

博士論文

ダイナミックインシュレーション技術
を利用した住宅に関する研究

河原 大輔

目次

図表番号	図表-1
一章 序章	1-1
1.1 章 はじめに		
1.2 章 研究背景		
1.2.1 世界の GDP とエネルギー消費		
1.2.2 日本の省エネ政策		
1.2.3 住宅の断熱化と健康化		
1.3 章 研究概要		
1.3.1 ダイナミックインシュレーション技術を利用した住宅		
1.3.2 市場性について		
1.4 章 本論文の構成		
1.4.1 研究構成		
1.4.2 研究構成の詳細		
二章 ダイナミックインシュレーション技術と既往研究	2-1
2.1 章 本研究の位置づけ		
2.1.1 省エネ手法		
2.1.2 ダイナミックインシュレーション技術の概要		
2.1.3 ダイナミックインシュレーション技術の種類		
2.1.4 躯体熱容量利用		
2.2 章 既往研究		
2.2.1 既往研究概要		
2.2.2 ダイナミックインシュレーション技術に関する既往研究（日本の事例）		
2.2.3 ダイナミックインシュレーション技術に関する既往研究（カナダの事例）		
2.2.4 ダイナミックインシュレーション技術に関する既往研究（イギリスの事例）		
2.3 章 提案技術システム概略		
2.3.1 ダイナミックインシュレーション技術の窓部への適用		
三章 住宅開口部への適用 断熱性能の検証	3-1
3.1 章 研究動機		
3.1.1 既往研究と本研究の位置づけ		

- 3.1.2 DI 技術を利用した住宅開口部の概要
- 3.1.3 DI 窓を組み込んだ省エネシステム
- 3.2 章 熱箱による断熱性能検証
 - 3.2.1 概要
 - 3.2.2 概要
 - 3.2.3 結果
 - 3.2.4 小結
- 3.3 章 実住宅による断熱性能検証
 - 3.3.1 概要
 - 3.3.2 概要
 - 3.3.3 結果 実験 A 日変動
 - 3.3.4 結果 実験 B 断熱性能の比較評価
 - 3.3.5 結果 実験 C 温度指標に基づく結露発生リスク
 - 3.3.6 結果 実験 C 外気の昇温度合
- 3.4 章 結論
- 3.5 章 議論

四章 住宅開口部への適用 暖房負荷に関する検証

.....

4-1

- 4.1 章 研究概要
- 4.2 章 解析概要
 - 4.2.1 シミュレーションソフトと検討モデル
 - 4.2.2 隙間性状
 - 4.2.3 外部要素
 - 4.2.4 内部要素
 - 4.2.5 窓の断熱性能
 - 4.2.6 検討ケース
- 4.3 章 解析結果
 - 4.3.1 一週間の挙動
 - 4.3.2 建築全体の換気回数
 - 4.3.3 総換気量の割合
 - 4.3.4 DI 窓前後の圧力差と通気量
 - 4.3.5 DI 窓の断熱性能
 - 4.3.6 全体のエネルギー削減量
- 4.4 章 結論
- 4.5 章 議論

五章 住宅開口部への適用 防露性能に関する検証 **5-1**

- 5.1 章 概要
- 5.2 章 実験概要
- 5.3 章 評価指標
 - 5.3.1 夏季の湿度指標
 - 5.3.1 冬季の湿度指標
- 5.4 章 実験結果
 - 5.4.1 結果 累積頻度分布
 - 5.4.1 結果 Z 分析
- 5.5 章 結論
- 5.6 章 議論

六章 住宅開口部への適用 室内温熱環境の検証 **6-1**

- 6.1 章 研究背景
- 6.2 章 実測による快適性検証
 - 6.2.1 概要
 - 6.2.2 検証
 - 6.2.3 結果 等価温度
 - 6.2.4 結果 Draught Rating
 - 6.2.5 小結
- 6.3 章 解析による快適性検証
 - 6.3.1 概要
 - 6.3.2 検証
 - 6.3.3 結果 等価温度
 - 6.3.4 結果 室内温熱環境形成寄与率 CRI
- 6.4 章 結論
- 6.5 章 議論

七章 結論 **8-1**

- 7.1 章 各章の結論
 - 7.1.1 一章
 - 7.1.2 二章
 - 7.1.3 三章
 - 7.1.4 四章
 - 7.1.5 五章

- 7.1.6 六章
- 7.2章 各章の謝辞
 - 7.2.1 一章
 - 7.2.2 二章
 - 7.2.3 三章
 - 7.2.4 四章
 - 7.2.5 五章
 - 7.2.6 六章

各章の図表

一章

- 図-1.1.1 Dynamic Insulation Window Frame
- 図-1.2.1 2014年におけるいくつかの国に対する一人あたりの国内総生産と一人あたりのエネルギー消費量の関係
- 図-1.4.1 目次
- 表-1.2.1 我が国における各部門別のエネルギー消費
- 表-1.3.1 標準住宅の各材料の詳細
- 表-1.3.2 検討材料の詳細

二章

- 図-2.1.1 AIFの流路による分類
- 図-2.1.2 Dynamic insulation system と Thermal mass activation の適用可能性は未知
- 図-2.1.3 DI技術の熱損失の考え方
- 図-2.1.4 DI技術の分類
- 図-2.2.1 Dynamic insulation wall Edinburgh の Energy FLO 社の実用化事例
- 図-2.3.1 DI窓の構成
- 図-2.3.2 DI窓の冬季のシステム構成
- 図-2.3.3 DI窓の夏季のシステム構成
- 表-2.2.1 研究の研究対象
- 表-2.2.2 太陽熱利用の歴史

三章

- 図-3.1.1 DI窓断面図
- 図 3.1.2 流路内のブラインド周囲の熱の流れ
- 図-3.2.1 DI窓の熱損失の考え方
- 図-3.2.2 試験機器概要と熱勘定
- 図-3.2.3 通気量別の断熱性能値: U_{dyn} とその熱抵抗値
- 図-3.3.1 実証試験住宅 一階平面
- 図-3.3.2 実証試験住宅 二階平面
- 図-3.3.3 DI窓の実測箇所
- 図-3.3.4 流入経路概念図

図-3.3.5	実験住宅一階平面図
図-3.3.6	実験住宅二階平面図
図-3.3.7	立面図 各面
図-3.3.8	DI窓の各ケース概念図
図-3.3.9	実験 A 外気温と通気量 (a) (b) (c) (d)
図-3.3.10	実験 A 窓面全日射量と温度指標:TI
図-3.3.11	実験 A 窓位置の熱流束と表面温度
図-3.3.12	各ケース、各窓の断熱性能比較
図-3.3.13	各ケース、各窓の室内外差圧
図-3.3.14	各ケース、各窓の通気量
図-3.3.15	各ケース、各窓の外部総合熱伝達率
写真-3.1.1	ハニカムブラインド
写真-3.1.2	サイドガイド
写真-3.1.3	使用例
写真-3.2.1	外側 DI窓の外観
写真-3.2.2	内側 DI窓の外観
写真-3.2.3	ブラインド表面①
写真-3.2.4	中空層
写真-3.2.5	ブラインド表面②
写真-3.2.6	外側給気口
写真-3.2.7	内側給気口
写真-3.3.1	外部測定装置
写真-3.3.2	外部窓表面測定装置
写真-3.3.3	実験住宅外観
写真-3.3.4	断熱改修前の主寝室
写真-3.3.5	断熱回収前 二階 廊下
写真-3.3.6	断熱改修前和室
写真-3.3.7	断熱改修前 リビング
写真-3.3.8	外壁 胴縁部分の気密
写真-3.3.9	土台床パネル
写真-3.3.10	外壁面の充填断熱部
写真-3.3.11	床面の断熱部
写真-3.3.12	構造パネルのシート
写真-3.3.13	テープによる気密化
写真-3.3.14	断熱パネル外側からのシート
写真-3.3.15	テープによる2次気密化
写真-3.3.16	外断熱パネル設置①

写真-3.3.17	外断熱パネル設置②
写真-3.3.18	2F 部分の外断熱
写真-3.3.19	天井の充填断熱
写真-3.3.20	DI 窓のガラス部
写真-3.3.21	DI 窓設置の様子
写真-3.3.22	天井換気ダクト
写真-3.3.23	二階換気ダクト部分
写真-3.3.24	廊下からの吸い込み口
写真-3.3.25	送風機への吹付け
表-3.2.1	熱箱実験の計測値(ブラインド有のケース)
表-3.2.2	熱箱実験の計測値 (ブラインド無のケース)
表-3.3.1	各窓の詳細
表-3.3.2	改修住宅の仕様
表-3.3.3	実証試験住宅の改修前後の断熱性能と気密性能
表-3.3.4	外窓と内窓の断熱性能値
表-3.3.5	各ケース別の実証試験住宅の通気量
表-3.3.6	実験 B 同形状を持つ比較窓と DI 窓の比較

四章

図-4.2.1	図 4.2.1 TRNFOW manual [10]より、概略図
図-4.2.2	標準住宅モデル平面図と DI 窓の適用位置
図-4.2.3	標準住宅モデルの立面図
図-4.2.4	隙間概念図
図-4.2.5	観測地から解析対象地の風速計算
図-4.2.6	住宅のエアノードの接続イメージ
図-4.2.7	各ファンと PQ 特性図
図-4.2.8	DI 窓の断熱性能の決定プロセス
図-4.3.1	1 月の一週間
図-4.3.2	換気量の累積頻度分布
図-4.3.3	標準ケースの換気量比率
図-4.3.4	比較ケースの全体の換気量比率
図-4.3.5	一階の換気量の累積頻度分布
図-4.3.6	二階の換気量の累積頻度分布
図-4.3.7	一階の断熱性能の累積頻度分布
図-4.3.8	二階の断熱性能の累積頻度分布
図-4.3.9	各ケースの年間暖房負荷削減量

表-4.2.1	開口比率
表-4.2.2	風圧係数
表 4.2.3	各ファンスケジュール
表 4.2.4	在室スケジュール
表-4.3.1	換気量の累積頻度分布
表-4.3.2	標準ケースの換気量のバランス
表-4.3.3	比較ケースの換気量のバランス
表-4.3.4	基準ケースの圧力差と通気量
表-4.3.5	比較ケースの圧力差と通気量
表-4.3.6	一階リビングの DI 窓の換気量の累積頻度分布
表-4.3.7	二階子供部屋の DI 窓の換気量の累積頻度分布
表-4.3.8	一階リビングの DI 窓の断熱性能の累積頻度分布
表-4.3.9	二階子供部屋の DI 窓の断熱性能の累積頻度分布
表-4.3.10	暖房負荷削減量
表-4.3.11	地域別の暖房負荷削減量

五章

図-5.2.1	DI 窓の断面と測定位置
図-5.2.2	北海道札幌の夏季における結露リスクの条件
図-5.2.3	実在住宅の平面図
図-5.3.1	減圧時の DI 窓まわりの露点温度
図-5.3.2	加圧時の DI 窓まわりの露点温度
図-5.3.3	減圧時における日射量と外気温度
図-5.3.4	加圧時における日射量と外気温度
図-5.3.5	減圧時の室内差圧と外部風速
図-5.3.6	加圧時の室内差圧と外部風速
図-5.3.7	減圧時の中空層の HI
図-5.3.8	加圧時の中空層の HI
図-5.3.9	減圧時の内窓の室内側表面の HI
図 5.3.10	加圧時の内窓の室内側表面の HI
図-5.3.11	ブラインド有の中空層内の露点温度
図-5.3.12	ブラインド有の内窓の室内側露点温度
図-5.3.13	ブラインド無の中空層内の露点温度
図-5.3.14	ブラインド無の内窓の室内側露点温度
図-5.3.15	ブラインド有の実測環境
図-5.3.16	ブラインド無の実測環境
図-5.3.17	ブラインド有の中空層 HI
図-5.3.18	ブラインド有の内窓の室内側 HI

図-5.3.19	ブラインド無の中空層 HI
図-5.3.20	ブラインド無の内窓の室内側 HI
図-5.4.1	検討する異なる気候区分の地域
図-5.4.2	夏季 減圧運転時、ブラインド有の相対湿度の累積頻度分布
図-5.4.3	夏季 加圧運転時、ブラインド有の相対湿度の累積頻度分布
図-5.4.4	冬季 減圧運転時、ブラインド有の相対湿度の累積頻度分布
図-5.4.5	冬季 減圧運転時、ブラインド無の相対湿度の累積頻度分布
表-5.2.1	スケジュールと各実測条件
表-5.3.1	夏季実測値 HI の不確かさ分析と TI
表-5.3.2	冬季実測値 HI の不確かさ分析
表-5.4.1	夏季の運用方法別の湿害リスク
表-5.4.2	冬季のブラインド有無による湿害リスク

六章

図-6.2.1	サーマルマネキンの外観
図-6.2.2	実測風景
図-6.2.3	マネキンの部位
図-6.2.4	平面図と配置場所
図-6.2.5	裸体時の換気種類別の等価温度
図-6.2.6	裸体時の配置別の等価温度
図-6.2.7	着衣時の換気種類別の等価温度
図-6.2.8	着衣時の配置別の等価温度
図-6.2.9	裸体時の DR と平均風速
図-6.2.10	着衣時の DR と測定値
図-6.2.11	裸体時の室温と乱流強度
図-6.2.12	着衣時の室温と乱流強度
図-6.2.13	局所空気温度と許容平均風速
図-6.3.1	人体モデルのメッシュ構成と人体周囲のセル分割
図-6.3.2	日射量別の流入空気温度と表面温度の回帰式
図-6.3.3	固体面分割状況と境界詳細
図-6.3.4	実測値と解析値の総合熱伝達率
図-6.3.5	各ケース別の等価温度
図-6.3.6	各ケース別の等価温度
図-6.3.7	各ケース別の等価温度
図-6.3.8	温度分布
図 6.3.9	CRI の分布

表-6.2.1	裸体時の総合熱伝達率[W/m ² K]
表-6.2.2	着衣時の総合熱伝達率[W/m ² K]
表-6.2.3	実証実験住宅の仕様
表-6.2.4	実証試験住宅の改修前後の断熱性能と気密性能
表-6.2.5	スケジュール
表-6.2.6	実測項目と機器の詳細
表-6.2.7	裸体時のケース別の通気量と流入温度
表-6.2.8	着衣時のケース別の通気量と流入温度
表-6.3.1	解析ケース

七章

図 7.1.1	Dynamic insulation wall specification
図 7.1.2	技術適用時の熱流イメージ
図-7.1.3	一般的な壁体の熱流イメージ
図 7.1.4	各建築工法との比較
図 7.1.5	DI 壁を適用した実住宅 1F
図-7.1.6	DI 壁を適用した実住宅 2F
図-7.2.1	熱板試験イメージ図
図-7.2.2	通気流路
図-7.2.3	測定位置
図-7.2.4	HFM 法試験概要
図-7.2.5	DI 壁の室外側の熱画像
図-7.3.1	解析領域
図-7.3.2	単位外周長さあたりの通気量と外皮断熱性能
図-7.3.3	単位外周長さあたりの通気量と内皮性能
図-7.3.4	貫流負荷と換気負荷
図-7.3.5	鉛直長さ別の外皮の表面温度分布
図-7.3.6	鉛直長さ 5m 時の通気量別の空気温度分布
図-7.3.7	縦スリット厚み別の外皮の表面温度分布
図-7.3.8	外皮の断熱性能に対する感度検証
図-7.3.9	金属サイディングと窯業系サイディングの断熱性能の違い
図-7.4.1	東京と北海道の 10 月の積算日射量
図-7.4.2	東京と北海道の 1 月の積算日射量
図-7.4.3	東京と北海道の 10 月から 4 月までの積算日射量
写真-7.2.1	熱流計
写真-7.2.2	環境温度計
写真-7.2.3	流量計

写真-7.2.4	柱の設置
写真-7.2.5	外装材の設置状況
写真-7.2.6	室内側通気層
写真-7.2.7	測定位置
表-7.2.1	断熱性能の検証結果
表-7.3.1	解析条件
表-7.3.2	利用物質の物性値
表-7.4.1	CRI 値の違い

第 01 章

序論

第 1 章 ■ はじめに ■

建物の省エネルギー化は全世界的な課題であり、居住者・利用者の生活の質の確保も重要視されている。この背景を受け、本研究で目指すものは、建物の省エネルギー化を図りつつ、快適性を維持できるシステムの構築と確立である。この条件を満たす可能性のあるダイナミックインシュレーション技術を取り上げ、住宅への窓部への適用や構成、熱的特性の検証を行う。

本章では、提案するシステムの背景の整理と、適用可能性を取り上げる。

1 章 序論

1.1 章 はじめに

本論文は、「ダイナミックインシュレーション技術を利用した住宅に関する研究」と題し、東京大学大学院 工学系研究科加藤信介研究室の博士課程に在籍した平成 25 年度から平成 27 年度までの期間の 3 年間の研究成果をまとめたものである*。具体的には、平成 23 年度から平成 24 年度に著者が博士課程前期の際、環境省の地球温暖化対策技術開発事業の「ダイナミックインシュレーション技術を活用する住宅の断熱改修に関する技術開発 [1] [2]」で携わった研究結果や知見をまとめた内容となる。

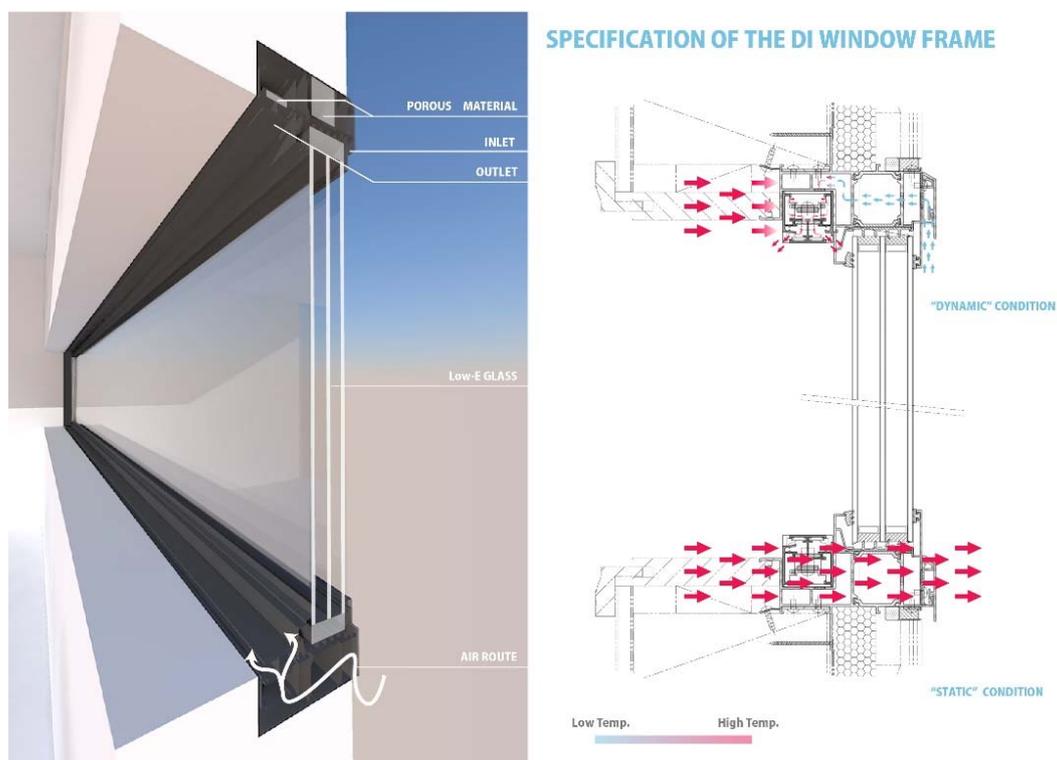


図-1.1.1 ダイナミックインシュレーション技術を適用した例 [3]

Dynamic Insulation Window Frame

以降の章、1.2 章と 1.3 章に、この研究テーマを取り上げるに至った背景と目的について述べ、1.4 章に本論文の構成を示す。

* 同大学院の博士課程前期の際には、本論文で取り扱った部位でなく、最も熱の逃げやすい窓枠（サッシ部分）を研究対象としていた。このイメージ図を図-1.1.1 に示す。

1.2 章 研究背景

1.2.1 世界の GDP とエネルギー消費

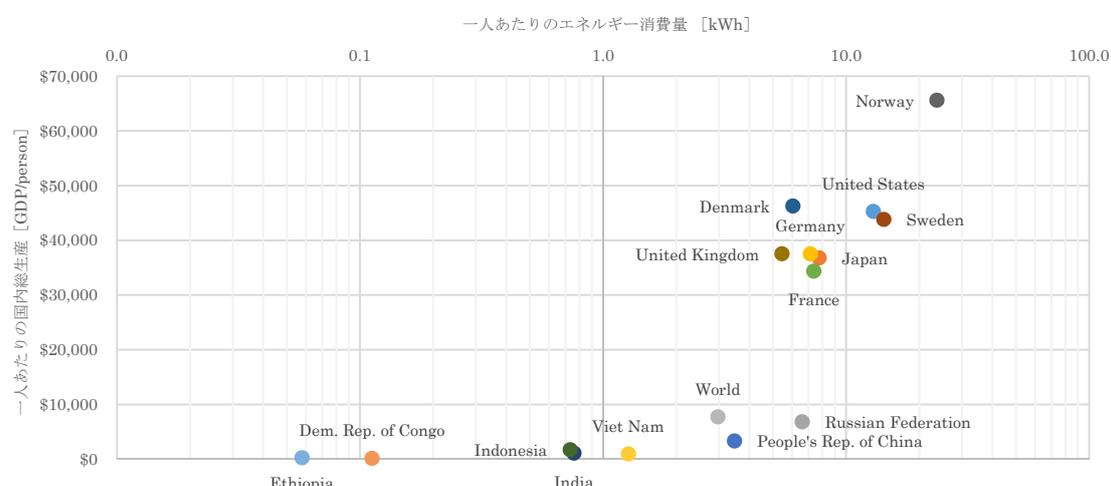


図-1.2.1 2014年におけるいくつかの国に対する一人あたりの国内総生産と一人あたりのエネルギー消費量の関係 [4]

建築に限らずの省エネ化の実現は全世界的な課題となっている。図-1.2.1に、2008年と2014年におけるいくつかの国に対する一人あたりの国内総生産と一人あたりのエネルギー消費量の関係を示した。工業国であるヨーロッパ、ロシア、アメリカ、日本は概ね同じ場所に固まっており、世界平均（図中のWorld）と比べ、3倍から5倍のエネルギー消費量である。一方で発展途上国の一人あたりの消費エネルギー量は世界平均10分の1程度の国がある。2008年から2014年にかけてインドや中国という開発途上国の増加が確認できる。人口の多い発展途上国が工業国と同様なエネルギー消費量となれば、世界平均が数倍に膨れ上がることが予測でき、省エネ化は世界的な課題といえることができる。この図からはもう一つ、一人当たりの消費エネルギー量が多い地域に寒冷地であるNorway、Sweden、Denmark、United Kingdomが群をなしていることが確認できる。

1.2.2 日本の省エネ政策

地球温暖化現象の対策を図るために、二酸化炭素の排出抑制や化石燃料の使用削減の要求から、1997年12月に京都で気候変動枠組み条約第3回締約国会議（COP3）において、先進諸国の温室効果ガスの具体的な排出削減量目標を盛り込んだ議定書が採択し、2005年2月に発行された。

我が国の場合では、温室効果ガス排出量を1990年比（基準年比）6%削減が国家的合意に基づく目標値である。しかしながら、2008年の温室効果ガスの総排出量（産業・民生・運輸）は基準年度比で6.3%増加であり、その9割を占める二酸化炭素由来の排出量が大幅に増加していた。2008年以降の国家的政策により2008年度から2012年度の京都議定書第一約束期間の5か年平均の総排出量は、12億7800万トンと、基準年度比で1.4%の増加となったが、これに森

林等吸収源及び京都メカニズムクレジットを加味して、標準年比 8.4%減となり、目標値（基準年比 6%）を達成することになった。

第一約束期間後は、「平成 25 年 3 月 15 日に決定した「当面の地球温暖化対策に関する方針」に基づき、地方公共団体、事業者及び国民には、取組状況を踏まえて京都議定書目標達成計画に掲げられていたものと同様以上の取組を推進することを求めること [5]」とされており、依然として温室効果ガスの削減が求められている。この京都議定書目標達成計画の当面取り組むべき対策・施策の方向に関し、家庭部門は 55.6 百万 t-CO₂ の CO₂ 削減見積もられている。対策の住宅の省エネ向上という区分は、このうち 8.5 百万 t-CO₂ 削減の努力が必要とされている。

表-1.2.1 我が国における各部門別のエネルギー消費* (単位：10¹⁸J)

年度	民生部門		産業部門	運輸部門
	家庭部門	業務部門		
2011	2.063	2.851	6.224	3.390

京都議定書第一約束期間では、森林吸収源及び京都メカニズムクレジットの効果を含まなければ目標値を達成することができなかった。この理由の一つが、家庭部門でのエネルギー需要の拡大が挙げられている。表-1.2.1 に示すように各部門別に消費エネルギー量を比較しても、家庭部門の割合は少なくはなく、対策が必要である。

1999 年の次世代基準により住宅における断熱や気密化が受け入れられて、徐々に外皮の断熱化が普及してきた。昨今では約 6000 千万戸という住宅ストック [6] を積極的に利用する住宅改修も地球温暖化現象の解決策の一端を担っている。このように、建築の断熱化や気密化が進んだ次のステップの新しい住宅のあり方が検証される必要がある。

1.2.3 住宅の断熱化と健康化

現在日本の寒冷地として知られる北海道札幌（地域区分 Ib [7]）の基準一次エネルギー消費はすべての段冷房方式で 113GJ であり、この内の暖房設備の一次エネルギー消費量は 81.8GJ とされている。このエネルギー消費削減として外皮の断熱化が重要とされている。

断熱化、すなわち住宅内部と外部との熱移動を小さくすること、は冷暖房エネルギーの削減に有効とされる。この他に、断熱化により確実に得られるものとしては、住空間の熱的快適性の質的改善が挙げられる。一般に知られている断熱化のメリットの概略は、省エネルギーの実現、体感温度の改善、健康安全性の向上である。

断熱化により熱損失と熱取得を低減でき、冬季の熱損失量と書きの熱取得量を減らすことができるため、省エネルギーの実現が可能である。たとえ暖房設備の高効率化が得られたとしても、断熱性能が乏しければエネルギー消費は大きい。既往の研究では断熱性能の向上に伴い、疾病予防効果により医療費の軽減や休業による所得低下を回避できることから、断熱改修の投

* 構成比は端数処理(四捨五入)の関係で合計が 100%とならないことがある。

資回収率も上がることが報告されている [8]。さらに熱抵抗の増加により室内表面温度が室内空気温度に近づくため体感温度の改善も可能である。断熱性能の向上により、新しい住まいになって喉の痛みや肌のかゆみ、高血圧などの症状が出なくなった人の割合（健康改善率）と住宅の断熱性能には相関があることが報告されている [9]。加えて住宅のヒートショックの危険性の高い非暖房領域の温度を快適域に維持できることも、健康面のメリットと言える。

1.3 章 研究概要

1.3.1 ダイナミックインシュレーション技術を利用した住宅

本研究の要旨を完結に書き示すと、「世界的な省エネの実現が急務な中で、断熱性能の向上と未利用エネルギーの積極的利用が可能なダイナミックインシュレーション技術（以下 DI 技術）に着目し、それを断熱性能の弱い開口部と住宅の中で最も表面積の大きい壁体部の2つの部位に適用し、実用化を考慮した特性値（断熱性能、防露性能、快適性、省エネ性）に関してまとめた「内容となる。

本研究は建物外皮と建築設備を総合化した省エネ評価手法の開発に該当し、国家的政策の一端を担うことができ本研究は住宅だけではなく、そのほかのビルディングタイプにも適用が可能である。断熱性能の向上が得られても、初期投資分の削減効果が得られなければそのシステムは利用されることはない。加えて、建材寿命の短縮や室内快適域を逸脱するものであってはならない。さらにこれ以上に重要なのが、低コストで実現できる市場性である。ドイツパッシブハウスのように断熱性能の確保に厚い断熱材外皮に巻き付ければ居住領域が狭まるし、真空断熱などの高性能建材を用いると建設初期投資が大きくなる。これら要求を解決できる住宅のシステムが必要である。

そこで、本研究はダイナミックインシュレーション技術に着目をした。ダイナミックインシュレーション技術とは、熱損失と逆方向に移流を発生させることで着目する部位の温度勾配を零に近づけ、実質的な熱移動を零に近づけることができる技術である。冬季に壁や窓を介して換気を行うことで、熱損失を減らせるとともに冷たい外気が流動過程で得た熱量で昇温するため室内の空間の冷却効果を低減することができ、かつ乾燥外気を導入することで適応する部分の結露リスクを低減することも期待している。

ダイナミックインシュレーション技術は室内差圧の符号に依存はしない。例えば室内を負圧にした際に適用部の外表面において、室内を正圧にした際に適用部の内表面において温度勾配を低減でき、移流が伴っている部位においては本技術の効果が付与される。本技術の方向（室内負圧もしくは正圧）を決定する要素は防露性能であり、冬季は室内減圧を、夏季は内部結露の観点から室内加圧が望ましい。

1.3.2 市場性について

(a) 開口部について

東日本大震災以来、省エネ住宅の関心が高まっている。総務省統計局のデータによれば、「5年前と比べ二重サッシまたは複層ガラスの窓を設置している住宅は 1315 万戸で 271 万戸と約 26%増加」となり、窓部の関心の高いところである。一般に断熱性能が弱いとされる開口部の、断熱性能を向上させる方法は内窓を取り付けた二重窓である。外窓と内窓の間にブラインドを設置することで飛躍的な断熱性能の向上が得られる。本技術を二重窓に適用することは、設置や施工の観点から容易である。構成部材は既存のものを使うことができるうえ、空気流動を促す通気口をサッシ部分に設けることは難しくない。

(b) 壁面について

参考に、面積の大きい壁体で DI 技術を適用することによる費用の削減はどの程度を知るために、一般的な住宅の構成と全体構成割合、価格を表-1.3.1 と表-1.3.2 に示した。例えば断熱性能が $0.3\text{W/m}^2\text{K}$ 相当の壁体を $0.1\text{W/m}^2\text{K}$ 相当にできると仮定する。建築の壁面表面積を 200m^2 として、断熱材の熱伝導率を 0.024W/mK * とすると、約 160mm 相当の断熱材を削減** したことになる。材の価格を 4000 円程度として計算すると価格にして、 250 万円相当であり断熱回収の価格に見合うリターンであると言える。

表-1.3.1 標準住宅の各材料の詳細

	標準住宅の住宅建材量			熱伝導率 W/mK	密度 kg/m ³	比熱 kJ/Kkg	容積比熱 kJ/Km ³	標準住宅の各建材の熱容量 MJ/K	材価格 ¥/kg
	m ³	t	%(m ³)						
木材	34.0 *	17.0	28%	0.14 [10]	500 [10]	1.3 [10]	650	22.1	約 200 円 **
コンクリート	32.3 ***	77.6	27%	1 [11]	2400 [11]	0.8 [11]	1920	62.1	約 10 円+
割栗石	24.3 ++	-	20%	-	-	-	-	-	
ブラスターボード	2.6 +++	1.9	2%	0.14 [10]	710 [10]	1.1 [10]	802	2.1	約 40 円Ⓞ
断熱材	21.9 ⓄⓄ	0.4	18%	0.041	20	1.0	20	0.4	約 4800 円 ⓄⓄⓄ

表-1.3.2 検討材料の詳細

PCM (F20)	2.5 ψ	2.1	2%	0.20	820	2.5	2050	5.1	約 3000 円
花崗岩	2.5 ψψ	6.5	2%	2.18	2600	0.8	2080	5.2	約 200 円 ψψψ

* 一般的に普及する断熱材の熱伝導率は 0.028 程度である。この値を用いれば、断熱材削減量は約 180mm となる。

** 向上した断熱性能の熱抵抗の差は、

$$1/0.1 - 1/0.3 = 6.66 \quad [\text{m}^2\text{K/W}] \quad \text{Eq-(1.1)}$$

断熱材厚みは、以下の様に見積もることができる

$$6.66 \times 0.024 = 0.159 \approx 0.16 \quad [\text{m}] \quad \text{Eq-(1.2)}$$

* [12] p49 より、量は推定値 $0.21\text{--}0.30$ の最小値を用いる

** 杉材 乾燥材 94000 円/m³ → 約 144 円/kg

*** 厚み $0.200\text{m} \times$ 床面積 161.72m^2 として計算

+ 御影石、 300 角厚み 10mm で 420 円より計算

++ 厚み $0.150\text{m} \times$ 床面積 161.72m^2

+++ 壁： 12.5 mm、天井 $9.5\text{mm} \times 2$ として計算

Ⓞ 12.5mm のチヨダ石膏ボード一枚 550 円より計算

ⓄⓄ 壁： 110 mm、天井 145mm として計算

ⓄⓄⓄ フェノバボード 20mm 厚み一枚 3220 円より計算

ψ 2F スラブ $\text{m}^2 \times 2$ 程度

ψψ PCM と同程度とした場合

ψψψ 御影石、 300 角厚み 10mm で 420 円より計算

1.4 章 論文構成

1.4.1 研究構成

本論文の構成を図-1.4.1に示す。

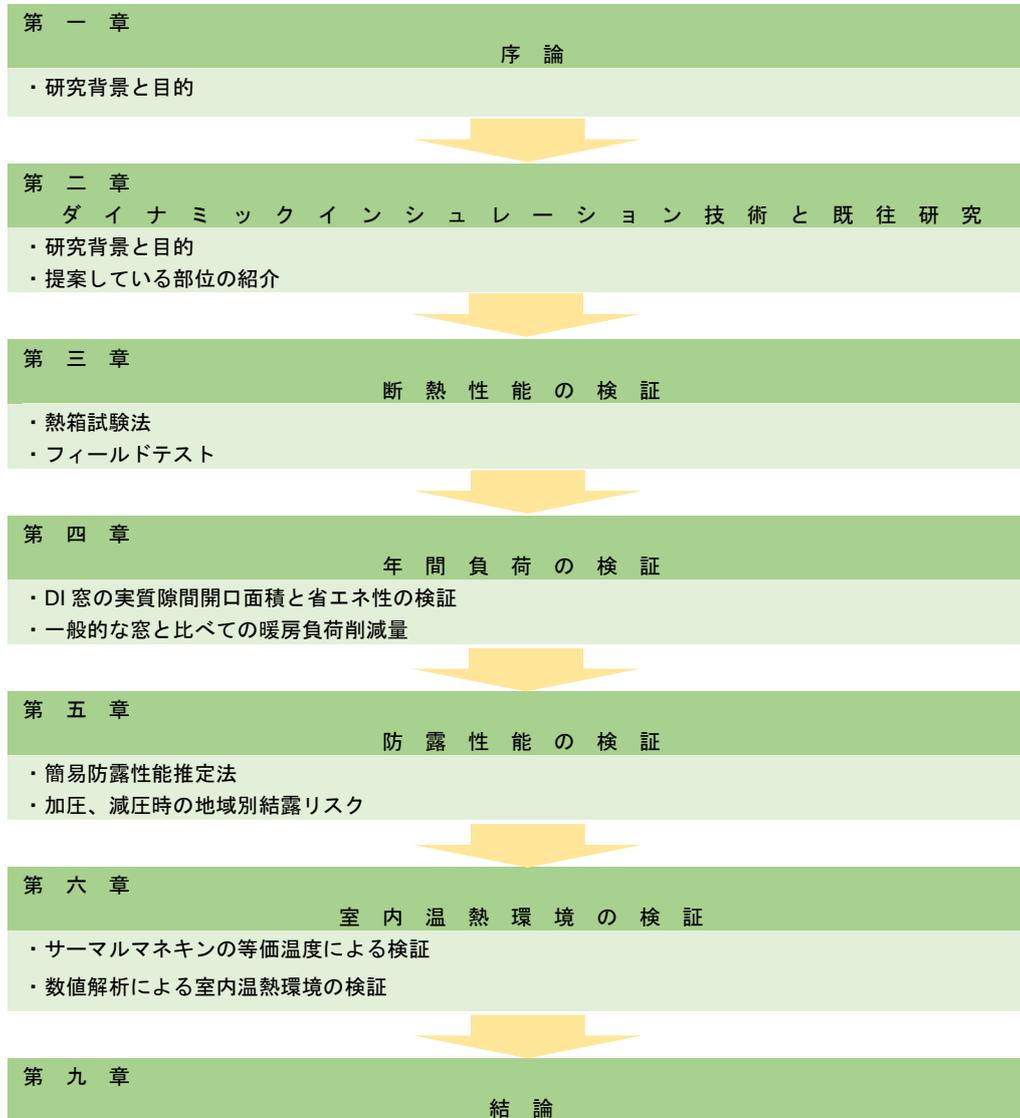


図-1.4.1 目次

1.4.2 研究構成の詳細

1章には、本論文の研究背景と研究目的に触れた。持続可能性と省エネ性を満たしかつ、安価に実現できる住宅の必要性について触れた。

2章には、省エネを目的とした建築デザイン技法を整理した。また寒冷地で研究、開発、実施、流通が行われるダイナミックインシュレーション技術（以下DI技術）の概略として技術概要と既往研究を通じて紹介した。本章では3章から6章にかけて研究開発を進めたDI技術を適用した開口部（窓部）のシステム構成と、7章から8章にかけて示す壁体部のシステム構成を示し、本論文の研究範囲を示した。

3章には、断熱性能の最も弱い開口部（窓部）にDynamic Insulation技術を適用し（以下DI窓）、その開発と熱箱試験による断熱性能検証、実住宅に適用した際の断熱性能検証と結露発生の可能性に関する検証と熱回収率・昇温率の調査結果を示した。

4章には、換気回路網計算と年間負荷計算の連成を行い、本システムの優位性と市場流通性を検証することを目的とする。3章の熱箱試験法による断熱性能検証の結果を用いて、外乱の影響を考慮した年間負荷シミュレーションを実施し、一般的な窓に対してどの程度の暖房負荷削減効果があるのかを検証を行った。

5章には、3章で室内表面温度の低下による結露リスクの懸念が疑問として残ったため、結露リスク検証を示した。DI窓は室内表面温度の低下という負の側面がみられる一方で、室外の乾燥空気の室内への導入により窓部を乾かす効果が得られる。本検証では、線形性を仮定した温度と絶対湿度の部位別の無次元指標で示し、この指標から特定部位の結露発生頻度を検証することでリスク評価を行った。

6章には、外気導入を行うことによる室内表面温度並びに近傍空気温度の低下が考えられ、室内快適性の影響評価を定量的に示した。3章と4章で触れた実住宅に人体形状と体温を模したマネキン（サーマルマネキン）を利用した等価温度による評価並びに、CFDに人体生理モデルを組み込んだ場合のDI窓周辺のパラメトリックスタディを行い、室内温度寄与率（CRI）による評価を行った。

7章には、結論と謝辞を各章にわたり示した。

■ 引用文献リスト ■

- [1] 東京大学, 平成 24 年度環境省委託事業 ダイナミックインシュレーション技術を活用する住宅の断熱改修に関する技術開発 成果報告書, 環境省, 2013.
- [2] 東京大学, 平成 22 年度環境省委託事業 ダイナミックインシュレーション技術を活用する住宅の断熱改修に関する技術開発 成果報告書, 環境省, 2011, p. p.27.
- [3] 樋山恭助, “窓サッシ部へのダイナミックインシュレーションの適用,” 日本建築学会環境系論文集 第 79 巻, 第 699 号, 2014.
- [4] International Energy Agency, “Key World Energy Statistics 2014,” OECD/IEA, France, 2014.
- [5] 環境省, “京都議定書目標達成の進捗状況について (お知らせ),” 3 7 2014. [オンライン]. Available: <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=18353>. [アクセス日: 1 11 2015].
- [6] 総務省統計局, “平成 25 年住宅・土地統計調査結果による住宅に関する主な指標,” 26 2 2015. [オンライン]. Available: http://www.stat.go.jp/data/jyutaku/topics/pdf/topics86_2.pdf. [アクセス日: 3 11 2015].
- [7] 田中俊六, 最新建築環境工学 [改訂 3 版], 井上書院, 2009, p. p.37.
- [8] 伊香賀俊治、江口里佳ら, “健康維持がもたらす間接的便益 (NEB) を考慮した住宅断熱の投資評価,” 日本建築学会, 日本, 2011.
- [9] 岩前篤, “断熱性能と健康,” 日本建築学会環境工学本委員会熱環境運営委員会, 2010.
- [10] 日本建築学会編, 建築設計資料集成 I 環境, 丸善出版株式会社, 2007, p. 119.
- [11] 自然科学研究機構国立天文台, 理科年表 平成 24 年, 丸善出版株式会社, 2014, p. 416.
- [12] 建築資料研究社, 積算ポケット 建築編 2014, 建築資料研究社, 2014.

第 02 章

ダイナミックインシュレーション技術と既往研究

第 2 章 ■まえがき ■

本論文で扱うダイナミックインシュレーション技術（DI 技術）の概念とこの研究史、他技術との連携、提案する技術の概要を本節で解説を行う。

2.1 章では、これまで行われてきた研究の中での本研究の位置づけ、2.2 章では本研究の既往研究と更なる省エネ化が可能な他技術との連携、2.3 章ではこれ以降の章で取り上げる住宅システムの概要を書き示す。

2章 ダイナミックインシュレーション技術と既往研究

2.1章 本研究の位置づけ

2.1.1 省エネ化手法

現在の持続可能性と省エネ性を満たす建築デザイン手法を整理し本研究の位置づけを示す。持続可能性と省エネ性を満たす建築の実現へ向け、研究者と専門業者に対する方策をまとめた報告書 IEA Annex44 [1] によれば、建築外皮には以下の建築的操作要素が分類されている。

- **Advanced Integrated Facades (AIF – 外皮建材の構成)**

例えばエアフローウィンドウが該当する。日射取得を低減が主な目的である。

- **Dynamic insulation (DI – 通気により建材表面の温度勾配をゼロにする技術)**

1970年代初頭より主に寒冷地で検証が進められた技術である。外皮の断熱性能向上に加えて導入する空気を加温する効果が得られる。

- **Thermal mass activation (TMA – 蓄熱材)**

コンクリートなど熱容量のある建築でピーク負荷の削減を図るもの

- **Phase change materials (PCM – 潜熱蓄熱材)**

相変化による蓄熱を利用する建材。

- **Earth coupling (EC – 地中熱利用)**

持続可能性と省エネ性を満たす建築の実現で重要なのは、負荷の低減と未利用エネルギーの取得である。Advanced integrated facades(以下 AIF) は元来的には Double skin から始まり、いわゆるビルディングの実質的な熱損失面/取得面である外皮の分類である。AIF の内の Integrated facades は Wigginton, M. ら [1]により以下のように定義されている。

“A composition of construction elements confined to the outer, weather-protecting zone of a building, which performs functions that can be individually or cumulatively adjusted to respond predictably to environment variations, to maintain comfort with the least use of energy”

外部との接触面並びに居住の用に供する空間にのみ限定した範囲で、室内の環境を維持し、外部の変動に対応が取れる建築建材の構成

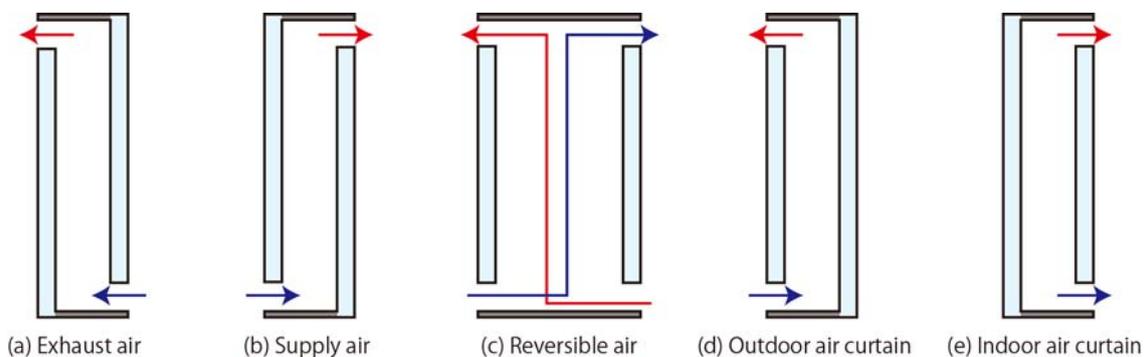


図-2.1.1 AIFの流路による分類

Dynamic insulation system (以下DI技術)も動的な変化を伴う通気要素がある点ではAIFと同じである。AIFの先行研究は主としてオフィスなどのビルディングタイプに対して適用されるのに対し、DI技術は住宅のようなビルディングタイプに対して適用される。図-2.1.1にAIFの流路による分類を示した。この分類ではDI技術は(a) Exhaust airと(b) Supply airに対応し、夏季に(a) Exhaust air、冬季に(b) Supply airとモードを切り替える。

2.1.2 DI 技術の概要

DI 技術は 1970 年代より寒冷地で研究報告がされており、その適用部前後の内外差圧を駆動力とした通気により、熱を輸送するものである。移流による熱の輸送の向きを、建築外皮の熱貫流の向きと逆転させることで、外皮表面の温度勾配を零にすることが DI 技術の本質である。特に冬季は外皮の外側表面の温度勾配をなくすことで、住宅という境界から実質的に熱の流出をなくすことを期待している。換気負荷の観点では、換気負荷は排気による熱（もしくは冷熱）の損失と考え、外気温度と室内温度との差により評価しているため、DI 窓の通過による昇温は換気負荷の削減とはならない。図-2.1.3 に DI 窓に流出入する熱の流れを示す。内側から「流入する熱量」 Q_T はDI無と比べ大きくなるが、付加熱量（図-2.1.3の薄い灰色）は通気空気に渡され室内に戻る。また外部に流出する熱の一部（図-2.1.3の濃い灰色）を回収する。本技術上で、室内空間から室外空間へ熱貫流し、実質的に損失している熱量は Q_{cond} であるため、境界は室内ではなく室外に設定する。なお、夏季においては実質的に取得する熱量は室内側であるため、室内側に境界を取る。

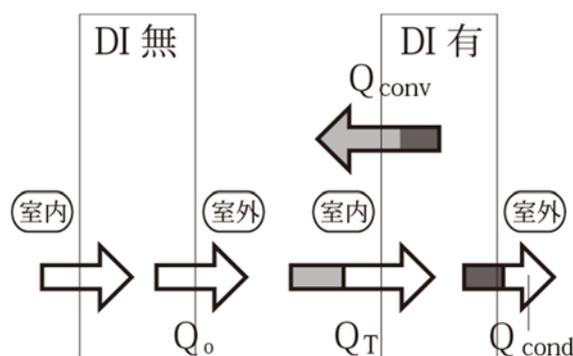


図 2.1.3 DI 技術の熱損失の考え方

2.1.3 DI 技術の種類

DI 技術は大きく分けて二種類の通気タイプが存在する。一つは多孔質材通気型 (Permeodynamic) 通気層通気型 (Parietdynamic) である*。図-2.1.4 に示すように、両ケース共に室内からの流入熱量 B と換気の昇温分 C の差分が、実質的な損失熱となる。多孔質材通気型は通気層通気型と異なり壁体内にバッファを持ち、多孔質材を経由して室内に導入するの

* 厳密には、二種類ではなく、通気層通気型に全熱交換器が加わった Thermodynamic 型を加えた三種類 [28]であるが、通気経路の分類として便宜上二種類とする。

に対し、通気層通気型は壁体内の通気層を経由して室内に導入される。多孔質材のバッファは雨水等の耐候性を持たせることを意図している。

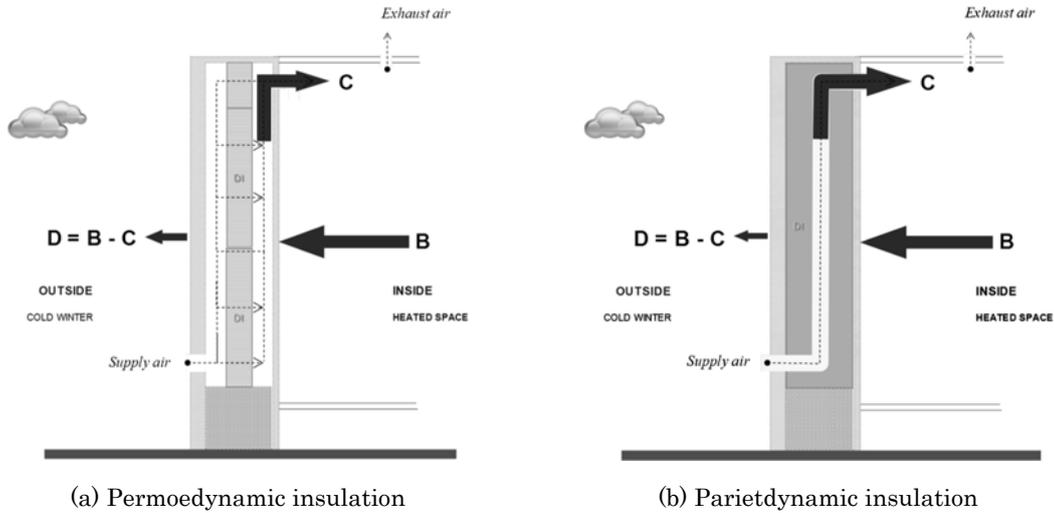


図-2.1.4 DI技術の分類（[2]より引用）

2.1.4 躯体熱容量利用

DI技術は、太陽熱の集熱や外気昇温により、一般的な換気口と比べ高い温度で空気を室内に供給することができる。この温度を利用した潜熱蓄熱材（以下PCM: Phase Change Material）は流量制御により任意の空気温度を融解・凝固温度に調整することができ、パッシブ利用が前提のものに比べ空調機器を用いることによる対流伝達率の増加が期待でき、組み合わせることで大きな効果が期待できる[3]。PCMは、1930年頃に太陽熱の蓄熱とその熱を用いた暖房が主な用途であった。熱容量の小さい建物は、短い時間間隔での温度変化が頻繁に起こり、室内空間の熱的快適性が得られないことに繋がるため、熱容量を増加させ、かつ有効的に用いるべく現在においてもPCMのR&Dが行われている。DI技術の適用による断熱性能の向上、加えて一般的な換気口と比較すれば室内の快適性も確保できる可能性がある。加えて、ピークシフトと室内温度の平準化を目的とするPCM及び躯体蓄熱の有効利用も期待できる。図-2.1.2に示すように包括的な資料[1]では、DI技術と蓄熱の検証は行われていない。

Building component	Suitability for combined use	Note
Advanced facades	Yes	Very suitable combination, advanced facade systems provide solar shading to decrease solar gains in the summer and also sufficient thermal insulation during the winter, this helps keep heating/cooling demand on the low level and allows TMA components to work with the highest efficiency.
Natural ventilation	Yes	Natural ventilation provides clean air into the premises without additional energy consumption (fans etc.) and gives the occupants ability to adjust their thermal environment. Self-control behaviour of the TMA components is more pronounced.
Mechanical and hybrid ventilation	Yes (with limitations)	Certain limitation can be seen in the fact that using the whole surface of ceiling for TMA components does not give a space for duct installations. The ventilation system must be integrated into the walls, floor or led in corridors etc.
Lighting	Yes (with limitations)	Suspended ceiling cannot be used, lighting installations should be designed in different way.
Solar shading	Yes	It is important to passively decrease heat loads in the building – suitably controlled solar shading is one of the most effective solutions.
Earth coupling	Yes	TMA components are very suitable for utilization of low valued energy obtained from ground heat exchangers for cooling.
Phase Change Material	Yes	Research is still in progress.
Dynamic insulation systems	Not known	-
Raised floors	Yes	In the buildings where all ceiling surface is used for radiant heating/cooling usage of raised floor is sometimes only solution when a space for electrical and other installation is needed.
Suspended ceilings	No	Suspended ceilings cannot be used.

図-2.1.2 Dynamic insulation system と Thermal mass activationの併用効果は未知 [1]

2.2 章 既往研究

2.2.1 研究史概要

1970 年台に北欧やその周辺の寒冷地域での検証が行われたが、実用化事例は確認できるもので Edinburgh の Energyflow 社の事例のみである。図-2.2.1 に示すように組積造建造物の外皮の上に通気層と断熱層を設け、外皮と断熱層の間の通気層に通気をするものである。当時本技術のボトルネックは気密性能であり、計画的な換気が困難であったため普及しなかったとされる。昨今注目を浴びる理由としては、気密性能の建物が建設可能になったということと、DI 技術との相性の良い太陽集熱パネルや PCM を代表とする新規素材の進出が挙げられる。このため近年は DI 技術の黎明期と言える。

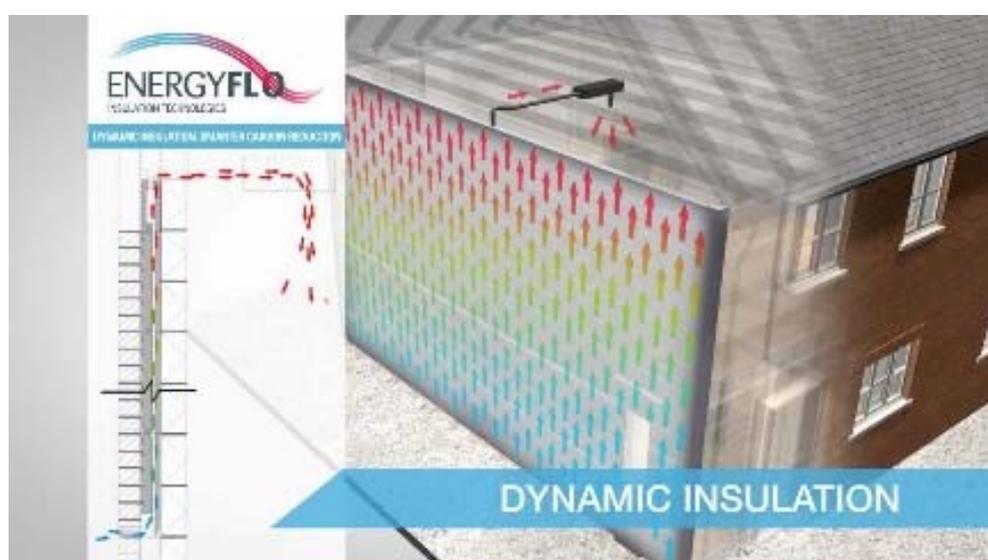


図-2.2.1 Dynamic insulation wall Edinburgh の Energy FLO 社の実用化事例*

外皮上に設置する壁体パネル上部に設置した換気ファンにより、外皮の下部より空気を導入し外皮から損失する熱の一部を回収することができる。

これまでの DI 技術の適用部位の変遷を表-2.2.1 に示した。DI 技術の研究は 1970 年代から存在が確認されているが、スウェーデン語等で書かれ解読が困難であることから、1990 年代で解読可能なものを列挙した。大半は多孔質材内の温度分布を主な研究対象としている。

2.2.2 DI 技術に関する既往研究（日本の事例）

2010 年頃から東京大学加藤研究室を中心に DI 技術を開口部に適用した際の省エネ効果 [4] [5] [6] [7] や天井に多孔質材を設置した際の断熱性能の向上効果 [8] について検証を進めてきた。また、北海道立総合研究機構北方建築総合研究所の研究グループが呼吸型 DI 技術 [9] [10] [11] [12] [13] [14] の検証を進めている。この呼吸型 DI 技術は室内空間の加圧減圧を繰り返し反転さ

* <https://www.youtube.com/watch?v=RIY8TmJK5DI> より引用

せることにより、外部接触した無機断熱コンクリートに蓄熱/放熱・吸湿/放湿を行うものである。

表-2.2.1 既往研究の研究部位

年代	著者	論文タイトル	出版社	部位		
				ポーラス材 通気型壁体	通気層通気 型壁体	開口部
1987	Catherine Langlais	Thermal efficiency of counterflow insulation systems: Possible applications. Thermal Insulation: Materials and Systems [15]	Astm intl	●		
1992	Morrison	thermal performance of a residential dynamic wall	ASHRAE	●		
1996	Taylor	Analytical Investigation of the Steady-state behaviour of dynamic and diffusive building envelopes [16]	B&E	●		
1997	Taylor	The effect of air film thermal resistance on the behaviour of dynamic insulation [17]	B&E	●		
1999	Taylor	The building envelope as an air filter [18]	B&E	●		
2000	Gan	Numerical evaluation of thermal comfort in rooms with dynamic insulation [19]	B&E	●		
2006	Imbabi	Modular breathing panels for energy efficient, healthy building construction [20]	Renewable Energy	●		
2007	Kai	Modeling the combined conduction—Air infiltration through [21]	B&E	●		
2007	Wong	Evaluation of thermal conductivity in air permeable concrete for dynamic breathing wall construction [22]	Cement & Concrete Composites	●		
2007	朴天吉	「息をする建築部材」の自然換気機能の工夫を取り入れた 新たな室内側仕上げ部位の提案	日本建築学会 環境系論文集	●		
2011	田中美穂	住宅開口部サッシ部へのダイナミックインシュレーション の適用とその省エネルギー効果 [4]	日本建築学会 環境系論文集			●
2011	李時桓	戸建住宅の断熱改修における開口部サッシ部へのダイナミ ックインシュレーションの適用可能性検討 [23]				●
2012	Imbabi	A passive-active dynamic insulation system for all climates	Sustainable Built Environment		●	
2013	八重樫彩	木造軸組構法へのダイナミックインシュレーションの適用 と実環境下における断熱性能評価	空気調和衛生工学会 大会学術講演梗概集	●		
2013	福島明	呼吸型ダイナミック・インシュレーションに関する研究	日本建築学会 大会学術講演梗概集	●		

2.2.3 DI 技術に関する既往研究（カナダの事例）

数値解析と実住戸への適用を行った事例では、通気経路形状と天候が断熱性能および太陽熱集熱へ与える影響を検証した [24]。また DI 技術を適用した部材内の温度分布の予測法について検証している [21]。

2.2.4 DI 技術に関する既往研究（イギリスの事例）

イギリスにおけるダイナミックインシュレーション技術の基礎研究は Aberdeen 大学の EPSRC 基金プロジェクトにより実施されている。その初期には断熱性能の検証をしたもの [16] [17] [25] や、その後に繊維系の断熱材による DI 技術の経年劣化の考察をしたものがある [18] [22]。初期の研究では、ポーラス材通気型壁体の内部の温度、湿度分布を明示することを目的とし、施工に加えて、内外表面条件が熱輸送構造に依存することを指摘した内容 [16] や、多孔質材通気型壁体の外表面温度と DI の熱損失低減効果の考察した内容である [17]。多孔質材通気型壁体の U_{dyn} の算出に必要な通気時の熱伝達率 λ の予測法の報告では、 λ への影響力が高いものは構成物質の大きさと、その物質元来の伝導率、含水率であることを指摘した [22]。

イギリスは新しい住宅改修計画の実施として、呼吸型壁体ユニットの作成とその省エネ効果の検証も進めている [20] [26]。面積の大きい壁面での換気は、従来の HEPA (High Efficiency

Performance Air Filter) より通気風速が低速になることから圧力損失が低減できる。つまり、断熱性能と空気洗浄効果の両方を兼ねそろえた部材として適用可能性の検証を行っている。

2.3 章 提案技術システム概略

2.3.1 ダイナミックインシュレーション技術の開口部への適用 (DI 窓)

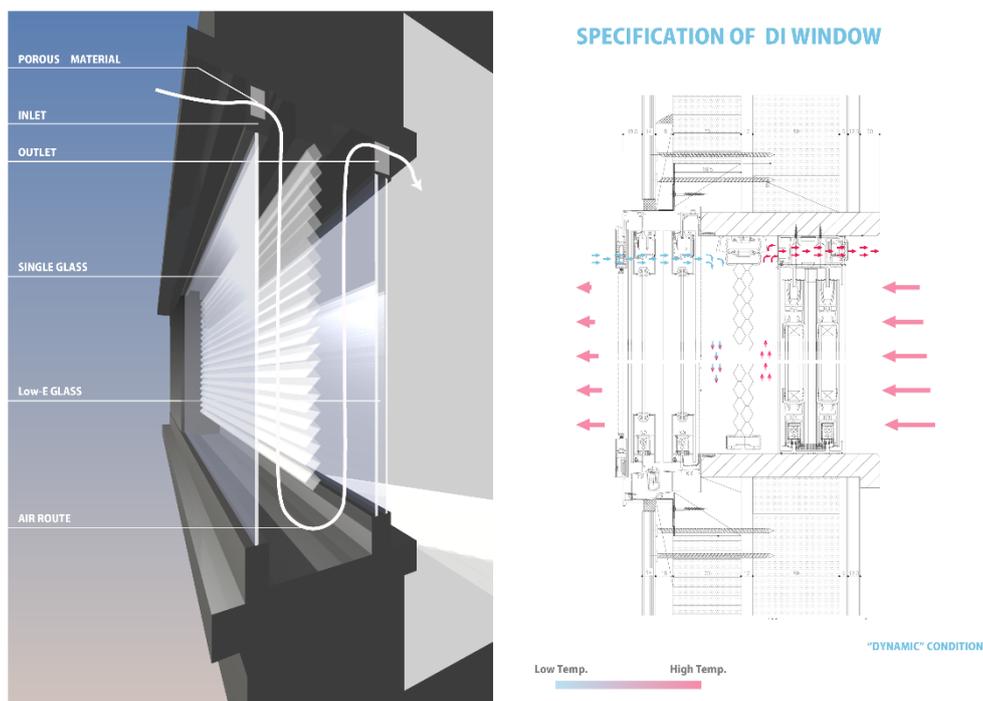


図-2.3.1 DI 窓部の構成

図-2.3.1 の DI 窓部の構成を示す。DI 窓部は3つの部位で構成され、外窓・中空層・内窓である。外窓はシングル窓ガラス、中空層にはブラインドを有し通気の整流効果を期待している。内窓は low-E の複層ガラスである。構成は一般的な二重窓と同様であるが、異なる点が、外窓と内窓の上側框に通気のための開口を設けている。流量の調節のために、上側框の内部に多孔質材を取り付けている。

図-2.3.2 と 図-2.3.3 に冬季と夏季の運転概要を示す。窓部のシステムは3つのシステムで構成され、①DI 適用部、②機械換気システム、③排熱回収ヒートポンプである。

①DI 適用部は、冬季に減圧、夏季に加圧されることにより熱損失・熱取得と逆方向の移流を発生させることで断熱性能の向上を図るものである。本論文の主目的は、この適用部位周辺の熱的な特性の明示化である。

②機械換気システムは、DI 適用部の断熱性能を維持するための通気量を調整する部位であり、冬季に室内を減圧する第三種機械換気システムを、夏季に室内を減圧する第二種換気システムを採用している。

③排熱回収ヒートポンプは、冬季の排気空気・夏季の外気から熱を取り出し、熱と冷熱を室内空間からの損失量を減らす機能を持つ。

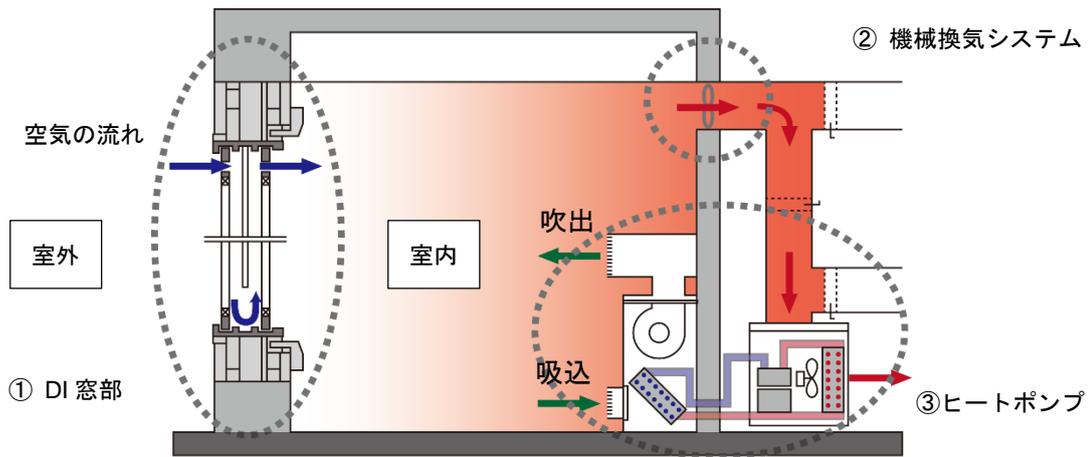


図-2.3.2 DI窓部の冬季のシステム構成*

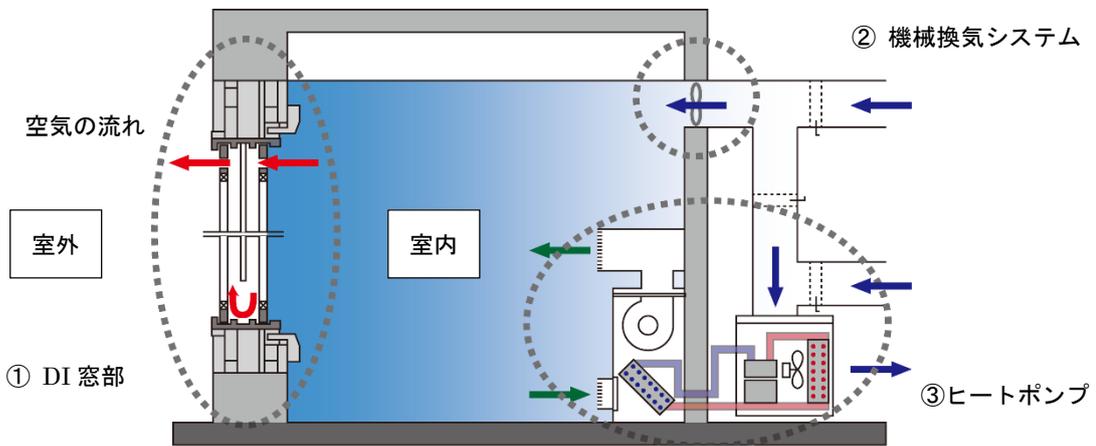


図-2.3.3 DI窓部の夏季のシステム構成

* [23] [4]を参考とした。

■ 引用文献 ■

- [1] IEA, “Expert Guide RBE November, APPENDIX 8A,” *Annex44*, p. p.3, 2009.
- [2] M. S.-E. Imbabi, “A passive-active dynamic insulation system for all climates,” *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2013.
- [3] Mehling・Cabeza, *Heat and cold storage with PCM*, Berlin Heidelberg: Springer, 2010.
- [4] 田中美穂、李時桓、加藤信介, “住宅開口部サッシ部へのダイナミックインシュレーションの適用とその省エネルギー効果,” 日本建築学会環境系論文集 第 76 巻 第 666 号, 2011.
- [5] 八重樫彩、河原大輔、大浦豊、手塚純一、樋山恭助、加藤信介, “住宅開口部へのダイナミックインシュレーションの適用(その 15): 窓部にダイナミック・インシュレーションを適用した改修住宅の性能評価試験結果,” 日本建築学会学術講演集環境Ⅱ, 2013.
- [6] 河原大輔, “窓部におけるダイナミックインシュレーション技術の適用 第 1 報—熱箱及び実測による省エネ性能検証,” 空気調和・衛生工学会論文集 No.211, 2014.
- [7] 樋山恭助, “窓サッシ部へのダイナミックインシュレーションの適用,” 日本建築学会環境系論文集 第 79 巻, 第 699 号, 2014.
- [8] 八重樫彩、加藤信介、河原大輔、手塚純一、二川智吏, “ダイナミックインシュレーションの木造軸組構法への適用と実環境下における性能評価,” 日本建築学会 学術講演梗概集環境Ⅱ, 2014.
- [9] 福島明、村田さやか、月舘司、安福勝、渡邊拓文、小川晃博, “呼吸型ダイナミック・インシュレーションに関する研究: その 3 環境試験室実験による BIC パネル内湿度性状把握,” 日本建築学会 学術講演梗概集, 2013.
- [10] 村田さやか、福島明、月舘司、安福勝、渡邊拓文、小川晃博, “呼吸型ダイナミック・インシュレーションに関する研究: その 4 実大実験による負荷削減効果の検証,” 日本建築学会学術講演梗概集環境Ⅱ, 2013.
- [11] 村田さやか、月舘司、福島明、安福勝、渡邊拓文、小川晃博, “呼吸型ダイナミック・インシュレーションに関する研究: その 5 実大実験による水分回収率と BIC 内湿度性状の実測,” 日本建築学会学術講演梗概集環境Ⅱ, 2014.
- [12] 村田さやか、安福勝、月舘司、福島明、渡邊拓文, “呼吸型ダイナミック・インシュレーションに関する研究: その 1 模型実験による温度性状と回収効率の把握,” 日本建築学会学術講演梗概集環境工学Ⅱ, 2012.
- [13] 村上龍義、安福勝、村田さやか、月舘司、福島明、渡邊拓文、小川晃博, “呼吸型ダイナミック・インシュレーションに関する研究: その 6 BIC パネル内湿度性状を把握する環境試験室実験に対応する数値解析,” 日本建築学会学術講演梗概集環境Ⅱ, 2014.
- [14] 安福勝、村田さやか、福島明、月舘司、渡邊拓文, “呼吸型ダイナミック・インシュレー

- ションに関する研究：その 2 熱的效果に関する数値解析,” 日本建築学会学術講演梗概集環境Ⅱ, 2012.
- [15] C. A. Langlais, “Thermal efficiency of counterflow insulation systems,” Thermal insulation materials and systems, ASTM STP 2922, 1987.
- [16] T. al., “Analytical Investigation of the Steady-state behaviour of dynamic and diffusive building envelopes,” 1996.
- [17] Taylor, “The effect of air film thermal resistance on the behaviour of dynamic insulation,” 1997.
- [18] Taylor, “The building envelope as an air filter,” Building and environment, 1999.
- [19] G. G., “Numerical Evaluation of Thermal Comfort in Rooms with Dynamic Insulation,” Building and Environment, Vol.35, 2000.
- [20] Imbabi, “Modular breathing panels for energy efficient, healthy building construction,” 2006.
- [21] K. Qiu, “Modeling the Combined Conduction-Air Infiltration through Diffusive Building Envelop.,” Energy and buildings Vol.39, 2007.
- [22] J. Wong, “Evaluation of thermal conductivity in air permeable concrete for dynamic breathing wall construction,” 2007.
- [23] 李時桓、田中美穂、加藤信介, “戸建住宅の断熱改修における開口部サッシ部へのダイナミックインシュレーションの適用可能性検討,” 日本建築学会環境系論文集 第76巻 第669号, 2011.
- [24] I. D. Morrison, A. N. Karagiozis, K. Kumaran, “thermal performance of a residential dynamic wall,” ASHRAE, 1992.
- [25] Taylor, Imbabi, “Environment design using dynamic insulation,” ASHRAE, America, 2000.
- [26] M. S.-E. Imbabi, “A Passive-Active Dynamic Insulation System for All Climates,” International Journal of Sustainable Built Environment Vol.1, Issue 2, 2013.
- [27] 福島明, “呼吸型ダイナミック・インシュレーションに関する研究,” 日本建築学会, 2013.
- [28] P. Matthews, Thermal insulation, materials and systems STP 922.

第 3 章 ■ まえがき ■

1 章、2 章に述べたように、建物の省エネルギー化は必要である。本章では、ダイナミックインシュレーション技術を窓部に適用した事例を紹介する。本章で検討する内容としては、断熱性能、防湿性能、室内快適性、建物全体の省エネ効果である。

3.1 章では、本論文の中心となる DI 技術を窓部に適用した事例(DI 窓)の概要、3.2 章では DI 窓の熱箱試験による断熱性能検証、3.3 章では実住宅に適用した際の断熱性能の検証、3.3 章は日変動、一般窓との比較、結露の検証、外気の昇温度合い、3.4 章にまとめを示した。

3.章 住宅開口部への適用 断熱性能の検証

3.1 章 研究動機

3.1.1 既往研究と本研究の位置づけ

建築物の省エネ化の実現は世界的な課題であり、建築外皮の高断熱化は、この課題解決に重要となる。建築外皮の高断熱化を実現する手法としては、高性能な断熱材を十分な厚みを持たせて施工することが一般的である。しかしこの手法では、壁体厚の増加による生活空間の縮小、及び施工費の増大が課題として残る。そこで、これら課題を解決し、且つ建築外皮の高断熱化を実現するため、必要な換気を動的な断熱材として活用する **Dynamic Insulation** 技術 [1] (以下、DI 技術) が注目を集める。DI 技術はその適用部前後の内外差圧を駆動力とした通気により、気流と共に熱を輸送する。移流による熱の輸送の向きを、建築外皮の熱貫流の向きと逆転させることで、外皮表面での温度勾配を零にすることが DI 技術の本質である。特に冬季は外皮の外側表面の温度勾配をなくすことで、住宅という境界から実質的に熱の流出をなくすことを期待する。

既往研究 [2] [3] [4] [5]に代表されるように、これまでの DI 技術に関する研究開発は、壁体への適用に着目している。一方で、壁体以外の部位への適用に着目した例は少ない。そこで、筆者等は、特に建材の中で断熱性能が弱く、冬季における熱損失の 58% [6]を占める開口部への適用を目指した研究開発を行っている [7] [8]。

本報告は、DI 技術を適用した窓部 (以下、DI 窓) の効果を把握するために実施した、熱箱を用いた実験室実験による基礎性能評価試験結果、及び実在する住宅に適用した実証試験結果をまとめたものである。熱箱を用いた基礎性能評価試験では、DI 窓の通気量と断熱性能の関係を明らかにし、また室内側の内窓表面温度を求めることで結露の発生条件を確認した。これに加え DI 窓の普及や流通を見据えた実証試験では、外乱のある実際の環境で長期間の実測を行い、DI 窓の通気量の変動が窓ガラス面の断熱性能へ及ぼす影響を評価した。また、同じく通気量の増減により変化する室内側表面温度が結露の発生リスクに与える影響を検証した。この実証試験は、寒冷地 (北海道・札幌市) にある断熱改修を施した住宅で、冬期に実施した。本実証試験住宅においては、窓面積や窓枚数 (単層/複層) の仕様が異なる DI 窓も実装しているため、加えてこれらの仕様が断熱性能試験結果に及ぼす影響も検証した。

3.1.2 DI 技術を適用した住宅開口部の概要

DI 窓は外窓、中空層、内窓で構成される。図-3.1.1 に DI 窓の構成を示す。以下は冬季の DI 窓の通気流路の説明とする。外気は外窓の上側框に設置した通気口を經由して中空層に入り、中空層を循環した後に内窓の上側框の通気口から室内へ導入される。中空層内の気流は、流入直後は外窓に沿って下降し、その後内窓に沿って上昇した後に室内へ導入するよう設計している [7]。外窓に沿った下降流は、ガイドを用いて通気口の吹出口を下向き吹出とすることによりコアンダ効果を得ると共に、外窓からの熱貫流により冷却された気流の重力沈降により形成する。このため、外窓表面においては温度勾配が零になることを意図している。内窓に沿った上昇流は、室内からの熱貫流による気流の加温による実現を意図している。また、中空層にブラインドを設置し、この循環流を整流する仕様も組み込んでいる。

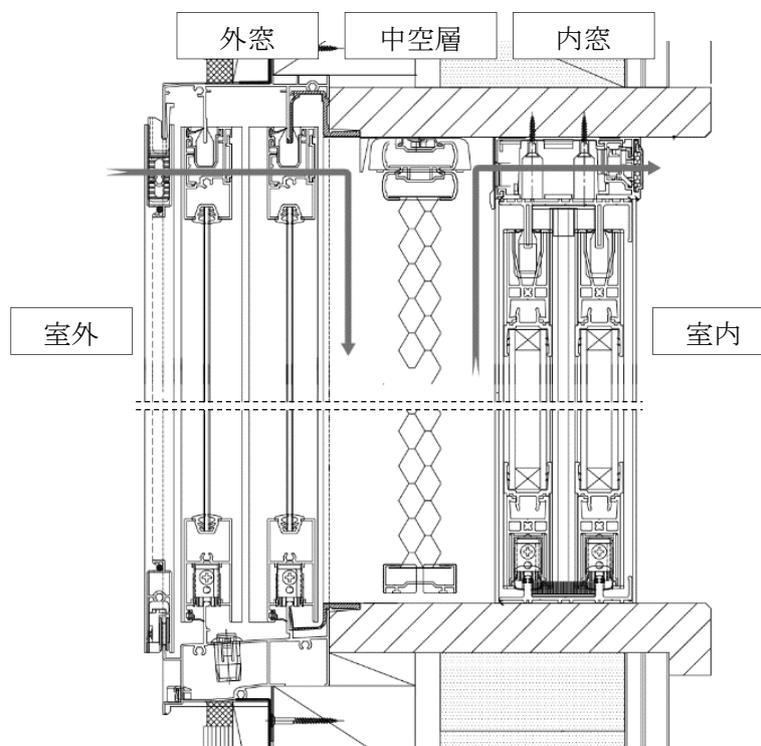


図-3.1.1 DI 窓断面図 ※黒い矢印は流入空気の流路を示す

構成部材のうち、整流効果促進のためのブラインドの条件としては気密性能の確保が挙げられる。一般的なオフィス等で用いられるベネシャンブラインド (Venetian Blind) *では、スラットの隙間が大きいため本システムには不向きである。このため中空層内のブラインド (写真-3.1.2) は、スラットが一体化したもので、窓の縦材の隙間を減らすようにサイドガイド (写真-3.1.2、写真-3.1.3) を設置することで解決した。

* スラットがヨコ型で垂直開閉するブラインド

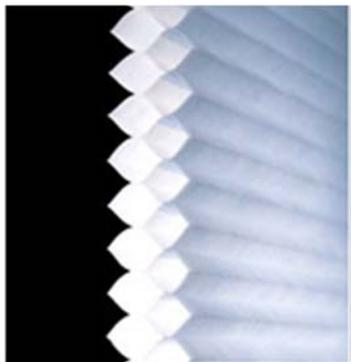


写真-3.1.1 ハニカムブラインド



写真-3.1.2 サイドガイド



写真-3.1.3 使用例

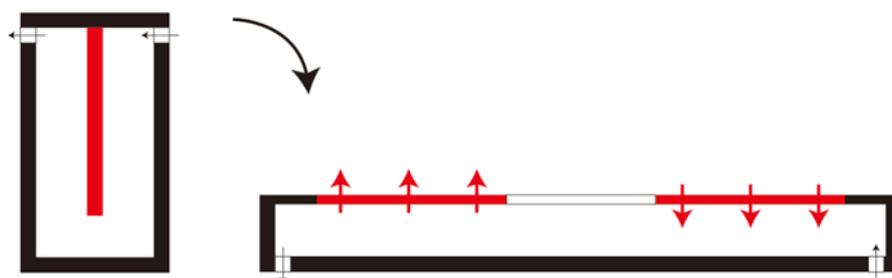


図 3.1.2 流路内のブラインド周囲の熱の流れ

採用したブラインドはブラインド利用時に通気層が得られるため、断熱性能が向上するというものであるが、本システムにおいてはこの断熱性能は、大きく作用はしない。この理由としては通気のない場合ではブラインドが下部まで降ろされているとブラインドの熱抵抗を考慮しなければならないが、DI 通気にはブラインドを図 3.1.2 に示すように流入量と流出量が釣り合うため、ブラインドの断熱性能は DI 窓の断熱性能に関与しない。

3.1.3 DI 窓を組み込んだ省エネシステム

筆者等は、DI 窓、機械換気設備、排熱回収ヒートポンプを組み合わせたシステムにより、住宅の省エネ化と居住環境の向上を提案している [9]*。実証試験のための住宅には、第 3 種機械換気設備を設置した。排気ファンは二階に設置し、各 DI 窓を通気口として外気を導入させる。実証試験では 1 階リビングにおいて室内外差圧を 10Pa 程度つけた条件で実施した。**

* このシステムでは、冬季は機械換気設備により室内を負圧にすることで低湿な外気を、逆に夏季は正圧にすることで室内の除湿された空気を DI 窓内に導入することで、DI 技術による貫流熱流の抑制を実現しつつ、通年における中空層内の結露リスクを低減させる。ただし、本報告における実証試験は、寒冷地（北海道・札幌）における住宅を検討対象とするため、冬季における運用時の性能を評価することに重点を置く。

** DI 窓通気の逆流防止を考慮して室内外差圧 10Pa 設定とした。

3.2 章 熱箱による断熱性能検証

3.2.1 概要

冬期において本研究では外皮外表面の法線方向の温度勾配を零にすることを意図しているため、DI 窓の断熱性能の評価には、外窓ガラス表面から流出した熱流束 $q_{out}[W/m^2]$ を室内外の環境温度差 $(\theta_{in} - \theta_{out}) [^{\circ}C]$ で除した値 $U_{dyn}[W/m^2K]$ を用いる(Eq-(3.1)) *。一般的な熱貫流では、定常状態時、室内から建材に「流入する熱量」と建材から室外へ「流出する熱量」は一致する。このため、熱貫流率の計測は、建材に「流入する熱量」、建材から「流出する熱量」のいずれを用いても、同値となる。しかし DI 技術適用部位は、建材の熱伝導と逆方向の移流により回収される熱量が存在する。そのため、室外へ「流出する熱量」は、室内から建材へ「流入する熱量」より小さくなる。熱貫流を”一方の空気から壁体を通して他方の空気まで熱を流れること” [10]と定義した場合、実質的な熱貫流は室外表面から「流出する熱量」ということになる。そこで、本報告では室外表面から「流出する熱量」を住宅外皮からの損失熱量とする。DI 技術では、この損失熱量は室内外環境温度差と線形の関係を持つと仮定し、単位面積あたりの室外へ「流出する熱量」を環境温度差で除した値で、その断熱性能を比較し、仕様の変更による性能の変動を評価する。

$$U_{dyn} = q_{out}/(\theta_{in} - \theta_{out}) \quad \dots\dots Eq-(3.1)$$

寒冷地で DI 技術を適用した場合、DI 窓に導入される外気により、適用部材の室内側表面温度の低下が考えられる。そのため、部材表面での結露リスクの増加が懸念される。そこで、本報告では試験対象とする DI 窓において、熱的に最も弱いサッシ表面における結露発生リスク評価を実施した。この際、結露発生リスクの評価には式(2)に示す Wilson& Brown (1964) 11)により提唱された空気温度を用いた温度指標: Temperature Index(以下、TI) [-]を用いる。本指標は、評価対象表面温度と外気温の差を、室内外の空気温度差で正規化した指標となる。本報告において、評価対象となるサッシ表面温度 θ_i は特に記述のない場合は、室内側サッシ下部の表面温度とする。これは、DI 窓の中空層における循環流の構造上、低温状態の外気による中空層底部の冷却が発生し、室内側サッシ下部において最も結露発生リスクが上昇することが予測されるためである。

$$TI = (\theta_i - \theta_{out_air})/(\theta_{in_air} - \theta_{out_air}) \quad \dots\dots Eq-(3.1)$$

ここで、 $\theta_i[^{\circ}C]$ は評価対象の表面温度、 $\theta_{in_air}[^{\circ}C]$ は室内空気温度、 $\theta_{out_air}[^{\circ}C]$ は室外空気温

* 換気負荷の観点では、換気負荷は排気による熱（もしくは冷熱）の損失と考え、外気温度と室内温度との差により評価しているため、DI 窓の通過による昇温は換気負荷の削減とはならない。図-3.2.1 に DI 窓に流出入する熱の流れを示す。内側から「流入する熱量」 Q_T はDI無と比べ大きくなるが、付加熱量（図 3.2.1 の薄い灰色）は通気空気に渡され室内に戻る。また外部に流出する熱の一部（図 3.2.1 の濃い灰色）を回収する。本技術上で、室内空間から室外空間へ熱貫流し、実質的に損失している熱量は Q_{cond} であるため、境界は室内ではなく室外に設定する。

度とする。

DI 窓を通過して室内に導入される外気は、熱回収の過程で昇温する。このため、第 3 種機械換気設備により直接外気を導入した場合と比較し、外気導入に伴う室内の温熱環境の悪化を防止することが可能である。この効果に関して、本報告では導入空気の昇温の度合いを昇温率: $\varepsilon[-]$ として評価する。 ε は、結露発生リスク評価で用いる TI と同様の計算方法を用い、Eq-(3.2)中の θ_i を室内に導入される空気温度に置換して求める。なお、この外気の昇温に供する熱量は、DI 技術適用部位への「流入する熱量」と「流出する熱量」の差分に一致する。つまり、導入外気の温度上昇に寄与した熱量は、DI 技術適用部位への「流入する熱量」の増加、若しくは「流出する熱量」の減少に依存する。ここで、後者（流出する熱量の減少）の寄与が大きい場合は

DI 技術による熱回収として評価できる。一方、前者（「流入する熱量」の増加）の寄与が大きい場合は、DI 技術による適用部位の内側表面温度の低下による効果のため、DI 技術による室内温熱環境の向上としては評価できない。そこで、この割合を熱回収率: $\eta[-]$ として評価する。この指標は Annex44 [1]で定義された DI 技術の指標であり、導入外気の温度上昇に寄与

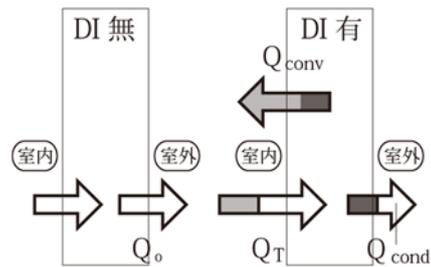


図-3.2.1 DI 窓の熱損失の考え方

した熱量(Q_{conv})のうち、通気によって「流出する熱量」の削減量($Q_0 - Q_{cond}$)の割合となる。定義式を以下(Eq-(3.3),Eq-(3.4))に示す。導入外気の受熱量における、「流出する熱量」の削減量の割合が大きいほど、この指標は大きくなる。

$$\eta = 1 - (Q_T - Q_0)/Q_{conv} = (Q_0 - Q_{cond})/Q_{conv} \quad \dots\dots\text{Eq- (3.3)}$$

$$Q_T = Q_{cond} + Q_{conv} = U_{dyn}A\Delta T + \rho Vc\Delta T' \quad \dots\dots\text{Eq- (3.4)}$$

ここで、 $Q_0[W]$ は無通気時に DI 窓から「流出する熱量」、 $Q_T[W]$ は DI 窓に「流入する熱量」、 $Q_{conv}[W]$ は通気によって「回収される熱量」、 $Q_{cond}[W]$ は通気時に DI 窓から「流出する熱流」、 $\rho[kg/m^3]$ は導入外気の密度、 $V[m^3/s]$ は DI 窓の通気量、 $c[J/kgK]$ は空気比熱、 $\Delta T[^\circ C]$ は通気時の室内外環境温度差、 $\Delta T'[^\circ C]$ は通気時の室内外空気温度差、 $A[m^2]$ は DI 窓ガラス面の見つけ面積である。

3.2.2 検討

今回開発した DI 窓の基礎性能評価として、その断熱性能と結露発生リスクの明示を目的とし、試験室において JIS A 4710 及び JIS A 1420 の熱箱法に基づく試験装置を一部改良し、熱箱下部より空気を吸引して試験対象から外気を取り入れる仕様とした。本試験室は高温室と低温室からなり、高温室内に加熱箱が取り付けられた入子構造となっている。試験機概要と各発生熱量及び損失熱量の概念を図-3.2.2 に示す。今回の熱箱実験では、窓内部に通気をするため、ブロアを用いた吸引により加熱箱を負圧にし、低温室より空気を導入する JIS を拡張した試験法を採用した。なお、吸引した空気はベンチュリー管を用いて流量を計測した。この吸引した空気の熱収支を考慮する点が、従来の JIS A4710 における評価手法とは異なる

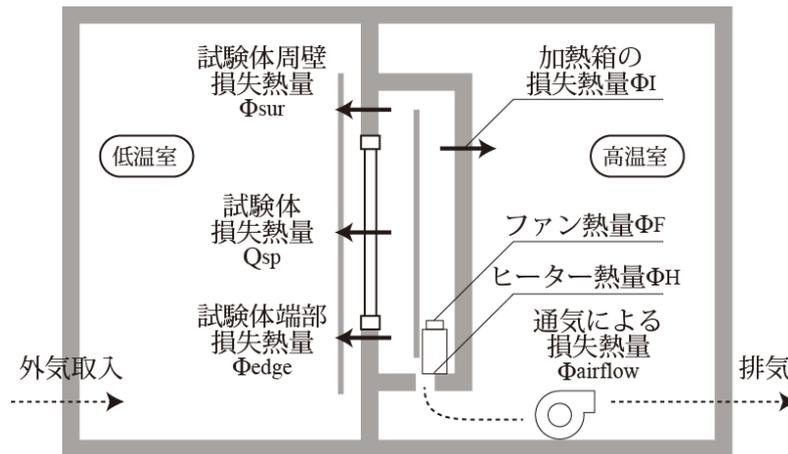


図-3.2.2 試験機器概要と熱勘定

$$Q_{sp} = (\Phi_{in} - \Phi_{out})/A_{sp} = ((\Phi_F + \Phi_H) - (\Phi_{airflow} + \Phi_I + \Phi_{edge} + \Phi_{sur}))/A_{sp} \quad \dots\dots Eq- (3.5)$$

Eq-(3.5)に DI 窓の単位面積当たりの損失熱量 Q_{sp} [W/m²]の計算式を示す。この損失熱量を加熱箱と低温室の内部環境温度差で除すことで U_{dyn} を評価する。 Q_{sp} は高温室内の加熱箱内部での発生熱量 Φ_{in} [W]から、加熱箱内部で DI 窓以外の部位からの損失熱量 Φ_{out} [W]を試験体面積 A_{sp} [m²]で除したものである。この Φ_{in} は加熱箱内のファンの熱量 Φ_F [W]とヒーター熱量 Φ_H [W]の和であり、消費電力を計測して求めた。また Φ_{out} は、通気による損失熱量 $\Phi_{airflow}$ [W]、加熱箱の損失熱量 Φ_I [W]、試験体端部の損失熱量 Φ_{edge} [W]、試験体周壁の損失熱量 Φ_{sur} [W]の和である。^{*}

本試験結果に用いた窓種類は外窓が単層ガラスで内窓が Low-E ガラスであり、後述する実証試験住宅における検証で用いた仕様とは異なる。表面温度の計測点はガラス表面上部中部下部に 2 か所ずつとした計 6 箇所、室内側サッシ下部 1 箇所に配置した。ブラインドと引違窓の組み合わせにより、ブラインド・窓間の距離が異なるため、外障子と内障子のそれぞれを計測対象とする。計測ケースは、通気量を 4 水準(無通気、6、12、24 m³/h)、及びブラインドの有無を条件とした 8 ケースとした。なお熱箱試験における無通気想定時は DI 窓の通気口が解放されているため、0.1 m³/h 程度の浮力による空気流動があった。

^{*} 試験体周壁の損失熱量 Φ_{sur} [W]、加熱箱の損失熱量 Φ_I [W]は熱流計で計測した。空気の損失熱量 $\Phi_{airflow}$ [W]は以下の式 Eq-(3.6)で求まる。

$$\Phi_{airflow} = Vc\rho(\theta_{airflow} - \theta_{c,e}) \quad \dots\dots Eq-(3.6)$$

ここで $\theta_{airflow}$ [°C]は加熱箱の吸い込み空気温度、 $\theta_{c,e}$ [°C]は低温室内の空気温度である。試験体端部損失熱量 Φ_{edge} [W]は以下の式 Eq-(3.7)で求まる。

$$\Phi_{edge} = \Psi_{edge}L(\theta_{c,i} - \theta_{c,e}) \quad \dots\dots Eq-(3.7)$$

ここで、端部線熱貫流率 Ψ_{edge} は JISA4710 に記載の 0.0033[W/mK]を使用した。また L [m]は試験体外周長、 $\theta_{c,i}$ [°C]は加熱箱内の温度である。



写真-3.2.1 外側 DI 窓の外観



写真-3.2.2 内側 DI 窓の外観



写真-3.2.3 ブラインド表面①



写真-3.2.4 中空層



写真-3.2.5 ブラインド表面②



写真-3.2.6 外側給気口



写真-3.2.7 内側給気口

3.2.3 結果

表-3.2.1 熱箱実験の計測値(ブラインド有のケース)

		DI 窓 ブラインド有			
通気量[m ³ /h]		0.1	6.1	11.8	24.0
環境温度 [°C]	加熱箱	19.8	19.7	19.6	19.5
	低温室	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2
単位面積当たりの損失熱量 Q_{sp} [W/m ²]		23.8	17.7	14.4	14.3
ガラス表面平均温度 [°C]	外障子	17.3	16.8	16.1	15.3
	内障子	17.1	16.7	16.1	15.1
サッシ下部 TI [-]	外障子	0.61	0.60	0.61	0.61
	内障子	0.65	0.64	0.62	0.56

表-3.2.2 熱箱実験の計測値 (ブラインド無のケース)

		DI 窓 ブラインド無			
通気量[m ³ /h]		0.1	6.0	11.5	24.0
環境温度 [°C]	加熱箱	19.7	19.6	19.6	19.5
	低温室	-0.2	-0.2	-0.1	-0.2
単位面積当たりの熱損失量 Q_{sp} [W/m ²]		29.2	22.1	18.6	18.0
ガラス平均表面温度 [°C]	外障子	17.4	16.9	16.5	15.9
	内障子	16.4	16.0	15.5	14.4
サッシ下部 TI [-]	外障子	0.58	0.56	0.54	0.52
	内障子	0.65	0.65	0.63	0.61

表-3.2.1 及び表-3.2.2 に DI 窓の単位面積あたりの損失熱量・ガラス表面温度・サッシ下部表面温度を、また図-3.2.3 に通気量ごとの Eq-(3.1) で定義した U_{dyn} とその熱抵抗を示す。

熱箱試験において、 q_{out} は DI 窓面積あたりの損失熱量を用いて代替した。低温室への損失熱量は通気量を増すごとに減少し、それに伴い加熱箱側のガラス表面温度の低下が確認された。ブラインドの有無にかかわらず、最大通気量時 (23.7m³/h) には、無通気想定時と比較して熱損失が 40%程度低減している。

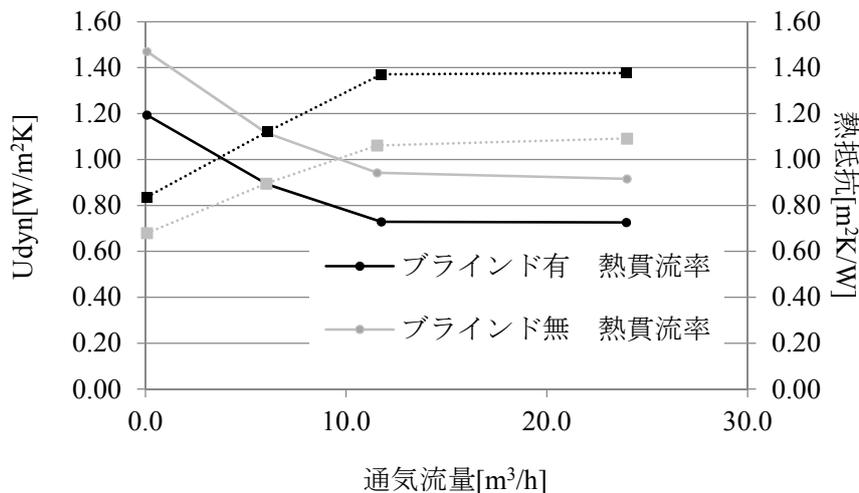


図-3.2.3 通気量別の断熱性能値:U_{dyn} とその熱抵抗値

図-3.2.3 に示すブラインド有のケースとブラインド無のケースの熱抵抗値の差に着目すると、無通気時(0.1 m³/h)の熱抵抗差(0.16 m²K/W)は、12 m³/h 時の熱抵抗差(0.31m²K/W)へ増加しており、ブラインド有のケースでは通気量の増加に伴い、ブラインドの熱抵抗分以上に全体の抵抗が増加することを確認した。しかしながら、流量が 12 m³/h から 24 m³/h にかけての熱抵抗差は変化が小さい。この理由として流量が、ある閾値以上になると、窓枠の伝導による損失、及びガラスと窓枠の接合部の損失などの対流の影響が小さい熱損失があるため、断熱性能が一定値に近づくと考えられる。

サッシ下部表面温度の温度指標 TI は、ブラインド有の場合は 0.56~0.65、ブラインド無の場合は 0.52~0.65 となる。これは、複層ガラスのサッシ・フレーム表面の値 (約 0.55~0.57 と同程度であり、DI 窓におけるサッシ表面結露リスクは複層ガラスのサッシ表面におけるものと同程度となることが確認された。*

3.2.4 小結

熱箱を用いた基礎性能評価試験により、DI 窓の通気量別の断熱性能の検証を行い、以下の知見を得た。

- ・ JIS に準じた基礎性能評価試験によりブラインドの有無の条件で、DI 窓の断熱性能を評価した結果、それぞれ、ブラインド有 : 0.73 W/m²K :、ブラインド無 : 0.92 W/m²K であった。(24.0 m³/h 通気時)

* [14]に記載されている、サーマルブレイクのあるアルミサッシの加熱箱側表面上の TI の参考値である。

3.3 章 実住宅による断熱性能検証

3.3.1 概要

次に、境界条件が変動する実環境における DI 窓の性能変動を評価することを目的として、実証試験住宅で複数の実測を行った。一つの窓を対象とし、日変動を考慮した熱貫流性状・結露発生リスクを検証する実験（以下、実験 A）、窓仕様や設置位置が異なる複数の窓を対象とした断熱性能の差を検証する比較実験（以下、実験 B）、及び一つの窓を対象として結露発生条件と導入外気の昇温と熱回収を検証する実験（以下実験 C）を行った。本技術は第 3 種機械換気により室内側を負圧とし、DI 窓に逆流が生じないことを基本とする。このため、室内外温度差及び風圧による自然換気駆動力が外力として加わる場合においても常に室内側が負圧となるよう、1 階リビングの室内外差圧を 10Pa 程度に設定する。DI 窓の通気量は、実証試験の前に実験室で窓の室内外圧力差と通気量の関係を明らかにしている。実証試験時の通気量は、風圧板を用いて室内外の圧力差を実測し、この実験室での計測結果から同定する。



図-3.3.1 実証試験住宅 一階平面

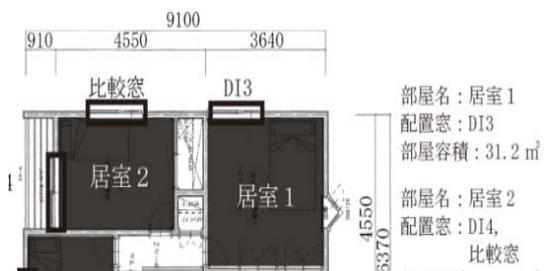
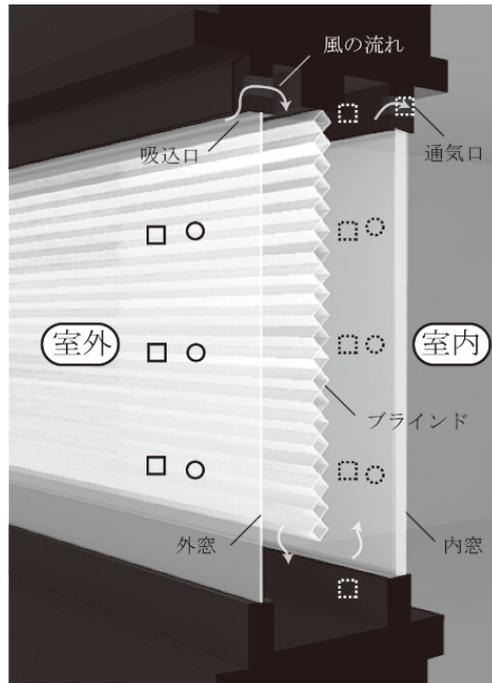


図-3.3.2 実証試験住宅 二階平面

なお、設置した DI 窓は、実証試験の前に実験室で室内外差圧 10Pa 時において、対象の部屋を 0.5 回/h 換気するように、各 DI 窓の上側框内に多孔質の抵抗を入れ調整をした。室内は実際の生活空間を考慮し、ヒーター及びエアコンを用いて 20°C に設定した。室内の温度分布を一樣にするため室内を扇風機で攪拌した。ただし、一般に流通するエアコンゆえに、室内空気温度には設定温度と差が見られた。実証試験住宅における DI 窓の配置箇所を [図-3.3.1](#) および [図-3.3.2](#) に示す。

以下実験 A~C の詳細となる。実験 A・C はリビングの DI 窓 (DI1) を、実験 B は各部屋に配置した DI 窓 (DI1~5) を対象とした。実験 A は、日変動を考慮した熱貫流性状・結露発生リスクの検証を目的とする。DI1 の実測項目・箇所を [図 3.3.3](#) と [写真-3.3.1](#) と [写真-3.3.2](#) に示す。



【凡例】○ 熱流計 □ 熱電対 ◻ 熱電対(室内側表面)

図-3.3.3 DI窓の実測箇所

表-3.3.1 各窓の詳細

	DI1	DI2	DI3	DI4	DI5
配置場所	一階	一階	二階	二階	二階
構成 (外×内) *	S×D	S×D	S×S	S×D	S×D
縦×横 [m×m]	1.60×1.63	1.35×1.70	1.11×1.63	1.78×1.54	1.11×1.63
中空層厚 [cm]	8	8	8	8	8
通気量 [m³/h] (差圧 10 [Pa]時)	21.4	11.7	15.6	11.7	11.7

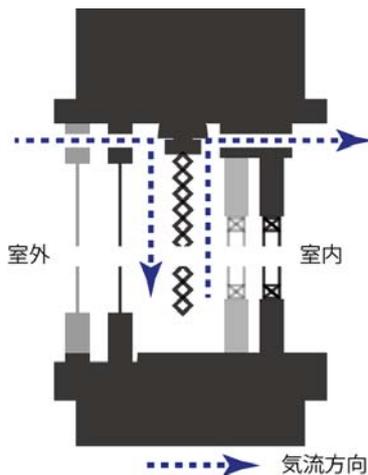


図-3.3.4 流入経路概念図



写真-3.3.1 外部測定装置



写真-3.3.2 外部窓表面測定装置

* 構成に関し、S: 単層ガラス、D: 複層ガラスを示す。

表面温度は T 型熱電対により実測し、その実測点は外窓ガラスに 3 点、内窓ガラスに 3 点、通気口に 3 点、室内サッシ上下部の表面に各 1 点とする。また、室内外ガラス表面上に 6 点の熱流計を、中空層の流路内に空気温度計を設置した。室内外の環境温度計は DI 窓付近に取り付けた。外気温と屋上に取り付けた日射計により水平面全天日射量を実測し、実験期間中の屋外環境の変動を観測した。なお、窓面全日射量の推定には、宇田川らの手法を用いた [11]。実験 B は、窓仕様や設置位置が異なる条件の断熱性能の差を検証することを目的とする。図-3.3.1 および図-3.3.2 で示した複数の窓 (DI1,2,3,4,5) において簡易的な実測を行った。これら窓の詳細は表-3.3.1 に示す。

DI3 のみ内窓と外窓が単層ガラスであり、その他は外窓が単層ガラス、内窓が複層ガラスの組み合わせである。実験 B の際に DI2,3,4,5 は、室外側ガラス表面中央に熱流計、表面温度計を配置し、外部環境温度計を窓に隣接した場所に配置した。この時の室内側環境温度は室内中央の空気温度で代替した。実験 C は、3.2.1 で定義した結露発生リスクの評価方法と昇温率: ε と熱回収率: η を用いた検証を行う。結露発生リスクの評価として、対象 DI 窓のサッシ上下部の室内側表面温度と室内外空気温度を実測した。また $\varepsilon \cdot \eta$ の評価では、室内への導入空気温を実測した。

3.3.2 検討

実験は北海道札幌市にある断熱改修を施した木造枠組壁構法の住宅（築 19 年）で実施した。住宅の仕様を表-3.3.2 に、断熱性能（計算値）・気密性能（実測値）を表-3.3.3 に示す。

表-3.3.2 改修住宅の仕様

改修部位	構成
外壁面	高性能グラスウール 16K 89 [mm] (既存) + 押出法ポリスチレンフォーム 3 種 70 [mm] U 値 : 0.185 [W/m ² K]
天井面	ブローイング 18K 300 [mm] (既存) U 値 : 0.130 [W/m ² K]
床面	高性能グラスウール 16K 235 [mm] (既存) U 値 : 0.152 [W/m ² K]

表-3.3.3 実証試験住宅の改修前後の断熱性能と気密性能

	改修前	改修後
Q 値	1.80 [W/m ² K]	1.24 [W/m ² K]
C 値	3.0 [cm ² /m ²]	0.8 [cm ² /m ²]

写真-3.3.3 実験住宅外観

住所：札幌清田区平岡四条七丁目
 構造：枠組み壁工法(2×4工法)
 規模：延床面積 100.19 m² (1F：54.65 m²、2F：45.54 m²)
 建築時期：1993/8(築19年)



写真-3.3.4 断熱改修前の主寝室



写真-3.3.5 断熱回収前 二階 廊下



写真-3.3.6 断熱改修前和室



写真-3.3.7 断熱改修前 リビング



写真-3.3.8 外壁 胴縁部分の気密



写真-3.3.9 土台床パネル



写真-3.3.10 外壁面の充填断熱部



写真-3.3.11 床面の断熱部



写真-3.3.12 構造パネルのシート



写真-3.3.13 テープによる気密化



写真-3.3.14 断熱パネル外側からのシート



写真-3.3.15 テープによる2次気密化



写真-3.3.16 外断熱パネル設置①



写真-3.3.17 外断熱パネル設置②



写真-3.3.18 2F部分の外断熱



写真-3.3.19 天井の充填断熱



写真-3.3.20 DI窓のガラス部



写真-3.3.21 DI窓設置の様子



写真-3.3.22 天井換気ダクト



写真-3.3.23 二階換気ダクト部分



写真-3.3.24 廊下からの吸い込み口



写真-3.3.25 送風機への吹付け

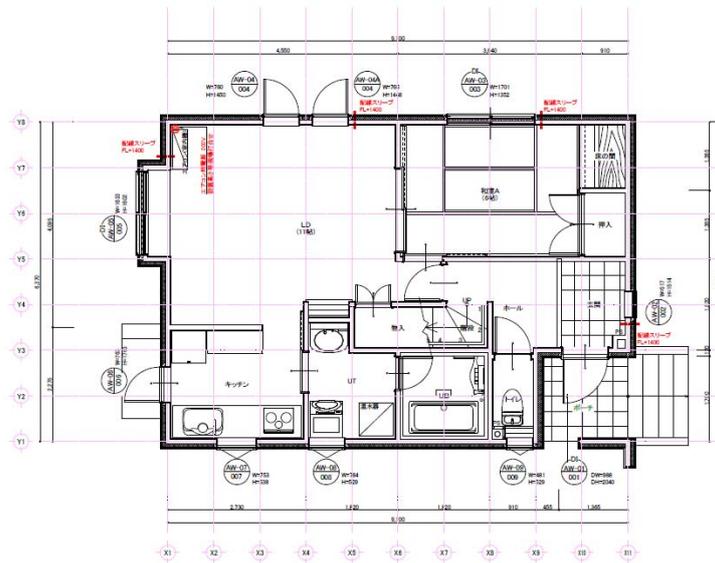


図-3.3.5 実験住宅一階平面図

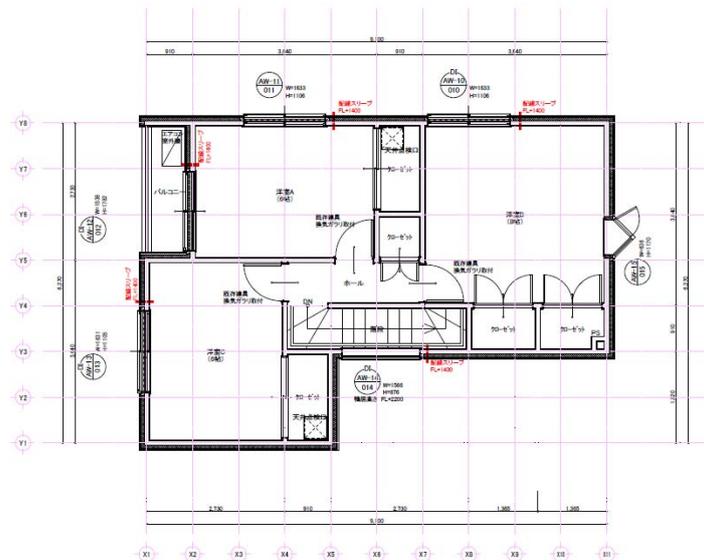


図-3.3.6 実験住宅二階平面図

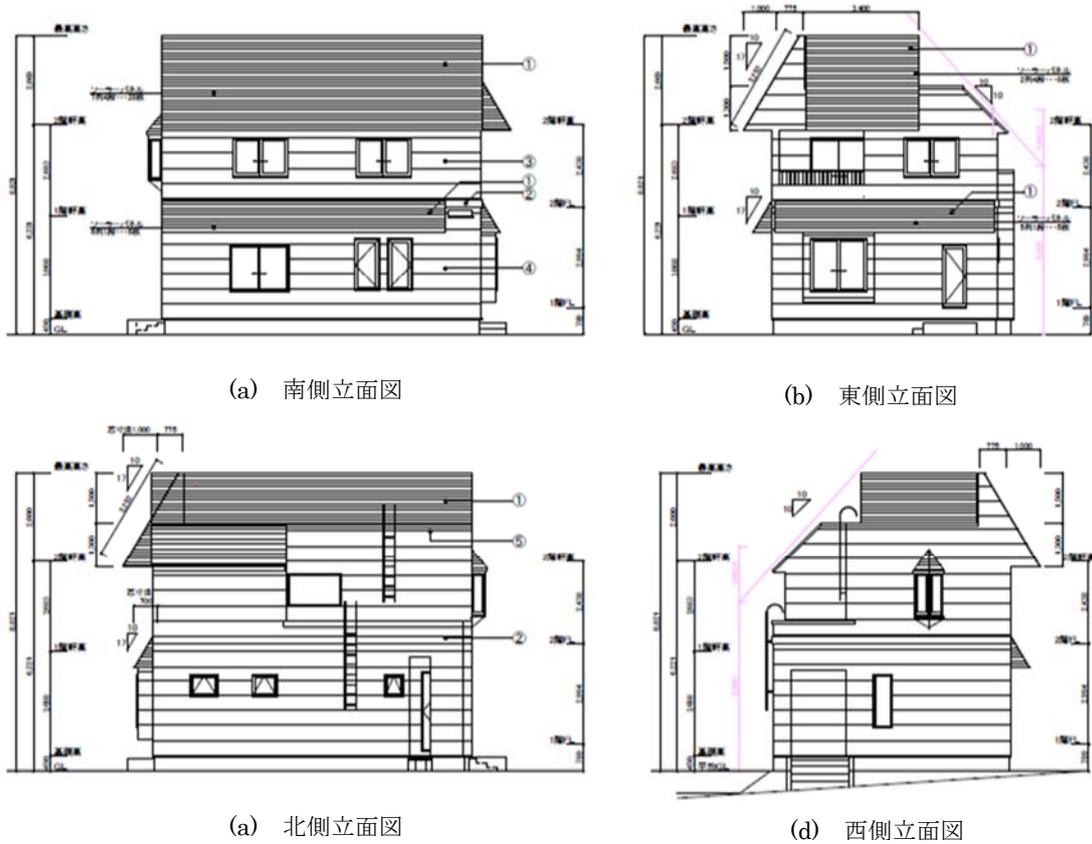


図-3.3.7 立面図 各面

なお、表-3.3.3 に示す改修後の C 値は、DI 窓に目張りをした状態での実測値となる。これは、DI 技術の定義により今回窓部からの導入外気を計画した通気とするため、DI 窓は通気口と扱い、従来の通気口を閉じた状態で実施する気密測定に準じた扱いとするためとなる。

3.3.3 結果 実験 A 日変動

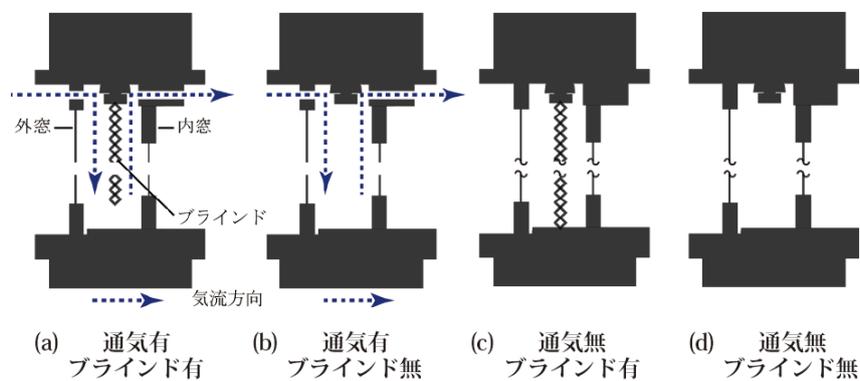
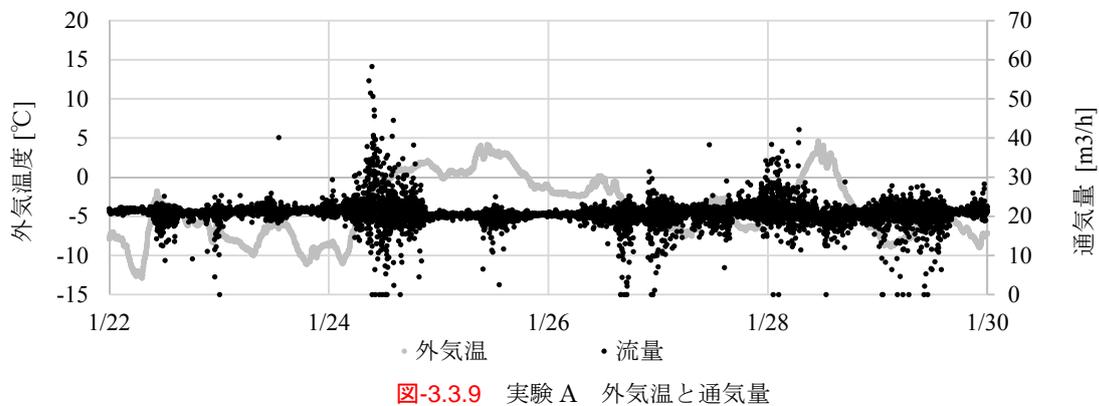


図-3.3.8 DI 窓の各ケース概念図

熱貫流性状を把握するため、DI1 を対象とした長期間の実測を行った。この実験 A では図-

3.3.8 (a)で示す経路で通気を計画しており、ブラインドを有するケース(以下通気有ブラインド有)における性能試験を一週間(2014年1月末)継続した。



なお、これ以降の実測データは一分ごとに採集したものである。図-3.3.9は実測期間内の外気温と通気量である。24日26日28日の日中に人の出入りのため、室内外差圧の乱れによる変動が大きいが、通気量は概ね想定通気量(21.4 m³/h)に落ち着いている。

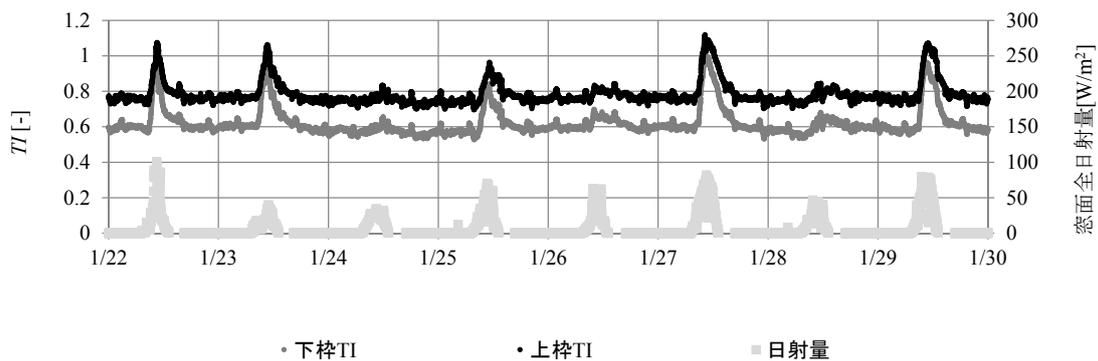


図-3.3.10は室内サッシ表面の温度指標: TI と窓面全日射量を示している。窓面全日射量の増加により通気空気が室温以上に昇温するため、 TI が1以上の値をとっている。 TI の下限値(約0.53)は外気が最も低下する夜間で、概ね熱箱の実験値と一致することを確認した。境界条件に変動のある実環境においても、サッシ表面結露リスクは複層ガラスを設置した条件と同等であり、一般的な窓仕様と比較しても大きな結露リスクの発生は防げることを確認した。また、DI技術は乾燥した外気を窓面付近に導入するシステムのため、窓面付近の湿度を下げる効果も期待できるが、この効果に関しては今後の検討対象としたい。

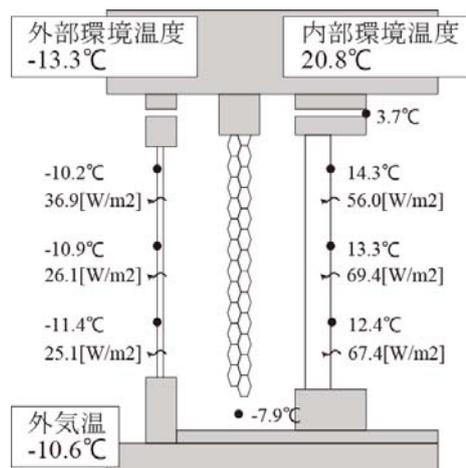


図-3.3.11 実験 A 窓位置の熱流束と表面温度

従来の建材は、1次元の熱伝導を基本とした考え方によりその熱性能を評価することが多いが、今回対象とする DI 窓は通気過程において外気の昇温に依存した窓ガラス面の上下方向の温度分布を考慮する必要がある。従来の窓であれば、熱流は室内外の温度差に比例した熱流が損失する。一方 DI 窓は中空層を設け通気していることと、その通気空気が暖まりながら導入されることで、従来の窓と異なった熱流束・温度分布になる。そこで図-3.3.11 に実測期間内で最も外気温の低い 22 日の夜明け前 4 時から 5 時において室内外 DI 窓ガラス表面の熱流・温度・室内外の環境温度・外気温を明示し、その熱性能の上下差を検証した。

外窓ガラス表面は下方へ行くにつれ熱流束が小さくなっており、DI 窓においてはガラス面上方からの熱損失が大きいことを意味する。なお、外窓の単層ガラスの熱抵抗を $0.167[\text{m}^2\text{K}/\text{W}]$ と仮定し、熱流束から外窓ガラスの中空層側表面温度を算出すると、上部で $-4.0[^\circ\text{C}]$ 、下部で $-7.2[^\circ\text{C}]$ となる。DI 窓は通気過程において外気は昇温しながら室内へ導入されるため、中空層内・ブラインド外側では、下方に行くに従いその温度が上昇する。ただし、今回の結果は中空層内の空気温度とは逆に、外窓ガラスの中空層側の表面温度は流路過程を進むにつれ低くなる結果となった。内窓ガラスの上部の表面温度が高いことから、これは、中空層内のブラインドを経由した放射熱が外窓ガラスの上部温度を高くし、その温度分布に関与しているためと考えられる。

3.3.4 結果 実験 B 断熱性能の比較評価

次に、窓仕様や設置位置が異なる条件の断熱性能の差を検証する。この実験においては、室外側の外窓中部を、DI 窓の性能評価対象点として扱い、この評価点に設置した熱流計と表面温度計から得られたデータを比較する。なお、実験 A において、外窓中部の実測点が実測点 3 点の平均値と近似しており(表-3.3.4)、各 DI 窓の断熱性能の比較評価においては、外窓中部の実測点を代表点として差し支えないものと判断する。各実測ケースの通気量(住宅全体)を表-3.3.5 に示す。

表-3.3.4 外窓と内窓の断熱性能値

	外窓断熱性能 [W/m ² K]			内窓断熱性能 [W/m ² K]			流量 [m ³ /h]	外窓
	上部	中部	下部	上部	中部	下部		平均値
平均値 (標準偏差)	1.2 (0.1)	0.9 (0.1)	0.8 (0.1)	1.8 (0.2)	2.3 (0.2)	2.2 (0.1)	21.6 (0.3)	1.0 (0.1)

表-3.3.5 各ケース別の実証試験住宅の通気量

	通気有 ブラインド有	通気有 ブラインド無	通気無 ブラインド有/無
住宅全体の通気量 [m ³ /h]	237	234	228
DI窓の通気量 [m ³ /h]	78.0	78.4	-

各仕様の断熱性能の比較評価実験は 2013 年 2 月末から 3 月初旬にかけて行った。実験の対象ケースは図-3.3.8 (a)-(d)に示す通気の有無とブラインドの有無を組み合わせた 4 ケースとした。通気有とは DI 窓の通気を開放し通気口として利用したケースであり、通気無とは DI 窓の通気口を閉鎖し、別途配置した一般的な通気口（ベントキャップ）を通気口として利用した場合となる。今回の性能評価は、DI 窓における熱移動を定常状態とすることを前提としている。そこで、外乱要素の内、断熱性能に感度の高い日射の影響を除外することを目的として、性能評価には日の出前の 4 時から 5 時の一時間の平均値を用いる。

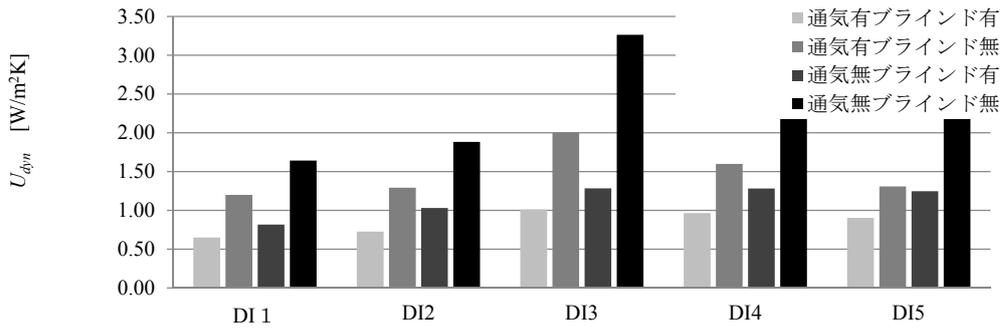


図-3.3.12 各ケース、各窓の断熱性能比較

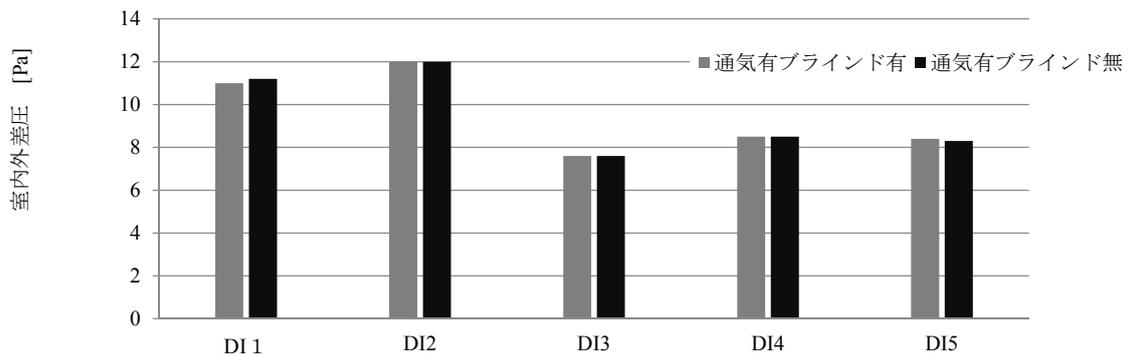


図-3.3.13 各ケース、各窓の室内外差圧

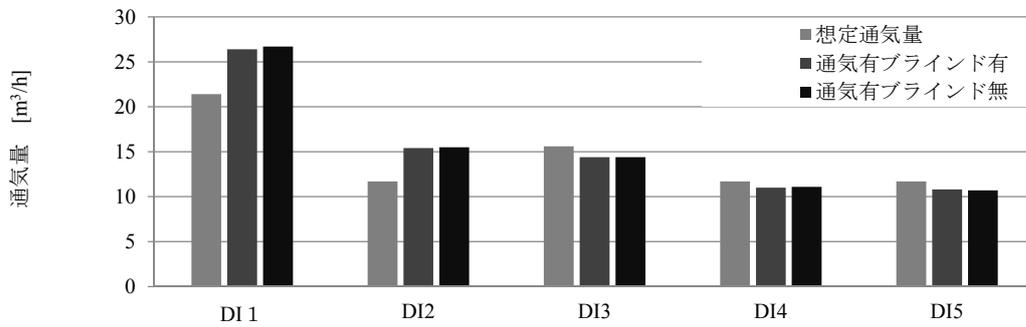


図-3.3.14 各ケース、各窓の通気量

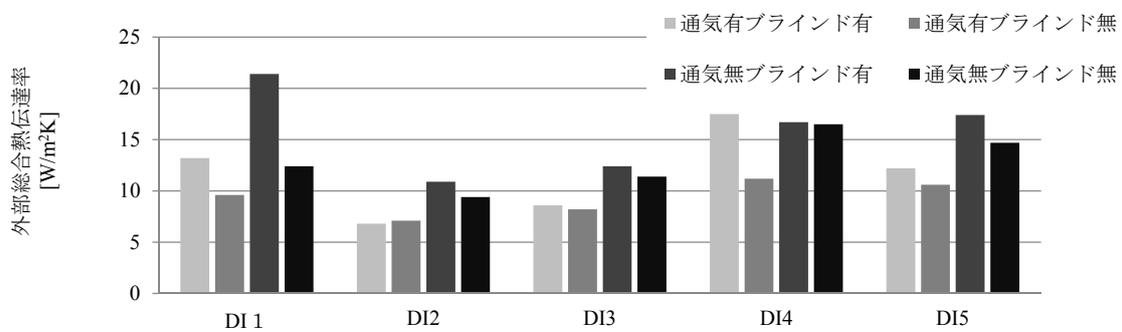


図-3.3.15 各ケース、各窓の外部総合熱伝達率

Eq.(3.1)で定義した各窓の U_{dyn} を用いて、図-3.3.12 に各 DI 窓の断熱性能をまとめた。図-3.3.13 および図-3.3.14 に、各 DI 窓の通気量と実測時の室内外差圧*を、図-3.3.15 に実測時の外部総合熱伝達率を示した。各ケースの比較に際しては、一定の制御が可能な室内環境の条件は同等とみなし、変動のある外部の影響は、外部総合熱伝達抵抗を JIS-A-4710 に基づく熱抵抗で置き換えた値**から U_{dyn} を計算することでその影響を考慮した。通気量は室内外差圧を実測することで算出した。通気有・ブラインド有 (図-3.3.9 (a)) の場合は、どのケースよりも断熱性能が高い。これは、まずブラインド自体の断熱効果が挙げられる。ただし、通気による断熱性能向上の度合に着目すると、通気有・ブラインド無 (図-3.3.9 (b)) の状態では、通気の効果で通気無 (図-3.3.9(c)) の状態より U_{dyn} が平均して 34.0%低減している

一方で、通気有・ブラインド有の状態では通気の効果による U_{dyn} の低減率は 24.7%止まる。この理由として、通気無・ブラインド有の状態では中空層がブラインドで 2 層に分割されていることに対し、通気有・ブラインド有の状態では通気のための流路によりブラインド前後の中空層が一体となるため (図-3.3.9 (a),(c))、ブラインド自体の熱抵抗が断熱性能に及ぼす影響が小さくなるとためと考えられる。

表-3.3.6 実験 B 同形状を持つ比較窓と DI 窓の比較

	比較窓 断熱性能 [W/m ² K]	DI 窓 断熱性能[W/m ² K]
ブラインド有	1.61	1.01
ブラインド無	3.45	2.00

内窓の仕様が単層となる DI3 は、複層を用いている他の DI 窓と比較し、通気無・ブラインド無の状態ではその U_{dyn} が大きい (図-3.4.5)。しかし DI 技術を導入することで、 U_{dyn} を 2.00 W/m²K まで低減させることが可能であり、他のケースと比較して、DI 技術の効果が最も顕著であった。表-3.3.6 は二階の異なる部屋に配置 (図-3.3.2 参照) された通気経路の無い一般窓 (以下比較窓) と DI 窓 (DI3) との U_{dyn} の比較結果となる。

この比較窓と DI3 は、通気経路の有無以外の仕様は揃えてあり、この結果から外部環境を同一とした条件下における DI 技術の効果を検証する。この結果から、ブラインドの有無にかかわらず、DI 技術の採用により U_{dyn} は低減しており、ブラインド有で 37.3%、ブラインド無で 42.0% とその断熱性能の向上が確認された。この結果においても、ブラインド無の低減率が大きく、各部屋に配置した DI 窓と同様の傾向がみられる。

* DI3.4.5 は図-3.3.2 に示す二階の諸室に配置されている。これらの通気量は、各居室にダクトを配し室内外差圧を個別に調整することで想定した通気量を実現している。

** 算出に利用した外部の総合熱伝達抵抗は、JIS A4710 を参照し、0.053 [m²K /W] とした。

3.3.5 結果 実験 C 温度指標に基づく結露発生リスク

冬期を想定した DI 技術の採用は、室内表面温度の低下により結露発生が懸念される。そこで図-3.3.1 で示した DI 窓 (DI1) を対象として、Eq-(3.3) に示した Wilson ら(1964)により提案された温度指標と結露発生の関係を用いて結露発生に対する室内許容相対湿度を検証する。図-3.4.9 および図 3.4.10 は、結露発生する室内相対湿度と温度指標 TI の関係を外気温度別に示している。このサッシ表面の温度指標 TI と外気温度別の曲線の交点の y 軸への投影が、結露の発生が見られる室内相対湿度となる。なお、この TI と結露発生の関係に用いられる室内温度は 23.3°C 設定である。*

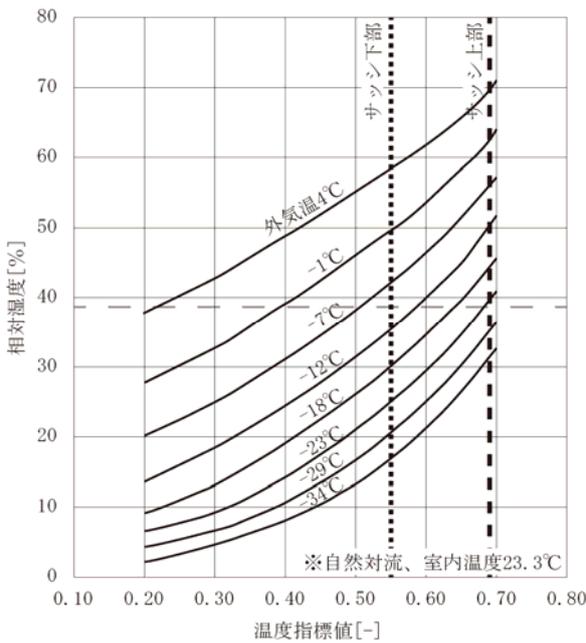


図-3.3.15 実験 C DI 窓の結露発生条件
ブラインド有

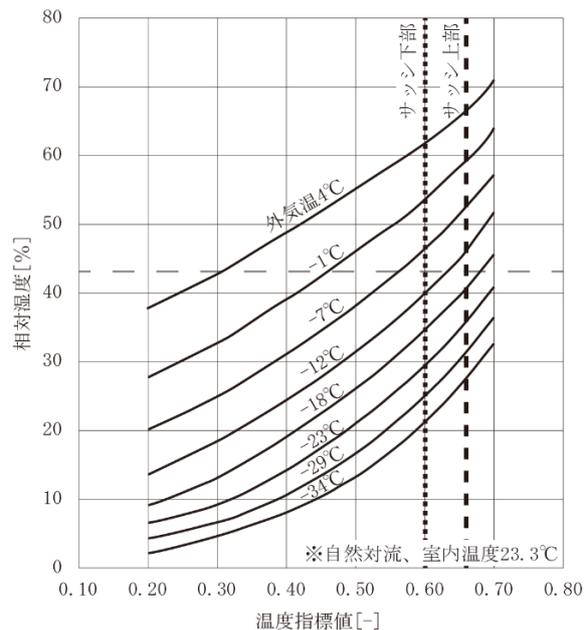


図-3.3.16 実験 C DI 窓の結露発生条件
ブラインド無

結露発生の有無の考察における外気温は、実測地域である北海道札幌市での冷暖房設計用乾球温度 (TAC 温度) を参照し、 -9.4°C [12] とした (8時から 17 時の区間 : 超過確率 2.5%)。ブラインドの有無にかかわらず、サッシ下部の表面温度が最も低く、結露リスクが高くなるため、参照した外気温の曲線とサッシ下部の温度指標 TI の交点から結露が発生する相対湿度を推察する。この結果、通気有・ブラインド無の場合の許容相対湿度は約 43%、通気有・ブラインド有の場合では約 38%の相対湿度を許容することが分かる**。断熱性能の高いブラインド有の条件で許容相対湿度が低い理由としては、サッシ上下部の温度差に起因するものと考えられる。これは、ブラインド無の場合は、導入外気が中空層内で旋回し混合してから室内に供給される

* Wilson ら (1964)による考察の室内空気温度と同様とした。なお、Wilson らの研究は室内側の窓の断熱性能による温度低下に着目した指標であり、DI 窓のような通気を考慮していない。すなわち、通気による乾いた外気導入による防露性能は評価しない前提である。

** TI の計算に用いる表面温度 θ_i は実測値であるため、実測日の夜間放射に影響を受ける。しかしながら TI は内外空気温度差で基準化した指標となるため、本考察はそれぞれの実測日の条件下での値と理解されたい。

ため、中空層内の空気に温度差がつきにくいことに対し、ブラインド有の場合では整流効果により、この混合による空気温度差の緩和が進まず、流路内の上下部、つまり気流の上流と下流で温度差がついたことに起因する。北海道の集合住宅を含む住宅群における室内湿度環境に関する報告 [13]では、室内の相対湿度は 42.4%であり、ブラインド有の条件では結露の危険があり、その対策の必要性が確認された。

3.3.6 結果 実験 C 外気の昇温度合

表-3.3.7 に昇温率 ε と熱回収率 η の計算結果を示す。DI 窓は熱回収が可能な通気口として機能する。第 3 種機械換気の一般的な通気口の場合、導入空気温度は外気温となるため、 ε は 0 になる。一方 DI 窓の導入空気は昇温するため、 ε は 0 よりも大きい値をとる。DI 窓の採用は、一般的な通気口から給気する第 3 種機械換気と比較して、冷涼な外気の導入による室内温熱環境への影響の緩和が可能となる。

表-3.3.7 実験 C 通気時のブラインド有無による導入空気温の上昇

	ブラインド有	ブラインド無
アメダス外気温[°C]	-3.6	-5.7
給気温度[°C]	7.3	5.2
室内空気温度[°C]	22.6	22.2
昇温率: ε [-]	0.42	0.39
回収率: η [-]	0.13	0.27

η は DI 窓を通過した外気の昇温に寄与した熱量の内、通気により削減した貫流熱損失の寄与率である。この η は、ブラインド有の場合の方が無い場合に比べて低い結果となった。これは、ブラインド有の場合、3.3.3 で考察したように、通気により窓の熱輸送の構造が大きく変化することで、DI 技術により削減された損失熱流量の割合が小さくなったことが原因と考えられ、熱回収率の向上の観点から通気流路の設計の検討が重要となることが確認された。

3.5 章 結論

熱箱を用いた基礎性能評価試験と実住宅の実証試験により、DI 窓の通気量別の断熱性能、室内温熱環境の要素であるガラス表面温度・熱流束・導入外気の昇温率の検証、及び結露発生リスクの検証を行い、以下の知見を得た。

- ・JIS に準じた基礎性能評価試験によりブラインドの有無の条件で、DI 窓の断熱性能を評価した結果、それぞれ、ブラインド有 : 0.73 W/m²K、ブラインド無 : 0.92 W/m²K であった。(24.0 m³/h 通気時)

- ・実証試験住宅において、外気温が低く、通気量が安定している条件で外窓ガラス位置(上部、中部、下部)別の熱流束・表面温度を確認した結果、それぞれ上部 : 36.9 W/m²・-10.2 °C、中部 : 26.1 W/m²・-10.9 °C、下部 : 25.1 W/m²・-11.4 °Cであった。なおこの際の室内外環境温

度はそれぞれ $20.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-13.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ であった。

・ブラインドを中空層に設置することで、DI 窓の断熱性能の向上が確認できた。実証試験住宅実験 B, ケース DI1 において断熱性能は、ブラインド有： $0.65\text{ W/m}^2\text{K}$ 、ブラインド無： $1.20\text{ W/m}^2\text{K}$ であった。

・DI 窓の外気導入による室内側表面温度の低下を定量的に示し、懸念事項である結露発生条件を確認した結果、その許容相対湿度はそれぞれ、ブラインド有：38%、ブラインド無：43%であった。

・導入外気が DI 窓を通過する過程で貫流熱を回収することで、室内に供給される空気が上昇する。この度合いを昇温率： ε で示した結果、それぞれ、ブラインド有：42%、ブラインド無：39%であった。

・DI 窓を通過した導入外気の昇温に寄与した熱量の内、通気により削減した貫流熱損失の寄与率である熱回収率： η は、それぞれ、ブラインド有：13%、ブラインド無：27%であった。

3.5 章 議論

熱箱試験法による断熱性能検証の際、外障子と内障子において表面温度に差ができることが分かった。通気幅が変わることによる気流場の変化が寄与すると考えられるがその詳細は今後の課題とする。

外気が室内に導入される際の空気温度の昇温度合いを示した昇温率 ε や導入外気の消音に寄与押した熱量のうち、通気により削減した貫流熱損失の寄与率を示す熱回収率 η は通気流量により異なる。昇温率が低い際には外皮の断熱性能が良い場合であるが、室内温熱環境に悪影響があると考えられる。また熱回収率 η が小さい場合は、外皮の断熱性能が無通気時と比べて変化しないことを示す。通気量別の昇温率 ε と熱回収率 η を検討する必要がある。

■ 引用文献 ■

- [1] IEA, “Expert Guide RBE November, APPENDIX 8A,” *Annex44*, p. p.3, 2009.
- [2] B. N R., “Dynamic Insulation Systems and Energy Conservation in Buildings,” *ASHRAE Transactions n 93*, pp. p.447-466, 1987.
- [3] K. Qiu, “Modeling the CombinedConduction-Air Infiltration through Diffusive Building Envelop.,” *Energy and buildings Vol.39*, 2007.
- [4] G. G., “Numerical Evaluation of Thermal Comfort in Rooms with Dynamic Insulation,” *Building and Environment, Vol.35*, 2000.
- [5] M. S.-E. Imbabi, “A Passive-Active Dynamic Insulation System for All Climates,” *International Journal of Sustainable Built Environment Vol.1,Issue 2*, 2013.
- [6] 東京都 都市整備局, 住宅の省エネリフォームガイドブック, 東京都, 2009.
- [7] 東京大学, 平成 24 年度環境省委託事業 ダイナミックインシュレーション技術を活用する住宅の断熱改修に関する技術開発 成果報告書, 環境省, 2013.
- [8] 樋山恭助, “窓サッシ部へのダイナミックインシュレーションの適用,” *日本建築学会環境系論文集 第 79 巻, 第 699 号*, 2014.
- [9] 東京大学, 平成 22 年度環境省委託事業 ダイナミックインシュレーション技術を活用する住宅の断熱改修に関する技術開発 成果報告書, 環境省, 2011, p. p.27.
- [10] 田中俊六, 最新建築環境工学 [改訂 3 版], 井上書院, 2009, p. p.37.
- [11] 宇田川ら, “水平面全天日射量観測値よりの直達日射量の推定,” *日本建築学会論文報告集 第 267 号*, 1978.
- [12] 空気調和・衛生工学会, “空気調和・衛生工学便覧,” *第 14 版 基礎編*, p. p.383, 2010.
- [13] 張ら, “全国の住宅における室内湿度環境に関する分析,” *日本建築学会*, 2009.
- [14] W. A. a. B. W.P., “Thermal Characteristics of Double Windows,” 1964.

第 04 章

住宅開口部への適用 年間暖房負荷の検証

第 4 章 ■まえがき ■

1 章、2 章に述べたように、建物の省エネルギー化は必要である。その方策として、ダイナミックインシュレーション技術に着目し、断熱性能の悪い開口部（窓部）に適用し 3 章で熱箱試験法による断熱性能の検証を行った。本章では、3 章で得た通気流量に伴い変化する断熱性能を用いて、換気回路網計算と年間暖房負荷計算の連成を行った。

4.1 章では、DI 技術を窓部に適用した事例(DI 窓)の概要と解析概要、4.2 章では解析モデルの概要と実際の住戸との更生、4.3 章に解析結果、4.4 章に示した。

4 章 住宅開口部への適用 年間暖房負荷の検証

4.1 章 研究概要

省エネ住宅の実現は世界的な課題である。前章には、換気により実質的な熱損失を低減できるダイナミックインシュレーション窓（以下 DI 窓）の提案を行い、通気量に伴い変化する断熱性能を熱箱試験と実住戸に設置した現地実測試験の両試験により報告した。

DI 技術は移流により熱輸送の方向を変化させるため、DI 窓の断熱性能は適用部位を通過する流量に強く依存することが知られている [1] [2] [3] [4] [5]。このため建築全体の省エネ効果を評価する際には、通気量が重要な要素である。計画的な通気量の達成には DI 窓の実質有効開口面積 (αA) が、住宅全体の開口面積に対して相対的に大きい必要がある。高気密・高断熱住宅化が進む現在では、住宅の実質有効開口面積が比較的小さくなったと言えるが、その影響がないとは言えず、無視できない。このため、住宅の実質有効開口面積の異なる二種類の検討モデルを作成し、換気回路網計算で年間暖房負荷の削減量を比較検討した内容となる。通気量の駆動力となる圧力差は、外部環境の影響（外部要素）と生活行為や建築隙間や設備機器の影響（内部要素）の二要素が考えられる。外的要因は風力換気が隣接する建物の影響を強く受け、通気量に与える影響が大きいことが指摘 [6] [7]されているため、住宅密度、地理（寒冷地：札幌、温暖地：東京）を取り上げる。内部要素は一般的な日程 [8]での局所換気の動作を取り上げる。局所換気は全体的な換気と比べて運転時間が短い、窓の断熱性能に関係するため、省エネ効果の評価対象とする。

4.2 章 解析概要

4.2.1 シミュレーションソフトと検討モデル

熱負荷計算と換気回路網計算を錬成する TRNSYS を用いた。換気回路網計算には従来ソフト COMIS3.1(Conjunction of Multizone Infiltration Specialists)をベースとしたエネルギー計算ソフト TRNSYS17 のアドオンプログラムの TRNFlow を使用した [9]。TRNSYS はモジュラーアプローチと呼ばれる仕組みを採用しており、機器や住戸や部位まで分解したブラックボックス化されたモジュールを繋ぎあわせて計算をする。本検証では、通気により断熱性能の変化とスケジュールにより変化する DI 窓のモジュールを作成した。

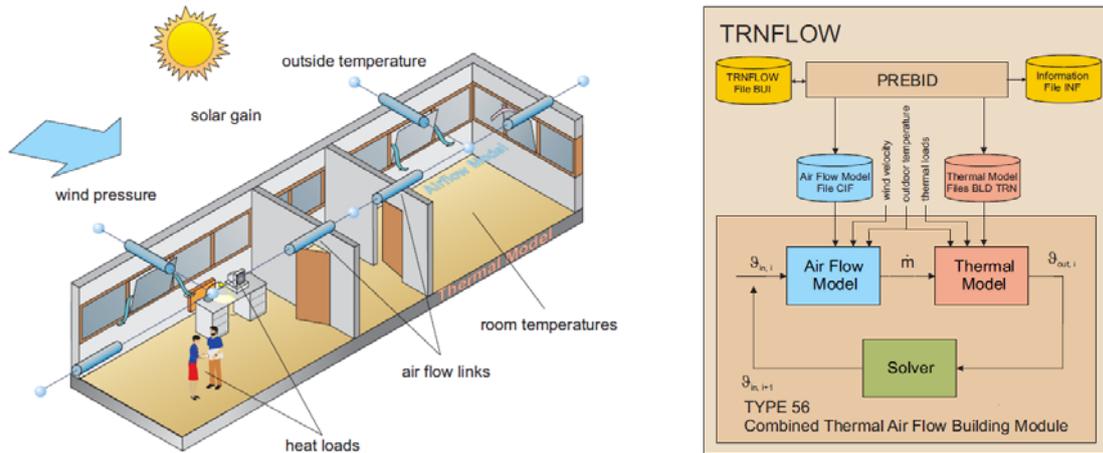


図 4.2.1 TRNFWO manual [10]より、概略図

検討モデルは IBEC の標準住宅モデル（寒冷地用）を作成した。解析対象地域である札幌と東京で、共に寒冷地用の住宅モデルを使用し計算した。図-4.2.1 と図-4.2.2 に示すように、住宅は 120m²相当の住宅であり、窓のうち、比較的大きな窓が設置される和室、リビング、主寝室、子供部屋二つ、キッチンに対する DI 窓の設置を想定した。

計算に必要な、床・壁・天井の断熱性能は、それぞれ 0.208、0.254、0.167W/m²K であり、DI 窓以外の窓は low-E ガラスとして 1.70W/m²K のものを用いた。

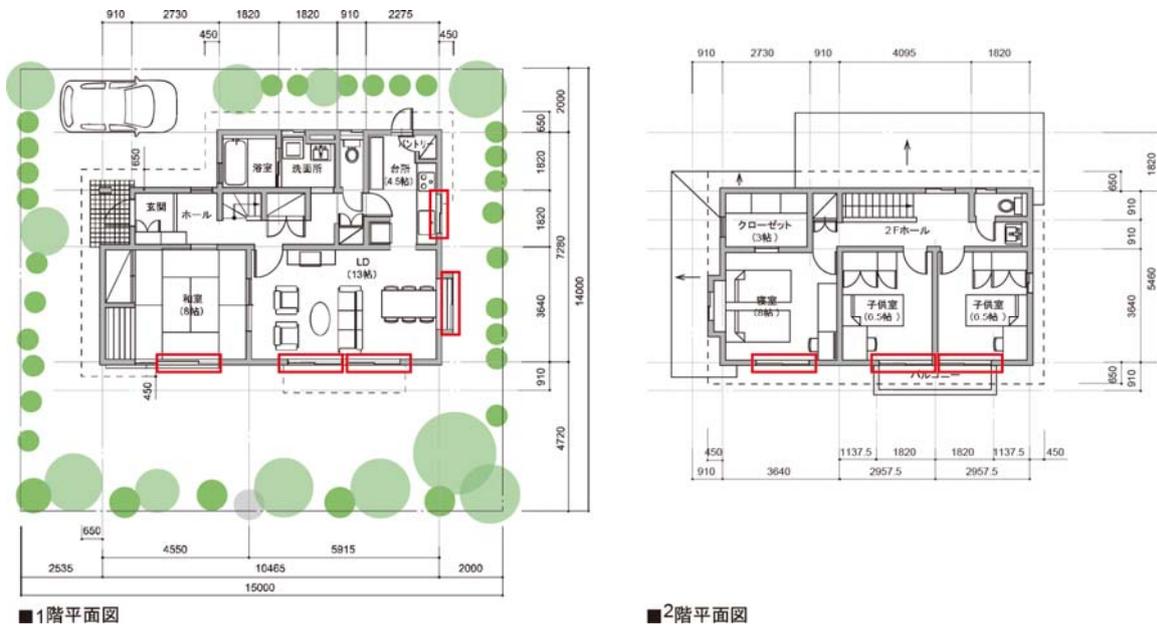


図-4.2.2 標準住宅モデル平面図と DI 窓の適用位置

DI 窓の設置位置は赤で囲われた部分で、計八ヶ所である。

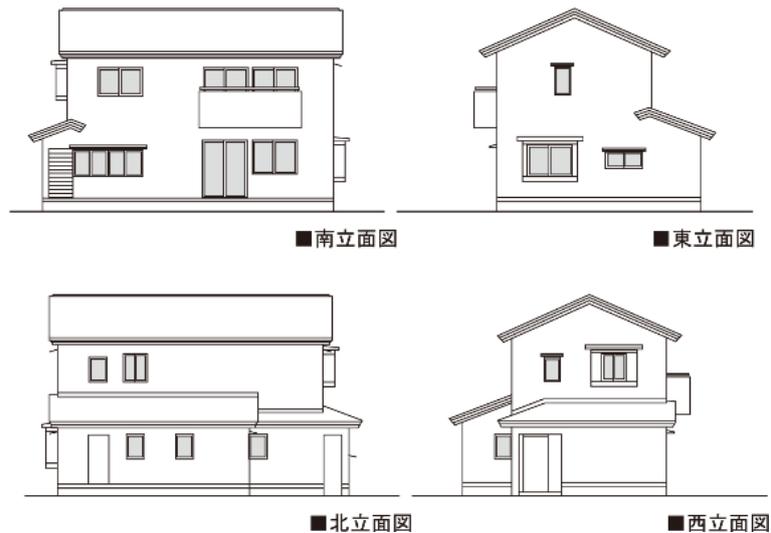


図-4.2.3 標準住宅モデルの立面図

4.2.2 隙間性状

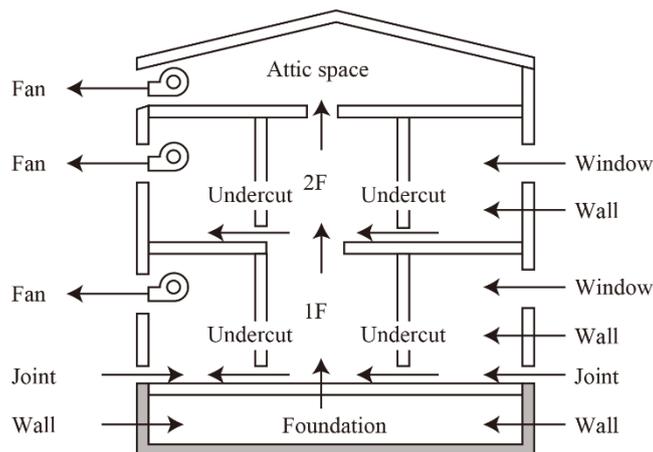


図-4.2.4 隙間概念図

図-4.2.4 に隙間概念図を示した。想定している換気は屋根上部に取り付けられる換気ファンで0.5回/h換気を行い、通気は基礎下、一階基礎接合部、局所換気口、開口部、DI窓等から導入される。局所換気口は局所換気が行われているときは換気口となる。換気口としてのDI窓の隙間は、チャンバー試験より得られた回帰式*より得て、面積にして31.7cm²であった。住宅部屋間の内扉は、すべて同じ隙間（アンダーカット）を持っていると仮定し、Orme**による値を入力した。

* 三協アルミ社により実施された。回帰式は次式である。

$$Q_v = 0.9968 \Delta P^{0.8901}$$

ここで、 Q_v は単位長さあたりの通気量 [m³/hm]、 ΔP は圧力差 [Pa] である。

** 扉周囲の単位長さあたりの C_s 2.4*10⁻⁴[kg/s/m]

Eq-(4.1)

表-4.2.1 開口比率

全体	総計	全体に占める割合%	全体に占める割合%				αA cm2		
			DI 有				C 値		
			DI 以外	DI			0.80	2	
躯体隙間	外壁	1.5%	北面 1階	B	100		96	240	
				C	0.02		0.02	0.05	
				H	0.07		0.07	0.16	
				G	0.05		0.04	0.11	
				F	0.05		0.04	0.11	
			北面 2階	E	0.02		0.02	0.05	
				N	0.07		0.07	0.17	
				M	0.05		0.05	0.11	
			南面 1階	L	0.13		0.13	0.31	
				B	0.07		0.07	0.17	
			南面 2階	A	0.12		0.12	0.29	
				I	0.16		0.15	0.38	
			東面 1階	J	0.10		0.09	0.23	
				K	0.08		0.08	0.19	
			東面 2階	E	0.08		0.08	0.19	
				A	0.10		0.09	0.23	
			西面 1階	N	0.10		0.09	0.23	
				M	0.03		0.03	0.07	
				K	0.03		0.03	0.07	
			西面 2階	H	0.12		0.12	0.30	
	C	0.05			0.05	0.11			
	B	0.05			0.05	0.11			
	屋根	0.9%			B	0.10		0.09	0.23
					A	0.10		0.09	0.23
					N	0.03		0.03	0.07
					M	0.03		0.03	0.07
					K	0.03		0.03	0.07
					H	0.05		0.05	0.11
					C	0.05		0.05	0.11
					B	0.10		0.09	0.23
					A	0.10		0.09	0.23
					I	0.10		0.09	0.23
	床	0.3%			Q	0.83		0.80	1.99
					P	0.15		0.14	0.36
					O	0.10		0.10	0.25
					A	0.10		0.10	0.25
					B	0.08		0.08	0.19
					C	0.02		0.02	0.06
					D	0.04		0.04	0.10
					E	0.04		0.04	0.10
外壁と1階床	36.3%		北面	F	0.01		0.01	0.02	
				G	0.02		0.02	0.04	
				H	0.02		0.02	0.04	
				B	1.03		0.99	2.48	
				C	3.10		2.98	7.45	
			南面	H	2.07		1.99	4.96	
				G	2.07		1.99	4.96	
				F	1.03		0.99	2.48	
			東面	E	3.12		3.00	7.50	
				B	5.40		5.19	12.97	
			西面	A	7.03		6.75	16.86	
				E	4.33		4.15	10.38	
A	4.33			4.15	10.38				
開口部	0	28.0%	北面	H	2.16		2.08	5.19	
				C	2.16		2.08	5.19	
				B	4.33		4.15	10.38	
				1	1.48		1.42	3.54	
				2	1.48		1.42	3.54	
			南面	3	1.48		1.42	3.54	
				4	1.48		1.42	3.54	
				5	2.29		2.20	5.49	
				DI 1	4.25	4.25	4.25		
				DI 2	4.25	4.25	4.25		
東面	DI 3	4.25	4.25	4.25					
	DI 4	4.25	4.25	4.25					
	DI 5	4.25	4.25	4.25					
西面	DI 6	4.25	4.25	4.25					
	DI 1	4.25	4.25	4.25					
換気設備	キッチン	33.0%		DI 2	1.93		1.93		
				3	1.48		1.42	3.54	
				2	2.86		2.74	6.85	
					40.66		39.03	97.58	

住宅の各隙間の設定は、より現実に近いモデリングを実現するために、廣田ら [11]*の気密住宅の隙間の分布比率（躯体隙間 39%、開口部 28%、換気設備 33%）を利用し、各 C 値により決定した総相当隙面積 αA を各部位に配分する。住宅隙間は躯体隙間と換気設備、開口部の半分を DI 窓にした。DI 窓は通気口として分類されるため、隙間として計上されない。このため隙間の比率は躯体隙間 39%、開口部 14%、換気設備 33%を元に全体の隙間面積を分配した。全体の隙間面積は、実際に断熱改修を行い得た $0.8\text{cm}^2/\text{m}^2$ を基準ケースとし、 $2.0\text{cm}^2/\text{m}^2$ を比較ケースとした。

表-4.2.1 に検討モデルの開口面積比率を示した。躯体隙間に関して、取合い部の隙間の割合が大きいことが報告されている [11]。この取合い部は主として外壁や基礎などの部材の接合部の隙間を指しているため、検討モデルの作成にあたり、躯体隙間は参考文献を踏襲するが細かな部位の隙間は、最も隙間の多い外壁と基礎に分配した。

TRNFlow は Eq-(4.2) を解く。これに必要な 1Pa 時に移動する質量流量 C_s [kg/s/Pa] は Eq-(4.2) と Eq-(4.3) を連立させ、相当隙間面積 αA [m^2] を代入することで得ることができる。(Eq-(4.5)、なお、通気量解析に用いる隙間抵抗の特性値は 1.5 とする。

$$\dot{m} = C_s \times \Delta P^{\frac{1}{n}} \quad \text{Eq-(4.2)}$$

$$\dot{m} = \alpha A \times \sqrt{2\rho \times \Delta P} \quad \text{Eq-(4.3)}$$

隙間を単純開口とみなす関係式は Eq-(4.4) のようになる。

これら 2 式を同一とみなして、 $\Delta P = 1$ とすると Eq-(4.5) となる。

$$C_s = \alpha A \times \sqrt{2\rho} \times \Delta P^{\frac{1}{n}} \quad \text{Eq-(4.4)}$$

$$C_s = \alpha A \times 1.29 \quad \text{Eq-(4.5)}$$

4.2.3 外部要素

計算に用いる外気条件は、1991 年~2000 年の 10 年間を対象とした 2000 年版標準年拡張アメダス気象データを利用した。利用したデータは、寒冷地として札幌市中央区北 2 条西 札幌管区气象台（風速は緯度 43 度 3.6 分、経度 141 度 19.6 分、気温・日照は緯度 43 度 3.6 分、経度 141 度 19.7 分の气象台）と、温暖地として東京千代田区大手町東京区气象台（北緯 35 度 41.4 分 東経 139 度 45.6 分）を用いた。風速と高さが Eq-(4.6) の様な経験式で表されることから、

* 参考文献 [11] で測定された住宅は次世代省エネ基準の設計施工指針に準じている気密工事を行った高気密住宅であり、気密測定結果は実質開口面積 αA が約 $1.0\text{cm}^2/\text{m}^2$ である。この住宅隙間量の内訳を見ると、躯体隙間の構成比は一般部（外壁・屋根・床）が 7~10%、取り合い部（外壁と基礎や一二階の床部分、間仕切り壁と床天井等）が 85%と、取り合い部に隙間が集中しているという結果である。

(風速 U) \propto (高さ z) ^{α} Eq-(4.6)

建物への流入風速は、札幌で観測値の海面上の高さ（17m）と風速計の高さ（59.5m）、東京で観測値の海面上の高さ（20m）、風速計の高さ（35.5m）を考慮して計算される。この観測値から解析対象値に対する風速の計算の概念図を **図 4.2.5** に示した。この際、べき指数 α は住宅街を想定して 0.28 を用いた [12] [13]。なお、風圧係数の分配は、同様の形状に囲まれた住宅地を想定し、**表-4.2.2** の通りである [10]。

表-4.2.2 風圧係数

方位	0	22.5	45	67.5	90	112.5	135	157.5	180	202.5	225	247.5	270	292.5	315	337.5	360
東	-0.30	-0.31	-0.32	-0.26	-0.2	-0.26	-0.32	-0.31	-0.30	-0.08	0.15	0.165	0.18	0.165	0.15	-0.08	-0.3
西	-0.30	-0.08	0.15	0.17	0.18	0.17	0.15	-0.08	-0.30	-0.31	-0.32	-0.26	-0.20	-0.26	-0.32	-0.31	-0.3
南	0.06	-0.03	-0.12	-0.16	-0.20	-0.29	-0.38	-0.34	-0.30	-0.34	-0.38	-0.29	-0.20	-0.04	0.12	0.09	0.06
北	-0.30	-0.34	-0.38	-0.29	-0.20	-0.16	-0.12	-0.03	0.06	-0.03	-0.12	-0.16	-0.20	-0.29	-0.38	-0.34	-0.3
天井 前	0.06	-0.05	-0.15	-0.19	-0.23	-0.42	-0.6	-0.51	-0.42	-0.51	-0.6	-0.42	-0.23	-0.19	-0.15	-0.05	0.06
天井 後	-0.42	-0.51	-0.60	-0.42	-0.23	-0.19	-0.15	-0.11	-0.06	-0.11	-0.15	-0.19	-0.23	-0.42	-0.60	-0.51	-0.42

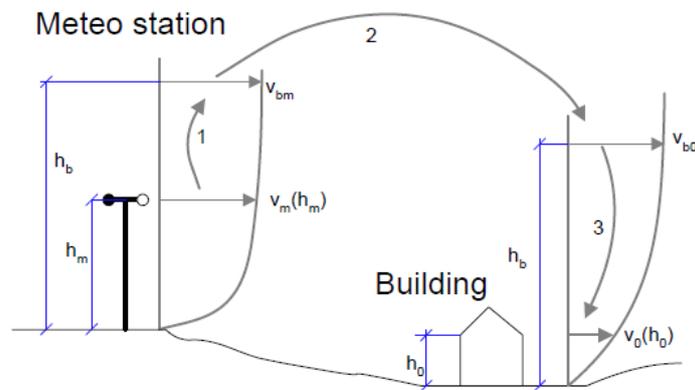
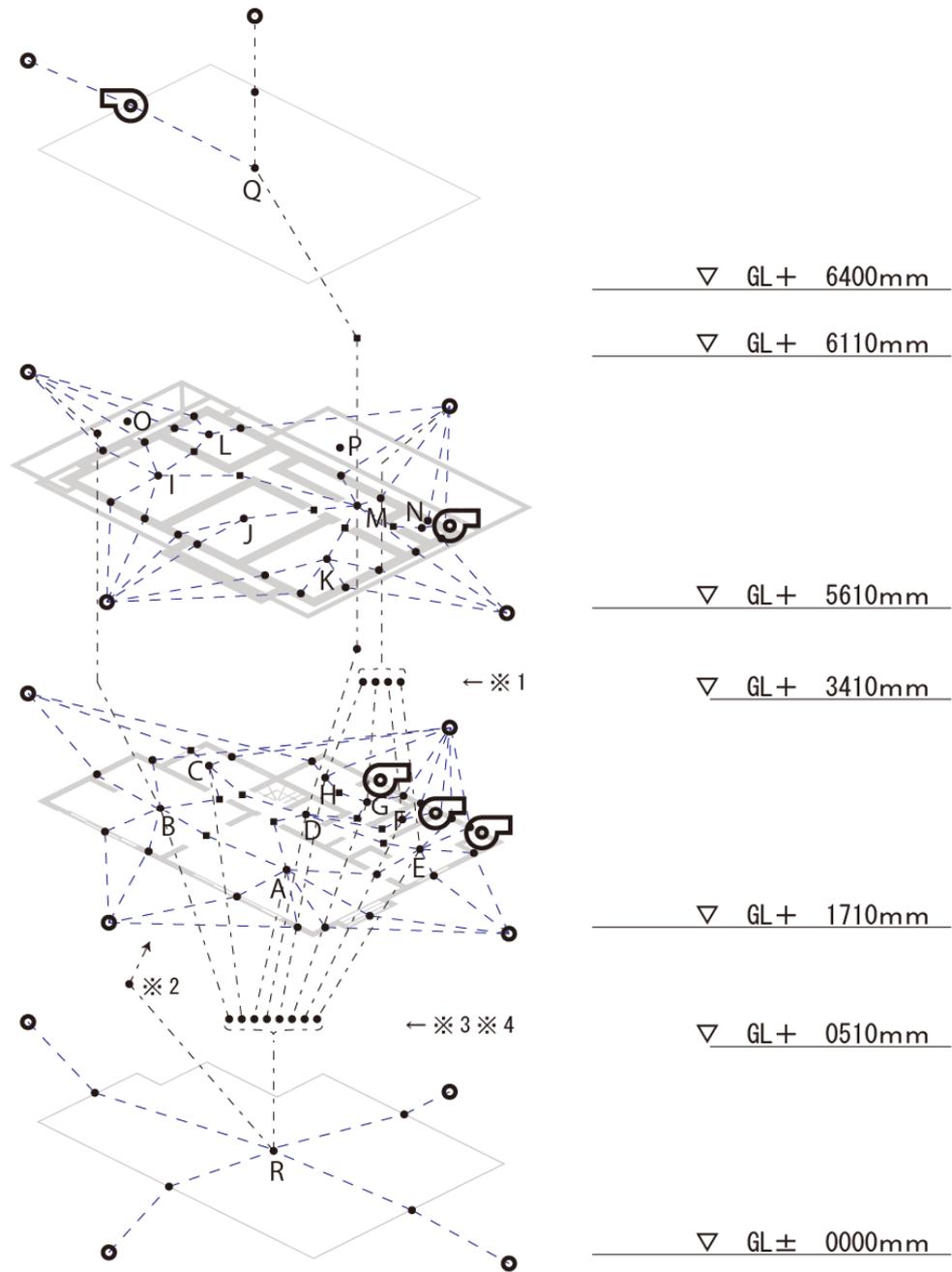


図-4.2.5 観測地から解析対象地の風速の計算 [10]

ここで、 h_b は境界層高さ [m]、 h_m は観測高さ [m]、 h_0 は解析地の建物高さ [m]、 v_{bm} は観測地における境界層高さの風速 [m/s]、 v_m は観測高さの風速 [m/s]、 v_0 は解析地の境界層高さの風速 [m/s] である。



凡例

- エアノード (隙間)
- エアノード (ドア隙間)
- 外部ノード
- 🌀 ファン

※1 最左[Crack] 風呂⇄屋根裏2、左中[Crack] 洗面所⇄屋根裏2、右中[Crack] トイレ⇄屋根裏2、最右[Crack] キッチン⇄屋根裏2
 ※2 床と壁体の取り合い部の隙間に接続
 ※3 左1[Crack] 地下⇄和室、左3[Crack] 地下⇄リビング、右1[Crack] 地下⇄風呂、右3[Crack] 地下⇄便所
 ※4 左2[Crack] 地下⇄玄関、左4[Crack] 地下⇄ホール、右2[Crack] 地下⇄洗面所、右4[Crack] 地下⇄台所

図-4.2.6 住宅のエアノードの接続イメージ

4.2.4 内部要素

DI窓の通気量に影響を与える内的要因は、局所換気を考える。各換気ファンは実際に住宅の断熱改修業者とのヒアリングにより、検討モデルに取り付ける換気ファンを選定し、**図-4.2.7**に示す性能曲線を用いた。便所、台所、風呂場の局所換気の他に、天井の換気ファンにより、住宅全体実現の換気を行う。この局所換気のスケジュールは、財団法人建築環境・省エネルギー機構の開示する熱負荷計算のためのデータ **[14]**より引用し、その詳細は**表-4.2.3**に示す。

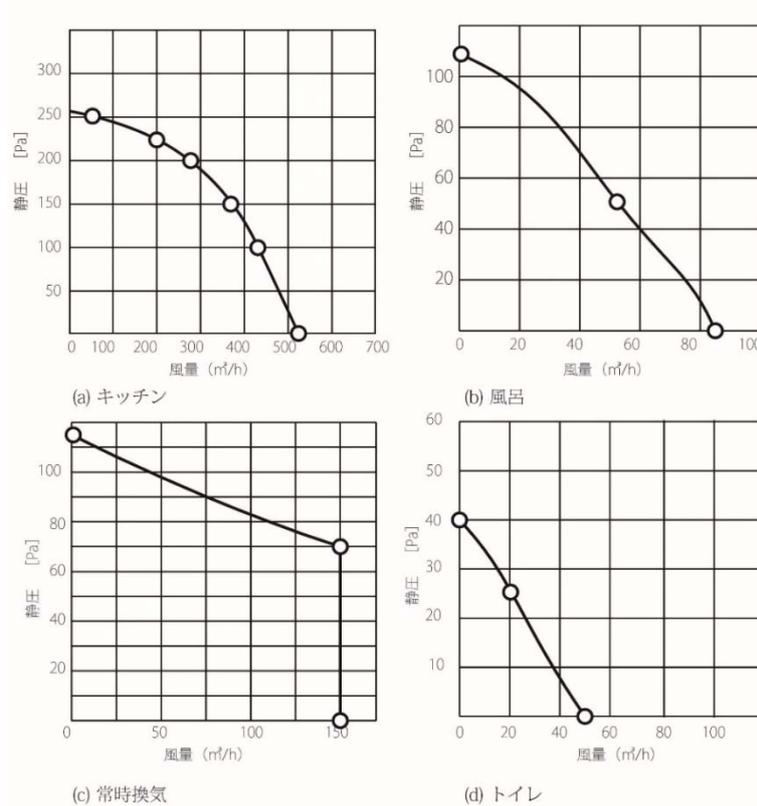


図-4.2.7 各ファンとPQ特性図*

表-4.2.3 各ファンスケジュール 単位：m³/h

		AM	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
		PM	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24
台所	平日	AM							75					
		PM	75						150	150				
	休日	AM									75			
		PM	75							150	150			
一階便所	平日	AM												
		PM	0.8				0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	2		2.8
	休日	AM								4	4		1.2	1.2
		PM					2	0.8		2	0.8		2	0.8
浴室	平日	AM												
		PM										50	25	100
	休日	AM												
		PM						75	25			25	25	100

* 製品はパナソニック製のものを使用した。

4.2.5 窓の断熱性能

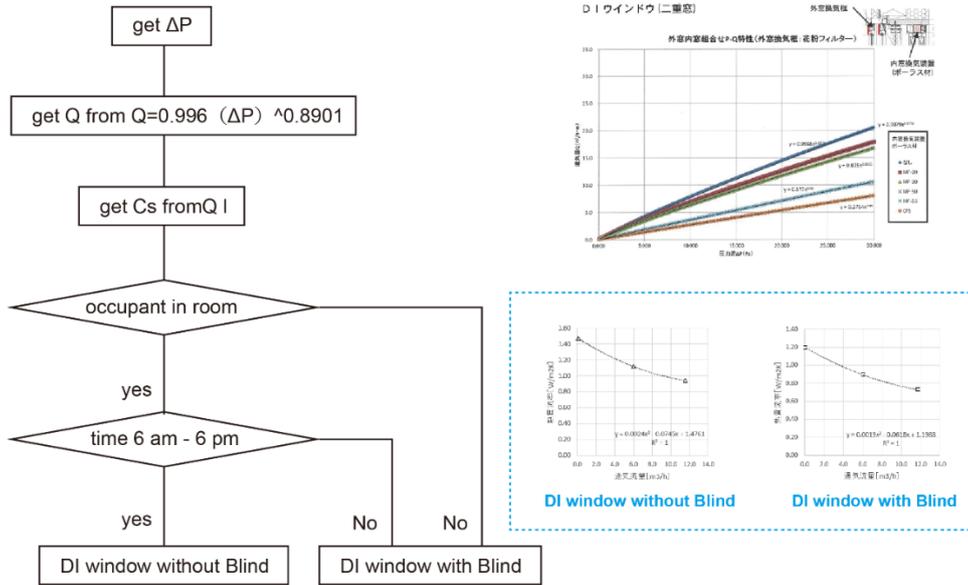


図-4.2.8 DI 窓の断熱性能の決定プロセス

窓の断熱性能はブラインド有とブラインド無で異なる。そこで図-4.2.8 のプロセスを得て解析タイムステップ毎に窓にブラインドがあるかどうかのプロセスを示した。まず、断熱性能の変数のうちの通気流量は、あらかじめ熱箱試験で得た回帰式を元に (図-4.2.8 の右上) Q を算出する。この値は窓の単位幅あたりの値となるため各窓の幅を乗じ、TRNFlow の Cs を決定した。ブラインド有とブラインド無では、わずかに実質有効開口面積が異なるが、本検証では同一のもののみとする。Cs の決定後、DI 窓の取り付けられた部屋に居住者がいる場合で、朝六時から夜の六時までであれば、ブラインドを開ける (DI window without blind) になり、それ以外であればブラインドが閉まっているケースとなる。なお、在室スケジュールは表-4.2.4 に示すように評価のためには一定の家族構成を想定して生活スケジュールを定める必要があり、一般的と思われるライフスタイルとして、世帯数構成の点から最も比率の高い 4 人家族を採用した。居住者が 0 であれば、無条件で DI 窓はブラインドが閉じられている状態となる。

表 4.2.4 在室スケジュール

居室名		AM	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	
リビング	平日	PM	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24	
		AM							1	2	1	1			
	休日	PM	1	1				1	2	2	3	3	2	1	1
		AM										3	2	2	2
子供部屋2	平日	PM	2	1				2	3	3	4	2	2	1	
		AM	1	1	1	1	1	1	1						
	休日	PM									1		1	1	
		AM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
主寝室	平日	PM	1	1	1	1	1	1	1			1	1	1	
		AM													
	休日	PM													
		AM	2	2	2	2	2	2	2	1				1	
	PM												2		

4.2.6 検討ケース

実質開口面積の断熱性能への感度を検証するために、施工した建築に存在する隙間の割合を示す気密性能の指標である C 値*の異なる値を持つ住宅モデルを作成し検証を行う。

検討ケースは基準ケース（C 値 $0.8\text{cm}^2/\text{m}^2$ 相当）と比較ケース（C 値 $2.0\text{cm}^2/\text{m}^2$ 相当）の二ケースである。基準ケースとして選んだ C 値 $0.8\text{cm}^2/\text{m}^2$ は、3 章で実測をした際に得られた測定値であり、一般的な住宅断熱改修・気密回収を行った際の値として採用した。比較ケースとして選んだ C 値 $2.0\text{cm}^2/\text{m}^2$ は次世代省エネ基準での寒冷地の C 値の目標値として $2.0\text{cm}^2/\text{m}^2$ が掲げられていたためである。

4.3 章 解析結果

4.3.1 一週間の挙動

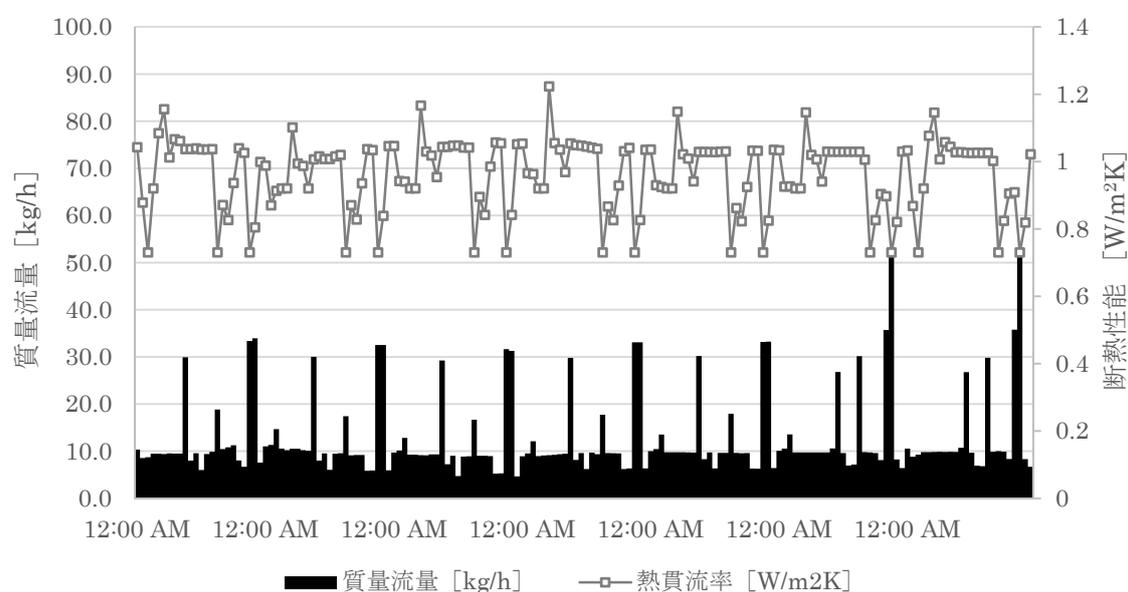


図-4.3.1 1月の一週間

通気流量の挙動の確認のため、図-4.3.1に C 値が $0.8\text{cm}^2/\text{m}^2$ の時の、一階リビングの DI 窓を通過した通気流量とその通気量に伴い変化した断熱性能を示した。この図は一週間の挙動を示しており、最初の 5 日は平日、残りの 2 日は休日のスケジュールである。概ね、風呂場とキッチンの局所換気を用いた時間帯において断熱性能が約 $0.7\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ となっている。また、局所換気がない場合においても屋根に取り付けた常時換気設備が空気を引き続けるため、DI 窓の通気は概ね $10\text{kg}/\text{h}$ に満たない通気量であり、熱貫流率は約 $1.0\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ である。

* 住宅の気密性を表す数値で、数字が小さいほど気密性が優れている。単位は cm^2/m^2 である。断熱改修において、部分的な改修であれば気密ラインが破られている改修予定でない部分からの隙間が大きい。本検証で選んだ $0.8\text{cm}^2/\text{m}^2$ は風呂場を改修しない断熱気密改修を行い、その際に得た C 値である。

4.3.2 建築全体の換気回数

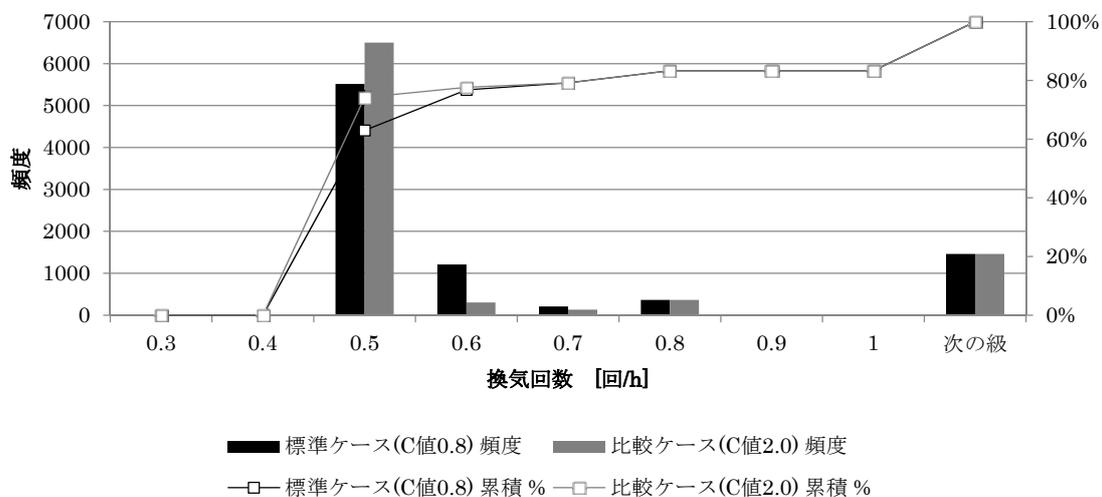


図-4.3.2 換気量の累積頻度分布

表-4.3.1 換気量の累積頻度分布

データ区間	基準ケース		比較ケース	
	頻度	累積 %	頻度	累積 %
0.3	0	0%	0	0%
0.4	0	0%	0	0%
0.5	6502	74%	5516	63%
0.6	302	78%	1209	77%
0.7	131	79%	210	79%
0.8	366	83%	366	83%
0.9	0	83%	0	83%
1	0	83%	0	83%
次の級	1460	100%	1460	100%

表 4.3.1 と図 4.3.2 に標準ケース (C 値 $0.8\text{cm}^2/\text{m}^2$) と比較ケース (C 値 $2.0\text{cm}^2/\text{m}^2$) 換気量の累積頻度分布について示した。概ね計画した 0.5 回/h 換気程度を満足する。局所換気を利用時において 1 回/h 換気以上になり、その頻度は年間で約 17%である。このとき年間の最大値は 2 ケース共に約 2.2 回/h 換気であり、年間の最小値は 0.4 回であった。標準ケースと比較ケースの全体の換気量は概ね同程度とみなせる。

4.3.3 総換気量の割合

表-4.3.2 標準ケースの換気量のバランス

	平均値 [m ³ /h]	比率%
全体の換気量	222.9	100
DIの換気量	81.5	36.7
開口部の換気量	16.6	7.4
換気設備の漏気量	77.5	34.8
その他*	47.3	21.1

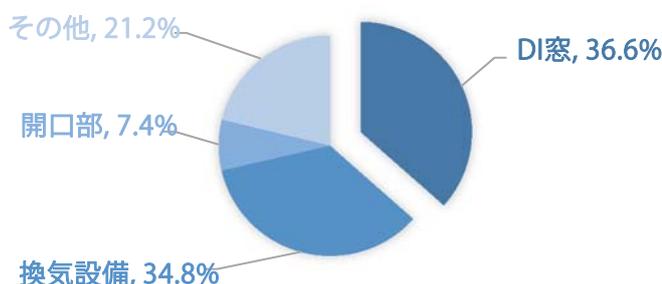


図-4.3.3 標準ケースの換気量比率

表-4.3.2 に一年間の標準ケースの換気量の平均値を示し、図-4.3.3 にその比率を示した。全体の換気量の年間平均値は約 0.7 回/h 換気であった。このうち、DI の換気量は年間の平均値で 81.5m³/h と、全体の換気量の割合で 36.7%であり、実住宅へ適用した際の DI 窓の実測値 32.9%と近い値で算出された。計画外の隙間からの流入量は 47.3m³/h であり、全体の約 21.1%にとどまることが分かった。また、開口部からの換気量は大きいことが予測されたが、窓の半分が換気口として扱われる DI 窓に置き換わっているため、割合は全体の約 7%にとどまる。

表-4.3.3 比較ケースの換気量のバランス

	平均値 [m ³ /h]	比率%
全体の換気量	225.6	100.0
DIの換気量	44.0	19.5
開口部の換気量	67.7	30.0
換気設備の漏気量	24.1	10.7
その他	89.9	39.8

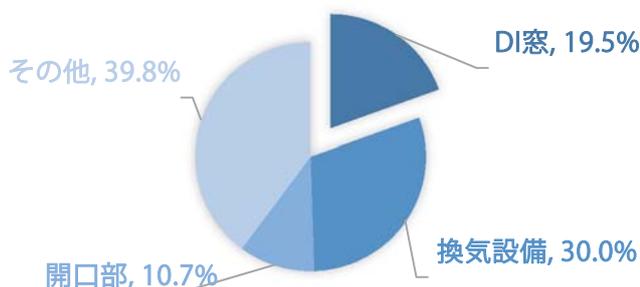


図-4.3.4 比較ケースの全体の換気量比率

一方で表-4.3.3 は比較ケースの一年間の換気量の平均値であり、図-4.3.4 にその比率を示した。全体の換気量は、標準ケースと同様で約 0.7 回/h 換気であった。このうち、DI 窓は全体の 19.5%ほどであり、年間の平均的な換気量は 44.0m³/h と基準ケースと比べ小さくなる。換気設備、開口部、その他からの換気量が増加する傾向が見られるが、換気設備の増加量が小さい理由としては、換気設備が起動している際に隙間が塞がるため、全体に対する割合が小さくなると考えられる。標準ケース C 値 0.8cm²/m² と比較ケース C 値 2.0cm²/m² の通気流量とそのバランスについて示したが、一般的な断熱改修程度の気密性能値 2.0cm²/m² を採用した際に

* その他は基礎部と柱材との取り合い部や、床材からの漏気が主である。なお算出は全体の換気量から、DI 窓通気量と一般的な窓の換気量、換気設備からの漏気量を差し引いて求めた。

全体の換気量の内 DI 窓から流入する換気割合が小さくなるため、断熱性能も小さくなることが予想できる。

4.3.4 DI 窓前後の圧力差と通気量

表-4.3.4 基準ケースの圧力差と通気量

		リビング 1	リビング 2	リビング 3	和室	キッチン	主寝室	子供部屋 1	子供部屋 2
	方位	南	南	東	南	東	南	南	南
圧力 [Pa]	平均値	-7.7	-7.7	-7.8	-7.3	-7.8	-5.9	-6.0	-5.9
	最大値	-2.0	-2.0	-2.1	-2.0	-2.1	-0.3	-0.3	-0.3
	最小値	-38.6	-38.6	-39.1	-35.4	-39.1	-33.5	-33.8	-33.7
換気量 [kg/h]	平均値	12.0	12.0	12.1	11.5	5.5	9.4	9.5	9.5
	最大値	52.6	52.6	52.7	48.7	23.9	45.1	45.5	45.2
	最小値	3.6	3.6	3.8	3.5	1.7	0.6	0.6	0.6

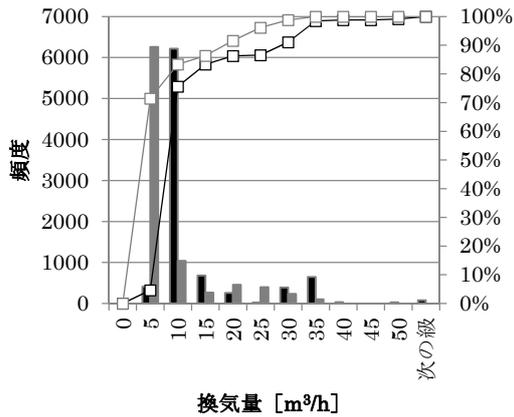
表-4.3.4 に基準ケースの DI 窓前後の室内外差圧と通気量を示す。1 階(リビング、和室、キッチン)と 2 階(主寝室、子供部屋)では約 2Pa の圧力差があり、浮力の影響により二階の DI 窓からの通気量が低下した。一階で 7.3~7.8Pa の範囲で圧力差、二階で 5.9~6.0Pa の範囲の圧力差のため、方位による圧力差は高さによる圧力差に比べ小さいことがわかる。また、局所換気利用時において 30Pa を超える室内外差圧となること、二階は常に負圧になることが確認できた。

表-4.3.5 比較ケースの圧力差と通気量

		リビング 1	リビング 2	リビング 3	和室	キッチン	主寝室	子供部屋 1	子供部屋 2
	方位	南	南	東	南	東	南	南	南
圧力 [Pa]	平均値	-4.25	-4.25	-4.29	-3.76	-4.29	-2.67	-2.74	-2.70
	最大値	-0.9	-0.9	-1.0	-0.9	-1.0	1.0	1.0	1.0
	最小値	-23.6	-23.6	-23.9	-19.8	-23.9	-18.6	-19.1	-18.8
換気量 [kg/h]	平均値	7.0	7.0	7.0	6.3	3.2	4.6	4.5	4.5
	最大値	33.8	33.8	34.0	28.9	15.4	27.3	26.6	27.0
	最小値	1.8	1.8	2.0	1.7	0.9	-2.0	-2.0	-2.0

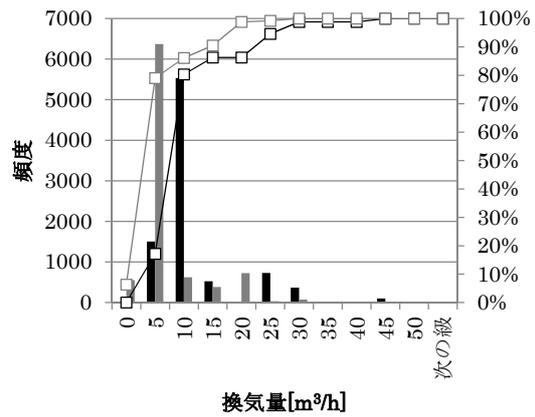
表-4.3.5 に比較ケースの DI 窓前後の室内外差圧と通気量を示す。階別では基準ケースと同様に浮力の影響から、約 2Pa の圧力差があり、二階からの通気量が低下する。室内外差圧は 4Pa 程度であり、基準ケースと比べ換気量が小さくなっている。また、二階の圧力が正の値をとることから、二階の窓からの漏気が確認できる。

表-4.3.4 と表-4.3.5 より、局所換気利用時の圧力差は過大となる。DI 窓の断熱性能はこの通気量の頻度が重要であるため、一年間の一時間ごとの換気量(8760 サンプル)の累積頻度分布を検証した。



■ 基準ケース 頻度 ■ 比較ケース 頻度
 □ 基準ケース 累積 □ 比較ケース 累積

図-4.3.5 一階の換気量の累積頻度分布



■ 標準ケース 頻度 ■ 比較ケース 頻度
 □ 標準ケース 累積 □ 比較ケース 累積

図-4.3.6 二階の換気量の累積頻度分布

表-4.3.6 一階リビングのDI窓の換気量の累積頻度分布

▶ 基準ケース(C値 0.8 cm²/m²)

データ区間 [kg/h]	頻度	累積 %
0	0	0%
5	408	5%
10	6214	76%
15	681	83%
20	259	86%
25	23	87%
30	392	91%
35	648	98%
40	32	99%
45	0	99%
50	27	99%
次の級	77	100%

▶ 比較ケース(C値 2.0 cm²/m²)

データ区間 [kg/h]	頻度	累積 %
0	0	0%
5	6260	71%
10	1041	83%
15	264	86%
20	456	92%
25	400	96%
30	236	99%
35	104	100%
40	0	100%
45	0	100%
50	0	100%
次の級	0	100%

表-4.3.7 二階子供部屋のDI窓の換気量の累積頻度分布

▶ 基準ケース(C値 0.8 cm²/m²)

データ区間	頻度	累積 %
0	0	0%
5	1503	17%
10	5534	80%
15	524	86%
20	1	86%
25	728	95%
30	367	99%
35	0	99%
40	0	99%
45	101	100%
50	3	100%
次の級	0	100%

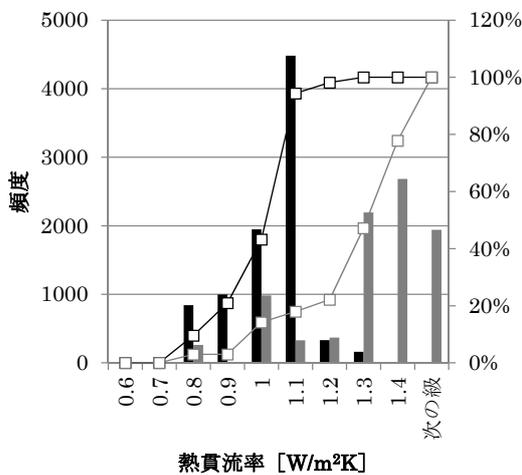
▶ 比較ケース(C値 2.0 cm²/m²)

データ区間	頻度	累積 %
0	553	6%
5	6370	79%
10	624	86%
15	384	91%
20	725	99%
25	34	99%
30	71	100%
35	0	100%
40	0	100%
45	0	100%
50	0	100%
次の級	0	100%

表-4.3.6 と図-4.3.5 に一階のリビングに設置した DI 窓、表-4.3.7 と図-4.3.6 に二階の子供部屋に設置した DI 窓の熱貫流率の累積頻度分布を示した。それぞれ南の方角に設置されており、位置もファサード上で上下に位置している。表-4.3.5 に示したように、上下で浮力による圧力差が生まれるため、通気流量が小さくなる。DI 窓は通気流量に依存した断熱性能を持つため、一階と二階で断熱性能の差が生まれ、一階の断熱性能が良い結果となった。リビングと子供部屋では人の滞在スケジュールが異なるため、DI 窓のブラインドの開閉により断熱性能が変わるが、その効果を含め、基準ケース場合では断熱性能の差は $0.06 \text{ W/m}^2\text{K}$ であった。

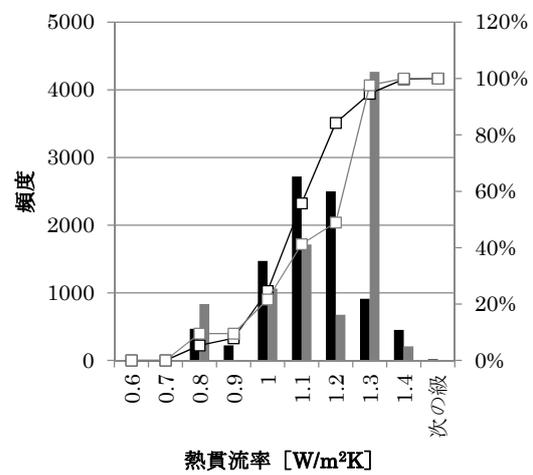
また、比較ケースにおいては換気量の約 19.5%しか通気されず、一階 DI 窓と二階 DI 窓で 5kg/h 以下が 71%を占めるため、断熱性能の向上効果が小さくなっている。

4.3.5 DI 窓の断熱性能



■ 標準ケース 頻度 ■ 比較ケース 頻度
 □ 標準ケース 累積 □ 比較ケース 累積

図-4.3.7 一階の断熱性能の累積頻度分布



■ 標準ケース 頻度 ■ 比較ケース 頻度
 □ 標準ケース 累積 □ 比較ケース 累積

図-4.3.8 二階の断熱性能の累積頻度分布

表-4.3.8 一階リビングの DI 窓の断熱性能の累積頻度分布

▶ 基準ケース(C 値 $0.8 \text{ cm}^2/\text{m}^2$)

データ区間	頻度	累積 %
0.6	0	0.00%
0.7	0	0.00%
0.8	841	9.60%
0.9	997	20.98%
1	1949	43.23%
1.1	4482	94.38%
1.2	331	98.16%
1.3	161	100.00%
1.4	0	100.00%
次の級	0	100.00%

▶ 比較ケース(C 値 $2.0 \text{ cm}^2/\text{m}^2$)

データ区間	頻度	累積 %
0.6	0	0%
0.7	0	0%
0.8	834	10%
0.9	2	10%
1	1062	22%
1.1	1714	41%
1.2	675	49%
1.3	4266	98%
1.4	208	100%
次の級	0	100%

表-4.3.9 二階子供部屋の DI 窓の断熱性能の累積頻度分布

▶ 基準ケース(C 値 0.8 cm ² /m ²)			▶ 比較ケース(C 値 2.0 cm ² /m ²)		
データ区間	頻度	累積 %	データ区間	頻度	累積 %
0.6	0	0.00%	0.6	0	0%
0.7	0	0.00%	0.7	0	0%
0.8	469	5.4%	0.8	261	3%
0.9	222	7.9%	0.9	0	3%
1	1471	24.7%	1	983	14%
1.1	2719	55.7%	1.1	329	18%
1.2	2500	84.3%	1.2	368	22%
1.3	911	94.7%	1.3	2194	47%
1.4	451	99.8%	1.4	2685	78%
次の級	18	100.00%	次の級	1941	100%

表-4.3.8 と図-4.3.7 に一階のリビングに設置した DI 窓、表-4.3.9 と図-4.3.8 に二階の子供部屋に設置した DI 窓の熱貫流率の累積頻度分布を示した。基準ケースに一階と二階の DI 窓の断熱性能は、0.7~1.2W/m²K の割合が一階で 98%、二階で 84%と通気による断熱性能の向上が確認できる。一方で比較ケースにおいて、一階リビングの断熱性能が 0.7~1.2W/m²K の割合が 49%、二階で 22%であり、断熱性能差が大きい。特に二階の窓に関しては DI 窓を取り付けたとしても二重窓と大きくは変化しない。

4.3.6 全体エネルギー削減量

表-4.3.10 暖房負荷削減量 (1.70W/m²K の複層 LowE ガラス窓を取り付けた場合からの削減量)

	リビング	和室	キッチン	主寝室	子供部屋 1	子供部屋 2	合計
窓	南 (2.97m ² ,2.15m ²) 東 (2.15m ²)	南 (2.15 m ²)	東 (0.6 m ²)	南 (1.82 m ²)	南 (2.97m ²)	南 (2.97m ²)	8 箇所
基準ケース [GJ]	2.0	0.7	0.2	0.4	0.7	0.7	4.7
比較ケース [GJ]	1.6	0.6	0.1	0.3	0.5	0.5	3.6

表-4.3.10 に暖房負荷削減量を示した。この値は、DI 窓にせず、一般的な複層 Low-E ガラスを取り付けている住宅に比べて、どの程度断熱性能が向上したかを示している。合計で、基準ケースで 4.7GJ、比較ケースで 3.6GJ と 1.1GJ ほどの年間の負荷の違いが確認できる。灯油換算として 25l、これは 1500 円/18l として考えると年間約 2000 円の違いである。原油価格が低下する現在では便益が小さいが、C 値が異なる (2.0 cm²/m²→0.8cm²/m²) だけで全体の約 3% 程度影響を及ぼすことが確認できた。

表-4.3.11 地域別の暖房負荷削減量

	寒冷地（札幌）		温暖地（東京）	
	IBEC 標準*		IBEC 標準	
基準ケース [GJ] (C 値:0.8 cm ² /m ²)	44.8	45.2→40.5 (4.7GJ の低減)	13.7	17.0→15.1 (1.9GJ の低減)
比較ケース [GJ] (C 値:2.0cm ² /m ²)		46.4→42.8 (3.6 GJ の低減)		18.2→16.7 (1.5 GJ の低減)

表-4.3.11 には、寒冷地の気象データと温暖地の気象データで、同様のモデルを解析した結果である。寒冷地の断熱水準等級 4 相当の年間暖房負荷の参考値 44.8GJ に対して、解析結果では基準ケースで 45.2GJ、比較ケースで 46.4GJ と、近似的な解が得られた。また、DI の効果によってその約 10%の暖房負荷削減効果が得られた。一方で温暖地の暖房負荷の計算を行ったところ、DI の効果によって約 11%の暖房負荷削減効果が得られることを確認した。両ケース共に、気密性能によって全体の負荷の 2~3%程度に影響をあたえることと、DI の効果として約 10%の暖房負荷削減効果が得られることが確認できた。

4.4 章 結論

DI 窓の断熱性能評価から得られた通気量別の熱貫流率を得て、標準住宅モデルによる省エネルギー性能を定量的に評価した。以下に得られた知見を示す。

- ・C 値 0.8cm²/m² の隙間を有する検証モデルで通気量の検証を行ったところ、想定した DI 窓からの通気量は全体の 36%程度であり、2.0 cm²/m² の隙間を有する比較モデルでは全体の 19%程度である。

- ・全体の有効開口面積に対し DI 窓の有効開口面積が小さい場合、DI 窓の換気量が小さくなり、二階では逆流する現象が起きることを確認した。

- ・C 値が 0.8cm²/m² 確保できれば、約 0.7 換気時に一階 DI 窓の断熱性能を約 1.2W/m²K に年間で 80%程度維持できる事を確認した。

- ・C 値の異なるケースで比較を行ったところ、暖房負荷の差は 1.1GJ ほど異なり、DI 窓の適用のためには断熱性能の向上が必至である。

4.5 章 議論

冬季において DI 窓は通気時に集熱効果が大きく、このため負荷の削減が可能と考えられる。また夏季において室内加圧時に日射取得を排気処理することも可能であり、地域気候要素を取り入れたより詳細な検証は今後の課題とする。

現在省エネルギーの観点から、換気負荷を低減させるために換気量を 0.5 回/h 換気から 0.3 回/h 換気程度にしようという動向がある。本システムは通気量に比例して断熱性能が向上するが、通気量にして約 10m³/h 程度で閾値に近づいてしまうため、各居室（5 部屋を想定）に配置

* IBEC 地域別断熱性能の暖房負荷計算結果（全館連続運転の場合）に解析対象面積 120m² を乗じた値。寒冷地（札幌）に関しては、等級 4 相当であるが、同じ住宅モデルを温暖地に適用しているため、温暖地の等級 4 越の参考値を示した。

すると仮定しても $50\text{m}^3/\text{h}$ 程度である。仮に常時 0.3 回/h 換気 ($96\text{m}^3/\text{h}$) を行うとしても、過換気とならない範囲で効果を発揮することができる。

室内外の差圧は 10Pa 程度を想定している。これは室内の浮力に対して約 $2\text{Pa}\sim 3\text{Pa}$ 程度の圧力が加わっても、通気が確実に行われることを期待して計画されている。室内外差圧は住宅の気密性能と局所換気利用に密接であり、解析結果から標準ケース (C 値 : $0.8\text{cm}^2/\text{m}^2$) で室内外差圧の平均値 7Pa 程度であることを確認しており、DI 窓の適用によりドアが開けられない等の致命的な問題はないと考える。

■ 引用文献 ■

- [1] 河原大輔、樋山恭助、加藤信介、山本哲也、二川智吏、朝岡幸康, “窓部におけるダイナミックインシュレーション技術の適用 第1報—熱箱及び実測による省エネ性能検証,” 空気調和・衛生工学会論文集 No.211, ,, 2014.
- [2] 樋山恭助, “窓サッシ部へのダイナミックインシュレーションの適用,” 日本建築学会環境系論文集 第79巻, 第699号, 2014.
- [3] M. S.-E. Imbabi, “A Passive-Active Dynamic Insulation System for All Climates,” *International Journal of Sustainable Built Environment* Vol.1, Issue 2, 2013.
- [4] B. N R., “Dynamic Insulation Systems and Energy Conservation in Buildings,” *ASHRAE Transactions* n 93, pp. p.447-466, 1987.
- [5] IEA, “Expert Guide RBE November, APPENDIX 8A,” *Annex44*, p. p.3, 2009.
- [6] 赤林伸一ら, “周辺に建築群のある独立住戸の風圧分布に関する風洞実験及び換気量測定,” 日本建築学会計画系論文集 第456号, 1994.
- [7] 赤林伸一ら, “接近流の気流性状が建物の換気、通風に及ぼす影響に関する研究(その1)立方体模型の開口部の風速と風圧変動性状に関する野外実験,” 一般社団法人 日本建築学会 研究報告集 計画系 (56) , 1985.
- [8] 国土交通省, “住宅事業建築主の判断の基準におけるエネルギー消費量計算方法の解説,” 2009. [オンライン]. Available: <http://ees.ibec.or.jp/documents/index.php>. [アクセス日: 22 10 2015].
- [9] L. Jankovic, *Designing Zero Carbon Buildings*, New York: earthscan, 2012.
- [10] The University of Wisconsin, “TRANFLOW manual,” 2009.
- [11] 廣田誠一, “住宅における各種気密ジョイント部の気密性能に関する研究(続報): その2 部位,部材の隙間特性の把握と既存測定データとの対比,” 一般財団法人 日本建築学会 学術講演梗概集 D-2, 2001.
- [12] 村上周三, 新建築学体系8 自然環境 第三章風論 (抜刷) , 彰国社.
- [13] A. Davenport, “The relationship of wind structure to wind loading,” 著: *Proc.1st Int. Conf.on Wind Effects on buildings and Structures* , 1965.
- [14] 財団法人建築環境・省エネルギー機構, “住宅事業建築主の判断の基準におけるエネルギー消費量計算方法の解説,” 2008.

第 05 章

住宅開口部への適用 防露性能の検証

第 5 章 ■ まえがき ■

1 章、2 章に述べたように、建物の省エネ化は必要である。そこでダイナミックインシュレーション技術に着目した。3 章と 4 章にその断熱性能と年間暖房負荷削減効果を示した。本章では、次の段階としてダイナミックインシュレーション技術を窓部に適用した事例のうち、防湿性能について取り上げ、検証を行う。

5.1 章では、防露検証の概要、5.2 章では、湿害リスク評価手法の概要、5.3 章実住宅による実験内容、5.4 章に実験結果と分析、5.5 章に結論、5.6 章に議論をまとめた。

5章 住宅開口部への適用 防露性能の検証

5.1章 概要

DI窓 [1] [2]は外窓と内窓で構成される二重窓に通気をするものであり*、中空層の温湿度や内窓の室内側の温湿度が通気に依存して変化する。内窓に排水口が設けられないために、結露が発生し排水されなければ、釘打ち箇所からの浸水・内窓周辺の腐食・衛生環境の低下が考えられる。結露が発生する箇所は冬季と夏季で異なる。冬季は第三種機械換気による室内減圧運用を想定し、内窓の室内側表面の温度低下による結露の懸念がある [3]。夏季は第二種機械換気設備による室内加圧運用を想定しているが、第三種機械換気設備による室内減圧運用を夏季にも行えば、内窓の中空層側表面・内窓の室内側表面で結露が考えられる。本論文では、結露の想定される周囲は高い相対湿度となることが予想できるため、湿害リスクとしてカビ・腐敗菌の増加リスク**、結露リスクの2種類を扱う。

湿害リスクの推定にあたり、評価部位の相対湿度は室内外温度差と移動係数（熱抵抗、透湿抵抗）により求めることができる。しかし、移流効果を含む部位は通気量だけでなく施工精度にも依存するため、解析による検証は難しい [4]。このため、実測に基づく評価方法が必要と考えられる。そこで本論文は、様々な建材に対応できるような温湿度を無次元化した指標を用いた湿害リスク推定手法を提案する。この無次元化は、少なくとも同じ型で同じ通気量の建材であれば同値を取ると仮定のもとに基づいている。

本論文の目的は、異なる気候条件を考慮した長期的（冬季・夏季）な湿害リスクを推定し評価することである。この推定にあたっては、まず実測により室内外の温湿度差を与えれば特定箇所の挙動が予想できる、線形性を仮定した普遍的な湿度指標 HI (Humidity Index) と温度指標 TI (Temperature Index) を求める。次に既往研究 [5]を参考に、任意の相対湿度の超過頻度を湿害リスクの尺度とする評価手法で、異なる気候を持つ地域の湿害リスクを検証する。本論では、湿害リスクのうち、相対湿度 80%をカビ・腐敗菌の増加リスクと 100%を結露リスクの閾値として取り上げる。

* DI窓は移流による冬季の熱損失を回収し、見かけ上の熱貫流率を低下させることを目的として、第三種機械換気の室内減圧運用を基本とする。また夏季においては壁体内・窓まわりにおける結露防止・日射による熱取得の削減を目的として第二種機械換気の室内加圧運用を基本とする。

** 住環境で確認される微生物の種類は限られる。それぞれ生育可能な相対湿度が異なり、中でも相対湿度が 70%程度で生育可能な乾性カビには重大な健康被害や毒性が報告されていない。カビの選定にあたり議論の余地はあるが、毒性のある青カビ (*Penicillium citrinum*) (生育可能な最低相対湿度 83%) を想定して、この発芽が困難となる相対湿度 80%を閾値とした。

5.2 章 実験概要

本節は、DI窓の室内減圧（冬季）・室内加圧（夏季）時の評価部位の温湿度を無次元指標から求め、任意の相対湿度の超過頻度を湿害リスクの尺度とした評価手法を提示する。図-5.2.1にDI窓の断面イメージを示す。湿度の無次元指標HI（Humidity Index）は分母を室内外の絶対湿度差、分子を測定点と室外との絶対湿度差、と定義する。この値に室内外の絶対湿度差を乗ずれば、対象の部位における絶対湿度を求める事ができる(Eq-(5.1))。同様に温度の無次元指標TI（Temperature Index）は対象の部位における温度を求めることができる(Eq-(5.2))。

$$HI = (X_i - X_{out}) / (X_{in} - X_{out}) \quad \dots\dots \text{Eq-(5.1)}$$

$$TI = (\theta_i - \theta_{out}) / (\theta_{in} - \theta_{out}) \quad \dots\dots \text{Eq-(5.2)}$$

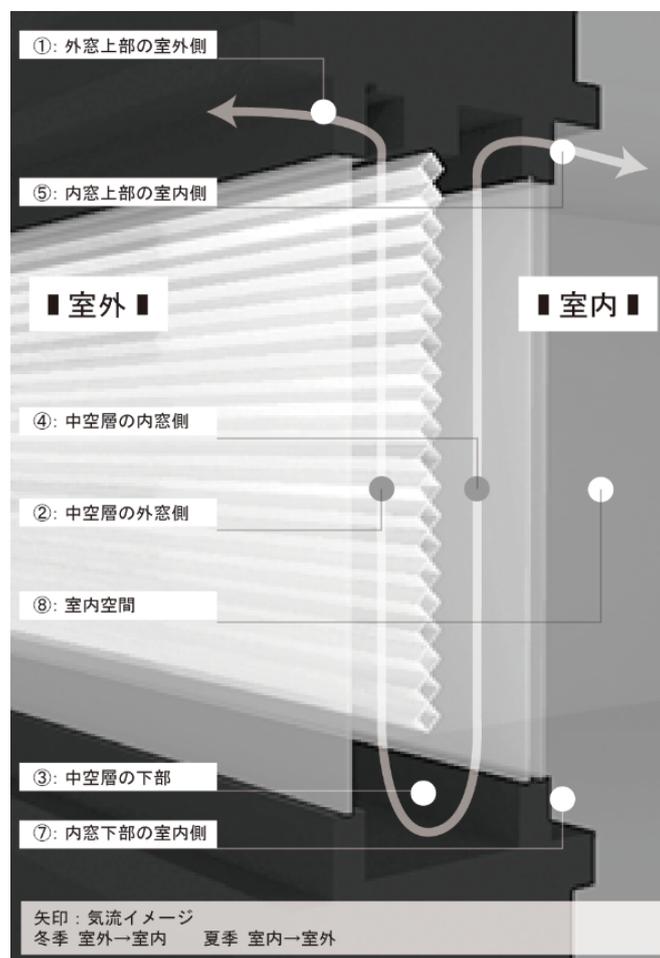


図-5.2.1 DI窓の断面と測定位置*

ここで X_i は評価部位 i における絶対湿度 [kg/kg']、 X_{out} は室外の絶対湿度 [kg/kg']、 X_{in} は室内絶対湿度 [kg/kg']、 θ_i は評価部位 i の空気温度 [°C]、 θ_{out} は室外空気温度 [°C]、 θ_{in} は室内空気温度 [°C] である。

* ⑥は図中には現れない、窓の縦枠の中央部である。

流路内部の結露判定・防露評価を行う方法は、既往研究 [5]を参考とし、相対湿度の閾値の超過頻度を防露性能評価の尺度とした。計算式は以下(eq-5.3)~(eq-5.8)である。eq-(5.3)は大気圧 $P[\text{Pa}]$ と任意点 i の絶対湿度 X_i より任意点 i の水蒸気圧 f_i を算出し、式(4)は Tetens (1930) の式より任意点 i の温度 t から飽和水蒸気圧 f_s の算出を示し、これらを元に任意点 i の相対湿度 φ を算出する Eq-(5.5)。なお、Eq-(5.1),Eq-(5.2)における $HI \cdot TI$ はそれぞれ、Eq-(5.3),Eq-(5.4)の未知数である X_i と t_i を計算するために用いる。

$$f_i = PX_i / (0.622 + X_i) \quad \dots\dots \text{Eq-(5.3)}$$

$$f_s = 6.1078 \times 10^{(7.5\theta_i / (\theta_i + 237.3))} \quad \dots\dots \text{Eq-(5.4)}$$

$$\varphi_i = 100 \times f_i / f_s \quad \dots\dots \text{Eq-(5.5)}$$

DI 窓の湿害リスク評価部位の相対湿度 φ は Eq-(5.1)から Eq-(5.5)より求められ、その密度関数を $f(\varphi)$ とすれば、区間 $[\varphi_c < \varphi]$ における累積頻度関数 $\text{Pr}(\varphi_c < \varphi)$ は Eq-(5.6)で表される。この時、 $f(\varphi)$ が正規分布とはみなせない場合があるため、標準正規分布変換してリスク評価に用いる Eq-(5.7), Eq-(5.8)。任意の閾値 φ_c (本検証では相対湿度 80%、100%)に対応した Z_c からの超過頻度を湿害リスク評価指標とする。

$$\text{Pr}(\varphi_c < \varphi) = \int_{\varphi_c}^{\infty} f(\varphi) d\varphi \quad \dots\dots \text{Eq-(5.6)}$$

$$Z_i = (\varphi_i - \bar{\varphi}) / \sigma_{\varphi} \quad \dots\dots \text{Eq-(5.7)}$$

$$\text{Pr}(Z_c < Z) = \int_{Z_c}^{\infty} g(z) dz \quad \dots\dots \text{Eq-(5.8)}$$

図-5.2.2 は北海道札幌の夏季(6月~8月)における湿害リスクの HI と TI の対応を示す。この図は、 $HI \cdot TI$ の値を 10[%]刻みで変化させた際の結露リスク(超過頻度 $\text{Pr}(100 = \varphi_i)$)を線形補間したグラフである。室内条件は温度が 27°C、相対湿度が 60% であり、外気条件は EA 気象データ (1991 年~2000 年) の気象データを用いた。評価部位の指標 $HI \cdot TI$ は 0%に近ければ、その特定部位の温湿度が室外の状態に、100%に近ければ室内の状態に近いことを示している。図-5.2.2 中の濃い部分は相対湿度が 100%の超過頻度を示している。このグラフより検討対象の北海道札幌の夏季の結露リスクは TI を 50%以上に保てば、結露リスクを 5[%]以下に維持することができる。

北海道札幌市の住宅に DI 窓を取り付け、冬季・夏季共にまず結露発生懸念箇所を実測期間の露点温度から検証した。次に図-5.2.1 に示す位置 (②~⑦) の HI と TI を実測値から求めた。夏季の実測期間は夜 8 時から次の日の夜 8 時までの 24 時間、室内加圧・減圧した 2 ケースで、冬季は夜 0 時から 6 時までの 6 時間、室内減圧条件で図-5.2.1 に示す中空層のブラインド有無の 2 ケースの実測を行った。詳細なスケジュール・実測条件を表-5.2.1 に示す。

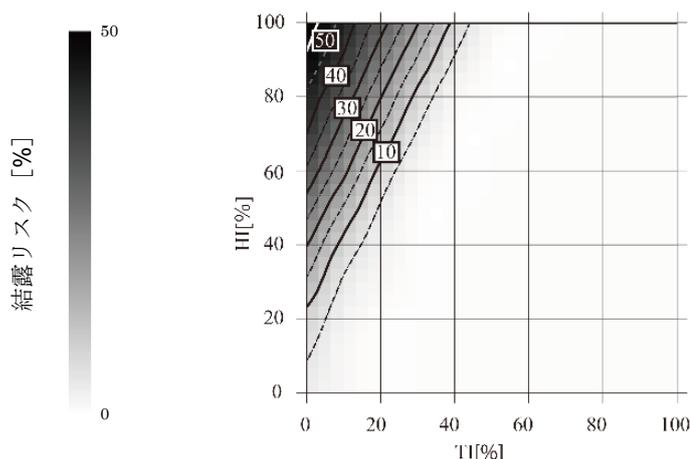


図-5.2.2 北海道札幌の夏季における結露リスクの条件

表-5.2.1 スケジュールと各実測条件

	冬季	夏季
換気モード	減圧	減圧、加圧
窓状態	ブラインド有 ブラインド無	ブラインド有
換気量	0.5 回換気相当	0.5 回換気相当
時期	2014 年 12 月 減圧 12/13 0:00~-(6 [h]) 減圧 12/14 0:00~-(6 [h])	2014 年 7 月 減圧 7/21 20:00~-(24 [h]) 加圧 7/23 20:00~-(24 [h])
サンプリングレート	1 [min]	1 [min]
室内湿度制御	加湿 (加湿器の自動制御により、 室内相対湿度 50%程度)	除湿 (エアコンの除湿モード による成行運転)

夏季・冬季の両ケースは、実測環境と同程度の環境にした半日程度の助走期間を設け、夜間の安定した時間帯のデータを用いた。室内加圧時の HI の算出にあたり室外湿度を測定するための図-5.2.1 中の①は室内加圧時に排気口となるため、室内空気との混合空気となる。このため加圧時の絶対湿度は実測日の札幌管区気象台の気象データを用いた。また気圧も同様である。評価要素の測定機器は SENSIRION 社の温湿度センサ SHT71 (精度±3 % (RH)、±0.5 °C) を用いた。この実測機器のサンプリングは 1 分周期とした。室内は冬季に加湿、夏季に除湿を行った。

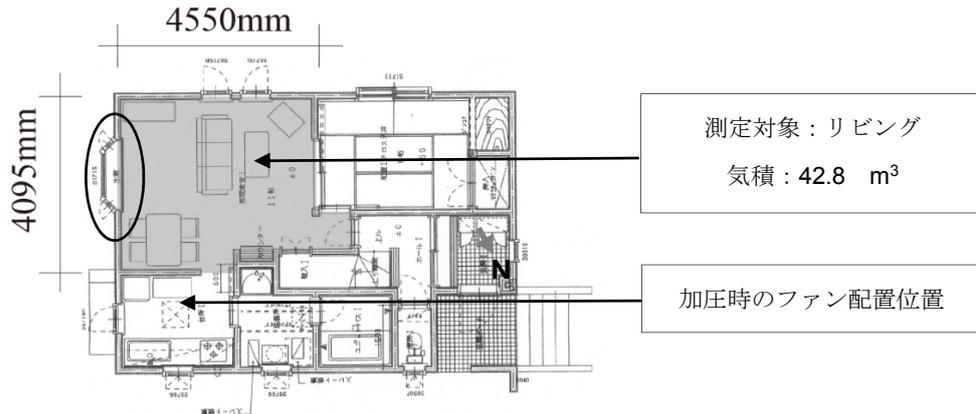


図 5.2.3 実在住宅の平面図*

実測は図-5.2.3に示す断熱改修を施した木造枠組壁構法の住宅のリビングの窓を対象とした。この住宅の断熱性能、及び気密性能は既往研究 [3]を参考にされたい。冬季の室内減圧時は2階の換気ファンから外気を導入し、夏季の室内加圧時はリビングのキッチンに換気ファンを設置し基礎から室内へ空気を導入した。

5.3 章 評価指標

5.3.1 夏季の湿度指標

DI 窓は主に寒冷地を対象として、窓から逃げる熱損失を減少させることを目的とすることから、室内減圧で運用される。この運用モードを夏季に適用した場合は、湿った外気が冷却された窓面に接触するため、結露の懸念がある。そこで、各部位の露点温度を測定し、異なる運転方法（加圧減圧）で最も湿害リスクの考えられる部位を検証した。

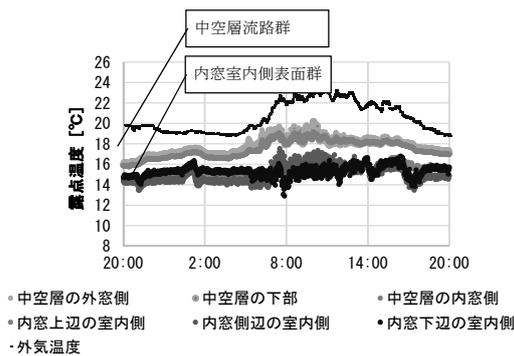


図-5.3.1 減圧時のDI窓まわりの露点温度

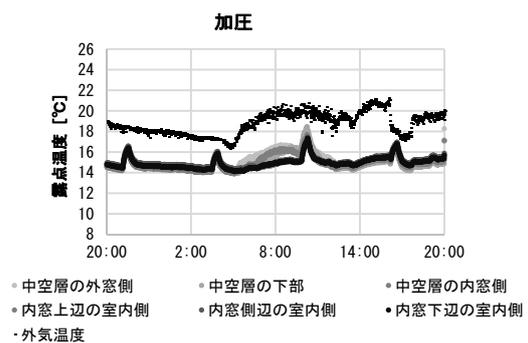


図-5.3.2 加圧時のDI窓まわりの露点温度

図-5.3.1, 図-5.3.2 に実測期間内での露点温度の各部位の推移を示した。図-5.3.1 の減圧時のDI窓まわりの露点温度は大きく分け、中空層流路群（中空層の外窓側、中空層の下部、中空層

* 図中の○に囲まれた位置にDI窓を設置した。

の内窓側)と内窓室内側表面群(内窓上辺、側辺、下辺)に分かれ、中空層流路群の方が内窓室内側表面群と比較して概ね 2°C 露点温度が大きいことから、湿害リスクが高いことが伺える。外気が最も低い温度である夜明け前に、中空層において外気温度と中空層流路群の温度差が最も小さくなる。一方、**図-5.3.2**に示した加圧時のDI窓まわりの露点温度は中空層流路群と内窓室内側表面群が近似している。この結果を受け、夏季の室内減圧時の中空層流路上において湿害リスクがあり、測定箇所の中でも最も露点温度が高かった中空層の下部のHIを湿害リスクの計算に用いる。なお、実測時、室内外に温度差が付けられなかったため、既往研究[3]より TI^* を決定した。

図-5.3.3と**図-5.3.4**に各ケース実施期間の日射量と外気温を示した。日較差は加圧時の方が大きく、減圧時で約 1°C 、加圧時で約 3°C であり、平均外気温は減圧時で 20.9°C 、加圧時で 25.7°C であった。

図-5.3.5、**図-5.3.6**に各ケースの室内差圧と外部風速を示した。DI窓の給排気量は室内外差圧が 10 Pa 時に対象となるリビングを 0.5 回/h 換気するよう、窓の上側框のポーラス材であらかじめ調整されている。実測時の減圧時の平均室内外差圧は -9.4 Pa 、加圧時の平均室内外差圧は 11.1 Pa と、 0.5 回/h 換気を想定した室内外差圧の 10 Pa を概ね満たしている。この際の減圧時の換気量は $22.3\text{ m}^3/\text{h}$ ($\sigma=\pm 2.9$)、加圧時は $24.0\text{ m}^3/\text{h}$ ($\sigma=\pm 3.0$)と、想定した換気量 $21.4\text{ m}^3/\text{h}$ (リビングの 0.5 回/h 換気量)よりも若干大きい換気量であった。

図-5.3.7から**図-5.3.10**に各ケースのHIを示した。図中に見られる室内絶対湿度の減圧・加圧時に一時的な増減は、室内湿度の制御機器(エアコン)の挙動によるものと考えられる。HIは夏季・冬季を問わず、値が $100[\%]$ に近づけば、部位 i の絶対湿度は室内の絶対湿度に近似し、 0 に近づけば室外の絶対湿度に近似する。減圧時には、概ね $40\% \sim 70\%$ 程度で分布し、日射と外部風速が大きい $8:00 \sim 14:00$ でのばらつきが大きい。日中は、日射により値が正しく測定できていないことを考慮し、日中のHIは参考値に留める。日中と比べて値のばらつきの小さい夜明け前では、減圧時の内窓の室内側において側辺、上辺、底辺の順でHIが大きく、加圧時は底辺、上辺、側辺の順で大きい。これは給気口による湿気流動が考えられるが、今後検討が必要である。また、加圧時では、窓表面・中空層のHIが 100% に近いため、湿度は室内湿度に近似している。なお、夏季のHIは、外乱の影響の小さい夜間 $2:00 \sim 3:00$ の結果より求めた。

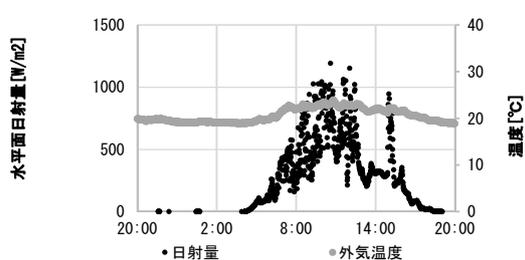


図-5.3.3 減圧時における日射量と外気温度

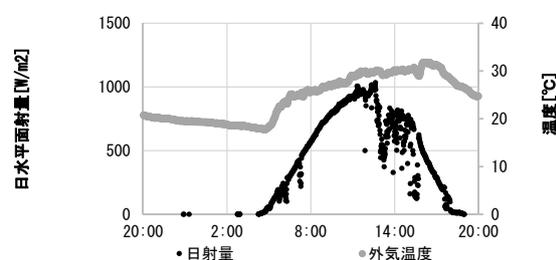


図-5.3.4 加圧時における日射量と外気温度

* 参考文献[3]より、外気温度が -10.6°C 、中空層内温度が -7.9°C 、室内環境温度が 20.8°C であった。室内環境温度は空気温度が放射温度と同じように室内を攪拌したため、空気温度として扱う。これより本論で扱う夏季の中空層底部におけるTIは、減圧時で 8.6% 、加圧時で 91.4% とした。

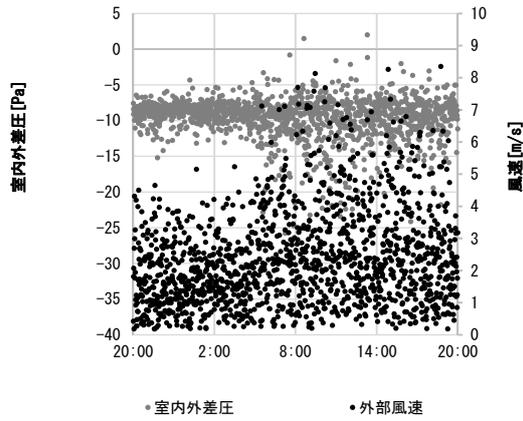


図-5.3.5 減圧時の室内差圧と外部風速

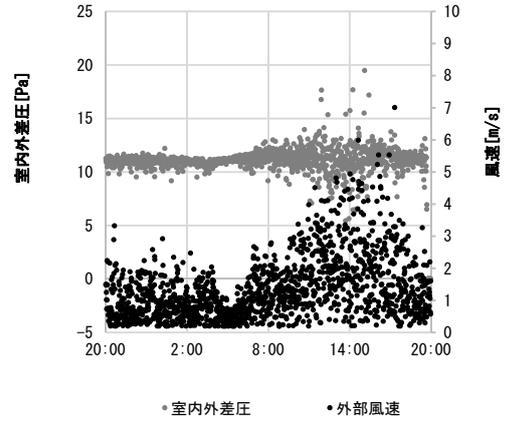


図-5.3.6 加圧時の室内差圧と外部風速

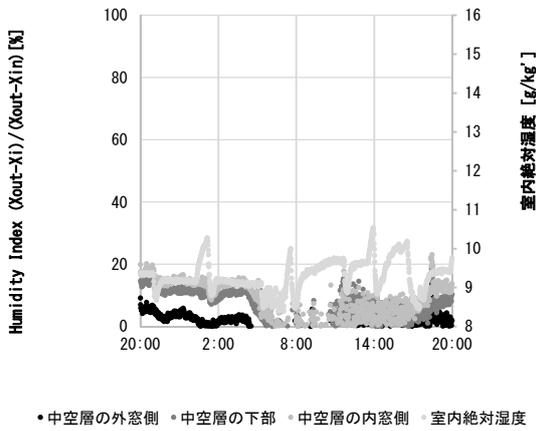


図-5.3.7 減圧時の中空層のHI

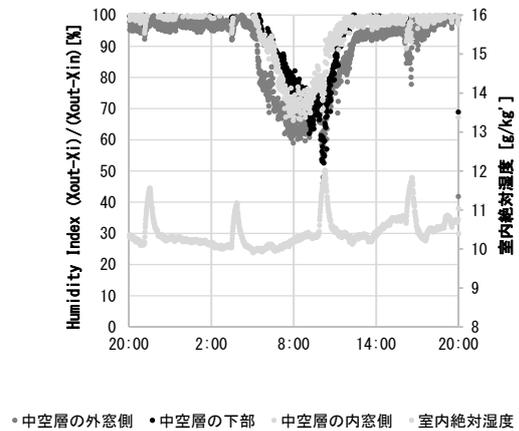


図-5.3.8 加圧時の中空層のHI

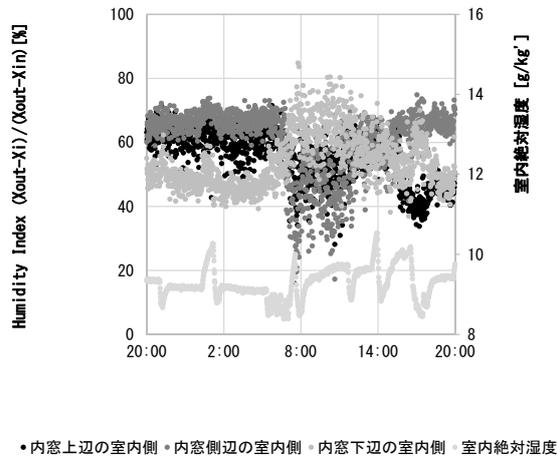


図-5.3.9 減圧時の内窓の室内側表面のHI

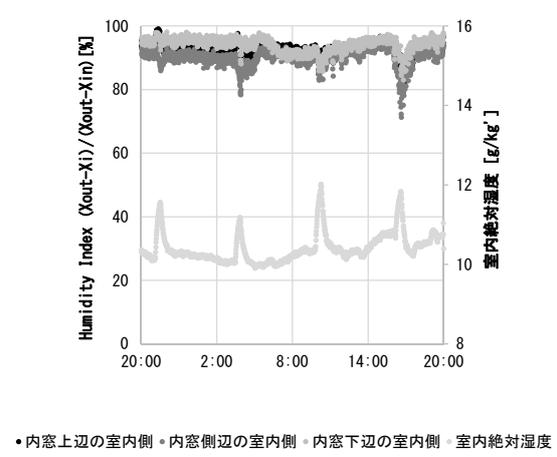


図 5.3.10 加圧時の内窓の室内側表面のHI

表-5.3.1 夏季実測値 HI の不確かさ分析と TI

	減圧	加圧
実施日・時間	7/22 2:00-3:00	7/24 2:00-3:00
絶対湿度差(札幌管区気象台-③)* (Xout-Xi) [g/kg']	0.3	2.5
絶対湿度差(札幌管区気象台-⑧) (Xout-Xin) [g/kg']	3.1	2.4
Humidity Index (Xout-Xi)/(Xout-Xin)[%]	10.4	100
絶対系統不確かさ B _{HI}	3.2	31.0
絶対偶然不確かさ S _{HI}	9.3	0.4
HI の 95% 包含度の範囲[%]	10.4±18.8	100.0±31.0
採用した TI 値 [%]	8.6	91.4

これら実測値の不確かさ分析**の結果を表-5.1.1に示す。絶対系統不確かさ B_{HI}は加圧時の方が大きく算出された。これは室内外の湿度差が減圧時と加圧時で 3.1 g/kg' と 2.4 g/kg' であることから、室内外の絶対湿度差に対し誤差割合が大きいことに起因すると考えられる。加圧時の HI は 100 %、減圧時は 10.4 % とした。95 % の包含度の範囲の HI は減圧時と加圧時でそれぞれ 10.4±18.8 %、100.0±31.0 % と誤差を考慮しても、室内加圧の防露性能の優位性が示されている。後節における湿害リスクの計算に用いる HI として、中空層の下部の平均値を用いた。

* 表中の番号 3,8 は、図-5.2.1 中の番号に対応する。札幌管区気象台はこの時刻の札幌管区気象台の測定値を意味する。

** 結果の不確かさの検証と代表 HI の決定について

結露リスクの推定に利用する HI・TI の測定誤差と信頼性を知るために結果の不確かさ分析が必要である。理想的環境下で行われるチャンバー実測と異なり、実環境下での実測は外乱要素が存在する。不確かさ分析は、“個々の測定に含まれる系統不確かさと偶然不確かさの推定値、及びそれらを結合した総括不確かさの推定値とその信頼度の近似値を評価することである”とされるので、本検証での外乱要素は偶然不確かさに包含される。結露リスクのある夜間に測定した HI の、95%信頼度での不確かさ区間の総括不確かさを U₉₅ とし、絶対偶然不確かさを S_{HI}、複数の系統不確かさを合成した絶対系統不確かさを B_{HI} とすれば、Eq-(5.6) のように示せる。これら S_{HI}、B_{HI} は伝播の式により Eq-(5.7) と Eq-(5.8) で示される。なおこの系統不確かさの算出時に用いるパラメータは、温度、湿度、気圧の 3 要素(k=3)とした。

$$U_{95} = 2 \sqrt{[(B_{HI}/2)^2 + S_{HI}^2]} \quad \text{Eq-(5.6)}$$

$$B_{HI} = \sqrt{\sum_{j=1}^k (\theta_j B_j)^2} \quad \text{Eq-(5.7)}$$

$$S_{HI} = \sqrt{\sum_{j=1}^k (\theta_j S_j)^2} \quad \text{Eq-(5.8)}$$

ここで、j は要素数、 θ_j は HI の偏微分で表現されるパラメータ j の結果への感度係数 [-] であり、B_j は系統不確かさ、S_j は偶然不確かさ [-] である。

5.3.2 冬季の湿度指標

DI 窓は中空層にブラインドを有する。既往研究 [3]では冬季の実測によりブラインドの有無で断熱性能が異なることを報告した。ブラインドの有無により部位の湿度性状・温度性状が異なることが予想できるため、検討ケースとしてブラインドを有するケースとブラインドの無いケースの計 2 ケースの検証を行った。室内は相対湿度が概ね 50%になるよう加湿器の湿度制御を利用した。夏季の測定と同様、湿害リスクの高い部位の特定のため、各部位の露点温度を測定した。

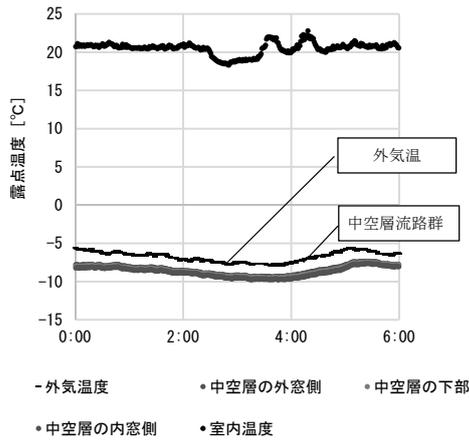


図-5.3.11 ブラインド有の中空層内の露点温度

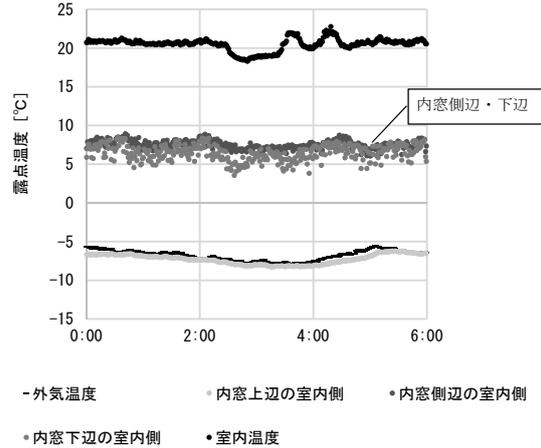


図-5.3.12 ブラインド有の内窓の室内側露点温度

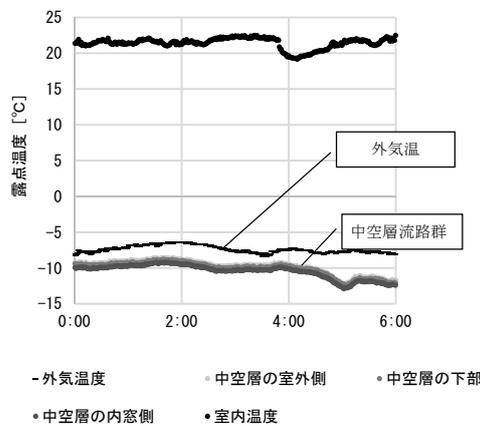


図-5.3.13 ブラインド無の中空層内の露点温度

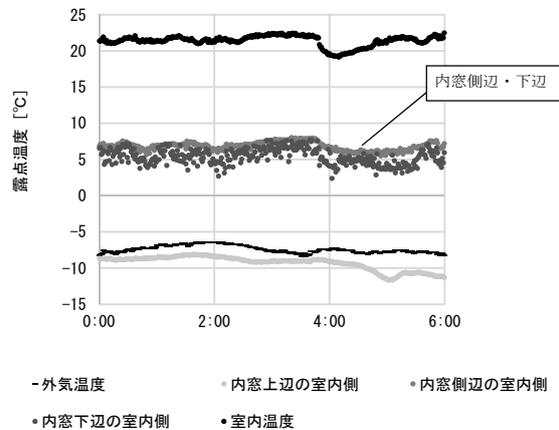


図-5.3.14 ブラインド無の内窓の室内側露点温度

図-5.3.11 から図-5.3.14 に夜間 0 時から 6 時までの 6 時間の各部位の露点温度を示す。両ケース共通の傾向として、中空層流路部の露点温度が内窓表面室内側部の露点温度に比べ低いことから、中空層内での結露発生は考えにくいことが確認できる。室内空気と接触する内窓下部と側辺の窓表面の露点温度が大きく、結露の発生が懸念される。室内側内窓上辺は導入した外気の吹き出し口 (図-5.2.1 中の⑤) であるため、下辺・側辺と比べ露点温度が中空層流路部に近い値となった。

表-5.3.2 冬季実測値 HI の不確かさ分析

	ブラインド有	ブラインド無
実施日・時間	2014 12/13 2:00-3:00	2014 12/14 2:00-3:00
絶対湿度差(①-⑦) * (Xout-Xi) [g/kg]	4.6	4.5
絶対湿度差(①-⑧) (Xout-Xin) [g/kg]	5.8	6.1
Humidity Index (Xout-Xi)/(Xout-Xin)[%]	79.5	73.6
絶対系統不確かさ BHI	8.6	8.0
絶対偶然不確かさ SHI	0.4	0.2
HI の 95%包含度の範囲[%]	79.5±8.6	73.6±8.1
絶対系統不確かさ BT	2.3	2.1
絶対偶然不確かさ ST	0.1	0.1
TI の 95%包含度の範囲[%]	74.0±2.3	62.0±2.2

表-5.3.2 に各ケースと実測結果、HI と TI の算出値をまとめた。

図-5.3.15 と図-5.3.16 に室内外差圧と外部風速を示す。外部風速は測定器の凍結により測定不可能であったため、札幌管区気象台の測定値から実測日の 10 分データを図-5.3.15 と図-5.3.16 中に配置した。測定時の平均外気温は期間平均で約-7 °C、であった。実測時の減圧時の平均室内外差圧はブラインド有で-10.2 Pa、ブラインド無で-9.9 Pa と目標値である室内外差圧-10 Pa を概ね満たしており、ブラインド有で 23.4 m³/h ($\sigma = \pm 0.3$)、ブラインド無で 23.1 m³/h ($\sigma = \pm 0.2$)であった。

図-5.3.17, から 図-5.3.20 に各部位の HI, TI を示す。室内減圧により中空層は乾燥外気が取り込まれるため、中空層の HI は低い値となる。湿害リスクの最も高い部位（内窓側辺の室内側）の 95%包括度の範囲の HI はブラインド有、無で 79.5±8.6 %、73.6±8.1 %、TI は 74.0±2.3 %、62.0±2.2 %であり、ブラインド有無による有意な差が確認できた。後節における湿害リスクの計算で用いる HI, TI として内窓側辺の室内側の平均値を用いた。

* 表中の番号①、⑦、⑧は、図 1 中の番号に対応する。

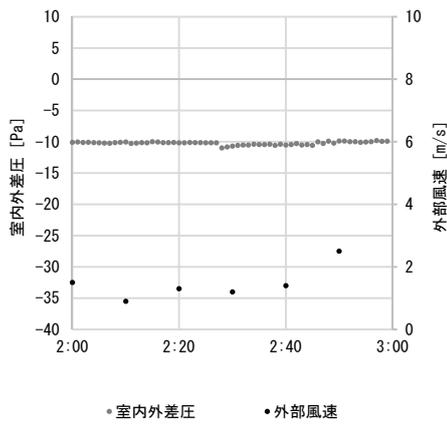


図-5.3.15 ブラインド有の実測環境

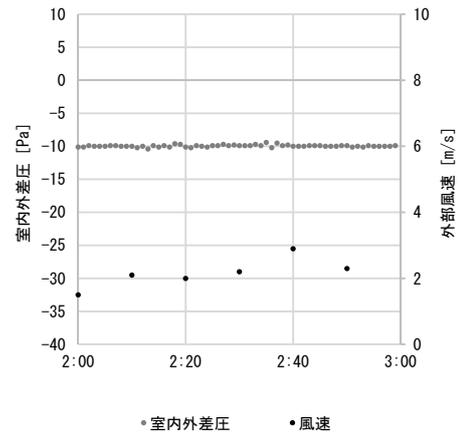


図-5.3.16 ブラインド無の実測環境

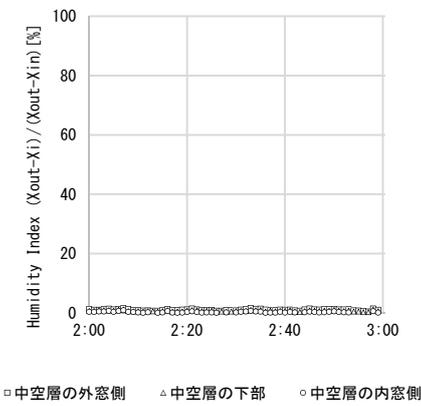


図-5.3.17 ブラインド有の中空層 HI

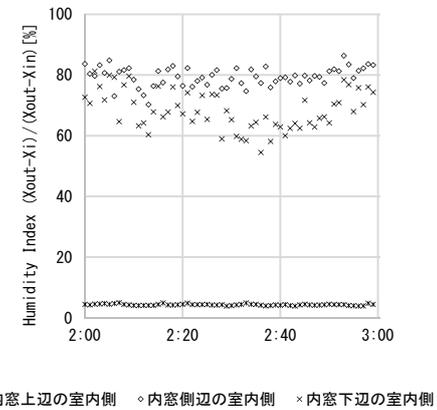


図-5.3.18 ブラインド有の内窓の室内側 HI

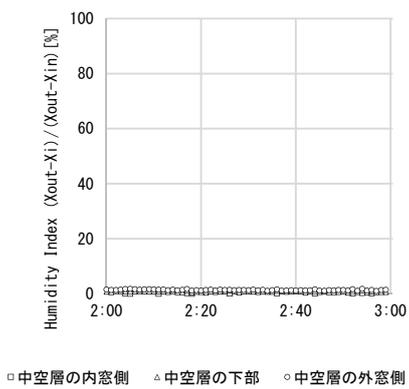


図-5.3.19 ブラインド無の中空層 HI

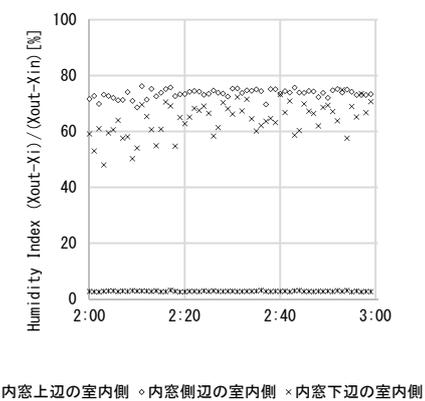


図-5.3.20 ブラインド無の内窓の室内側 HI

5.4 章 実験結果

5.4.1 累積頻度分布

本節では、前節（5.2.1 節及び 5.2.2 節）の HI と TI から、湿害リスク懸念箇所における絶対湿度と空気温度を算出し、5.2 節で示した閾値の超過頻度により湿害リスクを評価した。評価箇所として、夏季は中空層の下部を、冬季は内窓側辺の室内側を分析の対象とする。

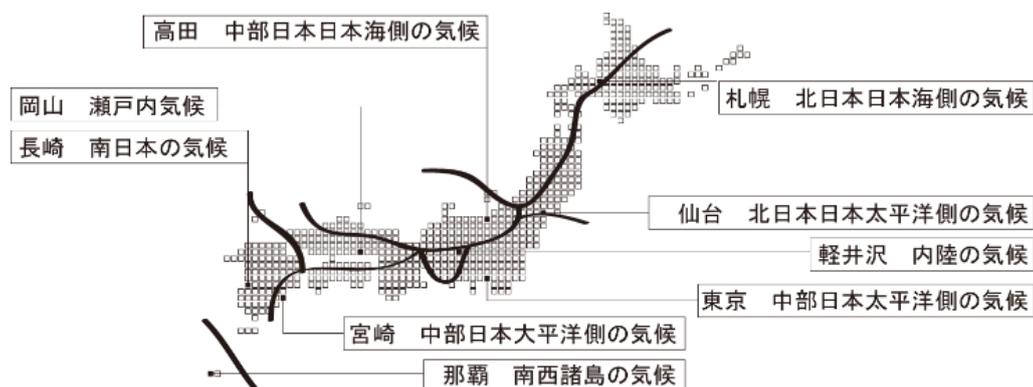


図-5.4.1 検討する異なる気候区分の地域

検討地域は、図-5.4.1 に示すような北日本・日本海側の気候、北日本・太平洋側の気候、中部日本・日本海側の気候、中部日本・太平洋側の気候、内陸の気候、瀬戸内の気候、南日本の気候、南西諸島の気候を日本の気候区分 [6] を参考として選定した。室外条件は EA 気象データ（1991~2000 年）を用いた。計算に用いる室内条件としては、参考文献 [7] のエネルギー消費量計算のための与条件から、夏季を想定した室内温度 27 °C、室内湿度 60 %、冬季を想定した室内温度 20 °C、室内相対湿度 60 %とした。

5.4.2 Z 分析

図-5.4.2～図-5.4.5 に日本各地における夏季(6 月～8 月)と冬季(12 月～2 月)の相対湿度頻度と累積を、表-5.4.1 に夏季の湿害リスクを示す。図中で示されるデータ区間は相対湿度である。減圧時と加圧時では、相対湿度の頻度に大きな差が見られ、加圧時であれば、中空層底部の相対湿度は 60.9~63.9 %を示し、カビの発育が困難な相対湿度とされる 60 % [8] 程度を維持していることから、いかなる地域であっても湿害リスクが低いことが伺える。一方減圧時では、減圧での運用の可能な地域もあるが、中空層底部の相対湿度の期間平均値が 89.8 %の地域(軽井沢)がある。降雨量の多い地域として知られる北日本・日本海側の高田は、中空層内相対湿度 100 %の時間の年間に占める割合が 7 %であり、札幌(1 %)、仙台(6 %)と比べ、日本海側の地域への適用は結露リスクが高いことが伺える。また、冷涼な環境として知られる軽井沢では 20%と、選定地域の中で最も高い値を示した。この結露リスクは、東京・札幌・岡山・那覇が最も低く 1 %、次いで長崎が 2 %であった。

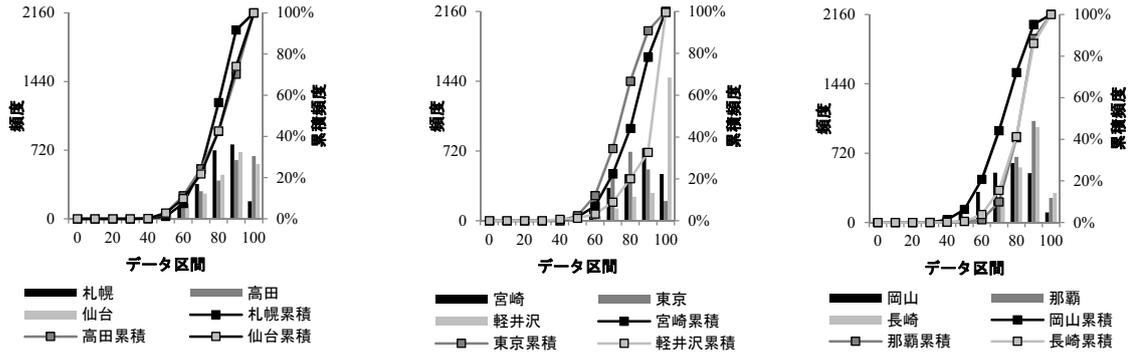


図-5.4.2 夏季 減圧運転時、ブラインド有の相対湿度の累積頻度分布

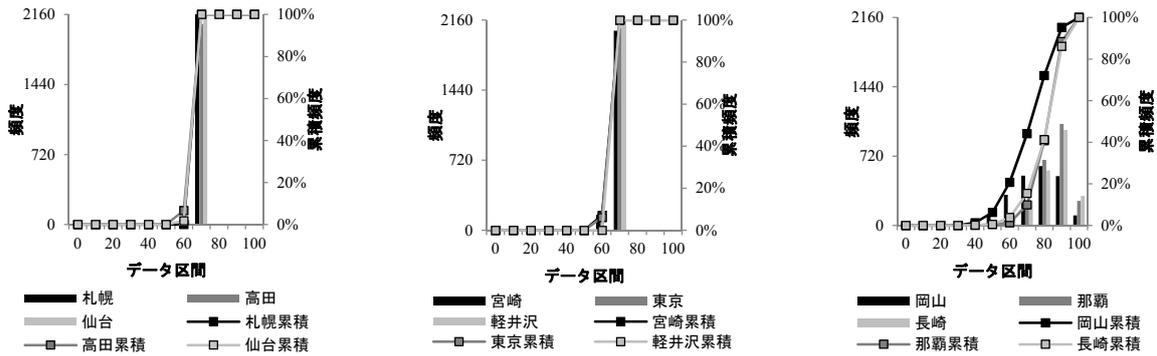


図-5.4.3 夏季 加圧運転時、ブラインド有の相対湿度の累積頻度分布

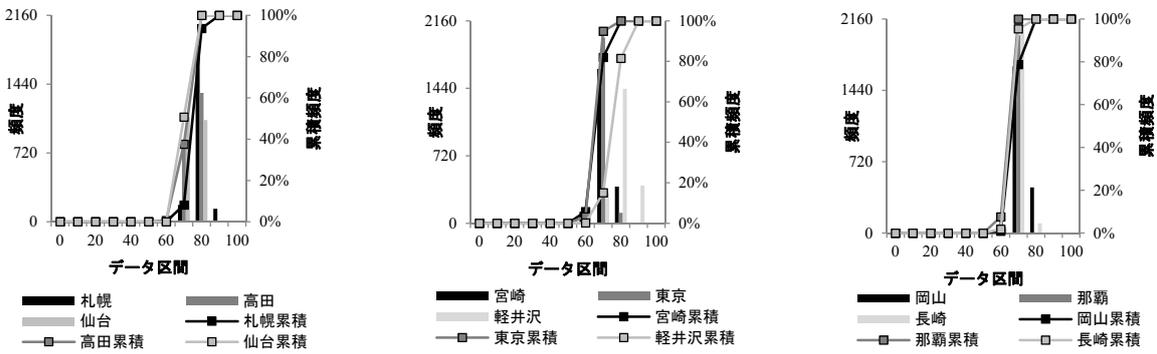


図-5.4.4 冬季 減圧運転時、ブラインド有の相対湿度の累積頻度分布

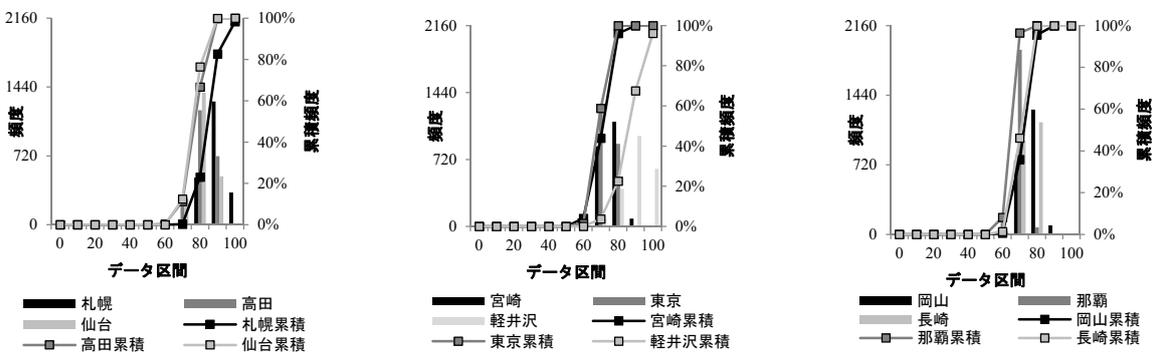


図-5.4.5 冬季 減圧運転時、ブラインド無の相対湿度の累積頻度分布

表-5.4.1 夏季の運用方法別の湿害リスク

	減圧			加圧		
	期間平均 RH [%]	RH >80%	RH =100%	期間平均 RH [%]	RH >80%	RH =100%
東京	74.5	32 %	1 %	61.9	0 %	0 %
札幌	76.9	38 %	1 %	63.7	0 %	0 %
仙台	79.8	49 %	6 %	62.9	0 %	0 %
高田	79.9	50 %	7 %	62.3	0 %	0 %
宮崎	79.3	48 %	4 %	61.6	0 %	0 %
軽井沢	89.8	79 %	20 %	63.9	0 %	0 %
岡山	71.0	24 %	1 %	61.5	0 %	0 %
長崎	80.3	51 %	2 %	61.6	0 %	0 %
那覇	80.7	54 %	1 %	60.9	0 %	0 %

表-5.4.2 冬季のブラインド有無による湿害リスク

	ブラインド有			ブラインド無		
	期間平均 RH [%]	RH >80%	RH =100%	期間平均 RH [%]	RH >80%	RH =100%
東京	65.2	0 %	0 %	68.8	1 %	0 %
札幌	74.6	6 %	0 %	84.4	76 %	1 %
仙台	69.7	0 %	0 %	76.1	22 %	0 %
高田	70.4	0 %	0 %	77.0	29 %	0 %
宮崎	66.4	0 %	0 %	70.3	5 %	0 %
軽井沢	75.5	18 %	0 %	85.9	76 %	5 %
岡山	67.2	0 %	0 %	71.9	5 %	0 %
長崎	66.0	0 %	0 %	69.9	1 %	0 %
那覇	63.0	0 %	0 %	64.0	0 %	0 %

表-5.4.2 に冬季の湿害リスクを示す。湿害リスク懸念箇所である内窓側辺の室内側の HI はブラインド有無による有意な差があるとは言えないが、TI の差は大きい。この理由としてはブラインド有のケースとブラインド無のケースの中空層内部の気流性状が起因すると考えられるが、この現象の解明に関しては今後の課題としたい。湿害リスク評価の結果として、ブラインド無の場合であると気温が低い地域(札幌・軽井沢)で相対湿度 80 %以上の超過確率が 76 %となり、地域ではカビ・腐食菌の増加リスクが懸念される。一方でブラインド有の運用であると、結露リスクはないものの軽井沢・札幌地域でカビ・腐食菌の増加リスクが大きい傾向となる結果となった。

5.5 章 結論

本検証では、実測値より求める温湿度の無次元指標を用いた、様々な建材に対応できる湿害リスク評価を提案した。具体的な事例として、二重窓に通気を行うダイナミックインシュレーション窓（DI窓）を取り上げ、湿害リスク（カビ・腐食菌の増加リスクとして相対湿度 80%、結露リスクとして相対湿度 100%を閾値とした超過頻度）を日本各地域で長期（夏季、冬季）の検証を行った。これにより、以下の知見を得た。

- ・ 第三種換気設備が設置されている場合において、露点温度の測定から夏季はDI窓の中空層の下部、冬季は内窓側辺の室内側で結露の懸念があることを確認した。
- ・ 夏季(8月~9月)に中空層の下部の湿害リスク検証を行い、第二種機械換気設備による加圧時の期間平均相対湿度は、日本各地域で 60.9~63.9%に維持できるため、湿害リスクは低い。一方で夏季の第三種換気設備による減圧時では、加圧時と比べ期間平均相対湿度が 74.5~89.8%と湿害リスクが大きい傾向がある。
- ・ 超過頻度を指標とするリスク評価を行い、夏季において内陸の気候以外の地域は、室内を減圧したとしても結露リスク（100%）は最大値で 7%であった。一方で、内陸の気候は 20%と結露リスクが大きく、夏季に冬季と同様に減圧が可能な地域があることを確認した。
- ・ 冬季(12月~2月)において、内窓側面の室内側表面の湿害リスク検証を行い、ブラインドの有無による違いを示した。
(ブラインド有:63.0~75.5%、ブラインド無:64.0~85.9%)

5.6 章 議論

本論文で提案した湿害リスクの計算において、室内を一定の環境で算出をしている。居住者の生活リズムや流入温度に影響を与える日射などの外乱を考慮すると、湿害リスクに影響が無いとは言えない。加えて、湿害は高い相対湿度の継続により表面化することが知られているため、これらに関しては今後の検討を予定している。

また、HI・TIの分布の根拠について、中空層の流れ場の検証は本章では触れていない。今後数値シミュレーションを行い、DI窓内部の熱輸送や湿気輸送を評価する必要がある。

■引用文献■

- [1] K. H. S. K. Daisuke K, “Low-Energy Effectiveness of Dynamic Insulation System for Windows,” Indoor Air2014, 2014.
- [2] 河原大輔、加藤信介、樋山恭助、八重樫彩、大浦豊、手塚純一, “住宅開口部へのダイナミックインシュレーションの適用(その 14)：窓部にダイナミック・インシュレーションを適用した改修住宅の詳細と性能評価試験の概要,” 日本建築学会学術講演梗概集環境Ⅱ, 2013.
- [3] 河原大輔, “窓部におけるダイナミックインシュレーション技術の適用 第 1 報—熱箱及び実測による省エネ性能検証,” 空気調和・衛生工学会論文集 No.211, 2014.
- [4] 伊庭千恵美, “空気移動を考慮した断熱外壁の熱・湿気性状に関する基礎実験:その 1 隙間性状の異なる単純漏気壁体モデルでの検討,” 学術講演梗概集 D-2, 2003.
- [5] 斎藤宏昭, “壁内相対湿度の発生頻度を考慮した温暖地向け木造住宅用簡易防露設計法の開発,” 日本建築学会環境系論文集,第 604 号, 2006.
- [6] 松本淳, 新詳高等地図初改訂版, 帝国書院編集部編, 2013.
- [7] 一般社団法人 日本サステイナブル・ビルディング・コンソーシアム, “住宅事業建築主の判断の基準ガイドブック,” 28 02 2015. [オンライン]. Available: http://ees.ibec.or.jp/documents/img/guide200907_all_ver_2.2.pdf.
- [8] 文部科学省, “カビ対策マニュアル基礎,” 28 02 2015. [オンライン]. Available: http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/sonota/003/houkoku/08111918/002.htm.

第 6 章 ■ まえがき■

1 章、2 章に述べたように、建物の省エネルギー化は必要である。本章では、ダイナミックインシュレーション技術を窓部（DI 窓）に適用した事例のうち、人体快適性について取り上げ、検証を行う。

6.1 章では、人体快適性の検証を行う研究背景、6.2 章では、実在住宅に DI 窓を設置し、室内空間に人体形状と発熱を模したサーマルマネキンを設置した快適性検証を行い、その概要と実測結果を示した。6.3 章では、実住宅による実験内容と結果を踏まえ、CFD と人体と同じように振る舞う精密人体モデルを提案し、快適性に影響を与える要素の感度分析を行った結果をまとめた。また 6.4 章に結論を、6.5 章議論を示した。

6.章 住宅開口部への適用 室内温熱環境検証

6.1 章 概要

建築物の省エネ化は世界的な課題であり、建築外皮の断熱化はこの課題解決に重要である。そこで著者らは見かけの断熱性能を向上させるダイナミックインシュレーション (DI: Dynamic Insulation) 技術に着目をした。この DI 技術は熱損失と逆方向の移流により外表面の温度勾配を小さくする、すなわち熱損失を小さくすることを基本とする。著者らは建築外皮の中で熱損失の大きい開口部に DI 技術を適用した DI サッシ [1]、及び DI 窓 [2]*を開発し、これまでにその断熱性能や導入外気の昇温を報告した [3]。

しかしながら本技術の住宅への導入は、DI 技術により若干昇温するとは言え、室内環境への影響がないとは言えない。DI 技術の既往研究 [4]では、外気導入に伴う室内壁面温度の低減による快適性の低下が報告されている。これは窓前後に於ける熱移動特性が異なることに起因する。実測例 [3]の熱流束を室内外の環境温度差で除した断熱性能で示せば、建築全体としての断熱性能は $0.77\text{W/m}^2\text{K}$ であり、居室から見た際の断熱性能は $2.0\text{W/m}^2\text{K}$ と室内から見れば断熱性能が相対的に悪くなる傾向が見られる。本論文では、この特性の快適性に対する感度を明らかにする。室内快適性を左右する影響要素は、窓本来のコールドドラフト [5]に加え、表面温度低下に起因する冷放射と換気口からの対流による冷却効果が考えられ、これらがどのような時に、どれだけ快適性に影響するのかを検証する必要がある。

そこで本論文は、実際に DI 窓が取り付けられた住宅を対象として、人体形状をした発熱モデル (サーマルマネキン) 用いて ISO-14505-2 : 2006 で定義される等価温度(ET: Equivalent Temperature)で DI 窓の冷却効果を評価した。ドラフトの影響範囲を考慮して、換気種類と評価対象からの距離を評価変数とした。さらに欧州標準化委員会(CEN:Comité Européen de Normalisation)の技術委員会(TC:Technical Committee)の CEN-report 1752 [6] に記載されるドラフト率(Draft Rating) **から対流由来の冷却効果の検証を行った。これら実測検証に加え、サーマルマネキンの Comfort 制御のように振る舞う境界条件を与えた人体生理モデルを CFD と連成し、人体表面の顕熱放熱量の内の対流・放射分離によるドラフトの影響評価、ならびに DI 窓の導入空気と窓・窓枠表面温度の室内温熱環境形成寄与率(CRI: Contribution Ratio of Indoor climate)による冷却影響評価を行い、室内温熱環境への寄与を評価した。

* ダイナミックインシュレーション窓とエアフローウィンドウは、窓内部通気という点では同じであるが、その目的が異なる。エアフローウィンドウは夏期の日射取得を削減が主な目的であり、ダイナミックインシュレーションは適用表面において、熱取得・熱損失する環境との温度勾配を小さくすることで熱取得・熱損失を減少させることが目的である。

** 欧州標準化委員会(CEN:Comité Européen de Normalisation)の技術委員会(TC:Technical Committee)により作成された CEN-report 1752 に記載されているドラフト率(DR: Draft Rating)は、fanger らの定義する不満足者率(PD: Percent dissatisfied)と同義である。

6.2 章 実測による快適性検証

6.2.1 概要

等価温度の計測にサーマルマネキン（以下マネキン）を用いた。検証に用いたマネキンは全身を 16 部位に分割されており、部位別に制御が可能である。（[図-6.2.1](#)、[図-6.2.2](#)、[図-6.2.3](#)）マネキンの発熱・表面温度制御モードは以下の Fanger の熱中立方程式に基づいて制御される、Comfort 制御を採用した。

$$\Theta_{\text{surface},i} = 36.4 - 0.054Q_{t,i} \quad \text{Eq-(6.1)}$$

ここで、 Θ_{surface} はマネキン表面温度[°C]、 Q_t はマネキン表面から環境へ損失する熱流束[W/m²]、 Θ_{surface} はマネキン表面温度[°C]、小文字 i は人体の特定部位を示す。

検証で用いる等価温度は、ISO14505-2 : 2006 で定義する方法によるもので、“マネキンの熱損失と同等の熱損失を生じる均一温熱環境の作用温度”である [7]。本検証ではドラフトの影響が発生しやすい部位を特定するため、まず裸体、すなわち表面から環境までの熱伝達率は人体表面の熱伝達のみとして実験を実施した。その後、着衣を考慮し、皮膚表面から環境までの標準の熱伝達は、固体表面からの総合熱伝達の他、着衣の熱伝達抵抗を考慮したもので行い、この影響の度合いを精査した*。評価指標としての等価温度は以下の式で算出される。

$$\Theta_{\text{eq},i} = \Theta_{\text{surface},i} - Q_{t,i} / \alpha_i \quad \text{Eq-(6.2)}$$

ここで Θ_{eq} は等価温度[°C]、 α は静穏環境下における総合熱伝達率[W/m²K]である。

表-6.2.1 裸体時の総合熱伝達率[W/m²K]

※全身は 8.00[W/m²K]

表-6.2.1 と表 6.2.2 の総合熱伝達率の算出に当たり、裸体ケースと着衣ケースを 5 回ずつ試行した平均値を示す。

左足	右足	左脛	右脛	左腿	右腿	尻	頭
9.36	9.45	9.28	8.96	8.48	8.22	7.16	7.15
左手	右手	左腕	右腕	左肩	右肩	胸	背中
9.19	10.17	8.48	8.26	7.92	7.31	6.79	7.23

表-6.2.2 着衣時の総合熱伝達率[W/m²K]

※全身は 4.51[W/m²K]

左足	右足	左脛	右脛	左腿	右腿	尻	頭
7.06	7.13	5.10	5.03	5.21	4.69	3.13	3.87
左手	右手	左腕	右腕	左肩	右肩	胸	背中
7.24	8.70	4.50	4.90	4.01	4.11	3.33	3.72

* 0.6clo 相当（着衣：長袖ハイネック、ズボン、靴下、パンツ、毛髪）



図-6.2.1 サーマルマネキンの外観

左半分は着衣時、右半分は裸体時のマネキンの外観である。着衣と裸体の区別は、裸体時の気流感度が大きいいため、ドラフトの影響評価に用いる。また着衣は日常生活を考慮した快適性の評価に用いる。



図-6.2.2 実測風景

実測は北海道札幌市の住宅を断熱回収した場所で行った。位置は床面に張り付けたテープで、マネキンの姿勢は糸を垂らすことでどのケースも同じ姿勢での検証を行った。

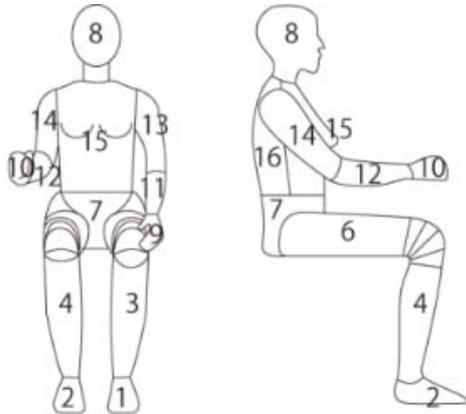


図-6.2.3 マネキンの部位

サーマルマネキンは分割数によりいくつかの種類に分けられる。本検証で用いたサーマルマネキンは、生産技術研究所 加藤研究室所有の 16 部位分割のものを使用した。

各部位名称：

- 1:左足,2:右足,3:左下腿部,4:右下腿部,5:左大腿部,6:右大腿部,7:臀部,8:頭部,9:左手,10:右手,11:左前腕部,12:右前腕部,13:左上腕部,14:右上腕部,15:胸部,16:背中

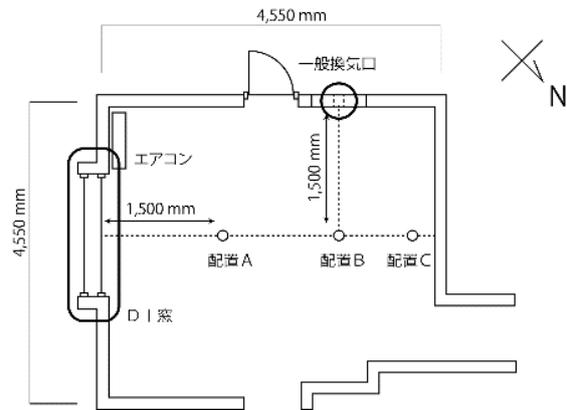


図-6.2.4 平面図と配置場所

マネキンは窓方向を向いた座位として設置をした。設置 A は窓面より 1.5m, 設置 B は窓面より 3.0m, 設置 C は窓面より 4.5m 離れた位置にある。

等価温度は静穏環境下における熱伝達率で人体からの頭熱損失量を除しているため、ドラフトの大きい場合は頭熱損失量が増加することで等価温度が低下する。またドラフトが小さい場合

には顕熱損失量が減少するため等価温度は大きくなる。等価温度での評価にあたり使用した総合熱伝達率を表-6.2.1,表-6.2.2 に示す。

表-6.2.3 実証実験住宅の仕様

改修部位	構成
外壁面	高性能グラスウール 16K 89 mm (既存) + 押出法ポリスチレンフォーム 3種 70 mm U 値 : 0.185 W/m ² K
天井面	ブローイング 18K 300 mm (既存) U 値 : 0.130 W/m ² K
床面	高性能グラスウール 16K 235 mm (既存) U 値 : 0.152 W/m ² K

表-6.2.4 実証試験住宅の改修前後の断熱性能と気密性能

	改修前	改修後
Q 値	1.80 W/m ² K	1.24 W/m ² K
C 値	3.0 cm ² /m ²	0.8 cm ² /m ²

実証試験住宅は約 20 年の住宅を断熱改修し、DI 窓を適用したものである。表-6.2.3 と表-6.2.4 に改修後の住宅の仕様と改修前後での Q 値（算出値）と C 値（実測値）を示した。換気は二階に取り付けたファンで第三種機械換気とし、DI 窓による換気が、リビングを 0.5 回/h 換気程度確保できるものを使用した。詳しくは参考文献 [2] を参照されたい。

表-6.2.5 スケジュール

配置	配置 B	配置 A	配置 B	配置 C	配置 B
換気	無	DI	DI	DI	一般
通気量	-	0.5 回/h			
実測日 (時刻)	1/15 (14:00-)	1/16 (7:00-)	1/16 (10:00-)	1/16 (15:00-)	1/16 (13:00-)

配置	配置 B	配置 A	配置 B	配置 C	配置 B
換気	無+	DI+	DI+	DI+	一般+
通気量	-	0.5 回/h			
実測日 (時刻)	1/15 (10:00-)	1/17 (17:00-)	1/17 (10:00-)	1/17 (16:00-)	1/17 (13:00-)

図-6.2.4 に DI 窓からの距離（配置 A : 1.5m, 配置 B : 3m, 配置 C : 4m）でそれぞれ測定を行った。また配置 B に限り、DI 窓と同量の通気をする一般的な換気口（一般換気口）と通気を

行わないケース（換気無）の測定を行った。これに加えマネキンは裸体と着衣の 2 水準の検証を行い、総計 10 水準の検討を行う（表-6.2.5）*。なお表-6.2.5 中の”+”は着衣があることを示す。なお、各実測の際にマネキン近くの鉛直方向 1.1m の位置において、風速と温度を測定した。

6.2.2 検証

表-6.2.6 実測項目と機器の詳細

		測定機器	サンプリング周期
温度	外気温度	温度計	10s
	外部風	微差圧計	10s
	窓表面温度	熱電対	10s
気流	マネキン近傍	微風速計	10s
	換気口	微風速計	10s
	外部風速	風速計	10s

測定期間内の天候は 15, 16 日は晴天で、17 日は一日を通じ降雪していた。測定時間内の外気温度は-5.1~-2.1 °C である。室内は実際の生活空間として、エアコン設定温度を 20 °C に設定した**。測定は各ケース 2 時間ほどの空調の予備運転を行った後の、20 分の値の平均値を利用した。測定器に関する詳細は表-6.2.6 に示す。また測定前後に対象となる測定場所の 6 面（床, 壁, 天井）に対する環境温度を測定した結果、19~22°C の範囲であった。

6.2.3 結果 等価温度

表-6.2.7 裸体時のケース別の通気量と流入温度

	配置 A	配置 B	配置 C	配置 B
換気種類	DI 窓	DI 窓	DI 窓	一般 通気口
通気量[m ³ /h] (標準偏差)	20.8 (1.1)	19.6 (3.0)	21.2 (0.3)	21*
流入温度[°C] (標準偏差)	22.3 (0.8)	23.0 (0.4)	7.7 (0.1)	-4.9 (0.1)
外気温度[°C] (標準偏差)	-3.3 (0.2)	-2.1 (0.1)	-2.9 (0.1)	

* 実測の都合上、夜間に行うことができなかったため、朝 7 時~17 時に実施した。1 ケース毎に 2 時間程度用い、後半の 20 分の平均値を各ケース環境下の定常とみなした。なお、実測の前後 30 分は室内環境温度を測定した。

** エアコンは一定の風量で吹き出すよう設定を行ったが、室温が設定温度以上であると判断された場合と霜取り運転時の場合に限り停止する。このため室内の温度は一様ではなく分布を持つ。

* 簡易的な風量計(KNS-300)を利用し、測定前後の平均値を記載した。

表-6.2.8 着衣時のケース別の通気量と流入温度

	配置 A	配置 B	配置 C	配置 B
換気種類	DI 窓	DI 窓	DI 窓	一般 通気口
通気量[m ³ /h] (標準偏差)	21.6 (0.4)	21.2 (0.4)	21.0 (0.6)	21*
流入温度[°C] (標準偏差)	10.0 (1.5)	12.8 (0.5)	7.2 (0.2)	-4.8 (0.1)
外気温度[°C]	-5.6 (0.1)	-3.7 (0.1)	-3.7 (0.1)	

(a-1) 裸体時のケース別の通気量と流入温度

表-6.2.7 に裸体時のケース別の通気量と流入温度を示す。裸体時の各ケースの通気量は概ね想定した通気量を満たしていた。流入温度は DI 窓の室内側上側框に取り付けられた温度センサーによって測定された。配置 A,B のケースにおいて、窓面日射により通気空気温度が室温以上となって空気導入していた。表-6.2.8 に配置 B の DI 窓時・一般通気口時の温度分布を示す。いずれのケースも 19~23°C の範囲であり、窓に近い場合の高さ 100mm で温度が低い傾向が見られる。

(a-2) 裸体時の換気種類別の等価温度

マネキン配置 B に固定した際、DI 窓、一般換気口、通気無の等価温度を示した。一般換気口からの通気時には全身等価温度が DI 窓通気時と比べ約 0.7°C 低い。(図-6.2.5)

(a-3) 裸体時の配置位置別の等価温度による比較

窓から遠い配置 C から窓に近い配置 A になるにつれ、全体的に等価温度が低下する。左半身に比べ、右半身の等価温度が大きいのは、マネキンから見て右手のエアコンの影響と考えられる。(図-6.2.6)

(b-1) 着衣時のケース別の通気量と流入温度

表-6.2.8 に着衣時のケース別の通気量と流入温度を示す。裸体時と同様、概ね想定した通気量を満たしている。流入温度は、天候による影響で窓面日射量が小さく、裸体時と比べ導入空気温度は低い。

(b-2) 着衣時の換気種類別の等価温度

配置位置別の等価温度と同様に、DI 窓と一般換気口の等価温度も概ね一致する結果となった。着衣抵抗の増加により異なる換気種類でも影響は小さく冷却効果が小さいということが確認できる。(図-6.2.7)

(b-3) 配置位置別の等価温度による比較

着衣抵抗が影響の小さい露出部で等価温度差がある、一方で全身等価温度はほぼ同等の値を示した。(図-6.2.8)

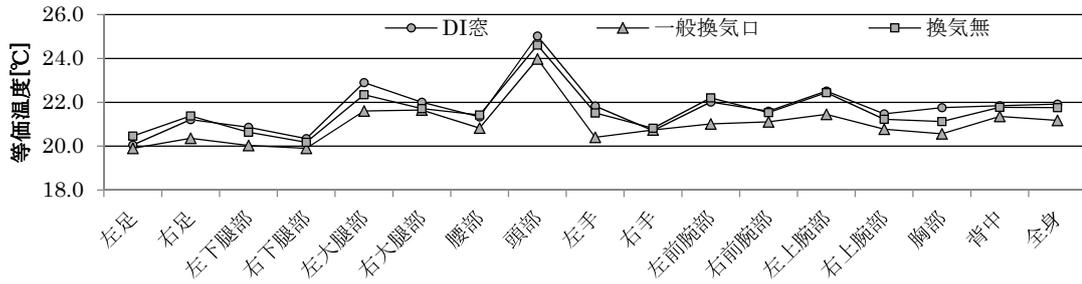


図-6.2.5 裸体時の換気種類別の等価温度

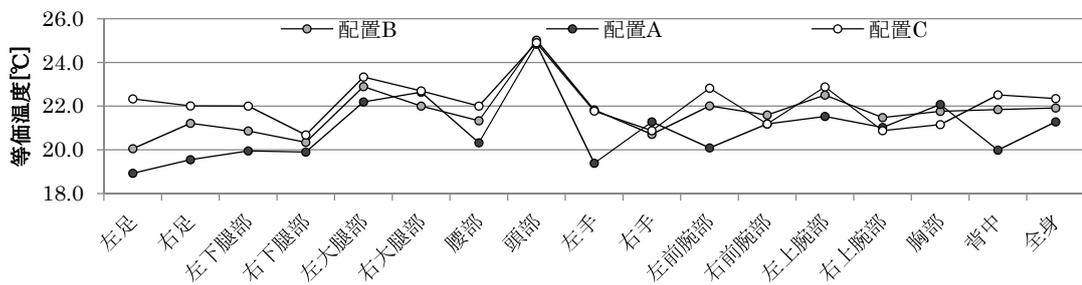


図-6.2.6 裸体時の配置別の等価温度

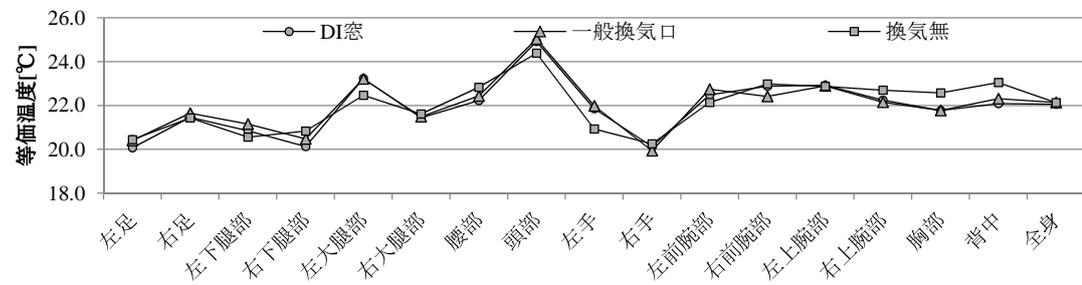


図-6.2.7 着衣時の換気種類別の等価温度

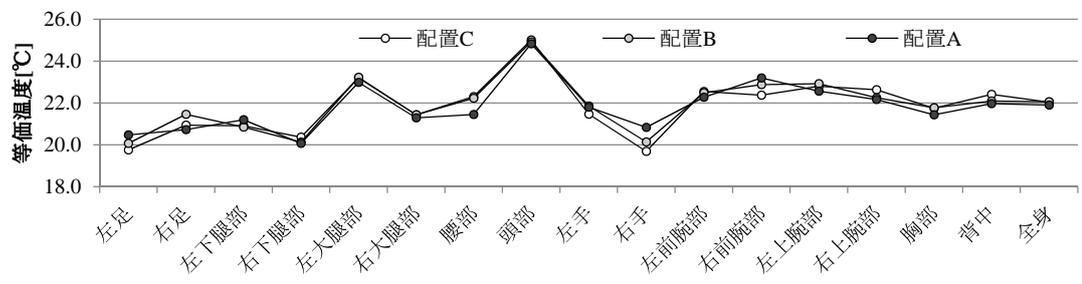


図-6.2.8 着衣時の配置別の等価温度

6.2.4 結果 DR(Draught rating)

欧州標準化委員会(CEN:Comité Européen de Normalisation)の技術委員会(TC:Technical Committee)による CEN-report 17525)に記載された DR[%] [8]*による評価を行った。DR は、空気温度、風速、乱流強度を変数とした、ドラフトが原因で不快感を持つ人間の予測割合であり、室内に温度分布やドラフトのあるシステムの温冷感評価に用いられる指標である。その定義を Eq-(6.3)に示す。

$$DR = (34 - T_a)(v - 0.05)^{0.62}(0.37vT_u + 3.14) \tag{Eq-(6.3)}$$

ここで、 T_a は局所空気温度[°C]、 v は局所風速[m/s]、 T_u は局所乱流強度[%]であり、マネキン座時の頭部位置である 1.1m の位置に対応する。DR の定義に従い、 $v < 0.05$ m/s の際に $v=0.05$ [m/s]、 $DR > 100$ の際に $DR=100$ を用いる**。

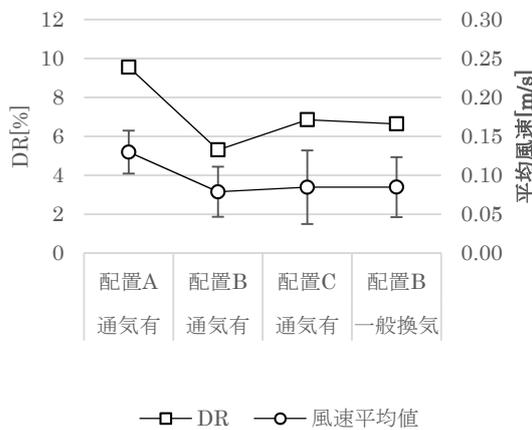


図-6.2.9 裸体時の DR と平均風速

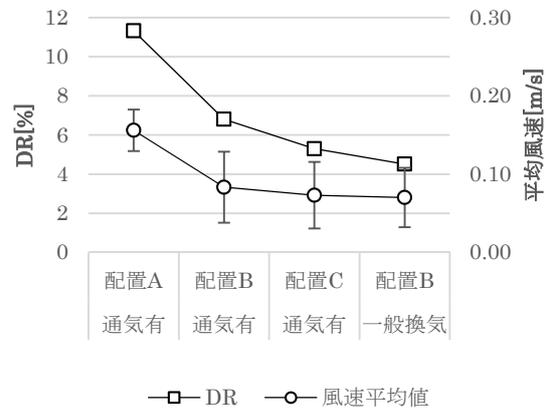


図-6.2.10 着衣時の DR と測定値

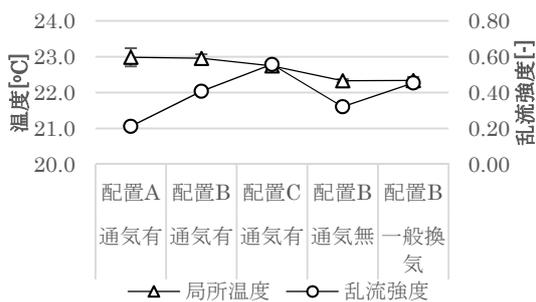


図-6.2.11 裸体時の室温と乱流強度

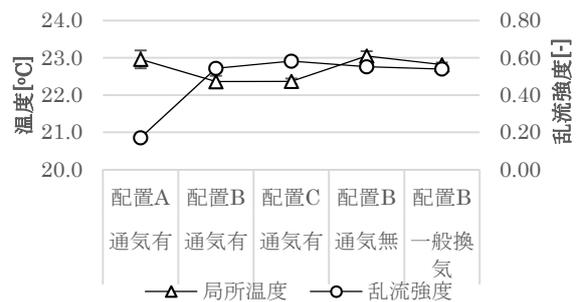


図-6.2.12 着衣時の室温と乱流強度

DR の算出に用いる実測値は、熱式風速計により測定した。等価温度の測定と同様の測定期間で

* 欧州標準化委員会(CEN:Comité Européen de Normalisation)の技術委員会(TC:Technical Committee)により作成された CEN-report 1752 に記載されているドラフト率(DR : Draft Rating)は、fanger らの定義する不満足者率(PD: Percent dissatisfied)と同義である。

** 局所空気温度は $19 < T_a < 27$ °C、局所風速は $0.05 < v < 0.40$ m/s 及び $0 < T_u < 70$ % という条件下において被験者実測との整合性が確認されており、本検証で得られた実測値はこの閾値内である。

の測定値を 図-6.2.9 から 図-6.2.12 に示す。窓へ近づく際に乱流強度が小さくなるが、平均風速は大きくなる傾向が得られた。DR は、DI 窓通気時に配置 C から A と近づくにつれ、大きくなり、特に配置 A において、DR は裸体時で 10%、着衣時で 11%と、リビング中央に比べ、それぞれ約 2.0, 1.6 倍になった。

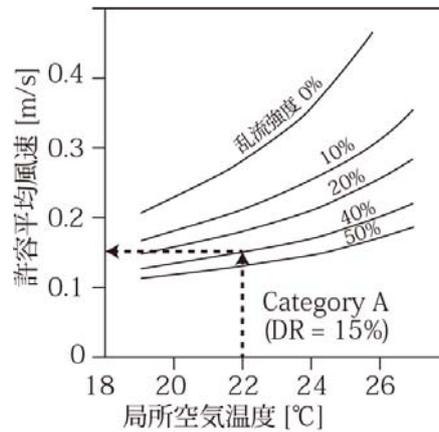


図-6.2.13 局所空気温度と許容平均風速

図-6.2.13 に、CEN-report 1752 に記載される Category A の局所空気温度が 22 °C、乱流強度が 40%に仮定した際の、許容平均風速を示す。Category A は、 $-0.2 < PMV < 0.2$ 、 $PPD < 6\%$ 、同等と定められており、DR が $DR < 15$ の際の区分である。各ケースのマネキン周辺の風速は、許容風速として得られた 0.15m/s より小さく対流由来の冷却効果は小さいことが伺える。

6.2.5 小結

実証試験住宅による室内快適性の評価をした。サーマルマネキンによる等価温度の検証では、室内外温度差の数%の温度低下が見られ、着衣抵抗を含めれば温冷感にほとんど寄与しないことがわかった。

6.3 章 解析による快適性検証

6.3.1 概要

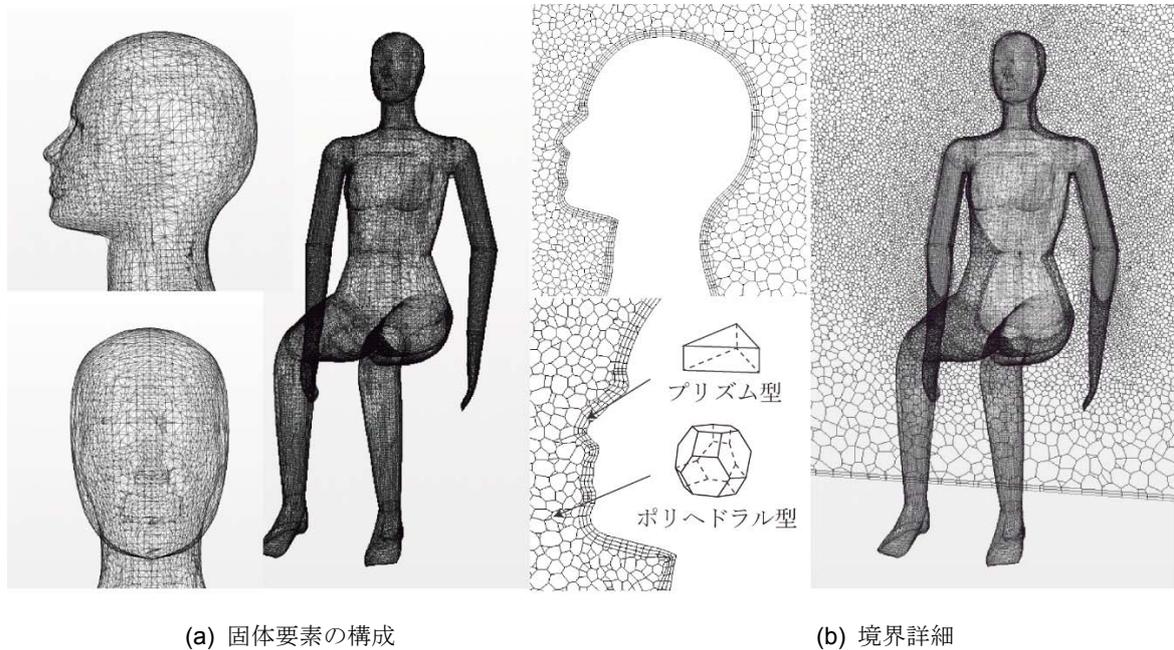


図-6.3.1 人体モデルのメッシュ構成と人体周囲のセル分割

本解析で利用した精密人体モデル（以下モデル）は、2節で使用したサーマルマネキンと形状・寸法の近い裸体女性形状のモデルを利用した。このモデルは図-6.3.1 (a),(b)に示すように合計74,844個の固体要素で構成されており、形状変化が激しい顔面、手足において、それぞれ、7980、2589、3384個の固体要素を配置した。本解析で用いるモデルの表面温度は、サーマルマネキンの制御と同様の Comfort 制御を採用し、大腿部と脛の接続部を除く16部位で各部位に制御した。なお、(eq-6.1)によりモデル表面の熱流束は各部位の平均値を用いて、部位ごとの表面温度を決定する。

6.3.2 検証

表-6.3.1 解析ケース

		Case1	Case2	Case3	Case4 *
検討対象	温度差 ΔT [°C]	10	20	30	30
流入境界 条件	外気流入速度 [kg/s]	0.0074			
	窓面 温度[°C]	17.9	15.2	12.8	17.0
	窓枠 温度[°C]	16.7	13.0	9.5	17.0
	流入温度[°C]	14.7	9.4	4.1	-10.0
	乱流強度[-]	0.2			
壁面境界 条件	温度[°C]	20.0			
人体表面境界 条件	温度[°C]	Comfort 制御に基づいて求められる皮膚温度分布			
放射 境界 条件	放射 率	床・壁・天井	0.9		
		人体	0.9		
CFD コード		STARCCM+ 10.04.009			

前章での実証試験住宅と同寸法のリビングの中央に人体モデルを配置し対流・放射連成解析によって人体周辺の温熱環境を解析する。解析ケースと境界条件を表-6.3.1に示す。Case1,2,3は室内を20°Cとし、室外温度差を10,20,30とした。

* 一般給気口は直径100mmとし、窓部はトリプルガラスの熱貫流率を0.9W/m²K、内部総合熱伝達率を9W/m²Kとして求めた表面温度を与えた。なお、厳密には隙間風が存在するが、本検証では隙間風の想定は行わない。

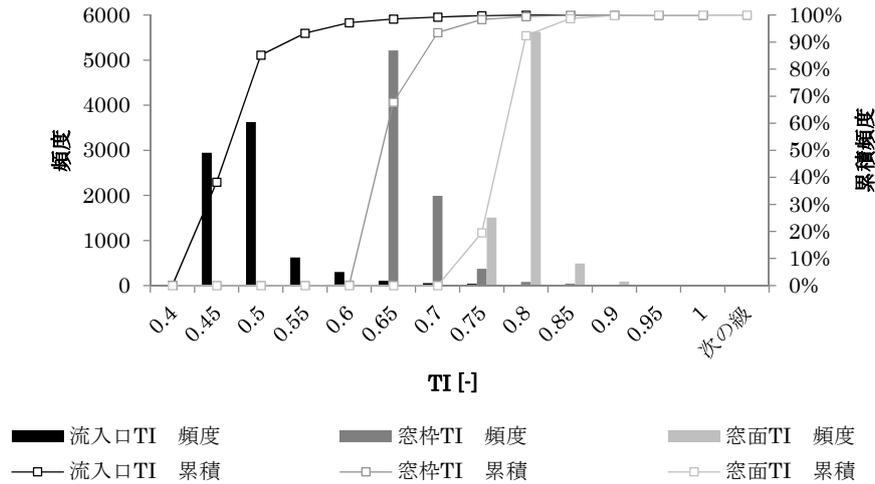


図-6.3.2 日射量別の流入空気温度と表面温度の回帰式

室内窓・窓枠表面温度は、図-6.3.2 に示す 2014 年 1/22 0:00 ~ 1/30 0:00 までの回帰式より求めた*。

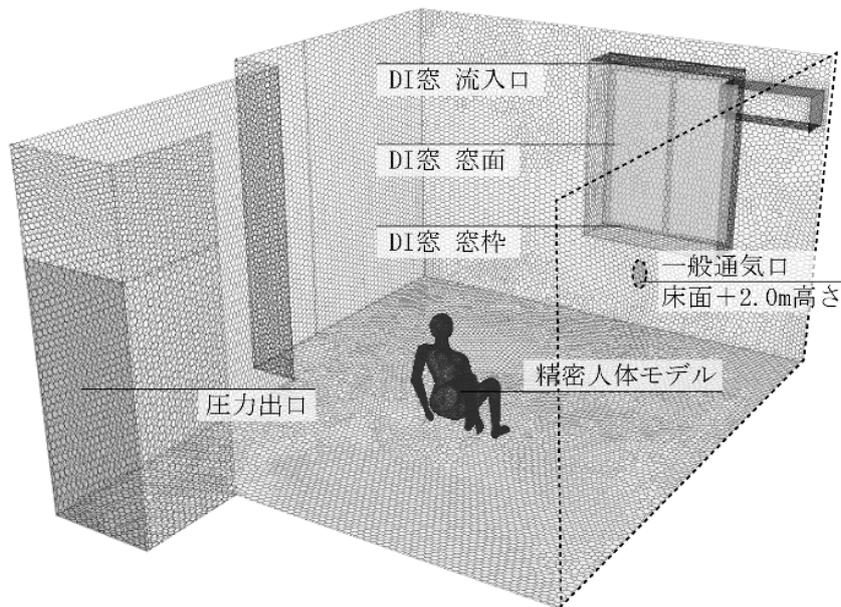


図-6.3.3 固体面分割状況と境界詳細

乱流モデルは、通常の乱流シミュレーションで標準的に用いられる標準 k-ε モデルに比べ、より詳細に対流を計算できるとされる Realizable k-ε 乱流モデルを用いた。温度による密度変化の影響は、ブシネスクモデルで評価した。室内壁体・ガラス面の固体表面は三角メッシュで分

* TI (Temperature Index) は(eq-6.5)の定義となる

$$TI_i = (\theta_i - \theta_{out}) / (\theta_{in} - \theta_{out}) \tag{eq-6.5}$$

ここで θ_i は任意の部位の温度[°C]、 θ_{out} は室外環境温度[°C]、 θ_{in} は室内環境温度[°C]であり、室内外環境温度差で無次元化したものである。

割した。固体面のメッシュ総数は合計で 1,757,680 個であり、固体面分割状況と境界詳細を **図-6.3.3** に示す。固体面表面から流体側への第一セル及び第二第三セルは **図-6.3.1 (b)** に示すようにプリズム型を、第四セル以降はポリヘドラル型を用いた。

物体の面近傍プリズムレイヤーの厚みは、人体表面、壁面、ガラス面でそれぞれ 2.5mm、10mm、5mm であり、 $y+$ は人体表面の第一セルで $y+ < 0.5$ であり、ガラス・壁体第一セルで $y+ < 1.2$ である。

6.3.3 結果 等価温度

(1) 表面温度制御の妥当性のための総合熱伝達率の検証

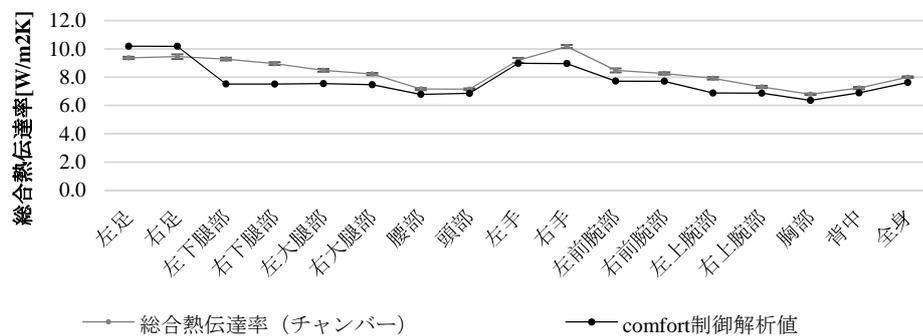


図-6.3.4 実測値と解析値の総合熱伝達率

モデルの表面温度の振る舞いの確認のため、サーマルマネキンの総合熱伝達率を測定したチャンバーと同様な環境を模擬した空間で、モデルの総合熱伝達率の解析を行った。その比較を **図-6.3.4** に示す。足や手という端部の総合熱伝達率が高い傾向や、温度境界層に覆われる胸や背中と言った部位で良い一致が確認でき、全身としての総合熱伝達率は概ね一致している。このため、Comfort 制御の様に振る舞う表面温度制御を境界条件で与える。

(2) 等価温度による快適性評価

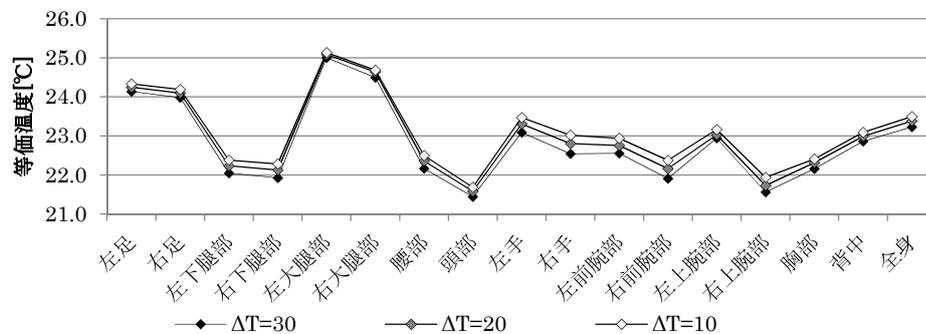


図-6.3.5 各ケース別の等価温度

図-6.3.5 に各部位の等価温度を示す。解析値は 21.6°C ~ 25.6°C の範囲に分布している。等価温度

は室内外温度差が 10 °C から 30 °C の際に、等価温度が 23.5 °C から 23.2 °C と変化し、外気温の数%程度の低減でしかなく、快適性の低下度合いは小さい。

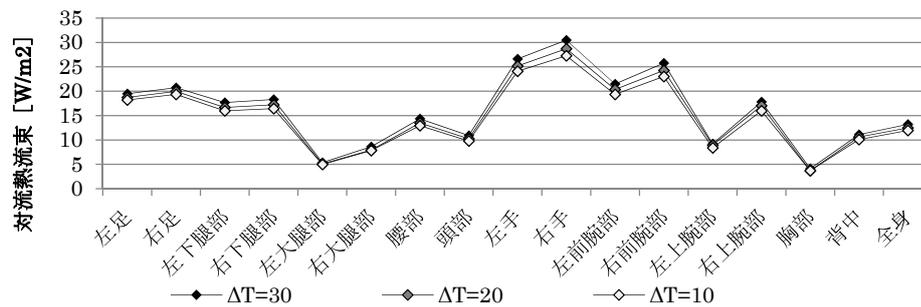


図-6.3.6 各ケース別の等価温度

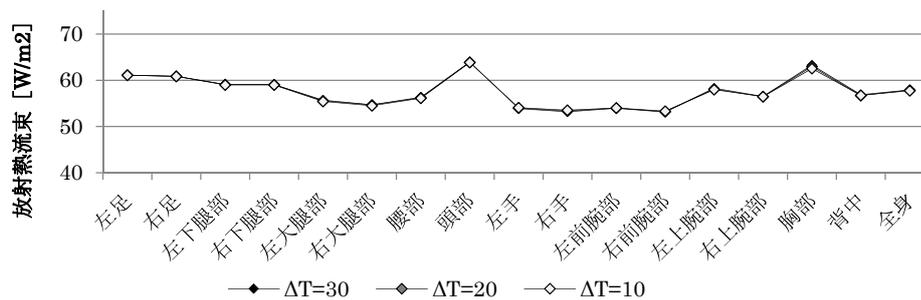


図-6.3.7 各ケース別の等価温度

図-6.3.6 と図-6.3.7 にモデルから室内に放出された対流成分と放射成分を示す。全体の割合から、対流による冷却効果は放射の約 1/4 程度であった。

また、温度差の一番大きい case3($\Delta T30$)の高さ 1.1m の空間中の風速の平均値は 0.008 m/s と二章で示した CEN-repoert1752 から推定された許容風速の約 0.15 m/s よりもはるかに小さいことが確認できた。

6.3.4 結果 CRI

温度場が室内温熱環境を構成する熱源の合成により説明可能であるという仮定の下に、固定された流れ場では温度輸送は線形システムとなることを利用した指標が室内温度環境形成寄与率 (CRI) である [9]。熱源は、窓枠・窓ガラス、通気口とし、CRI を用いて通気効果による冷却表面と換気種類別の人体影響の寄与の違いを検証する。CRI を算出は以下のとおりである。本研究で用いる CRI は Eq-(6.4) で定義される。CRI が 1 である場合は発熱により室内に一樣拡散していることを示す。CRI が 1 よりも小さい場合は、ある特定の場所の温度が発熱による一樣拡散温度よりも小さいことを示す。1 よりも大きい場合は、ある特定の場所の温度が、発熱により一樣拡散した温度よりも大きくなることを示している。

$$\begin{aligned}
 \text{CRI}_m(x_i) &= \Delta\theta_m(x_i)/\Delta\theta_{m,0} = (\theta_m(x_i) - \theta_n)/(\theta_{m,0} - \theta_n) \\
 &= (\theta_m(x_i) - \theta_n)/(Q_m/(C_p \cdot \rho F))
 \end{aligned}
 \tag{Eq-6.4}$$

ここで、 $\Delta\theta_m(x_i)$ は対象*i*となる熱源*m*に Q_m [W]の発熱が生じた際、CFD解析で得られる室内位置*x_i*における温度上昇を示し、また θ_n は熱源*m*の発熱による一様拡散温度 [°C]を示している。また、 $C_p \cdot \rho$ は空気の比熱[kJ/kgK]と密度[kg/m³]、 F は室内導入風量[m³/s]である。

室内外温度差を30°CとしたDI窓適用時 (Case3) と一般換気口適用時 (Case4) の温度分布を図-6.3.8に、CRI分布を図-6.3.9に示す。一般換気口適用時 (Case4) は直接-10°Cの外気が取り込まれるため換気口近くの温度分布が大きい。またCRIでは解析区域全域ではDI窓適用時で0.9、一般換気口適用時で0.7程度であり、どちらのケースも、窓近傍にかけて1.0程度、もしくはそれ以上の領域が見られる。この領域において室内温度低下の影響が大きいことが伺えるが、居住域への影響は小さいことが伺える。

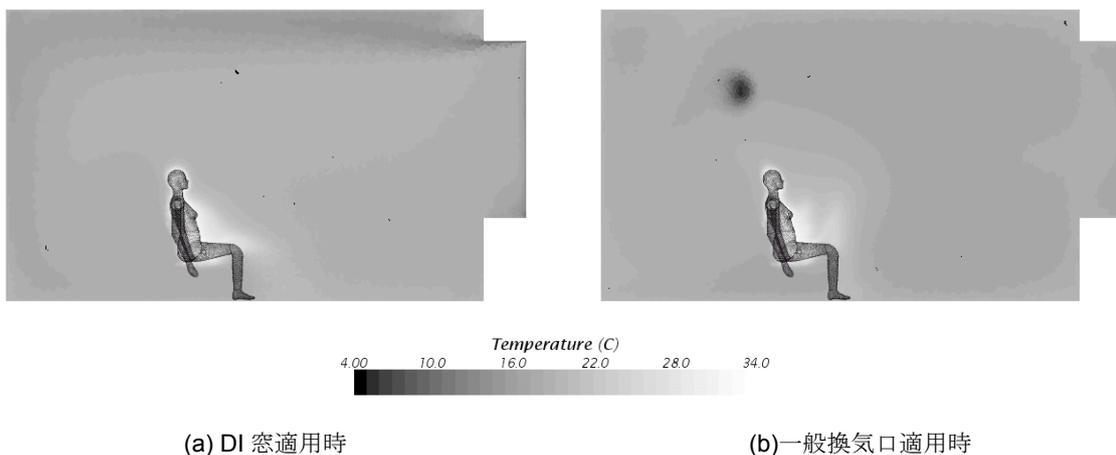


図-6.3.8 温度分布

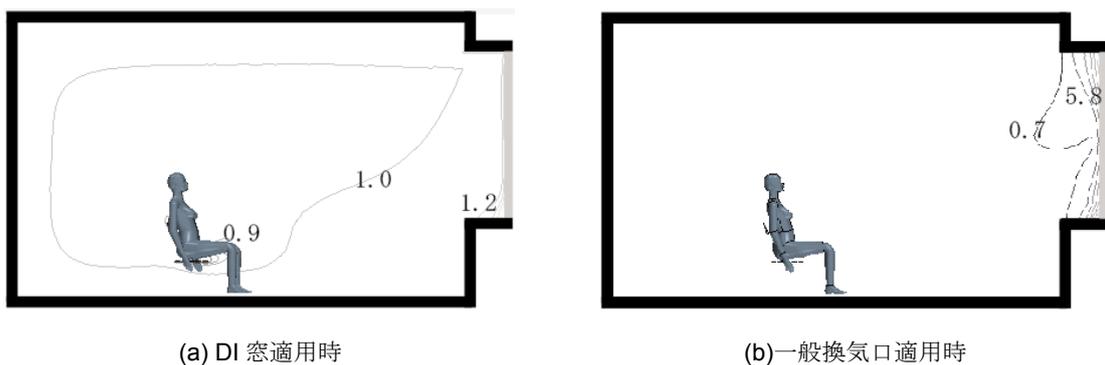


図 6.3.9 CRI の分布

6.3.5 小結

本検証ではサーマルマネキンの制御機構を取り入れた人体整理モデルの妥当性を検証するとともに、DI窓設置をした際の等価温度と窓の室内空間の温度場寄与率 CRI を求め、DI窓の冷却効果が小さいことを示した。

6.4 章 結論

省エネ効果が見込める DI窓を適用した際に、負の効果として現れる、外気導入による室内表面冷却効果とコールドドラフトが室内温熱環境に与える影響を実測・解析両面より検証を行い、以下の知見を得た。

- ・サーマルマネキンを用いた等価温度で検証では、着衣時において全身等価温度が室内外温度差の数%程度の減少しか見られず、着衣抵抗を含めるとほとんど快適性に寄与しない。
- ・対流が原因で不快感を持つ人間の予測割合である DR による評価を行い、窓近傍の DR は居室中央の約 1.6~2.0 倍になることが確認した。
- ・DR から推定される室内許容風速は 0.15m/s 程度であり、DI窓の対流による冷却効果は小さい。
- ・DI窓が適用された住宅を再現し、等価温度の実測値と解析値の比較を行い、室内外温度差が 30°C であっても室内外温度差の数%程度の等価温度の低減である。
- ・窓面と窓枠の温熱環境形成効率評価指標 CRI を検証したところ、DI窓の採用による室内温冷感への影響は小さいことを確認した。

6.5 章 議論

本検証は窓面の温度境界条件を、実測値を元に設定した。より詳細な数値解析のシミュレーションを行うという事であれば、理想的な環境が形成できる熱箱試験での試験を行うべきである。

■ 引用文献 ■

- [1] 樋山、河原ら, “窓サッシ部へのダイナミックインシュレーションの適用,” 日本建築学会環境系論文集, 2014.
- [2] K. H. S. K. Daisuke K, “Low-Energy Effectiveness of Dynamic Insulation System for Windows,” Indoor Air2014, 2014.
- [3] 河原大輔、樋山恭助、加藤信介、山本哲也、二川智吏、朝岡幸康, “窓部におけるダイナミックインシュレーション技術の適用 第 1 報—熱箱及び実測による省エネ性能検証,” 空気調和・衛生工学会論文集 No.211, ,, 2014.
- [4] G. G., “Numerical Evaluation of Thermal Comfort in Rooms with Dynamic Insulation,” Building and Environment, 2000.
- [5] V. D. U. S. T.Rueegg, “Must cold air down draughts be compensated when using highly insulating windows?,” Energy and Buildings, 2004.
- [6] C.-R. 1752, “Ventilation for buildings: design criteria for the indoor environment,” 1998.
- [7] 田辺新一、長谷部ヤエ, “皮膚温度可変型サーマルマネキンによる室内環境評価法に関する研究,” 日本建築学会計画系論文報告集、第 448 号, 1993.
- [8] F. P. e. al., “Air Turbulence and Sensation of Draught,” Energy and Buildings, 1988.
- [9] 加藤信介、小林光、村上周三, “不完全混合室内における換気効率・温熱環境形成効率評価指標に関する研究、第 2 報—CFD に基づく局所領域の温熱環境形成寄与率評価指標の開発,” 空気調和・衛生工学会論文集 No.69, 1998.

第 07 章

結論

第 7 章 ■ まえがき ■

これまでに示した本論の結論と謝辞を示す。

7章 結論

7.1 章 各章の結論

7.1.1 1章の結論

1章には、本論文を書くにあたり研究背景と研究目的に触れ、持続可能性と省エネ・安全健康を満たすことや安価に実現できる住宅の必要性について触れた。

7.1.2 2章の結論

2章には、建築デザイン技法を整理し、寒冷地で研究、開発、実施、流通が行われる Dynamic Insulation 技術を適用した住宅を提案した。DI 技術を適用した開口部（窓部）のシステム概要を示した。

7.1.3 3章の結論

3章には、断熱性能の最も弱い開口部（窓部）に Dynamic Insulation 技術を適用し（以下 DI 窓）、その開発と熱箱試験による断熱性能検証、実住宅に適用した際の断熱性能検証と結露発生の可能性に関する検証と熱回収率・昇温率の調査結果を示した。この結果、DI 窓に 24m³/h 通気した際にブラインドありで 0.73W/m²K、ブラインドなしで 0.92W/m²K であり、断熱性能の向上を確認できた。

7.1.4 4章の結論

4章には、年間負荷計算を行い、本システムの優位性と市場流通性を検証することを目的とする。3章の熱箱試験法による断熱性能検証の結果を用いて、外乱の影響を考慮した年間負荷シミュレーションを実施し、一般的な窓に対してどの程度の暖房負荷削減効果があるのかを検証を行ったところ、気密性能が良ければよいほど断熱性能が向上することが確認できた。

7.1.5 5章の結論

5章には、3章で室内表面温度の低下による結露リスクの懸念が疑問として残ったため、結露リスク検証を示した。DI 窓は室内表面温度の低下という負の側面がみられる一方で、室外の乾燥空気の室内への導入により窓部を乾かす効果が得られる。本検証では、線形性を仮定した温度と絶対湿度の部位別の無次元指標で示し、この指標から特定部位の結露発生頻度を検証することでリスク評価を行った。室内加圧・減圧をうまく制御することにより結露リスクを著しく低下させることが可能であることを示した。

7.1.6 6章の結論

6章には、外気導入を行うことによる室内表面温度並びに近傍空気温度の低下が考えられ、室内快適性の影響評価を定量的に示した。3章と4章で触れた実住宅に人体形状と体温を模した

マネキン（サーマルマネキン）を利用した等価温度による評価並びに、CFDに人体生理モデルを組み込んだ場合のDI窓周辺のパラメトリックスタディを行い、室内温度寄与率（CRI）による評価を行ったところ、DI窓の室内温熱環境形成への寄与は小さく、快適性が維持できることを確認した。

7.2 章 謝辞

本論文は、筆者が東京大学大学院工学系研究科博士課程在籍中に行った「ダイナミックインシュレーション技術を利用した住宅に関する研究」に関する研究をまとめたものです。大学院入学時より住宅の主に熱の分野に触れ、研究を行ってきました。大学院生としてのこの5年間は、恵まれた研究環境の中で国際色豊かな人々に囲まれながら、研究分野の知識だけでなく多くの経験と人とのつながりを得た、かけがえの無い時間であったと感じます。

東京大学生産技術研究所の加藤信介教授には、大学院入学当初より研究生活全般にわたって、懇切丁寧なご指導を賜りました。流体力学や伝熱工学の手ほどきを受け、本研究に関する機会と数多くの助言をいただき、本論文をまとめ上げることができました。加藤研は恵まれた環境で、何も不自由がなく、勉強に集中し、国内外の学会会議に挑戦させていただき、今後設計者として進んでいくうえで多くの糧を得ることができました。心から深く感謝申し上げます。

東京大学生産技術研究所の大岡教授には、本論文の審査委員としてはもちろんのこと、授業やゼミ、会議などを通して、自分がわかっていなければならない事に関して多くのご指導を頂きました。特に、プロジェクトを進めていくうえで、円滑に進行させる姿勢を、学ばせていただいたように思います。というのは、かつて著者が修士学生一年の時に阿修羅と帝釈天と蟻の話*をされて、「人生には許せないことがあったとしても、諦めなければならない時がある」という教えを受けました。当時の著者はこの意味がわからず、許せないままでもいいという意見でありました。しかし結局のところ大きな流れに身を寄せることしかできないのが人生であり、一つのことにとこだわると、重要な他のことに盲目的になるということを伝えたかったのだと、五年の年月を経てようやく結論に至りました。心から感謝申し上げます。

東京大学生産技術研究所の高橋岳生技術専門員には、本研究での実験の実施にあたって多大なご助力を頂きました。また、大学院生室の管理にも絶えずご注力頂き、快適な研究室生活を送る事ができました。ありがとうございました。

東京大学生産技術研究所の長谷川洋介講師、東京大学大学院工学系研究科の前真之准教授、赤司泰義教授には、本論文審査において様々な視点から貴重なご助言とご指導を頂き、研究への姿勢、研究を他者に説明する姿勢に関して多くを学ばせて頂きました。

* 阿修羅には美しい娘がいて、帝釈天に嫁がせたいと思っていた。しかし帝釈天は力づくで奪ってしまったので、阿修羅と戦うこととなった。阿修羅の軍が優勢になった時、帝釈天が後退したところへ蟻の行列にさしかかり、蟻を踏み殺してしまわないよう軍を止めた。これを見た阿修羅は驚いて、帝釈天の計略と思い撤退をした。この話が展開で広まって阿修羅が追放されることになったという話。

7.2.1 1章の謝辞

本研究を選ぶ機会を与えてくださった方々にまず感謝をしたいと思います。

修士課程の頃にDI技術を窓枠と窓に適用した研究を選ぶ際に、この研究の面白さを教えていただいたことと、全体に渡り学習指導をしていただいた、当時博士課程三年、現在理科大学 李時桓助教に深く感謝をしたいと思います。

同時期に窓枠の研究を行っていた際に論文化する意義や技術指導をしていただいた当時東京大学大学院助教授、現在山口大学 樋山恭助准教授に深く感謝をしたいと思います。

7.2.2 2章の謝辞

二章は住宅設計という立場からみたDI技術を適用した住宅システムを提案しており、システム設計、すなわちシステムの概要から図面化・施工方針、に携わった方々に感謝したいと思います。

構想にあたり、修士課程から博士課程までの約五年間、設計と施工という両領域に精通するJ建築システム株式会社 手塚純一社長、二川智吏氏に深く感謝を申し上げたいと思います。また、建築内からの排熱を一般に普及するエアコンの室外機に吹きつけた際の実験資料を、急な申し付けにもかかわらず快く送って頂いた、北方建築総合研究所 環境科学部環境グループ主査の月舘司氏に深く感謝したいと思います。エアサイクル工法とダイナミックインシュレーション技術の併用を考えていた時に、株式会社ソーラーサーキットの家 当時代表取締役社長の堀江康則氏には、エアサイクル工法のご自宅を測定させていただき、エアサイクル工法のイメージを得る機会を得たため、ここに深く感謝したいと思います。その際実測と分析を共に行った同社取締役技術開発室長の風見桂三氏にも深く感謝したいと思います。

7.2.3 3章の謝辞

DI窓の研究の要となる断熱性能の検証に携わった方に感謝したいと思います。

実験にあたり、DI窓の熱箱試験検証や通気流量の検証、窓自体の設計開発等を実施していただいた三協立山三協アルミ社の大浦豊氏、朝岡幸康氏、佐脇哲史氏、野村吉和氏に深く感謝したいと思います。中でも大浦氏、朝岡氏、佐脇氏には技術提供・アドバイスを頂き特に感謝したいと思います。

実測にあたり、寒くて鼻水が凍り、つらくて涙が出て、涙も凍る、-15°C近い北の大地で、過酷な実測を協力して頂いた当時修士課程 現在鹿島建設の吉富透悟氏と当時修士課程 現在日本郵政の八重樫彩氏には深く感謝したいと思います。DI窓の断熱性能検証において実住宅の確保と断熱改修を実施して頂いた、土屋ホーム トピア 当時部長、現在同社研究所 所長の山本哲也氏と当時次長の澤田修造氏に深く感謝を申し上げたいと思います。特に山本哲也氏には、建築設計における建築建主との様々な問題についてご指導を受け、後の研究に大きく役立ちました。ここに深く感謝を申し上げたいと思います。澤田氏は実測時に関東の仕様の靴に見かねて長靴をプレゼントしていただき、このおかげで外部のセンサーの設置や移動が用意になりました。ここに深く感謝し申し上げたいと思います。

分析にあたり、勉強会で窓ガラスの種類による熱回収効率の変化に関する知見を深めること

につながる指摘をいただいた、名古屋大学の久野覚教授に深く感謝したいと思います。

7.2.4 4章の謝辞

気密性能時の検証にあたり、協力して頂いた方に深く感謝したいと思います。

気密性能実測にあたり、住宅一戸の細かな隙間を埋める目張りを手伝って頂いた J 建築システム株式会社 二川智吏氏、土屋ホーム山本哲也氏、当時東京大学助教授、現在山口大学樋山恭助准教授に深く感謝を申し上げます。

解析にあたり、空調設備選定の際に断熱改修時に一般的に用いられる機器の助言とその資料の送付をして頂いた、土屋ホーム山本哲也氏に深く感謝を申し上げます。

分析にあたり、断熱性能の向上効果と換気負荷の増加という二律背反的現象が重要であることを気づかせて頂いた主査 加藤信介教授に深く感謝したいと思います。

7.2.5 5章の謝辞

防湿性能の検証を行った際に協力して頂いた方々に感謝したいと思います。

検証にあたり、実住宅を貸して頂いた土屋ホームトピア 研究所所長の山本哲也氏に深く感謝したいと思います。

分析にあたり、技術指導をして頂いた三協立山三協アルミ社 朝岡幸康氏に深く感謝したいと思います。また、勉強会で TI・HI の使い方が重要であると気づかせて頂いた慶応大学の伊香賀俊治教授に深く感謝したいと思います。

海外発表にあたり、イタリアのトリノで咽喉炎になり、ろくに声も出ない状態の自分の代理発表を快く引き受けていただいた、主査加藤信介教授に深く感謝したいと思います。

7.2.6 6章の謝辞

室内温熱環境の研究を行った際に協力して頂いた方々に感謝したいと思います。

実測にあたり、人体周りの研究を行っていた当時博士課程前期課程、現在竹中工務店 小林美子さん、同研究室の当時博士課程前期課程、現在日建設計 大浦理路氏にサーマルマネキンの実測時に手伝って頂いたことを深く感謝をしたいと思います。また、実住宅を幾度と無く貸して頂いた土屋ホームトピア 研究所所長の山本哲也氏に深く感謝も打ち上げたいと思います。

数値解析にあたり、モデルを快く手渡して頂いた研究室の OB である梁先生に深く感謝したいと思います。

勉強会の際に、人体周りの対流熱伝達率や等価温度、その他の指標の細かな条件に対する助言を頂き、知見を深めることにつながったため、信州大学の佐古井智紀教授に深く感謝したいと思います。