

論文の内容の要旨

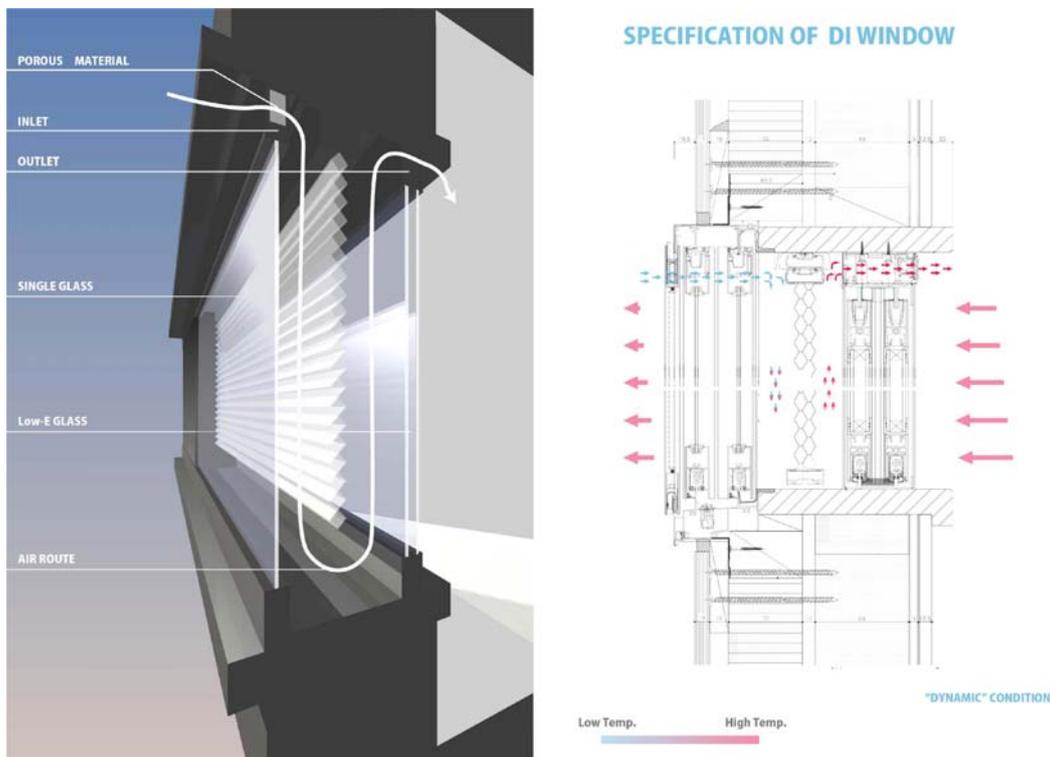
論文題目 ダイナミックインシュレーション技術を利用した住宅に関する研究

氏名 河原 大輔

要約

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、断熱性能の優れた高性能な建材を使用するか、建材に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、建材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、建築外皮の高断熱化を実現し、必要換気を動的な断熱材として活用する **Dynamic Insulation** 技術（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。本論文は **DI** 技術を熱損失の大きい窓部（**DI** 窓）に適用した際の、システム構成を提案するとともに、適用効果を示す内容となる。**DI** 技術は冬季、夏季共に断熱性能の向上効果や防露性能の向上効果等が得られ、使い勝手の良いシステムということができた。

各章の内容



1章と2章に、これまでのDI技術に関する研究開発の概要を示すとともに、DI技術を使用した住宅のシステム構成について示した。DI技術は大きく分けてポラス材に通気を行うものか通気層に通気を行う二種類があり既往研究は主にポラス材の壁体に適用した例が多い。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多く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。

3章に、DI技術を開口部に適用した際の研究対象の、通気流量時の断熱性能について示した。まず、通気流量別の断熱性能に関しては、熱箱を用いた実験室実験による基礎性能評価試験、及び実在する住宅に適用した実証試験を行った。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。

4章に、年間の暖房負荷に関して示した。断熱性能が通気量に依存するため、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小さくなったが、その影響がないとは言えず、その影響は無視できない。このため、断熱気密改修を行った実在住宅にDI窓を適用し、気密性能と通気流量の検証を行った。次に実測した実質有効開口面積を元に校正を行うとともに、換気回路網計算で住宅の実質有効開口面積を変化させた場合のエネルギー消費量の違いを確認する内容となり、実質有効開口面積を変えたケース間の比較では1.1GJ程度異なり、DI窓の省エネ性の確保には住宅の実質有効開口面積を低減する必要があり、気密性能が $2.0\text{cm}^2/\text{m}^2$ 程度であればDI技術の断熱性能の向上効果が小さいことを示した。

5章に、防露性能に関して示した。DI窓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。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。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。本章の目的は、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た。

6章に、DI窓を室内温熱環境に関して示した。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 $0.77\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ であり、居室から見た際の断熱性能は $2.0\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 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かを検証する必要がある。そこで実際に 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）を用いて 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 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。

7 章に総括として、DI 技術を開口部（窓部）に適用し、断熱性能やその他特性を示した。DI 技術は冬季・夏季共に使い勝手の良いシステムであり省エネ化が可能である。この断熱性能の向上・省エネ化の実現に本システムの制御・管理は必須であるため、通気流量や移流方向の制御を自動化するようなシステムが普及の際には必要になるため、この研究は今後の課題としたい。