

---

窓一躯体間の熱移動に関する研究

---

2013年3月

宮澤千顕

---



## 目次

第1章 序論 .....	1
1.1 本研究の背景 .....	3
1.2 窓と躯体との間の熱移動の現状 .....	5
1.3 既往の研究 .....	9
1.3.1 開口部の熱貫流率計算法及び測定法 .....	9
1.3.2 壁（躯体）の熱貫流率計算法及び測定法 .....	14
1.4 本論文の目的 .....	16
1.5 本論文の構成 .....	17
参考文献 .....	19
第2章 窓と躯体との間の熱移動の計算による評価 .....	21
2.1 はじめに .....	23
2.2 窓と躯体の間の熱流の計算法 .....	24
2.3 使用する計算ソフト（TB2D/BEM）の概要と精度 .....	25
2.3.1 TB2D/BEM の概要 .....	25
2.3.2 TB2D/BEM の精度検証 .....	27
2.4 窓と躯体との間の線熱貫流率 $\Psi_b$ 算出結果 .....	42
2.4.1 $\Psi_b$ 算出対象 .....	42
2.4.2 $\Psi_b$ 算出時の環境条件 .....	44
2.4.3 $\Psi_b$ 算出時の材料物性値（熱伝導率） .....	44
2.4.4 $\Psi_b$ 算出時の解析モデル .....	45
2.4.5 $\Psi_b$ 算出結果 .....	46
2.5 ガラススペーサ部の線熱貫流率 $\Psi_g$ との比較 .....	66
2.6 躯体の熱性能が $\Psi_b$ に及ぼす影響 .....	69
2.7 まとめ .....	71
参考文献 .....	73
第3章 窓と躯体との間の熱移動の実験による評価 .....	75
3.1 はじめに .....	77
3.2 測定装置の概要 .....	78
3.3 測定対象 .....	90
3.4 測定条件 .....	99

---

3.5	測定結果	99
3.6	測定結果と解析結果の比較	114
3.6.1	解析の環境条件	114
3.6.2	解析に使用する材料の物性値（熱伝導率）	114
3.6.3	解析モデル	115
3.6.4	測定結果	116
3.6.5	測定結果と解析結果の比較	118
3.7	測定と計算で整合性が確認出来なかった要因	119
3.8	まとめ	120
	参考文献	121
<b>第4章</b>	<b>熱伝達率分布の測定</b>	<b>123</b>
4.1	はじめに	125
4.2	測定装置の概要	126
4.3	測定対象	126
4.4	測定条件	130
4.5	測定結果	130
4.5.1	熱貫流率	130
4.5.2	表面温度の分布及び熱貫流率	130
4.5.3	熱伝達率の分布	134
4.6	まとめ	138
	参考文献	139
<b>第5章</b>	<b>熱伝達率分布の計算</b>	<b>141</b>
5.1	はじめに	143
5.2	計算方法	144
5.2.1	解析モデル	144
5.2.2	熱伝達率の算出方法	148
5.3	計算結果	149
5.3.1	壁からの無次元距離 $Y^+$ の確認	149
5.3.2	熱貫流率の算出	151
5.3.3	表面温度の分布	152
5.3.4	熱伝達率の分布	154

---

---

5.4 計算結果と測定結果の比較.....	158
5.4.1 熱貫流率の比較.....	158
5.4.2 表面温度の比較.....	158
5.4.3 熱伝達率の比較.....	160
5.5 フレーム部近傍の熱伝達率の確認.....	162
5.6 まとめ.....	165
参考文献.....	167
<b>第6章 窓と躯体との間の熱移動が建物の熱性能に及ぼす影響.....</b>	<b>169</b>
6.1 はじめに.....	171
6.2 窓の熱貫流率U値への影響.....	172
6.3 住宅の熱損失係数Q値への影響.....	175
6.4 まとめ.....	194
参考文献.....	195
<b>第7章 総括.....</b>	<b>197</b>
7.1 本論文の要約.....	199
7.2 今後の課題と展望.....	204
Summary.....	209
既発表論文一覧.....	213
謝辞.....	219

---



第 1 章 序論

---



## 1.1 本研究の背景

建物の外皮は、大きく分けて屋根部、壁部、開口部で構成されている。開口部を代表する窓（まど）は、柱と柱の間の戸（間戸）という語源で、一般的に壁や屋根に施された開口を意味する。屋根部や壁部は、外界の風雨や日射等を室内へ侵入することを防ぐ役割が主であるが、窓は自由に開閉ができるため、通気や採光、人の出入といった内と外の繋がりを調節する役割が主である。

窓は、ガラス等の透明な面材やその他不透明な面材と、それらを躯体に固定し自由に開閉できるフレーム（枠及び障子）で構成されている。

透過性のある面材を用いることで、窓を閉めた状態でも室内にいる居住者は窓を通して外界の状態が分かるようになった。景色を眺めることで季節を感じ、好ましい外界状態であれば外界状態を窓を通して室内へ採り入れ、好ましくなければ閉ざして外界の繋がりを断つことができる。そのため、面材は経年劣化の少ないガラスが広く普及している。

今からおよそ半世紀前までは、日本の窓フレームを構成する素材は木や鉄だった<sup>1)</sup>。しかし、外界に素材を露出するため、どちらの素材も腐食による経年劣化等の問題があった。現在は、耐食性に優れ、重量も軽い、また加工がし易く、形状が自在かつ精密に製造できるといったメリットから、アルミ製のフレームが普及している。これらのメリットを生かし、現在は用途に応じて様々な開閉形式のフレームが開発され、住宅用窓のおよそ 94%がアルミ化（アルミ、アルミ熱遮断、アルミ樹脂複合等の合計）となっている<sup>2)</sup>。

窓には、屋根や壁同様に外界状態を室内へ侵入することを防ぐ役割もあるため、閉めているときは気密性能、水密性能、耐風圧性能と呼ばれる窓の基本 3 性能の他、断熱性能、遮熱性能、採光性能、遮音性能、防火性能、防犯性能等、多くの性能が求められている<sup>3)</sup>。また、これらの性能は、安全性や快適性等あらゆることに対して、常により良い生活環境を要求される中で、日々性能を向上させるため進化し続けている。

日常生活する建物内において、季節や時間に関わらず快適な環境で暮らすことを求め、自然から与えられるエネルギーが不足、若しくは過剰となると、我々は人間によって作られたエネルギーを使って快適な室内環境を維持している。その結果、温室効果ガスが先進国を中心に世界中で発生させる結果となり、地球温暖化現象につながった。特に問題となっているのは CO<sub>2</sub> の排出量である。近年、漸く CO<sub>2</sub> の排出量を削減する必要性が世界レベルで認識され、自然エネルギーの活用に国家単位で取り組むところも増えてきたが、まだ先進国の一部であり、排出量削減への取り組みとしては不十分である。

建築物におけるエネルギー消費は、暖冷房・調湿といった熱負荷が最も多くの割合を占めている<sup>4)</sup>。開口部は、建築外皮を構成する屋根、壁と比較すると熱性能が劣るため、熱負荷によるエネルギー消費量は、開口部の仕様に強く影響される。建物の省エネルギー性や室内空間の快適性を評価する上で、開口部の熱性能を正確に評価することは極めて重要な因子となる。

このような背景の中、技術の発展により窓を構成するガラスやサッシフレームの開発は進み、窓の断熱性能はこの半世紀程で格段に、そして急速に向上した。窓の断熱性能は熱貫流率により評価される。熱貫流率は、室内外の気温差により窓を通過する単位時間、単位面積、単位気温あたりの熱流量で定義され、この値が小さいほど断熱性能が高い評価となる。その他の屋根や壁についても同様の評価となる。これらの評価法が確立されたことで、これらを基に様々なガイドラインが設けられた。国を挙げての取り組みもあり、断熱性能の向上した窓が一般に普及するスピードも著しかった。外皮を構成するその他の屋根や壁についても、同様である。

窓や外皮を構成するその他の屋根や壁の断熱性能が向上する一方で、これまで見えていなかった箇所に熱流が生じることが分かってきた。その箇所が窓と躯体との間（窓－躯体間）である。熱流は通過し易いところに集中する。つまり、窓や壁（躯体）の断熱性能が上がったことで、窓や壁（躯体）から抜け難くなった熱流は、流れ易い箇所に集中する。その流れ易い箇所の一つが窓と躯体との間（窓－躯体間）となる。しかし、現在の日本ではこの部分の評価方法はもちろん、検討すらされていない。建築物の高断熱化が進み、建築物を構成する窓や壁（躯体）の断熱性能が向上する現在、窓と躯体との間の熱移動について検討し把握することは、今後の建物の省エネルギー性や室内空間の快適性を評価する上で、重要な要素の一つとなる。

## 1.2 窓と躯体との間の熱移動の現状

現在、窓の断熱性能の評価は測定法と計算法がある。窓の熱性能の測定（試験法）では、試験体周囲の躯体を経由する熱移動は窓本体の熱性能に含めないことが ISO<sup>5)6)</sup>や JIS<sup>7)8)</sup>に規定されている。具体的には、測定の際にこの部分の熱流に相当する線熱貫流率、または校正板の測定より求めた線熱貫流率を、全体の熱流から差し引いて評価している。窓の熱性能の計算法による評価においても、窓枠と躯体の間は図 1.2-1 のように断熱境界とし、躯体を経由する熱移動は含めない計算をすることが ISO<sup>9)10)</sup>や JIS<sup>11)12)</sup>で規定されている。実際、これらの窓の熱性能の測定法や計算法は、窓製品の横並び評価を目的としたものであり、躯体の影響は除外すべき要素である。躯体の熱性能の評価法についても同様で、測定法<sup>13)14)</sup>ではこの部分の損失熱量は校正することとなっている。計算法<sup>15)16)</sup>では、二次元の計算方法を用いることになっている。不均質な層の計算も可能だが、セクション毎に分けたものを面積加重平均する方法であり、窓との取り合い部分を考慮した計算ではない。

しかし、実際には窓と躯体の間（窓と躯体の接触部分）では熱移動が生じることが知られている。また、前述したが、窓や壁（躯体）の断熱性能が向上することで、この部分の熱流が増加する可能性がある。ISO14683<sup>17)</sup>では、窓周りの壁の見込み部分からの熱損失を構造熱橋と位置付けて、躯体の構成と窓フレームの設置位置で整理した 18 種類の組合せに対して線熱貫流率 ( $\Psi$ ) を示している（図 1.2-2～図 1.2-4 参照）。この線熱貫流率には窓と躯体の間の熱移動も含まれるが、評価の対象としては窓周りの壁体に生じる 2 次元熱流が主である。一方で、日本では窓と躯体の取り合い部分の熱流は評価しておらず、熱損失係数や熱負荷計算ツールで、この部分の熱損失が無視されているのが現状である。

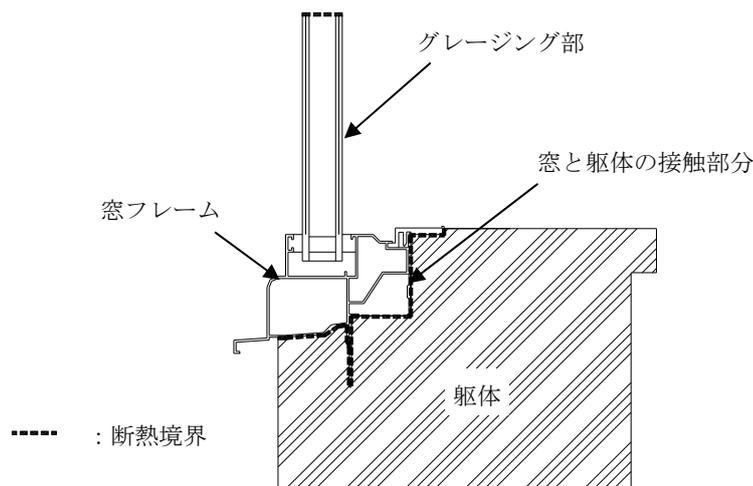


図 1.2-1 窓の熱貫流率算出におけるフレームの計算モデル

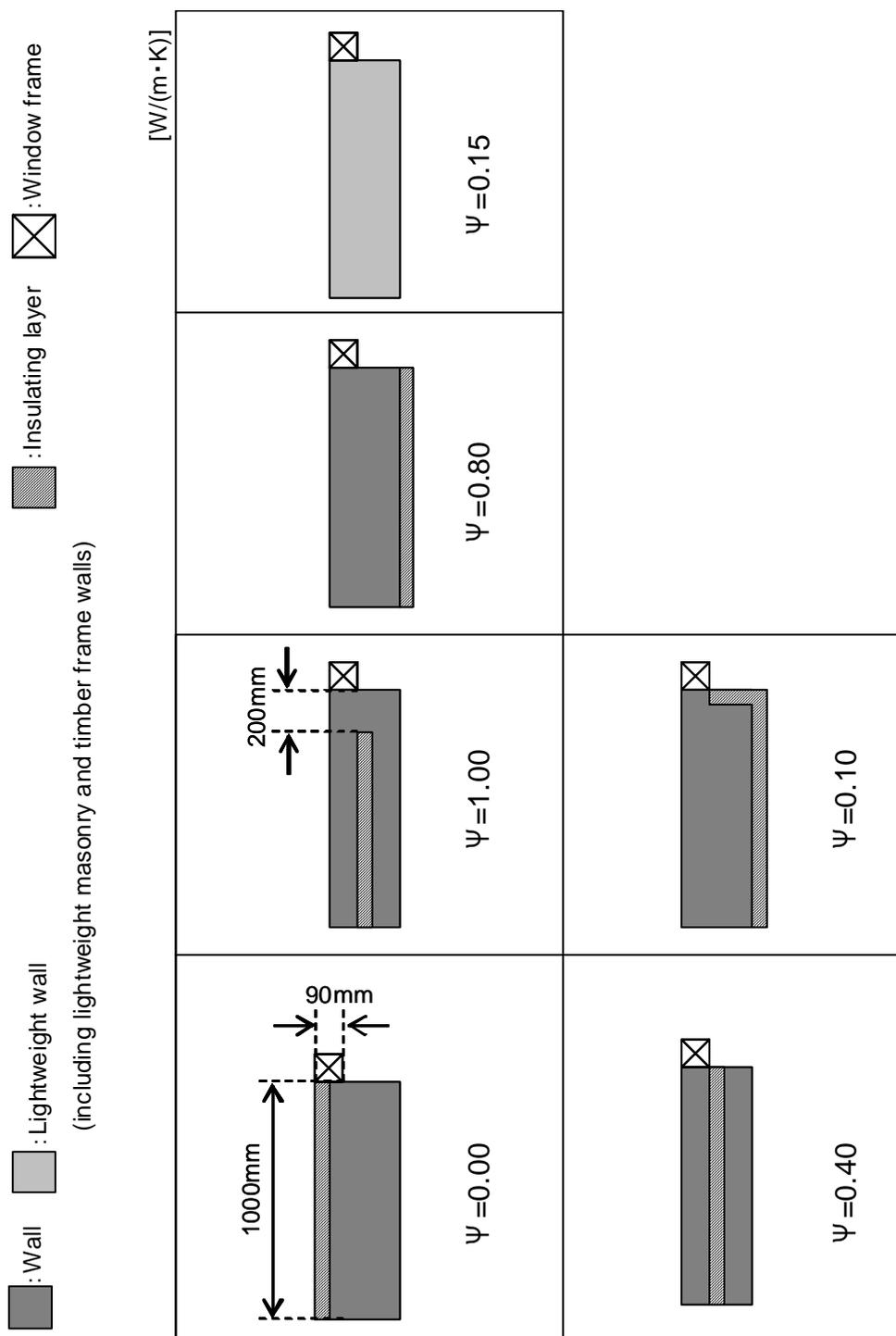


図 1.2-2 ISO14683 記載の窓周り部分の構造熱橋 (線熱貫流率)  
 フレームが室外側寄りに納まる場合

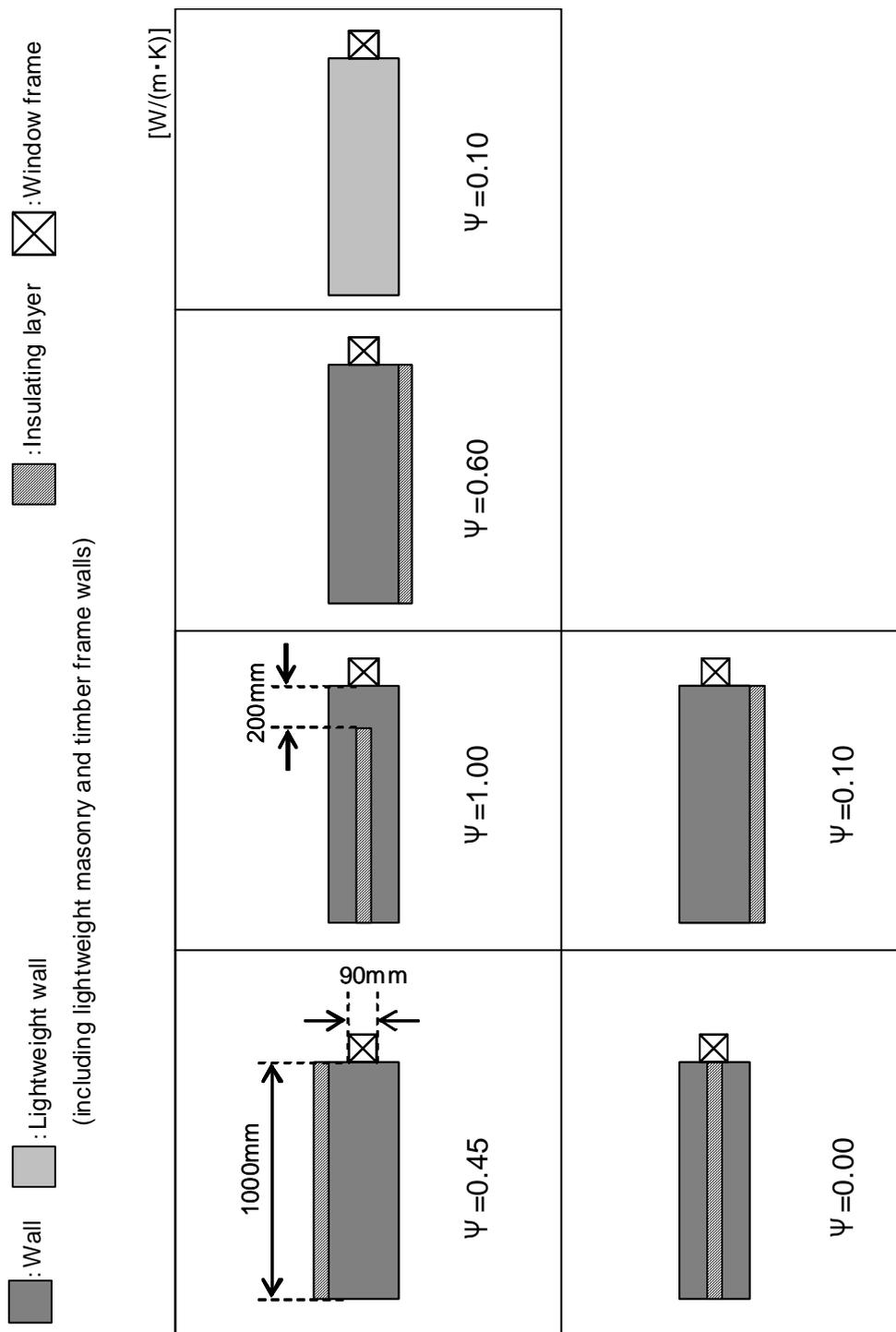


図 1.2-3 ISO14683 記載の窓周り部分の構造熱橋（線熱貫流率）  
フレームが外壁の中間付近に納まる場合

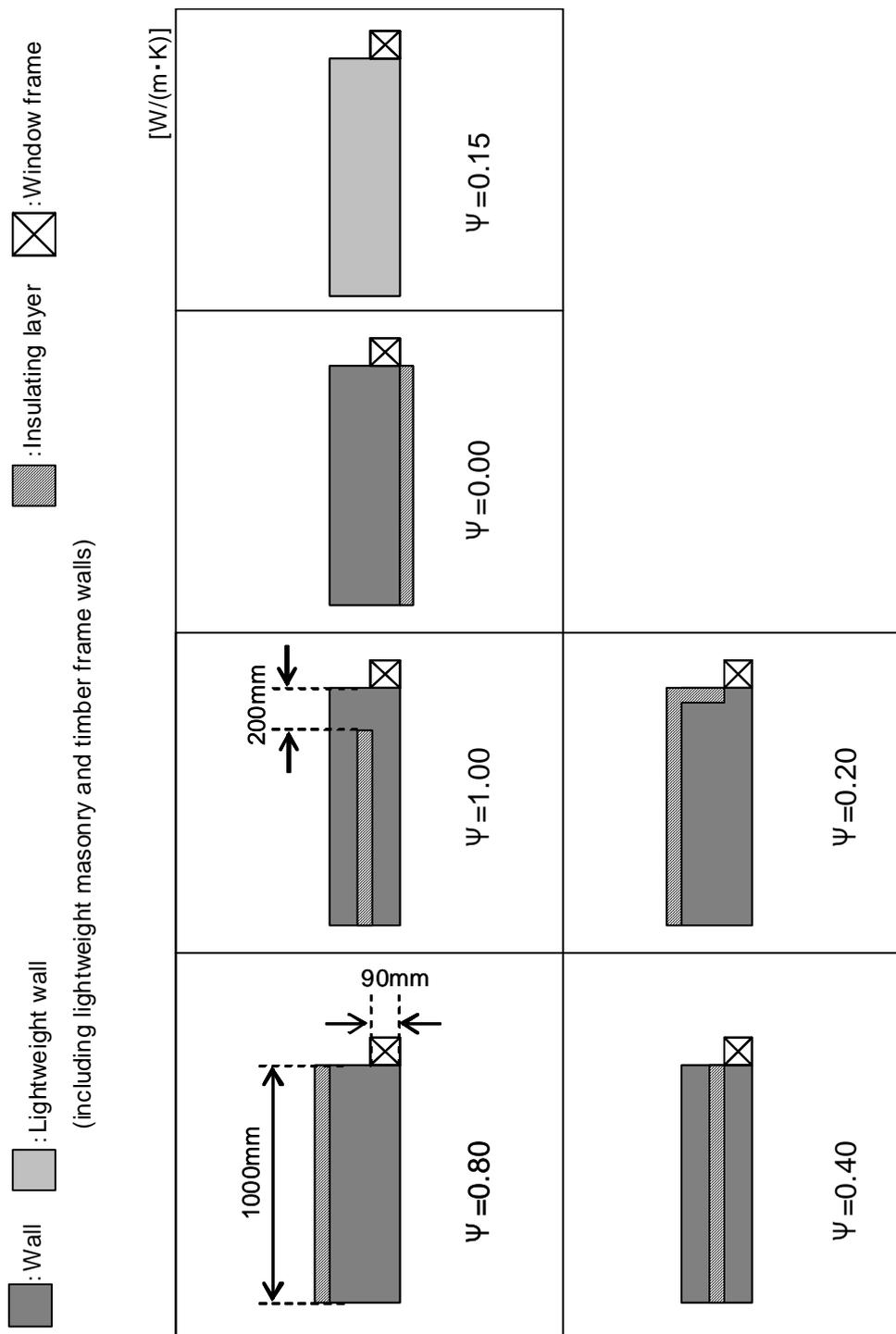


図 1.2-4 ISO14683 記載の窓周り部分の構造熱橋（線熱貫流率）  
フレームが室内側寄りに納まる場合

### 1.3 既往の研究

開口部の断熱性能及び躯体の断熱性能は、熱貫流率で評価している。各々の測定法と計算法に関する既往の研究（規格）を抜粋し概観する。各々の測定法と計算法に関する規格を表 1.3 に示す。

表 1.3 各種測定法と計算法に関する規格

対象	測定法規格		計算法規格	
	ISO	JIS	ISO	JIS
窓全体	ISO12567-1	JISA4710	ISO10077-1	JISA2102-1
	ISO12567-2 (天窓・出窓)	JISA1492 (天窓・出窓)	ISO15099 <sup>18)</sup>	
壁(躯体)	ISO 8990	JIS A 1420	ISO 6946	JIS A 2101
カーテンウォール	—	—	ISO12631 <sup>19)</sup>	—
ガラス	ISO10291 <sup>20)</sup>	JISR3106 <sup>22)</sup>	ISO10292 <sup>23)</sup>	JISR3107 <sup>24)</sup>
	ISO10293 <sup>21)</sup>	(放射率測定)	ISO15099	
フレーム	—	—	ISO10077-2	JISA2102-2
			ISO15099	

#### 1.3.1 開口部の熱貫流率計算法及び測定法

##### (1) 開口部の熱貫流率測定法

開口部の熱貫流率の測定法は、国内外において様々な測定法が提案され実施されている。表 1.3 に示すように国際的には ISO12567-1、ISO12567-2 が規格化されている。我が国でも JISA4710、JIS1492 が規格化されており、JISA4710 については ISO12567-1 に整合するように 2004 年に改訂された。これまで国内で行われてきた測定法との大きな相違は、熱貫流率算出に放射の影響を考慮した環境温度差を用いる点である。

これらの測定法は、試験体周囲の躯体を経由する熱移動は窓本体の熱性能に含めないことが規定されており、測定の際にこの部分の熱流に相当する熱流を、全体の熱流から差し引いて評価している。

**(2) 開口部の熱貫流率計算法**

開口部の熱貫流率の計算法は表 1.3 より、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 3107、ISO10292、ISO15099 が規格化されている。フレーム及び窓全体の計算法は、ISO10077-1、ISO10077-2、ISO15099 が規格化されており、国内では 2011 年 3 月に ISO10077-1、ISO10077-2 を引用した JIS A2102-1、JIS A2102-2 が規格化された。また、カーテンウォールについては欧州規格 EN13947 を基に、国際規格として昨年 ISO12631 が規格化された。

窓全体の熱貫流率( $U_w$ )は (1.3.1-1) 式で整理できる。

$$U_w = \frac{\sum A_g U_g + \sum A_f U_f + \sum l_g \Psi_g}{A_w} \quad \dots (1.3.1-1)$$

$U_w$  : 窓全体の総合熱貫流率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$U_g$  : ガラス部の熱貫流率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$U_f$  : フレーム部の熱貫流率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$A_w$  : 伝熱開口面積 [m<sup>2</sup>]

$A_g$  : ガラス部の見付面積 [m<sup>2</sup>]

$A_f$  : フレーム部の見付面積 [m<sup>2</sup>]

$l_g$  : ガラス周囲部の長さ [m]

$\Psi_g$  : ガラス周囲部の線熱貫流率 [W/(m·K)]

(単板の場合、 $\Psi_g=0$ )

(1.3.1-1)式からも分かるように、窓全体の総合熱貫流率( $U_w$ )は、ガラス部の熱貫流率( $U_g$ )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す線熱貫流率( $\Psi_g$ )が必要となる。解析モデルイメージを図 1.3.1-1 に示す。JIS A 2102-2 では、図 1.3.1-2 に示すように室内側平滑面と隅角部に異なる表面熱伝達率を与えて計算している。これは、隅角部では対流が起きにくいことと、隣り合う面が存在し放射による温度差が小さくなるため、総合熱伝達が小さくなることを考慮している。

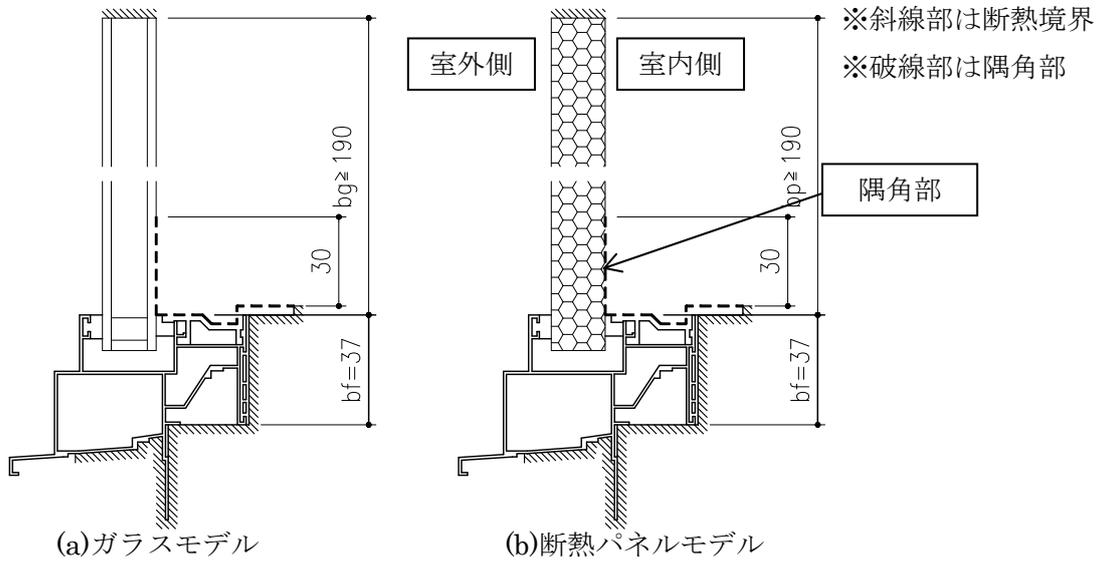
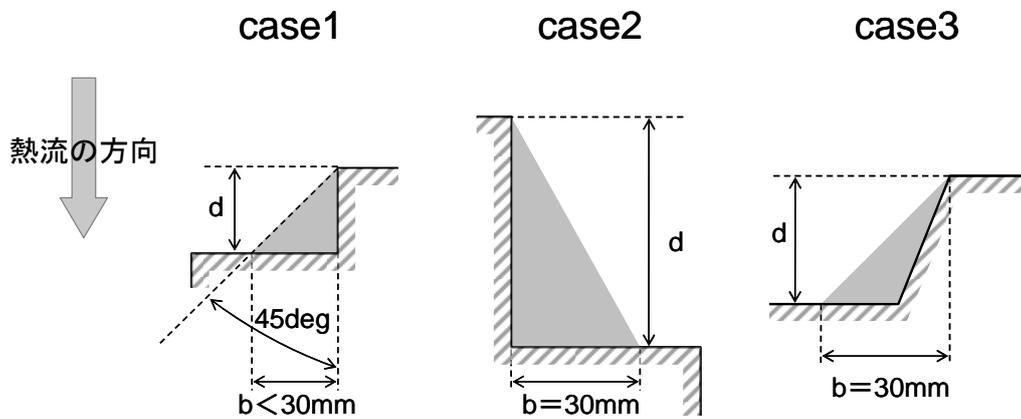


図 1.3.1-1 フレームの熱貫流率解析モデルイメージ



- 部が室内側隅角部となり、 $b$  と  $d$  の寸法によって決定される。
- case1 :  $d \leq 30 \text{ mm}$  の場合、 $d=b$
  - case2 :  $d > 30 \text{ mm}$  の場合、 $b=30 \text{ mm}$
  - case3 : 傾斜面で  $d > 30 \text{ mm}$  の場合、 $b=30 \text{ mm}$

図 1.3.1-2 水平熱流に対する表面抵抗 (JIS A 2102-2 抜粋)

フレーム部の熱貫流率( $U_f$ )は、フレームに断熱パネルを挿入した断熱パネルモデル (図 1.3.1-1(b)) を用いて (1.3.1-2) 式で求める。

$$U_f = \frac{L_f^{2D} - U_P \cdot b_p}{b_f} \quad \dots (1.3.1-2)$$

$U_f$ : フレームの熱貫流率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$L_f^{2D}$ : 図 1.3.1-1 (b) に示す断熱パネルモデルの熱コンダクタンス [W/(m·K)]

$U_P$ : 断熱パネル中央部分の熱貫流率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$b_p$ : 断熱パネルの見付け幅 [m]

$b_f$ : フレームの投影面積 (突出したガスケットを除く) [m]

複層ガラススペーサ部を含むフレームとガラスの間の線熱貫流率( $\Psi_g$ )は、フレームに複層ガラスを挿入した複層ガラスモデル (図 1.3.1-1(a)) と算出式(1.3.1-2) で得られる  $U_f$  値を用いて (1.3.1-3) 式で求める。但し、単板ガラスの場合は熱橋効果がないため無視する。

$$\Psi_g = L_\Psi^{2D} - U_f \cdot b_f - U_g \cdot b_g \quad \dots (1.3.1-3)$$

$\Psi_g$ : 線熱貫流率 [W/(m·K)]

$L_\Psi^{2D}$ : 図 1.3.1-1 (a) に示すガラスモデルの熱コンダクタンス [W/(m·K)]

$U_f$ : フレームの熱貫流率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$U_g$ : グレージング中央部分の熱貫流率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$b_f$ : フレームの投影幅 [m]

$b_g$ : グレージングの見付け幅 [m]

ガラスの熱貫流率は、表 1.3 に示すように国際的には ISO10292 が規格化されている。我が国でも JISR3107 が規格化されており、JISR3107 については ISO10292 を元に技術的内容を変更することなく作成したものである。

これらの計算法は、基本的にガラス中央部を一次元熱流として計算するものであり、複層ガラスのガラススペーサ部の熱橋を考慮した熱貫流率を算出する規格ではない。そのため、開口部の熱貫流率算出の際には、複層ガラススペーサ部を含むフレームとガラスの間の線熱貫流率( $\Psi_g$ )の算出が必要となる。

なお、フレーム部の計算概要イメージは、図 1.3.1-3 に示すようなものとなる。

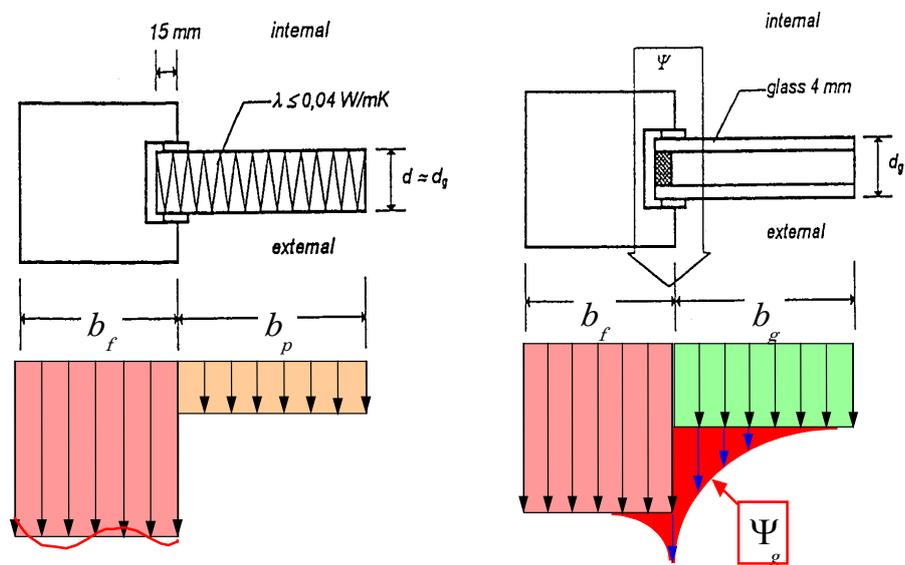


図 1.3.1-3 フレーム部の計算概要イメージ

図 1.3.1-1 の解析モデルからも確認できるように、開口部の熱貫流率の計算法は、窓枠と躯体の間は断熱境界の条件を適用することとなっており、躯体を経由する熱移動は含めない計算となっている。

### 1.3.2 壁（躯体）の熱貫流率計算法及び測定法

#### (1) 壁（躯体）の熱貫流率測定法

壁（躯体）の熱貫流率の測定法は、建築用構成材の断熱測定方法として提案され、実施されている。表 1.3 に示すように国際的には ISO8990 が規格化されており、我が国でも JISA1420 が規格化されている。JISA1420 については、ISO8990 を元に一部を除いて技術的内容を変更することなく作成したものである。なお、前述した一部とは、小さな試験体に対する測定法である。

これらの測定法についても、試験体周囲の躯体を経由する熱移動は窓本体の熱性能に含めないことが規定されており、測定の際にこの部分の熱流に相当する熱流を、全体の熱流から差し引いて評価している。

#### (2) 壁（躯体）の熱貫流率計算法

壁（躯体）の熱貫流率の計算法は、建築用構成要素及び建築部位の熱貫流率の計算方法として提案され、実施されている。表 1.3 に示すように国際的には ISO6946 が規格化されており、我が国でも JISA2101 が規格化されている。JISA2101 については、ISO6946 を元に日本の仕様に合うように技術的内容を変更し作成したものである。

均質な層からなる壁（躯体）の貫流熱抵抗は、(1.3.2) 式で整理される。

$$R_t = R_{si} + \sum R_n + R_{se} \quad \dots (1.3.2)$$

$R_t$  : 壁（躯体）の貫流熱抵抗 [(m<sup>2</sup>・K)/W]

$R_{si}$  : 室内側表面熱伝達抵抗 [(m<sup>2</sup>・K)/W]

$R_n$  : 各層の熱抵抗設計値 [(m<sup>2</sup>・K)/W]

$R_{se}$  : 室外側表面熱伝達抵抗 [(m<sup>2</sup>・K)/W]

また、不均質材からなる壁（躯体）の貫流熱抵抗も近似して算出できる規格となっており、図 1.3.2 のように構成要素を層の組合せ毎に各セクションに分割し、面積加重平均することで求めることが出来る規格となっている。

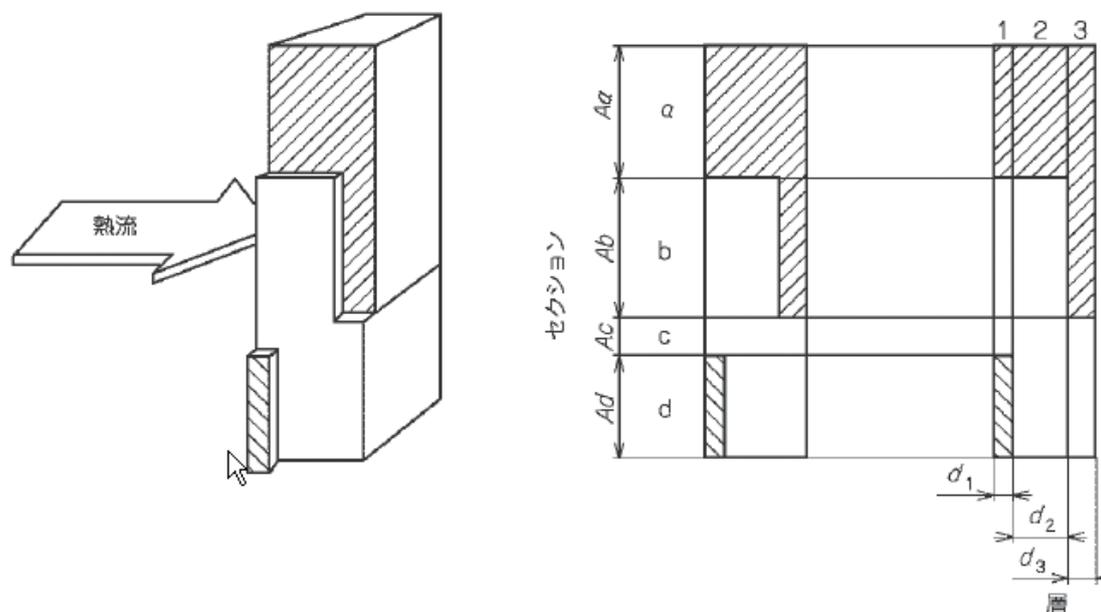


図 1.3.2 不均質な構成要素のセクションと層

(1.3.2) 式からも分かるように、これらの計算法についても、試験体周囲を經由する熱移動は壁本体の熱性能に含めない計算となっており、開口部等との取り合い部分は計算の適用範囲外となっている。

## 1.4 本論文の目的

### (1) 窓-躯体間の熱移動を評価する必要性

建築物の熱性能の評価において、建築物を構成する窓や壁（躯体）の評価法は確立されており、各々の性能評価において測定とシミュレーションである程度の整合性が取れていることが確認されている。しかし、建築物全体で見ると、現在の熱負荷の評価では測定とシミュレーションで値が乖離することも多い。

前述したが、建築物の高断熱化が進み、窓や壁（躯体）の断熱性能が向上することで、窓や壁（躯体）から抜け難くなった熱流は、窓と躯体との間に流れ易くなる傾向となる。日本ではこの窓と躯体の取り合い部分の熱流は評価しておらず、熱損失係数や熱負荷計算ツールでこの部分の熱損失が無視されている現状がある。熱負荷の評価において、測定とシミュレーションで値が乖離することが多い要因の一つとして、この窓と躯体の間での熱移動が考慮されていないことが考えられる。

そこで、現在の熱負荷の評価において測定とシミュレーションで値が乖離する原因の一つが窓と躯体の間での熱移動であるか否かを明らかにすると共に、より実態に近い熱負荷の評価を行うため、窓と躯体の間での熱移動の実態を把握する必要がある。

### (2) 窓-躯体間の熱移動を評価する目的

前述したが、建築物の熱性能の評価において、建築物を構成する窓や壁（躯体）の評価法は確立されており、各々の性能評価において測定とシミュレーションである程度の整合性が取れていることが確認されている。しかし、建築物全体で見ると、現在の熱負荷の評価では測定とシミュレーションで値が乖離することも多い。現在の熱負荷の評価において、日本では窓と躯体の取り合い部分の熱流は評価しておらず、熱損失係数や熱負荷計算ツールで、この部分の熱損失が無視されている現状がある。これが、熱負荷の評価では測定とシミュレーションで値が乖離する要因の一つと考えられている。

本研究では、これまで日本で評価・考慮されていなかった窓と躯体の間での熱移動について、計算方法を提示すると共にその実態を明らかにすることを目的とする。これにより、より実態に近い熱負荷の評価が可能となる。この評価を可能にすることで、エネルギー消費を抑えつつも快適な室内住環境を維持出来る建築物設計の一端を担うことができ、地球環境が重要視される現在において環境負荷低減の一助に繋がると考える。

## 1.5 本論文の構成

本論文は7章より構成され、各章の概要は以下の通りである。

第1章は、序論として、窓と躯体との間の熱移動がどのようなものか説明すると共に、本研究の社会的背景と目的を述べ、本研究の位置付けを述べる。

第2章は、窓と躯体との間の熱移動の計算による評価についてまとめる。まず、窓と躯体との間の熱移動を線熱貫流率 $\Psi_b$ （以下、 $\Psi_b$ と称す）として評価することを述べ、 $\Psi_b$ の計算方法を提案する。次に、計算の際に使用する計算ソフトについて、概要を述べると共に計算ソフトの精度検証を行い、結果を報告する。次に、精度検証がされた計算ソフトを用いて、提案した計算方法から $\Psi_b$ を求め、この $\Psi_b$ が窓の熱性能の評価対象となっているガラスペーサ部の線熱貫流率との比較を行う。また、躯体の熱性能の変化が $\Psi_b$ に及ぼす影響を確認し、影響がほとんど無いことを示す。

第3章は、窓と躯体との間の熱移動の実験による評価についてまとめる。まず、測定装置について概要を述べる。次に、測定結果を示し、測定結果と計算結果の比較を行う。その結果、熱流方向は一致していたが、熱流の大きさに乖離が見られることを示す。また、その乖離の要因を挙げ、その中で乖離の大きな要因が熱伝達率の分布の違いである可能性が高いことを述べる。

第4章は、熱伝達率分布の測定についてまとめる。第3章で、測定結果と計算結果の値に乖離が見られた要因として熱伝達率の分布の違いである可能性が高いと考えられたため、熱伝達率分布の測定を実施した。ここでは、測定装置の概要と測定結果についての報告を述べる。

第5章は、熱伝達率分布の計算についてまとめる。まず、解析モデルの概要と解析結果を述べる。次に、解析結果の熱伝達率の分布と第4章で得られた測定結果の熱伝達率分布を比較し、解析の整合性を確認すると共に測定しきれていない部分の熱伝達率の分布を把握する。

第6章は、窓と躯体との間の熱移動が、建物の熱性能に及ぼす影響についてまとめる。影響を確認する項目としては、窓の熱貫流率U値（以下、U値と称す）と住宅の熱損失係数Q値（以下、Q値と称す）の2項目とした。U値、Q値共に増加し、影響としては小さくないことを述べる。

第7章では、まとめとして本研究で得られた検討結果及び知見を総括した。また、今後の研究によって解決すべき課題を整理し、展望を述べる。

本論文の構成は、図 1.5 のようになる。

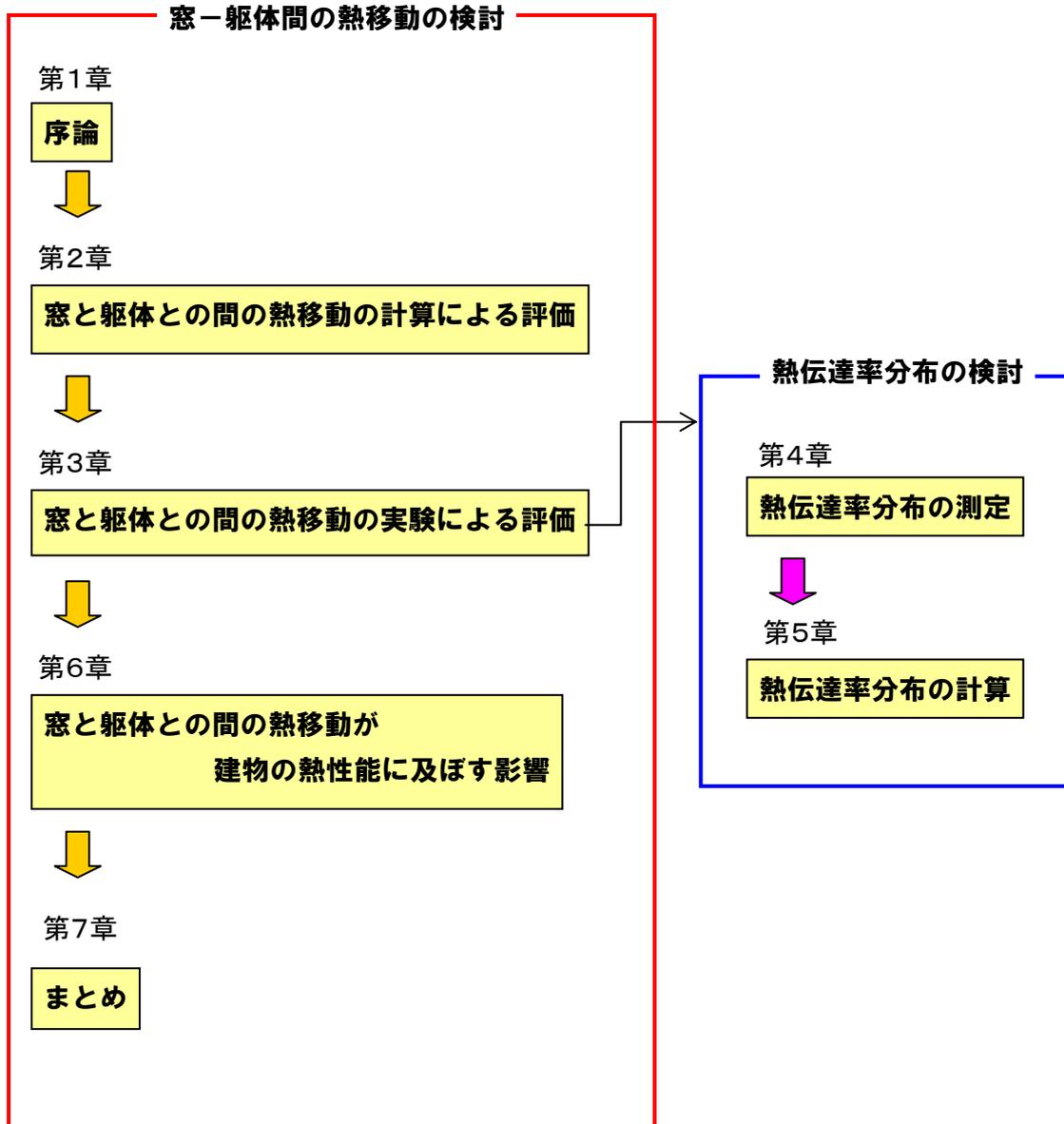


図 1.5 本論文の構成と流れ

---

**参考文献**

- 1) 潮田健次郎：熱意力闘「私の履歴書」,日本経済新聞出版社,2011.9
  - 2) 平成 22 年度版「住宅用建材使用状況調査」, (社) 日本サッシ協会, 2011.3
  - 3) "わかりやすいサッシ・ドア性能"「BASIS」2010, (社) 日本サッシ協会,2010
  - 4) 自立循環型住宅への設計ガイドライン,(財)建築環境・省エネルギー機構,2006
  - 5) ISO 12567-1 : Thermal performance of windows and doors - Determination of thermal transmittance by hot box method - Complete windows and doors, 2000
  - 6) ISO12567-2 : Thermal performance of windows and doors -- Determination of thermal transmittance by hot box method -- Part 2: Roof windows and other projecting windows, 2005
  - 7) JIS A 4710 : 建具の断熱性試験方法, (財) 日本規格協会, 2004
  - 8) JIS A 1492 : 出窓及び天窓の断熱性試験方法, (財) 日本規格協会, 2006
  - 9) ISO 10077-1 : Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance -- Part 1:General, 2006
  - 10) ISO 10077-2 : Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance -- Part 2:Numerical method for frames, 2003
  - 11) JIS A 2102-1 : 窓及びドアの熱性能-熱貫流率の計算-第 1 部 : 一般, (財) 日本規格協会, 2011
  - 12) JIS A 2102-2 : 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方法, (財) 日本規格協会, 2011
  - 13) ISO 8990 : Thermal insulation -- Determination of steady-state thermal transmission properties -- Calibrated and guarded hot box, 1994
  - 14) JIS A 1420 : 建築用構成材の断熱性測定方法-校正熱箱法及び保護熱箱法, (財) 日本規格協会, 1999
  - 15) ISO 6946 : Building components and building elements -- Thermal resistance and thermal transmittance -- Calculation method, 2007
  - 16) JIS A 2101 : 建築構成要素及び建築部位-熱抵抗及び熱貫流率-計算方法, (財) 日本規格協会, 2003
  - 17) ISO 14683 : Thermal bridges in building construction - Linear thermal transmittance - Simplified methods and default values, 2007
  - 18) ISO 15099 : Thermal performance of windows, doors and shading devices - Detailed calculations, 2003
  - 19) ISO 12631,Thermal performance of curtain walling -- Calculation of thermal transmittance, 2010
-

- 20) ISO10291 : Glass in building -- Determination of steady-state U values (thermal transmittance) of multiple glazing -- Guarded hot plate method, 1994
- 21) ISO10293 : Glass in building -- Determination of steady-state U values (thermal transmittance) of multiple glazing -- Heat flow meter method, 1997
- 22) JIS R 3106 : 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, 1998
- 23) ISO10292 : Glass in building -- Calculation of steady-state U values (thermal transmittance) of multiple glazing, 1994
- 24) JIS R 3107 : 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, 1998

第2章 窓と躯体との間の熱移動の計算による評価

---

---



## 2.1 はじめに

前述したが、窓は建具の熱性能として、壁は躯体の熱性能として、測定法及び計算法がそれぞれ確立されている<sup>1)~10)</sup>。しかし、これらは製品の横並び評価を目的としたものであり、窓と躯体との間の熱流を、試験法では差し引き、計算法では熱のやり取りのない条件を与える等により、窓と躯体との間の取り合い部分の熱流を考慮したものではない。

しかし、実際には窓と躯体の間（窓と躯体の接触部分）では熱移動が生じることが知られている。また、技術の発展により窓や壁（躯体）の断熱性能が向上することで、この部分の熱流が増加することが推察される。そのような中、日本にはこの部分の熱流を評価する規格や計算方法がなく、熱損失係数や熱負荷計算ツールでこの部分の熱損失が無視されている現状がある。

そこで、本章ではこの窓と躯体の間の熱流を定量化する計算方法を提案すると共に、その計算方法を用いて算出した幾つかの代表的な窓と躯体の組合せの熱流の結果を報告する。また、結果から得られた知見も報告する。

## 2.2 窓と躯体の間の熱流の計算方法

窓は建具の熱性能として、壁は躯体の熱性能として、測定法及び計算法がそれぞれ確立されている。そのため、窓と躯体の間の熱移動は窓や躯体の熱性能とは別に求めることが望ましい。そこで、窓が躯体に納まった状態の熱流から、窓単体の熱流と躯体単体の熱流を差し引くことで、窓と躯体の間の熱流のみを定量化することが出来ると考えた。計算法を以下に示す。

窓を構成する各断面について、窓が躯体に納まったモデルA（窓+躯体モデル）、窓単体のモデルB（窓モデル）、躯体単体のモデルC（躯体モデル）の3種類の解析モデルを作成し、各々の通過熱流量（モデルAの通過熱流量： $Q_A$ 、モデルBの通過熱流量： $Q_B$ 、モデルCの通過熱流量： $Q_C$ ）を算出する。次に、モデルAの通過熱流量 $Q_A$ からモデルBとCの通過熱流量 $Q_B$ 、 $Q_C$ を差し引き、窓と躯体の間の通過熱流量 $L_{Qb}$ を得る（図2.2参照）。得られた $L_{Qb}$ を室内外の温度差 $\Delta T$ で除して、窓と躯体の間の熱流を線熱貫流率 $\Psi_b$ （以下、 $\Psi_b$ と称す）として定量化する。計算式は（2.2）式となる。

$$\Psi_b = \frac{(Q_A - Q_B - Q_C)}{\Delta T} = \frac{L_{Qb}}{\Delta T} \quad \dots (2.2)$$

$\Psi_b$ ：窓と躯体の間の線熱貫流率 [W/(m·K)]

$Q_A$ ：モデルAの通過熱流量 [W/m]

$Q_B$ ：モデルBの通過熱流量 [W/m]

$Q_C$ ：モデルCの通過熱流量 [W/m]

$\Delta T$ ：室内外の温度差 [K]

$L_{Qb}$ ：窓と躯体の間の通過熱流量 [W/m]

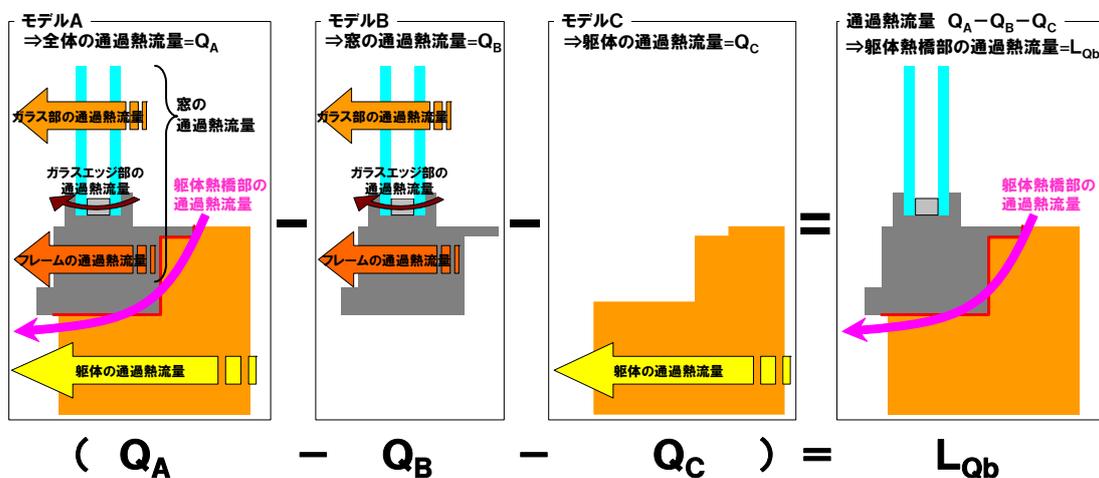


図 2.2  $L_{Qb}$  の算出方法

### 2.3 使用する解析ソフト (TB2D/BEM) の概要と精度

窓と躯体との間の熱流を算出する際に使用する解析ソフトは、2次元境界要素法計算プログラム TB2D/BEM<sup>11)~15)</sup> (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、窓や躯体などといった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にて公開されている窓の熱性能評価プログラムWindEyeの元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、その他の研究等でも多く使用されている。

#### 2.3.1 TB2D/BEM の概要

前述したが、TB2D/BEM はその名の通り、境界要素法による2次元定常伝熱計算プログラムで、窓や躯体などといった条件の異なる環境を隔てる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出来るプログラムである。図 2.3-1 にTB2D/BEM のデータフローを示す。

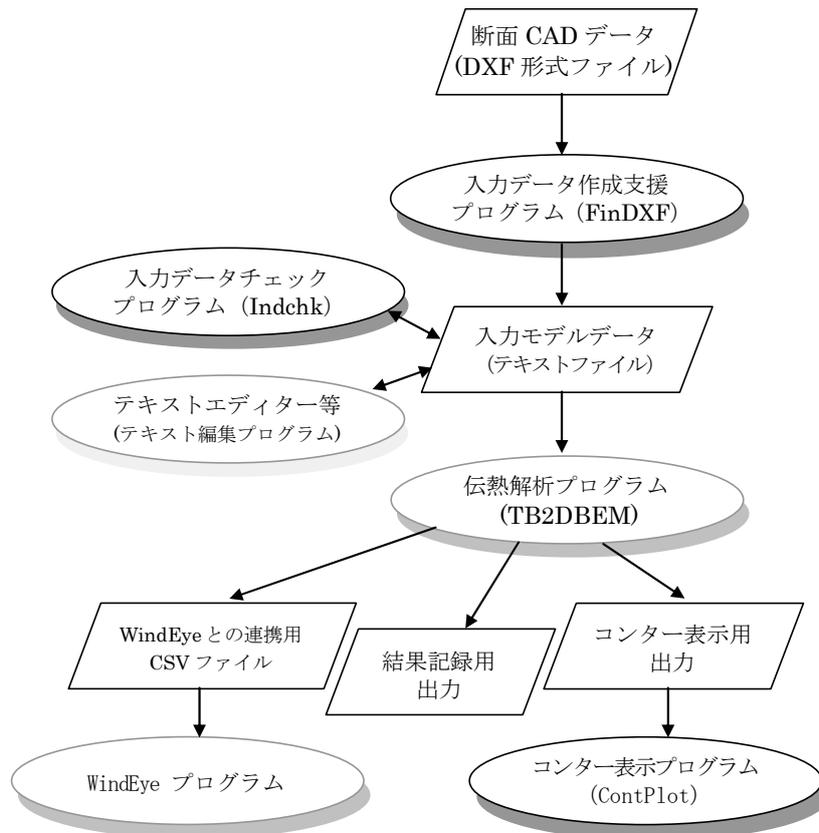


図 2.3-1 TB2D/BEM のデータフロー

図 2.3-1 からわかるように、TB2D/BEM は CAD データ (.dxf データ) を読み込むことが可能で、これによりサッシフレームのような複雑な形状でも容易にモデル化をすることが出来る。

境界条件は、室内外で各 3 種類の温度と表面熱伝達率の設定が可能で、100 種類までの熱伝導率の異なる媒質 (材料) からなる 2 次元壁体の熱橋解析が可能。また、媒質に空気層の指定を行うと、温度依存性や熱流方向に対する空気層の厚さ、高さ、幅から対流と放射による熱伝達を考慮した等価の熱伝導率を自動で算出し、算出した等価な熱伝導率を解析に反映することが出来る。そのため、サッシフレーム等の媒質に空気層の多い解析に適している。

日射を与えた計算も可能で、日射量と太陽高度とプロファイル角及び材料の日射吸収率を与えることで、3 次元的な斜め入射を考慮した日射解析も出来る。

アウトプットは、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、数値だけでなくコンター表示用の出力ファイル (.plt ファイル) をコンター表示プログラム ContPlot に読み込ませることで、温度分布と熱流分布のコンター図として表示することが出来る。また、サッシフレームの解析では、条件設定時にフレームの見付け寸法等を設定することで、フレームの熱貫流率 ( $U_f$ ) も直接出力することが可能である。

境界要素は、解析対象を構成する線分を分割した際に、図 2.3.2 のように端部を一定要素、中間部を一次要素とすることで、計算精度を高めている。

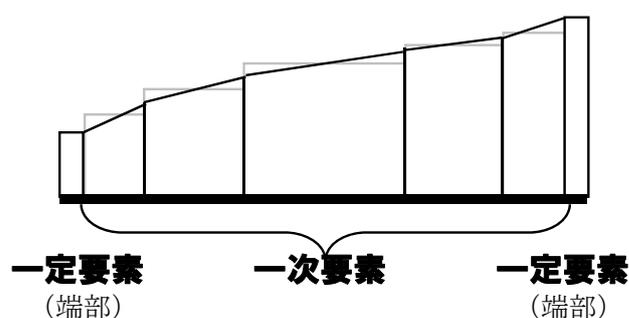


図 2.3-2 TB2D/BEM の境界要素の構成

### 2.3.2 TB2D/BEMの精度検証

前述したが、TB2D/BEMはリビングアメニティ協会HPにて公開されている窓の熱性能評価プログラムWindEyeの元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、その他の研究などでも多く使用されている。しかし、公的な精度検証がなされていない。そこで、2011年3月に公示された窓の熱性能計算法の規格JISA 2102に記載されている計算プログラムの検証例題基準（9モデル）を用いて、TB2D/BEMの精度検証を実施する。

なお、窓の熱性能計算法の規格であるJISA2102はJISA2102-1、JISA2102-2の2部構成となっており、検証例題はJISA2102-2の附属書Dに記載されている。

計算精度の判定基準は、ソフトの計算結果の二次元熱コンダクタンス（ $L^{2D}$ ）が規定されている値（表2.3.2-1及び表2.3.2-2参照）の±3%以内となっている。これにより、熱貫流率（ $U_f$ ）及び線熱貫流率（ $\Psi$ ）の精度は約5%となる。

なお、表中の括弧内のデータは、欧州及び北米にある9ヶ所の機関におけるラウンドロビン計算（2000年6月）における標準偏差である。

表 2.3.2-1 熱コンダクタンス（ $L^{2D}$ ）及び熱貫流率（ $U_f$ ）の計算値

	$L^{2D}$ [W/(m・K)]	$U_f$ [W/(m <sup>2</sup> ・K)]
例題1	0.522 (0.007)	3.24 (0.06)
例題2	0.261 (0.001)	1.44 (0.03)
例題3	0.422 (0.006)	2.05 (0.06)
例題4	0.346 (0.001)	1.36 (0.01)
例題5	0.408 (0.007)	2.08 (0.08)
例題6	0.659 (0.008)	4.67 (0.09)
例題7	0.285 (0.002)	1.31 (0.03)
例題8	0.207 (0.001)	3.64 (0.01)
注記 丸め誤差を避けるため、これらの値は3桁の有効数字で与える		

表 2.3.2-2 熱コンダクタンス（ $L^{2D}$ ）及び線熱貫流率（ $\Psi$ ）の計算値

	$L^{2D}$ [W/(m・K)]	$\Psi$ [W/(m・K)]
例題9	0.522 (0.007)	3.24 (0.06)

$U_f$ は、(2.3.2-1) 式より算出される。

$$U_f = \frac{L_f^{2D} - U_p \cdot b_p}{b_f} \quad \dots (2.3.2-1)$$

$U_f$ : フレームの熱貫流率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$L_f^{2D}$ : 図 2.3.2-1 に示す断面の熱コンダクタンス [W/(m·K)]

$U_p$ : 断熱パネル中央部分の熱貫流率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$b_p$ : 断熱パネルの見付け幅 [m]

$b_f$ : フレームの投影面積 (突出したガスケットを除く) [m]

単位 mm

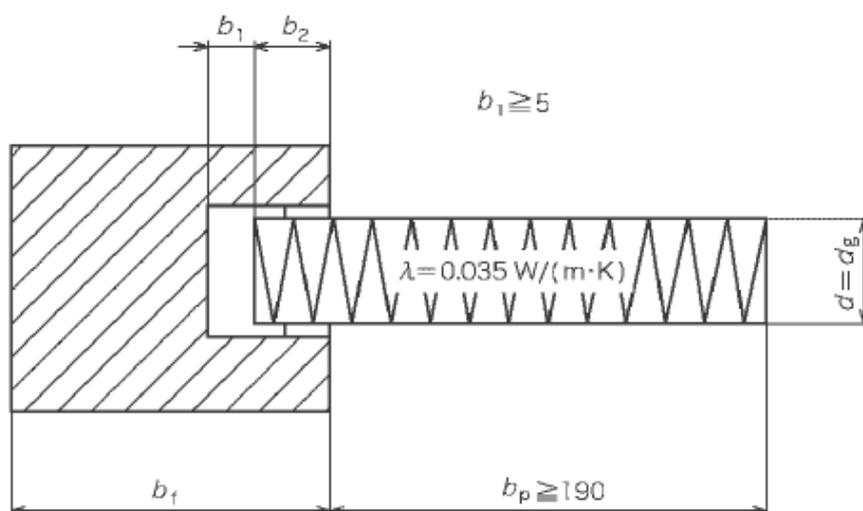


図 2.3.2-1 断熱パネルを取り付けたフレーム断面の概念図

$\Psi$ は(2.3.2-2)式より算出される。

$$\Psi = L_{\Psi}^{2D} - U_f \cdot b_f - U_g \cdot b_g \quad \dots (2.3.2-2)$$

$\Psi$  : 線熱貫流率 [W/(m·K)]

$L_{\Psi}^{2D}$  : 図 2.3.2-2 に示す断面の熱コンダクタンス [W/(m·K)]

$U_f$  : フレームの熱貫流率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$U_g$  : グレージング中央部分の熱貫流率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$b_f$  : フレームの投影幅 [m]

$b_g$  : グレージングの見付け幅 [m]

単位 mm

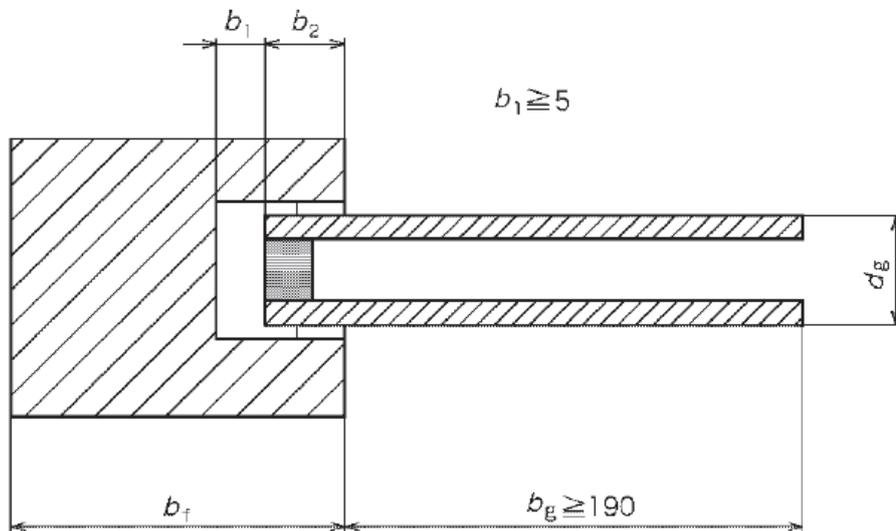


図 2.3.2-2 グレージングを取り付けたフレーム断面の概念図

精度検証の際に使用する境界条件及び材料物性値は規定されており、表 2.3.2-3～表 2.3.2-5 及び図 2.3.2-3 に示される条件を使用しなければならない。ただし、空気層の扱いについては、JIS2102 では大きめの温度差を用いて等価熱伝導率を求める方法が解説されているが、より詳細な方法によって計算してもよい、とされている。TB2D/BEM では ISO15099 に則った方法で、温度差も収束計算により非線形性を考慮した精度の高い計算方法を用いている。

表 2.3.2-3 精度検証に用いる境界条件

記号	表面熱伝達抵抗 [(m <sup>2</sup> ・K)/W]	温度 [°C]
A 断熱	無限大	-
B 屋外	表 2.3.2-5 参照	0
C 室内		20

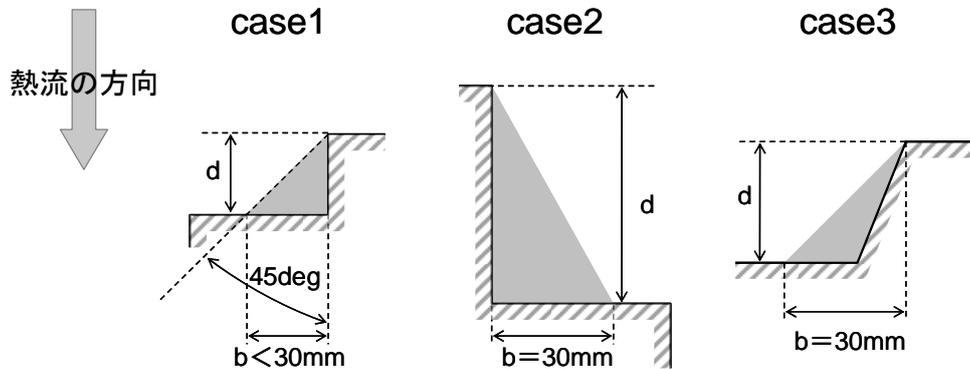
表 2.3.2-4 精度検証に用いる各種材料物性値

記号	材料	熱伝導率 [W/(m・K)]
a	断熱パネル	0.035
b	軟材	0.13
c	PVC	0.17
d	EPDM	0.25
e	25%のガラス繊維入り 6.6 ポリアミド	0.3
f	ガラス	1.0
g	鋼材	50
h	アルミニウム	160
i	パイルウェザーストリッピング(ポリエステルモヘア)	0.14
k	ポリアミド	0.25
l	PU(ポリウレタン), 硬質	0.25
m	ポリサルファイド	0.40
n	シリカゲル(乾燥剤)	0.13
o	封入ガス	0.035 <sup>a)</sup>
注記 全ての表面は、放射率 0.9		
注 <sup>a)</sup> 封入ガスの等価熱伝導率		

表 2.3.2-5 型材の表面熱伝達抵抗

[(m<sup>2</sup>・K)/W]

位置	屋外側 R <sub>se</sub>	室内側 R <sub>si</sub>
標準(平面)	0.04	0.13
低下した放射/対流 (端部又は2平面のつくる隅各部: 図 2.3.2-3 参照)	0.04	0.2
注記 これらの値は、ISO6946 に与えられる表面熱伝達抵抗に対応しており、 これは更に表面熱伝達抵抗に対する対流及び放射の影響に関する情報も与える		



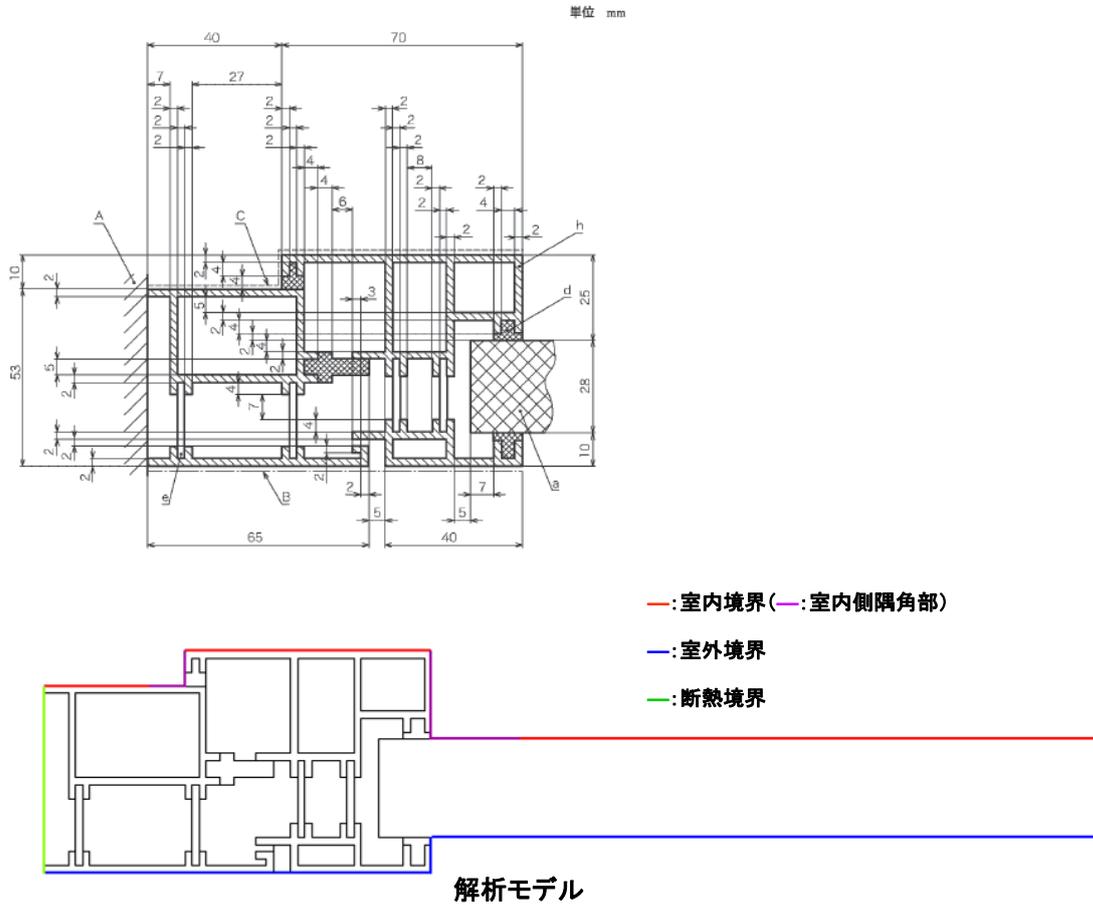
■ 部が室内側隅角部となり、b と d の寸法によって決定される。  
 case1 :  $d \leq 30$  [mm] の場合、 $d = b$   
 case2 :  $d > 30$  [mm] の場合、 $b = 30$  [mm]  
 case3 : 傾斜面で  $d > 30$  [mm] の場合、 $b = 30$  [mm]

図 2.3.2-3 放射/対流伝熱の低下によって表面抵抗が増加する面の概要

以上の条件を用いて、TB2D/BEM の精度検証を実施した。9つの例題で検証した結果を以下に示す。また、9つの例題で検証した結果をまとめたものを表 2.3.2-6 及び表 2.3.2-7 に示す。

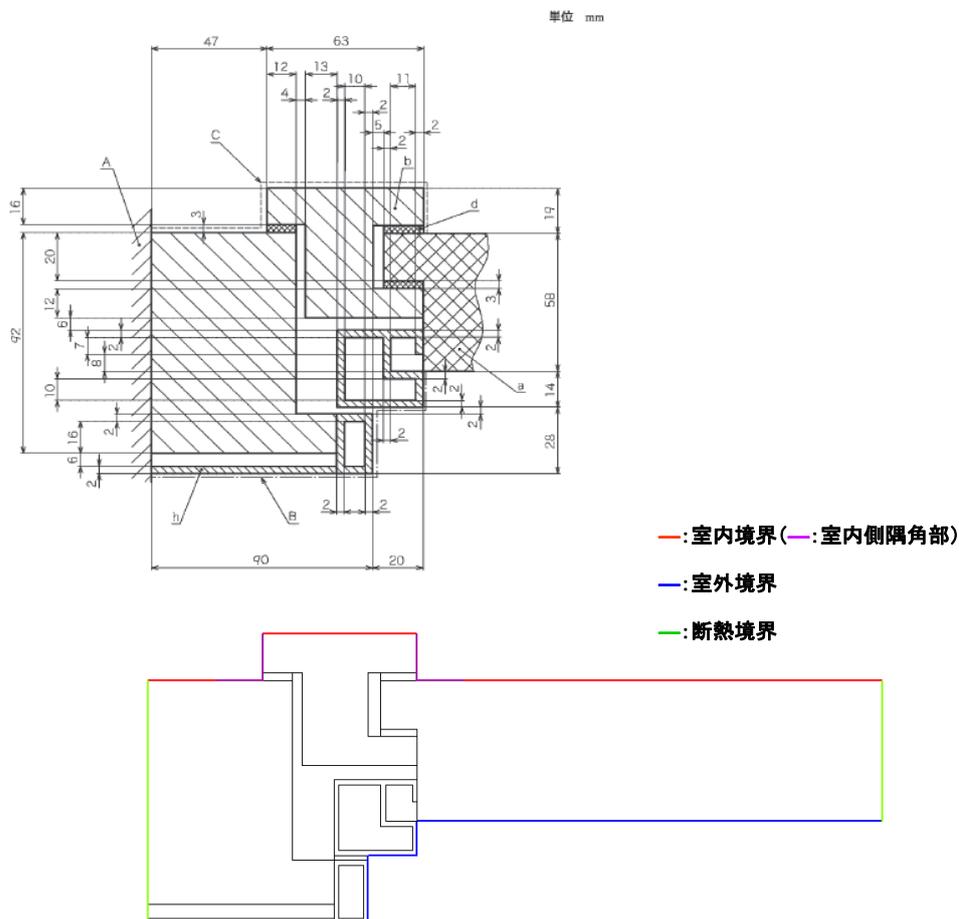
全ての検証例題で、計算結果の二次元熱コンダクタンス ( $L^{2D}$ ) が、JIS2102-2 附属書 D に記載されている値の3%以内となることが確認された。このことから、2次元境界要素法計算プログラム TB2D/BEM は、窓の熱性能計算法 JIS の適用基準を満たす精度を持つ解析プログラムであることが確認された。

検証例題 1 : アルミニウム熱遮断構造フレーム断面及び断熱パネル



条件		検証例題 1	
		計算値	基準値
$\Delta T$	°C	20	20
external	W/(m <sup>2</sup> ·K)	25	25
internal	W/(m <sup>2</sup> ·K)	7.69	7.69
outside	W/m	-11.0395	
inside	W/m	-11.019	
average	W/m	11.029	11.040
$L^{2D}$	W/(m·K)	0.551	0.552
$L^{2D}$ (BEM/基準値)	%	<b>99.9%</b>	
パネル寸法	m	0.190	
パネル部厚さ	m	0.028	0.028
パネル部通過熱流量	W/m	3.917	
フレーム部見付け	m	0.110	0.110
フレーム部通過熱流量	W/m	7.112	7.128
$U_f$	W/(m <sup>2</sup> ·K)	3.23	3.24
$U_f$ (BEM/基準値)	%	<b>99.8%</b>	

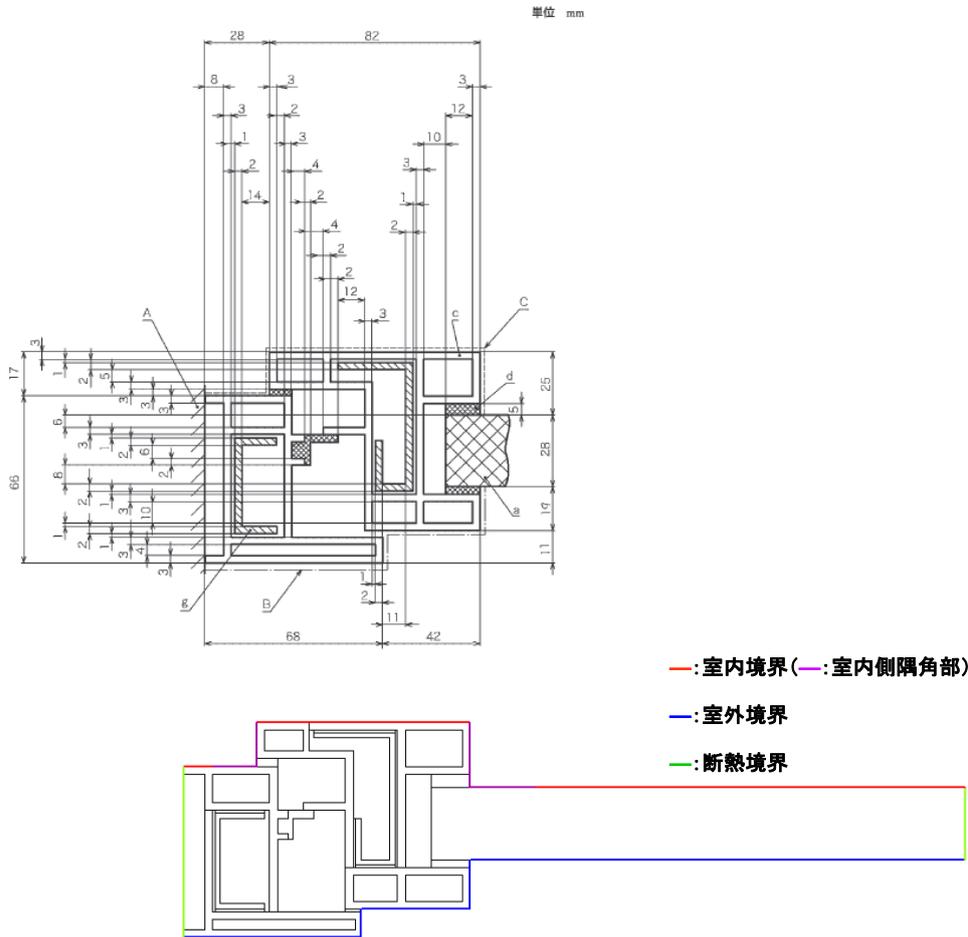
検証例題2：アルミニウム被覆木材フレーム断面及び断熱パネル



解析モデル

条件		検証例題2	
		計算値	基準値
$\Delta T$	°C	20	20
external	W/(m <sup>2</sup> ·K)	25	25
internal	W/(m <sup>2</sup> ·K)	7.69	7.69
outside	W/m	-5.2238	
inside	W/m	-5.2196	
average	W/m	5.222	5.220
$L^{2D}$	W/(m·K)	0.261	0.261
$L^{2D}$ (BEM/基準値)	%	<b>100.0%</b>	
パネル寸法	m	0.190	
パネル部厚さ	m	0.058	0.058
パネル部通過熱流量	W/m	2.080	
フレーム部見付け	m	0.110	0.110
フレーム部通過熱流量	W/m	3.142	3.168
$U_f$	W/(m <sup>2</sup> ·K)	1.43	1.44
$U_f$ (BEM/基準値)	%	<b>99.2%</b>	

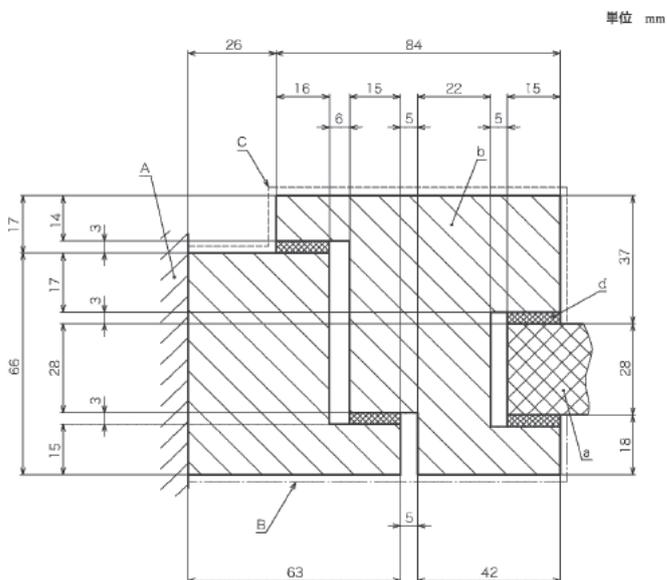
検証例題3：鋼補強材を備えたPVCフレーム断面及び断熱パネル



解析モデル

条件		検証例題3	
		計算値	基準値
$\Delta T$	°C	20	20
external	W/(m <sup>2</sup> ·K)	25	25
internal	W/(m <sup>2</sup> ·K)	7.69	7.69
outside	W/m	-8.4736	
inside	W/m	-8.4751	
average	W/m	8.474	8.440
$L^{2D}$	W/(m·K)	0.424	0.422
$L^{2D}$ (BEM/基準値)	%	<b>100.4%</b>	
パネル寸法	m	0.190	
パネル部厚さ	m	0.028	0.028
パネル部通過熱流量	W/m	3.917	
フレーム部見付け	m	0.110	0.110
フレーム部通過熱流量	W/m	4.557	4.510
$U_f$	W/(m <sup>2</sup> ·K)	2.07	2.05
$U_f$ (BEM/基準値)	%	<b>101.0%</b>	

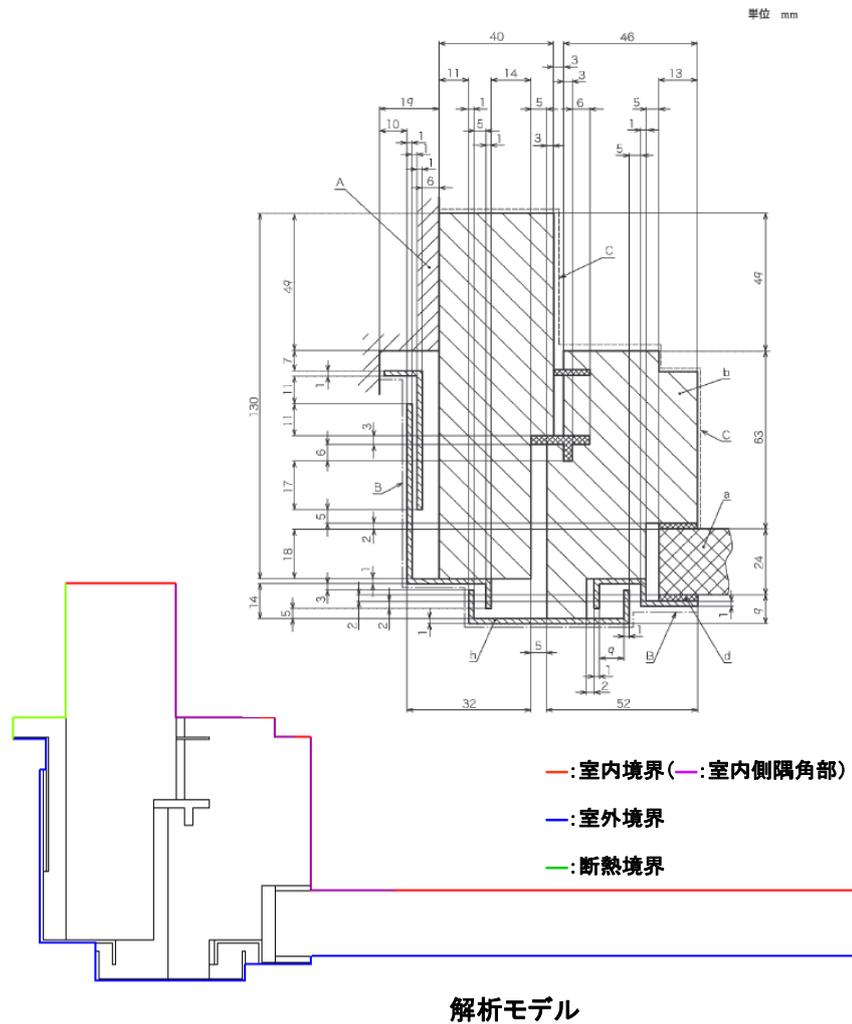
検証例題4：木材フレーム断面及び断熱パネル



解析モデル

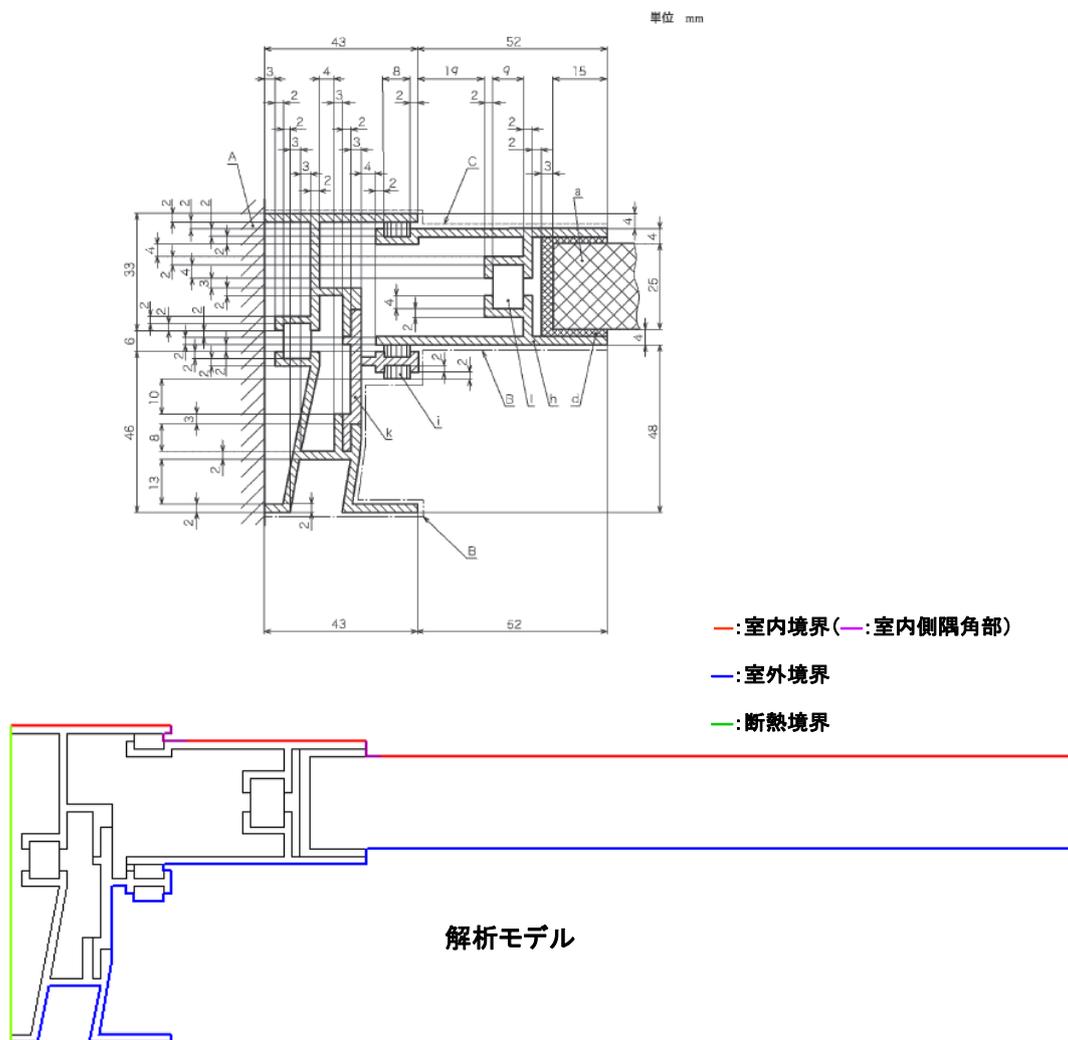
条件		検証例題4	
		計算値	基準値
$\Delta T$	°C	20	20
external	W/(m <sup>2</sup> ·K)	25	25
internal	W/(m <sup>2</sup> ·K)	7.69	7.69
outside	W/m	-6.875	
inside	W/m	-6.875	
average	W/m	6.875	6.920
$L^{2D}$	W/(m·K)	0.344	0.346
$L^{2D}$ (BEM/基準値)	%	99.3%	
パネル寸法	m	0.190	
パネル部厚さ	m	0.028	0.028
パネル部通過熱流量	W/m	3.917	
フレーム部見付け	m	0.110	0.110
フレーム部通過熱流量	W/m	2.958	2.992
$U_f$	W/(m <sup>2</sup> ·K)	1.34	1.36
$U_f$ (BEM/基準値)	%	98.8%	

検証例題5：天窗フレーム断面及び断熱パネル



条件		検証例題5	
		計算値	基準値
$\Delta T$	°C	20	20
external	W/(m <sup>2</sup> ·K)	25	25
internal	W/(m <sup>2</sup> ·K)	7.69	7.69
outside	W/m	-8.1841	
inside	W/m	-8.1856	
average	W/m	8.185	8.160
$L^{2D}$	W/(m·K)	0.409	0.408
$L^{2D}$ (BEM/基準値)	%	<b>100.3%</b>	
パネル寸法	m	0.190	
パネル部厚さ	m	0.024	0.024
パネル部通過熱流量	W/m	4.441	
フレーム部見付け	m	0.089	0.089
フレーム部通過熱流量	W/m	3.744	3.702
$U_f$	W/(m <sup>2</sup> ·K)	2.10	2.08
$U_f$ (BEM/基準値)	%	<b>101.1%</b>	

検証例題6：スライド式窓フレーム断面及び断熱パネル

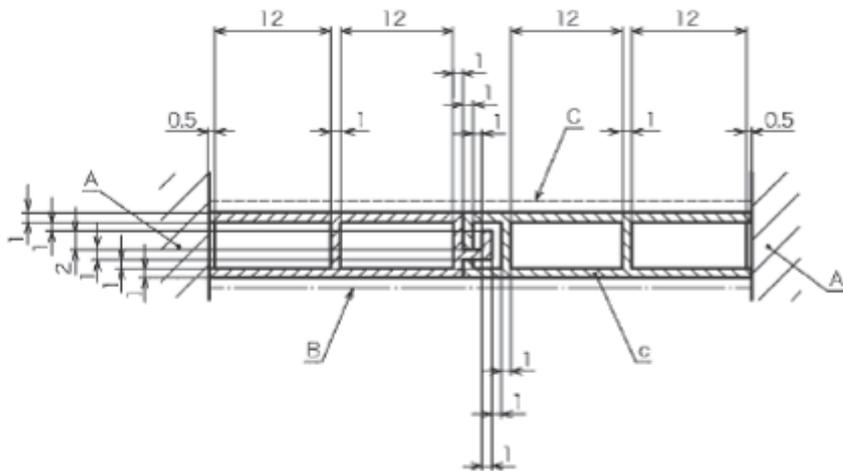


条件		検証例題6	
		計算値	基準値
$\Delta T$	°C	20	20
external	W/(m <sup>2</sup> ·K)	25	25
internal	W/(m <sup>2</sup> ·K)	7.69	7.69
outside	W/m	-13.1684	
inside	W/m	-13.1553	
average	W/m	13.162	13.180
$L^{2D}$	W/(m·K)	0.658	0.659
$L^{2D}$ (BEM/基準値)	%	<b>99.9%</b>	
パネル寸法	m	0.190	
パネル部厚さ	m	0.025	0.025
パネル部通過熱流量	W/m	4.297	
フレーム部見付け	m	0.095	0.095
フレーム部通過熱流量	W/m	8.865	8.873
$U_f$	W/(m <sup>2</sup> ·K)	4.67	4.67
$U_f$ (BEM/基準値)	%	<b>99.9%</b>	



検証例題8：PVCシャッター形材

単位 mm

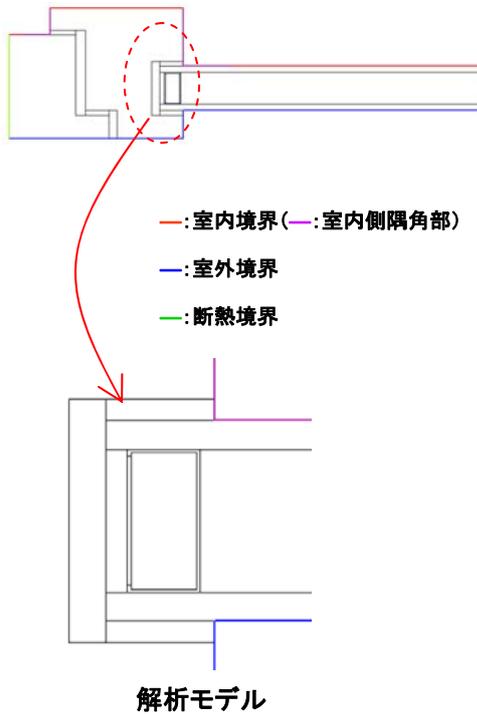
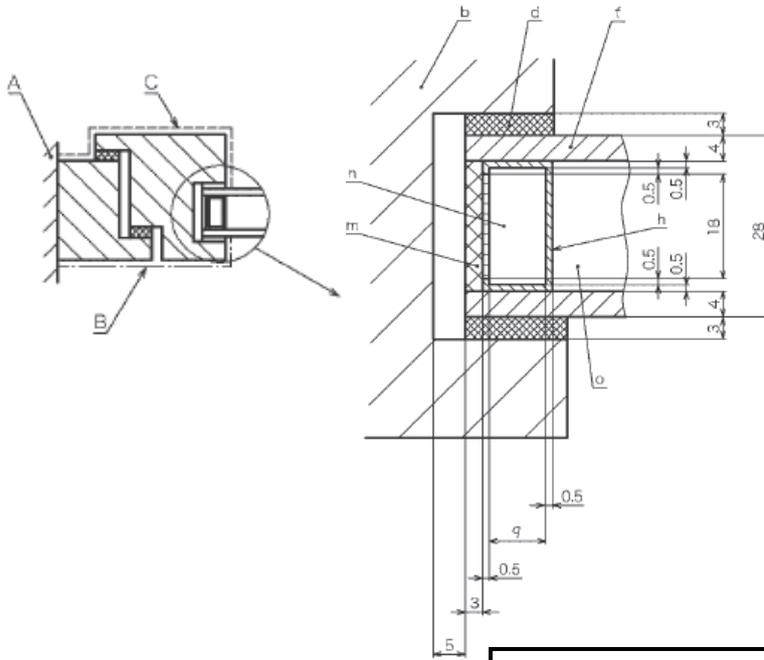


- : 室内境界 (—: 室内側隅角部)
- : 室外境界
- : 断熱境界

解析モデル

条件		検証例題8	
		計算値	基準値
$\Delta T$	°C	20	20
external	W/(m <sup>2</sup> ·K)	25	25
internal	W/(m <sup>2</sup> ·K)	7.69	7.69
outside	W/m	-4.1352	
inside	W/m	-4.1353	
average	W/m	4.135	4.140
$L^{2D}$	W/(m·K)	0.207	0.207
$L^{2D}$ (BEM/基準値)	%	<b>99.9%</b>	
パネル寸法	m		
パネル部厚さ	m		0.000
パネル部通過熱流量	W/m		
フレーム部見付け	m	0.057	0.057
フレーム部通過熱流量	W/m	4.135	4.150
$U_f$	W/(m <sup>2</sup> ·K)	3.63	3.64
$U_f$ (BEM/基準値)	%	<b>99.7%</b>	

検証例題9：木材フレームの断面（検証例題4参照）及び通常のガラスエッジシステムを備えた  $U_g=1.3$  [W/(m<sup>2</sup>·K)] のグレージングの線熱貫流率の決定例



条件		検証例題9	
		計算値	基準値
$\Delta T$	°C	20	20
external	W/(m <sup>2</sup> ·K)	25	25
internal	W/(m <sup>2</sup> ·K)	7.69	7.69
outside (パネル)	W/m	-6.875	
inside (パネル)	W/m	-6.875	
average	W/m	6.875	6.920
$L^{2D}$	W/(m·K)	0.344	0.346
$L^{2D}$ (BEM/基準値)	%	99.3%	
パネル寸法 a	m	0.190	
パネル部厚さ	m	0.028	0.028
パネル部通過熱流量	W/m	3.917	
フレーム部見付け	m	0.110	0.110
フレーム部通過熱流量	W/m	2.958	2.992
$U_f$	W/(m <sup>2</sup> ·K)	1.34	1.36
$U_f$ (BEM/基準値)	%	98.8%	
outside (ガラス)	W/m	-9.688	
inside (ガラス)	W/m	-9.688	
average	W/m	9.688	9.620
$L_{\psi}^{2D}$	W/(m·K)	0.484	0.481
$L_{\psi}^{2D}$ (BEM/基準値)	%	100.7%	
ガラス寸法 a	m	0.190	
外側ガラス厚さ	m	0.004	
空気層	m	0.020	
内側ガラス厚さ	m	0.004	
ガラス部通過熱流量	W/m	4.959	
$\Psi$	W/(m·K)	0.089	0.084
$\Psi$ (BEM/基準値)	%	105.4%	

表 2.3.2-6 例題1～8の検証結果

条件		検証例題1		検証例題2		検証例題3		検証例題4	
		計算値	基準値	計算値	基準値	計算値	基準値	計算値	基準値
$\Delta T$	°C	20	20	20	20	20	20	20	20
external	W/(m <sup>2</sup> ·K)	25	25	25	25	25	25	25	25
internal	W/(m <sup>2</sup> ·K)	7.69	7.69	7.69	7.69	7.69	7.69	7.69	7.69
outside	W/m	-11.0395		-5.2238		-8.4736		-6.875	
inside	W/m	-11.019		-5.2196		-8.4751		-6.875	
average	W/m	11.029	11.040	5.222	5.220	8.474	8.440	6.875	6.920
$L^{2D}$	W/(m·K)	0.551	0.552	0.261	0.261	0.424	0.422	0.344	0.346
$L^{2D}$ (BEM/基準値)	%	99.9%		100.0%		100.4%		99.3%	
パネル寸法	m	0.190		0.190		0.190		0.190	
パネル部厚さ	m	0.028	0.028	0.058	0.058	0.028	0.028	0.028	0.028
パネル部通過熱流量	W/m	3.917		2.080		3.917		3.917	
フレーム部見付け	m	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110
フレーム部通過熱流量	W/m	7.112	7.128	3.142	3.168	4.557	4.510	2.958	2.992
$U_f$	W/(m <sup>2</sup> ·K)	3.23	3.24	1.43	1.44	2.07	2.05	1.34	1.36
$U_f$ (BEM/基準値)	%	99.8%		99.2%		101.0%		98.8%	

条件		検証例題5		検証例題6		検証例題7		検証例題8	
		計算値	基準値	計算値	基準値	計算値	基準値	計算値	基準値
$\Delta T$	°C	20	20	20	20	20	20	20	20
external	W/(m <sup>2</sup> ·K)	25	25	25	25	25	25	25	25
internal	W/(m <sup>2</sup> ·K)	7.69	7.69	7.69	7.69	7.69	7.69	7.69	7.69
outside	W/m	-8.1841		-13.1684		-5.6527		-4.1352	
inside	W/m	-8.1856		-13.1553		-5.6525		-4.1353	
average	W/m	8.185	8.160	13.162	13.180	5.653	5.700	4.135	4.140
$L^{2D}$	W/(m·K)	0.409	0.408	0.658	0.659	0.283	0.285	0.207	0.207
$L^{2D}$ (BEM/基準値)	%	100.3%		99.9%		99.2%		99.9%	
パネル寸法	m	0.190		0.190		0.190			
パネル部厚さ	m	0.024	0.024	0.025	0.025	0.024	0.024		0.000
パネル部通過熱流量	W/m	4.441		4.297		4.441			
フレーム部見付け	m	0.089	0.089	0.095	0.095	0.048	0.048	0.057	0.057
フレーム部通過熱流量	W/m	3.744	3.702	8.865	8.873	1.212	1.258	4.135	4.150
$U_f$	W/(m <sup>2</sup> ·K)	2.10	2.08	4.67	4.67	1.26	1.31	3.63	3.64
$U_f$ (BEM/基準値)	%	101.1%		99.9%		96.4%		99.7%	

表 2.3.2-7 例題9の検証結果

条件		検証例題9	
		計算値	基準値
$\Delta T$	°C	20	20
external	W/(m <sup>2</sup> ·K)	25	25
internal	W/(m <sup>2</sup> ·K)	7.69	7.69
outside (パネル)	W/m	-6.875	
inside (パネル)	W/m	-6.875	
average	W/m	6.875	6.920
$L^{2D}$	W/(m·K)	0.344	0.346
$L^{2D}$ (BEM/基準値)	%	99.3%	
パネル寸法 a	m	0.190	
パネル部厚さ	m	0.028	0.028
パネル部通過熱流量	W/m	3.917	
フレーム部見付け	m	0.110	0.110
フレーム部通過熱流量	W/m	2.958	2.992
$U_f$	W/(m <sup>2</sup> ·K)	1.34	1.36
$U_f$ (BEM/基準値)	%	98.8%	
outside (ガラス)	W/m	-9.688	
inside (ガラス)	W/m	-9.688	
average	W/m	9.688	9.620
$L_{\psi}^{2D}$	W/(m·K)	0.484	0.481
$L_{\psi}^{2D}$ (BEM/基準値)	%	100.7%	
ガラス寸法 a	m	0.190	
外側ガラス厚さ	m	0.004	
空気層	m	0.020	
内側ガラス厚さ	m	0.004	
ガラス部通過熱流量	W/m	4.959	
$\Psi$	W/(m·K)	0.089	0.084
$\Psi$ (BEM/基準値)	%	105.4%	

## 2.4 窓と躯体との間の線熱貫流率 $\Psi_b$ 算出結果

2.2節で提案した計算方法及び2.3節で精度検証された解析ソフトTB2D/BEMを用いて、日本で多く用いられる代表的な窓と躯体の納まりにおける窓と躯体との間の線熱貫流率 $\Psi_b$ を算出する。

### 2.4.1 $\Psi_b$ 算出対象

$\Psi_b$ の算出対象を表2.4.1に示す。計算対象は、日本の住宅で多く使われている窓フレームの材質、窓の種類、躯体工法の組合せとした。

窓フレームの材質は、熱性能の異なるアルミ、アルミ樹脂複合、樹脂、アルミ熱遮断、木の5種類。窓の種類は、開閉形式の違いにより引違い窓、FIX窓、縦すべり出し窓の3種類。これらに加え、最近断熱改修として普及の著しいアルミフレームの引違い窓の室内側に樹脂フレームの引違い窓を後付けした二重窓も対象とした。

グレーディングは、二重窓の外窓を除き、全て普通複層ガラス(FL3+A12+FL3)した。二重窓の外窓は、多く用いられる仕様に合わせて単板(FL3)とした。

躯体は、断熱方法の異なる充填断熱工法と外張断熱工法に加え、RC造、鉄骨造(図2.4.1参照)を加えた4種類とした。なお、ここで扱う鉄骨造は、特定需要家向けの鉄骨造であり、ビル用の鉄骨造とは異なる。

以上の窓フレームの材質、窓の種類、躯体工法の組合せから、標準的に存在する組合せを抜粋し、これらを計算対象とした。

表 2.4.1  $\Psi_b$ 算出対象

躯体の種類 (納まり)	充填断熱工法	外張断熱工法	RC造	鉄骨造
窓フレームの材質	アルミ アルミ樹脂複合 樹脂 アルミ熱遮断 木	アルミ アルミ樹脂複合 樹脂 アルミ熱遮断 木	アルミ 樹脂 アルミ熱遮断 木	アルミ樹脂複合
窓の種類	FIX窓 引違い窓 縦すべり出し窓 二重窓	FIX窓 引違い窓 縦すべり出し窓 二重窓	FIX窓 引違い窓 二重窓	縦すべり出し窓

\* 二重窓は外窓がアルミ、内窓が樹脂の引違い窓

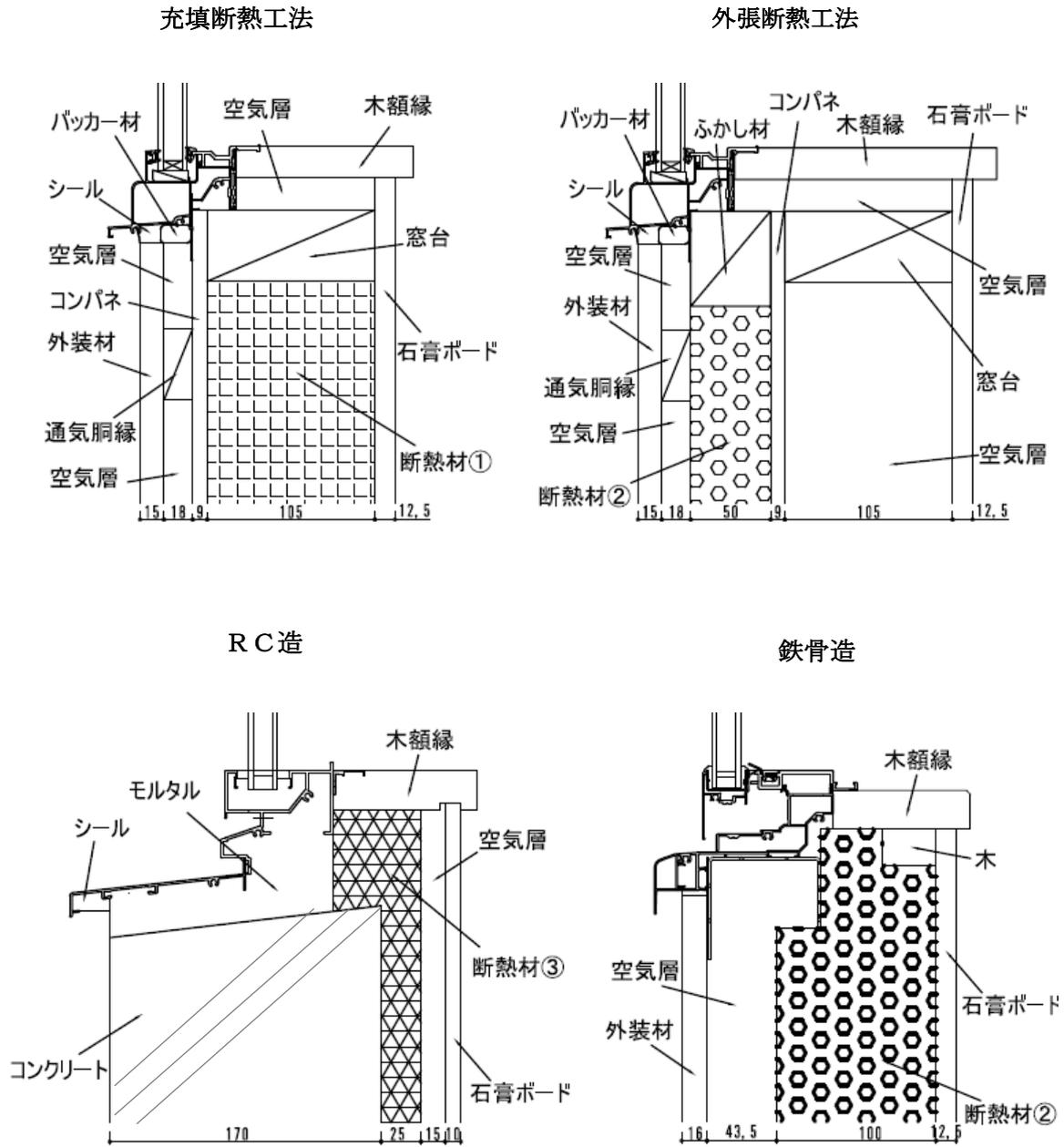


図 2.4.1 各種躯体工法の納まり

### 2.4.2 $\Psi_b$ 算出時の環境条件

$\Psi_b$  算出時の環境条件を表 2.4.2 に示す。環境条件は、JISA2102-2 に従い、室内外の温度は、室内側 20℃、室外側 0℃、内外温度差は 20℃ (=  $\Delta T$ ) とした。表面熱伝達率は、放射と対流を合わせた総合熱伝達率として、室内側一般部 7.69W/(m<sup>2</sup>·K)、室内側隅角部 5.00W/(m<sup>2</sup>·K)、室外側 25.0W/(m<sup>2</sup>·K) とした。

表 2.4.2  $\Psi_b$  算出時の環境条件

時期		冬期	
雰囲気温度 [°C]	室内側	20	
	室外側	0	
表面熱伝達率 [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	室内側	一般部	7.69
		隅角部	5.00
	室外側		25.0

### 2.4.3 $\Psi_b$ 算出時の材料物性値（熱伝導率）

$\Psi_b$  算出時の各種材料の物性値（熱伝導率）は、表 2.4.3 に示す値を用いた。断面内の個々の空気層については、TB2D/BEM で自動で算出される温度依存性や熱流方向に対する空気層の厚さ、高さ、幅から対流と放射による熱伝達を考慮した等価の熱伝導率を用いることとなる。

表 2.4.3 材料の熱伝導率

材質	熱伝導率 [W/(m·K)]
アルミ	160
樹脂	0.14
木額縁	0.16
ふかし材	0.16
窓台	0.16
通気胴縁	0.16
シール	0.35
外装材	0.62
バッカー材	0.35
コンパネ	0.16
石膏ボード	0.22
コンクリート	1.6
モルタル	1.5
断熱材①	0.05
断熱材②	0.028
断熱材③	0.025

2.4.4  $\Psi_b$ 算出時の解析モデル

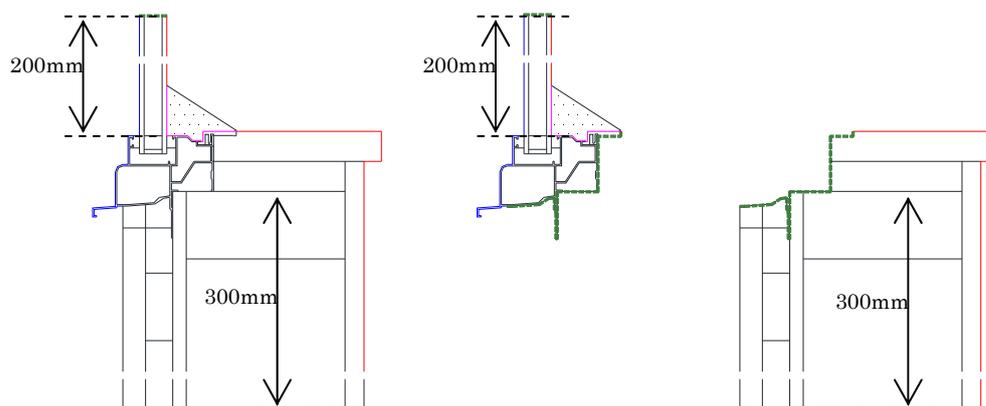
解析モデルを図 2.4.4 に示す。境界条件は、太い緑破線部を断熱境界とし、モデルの左側を室外側境界（青線部）、右側を室内側境界（赤線部）とした。熱伝達率の補正値を適用する室内側隅角部（ピンク線部）は JISA2102-2 に規定された範囲（図 2.3.2-3 参照）とした。なお、躯体部分の隅角部は熱伝達率の補正値を適用しない。

躯体とグレーディング部のモデル化の範囲は、ほぼ 1 次元熱流とみなせる位置までを範囲として、躯体は伝熱開口面積の押え位置から 300mm とし、グレーディング部は JIS の規定（190mm 以上）に従って 200mm とした。

二重窓は、内窓と外窓を一体として扱うモデルで解析を実施した。内窓は設置位置に規定が無いいため、本解析では室内側木額縁端部から 5mm の位置とした。

## 解析モデル例（二重窓を除く）

（例：アルミフレーム FIX 窓下部 充填断熱工法）



## 二重窓 解析モデル例

（例：二重窓下部 充填断熱工法）

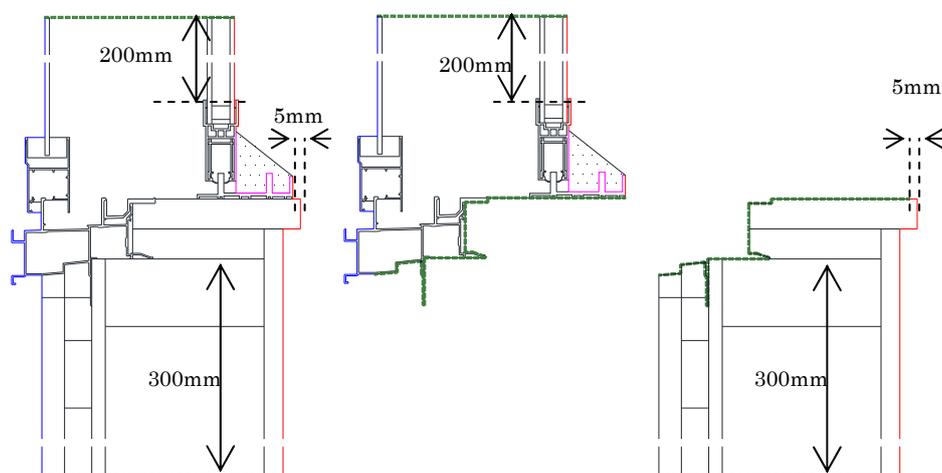


図 2.4.4 解析モデル

#### 2.4.5 $\Psi_b$ 算出結果

$\Psi_b$  の計算結果を表 2.4.5-1～2.4.5-13 に示す。表 2.4.5-1～2.4.5-3 がアルミフレーム、表 2.4.5-4～2.4.5-6 がアルミ樹脂複合フレーム、表 2.4.5-7～2.4.5-9 が樹脂フレーム、表 2.4.5-10 が二重窓、表 2.4.5-11～2.4.5-12 が木フレーム、表 2.4.5-13～2.4.5-14 がアルミ熱遮断フレームとなる。

なお、表中の窓-躯体間の平均線熱貫流率 ( $\Psi_{bt}$ ) とは、住宅性能評価機関等連絡協議会で定められた「サッシ等の遮音性能、熱貫流率及び気密性能に関し試験体と同等の性能を有すると認められる評価品の範囲を定める基準」<sup>16)</sup> で規定されている寸法によるもので、断熱試験及び計算における各窓種の代表的な寸法の開口部一窓当りの窓と躯体の間の平均線熱貫流率であり、(2.4.5) 式により算出されたものである。

$$\Psi_{bt} = \frac{\sum(\Psi_{bi} \times l_i)}{L} \quad \dots (2.4.5)$$

$\Psi_{bt}$  : 開口部一窓当りの窓と躯体の間の平均線熱貫流率 [W/(m·K)]

$\Psi_b$  : 窓と躯体の間の線熱貫流率 [W/(m·K)]

$l$  : 分担の長さ (部位の長さ) [m]

$L$  : 開口部周長 [m]

$i$  : 部位

表 2.4.5-1～2.4.5-13 の結果から、全ての組合せで窓と躯体の間に熱流が生じていることが確認できる。また、 $\Psi_b$  は全て正の値であることから、全ての組合せで、窓と躯体を一体として計算する方が窓と躯体を分けて計算する場合に比べ、熱移動量が大きいことが確認できる。熱流の大きさは、各々の部位で数値の大小は見られるが全て 0.30W/(m·K)以下となる。 $\Psi_{bt}$  は、RC 造を除くとフレームの材質毎に大まかに分類でき、アルミ及びアルミ樹脂複合は 0.08～0.10W/(m·K)、樹脂、アルミ熱遮断及び木は 0.03～0.05W/(m·K)程度となる。

表 2.4.5-1 アルミフレーム引違い窓  $\Psi_b$  算出結果

引違い窓	サイズ (m)	W		H			
		1.69	1.37				
充填断熱工法	アルミ	内障子 上部	内障子 下部	内障子 縦部	外障子 上部	外障子 下部	外障子 縦部
通過熱流量 [W/m]	モデルA	23.833	23.727	24.216	34.542	33.115	27.789
	モデルB	18.824	17.981	18.398	29.653	28.360	22.370
	モデルC	3.280	2.994	3.974	3.280	2.994	3.974
	$L_{QB}$	1.729	2.752	1.845	1.609	1.761	1.445
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.086	0.138	0.092	0.080	0.088	0.072
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		11.141					
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.091					
外張断熱工法	アルミ	内障子 上部	内障子 下部	内障子 縦部	外障子 上部	外障子 下部	外障子 縦部
通過熱流量 [W/m]	モデルA	24.426	24.408	24.025	34.717	33.605	27.508
	モデルB	18.824	17.981	18.398	29.653	28.360	22.370
	モデルC	3.521	3.214	3.521	3.521	3.214	3.521
	$L_{QB}$	2.081	3.213	2.107	1.544	2.032	1.618
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.104	0.161	0.105	0.077	0.102	0.081
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		12.597					
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.103					
RC造	アルミ	内障子 上部	内障子 下部	内障子 縦部	外障子 上部	外障子 下部	外障子 縦部
通過熱流量 [W/m]	モデルA	27.554	29.986	26.779	34.192	36.466	29.494
	モデルB	21.462	23.765	20.774	24.823	30.784	22.030
	モデルC	4.679	4.399	4.945	4.679	4.399	4.945
	$L_{QB}$	1.414	1.822	1.060	4.691	1.283	2.519
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.071	0.091	0.053	0.235	0.064	0.126
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		12.687					
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.104					

表 2.4.5-2 アルミフレームFIX窓 $\Psi_b$ 算出結果

FIX窓		サイズ(m)		W	H
		1.235	1.37		
充填断熱工法	アルミ	上部	下部	縦部	
通過熱流量 [W/m]	モデルA	22.616	20.713	23.152	
	モデルB	18.120	15.724	17.923	
	モデルC	3.281	3.054	3.974	
	$L_{QB}$	1.216	1.936	1.255	
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.061	0.097	0.063	
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		7.330			
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.070			
外張断熱工法	アルミ	上部	下部	縦部	
通過熱流量 [W/m]	モデルA	23.152	21.434	22.902	
	モデルB	18.120	15.724	17.923	
	モデルC	3.521	3.258	3.522	
	$L_{QB}$	1.511	2.452	1.458	
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.076	0.123	0.073	
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		8.889			
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.085			
RC造	アルミ	上部	下部	縦部	
通過熱流量 [W/m]	モデルA	24.549	23.516	24.444	
	モデルB	17.933	17.505	17.935	
	モデルC	4.684	4.439	4.985	
	$L_{QB}$	1.932	1.572	1.523	
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.097	0.079	0.076	
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		8.501			
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.082			

表 2.4.5-3 アルミフレーム縦すべり出し窓  $\Psi_b$  算出結果

縦すべり出し窓		サイズ(m)		W	H
		0.64	1.37		
充填断熱工法	アルミ	上部	下部	縦部 (戸先)	縦部 (吊元)
通過熱流量 [W/m]	モデルA	26.311	26.192	27.890	27.890
	モデルB	21.828	21.271	22.695	22.695
	モデルC	3.281	3.054	3.973	3.973
	$L_{QB}$	1.203	1.868	1.222	1.222
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.060	0.093	0.061	0.061
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		5.313			
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.066			
外張断熱工法	アルミ	上部	下部	縦部 (戸先)	縦部 (吊元)
通過熱流量 [W/m]	モデルA	26.681	26.713	27.590	27.590
	モデルB	21.828	21.271	22.695	22.695
	モデルC	3.521	3.258	3.519	3.519
	$L_{QB}$	1.332	2.184	1.377	1.377
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.067	0.109	0.069	0.069
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		6.023			
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.075			

表 2.4.5-4 アルミ樹脂複合フレーム引違い窓  $\Psi_b$  算出結果

引違い窓	サイズ (m)	W		H			
		1.69	1.37				
充填断熱工法	アルミ樹脂複合	内障子 上部	内障子 下部	内障子 縦部	外障子 上部	外障子 下部	外障子 縦部
通過熱流量 [W/m]	モデルA	21.593	22.582	21.326	28.492	26.638	24.120
	モデルB	16.756	16.776	15.435	24.441	21.513	18.592
	モデルC	3.270	2.973	3.962	3.270	2.973	3.962
	$L_{QB}$	1.567	2.833	1.929	0.781	2.152	1.566
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.078	0.142	0.096	0.039	0.108	0.078
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		10.984					
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.090					
外張断熱工法	アルミ樹脂複合	内障子 上部	内障子 下部	内障子 縦部	外障子 上部	外障子 下部	外障子 縦部
通過熱流量 [W/m]	モデルA	22.154	23.263	21.168	28.872	27.201	23.895
	モデルB	16.756	16.776	15.435	24.441	21.513	18.592
	モデルC	3.508	3.192	3.510	3.508	3.192	3.510
	$L_{QB}$	1.890	3.295	2.223	0.922	2.496	1.793
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.094	0.165	0.111	0.046	0.125	0.090
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		12.772					
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.104					

表 2.4.5-5 アルミ樹脂複合フレームFIX窓  $\Psi_b$  算出結果

FIX窓	サイズ (m)	W		H			
		1.235	1.37				
充填断熱工法	アルミ樹脂複合	上部	下部	縦部			
通過熱流量 [W/m]	モデルA	19.662	20.319	20.363			
	モデルB	14.854	15.202	14.849			
	モデルC	3.270	3.039	3.963			
	$L_{QB}$	1.539	2.078	1.551			
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.077	0.104	0.078			
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		8.717					
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.084					
外張断熱工法	アルミ樹脂複合	上部	下部	縦部			
通過熱流量 [W/m]	モデルA	20.172	20.855	20.153			
	モデルB	14.854	15.202	14.849			
	モデルC	3.508	3.240	3.511			
	$L_{QB}$	1.810	2.414	1.793			
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.091	0.121	0.090			
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		10.129					
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.097					

表 2.4.5-6 アルミ樹脂複合フレーム縦すべり出し窓  $\Psi_b$  算出結果

縦すべり出し窓		サイズ(m)		W	H
		0.64	1.37		
充填断熱工法	アルミ樹脂複合	上部	下部	縦部 (戸先)	縦部 (吊元)
通過熱流量 [W/m]	モデルA	22.229	23.129	24.122	24.122
	モデルB	17.401	18.257	18.648	18.648
	モデルC	3.270	3.040	3.963	3.963
	$L_{QB}$	1.558	1.831	1.512	1.512
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.078	0.092	0.076	0.076
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		6.311			
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.078			
外張断熱工法	アルミ樹脂複合	上部	下部	縦部 (戸先)	縦部 (吊元)
通過熱流量 [W/m]	モデルA	22.711	23.630	23.874	23.874
	モデルB	17.401	18.257	18.648	18.648
	モデルC	3.508	3.242	3.511	3.511
	$L_{QB}$	1.802	2.131	1.715	1.715
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.090	0.107	0.086	0.086
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		7.217			
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.090			
鉄骨造	アルミ樹脂複合	上部	下部	縦部 (戸先)	縦部 (吊元)
通過熱流量 [W/m]	モデルA	13.869	13.689	20.796	20.796
	モデルB	10.554	10.998	15.297	15.297
	モデルC	1.960	1.985	4.097	4.097
	$L_{QB}$	1.355	0.707	1.402	1.402
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.068	0.035	0.070	0.070
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		5.161			
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.064			

表 2.4.5-7 樹脂フレーム引違い窓  $\Psi_b$  算出結果

引違い窓		サイズ (m)					
		W	H				
		1.69	1.37				
充填断熱工法	樹脂	内障子 上部	内障子 下部	内障子 縦部	外障子 上部	外障子 下部	外障子 縦部
通過熱流量 [W/m]	モデルA	20.975	22.289	21.531	23.689	24.883	23.720
	モデルB	17.304	18.942	17.047	19.737	21.514	18.966
	モデルC	3.100	3.021	3.825	3.100	3.021	3.825
	$L_{QB}$	0.572	0.326	0.659	0.852	0.348	0.929
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.029	0.016	0.033	0.043	0.017	0.046
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		3.948					
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.032					
外張断熱工法	樹脂	内障子 上部	内障子 下部	内障子 縦部	外障子 上部	外障子 下部	外障子 縦部
通過熱流量 [W/m]	モデルA	21.216	22.566	21.139	23.852	25.027	23.260
	モデルB	17.304	18.942	17.047	19.737	21.514	18.966
	モデルC	3.300	3.233	3.331	3.300	3.233	3.331
	$L_{QB}$	0.611	0.390	0.761	0.814	0.280	0.962
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.031	0.020	0.038	0.041	0.014	0.048
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		4.132					
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.034					
RC造	樹脂	内障子 上部	内障子 下部	内障子 縦部	外障子 上部	外障子 下部	外障子 縦部
通過熱流量 [W/m]	モデルA	23.609	22.925	22.535	26.473	25.465	25.424
	モデルB	19.018	18.075	18.087	19.056	19.579	18.158
	モデルC	4.333	4.186	4.332	4.333	4.186	4.332
	$L_{QB}$	0.258	0.665	0.115	3.085	1.700	2.934
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.013	0.033	0.006	0.154	0.085	0.147
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		9.000					
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.074					

表 2.4.5-8 樹脂フレームFIX窓  $\Psi_b$  算出結果

FIX窓		サイズ(m)		W	H
		1.235	1.37		
充填断熱工法	樹脂	上部	下部	縦部	
通過熱流量 [W/m]	モデルA	17.621	17.553	18.375	
	モデルB	13.782	13.782	13.737	
	モデルC	3.231	3.157	3.998	
	$L_{QB}$	0.608	0.614	0.640	
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.030	0.031	0.032	
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		3.262			
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.031			
外張断熱工法	樹脂	上部	下部	縦部	
通過熱流量 [W/m]	モデルA	17.877	17.818	18.003	
	モデルB	13.782	13.782	13.737	
	モデルC	3.482	3.414	3.555	
	$L_{QB}$	0.613	0.622	0.711	
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.031	0.031	0.036	
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		3.475			
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.033			
RC造	樹脂	上部	下部	縦部	
通過熱流量 [W/m]	モデルA	19.153	19.442	19.124	
	モデルB	13.777	14.322	13.746	
	モデルC	4.306	4.220	4.305	
	$L_{QB}$	1.071	0.900	1.072	
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.054	0.045	0.054	
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		5.372			
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.052			

表 2.4.5-9 樹脂フレーム縦すべり出し窓  $\Psi_b$  算出結果

縦すべり出し窓		サイズ(m)			
		W	H		
		0.64	1.37		
充填断熱工法	樹脂	上部	下部	縦部 (戸先)	縦部 (吊元)
通過熱流量 [W/m]	モデルA	19.538	19.469	20.154	20.660
	モデルB	15.687	15.687	15.535	16.041
	モデルC	3.231	3.157	3.998	3.998
	$L_{QB}$	0.620	0.625	0.621	0.622
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.031	0.031	0.031	0.031
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		2.499			
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.031			
外張断熱工法	樹脂	上部	下部	縦部 (戸先)	縦部 (吊元)
通過熱流量 [W/m]	モデルA	19.777	19.715	19.770	20.280
	モデルB	15.687	15.687	15.535	16.041
	モデルC	3.482	3.414	3.555	3.555
	$L_{QB}$	0.607	0.614	0.680	0.685
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.030	0.031	0.034	0.034
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		2.652			
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.033			

表 2.4.5-10 引違い窓（二重窓） $\Psi_b$ 算出結果

引違い窓	サイズ(m)	W		H			
		1.69	1.37				
充填断熱工法	二重窓	内障子 上部	内障子 下部	内障子 縦部	外障子 上部	外障子 下部	外障子 縦部
通過熱流量 [W/m]	モデルA	14.954	15.760	14.494	14.831	15.829	14.284
	モデルB	10.548	11.088	9.578	10.576	11.413	9.536
	モデルC	3.031	2.860	3.624	3.031	2.860	3.624
	$L_{QB}$	1.375	1.811	1.292	1.224	1.555	1.124
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.069	0.091	0.065	0.061	0.078	0.056
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		8.350					
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.068					
外張断熱工法	二重窓	内障子 上部	内障子 下部	内障子 縦部	外障子 上部	外障子 下部	外障子 縦部
通過熱流量 [W/m]	モデルA	15.751	16.803	14.109	15.157	16.670	13.666
	モデルB	10.548	11.088	9.578	10.576	11.413	9.536
	モデルC	3.262	3.066	3.120	3.262	3.066	3.120
	$L_{QB}$	1.941	2.648	1.412	1.319	2.190	1.011
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.097	0.132	0.071	0.066	0.110	0.051
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		10.162					
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.083					
RC造	二重窓	内障子 上部	内障子 下部	内障子 縦部	外障子 上部	外障子 下部	外障子 縦部
通過熱流量 [W/m]	モデルA	16.288	16.973	15.532	15.956	17.437	15.067
	モデルB	10.780	11.445	10.118	10.857	12.429	10.205
	モデルC	4.414	4.044	4.502	4.414	4.044	4.502
	$L_{QB}$	1.094	1.484	0.912	0.685	0.964	0.360
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.055	0.074	0.046	0.034	0.048	0.018
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		5.314					
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.043					

表 2.4.5-11 木フレーム引違い窓  $\Psi_b$  算出結果

引違い窓	サイズ (m)	W		H			
		1.69	1.37				
充填断熱工法	木	内障子 上部	内障子 下部	内障子 縦部	外障子 上部	外障子 下部	外障子 縦部
通過熱流量 [W/m]	モデルA	22.359	22.174	21.225	22.936	27.133	20.815
	モデルB	18.827	18.285	17.004	19.732	23.811	16.749
	モデルC	3.017	2.866	3.967	3.017	2.866	3.967
	$L_{QB}$	0.515	1.023	0.253	0.188	0.456	0.098
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.026	0.051	0.013	0.009	0.023	0.005
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		2.326					
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.019					
外張断熱工法	木	内障子 上部	内障子 下部	内障子 縦部	外障子 上部	外障子 下部	外障子 縦部
通過熱流量 [W/m]	モデルA	23.669	24.354	21.198	24.001	28.485	20.621
	モデルB	18.827	18.285	17.004	19.732	23.811	16.749
	モデルC	3.940	3.599	3.762	3.940	3.599	3.762
	$L_{QB}$	0.903	2.469	0.432	0.330	1.075	0.111
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.045	0.123	0.022	0.016	0.054	0.006
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		4.780					
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.039					
RC造	木	内障子 上部	内障子 下部	内障子 縦部	外障子 上部	外障子 下部	外障子 縦部
通過熱流量 [W/m]	モデルA	24.039	23.341	22.588	25.484	28.476	22.984
	モデルB	18.827	18.285	17.004	19.732	23.811	16.749
	モデルC	4.668	4.335	5.153	4.668	4.335	5.153
	$L_{QB}$	0.544	0.722	0.431	1.085	0.330	1.082
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.027	0.036	0.022	0.054	0.016	0.054
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		4.337					
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.035					

表 2.4.5-12 木フレームFIX窓 $\Psi_b$ 算出結果

FIX窓	サイズ(m)	W	H			
		1.235	1.37			
充填断熱工法	木	上部	下部	縦部		
通過熱流量 [W/m]	モデルA	16.871	17.349	17.821		
	モデルB	13.518	14.075	13.722		
	モデルC	3.050	2.963	3.954		
	$L_{QB}$	0.304	0.311	0.145		
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.015	0.016	0.007		
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		1.156				
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.011				
外張断熱工法	木	上部	下部	縦部		
通過熱流量 [W/m]	モデルA	17.890	19.103	17.633		
	モデルB	13.518	14.075	13.722		
	モデルC	3.960	3.575	3.768		
	$L_{QB}$	0.413	1.452	0.143		
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.021	0.073	0.007		
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		2.694				
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.026				
RC造	木	上部	下部	縦部		
通過熱流量 [W/m]	モデルA	19.263	19.145	19.888		
	モデルB	13.518	14.075	13.722		
	モデルC	4.667	4.510	5.156		
	$L_{QB}$	1.078	0.560	1.009		
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.054	0.028	0.050		
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		4.787				
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.046				

表 2.4.5-13 アルミ熱遮断フレーム引違い窓  $\Psi_b$  算出結果

引違い窓	サイズ(m)	W		H			
		1.69	1.37				
RC造	アルミ熱遮断	内障子 上部	内障子 下部	内障子 縦部	外障子 上部	外障子 下部	外障子 縦部
通過熱流量 [W/m]	モデルA	25.925	27.333	24.951	36.935	35.151	27.765
	モデルB	20.791	22.271	20.063	30.737	30.795	21.832
	モデルC	4.277	3.901	4.376	4.277	3.901	4.376
	$L_{QB}$	0.858	1.161	0.511	1.921	0.455	1.557
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.043	0.058	0.026	0.096	0.023	0.078
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		6.548					
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.053					

表 2.4.5-14 アルミ熱遮断フレームFIX窓  $\Psi_b$  算出結果

FIX窓	サイズ(m)	W		H			
		1.235	1.37				
RC造	アルミ熱遮断	上部	下部	縦部			
通過熱流量 [W/m]	モデルA	22.586	22.634	22.607			
	モデルB	17.227	17.826	17.182			
	モデルC	4.379	3.903	4.378			
	$L_{QB}$	0.980	0.905	1.047			
線熱貫流率 [W/(m·K)]	$\Psi_b$	0.049	0.045	0.052			
窓-躯体間総合通過熱流量 [W]		5.197					
窓-躯体間総合線熱貫流率 [W/(m·K)]		0.050					

次に、各々の結果を詳しく考察する。様々な比較がし易いように、表 2.4.5-1～2.4.5-13 の $\Psi_b$ 値をフレームの材質と開閉形式毎に分類しグラフ化した結果を図2.4.5-1～2.4.5-14に示す。図 2.4.5-1～2.4.5-6 が引違い窓、図 2.4.5-7～2.4.5-11 が FIX 窓、図 2.4.5-12～2.4.5-14 が縦すべり出し窓となる。

全体的な傾向としては、アルミやアルミ樹脂複合の $\Psi_b$ 値が大きく、樹脂や木の値が小さくなっており、概ねフレームの主となる材質の熱伝導率が高いほど $\Psi_b$ は大きくなっている。しかし、RC 造の樹脂フレーム引違い窓の外障子上部や外障子縦部は、樹脂フレームにも関わらず比較的大きな値となっている。これは、図 2.4.5-15 に示すように構造補強用のスチールが影響を受けやすい個所に設けられているためと考えられる。また、これは躯体の構成も関係していると考えられる。RC 造以外の納まりは、窓と接触している部分のほとんどが空気層や木などの熱伝導率の低いものであるのに対して、RC 造は窓とコンクリートの間に隙間なくモルタルが充填されて納まっている。フレームの室内側から躯体へ伝わる熱流は、モルタルからそのまま外気、もしくはモルタルからコンクリートを經由し外気へ流れ、この部分が一種の構造熱橋となっていると考えられる。RC 造のアルミフレーム引違い窓の外障子上部（図 2.4.5-16 参照）の $\Psi_b$ がその他の値と比較して突出して大きいのも、そのためであると推察される。

次に、充填断熱工法と外張断熱工法では、下部の $\Psi_b$ が大きめに出る傾向がある。これは、下部には防水のための水切りが付いている、もしくは水切りの機能を有する形状となっているため、窓と躯体の接触部分が大きくなるためと考えられる。一方で、鉄骨造では納まりの関係上、上部及び縦部でフレーム室外側露出部が下部より大きくなることで、上部の $\Psi_b$ が下部及び縦部に比べ大きくなり、充填断熱工法や外張断熱工法とは逆の傾向となっている。充填断熱工法と外張断熱工法の結果を見比べると、どの部位でも同程度の値になっている。これは、両工法とも熱伝導率の低い窓台を介して納まっているためと考えられる。

引違い窓では、外障子より内障子の $\Psi_b$ が大きくなる傾向があり、窓の設置位置も $\Psi_b$ に影響があると考えられる。そこで、RC 造において窓の設置位置及び断熱材の施工方法を、図 2.4.5-17 のように変更して $\Psi_b$ の値を比較した。case1～3 はフレームの設置位置を変えたもの、case4 及び case5 はそれぞれ case1 及び case3 のフレームの設置位置で断熱材の施工方法を変えたものである。なお、躯体工法の中で RC 造を選定した理由は、実際の製品において RC 造以外の躯体工法でフレームの設定位置を変えた場合、窓台やフレームの形状が変わってしまい、設置位置以外の影響因子が結果に大きく作用すると考えられたためである。それぞれの $\Psi_b$ の値を図 2.4.5-18 に示す。この結果から、 $\Psi_b$ はフレームの設置位置だけでなく、断熱材の入り方でも値が変化することが確認できる。

以上の結果から、 $\Psi_b$ は概ねフレームの主となる材質の熱伝導率が高い程 $\Psi_b$ は大きくなるが、フレームの形状や設置位置、躯体の構成によっても値が変化することがわかった。

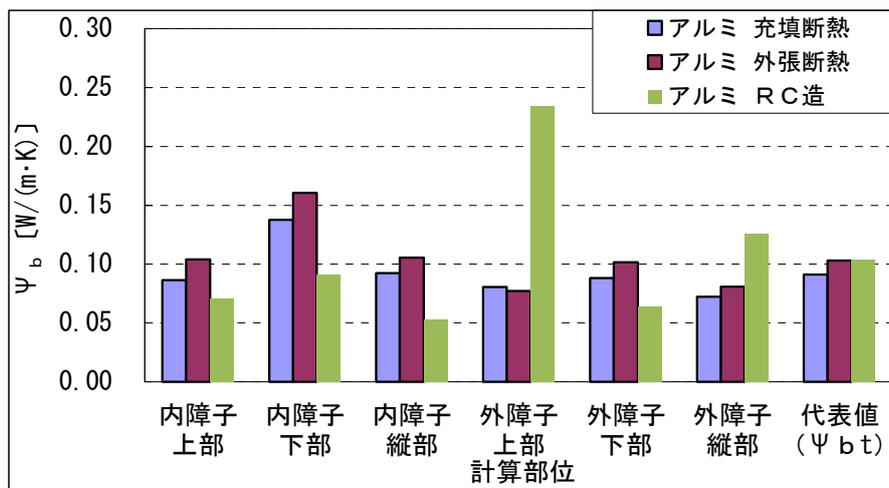


図 2.4.5-1 アルミフレーム引違い窓  $\Psi_b$  算出結果

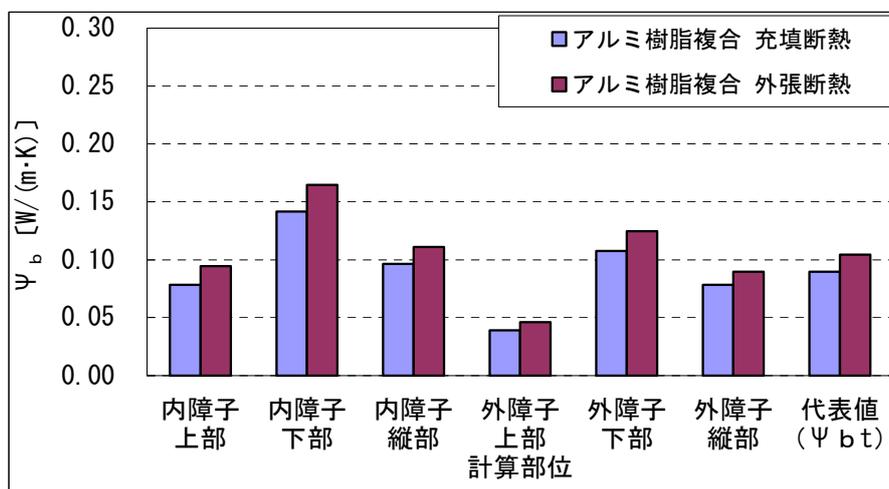


図 2.4.5-2 アルミ樹脂複合フレーム引違い窓  $\Psi_b$  算出結果

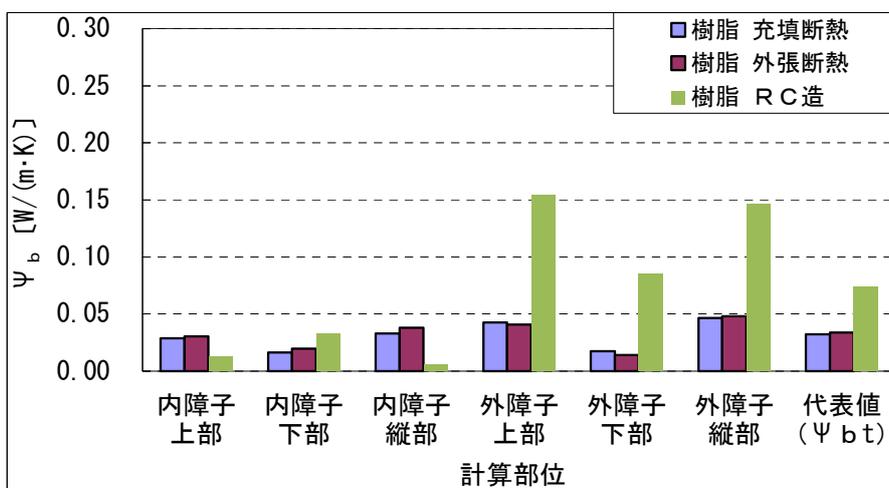


図 2.4.5-3 樹脂フレーム引違い窓  $\Psi_b$  算出結果

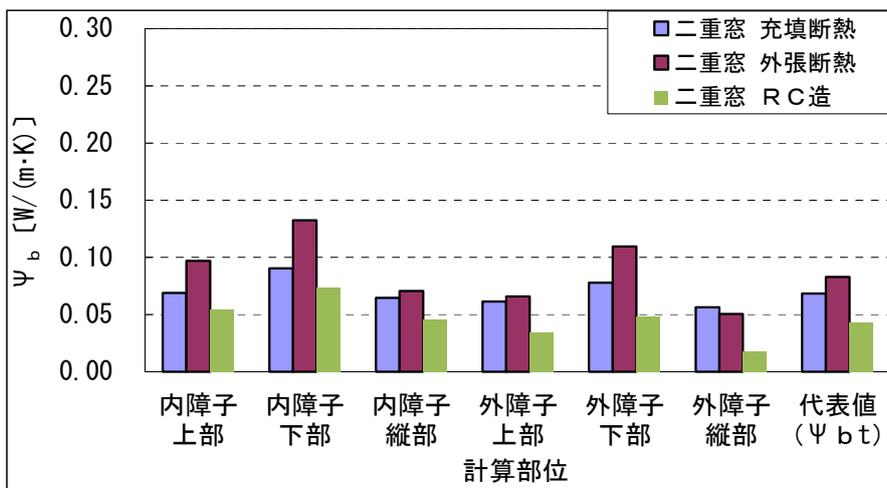


図 2.4.5-4 引違い窓（二重窓） $\Psi_b$ 算出結果

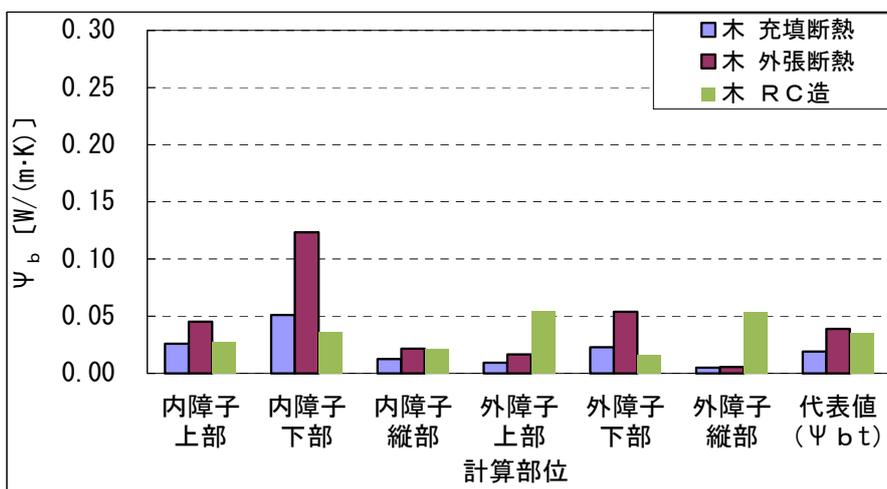


図 2.4.5-5 木フレーム引違い窓 $\Psi_b$ 算出結果

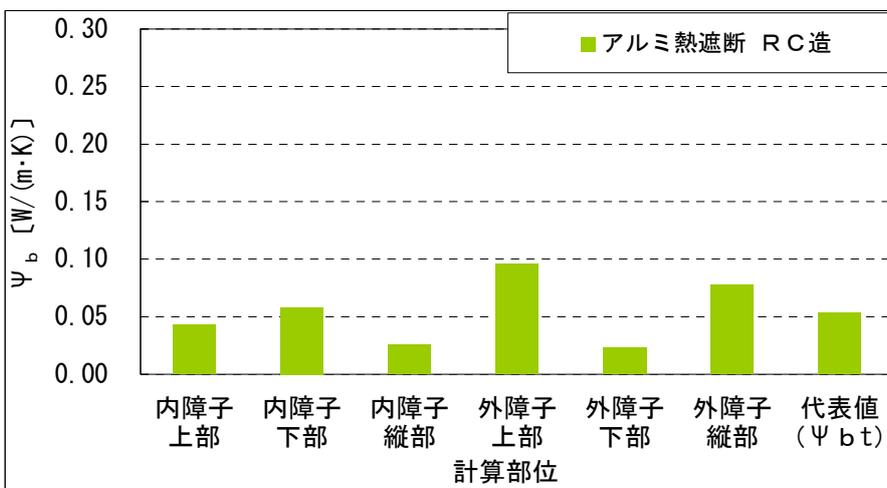


図 2.4.5-6 アルミ熱遮断フレーム引違い窓 $\Psi_b$ 算出結果

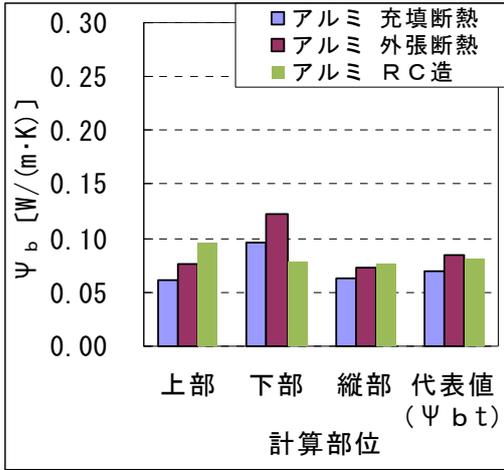


図 2.4.5-7  
アルミフレーム FIX 窓  $\Psi_b$  算出結果

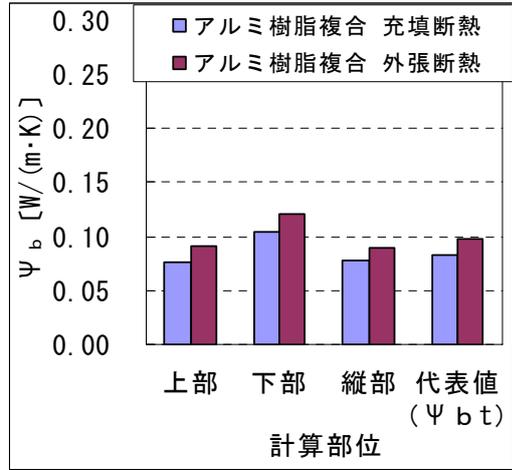


図 2.4.5-8  
アルミ樹脂複合フレーム FIX 窓  $\Psi_b$  算出結果

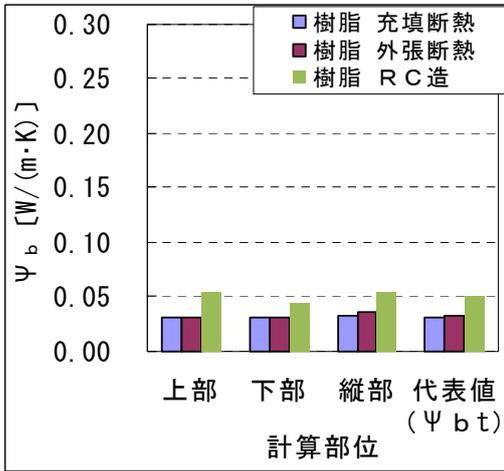


図 2.4.5-9  
樹脂フレーム FIX 窓  $\Psi_b$  算出結果

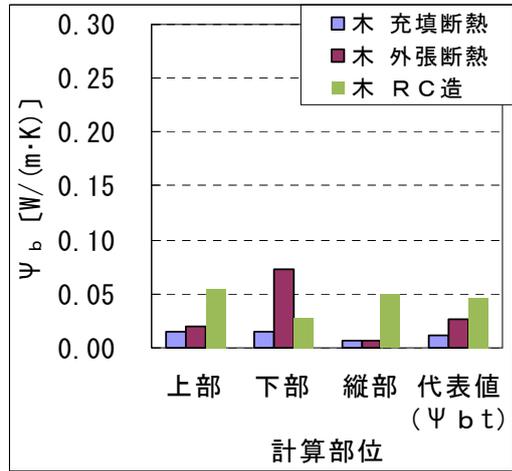


図 2.4.5-10  
木フレーム FIX 窓  $\Psi_b$  算出結果

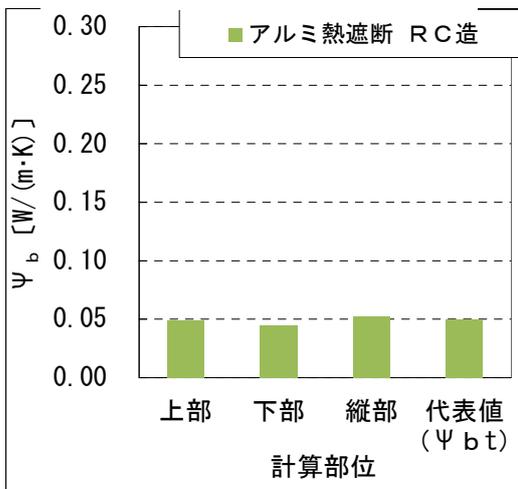


図 2.4.5-11  
アルミ熱遮断フレーム FIX 窓  $\Psi_b$  算出結果

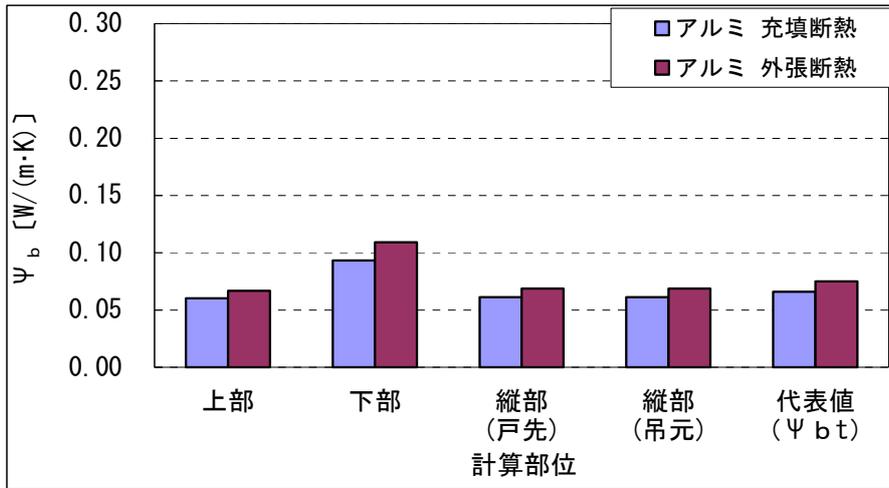


図 2.4.5-12 アルミフレーム縦すべり出し窓  $\Psi_b$  算出結果

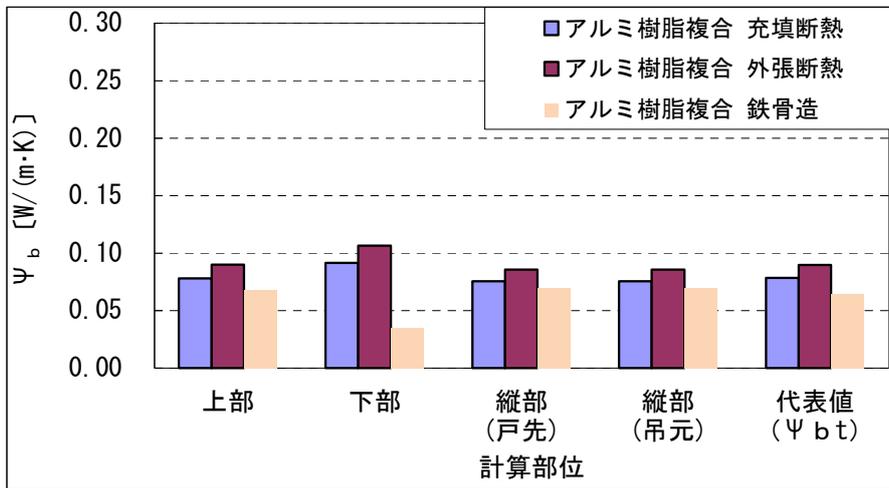


図 2.4.5-13 アルミ樹脂複合フレーム縦すべり出し窓  $\Psi_b$  算出結果

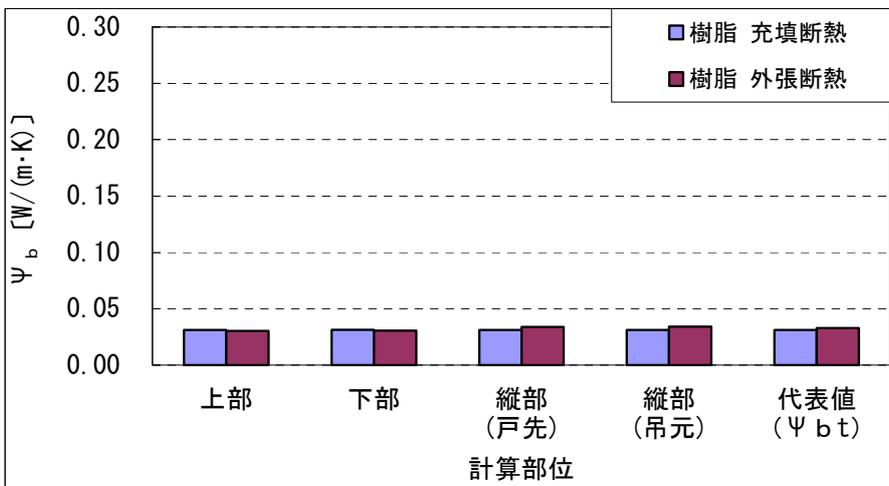


図 2.4.5-14 樹脂フレーム縦すべり出し窓  $\Psi_b$  算出結果

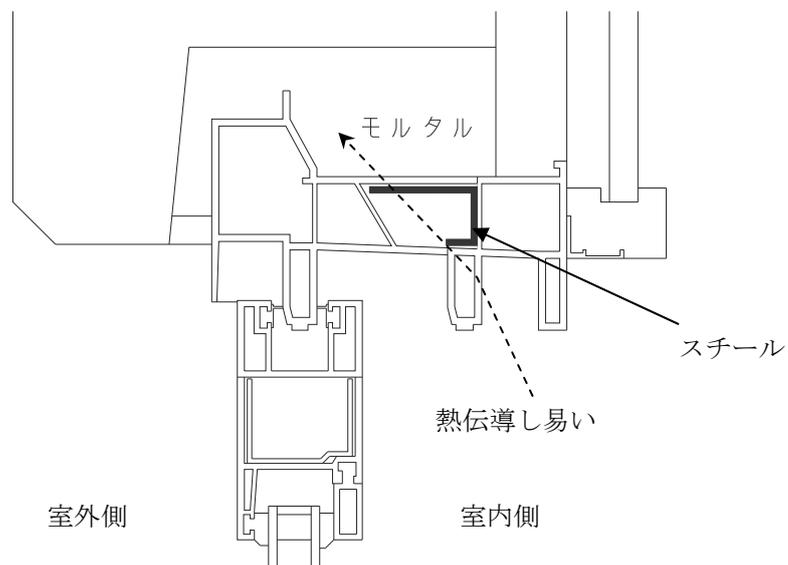


図 2.4.5-15 構造補強材用スチールの入り方 (例: RC造 樹脂引違い窓 外障子上部)

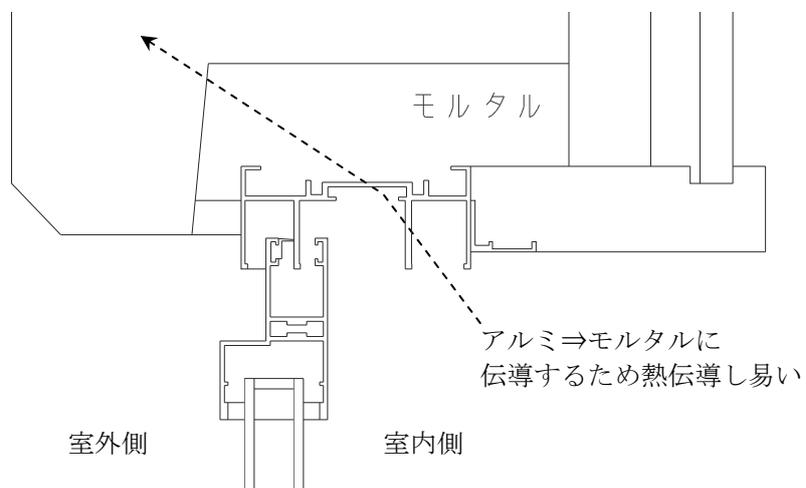


図 2.4.5-16 RC造 アルミ引違い窓 外障子上部

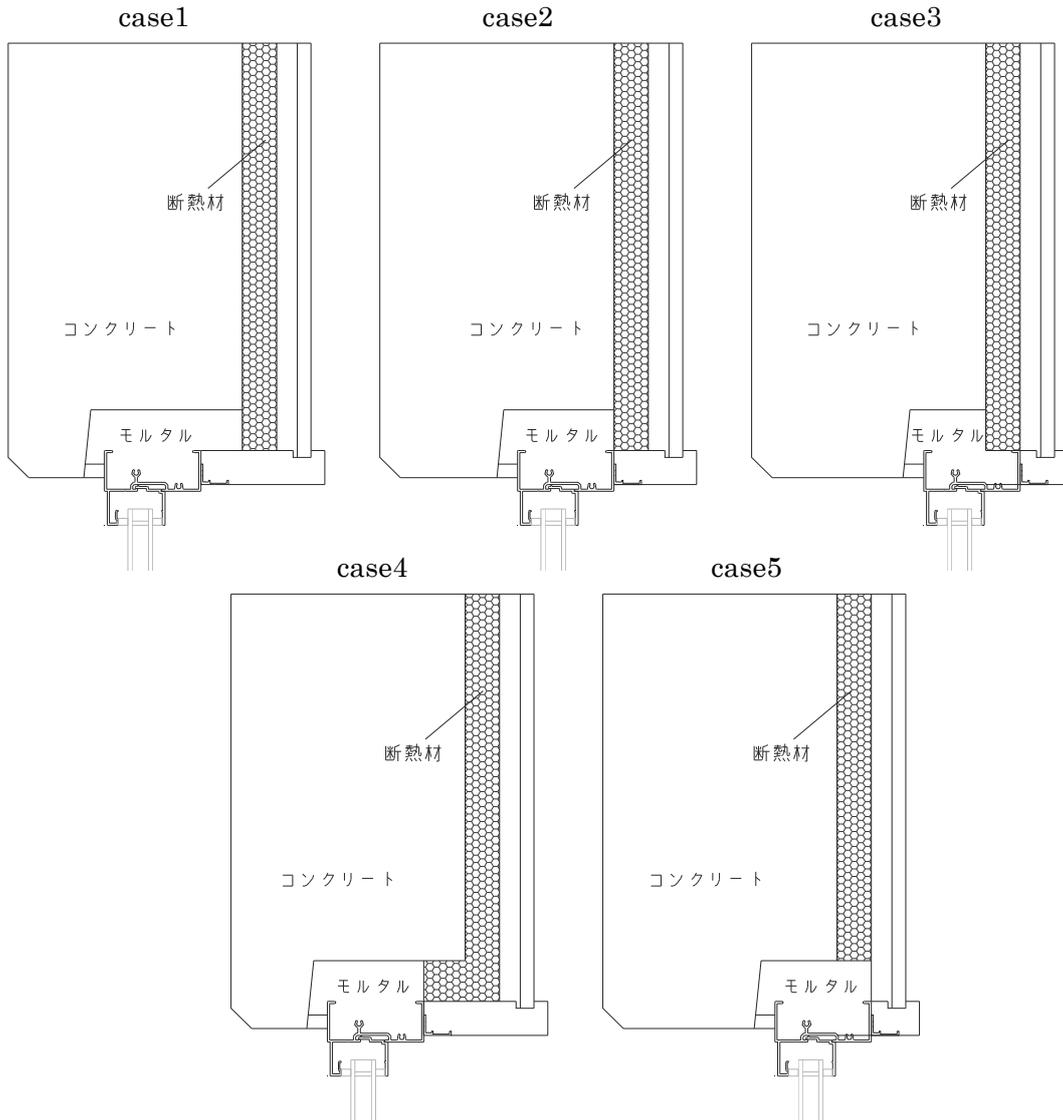


図 2.4.5-17 窓の設置位置及び断熱材の施工方法の変更パターン

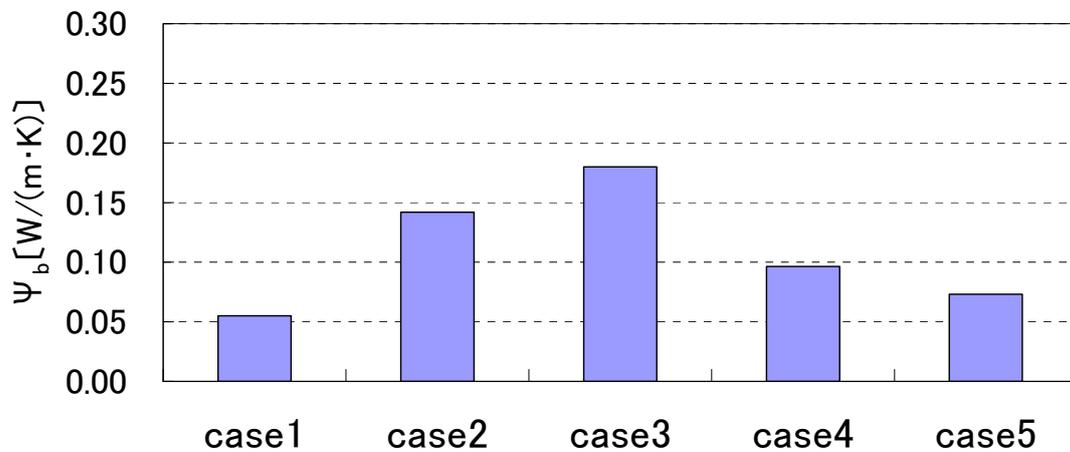


図 2.4.5-18 図 2.4.5-17 の各ケースの  $\Psi_b$

## 2.5 ガラススペーサ部の線熱貫流率 $\Psi_g$ との比較

窓の熱貫流率  $U_w$  は、(2.5-1) 式で算出される。また、ガラススペーサ部線熱貫流率  $\Psi_g$  は、(2.5-2) 式で算出される

$$U_w = \frac{\sum A_g U_g + \sum A_f U_f + \sum l_g \Psi_g}{A_w} \quad \dots (2.5-1)$$

$U_w$  : 窓全体の総合熱貫流率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$U_g$  : ガラス部の熱貫流率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$U_f$  : フレーム部の熱貫流率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$A_w$  : 伝熱開口面積 [m<sup>2</sup>]

$A_g$  : ガラス部の見付面積 [m<sup>2</sup>]

$A_f$  : フレーム部の見付面積 [m<sup>2</sup>]

$l_g$  : ガラス周囲部の長さ [m<sup>2</sup>]

$\Psi_g$  : ガラススペーサ部の線熱貫流率 [W/(m·K)] (単板の場合、 $\Psi_g=0$ )

$$\Psi_g = L_{\Psi}^{2D} - U_f \cdot b_f - U_g \cdot b_g \quad \dots (2.5-2)$$

$\Psi_g$  : 線熱貫流率 [W/(m·K)]

$L_{\Psi}^{2D}$  : ガラスの熱コンダクタンス [W/(m·K)]

$U_f$  : フレームの熱貫流率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$U_g$  : グレージング中央部分の熱貫流率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$b_f$  : フレームの投影幅 [m]

$b_g$  : グレージングの見付け幅 [m]

式 (2.5-1) にガラス周囲部の線熱貫流率 $\Psi_g$ の項があることからわかるように、窓の熱貫流率 $U_w$ を評価する際には、複層ガラスのスペーサ部線熱貫流率 $\Psi_g$ が必要となる。つまり、複層ガラスのスペーサ部線熱貫流率 $\Psi_g$ は、熱性能の評価を行う上で評価対象となっている。一方で、前述したように、窓と躯体との間の線熱貫流率 $\Psi_b$ は熱性能の評価を行う上で評価対象となっていない。ここでは、熱性能の評価を行う上で評価対象となっている複層ガラスのスペーサ部線熱貫流率 $\Psi_g$ と熱性能の評価を行う上で評価対象外となっている窓と躯体との間の線熱貫流率 $\Psi_b$ の比較を行った。

比較対象とする窓と躯体との間の線熱貫流率 $\Psi_b$ は、部位の違いや躯体の種類毎で値が異なってくるため、ここでは標準的な充填断熱工法におけるアルミ、アルミ樹脂複合、樹脂の3種類のフレームの組合せのFIX窓の値の平均値を用いる。対するガラススペーサ部の線熱貫流率 $\Psi_g$ は、JISA2102-1に規定される値(表2.5-1参照)と、JISA2102-2に規定される計算方法に則って式(2.5-2)より算出した普通複層ガラス(FL3+A12+FL3)とアルミ、アルミ樹脂複合、樹脂の3種類のフレームの組合せのFIX窓で算出した値とした。なお、JISA2102-1に規定される値として、今回は、金属スペーサを用いる。また、JISA2102-2に規定される式(2.5-2)より算出したガラススペーサ部の線熱貫流率 $\Psi_g$ も部位によって異なるため、平均値で比較を行った。

比較をした結果まとめたものを表2.5-2に示す。窓と躯体との間の線熱貫流率 $\Psi_b$ をガラススペーサ部の線熱貫流率 $\Psi_g$ と比較すると、アルミフレームではJISA2102-2の規定値で3.5倍、計算値で2.9倍も大きく、アルミ樹脂複合フレームでは規定値で1.2倍、計算値で2.2倍大きい線熱貫流率となる。一方で、樹脂フレームでは規定値では0.5倍、計算値では0.7倍の値となった。

この結果から、アルミやアルミ樹脂複合フレームでは、熱性能の評価対象となっている複層ガラスのスペーサ部線熱貫流率 $\Psi_g$ より、熱性能の評価対象外となっている窓と躯体との間の線熱貫流率 $\Psi_b$ の方が熱流としては大きいものとなり、熱性能評価へ及ぼす影響が大きいことが確認できる。

表 2.5-1 JIS2102-1 に規定されるガラススペーサ部の線熱貫流率  $\Psi_g$

[W/(m·K)]

フレームのタイプ	二層又は三層グレージング (低放射膜なし、空気又はガスを封入したもの)		二層 <sup>a)</sup> 又は三層 <sup>b)</sup> グレージング (低放射膜あり、空気又はガスを封入したもの)	
	金属スペーサ	断熱スペーサ	金属スペーサ	断熱スペーサ
木製又は樹脂製のフレーム	0.06	0.05	0.08	0.06
アルミニウム樹脂複合フレーム	0.07	0.04	0.09	0.05
熱遮断をもつ金属フレーム	0.08	0.06	0.11	0.08
熱遮断のない金属フレーム	0.02	0.01	0.05	0.04

注 <sup>a)</sup> 中空層に面する板ガラス表面のうち片面だけが低放射膜のもの  
<sup>b)</sup> 両外側ガラスの中空層に面する板ガラス表面が両面とも低放射膜のもの

表 2.5-2  $\Psi_b$  と  $\Psi_g$  の比較結果

[W/(m·K)]

		アルミ	アルミ樹脂複合	樹脂
窓と躯体との間の線熱貫流率 ( $\Psi_b$ )		0.07	0.08	0.03
ガラススペーサ部線熱貫流率 ( $\Psi_g$ )	JIS 規定値	0.02 <b>(3.5)</b>	0.07 <b>(1.2)</b>	0.06 <b>(0.5)</b>
	JIS 計算値	0.02 <b>(2.9)</b>	0.04 <b>(2.2)</b>	0.05 <b>(0.7)</b>

( )内は  $\Psi_b/\Psi_g$

## 2.6 躯体の熱性能が $\Psi_b$ に及ぼす影響

ここでは、外張断熱工法の納まりについて、断熱材の厚さや熱伝導率を変えた場合の窓と躯体との間の線熱貫流率 $\Psi_b$ の影響を検討する。

検討する対象を表 2.6-1、表 2.6-2 及び図 2.6-1 に示す。検討対象は、フレームの種類として、アルミ、アルミ樹脂複合、樹脂の3種類とし、躯体に使用される断熱材の種類として、住宅の省エネルギー基準の解説<sup>17)</sup>を参考に、断熱材の厚さと種類（熱伝導率）の異なる3種類とした。

表 2.6-1 計算対象及び計算条件

フレームの種類		アルミ	アルミ樹脂複合	樹脂
窓の種類		FIX窓(嵌め殺し窓)		
ガラス仕様		FL3+A6+FL3	FL3+A12+FL3	FL3+A12+FL3
夏季or冬季		冬季		
日射強度		無し		
温度[°C]	室外	0		
	室内	20		
表面熱伝達率[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	室外	23.26		
	室内	8.94		

表 2.6-2 断熱材の条件

条件	①	②	③
断熱材の厚さ[mm]	50	85	85
断熱材の種類	E	E	A-2
熱伝導率[W/(m·K)]	0.028	0.028	0.050
対応地域	Ⅲ～Ⅴ地域	Ⅰ地域	Ⅲ～Ⅴ地域

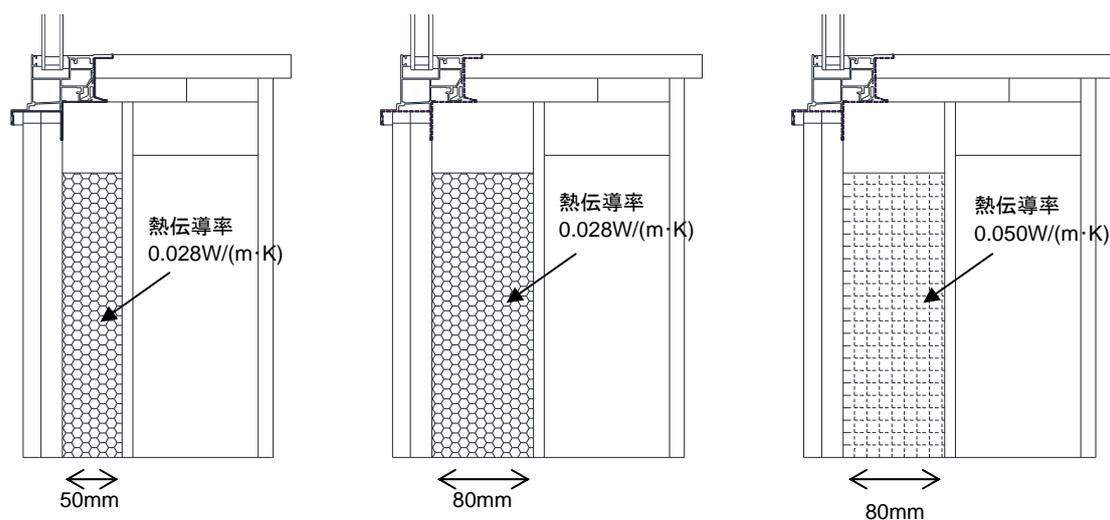


図 2.6-1 躯体の断熱材の条件

解析から得られた通過熱流量 $Q$ と、算出されたフレームと躯体との接触部の通過熱流量 $L_{Q_b}$ 、窓と躯体との間の線熱貫流率 $\Psi_b$ を表 2.6-3 に示す。また、比較をし易いように $\Psi_b$ をグラフにした結果を図 2.6-2 に示す。

断熱材の条件の違いによる影響に着目すると、各モデルの通過熱流量 $Q$ の値に違いが見られるにも関わらず、窓と躯体との接触部の通過熱流量 $L_{Q_b}$ 、窓と躯体との間の線熱貫流率 $\Psi_b$ の値には大きな違いが見られないことがわかる。これは、断熱材の厚さや熱伝導率を変えることで全体の通過熱流量が変化しても、フレームと躯体との接触部における熱移動量はほぼ一定であることを示している。

表 2.6-3 各モデルの通貨熱流量及び $\Psi_b$ 算出結果

部位	フレームの種類 断熱材の条件		アルミ			アルミ樹脂複合			樹脂		
			①	②	③	①	②	③	①	②	③
上部	モデルA	W/m	22.35	21.50	22.25	17.92	17.30	17.77	13.33	12.50	13.27
	モデルB		16.79	16.79	16.79	12.60	12.60	12.60	8.64	8.64	8.64
	モデルC		3.33	2.64	3.34	3.33	2.64	3.34	3.38	2.69	3.38
	$L_{Q_b}$	W/m	2.24	2.07	2.12	1.99	2.05	1.83	1.30	1.17	1.24
	$\Psi_b$	W/(m·K)	0.11	0.10	0.11	0.10	0.10	0.09	0.07	0.06	0.06
下部	モデルA	W/m	22.49	21.61	22.36	16.61	15.72	16.24	13.28	12.45	13.24
	モデルB		16.82	16.82	16.82	10.95	10.95	10.95	8.64	8.64	8.64
	モデルC		3.35	2.66	3.37	3.35	2.66	3.37	3.35	2.65	3.37
	$L_{Q_b}$	W/m	2.32	2.12	2.16	2.31	2.12	1.92	1.29	1.16	1.23
	$\Psi_b$	W/(m·K)	0.12	0.11	0.11	0.12	0.11	0.10	0.06	0.06	0.06
縦部	モデルA	W/m	20.73	20.22	20.78	15.75	15.20	15.82	12.84	12.32	12.88
	モデルB		15.81	15.81	15.81	10.67	10.67	10.67	8.58	8.58	8.58
	モデルC		3.56	3.06	3.63	3.56	3.06	3.63	3.43	2.93	3.50
	$L_{Q_b}$	W/m	1.36	1.35	1.34	1.52	1.47	1.52	0.82	0.81	0.81
	$\Psi_b$	W/(m·K)	0.07	0.07	0.07	0.08	0.07	0.08	0.04	0.04	0.04

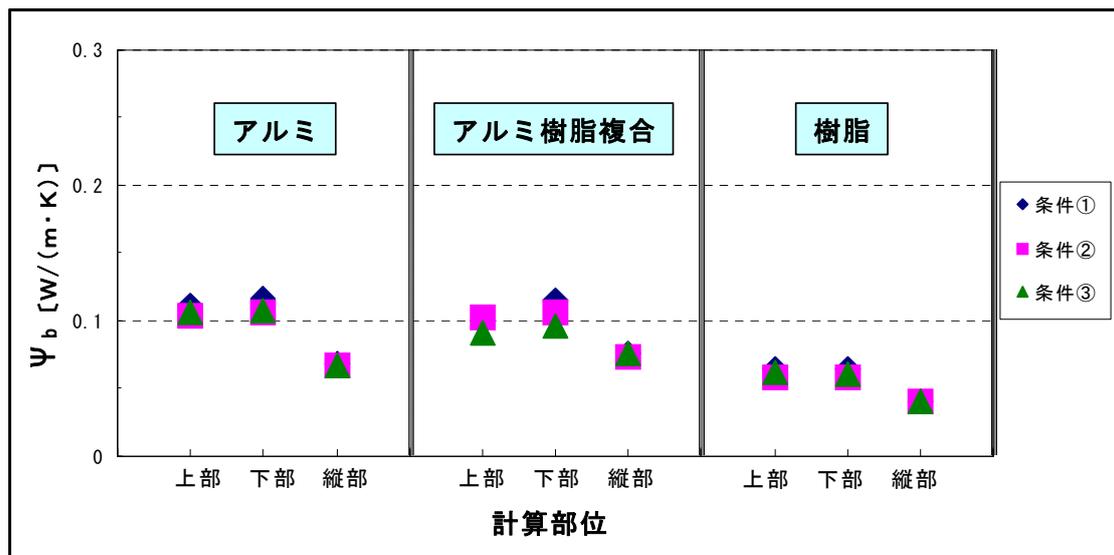


図 2.6-2 各条件の $\Psi_b$ 算出結果

## 2.7 まとめ

第2章では、この窓と躯体の間の熱流を定量化する計算方法を提案し、幾つかの代表的な窓と躯体の組合せについて、窓と躯体との間の熱流を線熱貫流率 $\Psi_b$ として算出した結果を報告し考察した。また、使用する解析ソフトの精度検証や、窓と躯体の間の線熱貫流率 $\Psi_b$ を熱性能の評価対象となっている複層ガラスのスペーサ部線熱貫流率 $\Psi_g$ との比較、躯体の熱性能が窓と躯体の間の線熱貫流率 $\Psi_b$ に及ぼす影響についての確認を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- ① 2次元境界要素法計算プログラム TB2D/BEM は、JIS2102-2 に規定される 9 つ全ての検証例題において、解析結果の 2次元熱コンダクタンス ( $L^{2D}$ ) が、規定された値の 3% 以内となることが確認された。このことから、TB2D/BEM は、窓の熱性能計算法 JIS の適用基準を満たす精度を持つ解析プログラムであることが確認された。
- ② 全ての組合せの窓と躯体の間で、熱流が生じていることが確認できた。また、 $\Psi_b$  は全て正の値であることから、全ての組合せで窓と躯体を一体として計算する方が窓と躯体を分けて計算する場合に比べ、熱移動量が大きいことが確認できた。熱流の大きさは、各々の部位で数値の大小は見られるが全て  $0.30W/(m \cdot K)$  以下であった。 $\Psi_{bt}$  は、RC 造を除くとフレームの材質毎に大まかに分類でき、アルミ及びアルミ樹脂複合は  $0.08 \sim 0.10W/(m \cdot K)$ 、樹脂、アルミ熱遮断及び木は  $0.03 \sim 0.05W/(m \cdot K)$  程度となった。
- ③ 窓と躯体の間の線熱貫流率 $\Psi_b$ は、フレームの設置位置だけでなく断熱材の入り方でも値が変化することが確認でき、概ねフレームの主となる材質の熱伝導率が大きい程 $\Psi_b$ は大きくなる。しかし、フレームの形状や設置位置、躯体の構成によっても値が変化することがわかった。
- ④ 窓と躯体との間の線熱貫流率 $\Psi_b$ をガラススペーサ部の線熱貫流率 $\Psi_g$ と比較すると、アルミフレームでは JIS2102-2 の規定値で 3.5 倍、計算値で 2.9 倍も大きく、アルミ樹脂複合フレームでは規定値で 1.2 倍、計算値で 2.2 倍大きい線熱貫流率となった。一方で、樹脂フレームでは規定値では 0.5 倍、計算値では 0.7 倍の値となった。この結果から、アルミやアルミ樹脂複合フレームでは、熱性能の評価対象となっている複層ガラスのスペーサ部線熱貫流率 $\Psi_g$ より、熱性能の評価対象外となっている窓と躯体との間の線熱貫流率 $\Psi_b$ の方が、熱性能評価へ及ぼす影響が大きいことが確認できた。

- ⑤ 躯体の断熱材の条件の違いによる影響を確認した結果、各モデルの通過熱流量 $Q$ の値に違いが見られるにも関わらず、窓と躯体との接触部の通過熱流量 $L_{qb}$ 、窓と躯体との間の線熱貫流率 $\Psi_b$ の値には大きな違いが見られないことがわかった。これは、断熱材の厚さや熱伝導率を変えることで全体の通過熱流量を変化させても、フレームと躯体との接触部における熱移動はほぼ一定であることを示している。

#### 参考文献

- 1) ISO 12567-1 : Thermal performance of windows and doors - Determination of thermal transmittance by hot box method - Complete windows and doors, 2000
- 2) JIS A 4710 : 建具の断熱性試験方法, (財) 日本規格協会, 2004
- 3) ISO 10077-1 : Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance -- Part 1:General, 2006
- 4) ISO 10077-2 : Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance -- Part 2:Numerical method for frames, 2003
- 5) JIS A 2102-1 : 窓及びドアの熱性能-熱貫流率の計算-第1部:一般, (財) 日本規格協会, 2011
- 6) JIS A 2102-2 : 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方法, (財) 日本規格協会, 2011
- 7) ISO 8990 : Thermal insulation -- Determination of steady-state thermal transmission properties -- Calibrated and guarded hot box, 1994
- 8) JIS A 1420 : 建築用構成材の断熱性測定方法-校正熱箱法及び保護熱箱法, (財) 日本規格協会, 1999
- 9) ISO 6946 : Building components and building elements -- Thermal resistance and thermal transmittance -- Calculation method, 2007
- 10) JIS A 2101 : 建築構成要素及び建築部位-熱抵抗及び熱貫流率-計算方法, (財) 日本規格協会, 2003
- 11) 遮熱計算法に関する研究報告書, 平成13年度 (社) リビングアメニティ協会, 2001
- 12) 遮熱計算法に関する研究報告書, 平成14年度 (社) リビングアメニティ協会, 2002
- 13) 遮熱計算法に関する研究報告書, 平成15年度 (社) リビングアメニティ協会, 2003
- 14) 遮熱計算法に関する研究報告書, 平成16年度 (社) リビングアメニティ協会, 2004
- 15) 遮熱計算法に関する研究報告書, 平成19年度 (社) リビングアメニティ協会, 2007
- 16) サッシ等の遮音性能、熱貫流率及び気密性能に関し試験体と同等の性能を有すると認められる評価品の範囲を定める基準, (社) 住宅性能評価機関等連絡協議会, 2003.12
- 17) 住宅の省エネルギー基準の解説, (財) 建築環境・省エネルギー機構, 2002



第3章 窓と躯体との間の熱移動の実験による評価

---

---



### 3.1 はじめに

第2章では、窓と躯体との間の熱移動について、計算方法を提案し、提案した計算方法から線熱貫流率を算出することで、計算による評価を実施した。第3章では、窓と躯体との間の熱移動について測定を行い、窓と躯体との間の熱移動について実態を把握すると共に、計算結果と測定結果の比較を行う。

なお、測定は茨城県つくば市の独立行政法人 建築研究所保有設備の測定装置を使用して実施する。

### 3.2 測定装置の概要

前述したが、測定は茨城県つくば市にある独立行政法人 建築研究所保有設備の日射熱取得率測定装置<sup>1)</sup>を用いて実施した。本装置は、ISO15099<sup>2)</sup>の計算法に準拠した日射熱取得率測定装置であり、冬期条件だけでなく夏期条件の日射熱取得率を測定できる世界で唯一の装置である。本装置は、太陽光シミュレータ、恒温室、計測箱を持ち、夏期・冬期の条件を切り替え、同一試験体の熱貫流率と日射熱取得率を測定できる特徴を有する。

測定装置の全体構成を図 3.2-1 に示す。

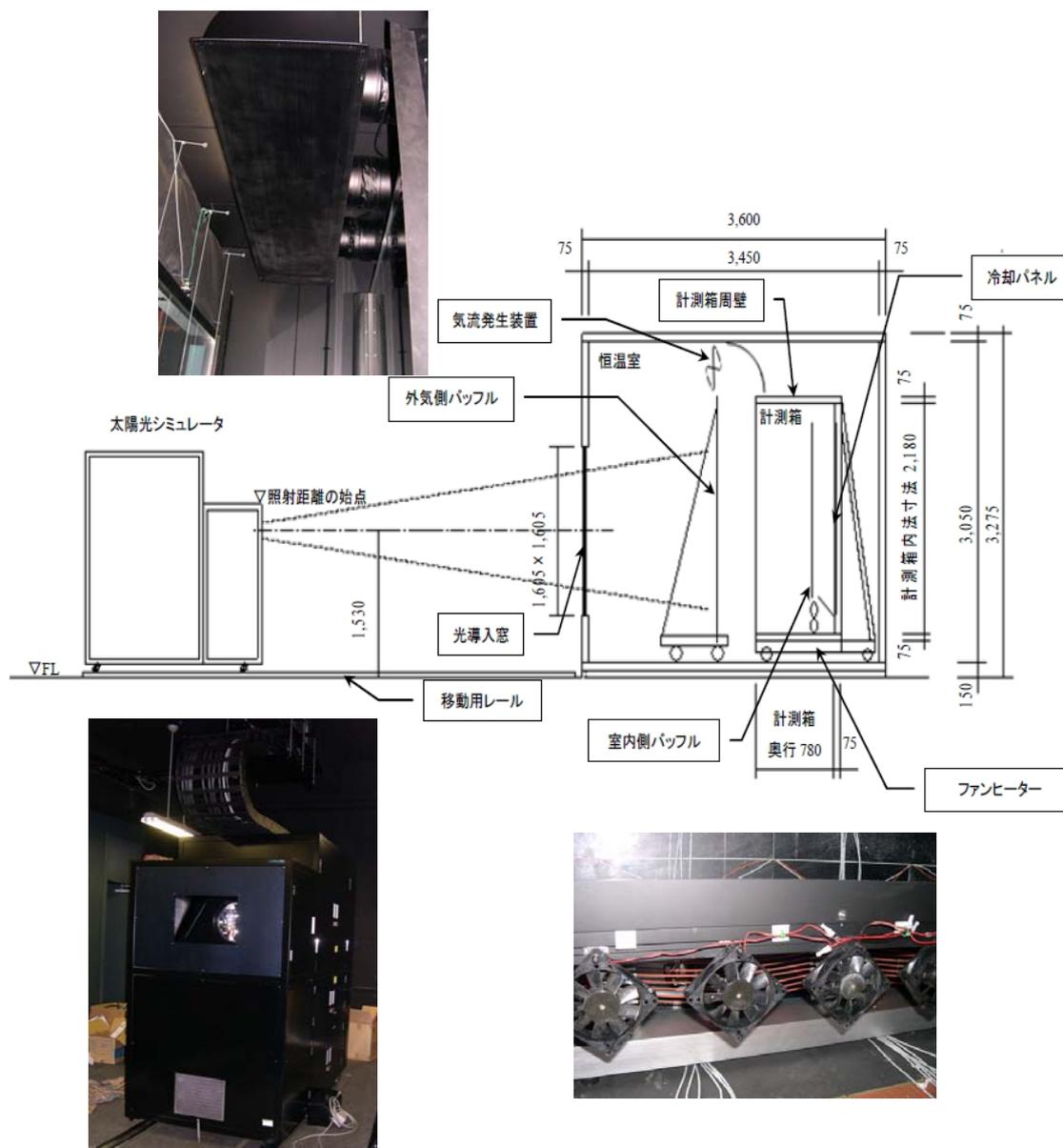


図 3.2-1 日射熱取得率測定装置の全体構成

太陽光シミュレータで照射された光は、光導入窓、外気側バッフルを通過し、試験体に当たり、さらに試験体を透過した光は計測箱のバッフルを透過し冷却パネルに当たる。

恒温室には、光導入用の窓を設け太陽光シミュレータの光が計測箱に取り付けられた試験体に照射されるようになっている。恒温室の設定は温度 $-10^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ で制御精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、湿度は成り行きである。

外気側には、照射光を透過させ外側の赤外放射の影響を遮断するために、試験体取付枠前面に厚さ 5mm の高透過型ガラスのバッフルが設けられている。高透過型ガラスは一般に用いられるフロート板ガラスに比べ、透過率が高く、分光特性もフラットであるために照射光の分光特性をほとんど変化させない仕様となっている。また、ガラスは  $3\mu\text{m}$  以上の赤外放射を透過しないので、バッフルより外側の赤外放射の影響を遮断できる。これにより、バッフルと試験体との間に測定時の屋外環境が形成される。

なお、高透過型ガラスの修正放射率は 0.837、日射反射率は 0.08、日射透過率は 0.90、日射吸収率は 0.02 である。

試験体間の熱伝達率を設定するために、恒温室上部に気流調整用の 300mm  $\phi$  AC200V 軸流ファン 5 台を設置し、試験体前面の空気を吸い込んでいる。

計測箱は 75mm の断熱パネルで構成される（内法寸法 W2,180mm  $\times$  H2,180mm  $\times$  D780mm）。計測箱の構成を図 3.2-2 に示す。試験体と反対側の面には透過した日射熱を除去するための冷却パネルが設けられる。冷却パネルには、外部の恒温槽で温度制御された水が循環するようになっている。また、冷却パネルは室内温度より低めに設定され、室温は後述のヒーターにより制御される。表面には熱流計が全面に貼り付けられ、除去熱量が計測される。熱流計は黒色で表面の放射率は 0.95、日射吸収率は 0.95 である。

計測箱と試験体取付枠の室内側表面全面に熱流計が取り付けられ、試験体以外からの恒温室と計測箱の間の熱量を計測できるようになっている。

計測箱内部には照射光を透過させ冷却パネルからの赤外放射の影響を遮断するために外気側と同様に、厚さ 5mm の高透過型ガラスのバッフルが設けられている。これにより、バッフルと試験体との間に測定時の室内環境が形成される。

なお、高透過型ガラスの修正放射率は、外気側と同様に修正放射率は 0.837、日射反射率は 0.08、日射透過率は 0.90、日射吸収率は 0.02 である。

バッフル下部には熱伝達率の調整と温度の制御のためのファン・ヒーターが取り付けられる。80mm  $\phi$  DC 軸流ファン 8 台が設置され、風速は電源(DC18V2A)の電圧を変更することで調整可能である。温度調整用のシリコン被覆シースヒーターは白金抵抗温度計により、電源(DC32V6A)の電流制御により定温度制御としている。供給電力は電圧、電流を計測することで求める。

試験体取付枠は、合板の間にハニカムコアをサンドイッチした厚さ 142mm のパネルで、 $W : 1.69\text{m}$ 、 $H : 1.37\text{m}$  の窓を取り付ける開口が開いている (図 3.2-3 参照)。計測箱側の表面には、熱流計がほぼ全面に貼られ (図 3.2-4 参照)、試験体取付枠を通過する熱量を計測できるようになっている。熱流計は、計測箱に使用しているものと同じもので、黒色で表面の放射率は 0.95、日射吸収率は 0.95 である。

冷却パネル面以外の計測箱周壁 4 面にも熱流量を計測するために全面に熱流計パネルが全面に貼り付けてある。熱流計は、計測箱及び試験体取付枠に使用しているものと同じもので、黒で表面の放射率は 0.95、日射吸収率は 0.95 である。

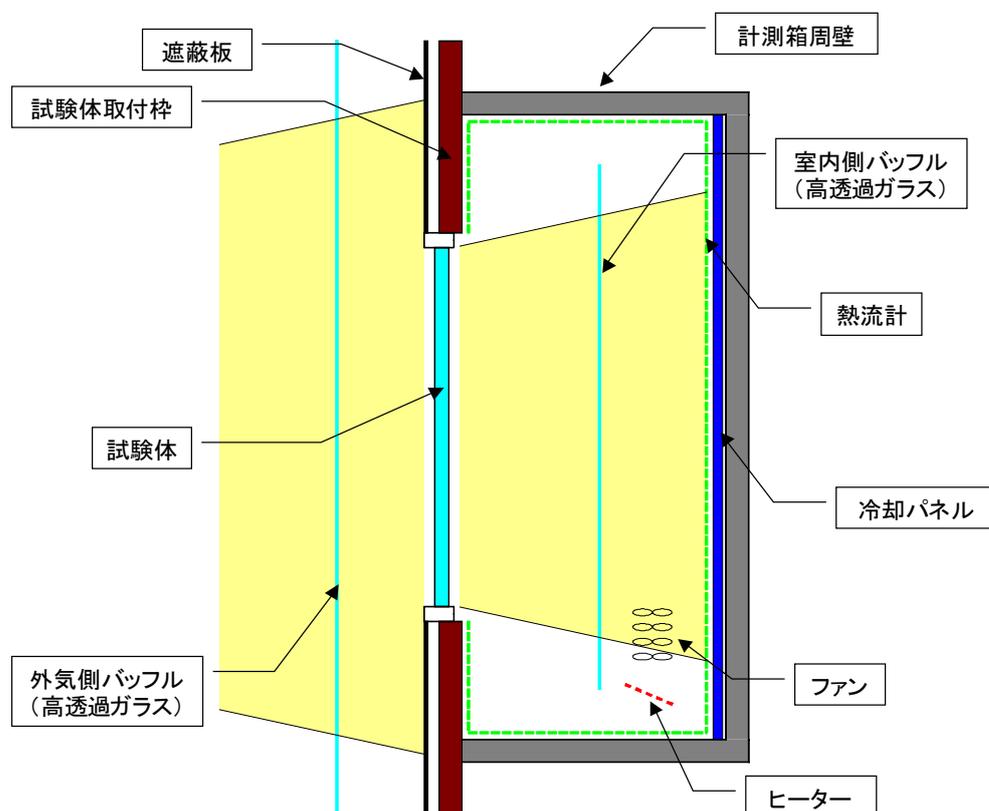


図 3.2-2 日射熱取得率測定装置の全体構成

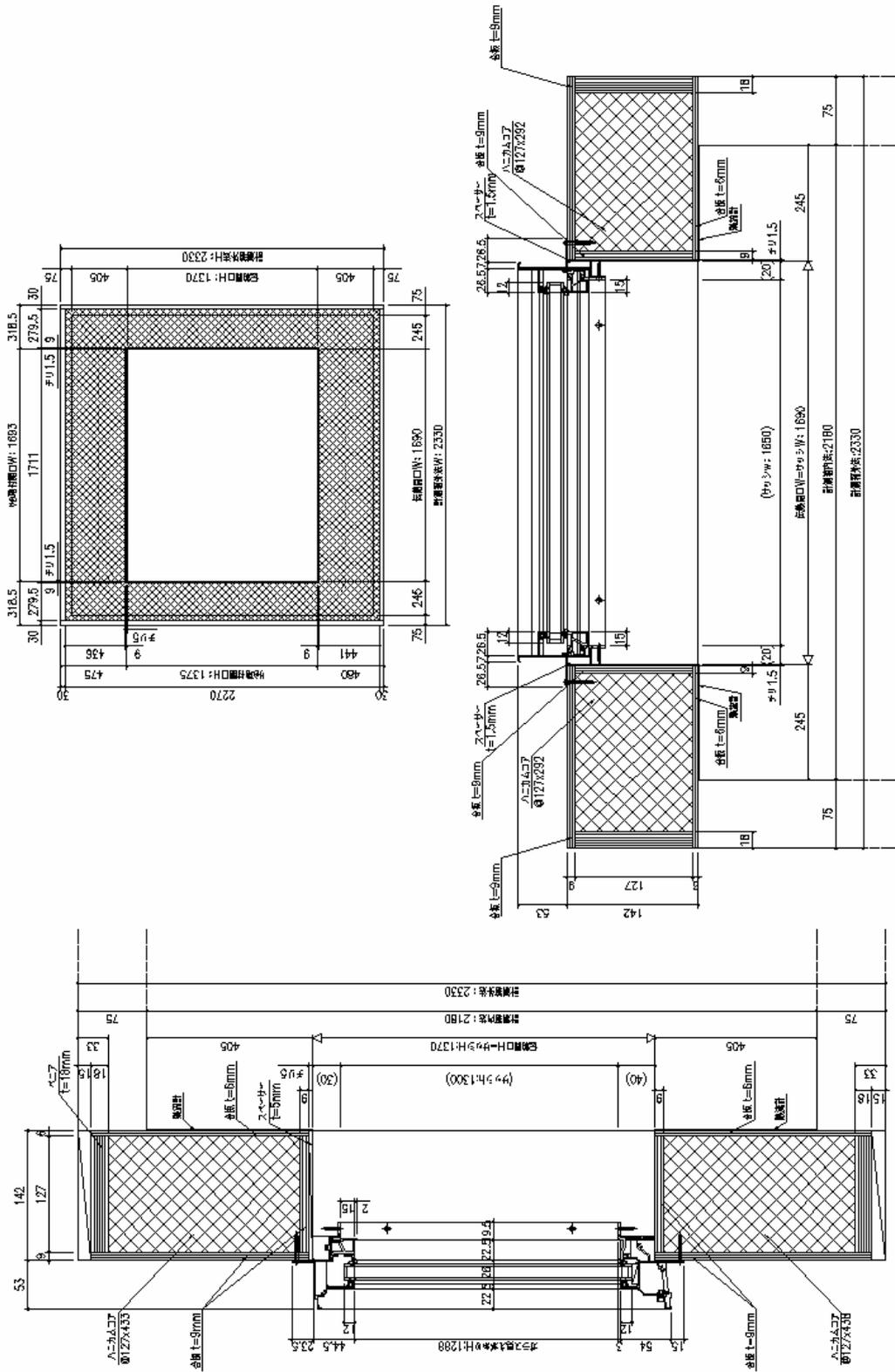


図 3.2-3 試験体取付パネルの概要

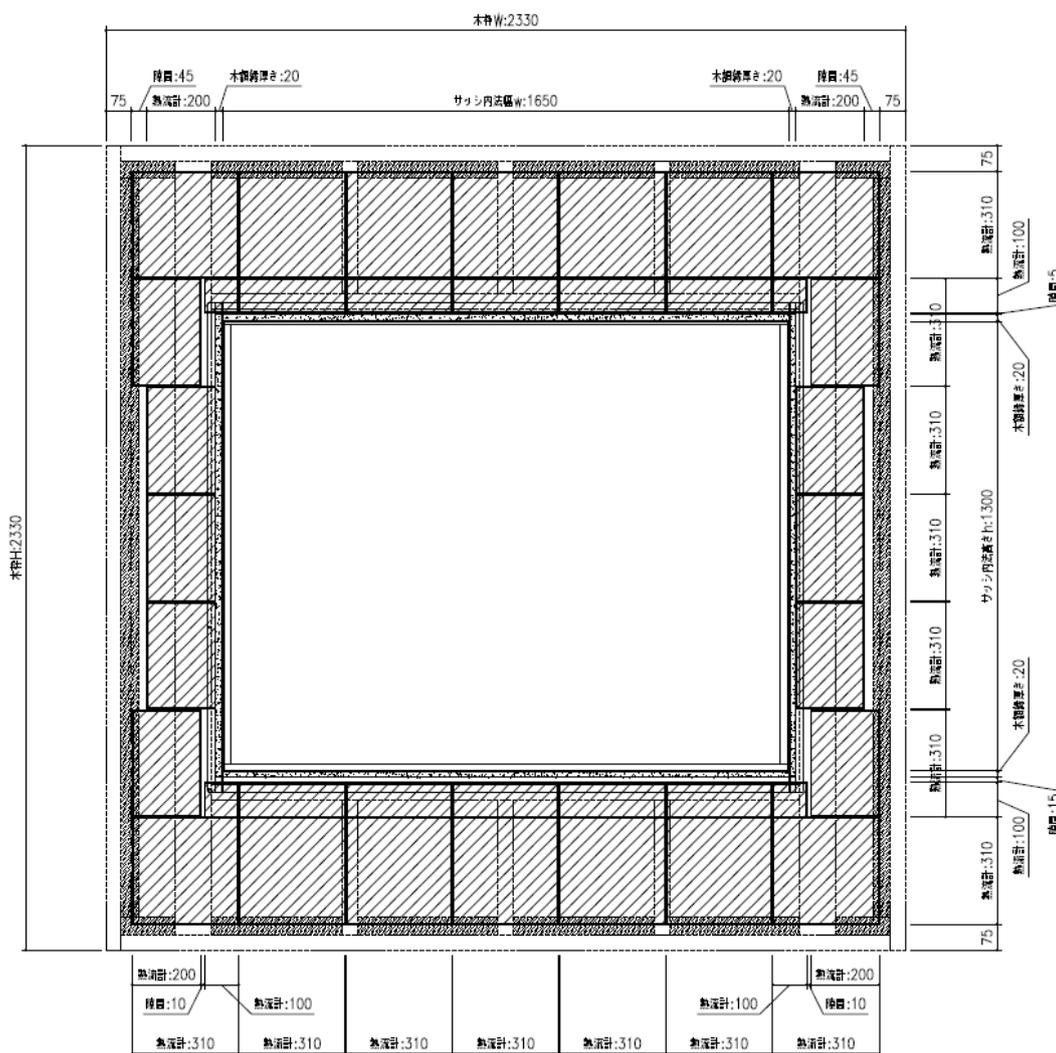


図 3.2-4 試験体取付パネル計測箱側表面に貼付けられた熱流計の配置

日射熱取得率測定装置の主な特徴は以下の通りである。

- (a) 遮蔽係数ではなく日射熱取得率を直接求める装置であるため、標準ガラス（通常は3mm厚フロートガラス）の波長特性の影響を受けない。そのため、近年普及してきた遮熱型LowEガラスなどの波長選択性を有する窓を正しく評価することができる。
- (b) 従来の装置では、一般に日射による取得熱量を流体の出入り口温度と流量から計測していたが、本装置では冷却パネル、計測箱及び試験体取付枠での熱量の計測に熱流計を用いて計測している。そのため、流量計や計測箱の校正実験を省くことができる。
- (c) 室内側、外気側の試験体正面に高透過ガラスのバッフル板を設け、光源及び冷却板からの長波長放射が試験体に与える影響をできるだけ小さくしている。
- (d) 太陽光シミュレータとして、標準試験体の大きさの照射面積で最大  $500\text{W}/\text{m}^2$  の照射強度を有し、平行度も高く、エアマス 1.5 の標準太陽光のスペクトルとよく合致したものを使用している。
- (e) 試験体取り付け開口の大きさが高さ 1,375mm、幅 1,695mm であり、市販の開口部製品の測定が可能である。

日射熱取得率(日射侵入率)は、ISO15099 では (3.2-1) 式のように定義されている。

$$\eta = \frac{q_{\text{int}} - q_{\text{inr}}(I_s=0)}{\Delta T} \quad \dots (3.2-1)$$

$\eta$  : 日射熱取得率 [-]

$q_{\text{int}}$  : 照射時の取得熱流密度 [W/m<sup>2</sup>]

$q_{\text{inr}} (I_s=0)$  : 照射無しの時の取得熱流密度 [W/m<sup>2</sup>]

$I_s$  : 照射日射量 [W/m<sup>2</sup>]

(3.2-1) 式の定義に従って日射熱取得率を測定するには、日射のある場合の取得熱量から日射の無い時の試験体の内外温度差による貫流分の熱量を除く必要がある。このため、日射の無い温度差のみの熱貫流率を求める必要がある。本装置では、図 3.2-5 に示す原理及び (3.2-2) 式、(3.2-3) 式より熱貫流率の測定をすることが出来る。

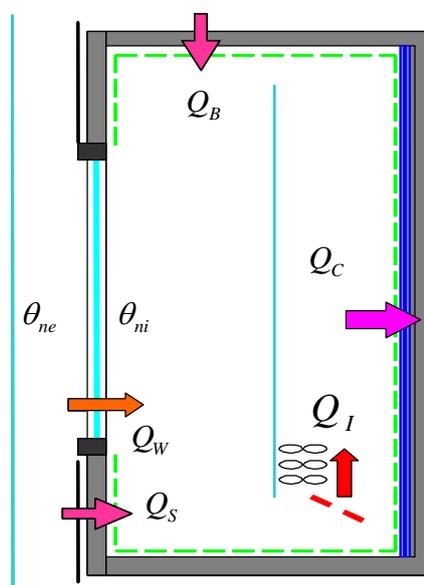


図 3.2-5 日射熱取得率測定装置の全体構成

$$Q_W = (Q_C - Q_S - Q_B - Q_I) \quad \dots (3.2-2)$$

$Q_W$ : 試験体を通過して計測箱内に流入する熱量 [W]

$Q_C$ : 冷却パネルより除去される熱量 [W]

$Q_S$ : ファン・ヒータにより供給される熱量 [W]

$Q_B$ : 試験体取付枠での熱量 [W]

$Q_I$ : 計測箱周壁4面での熱量 [W]

$$U = \frac{Q_W}{A} \cdot \frac{1}{(\theta_{ne} - \theta_{ni})} \quad \dots (3.2-3)$$

$U$ : 熱貫流率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$Q_W$ : 試験体を通過して計測箱内に流入する熱量 [W]

$\theta_{ne}$ : 外気環境温度 [K]

$\theta_{ni}$ : 室内環境温度 [K]

$A$ : 伝熱開口面積 [m<sup>2</sup>]

---

本測定では、この熱貫流率の測定方法を利用し、窓と躯体との間の熱流を測定する。窓と躯体との間の熱流は、図 3.2-6 及び図 3.2-7 に示す位置に熱流計を設置し測定する。また、試験体取付枠見込み部からの熱流も把握できるように、試験体取付枠見込み部分にも熱流計を設置した(図 3.2-8 参照)。これらの状況を納めた写真が、図 3.2-9～図 3.2-11 となる。

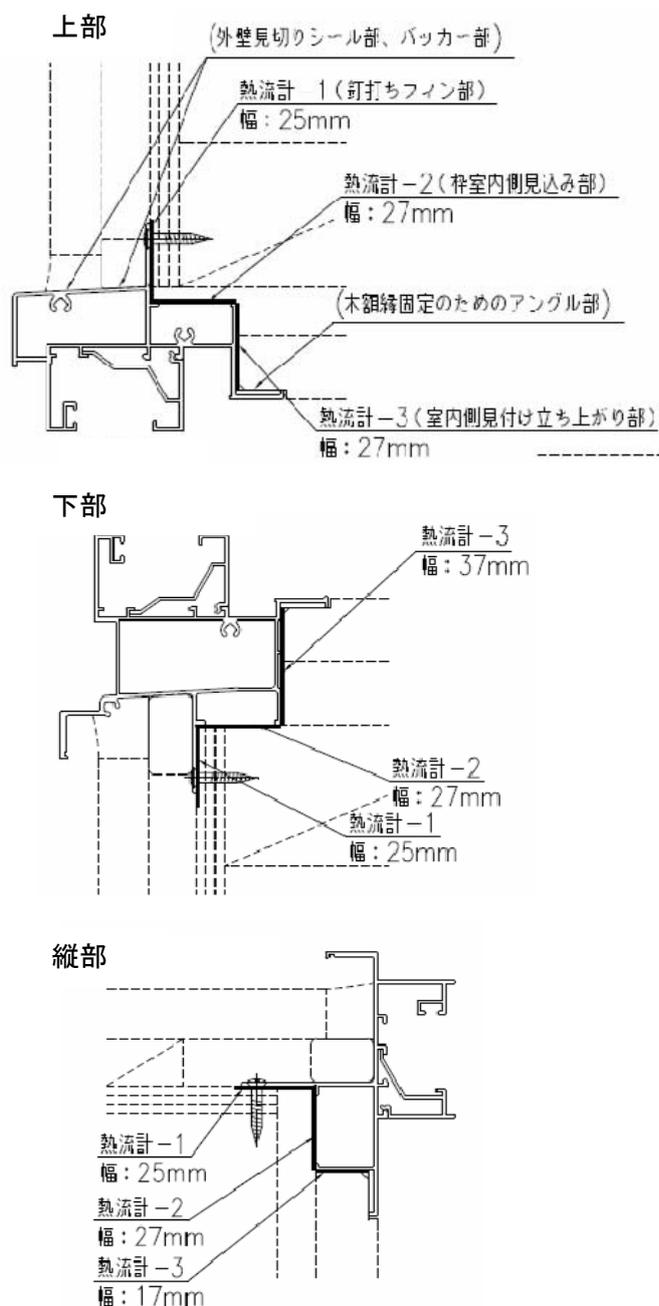


図 3.2-6 フレーム周りの熱流計貼付位置 (断面)

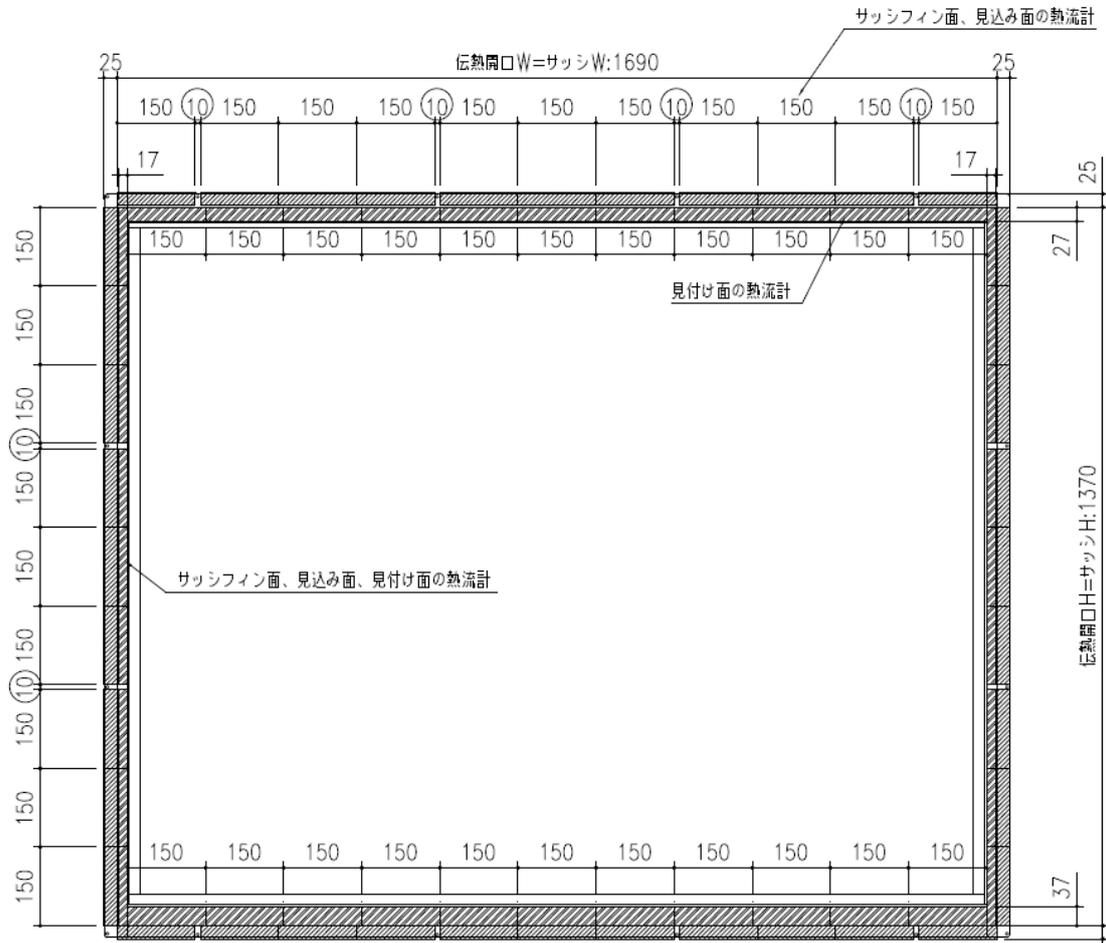


図 3.2-7 フレーム周りの熱流計貼付位置 (全体)

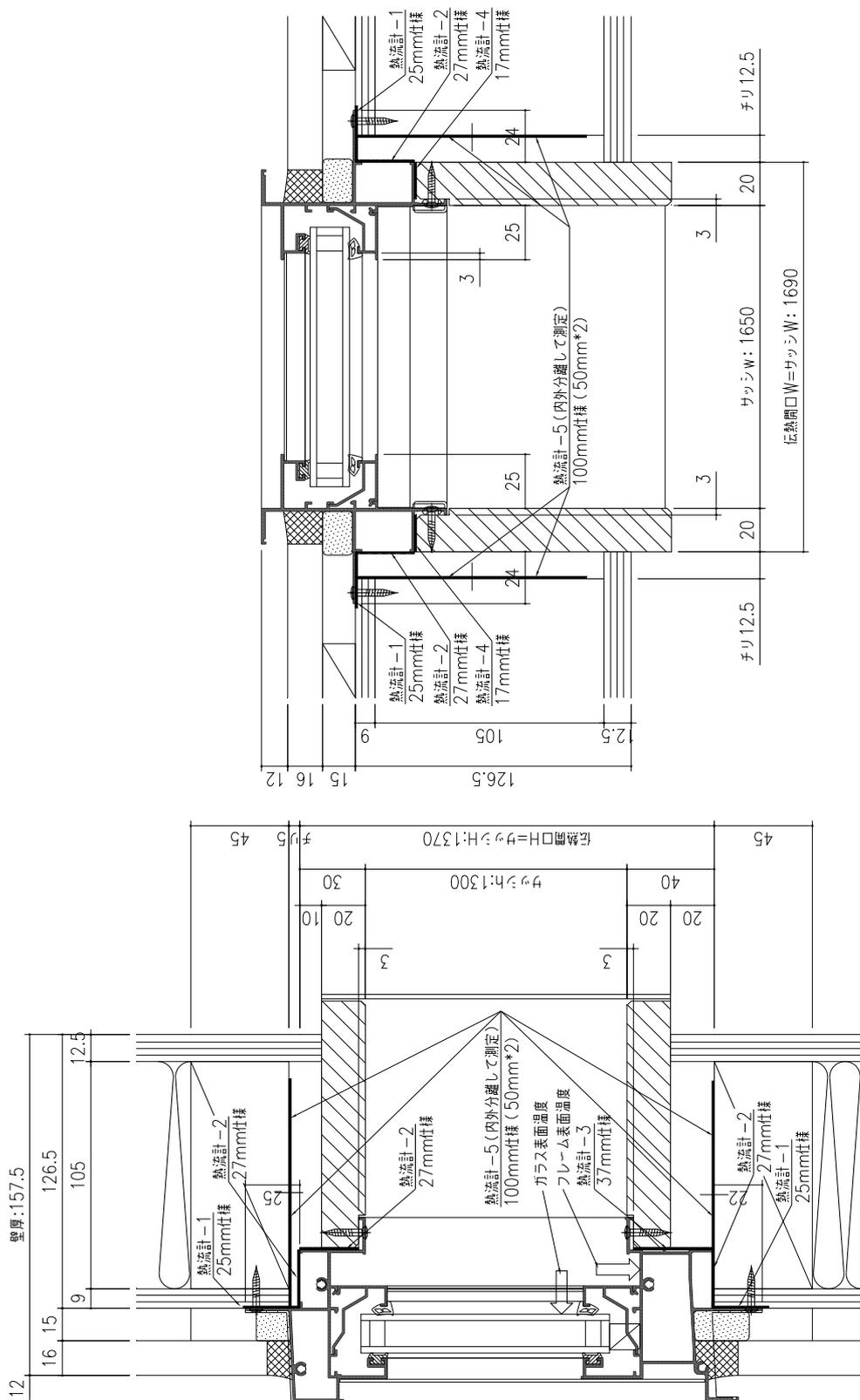


図 3.2-8 熱流計貼付け位置断面図

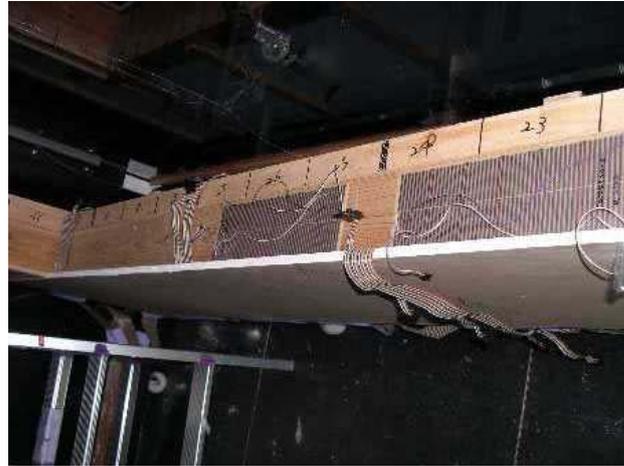


図 3.2-9 枠見込面の熱流計

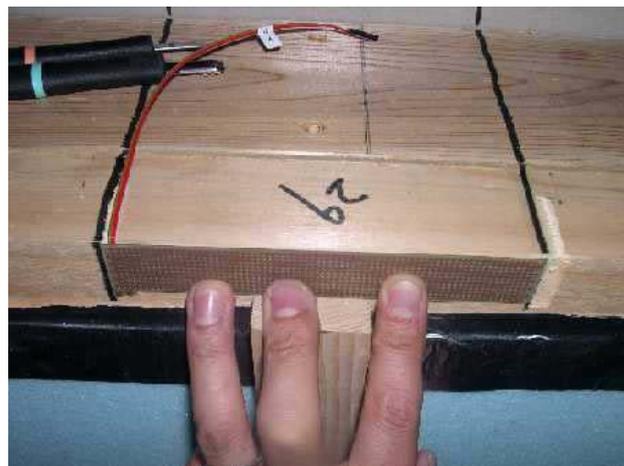


図 3.2-10 釘打ちフィン部と躯体の間の熱流計



図 3.2-11 釘打ちフィン部、枠見込面、窓台見込み面の熱流計

### 3.3 測定対象

測定対象を表 3.3-1 及び図 3.3-1～図 3.3-8 に示す。

フレームの材質は、一般的に多く使用されているアルミ、アルミ樹脂複合、アルミ熱遮断、樹脂の 4 種類とし、窓種（開閉機種）は、最も形状が簡易で評価の行ない易い FIX 窓とした。サイズは、伝熱開口寸法として断熱試験で多く使用される標準試験体サイズ  $W \times H = 1.690\text{m} \times 1.370\text{m}$  とした。

ガラスは、ガラスの断熱性能の違いによる影響を確認するため、アルミフレームでは普通複層ガラス (FL3+A12+FL3) と LowE 複層ガラス (FL3+A12+LowE3) の 2 種類とした。アルミ樹脂複合、アルミ熱遮断フレームは、傾向はアルミフレームと同様の結果になると考えられたため、普通複層ガラス (FL3+A12+FL3) 1 種類とし、樹脂フレームは、樹脂フレームで多く使用される LowE 複層ガラス (FL4+A12+LowE4) とした。

躯体は断熱構造の異なる充填断熱工法と外張断熱工法の 2 種類とした。前述した日射熱取得率測定装置の試験体取付パネル部を図 3.3-1～図 3.3-8 のように改良することで、充填断熱工法と外張断熱工法の躯体を模擬した。仕様として、本来存在しない試験体木枠端部を囲む木材の影響を小さくするために断熱材（スタイロフォーム 50mm）を貼付けた仕様となっている。

表 3.3-1 測定対象

フレームの種類	アルミ	アルミ樹脂複合	アルミ熱遮断	樹脂(PVC)
開閉機種	FIX 窓			
ガラスの種類	FL3+A12+FL3 FL3+A12+LowE3	FL3+A12+FL3		FL4+A12+ LowE4
躯体工法の種類	充填断熱工法 外張断熱工法			
伝熱開口寸法	W:1690 × H:1370 [mm]			

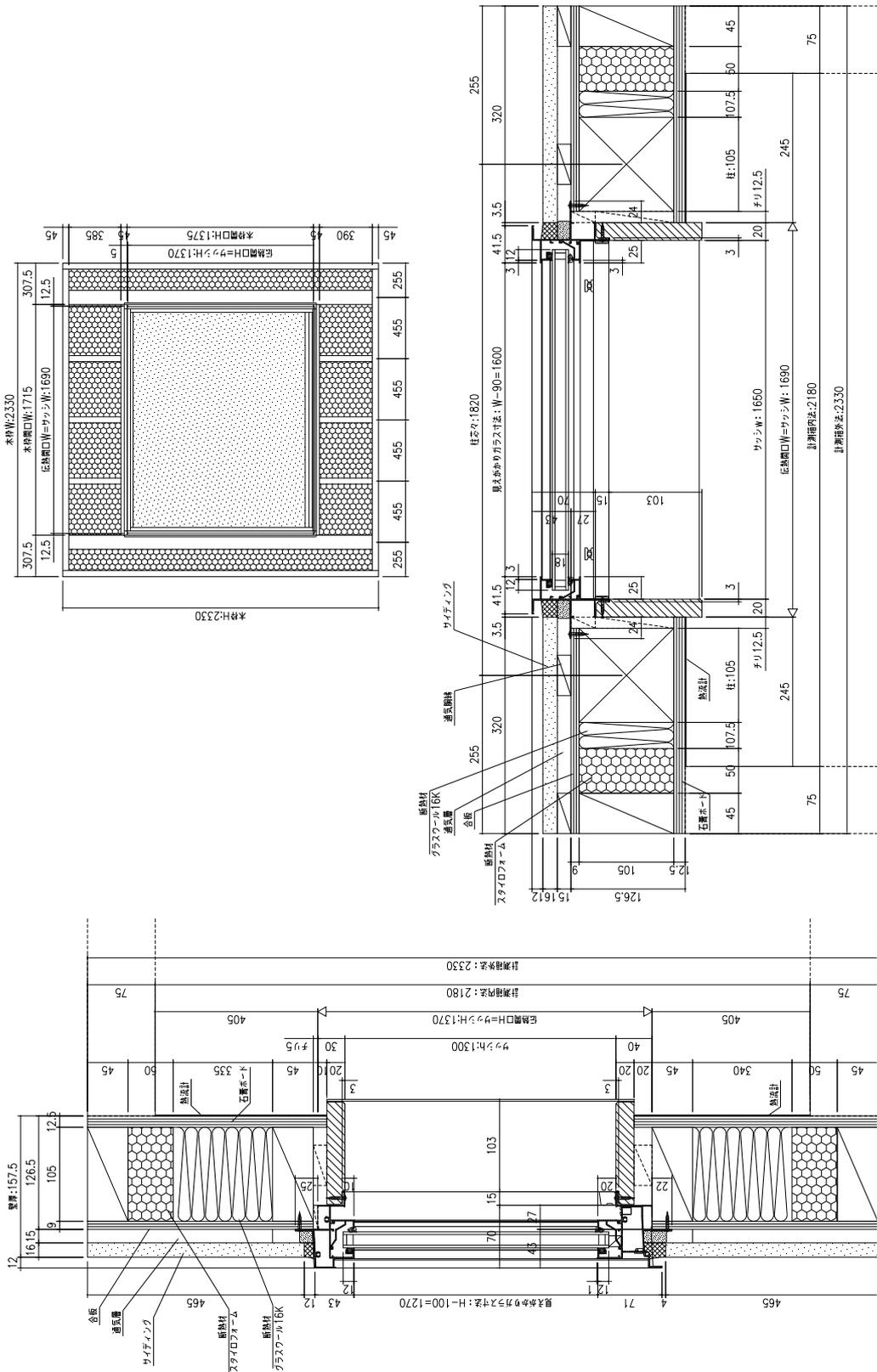


図 3.3-1 アルミフレーム（充填断熱工法納まり）

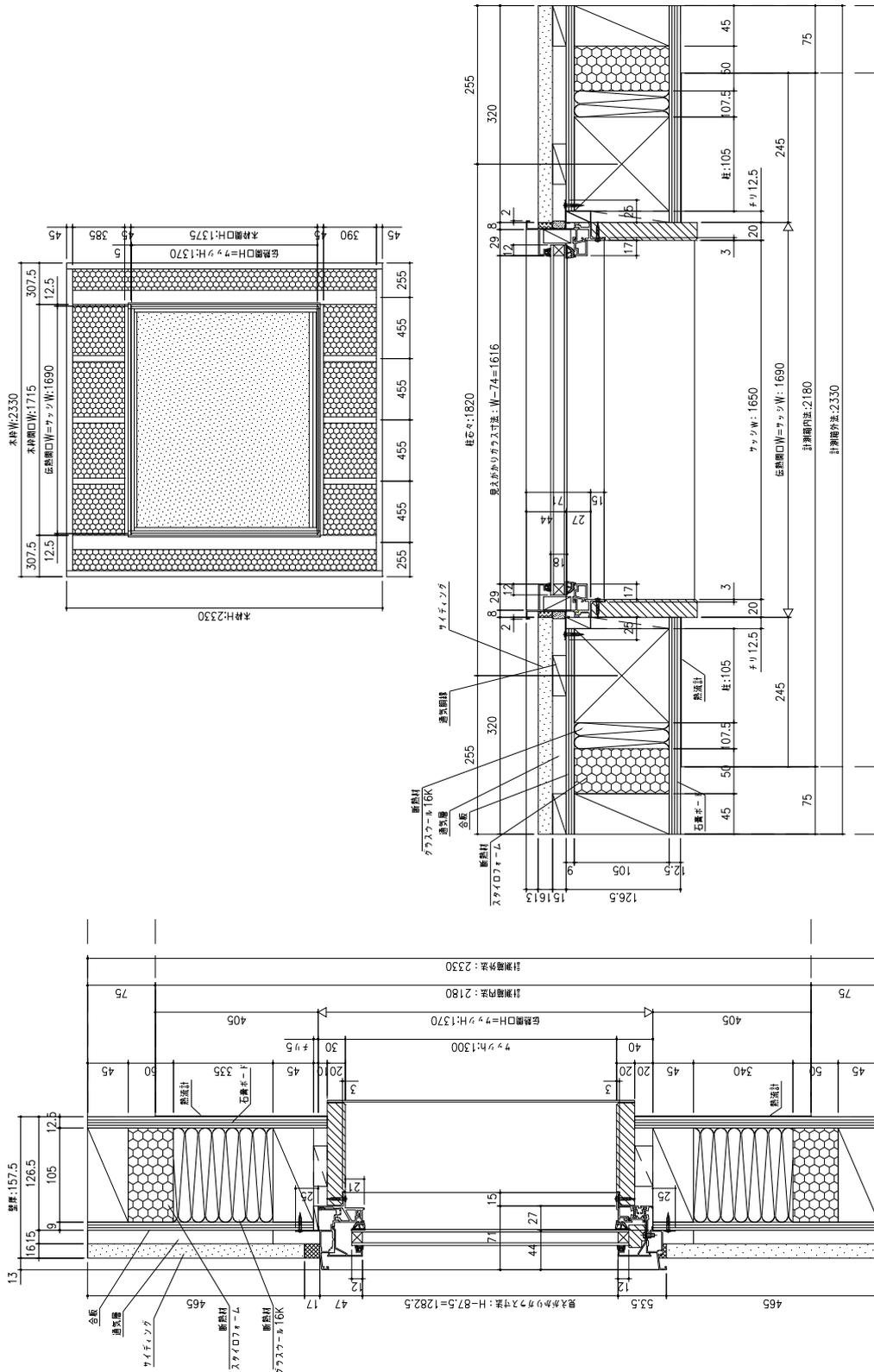


図 3.3-2 アルミ樹脂複合フレーム（充填断熱工法納まり）



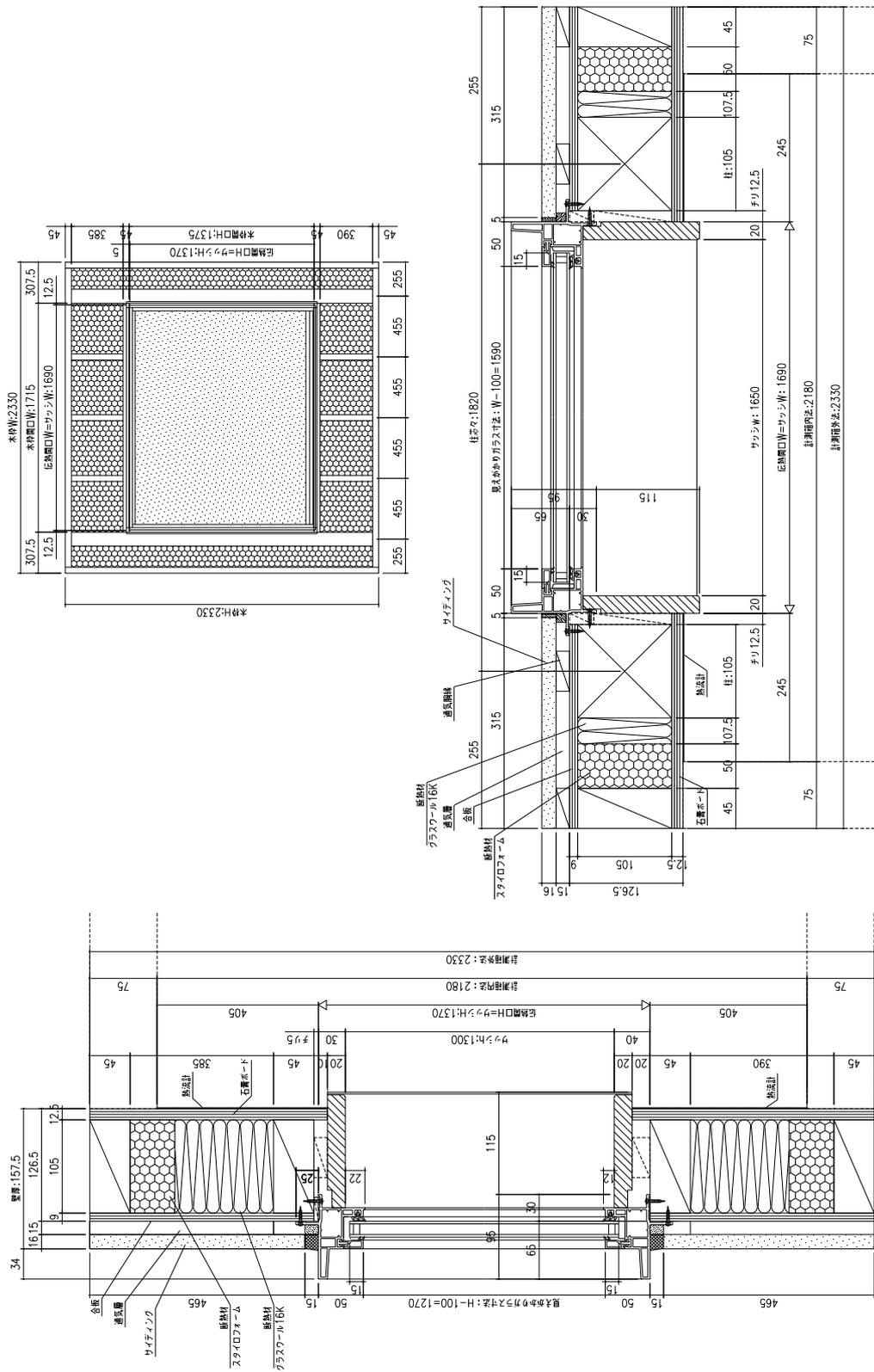


図 3.3-4 樹脂フレーム（充填断熱工法納まり）

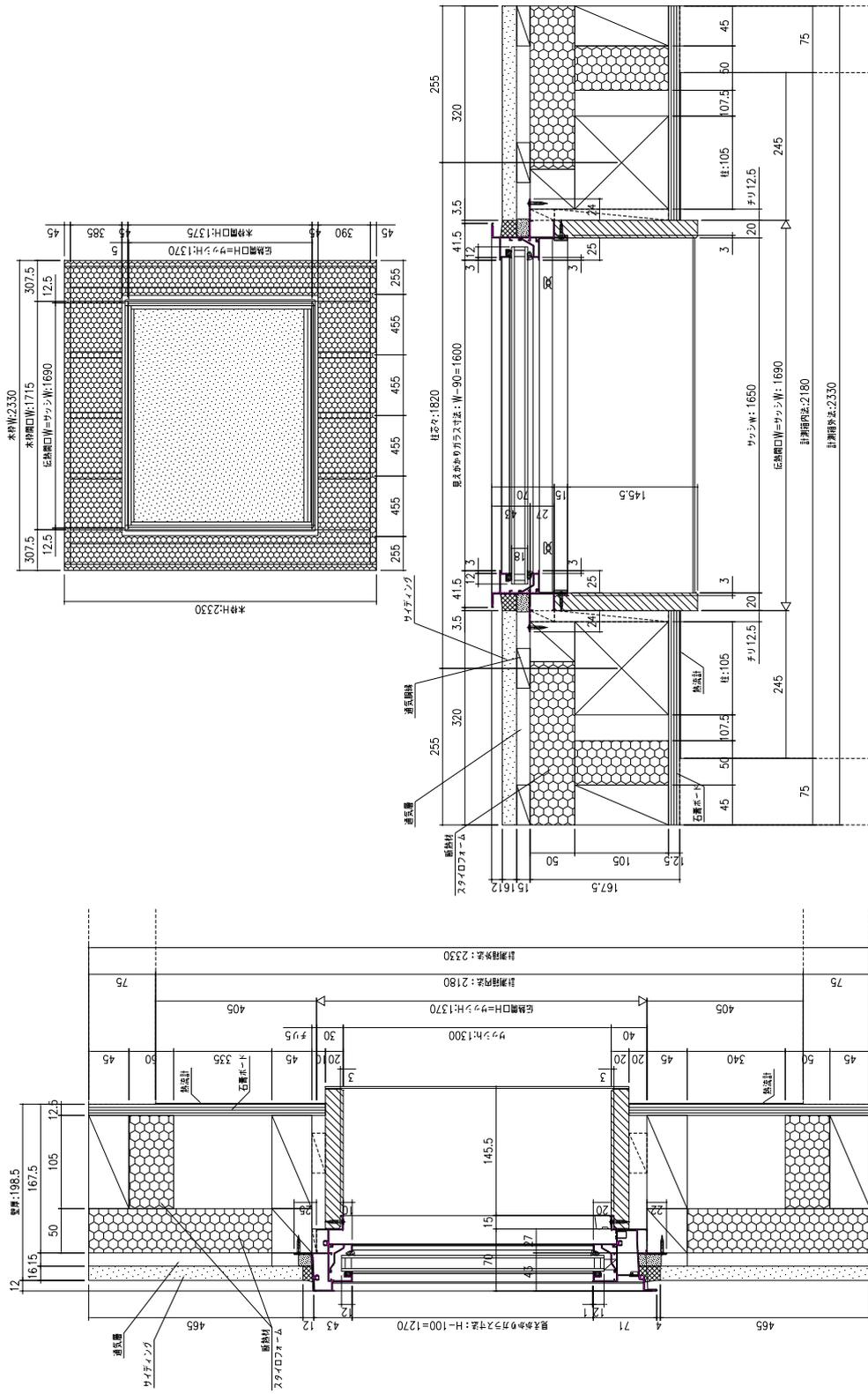


図 3.3-5 アルミフレーム（外張断熱工法納まり）

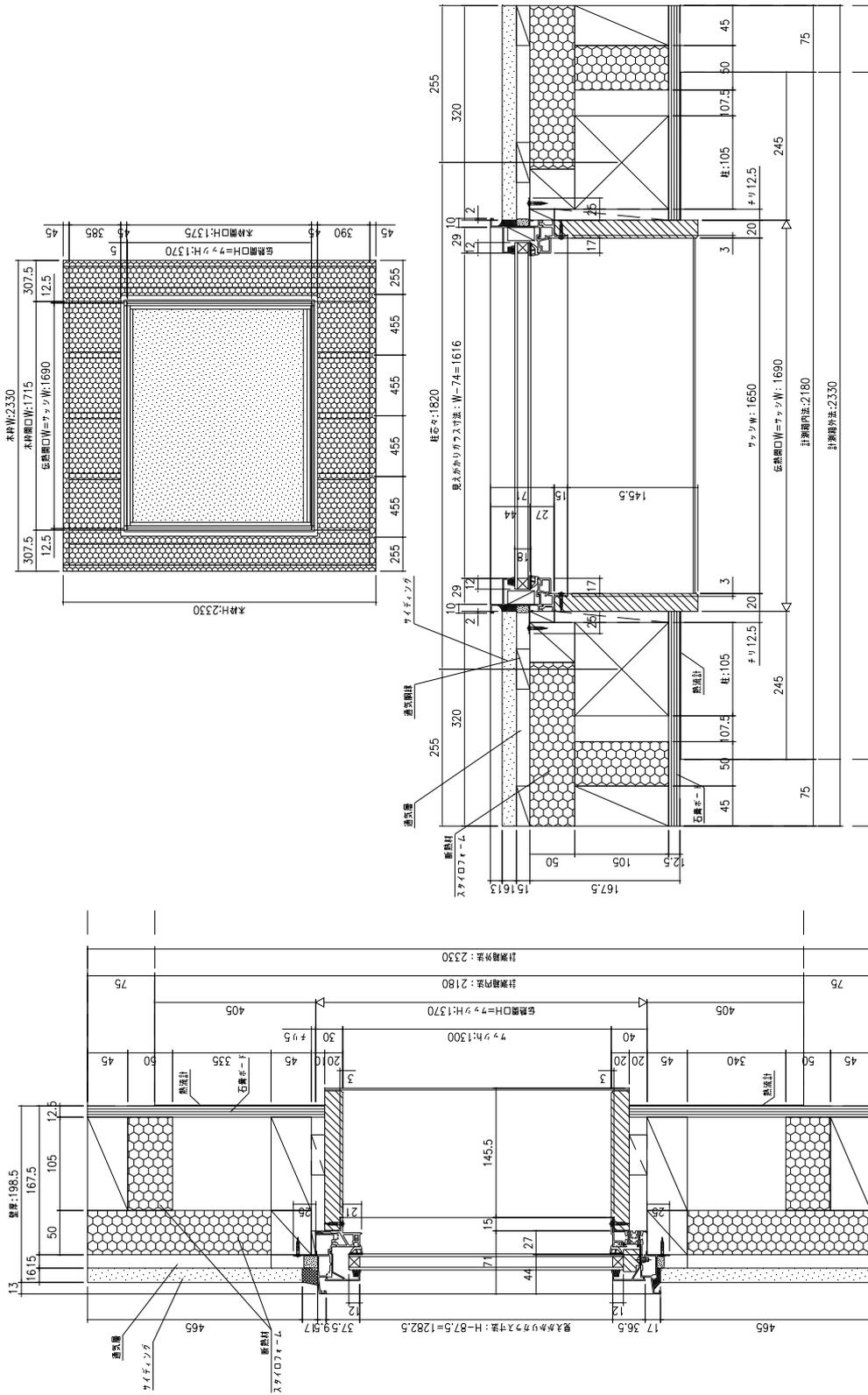


図 3.3-6 アルミ樹脂複合フレーム（外張断熱工法納まり）

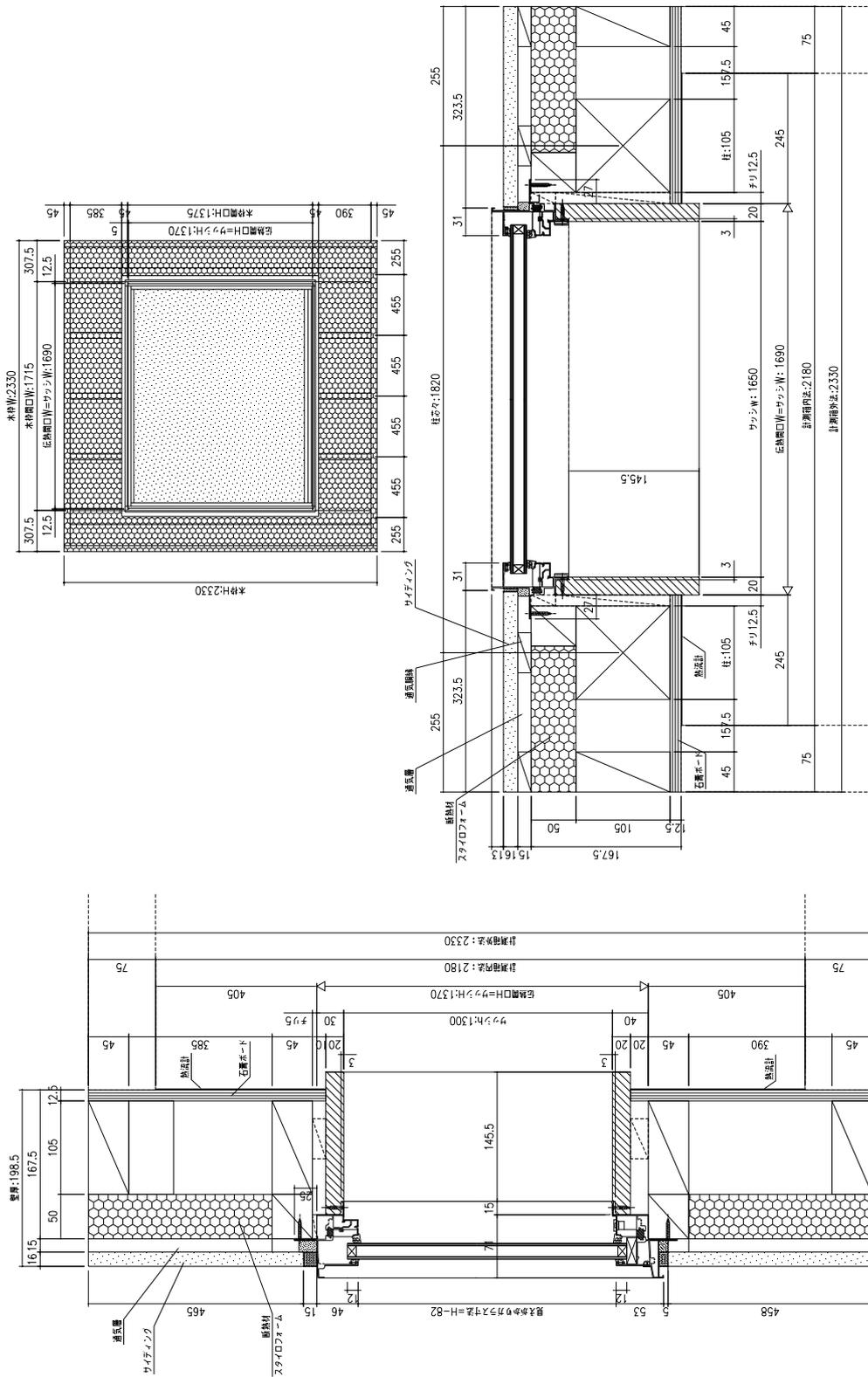


図 3.3-7 アルミ熱遮断フレーム（外張断熱工法納まり）

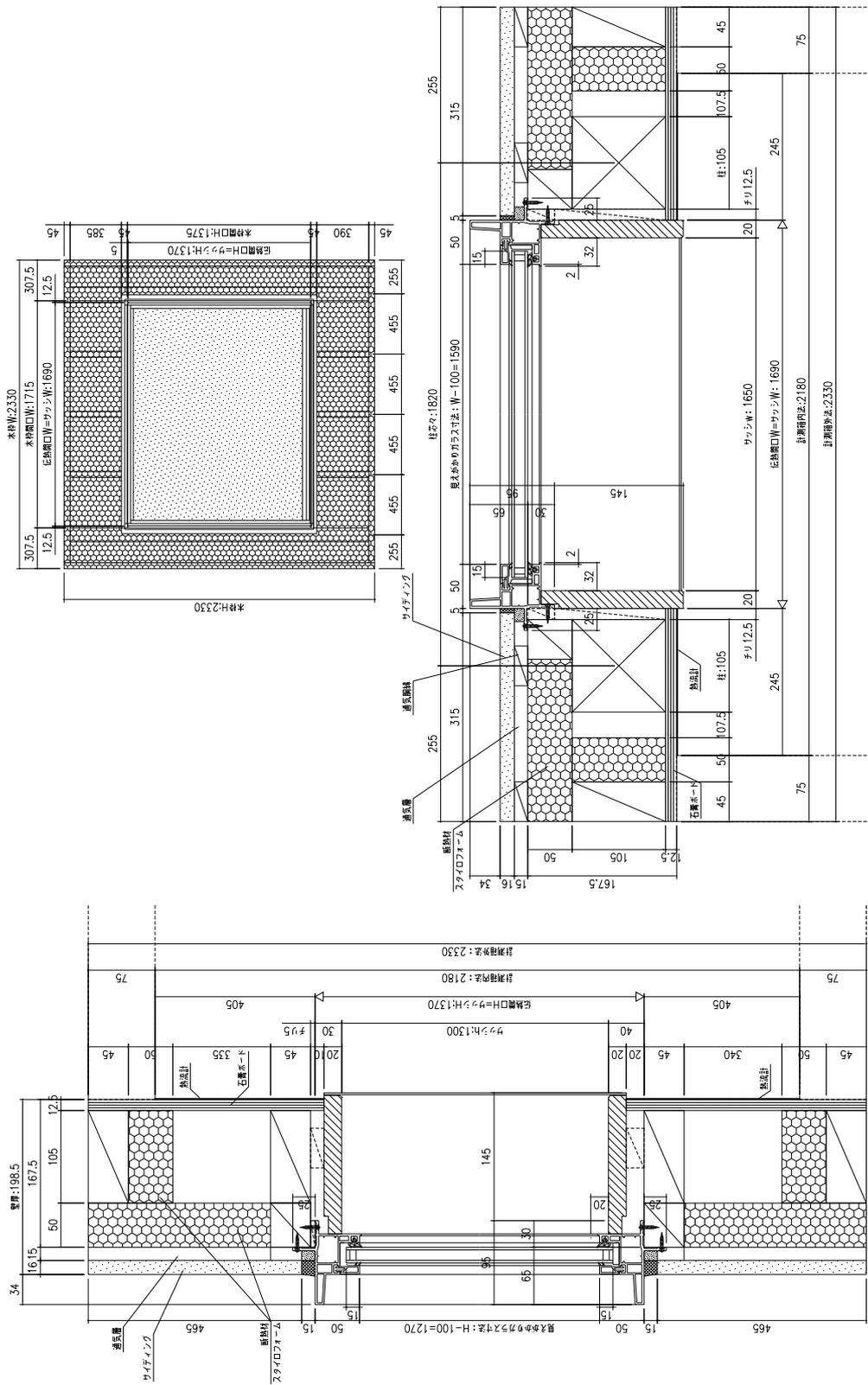


図 3.3-8 樹脂フレーム (外張断熱工法納まり)

### 3.4 測定条件

測定条件を表 3.4 に示す。測定条件は、冬季の測定条件として、室内外の雰囲気気温の設定は、室内側 20℃、室外側 0℃、内外温度差は 20℃ (=ΔT) とした。室内外の表面熱伝達率の設定は、室内外の表面熱伝達抵抗の合計として 0.17(m<sup>2</sup>·K)/W とした。

表 3.4 測定条件

	室内側	室外側
雰囲気温度[℃]	20	0
表面熱伝達抵抗[(m <sup>2</sup> ·K)/W] (室内外の抵抗の合計)	0.17	

### 3.5 測定結果

測定結果を図 3.5-2～図 3.5-11 に示す。図 3.5-2～図 3.5-6 が充填断熱工法、図 3.5-7～図 3.5-11 が外張断熱工法となっている。分かり易いように、図 3.5-2～図 3.5-11 に示してある数値（熱流量）は、図 3.5-1 に示す熱流計の配置にリンクするように表してある。なお、数値の単位は W である。断線等による測定が出来なかった箇所は空白としている。中央部には躯体種類、フレームの材質、ガラスの種類及び熱貫流率の測定結果（単位 W/(m<sup>2</sup>·K)）が記載されている。

結果を確認すると、全ての条件で窓と躯体の間には熱流が生じていることが測定からも確認できた。また、熱流の方向は全ての条件で図 3.5-12 に示す矢印の方向となっており、躯体の額縁の見込みにおいて、熱流方向が室内側寄りと室外側寄りで反転することが確認された。

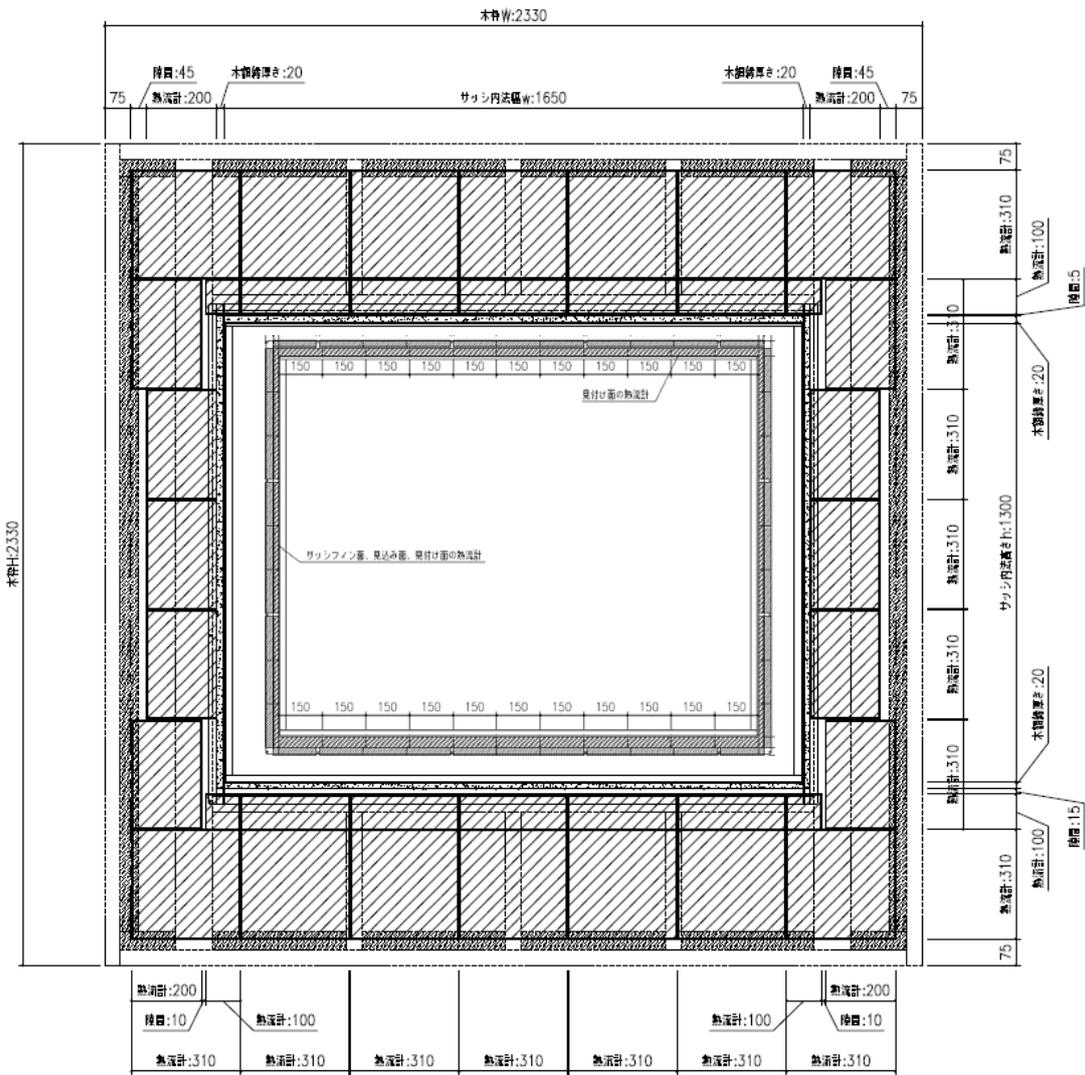


図 3.5-1 熱流計の配置

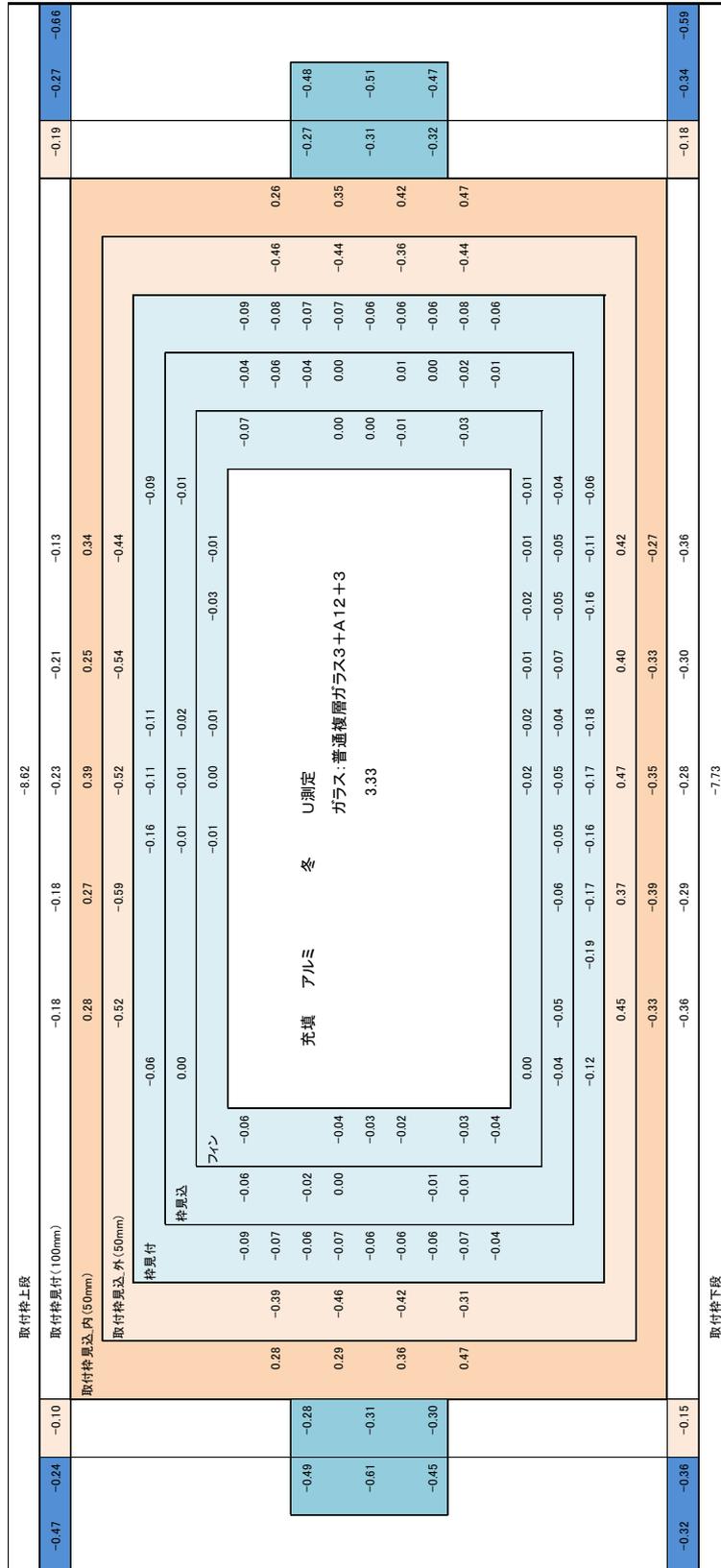


図 3.5-2 アルミフレーム FL3+A12+FL3 (充填断熱工法納まり)



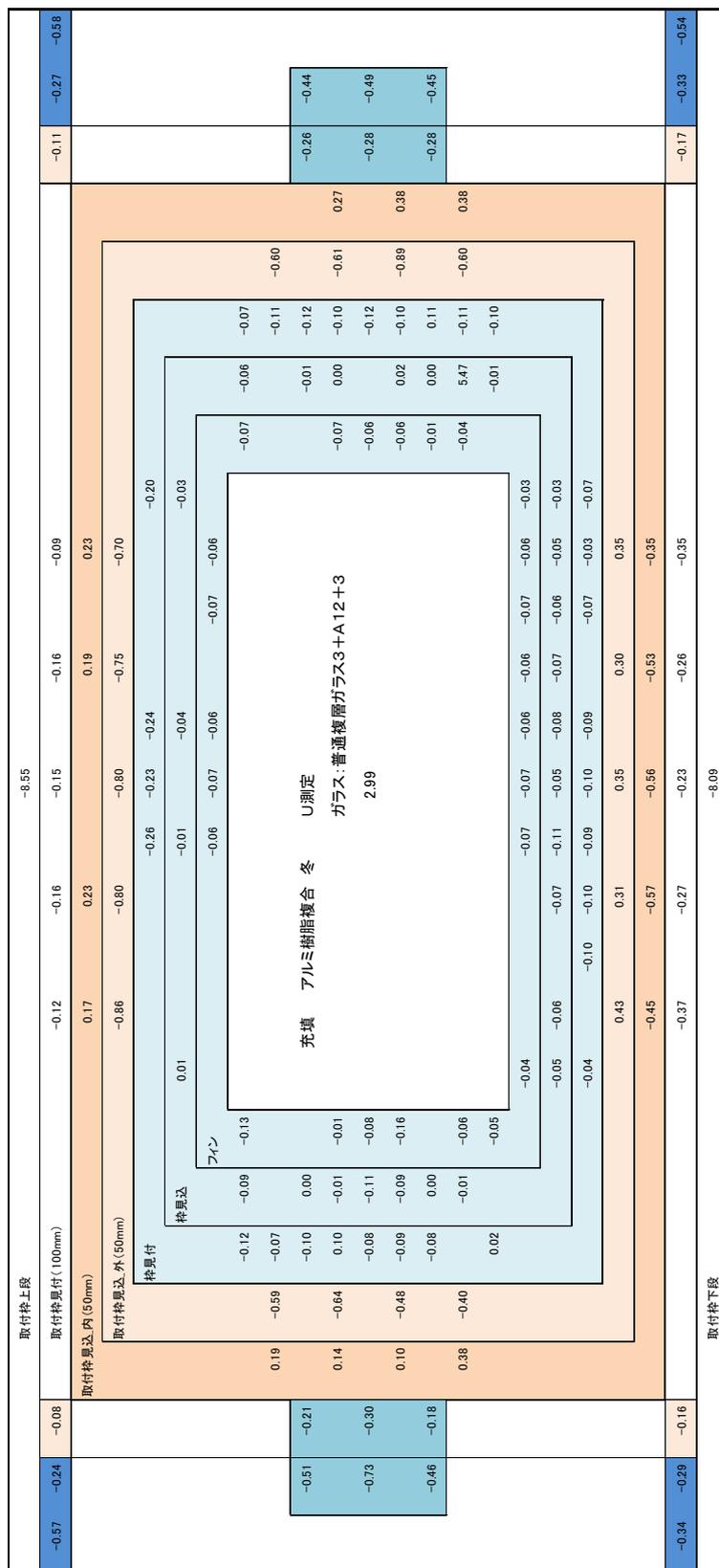


図 3.5-4 アルミ樹脂複合フレーム FL3+A12+FL3 (充填断熱工法納まり)





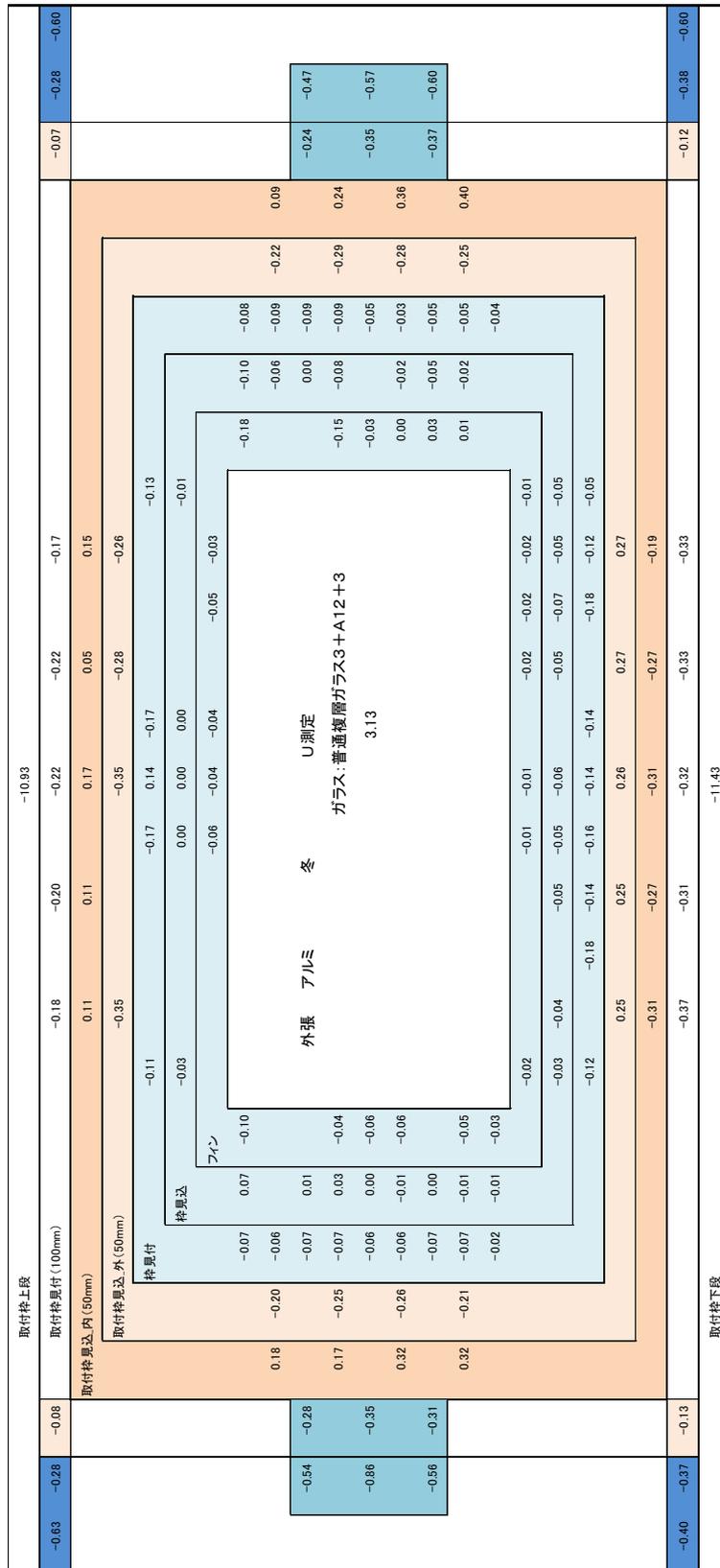


図 3.5-7 アルミフレーム FL3+A12+FL3 (外張断熱工法納まり)

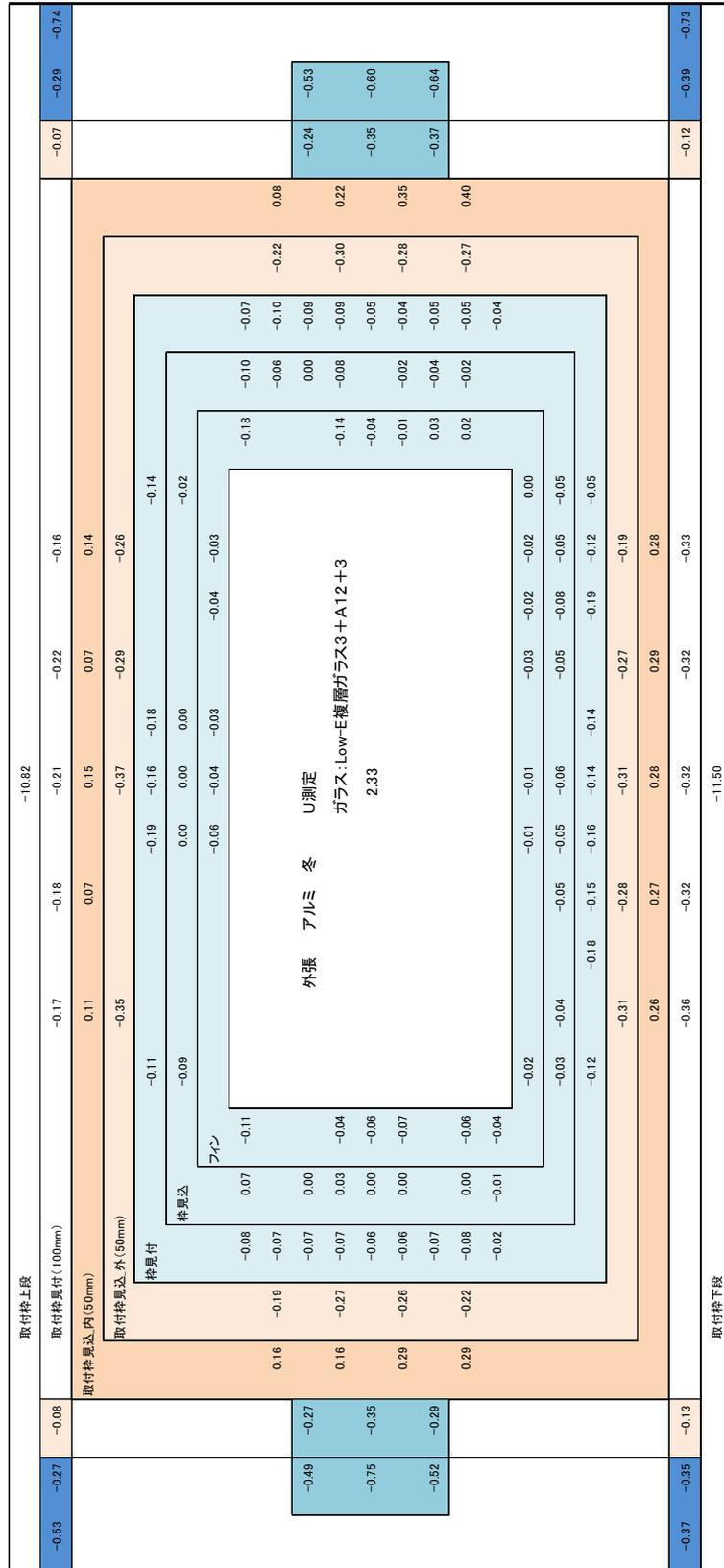


図 3.5-8 アルミフレーム FL3+A12+LowE3 (外張断熱工法納まり)

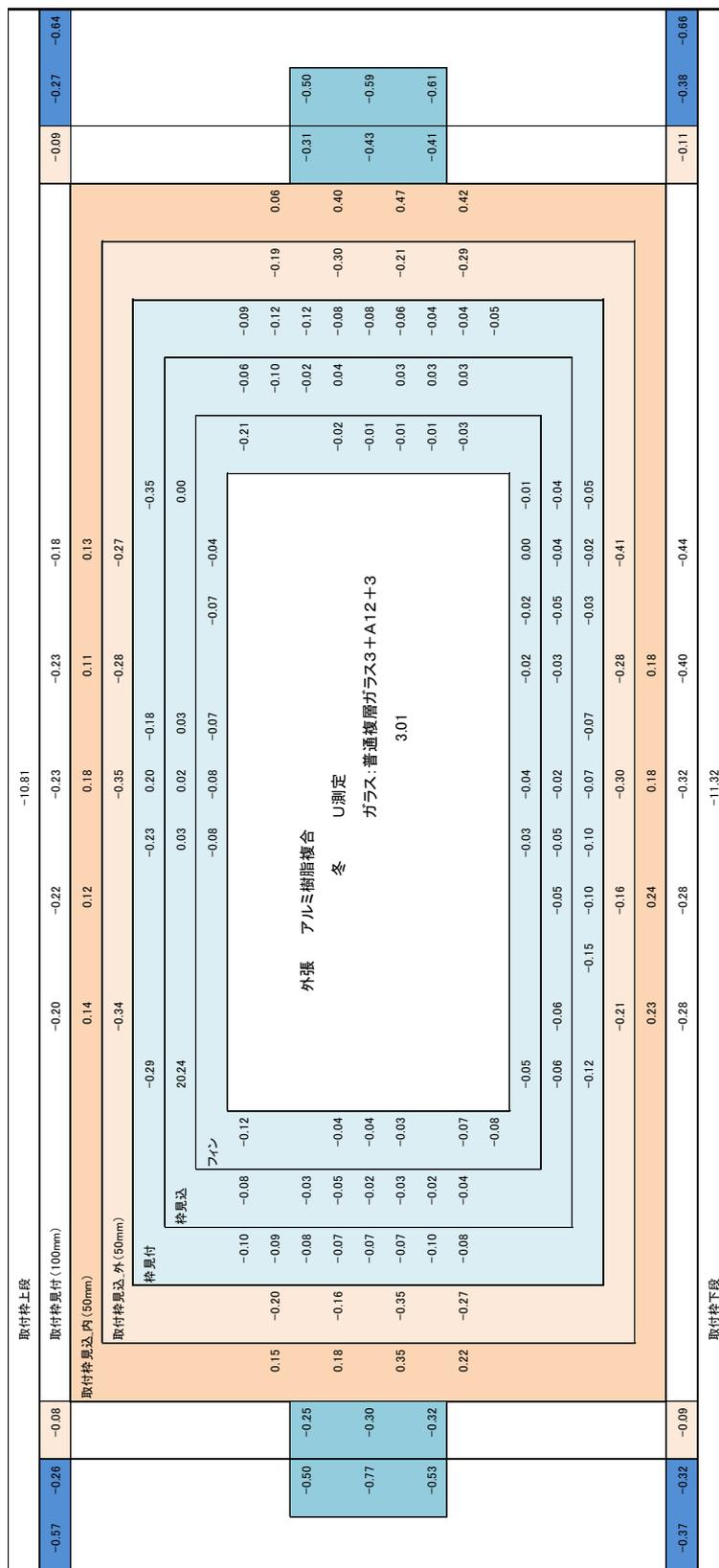


図 3.5-9 アルミ樹脂複合フレーム FL3+A12+FL3 (外張断熱工法納まり)

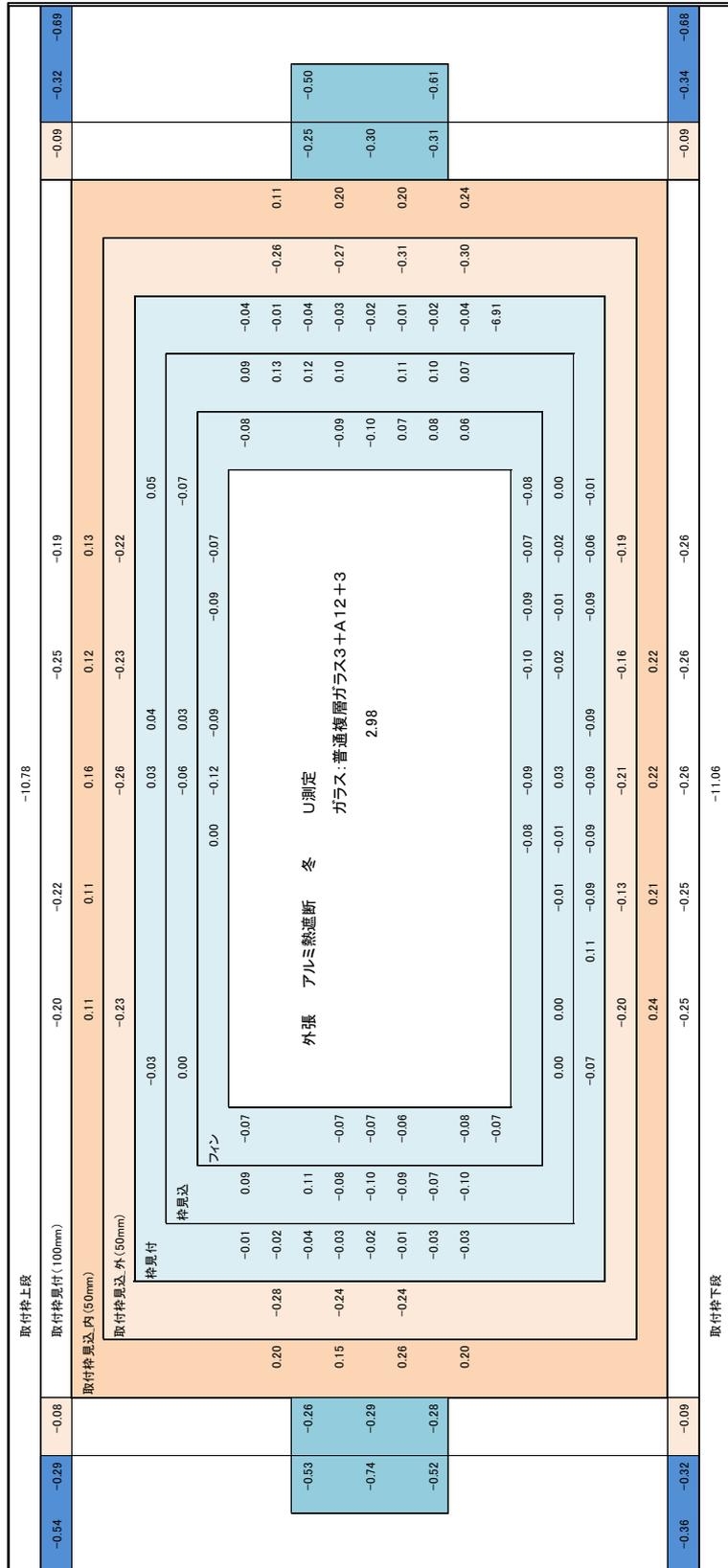


図 3.5-10 アルミ熱遮断フレーム FL3+A12+FL3 (外張断熱工法納まり)

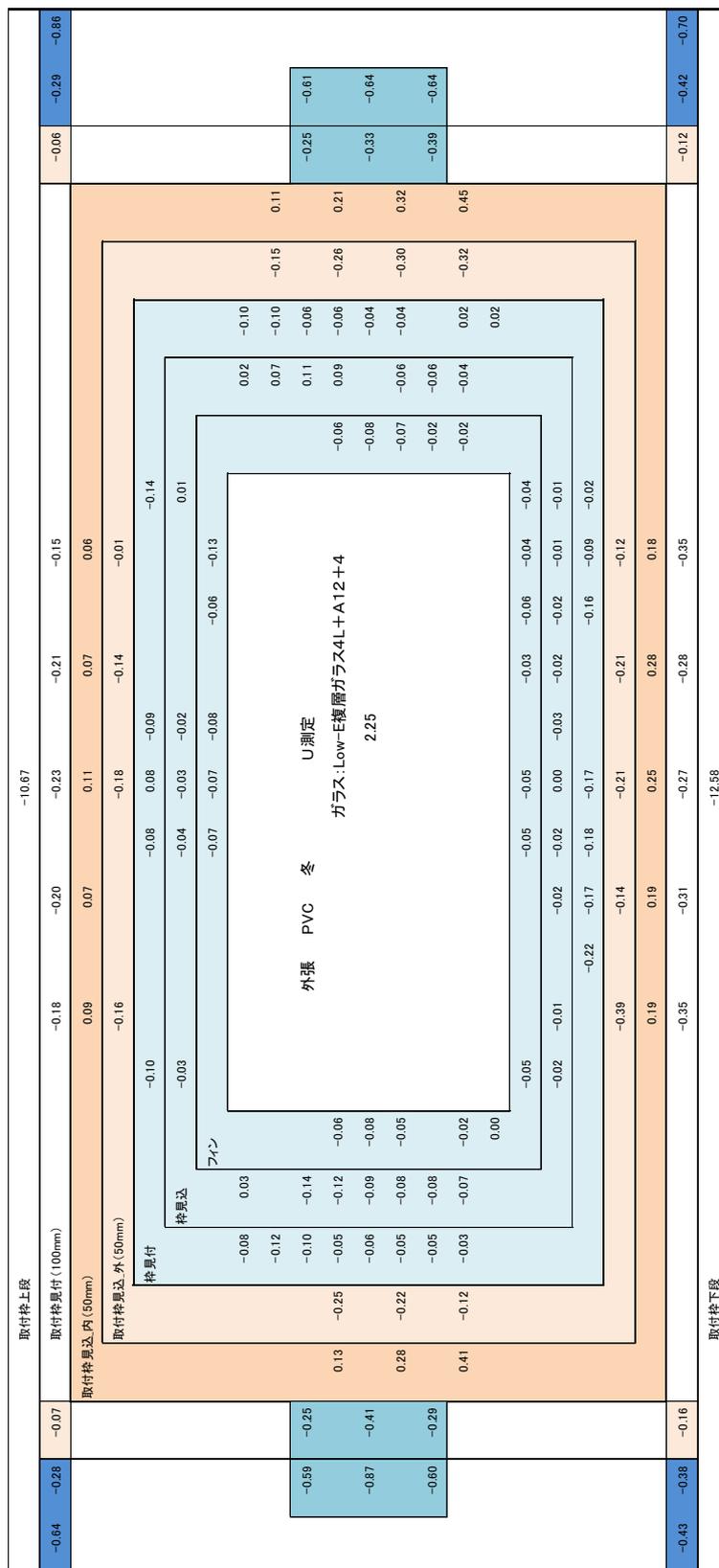


図 3.5-11 樹脂フレーム FL4+A12+LowE4 (外張断熱工法納まり)

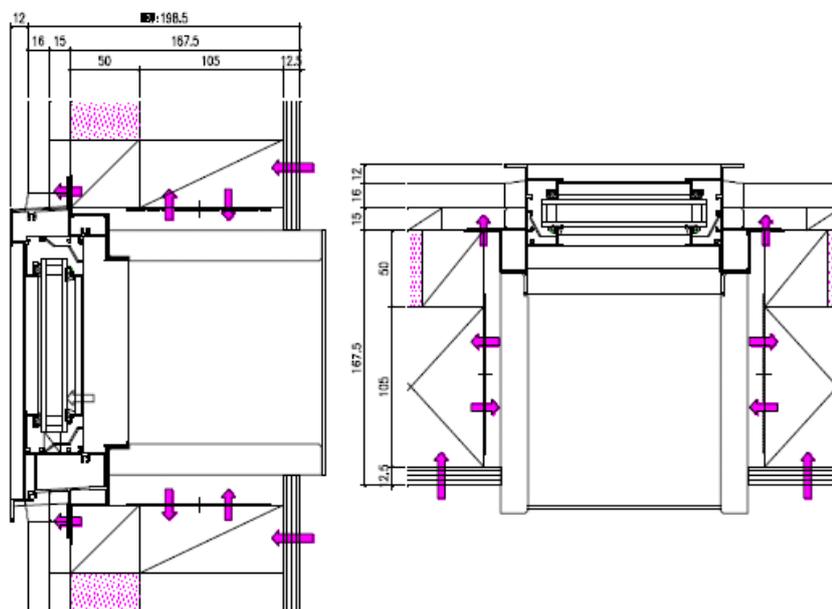


図 3.5-12 熱流方向のイメージ

これらの結果を、各部位の線熱貫流率 $\Psi_b$ に換算しまとめたものを表 3.5-1 に示す。なお、表中の線熱貫流率 $\Psi_b$ は、図 3.2-6 に示す各々の部位の熱流計 1~3 で測定した各箇所の熱流量 $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$ W の平均値の合計に熱流計の枚数を乗じたものを、測定時の温度差 $\Delta T$  と長さ $l$  で除したものであり、(3.5-1) 式で算出したものである。また、全体とは (3.5-2) 式で算出される開口部一窓辺りの平均線熱貫流率 $\Psi_{bt}$ である。

$$\Psi_b = \frac{a(\overline{q_1} + \overline{q_2} + \overline{q_3})}{\Delta T \cdot l_i} \quad \dots (3.5-1)$$

$\Psi_b$  : 各部位の線熱貫流率 [W/(m·K)]

$a$  : 熱流計の枚数 [-]

$q_1$  : 熱流計-1 の熱量 [W]

$q_2$  : 熱流計-2 の熱量 [W]

$q_3$  : 熱流計-3 の熱量 [W]

$\Delta T$  : 測定時の室内外の環境温度差 [K]

$l$  : 分担の長さ (部位の長さ) [m]

$i$  : 部位

$$\Psi_{bt} = \frac{\sum (\Psi_{bi} \times l_i)}{L} \quad \dots (3.5-2)$$

$\Psi_{bt}$  : 開口部一窓当りの窓と躯体の間の平均線熱貫流率 [W/(m・K)]

$l$  : 分担の長さ (部位の長さ) [m]

$L$  : 開口部周長 [m]

$i$  : 部位

表 3.5-1 各部位の窓と躯体の間の線熱貫流率  $\Psi_b$  及び  
開口部一窓当りの窓と躯体の間の平均線熱貫流率  $\Psi_{bt}$  算出結果

[W/(m・K)]

躯体構造	フレームの材質	ガラスの種類	$\Psi_b$				$\Psi_{bt}$
			上枠	下枠	右縦枠	左縦枠	全体
充填断熱工法	アルミ	普通複層	0.004	0.005	0.008	0.012	0.007
		LowE 複層	0.004	0.005	0.007	0.012	0.006
	アルミ樹脂複合	普通複層	0.020	0.018	0.016	0.026	0.020
	アルミ熱遮断	普通複層	0.028	0.030	0.008	0.022	0.023
	樹脂	LowE 複層	0.021	0.016	0.009	0.016	0.016
外張断熱工法	アルミ	普通複層	0.014	0.005	0.017	0.019	0.014
		LowE 複層	0.014	0.006	0.018	0.021	0.014
	アルミ樹脂複合	普通複層	0.017	0.009	0.017	0.020	0.015
	アルミ熱遮断	普通複層	0.024	0.028	0.010	0.023	0.022
	樹脂	LowE 複層	0.025	0.015	0.016	0.014	0.018

次に、ガラスの断熱性能の違いが $\Psi_b$ 及び $\Psi_{bt}$ に及ぼす影響を確認する。アルミフレームで実施した断熱性能の異なる2種類のガラス(普通複層ガラス FL3+A12+FL3 熱貫流率:  $2.9W/(m^2 \cdot K)$ , LowE複層ガラス FL3+A12+LowE3 熱貫流率:  $1.9W/(m^2 \cdot K)$ )の測定結果を比較したグラフを図3.5-13に示す。充填断熱工法、外張断熱工法共に、普通複層ガラスとLowE複層ガラスの値がほぼ同じであることから、窓と躯体の間の熱流はガラスの断熱性能の違いによる影響はほとんどないことは確認できる。

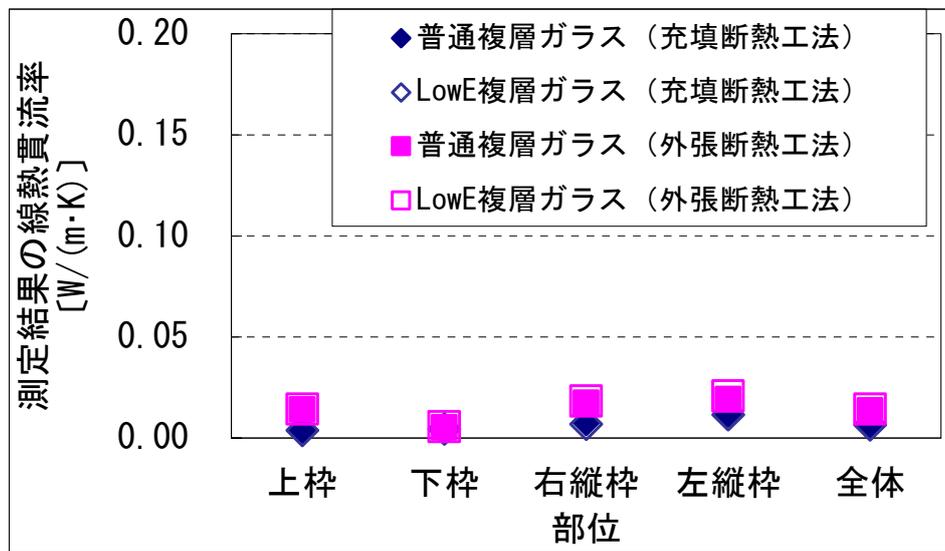


図3.5-13 普通複層ガラスとLowE複層ガラスの比較 (測定結果)

### 3.6 測定結果と計算結果の比較

3.5節で窓と躯体の間の熱流について測定値を得た。ここでは、測定値と計算値の比較を行なう。なお、計算は2章に示した計算方法を用いるが、解析モデルのモデル化範囲は測定に合わせることにした。

#### 3.6.1 解析の環境条件

解析に用いる環境条件を表 3.6.1 に示す。環境条件は、室内外の雰囲気温度は、室内側 20℃、室外側 0℃、内外温度差は 20℃ (=ΔT) とした。表面熱伝達率は、放射と対流を合わせた総合熱伝達率として、室内側 8.94W/(m<sup>2</sup>·K)、室外側 23.26W/(m<sup>2</sup>·K) とした。

表 3.6.1 解析に用いる環境条件

雰囲気温度 [°C]	20	0
表面熱伝達率 [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	8.94	23.26

#### 3.6.2 解析に使用する材料物性値（熱伝導率）

解析に用いる材料物性値（熱伝導率）を表 3.6.2-1 に示す。空気層については、自動で算出される温度依存性や熱流方向に対する空気層の厚さ、高さ、幅から対流と放射による熱伝達を考慮した等価の熱伝導率を用いる。複層ガラスの空気層の熱伝導率は、JIS R 3106<sup>3)</sup>、JIS R 3107<sup>4)</sup> から計算して求めた値を用いた（表 3.6.2-2 参照）。

表 3.6.2-1 各材料の熱伝導率

材料	熱伝導率 [W/(m·K)]
MDF（中密度繊維板）	0.17
木材（2種）	0.15
サイディング	0.21
スタイロフォーム	0.040
石膏ボード	0.22
アルミ	160
軟質ビニル	0.14
ポリサルファイド	0.40
ガラススペーサ	4.5
ポリスチレンフォーム	0.03
グラスウール	0.038

表 3.6.2-2 複層ガラス空気層の熱伝導率

ガラスの種類	空気層の熱伝導率 [W/(m·K)]
FL3+A12+FL3	0.0682
FL3+A12+LowE3	0.0273

### 3.6.3 解析モデル

解析モデルの概要を図 3.6.3 に示す。解析モデルのモデル化範囲は、ガラス部はほぼ一次元熱流とみなせる 100mm とし、躯体部分には試験体全体とした計測箱外法（480mm）とした。

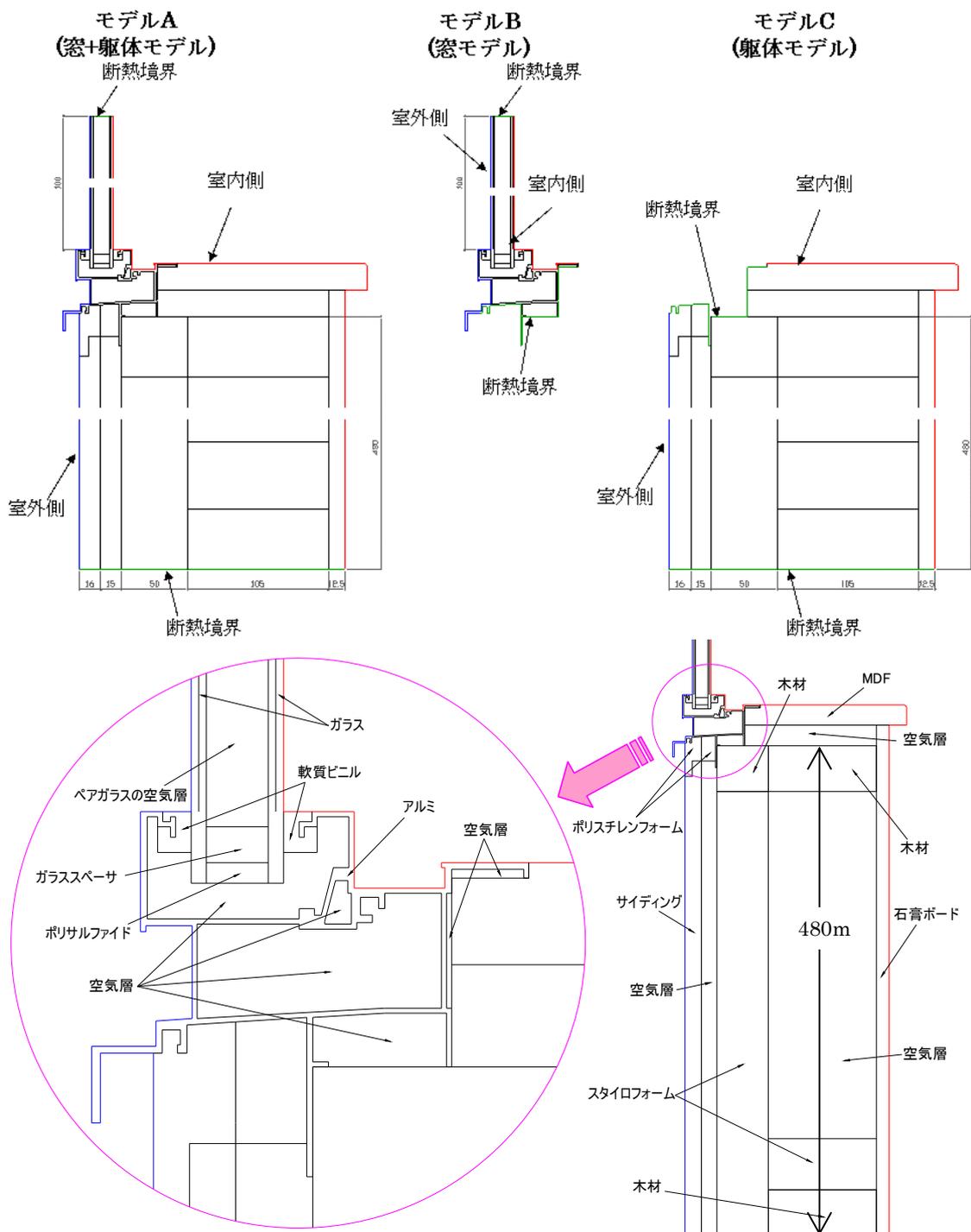


図 3.6.3 解析モデルの概要

## 3.6.4 計算結果

計算結果を表 3.6.4-1 及び表 3.6.4-2 に示す。なお、表 3.6.4-1 が充填断熱工法、表 3.6.4-2 が外張断熱工法となっている。また、測定結果と同様にガラスの断熱性能の違いが  $\Psi_b$  及び  $\Psi_{bt}$  に及ぼす影響を確認するために、アルミフレームで実施した断熱性能の異なる 2 種類のガラス（普通複層ガラス FL3+A12+FL3 熱貫流率：2.9W/(m<sup>2</sup>・K)、LowE 複層ガラス FL3+A12+LowE3 熱貫流率：1.9W/(m<sup>2</sup>・K)）の計算結果を比較したグラフを図 3.6.4 に示す。

これら結果を確認すると、部位毎 ( $\Psi_b$ ) では充填断熱工法と外張断熱工法で値に違いが見られる箇所も見受けられる。しかし、開口部 1 窓辺り ( $\Psi_{bt}$ ) では充填断熱工法と外張断熱工法で差の最も大きいアルミ熱遮断フレームにおいても 0.01W/(m・K)程度であり、大きな差は見られなかった。

ガラスの違いによる影響を確認すると、測定結果と同様に充填断熱工法、外張断熱工法共に、普通複層ガラスと LowE 複層ガラスの値がほぼ同じであることから、窓と躯体の間の熱流はガラスの熱性能の違いによる影響はほとんどないことが確認できる。

表 3.6.4-1 充填断熱工法計算結果

躯体構造		充填断熱工法					
フレーム材質		アルミ					
ガラス		FL3+A12+FL3			FL3+A12+LowE3		
室内側温度	℃	20			20		
室外側温度		0			0		
窓種 (開閉機種)		FIX			FIX		
部位		上部	下部	縦部	上部	下部	縦部
$Q_A$	W/m	20.195	20.856	19.732	18.143	18.817	17.690
$Q_B$		14.974	14.746	14.371	12.929	12.724	12.336
$Q_C$		4.560	4.206	4.177	4.560	4.206	4.177
$L_{QB}$	W/m	0.661	1.904	1.184	0.654	1.887	1.177
$\Psi_b$	W/(m・K)	0.033	0.095	0.059	0.033	0.094	0.059
$\Psi_{bt}$	W/(m・K)	0.062			0.061		

躯体構造		充填断熱工法								
フレーム材質		アルミ樹脂複合			アルミ熱遮断			樹脂		
ガラス		FL3+A12+FL3			FL3+A12+FL3			FL3+A12+LowE3		
室内側温度	℃	20			20			20		
室外側温度		0			0			0		
窓種 (開閉機種)		FIX			FIX			FIX		
部位		上部	下部	縦部	上部	下部	縦部	上部	下部	縦部
$Q_A$	W/m	19.432	18.434	18.279	20.409	19.747	19.323	17.616	17.535	17.000
$Q_B$		14.344	13.453	14.019	15.468	14.707	15.089	13.051	12.847	13.035
$Q_C$		4.047	3.752	3.428	4.270	4.183	3.620	4.038	3.794	3.075
$L_{QB}$	W/m	1.042	1.230	0.832	0.671	0.857	0.615	0.527	0.894	0.890
$\Psi_b$	W/(m・K)	0.052	0.061	0.042	0.034	0.043	0.031	0.026	0.045	0.045
$\Psi_{bt}$	W/(m・K)	0.050			0.035			0.040		

表 3.6.4-2 外張断熱工法計算結果

躯体構造		外張断熱工法					
フレーム材質		アルミ					
ガラス		FL3+A12+FL3			FL3+A12+LowE3		
室内側温度	°C	20			20		
室外側温度	°C	0			0		
窓種 (開閉機種)		FIX			FIX		
部位		上部	下部	縦部	上部	下部	縦部
$Q_A$	W/m	21.789	22.054	19.308	19.736	20.022	17.266
$Q_B$		14.974	14.746	14.371	12.929	12.724	12.336
$Q_C$		5.685	5.793	3.689	5.685	5.793	3.689
$L_{QB}$	W/m	1.130	1.515	1.248	1.122	1.504	1.241
$\Psi_b$	W/(m·K)	0.056	0.076	0.062	0.056	0.075	0.062
$\Psi_{bt}$	W/(m·K)	0.064			0.064		

躯体構造		外張断熱工法								
フレーム材質		アルミ樹脂複合			アルミ熱遮断			樹脂		
ガラス		FL3+A12+FL3			FL3+A12+FL3			FL3+A12+LowE3		
室内側温度	°C	20			20			20		
室外側温度	°C	0			0			0		
窓種 (開閉機種)		FIX			FIX			FIX		
部位		上部	下部	縦部	上部	下部	縦部	上部	下部	縦部
$Q_A$	W/m	20.550	19.507	18.218	20.936	20.273	19.284	18.624	18.659	16.691
$Q_B$		14.344	13.453	14.019	15.468	14.707	15.089	13.051	12.847	13.035
$Q_C$		5.009	5.016	3.125	5.036	4.516	3.087	4.984	5.073	2.905
$L_{QB}$	W/m	1.198	1.038	1.074	0.432	1.050	1.108	0.588	0.740	0.752
$\Psi_b$	W/(m·K)	0.060	0.052	0.054	0.022	0.052	0.055	0.029	0.037	0.038
$\Psi_{bt}$	W/(m·K)	0.055			0.045			0.035		

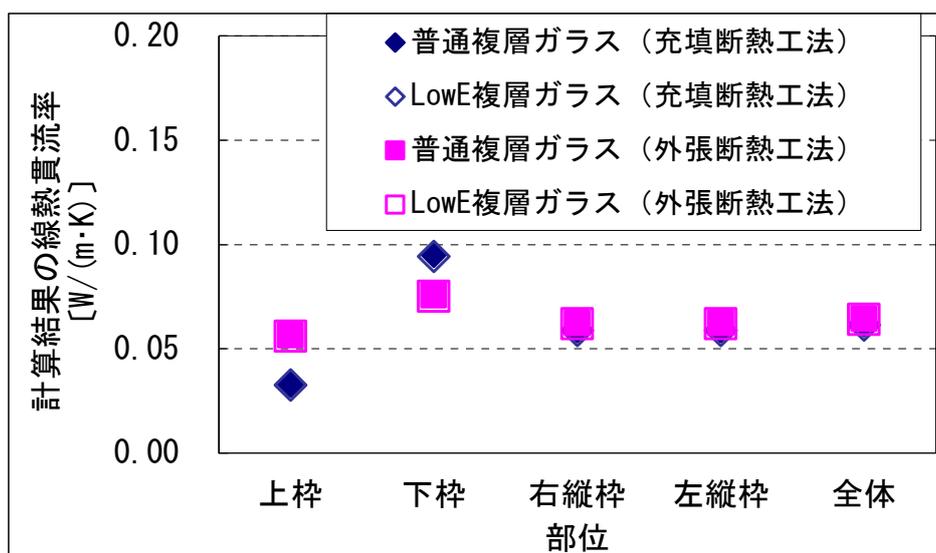


図 3.6.4 普通複層ガラスと LowE 複層ガラスの比較 (計算結果)

## 3.6.5 測定結果と計算結果の比較

測定結果と計算結果を比較した表を表 3.6.5 に示す。測定結果と計算結果共に、 $\Psi_b$  は全て正の値であることから、熱流方向については概ね一致していることが確認できる。しかし、熱流の大きさには測定結果と計算結果で大きな差が見られ、一部測定結果のほうが大きい箇所もあるが、ほとんどの箇所では測定結果が計算結果を大きく下回る結果となった。ガラスの断熱性能違いによる影響も同様で、測定結果と計算結果共にガラスの断熱性能が変わっても窓と躯体の間の熱流にはほとんど影響しない結果（図 3.5-13 及び図 3.6.4 参照）であり傾向としては同じ傾向が見られたが、熱流の大きさには測定結果と計算結果で大きな差が見られ、測定結果が計算結果を大きく下回る結果となった。

表 3.6.5 充填断熱工法計算結果

躯体構造	フレームの材質	ガラスの種類	$\Psi_b$					$\Psi_{bt}$ 全体	
			上枠	下枠	右縦枠	左縦枠			
充填断熱工法	アルミ	普通複層	測定	W/(m·K)	0.004	0.005	0.008	0.012	0.007
			計算	W/(m·K)	0.033	0.095	0.059	0.059	0.062
			比率(測定/計算)	[-]	(0.11)	(0.05)	(0.13)	(0.20)	(0.11)
		LowE複層	測定	W/(m·K)	0.004	0.005	0.007	0.012	0.006
			計算	W/(m·K)	0.033	0.094	0.059	0.059	0.061
			比率(測定/計算)	[-]	(0.11)	(0.05)	(0.12)	(0.20)	(0.11)
	アルミ樹脂複合	普通複層	測定	W/(m·K)	0.020	0.018	0.016	0.026	0.020
			計算	W/(m·K)	0.052	0.061	0.042	0.042	0.050
			比率(測定/計算)	[-]	(0.39)	(0.30)	(0.38)	(0.62)	(0.40)
	アルミ熱遮断	普通複層	測定	W/(m·K)	0.028	0.030	0.008	0.022	0.023
			計算	W/(m·K)	0.034	0.043	0.031	0.031	0.035
			比率(測定/計算)	[-]	(0.84)	(0.70)	(0.25)	(0.71)	(0.65)
樹脂	LowE複層	測定	W/(m·K)	0.021	0.016	0.009	0.016	0.016	
		計算	W/(m·K)	0.026	0.045	0.045	0.045	0.040	
		比率(測定/計算)	[-]	(0.80)	(0.36)	(0.20)	(0.36)	(0.40)	
外張断熱工法	アルミ	普通複層	測定	W/(m·K)	0.014	0.005	0.017	0.019	0.014
			計算	W/(m·K)	0.056	0.076	0.062	0.062	0.064
			比率(測定/計算)	[-]	(0.25)	(0.07)	(0.28)	(0.31)	(0.21)
		LowE複層	測定	W/(m·K)	0.014	0.006	0.018	0.021	0.014
			計算	W/(m·K)	0.056	0.075	0.062	0.062	0.064
			比率(測定/計算)	[-]	(0.26)	(0.07)	(0.30)	(0.34)	(0.22)
	アルミ樹脂複合	普通複層	測定	W/(m·K)	0.017	0.009	0.017	0.020	0.015
			計算	W/(m·K)	0.060	0.052	0.054	0.054	0.055
			比率(測定/計算)	[-]	(0.28)	(0.16)	(0.31)	(0.38)	(0.28)
	アルミ熱遮断	普通複層	測定	W/(m·K)	0.024	0.028	0.010	0.023	0.022
			計算	W/(m·K)	0.022	0.052	0.055	0.055	0.045
			比率(測定/計算)	[-]	(1.10)	(0.53)	(0.18)	(0.42)	(0.48)
樹脂	LowE複層	測定	W/(m·K)	0.025	0.015	0.016	0.014	0.018	
		計算	W/(m·K)	0.029	0.037	0.038	0.038	0.035	
		比率(測定/計算)	[-]	(0.86)	(0.40)	(0.42)	(0.36)	(0.51)	

### 3.7 測定と計算で整合性が確認出来なかった要因

第3章では、窓と躯体との間の熱移動について、幾つかの窓フレームの材質、躯体構造、ガラスの仕様における測定を行い、また同一条件における計算も行うことで、測定結果と計算結果の整合性の確認を行った。しかし、測定結果と計算結果では値に乖離が見られ、測定結果が計算結果を大きく下回る結果となった。測定結果が計算結果を大きく下回る結果となった要因として、以下の事項が考えられる。

#### (1) 測定と計算における室内外の熱伝達率の相違

解析では室内外の熱伝達率を、室内側  $8.94\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、室外側  $23.26\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  という条件を設定しているのに対し、測定では室内外にファンで風速を与えることで熱伝達率を与えているため、試験体近傍での熱伝達率に差異が生じている可能性がある。

#### (2) 測定における局所熱伝達率のバラつき

解析では室内外の熱伝達率を、室内側  $8.94\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、室外側  $23.26\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  という条件を計算対象に対して一様に設定しているのに対し、測定では室内外にファンで風速を与えることで熱伝達率を与えているため、上下方向の熱伝達率の分布や試験体の凹凸等により試験体の各所で熱伝達率にバラつきが生じている可能性がある。

#### (3) 熱流計等の測定機器の配線による影響

計測点が多数あるため熱流計等の測定機器の配線が多くなることで、室内外の熱伝達率や試験体内部の空気層の熱伝導率に影響を及ぼす可能性がある。

#### (4) 熱流計の設置による影響

窓と躯体との間の熱移動を測定するために躯体と接するフレームの各所に熱流計を設置したが、この熱流計が窓と躯体との間の熱移動に影響を及ぼしている可能性がある。

#### (5) 測定の精度（熱流計の浮き、剥れ等）

躯体と接するフレームの各所に配置した熱流計が、接着力不足による浮きや剥れが生じている可能性があり、それにより正確な熱量を測定出来ていない可能性がある。

(3)～(5)の項目については、本測定を実施する上で避けることのできない事項である。一方で、(1)及び(2)については検討可能な事項であり、また影響の大きい事項であると考えられるため、第4章及び第5章にて検討することとする。

### 3.8 まとめ

第3章では、窓と躯体との間の熱移動について、幾つかの窓フレームの材質、躯体構造、ガラスの仕様における測定を行い、結果を得た。また、同一条件における計算も行うことで、得られた測定結果と計算結果の比較を行い、様々な知見を得た。得られた知見を以下にまとめる。

- ①全ての条件において、窓と躯体との間には熱流が生じていることが測定からも確認できた。また、熱流の方向は全ての条件で躯体の額縁の見込みにおいて、熱流方向が室内側寄りと室外側寄りで反転することが確認された。
- ②測定結果と計算結果共に、 $\Psi_b$ は全て正の値であることから、熱流方向については概ね一致していることが確認できる。しかし、熱流の大きさには測定結果と計算結果で大きな差が見られ、一部測定結果のほうが大きい箇所もあるが、ほとんどの箇所で測定結果が計算結果を大きく下回る結果となった。
- ③測定結果と計算結果共に、 $\Psi_b$ は普通複層ガラスとLowE複層ガラスの違いによる影響がほとんど見られなかったため、窓と躯体の間の熱流はガラスの熱性能の違いによる影響をほとんど受けないことが確認できた。
- ④測定結果と計算結果で大きな差が見られた要因として、測定と計算における室内外の熱伝達率の相違、測定における局所熱伝達率のバラつき、熱流計等の測定機器の配線による影響、熱流計の設置による影響、測定の精度（熱流計の浮き、剥れ等）が考えられた。その中で、測定と計算における室内外の熱伝達率の相違、測定における局所熱伝達率のバラつきの2項目については検討可能な事項であり、また影響の大きい事項であると考えられるため、第4章及び第5章にて検討する。

参考文献

- 1) ISO 15099:2003, Thermal performance of windows, doors and shading devices - Detailed calculations
- 2) 倉山千春：開口部の総合熱性能評価法に関する研究，鹿児島大学大学院理工学研究科学位論文，2007
- 3) JIS R 3106：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，1998
- 4) JIS R 3107：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，1998



第4章 熱伝達率分布の測定

---

---



#### 4.1 はじめに

第3章で、窓と躯体との間の熱流が測定と計算で値に大きな乖離があり、その大きな要因の一つが熱伝達率の分布であることが考えられた。そこで、第4章と第5章で測定時の開口部の熱伝達率の分布について検討を行う。

開口部の熱性能の計算による評価において、熱伝達率は一律の条件として与えられているものがほとんどである。開口部の測定法<sup>1)2)</sup>では、標準板を用いて対流分と放射分を合わせた平均の熱伝達抵抗（熱伝達率の逆数）として数値が規定され、最終的に熱伝達抵抗を補正する基準化熱貫流率として評価している。一方で、開口部の計算法<sup>3)~8)</sup>では、放射分と対流分を合わせた総合熱伝達率として、部位や位置・場所によらず一律な値が規定されている。しかし、実際は熱伝達率は一律ではなく、特に上下方向の分布は顕著であることが知られている。開口部の評価において、開口部のサイズが変わると測定値と計算値で差異が大きくなるものがあるのは、この熱伝達率の分布が原因と考えられている。そのため、測定時の熱伝達率の分布を把握することは、窓と躯体との間の熱移動について測定と計算の差異の要因を明らかにするだけでなく、開口部の評価を正確に行なう上でも重要な項目である。

まず、本章では熱伝達率の分布を実測により把握することとする。

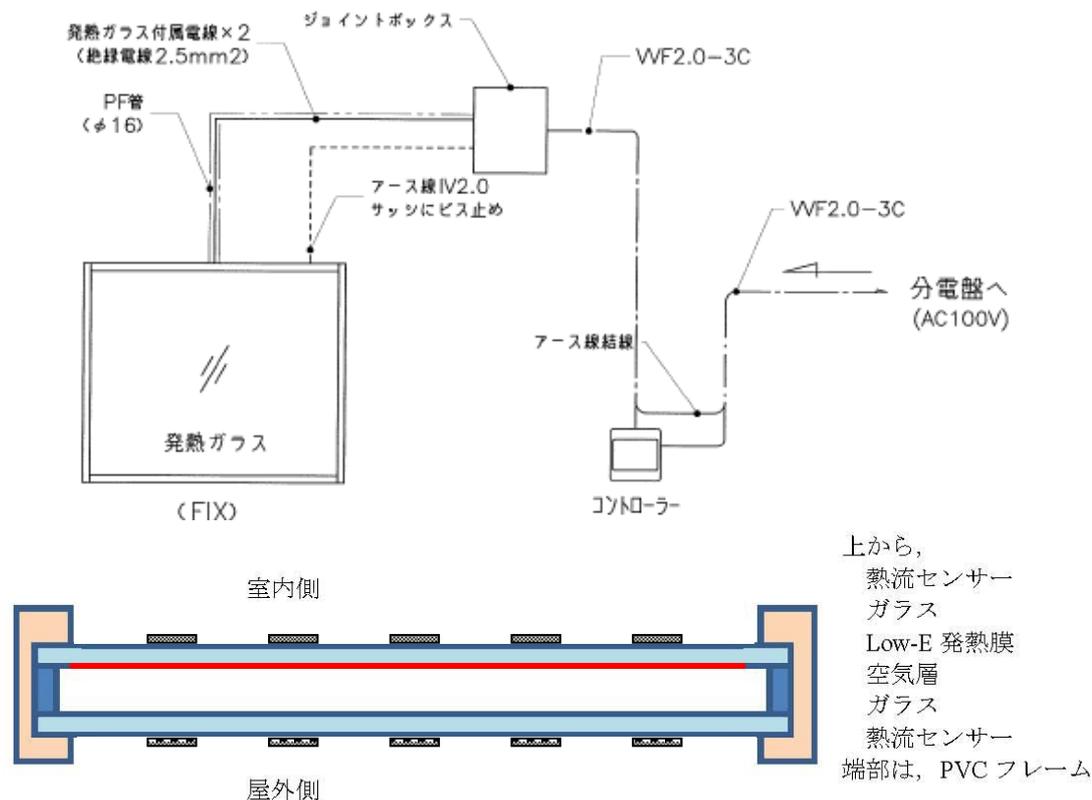
## 4.2 測定装置の概要

測定装置は、第3章で使用した日射熱取得率測定装置<sup>9)</sup>を用いる(3.2節参照)。

## 4.3 測定対象

測定対象を図4.3-1～図4.3-7に示す。測定対象は、LowE発熱複層ガラス(図4.3-1参照)を用いた樹脂フレームのFIX窓(図4.3-2参照)とした。発熱ガラスの表面には、室内側、室外側共に50×50mmの熱流計が図4.3-3のように等間隔に貼付けられ、この熱流計の測定結果から貼付けられた位置の総合熱伝達率を算出する仕様になっている。

なお、発熱ガラスを用いた理由は、発熱ガラスを発熱させることで、ガラス部通過する貫流熱分を打ち消すことを可能とすることで、フレームのみの性能を測定することができる等、様々な試験に使用できると考えられたためである。ただし、本試験では、発熱機能は使用しない。



- ・室内側からFL 5mm LowE発熱膜+空気層12mm+FL 5mm
- ・ガラス中央の熱貫流率2.03 W/(m<sup>2</sup>·K) (メーカー提供値)
- ・Low-E発熱膜面の垂直放射率0.21 (メーカー提供値)
- ・定格発熱量 190W (定格電圧 100V、抵抗 23.8Ω、縦電極)

図 4.3-1 発熱ガラスの概要

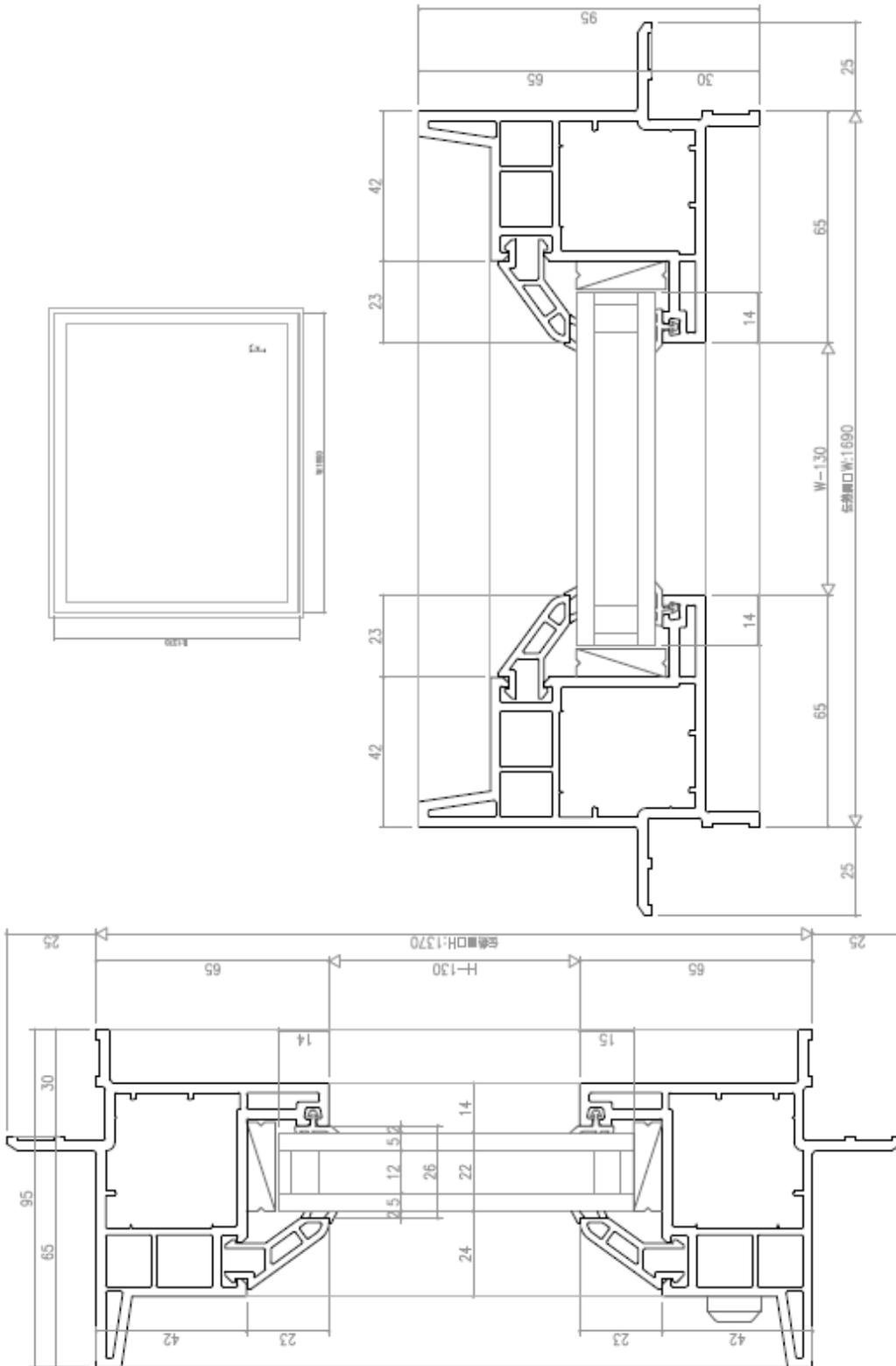
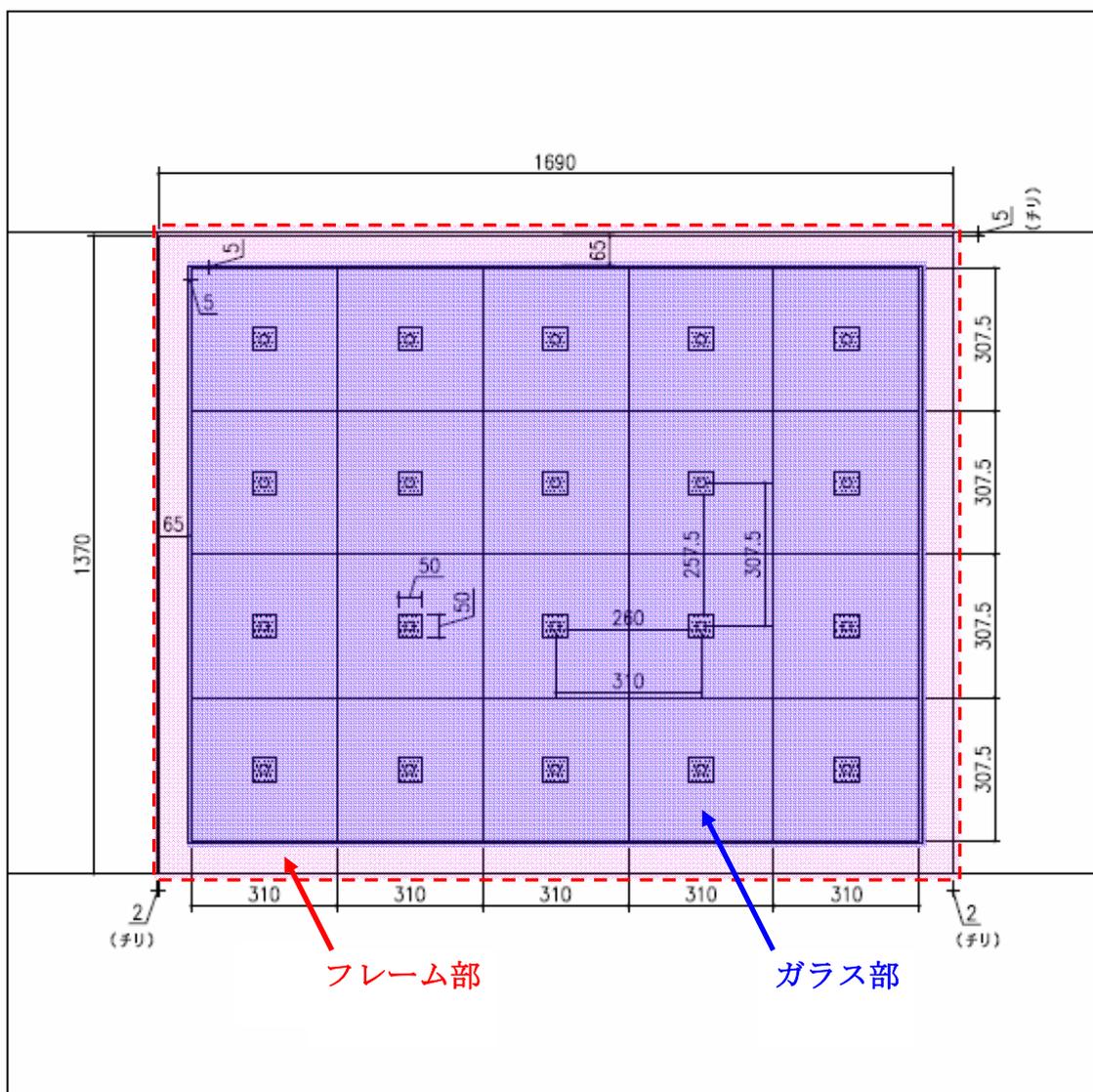


図 4.3-2 測定対象断面図



: 試験体範囲
  : 50mm×50mm の熱流計

図 4.3-3 熱流計の貼付位置



図 4.3-4 試験体写真 (恒温室外側)

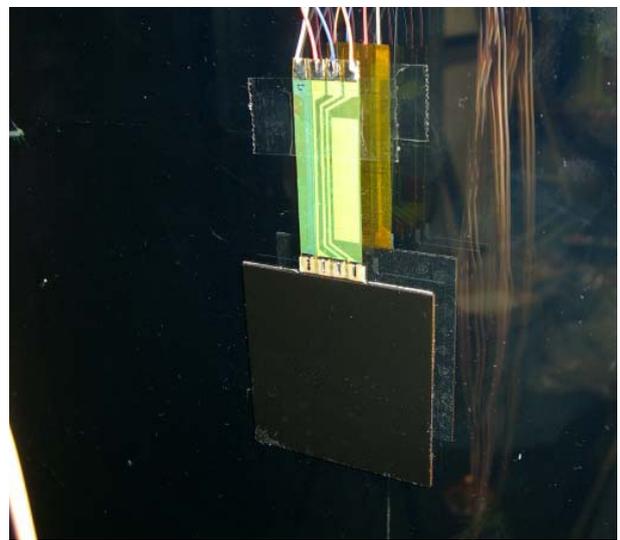


図 4.3-5 50mm × 50mm 熱流計



図 4.3-6 試験体写真 (室外側)



図 4.3-7 試験体写真 (室内側)

#### 4.4 測定条件

測定条件は、3章の測定条件（3.4節参照）に合わせた設定とした。

#### 4.5 測定結果

##### 4.5.1 熱貫流率

窓の熱貫流率の測定値は、 $2.45\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ であった。

##### 4.5.2 表面温度の分布

本試験で  $50\times 50\text{mm}$  の熱流計を貼付けた部分は、表面温度も測定している。ここでは、各部分の表面温度を図 4.5.2-1 及び図 4.5.2-2 に示す。図 4.5.2-1 及び図 4.5.2-2 中の下のコンター図は、表面温度の数値をコンター表示したものであり、図中の上の数値及びその位置とリンクする表示としてある。フレーム部分（灰色部）とコンター図との間は、測定範囲外の箇所である。

これらの結果を確認すると、W 方向の分布については、温度差の大きいところで、室外側は  $0.3^\circ\text{C}$  程度（下部）、室内側は  $0.9^\circ\text{C}$  程度（上部）であり、室内側、室外側共に若干の数値の乖離が見られるものの、測定誤差等を考慮すると大きな分布はないと考えられる。そこで、W 方向（横方向）について平均値を取り、H 方向（高さ方向）の分布を確認できるグラフを図 4.5.2-3 に示す。この結果から、H 方向の分布については、室外側は高さ  $530\text{mm}$  付近で表面温度が低くなる分布となっており、室内側は上に行くに従い表面温度が高くなる分布となっていることが確認できる。

なお、表面温度の平均値は室外側が  $0.7^\circ\text{C}$ 、室内側が  $12.8^\circ\text{C}$  であった。

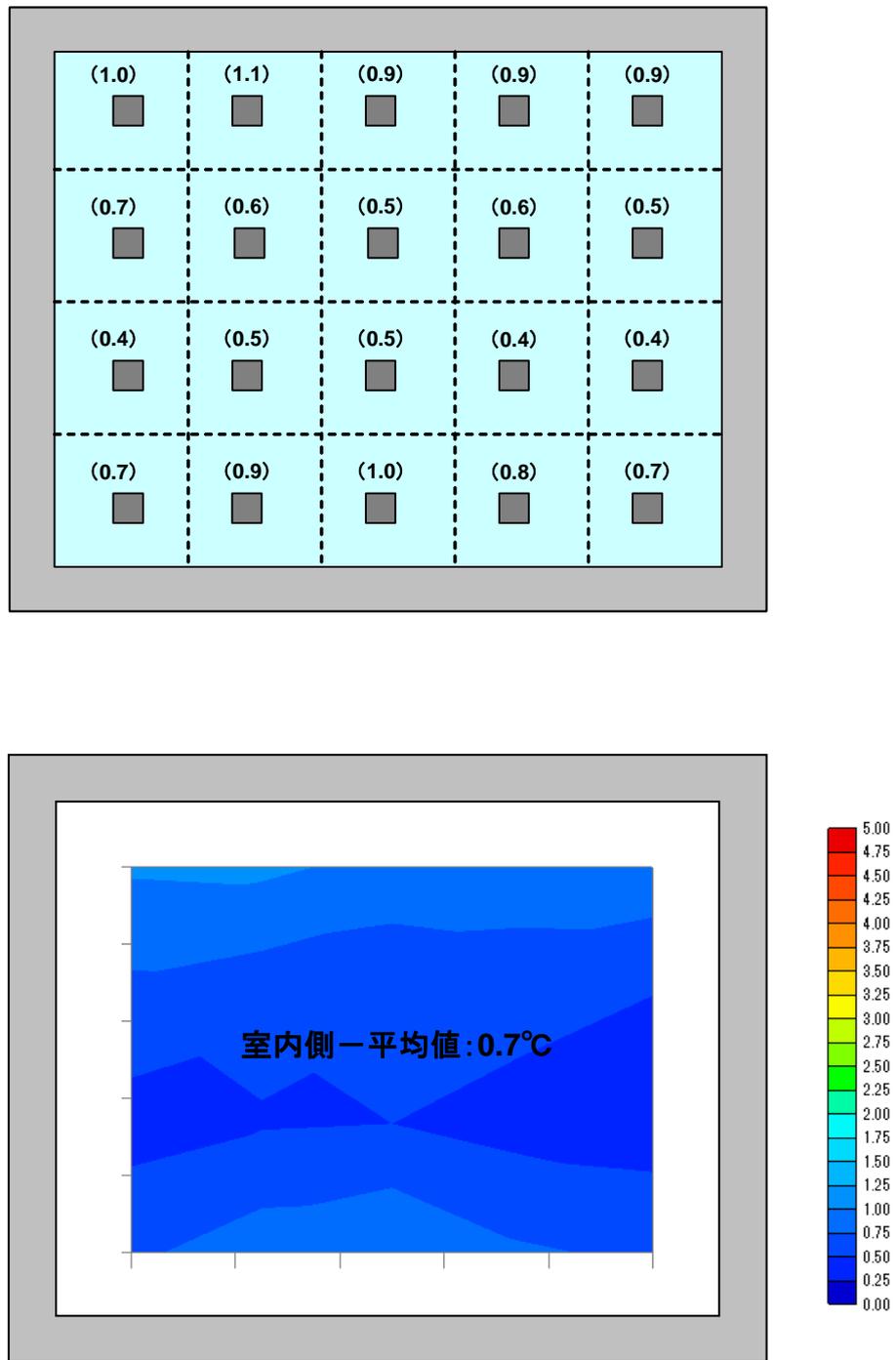


図 4.5.2-1 室外側表面温度測定結果

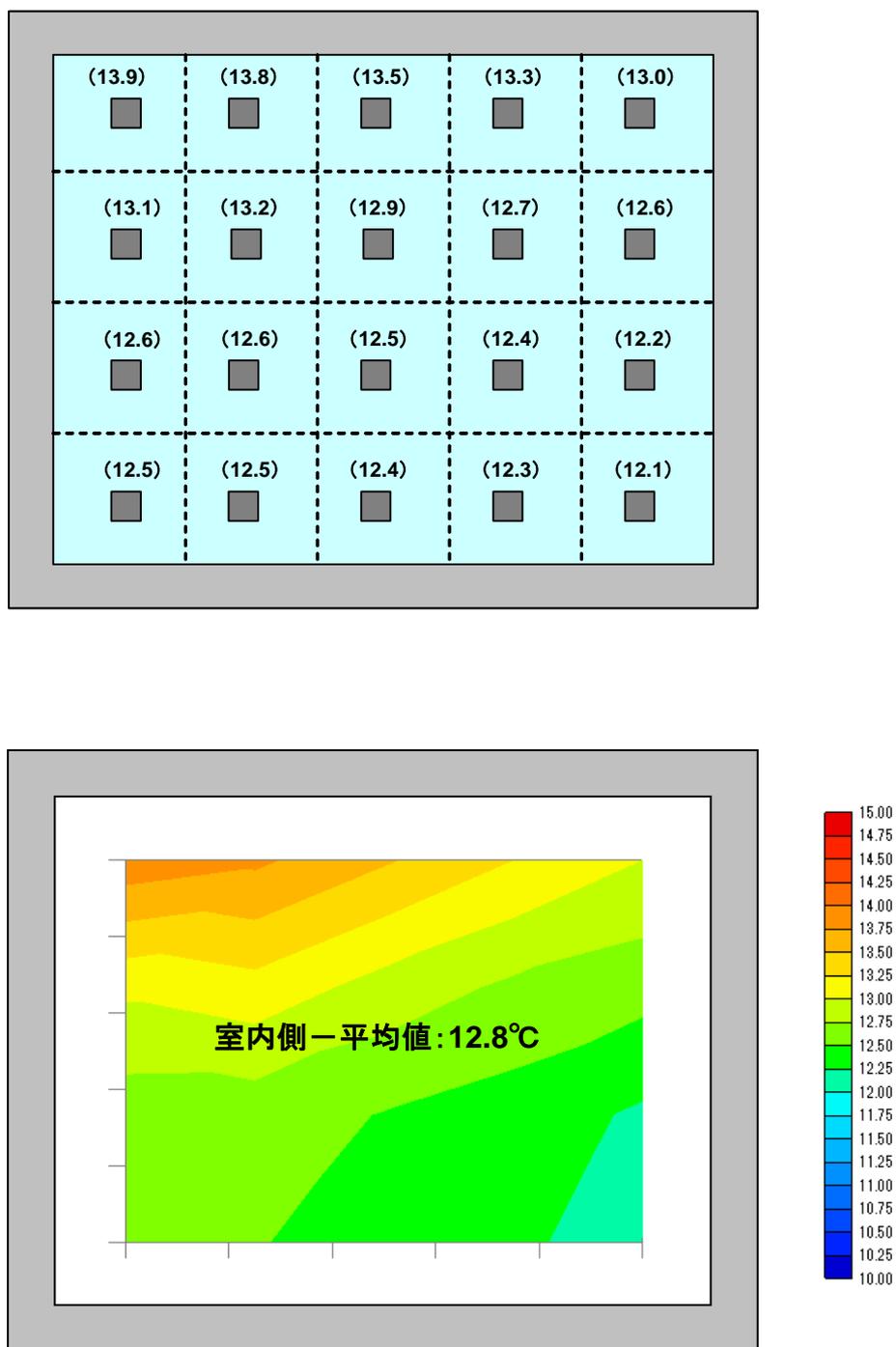


図 4.5.2-2 室外側表面温度測定結果

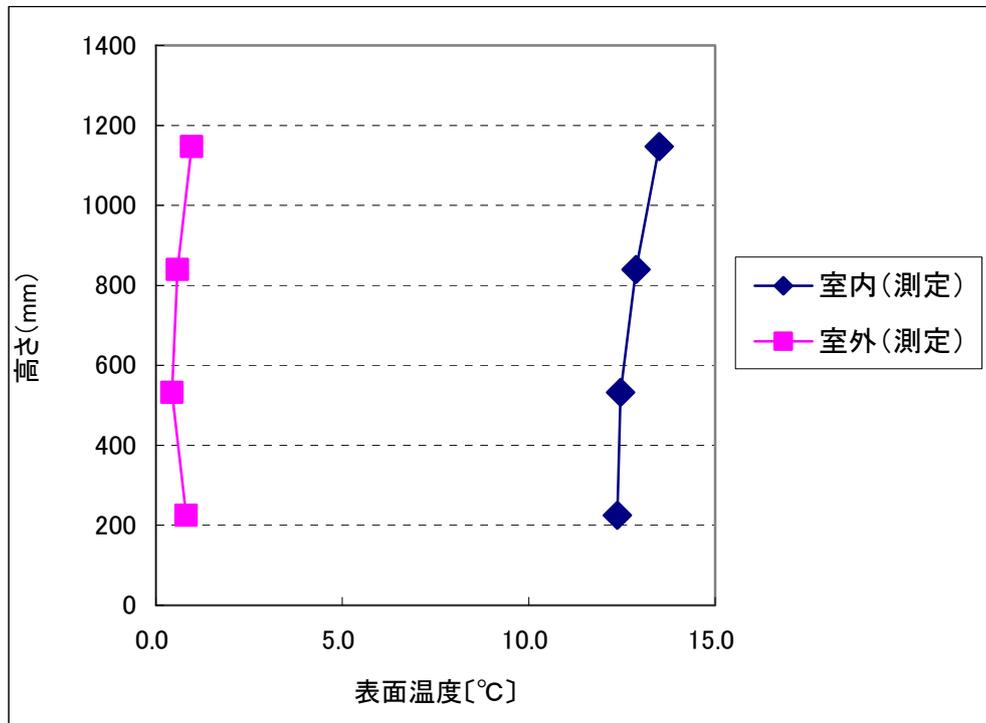


図 4.5.2-3 高さ方向の表面温度の分布 (W方向の平均値)

### 4.5.3 熱伝達率の分布

熱伝達率分布の測定結果を図 4.5.3-1 及び図 4.5.3-2 に示す。図 4.5.3-1 及び図 4.5.3-2 中の下にあるコンター図は、熱伝達率の数値をコンター表示したものであり、図中の上の数値及びその位置とリンクする。フレーム部分（灰色部）とコンター図との間は、測定範囲外の箇所である。なお、各部の熱伝達率は、計測された熱流束を試験時の室内外の温度差で除することで求められ、(4.5.3) 式にて算出している。

$$h = \frac{q_e}{\Delta T} \quad \dots (4.5.3)$$

$h$  : 各部の総合熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$q_e$  : 各部の計測された熱流束 [W/m<sup>2</sup>]

$\Delta T$  : 試験時の室内外の温度差 [K]

図 4.5.3-1 及び図 4.5.3-2 から、多少ばらつきがあるものの、室内側、室外側共に熱伝達率は高さ方向で分布があることが確認できる。また、W 方向についても分布が確認でき、室外側は高さ 220mm 及び 540mm 付近では中央部付近で値の低減が見られる。

4.5.2 項の温度分布と同様に、W 方向について平均値を取り、高さ方向の分布を確認すると図 4.5.3-3 のようなグラフとなる。室外側は高さ 540mm 付近で熱伝達率が最大となり、そこから上に行くに従い低下する。一方で、室内側は上に行くに従い徐々に熱伝達率が大きくなっている。

なお、熱伝達率の平均値は、室外側で 24.8W/(m<sup>2</sup>·K)、室内側で 7.7W/(m<sup>2</sup>·K)であった。

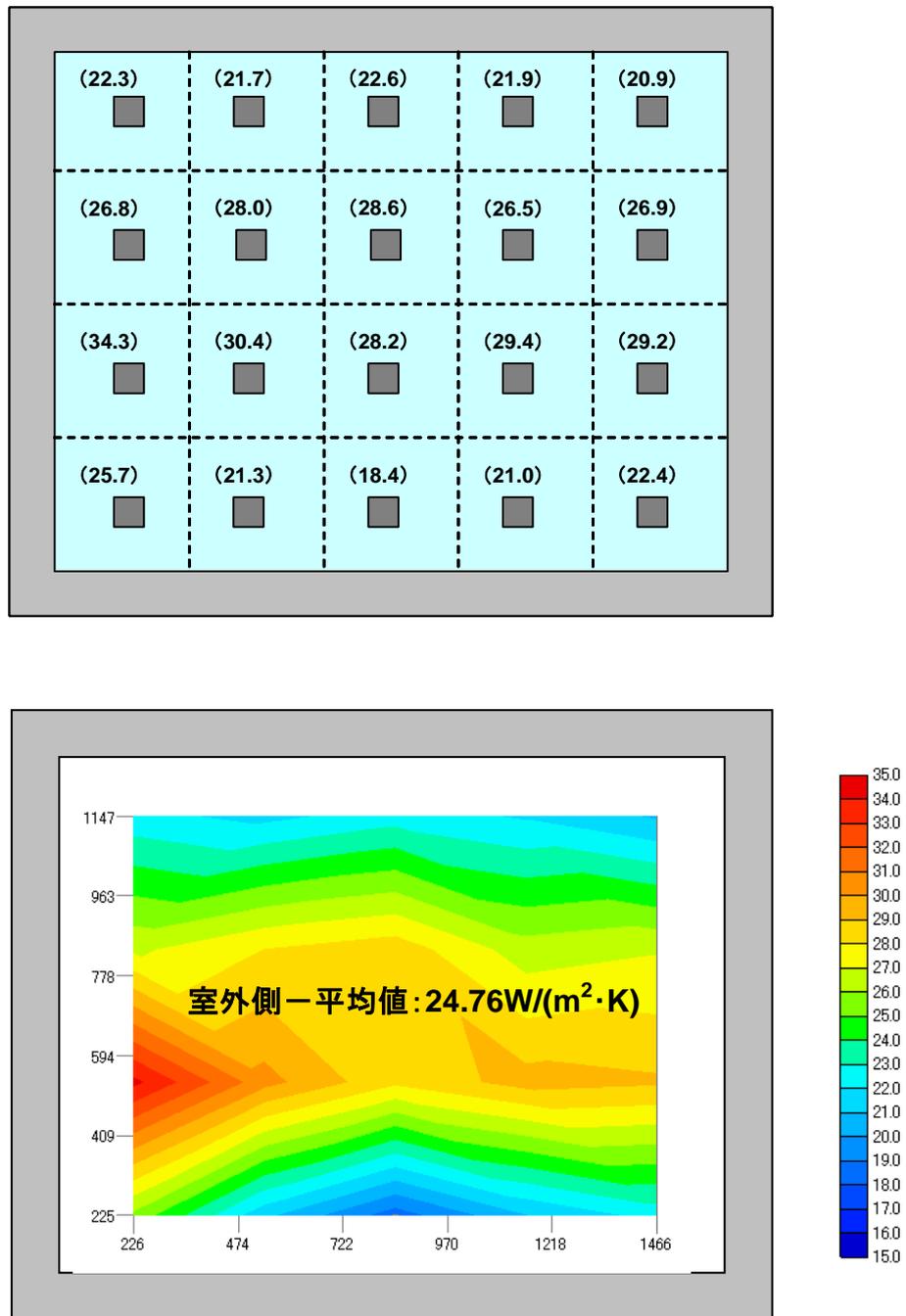


図 4.5.3-1 室外側総合熱伝達率測定結果

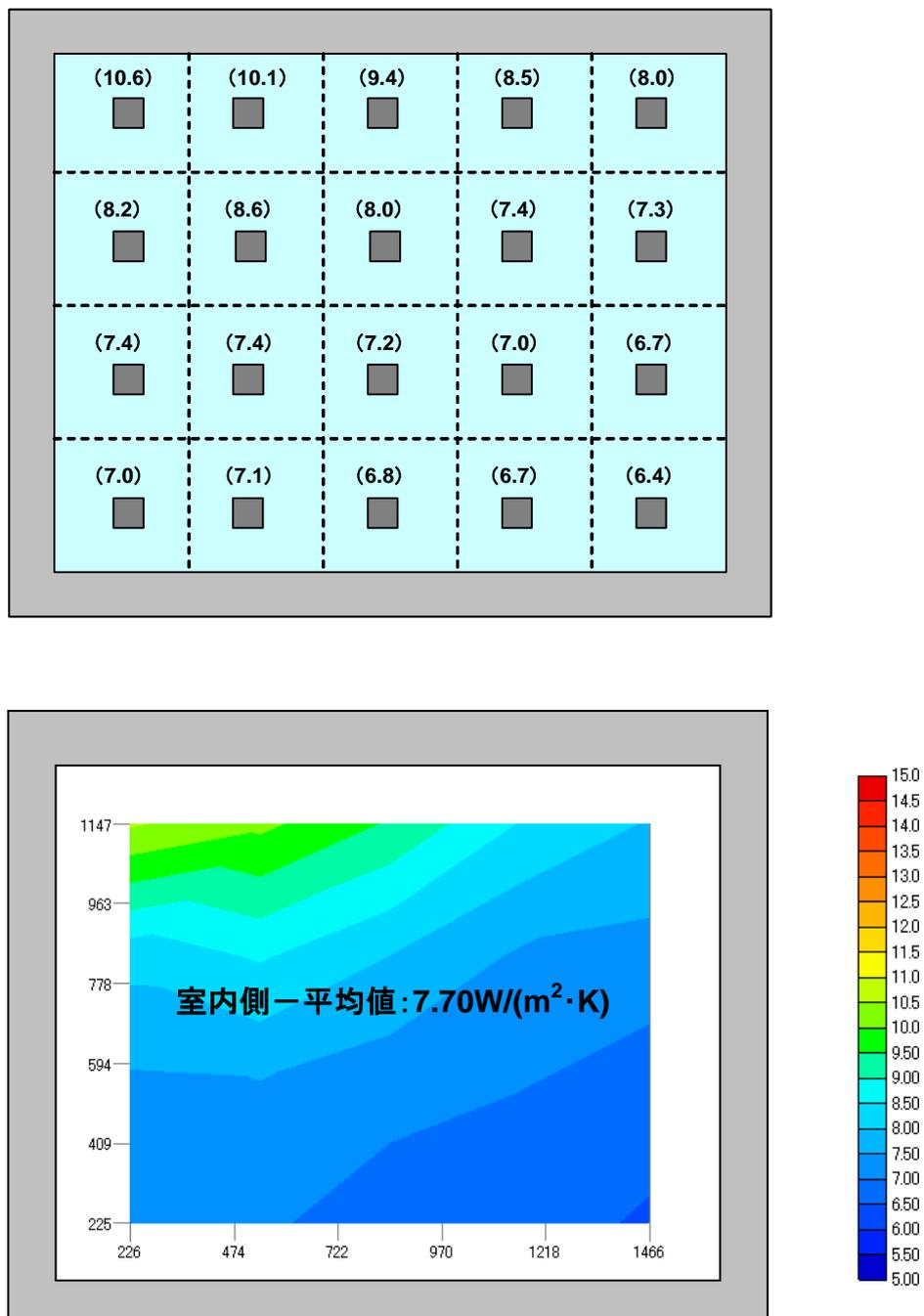


図 4.5.3-2 室内側総合熱伝達率測定結果

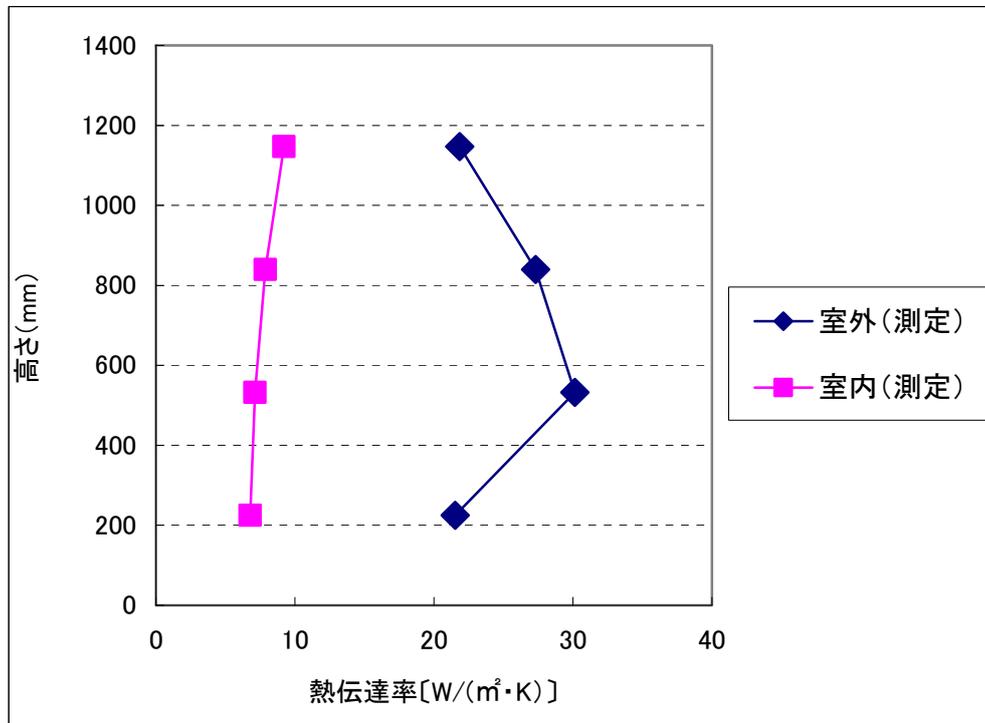


図 4. 5. 3-3 高さ方向の総合熱伝達率の分布 (W方向の平均値)

#### 4.6 まとめ

第3章で、窓と躯体との間の熱流が実測と計算で値に大きな乖離があり、その大きな要因の一つが熱伝達率の分布であることが考えられた。そこで、第4章と第5章で測定時の開口部の熱伝達率の分布について検討を行うこととした。

まず、この第4章で熱伝達率の分布の測定を行い、結果を得た。得られた結果を以下にまとめる。

- ①窓の熱貫流率の測定値は、 $2.45\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ であった。
- ②表面温度のW方向の分布は、室内側、室外側共に若干の数値の差異が見られるものの、測定誤差等を考慮すると大きな分布はないと考えられる。
- ③表面温度のH方向の分布は、室外側は高さ540mm付近で低くなる分布となっており、室内側は上に行くに従い高くなる分布となっている。
- ④平均表面温度は室外側が $0.7^\circ\text{C}$ 、室内側が $12.8^\circ\text{C}$ であった。
- ⑤総合熱伝達率は、室内側、室外側共に高さ方向で分布があることが確認できた。また、W方向についても分布が確認でき、室外側は高さ220mm及び540mm付近では、中央部付近で総合熱伝達率の低減が見られた。
- ⑥総合熱伝達率について、W方向で平均値を取り高さ方向の分布を確認すると、室外側は高さ540mm付近で最大となり、そこから上に行くに従い低下する。室内側は上に行くに従い徐々に熱伝達率が大きくなっていることが確認できた。
- ⑦熱伝達率の平均値は、室外側では $24.8\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、室内側では $7.7\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ であった。

参考文献

- 1) ISO 12567-1 : Thermal performance of windows and doors - Determination of thermal transmittance by hot box method - Complete windows and doors, 2000
- 2) JIS A 4710 : 建具の断熱性試験方法, (財) 日本規格協会, 2004
- 3) ISO 10077-1 : Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance -- Part 1:General, 2006
- 4) ISO 10077-2 : Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance -- Part 2:Numerical method for frames, 2003
- 5) JIS A 2102-1 : 窓及びドアの熱性能-熱貫流率の計算-第1部:一般, (財) 日本規格協会, 2011
- 6) JIS A 2102-2 : 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方法, (財) 日本規格協会, 2011
- 7) JIS R 3107:1998, 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
- 8) ISO10292:1994, Glass in building -- Calculation of steady-state U values (thermal transmittance) of multiple glazing
- 9) 倉山千春 : 開口部の総合熱性能評価法に関する研究, 鹿児島大学大学院理工学研究科学学位論文, 2007



第5章 熱伝達率分布の計算

---

---



### 5.1 はじめに

第3章で、窓と躯体との間の熱流が測定と計算で値に大きな乖離があり、その大きな要因の一つが熱伝達率の分布であることが考えられた。そこで、第4章では熱伝達率の分布の測定を行った。第4章でも述べたが、測定時の熱伝達率の分布を把握することは、窓と躯体との間の熱移動について測定と計算の差異の要因を明らかにするだけでなく、開口部の評価を正確に行なう上でも重要な項目である。

第5章では、第4章で実施した熱伝達率の測定を、流体解析によりシミュレートすることで熱伝達率の分布を計算により導出し、計算値と測定値の比較を行うことにより計算結果の整合性を確認する。また、測定で把握し切れなかった箇所の熱伝達率の分布を解析結果より把握する。

## 5.2 計算方法

第4章で実施した測定を、CFDにてシミュレーションをすることで開口部全体の熱伝達率を算出する。なお、シミュレーションは3次元熱流体解析ソフト STREAM (Ver. 9) を用いる。

### 5.2.1 解析モデル

解析モデルは、計算時間、計算負荷を減らし、また収束性を高めるために、図 5.2.1-1 のように第4章で用いた日射熱取得率測定装置<sup>1)</sup>の開口部周辺のみをモデル化する。

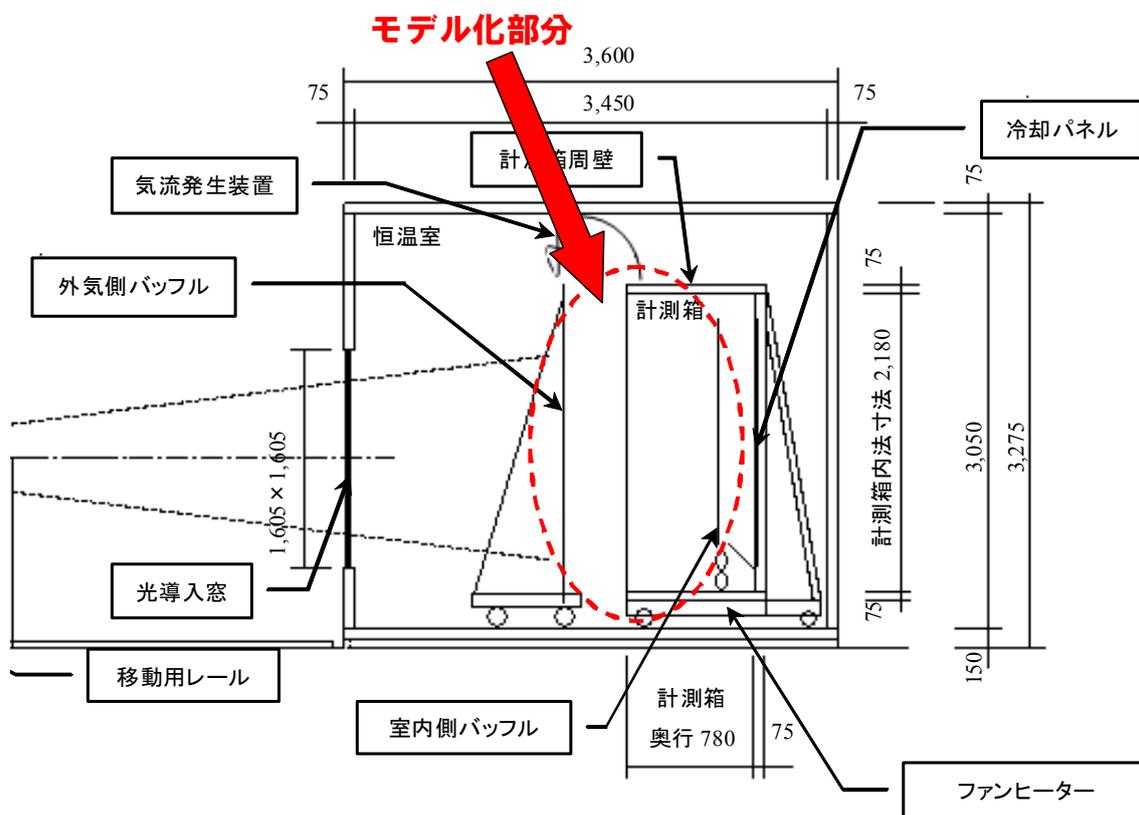


図 5.2.1-1 解析モデルのモデル化範囲

解析モデルを図 5.2.1-2 及び図 5.2.1-3 に示す。解析は、定常解析で実施した。レイノルズ数を概算したところ、室内側  $8 \times 10^2$ 、室外側  $7 \times 10^4$  であったため、乱流モデルは低レイノルズ型線形モデルを使用した。解析モデルのセル数は（要素数）は、およそ 400 万セルとなった。

輻射の計算手法は、多数の粒子を飛ばし、その到達面を追跡し形態係数計算を行う VF 法を用いる。

室内外の流速は、測定条件に合わせたいが、測定の誤差要因となるため、測定時には計測することが出来ない。しかし、熱伝達率の分布を把握するためには、流速は重要な項目である。測定では、室内側のファンは空気を攪拌させるように設置されている。そこで、室内側の流速はほぼ無風の状態として  $0.05\text{m/s}$  とした。室外側の風速は、解析時に開口部の熱貫流率が測定時の熱貫流率と概ね一致するようにパラメータ分析を行い、 $3.7\text{m/s}$  に設定した。

ガラス部表面の放射率は、修正放射率を用いて普通表面には  $0.837$ 、LowE 発熱膜面には  $0.23$  と設定した。

フレーム部は、計算時間、計算負荷を減らし、また収束性を高めるために、フレームの空気層等を忠実にモデル化することはせず、外形を簡略化した無垢のフレームを作成し、別途 TB2D/BEM を用いて算出したフレーム部の熱貫流率から等価の熱伝導率を求め、物性値として与えた。

解析領域の Y-MAX 面（室外側）と Y-min 面（室内側）は、室内外のバッフルを想定し、ノースリップ条件とした。また、放射率の設定として、高透過ガラスの修正放射率  $0.837$  を設定した。

解析領域の X-MAX 面、X-min 面、Z-MAX 面、Z-min 面は、輻射熱量を反射させる設定とし、室内側の全ての輻射熱量を Y-MAX 面で受け、室外側の全ての輻射熱量を Y-min 面で受ける設定とした。

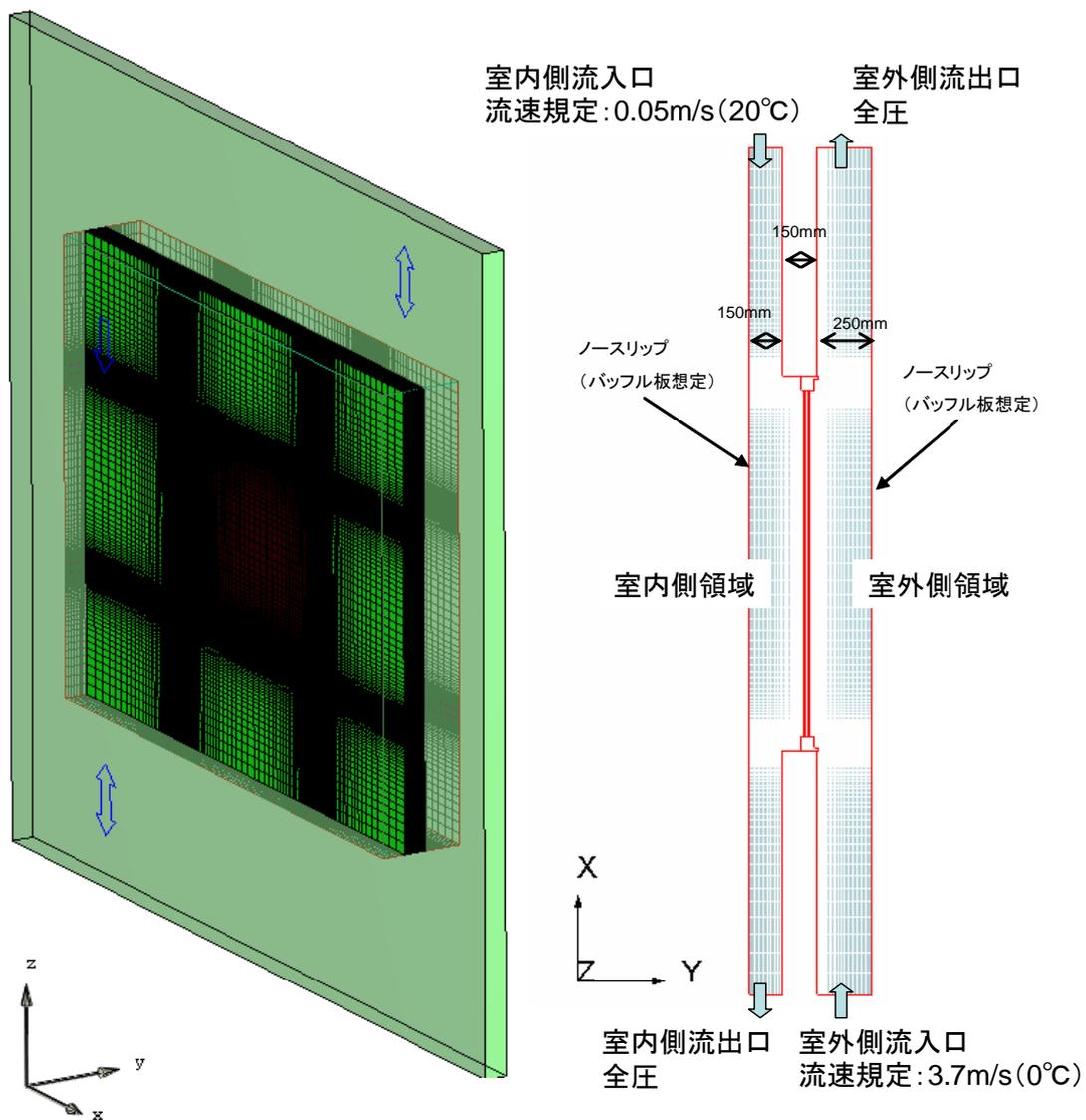


図 5. 2. 1-2 解析モデルの概要

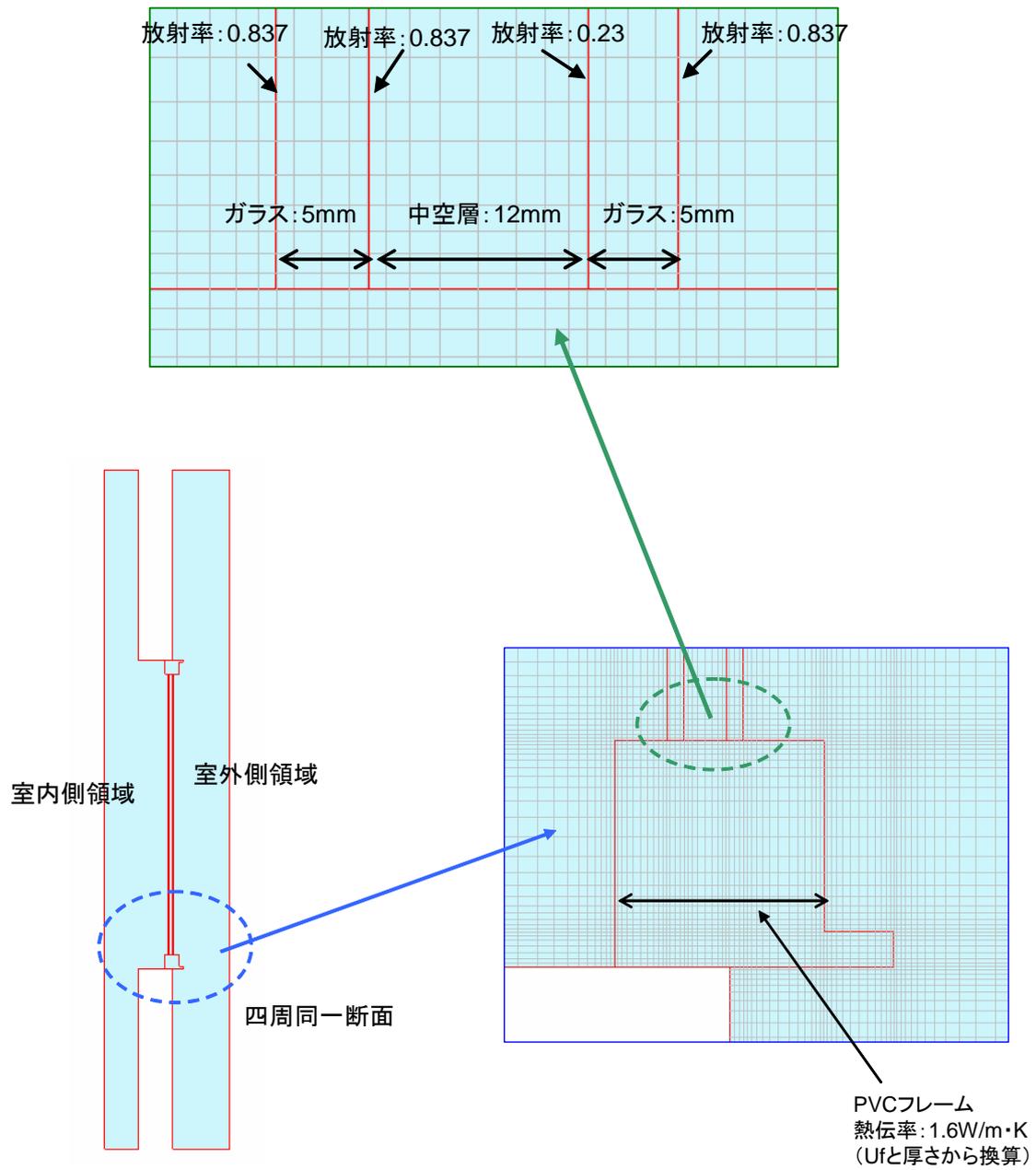


図 5. 2. 1-3 解析モデルの詳細

### 5.2.2 熱伝達率の算出方法

STREAM (Ver 9) のコンター図の出力には、熱伝達率という項目は存在するものの、これは隣接するセル間の熱伝達率を出力している。また、この熱伝達率は対流成分の熱流束から求められた熱伝達率であり、放射成分の熱伝達率が考慮されていないため、今回必要としている熱伝達率の値とは異なる。

そこで、(5.2.2-1) 式、(5.2.2-2) 式及び (5.2.2-3) 式と STREAM に搭載されている変数登録機能を用いて、コンター表示が可能な対流成分の熱流束と表面温度から対流熱伝達率と放射熱伝達率を算出する。そして、これらを合算することで総合熱伝達率の分布をコンター図で表現する。

$$h_r = \frac{\varepsilon \cdot \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{(T_1 - T_2)} \quad \dots (5.2.2-1)$$

$h_r$ : 放射熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$\varepsilon$ : 放射率 [-]

$\sigma$ : ステファン・ボルツマン定数 (=5.67×10<sup>-8</sup> [W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>)])

$T_1$ : 高温側表面温度 [K]

$T_2$ : 低温側表面温度 [K]

$$h_c = \frac{Q}{(T_1 - T_a)} \quad \dots (5.2.2-2)$$

$h_c$ : 対流熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>·K]

$Q$ : 熱流束 (対流成分のみ) [W/m<sup>2</sup>]

$T_a$ : 空気温度 [K]

$$h_r + h_c = h \quad \dots (5.2.2-3)$$

$h$ : 総合熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

### 5.3 計算結果

#### 5.3.1 壁からの無次元距離 $Y^+$ の確認

本解析のような壁面近傍を扱う解析では、壁からの無次元距離  $Y^+$  を適切に与えないと、正確な解析結果に得られないことがある。そのため、ここでは壁からの無次元距離  $Y^+$  がどの程度の値となっているかを確認する。なお、低レイノルズ数型の壁関数モデルを使用する場合、一般的に  $Y^+ < 1$  が望ましいとされているが、STREAM (Ver 9) では  $Y^+ < 10$  で十分な精度を有する計算手法をとっている。

図 5.3.1-1 に室内側、図 5.3.1-2 に室外側の  $Y^+$  のコンター図を示す。室外側は、縦枠のガラスエッジ部近傍で 3.5 程度となっており、 $Y^+ < 1$  と比べると少し大きめの結果となっているが、計算精度に大きく影響しないと考えられる。室内側についても、大きい箇所では 1.2 程度であり、 $Y^+ < 1$  とはならなかったが計算精度には問題ないと考えられる。

参考に、流速ベクトルを図 5.3.1-3 のようになる。

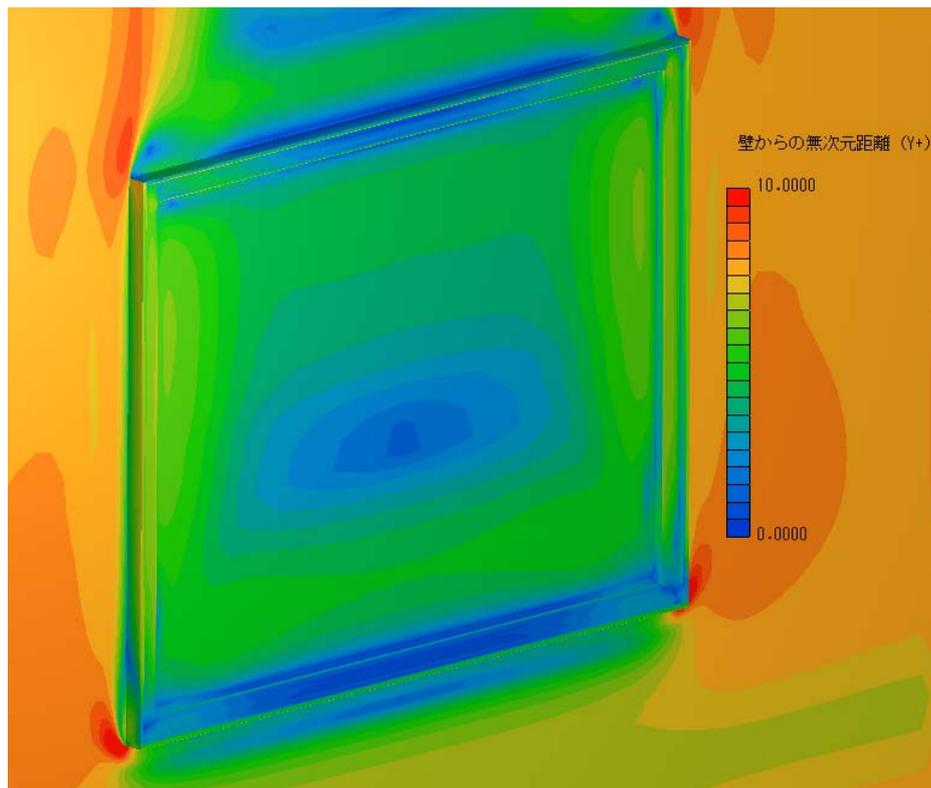


図 5.3.1-1 室外側  $Y^+$  の解析結果

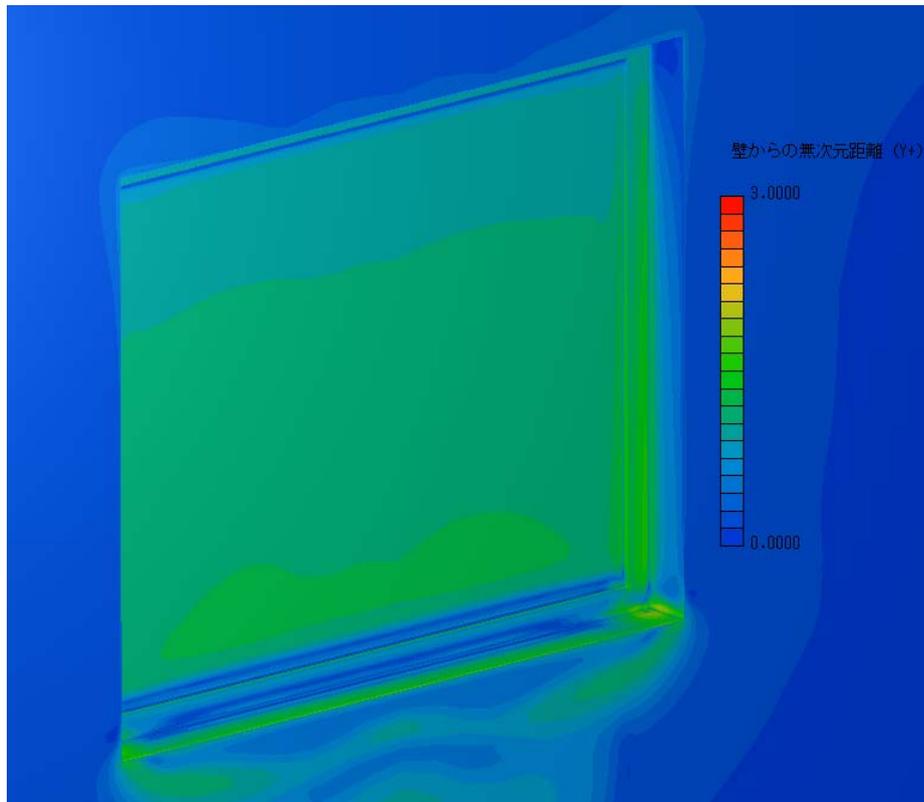


図 5. 3. 1-2 室内側 Y+の解析結果

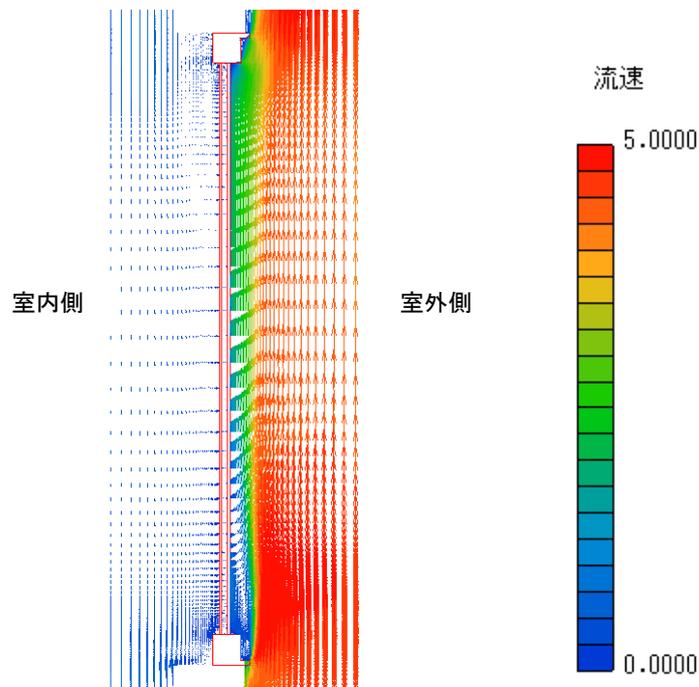


図 5. 3. 1-3 流速ベクトル図

### 5.3.2 熱貫流率の算出

STREAM (Ver 9) では、解析結果から直接熱貫流率の算出は出来ない。そこで、以下の方法により開口部の熱貫流率を導出した。

まず、解析で出力される結果ファイル (.1ファイル) から、最終サイクルの放射伝熱量と対流伝熱量を抜き出し、それらの結果を合算して開口部の総熱流量を求める。求めた開口部の総熱流量を内外温度差 ( $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ ) と伝熱開口面積 (W : 1.69m, H : 1.37m) で除することで、熱貫流率を求めた (図 5.3.2-1 参照)。

その結果、熱貫流率は  $2.38\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ であった。

heat_flux	室内上面	5.7300E-01	6.9588E+02		695.88	
heat_flux	室外上面	9.5500E-01	-9.5049E+01		-95.049	
heat_flux	室内下面	5.7300E-01	-6.5009E+02		-650.09	
heat_flux	室外下面	9.5500E-01	0.0000E+00		0	
対流伝熱量					-95.049 W	
DATA NO.	2	AREA = 1.150E+01				
	QOUT	= 3.039E+03	QIN = 3.054E+03	QNET	= -1.527E+01	-15.27
	QOUT/AREA	= 2.642E+02	QIN/AREA = 2.655E+02	QNET/AREA	= -1.328E+00	
	REGION NAME:Ymax面					
DATA NO.	3	AREA = 1.150E+01				
	QOUT	= 3.923E+03	QIN = 3.858E+03	QNET	= 6.461E+01	64.61
	QOUT/AREA	= 3.410E+02	QIN/AREA = 3.354E+02	QNET/AREA	= 5.617E+00	
	REGION NAME:Ymin面					
輻射伝熱量					-1.53E+01 W	
通過熱量				伝熱開口寸法		
面積				X	Y	
温度差				1.69	1.37	
熱貫流率						2.38 W/m <sup>2</sup> ·K

図 5.3.2-1 熱貫流率の算出方法

### 5.3.3 表面温度の分布

解析結果より求めた表面温度の分布を、図 5.3.3-1 及び図 5.3.3-2 に示す。図 5.3.3-1 が室内側で図 5.3.3-2 室外側の分布である。なお、図中の数値は、平均の表面温度である。また、表面温度分布について、測定結果と同様に W 方向の平均値を取り、高さ方向の温度分布を確認したグラフを図 5.3.3-3 に示す。なお、プロットしている高さは測定位置の同じ位置である。

これらの結果を確認すると、室内側ではガラス部に比べフレーム部が低い温度になっており、室外側ではガラス部に比べフレーム部が高い温度になっている。これにより、フレーム部はガラス部に比べ熱を通し易く、断熱性能が劣っていることが確認できる。ガラス部では室内側、室外側共に上に行くに従い表面温度が高くなっている。また、ガラスエッジ部の表面温度はフレーム部の影響を受け、ガラス中央部に比べ室内側は低く、室外側は高くなっていることが確認できる。

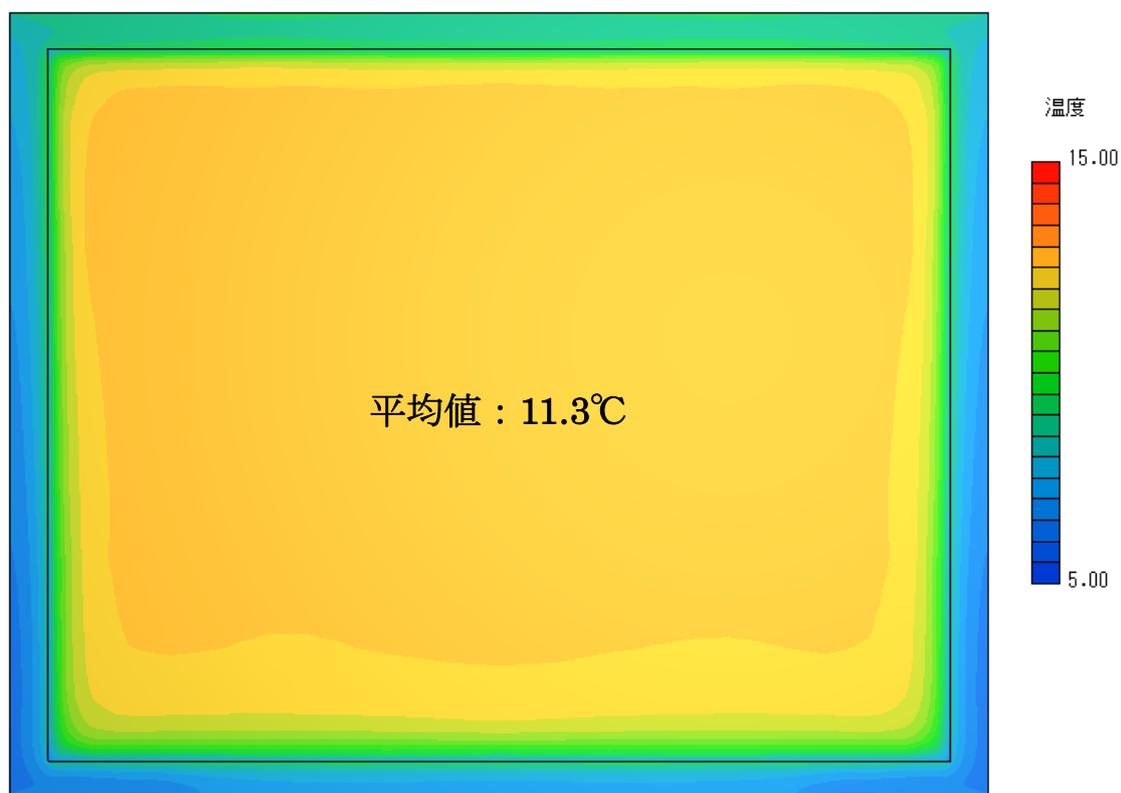


図 5.3.3-1 室内側表面温度の解析結果

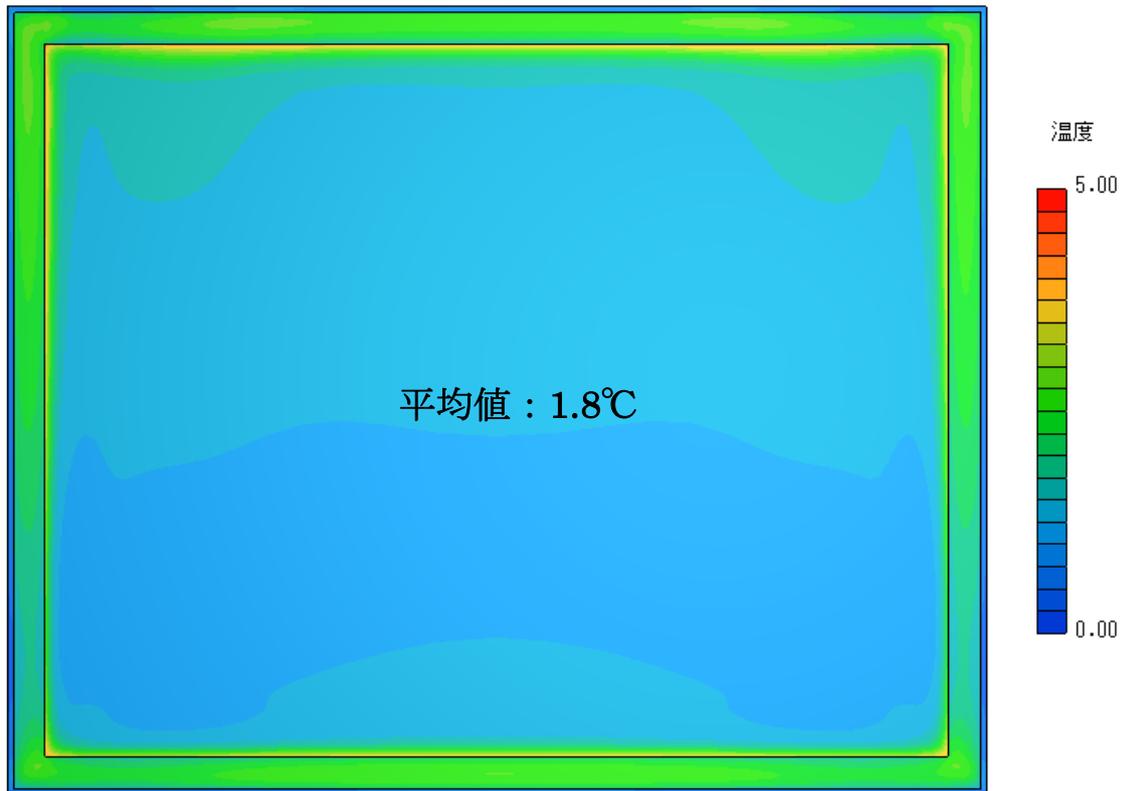


図 5. 3. 3-2 室外側表面温度の解析結果

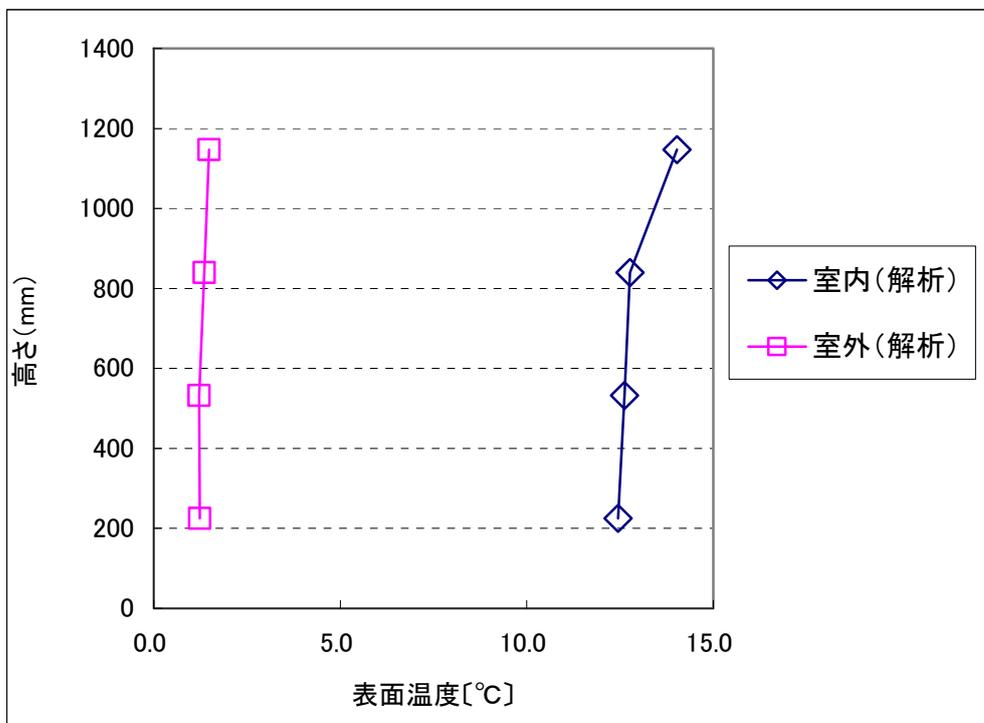


図 5. 3. 3-2 高さ方向の表面の分布 (W方向の平均値)

### 5.3.4 熱伝達率の分布

解析結果より求めた熱伝達率の分布を図 5.3.4-1～図 5.3.4-6 に示す。図 5.3.4-1～図 5.3.4-3 が室内側、図 5.3.4-4～図 5.3.4-6 が室外側とし、図 5.3.4-1 が室内側放射熱伝達率、図 5.3.4-2 が室内側対流熱伝達率、図 5.3.4-3 が室内側総合熱伝達率、図 5.3.4-4 が室外側放射熱伝達率、図 5.3.4-5 が室外側対流熱伝達率、図 5.3.4-6 が室外側総合熱伝達率の分布である。なお、図中の数値は、平均値である。また、総合熱伝達率について測定結果と同様に、W 方向の平均値を取り、高さ方向の分布を確認したグラフを図 5.3.4-7 に示す。なお、プロットしている高さは測定位置の同じ位置である。

これらの結果から、室内側、室外側共に、放射熱伝達率に大きな分布が見られないことがわかる。一方で、対流熱伝達率には分布が見られる。室内側では上下のフレームで  $3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  ほどの差が見られ、室外側では縦フレームの下部で大きな値となっている。また、室外側のガラス部では、H 方向の中央部よりやや下の箇所で大きな値となっていることや、W 方向の中央部で少し値が小さくなっていることがわかる。総合熱伝達は、室内側、室外側共に放射熱伝達率に大きな分布が見られなかったため、対流熱伝達率の分布の影響がそのまま出ている結果となった。

図 5.3.2-7 からは、室外側は高さ 540mm 付近で大きくなり、室内側は上に行くに従い徐々に熱伝達率が大きくなっていることが確認できる。

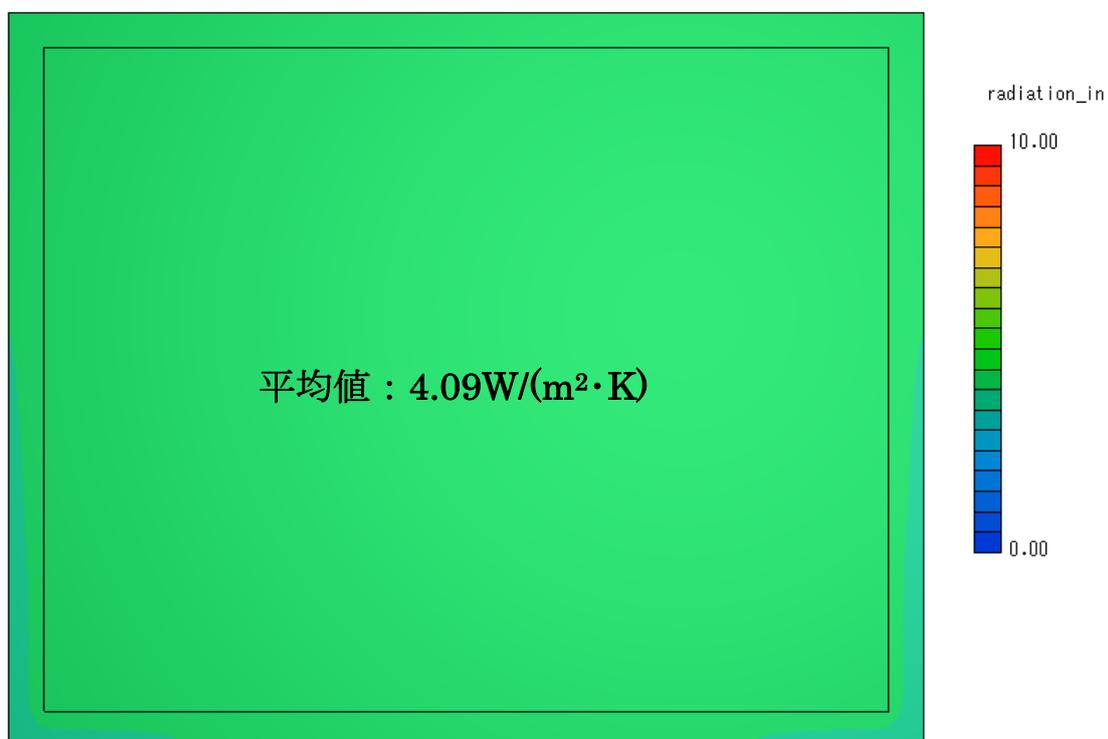


図 5.3.4-1 室内側放射熱伝達率の解析結果

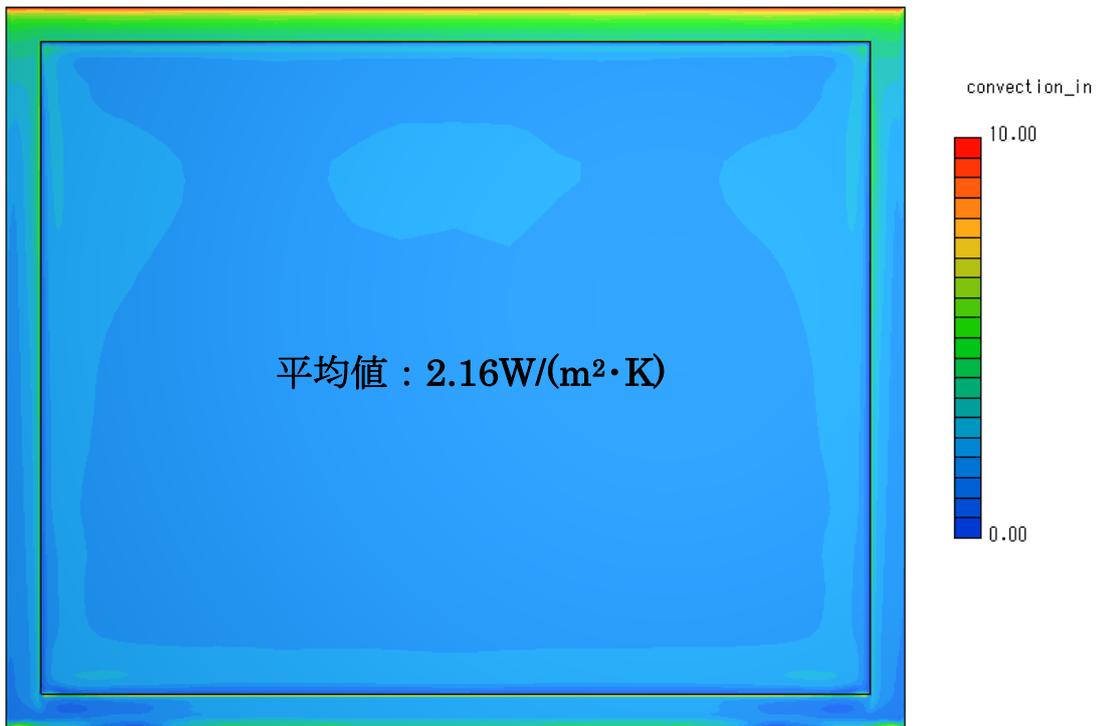


図 5. 3. 4-2 室内側対流熱伝達率の解析結果

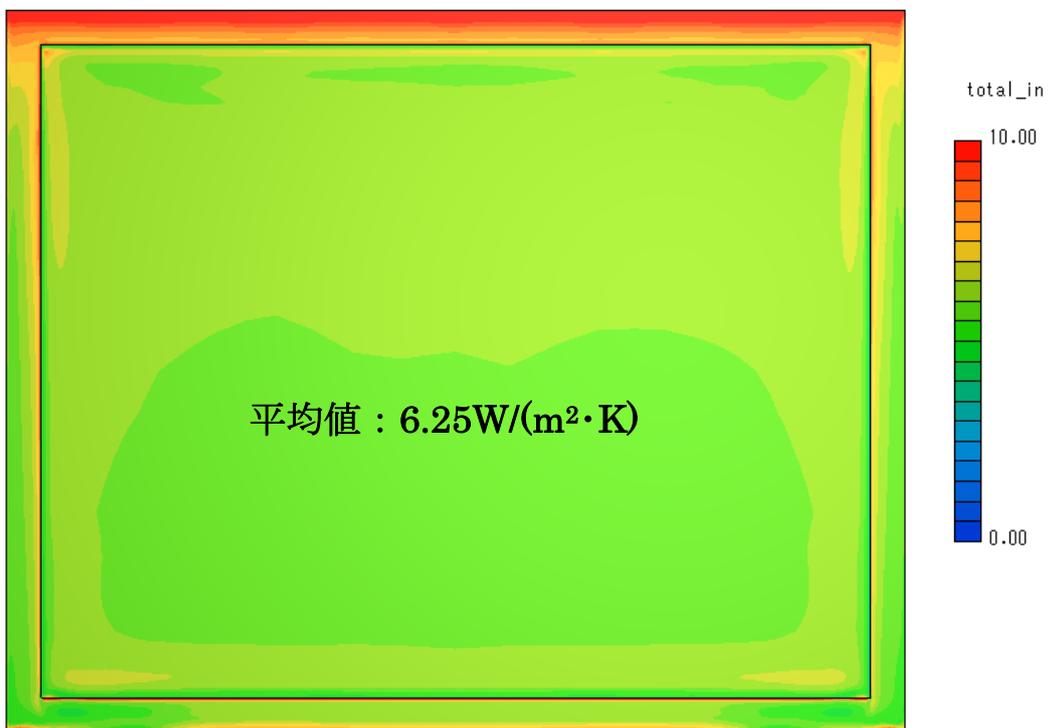


図 5. 3. 4-3 室内側総合熱伝達率の解析結果

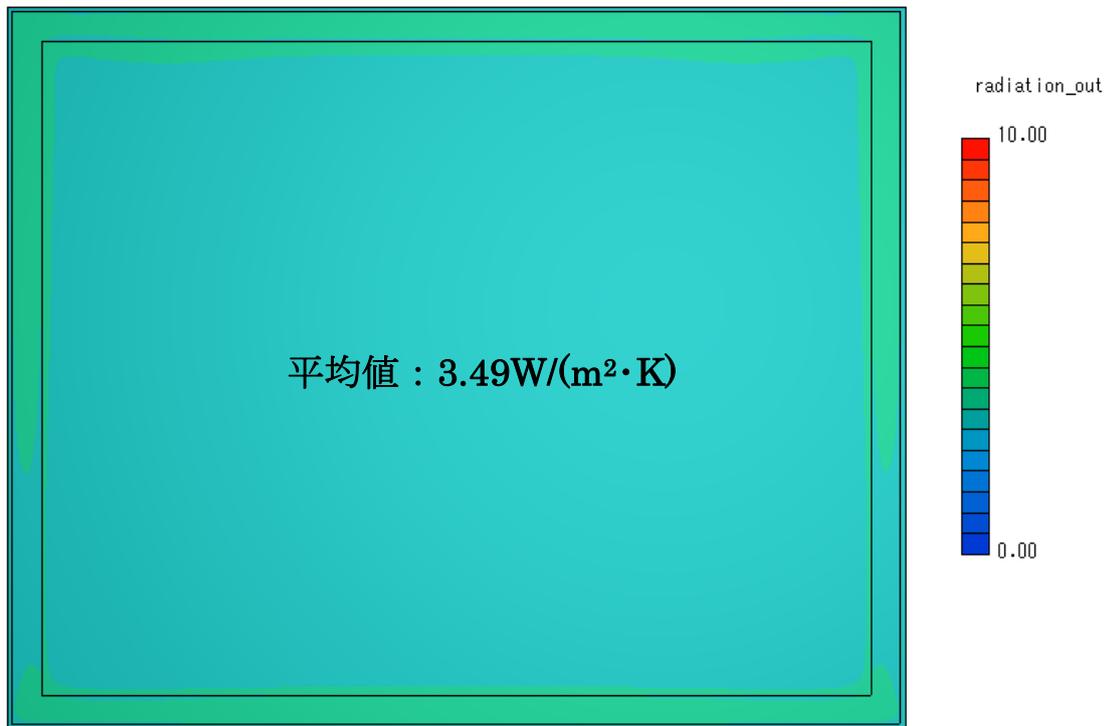


図 5.3.4-4 室外側放射熱伝達率の解析結果

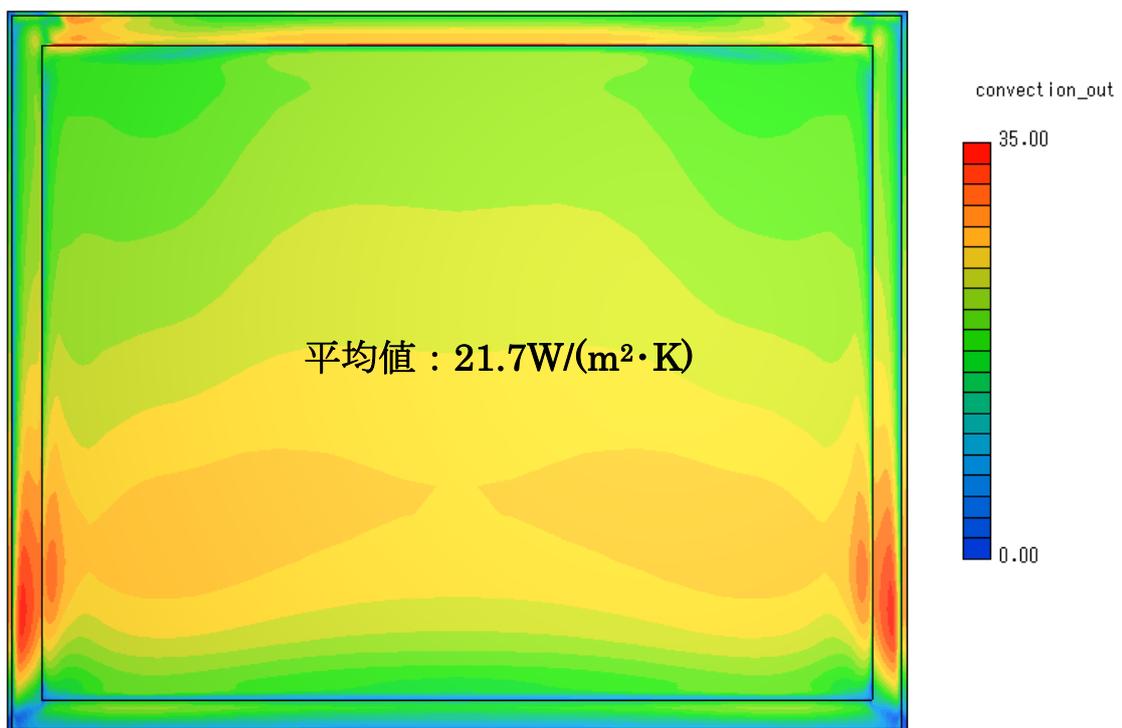


図 5.3.4-5 室外側対流熱伝達率の解析結果

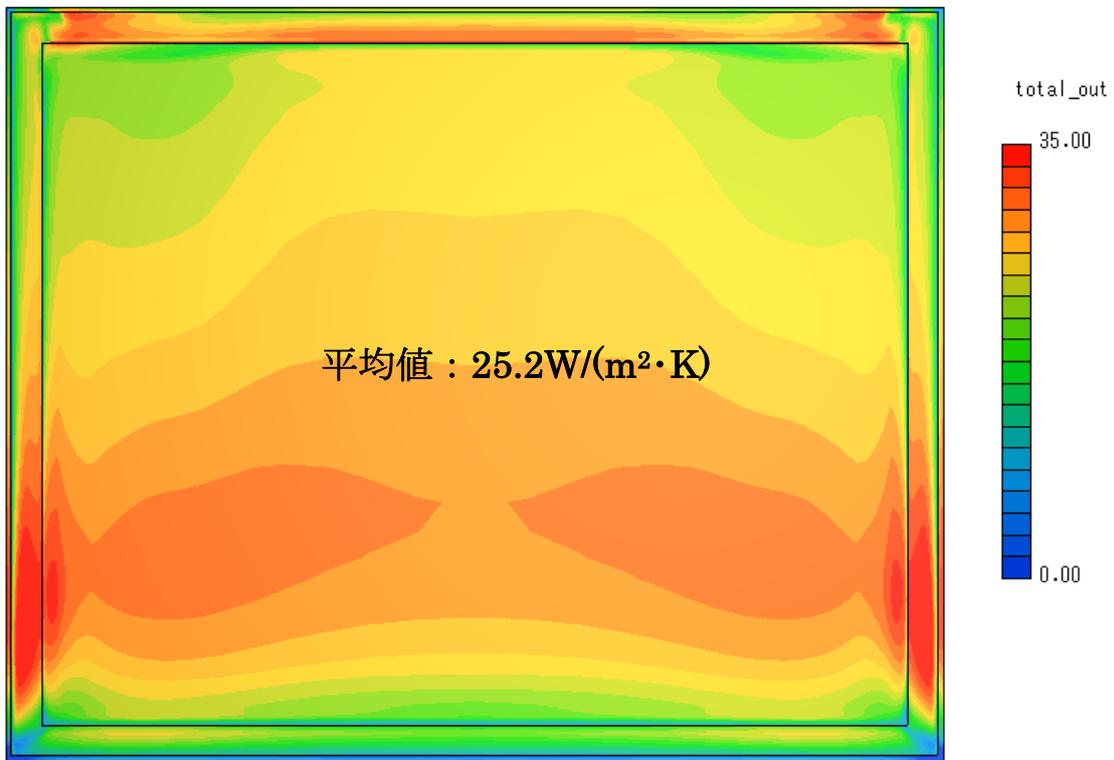


図 5. 3. 4-6 室外側総合熱伝達率の解析結果

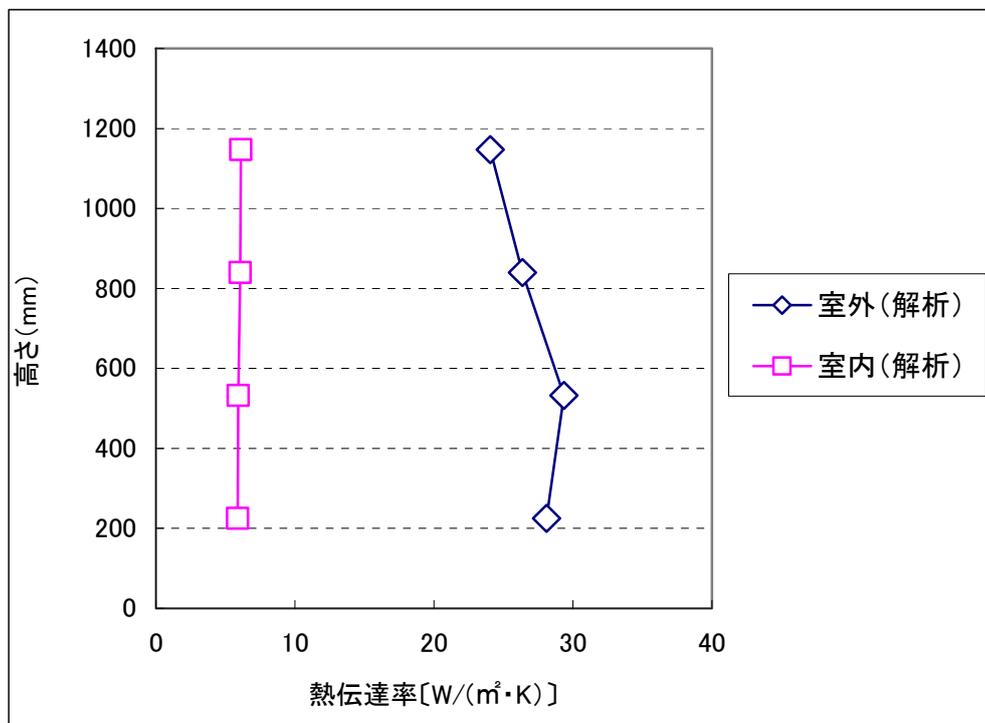


図 5. 3. 4-7 高さ方向の総合熱伝達率の分布 (W方向の平均値)

## 5.4 計算結果と測定結果の比較

### 5.4.1 熱貫流率の比較

窓の熱貫流率は、測定結果  $2.45\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、解析結果  $2.38\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  であり、測定結果と解析結果は概ね一致していると考えられる。

### 5.4.2 表面温度の比較

表面温度について、測定結果と解析結果を比較した結果を図 5.4.2-1 及び図 5.4.2-2 に示す。図中の数値の ( ) 内が測定結果、( ) なしの数値が測定点における解析結果の数値となる。また、測定結果と同様に W 方向の平均値を取り、高さ方向の分布を比較した結果を図 5.4.2-3 に示す。

これらの結果を確認すると、室内側、室外側共に測定値と計算値の差異は大きい箇所でも  $1^\circ\text{C}$  程度であり、測定値と計算値の差異は僅かである。これにより、測定結果と解析結果は概ね一致していると考えられる。

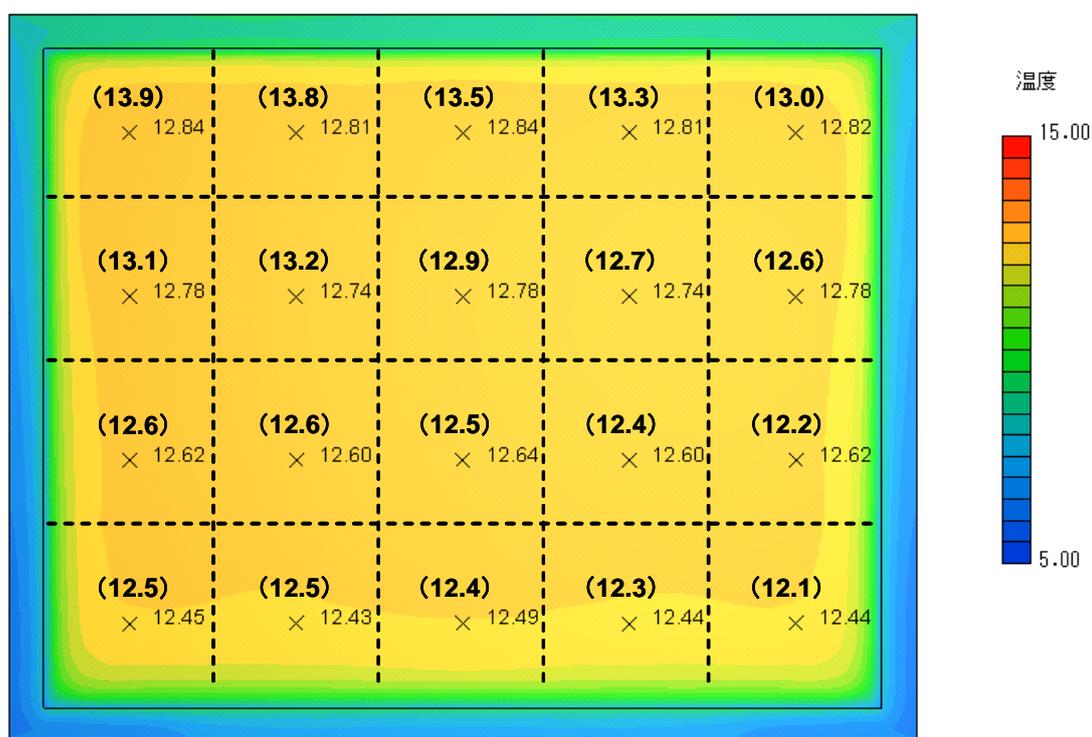


図 5.4.2-1 測定結果と解析結果の比較 (室内側表面温度)

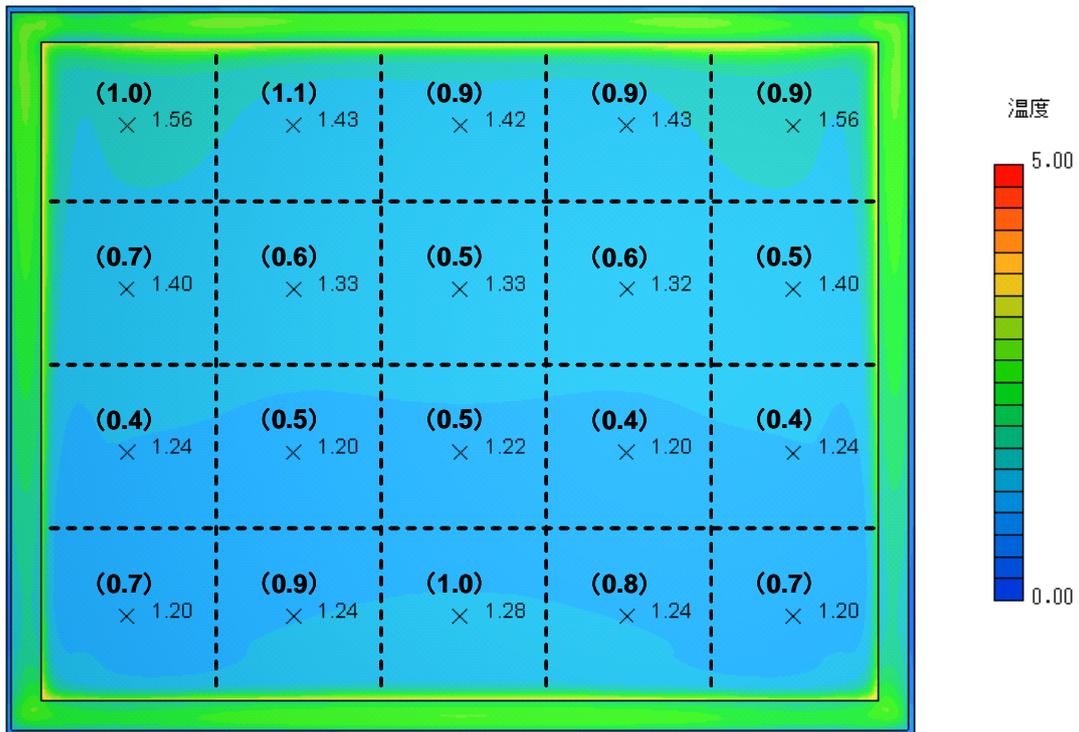


図 5. 4. 2-2 測定結果と解析結果の比較（室外側表面温度）

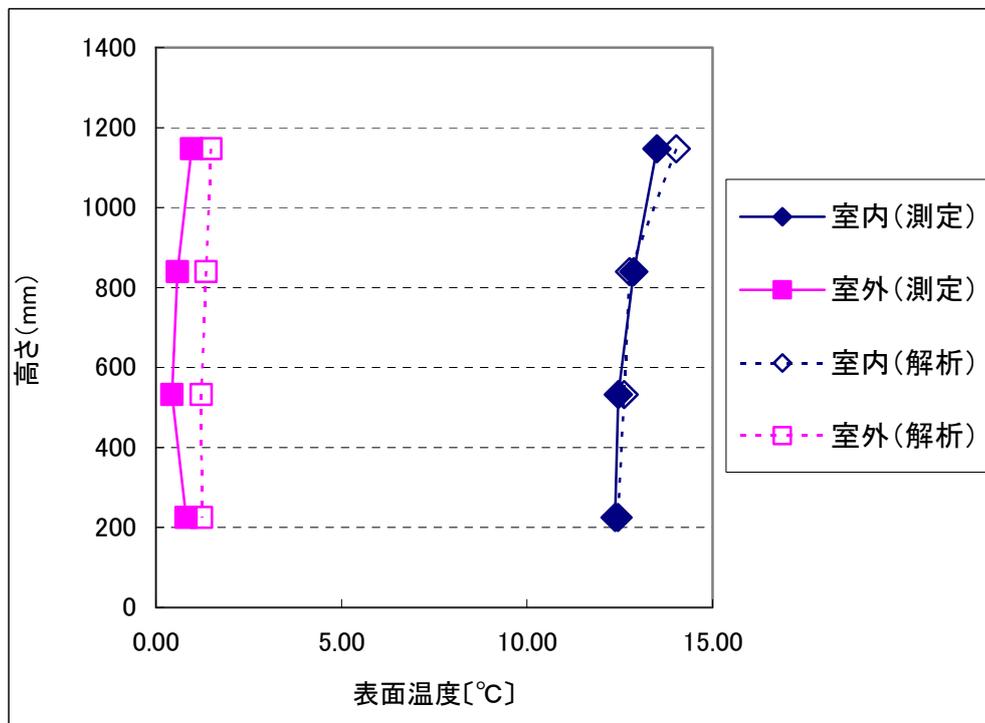


図 5. 4. 2-3 測定結果と解析結果の比較（表面温度 W方向の平均値）

### 5.4.3 総合熱伝達率の比較

総合熱伝達率について、測定結果と解析結果を比較した結果を図 5.4.3-1 及び図 5.4.3-2 に示す。図中の数値の ( ) 内が測定結果、( ) なしの数値が測定点における解析結果の数値となる。また、測定結果と同様に W 方向の平均値を取り、高さ方向の分布を比較した結果を図 5.4.3-3 に示す。

これらの結果を確認すると、総合熱伝達率は室外側の下部で測定値と計算値で乖離が見られる。しかし、図 5.4.3-2 を見るとわかるように、室外側の下部は総合熱伝達率が急激に変化する箇所であり、測定点の少しのずれが値に大きく影響する箇所である。そのため、測定点が少し下であったと仮定した場合、測定値と解析値は近づくことになる。この事を考慮すると、測定値と計算値で一部乖離が見られる箇所もあるが、測定結果と解析結果は概ね一致していると考えられる。

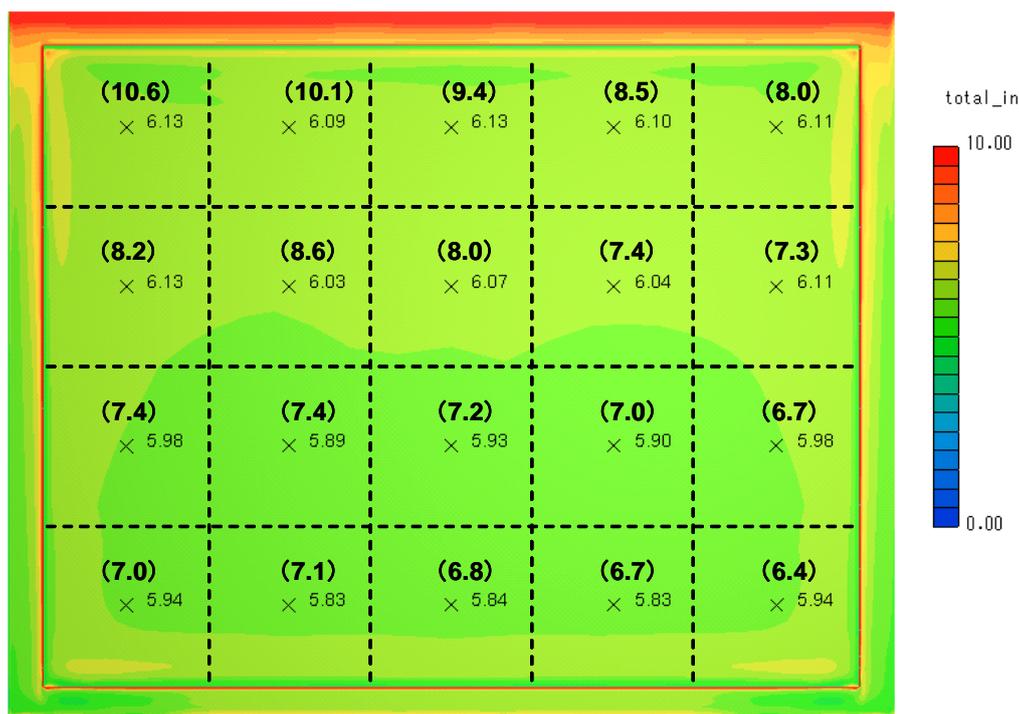


図 5.4.3-1 測定結果と解析結果の比較 (室内側総合熱伝達率)

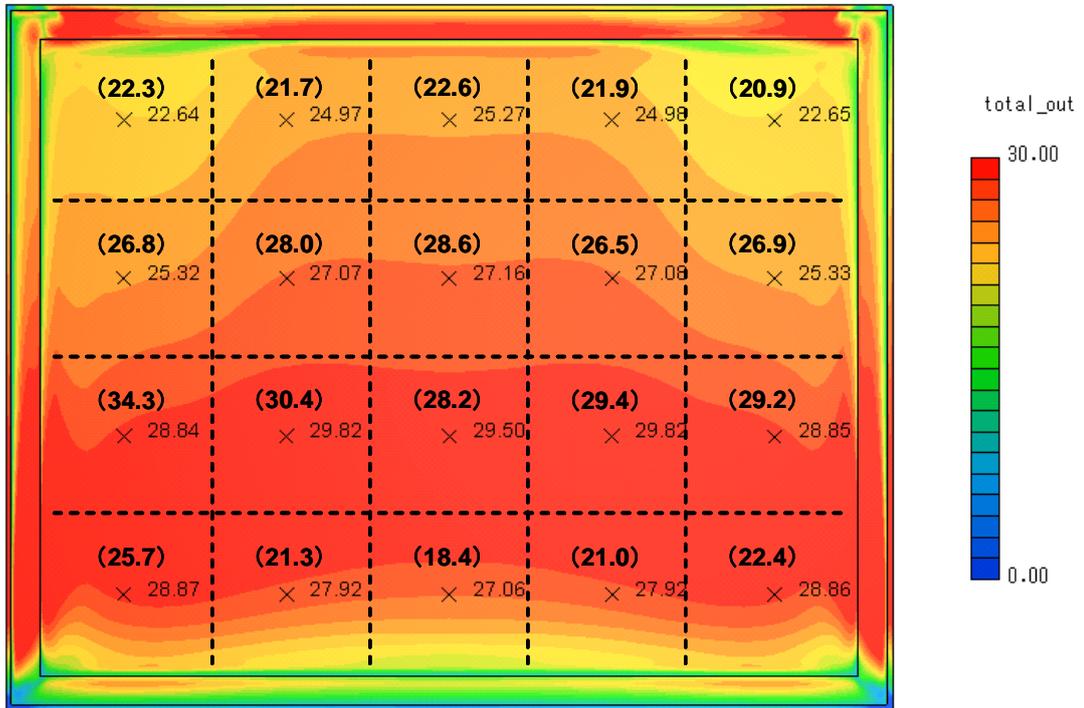


図 5.4.3-2 測定結果と解析結果の比較（室外側総合熱伝達率）

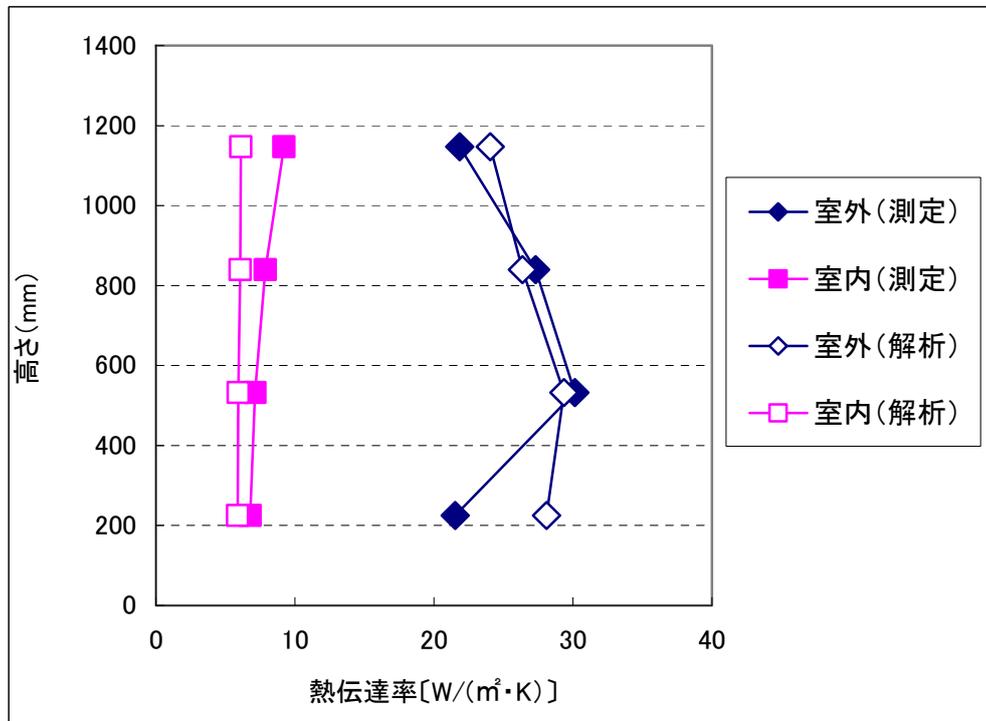


図 5.4.3-3 測定結果と解析結果の比較（総合熱伝達率 W方向の平均値）

## 5.5 フレーム部近傍の熱伝達率の確認

5.4節より、測定結果と解析結果が概ね一致していることが確認できた。ここでは、測定で把握しきれなかったフレーム部近傍の熱伝達率を、解析結果より確認する。フレーム部近傍の表面熱伝達率の解析結果を図 5.5-1～図 5.5-6 に示す。図 5.5-1～図 5.5-3 を室内側、図 5.5-4～図 5.5-6 を室外側とし、各々のフレームの中央部表面の総合熱伝達率をコンター表示したものである。

室内側では、図 5.5-1 から分かるように下部のフレームの出隅部分において熱伝達率が局所的に大きくなっている。窓フレーム部の熱性能の計算法である ISO10077-2<sup>2)</sup>及び JISA2102-2<sup>3)</sup> では、この部分は隅角部扱いとなり熱伝達率が低減する箇所であるが、逆に熱伝達率が増加する傾向を示している。また、フレーム部については隅角部による熱伝達率の低減は見られない。図 5.5-2 から、上部のフレームでは隅角部による熱伝達率の低減は見られることが確認できる。また、フレーム部の躯体側近傍で熱伝達率が増加していることも確認できる。図 5.5-3 から、縦部のフレームでは隅角部の影響も確認でき、5.4節の結果から上下方向の分布はあるもの、中央部を平均値として扱えばフレーム部の熱性能の計算法に規定される値と大きな乖離がない結果と見受けられる。ガラス部では、どの部位でも隅角部による熱伝達率の低減が確認できる。

室外側では、図 5.5-4 から下部のフレーム部の凸部が著しく熱伝達率が低下していることが確認できる。また、室内側と同様にフレームの出隅部分で熱伝達率が大きくなる傾向となっており、隅角部で熱伝達率の低減は見られないことも室内側と同様の傾向となっている。図 5.5-5 から、上部のフレームではガラス側のフレーム出隅部が著しく熱伝達率が増加していることが確認できる。また、フレーム部の隅角部では熱伝達率の低減が見られないことも確認できる。図 5.5-6 から、縦部のフレームでは室内側と同様に隅角部の影響が確認でき、また上下方向の分布はあるもの、中央部を平均値として扱えると考えられる。ガラス部においても、室内側と同様に隅角部の熱伝達率の低減が見られる。しかし、フレーム部の熱性能の計算法に規定される室外側の値は、隅角部による熱伝達率の低減は規定されていない。

窓フレーム部の熱性能の計算法である ISO10077-2 及び JISA2102-2 では、フレームの部位によらず、室内側は一般部を  $7.69\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、隅角部を  $5.00\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、室外側は  $25.0\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  という固定値で規定されている。しかし、解析結果を確認すると、熱伝達率分布を平均化したとしても、規定されている値と解析結果の値では乖離が見られる箇所が多い。また、部位による違いも見られ、特に室外側では上部のフレームと下部のフレームで大きな差が見られる。そのため、窓フレーム近傍の詳細な計算を行なう場合は、室外側にも隅角部による熱伝達率の低減効果を考える必要があると思われる。また、上フレーム近傍と下フレーム近傍で熱伝達率が大きく異なることから、フレームの部位毎による熱伝達率の分類が必要であると考えられる。

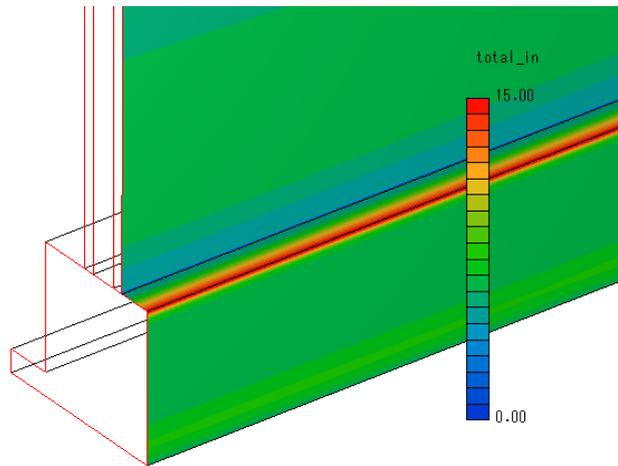


図 5.5-1 室内側下部（中央部）総合熱伝達率

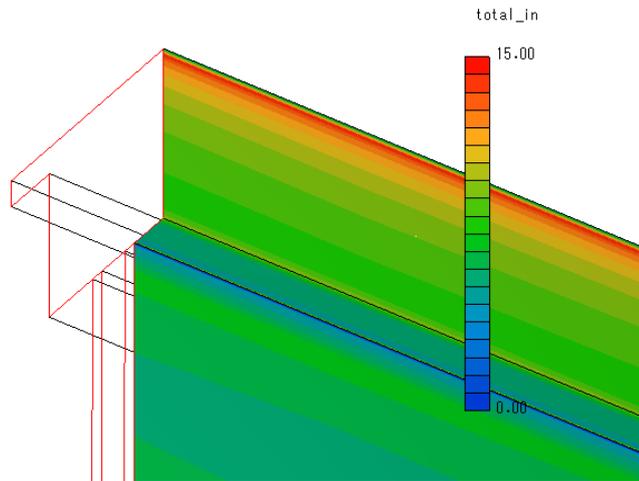


図 5.5-2 室内側上部（中央部）総合熱伝達率

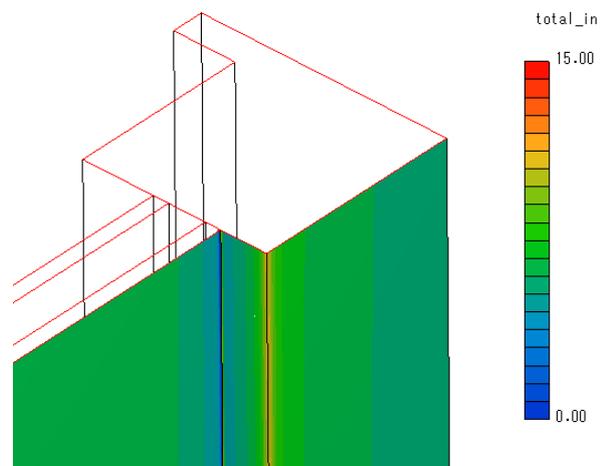


図 5.5-3 室内側縦部（中央部）総合熱伝達率

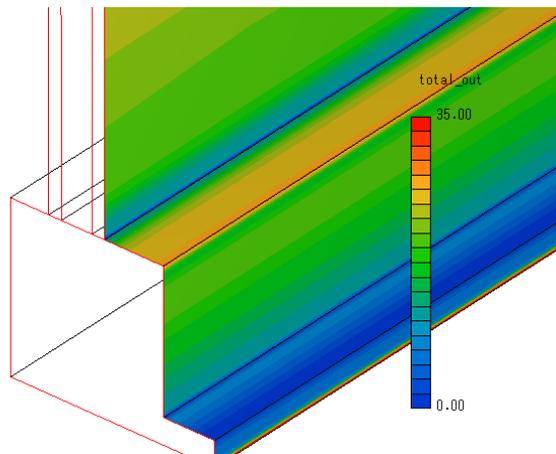


図 5.5-4 室外側下部（中央部）総合熱伝達率

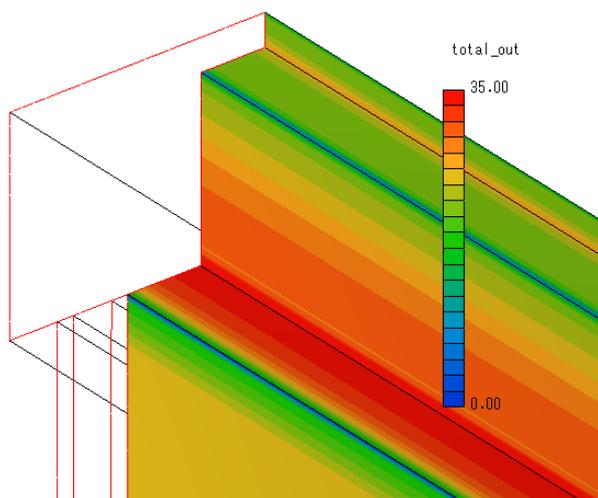


図 5.5-5 室外側上部（中央部）総合熱伝達率

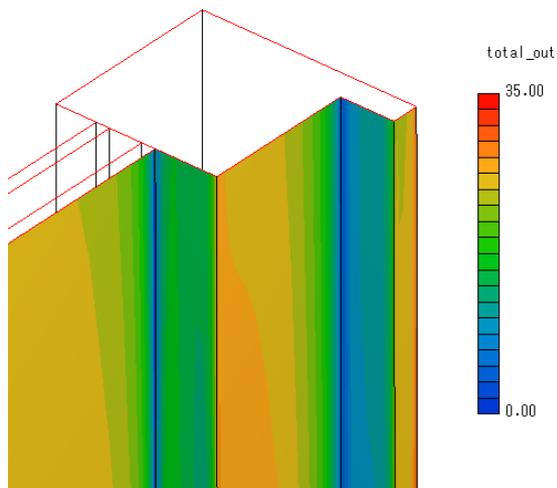


図 5.5-6 室外側縦部（中央部）総合熱伝達率

## 5.6 まとめ

第5章では、第4章で実施した熱伝達率の実測を、流体解析によりシミュレートすることで熱伝達率の分布を計算により導出し、計算と測定と比較を行うことにより計算結果の整合性を確認した。また、測定で把握し切れなかったフレーム部近傍の熱伝達率の分布を計算結果より把握した。得られた結果を以下にまとめる。

- ①解析結果の窓の熱貫流率は、 $2.38\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ であり、測定結果と概ね一致した。
- ②解析結果から、室内側ではガラス部に比べフレーム部の温度が低く、室外側ではガラス部に比べフレーム部の温度が高い。これにより、フレーム部はガラス部に比べ熱を通し易く、断熱性能が劣っていることが確認できる。ガラス部では、室内側、室外側共に上に行くに従い表面温度が高く、またガラスエッジ部の表面温度はフレーム部の影響を受け、ガラス中央部に比べ室内側は低く、室外側は高くなることが確認できた。
- ③解析結果から、室内側、室外側共に放射熱伝達率に大きな分布が見られないことがわかった。一方で、対流熱伝達率には分布が見られた。室内側では上下のフレームで $3\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 程の差が見られ、室外側では縦フレームの下部で大きな値となることがわかった。また、室外側のガラス部では、H方向の中央部よりやや下の箇所では大きな値となることや、W方向の中央部で少し値が小さくなることがわかった。総合熱伝達は、室内側、室外側共に放射熱伝達率に大きな分布が見られなかったため、対流熱伝達率の分布の影響がそのまま出ている結果となった。
- ④測定結果と解析結果の表面温度を比較すると、室内側、室外側共に測定値と計算値の差異は僅かであり、測定結果と解析結果は概ね一致していると考えられる。
- ⑤測定結果と解析結果の総合熱伝達率を比較すると、室外側下部で測定値と計算値で乖離が見られるが、解析結果から室外側下部は総合熱伝達率が急激に変化する箇所であり、測定点の少しのずれが値に大きく影響する箇所である。このことを考慮すると、測定値と計算値で一部乖離が見られる箇所もあるが、測定結果と解析結果は概ね一致していると考えられる。
- ⑥室内側下部のフレーム部の熱伝達率は、出隅部分で局所的に熱伝達率が大きくなっている。窓フレーム部の熱性能の計算法ではこの部分は隅角部扱いとなり熱伝達率が低減する箇所であるが、本結果では逆に熱伝達率が増加する傾向を示している。また、フレーム部については隅角部による熱伝達率の低減は見られなかった。

- ⑦室内側上部のフレーム部の熱伝達率は、隅角部による低減は見られ、またフレーム部の躯体側で熱伝達率が局所的に増加していることが確認できた。
- ⑧室内側縦部のフレーム部の熱伝達率は、隅角部の影響も確認でき、上下方向の分布はあるものの、中央部を平均値として扱えばフレーム部の熱性能の計算法に規定される値と大きな乖離は見られない。
- ⑨室内側のガラスエッジ部では、全ての部位で隅角部による熱伝達率の低減が見られた。
- ⑩室外側下部のフレーム部の熱伝達率は、凸部で著しく熱伝達率が低下していることが確認できた。また、室内側と同様にフレームの出隅部分で局所的に熱伝達率が大きくなる傾向となっており、隅角部で熱伝達率の低減は見られないことも室内側と同様の傾向であった。
- ⑪室外側上部のフレーム部の熱伝達率は、ガラス側のフレーム出隅部が著しく熱伝達率が増加していることが分かった。また、フレーム部の隅角部では熱伝達率の低減が見られなかった。
- ⑫室外側縦部のフレーム部の熱伝達率は、室内側と同様に隅角部の影響が確認でき、上下方向の分布はあるもの、中央部を平均値として扱えると考えられる。
- ⑬室外側のガラスエッジ部では、室内側と同様に隅角部による熱伝達率の低減が見られた。
- ⑭窓フレーム部の熱性能の計算法では、部位に関わらず室内側は一般部  $7.69\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、隅各部  $5.00\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、室外側は  $25.0\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  という固定値で規定されているが、解析結果を確認すると熱伝達率分布を平均化しても、規定されている値と解析結果の値では乖離が見られる箇所が多い。また、部位による違いも見られ、特に室外側では上フレーム近傍と下フレーム近傍で大きな差が見られた。
- ⑮窓フレーム近傍の詳細な計算を行なう場合は、室外側にも隅角部による熱伝達率の低減効果を考える必要があると思われる。また、上フレーム近傍と下フレーム近傍で熱伝達率が大きく異なることから、フレームの部位毎による熱伝達率を分ける必要があると考えられる。
-

**参考文献**

- 1) 倉山千春：開口部の総合熱性能評価法に関する研究，鹿児島大学大学院理工学研究科学位論文，2007
- 2) ISO 10077-2 : Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance -- Part 2:Numerical method for frames, 2003
- 3) JIS A 2102-2: 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方法，(財) 日本規格協会，2011



第6章 窓と躯体との間の熱移動が建物の熱性能に及ぼす影響

---

---



## 6.1 はじめに

前述したが、窓は建具の熱性能として、壁は躯体の熱性能として、試験法及び計算法がそれぞれ確立されている<sup>1)~10)</sup>。しかし、これらは窓製品の横並び評価を目的としたものであり、窓と躯体との間の取り合い部分の熱流は考慮されていない。しかし、実際には窓と躯体の間（窓と躯体の接触部分）では熱移動が生じることが知られている。また、技術の発展により窓や壁（躯体）の断熱性能が向上することで、この部分の熱流が増加することが推察される。そのような中、日本にはこの部分の熱流を評価する規格や計算方法がなく、熱損失係数や熱負荷計算ツールでこの部分の熱損失が無視されている現状がある。

そこで、本章では第2章で算出した窓と躯体の間の熱流（線熱貫流率 $\Psi_b$ ）を用いて、 $\Psi_b$ が建物の熱性能に及ぼす影響を確認する。

## 6.2 窓の熱貫流率U値への影響

ここでは、 $\Psi_b$ を窓の熱貫流率U値に付加した場合のU値への影響度を確認する。U値に $\Psi_b$ を付加した窓の熱貫流率を $U_{\Psi_b}$ 値とし、Uに対する比率 ( $U_{\Psi_b}/U$ ) から、 $\Psi_b$ のU値への影響度を確認する。検討対象は、FIX 窓として充填断熱工法におけるアルミ、アルミ樹脂複合、樹脂の3種類のフレームの仕様とした。検討した結果を図 6.2-1～図 6.2-3 に示す。図 6.2-1 がアルミフレーム、図 6.2-2 がアルミ樹脂複合フレーム、図 6.2-3 が樹脂フレームとなる。なお、 $U_{\Psi_b}$ 値は (6.2-1) 式より算出した。

$$U_{\Psi_b} = \frac{U \times A + \sum (\Psi_{bi} \times l_i)}{A} \quad \dots (6.2)$$

$U_{\Psi_b}$  :  $\Psi_b$ をUに付加した熱貫流率 [W/(m<sup>2</sup>・K)]

$U$  : 窓の熱貫流率 [W/(m<sup>2</sup>・K)]

$\Psi_b$  : 窓と躯体の間の線熱貫流率 [W/(m・K)]

$A$  : 伝熱開口面積 [m<sup>2</sup>]

$l$  : 分担の長さ (部位の長さ) [m]

$i$  : 部位

図 6.2-1～図 6.2-3 の結果から、開口部のサイズの小さいものほど熱貫流率の増加比率が大きくなることが確認できる。これは、開口部の面積が大きくなると、窓と躯体の間の通過熱量 (=  $\sum (\Psi_b \times L)$ ) も増加するが、それ以上に窓を通過する熱量 (=  $U \times A$ ) が増加し、窓と躯体の間の熱橋の影響が小さくなることを意味している。

熱貫流率の増加率は、開口寸法が小さいほど大きくなり、W:0.3m、H:0.7m ではアルミフレームが 14%、アルミ樹脂複合フレームが 16%、樹脂フレームが 8%程度増加しており、窓の熱貫流率U値に影響としては小さくないことがわかる。

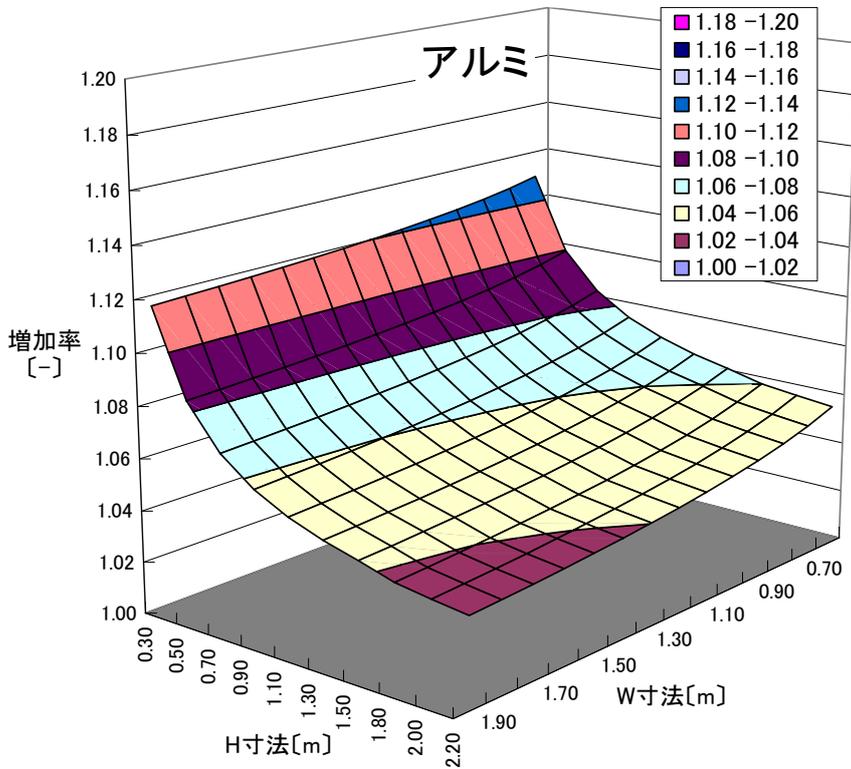


図 6.2-1 アルミフレーム窓の熱貫流率の増加率[-]

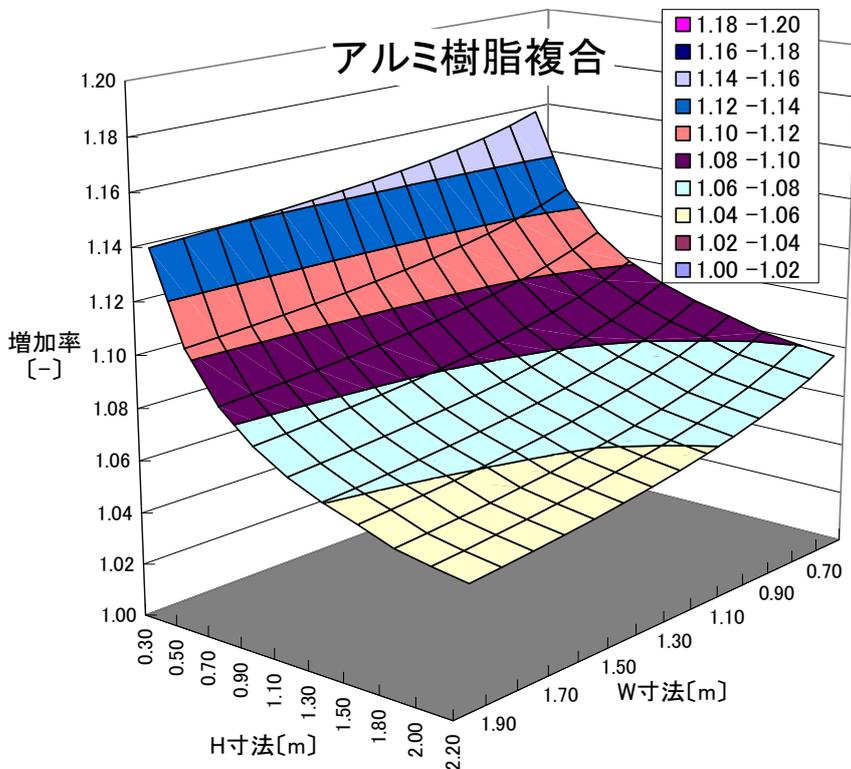


図 6.2-2 アルミ樹脂複合フレーム窓の熱貫流率の増加率[-]

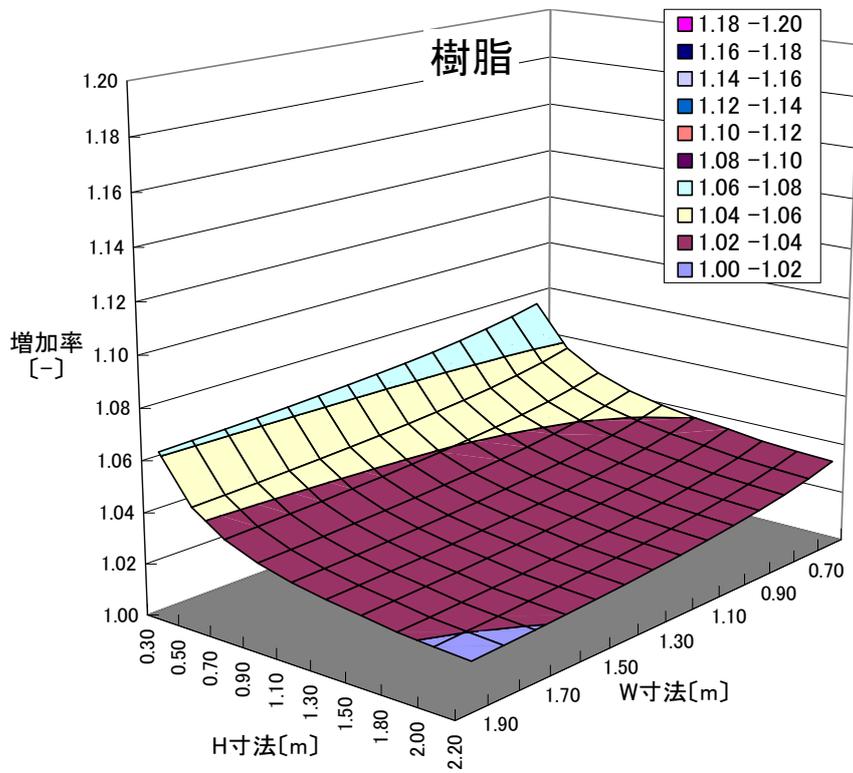


図 6.2-3 樹脂フレーム窓の熱貫流率の増加率[-]

### 6.3 住宅の熱損失係数Q値への影響

ここでは、住宅の熱損失係数Q値の計算の際に、 $\Psi_b$ を考慮した場合のQ値への影響度を確認する。 $\Psi_b$ を考慮した住宅の熱損失係数を $Q_{\Psi b}$ とし、Qに対する比率( $Q_{\Psi b}/Q$ )から、 $\Psi_b$ のQ値への影響度を確認する。熱損失係数を計算する対象は「住宅の省エネルギー基準の解説書」<sup>11)</sup>モデル(図6.3-1、図6.3-2及び表6.3-1、表6.3-2参照)を用いる。

ただし、 $Q_{\Psi b}$ を計算する際には、 $\Psi_b$ の計算条件を住宅の熱損失係数の算出条件に合わせる必要がある。本計算では、住宅の省エネルギー基準解説書モデルを使用するため、計算の際に使用する壁の性能値は実質熱貫流率であり、窓台や稜が含まれている。しかし、窓台や稜を考慮せず壁の代表断面の熱貫流率を用いて住宅の熱損失係数を計算する場合も多く、この場合は $\Psi_b$ を計算する際に2章で提案した計算方法のモデルCを窓台や稜を入れない壁の代表断面の条件とする必要がある。これは、ISO14683<sup>12)</sup>に示される線熱貫流率の算出条件に類似する。

ここでは、窓台や稜を含めた壁の実質熱貫流率を用いた計算を詳細計算、窓台や稜を含めない壁の代表断面の熱貫流率を用いた計算を簡易計算とし、双方のQ値への影響度を確認する。その際に使用する壁の代表断面の熱貫流率を用いた簡易計算における窓と躯体の間の線熱貫流率 $\Psi_b$ を求めた結果を図6.3-3～6.3-16に示す。図6.3-3～6.3-8が引違い窓、図6.3-9～6.3-13がFIX窓、図6.3-14～6.3-16が縦すべり出し窓となる。2章の結果と比較すると、全体的に簡易計算の $\Psi_b$ は詳細計算に比べ0.05W/(m・K)程度増加していることが確認できる。この結果をISO14683に示される線熱貫流率(図6.3-17～図6.3-19参照)と比較すると、樹脂や木のフレームは近い値となっている一方で、アルミやアルミ樹脂複合のフレームはISO14683に記載された値のほうが小さい値となっている。ISO14683に示される線熱貫流率は、フレームの納まる位置や躯体の構成による分類があるものの、フレームの材質による分類はない。日本でこの線熱貫流率を適用するには、フレームの材質による分類が必要になると考えられる。次に、壁の代表断面の熱貫流率を用いた簡易計算における窓と躯体の間の線熱貫流率 $\Psi_b$ を用いて、6.2節のようにFIX窓の充填断熱工法についてU値への影響度を確認した結果を図6.3-20～図6.3-22に示す。この結果から、熱貫流率の増加率はW:0.3m、H:0.7mの開口寸法では、アルミフレームで22%、アルミ樹脂複合フレームで25%、樹脂フレームで20%程度増加することが確認できる。

これらの結果を元に、アルミ、アルミ樹脂複合、樹脂の3種類のフレームの材質について、Qに対する $Q_{\Psi b}$ の比率( $Q_{\Psi b}/Q$ )を算出した結果を表6.3.3～表6.3.8に示す。表6.3.3～表6.3.5が詳細計算、表6.3.6～表6.3.8が簡易計算となる。住宅の熱損失係数は、詳細計算ではアルミ及びアルミ樹脂複合フレームで3%程度、樹脂フレームでは2%程度増加し、簡易計算ではアルミ及びアルミ樹脂複合フレームで5%程度、樹脂フレームでは3%程度増加することが確認できる。この結果から、 $\Psi_b$ のQ値への影響は小さくなく、住宅の熱損失係数を正確に算出する際は、窓と躯体の間の熱移動を考慮すべき項目と考えられる。

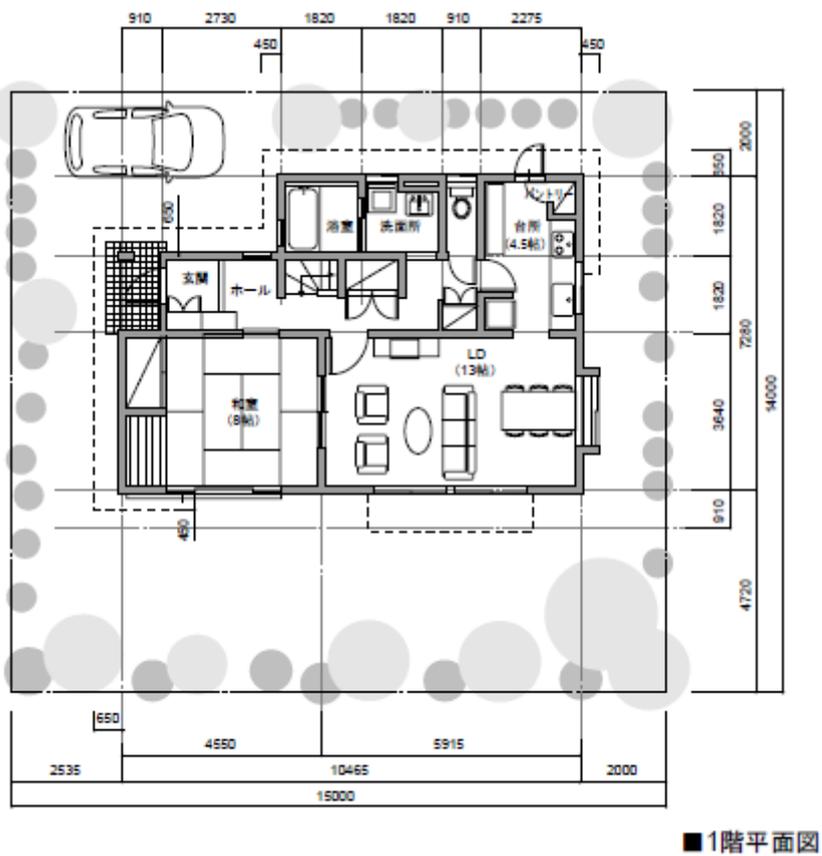
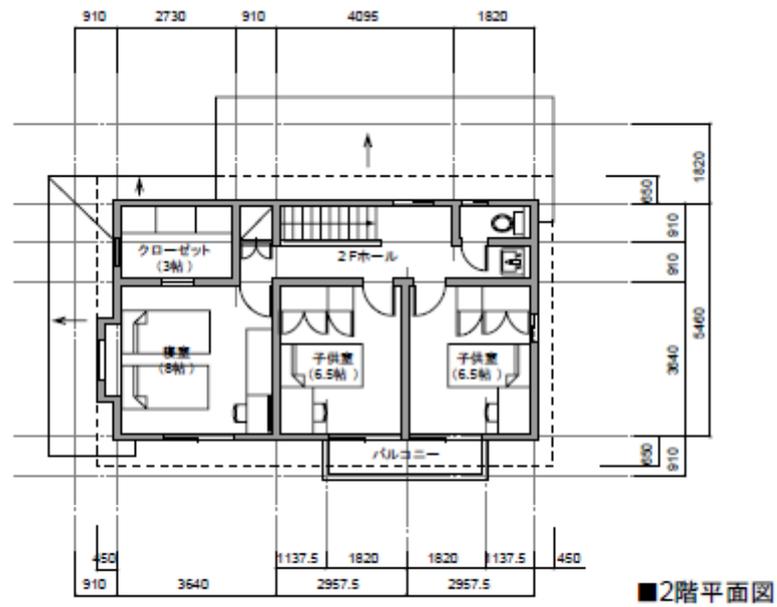


図 6.3-1 住宅の省エネルギー基準の解説書モデル（平面図）

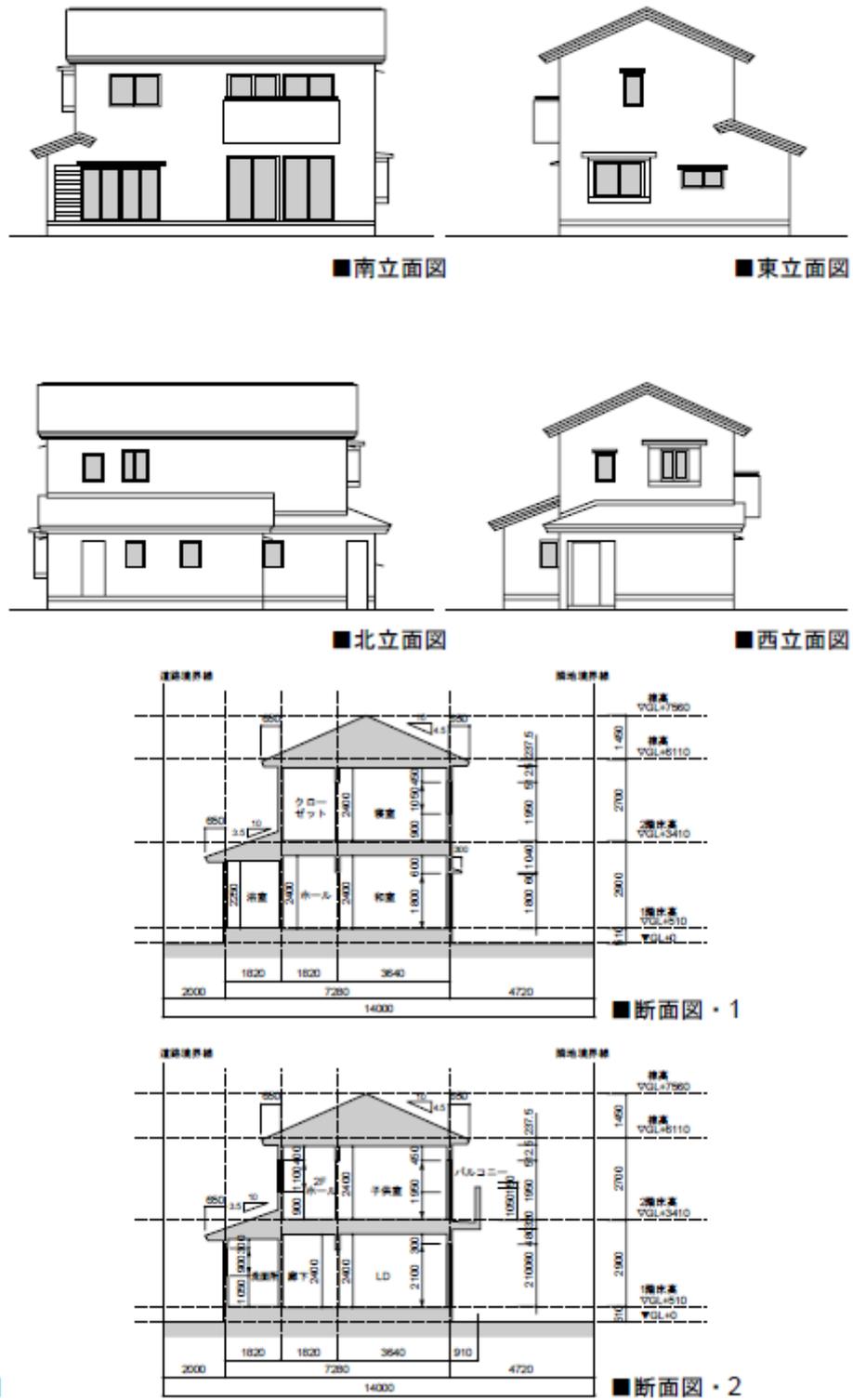


図 6.3-2 住宅の省エネルギー基準の解説書モデル（立面図及び断面図）

表 6.3-1 住宅の省エネルギー基準の解説書モデルのプラン概要

	温暖地(Ⅲ～Ⅵ地域)モデル	
プラン適用地域	Ⅲ、Ⅳa、Ⅳb、Ⅴ、Ⅵ地域	
延べ床面積	120.07	[m <sup>2</sup> ]
階高	2.825	[m]
開口比率	26.8	[%]
開口面積	32.2	[m <sup>2</sup> ]

表 6.3-2 住宅の省エネルギー基準の解説書モデルの開口部の仕様

階	部屋	方位	温暖地(Ⅲ～Ⅵ地域)モデル		
			窓サイズ[m]		窓面積 [m <sup>2</sup> ]
			幅	高さ	
1F	和室	南	2.550	1.800	4.59
	LD	南	1.650	2.100	3.47
		南	1.650	2.100	3.47
		東	1.650	1.300	2.15
	台所	東	1.400	0.700	0.98
		北 勝手口ドア	0.900	1.800	1.62
	トイレ	北	0.600	0.900	0.54
	洗面所	北	0.600	0.900	0.54
浴室	西	0.600	0.900	0.54	
ホール	北	0.600	0.900	0.54	
	西 玄関ドア	0.900	2.100	1.89	
2F	寝室	南	1.650	1.050	1.73
		西	0.900	1.100	0.99
	子供室1	南	1.650	1.950	3.22
	子供室2	南	1.650	1.950	3.22
		東	0.600	1.100	0.66
	ホール	北	0.900	1.100	0.99
	クローゼット	西	0.600	0.900	0.54
2Fトイレ	北	0.600	0.900	0.54	
開口面積					32.20
開口/床比率					26.8[%]

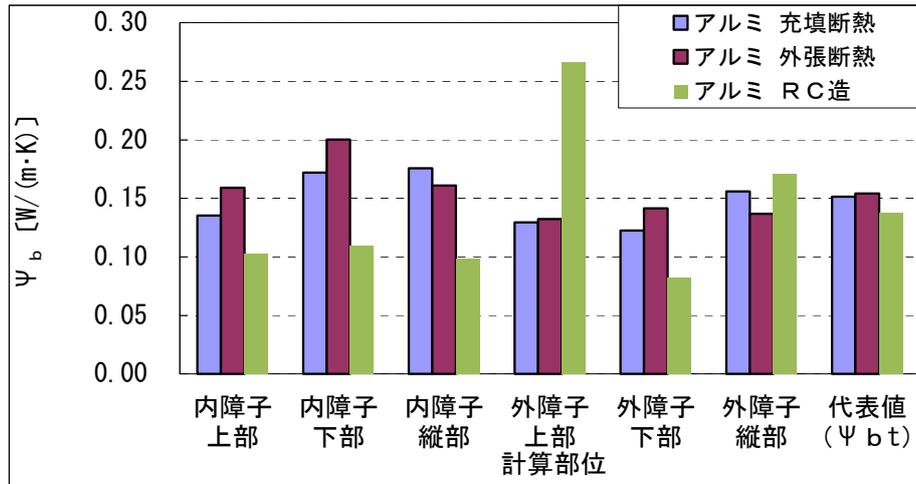


図 6.3-3 簡易計算時のアルミフレーム引違い窓  $\Psi_b$  算出結果

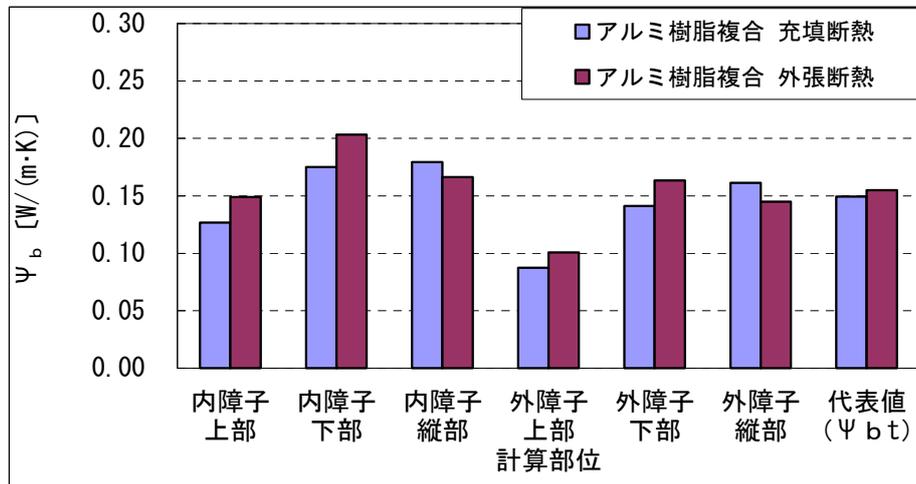


図 6.3-4 簡易計算時のアルミ樹脂複合フレーム引違い窓  $\Psi_b$  算出結果

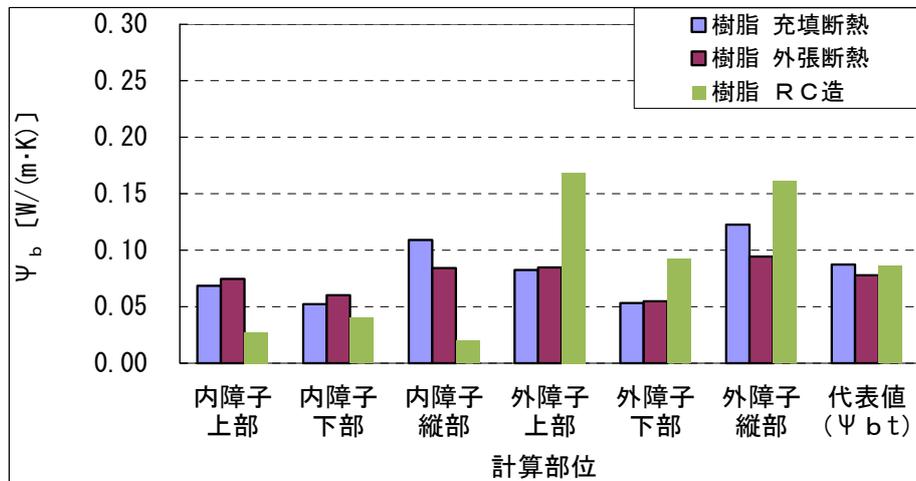


図 6.3-5 簡易計算時の樹脂フレーム引違い窓  $\Psi_b$  算出結果

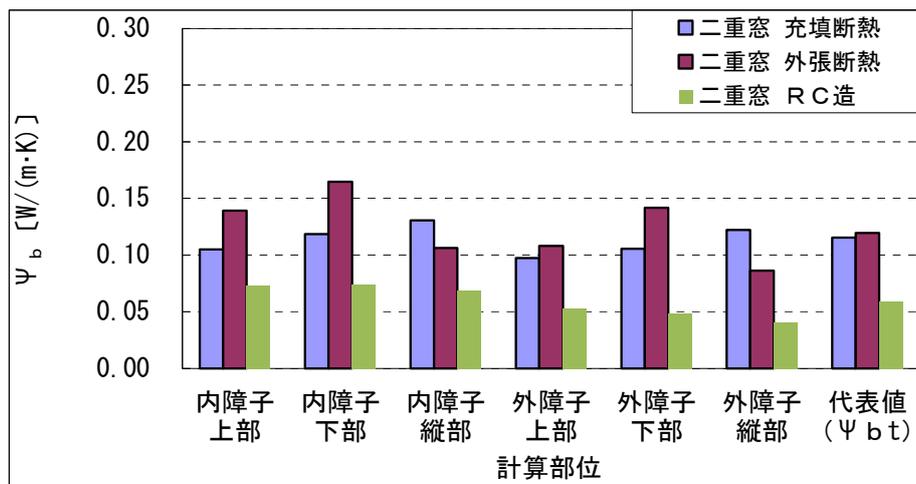


図 6.3-6 簡易計算時の引違い窓（二重窓） $\Psi_b$ 算出結果

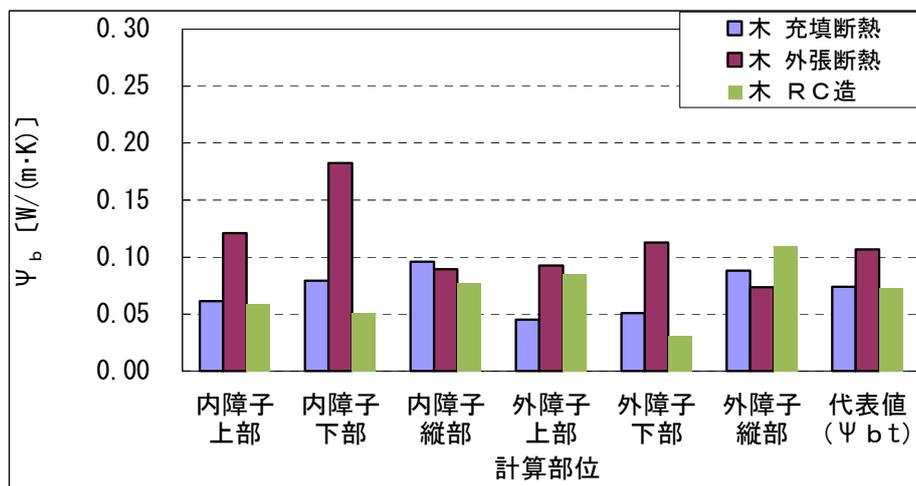


図 6.3-7 簡易計算時の木フレーム引違い窓 $\Psi_b$ 算出結果

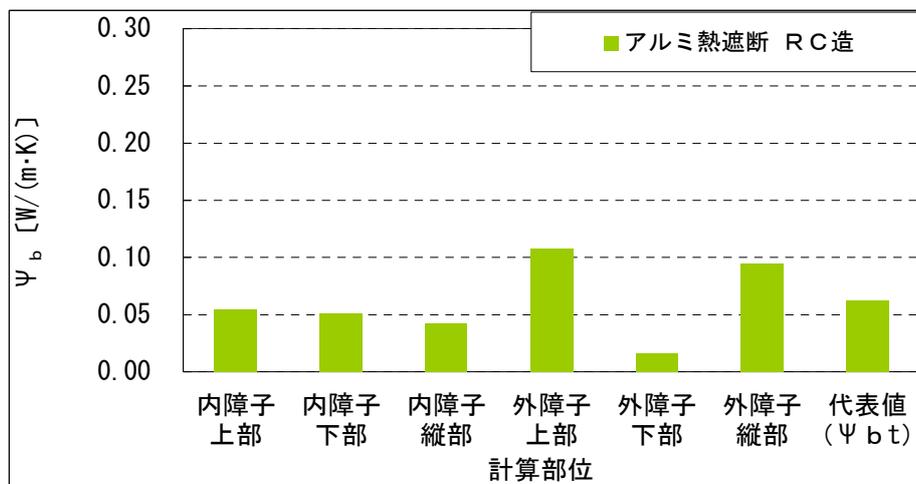


図 6.3-8 簡易計算時のアルミ熱遮断フレーム引違い窓 $\Psi_b$ 算出結果

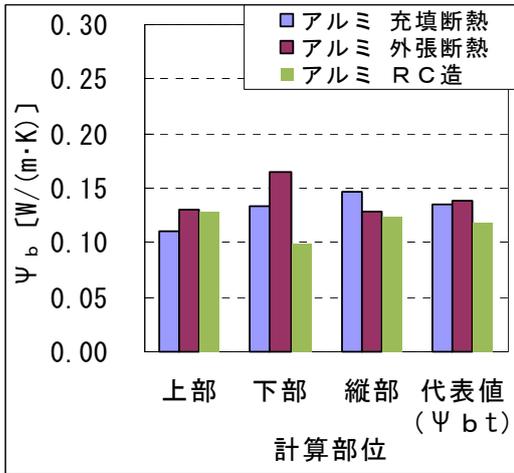


図 6.3-9 簡易計算時のアルミフレーム FIX 窓  $\Psi_b$  算出結果

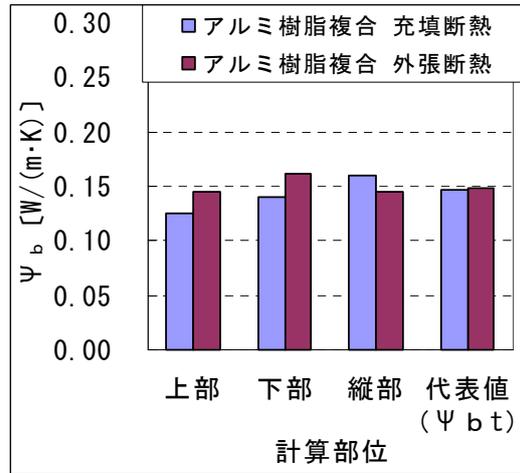


図 6.3-10 簡易計算時のアルミ樹脂複合フレーム FIX 窓  $\Psi_b$  算出結果

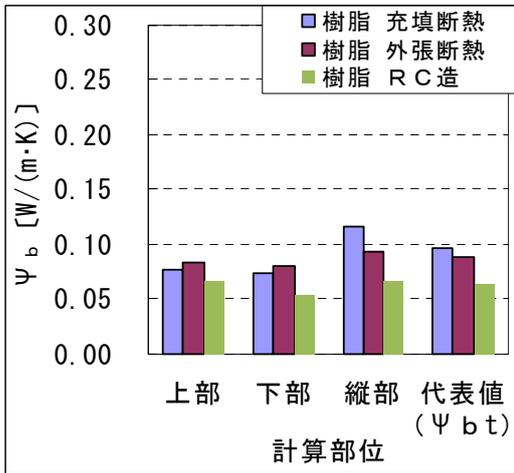


図 6.3-11 簡易計算時の樹脂フレーム FIX 窓  $\Psi_b$  算出結果

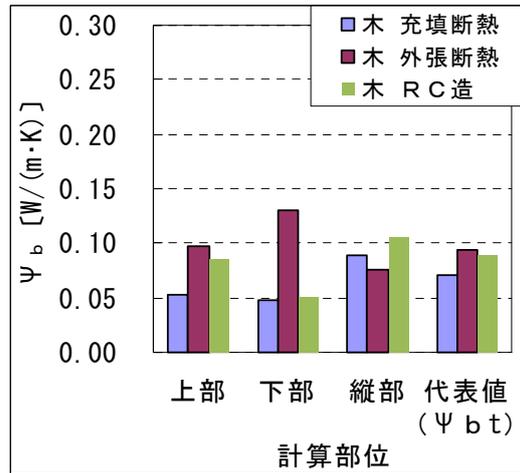


図 6.3-12 簡易計算時の木フレーム FIX 窓  $\Psi_b$  算出結果

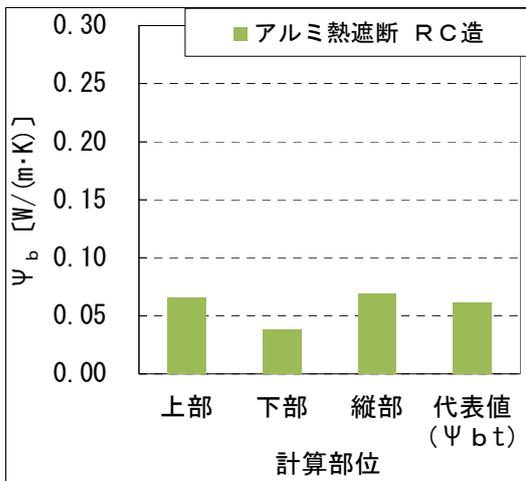


図 6.3-13 簡易計算時のアルミ熱遮断フレーム FIX 窓  $\Psi_b$  算出結果

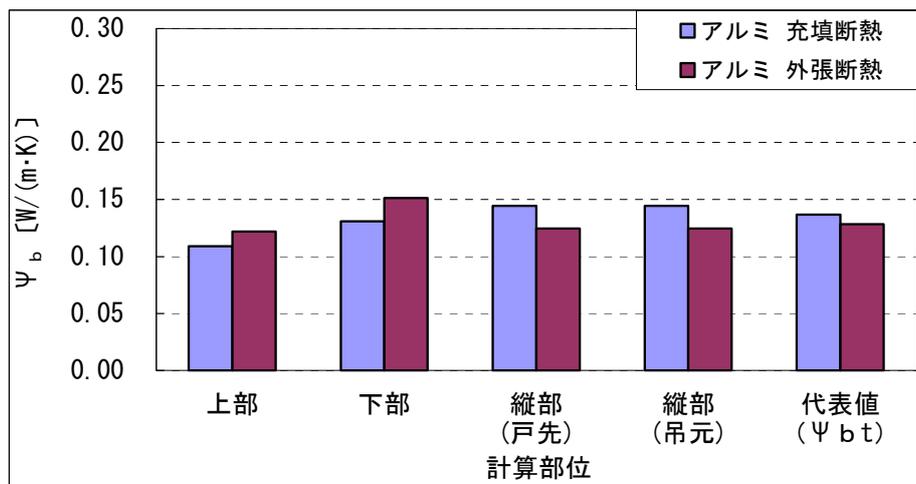


図 6.3-14 簡易計算時のアルミフレーム縦すべり出し窓  $\Psi_b$  算出結果

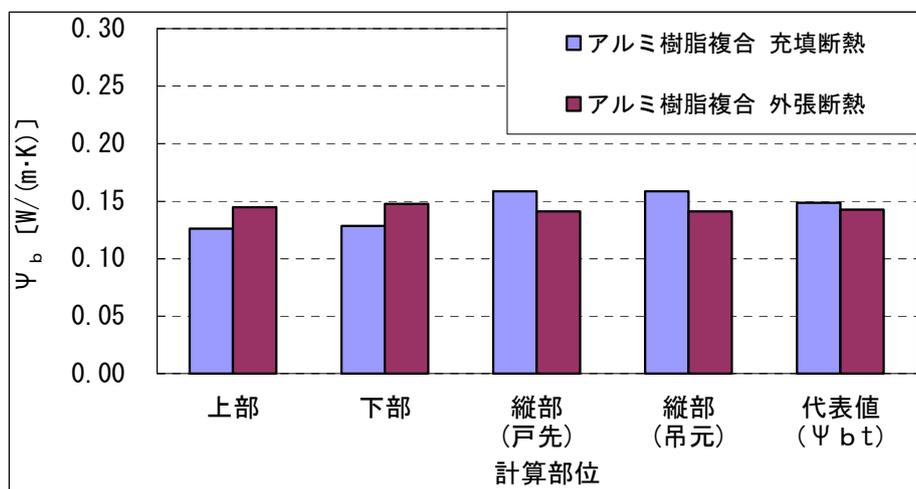


図 6.3-15 簡易計算時のアルミ樹脂複合フレーム縦すべり出し窓  $\Psi_b$

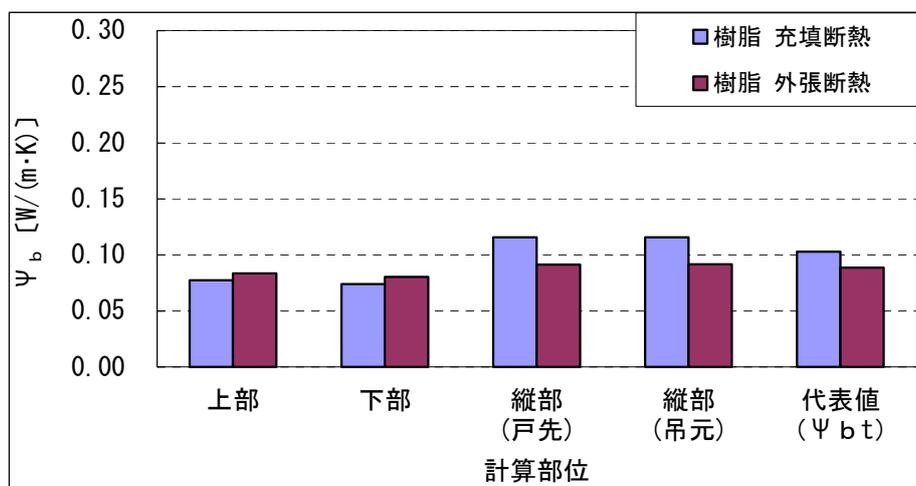


図 6.3-16 簡易計算時の樹脂フレーム縦すべり出し窓  $\Psi_b$  算出結果

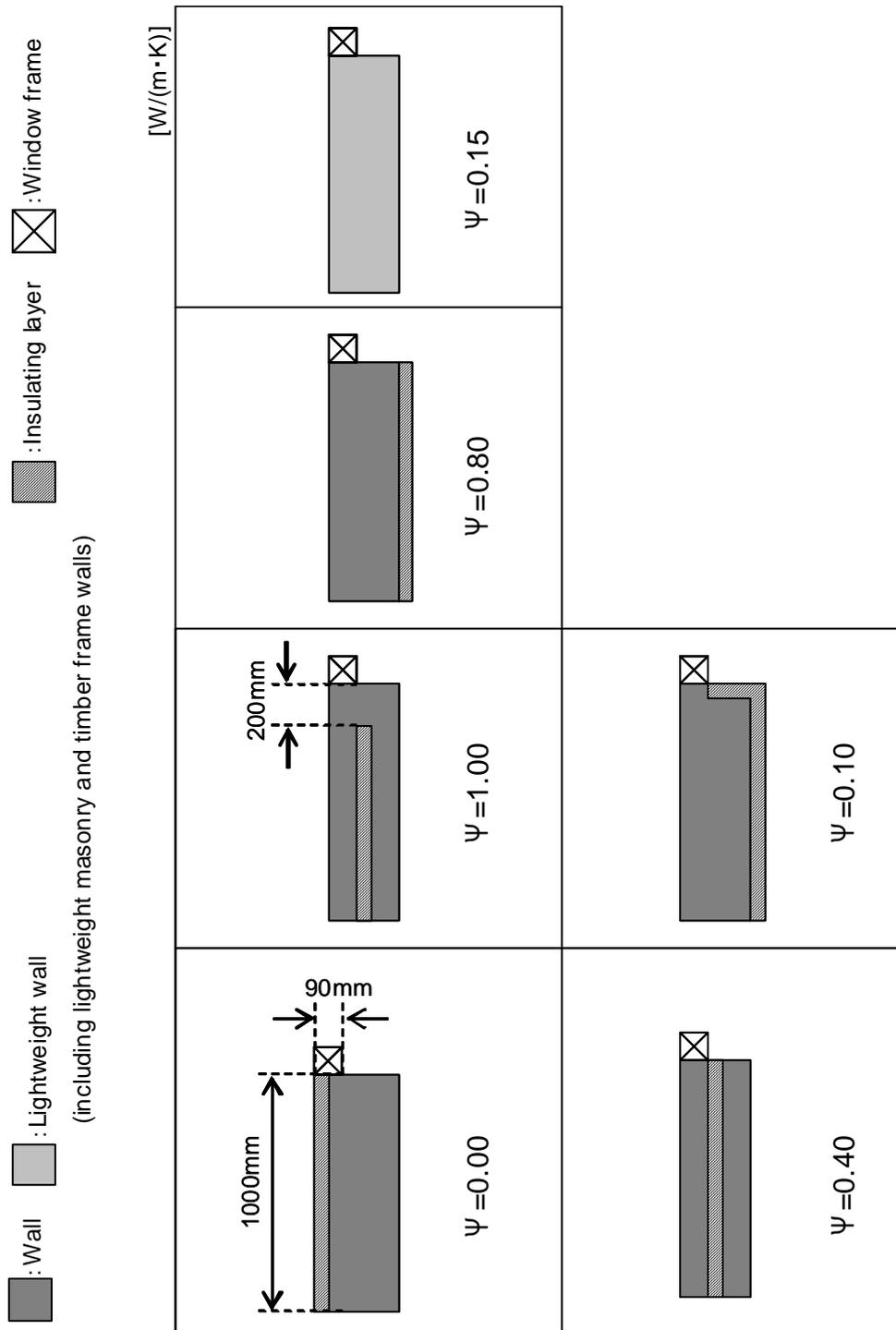


図 6.3-17 IS014683 記載の窓周り部分の構造熱橋（線熱貫流率）  
フレームが室外側寄りに納まる場合

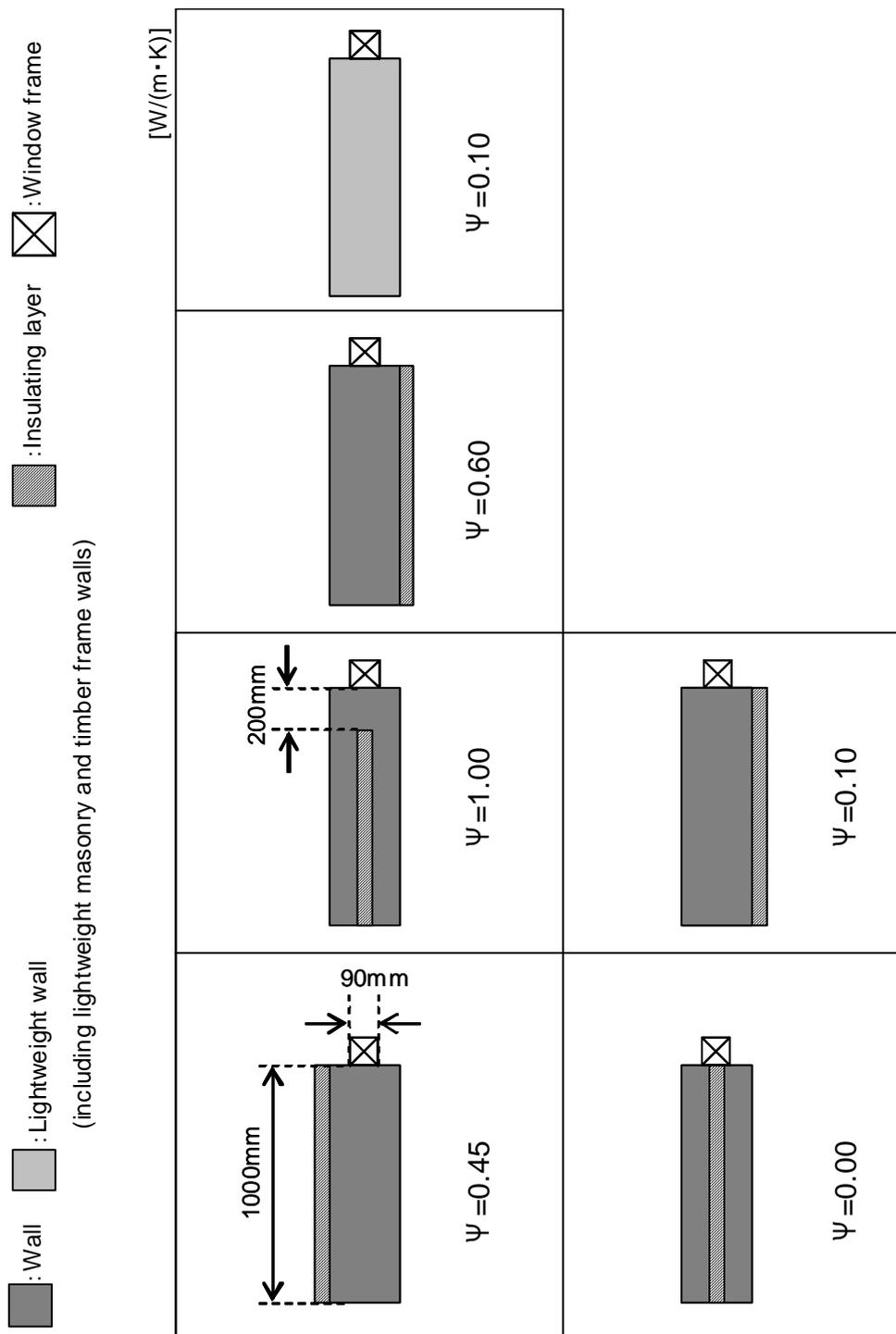


図 6.3-18 ISO14683 記載の窓周り部分の構造熱橋（線熱貫流率）  
フレームが外壁の中間付近に納まる場合

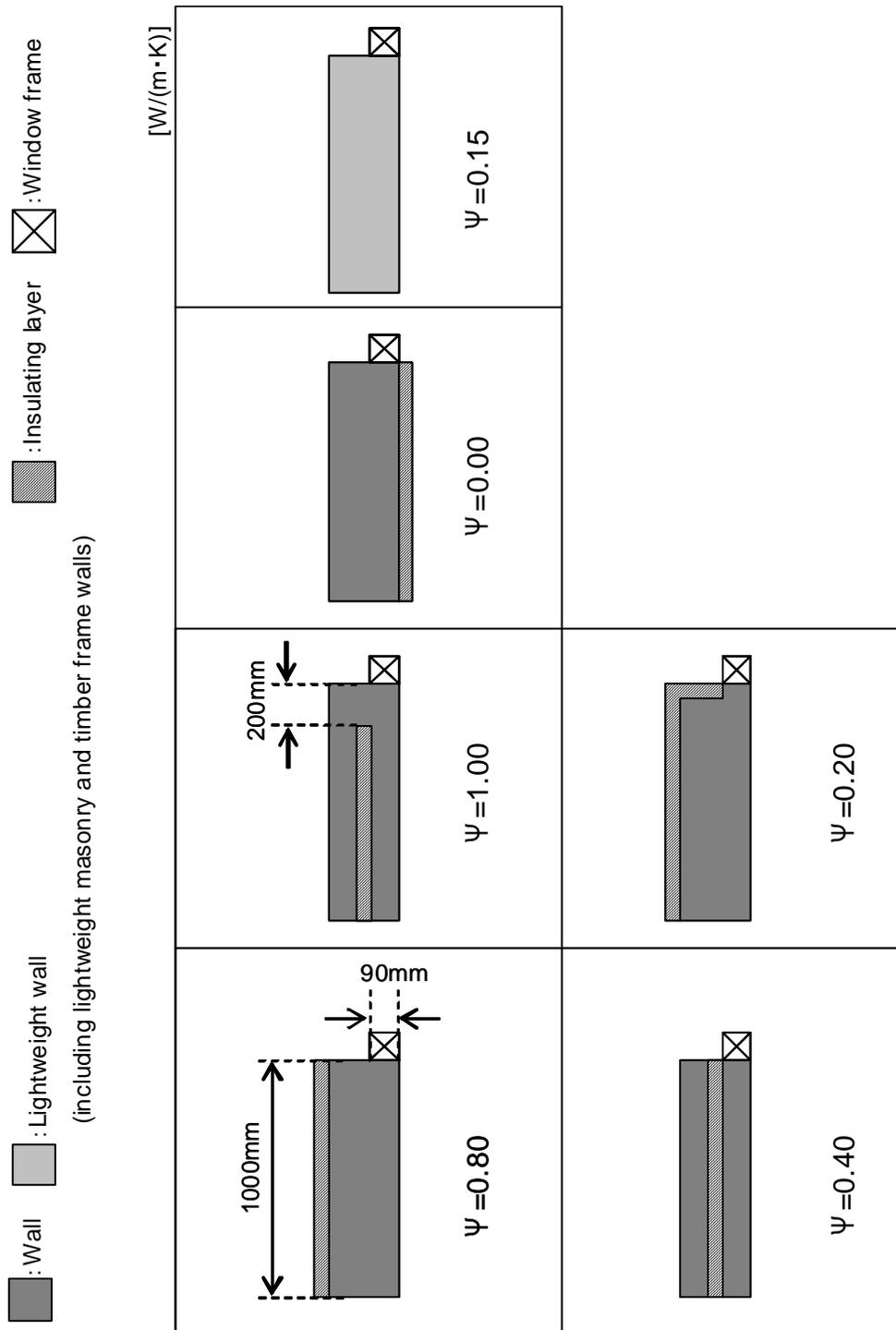


図 6.3-19 ISO14683 記載の窓周り部分の構造熱橋（線熱貫流率）  
フレームが室内側寄りに納まる場合

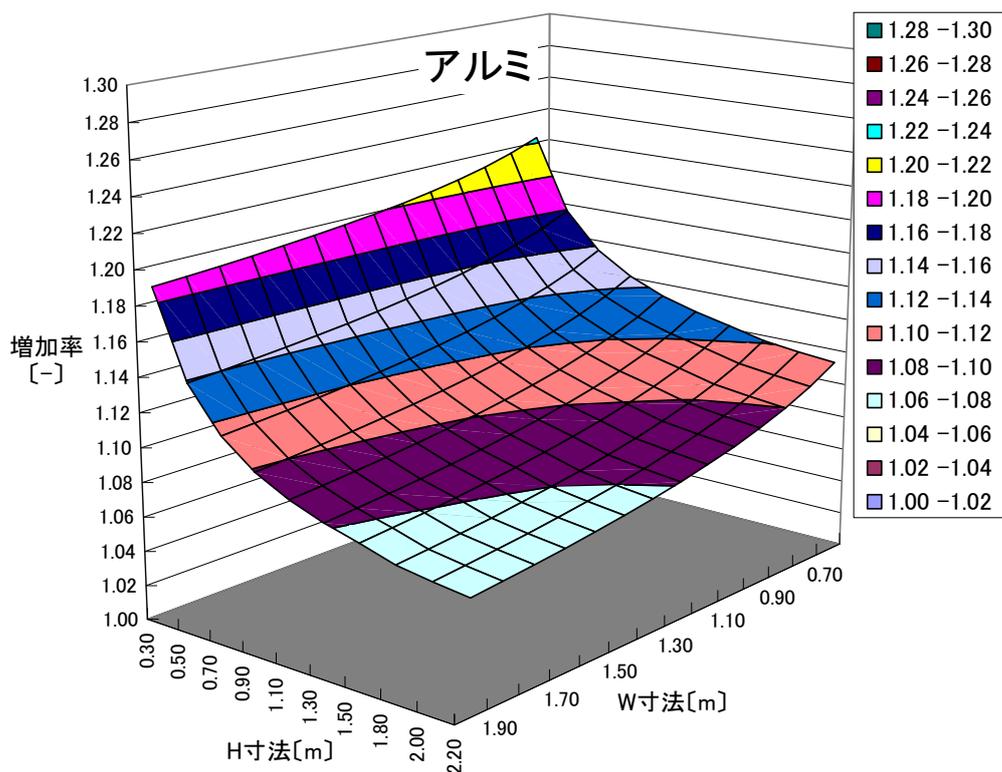


図 6.3-20 簡易計算時のアルミフレーム窓の熱貫流率の増加率[-]

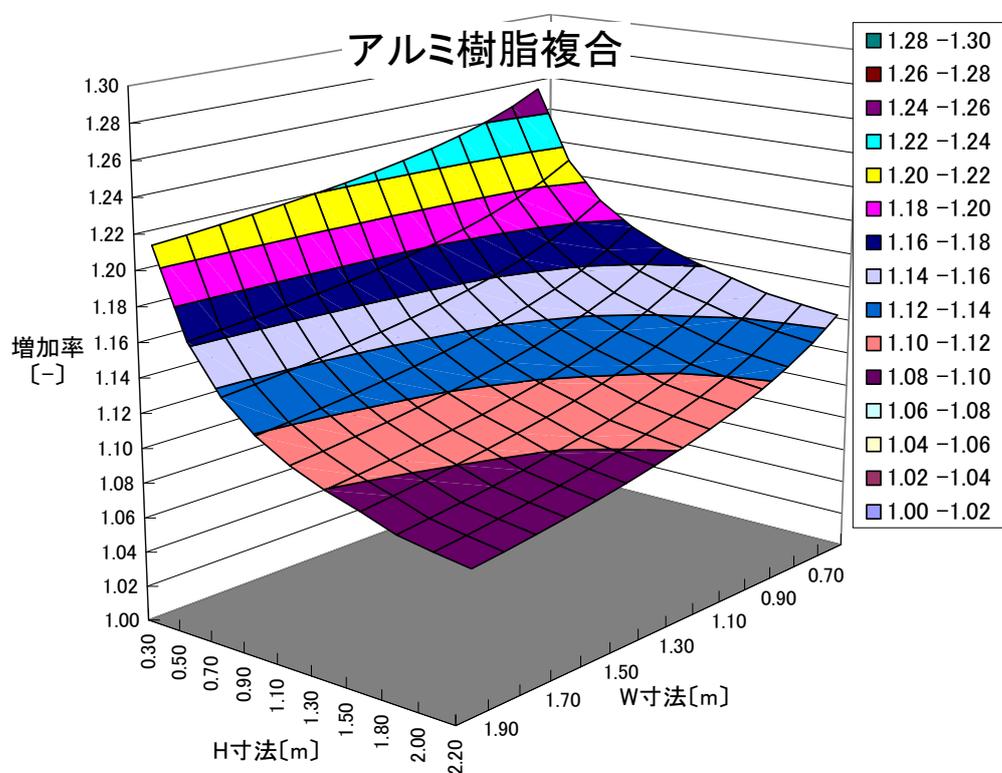


図 6.3-21 簡易計算時のアルミ樹脂複合フレーム窓の熱貫流率の増加率[-]

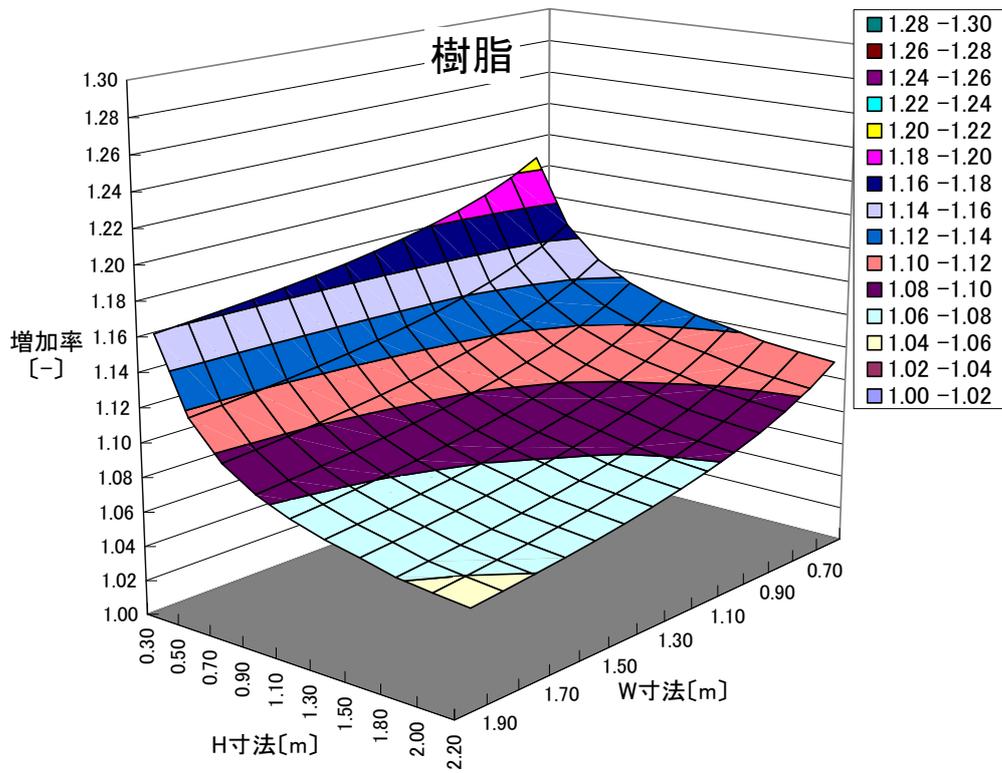


図 6.3-22 簡易計算時の樹脂フレーム窓の熱貫流率の増加率[-]

表 6.3-3 詳細計算時のアルミフレームにおける住宅の熱損失係数Qの増加比率[-]

総面積		32.20	[m <sup>2</sup> ]	フレームの材質		アルミ			
開口比率		26.8	[%]	対応地域		IV V 地域			
部位	幅 (W)	高さ (H)	面積 (A)	温度差係数 (H)	Ψ <sub>b</sub> 考慮無し		Ψ <sub>b</sub> 考慮 (詳細計算)		
	[m]	[m]	[m <sup>2</sup> ]	-	U値	AKH	U <sub>bt</sub> 値	AKH	
天井		-	-	67.90	1.0	0.23	15.93	0.23	15.93
壁	外壁	-	-	139.51	1.0	0.47	65.48	0.47	65.48
	基礎(外気)	-	-	0.35	1.0	0.47	0.16	0.47	0.16
	基礎(床裏)	-	-	0.35	0.7	4.45	1.08	4.45	1.08
床		-	-	65.47	0.7	0.47	21.72	0.47	21.72
1F	窓-1	1.65	2.10	3.47	1.0	3.82	13.24	4.04	13.99
	窓-2	1.65	2.10	3.47	1.0	3.82	13.24	4.04	13.99
	窓-3	2.55	1.80	4.59	1.0	3.67	16.85	3.86	17.72
	窓-4	0.90	2.10	1.89	1.0	4.65	8.79	4.97	9.39
	窓-5	0.60	0.90	0.54	1.0	4.79	2.59	5.34	2.89
	窓-6	0.60	0.90	0.54	1.0	4.79	2.59	5.34	2.89
	窓-7	0.60	0.90	0.54	1.0	4.79	2.59	5.34	2.89
	窓-8	0.60	0.90	0.54	1.0	4.79	2.59	5.34	2.89
	窓-9	0.90	1.80	1.62	1.0	4.65	7.53	4.98	8.07
	窓-10	1.40	0.70	0.98	1.0	4.35	4.26	4.78	4.68
	窓-11	1.65	1.30	2.15	1.0	3.88	8.32	4.15	8.91
2F	窓-12	1.65	1.95	3.22	1.0	3.85	12.37	4.07	13.09
	窓-13	1.65	1.95	3.22	1.0	3.85	12.37	4.07	13.09
	窓-14	1.65	1.05	1.73	1.0	3.97	6.88	4.28	7.42
	窓-15	0.90	1.10	0.99	1.0	4.30	4.26	4.70	4.66
	窓-16	0.60	0.90	0.54	1.0	4.79	2.59	5.34	2.89
	窓-17	0.90	1.10	0.99	1.0	4.30	4.26	4.70	4.66
	窓-18	0.60	0.90	0.54	1.0	4.79	2.59	5.34	2.89
	窓-19	0.60	1.10	0.66	1.0	4.69	3.09	5.20	3.43
<b>ΣAUH</b>						235.36		244.80	
土間床 (玄関)	土間外周部 [m]	3.16		1.0	0.53	1.67	0.53	1.67	
		3.16		0.7	0.76	1.68	0.76	1.68	
<b>Σ(LUH+AU)</b>						3.36		3.36	
換気熱損失 [W/K]	換気回数 n				0.50		0.50		
	0.35nB				50.58		50.58		
Q*S 熱損失係数*全床面積(W/K)						289.29		298.73	
<b>Q 熱損失係数 [W/(m<sup>2</sup>·K)]</b>						<b>2.376</b>		<b>2.454</b>	
延べ床面積[m <sup>2</sup> ]	S	121.7	比率(Q <sub>Ψ<sub>b</sub>}/Q) [-]</sub>		<b>1.03</b>				
気積[m <sup>3</sup> ]	B	289							

(省エネルギー基準解説書モデル)

表 6.3-4 詳細計算時のアルミ樹脂複合フレームにおける住宅の熱損失係数Qの増加比率[-]

総面積		32.20	[m <sup>2</sup> ]	フレームの材質		アルミ樹脂複合			
開口比率		26.8	[%]	Ψ <sub>b</sub> 考慮の有無		IVV地域			
部位	幅 (W)	高さ (H)	面積 (A)	温度差係数 (H)	Ψ <sub>b</sub> 考慮無し		Ψ <sub>b</sub> 考慮 (詳細計算)		
	[m]	[m]	[m <sup>2</sup> ]	-	U値	AKH	U <sub>bt</sub> 値	AKH	
天井		-	-	67.90	1.0	0.23	15.93	0.23	15.93
壁	外壁	-	-	139.51	1.0	0.47	65.48	0.47	65.48
	基礎(外気)	-	-	0.35	1.0	0.47	0.16	0.47	0.16
	基礎(床裏)	-	-	0.35	0.7	4.45	1.08	4.45	1.08
床		-	-	65.47	0.7	0.47	21.72	0.47	21.72
1F	窓-1	1.65	2.10	3.47	1.0	3.25	11.28	3.47	12.03
	窓-2	1.65	2.10	3.47	1.0	3.25	11.28	3.47	12.03
	窓-3	2.55	1.80	4.59	1.0	3.17	14.57	3.36	15.44
	窓-4	0.90	2.10	1.89	1.0	4.65	8.79	4.97	9.39
	窓-5	0.60	0.90	0.54	1.0	3.64	1.97	4.20	2.27
	窓-6	0.60	0.90	0.54	1.0	3.64	1.97	4.20	2.27
	窓-7	0.60	0.90	0.54	1.0	3.64	1.97	4.20	2.27
	窓-8	0.60	0.90	0.54	1.0	3.64	1.97	4.20	2.27
	窓-9	0.90	1.80	1.62	1.0	4.65	7.53	4.98	8.07
	窓-10	1.40	0.70	0.98	1.0	3.43	3.36	3.86	3.78
	窓-11	1.65	1.30	2.15	1.0	3.65	7.84	3.93	8.43
2F	窓-12	1.65	1.95	3.22	1.0	3.26	10.50	3.49	11.22
	窓-13	1.65	1.95	3.22	1.0	3.26	10.50	3.49	11.22
	窓-14	1.65	1.05	1.73	1.0	3.29	5.71	3.61	6.25
	窓-15	0.90	1.10	0.99	1.0	3.44	3.41	3.85	3.81
	窓-16	0.60	0.90	0.54	1.0	3.64	1.97	4.20	2.27
	窓-17	0.90	1.10	0.99	1.0	3.44	3.41	3.85	3.81
	窓-18	0.60	0.90	0.54	1.0	3.64	1.97	4.20	2.27
	窓-19	0.60	1.10	0.66	1.0	3.44	2.27	3.96	2.61
<b>ΣAUH</b>						216.60		226.04	
土間床 (玄関)	土間外周部 [m]	3.16		1.0	0.53	1.67	0.53	1.67	
		3.16		0.7	0.76	1.68	0.76	1.68	
<b>Σ(LUH+AU)</b>						3.36		3.36	
換気熱損失 [W/K]	換気回数 n				0.50		0.50		
	0.35nB				50.58		50.58		
Q*S 熱損失係数*全床面積(W/K)						270.53		279.97	
<b>Q 熱損失係数 [W/(m<sup>2</sup>·K)]</b>						<b>2.222</b>		<b>2.300</b>	
延べ床面積[m <sup>2</sup> ]	S	121.7	比率(Q <sub>Ψ<sub>b</sub>}/Q) [-]</sub>		<b>1.03</b>				
気積[m <sup>3</sup> ]	B	289							

(省エネルギー基準解説書モデル)

表 6.3-5 詳細計算時の樹脂フレームにおける住宅の熱損失係数Qの増加比率[-]

総面積		32.20 [m <sup>2</sup> ]		フレームの材質		樹脂			
開口比率		26.8 [%]		Ψ <sub>b</sub> 考慮の有無		IVV地域			
部位	幅 (W)	高さ (H)	面積 (A)	温度差係数 (H)	Ψ <sub>b</sub> 考慮無し		Ψ <sub>b</sub> 考慮 (詳細計算)		
	[m]	[m]	[m <sup>2</sup> ]	-	U値	AKH	U <sub>bt</sub> 値	AKH	
天井		-	-	67.90	1.0	0.23	15.93	0.23	15.93
壁	外壁	-	-	139.51	1.0	0.47	65.48	0.47	65.48
	基礎(外気)	-	-	0.35	1.0	0.47	0.16	0.47	0.16
	基礎(床裏)	-	-	0.35	0.7	4.45	1.08	4.45	1.08
床		-	-	65.47	0.7	0.47	21.72	0.47	21.72
1F	窓-1	1.65	2.10	3.47	1.0	2.20	7.61	2.30	7.98
	窓-2	1.65	2.10	3.47	1.0	2.20	7.61	2.30	7.98
	窓-3	2.55	1.80	4.59	1.0	2.05	9.43	2.15	9.87
	窓-4	0.90	2.10	1.89	1.0	2.33	4.40	2.49	4.70
	窓-5	0.60	0.90	0.54	1.0	2.34	1.27	2.62	1.42
	窓-6	0.60	0.90	0.54	1.0	2.34	1.27	2.62	1.42
	窓-7	0.60	0.90	0.54	1.0	2.34	1.27	2.62	1.42
	窓-8	0.60	0.90	0.54	1.0	2.34	1.27	2.62	1.42
	窓-9	0.90	1.80	1.62	1.0	2.33	3.77	2.50	4.04
	窓-10	1.40	0.70	0.98	1.0	2.12	2.08	2.34	2.29
	窓-11	1.65	1.30	2.15	1.0	2.02	4.34	2.16	4.63
2F	窓-12	1.65	1.95	3.22	1.0	2.20	7.07	2.31	7.43
	窓-13	1.65	1.95	3.22	1.0	2.20	7.07	2.31	7.43
	窓-14	1.65	1.05	1.73	1.0	2.04	3.54	2.20	3.81
	窓-15	0.90	1.10	0.99	1.0	2.19	2.17	2.39	2.37
	窓-16	0.60	0.90	0.54	1.0	2.34	1.27	2.62	1.42
	窓-17	0.90	1.10	0.99	1.0	2.19	2.17	2.39	2.37
	窓-18	0.60	0.90	0.54	1.0	2.34	1.27	2.62	1.42
	窓-19	0.60	1.10	0.66	1.0	2.35	1.55	2.61	1.72
ΣAUH						174.78		179.50	
土間床 (玄関)	土間外周部 [m]	3.16		1.0	0.53	1.67	0.53	1.67	
		3.16		0.7	0.76	1.68	0.76	1.68	
Σ(LUH+AU)						3.36		3.36	
換気熱損失 [W/K]	換気回数 n				0.50		0.50		
	0.35nB				50.58		50.58		
Q*S 熱損失係数*全床面積(W/K)						228.71		233.43	
Q 熱損失係数 [W/(m <sup>2</sup> ·K)]						1.879		1.918	
延べ床面積[m <sup>2</sup> ]	S	121.7	比率(Q <sub>Ψ<sub>b</sub>}/Q) [-]</sub>		1.02				
気積[m <sup>3</sup> ]	B	289							

(省エネルギー基準解説書モデル)

表 6.3-6 簡易計算時のアルミフレームにおける住宅の熱損失係数Qの増加比率[-]

総面積		32.20	[m <sup>2</sup> ]	フレームの材質		アルミ			
開口比率		26.8	[%]	Ψ <sub>b</sub> 考慮の有無		IV V 地域			
部位	幅 (W)	高さ (H)	面積 (A)	温度差係数 (H)	Ψ <sub>b</sub> 考慮無し		Ψ <sub>b</sub> 考慮 (簡易計算)		
	[m]	[m]	[m <sup>2</sup> ]	-	U値	AKH	U <sub>bt</sub> 値	AKH	
天井		-	-	67.90	1.0	0.23	15.93	0.23	15.93
壁	外壁	-	-	139.51	1.0	0.47	65.48	0.47	65.48
	基礎(外気)	-	-	0.35	1.0	0.47	0.16	0.47	0.16
	基礎(床裏)	-	-	0.35	0.7	4.45	1.08	4.45	1.08
床		-	-	65.47	0.7	0.47	21.72	0.47	21.72
1F	窓-1	1.65	2.10	3.47	1.0	3.82	13.24	4.15	14.36
	窓-2	1.65	2.10	3.47	1.0	3.82	13.24	4.15	14.36
	窓-3	2.55	1.80	4.59	1.0	3.67	16.85	3.96	18.16
	窓-4	0.90	2.10	1.89	1.0	4.65	8.79	5.13	9.69
	窓-5	0.60	0.90	0.54	1.0	4.79	2.59	5.62	3.04
	窓-6	0.60	0.90	0.54	1.0	4.79	2.59	5.62	3.04
	窓-7	0.60	0.90	0.54	1.0	4.79	2.59	5.62	3.04
	窓-8	0.60	0.90	0.54	1.0	4.79	2.59	5.62	3.04
	窓-9	0.90	1.80	1.62	1.0	4.65	7.53	5.15	8.34
	窓-10	1.40	0.70	0.98	1.0	4.35	4.26	4.99	4.89
	窓-11	1.65	1.30	2.15	1.0	3.88	8.32	4.29	9.20
2F	窓-12	1.65	1.95	3.22	1.0	3.85	12.37	4.18	13.45
	窓-13	1.65	1.95	3.22	1.0	3.85	12.37	4.18	13.45
	窓-14	1.65	1.05	1.73	1.0	3.97	6.88	4.44	7.69
	窓-15	0.90	1.10	0.99	1.0	4.30	4.26	4.90	4.86
	窓-16	0.60	0.90	0.54	1.0	4.79	2.59	5.62	3.04
	窓-17	0.90	1.10	0.99	1.0	4.30	4.26	4.90	4.86
	窓-18	0.60	0.90	0.54	1.0	4.79	2.59	5.62	3.04
	窓-19	0.60	1.10	0.66	1.0	4.69	3.09	5.46	3.60
ΣAUH						235.36		249.52	
土間床 (玄関)	土間外周部 [m]	3.16		1.0	0.53	1.67	0.53	1.67	
		3.16		0.7	0.76	1.68	0.76	1.68	
Σ(LUH+AU)						3.36		3.36	
換気熱損失 [W/K]	換気回数 n				0.50		0.50		
	0.35nB				50.58		50.58		
Q*S 熱損失係数*全床面積(W/K)						289.29		303.45	
<b>Q 熱損失係数 [W/(m<sup>2</sup>·K)]</b>						<b>2.376</b>		<b>2.493</b>	
延べ床面積[m <sup>2</sup> ]	S	121.7	比率(Q <sub>Ψ<sub>b</sub>}/Q) [-]</sub>		<b>1.05</b>				
気積[m <sup>3</sup> ]	B	289							

(省エネルギー基準解説書モデル)

表 6.3-7 簡易計算時のアルミ樹脂複合フレームにおける住宅の熱損失係数Qの増加比率[-]

総面積		32.20	[m <sup>2</sup> ]	フレームの材質		アルミ樹脂複合			
開口比率		26.8	[%]	$\Psi_b$ 考慮の有無		IV V 地域			
部位	幅 (W)	高さ (H)	面積 (A)	温度差係数 (H)	$\Psi_b$ 考慮無し		$\Psi_b$ 考慮 (簡易計算)		
	[m]	[m]	[m <sup>2</sup> ]	-	U値	AKH	U <sub>bt</sub> 値	AKH	
天井		-	-	67.90	1.0	0.23	15.93	0.23	15.93
壁	外壁	-	-	139.51	1.0	0.47	65.48	0.47	65.48
	基礎(外気)	-	-	0.35	1.0	0.47	0.16	0.47	0.16
	基礎(床裏)	-	-	0.35	0.7	4.45	1.08	4.45	1.08
床		-	-	65.47	0.7	0.47	21.72	0.47	21.72
1F	窓-1	1.65	2.10	3.47	1.0	3.25	11.28	3.58	12.40
	窓-2	1.65	2.10	3.47	1.0	3.25	11.28	3.58	12.40
	窓-3	2.55	1.80	4.59	1.0	3.17	14.57	3.46	15.87
	窓-4	0.90	2.10	1.89	1.0	4.65	8.79	5.13	9.69
	窓-5	0.60	0.90	0.54	1.0	3.64	1.97	4.47	2.42
	窓-6	0.60	0.90	0.54	1.0	3.64	1.97	4.47	2.42
	窓-7	0.60	0.90	0.54	1.0	3.64	1.97	4.47	2.42
	窓-8	0.60	0.90	0.54	1.0	3.64	1.97	4.47	2.42
	窓-9	0.90	1.80	1.62	1.0	4.65	7.53	5.15	8.34
	窓-10	1.40	0.70	0.98	1.0	3.43	3.36	4.08	3.99
	窓-11	1.65	1.30	2.15	1.0	3.65	7.84	4.07	8.72
2F	窓-12	1.65	1.95	3.22	1.0	3.26	10.50	3.60	11.58
	窓-13	1.65	1.95	3.22	1.0	3.26	10.50	3.60	11.58
	窓-14	1.65	1.05	1.73	1.0	3.29	5.71	3.76	6.52
	窓-15	0.90	1.10	0.99	1.0	3.44	3.41	4.05	4.01
	窓-16	0.60	0.90	0.54	1.0	3.64	1.97	4.47	2.42
	窓-17	0.90	1.10	0.99	1.0	3.44	3.41	4.05	4.01
	窓-18	0.60	0.90	0.54	1.0	3.64	1.97	4.47	2.42
	窓-19	0.60	1.10	0.66	1.0	3.44	2.27	4.21	2.78
$\Sigma AUH$						216.60		230.76	
土間床 (玄関)	土間外周部 [m]	3.16		1.0	0.53	1.67	0.53	1.67	
		3.16		0.7	0.76	1.68	0.76	1.68	
$\Sigma(LUH+AU)$						3.36		3.36	
換気熱損失 [W/K]	換気回数 n				0.50		0.50		
	0.35nB				50.58		50.58		
Q*S 熱損失係数*全床面積(W/K)						270.53		284.69	
<b>Q 熱損失係数 [W/(m<sup>2</sup>·K)]</b>						<b>2.222</b>		<b>2.339</b>	
延べ床面積[m <sup>2</sup> ]	S	121.7	比率(Q <sub>ψ<sub>b</sub></sub> /Q) [-]		<b>1.05</b>				
気積[m <sup>3</sup> ]	B	289							

(省エネルギー基準解説書モデル)

表 6.3-8 簡易計算時の樹脂フレームにおける住宅の熱損失係数Qの増加比率[-]

総面積		32.20	[m <sup>2</sup> ]	フレームの材質		樹脂			
開口比率		26.8	[%]	Ψ <sub>b</sub> 考慮の有無		IV V 地域			
部位	幅 (W)	高さ (H)	面積 (A)	温度差係数 (H)	Ψ <sub>b</sub> 考慮無し		Ψ <sub>b</sub> 考慮 (簡易計算)		
	[m]	[m]	[m <sup>2</sup> ]	-	U値	AKH	U <sub>bt</sub> 値	AKH	
天井		-	-	67.90	1.0	0.23	15.93	0.23	15.93
壁	外壁	-	-	139.51	1.0	0.47	65.48	0.47	65.48
	基礎(外気)	-	-	0.35	1.0	0.47	0.16	0.47	0.16
	基礎(床裏)	-	-	0.35	0.7	4.45	1.08	4.45	1.08
床		-	-	65.47	0.7	0.47	21.72	0.47	21.72
1F	窓-1	1.65	2.10	3.47	1.0	2.20	7.61	2.41	8.36
	窓-2	1.65	2.10	3.47	1.0	2.20	7.61	2.41	8.36
	窓-3	2.55	1.80	4.59	1.0	2.05	9.43	2.24	10.30
	窓-4	0.90	2.10	1.89	1.0	2.33	4.40	2.65	5.00
	窓-5	0.60	0.90	0.54	1.0	2.34	1.27	2.90	1.57
	窓-6	0.60	0.90	0.54	1.0	2.34	1.27	2.90	1.57
	窓-7	0.60	0.90	0.54	1.0	2.34	1.27	2.90	1.57
	窓-8	0.60	0.90	0.54	1.0	2.34	1.27	2.90	1.57
	窓-9	0.90	1.80	1.62	1.0	2.33	3.77	2.66	4.31
	窓-10	1.40	0.70	0.98	1.0	2.12	2.08	2.55	2.50
	窓-11	1.65	1.30	2.15	1.0	2.02	4.34	2.30	4.93
2F	窓-12	1.65	1.95	3.22	1.0	2.20	7.07	2.42	7.79
	窓-13	1.65	1.95	3.22	1.0	2.20	7.07	2.42	7.79
	窓-14	1.65	1.05	1.73	1.0	2.04	3.54	2.36	4.08
	窓-15	0.90	1.10	0.99	1.0	2.19	2.17	2.59	2.57
	窓-16	0.60	0.90	0.54	1.0	2.34	1.27	2.90	1.57
	窓-17	0.90	1.10	0.99	1.0	2.19	2.17	2.59	2.57
	窓-18	0.60	0.90	0.54	1.0	2.34	1.27	2.90	1.57
	窓-19	0.60	1.10	0.66	1.0	2.35	1.55	2.87	1.89
ΣAUH						174.78		184.22	
土間床 (玄関)	土間外周部 [m]	3.16		1.0	0.53	1.67	0.53	1.67	
		3.16		0.7	0.76	1.68	0.76	1.68	
Σ(LUH+AU)						3.36		3.36	
換気熱損失 [W/K]	換気回数 n				0.50		0.50		
	0.35nB				50.58		50.58		
Q*S 熱損失係数*全床面積(W/K)						228.71		238.15	
<b>Q 熱損失係数 [W/(m<sup>2</sup>·K)]</b>						<b>1.879</b>		<b>1.956</b>	
延べ床面積[m <sup>2</sup> ]	S	121.7	比率(Q <sub>Ψ<sub>b</sub>}/Q) [-]</sub>		<b>1.04</b>				
気積[m <sup>3</sup> ]	B	289							

(省エネルギー基準解説書モデル)

#### 6.4 まとめ

第2章及び第3章で、窓と躯体の間（窓と躯体の接触部分）では熱移動が生じることが確認された。第6章では、第2章で算出した窓と躯体の間の線熱貫流率を元に、日本では熱損失係数や熱負荷計算ツールで無視されている窓と躯体との間の熱移動が、建物の熱性能に及ぼす影響を確認した。結果を以下にまとめる。

- ①壁の実質熱貫流率を用いて算出した $\Psi_b$ を窓の熱貫流率U値に付加した場合、開口部のサイズの小さいものほど熱貫流率の増加比率が大きくなることが確認できた。熱貫流率の増加率は、W:0.3m、H:0.7mではアルミフレームが14%、アルミ樹脂複合フレームが16%、樹脂フレームが8%程度増加しており、窓の熱貫流率U値に影響としては小さいことがわかった。
- ②壁の代表断面の熱貫流率を用いて算出した $\Psi_b$ は、第2章で窓台や珞まで含めた壁の実質熱貫流率を用いて算出した $\Psi_b$ に比べ、概ね0.05W/(m・K)程度増加していることが確認できた。
- ③壁の代表断面の熱貫流率を用いて算出した $\Psi_b$ はISO14683に記載される線熱貫流率の算出条件に類似するため、この結果をISO14683に示される線熱貫流率と比較した。その結果、樹脂や木フレームでは近い値となっている一方で、アルミやアルミ樹脂複合フレームではISO14683に記載された値のほうが小さい値となっている。そのため、日本でこの線熱貫流率を熱負荷計算ツール等に適用するには、フレームの材質による分類が必要になると考えられる。
- ④壁の代表断面の熱貫流率を用いて算出した $\Psi_b$ を窓の熱貫流率U値に付加した場合、窓の熱貫流率の増加率は、W:0.3m、H:0.7mの開口寸法でアルミフレームが22%、アルミ樹脂複合フレームが25%、樹脂フレームが20%程度増加することが確認できた。
- ⑤アルミ、アルミ樹脂複合、樹脂の3種類のフレームの材質について、壁の実質熱貫流率を用いて算出した $\Psi_b$ を考慮して算出した住宅の熱損失係数Q値は、 $\Psi_b$ を考慮せずに算出したQ値に比べ、アルミ及びアルミ樹脂複合フレームで3%程度、樹脂フレームで2%程度増加することがわかった。また、壁の代表断面の熱貫流率を用いて算出した $\Psi_b$ を考慮して算出した場合は、アルミ及びアルミ樹脂複合フレームで5%程度、樹脂フレームで3%程度増加することがわかった。

#### 参考文献

- 1) ISO 12567-1 : Thermal performance of windows and doors - Determination of thermal transmittance by hot box method - Complete windows and doors, 2000
- 2) JIS A 4710 : 建具の断熱性試験方法, (財) 日本規格協会, 2004
- 3) ISO 10077-1 : Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance -- Part 1:General, 2006
- 4) ISO 10077-2 : Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance -- Part 2:Numerical method for frames, 2003
- 5) JIS A 2102-1 : 窓及びドアの熱性能-熱貫流率の計算-第1部:一般, (財) 日本規格協会, 2011
- 6) JIS A 2102-2 : 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方法, (財) 日本規格協会, 2011
- 7) ISO 8990 : Thermal insulation -- Determination of steady-state thermal transmission properties -- Calibrated and guarded hot box, 1994
- 8) JIS A 1420 : 建築用構成材の断熱性測定方法-校正熱箱法及び保護熱箱法, (財) 日本規格協会, 1999
- 9) ISO 6946 : Building components and building elements -- Thermal resistance and thermal transmittance -- Calculation method, 2007
- 10) JIS A 2101 : 建築構成要素及び建築部位-熱抵抗及び熱貫流率-計算方法, (財) 日本規格協会, 2003
- 11) 住宅の省エネルギー基準の解説書, 第3版第8刷, pp.331-339, (財) 建築環境・省エネルギー機構, 2011.11
- 12) ISO 14683 : Thermal bridges in building construction - Linear thermal transmittance - Simplified methods and default values, 2007



第7章 総括

---

---



## 7.1 本論文の要約

本論文は、ISO や JIS 等の規格や既往の研究を基に、これまで日本で評価・考慮されていなかった窓と躯体の間での熱移動について実態を明らかにすることを目的とし、窓と躯体の間での熱移動について定量化する計算方法を提示すると共に、実際に幾つかの代表例について計算した結果をまとめたものである。また、窓と躯体の間での熱移動について実態を明らかにしたことで、より実態に近い熱負荷の評価を可能となったため、実際に得られた窓と躯体の間での熱移動量を用いて幾つかの代表例における熱負荷の評価を行ない、現状の評価との比較を行なった結果をまとめたものである。

第1章では、本研究の社会的背景と関連する既往の研究を概説し、研究の意義と目的を明確にした。

第2章では、この窓と躯体の間での熱流を定量化する計算方法を提案し、幾つかの代表的な窓と躯体の組合せについて窓と躯体との間の熱流を線熱貫流率 $\Psi_b$ として算出した結果を報告し考察した。また、使用する解析ソフトの精度検証や、窓と躯体の間での線熱貫流率 $\Psi_b$ を熱性能の評価対象となっている複層ガラスのスペーサ部線熱貫流率 $\Psi_g$ との比較、躯体の熱性能が窓と躯体の間での線熱貫流率 $\Psi_b$ に及ぼす影響の確認を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- ① 2次元境界要素法計算プログラム TB2D/BEM は、JIS2102-2 に規定される9つ全ての検証例題において、計算結果の二次元熱コンダクタンス ( $L^{2D}$ ) が、規定された値の3%以内となることが確認された。このことから、二次元境界要素法貫流熱解析プログラム TB2D/BEM は、窓の熱性能計算法 JIS の適用基準を満たす精度を持つ解析プログラムであることが確認された。
- ② 全ての組合せの窓と躯体の間で、熱流が生じていることが確認できた。また、 $\Psi_b$  は全て正の値であることから、全ての組合せで窓と躯体を一体として計算する方が窓と躯体を分けて計算する場合に比べ、熱移動量が大きいことが確認できた。熱流の大きさは、各々の部位で数値の大小は見られるが全て  $0.30\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  以下であった。 $\Psi_{bt}$  は、RC 造を除くとフレームの材質毎に大まかに分類でき、アルミ及びアルミ樹脂複合は  $0.08\sim 0.10\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、樹脂、アルミ熱遮断及び木は  $0.03\sim 0.05\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  程度となった。
- ③ 窓と躯体の間での線熱貫流率 $\Psi_b$ は、フレームの設置位置だけでなく断熱材の入り方でも値が変化することが確認でき、概ねフレームの主となる材質の熱伝導率が大きい程 $\Psi_b$ は大きくなる。しかし、フレームの形状や設置位置、躯体の構成によっても値が変化することがわかった。

- ④窓と躯体との間の線熱貫流率 $\Psi_b$ をガラススペーサ部の線熱貫流率 $\Psi_g$ と比較すると、アルミフレームではJIS2102-2の規定値で3.5倍、計算値で2.9倍も大きく、アルミ樹脂複合フレームでは規定値で1.2倍、計算値で2.2倍大きい線熱貫流率となった。一方で、樹脂フレームでは規定値では0.5倍、計算値では0.7倍の値となった。この結果から、アルミやアルミ樹脂複合フレームでは、熱性能の評価対象となっている複層ガラスのスペーサ部線熱貫流率 $\Psi_g$ より、熱性能の評価対象外となっている窓と躯体との間の線熱貫流率 $\Psi_b$ の方が、熱性能評価へ及ぼす影響が大きいことが確認できた。
- ⑤躯体の断熱材の条件の違いによる影響を確認した結果、各モデルの通過熱流量 $Q$ の値に違いが見られるにも関わらず、躯体との接触部の通過熱流量 $L_{qb}$ 、窓と躯体との間の線熱貫流率 $\Psi_b$ の値には大きな違いが見られないことがわかった。これは、断熱材の厚さや熱伝導率を変えることで全体の通過熱流量を変化させても、フレームと躯体との接触部における熱移動はほぼ一定であることを示している。

第3章では、窓と躯体との間の熱移動について、幾つかの窓フレームの材質、躯体構造、ガラスの仕様における測定を行い、結果を得た。また、同条件における計算も行うことで、測定結果と計算結果の比較を行い、様々な知見を得た。得られた知見を以下にまとめる。

- ①全ての条件において、窓と躯体の間には熱流が生じていることが測定からも確認できた。また、熱流の方向は全ての条件で躯体の額縁の見込みにおいて、熱流方向が室内側寄りと室外側寄りで反転することが確認された。
- ②測定結果と計算結果共に、 $\Psi_b$ は全て正の値であることから、熱流方向については概ね一致していることが確認できる。しかし、熱流の大きさには測定結果と計算結果で大きな差が見られ、一部測定結果のほうが大きい箇所もあるが、ほとんどの箇所で測定結果が計算結果を大きく下回る結果となった。
- ③測定結果と計算結果共に、 $\Psi_b$ は普通複層ガラスとLowE複層ガラスの違いによる影響がほとんど見られなかったため、窓と躯体の間の熱流はガラスの熱性能の違いによる影響をほとんど受けないことが確認できた。
- ④測定結果と計算結果で大きな差が見られた要因として、測定と計算における室内外の熱伝達率の相違、測定における局所熱伝達率のバラつき、熱流計等の測定機器の配線による影響、熱流計の設置による影響、測定の精度（熱流計の浮き、剥れ等）が考えられた。その中で、測定と計算における室内外の熱伝達率の相違、測定における局所熱伝達率のバラつきの2項目については検討可能な事項であり、また影響の大きい事項であると考えられたため、第4章及び第5章にて検討した。

第4章では、第3章で窓と躯体との間の熱流が測定と計算で値に大きな差異があり、その大きな要因として熱伝達率の分布であることが考えられたため、測定時における開口部の熱伝達率の分布について測定を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- ①窓の熱貫流率の測定値は、 $2.45\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ であった。
- ②表面温度のW方向の分布は、室内側、室外側共に若干の数値の差異が見られるものの、測定誤差等を考慮すると大きな分布はないと考えられる。
- ③表面温度のH方向の分布は、室外側は高さ530mm付近で低くなる分布となっており、室内側は上に行くに従い高くなる分布となっている。
- ④平均表面温度は室外側が $0.7^\circ\text{C}$ 、室内側が $12.8^\circ\text{C}$ であった。
- ⑤総合熱伝達率は、室内側、室外側共に高さ方向で分布があることが確認できた。また、W方向についても分布が確認でき、室外側は高さ220mm及び540mm付近では、中央部付近で総合熱伝達率の低減が見られた。
- ⑥総合熱伝達率について、W方向で平均値を取り高さ方向の分布を確認すると、室外側は高さ540mm付近で最大となり、そこから上に行くに従い低下する。室内側は上に行くに従い徐々に熱伝達率が大きくなっていることが確認できた。
- ⑦熱伝達率の平均値は、室外側では $24.8\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、室内側では $7.7\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ であった。

第5章では、第4章で実施した熱伝達率の測定を、流体解析によりシミュレートすることで熱伝達率の分布を計算により導出し、計算と測定の比較を行うことにより計算結果の整合性を確認した。また、測定では把握し切れなかったフレーム部近傍の熱伝達率の分布を計算結果より把握した。得られた結果を以下にまとめる。

- ①解析結果の窓の熱貫流率は、 $2.38\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ であり、測定結果と概ね一致した。
- ②解析結果から、室内側ではガラス部に比べフレーム部の温度が低く、室外側ではガラス部に比べフレーム部の温度が高い。これにより、フレーム部はガラス部に比べ熱を通し易く、断熱性能が劣っていることが確認できる。ガラス部では、室内側、室外側共に上に行くに従い表面温度が高く、またガラスエッジ部の表面温度はフレーム部の影響を受け、ガラス中央部に比べ室内側は低く、室外側は高くなることが確認できた。
- ③解析結果から、室内側、室外側共に放射熱伝達率に大きな分布が見られないことがわかった。一方で、対流熱伝達率には分布が見られた。室内側では上下のフレームで $3\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ほどの差が見られ、室外側では縦フレームの下部で大きな値となることがわかった。また、室外側のガラス部では、H方向の中央部よりやや下の箇所で大きな値となることや、W方向の中央部で少し値が小さくなることがわかった。総合熱伝達は、室内側、室外側共に放射熱伝達率に大きな分布が見られなかったため、対流熱伝達率の分布の影響がそのまま出ている結果となった。

- 
- ④測定結果と解析結果の表面温度を比較すると、室内側、室外側共に測定値と計算値の差異は僅かであり、測定結果と解析結果は概ね一致していると考えられる。
  - ⑤測定結果と解析結果の総合熱伝達率を比較すると、室外側下部で測定値と計算値で乖離が見られるが、解析結果から室外側下部は総合熱伝達率が急激に変化する箇所であり、測定点の少しのずれが値に大きく影響する箇所である。このことを考慮すると、測定値と計算値で一部乖離が見られる箇所もあるが、測定結果と解析結果は概ね一致していると考えられる。
  - ⑥室内側下部のフレーム部の熱伝達率は、出隅部分で局所的に熱伝達率が大きくなっている。窓フレーム部の熱性能の計算法ではこの部分は隅角部扱いとなり熱伝達率が低減する箇所であるが、本結果では逆に熱伝達率が増加する傾向を示している。また、フレーム部については隅角部による熱伝達率の低減は見られなかった。
  - ⑦室内側上部のフレーム部の熱伝達率は、隅角部による低減は見られ、またフレーム部の躯体側で熱伝達率が局所的に増加していることが確認できた。
  - ⑧室内側縦部のフレーム部の熱伝達率は、隅角部の影響も確認でき、上下方向の分布はあるものの、中央部を平均値として扱えばフレーム部の熱性能の計算法に規定される値と大きな乖離は見られない。
  - ⑨室内側のガラスエッジ部では、全ての部位で隅角部による熱伝達率の低減が見られた。
  - ⑩室外側下部のフレーム部の熱伝達率は、凸部で著しく熱伝達率が低下していることが確認できた。また、室内側と同様にフレームの出隅部分で局所的に熱伝達率が大きくなる傾向となっており、隅角部で熱伝達率の低減は見られないことも室内側と同様の傾向であった。
  - ⑪室外側上部のフレーム部の熱伝達率は、ガラス側のフレーム出隅部が著しく熱伝達率が増加していることが分かった。また、フレーム部の隅角部では熱伝達率の低減は見られなかった。
  - ⑫室外側縦部のフレーム部の熱伝達率は、室内側と同様に隅角部の影響が確認でき、上下方向の分布はあるもの、中央部を平均値として扱えると考えられる。
  - ⑬室外側のガラスエッジ部では、室内側と同様に隅角部による熱伝達率の低減が見られた。
  - ⑭窓フレーム部の熱性能の計算法では、部位に関わらず室内側は一般部  $7.69\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、隅各部  $5.00\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、室外側は  $25.0\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  という固定値で規定されているが、解析結果を確認すると熱伝達率分布を平均化しても、規定されている値と解析結果の値では乖離が見られる箇所が多い。また、部位による違いも見られ、特に室外側では上フレーム近傍と下フレーム近傍で大きな差が見られた。
-

⑮窓フレーム近傍の詳細な計算を行なう場合は、室外側にも隅角部による熱伝達率の低減効果を考える必要があると思われる。また、上フレーム近傍と下フレーム近傍で熱伝達率が大きく異なることから、フレームの部位毎による熱伝達率を分ける必要があると考えられる。

第6章では、第2章で算出した窓と躯体の間の線熱貫流率を元に、日本では熱損失係数や熱負荷計算ツールで無視されている窓と躯体との間の熱移動が、建物の熱性能に及ぼす影響を確認した。結果を以下にまとめる。

- ①壁の実質熱貫流率を用いて算出した $\Psi_b$ を窓の熱貫流率U値に付加した場合、開口部のサイズの小さいものほど熱貫流率の増加比率が大きくなることが確認できた。熱貫流率の増加率は、W:0.3m、H:0.7mではアルミフレームが14%、アルミ樹脂複合フレームが16%、樹脂フレームが8%程度増加しており、窓の熱貫流率U値に影響としては小さいことがわかった。
- ②壁の代表断面の熱貫流率を用いて算出した $\Psi_b$ は、第2章で窓台や床まで含めた壁の実質熱貫流率を用いて算出した $\Psi_b$ に比べ、概ね0.05W/(m・K)程度増加していることが確認できた。
- ③壁の代表断面の熱貫流率を用いて算出した $\Psi_b$ はISO14683に記載される線熱貫流率の算出条件に類似するため、この結果をISO14683に示される線熱貫流率と比較した。その結果、壁の代表断面の熱貫流率を用いて算出した $\Psi_b$ は、樹脂や木フレームでは近い値となっている一方で、アルミやアルミ樹脂複合フレームではISO14683に記載された値のほうが小さい値となっている。そのため、日本でこの線熱貫流率を熱負荷計算ツール等に適用するには、フレームの材質による分類が必要になると考えられる。
- ④壁の代表断面の熱貫流率を用いて算出した $\Psi_b$ を窓の熱貫流率U値に付加した場合、窓の熱貫流率の増加率は、W:0.3m、H:0.7mの開口寸法でアルミフレームが22%、アルミ樹脂複合フレームが25%、樹脂フレームが20%程度増加することが確認できた。
- ⑤アルミ、アルミ樹脂複合、樹脂の3種類のフレームの材質について、壁の実質熱貫流率を用いて算出した $\Psi_b$ を考慮して算出した住宅の熱損失係数Q値は、 $\Psi_b$ を考慮せずに算出したQ値に比べ、アルミ及びアルミ樹脂複合フレームで3%程度、樹脂フレームで2%程度増加することがわかった。また、壁の代表断面の熱貫流率を用いて算出した $\Psi_b$ を考慮して算出した場合は、アルミ及びアルミ樹脂複合フレームで5%程度、樹脂フレームで3%程度増加することがわかった。

## 7.2 今後の課題と展望

これまで日本で評価・考慮されていなかった窓と躯体の間の熱移動について本報で検討を行った結果、様々な結果と知見が得られたが、幾つかの課題が見えてきた。以下に、それらの課題を挙げると共に今後の展望を述べる。

### (1) 窓と躯体との間の線熱貫流率の整理

本報で、窓と躯体の間での熱移動について実態を明らかにし、窓と躯体の間の熱流を定量化する計算方法を提案すると共に、その計算方法を用いて算出した幾つかの代表的な窓と躯体の組合せについて定量化した結果として線熱貫流率を算出した。しかし、この定量化を図る手法は手間が掛かり、建築物毎にルーチンワークのように計算を行うことは非現実的である。そのため、窓フレームと躯体の組合せ毎に代表値を定める等の整理が必要となる。また、本報で幾つかの代表的な窓と躯体の組合せについて定量化したが、これら以外にも様々な窓と躯体の組合せが存在するため、まだ検討されていない窓と躯体の組合せについて検討し、知見を蓄積する必要がある。

### (2) 窓と躯体との間の線熱貫流率の規格化

ISO14683 では、窓周りの壁の見込み部分からの熱損失を構造熱橋と位置付けて、躯体の構成と窓フレームの設置位置で整理した 18 種類の組合せに対して、線熱貫流率を示して規格化している。しかし、日本では窓と躯体の取り合い部分の熱流は評価しておらず、熱損失係数や熱負荷計算ツールで、この部分の熱損失が無視されている現状がある。建築物の熱性能の評価において、建築物を構成する窓や壁（躯体）の評価法は確立されており、各々の性能評価において測定とシミュレーションである程度の整合性が取れていることが確認されている。しかし、建築物全体で見ると現在の熱負荷の評価では測定とシミュレーションで値が乖離することも多い。実際、第6章の結果から窓と躯体の間の熱流を考慮した場合としない場合で少なからず建物の熱負荷に差が生じることが確認された。しかし、ISO14683 に示された値を適用しても、日本の状況に適していない。そのため、日本の現状に適した窓と躯体との間の線熱貫流率の規格化が望まれる。

### (3) 熱負荷計算ツールへの適用

(2) に示したように、日本では窓と躯体の取り合い部分の熱流は評価しておらず、熱損失係数や熱負荷計算ツールでこの部分の熱損失が無視されているが、実際に窓と躯体の間の熱流を考慮した場合と考慮しない場合を比較すると、少なからず建物の熱負荷に差が生まれることが確認された。この結果から、より正確に建築物の熱負荷を評価するために、窓と躯体の間の熱流を熱負荷計算ツールに適用できるように整備する必要がある。

### (4) 遮熱性能に対する窓と躯体との間の熱移動の検討

建築物の熱性能を総合的に評価するには、断熱性能だけでなく、遮熱性能の評価も必要である。しかし、本報で報告した窓と躯体の間の熱移動は、断熱性能のみの内容であり、遮熱性能は含まれていない。そのため、建築物の熱性能を総合的に評価する上で、窓と躯体の間の熱移動が遮熱性能にどの程度影響を与えるかを確認することが必要である。

### (5) 開口部の熱性能計算法における表面熱伝達率の提案

開口部の断熱性能の計算法では、フレーム部表面の熱伝達率はフレーム部位を問わず総合熱伝達率として、一般部を  $7.69\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、隅各部を  $5.00\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、室内側は  $25.0\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  という固定値で規定されている。しかし、本報の結果から計算法で規定されている値と解析結果の値では乖離が見られる箇所が多く、また部位による違いも見られた。現在、開口部の断熱性能の評価において、測定値と計算値は概ね一致していると言われているが、開口部のサイズが変わると測定値と計算値で値に乖離が生じる。測定値と計算値で乖離が生じる要因として、測定と計算の熱伝達率の相違が考えられ、本報の結果からも上下のフレームで熱伝達率に大きな違いが見られた。開口部の断熱性能の評価をより正確に行うためには、フレーム部位による熱伝達率の分類や開口サイズによる分類等が必要である。今後、窓の開閉機種やサイズ違いの検討を進めて、計算法にフレーム部位による分類や開口サイズによる分類等が整理された案を提案する必要がある。

本研究では、これまで日本で評価・考慮されていなかった窓と躯体の間での熱移動について、計算方法を提示すると共にその実態を明らかにした。これらの知見と前述した課題に取り組むことで、より精度の高い建築物の熱性能の評価が可能となる。そのため、前述した課題を継続的に取り組み、建築物の熱性能の評価法の構築を推進してゆく必要がある。建築物の熱性能の評価法の構築を推進してゆくことで、エネルギー消費を抑えつつも快適な室内住環境を維持出来る建築物設計の一端を担うことができ、環境問題が重要視される現在の地球環境への影響提言の一助に繋がると期待される。

Summary

---



## Study of heat flow between window frames and building walls

*Chiaki Miyazawa*

### Summary

This thesis is composed of 7 chapters, examines the heat transfer between window frames and building walls, which has not been evaluated nor taken into consideration to date in Japan, and summarizes the results. The summary of each chapter is as follows.

In Chapter 1 as introduction, the features, roles, and present state of windows were described, and the crucial importance of correctly evaluating the thermal performance of openings was emphasized. In addition, what's the heat transfer between window frames and building walls like was explained, and the social background, objectives, and positioning of this study were also described.

In Chapter 2, regarding the heat transfer between window frames and building walls, the results of conducting computational evaluation were summarized. First, the importance of evaluating the heat transfer between window frames and building walls using liner thermal transmittance ( $\Psi_b$ ) was described, and the calculation method for  $\Psi_b$  was proposed. Then, computational software in use, TB2D/BEM, was roughly introduced, and the verification of its precision was also performed. As a result, it was confirmed that TB2D/BEM is the computational software that has precision sufficient for the application standards of JIS A 2102-2. Successively,  $\Psi_b$  of the typical combinations between window frames and building walls that are commonly used in Japan was obtained, and the results were discussed. In addition, comparison was made between  $\Psi_b$  and  $\Psi_g$ , which is the liner thermal transmittance of the glass spacer part of multilayered glass. Multilayered glass is the evaluation target of the thermal performance of windows at present. The value of  $\Psi_b$  in a large case was about twice that of  $\Psi_g$ . In addition, the effect of change in the thermal performance of building walls on  $\Psi_b$  was confirmed, and it was shown that change in the thermal performance of building walls hardly had effect on it.

---

In Chapter 3, regarding the heat transfer between window frames and building windows, the results of conducting experimental evaluation were summarized. First, the outline of a measurement apparatus was described. Then, the measurement results were shown, and they were compared with the calculation results. The results show that although the heat flow directions agreed with each other, the heat flow quantities differed. In addition, the factors for difference in the heat flow quantities were picked up, and it was concluded that a larger factor among them for the difference came probably from the distribution of heat transfer coefficient.

In Chapter 4, regarding the distribution of heat transfer coefficient of window, measurement results were summarized. Since difference factor between the measurement results and the calculation results was highly considered due to the distribution of heat transfer coefficient as mentioned in Chapter 3, measurement of the distribution of heat transfer coefficient was performed. Here, the outline of measurement apparatus, measurement method, and measurement results were reported, and the results were discussed.

In Chapter 5, regarding the distribution of heat transfer coefficient of window, calculation results were summarized. First, the outline of an analytical model and the analytical results were described. Then, the distribution of heat transfer coefficient as the analytical results was compared with the distribution of heat transfer coefficient as the measurement results obtained in Chapter 4, and the consistency of the analysis was confirmed. In addition, the distribution of heat transfer coefficient of the part that cannot be grasped by measurement was grasped.

In Chapter 6, the effect of the heat transfer between window frames and building walls on the thermal performance of buildings was summarized. As the items used to confirm the effect, the thermal transmittance of window U value and the heat loss coefficient of buildings Q value were picked up, and the calculation, when  $\Psi_b$  was added to each of U value and Q value, was performed. As a result, the increment of the values in a large case was about 25% for U value and about 5% for Q value, which showed that the effect was not small.

In Chapter 7, discussion results and findings obtained in this study were summarized as the conclusions. In addition, challenges to be solved in future studies were organized, and future prospects were described.



既発表論文一覧

---



## ■既発表論文

## 1. 論文（査読あり）

## \*本研究と関係する論文

No	学術論文、研究発表・報告、特許等の 名称	発行又は発表 の年、巻、号、 項等	発行場所、発表 雑誌等又は発表 学会等名称	著者名
1*	窓と躯体の間の熱伝導が建物の熱性能に及ぼす影響	2013年1月 第78巻 第683号 17-23項	日本建築学会 環境系論文集	宮澤 千頭 二宮 秀與 田代 達一郎
2*	窓と躯体の間の熱移動に関する数値解析と線熱貫流率について	2009年10月 第15巻 第31号 789-792項	日本建築学会 技術報告集	宮澤 千頭 赤坂 裕 伊丹 清 田代 達一郎

## 2. 論文（査読なし）

## \*本研究と関係する論文

No	学術論文、研究発表・報告、特許等の 名称	発行又は発表 の年、巻、号、 項等	発行場所、発表 雑誌等又は発表 学会等名称	著者名
1*	開口部の遮熱性能の計算法 その9 窓－外壁間の線熱貫流率計算結果と考察	2005年9月 環境工学Ⅱ (41111) 251-252項	日本建築学会 大会（近畿）	宮澤 千頭 伊丹 清 赤坂 裕 倉山 千春 伊藤 春雄 田代 達一郎
2*	開口部の遮熱性能の計算法 その10 窓－RC造外壁間の線熱貫流率計算結果と考察	2006年9月 環境工学Ⅱ (41081) 161-162項	日本建築学会 大会（関東）	宮澤 千頭 伊丹 清 赤坂 裕 倉山 千春 田代 達一郎
3*	開口部の遮熱性能の計算法 その13 窓－外壁（外張断熱工法）間の線熱貫流率計算結果と考察	2007年8月 環境工学Ⅱ (41077) 153-154項	日本建築学会 大会（関東）	宮澤 千頭 伊丹 清 赤坂 裕 倉山 千春 田代 達一郎

No	学術論文、研究発表・報告、特許等の名称	発行又は発表の年、巻、号、項等	発行場所、発表雑誌等又は発表学会等名称	著者名
4	太陽熱集熱板の横並び性能評価 その1 測定機器、装置及び試験体概要	2008年9月 環境工学Ⅱ (41059) 117-118項	日本建築学会 大会(中国)	宮澤 千頭 倉山 千春 田代 達一郎 齋尾 梨沙
5	太陽熱集熱板の横並び性能評価 その2 屋内測定結果	2008年9月 環境工学Ⅱ (41060) 119-120項	日本建築学会 大会(中国)	齋尾 梨沙 倉山 千春 田代 達一郎 宮澤 千頭
6	太陽熱集熱板の横並び性能評価 その3 気流確認及びフィールドテストとの比較	2008年9月 環境工学Ⅱ (41061) 121-122項	日本建築学会 大会(中国)	田代 達一郎 倉山 千春 齋尾 梨沙 宮澤 千頭
7	開口部の断熱・遮熱性能 その16 防犯を考慮した屋外付属物を着けた窓の熱的性能測定結果	2009年8月 環境工学Ⅱ (41072) 155-156項	日本建築学会 大会(東北)	田代 達一郎 倉山 千春 宮澤 千頭
8*	窓-躯体間の熱移動について その1 測定結果	2009年8月 環境工学Ⅱ (41074) 159-160項	日本建築学会 大会(東北)	石積 広行 宮澤 千頭 倉山 千春 田代 達一郎
9*	窓-躯体間の熱移動について その2 計算結果と測定結果の比較	2009年8月 環境工学Ⅱ (41075) 161-162項	日本建築学会 大会(東北)	宮澤 千頭 倉山 千春 石積 広行 田代 達一郎
10*	窓-躯体間の熱移動について その3 測定結果 その2	2010年9月 環境工学Ⅱ (41210) 419-420項	日本建築学会 大会(北陸)	石積 広行 宮澤 千頭 倉山 千春 田代 達一郎

No	学術論文、研究発表・報告、特許等の名称	発行又は発表の年、巻、号、項等	発行場所、発表雑誌等又は発表学会等名称	著者名
11*	窓-躯体間の熱移動について その 4 局所熱伝達率を考慮した計算結果と測定結果の比較	2010年9月 環境工学Ⅱ (41211) 421-422項	日本建築学会 大会（北陸）	宮澤 千頭 倉山 千春 石積 広行 田代 達一郎 二宮 秀與
12	開口部の熱性能の屋外測定法と評価方法に関する研究 その 1 測定装置の概要と予備測定結果	2010年9月 環境工学Ⅱ (41226) 451-452項	日本建築学会 大会（北陸）	倉山 千春 田代 達一郎 二宮 秀與 宮澤 千頭
13	開口部の熱性能の屋外測定法と評価方法に関する研究 その 2 計算法と計算結果	2010年9月 環境工学Ⅱ (41227) 453-454項	日本建築学会 大会（北陸）	田代 達一郎 倉山 千春 二宮 秀與 宮澤 千頭
14*	貫流熱解析プログラム『TB2D/BEM』の精度検証結果	2011年8月 環境工学Ⅱ (41200) 407-408項	日本建築学会 大会（関東）	宮澤 千頭 伊丹 清 二宮 秀與
15	開口部の日射熱取得性能 その 1 単板ガラス+日射遮蔽物の日射熱取得率測定結果	2012年9月 環境工学Ⅱ (41022) 43-44項	日本建築学会 大会（東海）	上乘 正信 倉山 千春 宮澤 千頭 児島 輝樹
16	開口部の日射熱取得性能 その 2 単板ガラス+日射遮蔽物の温度分布	2012年9月 環境工学Ⅱ (41023) 45-46項	日本建築学会 大会（東海）	児島 輝樹 倉山 千春 上乘 正信 宮澤 千頭
17	開口部の日射熱取得性能 その 3 日射遮蔽物の色・形状が日射熱取得率に与える影響	2012年9月 環境工学Ⅱ (41023) 47-48項	日本建築学会 大会（東海）	宮澤 千頭 児島 輝樹 倉山 千春 上乘 正信

---

No	学術論文、研究発表・報告、特許等の 名称	発行又は発表 の年、巻、号、 項等	発行場所、発表 雑誌等又は発表 学会等名称	著者名
18	開口部の熱性能の屋外測定法と評価 方法に関する研究 その3 計算結果と測定結果の比較	2012年9月 環境工学Ⅱ (41067) 133-134項	日本建築学会 大会(東海)	田代 達一郎 倉山 千春 二宮 秀與 宮澤 千顕

---

謝辭

---



---

## 謝辞

本論文は、私が 2003 年に新日軽株式会社に入社し、会社統合により株式会社 LIXIL となった現在に至るまでに活動してきた社外研究会、鹿児島大学大学院で実施した窓の熱性能の計算法及び測定法に関する研究の成果をまとめたものであり、関係する多くの方々にご指導と貴重なご助言を頂きました。最後に、御礼を申し上げたいと思います。

鹿児島大学大学院理工学研究科教授 二宮秀興先生には、私が 2004 年から社団法人リビングアメニティ協会主催の窓の熱性能計算法研究委員会に参加した頃より、様々なご指導をいただきました。また、窓のエネルギー性能評価指標の研究委員会、窓の熱性能計算法 JIS 原案作成委員会他多くの研究委員会に研究委員として招集していただき、様々な研究者と意見を交わす場をご提供して頂き、多くのことを学ぶことができました。2010 年には鹿児島大学大学院へ社会人学生として入学する機会を与えて頂きました。入学後も主任教官としてご多忙の中にも関わらず、研究の方向性、論文作成に至るまで昼夜を問わず、また休日にも関わらず懇切丁寧にご指導を賜りました。全てのことが有意義であり、また通常では経験することのない貴重な時間を過ごさせて頂きました。全てのご厚意に深く感謝申し上げます。

鹿児島大学工学部建築学科教授 本間俊雄先生、同准教授 曾我和弘先生には、鹿児島大学大学院での指導教官として、専攻ゼミナールや特別演習の際に、厳しく、また有益かつ的確なご指導、ご助言を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。同助教授 長澤康弘先生には、指導教官の立場で無いにも関わらず、有益かつ的確なご指導、ご助言を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

国土交通省国土技術政策総合研究所 倉山千春氏には、私が 2004 年に前述の研究委員として参加した頃より、開口部の熱性能の計算法、測定法、評価法について昼夜を問わず懇切丁寧にご指導を頂きました。また、日射熱取得率測定装置を開発した測定の第一人者であり、本研究の測定を昼夜休日問わず実施頂いただけでなく、私の今後を考えて多くの測定技術のノウハウをご教示頂きました。更に、自然エネルギー利用に関して、様々な考え方や将来性をご教示頂き、興味深いデータを提供して頂きました。鹿児島大学の先輩でもあり、本研究の測定方法から論文作成の進め方に至るまで懇切丁寧にご指導を頂くと共に、体調の優れない時期でも常に私の論文の進捗を気に留めていて下さいました。全てのご厚意に深く感謝申し上げます。

鹿児島工業高等専門学校校長 赤坂裕先生には、私が 2004 年に前述の研究委員として参加した頃より、研究委員会の委員長として様々なご指導を賜りました。また、本研究を進めるきっかけを与えて下さいました。ここに深く感謝申し上げます。

滋賀県立大学環境科学部講師 伊丹清先生には、本論文で用いた計算プログラム TB2D/BEM について、難題を含めた様々な要望に懇切丁寧にご対応頂くと共に、有益かつ的確なご指導、ご助言を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

---

---

株式会社 LIXIL 田代達一郎氏には、私が 2004 年から前述の研究委員会に参加するきっかけを与えて頂きました。また、会社及び鹿児島大学の先輩として、昼夜休日問わず開口部の熱性能に関する基礎を懇切丁寧にご指導頂くと共に、大学院での講義、専攻ゼミナール、特別演習、論文作成の進め方に至るまで多くのご助言を頂きました。更に、論文作成により研究委員会の資料作成等が疎かになった私をサポートして頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

日本板硝子株式会社 木下泰斗氏、YKKAP 株式会社 齋藤孝一郎氏には、競合他社という立場でありながら、鹿児島大学の先輩として大学院での講義、専攻ゼミナール、特別演習、論文作成の進め方に至るまで多くのご助言を頂きました。また、窓に関わる日本の技術者として、将来について多くの有益な意見交換をさせて頂くと共に多くのご指導とご助言を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

三協立山株式会社 上乗正信氏、YKKAP 株式会社 児島輝樹氏には、競合他社という立場でありながら、論文や課題に対する忌憚無きご意見を頂いたほか、日本の開口部の熱性能に関する技術者として、昼夜休日問わず多くの有益な意見交換をさせて頂きました。また、論文作成により研究委員会の資料作成等が疎かになっていた私をサポートして頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

鹿児島大学大学院 窪田真樹氏には、社会人学生で大学の情報が不足がちな私に、常に的確な情報を教えて下さいました。また、同時期に論文をまとめる仲間として、切磋琢磨したことが大きな力になりました。ここに深く感謝申し上げます。

株式会社 LIXIL 佐藤方厚氏、吉田幸治氏、加藤啓一氏、佐々木道夫氏、高橋努氏、元株式会社 LIXIL 阿部敏徳氏には、私が社会人学生として博士後期課程へ進学することを容認して頂き、また常に進捗具合を気に掛けて頂きました。株式会社 LIXIL 石積広行氏をはじめ社内関係各位には、論文作成により業務が疎かになっていた私をサポートして頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

元新日軽株式会社 河西洸一氏には、私が社会人になった際の最初の上司として、また技術者として解析と試験の有るべき姿、報告文書の書き方等、多くのご指導を頂きました。また、同 五十嵐俊英氏、安部則弘氏、高橋弥生氏、中山一陽氏、木内一雅氏、川満男也氏、崎本佑氏、日本軽金属株式会社 高木正夫氏には、様々な視点で数多くの意見交換をさせて頂き、多くの知見を得ることが出来ました。ここに深く感謝申し上げます。

YKKAP 株式会社 伊藤春雄氏、元三協立山アルミ株式会社 鈴木宏政氏、三協立山株式会社 折原規道氏、小杉満氏、不二サッシ株式会社 須田宏氏、川島長人氏、株式会社ニチベイ 佐久間英二氏、今吉秀幸氏、立川ブラインド工業株式会社 鳥居由樹男氏、トーソー株式会社 近藤友洋氏には前述の研究委員会において、日本板硝子株式会社 塩崎智子氏には建築基準整備促進事業において、開口部の熱性能計算法及び測定法について、競合他社という立場を超えて、共に検討し意見を交わすことで多くの知見を得ることができました。ここに深く感謝申し上げます。

---

最後に私事になりますが、鹿児島大学大学院での博士号取得という私の新たなチャレンジを理解し応援し支えてくれた家族、友人に深く感謝申し上げます。

2013年 3月

宮澤 千頭