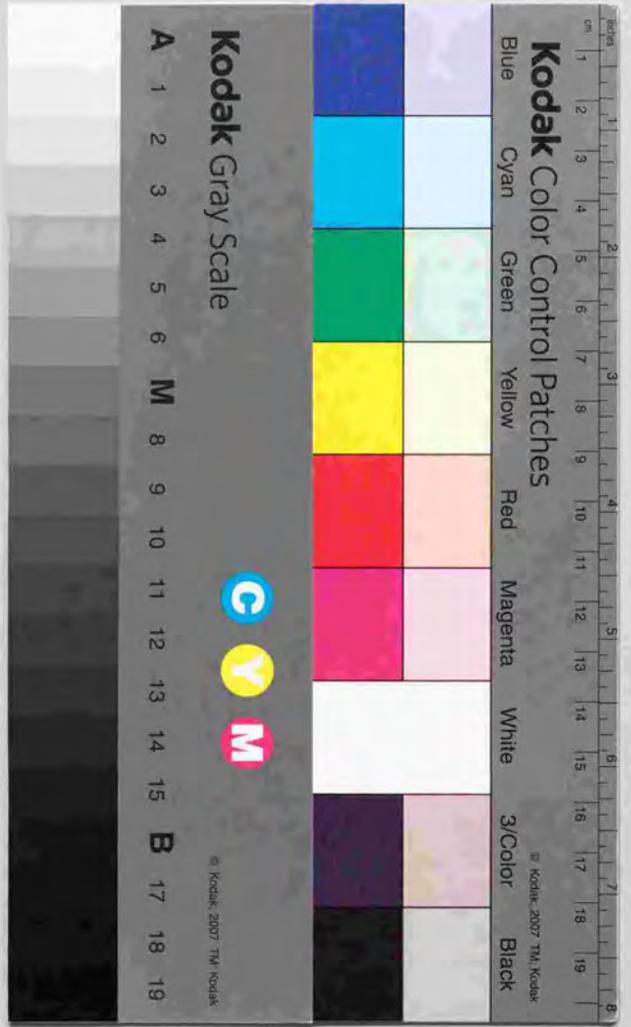


積雪寒冷地における断熱外壁の防露・防水・断熱性向上、
および、
屋根の積雪障害防止に関する研究

— 現場と地域に向けた全戸断熱外皮工法の展開とその実用化への提案 —

1998年

鈴木大隆



積雪寒冷地における断熱外壁の防露・防水・断熱性向上、
および、
屋根の積雪障害防止に関する研究

—環境と地域に向けた住宅断熱外皮技術の再構築と具現化の提案—

1998年

鈴木 大隆

ABSTRACT

**Study on the Prevention of Condensation, Waterproofing and Improvement
of Thermal Insulation in the External Walls of Houses
and on the Prevention of Problematic Icing on the Roofs of Houses
in a Cold Region**

— Proposal for the Realization of Insulated-Envelope Design for Houses Suitable
for the Changing Global Environment and the Region —

Hiroataka Suzuki

ABSTRACT

Appropriate house insulation for the changing global environment is an important issue; however, there are still many unresolved problems concerning durability and thermal performance in the current techniques for external wall construction. In addition to research on the elucidation of the mechanisms and methods of predicting physical phenomena, research on ways to unify realizable technology is also important in order to maintain a regional system of house construction.

This study focuses on the construction methods for insulated external walls and roofs, which are parts of the house that are in need of improvements in durability and thermal performance. The study also discusses arrangement of some technologies related to insulated envelopes, which have been developing in cold and snowy regions. The purpose of the arrangement is to establish universality of those technologies. This thesis consists of 13 chapters: Introduction (Chapter 1), Part I (Chapters 2~7), Part II (Chapters 8~12), and Conclusion (Chapter 13). The following is an outline of each chapter.

In Chapter 1, the changes and recent issues concerning modern construction techniques for houses are outlined, and the necessity for study of problems related to insulation and for study aimed at assisting home builders in the region is discussed. In Part I, focusing on the external wall structure of a house, which is the most important part of the house envelope in terms of performance demands, the design requirements for improvements in durability and insulation are clarified, and proposals for the realization of improved house envelope technology are made. In cold snowy regions, the roof design is also an important factor in house construction, therefore in Part II, roof designs that can prevent problematic icing are discussed.

In Chapter 2, which is an introduction to Part I, the changes and current issues concerning insulated external walls are discussed. With regards to improvement in durability, construction techniques that can ensure long-term maintenance of a dry condition of the house are important. So in order to establish those construction techniques, the importance of house design that can prevent condensation in wall cavities, the way of dealing with water in the wall cavities and the prevention from outside water leakage are discussed. With regards to improvement in insulation, differences between methods of insulation in Japan and other countries are mentioned, and the insulation system including the thermal bridge, is evaluated. The importance of an insulation system that does not require special material or special techniques is discussed.

In Chapter 3, measures to deal with moisture behaviors in the case of walls filled with mineral wool insulation are discussed. Problems in using numerical simulation to estimate the hygrothermal behavior of wooden wall structures are discussed. It is shown that comparative experiments using experimental walls, in which the conditions and methods of construction were accurately modeled, are valid. The results of three experiments, which were simulated concerning vapor flow from room to wall and concerning water contained in wall cavities, are presented. The results show that appropriate installation of the vapor barrier, ventilated air space and separation of the wall cavity from the other parts of a house are important for effective prevention of dampness in wall cavities.

In Chapter 4, measures to deal with outside water leakage in the external walls of an insulated house are discussed. It is first pointed out that present construction techniques for dry wall structures can not ensure long-term waterproofing and that there have been few studies on waterproofing of insulated external multi-layer walls. The results of experiments using full-sized wall structures that take into consideration various construction factors show that air movement in the wall cavity and air tightness of wind barriers or vapor barriers greatly affect the waterproofing of wall structures, and that installation of a ventilated air space and air tightness of the vapor-air barrier are important.

In Chapter 5, ways to ensure permanent maintenance of the air space for ventilation are discussed. Comparative experiments using several different kinds of wind barrier and insulation material show that in the case of a sheet wind barrier, the ventilated air space may be narrowed due to expansion of the insulation, if there is only a slight degree of looseness in construction, resulting in a decrease in the equivalent leakage area to as low as 10% of the original structure design. The necessary design and construction criteria in order to ensure long-term maintenance of air space for each type of insulation material are proposed.

In Chapter 6, methods to improve the insulation of external walls of a house, which is important for improving the thermal performance, are discussed. A simplified method for estimating the equivalent

thermal transmittance of all structural parts using the heat bridge ratio is proposed. The results of calculation show that insulation in the wall cavity plus additional insulation is a much more effective method than the insulation only in the wall cavity or only outside for improving thermal performance, and it is also superior in terms of cost effectiveness. The design and construction of walls for additional insulation are also discussed. Glass-fiber insulation board, which is effective for preventing condensation and is easy to use, is proposed as a suitable material for additional insulation.

In Chapter 7, which is a summary of Part I, technology for improving the durability and thermal performance of insulated external walls of a house, which incorporates the techniques for improving thermal performance, dew-proofing performance and water-proofing performance, is proposed for the Japanese conventional wood construction and the American wood-frame construction. The designs of other house envelope parts, such as the floor, ceiling and roof, based on the design criteria of the insulated external wall, are also discussed.

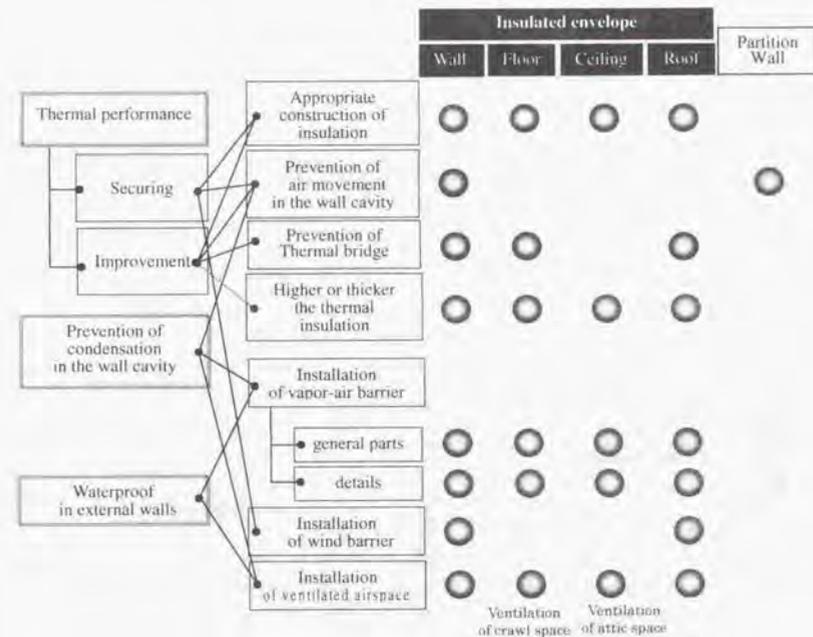


Fig. Design factor of insulated envelope

In Chapter 8, which is an introduction to Part II, the problems with current methods of dealing with damage caused by snow on the roofs of houses in a cold-snowy region are presented, and the sphere of study for realization of a roof design which is suitable for houses in a cold-snowy region is discussed.

In Chapter 9, from the results of experiments conducted using the experimental house, it is shown that the temperature in the attic space or in the ventilated air space of the roof, which depends on the methods of insulation and ventilation, greatly affects the level of problematic ice formation on the roof of a house. It is also shown that the criterion for problematic ice formation on the roof of a house lies on a 20-25% portion in a frequency that temperature in the attic space or ventilated air space rises above -1°C though the outside temperature is lower than 0°C .

In Chapter 10, a simulation program for estimating the temperature in the attic space or ventilated air space is presented. This program are characterized by simplifying the complicated phenomenon of heat and mass transfer in snow on the roof, using past research results. In the simulations, the ventilation rates were applied, which were calculated using the wind pressure coefficients obtained in wind-tunnel experiments, taking into account the shape of the house, house location and wind direction. It is shown that the variations of simulated temperature are very close to those of measured temperature in the attic space or ventilated air space.

In Chapter 11, the simulation program is used to estimate the ventilation levels and temperatures in the attic and ventilated air space, conducting 45 different simulations in house shape, insulation system and ventilation system. From the simulation results, criteria of insulation and ventilation systems designed for preventing damage caused by snow on the roof are obtained, and values for desirable insulation and ventilation performance are also shown.

In Chapter 12, which is a summary of Part II, methods of roof design using various roof shapes and insulation systems are presented. The technology for each component, such as the ventilation system and roof material, is then described. Finally, it is shown that the current techniques of construction can prevent damage caused by snow on the roof.

Chapter 13 is the summary of whole thesis. Conclusions from the present study are given, and issues requiring further study are noted.

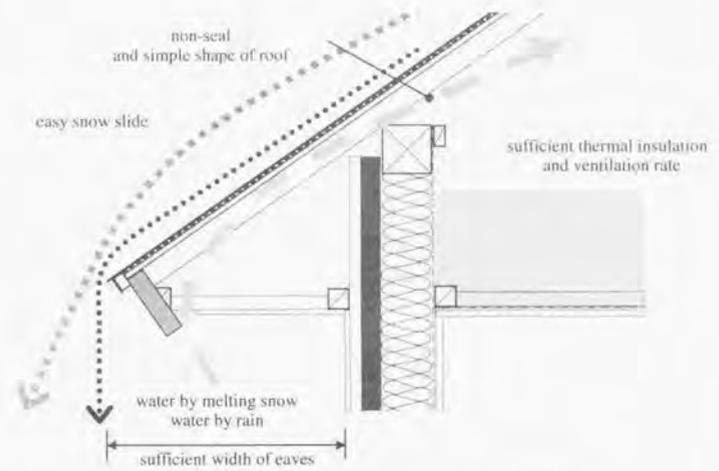


Fig. Design image of snow sliding technique for a pitched roof

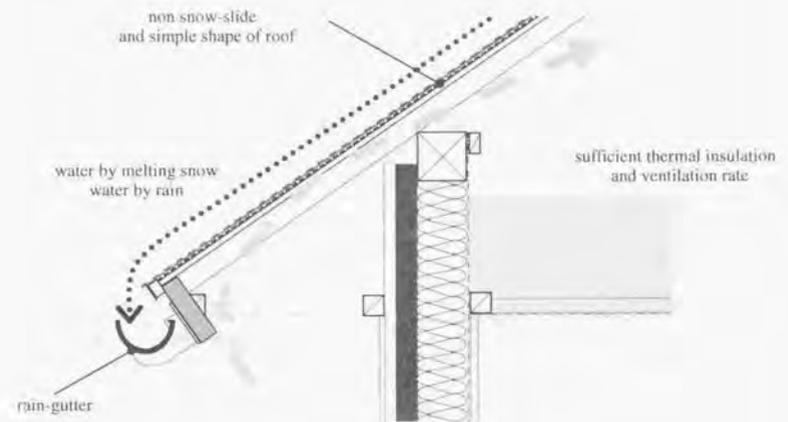


Fig. Design image for technique in roof with snow

目次

1章 序	
1.1 はじめに	1
1.2 本論の位置付けと研究アプローチ	4
1.3 積雪寒冷地の断熱住宅の系譜と技術の方向性	9
1.3.1 断熱住宅の系譜と研究者が果たしてきた役割	
1.3.2 気候特性への対応から環境と地域の対応へ	
1.4 本論の目的	16
1.5 本論の構成	19

I 部 断熱外壁の防露と防水、断熱性向上に関する研究
断熱外皮デザインへの提案

2章 断熱外皮の変遷と研究の基本方針	
2.1 はじめに ー断熱外皮の変遷ー	23
2.2 断熱外皮の耐久性向上への基本方針	33
2.2.1 木材腐朽条件の整理	
2.2.2 劣化要因の検討と基本方針	
2.3 断熱外皮の断熱性向上への基本方針	37

3章 内部結露防止手法に関する実験的検討	
3.1 はじめに	39
3.2 室内・他部位からの水蒸気侵入による内部結露防止に関する検討	41
3.2.1 検討のアプローチ	
3.2.2 実験概要	
3.2.3 1970年代以降に普及した乾式外装材の直貼り壁の湿度性状の把握	
3.2.4 在来木造工法の通気層壁の湿度性状の把握	
3.2.5 通気層壁を前提とした結露防止手法の検討	
3.2.6 まとめ	
3.3 壁内保有水分の放湿に関する検討	56
3.3.1 検討のアプローチ	
3.3.2 未乾燥材を用いた場合の各種外壁構成の木材含水率に関する実験的検討	
3.3.3 各種層構成の放湿性能に関する実験的検討	
3.4 まとめと設計要件の整理	66
3.4.1 本章のまとめ	
3.4.2 設計要件の整理	
4章 外部漏水の防止に関する実験的検討	
4.1 はじめに	69
4.2 外壁工法のパターン分類と実験概要	70
4.2.1 外壁工法のパターン分類	
4.2.2 水密実験装置概要	
4.2.3 実験壁体の共通概要	
4.3 直張り壁、通気層壁と中空層壁の特性把握	77
4.3.1 検討目的	
4.3.2 実験壁体概要	
4.3.3 実験結果と考察	
4.4 通気層を有する乾式外装材横目地の開放の可能性	83
4.4.1 検討目的	
4.4.2 実験壁体概要	
4.4.3 実験結果と考察	
4.5 通気層を有する乾式外装材縦目地の開放の可能性	84
4.5.1 検討目的	
4.5.2 実験壁体概要	
4.5.3 実験結果と考察	
4.6 まとめ	87

5章 シート状防風材を用いた通気層空隙の確保に関する検討	
5.1 はじめに	91
5.2 実験概要とモデリング	92
5.2.1 実験建物概要	
5.2.2 実験壁体のモデリング	
5.3 通気層空隙寸法の経時変化に関する検討	96
5.3.1 測定概要	
5.3.2 計測結果と考察	
5.4 通気層空隙の減少量の把握	100
5.4.1 検討方法	
5.4.2 検討結果と考察	
5.5 放射温度計による空隙評価の可能性	102
5.5.1 検討目的と概要	
5.5.2 検討結果と考察	
5.6 まとめと手法提案	104
5.6.1 本章のまとめ	
5.6.2 手法提案	
6章 断熱性能の向上に関する検討	
6.1 はじめに	107
6.2 検討概要	110
6.2.1 熱橋の定義	
6.2.2 検討方法	
6.3 外壁断熱性能の向上に関する検討	114
6.3.1 在来木造工法の断熱性能向上に関する検討	
6.3.2 枠組壁工法の断熱性能向上に関する検討	
6.3.3 高断熱化手法の費用対効果・施工性に関する検討	
6.4 付加断熱部分の地下構成に関する検討	124
6.4.1 検討モデル	
6.4.2 検討結果と考察	
6.5 まとめと手法提案	128
6.5.1 本章のまとめ	
6.5.2 付加断熱手法の提案	
7章 I部の小括 —断熱外皮デザインへの提案—	
7.1 各章のまとめ	133
7.2 断熱外壁における技術の具現化と整合化	135
7.2.1 設計要件に対応する技術の具現化	

7.2.2 断熱外壁の提案例	
7.3 断熱外壁技術の他の部位への応用	144
7.4 断熱外皮デザインの提案	149

II 部 屋根の積雪障害防止に関する研究

積雪寒冷地の住宅屋根デザインへの提案

8 章 住宅屋根の変遷と研究の基本方針	
8.1 はじめに —住宅屋根の変遷—	159
8.2 住宅屋根をめぐる課題と研究の基本方針	169
8.2.1 住宅屋根をめぐる課題	
8.2.2 研究の基本方針	
9 章 実験建物における基本特性の把握	
9.1 はじめに	173
9.2 実験概要	174
9.2.1 実験建物と実験モデルの概要	
9.2.2 測定概要	
9.3 実験結果	177
9.3.1 冬期測定期間中の外部環境と屋根面積雪状況	
9.3.2 屋根面積雪期間における温度特性	
9.4 屋根面積雪障害の有無と小屋裏・通気層温度の関係	187
9.5 まとめ	191
10 章 小屋裏・通気層温度に関するシミュレーション手法の検討	
10.1 はじめに	193
10.2 シミュレーションの概要	194
10.2.1 シミュレーションモデル	
10.2.2 屋根構成部材及び積雪内の温度計算	
10.2.3 積雪部分の扱い	
10.2.4 小屋裏換気量及び通気層通気量の算定方法	
10.3 実測結果との検証	213
10.4 まとめ	217

11 章 天井断熱・屋根断熱の断熱・換気設計に関する検討	
11.1 はじめに	219
11.2 検討の概要	220
11.2.1 計算条件	
11.2.2 住宅形状・立地条件と各部の風圧係数	
11.2.3 断熱・換気条件	
11.3 換気方式の特性と立地条件の違いによる検討	228
11.3.1 検討概要	
11.3.2 小屋裏換気量・通気量の推定	
11.3.3 天井断熱方式の小屋裏温度に関する検討	
11.3.4 屋根断熱方式の通気層温度に関する検討	
11.4 屋根面積雪障害の防止に有効な断熱・換気手法に関する検討	236
11.4.1 検討概要	
11.4.2 各条件別「障害の温度発生頻度」の把握	
11.4.3 住宅形状毎の断熱性能と必要換気量・通気量の検討	
11.4.4 断熱・換気設計のケーススタディ	
11.4.5 屋根面積雪障害防止に向けた断熱・換気手法の提案と 既往の基準の考え方としての問題点	248
11.5 まとめ	250
12 章 II 部の小括 —積雪寒冷地の住宅屋根デザインへの提案—	
12.1 各章のまとめ	253
12.2 屋根デザインフローと技術の具現化	255
12.2.1 屋根面積雪障害の防止に向けた設計フローの提案	
12.2.2 屋根面積雪障害の防止に向けた技術の具現化	
12.3 住宅屋根デザインへの提案	260
13 章 結	
13.1 本論のまとめ	270
13.2 おわりに	274

1

序

1.1 はじめに

中緯度に位置する我が国の寒冷地は、世界の寒冷地と比べて降雨・降雪量が多く、冬期の日照に恵まれた地域でもあり、世界でも類を見ないほど四季の移り変わりが明確で水資源や太陽熱などの自然エネルギーに恵まれた地域である。その中で培われた我が国の伝統的住宅技術は、古くは寒冷地と暖地の別なく、自然・建築・生活との調和から様々な対応を図るという確かなデザインコンセプトがそこには存在した。

そして、次第に各種性能の要求度が高まり、住宅技術は短期間で変貌し、生活や社会に多くの便利さと快適さをもたらした。しかし、いつしか、住空間に対する様々な外界要因の影響をいかに減ずるかという技術の上に、現代の住宅デザインは成り立っていることに気付く。

寒暖の差によらずそれらのことが最も顕著に現れているのは住宅外皮である。以下に、いくつかの例を挙げて、外界要因に対する対応の変化を論じてみたい。

性能・品質の安定的確保や生産効率の向上に対する要求は、塗り壁などに代表されるような「むら」の多い地場生産材料を、労働力の低下も相まって、工場生産を主体とした建材・部品化へと急速に移行させている。

次への対応は、古くは隣接建物からの距離などの計画的対応や自主的な相互協力の上に成り立っていたが、立地環境の悪化に伴って、材料・設備による対応が基本になっている。

降雨への対応は、材料の吸放湿と外気との構法的な開放によって成立していた伝統的な雨仕舞いを、品質や防火上の要求の高度化によって、乾式材料による一面的な防水技術へ

と移行させている。

また、降雪への対応は、積雪そして自然に落融雪するという傾斜屋根を、敷地の狭小化を背景に、無降雪あるいはエネルギーを用いて融雪するという手法を用いた屋根形態へ移行させている。これは外部アプローチの降雪への対応でも同様である。

そして、寒暖への対応は、厚着・採暖や通風・蓄冷によって不快を取り除こうとしてきた生活習慣と建築手法を、快適性を向上させつつ環境負荷への低減を図るため、内と外との明瞭さを求める断熱とそれに関連する建築技術に転換しつつある。

これらの新たな対応は、建築に対して功罪の二面性を持ち合わせている。

例えば、品質の安定性・生産効率の向上が促す建材・部品化の流れは、施工熟練度や地域性に係らず住宅性能の向上に大きく貢献する。しかし、一度消滅すると再生困難な左官業や建具屋などの地場生産システムを崩壊させつつある。そして、昨今の普及が著しい住宅パネル化などへの依存を高めることは、高度な職能者である大工の育成や地方経済にも少なからず影響を与えることとなろう。

外壁等の防火性向上は都市・住宅の防災強化に有効だが、その一方で建材に依存した外装システムを促し、そのジョイント部分には耐久性に乏しいシーリング材が多用される。そして、シール部分の早期劣化は外装汚損の誘因となり、外部意匠と防水の面では初期性能に優れるが長期性能に乏しい建築を作り出している。

無降雪屋根や融雪装置の普及は、狭小宅地での住宅建設を可能にし、住宅取得コストの低減や、多くの労を伴う除排雪作業を大幅に軽減する。これらは、積雪地における高齢化対応の一つの方法とも考えることができよう。しかし、これらの技術は、次代に積雪寒地に住むことがハンディとの意識を生み出し、環境・暮らしとの関わりの中で建築的対応を考えていくことの重要性を見失ってしまう危険性をも併せ持つ。そして、前者は住宅外観をアンバランスにし、堆雪スペースが不要となることから宅地の狭小化に一層の拍車をかけ、さらに前述のシーリング材を多用した長期防水性に乏しい屋根を作り出している。また、後者は、深夜電力の活用によって使用者のコスト負担は軽くなるため、適用範囲も拡大し普及の一途にあるが、近年の断熱・気密性に優れる住宅の年間暖房用エネルギー量を遙かに越えるエネルギー量を、私有物の融雪に消費する現実、技術とライフスタイルのあり方を考えざるを得ない深刻な問題を含んでいる。

また、断熱は、暖房用エネルギーの増加を抑制し、耐え難い寒さや暑さのない住空間を創出する基礎的な技術である。しかし、開放化によって耐久性を保持してきた住宅において、適切な手段を用いなければ、断熱性能を半減し、湿気の滞留による耐久性低下が避けられない。現に、安易な断熱化はこれまでも多く行われてきたし、今も大量に建設されている。

ここで例示したものに限らず、全ての建築技術は二面性を有することから、その適用には多くの思慮が必要である。そして個別の技術に対して、直感的に、代案なき非難やただ徒に伝統への復旧に解があると叫ぶのは論外だが、分化した中で行ってきた研究蓄積を背景に一つの問題に対応する知見を提示したとしても、望ましい建築への原動力にはなかなかなり得ない。なぜなら、特定の課題のみに対応する手法は、優秀な設計力がなければ時

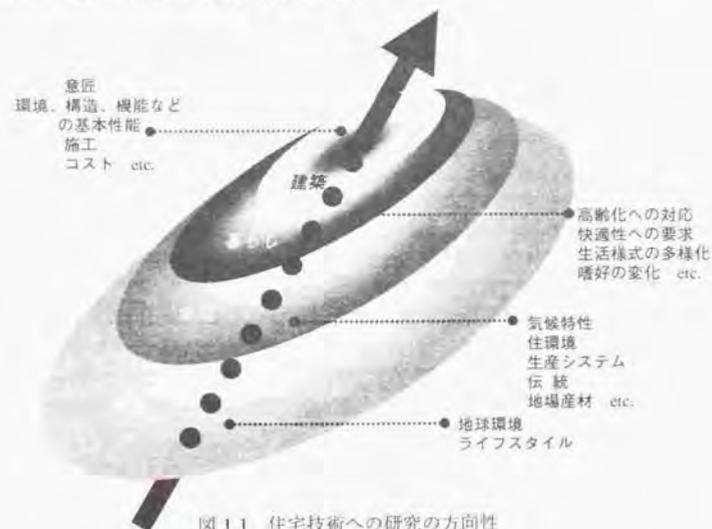
に形態を歪なもののするし、その妥当性の評価は明解に分かれがちなために、一般に法的拘束力や強力なセールス、あるいは嗜好の劇的変化が伴わなければ普及は進まない。また、多くの課題に対応し得る重要な手法でも、実現性との調整が図られてなければ、その実現化に多くの労力、時間、コストを要するため、普及途上で消滅する場合も少なくない。そして、意匠性や地域的な必然性に乏しければ、採用の魅力に欠け、技術は根付かない。あるいは、先述の融雪装置などのように、エネルギー依存型・消費型社会を助長する恐れもある技術は、これからの地球環境時代に向けて、適用には十分な思慮が必要である。

これらは、いずれも環境、地域、暮らし、そして建築そのものの中の総合化という行為を経ていない、分化された中での局所技術・対処療法的技術の開発が抱える課題である。

既往の研究の多くは、ある障害や技術が抱える課題に対して、事象把握を行い、数値計算による予測・評価手法を確立し、それを用いて障害や課題を解消するというアプローチをとる場合が多く、そこから多くの知見を得ることができる。しかし、他の面から要求される技術や建築そのものとの整合化を図り、現状の技術基盤を前提に、具現化する所まで踏み込んだ研究は予想の他少ない。

研究には、手法の研究、評価の研究など様々な形態がある。

筆者にとっての建築への研究とは、技術や手法を、暮らし、地域、気候風土、環境との係わりの中から必要性を見つめ直し、建築そのものとの整合性や建築生産上の現実性とのバランスを図り、その上で望ましくは意匠性に優れ、あるいは最低限それを損なわずに展開できる手法を具現化する行為である。そして、筆者はその行為を日頃、「建築技術をデザインする」という言葉で置き換えている。



1.2 本論の位置付けと研究アプローチ

建築技術をデザインする場として、積雪寒冷という気候風土と北海道という地域性は魅力的である。それは、時に生命さえ脅かすほどの厳しい気候ゆえ、常に研究者に切実さと即応性が求められ、技術の真価は明確に現われること、歴史の短きゆえ伝統をもたず、あるいは固執せず、新しい考え方や技術を常に積極的に取り入れようとする気質に満ち溢れていること、有意な研究は、とすればハンディと捉えがちな気候風土の中に良さを見いだす喜びを写してくれることなどからである。1.1 で述べたような建築への研究のスタンスは、こうした気候風土と地域性の中でいつしか芽生えたものと感じている。

そして、技術をデザインすることの重要性は何も寒冷地に限ったことでは無い。

個々の性能向上が求められ、生活様式はますます多様化し、住宅の方向性そのものが混雑化する方向にあるとあってさき良い今の時代であるからこそ、研究者が望ましい住宅像をイメージし、その像に向かって建築技術をデザインすることは重要になってきていると感じている。

ここで、本論の位置付けを明確にするため、建築技術をデザインする前提条件について論じてみたい。

(1) 断熱を前提としたデザイン

次代への重要な課題の一つであり、そして地球環境時代に向けて真剣に取り組まなくては行けないのが断熱である。そして断熱を前提とした外皮技術の再構築である。

なぜ再構築が必要なのか、それは、これまで、外皮に関して耐久、防水など多くの専門分野で行ってきた研究蓄積も、断熱とそれに関連する新たな層構成を前提とした場合は、対応しない部分が少なくないし、統合化が図られているとは云えない状況だからである。

ここで、断熱を前提とした外皮の研究があまり行われていない理由とその必要性を考へみる。まず最初に考えられるのは、この技術が他の技術と比べて、比較的历史が浅いということである。しかし、歴史が浅くとも例えば遮音のように多くの研究が行われている分野もあり、北海道や一部の研究者を除いて研究対象や興味対象にならなかった理由が他に存在する。そして、その理由から、断熱の定着に向けて何が浮かび上がってくる。

一つめの理由は、断熱と耐久性は相容れない技術であるという思い込みと直感が研究の妨げとなっている点である。断熱は、その厳しい気候風土ゆえ北海道で 30 年以上前からいち早く対応が始まり、多くの可能性をもたらした反面、様々な障害も生じさせた。もちろん、寒冷地では、これを契機に断熱を前提としたデザインの研究が進み始めたのだが、今も障害そのものが多くの研究者の残像に残っている。そのことが、北海道でも、あるいは環境工学の熱を扱う分野を除けば、いまだ断熱と耐久性とは馴染まない技術と直感的に感じさせる原因にもなっている。例えば材料系の研究者が書いた最近の書物によれば、「近年になって省エネルギーを性急に持ち込んだために、気密性がかりに目を向け、構造部材の風通しに配慮を欠いたため、従来より家が長持ちしなくなる傾向がある」との記述がある。この記述を見ると、直感と思い込みが優先し、そのことが技術の理解や研究することの妨げになっていることを思わずにはいられない。

二つめの理由は、断熱自体よりも、それを生かす手段としての防湿・気密化へのイメー

ジである。防湿と気密化は、断熱した壁体の内部結露防止のための手段だが、この言葉そのものと、開放系に対して閉鎖系と名付けられたこの技術を総称する言葉から受けるイメージは、多くの生活上の制約を伴うというイメージや、北海道から生まれたこともあって気候条件の厳しい局地にしか必要のないものというイメージを暖地の研究者に持たせがちである。筆者の経験からいえば、この言葉を耳にした隙間に、さほどの論理的背景も無く、その技術の必然性や内容を理解しようせず、この技術は暖地に相容れないと感じてしまう研究者も少なくない。その一方で、低炭化する住宅市場においては、一部の住宅技術者の中では差別化戦略として、断熱・気密化のみ強調したセールス展開を行い、実態や性能が伴わないイメージ先行型の住宅セールスや、性能一辺倒主義でバランスの欠いた住宅を積極的に建設している現実があることも、暖地の研究者の拒否反応をもたらす一因ともなっている。

以上述べてきたように、断熱を前提とした外皮デザインへの研究が欠落している中で、住宅の急速な断熱化は進んでいる。筆者が見る限り、その状況は北海道で断熱による障害が発生した「障害前夜」に酷似しており、先の材料系研究者の記述が錯覚や憂慮と片付けられない状況に進みつつある。

そして寒冷地も含めて、断熱は、内部結露という比較的微量な水蒸気移動に伴う障害が解決しても、総合化された技術にはならない。むしろ、降雨水や融雪水、壁体の構成材料の保有水分など、もっと大量な水分への対応を図らなくては行けない。そして今後ますます重要となる地球環境への対応として、高断熱化への整合を図られてはじめて統合化された技術が構築できる。

ここに断熱を前提としたデザイン研究への位置付けと、それが急務な理由が存在する。

(2) 耐久性向上への対応

断熱とのかかわりから耐久性維持への研究が必要な他に、次の観点から積極的に耐久性への技術構築を図らなくては行けないことがある。

北海道においては、寒冷積雪への対応における急速な技術革新は、快適性と利便性を求めて多くの住宅の建替えを促した。その結果、約 150 万戸ある北海道の住宅ストックのうちの半分強が 1970 年代以降の建設住宅で構成され、約 20 年程度で 50% 程度の住宅が滅失するという、諸外国や全国平均と比べて特異な状況となっている。そして北海道に比べれば厳しい気候への対応が無く、滅失率が低い本州でも、諸外国と比べて新築住宅への志向が極めて高いことが明確に読みとれる(図 1.2, 1.3)。我が国の耐用年数の短さは、単に気候風土のみに起因するものではない。もちろん、既存ストックの質が悪いことも原因だが、住宅に対する要求度が短期間で急速に高まっていることも深い関連がある。

耐用年数との係わりでの住宅技術を論じる際に重要なことは、住宅の基本性能向上への急速な高まりと技術革新は、住宅の魅力や商品価値を高める一方で、住宅の建替えを大いに喚起し、結果として住宅を耐久消費財にしてしまう側面も合わせ有しているという点である。

荒廃の一途をたどる地球環境に対して、この方向は弊害以外の何も生み出さないことに多くの論は必要ないだろう。住宅を社会資本に転換するには、ライフスタイルの転換と住替えに向けた社会整備が急務である。一方、新技術の変化についていけない耐久技術の研

究者は、住宅シェルターとしての基本性能や意匠性が竣工時をピークに低下する現状を、新技術の導入が原因と短絡的に決めつけ、あるいは維持管理の怠れた使用者や成熟していない社会的システムをその原因とすることが多い。しかも、多くは、新たな研究に取り組む意欲が希薄だったり、ただその成熟を叫んでいるに過ぎない場合が多い。維持管理の大切さとそれを支える社会システム構築に向けての提言は重要である。しかし、そこに個人としての研究者ができることは少なく、むしろ多くの研究者や行政との協働の中で徐々に転換を図って行くことしか、この解決策は見あたらない。

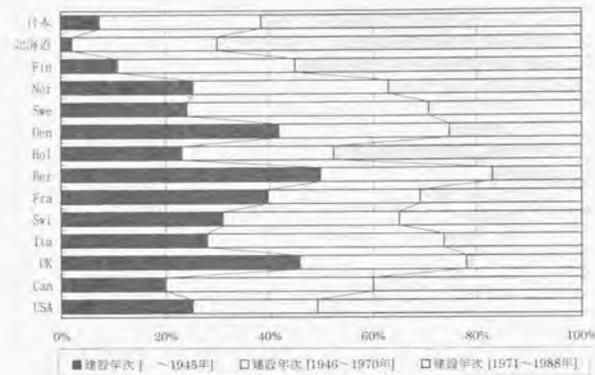


図 1.2 住宅ストックの現状 [1-1]

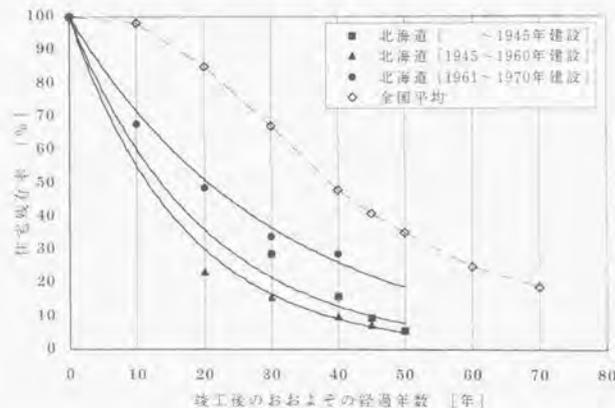


図 1.3 住宅の耐用年数の推定 [1-2,1-3]

そして筆者は、社会や意識の転換が図られれば住宅の耐用年数は必ず向上するとの楽観論は持っていない。耐用性、あるいは維持管理性を高めるには、シーリングに依存した防水技術などを初めとして、建築で対応すべき問題は未だ数多く残っているからである。住宅技術に関わる研究者は、前述したような社会活動に携わりながらも、現在の住宅技術が抱える課題をしっかりと見つけ、何が劣化要因となるのかを実際の建物で見定め、それを建築的に取り除き、維持管理し易いディテールを構築するための取り組みが重要と考えている。

(3) 研究の output の対象をどこに据えるか

研究の out-put は、地域と暮らしと環境のためにあることはいままでのない。

ここでは、そのことよりも、むしろ住宅建設の担い手である実務者に対する研究のあり方を論じてみたい。

我が国は、資本金を背景に技術開発力に優れ、工業化に指向する年間千戸以上の住宅を供給する大手ホームビルダーが大都市圏を中心に市場占有率を高める一方で、今もなお技術開発力に乏しく、現場生産を主体とした中小工務店が年間建設戸数の7割前後を占め、それらが共存する、世界に類を見ない住宅生産システムを有している。

先にも述べたが、多くの研究の out-put ともいえる評価手法・予測手法の提案や特定の課題への対応策も、技術開発力や総合力に富むホームビルダーが市場の大部分を占めるのであれば、研究者は具現化の労を要さず、絶えず新しい考え方を示し続け、受け皿である技術者が総合化し具現化するという役割分担もあり得る。

しかし、技術開発力に乏しい、あるいはそれを行う資本と人材が不足している多くの工務店にとって、専門性の追求から生まれた高度な研究成果や先進的 out-put も、統合化と具現化の担い手が存在しないことから、住宅を望ましい姿に変えるほどの原動力にはなり得ない。

その結果、大手と中小工務店の技術格差は広がり、多様化に向かうといわれる得体の知れないユーザーズへの対応に不安を感じ、あるいは住宅の専門家としての意識も薄れ、大手ホームビルダーや大手建材メーカーの FC 傘下へ参入したり、下請けとなって活力を得ようとしたり、協業化への体制づくりなどの様々な試行が行われている。そして、次代への後継者にも思われず、ただ日々の生活のために住宅建設に携わり自然に消滅するような工務店も数多い。このような先の見えない状況は、地域経済に少なからぬ影響と住宅生産システムの変革をもたらすだろう。

そして、これらの様々な試行にも多くの功罪がある。

下請け化は、荒利の減少と技術力の低下を促し、基礎体力の低下を招く恐れが少なくない。地域での協業化は机上では成立するが、筆者の少ない経験から言えば、多くは設計力が欠落したままの資材・経済的な協業化に取り組むため、大量仕入れによる画一化・標準化によって商品としての魅力が低下するジレンマを抱える。そして、FC 化は、小売店のコンビニエンスストア化に例を見るまでもなく、大手の論理優先の供給過多と競争の激化の中で、地域の中での乗換え・再選別化の洗礼を受け、業界全体の売上上げは上昇しつつ、系列への参入店舗数と倒産件数が同時に増加するという珍現象を作りかねない。日頃、中小工務店や地域の建築技術者との関わりの中で、どの方向が良いのか確かな思案は定まっ

ていない。しかし、地域の中小工務店が、大手に遜色のないむしろ様々なバリエーションが可能な技術を基盤に、活力有る自立した住宅供給をしていくことは、我が国の地域経済を維持する上で重要なことであるし、再生が困難な地域の住宅生産システムの次代への継承に大きく貢献することは間違いはないと感じている。

北欧・カナダなどでは、専門分野を統合化し具現化する学問である[building-physics]あるいは[building-technology]の分野が古くから確立している。そして技術の統合化に経験豊富な住宅コンサルタントが実務家との橋渡をするという体制ができていた。この体制は、大手ビルダーや大手建設会社が存在しない風土ゆえに生まれたものかもしれない。一方、これと完全に合致する研究分野は我が国には無く、コンサルタントといえば殆どが行政あるいは資本力のある民間に貢献し、諸外国のような技術者への役割を担っているものではない。今後、我が国のコンサルタントが、そのような役割をも担うような体制の変化を願わずにはおれない。しかし、いつになるか定かではないその体制の確立まで、我が国の住宅建築に関わる研究者が技術の統合化と具現化を行わなければ、地方の住宅生産の主体を担う、あるいは大手の住宅生産の底辺を担うかもしれない中 small 工務店の技術革新を進める有効な手段は今のところ見あたらない。

資本力、技術開発力の特化した一部の大規模なメーカを除けば、それに乏しい中小の工務店が大部分の建設を担っている我が国特有の住宅生産分野にこそ、統合化と具現化の研究と、それを主体とする研究分野の確立が重要である。

これらのことから、筆者はいつも、住宅技術の研究を、どちらかと言えばホームビルダーというより中小工務店の実務者に前提条件を置くことに重要な意義を感じている。

(4) 筆者の研究へのアプローチ

これまで筆者の建築への研究は、ある事象の解明や予測手法などに関する精緻な検討は殆ど行っていないと良い。無論、多くの研究者が行う研究に重要な価値があると感じている。しかし、筆者は、自身の能力から、一層の精緻化や再現性を増すための研究に精力をそそぎ、いつしか建築デザインへの感心が希薄になることに危惧を感じ、それよりも、多くの研究者が行ってきた有用な研究蓄積をベースに、既往の研究において希薄な部分を補いながら、住宅技術デザインへの提案に力を注ぐことに自分の位置づけと研究スタンスを置いてきた。

そして研究の out-put は、高度な生産体制を要せずに現状の技術基盤で、難しい施工技術と新建材・部品を要せず、エンドユーザの許容し得るコスト負担の範囲内で、望ましい住宅像をイメージしながら、既往技術との統合化を図り、技術デザインとして具現化を図ることが必要条件と考えてきた。

その中で、本論は、断熱を前提とした住宅外皮技術のデザインをするに当たり、従来の研究対象とならずに新たな検討が必要な部分を、主に環境工学的なアプローチで実験・検討を行い、前述の必要条件を考慮しながら統合化と具現化を行うことに力点を置いたものである。

それが本論の研究へのアプローチであり、筆者の現時点における建築技術のデザインへの取り組みの姿勢でもある。

1.3 積雪寒冷地の断熱住宅の系譜と技術の方向性

住宅技術史の中で、一時期に多くの障害が生じ、その中から個別の対応技術が生まれ、多くの研究者の努力と時間の経過によって、いつしか地場生産体制の中で住宅を大きく変革させることになった系譜が北海道にある。

ここでは、何が住宅技術を変え、その中で研究者がどうかかわってきたか、そして筆者らの住宅技術への研究がその中でどのような位置づけだったのかについて触れ、住宅技術をデザインすることの重要性と研究者の役割をより明らかにしたい。

1.3.1 断熱住宅の系譜と研究者が果たしてきた役割

—Think Locally, Act Practically—

北海道の住宅は、明治の開拓以来、極めて短期間に急激な変化を遂げてきた。

全国各地からの開拓移民が、各々の出身地の住文化・住宅様式を持ち込みつつも、自分や家族の生活を守るために、寒冷積雪の厳しい気候風土に対応せざるを得なかったのが大きな原動力であったことに誰も異論はないだろう。

伝統的な住宅は、積雪寒冷という気候風土と、二度に渡るオイルショックによって、その住宅技術をさらに大きく変革することになる。北海道の住宅構法に求められたのは、一つは省エネルギー化と居住空間の快適性向上という寒冷への対応、一つは通年施工化、そして一つは積雪への対応であった。

北海道における住宅構法の変遷は、次の3期に分けられる(図1.4)。

1) 第1期：防寒住宅普及期(1950年～1960年前半)

防寒改善と住宅の不燃化を目指し、1953年北海道寒地住宅建設等促進法(以下、寒住法と称す。)が定められ、簡易耐火造以上の不燃防寒住宅が住宅金融公庫などの公的融資の対象となる。

これらの特性を合わせもつ住宅構造として、クローズアップされたのがコンクリートブロック造住宅である。そして、この構造と結び付いて北海道の住宅を特徴づけたのが三角屋根住宅であった(写真1.1)。居間中心型プランと小屋裏利用による2階居室の確保。そして外観上の合理性により、この時期のプロトタイプとなり、道の公営住宅や住宅供給公社の個人住宅などを中心に相当な普及が図られた。

それと同時に、1965年前後から、次に示すような建材開発により防寒性能も大きく向上した。断熱材は、それまでオガクズ・モミガラ・岩綿が使用されていたが、グラスウール・発泡プラスチック系断熱材が開発され、それらに急速に移行した。しかし、当時の断熱厚さは30mm程度にすぎなかった。開口部は、外付アルミサッシが開発され、現場製作の本製建具から、外側アルミで内側木製建具という構成が一般に定着した。

さらに、積雪への対応として、屋根葺材として一般的だった小鉄板の平葺に変わり、滑雪・防水性向上が図られた長尺カラー鉄板が開発されたことは、屋根形態を大きく変える要因にもなった。

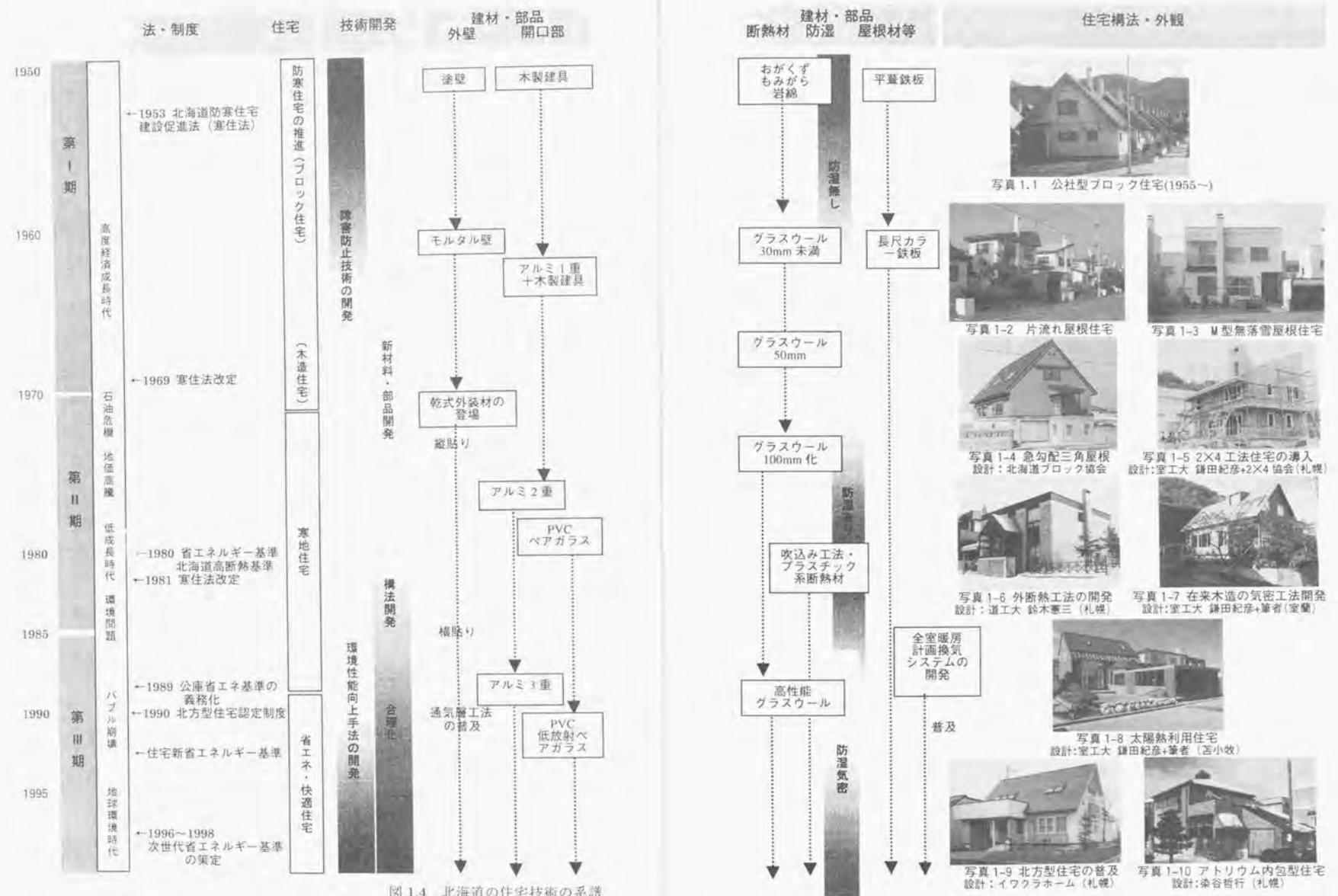


図 1.4 北海道の住宅技術の系譜

この間、木造住宅でも同様な防寒性能向上が図られ、1969年の寒住法の改正を期に住宅金融公庫の一般融資対象となる。

これらの住宅は初期の防寒住宅として高い評価を得た。しかし、十分とはいえない断熱性能と断熱手法上の問題、更に局所暖房による非暖房室の存在などから、以前には見られなかったような、内部結露・表面結露・「すがもり」などの問題が顕在化する。それが、次のステップで更に深刻化したのが、住宅技術やそれに取り組む研究のあり方を変える出発点ともなった。

2) 第二期：オイルショックを前後して（1965～1985年頃）

一方、寒冷積雪地特有の課題であった建設労働者の冬期雇用促進、通年施工化に向けて、外壁では塗壁から乾式外装材（当初は縦張り、1985前後に横張りが主流となる）、内装材では化粧石膏ボードへ、そしてユニットバスの導入など、建材そのものが湿式から乾式に移行し、施工体制や意匠が変化しはじめる。

さらに、地価暴騰により狭小宅地化した住宅地では、積雪への対応として1965以降に考案された引き屋根等の片流れ形式（写真1.2）が急速に普及する一方で、無落雪屋根（写真1.3）が開発され、公社型三角屋根や北欧風の急勾配三角屋根（写真1.4）など、様々な屋根形態が混在する。

通年施工化や積雪への対応に向けて、屋根形態、外装材、開口部材などが急激に変化する中で、住宅意匠は多様化の時代を迎える。

その一方で、第1次・2次オイルショックを契機として、省エネに対する意識が急速に高まり、100mmのグラスウール断熱材、天井ではブローイング断熱工法、アルミサッシ2重化が定着するなど、高断熱化が急速に進行する。開口部材は意匠性、断熱・気密性能面から、まもなくプラスチックサッシ（ペアガラス）に移行する。これらの急速な高断熱化の背景には、1980年、国の省エネルギー基準制定による公庫融資制度の連動、道の高断熱基準制定など、公的融資制度が整備されたことも大きく影響しているといえよう。

しかし、気密化なき高断熱化は、予想した程の快適性向上や省エネ化に繋がらなかったばかりか、断熱材内部での結露や床下・小屋裏空間での結露を引き起こし、住宅の耐久性そのものを大きく低下させる原因となった。これらに対し、様々な対症療法的な手法が諸説飛び交う中、北海道の断熱工法や暖房手法は混乱期に突入する。

この時期に、「在来木造」、「ブロック造」、そして1975年以降に導入された「枠組壁工法（写真1.5）」の住宅を対象に、一層の省エネ・快適性向上を図るべく、北海道大学洪教授・荒谷教授を中心として、大学、北海道立寒地建築研究所、（財）北海道建築指導センター、民間技術者などで構成された学会委員会や、いくつかの民間の住宅研究グループが形成される。主な検討内容としては、在来木造住宅の断熱化における諸問題の把握と原因の解明、ブロック造外断熱工法の提案（写真1.4、1.6）、開口部の性能向上手法の提案・木製サッシの開発、暖房手法の最適化に関する検討・提案など広範な分野に渡った（写真1.4～1.7）。この中で、例えば、結露などの寒冷地障害を防止し、耐久性の高い快適な付加低減に向けた住宅を実現するためには気密化が不可欠との考え方は、既に荒谷らが提唱していた[1-4]。そして、その考え方を基本に据えながら、1985年を前後して行われた、鎌田・筆者らを初めとする内部結露に関する構法的な研究（3.2で後述）や、福島らを初めとする断熱化に関する諸問題への研究[1-5]などによって、在来木造住宅の断熱化に必

要な対応がようやく鮮明に浮かび上がってきた。

そして研究成果を基に、何人かの研究者は住宅技術の具現化を進めた。その中で、次項に示す第三期に渡って、筆者らが取り組んだのは、住宅構法としての具現化をout-putの中心に据えた研究であった。それまでの外皮の構成材料や局所技術、層構成のみで障害に対応するという考えではなく、多くの実験住宅の建設を通じて環境工学的アプローチによる性能評価と、施工性の検証、そのフィードバックから住宅技術をデザインし、構法的な対応を示していったことは（写真1.7、[1-6]）、その後の多くの住宅技術者や住宅技術に大きな変化を与えることになった。

そして、重要なことは、多くの研究者は、住宅技術者や一般ユーザーに向けて住宅技術の伝達と普及、そして望ましい住宅像を示し続けることを自らの社会的役割と認識し、道行政との連携の中で、多くの普及啓発活動に携わったことである。これらの社会的活動は、断熱化と住宅技術の誤りを早期に是正し、また住宅像の方向性を一般ユーザーに伝えるのに大きな原動力になった。混迷化した時代ゆえに、研究者の社会活動は重要な意義があったし、多くの研究者は今もこの社会活動の重要性を認識し、精力的に携わっている。そして、対象が曖昧なニーズが散見される今の時代だからこそ、その社会的活動がより重要になってきている。

3) 第三期：そして現在まで（1985年～）

1985年前後より、高性能グラスウールや低放射ガラスの開発、地場産材を活用した木製断熱サッシの開発、輸入断熱玄関ドアなど建材・部品レベルでの高性能化が進む。

それらの高性能建材の市場展開に伴って、研究と現場とのフィードバックから生まれた実現性の高い断熱・気密化技術は本格的な普及の段階に入る。その中で、鎌田・筆者らの提案による在来木造工法の断熱気密技術は、多くの住宅に採用され、枠組壁工法や各種パネル工法、工業化住宅の寒冷地仕様開発にも少なからず影響を与えることとなる。

そして、筆者も関わった道の北方型住宅や国の新省エネルギー基準、公庫共通仕様書、次世代省エネルギー基準案（1998.3現在）の断熱気密仕様の基本的骨格にも据えられ、国民工法とも呼べる断熱技術になりつつある。このような研究から実践への取組みが、多くの新々工法が登場し市場の競争は激化し、本州では各地方都市やその周辺部が大手ホームビルダーへの依存率が急増している状況でも、北海道では地域の業者による現場生産型住宅の安定した市場が形成される背景の一つになっていると考えている。

一方、省エネ・障害防止といったシェルターの基本性能を実現できる信頼性の高い住宅技術が確立した頃から、環境工学者の望ましい住宅像として長年イメージし続けてきた住空間の全室暖房や計画換気の必要性が本格的に理解されはじめる。そして、道の北方型住宅推進（1990年より）や国の省エネ基準の見直し（1993年）もきっかけとなり、全室暖房や計画換気概念の普及と定着は急速に進んでいる。

そして住宅技術は、それまで、夏には開放的な吹き抜け空間も冬には冷風が循環する空間となり、夏にはオープンなプランも冬には暖房器具やこたつの廻りしか使えなかった居間中心型ではなく、少なくとも寒冷をハンディとしないう住宅空間の設計を可能にした（写真1-9）。

内と外との熱的境界を明解に求める断熱は、住空間内部の吹抜け空間、オープンプランといった開放的な空間デザインを可能にした。また、基礎の凍結深度が深いため比較的ロ

ーコストでできる地下空間、急勾配屋根を利用した小屋裏空間など、多くの魅力的な積雪寒冷地ならではの非居室空間を創出した。さらに、これらの空間と、サンルーム・風除室、最近ではアトリウムといった内と外との中間領域に位置する半戶外空間との組合せから、設計の自由度は大幅に広がった(図 1.5 写真 1-10)。

そして、住宅研究に従事していた多くの研究者が、住宅技術が持つ設計の可能性を、自ら実際の住宅の設計・建設に取り組みながら示したことは(写真 1.11)、住宅技術がもたらす住空間や住宅デザインへの可能性を設計者や技術者として明解に伝えるには有効な手段であった他、異分野からの住宅の研究開発への参画を促し総合的な住宅への取り組みや、多くのユーザーへの啓蒙を図る上での原動力ともなり得たと考えている。

そして、筆者の経験から、それらの行為の積み重ねは、誰のためでもなく自身にとって、次の研究課題を見つけ出すのに大いに役立つと感じている。



図 1.5 住宅技術が可能にした住空間



写真 1.11 筆者らが設計した住宅の内観(室蘭市)

1.3.2 気候特性への対応から環境と地域への対応へ

—Think Globally and Regionally, Act Practically—

寒冷地の長年の課題であった通年施工に関しては、現場打設せざるを得ない基礎工事の工期上の配慮を除いては、建材・部品の乾式化によってほぼそれが可能な段階になってきている。また、福島・月館・筆者らの基礎断熱工法を前提としたスカート断熱工法の研究[1-7]によって、各地でまちまちだった基礎凍結深度を北海道の殆どの地域で 450mm あるいは 600mm にすることが可能となった。それにより、今後基礎のプレハブ化が進めば、全工事の冬期施工も可能となるだろう。

むしろ、現在、住宅技術の方向性に大きく関連するのは、気候特性ではなく地域性や地球環境への対応であろう。

例えば、全国的な課題ともいえる建設労働者の高齢化と減少、技術レベルの低下への対応は、先にも述べたように大手の FC 化や中小工務店の協業化の中で合理化・省力化に向けた手法開発が盛んが進みつつある。しかし、地域にとっての望ましい方向は未だ見えない、いずれにしても、住宅市場の低迷化も相まって、今後地域の住宅建設業に大きな変革をもたらし、そして地域の住宅供給を担う住宅建設業は、気候特性への対応の他に地域の中での真剣な生き残りへの対応を求められるであろう。

そのような中で、住宅生産のあり方などをイメージした地域への対応は重要なテーマとなってくる。そして、地域の住宅技術者に対し、あるべき住宅像をイメージしながら、それに向けて自立した住宅建設が可能な技術を提示することは、ますます一層重要な意味合いをもってくる。

一方、荒廃化する地球環境への対応として、シェルターの熱的性能向上は一層高いレベルが必要となるだろう。この 3 年間に渡り策定に参画した次世代省エネルギー基準は、今後の住宅が進むべき一つの目標を示したものだが、その中でも現状の技術で可能なほぼ最大レベルの断熱化が求められている。生活のための断熱から環境のための断熱へ、その目的も大きく転換していくことになるだろう。そして、その際に耐久性の向上を同時に考えた技術構築は必要不可欠である。

また、雪国の積雪への対応は憂慮すべき方向に進んでいる。どちらかといえば雪をハンディキャップと考え、生活の利便性を追求する結果、無落雪、除雪・排雪・融雪という対応が基本になりつつある。その中で急速に普及しつつある屋根工法はデザインや長期防水に乏しいし、屋根や敷地など私有物への融雪装置の適用は、この 30 年間で培われてきた断熱が可能にする暖房負荷軽減効果を全く無いものとしてしまう程のエネルギーを消費する。あくまでもこれは一例にすぎないが、今後、技術は、地球環境への対応に向けて、我々のライフスタイルと利便性・快適性という狭間の中で、十分な思慮をもって展開していく必要がある。

そのためにも研究者は、地球環境時代に向けて望ましい住宅像や暮らしをイメージし、技術者やユーザーに向けてそのイメージと技術のあり方を示し続け、研究を具現化した技術をデザインすることがますます重要になってきていると感じる。

1.4 本論の目的

気候への対応と時代の変遷の中で、材料・構法が変化しダイナミックな変革を遂げた住宅外皮は、今後、多様化あるいは流動的で不確かな社会とともにますます変化を遂げるだろう。そのような方向にあるからこそ、次代への確かな課題である地域や環境への対応に向けて、研究者の役割は大きく、断熱を前提とし耐久性向上を目指した外皮技術の再構築と具現化への研究が重要となってこよう。

そのことを基本目標に掲げ、筆者の生活の場である積雪寒冷の地で研究展開を試みたのがこの小論である。そして、小論は図 1.6 に示す住宅外皮の構成部位のうち、外壁と屋根を主な検討の対象としている。ここで、何故これらを対象としたかについて論じてみたい。

(1) 外界因子との係わりが多いほど技術の整合化と具現化が求められる

外壁と屋根は、雨、雪、熱、風、地震、火などの外界因子に対応する住宅シェルターとして重要な役割を有し、加えて住宅外皮の大部分を占めることから、ここで構築される技術は住宅工法や外観意匠と大きな係わりがある。それゆえ、断熱を前提とした場合、多くの技術との整合化が必要となる。

その点からいえば、例えば最下階の床は、多くの外界因子は考慮の対象から外れ、しかも熱容量の大きな地盤に接することから熱的作用もはるかに穏やかである。また、構造上



図 1.6 住宅外皮の概念

は主に布基礎が水平構面の主体を担い、かつ外壁ほど構法的制約もないため、断熱を前提とした場合の技術の構築は外壁ほど困難ではない。むしろ、外壁で構築された技術から、係わりの薄いものを取り除き基本的な技術を構成した上で、熱・湿気容量の大きな地盤との関連からこの部位のあり方を検討していく必要がある。地盤の水分との係わりから求められる地盤防湿や床下換気などの技術的要件等に関しては、既に一定の基準や仕様も確立している[1-8]。また、地盤の熱水分の扱いについては、例えば水田らは、地下室などを対象に地盤の熱的扱いの精緻化に向けて[1-9]、岩前らは積雪時の地盤の扱いなどを対象に[1-10]、研究が進んでおり、それらの研究成果を反映していけばこの部位の技術構築は可能であろう。そこで本論では、断熱部位としての基本的な技術を構築するところまでを対象にし、地盤との係わりについては含まないこととした。

また、外気に接する床は、外壁と同様の外界因子が作用するが、水平部位だからその仕方は比較的穏やかである。そこで本論では、この部位は外壁として扱うこととし、この部位を対象とした検討は行わない。

(2) 部品対応ではなく層構成による対応ほど技術の整合化と具現化が求められる

古くは、土塗り壁や茅葺き屋根などの一層構成で外界因子に対応してきたが、近年の住宅外皮は断熱の要否に係わらず最低 4 層以上の構成から成り、各々の層が役割を担い、それぞれが補完の関係にある。断熱材は、どちらかといえば断熱という機能以外には、何も担わない材料であり、うまく機能するには他の層や住宅工法そのものとの協働が必要である。

この点から云えば、外壁と同じ機能が要求され、さらに日射取得、眺望、採光、通風なども求められる開口部は、多くの場合、完成された単一部品が複数の部品で対応できるため、他の部位ほど技術の整合化は求められない。むしろ住宅技術者へ必要なのは計画手法の提示である。この計画手法の検討は、今後、環境との整合に向けた住宅開発へは必要不可欠なものであるが、本論では技術の整合化と具現化に力点を置いているから、ここでは対象としない。

(3) なぜ外壁と屋根か—その共通点と相違点

これらの部位の共通点は、既に(1)~(2)で述べているが、技術をデザインする上で大きな相違点がある。

断熱を前提とした場合、外壁は、断熱層内部または躯体内部の水への対応や断熱性能の確保と向上を、せいぜい 100~150mm 程度の壁厚と構造的な制約の中でどう層構成するかが重要であり、それが技術のデザインに向けた研究の中心となる。

これらについては屋根も同様であるが、少なくとも寸法や構造上の制約は外壁ほどではないため、外壁で構築された技術を基に應用問題として具現化に力点を置けば良い。この部位をデザインする上で決定的に異なる点は、外皮外側の降水、降雪への対応の仕方である。特に積雪寒冷な地においては、冬期間の屋根雪への対応は環境や外壁の耐久性にも大きく係わる。すなわち、住宅の断熱化は、それ自身の保温性による自然室温の上昇や居住者の暖房への意識を促すことで、冬期間の室温を上昇させる。その結果、1.3 でも述べたが、多くの住宅では、断熱の乏しい時期と比べて天井からの熱損失も増大させ、従来通り

の換気による対応がなされるために、小屋裏温度は上昇し、屋根面に降雪した雪を融かす。融雪に伴って雪の比重は増すから、屋根の積雪荷重は大きくなり、構造的には不安定な状態を作り出す。そして外気が高温の時は、屋根面で生じた融雪水は、外壁面を流下したり地面や下屋から跳ね返って外壁を濡らし汚したり、乾式・湿式によらず多孔質な外装材にしみ込んだ水分は、凍結融解によって破損し防水性を損なわせ、時には構造体内に浸入した水分は躯体耐久性をも脅かす原因となる。また低温時には、屋根面凍着や軒先での水結が生じ、落雪が損なわれて積雪量が増加するため、地震時の構造安全性を脅かしたり寒気が緩んだ際の大量落雪事故の原因にもなる。そして個別的な対処によって、長期の防水性や意匠性に乏しい住宅屋根など、これからの地球環境時代に相応しいとはいえない技術を普及させている。以上述べてきたように、積雪寒冷な地では、屋根は冬期間の雪、水への対応が重要であり、それが技術のデザインに向けた研究の中心となる。

なお、荒谷が寒地での床下障害を取り除く手法として示唆した基礎断熱[1-4]は、その後、福島らの手法評価[例えば 1-11]や筆者らの実際住宅の適用に向けた検討[例えば 1-12]によって、北海道の一般手法として普及しつつあり、この方法による基礎はもう一つの外皮といえよう。そこで実現する床下環境は寒地では極めて良好なものがある。しかし、暖地への適用については、坂本・筆者らが中心となって統合化・具現化の検討を進めている最中で[1-13]、虫害を初めとする耐久性との係わりの中で未だ未知な部分も多く、本論でいうデザインの進段階にある。そのため、断熱基礎は本論の対象外とし、改めて何らかの形で別稿を起こしたいと考えている。

これらのことから、本論では、外壁は断熱と躯体内部の水への対応、屋根は断熱と屋根面の雪を水への対応に研究の骨格を据え、我が国の住宅技術の中では歴史の浅い断熱という技術の導入によって、統合化と具現化が必要な住宅技術を論じることを主な目的としている。

1.5 本論の構成

本論は、序に始まりⅠ部が2~7章、Ⅱ部が8~12章、そして結の全13章で構成される。

全体の構成を図1.7に示す。

Ⅰ章は序論である。

気候風土への対応から培われた我が国の住宅技術は、時代や社会の変化に伴い、多くの研究に基づく技術開発によって変遷しつつあるが、統合化を経ない個別対応の研究や技術開発が併せ持つ問題に触れ、北海道の断熱住宅の系譜から研究者が有する役割の重要性を述べた。そして、筆者の建築研究へのスタンスとして、次代に向けて地域と環境への研究が必要であり、断熱を前提に耐久性向上に向けた外皮技術の再構築が必要であること、我が国特有の住宅生産システムの中で一般の住宅技術者に向けた output が重要であることを論じた。そして、住宅外皮技術の再構築と具現化を図る上で外壁に着目することの重要性、地球環境時代や雪への住宅技術として屋根に着目することの重要性を述べ、それを本論で取り組む骨格に据えた。

(1) Ⅰ部の構成

Ⅰ部では、外壁に関して断熱と水・湿気への技術的対応を明らかにし、断熱住宅の外壁デザインの提案を行うことを主目的とする。

2章では、Ⅰ部の冒頭として、我が国の断熱外皮の先進事例として位置付けることができる北海道の技術的変遷に触れ、本論で取り組むべき論点を明らかにする。そして、Ⅰ部の基本方針として、耐久性向上や断熱性向上への対応は、これまでのような材料的対処から建築的対応に転換していくことの重要性を論じる。

3章では、断熱壁体における室内及び構造躯体内を源とする湿気・水分への対応に関し、木造壁体の湿気性状を捉えるには、既往の数値解析では未だいくつかの課題があり、実際の構法的条件や施工要因をモデル化した実験が有効であることを述べ、目的の異なる3種の実物大外部実験とその相互比較から、断熱壁体内部の長期乾燥維持に向けた技術的要件を論じる。

4章では、壁体の外部水への対応に関し、既往の研究では断熱壁体の層構成に合致した実験条件のものは殆ど無く、外装形状での対処に力点が置かれていたことを述べる。そして、まず構法要因や各層の施工要因等を含めてパターン分類を行い、代表的な壁体モデルを対象とした実物大実験から、長期性能に乏しいシーリング材に依存しない外部防水性に優れた層構成のあり方について論じる。

5章では、壁内乾燥や漏水防止に有効な通気層の空隙確保に関して、シート状防風材を初めとする各種防風材を対象とした実物大壁体による長期実験から、その技術的対策について論じる。

6章では、一層の断熱性向上に向けて、構造熱橋に配慮した断熱設計が重要であることを述べ、断熱住宅における熱損失比率が大きく、構造熱橋の影響が最も大きい外壁を対象に、費用対効果の高い断熱手法のあり方について論じる。そして、難燃性・施工性に富む繊維系断熱材を用いた新たな断熱手法を提案する。

7章は、I部の小括である。
 この章では、3~6章で展開してきた外壁を主対象とした断熱と水への対応の技術的要件についてまとめ、それらの統合化と具現化を試みる。そして、得られた技術要件の各部位へ展開し、断熱を前提とした住宅外皮デザインを提案する。

(2) II部の構成

II部では、積雪寒冷地における断熱住宅の屋根に関して、断熱と屋根面積積雪障害の防止に向けた技術的対応を明らかにし、積雪寒冷地の屋根デザインの設計手法の提案を行うことを主な目的とする。

8章では、II部の冒頭として、積雪寒冷地が歩んできた屋根と雪への対応の経緯から、本論で取り組むべき論点を明らかにする。そして、屋根工法や外装材の耐久性向上、地球環境時代に向けた屋根デザインへの取り組みの重要性を論じる。

9章では、断熱方式・換気方式と各層温度性状や屋根積雪性状の関係を捉えるために行った実物大モデルの実測結果を述べる。そして、各々の断熱方式・換気方式が有する温度特性を把握し、屋根面積積雪障害の発生量と小屋裏温度との関係から、障害防止の判断指標を導く。

10章では、屋根面積積雪モデルを検討し、屋根面積積雪・融雪、断熱条件、換気条件、建物形状、外部風圧などを勘案した小屋裏・通気層温度のシミュレーション手法を検討し、9章で述べる実測値との比較からその手法の妥当性を論じる。

11章では、10章で提案されたシミュレーション手法を用い、まず住宅立地条件など検討対象の絞り込みを行う。そして、住宅形状と断熱方式毎に、屋根面積積雪障害の防止に有効な断熱性能と換気量及び換気仕様との関係を捉え、断熱・換気設計手法として提案する。

12章は、II部の小括である。
 この章では、9~11章での検討を基に、積雪寒冷地の住宅屋根の設計手法の提案と、構成技術の具現化を試みる。そして、積雪寒冷地の屋根デザインとして何が可能になるかを述べ、望ましいImageを提案する。

13章は、本論の総括として、各部のまとめと今後の課題を述べる。そして、今後の筆者の建築研究への取り組みの方向について論じたい。

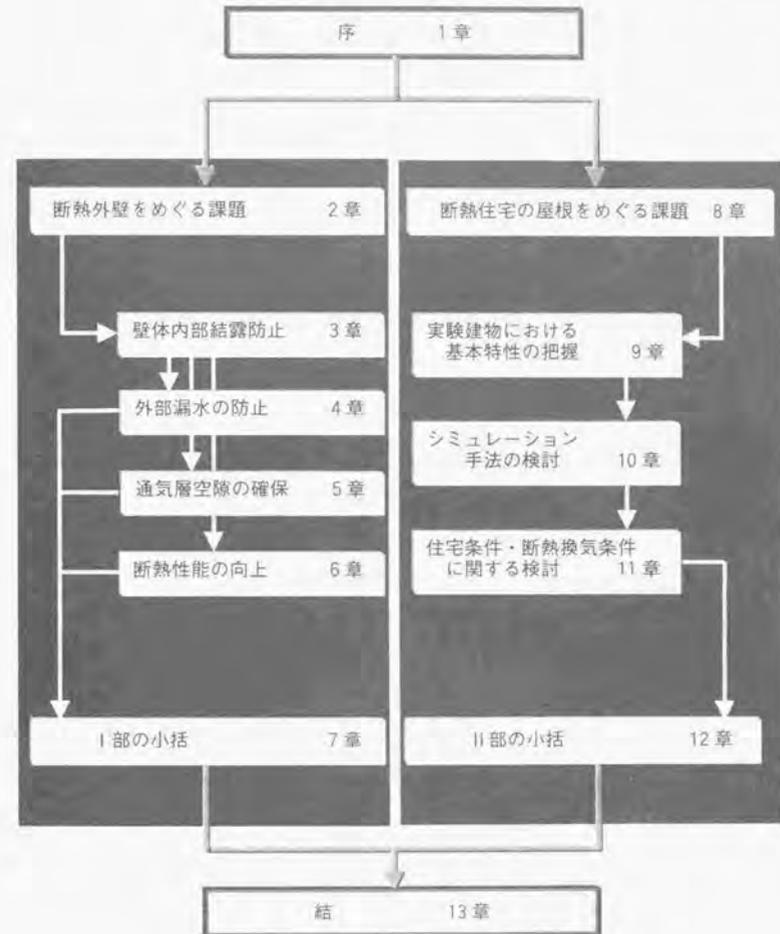


図 1.7 本論の構成

[参考・引用文献]

- 1-1 Lars-Göran Månsson: Evaluation and Demonstration of domestic Ventilation Systems-State of the Art, IEA, Energy Conservation In Buildings and Community Systems Program, ANNEX27, Report A12, 1995
- 1-2 小松幸夫ほか：都市別にみた木造専用住宅の寿命，日本建築学会計画系論文報告集第375号，1987.5
- 1-3 1992年度日本建築学会大会シンポジウム建築経済部門研究協議会・資料「社会資産としての建物のあり方を考える」，日本建築学会建築経済委員会耐用年数小委員会，1992.8
- 1-4 荒谷登：「住居の熱環境計画への研究」北海道大学博士論文，1973.9
- 1-5 福島明：「北海道の住宅結露と地域性への研究」北海道大学博士論文，1997.10
- 1-6 鎌田紀彦・鈴木大隆：寒冷地における木造住宅の構法改良に関する研究，室蘭工業大学研究報告理工編，第36号，1986.11
- 1-7 北海道立寒地住宅都市研究所：スカート断熱工法に関する研究，平成9年度特別研究報告書，1997.3
- 1-8 住宅金融公庫融資住宅建設基準，住宅金融公庫建設サービス部
- 1-9 永田明寛：「地下空間を対象とした熱負荷計算法に関する研究」東京大学博士論文，1996.1
- 1-10 岩前篤：「表層系地盤の熱水分性状に関する研究」神戸大学博士論文，1996.3
- 1-11 福島明，入江雄司：寒冷地における基礎断熱した床下空間の温湿度環境特性，日本建築学会計画系論文報告集第478号，1995.12
- 1-12 鎌田紀彦，鈴木大隆ほか：RC外断熱工法-伊達の家，日本建築学会作品選集，1990.3
鎌田紀彦，鈴木大隆ほか：北国に学ぶ 暖かい住宅-構法レポート室蘭の実験住宅から，建築知識 no.344, 1987.1
- 1-13 基礎断熱工法検討委員会平成9年度研究報告書：(財)住宅建築省エネルギー機構，1998.3
- 1-14 鈴木大隆：寒冷地技術のもたらすもの，新建築 住宅特集 9403, 1994.3

I 部

外壁の防露と防水，断熱性向上に関する研究

断熱外皮デザインへの提案

2

断熱外皮の変遷と 研究の基本方針

2.1 はじめに ー断熱外皮の変遷ー

1部では、地域や環境に向けて、まず断熱外壁を対象とした技術の再構築を図り、そこで得られた知見を基にその他の断熱部位にも応用し、住宅外皮技術として提案することを主な目的とする。

特に、外皮に関する耐久性について、建築的対応の重要性はこれまでも云われているが、その具現化への検討は余り行われていないし、まして断熱外皮については殆ど行われていないのが現状である。

2章では、冒頭で我が国の断熱外皮の先進事例として位置付けることができる北海道の住宅外壁の技術的変遷に触れ、断熱によって何が問題として浮かび上がってきたかを述べ、本論の出発点を明らかにする。そして、耐久性向上や一層の断熱化に向けて、これまでの材料的対処のみならず建築的対応が重要であることを述べ、1部で行う検討の基本方針を示す。

図2.1は、北海道における外壁の変遷を示したものである。

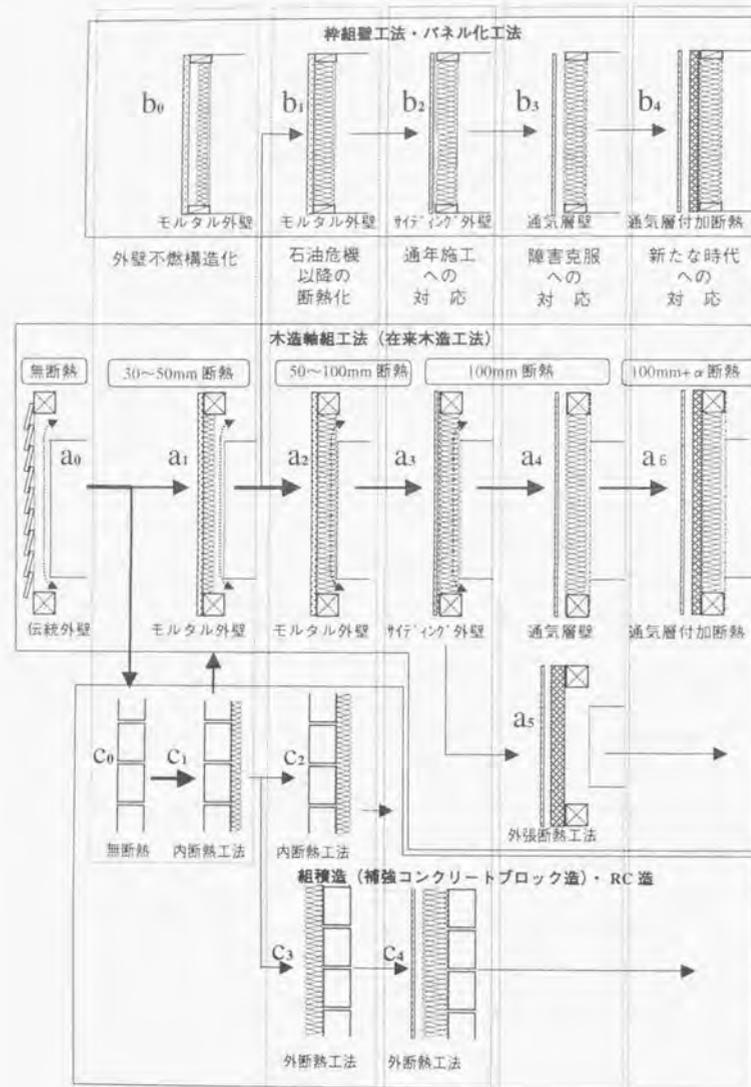


図 2.1 積雪寒冷地（北海道）における外壁の変遷

(1) 開放系から防寒・不燃構造化

1) 開放系住宅からブロック造外壁の誕生

北海道の住宅では、長い間、断熱が一切施されていない木造軸組で木羽目板を外装に使用し、板張りの内装とした開放系外壁が主流であった(図 2.1 中 a₀)。この頃の住宅は雨・雪を凌ぎ、外との視覚的プライバシーを保つことだけが基本的役割だったから、寒冷への対応は居住者の着衣量と薪ストーブのみであったといっても過言ではないだろう。開放系から断熱化への経緯は、寒地建築教材[日本建築学会北海道支部編[2-1]]に詳しいので、それを要約する。

【寒冷への対応として断熱などの建築的対応の意識が芽生えたのは、1940 年、戦時体制下の住宅供給・資材統制を目的として結成された北海道建築協会（北海道庁の建築技術者が中核）が、もう一面の活動としてこれからの北海道型住宅の探求を行った時からだろう。実現にはほど遠い状況ではありながらも、機関紙「北海道建築」には頻りに、ベチカ・オンドルといった暖房設備で暖を得ることの手法提案や鋸くず・もみがらを天井・外壁に詰め込んで防寒化することのアイデアなどが紹介され、当時の研究者・技術者が寒冷へ積極的な対応の姿勢が伺える。

木造開放系住宅に初めて断熱が施されるようになったのは、1949 年に国庫補助に 1 割の道費を上乗せした公営住宅の防寒構造化が推進された時からだろう。また併せて、1935 年の函館大火、岩内大火を契機に不燃化が強く推進され、防寒と不燃化がその後の住宅に大きな変革をもたらした(以上、[2-1]の 2 章から要約)。

材料そのものの不燃性と保温性を脚光を浴びたのが地場産材の火山灰ブロックである。それを用いた住宅の推進・高度化と洞爺丸台風による大規模な森林倒壊を受けた木材資源の保護のため、1952 年、北海道立ブロック建築指導所（筆者が所属する北海道立寒地住宅都市研究所の前々身）が設立された。そして、1953 年、住宅の防寒と不燃化を目的に北海道防寒住宅建設等促進法（通称、寒住法）が制定される。

これらは基本的に、一義的に不燃、副次的に防寒を目標として、準耐火造の住宅を積極的に推進するという姿勢の現れであり、同年、この構造に限っての住宅金融公庫の融資(抽選制)が開始された。1969 年に木造住宅が公庫融資対象になるまでの間は、木造住宅が主流でありつつも、北海道の住宅史を特徴付けるブロック造住宅が、公営住宅や北海道住宅供給公社が供給した個人住宅などを中心に大量に建設された(外観は写真 1.1 参照)。この構造は、無断熱でも以前の住宅に比べて断熱・気密性能は飛躍的に向上したため、しばらくの間は無断熱のまま建設される時代が続いた(図 2.1 中 c₀)。

2) 表面結露の発生とその対応から生まれた断熱

しかし、意図しない気密性の向上と採暖室の室温が上昇し非暖房室との温度むらが生じたことで、ブロック低温部での表面結露が顕在化することとなった。ブロック造住宅が普及し始めて数年後、その対応としてなされたのが表面結露防止のための断熱化であり、断熱材には、石綿やインシュレーションボードの数 mm 厚から 10mm、ロックウール、そして後に新材として登場したグラスウール厚さ 10mm から 25mm が使用された(図 2.1 中 c₁)。この時点での断熱化の目的は、負荷低減や快適性の向上ではなく、主に表面結露の防止にあったわけだが、目的はともかく、住宅の外壁などに本格的な断熱が施されたのはおそらくこの時からであろう。

室温保持の目的から断熱がなされた最初の部位はおそらく天井である。この住宅では天

井を木造とするため、小屋裏空間の天井下地の上に外壁用断熱材を載せるというものであった。保温性能が飛躍的に向上し空間の温度むらは拡大する一方で、大量の漏気による除湿換気が徐々に減じたことは、また再び表面結露を顕在化させることになる。

ここで、表面結露は、その後も断熱を高める度に顕在化し、この時代だけでは無く、今の新築住宅でも少なからず生じている問題である。これは断熱だけで対応できるものではなく、室温むら解消のための全室暖房、湿気拡散の防止のための計画換気が普及しつつある最近になって、ようやく解消の方向に向かっている。本論では表面結露への対応を特に論じるものではないことから、このことは余り触れない。

一方、一般の木造住宅においても、ブロック造とほぼ同程度の断熱化の過程を辿っていた。しかし、設立当初の使命を一度果たして1955年ブロック指導所から再編された北海道立寒地建築研究所(1989年から寒地住宅都市研究所に名称変更される。以下、寒研という)では、この間、寒住法の策定以後に市場展開し始めた様々な断熱建材・不燃建材の利用技術研究、外国の住宅技術の応用研究が進められていた。その成果は、木造住宅でのブロック造同等级以上の不燃・防寒化が可能であり、そして研究のみに留まらずその技術を多くの個人住宅等に提案し実証することで、実証的な[ものづくり]を通じて普及展開を図っていた。北海道の住宅研究が、基礎的なものより実証的・実証的な研究へとというスタンスは、既にこの時点で明確になっていた。

(2) 木造住宅の公庫融資適用を契機に

主流を占める木造住宅が、防寒・不燃という点でブロック造と同等、防寒についてはそれ以上の性能が期待できるという研究蓄積、今後の北海道の住宅には一層の防寒性能の向上が求められるとの研究者の予感、木材利用促進という政策的判断が相まって、1969年に防寒法は改定され、同時に公庫融資制度もそれに連動する。それは、適用をブロック造から木造住宅に広げ、大幅な断熱化を促すものであった。公庫融資の抽選制は一定枠となり、この時点から政策と融資が連動した本格的な一般民間住宅の断熱化が進む。

それを契機に、北海道では木造住宅比率が95%以上になり、ブロック造住宅の建設比率は急速に低下する。図2.2に年代別の住宅構造の比率を示すが、寒住法の制定・改定が転換期になったことを明確に物語っている。

その結果、在来木造工法をベースに、外壁はモルタル、屋根は亜鉛鉄板葺きといった新建材による不燃化と、外壁等の外皮には構造空隙にグラスウール10Kを50mm程度充填し(図2.1中a)、開口部は木製建具1重ガラスから外側アルミと内側木建の2重ガラスにより断熱化を図った住宅は、そう多くの時間を要さずに北海道に完全に定着した。従前の住宅から見れば飛躍的に断熱性能が向上したこの住宅は、防寒住宅として高い評価を得たのである。

外壁では、通風経路に当たる構造空隙部分に断熱材を施工することの性能低下は無論あったにせよ、断熱化による保温効果は著しく、また、グラスウールに付属した防湿紙による防湿は欠損も多く不完全なものではあったが、むしろ壁内通風の存在が表面結露以外の湿害を抑制していたともいえよう。

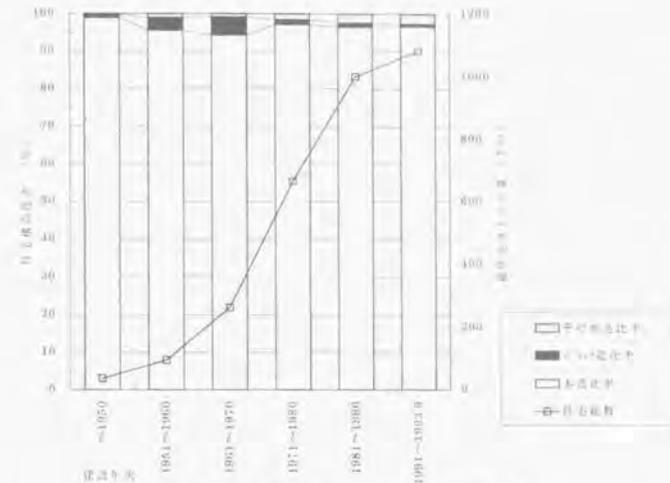


図2.2 建設年次別、住宅建設量と構造比率 [2-2]

一方、断熱化に伴い、小屋裏では著しい結露が発生するようになる。それは、断熱が貧弱な頃の小屋裏はむしろ熱的緩衝空間として捉えられていたため、この空間を積極的に外気へ開放するという考え方にはまだ至っていないことが、軒天井は不燃化のため換気口を忌避する傾向が強かったこと、天井断熱の強化によってこれらの空間がより低温になったこと、在来木造工法では室内で発生した水蒸気・構造物が保有する水蒸気は、温度差によって生じる壁内気流によって小屋裏へ搬送されるメカニズムを有すること[2-3]などが、その原因であった。多少要因は異なるが、床の断熱化によって同様の問題は床下空間でも生じるようになる。これらの湿害は、この時期からしばらくの間、程度の差、実害に至るかは別として、全ての断熱住宅で生じていた。

(3) 石防寒住宅から寒地住宅へ、そして諸問題の発生

1) 石油危機を契機とした高断熱化

1970年代半ばからの2度に渡る石油危機は、寒冷地の生活に省エネルギーという意識を強く芽生えさせるきっかけとなった。これを契機に、急速な高断熱化が進む。

1980年、国は省エネルギー基準を策定し、公庫は割増融資で政策誘導を図る。一方、北海道においては、トップアップのため独自の融資制度[高断熱基準]を創設し、戸建住宅の飛躍的な断熱向上を推進し、1981年、一般住宅のベースアップのため寒住法を改定し公庫一般融資を連動させた。その時の断熱化が何を求めていたのかを知るには、基準値である熱貫流率よりも代表的な仕様で示した方が理解しやすい。

ここで、木造住宅に関して仕様を表2.1に整理する。

1980年に制定された新基準はいずれも、必ずしも当時の断熱技術や流通建材を前提に

策定されたものではなかった。例えば、外壁の仕様を見ると、省エネ基準では殆ど流通していない 16K グラスウールの全充填化や、道高断熱融資ではさらに一般的ではないプラスチック系断熱材の付加断熱を前提としていることからそれが特徴付けられる。むしろ、現実にとらわれず、今後に向けて住宅の断熱化の進むべき方向を示すことで、建材は開発・供給され、技術は定着するとコンセプトが背景にあったと、基準策定に係わった上野榮氏は語っている。この予想通り、基準制定とともに、新建材・部品の開発に拍車がかかり、グラスウールは 10K-50~100mm から 16K-50~100mm へ、発泡プラスチック系断熱材の普及、開口部材はアルミ 2 重サッシなどが市場展開し、ほどなく北海道の住宅は外壁 100mm 全充填レベルの断熱住宅に進む (図 2.1 中 $a_1 \sim a_3$, $b_0 \sim b_1$)。

2) 通年施工化への動き

この頃、殆どの住宅では冬期間の施工は行わないのが一般だった。それは、厳寒期における手作業の困難さよりも、外内装材や設備工事の殆どは湿式であり、材料面での工期的制約があったためである。通年施工化は、建設労働者の雇用条件や夏期に集中する建設需要の平準化等、住宅生産システム上多くのメリットがあることから、積雪寒冷地の重要で切実な課題でもあった。

札幌オリンピック(1972 年開催)の前後から住宅建設量が急増したこともあって、通年施工化の要求は一層高まり、メーカーの開発によって、外壁材はモルタル壁から窯業系乾式材料へ、内装は塗壁から化粧合板などへ、設備ではユニットバスに代表されるような部品化へ移行する (図 2.1 中 $a_2 \sim a_3$, $b_1 \sim b_2$)。

また、現場レベルでは、軸組が完成した段階で「ダンマツト」と呼ばれる白いビニールシートを外側に張り、風雨雪に耐えつつ冬期施工が敢行でき、隙間風の軽減に繋がるような施工法も登場し流行した(写真 2.1a)。この方法は、後の外壁内部結露発生の一因にもなり得るわけだが、冬期施工に向けて様々な施工方法の試行も行われた。

この趨勢はその後も続き、特に材料の転換は住宅の外観意匠に大きく影響を与えた。そして多くの試行錯誤を経て現在は、基礎工事を除いてはほぼ完全な通年施工化が可能状況にある。

表 2.1 各基準と部位別仕様の概要表

各部位の代表的仕様	寒住法 ¹⁾		省エネ基準 1980-	道高断熱融資 1980-	北方型住宅基準 新省エネ基準 1993-	次世代基準 (案) 未定
	1969-	1981-				
屋根 又は天井	10K-30	10K-81	10K-140	10K-200	10K-250	10K-300
外壁(大壁)	10K-30	10K-70	16K-100	16K100 +FP25	24K-100	24K-100 +24K-50
その他の床	10K-20	10K-56	16K-100	16K-100	24K-100	24K-140
熱損失係数 kcal/m ² h℃		3.2	2.8	2.4	1.5	1.36

1) 寒住法は、北海道を道央・道南などの一般地域とその他の寒冷地に分けて基準値が設けられているが、表中の仕様は一般地域のものである。

2) 表中の記載は、グラスウール密度[kg/m³]・断熱材厚さ[mm]で表示している。

3) 見えない結露(外壁内部結露)の発生

断熱層の内側に連続した防湿層を形成することの重要性は今や常識である。

しかし、50~100mm 断熱化の初期は、グラスウールの梱包用の防湿紙が曖昧にその役割を果たしていた。1957 年から現在に至るまで、最新住宅情報の啓蒙普及のため年 1 回道内 10 数カ所で開催されている寒地建築技術者講習会(建築士会と北海道の共催)用テキストを見ると、その時代に研究者や行政が断熱や防露への対応をどう進めようとしたかを知ることができる。小屋裏結露防止を目的とした防湿層設置の必要性は、この問題が顕在化した直後の 1960 年代半ばから唱われ、ポリエチレンフィルムを設置例が示されている。しかし、この頃、外壁についてはブロック又は RC 造内断熱の場合に必要なが、木造では特に必要が無いとの記述に留まり、1970 年代の後半からその効果が述べられ、被害が顕在化した 1980 年代に入ってようやくその必要性が記されるという状況であった。

壁内結露の問題は、断熱化によって被害が顕在化する以前から、多くの研究者によって指摘され、その対応への基本的考え方は述べられていたが[2.4, 2.5]、ダイナミックな壁体通風がある在来木造を含めた住宅構造への実際的な技術的対応まで踏み込んでいなかった。また寒研も、以前から壁内通風による断熱性低下への対応策や諸外国を模範とした通気層工法の紹介は行ってはいたが、必ずしも強い説得力があるものでなかった。

実際、現場での対応はこれらの考え方とはほど違い状況にあった。なぜ現場に考え方が普及しないのか、技術的対策を提示しなかったからというのはいわゆる副次的理由で、これらで被害が発生しなかったというのがその直接的理由だろう。確かに、これまでも「防湿無き断熱住宅」は大量に建設されていたが、50mm 以下の断熱のもの大部分で、壁内気流による除湿と湿式工法による吸放湿の微妙なバランスによって「見えない結露」は抑制されていたのである。望まれる姿が示されても、現場の技術者が必要性を感じ、適用可能な手段がなければ、その姿は実現・普及しない。研究と現場の乖離の中で、日本全体が高度経済成長時代に突入り、北海道では「防湿無き断熱住宅」が大量に建設されていった (図 2.1 中 $a_2 \sim a_3$)。

また 1975 頃、これまでの在来木造住宅の他に、木質系パネル工法や我が国に導入された枠組壁工法などが住宅構造として加わる (図 2.1 中 $b_1 \sim b_2$)。枠組壁工法は北米から導入されたこともあってベーパーバリアの施工指導がなされていたが、本州系メーカーによる木質パネル化住宅などは「防湿無き低断熱住宅」であった。これらはいずれも構造材の外側に構造用合板を張り、かつ壁内気流が生じにくい構造であるため、湿気的にはむしろ壁内に滞留しやすい構造であった。防湿施工の信頼性が低い時代に、これらの住宅は、在来木造より湿害の危険性も持ち合わせていた。

「見えない結露」は、住宅構造に係わらず、通年施工化に向けた乾式化と 100mm 全充填断熱化が同時に進んだこの時期に、多くは、モルタル壁の剥離、耐凍害性に乏しい乾式外装材の劣化、土台腐朽による床の損傷など、表層の不具合部分の補修時に露呈した。あるいは建物損傷や外壁落下などの被害が多く発生した地震災害 (例えば 1982 年の日高沖地震) の補修時に発見された。「見えない結露」は、断熱住宅の構造材著しい腐朽や全充填したはずの断熱材が壁内下部にズレ落ちている或いはシャーベット状になっているという形で露呈したのである (写真 2.1~2.3 に被害例を示す)。



(a) 構造躯体の外側に防湿性の高いシートを施工した例
(写真はダンマツではなく、アルミ蒸着シートを使用したもの)



(b) ダンマツを外側に施工した壁で柱と断熱材が湿潤状態にある

写真 2.1 外側の透湿抵抗が高いために生じた内部結露の例



(a) 結露によって腐蝕が腐朽し、釧路沖地震[1993]で損傷を受けた住宅



(b) ダンマツ工法で、結露によって土台・隅柱が腐朽し、東方沖地震[1994]で損傷を受けた住宅

写真 2.2 内部結露による地震被害例



(a) 内部結露水が壁内から外側に漏れ、乾式外装材の汚損が生じている住宅



(b) 外装材の張替え時に発見された壁体下部結露による土台・柱下部の腐朽

写真 2.3 内部結露の被害例

当初は、漏水、モルタル壁の下地ボードの吸水、あるいは断熱材外側の防湿性を高めることとなったダンマツ工法、断熱施工の不備によるなど、その原因も諸説入り乱れた。原因が特定し難かったのは、それらが複合的に絡み合っていたものも少なくなかったし、これらの障害はクレームとしてユーザーと業者間で短期間のうちに個別処理されることが多く、なかなか調査対象になり得なかったのが主な理由だろう。

このような中で、寒研が行った腐朽実態調査は貴重なものである[2-6]。上記いずれかの被害にあった 67 件のうち、内部結露が主因で断熱材劣化や木材腐朽が生じたと推測されたのは 6 件にも上った。

この割合の多少は評価の分かれるところだが、住宅の構造安全性や保温性を大幅に低下させるこの問題が当時のクレーム住宅の 1 割程度を占めていたことは、無視できない社会問題であったことに多くの説明を要しないだろう。

4) 省エネルギー手法への反省

内部結露も含めて、断熱住宅の問題点を象徴的に示すことばが、第 23 回建築技術者講習会テキスト(1980 年)中に小項目のタイトル「省エネルギー手法への反省」として掲げられている。これは、1 章でも述べた洪、荒谷らなどを初めとする研究者や住宅技術者が参集した委員会の一つである、住宅計画からコスト問題まで幅広い分野を対象に行った「寒地住宅の性能水準に関する研究(1980)」委員会の報告書[2-7]からの抜粋であった。

その概要は、計 182 戸の暖房用灯油消費量実態調査を行った結果、多くの努力によっ

- | | |
|-----------|--|
| 住宅の保温工法 | <ol style="list-style-type: none"> ① グラスウール密度 108 は小さくないか。 ② 上記の密度では経年変化によって断熱低下を生じていないか。 ③ 断熱材を丁寧に施工しているだろうか。 ④ 壁体内部において種突作用が生じていないか。
(気流止めを入れているだろうか) ⑤ 壁体内部結露が発生して断熱低下をきたしていないか。 ⑥ 在来木造工法において、巾木、台輪などから冷風が入りしていないか。 ⑦ 窓、建具廻りからの隙間風が多くないか。 ⑧ 集合種突が屋外か、または室内のどの位置にあるだろうか。 ⑨ 太陽熱を窓から有効に利用しているだろうか。 ⑩ 北面の窓が大きすぎないか。 |
| 暖房システム | <ol style="list-style-type: none"> ① ボイラーのキャパシティが適正に選定されているか。 ② 種突のドラフトは適正に設計されているだろうか。 ③ 膨張水を垂れ流していないか。 ④ コールドドラフトを防止するような放熱器の配置になっているか。 ⑤ 輻射熱量の多くする放熱器であろうか。 ⑥ 床下パイプ断熱が適正になっているのか。 |
| 運転管理・住まい方 | <ol style="list-style-type: none"> ① 室温設定は高くはないだろうか。 ② 各室毎に室温が自動制御できる方式になっているだろうか。 ③ 床下換気口の気密度は高いだろうか。 ④ オイルタンクの水抜きをこまめにしているだろうか。 ⑤ 玄関、裏口の出入りにおいて風除室的な扱いになっているだろうか。 ⑥ 安全弁、膨張弁をこまめに点検しているだろうか。 |

図 2.3 全室暖房住宅における省エネルギー手法への反省と策

(※タイトル・内容とも、寒地住宅の性能水準に関する研究報告書から抜粋)

て100mm断熱化にまで至った在来木造住宅が、50mm断熱の木質系パネル住宅(図2.1中b₀)より暖房エネルギーを要しているとの現実であった。このことは、当時の研究者にとって、壁内気流が断熱性低下に及ぼす影響や間仕切壁の壁内気流が住宅熱損失に与える影響の大きさを改めて認識させることとなった。

既に、研究者の中で寒地住宅の常識になっていた全室暖房も、このような在来木造が抱える工法的問題が解決しなければ、省エネルギーとはほど遠い住宅になってしまうことになるとの反省と警鐘は、同報告書に図2.3のような形で整理されている。本論で検討する項目に直接関連の薄いものもあるが、この図から、断熱住宅における当時の問題点と緊急的な研究課題と考えていたものがよく分かる。

この現実、ようやく一般住宅での普及率が10%弱にまで急増しつつあった全室暖房への流れを、1990年に道が推進した北方型住宅が打ち出されるまで、一時的に減退させるほどの影響があった。

(4) 障害克服への対応 — 本論の出発点

この複合問題への対応に、研究者、行政と先進的な住宅技術者が果たした役割は大きい。そして、これらへの対応には、環境工学や材料施工などを初めとする各研究領域と設計施工の中間領域を対象とした構法的研究からのアプローチが必要不可欠であった。なぜなら、それまでの各研究分野から提示されていた手法は、施工精度や施工実現性を十分考慮したものとは云えなかったし、ある事象への対応は可能でも他には効果が期待できないといった、ともすれば局所技術に留まっていたためである。

その端的な例としては、壁内気流を防止するために壁上下端部にグラスウールを丸めて詰め込むという手法が挙げられる。この方法は、適切に施工すれば壁内通風による断熱低下を抑制できることが、実験室レベルでは確認されていたが[2-8]、小屋裏などの狭小空間で適切に施工できる可能性は低く、現場技術者の施工への意欲を創出するほどの現実性は無かった。また、内部結露の防止には殆ど効果はなかった。

内部結露と壁内通風など、当時の在来木造が抱えていた諸問題は、局所技術で解決するのではなく、構法的に対応することが重要であった。

当時、学会北海道支部専門委員会を初めとする各研究会が設立され、その実証的な研究活動、そして多くの研究者が個々に行った実験・研究などから、断熱化とそれにまつわる諸問題、本質的な命題である快適性向上への対応策は、次第にその全貌が浮かび上がってきたのである。その中で何人かの研究者が指向しメーカーとともに開発したのは外張断熱工法であった(図2.1中a₂)。この新断熱工法は、既に試みられていたRC・ブロック造の外断熱工法(図2.1中c₂)を参考に、木造軸組の外側にプラスチック系断熱材を施工するもので、在来木造の諸問題を構法的に解決するものであった。

また、鎌田・筆者は、国民工法とも云える在来木造の繊維系断熱材による充填断熱を工法改良することが最も普及解になり得ると判断から、その構法的改良に取り組んだ。これは、現状の技術体系の中で実現可能なもので、施工方法に一般性があるものが、コスト増を最小限に抑え普及するという考え方が基本にあった。この研究は、まず、内部結露防止を念頭に置き、約5年間に渡って現象の把握そして手法提案の検証を行い、次の5年間でその構法的要件を試行住宅に適用し、10軒以上の試行建設とのフィードバックを通じて総合的な工法提案に発展した。(図2.1中a₃)。そして、この構法的要件は、在来軸組と

同じ問題を有する鉄骨系軸組工法にも適用可能で、さらに壁内気流の生じない枠組壁工法・パネル化工法にも応用でき、その後の住宅の断熱・気密化に大きく貢献した。この時の知見が、1990年に望ましい住宅像の建設推進を図るべく創設した北方型住宅基準と融資制度、1992年の新省エネ基準、次代に向けた良質な住宅の建設を目的とした次世代省エネ基準(原案策定に筆者も参加)の基本となっている。

「省エネルギー手法の反省」を出発点とする一連の研究は、当初の防露や断熱性の確保という障害克服型の対応ばかりでなく、次代への課題とも云える耐久性向上に向けた断熱外皮技術の根幹を形成していることから、本論の出発点をここに据え、3-2で詳しく述べることにする。

多くの研究や試行の繰返しによって、防寒住宅から障害克服型住宅へ、そして住空間の快適環境の創出に向けた全室暖房・計画換気手法が適用し得る熱的性能の高い躯体技術に支えられた住宅建設が可能となったのは、省エネ基準の告示から約10年経過した1990年代初頭であった。

2.2 断熱外皮の耐久性向上への基本方針

断熱の有無に係わらず、従前より、住宅の高耐久化を図るためには、構造材料の断面寸法の増加と防露・防蟻措置の必要性が論じられ、公的仕様書等[2-9]でもそれが唱われている。この措置は、長期的には木材腐朽が生じ得ることを前提としながら、材料的対処によって必要な部材強度を確保するという考え方に基づくものである。しかし、断熱を前提とした場合、それらの対処のみでは耐久性を保持する有効な手段とはいえないことは既に述べた通りである。そして、今後に向けて、木造住宅の構造的耐久性を少なくとも欧米なみに確保すべきという観点からすると、これらの材料的対処の信頼性は低いと云わざるを得ない。なぜなら、防露・防蟻処理はその効果がせいぜい5~10年程度と短期間であること[2-10]、隠蔽された構造部材の維持保全は難しいこと、一度腐朽・蟻害が始まるとその速度は早く強度が急速に低下する危険性がある[例えば2-11]ためである。

これらの考え方も、多くの伝統工法がそうであるように、外壁構成などの建築的対応によって長期に渡って躯体構造の乾燥維持を図ることが、木造躯体の耐久性の保持に関して、最も信頼性を有する手法であることは言うまでもない。

本論では、断熱外皮の耐久性に向けて、耐久性を損なう劣化要因をそのまま残しながら材料的に対処していくという従来の考え方ではなく、建築的対応によって劣化要因を取り除くことを基本方針に据えて、3章から5章に渡って技術要件について考察する。

ここでは、まず、既往の文献等から木材腐朽条件について整理し、木材腐朽によって耐久性低下を生じさせる劣化要因を明らかにし、検討の基本方針を示す。

2.2.1 木材腐朽条件の整理

木造住宅における構造材等の腐朽劣化は木材腐朽菌が生育することによるのが主因である。一般的な木材腐朽菌は好気性であり、その発育には次の4条件が必要であることが定説となっている[例えば2-12]。

① 温度

腐朽菌の最適発育温度はおおよそ 24~35℃、発育可能温度帯は 4~45℃であり、この範囲を越えている場合は、発育は非常に阻害されるかまたは停止するといわれている。この条件は腐朽菌の種類によっても異なるが、一般的な腐朽菌はこの範囲である。寒冷地における木材腐朽の進行期間は、一般に春から初冬期までが該当すると考えて良いだろう。

② 水分

上記の温度条件が保たれている場合、腐朽菌が発育する最低重量含水率は、木材の繊維飽和点付近 (25~30%) である 40~50%の含水率となると著しい腐朽が生じる。一方、木材含水率が 20%以下となるような環境下では腐朽菌は発育し難い。

③ 空気

空気についての知見は少ないが、通常、木材容積の 20%程度あればよく、比重 0.4 程度の木材 (針葉樹等) は、重量含水率 100%以上になるまで発育に必要な空気は木材中で確保できる。

④ 養分

セルロース、リグニン等の木材主要成分が、腐朽菌の主な栄養分である。また、木材中で養分を確保できない場合は、外部から補給したり再利用することもあり、特殊な樹種を除いて腐朽菌の発育に必要な養分が不足することは無い。

(2) 建築的対応の基本方針

2.2.1 で整理した木材腐朽条件のうち、「①温度」「③空気」については、意図的に制御できるものではなく、住宅用木材はこの要件を満たしている。

「④養分」については、対応策として防腐処理 (加圧注入・塗布) が一般的に行われている。しかし、防腐材は揮発性であるため、長期的な効能は期待できないこと、躯体内部に隠蔽された構造部材などを定期的に防腐剤を塗布することが難しいこと、更にこの措置はあくまでも他の要件が整った場合に、発育に必要な養分の利用を阻止するのが目的であることなどから、主要な防止手法とは考え難い。また、現在用いられている現場塗布用の防腐材は毒性が強く、住宅居室の空気質の確保に問題が生じる恐れが少なくない。従って、無害で長期的効能に優れる防腐材が開発されない限り、高耐久化に向けて、防腐処理を前提とした手法の構築は避けるべきであろう。

以上のことから、一般的な針葉樹系木材を使用した住宅において、建築的対応によって住宅の高耐久化を図るには、木材の「②水分」管理が重要であり、乾燥維持のための手法を構築することが重要である。ここで、木造断熱外皮における水分に関連する項目として、次の事項に整理できる (図 2.4)。

そして、木材腐朽を促進する水に係わる要因を取り除くことは、東北や北関東、本州の日本海沿岸地域などの準寒冷地に分布するヤマトシロアリによる蟻害対策に有効といわれている。なお、関東以西の太平洋沿岸に分布するイエシロアリは、被害頻度は低い但其の程度は激甚であり、その対策には多くの混乱が生じているのも現実だが、少なくとも建築的対応としての躯体の乾燥維持が必要条件の一つであることに間違いはないだろう。



図 2.4 乾燥維持のための 4 要素

2.2.2 劣化要因と検討の基本方針

(1) 使用材料の含有水分

断熱外皮の層構成は概ね 4 層以上から構成されるが、近年の住宅では構造用木材や下地材を除く殆どの構成材料は工業化製品であり、そり・狂いが生じないよう初期的な含水率管理が行われた乾燥部材が用いられることが多い。木材は材積比率も大きいことから、断熱外皮を構成する材料の含有水分の殆どを占める。

北海道で流通汎用される木材は、施工時期によって違いはあるが、概ね 25%前後の含水率を有している。初期段階から木材腐朽条件とならないようにするには、前述したように重量含水率が 20%程度以下の木材を使用する必要がある。しかし、乾燥木材が比較的ローコストで流通・普及している北海道でも未だその流通量は新築住宅使用量の 20%程度にすぎなく、本州では数%程度にも満たない状況にあり、住宅用乾燥材の生産流通体制は未だ十分に確立しているとは云えない状況にある。

木造住宅の高耐久化を図るには、構造材や主要な下地材に乾燥材使用を前提とすべきことは言うまでも無いが、流通量の多い未乾燥材を使用した場合の乾燥促進が期待できる断熱外皮の設計要件を明らかにすることも重要である。また、多雨な気候条件下において、施工中に躯体内に浸入含湿した雨水が、壁内に滞留せず速やかに乾燥するための設計要件を探ることも重要である。

本論では、未乾燥材や施工中の雨水含湿に対する検討を 3.3 で行う。

(2) 内部結露・表面結露等の要因

断熱外皮は、内外装の乾式化や断熱材の壁内全充填化によって、湿気的には密閉化に向かっているため、従前の無断熱或いは低断熱な開放系外壁と比べて、内部結露に関するリスクは増大している。寒冷地では、冬期間に内部結露が生じた場合は、断熱材および木材に結露水が蓄積され、春～秋にかけて木材腐朽が生じる。

内部結露は単に、従前行われているような外壁の層構成ばかりでなく、現場施工精度や住宅構造との関連性も含めてその防止策を検討する必要があり、そのことが数値解析で扱い難しくし、対応を難しくしている。

本論では3.2で、この点に関して検討・考察を行う。また、表面結露防止に関しては、熱的な層構成の問題よりはむしろ、室温の保持、湿気コントロールが主要な対応と考えるべきであり、居室の換気計画に係わる問題であるため、本論の対象としない。

(3) 外部漏水等の要因

記憶に新しい関西大震災では、木材住宅の倒壊・損傷の被害が多かったが、蟻害や木材腐朽が主因だったものも少なくなく[2-13]、板張りの住宅などでは外部漏水が大きいかかわっていたと推測される。多雨な我が国の気候条件下において住宅木材の腐朽を防止するには、雨水の漏水への対応が重要であることは言うまでも無いだろう。寒地の断熱外壁では、春期から秋期にかけての雨水への対応に加えて、冬期間にあっては屋根面積積雪や外壁面に付着した雪の融雪水への対応も必要となる。

近年、寒地で普及定着している乾式外装工法は、耐久性に不安のあるシーリング材にジョイント部や取合い部の防水性を委ねており、この部分が経年劣化した場合には、躯体内部に漏水することも十分に予想される。これまで伝統的外壁や非住宅系建築の外装を対象とした外部防水に関する研究事例は多いが、断熱住宅の外壁に関する外装工法の防水評価については、これまで殆ど研究されていないのが現状である。

本論では4で、この点に関して検討・考察する。また、屋根雪の融雪などに関する対応などはII部で検討・考察する。

(4) 設備、配管の漏水等による要因

一般的に設備配管は躯体内部に隠蔽設置されることが多く、施工不備や配管自体の経年劣化等により漏水が生じた場合は、発見が遅れ、木材の乾燥維持に重大な支障が生じることがある。また、これまで設備・配管の設計施工は現場レベルで経験的・対処的に行われている場合が多く、住宅寿命に即して維持管理が容易な設備設計手法は未だ確立しているとはいえない。しかし、防水パンやユニットバスが普及し、設備配管自体も塩ビ管や銅管等の耐久性に富む材料が一般化していることなどから、設備系の漏水、生活水の処理の不備により、設備系空間の近傍に位置する構造材が腐朽する危険性は極めて少なくなっている。

この点に関しては、本論で対象とする断熱外壁との関連性は薄いことから、本論の対象とはしない。

2.3 断熱外皮の断熱性向上への基本方針

外皮の断熱手法はその構造空隙を利用した充填断熱が主流だったし、その合理性から、今後も主流となっていくだろう。そして、断熱性向上は、断熱厚みを増したり高性能な断熱材に置き換えるといった材料的対処が進められてきた。また、断熱材も繊維系断熱材の高性能化や発泡系吹付け断熱材など、多種多様になってきており、選択の幅は大きく広がってきている。

今後、環境への対応がますます重要になっていく中で、そして時代のトレンドともいえる合理化・省力化への指向の中で、少ない工事費でありながら多くの手間を要する断熱工事は、多くの検討対象となってくるだろうし、断熱への関心は高まり、より高性能な断熱材を選択していくこととなろう。

材料的対処は今後も主流を占めるであろうが、時代の変化とともに様々な対応の仕方も生まれてくるだろう。そして既に材料的対処とは異なるいくつかの技術もある。

例えば、北欧・カナダなどでRC造建物の断熱手法として定着している外断熱工法は、内断熱であれば建物全体の30%以上を占めるであろう構造熱橋からの熱損失を断熱材の位置を変えるだけでほぼ解消し、断熱性向上を図れる点に最大の特徴を有するもの[2-14]で、明らかに材料的対処とは異なる断熱化へのアプローチである。そして、建築的に火への対応を図ってきたこれらの国では、材料や工法そのものに過度な耐火要求もないことから、極めて簡単に建築技術者の裁量の中で自由に軽快な外断熱工法が展開している。

また、カナダで木造住宅の断熱手法として開発された206工法[2-15]は、ただ充填断熱材を90mmから140mmにするのではなく、我が国のそれと異なるのは、204材から206材への部材断面増によって部材間隔を広げるといった構造的検討が伴っていたことから、構造熱橋を大いに減じ有効な高断熱化手法となり得ている。そして、この手法は、断熱化に伴う躯体コスト増を抑え、現場生産性を低下させずに地域で展開可能であるという点に特徴がある。

一方、我が国を見ても、北海道で生まれたプラスチック系外断熱手法は、充填断熱に要する断熱気密工事の簡便化を図るのがその発端であり、高度な技術を要せずに地域で展開可能な断熱手法である。しかし、近年の躯体工事も含む様々な理化学工法の台頭によって、その魅力は薄れ、開発当初の勢いは無い。それは、これを展開する建材メーカーが施工合理化という単一目標しか掲げなかったことと、断熱性に対する評価に定まったものがなく、断熱性向上に向けては充填断熱と同様の材料的対処に留まっていることに起因すると考えられる。

また、近年、発泡ウレタンなどの高性能な断熱材を施工した断熱パネル工法が環境と合理化への対応策として住宅技術者の関心を呼び、普及途上にある。しかし、小断面部材を多用したパネル化・理化学工法の断熱評価は曖昧で、使用断熱材の性能向上ほど部位の断熱化に貢献しているかは定かではない。また発泡ウレタンは住宅用断熱材として汎用できるほどの施工体制が確立してなく、専ら住宅メーカー・建材メーカーが工場生産し、まとまった市場獲得のためのFC展開で断熱外皮部品或いは住宅システムとして地域に供給しているのが現状である。これらは住宅生産システムや地域経済に与える影響は未知だし、何よりも低速化・多様化する住宅市場の中でこれらを選択する住宅技術者の多くに、前向きな姿勢があるかと問われれば疑問である。合理化を是とする、あるいはやむなしとする

背景には、建築労働者の減少や技術低下が挙げられるが、これらの工法には、それを根本的に解決するほどの力は見えないし、むしろ助長する危険性さえある。

以上述べてきたように、諸外国の断熱化は地域で実現可能な環境への建築的対応であり、我が国の断熱化は材料的対処あるいは一面的対処が主流で、地域または環境への対応という面で抱えている課題は少なくない。

環境と地域への対応に向けた外皮デザインを検討する上で、断熱化にどうアプローチしていくかは重要な検討課題である。そのためにはまず、既往の断熱手法を断熱性能面での評価を行うことが重要だし、一層の断熱性向上に向けて、特殊な技術や材料を要さず、耐久性も損なわない技術として再構築していくことが重要である。

本論では6で、この点に関して検討・考察する。

[参考・引用文献]

- 2-1 寒地建築教材—概論編、日本建築学会北海道支部、彰国社、1982.11
- 2-2 住宅統計調査報告、総理府統計局、1963～1993 まで5年毎
- 2-3 福島明：木造住宅の通気経路と熱・湿気指導特性に関する研究、北海道大学修士論文、1977.3
- 2-4 前田敏夫：結露防止計画(1～3)、日本建築学会論文報告集 第38・40号、1957.8
- 2-5 荒谷登：断熱における結露対策、空気調和・衛生工学 第52巻第1号、1978.1
- 2-6 木造住宅の耐久性向上に関する研究、北海道立寒地住宅都市研究所 特別研究調報告書 No.46、1985
- 2-7 寒地住宅の居住水準に関する調査報告—望ましい規模水準・性能水準、北海道大学工学部建築工学科、1980
- 2-8 上野榮、福島明ほか：寒地住宅の省エネルギー化に関する研究、北海道立寒地住宅都市研究所調査研究報告No.43、1983
- 2-9 住宅金融公庫融資住宅建設基準、住宅金融公庫
- 2-10 日本住宅木材技術センター編：木造住宅3—耐久性向上の手引、丸善、1982
- 2-11 鈴木憲太郎ほか：イエシロアリに食害させたベイツ材の曲げ試験(1)、36回木材学会大会要旨、19(1986)
- 2-12 浅野猪久夫、杉山英男ほか：木材と住宅、学会出版センター、1970
- 2-13 建設省建築研究所：平成7年兵庫県南部地震被害調査中間報告書、1995
- 2-14 鈴木大隆、廣田誠一ほか：断熱住宅の構造熱橋が各部位の貫流熱量に及ぼす影響について、日本建築学会大会学術講演集 環境工学、1996.10
- 2-15 Canadian Home Builder's Association：R-2000 Builder's Manual、1987

内部結露防止手法に関する 実験的検討

3.1 はじめに

寒冷地の断熱住宅では、壁体の内部結露によって断熱材が湿潤し所定の性能を確保できなかったり、その程度が深刻な場合は木材に水分蓄積して腐朽に至らしめるケースも少なくない。前者の場合の多くは、木材腐朽に至らないこともあって、居住者のクレーム対象となったり実害として報告されることは極めて少ない。そして、被害が顕在化するのは、専ら後者の場合で、その多くは、リフォームや外装改修などを契機に見えられたり、或いは地震による外壁剥離や構造体破損事故がきっかけとなって発見されるのが一般的である(写真 2.1～2.3)。後者のケースは、住宅の安全性にも係わることであり、断熱住宅として無視できない障害である。発生頻度については、統計的データは必ずしも無く確かなことは云えないが、筆者の属する研究所の調査結果[3-1]や(財)北海道建築指導センターの技術相談件数などによると[3-2]、外壁に50mm程度の断熱をしていた段階では殆ど皆無のに対し、オイルショック以降、構造空隙への断熱材の全充填化された新築住宅では約1/100～1/1000のオーダーではなかったかと推測される。このオーダーは、交通機関の事故発生頻度や様々な家電製品の故障発生率と比べるまでもなく、かなり高い発生頻度であることはいうまでもない。

伝統的に壁内通風による乾燥促進によって構造躯体の耐久性を保持してきた在来木造住宅の構造空隙に、断熱材を全充填した頃から生じ始めた内部結露の問題は、その被害が隠蔽空間で生じるため顕在化し難く、発生頻度のオーダーから、そして実態調査研究の対象になり難いことから、寒冷地では、その対応策については長期にわたって混乱が生じた。

断熱壁体の乾燥化を図るためには、外部への湿気の開放に向けて通気層が有効であることは、筆者の知る限り、荒谷が提唱したのが我が国では最初と思われるが、その源は我が国の伝統工法にあったと推測される。しかし、通気層の効果は理想的には理解できても、我が国の外装工法には防水・防火が重んじられるため、伝統工法が成立し難いになっていること、現実的なコスト制約の中で、使用可能な材料選択の中で、その実現に向けては多くの課題があり、研究が必要であった。

その点では、詳しくは 3.2.1 で述べるが、実態調査や数値解析という手法よりも、むしろ、鎌田・筆者ら[例えば 3-3.3-4]、土屋ら[例えば 3-5]、福島ら[例えば 3-6]が行った実際的な実験結果から、その構成手法のあり方が少しづつ明らかとなっていった。その中で、ここで示す筆者らが行った実験は、その設計要件が明らかになっていく過程で極めて重要なものであったと考えている。

この章では、外壁内部結露の防止を目的として、室内で発生する水蒸気や他部位からの水蒸気の壁内侵入に対する防露性に関して 3.2「室内・他部位からの水蒸気侵入による内部結露の防止に関する検討」、湿潤した木材や施工中の雨水など壁内に保有した水分に対する防露性に関して 3.3「壁内保有水の放湿に関する検討」で、それぞれ実際の実験を行い、定性的な比較から、外壁の設計要件を明らかにしていく。

3.2 室内・他部位からの水蒸気侵入による内部結露の防止に関する検討

3.2.1 検討のアプローチ

内部結露の防止に係わらず、住宅内外で生じる現象の解明とその対応策に関する研究にはさまざまなアプローチがある。

例えば、現象を精緻に捉える解析手法を構築することを主目的とした研究は、その現象のメカニズムを理解するには非常に有効であり、それを用いることで、多くの計画上の基本的知見を得ることができる。しかし、それを用いて、設計施工要件を明らかにすべく、さらに検討を進めようとする時、手法構築の段階で含まれていない与条件、特に施工要因に係わる定量的指標が十分に整備されていないことが多いため、その予測は難しくまたそのために多くの時間を要する場合が多い。一方、実際に建つ住宅における実測研究は、適用手法の検証評価には有効な手段だが、外部環境や暮らし方等による変動要因があり、そこから普遍性のある設計施工要件を導き出すには、多くの実験データの蓄積が必要となる。また、実験室実験による研究は、各手法の定量的比較には有効な手段だが、外部や内部条件との係わりが多い実験項目を扱う場合は、特に外部条件の再現が難しく、多くの基礎的検討が必要となる。

断熱層の内部結露は、とりわけ木造住宅において発生する結露現象が、まさに外部気象や計画と工法・施工のはざまにある要因に左右されるため、これまで多くの研究がなされていても、必ずしも設計施工要件が明らかになっているとは言い難い状況にある。

すなわち、層構成の違いや構成材料の吸放湿を見込んだ断熱層内の湿気性状は、松本らが提案した熱水分同時移動方程式に基づいて土屋、坂本らが開発したシミュレーション手法[3-7, 3-8]によって予測することが可能であるし、そのことは環境工学の分野では一般的な認識となっている。しかし、大半が人的施工に委ねられ、かつ住宅構造も多岐に渡る断熱層における湿気性状の予測には、大きく3つの課題があると考えられる。

一つ目は、人的要因による現場での施工精度の影響をどう取り込むかという点である。とりわけ防湿材の施工法やコンセント・設備配管など現場で生じる防湿欠損、断熱材の施工精度などをどう扱うかについては、多くの研究では、現場性能との対比では無く、経験値的に防湿材の透湿抵抗値を設定するか完全断湿として考えたり、施工不良は無いという想定で行ったりしている。

二つ目は、例えば在来木造工法のように壁内気流が生じる場合に代表されるような、漏気に伴う熱・湿気移動の扱いについて、既往の研究も少なく、定量的に扱えるほどにはなっていないため、この要因を考慮しないで解析を行っている点である。壁内気流の多少は壁内の湿気性状に大きく影響を及ぼすと推測されることから、この扱いは湿気を扱う際に極めて重要といえる。そして、壁内気流の多少は内外温度差や外部風圧などの外部条件や、施工精度にも大きく左右されていることから、仮に、実測等で、この性状を把握し得たとしても、それはある限定条件下での性状把握にすぎず、その影響を定量的に示し得ている

ものとは云えないことがこのことを扱うのを難しくしている。

また三つ目は、木材や断熱構造部に用いられる材料の湿気物性値が十分整備されていない点である。

これらのことから、在来木造工法に代表されるような壁内が床下・小屋裏連続した断熱外壁の内部結露防止手法は、まだいくつかの課題があるシミュレーションによるアプローチより、実際の壁体をモデル化した実測実験によるアプローチが適していると考えられる。

ここでは、断熱外壁に着目し、寒冷地における内部結露防止手法について、限りなく実際に近い設定条件下で行った外部環境下での実験の定性的な比較から、求められる構法的要件を明らかにすることを目的とするものである。

すでに断熱壁体の内部結露に関する実験については、筆者らの他にも多くの研究者が取り組んでいる。しかし、在来木造工法特有の壁上下端の状態や防湿欠損などを十分モデル化していなかったり、その実験フィールドが穏やかな寒冷条件である場合やかなり厳しい条件化での定常的な実験室実験が多く、寒冷地における断熱外壁での防露上の構法計画面要件が明らかになっているとはいえない。筆者らが行った実験は、それらの多くの実験への取り組みをベースにその条件設定やモデル化を行ったものである。

なお、3.2 で述べる実験は、北海道の気候特性の中では比較的温暖な室蘭という条件下で行ったものだが、実際の条件下に近い状態で実験を行ったものであり、寒冷地における木造外壁の冬期内部結露防止に関する設計要件を検討するに当たって、重要な主眼を得ることができると考えている。

3.2.2 実験概要

(1) 実験期間と実験項目

実験は、1983年12月～1986年4月まで行っているが、本報で対象する期間は1983年12月～1984年12月(実験A、B)と1984年12月～1985年12月(実験C)である。また、実験は次の3つの検討目的からなる。

実験A：1970年以降に普及した乾式外装材の直張り壁の湿度性状の把握

北海道では、1970年代に外壁の乾式化が進み、特に石油危機以降、乾式外装材を直張りした壁内空隙に100mm厚の繊維系断熱材を全充填する構成が一般的となった。層構成、壁内気流の有無、防湿気密層の良否の違いによる比較検討から、この壁構成の防露上の問題点を捉えることを目的とする。

実験B：在来木造工法の通気層壁の湿度性状の把握

直張りした断熱壁の内部結露が問題となり、その改善策として1970年代後半になって通気層を設けることが提案された。在来木造工法において通気層壁が内部結露の観点からどのような改善効果と問題があるかを調べることを目的とする。

実験C：通気層壁を前提とした結露防止手法の検討

通気層壁を前提に、壁内結露を防止するための構法計画上の要件を探ることを目的とする。

(2) 実験建物概要

建物の概要を図3-1、3-2に示す。

実験は、室蘭工業大学構内にある間口2.7m×長さ14.56m×高さ3.73mの木造平屋実験建物で行った。内部結露の評価に対して危険側となる北側壁面に、実験壁体を計32枚まで設置でき、同じ内外条件下での定性的比較が可能である。

実験建物内部及び外部の典型的な温湿度性状を図3-3に示す。

建物内の温湿度は、ポット式灯油ストーブを熱源とする温風ダクトと市販加湿器2台

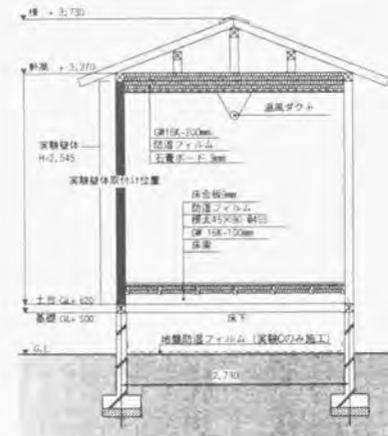


図3-1 実験建物の概要(矩計図)

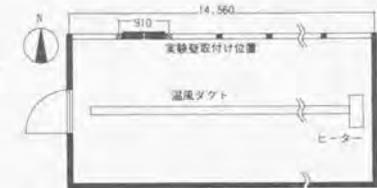


図3-2 実験建物の概要(平面図)

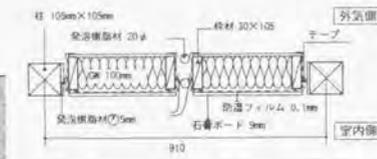


図3-4 実験建物の概要(断面図)

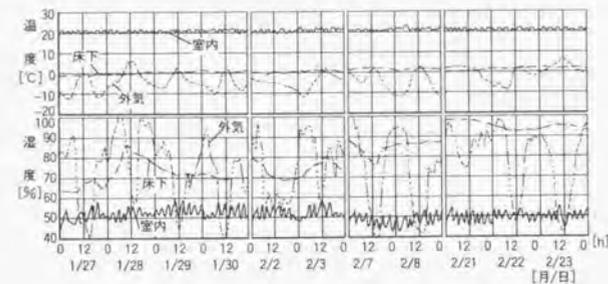


図3-3 冬期測定期間中の典型的な内外温湿度推移

を設置し、灯油流量の調整と温度・湿度センサーによる ON-OFF 制御によって、冬期実験期間中（概ね 12 月～5 月）は終日 20～22℃、50%前後に維持している。他の期間はなりゆきである。

(3) 実験壁体の概要

実験壁体の詳細を図 3-4 に示す。
ここでは、各実験壁体に共通する事項のみ述べることにし、層構成については、3.2.3 以降にその都度述べることにする。

1) 実験壁体寸法と構成

各々の実験体は、相互の熱的・湿氣的干渉を受けないように独立したパネルとして構成し、1 体のパネル外寸法は、巾 380mm×高さ 2545mm である。これは、幅はほぼ実際の住宅の間柱間に相当し、高さは階高分に相当するものであり、ほぼ実物大と考えて良い。また、各パネルのジョイント部分は、パネル間の空隙を 15mm 程度確保し、径 20mm の発泡断熱材を室内側と外気側にはさみ込み、実験壁体相互及び室内外の熱的干渉を受けないようにしている。

実験体の枠材には、約半年間に渡り 20℃前後の空間にて養生し、重量含水率で概ね 12% 程度まで乾燥させた木材 45mm×105mm を使用する。断熱材、防湿材、外装材などのその他の構成材料は全て市販の材料を用い、壁内に充填するグラスウールは全て、密度 16K 品、厚さ 100mm、防湿層には、ポリエチレンシート 0.1mm を使用する。また、土台・桁材・間柱に該当する枠材は、隣接実験体の湿的干渉を受けないように、枠の外側はポリエチレンフィルムとアスファルト系テープで覆い、木材の吸放湿が壁内に作用するように、枠の内側は壁内側に露出している。

2) 実験壁体のモデル化

実験壁体のモデル化の概要を図 3-5 に示す。
壁内に断熱材を充填する一般的な木造外壁のモデル化に当たり、内部結露の関連で考慮すべき点として、次の項目が挙げられる。

- ・在来木造工法では、壁の上下端は床下、天井裏に開放されており、この部分の防湿施工は全く行われなかったり不完全となり、また、施工中の傷や配管・構造材の貫通部分で防湿欠損が生じ易いこと。
- ・床下・壁内・小屋裏を通気経路とする壁内気流が生じること。
- ・繊維系断熱材による充填断熱の場合、施工方法により断熱材のへこみが間柱付近や壁中央部で生じやすいこと。

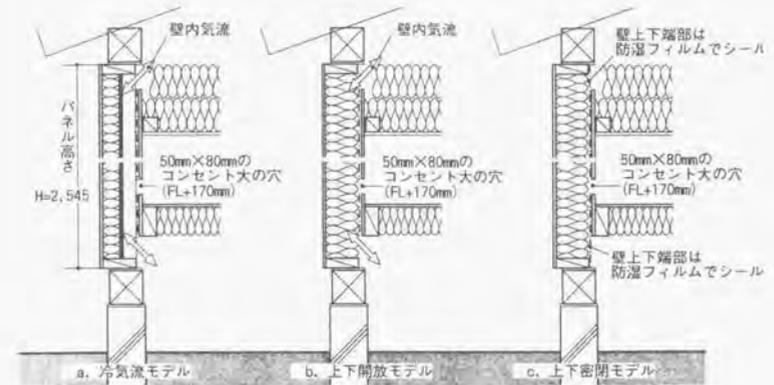
上記の要因を実験壁体で考慮するため、次のようなモデル化を行った。

(a) 防湿気密層の施工の良否

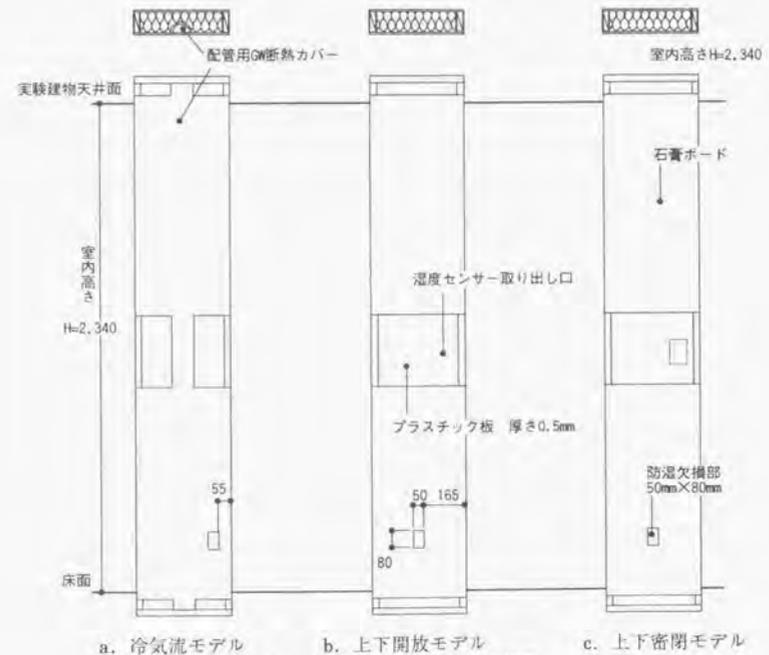
配線、配管上或いは構法上の理由で生じる防湿欠損については、壁体下部から 300mm の部分に 50mm×80mm のコンセント大の貫通孔を防湿フィルムと石膏ボードにあけることでモデル化することとした。防湿気密施工の良否は、この穴の有無による。

(b) 壁内気流の有無

断熱材の施工状態及び、壁内と床下・小屋裏の関連から、次の 3 タイプを設定した。



(a) 壁内気流モデル



(b) 内側姿図と防湿欠損の位置

図 3-5 実験壁体詳細図（矩計図及び内側姿図）

a. 冷気流モデル

断熱材の施工が不良で壁内側に空隙ができ、かつ壁体内部と床下や小屋裏で通気が生じるタイプで、断熱施工が雑な在来木造工法を想定したもの。

b. 上下開放モデル

断熱材は丁寧に充填されているが、断熱材を通じて、壁内と床下・小屋裏間で通気が生じるタイプで、断熱施工が良好な在来木造工法を想定したもの。

c. 上下密閉モデル

壁の上下端に通気止め措置が講じられており、壁内と床下や小屋裏は部位として独立しており、壁内は密閉構造となっているタイプで、在来木造工法の気密化住宅、枠組壁工法やパネル化住宅を想定したもの。

(4) 測定・調査概要

1) 温湿度の計測

壁内湿度は、測定毎に湿度校正した電気抵抗式センサーを用い、全ての実験項目に共通して実験壁体中央部(横方向:380/2mm、高さ方向 2600/2mm)で、実験 C ではそれに加えて壁体下部(横方向:380/2mm、高さ方向は下枠から 300mm)にて断熱材外側の境界空気部分(以下、断熱材裏面湿度と称す)で測定した。また、壁内温度は、銅コンスタンタン熱電対を用い、湿度と木材含水率計測部分の他、断熱材の室内側と外気側、内装仕上材の表面、通気層を有する壁体の通気層内などについて測定した。なお、これらの計測は 30 分間隔で自動記録した。

2) 木材重量含水率の計測

木材重量含水率は、土台に相当する下枠の中央部分と柱に相当する横枠の下から 300mm の位置の 2 箇所、電気抵抗式木材重量含水率計により電気抵抗を計測し、温度補正をした上で木材含水率に換算した。なお、計測は、2 日毎に 1 回、正午頃に計測した。

3) 結露目視調査

壁全体の湿気性状を把握するため、各測定期間毎に、冬期実験開始から約 2~3 ヶ月経過した 2 月下旬頃に、内装材・防湿フィルム・断熱材を一時的に外し、目視により結露発生の有無等を目視で観察した。なお、観察は、部分解体時の結露促進をなるべく避けるため、室内の暖房・加湿を中止し、温湿度を外気に近い状態まで低下するのを確認した後に、1 体当たり 10 分程度で行うこととした。

3.2.3 実験 A: 1970 年代以降に普及した乾式外装材の直張り壁の湿度性状の把握

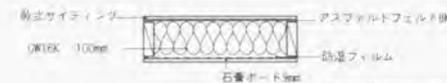
(1) 実験壁体の概要

実験壁体の概要を図 3-6 に示す。

層構成としては、壁内に断熱材 100mm 厚を全充填しアスファルトフェルトを防水下地に乾式外装材を直貼りした壁と、高断熱化手法として充填断熱材の他に押出法ポリスチレンフォーム 25mm を付加断熱し前記の乾式外装材を直貼りした付加断熱壁の 2 種である。

実験壁体は、壁内通気の関係から冷気流・上下開放・上下密閉の 3 種、防湿気密層の良・不良の 2 種、そして層構成の違いによる計 12 種類から構成される。

壁体No.	外装材	下地	充填断熱材	壁内気流のモデル	防湿材	内装材
A-1	乾式 サイディング 12mm	ゴムアジャスト フェルト貼	OW16K 100mm	(a)冷気流モデル	良施工	石膏 ボード 9mm
A-2				(b)上下開放モデル	不良施工	
A-3				(c)上下密閉モデル	良施工	
A-4				(c)上下密閉モデル	不良施工	
A-5				(c)上下密閉モデル	良施工	
A-6				(c)上下密閉モデル	不良施工	



壁体No.	外装材	付加断熱材	充填断熱材	壁内気流のモデル	防湿材	内装材
A-7	乾式 サイディング 12mm	押出法ポリス チレンフォー ム25mm	OW16K 100mm	(a)冷気流モデル	良施工	石膏 ボード 9mm
A-8				(b)上下開放モデル	不良施工	
A-9				(c)上下密閉モデル	良施工	
A-10				(c)上下密閉モデル	不良施工	
A-11				(c)上下密閉モデル	良施工	
A-12				(c)上下密閉モデル	不良施工	

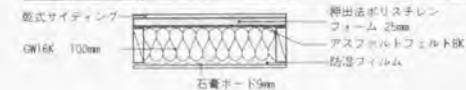


図 3-6 乾式外装材直張り実験壁体の概要

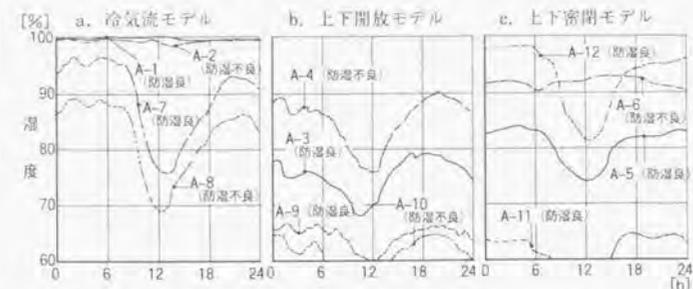


図 3-7 各実験壁体中央部の断熱材裏面湿度変動 (1984/2/16)

(2) 実験結果と考察

図3-7は、冬の壁中央部の典型的な断熱材裏面湿度の日変動を示す。この図は、実験結果を壁内気流のモデル毎に整理しているが、これは、断熱材裏面湿度や結露の発生状況は、層構成、防湿気密層の良否、壁内気流の違いによって異なるものの、このうち壁内気流モデルの違いで整理した方が、湿気性状を捉えやすいと判断したためである。

この図から次のことがいえる。

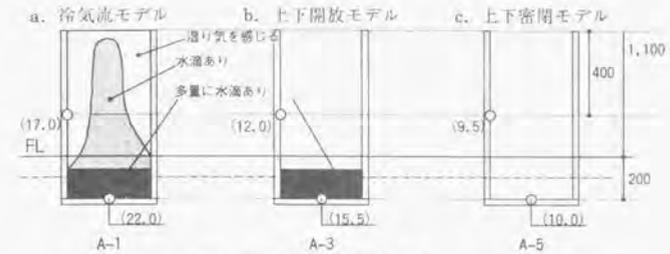
- ①防湿気密層の良・不良が及ぼす断熱材裏面湿度への影響は、冷気流、上下開放、上下閉閉モデルの順に大きくなる。上下閉閉に比べて上下開放や冷気流モデルの差異が少ないのは、また上下開放に比べて冷気流モデルの差異が少ないのは、壁内気流の存する壁構成では、防湿欠損部から侵入した水蒸気の一部は、壁内気流によって他の部位に排湿されるため、その差がでにくくなっていることが主因と考えられる。
- ②概して、上下開放モデルは上下閉閉モデルより低湿である。これも、同様の理由によるものと推測される。

図3-8は、冬期実験開始から2ヶ月経過後における結露目視調査結果について、直張り壁を代表例として示したものである。目視調査から次のことがいえる。

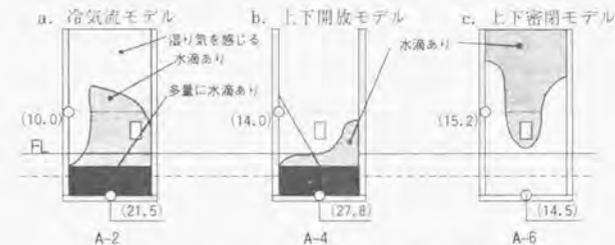
- ③上下閉閉モデルの防湿良施工の壁体(A-5)を除いて、各実験壁体とも壁体全面に強い湿り気を感じたり結露水が付着している。
- ④壁内気流の存する壁構成では層構成、防湿気密層の良・不良に係わらず、壁体下部を中心に結露が発生している。これは、高湿度な床下空気が、壁内気流または水蒸気拡散などによって壁内下部に侵入し、外装材表面で冷却され結露となったためと推測される。
- ⑤直貼り壁の冷気流モデルでは、冷気流沿いに結露が生じている。これは断熱欠損による断熱材裏面温度の低下によるものと推測される。
- ⑥図には示していないが、付加断熱壁でも前述したのと同様の傾向が確認されたが、結露発生程度は軽微であった。これは、付加断熱材によってグラスウールの外気側温度が上昇することによると考えられる。

図3-9は木材含水率の年間変動を示す。この図から次のことがいえる。

- ⑦間柱下部の木材含水率に関しては、実験壁体による差異は僅かである。しかし、下枠に関しては、壁体下部結露が発生している壁構成では、木材含水率が20~30%で推移し、外気温が上昇する5~7月頃までその状態が続くことから、木材腐朽の危険性は少なくないと推測される。



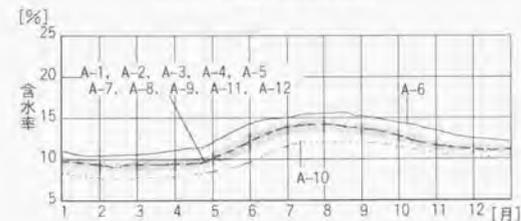
(a) 防湿材が良施工の場合



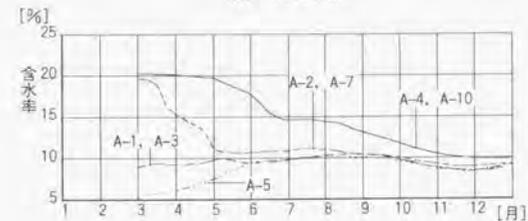
()内の数字は含水率(%)

(b) 防湿材が不良施工の場合

図3-8 結露目視調査結果



(a) 間柱下部



(b) 下枠

図3-9 木材含水率変動(1983年)

3.2.4 実験 B：在来木造工法の通気層壁の湿度性状把握

(1) 実験壁体概要

実験壁体の概要を図 3-10 に示す。

層構成としては、壁内に断熱材 100mm 厚を全充填し、その外側に防風層を設置し、厚さ 18mm の通気層、乾式外装材で成り立っている。防風材には、シート状材料では透湿防水シートとアスファルトフェルト 8kg、ボード状材料としてはシーディングボード 12mm 厚を用い、計 3 種からなる。いずれも上下開放壁モデルとし、防湿気密層は不良施工としている。

(2) 実験結果と考察

図 3-11 は、冬期の壁体中央部の典型的な断熱材裏面湿度の日変動を示す。

この図から次のことがいえる。

① 壁体中央部の断熱材裏面湿度は、防風材の物性、例えば透湿性や断熱性によって異なるが、いずれの場合でも直貼り壁と比べて低湿となっており、通気層による除湿効果が見られる。

しかし、図 3-12 に示す結露目視調査結果から次のことがいえる。

② 防風材に透湿防水シートを使用した壁構成を除いて、全ての壁構成で防湿欠損部を中心とした結露が認められる。さらに、直貼り壁と同様に、壁体下部を中心に結露が認められる。これは 3.2.3 (2) の④で前述したことが原因と推測される。また、透湿防水シートで結露が見られないのは、この材料の透湿性が極めて高いためであろう。

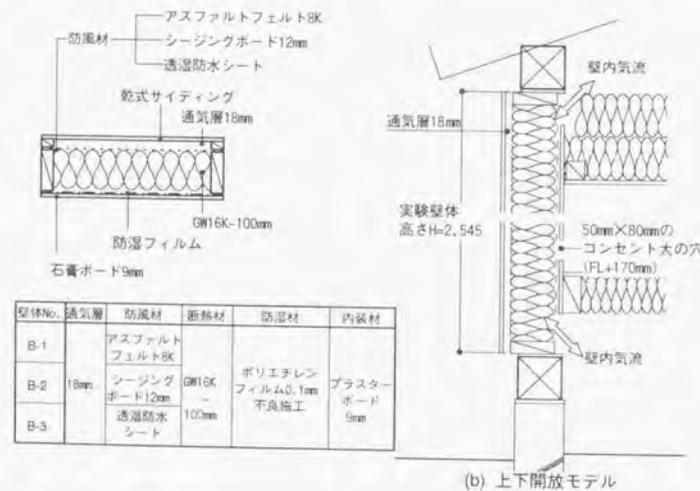


図 3-10 通気層を有する実験壁体の概要

また、図 3-13 に示す木材含水率変動から次のことがいえる。

③ 通気層を有する場合は、直貼りほど木材含水率が上昇せず、15%以下で推移している。

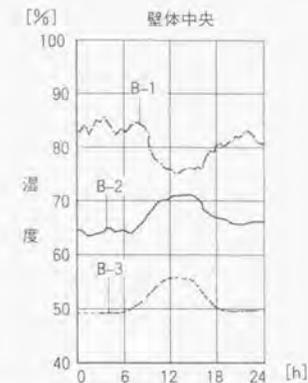


図 3-11 各実験壁体の断熱材裏面湿度変動

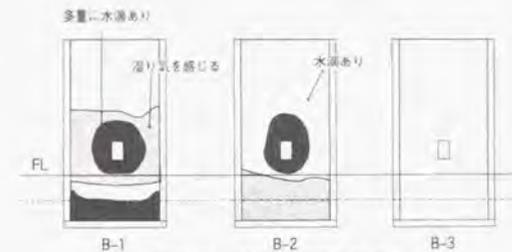


図 3-12 結露目視調査結果

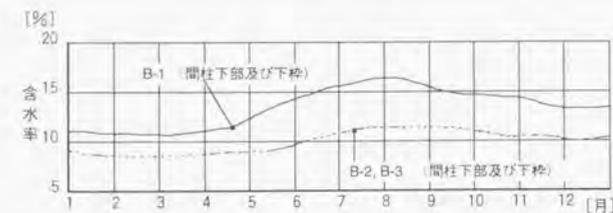


図 3-13 木材含水率変動

3.2.5 実験 C：通気層壁を前提とした結露防止手法の検討

これまで述べてきたように、直張り壁は壁体下部を含めた全面で結露が認められたのに対し、通気層工法は壁体内部の乾燥化に効果があるものの、壁体下部や防湿欠損が生じている部分では結露が生じる場合もあることが分かった。そして、壁体下部結露は、その発生状況から壁の層構成というよりは床下空間の湿気環境による影響が支配的であることが伺える。特に、実験 A、B では床下地盤防湿措置を行ってなく、床下空間が通年 80~90% を越える高湿な環境にあった。この条件で実験を行った理由は、オイルショック前後に建設された住宅の殆どがその条件に該当するためであった。

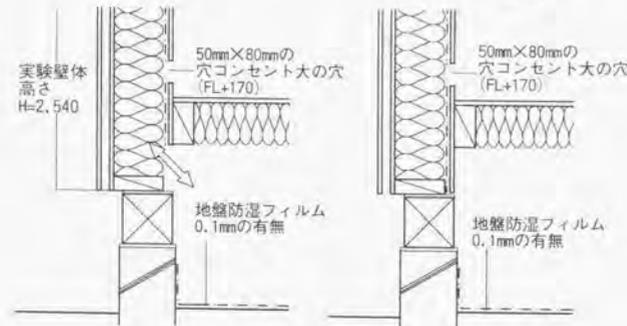
ここでは、壁体下部結露を含む結露防止手法に関して、通気層壁を前提に、床下地盤防湿措置や壁内気流の有無などをパラメーターとして実験を行い、その要件を明らかにするための検討を行う。

(1) 実験壁体概要

実験壁体の概要を図 3-14 に示す。

実験壁の層構成は、壁内に断熱材 100mm 厚を全充填し、その外側に防風材として実験 B の壁下部で結露を生じたシージングボード 12mm を用い、厚さ 18mm の通気層、乾式外装材からなる。

壁体No.	通気層	防風材	断熱材	壁内気流	防湿材	内装材
C-1	18mm	シージングボード12mm	GW16K 100mm	(b) 上下開放モデル	防湿フィルム 0.1mm	石膏ボード 9mm
C-2				(c) 上下密閉モデル	不良施工	



(b) 上下開放モデル (c) 上下密閉モデル

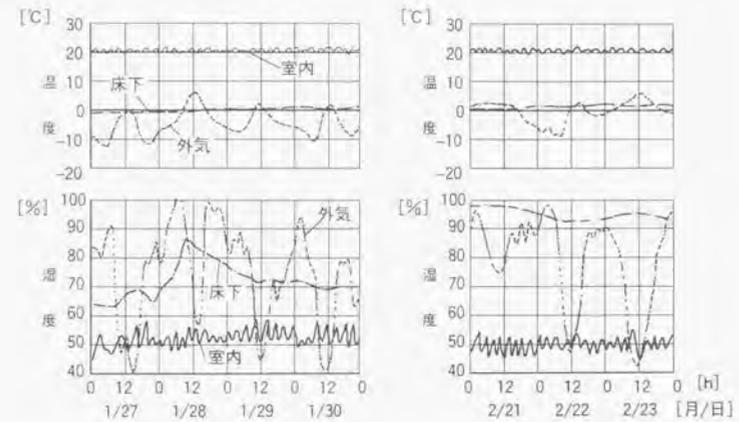
図 3-14 壁体下部結露に着目した実験壁体の概要

実験壁体は、上F密閉モデル(C-1)と上下開放モデル(C-2)の 2 種とし、防湿気密層の設定条件としては、内部結露に対しては危険側となる不良施工とした。

床下空間の湿気環境が壁体下部に及ぼす影響を把握するため、実験開始から約 4 週間は床下地盤にポリエチレンフィルムを施し床下湿度を低く保ち、その後はポリエチレンフィルムを取り除いた。地盤防湿の有無による実験建物の床下環境の違いを図 3-15 に示す。

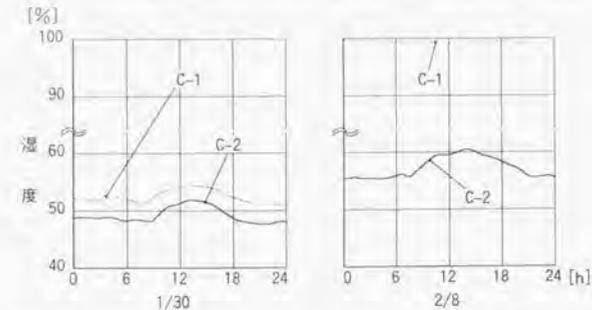
(2) 実験結果と考察

図 3-16 は、地盤防湿の有無と壁体下部の断熱材裏面湿度の関係、図 3-17 は、それぞれの結露目視調査の結果を示す。



(a) 床下地盤防湿が施された状態 (b) 床下地盤防湿が無い状態

図 3-15 地盤防湿の有無による実験建物の床下環境の違い



(a) 床下地盤防湿が施された状態 (b) 床下地盤防湿が無い状態

図 3-16 各実験壁体下部の断熱材裏面湿度変動

(a) 床下地盤防湿が施された状態

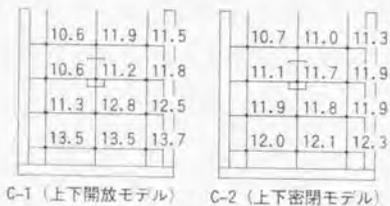
壁体下部の断熱材表面湿度は、実験壁相互の違いは無く、50%前後で推移しており、壁内の乾燥化は保たれている(図3-16左)。また、解体してもいずれの実験壁でも結露は認められず、シーリングボードの見かけの含水率も違いがないことがわかる(図3-17上)。

(b) 床下地盤防湿が無い状態

床下地盤面に敷設したポリエチレンフィルムを除いたところ、図3-16右、図3-17下に示すように、上下密閉モデルでは55%前後で推移し、解体でも結露は認められず乾燥していたのに対し、上下開放モデルの断熱材表面湿度は数時間で100%に達し、解体すると結露が認められ、シーリングボードのみかけの含水率は僅か3週間で30%程度まで上昇していた。

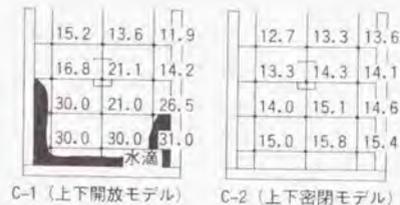
図3-18は、上下開放モデルに着目して、地盤防湿条件別の床下空気露点温度と壁体下部の断熱材表面温度の比較を示したものである。床下は終日安定した温湿度環境にあるので、露点温度は終日殆ど変わらないのに対し、断熱材表面温度は外気温変動に伴って変動するため、図中では日中(6:00~16:00)と夜間(16:00~翌朝6:00)に分けて、約6~14日間の実測した平均値で表示している。

図から、地盤防湿措置がある場合(a)は、壁体下部温度が床下の露点温度より上廻っているのに対し、地盤防湿措置が無い場合(b)は、壁体下部温度は露点温度を下回っていることがわかる。これは、壁内が床下に開放されている壁構造で、床下の湿気が壁内通気や拡散によって、壁下部に侵入した場合に、土台付近を中心として、結露が発生する危険性が高いことを示しているといえよう。



(a) 床下地盤防湿が施された状態

図中の数値は、木材含水率計を用いて、シーリングボード断熱材側の含水率を測定したもので、真値ではなく、見かけの含水率を示す。あくまでも相対比較のために示した値である。



(b) 床下地盤防湿が無い状態

図3-17 結露目視調査結果

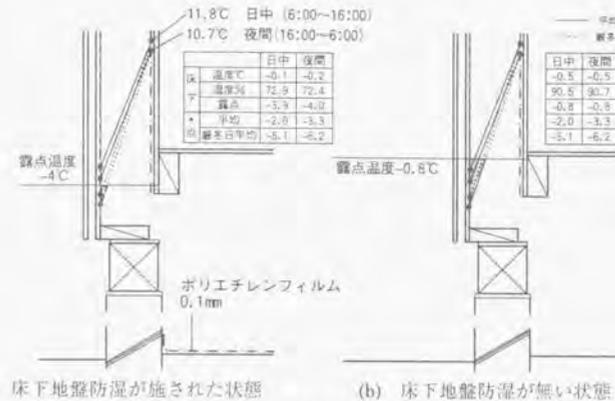


図3-18 上下開放壁下部の床下温湿度と断熱材表面温度の関係

3.2.6 まとめ

壁体内部に繊維系断熱材を全充填した外壁に関して、層構成、壁内気流の有無、防湿気密性の良否をパラメータとした実験の定性的比較から、冬期における各実験壁の湿気特性と内部結露の防止手法に対して次の知見を得ることができた。

- 1) 直張り壁体は、付加断熱材の有無によらず、壁体下部を含めた壁内全面で結露が生じる危険性が高い。また、土台の木材含水率も、夏期においては、木材腐朽条件の下限といわれる20%を超え、木材腐朽のリスクは高いと推測される。
- 2) 通気層工法を採用した場合は、壁体内部の乾燥化に効果がある。しかし、在来木造工法のような壁内と床下・小屋裏が通じる壁構成では、通気層を設置しても床下の温湿度環境によっては壁体下部の結露が防ぎきれない。また、防風層に透湿防水シートを用いた場合を除いて、大きな防湿欠損が生じている部分では結露が生じる危険が高い。
- 3) 壁体下部結露は、壁内気流の存する壁構成の場合に生じるもので、その発生程度は床下の湿気環境に左右される。すなわち、地盤防湿が不備または無く床下が高湿環境に置かれている場合は、層構成によらず壁体下部結露が生じる危険性があるのに対し、地盤防湿措置が適切に講じられており床下が低湿な場合は、そのリスクは低減される。
- 4) 一方で、壁体下部結露は、壁内が湿気的に床下・小屋裏と遮断されている場合は、地盤防湿の有無、床下湿気環境に係わらず、そのリスクを解消することができる。

以上のことから、寒冷地における充填断熱壁体の内部結露防止手法の要件としては、壁内の乾燥化のためには、大きな防湿欠損が生じないように防湿施工を行い、その上で通気層を設けることが有効である。そして、床下地盤防湿措置や床下換気が講じられていても、冬期間の床下は高湿度な環境にあることを勘案すると、壁体下部結露の防止のためには、壁体下部に床下の水蒸気が侵入しないよう、壁体の床下に面する部分に通気・透湿性の無い材料で遮断する措置を講じることが有効である。

3.3 壁内保有水分の放湿に関する検討

3.3.1 検討のアプローチ

外壁の構造材の乾燥維持を保つには、施工段階で乾燥木材を使用することが重要である。しかし、乾燥木材の供給体制が最も整備されている北海道でも、その流通量は20%に満たなく、我が国における住宅用乾燥木材の供給体制がまだ十分に確立していないことを考えると、未乾燥材を使用した場合の建築的対応も考えておくことが重要である。

住宅形状にもよるが、約40坪程度の戸建住宅では、外壁軸組材、下地材等に要する木材の使用量は約10~15m³程度になる。木造住宅の構造用製材は、出荷前は自然乾燥状態で保管されることが多いため、保管期間が長くなると共に平衡含水率まで乾燥していくが、保管期間の短い春先の使用では30~40%程度、それ以降でも30%前後の含水率を有しているのが一般と推測される。

仮に、使用木材の重量含水率を30%と考えた場合、この木材は、3.2で述べたような内部結露、4で述べる外部漏水による水分供給がなければ、これより高くはならないものの、木材中に自由水として保有している水分は、外壁全体で約100~150kgにもなる。その後、この自由水は、壁内との吸放湿を繰り返しながら、壁内環境によって決まる平衡含水率まで乾燥化に向かう。その乾燥過程や期間は、外壁構成によって違いが生じ、乾燥過程で、2.2で述べた木材腐朽条件を満たす期間が長期に渡るほど、木材腐朽のリスクは大きくなると予想される。

一方、壁内の乾燥維持のためには、木材が保有する水分の他に、施工中の雨水への対応も必要となる。十分に乾燥した木材は、一時的にその表面が濡れても、内部への浸透量は少なく木材含水率に与える影響は少ないといわれている[3-9]。むしろ、ここで問題にしたいのは、断熱住宅の殆どで用いられる繊維系断熱材の施工段階では、まだ外部防水が完了していないため、雨水が断熱材に浸透・含有される危険性が少なくないことである。また、防風材に良く用いられるシーリングボードも、防水処理が施されていない内側は吸水性がある。これらの材料に雨水が含有された場合は、木材の含水量をはるかに越えることも予想される。

そして、壁内に隠蔽設置された配管からの漏水が生じた場合にも同様のことがいえる。

これらのことから、壁内に保有する水分に対する乾燥促進の機能は、断熱外壁の構成を考えていくに当たり重要な項目といえるが、この点に関する検討はこれまで殆ど行われていない。

降雨水による壁内の含湿は工事施工法によって対応可能なことでもあり、またそれを実験的に再現することは難しいので、本節では、まず、未乾燥材を用いた場合に着目して各種壁構成の木材含水率変動を把握し、その比較から設計要件について考察する。次に、外壁構成の放湿性能に関して定量比較が可能な実験方法を考案し、その比較検討から、壁内保有水分の乾燥促進に有効な外壁構成について考察する。

3.3.2 未乾燥材を用いた場合の

各種外壁構成の木材含水率に関する実験的検討

(1) 実験概要

1) 実験建物概要

実験は、北海道立寒地住宅都市研究所内にある間口4.550mm×長さ7.280mmの木造2階建実験建物の北壁(幅9.100mm×高さ2.600mm)で行った。実験建物の概要は、図9.1(9章)に示す。

実験建物内の温湿度環境は、電気式パネルヒーター2台と自作の加湿器をサーモ制御し、冬期実験期間中(概ね12月~5月)は終日20~22℃前後、湿度40~50%前後に維持している。他の期間は、温湿度の制御は行っていないが、概ね実際の住宅の温湿度に近似した状況で推移している。

2) 実験壁体の概要

各実験壁の配置・概要を図3.19に、その種類を表3.1に示す。

各々の実験壁は相互の湿的干渉を受けないように、各境界面にポリエチレンフィルム0.2mm厚を気密に施工し、1つの実験壁体の寸法は、間柱を中心に幅607mm×高さ2.600mmであり、ほぼ実物大寸法と考えて良い。

壁内に充填する断熱材には高性能GW16K-100mmを使用し、断熱材内側の防湿気密層には0.2mmのポリエチレンフィルムを用い、気密に施工した。なお、壁内気流との関係では、3.2で下部結露の防止の面から有効性が確かめられた上下密閉モデルとし、壁内は床下や小屋裏には通じない構造としている。

実験壁体は、北海道や東北地方で一般的な外壁構成を対象とし、乾式外装材直貼り壁と通気層壁の2種に大別される。直貼り壁は、最近外装下地材として一般的に用いられるようになった透湿防水シートの上に市販横貼りサイディング12mm厚を施工したものである。また、通気層壁は、通気層厚を18mmとして、充填断熱材の外側に位置する防風材・付加断熱材の違いによる8タイプを設定している。

いずれも大壁構造として、計9種類の実験壁体を設置した。

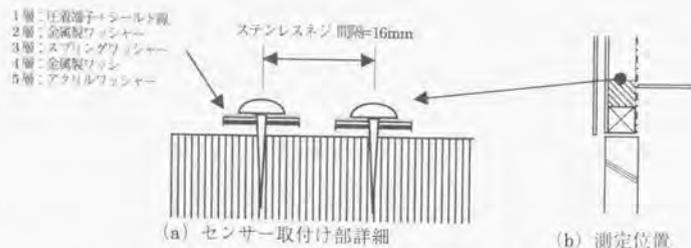
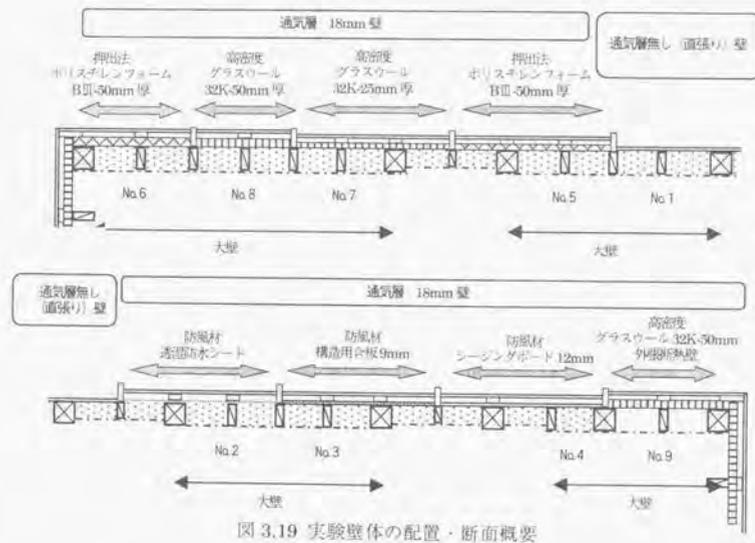
3) 測定概要

本実験は、土台に見立てた重量含水率約37%の高含水率木材(寸法103mm×103mm×230mm)を各実験壁体の下部に挿入し、その木材の含水率変動で各種壁体の評価を行う。含水率の測定は、木部上面の外気側に図3.20に示すセンサーを取り付け、多点木材含水率測定器(コーナー札幌製KNS-024II)にてその部分の電気抵抗を測定し、含水率測定点に設置したCC熱電対によって温度補正し、木材含水率を算定した。

各計測は、データロガー(江藤電気製サーモダックMODEL-5001A)を用いて30分毎に自動入力される。測定期間は1994年6月~1995年12月である。

表 3.1 実験壁体の種類

実験壁体No	通気層の有無	防風材・付加断熱材・防水下地材	軸間充填断熱材	防湿気密材	内装材
1	直貼り壁	透湿防水シート			
2	通気層18mm	透湿防水シート			
3	通気層18mm	構造用合板 12mm厚			
4	通気層18mm	シーリングボード 12mm厚	高性能グラスウール	ポリエチレンフィルム	石膏ボード
5	通気層18mm	押出法ポリスチレンb種 25mm	16K-100mm		9mm
6	通気層18mm	押出法ポリスチレンb種 50mm		0.2mm	
7	通気層18mm	高密度GWボード32K-25mm			
8	通気層18mm	高密度GWボード32K-50mm			
9	通気層18mm	高密度GWボード32K-50mm	なし		



(2) 実験結果と考察

各日 12:00 における温度補正後の各実験壁体の木材含水率の推移を図 3.21 に示す。

図は 2 つからなり、(a)は直貼り壁と代表的な通気層壁の比較、(b)は、防風層に付加断熱材を用いた場合の比較を行っている。

なお、木材含水率センサーでの計測は木材表層部で行っているため、木材内部の含水率が同じ状態となっているか確かめる必要がある。そのため、測定前後で壁体に挿入する木材の重量を計測した。

図 3.22 は、各実験壁体毎の測定開始直後と測定終了時の実際の重量差とセンサー計測値の絶対差を示している。図から、センサーによる計測値と実際の重量の相関性が高く、その違いは 5%以内に納まっていることがわかる。このことから、センサー計測値をほぼ実際の重量含水率と捉えて良いと思われる。

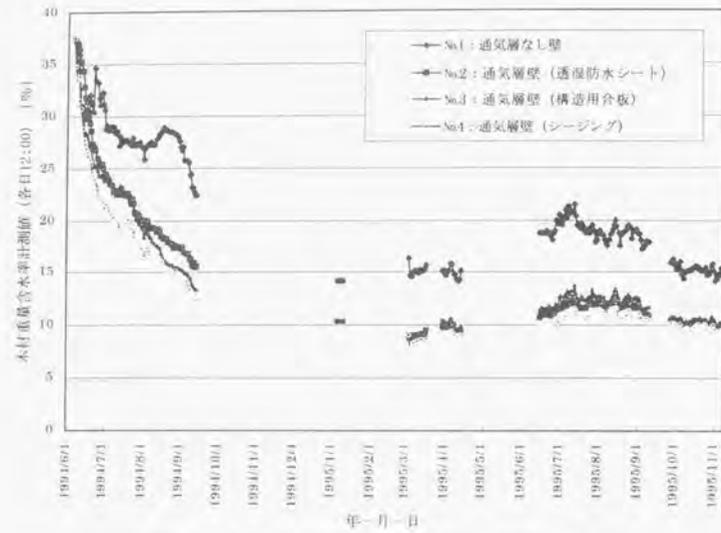
全実験壁体の測定開始時の木材含水率は約 37%と相互の差は殆どなかったが、その後、木材含水率に差異が生じた。その性状は以下のように整理される。

- ① 直貼り壁 (実験壁体No1) は、約 5 ヶ月経過後も重量含水率が 25%程度であり、約 1 年経過後の夏期間でも 20%程度で推移しており、2.2.1 で整理した木材腐朽の水分条件を満たしている。
- ② 通気層を有する壁は、防風材に透湿防水シート、構造用合板、シーリングボードを用いた場合 (実験壁体No2~4) の差は少なく、いずれも約 3 ヶ月経過時に 20%以下にまで低下し、約 1 年経過後は 10~15%で推移しており、木材腐朽の危険性は少ないと考えられる。
- ③ 通気層を有する壁で、防風材に付加断熱材を使用した場合、押出し法ポリスチレンフォーム 50mm 厚を使用した壁体を除いては (実験壁体No5~7)、前述した②と同様の性状となっており、木材腐朽の危険性は少ないと考えられる。
- ④ 通気層を有し、防風材に押出し法ポリスチレンフォーム 50mm 厚を使用した壁体 (実験壁体No8) は、約 5 ヶ月経過後でも 20%以上で推移し、他の通気層壁と比べて乾燥が遅れている。これは、この断熱材の透湿抵抗が他と比べて大きいことに起因すると考えられる。しかし、1 年経過後は、他の通気層壁と同様の性状となっており、初期段階を除けば木材腐朽の危険性は少ないと考えられる。
- ⑤ 軸間断熱をせず高密度グラスウールボード 50mm 厚による外張断熱した壁 (実験壁体No9) は、②と同様の性状になっている。

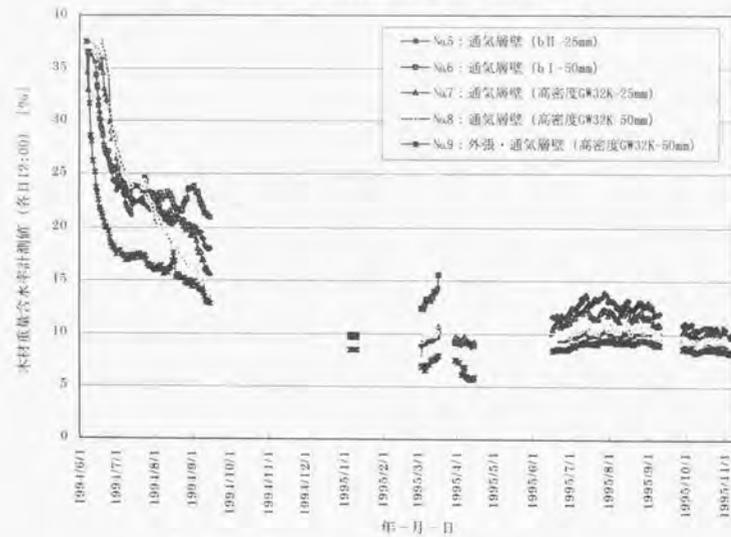
(3) まとめ

本実験により、壁内気流が生じないように上下密閉として断熱材内側の防湿気密層を確実に施工しても、高含水率木材を使用した場合においては、壁構成の違いによってその後の木材の乾燥過程に違いが現れることが明らかとなった。

すなわち、乾式外装材を直貼りした通気層の無い壁構成の場合は、木材の乾燥速度が遅く、乾燥に時間を要し、1 年経過後の夏期間においても 20%程度の含水率で推移し、木材腐朽条件を満たしている。実際の施工現場では、防湿気密層の施工状態が、この設定条件より良好な条件にはならないことを考慮すると、そのリスクは一層高くなることが予想される。



(a) 直貼り壁と一般的な通気層壁の木材含水率変動



(b) 付加断熱した通気層壁などの木材含水率変動

図 3.21 各実験壁体の木材含水率推移

一方、通気層を有する壁構成の場合は、防風材の透湿抵抗によって、竣工から数ヶ月は重量含水率の推移に相違は見られるものの、ここで設定した 8 種の防風材については、1 年経過後は 15% 以下で推移しており、木材腐朽の危険性は少ないと推測される。

これらのことから、未乾燥材の使用や施工中の雨水の壁内への含侵、竣工後の隠蔽配管の漏水発生などを考慮すると、壁内水分の乾燥化のためには、通気層を有することが有効であることがわかる。

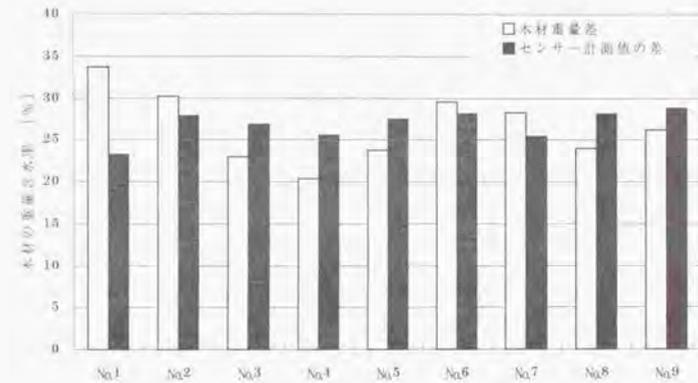


図 3.22 測定前後の木材重量差とセンサー計測値の絶対差

3.3.3 各種層構成の放湿性能に関する実験的検討

(1) 実験概要

1) 実験建物概要

実験は、北海道立寒地住宅都市研究所内にある、間口 2,730mm×長さ 3,640mm の木造半屋建実験建物の北壁を利用して行った。実験建物の概要を、図 3.23 に示す。

メスシリンダー中の水分凍結を避けるため実験時期は春～秋とし、壁内での結露が生じないよう実験建物内部の室温制御は行なわないこととする。

2) 実験壁体の概要

実験壁体の概要を図 3.24 に示す。

種類は直貼り壁 1 種、通気層壁で防風材の違いによる 7 種、計 8 種で構成され、表 3.1 中の No1～8 に該当する。各々の実験体は相互の湿的干渉を受けないように、独立したパネルとして構成し、構成枠材への吸放湿が無いように表面はブチル系防湿テープでシールし完全断湿とした。1 つのパネル寸法は幅 455mm×高さ 2,400mm で、ほぼ実物大と考えて良い。

パネルの室内側には、ポリエチレンフィルム 0.2mm 厚を気密に施工し、外側はそれぞれ実験対象の外装工法を施工する。なお、壁内には断熱材を充填していない。

3) 放湿性能の測定概要

各壁構成の放湿性能は、壁内空隙に設置したメスシリンダー（容量 500ml）中の水分減少量の多少で評価することとした。通常のメスシリンダーの口径では蒸発面積が少ないため顕著な差が出にくく、壁内の湿気分布が不均一になる恐れもある。そこで、壁内に全長 500mm×幅 50mm のセーム皮を吊し、その下部 150mm 程度をメスシリンダー内の水中に浸し、セーム皮に吸収した水分を気中で壁内に自然蒸発・拡散させる方法によることとした。メスシリンダー中の水分減少量は 5～7 日に 1 回計測、壁体内部・外気温湿度は 1 時間毎に計測する。なお、測定は、壁内で結露等が生じない夏期間に行うこととし、1995 年 6 月 16 日～8 月 31 日の計 76 日間で行った。

また、各実験壁体内部の湿気分布を把握するため、壁内下部と上部で温度、湿度を 1 時間に 1 回の測定間隔で計測した。計測には、電気式自動記録温湿度計（積水化学製ヒューテンプ CDR-TH 型）を用いた。

(2) 実験結果と考察

1) 実験期間中の外気・壁体内部の温湿度性状

壁体内部の温湿度性状について、代表的な 4 種を対象に、壁内部と外気の絶対湿度の変動を図 3.25 に示す。

測定期間中、各モデル壁内の温度変動は外気温よりやや高く推移しているが、モデル間での差異は少ない。

外気の絶対湿度に比べて壁内の絶対湿度は変動巾が大きく、日中は外気より概ね高く、夜間は外気より低くなる場合が多い。これは、昼間は外気温や壁内温の上昇に伴い、防風材の含有水分の壁内への放湿やメスシリンダー中水分の蒸発が促進し、夜間は構成材料への吸湿が主な理由と考えられる。

図から、通気層が無い直貼り壁（実験壁体 No1）は外気変動との追従性が悪く壁内と外気の差も大きくなるのに対し、通気層壁は外気との追従性が良好で、特に防風材の透湿性が高いほど、外気との絶対湿度差が小さくなることからわかる。

2) 実験期間中の水分減少量

測定期間中の各モデル放湿性能を表す指標として、各実験壁体内に設置したメスシリンダー中の水分減少量を図 3.26 に示す。水分減少量が多いモデルほど壁体の放湿性は良好と考えて良い。

7 月上旬頃を境に、放湿性を示す水分減少量の傾きが緩くなっている。これは、7 月上旬以前は外気より壁内絶対湿度が高く放湿が活発に行われたのに比べ、それ以降は絶対湿度が逆転することも多く、外気側に放湿する傾度が少なくなったことによるものと推測される。

期間中の水分減少量はメスシリンダー中の水面を目視で計測したものであり、僅かな計測誤差はあろうが、この図から次のことが云える。

- ① 直貼り壁（No1）に比べて通気層を設けた壁体は、概して水分減少量が多く、放湿性に優れている。
- ② 防風層に透湿防水シート（実験壁体 No2）、シーシングボード（No4）、高密度グラスウールボード 25mm 厚を使用した通気層壁体は、直貼り壁と比べて約 3 倍強の放湿性が認められる。
- ③ 防風材に構造用合板（No3）、高密度グラスウールボード 50mm（No8）を使用した通気層壁体は、直貼り壁に比べて約 2 倍程度の放湿性が認められる。
- ④ 防風材に押し出し法ポリスチレンフォームを使用した通気層壁（No7・8）は、他の通気層壁体と比べて放湿性能は劣り、直貼り壁とほぼ同程度か僅かに優れている程度となっている。また、b 類 I 種 50mm と b 類 II 種 25mm では、前者の方が放湿性に優れた結果となっているが、これは材料の透湿抵抗値の大小による。

上記のうち、④については、直貼り壁は、乾式横貼りサイディングを使用しており、サイディング施工は、水平に置かれたパネルに貼り付けていったため、横目地部が十分突き付けできず、その部分から放湿促進された可能性があること、また、外装下地にアスファルトフェルトを使用した場合には外側の透湿抵抗が増すことを考えると、直貼り壁の放湿性能は、この結果より低下する要因が多い。一方、実験では、防風材に使用した押し出し法ポリスチレンフォームのジョイント部分は防湿性に優れたブチル系テープでシールしたが、実際はこのシールが無い場合も多く、その場合は、この結果より放湿性能が向上すると予想されることから、この断熱材を防風材に使用した場合でも何らかの通気層による放湿効果があると思われる。この点に関しては今後検討を重ねる必要がある。

(3) まとめ

本実験は壁内と外気の絶対湿度が逆転することもある条件下で行ったものだが、以上の結果は、壁内の保有水分の放湿に対して通気層工法の有効性を示しているものと考えられる。また、ここで示した実験方法は、測定が困難な湿気伝導率などの材料物性値の把握や詳細な数値解析または長期的な実測を行わなくとも、実際的な気候条件下で材料の吸放湿特性等の要因も包含しながら放湿性能を簡易に把握でき、例えば一般的な通気層と同等性能を有する新たな外装工法の評価にも適用可能と推測される。

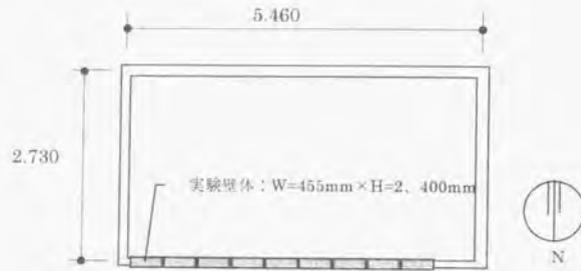


図 3.23 実験建物平面概要

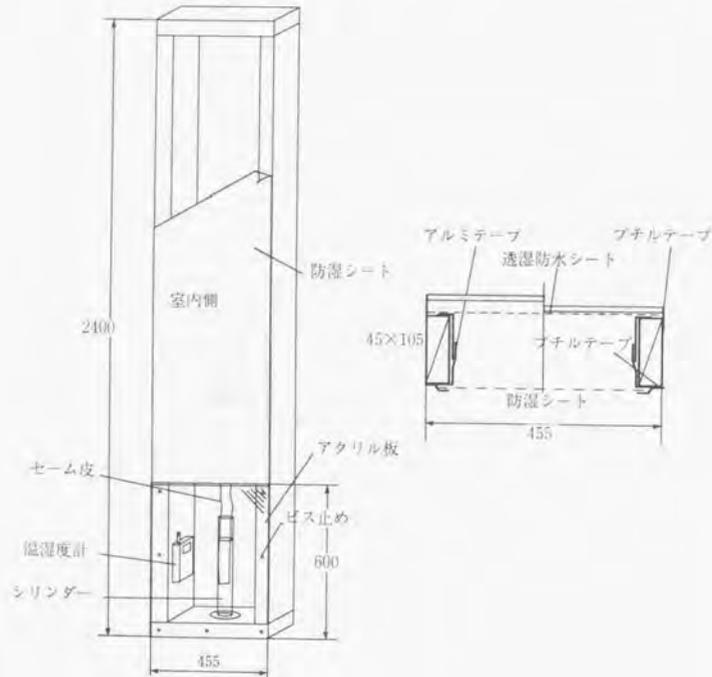


図 3.24 実験壁体概要及び放湿性能の計測概要

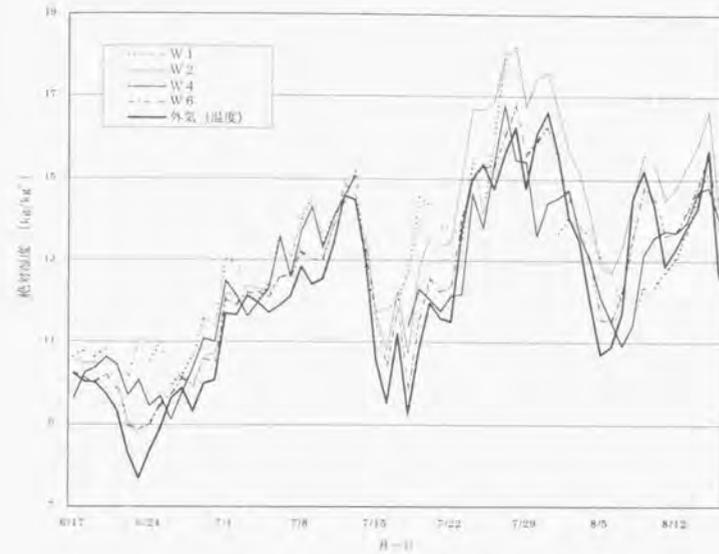


図 3.25 代表的実験壁体内の絶対湿度変動

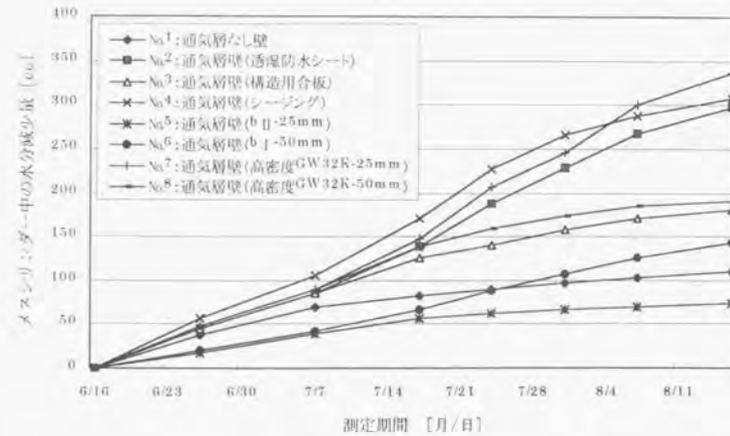


図 3.26 実験壁体毎のメスシリンダー中水分減少量

3.4 まとめと設計要件の整理

3.4.1 本章のまとめ

木造断熱躯体の耐久性向上に向けて、3章では断熱壁体の内部結露防止に関する検討を行った。

3.1では、木造断熱壁体の防露性を評価するには、数値解析で行う場合でも多くの課題があることを述べ、実際の壁体をモデル化した実測実験の有効性を述べた。

3.2では、室内で発生する水蒸気や床下などの他部位からの水蒸気の侵入に対する防露性に対して、層構成、壁内気流の有無、防湿気密層の良否をパラメータとした実験を行い、次のような知見を得た。

- 1) 壁内結露は、主に壁内と床下との関連から生じる壁体下部結露と、断熱欠損や防湿欠損と層構成の関連から生じる結露に分かれる。
- 2) 壁体下部結露は、在来木造工法のような壁内と床下・小屋裏が通じている壁構成で生じ、その発生程度は床下の湿気環境に左右される。すなわち、地盤防湿が不備で床下が高湿環境に置かれている場合は、層構成によらず壁体下部結露が生じる危険性があるのに対し、地盤防湿措置が適切に講じられており床下が低湿な場合は、そのリスクが低減される。
- 3) 壁体下部結露は、壁内が湿氣的に床下・小屋裏と遮断されている壁体構成（上下密閉壁）では、床下の湿気環境に係わらず、そのリスクは解消する。
- 4) 壁体一般部分で生じる結露に対しては、防湿気密層を断点無く設置し、通気層を設けることで、そのリスクは大きく低減する。

これらのことから、壁体下部結露を防止するには、壁内空隙と他部位を湿氣的に密閉し、壁内一般部分の結露を防止するには、防湿気密層の連続な設置と通気層工法の採用が有効であることが明らかとなった。

3.3では、壁内保有水分に対する壁体の乾燥促進に関する検討を行った。

まず、3.3.1では、実際の住宅で想定される壁内保有水分のうち、未乾燥材を用いた場合に着目して、3.2で有効性が明らかとなった上下密閉壁で防湿気密層が良好な壁体を対象に、層構成をパラメータとした実験を行い、次のような知見を得た。

- 5) 重量含水率 40%程度の未乾燥材を用いた場合、通気層の無い壁構成の場合は、木材の乾燥化に時間を要し、1年経過後の夏期においても20%を上回り、木材腐朽のリスクがある。
- 6) 通気層を設けた壁構成の場合は、防風材の透湿抵抗値によって多少の違いがあるものの、1年経過後の夏は概ね15%以下で推移し、木材腐朽条件にまで至らない。

これらのことから、寒冷地においては、上下密閉壁で防湿気密層の欠損が無い通気層壁は、かなり高含水率な木材を使用しても、或いは降雨水などによって木材が湿潤化しても、比較的短期間のうちに、木材腐朽の危険性が無いレベルにまで乾燥されることが明らかと

なった。

そして、3.3.2では、壁内保有水分に対する通気層の放湿効果について、次のような知見を得た。

- 7) 通気層を設けることは、通気層の無い壁構成に比べて、概ね2-3倍程度の放湿効果が認められ、壁内の保有水分に対する通気層工法の有効性が確認できた。

ここで行った実験は、精緻な数値解析を行わなくとも、材料の吸放湿特性等の要因も包含した壁体の総合的な放湿効果（例えば、通気層工法との同等評価）を行うことが可能となり、新たな外装工法の開発にも応用できよう。

3.4.2 設計要件の整理

3.4.1で整理した知見から、冬期内部結露防止のための設計・施工要件を整理すると次のようになる。

(1) 壁体下部結露の防止について

壁体下部結露は、壁内気流がある壁構成であっても、床下地盤防湿措置を適切に講じることで防止できるとの実験結果が得られている。しかし、床下は狭所空間であるため床下地面に防湿フィルムを精度良く施工することは難しく、それに加えて布基礎、配管、束などの取合い部分をテープ等で防湿処理したとしても、テープ材の経年による粘着性低下が避けられないため、地盤からの水蒸気を完全断湿することは難しい。また、竣工当初から1ないし2年間程度は、布基礎などの打設コンクリートからは相当量の発湿が予想され、床下換気が確保されていたとしても床下空間が相当高湿度な環境になる。加えて、床下換気口を設置しても、中間期や夏期はむしろ床下に対して加湿源となり、一方冬期は、床下換気口を閉鎖するという寒地の入居者の慣習があることや、密集住宅地では換気口近傍に隣接建物・植栽・塀などがあり、床下換気による低湿化は期待できないだろう。

さらに、外壁の断熱性能に関しては、表3.2.1に示したように壁内気流がある場合の性能低downも考え合わせると、壁内は床下に対して空間的に独立した構成とすることが最も有効と考えることができる。

外壁と小屋裏との取合い部分も、小屋裏の湿気環境によっては外壁上端部で下端部と同様のリスクがある。そして、壁内から小屋裏への漏気存在は、室内から壁内への水蒸気侵入を促進し壁内結露や小屋裏結露の促進や壁内断熱性能の低下の要因にもなり得ることを考えると、外壁下端部と同様に、小屋裏に対して壁内は空間的に独立した構成とするか、その境界部は防湿材料で遮断することが重要と考えられる。

(2) 一般部の壁内結露の防止について

一般部の壁内結露は、防湿欠損やそれに加えた断熱欠損によって生じる。

前者に起因する結露の防止は、まず設計段階から防湿欠損となる部分を極力生じないよ

うにする。すなわち配管・配線等を間仕切壁内や中間階床ふところ等、断熱外皮以外の空間に配することが重要である。そして、断熱層の防湿材を貫通する部分は、長期的に防湿性を確保し得るディテールで防湿処理を行い、壁内への水蒸気侵入を減ずることが望まれる。

後者に起因する結露の防止は、断熱欠損を生じないよう、断面の大きな配管、筋交いなどの外壁への設置は避けると共に、軸間の寸法に合わせたプレカット断熱材の使用や現場で切断加工する場合は入念な施工が望まれる。

しかし、これらの要因による結露に対しては、施工の殆どが人的作業に委ねられるのが一般であり、その施工が完全にできない場合を前提と考え、断熱層の外側には通気層を設けることが最もリスク低減に有効といえる。

[参考・引用文献]

- 3-1 木造住宅の耐久性向上に関する研究、北海道立寒地住宅都市研究所 特別研究調査報告書 No46, 1985
- 3-2 住宅相談事例調査報告書、(財)北海道建築指導センター, 1985~1996.12
- 3-3 鎌田紀彦、鈴木大隆ほか：寒冷地における断熱壁体の内部結露に関する研究(その1-4)、日本建築学会大会学術講演集 環境工学 pp.1337-1340, 1984.10 など
- 3-4 鎌田紀彦、鈴木大隆、廣田誠一：寒冷地における繊維系断熱材を充填断熱した木造壁体の内部結露の防止構法に関する実験的研究、日本建築学会計画系論文報告集 第513号, 1998.11に掲載決定
- 3-5 土屋高雄：住宅の結露防止手法(その1-5)、日本建築学会大会学術講演集 環境工学, 1978.9-1982.10
- 3-6 福島明、入江雄司：例えば、木造住宅における壁内の木材含水率測定、日本建築学会大会学術講演集 環境工学 pp.875-876, 1985.10
- 3-7 永峰章、土屋高雄：例えば、建物の断熱構造化と結露防止に関する研究(その3-4)、日本建築学会大会学術講演集 環境工学, 1985.10-1986.8
- 3-8 坂本雄三、渡辺一正：実験壁体における熱湿気同時移動モデルの検証、日本建築学会計画系論文報告集 No457 pp.39-47, 1994.3
- 3-9 浅野猪久夫、杉山英男ほか：木材と住宅、学会出版センター, 1970
- 3-10 細谷俊人、福島明、鈴木大隆ほか：外壁工法の放湿性能に関する研究、日本建築学会大会学術講演集 環境工学, 1995.8.
- 3-11 鈴木大隆、廣田誠一ほか：木造住宅における断熱構法の耐久性向上に関する研究、北海道立寒地住宅都市研究所共同研究報告書, 1996.3

外部漏水の防止に関する実験的検討

4.1 はじめに

寒冷地においては通年施工化、全国的には施工合理化に向けた乾式部材・部品の普及定着は住宅の各種工法を一変させた。この動きは、寒冷の住宅外壁材をモルタルなどの湿式材料から窯業系サイディング等々の乾式材料へ急速に移行させることとなり、最近ではその普及率は80%を越えるほどになっている[4-1]。

乾式外壁材の外装仕上は防水性に優れた塗膜材によることが多く、湿気が停留しがちな構成になること、初期は耐凍害性に乏しい材料も市場展開していたことから、外壁全面に凍害・汚損等が見られることも少なくなかった。3.2で述べた内部結露防止に有効な通気層工法は、外壁材の乾燥化も期待でき、その普及と耐凍害性に優れた建材開発が進んだこともあって、当初に見られたような外壁材の障害発生は少なくなる傾向にある。

しかし、乾式外壁材は、相互の継目、サッシ枠等の他部材との取合い部の防水性をシーリング材に委ねているのが現状である。この材料は紫外線や熱履歴によって粘弾性が低下する特性を有しており、気候条件、外壁材や躯体挙動に伴う応力によって、短期間でシーリング材が損なわれる危険性がある[4-2]。シーリング材の損傷から侵入した雨水・融雪水は、凍結融解により塗膜剥離や基材の劣化、長期的には外壁材の汚損の原因となったり、外壁層構成によっては構造躯体内部に漏水し、構造材の腐朽を引き起こす危険性も少なくない。

これらに対し設計施工者は、シーリング材や外壁材の定期的補修をユーザに委ねながら住宅建築に慣用しているのが一般的である。しかし、定期的補修には馴染めない現在の国民性、高所部分を診断・補修するには足場の設置等多くの手間を要することなどから、適切な管理が行われていないか或いは行えないのが実状である。

ひとたび躯体内への漏水が発生した場合には、断熱層内部で生じる結露量よりはるかに多量であることから、耐久上不安の多いシーリング材を前提としない開放目地の乾式外装材の可能性を模索することは、寒冷地のみならず多雨な気候風土である我が国において住宅躯体や外装材の耐久性向上を図る上で非常に重要な課題である。

既に、開放目地の外装材について、ビル用カーテンウォールを主用途とした比較的材料厚の大きな外装材を対象として、内田ら[4-3]、後藤・森下ら[4-4,5,6]やゼネコン研究所等で多くの研究が行われ、接合部の形状が単純な場合は内外差圧の面から、接合部の形状が一様で無い場合は気流速度の面から、その形状の設計に際して多くの知見を示している。また、木造住宅等で多用される薄厚の乾式外装材を対象として、石川ら[4-7,8]は単純形状の下見板で外装材背後に存する中空層を利用し内外差圧を減らすことで開放目地による防水が可能であることを示している。

本章では、戸建住宅用外装材の長期的な防水性向上に向けて、その設計要件を検討考察することを主な目的とする。具体的には、まず、実際に行われている寒冷地の外壁工法について、既往研究で指摘されている外装材ジョイント部分の内外差圧や気流速度に対して大きな係わりがあると推測される外壁構成、壁内空隙の密閉度などの観点からパターン分類を行う。次に、代表的パターンを対象に水密実験を行い、外装材の水密性ととの関連性を捉え、外気に開放した通気層工法の有効性について検討する。そして、通気層工法を前提とした場合の乾式外装材における開放目地の可能性について考察する。

4.2 外壁工法のパターン分類と実験概要

4.2.1 外壁工法のパターン分類

寒冷地の断熱外壁の構成は、外から外装材、通気層の有無、防水下地材(直張り壁の場合)若しくは防風材(通気層壁の場合)、繊維系断熱材、防湿材、内装材の順となるのが一般的である。

既に述べたように、外装材ジョイント部分の漏水性状は、ジョイント部の内外差圧や気流速度との関連性があることが明らかとなっているが、上記の外壁構成で考えた場合、これらに対しては、壁内空隙の気密性と外装工法の違いが関係すると推測される。

以下に、関連要因に関してそれぞれ考察を加えるとともに、外壁工法のパターン分類の検討を行う。

(1) 現状の施工仕様と気密性との関連

壁内空隙の気密性は、構成材料の気密性の良否、壁内通気の有無が関連する。

1) 構成材料との関連

前述した外壁構成のうち、評価対象である外装材を除くと、繊維系断熱材は通気性があり気密性を有しないこと、内装材は材料自体にある程度の気密性を有するものもあるが、ドライウォール工法等の特殊工法を除けば各取合い部分などで多くの断点が生じ、気密には構成されていないことから、防水下地材若しくは防風材、防湿材の施工仕様が壁内空隙の気密性に深い。

① 防水下地材・防風材

一般には、幅 900~1,000mm のシート状材料や 910mm×1,820mm 程度のボード状材料が多用されている。通常は、これらの材料を柱の直交方向に施工するのが一般であり、材料相互の重ねや突付けは下地の無い個所で行うこととなる。そのため、材料幅寸法毎にスリット状の隙間が生じる。

一方、最近では通気層壁を中心に、シート状材料では幅 2,000mm 程度の透湿防水シートを柱方向に施工するか、幅 3,000mm のシートを横架材方向に施工し、下地のある部分で重ねてテープ材や通気胴縁材(18mm×45mm)で挟み付ける、ボード状防風材では継目部をテープ張りする或いはその上に幅広の透湿防水シートを施工するなど、ジョイント部のシール性を高めた施工仕様も普及している。この場合は、前者と比べて気密性は向上する。

② 防湿材

防湿材は、北海道や気密住宅ではポリエチレンフィルム(0.1~0.2mm 厚)、本州の一般住宅では断熱材に付属する耳付き防湿紙で兼ねているのが一般的である。

ポリエチレンフィルムによる場合、下地方向に施工するのが一般的なため、下地のある部分で重ねが確保され、重ね部でのスリット状の隙間は出にくい。しかし、気密化に配慮しない住宅では躯体構造に係わらず、壁一般部でコンセント・配管等の貫通部及び開口部周り等でのシール性が悪く、また在来木造工法等では各横架材や間仕切壁の取合い部分で幅数十 mm~数百 mm の大きな隙間が加わり、各所に様々な形状の隙間が生じる。一方、気密住宅では、これらの隙間を工法・材料的にシールするため、この層の気密性が大幅に向上する。

耳付き防湿紙による場合、断熱材の施工単位毎に防湿材が切れてしまい、特に断熱材相互又は他部材との突付け部分は、数 mm 程度のスリット状の隙間が数多く生じ、さらに前述したような隙間が加わるため、この材料による気密性は前者よりはるかに低い。

2) 壁内通気との関連

壁内空隙とその他の部位との関係に着目すると、3.2 で述べたように、在来木造又は鉄骨の軸組工法のように壁内空隙が床下・小屋裏と空間的に連続している躯体構造と、最近の断熱気密化住宅・枠組壁工法やパネル工法のように壁内空隙が空間的にはほぼ独立している躯体構造の 2 つに大別できる。

3) 外装工法との関連

寒冷地で行われている外装工法は、直貼り壁、通気層壁の 2 つに大別できる。また、この他に、石川らが提案するように、外装材裏面を中空層とする考え方もあるが、現場施工が多い住宅建築では、完全な中空層を形成することは難しく、外装材裏面に侵入した雨水の排水性に難がある。よって、本章での中空層の扱いは、通気層壁において、施工上の不備から、通気層の上下端部またはいずれかが外気に開放されない納まりとなり、外装材裏面空間が半密閉空気層となってしまった場合の通気層壁の一例として捉えることとし、意図的に中空層を設けた壁の比較検討を行うものではない。

(2) パターン分類

ここでは、寒冷地の外壁が本格的に断熱されるようになった石油危機以降から最近までの断熱外壁について、壁内空隙の気密性と外装工法の違いからパターン分類を試みる。分類の概要を図 4.1 に示す。

図4.1甲及び以下では、直貼り壁、通気層壁を対象にA、B、Cの符合を付けているが、Cは壁内空隙の気密性が確保されているもの、A1~3及びBは壁内空隙の気密性が期待できない壁構成で、その隙間の箇所・形状等によって分類している。

1) 乾式外装材直貼り壁 (充填断熱)

一般的な乾式外装材直貼り壁は次のA1~A3に分けることができる。

直貼り壁 A1 は、壁上下端部の通気止めが無く、防水下地材や室内側防湿層が気密に施工されず、外部から室内と他部位若しくはいずれかへの漏気が生じる壁構成である (3.2では上下開放モデル、防湿気密層不良に該当する)。直貼り壁 A2 は、直貼り壁 A1 での冬期内部結露障害が顕在化し、その対策として室内側の防湿強化が図られたものの、壁内空隙と他部位とは連続しており、基本的に A1 と同じ性状を有すると推測される壁構成である (3.2では上下開放モデル、防湿気密層が良に該当する)。直貼り壁 A3 は、壁内空隙と他部位への漏気は殆どない構造となっているものの、室内防湿層が気密に施工されず、外部から室内への漏気が生じる壁構成である (3.2では上下密閉モデル、防湿気密層不良に該当する)。

いずれも、多少の時間のずれはあるものの、北海道で1980年前後までに建設された在来木造工法、枠組壁工法や工業化住宅による住宅の大部分がこれに該当する。また、本州の一般的な既存住宅の殆どは、これらの何れかに属すると考えられる。

なお、直貼り壁 B・C は、比較的最近の気密住宅で、透湿性外壁材・ALCなどを直張りした壁構成が該当するが、筆者の知る限り、寒冷地における実施例は少ない。

2) 通気層壁 (充填断熱)

直貼り壁で顕在化した冬期内部結露の防止策として、外装材表面に下地を設け、厚さ18mm程度の外気に開放した空間を有する通気層壁は、次のA1~A3、B、Cに分けることができる。

通気層壁 A1~A3 は、通気層を有すること以外、前述のそれぞれと同じ性状を有する。北海道では気密住宅が普及し始める1990年前後までに建設された住宅の大部分が該当し、最近の本州の比較的厚い断熱がなされた住宅で一般化しつつある壁構成である。

通気層壁 B は、室内側防湿層の気密化や壁上下端部の通気止め施工を施した壁構成で、北海道では断熱・気密化が急速に進行した1990年頃以降の新築住宅の半数以上が該当し、本州でも気密住宅の普及とともに少しずつ増えている壁構成である。また、通気層壁 C は、外部風や外装材表面に回った雨水の断熱層への侵入防止を重視し、Bに加えて防風層の気密化を図った壁構成を示し、最近の高性能住宅や合理化・パネル化住宅に見られる壁構成である。

3) 外張断熱

外張断熱工法による場合の壁構成は前述とはほぼ同様だが、多くは通気層を有し、躯体外側に位置する断熱材やプラスチック系防湿フィルムで気密層を形成しているものが多い。従ってこの断熱工法は、通気層 B または C に属すると考えて良いだろう。

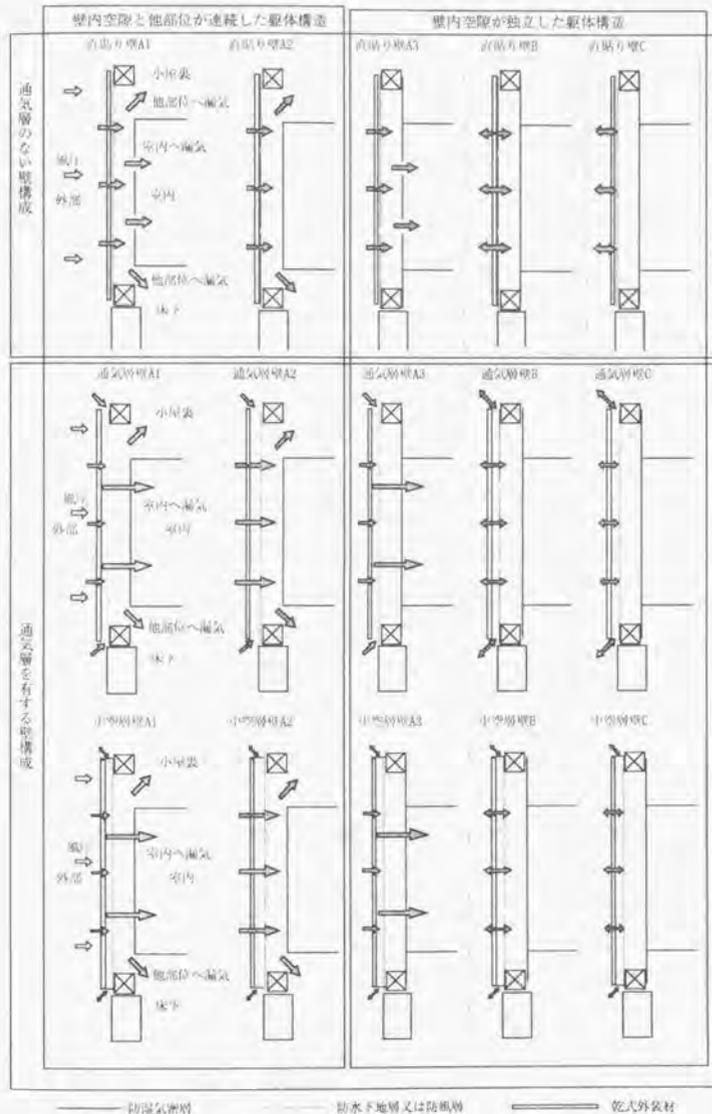


図4.1 外壁工法パターン分類

4.2.2 水密実験装置概要

(1) 実験装置概要

水密実験装置の概要を図 4.2 に示す。実験は、北海道立寒地住宅都市研究所内に設置された幅 2,000mm×高さ 2,000mm の開口を有する圧力箱式水密実験装置を用いる。この実験装置は、JIS A 1517 (建具の水密試験方法) の仕様を満たすものである。

なお、漏水の有無は、既往の研究に倣い、防水下地材若しくは防風材の代替部材として使用した 5mm 厚の透明アクリル板を通して、実験壁体内側から観察し、外装材継目部分から水滴が流下する状態を漏水と判定した。

(2) 実験条件

散水量は、試験体全面均一に $4 \text{ [l/m}^2\cdot\text{min]}$ とする。

参考までに、外部風速・水平面降雨量と壁面降雨量の関係を図 4.3(a) に示す。この関係を示す実験式としては、石崎[4-9]、R.E.Lacy[4-10]、伊藤[4-11]らの提案式が既知だが、図はこれらの式の中で平均的な値を示す石崎式に基づき作成したものである。

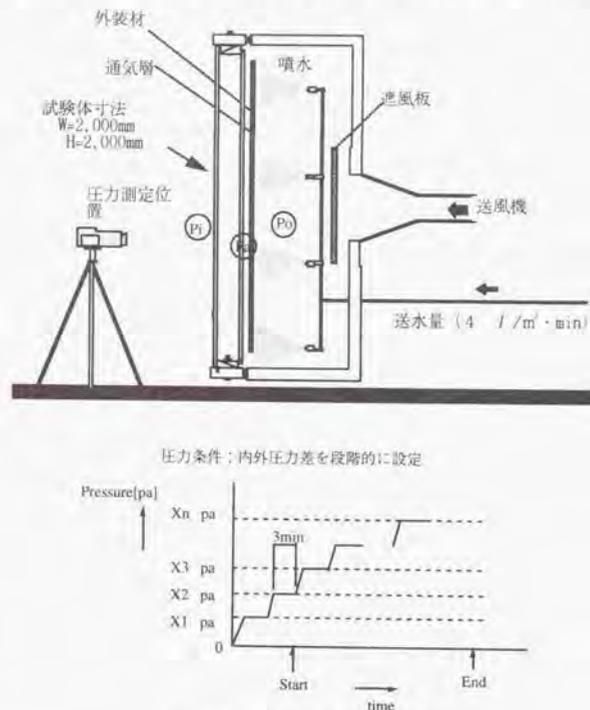


図 4.2 実験装置概要・圧力条件

圧力条件としては、外部と内部の圧力差を、概ね 50~100pa 毎に 700pa まで段階的に高め、各圧力差で 3 分間維持し、その間に漏水性状を確認する。参考までに、風圧係数 (住宅密集条件) を考慮した外部風速と正圧側壁面差圧の関係を図 4.3 (b) に示す。

これらの図から、例えば壁面の内外差圧 100pa 時の計測は、風圧係数 0.5 の住宅条件では、外部風速 15[m/sec]時に水平面降雨量 100[mm/hr]の場合にはほぼ相当すると推測される。村上らは、水密設計の基礎的資料として、全国 49 カ所で降雨量 H を伴う T 年間における風速の再現値を示している[4-12]。それによると、実験条件は、この再現値をはるかに上回っており、相当過酷な条件下であると推測できる。

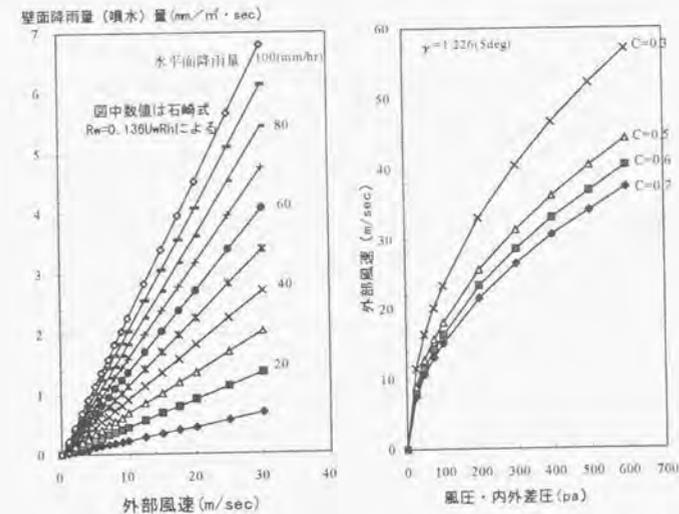
(3) 各部圧力差の測定

漏水性状と内外圧力差や層構成各部の圧力差の関係を把握するため、外部と内部の圧力差 ($P_o - P_i$) は測定範囲 $0 \sim \pm 1,000\text{pa}$ ・測定精度 0.14%FS、外部と外装材裏面若しくは通気層内の圧力差 ($P_o - P_s$) は測定範囲 $\pm 67.5\text{pa}$ ・測定精度 0.14%FS のダイヤフラム式精密差圧計 (コーナー札視製 KNS-2050、2100) を用いた。測定箇所を図 4.2 中に示す。

4.2.3 実験壁体の共通概要

(1) 寸法

実験壁体の寸法及び形状を図 4.4 (a, b)、図 4.7 に示す。



(a) 外部風速と壁面降雨量の関係 (b) 壁面内外差圧と外部風速の関係

図 4.3 実験条件と外部風速・水平面降雨量の関係

外寸法 $W=2,000\text{mm} \times H=2,000\text{mm}$ の試験体枠の中に、4.3 及び 4.4 に述べる検討では $W=650\text{mm} \times H=800\text{mm}$ の実験壁体を 6 種類、4.5 に述べる検討では $W=400\text{mm} \times H=800\text{mm}$ の実験壁体を 8 種類設置している。

1 つの試験体枠に複数の実験壁体を設置しているのは、同一条件下での比較を重んじたためである。

(2) 実験壁体のモデル化

1) 壁内空隙の気密性に関して

4.2.1 で前述したように断熱外壁には多くのパターンが存在し、構成材料の隙間の有無、隙間の形状や量によって、更に相当なバリエーションが存在する。このバリエーションに対して、既往の研究で行われているように構成材料の隙間量を小孔の数に代替し、それを変化させて漏水性状を把握する方法もある。しかし、仮に漏水と隙間量の関係が明らかになったとしても、その隙間量と実態との関係は未知な点が多く、また、住宅現場はそれを再現する程の施工精度を有していないのが現状である。

そこで、本章では、実態性に乏しい条件をモデル化するよりも、4.2.2.(1) で述べた施工仕様を再現したモデルで実験することとした。

ここで、図 4.1 に戻ると、A は、外気が室内と床下・小屋裏若しくはそのいずれかに漏気経路があるモデルを示すが、その漏気量は、防水下地材・防風材または防湿材防のいずれか最も隙間量の少ない構成材料によって決まると推測される。B は、防湿材が気密になっているため、壁内を通じた漏気経路は存在しないこととなる。また C は、防水下地材・防風材、防湿材とも気密になっているため、B と同様の性状になることが予想される。

この実験では、漏気経路にこだわる必要は無いことから、壁内空隙の気密性に関しては、表 4.1 に示すように、壁内空隙の気密性を有するものと有しないものの 2 種に分けることとした。そして、後者は、4.2.2 で前述したように防水下地材・防風材が定尺幅毎にスリット状の隙間が生じることに着目して、代替部材として使用する透明アクリル板に幅 900mm 毎に幅 5mm のスリットを設け、パターン A(A1~A3) はそのまま、パターン C はスリットをアルミテープで目貼りすることで、この層の気密の良否を擬似的に再現することとした。なお、アクリル板は木下地にビス止めとし、取付け部分の漏気防止のため、ビス穴はその上面にテーピング、木下地との取合い部は四周をシーリング材でシールした。

2) 外装工法について

外装材は、検討項目によって異なるので、次項以降にその都度述べる。

直貼り壁は、アクリル板外側に直に外装材を施工し、通気層壁は $18\text{mm} \times 45\text{mm}$ の通気剛縁材を下地に外装材を施工した。中空層壁は、通気層壁の通気層上下端部をプチル系テープで気密にシールした。

表 4.1 パターン分類と壁内空隙の気密性

	A			B	C
	A1	A2	A3		
防水下地材・防風材	気密不良	気密不良	気密不良	気密不良	気密
防湿材	気密不良	気密	気密不良	気密	気密
壁内通気	有り	有り	無し	無し	無し
壁内空隙の気密性	不良			良好	

4.3 直貼り壁、通気層壁と中空層壁の特性把握

4.3.1 検討目的

ここでは、寒冷地の外壁工法として一般的な直貼り壁と通気層壁を対象に、壁内空隙の気密性と外装工法の違いが外装材横目地部分の漏水性状に及ぼす影響の把握を主な目的とする。

4.3.2 実験壁体概要

実験壁体の概要を図 4.4 (a, b)、図 4.5 に示す。

外装材は、下見板仕様 2 種、相尺り仕様 4 種、計 6 種類から構成される。

このうち、Model-3 は、市販横貼り用乾式外装材の防水評価を目的に設定したものである。横目地部分が経年変化・躯体挙動若しくは施工要因によって防水性が損なわれた場合を想定し、工場出荷段階に設置されているゴム状パッキング材の中央部幅 700mm を取り除いて施工した。その他の Model は全て、既往研究などを基に、市販乾式外装材を加工試作したものである。

外装工法は直貼り壁、通気層壁、中空層壁の 3 種とし、それぞれに対して壁体空隙が気密な場合と気密では無い場合の 2 条件で、漏水性状や各部の圧力差を計測した。

なお、下地材に接する横目地部分では、毛細管現象により、一般目地部より少ない圧力差で漏水が生じることが知られているが、その部分の漏水性状の確認もできるよう、木下地は外装材の左右端部の他に中央部にも施工した。

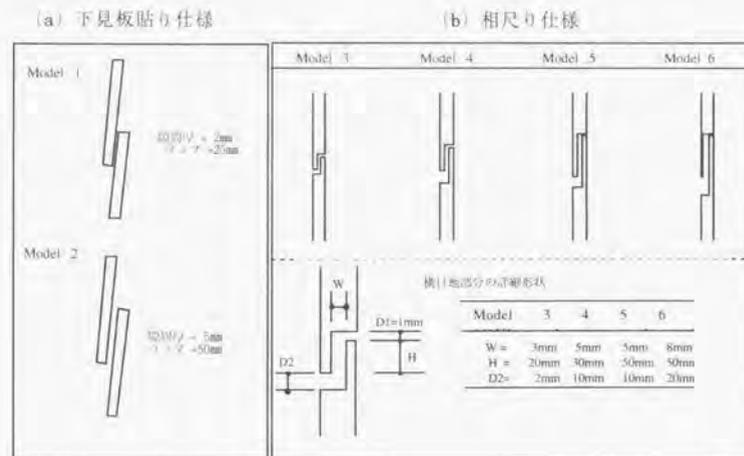
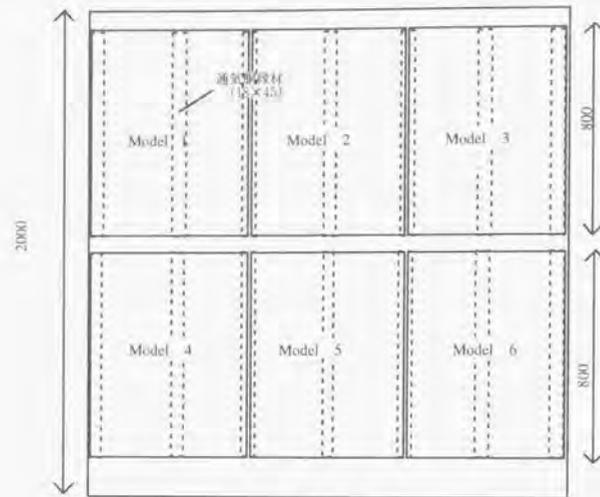


図 4.4 (a) 外装材横目地形状



(a) 実験壁体見付図

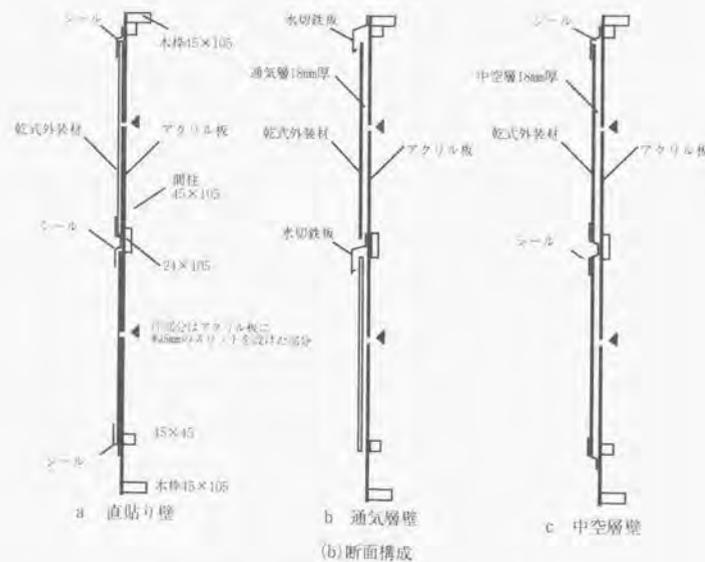


図 4.4 (b) 実験壁体概要 (寸法・外装工法)

4.3.3 実験結果と考察

ここでは、壁内空隙の気密性と外装工法の違いによる漏水性状や各部の圧力差について考察する。

各加圧条件での内外圧力差 (P_{o1} ・ P_{i1} ；以下、 P_{o1} と称す)と外部と外装材表面空間の圧力差 (P_{o2} ・ P_{i2} ；以下、 P_{o2} と称す。)の関係と漏水性状について、代表例として Model-3、下見板仕様 (Model-1)と相尺り仕様 (Model-6)の実験結果を図 4.5 に示す。また、6 種の実験結果を表 4.2 に示す。図中では、プロットの黒塗によって漏水が確認された実験条件を示している。

壁内空隙の気密性や外装工法の違いに着目すると、例えば、一般的な横貼用乾式外装材を用いた Model-3 の実験結果から、次のことがいえる。

[壁内空隙が気密構造となっている場合]

- ① 外装工法の違いによる P_{o2} の差は殆どない。
- ② 通気層壁は漏水は認められない。
- ③ 中空層壁や直貼り壁の漏水が生じた圧力条件は、図表では $P_{o1} = 100\text{pa}$ 前後、 $P_{o2} = 10\text{pa}$ 以下だが、目視では内外圧力差が生じる初期の段階から漏水が確認された。

[壁内空隙が気密構造になっていない場合]

- ④ P_{o2} は、通気層壁、中空層壁、直貼り壁の順に大きくなる。
- ⑤ 通気層壁は、 $P_{o1} = 250\text{pa}$ 前後、 $P_{o2} = 20\text{pa}$ 前後の圧力条件で漏水が生じ始める。
- ⑥ 直貼り壁の漏水が生じた圧力条件は、図表では $P_{o1} = 100\text{pa}$ 以下、 $P_{o2} = 50\text{pa}$ 程度だが、目視では③と同様に圧力差が生じる初期の段階から漏水が確認された。
- ⑦ 中空層壁の漏水が生じた圧力条件は、図表では $P_{o1} = 100\text{pa}$ 程度、 $P_{o2} = 20\text{pa}$ 前後前後だが、目視では⑥と殆ど同じ段階で漏水が確認された。

また、表 4.2 から、次のことがいえる。

- ⑧ 同一外装材の比較では、壁内空隙が気密になっている構造は、気密になっていない構造より、概して水密性は向上する。
- ⑨ 外装工法の関連では、直貼り壁や中空層壁に比べて通気層壁の水密性は大幅に向上する。

次に、外装材横目地部分の形状の違いに着目すると、Model-1、3、6 の比較から、次のことがいえる。

- ⑩ Model-3 は、図表によると壁内空隙や外装工法の違いで漏水が生じる P_{o1} ・ P_{o2} の値にばらつきがあるように見える。しかし、これはあくまでも内外圧力差を 50pa 毎にステップ上昇させた際の P_{o1} ・ P_{o2} の瞬時値を示しているにすぎなく、実際の値はこの数値よりも低い場合が多い。例えば、直貼り壁や中空層壁は、目視では P_{o1} が 50pa に達する以前に漏水が確認されており、その時の P_{o2} は 10pa にも満たない状態であった。従って、この外装材の場合は、直貼り壁・中空層壁の場合は概ね P_{o2} が 10pa 前後に達した時点で、通気層壁の場合は 20pa 前後に達した時点で漏水が発生すると推測される。
- ⑪ 一方、外装形状の異なる Model-1 に着目すれば、直貼り壁や中空層壁は、壁内が気密構造となっている場合は P_{o2} が 100pa 前後、気密構造になっていない場合は 10pa

前後で漏水が生じるが、通気層は漏水が生じない。

⑫ Model-6 に着目すれば、直貼り壁では、壁内が気密構造となっていない場合は P_{00} が 10pa にも満たない状態で、気密構造の場合は 70pa までの間で漏水が生じるのに対し、その他の壁構成では漏水は生じない。

⑩～⑫から、同一外装材でも、外装工法や壁内空隙の気密性によって、漏水が生じる P_{00} - P_{0i} に違いがあることがわかる。特に、直貼り壁や中空層壁が壁内が気密構造となっている場合でも、内外差圧が大きい条件下では P_{00} 値が小さくとも漏水が生じている。これは、同一実験壁でも横目地部分の僅かな寸法精度の違いによって、外装材表面内に侵入する経路と排気する経路が生じ、その気流によって搬水されるためと推測できる。

この結果は、例えば石川らを初めとする既往の研究の多くが示している「各外装材には固有で一定の漏水限界の圧力差が存在する」との知見に合致するものではなく、壁体空隙の気密性や外装工法の違いによって漏水限界の圧力差が異なることを示している。これは内田らが示している「接合部の形状・流量抵抗が一様で無く、接合部内で通過する気流速度が変動する場合は、水密性は直接的には局部的気流速度に左右され、圧力差は副次的要因である」との推論に合致していると推測できる。

以上、①から⑨に示した実験結果の定性的比較から、乾式外装材横目地部分の防水性向上には、第一には外気に開放された通気層を設け、第二には壁内空隙を気密構造にすることが有効であることがわかった。これは、前述のことも勘案すれば、これらの措置を講じることによって、外部と外装材表面に生じる圧力差 P_{00} を減少し、横目地部を通過する気流速度を減じたことが漏水防止に有効に働いたためと考えることができる。ただし、中空層は、通気層に比べて漏水が生じやすい条件になることから、通気層を外気に対して完全に開放することが重要である。

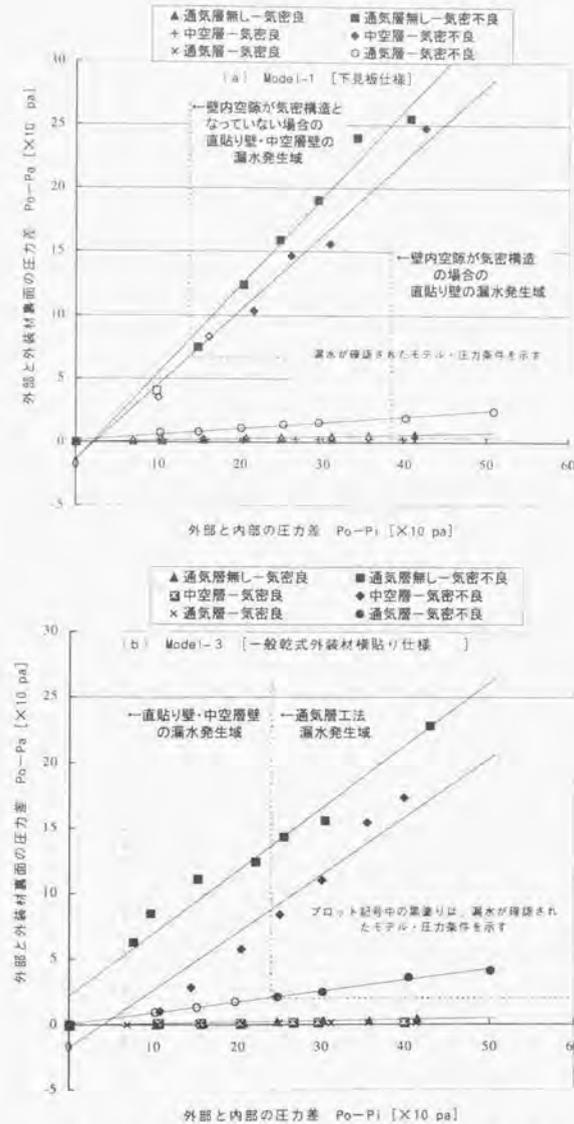


図 4.5(1) 直貼り壁、中空層壁と通気層壁の防水性比較

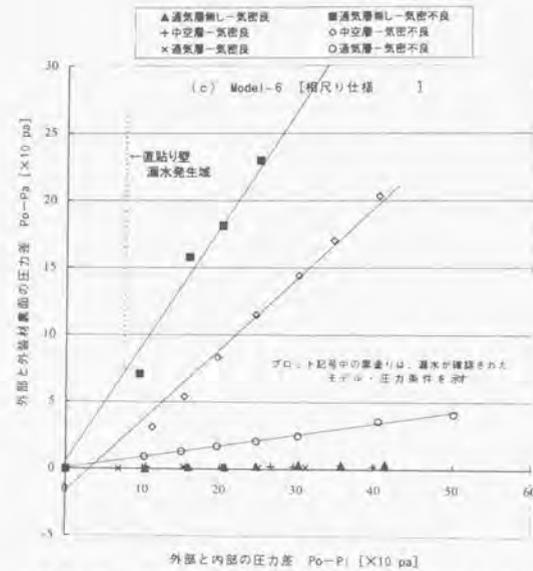


図 4.5(2) 直貼り壁、中空層壁と通気層壁の防水性状比較

表 4.2 直貼り壁、中空層壁と通気層壁の防水性状比較

(a) 躯体内が非気密構造となっている場合表中 部分は漏水が確認された範囲を示す

外装構成 (Po-Pi)	通気層無し						中空層						通気層									
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6				
0																						
50pa																						
100pa																						
150pa																						
200pa																						
250pa																						
300pa																						
350pa																						
400pa																						

[Po-Pi]の値は、表示値に対して±20 [pa]の範囲を示す

(b) 躯体内が気密構造となっている場合 表中 部分は漏水が確認された範囲を示す

外装構成 (Po-Pi)	通気層無し						中空層						通気層									
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6				
0																						
50pa																						
100pa																						
150pa																						
200pa																						
250pa																						
300pa																						
350pa																						
400pa																						

[Po-Pi]の値は、表示値に対して±20 [pa]の範囲を示す

4.4 通気層を有する乾式外装材横目地の開放の可能性

4.4.1 検討目的

ここでは、4.3 で水密性向上に有効であることが確かめられた通気層を有する外壁構成を前提に、6 種類の外装材の実験結果から、外装材横目地部分の形状設計に関する基礎的知見を得ることを主な目的とする。

4.4.2 実験壁体概要

実験壁体の概要は 4.3.2 を参照されたい。

4.4.3 実験結果と考察

実験結果を図 4.6、表 4.2 に示す。

壁内空隙が気密構造となる場合は、いずれの Model でも漏水は生じない。

壁内空隙が気密構造とならない場合は次のことが云える。

- ① 一般乾式外装材である Model-3、その形状に類似する Model-4 では、まず通気層縁材が接する横目地部分から漏水が生じ、やがて横目地一般部からも漏水が生じる。

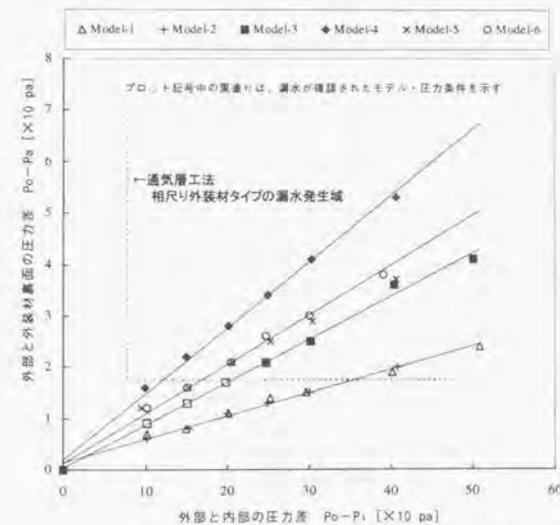


図 4.6 通気層を有する壁体の各種外装材の防水性状

前者の漏水は毛細管現象、後者の漏水は内外圧力差による気流速度の増加が主因と推測される。

- ② 前者と同じ相尺り形状としながら、横目地空隙内部の立上がり寸法、幅寸法を大きくとり、空隙内に浸水保有する水分重量と外部圧との均衡で防水性を確保する意図で製作した Model-5、6 では、漏水は生じない。ここから得られた空隙寸法に関する知見としては、Model-4 と 5 の比較から、幅 5mm の場合に立上がり高さは 30mm を越え 50mm 程度の範囲とすることが水密性の向上に有効ということである。
- ③ 下見板仕様とした場合は、横目地部分が通気胴縁材と接する部分が無いことから、毛細管現象による漏水が生じない。
- ④ Model-1 は漏水は無かったが、外装材ラップ部分の隙間には水分が侵入しているのが確認された。
- ⑤ Model-2 は漏水が無く、外装材ラップ部分の隙間にも水分の存在は確認できなかった。

一般的に目地部分の漏水は、毛細管現象によってまず下地材と接する部分から始まる傾向がある。しかし、下見板モデルは、下地との接点が殆どないこと、ラップ形状により外表面流下水の水切りが良好なことも相まって、隙間部分に水が入り込むこともなく、非常に良好な結果となった。ここで設定したモデルは、外装材成型時の形状工夫で実現可能なものである。

また、相尺りタイプのもは、サイディング材空隙の W・H 寸法が大きい程、目地部分及び下地が接する部分の漏水は減ずる傾向にあり、ある程度の空隙になると漏水が生じなくなる。これは、空隙に入り込んだ水分重量と外部圧がほぼ均衡するか、または水分重量がまさることによるものと推測される。実験結果からは、この仕様の場合、W=5mm 程度以上、H=50mm 程度の空隙を横目地部分に確保することが有効との結果がでているが、材厚 12mm では縦目地の材料強度が不足し現実的とはいえない。しかし、近年、素材の高級感を増すために材厚を増す傾向にあり、材厚 20mm 程度を前提とすれば、この程度の空隙形状を確保することは十分可能と思われる。

4.5 通気層を有する乾式外装材縦目地の開放の可能性

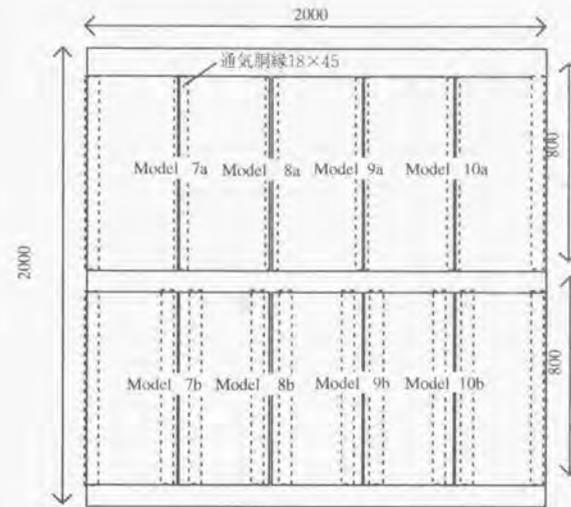
4.5.1 検討目的

ここでは、4.3 で水密性向上に有効であることが確かめられた通気層を有する外壁構成を前提に、外装材縦目地部分の形状設計に関する基礎的知見を得ることを主な目的とする。

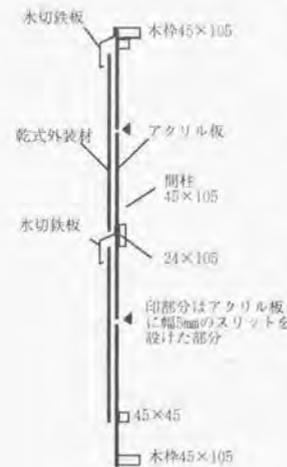
4.5.2 実験体概要

実験壁体の概要を図 4.7 に示す。

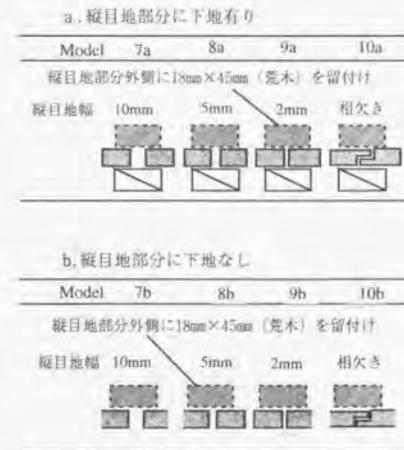
外装材は、平板乾式外装材 12mm 厚を用い、外装材縦目地幅の違いによる 3 種、相尺り仕様 1 種の計 4 種について、裏面通気胴縁下地の有無からなる計 8 種のモデルを試験体に設置し、実験を行った。



(a) 実験壁体見付図



(b) 外装構成



(c) 外装材縦目地部の形状

図 4.7 実験壁体概要

また、欧米等でよく見られる外装材縦目地部を外側から覆った場合も合わせて実験し、その効果を検証した。カバー材は特にカンナ掛けをしない荒木を使用し、木ねじで取り付けたもので、外装材外表面とカバー材との間には約 1mm 弱の微小な隙間は存在するような取り付け方をしている。

4.5.3 実験結果と考察

この実験では、壁体空隙が気密構造の場合と気密構造でない場合との違いがほとんど無かったことから、後者の場合の実験結果を表 4.3 に示す。

縦目地部分が外部に露出している場合には、次のことが云える。

- ① 縦目地背後の通気胴縁材の有無による違いは無い。毛細管現象による漏水を避けるため、縦目地部分に通気胴縁材（下地材）を設けない条件も実験したが、その効果は見受けられなかった。よって、下地材は外装材の留付けのし易さから判断して良いと思われる。
- ② Model-7a~9a は、目地底が外部に露出しているため、小さな P_{0a} で漏水が生じた。
- ③ Model-10a は、一般乾式外装材の縦目地部分に加工されている相尺り仕様をそのまま施工したもののだが、漏水は認められなかった。これは、既往の研究でも云われているように、横目地部に適用した場合は、狭所な空隙に侵入した水分は、外部圧に押され排水・流下され難いため、次第に侵入水量が増して漏水が生じ易い環境になるのに対して、縦目地部に適用した場合は、目地近傍の表面水は流下し、停留し難くなることの原因と推測される。

一方、縦目地外部をカバーした場合は、次のことが云える。

- ④ 全ての Model で漏水は認められなかった。ここで用いたカバー材は、荒木であり外装材との多少の隙間は存在する。この方法の水密性が高いのは、カバー材で覆うことで、外装材縦目地間の空隙と外部の圧力差が小さくなり、通気層を設けた場合と同様の効果となることや、加圧条件下では、その隙間が外装材に密着し、シール性が高まるためと考えられる。

表 4.3 外装材縦目地部分の防水性状比較

	$P_0 - P_1$ [pa]	(目地表面に下地有り)				(目地表面に下地無し)			
		7a	8a	9a	10a	7b	8b	9b	10b
目地露出	0pa								
	100pa								
	150pa								
	200pa								
	250pa								
	300pa								
目地外側 荒木 18×45 ビス留め	0pa								
	100pa								
	150pa								
	200pa								
	250pa								
	300pa								
	350pa								

[$P_0 - P_1$] の値は、表示値に対して ± 20 [pa] の範囲を示す
表中 部分は漏水が確認された範囲を示す

4.6 本章のまとめ

本章では、外部漏水防止に向けて、住宅用外壁材として一般的な乾式外装材に着目して外壁設計上の条件を探ることを目的に、まず実際の断熱外壁をパターン化し、実験壁体をモデル化して実験比較を行ってきた。

以下に、実験で得られた知見と設計要件などについて整理する。

なお、漏水の危険度の判断基準をどこに置くか、すなわち、本章で示したように外部水が外装材裏面から流下した時点が漏水とするか、躯体内部に侵入した場合を漏水とするかによって、必要な措置は当然異なってくる。ここでは安全側の判断として、前者の考え方で漏水を防止するという観点から整理している。

(1) 乾式外装材の横目地部の防水性向上に関する基本事項

住宅外装材のジョイント部分のうち、箇所数的に大部分を占める横目地部分の防水性向上に関しては、経時におけるシーリング材の弾性劣化や躯体挙動、施工時のパッキング材の損傷など施工不備によってシール切れが生じた場合でも、次の条件を満たすことで、外装防水性が向上することが明らかとなった。

- ・外装材裏面空間は、通気層を設けて外部に開放し、外部と等圧に近い環境にする。また、中空層とした場合には直貼り壁の漏水性状に近いことから、窓周りや各取合い部分、経時により通気層が閉鎖空間とならないような設計施工が肝要である。
- ・通気層内に漏水が侵入した場合を想定して、下端部は外部に開放し、排水性が損なわれないような納まりとする。合わせて、通気層内或いは防風材表面を流下する水が、防風材の隙間から毛細管現象によって躯体内部に侵入しないように、防風材は気密に施工する。この措置を講じることで、外装防水に対する安全性は更に向上する。
- ・外気が壁内空隙を通じて床下・小屋裏、室内に漏気しないよう、極力、壁内空隙は外気に対して気密構造とする。

ここで得られた知見は、これまで行われていたような外装塗材やシーリング材による材料の対処による防水技術ではなく、外装工法や躯体気密といった建築的対応によって外装防水を図る際の技術的要件である。そして、これらの要件を満たした壁体構造とすることで、市販外装材の使用を前提とした場合でも防水性の向上が可能であること示していると考えられる。

(2) 横目地部分の開放化（ノンシーリング化）に関して

横目地については、前述した (1) の条件に加えて、次の外装形状に関する設計条件を満たすことで、シールを前提としない開放目地による外装防水が可能になると推測される。

- ・下見板仕様の場合は、通気胴縁材等の接する部分は、多少の空隙を確保することで毛細管現象による漏水の危険性はかなり少なく、一般目地部分は、今回の実験条件としたラップ寸法、隙間幅寸法で高い水密性が確保できそうである。
- ・相尺り仕様の場合は、横目地空隙部分が飽水状態となった場合には通気胴縁材が接する部分での漏水を回避するのは難しく、また微細な隙間形状の場合は簡単に漏水が生じる危険性がある。この仕様の場合は、目地部分の侵入水重量が外部風圧に勝るか均衡するような空隙を確保し、毛細管現象による漏水を防止する方法が有効と思われる。

その空隙寸法の一応の目安としては、実験条件の中では、概ね幅5mm、立上がり約50mm弱程度と推定される。

また、外装材横目地部の漏水が生じる限界圧力差 $P_{e,1} - P_{e,2}$ は、形状毎に固有値があるのではなく、壁体空隙の気密性や外装工法によって異なることが明らかとなった。実際的な外装形状の開発・設計に際しては、ジョイント部の気流速度に着目することも重要といえる。しかし、既往の研究でも指摘されているように、微小空間の局部気流性状の把握は、測定も容易ではなく、本実験でも捉えていない。この点については今後の課題としたい。

(3) 縦目地部分の開放化（ノンシーリング化）に関して

縦目地については、次の外装条件を満たすことで、シーリングを前提としない外装防水が可能になると推測される。なお、実験では、通気胴縁材の有無が縦目地部分の漏水に及ぼす影響は顕著に認められなかったことから、ここでは、施工性を優先して通気胴縁材を設置した場合を前提に整理している。

- ・市販外装材レベルの相尺り加工で、縦目地一般部分の漏水は防止できる。ただし、外装材を定尺寸法で使用する場合は、工場生産時に相尺り加工してあるので問題無いが、外装材を現場切断して使用する場合は、現場で相尺り加工を行う必要がある。
- ・外装材相互の縦目地部分に一定の隙間を開けて、その外側を被覆材で覆う方法は、高い防水性が期待できる。この方法によれば、開口部枠との取合い部処理も容易になるが、外装デザイン上の処理とカバー材の材質選定が今後の課題となる。

外装材相互の縦目地部分や他部材との取合い部分などの直線的な縦目地部分は、いずれの方法にしても工場加工または現場加工で処理することが可能と思われる。しかし、換気フードなど曲線あるいは形状が複雑な部材との取合い部分では、外装材の形状で解決するのは必ずしも合理的とはいえない。むしろ、それらの部品にも何らかの形状工夫を講じた方がより簡易に実現することができる。これらのことから、外壁の防水性向上は、本章で述べてきた対応のほかに、外装と取り合う部品なども含めた総合的な対応が望まれる。

[参考・引用文献]

- 4-1 住宅用外装材の市場動向，1997 建築仕上り年鑑，1997
- 4-2 小池進夫，田中亨二ほか2名：ジョイントムーブメントにより生じるシーリング材の応力およびその粘弾性的検討，日本建築学会構造系論文集第373号，1987.3
- 4-3 内田祥哉，野城智也，関谷哲也：ハケを用いたオープンジョイントの水密性の指標に関する考察，日本建築学会計画系論文集第366号，1986.8
- 4-4 後藤一雄，森下清子，保坂一夫：接合部における雨仕舞に関する研究（オープンジョイントの動圧・静圧試験による比較実験，動圧試験によるオープンジョイントの漏水性状），日本建築学会大会学術講演集 pp17-20，1973.10
- 4-5 後藤一雄，森下清子：接合部における雨仕舞に関する研究（ラップ型オープンジョイントにおける漏水機構），日本建築学会大会学術講演集 pp37-38，1974.10
- 4-6 森下清子：水平オープンジョイントの防雨設計に関する基礎的研究，東京工業大学学位論文，1974.3
- 4-7 石川廣三：下見板および羽目板張り外壁の防水性実験，日本建築学会大会学術講演集 pp449-450，1980.9
- 4-8 石川廣三：等圧原理の応用による乾式外装材の防水性向上に関する研究（第2報），日本建築学会大会学術講演集 pp1259-1260，1994
- 4-9 石崎澄雄ほか：暴風に壁面に衝突する雨について，京都大学防災研究所年報，No.13-A，1969
- 4-10 R.E.Lacy：Driving-rain maps and the onslaught of rains on building，Proc.of RILEM/CIB symposium on moisture problems in building，Helsinki，1965
- 4-11 伊藤 弘ほか：建築物の外壁面が受ける壁面雨量の実測（第2報），日本建築学会大会学術講演梗概集，1991.9
- 4-12 村上周三ほか：降雨を伴う風速の再現期待値，日本建築学会計画系論文報告集 第434号，1992.4
- 4-13 鈴木大隆：オープンな外装目地の再生に関する実験，日本建築学会北海道支部研究報告集 No.70，1997年3月，

5

シート状防風材を用いた場合の 通気層空隙に関する検討

5.1 はじめに

我が国の温暖多湿な気候風土に即し、伝統的在来木造工法は構造木材の乾燥化のため、躯体内部の換気通風を積極的に図る構成となっている。

しかし、3章及び4章で述べたように、在来木造工法に限らず断熱化された木造住宅においては、内部結露や外部漏水の防止から、断熱層内側に防湿層を、外側に防風層を気密に施工し、軸組外側に外気に開放された通気層を設置することが必要である。

通気層の厚さに関しては、土屋ら[5-1]は冬期の壁内防露性や夏期の排熱効果の面から、水谷ら[5-2]はみかけの湿気貫流率測定による放湿効果の面から、20mm程度以上の厚さが望まれると報告している。また、筆者も執筆担当した(社)日本建築学会建築工事標準仕様書(断熱工事)JASS24や公的融資住宅の仕様書等には、通気層厚さは木造住宅で使われている一般流通汎用材の規格寸法を前提として、最低18mm程度以上確保することが望ましい旨記載されている。

既に述べてきたように、通気層を設けた場合は、断熱材への雨水・冷気侵入防止のため通気層と断熱層の境界面に防風層を設ける必要がある。防風層には透湿防水性を有する専用のシート状材料(透湿防水シート)と、シージングボード・構造用合板等のボード状材料が汎用されているが、材工費の関係からシート状材料を使う場合が圧倒的に多い[5-3]。

透湿防水シートの厚さは0.1~0.2mm程度とかなり薄く、伸び易い材質であるため、繊維系断熱材の復元厚さ・復元圧力によりシート材が通気層側に膨らみ、通気層空隙が減少する危険性があると推測される。その結果、3章に述べたような断熱壁体の乾燥化や、

4章に述べたように乾式外装材のジョイント部からの防水性が損なわれたり、漏水等の排水が阻害されて木材が湿潤化し、住宅の耐久性低下につながる危険性も少なくない。

この章では、シート状防風材を使用した場合の通気層空隙の確保に関して、実物大モデルの施工実験から問題点を把握・整理し、その設計要件を明らかにすることを主な目的とする。

5.2 実験概要とモデリング

5.2.1 実験建物概要

実験建物の平面・断面概要を図5.1に示す。

実験は、北海道立寒地住宅都市研究所敷地内に建つ実験建物(図9.1)の南側外壁面(幅9.1m×高さ2.6m)に計16種の実験壁を設置した。

図5.1(a)に示すように、1つのモデル寸法は高さ2,600mm(土台下端～軒桁上端)×幅455mm(柱芯々)からなり、実際の住宅とはほぼ同じディメンションを有する。壁内厚さは寒冷地が多い103mm厚とし、木材乾燥による寸法変化の影響を極力少なくするため、軸組材・間柱等の下地材には全て乾燥木材(重量含水率12%程度)を使用した。

5.2.2 実験壁体のモデリング

(1) 作成方法と使用材料寸法

軸組施工後の施工手順別に、次の1)～4)に示す。合わせて使用材料の選択根拠・施工方法を述べる。なお、モデル施工の工程は、実際の木造住宅と同じである。

1) シート状防風材の施工と材質

現在市販・流通しているシート状防風材は20数種類に上るが、製法・材質から単一材料と複合材料の2つに大別できる。このうち前者は不織布と有孔シートの2タイプ、後者は基材・補強材の材質等の違いから4タイプに分類される。

このうち、単一材料のうち有孔(ピンホール)シートは、破れやすい、非透湿部分も多い、透水性があるため防風材として不適合という判断から、不織布に限定して市場流通品の中から1種を選択した。また、複合材料については、上記4タイプ毎に市場流通量が多いシート材4種を選択した。各シート材は施工時に面内方向で緩み・伸びが生じないように間柱・土台・軒桁外面四周でガンタッカー150mm間隔にて留め付けた上で、通気胴縁材で挟み込み固定した。

2) 通気層・外装材の施工と材質

通気層は外壁下地材を兼ねた胴縁材(一般部は18mm×45mm、外装材継目部は18mm×105mm)で確保されることが多く、通気層厚さは18mm程度となるのが一般的である。実際は使用胴縁材の乾燥度合いによって若干の幅がある。ここでは、各モデルの通気層厚を正確に測定する必要があるため、乾燥材で厚さ18mmに揃えた胴縁材を使用し、防風材を介して柱・間柱に釘で留め付けた。なお、外装材は市販窯業系サイディング12mm厚を使用し胴縁材を下地として施工した。

3) 充填断熱材の施工と材質

一般的に使用される外壁の断熱材は、ロール品、パット品と吹込み用の3つに大別される。このうち、ロール品は柱間寸法に合わせて現場切断するため施工精度が悪くなる恐れがある。本実験では精度良く断熱施工することが肝要なため、生産段階で間柱間寸法にブレイカットされたパット品を使うこととし、現在北海道全域・東北の一部で最も普及しているグラスウール(以下GWと称す)16K-100mmと、今後急速な普及が予想される高性能GW16K-100mm及びGW24K-100mmの3種を選択し、室内から壁内に充填施工した。また、吹込み用では、外壁用として寒冷地で一般的な接着材混入のGW(BIB工法)及びセルローズファイバー断熱の2方法を選択し、各施工要領書に従い施工した。

4) 防湿材・内装材の施工と材質

断熱材内側の防湿材としてポリエチレンフィルム0.2mm厚、内装材には石膏ボード9mm厚を施工した。

(2) 実験モデル種類

モデル構成を表5.1、モデル配置を図5.1(b)に示す。

対象とした実験モデルは、シート状防風材5種と断熱材5種の組み合わせから計15タイプ、比較検討のためボード状防風材(シージングボード12mm厚)による1タイプ、合計16タイプから構成される。

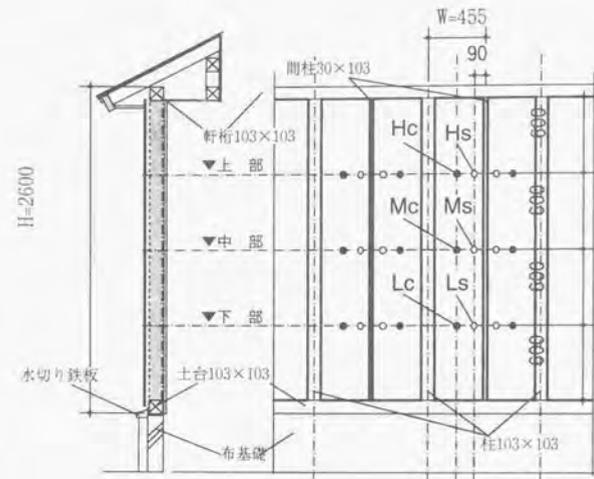
表5.1 実験モデル概要とモデル番号

シート状防風材	種別	シート材質		断熱材の種類				
		基材	表面処理・補強材等	一般品 GW16K 100mm	高性能 GW16K 100mm	一般品 GW24K 100mm	吹込み断熱材	
							GW (BIB)	セルローズ ファイバー
単一材	A	PE系不織布	なし	①◎	②◎	③◎	⑩◎	⑨◎
複合材	B	PE系不織布	PE系刺布	⑤◎	⑥◎		⑪○	⑫○
	C	PO系不織布	多孔質ネット	⑧◎	⑦◎			
	D	PS系不織布	表面コート	⑭○	⑬○			
	E	PS系不織布	多孔質ネット	⑮○	⑯○			
ボード状防風材		シージングボード12mm		④◎				

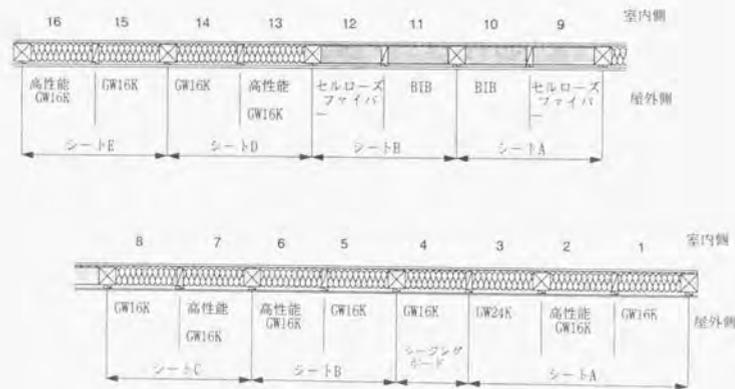
備考・◎印は空隙寸法測定と有効換気面積測定を行った実験壁

○印は空隙寸法のみ測定した実験壁

PEとはポリエチレン、PSはポリエスチルを示す。



(a) 実験壁の断面図



(b) 実験壁平面図及び配置図

図 5.1 実験壁概要



写真 5.1 実験壁概要



写真 5.2 断熱施工後のシート状防風材の様子

5.3 通気層空隙寸法の経時変化に関する検討

5.3.1 測定概要

図 5.1(a) に、各測定点位置を示す。

各モデルの通気層空隙は、シート状防風材の脹らみが四周固定部分からの距離で異なる
と予想されるため、モデル壁体上・中・下部 3 ヶ所において水平方向 (center 部：通気
層胴縁材内法間の中央部分、90mm 部：胴縁材内面より 90mm 内側の部分) に 2 ヶ所、
計 6 点で測定した。

このうち、モデル上中下部分の center 部 He、Mc、Le は、シート材に断熱材の復元
力が殆どかからない内装材施工前と、内装材施工により断熱材復元力がかかりシート材が
外側に脹らみ始める施工直後、施工直後から寸法変化が殆ど見られなくなった 301 日経
過時まで 6 回、合計 8 回の計測を行った。計測方法は、外装材に開けた測定孔 (直径 30mm)
から丸棒を差し込み、シート材から外装材裏面までの空隙間隔を丸棒に押しノギスで計
測し、空隙寸法は計測値を四捨五入して mm 単位で表示した。

また、シート材は中央部を中心にほぼ対称形で脹らむと予想されるため、90mm 部 Hs、
Ms、Ls についてはモデル毎に各 1 ヶ所で測定した。空隙寸法は、内装材施工直後と施工
後 26 日経過時の合計 2 回の計測を行った。計測方法は外装材施工前及び外装材を取り外
した際に、胴縁材間に渡した角棒内側からシート材表面までの空隙間隔を丸棒に押し上記
と同様に計測・表示した。

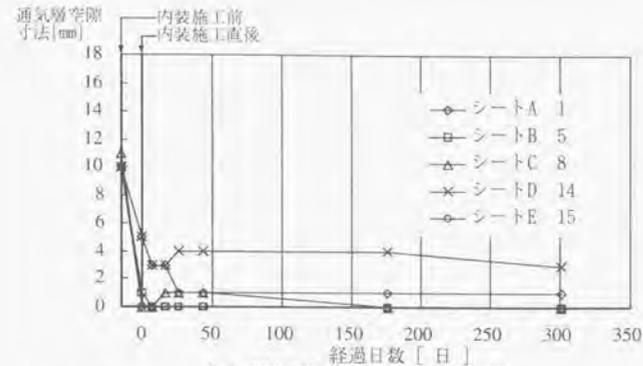
5.3.2 計測結果と考察

(1) center 部 He、Mc、Le の空隙寸法経時変化

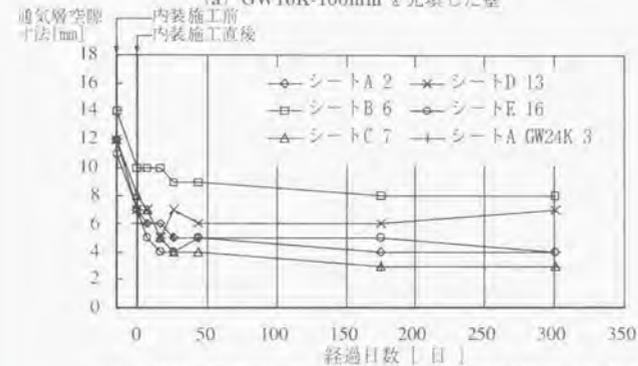
本実験では、center 部の空隙寸法はモデル上中下部で計測しているが、経時変化につ
いては各点とも同じ傾向を示している。その傾向は、シート材質より断熱材種別で検討す
る方が良く説明できる。従って、ここではモデル中央部の経時変化を代表例として図示し、
断熱材別に経時変化について検討・考察する。

1) GW16K-100mm 充填壁体の場合

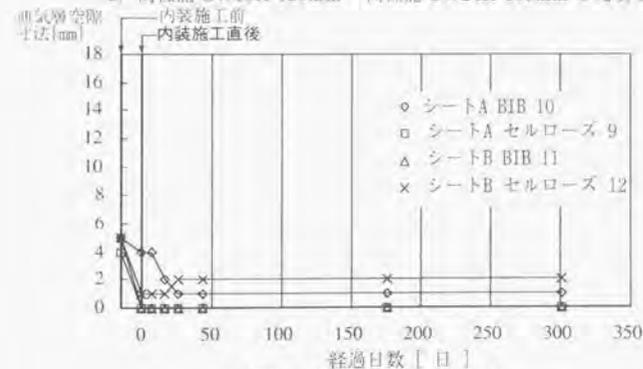
通気層空隙寸法の経時変化を図 5.2 (a) に示す。内装材施工前は 12~14mm 程度の空
隙が確保されている。この断熱材は相当な圧縮梱包状態で出荷されるため、JIS 規格で
は圧縮量を考慮して呼び厚さに対して必ずプラス側とすることが規定されているのみで製
品厚さは定められていない。通常は 120mm 程度の間隔復元厚さとなるような復元力を
持たして製造・出荷されている。そのため、内装材の施工直後より、断熱材の復元力がシ
ート状防風材を外側に脹らませることとなり、シート B、C、E モデルでは施工直後瞬時に
空隙が 1mm 以下まで減少し中央部は殆ど外装材表面に接触している状態となる。またシ
ート A、F モデルは内装材施工直後は 5mm 程度の空隙が確保されているが、26 日
経過後は上記モデルと同様の結果となった。比較的引張強度の高いシート D モデルでも、
175 日までは 4mm 程度の空隙で推移した後、僅かな減少が見られる。これは、断熱材
の復元力が長期的に持続していることの現れであろう。



(a) GW16K-100mm を充填した壁



(b) 高性能 GW16K-100mm・高性能 GW24K-100mm を充填した壁



(c) 吹込み用断熱材を充填した壁

図 5.2 充填断熱材別の通気層空隙寸法の経時変化

2) 高性能GW16K-100mm及びGW24K-100mm充填壁体の場合

通気層空隙寸法の経時変化を図 5.2 (b) に示す。高性能 GW16K-100mm を充填したモデルに関しては、内装材施工前の空隙寸法は GW16K-100mm と殆ど差は無い。しかし、内装材施工直後も 4~5mm 程度減少するに留まり、経時により微減する傾向がみられるものの、301 日経過後も 4~8mm 程度の空隙が確保されている。GW16K-100mm (一般品) と比べて空隙が確保されている理由は、この断熱材も圧縮梱包されているが、開梱復元厚さを 110~115mm 程度と低く抑えているためであると推測できる。

また、GW24K-100mm を充填したモデルに関しては、同図中にシート A のみを示したが、開梱復元厚さが 105mm 程度に設定して製造・出荷されているため、高性能 GW とほぼ同じ傾向となっている。

3) 吹込み用断熱材充填壁体の場合

通気層空隙寸法の経時変化を図 5.2 (c) に示す。ここではシート A、B を対象としたが、断熱材種別に拘わらず、内装材施工前の空隙寸法は 5mm 程度になり、内装材施工直後から 26 日経過までの間に空隙が 1~2mm 以下まで減少し、その後の変化が余り見られない。他のモデルと比べて長期的変化が少ない理由は、この方法に用いた断熱材は施工後短期間で固化するため、その後のシート材に及ぼす影響が殆ど無いためである。また、総じてパット状断熱材の充填モデルより空隙が少ない理由は、施工時の断熱材の吹込み圧力や充填密度が高いことによるものであろう。

(2) 通気層の空隙性状について

内装材施工直後及び 26 日経過時のモデル上中下部の通気層の空隙分布状況を図 5.3 に示す。なお、図は上中下部毎に center 部は He、Mc、Lc 計測値、90mm 部は Hs、Ms、Ls 計測値を用い、実際の形状に近似し得るよう曲線化し作成したものである。

1) GW16K-100mm 充填壁体の場合

空隙性状を図 5.3 (a) に示す。GW16K-100mm 充填モデルについては、施工直後からモデル上中下部の center 部、90mm 部共、外装材裏面に接するまで空隙が減少しているモデル (シート C、E) は、26 日経過後、ほぼ完全に外装材裏面に接し、通気副縁材近傍の僅かな部分にしか空隙が残らない状況となっている。また、施工直後は全域で空隙が確保されていたモデル (シート A~C) でも、26 日経過後、特に中・下部の center 部・90mm 部における空隙減少が顕著で、「下服れ状態」となり、上部を除くと空隙は副縁材近傍にしかない状況となっている。「下服れ状態」となる理由は、断熱材が自重で僅かに垂れ下がったことによるものと考えられる。

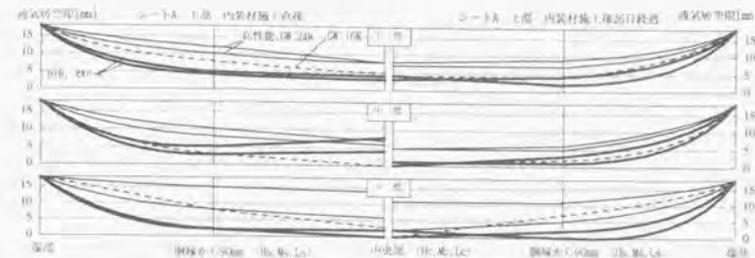
2) 高性能GW16K-100mm及びGW24K-100mm充填壁体の場合

空隙性状を図 5.3 (b) に示す。高性能 GW16K-100mm 充填モデルについては、施工直後から 26 日経過にかけて、モデル上中下部の各計測点で僅かに空隙が減少しているものの、シート材が外装材裏面に接する部分は無く、全域に渡り通気層空隙が確保され、「下服れ状態」も見られない。また、GW16K-100mm モデルと比べて、center 部と 90mm 部の空隙寸法の差異が少ないのが特徴的であり、これは復元厚さの違いによるものと考えられる。このことは、GW24K-100mm 充填モデルでも同様である。

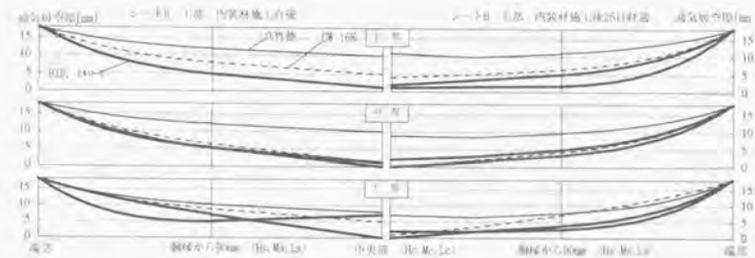
3) 吹込み用断熱材充填壁体の場合

空隙性状を図 5.3 (c) に示す。吹込み断熱モデルについては、施工直後から各計測点

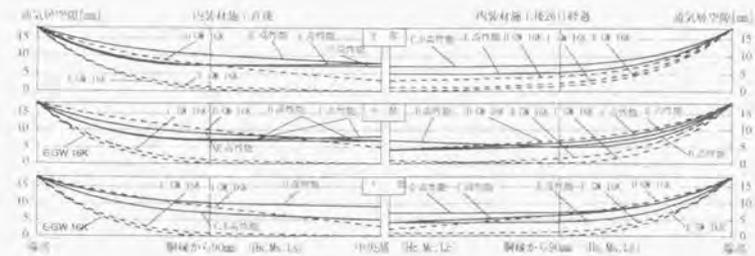
の空隙は僅かである。26 日経過後は僅かな空隙減少によって各点で外装材裏面に接する状態となり、GW16K-100mm モデルより通気層空隙の閉鎖性が高いのが特徴的である。



(a) シート A の空隙性状



(b) シート B の空隙性状



(c) シート C・D・E の空隙性状

図 5.3 シート材別の空隙性状

5.4 通気層空隙の減少量の把握

5.4.1 検討方法

測定方法の概要・測定機器の詳細を図5.4に示す。

5.3で述べたような通気層空隙の減少を示す指標として、換気有効な空隙量がどの程度減少するかを把握するため、無風に近い安穏日にシロッコファンを用いた減圧法にて風量と差圧を測定し、有効換気面積を求めた。なお、ここで求めた有効換気面積は通気層下端部（水切り鉄板上部12mmのスリット）及び上端部（軒裏を介して有孔ボード）納まりの隙間性状も含むものである。測定は、シート防風材を用いた典型的な空隙性状を有する9タイプのモデル壁と、比較のためボード状防風材（シーシングボード）を用いて通気層厚18mmが確保されたモデル壁の計10タイプを対象に行った。

測定対象モデルを表5.1中に示す。

5.4.2 検討結果と考察

測定モデルの有効換気面積とMc部分の空隙寸法の相関を図5.5、表5.2に示す。参考までに横軸に、Mc・Ms部分の空隙寸法実測値を基に、市販CADソフトで求めたシート延長長さ、変化率、通気層空隙面積も合わせて示す。

有効換気面積は、通気層が全域で18mm確保されたモデル壁（防風層にシーシングボードを使用）に比べ、モデル中部Mcの空隙寸法が5mm程度までは空隙寸法にはほぼ比例して低下するが、同空隙寸法が4mm以下になると10%程度にまで減少する。

図形シミュレーションより、例えば空隙寸法が5mm程度の場合、シート長さは、施工時（胴縁材間内法寸法：388mm）に比べて12mm程度（変化率で3%程度）増加したことになる。

実験壁の解体調査では、シート材固定部及びガンタッカー周辺部で引裂き等が生じシート長さが変化したという形跡がないことから、シート材の変形は断熱材の復元圧による材料自体の伸びが主因と考えられる。

表5.2 通気層中央部（Mc）の空隙寸法・空隙面積・シート材長さの関係

Mc部 空隙寸法	通気層空隙面積		シート材曲線長さ	
	面積[cm ²]	比率 [%]	長さ [mm]	比率 [%]
18mm	69.8	100.0	388	100.0
11mm	54.8	78.5	392	100.5
8mm	44.6	64.0	396	101.8
5mm	36.8	52.7	400	103.1
0mm	20.2	29.0	408	104.6

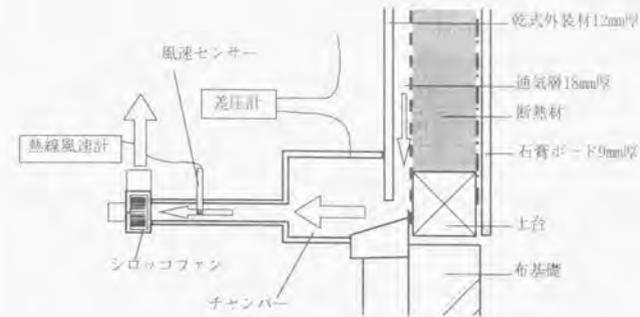


図5.4 通気層空隙の有効換気面積測定概要

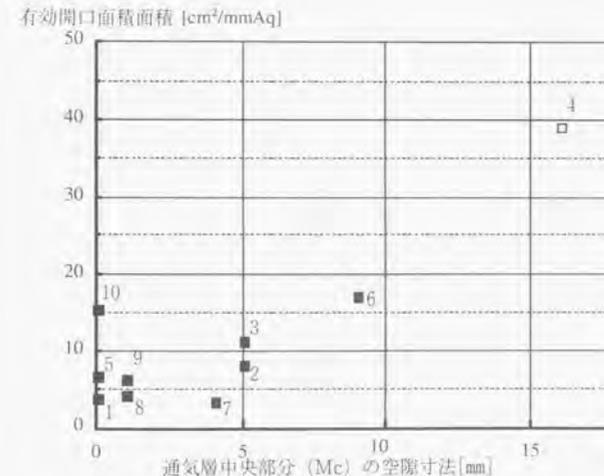


図5.5 中央部の空隙寸法と有効開口面積の関係

5.5 放射温度計による空隙評価の可能性

5.5.1 検討目的と概要

(1) 検討目的

シート状防風材を用いた場合の通気層空隙の確保に関する問題は、新築住宅では後述する5.6 (2) の手法を適用することで解消することができよう。

一方、既に建設された住宅でもこの問題が発生している恐れがある。しかし、空隙が確保されているか否かは、外装材を剥がして破壊検査する以外に無く、その調査は現実的とはいえない。ここでは、外装材を剥がさずに、放射温度計を用いた非破壊検査による通気層空隙の性状把握を試みた。

(2) 検討概要

調査対象は、前述した実験壁を用いる。

冬期晴天日であれば、通気層空隙が閉鎖された壁構成では、低温外気が通気層内に十分流入しなくなることから、空隙が確保された壁構成と比べて、日射受熱による外装材外側表面温度に相違が見られるはずである。そこで、5.4 までで前述した実験を開始した約3週間後の晴天日（1992年12月15～16日）に、放射温度計を用いて、各実験壁の外装表面の放射温度を測定した。

5.5.2 検討結果と考察

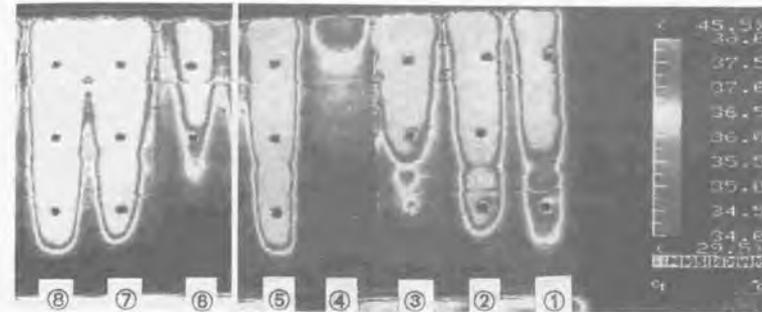
写真5.3 (a,b) に放射温度計で見た放射温度を示す。

写真から、厚さ18mm程度の通気層空隙が確保されている防風層にシーリングボードを用いた実験壁 (No.4) や、比較的空隙が確保されている高性能GWを充填した実験壁の一部 (No.6) においては、外装材表面温度はその上部付近を除いて低温になっていることがわかる。上部表面温が上昇しているのは、低温外気が通気層内を通過している過程で、外装材からの輻射によって温度上昇していることの顕れであろう。

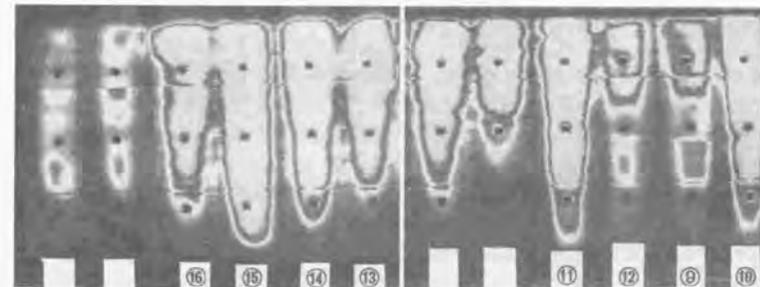
通気層空隙寸法の他、有効換気面積が明らかな実験壁と比較すると、通気層中央部の空隙が殆ど無く有効換気面積が約1/10前後にまで低下している実験壁 (No.1、5、8、9) や、中央部の空隙が設計値の約1/4まで減少し有効換気面積が約1/4にまで低下している実験壁 (No.2、3、7) では、外装材の下部より放射温度が上昇し、通気層空隙が確保されているNo.4や6と比べて、その性状が明らかに異なっていることがわかる。また、通気層空隙・有効換気面積が約半分まで減少している実験壁 (No.6) では、放射温度は、前記の2タイプの中間的な状況になることがわかる。

以上のように、放射温度計で測定した外装材の表面温度は、通気層空隙寸法や有効換気面積の性状と高い相関にあることがわかる。

この診断方法が、ここで検討した冬期晴天時の実験条件以外に、どのような測定条件でできるのか或いはどの程度の精度があるかは、現時点では明らかになっていない。しかし、いずれにしても、通気層空隙の性状については、放射温度計を用いた非破壊検査によっても確認できると推測される。



(a) 実験壁体の外壁表面温度-1



(b) 実験壁体の外壁表面温度-2

写真5.3 外装材の放射温度調査結果

5.6 まとめと手法提案

5.6.1 本章のまとめ

寒冷地で一般的な 103mm 厚の軸間に断熱材を全充填する断熱壁体において、市場流通しているシート状防風材を用いた場合の通気層空隙に関して行った実験より、下記の知見が得られた。

- 1) シート状防風材を用いた場合の通気層空隙は、使用する断熱材の間隔復元厚さや吹込み圧等による影響を著しく受ける。
- 2) 特に、GW16K-100mm を充填した場合は、長期に渡る断熱材復元圧によって施工後からシート材が外側にはらみ、通気胴縁材近傍を除く殆どの部分で外装材裏面に接触する危険性が高く、それに伴う通気量低下も著しい。
- 3) 高性能 GW16K-100mm・GW24K-100mm を充填した場合は、緩みなく適切にシート材の施工を行えば、通気層空隙は確保できるものの、空隙・通気量は本来の半分以下まで減少する危険性が高い。
- 4) 吹込み用断熱材による場合は、断熱材種による差異は少ないが、固化までの初期段階で胴縁材近傍部を除く殆どの部分で通気層が閉鎖する危険性が高い。
- 5) これらの空隙・通気量の減少は、シート材自体の微少な寸法変化で容易に発生するオーダーである。これは、本実験上の主因と推測される材料自体の僅かな伸び以外に、強風施工時等におけるシート材の僅かな緩み・握みによっても、通気層が閉鎖される危険性が高いことを示唆している。

これらの結果は、これまで述べてきたような、冬期における壁体内の結露防止、木材の乾燥化、乾式外装材のシール切れやディテールの不備等が生じている場合の外装防水性や排水性の確保など、通気層が持つ役割を阻害する恐れがあることを示している。

また、既存住宅における通気層確保に関する非破壊検査への可能性を探るため、放射温度計を用いた検討結果から、次の知見が得られた。

- 6) 冬期晴天日における外装材表面温度の性状は、通気層空隙寸法や有効開口面積と高い相関があり、この方法は、シート状防風材を用いた既存住宅での通気層空隙の性状を把握できる。

5.6.2 手法提案

シート状防風材を使用した場合の、通気層空隙を確保するための措置としては次のように整理できる。

- 1) 繊維系断熱材(ボード品を除く)を充填する場合
 - ① 断熱材の復元厚さを壁厚程度に設定する。
 - ② シート状防風材の変形防止のため伸度を抑える。
 - ③ 通気層内にバースを設置する。
 - ④ 間隔復元厚さより大きな通気胴縁材を使用する。

このうち、①は運搬費の増加に伴う材料のコストアップや、この対策を行った場合でも断熱材を押し込みすぎた場合は通気層空隙の確保に対する信頼性に問題がある。

また、②は市場流通品に無く新たな材料開発が必要であること、施工時の緩みや強風施工時の握み等の施工要因がからんだ場合には有効な解決策とはなり得ないことに問題が残る。

以上のことから、通気層空隙を確保するには、材質的改良より、③、④に示すような工法的対処による方法が、現実的かつ信頼性が高いといえる。

手法提案の具体例を図 5.6 に示す。

2) 吹込み断熱方法による場合

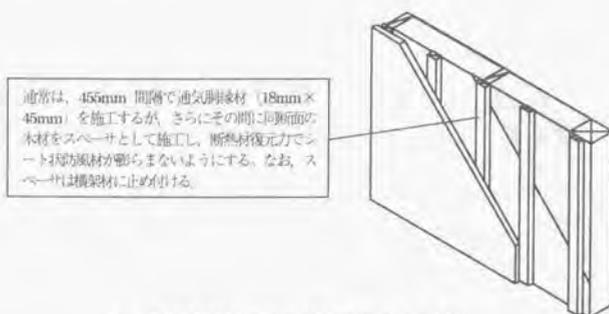
この方法は吹込み圧力が高いことから、シート状防風材の使用は避け、面剛性の高いボード状防風材の使用を前提とすべきであろう。

3) 屋根断熱に関して

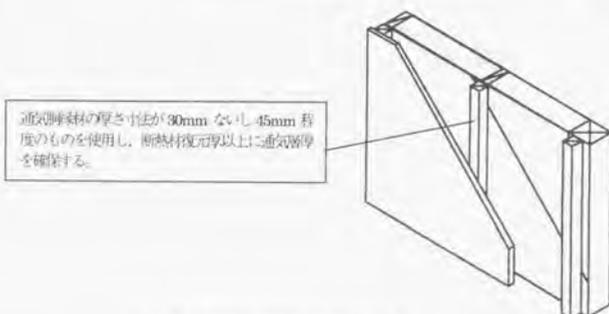
本論文では外壁断熱に着目して検討を行った。現在寒冷地では、外壁の他に屋根断熱でも通気層を設け、厚さ 200mm 以上のバット状断熱材を充填するか吹込み断熱方法を用いるケースが多くなってきている。前者による場合は、設計段階から十分な断熱・通気スペースを確保した屋根構造とすることで通気層空隙の減少については解決できよう。しかし、最近断熱施工の容易性から後者による場合が多く、シート状防風材を使用した場合には外壁と同様な問題が生じる危険性がある。従って、吹込みによる屋根断熱を行う場合にもボード状材料による通気層確保が重要と思われる。

[参考・引用文献]

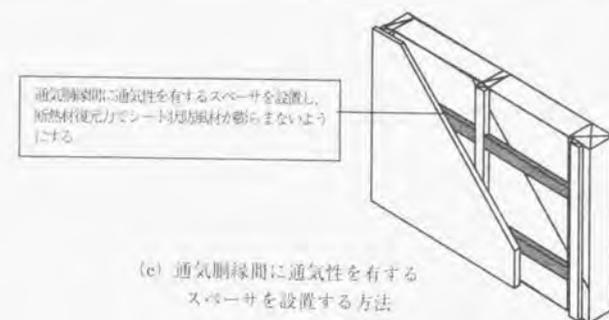
- 5-1 上屋喬雄ほか：外壁通気層の防湿防暑効果に関する研究、日本建築学会大会学術講演集、pp1431-1432、1990.10
- 5-2 水谷章夫ほか：垂直通気層構法における防湿・防露設計を対象とした定常計算方法に関する提案、日本建築学会計画系論文報告集 第 404 号、pp9-15、1989.10
- 5-3 硝子繊維協会+北海道立寒地住宅都市研究所：第 5 回住宅用グラスウール断熱材普及率調査結果、1994.5
- 5-4 鈴木大隆、廣田誠一ほか：シート状防風材を用いた木造断熱壁体の通気層空隙に関する実験的研究、日本建築学会計画系論文報告集 第 480 号、pp123-128、1996.12
- 5-5 鈴木大隆、廣田誠一ほか：木造住宅の耐久性向上に関する研究(その 1 通気層工法に関する研究)、日本建築学会北海道支部研究報告集 No66、1993.3
- 5-6 佐々木隆、鈴木大隆ほか：木造住宅の耐久性向上に関する研究(その 2 通気層閉鎖時の結露と改善)、日本建築学会北海道支部研究報告集 No67、1994.3



(a) 通気胴縁材の施工間隔を狭くする方法



(b) 通気胴縁材の断面を増す方法



(c) 通気胴縁間に通気性を有するスペーサを設置する方法

図 5.6 シート状防風材を用いた場合の手法提案

6

断熱性能の向上手法
に関する検討

6.1 はじめに

地球環境保全、居住空間の快適性向上を目的として、全国的なレベルで一層の住宅外皮の断熱性能向上が求められている。すでに、いずれかの部位が断熱された住宅は、全国的には90%を越え、北海道・東北地方、関東・信州以北の市部を中心とした地域では、多少に係わらず外被の全てを断熱した住宅がほぼ定着している[6-1.6-2]。

そして、全国的には新省エネルギー基準対応住宅の普及率はまだ低いものの、特に、研究者・地場の業者・建材メーカーが中心となった住宅研究グループによる普及啓蒙活動、行政レベルの地域施策・融資制度等による推進、メーカーが主体となった様々な躯体合理化手法の市場展開によって、寒冷な北海道・東北地方、比較的寒冷な信州・北関東地方等における断熱構造化技術や居住環境向上を目指した様々な技術手法の研究開発・普及展開は盛んであり、温暖な本州であっても相当な数の住宅が建設され、一般的な住宅にも多くの影響を与えている。また、多少の時間的遅れや性能に違いがあるものの、その他の地域でも、主に暖冷房負荷低減の面や決して快適とは云えない冬期居住空間の快適性向上の面から、先進的な施工業者が各種工法による断熱・気密化住宅が徐々に普及しつつある。

これらの地域では、一般的な断熱手法として、現場で大工または下職が繊維系断熱材等を躯体内部に充填する方法が主流になっている。しかし、近年、職人の高齢化・減少等の社会的背景から、施工合理化・省力化に対する要求が急速に高くなってきており、熱的性能の向上も同時に図れる施工合理化手法の開発が進み、使用される断熱材や断熱手法も

多様化している。例えば、中小の工務店レベルに多く採用されつつあるボード状断熱材の外張工法、少し経営規模の大きなビルダーやメーカー等を中心に市場展開しつつあるパネル化工法などは、その代表例といえよう。この方法では、工場で繊維系断熱材やプラスチック系断熱材が充填されたパネルの他に、発泡ウレタンを注入した断熱パネルが使われているケースも多くなってきている。

いずれにしても現在行われている高断熱化手法は、これまでより施工厚みを増すか、より高性能な断熱材を用いて、躯体内部への充填または躯体の内外に張り付ける方法が一般的である。

ここで、住宅の高断熱化に向けての着目点を明らかにするため、表 6.1 に示す住宅モデル・部位別断熱基準（新省エネルギー基準設計施工指針）を対象に、部位別熱損失量や部位別熱損失比率を求めた結果を図 6.1 に示す。

同図 (b) より、気密住宅であれば、住宅全体の熱損失量に対して、開口部が占める割合が 35~40%、外壁が 25~30%程度となる。また、断熱住宅であれば、換気負荷が 30%程度、開口部が 30~45%、外壁が 20%程度となることがわかる。このうち、開口部は、冬期日射取得や夏期の日射遮蔽、通風、部品コストなどの関係から仕様が決まるものであり、損失熱量によって一義的に決まるものではない。そこで、開口部の熱損失を除いた部位で熱損失比率を同図(c)に示すと、気密住宅であれば換気負荷が 25~40%、外壁が 45%程度、断熱住宅であれば換気負荷が 40~50%、外壁が 35%程度となる。

表 6.1 住宅モデル概要

住宅構造等	木造戸建総2階建形式	
1階床面積	60.86m ²	
2階床面積	60.86m ²	
延床面積	121.72m ²	
室容積	298.21m ³	
外壁断熱面積	I・II地域	127.34m ²
	III・IV地域	121.64m ²
開口部面積	I・II地域	28.72m ² (開口率:23.6%)
	III・IV地域	34.52m ² (開口率:28.4%)
床断熱面積	60.86m ²	
天井断熱面積	60.86m ²	

断熱気密仕様	実質熱貫流率 [kcal/mh℃]				換気回数[回/h]
	外壁	床	天井	開口部	換気
IV地域 断熱住宅	0.54	0.62	0.41	5.6	1.0
III地域 断熱住宅	0.43	0.37	0.41	4.0	1.0
II地域 断熱住宅	0.43	0.37	0.28	3.0	1.0
IV地域 気密住宅	0.75	0.85	0.57	5.6	0.5
III地域 気密住宅	0.66	0.55	0.57	4.0	0.5
II地域 気密住宅	0.66	0.55	0.44	3.0	0.5
I地域 気密住宅	0.36	0.31	1.2	2.0	0.5

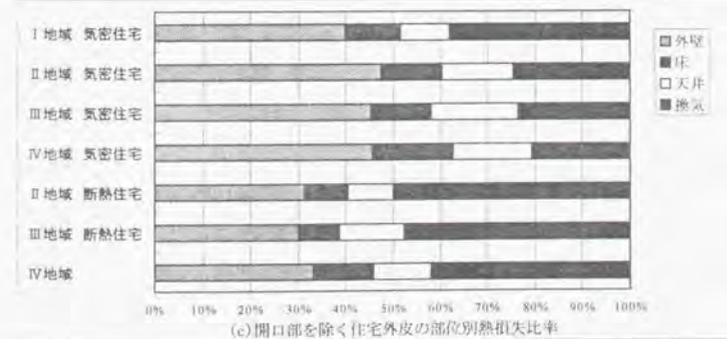
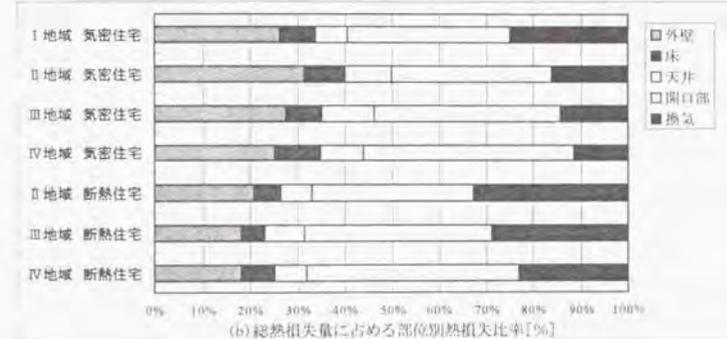
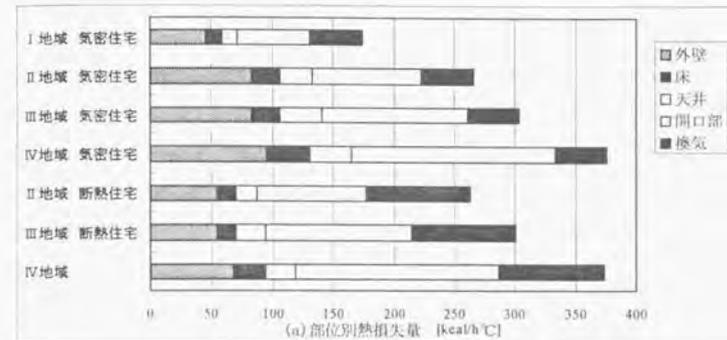


図 6.1 新省エネルギー基準に適合した断熱住宅の部位別熱損失量・比率

これは、より一層の住宅熱損失量の低減を図るには、断熱住宅の場合は、第一に気密化によって換気負荷を減らし、第二に外壁の高断熱化を図ること、気密住宅の場合は、換気負荷の低減は熱回収型換気を前提としない限り難しく、外壁の高断熱化が最も有効であることを示している。

今後、寒冷地においては気密住宅を前提にすべきことを考えると、新省エネ基準レベルより一層の熱損失軽減を図るには、外壁の高断熱化が重要といえよう。

しかし、外壁内には、断熱材が施工される部分の他に多くの構造材が存在し熱橋となるため、熱橋を含めた熱貫流率（以下、実質熱貫流率と称す。）は、断熱部の熱貫流率より大きくなる場合が多い。

本章は、住宅の一層の熱負荷低減に向けて重要な位置付けにある外壁断熱に着目し、在来木造住宅、枠組壁工法住宅を対象に、構造熱橋も勘案した貫流熱量の算定・検討から、外壁断熱設計に関する知見を得ることを主な目的とする。

6.2 検討概要

6.2.1 熱橋の定義

熱橋とは、壁体を構成する熱伝導率の小さい材料の一部または全部を、熱伝導率の比較的大きい材料が貫通している壁体の部分のことを意味している。

断熱設計上、重視すべき熱橋は、断熱材をそれ以外の材料が貫通し、断熱欠損が生じてしまう場合である。例えば、断熱化した建物を構成する壁体（屋根、天井、外壁、土間床等を除く床）において、木材、鋼材等の構造材が断熱材を貫通する部分が該当する。一方、断熱材の入った壁体に木材、金属等が含まれていても、これらが断熱材の一部または全部を貫通していない場合は、大きな断熱欠損には繋がらないケースが多い。例えば内装・天井下地材や筋交い等、施工する断熱厚さよりも寸法が小さい材料が断熱部位に設置され、材料の外側または室内側に断熱材が施されている部分が該当する。

ここでは、断熱設計上、無視し得ない前者の熱橋を対象とし、木造住宅では比較的影響の少ない後者の熱橋は検討に含めないこととした。

6.2.2 検討方法

熱橋を含めた熱貫流率、すなわち実質熱貫流率は、壁体一般部分で計算するのが慣例である[6-3]。しかし、実際の壁体には、主要構造材の他、各取合い部や外内装の下地・サッシ等建築部品の取付けに多くの下地材・補足材が必要となり、断熱材を貫通している。従って、計算対象を一般部から部位全体に拡大した場合には、断熱部が熱橋部の断熱性能より劣る場合を除いて、実質熱貫流率は大きくなるのが推測される。

低い断熱レベルの木造住宅では、断熱材と熱橋の断熱性能に大きな相違は無いため、この差は比較的僅かなものであり、計算の煩雑さを軽減することもあって、一般部分を対象に算定することで構わないだろう。しかし、新省エネルギー基準レベル或いはそれを越え

る高い断熱レベルの住宅においては、断熱手法の検討や熱負荷計算等において、この差は無視できないオーダーになると予想される。

これらのことから、一層の高断熱化に向けた検討においては、勘案すべき熱橋を一般部から部位全体を対象を広げて算定する必要がある。このことによって、設計性能と実際性能を近似させることとなるほか、より合理的・経済的な手法検討にも役立つ。その一方で、熱橋部材を一本毎に拾い積算するため、計算手間や煩雑さが大幅に増大するなどのマイナス面もある。

そこで、本章では、部材間隔がモジュール化し形状が比較的単純な木造系住宅では、実質熱貫流率は平均熱貫流率とほぼ同値になるとの赤坂ら[6-4]の知見を基に、まず、プラン型の異なる住宅での検討結果から、各部位の熱橋面積比率と部位面積は概ね比例関係にあることに着目して、熱橋形状毎に面積比率を提案する。その上で、様々な断熱パターンによる実質熱貫流率を検討し、高断熱化に向けての設計上の知見を考察する。

ここで、実質熱貫流率（平均熱貫流率）の算定は次式による。

$$\begin{aligned} \text{実質熱貫流率} &= K_{HB1} \cdot a_{HB1} + K_{HB2} \cdot a_{HB2} + \dots + K_{HBn} \cdot a_{HBn} + K_{IN} \cdot a_{IN} \\ &= \Sigma K_{HBn} \cdot a_{HBn} + K_{IN} \cdot a_{IN} \end{aligned}$$

ここで K_{HBn} : 熱橋部の熱貫流率 [kcal/m²h°C]

a_{HBn} : 部位面積に対する熱橋面積比率 [%]

K_{IN} : 断熱部の熱貫流率 [kcal/m²h°C]

a_{IN} : 部位面積に対する断熱面積比率 = $1 - \Sigma a_{HBn}$

(1) 熱橋部材の熱貫流率(K_{HBn})の算定

構造材等の熱橋部材の熱貫流率算定は、熱橋部材の厚さ寸法と断熱厚の関係から2つに大別される。

1) 熱橋部材の厚さ=断熱厚さの場合

この場合のイメージを図6.2(a)に示す。

構造空隙に断熱材を全充填する場合、熱橋部材内部の熱流はほぼ一方向であることから、熱橋部材の厚さと熱伝導率から熱橋部材の熱貫流率 K_{HBn} を求める。

2) 熱橋部材の厚さ>断熱厚さの場合

この場合のイメージを図6.2(b)に示す。

断熱厚さより熱橋部材寸法が大きい場合は、熱橋部材内部は二次元的な熱流となり、前者より熱橋部の熱貫流率は大きくなるのが予想される。ここで、枠組壁工法の断熱床を例に、二次元解析による計算結果を図6.3に示す。

この結果から、二次元解析で算出した熱橋部材の熱貫流率は、実寸法で計算した単純な熱貫流率より大きくなり、断熱厚さ分の寸法と見なした場合の熱貫流率に近似することがわかる。そこで、熱橋部材の熱貫流率 K_{HBn} は、二次元解析によらず、断熱材厚を熱橋部材の厚さと見なして簡易に熱貫流率を求めることとする。

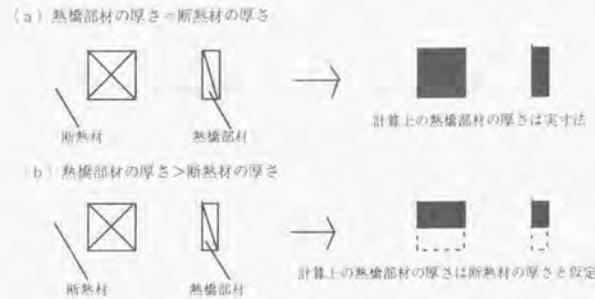
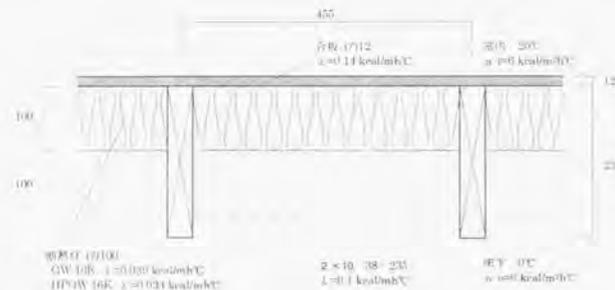


図 6.2 熱橋部材熱貫流率算定時の部材厚さの取り方



計算結果

断熱厚 (mm)	断熱材	各部熱貫流率 (kcal/m ² h [°] C)		平均熱貫流率 (kcal/m ² h [°] C)			
		断熱部	熱橋部 (235mm)	熱橋部 (断熱厚)	熱橋部 (235mm)	熱橋部 (断熱厚)	モデル計算
100	GW	0.335	0.361	0.705	0.337	0.366	0.367
	HPGW	0.298		0.705	0.303	0.332	0.333
200	GW	0.180	0.413	0.413	0.195	0.199	0.200
	HPGW	0.159		0.413	0.176	0.180	0.180

図 6.3 熱橋部材厚が断熱厚より小さい場合の二次元解析結果

(2) 熱橋面積比率(a_{100a})の算定

1) 在来木造工法

北海道に建つ比較的単純な外形の戸建住宅 4 軒と、長野に建つ 1 階床面積の大きい一部 2 階建和風住宅 1 軒の 5 軒を対象に、外壁の熱橋面積比率(a_{100a})を算定した。在来木造工法では、熱橋部材の厚さは全て壁厚と同寸法となるため、形状は 1 種類である。

算定結果を表 6.2 に示す。外壁面積に対する熱橋面積比率は、一部 2 階建和風住宅 (表中 a) では僅かに多いものの、概ね 14~17% の範囲に納まっており、極端なばらつきが無いことがわかる。よって、この工法の場合の熱橋面積比率は 17% に設定する。

2) 枠組壁工法

枠組壁工法住宅は、構造計画のルールが徹底しているから比較的単純な 2 階建形状が多く、住宅形状の地域的違いは少ない。ここでは、北海道に建つ戸建住宅 5 軒を対象に、熱橋形状毎の熱橋面積比率を算定した。枠組壁工法の住宅では、枠組材・まぐさ受け材などは壁厚と同寸法になるのに対し、まぐさは 80mm 厚となるので、熱橋部材の形状は 2 種類となる。

各形状毎の算定結果を表 6.3 に示す。枠組材・まぐさ受け材は 18~20% 程度、まぐさは 3% 程度となり、平均化していることがわかる。よって、ここでは、各部材形状毎に熱橋面積比率を 20%、3% に設定することとした。

なお、昨今普及が著しい在来木造工法のパネル化・合理化手法は、パネル四周枠等に木材を用いるため、その使用量は在来木造工法というよりはむしろ枠組壁工法に近いと推測される。

表 6.2 在来木造工法の外壁熱橋面積比率

住宅PLAN	住宅の外壁面積に占める割合 [%]		
	柱・間柱・窓周辺下地材 等	平均値	設定値
a	17.58	16.35	17.00
b	16.57		
c	16.80		
d	14.00		
e	16.78		

表 6.3 枠組壁工法の外壁の熱橋面積比率

住宅PLAN	住宅の外壁面積に占める割合 [%]	
	枠組材・まぐさ受け材 等	まぐさ
a	19.38	2.73
b	20.71	3.32
c	18.39	2.11
d	21.84	2.69
e	20.49	3.39
平均値	20.16	2.85
設定値	20.00	3.00

6.3 外壁断熱性能の向上に関する検討

ここでは、在来木造工法と枠組壁工法を対象に、まず、一般的な断熱手法である[充填断熱]、[外張断熱]、充填断熱手法に熱橋対策を講じた[充填+付加断熱]の断熱評価を行う。次いで、費用対効果や施工性を検討し、高断熱化に向けた各手法の特性を把握する。なお、実質熱貫流率算定に際し、[外張断熱]による場合は、構造材等は熱橋では無く、むしろ+の断熱材料として考えることもできる。そこで、この壁体は、構造材を加味しない断熱材の熱貫流率を実質熱貫流率と見なすこととする。一方、[充填+付加断熱]による場合は、熱橋となる構造材・下地材等が実質熱貫流率に及ぼす影響は少ないが、25~50mm程度の付加断熱材ではその影響を完全に無視することはできない。そこで、充填断熱部分に位置する柱材・間柱材・窓周辺材等の構造材・下地材を熱橋として考えることとした。

6.3.1 在来木造工法の断熱性能向上に関する検討

(1) 断熱手法の概要

外壁構造材には、東北地方、日本海沿岸地域や土佐壁等の伝統工法が継承されている本州の一部では4寸材が使われているものの、我が国の大部分の地域では、コスト低減、モデール寸法の関係から3寸5分材が主流となりつつある。従って、繊維系断熱材での100mm程度までの断熱化は、専ら壁内空隙を利用した[充填断熱]による方法が一般的に行われている。一方、近年では、断熱施工に不慣れた東北地方以南を中心に、断熱気密施工の省力化のため[外張断熱]も普及しつつある。

また、寒冷地の中でも寒さに厳しい地域で一層の高断熱化を図る場合には、軸間に断熱材を全充填する他に、外側にボード状断熱材を付加断熱する[充填+付加断熱]も見られるようになってきている。しかし、一般的には、構造熱橋部の断熱補強というよりも、軸間に充填しきれない断熱厚を外側に付加するという考え方で適用されているのが一般的である。付加断熱部の下地構成にしても、実質熱貫流率とのフィードバックから決定されたものではないから、必ずしも断熱性能上有効な設計となっているかは疑問である。

(2) 検討結果と考察

各断熱手法別に、使用断熱材の熱伝導率の違いによる実質熱貫流率とその内訳、断熱部の熱貫流率、熱損失増加率を図6.4に示す。この場合、防風材に透湿防水シートの使用を前提としており、計算上はこの材料の断熱性能を見込まない。

使用する防風材の違いによる影響を把握するため、充填断熱厚さを100mmとし防風材に合板9mm、シーリングボード12mmを用いた場合の実質熱貫流率とその内訳、熱損失増加率等を図6.5に示す。

ここで、熱損失増加率とは次式で表される。これは、熱損失増加率とは実質熱貫流率と断熱部の熱貫流率の比を示し、熱橋が存することによる外壁熱損失増加の割合を示すものである。また、付加断熱部分の下地は計算上見込んでいない。この点については6.4で検討する。

$$\text{熱損失増加率}(\%) = \frac{\text{実質熱貫流率}}{\text{断熱部の熱貫流率}}$$

また、各断熱手法における代表的仕様の断熱材熱抵抗値と実質熱貫流率の関係を図6.6に示す。プロットを結ぶ線の傾きが大きいかほど、高断熱化に向けて熱橋の影響が少ない手法であることを示すほか、各断熱手法が達成できる断熱性能のおおよその範囲を知ることができる。

これらの図から、次のことがいえる。

1) 標準的な断熱仕様

図6.4から、北海道で標準的になりつつある高性能GW16K-100mm、ロックウールもしくは壁専用の接着剤混入吹込み用断熱材(BIB他)を充填する断熱手法(図中100mm-0.034;断熱部の熱抵抗値 $R=2.94[\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}/\text{kcal}]$)は、断熱部の熱貫流率が $0.32[\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}]$ なのに対し、実質熱貫流率は $0.4[\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}]$ 程度となり、熱橋の存在によって約35%程度の熱損失が増加していることがわかる。

また、図6.5から、シート状防風材から構造用面材に変更しても、熱損失増加率には大きな差は見られず、熱橋の影響を軽減する効果は僅かであることがわかる。

2) 充填断熱

充填断熱によって、前述の仕様より高断熱化を図ろうとした場合、2つの方法が考えられる。一つは、壁厚を要えずに断熱材を高性能化する方法で、この場合、発泡プラスチック系断熱ボード($\lambda=0.032\sim 0.024$)の充填は施工性が悪いことから通常は敬遠され、現場発泡ウレタン材($\lambda=0.022$)に置き換えるのが一般的である。もう一つは、4寸柱を使用し高性能GW16K-120mm断熱するなど、壁厚を増す方法である。この場合、一般的な在来木造工法では、4寸柱を用いた120mmが壁厚の上限と考えて良いだろう。

図6.4から、断熱材の高性能化は(図中、100mm-0.022、同 $R=4.55$)、断熱一般部の性能向上は著しいが、熱損失増加率は1.5以上にも達し、実質熱貫流率に及ぼす熱橋の影響は大きい。一方、壁厚の増加は(図中、120mm-0.034、同 $R=3.53$)、断熱部とともに、熱橋部の断熱性も向上するから、熱損失増加率は前者ほど大きくならないことがわかる。

そして図6.6から、後者は、前者に比べて、断熱材R値の増加に伴う性能向上は優れた特性を有するものの、その範囲に限りがあることなどがわかる。

3) 外張断熱

前述した通り、図6.4の断熱部熱貫流率は、外張断熱手法の場合の壁体の実質熱貫流率と考えることができる。

外張断熱手法は、従来、充填断熱に対する省力化工法としてのみ着目されていた感があり、熱橋との係わりの中での熱的評価は十分行われていなかった。

図6.4や図6.6から、同じ断熱材を使用した場合でも、外張断熱手法は充填断熱手法と比べて約3~5割の熱損失低減効果があることがわかる。

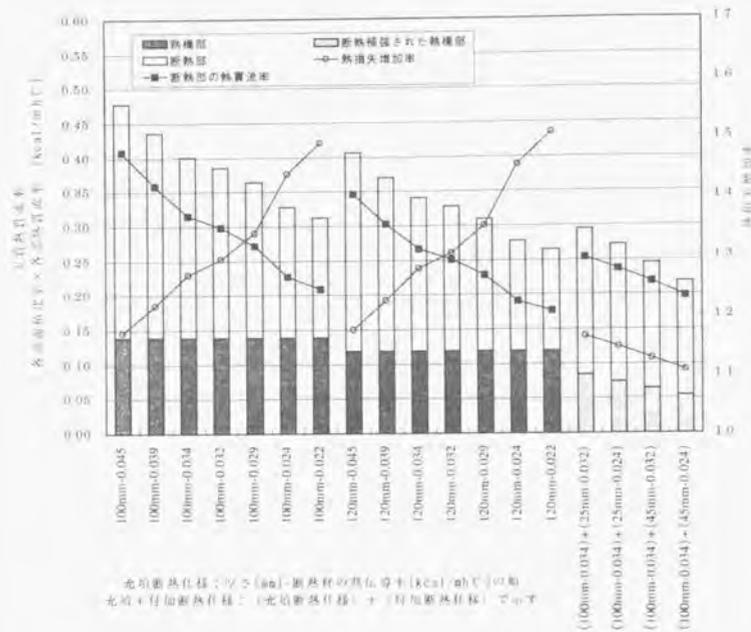


図 6.4 断熱手法・仕様別の外壁熱貫流率・実質減貫流率・熱損失増加率の関係

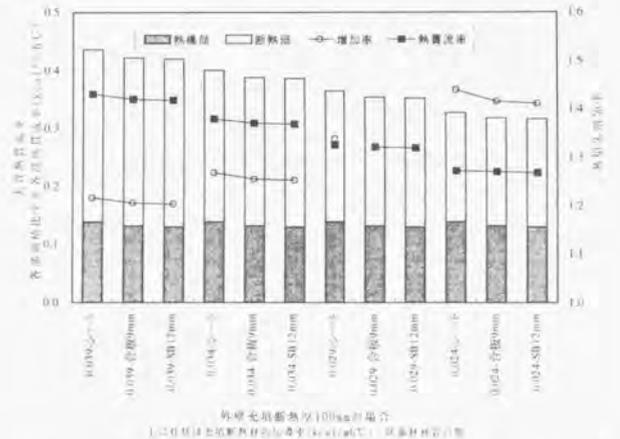


図 6.5 充てん断熱(100mm-0.034)仕様の場合の防風材の違いによる比較

例えば、(100mm-0.034)程度の断熱材と同等の押出法 b 類 2 種 70mm (同 R=2.92)の外張断熱と、現場発泡ウレタン(100mm-0.022)の充てん断熱仕様による高断熱化手法とはほぼ同程度の断熱効果となる。また、施工上の上限厚さと呼ばれる 75mm で、 $\lambda=0.024$ (同 R=3.13 で図中の 100mm-0.032 に相当) 或いは $\lambda=0.022$ (同 R=3.41 で図中の 100mm-0.029 に相当)の断熱材を使用すれば、1)の標準仕様と比べて約 25~30%程度の高断熱化が可能である。

4) 充てん+付加断熱

方、充てん+付加断熱手法は、25mm-0.032 (高密度 GW32K、押出し法 b 類 1 種等が該当)を付加断熱することで、断熱部及び熱橋部の熱損失が低減し、前述した外張断熱手法と同様の約 25%程度の熱損失低減効果があることがわかる。この工法によれば、例えば 45mm-0.024 程度の断熱材を付加することによって、前述した北海道の標準仕様レベルの約半分程度まで熱損失を低減することも可能である。また、充てん断熱をベースに、外張断熱手法ほど壁厚を増加しないで高断熱化に対応できる点に最大の特徴を有し、外張断熱手法より更に高断熱化が期待できる断熱手法と位置付けることができよう。

図中の数値は、断熱材の厚さ(mm)・熱伝導率[kcal/mh°C]を表す

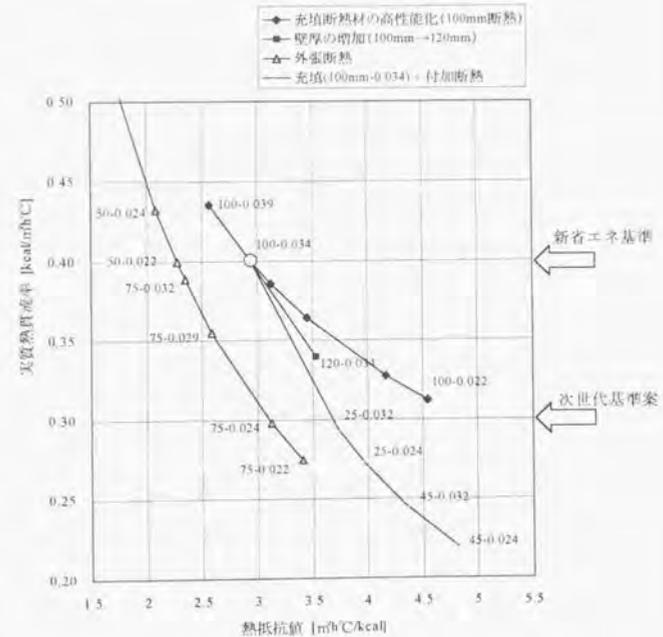
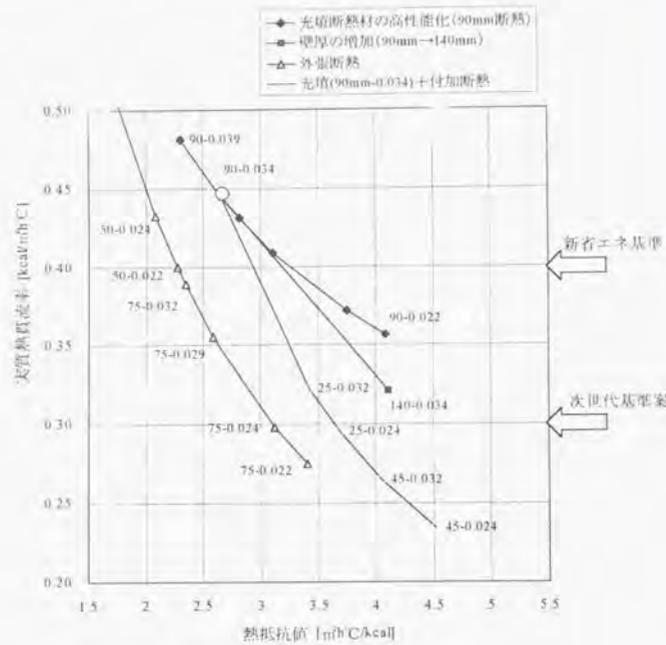


図 6.6 各断熱手法の代表的仕様の熱抵抗値と実質熱貫流率の関係

要となり使用木材量も増すため、枠組壁工法の検討結果に近いと推測される。この工法では、パネル枠材の寸法を増す、すなわち壁厚の増加による高断熱化は、パネル重量が増し施工性が低下することから余り合理的とは云えない。また、外張断熱手法は現場施工比率が高くなり、パネル化工法が目指す生産性向上に寄与しない。よって、この工法の場合は、発泡ウレタンを充填断熱するか、または充填+付加断熱手法により高断熱化を図るのが有効といえよう。



図中の数値は、断熱材の厚さ[mm]・熱伝導率[kcal/(m·h·°C)]を表す

図 6.8 代表的断熱仕様の熱抵抗値と実質熱貫流率の関係

6.3.3 高断熱化手法の費用対効果・施工性に関する考察

6.3.1, 6.3.2 では、断熱効果の面から、標準的な充填断熱仕様に対する高断熱化手法として、在来木造工法では現場発泡ウレタン注入工法に代表される充填断熱材の高性能化・4寸柱材の使用による断熱厚の増加、外張断熱や充填+付加断熱手法、枠組壁工法ではスタッドの206化による断熱厚の増加や充填+付加断熱手法の断熱効果を示した。

ここでは、各断熱手法に関して、断熱に要する各種工事の材工費（以下、断熱工事費と称す。）を算出し、費用対効果の高い断熱手法を明らかにし、施工性などを勘案しながら現場施工を前提とした住宅の高断熱化手法について考察する。

なお、断熱工事費とは、断熱工事の他、木工事や気密工事などの関連工事や当該諸経費も含むものである。断熱工事費の積算は、1997年7月現在の札幌市における年間50軒程度の住宅建設を行う住宅メーカーの積算単価に基づいている。なお、断熱工事費は、工務店規模・年間建設量によっても多少の違いがある。例えば、年間10棟未満の中小工務店による場合は、算出額と同程度か数%程度低減するのが多いのに対し、年間100棟以上のホームビルダーによる場合は同程度か数%程度上昇するケースが多いようである。

図 6.9 は、在来木造工法で、高性能 GW16K-100mm を充填断熱した場合を標準として各断熱手法・仕様毎の断熱工事費の増分と実質熱貫流率の関係を示したものである。

また、図 6.10 は、各断熱手法・仕様別の断熱工事費の内訳を示したものである。

費用対効果に関しては、図 6.9 から次のことがいえる。

- ① 同じ実質熱貫流率であっても、断熱手法によって断熱工事費には大きな相違がある。例えば、充填 B と外張 C、充填 D と外張 E は実質熱貫流率はほぼ同値だが、外張断熱手法は充填断熱手法と比較して約 20～10 万円程度のコスト増となる。
- ② 各断熱手法毎に見ると、断熱性能の強化と断熱工事費増はほぼ正の比例関係にある。しかし、各工法の費用対効果を示すと思われる回帰式の傾きは異なる。3種の断熱手法のうち、充填断熱手法の傾きが最も急だが、これは、図 6.9 に示すように、断熱強化に要するコスト増が、他の手法では同一断熱材の厚さや仕様変更に伴う金額のみで比較的少額であるのに対し、充填断熱は構造材の材積増加に伴う木工事費増や発泡ウレタン注入といった材料変更による工事費増が大きいためである。
- ③ 費用対効果の面からは、繊維系断熱材が適用できかつ汎用構造材で壁厚が増加できる範囲として充填 C レベルまでは充填断熱手法、それ以上の高断熱化を図る場合には充填+付加断熱手法が優れており、外張断熱手法は必ずしも有利とはいえない。

次に、施工性など工法的な特性に関しては、次のことがいえる。

- ④ 繊維系断熱材による充填断熱は、費用対効果に優れているものの、断熱・気密施工上の留意点が多いことが一般に知られている。また、壁厚の増加に要する4寸構造材や断熱材は寒冷地では流通していなく、入手し難いなどの問題点もある。
- ⑤ 発泡ウレタンによる充填断熱手法は、現場施工では、前述のように工事費も高く、作業安全性に注意を要するが、工場生産を前提とした住宅では、この試算結果より安価に行うことも可能で、施工監理上の負担も少ない。

- ⑥ 外張断熱は、前述したように費用対効果の面での優位性は少ないが、充填断熱手法に比べれば、断熱気密工事に熟練性を要さず、施工監理上の負担も少なく、性能安定性も高い。しかし、壁厚が増すため、外窓部分の造作工事などが更に加算されることや、狭小宅地での適用性・防火性などに難があるのも現実である。
- ⑦ 充填+付加断熱手法は、充填断熱部分は汎用材料で対応でき、また付加断熱部の施工も外張断熱ほどの手間は要せず、費用対効果に優れているが、充填断熱部の断熱気密施工は④で述べたと同様の留意点がある。

一方、現場施工を前提とした住宅生産体制では、断熱技術に限らず全ての新技術の導入新技術の導入に対して、慎重になるきらいがあり、その浸透普及には相当の時間を要する。特に新たな材料を要したり、既往の施工方法と異なる場合はなおさらである。速やかな普及を重んじた場合、できればその技術は、なるべく既往の材料、汎用材料、既往の施工技術で対応できることが肝要と思われる。

以上のことを総合的に勘案すると、断熱気密工事に関する施工技術が確立し、技術者も比較的慣れている北海道などの寒冷地において、現場生産を中心としている住宅メーカー・工務店を前提とした場合の外壁高断熱化手法としては、汎用材料、既往の施工技術の中で比較的違和感が無く、費用対効果に優れる充填+付加断熱手法が優れていると考えることができる。

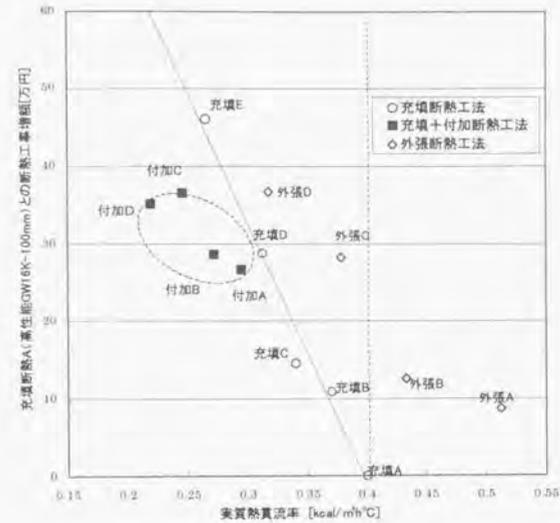


図 6.9 断熱工事費と実質熱貫流率の関係

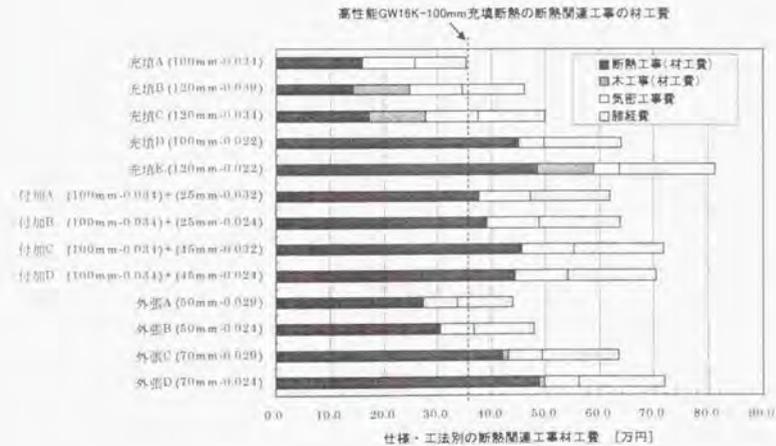


図 6.10 断熱手法別の断熱工事費の内訳

6.4 付加断熱部分の地下構成に関する検討

6.3で行った費用対効果の検討から、高性能 GW16K レベルの断熱材 100mm 若しくは 90mm を壁内空隙に全充填する地域においては、一層の高断熱化に向けて充填+付加断熱手法の優位性が明らかになった。

付加断熱材は、防風材と兼ねて設置されることが多く、撥水性、防風性が求められるため、押出法ポリスチレンフォームなどのプラスチック系断熱ボードか、高密度グラスウールなどの繊維系断熱ボードを使用するのが一般である。

前者の場合は、断熱材が面強度に優れているため、付加断熱部には木下地が無く、断熱材の外側に通気胴縁材を釘留めして外装材を支持するケースが多い。しかし、タイルなど重量のかさむ外装材を用いる場合や、付加断熱材を厚くする場合は、通気胴縁材を固定するため、付加断熱部に断熱厚さ分の木下地を併用して付加断熱層を構成することもある。後者の場合は、断熱材が面強度に乏しいため、木下地を併用して付加断熱層を構成するのが一般である。そして、付加断熱部の木下地は、通気胴縁材を施工する場合は柱の横方向、通気胴縁を兼ねる場合は柱方向に施工する方法など、設置方法も各種考えられる。

ここでは、付加断熱部の下地の有無、下地構成の違いが外壁の断熱性能に及ぼす影響を把握し、充填+付加断熱手法の設計上の知見を得るための検討を行う。

6.4.1 検討モデル

在来木造工法と枠組壁工法を対象に、住宅付加断熱部の下地の有無、下地構成の違いにより各 4 種の検討モデルを設定する。付加断熱材は、熱伝導率 $\lambda=0.032$ と 0.024 、厚さは汎用木材との整合性を考えて 25mm と 45mm 厚、計 4 種を想定している。

在来木造工法の場合の概要を図 6.11 に示し、検討モデルの概要を以下に述べる。

(a) 充填断熱モデル

参考例として示したもので、6.3の充填断熱標準仕様モデル。

(b) 付加断熱部下地無しモデル

付加断熱層は断熱材のみで構成されたモデル。

(c) 付加断熱部横下地 455mm 間隔モデル

付加断熱部の木下地は、見付け幅 45mm で付加断熱材と同厚の材料を使用し、柱横方向に 455mm 間隔で設置したモデル。付加断熱材は木下地に施工するもので、付加断熱手法として最も標準的に行われている仕様。

(d) 付加断熱部横下地 600mm 間隔モデル

付加断熱部の木下地は、見付け幅 45mm で付加断熱材と同厚の材料を使用し、柱横方向に 600mm 間隔で設置したモデル。木下地を必要とする場合の提案モデルとして設定したモデル。

(e) 付加断熱部縦下地モデル

付加断熱部の木下地は、見付け幅 45mm で付加断熱材に通気層厚を見込んだ材厚とし、柱方向に 455mm 間隔で設置したモデル。通気胴縁材施工の省力化が可能なもの。熱橋計算上は、付加断熱部の木下地は断熱厚と同寸法で扱う。

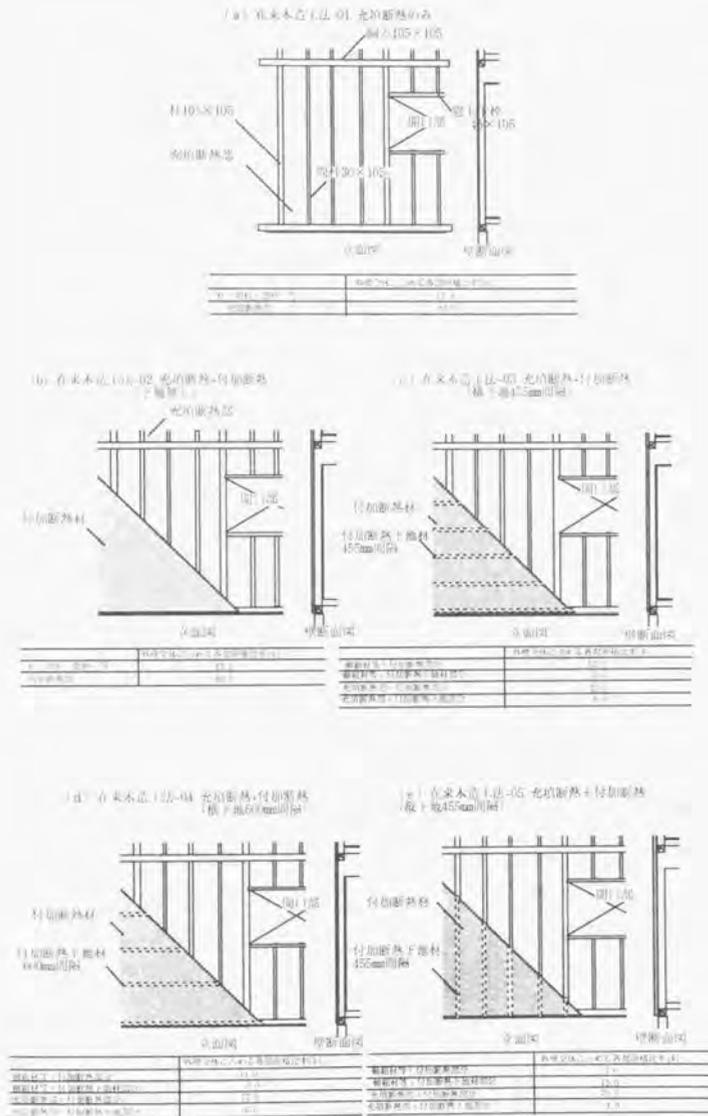


図 6.11 外壁付加断熱下地構成手法の概要（在来木造工法の場合）

6.4.2 検討結果と考察

付加断熱材 4 種、付加断熱部の下地構成 4 種の違いによる実質熱貫流率とその内訳、断熱部の熱貫流率、熱損失増加率について、在来木造工法の検討結果を図 6.12、枠組壁工法の検討結果を図 6.13 に示す。

また、各下地モデルの外壁面積に対する構造材と付加断熱部下地材の交差部の面積比率、下地無しモデルと比べた実質熱貫流率の増加率を表 6.4 に示す。

これらの図・表から次のことがいえる。

付加断熱部に下地がない構成と比べて、軸組材と付加下地材の交差面積比率が多くなるほど熱橋の影響が増し、実質熱貫流率は増大する。また、付加断熱材を高性能化或いは厚さを増すことで実質熱貫流率が減少するが、実質熱貫流率に及ぼす熱橋の影響は大きくなる傾向がある。これらの傾向は、外壁熱橋面積比率の大きい枠組壁工法ほどより顕著に現れている。

その結果、例えば、在来木造工法で付加断熱材の厚さに係らず、下地無しで $\lambda=0.032[\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{C}]$ の断熱材を用いた場合と縦下地 455mm 間隔で $\lambda=0.024$ の断熱材を用いた場合の実質熱貫流率がほぼ同値となる。また、枠組壁工法では、付加断熱材の厚さに係らず、下地無しで $\lambda=0.032[\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{C}]$ の断熱材を用いた場合と横下地 455mm 間隔で $\lambda=0.024$ の断熱材を用いた場合の実質熱貫流率がほぼ同値となる。さらに、この住宅工法では、付加断熱材の熱伝導率に係らず、下地無しで 25mm 厚の断熱材を用いた場合と、縦下地 455mm 間隔で 45mm 厚の断熱材を用いた場合がほぼ同値になるなど、下地構成の違いが壁の断熱性能に及ぼす影響は無視できないことがわかる。一方、横下地を 600mm 程度とした場合は、前述したような上位の断熱仕様が逆転することは無い。

これらのことから、付加断熱による外壁断熱性能の強化を効果的に行うには、木造工法の場合は、下地無し若しくは横下地間隔を 600mm 程度とするなど下地間隔をなるべく広げて、構造材と下地材の交差面積比率を極力抑えるための工夫が必要である。

また、木材より熱伝導率の高い構造材を主要構造材とした住宅工法の場合には、付加断熱部の下地を必要としない付加断熱手法の適用が望まれよう。

表 6.4 付加断熱構成手法別の実質熱貫流率の増加率

(a) 在来木造工法		付加断熱材仕様			
付加断熱部の下地構成	構造材と付加断熱下地の交差部の面積比率 [%]	25mm-0.032	25mm-0.024	45mm-0.032	45mm-0.024
下地無し	0	1.000	1.000	1.000	1.000
横下地600mm間隔	3	1.026	1.038	1.040	1.059
横下地450mm間隔	5	1.041	1.060	1.063	1.091
縦下地455mm間隔	13	1.084	1.121	1.124	1.177

(b) 枠組壁工法		付加断熱材仕様			
付加断熱部の下地構成	構造材と付加断熱下地の交差部の面積比率 [%]	25mm-0.032	25mm-0.024	45mm-0.032	45mm-0.024
下地無し	0	1.000	1.000	1.000	1.000
横下地600mm間隔	3.5	1.029	1.042	1.044	1.064
横下地450mm間隔	7	1.090	1.075	1.079	1.114
縦下地455mm間隔	20	1.115	1.166	1.169	1.242

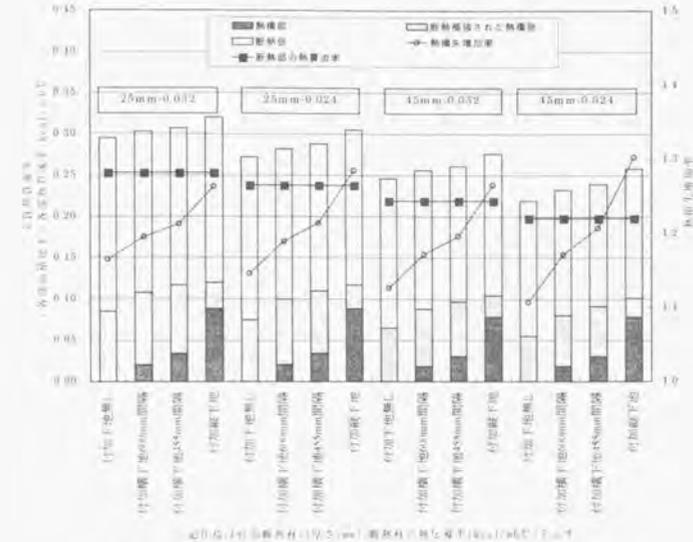


図 6.12 在来木造工法の付加断熱下地構成の違いによる検討

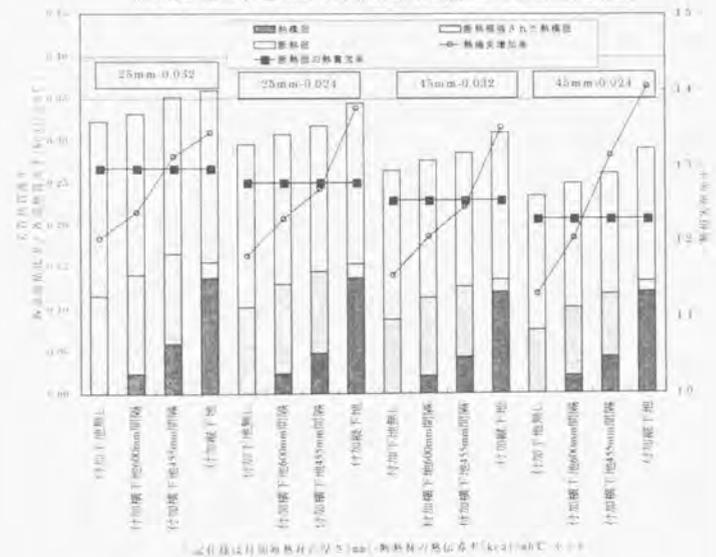


図 6.13 枠組壁工法の付加断熱下地構成の違いによる検討

6.5 まとめと手法提案

6.5.1 本章のまとめ

本章では、6.1 で、一層の住宅断熱化を図るには、熱損失比率の大きい外壁に着目する必要があることを述べ、外壁を構成する主要構造材などの熱橋を勘案した断熱設計が重要であることを述べた。

6.2 では、断熱設計上勘案すべき熱橋について定義し、熱橋を含めた実質熱貫流率の簡易算定方法について述べた。この中で、外壁一般部を対象に実質熱貫流率を算定していた従来の考え方から外壁部位全体を対象範囲を広げることの重要性や、我が国で一般的住宅工法である在来木造工法と枠組壁工法を対象に熱橋面積比率を用いた実質熱貫流率の簡易計算法を提案した。

6.3 では、2 種の住宅工法に関して、積雪寒冷地で標準仕様となりつつある高性能 GW レベルの断熱材を壁内に全充填する断熱仕様に対して、一層の高断熱化を図るための検討を行った。ここで得られた知見を以下に整理する。

- 1) 在来木造工法で充填断熱を前提とするなら、熱橋の影響は更に大きくなるが、現場発泡ウレタンなど使用断熱材の高性能化を図るか、もしくは 4 寸柱を前提とした断熱厚の増加が考えられ、その時の熱損失低減効果は 20% 程度となる。
- 2) 枠組壁工法で充填断熱を前提とするなら、スタッドに 206 材を使用して壁内全充填断熱する方法が有効であり、30% 程度の熱損失低減効果が期待される。さらにまぐさ部分の熱損失が無視できないオーダーであり、この部分の断熱補強を行うことが有効である。
- 3) 充填断熱材と同性能な断熱材を外張断熱することで 25~30% 程度の熱損失低減効果があり、熱橋の生じない断熱手法を適用した場合の断熱効果は顕著である。
- 4) 検討対象とした充填+付加断熱仕様で、25~50% 程度の熱損失低減効果が期待できる。

次に、ここで浮かび上がってきた高断熱化手法を対象に費用対効果や施工性の面から検討を重ね、費用対効果が良好で、特殊な機械設備に依存せず汎用性材料で施工可能な方法として、充填断熱+付加断熱手法の優位性を示した。

6.4 では、断熱性能の確保の面から、付加断熱手法の構成方法に関する検討を行い、面強度の高い断熱材を使用して下地を設けない方法か、若しくは横下地間隔 600mm で付加断熱層を構成することが有効であることを示した。

6.5.2 付加断熱手法の提案

(1) 付加断熱層にプラスチック系断熱材を用いる場合

この断熱材は概して面外強度があるため、乾式外装材を前提とするなら必ずしも木下地は必要とせず、付加断熱手法としての有効性は高い。しかし、関西大震災以降、住宅耐震性向上の要求が高まったこともあって、壁耐力の強化、水平剛性の強化の面から、在来木造工法であっても構造材の外側に構造用合板、OSB などの構造用面材を施工するケース

が多くなってきている。また、枠組壁工法はもとより、近年開発普及しているパネル化工法の殆どが、構造材の外側に構造用面材を施工している。構造用面材は比較的透湿抵抗値が高いものが多く、加えてプラスチック系断熱材も透湿性に乏しいため、壁内の乾燥化、すなわち 3 章で述べたような内部結露や壁内保有水分の放湿の観点からは、危険側にシフトしているともいえよう。これらの条件で、壁内の乾燥維持を図るには、3 章や 4 章のまとめに記したような工法的対応の重要性は更に増すことになろう。

(2) 付加断熱層に繊維系断熱ボードを用いる場合

一方、透湿性に富む繊維系断熱ボードを用いた場合は、壁内乾燥に関するリスクは前述した仕様より低減する。しかし、材料自体の面強度に乏しいため、木下地が必要となり、断熱性の確保の面から、その下地は実用上支障の無い最大限の間隔として 600mm とすることが望まれる。

(3) 繊維系断熱ボードを用いた新工法の提案

繊維系断熱材を外張断熱に使用することは、壁内乾燥の面や、寸法柔軟性があるため施工性も良好であること、不燃材料であるため外壁防火性が向上するなどの利点もあるが、下地を要するのが難点でもある。このことに着目して、筆者は、下地材を必要としない繊維系断熱ボードを付加断熱或いは外張断熱手法を、硝子繊維協会と共同で 1994 年から 4 年間に渡り開発を行い、実用化した[6-5]。前述したような付加断熱手法の他に、新たな選択肢を提案する意味で、以下にその概要を示し、この章の終わりとしたい。

本手法は、面剛性の期待できない 32K 程度の比較的低密度な GW ボード中に断熱欠損の生じ難いスパーサーを設置し、そのスパーサーを介して通気胴縁材を固定し外装材を施工するものである。以下に、主要な使用材料の概略と手法概要を示す。

1) スパーサー

形状としては、大きく次の 2 種に分かれる。その概要を図 6.14 に示す。

① 点状スパーサー型

点状にスパーサーを設置するもので、GW ボード設置後にスパーサーを施工するため、その先端は断熱材繊維を切断でき、寸法安定性に優れた形状とする必要がある。設置箇所は、間柱及び柱などの構造材が下地となるよう幅 455mm で、高さは 600~455mm 間隔とする。現在市場展開しているスパーサーには、人力で設置するものと機械で設置するものがあり、いずれも樹脂製で、各種外装材の荷重支持に対して十分な強度を有することが実験的に確認されている。外装強度に関する実験検討は[9-4]に詳しいのでここでは割愛する。

② 線状スパーサー型

もう一つは、線状にスパーサーを高さ 455~600mm 間隔で設置するもので、GW ボード設置後にスパーサー施工するタイプと GW ボードと同時に施工するタイプに分かれる。前者は、点状設置スパーサーと同様の先端形状が求められる他、断熱欠損を少なくするために見付面積の小さな部材形状・材質とする必要がある。後者は、断熱欠損の少ない材質とする必要があり、ここでは例えば高々密度 GW や 96K 程度の RW でできた断熱ブロック材をスパーサーとして考えている。今後、実用化を図る所存である。

2) 断熱材

断熱材切断時・施工時の不快感の軽減を考え細繊維品とし、施工中の降雨水対策として撥水処理加工を行ったものか、または透湿防水シートを外側表面設置することが望ましい。

3) 工法概要

既に市場展開している点状スペーサを前提とした手法概要を図 6.15 に示す。

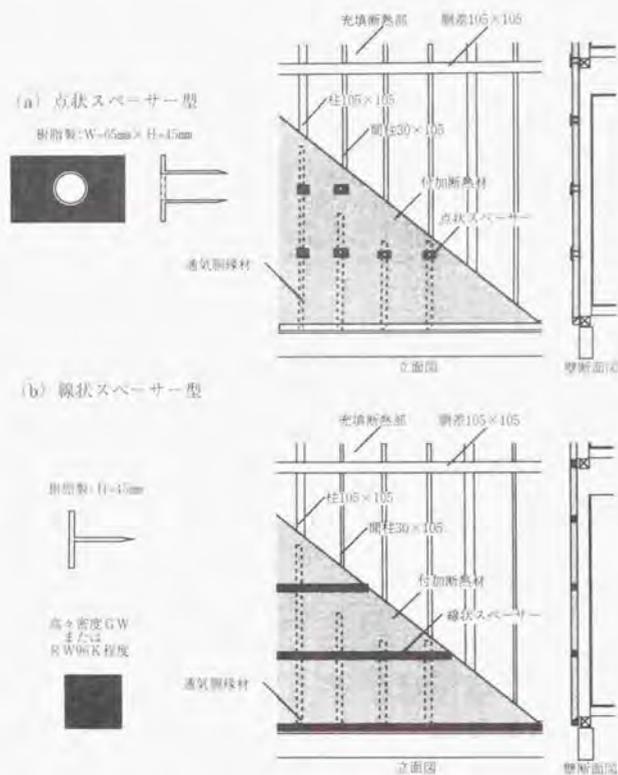


図 6.14 スペーサ形状

6. 断熱性能の向上手法に関する検討

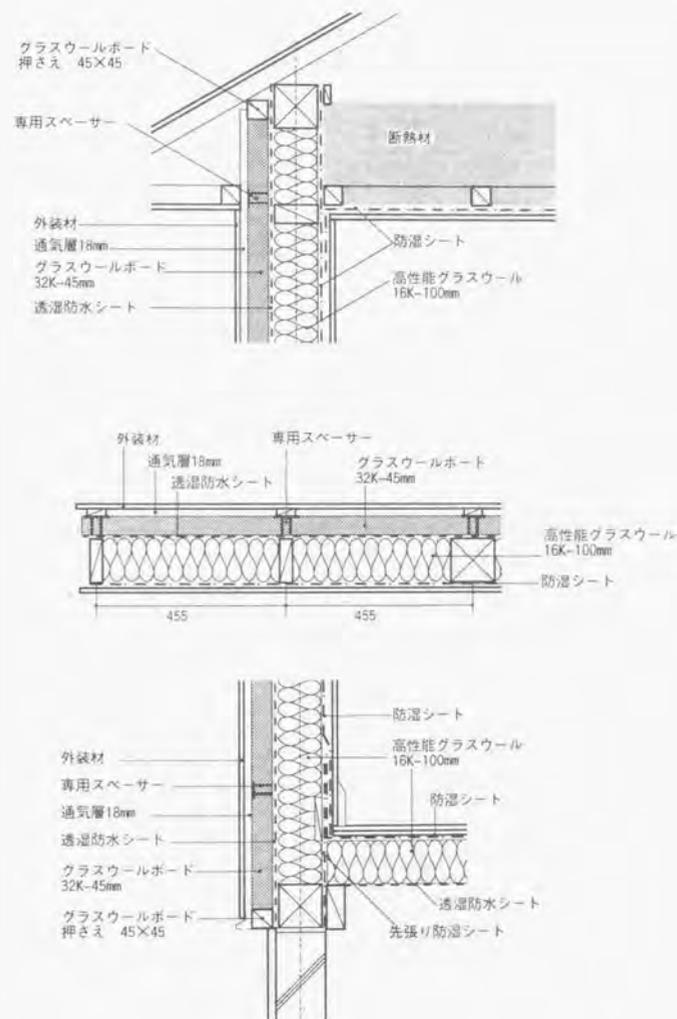


図 6.15 手法概要

[参考・引用文献]

- 6-1 住宅金融公庫：住宅・建築主要データ調査報告―戸建住宅編―、1997
 6-2 硝子繊維協会：第5回住宅用グラスウール断熱材普及調査結果、1994.9
 6-3 (財)住宅・建築・省エネルギー機構：住宅の新省エネルギー基準と指針、1992.4
 6-4 (財)住宅・建築・省エネルギー機構：住宅水準向上に伴うエネルギー消費増加の抑制技術開発研究(その2)第7章(担当、赤坂 裕)、1991.3
 6-5 鈴木大隆：グラスウールボードを用いた外張断熱工法の実用化に関する研究、北海道立寒地住宅都市研究所 平成8年度共同研究報告書、1997.3
 6-6 鈴木大隆、廣田誠一、大澤元毅、小田原隆：断熱住宅の構造熱橋が各部位の貫流熱量に及ぼす影響について、日本建築学会大会学術講演集 環境工学、1996.9

7

I部の小括
―断熱外皮デザインへの提案―

I部では、住宅技術の地域や環境への対応に向けて、多くの技術との整合化が求められる断熱外皮に着目し、耐久性と断熱性向上を目的とした設計要件を検討した。

本章では、各章をまとめ、各設計要件に対応する技術を具現化し、断熱外皮技術として整合化を図る。そして、断熱外皮に求められる各技術を他の断熱部位へ応用し、住宅断熱外皮技術として提案する。

7.1 各章のまとめ

2章では、先進事例として北海道の断熱外皮の変遷を述べ、断熱化に伴って顕在化した内部結露や断熱性の低下などの諸問題の克服に対して、材料的対処では無く構造的対応で克服していくことの重要性を述べ、それを本論の基本方針に据えた。次に、次代への課題とも云える耐久性向上に向けて、躯体の長期的な乾燥維持が重要であり、それを損なう要因を建築的に取り除いていくことの重要性を示した。そして、I部での検討範囲を、よく検討の対象となっている室内側からの湿気移動による壁体内結露への対応の他に、他部位からの水蒸気移動や漏気への対応、壁内保有水分への対応、降雨水への対応が求められることを述べた。また、断熱性向上に向けて、熱橋の影響を含めた断熱評価手法を確立し、特殊な材料・技術を要さない高断熱化手法の検討が重要であることを述べた。

3章では、耐久性向上に向けて、断熱壁体における室内、他部位及び構造躯体内を源とする湿気・水分移動への対応に関して検討を行った。冒頭で、特に開放系木造外壁の湿気

性状を捉えるには、既往の数値解析では施工要因や壁内通気モデル化が難しいこと、材料物性値が十分整備されていないことなどの課題が多いのに対して、それらを実際条件で再現できる実物大実験によるアプローチの有効性を述べた。壁内通気や断熱・防湿欠損を考慮した各種壁体の比較実験から、室内からの水蒸気移動への対応には防湿気密層と通気層の有効性、他部位からの水蒸気移動には壁内と他部位を空間的に独立させることの重要性を示した。そして、構造躯体内の保有水の代表例として、重量含水率 40%程度の未乾燥材を用いた各種壁構成の比較実験を行い、前述の条件を満たす壁構成では、比較的短時間で木材腐朽菌が生育し難い含水率まで乾燥することを確認した。また、壁内に保有する湿気・水分の放湿特性を簡易に把握できる実験方法を考案し、直張り壁と比べて通気層壁の放湿上の優位性を示した。

4章では、耐久性向上に向けて、多くの層構成からなる断熱壁体の外部水への対応に関して検討を行った。冒頭で、シーリング材を多用した乾式外装技術は、長期的な防水の信頼性が低いこと、既往研究では断熱壁体の層構成に合致したものは少ないことから、検討が重要であることを示した。そして、外部漏水には、通気層や壁内気流の有無、防風層や防湿気密層の気密性などが大きく係わることを述べ、それらをモデル化した実験を行った。そして、外部漏水への対応には、通気層の設置と壁内空隙の気密性の確保が重要であることを示した。これらの要件は、内部結露防止に向けた壁体の設計要件とも合致する。また、この要件を満たせば、住宅用途の薄厚な外装材でもシーリング材を要しない開放目地が可能であることを示唆した。実験壁体の防水性を捉える際には、漏水発生時における内外差圧の他に、ジョイント部の局所流速の関連性が高いが、その点については今後の課題である。

5章では、前章までで有効性が明らかとなった通気層に関して、空隙を長期的に確保するための構造的検討を行った。各種防風材・断熱材を用いた壁体の比較実験から、防風層として最も一般的なシート状防風材を使った場合に、断熱材の復元力や僅かな施工時の緩みによって、通気層厚みが相当減少し、特に圧縮梱包された断熱材や吹込み用断熱材では空隙有効開口面積が設計値の約 10%程度まで減少することなどを明らかにした。そして、シート状防風材を用いた場合の通気層空隙を確保するための設計施工方法を提案した。

6章では、住宅の断熱性能向上に関する検討を行った。冒頭で、住宅の高断熱化には、住宅熱損失量の 35~45%を占める外壁の性能向上が重要であること、構造熱橋を考慮に入れた断熱設計の重要性を述べた。そして、部位全体の実質熱貫流率を求める際に有効な熱橋面積比率を提案し、簡易計算法を示した。在来木造工法と枠組壁工法の 2種を対象に、断熱性、コスト、施工性などの面から各種断熱手法の評価を行い、次のような設計上の知見を得た。充填断熱による断熱材の高性能化や断熱厚の増加は 30~50%程度を占める熱橋部の損失熱によって、向上し得る断熱性能に限界がある。また、外張断熱は断熱材の性能を変えずに効率的な高断熱化が図れるが、施工可能な断熱厚の制約から、性能向上に限界がある。それらに比べて、充填+付加断熱は、特殊な材料・工法によらずに大幅な性能向上が可能で、費用対効果にも優れることを示した。次に、充填+付加断熱手法は、下地構成の仕方によってその断熱効果が異なり、下地を用いない付加断熱か下地を 600mm 間隔程度とすることの有効性を述べ、繊維系断熱ボードを用いた付加断熱手法を提案した。

7.2 断熱外壁における技術の具現化と整合化

ここでは、各章で得られた知見を基に、対応策を具現化し、断熱外壁技術として提案する。なお、外張断熱や充填断熱などの断熱方法、在来木造工法と枠組壁工法に代表されるような住宅構造の違いによって、断熱外壁技術は異なってくる。以下では、最も一般的で、多くの技術との整合化が求められる「壁内通気がある構造で充填断熱とした外壁」を中心に述べていくこととする。なお、これに該当しないものは、必要に応じてその都度触れたい。

7.2.1 設計要件に対応する技術の具現化

(1) 断熱性能の確保

1) 壁内気流の防止

在来木造工法など、外壁内部と床下・小屋裏等の他部位が空間的に連続する構造で、繊維系断熱材などの通気性・透湿性のある材料で充填断熱とした場合は、壁内気流によって外壁断熱性能が低下する危険性がある。また、プラスチック系断熱ボードを充填した場合でも、壁内に隙間無く充填することは難しく、壁内気流によって断熱性能が低下することも考えられる。これは、発泡ウレタンを現場で壁内に充填する工法でも、ウレタンが十分に充填されていない場合や構造躯体の長期的な乾燥収縮の恐れがある場合は、同様の問題が起こり得る。よって、これらの場合は、小屋裏、2階床ふところ、床下に接する外壁端部は、通気性が無い材料で遮断し、壁内気流が生じない構成とする必要がある。このことは、特に繊維系断熱材の充填断熱では極めて重要である。通気止め材としては、防湿フィルム、乾燥木材など、乾燥収縮が無く、長期的な寸法安定性に優れた材料を使用することが肝要である。

図 7.1 は、これらの考え方を基に、壁内気流の防止の考え方を示したものである。

なお、図中右には、参考までに枠組壁工法の壁断面を示すが、この構造は工法的に部位の独立化が図られているため、壁内気流の防止に関して特別な配慮は必要ない。また、構造躯体の外側に断熱層を構成する外張断熱の場合も、この点に関する配慮は必要としない。

① 縦間柱工法+先張り防湿フィルムによる方法

(a)は、床根太の施工前に、一階床と外壁の取合い部は巾 300mm 程度、中間階床と外壁の取合い部は巾 700mm 程度の防湿フィルムを先張りし、外壁上端部は軒桁に外壁の防湿フィルムを留め付け、防湿フィルムを用いて各取合い部の通気止めを設ける方法である。

この手法は、筆者らが 1985 年頃に多くの実験住宅での試行を繰り返しながら開発したもので [7-1]、在来木造で一般的な縦間柱工法を前提に、工程を変えずに施工できる点に最大の特徴があり、最近では我が国における気密工法の標準的仕様に位置付けられているものである [例えば 7-2,7-3]。

② 横間柱工法

(b)は、外壁間柱を横に入れて、通気止めを兼ねる方法である。①に比べて、一階床取合い部の先張り防湿フィルムの省略ができる、通気層を構成し外装下地を兼ねる胴縁材を外装割付寸法に合わせて施工できる点などに特徴がある。その一方で、横間柱を留め付け

るために柱材を欠き込んだり、間柱の施工本数が多くなるなど、柱の断面欠損や手間の増大などの問題点もある。従って、プレカット時の加工や構造上主要な役割を担う柱材の側面強化などに注意して適用していくことが肝要である。

③ その他の各取合い部に適用可能な方法

ここでは、各取合い部毎に、個別に適用できる方法を示す。

図(c-1)は、床と外壁の取合い部に適用できるもので、土台または胴差と床根太を同面に施工し、床合板を直接、横架材に留め付ける方法である。ただし、1階外壁の上端部は、巾400mm程度の先張り防湿フィルムを胴差から貼り下げる必要がある。この方法は、住宅の水平剛性が向上するなどの利点があるが、施工時における横架材の厳密な水平精度が求められるなどの注意点もある。

図(c-2)は、中間階床と外壁の取合い部に適用できるもので、床合板を横架材に留め付け、胴差をサイズアップすることによって、先張り防湿フィルムを省略する方法である。大断面の乾燥材は入手が容易でないことが多いため、長期的にそり・狂い・乾燥収縮が生じないような集成材を用いることが望まれる。壁の重量が増すため、現場施工の場合は、組立時に多くの人手が必要となること、壁内配管の貫通部分の処理が難しいこと、歪み直しが大変なことなどの問題点もあるが、先張り防湿フィルムの省力化や柱材の標準部材化などが図れ、在来木造工法の工業化・合理化手法への適用上の利点は多い。

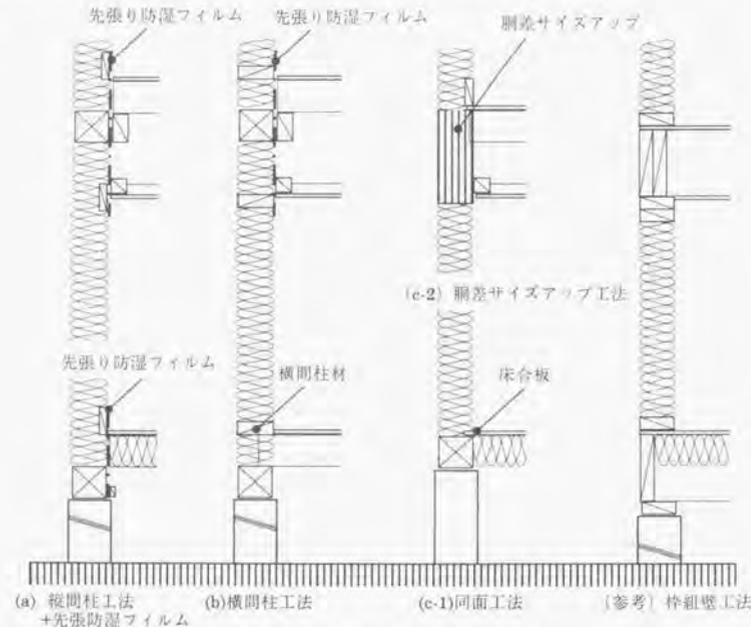


図 7.1 壁内気流の防止方法の考え方

2) 外部風の侵入防止

通気層を有し、繊維系断熱材を充填した壁では、断熱層内部に外部風が侵入しないように、断熱材外側に防風層を設ける必要がある。一般に、シート状とボード状のものが使用されるが、いずれの場合でも、壁内水蒸気の放湿が妨げられないよう透湿性に優れたものを選択することが望まれる。図 7.2 に、通気層を設けた場合の防風層の設置例を示す。

外部風の侵入防止には、防風層を気密に施工する必要がある。

(a) はシート状防風材を用いる場合を示す。シートは、なるべく幅広のものを使用し、その重ねは、防湿層と同様に図 7.4 に示すような処理が望ましい。この材料は、透湿性に優れるが面剛性が無いため、充填断熱材の復元力で通気層空隙が閉鎖される危険性がある。従って、弛みが生じないように施工し、通常 455mm 間隔に施工する通気胴縁材の間にスペーサーを追加するなど、通気層空隙の確保に留意した施工を行う必要がある。

(b) は構造用合板、OSB、シージングボードなどのボード状防風材を用いる場合を示す。構造用合板や OSB など接着層が多いものやプラスチック系断熱材など、比較的透湿抵抗値が高い材料を用いる場合は、放湿性を妨げないためにジョイント部分はシールせず、突き付けたままとするのが望まれる。外部風の侵入防止や通気層内に侵入した雨水の毛細管現象による漏水を重視するなら、透湿防水シートをその上面に施すなど、透湿・防水性の高い材料で、継ぎ目をシールすることとなる。

(c) は高密度な繊維系ボード状断熱材を用いる場合を示す。材料自体に防風・撥水性があるので、施工時の小口面の雨水対策に留意すれば、防風・防水層を別に設ける必要は必ずしもない。ジョイント部での隙間が生じない施工を心がければ良いだろう。

(2) 断熱性能の向上

一層の住宅断熱化を図るには、在来木造工法であれば外壁面積のうちの 20% 弱、枠組壁工法や在来木造パネル化工法であればそれ以上の比率を占める構造熱橋に留意して断熱設計を行うことが重要である。

高断熱化に向けては、図 7.3 に示すように、熱橋の存在を残しながら高性能断熱材による充填断熱化 (a)、熱橋を解消する外張断熱化 (b)、206 工法に代表されるような熱橋部材の断面増加と断熱厚増加による充填断熱化 (c)、断熱厚の増加と熱橋の断熱補強を同時に行える充填断熱+付加断熱 (d) の方法がある。この中で、寒冷地で一般的な高性能 GW による充填断熱から一層の高断熱化を図る方法としては、次の方法が考えられる。

在来木造工法やパネル化工法などで実質熱貫流率 $K=0.3[\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^\circ\text{C}]$ 以下の断熱性能を求めるのなら、特殊な施工技術を要せず、費用対効果に優れる方法として、充填+付加断熱工法が有効である。付加断熱材に、プラスチック系断熱材を用いる場合は、壁内放湿を妨げないように、そのジョイント部分は防水上のシールは避けた方がよい。また、繊維系断熱材を用いる場合は、下地の熱橋による影響を最小限に抑えるために、木下地は横に施工してその間隔は 600mm 程度とするか、または例えば専用スペーサーを用いて下地を設けない方法とすることが望まれる。

枠組壁工法で、外壁の実質熱貫流率 $K=0.3[\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^\circ\text{C}]$ 程度を目標とするなら、この方法の他に、206 工法にまぐさ・側根太などの断熱補強を行った方法も有効である。この場合、まぐさ及び側根太部の熱抵抗値 $R=1.45[\text{m}^2 \cdot \text{h}^\circ\text{C}/\text{kcal}]$ 程度の断熱補強が必要となる。

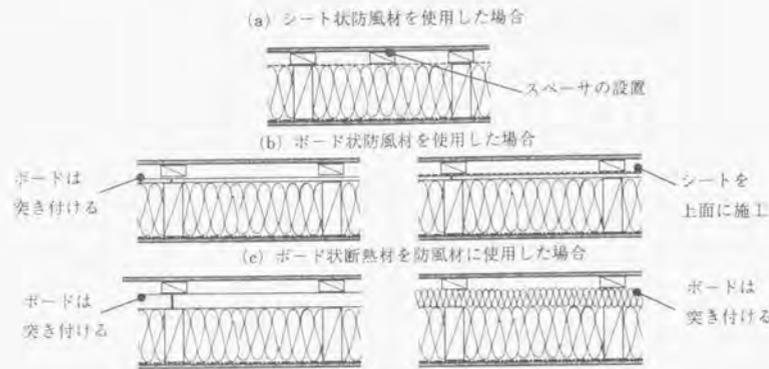


図 7.2 防風層の設置方法

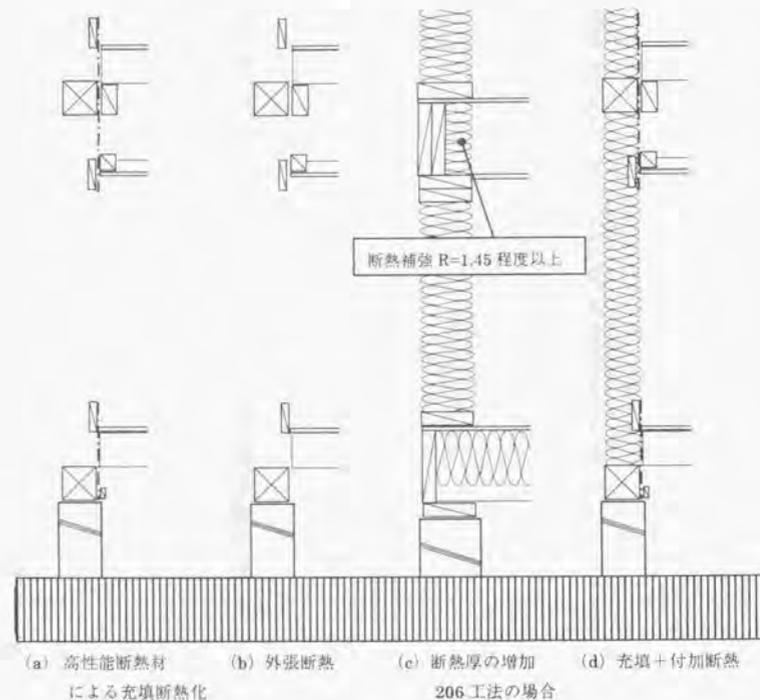


図 7.3 外壁高断熱化手法

(3) 防露性能の確保

1) 壁体一般部の結露の防止

充填断熱した壁体一般部での結露防止には、室内で発生する水蒸気の侵入防止と、壁内に存する水蒸気の乾燥促進を図ることが重要である。そのため、次のような設計施工技術が考えられる。この要件は外張断熱における断熱材の内部結露防止の上でも重要である。

① 防湿層の連続

室内側で発生する水蒸気の侵入による結露の防止には、住宅構造に係わらず、まず、室内側の防湿層に断点が生じないように連続的に施工することが肝要である。

例えば、在来木造工法などの壁を先行する工程の住宅構造では、防湿層に断点が生じやすい部分としては、断熱一般部のほか、各取合い部の横架材などの構造材や配管、配線などで防湿層を貫通する部分が挙げられる。

また、枠組壁工法などの床を先行する工程の住宅構造では、各取合い部で著しい断点ができないので、一般部と配管等の貫通部分の防湿化への注意が必要となる。

断熱一般部の防湿施工は、筆者らが 1997 年に策定した JIS A 6930[7-4]に基づく住宅用防湿フィルムを使用し、図 7.4 に示すような重ね部分や端部の処理を行えば、比較的容易にその連続性は保たれる。しかし、各取合い部や細部の断点の処理は、図 7.5 に示すような、専用の防湿気密部材を用いるか (a)、または長期粘着性に優れた防湿テープ (例えばブチル系テープ) によってシールする方法 (b) などが挙げられる。また、これらの手間を軽減するには、設備配管・配線などは極力、断熱層内部に設置せずに間仕切壁などの非断熱部の空隙を利用するなど、計画段階からの配慮が重要である。

② 通気層の設置

防湿層は①に示すような設計施工に配慮しても、現場施工では大半が人的作業に委ねられるため、欠損部が生じないことを前提とした防露設計のリスクは大きい。また、我が国の住宅用外装材は防水・防火性が重んじられるため、外装材自体の透湿に期待した設計もリスクが大きい。

防湿欠損や透湿によって壁内に侵入する水蒸気や、外壁を構成する材料が保有する水分の放湿のため、断熱層外側は湿氣的に外気へ開放した構成とする必要がある。伝統的な在来木造工法では、床下から壁内を経由して小屋裏への通風経路を確保することで、壁内の乾燥化を保ってきた。しかし、断熱外壁においては、7.2.1 で述べたように壁内通風は断熱性能の確保の面から問題があり、これに委ねた設計は避けるべきである。従って、壁内の乾燥化には、断熱層外側を外気へ開放する通気層の設置が対応の基本となる。

通気層は、現場における汎用木材である胴縁材によって構成することが多く、通常 18~24mm 程度の厚さを有するが、本論の実験結果からもその程度の厚さで問題ないと考えられる。むしろ、通気層の設計施工上重要なことは、通気層上下端が外気に開放され、その設計厚さが長期的に確保されるような仕様とすることにある。特に、(1)・(2) で述べたように、シート状防風材を用いた場合は注意が必要である。

2) 壁体下部結露の防止

在来木造工法等の外壁内部と床下が連続する構造で、通気性・透湿性のある繊維系断熱材を充填断熱した場合は、壁体下部を中心として結露発生または高湿な環境になる恐れがある。これは、地盤防湿や床下換気の不具合によって床下が高湿になりがちで、壁内気流

によって床下の湿気が壁内に移動することが原因である。また、室内側から壁内への透湿の他に、壁内が他部位に連続していることで、漏気による水蒸気が加わることも大きく影響しているものと思われる。

このような理由で生じる結露に対しては、地盤防湿や床下換気の確保による床下の乾燥化に努めるだけでは、必ずしもそのリスクは解消できない。そして、漏気による水蒸気侵入の防止策にはなり得ないからである。また、竣工直後は基礎コンクリートから相当な発湿が予想され、また床下換気量は近隣の立地環境に大きく左右されるためである。

従って、床下換気の確保や地盤防湿のほかに、床下と壁内が空間的に独立した構成とすることが重要である。壁内下端部の設計施工の対応策としては、基本的には(1)「断熱性能の確保」の項で提案した壁内気流の防止方法と同じであり、壁内下部結露の防止には、図7.1に示すいずれかの方法を適用することが重要となる。

(4) 防水性の向上

近年、住宅外壁の大部分を占める乾式外装材は、そのジョイント部に使われるシーリング材が経時によって弾性低下し、外装防水が損なわれる場合が多い。また、モルタル壁などの湿式外装材も、躯体挙動に伴う亀裂や材料そのものの乾燥亀裂が生じた場合は、同様

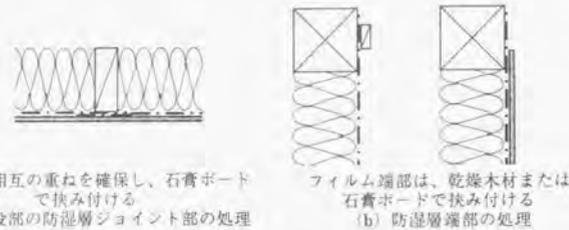


図7.4 断熱一般部の防湿層ジョイント処理の考え方

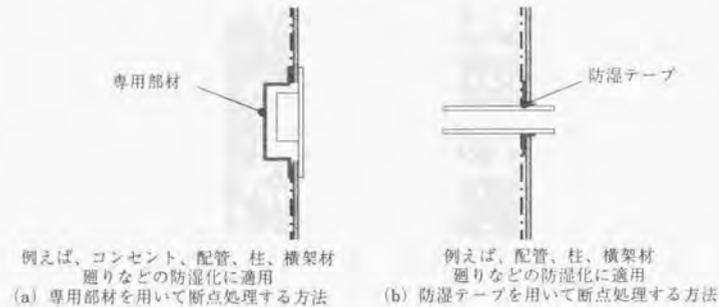


図7.5 細部の防湿処理の考え方

のことがいえる。外装防水に不具合が生じた場合は、降雨水や融雪水などの大量の水分が壁内に侵入し、躯体の耐久性を著しく低下させる危険性が高い。

一方、前述したような箇所を外装に不具合が生じた場合でも、その部分に生じる漏気もしくは内外圧力差を減じることで、隙間形状によっては漏水が生じなくなったり、もしくは僅かな漏水量を抑えることが可能となる。このような材料的対処ではなく建築的対応によって外装防水を向上するための技術的要件としては、外装材表面に外気に開放した通気層を設け、壁体層構成のいずれかで外部との気密化を図ることに集約される。

1) 通気層の設置

通気層は、単に漏気や内外圧力を減じる役割の他に、外部漏水が生じた場合の排水層としての機能も合わせ持つため、躯体内漏水の危険性は大幅に低減する。通気層の具現化については、既に(3)でも述べているので、ここでは繰り返さない。

2) 外部に対する壁の気密化

外部漏水に対する気密化とは、外装材内外に生じる圧力差や漏気を減ずることを目的に、外装材・通気層を除くいずれか層を気密に構成することをいう。よって、防露性や漏気負荷低減を目的として設置する気密層と必ずしも合致しなくても良い。しかし、多くの場合、断熱方法との係わりの中で整合化を図っていった方が合理的である。図7.6は、断熱手法との係わりで、外部との気密化になり得る層を整理したものである。

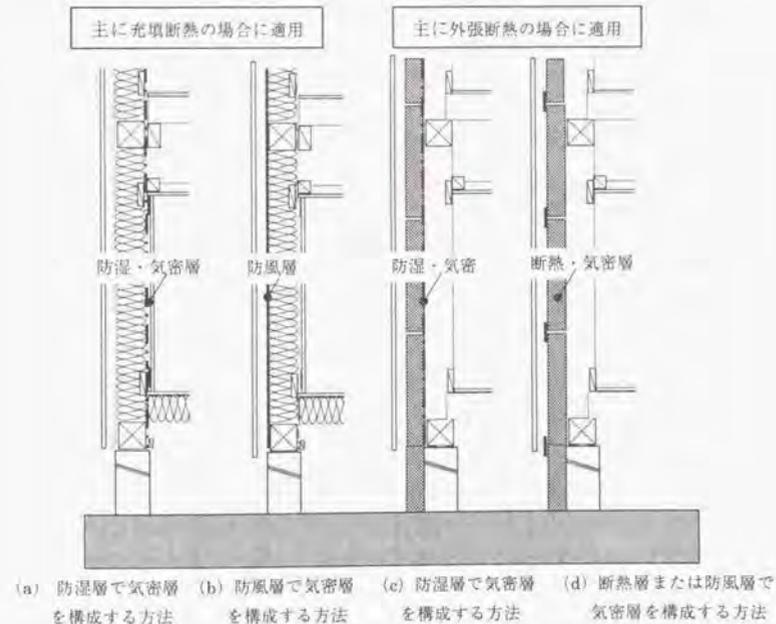


図7.6 外部に対する気密化の考え方

(a)と(b)は充填断熱、(c)と(d)は外張断熱とした場合の気密層の考え方を示す。

(a)と(c)は、充填断熱・外張断熱の別なく、断熱層内側に位置する防湿層によって外気に対する気密を確保する方法で、防露性の確保などから求められる防湿・気密層がその役割を有することになる。従って、防水のために新たに気密層を加える必要は無く、断熱外皮の設計や現場管理上は明解なものとなるため、繊維系断熱材を用いた断熱手法では、外部防水に対する壁内気密化の方法として最も汎用的な方法である。

(b)は、断熱材外側に位置する防風層を外気に対して気密化する方法で、防風層を必要とする繊維系断熱材を用いた断熱手法に適用できるものである。しかし、この断熱手法では、防露の面から防湿層の気密化が求められることから、既に(a)で述べた防水上の要件は満たしている。よって、この方法は、組合わせとしてはあり得るものの、余り現実的なものとはいえないだろう。

(d)は、断熱材自身によって、外気に対する気密を確保する方法である。プラスチック系断熱材の外張断熱で断熱相互のジョイント部を気密にシールした場合や、現場発泡断熱材を隙間無く完全に充填した場合に限り適用する方法といっていよう。

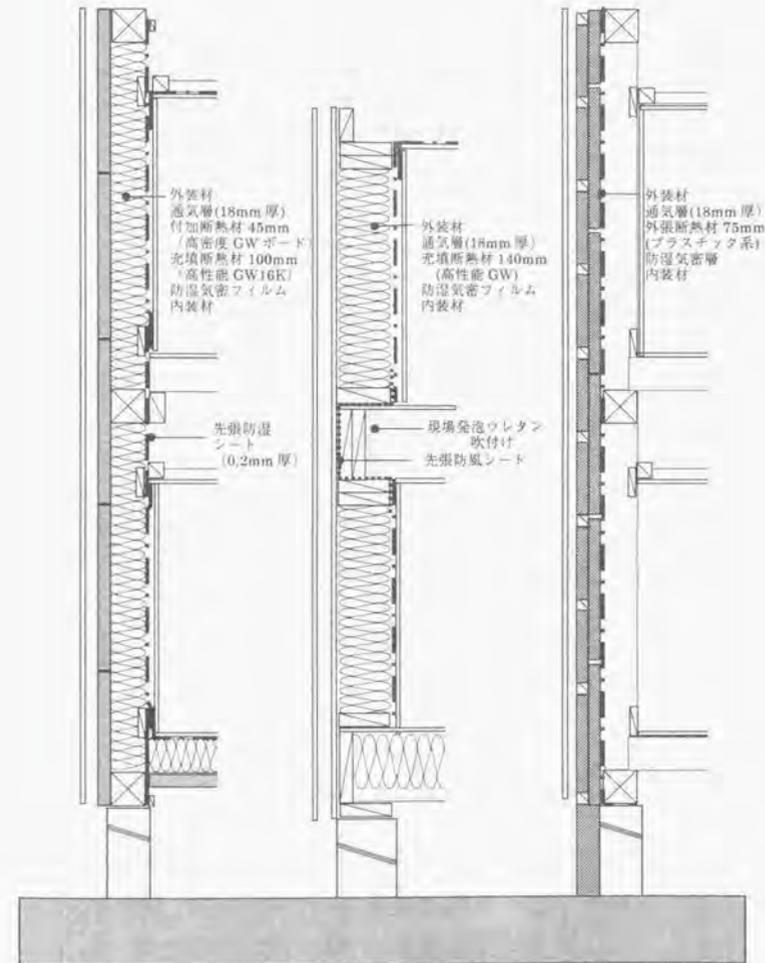
7.2.2 断熱外壁の提案例

7.2.1 で具現化した技術を、一般的な充填断熱と外張断熱の外壁技術として整合化した例を図7.7に示す。

(a)は、充填断熱+付加断熱によって高断熱化に対応した方法である。図は、在来木造工法を想定したもので、充填断熱部は高性能GW16K、GW24Kもしくはロックウールのいずれかを100mm施工し、付加断熱部は高密度GW32K-45mmを6章で提案した専用スベサを用いて構成する。また、断熱層内側の防湿気密フィルム及び先張り防湿シートで、壁内気流を防止し、防露、防水のための気密層を構成したものである。

(b)は、充填断熱厚を増すことで高断熱化に対応する方法を示したもので、枠組壁工法で206工法とした場合を例にしている。充填断熱部には前述した断熱材を140mm施工し、(a)と同様に防湿気密フィルムによって防露、防水のための気密層を構成する。また、まぐさ、側根太部は材厚が計80mmで断熱上の弱点となるため、図では約60mmの室内側空隙に現場発泡ウレタンを吹付けた仕様となっている。透湿性の低い現場発泡ウレタンを用いているのは、断熱材と木材の間での結露防止のためである。これとは別に、側根太やまぐさを室内側に設置した場合は、60mmの空隙は外気側になるので、繊維系断熱ボード材を用いることも可能である。また、側根太部はスリット状の隙間が生じやすいので、漏気防止のため防風シートを先張りしている。防風シートを用いているのは、外壁外側に位置する部分もあり、非透湿材を施工した場合は結露の危険性があるためである。

(c)は、外張断熱によって高断熱化に対応した方法である。外張断熱部にプラスチック系断熱材75mm程度の断熱とすれば、この手法で高性能GW120mm充填断熱以上の性能向上が図れる。防水と漏気防止のための気密層を断熱材内側に設けている。75mm程度の断熱厚さになると、構造材に外壁下地を留め付けるための釘足が長くなるので、通常は断熱材を2層貼りとし、外側の断熱層に木下地を併用する場合が多い。



(a) 充填+付加断熱による方法 在来木造工法の場合 (b) 断熱厚の増加による方法 枠組壁工法 206 工法の場合 (c) 外張断熱による方法

図 7.7 断熱外壁の提案例

7.3 断熱外壁技術の他の断熱部位への応用

ここでは、断熱外壁の設計要件とそれに対応する技術を基にして、他の断熱部位への応用を図る。

図 7.8 は、最も設計要件の多い充填断熱した外壁の設計要件と対応技術が、他の断熱部位にどう対応するかを示したものである。なお、外張断熱は、図 7.7(c)で示した層構成を、屋根などの他の部位にそのまま適用できるため、ここでは詳説しない。

(1) 床断熱への応用

断熱性能の確保に関しては、断熱受けを確実に設け、断熱材内側を床下地材に密着した断熱施工を行うことが重要である。このことに留意すれば、この部位が水平断熱部位で、熱的・気流的にも穏やかな床下に面し、外壁のような外部風の影響が強い部位ではないため、防風層や部位の独立化は、構法的要件には含まれない。

断熱性能の向上に関しては、6章の住宅プランで検討した結果によれば[詳しくは 7-5]、在来木造工法で根太間断熱した場合は、断熱床面積に対して床根太などの構造熱橋面積比率が約 20%、枠組壁工法で根太間断熱した場合は約 13%にもなる。

図 7.9 は、床の高断熱化手法の考え方を示したものである。在来木造工法や、204 材（公

	断熱外皮				
	外壁	床	天井	屋根	間仕切壁
断熱性能	○	○	○	○	○
性能の確保	○	○	○	○	○
性能向上	○	○	○	○	○
内部結露の防止	○	○	○	○	○
外部漏水の防止	○	○	○	○	○
	○	○	○	○	○
	○	○	○	○	○

床下換気 小屋裏換気

図 7.8 断熱外壁の設計要件と対応技術の他の部位への応用

称寸法 40×90mm)を床根太に用いた大引工法の枠組壁工法で、床根太間に断熱する場合は、この数値は、外壁と同様に、高断熱化に際して無視できないオーダーになり得る。

(a) は、前述した工法の場合に、根太下面に熱橋防止と断熱受け材を兼ねたボード状断熱材によって高断熱化を図る方法である。通常、断熱材下面には約 200~300mm 程度のクリアランスが残っているため、根太下面に 20~50mm 程度のボード状断熱材を止め付けることは比較的容易である。また、断熱材は、根太間断熱材の自重を支える程度の簡易な取付けで良い。(b) は、東立床が一般的な本州の寒冷地を主な対象として、構造熱橋面積比率が少ない大引間で断熱することで、性能向上を図ろうとする方法である。(c) は、充填断熱厚を増すことで、断熱部及び構造熱橋部分の断熱性能の向上も同時に図る方法である。(c-1) は寒冷地の枠組壁工法で一般に行われている方法で、208 材 (40mm×185mm)あるいは 210 材 (公称 40mm×235mm)に充填断熱するものである。(c-2)は、床梁間に断熱材を施工して、根太部分の熱橋の断熱補強を兼ねるものである。

断熱層の内部結露の防止に関しては、(3) -1)で示した外壁と同様の考え方となる。ただし、床下空間の結露防止については、床下地盤面からの発湿を抑えるための地盤防湿措置と床下換気の確保が重要であることは言うまでもない。

外部漏水に関しては、この部位では考慮する必要はない。

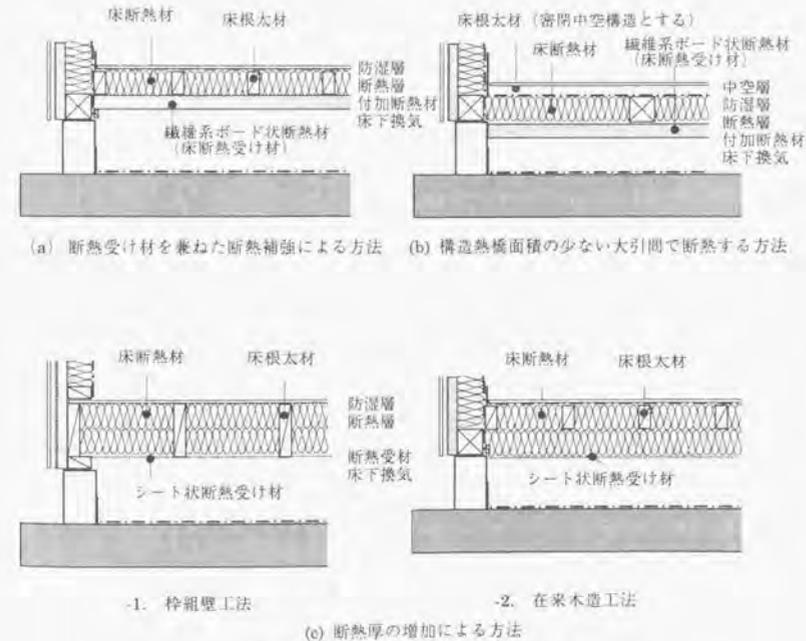


図 7.9 床の層構成と高断熱化の考え方

(2) 天井断熱への応用

断熱性能の確保に関しては、床面と同様に水平断熱部位で、しかも比較的ゆとりのある小屋裏空間に面するため、ブローイング工法による厚い断熱が可能である。

また、天井下地は在来木造工法であれば45mm角、枠組壁工法でも40mm×90mmの木材が使われ、高断熱な住宅では、その材厚より断熱厚が大きく上回るため、熱橋の対策は特に講じなくとも良い(図7-10)。

断熱層の内部結露の防止に関しては、(3)-1)で示した外壁と同様の考え方となる。ただし、小屋裏空間の結露防止への対応は、小屋裏換気が基本となる。小屋裏換気手法に関しては本論Ⅱ部で検討する。

外部漏水は屋根防水が基本であるため、この部位では考慮する必要が無い。

(3) 屋根断熱への応用

屋根断熱は屋根勾配なりの斜めな断熱部位となる場合が多い。そして、断熱厚に合わせて、在来木造工法でも枠組壁工法に使用する208材(40mm×185mm)もしくは210材(40mm×235mm)を屋根たる木に用いて充填断熱することが多い。

断熱性能の確保に関しては、どちらかといえば外壁に近い設置環境となるため、断熱層

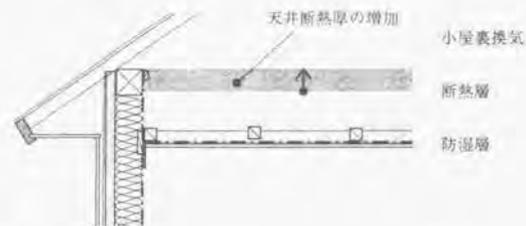
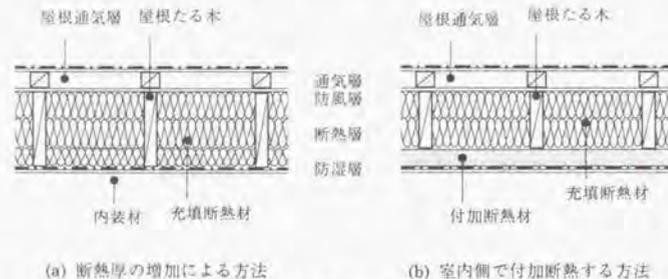


図7-10 天井の層構成と高断熱化の考え方



(a) 断熱厚の増加による方法

(b) 室内側で付加断熱する方法

図7.11 屋根の層構成と高断熱化の考え方

内に気流が生じないように構成とし、防風層を設置するなど外壁に準じる構成とする。

断熱性能の向上に関しては、図7.11に示すように、大きく2通りの考え方がある。前述した住宅プランの検討結果では、断熱屋根面積に対して屋根たる木などの構造熱橋部材が占める割合は約14%程度になる[詳しくは7-5]。屋根たる木は大断面となるから、外壁の206工法よりも熱橋の影響は小さくなる。よって、210材を用いて高断熱化に対応する方法が考えられる。一方で、大断面の屋根たる木を現場で架構することは多くの材工を要することから、比較的軽量な206材或いは208材を用いて、不足分の断熱材をたる木の下面に断熱補強を兼ねて施工する方法も考えられる。

内部結露の防止に関しては、基本的に外壁と同様の考え方となる。ただし、積雪寒冷地における屋根通気層を含めた換気手法については本論Ⅱ部で検討する。

外部漏水の防止に関しては、防水性に優れた屋根材とその下面の防水下地(アスファルトルーフィング17K品)で対応するのが一般であり、断熱層構成上に求められる要件は無いと考えて良い。

(4) 間仕切壁への応用

間仕切壁は云々までもなく非断熱構造部である。しかし、在来木造工法のような壁先行型の構造では、間仕切壁と断熱床、断熱天井などの断熱外皮が取り合う部分は、図7.12(a)に示すような断熱・防湿上の欠損が生じる。この欠損は、間仕切壁内部の壁内気流を生じさせ、住宅の熱損失の増大や表面温度の低下を引き起こす原因ともなる。また、間仕切壁は防湿が施されない部位なので、居室の水蒸気が間仕切壁内を経由して小屋裏や床下に侵入し、これらの空間での結露を生じさせる原因にもなる。よって、間仕切壁の壁内気流を防止し、断熱外皮との取合い部で、断熱・防湿欠損が生じないように対策が必要となる。しかし、その手法は外壁とは必ずしも一致しないので、以下にその考え方を示す。

同図(b)~(d)は、間仕切壁の上下端部の考え方を示したものである。

(b)は、参考例として、枠組壁工法の間仕切壁構造を示したものである。この工法は、壁を上下枠付きのパネルとして組み立てるため、壁内気流は生じない納まりとなる。また、床先行型の工程になることから、断熱床との取合い部における防湿欠損は生じにくい。そして、断熱天井との取合い部も、主体の構造を担う間仕切壁は上端部に先張り防湿シートを施工し天井の防湿層と連続させることで、非構造壁は断熱天井を施工した後に組み立てるため、防湿欠損が生じにくい構成となっている。

(c)は、(b)を参考に在来木造工法の改良手法として示したものである。断熱床と断熱天井の取合い部に、間仕切壁の間柱受け材をあらかじめ設けておき、各部位の防湿工事を行った後に間仕切壁下地を施工する。この方法は、外壁の先張り防湿フィルムによる改良手法とともに、筆者らが1980年代に考案したもののだが、以後、在来木造工法の断熱・気密手法の標準仕様位置付けられている[7-2]。この方法は、間仕切壁下地施工の工程上の変更が伴い、間柱寸法が外壁と間仕切壁では異なるなど、事前の理解が重要である。

(d)は間仕切壁の工法改良を行うのではなく、取り合う床や天井の断熱手法の改良によって、間仕切壁の施工は従来通りに施工する考え方を示している。以下に示す考え方は(d-2)を除いて、まだ一般的なものとはいえないが、(e)がもつ施工上の課題も解決でき、今後の普及を期待したい。

(d-1)は、床の手法改良の例を示したもので、床根太間断熱ではなく大引間断熱とし、床の防湿フィルムを土台・大引上端部に施工してから、間仕切壁下地を施工する方法である。基本的には床先行型のバリエーションの一つではあるが、外壁と間仕切壁の間柱長さは同寸法になるのが特徴である。

(d-2)は、床の改良手法の例を示したもので、床断熱ではなく基礎断熱として床下空間を熱的内側に取り込んでしまい、通気止めの措置をなくす方法である。この方法の場合、(d-1)で前述した点に加えて、従来と同じ工程で施工できる点が特徴である。

(d-3)は、天井の改良手法の例を示したもので、天井断熱の位置を軒桁上面に変更し、最上階天井ふところを熱的内側に取り込んでしまい、通気止めの措置をなくす方法である。考え方としては屋根に外張断熱を適用した場合と同じであるが、屋根外張断熱手法の適用上の問題(7.3.2で後述する)を改善し、様々な屋根勾配や形状にも対応しつつ、間仕切壁で生じる問題を解消できる点に特徴を有する。

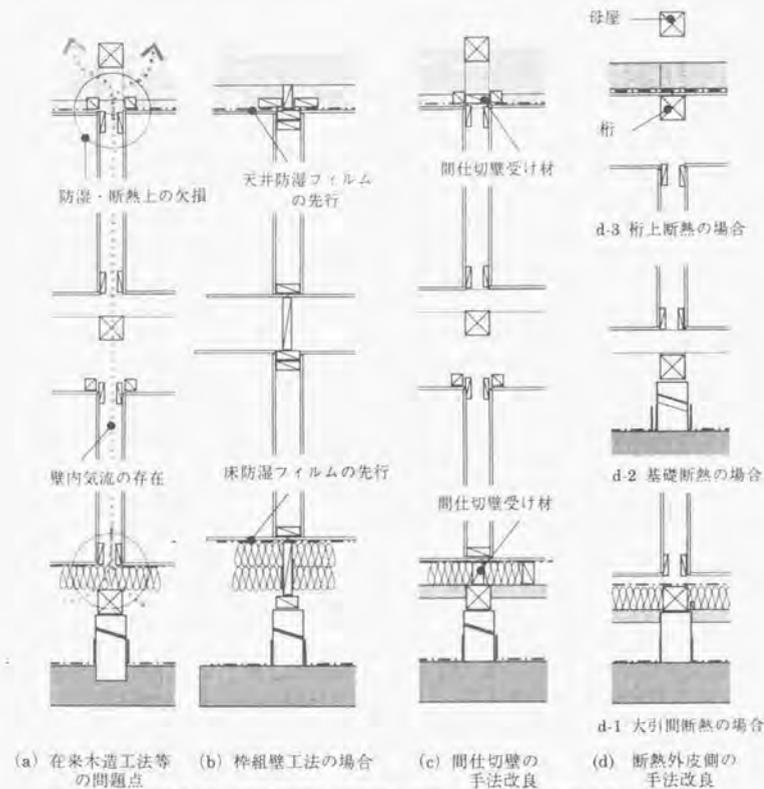


図 7.12 間仕切壁上下端部の断熱・防湿処理の考え方

7.4 断熱外皮デザインへの提案

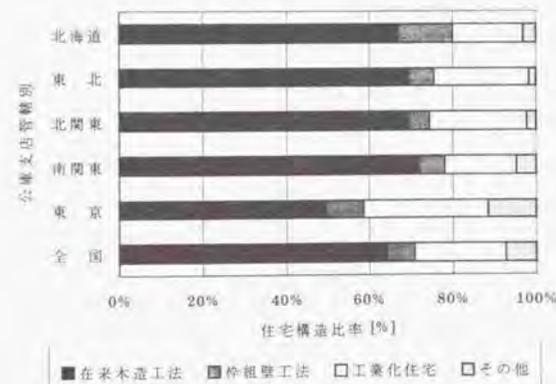
我が国の住宅は、古くは、大半が現場施工を占める在来木造工法が主流を占めていた。戦後、枠組壁工法や工業化住宅など新たな住宅構造が出現し、主に現場生産を主体とした在来木造工法や枠組壁工法と、鉄骨軸組工法、木質パネル化工法、コンクリートプレハブ工法などの工業化住宅などに多様化している。

図 7.13 は、平成 6 年度における住宅金融公庫融資住宅の住宅構造の全国比率と関東以北の支店別比率を示したものである[7-6]。例えば、東京では工業化住宅比率が高く、在来木造工法は 50% を満たないのに対し、北海道を始めとする寒冷地域では今もなお在来木造工法の比率が高いことが伺える。もちろん、最近では、職人の減少や高齢化などさまざまな社会的背景から、在来木造工法や枠組壁工法の中でも、従来通りの施工法の他に、工場生産或いは加工場で製作したパネルを現場で組み込むハーフパネル化工法と呼べるような工法も普及しつつあり、図はこれらの比率も含んだものである。

この比率が示すように、地域で展開する中小工務店では、現場生産を主体としたあるいは一部パネル化部品を持ち込んだ在来木造工法が、依然として主流を占めている。そして、1 章でも論じたように、次代に向けてその体制を持続することも重要である。

7 章で論じてきた、各部位の設計要件と対応技術の具現化は、画一的な手法の推進や仕様規定の延長上にあるのではなく、むしろ、地域に展開する様々な住宅に適応する外皮技術の選択枝を拡張するためにあると考えている。

性能規定化は今後の大きな流れであろう。それは、シミュレーション手法による予測や実験のフィードバックから手法を構築し得る住宅技術者にとっては、手法の選択枝を広げ、



なお、その他には、鉄骨造、RC造、CB造などと不明なものも含む

図 7.13 住宅構造比率 [7-6]

自由な設計を可能にするだろう。しかし、地域で展開する大半の住宅技術者や大工にとっては、シミュレーションや実験は日常のものではなく、自由な設計のためのツールとして活用できるものではないだろう。性能向上のための設計要件を明らかにし、対応技術を具現化して、整合した技術デザインとして示す行為は、前者ではなく、後者への研究者の役割でもあると考えている。

これまでに整理したような断熱技術の基本的考え方は、住宅の生産形態に係わらず、様々な住宅構造に対応することが可能であろう。しかし、ここでは、前述したような観点から、現場生産を主体とした在来木造工法に対象を絞る、繊維系断熱材を用いた充填断熱の場合を基本に据えて、地域に向けた断熱外皮デザインを提案していくこととする。

(1) 代表的な断熱外皮の構成手法の提案

図 7.14 は、いくつかの代表的な断熱外皮の構成パターンを示したものである。

(a) は、充填断熱を前提に構成したもので、現在、最も一般的な断熱手法といえよう。最大の特徴は、躯体内空隙を利用して断熱化を図るため、内外装工事を始めとする他の工事への影響が少ないこと、さらに坪単価契約による大工の賃金体系も相まって、断熱工事に伴うコスト増が現れにくいことなどが挙げられよう。しかし、断熱・耐久性向上を図るには、断熱各部位及び取合い部、横架材を初めとする各構造材や壁内空隙を利用して施工される設備配管や電気配線、開口部廻りの細部の防湿処理など多くの技術的対応が求められる。

(b) は、外張断熱の特性を述べるために参考として示したものである。最大の特徴は、充填断熱に求められる技術的対応の殆どを行わなくて済み、現場の熟練性によらず安定した性能を確保できることである。しかし、充填断熱材よりも材料が高価で、ボードの貼り手間は新たな工事項目として加算され、コスト増に繋がりがやすすぎが問題として挙げられる。さらに、プラスチック系断熱材は可燃性材料であることや、外壁厚さが増えることで、住宅密集地への適用には難があるのも現状である。また、傾斜屋根への適用は、高所作業時の安全性や、屋根たる木が 2 重に必要となることによる施工手間の増大、施工可能な断熱厚さの制約、軒の出が大きい住宅での下地構成に工夫を要することなどの問題がある。このような点からは、7.3.1(4)で提案したような桁上断熱は、外張断熱の断熱施工上の有意性を保ちつつ、これらの問題を解消しうる手法といえよう。

住宅現場では、大きくは、充填断熱か外張断熱を適用するかの二者択一式な選択が一般的である。それは、各部位とも同じ考え方を採用することで、大工や技術者の理解を早め、施工上の混乱を避けることに重きを置いているためであろう。そして、外張断熱は、どちらかと言えば断熱建材メーカー主導型の技術普及のため、他の断熱手法と複合することは、現場の選択枝にはなりにくかったことも一因と考えられる。しかし、各断熱手法には、部位に応じて施工上留意すべき点があり、部位に応じて選択し、それぞれの適用上の特性を最大限生かすことを考えると、今までにない新たな断熱外皮の構成手法も浮かび上がってくる。

以上のことから、(c) と (d) は、充填断熱をベースに、それぞれの目的から外張断熱と混成した断熱パターンを提案したものである。

(c) は、充填断熱とした場合に多くの技術改善が必要な外壁は外張断熱とし、外張断熱では多くの手間を要する屋根を天井断熱とする方法である。この方法は、外壁に要する断熱工事の大幅な省力化と、様々な屋根形態に対応するフレキシビリティを合わせ有するのが特徴といえる。図では、下屋部分は屋根外張断熱を適用しているが、これは、充填断熱とした場合の 2 階下がり壁と天井との取合い部における断熱施工の省力化を図ることを目的としたもので、特に断熱施工が難しい和室天井が 1 階にある場合は有効と思われる。なお、この場合、基礎断熱と床断熱のいずれも適用可能である。

(d) は、外壁は一般的な充填断熱とし、屋根は外張断熱とするか、もしくは天井面は外張断熱の特性と屋根構法上のフレキシビリティを併せ持つ桁上断熱を適用する方法である。基礎断熱と併用することで、床下・天井ふところが熱的には内側となるため、間仕切壁や天井、床面の技術的対応が不要になるのが特徴といえる。

(2) 充填断熱手法の断熱外皮デザインの提案

現場生産を前提とした在来木造住宅における性能向上技術の導入に際しては、次の条件が求められるよう。

- 1) 現場において、工程上の大きな変化が伴わないこと。
- 2) 特殊な加工技術を要しないこと。
- 3) 地方でも入手可能な材料で、かつ汎用的な材料で構成されていること。
- 4) 一般的な大工の技術レベルで実現可能であること。
- 5) 手法に明解性があること。
- 6) 許容できるコスト増の中で実現可能なこと。

そこで、図 7.15 は、新技术導入の条件である 1)~6) を考慮しつつ、実現性のある断熱外皮技術として具体的な提案を試みたものである。

その詳細は図中に示すこととし、ここでは詳説しない。

I 部で検討してきたように、外壁及び他の断熱部位の設計要件を明らかにし、いくつかの代表的な手法を提示することにより、住宅技術者は様々な応用展開を図ることが可能になる。筆者が考える研究者と住宅技術者の役割・分担は、そこにあると考えている。

住宅外皮には、I 部で検討した性能項目の他にも、例えば、構造安全性や防火性など、多くの性能向上が求められる、それらとの整合を図ることも重要である。本論では、そのうち、断熱化に伴う技術の整合化を論じたものである。

冒頭にも述べたように、既往の研究や新たな研究によって得られた多くの知見を学び、さらに整合化された外皮技術のデザインへの研究に取り組んでいくのが、今後の筆者の方向と考えている。

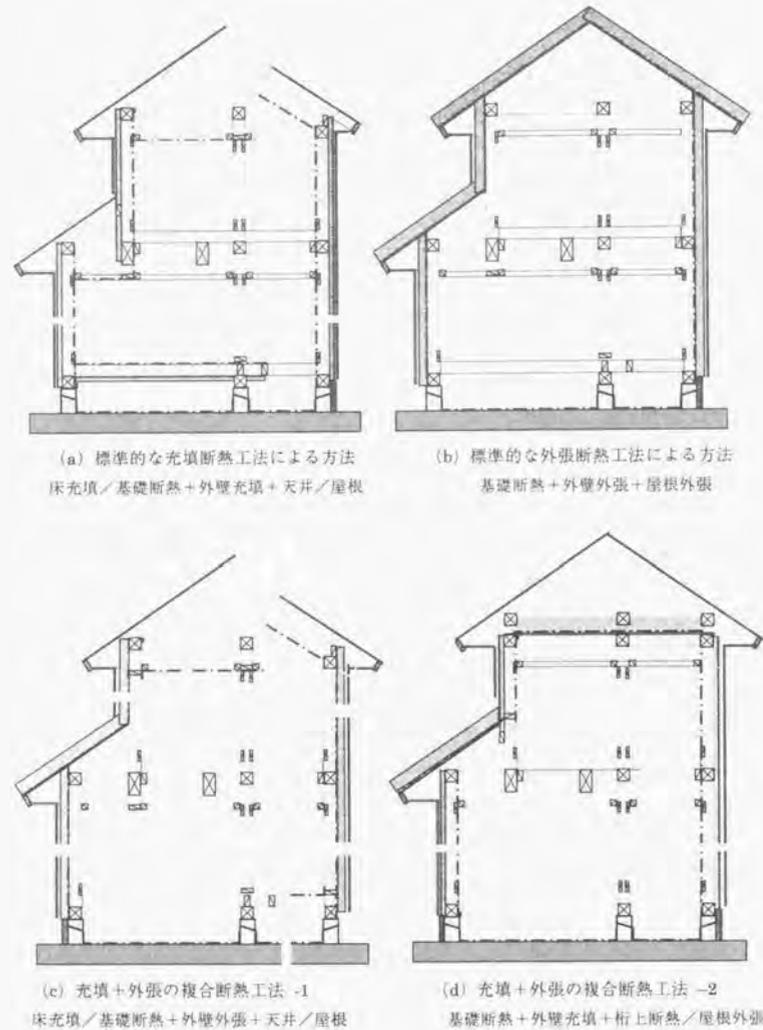
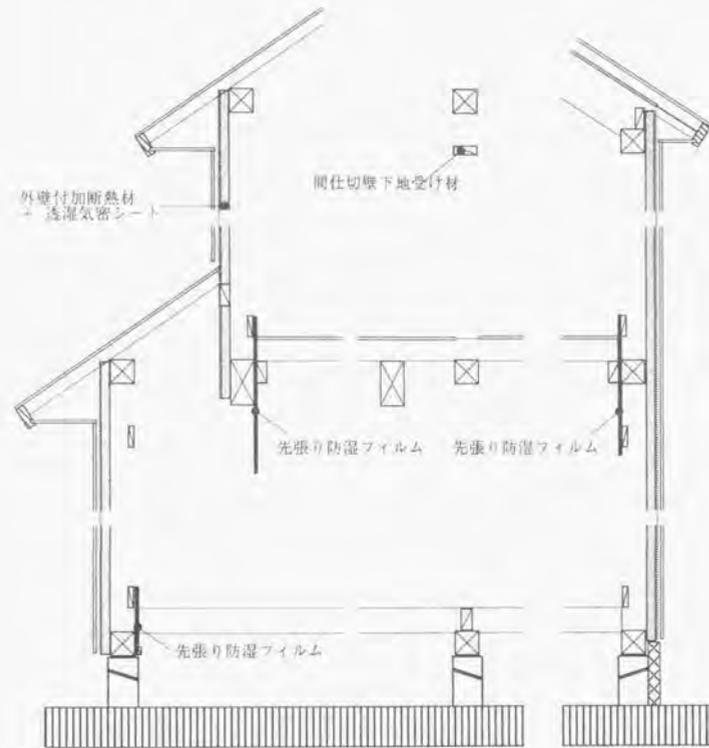


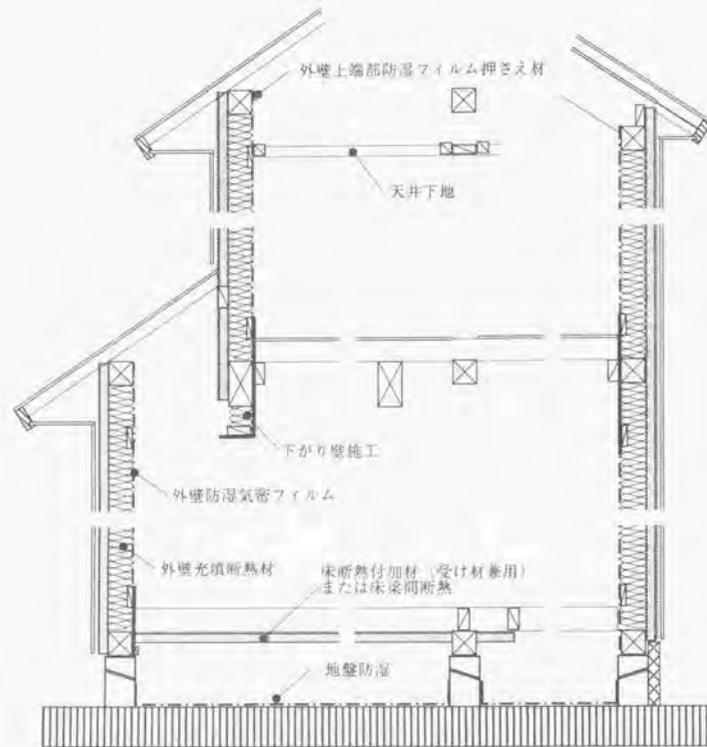
図 7.14 断熱外皮の構成パターン



主な工程と施工上の特徴

- ① 基礎打設後、建て方、屋根材の施工
- ② 中間階床（2階）と取り合う外壁部分に幅 700mm 程度の先張り防湿フィルムを施工
- ③ 最下階床（1階）と取り合う外壁部分に幅 300mm 程度の先張り防湿フィルムを施工
（但し、基礎断熱とする場合は必ずしも必要ない）
- ④ 外壁間柱材の施工
- ⑤ 外壁付加断熱材の施工
- ⑥ 外壁通気層（胴縁材）の施工
- ⑦ 外装材の施工

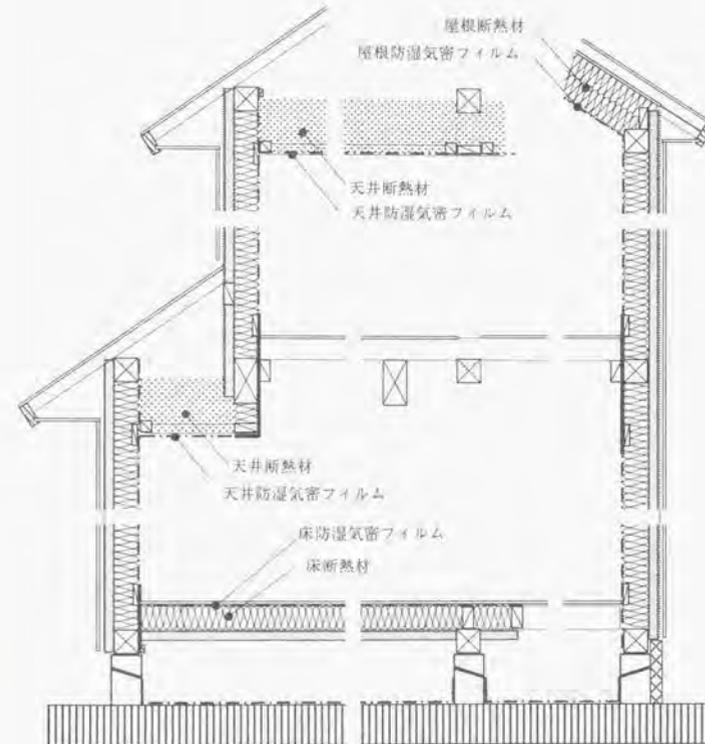
(a) 工程 -1 建て方から外壁材の施工まで
図 7.15 在来木造工法・充填断熱の工程



主な工程と施工上の特徴

- ① 地盤防湿施工
- ② 最下階床の断熱の受け材(付加断熱と兼用)または床梁・大引間に断熱材を施工
- ③ 中間階床の床合板を施工
- ④ 外壁の充填断熱材の施工
- ⑤ F屋部分の下がり壁下地と断熱施工

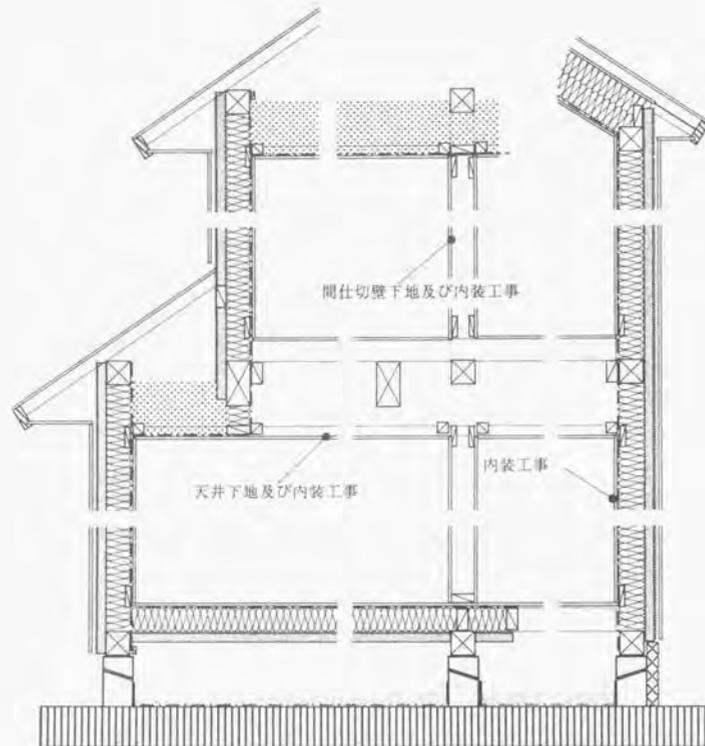
(b) 工程-2 外壁断熱・防湿施工、地盤防湿、床断熱付加材施工まで
図 7.15 在来木造工法・充填断熱の工程



主な工程と施工上の特徴

- ① 最下階床の断熱材の施工と防湿フィルムの施工
- ② 最下階の床合板の施工
- ③ 最上階天井及び1階下屋部分の天井の防湿フィルム施工
(屋根断熱の場合は、屋根断熱材の施工)
- ④ ③の部分の吹込み断熱材の施工
(屋根断熱の場合は、屋根の防湿フィルムの施工)

(c) 工程-3 天井/屋根と床断熱・防湿施工まで
図 7.15 在来木造工法・充填断熱の工程



主な工程と施工上の特徴

- ① 間仕切壁の間柱施工
- ② 内装材下地の施工

(d) 工程 -4 間仕切壁下地の施工と内装下地材の施工

図 7.15 在来木造工法・充填断熱の工程

[参考・引用文献]

- 7-1 鎌田紀彦、鈴木大隆：寒地における木造住宅の構法改良に関する研究，室蘭工業大学研究報告理工編，第 36 号，1986.11
鎌田紀彦・鈴木大隆ほか：北海道・東北の在来木造住宅の高断熱化及びその温熱環境に関する研究（その 1. 在来木造住宅の高断熱化・高気密化構法について），日本建築学会東北支部研究発表会，1988.6
鎌田紀彦・鈴木大隆：寒冷地における高断熱・高気密住宅の温度環境実測結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，1989 年 10 月，
林康治・鈴木大隆ほか：改良木造構法による実験住宅の温度環境に関する研究（その 1 基礎断熱構法住宅の測定結果とその検討），日本建築学会大会学術講演梗概集 1990.10 など
鎌田紀彦、鈴木大隆：高断熱住宅の暖房方式と温熱環境実測結果，日本建築学会計画系論文報告集 投稿中
- 7-2 建設省告示 第 415 号 住宅に係わるエネルギーの使用の合理化に関する設計及び施工の指針，1992.2
- 7-3 次世代省エネルギー基準（案）設計施工指針，1998.2
- 7-4 日本工業規格 住宅用プラスチック系防湿フィルム JIS A 6930-1997，日本工業規格協会，1997.12
- 7-5 (財)住宅・建築・省エネルギー機構，住宅の次世代省エネルギー技術基準の策定検討調査報告書 第 2 章（筆者担当），1997.2
鈴木大隆・大澤元毅ほか：断熱住宅の構造熱橋が各部位の貫流熱量に及ぼす影響について，日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学，1996.9
- 7-6 住宅金融公庫：住宅・建築主要データ調査報告-戸建住宅編-（平成 4 年度），1995.6

II部

屋根の積雪障害防止に関する研究

屋根デザインへの提案

住宅屋根の変遷と 研究の基本方針

8.1 はじめに 一住宅屋根の変遷一

日本の北部・東北部の冬は、北方圏諸国の都市圏とはほぼ同様に寒冷だが、居住地域に多量の降雪があることが特徴的であり、生活域で比べれば世界で有数の多雪地域ともいえる(図 8.1)。最深積雪が 1,000mm を越える地域に多くの都市・町・村が存在し、そこには約 900 万人を越える人の暮らしと年間約 10 万戸以上の新築住宅が建設されている。そして、我が国では、1960 年代からの急速な経済成長によって宅地開発は盛んとなったが、この頃から土地価格が上昇し、宅地の狭小化傾向は現在も続いている。それは、東京を初めとする大都市圏ばかりでなく、積雪寒冷な地も例外では無い。

住宅屋根の積雪への対応は、暖地からの緩勾配屋根を源流としながらも、気候風土、住様式の変化に伴う住宅形状の変化、屋根材の開発、そして宅地面積の狭小化などの社会的背景によって、屋根面積積雪処理の対応方法にさまざまなバリエーションが生まれ、短期間に急速な変貌を遂げ、その工法や形状も多様化している。

8 章では、冒頭で最も急激な変遷を遂げている北海道の住宅屋根の変遷に触れ、断熱化に伴う積雪への対応の中で何が問題として浮かび上がってきたかを述べ、環境や地域への対応に向けて II 部で行う検討の基本方針を示す。

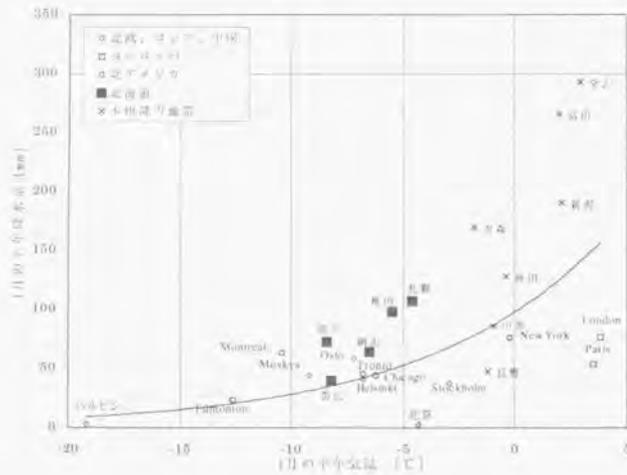


図 8.1 北方圏諸国の気候特性 (外気温と降水量) [8-1]

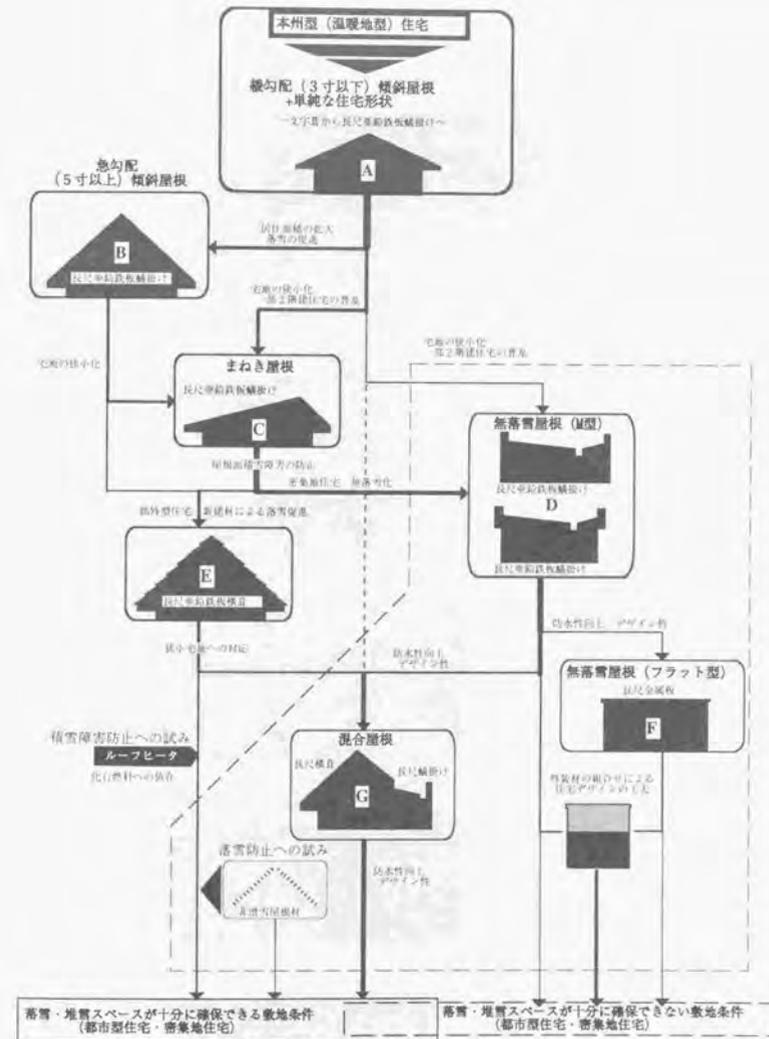


図 8.2 積雪寒冷地 (北海道) における住宅屋根の変遷

(1) 垂鉛鉄板による本州型緩勾配屋根から急勾配屋根へ

北海道の住宅屋根は、入植時に本州型の伝統的な屋根が持ち込まれてから、比較的長い間 2~3 寸勾配程度の緩勾配屋根が主流であった。もちろん、滑雪抵抗の大きい瓦屋根等の材料は、かなり早い段階から垂鉛鉄板の一字葺きなどに代替されたが、屋根材料の違いを除いては殆ど相違はなかったといえよう (図 8.2 中 A)。

そして、1960 年代になって、蟻掛け垂鉛長尺鉄板の開発と当時の寒地住宅デザインの象徴ともいえる公社型ブロック造三角屋根住宅の開発により、この頃から北海道の住宅では急勾配三角屋根(45°勾配屋根)が主流となる (図中 B)。公社型三角屋根住宅とは、平屋建のブロック構造に急勾配な木造屋根を架構し、その小屋裏空の居室への転用を図ったもので、コンパクトな家作りと居住空間の拡大を両立する意図から生まれたものであった。この住宅は、当時の寒地住宅のプロトタイプになり、急速に普及した (写真 8.1)。

そして屋根形状は、雪処理の観点からは、速やかな落雪を促すことで、氷柱など寒冷期における住宅屋根面での障害を防止するという考え方に基づいたものであった。

(2) 住宅の暖房化や宅地狭小化と新たな屋根形状の出現

住宅の断熱化は住宅内の暖房化を促し、住空間の室温が上昇するにつれて、小屋裏温度が上昇し、寒期には軒先に大量の水柱が生じたり (写真 8.2)、水柱が次第に氷提になり、融雪水が停留して、水圧によってハゼ部分から漏水が生じる 'すがもり' (図 8.3) などの障害が顕在化した。また、屋根面積雪の屋根材蟻掛け部分への凍着が起り、速やかな落雪が損なわれ、寒さが緩んだ時に多量の落雪が生じるようなケースが多く見られるようになる (写真 8.3)。

そして、宅地狭小化が進んだことによって、多量の落雪が自地では処理しきれず隣地に及ぶようになり、落雪問題は急速にクローズアップされるようになった。

このような背景から、急勾配屋根は、緩・急勾配を併用した 'まねき屋根' という北海道独自の屋根が出現し、密集住宅地を中心に急速に普及することとなる (図中 C、写真 8.4)。この屋根は、南側は自地や下屋部分への多量な落雪が生じないよう更に急勾配 (60~70°) として落雪を促し、北側は落雪事故の防止のために 3 寸程度の緩勾配として、落雪させないようにする意図 (以下、このことを落雪に対して載雪と称することにする。) があった。これは、宅地狭小化に伴う落雪障害を主眼に、地場の工務店レベルで自然発生



写真 8.1 蟻掛け鉄板による急勾配屋根 (公社型三角屋根住宅)



写真 8.2 軒先部の水柱などの障害の例

写真 8.3 落雪障害の例

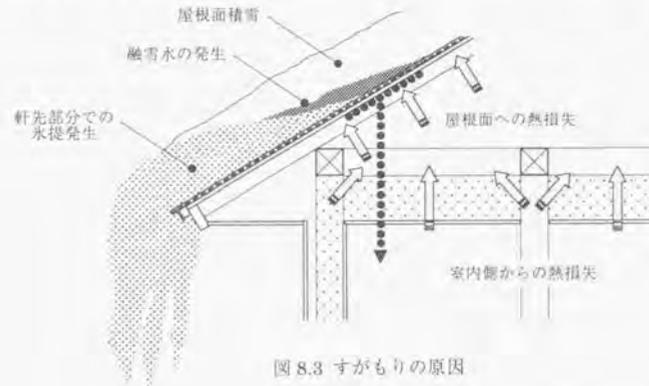


図 8.3 すがもりの原因



写真 8.4 蟻掛け鉄板によるまねき屋根

的に現れたものであった。しかし、天井の断熱性能の不足や小屋裏換気の不足、蟻掛け部分の屋根面滑雪抵抗が大きいこと[8-2]などの原因が重なり、緩勾配部分では屋根面積雪の凍着・融雪の繰り返しによって、氷柱、氷提、すがもりなどの障害が生じたり、従来より多量の落雪が生じるなどの屋根面積雪障害が顕在化した。

一方、この頃、住宅地への傾斜屋根の適用に関して、対処法的に、行政が雪止め金物や防雪柵の設置要綱を作り指導したことは、さらに多くの問題を引き起こす原因となった。例えば、蟻掛け鉄板の縦ハゼ部分に取り付ける雪止め金物(写真 8.5)は、雪がずり落ちようとする力はハゼに集中してかかることとなり、ハゼの損傷を生じさせ、漏水の原因にもなった。また、固定強度の弱い雪止め金物は、大量の積雪には対抗しきれず、留め付けがはずれ大量の落雪事故をしばしば生じさせた。また、すがもりや氷提は、雪止めの無い状態より多く発生する場合もあった。防雪柵も、軒先ざりざりの所に設置するケースが多く、同じような問題が生じた(写真 8.5)。そして、雪止め金物が無い屋根でも、経時によって屋根塗膜面の劣化が進んで滑雪性が低下し[8-3]、屋根面に積雪が生じ、凍着と融雪の繰り返しによって類似する問題は数多く見られた。

いずれの勾配屋根や雪止めの対処策をとっても類似して見られたものは、外装材の汚損である。すなわち、外気が高温の時は、屋根面で生じた融雪水は、軒先から直接外壁面を伝わり流下したり地面や下屋から跳ね返って外壁を濡らし汚したり、乾式・湿式に問わず多孔質な外装材にしみ込んだ水分は、凍結融解によって著しい汚損を生じさせる原因ともなった(写真 8.4)。もちろん、これらの凍害によって外装材の防水性が低下するため、時には構造体内に浸入した水分は構造耐久性をも脅かす原因にもなり得た。

(3) 無落雪屋根の開発

1970 年前後から、高度経済成長時代の到来で宅地の狭小化に一層拍車がかかり落雪スペースが確保できなくなったことや排雪作業の軽減、落雪勾配屋根特有の様々な障害の解消のため、'M型無落雪屋根+内樋形式'が開発され、密集住宅地を中心として急速に普及する(図中 D、写真 8.6)。この屋根は、載雪により屋根雪を処理するものであり、融雪水や降雨水は屋根面に設けられた内樋で集水し、建物内部に設置した縦樋を經由して公共排水管や排水溝に処理するもので、無落雪屋根と呼ばれた。

普及当初は、積雪荷重による構造変形、降水に対して内樋部分やパラペット周りの防水処理が不適切で漏水事故等の問題が発生した。さらに、縦樋が枯葉や管内凍結によって詰まり、屋根面でオーバーフローして漏水が生じるなどの問題もあった。これらに対しては、北海道立寒地住宅都市研究所による設計施工マニュアル[8-4]が作成され、それに基づき行政指導されたことや、民間の技術開発が進み、かなり改善した。しかし、未だにこれらの問題を耳にすることも少なくないのが現状である。

いずれにしても M 型無落雪屋根は、都市部の密集住宅地のみならず敷地にゆとりのある農村地帯にも広く普及し、北海道の住宅屋根の主流ともなっている。そしてこの屋根が高いパラペットを必要とし、デザイン上トップヘビーなることを解消するためか、はちまきタイプのものなどパラペット周りに様々な装飾を施したデザイン手法が開発された(写真 8.7、8.8)。いずれも装飾に傾倒しすぎ、外観意匠として好ましいものかは疑問が多い。

そして、降水、融雪水を内樋と内勾配で処理するこの屋根工法は、耐久上多くの問題を抱えていると筆者は感じている。



写真 8.5 屋根面の雪止め金物



写真 8.6 M型無落雪屋根の障害例



写真 8.7 パラペット周りの処理例 1



写真 8.8 パラペット周りの処理例 2

(4) 屋根工法の多様化

1980年頃から、大きく3種の屋根形状が加わる。

一つ目は、意匠性・滑雪性などの向上を目的に、5寸勾配以上への適用を前提に開発された長尺亜鉛鉄板の横葺材によって、敷地寸法にゆとりのある住宅屋根形状に大きな変化が現れる。それは、公社型三角屋根のように桁方向に屋根を架構する手法では無く、開口方向に急勾配屋根を架構した手法で、北欧の住宅によく用いられる急勾配屋根である(図中 E、写真 8.9)。構造的にも短手スパンで架構するこの屋根形状は、水処理に対して信頼性が高く、構造コスト面でも合理性に優れ、外観意匠性も向上することが、普及の原動力であったといえるだろう。

二つ目は、従前の無落雪屋根の課題でもあった屋根材継目部の防水信頼性を高めた各種屋根材の登場は、M型屋根に加えて‘フラット屋根’というバリエーションを生み出す(図中 F)。これは、パラベット、内樋・縦樋を無くし、1/100程度の僅かな水勾配を外周に向けて確保するもので、M型無落雪屋根が抱える防水、外観意匠上の問題のいくつかを解消するものであった。普及当初は都市圏に建つプレハブ系住宅を中心として、やがて多くの住宅に取り入れられた。後に外壁材の意匠上の工夫によってトップヘビー感も薄れ、現在ではM型屋根より多く普及している手法となっている(写真 8.10)。基本的に雪処理に対しては載雪し、風によって屋根雪を吹き飛ばす考え方だが、屋根雪が住宅からの熱損失や外気温、日射によって融けて比重を増し、巻垂れが生じて落雪障害を引き起こすことも少なくない(写真 8.11)。

三つ目は、特に狭小宅地で用いられる方法だが、落雪・堆雪スペースが確保できる方位は前述した横葺き屋根材による急勾配屋根とし、その他はM型無落雪屋根とするような混合屋根である(図中 G、写真 8.12)。この屋根形状が最近の新築住宅で最も多い形態といっても良いだろう。

1990年以降は、新たな屋根材の開発や融雪装置の開発によって、敷地寸法と屋根形状が直接関係しないような設計も可能となってきている。

例えば、まだその普及率は多いとは云えないが、ハゼを大きく立ち上げたり屋根材表面を非滑雪処理した金属製屋根材の登場は、M型無落雪屋根やフラット屋根や載雪化を図った急勾配屋根などに使われ始めている。この屋根材は、点で受ける雪止め金物とは異なり、雪止めの信頼性ははるかに高く、急勾配屋根を密集住宅地にも適用拡大させる可能性を有している(写真 8.13)。しかし、実際の適用では、材料を張り替えただけの対処に留まっているため、屋根面積積雪の融雪・凍着によって、巻垂れや従前の傾斜屋根に見られた障害が生じるケースも少なくない。

また、傾斜屋根の軒先に生じる氷柱や巻垂れの対処策として、軒先に深夜電力を利用した低電力型ヒーターを設置し融雪する方法も市場展開している(写真 8.14)。しかし、年間の住宅暖房用エネルギー消費量にも匹敵するエネルギーを使用するこのシステムが、地球環境時代に向けて抱えている問題は多い。

これまで述べてきたように、従前は敷地条件が積雪寒冷地の住宅屋根を決定する際の主要因であり、屋根工法や屋根材の開発によって、多くの屋根形状が展開してきた。そして近年の新技术によって、積雪地の住宅屋根は一層多様化の方向に向かっているのは間違いないだろう。



写真 8.9 横葺屋根材を用いた急勾配屋根(筆者らの設計、建設地:北海道虻田町)



写真 8.10 フラット屋根



写真 8.11 フラット屋根軒先の巻垂れの発生



写真 8.12 混合屋根（勾配屋根+無落雪屋根）



写真 8.13 非滑雪屋根材の一例



写真 8.14 ルーフヒータ施工例

8.2 住宅屋根をめぐる課題と研究の基本方針

8.2.1 住宅屋根をめぐる課題

北海道における住宅屋根と雪処理方法の現状については、筆者も参加している日本建築学会北海道支部北方系住宅専門委員会（主査 荒谷登）と住宅金融公庫北海道支店が行った共同調査[8-5]が詳しい。平成3年度に建設された新築住宅759戸を対象に行った調査によると、表8.1のように整理される。

すなわち、多雪地域においては、宅地狭小化の進む札幌圏では無落雪屋根（M型及びフラット型）が65%と大部分を占め、一部無落雪屋根を併用した混合屋根も含めると8割近くが無落雪屋根に指向していることがわかる。また、帯広圏では65%、旭川圏でも50%を越えており、宅地狭小化が進む中で、この傾向は更に進んでいると推測される。

また、比較的少雪な釧路・北見・網走地方では、傾斜屋根が主流を占めるが、行政指導などによって雪止め金物の設置された住宅がこのうちの約半数を占めている。以上のことから、全道的に見ても、屋根形状に関わりなく無落雪化が進んでいることが伺える。

ここで、各屋根形式の特徴や問題点を表8.2に示す。

傾斜屋根は、降水や融雪水の処理に関して長期的信頼性が高いのが特徴である。しかし、積雪期への対応としては、雪止め金物や防雪柵によって落雪事故を防止し、これらの対処策の有無に係わらず発生する屋根面積雪障害に対しては、雪下ろし等の自動的な対応に依存しているのが現状である。この屋根の課題を整理すると次のようになる。

- ・ 垂鉛鉄板の縦置きとした場合は、はげ部分の滑雪抵抗が大きいため、屋根雪が凍着し積雪量が増し、落雪事故や軒先部の氷柱、氷提・すがもりなどの障害が生じる危険性が高い。また、大量の落雪に備えて堆雪スペースを確保しなくてはならないなど、敷地条件上の制約も多い。
- ・ 横置きとした場合は、滑雪抵抗が小さく屋根雪が少量のうちに落雪するため、前者に比べて落雪時の飛距離は小さくなり敷地条件上の制約は減るが、勾配によって凍着や水結障害が生じる危険性は少なくない。
- ・ 雪止め金具を設けることは、必ずしも落雪事故の防止には繋がらない。そして、大量の雪が屋根面に積雪することから、通常の傾斜屋根より軒先部の氷柱・すがもりなどの障害の危険性が増す。
- ・ 融雪装置を併用した場合は、環境保全に向けた省エネルギー化が求められている昨今、自然エネルギーや廃熱の有効利用等による新技術を前提としない限り、この方式を一般住宅への普及解とすべきでは無いだろう。
- ・ また、融雪水の流下は、外壁の凍害・汚損の原因にもなり、それに起因する外壁防水性の低下は、躯体耐久性を低下させる危険性もある。
- ・ 一方、無落雪屋根は、敷地への適合性は良好だが、次のような課題を抱えている。
- ・ M型屋根の場合は、前述したような意匠性の問題の他に、パラペット廻りや内樋廻りのなどの板金材の接点部が多くなり、シーリング材を多用するため、初期の防水性は良好でも、長期的な防水性に不安が多い。それ故、降雨水や屋根面積雪の融雪水による漏水事故は少なくない。

表 8.1 北海道内の住宅屋根形状の概要

	無落雪屋根	混合屋根	勾配屋根		融雪装置 その他
			一般	雪止金物等	
北海道平均	33.5	7.5	45.0	12.9	1.2
市部	37.1	8.2	40.2	-	1.5
郡部	19.2	4.6	53.6	12.6	-
札幌	64.1	12.1	18.2	5.6	-
旭川	46.0	8.0	44.0	2.0	-
苫小牧・室蘭	-	-	29.0	56.0	-
函館	20.5	7.7	64.1	-	7.7
帯広	57.9	7.9	21.0	-	2.6
釧路	3.3	3.3	46.6	46.7	-
北見・網走	6.7	6.6	58.4	33.3	-

無落雪屋根：住宅全体にM型屋根とフラット屋根の住宅
 混合屋根：無落雪屋根と傾斜屋根を併用した住宅
 勾配屋根：一般：雪止金物等を用いず、住宅全体を傾斜屋根とした住宅
 雪止金物等：雪止金物・非滑雪屋根材を使用した住宅
 融雪装置その他：ルーフヒーターを使用した住宅や形状判別不能な住宅

表 8.2 屋根形状の特性と問題点

屋根形状	屋根材	敷地への適合性		雪処理		性能			屋根積雪障害		外壁障害
		住宅地	広潤地	方法	防水性	意匠性	凍害	氷柱	巻垂れ	躯体耐久性	
傾斜屋根	亜鉛鉄板縦書き	×	○	落雪	○	△	●	●	▲	●	
	亜鉛鉄板横書き	△	○	落雪	○	○	▲	▲	▲	●	
	非滑雪屋根材	○	○	無落雪	○	△	●	●	●	●	
無落雪屋根	M型屋根	○		無落雪	△	×	●	-	●	-	
	フラット屋根	○		無落雪	○	△	●	●	●	●	

凡例 ○：適 △：やや不適 ×：不適
 ●：障害が多い ▲：障害がやや多い -：該当しない

・フラット屋根の場合は、ステンレス防水や防水性に富む屋根材を使用し、シーリング箇所が殆ど生じない納めとするため、防水性に優れているが、屋根面積の凍着、軒先での氷積、巻垂れなどの障害が生じる危険性がある。

そして、いずれの屋根の場合も、屋根面の積雪が融雪・再凍結しながらその厚さが増すことは、自然積雪の状態と比べて、屋根の積雪荷重を著しく増加させる。それに対する小屋梁の構造強度が不足し、冬期間、建具や窓が開かなくなったりすることは数多く、まれにはそれに耐えきれずに倒壊事故も引き起こすことさえある。また、筆者が心配するのは、比重の重い雪が屋根面に積雪している場合の地震に対する構造安全性である。幸い、積雪期の大きな地震災害はこれまで起きていないが、設計荷重の1.5倍ほどにもなり得る湿雪の存在が、住宅の構造安全性を大きく低下させる要因になることは多くの論を必要としないであろう。

8.2.2 研究の基本方針

寒冷積雪地における住宅屋根の雪への対応は、長期防水性や意匠性に乏しい無落雪屋根へ、或いは暖房にも勝るとも劣らないほどのエネルギーを浪費する融雪装置へと指向しつつある。一方で傾斜屋根は、時として引き起こす大量落雪や氷結障害、屋根面融雪水による外壁汚損、そして雪と生活の対応の変化から、次第にその姿を消しつつある。

住宅屋根の雪の問題は、これまでも述べてきたように「融ける・凍る」という現象に起因していることが殆どであり、その問題は、様々な住宅性能の低下の原因にもなる。

この問題に対しては、北海道の住宅建設に影響力のある公庫仕様書[8-6]或いは北方型住宅の建設基準やテキスト[例えば 8-7]でも、適切な天井または屋根断熱の確保と適切な小屋裏換気量の確保が重要な暖味な技術的対処と、落雪距離と堆雪空間の確保という暖味な計画的対処の記述と注意喚起に留まっているのが現状である。

そして、適切な断熱と換気の確保に関する住宅技術者の対応の仕方は、断熱性能は、屋根面の積雪障害との関連では無く、省エネルギーや居住空間の室温形成のために求められる断熱性能から決められるのが一般である。そして、小屋裏換気などは、前述の仕様書を判断の目安としている。しかし、この小屋裏換気に関する基準は、小屋裏結露防止と夏期の排熱を目的に、十数年以上も前にアメリカ・ヨーロッパで検討されたもので[8-8]、前提とする断熱・換気・住宅事情が異なるばかりでなく、本論で目的とするような屋根面積積雪障害の防止も含めて検討・設定されたものでもない。

また、土地取得コストを抑えるための分譲宅地の狭小化、建ぺい率ぎりぎりの住宅計画が余儀なくされる状況にあって、十分な堆雪スペースを確保した敷地計画は、この上もなく難しいと云わざるを得ない。

その結果、住宅技術者は屋根雪に対しては、これまでの経験則によって対処しているのが現状であり、ユーザはこの点に関して極めて不確かな住宅を取得する或いは取得せざるを得ない状況にある。

そして、既往の研究では、寒研が行った屋根材・勾配と落雪距離の実験的研究が挙げられる[8-9]が、断熱・換気条件を考慮に入れたものではなく、材料的対処を超えていない。また、小屋裏換気に関しては、温暖地の気候条件下で宮田ら[8-10]、8-11]が冬期の防露性や夏期の排熱、赤坂ら[8-12]、須貝ら[8-13]、赤林ら[8-14]、山本ら[8-15]が夏期の排熱に着目した研究を行っている。これらは、研究目的が異なり、検討のアプローチは大いに参考になるものの、そこから屋根雪障害など積雪寒冷地特有の問題への対応策を見いだすことはできない。

屋根面積積雪障害とそれが引き起こす様々な住宅性能の低下に着目し、その根本となる原因を探り、建築的に対応してこうとする研究は筆者の知る限り皆無である。

この問題に対する研究蓄積の少なさが、住宅屋根の形態や雪への対応の仕方を一層多様なものにし、混迷化させているともいえよう。

本論のI部で提案したような断熱・防湿・気密に優れた住宅では、小屋裏内への水蒸気流入量が大幅に減少するだろうから、断熱気密化によって、防露に必要な小屋裏換気量は少なく済む傾向にある。従って、冬期的小屋裏換気は防露性よりむしろ屋根雪への対応から求められることとなろう。

II部は、断熱住宅における屋根雪の融ける或いは凍る要因と建築的対応を明らかにし、積雪寒冷地にふさわしい屋根デザインを探っていくことを目的とする。

9章では、北海道の天井断熱・屋根断熱の住宅で最も一般的に行われている換気手法を実物大モデル化し、その冬期温度測定などから屋根面積雪時における断熱方式や換気方式の温度特性を把握し、屋根積雪障害防止に向けた判断の指標を導く。

10章では、実測結果を再現し得るシミュレーション手法を検討・確立する。

11章では、数値解析により、断熱・換気条件や住宅密集度・住宅形状等の住宅条件が小屋裏の温度性状に及ぼす影響を比較検討し、屋根面積雪障害の防止に向けた断熱・換気設計に係わる知見を得、設計方法の提案を行う。

そして12章では、II部のまとめとして、積雪寒冷地の屋根設計フローを提案し、構成技術の具現化を図る。そして、最後に、筆者が考える望ましい屋根デザインのImageを示してゆきたい。

[参考・引用文献]

- 8-1 国立天文台編：理科年表 平成8年、1997
- 8-2 伊藤敏幸，苦米地司ほか：屋根雪積雪に及ぼす屋根工法の影響，日本建築学会北海道支部研究報告集 No.67, 1994.3
川上俊一，苦米地司ほか：屋根上積雪の制御に関する研究(その2 各種屋根材の積雪抵抗性)，日本建築学会北海道支部研究報告集 No.67, 1994.3 など多数
- 8-3 伊藤敏幸，苦米地司ほか：屋根材の劣化による積雪性能の変化，日本建築学会北海道支部研究報告集 No.65, 1992.3
- 8-4 北海道立寒地住宅都市研究所：無落雪屋根の設計施工，1982
- 8-5 日本建築学会北海道支部北方系住宅専門委員会：北海道の住宅の地域特性等に関する研究報告書 平成3年度版，1992
- 8-6 住宅金融公庫北海道支店：木造住宅工事共通仕様書（北海道版），1997
- 8-7 北海道：BIS 養成テキスト 北方型住宅の熱環境計画，1997
- 8-8 ARMONK PRESS：Wood Frame House Construction, 1978
- 8-9 北海道立寒地住宅都市研究所：研究普及資料 82-22 「住宅屋根の雪処理」，1982.3
- 8-10 宮田清久，松本 衛：住宅の小屋裏と床下の熱・湿気性状，日本建築学会計画系論文報告集第457号，pp.19-28, 1994.3
- 8-11 宮田清久，松本 衛：小屋裏の熱・湿気性状に関する解析的研究，日本建築学会計画系論文報告集第457号，pp.29-38, 1994.3
- 8-12 赤坂 裕，黒木莊一郎ほか：小屋裏強制換気による排熱効果に関する研究（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集 D, pp.581-582, 1990.10
- 8-13 須貝 高，尾崎明仁ほか：小屋裏換気と断熱通気屋根の遮熱・排熱効果，日本建築学会大会学術講演梗概集 D, pp.59-62, 1995.8
- 8-14 赤林 伸一，坂口 淳ほか：小屋裏の換気性状と温熱環境に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集 D, pp.63-66, 1995.8
- 8-15 山本一伸，本間宏ほか：小屋裏空間の自然換気による日射排除方法 第1報，日本建築学会計画系論文報告集第490号，1996.12
- 8-16 鈴木大隆：寒冷地技術のもたらすもの，新建築 住宅特集 9403, 1994.3

9

実験建物における基本特性の把握

9.1 はじめに

寒冷地では、外壁や床下空間の実測に比べて、断熱された天井や屋根を対象としたものはかなり少ない。筆者の知る限りでは、まだ天井の断熱や防湿が不十分な頃に、福島らが、小屋裏などの結露現象は在来木造工法の壁内通風による水蒸気移動もその一因であることを示した数値解析的な研究[9-1]などがあるのみである。他は、住宅居室の温湿度を測定する際に、参考値的な扱いで小屋裏の測定をしている程度で、8章で述べたような屋根工法の変遷の中で小屋裏温湿度性状を系統的に捉えようとする試みは殆どなかった。

住宅の断熱化によって最も多くの結露障害が現れたのが小屋裏空間である。これまで断熱化や結露防止に向けて、多くの研究が精力的に行われたにも関わらず、断熱天井を対象とした研究が少ないのは、この部位構成が比較的単純で、厚い断熱を施すことが容易であり、既に小屋裏換気が一般化しており、防湿気密の強化を図る手段さえ講じれば対応可能との認識が研究者間にあったためと考えられる。そして、住宅の断熱気密化によって、小屋裏結露が解消し、6章の冒頭にもあるように多くの熱損失比率を有しない断熱天井は、多くの研究者の研究対象では無くなった。

しかし、住宅屋根にまで目を広げると、今なお、積雪期にはつらら・落雪などの屋根雪障害に悩まされ、しかもその対応への検討が十分なされないまま、前章で述べたような多様な対処法に委ねているのが現実である。

積雪寒冷地にふさわしい住宅屋根をイメージしながら、屋根の積雪障害の防止を天井や屋根面での断熱と換気係わりの中でその設計条件を導き出して行くには、まず、実測によって現状の断熱換気方法の特性を捉えることが重要である。

本章は、まず寒冷地において一般的な断熱・換気方式を実験建物で再現し、その相互比較から各手法の基本特性の把握、屋根面積積雪障害の要因などについて実験的に検討・考察するものである。

9.2 実験概要

9.2.1 実験建物と実験モデルの概要

(1) 実験建物の概要

実験は、北海道立寒地住宅都市研究所内にある、間口 4.550mm×長さ 7.280mm の木造 2 階建実験建物の天井面及び屋根面（間口 4.550mm×長さ 3.640mm）で行った。

実験建物の概要を、図 9.1 及び図 9.2 に示す。

実験建物内の温湿度環境は、電気式パネルヒータ 2 台と自作の加湿器をサーモ制御し、冬期実験期間中（概ね 12 月～5 月）は終日 20～22℃前後、湿度 40～50%前後に維持し、概ね生活環境に近い状態を維持した。他の期間は、温湿度の制御は行っていないが、概ね実際の住宅の温湿度に近似した状態で推移している。

(2) 実験モデルの概要

各実験モデルの種類を表 9.1、配置などを図 9.2 に示す。

天井断熱部位は換気方式の異なる 4 タイプ、屋根断熱部位は通気層厚さや換気方式の異なる 7 タイプの実物大モデルを南北面に設置している。

換気方式は、軒天井に換気口を設けた軒天換気タイプと、軒天換気に棟換気口を併用した棟換気併用タイプに分かれる。軒天換気部材は、有効開口面積 $aA=67.75[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ を有する市販軒天専用有孔板（表 9.1※2）と、テープ貼りによって換気面積を約 2/3 まで減少した有孔板の 2 タイプを使用した（以下 2/3 モデルと称す。同表※3）。棟換気部材（同表※1）は、屋根頂部に有効開口面積 $379[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ の市販専用部材を使用した。各換気部材の通気特性を表 10.2、10.3（10 章）に示す。

天井断熱仕様は、GW ブローイング 250mm 厚、屋根断熱仕様は高性能 GW200mm の外側に防風材を兼ねて高密度 GW ボード 32K-15mm とした。いずれも、北海道で一般的になりつつあるレベルといえよう。

また、各モデルの小屋裏空間・通気層や断熱層が、隣接モデルによる熱的影響を受けないように、天井断熱モデルについては、小屋裏内部の境界面に押出法ポリスチレンフォーム 3 種 50mm 厚を施工し、漏気が無いように継目をプチル系気密テープでシールした。また、屋根断熱モデルについては、モデル境界部分に屋根たる木(212"材:38mm×286mm、455mm 間隔)を設置し、漏気防止のため、たる木四周をシーリング材でシールした。

屋根葺きは、北海道で一般的な着色亜鉛鉄板 0.32mm 厚を横葺き仕様とした。野地板には、野地板用合板 12mm 厚を使用した。

9.2.2 測定概要

(1) 測定期間と検討対象期間

1993 年 10 月～1995 年 5 月の間で計測したうち、ここで対象とする検討期間は屋根面に積雪のあった 1994 年 1 月中旬～1995 年 3 月下旬までの約 2 ヶ月半である。

(2) 実験モデルの温度計測、外部環境データの計測

天井・屋根断熱モデル及び外部環境データの測定位置を図 9.1、9.2 中に示す。

各実験モデルの温度は T(CC)型熱電対を用い、室内・外部・小屋裏や通気層内部等の各空気温や各種表面温など計 113 点を 1 時間毎に測定した。水平面日射量は 1 時間毎の積算値、外部風向・風速は 10 分間毎の平均値を測定した。これらの測定は、実験建物の影響を避けるため、約 25m 離れた地盤面高さ 10m の位置で計測している。

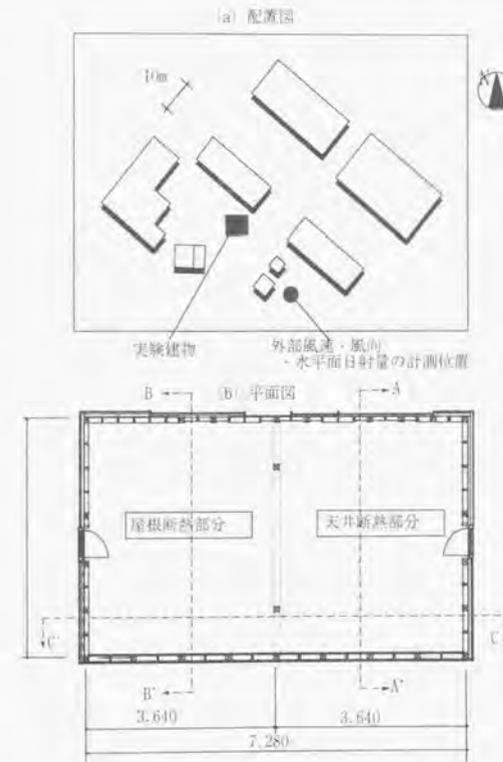
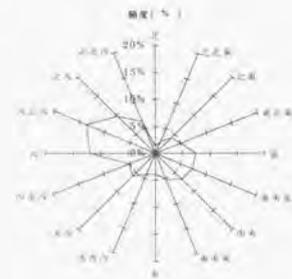
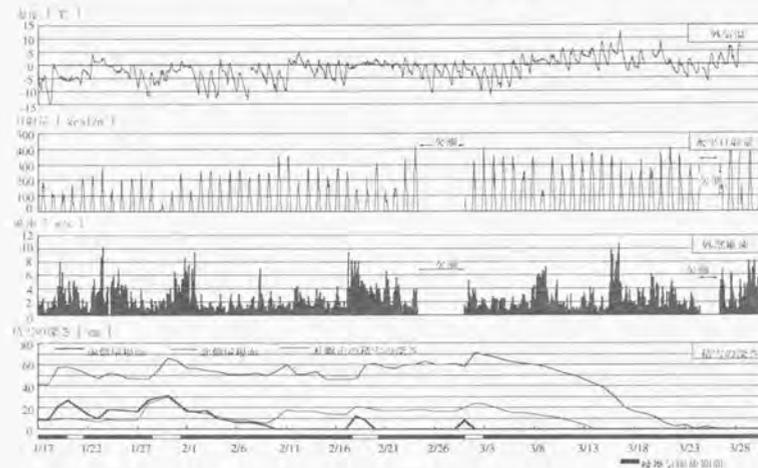


図 9.1 実験建物の概要



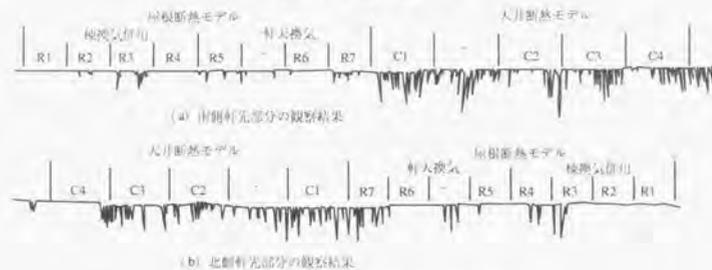
図は、測定期間中における外部風速 1m/sec 以上の風向を対象に、16 方位の発生頻度で示したものである。1m/sec 未満の発生頻度は全体の 30%程度である。

(a) 外部風向の発生頻度



(b) 外気温・水平面日射量・風速・積雪深

図 9.3 外部環境 data



(a) 南側軒先部分の観察結果

(b) 北側軒先部分の観察結果

図 9.4 軒先部分の水結障害観察結果

また、棟換気口が設置された屋根頂部は、多量の降雪時には一時的に雪で塞がってしまう場合もあったが、外部風によって吹き飛んでしまい、殆どの期間、棟換気は開いている状態であった。VTR 観察による棟換気開放期間を図 9.3 (b) に示す。

9.3.2 屋根面積雪期間における温度特性

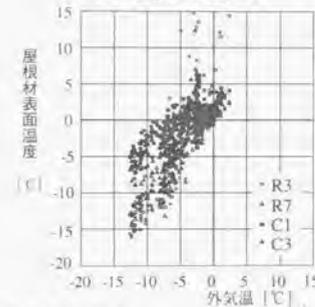
(1) 各層の温度特性

ここでは、屋根面積雪障害の発生因子を探るため、各層の温度特性について検討する。

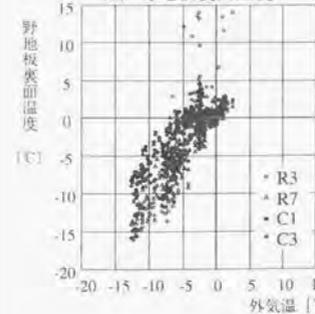
1月下旬に南面で水結障害が発生したモデルの一例として天井断熱 C1・C3 モデルと、水結障害が発生しなかったモデルの一例として屋根断熱(45mm 通気層)R3・R7 モデルを対象に、屋根材表面・野地板裏面・小屋裏温度と外気温との相関を図 9.5 に示す。プロットしたデータは 1月 27日から 1週間分のデータである。

図から、3ヶ所の温度のうち、積雪障害の生じた C1・C3 と生じなかった R3・R7 で最も顕著な差が見られるのは小屋裏・通気層内温度であることがわかる。障害の発生した天井断熱の小屋裏温度と比べて、障害の無い屋根断熱の通気層は外気温との追従性が極めて良く、外気温が 0℃ 以下の場合に通気層温度がプラスとなる頻度が少ない。

(a) 屋根材表面温度



(b) 野地板裏面温度



(c) 小屋裏・通気層温度

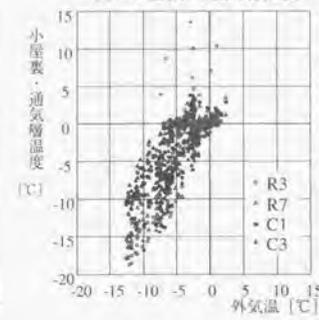


図 9.5 各層の温度と外気温の関係

一方、野地板表面温度や載雪面温度を示している屋根表面温度はわずかな差異しか見られない。これは、屋根面積積雪時においては、雪の熱伝導率・光線透過率が低い（10.2.3に詳述）ため、載雪面での融雪は、積雪上面からの外気温度や日射などの外的要因の影響は小さく、小屋裏・通気層からの供給熱量が支配的になるためと推測できる。

また、載雪面では、外部の影響が少ないことに加えて、融雪が起きている場合には、雪の融点である0℃以上にはなかなか温度上昇し難いため、屋根表面温度・野地板表面温度に差ができていくことを示していると思われる。

よって、屋根面積積雪時の障害発生の有無には、断熱条件や換気条件が大きく係わり、天井断熱では小屋裏温度、屋根断熱では通気層温度が判断の指標になると推測される。

(2) 天井断熱の小屋裏温度について

屋根面積積雪時の小屋裏温度の特性について、以下に述べる。

1) 小屋裏温度の分布

各モデルとも小屋裏内部の温度は、南北軒先付近と中央部の3ヶ所で計測している。

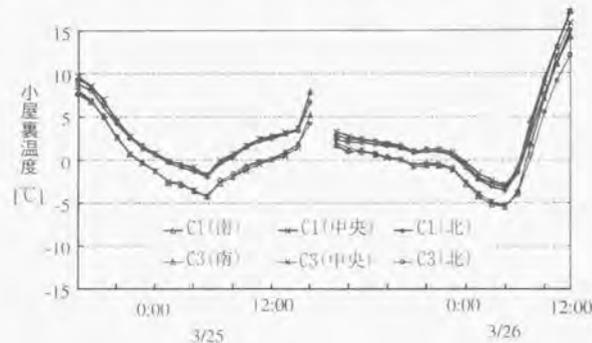


図 9.6 小屋裏温度分布

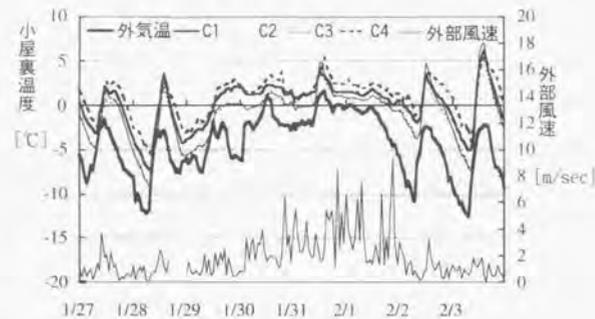


図 9.7 各モデルの小屋裏温度比較

小屋裏空間の温度分布を把握するため、天井断熱 C1・C3 モデルを対象に、約 2 日分の温度変動を図 9.6 に示す。図から、換気方式の違いによらず小屋裏空間内部はほぼ均一な温度性状であり、モデル比較は、いずれか 1 点の温度に着目すれば良いことがわかる。

2) 各モデルの小屋裏温度比較

屋根面積積雪期間中の温度特性について、天井断熱 4 モデルの小屋裏中央部温度の 1 週間分の推移と外部風速を図 9.7 に示す。図から、各モデルの小屋裏温度に違いがあることがわかる。この図では、限られた期間での比較しかできないため、対象期間中の全データを外気温度の昇順に並び替えた結果を図 9.8 に示す。対象とするデータは、南北屋根面とも積雪のあった 526 時間分である。

① 軒天換気モデル

図から、各モデルの小屋裏温度は外気温度との追従性が悪く、外気温度が -5.0°C よりかなり低くならないと小屋裏温度がマイナスにならないことがわかる。このような温度特性が、観察結果でも示した通り、屋根面積積雪時の融雪障害を引き起こす原因であると考えられる。

また、2/3 モデル (C4) の小屋裏温度は、市販有孔板のモデル (C1) に比べて 2~3℃程度高く変動していることがわかる。これは、2/3 モデルの軒天換気面積が小さく小屋裏換気量が少ないことが原因と思われる。

② 棟換気併用モデル

図から、棟換気を併用することにより、軒天換気のみモデルと比べて外気温度との追従性が若干良好になること、C2 と C3 の比較から軒天換気面積の違いによる影響が余りないことがわかる。また、外気温度が -5°C 程度以下になれば、小屋裏温度が概ねマイナスに保たれることがわかる。

以上の測定結果は、棟換気併用による小屋裏換気の促進効果を示しているといえよう。しかし、観察結果でも示した通り、棟換気を併用しても融雪障害が発生しており、設定モデルでは小屋裏換気量が不足していると思われる。

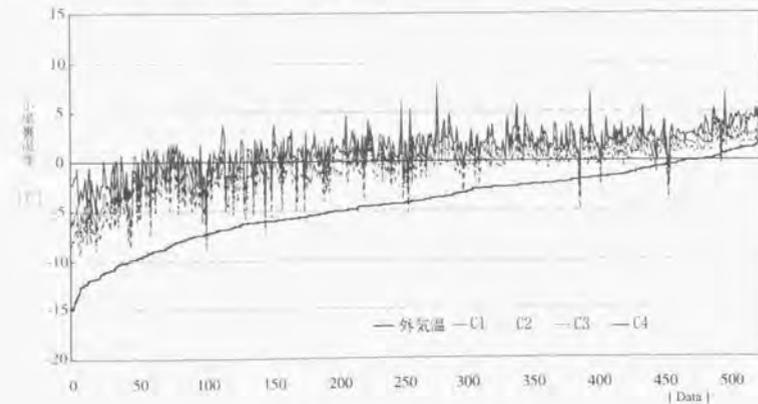


図 9.8 各モデルの小屋裏温度比較

(3) 屋根断熱モデルの通気層温度

屋根面積雪時の通気層温度の特性について、以下に述べる。

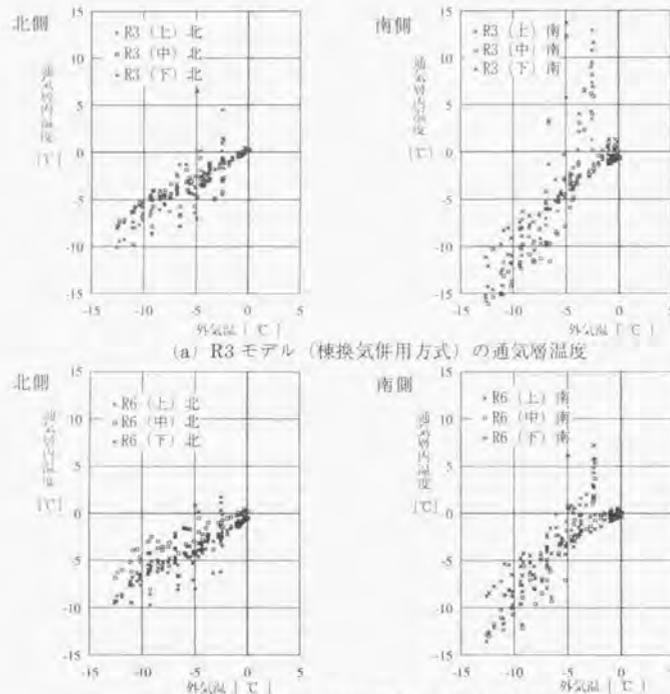
1) 通気層温度の分布

屋根断熱の通気層内温度は、南北面上中下部の6点で計測している。

通気層温度の分布を把握するため、屋根断熱で棟換気併用モデル (R3) と軒天換気モデル (R6) の各部通気層温度を図 9.9 に示す。

北側の通気層温度は、上中下部の温度差は小さく、R3 と R6 の差異も殆ど無く、外気温との追従性が比較的良好である。しかし、南側の通気層温度は、R6 と比べて R3 は外気温が -5℃ 以上及び -10℃ 以下でのばらつきが大きい。このような傾向は、他の通気層モデルでも見られる。これは、換気方式の違いに起因しているが、11.3 で詳しく検討する。

以上のことは、換気方式の違いがある屋根断熱モデルの通気層温度に関しては、南北面に分けて比較検討する必要があることを示しているといえよう。以下では南・北側通気層毎に、最も平均的な温度を示す中央部の計測値に着目し検討を行うこととする。



(a) R3 モデル (棟換気併用方式) の通気層温度
(b) R6 モデル (軒天換気方式) の通気層温度
図 9.9 通気層内の上中下部温度比較

2) 各モデルの通気層温度比較

屋根面積雪期間中の屋根断熱 7 モデルの南北別の温度特性について、1 週間分の温度推移と外部風速の関係を図 9.10 (a)、図 9.11 (a) に示す。また、対象期間中の全データを外気温の昇順に並び替えた結果を、換気方式別に図 9.10 (b,c)、図 9.11 (b,c) に示す。対象とするデータは、南側屋根は 526 時間、北側屋根は 618 時間分である。

① 軒天換気モデル

図 9.10 (a) から、強風時 (約 5m/sec 以上) においては通気層厚みによる差異はないが、比較的静穏な状態では通気層厚 45mm (R6) と 90mm (R7) モデルの温度変動の差異は殆ど無いものの、18mm モデル (R5) は北面では外気温との追従性がやや悪く南面では変動幅がやや大きいことがわかる。また特に、晴天日の昼間は南面側の通気層温度がかなり上昇し、夜間は南面・北面とも外気温よりかなり低下する場合が多い。

これは、他のモデルに比べて 18mm モデルは通気量が少ないため、室内側の熱損失や外部日射の影響などを受けやすいことが原因と考えられる。

図 9.10 (b,c) から、振幅が大きい 18mm モデルを含めて軒天換気モデルの通気層は、天井断熱の小屋裏温度と比べて外気温との追従性が良好で、外気温が -1℃ 以下の場合に通気層温度が概ねマイナスに保たれていることがわかる。

このような屋根断熱の温度特性が、融雪障害を殆ど生じさせない理由となったと思われる。

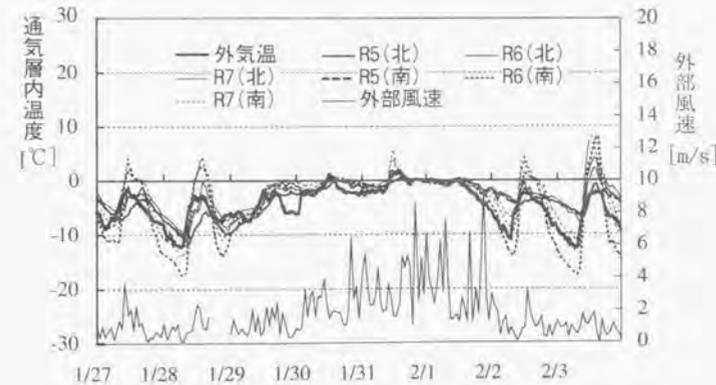


図 9.10 (a) 軒天換気モデルの通気層温度推移

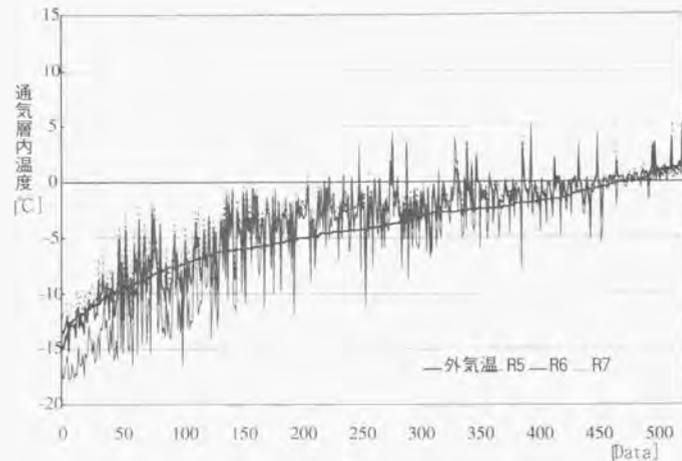


図 9.10 (b) 軒天換気モデルの南面の通気層温度と外気温の関係

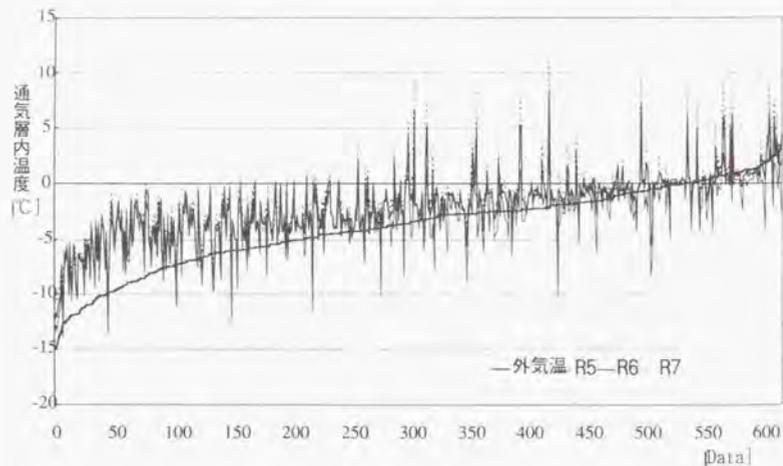


図 9.10 (c) 軒天換気モデルの北面の通気層温度と外気温の関係

② 棟換気併用モデル

図 9.11 (a) から、軒天換気モデルと同様に、強風時の通気層厚みによる差異は少ないが、比較的静穏な状態では通気層厚 30・45・90mm モデル (R2~4) の差異は無いものの、18mm モデル (R1) は北面では外気との追従性がやや悪く、南面では軒天換気に比べて更に変動幅が大きいことがわかる。

また、棟換気併用モデルは通気層厚さにかかわらず、日中時南面は、軒天換気モデルより一時的な温度上昇が著しいのが特徴的である。

図 9.11 (e) から、北面は軒天換気モデルより外気温との追従性が良好となり、棟換気併用の有効性が示されている。

しかし、図 9.11 (b) からは、南面は軒天換気モデルより一時的な温度上昇が多く見られる。これは、南面側が間中風下側となる頻度が多く、風上側の軒天から流入した外気の相当分が棟換気口から流出し、風下側の通気量が減少するのが主因であり、詳しくは 11.3 で述べる。

この方式の場合、天井断熱モデルと比べて、風上側は外気温との追従性が極めて良好で、風下側も外気が低温時には追従性が良好なもの、日中は南面の通気層温度が一時的に上昇するという特性がある。しかし、一時的に温度上昇する際にも、外気温が 0℃を越えている場合が多く、観察結果からも明らかなようにこの特性が必ずしも積雪障害に結びついてはいない。

ここでは、この方式の評価は行わず 11 章に譲ることとし、温度特性の説明にとどめておくことにする。

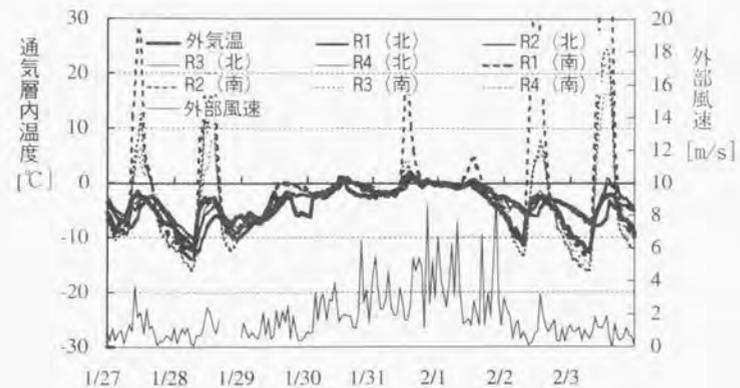


図 9.11 (a) 棟換気併用モデルの通気層温度推移

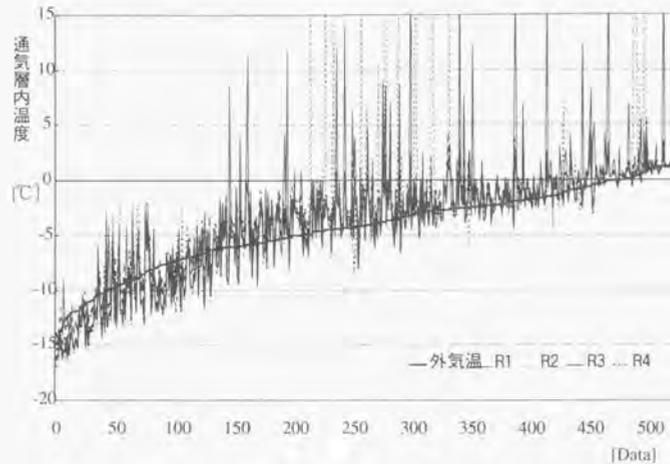


図 9.11 (b) 棟換気併用モデルの南面の通気層温度と外気温の関係

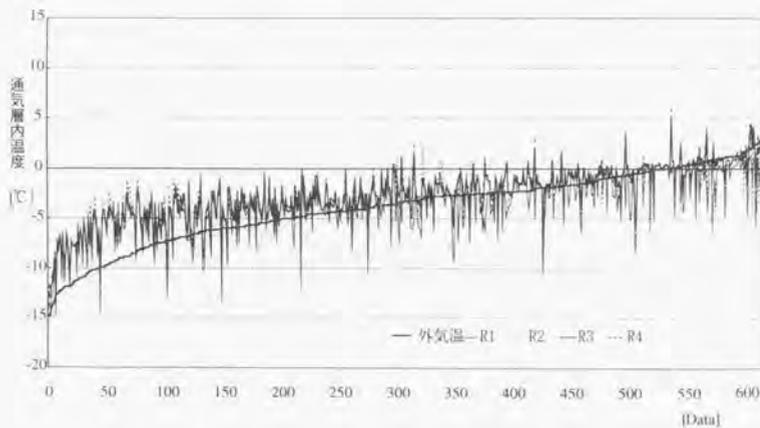


図 9.11 (c) 棟換気併用モデルの北面の通気層温度と外気温の関係

9.4 屋根面積雪障害の有無と小屋裏・通気層温度の関係

実験結果から、屋根面積雪障害の有無と小屋裏温度・通気層温度はかなり密接な関係があることが推測される。

ここで、積雪障害の発生プロセスと各温度の関係については次のような仮説が考えられる。

ア. 屋根面積雪時に、小屋裏・通気層温度がある温度 (X_1) 以上になった場合に、屋根面近傍の融雪を促す。融雪水が雪に保有し得る状態では、次のような障害が発生する可能性がある。

- ① 融雪水が雪に保水されることで比重が増加し、粉体から個体に近い性状となり、風または自重による僅かな移動で巻垂れなどの障害が生じる (図 9.12a)。
- ② 外気が低温時または小屋裏・通気層温度が低温になった場合は、融雪水が凍結して屋根材に凍着し (図 9.12b)、落雪が損なわれ、次第に積雪量が増し、寒気がゆるんだ際に大量の落雪が生じる。

イ. 融雪水が雪に保有できる範囲を越えた状態では、屋根面を流下し軒先部分に達し、上記に加えて次のような障害が発生する可能性がある。

- ③ 外気温が低温 (X_2) になり、軒先の露出部の温度がマイナスの場合は、観察結果でも示したように軒先部分で水柱等の氷結障害が生じる (図 9.12c)。

このうち、①について、本実験では雪の比重は測定してなく、また巻垂れの定量的把握も行っていないため上記 X_1 を明らかにすることはできない。

しかし、②凍着または③軒先部の氷結障害については、目視で確認されており実験結果から、 X_1 や X_2 を推定することは可能であろう。一般に外気が低温になるのは夜間か日射量が少ない状態であり、その場合、放射冷却等によって軒先部は外気温より低温となることが多い。従って、直接的には軒先露出部の表面温度が支配的だが、外気温との関係で考えて差し支えないだろう。

そこで、各モデルの屋根面積雪期間中のデータを対象に、外気温 X_2 がマイナスとなる条件下で屋根面融雪が起こり得る小屋裏・通気層温度 X_1 を 0°C もしくは -1°C 以上と仮定して、その条件に合うデータの発生頻度と南北軒先部分の水柱発生量の関係を示したのが図 9.13 である。ここで、水柱の発生量は、9.3.1 で述べたように南側は 1 月中旬から下旬、北側は 3 月中旬までであり、それぞれ目視観察で発生量がほぼピークと思われた 1 月下旬と 2 月中旬に撮影した各モデル毎の拡大写真を基に、水柱断面はほぼ円形であると仮定し、見付け寸法を直径と見なして算定した体積で示している。

図から、どちらの温度条件でも、温度の発生頻度の割合が増すにつれて水柱発生量が増加する傾向にあることがわかり、両者の関連性が深いことがわかる。

また、水柱の発生量と温度発生頻度の関係では次のことがいえる。

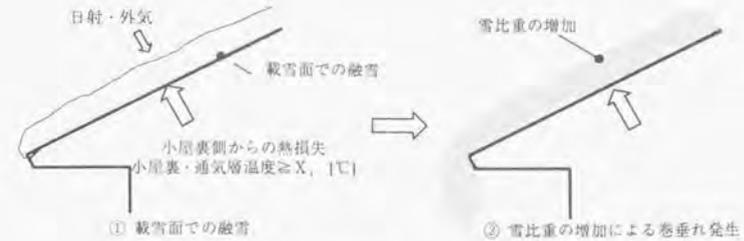
- ① 南・北側とも水柱発生量が多い天井断熱モデル(C1~C4)は、温度の発生頻度が $X_1 \geq 0^\circ\text{C}$ の条件では約 35%以上、 $X_1 \geq -1.0^\circ\text{C}$ の条件では約 50%以上である。

- ② 南側で軽微な水柱が発生した屋根断熱モデル(R3・R5-R7)は、温度の発生頻度が $X_1 \geq 0^\circ\text{C}$ の条件では約 10%以上、 $X_1 \geq -1.0^\circ\text{C}$ の条件では約 25%以上である
- ③ 北側で軽微な水柱が発生した屋根断熱モデル(R3・R4)は、温度の発生頻度が $X_1 \geq 0^\circ\text{C}$ の条件では約 55%以上、 $X_1 \geq -1.0^\circ\text{C}$ の条件では約 15%以上である。なお、R7モデルは、隣接する天井断熱モデルの影響を受けて水柱ができたものと推測され、ここでは対象外としている。
- ④ 水柱が殆ど発生しなかったその他の屋根断熱モデルは、南側での温度の発生頻度が $X_1 \geq 0^\circ\text{C}$ の条件では約 15%以下、 $X_1 \geq -1.0^\circ\text{C}$ の条件では約 25%以下である。また、北側での温度発生頻度が $X_1 \geq 0^\circ\text{C}$ の条件では約 7%以下、 $X_1 \geq -1.0^\circ\text{C}$ の条件では約 20%以下である。

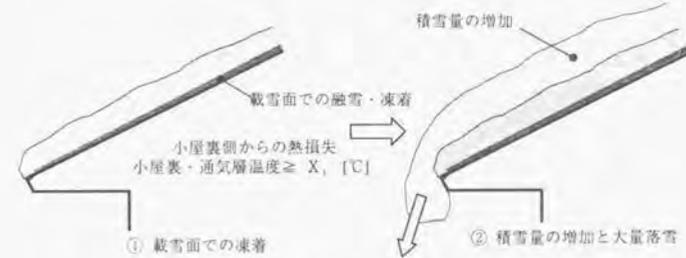
以上のことから、軒先部分の水柱発生程度と小屋裏・通気層温度には密接な関係があり、外気温(X_2) $< 0^\circ\text{C}$ で $X_1 \geq 0^\circ\text{C}$ もしくは $X_1 \geq -1.0^\circ\text{C}$ となる温度発生頻度の割合が屋根面積雪時の障害の程度を予測する際の指標として有効であると考えられる。

指標として上記のいずれの条件を用いるかについては、 $X_1 \geq 0^\circ\text{C}$ より $X_1 \geq -1.0^\circ\text{C}$ とした方が、発生の有無による温度発生頻度の違いが明確であること、相関性が高いことなどから、後者の条件を用いる方が良い。

従って、以下では、屋根面積雪障害の防止には、 X_2 が 0°C 未満で X_1 が -1.0°C 以上となる温度の発生頻度を、南側では 25%以下、北側では 20%以下に抑えることを判断の目安と考えることとする。



(a) 小屋裏・通気層温度 $\geq X_1$ [°C] となった場合に屋根面積雪の融雪発生



(b) 凍着による屋根面積雪深の増加と落雪



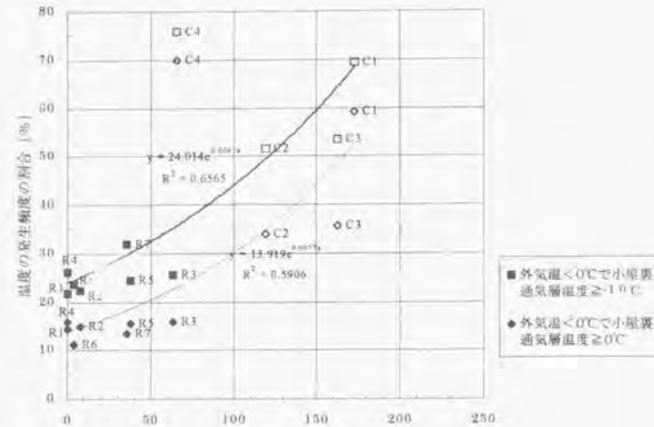
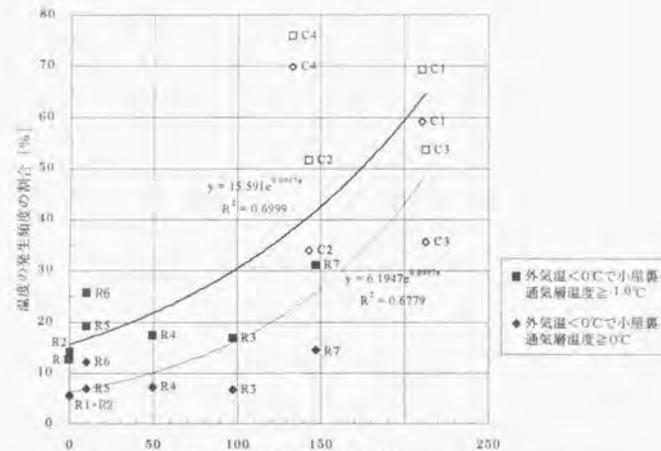
(c) 小屋裏・通気層温度 $\geq X_1$ [°C] となった場合の軒先部分の凍結障害の発生

図 9.12 屋根面積雪障害のメカニズム

9.5 まとめ

換気方式の異なる天井断熱と屋根断熱の実物大モデルの冬期温度測定・観察結果から次のことが明らかとなった。

- 1) 屋根面積積雪時の融雪障害に関しては、屋根表面温度や野地板等の温度より、小屋裏温度や通気層温度が支配的要因である。
- 2) 小屋裏換気を講じた天井断熱の小屋裏空間内部は、かなり均一な温度性状となっている。外気温が0℃以下の場合に小屋裏や通気層温度を概ねマイナスに保つことが融雪障害の防止に有効である。
- 3) 天井断熱の軒天換気モデルでは、軒天換気面積の差異が小屋裏温度にも良く現れているが、いずれも外気温との追従性が悪く融雪障害が発生した。また、棟換気の併用による効果は一応確認できたものの、融雪障害を防止するほどの効果はなかった。
- 4) 屋根断熱の通気層温度は、換気方式や外部風速・風向によって、南北面の温度変動に大きな差異が生じる場合がある。
- 5) 屋根断熱では軒天換気・棟換気併用モデルとも、外気温との追従性は極めて良好で融雪障害は発生しなかった。また、通気層厚 30mm・45mm・90mm では殆ど差異が無いのに対し、18mm モデルは日射や夜間冷却の影響をかなり受け温度振幅が大きくなる傾向がある。
- 6) 屋根面積積雪時の障害の程度を判断する指標として、小屋裏・通気層温度 (X_1) と外気温 (X_2) の関係に着目するのが有効である。
- 7) 障害発生の目安としては、 $X_1=1$ ℃以上、 $X_2=0$ ℃未満のデータ頻度が概ね 20~25% 程度を越えるか否かを判断の目安と考えて良いと推測される。

(a) 南側水柱体積の推定量 [mm³](b) 北側水柱体積の推定量 [mm³]

※ 図中の黒塗プロット点は屋根断熱モデル、白抜プロット点は天井断熱モデルを示し、それぞれ表9.1のモデル番号と符合する。

図 9.13 南側及び北側の水柱発生量と小屋裏・通気層温度の発生頻度の関係

[参考・引用文献]

- 9-1 福島明, 荒谷登ほか: 回路網法による木造住戸モデルの通気と熱湿気移動解析 (その1, その2), 日本建築学会北海道支部研究報告集 No.49, 1978.3
- 9-2 鈴木大隆, 廣田誠一, 本間義規ほか: 傾斜屋根における天井断熱・屋根断熱モデルの冬期温度特性について, 日本建築学会計画系論文報告集 第486号, p. 27, 1996. 8
- 9-3 鈴木大隆, 坂本弘志・廣田誠一ほか: 積雪寒冷地にふさわしい屋根工法に関する研究 (COLD-ROOF 手法の可能性について) その1 研究の目的と実験建物における小屋裏換気・通気量に関する検討, 日本建築学会北海道支部研究報告集 No.68, 1995.3

10

小屋裏・通気層温度に関する シミュレーション手法の検討

10.1 はじめに

積雪を扱うシミュレーションには、理学分野や農業分野、また工学分野、特に土木工学、建築工学分野で、その目的に応じたモデルや解法が存在する。例えば、農業分野では春の積雪融雪の速さが田畑の管理や作物の育成に大きく影響することから、稲葉らは積雪を速く消雪させる技術としての積雪融雪に関するシミュレーションを扱っている[10-1]。また北海道のような積雪地域において利水上重要な水資源としての活用や春先の急激な融雪出水による洪水災害防止のための融雪予測法として、中尾らにより融雪水の積雪浸透に関する実験研究や融雪モデルの開発が行われている[10-2]。建築工学分野では、積雪問題を扱う研究は多くはないが、構造力学分野では苫米地らが建造物の雪加重算定のための取り組みや滑雪・巻垂れなど力学的な視点からの研究を行っており、また環境工学分野においては、月館らはロードヒーティングの期間融雪負荷で融雪を[10-3]、岩前らは積雪地での地盤を含む熱解析において雪問題を扱っている[10-4]。

この中での積雪の扱いは、降雪量の算定や密度、粒径の違い、圧密現象、融雪水の積雪層内移動の仕方、融雪水の再凍結、日射や表面熱伝達率の扱い、日射反射率(アルベド)や積雪内を透過する短波長の扱いなど、雪の性質が全て均一な材料として扱うことが

できないために、いろいろな仮定の導入や簡略化、モデル化が図られる[10-5、10-6、10-7]。

雪に関する熱解析手法には、単純熱伝導で扱うもの、移動境界問題として扱うもの、積雪を多孔質材料とみなし、融解した水分の移動と凝結、また積雪内での水蒸気による熱輸送を扱う3相系熱水分同時移動として扱うものなどがある。

本章では、屋根面積雪の障害防止を目的とした小屋裏・屋根通気層の温度、換気・通気量を明らかにするために、屋根面積雪を含めた温度シミュレーションプログラムを開発し、実測データとの比較を行って、その妥当性を検証することを目的としている。

10.2 シミュレーションの概要

10.2.1 シミュレーションモデル

図10.1にシミュレーションフローを示す。本シミュレーションは屋根構成部材の各部温度を予測することが目的であるが、そのアルゴリズムの中で積雪の扱い方と換気量・通



図 10.1 シミュレーションフロー

気量の扱い方の部分が本シミュレーションの特色である。こうした理由から、以下では温度計算に関わる部分、積雪の扱いに関わる部分、換気量・通気量の算定に関わる部分に分類して記述する。

10.2.2 屋根構成部材及び積雪内の温度計算

(1) 各断面の温度計算

図10.2に天井断熱、図10.3に屋根断熱の場合のシミュレーションモデルを示す。各断面の温度計算は、屋根面が全て積雪で覆われていることを条件として、屋根法線方向について1次元非定常熱伝導で扱い、時間に関して後退差分、距離に関して中心差分とする。非定常熱伝導基礎式は(10-1)式となる。なお、本シミュレーションでは、基本的に材料分割幅は材料によって異なる分割幅としており(図10.2、10.3)、その幅は0.01~0.05m程度とし、また時間分割は1.0時間とする。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (10-1)$$

ただし、Tは温度(°C)、tは時間(h)、xは距離(m)を表す。またaは温度拡散率(m²/h)を表し、 $a = \lambda / c\rho$ である。ここでλは熱伝導率(kcal/mh°C)、cρは容積比熱(kcal/m³°C)を表す。

(10-1)式を空間中心差分、時間後退差分化すると、時間P、節点nに関する差分式は(10-2)式になる。

$$\frac{T_n^{P+1} - T_n^P}{\tau} = \left(\frac{2}{c_{n-1} \rho_{n-1} l_{n-1} + c_n \rho_n l_n} \right) \left\{ \frac{\lambda_n}{l_n} (T_n^{P+1} - T_{n-1}^{P+1}) - \frac{\lambda_{n+1}}{l_{n+1}} (T_{n+1}^{P+1} - T_n^{P+1}) \right\} \quad (10-2)$$

ただし、Tに関する下付サフィックスnは空間分割した節点を、上付サフィックスpは時間を表している。またτは分割時間(h)を表し、cρは容積比熱(kcal/m³°C)を、l_nは部材nの長さ(m)を表す。節点に関するサフィックスの対応関係を図10.4に示す。

また、積雪面は第3種境界条件とし、表面熱伝達の他に、短波長日射と長波長放射、雪表面と大気との潜熱伝達を考慮する。積雪表面での熱収支を(10-3)式で表す。



図 10.4 空間分割とサフィックスの対応

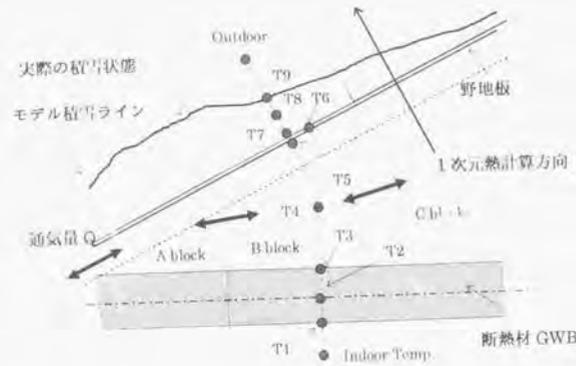


図 10.2 天井断熱シミュレーションモデル

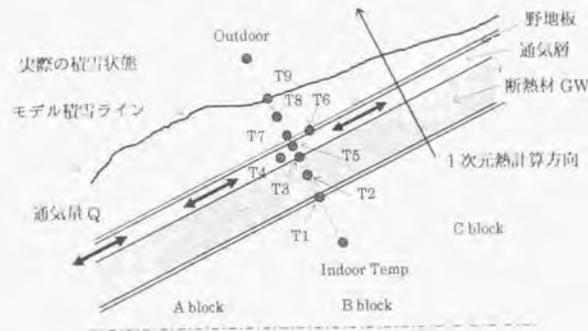


図 10.3 屋根断熱シミュレーションモデル

$$q_{\text{total}} = q_a + q_b + q_c + q_d + q_e + q_f \quad (10-3)$$

ただし $q_a = \alpha \cdot (T_{\text{air}} - T_{\text{surf}}) \quad (10-4)$

$$q_b = R \cdot \alpha' \cdot (X_{\text{air}} - X_{\text{surf}}) \quad (10-5)$$

$$q_c = J_s \cdot (1 - \Gamma) \cdot (1 - R_{\text{trans}}) \quad (10-6)$$

$$q_d = -J_l \quad (10-7)$$

$$q_e = (\lambda_{\text{snow}} / l_{\text{snow}}) \cdot (T_{\text{surf}} - T_{\text{sd}}) \quad (10-8)$$

$$q_f = c_w \cdot \rho_w \cdot r \cdot (T_{\text{wb}} - T_{\text{surf}}) \quad (10-9)$$

ここで、 α は対流熱伝達率(kcal/m²h°C)、 α' は湿気伝達率(kg/m²h(kg/kg')), R は蒸発潜熱(kcal/kg)、 J_l は長波長放射(kcal/m²h)、 J_s は短波長放射(kcal/m²h)、 Γ は積雪面反射率(アルベド: (-)), R_{trans} は積雪内部への日射透過率(-)、 λ_{snow} は雪の熱伝導率(kcal/mh°C)、 l_{snow} は積雪厚さ(m)、 T_{sd} は積雪下部温度(°C)、 c_w は水の比熱(kcal/kg°C)、 ρ_w は水密度(kg/m³)、 r は降水量(m)、 T_{wb} は湿球温度(°C)を表す。また、 T 、 X はそれぞれ温度(°C)と絶対湿度(kg/kg')を表し、サフィックスairは大気を、サフィックスsurfは積雪表面を表す。

表面对流熱伝達率は普通面におけるユルゲスの式を用いることとし、湿気伝達率はルイスの関係を用いて対流熱伝達率から算出する。

ユルゲスの式を(10-10)、(10-11)式に、ルイス関係の式を(10-12)式に示す。

$$\alpha = 5.0 + 3.4v \quad (v \leq 5\text{m/s}) \quad (10-10)$$

$$\alpha = 6.14 \cdot v^{0.78} \quad (v > 5\text{m/s}) \quad (10-11)$$

$$\alpha' = \alpha / C_a \quad (10-12)$$

ここで、 v は積雪表面近傍風速(m/s)を、 α は対流熱伝達率(kcal/m²h°C)、 C_a は空気の設定比熱(kcal/kg°C)を表す。また、ルイス関係式では、空気の温度拡散率と水蒸気の空気中での拡散係数の比を1として扱う。 q_{total} は、ある厚さを仮定した積雪表面での融雪・再凍結の計算に使用し、再凍結時には、その時の保有融雪水量から、積雪表面での凍結潜熱を考慮する。

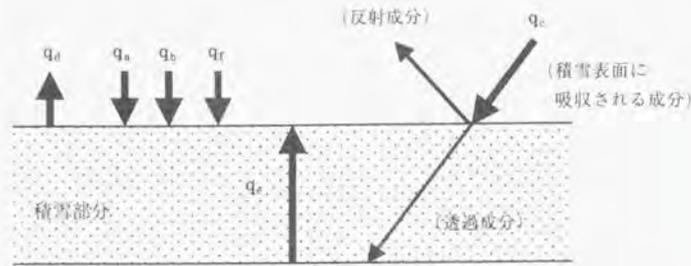


図 10.5 積雪部分の熱収支

(2) 小屋裏内及び通気層内の熱平衡式

小屋裏・通気層内温度は、屋根構成部材の温度計算を非定常で行い、その時の小屋裏内若しくは通気層内表面温度を算出し、さらに風圧係数・外部風速及び風向を与えて換気量を算定、瞬時定常状態における小屋裏・通気層空間での熱平衡式から算出する。

熱平衡式を(10-13)式に示す。

$$\sum q_{\text{air}} = \sum \alpha \cdot S_j \cdot (T_m - T_j) + \sum c \rho \cdot V_k \cdot (T_m - T_{\text{out}}) = 0 \quad (10-13)$$

ただし、 $\sum q_{\text{air}}$ は小屋裏空間若しくは通気層に流出する熱量(kcal/h)を表しており、 V_k は各開口換気量(m^3/h)、 T_m は小屋裏若しくは通気層内温度($^{\circ}\text{C}$)、 T_{out} は外気温度($^{\circ}\text{C}$)を表す。 T_j : $j=a$ のとき通気層室内側温度($^{\circ}\text{C}$) $j=b$ のとき通気層外側温度($^{\circ}\text{C}$)、 S_j : $j=a$ のとき通気層室内側面積(m^2) $j=b$ のとき通気層外側面積(m^2)、 α は総合熱伝達率($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$) $c\rho$:容積比熱($\text{kcal}/\text{m}^3\text{C}$)である。また、 $\text{サフィックス } j$ は通気層に面する壁面部位、 k は熱流出部位を表す。

屋根構成部材の各節点温度を算出するにあたり、通気量は小屋裏内温度若しくは通気層内温度算定のための与条件であるが、通気量算定には浮力の影響も含まれることから、これらを連成させて解かなくてはならない。これはいわゆる非線形問題であるから、正確には初期値(この場合、前時間ステップの当該空間温度が適当と考えられる)を与えて反復計算を行うことにより各節点温度及び小屋裏もしくは通気層内温度を求めることになる。しかし、前時間ステップの小屋裏内若しくは通気層内温度を与えて通気量算定を行い、その後各節点温度を計算した場合でも結果にほとんど差がないため、簡略化のために本プログラムでは反復計算を行わず、前時間ステップの小屋裏内温度若しくは通気層内温度を用いて通気量を計算し、その結果を用いて次時間ステップの各節点温度を計算している。

また、(10-13)式に示す熱平衡式内の熱伝達率は、小屋裏換気モデルと通気層通気モデルとは異なる値を用いる。すなわち小屋裏内での表面熱伝達率の他には、小屋裏内で換気により空気が流動していることから、一般に外壁における総合熱伝達率として用いられている値とし、 $20\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$ を用いる。一方、通気層内表面熱伝達率は、換気量から計算した通気層内風速を用いて(10-10)、(10-11)式より算出した値に一律に放射熱伝達率

$\alpha = 4.0$ ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$)を加えた値を用いる。

通気層内通気量、小屋裏換気量の算定方法に関しては10.2.4に後述する。

10.2.3 積雪部分の扱い

(1) 積雪分布のモデル化

図10-6は、本シミュレーションプログラムにおける屋根面積雪の熱的な扱い方を示したものである。降雪、圧密、融雪・再凍結などの過程は、全て既往研究から導かれた実験式に基づいて、降水量・積雪内含水量及び積雪内含水率の関数として扱い、積雪部を熱的に解いているのが特徴である。

以下に、積雪モデルの代表的な特徴とそれに関連する記載箇所を示す。

積雪モデルの初期条件として、まず考慮すべき点は積雪厚さの偏分布である。傾斜屋根面の積雪分布は、屋根傾斜角や方位、周辺気流の影響による吹き溜まりなどにより必ずしも均一な厚さとはならない。一般に、周辺建物による気流外乱を受けない場合、屋根積雪厚は屋根軒先から中央部にかけて漸減或いはほぼ同じになり、屋根頂部は極端に薄くなる傾向がある[10-8]。同一屋根面での積雪の偏りは、小屋裏・通気層温度を決める際の熱収支に少なからず影響を与えると考えられる。屋根形態別の積雪偏分布は、構造力学分野で屋根面積雪荷重を検討する目的から多くの研究が行われている。しかし、その殆どは大規模建築を対象としており、住宅を対象とした継続的な研究は吾米地ら[10-9]が行っている他は少ない。また、既往の研究も、ある建築条件下での実測値をまとめたものが多く、様々な住宅条件に対して適応できるほどの普遍性を有するまでは至っていないのが現状である。そこで本シミュレーションでは、天井断熱小屋裏モデル(図10.2)及び屋根断熱通気層モデル(図10.3)とも、初期積雪密度は $100[\text{kg}/\text{m}^3]$ 一定、屋根面の傾斜方向に片側3分割し、それぞれ平均積雪厚さを初期条件として与えることで偏分布の影響を考慮することとした。

気象データの降水量から、降水が降雪かの判断、降雪量への換算、外部風によって吹き飛ばされ屋根面積雪深が減少する点については、次項(6)による。

屋根面積雪層の圧密による、積雪深の変化は、次項(7)による。

積雪面上部及び屋根材との境界部において、熱供給された場合に生じる融雪水量の算定、前時間で融雪が生じた後に次時間で積雪部分から熱損失があった場合に生じる再凍結水の算定は、次項(2)による。この算定により、融雪・再凍結に伴う積雪部の潜熱を考慮し、融雪・再凍結が生じている場合は、該当する積雪部の節点温度は 0°C に固定して、各節点計算を行う。

なお、積雪部及び屋根構成材の各節点の温度計算に際して、雪の日射反射率、日射透過率、熱伝導率は、積雪厚さ、積雪部の含水率などの関数として(3)～(5)によって算出する。

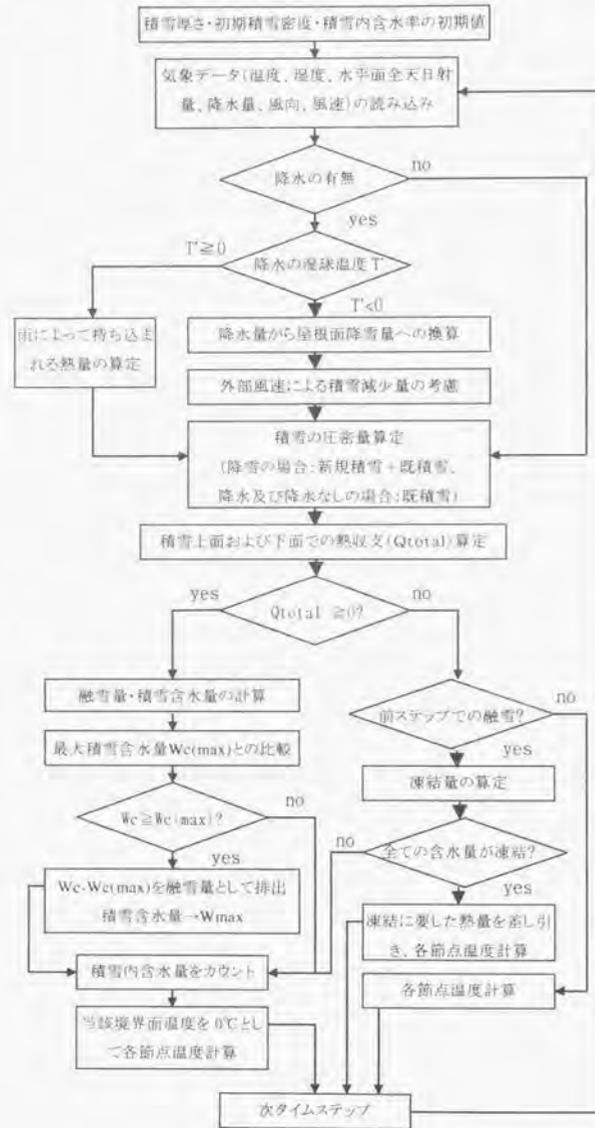


図 10.6 屋根面積雪モデルの扱い

(2) 融雪・再凍結の扱い

積雪内にある水分（積雪内含水率）は、降水（雪）がある場合、次式で表される。

$$W_{eq}^{P+1} = W_{eq}^P + R \quad (10-14)$$

ただし、 W_{eq} は積雪水量(m)を、 R は降水（雪）量(m)を表す。サフィックスP+1は時間を表す。

降水が液体（雨）の場合、保有積雪水量(m)は次式により増加する。

$$W_c^{P+1} = W_c^P + R_{rain} \quad \text{また、降雪の場合は} \quad W_c^{P+1} = W_c^P \quad (10-15)$$

また、積雪含水率 W^{P+1} (%)は下式で表される。

$$W^{P+1} = W_c^{P+1} / W_{eq}^{P+1} \times 100 \quad (10-16)$$

ただし、 W_c は積雪内保有含水量(m)である。 q_{total} が負の場合、積雪内水分が凍結をはじめ、全て凍結した後で雪温度が低下する。逆に q_{total} が正の場合、積雪を融かして積雪内含水量を増加させることになる。その量が積雪密度に対する最大保有含水量を超えると、超えた分が融雪水として排出されるモデルを用いる [10-2]。積雪の最大含水量 $W_c(max)$ は、積雪の最大含水率 W_{eq} と積雪水量 W_{eq} から、次式を用いて求めることができる。

$$W_c(max) = W_{eq} \times (W_{cup} / 100) \quad (10-17)$$

また、積雪の最大許容含水率は積雪密度を用いて次式で表す [10-2]。

$$W_{cup} = (0.025 \times \rho_{snow} + 0.030) \times 100, \quad \rho_{snow} \leq 400 \quad (10-18)$$

$$W_{cup} = (0.020 \times \rho_{snow} - 0.400) \times 100, \quad 400 < \rho_{snow} \leq 550 \quad (10-19)$$

$$W_{cup} = (0.111 \times \rho_{snow} + 0.131) \times 100, \quad \rho_{snow} > 550 \quad (10-20)$$

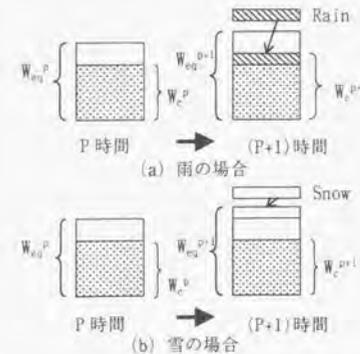


図 10.7 降水（雪）の扱い

(3) 積雪表面での日射反射率 (アルベド) について

全天日射量 (J_s) に対する反射日射量 (J_{ref}) の比をアルベド Γ といい、両者の関係は (10-21) 式で表される。

$$J_{ref} = \Gamma \cdot J_s \quad (10-21)$$

積雪厚が薄い時は下地材の反射率の影響を大きく受けることが知られており、積雪がある一定の厚さ以上になると下地材の影響はほとんど受けなくなって、積雪表面及び内部の状態により一意に定まる。また積雪は日射を散乱する氷の粒と単位空間の半分以上を占める空気との混合物であるため、積雪表面上の反射率は表面からの反射光ばかりでなく、積雪内部の各層で散乱して表面からでてきた光も含んでいる。このことから、アルベドは単に表面の状態のみではなく、積雪の密度や粒径にも大きく影響される。

本シミュレーションプログラムで用いるアルベドには、積雪深が 0~9cm までは O'neil & Gray (1979) が測定した黒い板上での積雪深とアルベドの関係の実測値 [10-5] を補間して用いることとし、10cm 以上になった場合は、積雪深とアルベドの関係を 1 次直線で近似して用いる。補間法には Lagrange の方法を用いる。

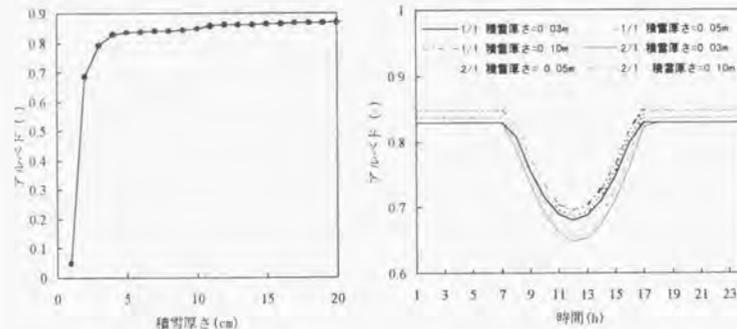
表 10-1 に 0~9cm までの各厚さにおけるアルベドを示し、(10-22) 式に 10cm 以上の場合の 1 次直線近似式を示す。

$$\Gamma \times 100 = 84.67 + 0.112 \cdot I_{snow} \quad (10-22)$$

ただし、 Γ はアルベドを表し、 I_{snow} は積雪深 (cm) を表す。

表 10.1 積雪深とアルベドの測定 (O'neil & Gray, 1979)

積雪深 I_{snow} (cm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
アルベド ($\Gamma \cdot 100$)	5.03	68.84	79.40	82.91	83.41	83.67	83.91	84.17	84.42	84.67



(a) 積雪深とアルベドの関係 (b) 太陽高度とアルベドの関係

図 10.8 積雪深とアルベド (O'neil & Gray, 1979)

(4) 積雪内部への日射透過率

日射は、積雪の表面で反射し、残りの日射成分が積雪内部に吸収され、吸収されない分は積雪下面にある屋根構成部材へと吸収される。屋根積雪の融雪は、積雪表面と積雪下面の境界部分でのみ起こるものとし、積雪下部への日射透過率は Beer の法則 (Rambert の法則、または Bouguer の法則とも言う) に従うものとする。

表面から深さ Z (m) における透過日射の強さ R_{trans} は (10-23) 式で表される。

$$R_{trans} = (1 - \Gamma) \cdot J_s \cdot e^{-kZ} \quad (10-23)$$

ただし、 k は減衰係数を表す。積雪の減衰係数は多くの研究者らが測定している。しかし積雪の密度、粒径、透過日射の波長、含水率に大きく依存するため、必ずしも一定の測定結果が得られているわけではなく、かなりばらつきをもった値が報告されている [10-11]。Mellor の測定では、解けつつある粗目雪 (粒径 1mm 以下) を板状試料にし、波長 $0.41 \mu m$ の透過光を用いた場合で $18 \sim 21 m^{-1}$ という数値を得ており、深見・小島らの室内実験および野外観測によれば、 $23 \sim 58 m^{-1}$ の値をとることが明らかにされている [10-5]。

そこで、ここで用いる減衰係数には、これら文献の数値を参考にし、またシミュレーションと実測との対比から $30 m^{-1}$ 一定の値を用いることにする。

減衰係数を $30 m^{-1}$ を用いた場合の日射透過率の変化を図 10.9 に示す。

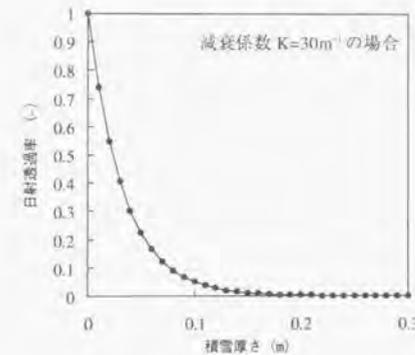


図 10.9 積雪深と日射透過率の関係

(5) 積雪の熱伝導率

積雪内の熱伝導は、融雪水流下による液水移動がない場合、すなわちハイグロスコピック領域においては、氷の結晶部分や空隙内空気の熱伝導と内部の空隙を通る水蒸気の拡散による熱移動により行われるといつてよい。雪の熱伝導率の測定は多数の研究者によって行われているが、測定条件や測定対象としている雪の構造 (粒子の大きさや結合の度合いなど) の違いにより異なった結果が得られている。

雪部のみ純熱伝導率は、基本的には水分及び湿気移動は含めて考えないが、融雪水に

よる熱移動の影響をシミュレーションの中で正当に評価するのであれば、解析手法そのものを3相系熱水分移動問題として扱う必要が出てくる。しかし、融雪水の移動は単純な多孔質内の水分移動現象として見るには、水道の形成など、モデル化が困難な要素を含んでいる。一方で雪熱伝導率の実測値は、水蒸気拡散による手渡し輸送に伴う熱移動をも含んだものであるため、実際の積雪部の熱伝導現象を単純熱伝導問題として扱うことができる点で非常に簡便である。

雪の熱伝導率の経験式(実測値に基づいた実験式)はいくつか知られており、それを図10.10に示す。このなかで、広い密度領域において平均的な熱伝導率を与えているDevauxの経験式(1933)を本シミュレーションでは用いる。

Devauxの式を(10-24)式に示す。

$$\lambda_{snow} = 2.9 \times 10^{-2} + 2.9 \times 10^{-6} \cdot \rho_{snow}^2 \quad (10-24)$$

ここで、 λ_{snow} は雪の熱伝導率(W/mK)を表し、 ρ_{snow} は雪密度[kg/m³]であり、適用密度範囲は100 < ρ_{snow} < 600である。

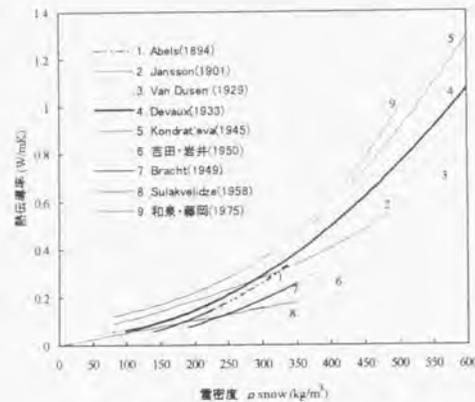


図10.10 雪の熱伝導率

(6) 降水・降雪の扱い

1) 降水の判定方法

降水が雨か雪かの判断は、通常、気温によって行われ、その場合の温度は、一般に気温2℃が用いられることが多い。しかし、雨であるか雪であるかで、積雪深の計算や積雪内に持ち込まれる熱量に違いが生じるため、中尾らの検討[10-2]に準じて、降水の温度が湿球温度に等しいと考え、湿球温度が0℃以下であれば雪、0℃より高ければ雨であると判断する。

湿球温度は(10-25)、(10-26)、(10-27)式で表される断熱飽和温度(熱力学的湿球温度)T'と等しいと見なすことができる[10-14]。

$$h - h_s = (X - X_s) \cdot h_e \quad (10-25)$$

ここで、 h_s は温度t'の飽和空気の水蒸気比エンタルピー(kcal/kg)、 X_s は温度t'の飽和空気の水蒸気比(kg/kg)、 h_e は温度t'の水または氷の水蒸気比エンタルピー(kcal/kg)である。 h_s は次式で近似できる。

$$\text{湿球が氷で包まれている場合: } h_e = T' \quad (10-26)$$

$$\text{湿球が氷で包まれている場合: } h_e = 0.5 \cdot T' - 79.7 \quad (10-27)$$

飽和絶対湿度はGoff-Gratchの公式等によって計算しなければならないため、(10-25)式は代数的に解くことができず、Newton-Raphson法などの反復計算が必要である。

2) 降水量から屋根面降雪量への換算

降雪量は降水量から換算する。湿球温度が0℃未満の場合の、降水量から積雪量への換算は、(10-28)式から算出する[10-10]。(10-28)式では、気温に対する降雪量の変化を2次式で近似し、かつ降雪量は降水量に比例するとみなしている。

$$S = (0.091 \cdot T_{out}^2 - 1.81 \cdot T_{out} + 9.47) \cdot R / 10 \quad (10-28)$$

ここで、Sは降雪量[cm]、 T_{out} は外気温[℃]、Rは降水量[mm]を示す。

また、傾斜屋根面における積雪は、傾斜している部分に対する積雪であるということ、また建物の周辺気流により密度の軽い新雪などは吹き飛ばされる現象が見られる。このことを考慮するために、実験建物における外部風速と屋根面積雪の実測値から求めた減少量の直線回帰式を用いる。直線回帰式を(10-29)、(10-30)式に、グラフを図10.11に示す。

$$\text{南面: } Y = 0.3440 \cdot v - 0.0945 \quad (\text{相関係数: } 0.741) \quad (10-29)$$

$$\text{北面: } Y = 0.0628 \cdot v + 0.4760 \quad (\text{相関係数: } 0.668) \quad (10-30)$$

ここで、Yは積雪減少率[%/h]、vは外部風速[m/sec:1h平均]を示す。

以上の関係式から、屋根面への降雪量 l_{snow} は(10-31)式により算出される。

$$l_{snow} = S \cdot (1 - Y / 100) \quad (10-31)$$

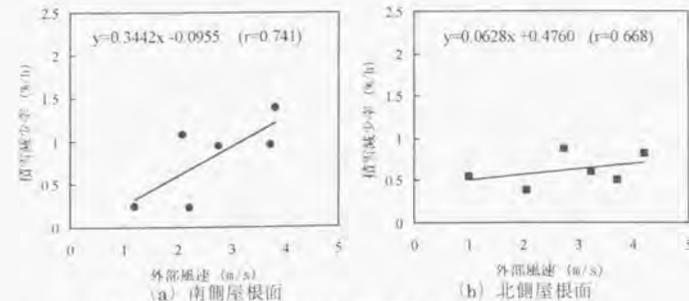


図10.11 実験住宅における外部風速と積雪減少率の関係

(7) 積雪圧密の取り扱い

積雪層の粘性圧縮による積雪深変化の基礎式は(10-32)式で表される[10-6]。

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = \frac{W}{\eta_0 \cdot e^{K \cdot \rho}} \quad (10-32)$$

ただし、 η_0 は密度 ρ の関数である粘性係数を、 W は上層にかかる荷重(kg)を表す。粘性係数 η_0 には $1.0 \times 10 \text{ kg} \cdot \text{day}/\text{m}^2$ (札幌での測定値：小島の値)を用いることとし、また K は一定値 ($K=21.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ ；小島の値)を用いる。ここで(10-32)式の左辺は、密度 ρ で除する形になっているが、この値は p 時間と $(p+1)$ 時間後との密度の単純平均値を用いることとする。以上の式変形を行い、(10-32)式を差分化すると(10-33)式になる。

$$\frac{\rho_n^{p+1} - \rho_n^p}{\tau} = \frac{\rho_n^{p+1} + \rho_n^p}{2} \cdot \frac{W_n}{K(\rho_n^{p+1} + \rho_n^p)} \cdot \frac{1}{\eta_0 \cdot e^{\frac{K(\rho_n^{p+1} + \rho_n^p)}{2}}} \quad (10-33)$$

$$\begin{aligned} & \rho_n^{p+1} - \rho_n^p \\ &= \frac{W_n \cdot \tau \cdot e^{-0.5K\rho_n^p}}{2 \cdot \eta_0} \cdot \rho_n^{p+1} \cdot e^{-(1.5K\rho_n^{p+1})} + \frac{W_n \cdot \tau \cdot e^{-0.5K\rho_n^p}}{2 \cdot \eta_0} \cdot \rho_n^p \cdot e^{-0.5K\rho_n^{p+1}} \end{aligned} \quad (10-34)$$

ここで $\rho_n^p = A$ 、 $\frac{W_n \tau}{2\eta_0} \cdot e^{-0.5K\rho_n^p} = B$ とおくと、(10-34)式は(10-35)式と書き換えることができる。

$$\rho_n^{p+1} - A = (\rho_n^{p+1} + A) \cdot B \cdot e^{-0.5K\rho_n^{p+1}} \quad (10-35)$$

(10-35)式は非線形方程式であるため、 $(p+1)$ 時間後の密度 ρ_n^{p+1} を求めるためには取束計算が必要となる。ここではNewton-Raphson法を用いて算出する。なお、上層にかかる積雪荷重 W_n は、 n 層より上層の積雪荷重に自重 $\times 0.5$ を足し合わせたものとする。

以上の過程により、 $(p+1)$ 時間後の n 層密度 ρ_n^{p+1} と n 層の積雪水量 $(W_{eq})_n^{p+1}$ より、次式を用いて $(p+1)$ 時間後の n 層厚さを算出する。

$$(L_{snow})_n^{p+1} = (W_{eq})_n^{p+1} \times 1000 / \rho_n^{p+1} \quad (10-36)$$

10.2.4 小屋裏換気量及び通気層通気量の算定方法

通気層内及び小屋裏内の熱収支式は(10-13)式で表されるが、この式の中の変数である換気量 V_k を計算条件として与える必要がある。ここでは、天井断熱小屋裏換気量及び屋根断熱通気層量の算定方法、換気部材の有効開口面積と風洞実験による実験建物各部の風圧係数の測定結果について述べる。

(1) 天井断熱・棟換気併用方式の小屋裏換気量の算定

天井断熱・棟換気併用方式の小屋裏換気量の計算式を以下に示す。サフィックスは、南側軒天を1、北側軒天を2、南棟を3、北棟を4を表している。浮力 P_i は、各開口のG.L.からの高さを南側軒天 h_1 、北側軒天 h_2 、棟開口部分 h として、

$$P_{i1} = h_1 \cdot (\gamma_{out} - \gamma_{in}) \quad (10-37)$$

$$P_{i2} = h_2 \cdot (\gamma_{out} - \gamma_{in}) \quad (10-38)$$

$$P_i = h \cdot (\gamma_{out} - \gamma_{in}) \quad (10-39)$$

また、風圧力 P_w に関しては、

$$P_{w1} = C_1 \cdot \frac{\gamma_{out}}{2g} \cdot V_{out}^2 \quad (10-40)$$

$$P_{w2} = C_2 \cdot \frac{\gamma_{out}}{2g} \cdot V_{out}^2 \quad (10-41)$$

$$P_{w3} = C_3 \cdot \frac{\gamma_{out}}{2g} \cdot V_{out}^2 \quad (10-42)$$

$$P_{w4} = C_4 \cdot \frac{\gamma_{out}}{2g} \cdot V_{out}^2 \quad (10-43)$$

ただし、 P_i は各開口高さにおける空気浮力を表し、 γ_{in} 、 γ_{out} はそれぞれ通気層内部密度と外気密度 (ともに kg/m^3) を表す。また、 P_w は風圧力を表し、 C_i は各々の開口にかかる風圧係数を表す。 V_{out} は外部風速(m/s)である。

浮力と風圧力がかかる4開口の単室換気問題と扱うと、各開口における流量 Q は内部圧力を P_i として、(10-44)、(10-45)、(10-46)、(10-47)式で表すことができる。

$$Q_1 = \alpha A_1 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (P_i - P_{w1} + P_{i1})} \quad (10-44)$$

$$Q_2 = \alpha A_2 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (P_i - P_{w2} + P_{i2})} \quad (10-45)$$

$$Q_3 + Q_4 = \alpha A_3 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (P_i - P_{w3} + P_i)} + \alpha A_4 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (P_i - P_{w4} + P_i)} \quad (10-46)$$

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 0 \quad (10-47)$$

小屋裏内部圧力 P_i は収束計算をしなければ求まらないため、二分法 (Bisection Method) を用いて算定する。

(2) 天井断熱・軒天換気方式の小屋裏換気量の算定

サフィックスとして、南側軒天を1、北側軒天を2とする。この場合、換気口入り口の高さが同じなので浮力は考えないことにする。

風圧力に関する計算は、(10-40)、(10-41)式を用いる。この場合は1室2開口の換気量を計算となるので、収束計算しなくとも換気量を得ることができる。

$$\alpha A = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\alpha A_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{\alpha A_2}\right)^2}} \quad (10-48)$$

$$Q = \alpha A \cdot \sqrt{\frac{2g}{\gamma} |P_{w1} - P_{w2}|} \quad (10-49)$$

(3) 屋根断熱・棟換気併用方式の通気量の算定

屋根断熱・棟換気併用方式の通気量計算は以下のようになる。サフィックスは、南側軒天換気口を1、北側軒天換気口を2、南棟換気口を3、北棟換気口を4とし、通気層内部への空気流入の向きを正とする。

浮力 P_f に関して

$$P_{f1} = h_1 (\gamma_{out} - \gamma_{in}) \quad (10-50)$$

$$P_{f2} = h_2 (\gamma_{out} - \gamma_{in}) \quad (10-51)$$

$$P_{f3,4} = (h_{3,4} - h_1) (\gamma_{out} - \gamma_{in}) + (h_{3,4} - h_2) (\gamma_{out} - \gamma_{in}) \quad (10-52)$$

風圧に関しては(10-40)、(10-41)、(10-42)、(10-43)式を用いる。各開口の流量 Q は

$$Q_1 = \alpha A_1 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (P_i - P_{w1} + P_{f1})} = v_1 \cdot S_1 \quad (10-53)$$

$$Q_2 = \alpha A_2 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (P_i - P_{w2} + P_{f2})} = v_2 \cdot S_2 \quad (10-54)$$

$$Q_3 + Q_4 = \alpha A_3 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (P_i - P_{w3} + P_f - P_{nd1})} + \alpha A_4 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (P_i - P_{w4} + P_f - P_{nd2})} \\ = v_1 \cdot S_1 + v_2 \cdot S_2 \quad (10-55)$$

ただし P_{nd} は通気層の摩擦抵抗による圧力損失であり、(10-56)式で与える。

$$P_{nd1} = \frac{\Lambda_1 \cdot l}{d} \cdot \frac{\gamma_{out}}{2g} \cdot v_1^2 \quad \text{or} \quad P_{nd2} = \frac{\Lambda_2 \cdot l}{d} \cdot \frac{\gamma_{out}}{2g} \cdot v_2^2 \quad (10-56)$$

ここで、 d' は等価直径で $d' = 4 \cdot S / (\text{周囲の長さ} \cdot \text{m})$ (m) で表す。S は断面積 (m²) である。層流域と乱流域の境界をレイノルズ (Re) 数 3000 とすると、坂本らの測定 [10-12] による通気層摩擦抵抗係数 Λ は、(10-57)、(10-58) 式で表される。また、 l は通気層の長さ (m) を表す。

$$\Lambda = 489.0 \text{Re}^{-1.13} \quad (\text{Re} < 3000) \quad (10-57)$$

$$\Lambda = 0.46 \text{Re}^{-0.26} \quad (\text{Re} \geq 3000) \quad (10-58)$$

内部圧力 P_i は収束計算によらなければ求まらないので、二分法 (Bisection Method) を用いて各 Q の式に代入し各流量を求める。

(4) 屋根断熱・軒天換気方式の通気量の算定

屋根断熱・軒天換気方式の通気量計算は、棟部分の開口がないので2開口単室換気計算モデルとして扱える。このとき南側軒天開口から北側軒天開口へと空気が流れる向きを正とする。

浮力に関して南側通気層空気密度を γ_{in1} 、北側通気層空気密度を γ_{in2} として

$$P_{f1} = h \cdot (\gamma_{out} - \gamma_{in1}) \quad (10-59)$$

$$P_{f2} = h \cdot (\gamma_{out} - \gamma_{in2}) \quad (10-60)$$

とし、南側から入り北側に抜ける方向をプラスとして圧力項に加える。

すなわち、浮力による圧力 P_f は(10-61)式で示される。

$$P_f = P_{fA} - P_{fB} \quad (10-61)$$

風圧に関しては(10-40)、(10-41)式により計算する。

換気にかかる動力 (圧力差) ΔP は以下の式で表される。

$$\Delta P = P_{w1} - P_{w2} + P_f = \zeta \cdot \frac{\gamma}{2g} \cdot v^2 \quad (10-62)$$

この式を解いて v を算出すれば、 $Q = v \cdot S$ (S: 通気層断面積 m²) により通気量が求まる。これは通気出入り口の形状抵抗、通気層内の摩擦抵抗の和であり、以下の式で表される。

$$C = \zeta_1 + \frac{\Lambda \cdot L}{D} + \zeta_2 = \left(\frac{A_1}{\alpha A_1}\right)^2 + \frac{\Lambda \cdot L}{D} + \left(\frac{A_2}{\alpha A_2}\right)^2 \quad (10-63)$$

この場合も通気層内風速が一意には求まらないので、二分法 (bisection method) により収束計算を行う。

(5) 換気部材の有効開口面積の測定

上記の換気計算を行う場合には、各開口の有効開口面積が既知でなければならない。そこでJIS A1516 建具の気密性試験方法に準じ、軒天有孔ボードの有効開口面積の測定を行った。

測定には気密箱を用いて、気密箱内部を送風機で加圧もしくは減圧し、気密箱内外差圧と送風機風量を各5点ずつ測定した(表10.2)。この結果を(10-64)式に当てはめ、最小2乗法を用いて軒天有孔ボードの有効開口面積 αA 及び隙間特性値 n を算出した。

$$Q = \alpha A \left(\frac{2g}{\gamma} \Delta p \right)^{1/n} \quad (10-64)$$

以上の算出結果を表10.3に示す。ただし、棟換気部材については製品カタログの測定データを使用した。これらの値も合わせて表10.3に示す。

表 10.2 軒天有孔ボードの通気特性の測定結果

加圧法による測定		減圧法による測定	
差圧 (mmAq)	通気量 (m ³ /h)	差圧 (mmAq)	通気量 (m ³ /h)
0.51	10.99	0.51	11.73
1.02	16.53	1.02	18.52
1.53	20.30	1.53	23.18
2.04	23.88	2.04	26.32
2.55	25.40	2.55	28.87

表 10.3 換気部材の有効開口面積

	軒天有孔ボード 加圧法結果	軒天有孔ボード 減圧法	加圧法・減圧法 の算術平均値
有効開口面積 αA (cm ² /m ²)	64.41	71.08	67.75
隙間特性値 n (-)	1.88	1.78	1.83
棟換気部材の有効開口面積(cm ² /m: 部材単位長さ当たり)			379.0

(6) 風洞実験による住宅の風圧係数測定方法

小屋裏換気量・屋根通気量を算定するためには、開口部近傍の風圧係数が既知でなければならない。そこで、実験建物を中心とした半径250mの周辺建物を含む1/250スケールの縮小モデルを作成し、北見工業大学構内にある吹出し型風洞装置(1.5m×1.5m×長さ15m: 図10.12)を用いて風向16方位に対する各部の風圧係数を計測した。実験建物及び北海道立寒地住宅都市研究所構内の配置図を図10.13、実験建物の風圧係数計測位置を図10.14に示す。

圧力計測点は桁行方向壁面18点、妻側壁面6点、屋根頂部4点の計28点である。

この風洞装置における住宅モデルへの近寄り流れは乱流境界層であり、大気境界層と類似の特性を有している。図10.15に乱流境界層内の平均速度 U の分布及び主流方向の乱れ成分 u' の分布を示す。風洞内の平均速度分布をべき乗則 $U \propto Z^a$ で近似した時の指数は0.357であり、都市中心部の大気境界層で観測される値に近いものとなっている。

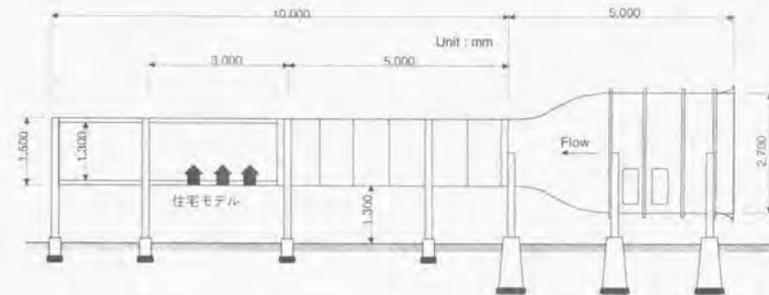


図 10.12 風洞装置の概要

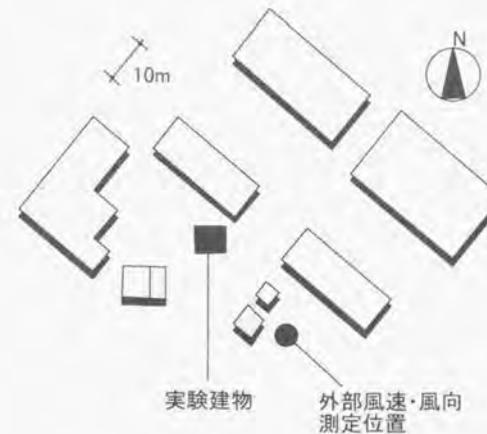


図 10.13 寒研実験住宅の形状、周辺条件等

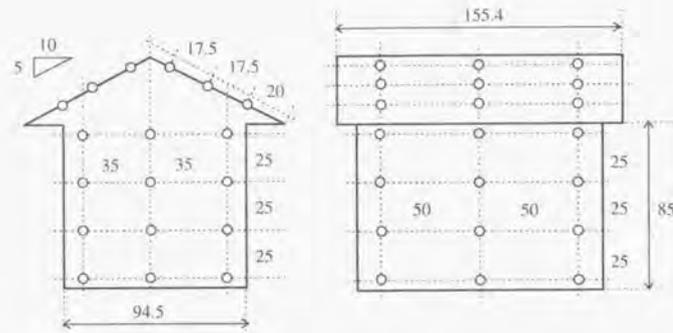


図 10.14 実験建物の風圧係数計測位置

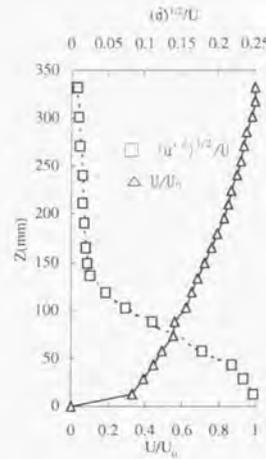


図 10.15 乱流境界層内の平均速度Uの分布及び主流方向の乱れ成分u'の分布

(7) 実験建物各部の風圧係数の計測結果

以上の風洞実験により得られた風向8方位の風圧係数測定値を表 10.4 に示す。実験建物は周辺建物が混在している中に立地するため、各部の風圧係数はかなり幅があることがわかる。

表10.4 寒研実験建物の風圧係数計測値(8方位)

風向	南側軒天部分	北側軒天部分	南側棟部	北側棟部
NE	-1.15	-1.15	-1.25	-1.35
N	-0.38	-0.49	-0.97	-0.75
NW	-0.45	0.13	-0.97	-0.62
W	-0.44	0.87	-1.30	-0.81
SW	0.57	0.16	-0.37	-0.27
S	1.24	-0.01	-0.43	-0.30
SE	-0.04	-0.64	-0.78	-1.20
E	-0.74	-0.51	-0.45	-0.69

10.3 実測結果との検証

(1) 実験建物における小屋裏換気量・通気量の推定

表10.4に示した風圧係数を用いて、10.2.4で述べた算定式により、実験建物の小屋裏換気量・屋根通気量を計算した結果を図10.16に示す。図は、9章で述べた実測期間中の平均的な外部風速ともいえる3.0[m/sec(基準高さH=10m)]とした場合の例を示している。図から、実験建物における天井断熱の小屋裏換気量は、屋根断熱の通気量と比べるとその絶対量は大きいものの換気回数に換算すると小さいことがわかる。また、棟換気併用タイプは軒天換気タイプに比べて、およそどの風向に対しても小屋裏換気量・通気量を増大させる効果があることがわかる。また、周辺建物の影響から、外部風向によって換気量・通気量に大きな違いが生じる場合があること、棟換気併用タイプでは風上側の通気量は増加するが殆どは棟換気から排気されるため風下側の通気量が極端に減ずる場合があることなどがわかる。

屋根断熱モデルでの通気量計算結果では、通気層厚45mmと90mmの違いによる通気量の違いはほとんどない。

寒研実験建物における温度実測では、棟換気併用タイプの南面通気層温度変動幅が北面に比べて大きくなる現象が観測されていたが、この現象は、南面が北を主風向とする卓越風の影響で期間中風下側となる頻度が多く、通気量が減少したことが主因だという推測が換気計算結果からも裏付けられたといえる。

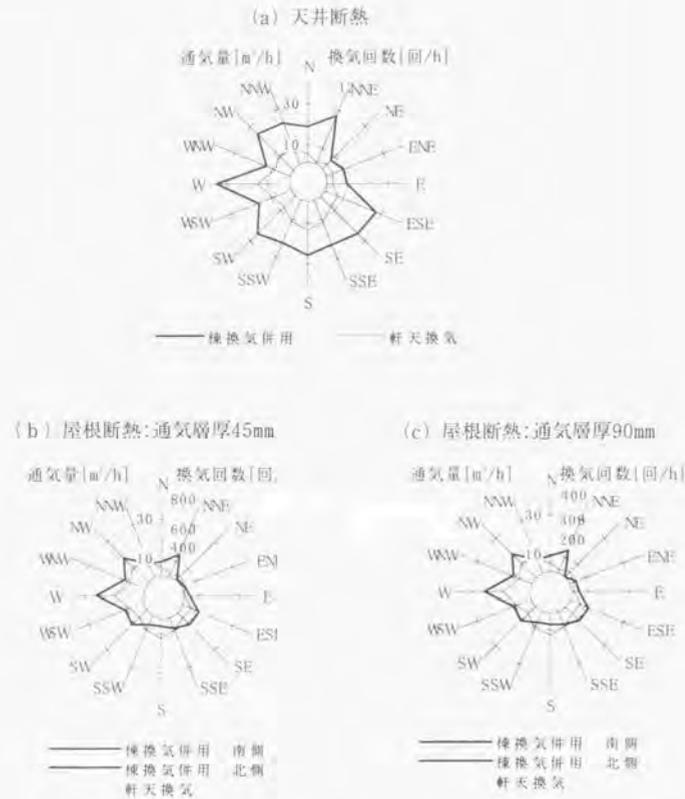


図 10.16 寒研実験建物の断熱・換気条件の違いにおける小屋裏換気量・通気量比較

(2) 小屋裏温度・通気層温度のシミュレーション結果と実測値との比較

実測値と比較するためのシミュレーションは、温度データや積雪厚さなどの実測データが揃っている1995.1.25～1995.2.2までの336時間を対象とする。計算に用いる外気温・室内温度・水平面全天日射量・風向・風速及び室温は実測値を使用し、降水量・雲量については札幌管区気象台のデータを用いる。計算に共する期間中の室温状況は概ね $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ であった。

図10.17に天井断熱・棟換気併用方式の小屋裏温度の実測値と計算値との比較を、図10.18に屋根断熱・軒天換気方式の通気層温度の実測値と計算値との比較を示す。図

10.19には天井断熱・棟換気併用方式での屋根面積積雪深の計算値と実測値を比較したものを示す。

また、外気温と小屋裏温度、通気層通気温度の相関性について比較したものを図10.20、図10.21に示す。

各温度の計算値はピークで実測値よりも $1.0 \sim 1.5^{\circ}\text{C}$ 程度低く示す場合がある。この理由には、対象期間中は屋根面が積雪で全覆条件での結果であるのに対し、実験建物では、ダム式の雪止め柵を軒桁直上に留めており、柵から軒先部分までは屋根面が露出していて、屋根面への日射量熱取得が生じていること、こうした状況で生じる融雪水移動に伴う熱移動を、シミュレーションでは考慮していないことなどが、計算結果と実測結果とのずれの原因と考えられる。

しかし、各温度や屋根面積積雪深の計算値は、実測値と概ね近似かつ同じ変動傾向を示しており、実測による温度変動の性状を良く捉えていると考えられる。

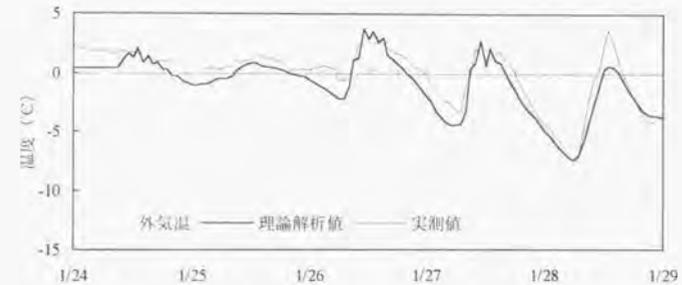


図10.17 天井断熱モデルの実測値と計算値の比較

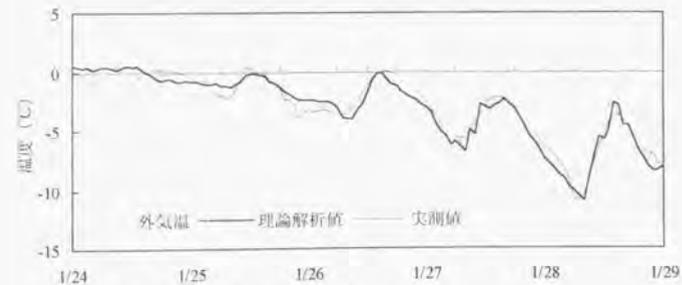


図10.18 屋根断熱モデルの実測と計算値の比較

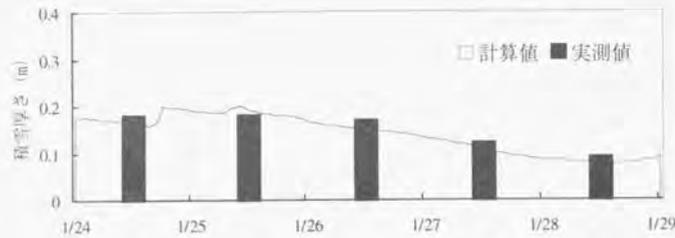


図10.19 実測と計算値の積雪厚さの比較

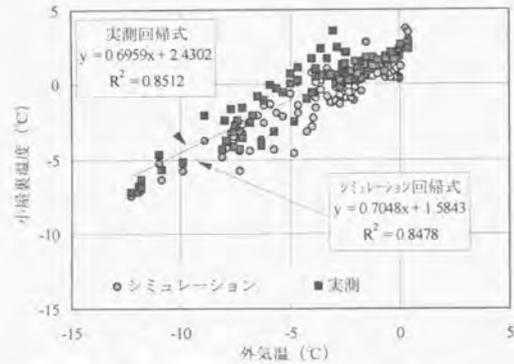


図10.20 天井断熱モデルの小屋裏温度回帰グラフ

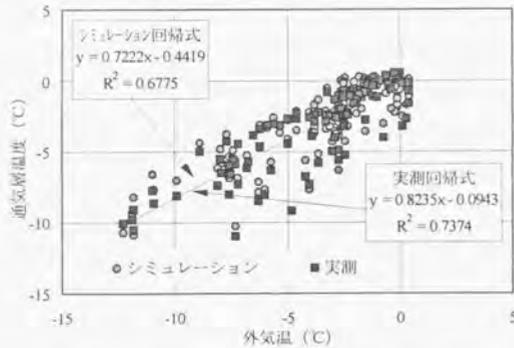


図10.21 屋根断熱モデルの通気層温度回帰グラフ

10.4 本章のまとめ

本章では、屋根面積雪による障害防止を目的とした検討を行うに先立ち、屋根断熱及び天井断熱の場合の小屋裏・屋根通気層構成部材の温度予測を可能とするシミュレーションプログラムの開発を行った。

その結果、蒸気輸送を含む熱伝導率や積雪厚減少などの実測値をもとにした実験式を用いて、本来は取り扱いが容易ではない屋根面積雪の熱的な扱いを簡易な単純熱伝導モデルで扱い、外部風向の変化に連動した換気・通気量を考慮したシミュレーション計算結果は、実測値の性状をほぼ再現できることを示した。

[参考・引用文献]

- [10-1] 稲葉秀男, 大竹秀雄, 野津 滋: 放射熱吸収物質を利用した雪層融解, 第30回日本伝熱シンポジウム講演論文集 1993.5
- [10-2] 中尾隆志, 佐藤公明: 積雪の含水率・温度を考慮した融雪モデルの研究 土木学会北海道支部 論文報告集 昭和63年度
- [10-3] 月館 司, 富田 和彦: ロードヒーティングの期間融雪負荷シミュレーション 空気調和・衛生工学会論文集 No.61, 1996.4
- [10-4] 岩前 篤, 松本 衛: 積雪及び積雪下の地盤の熱水分性状とその解析, 日本建築学会環境工学委員会熱環境小委員会 第26回熱シンポジウム, 1996.10
- [10-5] 前野紀一, 黒田登志雄: 基礎雪氷学講座 I, 雪水の構造と物性, 古今書院 1986.7
- [10-6] 本山秀明, 小島賢治: 積雪深変化の推定法(乾雪の場合) - 積雪層の粘性圧縮を考慮して - (北海道大学低温科学研究所業績第2787号), 低温科学物理篇 昭和60年
- [10-7] 例えば, 中尾隆志, 佐藤公明: 融雪水の積雪浸透に関する実験的研究 土木学会北海道支部 論文報告集 平成2年度
- [10-8] 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説 p.201~210 1996.3
- [10-9] 苫米地 司, 和泉 正哲, 遠藤 明久: 屋上積雪の評価方法に関する基礎的研究 構造工学論文集 vol.32 1986.3
- [10-10] 菊池勝弘, 今 久ほか2名: 札幌市における最近10冬期間の降水の特徴 北海道大学地球物理学研究報告 vol.44, 1984.10
- [10-11] 小野延雄, 石川信敬, 新井 正ほか2名: 基礎雪氷学講座 I, 雪氷水文現象, 古今書院 1994.5
- [10-12] 石原正雄: 建築換気設計, 朝倉書店 1969.3
- [10-13] 西岡哲平, 朝田 満: 融雪に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1989.10
- [10-14] 空気調和・衛生工学便覧 I 巻, 空気調和・衛生工学会編集・発行, オーム社 1982.12
- [10-15] 鈴木大隆, 本間義規ほか: 30° 勾配屋根住宅の立地条件や断熱・換気条件を考慮した小屋裏・通気層温度解析結果と考察, 日本建築学会計画系論文報告集 第504号, 1998.2
- [10-16] 本間義規・鈴木大隆ほか: 積雪寒冷地にふさわしい屋根工法に関する研究(その2 実験建物における温度測定結果とシミュレーション検討), 日本建築学会北海道支部研究報告集No.68, 1995.3
- [10-17] 廣田誠一・本間義規・鈴木大隆・福島明ほか: 積雪寒冷地にふさわしい屋根工法に関する研究(その3 天井断熱モデルのシミュレーション結果について), 日本建築学会北海道支部研究報告集No.69, 1996.3

11

天井断熱・屋根断熱の 断熱・換気設計に関する検討

11.1 はじめに

住宅屋根の積雪障害の有無に大きな係わりがある小屋裏温度や通気層温度は、天井・屋根の断熱性能や小屋裏換気量・屋根通気量によって大きく変化する。

しかし、断熱性能は省エネルギーや居住空間の室温形成から求められ、小屋裏換気・屋根通気は、金融公庫融資仕様書に掲げられた必要換気面積から求められるのが一般的である。特に、仮に換気面積を確保したとしても、密集度合いなどの周辺環境、換気口の形状や設置位置などによって、換気効率は大きく影響を受けることが予想される。

本章では、まず9章で述べた実測結果から屋根面積積雪障害が生じやすい期間を抽出し、10章で検討・提案したシミュレーション手法を用いて、いくつかの断熱・換気条件を前提に住宅立地条件による影響を把握し、換気方式の特性や検討とすべき立地条件を明らかにする。その上で、住宅形状毎に、屋根面積積雪障害の防止に必要な断熱性能と小屋裏換気量・屋根通気量の関係を捉える。そして、現実的なケーススタディを行いながら、断熱・換気に関する知見を得ることと、設計手法を提案することを目的とする。

11.2 検討の概要

小屋裏温度、通気層温度の計算は、10章で提案したシミュレーション手法を用いる。
以下に計算条件や住宅条件と各部の風圧係数等を整理する。

11.2.1 計算条件

(1) 外部気象条件

冬期間に最も屋根面積雪障害が生じやすい期間を探るため、9章で述べた小屋裏・通気層温度と外気温の実測結果を整理したものの一例を図11.1に示す。図は、屋根断熱モデル・軒天換気方式を対象に、1月中旬から3月中旬まで6期に分けて散布したものである。さらに、それぞれの期間における積雪障害の発生頻度を示すものとして、外気温が0℃未満で通気層温度が1℃以上となる時間の発生頻度の割合を表11.1に示す。

図及び表から、1月中旬以降から次いで2月上旬までが他の期間に比べて最も屋根面積雪障害が生じやすい期間であることがわかる。従って、シミュレーションは、外部気象データについては1995年1・2月の札幌管区気象台データを用い、月初めから計算を開始し、助走期間を除いたあとの1月21日～2月10日までの20日間を対象とする。

(2) 室内条件

計算期間中の室温は20度一定とする。

(3) 屋根面積雪厚

屋根積雪厚の初期条件は、屋根面方向に3分割した場合、軒から棟にかけて20、15、10cmの対称形とする。

(4) 計算対象部位

計算対象部位は、11.2.2に示す住宅の東側端部に位置するものとする。

ここで、東側端部としたのは、次の理由による。

- ① 計算期間中、外部風向は北ないし北西を主方向とする頻度が多く、この部分が風下側となるため風上側と比べて温度的に高くなり、屋根面積雪障害に対しては安全側で判断できると考えたこと。
- ② 屋根面頂部や軒天部の風圧係数はばらつきが多く、相互比較を行うには計算対象部位を特定した方が良いと判断したこと。

(5) 計算パターン

本章では、住宅形状、立地条件、断熱・換気条件をパラメーターとしながら検討を進めていくが、その計算パターンを表11.2に示す。

また、11.2.2及び11.2.3に詳説する。

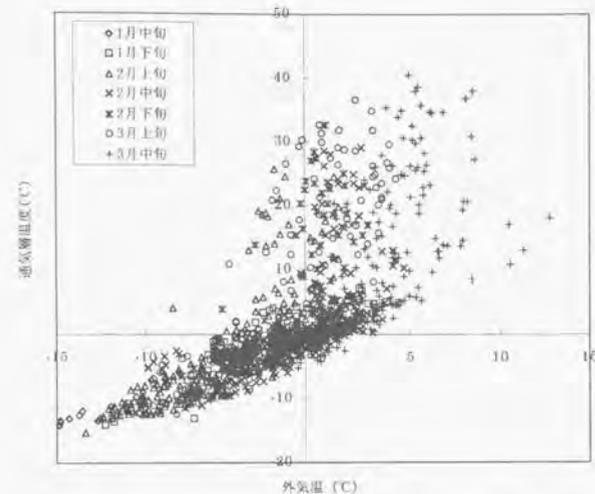


図 11.1 屋根断熱・軒天換気方式の南側通気層温度と外気温の関係

表 11.1 外気温0℃未満、通気層温度1℃以上の実測結果の発生頻度割合

	屋根面積雪障害が発生しやすい条件となる頻度 (%)
1月中旬	6.3
1月下旬	34.8
2月上旬	31.1
2月中旬	25.8
2月下旬	29.7
3月上旬	23.3
3月中旬	5.1

11.2.2 住宅形状・立地条件と各部の風圧係数

(1) 立地条件

立地条件を図 11.2 に示す。立地条件は、次の 2 種類を設定した。

- ① 単独立地条件：広潤地に建設された場合を想定したもの。
- ② 住宅地想定条件：第 1 種住宅専用地域（建坪率上限 40%、容積率上限 60%）に建つことを想定し、建坪率約 31% で隣接住戸が建設されているもので、寒地型の住宅配置として多く見られる南北接道を基本とする。

(2) 住宅形状、屋根形状

住宅形状、屋根形状などを図 11.3 に示す。

住宅形状は、実物換算寸法で間口 6.300mm×桁行 9.900mm、高さは下述の 3 種、延床面積は 125 m²程度の総 2 階建とする。

屋根形状は、積雪寒冷地で標準的な 3 種類の屋根勾配を設定した。

- ① 屋根勾配角度 0°：M 型無落雪屋根またはフラット屋根を想定したもの。
住宅最高高さ=6.470mm。
- ② 屋根勾配角度 30°：北海道における勾配屋根では、落雪を促すため最低この程度の勾配以上とする場合が多い。そこで勾配屋根の最低勾配として設定したもの。住宅最高高さ=7.820mm。
- ③ 屋根勾配角度 45°：急勾配屋根の代表例として想定したもので、10 寸勾配屋根に相当するもの。住宅最高高さ=9.150mm。

(3) 住宅形状・立地条件別の風圧係数の把握

1) 計測概要

(1)、(2) で述べた条件での小屋裏換気量・屋根通気量を推定するため、15/1000 スケールの縮小モデルを作成し、10 章に示した吹出し型風洞装置を用いて風向 16 方位における各住宅モデルの風圧係数を計測した。風洞装置の詳細は 10.2.4 (6) を参照されたい。

風圧計測点の位置を図 11.2 中に示す。

屋根勾配 0° 住戸は、桁行方向壁面 24 点、妻側壁面 24 点、計 48 点である。屋根勾配 30° と 45° の住戸の計測点は桁行方向壁面 56 点、妻側壁面 56 点、各屋根面 42 点の計 154 点である。なお、様々な住宅条件下における各部の風圧係数については既に赤林らが行った詳細な報告[11-1]があるが、勾配屋根は平屋住宅で設定されていることや、北海道などの積雪寒冷地の傾斜屋根はその設定条件より急勾配屋根住宅もあること、棟換気併用方式の推定に必要な棟換気口近傍の風圧係数を把握する必要があったことなどから、坂本・筆者らが計測した風圧係数値を用いることとした[11-2]。

2) 風圧係数の計測値

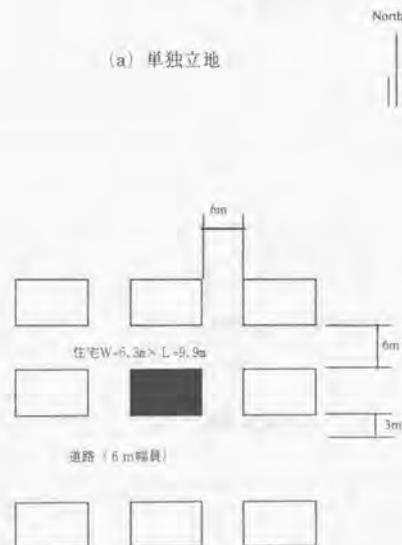
表 11.2 に、各条件別の代表的 8 風向の風圧係数計測値を示す。

表中北側棟換気近傍・南側棟換気近傍とは棟換気部材の換気口両側近傍の計測値をいう。また、住宅地想定条件は、風圧係数を計測した軒の住戸のうち、隣接住戸の影響で各部風圧係数が最も小さく換気量の減少が予想される中央に位置する住宅を検討対象とする。



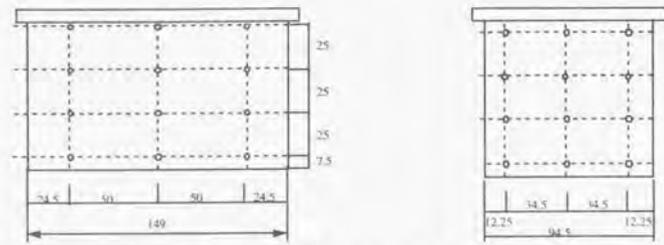
住宅W=6.3m×L=9.9m

(a) 単独立地

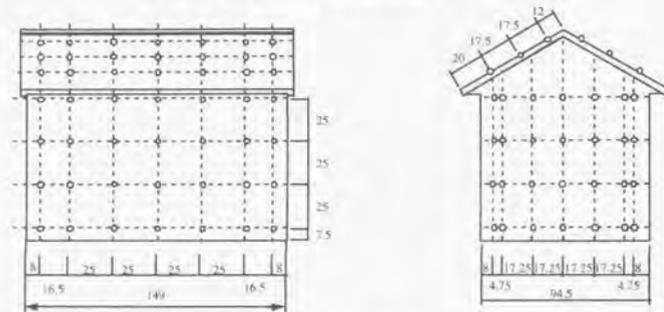


(b) 住宅地想定

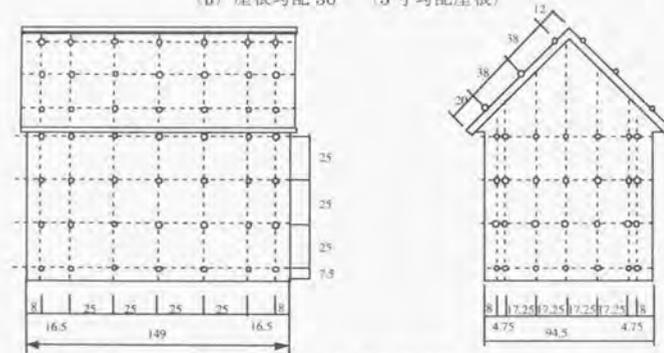
図 11.2 立地条件



(a) 屋根勾配 0° (M型無落雪屋根及びフラット屋根)



(b) 屋根勾配 30° (5寸勾配屋根)



(c) 屋根勾配 45° (10寸勾配屋根)

※ 图中○印は風圧係数計測位置を示す

図 11.3 住宅形状・屋根形状・風圧係数計測位置

表 11.2 住宅・立地条件別の各部風圧係数計測値 (風向 8 方位)

(a) 屋根勾配 0°

風向	南側 軒天部		北側 軒天部		南側 棟換気近傍		北側 棟換気近傍	
	単独地	住宅地	単独地	住宅地	単独地	住宅地	単独地	住宅地
NE	-0.46	-0.35	0.45	-0.10	-	-	-	-
N	-0.28	-0.11	0.70	-0.19	-	-	-	-
NW	-0.46	-0.22	0.45	-0.01	-	-	-	-
W	-0.60	-0.10	-0.60	-0.12	-	-	-	-
SW	0.20	-0.01	-0.46	-0.22	-	-	-	-
S	0.70	-0.19	-0.28	-0.11	-	-	-	-
SE	0.45	-0.10	-0.46	-0.35	-	-	-	-
E	-0.20	-0.12	-0.20	-0.12	-	-	-	-

(b) 屋根勾配 30°

風向	南側 軒天部		北側 軒天部		南側 棟換気近傍		北側 棟換気近傍	
	単独地	住宅地	単独地	住宅地	単独地	住宅地	単独地	住宅地
NE	-0.44	-0.33	0.52	0.09	-0.51	-1.04	-0.11	-0.22
N	-0.37	-0.15	0.73	-0.17	-0.35	-0.28	0.06	-0.17
NW	-0.37	-0.33	0.73	0.09	-0.35	-1.04	0.06	-0.22
W	-0.56	-0.12	-0.56	-0.09	-0.57	-0.10	-0.57	-0.10
SW	0.52	-0.02	-0.44	-0.26	-0.11	-0.22	-0.51	-1.04
S	0.73	-0.16	-0.37	-0.14	0.06	-0.17	-0.35	-0.28
SE	0.73	-0.02	-0.37	-0.26	0.06	-0.22	-0.35	-1.04
E	-0.56	-0.11	-0.56	-0.10	-0.57	-0.10	-0.57	-0.10

(c) 屋根勾配 45°

風向	南側 軒天部		北側 軒天部		南側 棟換気近傍		北側 棟換気近傍	
	単独地	住宅地	単独地	住宅地	単独地	住宅地	単独地	住宅地
NE	-0.43	-0.44	0.50	0.08	-0.51	-0.56	-0.13	-0.07
N	-0.37	-0.18	0.78	-0.11	-0.37	-0.26	0.05	-0.18
NW	-0.45	-0.28	0.14	-0.20	-0.51	-0.56	-0.13	-0.07
W	-0.37	-0.11	-0.37	-0.08	-0.51	-0.10	-0.51	-0.11
SW	0.14	-0.20	-0.45	-0.28	-0.13	-0.07	-0.51	-0.56
S	0.73	-0.15	-0.37	-0.17	0.05	-0.18	-0.37	-0.26
SE	0.50	0.08	-0.43	-0.44	-0.13	-0.07	-0.51	-0.56
E	-0.63	-0.12	-0.63	0.11	-0.51	-0.11	-0.51	-0.10

11.2.3 断熱・換気条件

(1) 「11.3 換気方式の特性と立地条件の違いによる検討」における断熱・換気条件

立地条件の違いによる検討では、表 11.3 (a) 欄に示した断熱・換気条件とする。

ここでは、換気方式の特性や立地条件の違いを把握することが目的であるため、屋根勾配 30° の住宅を対象を絞る。

断熱条件は、天井断熱では、寒冷地で一般的な断熱仕様と高断熱化による影響を把握するため、グラスウール吹込工法で厚さ 200mm と 400mm の 2 種類を設定した。屋根断熱モデルは、寒冷地で一般的な高断熱仕様として、屋根タル木に 210°(W=38mm × H=240mm)材を使用し高性能 GW を 200mm 充填し、高密度 GW15mm で通気層を確保する仕様を設定した。

換気条件に関しては、各断熱方式とも、棟換気併用方式と軒天換気方式を対象としている。各換気部材は、表 10.3 に示すように、軒天換気方式は有効開口面積が 67.75[cm²(ela:有効換気面積との区別化を図るための符号。以下、同じ。)/m²]の市販軒天有孔ボードを軒天井に設置し、棟換気併用方式は、軒天換気口に加え屋根頂部に有効開口面積が 379[cm²(ela)/m]の市販専用部材を設置したものである。また、屋根断熱方式については、9 章で前述した通り、通気層厚 45mm と 90mm では通気量や温度性状に違いが無く、18mm では温度性状が異なる点や施工性の面から問題があることから、30mm と 45mm を対象としている。

計算の組み合わせは、天井断熱及び屋根断熱方式とも各 8 パターンである。

(2) 「11.4 屋根面積雪障害の防止に有効な必要換気量・通気量の検討」

における断熱・換気条件

この項の検討では、表 11.3 (b) 欄に示す断熱・換気条件とする。

ここでは、立地条件を住宅地想定に絞り、3 種の屋根形状を対象とする。

各屋根形状に応じて、断熱性能と必要換気量、そして換気手法との関連付けをするのが主な目的であるため、断熱・換気条件とも数種のパラメーターを設定する。

断熱条件に関しては、工法的な実現性を保つ範囲で各断熱方式における断熱材の R 値をラウンドナンバー化して 5~9 の 5 段階で設定する。換気条件に関しては、11.3 の項で設定する換気方式の他に、毎時の計算値に 0.5~8 の 4 種の換気倍率を掛け合わせた場合も計算条件に加えている。なお、11.3 で後述する結果から、屋根断熱の通気層厚は 30mm の 1 種に限定した。また、フラット屋根は、通常の換気経路の厚さは 300mm 程度だが、工法によってはたる本程度の厚さ (45mm) になることもあるので 2 種設定した。

従って、断熱性能に対する必要な換気・通気量を求める計算の組み合わせは、屋根形状・断熱方式・換気方式・換気倍率の異なる 45 パターンである。

表 11.3 断熱・換気条件

(a) 「11.3 換気方式の特性と立地条件の違いによる検討」の断熱・換気条件

立地条件	住宅屋根形状	断熱方式	換気方式
単独立地	屋根勾配 30°	天井断熱 R=4.444 [m ^h C/kcal]	軒天換気
			棟換気併用
住宅地想定		R=8.889 [m ^h C/kcal]	軒天換気
			棟換気併用
単独立地	屋根断熱 R=5.882 [m ^h C/kcal]	屋根断熱 R=5.882 [m ^h C/kcal]	軒天換気
住宅地想定			棟換気併用
		通気層厚 30mm, 45mm	
			棟換気併用

(b) 「11.4 屋根面積雪障害の防止に有効な必要換気量・通気量の検討」の断熱・換気条件

立地条件	住宅屋根形状	断熱方式	換気方式	換気倍率	
住宅地想定	屋根勾配 30°	天井断熱 R=5.0, 6.0, 7.0	軒天換気	× 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0	
			棟換気併用		
	屋根勾配 45°	R=8.0, 9.0 [m ^h C/kcal]	軒天換気	× 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0	
			棟換気併用		
	屋根勾配 30°	屋根断熱 R=5.0, 6.0, 7.0	屋根断熱 R=5.0, 6.0, 7.0 通気層厚 30mm	軒天換気	× 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0
				棟換気併用	
屋根勾配 0°	R=5.0, 6.0, 7.0	天井断熱 R=5.0, 6.0, 7.0	軒天換気	× 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0	
					換気経路厚 300, 45mm

11.3 換気方式の特性と立地条件の違いによる検討

11.3.1 検討概要

本検討は、表 11.3 (a) に示す条件の小屋裏換気量・通気量、各温度の相互比較から、各立地条件における各換気方式の特性や立地条件が及ぼす影響を把握することを主な目的とする。

前述した通り、住宅・屋根形状は 3 種設定しているが、ここでは屋根勾配 30° の住宅に着目して検討を進めることとする。

11.3.2 小屋裏換気量・通気量の推定

立地条件、断熱・換気条件の違いによる平均的な小屋裏換気量・南北面通気量を示すため、図 11.4、図 11.5 は、基準高さ $H=10\text{m}$ で検討期間中の発生頻度が高い外部風速 $3[\text{m}/\text{sec}]$ の場合に着目して、桁行長さ $450\text{mm} \times$ 間口 $6,300\text{mm}$ 当たりの小屋裏換気量・屋根通気量の風向別算定結果を示したものである。

いずれの場合でも、東西方向の外部風向に対して、換気量・通気量がそれぞれ落ち込んでいるが、これは東西方向（住宅妻側）に換気口を設けない条件で検討を行っているためである。妻側に換気口を設定しなかった理由は、現在市販されている妻用換気口は防雨性はあるが、北海道のような乾燥雪が降雪する地域では粉雪の侵入する危険性が高く、実際に適用されるケースが少ないことや実用面で問題があると判断したためである。

(1) 天井断熱・小屋裏換気量の比較

単独立地の場合、図 11.4 (a) から、棟換気併用方式は東西風向を除いて概ね $25\text{m}^3/\text{h}$ （換気回数：10 回/h 程度）の小屋裏換気量が確保できるのに対し、軒天換気方式は $10\text{m}^3/\text{h}$ （換気回数で 5 回/h 程度）に減少している。また、前者は東西風向に対しても $5\text{m}^3/\text{h}$ 程度の換気量が確保されているが、後者はほぼ換気が行われないことがわかる。

住宅地想定の場合、図 11.4 (b) から、棟換気併用方式は南北東西風向を除いて概ね $15 \sim 20\text{m}^3/\text{h}$ （換気回数：6 ~ 10 回/h 程度）の小屋裏換気量が確保できるのに対し、軒天換気方式は $5 \sim 7\text{m}^3/\text{h}$ （換気回数で 3 回/h 程度）に減少している。南北方向の外部風に対しても換気量が落ち込んでいるのは、風上側の隣接住宅に影響によるものと推測される。また、東西風向は両者に大きな差は無い。軒天換気方式でも僅かに換気がなされるのは、隣接住戸の影響で南北の軒天井に圧力差が生じるためである。

以上のことから、換気方式の違いでは、軒天換気方式に比べて棟換気併用方式が各風向に対して換気促進効果に優れていることがわかる。また、立地条件の違いでは、単独立地と比べて住宅地想定は、風向によって 10 ~ 80%、平均 40 ~ 60% 程度の換気量が低下することがわかる。

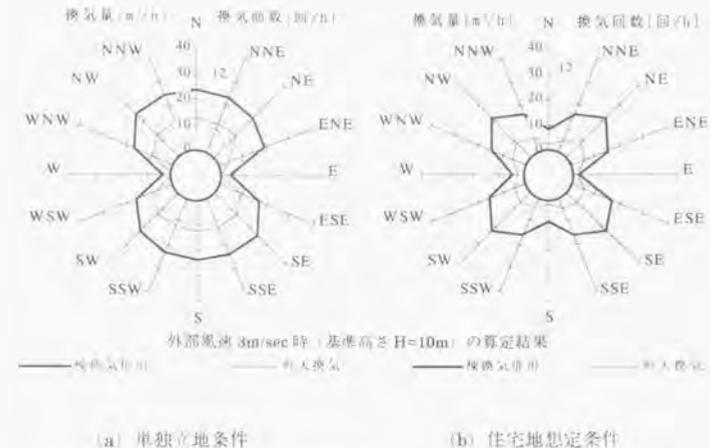


図 11.4 立地条件・換気方式の違いによる天井断熱・小屋裏換気量の比較

(2) 屋根断熱・通気量の比較

図 11.5 から、単独立地の場合は東西風向、住宅地想定条件の場合は南北・東西風向に対して各通気量が落ち込んでいることがわかる。これは、天井断熱と同様の理由によると推測される。

また、殆どの風向で、棟換気併用方式は南北面の通気量に違いがあることがわかる。例えば、単独立地の場合は、東西風向を除いて、風上側は概ね $15\text{m}^3/\text{h}$ （換気回数：450 回/h 程度）の通気量が確保されているのに対し、風下側は概ね $10\text{m}^3/\text{h}$ （換気回数：300 回/h 程度）となっており、約 35% 程度減少する。また、住宅地想定の場合は、南北・東西風向を除いて、風上側は概ね $10\text{m}^3/\text{h}$ （換気回数：300 回/h 程度）の通気量が確保されているのに対し、風下側は概ね $7\text{m}^3/\text{h}$ （換気回数：200 回/h 程度）となっており、約 30% 程度減少する。これは、風上側に当たる通気層内通気量の相当量が負担となっている棟換気から排出し、その分風下側の通気量が減少するためである。このような換気特性が、9 章で前述したように、風下側となる頻度の多い南側通気層の一時的な温度上昇の原因になっていたものと考えられる。

検討期間中は、北を主方向とする卓越風が多いため、南面の通気量が減少する頻度が

多いと推測されること、南側屋根面は日射受熱が多く屋根面積雪の融雪を促す危険性が高いことなどから、屋根断熱の場合は南面で検討することが重要といえる。

通気層厚みの違いに関しては、通気層厚 30mm と 45mm の通気量の違いは大きくないことがわかる。これは、このオーダーの厚みであれば、通気層内の通気抵抗より、軒天換気などの通気部材の抵抗で流量が支配されていることの現れといえよう。よって以下では、通気層厚 30mm の南側通気層に着目して、換気方式の違いによる比較検討を行っていくこととする。

立地条件の違いに関しては、単独立地の場合、図 11.5 (a) から、棟換気併用方式と軒天換気方式は、風向によっては後者が僅かに優る場合もあるが、両者の違いは殆どなく、概ね $10\text{m}^3/\text{h}$ (換気回数: 300 回/h 程度) 程度の通気量が確保されている。

一方、住宅地想定の場合、図 11.5 (b) から、棟換気併用方式は北風を除いて概ね $7\text{m}^3/\text{h}$ (換気回数: 200 回/h) 程度の通気量があるのに対し、軒天換気方式は概ね $5\text{m}^3/\text{h}$ (換気回数: 150 回/h) 程度に減少しており、棟換気併用方式の換気促進効果が現れている。

以上のことから、換気方式の違いでは、軒天換気方式に比べて棟換気併用タイプは、特に住宅地想定条件の場合に通気促進効果に優れていることがわかる。また、立地条件の違いでは、単独立地と比べて住宅地想定は、概ね 40~60% 程度の通気量が低下することがわかる。

(3) 換気量・通気量比較のまとめ

換気量・通気量に関して、次のことがいえる。

- 1) 軒天換気方式に比べて、棟換気併用方式の方が、換気量・通気量の確保に有利に働く。
- 2) 単独立地に比べて、住宅地想定の場合換気量・通気量は大きく低下する。
- 3) 天井断熱の小屋裏換気量に比べて、屋根断熱の通気量は、立地条件や換気方式によって多少の違いがあるものの、半分以下にまで低下する場合がある。しかし、換気回数として見ると、前者の 30 倍から 60 倍程度となる。
- 4) 屋根断熱で棟換気併用方式の場合、風上側と比べて風下側の通気量が 30% 以上低下することが多い。

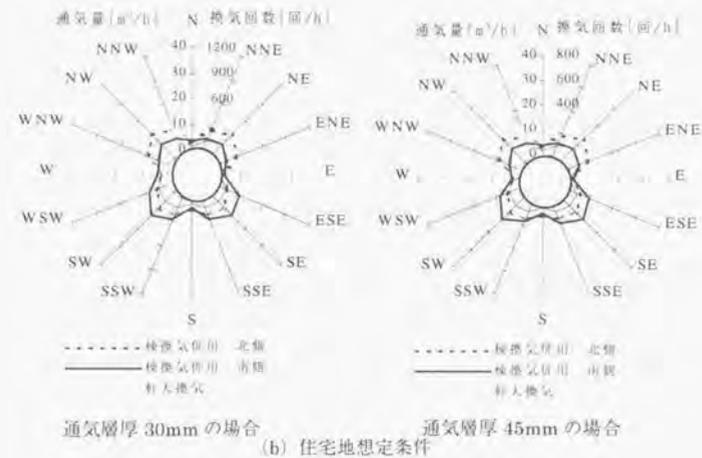
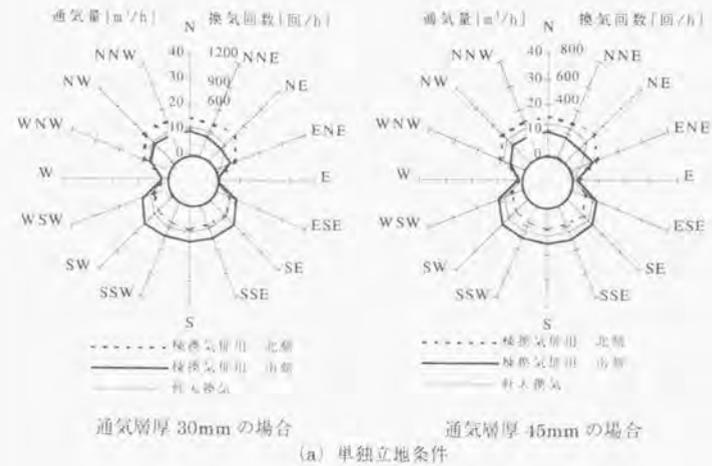


図 11.5 立地条件・換気方式の違いによる屋根通気量の比較
外部風速 3m/sec 時 (基準高さ H=10m) の算定結果

11.3.3 天井断熱方式の小屋裏温度に関する検討

天井断熱方式に関して、天井断熱材の熱抵抗値 $R=4.444[m^2 h^{\circ}C/kcal]$ (以下この項では、 $R=$ と称す)と $R=8.889$ の1時間毎の小屋裏温度解析結果を図 11.6 に示す。図は 9 章と同様に、相対比較が容易なように外気温昇順で並び替えたものである。

立地条件の違いで見ると、単独立地の場合は、住宅地想定条件の場合と比べて、換気手法の違いによる差異は少なく、外気温との追従性が高い。換気手法によって換気量に差異があるにもかかわらず温度性状に違いが顕れないのは、いずれのタイプでも十分な換気量が得られているためと推測される。住宅地想定の場合は、棟換気併用方式の温度性状は、単独立地よりもやや高く推移しながらも外気温との近似性が高い。しかし、軒天換気方式は高い温度で推移し、外気温との追従性が悪いことがわかる。

断熱性能の違いで見ると、 $R=4.444$ レベルでは、外気温との追従性が悪く、例えば住宅地想定の場合の軒天換気タイプでは、外気温によらず最も融雪障害の起きやすい $0^{\circ}C$ 付近を推移する。しかし、 $R=8.889$ レベルになれば、外気温との追従性は改善し、前述タイプでも、外気が低温時には小屋裏温度を概ね $0^{\circ}C$ 以下に保つことが可能であることがわかる。

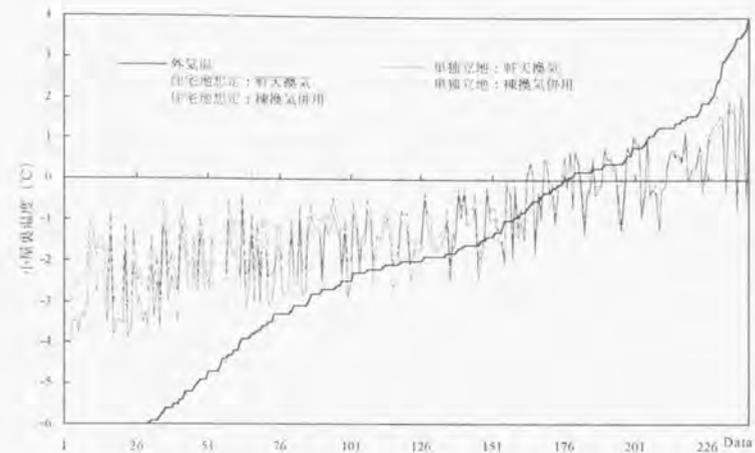
また、外気温が $0^{\circ}C$ 未満の場合における各小屋裏温度が $-1^{\circ}C$ 以上となる発生頻度 (以下、「障害の温度発生頻度」と称す。)を表 11.4 に示す。表中の数値が大きいほど屋根面積雪障害が生じやすいことを示している。前述したことはこの表からも良く説明できる。さらに、断熱条件と換気条件の関連では、同じ換気条件の場合は天井断熱強化が障害防止に有効であることがわかり、その傾向は換気量に乏しい住宅地想定条件で顕著である。見方を変えれば、仮にここで検討した以上の断熱強化を図った場合は、これまで設定した換気条件でも上記発生頻度の割合を相当減らす可能性も残っていることを示しているといえよう。

以上の検討から、単独立地のような通風換気に支障の無い立地条件では、ここで検討した換気手法のいずれかを講じ、 $R=6.667\sim 8.889$ 程度の天井断熱性能を確保することで、屋根面積雪障害を防止できる可能性が高い。しかし、住宅地に建つ場合は、上記の点に留意するだけでは十分とはいえず、上記より更に断熱を強化するか、または設定条件より換気量を増加する必要があると考えられる。

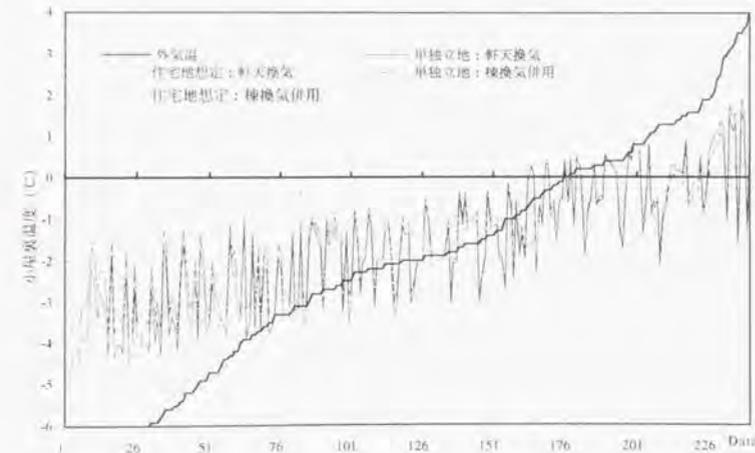
表 11.4 天井断熱方式で外気温が $0^{\circ}C$ 未満で小屋裏温度が $-1^{\circ}C$ 以上になるデータの発生頻度の割合 [%]

計算条件	単独立地		住宅地想定	
	軒天換気	棟換気併用	軒天換気	棟換気併用
断熱性能 [$m^2 h^{\circ}C/kcal$]				
$R=4.444$	18.8	35.8	93.8	39.8
$R=6.667$	11.9	23.3	63.1	28.4
$R=8.889$	11.4	18.8	47.2	22.7

※表中の数値は発生頻度 [%] を示し、外気温が $0^{\circ}C$ 未満で小屋裏温度が $-1^{\circ}C$ 以上となる時間を、外気温 $0^{\circ}C$ 未満の合計時間数で除したものである。表中の数値が大きいほど屋根面積雪障害が生じやすいことを示している。



(a) 断熱性能 $R=4.444 [m^2 h^{\circ}C/kcal]$ の場合



(b) 断熱性能 $R=8.889 [m^2 h^{\circ}C/kcal]$ の場合

図 11.6 天井断熱方式の小屋裏温度比較

11.3.4 屋根断熱方式の通気層温度に関する検討

屋根断熱方式では、冬期卓越風の影響で風上側より通気量が減じ温度変動巾が大きく危険側となりがちな風下側（南面）の通気層温度を対象として比較評価を行う。

図 11.7 は立地条件、断熱・換気条件の違いによる 1 時間毎の通気層温度解析結果を外気温昇順に並び替えたものである。この図は、屋根断熱として一般的な断熱仕様である熱抵抗値 $R=5.882[m^2 \cdot h \cdot K / kcal]$ (以下この項では、 $R=$ と称す) の場合の解析結果を通気層の厚さ別に示したものである。

立地条件の違いでは、同じ換気条件で見ると、単独立地は外気温との追従性が良好で外気温が 0°C 未満時に通気層温度がプラスとなる頻度も少ないのに対して、住宅地想定は外気温が 0°C 未満では単独立地より高い温度で推移し、外気温が 0°C 以上では低い温度で推移しており、天井断熱方式と同様に外気温への追従性が低下する。また、表中に示す頻度の割合も多くなる傾向がある。

一方、換気条件の違いでは、通気層厚の違いに着目すると、それぞれの条件下において、通気層厚さ 30mm より 45mm の方が、外気温との追従性が若干良好となる傾向が見受けられるが、外気温が低い場合を除くとその違いは少ない。次に、換気方式の違いに着目すると、軒天換気方式より棟換気併用方式の方が、外気温との追従性は良いことがわかる。これは、図 11.5 に示すように棟換気併用方式の風下側通気量が減少する風向はごく一部で、外部風向は絶えず変化するため、殆どの風向に対してこの方式の通気量が優ることによるものと推測される。

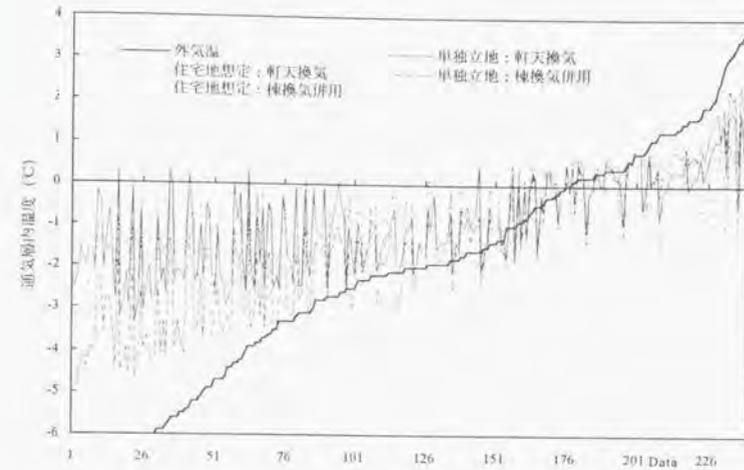
また、障害の温度発生頻度を表 11.5 に示す。これらのことは、表中に示す各発生頻度の割合でもよく説明できる。

以上のことから、住宅地想定条件の場合には、天井断熱と同様に、ここで検討した条件では十分といえず、障害発生頻度の割合を減ずる方向での検討が必要である。

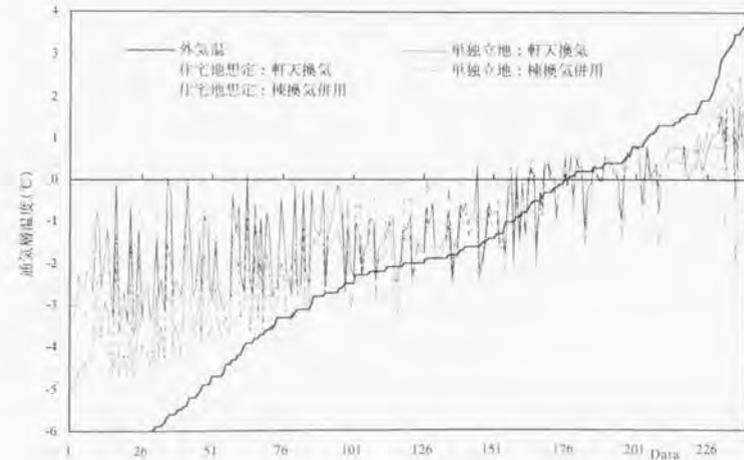
表 11.5 屋根断熱方式で外気温が 0°C 未満で小屋裏温度が -1°C 以上になるデータの発生頻度の割合[%]

計算条件	単独立地		住宅地想定	
	軒天換気	棟換気併用	軒天換気	棟換気併用
30mm モデル	39.5	23.9	50.6	48.3
45mm モデル	32.6	21.0	47.2	45.5

※表中の数値は発生頻度[%]を示し、外気温が 0°C 未満で通気層温度が -1°C 以上となる時間を、外気温 0°C 未満の合計時間数で除したものである。表中の数値が大きいほど屋根面積雪障害が生じやすいことを示している。



(a) 通気層厚 30mm の場合



(b) 通気層厚 45mm の場合

図 11.7 屋根断熱方式の通気層温度比較

11.4 屋根面積雪障害の防止に有効な断熱・換気手法に関する検討

11.4.1 検討概要

本項では、屋根面積雪障害の防止に有効な断熱・換気設計手法を提案すべく、立地条件を住宅地想定に絞り、3種の住宅屋根形状を対象として検討を行う。

本項は、次に示す内容で構成される。

11.4.2で、表11.3(b)に示す断熱・換気条件で小屋裏温度・通気層温度を計算し、障害の温度発生頻度(外気温0℃未満で各温度が-1℃以上となるデータの割合)を把握する。次に11.4.3で、屋根面積雪障害の防止の目安として障害発生頻度25%以下になるような必要換気量・通気量を断熱性能との関係で示す。さらに11.4.4で、代表的な断熱仕様を前提とした場合の換気手法の検討する。そして11.4.5で、検討結果を用いて、屋根面積雪障害の防止に有効な断熱・換気設計手法を提案する。

住宅屋根の設計は、周辺環境や外部意匠等から勾配が先に決まる。また、これまでの検討から、どの部位で断熱するか、すなわち天井断熱か屋根断熱か、そしてどの換気方式とするか、すなわち軒天換気か棟換気併用方式かによって求められる換気量・通気量は異なってくる事が予想される。

そこで、以下では、屋根勾配、断熱・換気方法別に検討を進めていくこととする。

11.4.2 各条件別「障害の温度発生頻度」の把握

勾配屋根における小屋裏換気量と障害の温度発生頻度の関係を、天井断熱の場合を図11.7~11.8、屋根断熱の場合を図11.9~11.10、M型無落雪屋根・フラット屋根を図11.11に示す。

各図は、横軸に桁行方向の幅455mmで平均小屋裏換気量・通気量、縦軸に前述の発生頻度を置き、断熱性能別(R=5.0から9.0[m²hC/kcal]の5段階)に示したものである。

ここで、平均小屋裏換気量は、10章で示した計算式により、表11.2の風圧係数を用いて毎時の換気量を求め、計算期間の1時間当たりの平均値で示したものである。障害の温度発生頻度は、まず各断熱・換気条件毎に小屋裏温度を計算し、外気温が0℃未満で小屋裏温度が-1℃以上となる全期間に対するデータの割合を示したものである。

また、フラット屋根では、軒天換気方式で換気経路の厚さを2種設定しているが、どちらも軒天換気方式となり、平均換気量と障害の温度発生頻度の関係での違いはないため、図は換気経路厚300mmとした場合の検討結果を示したものである。

図中では、断熱材の熱抵抗値R毎に、各点のプロットと累乗近似式を示している。

図中の横実線は障害の発生頻度25%を示し、各近似式との交点から最低必要換気量・通気量が得られる。

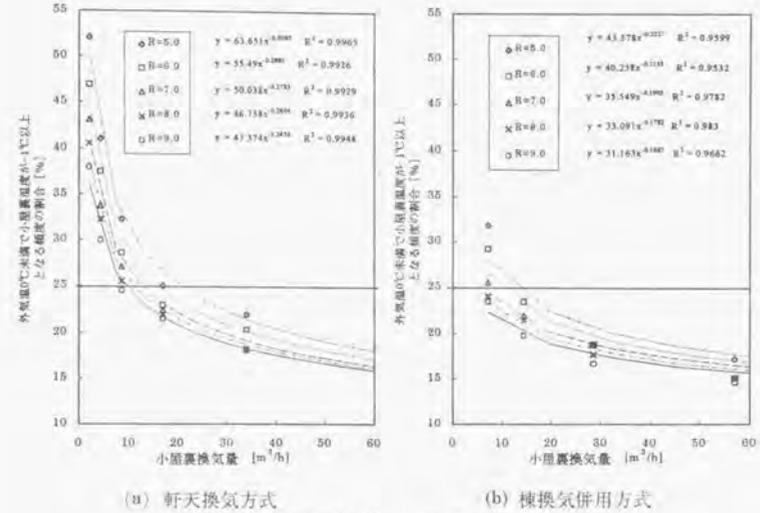


図11.7 屋根勾配30° - 天井断熱の場合

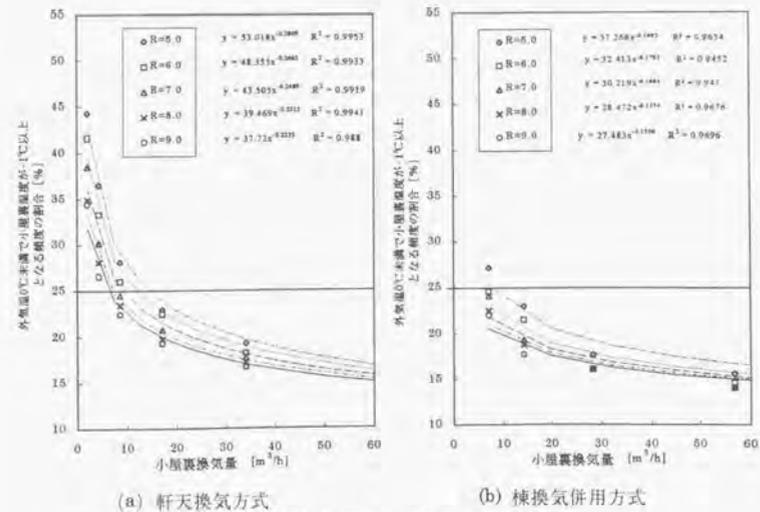
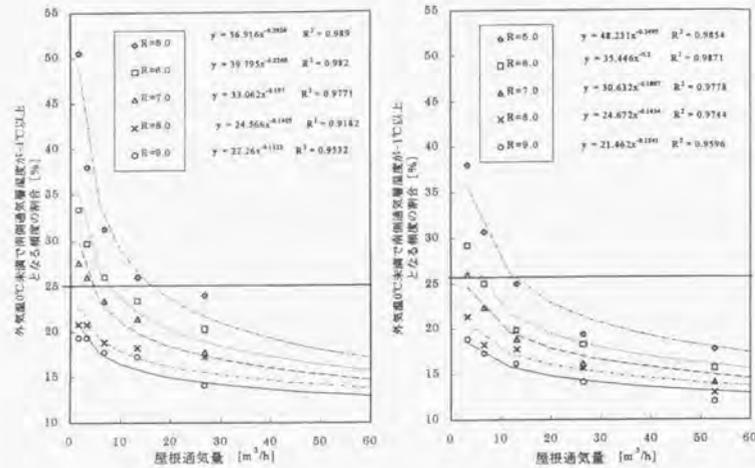
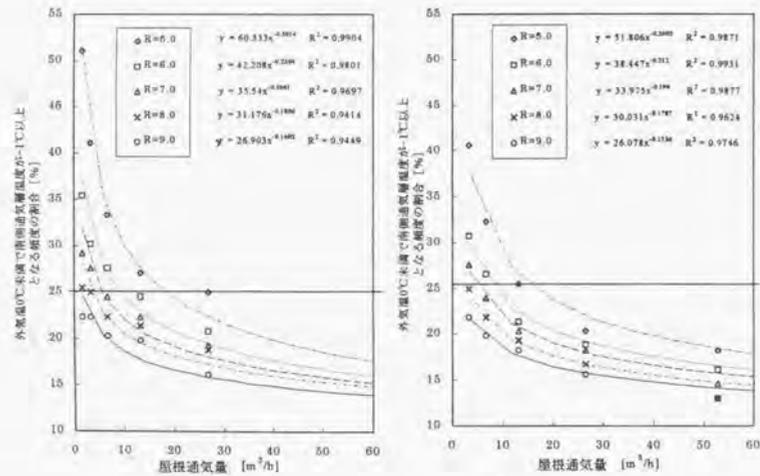


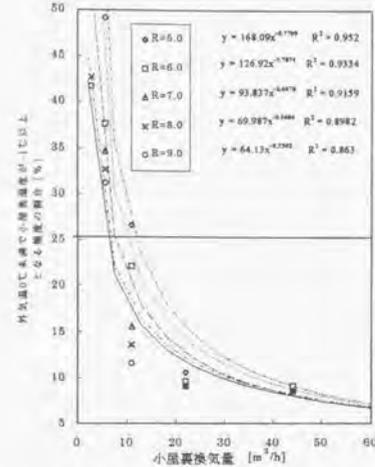
図11.8 屋根勾配45° - 天井断熱の場合



(a) 軒天換気方式 (b) 棟換気併用方式
図 11.9 屋根勾配 30° - 屋根断熱の場合



(a) 軒天換気方式 (b) 棟換気併用方式
図 11.10 屋根勾配 45° - 屋根断熱の場合



(換気経路厚 300mm の計算結果)
図 11.11 屋根勾配 0° - 天井断熱の場合

11.4.3 住宅形状毎の断熱性能と必要換気量・通気量の検討

図 11.12~11.13 は、図左に、障害の発生頻度が 25%以下となる断熱性能 R 値と平均必要換気量・通気量の関係、図右に所定の換気量等を確保するための軒天井及び棟頂部に設ける換気口の有効開口面積の関係を示したものである。

図左は、図 11.7~11.11 に示した断熱性能毎の累乗近似式から、障害の温度発生頻度を 25%以下とするための必要換気量・通気量を住宅形状・断熱方式・換気方式毎に求めたものである。なお、必要換気量・通気量は、桁方向 455mm 当たりの計算期間中の 1 時間当たりの平均値である。

図右は、各換気方式毎に、換気口の有効開口面積を設定し、10.2.4 に述べた換気・通気量算定式に基づいて計算期間中の平均換気量・通気量を求めたものである。図の横軸は 2 軸あるが、下軸は桁方向 455mm 当たりの軒天換気部材の有効開口面積を示し、上軸は、天井面積 1 m² 当たりには占める軒天換気部材の有効開口面積の合計値の比を示している。計算は、軒天換気方式の場合、軒天井に設ける換気部材の有効開口面積を、軒桁方向 455mm 当り 5~100[cm²(ela)/455mm]の範囲で 5 cm²毎に 20 段階で設定している。また、

棟換気併用方式の場合は、軒天井に設置する換気部材は前述の通りとし、棟換気口は有効開口面積を天井面積 1m^2 当たり 24.2、48.3、72.5、96.6[cm^2/mmAq]の4段階の設定とし、それらを組み合わせたものである。

なお、勾配屋根・天井断熱方式の 30° と 45° では、同一の換気手法を用いた場合に得られる換気量は殆ど違いはない。これは、風力による換気に関しては、殆どが換気口の出入り口の流通抵抗で決まり、小屋裏の換気経路の違いによる影響は殆ど無いこと、また、屋根頂部の高さが 3m 程度の違いでは温度差による換気量の差も殆ど無いことによる。従って、この方式の換気量は、温度差による換気がやや少なくなる屋根勾配 30° の計算結果を示している。また、勾配屋根・屋根断熱方式の換気量は 30° より 45° の方がやや減少する。これは、流通経路が長く、流量抵抗が増すためである。そこで、この方式は、換気量が少なくなる屋根勾配 45° の計算結果を示している。

なお、有効開口面積とは実開口に流量係数 α を乗じたものを言い、公庫仕様書などで用いられている有効換気面積（換気口の実開口面積）とは異なる。理由は後述する。

実際の設計を行う際には、断熱性能 R 値は、断熱工法として実現可能な範囲から決定することが重要であり、換気設計も市販汎用される換気部材で構築可能でなくてはならない。以下では、それらに関する考察を加える。

表 11.6 は、各断熱方式の代表的仕様と熱抵抗値の関係を示したものである。天井断熱の場合は熱抵抗値が概ね $5\sim 8[\text{m}^2\text{h/kcal}]$ 、屋根断熱の場合は熱抵抗値が概ね $5\sim 6.5[\text{m}^2\text{h/kcal}]$ 程度が、一般的に施工可能な範囲といえよう。

また、表 11.7 は、市販されている換気部材の有効開口面積 αA を示したものである。軒天井用換気部材として一般的な有孔ボードは、軒の出を 450mm とした場合の桁方向 455mm 当たりの有効換気面積は $20[\text{cm}^2/455\text{mm}]$ 程度だが、有効開口面積は $11\sim 12[\text{cm}^2(\text{ela})/455\text{mm}]$ となり、約 $1/2$ まで減少する。また、最も有効開口面積が確保できるのは表中*2のスリット状換気部材 ($\alpha A=75\sim 20[\text{cm}^2(\text{ela})/455\text{mm}]$) である。軒先の見切り材として良く使われる通気見切り部材 (表中*3) は、有効換気面積は $15\sim 20[\text{cm}^2/455\text{mm}]$ 程度であるが、換気口の抵抗が大きいため有効開口面積は、有孔ボードと同様に、 $1/3\sim 1/2$ 以下まで減少する。従って、換気量の面からは有孔ボードと同様以下の性能しか有していない。また、ガラリ付きのレジスターを設置した場合は、これらより大きな換気面積を確保することも可能である。しかし、意匠性に乏しく、積雪・降水が侵入する危険性が少なくないので、なるべく避けた方がよい。従って、軒天井に設置する換気口の αA は $75\sim 5[\text{cm}^2(\text{ela})/455\text{mm}]$ 程度の範囲で考えた方がよいだろう。

棟換気部材も多数市販されているが、本州の瓦屋根や緩勾配屋根用途のものも多く、積雪地の板金屋根に適用できるものは少ない。表中の部材は、北アメリカで開発された棟換気専用部材で、適用上のフレキシビリティが高いため、北海道などの積雪地で多く使われているものである。この部材を使用すると、部材長さ 1m 当たりの $\alpha A=379[\text{cm}^2(\text{ela})/\text{m}]$ が確保できる。これを、図中に対応する天井面積 1m^2 当たりで表すと、屋根頂部に全て使用した場合で $60[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ となり、部材の施工間隔に応じて、その $1/2$ 、 $1/4$ 程度の面積となる。従って、この棟換気部材を用いた場合の天井面積 1m^2 当たりの有効開口面積は $60\sim 15[\text{cm}^2(\text{ela})/\text{m}^2]$ 程度の範囲と考えてよいだろう。

表 11.6 各断熱方式の代表的仕様と熱抵抗値

断熱方式	断熱仕様	熱抵抗値 R [$\text{m}^2\text{h/kcal}$]	
天井断熱	吹込み用グラスウール 13-18K 熱伝導率 $\lambda=0.045[\text{kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}]$	200mm	4.44
		250mm	5.56
		300mm	6.67
	吹込み用ロックウール 25K 熱伝導率 $\lambda=0.040[\text{kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}]$	200mm	5.00
		250mm	6.25
		300mm	7.50
屋根断熱	グラスウール 16K 熱伝導率 $\lambda=0.039[\text{kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}]$	150mm	3.85
		200mm	5.13
		250mm	6.41
	高性能グラスウール 16K ロックウール 等 熱伝導率 $\lambda=0.034[\text{kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}]$	150mm	4.41
		200mm	5.88
		250mm	7.35

表 11.7 換気部材の施工間隔と有効開口面積 αA の関係

※各換気部材の概要は図 12.2 を参照

(a) 軒天換気部材 (桁行方向 455mm 当たりの $\alpha A[\text{cm}^2(\text{ela})]$)

換気部材		施工間隔			
		全て適用	910mm 間隔	1820mm 間隔	2730mm 間隔
有孔ボード	*1	11~13	5.5~6.5	—	—
通気スリット部材	*2	75	37.5	18.8	—
通気見切り部材	*3	10未満	—	—	—

*1: 最も一般的な軒天用有孔ボードで、孔径 5mm が 400 個/ m のもの

*2: 軒先設置型のストロー状集積部材で $\alpha A=166[\text{cm}^2(\text{ela})/\text{m}^2]$ のもの

*3: 軒先に設置する通気見切り材で、有孔ボードに次いで一般的なもの。
ハンチングメタル風の見切り金物

(b) 棟換気部材 (天井面積 1m^2 当たりの $\alpha A[\text{cm}^2(\text{ela})]$)

全て適用	910mm 間隔	1820mm 間隔	2730mm 間隔
60	30	—	—

棟換気部材は、ストロー状集積部材で $\alpha A=379[\text{cm}^2/\text{m}]$ のもの

以下では、屋根勾配と断熱方式、換気方式の違いに着目して、各図左から読みとれる各手法の特性について述べる。

(1) 屋根形状の違いに関して

傾斜屋根・天井断熱方式では、30°に比べて45°勾配の方が、断熱性能と同じとした場合は必要換気量を約30～50%程度減ずることが可能になることがわかる。また、換気量と同じとした場合は、必要な断熱性能を約25%程度減ずることが可能になることがわかる(図11.12左)。これは、後者の小屋裏容積が大きく、小屋裏空気や構成材料の熱容量が大きくなり、高温外気が流入しても温度上昇幅が小さくなることが理由である。また、冬期間の日射入射角が低い北海道では(北緯43°の冬至南中高度は23.6°)、30°より45°勾配の方が、屋根面の日射受熱量が大きく、屋根面積雪厚が小さい場合には、通気層への伝熱量が多くなることも理由と考えられる。

また、0°勾配の場合は、傾斜屋根の軒天換気方式に比べて、同じ断熱性能を確保した場合は必要換気量を減ずることが可能になることがわかる(図11.13左)。これは、勾配屋根と比べて小屋裏容積が少なく、換気回数が増大するため、外気温との追従性が良くなること、屋根面受熱日射量が少ないことなどが理由である。しかし、この方式の場合は、棟換気併用方式を用いることができないため、換気設計上の制約がある。この点については11.4.4(1)で後述する。

傾斜屋根・屋根断熱方式では、天井断熱と異なる傾向を示している。すなわち、30°勾配より45°勾配の方が、断熱性能と同じとした場合は必要換気量が、換気量と同じとした場合は必要な断熱性能がわずかに大きくなる(図11.14左)。これは、屋根断熱は卓越風の影響で北側通気層を経由して南側通気層に侵入することが多いため、通気経路が長い45°勾配屋根は、その間の温度上昇分が大きくなり、それを低減するための通気や断熱の必要性が増すためである。

(2) 断熱方式の違いに関して

傾斜屋根において、断熱方式の違いに着目すると、屋根断熱方式は天井断熱方式に比べて、断熱性能が同じ場合には、必要換気量を減ずることが可能になることがわかる。これは、前述したように、通気層容積が少なく、少ない換気量でも大きな換気回数を得られるため、外気温との追従性が良くなることが理由である。

(3) 換気方式の違いに関して

0°勾配は軒天換気方式しか適用できないため、ここでは勾配屋根で比較する。

天井断熱方式の場合は、軒天換気方式に比べて棟換気併用方式は、同じ断熱性能とした場合、必要換気量を50%以下にできることがわかる(図11.12左)。これは、11.3で述べたように、棟換気併用方式はどの風向に対しても安定した換気量が得られるのに対し、軒天換気方式は風向によっては換気量が得られない場合があるため、結果的に多量の換気量を要することが理由である。

屋根断熱方式の場合も同じ傾向があるが、天井断熱方式ほどの有効性は認められない。これは、この換気方式は、多風向に対して比較的安定した換気量を確保できるものの、外気が北から侵入する頻度が高い冬期間は、相当分が棟換気から排気され、南側通気量が

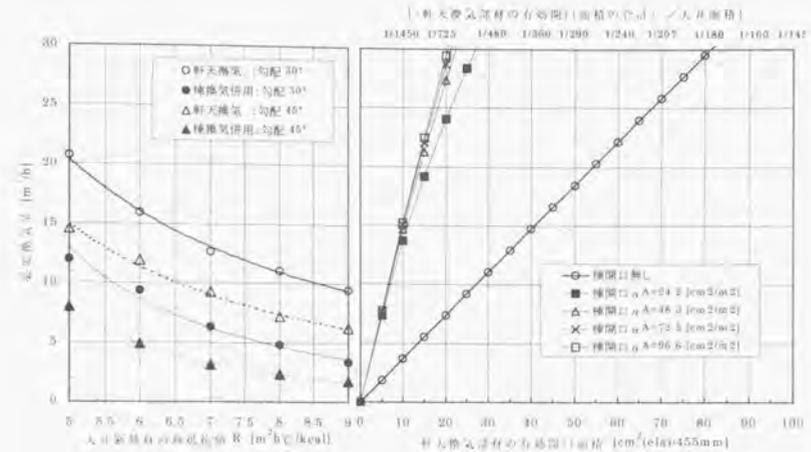


図 11.12 傾斜屋根・天井断熱方式における断熱性能と平均必要換気量・有効開口面積の関係

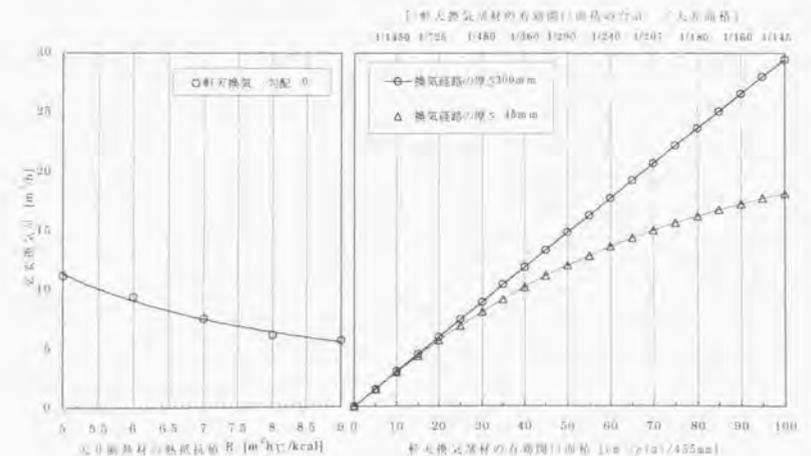


図 11.13 フラット屋根・天井断熱方式における断熱性能と平均必要換気量・有効開口面積の関係

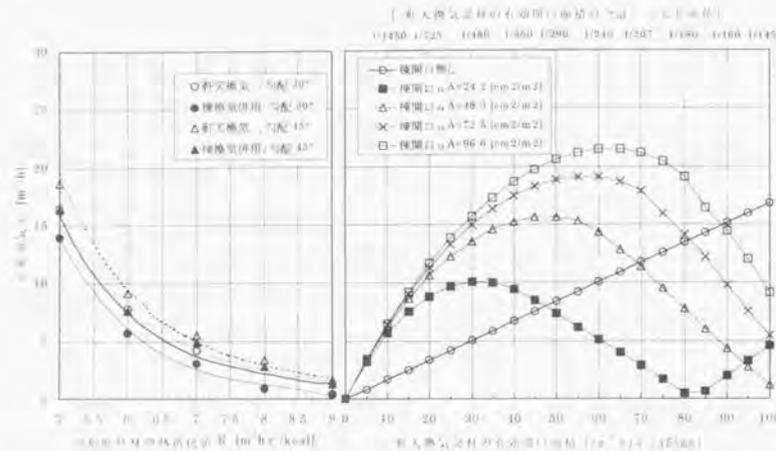


図 11.14 傾斜屋根・屋根断熱方式における断熱性能と平均必要換気量・有効開口面積の関係

減ずるためである。なお、屋根断熱の通気量が(図 11.14 右)、棟換気口の aA によってそれぞれ最大値がある。これは軒天換気口を大きくとりすぎると、棟換気口から排気される分が多くなって、風下側の通気量が限ることを意味している。従って、軒天換気口は、棟換気口の aA とのバランスの中で最適値を求めていくことが重要である。

11.4.4 断熱・換気設計のケーススタディ

ここでは断熱仕様を新省エネルギー基準と同等以上とした場合の、各換気方式毎の有効開口面積の把握と、換気手法としての実現性に関して検討・考察する。

表 11.8 は、図 11.12~11.13 を用いて、各住宅形状毎に換気設計のケーススタディを行ったものである。表中では、使用できる換気部材の有効開口面積と()内に天井見付け面積当たりの有効開口面積合計値の比(表中では面積比と称す)を示す。なお、表の右欄に、住宅金融公庫の共通仕様書[11-3]や学会仕様書[11-4]などの既往の基準(以下、既往の基準と称す)で用いられている、天井見付け面積当たりの有効換気面積合計値の比を参考までに示す。

(1) 勾配屋根・天井断熱方式の場合

天井断熱の仕様は、屋根勾配に係わらず、寒冷地では吹込み用グラスウール(表中ではGWB) 250mm (R 値=5.56[m² h/kcal]) もしくは 300mm (R 値=6.67[m² h/kcal]) が一般的である。

1) 屋根勾配 30°

寒冷地で一般的な断熱仕様GWB-250mm (R=5.56) の場合、軒天換気方式では軒天換気部材の有効開口面積は $aA=50[\text{cm}^2(\text{ela})/455\text{mm}]$ 以上、面積比では 1/290 以上必要となる。これは、一般的な有孔ボードや通気見切り部材では有効開口面積が大幅に不足しており、通気スリット部材など設置が必要であることを意味している。

方、棟換気併用方式とした場合は、棟換気に $aA=24[\text{cm}^2(\text{ela})/\text{m}^2]$ 以上、軒天井に $aA=12[\text{cm}^2(\text{ela})/455\text{mm}]$ 以上の換気部材を設ければよい。これは、屋根頂部長さの半分に棟換気部材を設け、軒天井全てに有孔ボードを用いれば良いことを意味している。

断熱仕様をGWB-300mm (R=6.67) とした場合、いずれの換気方式でも、前述の仕様と比べて、軒天換気部材の aA を約 30%減少することができる。例えば、棟換気併用方式の場合は、有孔ボードを軒天井面積の 2/3 以上を使用する方法も可能である。

なお、棟換気口は、4 段階で設定・検討したうちの最小値で決まっており、さらに施工間隔を広げて aA を減じることとも可能と思われる。しかし、軒天井に設置する換気部材の aA が大きくなるのが、前項で述べたように、必ずしも最適な設計にはならないため、 $aA=24$ で固定することとした。

2) 屋根勾配 45°

断熱仕様にかかわらず、軒天換気方式の換気仕様は、30° 勾配の R=6.67 の換気仕様とすることができる。また、棟換気併用方式の場合は、棟換気口の aA は変わらないが、軒天の有孔ボードは、R=5.56 で軒天井面積の 1/2 以上、R=6.67 で 1/3 以上に使用すればよいことになる。

(2) M型無落雪屋根またはフラット屋根の場合

この屋根形状の換気設計を行う場合に注意しなくてはいけないことは、M型無落雪は 300mm×300mm の内樋を屋根面に設けるため、最低でも天井断熱上端からの小屋裏高さが 300~400mm 以上確保されるのに対し、フラット屋根は内樋が不要のため、屋根たるき厚さ(45mm)程度の小屋裏空間しか確保されないことである。ここでは、その違いも含めて検討する。

屋根工法の違いでは、図 11.13 右から、前者を想定した通気経路厚 300mm に比べて、後者を想定した通気経路 45mm は、軒天換気部材の aA が大きくなるにつれて、得られる換気量が少なくなる。これは、換気量が増すと、換気経路の抵抗の影響が大きくなるためである。

天井断熱性能が R=5.56 の軒天換気部材の aA は、M型屋根では 35、フラット屋根では $40[\text{cm}^2(\text{ela})/455\text{mm}]$ 以上必要となり、30° 勾配屋根の同仕様と比べると、30~20%ほど少なくなる。これは、11.4.3 (1) で述べた理由による。

次に R=6.67 の場合は、それぞれ $aA=25, 29[\text{cm}^2(\text{ela})/455\text{mm}]$ となり、R=5.56 と比べて 30%ほど減ずることが可能である。そして、ロックウール 300mm を吹込んだ場合には (R=8.82)、両工法とも $aA=20[\text{cm}^2(\text{ela})/455\text{mm}]$ 程度まで減少する。しかし、重要な

表 11.8 断熱・換気設計のケーススタディ

(a) 勾配屋根・天井断熱方式

屋根勾配	断熱仕様 断熱 R 値	換気方式	有効開口面積と面積比 ^{*1} [cm ² (ela)/455mm]	既往の基準値 実開口面積の面積比 ^{*1}
30°	GWB250mm R=5.56	軒天換気	$\alpha A=50$ (1/290 以上)	1/250 以上
		棟換気 併用方式	軒 $\alpha A \geq 12$ (1/1200 以上) 棟 $\alpha A \geq 24$ (1/1200 以上)	1/900 以上 1/1600 以上
	GWB300mm R=6.67	軒天換気	$\alpha A \geq 35$ (1/390 以上)	同上
		棟換気 併用方式	軒 $\alpha A \geq 7$ (1/2000 以上) 棟 $\alpha A \geq 24$ (1/1200 以上)	
45°	GWB250mm R=5.56	軒天換気	$\alpha A \geq 35$ (1/390 以上)	同上
		棟換気 併用方式	軒 $\alpha A \geq 5$ (1/2800 以上) 棟 $\alpha A \geq 24$ (1/1200 以上)	
	GWB300mm R=6.67	軒天換気	$\alpha A \geq 26$ (1/530 以上)	同上
		棟換気 併用方式	軒 $\alpha A \geq 3$ (1/2800 以上) 棟 $\alpha A \geq 24$ (1/1200 以上)	

(b) M型無落雪屋根・フラット屋根

屋根勾配	断熱仕様 断熱 R 値	換気方式	有効開口面積と面積比 ^{*1} [cm ² (ela)/455mm]	既往の基準値 実開口面積の 面積比 ^{*1}	
0°	GWB250mm R=5.56	軒天換気	M型	$\alpha A \geq 35$ (1/390 以上)	1/250 以上
			フラット	$\alpha A \geq 40$ (1/360 以上)	
	GWB300mm R=6.67		M型	$\alpha A \geq 25$ (1/580 以上)	
			フラット	$\alpha A \geq 29$ (1/500 以上)	
	RWB300mm R=8.82	M型	$\alpha A \geq 20$ (1/725 以上)		
		フラット			

*1 面積比とは、天井の見付け面積（屋根断熱の場合は見かけの水平天井面積）に占める各換気口の面積合計値の比をいう。但し、本論では有効開口面積を指標にしているが、既往の基準では実開口面積、すなわち有効換気面積を用いており、数値上の単純比較はできない。

(c) 勾配屋根・屋根断熱方式

屋根勾配	断熱仕様 断熱 R 値	換気方式	有効開口面積と面積比 ^{*1} [cm ² (ela)/455mm]	既往の基準値 実開口面積の面積比 ^{*1}
30°	HGW200mm R=5.88	軒天換気	$\alpha A \geq 45$ (1/320 以上)	1/250 以上
		棟換気 併用方式	$\alpha A \geq 12$ (1/1200 以上)	1/900 以上
$\alpha A \geq 24$ (1/1200 以上)			1/1600 以上	
45°		軒天換気	$\alpha A \geq 60$ (1/240 以上)	1/250 以上
	棟換気 併用方式	$\alpha A \geq 20$ (1/720 以上)	1/900 以上	
$\alpha A \geq 24$ (1/1200 以上)		1/1600 以上		

ことは、この屋根工法の場合は断熱性能を向上しても、実際の仕様としては、軒天有孔ボードや通気水切り部材を使用できるオーダにはならず、通気スリット部材を使用しないといけない点である。

(3) 傾斜屋根・屋根断熱方式の場合

屋根断熱の仕様は、工法的に厚い断熱を施すことが難しく、210“材（38mm×235mm）を用いた屋根たる木の間高性能グラスウール（表中では HGW）を 200mm 程度とするのが一般的である。その時の R 値は 5.88 となり、天井断熱の GWB250mm に近いものとなる。

1) 屋根勾配 30°

軒天換気方式では、軒天換気部材の有効開口面積は $\alpha A=45[\text{cm}^2(\text{ela})/455\text{mm}]$ 以上、面積比では 1/320 以上必要となり、天井断熱の換気仕様より必要な面積は減ずる。しかし、実際の仕様としては通気スリット材を用いることとなり、天井断熱の仕様と変わらない。なお、棟換気併用方式とした場合は、天井断熱の 30° 勾配の仕様と変わらない。

2) 屋根勾配 45°

屋根勾配 45° の場合は、11.4.3 (2) で述べたように、前者に比べて必要となる有効開口面積は増える。すなわち、軒天換気方式では $\alpha A=60[\text{cm}^2(\text{ela})/455\text{mm}]$ 、面積比は 1/240 以上となり、30° 勾配屋根に比べて約 30% 程度増加する。その結果、天井断熱の 45° 勾配とした時よりも、必要とする有効開口面積は大きくなる。

実際の仕様としては、軒天換気方式は 30° 勾配の場合と変わらないが、棟換気併用方式では、軒天井の換気部材は有孔ボード、通気水切り部材のオーダではなく、その上位仕様のものが必要となる。

11.4.5 屋根面積雪障害防止に向けた断熱・換気設計手法の提案と 既往の基準の考え方としての問題点

11.4.4 では、北海道における新省エネルギー基準と同等以上の代表的な断熱仕様を前提に、換気設計に関するケーススタディを行った。その結果、屋根勾配、断熱・換気方式によって、換気口の必要な有効開口面積が異なることなどを述べた。

(1) では、断熱・換気設計手法を提案する。そして(2)では、提案値と既往の基準と比較し、その考え方の違いや問題点などについて考察する。

(1) 屋根面積雪障害の防止に向けた断熱・換気設計手法の提案

屋根面積雪障害の防止を目的とした断熱・換気設計手法の提案として、次の3つの方法が考えられる。

1 つ目は、立地条件や住宅形状を考慮し、屋根面積雪障害に関する判断基準を設け、10章で開発した小屋裏・通気層温度の数値予測プログラムを用いて、様々な住宅形状、断熱・換気方式に応じた断熱・換気性能の最適値を求める方法である。この方法は、様々な設計条件に対応することができる。しかし、序章や7章でも述べたように、地域で展開する住宅建設の担い手に対して、この計算方法の提案だけでは、II部で取り上げた問題は解決しないだろう。なぜなら、精緻な検討を行うには、地域の気象データ、住宅各部の風圧係数の把握など多くのデータの蓄積と専門知識を要し、一般の住宅技術者では対応できないためである。むしろ、多少の設計施工上の制約が生じて、もう少し具体的な断熱・換気設計に関する目安が必要である。

2 つ目は、図 11.12～11.14 に示したように、住宅形状、断熱方式、換気方式毎のグラフから断熱・換気設計を行う方法である。この方法は、1 つ目の方法よりは簡便で、しかも多くの設計バリエーションを考えていくことができるものである。

3 つ目は、簡便化を図るために、断熱性能は新省エネルギー基準と同等以上、勾配屋根は30°～45°の範囲に限定するという前提条件で、住宅形状・換気方式毎に、馴染みのある天井見付け面積当たりの換気口の面積比を満たすという方法である。表 11.8 と、それをさらに簡便化した表 11.9 がこれに該当する。ここで、表 11.9 は、住宅形状、換気方式毎に安全側の値で統合し、簡便にしたものである。なお、表中の値は、勾配屋根・天井断熱は危険側の30°勾配 R=5.56 で、屋根断熱は危険側の45°勾配でそれぞれ提案している。また、M型無落雪屋根等は、危険側のフラット屋根で、各換気口の面積比を統合したものである。表 11.9 は、表 11.8 に比べて、安全側の設計となり、多少、過剰設計となる場合もあるが、分かりやすいのが特徴である。

これらの表を用いれば、各換気部材の有効開口面積の情報があれば、換気設計が可能となるだろう。

以上、3つの方法が提案できるが、多くの住宅技術者が利用できるものとしては2または3の方法であろう。

表 11.9 住宅形状・換気方式毎の換気口面積比の提案値

		換気口の面積比の提案値 (有効開口面積を指標とする)			既往の基準値 有効換気面積 を指標とする
		勾配屋根		M型無落雪屋 フラット屋根	
		天井断熱方式	屋根断熱方式		
軒天換気方式		1/290 以上	1/240 以上	1/360 以上	1/250 以上
棟換気 併用 方式	棟換気口	1/1200 以上			1/1600 以上
	軒天換気口	1/1200 以上	1/720 以上		1/900 以上

(2) 既往の基準との比較と問題点の整理

前項では、屋根面積雪障害の防止を目的とした3つの断熱・換気設計手法を提案した。しかし、いずれの方法にしても、既往の基準値の考え方との大きな違いがある。

1 つ目は、本章の検討は全て換気口面積の指標に有効開口面積を用いているが、既往の基準では、それを用いず、有効換気面積を指標にしている点である。有効換気面積は換気を担う開口の実面積を表しているにすぎなく、部材の通気抵抗などを勘案した実際の通気性能を示すものではない。従って、11.4.2でも述べたように、有効開口面積は、有効換気面積よりかなり小さくなるのが一般である。例えば、軒天井有孔ボードは1/2以下、通気見切り材は1/2～1/3にまで低下する。換言すれば、使用部材によっては、既往の基準値の2～4倍程度、換気口面積が必要となるということである。一方、検討対象とした棟換気部材など、有効開口面積と有効換気面積ではそれほどの違いは無いものもある。このように、同じ有効換気面積の換気部材でも、例えば換気口の防虫網の仕様やガラリの形状、フードの形状など換気部材形状によって、有効開口面積は大きく変化する。そのようなことから、換気量・通気量を扱う基準では、通気抵抗のファクターが考慮されない有効換気面積を指標に用いることは、使用部材によって得られる性能のばらつきが大きくなると予想され、きわめて問題が多い。また、換気部材メーカーのカタログには、有効換気面積しか表示されておらず、設計資料としての整備が望まれる。

2 つ目は、カテゴリ分類が異なる点である。公庫基準などの既往の基準では、換気方式の違いでしか性能値が定められていない。仮に、これらの基準値は、小屋裏の防露、排熱等のために定められた基準であるとしても、例えば排熱に関して言えば、屋根形状に応じて最低限必要とする換気量には違いが生じるはずである。また、余りにもラフな決め方では、極端に過剰な設計が行われることも考えられる。

従って、最適な断熱・換気設計を行うことを重んじれば、最低限、表 11.9 に示すような住宅形状、断熱方式・換気方式毎に設計値を決める必要があると考えられる。

11.5 まとめ

本章では、10章で提案したシミュレーションプログラムを用いて、屋根面積雪障害の防止を目的とした断熱・換気設計に関する検討を行った。

まず、立地条件の違いや換気方式の特性の把握を目的とした検討から、次のようなことが明らかとなった。

- (1) 立地条件の違いでは、単独立地に比べて住宅地想定条件下では、同一の換気手法を用いた場合でも、確保できる換気量・通気量は平均して40～60%程度減少し、その結果、屋根面積雪障害が生じやすくなる。
- (2) 棟換気併用方式は、軒天換気方式に比べて多方位の風向に対して安定的に換気量・通気量が確保でき、屋根面積雪障害の軽減に有効である。
- (3) 屋根断熱・棟換気併用方式とした場合、風上側と比べて風下側の通気量が30%以上低下する場合が多い。冬期間は卓越風の影響で南側通気層がこれに該当することが多い。その結果、南側通気層の外気温との追従性が悪くなり、北側より南側で積雪障害が生じやすい条件となる。
- (4) 天井断熱より屋根断熱の方が少ない通気量となるが、換気回数は30～60倍程度となるため、外気温との追従性が向上する。

これらから、住宅地想定条件下で積雪障害に対して危険側となる南側屋根面に検討対象を絞ることとした。計算は、住宅形状と断熱・換気条件の異なる45パターンで行い、屋根面積雪障害の防止に向けて、次のことが明らかとなった。

- (5) 断熱性能が向上する、あるいは換気量・通気量を大きくすることが、障害の温度発生頻度を少なくし、障害防止に有効である。
- (6) 棟換気併用方式は、(2)の理由から軒天換気方式に比べて障害の温度発生頻度を減ずることができる。
- (7) 屋根断熱は、(4)の理由から天井断熱に比べて障害の温度発生頻度を減ずることができる。

そして、障害の温度発生頻度を25%以下となる屋根勾配毎の断熱・換気性能の検討から、設計上の知見として、次のことが得られた。

- (8) 傾斜屋根の勾配の違いでは、天井断熱は45°より30°勾配の方が積雪障害に対して危険側となり、断熱性能あるいは必要換気量を増す必要がある。また、屋根断熱は30°より45°勾配の方が、障害防止に必要な断熱性能あるいは通気量を増す必要がある。前者は、小屋裏容積が小さいことや日射受熱量が多いこと、後者は通気経路が長くなることなどが主な理由である。
- (9) M型無落雪屋根及びフラット屋根は、軒天換気方式しか適用できないが、傾斜屋根30°の天井断熱と比べて、必要な断熱性能、あるいは換気量をわずかに減ずることができる。これは、小屋裏容積が小さく、換気回数が増えるためである。
- (10) 断熱方式の違いでは、天井断熱に比べて屋根断熱方式の方が、断熱性能が同じ場合、総じて必要換気量を減ずることができるが、その効果は棟換気併用方式では少ない。前者は、通気容積が小さく換気回数が増すこと、後者は(3)の理由による。

- (11) 換気方式の違いでは、傾斜屋根の天井断熱では、棟換気併用方式は軒天換気に比べて必要換気量を大幅に減少でき、有効性が高い。一方、屋根断熱では、傾向は同じだが、天井断熱ほどの効果はない。これは、(3)に述べた理由による。
- (12) 屋根断熱・棟換気併用方式の場合、棟換気口の σA に応じて、軒天換気口の σA の最適な範囲があり、その範囲より大きくすると、むしろ風下側の通気量が減ずることがある。

また、新省エネルギー基準と同様以上の断熱性能の確保を前提とした場合の、換気設計のケーススタディーから、次のことが明らかとなった。

- (13) 本論で対象とした屋根形状、断熱・換気条件では、いずれのタイプでも、汎用部材を用いて障害の温度発生頻度を25%以下に抑えることが可能である。
- (14) 住宅形状、断熱・換気方式によって必要な換気口の有効開口面積は大きく異なる。

そして、屋根面積雪障害の防止に向けた断熱・換気設計手法として、シミュレーションプログラムによる方法、図11.12～図11.14に示した性能規定的な方法、表11.8あるいは簡便化した表11.9を読みとる仕様限定的な方法の3つを提案した。

また、既往の基準値に対して、有効開口面積を用いることの重要性と、最適設計を行うには住宅形状、断熱・換気方式毎に細分化して性能値を決める必要があることを指摘した。

[参考文献・引用文献]

- 11-1 赤林伸一, 村上周三ほか: 周辺に建物群のある独立住宅の風圧分布に関する風洞実験および換気量予測, 日本建築学会計画系論文集第 456 号, 1994.2
- 11-2 鈴木大隆, 本間義規, 廣田誠一ほか: 積雪寒冷地にふさわしい屋根工法に関する研究(その1-4), 日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学, 1995.8 ~ 1997.10
- 鈴木大隆, 本間義規ほか: 30° 勾配屋根住宅の立地条件や断熱・換気条件を考慮した小屋裏・通気層温度解析結果と考察, 日本建築学会計画系論文報告集 第504号, 1998.2
- 11-3 住宅金融公庫: 住宅金融公庫融資住宅共通仕様書, 1997
- 11-4 建築工事標準仕様書・同解説 24 断熱工事 4 節木造断熱工事

12

II部の小括

—積雪寒冷地の住宅屋根デザインへの提案—

II部では、住宅屋根デザインの積雪寒冷への対応に向けて、屋根面積雪障害の防止を目的とした断熱・換気設計に関して検討した。

本章では、各章をまとめ、屋根面積雪障害の防止に向けた設計フローを提案し、それを構成する技術の具現化について述べて、II部の締めとしたい。そして、さらに考察を加え、筆者の研究フィールドである積雪寒冷地の望ましい住宅屋根デザインのImageを考えていく。

12.1 各章のまとめ

8章では、我が国の積雪寒冷地は、世界でも類を見ないほど多雪な気候にあることを述べ、北海道における住宅屋根の技術的変遷に触れた。すなわち、氷柱、落雪事故、巻垂れなどの屋根面積雪障害は、住宅の断熱化や宅地の狭小化などに伴って顕在化し、対処策として様々な屋根形状や屋根材料、防止技術が生まれた。しかし、それらの多くは、材料的或いは設備的対処に留まっており、根本原因を解決するものではなく、長期的防水性や意匠性、環境負荷低減などの面で多くの課題を有していることを論じた。また、屋根雪の問題を建築的に解決していく研究がこれまで殆ど行われていないことが、対応の仕方を多様化・混迷化させる原因ともなっていることを述べた。そして、屋根積雪障害の原因を建築的に取り除く設計手法を明らかにすることが、積雪寒冷地の住宅外皮をデザインする上で重要であることを示した。

9章では、換気手法の異なる天井断熱4種、屋根断熱7種を適用した実験建物各部の温度測定と屋根面積雪障害の発生状況の観察した結果を述べた。屋根面積雪障害の原因としては小屋裏・通気層温度が関係しており、外気温との追従性が良好な断熱・換気手法ほど、屋根面積雪障害が生じにくいことを示した。また、天井断熱と屋根断熱との比較、軒天換気と棟換気併用方式との比較などから、小屋裏・通気層温度の性状は、断熱方式や換気手法によって大きく異なることを述べた。そして、屋根面積雪障害の発生程度は小屋裏・通気層温度が支配的であることに着目し、外気温と小屋裏・通気層温度の関係に着目し、前者が0°未満の時に後者が1°C以上になる頻度が概ね20~25%程度を超えるか否かが判断の目安になることを示した。

10章では、屋根面積雪障害に関係する小屋裏・通気層温度を捉えるためのシミュレーションプログラムの検討・開発を行った。屋根面積雪のモデル化に関しては、なるべく実際の積雪性状を再現できるように、既往の研究をベースに、降水量から積雪深への変換や、融雪・再凍結時の積雪保有含水量、圧密を含めた積雪深の推定などを考慮した。また、小屋裏換気量・屋根通気量に関しては、なるべく実際に近い換気性状を再現するため、住宅形状・配置条件の異なる住宅縮小モデルを用いた風洞実験から外部風向16方位に対する各部の風圧係数を把握し、外部風向・風速に対応した算定を行うこととした。そして、それらを考慮して小屋裏・通気層温度を推定できるシミュレーションプログラムを開発し、9章で述べた実測値との比較から、実際の性状をほぼ再現できることを示した。

11章では、10章で提案したシミュレーションプログラムを用いて、屋根面積雪障害の防止を目的とした断熱・換気設計に関する検討を行った。まず、9章の実測結果の整理から、外気温が0°C未満で小屋裏温度等が1°C以上になる頻度が高い1月中旬から2月上旬までを計算期間として抽出した。次いで、断熱・換気条件の異なる8パターンを対象にしたシミュレーション検討により、立地条件は換気量が半減する危険性がある住宅地想定条件とし、日射の影響が大きく、屋根断熱の通気層温度が危険側となる南側屋根面を検討対象に絞った。そして、住宅形状、断熱・換気方式の異なる計45パターンの計算から、断熱性能の向上や換気量・通気量の確保、軒天換気方式に比べて棟換気併用方式の適用などが障害の防止に有効であることを示した。次に、屋根面積雪障害の防止に向けて、先述の温度発生頻度を25%以下に保つ断熱・換気性能を各条件別に明らかにした。そこで、天井断熱では30°勾配が45°勾配・0°勾配よりも、積雪障害には危険側になり、断熱性能もしくは換気量を増す必要があること、屋根断熱では45°勾配が30°勾配よりも、断熱性能もしくは通気量を増す必要があることが分かった。また、棟換気併用方式は天井断熱では効果的だが、屋根断熱ではそれほどでもなく、棟換気口面積に応じて軒天換気口の最適範囲があることなどの、断熱・換気設計上の知見を得ることができた。次に、新省エネルギー基準同等以上の断熱性能の確保を前提とした換気設計のケーススタディを行った。設定条件のいずれのタイプでも、汎用部材を用いて障害温度の発生頻度を25%以下に抑えることが可能であることや、住宅形状や断熱・換気方式によって、必要とする有効開口面積・Aは大きく異なることを確認し、建築的対応の可能性を示した。最後に、屋根面積雪障害の防止に向けた断熱・換気設計手法として、地域で展開する実務者に向けた容易な換気設計への提案も含めた3つの方法を提案した。また、既往の基準の考え方との比較から、有効開口面積を指標に用いて、住宅形状・断熱・換気方式毎に細分化した基準値を設定することの重要性を述べた。

12.2 屋根デザインフローと技術の具現化

12.2.1 屋根面積雪障害の防止に向けた設計フローの提案

II部では、屋根面積雪障害の防止に向けて、融雪装置などの機械的設備に依存しない住宅屋根の可能性を検討してきた。ここで得た知見を基に、設計フローを考えると、おおよそ図12.1のようになろう。

フローに従って、以下にステップ毎の説明を加える。

① 屋根雪処理方法と屋根形状の決定

まず、近隣条件や外観意匠などから、屋根雪処理方法と屋根形状を決定する。落雪とする場合は、錆掛け鉄板や横身鉄板など通常の金属製屋根材を用い、5寸勾配以上とするのが一般的になろう。載雪(無落雪)とする場合は、意匠や防水上の耐久性に考慮したM型無落雪屋根・フラット屋根とするほかに、非滑雪屋根材を用いた勾配屋根も選択肢になる。また、落雪と載雪を混合した屋根形状も選択肢になる。

② 断熱方式の決定

居室の空間構成の仕方や、7章で述べた断熱外皮の構成パターンなどから、断熱方式、すなわち天井断熱とするか屋根断熱とするかを決定する。

天井断熱として天井面を水平に構成するか、屋根断熱として斜め天井にするかは、室内空間の性格付けに大きく係わる。半年間を雪に閉ざされる冬期間は、とすれば住宅内での滞在時間は長くなりがちである。筆者の設計経験からいえば、とりわけ最上階居室や居間上部の吹抜け空間においては、屋根断熱とした場合の空間的な広がりや適度な閉鎖感、居住者に生活上の心地よさを与えてくれる場合が多いと感じている。このような空間計画との係わりから断熱方式を選択していくことも重要である。

③ 断熱・換気設計方針の決定と検討方法

屋根面積雪障害防止のための断熱・換気設計手法としては、シミュレーションプログラムを用いる、図11.12~11.14に提案したような性能規定的なものに基づく、表11.8あるいは表11.9に提案したような仕様規定的なものを用いる方法のいずれかになろう。

どの場合でも検討のアプローチとして、大きく2つの方法が考えられる。すなわち、住宅の快適性や省エネルギーなどの面から天井や屋根の断熱性能を先に想定し、それに適合する換気設計を行っていく方法と、建物形状や換気部材の適用性などから換気仕様を先に想定し、それに適合する断熱設計を行っていく方法がある。このうち前者のアプローチが一般的と思われる。

④ 実現性の検討

導かれた性能の施工実現性や、住宅意匠として整合性がとれているのかを判断し、それに満たさない場合は、③あるいは②、①までフィードバックしながら、最適解を求めていく。仮に、その中から最適解が得られない場合は、例えば、温度制御による低負荷型の強制機械換気などの手法を併用することなどを検討していく必要も生じてこよう。

しかし、11章の検討でも明らかのように、局所的な技術対応ではなく、住宅形状、断熱方式、換気方式の組み合わせの中から、建築的対応への解を導き出すことはそう困難なことではないだろう。

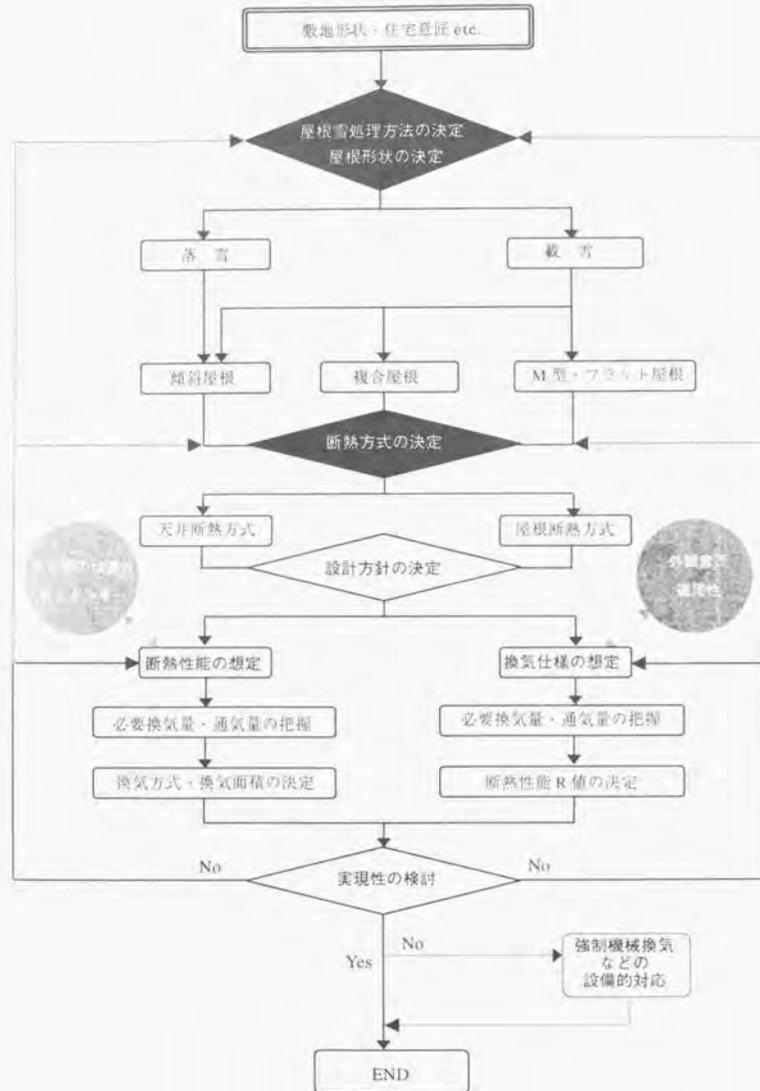


図 12.1 積雪寒冷地における住宅屋根のデザインフロー

12.2.2 屋根面積雪障害の防止に向けた技術の具現化

ここでは、前項で提案した設計フローを支える技術の具現化について検討する。図 12.2 及び写真 12.1 は、構成技術の概要を示したものである。図 (a) 中に示すように、屋根積雪障害防止技術は①-⑤の 4 つの技術から構成される。①-③は換気性能を実現するための技術、④は断熱性能を実現するための技術、⑤は勾配屋根において落雪が載雪を決定付ける技術である。

図①は、軒天換気部材のバリエーションを示したものである。軒の出を 450mm 程度とした場合の軒桁方向 455mm 当たりの有効換気面積は、5~75[cm²/455mm]程度の中から選択することとなる。また、雨や雪の侵入しにくい形状のものを選択していくことが重要となる。

図②は、種換気用部材の一例を示したものである。11 章でも述べたように、雨よりも細かで比重の軽い新雪の吹込みを防止できる換気部材としては、多くの選択肢は無く、ここに示したような部材を選択しているのが一般的である。

図③は、天井断熱及び屋根断熱の層構成を述べるためにマーキングしたものである。各断熱層は 7 章で述べた層構成によることとなる。なお、屋根断熱の場合は通気層の設置が重要だが、厚みは、本論の検討から最低 30mm 程度確保する必要がある。通気層を設置する方法としては、図右上に示すように、屋根たる木間で確保する方法と、2 重たる木として野地板合板の上に確保する方法が考えられる。前者に比べて、後者の方が材工費は要するものの施工性は高い。

図④は、屋根材料の選択肢を述べるためにマーキングしたものである。落雪屋根にする場合には滑雪性・耐久性に優れた金属系屋根材、勾配屋根で載雪化を進める場合には、写真 12.1 に示すような非滑雪屋根材を選択することになる[12-1]。フラット屋根等で載雪化を進める場合は、シールレスもしくはシーリング材を多用しない長期防水性に富む屋根材を選択していくことが重要である。

図 12.2 でまとめた各技術は、いずれも汎用的なもので、新たな技術開発を要したり、特殊な施工技術が必要となるものではない。ここで、強調しておきたいことは、屋根面積雪障害防止技術は、新たな技術開発の延長上にあるのではなく、既存の技術基盤をベースに断熱・換気を初めとする建築的手段との整合化の中から、新たな対応策が生まれてくるという点である。

このような普遍技術の組み合わせによって、地域と環境への対応を図ることが、筆者の建築研究へアプローチであり、地域の住宅への提案と考えている。

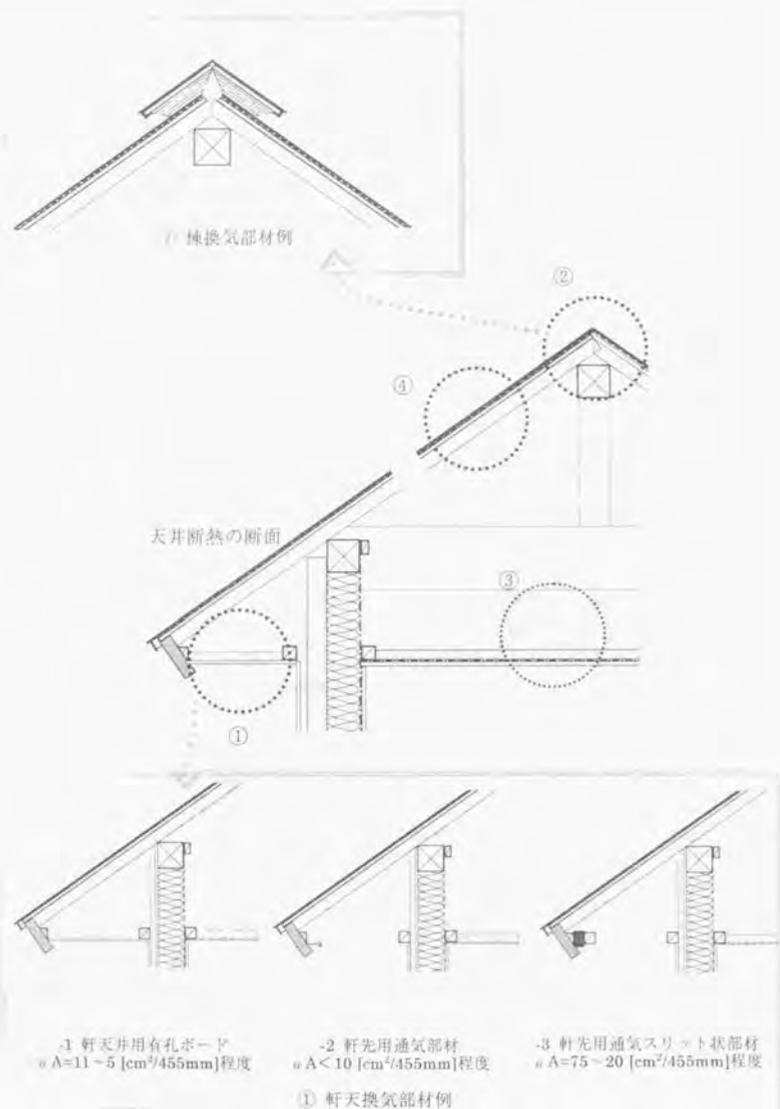


図 12.2 屋根面積雪障害防止技術の概要

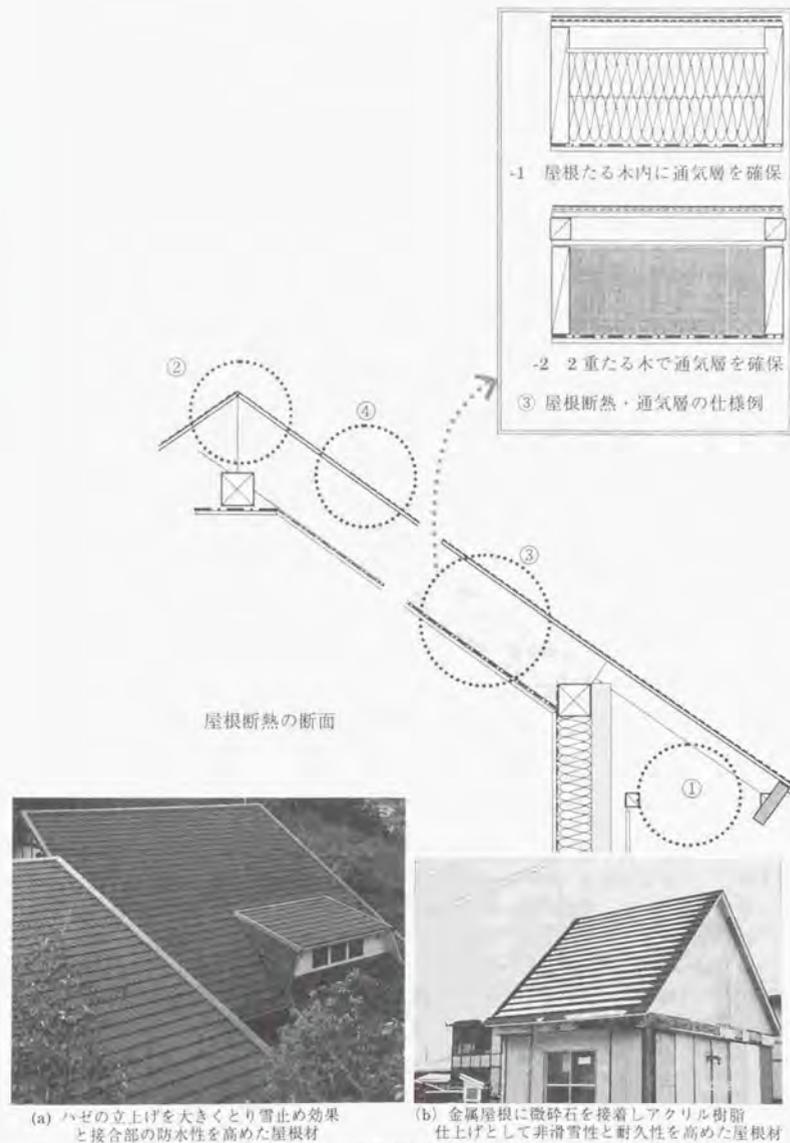


写真 12.1 (図 12.2 中④) 非滑雪屋根材のバリエーション

12.3 住宅屋根デザインへの提案

積雪寒冷地における望ましい屋根デザインとは、少なくとも、以下の1)～4)の項目を満たしていることが重要である。そして理想的には、5)の要件も合わせ満たすものであることが望まれる。

- 1) 化石エネルギーを要せずに、屋根面積雪障害を防止できること。
- 2) 長期的な防水性に優れていること。
- 3) 融雪水、雨水による、外壁汚損・劣化、躯体の耐久性低下が生じないこと。
- 4) 地域で実現可能な技術・部材で構築されていること。
- 5) 個としての意匠性に優れ、群としての普及が宅地景観を乱さないこと。そして、積雪寒冷地の新しい住宅像が浮かび上がってくるものであること。

以下では、それぞれの項目に考察を加えながら、望ましい屋根デザインのImageを明確にしていく。

(1) 要件1: 化石エネルギーを要せずに、屋根面積雪障害を防止できること

多様化の一途を辿る現行の屋根技術は、8章でも述べた通り、何らかの屋根面積雪障害に関する危険性を抱えている。前項までで述べてきた設計手法(図12.1)によって、外気温が0℃未満の時の屋根面積雪の融雪・再凍結とそれに起因する多くの障害の危険性を、資源エネルギーを要する機械的・設備的な対応ではなく、建築的な対応によって大幅に低減することが可能となるだろう。

例えば、落雪・傾斜屋根では、多雪地域においては、一度の降雪で数cm以上の積雪が生じることが珍しくないし、経時により金属屋根塗膜面に劣化・汚損が生じ滑雪抵抗が大きくなった場合は、屋根面に積雪が生じることが少なくない。軒先部の水結障害や屋根雪の凍着を防止することは、速やかな落雪を促進し、これまで見られたような大量落雪の危険性を大いに減らす。勾配屋根の大量落雪に関しては、15年以上も前に、寒研などが行った調査・研究から、屋根勾配と飛雪距離が明らかとなっていた[12-2]。この調査研究に基づいて、勾配屋根は、隣地境界と軒先の離れを概ね2.5m以上とする適用制限が各市町村の指導要綱に唱われ、一般には2.7～3m程度の離れを確保しているのが現状である。一方で、この指導要綱は、耐久上の不安が多く、屋根板金を損傷する原因となる雪止め金物を使用すれば、離れ寸法は満たさなくとも良いこと意味している。多くは、雪止め金物に不安を抱き、使用を控えることになったため、勾配屋根を住宅地で急減させ、意匠性・耐久性に乏しいM型無落雪屋根・フラット屋根を普及させることになったと考えられる。本論で得た設計フローによる勾配屋根を前提に、改めて飛雪距離の調査研究を行うことは、この適用制限を緩和し、長期的防水性や意匠性に優れる勾配屋根の住宅地への適用拡大を可能にするだろう(図12.3)。

また、M型無落雪屋根やフラット屋根の場合では、屋根面積雪の融雪・再凍結を防止することは、巻垂れや前者の漏水事故などの危険性を大いに減らすだろう。

これらを組み合わせた混合屋根も同様のことがいえる。

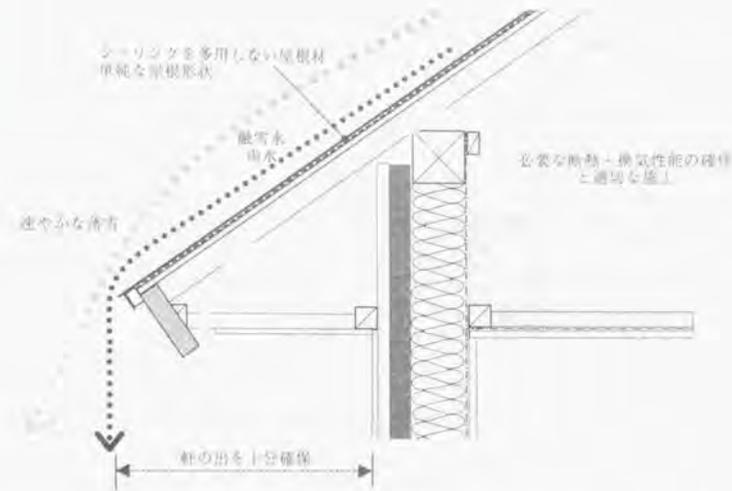


図 12.3 落雪・傾斜屋根技術のデザイン Image

また、この技術はこれまで述べてきたような障害防止対策ばかりでなく、従来の屋根と比べて、融雪・再凍結が少なくなるため、屋根面積雪を比較的乾燥した状態に置くことが可能となる。そのことによって、雪は天然の断熱材となり、それに覆われた住宅屋根は、夜間放射による小屋裏温度の極端な低下を防止し、住宅の熱損失を低減する効果も期待できよう。また、屋根面積雪が乾燥状態に保たれていることは、湿雪の場合と比べて、屋根面積雪荷重を軽減し、冬期間の地震発生時の住宅安全性にも寄与しよう。

以上述べてきたように、屋根面積雪障害防止技術は、障害の克服のみならず、多くのことに貢献する可能性を秘めている。しかし、そのことだけでは望ましい屋根デザインは構築できない。それは次項以降に述べる点への対応が欠けているからである。

(2) 要件2: 長期的な防水性に優れていること

他の住宅部材に比べて、屋根材料自体の耐久性は高い範疇に属するだろう。しかも、屋根下地には長期防水性に富む材料が併用されているため、材料寿命が短いと云われる車路鉄板でも、腐蝕防止のための定期的点検・補修が適切に行われれば、海岸地域を除いて、

材料劣化に起因する重大な漏水事故は生じ難いだろう。むしろ、ここで問題にしたいのは、屋根材そのものより、他部材との取合い部や屋根材相互の折曲げ部、接点等の漏水である。実際、多くの屋根漏水事故は、これらの部分に発生していると云われ[12-3]、その原因の殆どは、屋根形状に起因する接合部の納まりの不備やシーリング切れと推測される。特に、後者に関しては、屋根面は、他の部位に比べて温冷履歴や紫外線照射等の条件が厳しい環境下であり、屋根材よりはるかに短時間で防水性が損なわれる危険がある。従って、シーリング箇所は設計図書等にも明記し、屋根材の塗替え期間よりも短いサイクルで点検・補修する必要がある。しかし、シール切れを外観から診断することは難しく、この材料は見え難い箇所に多用されるため、多くは漏水等の被害が生じた後の事後補修となり、予防保全が行い難い材料である。

例えば切妻、片流れ、方形、フラット屋根などの単純な屋根形態は、接合部が少なくシーリング材を用いる部分は殆ど無く、長期的防水性に関する信頼性は高い。それに対して、M型屋根は、単純な形態でも屋根工法上の問題から内樋やパラペット廻りに接合部が生じ、随所にシーリング材を多用するため、季節を問わず漏水事故の危険性が生じる。屋根の漏水は、一度問題が生じた場合には室内の汚損や躯体の耐久性に大きな影響をもたらすことから、例えばM型無落雪屋根や接合部・取合い部が多く発生する混合屋根は、積雪寒冷地の屋根デザインの選択枝から除くことが賢明といえる。

(3) 要件3: 融雪水、雨水による、外壁汚損・劣化、躯体の耐久性低下が生じないこと

傾斜屋根やフラット屋根は、シーリング材の問題は少ないが、近年の外観意匠の傾向などから、軒の出が少ないものが多い。冬期の屋根面積雪の融水は、壁面を流下したり地面に跳ね返り、外壁や基礎の外装を濡らし、これらの材料を日常的に凍結融解の環境下に置く。そして、外装材の塗膜剥離やシーリング切れなどが重なると、外装材自体の凍害・汚損や躯体の耐久性低下を引き起こす原因にもなり得る。また、時として窓の外側における凍結の原因にもなり、日常や緊急時の開閉に支障が生じることも予想される。このうち、外装材の汚損や躯体の耐久性に関しては、非積雪時の降雨水も同様の問題を生じさせる危険性がある。

これらの防止対策としては、軒の出を十分に確保することなどが一般的に云われている。しかし、積雪荷重の関係から、構造的配慮がないまま軒の出を大きくすることには問題があるし、敷地寸法の制約も多い。

II部で検討してきた考え方と非積雪屋根材の組み合わせによって、勾配屋根・フラット屋根に係わらず、軒先に雨樋の装着が可能になる。本州では伝統的な雨樋も、積雪寒冷地では冬期落下の恐れから、殆ど使われていなかった。適切な断熱換気設計に裏付けされた載雪屋根と雨樋の組み合わせは、ここで述べる要件も含めて、前述の要件を満足する最も確実な手法になり得ると考えられる(図12-4(a,b))。

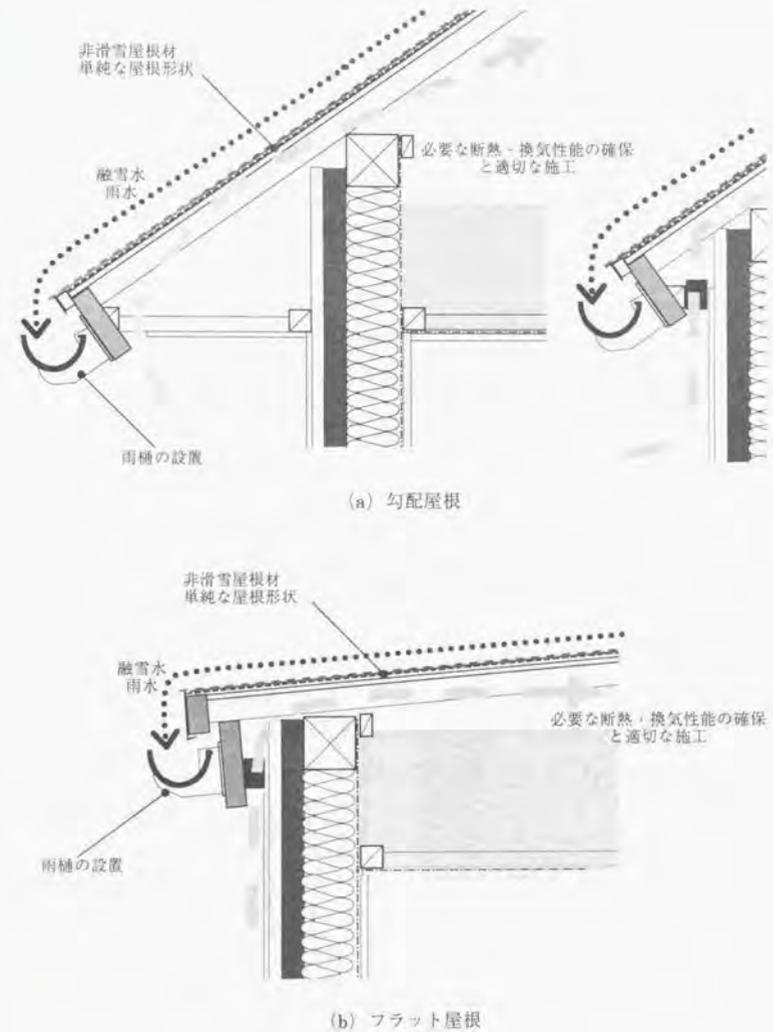


図12.4 載雪屋根の技術デザイン Image

(4) 要件4: 地域で実現可能な技術・部材で構築されていること

屋根を構築する技術や施工法が特殊で高価なものであれば、いかに性能面で優れたものであっても地域で展開する屋根技術としては馴染み難い。そして、地域や環境への対応に重視した技術は、広く普及展開することが重要であるから、馴染みにくい技術による構築は避けるべきである。前項までで浮かび上がってきた屋根デザインは、例えば雨樋を含めて汎用部材を用いて標準的な施工技術で構築が可能なものである。

(5) 要件5: 個としての意匠性に優れ、群としての普及が宅地景観を乱さないこと。

そして、積雪寒冷地の新しい住宅像が浮かび上がってくるものであること

数ヶ月に渡る寒さと雪との共生を余儀なくされる地域では、計画段階で雪の中での外観意匠をImageすることはとても重要である。このImageが不十分なためか、非積雪期間は外観意匠に優れていても、積雪期間は雪に関連する障害が生じている住宅は少なくないのが現状である。

気候風土や地域性によらず、住空間の空間構成が人間の生活・心理に及ぼす影響は大きい。また、足立らの調査によれば、積雪寒冷地では高知と比べて、住宅内での冬期滞在時間は約1.2倍、居間の冬期在室時間は世帯主で約1.4倍、主婦で約1.8倍となり、住宅内生活が多いことが指摘されている[12-4]。従って、空間の熱的性能の確保や開放感の創出などは、この地域に建つ住宅を計画する際にとても重要なことである。

そして、このような気候特性と生活様式の中で、外観意匠、住空間の計画をどう進めていくかは、重要な研究課題でもある。筆者の研究はこれらを中心とするものではないので、深い知見は有していない。



(a) 居間上部の吹抜け空間



(b) 主寝室上部の吹抜け空間

写真 12.1 筆者らが設計した住宅内部空間の一例 [建設地: 北海道苫小牧市]



(a) 住宅プラン



(b) 住空間の構成



(c) 外観

図 12.5 屋根形態と外観意匠、住空間構成

しかし、筆者が大学在籍中の11年間に設計した十数件の住宅は、そのうちの3件を除いて5寸から10寸の勾配屋根で設計され、すべての住宅の居間または個室の上部に何らかの吹抜け空間を設けている（例えば、写真12-1）。しかも、天井断熱による矩形空間ではなく、屋根断熱による斜め天井とした吹抜け空間が多数を占めている。それは、勾配屋根が長期防水性に優れるなどの住宅シェルター性能と、内部空間においては漠然とした広がりとは異なる適度な開放感を与えてくれる吹抜けを可能にし、小屋裏等の未利用空間の有効活用や、それらによって形成された住宅群は、積雪寒冷地ならではの住宅地景観を形成する可能性を感じているからであった。

それらは、M型屋根やフラット屋根で創出できるものではない。図12.5は、同一プランを無落雪屋根と勾配屋根で設計したものだが、前述したことを十分に示している。

多くの魅力を有する勾配屋根だが、先に述べた飛雪距離が短くなったとしても、多少の堆雪スペースを必要し、適用し得る敷地条件は限られてくる。これに対して、II部で検討してきた屋根面積積雪障害防止技術と非滑雪屋根材との組み合わせは、堆雪スペースが不足しがちな狭小宅地でも、その屋根形態を可能にし、新たな積雪寒冷地の住宅屋根デザインを創出する可能性を有している。

住宅屋根は外観意匠を決定する重要な要素である。だからこそ、筆者の研究フィールドである積雪寒冷地に提案したい住宅屋根デザインとは、個や群としての意匠性に優れ、その形態を利用した魅力的な居住空間を創出でき、外皮は勾配屋根、敷地形状によっては非滑雪屋根材、雨樋、屋根断熱とそれに対応する換気手法から構成される普遍的技術の集合体と考えている。

図12.6 雪の住宅地景観



[参考文献・引用文献]

- 12-1 北海道立寒地住宅都市研究所：調査研究報告No61「北海道の住宅地における雪処理の研究」第7章 屋根の積雪障害対策，1995.3
- 12-2 北海道立寒地住宅都市研究所：研究普及資料82-22「住宅屋根の雪処理」，1982.3
- 12-3 日本住宅・木材技術センター編：木造住宅 耐久性向上の手引き，丸善株式会社，1982.3
- 12-4 足立富士夫，真嶋二郎，大垣直明ほか：北海道の住宅と住様式，北海道大学図書刊行会，1982.5



13

結

住宅の設計・建築行為は、地球環境や地域性への対応、高齢化や合理化などの社会的課題、多様化する住まい手の要求の中で最適な解を求め、形にする行為である。

このうち、新たな部品や建材の適用によって実現できるものは、経験と性能の対比から、住宅技術者や住まい手が必要なものを選択することも可能である。しかも、費用対効果が明確で、住まい手に理解を求め易いことから、実践は容易である。例えば、手摺の設置など、部品・設備指向に終始している感もある高齢化対応などが、これに該当しよう。

一方、層構成やいくつもの技術の組み合わせによる対応が求められるものは、目的や必要性を理解していても、時に具現化の手段を知らず、あるいは手法の必然性を住まい手に明解に示すことが難しいため、前者ほど実践が容易ではない。例えば、建築的な対応のみならず、住まい方やライフスタイルとの関連も考慮しなくてはいけない地球環境への対応などが、これに該当しよう。

一般の住宅生産者は、前者、すなわち個別技術を駆使して様々な問題に対処することは得意だが、それに比べて後者への対応は不得手なことが多い。それは、多くの知識と技術のデザイン能力が必要とされるからである。このことは、我が国の住宅生産の主体を担い、地域経済の一翼を担う中小の生産者も同様で、むしろ一層顕著である場合が多い。

しかし、地域の中小工務店が、大手に遜色のないむしろ様々なバリエーションが可能な技術を基盤に、活力有る自立した住宅供給をしていくことは、我が国の地域経済を維持する上で重要なことだし、再生が困難な地域の住宅生産システムの次代への継承に大きく貢献することは間違いはないと感じている。

それゆえ、住宅技術を扱う研究者の一人として、対応が急務とされる環境への対応に望ましい住宅像を Image しながら、地域の生産者に向けて、それを実践するための技術の整合化と具現化を、研究の output とすることに重要な意義を感じてきた。

以上の考え方から、我が国の住宅技術の中では新しい技術といえる「断熱」を前提とした住宅外皮に着目して、筆者の研究フィールドである積雪寒冷地において、主に環境工学的アプローチを用いながら、技術の再構築と具現化に取り組んできたのが本論文である。

13.1 本論のまとめ

以下に、各章のまとめを示して、本論文のまとめとしたい。

序では、気候風土への対応から培われた我が国の住宅技術は、各種要求の高まりから短期間で変貌し、多くの性能向上をもたらしたが、その一方で、統合化を経ない個別的な技術対応は様々な問題を生じさせていることを述べた。また、研究の方向として、我が国の住宅生産を支える地域の住宅技術者に対して、技術の整合化と具現化に向けた研究が重要であり、それが住宅研究分野で希薄であることを論じた。

そして、我が国の住宅技術の中では比較的歴史が浅く、環境への対応に向けて重要な基盤技術である「断熱」を前提とした住宅外皮技術は、未だ耐久性や断熱性向上に向けて多くの課題を有しており、断熱外皮技術としての再構築と具現化が必要であることを述べ、その取り組みを本論の目的に据えた。

断熱を前提とした住宅外皮技術の再構築にあたっては、最も多くの要求性能と制約条件が伴う外壁に着目し、その設計要件と具現化の検討を行うことが重要であることを示し、それをⅠ部の主な検討対象に据えることとした。そして、その応用展開から、耐久性・断熱性向上に向けた住宅外皮技術の具現化を図ることをⅠ部の output にすることとした。

また、屋根は外壁の設計要件の他に、積雪寒冷地では冬期の屋根雪、融雪水への対応が必要となること、既に多様な個別技術が生まれているが、多くは耐久、意匠、環境上、考慮すべき課題を抱えていることを述べた。それらに対応した技術要件を明らかにすることが住宅屋根技術の再構築に不可欠であることを述べ、それをⅡ部の主な検討対象に据えることとした。そして、その構成技術の具現化を図ることをⅡ部の output にすることとした。

(1) Ⅰ部 断熱外皮技術の具現化と提案

Ⅰ部の冒頭として 2 章では、例えば室内側からの水蒸気の移動に伴う断熱材内部結露の問題にしても、個別対応では解消ができず、構法的対応によってようやく解決の糸口が見えた北海道の取り組みの変遷に触れ、断熱外壁の耐久性・断熱性向上に向けては、材料的・個別対応ではなく、建築的な対応によって取り組んでいくことの重要性を示し、それを本論における研究の基本方針に据えた。

そして、断熱外皮の耐久性向上に関しては、障害の発生を前提とした対処ではなく、躯体の長期的な乾燥維持を図るための建築的対応が必要であり、その技術構築には、従来から研究対象となっていた内部結露防止の他に、壁内保有水分の扱いや外部漏水の防止の設計要件を明らかにすることが不可欠であることを述べ、検討対象を明らかにした。

さらに、断熱性向上に関しては、諸外国と我が国の断熱手法に対する考え方の相違に触れ、構造熱橋を含めた評価を行い、特殊な材料・技術を要さない高断熱化手法の技術構築への取り組みが重要であることを述べ、検討対象を明らかにした。

3 章では、断熱壁体における室内、他部位及び構造躯体内を源とする湿気・水分移動への対応に関して検討を行った。冒頭で、特に開放系木造外壁の湿気性状や設計要件を捉えるには、既往の数値解析によるアプローチでは施工要因や壁内通気モデル化が難しいこと、材料物性値が十分整備されていないことなどの課題があり、実際の構法的条件や施工要因をモデル化した実験によるアプローチが有効であることを述べた。

壁内通気や断熱・防湿欠損を考慮した各種壁体の比較実験から、室内からの水蒸気移動への対応には防湿気密層と通気層の有効性、他部位からの水蒸気移動には壁内と他部位を空間的に独立させることなどの設計要件を明らかにした。そして、構造躯体内の保有水の代表例として、重量含水率 40% 程度の未乾燥材を用いた各種壁構成の比較実験を行い、前述の条件を満たす壁構成では、比較的短期間で木材腐朽菌が生育し難い木材含水率まで乾燥することを確認した。また、壁内保有水分の放湿特性を簡易に把握できる実験方法を考案し、直張り壁と比べて通気層壁の壁内保有水分に対する放湿上の優位性を示した。

4 章では、多くの層構成からなる断熱壁体の外部漏水への対応に関して検討を行った。冒頭で、シーリング材を多用した乾式外装技術は長期的な防水の信頼性が低いこと、既往の研究では断熱壁体の層構成に合致した実験条件のものは殆ど無く、新たな取り組みが必要であることを述べた。

構法要因や各層の施工要因等を含めてパターン分類を行い、代表的な壁体モデルを対象とした実物大実験から、壁体の漏水性状は、層構成や壁内空隙の気密性、すなわち壁内気流の有無、防風層や防湿気密層の気密性などが大きく係わることを明らかにした。そして、外部漏水への対応には、通気層の設置と壁内空隙の気密性の確保が重要であることを示し、これらの要件は、内部結露防止に向けた壁体の設計要件とも概ね合致することを述べた。また、この要件を満たせば、住宅用途の薄厚外装材でも開放目地が可能になることを示唆した。これらは、単に、外装材形状のみに依存した防水ではなく、壁体構造との協働によって可能になるかつての伝統的防水技術の方向と合致していよう。そして、外部漏水が生じる限界条件は、既往研究で云われているような外装材毎の圧力差の固有値で生じるのではなく、漏水が生じる接合部の気流速も関連している可能性があることを示唆した。

5 章では、前章までで有効性が明らかとなった通気層に関して、空隙を長期的に確保するための構法的検討を行った。各種防風材・断熱材を用いた壁体の比較実験により、防風層として最も一般的なシート状防風材を使った場合は、断熱材の復元力や僅かな施工時の緩みによって、通気層厚みが相当減少し、有効開口面積が設計値の約 10% 程度まで減少する危険性があることなどを明らかにした。そして、シート状を含む各種防風材を用いた場合の通気層空隙を確保するための設計施工方法を示した。

6章では、冒頭に、住宅の一層の断熱性能向上には、住宅熱損失量の35~45%を占める外壁の性能向上が重要であること、構造熱橋を考慮に入れた断熱設計の重要性を述べた。そして、部位全体の実質熱貫流率を求めるのに簡便な熱橋面積比率と算法を示し、在来木造工法と枠組壁工法の2種を対象に、断熱性、コスト、施工性などの面から各種断熱手法の評価・検討を行った。

その結果、充填断熱は熱損失の30~50%程度を占める熱橋の存在によって向上し得る断熱性能に限界があること、外張断熱は熱橋を防止し効率的な高断熱化が図れるが、施工断熱厚の制約から性能向上に限界があることなどを示した。それらに比べて、充填+付加断熱は、特殊な材料・工法によらずに大幅な性能向上が可能で、費用対効果にも優れることを示した。ただし、この手法は、下地構成の仕方によってその断熱効果が異なり、下地を用いない付加断熱が下地を600mm間隔程度とすることなどの設計上の留意点を示した。

そして、内部結露や壁内保有水分の放湿に効果的で、施工性も良好な繊維系断熱ボード材を、木下地を要さずに付加断熱材に用いた充填+付加断熱手法を提案した。

I部の小括である7章では、3~6章で得られた各種設計要件、すなわち断熱性能の確保、断熱性能の向上、防露性能の確保、防水性の向上に対応する技術を具現化し、在来木造住宅及び枠組壁工法の充填断熱と、外張断熱工法の計3種を対象に整合化を図り、耐久性・断熱性向上に向けた断熱外壁技術として提案した。次に、断熱外壁に求められる設計要件を、他の外皮、すなわち床・天井・屋根とそれに関連する間仕切壁へ応用し、整理して、それぞれの部位における技術の具現化を図った。

最後に、地域の住宅供給の主体を担う現場生産型の住宅においては、

- 1) 現場において工程上の大きな変化が伴わないこと、
- 2) 特殊な加工技術を要しないこと、
- 3) 地方でも入手可能な汎用材料で構成されていること、
- 4) 一般的な大工の技術レベルで実現可能なこと、
- 5) 許容できるコスト増の中で実現可能なこと

などが、新技術を導入する際の条件であると論じた上で、地域の主流を占める在来木造工法の断熱外皮技術の構造的な提案を試みた。

(2) II部のまとめ 一積雪寒冷地の屋根デザインへの提案一

II部の冒頭として8章では、我が国の積雪寒冷地は、世界でも類を見ないほど多雪な気候にあることを述べ、北海道の住宅屋根の変遷から、すがもり、氷柱、落雪事故などの屋根面積積雪障害に対して生まれた材料的あるいは設備的対処が有する問題点を整理した。

また、屋根雪の問題を解決していく研究がこれまで殆ど行われていないことが、積雪寒冷地の住宅屋根を多様化・混雑化させる一因にもなっていることを述べた。

そして、屋根工法や外装材の耐久性向上、地球環境時代に向けた住宅屋根の技術構築のためには、屋根面積積雪障害の防止を目的とした建築的対応の可能性を探り、その設計手法の構築と技術の具現化が重要であることを述べ、それをII部の研究の基本方針に据えた。

9章では、屋根面積積雪障害の原因を探ることを目的に行った各種断熱・換気条件を適用した実験建物の実測・観察結果から、屋根面積積雪障害の原因としては小屋裏・通気層温度が大きく係わっていること、小屋裏・通気層温度の性状は、断熱方式や換気手法によって大きく異なることなどを明らかにした。そして、屋根面積積雪障害発生の際は、外気温0℃未満の時に、小屋裏・通気層温度が-1℃以上になる頻度が概ね20~25%程度を超えるか否かが判断の目安になることを示した。

10章では、屋根面積積雪障害に関係する小屋裏・通気層温度を捉えるためのシミュレーションプログラムの検討・開発を行った。プログラムの特徴としては、屋根面積積雪のモデル化に関しては、既往の実測研究を参考に、扱いの難しい降水量から積雪深への変換や、融雪・再凍結時の積雪保有含水量、圧密を含めた積雪深の推定などを考慮したことと、小屋裏換気量・屋根通気量に関しては、風洞実験から得た立地条件・住宅形状毎の住宅各部の風圧係数を基に外部風向16方位と風速に対応した算定が行える点である。

そして、9章で述べた実測値との比較から、ここで開発したシミュレーションプログラムが、実際的小屋裏・通気層温度性状をほぼ再現できることを示した。

11章では、まず、検討対象を明らかにした。実測結果から、計算期間は、外気温が0℃未満で小屋裏温度等が-1℃以上になる頻度が高い1月中旬から2月上旬までを抽出した。断熱・換気条件の異なる8パターンを対象にしたシミュレーション検討から、換気・通気量が半減し、前述の温度発生頻度が多くなる住宅地想定条件を立地条件とし、屋根断熱の通気層温度が危険側になる南側屋根面を計算対象にすることとした。

そして、住宅形状、断熱・換気方式の異なる45パターンの計算を行い、屋根面積積雪障害の防止に向けて、先述の温度発生頻度を25%以下に保つ断熱・換気性能を各条件別に明らかにした。その結果、総じて、断熱性能の向上や換気量・通気量の確保、軒天換気方式に比べて棟換気併用方式の適用などが障害の防止に有効であることを示した。そして、天井断熱では30°勾配が45°勾配・0°勾配よりも、屋根断熱では45°勾配が30°勾配よりも、断熱性能もしくは換気量・通気量を必要とすること、棟換気併用方式は天井断熱では効果的だが、屋根断熱では棟換気口面積に応じた軒天換気口の最適範囲があり、天井断熱とは異なる特性を有すること、住宅形状や断熱・換気方式によって、必要とする有効開口面積 σ_A は大きく異なることなどの断熱・換気設計上の知見を明らかにした。

次に、新省エネルギー基準同等以上の断熱性能を前提とした換気設計のケーススタディから、本論で設定したいずれの条件でも、汎用部材を用いて障害温度の発生頻度を25%以下に抑えることが可能であることを述べ、II部で検討を進めてきた屋根面積積雪障害防止に対する建築的対応の可能性を示した。

最後に、屋根面積積雪障害の防止に向けた断熱・換気設計手法として、地域で展開する実務者に向けた簡便な設計法も含む3つの考え方を提案した。また、既往の基準の考え方の比較から、小屋裏換気等を扱う基準としては、有効開口面積を指標に用いて、住宅形状・断熱・換気方式毎に細分化して設定することが重要であることを示唆した。

II部の小括である12章では、主に11章で得られた断熱・換気設計の知見などを基に、屋根雪処理、屋根形状、断熱方式に対応する屋根面積積雪障害の防止に向けた屋根設計フローの提案を行った。

そして、構成技術である換気手法、断熱手法、屋根葺材などの具現化を図り、融雪装置などの機械的設備に依存しない住宅屋根の各構成技術は、新たな技術開発の延長上にあるのではなく、既存の技術基盤をベースに断熱・換気を初めとする建築的手段との整合化の中から、対応策が生まれてくるということを示した。

最後に、積雪寒冷地における望ましい屋根技術とは、

- 1) 化石エネルギーを要さないこと、
- 2) 長期的な防水性に優れていること、
- 3) 融雪水、雨水による外壁汚損・劣化、躯体の耐久性低下が生じないこと、
- 4) 地域で実現可能な技術・部材で構築されていること、
- 5) 個としての意匠性に優れ、群としての普及が宅地景観を乱さないこと

などが、その要件であると論じた。

その上で、その形態を利用した魅力的な居住空間を創出でき、外皮は勾配屋根、敷地形状によっては非滑雪屋根材、雨樋、屋根断熱とそれに対応する換気手法から構成される普遍的技術の集合体を望ましい屋根の Image として提案した。

以上、環境と地域への対応に向けた断熱を前提とした住宅外皮技術の方向性とその構成技術を普遍技術の集合体としての具現化に取り組んだのが本論文である。

13.2 おわりに

本論文は、筆者が室蘭工業大学に在籍してから、現在の北海道立寒地住宅都市研究所に従事し、取り組んできた研究を基に纏めたものである。この間、多くの住宅・建築の設計や地域の住宅研究会への参加、住宅施策を進めるための地域基準や全国基準の策定等に取り組みなから、いつも考えていたことは、地球環境あるいは全国的に抱える課題を、地域の住宅技術者が実践可能で、一般の住まい手が恩恵を受ける普遍的技術としてどう具現化し、分かり易い形で住宅生産者や住まい手に伝えていくかということであった。

筆者の生活の場が北海道であることから、活動は、いつも寒冷積雪な気候への対応とそれに起因する障害防止が中心であり、その対象は限られていたが、一方で、美しくも厳しい気候風土ゆえに妥協を許さず、常に即応性を求められたことが、この考え方をより明確なものにしたように思う。また、いつしか学んだ、気候の厳しさもしくは明解さは、時に、装飾や自己満足とは異なる合理性と機能美を持つ「かたち」をつくり出す原動力であることが、研究へのアプローチの確かな道しるべでもあった。

この小論の目標を、環境と地域への対応に向けた断熱外皮技術の再構築と具現化への取り組みに位置付けたことからいえば、寒さ、雪、雨水などの自然現象との係わりが大きい住宅外皮の断熱に係わる性能向上・障害防止技術の方向性と、その構成技術を普遍的・汎用的な技術・部材の集合体として示し得たことで、当初の目的は一応完結しているように思う。

しかし、改めて見れば、取り組むべき課題も山積していることに気付く。以下に、大小さまざまな課題をいくつか述べることで、筆者の今後の取り組むべき方向を示し、この小論のおわりとしたい。

1) 壁内通気や壁内空隙の気密性の把握

I部で行った研究アプローチの多くは、まず、住宅技術の現状を現場で良く観察し、実態性の高いモデリングを検討し、実験や計算の相互比較から、その設計要件を導くアプローチをとっている。このうち、壁体内部結露の発生性状や外部防水性能の検討において、定量化の難しい壁内通気の性状あるいは壁内空隙の気密性に関しては、その要因を実験壁体のモデリングの際に考慮することで、検討を進めてきた。

しかし、壁体の通気性状に関して、提案したような在来木造工法の外壁上下端部に通気止めを講じた壁体と枠組壁工法の壁体のようなパネル壁体でどのような違いがあるのか、また、それらと防湿気密層や防風層の施工仕様との組み合わせの中で、漏気性状にどの程度の差異が生じるのかは、明らかになっていないといえる。

このことは、内部結露に対してリミットデザインを行う場合や温暖地の外壁のあり方を考えていく過程で、また外部漏水防止の外装設計を行う上で、漏水の原動力と推測される内外圧力差や接合部の気流速などを捉える際に重要となってこよう。

2) 屋根面積積雪障害防止に関する手法の検証と方法論の構築に向けて

本論のII部では、屋根面積積雪障害の防止に関してツール開発や様々な検討を行った。この検討から、従前、経験的にしか対処し得なかった住宅屋根の断熱・換気設計に関する実際的な方法論が浮かび上がってきたことは、一つの成果と考えている。

しかし、この検討は、立地場所を札幌としたものであり、他の気候条件においてそのまま適用できるか否かは現時点では明らかとはいえない。今後、これらの考え方を導入した実住宅での評価・検証を様々な気候条件下で行いながら、より普遍的で信頼性の高い方法論として構築していきたい。

3) 断熱外皮技術の統合化に向けての課題

本論のI部では断熱を前提とした住宅外皮の耐久性・断熱性・積雪への対応に着目してその検討を進めてきた。しかし、当然のことながら、住宅外皮としてはこれらの性能項目の他にも、例えば、構造安全性や防火性など、多くの技術的対応と性能向上が求められる。本論は、それらとの整合を図ることは対象としなかった。今後は、ここで含まなかった性能項目に関し、既往の研究や新たな研究によって得られた多くの知見を学び、さらに統合化された外皮技術のデザインへの研究に取り組んでいくのが、今後の課題と考えている。

また、基礎断熱の具現化への検討も本論の検討外とした。これは、暖房の概念が普及していない地域、あるいは夏期の温暖多湿な気候条件下における床下湿気性状の把握は十分とは云えず、床下に乾燥木材を使用した場合でも蟻害が及ぶ恐れがあるとの指摘に対して、定まった処方などがまだ確立していないためである。この点に関しては、現在参加している委員会[1-13]の中で検討を進めていきたいと考えている。

4) 仕様規定と性能規定の狭間の中で 一研究の output の方向性一

本論の output は、まず構法的要件を明らかにし、その要件に対応する個別技術を選択枝として整理した上で、最終的にはそれらを統合化した技術として具現化することに力点を置いている。その方向はどちらかといえば仕様規定の範疇に入るだろう。これは、地域で展開する住宅技術者には、新たな住宅技術の方向と実践方法の理解を、具現的な表現で情報伝達することが、明解かつ有効であると判断しているためである。また、各部位を構成する個別技術のみの提示では、その組み合わせによって、障害の防止に対するリスクコントロールが必ずしも一様とはならない場合があるからである。すなわち、選択性のある個別技術の提示は重要だが、多くの人的行為によって構成され、生命を委ねる「もの・かたち」の創造に向けては、いくつかの予期し得ない細かなヒューマンエラーが生じても、その目標性能を保つことが可能な組み合わせの提示が必要と考えているためである。

しかし、これらの考え方を基に、地域の住宅技術者に向けた基準や指針等を策定しようとした場合、組み合わせの選択性を盛り込もうとするほど、仕様規定は複雑になり、その利点である明解性が失われ、理解力と統合力が住宅技術者に求められるようになる。

一方、折しも、時代は仕様規定から性能規定へと向かっている。地域において性能規定が定着するには、住宅に係わる広範な知識を有し、性能から技術をデザインできる地域の住宅技術者やコンサルタントの役割が重要である。また、新たな技術を客観的に評価・判断できる地域の第三者機関の存在と、零細な中小の生産者に対しては、多くは既存の技術にしかリンクしていない性能保証との連携も重要となる。性能規定化に向けたプログラムを机上で練り上げることは比較的簡単だが、それを地域で機能させるためには、人材の育成と硬直化しない体制づくりに多くの時間と思慮が必要であり、これも今後の重要な課題である。

研究で得た具現化の技術を、例えば、住宅金融公庫共通仕様書や学会仕様書などに、仕様規定的な表現で盛り込んでいくことは比較的簡単なことである。しかし、前述したような仕様規定や性能規定が有する課題の狭間の中で、技術のあるべき方向性を、地域の住宅技術者にどのような形で情報伝達していくか、人材育成に向けて研究者として何をすべきか、確かな考えはまだ纏まっていない。この点に関しては、十分な思索を重ね、今後の研究の output に反映させていきたいと考えている。

5) 環境と地域に向けた研究のあり方

多様化するユーザーニーズという言葉と、それらのニーズを追求していくことが住宅の方向性であるかのような専門家不在の建築が乱立する一方で、時代は地球環境に向けた建築・住宅技術の創出とライフスタイルの変革が急務な状況に直面している。

一方で、本論で繰り返し述べたように、地域の住宅生産の現場では、経営の安定と生き残りをかけて様々な試みが繰り返されている。この2年間、筆者が参加していたある地方都市の地域木造住宅検討委員会では、中小工務店の競争力を促すため様々な検討や仕組みづくりを模索していた。その結論が出ようとしていた矢先に、参加していた工務店が2社倒産した。住宅市場が低速化し、大手が活路を得るため、市場開拓のための地方展開が活発化している状況の中で、地域の住宅生産システムの継承に向けて、その対応策を思慮していても、それより早いスピードで、地域の住宅生産システムは変貌を遂げつつある。

利便性を追求する生活と荒廃化の一途を辿る地球環境、そして地域の住宅生産システムの継承に向けて、研究者として何を担い、伝えていくべきなのか、今後の研究への取り組みを通して、その答えをより明確にしていきたい。

6) そして新たな発見に向けて

筆者にとって、単品生産としての住宅や共同住宅の設計・施工に参加することや、これからの普及解やあるべき方向を基準や指針などに示していくことは、いずれも、「ものづくり」の過程で生まれる多くの議論や、形にするための苦しみと喜びを通して、新たな問題意識や取り組むべき研究課題を発見させてくれることから、貴重かつ重要な活動と考えている。

前者に関しては、ここ数年携わっている公営住宅などの集合住宅、また、最近ではエコスクールや寒研施設の設計参加の機会が得られたことは、住宅から一般建築へ視野を広げるのにまたとないことと感じている。その機会を有意に活用し、そこから戸建住宅では取り組めない環境への対応技術を実践し、新たな発見を得たいと考えている。

また後者に関しては、自ら問題意識を持ち創造の力を持つ技術者はむしろ希少であり、問題意識があっても創造の力を有しない技術者にあるべき姿と実践の手段を示すために、あるいは問題意識もないままに愚劣な建築行為を繰り返す技術者の意識改革を促すために、研究と実践の繰り返しの中から標準形を見つけ出し、それを反映しながら、新たな研究課題の発見に努めていきたい。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、多くの方々の御指導と御協力をいただきました。
ここに記して感謝の意を表します。

東京大学坂本雄三教授には、ここ数年来、たくさんの方々の委員会活動などを通じて、常に、有すべき視点と今後の方向を考える機会を与えて頂き、本論文の作成に際しては、暖かくも、明解で時に厳しい御指導と御助言をいつも頂きました。本格的に作成を開始してほぼ1年、本論文が纏められたのは、坂本先生のお陰であり、ここに厚く御礼申し上げます。いつも先生から頂いた言葉から、たくさんの方々の考えるきっかけが生まれ、何かに気付くことが、論文作成の過程の中で、この上もない楽しみでもありました。

そして、貴重な時間をさいて、本論文に対して多くの御指導、御助言を頂いた東京大学鎌田元康教授、坂本功教授、加藤信介助教授、松村秀一助教授に感謝致します。緊張の中で各先生のお部屋をお訪ねし、たくさんのお話を聞かせて頂いたことは、私にとってはとても有益な経験でありました。

また、多方面に渡りアドバイスを頂いた東京大学助手永田明寛博士、印刷などの協力を頂いた坂本研究室スタッフの方々に感謝致します。

卒論から助手で退職するまでの11年間に渡り、住宅・建築へのアプローチ、研究への取り組みの姿勢など、研究や設計を通じて多大な御指導と叱咤激励を頂いた室蘭工業大学鎌田紀彦助教授に深謝致します。私自身の研究者としての役割と方向性は、多くは、鎌田先生と室蘭工業大学の諸先生方との11年間の中で培われたものと感じています。

また、本論文の作成に際し、北海道立寒地住宅都市研究所の多くの方にご支援頂きました。終始助言を頂き、見守ってくれた福島明氏、なかなか収束しない私の性格を十分に知りつつ、長期に渡り研究を共に歩んでくれた本間義規氏、廣田誠一氏、直接間接的な支援を頂いた千葉純前所長、林勝朗部長、阿部宏侑部長、並びに寒研及び北海道庁の多くの先輩や同僚の方々に感謝致します。本当に有り難うございました。寒研そして道という職場は、論文作成、研究の方向にとって、すばらしい環境であったと感じています。

本論文Ⅰ部の断熱化の系譜をまとめるにあたり、上野榮氏からは多くの貴重な助言を受けました。記して感謝いたします。

本論文Ⅱ部の研究全般に渡り、貴重なアドバイスと風洞実験など多大なご協力を頂いた北見工業大学機械工学科坂本弘志教授、そして研究室スタッフに感謝致します。それまで、余り得手としていなかった換気分野を扱うことができるようになったのは、先生のお陰と思っています。

また、出張が多く、私自身に時間が乏しい時でも、多くの卒論生が実験・作業を進めてくれたことは、何にも優る精神的安定を与えてくれました。多くの卒論生に感謝するとともに、特に、快く卒論生を派遣して頂き、また、研究の途上にて多くの問題提起をして頂いた北海道大学荒谷登名誉教授、絵内正道教授、北海道工業大学鈴木憲三教授に感謝致します。

振り返って見ますと、本論の文章は、多くを、東京往復の移動の中でその基本構想ができ、その内容が少しずつ具体化してきたと記憶しています。日頃、あわただしく過ぎる毎日の中で、この時間は、ものを考える上で極めて上質で有用なものであったような気がしています。そのような機会がなければこの論文を纏めるには、まだ多くの時間が必要だったかもしれません。

これからは、この上質な時間に加えて日常の生活の中で、自身ができることを考え、社会に向けて実践していくことが、いくら紙面があっても感謝の念を示し得ない、多くのお世話になった方々にお応えする私の役割と感じています。

改めて考えてみますと、本論の根幹にあった「環境と地域に向けた建築技術デザインへの研究」は、この論文が一区切りついた今もなお、その途上にある感が少なくありません。本論文とこのテーマを道標としながら、再び歩んでいこうと考えているこの頃です。

