

住宅用樹脂製サッシの超高断熱化に関する研究

Study on High Thermal Insulated PVC Windows
for Houses

概要 Abstract

住宅用樹脂製サッシの超高断熱化に関する研究 Study on High Thermal Insulated PVC Windows for Houses

遠藤 卓¹⁾、立松 宏一²⁾、村田 さやか²⁾、廣田 誠一³⁾、北谷 幸恵⁴⁾、鈴木 大隆⁵⁾
高根 智明⁶⁾、橋本 善彦、工藤 雅巳、高田 和規、細川 大輔、
山下 幸司、政田 圭三、船尾 真充、沢口 茂幸、加藤 正広
Endo Suguru¹⁾, Tatematsu Koichi²⁾, Murata Sayaka²⁾, Hirota Tomokazu³⁾,
Kitadani Yukie⁴⁾, Suzuki Hiroataka⁵⁾,
Takane Tomoaki⁶⁾, Hashimoto Yoshihiko⁶⁾, Kudo Masami⁶⁾, Takada Kazunori⁶⁾, Hosokawa Daisuke⁶⁾,
Yamashita Koji⁷⁾, Masada Keizo⁸⁾, Funao Masamitsu⁸⁾, Sawaguchi Shigeyuki⁹⁾, Kato Masahiro⁹⁾

キーワード : 窓、断熱、住宅、省エネルギー

Keywords : Window, Insulation, Residential Houses, Saving Energy

1. 研究概要

1) 研究の背景

断熱壁体に比べ熱的性能が劣る窓の高断熱化は、暖冷房エネルギー削減において重要な手法であるが、北海道等の寒冷地と同様の気候特性を有するヨーロッパ諸国と比べて、かなり性能が劣っているのが現状である。仮に、それらに匹敵する性能の窓部材が実現できれば、冬期日射取得量も合わせると熱収支上は住宅外皮の中で最も省エネルギー性の高い部位になるとともに、室内温熱環境の向上や窓配置などの面で設計自由度を大幅に高めることも可能になる。今後、住宅における低炭素化・省エネルギー化は喫緊の課題であり、我が国の寒冷地に相応しい高断熱な窓部材の開発は重要なテーマである。

2) 研究の目的

本研究は、寒冷地における空調エネルギーの大半を占める暖房エネルギー削減と低炭素化に向けて、窓枠の高断熱化、ガラスの高性能化（高断熱化と日射取得量の確保）を図り、世界最高水準の断熱性能（熱貫流率 $0.6\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 以下）を有する住宅用窓部材を実現するための各種要件と導入効果を明らかにすることを主な目的とする。

2. 研究内容

1) 目標を達成するための各種要素技術の検討（H26年度）

- ・ねらい：海外先進技術製品に関する調査、数値解析等から、樹脂枠、ガラス、ガラス周縁部の各要素技術の性能向上に関する技術検討を行う。
- ・試験項目等：海外先進技術製品の調査・分析、各パーツ（枠・ガラス・ガラス周縁部）の数値解析・分析等

2) 実測等による性能検証（H26年度）

- ・ねらい：1) の検討に基づく試作品の断熱性能等を実測等で評価する。
- ・試験項目等：JISA 4710（実測）及びJIS A2102（数値解析）に基づく性能評価

¹⁾ 環境科学部環境グループ 研究職員 ²⁾ 環境科学部環境グループ 研究主任 ³⁾ 環境科学部構法材料グループ 研究主幹 ⁴⁾ 企画調整部企画グループ 主査 ⁵⁾ 副所長 ⁶⁾ 株式会社エクセルシャノン ⁷⁾ 倉敷紡績株式会社 ⁸⁾ 中島硝子工業株式会社 ⁹⁾ 東電化工業株式会社

¹⁾ Researcher of Bld. Environment Group, ²⁾ Researcher of Bld. Environment Group, ³⁾ Senior Research Manager of Structure and Material Group, ⁴⁾ Chief Coordinator of Planning and Coordination Div., ⁵⁾ Associate Director, ⁶⁾ Excel Shanon Corporation,

⁷⁾ Kurabo Industries Ltd., ⁸⁾ Nakajima Glass Co., Inc., ⁹⁾ Azuma Denka Industry Co., Ltd.

3) 導入効果の予測 (H26 年度)

- ・ねらい：日本の寒冷地を対象に、窓部材が高性能化することによる省エネルギー効果、LCCO₂ 効果、温熱環境上の効果等を明らかにする。
- ・試験項目等：各種数値解析、シミュレーション等

3. 研究成果

1) 目標を達成するための各種要素技術の検討 (H26 年度)

- ・海外先進技術製品として、熱貫流率 $0.67\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ の製品を調査し、フレーム内部の断熱材の充填状況等により公称値を満足しない可能性があることなど、フレーム内部の構造や断熱材の充填手法について、本研究で検討するサッシの構成上の技術的知見を得た。
- ・ガラス及びガラス周縁部を対象とした熱解析から、ペアガラス内の中空層への低放射フィルム挿入やガラススペーサーの仕様変更による断熱性能向上の可能性を明らかにした。フレーム部については、断熱材の充填や内部の金属メッキ処理による放射伝熱低減の効果を試算した。
- ・フレーム製作において、フレーム内部への断熱材（硬質発泡ウレタンフォーム）充填は実現できたが、メッキ処理には課題を残した。また、日射受熱時の開閉性に問題が無いことを実験で確認したほか、国内外の試験規格を参照しガラス部の耐久性試験項目を整理した。

2) 実測等による性能検証 (H26 年度)

- ・前項の検討を基に、製品化を見据え現実的な高断熱化技術を段階的に盛り込んだ試作品の性能試験を行い、熱貫流率 $0.63\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ の性能を確認した。
- ・さらなる性能向上の可能性を数値解析により検討し、熱貫流率 $0.60\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ を実現する仕様を提案した。

3) 導入効果の予測 (H26 年度)

- ・代表都市（旭川、札幌、盛岡、長野、東京）において窓の年間の熱収支を算出し、気候特性や方位に応じた本フレームとガラス性能の組合せによる暖冷房負荷削減効果を示した。代表的な住宅モデルを対象に各都市での暖冷房負荷および CO₂ 排出量の削減効果を示した。例として、札幌では現行窓（熱貫流率 $1.90\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ）から試作品仕様への転換で暖冷房負荷を 17%削減、方位に応じた日射熱取得率の高いガラス仕様の併用で 36%削減が得られた。また、室内温度環境の面から、室温改善効果や窓付近の温度改善効果を明らかにした。

4. 今後の見通し

本研究の成果は共同研究者が製品化に活用する。なお、本研究で得られた知見の一部は特許化する予定である。

目 次

1.	はじめに	1
	(1) 研究の背景	
	(2) 研究の目的	
	(3) 報告書の構成	
2.	海外先進技術製品の調査	3
	(1) 調査概要	
	(2) 調査手法	
	(3) 測定ケース	
	(4) 測定結果	
	(5) まとめ	
3.	各種要素技術による断熱性向上の可能性検討	14
	(1) 検討概要	
	(2) フレーム内部への断熱材充填	
	(3) フレーム内部の低放射膜の形成	
	(4) ペアガラス内中空層への低放射フィルム挿入	
	(5) ガラスエッジスペーサの仕様	
	(6) 断熱材充填・低放射層以外のフレーム部の高断熱化	
	(7) 窓全体の断熱性能	
	(8) まとめ	
4.	試験等による断熱性能の検証	40
	(1) 検討概要	
	(2) 検討ケース	
	(3) 計算法による検討	
	(4) 試験による性能検証	
	(5) 計算法と試験による性能値の比較	
	(6) まとめ	
5.	長期的な断熱性能の確保に関する検討	68
	(1) フレーム内部への断熱材の充填について	
	(2) フレーム部の温度収縮について	
	(3) フレーム内部のメッキ処理について	
	(4) 複層ガラスの耐久性について	

6.	高性能窓の導入効果について81
	(1) 検討概要	
	(2) 窓単体の熱収支に関する検討	
	(3) 窓の性能と住宅の暖冷房負荷・CO2 排出量	
	(4) 室内温熱環境評価	
	(5) まとめ	
7.	まとめ95

1. はじめに

(1) 研究の背景

わが国では 1973 年のオイルショックをきっかけに省エネルギーが進められ、産業部門においては経済規模が大きく拡大したにもかかわらずほぼ横ばいのエネルギー消費量で推移している。一方、民生部門における家庭部門のエネルギー消費動向は 1973 年度比で 2009 年においては約 2 倍に増加している。このような状況下において、建築分野における省エネルギー化の手法として、「負荷の低減」と「エネルギーの効率的使用」が考えられる。

負荷の低減を考えると、壁体に比べ断熱性能が劣る窓の高断熱化は特に重要である。また、冷気流発生の原因となりやすい窓を高断熱化することは温熱環境確保の上でも重要性が高い。また、エネルギーの効率的使用として、壁体と異なり窓は日射のダイレクトゲインが多く期待できることから、さらなる省エネ化に向けて、その効果は大きいといえる。

まず、現状の一般的な窓と高断熱製品について、その断熱性能を整理する。

2012 年度に実施した道内の住宅事業者へのアンケート調査¹⁾による新築住宅の窓の仕様を表 1-1-1 に示す。現状道内の新築住宅で最も多い仕様は、フレーム材が樹脂又は木材、二層複層ガラスに LowE 加工を施しアルゴンもしくはクリプトンガスを封入したもので、空気層厚さが 12mm 以上のものである。これらの仕様から、平成 25 年省エネ基準の「仕様に応じた開口部の熱貫流率」を基に熱貫流率を求めると 1.9 W/(m²K)となり、新築住宅ではこの程度の断熱性能を持つ窓が主流として使用されているといえる。

国内の高断熱製品では、株式会社エクセルシャノンの熱貫流率 0.81 W/(m²K)のほか、L 社の熱貫流率 0.79 W/(m²K)、Y 社の熱貫流率 0.78 W/(m²K)があり、熱貫流率 0.8 W/(m²K)前後の水準である。一方、海外製品に目を向けると、ヨーロッパの A 社で熱貫流率 0.67 W/(m²K)の製品がある等、現状では日本より断熱性能が高い。これらはいずれもトリプルガラスの窓の性能である。クアトロ（4 枚）ガラス等ではさらに高断熱化すると考えられるが、重量が著しく大きいために一般的な住宅工事に適用するのが困難となる。

トリプルガラス以下の重量で、ヨーロッパの水準を上回る世界最高水準の断熱性能を持つ窓が開発されれば、無暖房住宅等といった暖冷房負荷のさらな

る削減に向けて、その可能性を大きく広げるとともに、多くの波及効果が期待できる。また、省エネ住宅の設計の自由度を向上させることが期待できる。

表 1-1-1 道内の住宅用窓仕様の調査

(a) フレーム材とガラス構成

フレーム材	ガラス			戸建住宅 (2012)	共同住宅 (2011)
	層数	LowE	ガス		
樹脂 又は木	ペア	なし	空気	1.4%	17.3%
		あり		4.0%	17.3%
	トリプル		Ar 又 は Kr	85.5%	47.5%
				8.5%	-
アルミ	ペア			-	8.2%
その他				0.6%	9.8%

(b) 空気層厚さ

空気層厚さ [mm]	戸建住宅 (2012)	共同住宅 (2011)
6	0.7%	4.7%
12	68.3%	95.3%
16	27.5%	0%
18	1.0%	0%
その他	2.5%	0%

(2) 研究の目的

本研究では、寒冷地における暖冷房負荷の削減と温熱環境確保に資する窓の高断熱化のため、世界最高水準の断熱性能を持つ窓製品の開発に向け、それを実現するための各種技術要件を明らかにするとともに、試験体の製作と性能検証によってその実現性を検討する。また、検討した窓の年間熱収支や代表的な住宅モデルに導入した際の試算から、暖冷房負荷削減や温熱環境確保の効果を示すとともに、気候特性や方位に応じた窓フレームとガラス性能の適切な組み合わせを明らかにする。

(3) 報告書の構成

第 2 章では、海外の先進技術製品としてヨーロッパ A 社の製品を分析し、本研究で検討する窓の技術的知見を得る。

第 3 章では、数値計算によって各種高断熱化技術の性能向上に及ぼす効果を明らかにし、目標性能として設定する熱貫流率 0.60 W/(m²K)に到達するための要件を示す。

第 4 章では、第 3 章で検討した高断熱化技術を段階的に盛り込んだ試作品を作成し、高断熱化技術の実現性を探るとともに試作品の断熱性能の検証を行う。

第 5 章では、長期的な断熱性能の確保や製造時の

課題に係る検討をまとめた。具体的には、複層ガラスの耐候性に関する試験条件の整理、フレーム部の温度収縮に関する実験、フレーム内部へのウレタンの充填性及びフレーム内部のメッキ処理について検討を行った。

第6章では、検討する窓の地域や方位に応じた熱収支や住宅モデルに適用した場合の暖冷房負荷や温熱環境に及ぼす影響を検討する。また、検討する窓フレーム部とガラス性能の適切な組み合わせについて考察する。

[第1章参考文献]

- 1-1) 月館司 他：北海道型ゼロエミッション住宅に関する研究、
北方建築総合研究所調査研究報告、2014.3

2. 海外先進技術製品の調査

(1) 調査概要

2014年3月26日～29日にドイツのニュルンベルクエキシビジョンセンターにて開催された窓の見本市「fensterbau」を視察し、主にヨーロッパの樹脂性高断熱窓を中心に調査を行った（調査は共同研究機関が実施）。様々な窓断面やそれに装着された複層ガラスが展示されていたが、全体の傾向としてフレーム部は断面中空部に断熱材を充填し断熱性能を強化しており、また複層ガラスは一部4層構成の複層ガラスが展示されていたものの、概ね3層以下、あるいは真空構造の複層ガラスが中心であった。本章では「fensterbau」における樹脂製高断熱窓の全体的な傾向の中でもとりわけ高性能な製品（以下、海外先進技術製品）を調査対象とし、断熱性能や高断熱技術について述べる。

展示されていた製品において、複層ガラスが3層以下の構成で研究目標値に近い断熱性能を保持するメーカーの製品を調査対象とした。展示されていた製品の説明やカタログ記載値・メーカーの規模・調達の難易度を勘案した。表 2-1-1 に調査対象製品のカタログ等による仕様及び性能を、断面を図 2-1-1 に示す。



図 2-1-1 調査対象商品の断面

(2) 調査手法

1) JIS A4710²⁻¹⁾ 「建具の断熱性試験方法」による窓の熱貫流率測定

窓の熱貫流率 U_w を JIS A4710 に基づいて測定し、表 2-1-1 で示した値と比較する。測定は北方建築総合研究所の断熱防露試験室で行った。測定方法の詳細は 4(4)節に記載するので、ここでは省略する。なお、表 2-1-1 の U_w は ISO 10077-1²⁻²⁾-2²⁻³⁾ に基づいた計算法による値であり、JIS A4710 との間において室内外の合計表面熱伝達抵抗が異なることから、(2-2-1)式を用いて測定結果に室内外の合計表面熱伝達抵抗の差分を補正した値 U_{wISO} を比較に用いる。

$$U_{wISO} = \frac{1}{(1/U_w) + 0.005} \quad (2-2-1)式$$

0.005 : 合計表面熱伝達抵抗の差分 [(m²K)/W]

2) ガラス中央部の熱貫流率推定

ガラス中央部の熱貫流率 U_g については、1)項の測定で得られたガラス内外の表面温度及び室内外の温度差、室内外の合計表面熱伝達抵抗を用い(2-2-2)式により算出し、表 2-1-1 で示した値と比較する。なお、表 2-1-1 の U_g は ISO 10292²⁻⁴⁾ に基づいた計算法による値であるため、(2-2-3)式を用いて算出された値に ISO 10292 で規定された室内外の合計表面熱伝達抵抗との差分を補正した値 U_{gISO} を比較に用いる。

ガラス中央部の熱貫流率は ISO 10291²⁻⁵⁾ や JIS A1412-1²⁻⁶⁾ に基づいて測定することが一般的なため、ここで算出する値は参考値と位置付ける。

表 2-1-1 調査対象製品の仕様及び性能

メーカー	ヨーロッパ A 社
種類	内開き内倒し窓 (ドレーキップ窓)
サッシの熱貫流率 U_{wISO}	0.67 W/(m ² K)
フレームの熱貫流率 U_{fISO}	0.79 W/(m ² K)
ガラス中央部の熱貫流率 U_{gISO}	0.50 W/(m ² K) (LowE4-Ar14-FL4-Ar14-LowE4)
ガラスエッジ部の線熱貫流率 ψ_{gISO}	0.032 W/(mK)
サッシサイズ	W=1,230 mm H=1,480 mm

注 ガラス仕様は室外側より記載、数字は厚さ[mm]

FL : フロート板ガラス、LowE : 低放射ガラス、Ar : アルゴンガス

$$U_g = \frac{\Delta t - (\theta_{in} - \theta_{out})}{R \cdot \Delta t} \quad (2-2-2)式$$

$$U_{gISO} = \frac{1}{(1/U_g) + R_{ISO1} - R} \quad (2-2-3)式$$

3) フレーム部の熱貫流率推定

フレーム部の熱貫流率の算出方法として、計算による方法 (ISO 10077-2、JIS A2102-2²⁻⁷⁾) と測定による方法 (ISO 12412-2²⁻⁸⁾) があるが、計算法を用いる場合はフレーム断面の詳細情報 (CAD データや各媒質の熱伝導率等) が必要となる。調査対象製品は断面詳細が得られなかったため、測定法を用いた算出を前提とする。なお、ISO 12412-2 に規定されるフレーム一片ごとの熱貫流率の測定では、窓とした場合に発生する隅角部を含めた評価ができず、局所的な熱伝達抵抗において不確かさが残るが、実現象を鑑みると無視できないと考えられる。そこで、4)項の測定法を用いてより実態に沿った形としてフレーム部の熱貫流率を算出し、表 2-1-1 で示した値と比較する。但し、ここで算出する値は ISO や JIS の規定から外れている為、推定値と位置付ける。

4) 断熱パネルを用いた窓の熱貫流率測定

ISO 10077-2 や JIS A2102-2 に規定される断面の詳細計算時における手法を参考に、製品に装着された複層ガラスを複層ガラスと同等の厚みを持つ押出法ポリスチレンフォーム等の断熱パネルに置き換える。断熱パネルを装着した状態における窓全体の通過熱量を 1)項と同様、JIS A4710 に基づき測定する。断熱パネルの熱伝導率をあらかじめ JIS A1412-2²⁻⁹⁾ に基づいた熱流計法により測定し、測定値を用いて(2-2-4)式より断熱パネルの見付け面積相当分の通過熱量を算出する。2)項で示す内外の表面温度を用いる手法においても断熱パネルの通過熱量算出は可能であるが、より精度の高い方法を優先した。断熱パネルを装着した状態における窓全体の通過熱量から断熱パネルの見付け面積相当分の通過熱量を差し引くことでフレームのみの通過熱量が得られ、(2-2-5)式によりフレームの熱貫流率が得

られる。なお、表 2-1-1 の U_f は ISO 10077-2 に基づいた計算法による値である。ISO 10077-2 で規定された室内外の合計表面熱伝達抵抗と測定時の室内外の合計表面熱伝達抵抗との差分を(2-2-6)式を用いて補正し、補正した値 U_{fISO} を比較に用いる。

$$\Theta_{spf} = \frac{PW \cdot PH \cdot \Delta t}{R + (D/\lambda)} \quad (2-2-4)式$$

$$U_f = \frac{\Theta_{sp} - \Theta_{spf}}{\Delta t \cdot (W \cdot H - PW \cdot PH)} \quad (2-2-5)式$$

$$U_{fISO} = \frac{1}{(1/U_f) + R_{ISO2} - R} \quad (2-2-6)式$$

5) ガラスエッジ部の線熱貫流率推定

ガラスエッジ部の線熱貫流率の算出方法は計算法による方法 (ISO 10077-2、JIS A2102-2) のみ規定されている。しかし、3)項同様、計算法を用いる場合はフレーム断面の詳細情報が必要なため、計算法は適用できなかった。断面の詳細情報の代替として前項までの手法で得た U_{wISO} 、 U_{gISO} 、 U_{fISO} を用いて(2-2-7)式によりガラスエッジ部の線熱貫流率 ψ_g を算出し、表 2-1-1 で示した値と比較する。

$$\psi_g = \frac{W \cdot H \cdot (U_{wISO} + U_{fISO}) - GW \cdot GH \cdot (U_{gISO} + U_{fISO})}{2 \cdot (GW + GH)} \quad (2-2-7)式$$

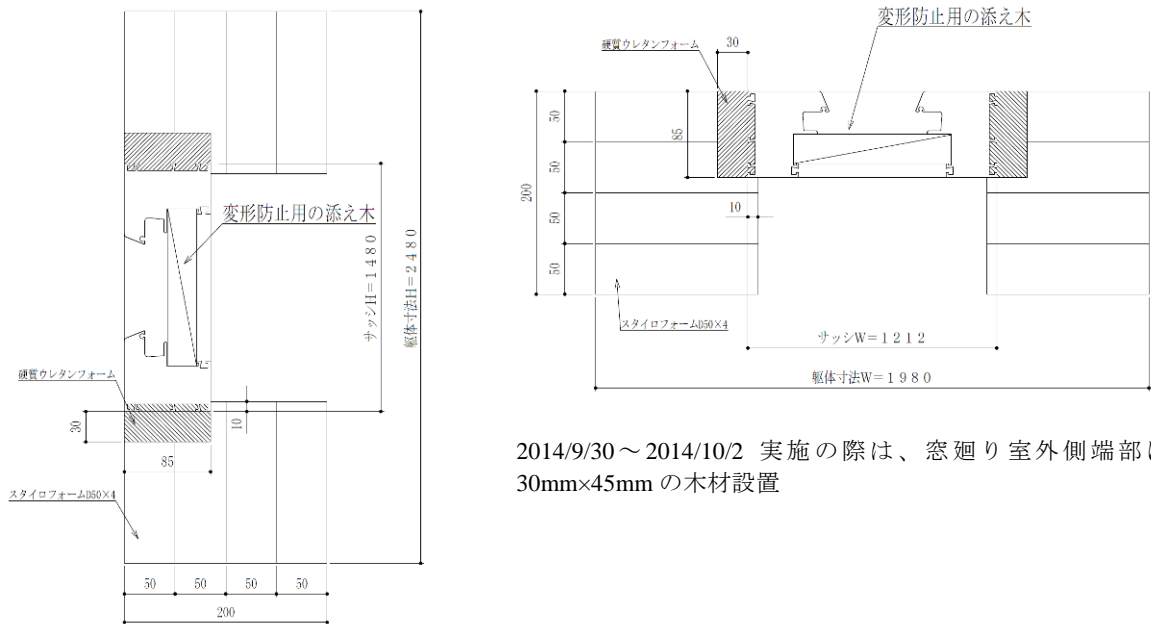
(3) 測定ケース

測定仕様の一覧を表 2-3-1 に示す。測定は窓の熱貫流率 U_w を計測するほか、前節 3)で示すフレーム部の熱貫流率 U_f を推定する目的で、ガラス部分を熱抵抗の実測が可能な断熱パネルで置き換えた仕様で実施した。またすべての測定仕様で室内外表面温度を各 12 点測定したほか、一部の仕様では参考に熱画像を撮影した。試験体の断面図を図 2-3-1 に、表面温度測定点を図 2-3-2 に、試験体の設置状況を写真 2-3-1 に示す。

表 2-3-1 海外先進技術製品の JIS A4710 による熱貫流率測定一覧

実施日	試験体概要	実施内容
2014/6/23 ～2014/6/25	種類： 樹脂サッシ(内開き内倒し) サイズ： W1,230 mm×H1,480 mm LowE4-Ar14-FL4-Ar14-LowE4 ガラス部仕様： (ガス種類は測定値からの推定) $U_g=0.50W/(m^2 K)$ (公称) フレーム： EPS 挿入	海外先進技術製品 (U_w) 測定 熱画像撮影
2014/6/26 ～2014/6/30	種類： 樹脂サッシ(内開き内倒し) サイズ： W1,230 mm×H1,480 mm ガラス部仕様： XPS3b 40 mm フレーム： EPS 挿入	海外先進技術製品 (U_f) 推定のための断熱パネルモデル 熱画像撮影
2014/9/30 ～2014/10/2	種類： 樹脂サッシ(内開き内倒し) サイズ： W1,212 mm×H1,480 mm ガラス部仕様： XPS3b 40 mm フレーム： ウレタン充填	海外先進技術製品 (U_f) 算出のための断熱パネルモデル

注 ガラス仕様は室外側より記載、数字は厚さ[mm]
FL：フロート板ガラス、LowE：低放射ガラス、
Kr：クリプトンガス、 U_g ：ガラス中央部の熱貫流率



(a)縦断面図

(b)横断面図

図 2-3-1 試験体断面図

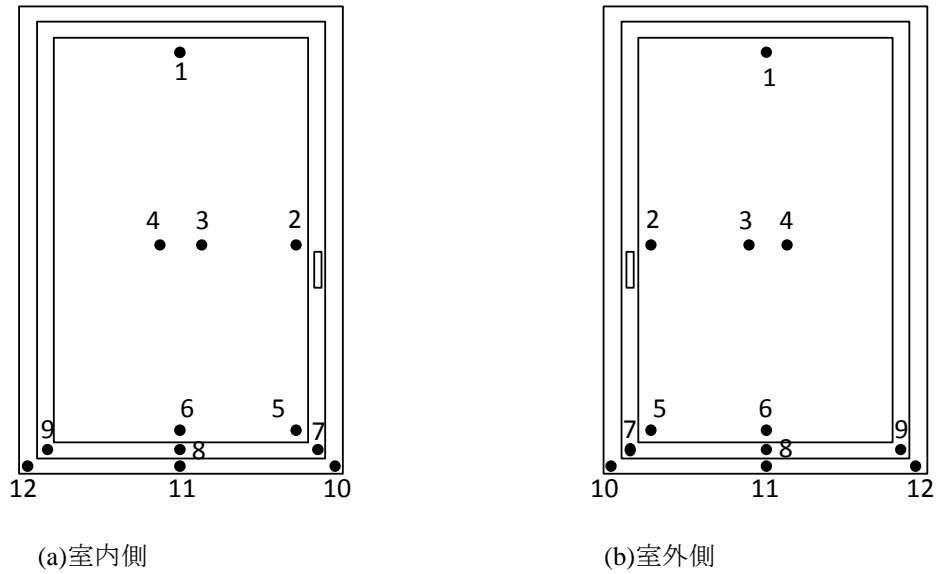
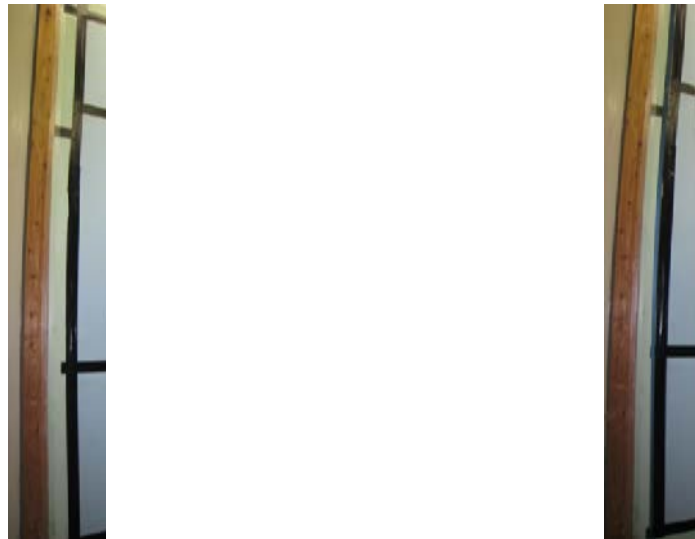


図 2-3-2 表面温度測定点



(a) 海外先進技術製品

(b) 海外先進技術製品（断熱パネル置換モデル）

写真 2-3-1 試験体設置状況

(4) 測定結果

1) 窓の熱貫流率

表 2-4-1 に測定結果を、図 2-4-1 に赤外線熱画像を示す。表中の基準化熱貫流率 U_w を(2-1-1)式を用いて補正した U_{wISO} は $0.81 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ となり、表 2-1-1 で示した公称値 ($0.67 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) 程度の測定結果は得られなかった。

表 2-4-1 海外先進技術製品（複層ガラス）の測定結果

試験年月日		2014/6/23～2014/6/25										
試験体		種類：樹脂サッシ(内倒し内開き) サイズ：W1,230×H1,480 ガラス部仕様：LowE4-Ar14-FL4-Ar14-LowE4 (ガス種類は測定値からの推定) $U_g=0.50W/(m^2K)$ (公称) 枠：EPS挿入										
断熱性能試験結果	測定回		第1回	第2回	第3回							
	発熱量	Φ_{in} (W)	38.0	38.0	37.9							
	校正熱量	Φ_{cal} (W)	9.4	9.3	9.4							
	試験体通過熱量	$\Phi_{sp}=\Phi_{in}-\Phi_{cal}$ (W)	28.6	28.6	28.6							
	冷却側環境温度	θ_{ne} (°C)	-0.3	-0.3	-0.3							
	加熱側環境温度	θ_{ni} (°C)	19.2	19.2	19.2							
	試験体両側環境温度差	$\theta_{ni}-\theta_{ne}$ (°C)	19.5	19.5	19.5							
	伝熱開口面積	A_{sp} (㎡)	1.82	1.82	1.82							
	熱貫流率 $U_m=\Phi_{sp}/\{(\theta_{ni}-\theta_{ne})\cdot A_{sp}\}$	U_m (W/㎡K)	0.81	0.81	0.81							
	熱貫流抵抗 $R_m=1/U_m$	R (㎡K/W)	1.240	1.238	1.242							
試験体両表面の熱伝達抵抗	$R_{s,t}$ (㎡K/W)	0.168										
表面熱伝達抵抗補正值	$\Delta R=0.165\cdot(R_i+R_o)$ (㎡K/W)	-0.003										
基準化熱貫流率** $U_{st}=[U_m^{-1}-R_{s,t}+R(s,t)]^{-1}$	U_{st} (W/㎡K)	0.81	0.81	0.81								
表面温度	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12
室内側(°C)	17.7	16.9	17.8	17.8	14.8	15.7	16.4	16.5	16.3	15.1	14.7	15.0
室外側(°C)	1.2	0.8	0.3	0.5	0.7	0.6	0.9	0.7	0.3	0.2	0.1	0.1

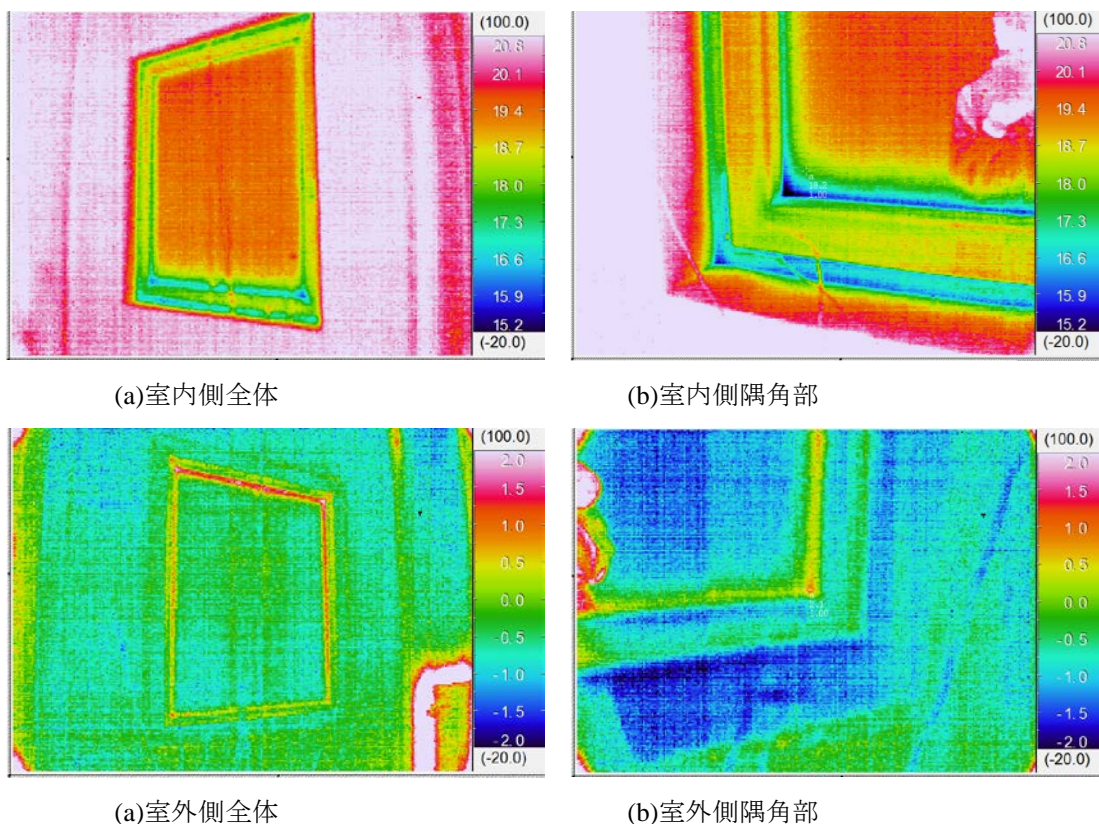


図 2-4-1 海外先進技術製品（複層ガラス）赤外線熱画像

2) ガラス中央部熱貫流率

図 2-3-2 で示すガラスの内外表面温度測定箇所 (No3、4) に該当する温度、(2-2-2)式を用いて求めた U_g 、(2-2-3)式を用いて求めた U_{gISO} を表 2-4-2 に示す。No3、No4 いずれの補正值においても表 2-1-1 で示した公称値程度に至らなかった。

表 2-4-2 ガラス中央部熱貫流率算出結果

測定箇所	No3	No4
室外側表面温度[°C]	0.3	0.5
室内側表面温度[°C]	17.8	17.8
U_g [W/(m ² K)]	0.61	0.67
U_{gISO} [W/(m ² K)]	0.60	0.66
Ave U_{gISO} (No3、4 の平均) [W/(m ² K)]	0.63	

乖離要因として複層ガラスの中空層に充填されたアルゴンガス (充填率 90%) のリークによる影響が想定される。ISO 20492-3²⁻¹⁰⁾では、「10 年経過したサンプルは加速耐久試験の結果の 10 倍より低いリークである」と記載されており、短期間でのガスリークは考えにくいものの、調達した商品は航空機で輸送しており急激な圧力変動によるガスリークの影響の可能性がある。

そこで、アルゴンガス (充填率 90%) で、表 2-1-1 で示した U_{gISO} となるような、板ガラスに被膜された低放射金属膜 (以下 LowE 膜) の垂直放射率を推定したところ、LowE 膜の垂直放射率を 0 としても実現出来ないことが分かった。

よって、乖離要因はガスリークではなくオーダー時の充填ガスの錯誤と推定し、アルゴンガスをクリプトンガス (充填率 90%) と仮定し、表 2-1-1 で示した U_{gISO} を実現する LowE 膜の垂直放射率を推定した結果 0.03 程度となった。

以上のことからオーダー時の錯誤が乖離の主要因であると考えた。なお、LowE 膜の垂直放射率を 0.03、充填ガスをアルゴンガス (90%) とした場合のガラス中央部熱貫流率を伝熱解析で求めた結果 0.67 W/(m²K)となり、測定結果から推定した値 Ave U_{gISO} と近い値を示した。

3) フレーム部の熱貫流率

① 測定結果 (調査対象製品)

表 2-4-3 に測定結果を示す。測定結果を基にフレーム部の熱貫流率 U_{fISO} を算出した結果 0.91 W/(m²K) となり、表 2-1-1 で示した公称値程度に至らなかった。測定後、試験体を解体する際フレームの一片を切断し断面を確認した結果、フレーム内部には写真 2-4-1、2-4-2 に示す様な断熱材が充填されていた。展示会での商品説明では硬質発泡ウレタンフォーム (以下、ウレタン) を断熱材として充填しているとのことであったが、フレーム内部の断熱材は一般的なウレタンの外観 (色や表面) と相違していた。目視では材質の判別がつかず、物性を推定するためフレームから断熱材を抽出し赤外分光法により組成分析を実施した。測定結果を図 2-4-2 に示す。抽出した断熱材のスペクトル (赤) はポリスチレン標準スペクトル (青) と良く一致していることから、断熱材の組成はポリスチレン、外観仕様からビーズ法ポリスチレンフォーム (以下、EPS) と考えられる。また、断熱材の全体密度は 24.9 kg/m³であった。表 2-4-4 で示す JIS A9511「発砲プラスチック保温材」の分類では 3 号品に分類するが、抽出した材が小さいことから測定による不確かさを考慮し、2~3 号相当と考え断熱材の熱伝導率は 0.037~0.040 W/(mK) と考えられる。

表 2-4-3 海外先進技術製品（断熱パネル）の測定結果

試験年月日		2014/6/26～2014/6/30										
試験体		種類：樹脂サッシ(内倒し内開き) サイズ：W1,230×H1,480 ガラス部仕様：XPS3b 40mm 枠：EPS挿入										
断熱性能試験結果	測定回			第1回	第2回	第3回						
	発熱量	Φ_{in}	(W)	34.6	34.6	34.5						
	校正熱量	Φ_{cal}	(W)	9.2	9.2	9.2						
	試験体通過熱量	$\Phi_{sp} = \Phi_{in} - \Phi_{cal}$	(W)	25.3	25.4	25.3						
	冷却側環境温度	θ_{ne}	(°C)	-0.3	-0.3	-0.3						
	加熱側環境温度	θ_{ni}	(°C)	19.2	19.2	19.2						
	試験体両側環境温度差	$\theta_{ni} - \theta_{ne}$	(°C)	19.5	19.5	19.5						
	伝熱開口面積	Asp	(m ²)	1.82	1.82	1.82						
	熱貫流率 $U_m = \Phi_{sp} / \{(\theta_{ni} - \theta_{ne}) * Asp\}$	U _m	(W/m ² K)	0.71	0.71	0.71						
	熱貫流抵抗 $R_m = 1/U_m$	R	(m ² K/W)	1.401	1.401	1.403						
	試験体両表面の熱伝達抵抗	R _{s,t}	(m ² K/W)	0.168								
	表面熱伝達抵抗補正值 $\Delta R = 0.165 - (R_i + R_o)$	$\Delta R = 0.165 - (R_i + R_o)$	(m ² K/W)	-0.003								
基準化熱貫流率 ^{**} $U_{st} = [U_m^{-1} - R_{s,t} + R(s,t),st]^{-1}$	U _{st}	(W/m ² K)	0.72	0.72	0.71							
表面温度	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12
室内側(°C)	17.9	17.7	17.9	17.8	17.1	17.3	16.6	17.2	16.3	15.2	14.9	15.0
室外側(°C)	0.4	0.5	0.3	0.5	0.4	0.4	0.8	0.7	0.2	0.2	0.2	0.1



写真 2-4-1 試験体フレーム断面

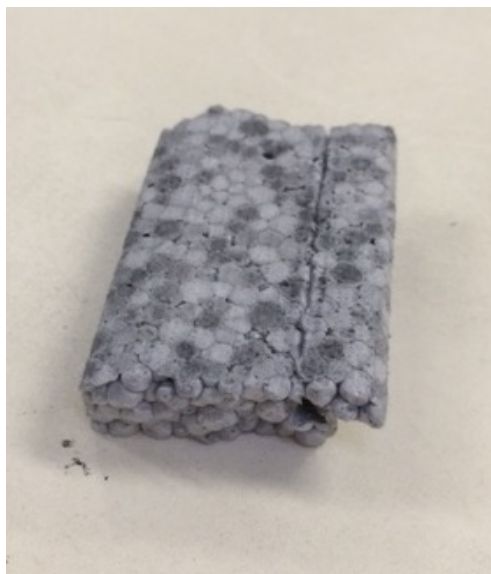


写真 2-4-2 抽出した断熱材

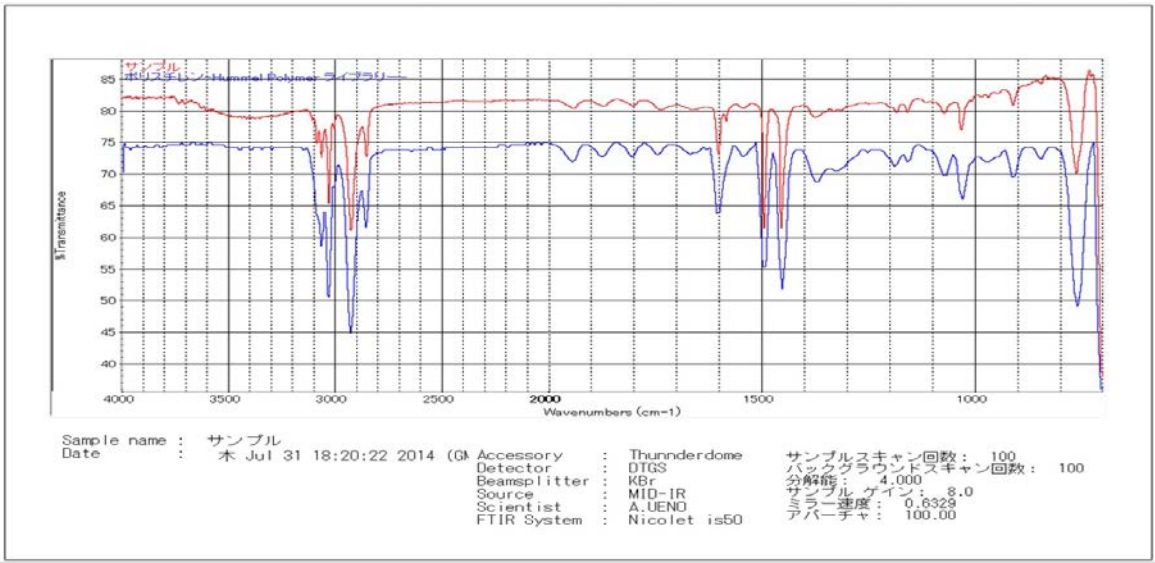


図 2-4-2 抽出した断熱材の赤外分光結果

表 2-4-4 JIS A9511「発砲プラスチック保温材」の分類

種類		密度	熱伝導率	透湿係数	圧縮強さ	曲げ強さ	燃焼性	吸水量	
		Kg/ m3	at.23 °C W/(m・K)	厚さ 25mm ng/ m ² ・s・Pa	N /cm ²	N /cm ²		g/100cm ²	
A 種	ビーズ法	特号	27 以上	0.034 以下	185 以下	14 以上	29 以上	3 秒以内に 炎が消えて、 残じんが 泣く燃焼 限界指示線 を超えない	1.0 以下
	ポリス	1号	30 以上	0.036 以下	145 以下	16 以上	32 以上		
	チレン	2号	25 以上	0.037 以下	205 以下	12 以上	25 以上		
	フォーム	3号	20 以上	0.040 以下	250 以下	8 以上	18 以上		
	保温板	4号	15 以上	0.043 以下	290 以下	5 以上	10 以上	1.5 以下	

② 測定結果 (充填断熱材変更)

①で測定した試験体のフレーム内部に充填されていた断熱材は EPS であったが、展示会での商品説明ではウレタンを断熱材として充填していると説明があり、何らかの要因により錯誤が生じたと考えられる。本来の商品仕様に近づけるべく、海外先進技術製品からガラスを取り外し、枠・障子フレームの溶着部分に沿って切断し EPS を取り除き、写真 2-4-3 の様に熱伝導率が 0.024W/(mK)のウレタンを隙間なく充填し再度フレームを溶着した。なお、切断の際用いた工具の歯径及びフレーム端部の溶着による溶け代分の欠損により、窓の仕上がり寸法 (W 寸法) が 2.(3)節で示した試験体より小さくなったが、ごく僅かであることから窓全体への影響は少ないと判断した。ウレタンを充填したフレームを用いた測定結果を表 2-4-5 に、赤外線熱画像を図 2-4-3 に示す。測定結果を基にフレーム部の熱貫流率 U_{ISO} を算出した結果 0.86 W/(m²K)となり、①で示した値から 6%向上し、表 2-1-1 で示した公称値に近

づいた。



写真 2-4-3 ウレタンを充填した断面

表 2-4-5 海外先進技術製品（断熱パネル・フレーム部ウレタン充填）の測定結果

試験年月日		2014/9/30~2014/10/2										
試験体		種類: 樹脂サッシ(内倒し内開き) サイズ: W1,212×H1,480 ガラス部仕様: XPS3b 40mm 枠: ウレタン充填										
断熱性能試験結果	測定回			第1回	第2回	第3回						
	発熱量	Φ_{in}	(W)	35.5	35.5	35.4						
	校正熱量	Φ_{cal}	(W)	9.9	9.8	9.9						
	試験体通過熱量	$\Phi_{sp} = \Phi_{in} - \Phi_{cal}$	(W)	25.6	25.7	25.6						
	冷却側環境温度	θ_{ne}	(°C)	-0.3	-0.2	-0.3						
	加熱側環境温度	θ_{ni}	(°C)	19.4	19.4	19.4						
	試験体両側環境温度差	$\theta_{ni} - \theta_{ne}$	(°C)	19.6	19.6	19.6						
	伝熱開口面積	A_{sp}	(m ²)	1.79	1.79	1.79						
	熱貫流率 $U_m = \Phi_{sp} / \{(\theta_{ni} - \theta_{ne}) * A_{sp}\}$	U_m	(W/m ² K)	0.73	0.73	0.73						
	熱貫流抵抗 $R_m = 1/U_m$	R	(m ² K/W)	1.375	1.372	1.377						
	試験体両表面の熱伝達抵抗	$R_{s,t}$	(m ² K/W)	0.168								
表面熱伝達抵抗補正值	$\Delta R = 0.165 - (R_i + R_o)$	(m ² K/W)	-0.003									
基準化熱貫流率 [*] $U_{st} = [U_m^{-1} - R_{s,t} + R(s,t),st]^{-1}$	U_{st}	(W/m ² K)	0.73	0.73	0.73							

表面温度	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12
室内側(°C)	18.0	17.8	17.8	17.8	17.3	17.4	16.1	17.2	16.3	12.7	13.8	13.5
室外側(°C)	0.5	0.6	0.4	0.6	0.4	0.4	0.6	1.1	0.5	0.2	0.2	0.1

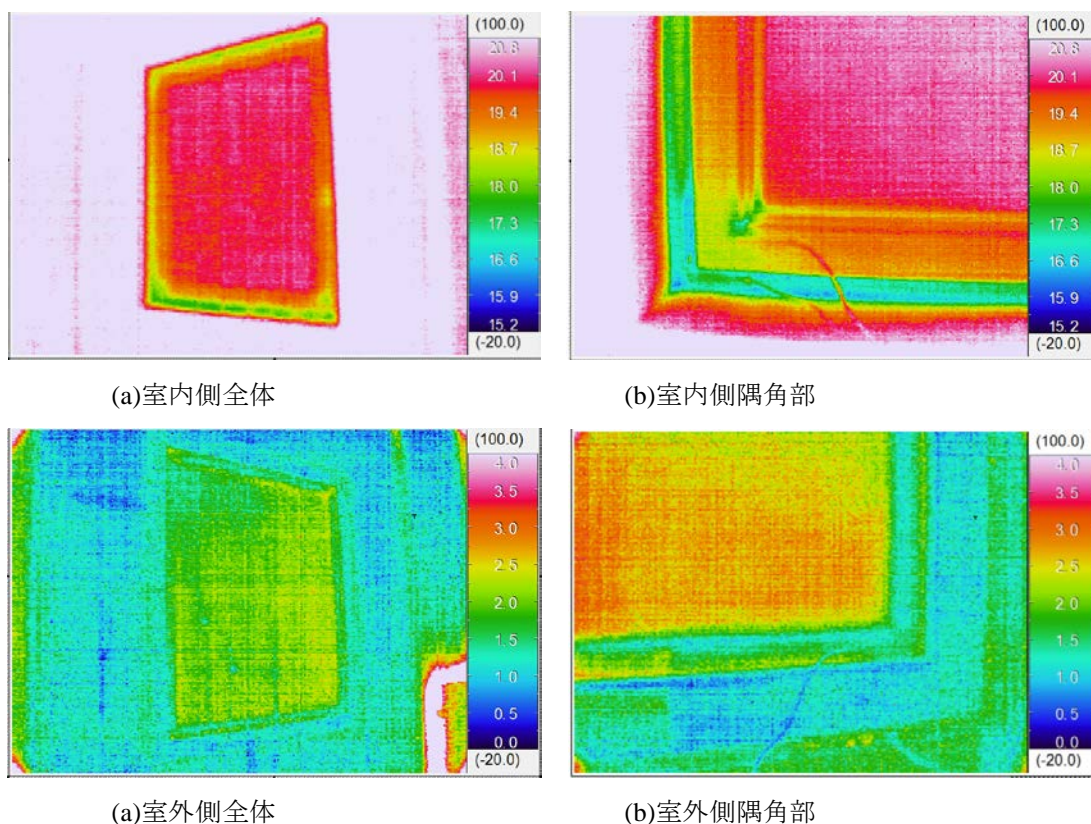


図 2-4-3 海外先進技術製品（断熱パネル・フレーム部ウレタン充填）赤外線熱画像

4) ガラスエッジ部線熱貫流率

前項までに示した $U_{wISO}=0.81 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ 、 $AveU_{gISO}=0.63 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ 、 $U_{fISO}=0.91 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ を用いてガラスエッジ部の線熱貫流率 ψ_g を算出した結果 $0.033 \text{ W}/(\text{mK})$ となり、表 2-1-1 で示した公称値とほぼ一致した。また、スペーサの形状や材質を確認するため複層ガラスを解体し、スペーサを抽出した。写真 2-4-4 に示す様に、日本国内においても一般的に流通している、樹脂とステンレスの複合型断熱スペーサであった。

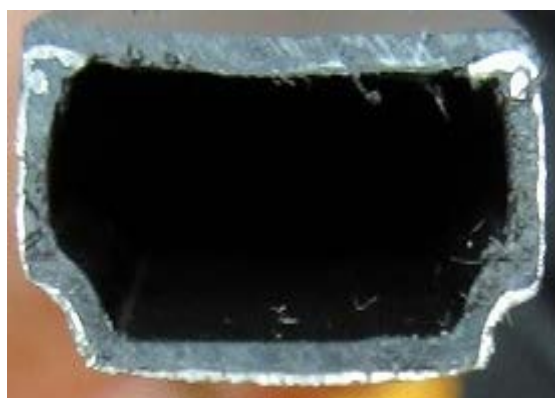


写真 2-4-4 抽出した試験体のスペーサ

5) 測定結果とカタログ値との比較

前項までで得られた測定値・推定値と表 2-1-1 に示した値との対比を表 2-4-6 に示す。

表 2-4-6 測定値・推定値とカタログ値との比較

部位	測定値	公称値 (表 2-1-1)
U_{wISO} [W/(m ² K)]	0.81	0.67
U_{gISO} (No3) [W/(m ² K)]	0.60	0.50
U_{gISO} (No4) [W/(m ² K)]	0.66	
$AveU_{gISO}$ (No3,4 の平均) [W/(m ² K)]	0.63	
U_{fISO} (EPS) [W/(m ² K)]	0.91	0.79
U_{fISO} (ウレタン) [W/(m ² K)]	0.86	
ψ_g [W/(mK)]	0.033	0.032

(5) まとめ

第 2 章では、海外先進事例の調査としてヨーロッパの高断熱サッシを調達し窓の熱貫流率の測定や、測定結果から複層ガラス・フレーム・ガラスエッジ

部の熱的性能を推定した。また、得られた結果と海外先進技術製品の公称値を比較し乖離要因を考察した。調査結果から得られた知見及び商品解体の際に得られた知見を以下にまとめる。

① U_g の公称値 $0.50 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ は、クリプトンガス相当を用いた値と推定する。アルゴンガスでは LowE 膜の垂直放射率を 0 としても公称値に届かなかったことによる。

② LowE 膜の垂直放射率は、0.03~0.05 程度と推定する。

③ ②相当の LowE 膜の垂直放射率、充填ガスをアルゴンガス (90%) とした場合のガラス中央部の熱貫流率解析結果は、測定結果から推定した値 ($AveU_{g,ISO}$) と近似していることが確認できた。

④ U_f の公称値 $0.79 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ は、納入状態 (フレーム内部に充填された断熱材の材質が EPS) では達成が確認できなかったが ($0.91 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$)、ウレタンに代替することにより 6%向上 ($0.86 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) し、公称値に近づくことが確認できた。

⑤ ψ_g は公称値と推定値がほぼ一致した。これはフレームや複層ガラスの断熱性能が公称値と推定値の違いによりお互いの全体の通過熱流量が異なっている、スペーサ構造や材質が同じであればガラスエッジ部の熱移動はほぼ一定であることを示している。

⑥ 商品のエッジクリアランス寸法は、4 方全て 4 mm だった。また、締め金物等が納まる空間部 (以下、キャビティ空間) に気密材 (センターシール) が設置されていた。エッジクリアランス寸法やセンターシール構造を本研究に採用した場合、既存品と比較しキャビティ空間が減少、あるいは分断されることから対流伝熱の抑制効果が期待できる。

⑦ フレーム内部には、耐風圧性能を担保することを目的として、金属製の補強材を設置する場合がある。海外先進技術製品には見受けられなかったが、調査の結果、写真 2-4-2 で示す黒色のスリット状部材がそれに該当することがわかった。材質は強化樹脂系である炭素繊維や硝子繊維を含んだポリブチレンテレフタレート (PBT) であった。従来の金属製補強材 (鋼材: $\lambda=50 \text{ W}/(\text{mK})$) と比べ熱伝導率はるかに小さい ($\lambda=0.27 \text{ W}/(\text{mK})$) ことから、熱橋効果の大幅な改善、サッシ全体の断熱性能の向上が期待できる。また、比重も小さく窓全体の重量軽減も期待できる。

⑧ フレーム内部に充填されていた断熱材は定型品であったことから、フレーム溶着前の充填が予想される。溶着前の取り回しや溶着時において断熱材がずり落ちない工夫が必要となるが、ビス固定や接着材による固定手法を用いず、断熱材の断面形状を溶着時型材内部からずり落ちない様スプリング機能を持たせることで対処していた。資材の減少や作業効率向上が期待できる。

U_w : 補正前 (JIS A4710) の (基準化) 熱貫流率[W/(m² K)]
 U_{wISO} : 補正後 (ISO 10077-1、-2) の熱貫流率[W/(m² K)]
 R_{ISO1} : ISO 10292 に規定された合計表面熱伝達抵抗[0.165(m² K)/W]
 R_{ISO2} : ISO 10077-2 に規定された合計表面熱伝達抵抗[0.170(m² K)/W]
 R : 測定時の合計表面熱伝達抵抗[(m² K)/W]
 W : 窓の幅[m]
 Δt : 測定時の室内外環境温度差[°C]
 θ_{IN} : 室内側ガラス中央部表面温度[°C]
 θ_{out} : 室外側ガラス中央部表面温度[°C]
 Θ_{spf} : 断熱パネルの見付け面積相当分の通過熱量[W]
 Θ_{sp} : 断熱パネルを含めた窓全体の通過熱量[W]
 λ : 断熱パネルの熱伝導率[W/(mK)]
 PW : 断熱パネルの見付け幅[m]
 PH : 断熱パネルの見付け高さ[m]
 ψ_g : ガラスエッジ部の線熱貫流率[W/(mK)]

[第2章参考文献]

- 2-1) JIS A4710 : 建具の断熱試験方法, (財) 日本規格協会, 2004
 2-2) ISO 10077-1 : Thermal performance of windows, doors and shutters-Calculation of thermal transmittance-Part1 : General, 2006
 2-3) ISO 10077-2 : Thermal performance of windows, doors and shutters-Calculation of thermal transmittance-Part2 : Numerical method for frames, 2003
 2-4) ISO 10292 : Glass in building-Calculation of steady-state U values (thermal transmittance) of multiple glazing, 1994
 2-5) ISO 10291 : Glass in building-Determination of steady-state U values (thermal transmittance) of multiple glazing -Guarded hot plate method, 1994
 2-6) JIS A1412-1 : 熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法-第1部 : 保護熱板法 (GHP 法) , 1999
 2-7) JIS A2102-2 : 窓及びドアの熱性能-熱貫流率の計算-第2部 : フレームの数値計算法, (財) 日本規格協会, 2011
 2-8) ISO 12412-2 : U-value : Hot Box Test Method Window Frames, 2005
 2-9) JIS A1412-2 : 熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法-第2部 : 熱流計法 (HFM 法) , 1999
 2-10) ISO 20492-3 : Glass in buildings-Insulating glass-Part3: : Gas concentration and gas leakage, 2010

[第2章記号]

D : 断熱パネルの厚み[m]
 GW : ガラスの見付け幅[m]
 GH : ガラスの見付け高さ[m]
 H : 窓の高さ[m]
 U_f : 補正前のフレーム熱貫流率[W/(m² K)]
 U_{fISO} : 補正後のフレーム熱貫流率[W/(m² K)]
 U_g : 補正前の熱貫流率[W/(m² K)]
 U_{gISO} : 補正後 (ISO 10292) の熱貫流率[W/(m² K)]

3. 各種要素技術による断熱性向上の可能性検討


(1) 検討概要

本章では、断熱性能を向上するための主なポイントとして、フレーム内部への断熱材充填（第2節）、フレーム内部における低放射膜層の形成（第3節）、ペアガラス内中空層への低放射フィルム挿入（第4節）、ガラスエッジスペーサ（第5節）に着眼し、各節で述べる。フレーム枠の断面の形状、補強材といったその他の構成要素についての検討は第6節で述べる。

さらに、検討の目標とする世界最高水準の窓の断熱性能として熱貫流率 $0.60\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ を達成するための要件を整理して第7節で述べる。

以下の検討では、表3-1-1に示す窓のタイプ、サイズを対象として検討することとした。この仕様は、寒冷地で過去30～40年間に於いて最も使用実績のある樹脂製窓メーカーの製品であり、居室において腰高窓として一般的に使用されている縦すべり出し窓であり、窓サイズは腰高窓で最も使用実績のある規格サイズとした。

表3-1-1 検討対象とした窓仕様

メーカー	株式会社エクセルシャノン
製品姿	
窓タイプ	縦すべり出し+はめこりし
窓サイズ	W=1,690 mm H=1,370 mm (規格 16513) (w1=665 mm)

(2) フレーム内部への断熱材充填

1) 検討概要

第2章で示した通り、海外先進事例の調査対象製品のフレーム内部には、フレーム部の断熱性能向上を目的とし、ビーズ法ポリスチレンフォーム（以下、EPS）が充填されていた。また、EPSより熱伝導率の小さい断熱材として、硬質発泡ウレタンフォーム（以下、ウレタン）を充填することでさらに断熱性能が向上することを確認した。本節では、検討対象窓でフレーム内部に断熱材を充填した場合におけるフレーム部の断熱性能向上効果を、JISA2102-2³⁻¹¹に基づく伝熱解析により明らかにする。

2) 断熱材の種類について

研究対象窓のフレーム内部に充填する断熱材の仕様を表3-2-1に示す。海外先進技術製品のフレーム内部に充填されていた断熱材は、その形状からフレーム溶着前の充填と予想したが、本研究ではフレーム溶着後の充填においても対応できる可能性の高い、湿式充填が可能なウレタンを用いることとした。メーカー選択における条件は、市場で一般的に流通し安定調達が可能であること、ウレタンの発泡圧によりフレームに悪影響を及ぼさないこと、A種硬質ウレタンフォーム保温版2種2号程度の熱伝導率を有することとした。

表3-2-1 断熱材の仕様

メーカー	倉敷紡績株式会社
製品姿	
製品名	クララフォーム-R
熱伝導率	0.024W/(mK) (メーカー公称値)

3) 断熱材の充填箇所

フレーム各部位の断面を図3-2-1～図3-2-4に、内観姿図を図3-2-5に示す。図の斜線部は断熱材の充填箇所を示す。断熱材を充填することが困難な箇所は充填対象から外した。

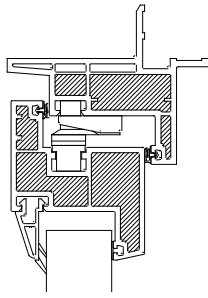


図 3-2-1 フレーム断面
(障子側上下枠)

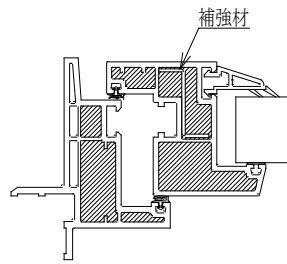


図 3-2-2 フレーム断面
(障子側吊元枠)

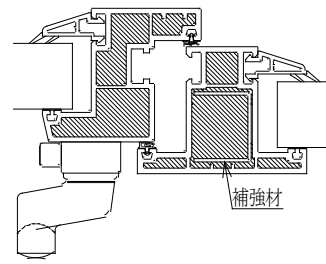


図 3-2-3 フレーム断面
(方立)

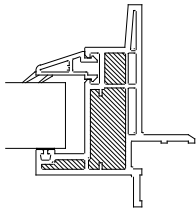


図 3-2-4 フレーム断面
(FIX側上下縦枠)

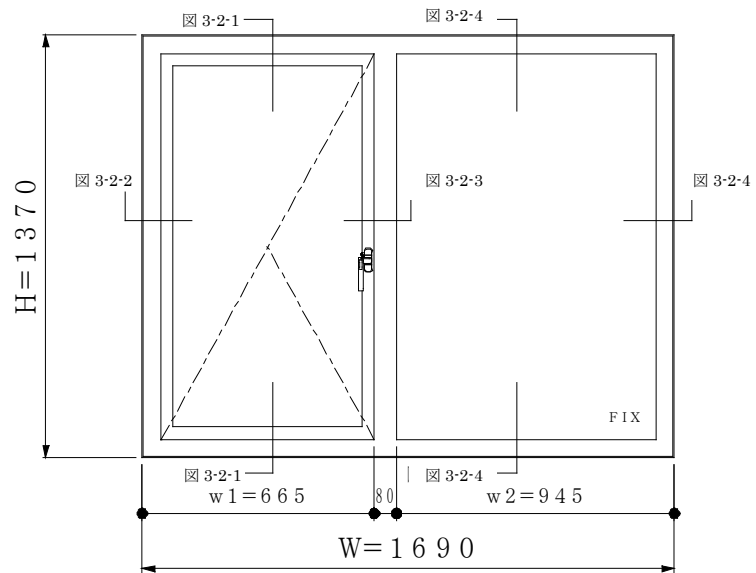
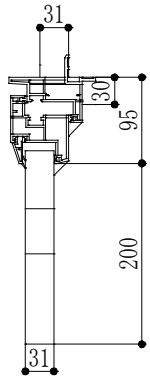


図 3-2-5 内観姿図

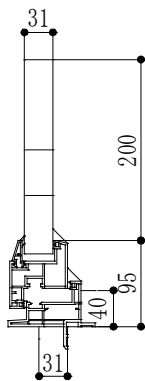
4) 数値解析による検討

フレーム部の熱貫流率 U_f は、フレームに断熱パネルを装着した図 3-2-6 に示す断熱パネルモデルを用いて、(3-2-1)式で求める。

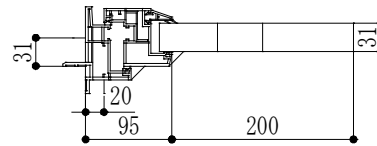
$$U_f = \frac{L_f^{2D} - U_p \cdot b_p}{b_f} \quad (3-2-1)式$$



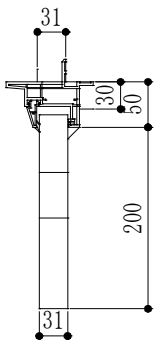
(a) 障子側上枠



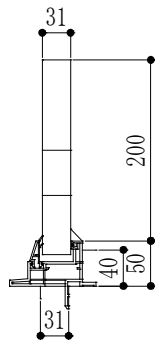
(b) 障子側下枠



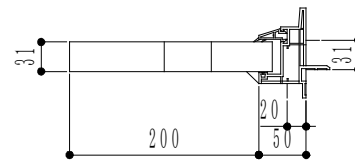
(c) 障子側吊元枠



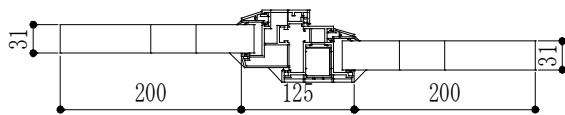
(d) FIX 側上枠



(e) FIX 側下枠



(f) FIX 側縦枠



(g) 方立

図 3-2-6 フレーム断面

断熱パネルモデルの2次元熱コンダクタンス算出に用いる解析ソフトは、2次元境界要素法計算プログラム TB2D/BEM^{3,2)} (Thermal Bridge Computation by 2-Dimensional Boundary Element Method) を用いる。TB2D/BEM は、境界要素法による2次元定常伝熱計算プログラムで、窓や躯体といった2次元壁体を貫流する総熱流量及びその表面での温度と熱流を計算することが可能である。また、リビングアメニティ協会 HP (<http://www.alianet.org/>) にて公開されている窓の熱性能評価プログラム WindEye^{3,3)}の基となるデータベースを作成する計算ツールとして使用されているほか、研究等でも多く使用されている。各断面モデルにおける構成材料の熱伝導率は、表 3-2-2 に示す値を用いた。構成材料の配置は図 3-2-7 に示す。なお、各断面解析モデルの外壁想定位置は枠フレームフィンからの一般的な厚さである通気胴縁

15 mm、サイディング 16 mmの合計 31 mmとし、額縁想定位置は窓内法基準寸法押え位置(伝熱開口寸法の押え位置から上枠 30 mm、下枠 40 mm、縦枠 20 mm)とした。室内側隅角部については JIS A2102-2 に基づいて局所熱伝達率を別途与えた。

各断熱パネルモデルの熱流量 Q_{fp} 及び2次元熱コンダクタンス L_{r}^{2D} の算出結果を表 3-2-3 に示す。

また、2次元熱コンダクタンス L_{r}^{2D} を用いて算出したフレーム部の熱貫流率 U_f を表 3-2-4 に示す。なお、算出にあたり各フレーム部の見付面積 A_f は、リビングアメニティ協会から発行されている TB2D/BEM マニュアル第 II 編応用編資料編^{3,4)}を参考とした。

比較のため、表 3-2-3 と表 3-2-4 には、断熱材が充填されていない、いわゆる既存仕様における断面の伝熱解析結果を併記した。

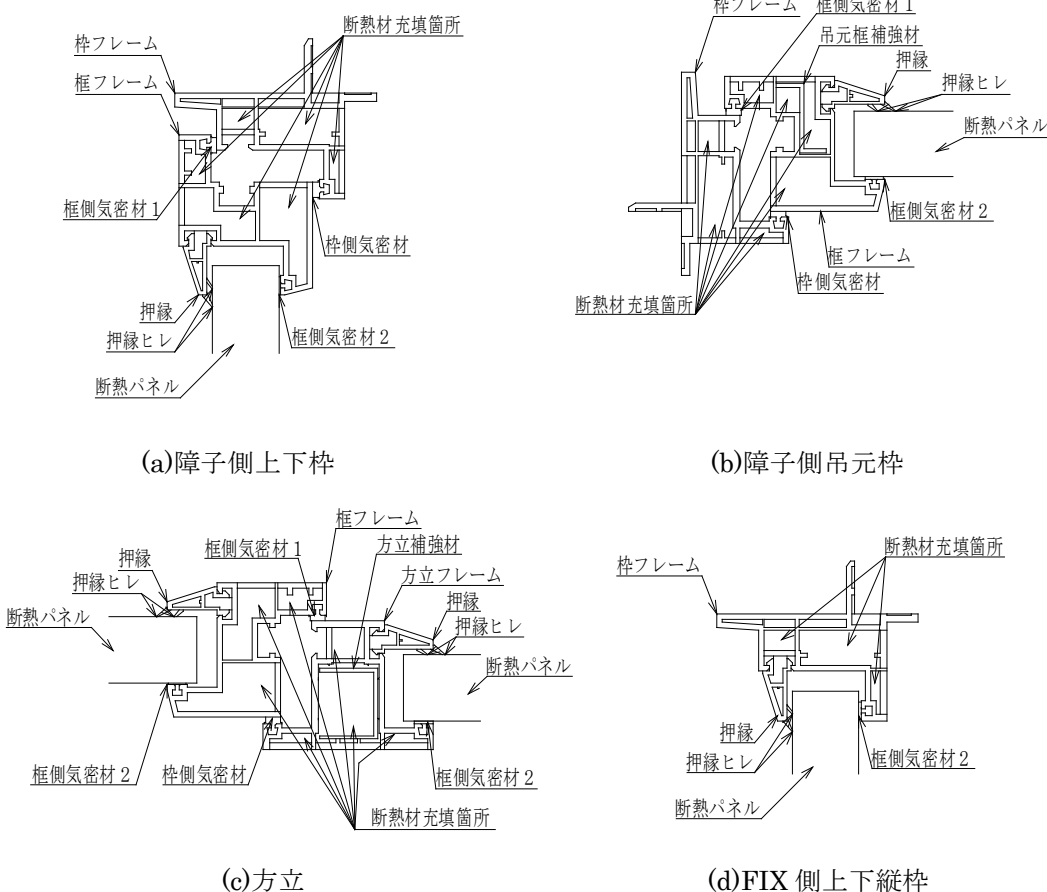


図 3-2-7 各断面の構成材料の配置

表 3-2-2 構成材料の熱伝導率

構成材料	材質	熱伝導率 λ [W/(mK)]	備考
枠フレーム	硬質 PVC	0.17	JIS 規定値
框フレーム			
方立フレーム			
押縁			
押縁ヒレ	軟質 PVC	0.14	JIS 規定値
枠側気密材			
框側気密材 1			
框側気密材 2	軟質 PVC (独立発泡性)	0.043	メーカー公称値
吊元框補強材	鋼材	50	JIS 規定値
方立補強材			
断熱材	ウレタン	0.024	メーカー公称値
断熱パネル		0.035	JIS 規定値

表 3-2-3 各断熱パネルモデルの熱流量 Q_{fp} 及び 2 次元熱コンダクタンス L_f^{2D}

種別	記号	単位	障子側 上枠	障子側 下枠	障子側 吊元枠	FIX 側 上枠	FIX 側 下枠	FIX 側 縦枠	方立
断熱材充填	Q_{fp} (out)	W/m	-5.72	-5.57	-5.99	-4.54	-4.44	-4.69	-10.86
	Q_{fp} (in)	W/m	-5.72	-5.57	-5.99	-4.54	-4.44	-4.69	-10.86
	Ave Q_{fp}	W/m	5.72	5.57	5.99	4.54	4.44	4.69	10.86
	L_f^{2D}	W/(m·K)	0.29	0.28	0.30	0.23	0.22	0.23	0.54
断熱材充填 なし	Q_{fp} (out)	W/m	-6.48	-6.28	-6.85	-4.77	-4.56	-4.97	-11.64
	Q_{fp} (in)	W/m	-6.48	-6.28	-6.85	-4.77	-4.56	-4.97	-11.64
	Ave Q_{fp}	W/m	6.48	6.28	6.85	4.77	4.56	4.97	11.64
	L_f^{2D}	W/(m·K)	0.32	0.31	0.34	0.24	0.23	0.25	0.58

Q_{fp} (out) : 熱流量 (室外側)、 Q_{fp} (in) : 熱流量 (室内側)、Ave Q_{fp} : 室内外の熱流量平均値、 L_f^{2D} : 2次元熱コンダクタンス

表 3-2-4 各フレーム部の熱貫流率 U_f

種別	記号	単位	障子側 上枠	障子側 下枠	障子側 吊元枠	FIX 側 上枠	FIX 側 下枠	FIX 側 縦枠	方立
断熱材充填	U_p	W/(m ² K)	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
	b_f	m	0.10	0.10	0.10	0.05	0.05	0.05	0.13
	A_f	m ²	0.06	0.06	0.12	0.05	0.05	0.07	0.16
	U_f	W/(m ² K)	1.02	0.94	1.16	0.75	0.66	0.90	1.31
断熱材充填 なし	U_p	W/(m ² K)	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
	b_f	m	0.10	0.10	0.10	0.05	0.05	0.05	0.13
	A_f	m ²	0.06	0.06	0.12	0.05	0.05	0.07	0.16
	U_f	W/(m ² K)	1.42	1.31	1.61	0.98	0.77	1.18	1.63

U_p : 断熱パネル中央部の熱貫流率、 b_f : フレーム部の投影幅、 A_f : フレーム部の見付面積、 U_f : フレーム部の熱貫流率

5) 断熱材充填の効果

フレーム部への断熱材充填有り無しにおけるフレーム各部の熱貫流率 U_f を表 3-2-5 にまとめた。

表 3-2-5 中の $AveU_f$ は、(3-2-2)式を用いて算出したフレーム部の平均熱貫流率を示す。

$$AveU_f = \frac{\sum U_{fn} \cdot A_{fn}}{\sum A_{fn}} \quad (3-2-2)式$$

フレーム部の熱貫流率 U_f は、全ての部位において断熱材を充填した仕様の方が小さい値となった。障子側で 28%、FIX 側で 14~23%、方立で 20%、フレーム部の平均熱貫流率 $AveU_f$ では 23% 向上した。

以上のことから、断熱材の充填は、研究対象窓においてもフレーム部の熱貫流率 U_f 向上に効果が大きいことが確認できた。

表 3-2-5 断熱材充填有無の熱貫流率 U_f への影響

断熱材充填		フレーム部熱貫流率 U_f [W/(m ² K)]	
		有り	無し
部位	障子側上枠	1.02	1.42
	障子側下枠	0.94	1.31
	障子側吊元枠	1.16	1.61
	FIX 側上枠	0.75	0.98
	FIX 側下枠	0.66	0.77
	FIX 側縦枠	0.90	1.15
	方立	1.31	1.63
全体	$AveU_f$	1.06	1.38

(3) フレーム内部の低放射膜の形成

1) 検討概要

前節で検討したように、フレーム内部にウレタン等の断熱材を充填することは断熱性向上のために効果的である。しかし、フレーム内部には断熱材を充填することが困難な細かな断面形状も存在する。そこで、ウレタン充填以外のフレーム部断熱性能向上の方策として、フレーム断面内部の放射率低減による高断熱化の可能性を検討する。

また、前節で検討したウレタンの充填は、狙った部分に 100% 充填できるとも限らない。多少の充填ムラが発生した場合に、フレーム断面内部の放射率を低減することによって断熱性能低下のリスク低減になると考えられるので、これについても併せて検討する。

2) 放射率低減の方法

放射率を低減する方法としては、塗料による方法とメッキによる方法が考えられる。以下にそれぞれを検討する。

① 塗料による方法

一般に、遮熱塗料もしくは高反射塗料とは、日射のような短波に対して遮熱効果が高い、即ち放射率が高い塗料のことを指しており、これらの塗料では長波の放射率の低減はあまり期待できない。通常の塗装を含めた建築材料の多くは放射率 0.9 程度である。

放射率が低い塗料に関する JIS 規格はない。近い規格として JIS K 5492³⁻⁵⁾ (アルミニウムペイント) があり、これに適合するいくつかの商品が流通している。JIS K 5492 では放射率に関する記述はないが、鏡面光沢度に関する規定があるために、放射率が低い可能性がある。ここでは文献 3-1) の表面種別による放射率の値を参考に、対象塗料の放射率を 0.3 程度であると考ええる。

② メッキによる方法

光沢のある金属は一般的に放射率が高い。次節の検討では、文献³⁻⁶⁾による銀の放射率 0.02 を参考に安全側に考えて、メッキの放射率を 0.05 と考える。塗料に比べて放射率の優位性が大きいので、本研究ではメッキの効果を検討することとする。

3) 放射率低減の効果

単純化のため、平行 2 平面間の熱抵抗で検討する。

対流熱伝達抵抗 R_C は文献³⁻⁷⁾を基に算出した。放射熱伝達抵抗 R_R は以下による。

$$R_R = \frac{|T_1 - T_2|}{\sigma \varepsilon_{12} |T_1^4 - T_2^4|} \quad (3-3-1) \text{式}$$

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1} \quad (3-3-2) \text{式}$$

計算結果を表 3-3-1 に示す。なお、充填する断熱材は前節で検討した硬質発泡ウレタンフォーム (熱伝導率 0.024 W/(mK)) とした。表 3-1-1 では(a)垂直面及び(b)水平面それぞれの検討を行っている。結果として、水平面と鉛直面の計算にあまり差がないので鉛直方法についての比較を以下に述べる。

まず、CASE 5V (両面メッキ) と CASE 4V (片面メッキ) を比較すると熱抵抗が同じ数値である (表示桁数より小さい範囲で CASE 5V の熱抵抗がわずかに大きい)。CASE 4V (片面メッキ) と CASE 3V (メッキなし) を比較すると熱抵抗の差がある。このことから、金属メッキが可能であれば、熱授受の最低片面がメッキされていれば断熱性能に効果があると言える。

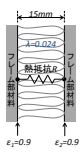
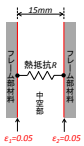
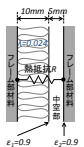
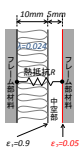
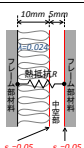
CASE 1V (ウレタン完全充填) と CASE 4V (ウレタン完全充填でないが片面メッキ) を比較すると、CASE 1V の熱抵抗が大きい、その差は大きくない。このことから、仮にウレタンが完全に充填できないとしても、メッキ加工を施すことによって完全充填と同等程度の熱抵抗が得られることが分かる。

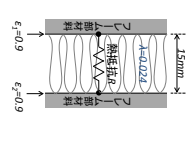
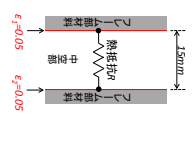
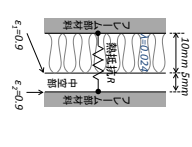
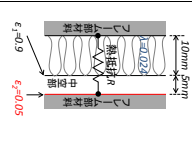
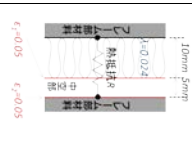
このことから、本研究ではフレーム部内側断面のメッキ処理を断熱性能向上に効果的と考えた。

表 3-3-1 低放射膜形成の効果の検討

(a) 垂直面

(b) 水平面

CASE	断熱材熱 伝導抵抗 R_f [m ² K/W]	中空層対 流熱伝達 抵抗 R_c [m ² K/W]	中空層放 射熱伝達 抵抗 R_e ^{*2} [m ² K/W]	合成 熱抵抗 R ^{*3} [m ² K/W]
CASE 1V 	0.625	0	0	0.63
CASE 2V 	0	0.257	7.003	0.25
CASE 3V 	0.417	0.200	0.219	0.52
CASE 4V 	0.417	0.200	3.611	0.61
CASE 5V 	0.417	0.200	7.003	0.61

CASE	断熱材熱 伝導抵抗 R_f [m ² K/W]	中空層対 流熱伝達 抵抗 R_c ^{*1} [m ² K/W]	中空層放 射熱伝達 抵抗 R_e ^{*2} [m ² K/W]	合成 熱抵抗 R ^{*3} [m ² K/W]
CASE 1H 	0.625	0	0	0.63
CASE 2H 	0	0.247	7.003	0.24
CASE 3H 	0.417	0.200	0.219	0.52
CASE 4H 	0.417	0.200	3.611	0.61
CASE 5H 	0.417	0.200	7.003	0.61

(4) ペアガラス内中空層への低放射フィルム挿入

1) 検討概要

本節では、ガラス部の断熱性能を向上させる方策として、ペアガラス内中空層へ可視光透過低放射フィルム（以下、フィルム）挿入について検討を行う。

ここでは、以下の3点の最適化により、断熱性能上、理想的なガラス構造について検討する。

- ・低放射膜（以下 LowE 膜）の効果と配置の最適化
- ・ガス種別の気体熱伝達と中空層の厚みの関係から、ガスに合わせた最適厚みの推察
- ・最適な断熱ガラス構成

2) 計算方法

ガラス中央部の熱貫流率 U_g は、現在のところ JIS R3107³⁻⁹⁾「板ガラス類の熱抵抗および建築における熱貫流率の算定方法」に従って計算されている。一方で、JIS R3107 は ISO10291³⁻⁹⁾がベースとなっており、国際的に計算方法として主流となっている ISO 15099 より古い方式であるため、多層構造のシミュレーション方法が概念的にしか示されていないほか、ガス物性値なども簡易計算方式のため ISO とは数値計算の結果が異なる傾向がみられる。

本研究では ISO 15099³⁻¹⁰⁾に従った手順・算定式を用い、JIS R3107 の境界条件を採用することによって U_g の算出を行った。

U_g は(3-4-1)式で求められる。

JIS R3107 による断熱計算時の境界条件は以下の通りである。

$$U_g = \left(\frac{1}{h_{out}} + \sum_{i=2}^n R_i + \sum_{i=1}^m R_{g,i} + \frac{1}{h_{in}} \right)^{-1} \dots (3-4-1)$$

室外温度 = 0°C , 室内温度 = 20°C

室外表面熱伝達率 : $h_{out} = 4.9 \times \epsilon_e + 16.3$

室内表面熱伝達率 : $h_{in} = 5.4 \times \epsilon_i + 4.1$

複層ガラスの熱抵抗は中空層の熱抵抗の和と固体の熱抵抗の和によって求められ、その値に室外および室内表面伝達率を加味して計算した値が、ガラス中央部の熱貫流率 U_g となる。

固体部の熱抵抗は材料各々について、厚みを熱伝導率で除して求めた熱抵抗を積算した値となり、中空層の熱コンダクタンス（熱抵抗の逆数）は、ステ

ファンボルツマン則によって求めた放射成分と、中空層に封入されるガスの特性値と厚みおよび対流効果を考慮して求めた対流成分の値を積算した値となる。

3) LowE 膜の効果と配置の最適化

放射熱伝達 h_r は(3-4-2)式によって求められるが、垂直設置され、熱流方向が複層ガラスの厚み方向である場合、中空層の厚みに対してガラス高さが十分に大きい場合には、(3-4-3)式に置き換えることができる。

$$h_c = \frac{4\sigma T_m^3}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 2 + \frac{1}{2} \left\{ \left[1 + \left(\frac{d}{H} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{d}{H} + 1 \right\}} \dots (3-4-2)$$

$$h_r = 4\sigma \left(\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)^{-1} T_m^3 \dots (3-4-3)$$

表面放射率が低い材料を向かい合わせて使うことで最も放射熱伝達を下げるのが可能となるが、放射率が低い場合にはあまり効果が無い。

一般的なフロートガラス（LowE コーティング無し）と本件で採用したフィルムの放射率を利用して伝熱解析を実施した結果、下記の結果が得られる。

$\epsilon_1 = 0.837$, $\epsilon_2 = 0.837$, $T_m = 283\text{K}$ の場合,
 $h_r = 3.68 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

$\epsilon_1 = 0.045$, $\epsilon_2 = 0.837$, $T_m = 283\text{K}$ の場合,
 $h_r = 0.23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

$\epsilon_1 = 0.045$, $\epsilon_2 = 0.045$, $T_m = 283\text{K}$ の場合,
 $h_r = 0.12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

1 層あたりの気体熱の伝達率は、空気の場合、最小で 2 W/(m²K)程度（次項にて説明）のため、ガスを充填してその値を下げるよりも LowE 膜を設ける方が効率的なことが窺える。ところが、ガラスに対して LowE 膜の 1 枚設置で 94%低減できるのに対して、2 枚使用しても 97%の低減と LowE 膜 1 枚追加したことに見合った効果は得られない。

また LowE 膜は透明であるが、コーティング無し

のガラスもしくは PET フィルムと比較すると反射が高く、着色もあるため、視野性や日射特性等を考慮すると、1つの中空層に対して LowE 面は1つとする方が効率的である。

なお、LowE 膜は基本的に材料の片面にコーティングされることが多く、多層化する場合には、全ての面に LowE 膜を配置することは非常に困難かつコストが増加することを考慮し、1層あたり1つの LowE 膜とする。

4) 充填ガス別の厚みの最適化

気体熱伝達 h_c は(3-4-4)式によって求められる。

$$h_c = Nu \times \frac{\lambda_{gas}}{d_{gas}} \dots (3-4-4)$$

ここで、ヌセルト数 Nu は対流の程度を示す無次元数で、レイリー数 Ra の大きさに応じて(3-4-5)式～(3-4-7)式のいずれかおよび(3-4-8)式の計算を行い大きい値を採用する。

$Ra \leq 10^4$ の時

$$Nu = 1 + 1.766 \cdot 10^{-10} \cdot Ra^{2.2985} \dots (3-4-5)$$

$10^4 < Ra \leq 5 \cdot 10^4$ の時

$$Nu = 0.028154 \cdot Ra^{0.4134} \dots (3-4-6)$$

$5 \cdot 10^4 < Ra$ の時

$$Nu = 0.06738 \cdot Ra^{\frac{1}{3}} \dots (3-4-7)$$

および

$$Nu = 0.242 \cdot \left(\frac{Ra}{A_g}\right)^{0.272} \dots (3-4-8)$$

ここで、レイリー数 Ra は静止流体における熱対流の様子を特徴づける無次元の数で、グラフホフ数とプラントル数の積で表される。(3-4-9)式により算出する。

$$Ra = \frac{g \cdot \rho^2 \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot d^3}{\mu \cdot \lambda} = Gr \cdot Pr = \frac{g \cdot d^3 \cdot \Delta T \cdot \rho^2 \cdot \mu \cdot C}{T_m \cdot \mu^2 \cdot \lambda} \dots (3-4-9)$$

なお、これらに用いる気体の物性値は JIS R 3107 と ISO15099 で異なるが、本研究では ISO15099 に従って算出したものを用いることとした。相違点について以下に示す。

① 単一ガスの物性値

JIS R 3107 では表に示された気体の物性値より選択するのに対し、ISO15099 では熱伝導率、粘度、および比熱が表 3-4-1 に示すように温度による補正項を含む式で示される。これらの値を計算によって求め、理想気体の状態方程式から密度を算出する。

② 混合ガスの物性値

JIS R 3107 では体積比(理想気体では=モル分率)で特性値を割り振るのに対して、ISO15099 では状態方程式、気体分子運動論、衝突積分などの理論式を組み合わせてより精度の高い値を求める。

算出方法の違いを表 3-4-2 にまとめる。

表 3-4-1 気体の物性値

ガス	分子量	熱伝導率[W/(m K)]		粘度[k g/m s]		比熱[J / k g K]	
		A	B	A	B	A	B
空気	29.0	2.87×10^{-3}	7.76×10^{-5}	3.72×10^{-6}	4.94×10^{-8}	1.00×10^3	1.23×10^2
アルゴン	39.9	2.28×10^{-3}	5.15×10^{-5}	3.38×10^{-6}	6.45×10^{-8}	5.22×10^2	—
クリプトン	83.8	9.44×10^{-4}	2.83×10^{-5}	2.21×10^{-6}	7.78×10^{-8}	2.48×10^2	—
キセノン	131.3	4.54×10^{-4}	1.72×10^{-5}	1.07×10^{-6}	7.41×10^{-8}	1.58×10^2	—

表 3-4-2 混合ガスの物性値の算出方法

物性値	JISR3107	ISO15099
M_{mix} 分子量	$M_{mix} = \sum_{i=1}^v m_i M_i$	$M_{mix} = \sum_{i=1}^v m_i M_i$
ρ_{mix} 密度	$\rho_{mix} = \sum_{i=1}^v m_i \rho_i$	$\rho = \frac{P \cdot M_{mix}}{\mathfrak{R} \cdot T_m}$
C_{mix} 比熱	$C_{mix} = \sum_{i=1}^v m_i C_i$	$C_{mix} = \frac{\hat{C}_{mix}}{M_{mix}}$ $\hat{C}_{mix} = \sum_{i=1}^v m_i \hat{C}_i$ $\hat{C}_i = C_i M_i$
μ_{mix} 粘度	$\sigma_{mix} = \sum_{i=1}^v m_i \sigma_i$	$\mu_{mix} = \sum_{i=1}^v \frac{\mu_i}{\left(1 + \sum_{j \neq i}^v \phi_{ij}^{\mu} \frac{m_j}{m_i}\right)}$ $\phi_{ij}^{\mu} = \frac{\left[1 + (\mu_i/\mu_j)^{1/2} (M_j/M_i)^{1/4}\right]^2}{2\sqrt{2} \left[1 + (M_i/M_j)\right]^{1/2}}$
λ_{mix} 熱伝導率	$\lambda_{mix} = \sum_{i=1}^v m_i \lambda_i$	$\lambda_{mix} = \lambda'_{mix} + \lambda''_{mix}$ $\lambda'_i = \frac{15}{4} \times \frac{\mathfrak{R}}{M_i} \mu_i$, $\lambda''_i = \lambda_i - \lambda'_i$ $\lambda'_{mix} = \sum_{i=1}^v \frac{\lambda'_i}{\left(1 + \sum_{j \neq i}^v \psi_{ij} \frac{m_j}{m_i}\right)}$, $\lambda''_{mix} = \sum_{i=1}^v \frac{\lambda''_i}{\left(1 + \sum_{j \neq i}^v \phi_{ij}^{\lambda} \frac{m_j}{m_i}\right)}$ $\psi_{ij} = \frac{\left[1 + (\lambda'_i/\lambda'_j)^{1/2} (M_j/M_i)^{1/4}\right]^2}{2\sqrt{2} \left[1 + (M_i/M_j)\right]^{1/2}} \times \left[1 + 2.41 \times \frac{(M_i - M_j)(M_i - 0.142M_j)}{(M_i + M_j)^2}\right]$ $\phi_{ij}^{\lambda} = \frac{\left[1 + (\lambda'_i/\lambda'_j)^{1/2} (M_j/M_i)^{1/4}\right]^2}{2\sqrt{2} \left[1 + (M_i/M_j)\right]^{1/2}}$

m_i : モル分率 理想気体では体積分率と同等、 \mathfrak{R} : 気体定数、 P : 気体の圧力

なお、JIS R 3107 では式の表現方法が異なるが、比較しやすいよう ISO15099 と表現方法を揃えた。

また、複層ガラスへのガス充填は置換方式で行うため、100%の高純度ガスの充填は技術的に難しく、通常90%程度で生産される。従って本来は充填ガスと空気との混合気体の実際の混合濃度にて物性値を求めるべきであるが、ここでは各気体の特長を簡潔に比較するために、それぞれのガスが100%で充填されたと見なして計算を行うこととした。

解析条件として便宜的にガスの温度を283K、対向する2面間の温度差を15K（JIS R3107の標準条件）として気体熱伝達を縦軸、中空層の厚みを横軸としてグラフを作成すると図3-4-1に示す曲線が得られる。あわせて得られた気体熱伝達を厚みで割った、単位厚みあたりの熱伝導率の値も破線により併記した。これにより、対流の発生厚みを副次的に確認することができる。

空気およびアルゴンは10 mm程度、クリプトンは8 mm程度、キセノンは5 mm程度まで熱伝導率が一定で対流をしないことがわかり、層数に制限が無い場合にはこの厚みで分割することで最大の断熱効果が期待できる。一方で中空層の厚みを増加、あるいは限られた空間を複数の中空層に分断して断熱性の向上を試みる場合には、高断熱のガスほど薄い中空層から対流が発生しやすくなるため、断熱性能とガス充填量に伴い増加するコストとのバランスを考え上限値を設定する必要がある。（例えば、16 mmの中空層にクリプトンを充填してもアルゴンガスとほとんど変わらず、ガスが占める製品全体に対する費用は著しく増加するためアルゴンを選択するのが好ましい。）

以上の結果から考察した、それぞれのガスへの最適充填厚みを下記に示す。

キセノンガス	⇒	4 ~ 7 mm
クリプトンガス	⇒	6 ~ 10 mm
空気, アルゴンガス	⇒	10 ~ 16 mm

なお本項では簡易化のために、温度を固定した条件にて説明を行ったが、実際には、図3-4-2に示すように、各材料の温度と物性値から求める熱収支と各部の熱抵抗を連立させ、収束計算を行うことで解を得る必要がある。

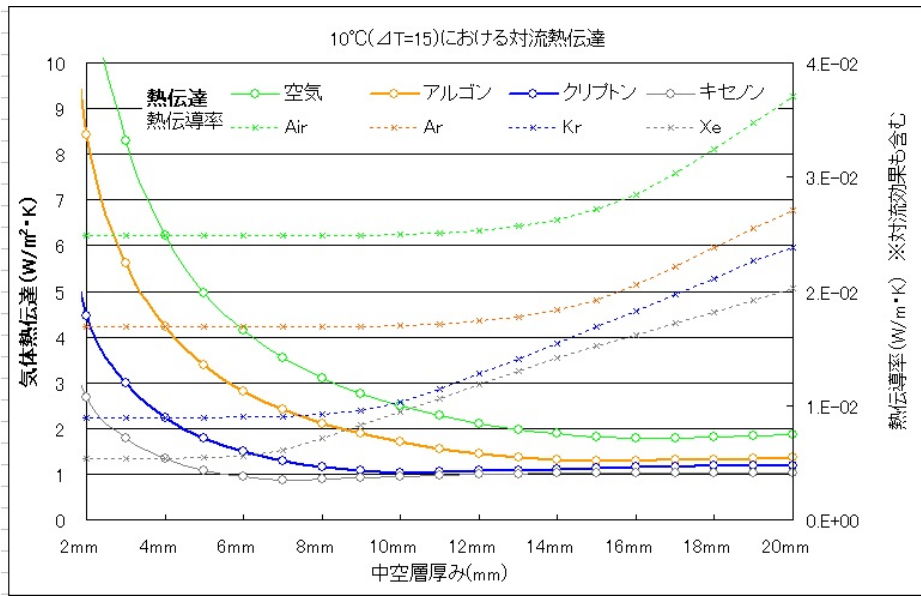


図 3-4-1 中空層の厚みと気体熱伝達の変化

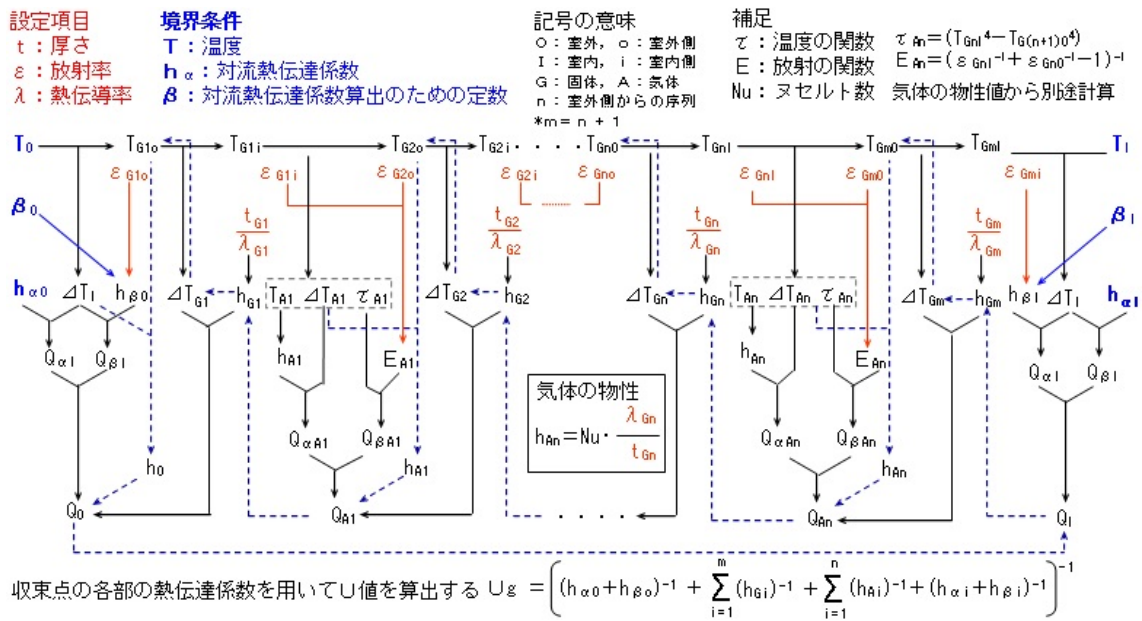


図 3-4-2 ガラスの熱貫流率計算フロー

5) ガラス構成の提案

LowE 膜、ガス入り中空層を最適な厚みで設計しても 1 つのガス層での断熱性には限界があり、その値を上回るには空間を複数に仕切る必要がある。ガラスは厚みを持つため、限られた厚みでの設計では、ガラスの厚み×分断数の厚みだけ中空層が減るが、フィルムの場合にはほぼ厚みがないため、中空層を減らすことなく設計が可能である。また、フィルムの場合には、重量もほとんど無いため、ガラス構成

の変更によって窓の構造を見直す等の影響がなく、4 層ガラスや 5 層ガラスに相当する構成を製造できるというメリットがある。

上記のことから、本研究においては、フィルムによって内部を多数に分断したガラスを選定した。そして研究のために設計したガラス構成およびその熱的特性値を表 3-4-3 に示す。

表 3-4-3 ガラス構成の提案仕様

製品厚さ [mm]	ガラス構成	熱貫流率 [W/(m ² K)]	日射 遮蔽係数	日射熱 取得率
32	LE+Xe+SC+Xe+SC+XE+SC+Xe+FL	0.29	0.27	0.23
36	LE+K r +SC+K r +SC+K r +FL	0.39	0.32	0.28
38	LE+A r +SC+A r +FL	0.64	0.40	0.35
38	FL+A r +HM+A r +FL	0.69	0.58	0.51

記号の説明

ガラス : LE=LowE ガラス 3mm

フィルム : SC=遮熱タイプフィルム

中空層 : Xe=キセノンガス (90%) 6.5mm

A r =アルゴンガス (90%) 16mm

気体の物性値 : 表 3-4-1 の値

放射率 : フィルムの低放射面 0.045

Low-E ガラス 0.059

フロートガラス 0.837

FL=フロートガラス 3mm

HM=断熱タイプフィルム

K r =クリプトンガス (90%) 10mm

(5) ガラスエッジスペーサの仕様

複層ガラスのスペーサの役割および要求性能としては主に以下の3点が上げられる(図3-5-1)。

- ・ガラス間の距離の調整および構造体としての保持：実用的な強度
- ・空気層と外部の遮断：水蒸気やガスの透過性が低いこと
- ・空気層の乾燥：スペーサ内部に乾燥材を充填でき通気孔があること

強度の確保や乾燥材を充填するための空間の形成、乾燥材が内部へ抜けずに通気を確保するための細孔を設ける必要があるため、複層ガラスのスペーサは優れた加工性を持つアルミニウムで製造され始め、現在でも国内においてはほとんどがアルミニウム製である。

しかしながら、アルミニウムは熱伝導率が非常に高いため木製サッシや樹脂製サッシが用いられるようになるにつれ、ガラスのエッジ部の熱橋が無視できない程の影響を与えることから、熱伝導の小さい鉄、さらに小さいステンレス等の金属への遷移を経て、金属-樹脂のハイブリッド構造、金属をより薄い箔とするなどの改善が図られ、現在では樹脂単体と同等の熱伝導率をもつ材料も現れている。主なスペーサの構造と分類を表3-5-1に示す。

高断熱が特長のフィルム挿入ガラスには、アルミニウムの約1/5の熱伝導率であるスチールスペーサを標準とし製品化が行われている。現状、旧来よりも金属の厚みを約1/2まで薄くして熱橋部の断面比率を下げた薄型のスチールスペーサを標準として用いている。これにより金属単体でありながらもU字形状のハイブリッドスペーサと同等の断熱性が確保されている。

本研究では、従来品に比べて著しく高断熱のガラスとなるため、Hi-Qスチールスペーサよりもさらに熱伝導率の低いステンレス製のスペーサを用いることとした。

ウォームエッジはISO10077-1³⁻¹¹⁾もしくはJISA2102-1³⁻¹²⁾において図3-5-2の様に定義されている。

定義に従いアルミニウム、スチール、Hi-Qスチール、ステンレスおよび将来的に適用を考えている樹脂スペーサについて $\Sigma(d \cdot \lambda)$ を計算し、ウォームエッジへの適合を確認した。その結果を表3-5-2に示す。

今回は第5章に記載する、耐候性試験やフォギング試験における信頼性も考慮し、金属単体でありながらウォームエッジに適合する、ステンレススペーサを用いることとした。今後は耐候性試験で得られる結果を確認しながら、さらに高断熱となる樹脂スペーサの導入も検討する。

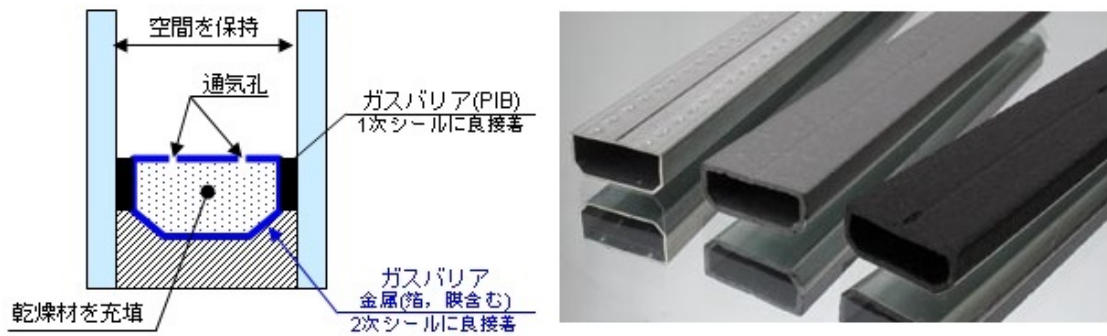


図 3-5-1 スパサの役割および外観

表 3-5-1 主なスパサの分類と金属部の推移

分類	構造図	金属 (材質・厚み) の推移
金属 スパサ	筒状 U字型	熱伝導率: λ (W/m·K) アルミ 200 鉄 SUS 15
ハイブリッド スパサ	U字型に樹脂の蓋 樹脂-金属 一体成形 金属-樹脂 積層体	金属厚み: t 0.5 mm 樹脂 0.2 mm 蒸着 μm nm
樹脂 スパサ	発泡樹脂 + 金属箔 FRP + 金属箔 T PS (Thermoplastic)	

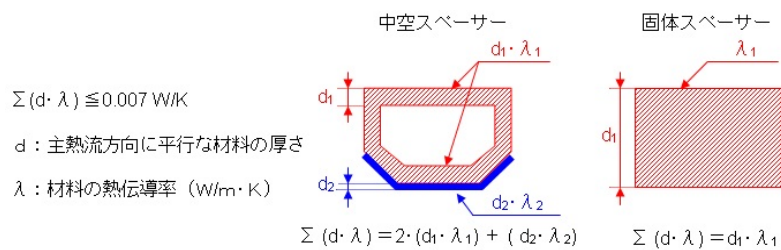


図 3-5-1 ISO10077-1 及び JIS A2102-1 によるウォームエッジの定義

表 3-5-2 主なスパサの分類

スパサ種類	金属厚み [mm]	熱伝導率 [W/(m·K)]	$\Sigma(d \cdot \lambda)$ [W/K]	ウォームエッジ 適合
アルミニウム	0.41	171.63	0.141	×
スチール	0.36	48.00	0.035	×
薄型スチール	0.20	48.00	0.019	×
ステンレス	0.20	14.86	0.006	○
樹脂	—	0.16	0.001	○

(6) 断熱材充填・低放射層以外のフレーム部の高断熱化

1) 検討概要

本節では断熱材充填・低放射層以外のフレーム部断熱性能向上の方策として、2章の海外先進事例の調査で得た知見を基に、2)項でエッジクリアランス寸法・キャビティ寸法の最小化・センターシール構造の採用がフレーム部の高断熱化にどの程度影響するかをケーススタディで明らかにする。

既存サッシは耐風圧性能担保を目的として方立や吊元框の断面中空部に金属製の補強材（鋼材）が挿入されている。方立や吊元框は金属性補強材の熱橋効果により他の部位と比べ断熱性能が大きく劣っている部位でもある。ここについても海外品と同様、補強材の材質を強化樹脂とした場合における断熱性能の向上効果について、方立断面を例に3)項で明らかにする。

また、枠・框に設置している気密材について、熱伝導率の小さい材料を選択することによる断熱性能の向上効果を4)項にて明らかにする。

さらに、(2)節で用いた枠フレームより断熱性能が高い可能性のある既存枠フレームを抽出し、その実力を5)項にて明らかにする。

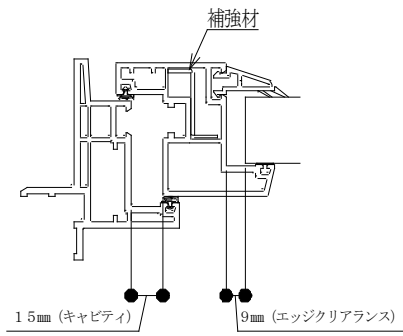
2) エッジクリアランス寸法・キャビティ寸法の最小化、センターシール

図 3-2-6(c) に示した吊元框断面を例に、TB2D/BEM を用いた伝熱解析により妥当性の評価を行った。図 3-6-1 に示すように、ケース 1：既存仕様（エッジクリアランス寸法 9 mm、キャビティ寸法 15 mm）、ケース 2：既存仕様からエッジクリアランス寸法 3 mm、ケース 3：既存仕様からキャビティ寸法 10 mm、ケース 4：既存仕様にセンターシール追加、ケース 5：ケース 2 と 3 の複合、ケース 6：ケース 2 と 4 の複合、ケース 7：ケース 3 と 4 の複合、ケース 8：ケース 2～4 の複合をケーススタディとして、各仕様の室内外の熱流量平均 $AveQ_{fp}$ 、フレーム部の熱貫流率 U_f 、サッシ H=1,370 mm における吊元框領域の通過熱流量 Q_f を算出した。算出結果を表 3-6-1 に示す。尚、吊元框領域の通過熱流量算出は(3-6-1)式を用いる。

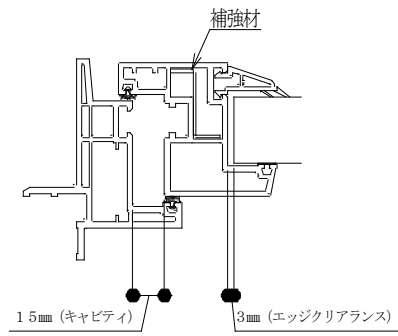
$$Q_f = U_f \cdot A_f \quad (3-6-1)式$$

単体評価のケース 2～4 において、全てのケースでケース 1 より $AveQ_{fp}$ 、 U_f 、 Q_f いずれも小さい値を示したことから、どのケースも断熱性能向上に有効であることが確認できた。つまり、伝熱解析上では 2 章で得た知見が検討対象窓においても有効であることを示すことができた。

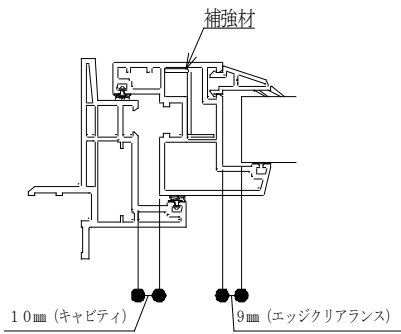
U_f に着目すると最も小さいのはケース 4 であった。また、ケース 2 の U_f はケース 3 とほぼ同等であった。 Q_f に着目すると、ケース 3 が最も小さな値を示した。これは U_f がケース 4 より劣っていても、キャビティ寸法を小さくしたことにより A_f も連動して小さくなり、 Q_f の要素において U_f の差より A_f の差の方が支配的となったためである。 U_f はケース 4 が最も優れているが、サッシ全体の総合熱貫流率の観点では Q_f による比較が好ましい。よって、単体評価ではケース 3 が最も効果があると言える。複合評価のケース 5～8 において、最も U_f 、 Q_f が小さい値を示したのは全てのケースを複合させたケース 8 であった。 U_f ベースでは 7%、 Q_f ベースでは 15% 向上することがわかった。



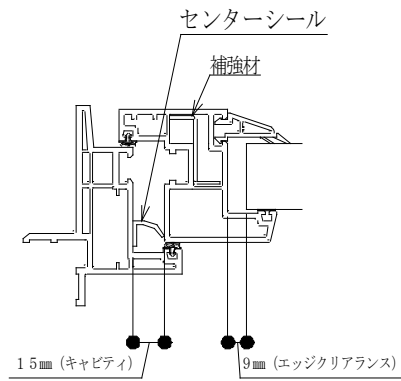
(a) ケース 1



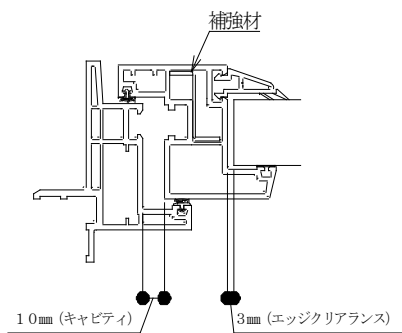
(b) ケース 2



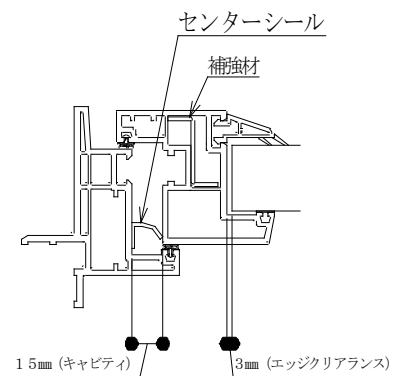
(c) ケース 3



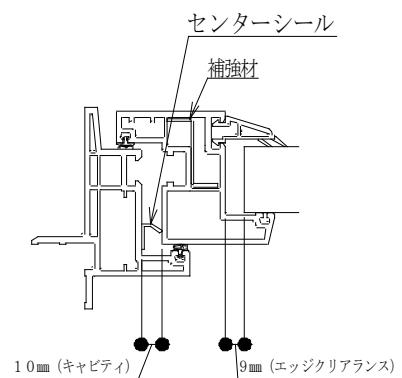
(d) ケース 4



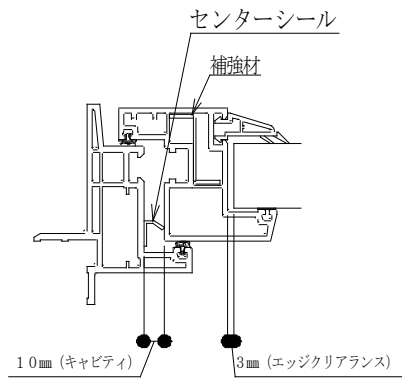
(e) ケース 5



(f) ケース 6



(g) ケース 7



(h) ケース 8

図 3-6-1 検討ケースの断面形状

表 3-6-1 各ケーススタディの算出結果

ケース	ケース1 既存仕様	ケース2 エッジクリア ランス3mm	ケース3 キャビティ 10mm	ケース4 センターシール	ケース5 2と3の複合	ケース6 2と4の複合	ケース7 3と4の複合	ケース8 2～4の複合
A_f (mm)	95	95	90	95	90	95	90	90
$AveQ_{fp}$ (W/m)	6.85	6.79	6.67	6.71	6.56	6.68	6.58	6.48
U_f (W/m ² ・K)	1.61	1.58	1.59	1.54	1.54	1.52	1.55	1.49
Q_f (W/K)	0.20	0.19	0.18	0.19	0.18	0.18	0.18	0.17

3) 方立補強材の材質見直し

既存製品では、方立内部に設置されている金属製補強材によって熱橋が生じる。一方、2章で示したように海外先進技術製品では金属製補強材の代替えとして強化樹脂（硝子繊維、あるいは炭素繊維入りのポリブチレンテレフタレート）を用いていた。研究対象窓は、材料の熱伝導率・強度・成形性・調達難度・単価を勘案し、炭素繊維入りポリカーボネート樹脂（以下 CFRP）を用いた場合における方立部の断熱性能向上効果を明らかにする。

補強材を用いた断面の方が 1.4℃高く、熱橋効果の改善に有効であることがわかった。補強材の断面形状を、方立の室内側壁面に隣接しない形状としたことも表面温度の上昇要因の一つとして考えられる。

① CFRP 補強材の断面形状及び基本物性

住宅用窓の一般的な耐風圧グレードである、1600Pa 相当が担保可能な板厚・形状とした。図 3-6-2 に断面形状を、写真 3-6-1 に外観を、表 3-6-2 に基本物性を示す。

② CFRP 補強材を挿入した方立断面の伝熱解析

図 3-6-3 に示す断面構造にて、TB2D/BEM を用いた伝熱解析によりフレーム部の熱貫流率 U_f を算出した。また、材質を金属から CFRP に変えたことによる熱橋効果の改善度合いの確認を目的として、方立の室内側最低表面温度 θ を既存断面、CFRP 補強材を装着した断面をともに算出した。フレーム部の熱貫流率 U_f 及び方立の室内側最低表面温度 θ の、既存断面との対比結果を表 3-6-3 に、表面温度 θ の位置を図 3-6-4 に示す。

CFRP 補強材を用いた断面の U_f は、金属製補強材を用いた既存断面のそれより 10% 向上した。補強材の熱伝導率に連動して U_f が向上することがわかった。また、方立の室内側最低表面温度 θ は、CFRP

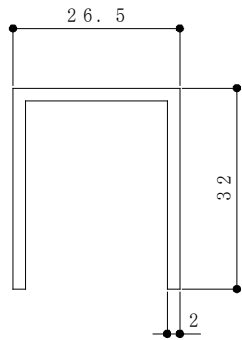


図 3-6-2 CFRP 補強材の断面形状



写真 3-6-1 CFRP 外観

表 3-6-2 CFRP の基本物性

項目	試験方法	物性値
密度[g/m ³]	ISO 1183 ³⁻¹³⁾	1.31
引張弾性率[Mpa]	ISO 527-1 ³⁻¹⁴⁾ , -2 ³⁻¹⁵⁾	17200
破壊応力[Mpa]		155
曲げ強さ[Mpa]	ISO 178 ³⁻¹⁶⁾	210
曲げ弾性率[Mpa]		16200
線膨張係数[1/°C]	ISO 11359-2 ³⁻¹⁷⁾	6.0×10 ⁻⁶
熱伝導率[W/(mK)]	JIS A1412-2 ³⁻¹⁸⁾	0.35

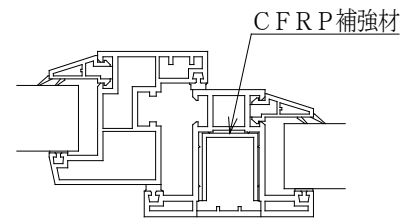


図 3-6-3 CFRP を装着した方立断面

表 3-6-3 フレーム部熱貫流率 U_f 及び室内側方立最低表面温度 θ の対比

補強材材質	U_f [W/(m ² K)]	θ [°C]
金属 (鋼材)	1.63	14.8
CFRP	1.46	16.2

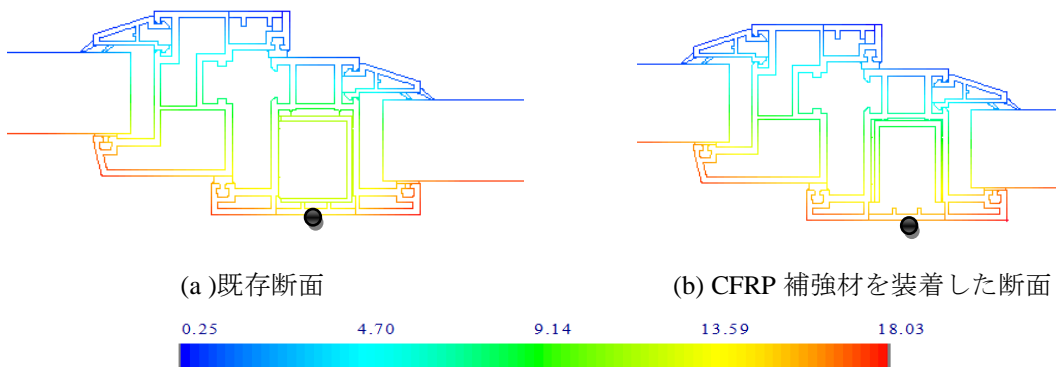


図 3-6-4 方立の室内側最低表面温度 θ 位置 (図の●印が該当箇所)

4) 枠・障子に設置している気密材の見直し

既存製品の枠・障子には、図 3-6-5 に示す通り軟質 PVC を用いた気密材を設置している。気密・水密ラインを保つ重要な個所として耐久性・追随性に優れた材料を一般的には優先するため、軟質 PVC やクロロプレンゴムを用いることが多い。それらの熱伝導率はフレーム（硬質 PVC）と大きく変わらないが改善の余地はあると考え、研究対象窓に、材料の熱伝導率・耐久性・追随性・調達難度・単価を勘案し、独立発砲性熱可塑性エラストマー樹脂（以下 TPO）を用いた場合におけるフレーム部の断熱性能向上効果を明らかにする。材料の熱伝導率はメーカー公称値 $0.041\text{W}/(\text{mK})$ を用いた。形状を図 3-6-6 及び写真 3-6-2 に示す。図 3-6-7 に示す断面構造にて、TB2D/BEM を用いた伝熱解析によりフレーム部の熱貫流率 U_f を算出した。また、軟質 PVC から TPO に変えたことによる熱橋効果の改善度合いの確認を目的として、室内側気密材の表面温度 θ を既存断面・TPO 気密材を装着した断面共に算出した。 U_f 及び室内側気密材表面温度 θ の、既存断面との対比結果を表 3-6-4 に、室内側気密材表面温度 θ の位置を図 3-6-8 示す。

TPO を用いたフレーム部の熱貫流率 U_f は、軟質 PVC を用いた既存断面のそれより 1% 向上した。わずかではあるが、気密材の熱伝導率に応じて U_f が向上することがわかった。また、室内側気密材表面温度 θ は TPO を用いた断面の方が 0.8°C 高く、熱橋効果の改善が概ね確認できた。

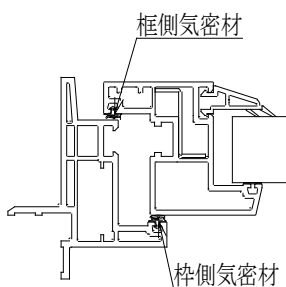


図 3-6-5 既存枠・障子の気密材設置位置
(吊元框断面)

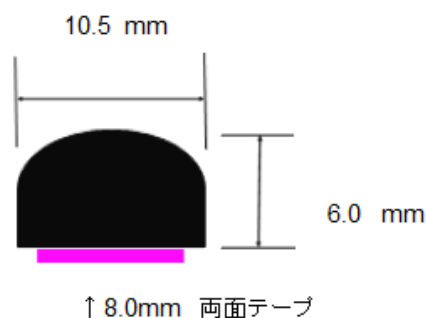


図 3-6-6 TPO の形状



写真 3-6-2 TPO の形状

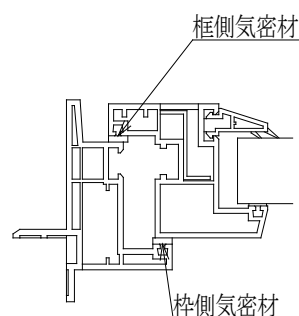


図 3-6-7 解析に用いた断面 (吊元框)

表 3-6-4 フレーム部熱貫流率 U_f 及び室内側気密材表面温度 θ の対比

気密材材質	U_f [W/(m ² K)]	θ [°C]
軟質 PVC	1.61	13.5
TPO	1.59	14.3

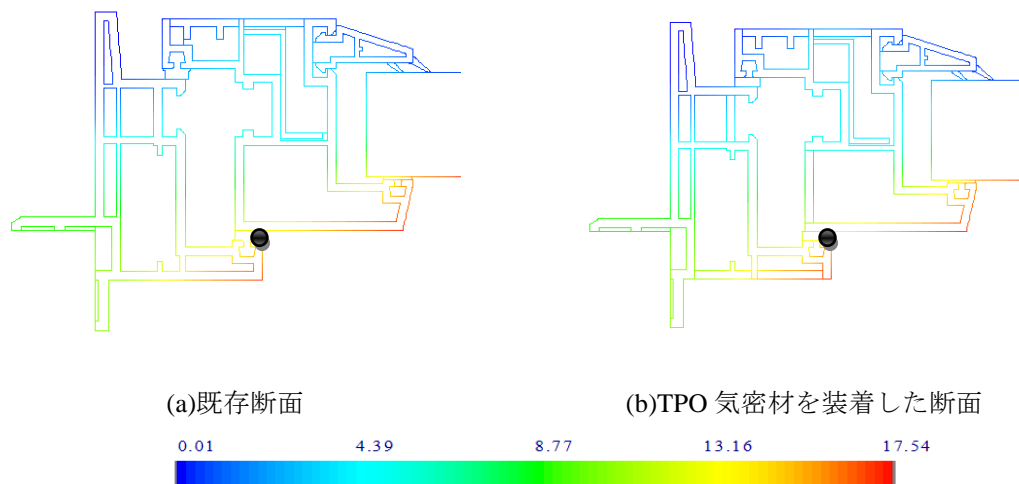


図 3-6-8 室内側気密材表面温度の位置 (図の●印が該当箇所)

5) 枠フレーム

(2)節で示した研究対象サッシの枠フレームに用いた断面は、図 3-6-9 に示す通り室外側の出寸法が 65 mm、躯体への乗り代が 15 mm、フレームの奥行き寸法が 80 mm の、市場流通が多い断面を 1 例として用いた。市場流通にとらわれず様々な既存枠フレームを整理し、高断熱化が期待できる形状として、図 3-6-9 に示すフレームの奥行き寸法は変わらず室外側の出寸法が 53 mm、躯体への乗り代が 27 mm の、室外側露出面が少なく躯体への乗り代が多い断面を抽出した。室内側に 12 mm セットバックしたことにより断熱境界の比率が増加 (熱的影響を受けないエリアが増加) する。本項では、図 3-6-10 に示す枠フレームを用いた場合における各部位の断熱性能を、TB2D/BEM を用いた伝熱解析により明らかにする。

TB2D/BEM を用いた伝熱解析により各部位 (方立部は除く) の熱貫流率 U_f を算出した。算出結果を表 3-6-5 に示す。表中には、図 3-6-9 で示した枠フレーム形状における各部位の熱貫流率との対比も併せて示す。

この結果、全ての部位において、室外側露出面が少ない断面を用いた方が U_f は 2% 小さく、僅かではあるが断熱性能が向上することが明らかとなった。

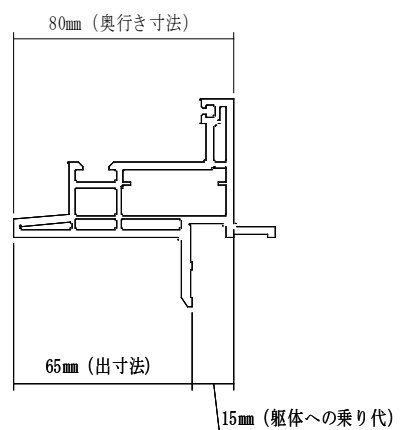


図 3-6-9 (2)節で示した枠フレーム形状

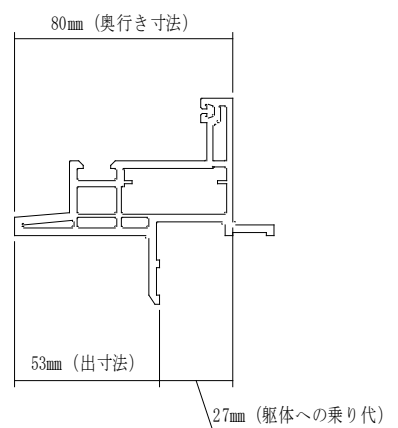


図 3-6-10 検討形状
(室外側露出面が少なく躯体への乗り代が多い)

表 3-6-5 フレーム部熱貫流率 U_f の算出結果

部位	各部位の熱貫流率 U_f [W/(m ² ·K)]	
	通常 (図 3-6-8)	変更案 (図 3-6-9)
枠フレーム形状		
障子側上枠	1.42	1.39
障子側下枠	1.31	1.29
障子側吊元枠	1.61	1.58
FIX 側上枠	0.98	0.96
FIX 側下枠	0.77	0.75
FIX 側縦枠	1.15	1.13

6) その他

前項では室外側露出面が少ない枠フレームの影響を明らかにしたが、当該フレームのさらなる断熱性能向上方策として、躯体との接合部に生じる、放射・対流による熱橋効果はその大きさから無視できない中空部（図 3-6-11）に、3.(2)で示した様に断熱材を隙間なく充填することが考えられる。

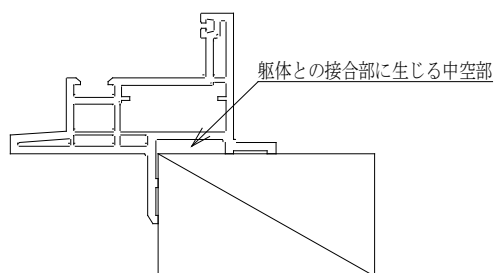


図 3-6-11 躯体との接合部に生じる中空部

(7) 窓全体の断熱性能

前節までは部位別に各種高断熱化技術を検討した。本節ではそれらを総合して、窓の各部位の仕様と断熱性能について検討し、目標とした熱貫流率 $0.60 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ を達成する要件を明らかにした。

まず、前節までの内容を踏まえ、窓の断熱性能向上の代表的なポイントを図 3-7-1 にまとめる。ガラス中央部については低放射フィルム挿入やガスの封入、ガラスエッジ部についてはスペーサの仕様、フレーム部については断熱材の充填、内部メッキ処理、センターシールの有無やエッジクリアランス寸法等といった断面形状が、断熱性能に影響を与えることとなる。

表 3-7-1 に各部位の仕様と熱貫流率の計算結果を示す。計算方法は JIS A2102 による。仕様 A は比較のために示す株式会社エクセルシャノンの現行製品で最高の断熱性能を有する製品である。仕様 A は JIS A4710 に基づく試験により熱貫流率 $0.81 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ が確認されているが、JIS A2102 に基づく計算では $0.89 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ である。

仕様 C は熱貫流率 $0.60 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ を達成する仕様である。ただし次の点において、製品化を考えたときに現状困難な点がある。

製造上困難な点として、フレーム内部のメッキ処理が現状困難であること（5.4 節で検討）、フレーム内部に充填する断熱材はフェノールフォーム定型材（熱伝導率 $0.019 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ）を想定したが、定型材はフレーム内部の充填性が低いことが懸念される。

また、ペアガラス内にキセノンガスを封入する事を想定しており、技術的には可能であるものの高価になりすぎることがある。

本研究ではこれら仕様と断熱性能の関係を踏まえた上で、製品化を想定し製作可能な範囲において、試作品を作成し性能検証を行うこととした。次章のステップ 2 とした仕様を表 3-7-1 の仕様 B として示した。

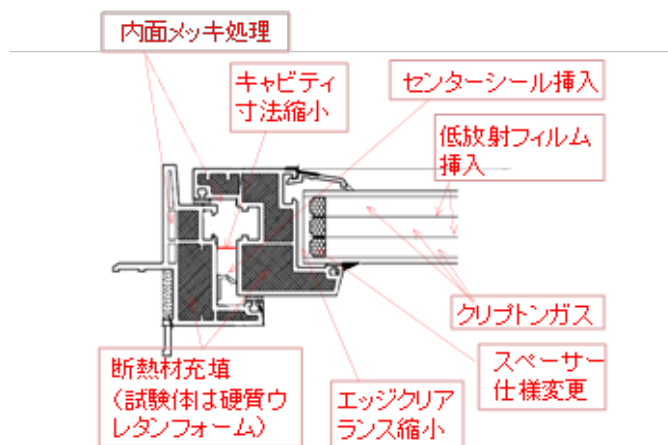


図 3-7-1 断熱性能向上のための要素技術

表 3-7-1 各部の仕様と窓の断熱性能

項目		仕様 A	仕様 B	仕様 C		
構成要素の検討	ガラス中央部	熱貫流率[W/(m ² K)]	0.56	0.39	0.29	
		ガラスの構成	トリプルガラス (LowE3-Kr11-FL3-Kr11-LowE3)	低放射フィルム2枚 (LowE3-Kr10-Kr10-Kr10-FL3)	低放射フィルム3枚 (LowE3-Xe6.5-Xe6.5-Xe6.5-FL3)	
		ガス	クリプトンガス	クリプトンガス	キセノンガス	
	ガラスエッジ部	線熱貫流率[W/(mK)]	0.039	0.048	0.047	
		スペーサー仕様	樹脂	ステンレス	ステンレス	
	フレーム部	熱貫流率[W/(m ² K)]	1.38	0.80	0.76	
		断熱材充填	なし	図 3-7-1 の位置に、熱伝導率 0.024(硬質発泡ウレタンフォーム相当)挿入	図 3-7-1 の位置に、熱伝導率 0.019(フェノールフォーム定型材相当)充填	
		内部メッキ	なし	なし	あり(放射率 0.05)	
		断面形状	センターシール	なし	あり	
			キャビティ寸法	15mm	10mm	
			エッジクリアランス	9mm	3mm	
	補強材の素材		スチール	ステンレス		
	戸当り気密材の素材	軟質塩ビ	ノルプレんフォーム			
吊元框補強材	有	無(水密・気密・耐風圧性能に支障がないことを確認済み)				
サッシ全体	熱貫流率[W/(m ² K)]	0.89	0.65	0.56		

(8) まとめ

本章では部位別に断熱性能向上の可能性検討を行った。

フレーム部については、断熱材充填によって 20% 程度、断面寸法の最小化やセンターシール挿入によって 10% 程度の熱貫流率を低減できるほか、方立補強材等の材質を見直すこと等による熱貫流率低減効果を示した。また、フレーム内部にメッキ処理を施すことによる熱抵抗確保の効果を示した。

ガラス部については、低放射フィルム挿入による効果を検討し、キセノンガスと低放射フィルム 3 枚によるガラス部の熱貫流率 0.29W/(m²K)仕様やクリプトンガスと低放射フィルム 2 枚によるガラス部の熱貫流率 0.39W/(m²K)仕様を提示した。また、エッジスペーサーの材質の違いによる断熱性能の違いを

示した。

窓全体の性能としては、コストもしくは製作上現実的な仕様として熱貫流率 0.65 W/(m²K)の組合せ、さらなる高断熱化を目指す仕様として熱貫流率 0.56 W/(m²K)の組合せを提案した。

[第3章 参考文献]

- 3-1) JIS A2102-2 : 窓及びドアの熱性能-熱貫流率の計算-第2部 :
 フレームの数値計算法, (財) 日本規格協会, 2011
- 3-2) TB2D/BEM Ver3, (一社) リビングアメニティ協会
- 3-3) 窓の総合熱性能評価プログラム Wind Eye, (一社) リビング
 アメニティ協会
- 3-4) TB2D/BEM マニュアル第II編 応用編 資料編, (一社) リビ
 ングアメニティ協会
- 3-5) JIS K5492 : アルミニウムペイント, (財) 日本規格協会, 2003
- 3-6) ASHRAE : 2009 ASHRAE handbook fundamentals
- 3-7) 日本機械学会 : 伝熱工学資料 改訂第5版, 丸善株式会社,
 2009, pp52 自然対流熱伝達
- 3-8) JIS R3107 : 板ガラス類の熱抵抗及び建築における熱貫流率の
 算定方法, (一財) 日本規格協会, 1998
- 3-9) ISO 10291 : Glass in building-Determination of steady-state U
 values (thermal transmittance) of multiple glazing -Guarded hot
 plate method, 1994
- 3-10) ISO 15099 : Thermal performance of windows, doors and shading
 devices- Detailed Calculations, 2003
- 3-11) ISO 10077-1 : Thermal performance of windows, doors and
 shutters-Calculation of thermal transmittance-Part1 : General,
 2006
- 3-12) JIS A2102-1 : 窓及びドアの熱性能-熱貫流率の計算-第1部 :
 一般, (一財) 日本規格協会, 2011
- 3-13) ISO 1183-1 : Plastics-Methods for determining the density of
 non-cellular plastics Part 1: Immersion method, liquid
 pycnometer method and titration method, 2004
- 3-14) ISO 527-1 : Plastics-Determination of tensile properties-Part
 1 : : General principles, 2012
- 3-15) ISO 527-2 : Plastics- Determination of tensile properties -Part 2 :
 Test conditions for moulding and extrusion plastics, 2012
- 3-16) ISO 178 : Plastics -Determination of flexural properties, 2010
- 3-17) ISO 11359-2 : Plastics -Thermomechanical analysis (TMA) -Part
 2 : : Determination of coefficient of linear thermal expansion and
 glass transition temperature, 1999
- 3-18) JIS A1412-2 : 熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法-
 第2部 : 熱流計法 (HFM 法) , 1999

[第3章 記号表]

- A_f : フレーム部の見付面積
- B : 気体膨張係数 (1/K)
- b_p : 断熱パネルの見付け幅 [m]
- b_f : フレームの投影幅[m]
- C : 気体の比熱
- d : 中空層の厚さ (m)
- g : 重力加速度
- H : ガラスの高さ (m)
- L_f^{2D} : 2次元熱コンダクタンス[W/(mK)]
- Nu : ヌセルト数=対流の程度を示す無次元数
- P : 気体の粘度
- $Q_{fp}(out)$: 熱流量(室外側)
- $Q_{fp}(in)$: 熱流量(室内側)
- $AveQ_{fp}$: 室内外の熱流量平均値
- R_a : レーリー数
- R_C : 対流熱伝達抵抗 [(m²K)/W]
- R_R : 放射熱伝達抵抗 [(m²K)/W]
- R_i : 中空層の熱抵抗
- $R_{g,i}$: ガラス, フィルム等の個体部の熱抵抗
- T : 面の温度 [K]
- T_m : 中空層気体の温度 (K)
- U_f : フレーム部の熱貫流率
- U_m : 各部位のフレーム部熱貫流率[W/(m² K)]
- $AveU_f$: フレーム部の平均熱貫流率[W/(m² K)]
- U_p : 断熱パネル中央部の熱貫流率[W/(m² K)]
- ΔT : 2面間の温度差 (K)
- ε : 面の放射率 [-]
- 添え字 1, 2 : 面の番号
- σ : ステファンボルツマン係数 5.67×10^{-8} [W/(m²·K⁴)]
- λ_{gas} : 中空層気体の熱伝導率
- μ : 気体の粘度

4. 試験等による断熱性能の検証

(1) 検討概要

前章では、数値計算によって断熱性能向上の可能性とその方策を探った。本章では、断熱性能向上の方策のうち、製品化を見据えた上で現実的な高断熱化技術を盛り込んだ試作品を作成し、その性能検証を行う。

第3節では試作品の性能を数値計算で予測し、第4節では試作品の性能を試験で計測、第5節では数値計算と試験結果の比較を行う。

これらのことから、断熱性能向上の実現性を検討する。

(2) 検討ケース

試作品は前章で検討した技術を段階的に盛り込み、以下の2種類(ステップ1、ステップ2)を作成した。

① ステップ1

既存製品から、3.(6)節で示した断熱材充填・低放射層以外のフレーム部の高断熱化手法として、エッジクリアランス寸法、キャビティ寸法の最小化、センターシール構造を採用した。

② ステップ2

ステップ1の項目に加え、3.(2)節で検討したフレーム部への断熱材充填、3.(4)節で検討したペアガラス内中空層への低放射フィルム挿入を採用した。

各ステップの仕様を表4-2-1に整理する。

表4-2-1 各ステップの仕様一覧

ステップ	1	2
試験番号	1 (断熱パネル)	5 (複層ガラス) 6 (断熱パネル)
種類	縦すべり出し+はめこりし	
サイズ	W1,690 mm×H1,370 mm	
枠形状	図 3-6-8	図 3-6-9
断熱材充填	無し	有り
エッジクリアランス寸法	3 mm	
キャビティ寸法	縦 10 mm、横 14 mm	
センターシール	4 方有り	
補強材材質	鋼材 (吊元框、方立)	CFRP (方立) 吊元框補強材は無し※
枠・框の気密材	軟質 PVC	TPO
枠と躯体の接合部の断熱補強	無し	有り
複層ガラス	—	LowE3-Kr10-Kr10-Kr10-FL3 (遮熱タイプフィルム入り ガラス) $U_g=0.39W/(m^2 K)$ $\eta_g=0.28$
断熱パネル	XPS3b 30 mm	XPS3b 35 mm

注 ガラス仕様は室外側より記載、数字は厚さ[mm]

FL：フロート板ガラス、LowE：低放射ガラス、Kr：クリプトンガス

※ 該当サイズにおける社内耐風圧試験結果 (S-3：1600Pa) による

(3) 計算法による検討

1) 検討概要

試作品による実測での検証に先行し、本節では計算法によって試作品の性能を予測する。手法は JIS A2102-1⁴⁻¹⁾、-2⁴⁻²⁾による。

いずれも、フレーム各部の熱貫流率 U_f 、フレーム部の平均熱貫流率 $AveU_f$ を算出する。

さらにステップ 2 では、ガラスエッジ部の線熱貫流率 Ψ_g 、ガラスエッジ部の平均線熱貫流率 $Ave\Psi_g$ 、サッシ全体の熱貫流率 U_w を算出し、(5)節で測定結果との比較を行う。

2) 計算手法

窓の熱貫流率の計算法は、ガラスの計算法とフレームを加えた窓全体の計算法に分かれる。ガラスの計算法は JIS R 3107⁴⁻³⁾、ISO 10292⁴⁻⁴⁾、ISO 15099⁴⁻⁵⁾が規格化されているが、本研究におけるガラスの計算については JIS R 3107 に基づいたメーカー算出値を用いた。

窓全体の総合熱貫流率 U_w は(4-3-1)式で示される。

$$U_w = \frac{\sum A_g U_g + \sum A_f U_f + \sum \ell_g \Psi_g}{\sum A_g + \sum A_f} \quad (4-3-1) \text{式}$$

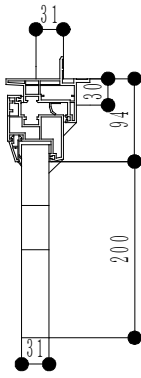
フレーム部の熱貫流率 U_f は(3-2-1)式で求められる。

(4-3-1)式で示す通り、窓全体の総合熱貫流率 U_w は、ガラス中央部の熱貫流率 U_g とフレーム部の熱貫流率 U_f の他に、複層ガラスの場合は複層ガラスのガラススペーサ部周辺の 2 次元熱流の影響を表わすガラスエッジ部の線熱貫流率 Ψ_g が必要となる。JIS A2102-1 付属書 E に示される規定値を使用する方法（簡易計算法）もあるが、より計算精度の高い JIS A2102-2 の手法（詳細計算法）によることとし、試験体各断面の伝熱解析を行う。

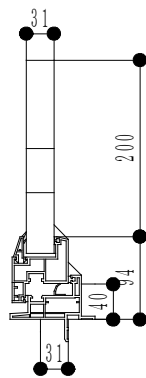
ガラスエッジ部の線熱貫流率 Ψ_g は、フレーム部に複層ガラスを挿入したモデルの伝熱解析から得られる 2 次元熱コンダクタンス L_{Ψ}^{2D} と、(3-2-1)式より得られるフレーム部の熱貫流率 U_f を用いて、(4-3-2)式で求める。

$$\Psi_g = L_{\Psi}^{2D} - U_f b_f - U_g b_g \quad (4-3-2) \text{式}$$

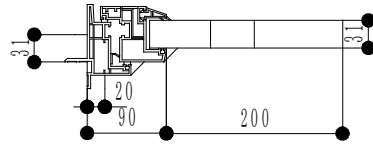
ステップ 1、2 各断面解析モデルの外壁想定位置、額縁想定位置、室内側隅角部の取り扱いは、3.(2).4)項で示した通りとする。ステップ 1 の各断面モデルを図 4-3-1（断熱パネルモデル）に、構成材料の熱伝導率を表 4-3-1 に、構成材料の配置を図 4-3-2 に示す。ステップ 2 の各断面モデルを図 4-3-3 ((a)～(g)は断熱パネルモデル、(h)～(g)は複層ガラスモデル) に、構成材料の熱伝導率を表 4-3-2 に、構成材料の配置を図 4-3-4 及び図 4-3-5 に示す。



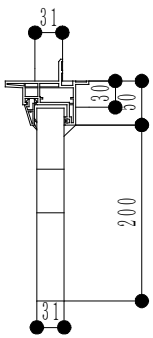
(a) 障子側上枠



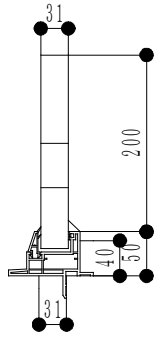
(b) 障子側下枠



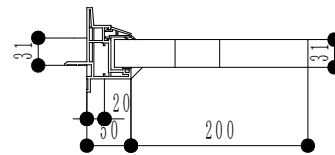
(c) 障子側吊元枠



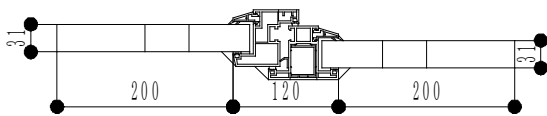
(d) FIX 側上枠



(e) FIX 側下枠



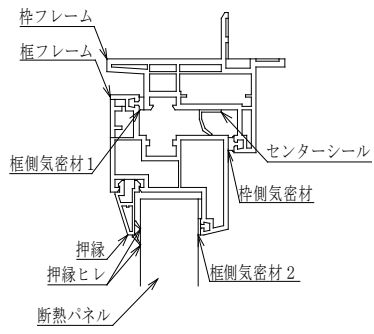
(f) FIX 側縦枠



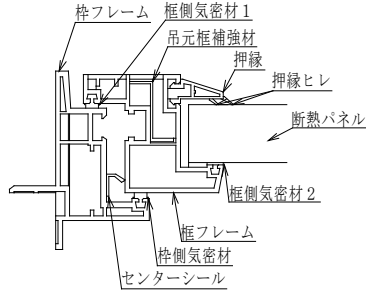
(g) 方立

(いずれも断熱パネルモデル)

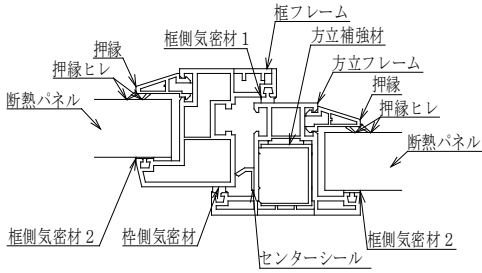
図 4-3-1 ステップ 1 の各断面モデル



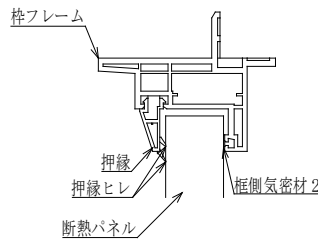
(a)障子側上下枠



(b)障子側吊元枠

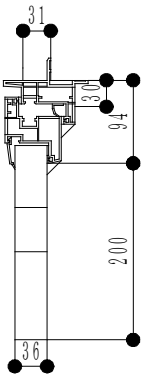


(c)方立

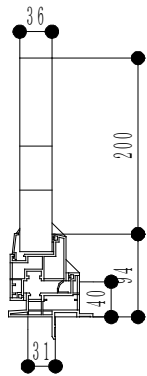


(d)FIX 側上下縦枠

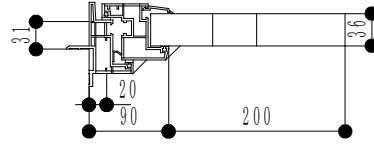
図 4-3-2 各断面の構成材料配置：ステップ 1 断熱パネルモデル



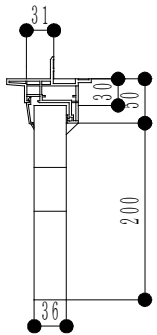
(a) 障子側上枠



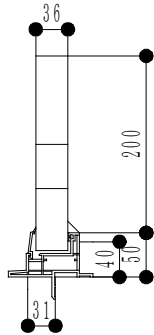
(b) 障子側下枠



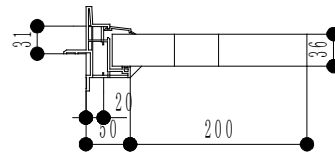
(c) 障子側吊元枠



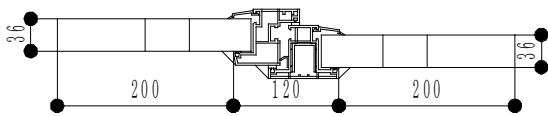
(d) FIX 側上枠



(e) FIX 側下枠



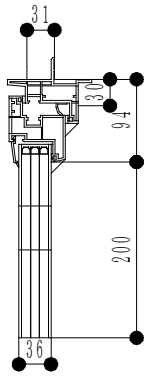
(f) FIX 側縦枠



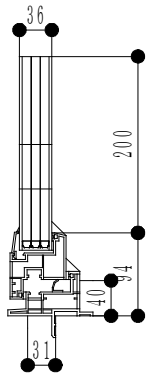
(g) 方立

(いずれも断熱パネルモデル)

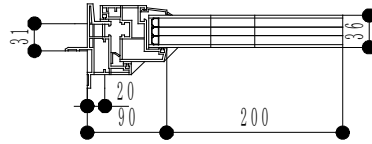
図 4-3-3 ステップ 2 の各断面モデル



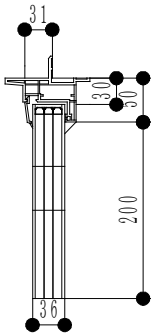
(h) 障子側上枠



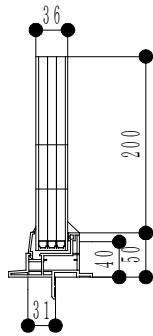
(i) 障子側下枠



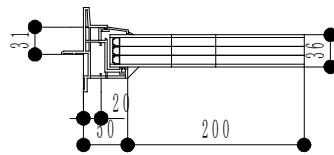
(j) 障子側吊元枠



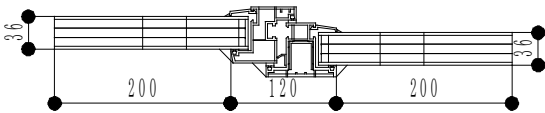
(k) FIX 側上枠



(l) FIX 側下枠



(m) FIX 側縦枠



(n) 方立

(いずれも複層ガラスモデル)

図 4-3-3 ステップ 2 の各断面モデル

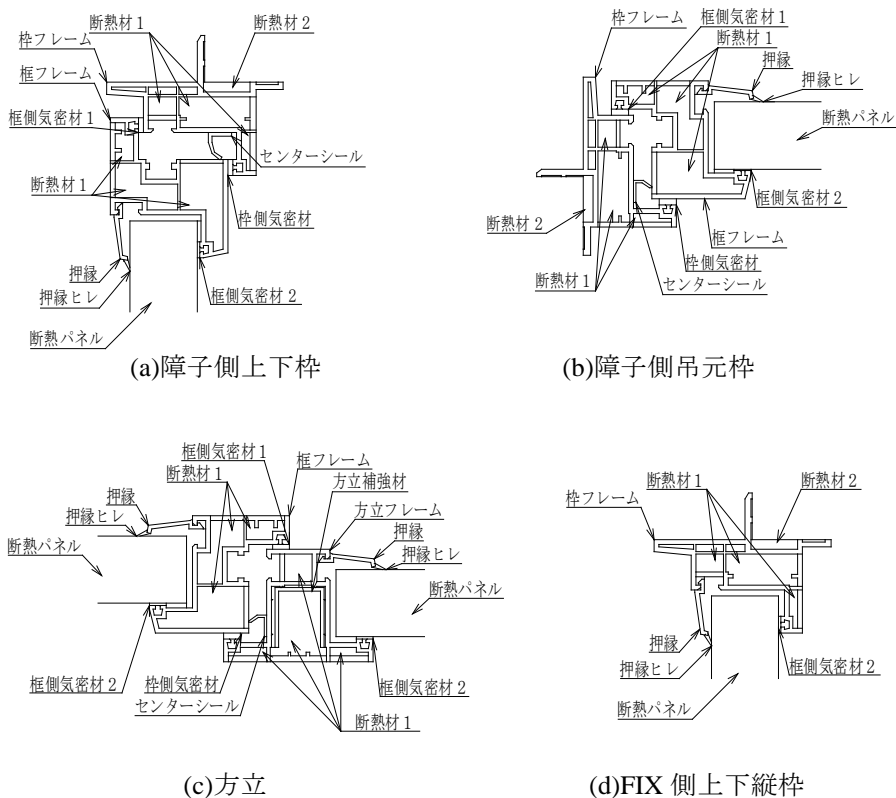


図 4-3-4 各断面の構成材料配置：ステップ 2 断熱パネルモデル

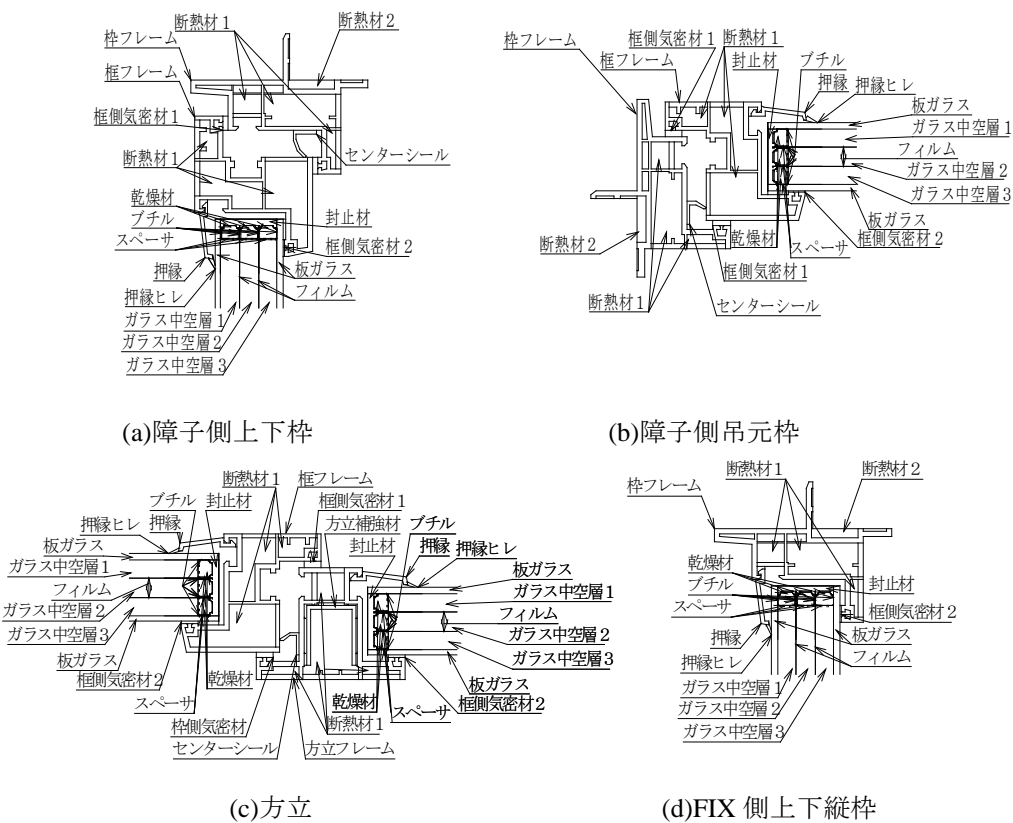


図 4-3-5 各断面の構成材料配置：ステップ 2 複層ガラスモデル

表 4-3-1 ステップ 1 の各断面モデルにおける構成材料の熱伝導率

構成材料	材質	熱伝導率 λ [W/(mK)]	備考
枠フレーム	硬質 PVC	0.17	JIS 規定値
方立フレーム			
押縁			
押縁ヒレ			
枠側気密材	軟質 PVC	0.14	JIS 規定値
框側気密材 1			
框側気密材 2	独立発泡性軟質 PVC	0.04	メーカー公称値
センターシール	軟質 PVC	0.14	JIS 規定値
戸先框補強材	鋼材	50	JIS 規定値
方立補強材			
断熱パネル		0.035	JIS 規定値

表 4-3-2 ステップ 2 の各断面モデルにおける構成材料の熱伝導率

構成材料	材質	熱伝導率 λ [W/(mK)]	備考
枠フレーム	硬質 PVC	0.17	JIS 規定値
方立フレーム			
押縁			
押縁ヒレ			
枠側気密材	TPO	0.041	メーカー公称値
框側気密材 1			
框側気密材 2	独立発泡性軟質 PVC	0.04	メーカー公称値
センターシール	軟質 PVC	0.14	JIS 規定値
方立補強材	CFRP	0.35	メーカー公称値
断熱材 1	ウレタン	0.024	メーカー公称値
断熱材 2	独立発泡性軟質 PVC	0.04	メーカー公称値
断熱パネル		0.035	JIS 規定値
板ガラス	ソーダ石灰ガラス	1.0	JIS 規定値
スペーサ	ステンレス	15	メーカー公称値
プチル	ポリイソブチレン	0.24	JIS 規定値
乾燥材	モレキュラーシーブ	0.10	JIS 規定値
封止材	シリコン	0.49	メーカー公称値
フィルム	ポリエチレン	0.50	メーカー公称値
ガラス中空層 1 (室外側)		0.128	メーカー算出値
ガラス中空層 2 (中央部)		0.125	
ガラス中空層 3 (室内側)		0.128	

3) フレーム部の伝熱解析

断熱パネルモデルの熱流量 Q_{fp} 及び複層ガラスモデルの熱流量 Q_{fg} を算出する。算出には解析ソフト TB2D/BEM^{4,6)}を用いる。各ステップにおける各断熱パネルモデルの熱流量 Q_{fp} 及び 2次元熱コンダクタンスの L_f^{2D} の算出結果を表 4-3-3 に示す。なお、ステップ 2 の方立における複層ガラスモデル (図 4-3-3(n)) は、解析ソフトの媒質指定容量を超えてしまう為、JIS A2102-2 付属書 E 文献 5 Annex C^{4,7)}に記載される「Two box model」(概要を図 4-3-6 に示す)によりガラスエッジ部 (ブチル・スペーサ・乾燥材) を図 4-3-7 の様に簡略化し、該当部の等価熱伝導率

を算出しその結果を用いた。該当部分の等価熱伝導率は 0.73 W/(mK) である。

また、各断熱パネルモデルにおける 2次元熱コンダクタンス L_f^{2D} から算出したフレーム部の熱貫流率 U_f を表 4-3-4 に示す。なお、算出にあたり各フレーム部の見付面積 A_f は、3.(2).4項を参考とした。

さらに、ステップ 1、2 及び 3.(2)節で示した既存仕様における各部位の U_f 及び $AveU_f$ の一覧を表 4-3-5 に、対比を図 4-3-8 に示す。なお、 $AveU_f$ は(3-2-2)式を用いて算出した。

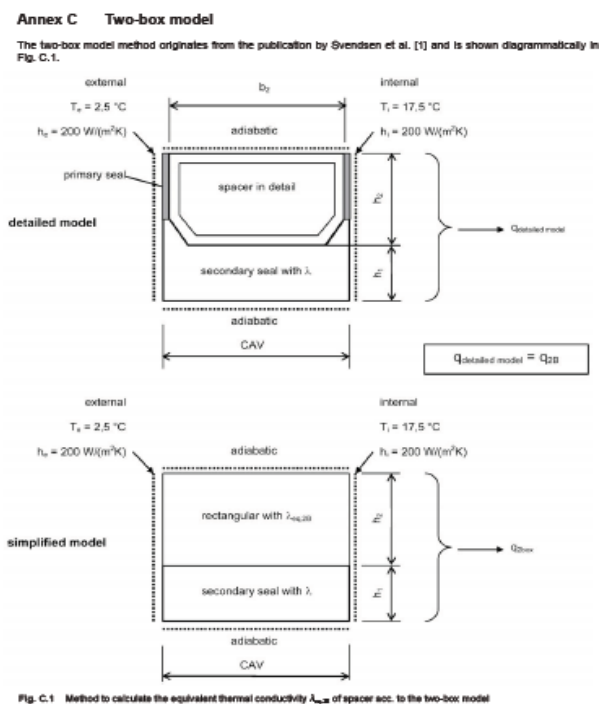


図 4-3-6 「Two box model」の概要

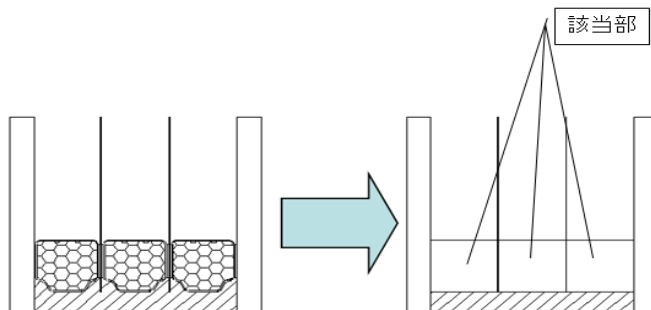


図 4-3-7 ガラスエッジ部の簡略化

表 4-3-3 熱流量及び2次元熱コンダクタンスの算出結果

種別	記号	単位	障子側 上枠	障子側 下枠	障子側 吊元枠	FIX側 上枠	FIX側 下枠	FIX側 縦枠	方立
ステップ1	Q_{fp} (out)	W/m	-6.17	-6.01	-6.43	-4.69	-4.51	-4.89	-11.20
	Q_{fp} (in)	W/m	-6.17	-6.01	-6.43	-4.69	-4.51	-4.89	-11.20
断熱パネル モデル	Ave Q_{fp}	W/m	6.17	6.01	6.43	4.69	4.51	4.89	11.20
	L_f^{2D}	W/(m ² ·K)	0.31	0.30	0.32	0.23	0.23	0.24	0.56
ステップ2	Q_{fp} (out)	W/m	-4.89	-4.80	-4.80	-4.02	-3.92	-4.09	-8.82
	Q_{fp} (in)	W/m	-4.89	-4.80	-4.80	-4.02	-3.92	-4.09	-8.82
断熱パネル モデル	Ave Q_{fp}	W/m	4.89	4.80	4.80	4.02	3.92	4.09	8.82
	L_f^{2D}	W/(m ² ·K)	0.24	0.24	0.24	0.20	0.20	0.20	0.44
ステップ2	Q_{fp} (out)	W/m	-4.09	-3.97	-3.99	-3.22	-3.07	-3.34	-7.31
	Q_{fp} (in)	W/m	-4.09	-3.97	-3.99	-3.23	-3.07	-3.34	-7.31
複層ガラス モデル	Ave Q_{fp}	W/m	4.09	3.97	3.99	3.23	3.07	3.34	7.31
	L_f^{2D}	W/(m ² ·K)	0.20	0.20	0.20	0.16	0.15	0.17	0.37

Q_{fp} (out) : 熱流量 (室外側)、 Q_{fp} (in) : 熱流量 (室内側)、Ave Q_{fp} : 室内外の熱流量平均値、 L_f^{2D} : 2次元熱コンダクタンス

表 4-3-4 各フレーム部の熱貫流率 U_f

種別	記号	単位	障子側 上枠	障子側 下枠	障子側 吊元枠	FIX側 上枠	FIX側 下枠	FIX側 縦枠	方立
ステップ1	U_p	W/(m ² ·K)	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
	b_f	m	0.09	0.09	0.09	0.05	0.05	0.05	0.12
断熱パネル モデル	A_f	m ²	0.06	0.06	0.11	0.05	0.05	0.07	0.15
	U_f	W/(m ² ·K)	1.27	1.18	1.50	0.90	0.73	1.10	1.51
ステップ2	U_p	W/(m ² ·K)	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	b_f	m	0.09	0.09	0.09	0.05	0.05	0.05	0.12
断熱パネル モデル	A_f	m ²	0.06	0.06	0.11	0.05	0.05	0.07	0.15
	U_f	W/(m ² ·K)	0.84	0.78	0.82	0.69	0.60	0.77	0.90

U_p : 断熱パネル中央部の熱貫流率、 b_f : フレーム部の投影幅、 A_f : フレーム部の見付面積、 U_f : フレーム部の熱貫流率

表 4-3-5 ステップ1、2及び既存仕様の U_f 及びAve U_f 一覧

部位	フレーム部熱貫流率 U_f [W/(m ² ·K)]		
	既存仕様	1	2
障子側上枠	1.42	1.27	0.84
障子側下枠	1.31	1.18	0.78
障子側吊元枠	1.61	1.50	0.82
FIX側上枠	0.98	0.90	0.69
FIX側下枠	0.77	0.73	0.60
FIX側縦枠	1.15	1.10	0.77
方立	1.63	1.51	0.90
Ave U_f	1.38	1.27	0.80

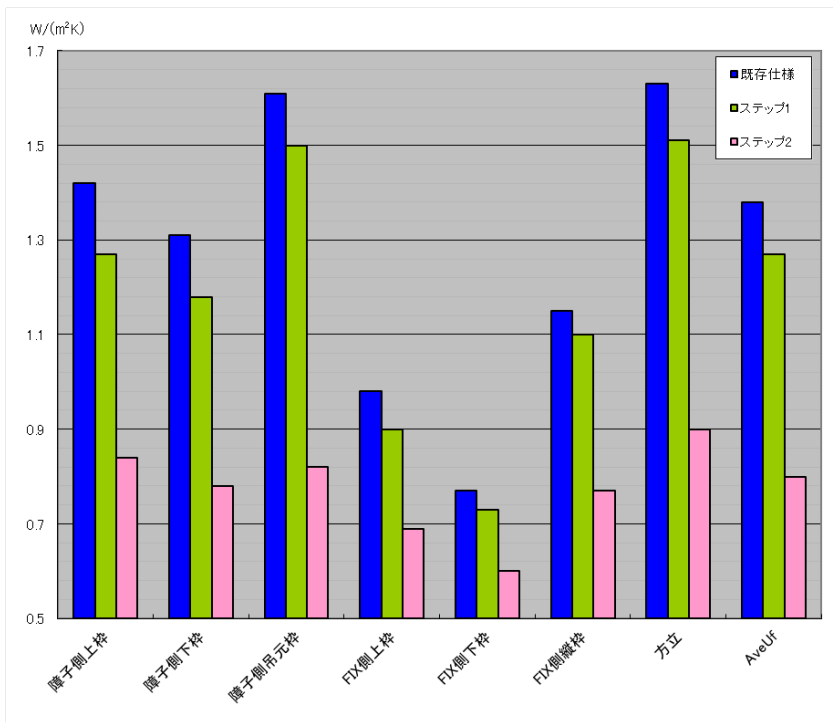


図 4-3-8 ステップ 1、2 及び既存仕様の U_f 及び $AveU_f$

表 4-3-5 及び図 4-3-8 から、全ての部位においてステップ 2 が、最も U_f 及び $AveU_f$ が小さい値を示し、既存仕様 > ステップ 1 > ステップ 2 が確認できた。既存仕様に対する、ステップ 1 の U_f 向上率は、障子側 7~10%、FIX 側 4~8%、方立 7% だった。同様にステップ 2 は、障子側 40~49% (吊元枠 49%)、FIX 側 22~33%、方立 42% だった。ステップ 1 に対する、ステップ 2 の U_f 向上率は、障子側 34~45% (吊元枠 45%)、FIX 側 18~30%、方立 40% だった。障子側吊元枠と方立の向上率が他の部位と比べ突出しているが、これは補強材の削除や材質の変更による影響が加えられていることを示している。

4) ステップ 2 におけるガラスエッジ部の線熱貫流率

表 4-3-3 の各複層ガラスモデルにおける 2 次元熱コンダクタンス L_p^D 及び表 4-3-4 のフレーム部の熱貫流率 U_f を用いて、(4-3-4)式により算出したガラスエッジ部の線熱貫流率 Ψ_g を表 4-3-6 に示す。なお、 Ψ_g 算出の際用いるガラス中央部の熱貫流率算 U_g は、(4-3-3)式を用いて補正した値 U_g' を使用する。JIS R3107 と JIS A2102-1、-2 の内外表面熱伝達率の規定

値が異なっており、JIS A 2102-1、-2 の規定値に合わすべく、JIS R3107 の規定値との差分を加味する必要がある。

$$U_g' = \frac{1}{(1/U_g) + 0.005} \quad (4-3-3)式$$

なお、表 4-3-6 中の $Ave\Psi_g$ は、(4-3-4)式を用いて算出した。

$$Ave\Psi_g = \frac{\sum \Psi_{gn} \cdot b_{gn}}{\sum l_{gn}} \quad (4-3-4)式$$

表 4-3-6 ステップ 2 におけるガラスエッジ部の線熱貫流率 Ψ_g

部位	ガラスエッジ部の線熱貫流率 [W/(mK)]
障子側上枠	0.047
障子側下枠	0.046
障子側吊元枠	0.047
FIX 側上枠	0.048
FIX 側下枠	0.045
FIX 側縦枠	0.050
方立	0.099
Ave Ψ_g	0.048

5) ステップ 2 におけるサッシ全体の熱貫流率

表 4-3-4 の各フレーム部の熱貫流率 U_f 及び表 4-3-6 のガラスエッジ部の線熱貫流率 Ψ_g を用いて算出した窓全体の熱貫流率 U_w を表 4-3-7 に示す。なお、 U_w 算出の際においても Ψ_g 算出と同様、ガラス中央部の熱貫流率算 U_g は(4-3-3)式を用いて補正した値 $U_{g'}$ を用いた。

表 4-3-7 ステップ 2 の窓全体の熱貫流率 U_w

適応 JIS	一般	JIS A2102-1		
	フレーム部	JIS A2102-2		
	ガラスエッジ部	JIS A2102-2		
	ガラス部	JIS R3107		
内外温度差		Δt	20.00	°C
伝熱開口	サッシの幅	W	1.69	m
	サッシの高さ	H	1.37	m
	w1 寸法	w1	0.67	m
	伝熱面積	S	2.32	m ²
表面熱伝達率	室内側	α_i	7.69	W/(m ² ·K)
	室外側	α_o	25.00	W/(m ² ·K)
ガラス	ガラス中央部熱貫流率	U_g	0.39	W/(m ² ·K)
	補正ガラス中央部熱貫流率	$U_{g'}$	0.39	W/(m ² ·K)
	ガラス露出幅 (障子側)	$l_{g w1}$	0.54	m
	ガラス露出幅 (FIX 側)	$l_{g w2}$	0.90	m
	ガラス露出高 (障子側)	$l_{g h1}$	1.18	m
	ガラス露出高 (FIX 側)	$l_{g h2}$	1.27	m
	ガラス露出面積	A_g	1.77	m ²
ガラス中央部の通過熱流量		$\Sigma A_g U_{g'}$	0.70	W/K
フレーム部の通過熱流量		$\Sigma U_f A_f$	0.44	W/K
ガラスエッジ部の通過熱流量		$\Sigma l_g \Psi_g$	0.38	W/K
サッシ全体の通過熱流量		$\Sigma l_g \Psi_g$	1.51	W/K
サッシ全体の熱貫流率		U_w	0.65	W/(m ² ·K)

(4) 試験による性能検証

1) 試験方法

JIS A4710⁴⁾⁸⁾「建具の断熱試験方法」に準じ、サッシの熱貫流率の測定を行った。測定には北方建築総合研究所の断熱防露試験室を使用した。装置の概要を図 4-4-1 に示す。試験体は室内室と室外室の境界壁に設置した。

実験中の室内室は温度 20℃、相対湿度 30%以下、室外室は 0℃、相対湿度成り行きに設定した。また、室外室側は、幅 2,000×高さ 2,500×奥行き 150mm の風道を試験体に突き当て、風道下部の斜流ファンにより上向きの気流(約 3m/s)を発生させた。

熱貫流率の算出に必要な空気温度、取付パネル、バッフル板及び加熱箱の表面温度並びにヒーター及びファンの消費電力をデータログで測定した。

環境温度および標準化熱貫流率の算出に必要な室内外の対流および放射熱伝達率は、熱抵抗 0.53(m²K)/W および 1.67(m²K)/W の校正板を用いて求めた値を、試験体開口部の熱流密度で直線補間し

て求めた。

加熱箱内の発生熱量に対し、サッシ以外からの損失熱量である校正熱量には、熱箱の損失熱量、取付パネルの通過熱量、サッシと取付パネルの間を通過する熱量、取付パネルと装置木枠の間を通過する熱量が含まれる。これらのうち、熱箱の損失熱量と取付パネルの通過熱量は、表面温度差と材料の熱抵抗から求めた。サッシと取付パネルの間を通過する熱量、取付パネルと装置木枠の間を通過する熱量は、2次元伝熱計算で求めた線熱貫流率と環境温度差から求めた。

また、ガラス部の熱抵抗や熱通過量の推定や、枠部材の断熱性検証のため、室内外の表面温度を各 12 点測定した。表面温度の測定位置を図 4-4-2、図 4-4-3 に示す。

さらに、参考として一部の測定仕様では、熱画像を撮影した。撮影には赤外線カメラ(NEC 三栄製、TH7102MV)を用いた。

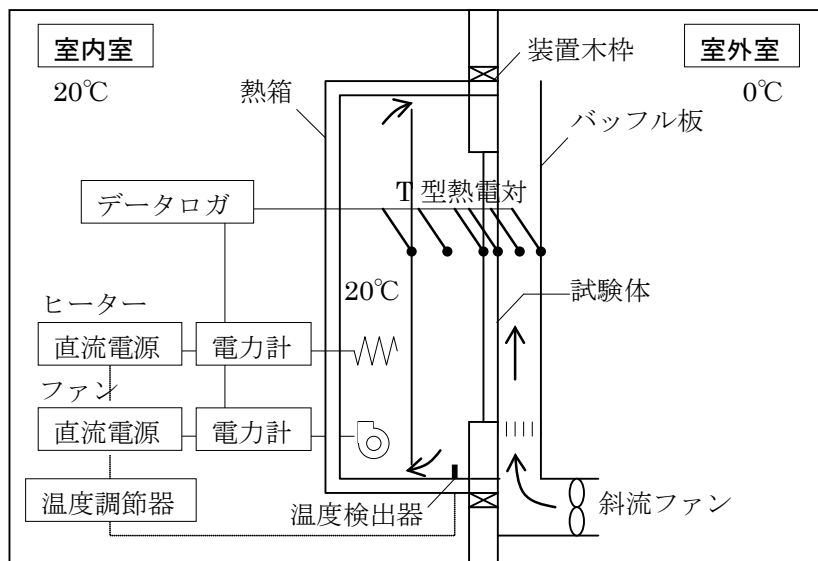
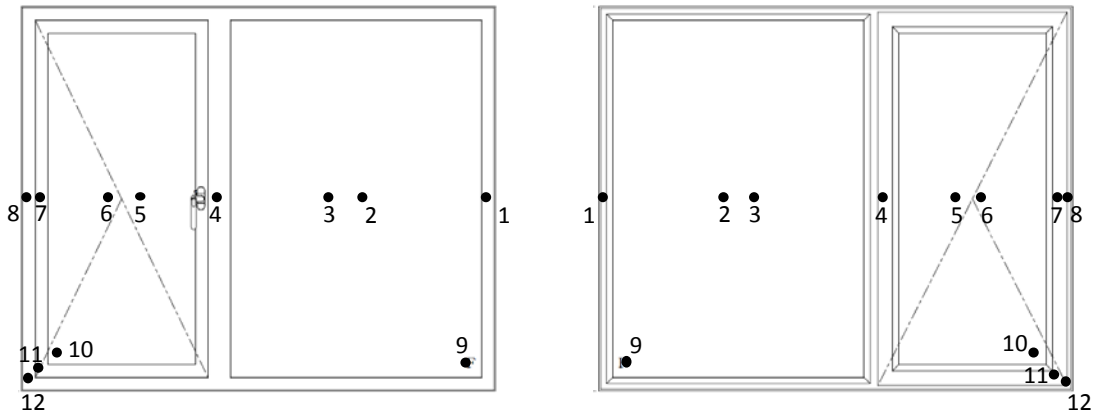


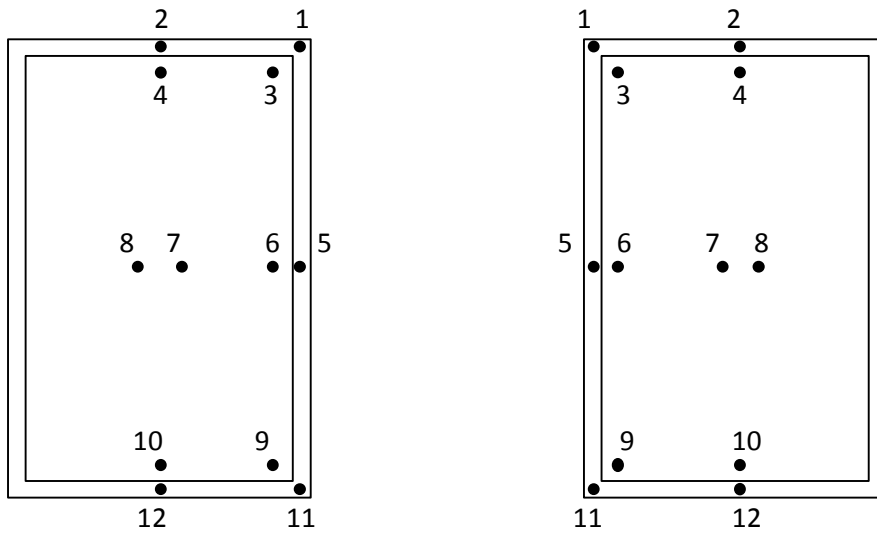
図 4-4-1 実験装置概要



(a)室内側

(b)室外側

図 4-4-2 表面温度測定点(縦すべり出し+はめころし)



(a)室内側

(b)室外側

図 4-4-3 表面温度測定点(はめころし)

2) 試験体

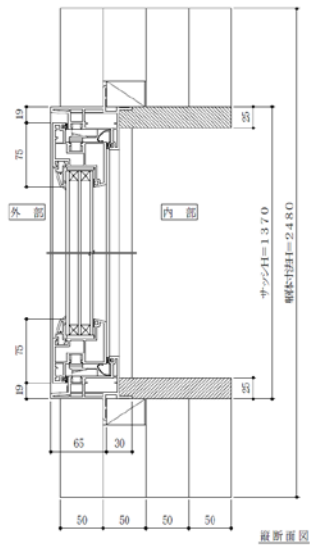
試験仕様の一覧を表 4-4-1 に示す。試験体は JIS A4710 建具の断熱試験方法に準じ、XPS3b で製作した取付パネル (W2,000×H2,500×D200) の中央に設置した。サッシと取付パネルの位置関係を図 4-4-4 ~4-4-6 に示す。また、試験体の設置状況を写真 4-4-1 に示す。

表 4-4-1 熱貫流率測定関連の試験仕様一覧

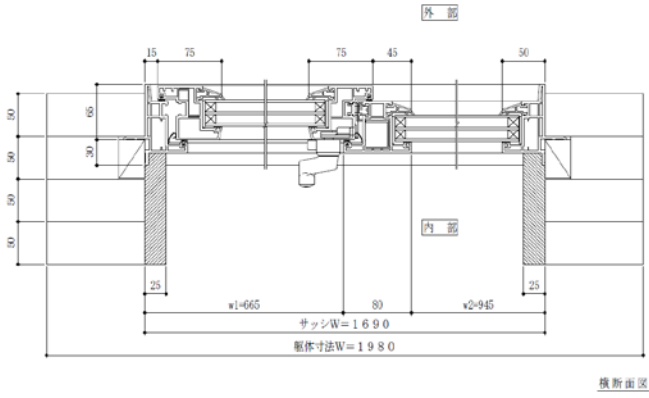
試験番号	実施日	試験体概要	実施内容
1	2014/7/25 ~2014/7/28	種類：樹脂サッシ (縦すべり出し+はめころし) サイズ：W1,690×H1,370 ガラス部仕様：XPS3b 30mm 枠：従来品	ステップ 1 U _f 算出のためのガラス置換モデル
2	2014/8/1 ~2014/8/3	種類：樹脂サッシ (縦すべり出し+はめころし) サイズ：W1,690×H1,370 ガラス部仕様：LowE3-Ar11-FL3-Ar11-LowE3 U _g =0.78W/(m ² K) 枠：従来品	試験番号1のU値測定 熱画像撮影
3	2014/10/2 ~2014/10/6	種類：樹脂サッシ (縦すべり出し+はめころし) サイズ：W1,690×H1,370 ガラス部仕様：遮熱タイプフィルム入りガラス LowE3-Kr8.5-Kr8.5-Kr8.5-FL3 U _g =0.44W/(m ² K)、η _g =0.28 枠：ウレタン充填	U値測定
4	2014/10/6 ~2014/10/8	種類：樹脂サッシ (縦すべり出し+はめころし) サイズ：W1,690×H1,370 ガラス部仕様：XPS3b 30mm 枠：ウレタン充填	試験番号2の U _f 算出のためのガラス置換モデル
5	2014/11/26 ~2014/12/1	種類：樹脂サッシ (縦すべり出し+はめころし) サイズ：W1,690×H1,370 ガラス部仕様：遮熱タイプフィルム入りガラス LowE3-Kr10-Kr10-Kr10-FL3 U _g =0.39W/(m ² K)、η _g =0.28 枠：ウレタン充填	ステップ2 U値測定
6	2014/12/1 ~2014/12/3	種類：樹脂サッシ (縦すべり出し+はめころし) サイズ：W1,690×H1,370 ガラス部仕様：XPS3b 35mm 枠：ウレタン充填	ステップ2 U _f 算出のためのガラス置換モデル 熱画像撮影
7	2015/1/29 ~2015/2/1	種類：樹脂サッシ (縦すべり出し+はめころし) サイズ：W1,690×H1,370 ガラス部仕様：XPS3b 30mm 枠：従来品	現行商品 U _f 算出のためのガラス置換モデル コールドドラフト検証
8	2015/2/6 ~2015/2/9	種類：樹脂サッシ (はめころし) サイズ：W780×H1,370 ガラス部仕様：XPS3b 30mm 枠：ウレタン充填	FIX窓 U _f 算出のためのガラス置換モデル

9	2015/2/19 ～2015/2/21	種類：樹脂サッシ (縦すべり出し+はめころし) サイズ：W1,690×H1,370 ガラス部仕様：断熱タイプフィルム入りガラス FL3-Ar16-Ar16-LowE3 $U_g=0.69W/(m^2K)$ 、 $\eta_g=0.51$ 枠：ウレタン充填	アルゴン断熱仕様 U値測定
10	2015/2/24 ～2015/2/27	種類：樹脂サッシ (縦すべり出し+はめころし) サイズ：W1,690×H1,370 ガラス部仕様：遮熱タイプフィルム入りガラス LowE3-Ar16-Ar16-FL3 $U_g=0.64W/(m^2K)$ 、 $\eta_g=0.35$ 枠：ウレタン充填	アルゴン遮熱仕様 U値測定
11	2015/2/27 ～2015/3/2	種類：樹脂サッシ (縦すべり出し+はめころし) サイズ：W1,690×H1,370 ガラス部仕様：EPS 38mm 枠：ウレタン充填	試験番号 9,10 の U_f 算出のためのガラス置換モデル コールドドラフト検証
12	2015/3/6 ～2015/3/10	種類：樹脂サッシ (縦すべり出し+はめころし) サイズ：W1,690×H1,370 ガラス部仕様：FL3-Ar16-LowE3 $U_g=1.49W/(m^2K)$ 、 $\eta_g=0.75$ 枠：ウレタン充填	断熱仕様ペアガラス コールドドラフト検証
13	2015/3/18 ～2015/3/21	種類：樹脂サッシ (縦すべり出し+はめころし) サイズ：W1,690×H1,370 ガラス部仕様：遮熱タイプフィルム入りガラス LowE3-Kr10-Kr10-Kr10-FL3 $U_g=0.39W/(m^2K)$ 、 $\eta_g=0.28$ 枠：ウレタン充填	フィルム入りガラス 接着
14	2015/3/27 ～2015/3/30	種類：樹脂サッシ (縦すべり出し+はめころし) サイズ：W1,690×H1,370 ガラス部仕様：LowE3-Ar16-FL3 $U_g=1.17W/(m^2K)$ 、 $\eta_g=0.46$ 枠：ウレタン充填	遮熱仕様ペアガラス コールドドラフト検証

注 ガラス仕様は室外側より記載、数字は厚さ[mm]
FL：フロート板ガラス、LowE：低放射ガラス、
Ar：アルゴンガス、Kr：クリプトンガス
(フィルム入りガラスの中空層ガス濃度は Ar、Kr とも 90%、ペアガラスは 85%)
フィルム入りガラスの中空層間のフィルムは記載省略。遮熱仕様は各フィルムの室内側表面に低放射処理、断熱仕様は各フィルムの室外側表面に低放射処理
 U_g ：ガラス中央部の熱貫流率 ($W/(m^2K)$)、ガラスメーカー算出値)
 η_g ：ガラスの日射熱取得率 (ガラスメーカー算出値)

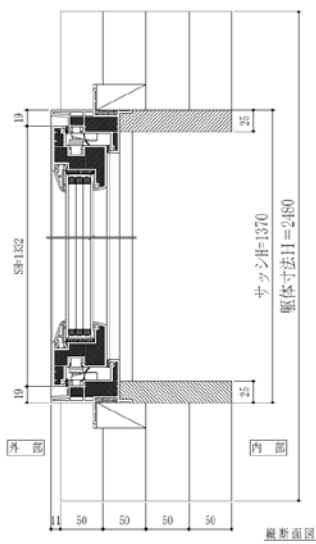


(a)縦断面図

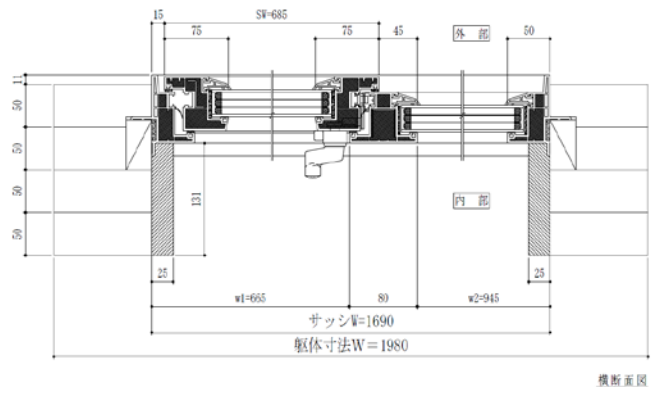


(b)横断面図

図 4-4-4 試験体断面図 (試験番号 1、2)

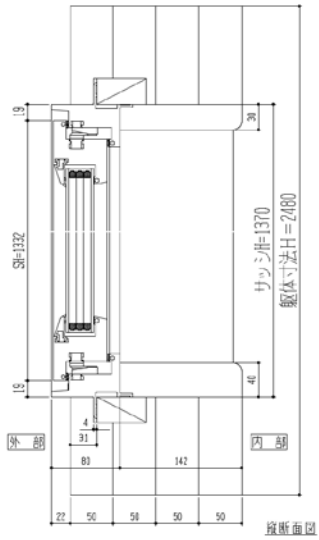


(a)縦断面図

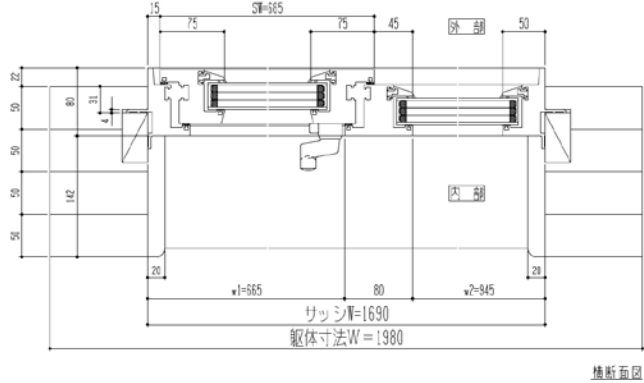


(b)横断面図

図 4-4-5 試験体断面図 (試験番号 3、4)



(a)縦断面図



(b)横断面図

試験番号 5 以降は開口部と取付パネルの納まりは同様である。

図 4-4-6 試験体断面図 (試験番号 5)



室内側



室外側

(a) 試験番号 1



室内側

(b) 試験番号 5



室内側

(c) 試験番号 6

写真 4-4-1 試験体設置状況 (試験番号は表 4-4-1 に対応)

3) 試験結果

① 熱貫流率および表面温度

熱貫流率および表面温度の測定結果のうち、主要なものを表 4-4-2～表 4-4-4 に示す。なお、すべての仕様の試験結果は表 4-5-1 にまとめて示す。

表 4-4-2 熱貫流率および表面温度の試験結果（試験番号 1）

試験年月日		2014/7/25～2014/7/28										
試験体		種類：樹脂サッシ(縦すべり出し+はめこりし) サイズ：W1,690×H1,370 ガラス部仕様：XPS3b 30mm 枠：従来品										
断熱性能試験結果	測定回			第1回	第2回	第3回						
	発熱量	Φ_{in}	(W)	50.5	50.6	50.7						
	校正熱量	Φ_{cal}	(W)	9.1	9.1	9.1						
	試験体通過熱量	$\Phi_{sp} = \Phi_{in} - \Phi_{cal}$	(W)	41.5	41.5	41.7						
	冷却側環境温度	θ_{ne}	(°C)	-0.3	-0.3	-0.3						
	加熱側環境温度	θ_{ni}	(°C)	19.2	19.2	19.2						
	試験体両側環境温度差	$\theta_{ni} - \theta_{ne}$	(°C)	19.4	19.4	19.4						
	伝熱開口面積	A_{sp}	(m ²)	2.32	2.32	2.32						
	熱貫流率 $U_m = \Phi_{sp} / \{(\theta_{ni} - \theta_{ne}) * A_{sp}\}$	U_m	(W/m ² K)	0.92	0.92	0.93						
	熱貫流抵抗 $R_m = 1/U_m$	R	(m ² K/W)	1.085	1.084	1.080						
	試験体両表面の熱伝達抵抗	$R_{s,t}$	(m ² K/W)	0.167								
	表面熱伝達抵抗補正值	$\Delta R = 0.165 - (R_i + R_o)$	(m ² K/W)	-0.002								
	基準化熱貫流率* $U_{st} = [U_m^{-1} - R_{s,t} + R(s,t),st]^{-1}$	U_{st}	(W/m ² K)	0.92	0.92	0.93						

表面温度	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12
室内側(°C)	16.1	17.3	17.3	15.9	17.4	17.5	15.2	16.0	15.7	16.0	13.1	13.1
室外側(°C)	1.0	0.4	0.5	0.9	0.4	0.5	1.8	2.9	0.5	0.4	0.3	0.5

表 4-4-3 熱貫流率および表面温度の試験結果 (試験番号 5)

試験年月日		2014/11/26~2014/12/1										
試験体		種類: 樹脂サッシ(縦すべり出し+はめころし) サイズ: W1,690×H1,370 ガラス部仕様: 遮熱仕様ヒートミラーガラス3LowE-Kr10-Kr10-Kr10-FL3 U _g =0.39W/(m ² K)、η _g =0.28 枠: ウレタン充填										
断熱性能試験結果	測定回			第1回	第2回	第3回						
	発熱量	Φ _{in}	(W)	39.7	39.7	39.7						
	校正熱量	Φ _{cal}	(W)	10.7	10.7	10.7						
	試験体通過熱量	Φ _{sp} =Φ _{in} -Φ _{cal}	(W)	29.1	29.0	29.1						
	冷却側環境温度	θ _{ne}	(°C)	-0.2	-0.2	-0.2						
	加熱側環境温度	θ _{ni}	(°C)	19.6	19.6	19.6						
	試験体両側環境温度差	θ _{ni} -θ _{ne}	(°C)	19.8	19.8	19.8						
	伝熱開口面積	A _{sp}	(m ²)	2.32	2.32	2.32						
	熱貫流率 U _m =Φ _{sp} /((θ _{ni} -θ _{ne})*A _{sp})	U _m	(W/m ² K)	0.63	0.63	0.63						
	熱貫流抵抗 R _m =1/U _m	R	(m ² K/W)	1.577	1.584	1.580						
試験体両表面の熱伝達抵抗	R _{s,t}	(m ² K/W)	0.168									
表面熱伝達抵抗補正值	ΔR=0.165-(R _i +R _o)	(m ² K/W)	-0.003									
基準化熱貫流率 ^{**} U _{st} =[U _m ⁻¹ -R _{s,t} +R(s,t),st] ⁻¹	U _{st}	(W/m ² K)	0.64	0.63	0.63							

表面温度	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12
室内側(°C)	16.5	18.8	18.8	17.5	18.7	18.8	17.6	16.9	15.2	15.9	15.6	15.1
室外側(°C)	0.8	0.1	0.1	0.6	0.2	0.1	0.4	1.9	0.4	0.2	0.1	0.5

表 4-4-4 熱貫流率および表面温度の試験結果 (試験番号 6)

試験年月日		2014/12/1~2014/12/3										
試験体		種類: 樹脂サッシ(縦すべり出し+はめころし) サイズ: W1,690×H1,370 ガラス部仕様: XPS3b 35mm 枠: ウレタン充填										
断熱性能試験結果	測定回			第1回	第2回	第3回						
	発熱量	Φ _{in}	(W)	45.5	45.7	45.6						
	校正熱量	Φ _{cal}	(W)	11.0	11.0	11.0						
	試験体通過熱量	Φ _{sp} =Φ _{in} -Φ _{cal}	(W)	34.5	34.7	34.6						
	冷却側環境温度	θ _{ne}	(°C)	-0.2	-0.2	-0.2						
	加熱側環境温度	θ _{ni}	(°C)	19.6	19.6	19.6						
	試験体両側環境温度差	θ _{ni} -θ _{ne}	(°C)	19.8	19.8	19.8						
	伝熱開口面積	A _{sp}	(m ²)	2.32	2.32	2.32						
	熱貫流率 U _m =Φ _{sp} /((θ _{ni} -θ _{ne})*A _{sp})	U _m	(W/m ² K)	0.75	0.75	0.75						
	熱貫流抵抗 R _m =1/U _m	R	(m ² K/W)	1.329	1.325	1.329						
試験体両表面の熱伝達抵抗	R _{s,t}	(m ² K/W)	0.168									
表面熱伝達抵抗補正值	ΔR=0.165-(R _i +R _o)	(m ² K/W)	-0.003									
基準化熱貫流率 ^{**} U _{st} =[U _m ⁻¹ -R _{s,t} +R(s,t),st] ⁻¹	U _{st}	(W/m ² K)	0.75	0.76	0.75							

表面温度	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12
室内側(°C)	17.2	18.0	18.0	17.9	18.0	18.1	18.0	17.0	16.6	16.8	16.3	15.2
室外側(°C)	0.6	0.4	0.4	0.6	0.4	0.5	0.4	2.3	0.4	0.3	0.1	0.5

② 熱画像

赤外線カメラによる熱画像を図 4-4-7、4-4-8 に示す。なお、熱画像は校正が十分ではないので、温度の絶対値は参考程度のものである。

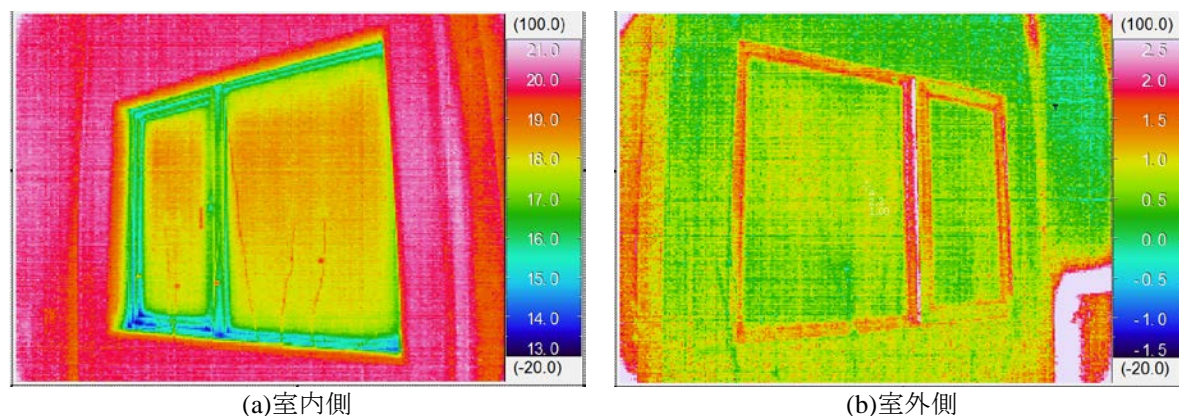


図 4-4-7 試験番号 2 赤外線熱画像

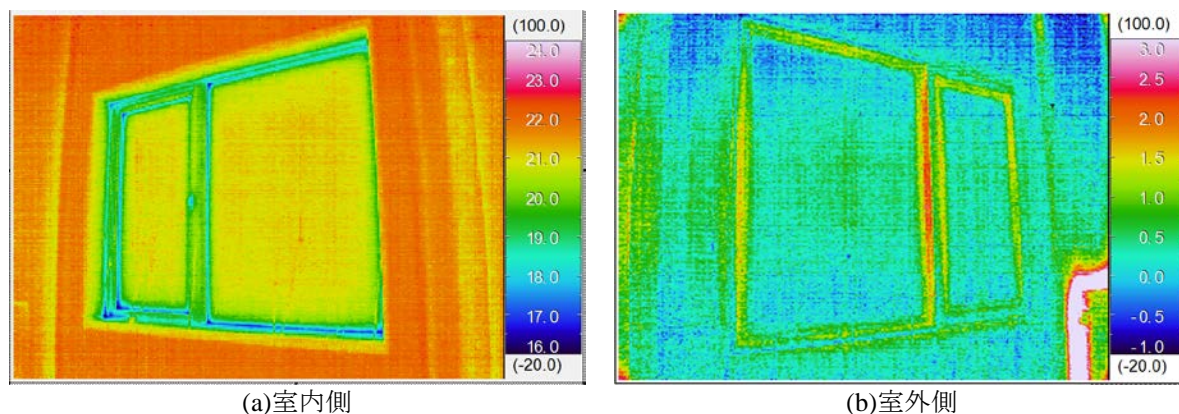


図 4-4-8 試験番号 6 赤外線熱画像

③ コールドドラフトに関する検証

窓の性能による、窓近傍のコールドドラフトの違いを検証するため、温度測定および熱画像撮影を行った。熱画像撮影のため、図 4-4-9 に示すように縦方向 7 枚×横方向 3 枚=計 21 枚の白色の樹脂板(実測放射率 0.92)を吊り下げ、視覚的な温度分布の把握を試みた。吊り下げ位置はサッシの幅方向中央で、窓に対して概ね垂直に設置した。赤外線カメラから見た樹脂板の裏面には、温度測定のため熱電対を貼り付けた。また、窓の近傍にも熱電対を上下方向 9 点設置した。実験状況を写真 4-4-2 に示す。

実験は、熱貫流率測定と同じ試験体を用いて、北

方建築総合研究所の断熱防露試験室で行ったが、室内室で空調による温度制御を行うと、空調による気流が支障となるため、小型の電気式ファンヒーターを直接窓に気流が当たらないように設置し、約 25℃に加温した。室外室は、熱貫流率測定時と同じく、風道により強制気流を与え、仕様による違いを明確にするため室内外温度差を大きくとることを意図し、-10℃一定で空調を行った。

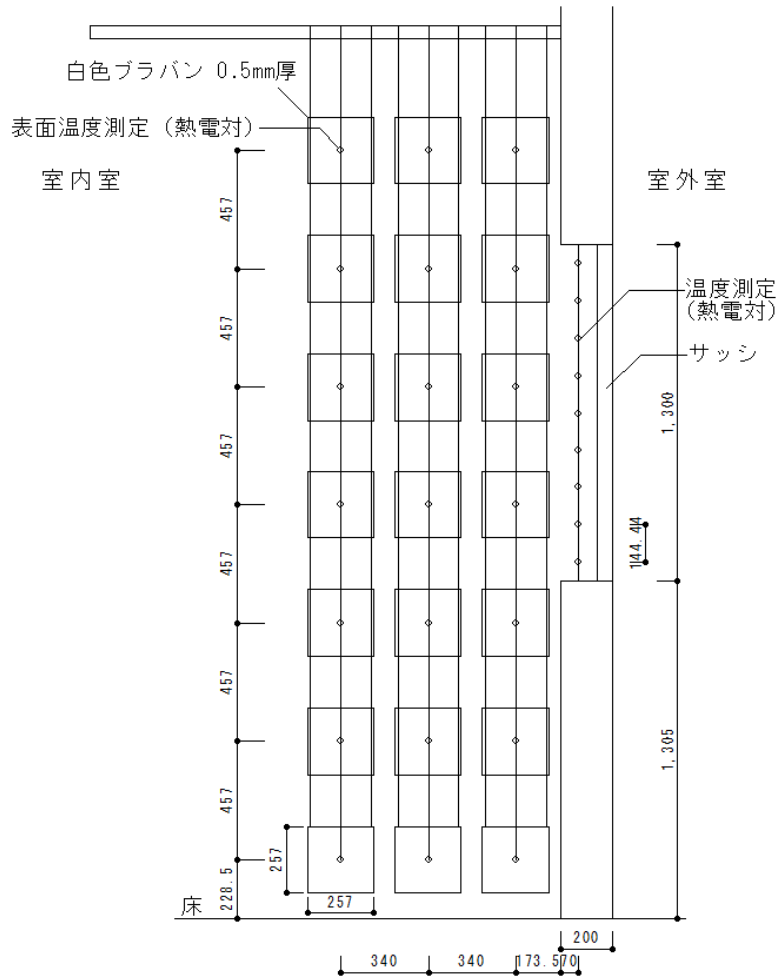


図 4-4-9 熱画像用樹脂板と熱電対の設置位置(立面図)



(a)熱画像撮影位置から見た状況



(b)樹脂板裏面熱電対設置状況

写真 4-4-2 実験状況

実験は試験番号 7、11、12 で行った。温度の測定結果を図 4-4-10 に示す。また、熱画像を図 4-4-11 に示す。なお、室内室の温度は、実験時の断熱防露試験室周囲温度などによって変動するため、次式で補正している。

$$\theta_i' = (25 - \theta_{out}) / (\theta_{in} - \theta_{out}) \times (\theta_i - \theta_{out}) + \theta_{out} \quad (4-4-1) \text{式}$$

θ_i' : 補正した測定温度[°C]

θ_{in} : 室内室温度[°C]

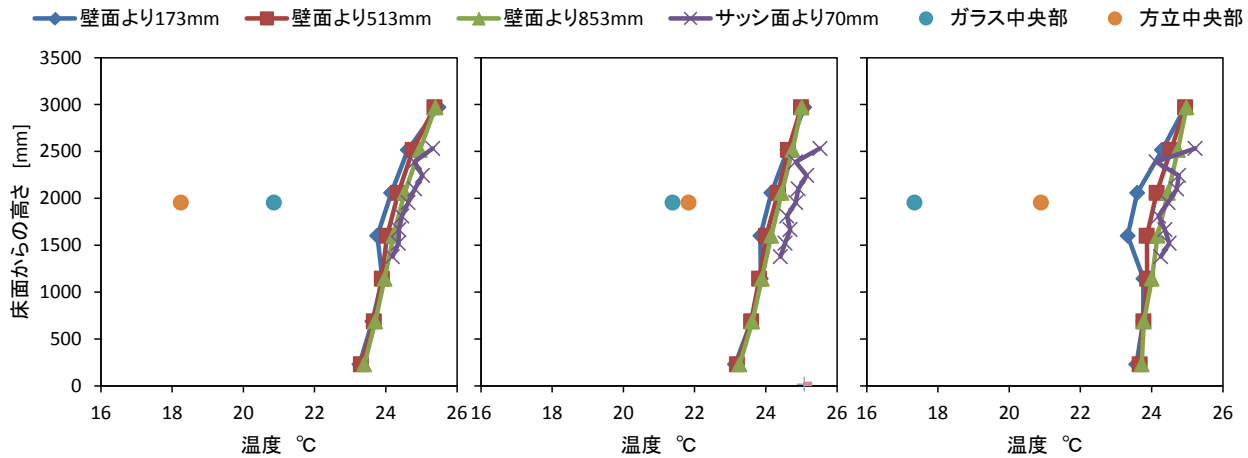
θ_{out} : 室外室温度[°C]

θ_i : 測定温度[°C]

方立中央部の温度は枠材にウレタンを充填していない試験番号 7 に対して、充填している試験番号 11、12 が高く、ウレタン充填の効果が表れている。ガラス中央部の温度は、ペアガラスの試験番号 12 が低

い。窓周囲の温度は試験番号 12、7、11 の順に高くなっており、窓に近い位置ほど違いが大きい。なお、次の点に留意が必要である。

- 上下温度差が 2°C 程度ついているが、断熱防露試験室自体の断熱性能や、暖房方式の影響も受けている。
- 樹脂板は周囲の空気温度のみならず、放射伝熱の影響も受けている。窓周囲の温度が低く計測されているのは、放射伝熱の影響も大きいと考えられる。
- 「窓より 70mm」位置の測定は、T 熱電対を 15mm 程度露出させ、先端部のみ接合しているため、放射伝熱の影響を受けにくい。そのため温度が高めに計測されていると考えられる。

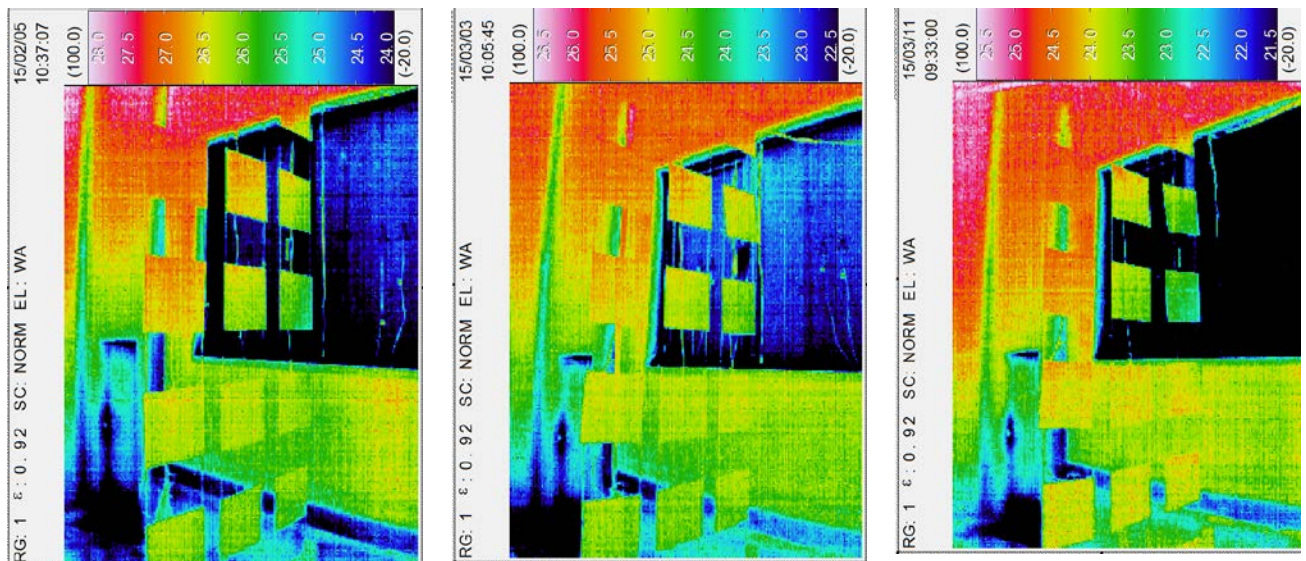


(a) 試験番号 7

(b) 試験番号 11

(c) 試験番号 12

図 4-4-10 温度測定の結果



(a) 試験番号 7

(b) 試験番号 11

(c) 試験番号 12

図 4-4-11 赤外線熱画像

(5) 計算法と試験による性能値の比較

4.(3)にて示した各試験番号における性能値と、計算法により算出した性能値の一覧を表 4-5-1 に、測定結果と計算結果における U_w の対比を図 4-5-1 に、同様に $AveU_f$ の対比を図 4-5-2 に示す。 U_w においては、ステップ 1、2 共、測定結果と計算結果の差は 3% だった。 $AveU_f$ においては、ステップ 1 の差は 3% だったが、ステップ 2 は 14% と差が目立つ結果となった。差の要因として、測定における局所熱伝達率のばらつき、熱流計等の測定機器の配線による影響、測定精度（熱流計の設置状況）や試作品の製作精度が挙げられるが、ステップ 2 の測定結果から得られた U_g 、 $AveU_f$ 、計算法により算出した $Ave\Psi_g$ を用いて U_w を算出すると $0.64W/(m^2 K)$ となり、測定結果と近い値を示したことから、差の主要因は試作品の製

作精度（フレーム内部に充填した断熱材の欠損やスペック不足）と考え、試作品を解体しフレーム内部に充填されている断熱材の欠損状況を確認したが、性能に影響を及ぼす様な欠損は確認できなかった。さらに、断熱材を抽出し密度を測定した結果、どの部位においても概ね $40 kg/m^3$ だったことから、公称値通りの熱伝導率 ($\lambda=0.024W/(mK)$) が推定され、断熱材の熱的性能においても問題は見受けられず、差の要因把握には至らなかった。尚、ステップ 2 と同様のフレーム構造を用いて断熱パネルの厚さのみを変えた試験番号 11 は、計算値と近い値を示した。また、ステップ 2 とフレーム構造は異なるが断熱材を充填した仕様である試験番号 8 (FIX 窓) においても計算値と近い値を示した。

表 4-5-1 計算法と測定による性能値の一覧

性能値	適用JIS	試験番号													
		1 ステップ1	2	3	4	5 ステップ2	6 ステップ2	7	8	9	10	11	12	13	14
U_w [W/(m ² K)]	JIS A4710	-	1.00	0.69	-	0.63	-	-	-	0.87	0.79	-	1.46	0.61	1.24
	JIS A2102	-	1.02	0.69	-	0.65	-	-	-	0.88	0.83	-	1.43	0.65	1.19
$AveU_f$ [W/(m ² K)]	JIS A4710	1.23	-	-	0.93	-	0.93	1.30	0.78	-	-	0.79	-	-	-
	JIS A2102	1.27	-	-	0.84	-	0.80	1.37	0.81	-	-	0.80	-	-	-
U_g (障子) [W/(m ² K)]	JIS A4710 (△t)	-	0.74	0.40	-	0.36	-	-	-	0.69	0.58	-	1.43	0.36	1.13
U_g (FIX) [W/(m ² K)]		-	0.74	0.35	-	0.33	-	-	-	0.69	0.57	-	1.44	0.33	1.13
U_g [W/(m ² K)]	JIS R3107	-	0.78	0.44	-	0.39	-	-	-	0.69	0.64	-	1.49	0.39	1.17
$Ave\Psi_g$ [W/(Mk)]	JIS A2102	-	0.038	0.046	-	0.048	-	-	-	0.049		-	0.031		

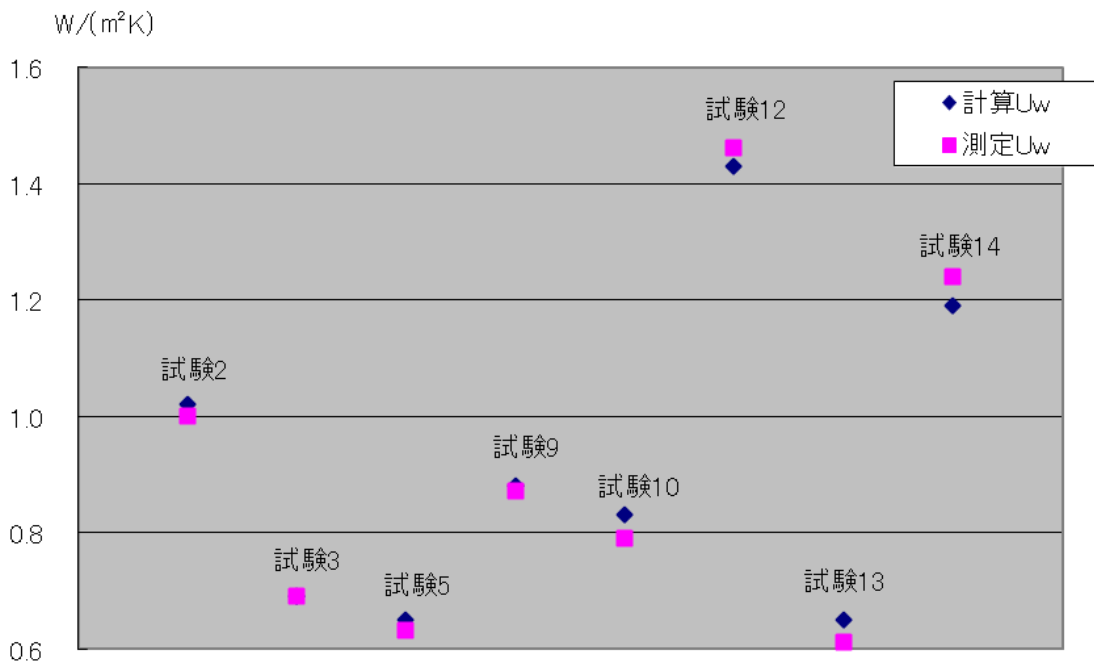


図 4-5-1 測定結果と計算結果における (U_w) の対比

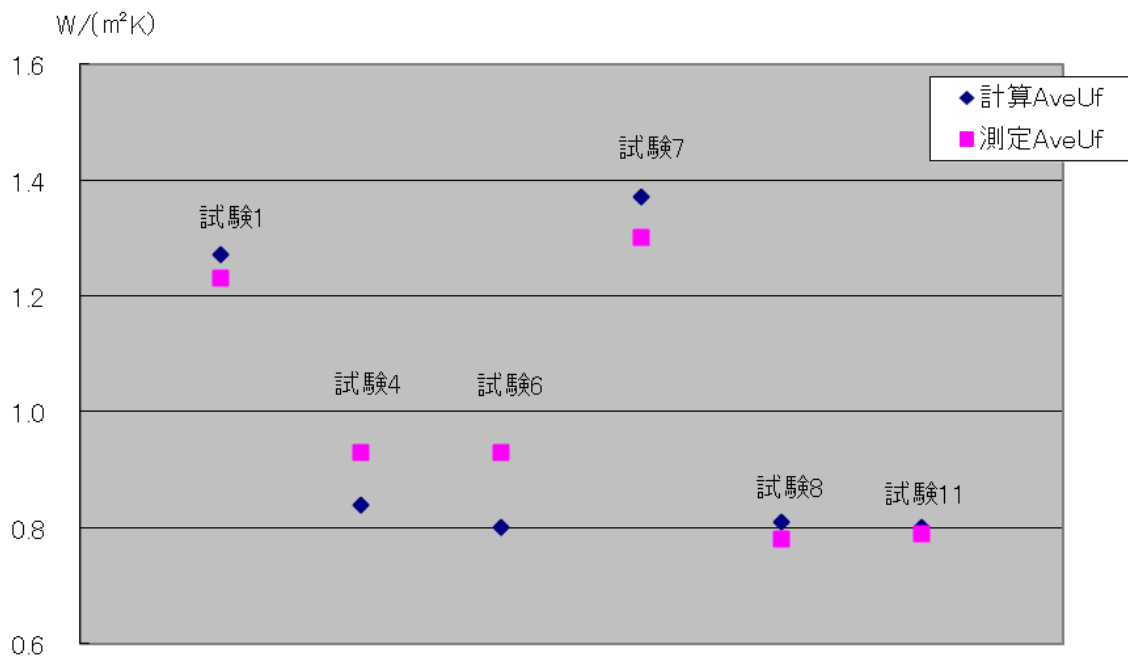


図 4-5-2 測定結果と計算結果における (AveUf) の対比

(6) まとめ

第4章では、第2章で示した海外先進事例の調査で得た知見を参考に、4.(3)ではステップ1（エッジクリアランス寸法・キャビティ寸法の最小化、センサーシール構造）における U_f の、ステップ2（ステップ1+断熱材充填+枠・框の気密材変更+補強材の削除・材質変更+枠と躯体の中空部への断熱補強+フィルム入りガラス）における U_w 、 U_f 、 $AveU_f$ 、 Ψ_g 、 $Ave\Psi_g$ の妥当性評価をJIS A2102-2に基いた計算法にて行った。4.(4)ではステップ1、2の仕様における試作品を中心に製作し、JIS A4710に基いた測定法により U_w 、 $AveU_f$ の妥当性評価を行った。また、サッシ近傍のコールドドラフトの状況検証を目的として温度測定及び熱画像撮影を行った。4.(5)では計算法と測定法で得た結果を比較し、差の要因を考察した。評価により得られた知見、課題を以下にまとめる。

- ①ステップ1の $AveU_f$ について、計算法・測定法いづれにおいても既存仕様（試験番号7）から向上し、知見の有効性が証明できた。また、計算結果と測定結果との差はわずかであり、計算結果は測定結果を概ね再現したといえる。
- ②ステップ2の計算法により算出した各部位の U_f において、既存仕様やステップ1に対する、障子側吊元枠と方立の性能向上率が他の部位と比べ突出した。断熱材充填の効果のみならず、熱橋要因の排除や軽減（補強材の削除や材質変更）による効果も加味されていることを示している。
- ③ステップ2における $AveU_f$ の計算結果と測定結果で、大きな差（14%の乖離）が見られた。様々な要因が考えられる中、主要因を試作品の製作精度（フレーム内部に充填した断熱材の欠損やスペック不足）と予測し分析したが、性能に影響を及ぼす様な欠陥は見受けられなかった。一方、ステップ2と同様のフレーム構造で、断熱パネルの厚さのみ異なる試験番号11の $AveU_f$ における計算結果と測定結果との差はわずかであった。計算上では、断熱パネルの厚さの差分（ステップ2と試験番号11の断熱パネルの厚さの差=3mm）は $AveU_f$ に影響を及ぼすとはいえず、構造の違いによる影響はほぼ無いものとして考えられ、試験番号11においては、計算結果は測定結果を概ね再現したといえる。ステップ2と試験番号11で整合が図れず、差の要因把握は今後

の検討項目として残った。

[第4章参考文献]

- 4-1) JIS A2102-1：窓及びドアの熱性能-熱貫流率の計算-第1部：一般、（一財）日本規格協会、2011
- 4-2) JIS A2102-2：窓及びドアの熱性能-熱貫流率の計算-第2部：フレームの数値計算法、（一財）日本規格協会、2011
- 4-3) JIS R3107：板ガラス類の熱抵抗及び建築における熱貫流率の算定方法、（一財）日本規格協会、1998
- 4-4) ISO 10292：Glass in building-Calculation of steady-state U values (thermal transmittance) of multiple glazing, 1994
- 4-5) ISO 15099：Thermal performance of windows, doors and shading devices- Detailed Calculations, 2003
- 4-6) TB2D/BEM Ver3, （一社）リビングアメニティ協会
- 4-7) ift Guideline WA-08eng/1, Thermally improved spacers—Part 1：Determination of representative Ψ -values for profile sections of windows, ift Rosenheim, November 2008
- 4-8) JIS A4710：建具の断熱試験方法, （財）日本規格協会, 2004

[第4章記号]

- A_w : 伝熱開口面積[m²]
 A_g : ガラス部の見付面積[m²]
 A_f : フレーム部の見付面積[m²]
 b_g : ガラスの見付け幅 [m]
 b_{gn} : 各部位におけるガラス見付け寸法[m]
 b_f : フレームの投影幅 [m]
 U_f : フレーム部の熱貫流率[W/(m²・K)]
 U_g : ガラス中央部の熱貫流率[W/(m²・K)]
 U_g' : 補正後（JIS A2102-1、-2）のガラス中央部の熱貫流率[W/(m²・K)]
 U_p : 断熱パネル中央部の熱貫流率
 U_w : サッシ全体の総合熱貫流率[W/(m²・K)]
 l_g : ガラスエッジ部の長さ[m]
 L_f^{2D} : 2次元熱コンダクタンス
 L_{qp}^{2D} : 複層ガラスモデルの2次元熱コンダクタンス[W/(mK)]
 Ψ_g : ガラスエッジ部の線熱貫流率[W/(m・K)]
 $Q_{fp}(out)$: 熱流量(室外側)
 $Q_{fp}(in)$: 熱流量(室内側)
 $AveQ_{fp}$: 室内外の熱流量平均値
 $Ave\Psi_g$: ガラスエッジ部の平均線熱貫流率[W/(m・K)]
 Ψ_{gn} : 各部位におけるガラスエッジ部の線熱貫流率[W/(m・K)]
 θ_i' : 補正後の測定温度[°C]

θ_i : 測定温度[°C]

θ_{in} : 室内の空気温度[°C]

θ_{out} : 室外の空気温度[°C]

5. 長期的な断熱性能の確保に関する検討

前章まででは、断熱性能向上の可能性について数値計算及び試作品の実測を通して、検討を行ってきた。本章では、製品化を見据えた製作上の課題及び長期的な断熱性能の維持の観点から検討を行う。

第1節ではフレーム内部への断熱材の充填について、第2節では日射受熱時のフレーム部の温度収縮について、第3節ではフレーム内部のメッキ処理について、第4節では複層ガラスの耐久性についての検討を行う。

なお、本章では第1～3節の一部の内容は実験による検討を行っているが、その他は試験方法の整理もしくは課題整理にとどまっており、これらについては製品化の際はさらなる性能検証が求められる。

(1) フレーム内部への断熱材の充填について

1) 試作品の注入方法について

断熱材には成型品よりも発泡品の方が高い充填性が期待できることから、硬質発泡ウレタンフォームを用いた。使用した製品は3.(2).2)項で示したものである。なお、使用する発泡原液は安定した成形のために「発泡倍率(密度)」「反応特性」を最適化した上で、「断熱性(熱伝導率)」「加工性(熱可塑性・接着性)」に配慮した。

荒切りしたフレームおよび組部品に加工されたフレームの片方の端部より、少量吐出が可能な発泡機を使用してウレタン発泡原液を充填対象チャンバー毎に注入した。ただし、発泡機吐出口が挿入できない極小断面のチャンバーへは、スポイトボトルを使用して注入を行った。充填箇所を図5-1-1に示す。

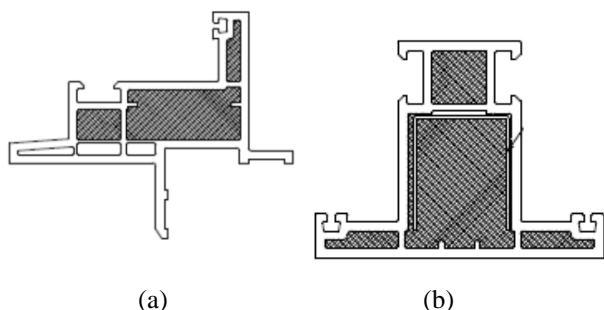


図5-1-1 断熱材の充填箇所

2) 未充填箇所の発生原因

「未充填箇所」とは、連続した断熱層が形成されていない箇所を指し、発泡段階で形成される多少の

充填ムラ(ボイド)とは異なるものとする。

未充填箇所は、充填すべき容積に対してウレタン発泡原液投入量が不足した場合、あるいは、温度条件や配合比率に起因し原液設計時と異なる発泡倍率となった場合に発生する。その際の処置として原液の追加投入を行っても、先に充填した発泡体に追加した原液が液体の状態で接しない場合、その間の空間部分にあった空気が閉じ込められて未充填箇所を形成する。

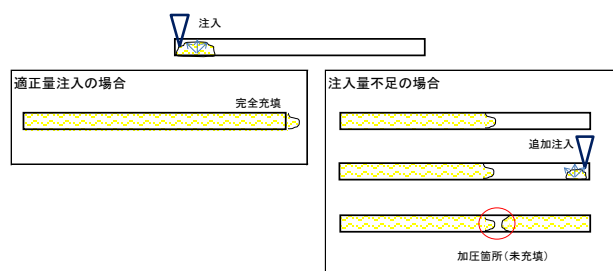


図5-1-2 未充填箇所発生概念図

3) 品質確保の考え方

未充填部分(断熱欠損部)を発生させない管理ポイントを以下に示す。

- ▶ 投入量の確保
(装置による計量充填、フレーム加工部の養生)
- ▶ 充填条件の均一化
(作業環境温度、フレーム温度、原液温度、二液配合比率、混合条件、注入位置、等)
- ▶ 充填部空気の排出経路の確保

特に、極小断面のチャンバーへの充填には、発泡機吐出口と端部とをジョイントする専用のノズル・アプリケーションの開発を必要とする。

4) 充填状況の確認方法

サッシ枠内へのウレタン充填状態を確認する方法として、打撃音による検討を行った。

試験体は、透明なサッシ枠を作成し、その枠内にウレタンを一部に空隙が生じるように充填した。

図5-1-3にウレタンの充填状態と打撃点を示す。

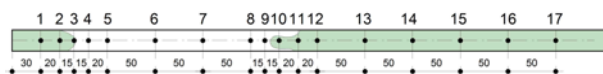


図5-1-3 サッシ枠のウレタン充填状態と打撃点
(色のついている部分はウレタンが充填されている)

打撃音の測定は、インパルスハンマを使用して打撃し（写真 5-1-1）、20cm 離れた位置に設置したマイクロホンで音圧レベルを測定した。音圧レベルの測定結果は A 特性による補正を行った。インパルスハンマで衝撃力を測定したが、ほぼ一定の衝撃力で打撃できているため衝撃力による基準化を行わず音圧レベルを用いて分析することにした。

図 5-1-4 に全 17 点の音圧レベルを、図 5-1-5 に空隙ありの打撃点 5～8 の平均値と、打撃点 11 から 17 の平均値の値を示す。図 5-1-5 から、500Hz 帯域から 1600Hz 帯域の間でウレタン充填している方が最大 10dB 大きくなっていることがわかる。実際に打撃音を聞いた場合にも音の違いを聞き分けることができたため、少し訓練を積めば大きな空隙については認知することが可能と言える。



写真 5-1-1 打撃状況

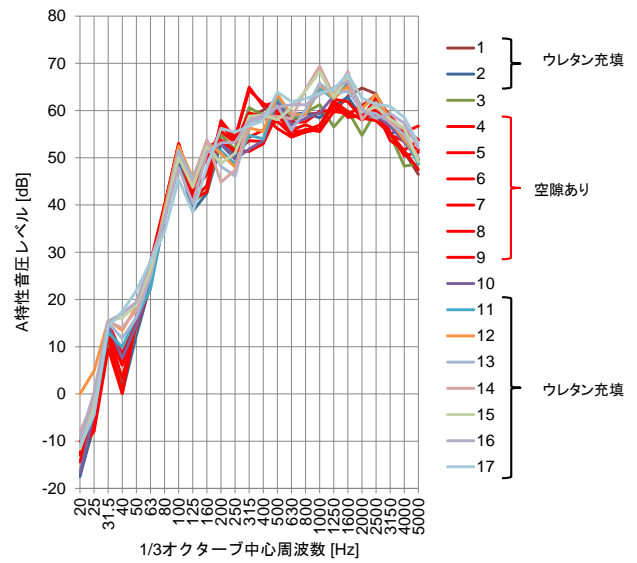


図 5-1-4 打撃音の音圧レベル (全データ)

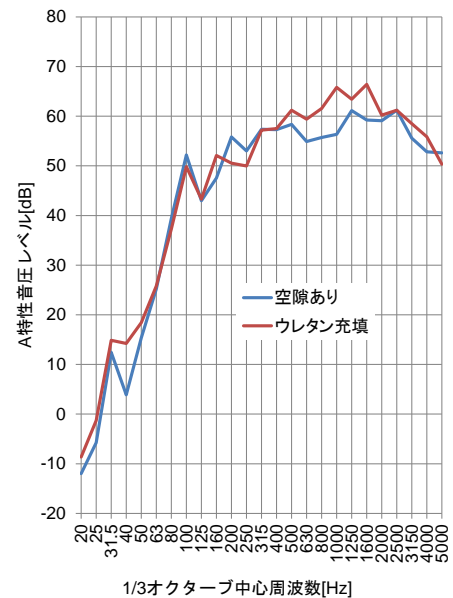


図 5-1-5 ウレタン充填状況の違いによる打撃音の音圧レベル

(2) フレーム部の温度収縮について

窓フレーム部の断熱性能が向上することによって、既存品よりフレームの内外表面温度差が大きくなり、温度収縮の差により変形が生じやすくなることが懸念される。本検討では、実験によって温度収縮による変形を把握する。

1) 実験条件の検討

窓フレーム部は内外表面温度差が大きいときに温度収縮による変形を生じ、窓の開閉等の障害を生じる危険性があるが、特に夏季に日射を受ける際は内外表面温度差が大きくなると考えられる。しかし、窓フレーム部の温度収縮による変形に関する JIS 等の試験規格は存在しない。そこで、本研究では以下の通り実験条件を考えた。

夏季の日射量が大きい昼間として、表 5-2-1 のような条件を想定し、フレーム部の定常伝熱計算から、室外側表面温度を算出し実験で再現することとした。日射吸収率は既往製品の測定結果による。試験は本研究で代表サイズと考える幅 1,690mm、高さ 1,370mm の縦すべり出し+はめこり窓とした

実験条件となる、解析による室内外表面温度の結果を表 5-2-2 に示す。本研究による窓の外側表面温度が黒色で最大 73.4℃、表面が白色で最大 45.1℃となった。それぞれを安全側に数値を丸めて、外側表面温度の実験条件は 75℃と 46℃とした。

表 5-2-1 想定条件

条件	数値	備考
鉛直面日射量	500 [W/m ²]	JIS A 2103 ⁵⁻¹⁾ 夏季条件を参考
外気温	35 [°C]	JIS A 2103 夏季条件を参考
室温	25 [°C]	JIS A 2103 夏季条件を参考
室外側表面熱伝達率	10.3 [W/(m ² K)]	ユルゲスの実験式による (v=0.05m/s)
室内側表面熱伝達率	7.69 [W/(m ² K)]	JIS A 2102 を参考
日射吸収率	0.82 [-]	黒色を想定
	0.21 [-]	白色を想定

表 5-2-2 実験条件

表面色	黒色	白色
日射吸収率 [-]	0.82	0.21
室内側温度 [°C]	25	25
室外側フレーム表面温度 (解析結果) [°C]	74.8	45.1
室外側フレーム表面温度 (実験条件) [°C]	75	46

2) 実験方法

実験には北方建築総合研究所にある複合劣化試験装置の加熱装置を使用した。試験装置を写真 5-2-1 に示す。本試験は外気側に設置されている赤外線ランプによって、表 5-2-2 に示す室外側フレーム表面温度になるよう加熱する。室内側は恒温室である。

照射は夏季の日射受熱を想定した十分な時間として、ETAG 004 (External Thermal Insulation Composite Systems with Rendering) を参考とし 8 時間 (昇温 1 時間、加熱 7 時間) 行い、その後試験室の常温 (18℃程度) で冷却し、フレーム部の表面温度と変位の継続的な測定を行った。

試験手順は以下の通りである。

- ① 窓の開閉確認。
- ② 昇温 (1 時間)。
- ③ 加熱 (7 時間)。
- ④ 加熱終了時に目視確認。
- ⑤ 冷却 (1 日)。
- ⑥ 冷却終了後に目視確認及び窓の開閉確認。

温度測定点は図 5-1-1 の通りとした。変位測定点は図 5-1-2 の通りとした。変位測定点は、室外側からの設置は受熱部に温度の不均一を与える等の理由から室内側とした。なお、室内側からと室外側からの計測では変位が概ね等しいことを予備実験から確認した。温度測定は T 型熱電対、変位測定はひずみ変換型変位計 (DG 1~DG 10 : TCL-100A 株式会社昭和測器製, DG 11~DG 15 : DT100A 株式会社共和電業) を用い、データロガー (CADAC2, 江藤電気株式会社製) で 1 分間隔のデータ収録を行った。



写真 5-2-1 試験装置

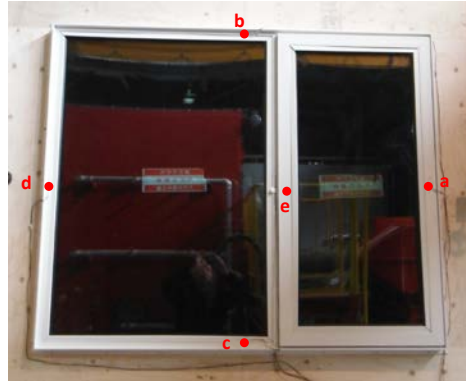


図 5-2-1 温度測定点

測定点	平面位置	断面位置
T01	a	室外側表面
T02	b	室外側表面
T03	c	室外側表面
T04	d	室外側表面
T05	e	室外側表面
T06	a	室内側表面
T07	b	室内側表面
T08	c	室内側表面
T09	d	室内側表面
T10	e	室内側表面

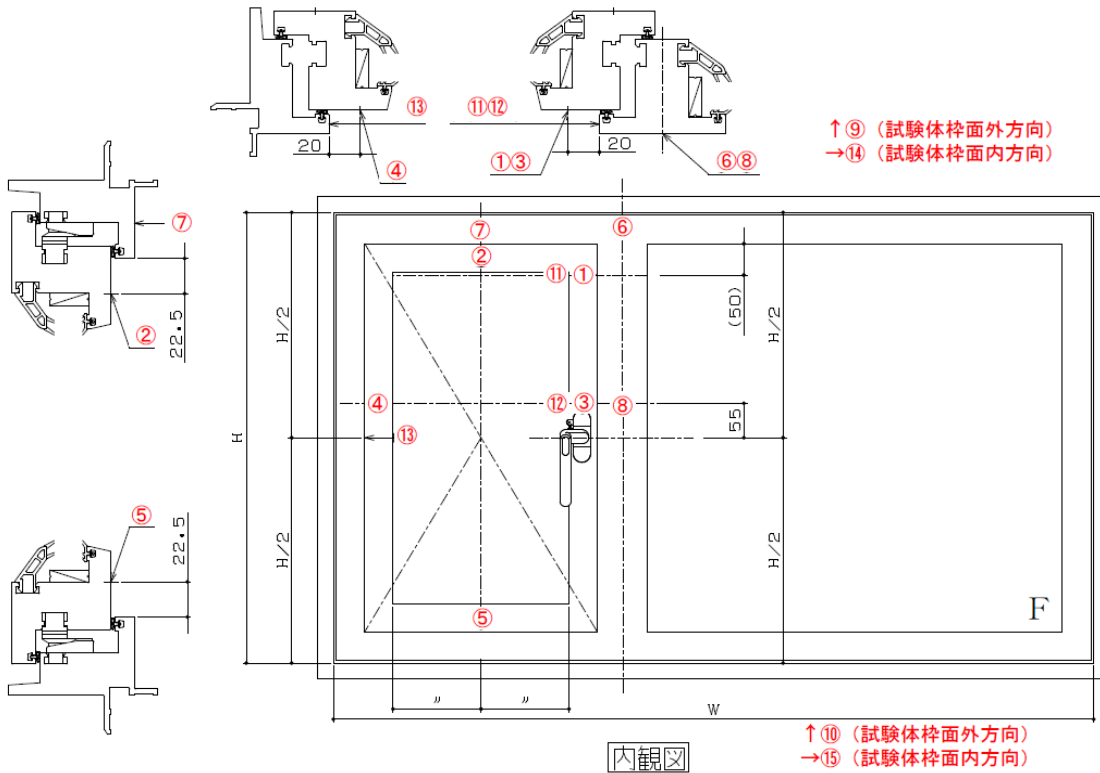


図 5-2-2 変位測定点

3) 実験結果

① 白色のフレーム

A. 温度

温度の計測結果を図 5-2-3 に示す。昇温が完了した時刻を経過時間 0[h] として示している。昇温には予定よりも時間を要し、2 時間程度要した。加熱中、室内側の室温は 25℃程度に保たれ、屋外表面温度はおおむね 46℃以上を保持した。加熱終了後も室内側の室温は 25℃程度を維持するが、室外側表面温度は

20℃前後まで下降した。

B. 開閉及び目視確認

試験前後にそれぞれ開閉確認を 5 回行ったが問題は見受けられなかった。外観確認は試験中随時実施したが、特に変化は見られなかった。

C. 変位

試験体枠の変位を差し引いた面外方向の各測定点

の変位量を図 5-2-4 に示す。変位量は最大 4.2mm 程度あった (DG3)。窓枠部と障子部では相対変位が最大 1.5mm 程度 (DG3 と DG8) あった。また、加熱終了後においても 1mm 以内ではあるが残留変位が見られた。

試験体枠の変位を差し引いた面内方向の各測定点の変位量を図 5-2-5 に示す。変位量は面外方向に比べて小さく、全て 1mm 以内であった。加熱終了後においても 1mm 以内ではあるが残留変位が見られた。

② 黒色のフレーム

A. 温度

温度の計測結果を図 5-2-6 に示す。昇温が完了した時刻を経過時間 0[h]として示している。昇温には予定よりも時間を要し、2 時間程度要した。加熱中、室内側の室温は 25℃程度に保たれた。屋外表面温度では T1 (FIX 側) が 75℃を下回ったが、平均温度では常に 75℃以上を保持した。加熱終了後も室内側の室温は 25℃程度を維持するが、室外側表面温度は 20℃前後まで下降した。

B. 開閉及び目視確認

試験前後にそれぞれ開閉確認を 5 回行ったが問題は見受けられなかった。外観確認は試験中随時実施したが、特に変化は見られなかった。

C. 変位

試験体枠の変位を差し引いた面外方向の各測定点の変位量を図 5-2-7 に示す。変位量は最大 5.9mm 程度あった (DG4)。窓枠部と障子部では相対変位が最大 1.6mm 程度 (DG2 と DG7) あった。また、加熱終了後においても 4.2mm 程度残留変位が見られた。

試験体枠の変位を差し引いた面内方向の各測定点の変位量を図 5-2-8 に示す。変位量は面外方向に比べて小さく、全て 1mm 以内であったが、加熱中よりも加熱終了後に比較的大きな変位が計測された。

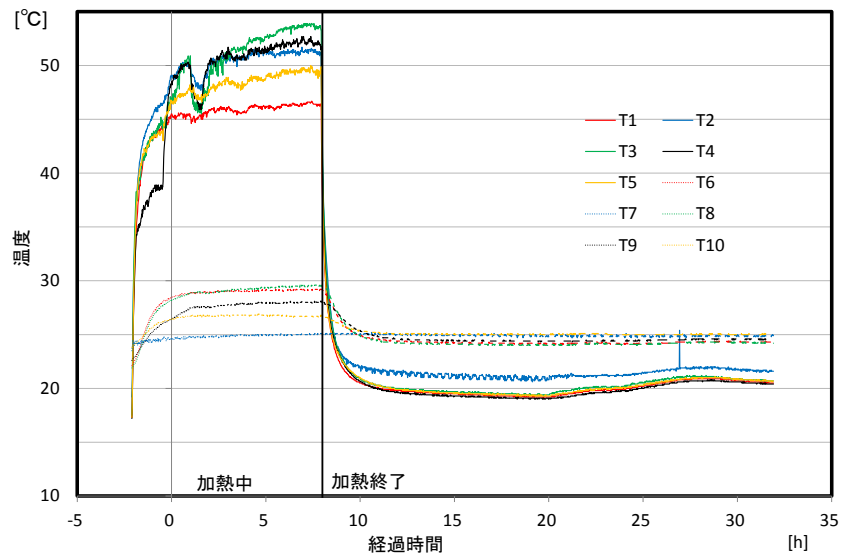


図 5-2-3 白色 温度変化

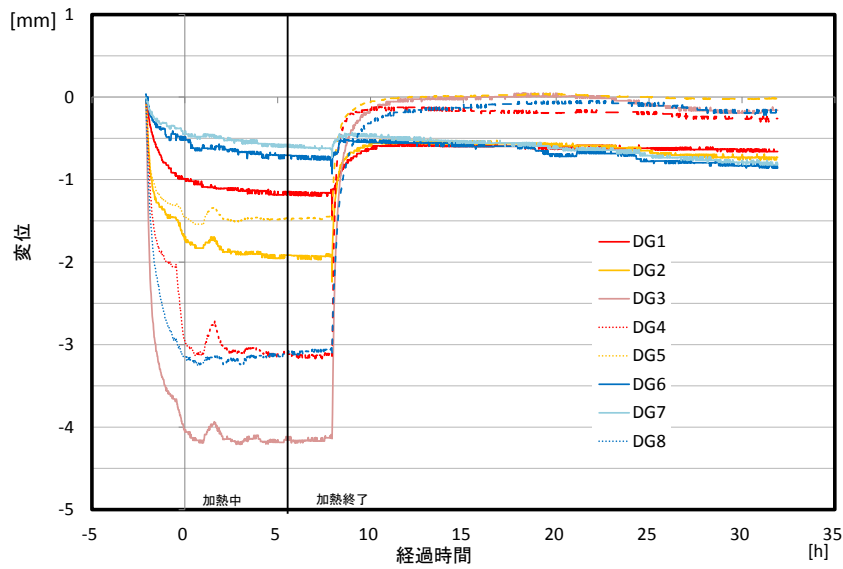


図 5-2-4 白色 面外方向の変位

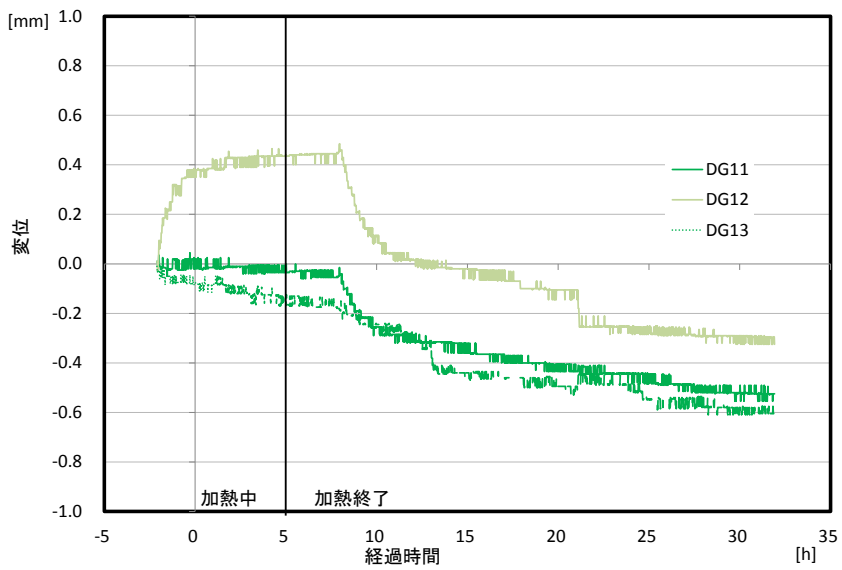


図 5-2-5 白色 面内方向の変位

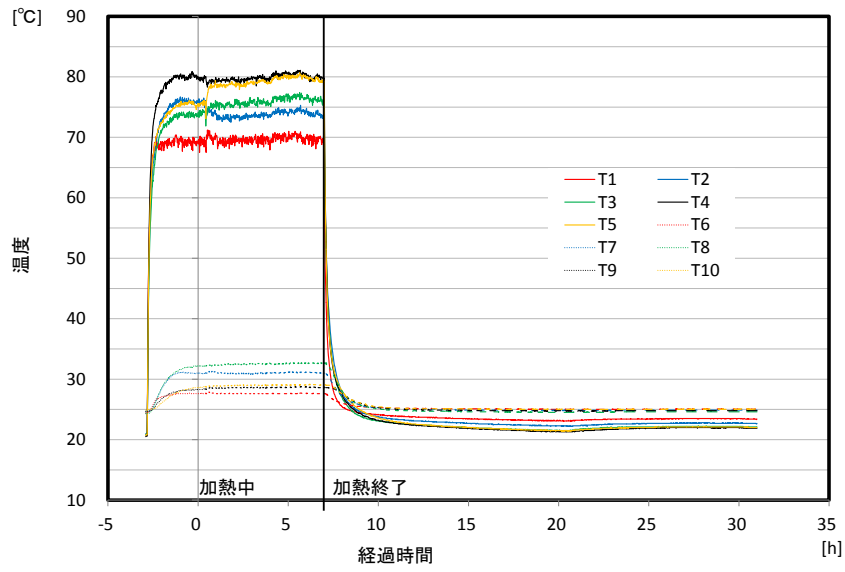


図 5-2-6 白色 温度変化

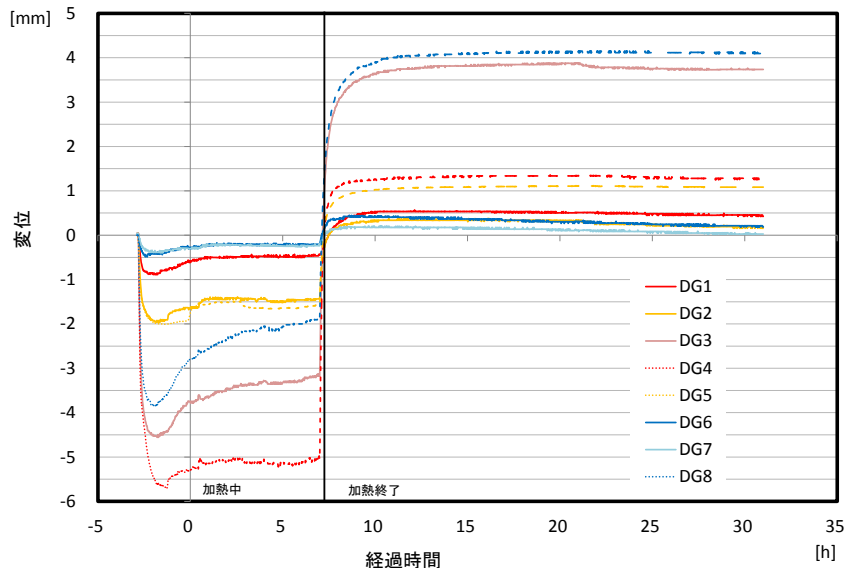


図 5-2-7 白色 面外方向の変位

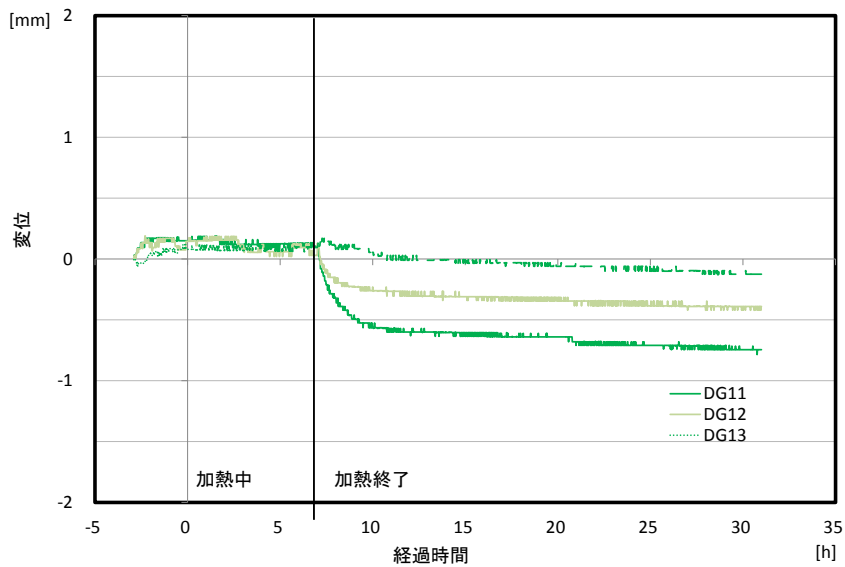


図 5-2-8 白色 面内方向の変位

(3) フレーム内部のメッキ処理について

3. (3) で節で有効性が示されたフレーム内部のメッキ処理について、製造方法を検討する。

1) 工程の概要

メッキ処理の工程を大きく 7 つに分けて表 5-3-1 に示す。以下に各工程での検討を述べていく。

2) 工程 No. 1 エッジングについて

現状、PVC をエッジングする薬品は 6 価クロムの使用が必須であるが、6 価クロムは RoHS 規制に抵触する恐れがある。そこで、代替手法を検討することとした。

エッジングは上記のような化学的な手法のほか、物理的な手法が考えられ、ここでは物理的な手法を実験によって検討した。

簡易的に紙やすりにて表面を研磨しメッキした。紙やすりは #400、#800、#2000 の 3 品番を使用した。メッキを施した後の外観及び密着性を表 5-3-2 に示す。

実験の結果、物理研磨では正常な析出性、密着性を得ることができなかった。

3) 工程 No. 3~4 コンディショナー、カタリストについて








めっき厚 0.5 μm 狙い（蛍光 X 線膜厚計では塩ビ上の測定は精度が低いので、析出速度を計算した狙い値）で試作品を作製した。

コンディショナー、カタリスト工程の薬品を変更することでテープピール試験では剥離頻度は少なくなることを確認できた。これは、カタリストを微粒化することによりアンカー効果を強化し密着性が高まったことによる。図 5-3-1 に概念図を示す。

表 5.3.1 メッキ処理の工程

NO	処理名	薬品名	濃度	温度 (°C)	時間 (分)	目的:ポイント
1	・ブリエッチング ・湯洗 ・水洗	N,Nジメチルホルムド エタノール	450ml/l 450ml/l	25	5	塩ビ表面のエッチング (化学研磨により粗くする)
2	・エッチング ・回収 ・水洗	無水クロム酸 濃硫酸	20g/l 930g/l	65	10	塩ビ表面のエッチング (化学研磨により粗くする)
3	・コンディショナー ・水洗	塩酸 特定薬品	50ml/l 5ml/l	30	3	エッチング液の持ち込み防止
4	・カタリスト ・水洗	触媒薬品	170ml/l	30	5	触媒付与
5	・アクセレーター ・水洗	硫酸	200ml/l	40	3	触媒後の表面活性化
6	・無電解Agメッキ ・水洗	3成分薬品	50ml/l	60	45	Agメッキ
7	・変色防止 ・水洗	特定薬品	50ml/l	40	0.5	Agめっき後の硫化対策

表 5.3.2 紙やすりの研磨によるメッキ処理の実験結果

紙やすり品番	REF	#400	#800	#2000
外観①				
外観②	No image			
密着強度	×	×	×	×

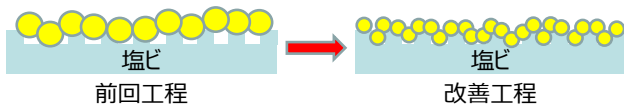


図 5-3-1 改善点の概念図

4) 工程 No. 6 無電解 Ag メッキについて

本工程は、外部に処理液（タンク）を準備し、ポンプで塩ビ管内を循環しながらメッキを行う（図 5-3-2）。

試作品は、テストピースで一工程ずつ処理するが、量産時は、各処理工程に於いて製品内を液が循環する装置が必要となる。

処理液は温度が 60℃と高温な事と、Ag めっき液自体が非常に分解しやすい。試作品では実験室レベルであり処理槽も小さい為処理温度、処理濃度のバラツキを極力抑えているが、量産時は長尺品をめっきするため、装置が大型化する事を考慮し、処理液の安定化を検討する必要がある。

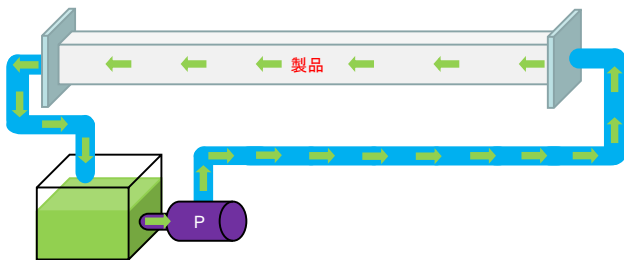


図 5-3-2 Ag メッキ処理の工程

以上の通り、工程別に検討を行ったが、現状製造上の課題が残ることとなった。

このため、第 4 章の試作品において対象外の技術としたが、今後さらなる高断熱化を目指すときに、処理方法改善に向けたさらなる検討を要する。

(4) 複層ガラスの耐久性について

本節では今後のガラス部の耐久性検証に向けて国内及び海外の試験方法の整理を行う。

1) 国内の試験規格

複層ガラスの耐久性は一般的に JIS R3209⁵⁻²⁾：複層ガラスに規定されている、封止の加速耐久試験および光学薄膜性能の加速耐久試験によって確認される。以下にその概要を記載する。

① 試験概要

露点試験により中空層の露点温度が -35°C 以下であることを確認した後、耐湿耐候試験および冷熱繰返し試験を所定の条件で行い、中空層の露点温度が -30°C 以下に維持されていること及び光学薄膜の放射率の変化が0.02以内であることを確認する。

試験体の概要は表 5-4-1 の通りである。

表 5-4-1 JIS R3209 で用いる試験体概要

試験	封止の加速耐久試験	光学薄膜性能の加速耐久試験
寸法	350mm×500mm	50mm×50mm
構成	原則 5mm ガラスと 6mm 空気層	Low-E ガラス単板
試験体数	6 枚	1 枚 (初期性能測定用)

② 試験方法

A. 露点試験

温度計を挿した銅板製の容器に有機溶剤を入れ、ドライアイスにより液温を下げる。

所定の温度になったら、所定の時間 (5mm の場合 4 分) 容器を試験体の表面にあて、その後素早く表面の霜を拭き取り試験体内部の結露の有無を確認する。

B. 耐湿耐候性試験

気温 $55\pm 3^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 95%以上の恒温恒湿槽内に試験体を入れ、近紫外線蛍光ランプによりガラスと封止材の接着面に紫外線を照射する。

C. 冷熱繰返し試験

$-20\pm 3^{\circ}\text{C}$ で1時間保持した後、 $55\pm 3^{\circ}\text{C}$ で1時間保持するサイクルを繰返す (図 5-4-1)。

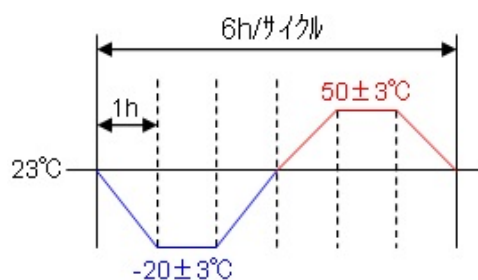


図 5-4-1 冷熱繰返し試験の温度環境

ここで、封止の加速耐久試験の暴露条件は、表 5-4-2 の 3 種類に分類される。住宅用窓の試験では一般にⅢ類を 3 度繰返す条件が適用される。

表 5-4-2 封止の加速耐久試験の暴露条件の種類

I 類	耐湿耐候性試験を 7 日、冷熱繰返し試験を 12 サイクル実施
II 類	I 類に加え、さらに耐湿耐候性試験を 7 日、冷熱繰返し試験を 12 サイクル実施
III 類	II 類に加え、さらに耐湿耐候性試験を 28 日、冷熱繰返し試験を 48 サイクル実施

光学薄膜の加速耐久性は、封止の加速耐久試験が終了した試験体から 50mm×50mm の試験体を切り出し、赤外線分光測定器を用いて測定する。JIS R3106⁵⁻³⁾に従い、事前に測定した加速耐久試験未実施の試験体の測定結果とともに垂直放射率を算出し数値を比較する。

2) 海外と国内の試験規格と今後の検証項目の整理

本項では、海外の試験規格を整理するとともに、本研究で検討する試作品において、今後必要な試験項目を整理する。

国際標準化機構 (ISO) により、ISO 20492^{5-4),5),6),7)} 建築用ガラス-複層ガラス-が策定および発行された。この規格は 4 つのパートで構成されそれぞれのパートは下記の通りである。

Part1：加速試験による封止の耐久性

Part2：ケミカルフォグgingテスト

Part3：ガス濃度およびガスリーク率

Part4：エッジシールの物理的特性の試験方法

それぞれのパートは、大別してアプローチ 1 とアプローチ 2 の 2 つの評価方法が示され、地域に合わせて適切な方式を選択することができ、アプローチ 1 が北米式、アプローチ 2 が欧州式となっている。

表 5-4-3 封止の加速耐久試験の内容比較

	UV 照射	恒温恒湿	冷熱試験	結果方法
JIS R3209 Ⅲ類 日本式	合計：672h (7日+7日+28日) 40W フラックライト 50mm	合計：672h (7日+7日+28日) 55℃-95%RH	合計：72 サイクル (6h/回=432h) -20℃~50℃	露点試験 -30℃以下
ISO20492-1 アプローチ 1 米国式	合計：756h (3h/回×252回) 10W/m ² 以上	合計：672h (14日+28日) 60℃-95%RH	合計：252 サイクル (6h/回=1512h) -29℃~60℃	露点試験 -40℃以下
ISO20492-1 アプローチ 2 欧州式	無し	合計：1176h (7週間) 58℃-95%RH	合計：56 サイクル (12h/回=672h) -18℃~53℃	乾燥材の含水量から 水蒸気透過係数を算出 可否でなく数値評価

① Part1：加速試験による封止の耐久性

国内外の試験方法の比較を表 5-4-3 に示す。いずれの試験方法も高温高湿環境と急激な温度変化を試験体に与えることで、加速試験を行っている。ただしアプローチ 2 は UV 暴露が無い。

試験内容で比較するとアプローチ 1 が最も過酷であり、特に冷熱サイクルにおいては JIS R3209 の 3 倍以上のサイクルを必要とする。そのため、JIS 試験ではⅢ類を連続して 3 回実施した後に同様の評価を行うことが行われる。

可視光透過低放射フィルム（以下、フィルム）入りガラスに関する既往の試験結果として、フロートガラス 5mm+空気層 6mm+HM フィルム+空気層 6mm+フロートガラス 5mm という構成にて、JIS R3209 のⅢ類を連続して 3 回試験を実施し、十分な加速耐久性能があることを確認している。このことから、封止に同じ材料を用い同じ構造で製造した製品においては、同様の耐久性があることが期待されている。

ただし、実製品と同じ構成で検証を行うことが望ましい。しかし、本研究で検討する構成の場合、空気層が厚く内部の体積が大きいため、試験中の温度の変化により、ガラスが割れそのままでは試験ができないという課題がある。

両面のガラスの厚みを 3mm、空気層を 30mm とし、ガラスの寸法を試験条件（350×500mm）とした場合において、温度変化が 40℃とすると、発生応力は約 28MPa となり許容応力の 10MPa を大きく超えてしま

う。そのため、ガラスは両面ともに強化ガラスを使用することで許容応力を高め（約 69MPa）試験を実施する予定である。

なお、フィルム入りガラスの光学薄膜の加速耐久性能については測定ができないため、ガラス部の熱貫流率の評価結果により把握する予定である。

② Part2：ケミカルフォギングテスト

窓の周辺部の断熱性の向上に関心が広がるにつれ、ウォームエッジと呼ばれる高断熱のスペーサが作られ始めた。従来スペーサはアルミや鉄といった金属材料で構成されていたが、熱伝導率の低いプラスチックや発泡材等の有機物を材料として多く用いられるようになった。これらの材料はその特性上可塑剤や合成時の溶剤などの化学物質が含まれている、あるいは残留していることにより、水蒸気の侵入とは別要因でガラス内部に結露や汚染が発生する可能性が露見された。それを事前に評価する方法として、この方法が発案されたようである。

試験方法を表 5-4-4 に示す。試験方法はいずれも類似しており、強力な紫外線を放射するランプを用いて試験体を加熱し、その領域中にコールドスポットをつくることでその部分へのケミカルの付着を促すものである。試験後に目視で詳細に検査を行い曇りがなければ合格となる。

上記の経緯から、アルミスペーサ、スチールスペーサおよびステンレススペーサ等の金属製スペーサ

の製品は特にこの評価は不要と考えられるが、樹脂を含むスペーサを使用した製品については本試験により確認を実施することとなる。

③ Part3：ガス濃度およびガスリーク率の算定

複層ガラスへのガス注入は一般的に置換により行われるため、注入時の対流などによりガスと空気が混合するなど、注入量と中空層の容積との関係は一定ではない。

そのため、アプローチ1では製品のガス濃度を正確に求める方法、加えてアプローチ2では耐久性試験の前後の測定により、ガスリーク率を測定する方法が規定されている。

附属書への表記にも実際に設置された製品の結果とは必ずしも一致しないとの表記はあるが、シールの安定性や性能保持の目安としては有用な評価だと考えられる。しかしながら、ガスクロマトグラフィ

一等高度な設備や測定技術が必要とされ、現状では国内に評価できる設備を所持している試験所がないため適用が困難である。

一方で本研究において、試作品のガラス部の熱貫流率および熱抵抗の測定結果がシミュレーションで求めた値にほぼ一致していることから、初期の充填濃度については現在の充填方法の妥当性が確認できている。リーク率については、耐久性試験前後の熱貫流率の比較等により評価を行う予定である。

④ Part4：エッジシールの物理的特性の試験方法

材料単体の評価となるためここでは述べない。

表 5-4-4 ケミカルフォグングテストの内容比較

試験規格	試験体	実施期間	試験方法	判定基準
JIS R3209	-	-	-	-
ISO 20492-1 アプローチ1 for North America	305×505mm 2層構造-2セット 4T+A12+4T 3層構造-4セット 4T+A6+4T+A6+4T	7日間 (168h)		曇りが 観測され ないこと
ISO20492-1 アプローチ2 a)British b)Continental Europe	302×502mm 2層構造-2セット 4T+A12+4T	168±4h		曇りが 観測され ないこと
ISO20492-1 アプローチ2 c)放射壁	302×502mm 2層構造-2セット 4T+A12+4T	168±4h		曇りが 観測され ないこと

[第5章参考文献]

- 5-1) JIS A2103 : 窓及びドアの熱性能-日射熱取得率の計算, (財) 日本規格協会,2014
- 5-2) JIS R3209 : 複層ガラス, (財) 日本規格協会,2009
- 5-3) JIS R3106: 板ガラス類の透過率・反射率・放射率・日射熱取得率の試験方法, (財) 日本規格協会,1998
- 5-4) ISO 20492-1: Glass in buildings -Insulating glass-Part 1: Durability of edge seals by climate tests, 2008
- 5-5) ISO 20492-2: Glass in buildings -Insulating glass-Part 2: Chemical fogging tests, 2008
- 5-6) ISO 20492-3: Glass in buildings-Insulating glass-Part3: Gas concentration and gas leakage, 2010
- 5-7) ISO 20492-4: Glass in buildings -Insulating glass -Part 4: Methods of test for the physical attributes of edge seals, 2010

6. 高性能窓の導入効果について

(1) 検討概要

窓の断熱性能が高く(熱貫流率が小さく)になると、住宅の外皮からの熱損失量を大きく減らすことができ、また、窓の室内表面温度が室温に近くなって冬季のコールドドラフト感を抑えるなど快適性に寄与する。

しかし、断熱性能の向上に伴い一般にガラスの日射取得率が小さくなるため、冬季の日射受熱の多い面においては、熱損失の低減量以上に日射熱の取得量が減って年間の暖冷房負荷が増加する場合もある。したがって、地域、方位別に、断熱性能と日射熱取得率のバランスが最適なガラスを選定することが必要である。

本章では、まず、窓の貫流熱損失と日射熱取得の収支を、地域別、方位別、ガラス種類別に計算し、窓の性能向上により窓単体が熱負荷の削減と増加のどちらに寄与するか(熱収支の正負)を示す。これは、地域、方位別に最適なガラスを選定するための資料として活用できる。次に、住宅の熱負荷計算ソフトを用いて、住宅1棟のモデルにおいて高性能窓を導入した時の暖冷房負荷を計算し、年間の暖冷房負荷の削減効果を示す。最後に、熱流体解析(CFD)により、高性能窓を導入した時のコールドドラフト抑制等の室内の快適性に関する効果を示す。

(2) 窓単体の熱収支に関する検討

1) 窓の熱収支の計算方法

① ガラス部の日射熱取得・損失熱量の計算⁶⁻¹⁾

窓からの全取得・損失熱量は次式で表すことができる。

$$Q_G = Q_{GT} + Q_{GA} + Q_{GO} \quad (6-2-1)式$$

日射の熱取得はそれぞれ、以下で示される。

$$\begin{aligned} Q_{GT} &= A_{GS} \cdot \{(1-F_{SDW}) \cdot \tau_{TD} \cdot I_D + \tau_{Td} \cdot I_d\} \quad (6-2-2)式 \\ &= A_{GS} \cdot \tau_{TN} \{(1-F_{SDW}) \cdot CI_D \cdot I_D + C_d \cdot I_d\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{GA} &= A_{GS} \{(1-F_{SDW}) \cdot B_D \cdot I_D + B_d \cdot I_d\} \quad (6-2-3)式 \\ &= A_{GS} \cdot B_N \{(1-F_{SDW}) \cdot CI_D \cdot I_D + C_d \cdot I_d\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} CI_D &= \tau_D / \tau_N \\ &= 3.4167 \cos \theta - 4.3890 \cos^2 \theta + 2.4948 \cos^3 \theta \end{aligned}$$

$$-0.5224 \cos^4 \theta \quad (6-2-4)式$$

$$Cd = \tau_d / \tau_N = 0.91 \quad (6-2-5)式$$

CI_D 、 Cd は透過率の特性を示すものであるが、透過率に比べ吸収率は小さいので、吸収率に関する用いる。

貫流熱量は、次式で示される。

$$Q_{GO} = A_{GO} U_w \left(T_a - \frac{\varepsilon F_s \cdot RN}{\alpha_0} - T_R \right) \quad (6-2-6)式$$

② 不透明部位(フレーム部)の日射熱取得

上記には、ガラス以外の日射の取得量が含まれていないので、外壁等と同様の日射熱取得量の計算式により、取得量を計算し、加算する。

$$Q_{FA} = A_{FA} \frac{a}{\alpha_0} U_f \cong 0.034 \cdot A_{FA} \cdot U_f \quad (6-2-7)式$$

③ 暖房期間・冷房期間の熱収支

以上の熱収支を毎時計算し、積算して暖房期間、冷房期間の熱収支を求める。ここで、窓の熱収支を単純に合計して期間の収支とすると、暖冷房負荷が小さくかつ日射熱取得が暖冷房負荷に寄与する割合が低い時期も等しく評価される。そこで、まず月毎に合計し、月毎の熱収支に、内外温度差による熱損失(貫流熱)の年間の割合をかけて積算する。ただし、冷房期の貫流熱が負の場合は、負荷にならないので積算しない。

$$Q_T = \frac{\sum_n (Q_G^n \cdot |Q_{GO}|)}{\sum_n |Q_{GO}|} \quad (6-2-8)式$$

2) 窓の熱収支計算と負荷計算ソフトとの方位別窓単体の評価比較

① 概要

上記により窓単体で評価した暖房、冷房期間の熱収支が正、つまり熱取得が多いほど、暖房負荷は削減となり、冷房負荷は増加となると判断するが、そ

の窓を採用した住宅の熱負荷計算による熱負荷の増減と相違が生じると、窓単体での評価はガラスの選定の指標として使用できない。そこで、前述で評価した窓単体の熱収支と、熱負荷計算ソフトで計算した暖冷房負荷を比較検証した。

② 計算条件

A) 熱負荷計算

熱負荷計算は、汎用熱負荷計算プログラム Sim/Heat を用いた。

表 6-2-1 に計算条件を示す。地域の気象データは拡張アメダス気象データ⁶⁻²⁾を用いた。

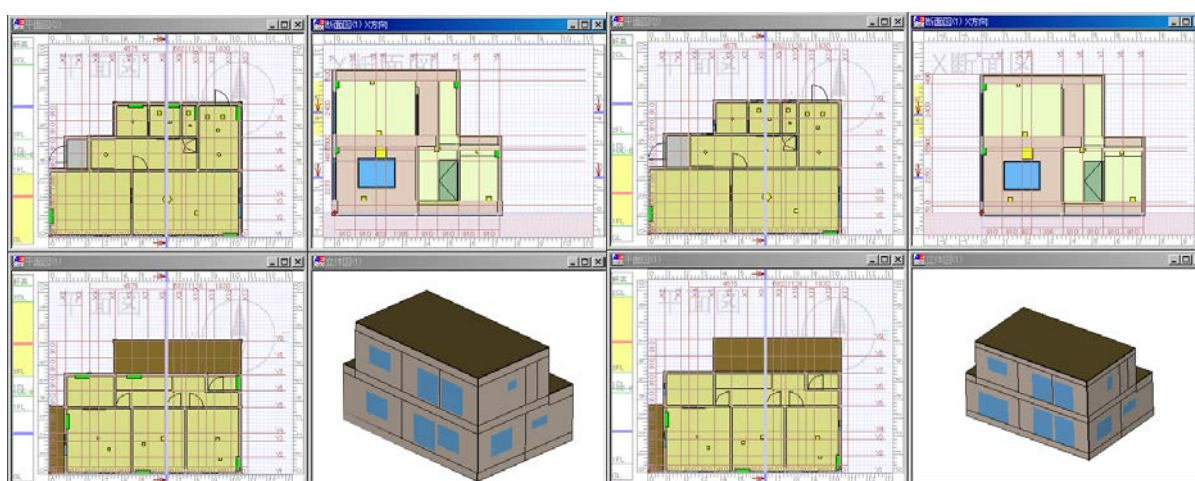
表 6-2-2 に、比較する窓の熱貫流率、日射遮蔽係

数を示す。日射遮蔽係数は、日射熱取得率を 0.88 (3mm 透明ガラスの取得率) で割った値である。窓の熱貫流率および日射取得を 0 とした状態を基本ケースとし、一方だけ窓に①～④の仕様を与え、暖冷房負荷の増減を計算した。南および南東は、南の窓に①～④の仕様を与え、建物の方位を回転させた。東～北東は、東の窓に①～④の仕様を与え、建物の方位を回転させた。

各条件で、暖冷房負荷の基本ケース（熱貫流率および日射取得を 0 とした状態）との差を、与えた窓の面積で割り、窓の単位面積あたりの負荷増減量とした。

表 6-2-1 熱負荷計算条件

住宅モデル		図 6-2-1 事業主基準 ⁶⁻³⁾ の住宅モデルの軒、庇等をなくしたもの	
地域 (地域区分)		札幌 (2)	東京 (6)
断熱仕様 [W/(m ² K)]	外壁	0.338	0.469
	床	0.308	0.452
	天井 (屋根)	0.167	0.235
	出入口	2.33	4.65
空調	全館連続運転	暖房：20℃、冷房 27℃/60%	
	部分間欠	—	暖房：20℃、冷房：27℃ (就寝時 28℃) 湿度 60%
スケジュール		事業主基準 ⁶⁻³⁾ のスケジュール	
排熱換気 (冷房期)		室温の下限 28℃、外気温上限 26℃、自然換気 10 回/h	
全般換気		全室 0.5 回/h	



札幌モデル

東京モデル

図 6-2-1 計算モデル

表 6-2-2 窓の熱貫流率と日射遮蔽係数

	基本ケース	①日射遮蔽型 (Kr)	②日射遮蔽型 (Ar)	③ベストバラ ンス型	④日射取得型
熱貫流率 [W/m ²]	0×10 ⁻⁴⁰	0.6	0.8	0.9	1.1
日射遮蔽係数	0.020	0.329	0.329	0.50	0.659
放射遮蔽係数	0.010	0.241	0.241	0.347	0.582
対流遮蔽係数	0.010	0.088	0.088	0.153	0.077

※Sim/Heat では 0 とするとエラーになるためわずかに与えている。

B) 窓の単体の熱収支計算

地域および気象データは、熱負荷計算と同じである。窓の仕様は、表 6-2-2 の①～④である。窓を 1m² とし、熱負荷計算との比較のため不透明部位はなしとして計算した。

暖房期間は、日平均外気温度が 14℃以下のときとし、室内設定温度 20℃として計算する。冷房期間は、通風を行えば室温は外気+3℃程度に室温上昇を抑えられるとして、日平均外気温度が 24℃以上のとき、室内設定温度 27℃として計算する。

③ 計算結果

A) 札幌全館連続空調

図 6-2-2 に、熱負荷計算による窓 1m²あたりの基本ケースに対する暖房負荷、冷房負荷、期間合計負荷の増減量を示す。正が負荷の削減量、負が負荷の増加量である。図 6-2-3 に、窓の単体の熱収支計算による暖房期間、冷房期間、期間合計の熱収支を示す。ただし、冷房期間は、熱取得が多いほど冷房負荷の増加となるので、図 6-2-2 の冷房負荷の増減量と比較できるように、冷房負荷が増加になるほど負（熱取得より損失が多いほど正）になるように軸を変えている。また、期間合計の熱収支は、暖房期間と冷房期間は負荷が違うので、単純に両期間の収支を合計することはできない。合計するのであれば、暖房負荷と冷房負荷の割合で重みづけなどをする必要がある。しかし、冷房負荷と暖房負荷の割合は、地域、住宅の仕様によって異なってしまい、一概には決定できない。地域及び住宅の性能別に重みづけの係数を示すことも今後必要であるが、ここでは、Sim/Heat の負荷計算結果もあるため、仮に基本ケース（熱貫流率および日射取得を 0 とした状態）の暖房負荷：冷房負荷の割合をそれぞれ暖房期間と冷房

期間の熱収支にかけて加算し、期間合計の熱収支として示した。札幌の場合は、暖房負荷：冷房負荷は 0.98：0.02 であった。

図 6-2-2 の暖房負荷と図 6-2-3 の暖房期間の北東～南を比較すると、負荷削減効果の順は熱負荷計算と窓単体の熱収支計算で同じ結果となった。いずれも、窓②は全方位において他の窓と比べると負荷削減効果が低く（熱取得が小さく）、東北東を境に南側では④、③、①の順で負荷削減効果が大きく（熱取得が多く）、北側ではその逆の順であった。

次に、図 6-2-2 の冷房負荷と図 6-2-3 の冷房期間の北東～南を比較すると、両者の負荷削減効果が高い順は①と②で逆のように見えるが、窓による差が極めて小さいので、どの窓であっても負荷に大きな差は生じない結果である。

図 6-2-2 の期間合計の負荷増減量と、図 6-2-3 の期間合計の熱収支は、札幌では冷房負荷は暖房負荷に比べると非常に小さいので、いずれも暖房負荷（暖房期間）だけで見たときと負荷削減効果の順は変わらない結果となった。

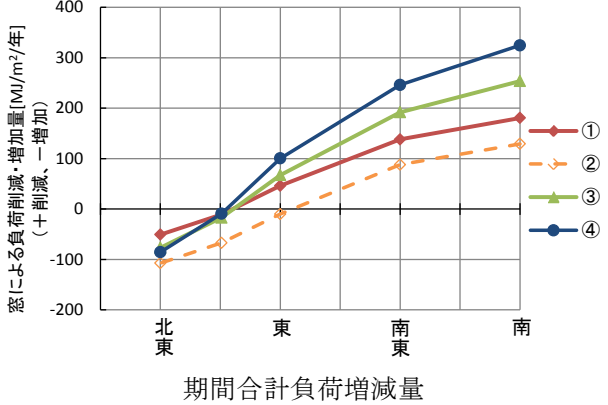
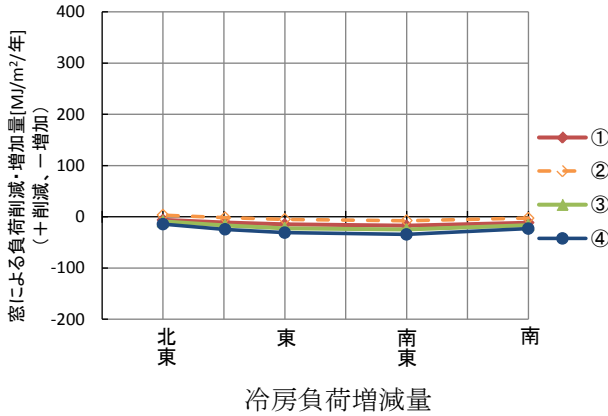
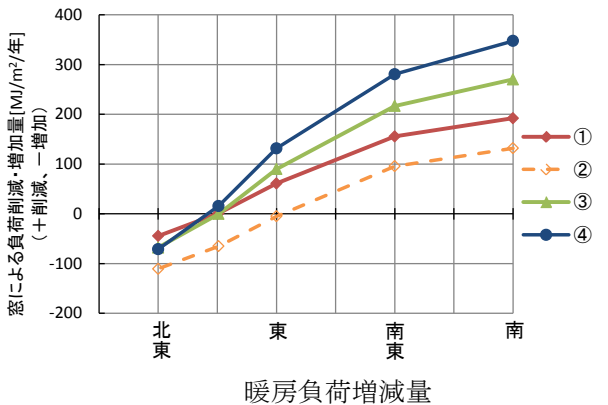


図 6-2-2 熱負荷計算による負荷増減量 (札幌)

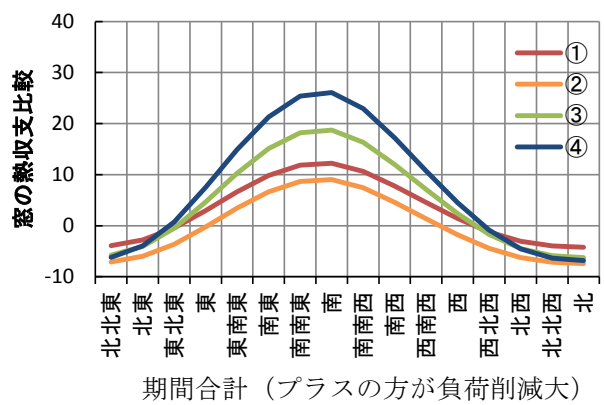
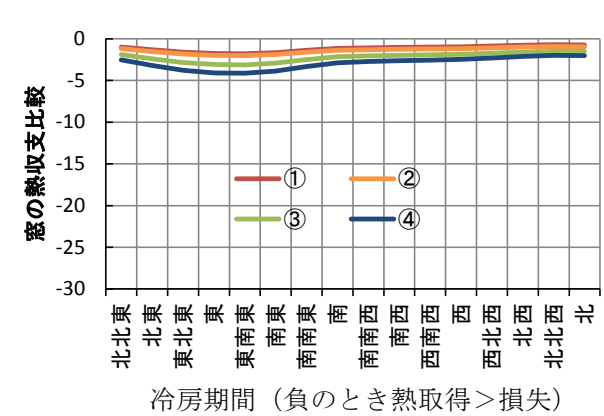
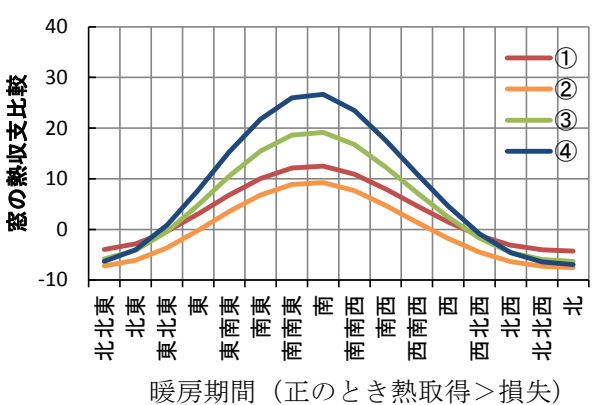


図 6-2-3 窓単体熱収支 (札幌)

B) 東京全館連続空調

図 6-2-4 に、熱負荷計算による窓 1m²あたりの基本ケースに対する負荷の増減量を示す。図 6-2-5 に、窓の熱収支計算による熱収支を示す。東京の全館空調の場合は、暖房負荷：冷房負荷は 0.66：0.34 であった。

図 6-2-4 と図 6-2-5 の暖房期間の北東～南の方位を比較すると、窓の負荷削減効果の順が入れ替わる方位が、熱負荷計算では東北東、窓の熱収支計算では北東で、両者に 22.5°程度方位にずれがあった。しか

しこの東北東と北東の方位あたりでは、負荷の増減や収支は 0 に近く、この中ではどの窓を選定しても負荷に及ぼす影響は小さいので、このずれは問題ない範囲と考える。次に、冷房期間を比較すると、いずれも②、①、③、④の順で冷房負荷の増加が小さい点は同じで、順位の逆転する方位もない。また、東南東が窓を設けることで冷房負荷が最も増加する方位である点も同じである。期間合計を比較すると、熱負荷計算による負荷増減量は、東南東から南では、④、③、①、②の順で負荷削減効果が高く、東南東から北では順序が逆転する。窓単体の熱収支計算で

は、順序の逆転する方位が東で、熱負荷計算の東北東とは22.5°のずれが生じた。しかし、この順序が逆転する方位あたりでは、負荷の増減や収支は0に近いので、どの窓を選んでも負荷に及ぼす影響は小さ

い。したがって、順序が逆転する方位に多少のずれがあっても、ガラスの選定の指標として問題はないと考えられる。

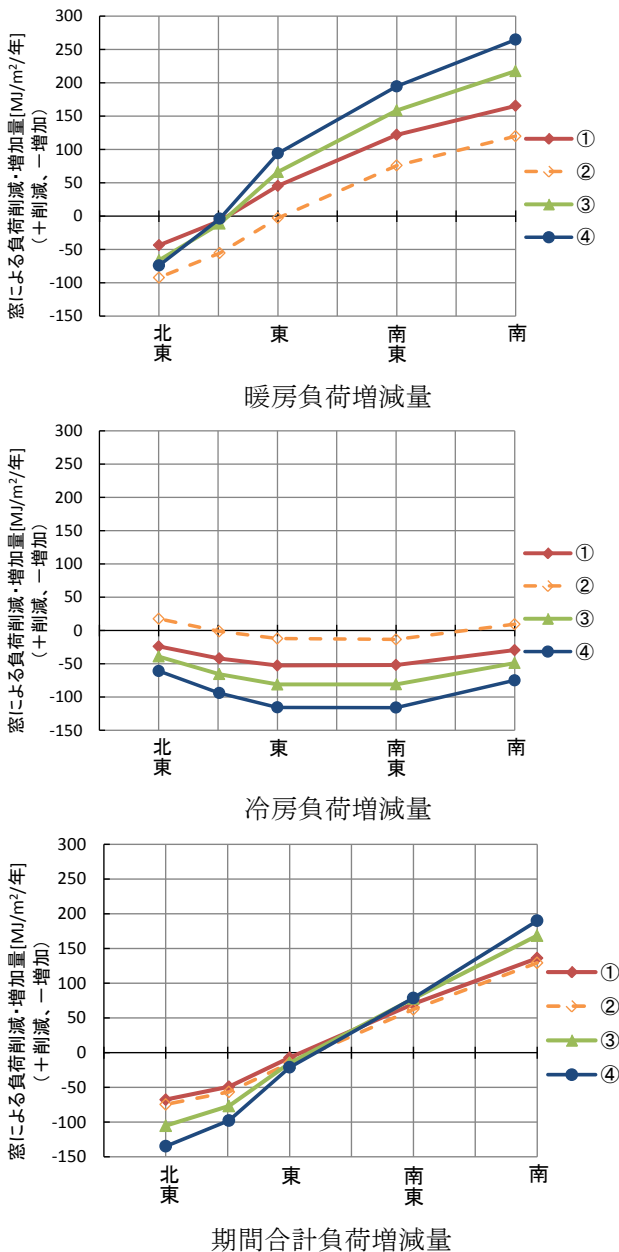


図 6-2-4 熱負荷計算による負荷増減量 (東京・連続)

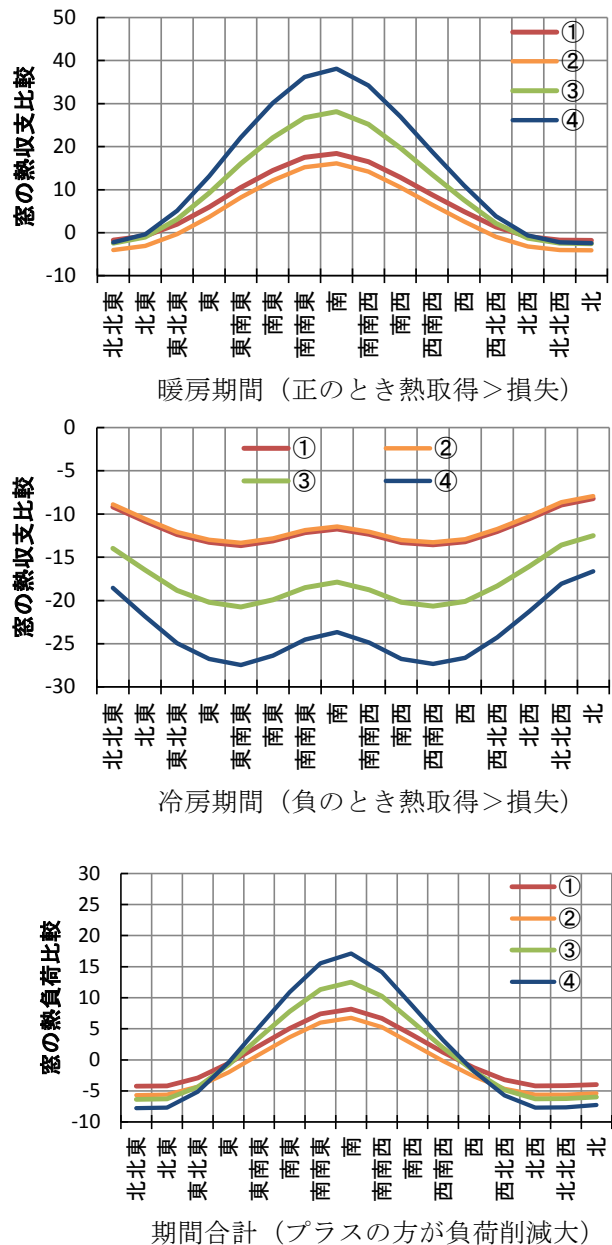


図 6-2-5 窓単体熱収支 (東京・連続)

C) 東京部分間欠空調

図 6-2-6 に、熱負荷計算による窓 1m²あたりの基本ケースに対する負荷の増減量を示す。図 6-2-7 に、窓の熱収支計算による期間合計の熱収支を示す。暖房期間、冷房期間は図 6-2-5 と同じである。部分間欠空調では、暖房負荷：冷房負荷は 0.58 : 0.42 で、

全館連続空調のときより冷房負荷の割合が増えた。前述の全館連続空調の場合と比べて、暖房負荷と冷房負荷それぞれでは、負荷削減効果の順序の逆転する点及び順序にはほぼ違いはない。期間の合計では、順序の逆転する方位が全館連続空調からは若干ずれた。負荷計算と窓単体の収支計算の順序の逆転

する方位にも差が生じたが、いずれも東北東から東南東の間である。前述同様、この順序が逆転する方位のあたりでは、窓の違いによる負荷削減効果の差は小さいので、窓単体の収支計算で窓を選定しても

問題はないと考える。

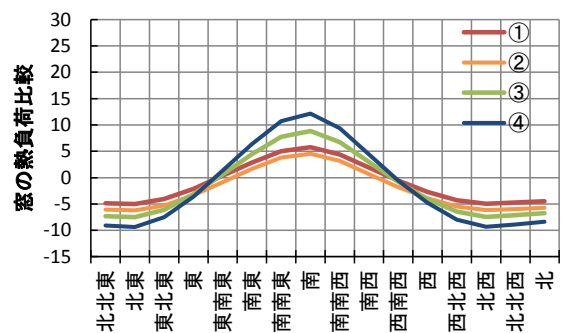
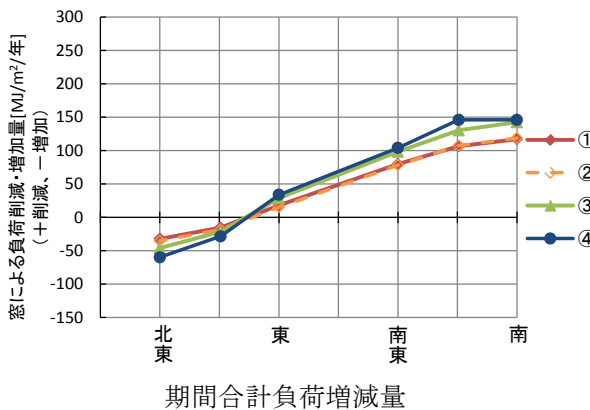
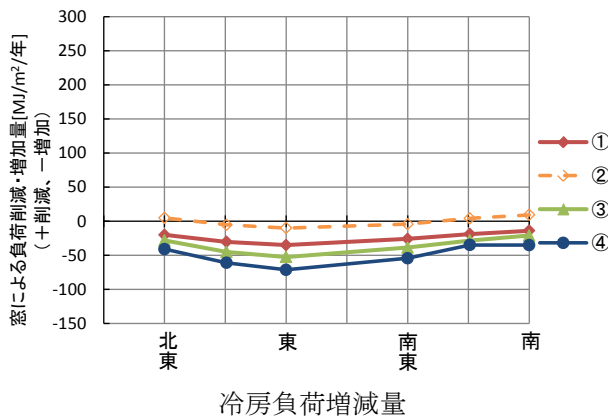
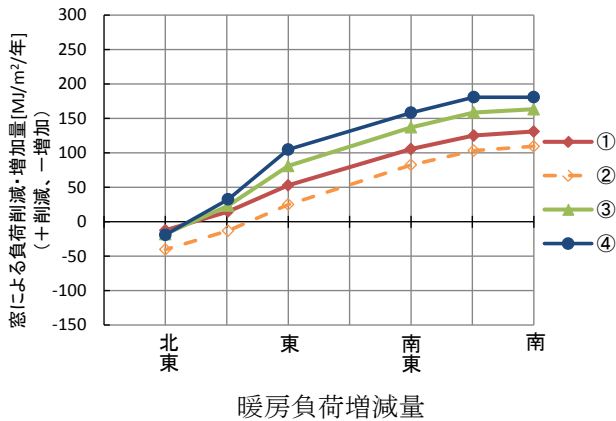


図 6-2-6 熱負荷計算による負荷増減量 (東京・間欠)

図 6-2-7 窓単体熱収支期間合計 (東京・間欠)

以上の結果、窓単体の熱収支計算と負荷計算を比較し、方位別の負荷削減効果の順の両者の差は問題ない程度であり、窓単体の熱収支計算を方位別に最も負荷削減に寄与する窓仕様を選定する指標としての可能性があることを確認できた。

3) 窓の熱収支計算

① 概要

本研究で検討した超高断熱窓で、フレーム部の仕様を固定し、ガラスの仕様を変えた場合の方位別の窓の熱収支計算を行い、方位別に最適なガラスを選定する指標を示す。

表 6-2-3 に、窓の特性と暖冷房負荷比率を示す。

①が熱貫流率 $0.65\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ の仕様であり、⑤になるにつれて、ガラスの日射熱取得率は高くなるが、窓

の熱貫流率も大きくなる。暖房負荷と冷房負荷の年間比率は、次節で計算した住宅1棟に標準的な窓を採用したときの暖冷房負荷の結果から求めた。東京以外の4つの地域は、全館連続空調と部分間欠空調で比率に大きな差がないので、全館連続空調のときの比率を用いて、年間の合計の収支を求めた。東京は、全館連続空調と部分間欠空調の比率に大きな差があるので、両方の比率を用いた。

表 6-2-3 設定した窓の特性と暖冷房負荷比率

			①日射遮蔽型1	②日射遮蔽型2	③バランス型	④日射取得型1	⑤日射取得型2
室内設定温度 [°C]	暖房		20	20	20	20	20
	冷房		27	27	27	27	27
日射熱取得率 (ガラス)			0.28	0.35	0.51	0.62	0.75
日射遮蔽係数 (ガラス)			0.32	0.40	0.58	0.71	0.85
面積[m ²]	ガラス		0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
	枠		0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
熱貫流率 [W/(m ² K)]	窓 U _w		0.65	0.83	0.88	1.24	1.43
	ガラス U _g		0.39	0.64	0.69	1.23	1.49
	枠*		1.11	1.17	1.22	1.26	1.32
		地域	旭川	札幌	盛岡	長野	東京
暖冷房比 (0-1)	全館連続空調	暖房	0.96	0.95	0.90	0.83	0.56
		冷房	0.04	0.05	0.10	0.17	0.44
	部分間欠空調	暖房	0.97	0.96	0.89	0.81	0.41
		冷房	0.03	0.04	0.11	0.19	0.59

※枠の熱貫流率 = (窓の熱貫流率 U_w - ガラス面積 × ガラスの熱貫流率 U_g) / 枠の面積 で求めたもの。

② 計算結果

図 6-2-8 に、各地域の暖房期間、冷房期間、期間合計の窓単体の熱収支計算結果を示す。縦軸の正になるほど負荷の削減効果が大きい。旭川、札幌、盛岡、長野に関しては、南は⑤、東と西は③、北は①が最適なガラス（負荷削減効果が高い）という結果となった。東京に関しては、全館連続空調も部分間欠空調も、北と東と西は①が最適という結果である。南は、全館空調では①と③と⑤がほぼ等しく良く、部分間欠空調では①と③が良い結果となったので、東京は、全方位①で統一するのが最適と判断する。

上記の窓単体の評価では庇等を考慮していないが、庇やブラインド等で夏季の日射を遮蔽する場合は暖房期間の評価で判断できる。したがって、いずれの地域も南は⑤、東と西は③、北は①が最適となる。

また、隣棟等の影響で日射が期待できない面は、北面同等として判断する必要がある。

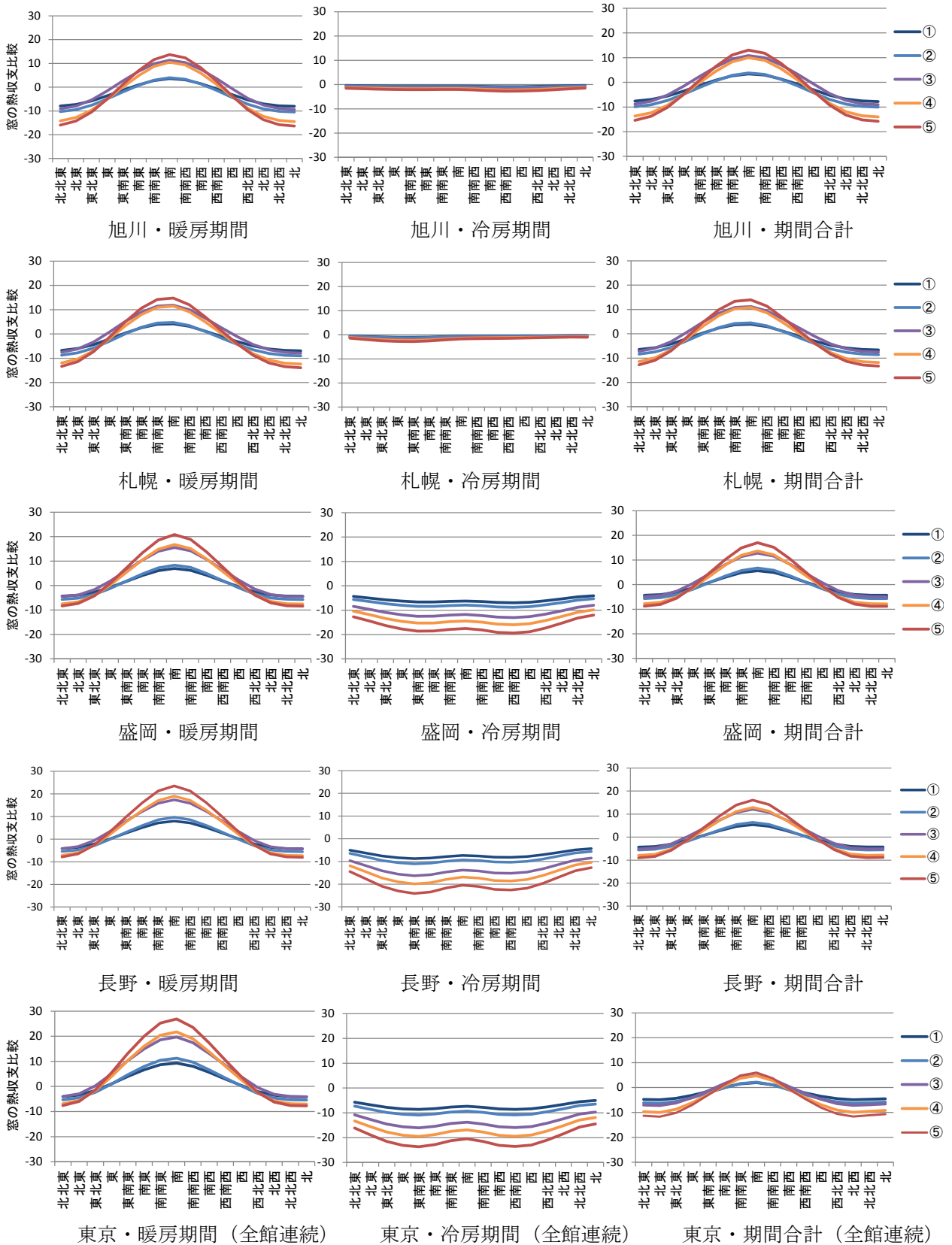
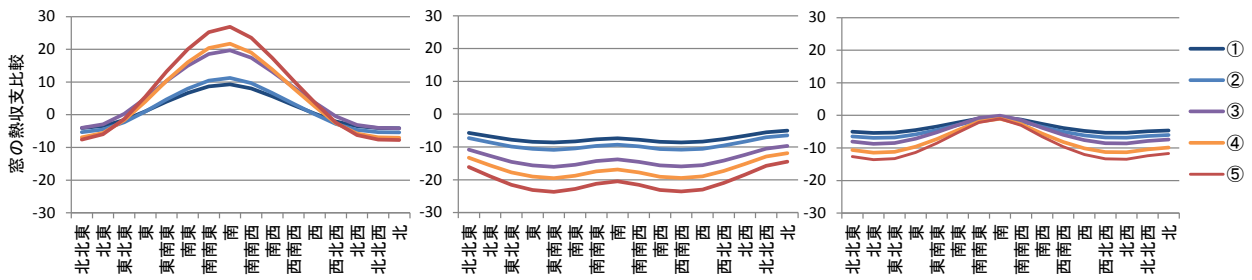


図 6-2-8 その 1 窓単体の熱収支計算



東京・暖房期間（部分間欠） 東京・冷房期間（部分間欠） 東京・期間合計（部分間欠）

図 6-2-8 その 2 窓単体の熱収支計算

(3) 窓の性能と住宅の暖冷房負荷・CO2 排出量

1) 計算条件

住宅 1 棟のモデルを用いて、負荷計算による高性能窓の暖冷房負荷と暖房による CO2 排出量の削減効果を示す。

表 6-3-1、表 6-3-2 に住宅モデルの計算条件を示す。表 6-3-3 に、窓の条件を示す。標準的な窓に対して、すべて表 6-2-3 の①熱貫流率 $0.65\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ の高断熱窓とした熱貫流率重視型、南を表 6-2-3 の⑤、北を同①、東と西を同③と方位別に東京を除き最適なガラスを選んだバランス重視型、の 3 条件である。東京は、熱貫流率重視型（すべて①）が最適という判断であるが、他地域のバランス重視型と同じ条件で

も計算する。表 6-3-4 に、住宅モデルの方位別の面積の合計を示す。年間の窓の熱収支が正（負荷が削減）となる方位の面では、外壁よりも窓の面積の割合を大きくした方がより負荷を削減できる。例として、図 6-2-8 から、①～⑤のすべての種類で札幌は南の熱収支が正、東京の部分間欠空調は、南では①の熱収支がわずかに正であるが⑤は負である。そこで、事業主基準モデル⁶⁻³⁾のサイズから、札幌の全館連続空調の条件のみ南の開口部の面積大きく、また、東京の部分間欠暖房の条件はすでに南の開口部の面積は大きいので小さくした場合の条件で比較の計算を行った。

表 6-3-1 計算条件

モデル	事業主基準モデル ⁶⁻³⁾ の平面で、庇や軒をなくしたもの（図 6-2-1 参照）
地域（地域区分）	旭川（1）、札幌（2）、盛岡（3）、長野（3）、東京（6）
断熱仕様（窓を除く）	表 6-3-2
空調	全館連続運転 暖房：20℃、冷房 27℃/60%
	部分間欠 暖房：20℃、冷房：27℃（就寝時 28℃）湿度 60%
	暖房は石油熱源温水パネルヒーターで熱源器定格効率 83%を想定し、熱源効率計算法は平成 25 年省エネ基準の計算法に基づく。冷房は COP 3.0 のエアコンを想定。
スケジュール	事業主基準 ⁶⁻³⁾ のスケジュール
排熱換気（冷房期）	室温の下限 28℃、外気温上限 26℃、自然換気 10 回/h
全般換気	全室 0.5 回/h

表 6-3-2 断熱仕様

地域	外皮熱貫流率 $[\text{w}/(\text{m}^2\text{K})]$					備考
	外壁	屋根	床	基礎壁	ドア	
旭川・札幌	0.336	0.167	—	0.263	2.33	基礎断熱
盛岡	0.485	0.236	0.308	0.263	2.33	床断熱、玄関土間
長野	0.485	0.236	0.452	0.495	3.49	
東京	0.485	0.236	0.452	0.495	4.65	

表 6-3-3 窓条件

仕様名		地域	方位	窓の熱貫流率 U_w [W/(m ² K)]	熱的性能	
					放射遮蔽係数	対流遮蔽係数
標準		旭川	全共通	1.60	0.330	0.050
		札幌・盛岡・長野		1.90	0.435	0.015
		東京		2.33	0.370	0.080
高性能	高断熱（熱貫流率重視）	全地域	全①	0.65	0.280	0.040
	方位別バランス重視	全地域	南⑤	1.43	0.780	0.060
			北①	0.65	0.280	0.040
			東・西③	0.88	0.520	0.060

表 6-3-4 方位別開口部の面積[m²]

方位	旭川・札幌・盛岡 モデル		長野・東京 モデル	
	基準	南開口大	基準	南開口小
南	15.03	19.77	19.67	14.93
西	1.66	同左	2.07	同左
北	2.22	同左	3.15	同左
東	3.09	同左	3.79	同左

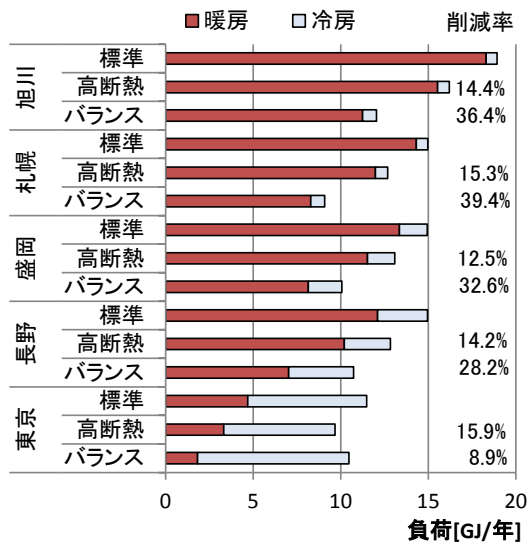
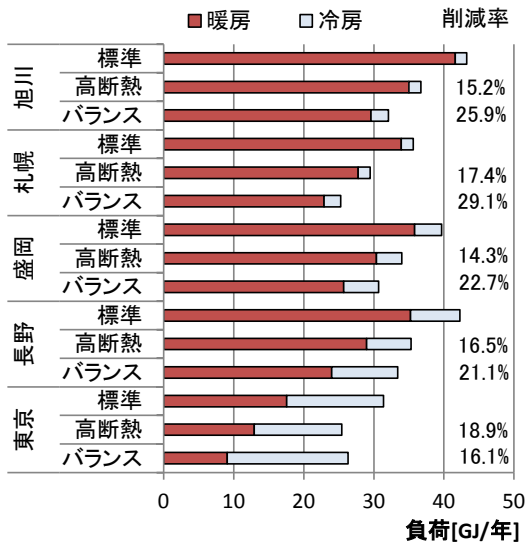
2) 計算結果

図 6-3-1 に、各地域の年間の暖房・冷房負荷を示す。標準と比べて、すべて高断熱にした場合（熱貫流率重視）は、全地域とも 15%前後年間の暖冷房負荷が削減できる。さらに、方位別に最適なガラスにした場合（バランス重視）では、東京を除き、標準と比べて全館連続空調で 21～29%削減、部分間欠空調で 28～39%削減となる。東京は、すべて高断熱にした場合に標準と比べて全館連続空調で 19%程度、部分間欠空調で 16%程度削減となる。東京は、方位別に他地域と同様にガラスを変えた場合（バランス重視）は負荷が増える結果となったが、これは、東京においては全方位高断熱（熱貫流率重視）が最適という予測の通りである。

図 6-3-2 に、各地域の年間の暖房と冷房による CO₂ 排出量を示す。暖房・冷房負荷と似た傾向が強

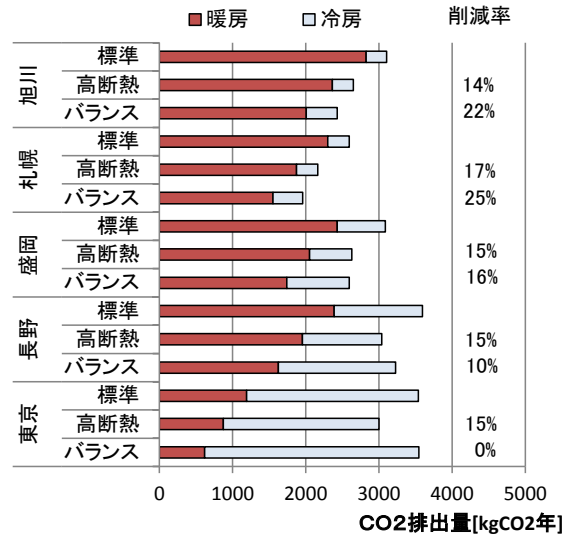
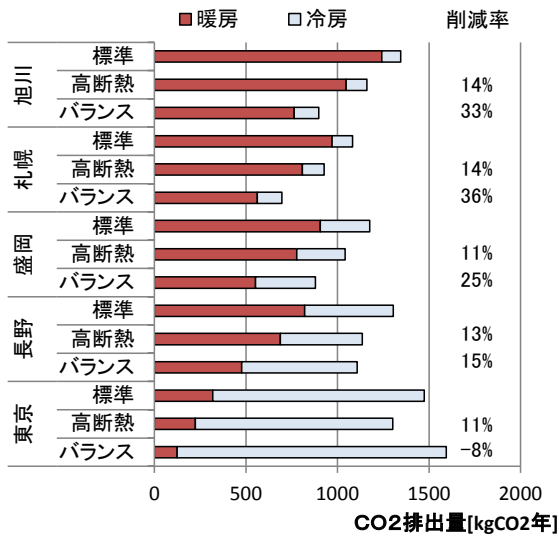
いが、比較的冷房の影響が大きくなる。

図 6-3-3 に、窓のサイズを変えた場合の結果を示す。札幌において、標準（熱貫流率 1.9 W/(m²K)、日射遮蔽係数 0.45）の窓仕様では南の開口を大きくすると負荷が増加したが、高断熱窓では、開口を大きくすると負荷が減少する結果となった。東京においては、窓を小さくしたときに、標準および高断熱窓で方位別にガラスを変えた場合（バランス重視）では負荷が減少したが、すべて高断熱にした場合（熱貫流率重視）では負荷は増加した。つまり、東京は南面が高断熱（熱貫流率 0.65 W/(m²K）窓であれば開口部が大きいほど負荷が削減できる。ただし、以上は、庇や隣棟等の日射遮蔽物がない場合の結果であるので、冬季に日射が見込めない面は高断熱（熱貫流率 0.65 W/(m²K）窓にするなどの判断が必要である。



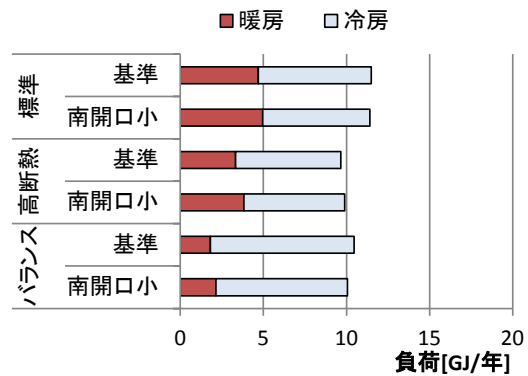
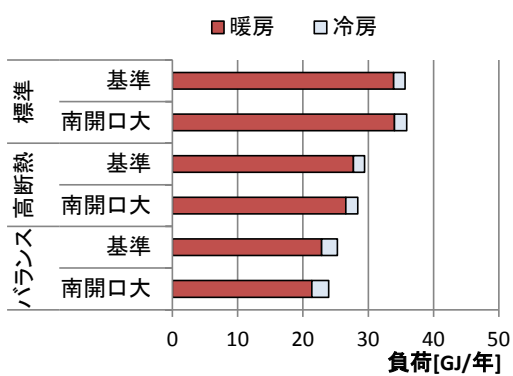
全館連続空調 部分間欠空調

図 6-3-1 年間の暖冷房負荷（窓選定の比較）



全館連続空調 部分間欠空調

図 6-3-2 年間の CO2 排出量（窓選定の比較）



札幌全館連続空調 東京部分間欠空調

図 6-3-3 年間の暖冷房負荷（南面開口面積による比較）

(4) 室内温熱環境評価

1) 評価概要

① 計算モデル

図 6-4-1 に、熱流体解析 (CFD) によって室内の温度、気流をシミュレーションする対象のモデルを示す。外壁の 2 面が外気、床が床下空間、その他壁および天井は室内に接する。部屋は空気対流式の暖房器により温風を吹出して暖房する。

解析コード (汎用 CFD プログラム) は STAR-CCM+、メッシュはポリヘドラル、乱流モデルは、標準 $k-\epsilon$ 乱流モデルである。

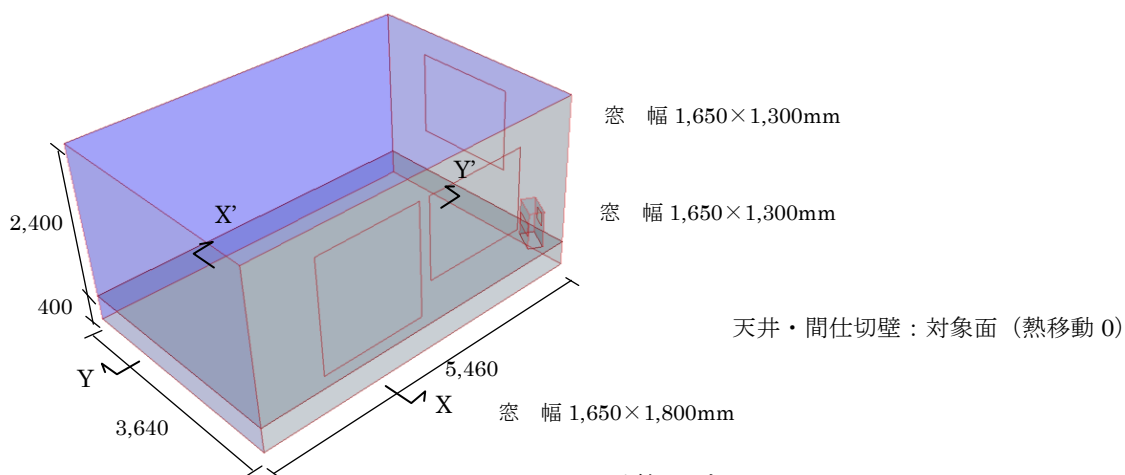


図 6-4-1 計算モデル

表 6-4-1 CFD 計算条件

熱貫流率[W/(m ² K)]		熱抵抗値[(m ² K)/W]	外気温度[°C]	放熱量[W]	
窓	外壁	床	-5°C	窓 A (0.6)	窓 B(1.9)
A)0.60	B)1.90	0.29		2.95	182

※熱貫流率から室内の表面熱伝達を除いて与えている

2) 評価結果

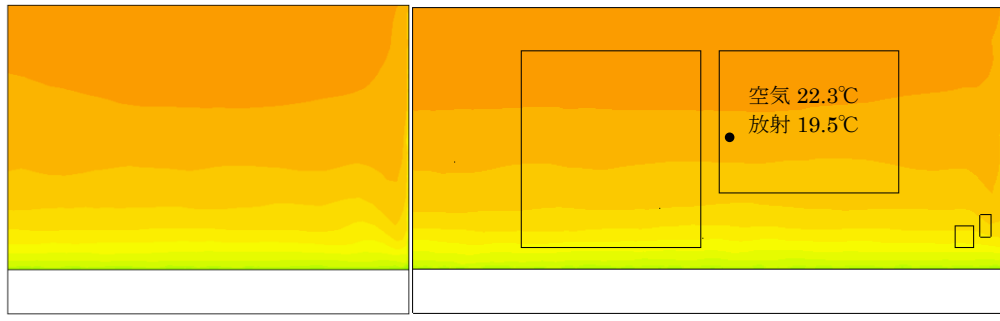
図 6-4-2 に、X 断面、Y 断面の温度分布を示す。部屋中央部の上下温度差等に大きな差はなかったが、窓近傍を見ると、熱貫流率 $0.6\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ では 20°C 程度で室温とは 2°C 差であるのに対し、熱貫流率 $1.9\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ では $16\sim 17^\circ\text{C}$ と室温とは $5\sim 6^\circ\text{C}$ の差がある。また、部屋中央の室温 22°C に対して、グローブ温度は、熱貫流率 $0.6\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ では 19.5°C 、熱貫流率 $1.9\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ では 19.1°C と、放射温度にわずかに差が生じた。これは窓の表面温度の違いによるものであり、窓が部屋の面に占める面積割合にもよるが、窓を高性能にすることで、放射環境が良くなる (より暖かく感じる) と言える。

温度、気流の分布の他、部屋中央 (床上 1.2m) に、放射率 1、直径 150mm のグローブ球を設定し、その中央の温度 (グローブ温度) も解析する。

② 計算条件

表 6-4-1 に、計算条件を示す。窓の熱貫流率は、A) $0.6\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ と、現在北海道内の新築住宅で多く使われている B) $1.9\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ の 2 条件で比較を行う。暖房器の吹出し温度は 26°C で固定し、部屋中央の温度が 22°C 程度になるように吹出しの流量 (流速) で放熱量を調整した。

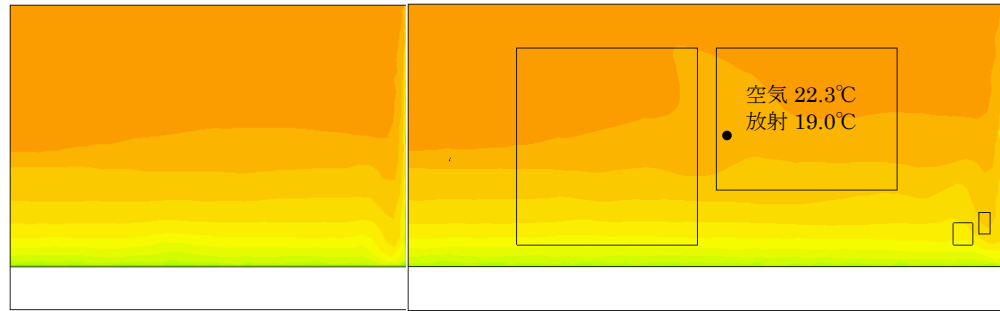
図 6-4-3 に、断面の気流を示す。窓近傍の下降流を見ると、窓の熱貫流率 $0.6\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ では 0.12m/s 程度、熱貫流率 $1.9\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ では 0.15m/s 程度で、窓の断熱性能が良いほど気流速が小さくなるのがわかる。なお、部屋中央の気流速が速い部分は、暖房器の吹出しの気流であり、窓の熱貫流率 $1.9\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ では熱貫流率 $0.6\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ と同じ室温とするためには暖房の放熱量が多く必要となるため、吹出しの風速が速くなって、室内の気流速が速くなっている。つまり、空気対流式の暖房器の温度制御方法 (例えば流量で室温を制御する方法など) によっては、窓およびその他の断熱性能を良くすることで、対流による乾燥感等も抑える効果があると考えられる。



X-X'断面

Y-Y'断面

A)窓熱貫流率 0.6W/(m²K)



X-X'断面

Y-Y'断面

B)窓熱貫流率 1.9W/(m²K)

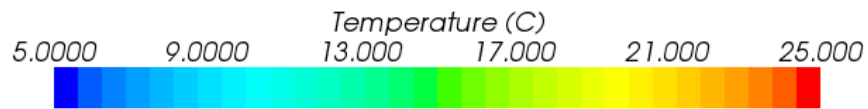
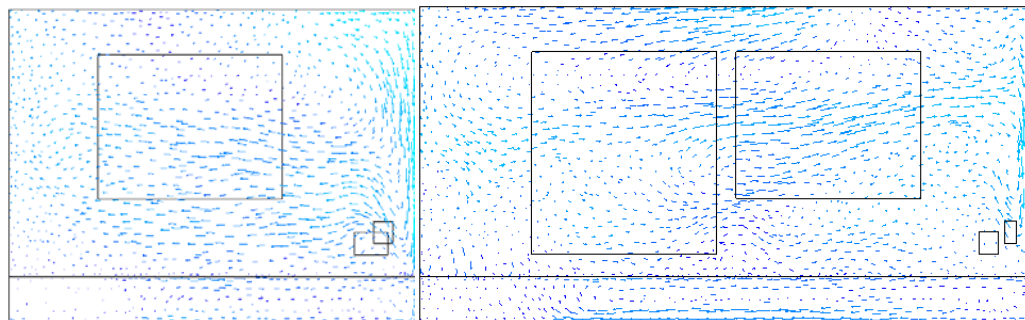


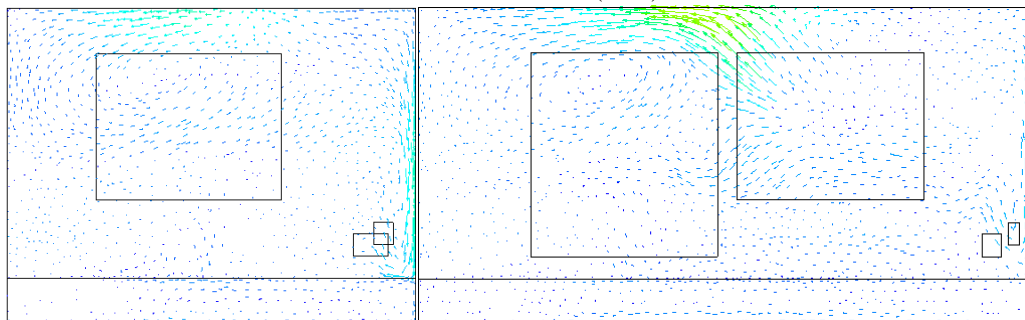
図 6-4-2 温度分布



X-X'断面

Y-Y'断面

窓熱貫流率 0.6W/(m²K)



X-X'断面

Y-Y'断面

窓熱貫流率 1.9W/(m²K)

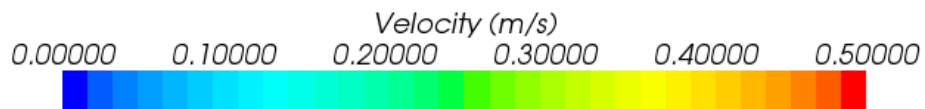


図 6-4-3 気流分布

(5) まとめ

以下に、本章のまとめを示す。

- ・住宅モデルを用いた試算で、標準窓（旭川 1.6W/(m²K)、札幌・盛岡・長野 1.9 W/(m²K)、東京 2.33 W/(m²K)）から、前章までで検討を行った高断熱窓への置換で 15%程度の暖冷房負荷を削減できる。また、窓近傍の温度が室温により近づき、放射温度環境が良くなる。
- ・本研究で示したフレーム部を用いてガラス性能を変更した場合の窓単体の熱収支を全国 5 地域で試算した。その結果、日射遮蔽物がない条件において、旭川、札幌、盛岡、長野では、南面には日射取得型のガラス（窓の熱貫流率 1.43W/(m²K)、ガラスの日射熱取得率 0.75）、北には日射遮蔽型・高断熱のガラス（窓の熱貫流率 0.65W/(m²K)、ガラスの日射熱取得率 0.28）、東および西にはバランス型のガラス（窓の熱貫流率 0.88W/(m²K)、ガラスの日射熱取得率 0.51）を選定すると暖冷房負荷の削減に最も効果があることがわかった。また、東京では、全方位で日射遮蔽型・高断熱のガラスが暖冷房負荷の削減に効果が高いことがわかった。
- ・住宅モデルを用いた試算で、標準窓から上記検討によるガラス性能の使い分けを行った結果、各地域で 20～30%の暖冷房負荷を削減できた。

[第 6 章参考文献]

- 6-1) 宇田川光弘:パソコンによる空気調和計算法、オーム社、1986
- 6-2) 日本建築学会編: 拡張アメダス気象データ 1981-2000、鹿児島 TLO、2005
- 6-3) 住宅省エネ性能検討委員会: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、<http://ees.ibec.or.jp/documents/index.php>、(一財) 建築環境・省エネルギー機構

[第 6 章記号]

a	: 日射吸収率 ≈ 0.8
A_{GO}	: 開口部面積[m ²]
A_{GS}	: ガラス面積[m ²]
A_{FA}	: 不透明部位の面積[m ²]
B_D	: 直達日射に対する吸収日射取得率
B_d	: 拡散日射に対する吸収日射取得率[-]
B_N	: 垂直入射時の B_D [-] (標準ガラス比) = 対流遮蔽係数
CI_D	: 標準入射角特性 (3mm 透明ガラス)
F_S	: 面の天空に対する形態係数 (垂直 0.5)
F_{SDW}	: 日影面積率[-] (日よけがなければ 0)
I_D	: 窓面に入射する直達日射[W/m ²]
I_d	: 窓面に入射する拡散日射[W/m ²]
Q_{GT}	: 透過日射熱取得[W]
Q_{GA}	: 吸収日射熱取得[W]
Q_{GO}	: 貫流熱量[W]
R_N	: 夜間放射量[W/m ²]
T_a	: 外気温度[°C]
T_R	: 室内温度[°C]
α_0	: 表面熱伝達率[W/m ² K] ≈ 23
ε	: 長波長放射に対する放射率 ≈ 0.9 [-]
U_w	: 開口部平均熱貫流率[W/m ² K]
U_f	: 不透明部位の平均熱貫流率[W/m ² K]
τ_{TD}	: 直達日射に対する透過率[-]
τ_{Td}	: 拡散日射に対する透過率[-]
τ_{TN}	: 垂直入射時の τ_{TD} [-] (標準ガラス比) = 放射遮蔽係数
τ_N	: 垂直入射時の透過率 (3mm 透明ガラス) ≈ 0.88
τ_D	: 入射角 θ のときの透過率 (同上)
τ_d	: 拡散日射に対する垂直入射時の透過率

7. まとめ

本研究では、世界最高水準の断熱性能を持つ窓製品の開発に向け、それを実現するための各種技術要件を明らかにするとともに、試験体の製作と性能検証によってその実現性を検討した。また、検討した窓の年間熱収支や代表的な住宅モデルに導入した際の試算から、暖冷房負荷削減や温熱環境確保の効果を示すとともに、気候特性や方位に応じた本サッシフレームとガラス性能の適切な組み合わせを明らかにした。

第2章で述べた海外の先進事例調査では、ヨーロッパA社の熱貫流率の公称値 $0.67\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ の製品を輸入し、性能検証及びフレーム部の分解や材料分析の結果、調査対象製品は公称値を満足しない可能性があるものの、フレーム内部への断熱材充填や断面の形状において、本研究の参考となる技術的知見を得ることができた。

第3章では、技術的検討を踏まえ数値解析による窓の各部位の断熱性能向上の可能性を検討した。ここでは、フレーム内部への断熱材充填、フレーム内部のメッキ処理、フレーム部の断面形状や材質変更、ペアガラス内部への低放射フィルム挿入による空気層の形成とガスの封入、フィルム挿入のためのエッジスペーサーの仕様が及ぼす断熱性能への影響を定量的に把握した。これを踏まえ、各部位の断熱性能向上の要素技術の組み合わせにより、熱貫流率 $0.60\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ を達成する仕様（pp.38, 表 3-7-1）を提案した。

しかし、上記で提案する熱貫流率 $0.60\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 仕様は、現状では製造上困難な技術（フレーム内部のメッキ処理及び定型断熱材の充填）もしくは製造コスト上の問題点（ペアガラス内部へのキセノンガス封入）があることから、製品化を見据えた現実的な仕様で試作品による断熱性能の検証を行った。その結果、世界最高水準の断熱性能の窓として、数値解析で熱貫流率 $0.65\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ の仕様で、 $0.63\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ の試験結果を得ることができた。

長期的な断熱性能の確保もしくは製造時の課題に係る事項を第5章に整理した。

長期的な断熱性能の確保に関しては、夏季の日射受熱による変形性に関する試験を行い、開閉に支障がないことを確認した。また、本研究において試験は実施しなかったものの、複層ガラスの耐久性に関する試験方法について国内外の規格を参照し、本研

究で検討した窓について今後検証が必要な事項を整理した。

製造時の課題に関しては、フレーム内部への断熱材として硬質ウレタンフォームの充填性に関して検討を行い、試作品制作の中で充填性が向上したことが確認できたほか、打診による充填状況の確認の可能性を示した。また、試作品では実現しなかったフレーム内部のメッキ処理について、実験室レベルでの加工及び製品化の際の製造法の検討を行い、今後の課題を整理した。

第6章では、前章までに検討した高断熱窓フレームを使用した上で、地域や方位に応じた暖冷房負荷削減のためのガラス性能の使い分けについて検討を行った。その結果、日射熱取得による暖房負荷削減も大きいことから、断熱性能だけでなく日射熱取得率に配慮し、地域や方位・日射条件に応じたガラスの使い分けが効果的なことを示した。

また、一般的な性能の窓から本研究で検討した窓に変更することによる負荷削減効果、窓近傍空気温度等の温熱環境の改善効果を示した。

なお本研究では、試作品で断熱性能の検証を行ったが、今後の製品化に際しては第三者機関での検証などを重ねる必要がある。一部その他性能に関して実験を行ったが、製品化のためには第5章で示した耐久性の検証や硬質ウレタンフォームの充填性確認の方法の確立が必要となる。

また本研究では、フレーム内部のメッキ処理、フレーム内部へのさらなる高性能断熱材（フェノールフォームクラス）の充填、低放射フィルムとウォームエッジスペーサ（ステンレスと樹脂の複合）の組み合わせ、キセノンガスの充填と低放射フィルム枚数の増加、については断熱性能向上の効果があるものの、現状では製造上困難もしくはコスト上問題があることから、試作の対象外とした。将来、今回の試作品で実現した熱貫流率 $0.63 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ を上回る断熱性能が求められるようになるとき、これら要素技術の再検討が必要となる。

第6章で実施した窓単体の熱収支と代表的な住宅モデルを対象とした暖冷房負荷の計算から、本研究で検討した窓による暖冷房負荷の削減効果と本研究で検討した窓フレームとガラス性能の気象条件や方位に応じた適切な組み合わせを、限定的な条件の中で提示した。しかし、窓の熱貫流率が壁体に近づき、従来住宅熱損失の多くを占めた窓が日射熱取得を含めると壁体よりも熱損失・取得の面から有利になる可能性が増えることは、寒冷地の住宅設計の考え方に大きな転換をもたらす可能性を大いに有する。本研究で提案した超高断熱窓を前提とした寒冷地の住宅設計の在り方の提案も今後の大きな課題と言える。