



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	住宅用樹脂製窓の高断熱化に関する研究
Author(s)	高田, 和規
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14001号
Issue Date	2020-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k14001
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/77974
Type	doctoral thesis
File Information	Kazunori_Takada.pdf



博 士 論 文

住宅用樹脂製窓の高断熱化に関する研究

Study on thermal insulated PVC windows for residential buildings

2020 年 2 月

北海道大学大学院工学院
空間性能システム専攻

高 田 和 規

【目次】

第 1 章 序論

1.1	研究の背景.....	1
1.2	研究の目的.....	6
1.3	既往の研究と本研究の位置付け.....	8
1.4	論文の構成.....	11
	【第 1 章の参考文献】	14

第 2 章 品質工学とは

2.1	品質工学とは.....	17
2.2	パラメータ設計の概要と手順.....	18
2.2.1	パラメータ設計の概要.....	18
2.2.2	パラメータ設計の手順.....	22
2.3	タグチメソッドの窓開発への応用.....	23
2.3.1	従来の検討方法と課題.....	23
2.3.2	窓開発にタグチメソッドを用いる利点.....	23
2.3.3	窓開発にタグチメソッドを用いる際の留意点.....	24
	第 2 章の記号表	25
	【第 2 章の参考文献】	26

第 3 章 各種要素技術による断熱性能向上の実現性に関する検討

3.1	本章の背景と目的.....	28
3.2	各種要素技術の断熱性能向上に及ぼす効果.....	29
3.2.1	窓フレーム部の高断熱化.....	29
3.2.1-1	設定条件と評価方法.....	29
3.2.1-2	各断面の Q_f 計算結果.....	45
3.2.1-3	最適条件の導出.....	46

3.2.1-4 Q_f 低減効果の検証.....	49
3.2.2 ガラス中央部の高断熱化.....	50
3.2.2-1 検討概要	50
3.2.2-2 ガラス中央部熱貫流率の計算方法.....	51
3.2.2-3 Low-E 膜の効果と配置の最適化.....	52
3.2.2-4 充填ガス別厚みの最適化.....	53
3.2.2-5 最適なガラス中央部構成の提案.....	57
3.2.3 ガラスエッジ部の高断熱化.....	58
3.2.3-1 設定条件と評価方法.....	58
3.2.3-2 各断面の Ψ_g 計算結果	65
3.2.3-3 制御因子の Ψ_g に対する影響と最適条件の導出.....	69
3.2.4 各部位の最適条件組み合わせと窓全体の断熱性能.....	72
3.3 測定による性能検証.....	75
3.3.1 U_w の測定方法	75
3.3.2 試験体.....	77
3.3.3 U_g と $AveU_f$ の推定方法.....	78
3.3.4 測定結果と計算結果の比較.....	79
3.4 第3章のまとめ.....	82
第3章の記号表	83
【第3章の参考文献】	87
第4章 樹脂製窓と躯体の間の線熱貫流率低減手法に関する検討	
4.1 本章の背景と目的.....	90
4.2 計算条件と評価方法.....	91
4.2.1 計算対象窓と躯体込み断面図.....	91
4.2.2 計算条件	94

4.2.3	評価方法	98
4.3	計算結果と考察	103
4.3.1	各断面の通過熱流量及び Ψ_b 計算結果	103
4.3.2	各制御因子の Ψ_b に対する影響	109
4.3.3	各制御因子の $Ave\Psi_b$ に対する影響	112
4.4	測定による妥当性検証	113
4.4.1	測定概要	113
4.4.2	窓の室内外表面熱伝達抵抗	120
4.4.3	測定値と計算値の比較結果	121
4.4.4	窓の躯体への設置位置が窓の室内外表面熱伝達抵抗に与える影響	126
4.5	第 4 章のまとめ	128
	第 4 章の記号表	129
	【第 4 章の参考文献】	131
第 5 章 樹脂製窓の熱的性能が寒冷地の窓の暖房負荷に与える影響		
5.1	本章の背景と目的	134
5.2	計算条件と評価方法	135
5.2.1	計算条件	135
5.2.2	評価方法	138
5.3	計算結果と考察	142
5.3.1	$P_{WE,H}$ 計算結果	142
5.3.2	各制御因子の $P_{WE,H}$ に対する影響	188
5.3.3	最適組合せにおける $P_{WE,H}$ 低減効果	195
5.4	第 5 章のまとめ	197
	第 5 章の記号表	198
	【第 5 章の参考文献】	199

第 6 章 総括

6.1	本研究のまとめ	201
6.2	今後の課題と展望.....	205
	【第 6 章の参考文献】	207

第1章 序論

1.1 研究の背景

わが国では 1973 年のオイルショックをきっかけに省エネルギーが進められ、産業部門においては、図 1-1 に示すとおり経済規模が大きく拡大したにもかかわらず、ほぼ横ばいのエネルギー消費量で推移している。一方、民生部門における家庭部門のエネルギー消費動向は、図 1-2 に示すとおり 1973 年度比で 2009 年においては約 2 倍に増加している。

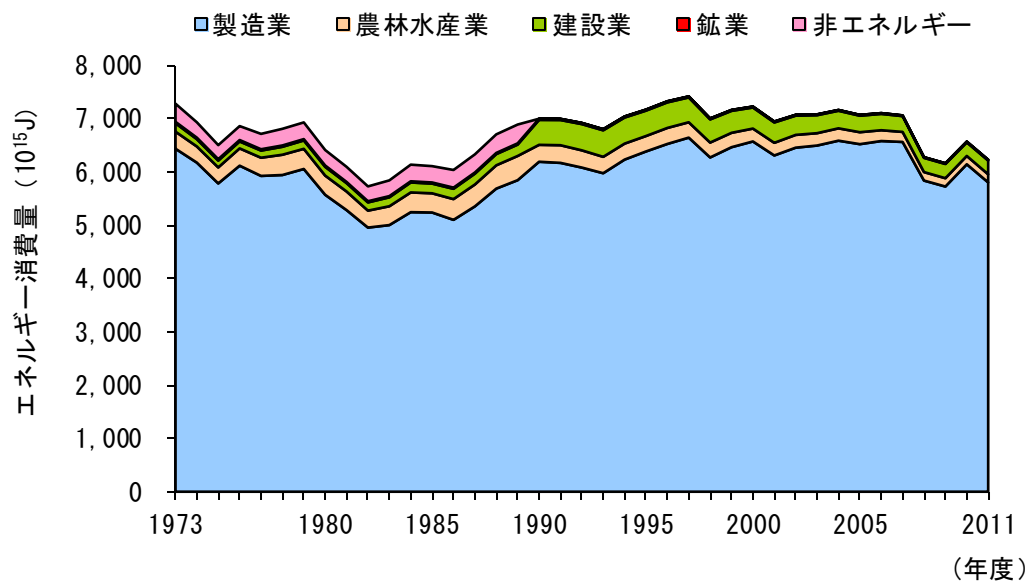


図 1-1 産業部門のエネルギー消費の推移

* 資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」から作成。「総合エネルギー統計」では、1990 年度以降、数値の算出方法が変更されている。非エネルギー利用分については、1990 年度以降は各業種の消費量の内数となっている。

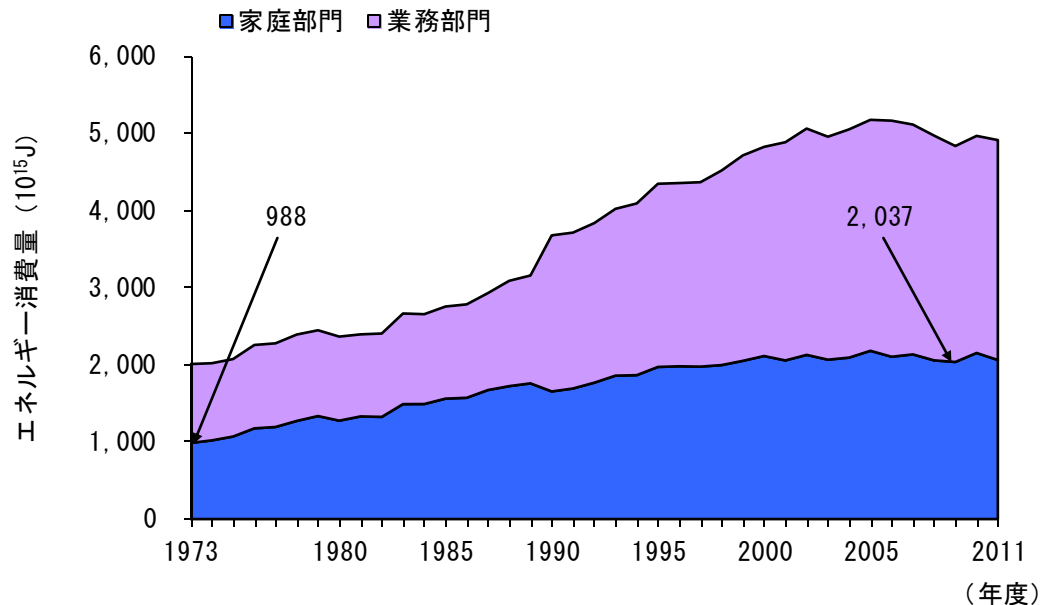


図 1-2 民生部門のエネルギー消費の推移

* 資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」¹⁾から作成。「総合エネルギー統計」では、1990年度以降、数値の算出方法が変更されている。

このような状況下において、建築分野における省エネルギー化の手法として、「負荷の低減」と「自然エネルギーの効率的使用」が考えられる。

平成 25 年省エネルギー基準²⁾では、建物外皮の断熱性能における計算方法と基準が策定されているが、建物の一次エネルギー消費量を評価する際には、外皮の断熱性能が低くても設備の高効率化や太陽光発電の利用などでカバーできてしまう。一次エネルギー消費量のみの主眼が置かれた場合、建物自体の性能である断熱、日射熱取得／日射遮蔽、気密などが軽視される状況にもなりうると考えられる。

一方、経済産業省は今後数十年～半世紀に渡り住宅分野における省エネルギーを確保し、優良な住宅ストックを形成するためには、竣工後に抜本的な改善が困難である躯体や外皮の高性能化が重要と判断し、省エネルギー基準の外皮基準を強化した高断熱基準を「強化外皮基準 (ZEH 断熱基準)」として設定した³⁾。すなわち、一次エネルギー消費量がゼロという ZEH 基準の中に、外皮の基準を設けたことになる。

建築物におけるエネルギー消費は、暖冷房や調湿の熱負荷が最も多くの割合を占めている⁴⁾。そのため、負荷の低減を考えると、建築外皮を構成する屋根や壁と比較すると熱的性能が劣る窓の高断熱化は特に重要である。さらに、冷気流発生の原因となりやすい窓を高断熱化することは良好な温熱環境確保の上でも重要性が高い。また、自然エネルギーの効率的使用として、壁体と異なり窓は日射のダイレクトゲインが多く期待できることから、さらなる省エネ化に向けて、その効果は大きいといえる。

窓は建築物の外観を決定するとともに、採光、眺望、通風、日射熱取得、日射遮蔽、換気、開放感、断熱性能、遮音性能等の機能により住まいの快適性を大きく左右する重要な部位である。また、これら性能に加え、基本 3 性能と呼ばれる気密性能、水密性能、耐風圧性能や、開閉耐久性能、防火性能、防犯性能等、多くの性能が求められている⁵⁾。さらに、窓の構成材料には、室外環境で使用されることから高い耐食性能、耐候性能が要求される。

断熱性能の高い窓として樹脂製窓が寒冷地を中心に普及している。樹脂製窓は主要構成材料である窓枠（以下窓フレームという）に無可塑ポリ塩化ビニル樹脂（Unplasticized Polyvinyl Chloride、以下硬質 PVC という）を用いている。硬質 PVC の主な特徴は、優れた断熱・防露性能（熱伝導率がアルミニウムの約 1/1000）、酸やアルカリに対する優れた耐食性能、耐塩害性能であり、樹脂型材については、2010 年に JIS A 5558⁶⁾「無可塑ポリ塩化ビニル製建具用型材」が制定されている。また、樹脂製窓は 1950 年代に世界で最初にドイツで販売が開始されてから 70 年近く、日本でも販売が開始されて以来既に 40 年以上が経過しており、建具として十分な耐候性能、耐久性能を持っていることが証明されている。

図 1-3 に 2018 年度の住宅用建材使用状況調査⁷⁾における全国および各地域の窓の材質別構成比を示したが、樹脂製窓の全国普及率が 20.4%に対し、北海道は 99.3%、東北は 52.5%と突出しており、特に北海道では樹脂製窓が標準的に用いられる窓といえる。

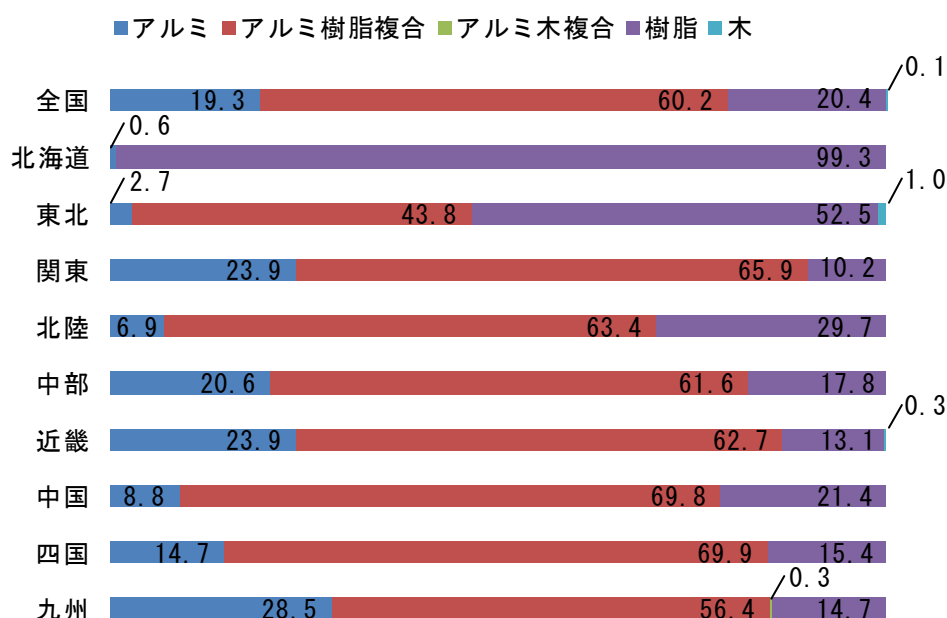


図 1-3 窓の材質別構成比

*参考文献⁷⁾のデータから作成。

2016 年度に実施した、北海道内の住宅事業者へのアンケート調査⁸⁾における新築住宅に設置される窓の、窓フレームの材質と複層ガラスの種類の比率を図 1-4 に示す。現状北海道内の新築住宅で最も多く用いられている窓の仕様は、窓フレームの材質が樹脂又は木材、Low-E 2 層複層ガラスにアルゴンガスもしくはクリプトンガスを封入したもので、ガラス中空層厚さが 12mm 以上のものであった。これら仕様から、平成 25 年省エネルギー基準の「仕様に応じた開口部の熱貫流率」を基に窓の熱貫流率を求めると 1.9 W/(m²・K)となり、新築住宅ではこの程度の断熱性能を持つ窓が主流として使用されているといえる。

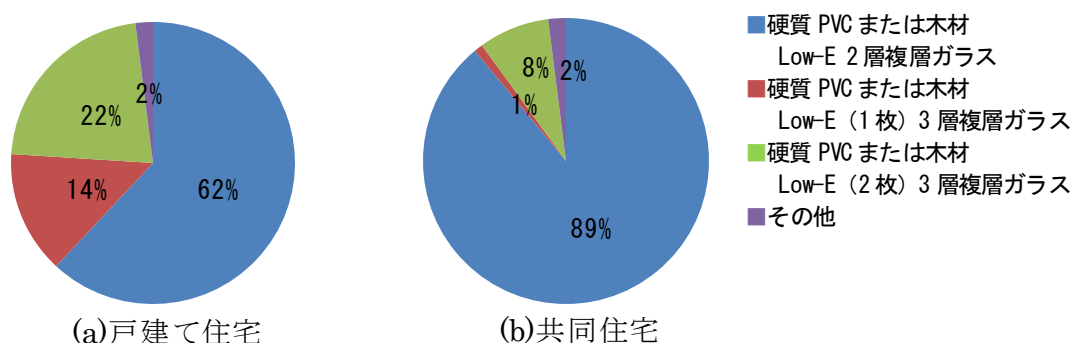


図 1-4 窓フレームの材質とガラス種類の比率

* 参考文献⁸⁾のデータから作成。用語統一のため、窓フレームの材質を硬質 PVC（文献上は樹脂）とした。ガラス中空層厚さは、戸建て住宅は 16mm（46.2%）が、共同住宅は 12mm（52.8%）が最も多い。

一方、図 1-5 に平成 25 年省エネルギー基準における戸建て住宅の部位別（屋根または天井・壁・土間床等の外周）の熱貫流率の基準（1、2 地域）と上述の窓の熱貫流率を示したが、それらを比較すると、窓の断熱性能が他の部位と比べ大きく劣っていることが分かる。このことから、窓の高断熱化の重要性が認識できる。

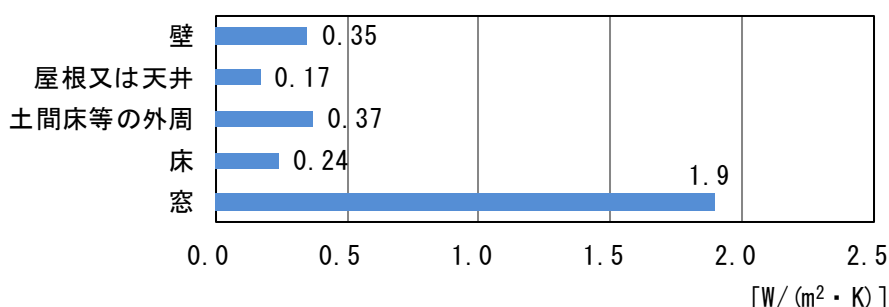


図 1-5 戸建て住宅の部位別の熱貫流率

* 参考文献²⁾のデータから作成。土間床等の外周と床は外気に接する部分とその他の部分に細分類されるが、本論では外気に接する部分の熱貫流率を抜粋した。

次に、高断熱な樹脂製窓製品に着目すると、国内では、図 1-6 (a)に示す A 社の窓の熱貫流率が $0.81 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ のほか、B 社： $0.79 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、C 社： $0.78 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、D 社： $0.85 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 等があり、窓の熱貫流率は $0.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 前後の水準である。一方、海外製品に目を向けると、図 1-6 (b)に示すヨーロッパの E 社で窓の熱貫流率が $0.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ の製品がある等、現状では日本より断熱性能が高い。これらはいずれもガラス中空層にアルゴンガスもしくはクリプトンガスを封入した、Low-E 膜が 2 枚の 3 層複層ガラスの窓の性能である。4 層複層ガラス等ではさらに高断熱化すると考えられるが、重量が著しく大きいために一般的な住宅工事に適用するのが困難となるばかりか、ガラス重量によっては窓フレームの剛性を見直す等の設計変更を余儀なくされ、製造コストへの影響が懸念される。

なお、日本とヨーロッパは窓の断面形状が図 1-6 に示すように大きく異なっているが、これは日本とヨーロッパの住宅構造の違いや環境条件（特に地震や台風等の自然災害の頻度）の違い等を背景に、窓の躯体への固定方法や窓と躯体の接合部の防水方法が異なっていることが要因の一つとして考えられる。例えば日本の一般的な木造戸建て住宅用窓は室外側からの躯体への固定を前提とした断面形状となっており、具体的には窓フレームの外周（4 方）に設けられた図 1-6 (a)に示す「フィン」と呼ばれる部位をネジ等により躯体に固定するとともに、フィンと躯体の室内外見付け面接合部に防水シート等を設置し防水処理を行う。一方ヨーロッパの一般的な住宅用窓は室内側からの躯体への固定を前提とした断面形状となっており、具体的には日本の住宅用窓のようなフィンは存在せず、窓と躯体の見込み面接合部に防水目的で設置されるクロロプレンゴム等のパッキンを介して、窓フレームの見込み面から躯体へネジ等により固定する。

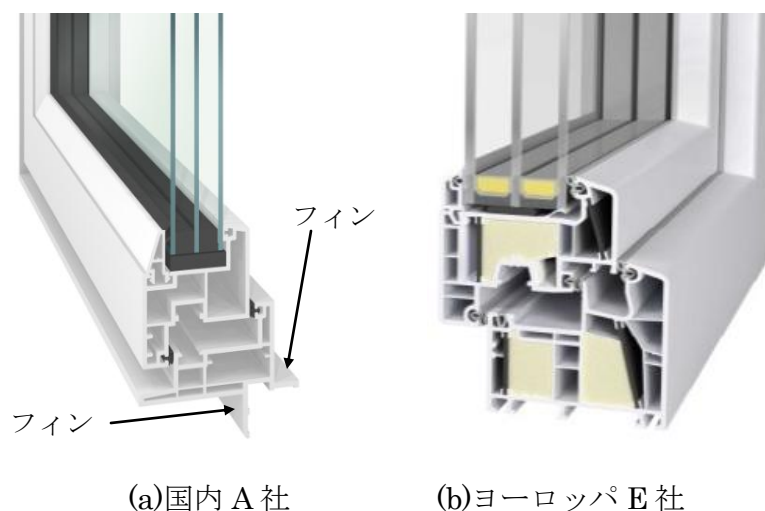


図 1-6 国内外の高断熱な樹脂製窓製品

1.2 研究の目的

寒冷地を中心に普及している樹脂製窓の断熱性能は、窓の熱貫流率で $1.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 程度が主流であり、外皮を構成するその他の部位と比べ大きく劣っていることから、より高断熱な樹脂製窓の普及が望まれる。国内の高断熱な樹脂製窓製品は、3層複層ガラスを用いた仕様で窓の熱貫流率が $0.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 前後の水準であるものの、現状ヨーロッパの水準（窓の熱貫流率が $0.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 未満）には及んでいない。4層複層ガラス等ではさらに高断熱化すると考えられるが、住宅工事の観点から現実的ではない。このような背景から、従来の3層複層ガラスを用いた窓重量よりも小さく、ヨーロッパの水準相当の断熱性能が実現可能な樹脂製窓が開発されれば、無暖房住宅等といった暖冷房負荷のさらなる削減に向けてその可能性を大きく広げるとともに、省エネルギー住宅の設計自由度の向上や、建築コストの削減（例えば窓重量が従来よりも小さくなることによる、開口部への窓の設置時における工数削減への寄与）が期待される。

一方で、窓が躯体に設置された状態を考えた場合、窓の断熱性能が向上することで、窓から抜け難くなった熱流は流れやすい個所に集中し、その流れやすい個所の一つが窓と躯体との間であることが既往の研究⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾により明らかになっている。また、ISO 14683¹²⁾では、窓と躯体との間の熱流（以下窓と躯体の間の線熱貫流率という）を、躯体の構成や窓の躯体への設置位置で整理した18種の組合せに分類し、それぞれの線熱貫流率を示している。これら点に着目し、窓の熱的性能や窓の躯体への設置位置が、窓と躯体の間の線熱貫流率に及ぼす影響を把握するとともに、窓と躯体の間の線熱貫流率を小さくするための方策を示すことは、今後の建築物の省エネルギー性や室内空間の快適性向上において意義がある。

窓の高断熱化において複層ガラスの低放射 (Low-E) 化は一般的な手法であるものの、Low-E 化に伴い日射熱取得量が減少することが知られている。例えば冬季日射量の多い面においては、熱損失の低減以上に日射熱の取得量が減って年間の暖房負荷が増加する場合もある。そのため、自然エネルギーの有効的使用といった観点からも、地域の気候特性や方位に応じて最適な熱収支を実現できる窓を消費者が選択するための有用な情報が望まれる。

本研究は、住宅用樹脂製窓において、寒冷地の空調エネルギーの大半を占める暖房負荷削減と低炭素化に寄与することを目指し、以下の内容について知見を示すことを目的とした。

- ① 軽量かつヨーロッパの水準相当の断熱性能を有した樹脂製窓を実現するに当り、構成する部材の高断熱化への寄与が想定される各種要素技術の性能向上に及ぼす影響と最適条件（断熱性能向上に最も寄与する要素技術と水準）を明らかにする
- ② 樹脂製窓と躯体の間の線熱貫流率の低減をはかるに当り、窓や室内額縁の熱的性能や躯体への設置位置等の因子が線熱貫流率に及ぼす影響と最適条件（線熱貫流率低減に最も寄与する因子と水準）を明らかにする
- ③ 地域の気候特性や方位に応じて最適な熱収支を実現できる窓の評価手法に関する検討として、寒冷地における樹脂製窓の暖房負荷に焦点をあて、窓の熱的性能が寒冷地の窓の暖房負荷に及ぼす影響と最適条件（暖房負荷低減に最も寄与する窓の熱的性能の因子と水準）を明らかにする

1.3 既往の研究と本研究の位置付け

窓の高断熱化に関する既往の研究は、窓全体を対象にしたケースと、窓の構成部位単位（窓フレーム部^{注1)}、ガラス中央部^{注2)}、ガラスエッジ部^{注3)}）を対象にしたケースに分類できる。本研究と同様、窓全体を対象にしたケースには新井らの研究¹³⁾があり、窓の熱貫流率が $0.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 以下を目標値とする Low-E 複層ガラス（3層複層ガラスや4層複層ガラス）、ヒノキ、断熱材等を用いた木製窓の断熱性能評価が ISO 10077-1¹⁴⁾、ISO 10077-2¹⁵⁾や JIS A2102-1¹⁶⁾、JIS A2102-2¹⁷⁾、JIS A4710¹⁸⁾に基づき行われている。窓の構成部位単位を対象としたケースとして、窓フレーム部を対象にしたケースには Gustavsen らの研究¹⁹⁾²⁰⁾があり、高断熱な窓フレーム部の断面構造に関する市場調査結果を、パッシブハウス要件（窓の熱貫流率が $0.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 以下）を満たす仕様に焦点を当て報告するとともに、さらなる断熱性能向上が期待できる様々な窓フレーム部を構成する部材の検討や課題解決策の例が示されている。Bosschea らの研究²¹⁾では、硬質 PVC 製、アルミニウム製、木製の窓フレームから構成された窓フレーム部に焦点を当て、市場調査に基づいた、各タイプの窓フレーム部の断熱性能を改善するための一般的な手法を示すとともに、効果の検証が ISO 10077-2 に基づき行われている。Lechowska らの研究²²⁾では、樹脂製窓の窓フレーム部の熱貫流率を改善する方法として、窓フレーム部の断面中空部への断熱材の充填と、断面中空部を形成する壁面への低放射コーティングを提案し、それらを用いた際の窓フレーム部の断熱性能評価が数値解析や ISO 8990²³⁾、EN12412-2²⁴⁾に基づき行われている。ガラス中央部を対象にしたケースには御園生の紹介²⁵⁾があり、2枚の板ガラスの間を真空中に減じて、高い断熱性ととも全体のを薄くした真空断熱ガラスが紹介されている。Kralj らの研究²⁶⁾では、高断熱な複層ガラスとして 6層複層ガラスを提案し、一般的な構造や熱的特性、経済的側面や快適性について示すとともに、6層複層ガラスを用いた改修後の年間エネルギー消費量が 50%削減されることを示す事例研究が紹介されている。Kou らの研究²⁷⁾では、単板ガラスを用いた窓の断熱性能を簡易的に向上させるための手法として、単板ガラスを用いた窓への低放射コーティングを施したフィルムの設置を提案し、数値解析や実験室実験により断熱性能評価を行っている。ガラスエッジ部を対象にしたケースには Song らの研究²⁸⁾があり、ガラススペーサの材質や構造に焦点を当て、市場調査に基づいた、断熱スペーサの一般的な種類を報告するとともに、窓フレーム部に設置した際の断熱スペーサと金属（アルミニウム）製スペーサの熱的特性（窓フレームの室内側表面温度）に関する評価を数値計算により行い、得られた結果から窓フレームの室内側表面結露防止のための評価方法と判断基準が提案されている。Shin らの研究²⁹⁾では、高断熱化されたガラススペーサ（Thermo Insulated Spacer、以下 TIS という）の材質や構造に焦点を当て、市場調査に基づいた、TIS の種類とそれら熱的性能を報告するとともに、TIS を用いた窓の断熱性能評価を数値解析により行っている。しかしながらこれらの研究は、窓の断熱性能向上に必要な要件の整理や改善策の提案、改善策における断熱性能向上効果の検証にとどまっており、窓を高断熱化するための効率的かつ合理的な評価手法については示してい

ない。

窓と躯体の間の線熱貫流率に関する既往の研究は宮澤らの研究⁹⁾があり、窓と躯体の複合的な 2 次元熱移動は、窓単体および躯体単体を仮定した熱移動の合計より大きくなることを示し、その熱移動の増分を窓と躯体の間の線熱貫流率と定義するとともに、線熱貫流率を定量的に評価可能な計算方法が提示されている。さらに、幾つかの代表的な窓と躯体の組合せを対象に検討し、検討した全ての組合せで熱移動が生じていること、線熱貫流率は窓フレーム材質毎で大まかに分類できること、窓の熱貫流率に線熱貫流率を付加した場合、最大で熱貫流率が 16% 増加すること、住宅の熱損失係数に線熱貫流率を考慮すると熱損失係数は 3~5% 程度増加することが示されている。于らの研究¹⁰⁾では、躯体に鉄製窓下地材が用いられた場合における窓と躯体の間の表面温度や線熱貫流率を窓フレーム材質毎（二重窓^{注4)}、アルミ樹脂複合窓、樹脂製窓）に数値計算や測定により算出し、樹脂製窓は他の材質と比べ当該個所の表面温度が高く線熱貫流率が小さいことや木造躯体（充填断熱工法）の場合の線熱貫流率とほぼ同等であること、二重窓やアルミ樹脂複合窓は鉄製下地材との設置状況が線熱貫流率に影響を与えることが示されている。岸本らの研究¹¹⁾では、ISO 14683¹²⁾に基づいた窓周り熱橋の評価法を提案するとともに、躯体の工法と窓フレームの材質をパラメータとした窓周り熱橋及び建物全体の熱損失に占める割合について検討し、躯体と窓フレーム材質の組合せによっては、建物全体の熱損失のうち窓周り熱橋の占める割合が温暖地で 15%、寒冷地で 20% を超える可能性があることを示している。しかしながら、これらの研究は窓と躯体の間の線熱貫流率の定量的な把握にとどまっており、どのような方策を採れば線熱貫流率の低減に寄与するか、には至っていない。

窓仕様による暖冷房負荷削減効果の方位特性等を示した既往の研究は樋口らの研究³⁰⁾があり、学校教室における省エネルギー手法に関する検討として品質工学の手法³¹⁾³²⁾³³⁾を用いて教室モデルの熱負荷計算を行い、窓の面積、ガラス単体の断熱性能、日射熱取得率、暖房設定温度、冷房設定温度が年間熱負荷に与える影響について考察し、年間熱負荷の低減に寄与する上位 3 つの制御因子を地域別に示すとともに、窓面積の大小が年間熱負荷に与える影響は小さいものの、札幌、盛岡などの寒冷地では他の制御因子の適切な選択により窓面積を大きくすることで熱負荷を低減できる可能性が示されている。また、村田らの研究³⁴⁾では、窓の貫流熱損失と日射熱取得の収支を計算する方法を提案し、複数の地域について方位別に窓の熱収支の計算を行い、負荷削減のために最適な熱収支を実現できる窓を選定する指標を示すとともに、住宅モデルの熱負荷計算を行い、方位別の指標に基づき最適な熱収支を実現できる窓を採用した際の年間の暖冷房負荷の削減効果が示されている。しかしながら、これらの研究は暖冷房負荷に関わる窓の熱的性能の因子として、窓の断熱性能を表す熱貫流率と、日射熱取得／日射遮蔽を表す日射熱取得率にとどまっており、窓の気密性能（通気量）や窓付属部材が暖冷房負荷に与える影響については考慮されていない。

以上より、本研究の位置付けを示すと、以下のようになる。

- ① 国内の既存樹脂製窓を対象に、窓フレーム部の主要構成材料である枠、樫、方立の形状や材質を変えずに高断熱化をはかるに当たり、窓フレーム部やガラス中央部、ガラスエッジ部の高断熱化への寄与が想定される各種要素技術の性能向上に及ぼす影響と最適条件（各部位の断熱性能向上に最も寄与する要素技術と水準）を明らかにするとともに、最適条件の組合せからなる窓の断熱性能を示し、さらに試験体の製作と性能検証によってその実現性の検討結果を報告する
- ② 窓と躯体の間の線熱貫流率の低減手法に関する検討として、木造充填断熱工法に焦点を当て、「窓フレーム内部断熱材の熱伝導率」、「窓の躯体への設置位置」、「室内額縁の構成材料」といった因子が、窓と躯体の間の線熱貫流率に与える影響と最適条件（線熱貫流率低減に最も寄与する因子と水準）を明らかにするとともに、最適条件の組合せからなる窓と躯体の間の線熱貫流率を示し、さらに試験体の製作と性能検証によってその妥当性の検討結果を報告する
- ③ 地域の気候特性や方位に応じて最適な熱収支を実現できる窓の評価手法に関する検討として、寒冷地における樹脂製窓の暖房負荷に焦点をあて、「窓付属部材の付加熱抵抗」、「窓の断熱性能（熱貫流率）」、「窓の日射熱取得率」、「窓の気密性能（通気量）」といった因子が、窓の暖房負荷に与える影響とそれら最適条件（暖房負荷低減に最も寄与する因子と水準）を明らかにするとともに、最適条件の組合せからなる窓の暖房負荷を示し、さらに標準的な組合せからなる窓の暖房負荷との比較結果を報告する

注 1) 窓フレーム部とは、窓フレーム部の主要構成材料である枠、樫、方立や、複層ガラスの留め付けに用いる押縁、窓フレーム間ならびに窓フレームと複層ガラスとの気密性、水密性確保を目的とした気密材、さらに窓フレームの耐風圧性能確保等を目的として窓フレーム断面内部に設置される補強材等で構成される部位（すなわち複層ガラスを除いた部位）を指す。

注 2) ガラス中央部とは、複層ガラスの主要構成材料である板ガラスと、板ガラス間の中空層（中空層内部の気体は主に乾燥空気や特殊ガス等で構成される）で構成される部位を指す。

注 3) ガラスエッジ部とは、ガラスエッジ部の主要構成材料であるガラススペーサ（複層ガラスの中空層確保を目的としている）や、ガラススペーサ内部に充填される乾燥材（製造時に封入された湿気を取り除き、実用時の時間経過とともに複層ガラスの中空層に侵入する僅かな水分子を吸着することを目的としている）、さらにシール材（ガラス中空層の密閉封着確保を目的としている）で構成される部位を指す。

注 4) アルミ製窓の室内側に樹脂製窓を後付けした仕様を示す。

1.4 論文の構成

本論文は、全 6 章より構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章「序論」では、研究の背景と目的を述べ、関連する既往の研究について概説し、本研究の位置付けを示した。

第 2 章「品質工学とは」では、第 3 章～第 5 章で用いる品質工学の手法について概説するとともに、窓開発に品質工学の手法を用いる利点や留意点、さらに従来 of 検討方法との差異等を示した。

第 3 章「各種要素技術による断熱性能向上の実現性に関する検討」では、国内の既存樹脂製窓を対象に窓フレーム部の主要構成材料である枠、框、方立の形状や材質を変えずに高断熱化をはかるに当たり、構成する部位（窓フレーム部、ガラス中央部、ガラスエッジ部）の影響を定量的に評価した。その結果、窓フレーム部については、品質工学の手法を用いて高断熱化への寄与が想定される複数の制御因子の各断面に対する通過熱流量の低減効果を検討し、各制御因子の最適条件（通過熱流量低減に最も寄与する水準）を導出するとともに、最適条件時の既存樹脂製窓からの低減率（障子部 19～21%、FIX 部 6～10%、方立部 22%）を示した。さらに、SN 比影響度から、障子部、FIX 部は「窓フレーム内部断熱材の熱伝導率」が、方立部は「方立補強材の熱伝導率」が最も低減効果が高いことを示した。ガラス中央部については、複層ガラスの中空層へ重量がほとんどない Low-E フィルムを挿入した仕様を検討し、Low-E 膜の効果と配置の最適化（視野性や日射特性等に配慮したうえで最大の断熱効果が期待できる配置）や充填ガス別の最適（最大の断熱効果が期待できる）中空層厚みを示すとともに、キセノンガスとフィルム 3 枚によるガラス中央部の熱貫流率 $0.29 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 仕様や、クリプトンガスとフィルム 2 枚によるガラス中央部の熱貫流率 $0.39 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 仕様を提案した。ガラスエッジ部については、窓フレーム部と同様に品質工学の手法を用いて、高断熱化への寄与が想定される複数の制御因子の各断面に対するガラスエッジ部の線熱貫流率低減効果を検討し、一窓あたりのガラスエッジ部の平均線熱貫流率を用いた SN 比平均値から各制御因子の最適条件（線熱貫流率低減に最も寄与する水準）を導出した。さらに、SN 比影響度から、各断面に共通して「ガラススペーサの熱伝導率」が最も低減効果が高いことを示した。次に、窓フレーム部、ガラス中央部、ガラスエッジ部の最適条件の組合せからなる窓の熱貫流率 $0.46 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ を示したが、現状の課題（製造上困難な技術や製造コスト上の課題）があることから、製品化を見据えた現実的な仕様で試験体による断熱性能の検証を行った結果、計算で熱貫流率 $0.65 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ の仕様で、 $0.63 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ の測定結果が得られたことを示した。

第 4 章「樹脂製窓と躯体の間の線熱貫流率低減手法に関する検討」では、木造充填断熱工法における樹脂製窓（FIX 窓、外開き窓、引違い窓）と躯体の間の線熱貫流率計算を行い、「窓フレーム内部断熱材の熱伝導率」、「窓の躯体への設置位置」、「室内額

縁の構成材料」といった制御因子が窓と躯体の間の線熱貫流率に与える影響を、品質工学の手法を用いて定量的に評価した。その結果、窓フレーム部や室内額縁の断熱性能が高いほど、窓の躯体への設置位置を室内側に向けるほど、窓と躯体の間の線熱貫流率の低減につながることを明らかにするとともに、開口部一窓当りの窓と躯体の間の平均線熱貫流率を用いた SN 比影響度から、FIX 窓、外開き窓は「室内額縁の構成材料」が、引違い窓は「窓フレーム内部断熱材の熱伝導率」が最も低減効果が高いことを示した。さらに最適条件の組合せ（各制御因子の線熱貫流率低減に最も寄与する水準で構成される組合せ）からなる窓と躯体の間の線熱貫流率を示した。次に、FIX 窓における開口部一窓当りの窓と躯体の間の平均線熱貫流率を、試験体を製作し数値計算結果の妥当性検証を行った結果、測定値は計算値と同様に窓フレーム部や室内額縁の断熱性能を高め、窓の躯体への設置位置を室内側に向けることで線熱貫流率の低減につながることを明らかにするとともに、両者の乖離が 10%未満と良い整合性が得られたことを根拠に計算値の妥当性を証明した。また、窓の躯体への設置位置が窓の室内外表面熱伝達抵抗に与える影響を把握するため、窓に設置した 2 層複層ガラスを校正板に見立て、室内外の表面熱伝達抵抗の算出を試みた。その結果、窓の躯体への設置位置は室内外の表面熱伝達抵抗の放射成分より対流成分に多く影響を及ぼしているものの、線熱貫流率への影響は小さいことを明らかにした。

第 5 章「樹脂製窓の熱的性能が寒冷地の窓の暖房負荷に与える影響」では、地域の気候特性や方位に応じて最適な熱収支を実現できる窓の評価手法に関する検討として、寒冷地（1、2、3 地域）における樹脂製窓の暖房負荷に焦点をあて、「窓付属部材の付加熱抵抗」、「窓の断熱性能（熱貫流率）」、「窓の日射熱取得率」、「窓の気密性能（通気量）」といった制御因子が窓の暖房負荷に与える影響を、品質工学の手法を用いて定量的に評価した。その結果、全ての地域・主方位・面・1 棟分に共通して、窓付属部材の付加熱抵抗が大きいほど、窓の断熱性能が高い（熱貫流率が小さい）ほど、窓の日射熱取得率が高いほど、窓の気密性能が高い（通気量が少ない）ほど、窓の暖房負荷の低減につながることを明らかにするとともに、1、2 地域は SN 比影響度から、3 地域は窓の暖房負荷の平均値の最大と最小の差から、樹脂製窓の熱的性能を選択する際、1、2 地域では主方位や面によらず、まず断熱性能、次に気密性能を、3 地域では主方位によらず、南面はまず日射熱取得率、次に断熱性能を、それ以外の面はまず断熱性能、次に日射熱取得率を重視して選択するのがよいことを提案した。また、検討条件の範囲内において、最適条件の組合せ（窓の暖房負荷低減に最も寄与する制御因子の水準の組合せ）とすることで、1～2 地域は標準ケースから最大 98%低減、3 地域は最大 100%低減かつ 148.4 kWh/m²の熱取得が得られることを示した。

第 6 章「総括」では、本研究で得られた知見を総括し、今後の課題について考察した。

本論文の構成は、図 1-7 のようになる。

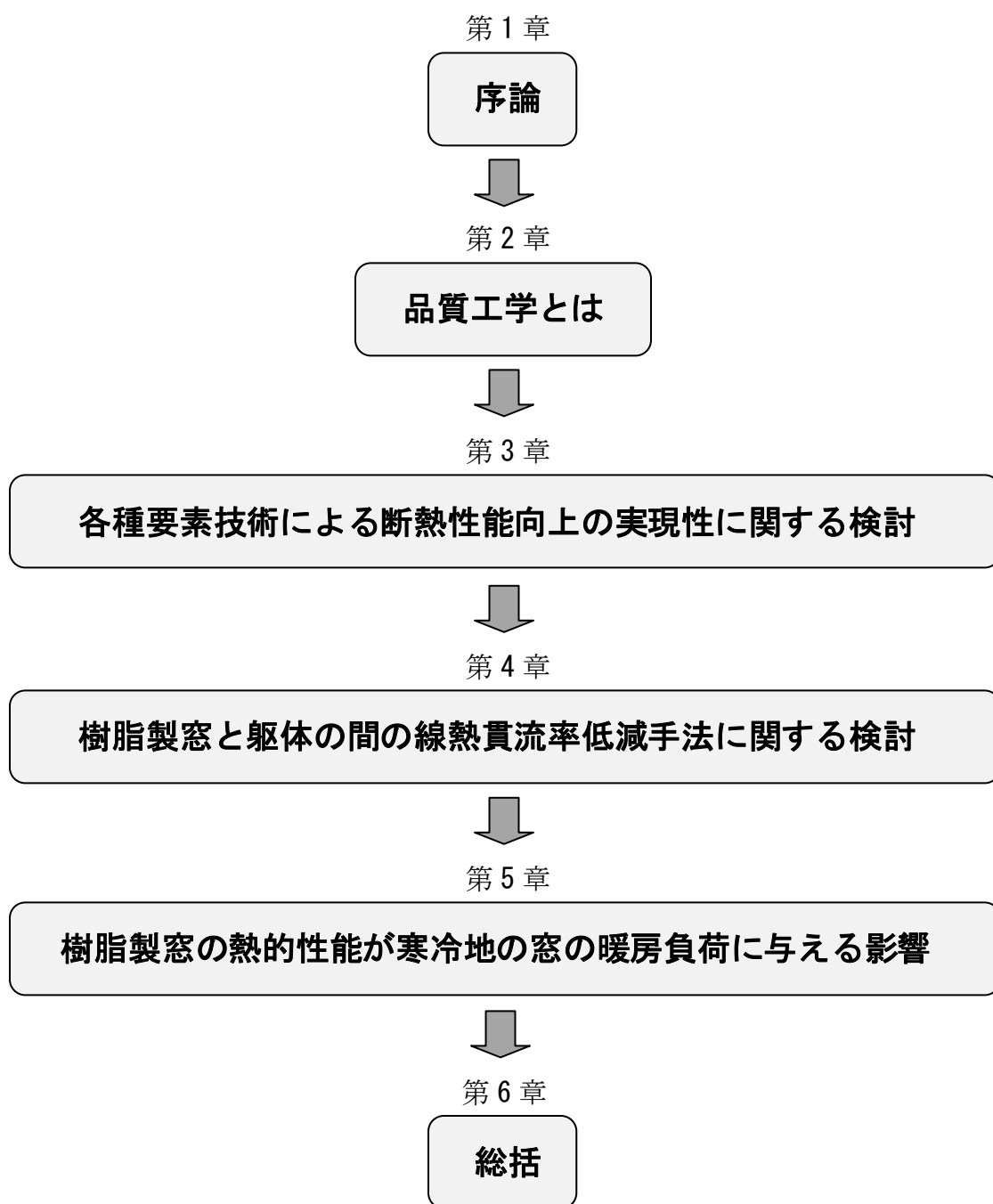


図 1-7 本論文の構成と流れ

【第1章の参考文献】

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁ホームページエネルギー白書 平成24年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2013）第2部 エネルギー動向 第1章 国内エネルギー動向
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2013html/2-1-2.html>参照
- 2) 経済産業省・国土交通省：エネルギーの使用の合理化に関する建築主等及び特定建築物の所有者の判断の基準，平成28年経済産業省・国土交通省告示第1号，2016.1
- 3) ZEHロードマップ検討委員会とりまとめ，経済産業省 資源エネルギー庁 省エネルギー対策課，2015.12
- 4) 自立循環型住宅への設計ガイドライン，（一財）建築環境・省エネルギー機構，2015.8
- 5) “分かりやすいサッシ・ドアの性能” 「BASIS」2016，（一社）日本サッシ協会，2016
- 6) JIS A5558：無可塑ポリ塩化ビニル製建具用形材，（一財）日本規格協会，2010
- 7) 住宅用建材使用状況調査，（一社）日本サッシ協会，2019.3
- 8) 下ノ菌慧，遠藤卓，立松宏一，月館司：北海道の新築戸建・共同住宅における断熱及び設備仕様調査，日本建築学会北海道支部研究報告集 No. 90，p143～146，2017.06
- 9) 宮澤千頭，二宮秀與，田代達一郎：窓と躯体の熱伝導が建物の熱性能に及ぼす影響，日本建築学会環境系論文集，第78巻第683号，pp17-23，2013.1
- 10) 于海源，永田明寛，菅野普，高田和規：窓と鉄製窓下地材の間の熱移動に関する研究，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp281-284，2014.9
- 11) 岸本尚子，齋藤宏昭，野中俊宏，齊藤孝一郎：窓周り熱橋と結露の評価法に関する研究その1 窓周り線熱橋の評価法，日本建築学会大会学術講演梗概集環境工学Ⅱ，pp1～2，2018.09
- 12) ISO 14683: Thermal bridges in building construction - Linear thermal transmittance - Simplified methods and default values, 2017
- 13) 新井光一郎，浅野良晴，高村秀紀，岩井一博，千福地航平，富澤佑太，福島功二：高断熱木製サッシの性能に関する研究その2 - サッシ全体の断熱性能評価 -，日本建築学会技術報告集第21巻第49号，pp1107-1110. 2015.10
- 14) ISO 10077-1: Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 1: General, 2006
- 15) ISO 10077-2: Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 2: Numerical method for frames, 2012
- 16) JIS A2102-1: 窓及びドアの熱性能 - 熱貫流率の計算-第1部：一般，（一財）日本規格協会，2015
- 17) JIS A2102-2: 窓及びドアの熱性能 - 熱貫流率の計算-第2部：フレームの数値計算方法，（一財）日本規格協会，2011
- 18) JIS A4710: 建具の断熱試験方法，（一財）日本規格協会，2015
- 19) A. Gustavsen, B. Petter Jelle, D. Arasteh, C. Kohler, State-of-the-art highly insulating window frames. Research and Market Review, Project report no. 6 Norwegian University of Science and Technology, Building and Infrastructure 2007, ISBN 978-82-536-0970-6.

- 20) A. Gustavsen, S. Grynning, D. Arasteh, B. Petter Jelle, H. Goudey, Key elements of and material performance targets for highly insulating window frames, *Energy and Buildings* 43 (10) (2011) 2583–2594. N. Bosschea, L. Buffela, A. Janssens, Thermal optimization of window frames, *Energy Procedia* 78 (2015) 2500 – 2505
- 21) N. Bosschea, L. Buffela, A. Janssens, Thermal optimization of window frames, *Energy Procedia* 78 (2015) 2500–2505
- 22) Lechowska. A., J. Schnotale, B. Giorgio. 2017. “Window frame thermal transmittance improvements without frame geometry variations: An experimentally validated CFD analysis.” *Energy and Buildings* 145: 188–199
- 23) ISO 8990. 1994. “Thermal insulation — Determination of steady-state thermal transmission properties — Calibrated and guarded hot box.”
- 24) EN 12412-2: Thermal performance of windows, doors and shutters. Determination of thermal transmittance by hot box method. Frames, 2003
- 25) 御園生雅朗：真空断熱ガラス，真空，No. 41 (4)，pp448–451，1998
- 26) Kralj. A., D. Marija, Z. Matjaz, C. Bostjan, H. Joze, j. Bjorn. 2019. “Investigations of 6-pane glazing: Properties and possibilities.” *Energy and Buildings* 190: 61–68
- 27) Kou. R., Z. Ying, K. Jeongmin, W. Qingyang, W. Meng, C. Renkun, Q. Yu. 2019. “Elevating low-emissivity film for lower thermal transmittance.” *Energy and Buildings* 193: 69–77
- 28) S.Y. Song, J.H. Jo, M.S. Yeo, Y.D. Kim, K.D. Song, Evaluation of inside surface condensation in double glazing window system with insulation spacer: A case study of residential complex, *Building and Environment* 42 (2007) 940–950
- 29) Shin. M., K. Rhee, J. Yu, G. Jung. 2017. “Determination of Equivalent Thermal Conductivity of Window Spacers in Consideration of Condensation Prevention and Energy Saving Performance.” *energys* 10(5): 717
- 30) 樋口作夫，羽山広文，絵内正道：学校教室の窓ガラス仕様と空調条件が年間熱負荷に与える影響，日本建築学会環境系論文集，第73巻第629号，pp873–879，2008.7
- 31) 田口玄一：品質工学講座[1] 開発・設計段階の品質工学，(一財)日本規格協会，pp73～81，1998.08
- 32) 立林和夫：入門タグチメソッド，(株)日科技連出版社，2006.3
- 33) 広瀬健一，上田太一郎：Excelのできるタグチメソッド解析方入門，(株)同友館，2005.4
- 34) 村田さやか，遠藤卓，立松宏一，高田和規：住宅用樹脂製窓の超高断熱化に関する研究 (第2報)高断熱窓の熱収支と冷暖房負荷削減効果，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp185–188，2015.9

第2章 品質工学とは

2.1 品質工学とは

品質工学¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾は、欧米ではタグチメソッドと呼ばれ（以下品質工学をタグチメソッドという）、田口玄一博士⁶⁾によって開発された、多くの品質特性を一つ一つ評価するのではなく、製品やシステムの本来のはたらき（機能）を評価し、品質改善をはかる工学手法である。より具体的には、山際らの既往研究⁷⁾では「製品やシステムの機能がその使用条件や環境条件の影響よりもたらされる“ばらつき”をSN比として表現し、SN比を高めることで機能のばらつきを低減する。次いで目標とする性能に調整していく2段階設計法が特徴であり、その検討の中でその他の品質特性の改善が図られ、製品・システムの頑健化を目指す手法」と定義されており、図2-1に示すように、大まかに実験計画法⁸⁾⁹⁾をベースとした「オフライン品質工学¹⁰⁾」と呼ばれるパラメータ設計¹¹⁾や許容差設計（公差設計¹²⁾ともいう）と、工程管理のための「オンライン品質工学¹³⁾」に分類できる。オフライン品質工学とは、品質の改善を生産段階前、すなわち技術開発、製品設計、性能設計、生産技術（生産準備段階）のステップで適用する手法であり、オンライン品質工学とは、生産段階のステップ（例えば生産工程におけるフィードバック制御や、計測機器の校正等）で適用する手法である。なお、本章ではオフライン品質工学のパラメータ設計に関する概説を中心に行う。

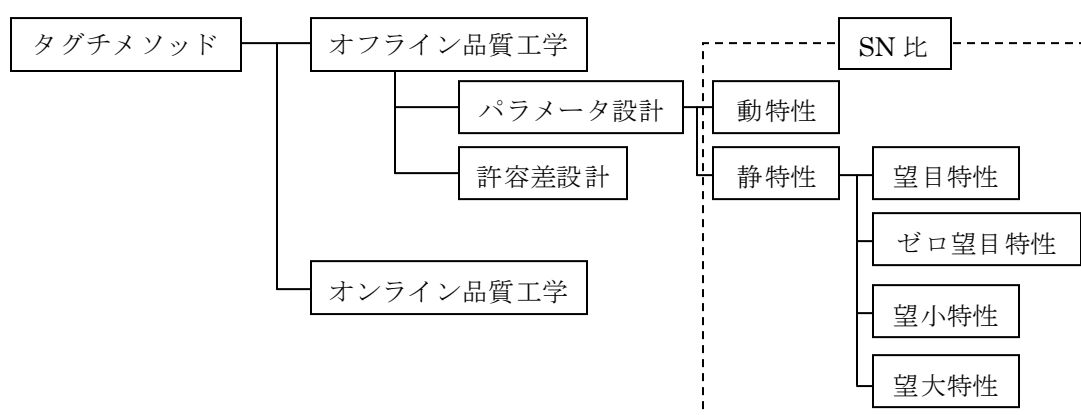


図 2-1 タグチメソッドの分類

* 文献⁵⁾の P.20 表 1-11 を元に作成。

2.2 パラメータ設計の概要と手順

2.2.1 パラメータ設計の概要

パラメータ設計とは、実験の計画に用いる直交表に制御因子やその水準、環境条件（誤差因子）を主に割り付け、直交条件から得られた特性値を機能の目的用途に応じた SN 比に変換し、SN 比から環境条件に左右されない最適な設計条件を探すことを指す。パラメータ設計では、「基本機能」、「SN 比」、「制御因子」、「水準」、「直交表」、「誤差因子」の 6 つがキーワードとしてあげられる。以下に各用語の定義と特徴について簡潔に述べる。

タグチメソッドを用いた評価では、製品やシステムの「基本機能」が評価の対象となる。「基本機能」とは、目的（製品やシステムに要求される役割）を実現するための、製品やシステムが有する技術的手段からなされる働き（以下技術の働きという）を表し、タグチメソッドでは目的と技術の働きの関係を、基本的にエネルギーの入出力の関係で表現する。

「SN 比」とは、機能の安定性を示す尺度のことで、S はシグナル（信号）、N はノイズ（誤差）を意味し、値が大きいほど機能の安定性が高い（誤差(ばらつき)が小さい）ことを表す。SN 比は概念的には樋口らの既往研究¹⁴⁾で示されているように信号と誤差の比で定義（式 2-1）でき、この対数（SN 比で用いる対数は常用対数であることに留意）を 10 倍し、デシベル[db]単位で表わす。通信工学の分野で用いられる尺度とアナロジーである。通信工学における SN 比の単位表記は[dB]であるが、タグチメソッドではそれと区別するために小文字を用いる。

$$\text{SN 比} = \frac{\text{投入されたエネルギーの有効な成分（信号）}}{\text{投入されたエネルギーのうち、出力として有効に働かなかった有害な成分（誤差）}} \quad \cdots \text{式 2-1}$$

SN 比は、図 2-1 の破線で囲った個所に示すように種々の特性が提唱されている。動特性とは、目的と技術の働きの関係を、技術の働きを M （入力、信号因子ともいう）、目的を y （出力、特性値ともいう）として、両者の間に $y = \beta M$ （ β は入出力特性の傾き、すなわち両者のばらつき）を定義（具体例：車のアクセル(M)とスピード(y)の関係のように、 M の変化に対応して y が変化する特性）したものである。つまり、技術の働きと目的を単純な比例関係として考え、両者の間のばらつきが小さければ小さいほど、その技術手段は頑健性が高いという評価になる。動特性の SN 比の算出は式 2-2 を用いる。

$$\text{SN 比} = 10 \log(\beta / \sigma^2) \quad \cdots \text{式 2-2}$$

静特性とは、どのような条件でも特性値が一定となる特性を表し、その特性値の性質から以下の4つに細分類される。各々の特性を簡潔に述べる。

① 望目特性

砂時計の設定時間など、ある一定の目標値（非負）があつて、目標値よりも小さくても大きくても望ましくない特性。SN比の算出は式 2-3～式 2-5 を用いる。

$$\text{SN 比} = 10 \log \frac{(S_m - V_e)/n}{V_e} \quad \dots \text{式 2-3}$$

ここで、

$$S_m = \frac{(\sum y)^2}{n} \quad \dots \text{式 2-4}$$

$$V_e = \frac{\sum (y - \bar{y})^2}{n - 1} \quad \dots \text{式 2-5}$$

② ゼロ望目特性

製品のひずみや反りなど、目標値が 0 である特性。SN比の算出は式 2-6～式 2-7 を用いる。

$$\text{SN 比} = 10 \log (1/V_e) \quad \dots \text{式 2-6}$$

ここで、

$$V_e = \frac{\sum (y - \bar{y})^2}{n - 1} \quad \dots \text{式 2-7}$$

③ 望小特性

騒音など特性値（非負）が小さければ小さいほどよい特性。SN比の算出は式 2-8 を用いる。

$$\text{SN 比} = 10 \log \left(n / \sum y^2 \right) \quad \dots \text{式 2-8}$$

④ 望大特性

溶接強度など特性値が大きければ大きいほどよい特性。SN比の算出は式 2-9 を用いる。

$$\text{SN 比} = 10 \log \left(n / \sum 1/y^2 \right) \quad \dots \text{式 2-9}$$

「制御因子」とは、性能改善を目的として設計者が最適水準を目指すために検討に取り上げる因子を表し、設計者が自由に選択・設定できる。設計条件ともいう。

「水準」とは、制御因子を量的に変化（例えば 1、2…）、あるいは質的に分類（例えばあり、なし）させた条件のことを表し、後述するタグチメソッドで一般的に用いられる L_{18} 直交表では、2 水準の制御因子が 1 つと 3 水準の制御因子が 7 つまで設定できる。

「直交表」とは、タグチメソッドでは直交表と呼ばれる実験計画表を用いることが一般的である。制御因子や水準の組合せ数によっては、それら全てを実験し最適条件を見出すことは非効率かつ非現実的であるが、直交表は様々な制御因子や水準を包括的（同時）に取り扱え、さらに総当たりによる実験回数より少ない実験回数で総当たり相当の結果が得られる特徴を持つ。タグチメソッドは一般的に、2 水準の制御因子が 1 つ、3 水準の制御因子が 7 つまで設定可能な、混合系と呼ばれる L_{18} 直交表が用いられる。例えば、これら総当たりで考えた場合、最適条件を見出すために $2^1 \times 3^7 = 4,374$ 回の実験が必要であるのに対し、 L_{18} 直交表を用いることにより、わずか 18 回の実験で最適条件が見出せる。これは、総当たりの実験で得られる結果と同等の結果を、総当たりで要する回数の $1/243$ で獲得することができることを示しており、つまり直交表を用いることで実験の大きな効率化がはかれる。また、 L_{18} 直交表は特定の制御因子間の交互作用は求められないものの、交互作用が各列に均等に配置されるため、各制御因子と水準の組合せに対する交互作用の偏りがなく、主効果の信頼性が高い。表 2-1 に L_{18} 直交表を、表 2-2 に L_{18} 直交表に割り付ける制御因子と水準を示す。

「誤差因子」とは、製品やシステムにばらつきを生み出す、設計者が制御不能な全ての因子を表す。誤差因子は一般的に直交表の外側に割り付ける。

表 2-1 L₁₈直交表

制御因子 ケース	A	B	C	D	E	F	G	H
1	A1	B1	C1	D1	E1	F1	G1	H1
2	A1	B1	C2	D2	E2	F2	G2	H2
3	A1	B1	C3	D3	E3	F3	G3	H3
4	A1	B2	C1	D1	E2	F2	G3	H3
5	A1	B2	C2	D2	E3	F3	G1	H1
6	A1	B2	C3	D3	E1	F1	G2	H2
7	A1	B3	C1	D2	E1	F3	G2	H3
8	A1	B3	C2	D3	E2	F1	G3	H1
9	A1	B3	C3	D1	E3	F2	G1	H2
10	A2	B1	C1	D3	E3	F2	G2	H1
11	A2	B1	C2	D1	E1	F3	G3	H2
12	A2	B1	C3	D2	E2	F1	G1	H3
13	A2	B2	C1	D2	E3	F1	G3	H2
14	A2	B2	C2	D3	E1	F2	G1	H3
15	A2	B2	C3	D1	E2	F3	G2	H1
16	A2	B3	C1	D3	E2	F3	G1	H2
17	A2	B3	C2	D1	E3	F1	G2	H3
18	A2	B3	C3	D2	E1	F2	G3	H1

表 2-2 制御因子と水準

制御因子	第 1 水準	第 2 水準	第 3 水準
A	A1	A2	B3
B	B1	B2	
C	C1	C2	C3
D	D1	D2	D3
E	E1	E2	E3
F	F1	F2	F3
G	G1	G2	G3
H	H1	H2	H3

2.2.2 パラメータ設計の手順

パラメータ設計の手順例として、図 2-2 にタグチメソッド静特性の望小特性を評価する際の手順を示す。前述のとおり、望小特性は騒音など特性値が小さければ小さいほどよい特性である。18 のケースから得られた特性値を SN 比に変換した後、各制御因子の水準に応じて SN 比の平均化（SN 比平均値という）を行う。SN 比平均値の詳細な算出方法は、第 3 章の 42、43、44、64 ページ、第 4 章の 102 ページ、第 5 章の 141 ページを参照されたい。SN 比平均値を比較することで、特性値の低減に寄与する制御因子の水準が把握できる。SN 比平均値が最大となる制御因子の水準の組合せが特性値を最も小さくする組合せを意味し、すなわち最適設計条件となる。また、SN 比影響度を比較することで各制御因子の水準を変更した際の特性値の影響度合い（序列）が把握できる。SN 比影響度は SN 比平均値の最大値と最小値の差から求める。

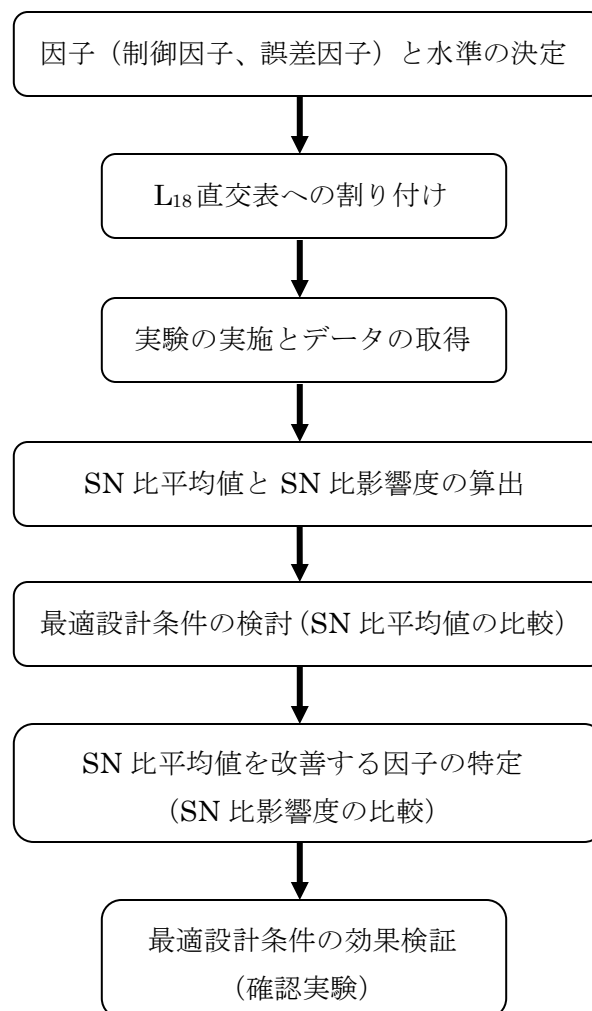


図 2-2 望小特性を評価する際の手順

2.3 タグチメソッドの窓開発への応用

2.3.1 従来の検討方法と課題

窓の性能向上を主体とした製品開発を行うにあたり、窓の性能向上に寄与すると予測される複数の要素技術において、最も性能向上効果が高い要素技術を把握するとともに、それら要素技術の序列を把握することは合理的かつ効率的な製品開発にはかかせない。

性能やコストにおいて真に最適であるかを客観的に判断する検討方法として、従来の検討方法では、例えばパラメトリックスタディが挙げられる。パラメトリックスタディとは、制御因子や水準に関わる様々な数値をパラメータとして定義し、順次パラメータを変化させながら繰り返し解析を行い最適化の条件を見出す手法であるが、この手法は複数の制御因子や水準を包括的に取り扱うことが難しいため、制御因子や水準が多い場合、これら全てを解析するには膨大な時間を要してしまう。そのため、製品開発に相当の時間を要し上市の最適なタイミングを逸しビジネスチャンスを不意にしたり、あるいは、与えられた製品開発期間によっては、設計者の感性や経験則等をベースに性能向上に寄与すると予測される要素技術をあらかじめ絞った上で、それらの妥当性評価にとどめ窓の製品開発を行った結果、結局狙った性能やコストが実現できず顧客のニーズにそぐわない中途半端な製品を上市し、製品化に要したコストが満足に回収できないといった課題が挙げられる。

2.3.2 窓開発にタグチメソッドを用いる利点

タグチメソッドは制御因子や水準をパラメトリックスタディのように一つ一つ評価するのではなく、それらを包括的に取り扱うことができる。さらに、直交表や SN 比等を用いてそれらの最適な組合せと序列が把握できる。そのため、タグチメソッドを窓開発に用いることにより「製品開発の効率化」がはかれ、これが最大の利点となる。

「製品開発の効率化」とは、すなわち製品開発期間の大幅な短縮とそれに伴うコスト削減をはかることであり、タグチメソッドを用いることによってそれが可能となる。具体的な例を示すと、例えば 3 章では窓フレーム部と複層ガラスのガラスエッジ部の最適化にタグチメソッドを用いたが、窓フレーム部の総解析数 126 (18 ケース×7 断面)、ガラスエッジ部の総解析数 252 (18 ケース×7 断面×2 仕様) に対し、直交条件を総当たりで検討した場合、窓フレーム部は 6,318 (障子部上、下、吊元、方立部が各 $2^1 \times 3^6$ 、FIX 部上、下、縦が各 $2^1 \times 3^4$)、ガラスエッジ部は 6,804 (7 断面 $2^1 \times 3^5 \times 2$ 仕様) となり、これらに 1 断面毎の解析時間 (概ね 0.5 時間) を乗じると、タグチメソッドを用いた場合の総解析時間は 189 時間 (0.5 時間×(窓フレーム部 126+ガラスエッジ部 252)) に対し、総当たりの場合は 6,561 時間 (0.5 時間×(窓フレーム部 6,318+ガラスエッジ部 6,804)) となり、タグチメソッドを用いることで、総当たりの検討で得られる結果と同等

の結果を、総当たりに要する時間の 1/35 程度で獲得することができる。これを人工として表現すると、例えば解析に充てる時間を 1 日あたり 5 時間（5 時間／人工）とした場合、タグチメソッドを用いた場合は解析終了までに 38 日程度要するのに対し、総当たりの場合は 1,312 日程度となり、前者は解析に要する日数の少なさから少数の人工で対応可能であると考えられるものの、後者は与えられた開発期間によっては相当数の人工が必要になることが考えられ、その場合、人件費等のコスト高騰による製品原価への影響が懸念される。

2.3.3 窓開発にタグチメソッドを用いる際の留意点

前述したが、タグチメソッドを用いた評価では、製品やシステムの「基本機能」をとりあげ評価をすることが前提となる。本論文では樹脂製窓の「断熱性能」、「窓と躯体の間の熱橋」、「暖房負荷」の低減を目的としている。そのため、これら 3 つを製品の基本機能と考え、3 章では樹脂製窓の窓フレーム部の通過熱流量や複層ガラスのガラスエッジ部の線熱貫流率、4 章では樹脂製窓と躯体の間の線熱貫流率、5 章では寒冷地における樹脂製窓の暖房負荷を具体的な基本機能と設定し、それらに影響を及ぼすと考えられる複数の要素（制御因子と水準）を主な解析パラメータとし、通過熱流量や線熱貫流率、暖房負荷はいずれも値が小さければ小さいほど良い特性であることから、これらを望小特性と仮設しタグチメソッドの適用を試み良好な結果を得た。窓開発にタグチメソッドを用いる際の留意点として、まずは上述のように製品の基本機能と特性を正確に把握することを挙げる。つまり、基本機能が何で、それがどうあるべきが理想なのかを正確に見出す必要がある。ここが不明確な場合、SN 比の評価で再現性が得られないといった不具合が生じる恐れがある。また、本論文で取り扱った基本機能には、JIS 等に基づいた一様な条件下での最適化を前提としたため誤差因子を与えていない。製品のさらなる頑健化を目指すためには、次のステップとして、環境条件（室内外の空気温度や表面熱伝達率、断熱境界等）のばらつきや、構成部材の熱的特性や形状等のばらつきといった誤差因子に対する影響についても把握する必要があることを留意点として付け加える。

第 2 章の記号表

2.2 パラメータ設計の概要と手順

2.2.1 パラメータ設計の概要

記号	意味
β	入出力特性の傾き
σ	回帰誤差分散
S_m	平均の 2 乗和
V_e	誤差分散
n	個数
y	特性値
$\bar{y}$	特性値の平均

【第2章の参考文献】

- 1) 田口玄一：品質工学の定義とタグチメソッド，品質工学 1(2)，2-7，1992
- 2) 田口玄一：品質工学の数理，(一財)日本規格協会，1999.6
- 3) 田口玄一：品質工学講座[1] 開発・設計段階の品質工学，(一財)日本規格協会，pp73～81，1998.08
- 4) 立林和夫：入門タグチメソッド，(株)日科技連出版社，2006.3
- 5) 広瀬健一，上田太一郎：Excelでできるタグチメソッド解析方入門，(株)同友館，2005.4
- 6) 田口玄一：Studies on mathematical statistics for quality control，九州大学学位論文，1962
- 7) 山際和男，百々精二，宮本忠博，中島佑子，本城宏昌，上田吉昭，丸本光弘：品質工学を用いたハロゲンフリー被覆材料の開発，三菱電線工業時報第108号，pp17-21，2011.10
- 8) 田口玄一：実験計画法 上 復刻版，丸善(株)，2010.7
- 9) 田口玄一：実験計画法 下 復刻版，丸善(株)，2010.7
- 10) 田口玄一，横山巽子：ベーシックオフライン品質工学，(一財)日本規格協会，2007.5
- 11) 井上清和，中野恵司，林祐人，芝野広志，大場章司：入門パラメータ設計—Excel演習でタグチメソッドの考え方と手順を体得できる，(株)日科技連出版社，2008.2
- 12) 栗山弘：公差設計入門 コストと品質のバランスを最適化する，(株)日経BP，2011.11
- 13) 田口玄一，横山巽子：ベーシックオンライン品質工学，(一財)日本規格協会，2009.9
- 14) 樋口作夫，羽山広文，絵内正道：学校教室の窓ガラス仕様と空調条件が年間熱負荷に与える影響，日本建築学会環境系論文集，第73巻第629号，pp873-879，2008.7

第3章 各種要素技術による断熱性能向上の実現性に関する検討

3.1 本章の背景と目的

樹脂製窓は主に窓フレーム部とガラス部から構成される。窓フレーム部は主要構成材料である窓フレームの他に、気密材や、窓フレームの耐風圧性能確保等を目的として窓フレーム断面内部に設置される補強材等に、ガラス部はガラス中央部を構成する板ガラスと中空層、さらにガラスエッジ部を構成するガラススペーサとガラススペーサ内部に充填される乾燥材やガラス中空層の密閉封着を主としたシール材に細分類される。このように樹脂製窓は様々な材料から構成され、また、それぞれの熱的性能が窓全体の断熱性能に影響を及ぼす。樹脂製窓の断熱性能向上をはかるにあたり、それら構成材料の熱的影響を定量的に評価し、最適な構成（窓の断熱性能を最も小さくする構成）を決定するプロセスを示した既往研究例は存在しない。そのため、効率的かつ合理的な評価手法を示すことは、生産者等の今後の更なる高断熱な樹脂製窓の開発行為に対して、構成材料の選択時における客観的合理性や製品開発期間の短縮等といった寄与が期待されることから、大変意義がある。

そこで本章では、国内の既存樹脂製窓（以下既存品という）を対象に、窓フレーム部の主要構成材料である枠、框、方立の形状や材質を変えずに高断熱化をはかるに当たり、窓フレーム部やガラス中央部、ガラスエッジ部の高断熱化への寄与が想定される各種要素技術を複数提案し、それら断熱性能向上に及ぼす効果と最適条件（各部位の断熱性能向上に最も寄与する要素技術と水準）をタグチメソッド¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾を用いて明らかにするとともに、最適条件の組合せからなる窓の断熱性能を示し、さらに試験体の製作と性能検証によってその実現性の検討結果を報告する。

3.2 各種要素技術の断熱性能向上に及ぼす効果

3.2.1 窓フレーム部の高断熱化

3.2.1-1 設定条件と評価方法

検討対象とした既存品（連窓形式の縦すべり出し窓）の内観姿図を図 3-1 に、各部の名称を窓のサイズとともに図 3-2 に、窓フレーム部の各断面形状を図 3-3 に、各構成材料の物性値（熱伝導率）を表 3-1 に示す。既存品は枠、框、方立、押縁に硬質 PVC、気密材に軟質塩化ビニル樹脂（Soft Polyvinyl Chloride、以下軟質 PVC という）、方立内部の補強材に鋼材（以下スチールという）を用いている。この仕様は、寒冷地で過去 30～40 年間に於いて最も出荷実績があり、居室において腰高窓として一般的に使用されている縦すべり出し窓である。窓のサイズは腰高窓で最も使用実績のある規格サイズ（16513）とした。



図 3-1 内観姿図

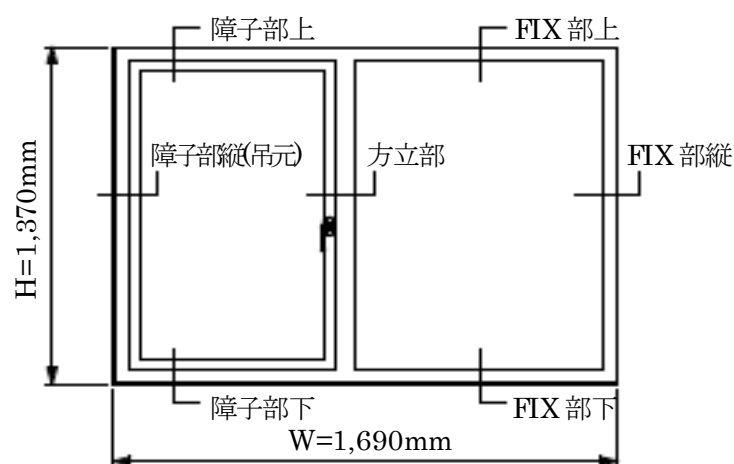


図 3-2 各部位の名称（内観）

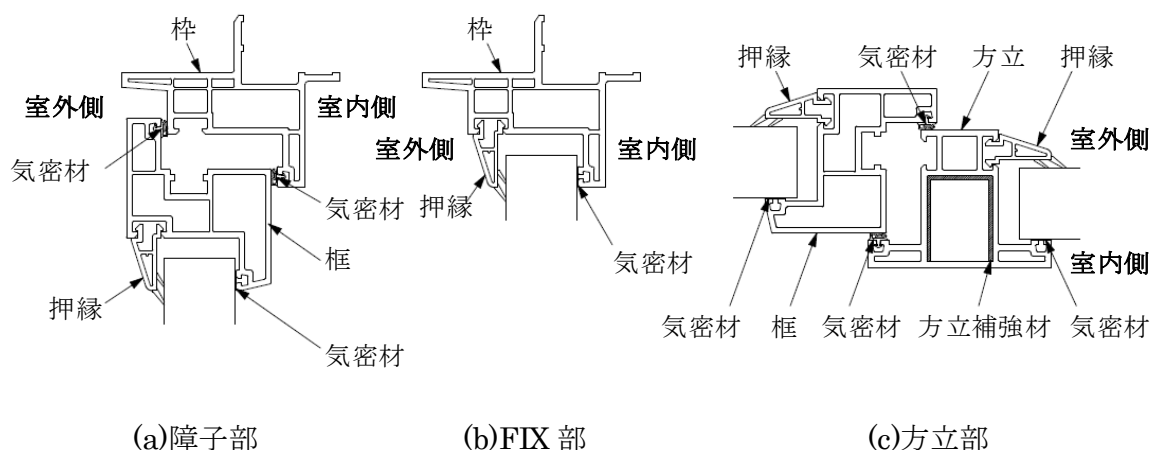


図 3-3 窓フレーム部の断面形状

表 3-1 各構成材料の物性値

構成材料	熱伝導率[W/(m・K)]
枠 (硬質 PVC)	0.17
方立 (硬質 PVC)	
押縁 (硬質 PVC)	
気密材 (軟質 PVC)	
方立補強材 (スチール)	50

窓フレーム部の高断熱化への寄与が想定される要素技術（以下制御因子という）を各断面に対し複数設定し、それら制御因子が各断面の通過熱流量（ Q_f ）に与える効果を効率的かつ合理的に評価する方法として、タグチメソッドを用いた。前述したが、タグチメソッドは田口玄一博士によって開発された技術評価の方法で、機能のばらつきを抑え品質を最適化する技術の体系といわれている。

各断面の Q_f の計算は、「TB2D/BEM⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾ (Thermal Bridge Computation by 2-Dimensional Boundary Element Method)」を用いて行った。TB2D/BEM は境界要素法による 2 次元定常伝熱解析プログラムで、具体的な断面形状から解析モデルを作成し、これに計算目的に応じた境界条件を与えて伝熱解析を行うことで、窓や躯体といった 2 次元壁体を通過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、一般社団法人リビングアメニティ協会ホームページ (<http://www.alianet.org/>) にて公開されている窓の熱性能評価プログラム「WindEye¹³⁾」の基となるデータベースを作成する計算ツールとして使用されているほか、研究等でも多く使用されている。なお、TB2D/BEM は JIS A2102-2¹⁴⁾ に準拠しており、かつ計算精度が規定を満たしていることが第 3 者（一般財団法人建材試験センター）において確認されている。

解析モデルはガラス部を断熱性能が既知である断熱材（熱伝導率 $0.035 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ）に置き換えたパネルモデル断面とし、環境条件は JIS A2102-2 に従い表 3-2 に示すように室内外の温度は、室内側 20°C 、室外側 0°C 、室内外温度差 20°C 、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、室外側一般部を $7.69 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ 、室内側隅角部を $5.00 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ 、室外側を $25.0 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ とした。また、境界条件は図 3-4 に示す太い破線部（枠の外部フィンからの一般的な厚さである通気胴縁 15mm ＋サイディング 16mm の合計 31mm 、額縁想定位置として窓内法基準寸法押え位置（伝熱開口寸法の押え位置から上枠 30mm 、下枠 40mm 、縦枠 20mm ）を断熱境界（熱移動ゼロ）とした。各部位のパネルモデル断面を図 3-5 に示す。

表 3-2 各断面の Q_f 計算時の環境条件

環境条件			
雰囲気温度 $^{\circ}\text{C}$	室外側		20
	室内側		0
表面熱伝達率 [$\text{W/(m}^2 \cdot \text{K)}$]	室内側	室外側	7.69
		室外側	5.00
	室外側		25.0

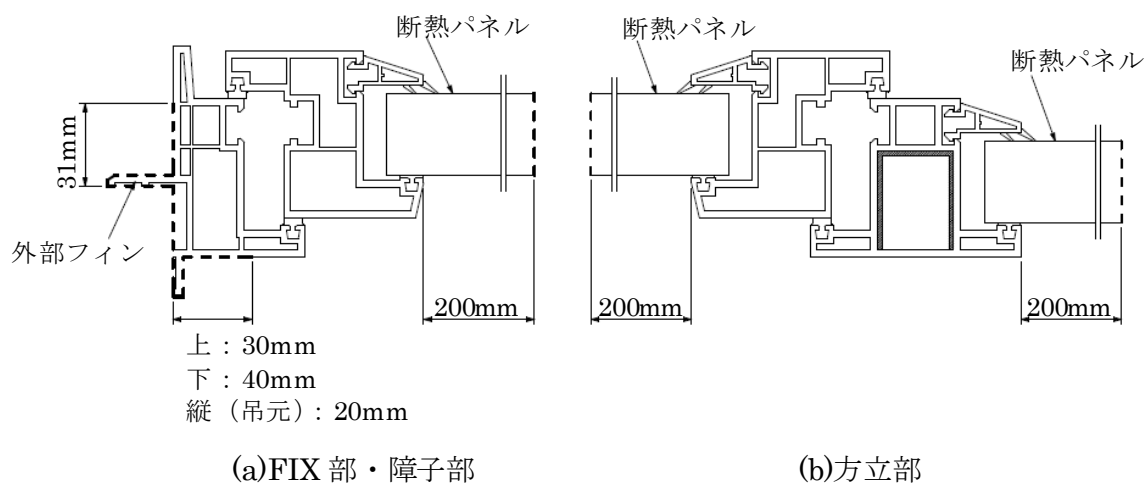


図 3-4 各断面の境界条件

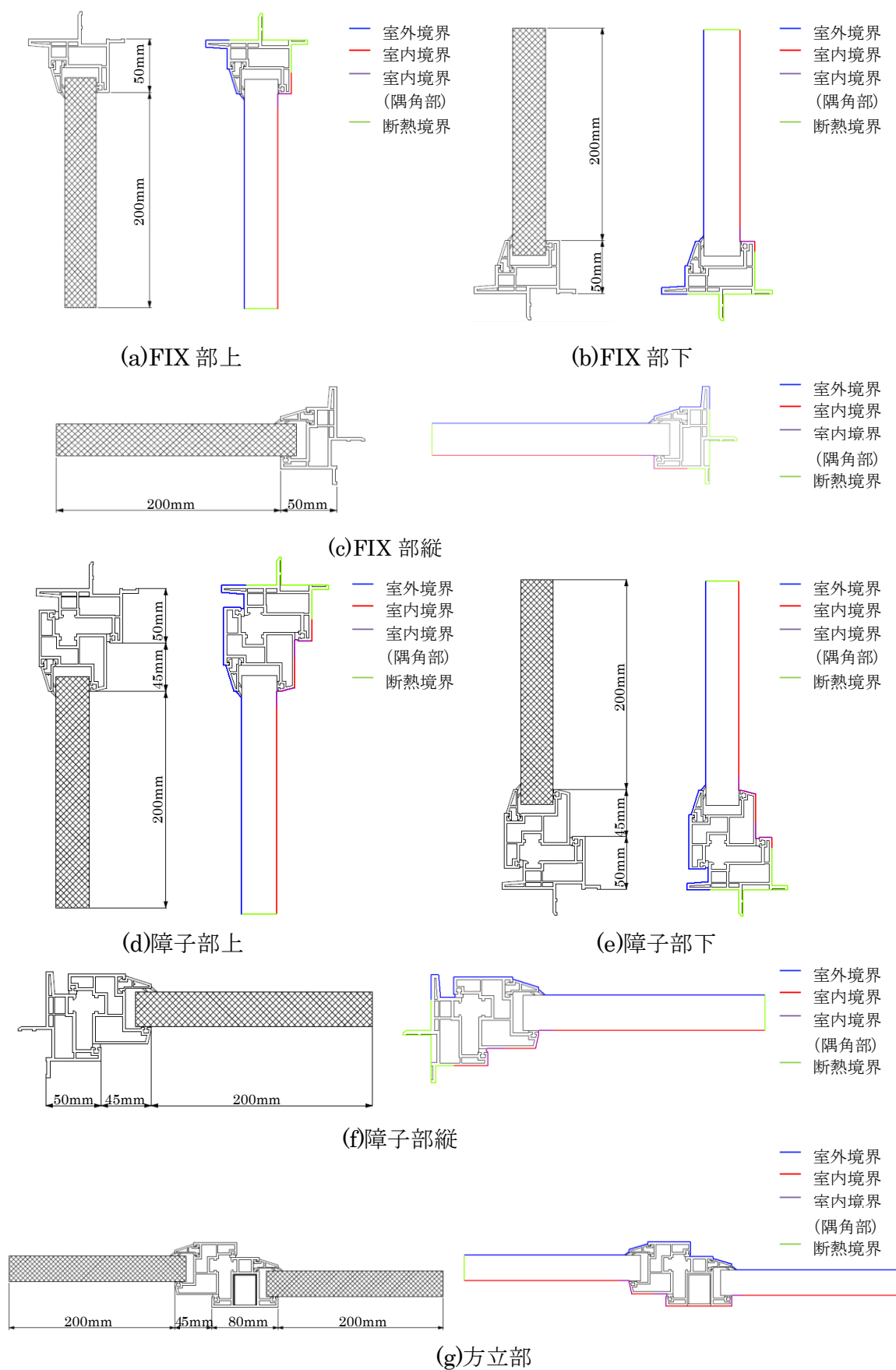


図 3-5 各部位のパネルモデル断面

制御因子と水準の一覧を表 3-3 に、各断面に適用した制御因子と水準を表 3-4 に、制御因子の概略図（制御因子 A、H は略した）を図 3-6 に示す。

表 3-3 制御因子と水準の一覧

制御因子	第 1 水準	第 2 水準	第 3 水準
A 気密材の熱伝導率 [W/(m・K)]	0.14 軟質PVC	0.04 TPO	
B 窓フレーム内部金属膜の放射率 [－]	無	0.3 アルミ塗料	0.05 銀メッキ
C 窓フレーム内部断熱材の熱伝導率 [W/(m・K)]	無	0.024 PUF	0.020 PF
D 窓フレーム外部断熱材の熱伝導率 [W/(m・K)]	無	0.024 PUF	0.020 PF
E エッジクリアランス寸法 [mm]	9	6	3
F キャビティ寸法 [mm]	15	12.5 (14.5)	10 (14)
G キャビティ部の分割	無	有	有 (ダミー)
H 方立補強材の熱伝導率 [W/(m・K)]	50 スチール	17 SUS	0.35 CFRP

表 3-4 各断面に適用した制御因子と水準

(a)障子部（上・下・縦）

制御因子	第 1 水準	第 2 水準	第 3 水準
A	0.14	0.04	
B	無	0.3	0.05
C	無	0.024	0.020
D	無	0.024	0.020
E	9	6	3
F	15	12.5 (14.5)	10 (14)
G	無	有	有 (ダミー)

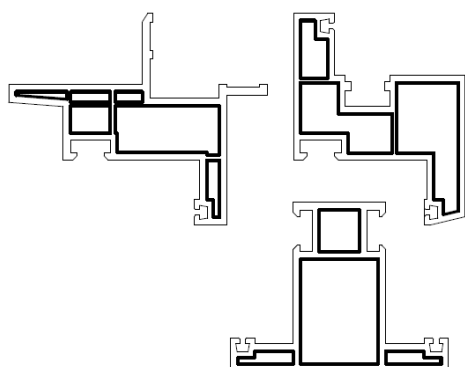
(b)方立部

制御因子	第 1 水準	第 2 水準	第 3 水準
A	0.14	0.04	
B	無	0.3	0.05
C	無	0.024	0.020
E	9	6	3
F	15	12.5	10
G	無	有	有 (ダミー)
H	50	17	0.35

(c)FIX 部（上・下・縦）

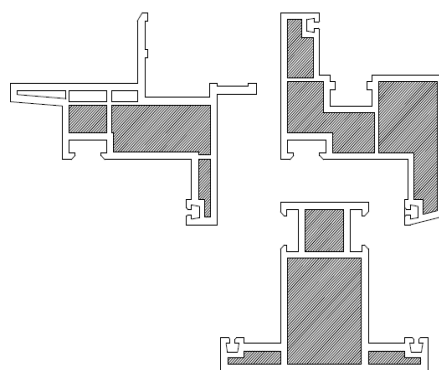
制御因子	第 1 水準	第 2 水準	第 3 水準
A	0.14	0.04	
B	無	0.3	0.05
C	無	0.024	0.020
D	無	0.024	0.020
E	9	6	3

※太線部は金属膜を示す。



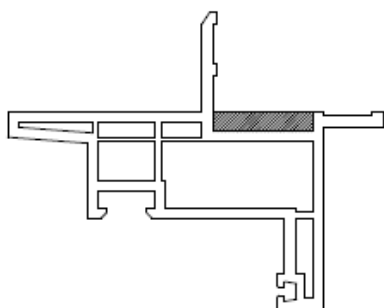
(a)制御因子 B

※斜線部は断熱材を示す。

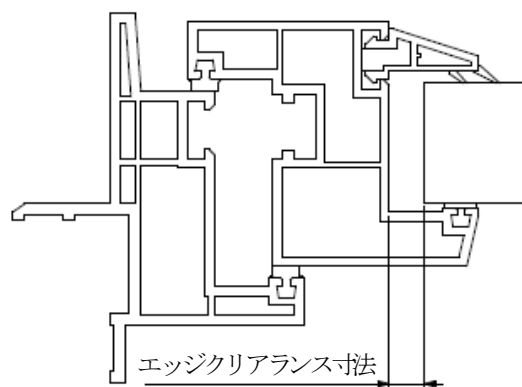


(b)制御因子 C

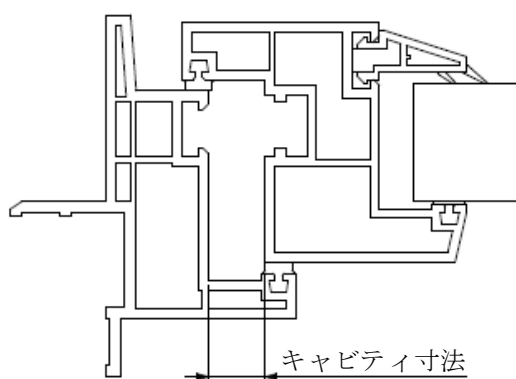
※斜線部は断熱材を示す。



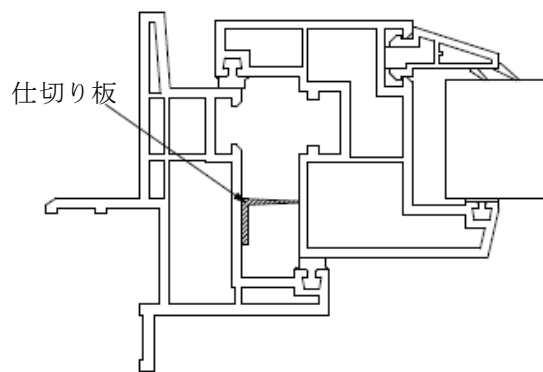
(c)制御因子 D



(d)制御因子 E



(e)制御因子 F



(f)制御因子 G

図 3-6 各制御因子の概略図

制御因子 A の「気密材の熱伝導率」は、既存品の枠・障子・方立には軟質 PVC を用いた気密材を設置している。気密・水密ラインを保つ重要な個所として耐久性・追随性に優れた材料を一般的には優先するため、軟質 PVC やクロロプレンゴムを用いることが多い。それら熱伝導率は窓フレーム（硬質 PVC）のそれと大きく変わらないが、改善の余地はあると考え、耐久性・追随性に優れ、なおかつ熱伝導率が極めて小さい独立発泡性オレフィン系熱可塑性エラストマー樹脂（Thermoplastic Olefinic Elastomer、以下 TPO という）を選択することによる断熱性能の向上をねらった。設置する気密材の熱伝導率は、軟質 PVC 相当（ $0.14 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ）、TPO 相当（ $0.04 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ）の 2 水準を設定した。

制御因子 B の「窓フレーム内部金属膜の放射率」は、後述する制御因子 C の窓フレーム断面内部に断熱材を充填することは断熱性向上のために効果的であると予測するものの、窓フレーム断面内部には断熱材を充填することが困難な細かな断面形状も存在する。そこで、断熱材充填以外の窓フレームの断熱性能向上の方策として、窓フレーム断面内部の空気層壁面に長波長放射率の低い金属膜を形成することによる放射伝熱の低減をねらった。なお、Gustavsen らの既往研究¹⁵⁾や Lechowska らの既往研究¹⁶⁾では、窓フレーム断面内部の空気層壁面に低い放射率を形成することが窓フレームの断熱性能向上に寄与すると示されている。放射率を低減する方法としては、塗料による方法とメッキによる方法が考えられる。一般に、遮熱塗料もしくは高反射塗料とは、日射のような短波に対して遮熱効果が高い、すなわち放射率が高い塗料のことを指しており、これらの塗料では長波の放射率の低減はあまり期待できない。通常の塗装を含めた建築材料の多くは放射率 0.9 程度である。放射率が低い塗料に関する JIS 規格はない。近い規格として JIS K5492¹⁷⁾（アルミニウムペイント）があり、これに適合するいくつかの商品が流通している。JIS K5492 では放射率に関する記述はないが、鏡面光沢度に関する規定があるために、放射率が低い可能性がある。ここでは JIS A2102-2 の表面種別による放射率の値を参考に、対象塗料の放射率を 0.3 程度と考えた。また、メッキによる方法として、光沢のある金属は一般的に放射率が低いことから、文献¹⁸⁾による銀の放射率 0.02 を参考に安全側に設定し、銀メッキの放射率を 0.05 と考えた。以上により、金属膜の放射率は、無、アルミニウム塗料相当（0.3）、銀メッキ相当（0.05）の 3 水準を設定した。

制御因子 C の「窓フレーム内部断熱材の熱伝導率」や制御因子 D の「窓フレーム外部断熱材の熱伝導率」は、窓フレーム断面内部や窓フレーム断面外部（枠と躯体の接合部分）の空気層に静止空気の熱伝導率相当（ $0.024 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ）、あるいはそれより小さい熱伝導率を保持する断熱材を隙間なく設置することによる対流伝熱の低減をねらった。設置する断熱材の熱伝導率は、無、硬質発泡ウレタンフォーム（Polyurethane Foam、以下 PUF という）相当（ $0.024 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ）、フェノールフォーム（Phenol Foam、以下 PF という）相当（ $0.020 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ）の 3 水準を設定した。なお、断熱材の設置が困難な個所は設置対象から外した。

制御因子 E の「エッジクリアランス寸法」や制御因子 F の「キャビティ寸法」は、当該部の寸法を最小化し空気層面積を縮小することによる対流伝熱の低減をねらった。最小化は雨仕舞いや開閉に支障をきたさない範囲とし、エッジクリアランス寸法は 9mm、6mm、3mm の 3 水準、キャビティ寸法は 15mm、12.5mm（障子部上下は 14.5mm）、10mm（障子部上下は 14mm）の 3 水準とした。

制御因子 G の「キャビティ部の分割」は、キャビティ部内に障子の開閉に支障をきたさない材質（軟質 PVC を選択した）の仕切り板を設置し、空気層を分割することによる対流伝熱の低減をねらった。仕切り板の設置位置はキャビティ部内に設置される吊金物や締り金物等に干渉しない位置とし、水準は 2 つ（無、有）とした。

制御因子 H の「方立補強材の熱伝導率」は、既存品の方立断面内部には図 3-3 で示したように剛性向上（主に耐風圧性能の確保）を目的としてスチール製の補強材が挿入されている。そのため、方立部はスチール製補強材の熱橋効果により他の部位と比べ断熱性能が大きく劣っている部位でもある。そこで、スチールよりも熱伝導率が小さく、剛性が同等のステンレス（以下 SUS という）ならびに炭素繊維入り強化樹脂（Carbon Fiber Reinforced Plastic、以下 CFRP という）を選択することによる断熱性能の向上をねらった。設置する方立補強材の熱伝導率は、スチール相当（50 W/(m・K)）、SUS 相当（17 W/(m・K)）、CFRP 相当（0.35 W/(m・K)）の 3 水準を設定した。

各制御因子の組合せが均等になるように制御因子と水準を L_{18} 直交表に割り付け、その組合せで各断面の Q_f を算出し、SN 比平均値と SN 比影響度を求める。各断面の L_{18} 直交表を表 3-5 に示す。

表 3-5 各断面の L_{18} 直交表

(a)障子部（上・下）

制御因子 ケース	A	B	C	D	E	F	G
1	0.14	無	無	無	9	15	無
2	0.14	無	0.024	0.024	6	14.5	有
3	0.14	無	0.020	0.020	3	14	有 (ダミー)
4	0.14	0.3	無	無	6	14.5	有 (ダミー)
5	0.14	0.3	0.024	0.024	3	14	無
6	0.14	0.3	0.020	0.020	9	15	有
7	0.14	0.05	無	0.024	9	14	有
8	0.14	0.05	0.024	0.020	6	15	有 (ダミー)
9	0.14	0.05	0.020	無	3	14.5	無
10	0.04	無	無	0.020	3	14.5	有
11	0.04	無	0.024	無	9	14	有 (ダミー)
12	0.04	無	0.020	0.024	6	15	無
13	0.04	0.3	無	0.024	3	15	有 (ダミー)
14	0.04	0.3	0.024	0.020	9	14.5	無
15	0.04	0.3	0.020	無	6	14	有
16	0.04	0.05	無	0.020	6	14	無
17	0.04	0.05	0.024	無	3	15	有
18	0.04	0.05	0.020	0.024	9	14.5	有 (ダミー)

表 3-5 各断面の L₁₈直交表

(b)障子部 (縦)

制御因子 ケース	A	B	C	D	E	F	G
1	0.14	無	無	無	9	15	無
2	0.14	無	0.024	0.024	6	12.5	有
3	0.14	無	0.020	0.020	3	10	有 (ダミー)
4	0.14	0.3	無	無	6	12.5	有 (ダミー)
5	0.14	0.3	0.024	0.024	3	10	無
6	0.14	0.3	0.020	0.020	9	15	有
7	0.14	0.05	無	0.024	9	10	有
8	0.14	0.05	0.024	0.020	6	15	有 (ダミー)
9	0.14	0.05	0.020	無	3	12.5	無
10	0.04	無	無	0.020	3	12.5	有
11	0.04	無	0.024	無	9	10	有 (ダミー)
12	0.04	無	0.020	0.024	6	15	無
13	0.04	0.3	無	0.024	3	15	有 (ダミー)
14	0.04	0.3	0.024	0.020	9	12.5	無
15	0.04	0.3	0.020	無	6	10	有
16	0.04	0.05	無	0.020	6	10	無
17	0.04	0.05	0.024	無	3	15	有
18	0.04	0.05	0.020	0.024	9	12.5	有 (ダミー)

表 3-5 各断面の L₁₈直交表

(c)方立部

制御因子 ケース	A	B	C	E	F	G	H
1	0.14	無	無	9	15	無	50
2	0.14	無	0.024	6	12.5	有	17
3	0.14	無	0.020	3	10	有 (ダミー)	0.35
4	0.14	0.3	無	9	12.5	有	0.35
5	0.14	0.3	0.024	6	10	有 (ダミー)	50
6	0.14	0.3	0.020	3	15	無	17
7	0.14	0.05	無	6	15	有 (ダミー)	17
8	0.14	0.05	0.024	3	12.5	無	0.35
9	0.14	0.05	0.020	9	10	有	50
10	0.04	無	無	3	10	有	17
11	0.04	無	0.024	9	15	有 (ダミー)	0.35
12	0.04	無	0.020	6	12.5	無	50
13	0.04	0.3	無	6	10	無	0.35
14	0.04	0.3	0.024	3	15	有	50
15	0.04	0.3	0.020	9	12.5	有 (ダミー)	17
16	0.04	0.05	無	3	12.5	有 (ダミー)	50
17	0.04	0.05	0.024	9	10	無	17
18	0.04	0.05	0.020	6	15	有	0.35

表 3-5 各断面の L₁₈直交表

(d)FIX 部 (上・下・縦)

制御因子 ケース	A	B	C	D	E
1	0.14	無	無	無	9
2	0.14	無	0.024	0.024	6
3	0.14	無	0.020	0.020	3
4	0.14	0.3	無	無	6
5	0.14	0.3	0.024	0.024	3
6	0.14	0.3	0.020	0.020	9
7	0.14	0.05	無	0.024	9
8	0.14	0.05	0.024	0.020	6
9	0.14	0.05	0.020	無	3
10	0.04	無	無	0.020	3
11	0.04	無	0.024	無	9
12	0.04	無	0.020	0.024	6
13	0.04	0.3	無	0.024	3
14	0.04	0.3	0.024	0.020	9
15	0.04	0.3	0.020	無	6
16	0.04	0.05	無	0.020	6
17	0.04	0.05	0.024	無	3
18	0.04	0.05	0.020	0.024	9

SN 比平均値を比較することで、各断面の Q_f 低減に寄与する制御因子の水準が把握できる。SN 比平均値が最大となる制御因子の水準の組合せが Q_f を最小にする。また、SN 比影響度を比較することで各制御因子の水準を変更した際の Q_f への影響度合い（序列）が把握できる。SN 比影響度は SN 比平均値の最大値と最小値の差から求める。なお、品質工学における SN 比は一般に「ばらつきの尺度（SN 比が大きい＝ばらつきが小さい）」を表すが、本節では通過熱流量を最も小さくする構成を示すことを目的としている。そのため、本論における SN 比は望小特性を表わし、SN 比 (η_{Q_f}) の算出は式 3-1 を用いる。

$$\eta_{Q_f} = 10 \log(1/Q_f^2) \quad \cdots \text{式 3-1}$$

また、各断面の SN 比平均値 ($Ave\eta_{Q_f}$) の算出は式 3-2～式 3-55 を用いる。

障子部の $Ave\eta_{Q_f}$ 算出式

制御因子 A

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第1水準}) = \sum_{n=1}^9 \eta_{Q_{f_n}} / 9 \cdots \text{式 3-2}$$

制御因子 B

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第1水準}) = \left(\sum_{n=1}^3 \eta_{Q_{f_n}} + \sum_{n=10}^{12} \eta_{Q_{f_n}} \right) / 6 \cdots \text{式 3-4}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第2水準}) = \sum_{n=10}^{18} \eta_{Q_{f_n}} / 9 \cdots \text{式 3-3}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第2水準}) = \left(\sum_{n=4}^6 \eta_{Q_{f_n}} + \sum_{n=13}^{15} \eta_{Q_{f_n}} \right) / 6 \cdots \text{式 3-5}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第3水準}) = \left(\sum_{n=7}^9 \eta_{Q_{f_n}} + \sum_{n=16}^{18} \eta_{Q_{f_n}} \right) / 6 \cdots \text{式 3-6}$$

制御因子 C

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第1水準}) = (\eta_{Q_{f_1}} + \eta_{Q_{f_4}} + \eta_{Q_{f_7}} + \eta_{Q_{f_{10}}} + \eta_{Q_{f_{13}}} + \eta_{Q_{f_{16}}}) / 6 \cdots \text{式 3-7}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第2水準}) = (\eta_{Q_{f_2}} + \eta_{Q_{f_5}} + \eta_{Q_{f_8}} + \eta_{Q_{f_{11}}} + \eta_{Q_{f_{14}}} + \eta_{Q_{f_{17}}}) / 6 \cdots \text{式 3-8}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第3水準}) = (\eta_{Q_{f_3}} + \eta_{Q_{f_6}} + \eta_{Q_{f_9}} + \eta_{Q_{f_{12}}} + \eta_{Q_{f_{15}}} + \eta_{Q_{f_{18}}}) / 6 \cdots \text{式 3-9}$$

制御因子 D

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第1水準}) = (\eta_{Q_{f_1}} + \eta_{Q_{f_4}} + \eta_{Q_{f_9}} + \eta_{Q_{f_{11}}} + \eta_{Q_{f_{15}}} + \eta_{Q_{f_{17}}}) / 6 \cdots \text{式 3-10}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第2水準}) = (\eta_{Q_{f_2}} + \eta_{Q_{f_5}} + \eta_{Q_{f_7}} + \eta_{Q_{f_{12}}} + \eta_{Q_{f_{13}}} + \eta_{Q_{f_{18}}}) / 6 \cdots \text{式 3-11}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第3水準}) = (\eta_{Q_{f_3}} + \eta_{Q_{f_6}} + \eta_{Q_{f_8}} + \eta_{Q_{f_{10}}} + \eta_{Q_{f_{14}}} + \eta_{Q_{f_{16}}}) / 6 \cdots \text{式 3-12}$$

制御因子 E

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第1水準}) = (\eta_{Q_{f_1}} + \eta_{Q_{f_6}} + \eta_{Q_{f_7}} + \eta_{Q_{f_{11}}} + \eta_{Q_{f_{14}}} + \eta_{Q_{f_{18}}}) / 6 \cdots \text{式 3-13}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第2水準}) = (\eta_{Q_{f_2}} + \eta_{Q_{f_4}} + \eta_{Q_{f_8}} + \eta_{Q_{f_{12}}} + \eta_{Q_{f_{15}}} + \eta_{Q_{f_{16}}}) / 6 \cdots \text{式 3-14}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第3水準}) = (\eta_{Q_{f_3}} + \eta_{Q_{f_5}} + \eta_{Q_{f_9}} + \eta_{Q_{f_{10}}} + \eta_{Q_{f_{13}}} + \eta_{Q_{f_{17}}}) / 6 \cdots \text{式 3-15}$$

制御因子 F

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第1水準}) = (\eta_{Q_{f_1}} + \eta_{Q_{f_6}} + \eta_{Q_{f_8}} + \eta_{Q_{f_{12}}} + \eta_{Q_{f_{13}}} + \eta_{Q_{f_{17}}}) / 6 \cdots \text{式 3-16}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第2水準}) = (\eta_{Q_{f_2}} + \eta_{Q_{f_4}} + \eta_{Q_{f_9}} + \eta_{Q_{f_{10}}} + \eta_{Q_{f_{14}}} + \eta_{Q_{f_{18}}}) / 6 \cdots \text{式 3-17}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第3水準}) = (\eta_{Q_{f_3}} + \eta_{Q_{f_5}} + \eta_{Q_{f_7}} + \eta_{Q_{f_{11}}} + \eta_{Q_{f_{15}}} + \eta_{Q_{f_{16}}}) / 6 \cdots \text{式 3-18}$$

制御因子 G

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第1水準}) = (\eta_{Q_{f_1}} + \eta_{Q_{f_5}} + \eta_{Q_{f_9}} + \eta_{Q_{f_{12}}} + \eta_{Q_{f_{14}}} + \eta_{Q_{f_{16}}}) / 6 \cdots \text{式 3-19}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第2水準}) = (\eta_{Q_{f_2}} + \eta_{Q_{f_6}} + \eta_{Q_{f_7}} + \eta_{Q_{f_{10}}} + \eta_{Q_{f_{15}}} + \eta_{Q_{f_{17}}}) / 6 \cdots \text{式 3-20}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第3水準}) = (\eta_{Q_{f_3}} + \eta_{Q_{f_4}} + \eta_{Q_{f_8}} + \eta_{Q_{f_{11}}} + \eta_{Q_{f_{13}}} + \eta_{Q_{f_{18}}}) / 6 \cdots \text{式 3-21}$$

方立部の $Ave\eta_{Q_f}$ 算出式

制御因子 A

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第1水準}) = \sum_{n=1}^9 \eta_{Q_{f_n}} / 9 \cdots \text{式 3-22}$$

制御因子 B

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第1水準}) = \left(\sum_{n=1}^3 \eta_{Q_{f_n}} + \sum_{n=10}^{12} \eta_{Q_{f_n}} \right) / 6 \cdots \text{式 3-24}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第2水準}) = \sum_{n=10}^{18} \eta_{Q_{f_n}} / 9 \cdots \text{式 3-23}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第2水準}) = \left(\sum_{n=4}^6 \eta_{Q_{f_n}} + \sum_{n=13}^{15} \eta_{Q_{f_n}} \right) / 6 \cdots \text{式 3-25}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第3水準}) = \left(\sum_{n=7}^9 \eta_{Q_{f_n}} + \sum_{n=16}^{18} \eta_{Q_{f_n}} \right) / 6 \cdots \text{式 3-26}$$

制御因子 C

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第1水準}) = (\eta_{Q_{f_1}} + \eta_{Q_{f_4}} + \eta_{Q_{f_7}} + \eta_{Q_{f_{10}}} + \eta_{Q_{f_{13}}} + \eta_{Q_{f_{16}}}) / 6 \cdots \text{式 3-27}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第2水準}) = (\eta_{Q_{f_2}} + \eta_{Q_{f_5}} + \eta_{Q_{f_8}} + \eta_{Q_{f_{11}}} + \eta_{Q_{f_{14}}} + \eta_{Q_{f_{17}}}) / 6 \cdots \text{式 3-28}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第3水準}) = (\eta_{Q_{f_3}} + \eta_{Q_{f_6}} + \eta_{Q_{f_9}} + \eta_{Q_{f_{12}}} + \eta_{Q_{f_{15}}} + \eta_{Q_{f_{18}}}) / 6 \cdots \text{式 3-29}$$

制御因子 E

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第1水準}) = (\eta_{Q_{f_1}} + \eta_{Q_{f_4}} + \eta_{Q_{f_9}} + \eta_{Q_{f_{11}}} + \eta_{Q_{f_{15}}} + \eta_{Q_{f_{17}}}) / 6 \cdots \text{式 3-30}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第2水準}) = (\eta_{Q_{f_2}} + \eta_{Q_{f_5}} + \eta_{Q_{f_7}} + \eta_{Q_{f_{12}}} + \eta_{Q_{f_{13}}} + \eta_{Q_{f_{18}}}) / 6 \cdots \text{式 3-31}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第3水準}) = (\eta_{Q_{f_3}} + \eta_{Q_{f_6}} + \eta_{Q_{f_8}} + \eta_{Q_{f_{10}}} + \eta_{Q_{f_{14}}} + \eta_{Q_{f_{16}}}) / 6 \cdots \text{式 3-32}$$

制御因子 F

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第1水準}) = (\eta_{Q_{f_1}} + \eta_{Q_{f_6}} + \eta_{Q_{f_7}} + \eta_{Q_{f_{11}}} + \eta_{Q_{f_{14}}} + \eta_{Q_{f_{18}}}) / 6 \cdots \text{式 3-33}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第2水準}) = (\eta_{Q_{f_2}} + \eta_{Q_{f_4}} + \eta_{Q_{f_8}} + \eta_{Q_{f_{12}}} + \eta_{Q_{f_{15}}} + \eta_{Q_{f_{16}}}) / 6 \cdots \text{式 3-34}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第3水準}) = (\eta_{Q_{f_3}} + \eta_{Q_{f_5}} + \eta_{Q_{f_9}} + \eta_{Q_{f_{10}}} + \eta_{Q_{f_{13}}} + \eta_{Q_{f_{17}}}) / 6 \cdots \text{式 3-35}$$

制御因子 G

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第1水準}) = (\eta_{Q_{f_1}} + \eta_{Q_{f_6}} + \eta_{Q_{f_8}} + \eta_{Q_{f_{12}}} + \eta_{Q_{f_{13}}} + \eta_{Q_{f_{17}}}) / 6 \cdots \text{式 3-36}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第2水準}) = (\eta_{Q_{f_2}} + \eta_{Q_{f_4}} + \eta_{Q_{f_9}} + \eta_{Q_{f_{10}}} + \eta_{Q_{f_{14}}} + \eta_{Q_{f_{18}}}) / 6 \cdots \text{式 3-37}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第3水準}) = (\eta_{Q_{f_3}} + \eta_{Q_{f_5}} + \eta_{Q_{f_7}} + \eta_{Q_{f_{11}}} + \eta_{Q_{f_{15}}} + \eta_{Q_{f_{16}}}) / 6 \cdots \text{式 3-38}$$

制御因子 H

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第1水準}) = (\eta_{Q_{f_1}} + \eta_{Q_{f_5}} + \eta_{Q_{f_9}} + \eta_{Q_{f_{12}}} + \eta_{Q_{f_{14}}} + \eta_{Q_{f_{16}}}) / 6 \cdots \text{式 3-39}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第2水準}) = (\eta_{Q_{f_2}} + \eta_{Q_{f_6}} + \eta_{Q_{f_7}} + \eta_{Q_{f_{10}}} + \eta_{Q_{f_{15}}} + \eta_{Q_{f_{17}}}) / 6 \cdots \text{式 3-40}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第3水準}) = (\eta_{Q_{f_3}} + \eta_{Q_{f_4}} + \eta_{Q_{f_8}} + \eta_{Q_{f_{11}}} + \eta_{Q_{f_{13}}} + \eta_{Q_{f_{18}}}) / 6 \cdots \text{式 3-41}$$

FIX 部の $Ave\eta_{Q_f}$ 算出式

制御因子 A

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第1水準}) = \sum_{n=1}^9 \eta_{Q_{f_n}} / 9 \quad \cdots \text{式 3-42}$$

制御因子 B

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第1水準}) = \left(\sum_{n=1}^3 \eta_{Q_{f_n}} + \sum_{n=10}^{12} \eta_{Q_{f_n}} \right) / 6 \quad \cdots \text{式 3-44}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第2水準}) = \sum_{n=10}^{18} \eta_{Q_{f_n}} / 9 \quad \cdots \text{式 3-43}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第2水準}) = \left(\sum_{n=4}^6 \eta_{Q_{f_n}} + \sum_{n=13}^{15} \eta_{Q_{f_n}} \right) / 6 \quad \cdots \text{式 3-45}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第3水準}) = \left(\sum_{n=7}^9 \eta_{Q_{f_n}} + \sum_{n=16}^{18} \eta_{Q_{f_n}} \right) / 6 \quad \cdots \text{式 3-46}$$

制御因子 C

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第1水準}) = (\eta_{Q_{f_1}} + \eta_{Q_{f_4}} + \eta_{Q_{f_7}} + \eta_{Q_{f_{10}}} + \eta_{Q_{f_{13}}} + \eta_{Q_{f_{16}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 3-47}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第2水準}) = (\eta_{Q_{f_2}} + \eta_{Q_{f_5}} + \eta_{Q_{f_8}} + \eta_{Q_{f_{11}}} + \eta_{Q_{f_{14}}} + \eta_{Q_{f_{17}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 3-48}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第3水準}) = (\eta_{Q_{f_3}} + \eta_{Q_{f_6}} + \eta_{Q_{f_9}} + \eta_{Q_{f_{12}}} + \eta_{Q_{f_{15}}} + \eta_{Q_{f_{18}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 3-49}$$

制御因子 D

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第1水準}) = (\eta_{Q_{f_1}} + \eta_{Q_{f_4}} + \eta_{Q_{f_9}} + \eta_{Q_{f_{11}}} + \eta_{Q_{f_{15}}} + \eta_{Q_{f_{17}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 3-50}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第2水準}) = (\eta_{Q_{f_2}} + \eta_{Q_{f_5}} + \eta_{Q_{f_7}} + \eta_{Q_{f_{12}}} + \eta_{Q_{f_{13}}} + \eta_{Q_{f_{18}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 3-51}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第3水準}) = (\eta_{Q_{f_3}} + \eta_{Q_{f_6}} + \eta_{Q_{f_8}} + \eta_{Q_{f_{10}}} + \eta_{Q_{f_{14}}} + \eta_{Q_{f_{16}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 3-52}$$

制御因子 E

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第1水準}) = (\eta_{Q_{f_1}} + \eta_{Q_{f_6}} + \eta_{Q_{f_7}} + \eta_{Q_{f_{11}}} + \eta_{Q_{f_{14}}} + \eta_{Q_{f_{18}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 3-53}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第2水準}) = (\eta_{Q_{f_2}} + \eta_{Q_{f_4}} + \eta_{Q_{f_8}} + \eta_{Q_{f_{12}}} + \eta_{Q_{f_{15}}} + \eta_{Q_{f_{16}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 3-54}$$

$$Ave\eta_{Q_f}(\text{第3水準}) = (\eta_{Q_{f_3}} + \eta_{Q_{f_5}} + \eta_{Q_{f_9}} + \eta_{Q_{f_{10}}} + \eta_{Q_{f_{13}}} + \eta_{Q_{f_{17}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 3-55}$$

3.2.1-2 各断面の Q_f 計算結果

各断面の Q_f 計算結果を表 3-6 に示す。ケース 1 は制御因子の第 1 水準からなる組合せであり、既存品の Q_f を示す。表から、全ての断面に共通してケース 1 の数値が最も大きいことが確認できる。ケース 1 以外は、制御因子の第 2 水準あるいは第 3 水準が必ず含まれる組合せであり、数値の大小は見られるが全てケース 1 より小さい値を示していることから、少なくとも各断面に設定した制御因子の第 2 水準以上を選択すれば Q_f を低減できることがわかる。また、制御因子 A、B 以外は全て第 3 水準の組合せであるケース 3 の数値が、全ての断面に共通して最も小さいことが確認できる。ケース 3 の制御因子 A、B はいずれも第 1 水準であることから、それら水準を変更することでさらに Q_f を低減できる可能性がある。ケース 1 とケース 3 の差は、ケース 1 を 100% とした場合、ケース 3 は概ね障子部で 80～82%、FIX 部で 90～94%、方立部で 78% 程度となった。次に、 $Aven\eta_{Qf}$ を用いて Q_f に対する各制御因子の関係を評価した。

表 3-6 各断面の Q_f 計算結果[W/m]

断面部位 ケース	障子部			方立部	FIX 部		
	上	下	縦		上	下	縦
1	5.96	5.79	5.93	11.28	4.34	4.14	4.50
2	4.98	4.88	4.94	9.97	4.08	3.97	4.15
3	4.85	4.76	4.75	8.83	4.00	3.91	4.07
4	5.43	5.29	5.28	9.44	4.20	4.04	4.32
5	5.04	4.92	4.91	9.93	4.02	3.92	4.09
6	5.01	4.91	5.01	10.03	4.14	4.02	4.20
7	5.36	5.24	5.09	10.49	4.22	4.06	4.32
8	4.99	4.89	5.01	9.11	4.08	3.97	4.14
9	5.01	4.89	4.96	9.95	4.01	3.92	4.08
10	5.60	5.40	5.53	10.46	4.21	4.04	4.37
11	4.99	4.90	4.89	9.26	4.15	4.03	4.23
12	5.04	4.93	5.06	10.03	4.06	3.96	4.13
13	5.31	5.20	5.25	9.31	4.13	3.99	4.25
14	5.15	5.03	5.08	10.07	4.15	4.02	4.21
15	4.86	4.77	4.77	9.94	4.07	3.96	4.14
16	5.37	5.23	5.09	10.28	4.14	4.01	4.25
17	4.89	4.80	4.93	10.00	4.02	3.92	4.10
18	4.94	4.85	4.89	9.11	4.13	4.01	4.19

3.2.1-3 最適条件の導出

各断面の制御因子毎の水準と $Aven_{Q_f}$ を図 3-7 に、SN 比影響度を図 3-8 に示す。図 3-7 中で囲った各制御因子の水準の組合せが最も Q_f を小さくする。図 3-7 から、全ての断面に共通して制御因子の水準が上がるにつれ $Aven_{Q_f}$ が上昇していることがわかる。つまり、キャビティ部内の空気層を分断する仕切り板を設置しつつ、気密材や方立補強材の熱伝導率が小さいほど、窓フレーム断面内部の空気層壁面に形成する金属膜の長波長放射率が低いほど、窓フレーム断面内部や窓フレーム断面外部の空気層に隙間なく設置する断熱材の熱伝導率が小さいほど、エッジクリアランス寸法やキャビティ寸法が小さいほど、 Q_f の低減につながることを意味している。

次に、図 3-8 から SN 比影響度が最も大きかった Q_f 低減に寄与する制御因子に着目すると、障子部は上・下・縦に共通して制御因子 C（窓フレーム内部断熱材の熱伝導率）が最も効果的であった。FIX 部についてもほぼ同様の傾向を示しているが、下のみ制御因子 E（エッジクリアランス寸法）の SN 比影響度が大きかった。これは、下の室内側断熱境界（伝熱開口寸法の押えから 40mm）が上（30mm）、縦（20mm）のそれよりも広く、窓フレーム部の熱流範囲が狭くなっていることが影響していると推察する。しかしながら制御因子 C 下と制御因子 E 下の SN 比影響度の差は非常にわずかであることから、障子部とほぼ同等の傾向と位置付けた。方立部は制御因子 H（方立補強材の熱伝導率）が最も効果的であった。これは、スチールと CFRP の熱伝導率の差（CFRP の熱伝導率はスチールの約 143 分の 1）が突出して大きいことが影響していると考えられる。なお、補強材の熱伝導率が SUS 相当では SN 比影響度が 0.1db 程度となり、その場合制御因子 C が最も効果的となる。

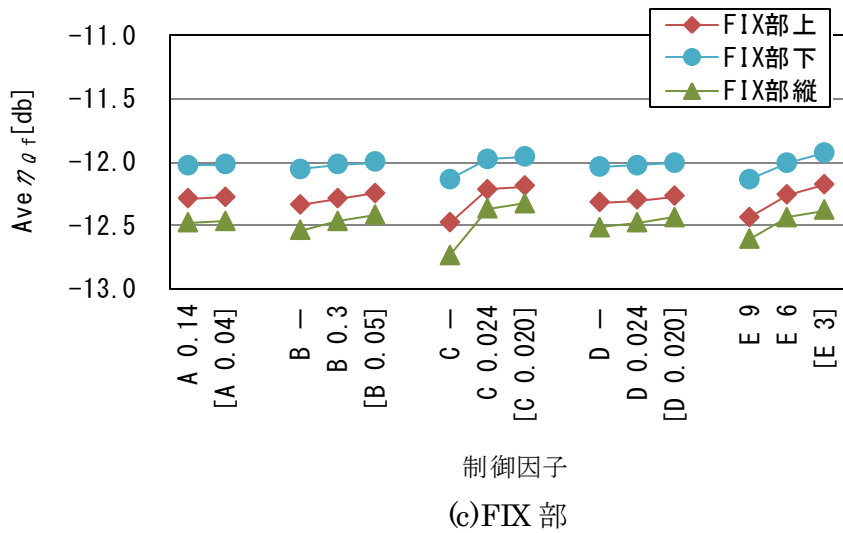
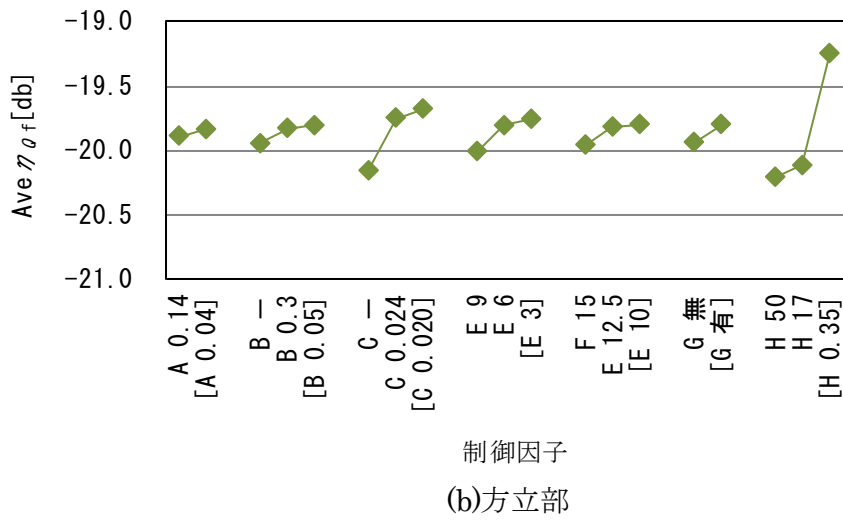
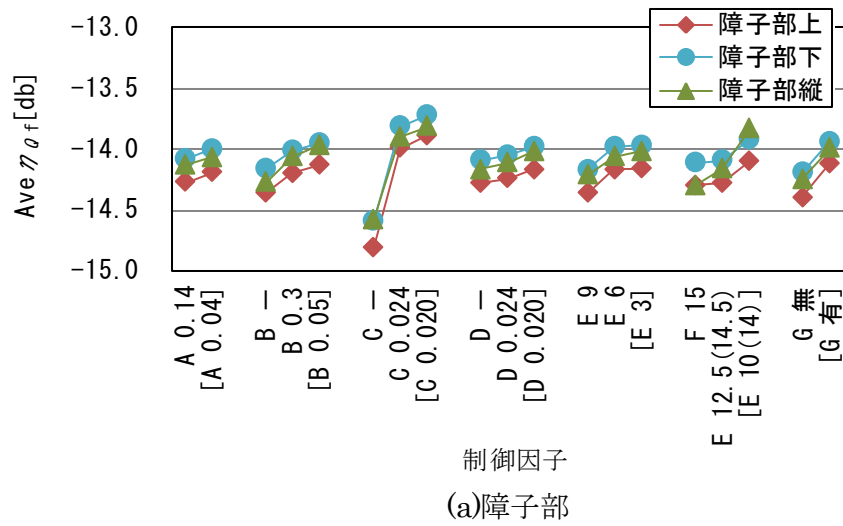


図 3-7 各断面の制御因子毎の水準と $Ave\eta_{Qf}$

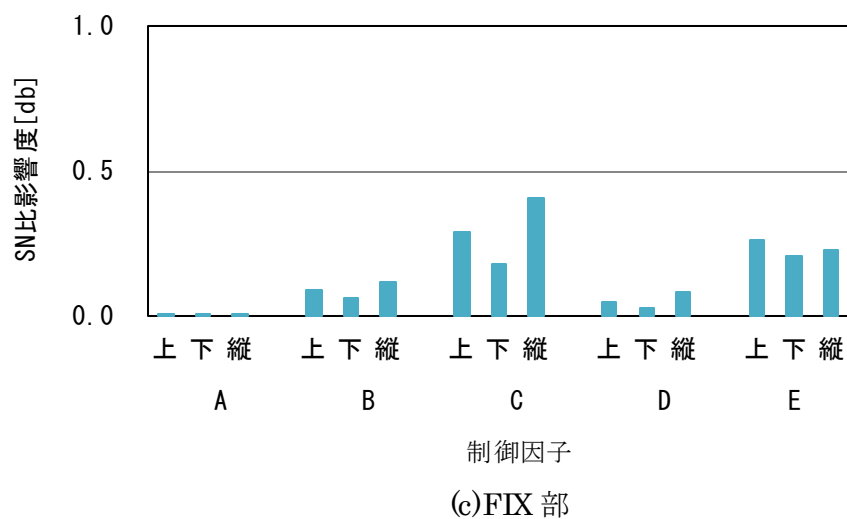
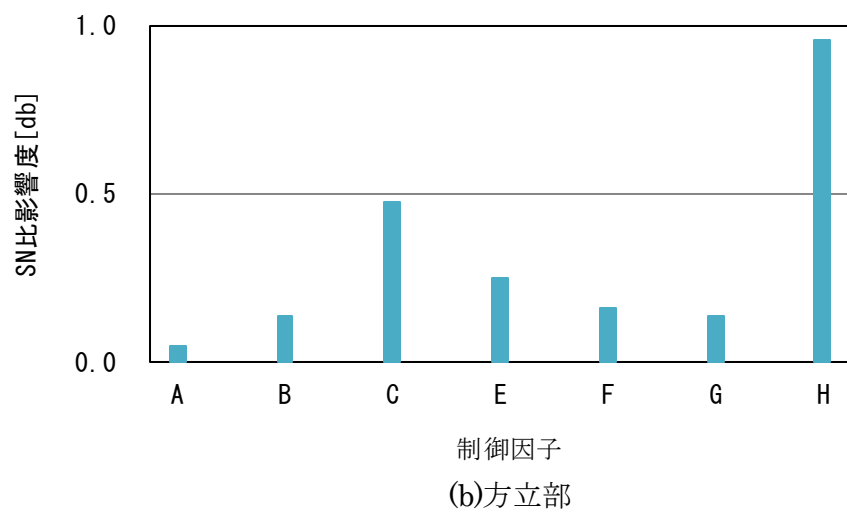
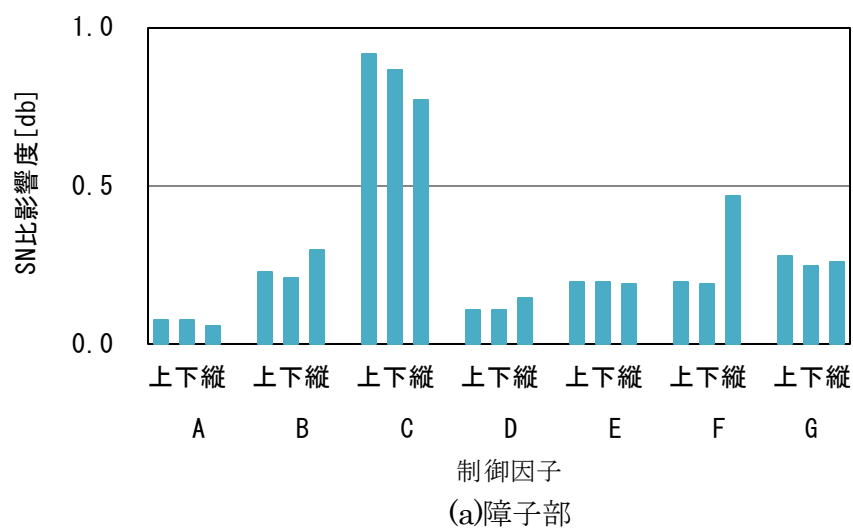


図 3-8 SN 比影響度

3.2.1-4 Q_f 低減効果の検証

最適条件と既存品（表 3-6 のケース 1）における各断面の Q_f と既存品からの低減率を表 3-7 に示す。最適条件は表 3-6 のケース 3 の制御因子 A を第 2 水準に、制御因子 B を第 3 水準とした仕様となる。全ての断面でケース 3 よりも小さい値を示したことから、最適条件としての妥当性が得られた。なお、方立部は他の断面と比べケース 3 からの数値の変化が乏しいが、このような結果になった理由として、方立部は断熱材が未設置の中空部が存在しないため金属膜の効果が表れず、気密材の物性変更による効果にとどまったことが要因として考えられる。

表 3-7 最適条件の Q_f 計算結果[W/m]

条件	障子部			方立部	FIX 部		
	上	下	縦		上	下	縦
最適	4.80	4.71	4.70	8.82	3.96	3.88	4.03
既存	5.96	5.79	5.93	11.28	4.34	4.14	4.50
低減率[%]	20	19	21	22	9	6	10

3.2.2 ガラス中央部の高断熱化

3.2.2-1 検討概要

ガラス中央部の高断熱化への寄与が想定される要素技術として、複層ガラスの中空層へ可視光透過低放射フィルム（Low Emission Film、以下 Low-E フィルムという）を挿入した仕様について検討を行った。Low-E 膜、ガス入り中空層を最適な厚みで設計しても 1 つのガス層での断熱性能には限界があり、その値を上回るには空間を複数に仕切る必要がある。ガラスは厚みを持つため、限られた厚みでの設計では、ガラスの厚み×分断数の厚みだけ中空層が減るが、フィルムの場合にはほぼ厚みがないため、中空層を減らすことなく設計が可能である。また、フィルムは重量もほとんどないため、ガラス構成の変更によって窓の構造を見直す等の影響がなく、4 層複層ガラスや 5 層複層ガラスに相当する構成を実現できるというメリットに着眼した。

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

- ・ Low-E 膜の効果と配置の最適化
- ・ ガス種別の気体熱伝達と中空層の厚みの関係から、ガスに合わせた最適厚みの推察
- ・ 最適なガラス中央部構成の提案

3.2.2-2 ガラス中央部熱貫流率の計算方法

ガラス中央部の熱貫流率 (U_g) は、一般には JIS R3107¹⁹⁾「板ガラス類の熱抵抗および建築における熱貫流率の算定方法」に従って計算される。一方で、JIS R3107 は ISO 10291²⁰⁾がベースとなっており、国際的に計算方法として主流となっている ISO 15099²¹⁾より古い方式であるため、多層構造のシミュレーション方法が概念的にしか示されていないほか、ガス物性値なども簡易計算方式のため ISO15099 とは数値計算の結果が異なる傾向がみられる。

本節では ISO 15099 に従った手順・算定式を用い、JIS R3107 の境界条件を採用することによって U_g の算出を行った。

U_g は式 3-56 で求められる。JIS R3107 による計算時の境界条件は表 3-8 の通りである。

$$U_g = \left(\frac{1}{h_{\text{out}}} + \sum_{i=2}^n R_i + \sum_{i=1}^n R_{g,i} + \frac{1}{h_{\text{in}}} \right)^{-1} \quad \cdots \text{式 3-56}$$

ここで

$$R_{g,i} = \frac{t_{g,i}}{\lambda_{g,i}} \quad \cdots \text{式 3-57}$$

$$R_i = \frac{T_{f,i} - T_{b,i-1}}{q_i} \quad \cdots \text{式 3-58}$$

表 3-8 JIS R3107 による計算時の境界条件

環境条件		
雰囲気温度[°C]	室外側	20
	室内側	0
表面熱伝達率 [W/(m ² ・K)]	室外側[h_{out}]	$4.9 \times \varepsilon_e + 16.3$
	室内側[h_{in}]	$5.4 \times \varepsilon_i + 4.1$

複層ガラスの熱抵抗は中空層の熱抵抗の和と固体（板ガラスやフィルム）の熱抵抗の和によって求められ、その値に室外および室内の表面伝達抵抗を加算し逆数とした値がガラス中央部の熱貫流率 U_g となる。固体部の熱抵抗は材料各々について、厚みを熱伝導率で除して求めた熱抵抗を積算した値となり、中空層の熱コンダクタンス（熱抵抗の逆数）は、ステファンボルツマン則によって求めた放射成分と、中空層に封入されるガスの特性値と厚みおよび対流効果を考慮して求めた対流成分の値を積算した値となる。

3.2.2-3 Low-E 膜の効果と配置の最適化

放射熱コンダクタンス (h_r) は式 3-59 によって求められるが、垂直設置され、熱流方向が複層ガラスの厚み方向である場合、中空層の厚み (d) に対してガラス高さ (H) が十分に大きい場合には、式 3-60 に置き換えることができる。

$$h_r = \frac{4\sigma T_m^3}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 2 + \frac{1}{2} \left\{ \left[1 + \left(\frac{d}{H} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{d}{H} + 1 \right\}} \quad \dots \text{式 3-59}$$

$$h_r = 4\sigma \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1} T_m^3 \quad \dots \text{式 3-60}$$

一般的なフロートガラス (Low-E 膜無し) の修正放射率 (ε_g) と Low-E フィルムの修正放射率 (ε_f) を用いて、式 3-60 に基づき h_r を算出した。算出結果を表 3-9 に示す。

表 3-9 h_r 算出結果 [$W/(m^2 \cdot K)$]

	放射熱伝達率 (h_r) [$W/(m^2 \cdot K)$]	
	$\varepsilon_g=0.837$	$\varepsilon_f=0.045$
$\varepsilon_g=0.837$	3.68	0.23
$\varepsilon_f=0.045$	0.23	0.12

表 3-9 から、ガラスに対して Low-E 膜の 1 枚設置で 94% 低減できるのに対して、2 枚使用しても 97% の低減と Low-E 膜 1 枚分追加したことに見合った効果は得られないことがわかる。また、Low-E 膜は透明であるが、Low-E 膜無しのガラスもしくは PET フィルムと比較すると反射が高く、着色もあるため、視野性や日射特性等を考慮すると、1 つの中空層に対して Low-E 膜は 1 つとする方が効率的である。なお、Low-E 膜は一般に材料の片面にコーティングされることが多く、多層化する場合には全ての面に Low-E 膜を配置することは非常に困難かつコストが増加することを考慮し、1 層あたり 1 つの Low-E 膜が現実的である。

3.2.2-4 充填ガス別厚みの最適化

気体熱コンダクタンス (h_c) は式 3-61 によって求められる。

$$h_c = N_u \cdot \frac{\lambda_{\text{gas}}}{d_{\text{gas}}} \quad \cdots \text{式 3-61}$$

ここで、ヌセルト数 (N_u) は対流の程度を示す無次元数で、レイリー数 (R_a) の大きさに応じて式 3-62～式 3-64 のいずれかおよび式 3-65 の計算を行い、大きい値を採用する。

$R_a \leq 10^4$ の時

$$N_u = 1 + 1.766 \cdot 10^{-10} \cdot R_a^{2.2985} \quad \cdots \text{式 3-62}$$

$10 < R_a \leq 5 \cdot 10^4$ の時

$$N_u = 0.028154 \cdot R_a^{0.4134} \quad \cdots \text{式 3-63}$$

$5 \cdot 10^4 < R_a$ の時

$$N_u = 0.06738 \cdot R_a^{\frac{1}{3}} \quad \cdots \text{式 3-64}$$

および

$$N_u = 0.242 \cdot \left(\frac{R_a}{H/d_{\text{gas}}} \right)^{0.272} \quad \cdots \text{式 3-65}$$

ここで、 R_a は静止流体における熱対流の様子を特徴づける無次元の数で、式 3-66 に示すようにグラフホフ数 (G_r) (式 3-67) とプラントル数 (P_r) (式 3-68) の積で表される。

$$R_a = G_r \cdot P_r \quad \cdots \text{式 3-66}$$

ここで

$$G_r = \frac{g \cdot \rho^2 \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot d_{\text{gas}}^3}{\mu \cdot \lambda_{\text{gas}}} \quad \cdots \text{式 3-67}$$

$$P_r = \frac{g \cdot d_{\text{gas}}^3 \cdot \Delta t \cdot \rho^2}{T_m \cdot \mu^2} \cdot \frac{\mu \cdot C}{\lambda_{\text{gas}}} \quad \cdots \text{式 3-68}$$

なお、これらに用いる気体の物性値は JIS R3107 と ISO 15099 で異なるが、本節では ISO 15099 に従って算出したものをを用いることとした。相違点を以下に示す。

① 単一ガスの物性値

JIS R3107 では表に示された気体の物性値より選択するのに対し、ISO 15099 では熱伝導率 (λ)、粘度 (ρ)、および比熱 (C) が表 3-10 に示すように温度による補正項を含む式で示される。これらの値を計算によって求め、理想気体の状態方程式から密度を算出する。

② 混合ガスの物性値

JIS R 3107 では体積比（理想気体では＝モル分率）で特性値を割り振るのに対して、ISO 15099 では状態方程式、気体分子運動論、衝突積分などの理論式を組み合わせにより精度の高い値を求める。算出方法の違いを表 3-11 にまとめる。

表 3-10 気体の物性値

ガス	分子量	λ [W/(m・K)] $\lambda = A + B \cdot T(K)$		ρ [kg/(m・s)] $\rho = A + B \cdot T(K)$		C [J/(kg・K)] $C = A + B \cdot T(K)$	
		A	B	A	B	A	B
空気	29.0	2.87×10^{-3}	7.76×10^{-5}	3.72×10^{-6}	4.94×10^{-8}	1.00×10^3	1.23×10^{-2}
アルゴン	39.9	2.28×10^{-3}	5.15×10^{-5}	3.38×10^{-6}	6.45×10^{-8}	5.22×10^2	—
クリプトン	83.8	9.44×10^{-4}	2.83×10^{-5}	2.21×10^{-6}	7.78×10^{-8}	2.48×10^2	—
キセノン	131.3	4.54×10^{-4}	1.72×10^{-5}	1.07×10^{-6}	7.41×10^{-8}	1.58×10^2	—

*本表は ISO 15099 Annex B Table B.1、Table B.2、Table B.3、Table B.4 をとりまとめたものである。

*T(K)…中空層の気体の平均温度（273K、283K）

表 3-11 混合ガスの物性値の算出方法

物性値	JIS R3107	ISO 15099
M_{mix} 分子量	$M_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^v m_i M_i$	$M_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^v m_i M_i$
ρ_{mix} 密度	$\rho_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^v m_i \rho_i$	$\rho = \frac{P \cdot M_{\text{mix}}}{\Re \cdot T_m}$
C_{mix} 比熱	$C_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^v m_i C_i$	$C_{\text{mix}} = \frac{\hat{C}_{\text{mix}}}{M_{\text{mix}}}$ $\hat{C}_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^v m_i \hat{C}_i$ $\hat{C}_i = C_i M_i$
σ_{mix} 粘度	$\sigma_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^v m_i \sigma_i$	$\mu_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^v \frac{\mu_i}{\left(1 + \sum_{j=1, j \neq i}^v \phi_{i,j}^{\mu} \frac{m_j}{m_i}\right)}$ $\phi_{i,j}^{\mu} = \frac{\left[1 + (\mu_i/\mu_j)^{1/2} (M_j/M_i)^{1/4}\right]^2}{2\sqrt{2}[1 + (M_i/M_j)]^{1/2}}$
λ_{mix} 熱伝導率	$\lambda_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^v m_i \lambda_i$	$\lambda_{\text{mix}} = \lambda'_{\text{mix}} + \lambda''_{\text{mix}}$ $\lambda'_i = \frac{15}{4} \times \frac{\Re}{M_i} \mu_i$, $\lambda''_i = \lambda_i - \lambda'_i$ $\lambda'_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^v \frac{\lambda'_i}{\left(1 + \sum_{j=1, j \neq i}^v \psi_{i,j} \frac{m_j}{m_i}\right)}$, $\lambda''_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^v \frac{\lambda''_i}{\left(1 + \sum_{j=1, j \neq i}^v \phi_{i,j}^{\lambda} \frac{m_j}{m_i}\right)}$ $\psi_{i,j} = \frac{\left[1 + (\lambda'_i/\lambda'_j)^{1/2} (M_j/M_i)^{1/4}\right]^2}{2\sqrt{2}[1 + (M_i/M_j)]^{1/2}} \times \left[1 + 2.41 \times \frac{(M_i - M_j)(M_i - 0.142 M_j)}{(M_i + M_j)^2}\right]$ $\phi_{i,j}^{\lambda} = \frac{\left[1 + (\lambda'_i/\lambda'_j)^{1/2} (M_j/M_i)^{1/4}\right]^2}{2\sqrt{2}[1 + (M_i/M_j)]^{1/2}}$

*JIS R3107 では式の表現方法が異なるが、比較しやすいよう ISO 15099 と表現方法を揃えた。

空気、アルゴンガス、クリプトンガス、キセノンガスの場合における、中空層厚み別の h_c を算出した。また、得られた h_c を中空層厚み (d_{gas}) で除した、単位厚みあたりの熱伝導率 (λ_d) についても算出した。これにより対流の発生厚みを確認することができる。解析条件は便宜的にガスの温度を 283K、対向する 2 面間の温度差を 15K (JIS R3107 の標準条件) とした。算出結果を図 3-9 に、それぞれのガスの最適充填厚みを表 3-12 に示す。なお、複層ガラスへのガス充填は一般に置換方式で行うため、100% の高純度ガスの充填は技術的に難しく、通常 90% 程度で生産される。従って本来は充填ガスと空気との混合気体の実際の混合濃度にて物性値を求めるべきであるが、ここでは各気体の特長を簡潔に比較するために、それぞれのガスが 100% で充填されたと見なして計算を行った。

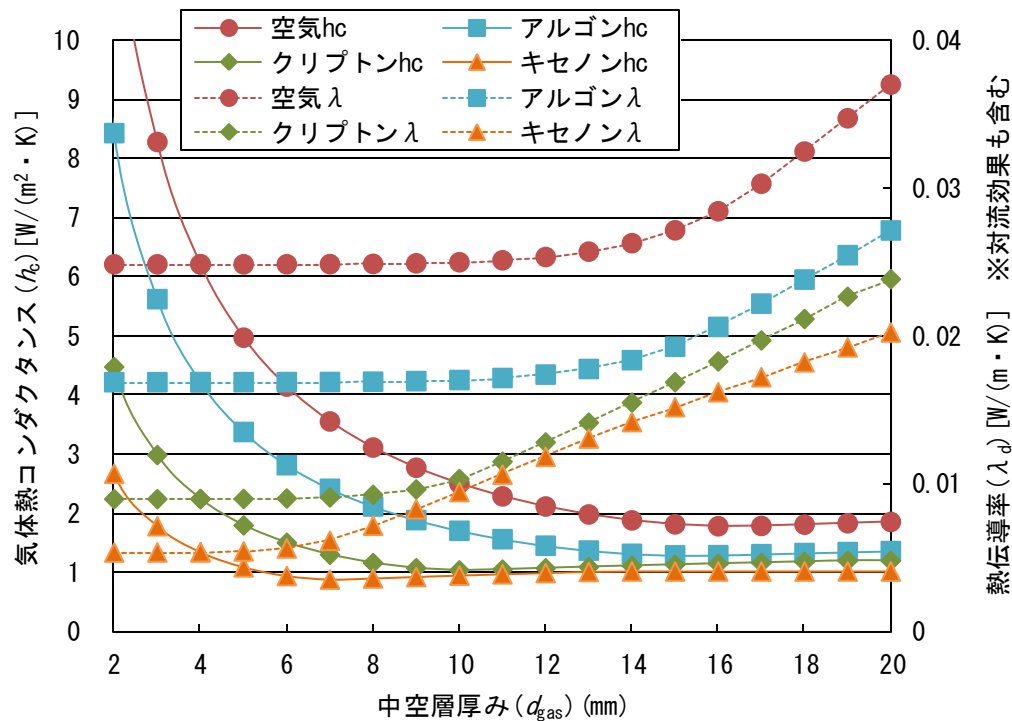


図 3-9 中空層厚み別 h_c 算出結果

表 3-12 各ガスの最適充填厚み

ガス種類	中空層厚み [mm]
空気	10～16
アルゴンガス	
クリプトンガス	8～10
キセノンガス	4～7

図 3-9 から、空気およびアルゴンガスは 10mm 程度、クリプトンガスは 8mm 程度、キセノンガスは 5mm 程度まで λ_d が一定で対流をしないことがわかる。層数に制限が無い場合にはこの厚みで中空層を分割することで最大の断熱効果が期待できる。

一方で、中空層の厚みを増加、あるいは限られた空間を複数の中空層に分断して断熱性の向上を試みる場合には、高断熱のガスほど薄い中空層から対流が発生しやすくなるため、断熱性能とガス充填量に伴い増加するコストとのバランスを考え上限値を設定する必要がある（例えば、16 mm の中空層にクリプトンガスを充填してもアルゴンガスとほとんど変わらず、ガスが占める製品全体に対する費用は著しく増加するためアルゴンを選択するのが好ましい等）。

3.2.2-5 最適なガラス中央部構成の提案

以上の検討結果から、表 3-13 に Low-E フィルムを用いた複層ガラスの最適なガラス中央部の構成と U_g を示す。表の(A)が中空層 6.5mm にキセノンガスが 90%封入された、Low-E フィルム 3 枚（フィルムの室内側に Low-E 膜）、板ガラス 2 枚（室外側板ガラスの中空層側に Low-E 膜）による総厚 32.3mm、 $U_g=0.29 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ の 5 層複層ガラス仕様、(B)が中空層 10mm にクリプトンガスが 90%封入された、Low-E フィルム 2 枚（フィルムの室内側に Low-E 膜）、板ガラス 2 枚（室外側板ガラスの中空層側に Low-E 膜）による総厚 36.2mm、 $U_g=0.39 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ の 4 層複層ガラス仕様である。

表 3-13 最適なガラス中央部構成の提案

厚さ [mm]	ガラス構成 (室外側からの表記)	U_g [W/(m ² ・K)]
32.3	(A) LE+Xe+Film+Xe+Film+Xe+Film+Xe+FL	0.29
36.2	(B) LE+Kr+Film+Kr+Film+Kr+FL	0.39

記号の説明

ガラス …LE=Low-E ガラス 3mm
FL=フロートガラス 3mm
フィルム …Film=Low-E フィルム 0.1mm
中空層 …Xe=キセノンガス (90%) 6.5mm
Kr=クリプトンガス (90%) 10mm
気体の物性値…表 2-10 の値
修正放射率 …フロートガラス=0.837
Low-E ガラス=0.059
Low-E フィルム=0.045

3.2.3 ガラスエッジ部の高断熱化

3.2.3-1 設定条件と評価方法

3.2.2 で提案した複層ガラスのガラスエッジ部は、図 3-10（表 3-13 のガラス構成(B) を代表とした）に示すようにガラススペーサ、乾燥材、1 次シール、2 次シールで構成されている。ガラスエッジ部の代表的な構成材料であるガラススペーサの役割および要求性能としては主に以下の 3 点が上げられる。

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

強度の確保や乾燥材を充填するための空間の形成、乾燥材が内部へ抜けずに通気を確保するための細孔を設ける必要があるため、ガラススペーサは優れた加工性を持つアルミニウムで製造され始め、現在でも国内においてはほとんどがアルミニウム製である。しかしながら、アルミニウムは熱伝導率が非常に大きいため高断熱な窓が用いられるようになるにつれ、ガラスエッジ部の熱橋が無視できない程の影響を与えることから、熱伝導率の小さいスチール、さらに小さい SUS 等の金属への遷移を経て、金属－樹脂のハイブリッド構造^{例えば 22)}、金属をより薄い箔とするなどの改善が図られ、現在では樹脂単体と同等の熱伝導率をもつ材料^{例えば 23)}も現れている。

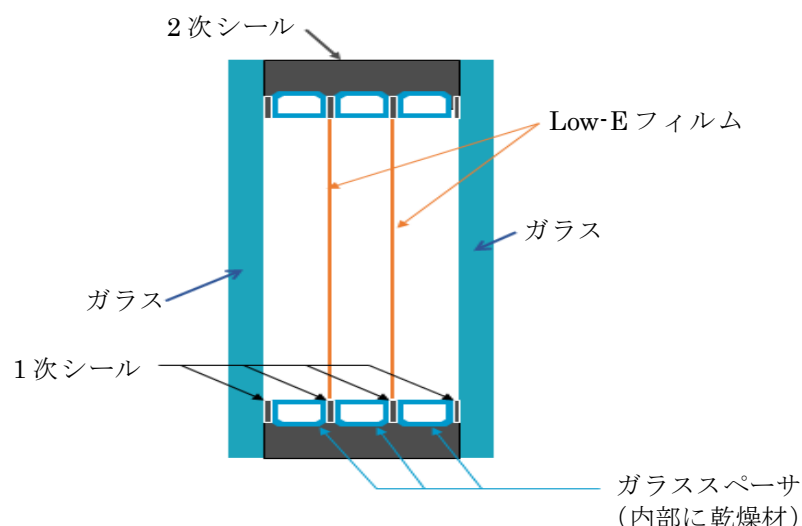


図 3-10 ガラスエッジ部の構成 (表 3-13 のガラス構成(B))

本節では、ガラスエッジ部の高断熱化への寄与が想定される制御因子として、エッジ要素（ガラススペーサの材質・厚み、2次シールの材質・厚み）とフレーム要素（窓フレームの断熱性能、エッジクリアランス寸法）に着目し、それら制御因子が図 3-3 に示す各断面のガラスエッジ部の線熱貫流率（ Ψ_g ）に与える効果を、タグチメソッドを用いて評価した。

Ψ_g は、図 3-11 に示す窓フレーム部に複層ガラスを装着した複層ガラスモデル断面（表 3-13 のガラス構成(B)を代表とした）の伝熱解析から得られる通過熱流量（ Q_g ）と、式 3-69 から得られる窓フレーム部の熱貫流率（ U_f ）ならびに U_g を用いて、式 3-70 で求める。

$$U_f = \frac{\frac{Q_f}{\Delta T} - U_p \cdot b_p}{b_f} \quad \dots \text{式 3-69}$$

$$\Psi_g = \frac{Q_g}{\Delta T} - U_f \cdot b_f - U_g \cdot b_g \quad \dots \text{式 3-70}$$

なお、複層ガラスモデル断面の Q_g 計算は、パネルモデル断面と同様に TB2D/BEM を用いた。環境条件、境界条件は 3.2.1-1 と同様とした。

制御因子と水準の一覧（各断面共通）を表 3-14 に、制御因子の概略図（制御因子 C、E は略した）を図 3-12 に示す。

表 3-14 制御因子と水準の一覧

制御因子	第 1 水準	第 2 水準	第 3 水準
A 窓フレーム内部断熱材の熱伝導率 [W/(m・K)]	無	0.024 PUF	
B エッジクリアランス寸法 [mm]	9	6	3
C ガラススペーサの熱伝導率 [W/(m・K)]	160 アルミ	17 SUS	0.17 硬質PVC
D ガラススペーサの厚み [mm]	9	7	5
E 2次シールの熱伝導率 [W/(m・K)]	0.4 ポリサルフェイド	0.3 シリコン	0.2 PIB
F 2次シールの厚み [mm]	7	5	3

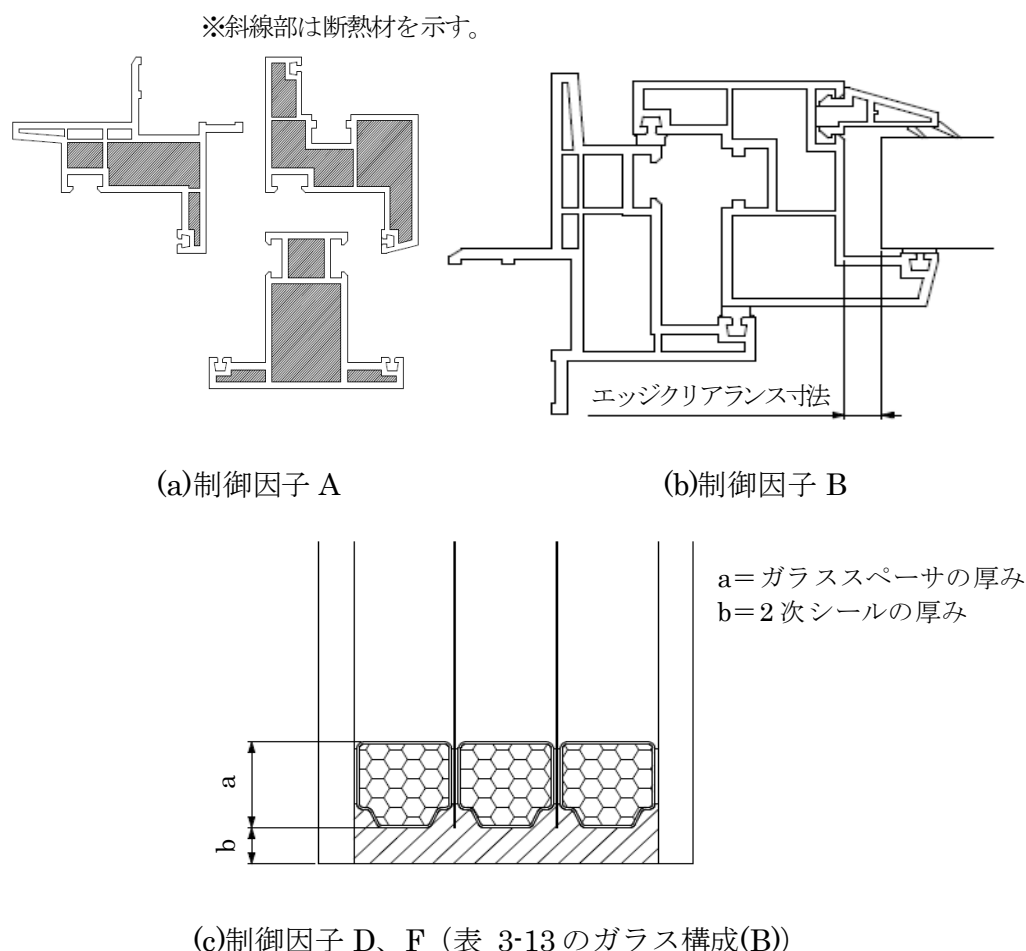


図 3-12 各制御因子の概略図

制御因子 A の「窓フレーム内部断熱材の熱伝導率」や制御因子 B の「エッジクリアランス寸法」は、3.2.1 で示された窓フレーム部の高断熱化への寄与が大きい制御因子の、 Ψ_g への影響把握を目的とした。設置する断熱材の熱伝導率は、無 (—)、PUF 相当 ($0.024 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) の 2 水準を設定し、各断面の断熱材の設置位置や設置条件は 2.2.1 と同様とした。また、エッジクリアランス寸法は 2.2.1 と同様に 9mm、6mm、3mm の 3 水準を設定した。

制御因子 C の「ガラススペーサの熱伝導率」や制御因子 D の「ガラススペーサの厚み」、制御因子 E の「2 次シールの熱伝導率」や制御因子 F の「2 次シールの厚み」は、ガラスエッジ部の主要構成材料であるそれら熱伝導率や厚み (図 3-12(c)の a、b 寸法) の違いが Ψ_g に与える影響把握を目的とした。ガラススペーサの熱伝導率は、アルミニウム相当 ($160 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)、SUS 相当 ($17 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)、硬質 PVC 相当 ($0.17 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) の 3 水準を、2 次シールはポリサルファイド相当 ($0.4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)、シリコン相当 ($0.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)、ポリイソブチレン (Polyisobutylene、以下 PIB という) 相当 ($0.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) の 3 水準を設定した。また、ガラススペーサの厚みは、9mm、7mm、5mm の 3 水準を、2 次シールの厚みは、7mm、5mm、3mm の 3 水準を設定した。

各制御因子の組合せが均等になるように制御因子と水準を L_{18} 直交表に割り付け、その組合せで各断面の Ψ_g を算出し、SN 比平均値と SN 比影響度を求める。各断面の L_{18} 直交表を表 3-15 に示す。

表 3-15 各断面の L_{18} 直交表

制御因子 ケース	A	B	C	D	E	F
1	無	9	160	9	0.4	7
2	無	9	17	7	0.3	5
3	無	9	0.17	5	0.2	3
4	無	6	160	9	0.3	5
5	無	6	17	7	0.2	3
6	無	6	0.17	5	0.4	7
7	無	3	160	7	0.4	3
8	無	3	17	5	0.3	7
9	無	3	0.17	9	0.2	5
10	0.024	9	160	5	0.2	5
11	0.024	9	17	9	0.4	3
12	0.024	9	0.17	7	0.3	7
13	0.024	6	160	7	0.2	7
14	0.024	6	17	5	0.4	5
15	0.024	6	0.17	9	0.3	3
16	0.024	3	160	5	0.3	3
17	0.024	3	17	9	0.2	7
18	0.024	3	0.17	7	0.4	5

SN 比 (η_{ψ_g}) の算出は式 3-71 を用いる。また、各断面の SN 比平均値 ($Ave\eta_{\psi_g}$) の算出は式 3-72～式 3-88 を用いる。

$$\eta_{\psi_g} = 10 \log(1/\psi_{g_n}^2) \quad \cdots \text{式 3-71}$$

制御因子 A

$$Ave\eta_{\psi_g}(\text{第1水準}) = \sum_{n=1}^9 \eta_{\psi_{g_n}} / 9 \quad \cdots \text{式 3-72}$$

制御因子 B

$$Ave\eta_{\psi_g}(\text{第1水準}) = \left(\sum_{n=1}^3 \eta_{\psi_{g_n}} + \sum_{n=10}^{12} \eta_{\psi_{g_n}} \right) / 6 \quad \cdots \text{式 3-74}$$

$$Ave\eta_{\psi_g}(\text{第2水準}) = \sum_{n=10}^{18} \eta_{\psi_{g_n}} / 9 \quad \cdots \text{式 3-73}$$

$$Ave\eta_{\psi_g}(\text{第2水準}) = \left(\sum_{n=4}^6 \eta_{\psi_{g_n}} + \sum_{n=13}^{15} \eta_{\psi_{g_n}} \right) / 6 \quad \cdots \text{式 3-75}$$

$$Ave\eta_{\psi_g}(\text{第3水準}) = \left(\sum_{n=7}^9 \eta_{\psi_{g_n}} + \sum_{n=16}^{18} \eta_{\psi_{g_n}} \right) / 6 \quad \cdots \text{式 3-76}$$

制御因子 C

$$Ave\eta_{\psi_g}(\text{第1水準}) = (\eta_{\psi_{g_1}} + \eta_{\psi_{g_4}} + \eta_{\psi_{g_7}} + \eta_{\psi_{g_{10}}} + \eta_{\psi_{g_{13}}} + \eta_{\psi_{g_{16}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 3-77}$$

$$Ave\eta_{\psi_g}(\text{第2水準}) = (\eta_{\psi_{g_2}} + \eta_{\psi_{g_5}} + \eta_{\psi_{g_8}} + \eta_{\psi_{g_{11}}} + \eta_{\psi_{g_{14}}} + \eta_{\psi_{g_{17}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 3-78}$$

$$Ave\eta_{\psi_g}(\text{第3水準}) = (\eta_{\psi_{g_3}} + \eta_{\psi_{g_6}} + \eta_{\psi_{g_9}} + \eta_{\psi_{g_{12}}} + \eta_{\psi_{g_{15}}} + \eta_{\psi_{g_{18}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 3-79}$$

制御因子 D

$$Ave\eta_{\psi_g}(\text{第1水準}) = (\eta_{\psi_{g_1}} + \eta_{\psi_{g_4}} + \eta_{\psi_{g_9}} + \eta_{\psi_{g_{11}}} + \eta_{\psi_{g_{15}}} + \eta_{\psi_{g_{17}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 3-80}$$

$$Ave\eta_{\psi_g}(\text{第2水準}) = (\eta_{\psi_{g_2}} + \eta_{\psi_{g_5}} + \eta_{\psi_{g_7}} + \eta_{\psi_{g_{12}}} + \eta_{\psi_{g_{13}}} + \eta_{\psi_{g_{18}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 3-81}$$

$$Ave\eta_{\psi_g}(\text{第3水準}) = (\eta_{\psi_{g_3}} + \eta_{\psi_{g_6}} + \eta_{\psi_{g_8}} + \eta_{\psi_{g_{10}}} + \eta_{\psi_{g_{14}}} + \eta_{\psi_{g_{16}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 3-82}$$

制御因子 E

$$Ave\eta_{\psi_g}(\text{第1水準}) = (\eta_{\psi_{g_1}} + \eta_{\psi_{g_6}} + \eta_{\psi_{g_7}} + \eta_{\psi_{g_{11}}} + \eta_{\psi_{g_{14}}} + \eta_{\psi_{g_{18}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 3-83}$$

$$Ave\eta_{\psi_g}(\text{第2水準}) = (\eta_{\psi_{g_2}} + \eta_{\psi_{g_4}} + \eta_{\psi_{g_8}} + \eta_{\psi_{g_{12}}} + \eta_{\psi_{g_{15}}} + \eta_{\psi_{g_{16}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 3-84}$$

$$Ave\eta_{\psi_g}(\text{第3水準}) = (\eta_{\psi_{g_3}} + \eta_{\psi_{g_5}} + \eta_{\psi_{g_9}} + \eta_{\psi_{g_{10}}} + \eta_{\psi_{g_{13}}} + \eta_{\psi_{g_{17}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 3-85}$$

制御因子 F

$$Ave\eta_{\psi_g}(\text{第1水準}) = (\eta_{\psi_{g_1}} + \eta_{\psi_{g_6}} + \eta_{\psi_{g_8}} + \eta_{\psi_{g_{12}}} + \eta_{\psi_{g_{13}}} + \eta_{\psi_{g_{17}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 3-86}$$

$$Ave\eta_{\psi_g}(\text{第2水準}) = (\eta_{\psi_{g_2}} + \eta_{\psi_{g_4}} + \eta_{\psi_{g_9}} + \eta_{\psi_{g_{10}}} + \eta_{\psi_{g_{14}}} + \eta_{\psi_{g_{18}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 3-87}$$

$$Ave\eta_{\psi_g}(\text{第3水準}) = (\eta_{\psi_{g_3}} + \eta_{\psi_{g_5}} + \eta_{\psi_{g_7}} + \eta_{\psi_{g_{11}}} + \eta_{\psi_{g_{15}}} + \eta_{\psi_{g_{16}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 3-88}$$

3.2.3-2 各断面の Ψ_g 計算結果

各ガラス構成における、各断面各ケースの Ψ_g 計算結果を表 3-16 に示す。表中の $Ave\Psi_g$ は一窓あたりのガラスエッジ部平均線熱貫流率を示し、式 3-89 により算出する。

$$Ave\Psi_g = \frac{\sum(l_g \cdot \Psi_g)}{\sum l_g} \quad \cdots \text{式 3-89}$$

表 3-16 各断面各ケースの Ψ_g 計算結果[W/(m・K)]

(a) ガラス構成(A) : LE+Xe+Film+Xe+Film+Xe+Film+Xe+FL

断面部位 ケース	障子部			方立部	FIX 部			$Ave\Psi_g$
	上	下	縦		上	下	縦	
1	0.087	0.092	0.093	0.184	0.088	0.084	0.090	0.090
2	0.053	0.058	0.058	0.115	0.056	0.055	0.056	0.057
3	0.021	0.021	0.021	0.045	0.023	0.024	0.022	0.022
4	0.071	0.076	0.077	0.150	0.072	0.068	0.074	0.074
5	0.041	0.046	0.046	0.091	0.045	0.043	0.046	0.045
6	0.033	0.038	0.038	0.077	0.038	0.037	0.038	0.038
7	0.053	0.058	0.059	0.115	0.054	0.051	0.056	0.056
8	0.044	0.049	0.050	0.099	0.047	0.046	0.049	0.048
9	0.027	0.028	0.027	0.058	0.028	0.029	0.027	0.028
10	0.058	0.058	0.058	0.114	0.058	0.056	0.059	0.058
11	0.058	0.058	0.057	0.113	0.058	0.056	0.059	0.057
12	0.039	0.039	0.039	0.078	0.039	0.039	0.039	0.039
13	0.069	0.069	0.069	0.135	0.069	0.066	0.071	0.069
14	0.051	0.050	0.050	0.098	0.051	0.049	0.052	0.050
15	0.028	0.028	0.028	0.057	0.028	0.028	0.028	0.028
16	0.048	0.048	0.049	0.093	0.048	0.046	0.050	0.048
17	0.055	0.055	0.055	0.108	0.055	0.053	0.057	0.055
18	0.032	0.032	0.032	0.064	0.032	0.031	0.032	0.032

表 3-16 各断面各ケースの Ψ_g 計算結果[W/(m・K)]

(b)ガラス構成(B) : LE+Kr+Film+Kr+Film+Kr+FL

断面部位 ケース	障子部			方立部	FIX 部			Ave Ψ_g
	上	下	縦		上	下	縦	
1	0.090	0.094	0.095	0.192	0.090	0.085	0.092	0.099
2	0.052	0.057	0.057	0.115	0.055	0.053	0.055	0.056
3	0.019	0.019	0.019	0.042	0.020	0.022	0.019	0.020
4	0.074	0.079	0.080	0.159	0.075	0.070	0.077	0.077
5	0.042	0.047	0.047	0.095	0.045	0.044	0.046	0.046
6	0.030	0.036	0.036	0.072	0.035	0.035	0.035	0.035
7	0.058	0.063	0.065	0.128	0.058	0.054	0.062	0.062
8	0.045	0.051	0.052	0.104	0.048	0.046	0.050	0.050
9	0.025	0.025	0.025	0.052	0.026	0.026	0.025	0.026
10	0.062	0.062	0.062	0.124	0.062	0.059	0.064	0.062
11	0.056	0.056	0.056	0.112	0.056	0.054	0.057	0.056
12	0.035	0.035	0.035	0.073	0.035	0.035	0.035	0.035
13	0.073	0.073	0.073	0.144	0.073	0.069	0.076	0.073
14	0.051	0.051	0.051	0.101	0.051	0.049	0.053	0.051
15	0.025	0.025	0.025	0.052	0.025	0.025	0.025	0.025
16	0.054	0.053	0.054	0.105	0.054	0.050	0.057	0.053
17	0.055	0.055	0.055	0.110	0.055	0.053	0.057	0.055
18	0.030	0.030	0.029	0.061	0.030	0.029	0.030	0.030

表 3-16 から、ガラス構成(A)、(B)ともに全ての断面に共通してケース 1～18において程度の差はあれ Ψ_g の大小が確認できる。これは、ガラスエッジ部の熱流が制御因子の影響を受けたことによるものと考えられる。また、ガラス構成(A)、(B)共に、全ての断面に共通して制御因子の水準が全て第 1 水準のケース 1 が最も大きく、制御因子の水準が A、B 以外は全て第 3 水準のケース 3 が最も小さい値となっていることが確認できる。ケース 1 とケース 3 の Ψ_g の差は、ケース 1 を 100%とした場合、ガラス構成(A)のケース 3 は障子部で 23～24%、FIX 部で 24～29%、方立部で 24%程度、ガラス構成(B)のケース 3 は障子部で 21～26%、FIX 部で 20～21%、方立部で 22%程度となった。次に、SN 比を用いて Ψ_g に対する各制御因子の影響を評価した。

なお、ガラスエッジ部は JIS A2102-2 付属書 E 文献 5 Annex C ²⁴⁾に記載される「Two box model」 (概要を図 3-13 に示す) によりガラススペーサを含む周辺部を図 3-14 の様に Simplified model (簡略) 化し、当該部の等価熱伝導率 ($\lambda_{eq,2B}$) を算出しその結果を Q_g 計算に用いた。なお、 $\lambda_{eq,2B}$ の算出は TB2D/BEM を用いた。各ケースの $\lambda_{eq,2B}$ は表 3-17 の通りである。

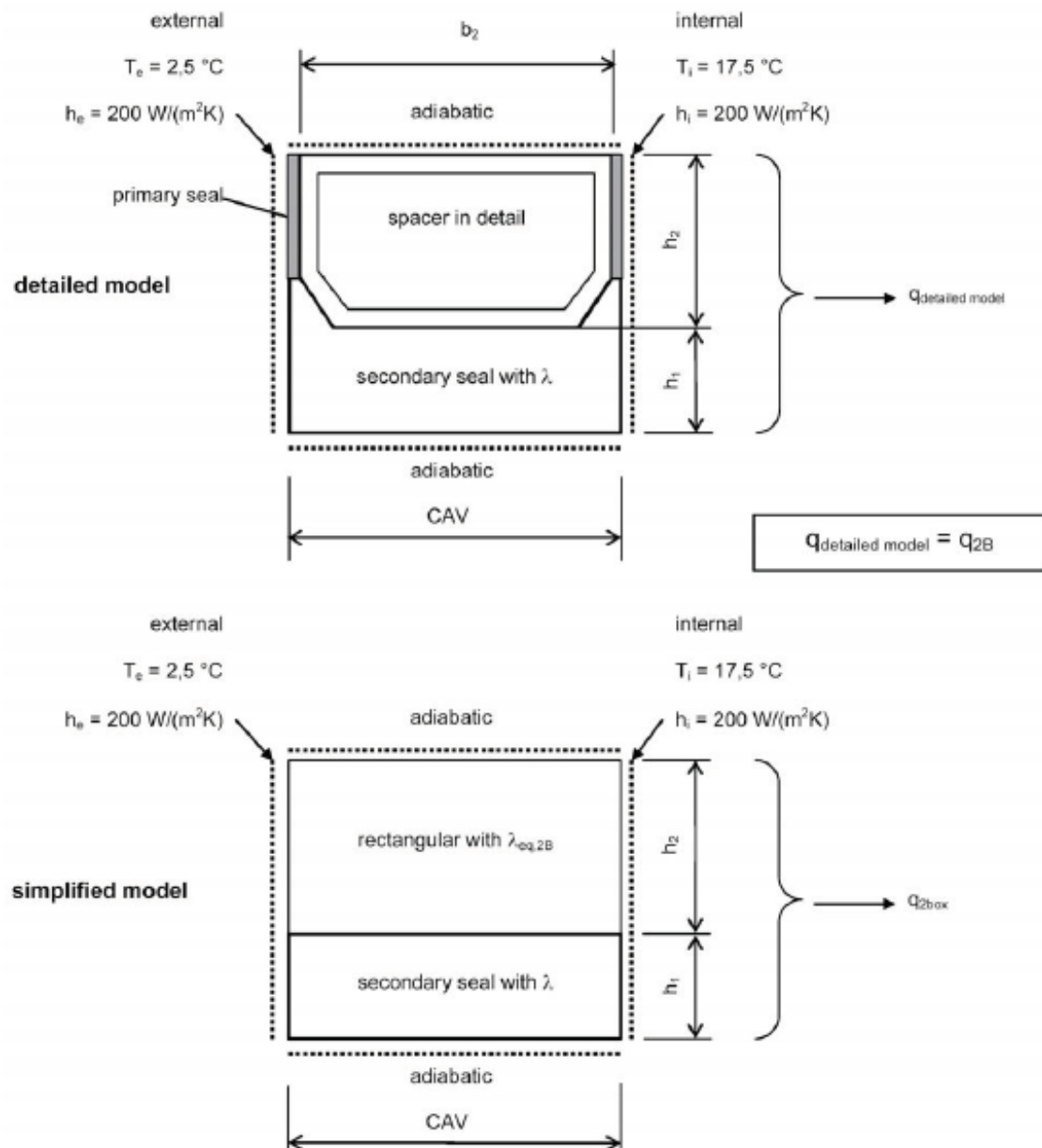


図 3-13 Two box model の概要
 (JIS A2102-2 付属書 E 文献 5 Annex C から抜粋)

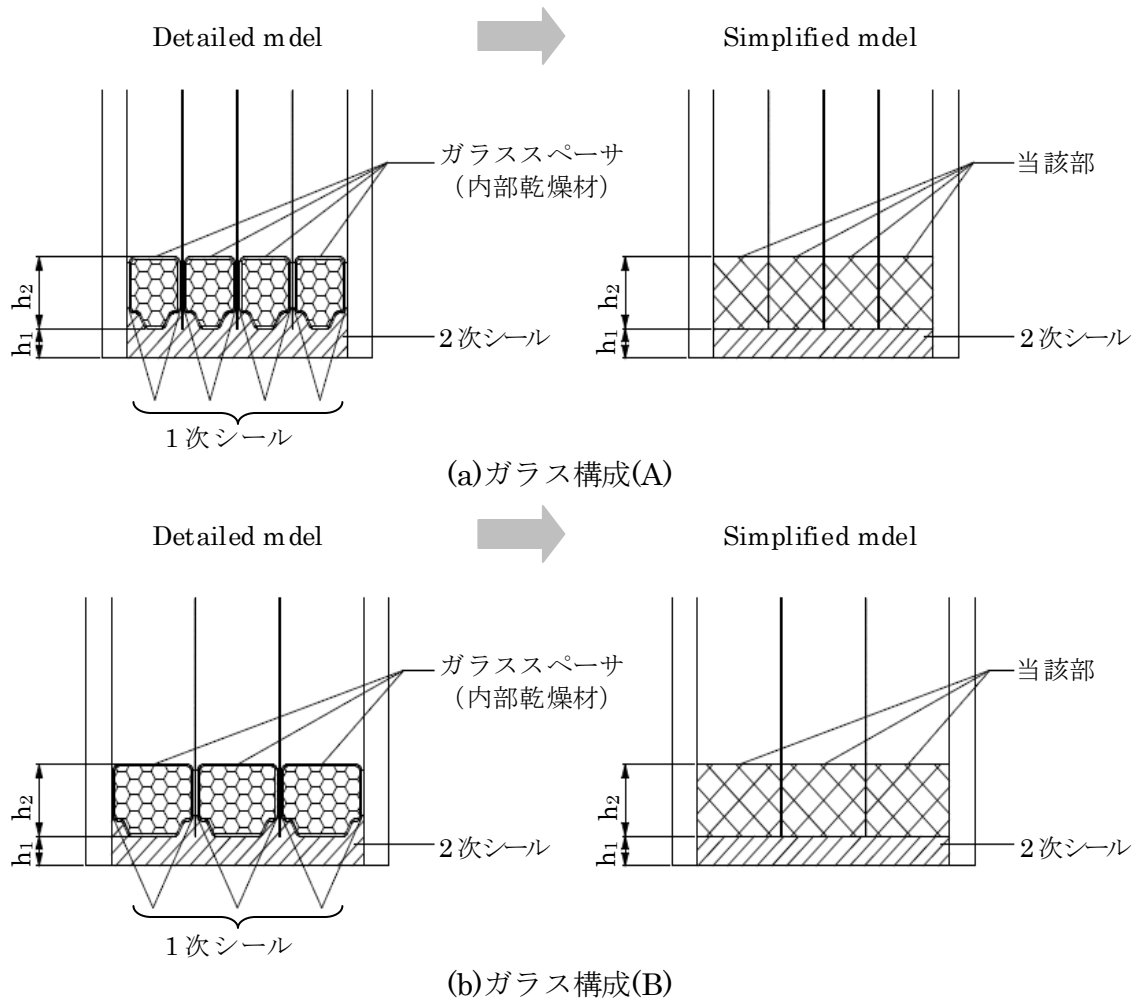


図 3-14 Two box model によるガラスエッジ部の簡略化

表 3-17 $\lambda_{eq,2B}$ 算出結果[W/(m・K)]

(a) ガラス構成(A)

ケース	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\lambda_{eq,2B}$	1.88	0.72	0.14	1.73	0.67	0.16	1.98	0.88	0.13
ケース	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$\lambda_{eq,2B}$	1.42	0.62	0.14	1.53	0.95	0.13	1.75	0.57	0.14

(b) ガラス構成(B)

ケース	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\lambda_{eq,2B}$	2.61	0.82	0.13	2.42	0.78	0.14	2.82	1.04	0.12
ケース	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$\lambda_{eq,2B}$	2.16	0.69	0.13	2.22	1.10	0.12	2.63	0.65	0.13

3.2.3-3 制御因子の Ψ_g に対する影響と最適条件の導出

各ガラス構成・各断面の制御因子毎の水準と $Ave\eta_{\Psi_g}$ を図 3-15 に、SN 比影響度を図 3-16 に示す。図 3-15 から、ガラス構成(A)、(B)共に、全ての断面に共通して制御因子 A（窓フレーム内部断熱材の熱伝導率）以外は水準があがるにつれ、 $Ave\eta_{\Psi_g}$ が上昇していることがわかる。これは、ガラススペーサや 2 次シールの熱伝導率が小さいほど、それら厚みが小さいほど、また、エッジクリアランス寸法が小さいほど、 Ψ_g の低減につながることを意味している。

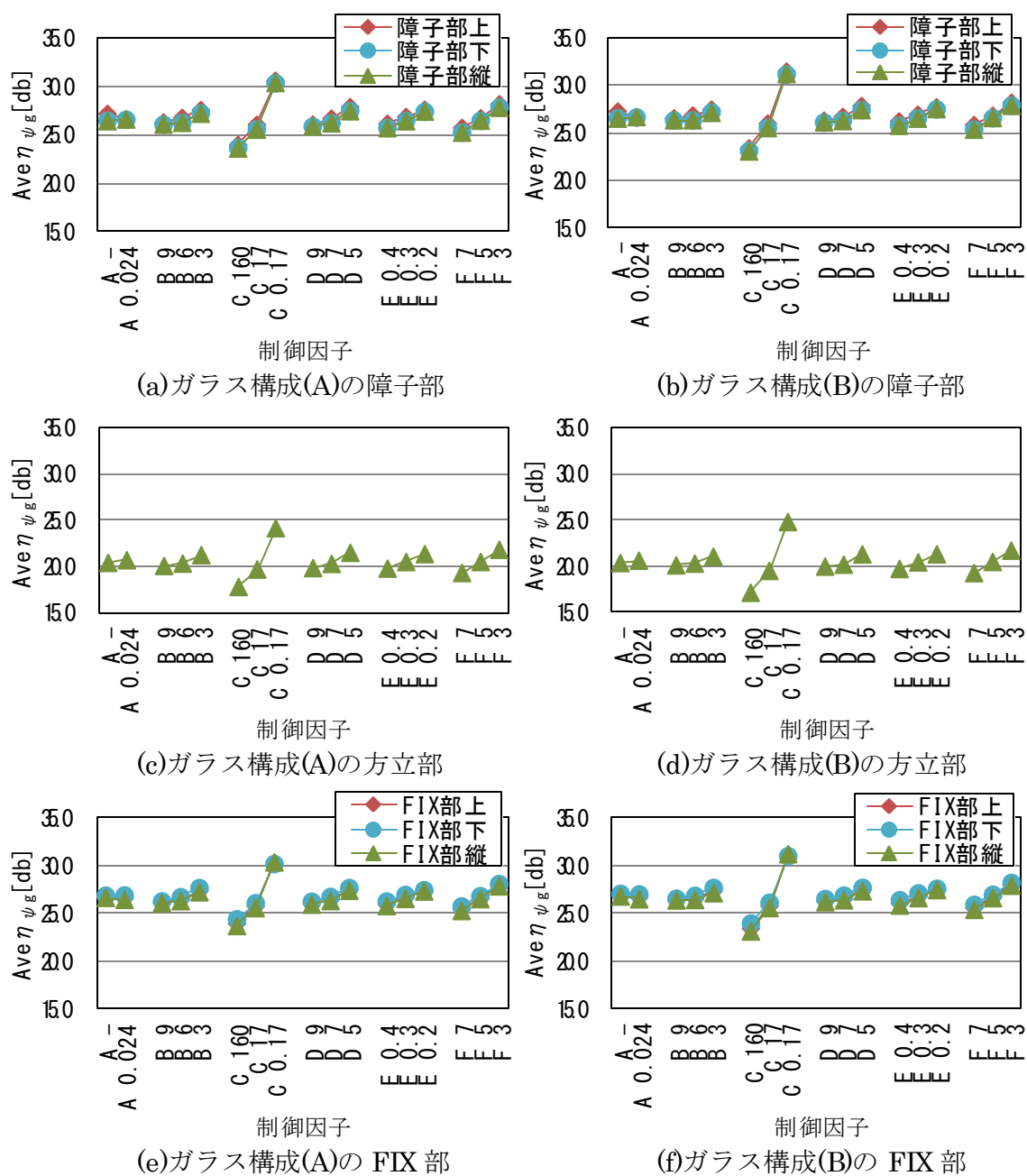


図 3-15 各ガラス構成・各断面の制御因子毎の水準と $Ave\eta_{\Psi_g}$

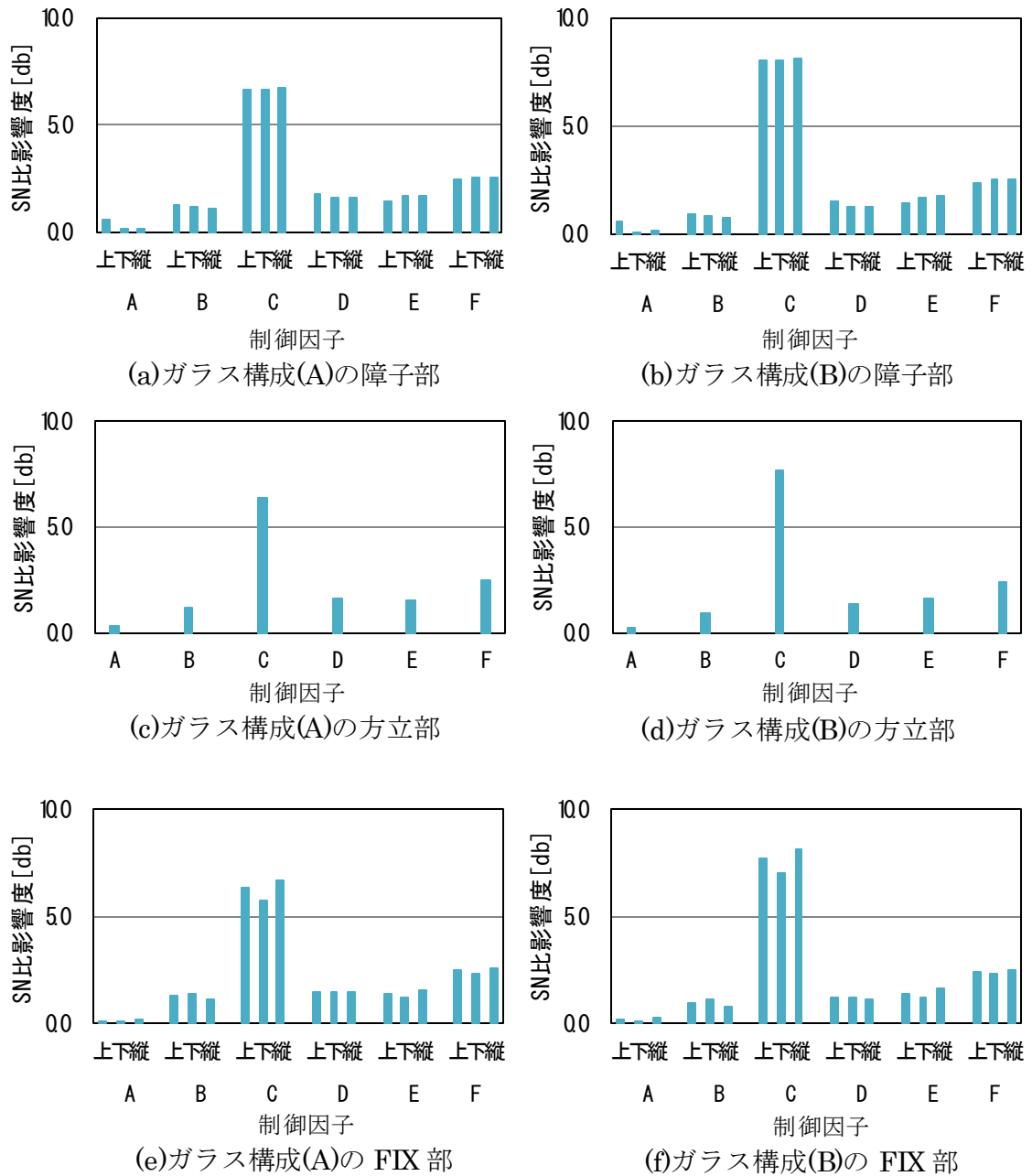


図 3-16 SN 比影響度

次に、図 3-16 から SN 比影響度が最も大きかった Ψ_g 低減に寄与する制御因子に着目すると、ガラス構成(A)、(B)共に、各断面に共通して制御因子 C (ガラススペーサの熱伝導率) が最も効果的であった。一方、 Ψ_g 低減の寄与が最も小さい制御因子 A は各断面で傾向が異なり (例えばガラス構成(A)の障子部上は第 1 水準の方が $Aven\eta_{\Psi_g}$ が大きい、障子部下、障子部縦は第 2 水準の方が $Aven\eta_{\Psi_g}$ が大きい等)、断面部位毎の $Aven\eta_{\Psi_g}$ や SN 比影響度からでは、制御因子 A の Ψ_g 低減に最も効果的な水準を判断することが難しい結果となった。

そこで、制御因子 A の水準の序列を明確に示す方法として、一窓当りのガラスエッジ部平均線熱貫流率 ($Ave\psi_g$) を用いた $Ave\eta_{\psi_g}$ に着目する。各断面の ψ_g を一窓当たりとして平均化することにより、断面部位の違いによる影響を排除できる。 $Ave\psi_g$ を用いた各ガラス構成・各制御因子の $Ave\eta_{\psi_g}$ を図 3-17 に、SN 比影響度を図 3-18 に示す。

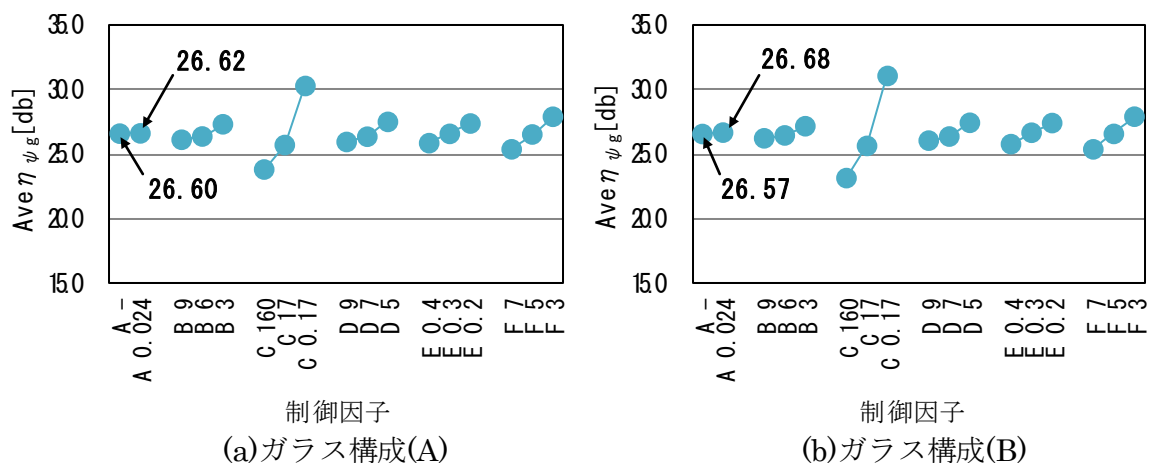


図 3-17 一窓当りの $Ave\eta_{\psi_g}$

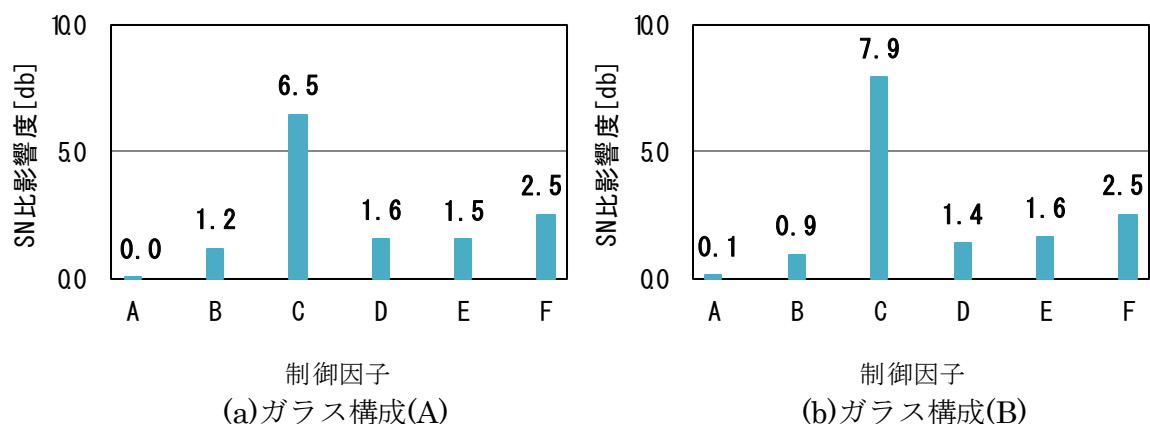


図 3-18 一窓当りの SN 比影響度

図 3-17 から、各ガラス構成共に、一窓当たりとした場合における制御因子 A は第 2 水準の方が ψ_g 低減に寄与することが示された。また、図 3-18 から、各ガラス構成の制御因子の序列は以下の通りとなった。

- ・ ガラス構成(A)：制御因子 C > 制御因子 F > 制御因子 D > 制御因子 E > 制御因子 B > 制御因子 A
- ・ ガラス構成(B)：制御因子 C > 制御因子 F > 制御因子 E > 制御因子 D > 制御因子 B > 制御因子 A

3.2.4 各部位の最適条件組み合わせと窓全体の断熱性能

前節までは部位別に各種高断熱化技術を検討した。本節ではそれらを総合して、窓の各部位の仕様と断熱性能を整理し、最適条件の組合せからなる窓全体の断熱性能を示す。まず、前節までの内容を踏まえ、窓の断熱性能向上の代表的な要素技術を図 3-19 にまとめる。窓フレーム部については窓フレーム断面内部へ断熱材の充填、窓フレーム断面内部の空気層壁面に金属膜形成、キャビティ部の分割やキャビティ寸法、エッジクリアランス寸法の縮小等といった断面形状が、ガラス中央部については Low-E フィルムの挿入や（キセノン、クリプトン）ガスの封入、ガラスエッジ部についてはガラススペーサや 2 次シールの仕様（熱伝導率や厚み）が断熱性能に影響を与えることとなる。

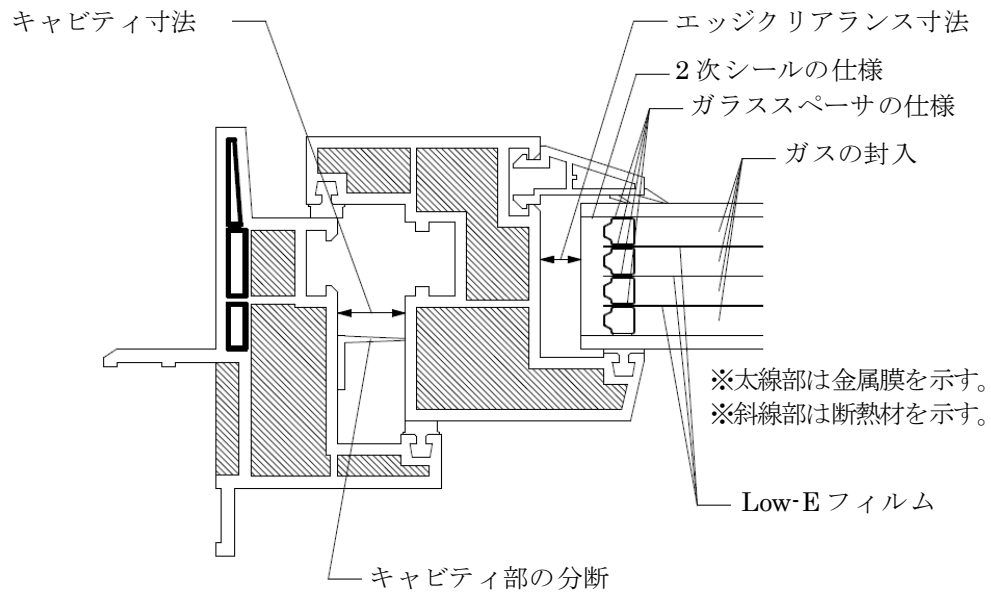


図 3-19 断熱性能向上のための代表的な要素技術

表 3-18 に各部位の仕様と窓全体の熱貫流率 (U_w) を、表 3-19 に U_w の計算結果を示す。計算方法は JIS A2102-1²⁵⁾、JIS A2102-2 による。 U_w は式 3-90 で示す通り、ガラス中央部の熱貫流率 U_g と、窓フレーム部の熱貫流率 U_f の他に、複層ガラスのガラススペーサ周辺の 2 次元熱流の影響を表わすガラスエッジ部の線熱貫流率 ψ_g が必要となる。JIS A2102-1 付属書 E に示される規定値を使用する方法（簡易計算法）もあるが、より計算精度の高い JIS A2102-2 の手法（詳細計算法）によることとした。また、表 3-18 中の $AveU_f$ は一窓当りの窓フレーム部平均熱貫流率を示し、式 3-91 より算出した。

$$U_w = \frac{\sum(A_g \cdot U_g) + \sum(A_f \cdot U_f) + \sum(l_g \cdot \psi_g)}{\sum A_g + \sum A_f} \quad \cdots \text{式 3-90}$$

$$AveU_f = \frac{\sum(A_f \cdot U_f)}{\sum A_f} \quad \cdots \text{式 3-91}$$

表 3-18 各部位の仕様と窓全体の熱貫流率 (U_w)

部位		仕様 A	仕様 B
ガラス 中央部	ガラス構成	表 3-13 (A)	表 3-13 (B)
	U_g [$W/(m^2 \cdot K)$]	0.29	0.39
窓フレーム 部	制御因子		
	A 気密材の熱伝導率 [$W/(m \cdot K)$]	0.04 TPO	0.04 TPO
	B 窓フレーム内部金属膜の放射率 [—]	0.05 銀メッキ	無
	C 窓フレーム内部断熱材の熱伝導率 [$W/(m \cdot K)$]	0.020 PF	0.024 PUF
	D 窓フレーム外部断熱材の熱伝導率 [$W/(m \cdot K)$]	0.020 PF	0.020 PF
	E エッジクリアランス寸法 [mm]	3	3
	F キャビティ寸法 [mm]	10 (障子部上下 14)	10 (障子部上下 14)
	G キャビティ部の分割	有	有
	H 方立補強材の熱伝導率 [$W/(m \cdot K)$]	0.35 CFRP	0.35 CFRP
	$AveU_f$ [$W/(m^2 \cdot K)$]	0.76	0.80
ガラス エッジ部	制御因子		
	A 窓フレーム内部断熱材の熱伝導率 [$W/(m \cdot K)$]	0.020 PF	0.024 PUF
	B エッジクリアランス寸法 [mm]	3	3
	C ガラススペーサの熱伝導率 [$W/(m \cdot K)$]	0.17 硬質 PVC	17 SUS
	D ガラススペーサの厚み [mm]	5	5
	E 2次シールの熱伝導率 [$W/(m \cdot K)$]	0.2 PIB	0.2 PIB
	F 2次シールの厚み [mm]	3	3
	$Ave\psi_g$ [$W/(m \cdot K)$]	0.018	0.048
窓全体	U_w [$W/(m^2 \cdot K)$]	0.46	0.65

表 3-19 窓全体の熱貫流率 (U_w) 算出結果

窓の仕様			仕様 A	仕様 B	単位		
適応 JIS、ISO	一般		JIS A2102-1				
	窓フレーム部		JIS A2102-2				
	ガラスエッジ部		JIS A2102-2				
	ガラス中央部		JIS R3107 ISO 15099				
JIS A2102-1、-2に基づく内外温度差			ΔT		20	℃	
伝熱開口	窓の幅		W		1.69	m	
	窓の高さ		H		1.37	m	
	伝熱開口面積		A_{sp}		2.32	m ²	
表面熱伝達率	室外側		α_{i}		25.0	W/(m ² ・K)	
	室内側		α_{o}		7.69	W/(m ² ・K)	
ガラス	ガラス中央部熱貫流率		U_{g}		0.29	0.39	W/(m ² ・K)
	補正ガラス中央部熱貫流率 ^{注)}		U'_{g}		0.29	0.39	W/(m ² ・K)
	ガラス露出幅（障子側）		$l_{\text{g,w1}}$		0.54		m
	ガラス露出幅（FIX 側）		$l_{\text{g,w2}}$		0.90		m
	ガラス露出高さ（障子側）		$l_{\text{g,h1}}$		1.18		m
	ガラス露出高さ（FIX 側）		$l_{\text{g,h2}}$		1.27		m
	ガラス露出面積		A_{g}		1.77		m ²
ガラス中央部の通過熱流量			$\Sigma(A_{\text{g}} \cdot U'_{\text{g}})$		0.52	0.70	W/K
窓フレーム部の通過熱流量			$\Sigma(A_{\text{f}} \cdot U_{\text{f}})$		0.41	0.44	W/K
ガラスエッジ部の通過熱流量			$\Sigma(l_{\text{g}} \cdot \Psi_{\text{g}})$		0.14	0.38	W/K
窓全体の熱貫流率			U_{w}		0.46	0.65	W/(m ² ・K)

注) JIS R3107 と JIS A2102-1、-2 の内外表面熱伝達率の規定値が異なっており、JIS A2102-1、-2 の規定値に合わすべく、JIS R3107 の規定値との差分を加味する必要があるため、ガラス中央部熱貫流率算 U_g は式 3-92 を用いて補正した値 U'_g を使用する。

$$U'_g = \frac{1}{(1/U_g) + 0.005} \quad \cdots \text{式 3-92}$$

表中の仕様 A が、窓フレーム部、ガラス中央部、ガラスエッジ部の最適条件からなる組合せであり、 U_w は 0.46 W/(m²・K) となった。しかし、製品化を考えたときに、窓フレーム断面内部への金属膜形成が現状困難であること、PF 断熱材を窓フレーム断面内部へ隙間なく設置することが現状困難であること、複層ガラス中空層内へのキセノンガス封入は技術的には可能であるものの高価になりすぎることで、ガラススペーサによる Low-E フィルムの展張状態確保が硬質 PVC では強度不足のため現状困難であることから、次節では、これら仕様と断熱性能の関係を踏まえた上で、現実的な高断熱化技術を盛り込んだ試験体 (仕様 B) を作成し、その性能検証を行った。

3.3 測定による性能検証

3.3.1 U_w の測定方法

JIS A4710²⁶⁾「建具の断熱試験方法」に準じ、前節で示した仕様 B の試験体における U_w の測定を行った。なお、測定は北海道旭川市の地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 建築研究本部の断熱防露試験室を使用した。装置の概要を図 3-20 に示す。試験体は室内室と室外室の境界壁に設置した。

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

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

環境温度および標準化熱貫流率の算出に必要な室内外の対流および放射熱伝達率は、熱抵抗 0.53 (m²・K)/W および 1.67 (m²・K)/W の校正板を用いて求めた値を、試験体開口部の熱流密度で直線補間して求めた。

熱箱内の発生熱量に対し、試験体以外からの損失熱量である校正熱量には、熱箱からの損失熱量、取付パネルからの通過熱流量、試験体と取付パネルの間を通過する熱流量が含まれる。これらのうち、熱箱からの損失熱量と取付パネルからの通過熱流量は、表面温度差と材料の熱抵抗から求めた。試験体と取付パネルの間を通過する熱流量は、JIS A4710 付属書 2 表 4 に基づき、試験体の枠見込み寸法、枠見付け寸法、試験体の取付パネルに対する設置位置、取付パネルの熱伝導率をパラメータとして算出した線熱貫流率と空気温度差から求めた。

また、ガラス中央部や窓フレーム部の、室内外の表面温度を各 12 点測定した。表面温度の測定位置を図 3-21 に示す。

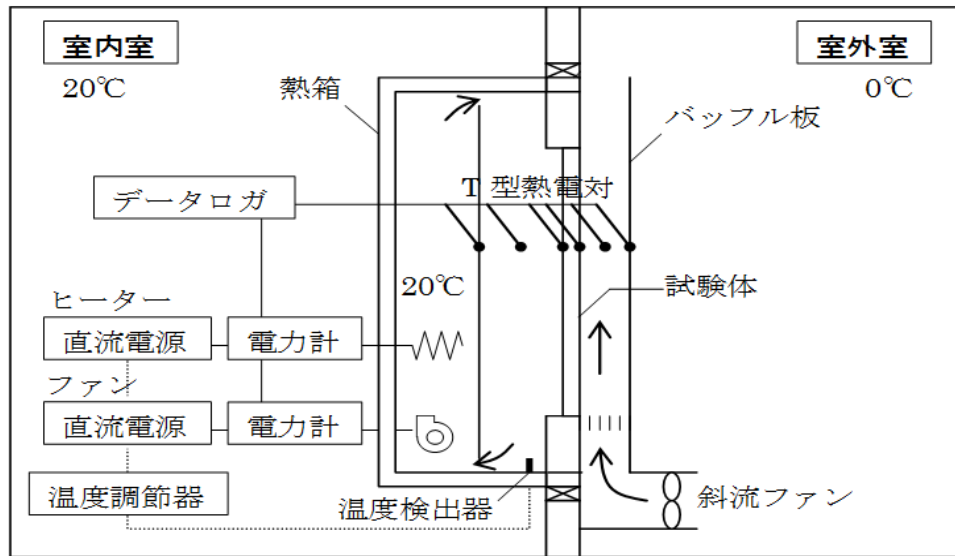


図 3-20 測定装置概要

※測定位置下の数字は測定番号を示す。

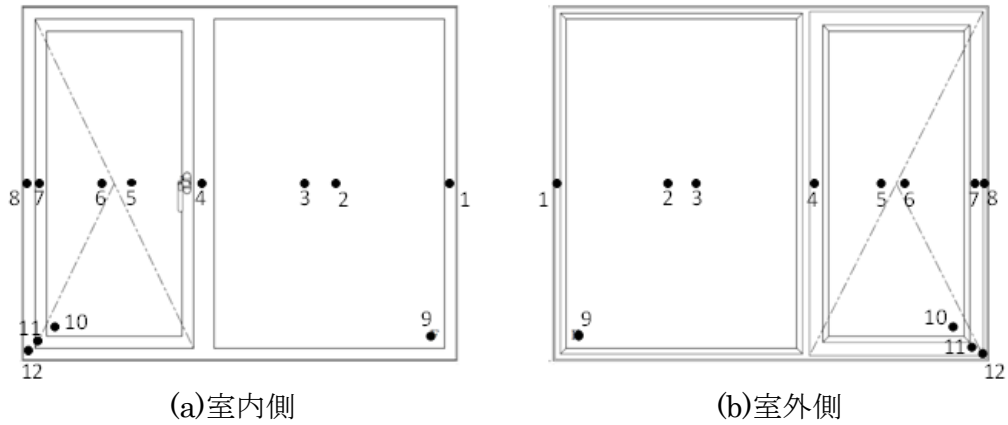


図 3-21 表面温度測定位置



(a)複層ガラス (室内室側)



(b)断熱パネル (室内室側)

図 3-22 試験体の設置状況

3.3.2 試験体

試験体は JIS A4710 に準じ、押出法ポリスチレンフォーム（XPS3b）で製作した取付パネル（W1,980mm×H2,480mm×D200mm）の見付け中央部に設置した。試験体の設置状況を図 3-22 に示す。また、試験体と取付パネルの設置位置関係を図 3-23 に示す。

※斜線部は PUF の充填箇所を示す。

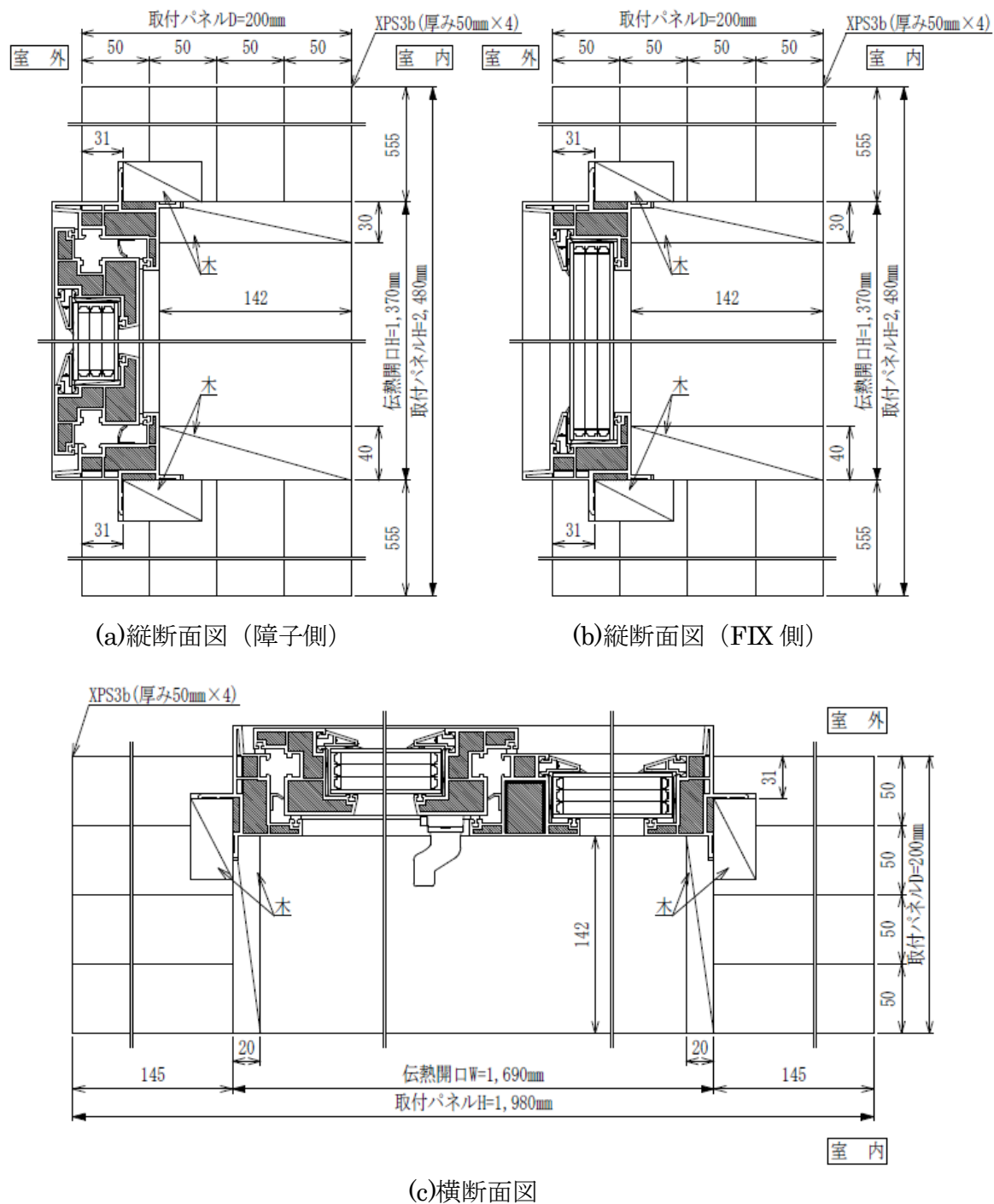


図 3-23 試験体と取付パネルの設置位置関係

3.3.3 U_g と $AveU_f$ の推定方法

測定結果の室内外ガラス中央部表面温度を用いて、式 3-93、式 3-94 により U_g を推定した。

$$U_g = \frac{1}{(1/U'_g) + 0.165 - R_{st}} \quad \cdots \text{式 3-93}$$

ここで

$$U'_g = \frac{\Delta\theta - (\theta_{in} - \theta_{out})}{R_{st} \cdot \Delta\theta} \quad \cdots \text{式 3-94}$$

さらに、窓フレーム部の断熱性能を把握するため、JIS A2102-2 に規定される断面の詳細計算時における手法を参考に、複層ガラスを熱抵抗の実測が可能なビーズ法ポリスチレンフォーム（EPS）製の断熱パネルに置き換え（図 3-22 (b)）、窓全体の通過熱流量（ Q_{sp} ）を測定し、式 3-95 により算出した断熱パネルの見付け面積相当分の通過熱流量（ Q_{spf} ）を Q_{sp} から差し引き、式 3-96、式 3-97 より $AveU_f$ を推定した。

$$Q_{spf} = \frac{PW \cdot PH \cdot \Delta\theta}{R_{st} + (D/\lambda_p)} \quad \cdots \text{式 3-95}$$

$$AveU_f = \frac{1}{(1/AveU'_f) + 0.170 - R_{st}} \quad \cdots \text{式 3-96}$$

ここで

$$AveU'_f = \frac{Q_{sp} - Q_{spf}}{\Delta\theta \cdot (A_{sp} - PW \cdot PH)} \quad \cdots \text{式 3-97}$$

窓フレーム部の熱貫流率の測定は JIS による規定はないが、EN 12412-2²⁷⁾に規定がある。しかし、EN 12412-2 では窓フレーム一片毎の熱貫流率の測定のみを定めており、窓とした場合に発生する隅角部を含めた評価ができず、局所的な熱伝達抵抗において不確かさが残る。そのため、より実態に沿った形として上述の手法により窓フレーム部の熱貫流率の算出を試みた。

3.3.4 測定結果と計算結果の比較

U_w 、 U_g 、 $AveU_f$ の測定結果を計算結果と共に図 3-24 に示す。なお、窓フレーム部に複層ガラスを設置した仕様の測定結果ならびに表面温度は表 3-20(a)を、断熱パネルを設置した仕様の測定結果ならびに表面温度は表 3-20(b)を参照されたい。

測定結果と計算結果の乖離は、 U_w で 3%程度、 U_g で 8%程度、 $AveU_f$ で 1%程度となった。測定値と計算値の乖離は、NFRC 100A²⁸⁾では 10%以内が望ましいと示されており、本結果はよい整合性が得られたと言える。

なお、乖離の要因として、測定における局所熱伝達率のばらつき、熱流計等の測定機器の配線による影響、測定精度や試験体の製作精度等が考えられる。

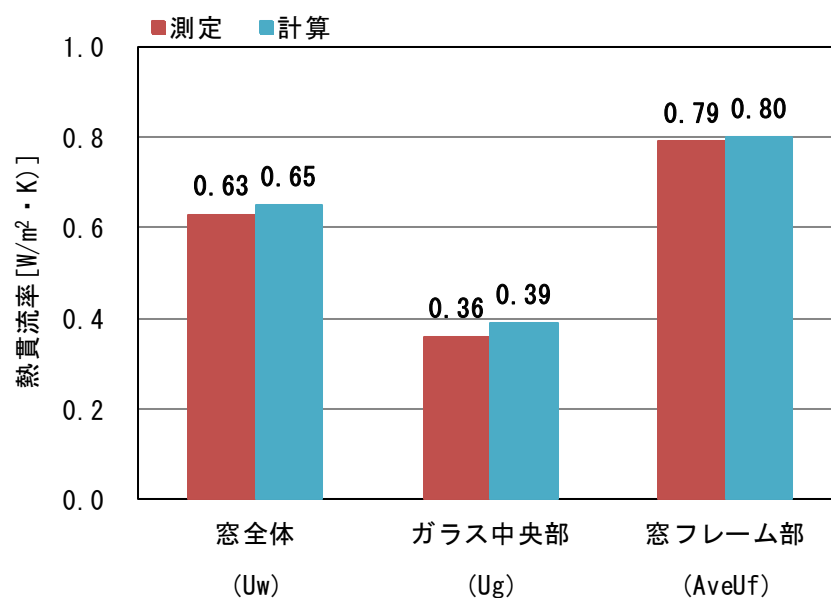


図 3-24 測定結果と計算結果の比較

表 3-20 U_w 測定結果

(a) 複層ガラス仕様

項目							結果				単位		
伝熱開口面積			A_w				2.32				m^2		
熱箱内の発生熱量			Q_{in}				39.7				W		
校正熱量			Q_{out}				10.7				W		
窓全体の通過熱流量			Q_{sp} $(Q_{sp} = Q_{in} - Q_{out})$				29.1				W		
室外側の環境温度			θ_{ne}				-0.2				$^{\circ}C$		
室内側の環境温度			θ_{ni}				19.6				$^{\circ}C$		
窓両側の環境温度差			$\Delta\theta$ $(\Delta\theta = \theta_{ni} - \theta_{ne})$				19.8				$^{\circ}C$		
測定熱貫流率			U'_w $(U'_w = Q_{sp}/(\Delta\theta \cdot A_{SP}))$				0.63				$W/(m^2 \cdot K)$		
測定熱貫流抵抗			R'_w $(R'_w = 1/U'_w)$				1.58				$(m^2 \cdot K) / W$		
測定時の窓両表面の熱伝達抵抗の総和			$R_{s,t}$				0.168				$(m^2 \cdot K) / W$		
表面熱伝達抵抗の補正值			ΔR $(\Delta R = 0.170 - R_{s,t})$				0.002				$(m^2 \cdot K) / W$		
標準化熱貫流率			U_w $(U_w = [R'_w + \Delta R]^{-1})$				0.63				$W/(m^2 \cdot K)$		
窓表面温度													
測定点		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
室内側 ($^{\circ}C$) (θ_{in})		16.5	18.8	18.7	17.5	18.7	18.8	17.6	16.9	15.2	15.9	15.6	15.1
室外側 ($^{\circ}C$) (θ_{out})		0.8	0.2	0.1	0.6	0.2	0.1	0.4	1.9	0.4	0.2	0.1	0.5

表 3-20 U_w 測定結果

(b)断熱パネル仕様

項目							結果				単位		
伝熱開口面積			A_w				2.32				m^2		
熱箱内の発生熱量			Q_{in}				43.5				W		
校正熱量			Q_{out}				10.6				W		
窓全体の通過熱流量			Q_{sp} $(Q_{sp} = Q_{in} - Q_{out})$				32.9				W		
室外側の環境温度			θ_{ne}				-0.2				$^{\circ}C$		
室内側の環境温度			θ_{ni}				19.6				$^{\circ}C$		
窓両側の環境温度差			$\Delta\theta$ $(\Delta\theta = \theta_{ni} - \theta_{ne})$				19.8				$^{\circ}C$		
測定熱貫流率			U'_w $(U'_w = Q_{sp}/(\Delta\theta \cdot A_{SP}))$				0.72				$W/(m^2 \cdot K)$		
測定熱貫流抵抗			R'_w $(R'_w = 1/U'_w)$				1.40				$(m^2 \cdot K) / W$		
測定時の窓両表面の熱伝達抵抗の総和			$R_{s,t}$				0.168				$(m^2 \cdot K) / W$		
表面熱伝達抵抗の補正值			ΔR $(\Delta R = 0.170 - R_{s,t})$				0.002				$(m^2 \cdot K) / W$		
標準化熱貫流率			U_w $(U_w = (R'_w + \Delta R)^{-1})$				0.72				$W/(m^2 \cdot K)$		
窓表面温度													
測定点		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
室内側 ($^{\circ}C$) (θ_{in})		17.1	17.9	17.9	18.1	18.1	18.1	17.7	16.9	15.8	16.5	16.0	14.1
室外側 ($^{\circ}C$) (θ_{out})		0.5	0.4	0.3	0.5	0.4	0.4	0.4	1.5	0.3	0.3	0.2	0.3

* 断熱パネルの厚み (D) …38.7mm

断熱パネルの熱伝導率 (λ_p) …0.0304 W/(m · K)

3.4 第3章のまとめ

第3章では、国内の既存樹脂製窓を対象に高断熱化をはかるに当たり、構成する部材の影響を定量的に評価し、部材の最適条件（各部位の断熱性能向上に最も寄与する要素技術と水準）とそれら最適条件の組合せからなる窓の断熱性能を示すとともに、製品化を見据えた現実的な仕様で試験体による性能検証を行った。以下に、本章で得られた知見を簡潔にまとめる。

- ① 窓フレーム部については、タグチメソッドを用いて高断熱化への寄与が想定される複数の制御因子の各断面に対する通過熱流量 Q_f 低減効果を検討し、各制御因子の最適条件（通過熱流量低減に最も寄与する水準）を導出するとともに、最適条件時の既存品からの低減率（障子部 19～21%、FIX 部 6～10%、方立部 22%）を示した。さらに、SN 比影響度から、障子部、FIX 部は「窓フレーム内部断熱材の熱伝導率」が、方立部は「方立補強材の熱伝導率」が最も低減効果が高いことを示した。
- ② ガラス中央部については、複層ガラスの中空層へ Low-E フィルムを挿入した仕様を検討し、Low-E 膜の効果と配置の最適化（視野性や日射特性等に配慮したうえで最大の断熱効果が期待できる配置）や充填ガス別の最適（最大の断熱効果が期待できる）中空層厚みを示すとともに、キセノンガスとフィルム 3 枚によるガラス中央部熱貫流率 $U_g = 0.29 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 仕様や、クリプトンガスとフィルム 2 枚による $U_g = 0.39 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ を示した。
- ③ ガラスエッジ部については、窓フレーム部と同様にタグチメソッドを用いて高断熱化への寄与が想定される複数の制御因子の各断面に対するガラスエッジ部線熱貫流率 ψ_g の低減効果を検討し、一窓当りのガラスエッジ部平均線熱貫流率 $\text{Ave}\psi_g$ を用いた SN 比平均値 $\text{Ave}\eta_{\psi_g}$ から、各制御因子の最適条件（線熱貫流率低減に最も寄与する水準）を導出した。さらに、SN 比影響度から、各断面に共通して「ガラススペーサの熱伝導率」が最も低減効果が高いことを示した。
- ④ 窓フレーム部、ガラス中央部、ガラスエッジ部の最適条件の組合せからなる窓全体の熱貫流率 $U_w = 0.46 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ を示したが、現状では製造上困難な技術（窓フレーム断面内部への金属膜形成や PF 断熱材を隙間なく設置、ガラススペーサの材質を硬質 PVC）もしくは製造コスト上の問題点（複層ガラス中空層へのキセノンガス封入）があることから、製品化を見据えた現実的な仕様で試験体による断熱性能の検証を行った。その結果、計算で $U_w = 0.65 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ の仕様で、 $0.63 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ の測定結果が得られた。

第3章の記号表

3.2 各種要素技術の断熱性能向上に及ぼす効果

3.2.1 窓フレーム部の高断熱化

3.2.1-1 設定条件と評価方法

記号	意味	単位
Q_f	パネルモデル断面の通過熱流量	W/m
ΔT	JIS A2102-2 に基づく室内外温度差	℃
η_f	SN 比	db
$Ave\eta_{Q_f}$	SN 比平均値	db

3.2.2 ガラス中央部の高断熱化

3.2.2-2 ガラス中央部熱貫流率の計算方法

記号	意味	単位
U_g	ガラス中央部熱貫流率	W/(m ² ・K)
h_{out}	室外側表面熱伝達率	W/(m ² ・K)
h_{in}	室内側表面熱伝達率	W/(m ² ・K)
R_i	i 番目のガラス中空層の熱抵抗	(m ² ・K)/W
$R_{g,i}$	i 番目のガラス (フィルム) の熱抵抗	(m ² ・K)/W
$t_{g,i}$	i 番目のガラス (フィルム) の厚み	m
$\lambda_{g,i}$	i 番目のガラス (フィルム) の熱伝導率	W/(m・K)
$T_{f,i}$	i 番目ガラス (フィルム) の Front 側のガラス (フィルム) の温度	K
$T_{b,i-1}$	i-1 番目ガラス (フィルム) の Back 側のガラス (フィルム) の温度	K
q_i	i 番目の複層ガラス中空層の通過熱流量	W/m
ε_e	室外側ガラス表面の修正放射率	—
ε_i	室内側ガラス表面の修正放射率	—

3.2.2-3 Low-E 膜の効果と配置の最適化

記号	意味	単位
h_r	放射熱コンダクタンス	W/(m ² ・K)
σ	ステファン・ボルツマン定数 (5.67×10 ⁻⁸)	W/(m ² ・K ⁴)
T_m	中空層に接する 2 つのガラス (フィルム) 面の絶対温度の値の平均値	K
ε_1	中空層に接する 2 つのガラス (フィルム) 面の修正放射率	—
ε_2	中空層に接する 2 つのガラス (フィルム) 面の修正放射率	—
d	中空層の厚み	m
H	ガラスの高さ	m
ε_g	一般的なフロートガラス (Low-E 膜無し) の修正放射率	—
ε_f	Low-E フィルムの修正放射率	—

3. 2. 2-4 充填ガス別厚みの最適化

記号	意味	単位
h_c	気体熱コンダクタンス	$W/(m^2 \cdot K)$
N_u	ヌセルト数（対流の程度を示す無次元数）	—
λ_{gas}	中空層の熱伝導率	$W/(m \cdot K)$
d_{gas}	中空層厚み	m
R_a	レイリー数（静止流体における熱対流の様子を特徴づける無次元数）	—
H	ガラスの高さ	m
G_r	グラスホフ数（自然対流の強さを示す無次元数）	—
P_r	プラントル数（流れと熱移動の相関を示す無次元数）	—
g	重力加速度	m/s^2
ρ	気体の密度	kg/m^3
β	気体の体膨張係数（ $=1/T_m$ ）	K^{-1}
Δt	中空層に接する 2 つのガラス（フィルム）面の温度差	K
μ	気体の粘度	$kg/(m \cdot s)$
C	気体の比熱	$J/(kg \cdot K)$
T_m	中空層に接する 2 つのガラス（フィルム）面の絶対温度の値の 平均値	K
m_i	モル分率	—
P	気体の圧力	Pa
$\Re$	気体定数	$J/(kmol \cdot K)$
λ_d	h_c を d_{gas} で除した単位厚みあたりの熱伝導率	$W/(m \cdot K)$

3.2.3 ガラスエッジ部の高断熱化

3.2.3-1 設定条件と評価方法

記号	意味	単位
U_f	窓フレーム部熱貫流率	$W/(m^2 \cdot K)$
Q_f	パネルモデル断面の通過熱流量	W/m
ΔT	JIS A2102-2 に基づく室内外温度差	℃
U_p	断熱パネルの熱貫流率	$W/(m^2 \cdot K)$
b_p	断熱パネルの見付け幅	m
b_f	窓フレーム部の投影幅（突出したガスケットを除く）	m
Ψ_g	ガラスエッジ部線熱貫流率	$W/(m \cdot K)$
Q_g	ガラスモデル断面の通過熱流量	W/m
U_g	ガラス中央部熱貫流率	$W/(m^2 \cdot K)$
b_g	ガラスの見付け幅	m
η_Ψ	SN 比	db
$Ave\eta_{\Psi_g}$	SN 比平均値	db

3.2.3-2 各断面の Ψ_g 計算結果

記号	意味	単位
$Ave\Psi_g$	一窓当りのガラスエッジ部平均線熱貫流率	$W/(m \cdot K)$
l_g	ガラス露出幅（高さ）	m
Ψ_g	ガラスエッジ部線熱貫流率	$W/(m \cdot K)$
$\lambda_{eq,2B}$	文献 ²⁴⁾ により簡略化されたガラスエッジ部の等価熱伝導率	$W/(m \cdot K)$

3.2.4 各部位の最適組合せと窓全体の断熱性能

記号	意味	単位
U_w	窓全体の熱貫流率	$W/(m^2 \cdot K)$
A_g	ガラスの露出面積	m^2
U_g	ガラス中央部熱貫流率	$W/(m^2 \cdot K)$
A_f	窓フレーム部の露出面積	m^2
U_f	窓フレーム部熱貫流率	$W/(m^2 \cdot K)$
l_g	ガラス露出幅（高さ）	m
Ψ_g	ガラスエッジ部線熱貫流率	$W/(m \cdot K)$
b_g	ガラスの見付け幅	m
$AveU_f$	一窓当りの窓フレーム部平均熱貫流率	$W/(m^2 \cdot K)$
$Ave\Psi_g$	一窓当りのガラスエッジ部平均線熱貫流率	$W/(m \cdot K)$

3.3 測定による性能検証

3.3.3 U_g と $AveU_f$ の推定方法

記号	意味	単位
U_g	標準化されたガラス中央部熱貫流率	$W/(m^2 \cdot K)$
U'_g	測定時のガラス中央部熱貫流率	$W/(m^2 \cdot K)$
0.165	JIS R3107 に基づく室内外表面熱伝達抵抗の総和	$(m^2 \cdot K) / W$
$R_{s,t}$	測定時の試験体両表面の熱伝達抵抗の総和	$(m^2 \cdot K) / W$
$\Delta\theta$	室内外環境温度差	$^{\circ}C$
θ_{in}	室内側ガラス中央部表面温度	$^{\circ}C$
θ_{out}	室外側ガラス中央部表面温度	$^{\circ}C$
Q_{sp}	(断熱パネルを含めた) 試験体を通過する熱流量	W
Q_{spf}	断熱パネルの見付け面積相当分の通過熱流量	W
PW	断熱パネルの見付け幅	m
PH	断熱パネルの総見付け高さ	m
D	断熱パネルの厚み	m
λ_p	断熱パネルの熱伝導率	$W/(m \cdot K)$
$AveU_f$	標準化された一窓当りの窓フレーム部平均熱貫流率	$W/(m^2 \cdot K)$
$AveU'_f$	測定時の一窓当りの窓フレーム部平均熱貫流率	$W/(m^2 \cdot K)$
0.170	JIS A2102-2 に基づく室内外表面熱伝達抵抗の総和	$(m^2 \cdot K) / W$
A_w	伝熱開口面積	m^2

【第3章の参考文献】

- 1) 田口玄一：品質工学の定義とタグチメソッド，品質工学 1(2)，2-7，1992
- 2) 田口玄一：品質工学の数理，（一財）日本規格協会，1999.6
- 3) 田口玄一：品質工学講座[1] 開発・設計段階の品質工学，（一財）日本規格協会，pp73～81，1998.08
- 4) 立林和夫：入門タグチメソッド，（株）日科技連出版社，2006.3
- 5) 広瀬健一，上田太一郎：Excelでできるタグチメソッド解析方入門，（株）同友館，2005.4
- 6) 遮熱計算法に関する研究報告書，平成13年度（一社）リビングアメニティ協会，2001
- 7) 遮熱計算法に関する研究報告書，平成14年度（一社）リビングアメニティ協会，2002
- 8) 遮熱計算法に関する研究報告書，平成15年度（一社）リビングアメニティ協会，2003
- 9) 遮熱計算法に関する研究報告書，平成16年度（一社）リビングアメニティ協会，2004
- 10) 遮熱計算法に関する研究報告書，平成19年度（一社）リビングアメニティ協会，2007
- 11) 伊丹清，赤坂裕，二宮秀與：窓の熱貫流率の計算法：その1 開き窓の計算値と試験値の比較，日本建築学会計画系論文集，第523号，pp31-37，1999.9
- 12) 二宮秀與，赤坂裕，伊丹清，倉山千春：窓の熱貫流率の計算法：その2 引違い窓の計算値と試験値の比較，日本建築学会環境系論文集，第576号，pp9-15，2004.2
- 13) 一般社団法人リビングアメニティ協会ホームページ<https://www.alianet.org/windeye/>，2019.5.4参照
- 14) JIS A2102-2：窓及びドアの熱性能－熱貫流率の計算-第2部：フレームの数値計算方法，（一財）日本規格協会，2011
- 15) A. Gustavsen, B. Petter Jelle, D. Arasteh, C. Kohler, State-of-the-art highly insulating window frames. Research and Market Review, Project report no. 6 Norwegian University of Science and Technology, Building and Infrastructure 2007, ISBN 978-82-536-0970-6.
- 16) Lechowska. A., J. Schnotale, B. Giorgio. 2017. "Window frame thermal transmittance improvements without frame geometry variations: An experimentally validated CFD analysis." Energy and Buildings 145: 188-199
- 17) JIS K5492：アルミニウムペイント，（一財）日本規格協会，2003
- 18) ASHRAE：2009 ASHRAE handbook fundamentals
- 19) JIS R3107：板ガラス類の熱抵抗及び建築における熱貫流率の算定方法，（一財）日本規格協会，1998
- 20) ISO 10291：Glass in building-Determination of steady-state U values (thermal transmittance) of multiple glazing -Guarded hot plate method, 1994
- 21) ISO 15099：Thermal performance of windows, doors and shading devices-Detailed Calculations, 2003
- 22) SWISSPACER Corpホームページ<http://www.swisspacer.com/en/>，2019.5.4参照

- 23) 日本板硝子北海道株式会社ホームページ<http://www.nsg-hokkaido.jp/> , 2019.5.4参照
- 24) ift Guideline WA-08engl/1, Thermally improved spacers—Part 1: Determination of representative Ψ -values for profile sections of windows, ift Rosenheim, November 2008
- 25) JIS A2102-1: 窓及びドアの熱性能 - 熱貫流率の計算-第1部: 一般, (一財)日本規格協会, 2015
- 26) JIS A4710: 建具の断熱試験方法, (一財)日本規格協会, 2015
- 27) EN 12412-2: Thermal performance of windows, doors and shutters. Determination of thermal transmittance by hot box method. Frames, 2003
- 28) NFRC 100A-2014[E0A0] Procedure for determining fenestration attachment product U-factors

【本章に関連する既発表文献】

- 29) 高田和規, 遠藤卓, 立松宏一, 村田さやか, 廣田誠一, 北谷幸恵, 鈴木大隆, 羽山広文: 住宅用樹脂製窓の高断熱化に関する研究 - 各種要素技術による断熱性能向上の実現性 -, 日本建築学会環境系論文集, 第82巻第732号, pp165-173, 2017. 2
- 30) 高田和規, 遠藤卓, 立松宏一, 村田さやか, 廣田誠一, 北谷幸恵, 鈴木大隆, 羽山広文: 住宅用樹脂製窓の高断熱化に関する研究 - 各種要素技術による断熱性能向上の実現性 -, 日本建築学会環境工学委員会熱環境運営委員会第46回熱シンポジウム, pp85-92, 2016. 10
- 31) 高田和規, 村田さやか, 遠藤卓, 立松宏一: 住宅用樹脂製窓の超高断熱化に関する研究 (第1報)各種要素技術による断熱性能向上の実現性, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp181-184, 2015. 9

第4章 樹脂製窓と躯体の間の線熱貫流率低減手法に関する検討

4.1 本章の背景と目的

前述したが、窓が躯体に設置された状態を考えた場合、窓の断熱性能が向上することで、窓から抜け難くなった熱流は流れやすい個所に集中し、その流れやすい個所の一つが窓と躯体との間であることが既往の研究¹⁾²⁾³⁾により明らかになっている。また、ISO 14683⁴⁾では、窓と躯体の間の線熱貫流率を、躯体の構成や窓の躯体への設置位置で整理した18種の組合せに分類し、それぞれの線熱貫流率を示している。これら点に着目し、窓の熱的性能や窓の躯体への設置位置が、窓と躯体の間の線熱貫流率に及ぼす影響を把握するとともに、窓と躯体の間の線熱貫流率を小さくするための方策を示すことは、今後の建築物の省エネルギー性や室内空間の快適性向上において意義がある。

そこで本章では、樹脂製窓と躯体の間の線熱貫流率の低減手法に関する検討として、木造充填断熱工法に焦点を当て、「窓フレーム内部断熱材の熱伝導率」、「窓の躯体への設置位置^{注1)}」、「室内額縁の構成材料」といった因子が窓と躯体の間の線熱貫流率に与える影響と最適条件（線熱貫流率低減に最も寄与する因子と水準）を、タグチメソッドを用いて明らかにするとともに、最適条件の組合せからなる窓と躯体の間の線熱貫流率を示し、さらに試験体の製作と性能検証によってその妥当性の検証結果を報告する。

なお、本検討では実験室実験での再現が容易であることを考慮し、窓（窓フレーム部の断熱性能と窓の躯体への設置位置）と窓周辺部材（室内額縁）に絞って検討したため、躯体は対象としていない。躯体の構成材料（例えば充填断熱材や内装材、外装材等）の仕様や他の工法、構造（例えば外張断熱工法やRC造、鉄骨造等）が窓と躯体の間の線熱貫流率に与える影響については今後の課題として検討していく予定である。

注1) 本章で示す「窓の躯体への設置位置」とは、躯体の奥行き方向に対する窓の設置位置を表わし、設置方位等は考慮していない。

4.2 計算条件と評価方法

4.2.1 計算対象窓と躯体込み断面図

日本国内で流通している樹脂製窓は概ね **FIX 窓**、開き窓、引違い窓の 3 窓種に分類できることを背景に、計算対象窓は **FIX 窓**、外開き窓、引違い窓の 3 タイプを設定した。内観姿図を図 4-1 に、各部の名称を窓のサイズ (W、H) とともに図 4-2 に示す。断面形状は国内メーカー間で軽微な差異はあるものの、概ね類似していることからディテールが入手可能、加工や試験が可能な国内 A 社の樹脂製窓製品を選択した。各計算対象窓の躯体込み断面図 (下枠断面を代表とした) と構成材料の名称を図 4-3 に、各構成材料の物性値 (熱伝導率) を表 4-1 に示す。なお、窓フレーム部に設置する複層ガラスは各計算対象窓共通してアルゴンガス (Ar) 入り **Low-E 2 層複層ガラス (Low-E3+Ar16+FL3)** とし、複層ガラス中空層の等価熱伝導率は **JIS R3107**⁵⁾ に基づき算出した値を用いた。



図 4-1 計算対象窓の内観姿図

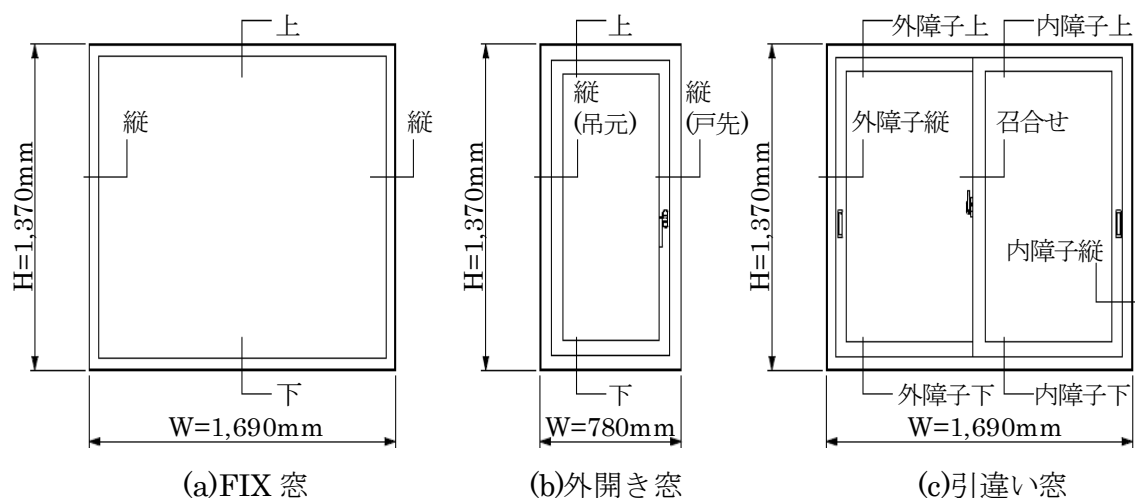
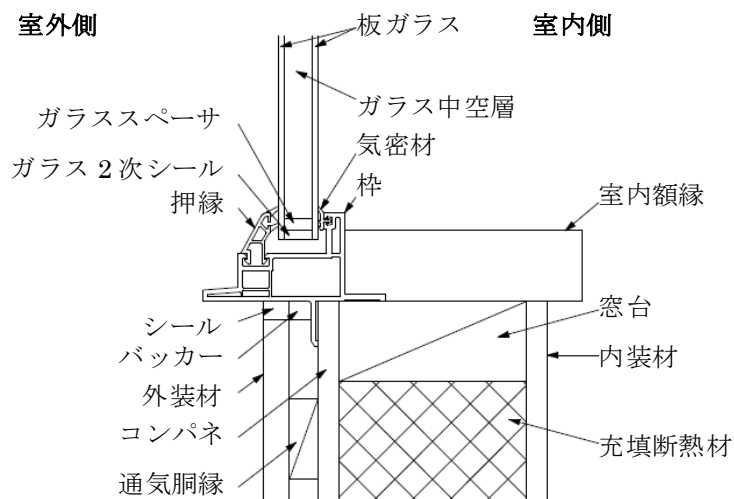
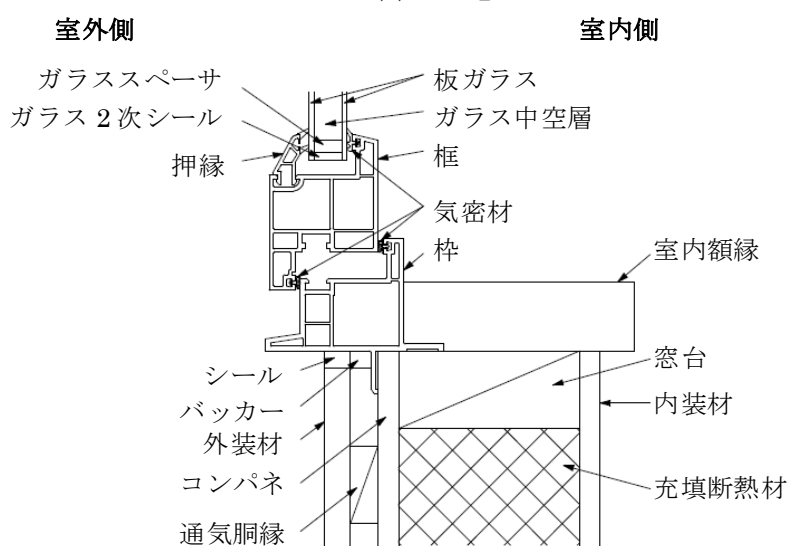


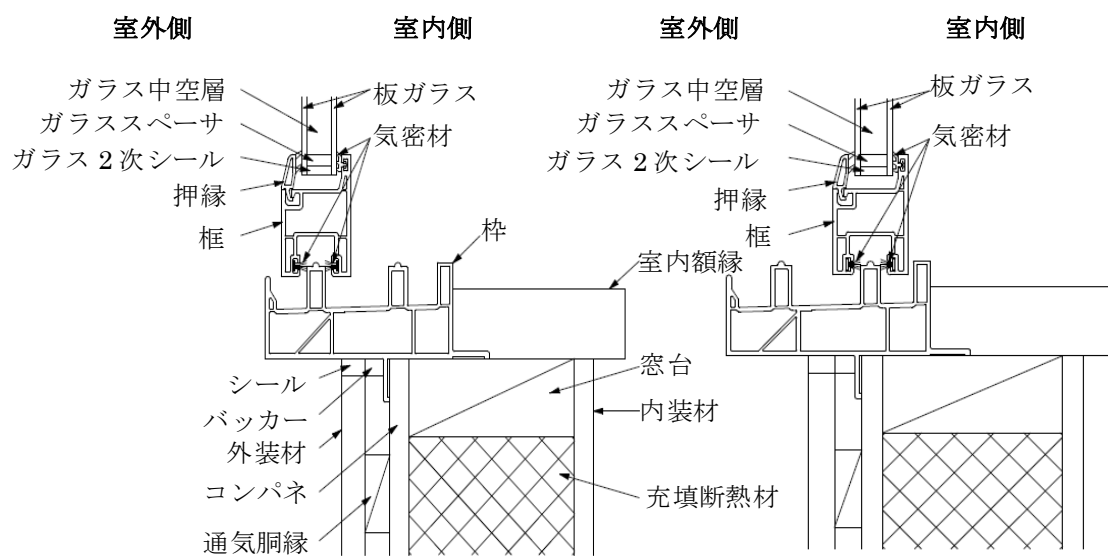
図 4-2 計算対象窓の各部の名称 (内観)



(a)FIX 窓



(b)外開き窓



(c)引違い窓 (外障子)

(d)引違い窓 (内障子)

図 4-3 計算対象窓の躯体込み断面図 (下枠断面)

表 4-1 各構成材料の物性値

構成材料	熱伝導率[W/(m・K)]
枠 (硬質 PVC)	0.17
押縁 (硬質 PVC)	
気密材 (軟質 PVC)	
板ガラス (ソーダ石灰ガラス)	1.0
ガラス中空層 注 1)	0.023
ガラススペーサ (TPS 注 2))	0.24
ガラス 2 次シール (ポリサルファイド)	0.40
外装材 (石膏プラスター)	0.62
内装材 (石膏ボード)	0.22
窓台 (木)	0.16
コンパネ (木)	
通気胴縁 (木)	
シール (シリコン)	0.35
バッカー (ポリエチレン)	0.35
充填断熱材 (グラスウール)	0.05

注 1) ガラス中空層に充填されるアルゴンガスの濃度は 85%、Low-E 膜の修正放射率は 0.042、板ガラスの修正放射率は 0.837 としてガラス中空層の等価熱伝導率を JIS R3107 に基づき算出した。

注 2) TPS は Thermo Plastic Spacer の略語で、1 次シールとしてのガスバリア性も兼ねた、カーボンブラック、ブチルゴム、乾燥材で構成される中実タイプのスペーサ。

各計算対象窓のサイズ (W、H) は、住宅性能評価・表示協会で定められた「サッシ等の遮音性能及び熱貫流率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」⁶⁾で規定されている、窓の熱貫流率の測定及び計算に用いる各窓種の代表的な寸法を参考に設定した。躯体の各構成材料の厚み (奥行き方向) は、各計算対象窓共通とし、外装材が 16mm、通気胴縁が 15mm、コンパネが 12mm、窓台および充填断熱材が 105mm、内装材が 12mm の、躯体総厚を 160mm とした。額縁の見付け幅は、窓内法基準寸法押え位置に合うように、上枠側を 30mm、下枠側を 40mm、縦枠側を 20mm とした。なお、額縁の物性は 4.2.3 にて後述する。

4.2.2 計算条件

窓と躯体の間の線熱貫流率 (ψ_b) は、宮澤らの既往研究¹⁾の手法に沿って、式 4-1 に示す様に、躯体込み窓モデル (Q_A) の通過熱流量から窓モデル (Q_B) 及び躯体モデル (Q_C) の通過熱流量を差し引き、得られた窓と躯体の間の通過熱流量 (L_{QB}) を室内外の温度差 (ΔT) で除すことにより求める。各計算モデルの形状を、FIX 窓の下枠断面を代表して図 4-4 に示す。なお、各モデルの通過熱流量計算は、境界要素法による 2 次元定常伝熱解析プログラム「TB2D/BEM⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾」を用いて行った。

$$\psi_b = \frac{Q_A - Q_B - Q_C}{\Delta T} = \frac{L_{QB}}{\Delta T} \quad \cdots \text{式 4-1}$$

環境条件は JIS A2102-2¹⁴⁾に従い表 4-2 に示すように室内外の温度は、室内側 20℃、室外側 0℃、室内外温度差 (ΔT) 20℃、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、室外側一般部を 7.69 W/(m²・K)、室内側隅角部（躯体部分の隅角部には適用しない）を 5.00 W/(m²・K)、室外側を 25.0 W/(m²・K)とした。また、境界条件は図 4-4 に示す太い破線部（額縁を含めた躯体と枠フレームとの接合部分）を断熱境界（熱移動ゼロ）とした。各計算対象窓の解析モデルを、下枠断面（引違い窓は外障子側を代表とした）を代表として図 4-5～図 4-7 に示す。

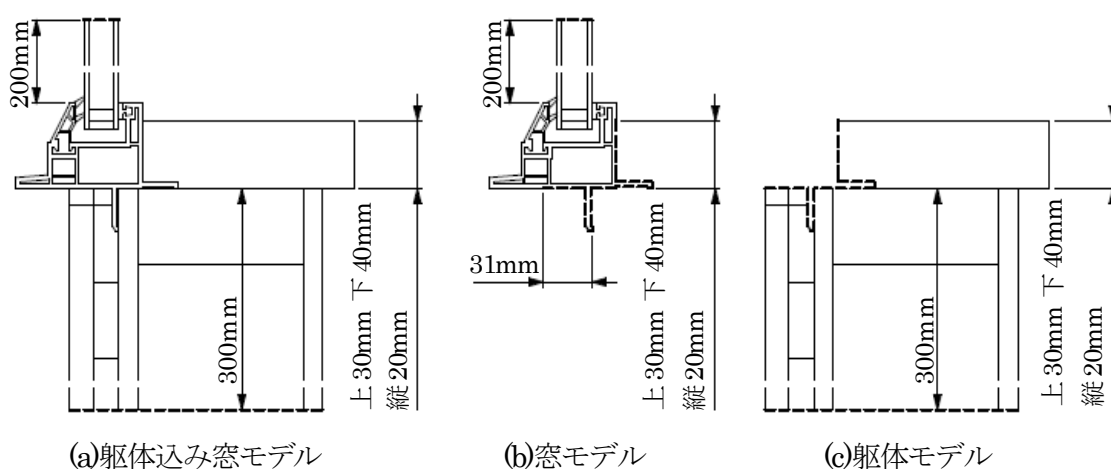
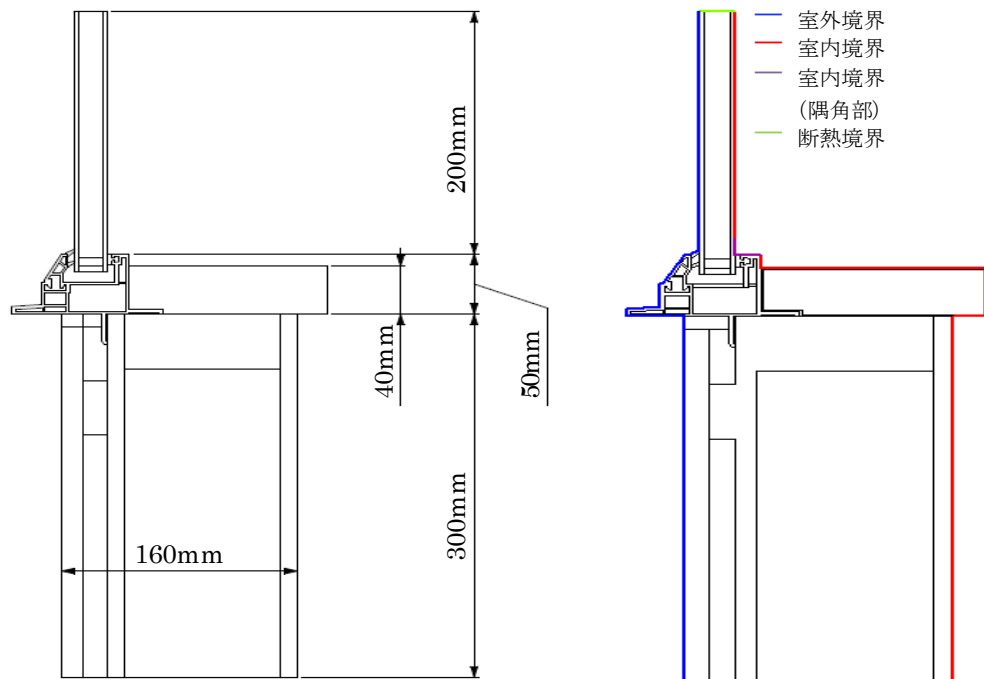


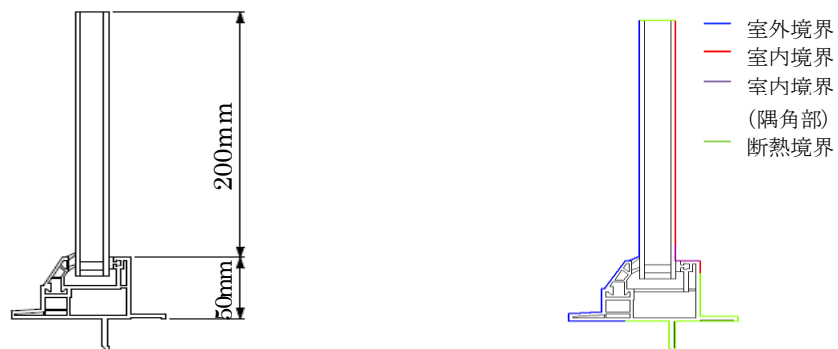
図 4-4 各計算モデルの形状（FIX 窓下枠）

表 4-2 ψ_b 計算時の環境条件

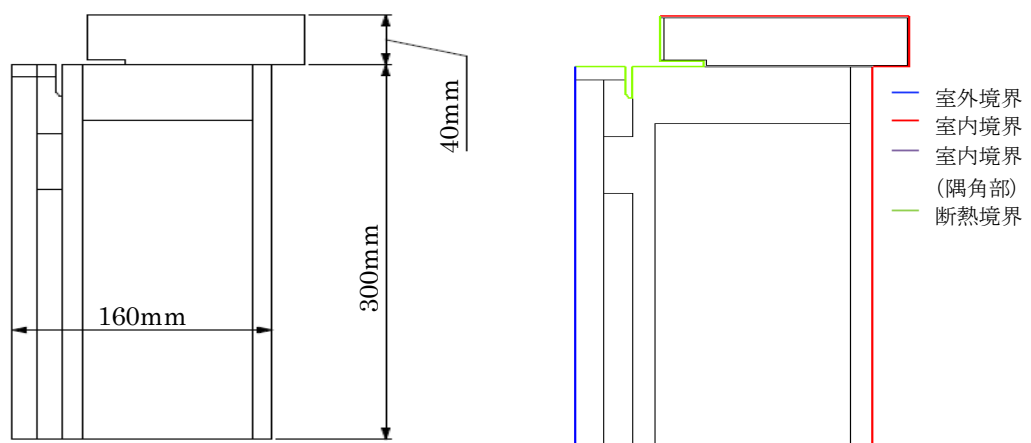
環境条件			
雰囲気温度[℃]	室外側		20
	室内側		0
表面熱伝達率 [W/(m ² ・K)]	室内側	室外側	7.69
		室外側	5.00
	室外側		25.0



(a) 躯体込み窓モデル

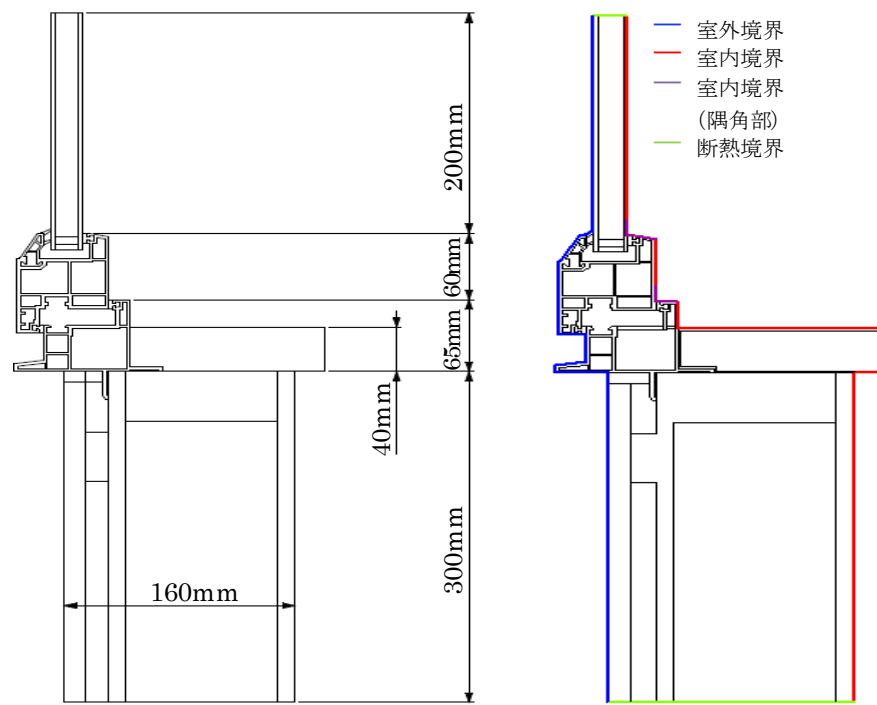


(b) 窓モデル

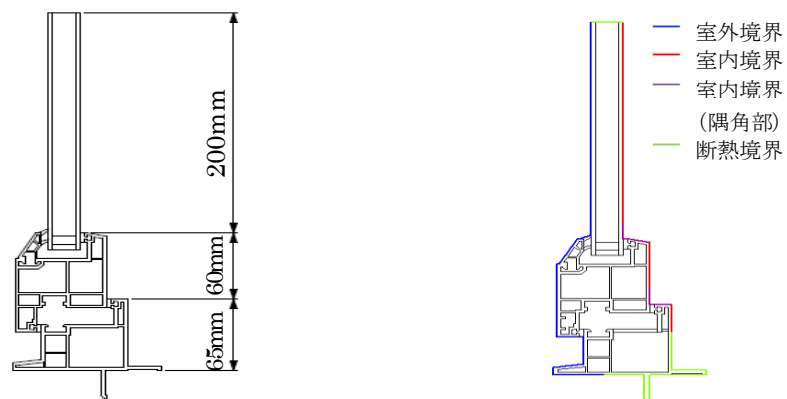


(c) 躯体モデル

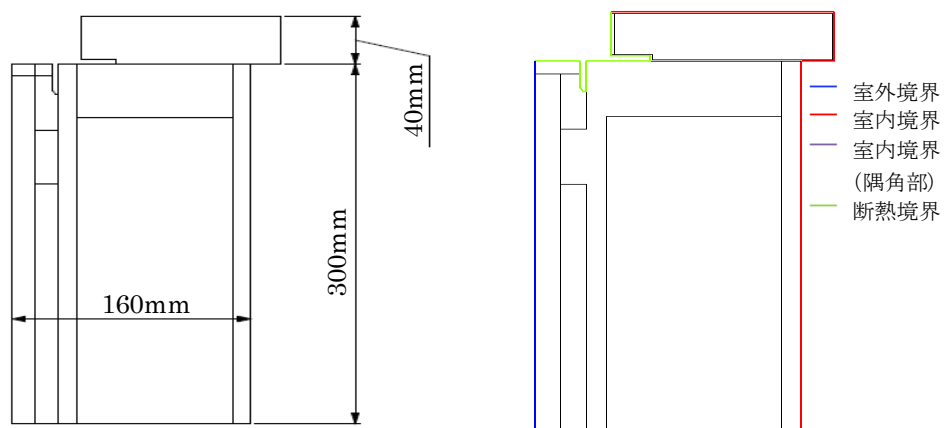
図 4-5 FIX 窓の解析モデル（下枠断面）



(a) 躯体込み窓モデル

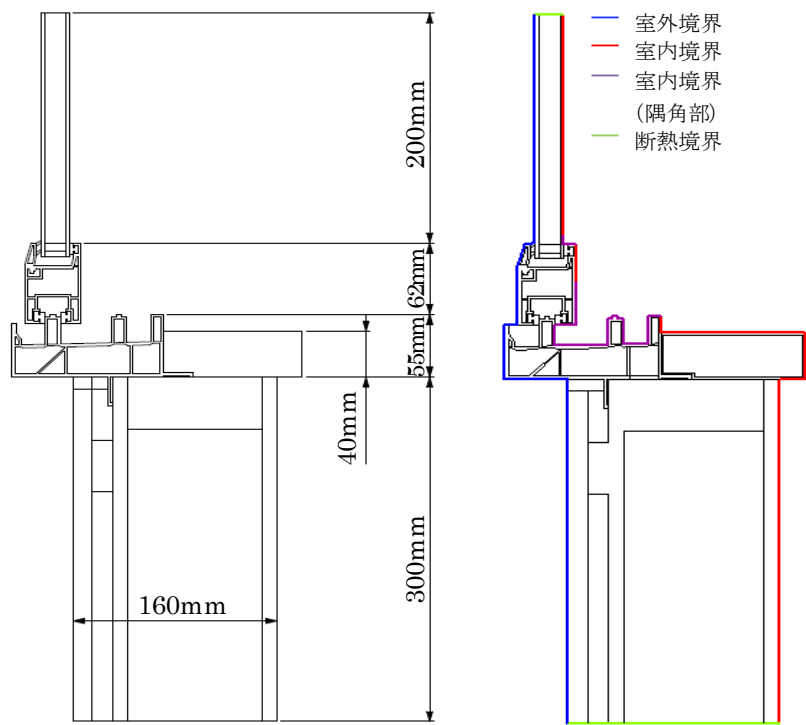


(b) 窓モデル

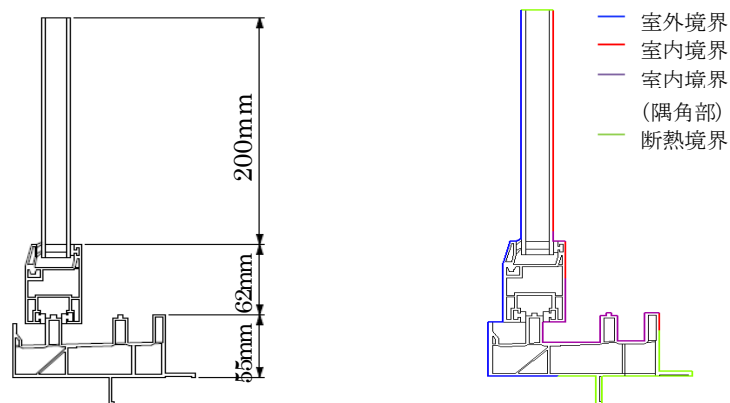


(c) 躯体モデル

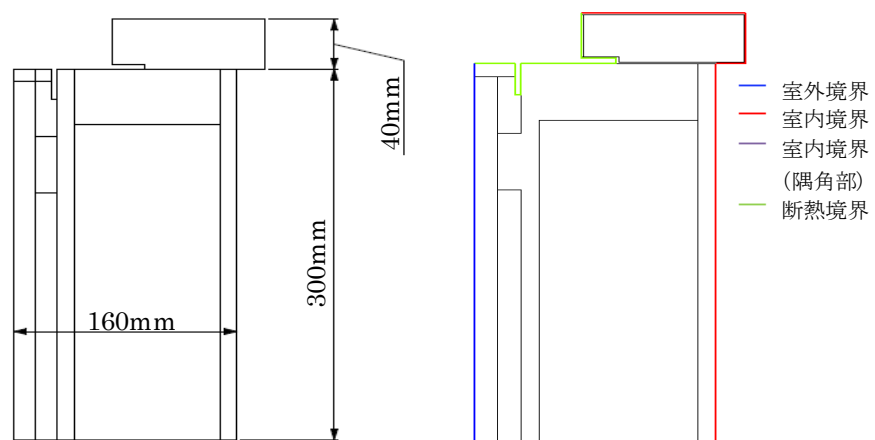
図 4-6 外開き窓の解析モデル (下枠断面)



(a) 躯体込み窓モデル



(b) 窓モデル



(c) 躯体モデル

図 4-7 引違い窓の解析モデル (外障子側下枠断面)

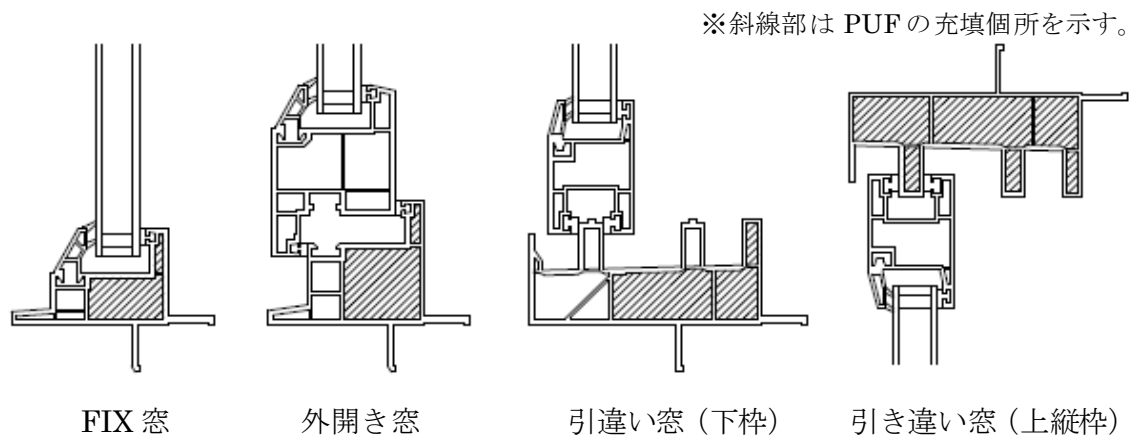
4.2.3 評価方法

Ψ_b に影響を与えると想定される制御因子は、「窓フレーム内部断熱材の熱伝導率」、「窓の躯体への設置位置」、「室内額縁の構成材料」の 3 つとし、各因子に 3 つの水準を設定した。これら制御因子が Ψ_b に与える効果を効率的かつ合理的に評価する方法としてタグチメソッドを用いた。制御因子と水準の一覧を表 4-3 に、制御因子の概略図を図 4-8 に示す。

表 4-3 制御因子と水準の一覧

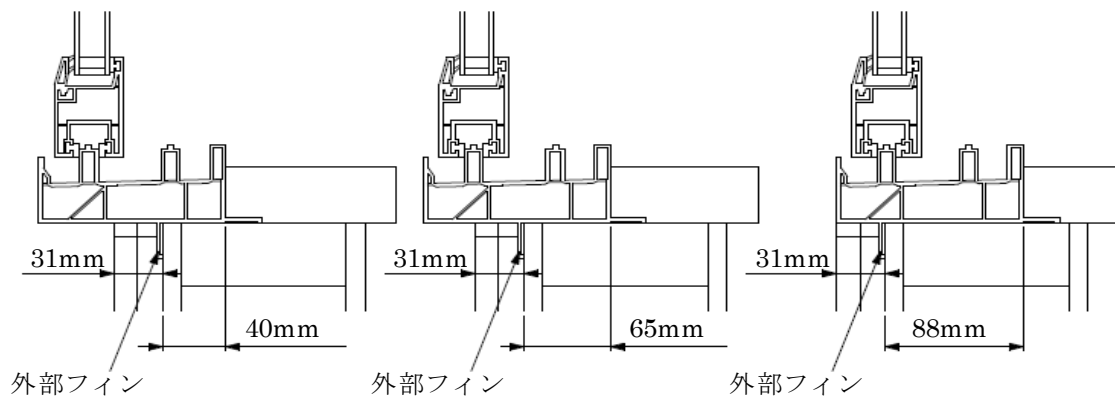
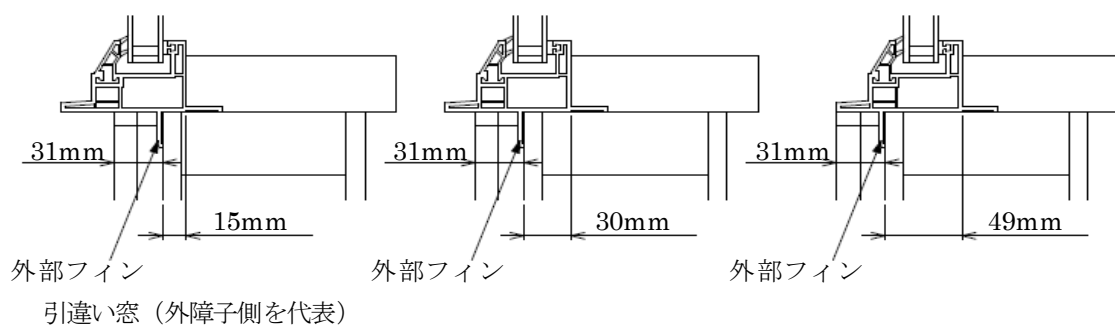
制御因子	第 1 水準	第 2 水準	第 3 水準
A 窓フレーム内部断熱材の熱伝導率 [W/(m・K)]	無	0.024 PUF	
B 窓の躯体への設置位置 [mm]	15 (40)	30 (65)	49 (88)
C 室内額縁の構成材料	アルミニウム	木	硬質 PVC+ PUF

制御因子 B の () の数値は引違い窓の設置位置を示す。

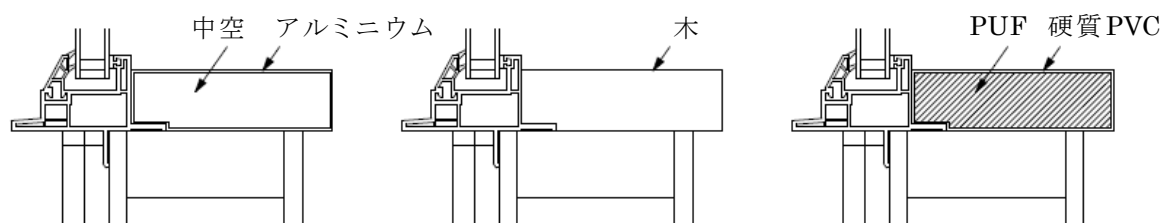


(a)制御因子 A

FIX 窓、外開き窓 (FIX 窓を代表)



(b)制御因子 B



(c)制御因子 C (FIX 窓を代表)

図 4-8 各制御因子の概略図

制御因子 A の「窓フレーム内部断熱材の熱伝導率」は、躯体と接合する枠の断面内部に静止空気の熱伝導率相当 ($0.024 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$) の断熱材を隙間なく設置し、枠の断熱性能を向上させたことによる Ψ_b への影響把握を目的とした。なお、宮澤らの既往研究では、窓フレーム部の主となる材質の熱伝導率が大きいほど Ψ_b が大きくなっていることを示している。そのため、断熱材の設置は Ψ_b 低減に寄与する可能性があると考えた。設置する断熱材の熱伝導率は、無、PUF 相当 ($0.024 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$) の 2 水準を設定した。なお、断熱材の設置が困難な個所や雨水等の排出経路に該当する箇所は設置対象から外した。

制御因子 B の「窓の躯体への設置位置」は、ISO 14683 では線熱貫流率を躯体の構成や窓の躯体への設置位置で整理した 18 種の組合せに分類し、それぞれの線熱貫流率を示している。断熱材が室内側に配置されたケースが本章で取り扱う木造充填断熱工法の充填断熱材の配置に類似しており、これを参照すると、窓が躯体に対し室外側寄りに納まるケース (図 4-9 (a)) の線熱貫流率は $0.80 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ に対し、窓が躯体の中間付近に納まるケース (図 4-9 (b)) が $0.60 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 、窓が室内側寄りに納まるケース (図 4-9 (c)) が $0.00 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ となっており、窓の設置位置が室内側に向くにつれ線熱貫流率が減少している点に着目し、本検討では、窓の躯体とのかかり代を図 4-8 (b) に示す様に、FIX 窓、外開き窓は 15mm、30mm、49mm、引違い窓は 40 mm、65mm、88mm の 3 水準を設定した。なお、枠フレームの外部フィンと外壁間の距離は一定 (31mm) とした。

制御因子 C の「室内額縁の構成材料」は、窓フレーム部と躯体の両方に接している室内額縁はその両者に対し伝熱すると考えられ、室内額縁の構成材料が Ψ_b に影響を与える可能性がある。そこで本検討では、主に水周り等の膳板として一般的に用いられる金属製 (板厚 2.0mm のアルミニウム製中空形材、)、水周り以外で一般的に用いられる木製、高断熱化した額縁を想定した硬質 PVC と PUF の複合製 (板厚 2.0mm の硬質 PVC 製中空形材の中空部に PUF を隙間なく配置) の 3 水準を設定した。各構成材料の熱伝導率は、アルミニウム ($160 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$)、木 ($0.16 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$)、硬質 PVC ($0.17 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$)、PUF ($0.024 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$) とした。

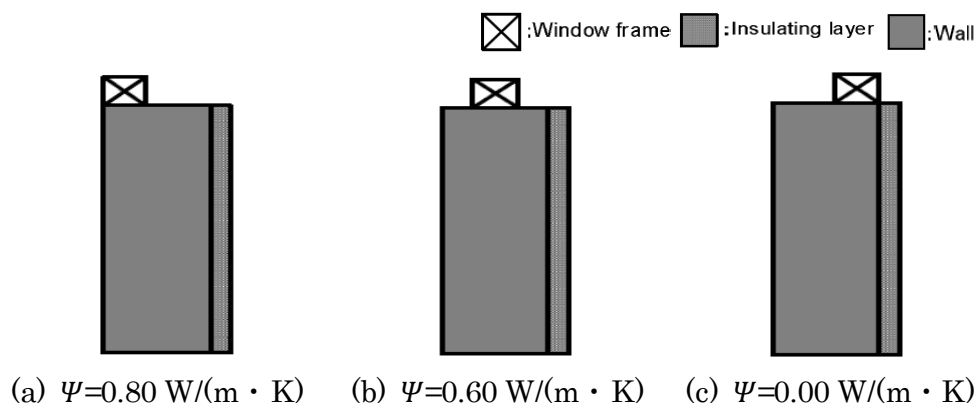


図 4-9 ISO 14683 Annex A (一部抜粋)

各制御因子の組合せが均等になるように制御因子と水準を L_{18} 直交表に割り付け、その組合せで各窓各ケースの Ψ_b を算出し、SN 比平均値と SN 比影響度を求める。各窓各断面に共通した L_{18} 直交表を表 4-4 に示す。

表 4-4 各窓各断面の L_{18} 直交表

制御因子 ケース	A	B	C
1	無	15 (40)	アルミニウム
2	無	15 (40)	木
3	無	15 (40)	硬質 PVC+PUF
4	無	30 (65)	アルミニウム
5	無	30 (65)	木
6	無	30 (65)	硬質 PVC+PUF
7	無	49 (88)	アルミニウム
8	無	49 (88)	木
9	無	49 (88)	硬質 PVC+PUF
10	0.024	15 (40)	アルミニウム
11	0.024	15 (40)	木
12	0.024	15 (40)	硬質 PVC+PUF
13	0.024	30 (65)	アルミニウム
14	0.024	30 (65)	木
15	0.024	30 (65)	硬質 PVC+PUF
16	0.024	49 (88)	アルミニウム
17	0.024	49 (88)	木
18	0.024	49 (88)	硬質 PVC+PUF

制御因子 B の () の数値は引違い窓の設置位置を示す。

SN 比平均値を比較することで、各断面の Ψ_b 低減に寄与する制御因子の水準が把握できる。SN 比平均値が最大となる制御因子の水準の組合せが Ψ_b を最小にする。また、SN 比影響度を比較することで各制御因子の水準を変更した際の Ψ_b への影響度合い（序列）が把握できる。SN 比影響度は SN 比平均値の最大値と最小値の差から求める。なお、品質工学における SN 比は一般に「ばらつきの尺度 (SN 比が大きい＝ばらつきが小さい)」を表すが、本章においても対象部位の数値（ここでは Ψ_b を指す）を最も小さくする構成を示すことを目的としている。そのため、本章における SN 比は望小特性を表わし、SN 比 (η_{Ψ_b}) の算出は式 4-2 を用いる。

$$\eta_{\Psi_b} = 10 \log(1/\Psi_b^2) \quad \cdots \text{式 4-2}$$

また、各窓各断面の SN 比平均値 ($Ave\eta_{\psi_b}$) の算出は式 4-3～式 4-10 を用いる。

制御因子 A

$$Ave\eta_{\psi_b}(\text{第 1 水準}) = \sum_{n=1}^9 \eta_{\psi_{b_n}} / 9 \quad \cdots \text{式 4-3}$$

$$Ave\eta_{\psi_b}(\text{第 2 水準}) = \sum_{n=10}^{18} \eta_{\psi_{b_n}} / 9 \quad \cdots \text{式 4-4}$$

制御因子 B

$$Ave\eta_{\psi_b}(\text{第 1 水準}) = \left(\sum_{n=1}^3 \eta_{\psi_{b_n}} + \sum_{n=10}^{12} \eta_{\psi_{b_n}} \right) / 6 \quad \cdots \text{式 4-5}$$

$$Ave\eta_{\psi_b}(\text{第 2 水準}) = \left(\sum_{n=4}^6 \eta_{\psi_{b_n}} + \sum_{n=13}^{15} \eta_{\psi_{b_n}} \right) / 6 \quad \cdots \text{式 4-6}$$

$$Ave\eta_{\psi_b}(\text{第 3 水準}) = \left(\sum_{n=7}^9 \eta_{\psi_{b_n}} + \sum_{n=16}^{18} \eta_{\psi_{b_n}} \right) / 6 \quad \cdots \text{式 4-7}$$

制御因子 C

$$Ave\eta_{\psi_b}(\text{第 1 水準}) = (\eta_{\psi_{b_1}} + \eta_{\psi_{b_4}} + \eta_{\psi_{b_7}} + \eta_{\psi_{b_{10}}} + \eta_{\psi_{b_{13}}} + \eta_{\psi_{b_{16}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 4-8}$$

$$Ave\eta_{\psi_b}(\text{第 2 水準}) = (\eta_{\psi_{b_2}} + \eta_{\psi_{b_5}} + \eta_{\psi_{b_8}} + \eta_{\psi_{b_{11}}} + \eta_{\psi_{b_{14}}} + \eta_{\psi_{b_{17}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 4-9}$$

$$Ave\eta_{\psi_b}(\text{第 3 水準}) = (\eta_{\psi_{b_3}} + \eta_{\psi_{b_6}} + \eta_{\psi_{b_9}} + \eta_{\psi_{b_{12}}} + \eta_{\psi_{b_{15}}} + \eta_{\psi_{b_{18}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 4-10}$$

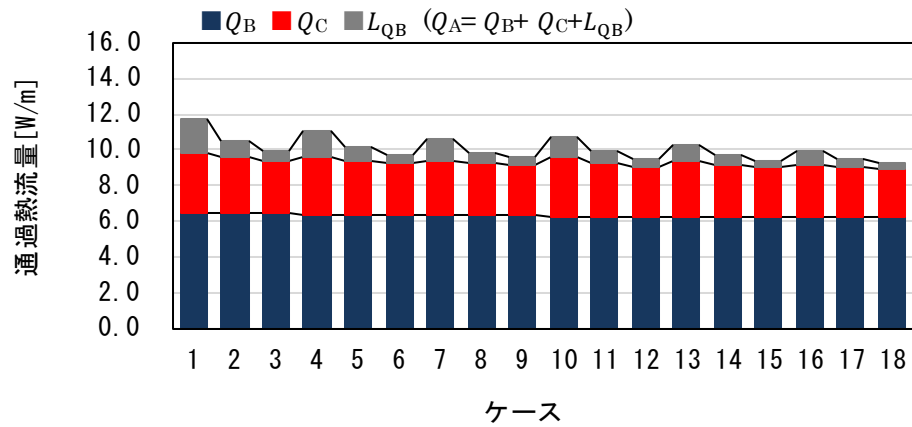
4.3 計算結果と考察

4.3.1 各断面の通過熱流量及び Ψ_b 計算結果

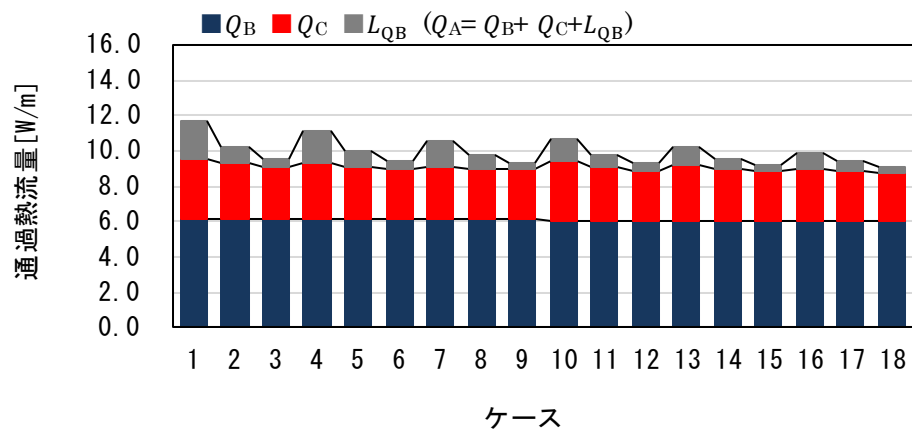
各窓各断面各ケースの通過熱流量 (Q_A 、 Q_B 、 Q_C 、 L_{QB}) 計算結果を図 4-10～図 4-13 に、 Ψ_b 計算結果を表 4-5 に示す。なお、表 4-5 の $Ave\Psi_b$ とは、開口部一窓当りの窓と躯体の間の平均線熱貫流率を示し、算出式は宮澤らの既往研究の手法に沿って式 4-11 を用いた。

$$Ave\Psi_b = \frac{\sum(\Psi_{bi} \times l_i)}{L} \quad \cdots\text{式 4-11}$$

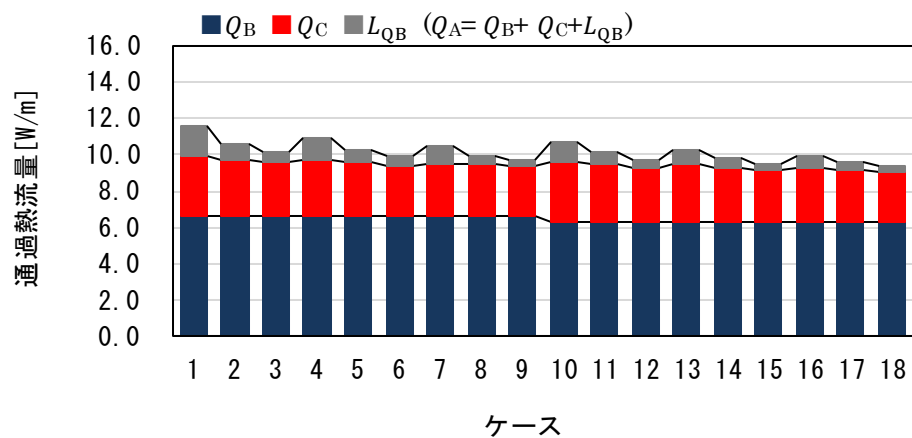
まず図 4-10～図 4-13 の Q_A に着目すると、全ての断面に共通してケース 1 が最も大きく、ケース 18 が最も小さい値となっていることが確認できる。ケース 1 とケース 18 の Q_A の差は、ケース 1 を 100%とした場合、ケース 18 は FIX 窓で 78～81%、外開き窓で 79～82%、引違い窓で 78～87%程度となった。また、制御因子 A の水準のみ変化させたケース (ケース 1、10)、制御因子 B の水準のみ変化させたケース (ケース 1、4、7)、制御因子 C の水準のみ変化させたケース (ケース 1、2、3) から、全ての制御因子において水準があがるにつれ Q_A が小さくなっていることがわかる。次に表 4-5 から、全ての断面に共通してケース 1～18において程度の差はあれ Ψ_b の大小が確認できる。これは、窓と躯体の間の熱流が制御因子の影響を受けたことによるものと考えられる。また、 Ψ_b は全ての断面に共通してケース 1 が最も大きく、ケース 18 が最も小さい値となっていることが確認できる。ケース 1 とケース 18 の Ψ_b の差は、ケース 1 を 100%とした場合、ケース 18 は FIX 窓で 14～19%、外開き窓で 12～18%、引違い窓で 16～29%程度となった。次に、SN 比を用いて Ψ_b に対する各制御因子の影響を評価した。



(a)上

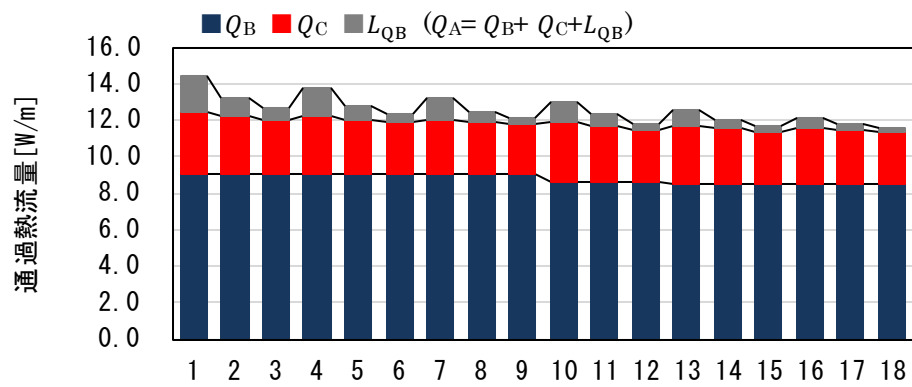


(b)下

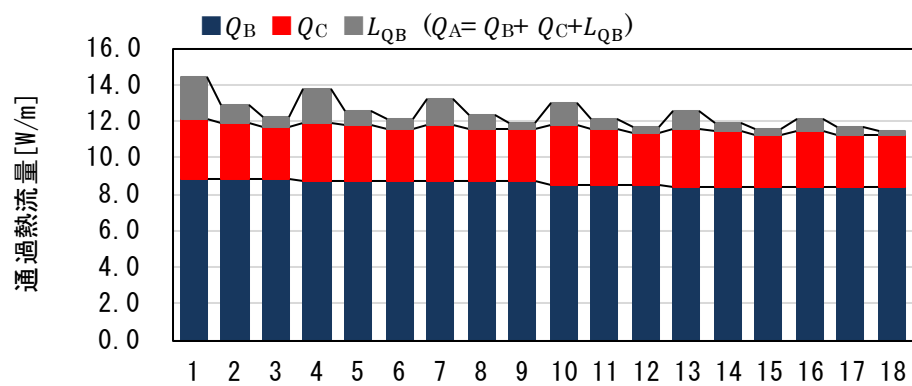


(c)縦

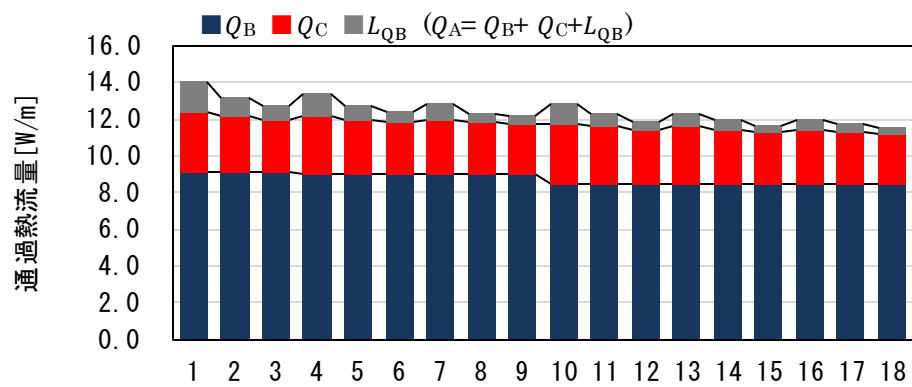
図 4-10 FIX 窓の各ケース通過熱流量計算結果



ケース
(a)上

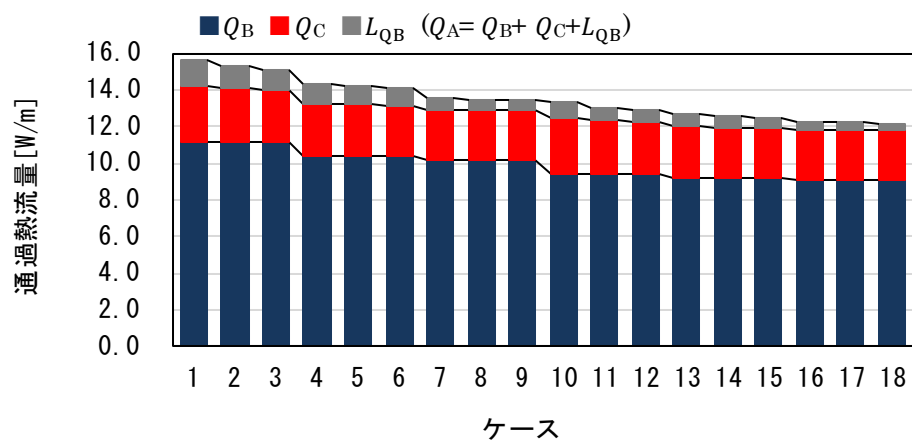


ケース
(b)下

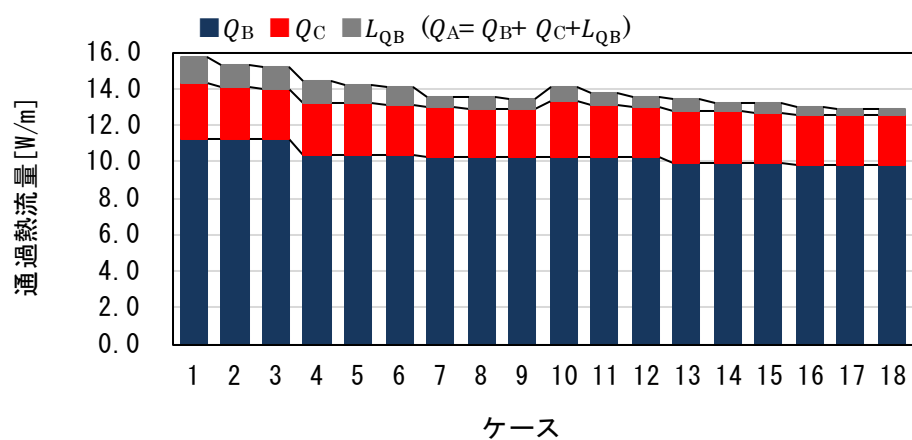


ケース
(c)縦

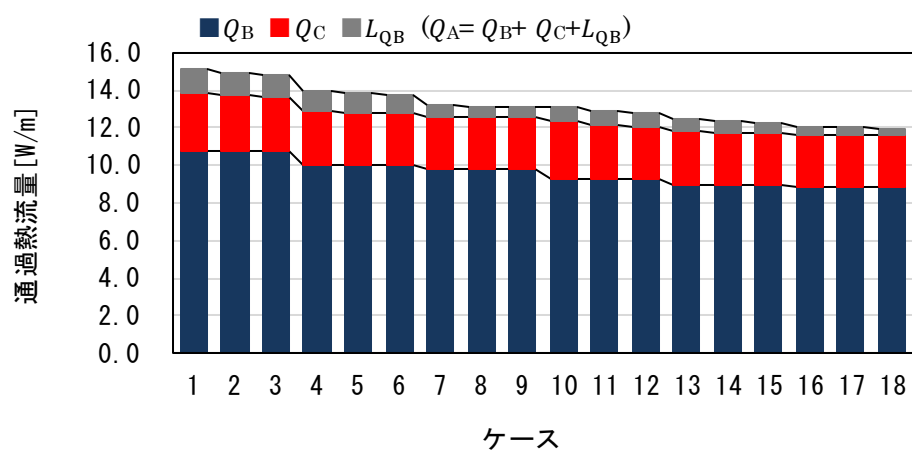
図 4-11 外開き窓の各ケース通過熱流量計算結果



(a)外障子側上

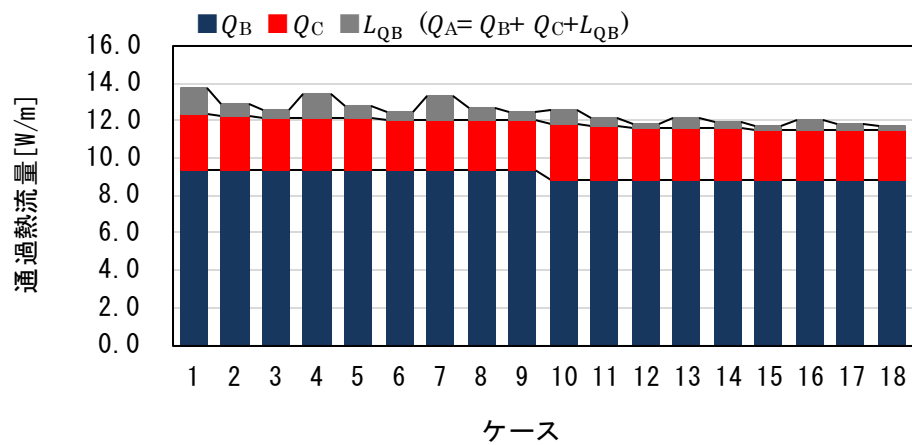


(b)外障子側下

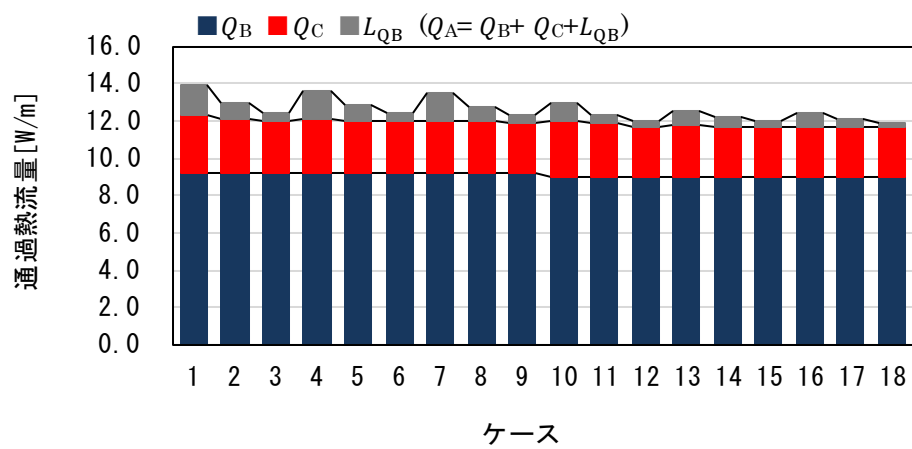


(c)外障子側縦

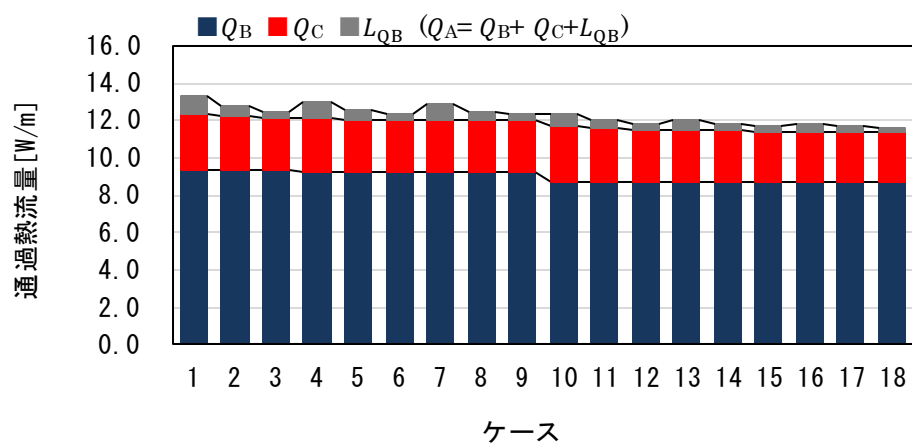
図 4-12 引違い窓の各ケース通過熱流量計算結果（外障子側）



(d)内障子側上



(e)内障子側下



(f)内障子側縦

図 4-13 引違い窓の各ケース通過熱流量計算結果（内障子側）

表 4-5 各窓各断面の Ψ_b 計算結果[W/(m・K)]

(a)FIX 窓					(b)外開き窓				
部位 ケース	上	下	縦	Ave Ψ_b	部位 ケース	上	下	縦	Ave Ψ_b
1	0.099	0.110	0.081	0.094	1	0.100	0.114	0.082	0.096
2	0.047	0.048	0.043	0.046	2	0.048	0.051	0.046	0.048
3	0.029	0.026	0.032	0.029	3	0.032	0.030	0.036	0.033
4	0.077	0.088	0.060	0.072	4	0.078	0.091	0.060	0.073
5	0.038	0.041	0.033	0.036	5	0.038	0.043	0.035	0.038
6	0.024	0.022	0.024	0.023	6	0.025	0.025	0.028	0.026
7	0.063	0.073	0.047	0.059	7	0.059	0.072	0.044	0.056
8	0.030	0.036	0.026	0.030	8	0.029	0.036	0.024	0.029
9	0.020	0.020	0.019	0.019	9	0.018	0.021	0.018	0.019
10	0.059	0.066	0.052	0.058	10	0.054	0.060	0.051	0.054
11	0.033	0.034	0.033	0.033	11	0.031	0.031	0.032	0.032
12	0.020	0.019	0.023	0.021	12	0.019	0.018	0.023	0.021
13	0.045	0.052	0.039	0.044	13	0.040	0.045	0.036	0.040
14	0.026	0.028	0.025	0.026	14	0.024	0.025	0.024	0.025
15	0.017	0.016	0.018	0.017	15	0.015	0.015	0.018	0.017
16	0.037	0.045	0.031	0.036	16	0.031	0.037	0.028	0.031
17	0.022	0.026	0.020	0.022	17	0.020	0.022	0.019	0.020
18	0.015	0.016	0.015	0.015	18	0.013	0.014	0.014	0.014

(c)引違い窓							
部位 ケース	外障子側			内障子側			Ave Ψ_b
	上	下	縦	上	下	縦	
1	0.069	0.072	0.067	0.068	0.083	0.051	0.067
2	0.060	0.060	0.061	0.033	0.041	0.028	0.047
3	0.057	0.058	0.059	0.021	0.023	0.019	0.039
4	0.053	0.056	0.052	0.062	0.076	0.044	0.055
5	0.049	0.052	0.050	0.032	0.040	0.025	0.041
6	0.048	0.050	0.049	0.021	0.022	0.019	0.035
7	0.030	0.032	0.030	0.062	0.075	0.044	0.044
8	0.028	0.029	0.029	0.031	0.040	0.025	0.030
9	0.027	0.028	0.028	0.021	0.021	0.018	0.024
10	0.041	0.041	0.041	0.036	0.045	0.032	0.039
11	0.034	0.033	0.036	0.022	0.026	0.022	0.029
12	0.030	0.028	0.033	0.015	0.016	0.016	0.023
13	0.033	0.030	0.033	0.027	0.037	0.023	0.030
14	0.029	0.026	0.030	0.018	0.024	0.016	0.024
15	0.028	0.024	0.029	0.012	0.014	0.012	0.020
16	0.022	0.019	0.022	0.024	0.035	0.019	0.023
17	0.020	0.017	0.020	0.017	0.023	0.014	0.019
18	0.019	0.016	0.020	0.012	0.014	0.012	0.015

4.3.2 各制御因子の Ψ_b に対する影響

各窓種・各断面の制御因子毎の水準と $Ave\eta_{\Psi_b}$ を図 4-14 に、SN 比影響度を図 4-15 に示す。なお、引違い窓は比較がし易いように、外障子側（図 4-14、図 4-15 の(c)）と内障子側（図 4-14、図 4-15 の(d)）に分けて示した。図 4-14 中で囲った各制御因子の組合せが最も Ψ_b を小さくする。すなわち、制御因子の第 3 水準（制御因子 A は第 2 水準）からなる組合せであるケース 18（表 4-5 参照）が最も Ψ_b の小さい構成となる。また、全ての断面に共通して制御因子の水準が上がるにつれ $Ave\eta_{\Psi_b}$ が上昇していることがわかる。これは、窓フレーム部や室内額縁の断熱性能が高いほど、窓の躯体への設置位置を室内側に向けるほど、 Ψ_b の低減につながることを意味している。

次に、図 4-15 から SN 比影響度が最も大きかった Ψ_b 低減に寄与する制御因子に着目すると、FIX 窓と外開き窓は各断面部位（上枠・下枠・縦枠）に共通して制御因子 C（室内額縁の構成材料）が最も効果的であったことから、窓全体としても制御因子 C が最も効果的であると言える。一方引違い窓は外障子側と内障子側で傾向が異なり、外障子側は制御因子 B（窓の躯体への設置位置）が、内障子側は制御因子 C が各断面部位に共通して最も効果的と読み取れるものの、窓全体として最も効果的な制御因子を判断することが難しい結果となった。引違い窓がこのような結果になった理由として、外障子側と内障子側で断面構造が異なっていることが要因として考えられる。例えば、図 4-3 に示す様に外障子側の框は室内額縁から離れた配置となっており、室内額縁の熱的影響を受け難い断面構造であることに対し、内障子側の框は室内額縁に隣接した配置となっており、室内額縁の熱的影響を受けやすい断面構造となっている。外障子側の制御因子 C の効果が内障子側と比べ極端に低いのも、そのためであると推察する。なお、各窓種の制御因子において、断面部位毎の SN 比影響度にばらつきが見られるが、これは室内額縁の厚さ（伝熱開口寸法の押えから上枠 30mm、下枠 40mm、縦枠 20mm）の影響によるものと推察する。

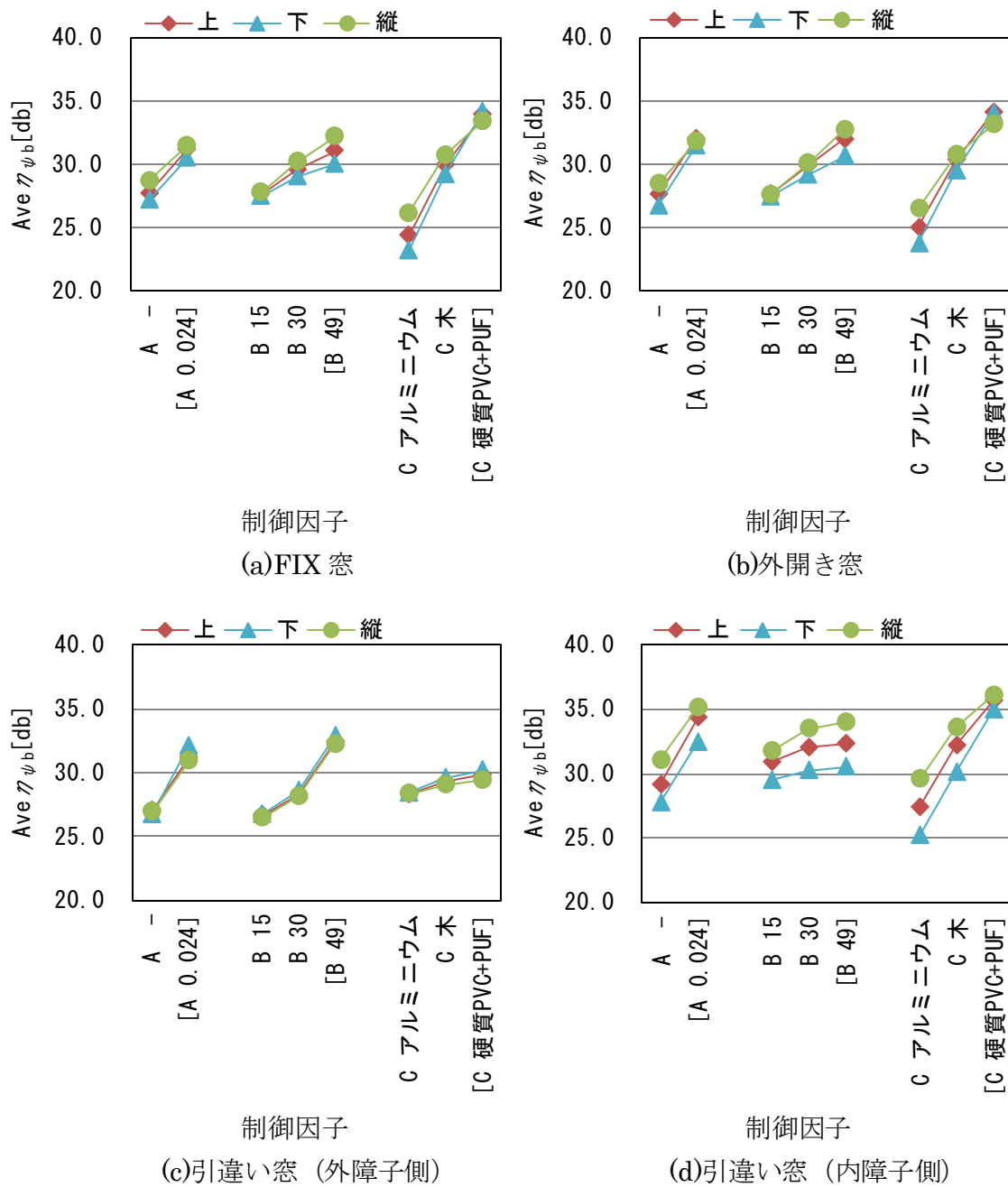
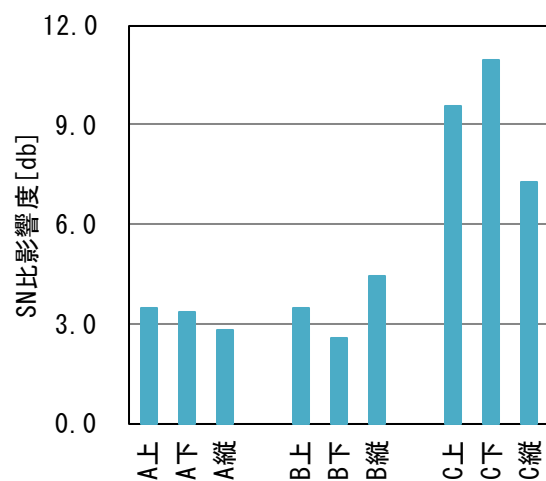
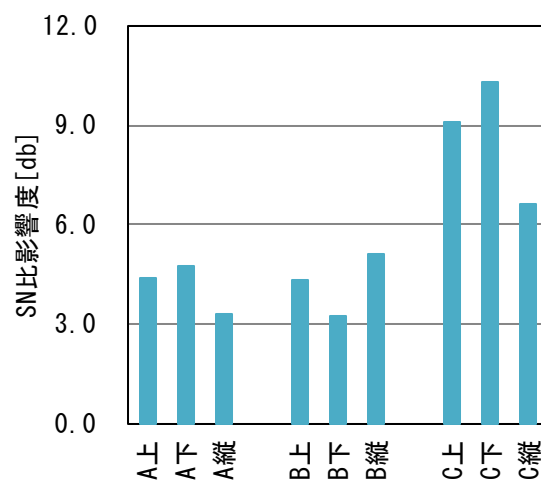


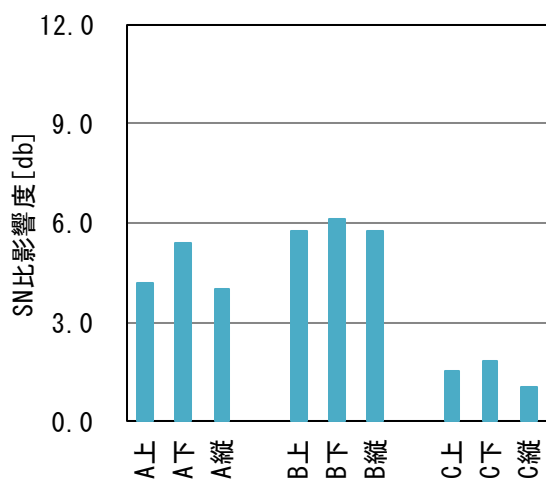
図 4-14 各窓種・各断面の制御因子毎の水準と $Ave \eta \psi_b$



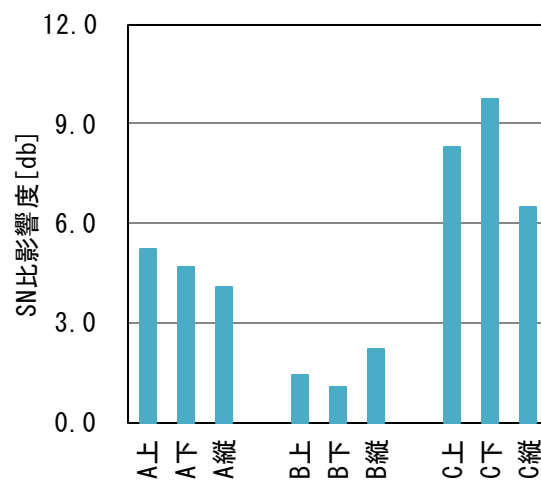
制御因子
(a)FIX 窓



制御因子
(b)外開き窓



制御因子
(c)引違い窓 (外障子側)



制御因子
(d)引違い窓 (内障子側)

図 4-15 SN比影響度

4.3.3 各制御因子の $Ave\Psi_b$ に対する影響

4.3.2 では、断面部位毎では図 4-15 に示す通り明確に Ψ_b 低減に寄与する制御因子の序列を示すことができるものの、窓全体として考えた場合、引違い窓のような部位によって断面構造が異なる窓種は断面部位毎の SN 比影響度からでは、序列の明確な判断が難しいことがわかった。

そこで、窓全体として各制御因子の序列を明確に示す方法として、開口部一窓当りの窓と躯体の間の平均線熱貫流率 $Ave\Psi_b$ を用いた SN 比影響度に着目する。各部位の線熱貫流率を一窓当たりとして平均化することにより、窓フレーム部の断面構造の違いや室内額縁の厚さによる影響を排除し、窓全体として各制御因子の序列を明確に示すことができる。 $Ave\Psi_b$ を用いた各窓種・各制御因子の SN 比影響度を図 4-16 に示す。

図 4-16 から、各窓種における窓全体とした場合における各制御因子の序列は以下の通りとなった。

- ・ FIX 窓 : 制御因子 C > 制御因子 B > 制御因子 A
- ・ 外開き窓 : 制御因子 C > 制御因子 B > 制御因子 A
- ・ 引違い窓 : 制御因子 A > 制御因子 C > 制御因子 B

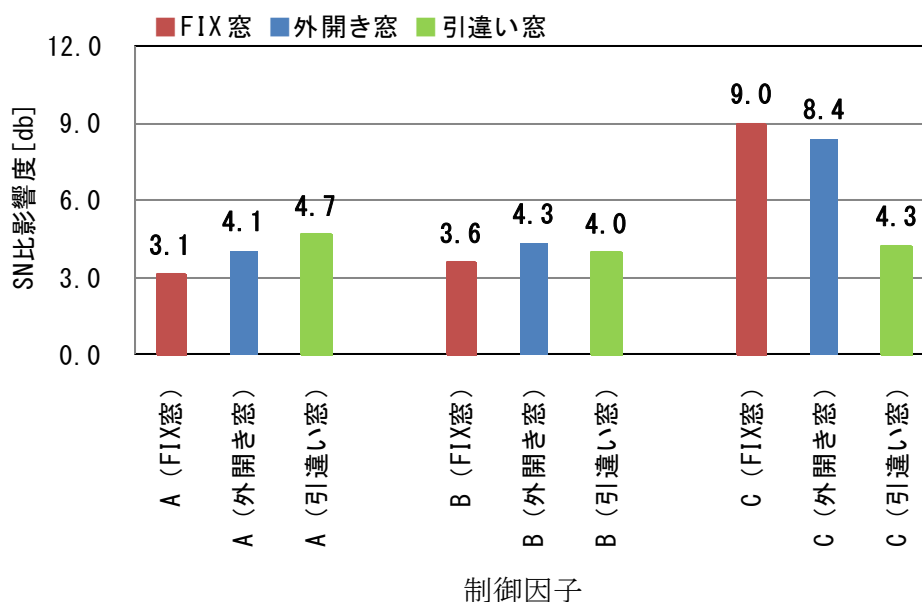


図 4-16 $Ave\Psi_b$ を用いた SN 比影響度

4.4 測定による妥当性検証

4.4.1 測定概要

FIX 窓における開口部一窓当りの窓と躯体の間の平均線熱貫流率を、試験体（ここでは窓＋躯体：取付パネルを示す）を製作し JIS A4710¹⁵⁾「建具の断熱性試験方法」に基づき測定した結果を用いて算出した値（以下測定値という）と、試験体を数値計算モデル化し 4.2 および式 4-11 で示した計算方法により算出した値（以下計算値という）を比較し、計算値の妥当性を検証した。測定は 3 章と同様に、北海道旭川市の地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 建築研究本部の断熱防露試験室を使用した。試験体は室内室と室外室の境界壁に設置した。試験体の概要を図 4-17 に示す。なお、試験装置の概要は 3 章の図 3-20 で示した内容と同様である。FIX 窓は 4.2 で計算対象とした国内 A 社の窓商品を用いた。

測定中の室内室は温度 20℃、相対湿度 30%以下、室外室は 0℃、相対湿度は成り行きに設定した。また、室外室側は、幅 2,000mm×高さ 2,500mm×奥行き 150mm の風道を試験体に突き当て、風道下部の斜流ファンにより上向きの気流（約 3m/s）を発生させた。また、以下に示す各々の数値の算出に必要な空気温度や、試験体、バツフル板及び熱箱の表面温度並びにヒーター及びファンの消費電力をデータログで測定した。

測定値 ($Ave\psi'_b$) の算出は、式 4-12 を用いて、熱箱内の発生熱量 (Φ_{in}) から窓を通過する熱流量 (Φ_{sp})、取付パネルを通過する熱流量 (Φ_{sur})、熱箱を通過する熱流量 (Φ_l) を差し引き、試験体両側の空気温度差 ($\Delta\theta_c$) と開口部周長 (L) で除することにより求める。 Φ_{sp} の算出は、式 4-13 を用いて、窓を数値計算モデル化して得られた熱貫流率 (U_w) に伝熱開口面積 (A_w) と窓両側の環境温度差 ($\Delta\theta_{n,cal}$) を乗じることにより求める。 Φ_{sur} の算出は、式 4-14 を用いて、取付パネルを数値計算モデル化して得られた熱貫流率 (U_p) に取付パネルの見付け面積 (A_p) と $\Delta\theta_c$ を乗じることにより求める。

$$Ave\psi'_b = \frac{\Phi_{in} - \Phi_{sp} - \Phi_{sur} - \Phi_l}{\Delta\theta_c \cdot L} \quad \cdots\text{式 4-12}$$

$$\Phi_{sp} = U_w \cdot A_w \cdot \Delta\theta_{n,cal} \quad \cdots\text{式 4-13}$$

$$\Phi_{sur} = U_p \cdot A_p \cdot \Delta\theta_c \quad \cdots\text{式 4-14}$$

なお、 U_w は 4.4.2 で示す手法により得られた環境温度と表面熱伝達抵抗（室内側隅角部の表面熱伝達抵抗は JIS A2102-2 に基づいた）を環境条件として算出した熱貫流率を、JIS A4710 に基づき標準化した。また、 U_p は $\Delta\theta_c$ と JIS A2102-2 に基づく表面熱伝達抵抗を環境条件として算出した。窓と取付パネルの数値計算モデル（下枠断面を代表とした）を図 4-18 に、各構成材料の物性値（熱伝導率）を表 4-6 に示す。

窓フレーム部と取付パネルの通過熱流量計算は TB2D/BEM を用いて行った。境界条件は図 4-18 に示す太い破線部を断熱境界（熱移動ゼロ）とした。窓と取付パネルの熱貫流率計算は JIS A2102-1¹⁶⁾、JIS A2102-2 に基づいた。取付パネルの主要構成材料である EPS の熱伝導率は、取付パネル製作時に発生した端材を JIS A1412-2¹⁷⁾に基づき測定した値を用いた。 Φ_1 は加熱箱の表面温度差と材料の熱抵抗から求めた。

試験体は、表 4-4 に示すケース 1（線熱貫流率最大）、ケース 5、ケース 18（線熱貫流率最小）の 3 条件を設定した。試験体の設置状況（ケース 1 を代表とした）を図 4-19 に示す。試験体は JIS A4710 に準じ、ビーズ法ポリスチレンフォーム（EPS）で製作した取付パネル（W1,980mm×H2,480mm×D200mm）の見付け中央部に設置した。各ケースの試験体の詳細図を額縁の詳細図とともに図 4-20～図 4-22 に示す。なお、窓は取付パネルへの設置位置が変更できるよう、枠フレームの外部フィンをカットした。また、取付パネルは試験装置に設置した状態で窓の取り換えができるよう、取付パネルの開口と窓との間（上部と縦部）に 2mm 程度の隙間を設けた。隙間は漏気には十分配慮し気密テープで厳重に塞いだ。

表 4-6 各構成材料の物性値

構成材料	熱伝導率[W/(m・K)]
枠 (硬質 PVC)	0.17
押縁 (硬質 PVC)	
樹脂額縁 (硬質 PVC)	
気密材 (軟質 PVC)	0.14
板ガラス (ソーダ石灰ガラス)	1.0
ガラス中空層 注 1)	0.023
ガラススペーサ (TPS 注 2))	0.24
ガラス 2 次シール (ポリサルファイド)	0.40
取付パネル (EPS)	0.031
金属額縁 (アルミニウム)	160
木額縁 (木：ホクオウパイン)	0.13
窓台 (木：ホクオウパイン)	
PUF	0.024

注 1) ガラス中空層に充填されるアルゴンガスの濃度は 85%、Low-E 膜の修正放射率は 0.042、板ガラスの修正放射率は 0.837 としてガラス中空層の等価熱伝導率を JIS R3107 に基づき算出した。

注 2) TPS は Thermo Plastic Spacer の略語で、1 次シールとしてのガスバリア性も兼ねた、カーボンブラック、ブチルゴム、乾燥材で構成される中実タイプのスペーサ。

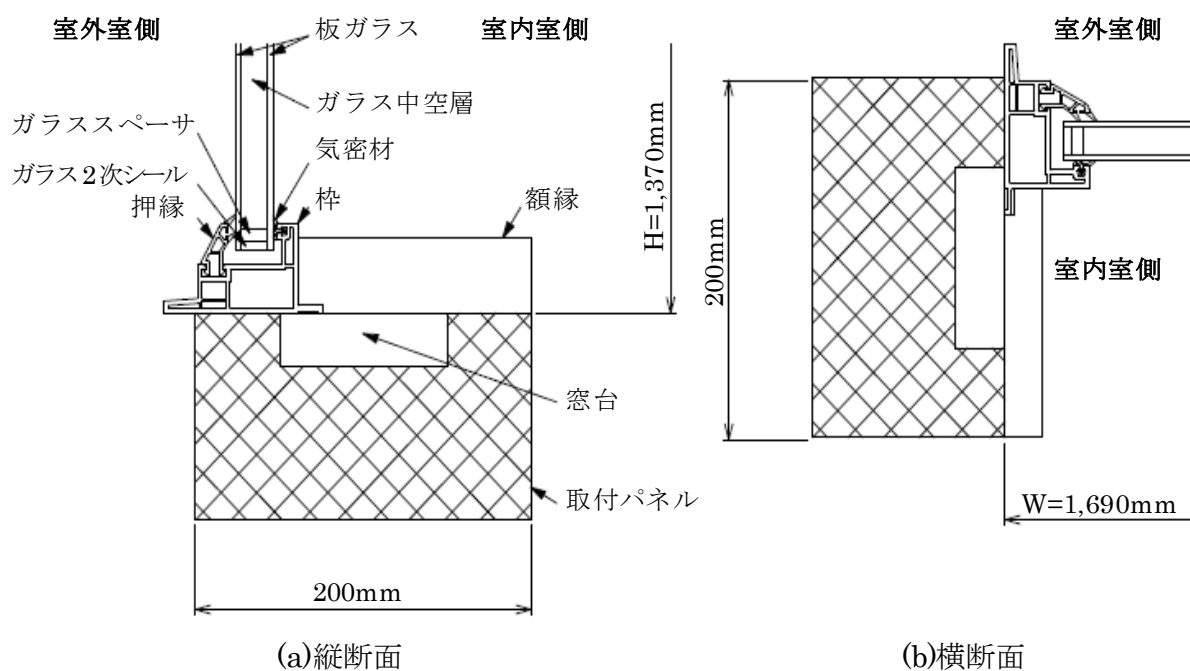
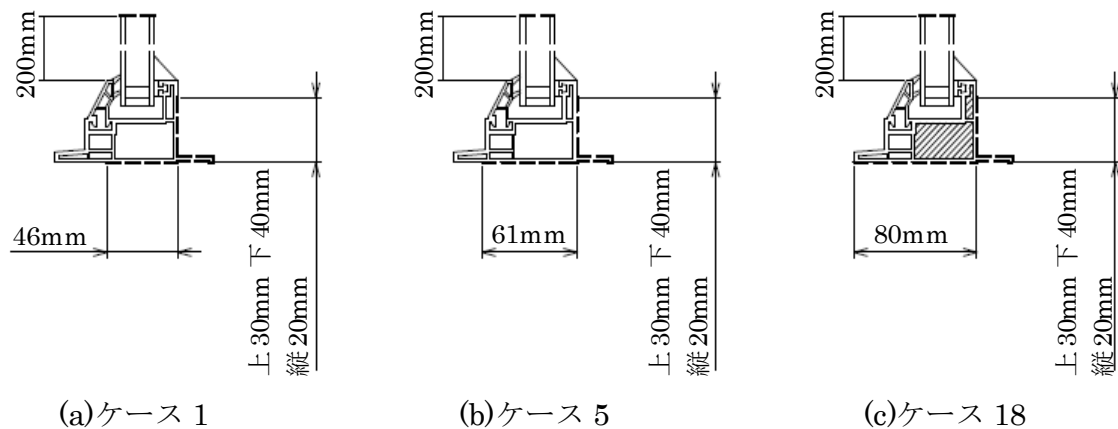


図 4-17 試験体の概要

窓の数値計算モデル

※斜線部は PUF の充填箇所を示す。



取付パネルの数値計算モデル

※斜線部は PUF の充填箇所を示す。

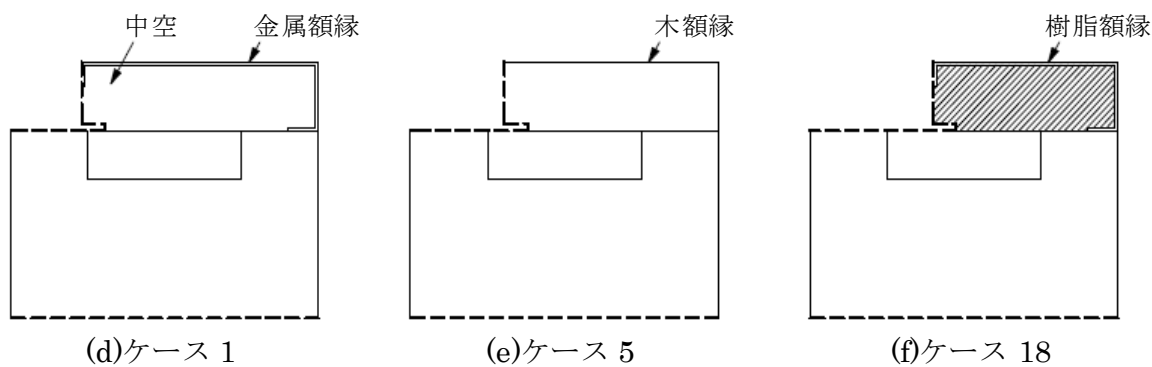


図 4-18 窓と取付パネルの数値計算モデル（下枠断面を代表）

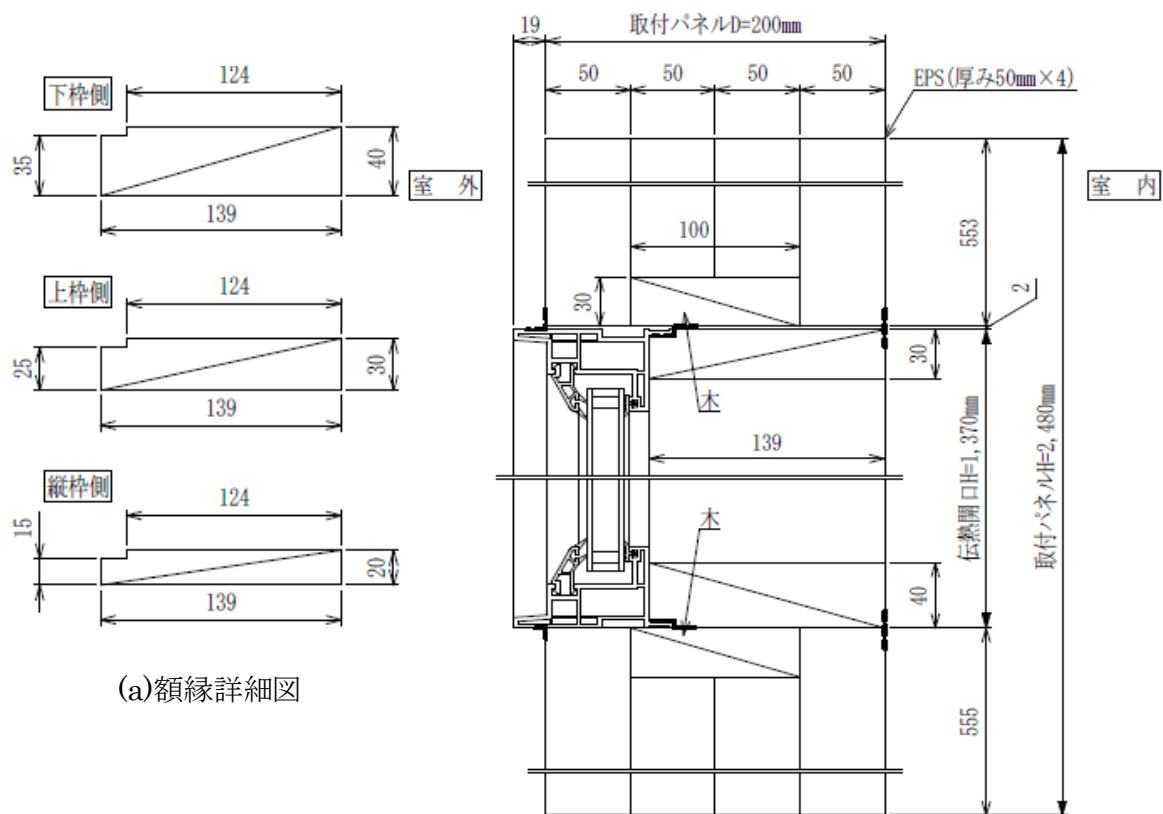


(a) 室外室側



(b) 室内室側

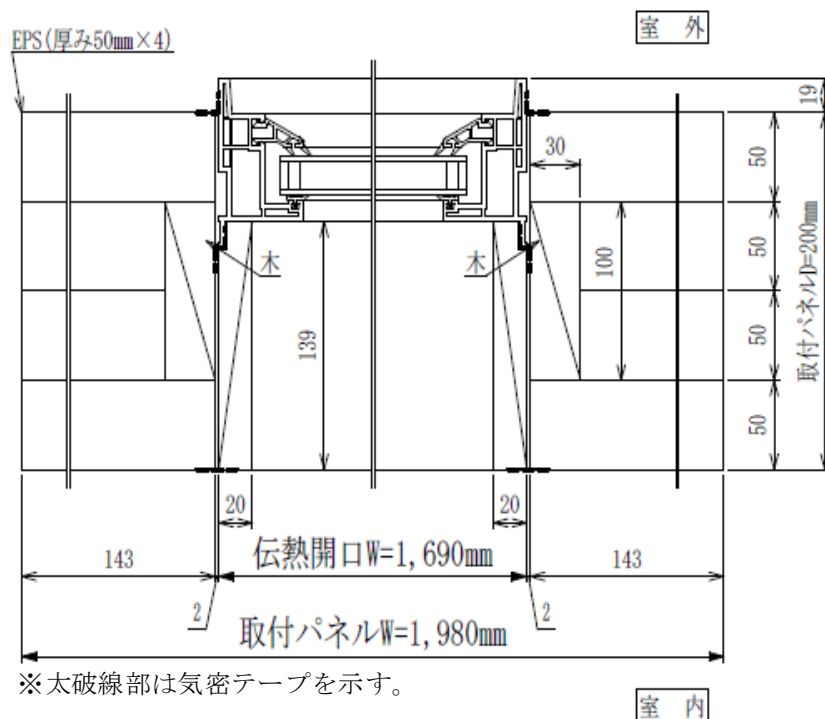
図 4-19 試験体の設置状況（ケース 1 を代表）



(a) 額縁詳細図

※太破線部は気密テープを示す。

(b) 試験体縦断面図



※太破線部は気密テープを示す。

(c) 試験体横断面図

図 4-21 ケース 5 の試験体と額縁の詳細図

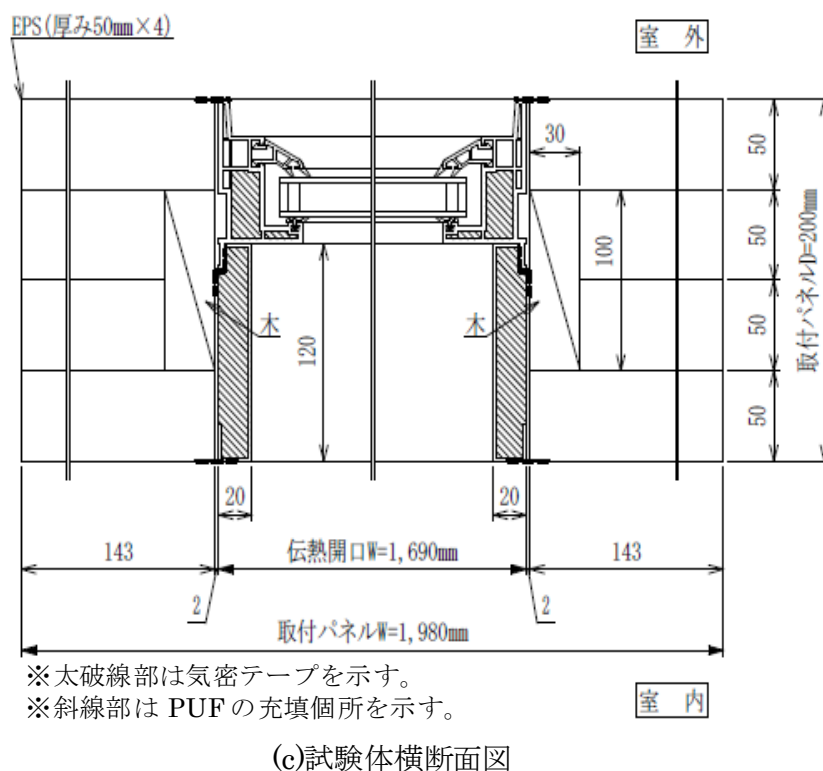
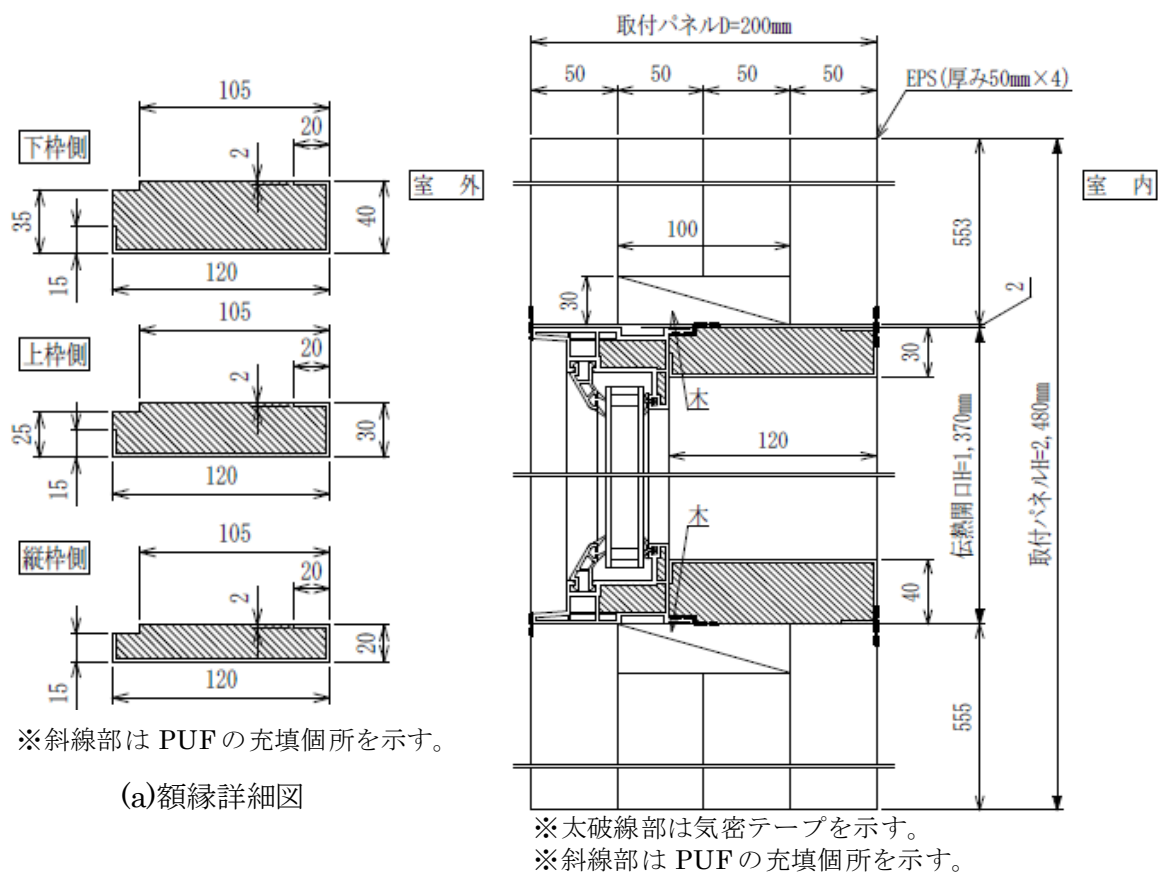
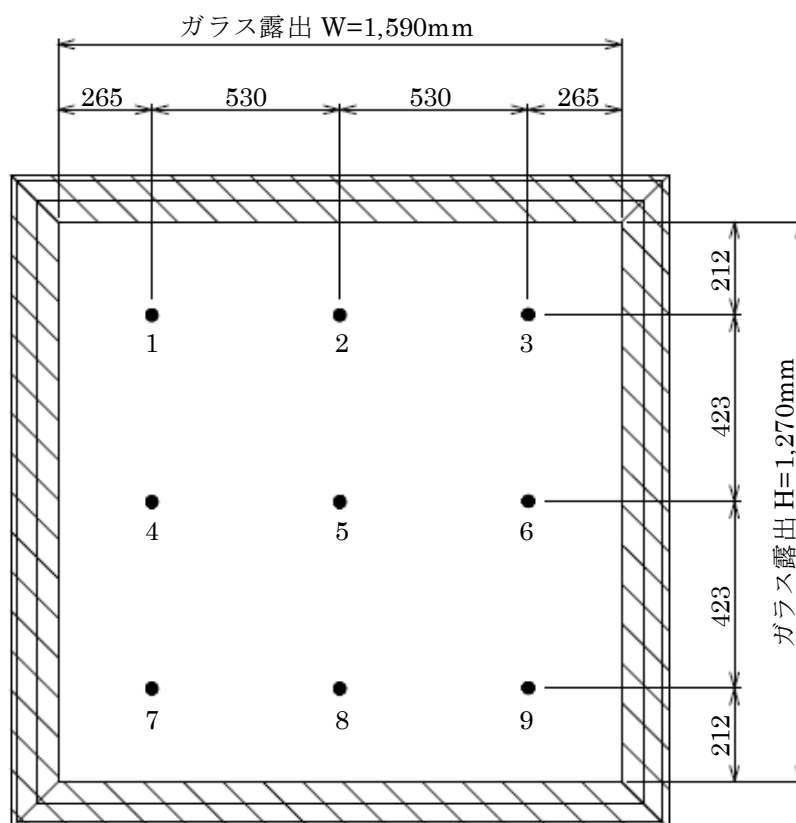


図 4-22 ケース 18 の試験体と額縁の詳細図

4.4.2 窓の室内外表面熱伝達抵抗

4.2 では、窓モデル (Q_B) の通過熱流量計算の際に用いた室内外の表面熱伝達抵抗は、窓の躯体への設置位置によらず一定値を与えた。測定では、前述したが室外室側に幅 2,000mm×高さ 2,500mm×奥行き 150mm の風道を窓に突き当て、風道下部の斜流ファンにより上向きの気流 (約 3m/s) を発生させている。そのため、窓の躯体 (ここでは取付パネル) への設置位置が変われば風道断面も変わり、それに伴い特に室内外の表面熱伝達抵抗の対流成分と放射成分も変わる可能性がある。

そのため測定では、窓の躯体への設置位置が室内外の表面熱伝達抵抗に与える影響を把握すべく、JIS A4710 で示された方法とは異なるが、窓に設置した 2 層複層ガラスを校正板に見立て、2 層複層ガラスの表面温度差と熱伝導率から求めた通過熱流量と、2 層複層ガラス両側の表面温度と窓両側の環境温度の差から各ケースの室内外表面熱伝達抵抗を算出した。2 層複層ガラスの表面温度は直径 0.18mm の T 熱電対を用いて測定した。測定位置を図 4-23 に示す。なお、2 層複層ガラスの熱伝導率は、ガラス総厚 (22mm) を JIS R3107 に基づき算出した 2 層複層ガラスの熱抵抗で除すことにより求めた。



※斜線部は枠を示す。

※測定位置下の数字は測定番号を示す。

図 4-23 2層複層ガラスの表面温度測定位置

4.4.3 測定値と計算値の比較結果

各ケースの開口部一窓当りの窓と躯体の間の平均線熱貫流率の測定値 $Ave\Psi'_b$ を、計算値とともに図 4-24 に示す。なお、各ケースにおける測定結果の詳細は表 4-7～表 4-9 を、計算結果の詳細は表 4-10 を参照されたい。

図 4-24 から、測定値は計算値と同様に、ケース 1→ケース 5→ケース 18 の順で線熱貫流率が小さくなる傾向であることが確認できる。これは、測定においても窓フレーム部や室内額縁の断熱性能を高め、窓の躯体への設置位置を室内側に向けることで線熱貫流率の低減につながることを意味している。

測定結果と計算結果の乖離は、ケース 1 で 9% 程度、ケース 5 で 4% 程度、ケース 18 で 7% 程度となり、どのケースにおいても両者の乖離は 10% 未満であった。測定値と計算値の乖離は、NFRC 100A¹⁸⁾ では 10% 以内が望ましいと示されており、本結果はよい整合性が得られたと言える。以上の結果から、計算値の妥当性が示された。

なお、測定値と計算値の乖離の要因として、測定における局所熱伝達抵抗のばらつき、熱電対等の配線による影響、測定精度や試験体の製作精度等が考えられる。

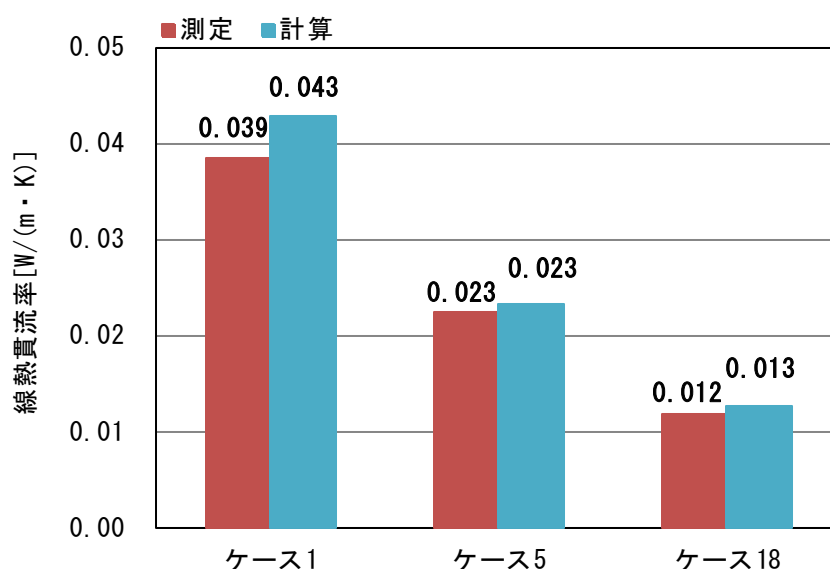


図 4-24 測定値と計算値の比較

表 4-7 ケース 1における測定結果の詳細

項目						結果	単位		
伝熱開口面積						A_W	2.32	m^2	
開口部周囲長						L	6.12	m	
取付パネルの見付け面積						A_P	2.46	m^2	
試験体両側の空気温度差						$\Delta \theta_c$	19.98	$^{\circ}\text{C}$	
窓両側の環境温度差						$\Delta \theta_{n,cal}$	19.59	$^{\circ}\text{C}$	
2 層複層ガラスの表面温度差						$\Delta \theta_g$	15.72	$^{\circ}\text{C}$	
窓の合計表面熱伝達抵抗						$R_{s,t}$	0.173	$(\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$	
窓の表面熱伝達抵抗 (室外側)						R_{se}	0.048	$(\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$	
窓の放射熱伝達抵抗 (室外側)						$h_{r,se}$	0.298	$(\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$	
窓の対流熱伝達抵抗 (室外側)						$h_{c,se}$	0.058	$(\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$	
窓の表面熱伝達抵抗 (室内側)						R_{si}	0.124	$(\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$	
窓の放射熱伝達抵抗 (室内側)						$h_{r,si}$	0.246	$(\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$	
窓の対流熱伝達抵抗 (室内側)						$h_{c,si}$	0.250	$(\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$	
窓の熱貫流率						U'_w	1.21	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	
標準化された窓の熱貫流率						U_w	1.22	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	
取付パネルの熱貫流率						U_P	0.21	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	
2 層複層ガラスの熱抵抗						R_g	0.702	$(\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$	
熱箱内の発生熱量						Q_{in}	70.33	W	
窓を通過する熱流量						Φ_{sp}	55.26	W	
取付パネルを通過する熱流量						Φ_{sur}	10.32	W	
熱箱を通過する熱流量						Φ_I	0.01	W	
開口部一窓当りの窓と躯体の間の平均線熱貫流率						$Ave\Psi'_b$	0.039	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	
2 層複層ガラスの表面温度									
測定点	1	2	3	4	5	6	7	8	9
室内側 ($^{\circ}\text{C}$) ($\theta_{g,in}$)	17.0	16.8	16.9	16.8	16.6	16.7	16.2	16.0	16.2
室外側 ($^{\circ}\text{C}$) ($\theta_{g,out}$)	1.3	1.2	0.9	1.3	1.2	0.8	0.9	0.8	0.6

表 4-8 ケース 5における測定結果の詳細

項目						結果		単位	
伝熱開口面積						A_W	2.32	m^2	
開口部周囲長						L	6.12	m	
取付パネルの見付け面積						A_P	2.46	m^2	
試験体両側の空気温度差						$\Delta \theta_c$	19.79	$^{\circ}\text{C}$	
窓両側の環境温度差						$\Delta \theta_{n,cal}$	19.46	$^{\circ}\text{C}$	
2 層複層ガラスの表面温度差						$\Delta \theta_g$	15.68	$^{\circ}\text{C}$	
窓の合計表面熱伝達抵抗						$R_{s,t}$	0.169	$(\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$	
窓の表面熱伝達抵抗 (室外側)						R_{se}	0.048	$(\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$	
窓の放射熱伝達抵抗 (室外側)						$h_{r,se}$	0.297	$(\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$	
窓の対流熱伝達抵抗 (室外側)						$h_{c,se}$	0.058	$(\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$	
窓の表面熱伝達抵抗 (室内側)						R_{si}	0.122	$(\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$	
窓の放射熱伝達抵抗 (室内側)						$h_{r,si}$	0.246	$(\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$	
窓の対流熱伝達抵抗 (室内側)						$h_{c,si}$	0.241	$(\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$	
窓の熱貫流率						U'_w	1.21	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	
標準化された窓の熱貫流率						U_w	1.21	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	
取付パネルの熱貫流率						U_P	0.19	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	
2 層複層ガラスの熱抵抗						R_g	0.70	$(\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$	
熱箱内の発生熱量						Q_{in}	67.85	W	
窓を通過する熱流量						Φ_{sp}	54.56	W	
取付パネルを通過する熱流量						Φ_{sur}	9.30	W	
熱箱を通過する熱流量						Φ_I	-0.26	W	
開口部一窓当りの窓と躯体の間の平均線熱貫流率						$Ave\Psi'_b$	0.023	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	
2 層複層ガラスの表面温度									
測定点	1	2	3	4	5	6	7	8	9
室内側 ($^{\circ}\text{C}$) ($\theta_{g,in}$)	16.8	17.0	16.9	16.8	17.0	16.9	16.1	16.0	16.2
室外側 ($^{\circ}\text{C}$) ($\theta_{g,out}$)	1.3	1.1	0.9	0.9	1.1	0.8	0.6	0.6	0.5

表 4-9 ケース 18 における測定結果の詳細

項目		結果	単位						
伝熱開口面積		A_W	2.32	m ²					
開口部周囲長		L	6.12	m					
取付パネルの見付け面積		A_P	2.46	m ²					
試験体両側の空気温度差		$\Delta \theta_c$	19.82	℃					
窓両側の環境温度差		$\Delta \theta_{n,cal}$	19.52	℃					
2 層複層ガラスの表面温度差		$\Delta \theta_g$	15.63	℃					
窓の合計表面熱伝達抵抗		$R_{s,t}$	0.174	(m ² ・K) /W					
窓の表面熱伝達抵抗 (室外側)		R_{se}	0.053	(m ² ・K) /W					
窓の放射熱伝達抵抗 (室外側)		$h_{r,se}$	0.297	(m ² ・K) /W					
窓の対流熱伝達抵抗 (室外側)		$h_{c,se}$	0.064	(m ² ・K) /W					
窓の表面熱伝達抵抗 (室内側)		R_{si}	0.122	(m ² ・K) /W					
窓の放射熱伝達抵抗 (室内側)		$h_{r,si}$	0.246	(m ² ・K) /W					
窓の対流熱伝達抵抗 (室内側)		$h_{c,si}$	0.239	(m ² ・K) /W					
窓の熱貫流率		U'_w	1.18	W/(m ² ・K)					
標準化された窓の熱貫流率		U_w	1.19	W/(m ² ・K)					
取付パネルの熱貫流率		U_P	0.17	W/(m ² ・K)					
2 層複層ガラスの熱抵抗		R_g	0.70	(m ² ・K) /W					
熱箱内の発生熱量		Q_{in}	65.07	W					
窓を通過する熱流量		Φ_{sp}	53.80	W					
取付パネルを通過する熱流量		Φ_{sur}	8.50	W					
熱箱を通過する熱流量		Φ_I	-0.11	W					
開口部一窓当りの窓と躯体の間の平均線熱貫流率		$Ave\Psi'_b$	0.012	W/(m・K)					
2 層複層ガラスの表面温度									
測定点	1	2	3	4	5	6	7	8	9
室内側 (℃) ($\theta_{g,in}$)	17.0	17.0	17.0	16.7	16.5	16.7	16.1	16.1	16.3
室外側 (℃) ($\theta_{g,out}$)	1.4	1.2	0.9	1.1	1.1	0.9	0.8	0.8	0.6

表 4-10 各ケースの計算結果詳細

(a) ケース 1

計算断面 計算部位	上	下	縦
Q_A [W/m]	9.27	9.12	8.05
Q_B [W/m]	6.26	6.01	6.55
Q_C [W/m]	2.05	2.05	0.83
Ψ_b [W/(m · K)]	0.048	0.053	0.033
Ave Ψ_b [W/(m · K)]			0.043

(b) ケース 5

計算断面 計算部位	上	下	縦
Q_A [W/m]	8.62	8.43	7.54
Q_B [W/m]	6.24	5.99	6.45
Q_C [W/m]	1.97	1.97	0.59
Ψ_b [W/(m · K)]	0.020	0.023	0.025
Ave Ψ_b [W/(m · K)]			0.023

(c) ケース 18

計算断面 計算部位	上	下	縦
Q_A [W/m]	8.12	7.91	7.08
Q_B [W/m]	6.09	5.90	6.24
Q_C [W/m]	1.82	1.81	0.53
Ψ_b [W/(m · K)]	0.011	0.010	0.016
Ave Ψ_b [W/(m · K)]			0.013

4.4.4 窓の躯体への設置位置が窓の室内外面熱伝達抵抗に与える影響

各ケースの窓の室内外の表面熱伝達抵抗を、対流・放射熱伝達抵抗とともに図 4-25 に示す。表面熱伝達抵抗は窓の躯体への設置位置を室内側に向けるにつれ、室外側で最大 10%程度大きくなる傾向が、室内側で最大 2%程度小さくなる傾向が示された。対流熱伝達抵抗は表面熱伝達抵抗窓と同様に窓の躯体への設置位置を室内側に向けるにつれ、室外側で最大 10%程度大きくなる傾向が、室内側で最大 5%程度小さくなる傾向が示された。放射熱伝達抵抗は窓の躯体への設置位置にかかわらず、ほとんど変化がなかった。

このような結果になった理由として、室外側は、窓の躯体への設置位置を室内側に向けた結果、室外側の風道断面が大きくなり、それに伴い窓の室外側表面に作用するファンの影響（風速）が小さくなったためと考えられる。室内側は、熱箱内に設置された軸流ファンによるわずかな気流（約 0.5m/s）に加え、ガラスや窓フレームの上下温度差を駆動力とした気流（ドラフト）も発生していると考えられ、これら気流の影響を受け室外側とは逆の現象（室内側の風道断面が小さくなり、それに伴い窓の室内側表面に作用する気流の影響が大きくなった）になったと推察する。

これら傾向から、4.3 で示した FIX 窓の各ケースの窓モデル (Q_B) における、JIS A2102-2 に基づく室内外の表面熱伝達抵抗とした場合の通過熱流量と、室外側表面熱伝達抵抗を JIS A2102-2 に基づく値から 10%大きく ($0.044 \text{ (m}^2 \cdot \text{K) / W}$) し、さらに室内側表面熱伝達抵抗を JIS A2102-2 に基づく値から 2%小さく ($0.127 \text{ (m}^2 \cdot \text{K) / W}$) した場合（室内側隅角部の表面熱伝達抵抗は JIS A2102-2 に基づく値を使用した）の通過熱流量（表 4-11 参照）を比較した結果、両者の差は 1%にも満たず、また、線熱貫流率への影響も小さい（最大 1%程度）ことがわかった。以上の結果から、窓の躯体への設置位置は室内外の表面熱伝達抵抗の放射成分より対流成分に多く影響を及ぼしているものの、線熱貫流率への影響は小さいことが示された。

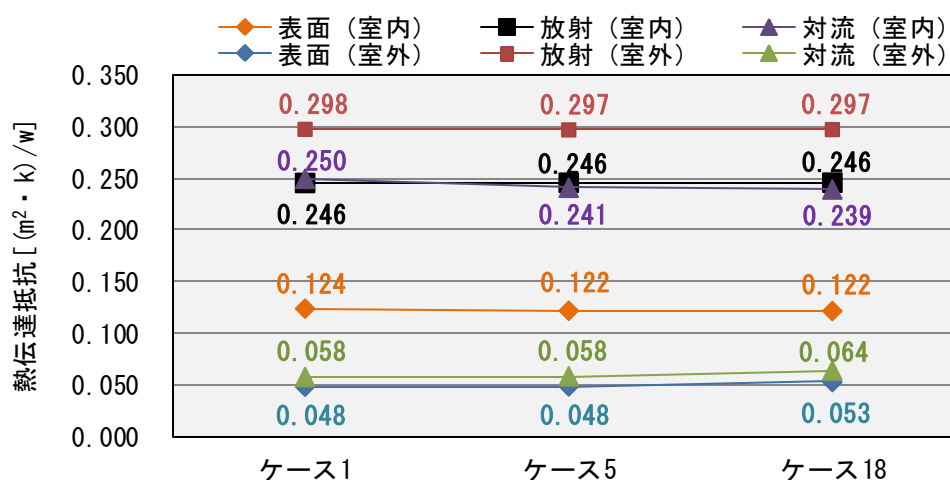


図 4-25 各ケースの室内外の表面熱伝達抵抗

表 4-11 室内外表面熱伝達抵抗の違いにおける各ケースの計算結果比較

(a) ケース 1

室外側表面熱伝達抵抗…0.040 ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)
室内側表面熱伝達抵抗…0.130 ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)

計算断面 計算部位	上	下	縦
$Q_A [\text{W/m}]$	11.76	11.74	11.57
$Q_B [\text{W/m}]$	6.43	6.19	6.64
$Q_C [\text{W/m}]$	3.36	3.36	3.32
$\Psi_b [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	0.099	0.110	0.081
Ave $\Psi_b [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$			0.094

室外側表面熱伝達抵抗…0.044 ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)
室内側表面熱伝達抵抗…0.127 ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)

計算断面 計算部位	上	下	縦
$Q_A [\text{W/m}]$	11.72	11.70	11.54
$Q_B [\text{W/m}]$	6.42	6.18	6.63
$Q_C [\text{W/m}]$	3.35	3.35	3.31
$\Psi_b [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	0.098	0.109	0.080
Ave $\Psi_b [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$			0.093

(b) ケース 5

室外側表面熱伝達抵抗…0.040 ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)
室内側表面熱伝達抵抗…0.130 ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)

計算断面 計算部位	上	下	縦
$Q_A [\text{W/m}]$	10.14	9.95	10.24
$Q_B [\text{W/m}]$	6.39	6.16	6.60
$Q_C [\text{W/m}]$	2.99	2.98	2.99
$\Psi_b [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	0.038	0.041	0.033
Ave $\Psi_b [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$			0.036

室外側表面熱伝達抵抗…0.044 ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)
室内側表面熱伝達抵抗…0.127 ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)

計算断面 計算部位	上	下	縦
$Q_A [\text{W/m}]$	10.12	9.93	10.22
$Q_B [\text{W/m}]$	6.38	6.15	6.58
$Q_C [\text{W/m}]$	2.99	2.98	2.99
$\Psi_b [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	0.038	0.040	0.033
Ave $\Psi_b [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$			0.036

(c) ケース 18

室外側表面熱伝達抵抗…0.040 ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)
室内側表面熱伝達抵抗…0.130 ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)

計算断面 計算部位	上	下	縦
$Q_A [\text{W/m}]$	9.25	9.11	9.40
$Q_B [\text{W/m}]$	6.18	6.03	6.32
$Q_C [\text{W/m}]$	2.77	2.76	2.78
$\Psi_b [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	0.015	0.016	0.015
Ave $\Psi_b [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$			0.015

室外側表面熱伝達抵抗…0.044 ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)
室内側表面熱伝達抵抗…0.127 ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)

計算断面 計算部位	上	下	縦
$Q_A [\text{W/m}]$	9.23	9.09	9.38
$Q_B [\text{W/m}]$	6.17	6.02	6.31
$Q_C [\text{W/m}]$	2.77	2.76	2.77
$\Psi_b [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	0.015	0.016	0.015
Ave $\Psi_b [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$			0.015

4.5 第4章のまとめ

第4章では、樹脂製窓と躯体の間の線熱貫流率の低減手法に関する検討として、木造充填断熱工法に焦点を当て、「窓フレーム内部断熱材の熱伝導率」、「窓の躯体への設置位置」、「室内額縁の構成材料」といった制御因子が窓と躯体の間の線熱貫流率に与える影響と最適条件（線熱貫流率低減に最も寄与する制御因子と水準）を、タグチメソッドを用いて明らかにするとともに、最適条件の組合せからなる窓と躯体の間の線熱貫流率を示し、さらに試験体の製作と性能検証によってその妥当性を明らかにした。以下に、得られた結果と知見を簡潔にまとめる。

- ① 窓と躯体の間の線熱貫流率 Ψ_b は、全ての断面に共通して、各ケースにおいて程度の差はあれ数値の大小が確認できた。これは、窓と躯体の間の熱流が制御因子の影響を受けたことによるものと考えられる。
- ② SN比平均値 $Ave\eta_{\Psi_b}$ から、全ての断面に共通して制御因子の第3水準（制御因子Aは第2水準）からなる組合せ（ケース18）が最も線熱貫流率を小さくする構成であることがわかった。
- ③ SN比平均値 $Ave\eta_{\Psi_b}$ から、窓フレーム部や室内額縁の断熱性能が高いほど、窓の躯体への設置位置を室内側に向けるほど、線熱貫流率の低減につながるということがわかった。
- ④ 断面部位毎では明確に線熱貫流率低減に寄与する制御因子の序列を示すことができるものの、窓全体として考えた場合、引違い窓のような部位によって断面構造が異なる窓種は、断面部位毎のSN比影響度からでは序列の明確な判断が難しいことがわかった。
- ⑤ 開口部一窓当りの窓と躯体の間の平均線熱貫流率 $Ave\Psi_b$ を用いたSN比影響度から、窓全体として各制御因子の序列を明確に示すことができることが示された。
- ⑥ FIX窓における開口部一窓当りの窓と躯体の間の平均線熱貫流率を、試験体（ケース1、5、18）を製作し性能検証を行った結果、測定値は計算値と同様に、ケース1→ケース5→ケース18の順で線熱貫流率が小さくなる傾向が示されたことから、測定においても窓フレーム部や室内額縁の断熱性能を高め、窓の設置位置を室内側に向けることで線熱貫流率の低減につながることを明らかにした。さらに、どのケースにおいても両者の乖離は10%未満とよい整合性が得られたことを根拠に計算値の妥当性が示された。
- ⑦ 窓の躯体への設置位置は室内外の表面熱伝達抵抗の放射成分より対流成分に多く影響を及ぼしているものの、線熱貫流率への影響は小さいことが示された。

第4章の記号表

4.2 計算条件と評価方法

4.2.2 計算条件

記号	意味	単位
Ψ_b	窓と躯体の間の線熱貫流率	W/(m・K)
Q_A	躯体込み窓モデルの通過熱流量	W/m
Q_B	窓モデルの通過熱流量	W/m
Q_C	躯体モデルの通過熱流量	W/m
L_{QB}	窓と躯体の間の通過熱流量	W/m
ΔT	JIS A2102-2 に基づく 室内外温度差	℃

4.2.3 評価方法

記号	意味	単位
η_{Ψ_b}	SN 比	db
$Ave\eta_{\Psi_b}$	SN 比平均値	db

4.3 計算結果と考察

4.3.1 各断面の通過熱流量及び Ψ_b 計算結果

記号	意味	単位
$Ave\Psi_b$	開口部一窓当りの窓と躯体の間の平均線熱貫流率（計算値）	W/m
Ψ_{bi}	部位 i の窓と躯体の間の線熱貫流率	℃
l_i	部位 i の長さ	m
L	開口部周長	m

4.4 測定による妥当性検証

4.4.1 測定概要

記号	意味	単位
$Ave\Psi'_b$	開口部一窓当りの窓と躯体の間の平均線熱貫流率（測定値）	W/(m・K)
Φ_{in}	熱箱内の発生熱量	W
Φ_{sp}	窓を通過する熱流量	W
Φ_{sur}	取付パネルを通過する熱流量	W
Φ_l	加熱箱を通過する熱流量	W
$\Delta\theta_c$	試験体両側の空気温度差	℃
L	開口部周長	m
U_w	窓の数値計算モデルの熱貫流率	W/(m ² ・K)
A_w	伝熱開口面積	m ²
$\Delta\theta_{n,cal}$	窓両側の環境温度差	℃
U_p	取付パネルの数値計算の熱貫流率	W/(m ² ・K)
A_p	取付パネルの見付け面積	m ²

【第4章の参考文献】

- 1) 宮澤千頭, 二宮秀與, 田代達一郎: 窓と躯体の熱伝導が建物の熱性能に及ぼす影響, 日本建築学会環境系論文集, 第78巻第683号, pp17-23, 2013.1
- 2) 于海源, 永田明寛, 菅野普, 高田和規: 窓と鉄製窓下地材の間の熱移動に関する研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp281-284, 2014.9
- 3) 岸本尚子, 齋藤宏昭, 野中俊宏, 齊藤孝一郎: 窓周り熱橋と結露の評価法に関する研究
その1 窓周り線熱橋の評価法, 日本建築学会大会学術講演梗概集環境工学Ⅱ, pp1~2, 2018.09
- 4) ISO 14683: Thermal bridges in building construction - Linear thermal transmittance - Simplified methods and default values, 2017
- 5) JIS R3107: 板ガラス類の熱抵抗及び建築における熱貫流率の算定方法, (一財)日本規格協会, 1998
- 6) サッシ等の遮音性能及び熱貫流率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, (一社)住宅性能評価・表示協会, 2015.4自立循環型住宅への設計ガイドライン, (一財)建築環境・省エネルギー機構, 2015.8
- 7) 遮熱計算法に関する研究報告書, 平成13年度 (一社)リビングアメニティ協会, 2001
- 8) 遮熱計算法に関する研究報告書, 平成14年度 (一社)リビングアメニティ協会, 2002
- 9) 遮熱計算法に関する研究報告書, 平成15年度 (一社)リビングアメニティ協会, 2003
- 10) 遮熱計算法に関する研究報告書, 平成16年度 (一社)リビングアメニティ協会, 2004
- 11) 遮熱計算法に関する研究報告書, 平成19年度 (一社)リビングアメニティ協会, 2007
- 12) 伊丹清, 赤坂裕, 二宮秀與: 窓の熱貫流率の計算法 : その1 開き窓の計算値と試験値の比較, 日本建築学会計画系論文集, 第523号, pp31-37, 1999.9
- 13) 二宮秀與, 赤坂裕, 伊丹清, 倉山千春: 窓の熱貫流率の計算法 : その2 引違い窓の計算値と試験値の比較, 日本建築学会環境系論文集, 第576号, pp9-15, 2004.2
- 14) JIS A2102-2: 窓及びドアの熱性能 - 熱貫流率の計算-第2部: フレームの数値計算方法, (一財)日本規格協会, 2011
- 15) JIS A4710: 建具の断熱試験方法, (一財)日本規格協会, 2015
- 16) JIS A2102-1: 窓及びドアの熱性能 - 熱貫流率の計算-第1部: 一般, (一財)日本規格協会, 2015
- 17) JIS A1412-2: 熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法-第2部: 熱流計法(HFM法), 1999
- 18) NFRC 100A-2014[E0A0] Procedure for determining fenestration attachment product U-factors

【本章に関連する既発表文献】

- 19) 高田和規, 立松宏一, 下ノ蘭慧, 羽山広文, 森太郎, 菊田弘輝: 樹脂製窓と躯体の間の線熱貫流率軽減手法に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第83巻第754号, pp955-964, 2018.12

- 20) 高田和規, 羽山広文, 森太郎, 菊田弘輝: 樹脂製窓と躯体の間の線熱貫流率軽減手法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集環境工学Ⅱ, pp23～24, 2018. 09

第5章 樹脂製窓の熱的性能が寒冷地の窓の暖房負荷に与える影響

5.1 本章の背景と目的

前述したが、複層ガラスの低放射（Low-E）化に伴い日射熱取得量が減少することが知られている。例えば冬季日射量の多い面においては、熱損失の低減以上に日射熱の取得量が減って年間の暖房負荷が増加する場合もある。そのため、自然エネルギーの有効的使用といった観点からも、地域の気候特性や方位に応じて最適な熱収支を実現できる窓を消費者が選択するための有用な情報が望まれる。

そこで本章では、地域の気候特性や方位に応じて最適な熱収支を実現できる窓の評価手法に関する検討として、寒冷地住宅における樹脂製窓の暖房負荷に焦点をあて、「窓付属部材の付加熱抵抗」、「窓の断熱性能（熱貫流率）」、「窓の日射熱取得率」、「窓の気密性能（通気量）」といった因子が、窓の暖房負荷に与える影響とそれら最適条件（暖房負荷低減に最も寄与する因子と水準）を、タグチメソッドを用いて明らかにするとともに、最適条件の組合せからなる窓の暖房負荷を示し、さらに標準的な組合せからなる窓の暖房負荷との比較結果を報告する。

5.2 計算条件と評価方法

5.2.1 計算条件

窓の暖房負荷の計算は、2018年5月に制定されたJIS A2104:2018¹⁾「住宅用窓の熱エネルギー性能—計算手順」（以下本JISという）に基づいた。本JISでは、窓や窓付属部材に起因する内外温度差による貫流熱や漏気などの熱損失、日射による熱取得を根拠とした総合的な熱性能の評価が可能である。

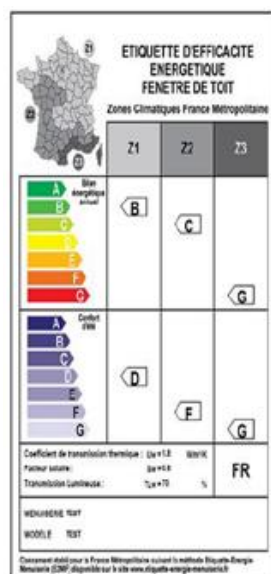
本JISの制定主旨を以下に概説する。なお、概説は本JISの解説を引用した。

「本JISでは、エネルギーとは暖房及び冷房に係る熱負荷を扱い、窓のエネルギー性能とはある気象条件下の住宅内における窓が寄与する暖房及び冷房それぞれの年間熱負荷をその窓の面積で除した値として定義される。

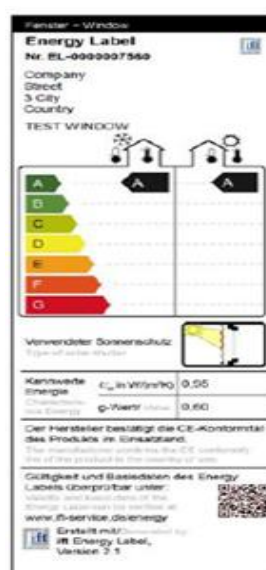
これまで、暖冷房負荷に関わる窓の熱性能として、窓の断熱性能を表す熱貫流率、日射取得／日射遮蔽性能を表す日射熱取得率、及び気密性能を表す通気量が別々の評価法規格（測定法又は計算法）に従って別々に評価されてきた。しかし、住宅の暖冷房負荷にはこれら三つの熱性能が影響を与えており、暖冷房負荷の大小は、一つの性能を切りとっては論じられない。

近年では、これら熱性能を熱負荷レベルで統合化した窓のエネルギー性能による評価が欧州などで導入され、これによって窓製品の格付けが行われている。例えば、欧州ではEWERS²⁾（European Window Energy Rating System）、イギリスではBFRC³⁾

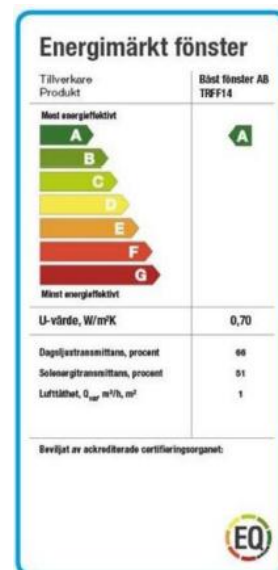
（British Fenestration Rating Council）、カナダではCSA⁴⁾⁵⁾（Canadian Standard Association）において、熱貫流率、日射熱取得率及び漏気率の線形結合の形での窓のエネルギー性能の評価式が規定され、各項の係数には国又は地域の気象、建物及び暖冷房使用条件を考慮した値が定数として設定されている。また、これらの既存規格を基に窓のエネルギー性能評価手法に関するISO 18292：2011⁶⁾（Energy performance of fenestration systems for residential buildings—Calculation procedure）が2011年に発行され、その後、欧州各国ではISO 18292による窓のエネルギー性能評価に基づいた窓製品の格付け及びラベリング（図 5-1）が普及しつつある。



(a) フランス



(b) ドイツ



(c) スウェーデン

図 5-1 欧州各国における窓製品の格付け及びラベリング例

ISO 18292では、窓のエネルギー性能の評価の計算手順として、①気象データの準備（外気温、窓面受照日射量）、②標準建物の設定（外皮仕様、室内使用条件、暖冷房設定）、③窓の熱性能の準備（熱貫流率、日射熱取得率、漏気率、窓面積）、④窓のエネルギー性能の計算（暖房エネルギー性能、冷房エネルギー性能）が示されているが、具体的な気象条件及び標準建物条件については直接規定されず、各国又は各地域で策定される基準に委ねられる。

そこで、日本の住宅用の窓のエネルギー性能評価を可能とするために、日本の気象及び住宅モデルの条件下における窓のエネルギー性能の計算手順及び関連する入力データをJISとしてまとめるため、ISO 18292を基に、本JISを制定した。」

窓の暖房負荷は、窓によって生じる年間暖房負荷をその窓面積で除すことにより求める。窓の暖房負荷（ $P_{WE,H}$ ）の基礎式を式5-1～式5-4に示す。

$$P_{WE,H} = \sum_{m=1}^{12} \frac{Q_{H,nd,w,m}}{A_w} \quad \cdots \text{式 5-1}$$

$$Q_{H,nd,w,m} = f_{H,m} \cdot [Q_{H,ht,w,m} - \eta_{H,gn,m} \cdot Q_{H,gn,w,m}] \quad \cdots \text{式 5-2}$$

$$Q_{H,ht,w,m} = \frac{1}{1000} \cdot (U_{H,w,m} \cdot A_w + H_{H,ve,w}) \cdot (\theta_{int,set,H} - \theta_{e,avg,m}) \cdot t_m \quad \cdots \text{式 5-3}$$

$$Q_{H,gn,w,m} = \frac{1}{1000} \cdot \left(F_{sh,m} \cdot g_{H,w,m} \cdot I_{sol,m} - \frac{\varepsilon_e}{h_e} \cdot U_{H,w,m} \cdot E_m \right) \cdot A_w \cdot t_m \quad \cdots \text{式 5-4}$$

窓の気密性能は、窓の通気による熱移動係数（ $H_{H,ve,w}$ ）として式5-5により換算する。

$$H_{H,ve,w} = \frac{1}{3.6} \cdot \left(\frac{\Delta p}{\Delta p_{ref}} \right)^{2/3} \cdot \rho \cdot c_p \cdot A_w \cdot q_{\Delta p,ref} \quad \cdots \text{式 5-5}$$

窓付属部材を考慮した窓の熱貫流率（ $U_{w,sh}$ ）は式5-6により求める。

$$U_{w,sh} = \frac{1}{\left(\frac{1}{U_{w,non-sh}} \right) + \Delta R} \quad \cdots \text{式 5-6}$$

計算対象とした地域は1地域：北見、2地域：岩見沢、3地域：盛岡、とした。標準戸建住宅モデルの窓の面する方位は東西南北の4方位とし、主方位を東西南の3方位設定した。

$P_{WE,H}$ を計算するために必要な各地域の気象データ（平均外気温・平均窓面受照日射量・夜間放射量・該当時間）、標準建物データ（暖房設定温度・暖房熱取得ユーティリゼーションファクタ・暖房割合・窓面積・ひさし効果係数）、窓の熱的性能（窓の日射熱取得率を算出する際に用いるガラスの斜入射効果係数・窓付属部材のある窓の熱貫流率を算出する際に用いる付加断熱のための窓の付属部材の使用割合）は全て本JISに基づいた。なお、窓面積とひさし効果係数は各主方位における方位別窓面積加重平均時の値を用いた。

5.2.2 評価方法

$P_{WE,H}$ に影響を与えると想定される制御因子は、「窓付属部材の付加熱抵抗」、「窓の断熱性能（熱貫流率）」、「窓の日射熱取得率」、「窓の気密性能」の4つとし、各因子に3つ（窓付属部材の付加熱抵抗は2つ）の水準を設定した。これら制御因子が $P_{WE,H}$ に与える効果を効率的かつ合理的に評価する方法としてタグチメソッドを用いた。制御因子と水準の一覧を表 5-1に示す。

表 5-1 制御因子と水準の一覧

制御因子	第 1 水準	第 2 水準	第 3 水準
A 窓付属部材の付加熱抵抗 [(m ² ・K)/W]	無	0.207 ハニカムスクリーン	
B 窓の断熱性能（熱貫流率） [W/(m ² ・K)]	0.9	1.4	1.9
C 窓の日射熱取得率 [—]	0.22 (0.3×0.72)	0.36 (0.5×0.72)	0.50 (0.7×0.72)
D 窓の気密性能 [m ³ /(h・m ²)]	0.5	1.0	2.0

制御因子Aの「窓付属部材の付加熱抵抗」は、省エネルギー基準⁷⁾や既往研究⁸⁾⁹⁾において、シャッターや雨戸、ブラインドやロールスクリーン等を開口部に設置することにより窓の断熱性能が向上することが明らかになっている点に着目し、それらのなかで付加熱抵抗が最も大きいと考えられるハニカムスクリーンを設置した場合における $P_{WE,H}$ への影響把握を目的とした。設置するハニカムスクリーンの付加熱抵抗は、無、 $0.207 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$ ^{注1)}の2水準を設定した。なお、ハニカムスクリーンは昼夜で開閉操作（昼間：全開、夜間：全閉）する、とした。

制御因子Bの「窓の断熱性能（熱貫流率）」は、3層ダブルLow-E複層ガラスを装着した超高断熱な樹脂製窓と、2層Low-E複層ガラスを装着した樹脂製窓（高断熱と標準）を想定し、熱貫流率として、 $0.9 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ 、 $1.4 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ 、 $1.9 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ の3水準を設定した。

制御因子Cの「窓の日射熱取得率」は、ガラスの日射熱取得率を、日射遮蔽型として0.3、日射中庸型として0.5、日射取得型として0.7の3水準を設定し、これらに窓フレーム部の影響を加味し、一律0.72を乗じた値^{注2)}とした。

制御因子Dの「窓の気密性能」は、JIS A1516¹⁰⁾に基づく測定時の標準気圧差 ($\Delta p_{\text{ref}}=10 \text{ Pa}$) における単位窓面積当たりの通気量 ($q_{\Delta p, \text{ref}}$) として、高气密な開き窓を想定した $0.5 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ 、標準的な開き窓を想定した $1.0 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ 、JIS A4706¹¹⁾のA-4等級線相当である $2.0 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ の3水準を設定した。

注 1) 本 JIS に記載されるハニカムスクリーンの付加熱抵抗値を用いた。

注 2) 「平成 28 年省エネ基準に準拠したエネルギー消費性能の評価に関する技術情報(住宅)」の、2.1 算定方法 第四節 日射熱取得率 付録 C による。

各制御因子の組合せが均等になるように制御因子と水準を L_{18} 直交表に割り付け、これらに寒冷地で用いられている一般的な樹脂製窓の熱的性能である基準ケースを加えた計 19 ケースにおける各地域の $P_{WE,H}$ を算出し、SN 比平均値と SN 比影響度を求める。 L_{18} 直交表を表 5-2 に示す。

表 5-2 L_{18} 直交表

制御因子 ケース	A	B	C	D
基準	無	1.9	0.36	1.0
1	無	0.9	0.22	0.5
2	無	0.9	0.36	1.0
3	無	0.9	0.50	2.0
4	無	1.4	0.22	0.5
5	無	1.4	0.36	1.0
6	無	1.4	0.50	2.0
7	無	1.9	0.22	1.0
8	無	1.9	0.36	2.0
9	無	1.9	0.50	0.5
10	0.207	0.9	0.22	2.0
11	0.207	0.9	0.36	0.5
12	0.207	0.9	0.50	1.0
13	0.207	1.4	0.22	1.0
14	0.207	1.4	0.36	2.0
15	0.207	1.4	0.50	0.5
16	0.207	1.9	0.22	2.0
17	0.207	1.9	0.36	0.5
18	0.207	1.9	0.50	1.0

SN 比平均値を比較することで $P_{WE,H}$ の低減に寄与する制御因子の水準が把握できる。SN 比平均値が最大となる制御因子の水準の組合せが $P_{WE,H}$ を最小にする。SN 比影響度を比較することで各制御因子の水準を変更した際の $P_{WE,H}$ への影響度合いが把握できる。なお、SN 比影響度は SN 比平均値の最大と最小の差から求める。なお、品質工学における SN 比は一般に「ばらつきの尺度（SN 比が大きい＝ばらつきが小さい）」を表すが、本章では $P_{WE,H}$ が最も小さくなる構成を示すことを目的としている。そのため、本章における SN 比は望小特性 SN 比を表し、SN 比 ($\eta_{P_{WE,H}}$) の算出は式 5-7 を用いる。

$$\eta_{P_{WE,H}} = 10 \log(1/P_{WE,H}^2) \quad \cdots \text{式 5-7}$$

また、SN 比平均値 ($Ave\eta_{P_{WE,H}}$) の算出は式 5-8～式 5-18 を用いる。

制御因子 A

$$Ave\eta_{P_{WE,H}}(\text{第 1 水準}) = \sum_{n=1}^9 Ave\eta_{P_{WE,H_n}} / 9 \quad \cdots \text{式 5-8}$$

$$Ave\eta_{P_{WE,H}}(\text{第 2 水準}) = \sum_{n=10}^{18} Ave\eta_{P_{WE,H_n}} / 9 \quad \cdots \text{式 5-9}$$

制御因子 B

$$Ave\eta_{P_{WE,H}}(\text{第 1 水準}) = \left(\sum_{n=1}^3 Ave\eta_{P_{WE,H_n}} + \sum_{n=10}^{12} Ave\eta_{P_{WE,H_n}} \right) / 6 \quad \cdots \text{式 5-10}$$

$$Ave\eta_{P_{WE,H}}(\text{第 2 水準}) = \left(\sum_{n=4}^6 Ave\eta_{P_{WE,H_n}} + \sum_{n=13}^{15} Ave\eta_{P_{WE,H_n}} \right) / 6 \quad \cdots \text{式 5-11}$$

$$Ave\eta_{P_{WE,H}}(\text{第 3 水準}) = \left(\sum_{n=7}^9 Ave\eta_{P_{WE,H_n}} + \sum_{n=16}^{18} Ave\eta_{P_{WE,H_n}} \right) / 6 \quad \cdots \text{式 5-12}$$

制御因子 C

$$Ave\eta_{P_{WE,H}}(\text{第 1 水準}) = (\eta_{P_{WE,H_1}} + \eta_{P_{WE,H_4}} + \eta_{P_{WE,H_7}} + \eta_{P_{WE,H_{10}}} + \eta_{P_{WE,H_{13}}} + \eta_{P_{WE,H_{16}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 5-13}$$

$$Ave\eta_{P_{WE,H}}(\text{第 2 水準}) = (\eta_{P_{WE,H_2}} + \eta_{P_{WE,H_5}} + \eta_{P_{WE,H_8}} + \eta_{P_{WE,H_{11}}} + \eta_{P_{WE,H_{14}}} + \eta_{P_{WE,H_{17}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 5-14}$$

$$Ave\eta_{P_{WE,H}}(\text{第 3 水準}) = (\eta_{P_{WE,H_3}} + \eta_{P_{WE,H_6}} + \eta_{P_{WE,H_9}} + \eta_{P_{WE,H_{12}}} + \eta_{P_{WE,H_{15}}} + \eta_{P_{WE,H_{18}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 5-15}$$

制御因子 D

$$Ave\eta_{P_{WE,H}}(\text{第 1 水準}) = (\eta_{P_{WE,H_1}} + \eta_{P_{WE,H_4}} + \eta_{P_{WE,H_9}} + \eta_{P_{WE,H_{11}}} + \eta_{P_{WE,H_{15}}} + \eta_{P_{WE,H_{17}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 5-16}$$

$$Ave\eta_{P_{WE,H}}(\text{第 2 水準}) = (\eta_{P_{WE,H_2}} + \eta_{P_{WE,H_5}} + \eta_{P_{WE,H_7}} + \eta_{P_{WE,H_{12}}} + \eta_{P_{WE,H_{13}}} + \eta_{P_{WE,H_{18}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 5-17}$$

$$Ave\eta_{P_{WE,H}}(\text{第 3 水準}) = (\eta_{P_{WE,H_3}} + \eta_{P_{WE,H_6}} + \eta_{P_{WE,H_8}} + \eta_{P_{WE,H_{10}}} + \eta_{P_{WE,H_{14}}} + \eta_{P_{WE,H_{16}}}) / 6 \quad \cdots \text{式 5-18}$$

5.3 計算結果と考察

5.3.1 $P_{WE,H}$ 計算結果

各地域の $P_{WE,H}$ 計算結果を表 5-3～表 5-11 に示す。表中の 1 棟分とは、各面（東西南北）の $P_{WE,H}$ を標準戸建住宅モデルの総窓面積に対する各面の窓面積で重み付けした値の総和を示す。なお、各地域の月別の $P_{WE,H}$ 計算結果は図 5-2～図 5-37 を参照されたい。

表 5-9～表 5-11 から、3 地域の各主方位の北面以外において、複数のケースで値がマイナス（表中の赤字数値）となっているが、これは年間の窓からの熱損失量を日射熱取得量が上回り、窓を設置することで窓が無かった場合よりも暖房負荷削減につながることを意味し、それらケースは建物の暖房負荷を削減できる制御因子の組合せであることを表している。

全体的な傾向として、1 地域→2 地域→3 地域の順で $P_{WE,H}$ が小さくなっていることがわかる。また、各ケースに共通して南面が最も小さく、北面が最も大きい値となっており、概ね窓からの日射による熱取得が大きい面ほど $P_{WE,H}$ は小さくなっている。

1 棟分の $P_{WE,H}$ に着目すると、各地域に共通してケース 12 が最も小さく、1、2 地域はケース 8 が、3 地域はケース 7 が最も大きい値となっていることが確認できる。1、2 地域のケース 8 とケース 12 の $P_{WE,H}$ の差は、最も差の大きい主方位南で 1 地域が 189.6 kWh/m²、2 地域が 169.1 kWh/m²、3 地域のケース 7 とケース 12 の $P_{WE,H}$ の差は、最も差の大きい主方位南で 212.1 kWh/m² となった。なお、1 棟分の $P_{WE,H}$ は主方位の面と近い値（例えば 1 地域の主方位東の東面の値と 1 棟分の値）となっているが、これは、主方位の面の窓面積が他の面と比べ大きいことが影響していると考えられる。次に、SN 比を用いて $P_{WE,H}$ に対する各制御因子の影響を評価した。

表 5-3 1 地域：主方位東の P_{WEH} 計算結果[kWh/m²]

方位	東	西	南	北	1棟分
標準	215.6	225.2	194.0	244.2	218.9
ケース 1	97.4	103.0	84.9	114.0	99.3
ケース 2	92.2	101.5	71.5	119.9	95.5
ケース 3	102.1	115.1	73.0	140.9	106.6
ケース 4	158.9	164.6	145.9	176.1	160.9
ケース 5	153.1	162.6	131.4	181.7	156.4
ケース 6	162.2	175.6	131.9	202.3	166.9
ケース 7	236.5	242.2	223.5	253.6	238.5
ケース 8	245.7	255.2	224.0	274.3	249.0
ケース 9	179.7	193.1	149.4	219.8	184.4
ケース 10	132.3	137.9	119.9	149.0	134.3
ケース 11	67.1	76.4	46.3	94.8	70.3
ケース 12	62.0	75.0	32.9	100.8	66.5
ケース 13	151.4	157.2	138.4	168.6	153.4
ケース 14	160.6	170.2	138.9	189.2	163.9
ケース 15	94.7	108.1	64.4	134.7	99.3
ケース 16	228.2	233.9	215.2	245.3	230.2
ケース 17	162.3	171.8	140.6	190.9	165.6
ケース 18	156.4	169.8	126.1	196.5	161.1

表 5-4 1 地域：主方位西の $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

方位	東	西	南	北	1棟分
標準	222.6	221.1	191.8	245.2	218.9
ケース 1	101.4	100.6	83.6	114.5	99.4
ケース 2	99.0	97.6	69.3	120.8	95.5
ケース 3	111.5	109.6	70.0	142.2	106.7
ケース 4	163.1	162.2	144.6	176.6	160.9
ケース 5	160.0	158.5	129.2	182.6	156.4
ケース 6	172.0	169.8	128.8	203.6	166.9
ケース 7	240.7	239.7	222.2	254.2	238.5
ケース 8	252.6	251.1	221.8	275.2	249.0
ケース 9	189.5	187.3	146.4	221.1	184.4
ケース 10	136.4	135.5	118.6	149.5	134.3
ケース 11	73.9	72.4	44.2	95.7	70.4
ケース 12	71.4	69.4	29.9	102.0	66.6
ケース 13	155.6	154.7	137.1	169.2	153.4
ケース 14	167.6	166.0	136.8	190.2	163.9
ケース 15	104.5	102.3	61.3	136.1	99.3
ケース 16	232.4	231.4	213.9	245.9	230.2
ケース 17	169.2	167.7	138.4	191.8	165.6
ケース 18	166.2	164.0	123.0	197.8	161.1

表 5-5 1 地域：主方位南の $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

方位	東	西	南	北	1棟分
標準	219.6	228.2	183.9	245.4	198.5
ケース 1	99.7	104.7	79.0	114.7	87.5
ケース 2	96.1	104.4	61.7	121.0	75.8
ケース 3	107.5	119.2	59.3	142.4	79.1
ケース 4	161.3	166.4	139.8	176.8	148.6
ケース 5	157.0	165.6	121.3	182.8	135.9
ケース 6	167.8	179.8	117.8	203.9	138.2
ケース 7	238.9	244.0	217.4	254.3	226.2
ケース 8	249.6	258.2	213.9	275.4	228.5
ケース 9	185.3	197.4	135.3	221.4	155.7
ケース 10	134.6	139.7	114.0	149.6	122.5
ケース 11	71.0	79.3	36.6	95.9	50.6
ケース 12	67.4	79.1	19.2	102.3	38.9
ケース 13	153.8	159.0	132.4	169.3	141.1
ケース 14	164.6	173.2	128.8	190.4	143.5
ケース 15	100.3	112.3	50.2	136.3	70.7
ケース 16	230.6	235.7	209.1	246.0	217.9
ケース 17	166.3	174.8	130.5	192.0	145.1
ケース 18	162.0	174.0	112.0	198.1	132.4

表 5-6 2地域：主方位東の $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

方位	東	西	南	北	1棟分
標準	190.7	195.2	176.5	216.4	193.7
ケース 1	85.7	88.3	77.7	100.6	87.4
ケース 2	79.7	84.0	66.9	104.6	82.6
ケース 3	87.2	93.2	69.5	122.1	91.4
ケース 4	141.0	143.7	132.3	156.5	142.8
ケース 5	134.4	138.9	120.6	160.1	137.4
ケース 6	141.2	147.5	122.4	177.2	145.5
ケース 7	210.9	213.6	201.6	226.3	212.6
ケース 8	217.7	222.2	203.3	243.4	220.7
ケース 9	157.0	163.4	138.1	193.0	161.3
ケース 10	117.4	120.0	109.2	132.3	119.1
ケース 11	57.4	61.7	44.7	82.3	60.3
ケース 12	51.4	57.4	33.9	86.3	55.5
ケース 13	134.9	137.6	126.3	150.3	136.7
ケース 14	141.7	146.2	128.0	167.4	144.7
ケース 15	81.0	87.4	62.8	117.0	85.3
ケース 16	204.4	207.1	195.3	219.8	206.1
ケース 17	143.7	148.2	130.0	169.4	146.7
ケース 18	137.0	143.4	118.4	173.0	141.3

表 5-7 2地域：主方位西の P_{WEH} 計算結果[kWh/m²]

方位	東	西	南	北	1棟分
標準	197.4	190.9	174.9	217.5	191.3
ケース 1	89.6	85.7	76.7	101.2	86.1
ケース 2	86.2	79.8	65.3	105.6	80.4
ケース 3	96.3	87.3	67.3	123.5	88.2
ケース 4	145.1	141.1	131.3	157.1	141.4
ケース 5	141.1	134.5	119.1	161.1	135.1
ケース 6	150.6	141.4	120.2	178.7	142.2
ケース 7	214.9	211.0	200.6	226.9	211.1
ケース 8	224.4	217.9	201.7	244.5	218.3
ケース 9	166.4	157.3	135.9	194.5	158.0
ケース 10	121.3	117.4	108.2	132.9	117.7
ケース 11	63.9	57.4	43.2	83.3	58.1
ケース 12	60.5	51.5	31.8	87.7	52.4
ケース 13	138.9	135.0	125.3	150.9	135.2
ケース 14	148.4	141.9	126.5	168.5	142.4
ケース 15	90.4	81.3	60.6	118.5	82.1
ケース 16	208.4	204.5	194.3	220.4	204.7
ケース 17	150.4	143.9	128.4	170.5	144.4
ケース 18	146.4	137.3	116.2	174.5	138.1

表 5-8 2地域：主方位南の P_{WEH} 計算結果[kWh/m²]

方位	東	西	南	北	1棟分
標準	194.5	197.7	168.1	217.7	179.1
ケース 1	87.9	89.7	72.8	101.4	79.1
ケース 2	83.4	86.4	58.7	105.8	69.0
ケース 3	92.3	96.6	58.0	123.8	72.4
ケース 4	143.3	145.2	127.2	157.2	133.9
ケース 5	138.1	141.3	112.2	161.3	123.0
ケース 6	146.5	151.0	110.6	178.9	125.6
ケース 7	213.2	215.1	196.5	227.1	203.3
ケース 8	221.5	224.7	194.9	244.7	205.9
ケース 9	162.3	166.8	126.3	194.8	141.4
ケース 10	119.6	121.4	104.3	133.0	110.6
ケース 11	61.0	64.0	36.6	83.5	46.8
ケース 12	56.5	60.7	22.5	87.9	36.8
ケース 13	137.2	139.1	121.2	151.1	127.8
ケース 14	145.5	148.7	119.6	168.7	130.4
ケース 15	86.3	90.8	51.0	118.8	65.8
ケース 16	206.7	208.6	190.2	220.6	197.0
ケース 17	147.5	150.7	121.6	170.7	132.4
ケース 18	142.3	146.8	106.6	174.8	121.6

表 5-9 3地域：主方位東の P_{WEH} 計算結果[kWh/m²]

方位	東	西	南	北	1棟分
標準	92.6	111.0	49.1	151.2	99.4
ケース 1	32.9	43.5	7.3	66.8	36.7
ケース 2	1.5	19.2	-41.1	58.1	7.9
ケース 3	-19.0	5.8	-78.6	60.2	-10.0
ケース 4	78.1	89.1	52.0	113.2	82.1
ケース 5	45.1	63.6	1.6	103.7	51.9
ケース 6	23.2	48.9	-37.7	105.2	32.6
ケース 7	136.5	147.5	110.4	171.6	140.5
ケース 8	114.5	132.9	71.0	173.1	121.2
ケース 9	37.8	63.6	-23.1	119.8	47.2
ケース 10	58.1	68.7	32.5	92.0	61.9
ケース 11	-17.1	0.6	-59.7	39.5	-10.7
ケース 12	-48.5	-23.7	-108.1	30.7	-39.5
ケース 13	72.0	83.0	45.9	107.1	76.0
ケース 14	50.0	68.4	6.5	108.6	56.8
ケース 15	-26.7	-0.9	-87.6	55.3	-17.2
ケース 16	129.4	140.4	103.3	164.5	133.4
ケース 17	52.7	71.1	9.2	111.2	59.4
ケース 18	19.7	45.5	-41.2	101.8	29.2

表 5-10 3 地域：主方位西の $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

方位	東	西	南	北	1棟分
標準	107.7	102.1	45.4	153.3	98.7
ケース 1	41.6	38.4	5.2	68.0	36.3
ケース 2	16.0	10.6	-44.7	60.1	7.2
ケース 3	1.4	-6.2	-83.6	63.0	-11.0
ケース 4	87.1	83.8	49.8	114.5	81.7
ケース 5	60.3	54.7	-2.0	105.8	51.2
ケース 6	44.3	36.5	-42.9	108.1	31.6
ケース 7	145.5	142.2	108.2	172.9	140.1
ケース 8	129.6	124.0	67.3	175.2	120.5
ケース 9	59.0	51.1	-28.3	122.7	46.3
ケース 10	66.8	63.5	30.4	93.2	61.5
ケース 11	-2.5	-8.0	-63.3	41.5	-11.4
ケース 12	-28.1	-35.7	-113.2	33.5	-40.5
ケース 13	81.1	77.7	43.7	108.4	75.6
ケース 14	65.1	59.5	2.8	110.7	56.1
ケース 15	-5.5	-13.4	-92.7	58.2	-18.2
ケース 16	138.4	135.1	101.0	165.8	133.0
ケース 17	67.8	62.1	5.5	113.3	58.7
ケース 18	40.9	33.1	-46.3	104.7	28.2

表 5-11 3 地域：主方位南の $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

方位	東	西	南	北	1棟分
標準	100.9	117.4	27.6	153.6	57.5
ケース 1	37.7	47.2	-5.2	68.2	12.2
ケース 2	9.5	25.4	-62.0	60.4	-32.9
ケース 3	-7.7	14.5	-107.9	63.5	-67.2
ケース 4	83.1	93.0	39.0	114.7	57.0
ケース 5	53.5	70.0	-19.9	106.2	10.0
ケース 6	34.8	57.9	-67.9	108.6	-26.1
ケース 7	141.5	151.4	97.5	173.1	115.4
ケース 8	122.8	139.3	49.5	175.5	79.3
ケース 9	49.5	72.6	-53.2	123.2	-11.4
ケース 10	62.9	72.4	20.0	93.4	37.4
ケース 11	-9.1	6.8	-80.6	41.8	-51.5
ケース 12	-37.3	-15.1	-137.4	34.0	-96.7
ケース 13	77.0	86.9	33.0	108.6	50.9
ケース 14	58.3	74.8	-15.0	111.0	14.9
ケース 15	-15.0	8.1	-117.7	58.7	-75.9
ケース 16	134.4	144.3	90.3	166.0	108.3
ケース 17	61.0	77.5	-12.4	113.7	17.5
ケース 18	31.4	54.5	-71.3	105.2	-29.5

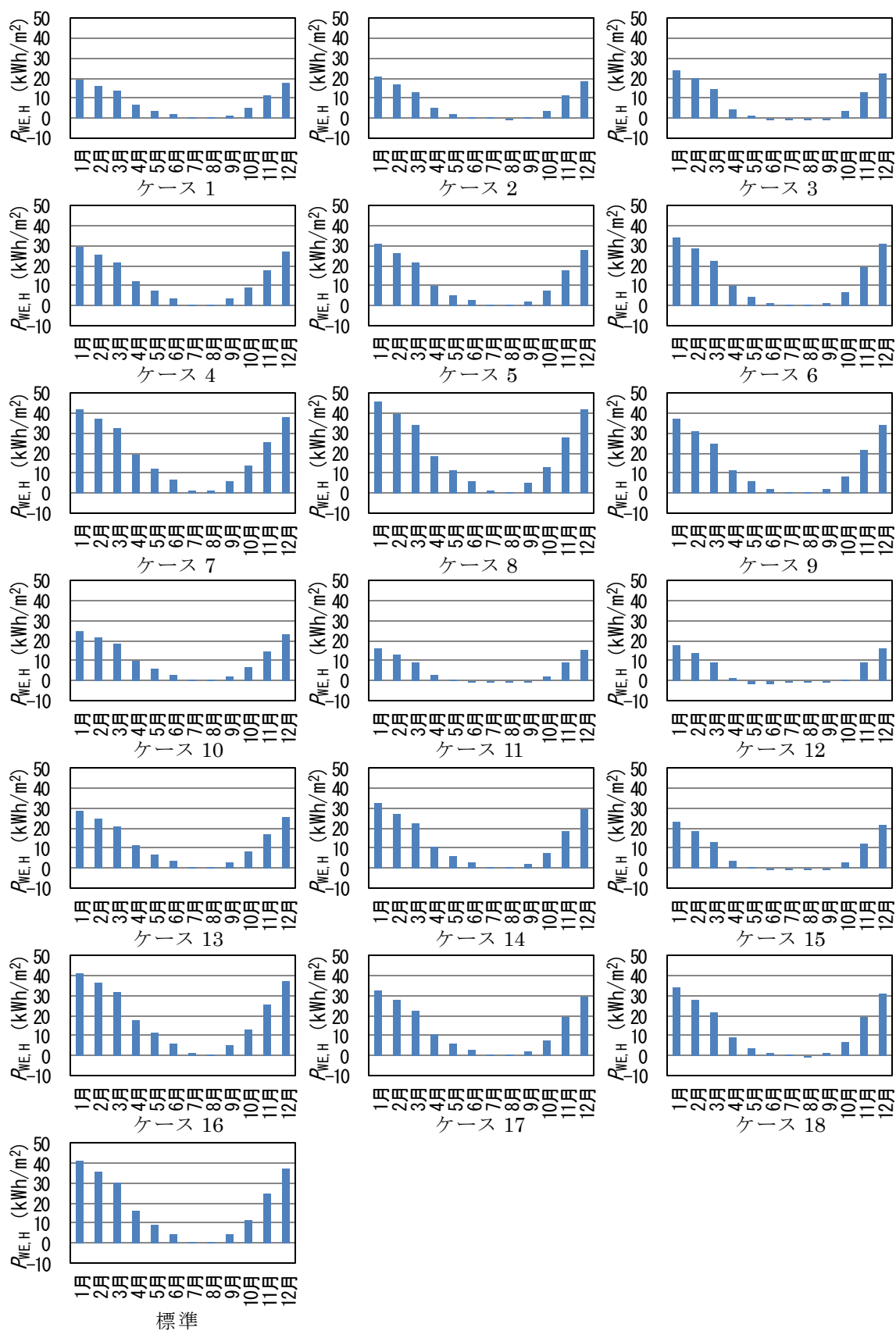


図 5-2 1 地域（主方位東：東面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

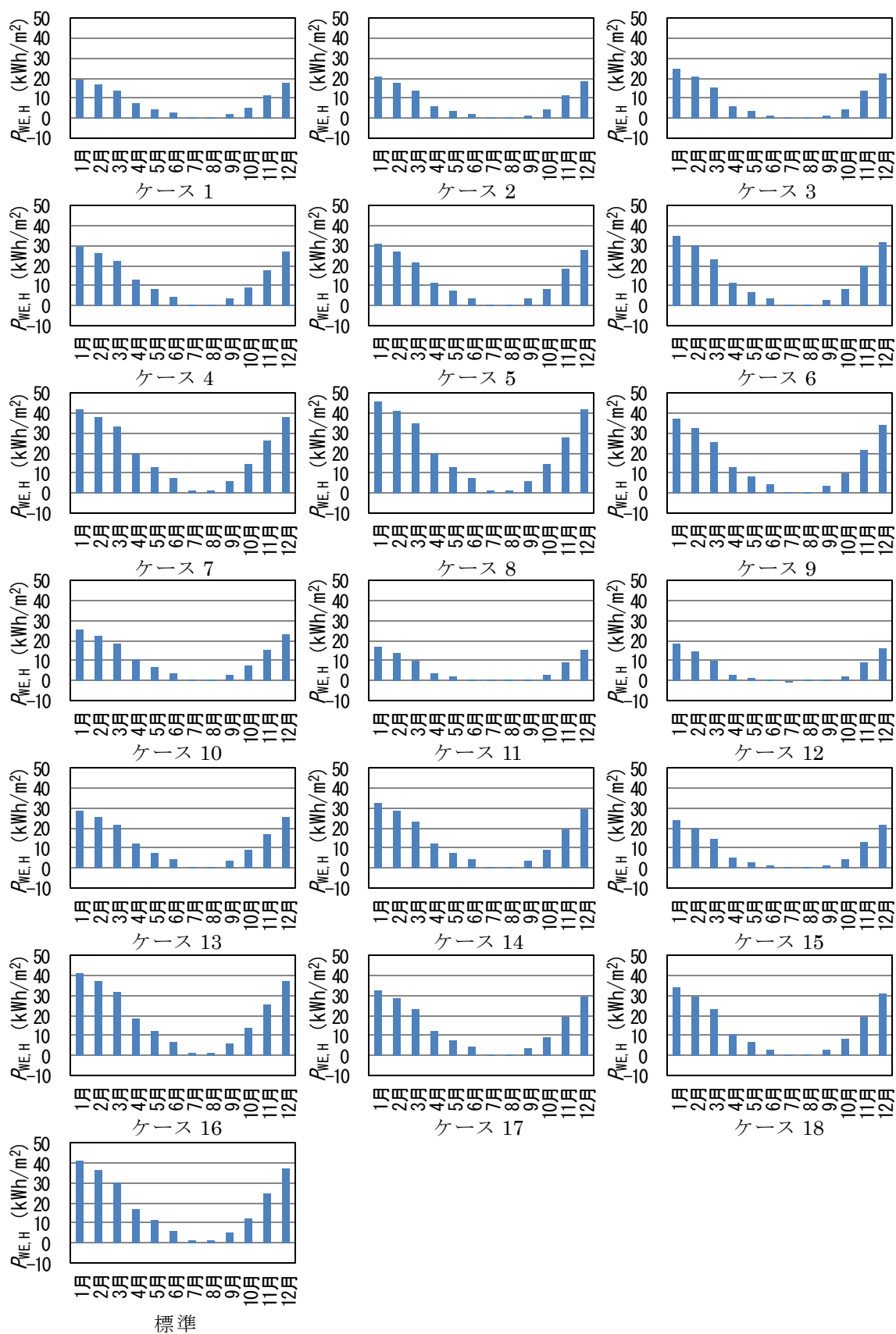


図 5-3 1 地域（主方位東：西面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果 [kWh/m^2]

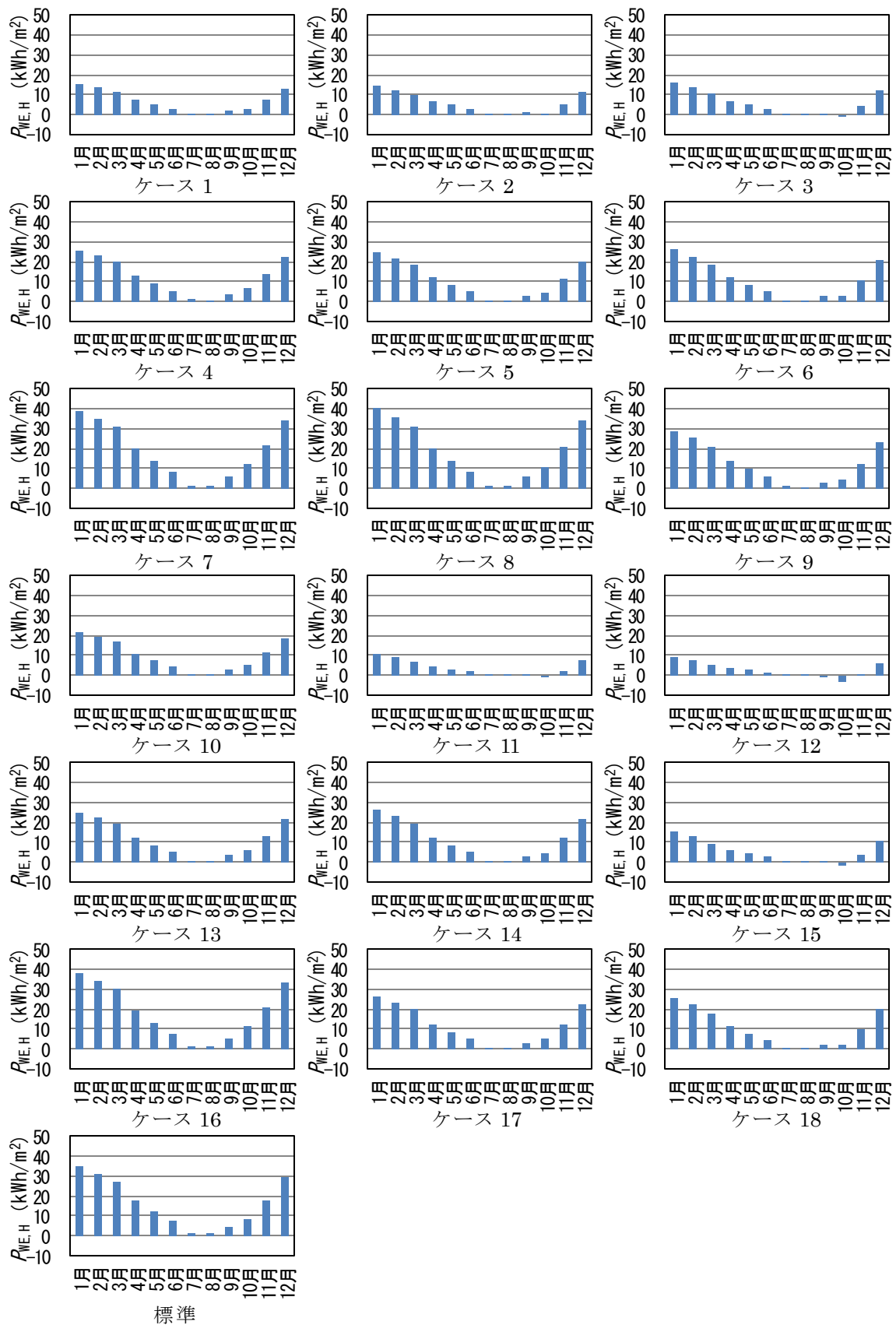


図 5-4 1 地域（主方位東：南面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

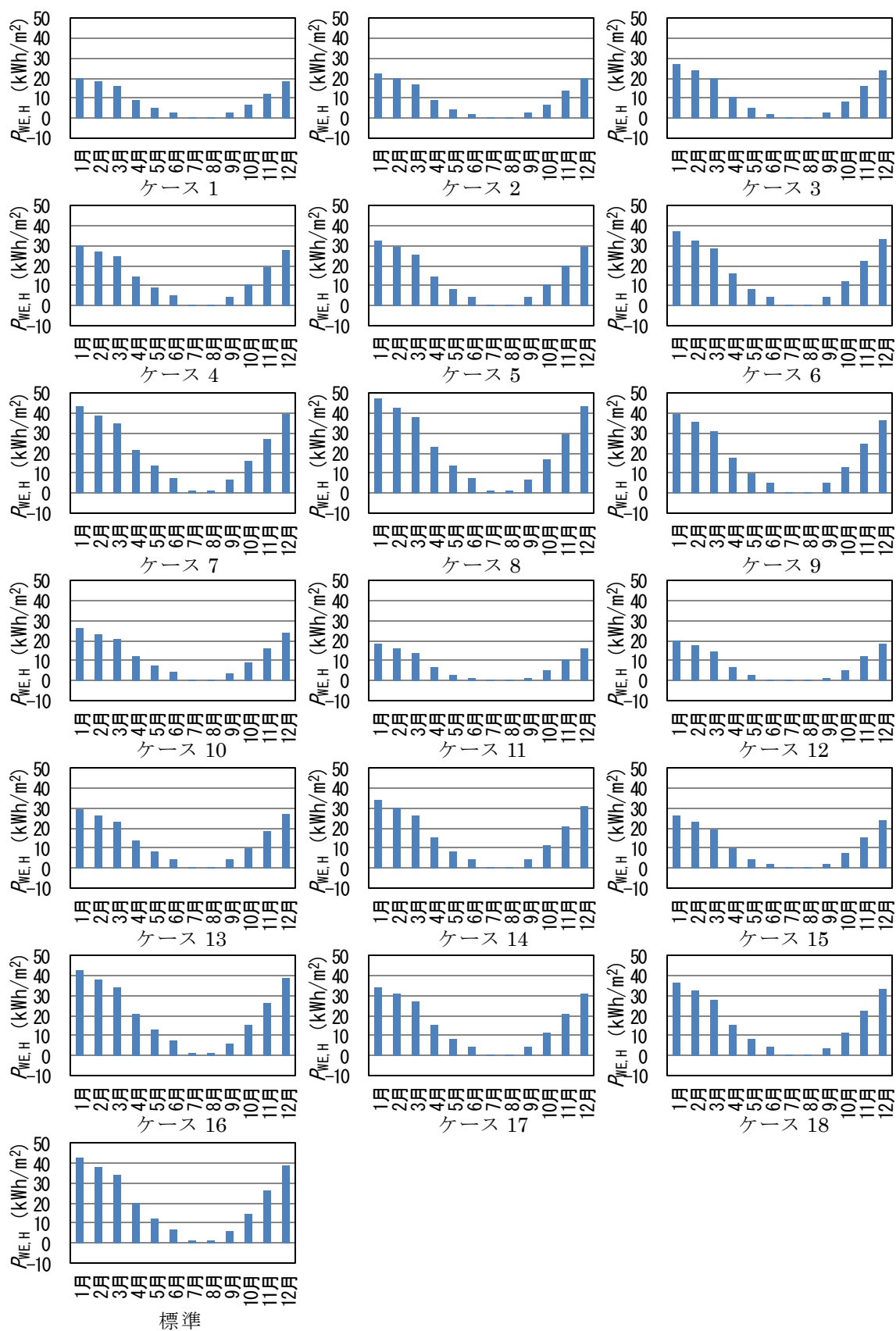


図 5-5 1 地域（主方位東：北面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

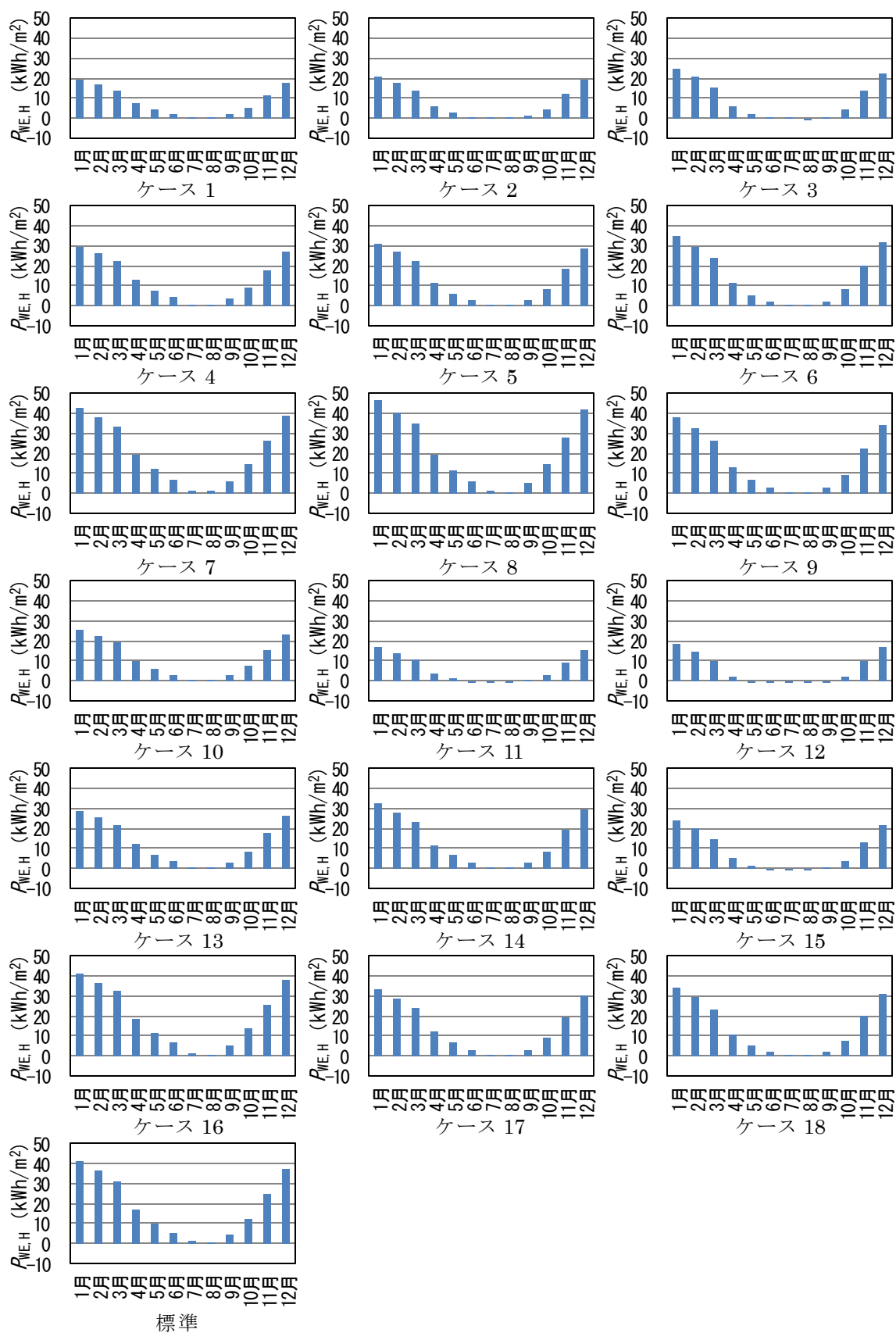


図 5-6 1 地域（主方位西：東面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果 [kWh/m^2]

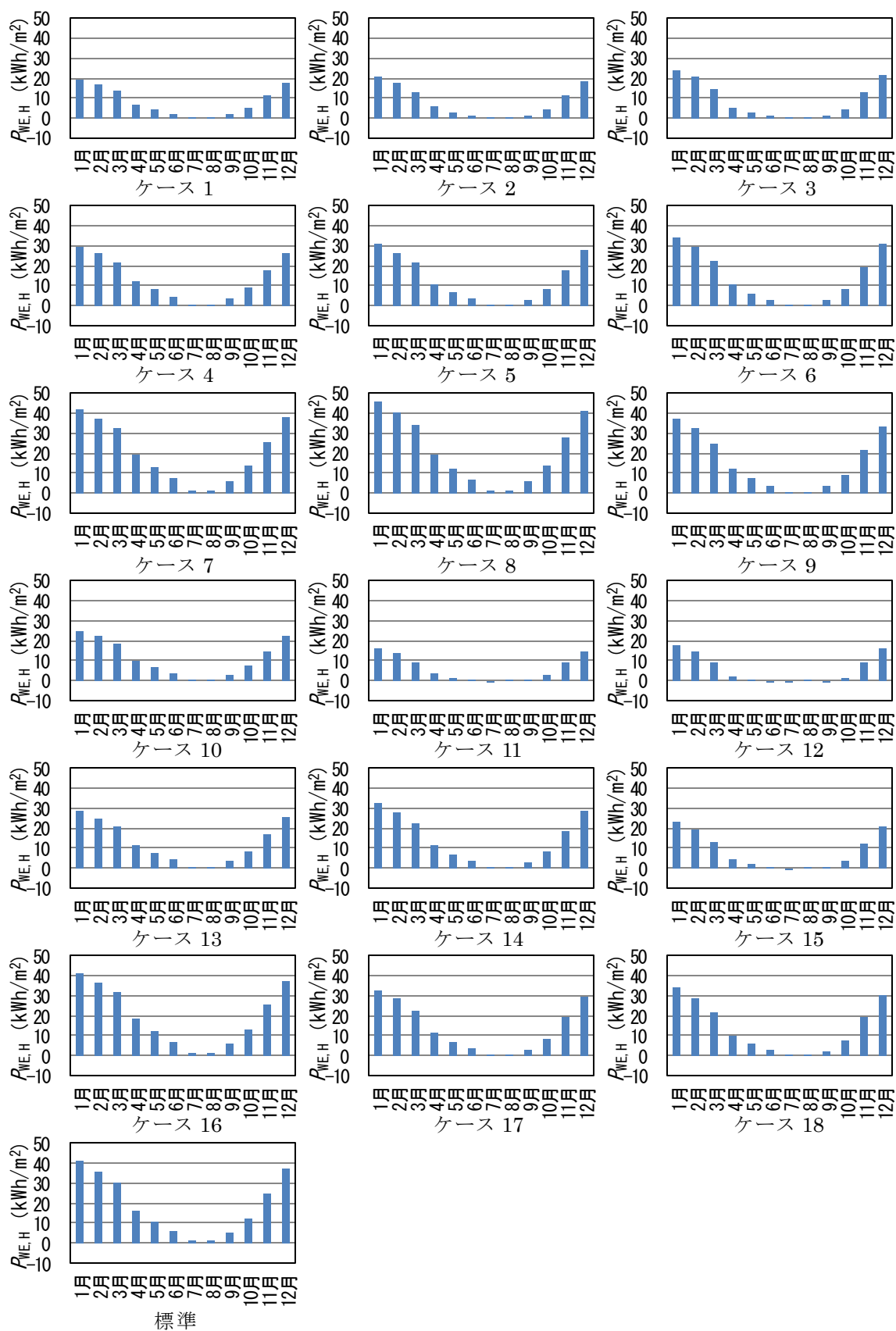


図 5-7 1 地域（主方位西：西面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

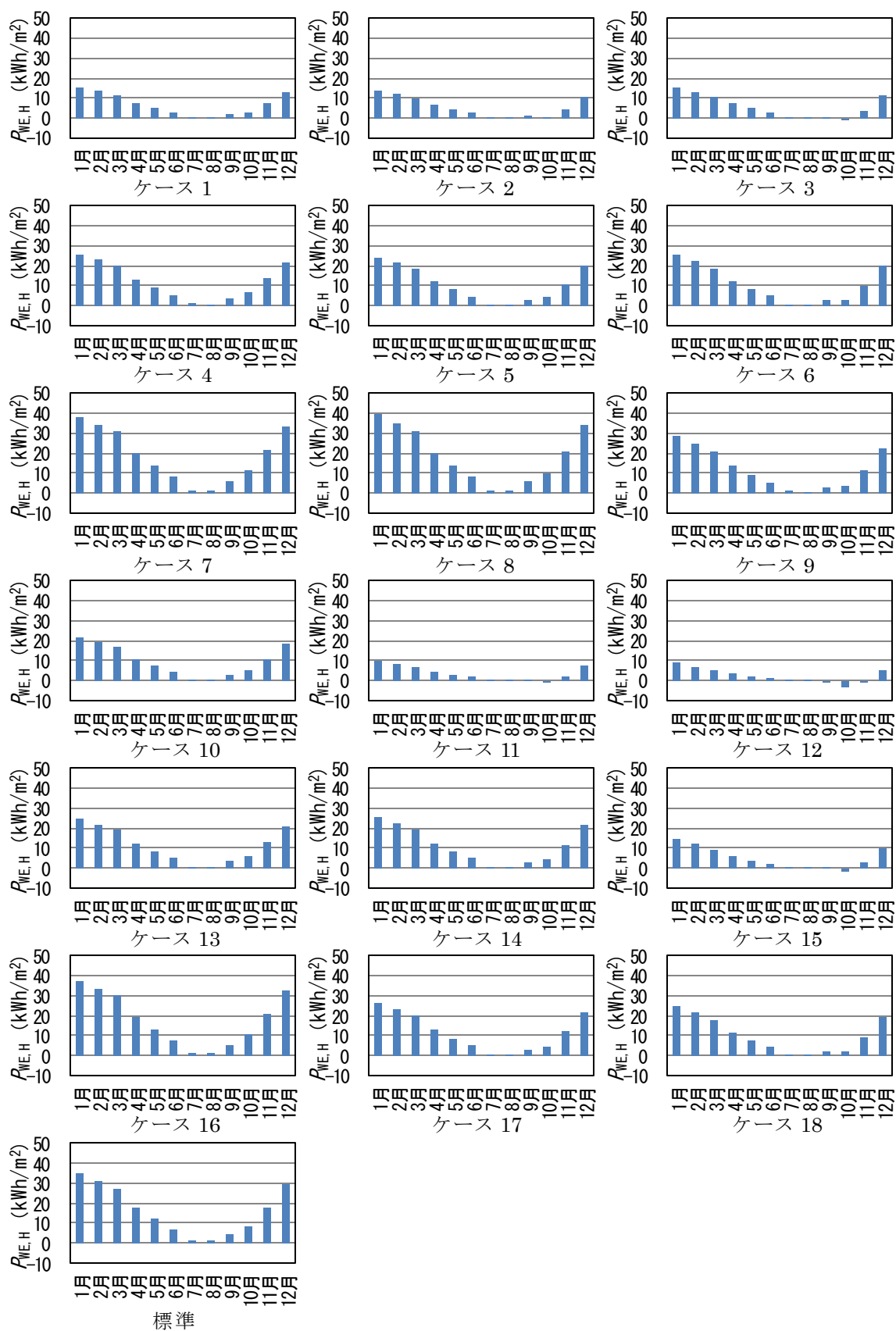


図 5-8 1 地域（主方位西：南面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

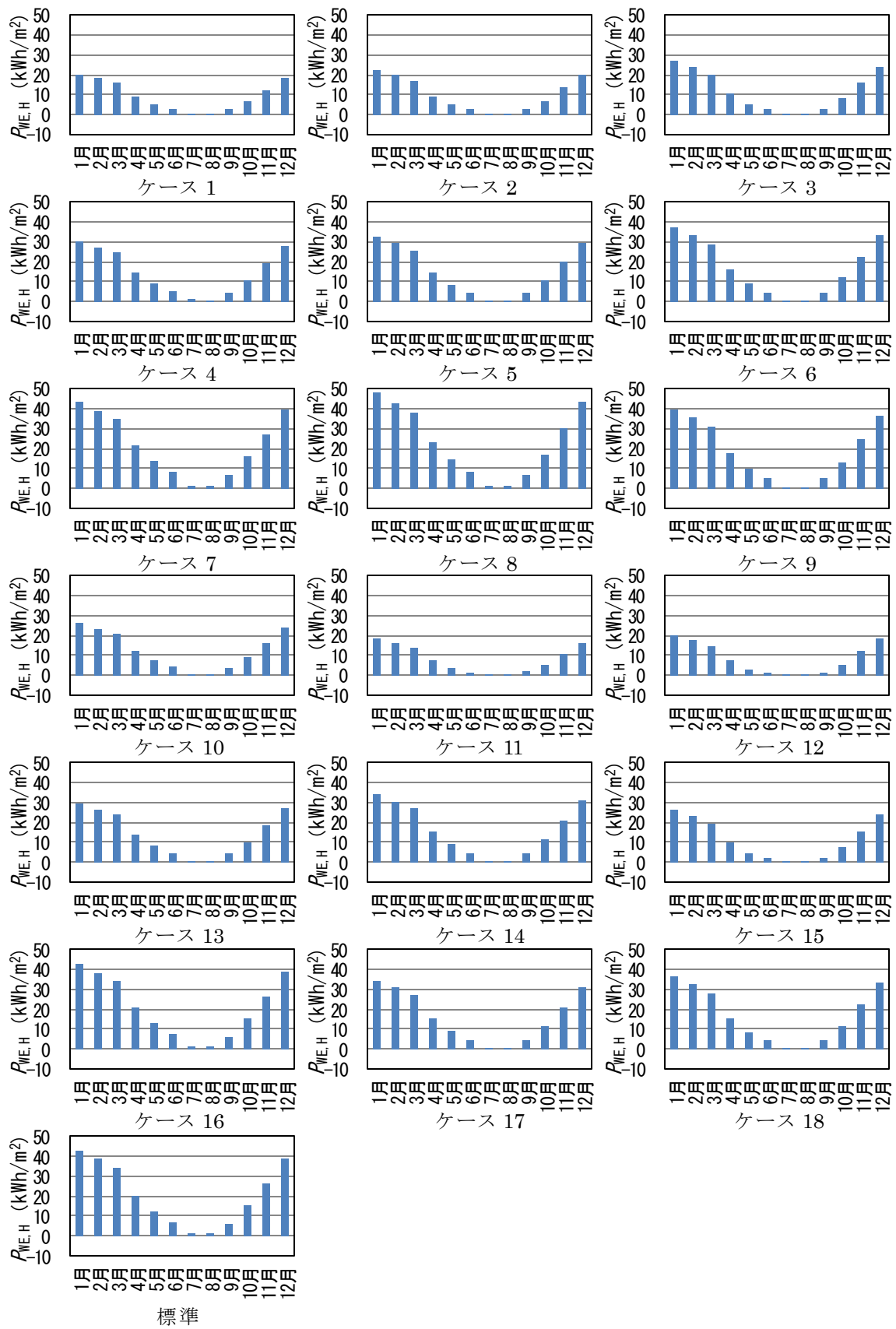


図 5-9 1 地域（主方位西：北面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

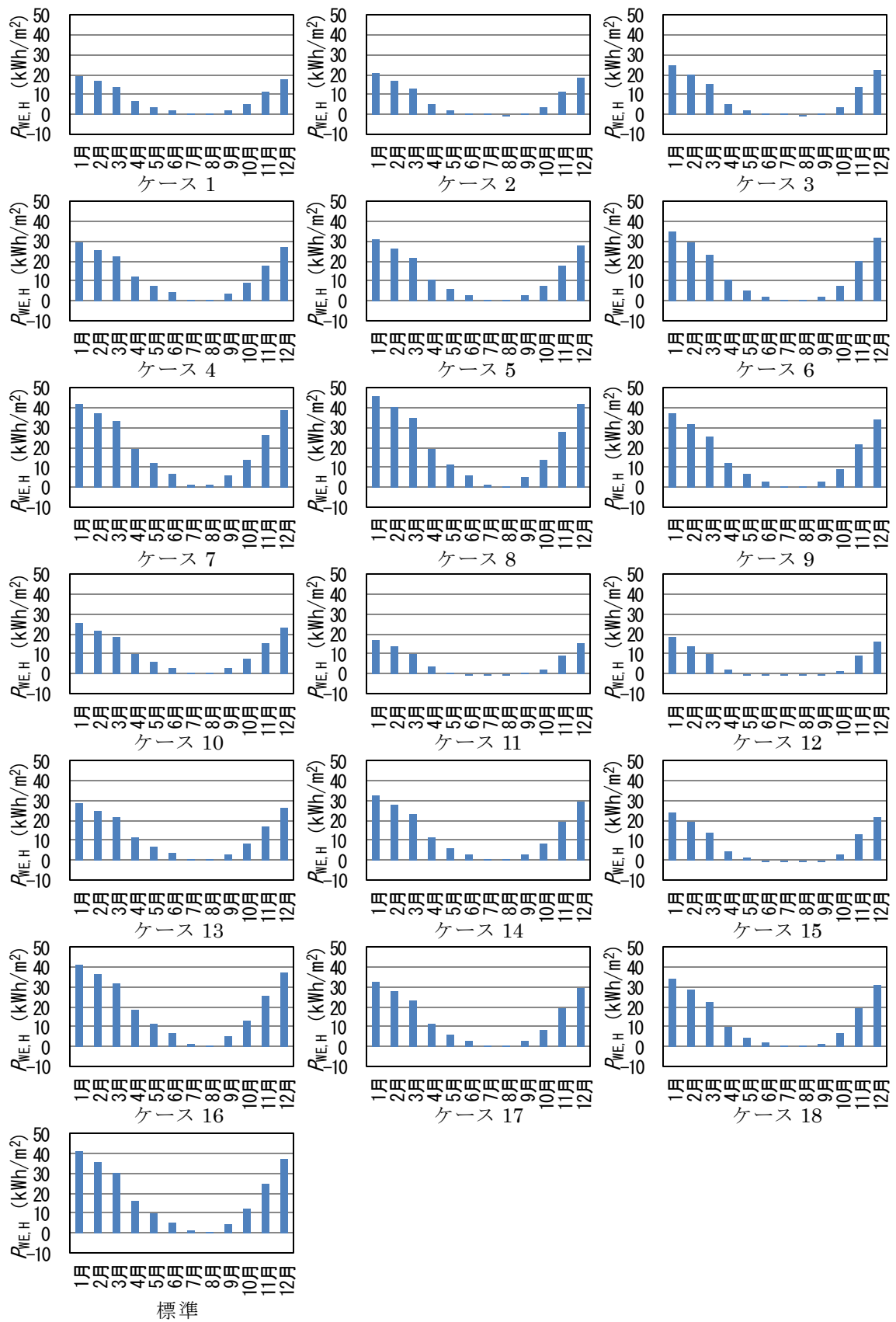


図 5-10 1地域（主方位南：東面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

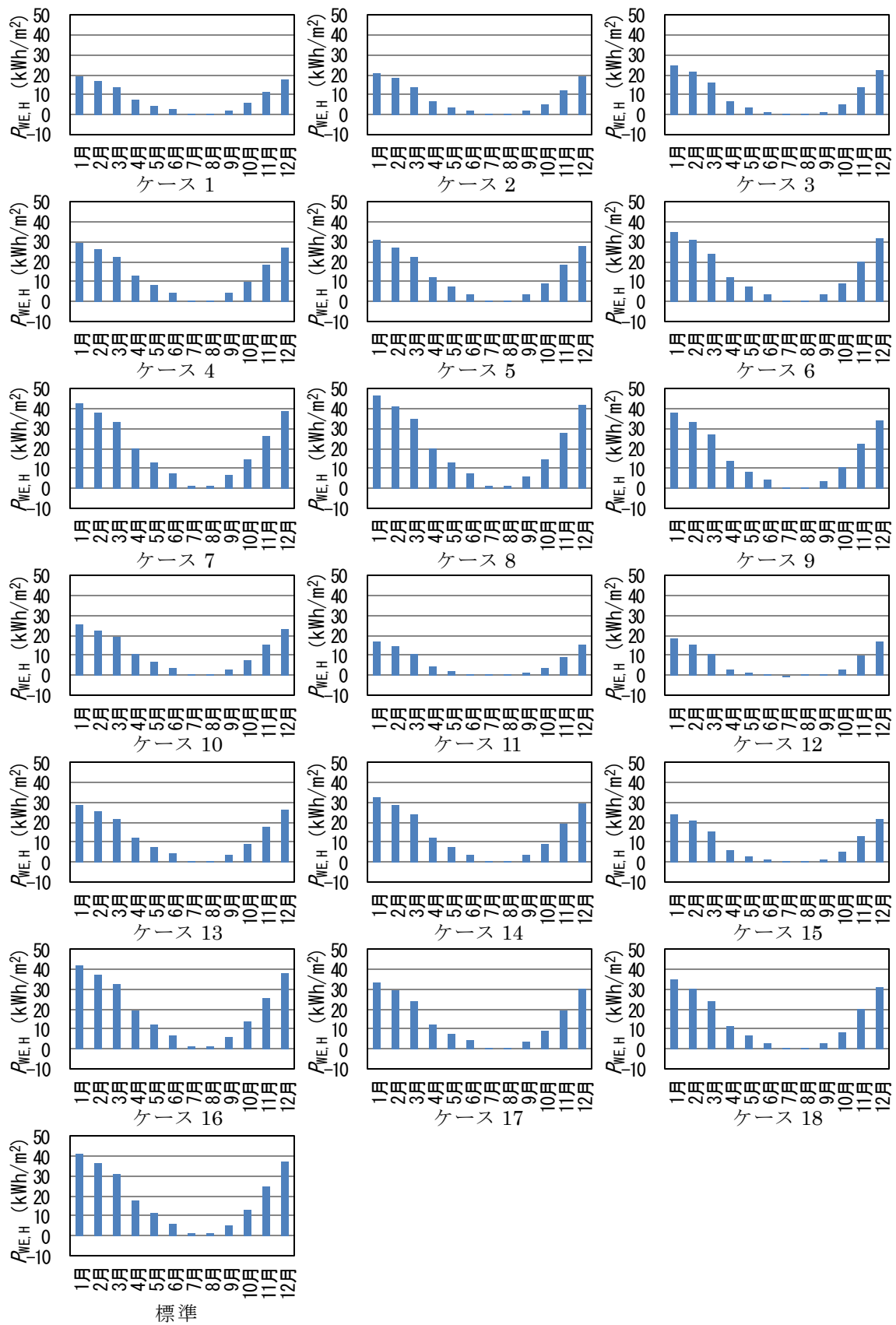


図 5-11 1地域（主方位南：西面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

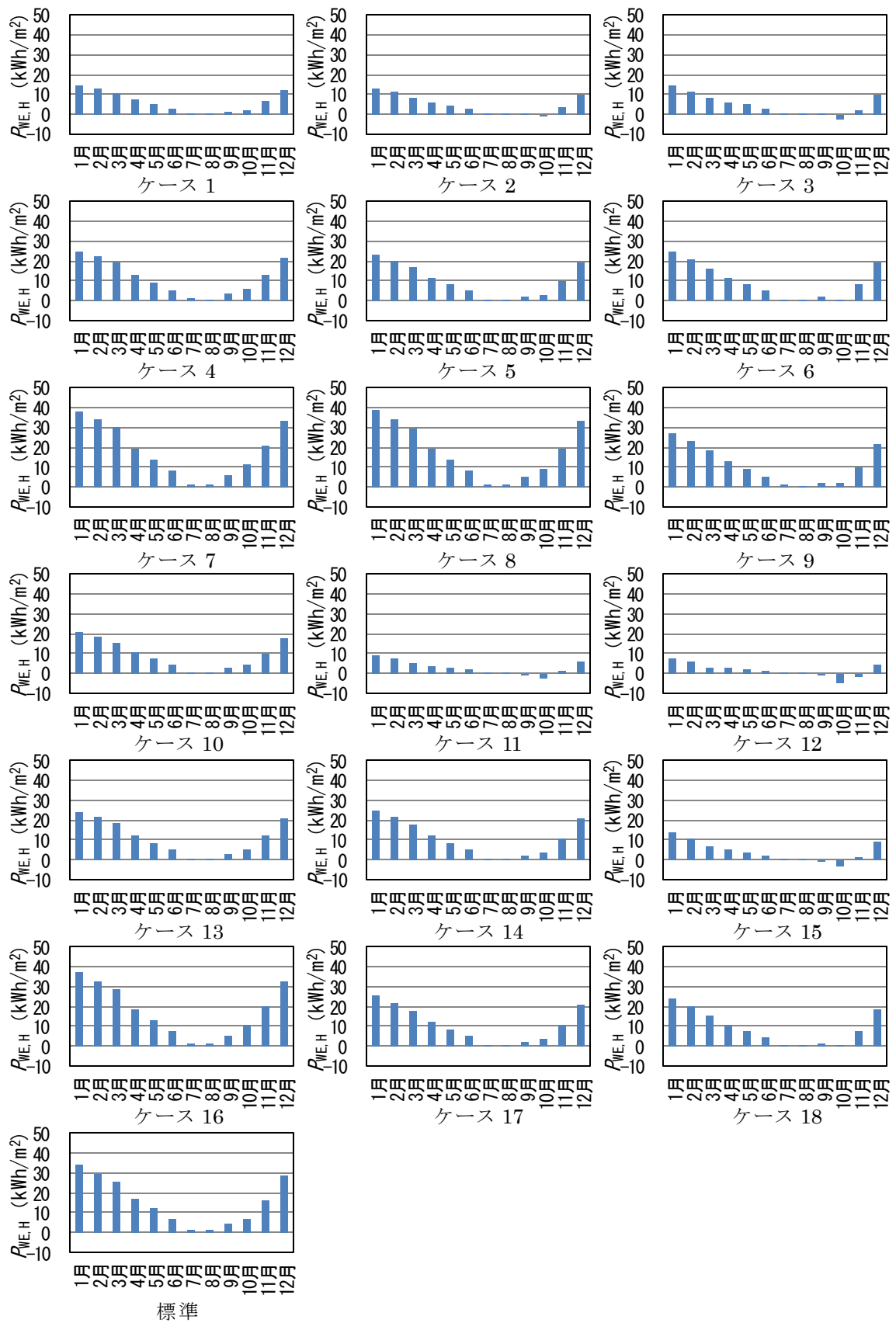


図 5-12 1地域（主方位南：南面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

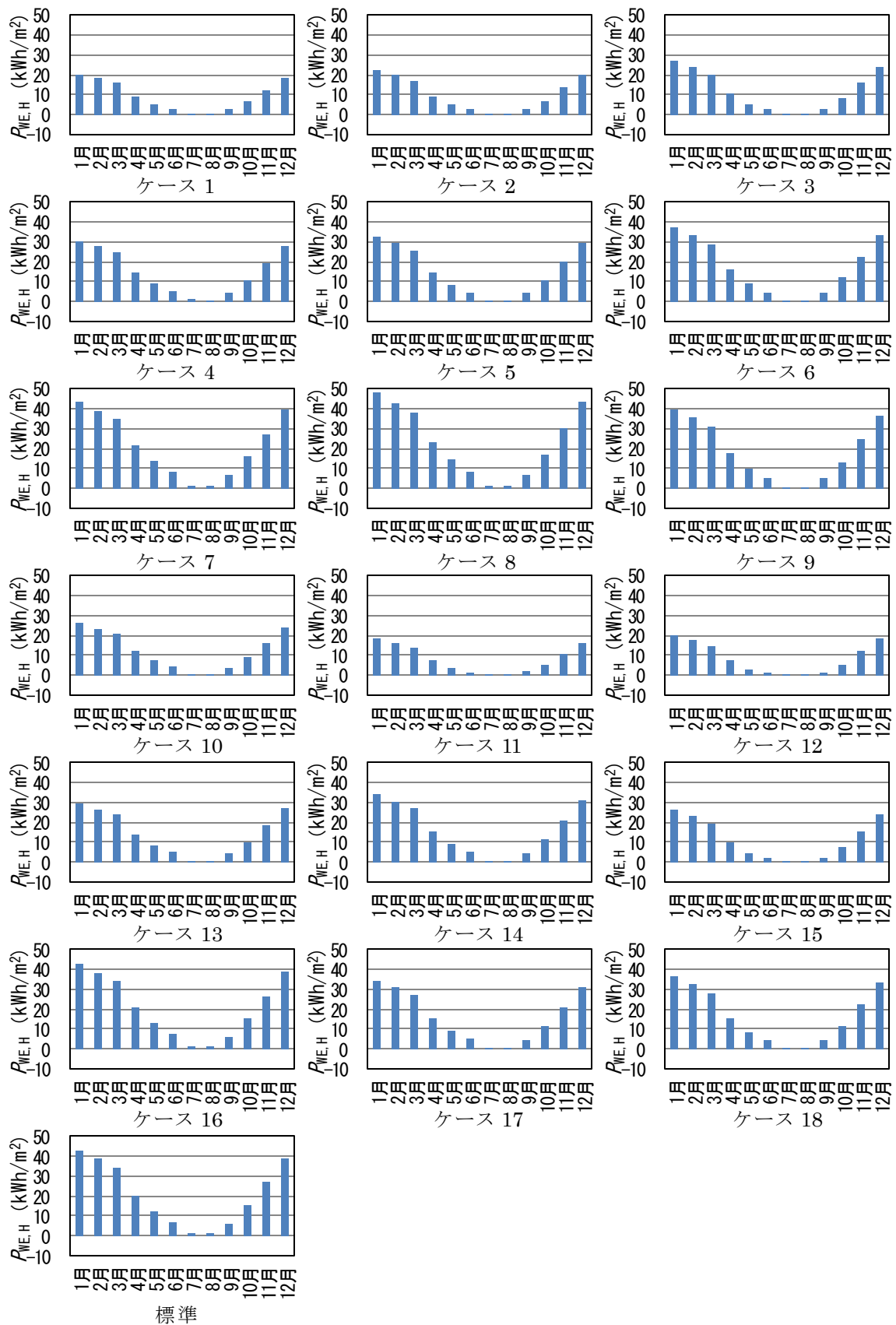


図 5-13 1地域（主方位南：北面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

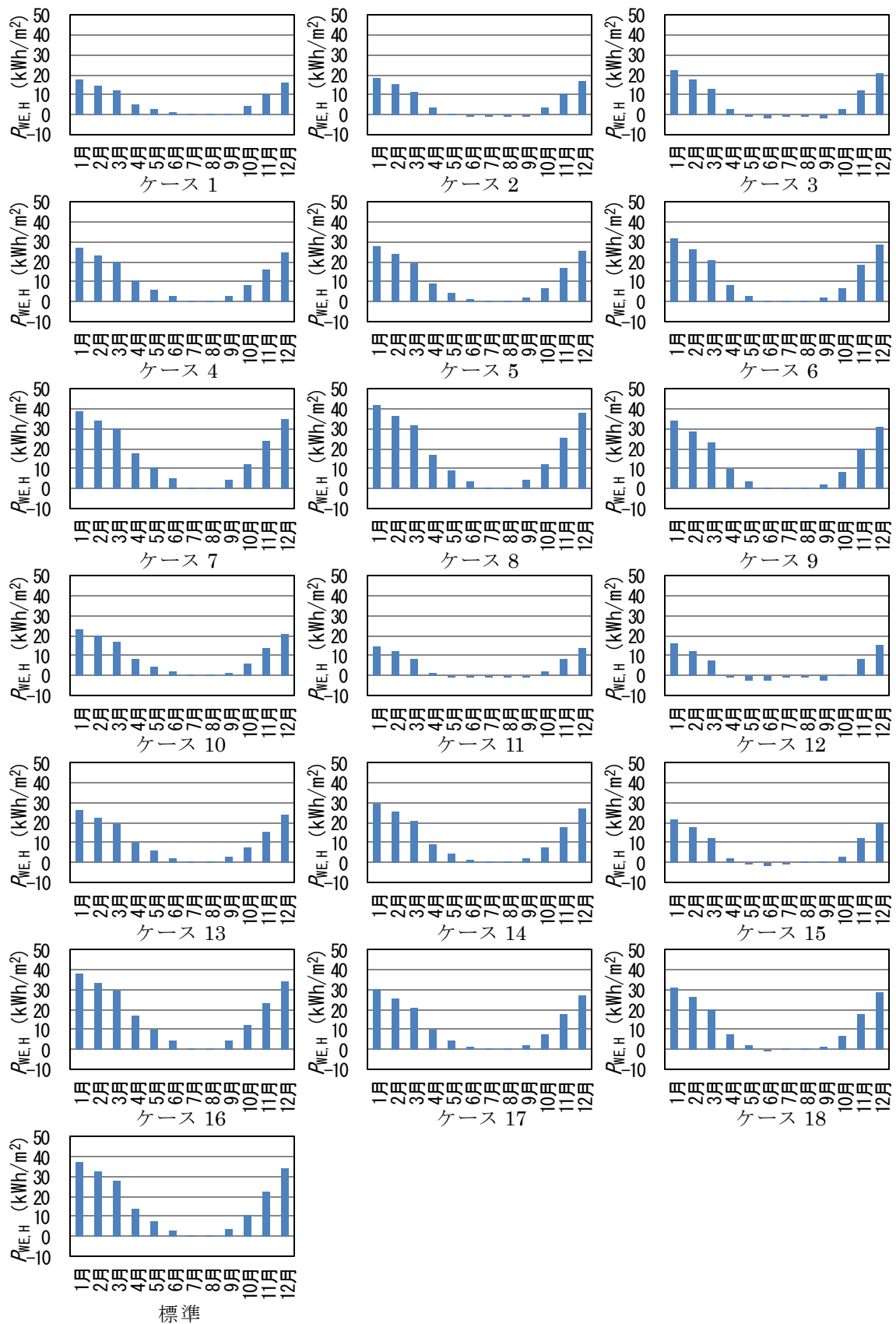


図 5-14 2 地域（主方位東：東面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

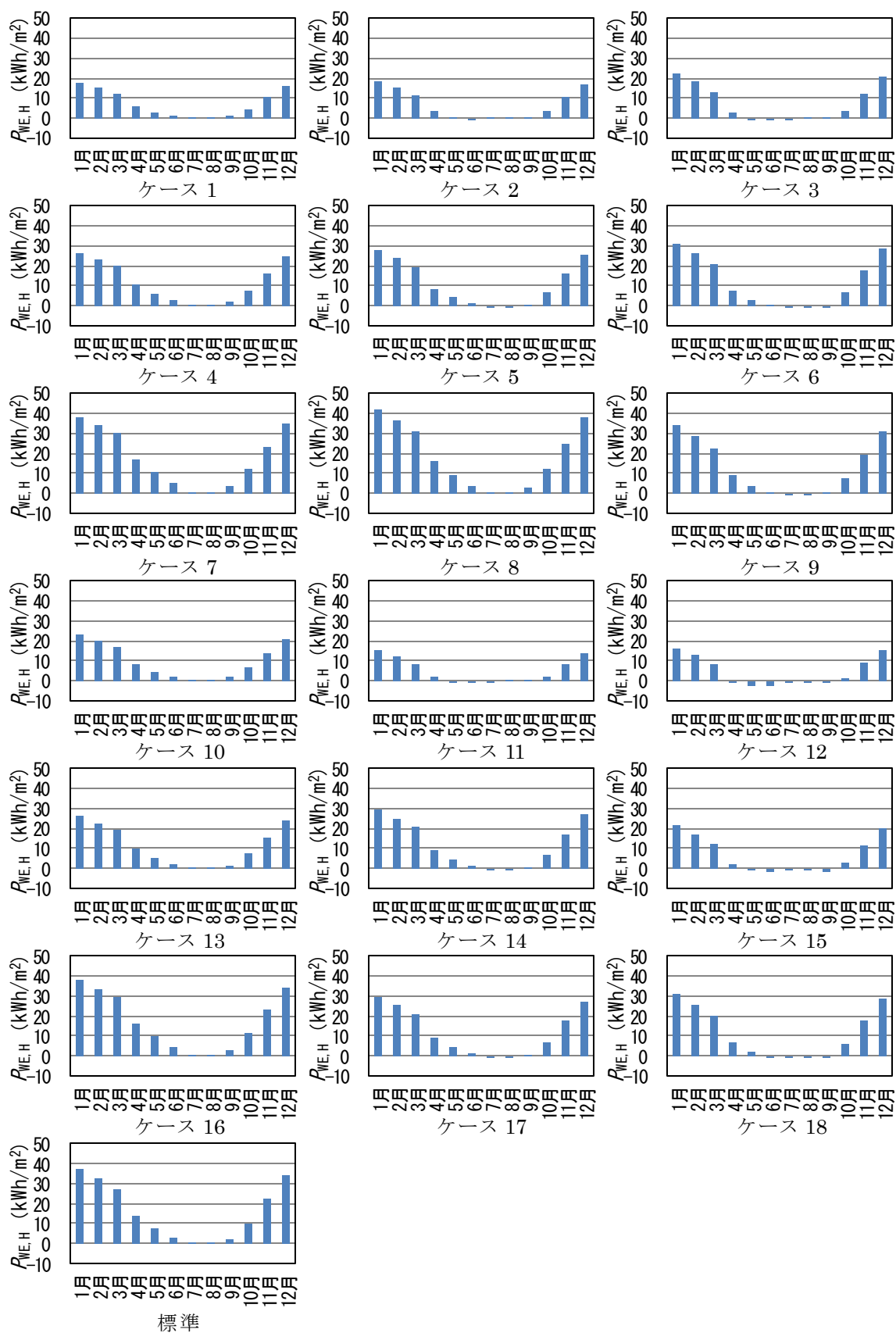


図 5-15 2 地域（主方位東：西面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

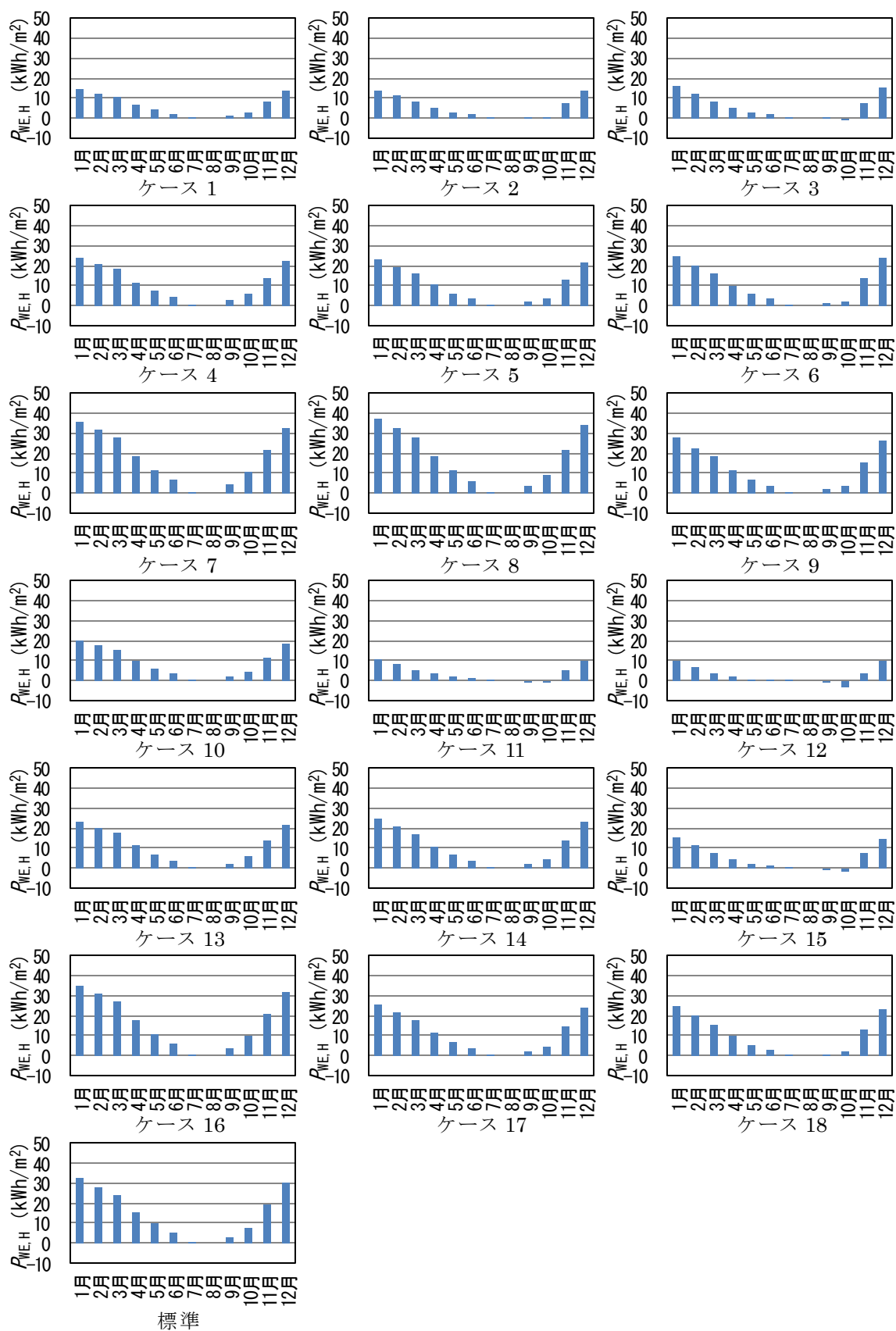


図 5-16 2 地域（主方位東：南面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

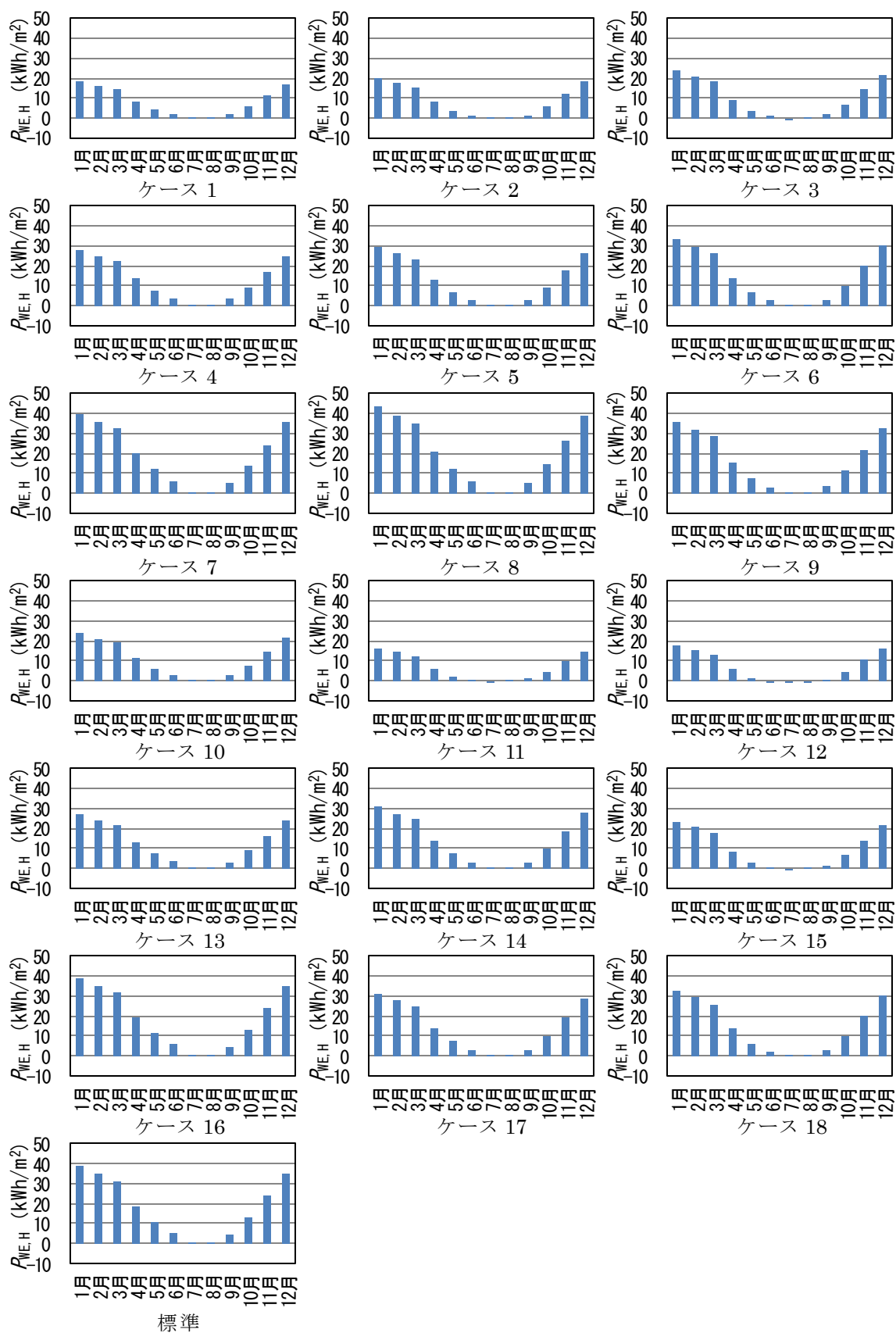


図 5-17 2 地域（主方位東：北面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

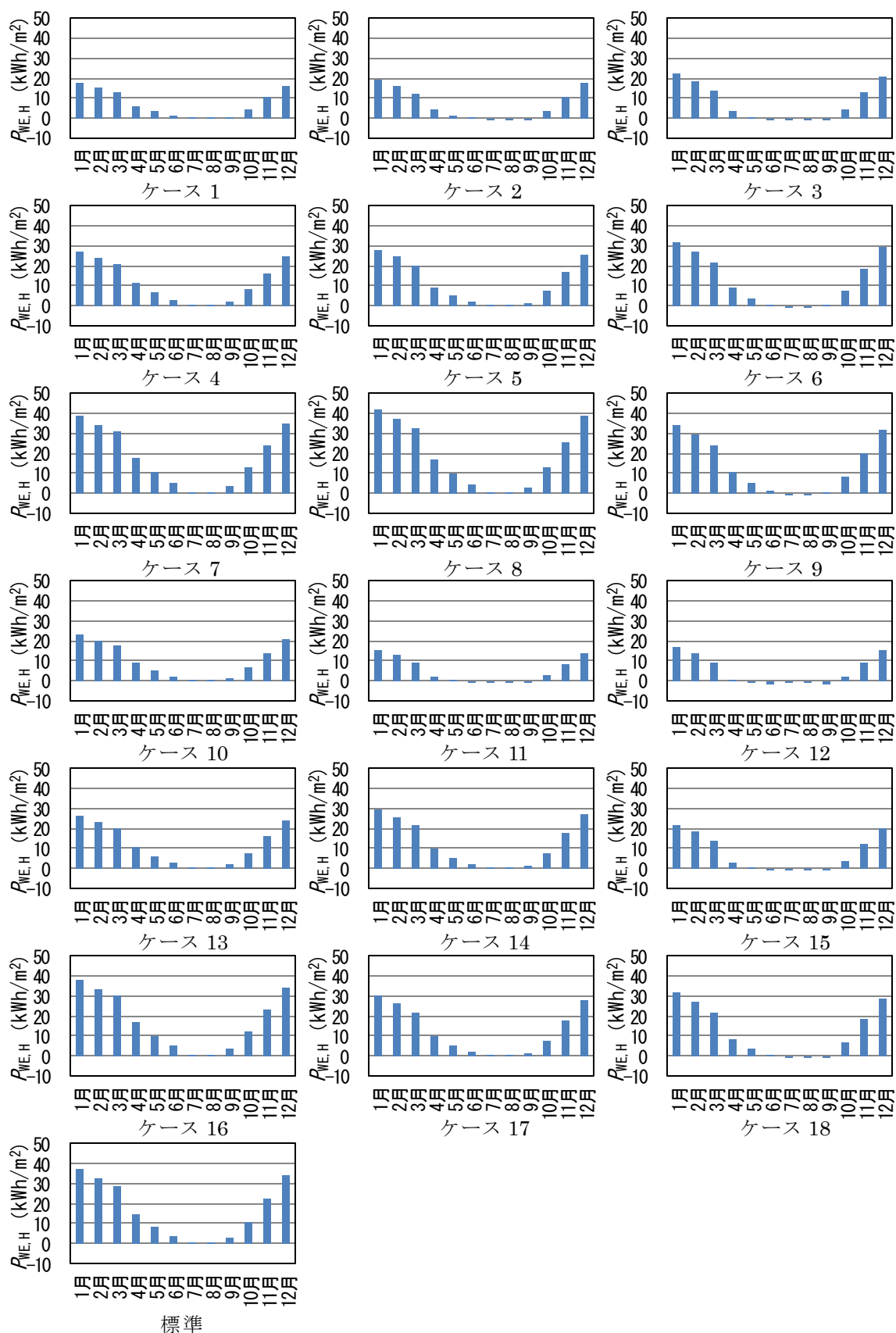


図 5-18 2 地域（主方位西：東面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

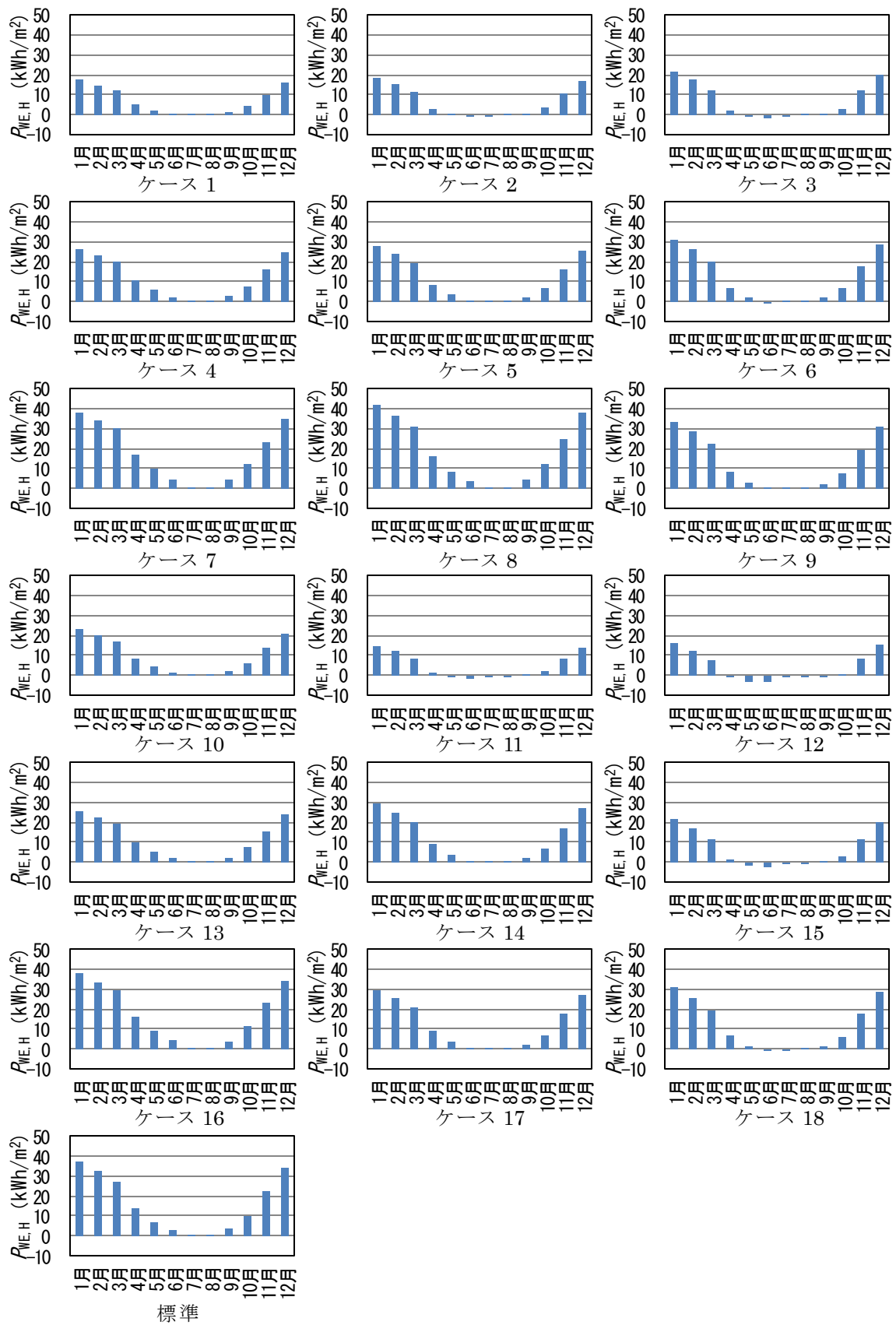


図 5-19 2地域（主方位西：西面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

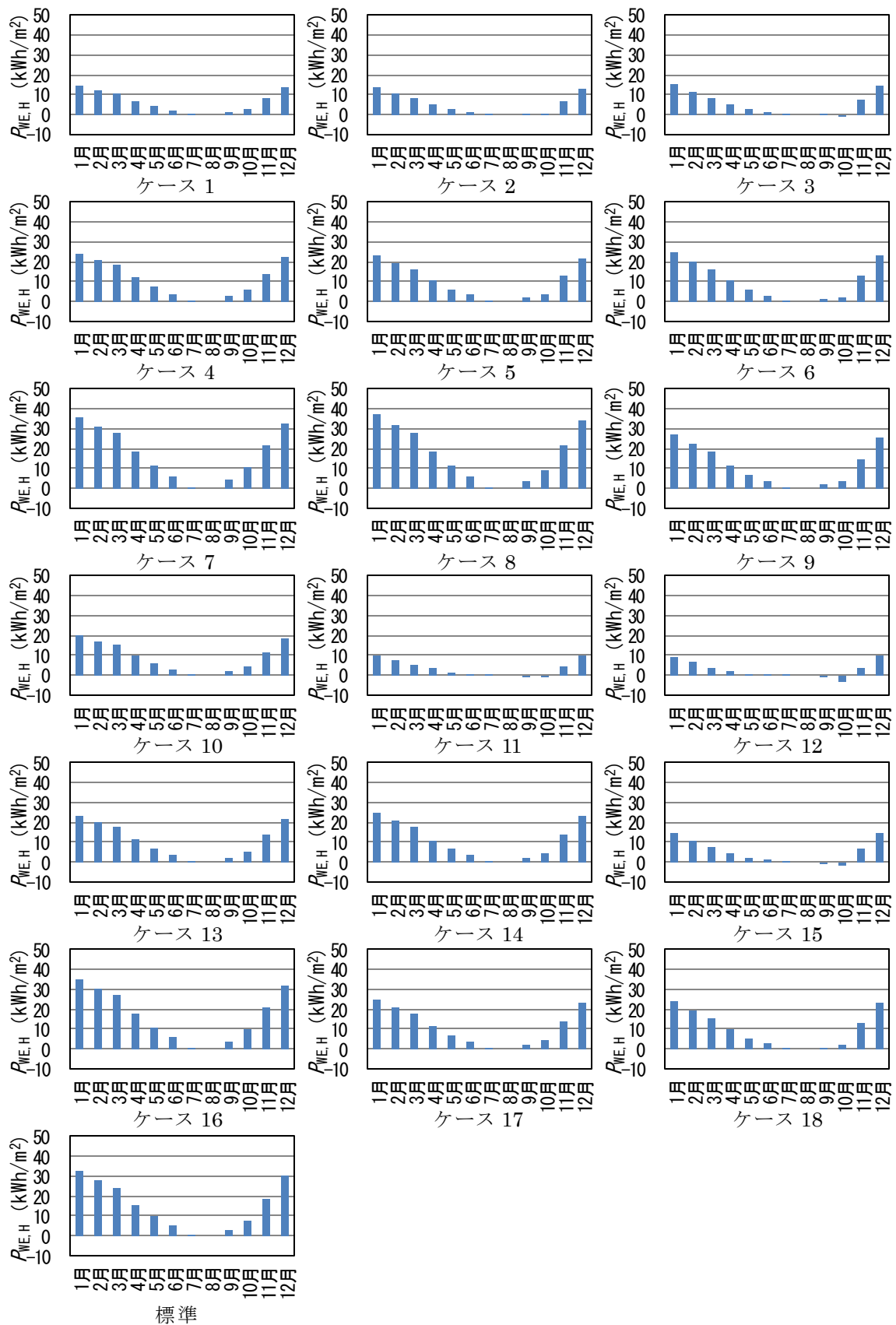


図 5-20 2 地域（主方位西：南面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

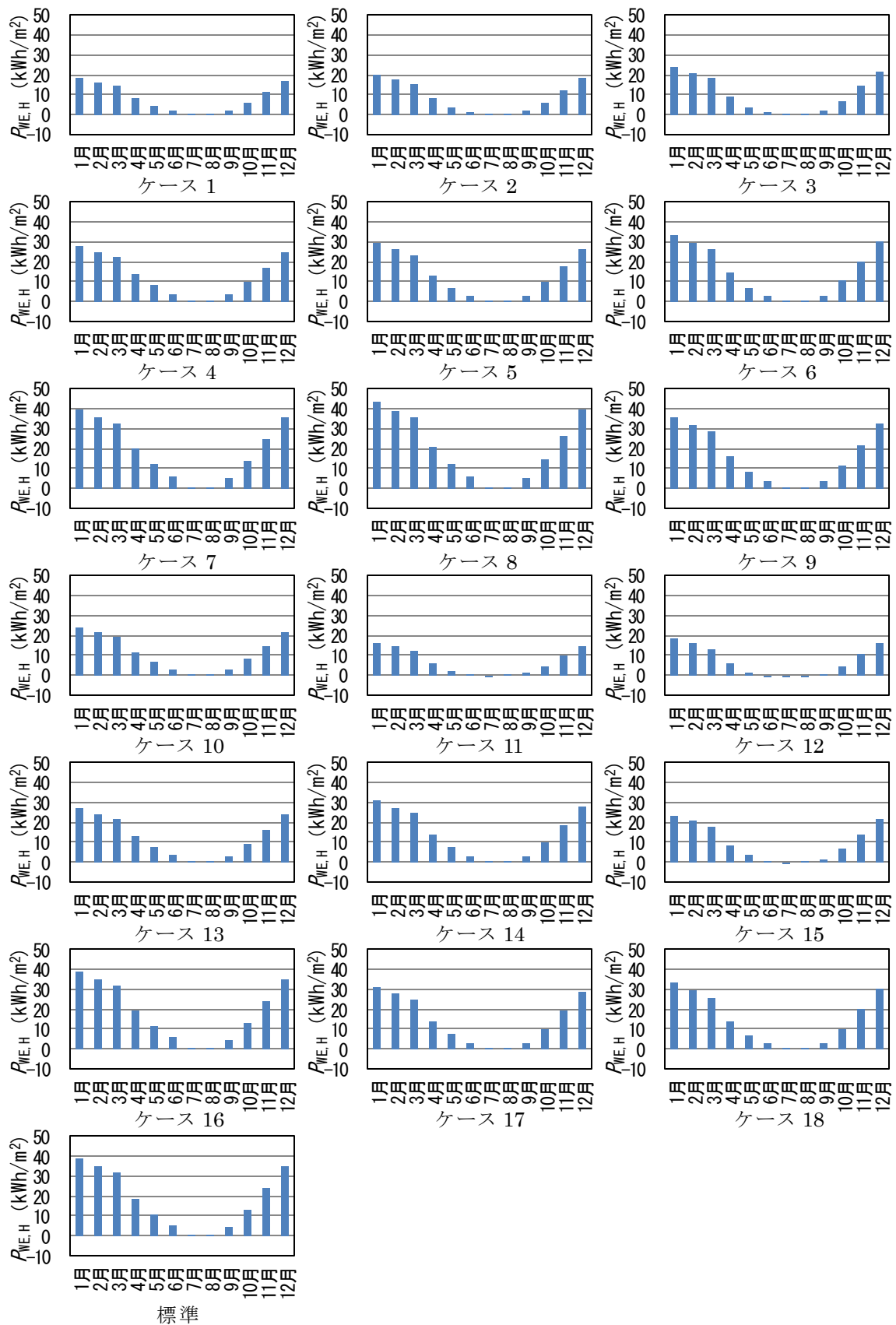


図 5-21 2 地域（主方位西：北面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

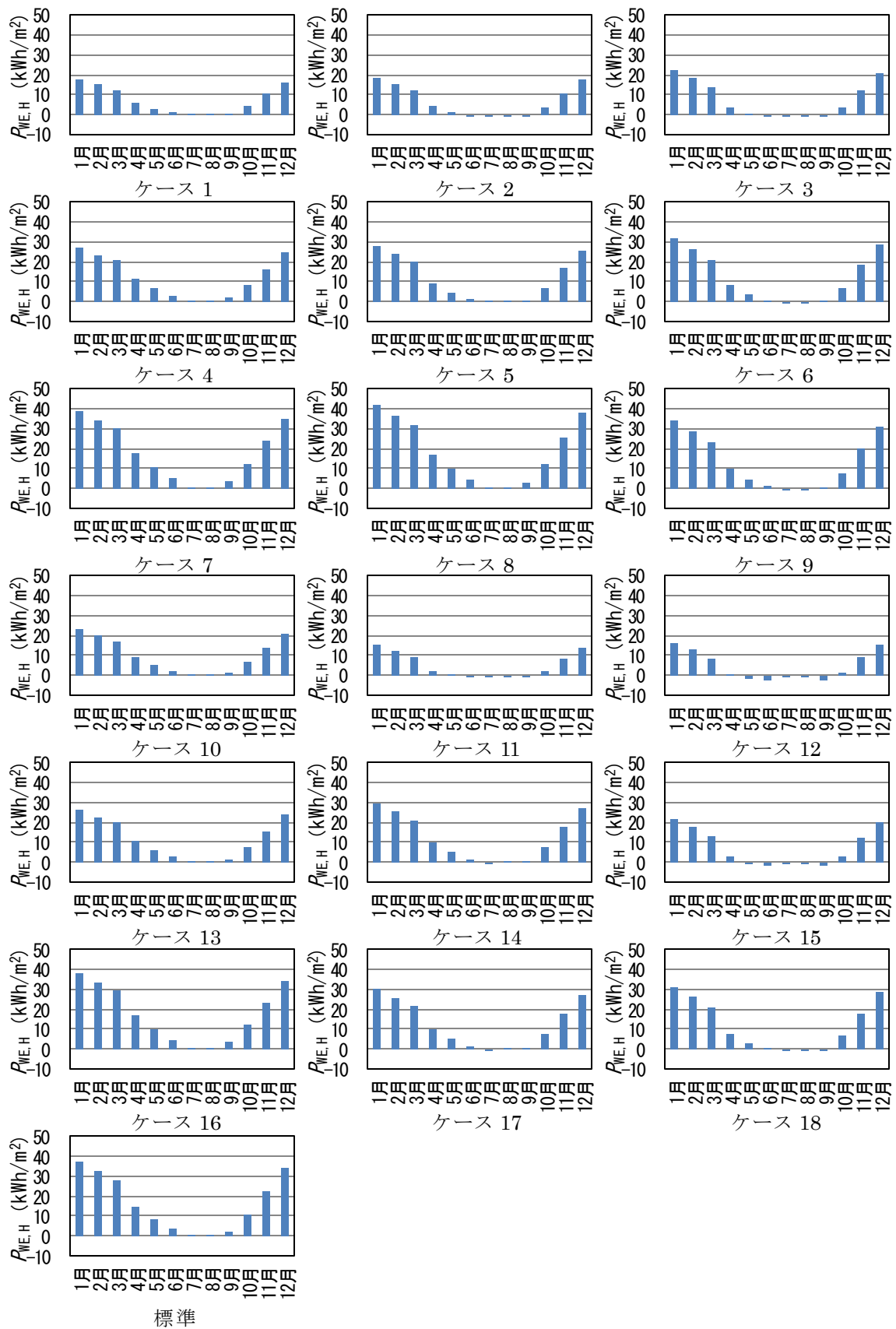


図 5-22 2 地域（主方位南：東面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

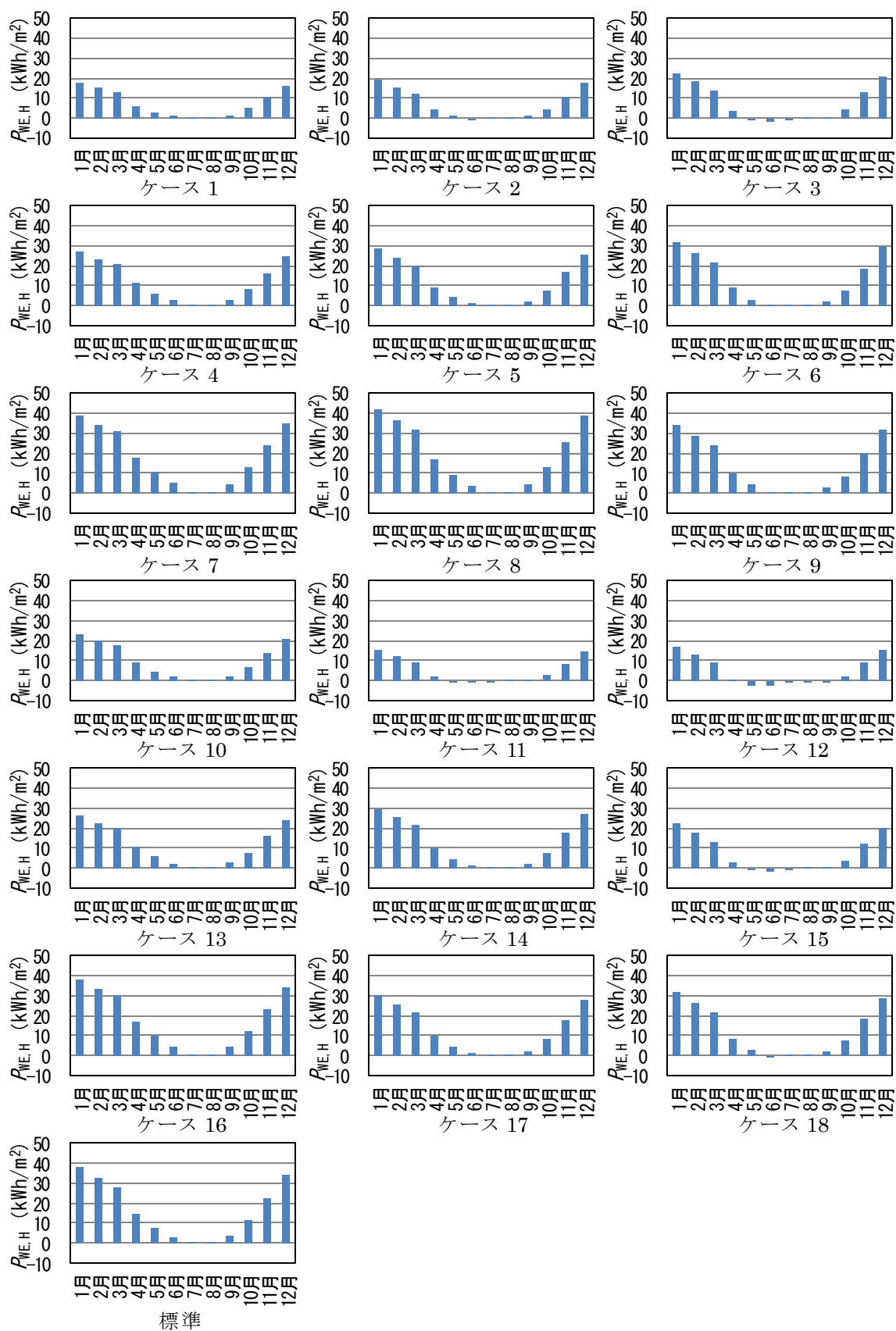


図 5-23 2 地域（主方位南：西面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

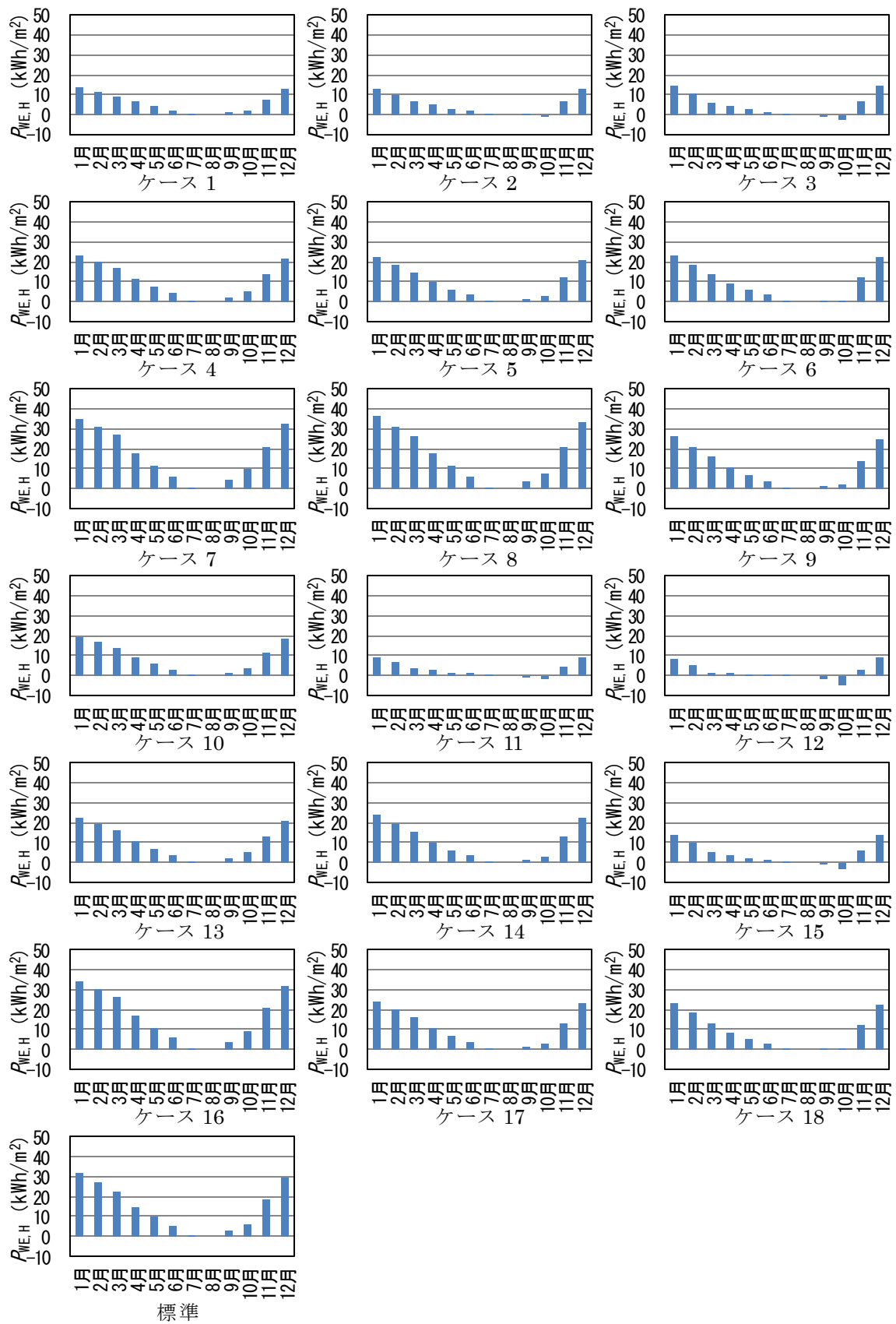


図 5-24 2 地域（主方位南：南面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

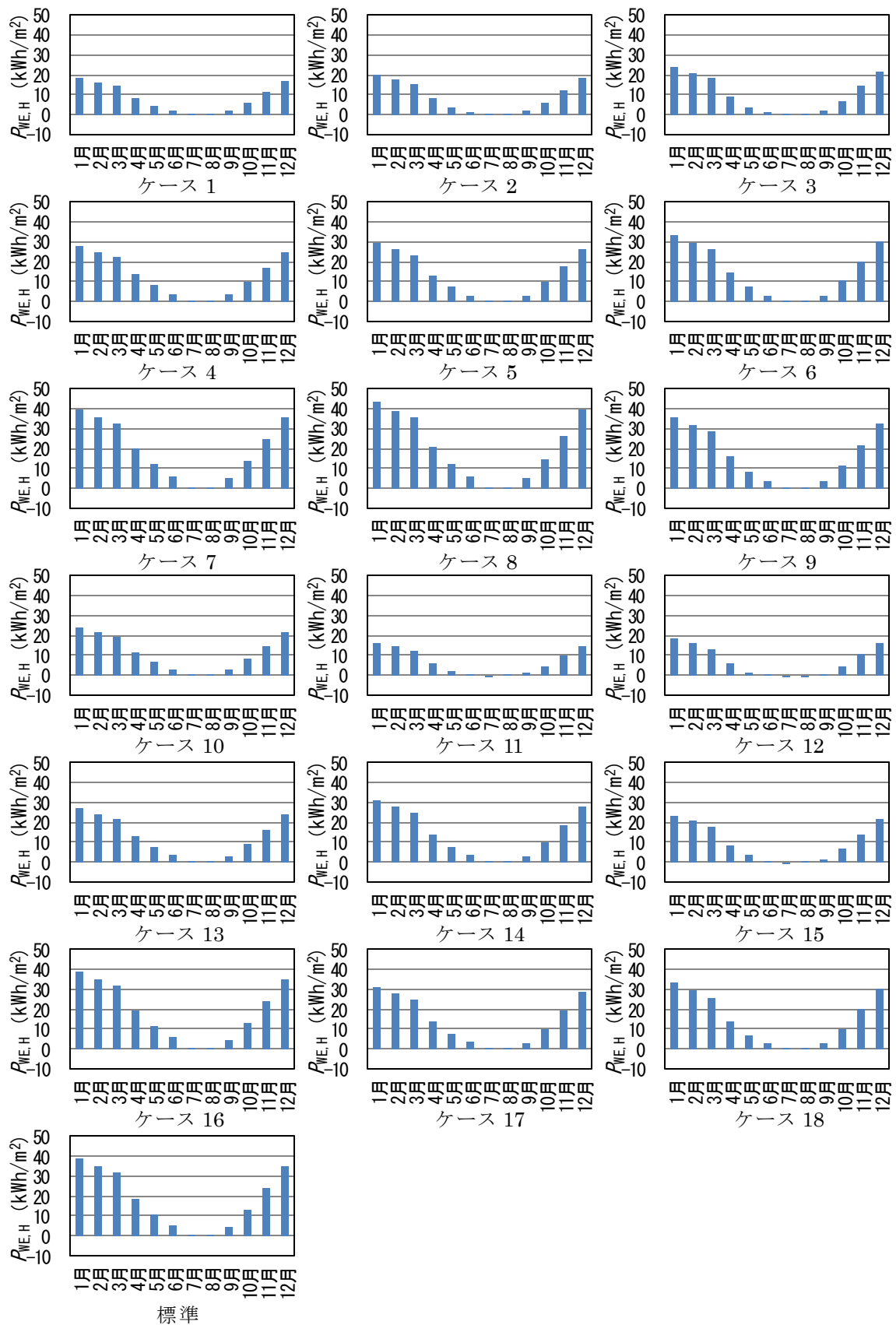


図 5-25 2 地域（主方位南：北面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

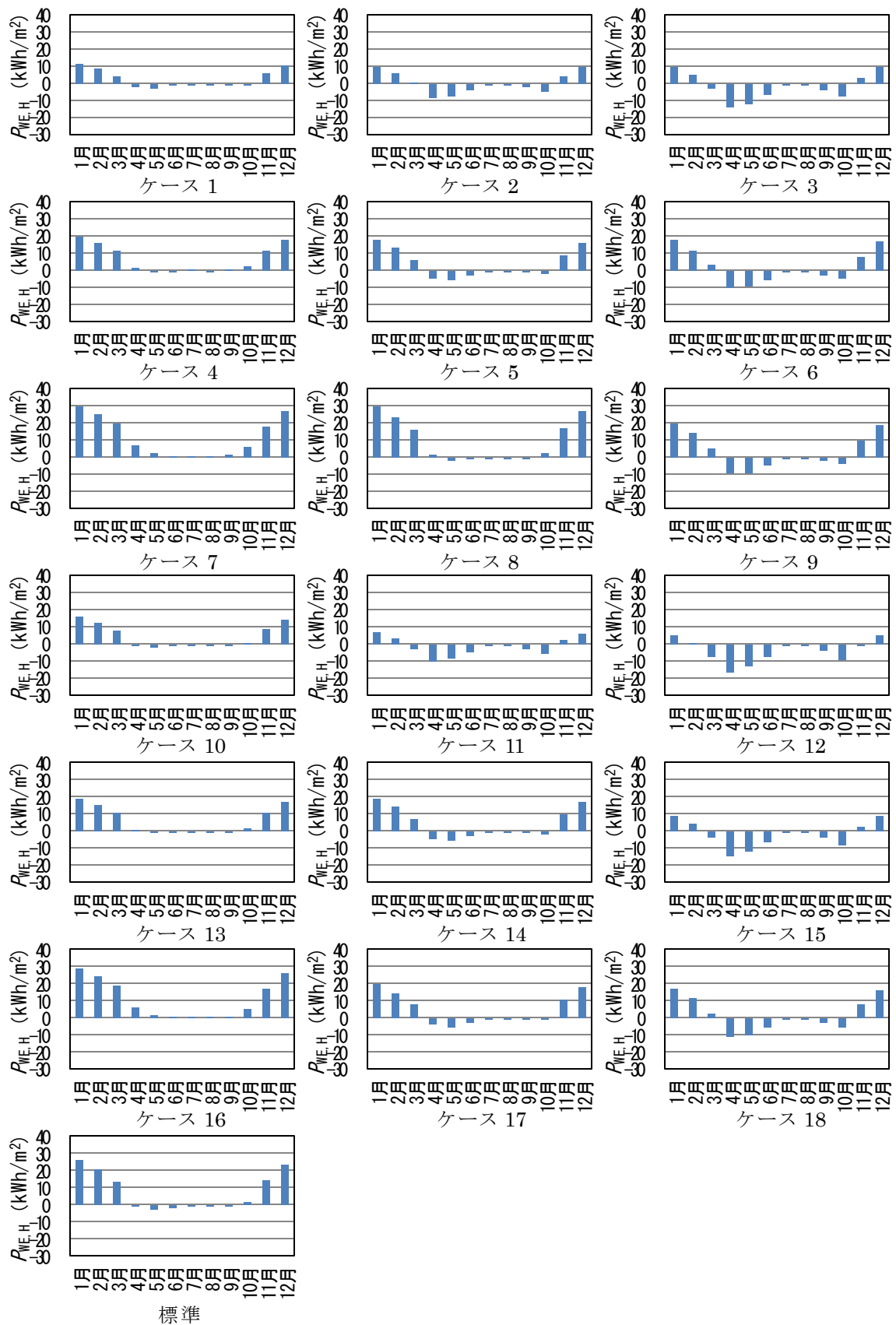


図 5-26 3 地域（主方位東：東面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果 [kWh/m^2]

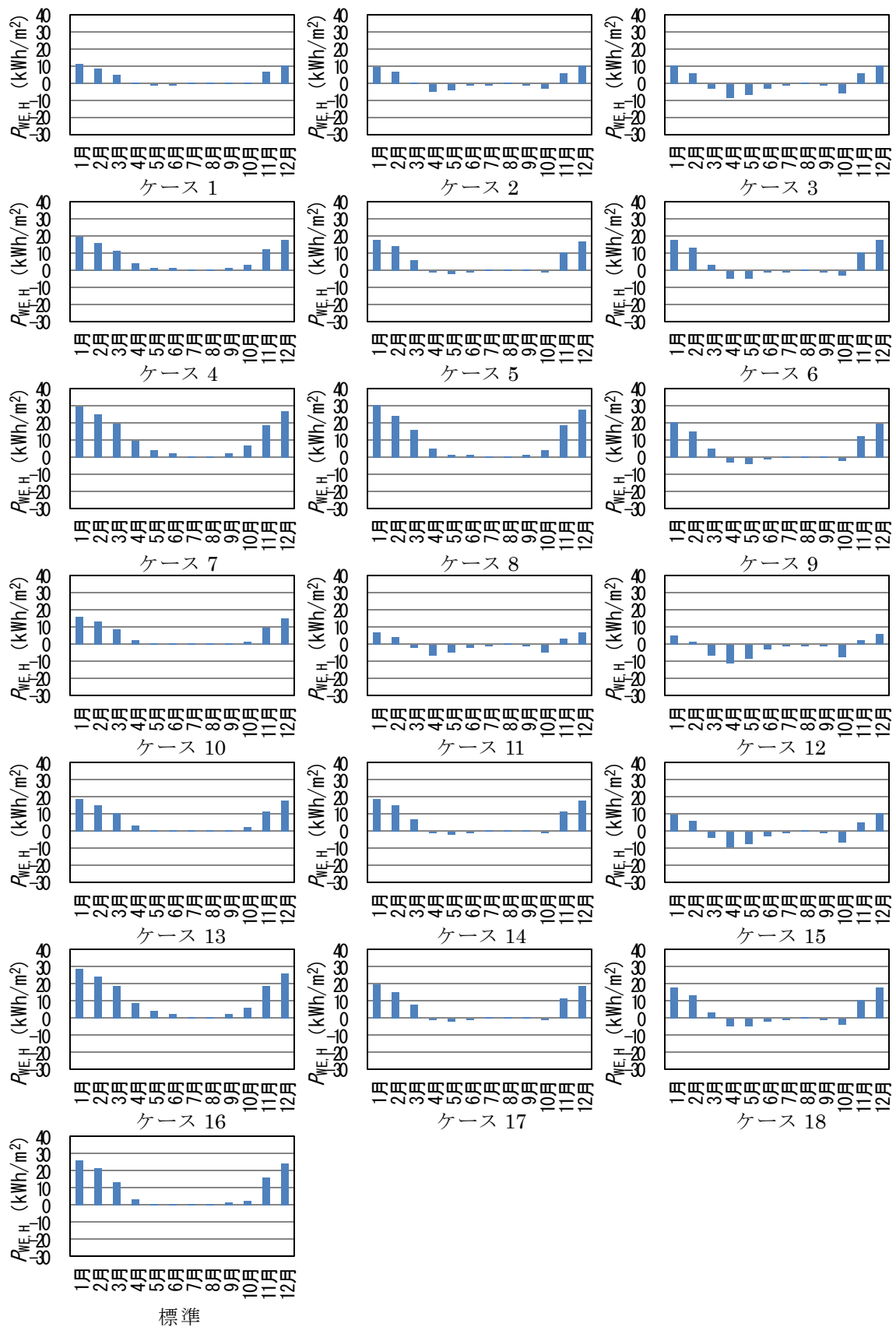


図 5-27 3 地域（主方位東：西面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果 [kWh/m^2]

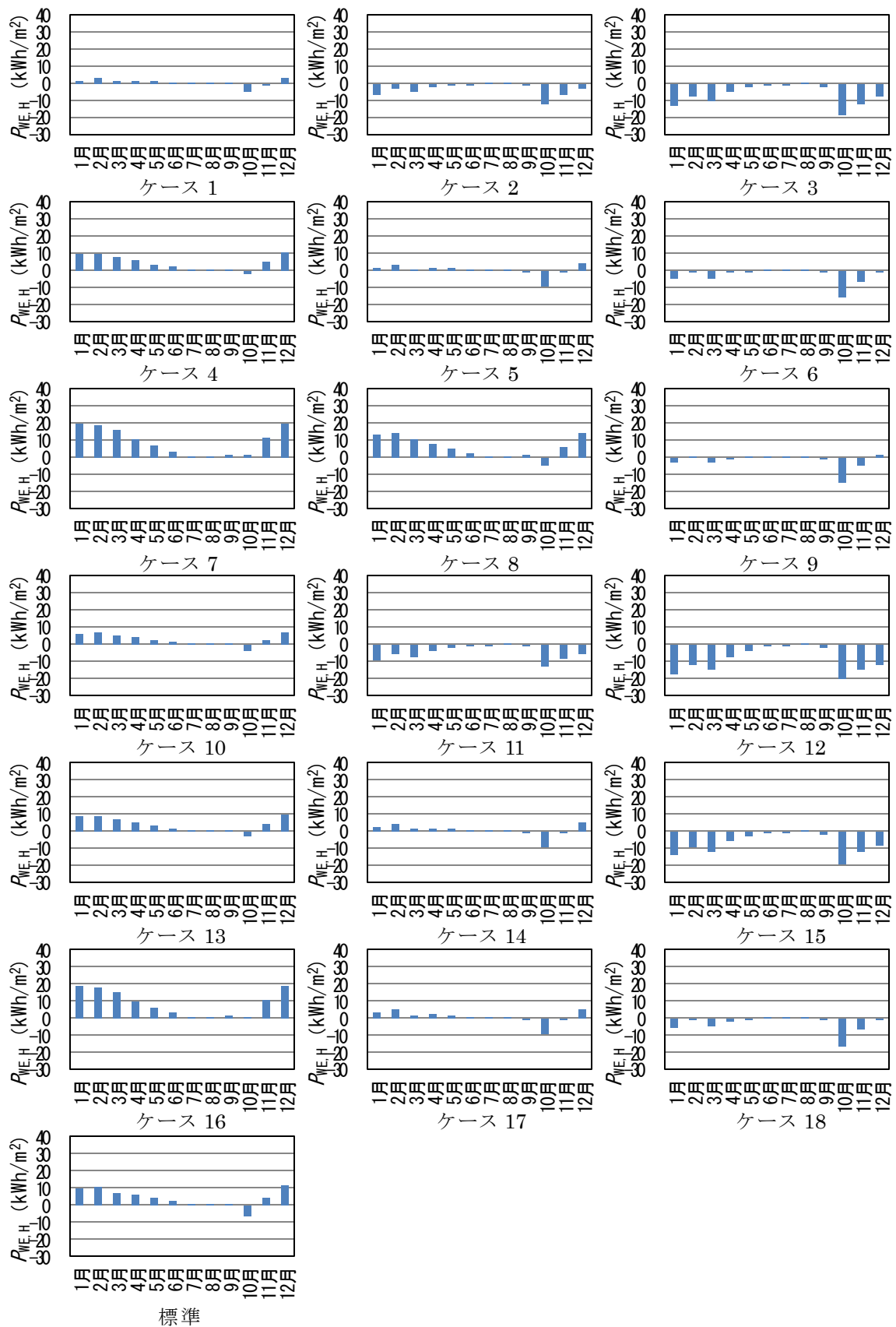


図 5-28 3 地域（主方位東：南面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

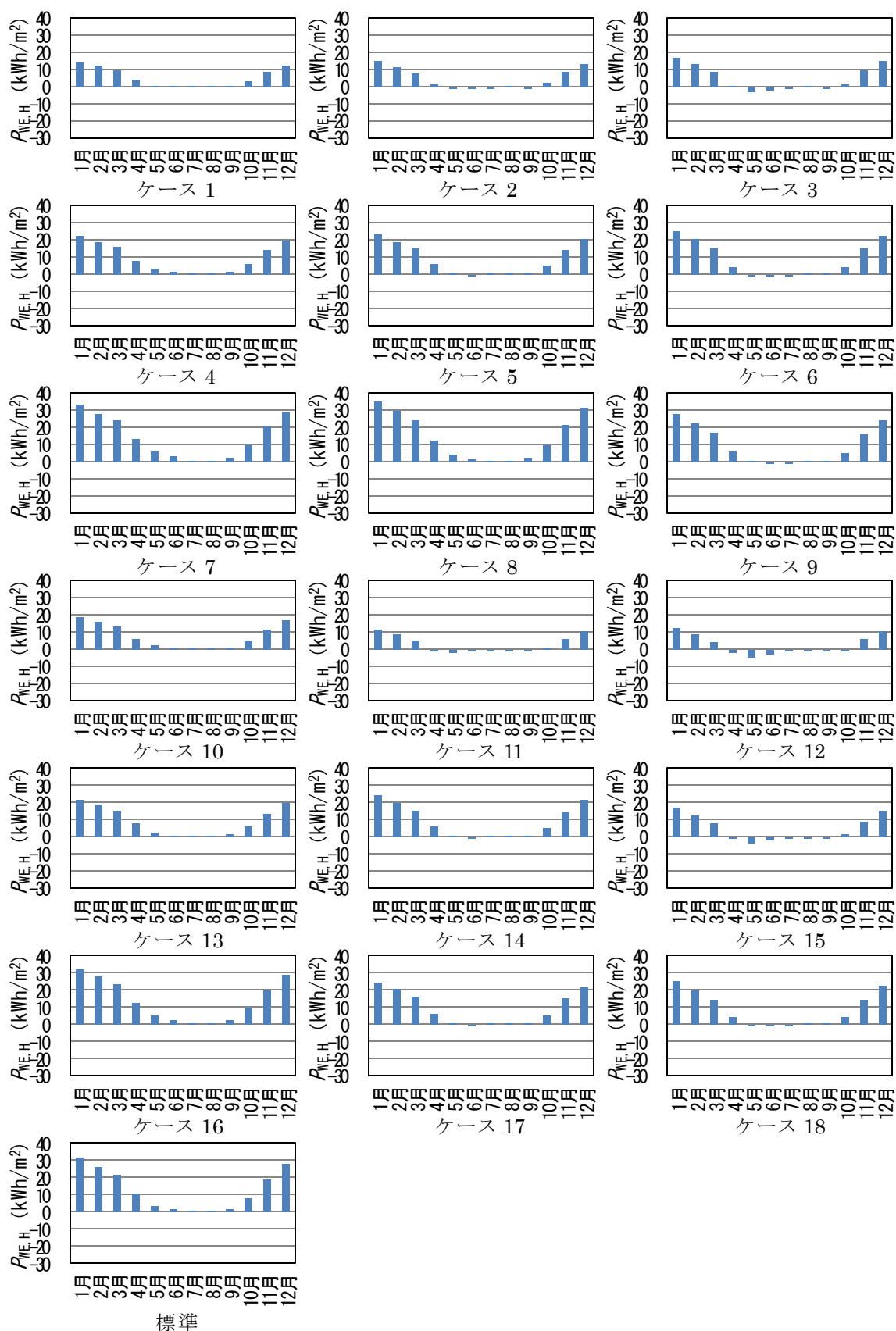


図 5-29 3 地域（主方位東：北面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

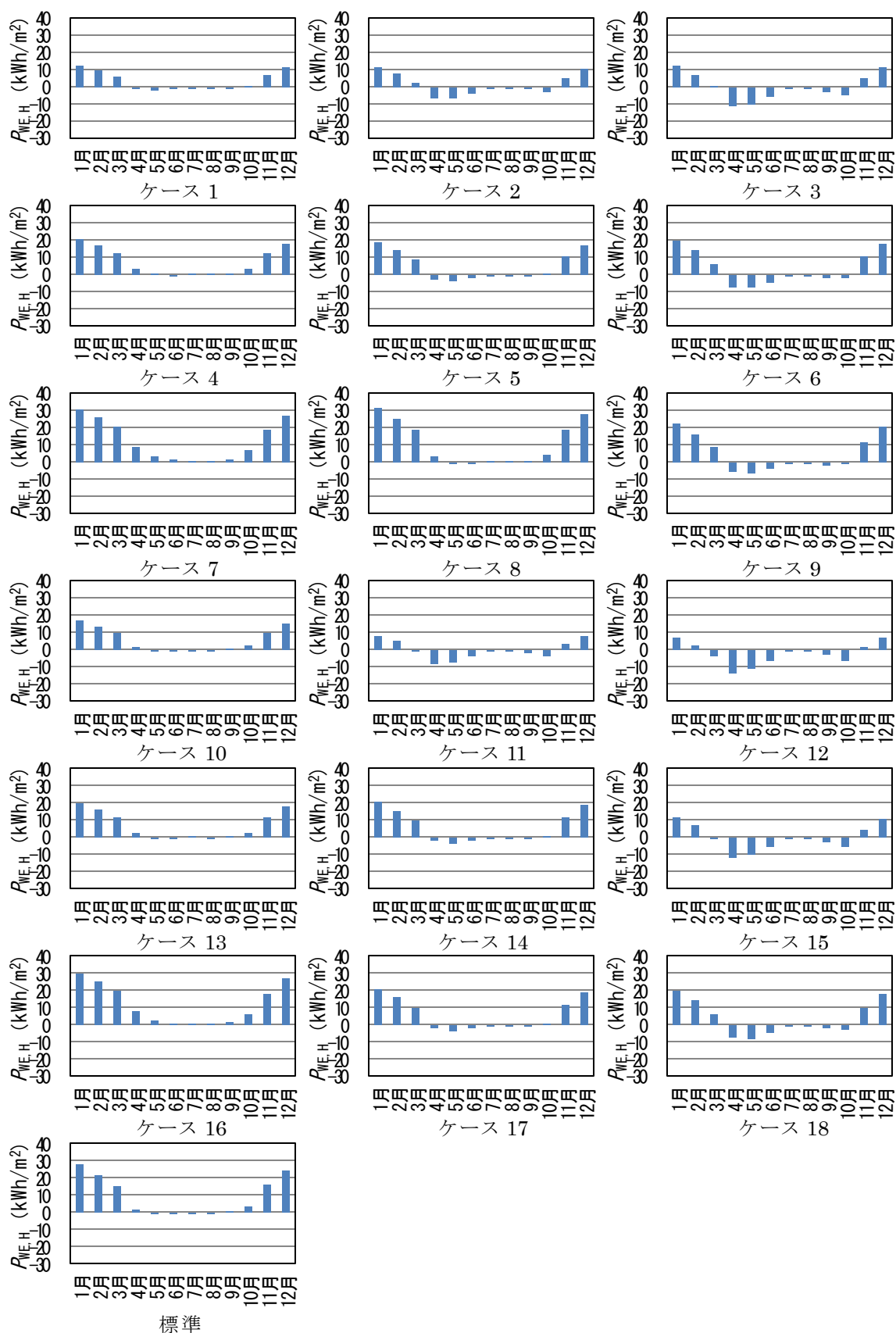


図 5-30 3 地域（主方位西：東面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

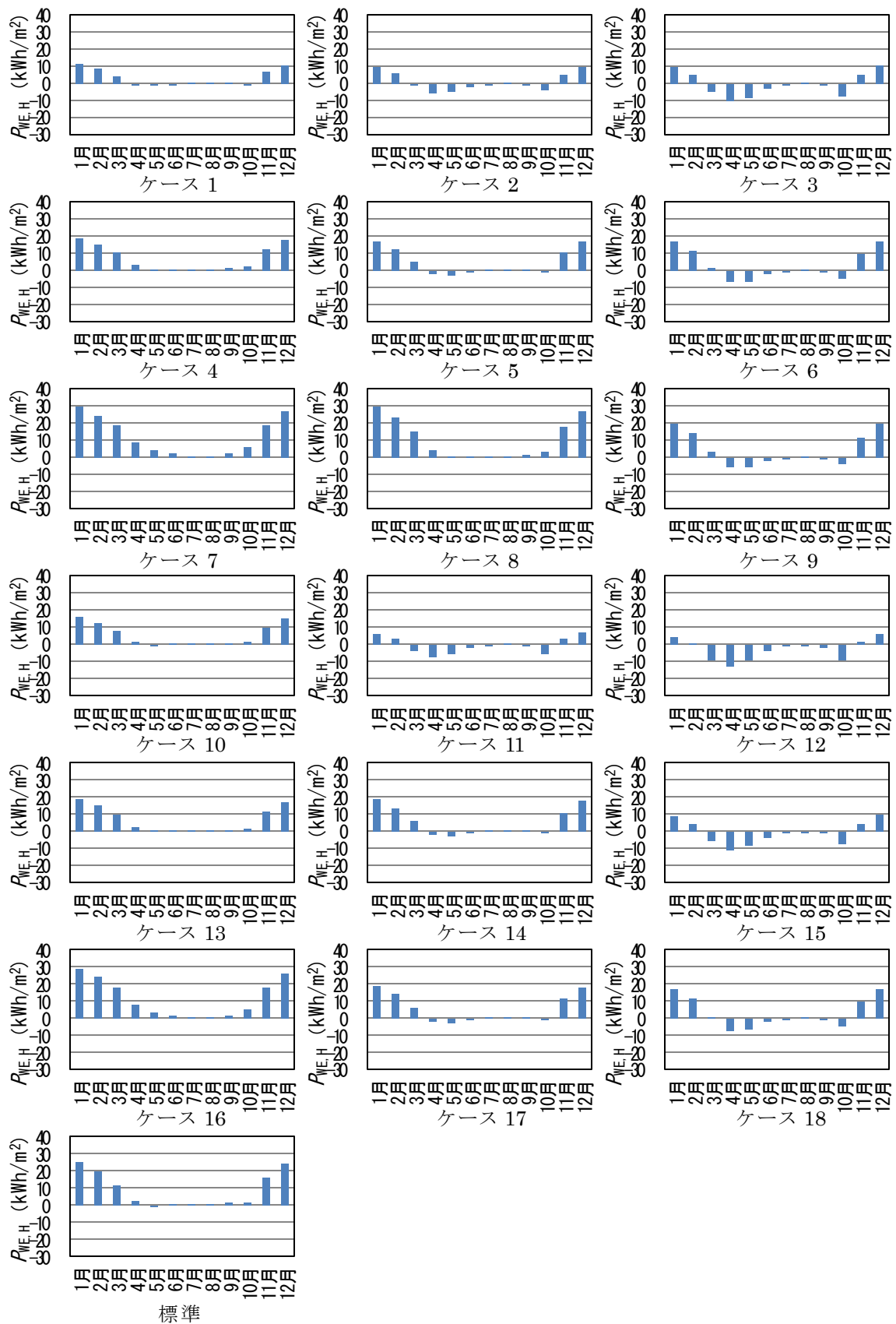


図 5-31 3 地域（主方位西：西面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

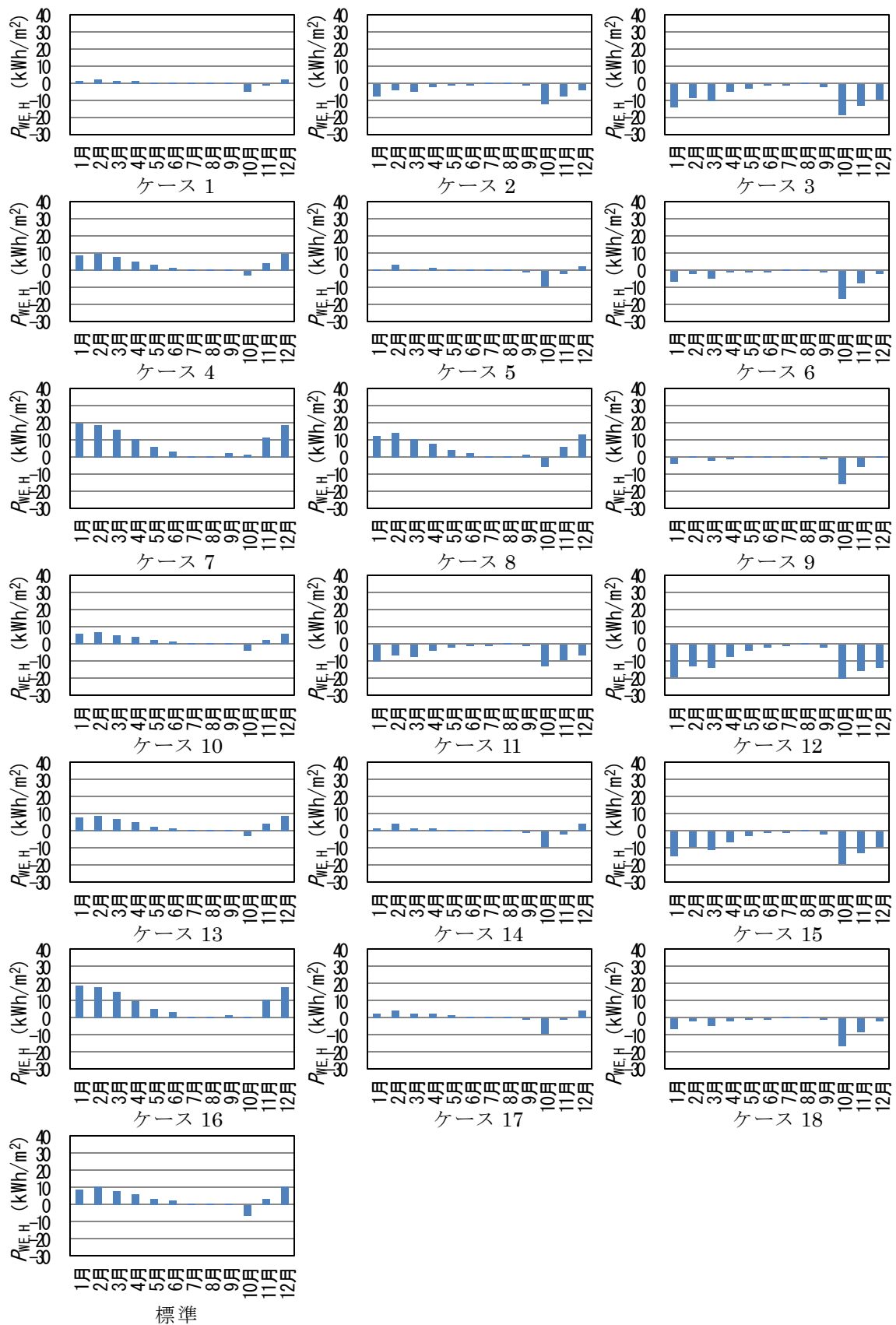


図 5-32 3 地域（主方位西：南面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果 [kWh/m^2]

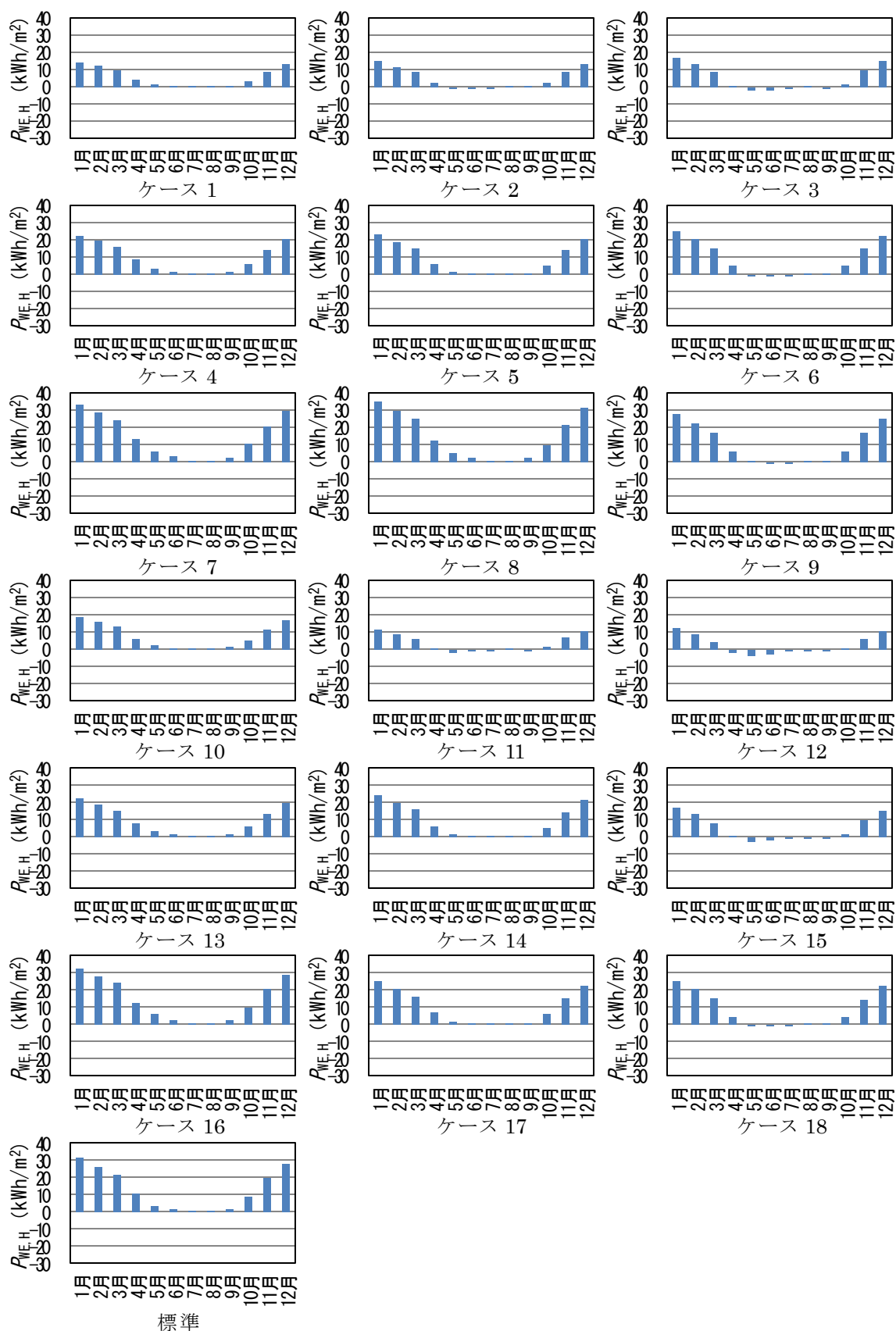


図 5-33 3 地域（主方位西：北面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果 $[\text{kWh/m}^2]$

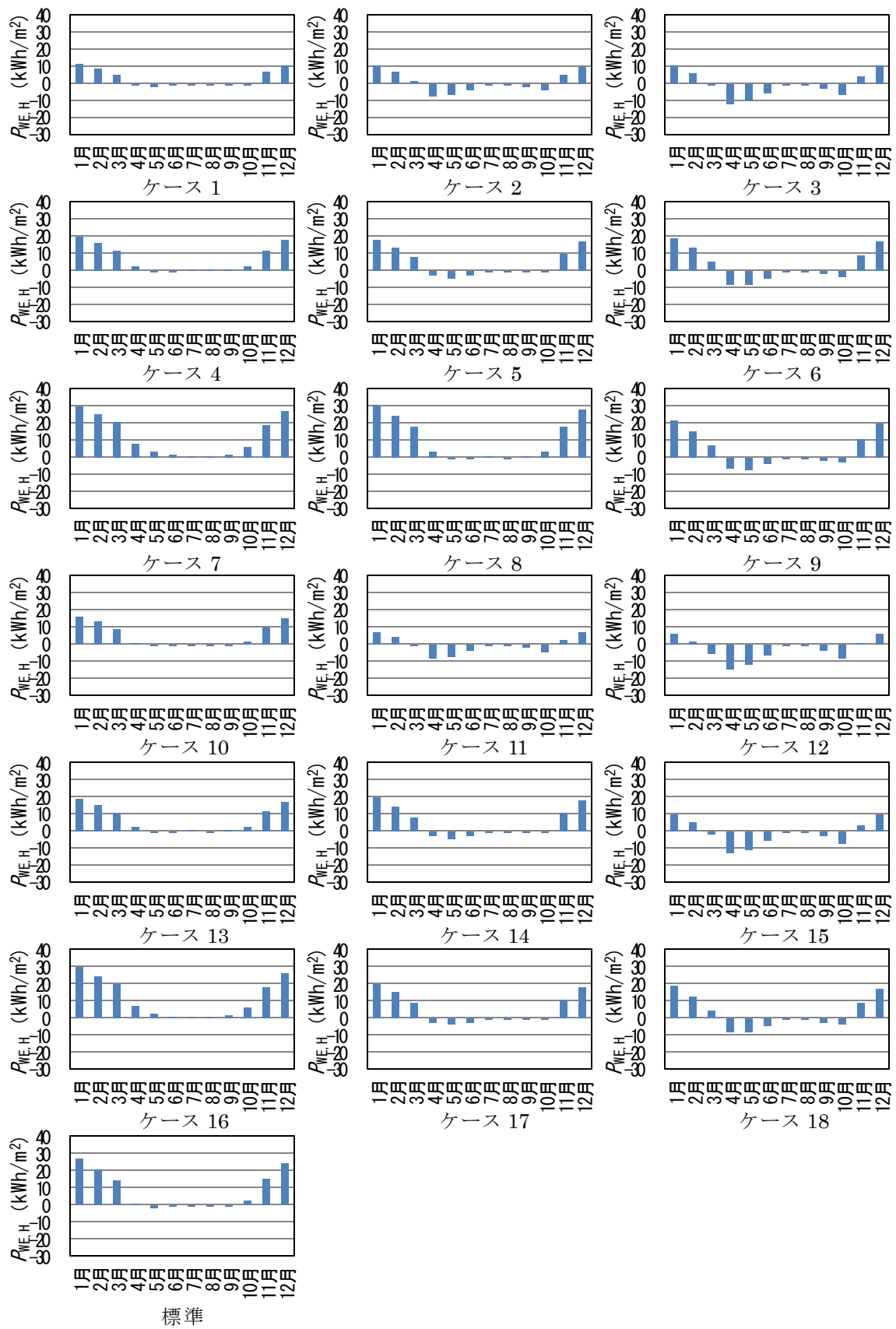


図 5-34 3 地域（主方位南：東面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果 $[\text{kWh/m}^2]$

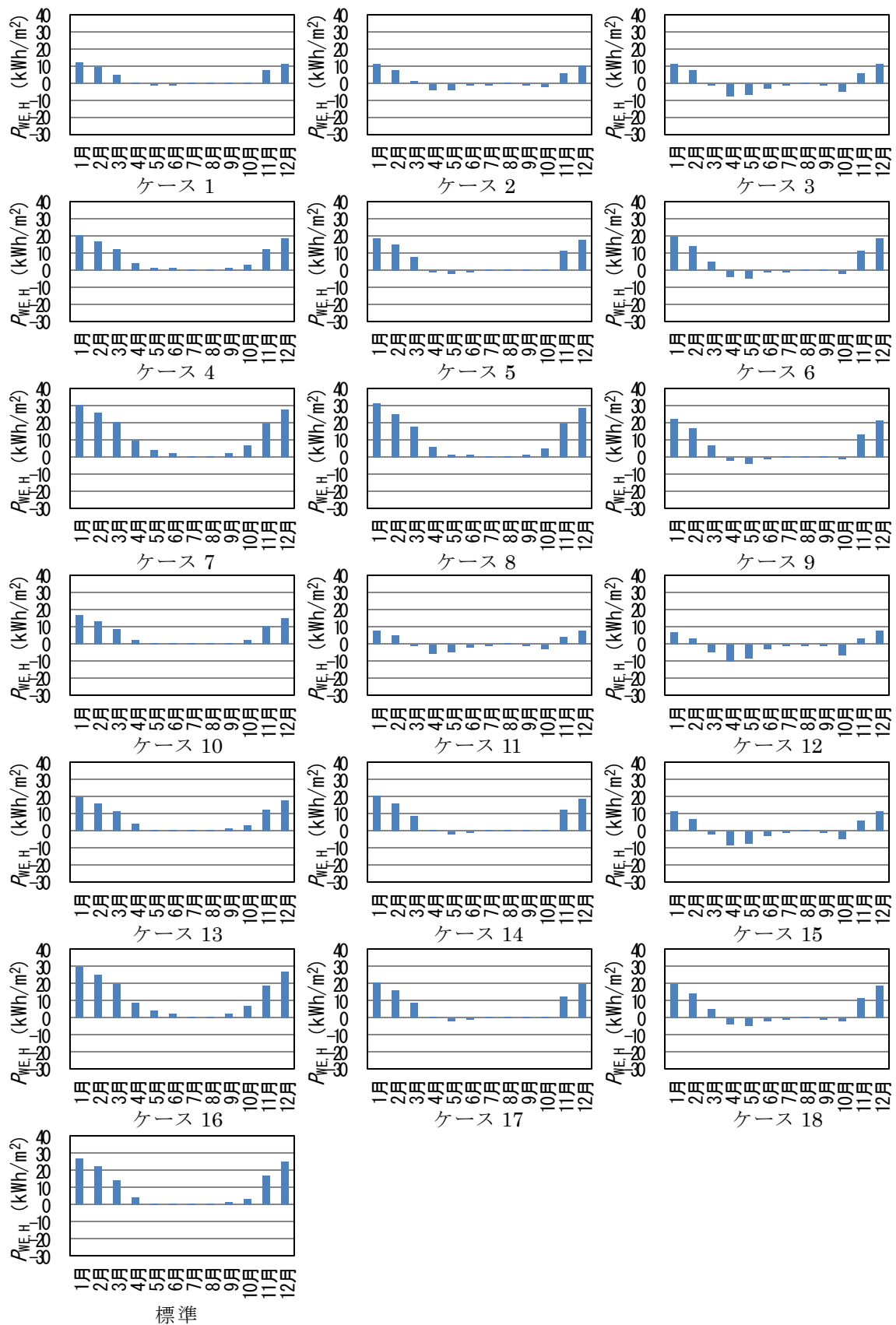


図 5-35 3 地域（主方位南：西面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

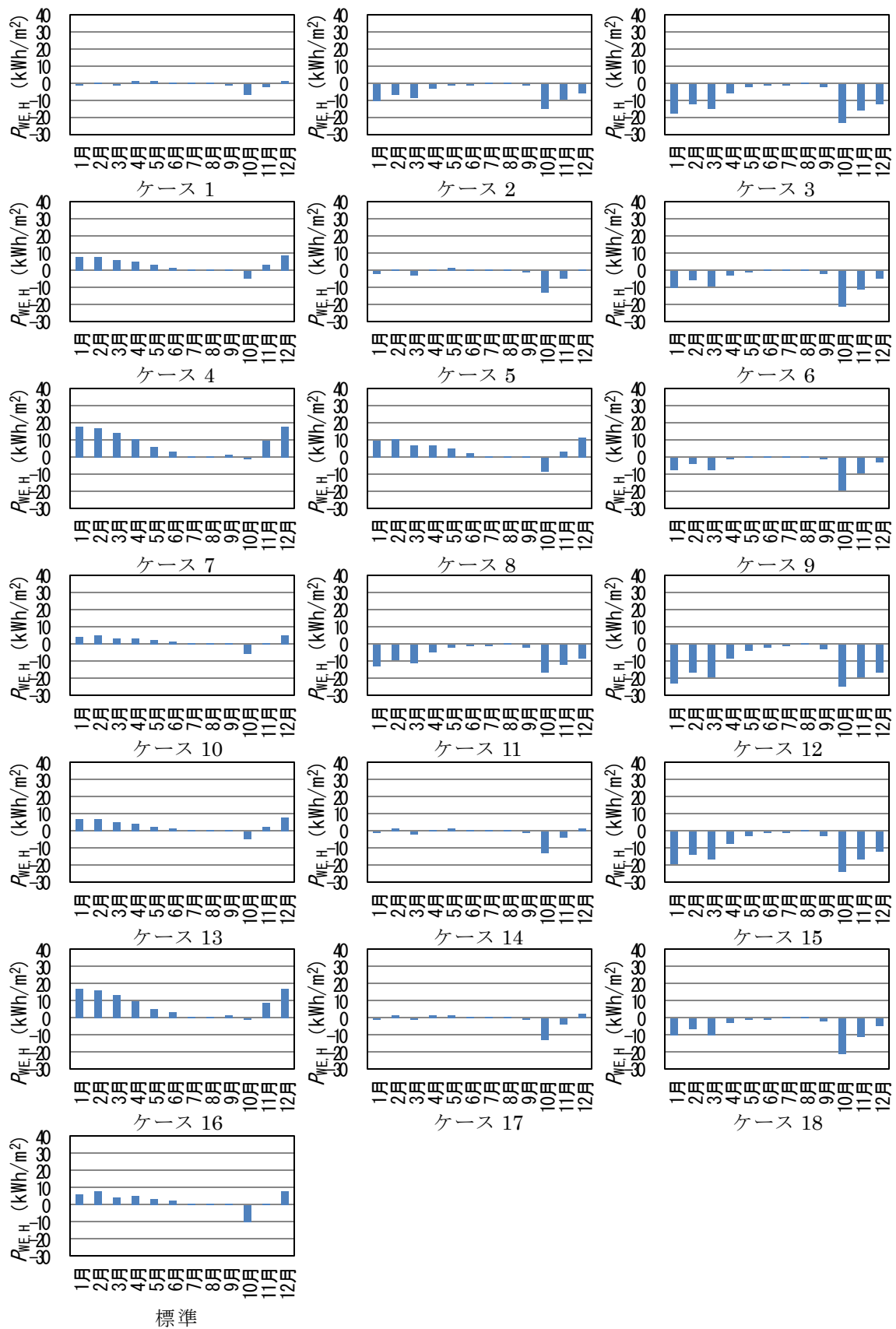


図 5-36 3 地域（主方位南：南面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

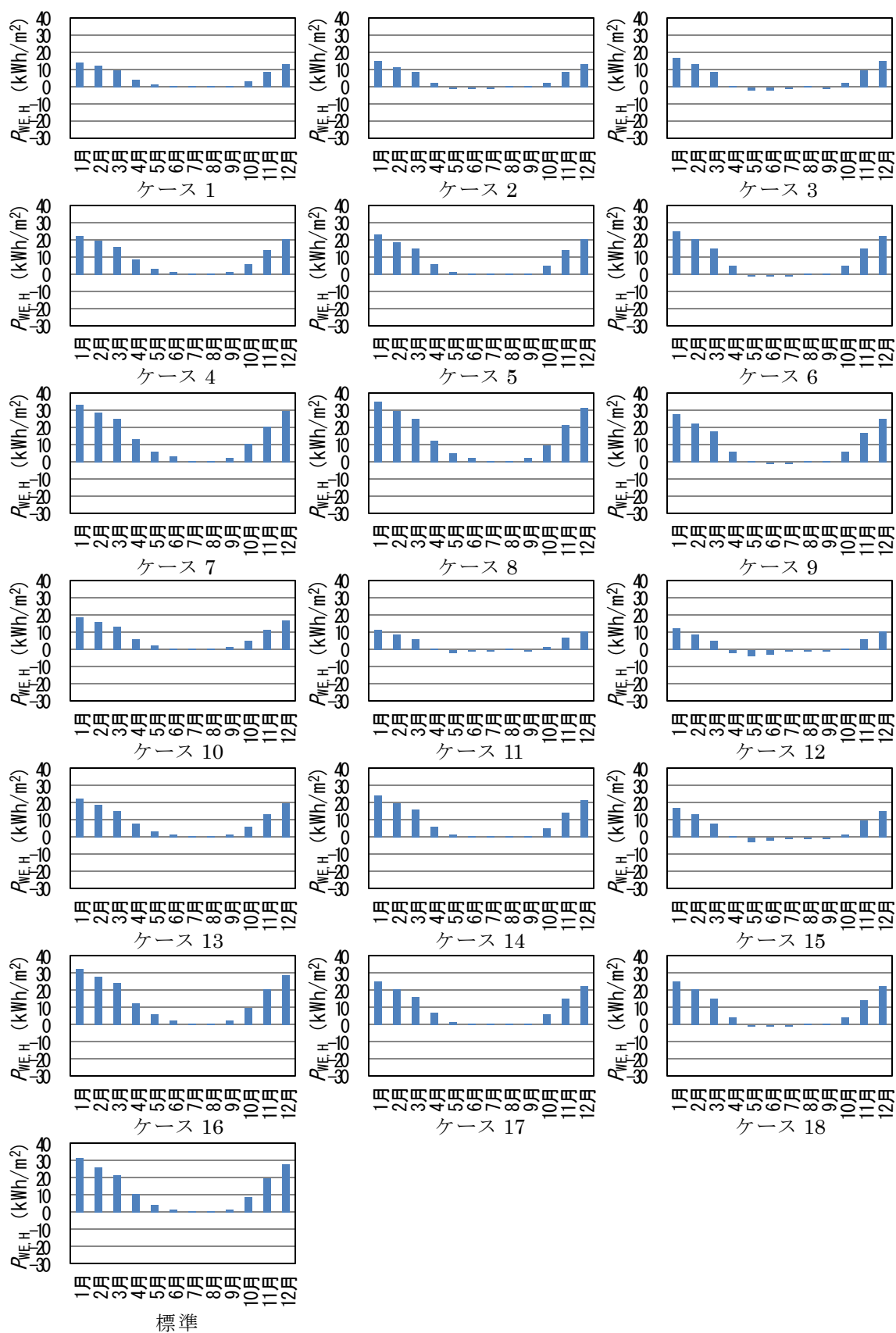


図 5-37 3地域（主方位南：北面）の各ケース月別 $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

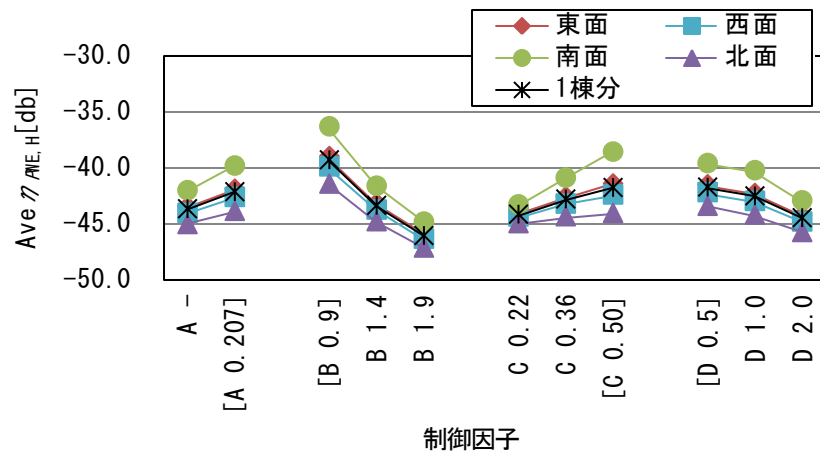
5.3.2 各制御因子の $P_{WE,H}$ に対する影響

1、2 地域の制御因子毎の水準と $Aver_{P_{WE,H}}$ を図 5-38、図 5-39 に、SN 比影響度を図 5-40、図 5-41 に示す。なお、3 地域は $P_{WE,H}$ がマイナスとなっているケースが複数存在するが、それらを SN 比に換算した際、マイナスの値が大きい程 SN 比が小さくなってしまい、SN 比を用いて各制御因子の影響を評価することの妥当性に疑問が生じるため、3 地域については $P_{WE,H}$ の平均値を用いて、 $P_{WE,H}$ 平均値が最小となる制御因子の水準の組合せや、 $P_{WE,H}$ 平均値の最大と最小の差から、各制御因子の水準を変更した際の $P_{WE,H}$ への影響度合いを把握した。制御因子毎の水準と $P_{WE,H}$ 平均値を図 5-42 に、 $P_{WE,H}$ 平均値の最大と最小の差を図 5-43 に示す。

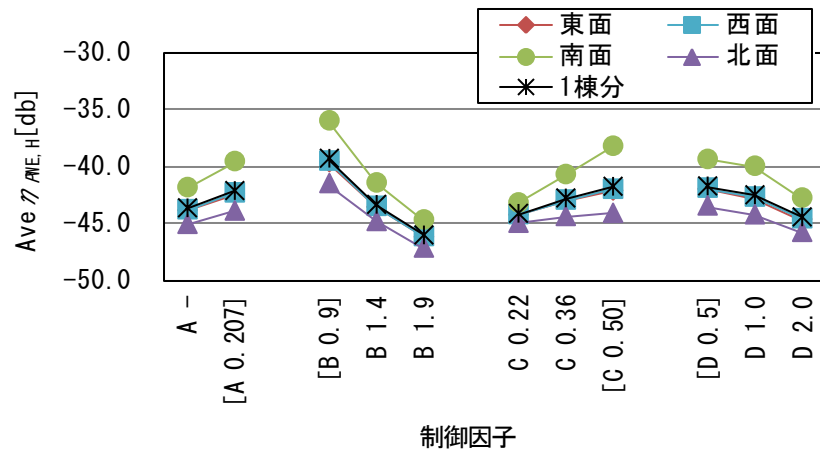
図 5-38、図 5-39 ならびに図 5-42 中で囲った制御因子の水準の組合せが最も $P_{WE,H}$ を小さくする。図から、全ての地域・主方位・面・1 棟分に共通して、窓付属部材の付加熱抵抗が大きいほど、窓の断熱性能が高い（熱貫流率が小さい）ほど、窓の日射熱取得率が高いほど、窓の気密性能が高い（通気量が少ない）ほど、 $P_{WE,H}$ の低減につながる事がわかる。

次に、図 5-40、図 5-41 ならびに図 5-43 から、SN 比影響度ならびに $P_{WE,H}$ 平均値の最大と最小の差が大きかった $P_{WE,H}$ 低減に寄与する上位 2 因子に着目すると、1、2 地域は、全ての主方位・面・1 棟分に共通して制御因子 B（窓の断熱性能）が第 1 因子となった。また、各主方位の南面および主方位南の 1 棟分は制御因子 C（窓の日射熱取得率）が、それら以外は概ね制御因子 D（窓の気密性能）が第 2 因子となった。3 地域は全ての主方位に共通して南面および 1 棟分は制御因子 C が第 1 因子、制御因子 B が第 2 因子、北面は制御因子 B が第 1 因子、制御因子 C が第 2 因子、それら以外は制御因子 B、C のいずれかが第 1、第 2 因子となった。このことから、樹脂製窓の熱的性能を選択する際、1、2 地域では主方位や面によらず、まず断熱性能、次に気密性能を、3 地域では主方位によらず、南面はまず日射熱取得率、次に断熱性能を、それ以外の面はまず断熱性能、次に日射熱取得率を重視して選択するのがよい。

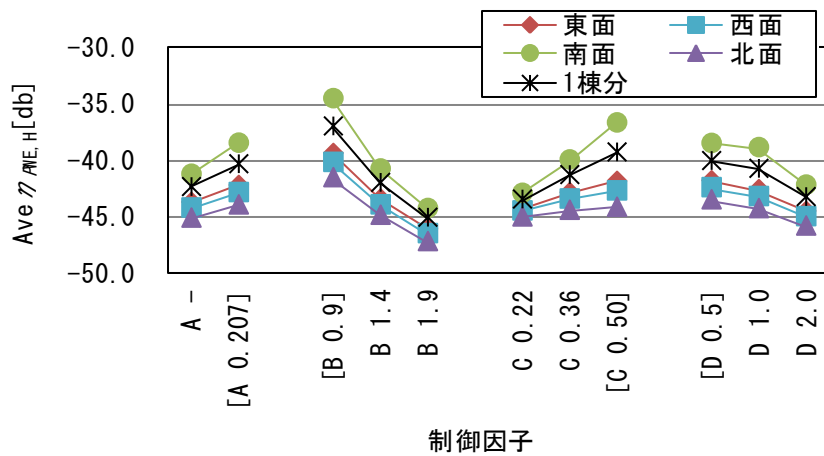
一方、 $P_{WE,H}$ 低減の寄与が最も小さい制御因子を見ると、1、2 地域は全ての主方位に共通して北面は制御因子 C が、それ以外は制御因子 A が最も小さかった。3 地域は全ての地域・主方位・面・1 棟分に共通して、制御因子 A が最も小さかった。このような結果となった理由として、1、2 地域の各主方位の北面は年間の平均窓面受照日射量が他の面と比べ極端に少なく、日射による熱取得がほとんど得られないこと、窓付属部材は昼夜で開閉操作（昼間：全開、夜間：全閉）する、としたため、窓付属部材を考慮した窓の熱貫流率は窓付属部材の使用割合の影響を受け、特に内外温度差の大きい冬季間（11 月～3 月）は窓付属部材の使用割合が 0.5 程度となっており、冬季間は窓付属部材の断熱効果が、暖房が必要な月の合計時間の半分程度しか見込めないこと、等が要因として考えられる。



(a)主方位東

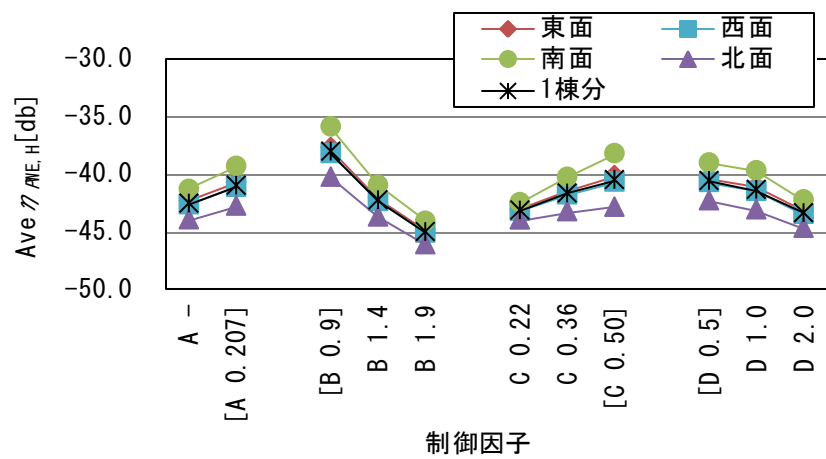


(b)主方位西

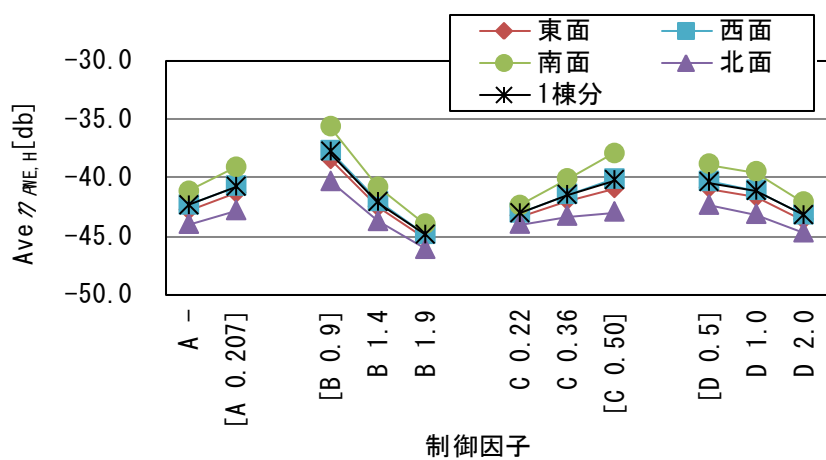


(c)主方位南

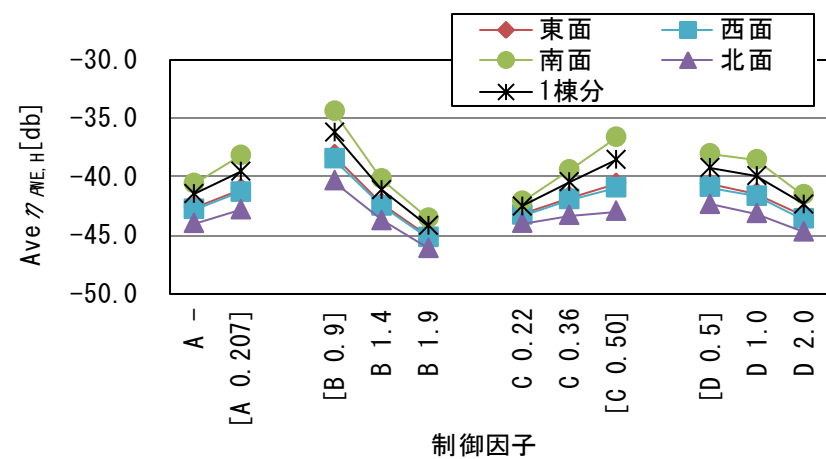
図 5-38 $Ave \eta_{PE,H}$ (1 地域)



(a)主方位東

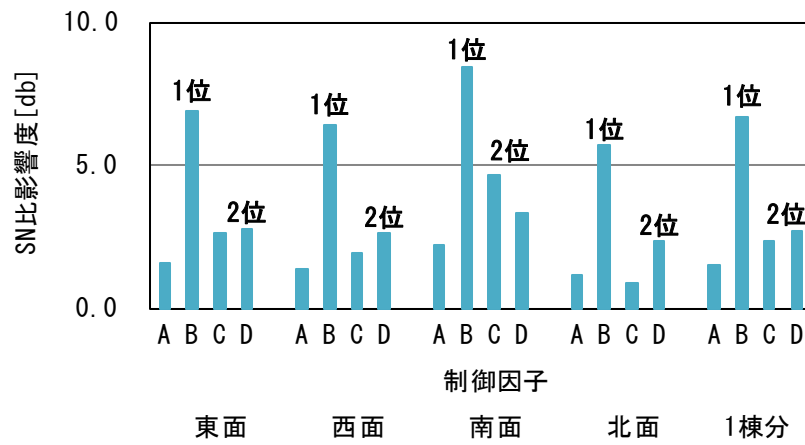


(b)主方位西

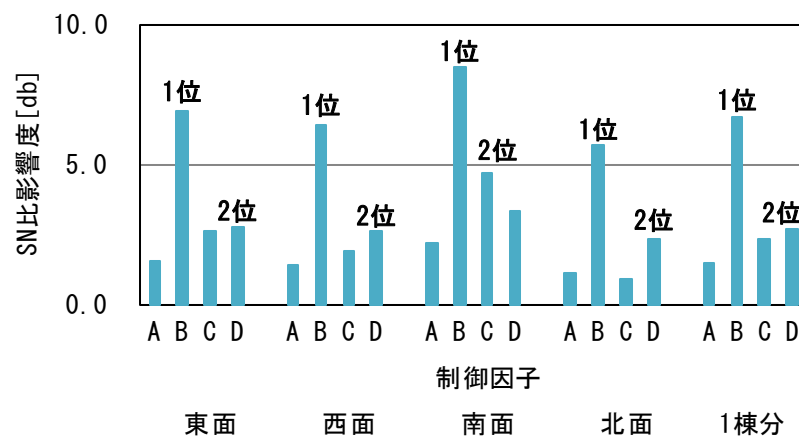


(c)主方位南

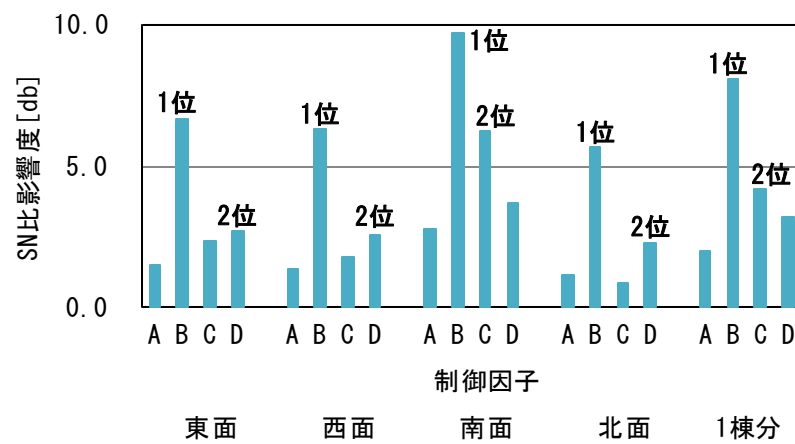
図 5-39 $Ave \eta_{P_{WE,H}}$ (2 地域)



(a)主方位東

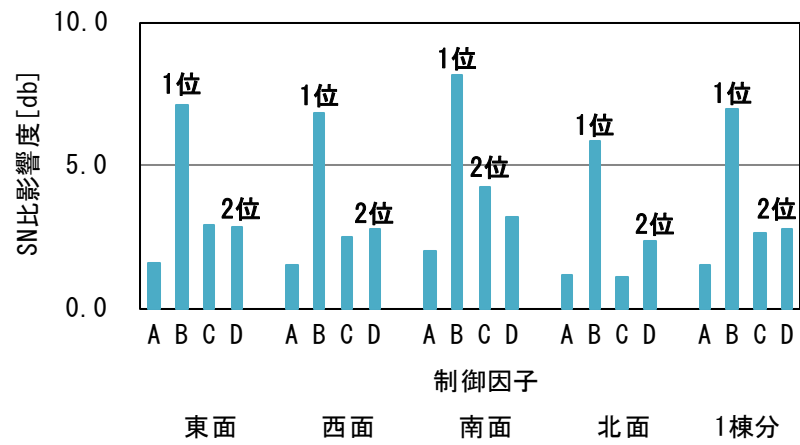


(b)主方位西

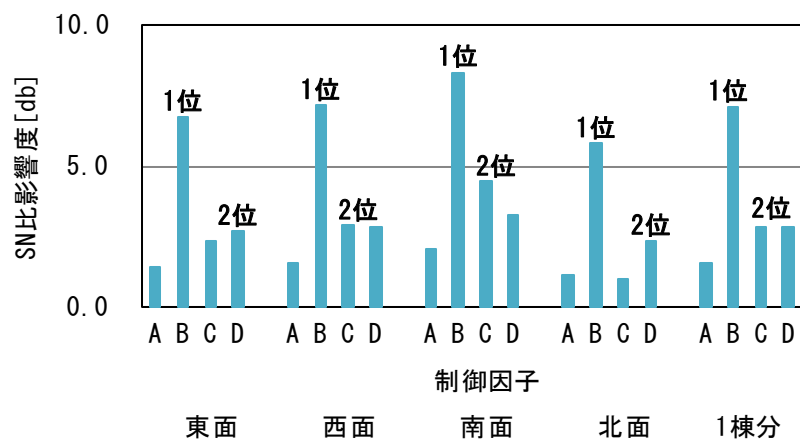


(c)主方位南

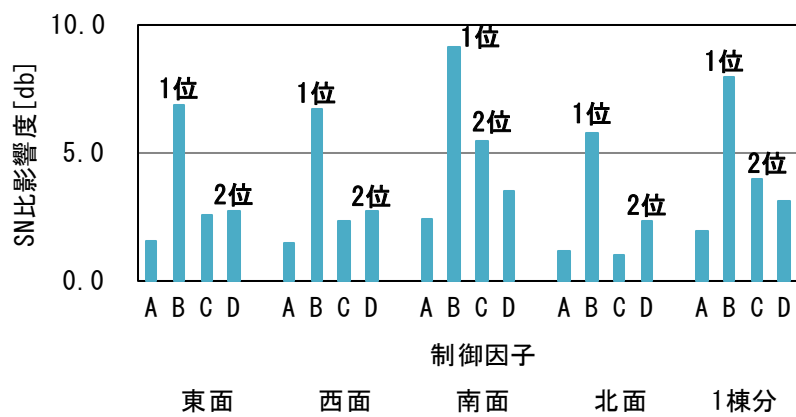
図 5-40 SN比影響度 (1地域)



(a)主方位東

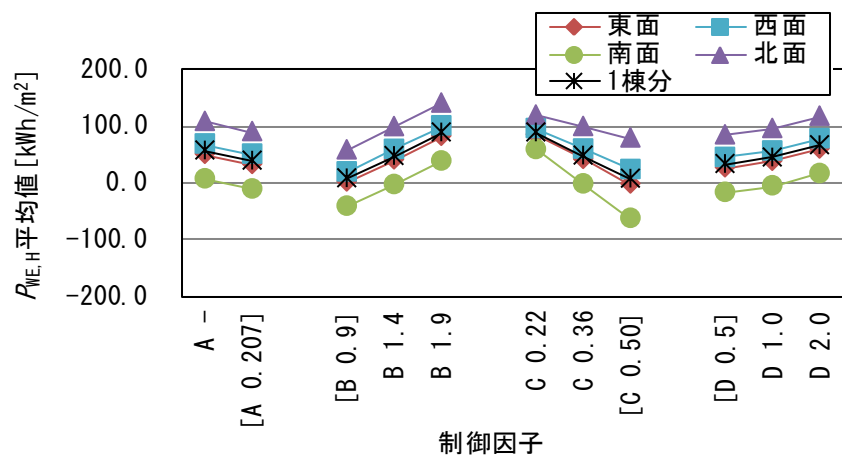


(b)主方位西

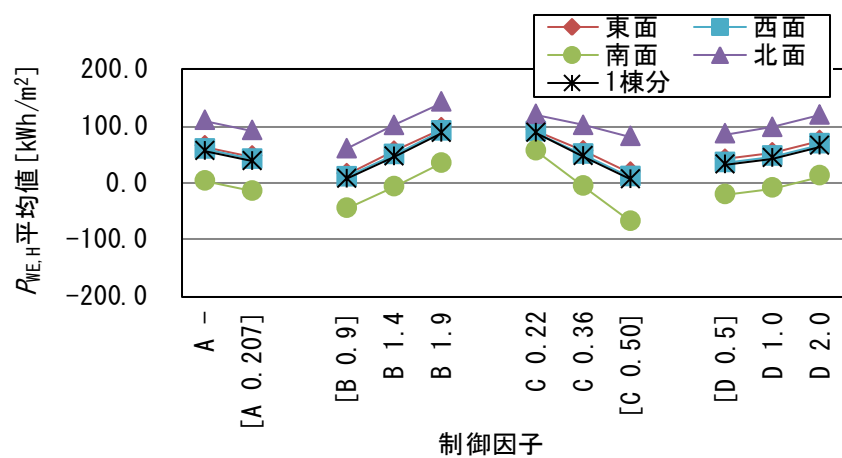


(c)主方位南

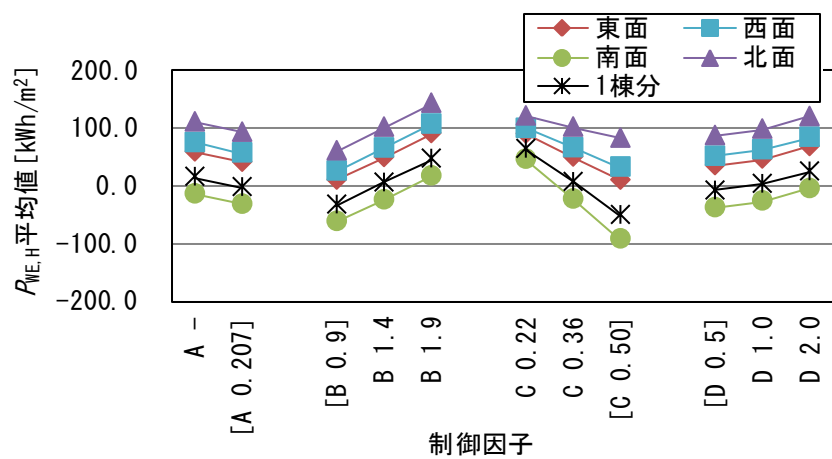
図 5-41 SN 比影響度 (2 地域)



(a)主方位東

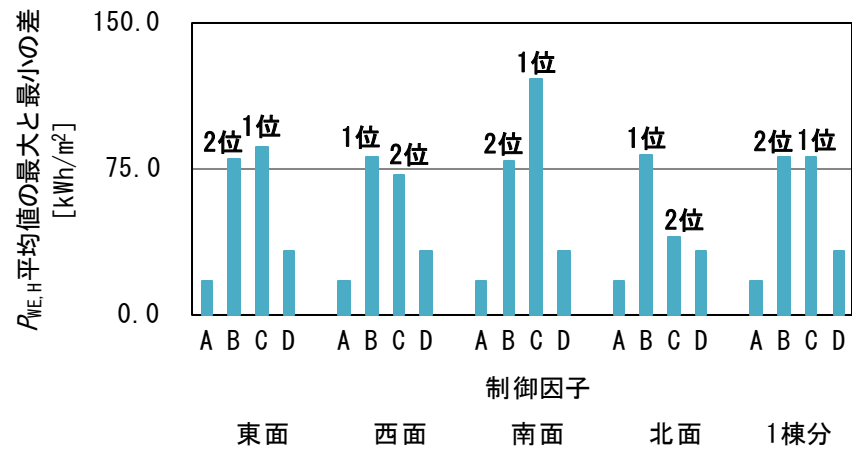


(b)主方位西

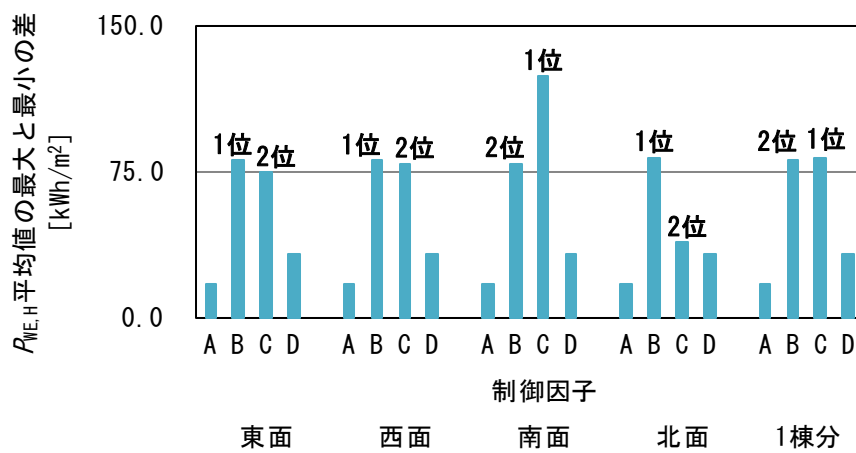


(c)主方位南

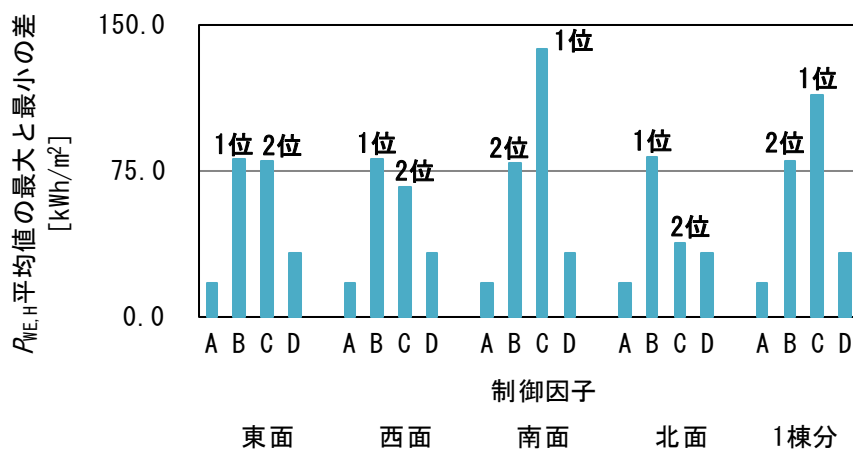
図 5-42 $P_{WE,H}$ 平均值 (3 地域)



(a)主方位東



(b)主方位西



(c)主方位南

図 5-43 $P_{WE,H}$ 平均値の最大と最小の差 (3 地域)

5.3.3 最適組合せにおける $P_{WE,H}$ 低減効果

各地域における、各制御因子の最適組合せでの $P_{WE,H}$ 計算結果と基準ケースに対する $P_{WE,H}$ の低減率を表 5-12～表 5-14 に示す。今回の検討条件の範囲内においては、最適な制御因子の水準の組合せ（各地域ともに、制御因子 A：窓付属部材の付加熱抵抗＝第 2 水準：0.207 (m²・K)/W、制御因子 B：窓の断熱性能＝第 1 水準：0.9 W/(m²・K)、制御因子 C：窓の日射熱取得率＝第 3 水準：0.50、制御因子 D：窓の気密性能＝第 1 水準：0.5 m³/(h・m²)) とすることで、1 地域は標準ケースから最大 98%低減（主方位南の南面）、2 地域は標準ケースから最大 95%低減（主方位南の南面）、3 地域は標準ケースから最大 100%低減かつ 148.4 kWh/m²の熱取得（主方位南の南面）が得られることを示した。

表 5-12 1 地域における最適組合せの $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

方位			東	西	南	北	1棟分
主方位	東	最適	47.0	60.0	17.9	85.7	51.5
		基準	215.6	225.2	194.0	244.2	218.9
		低減率[%]	78	73	91	65	76
	西	最適	56.4	54.4	14.9	87.0	51.5
		基準	222.6	221.1	191.8	245.2	218.9
		低減率[%]	75	75	92	65	76
	南	最適	52.4	64.0	4.2	87.3	23.9
		基準	219.6	228.2	183.9	245.4	198.5
		低減率[%]	76	72	98	64	88

表 5-13 2 地域における最適組合せの $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

方位			東	西	南	北	1棟分
主方位	東	最適	37.9	43.9	20.5	72.8	42.0
		基準	190.7	195.2	176.5	216.4	193.7
		低減率[%]	80	78	88	66	78
	西	最適	47.0	38.0	18.4	74.1	38.9
		基準	197.4	190.9	174.9	217.5	191.3
		低減率[%]	76	80	89	66	80
	南	最適	43.0	47.2	9.1	74.4	23.4
		基準	194.5	197.7	168.1	217.7	179.1
		低減率[%]	78	76	95	66	87

表 5-14 3地域における最適組合せの $P_{WE,H}$ 計算結果[kWh/m²]

方位			東	西	南	北	1棟分
主方位	東	最適	-59.5	-34.6	-119.1	19.8	-50.4
		基準	92.6	111.0	49.1	151.2	99.4
		低減率[%]	100	100	100	87	100
	西	最適	-39.1	-46.7	-124.1	22.6	-51.5
		基準	107.7	102.1	45.4	153.3	98.7
		低減率[%]	100	100	100	85	100
	南	最適	-48.2	-26.0	-148.4	23.1	-107.6
		基準	100.9	117.4	27.6	153.6	57.5
		低減率[%]	100	100	100	85	100

5.4 第5章のまとめ

第5章では、地域の気候特性や方位に応じて最適な熱収支を実現できる窓の評価手法に関する検討として、寒冷地住宅における樹脂製窓の暖房負荷に焦点をあて、「窓付属部材の付加熱抵抗」、「窓の断熱性能（熱貫流率）」、「窓の日射熱取得率」、「窓の気密性能（通気量）」といった因子が、窓の暖房負荷に与える影響とそれら最適条件（暖房負荷低減に最も寄与する因子と水準）を、タグチメソッドを用いて明らかにするとともに、最適条件の組合せからなる窓の暖房負荷を示し、さらに標準的な組合せからなる窓の暖房負荷との比較を行った。以下に、得られた結果と知見を簡潔にまとめる。

- ① 3 地域の各主方位の北面以外において、複数のケースで $P_{WE,H}$ がマイナスとなった。これは、年間の窓からの熱損失量を日射熱取得量が上回り、窓を設置することで窓が無かった場合よりも暖房負荷削減につながることを意味し、それらケースは建物の暖房負荷を削減できる制御因子の組合せであることを表している。
- ② 全ての地域・主方位・面・1棟分に共通して、窓付属部材の付加熱抵抗が大きいほど、窓の断熱性能が高い（熱貫流率が小さい）ほど、窓の日射熱取得率が高いほど、窓の気密性能が高い（通気量が少ない）ほど、 $P_{WE,H}$ の低減につながることが示された。
- ③ 樹脂製窓の熱的性能を選択する際、1、2 地域では主方位や面によらず、まず断熱性能、次に気密性能を、3 地域では主方位によらず南面はまず日射熱取得率、次に断熱性能を、それ以外の面はまず断熱性能、次に日射熱取得率を重視して選択するのがよい。
- ④ 今回の検討条件の範囲内においては、最適な制御因子の水準の組合せとすることで、1～2 地域は標準ケースから最大 98%低減、3 地域は最大 100%低減かつ 148.4 kWh/m²の熱取得が得られることを示した。

第 5 章の記号表

5.2 計算条件と評価方法

5.2.1 計算条件

記号	意味	単位
$P_{WE,H}$	窓の暖房負荷	kWh/m ²
A_w	窓の（投影）面積	m ²
$Q_{H,nd,w,m}$	月 m の暖房モードでの窓による正味の熱損失	kWh
$Q_{H,ht,w,m}$	月 m の熱損失が正の時間帯の暖房モードでの窓の貫流及び通気による熱損失	kWh
$Q_{H,gn,w,m}$	月 m の熱損失が正の時間帯の暖房モードでの窓の日射による熱取得	kWh
$f_{H,m}$	月 m の暖房割合	—
$\eta_{H,gn,m}$	月 m の暖房熱取得ユーティリゼーションファクタ	—
$U_{H,w,m}$	月 m の暖房モードでの窓の熱貫流率	W/(m ² ・K)
$H_{H,ve,w}$	暖房モードでの窓の通気による熱移動係数	W/K
$\theta_{int,set,H}$	暖房設定温度	°C
$\theta_{e,avg,m}$	月 m の熱損失が正の時間帯の平均外気温度	°C
t_m	月 m の熱損失が正の時間帯の合計時間	h
$F_{sh,m}$	月 m のひさし効果係数	—
$g_{H,w,m}$	月 m の暖房モードでの窓の日射熱取得率	—
$I_{sol,m}$	月 m の熱損失が正の時間帯の時間平均窓面受照日射強度	W/m ²
ε_e	窓面の室外側表面の放射率	—
h_e	窓面の室外側表面熱伝達率	W/(m ² ・K)
E_m	月 m の熱損失が正の時間帯の時間平均窓面夜間放射量	W/m ²
Δp	建物内外の平均気圧差（=6）	Pa
Δp_{ref}	窓の通気量測定時の標準気圧差（=10）	Pa
$\rho \cdot c_p$	空気の熱容量（=1.24）	KJ/(m ³ ・K)
$q_{\Delta P,ref}$	（投影）窓面積 1 m ² 当りの通気量	m ³ /(h・m ²)
$U_{w,sh}$	窓付属部材がある窓の熱貫流率	W/(m ² ・K)
$U_{w,non-sh}$	窓付属部材がない窓の熱貫流率	W/(m ² ・K)
ΔR	窓付属部材の付加熱抵抗	(m ² ・K)/W

5.2.2 評価方法

記号	意味	単位
$\eta_{P_{WE,H}}$	SN 比	db
$Ave\eta_{P_{WE,H}}$	SN 比平均値	db

【第5章の参考文献】

- 1) JIS A2104 : 住宅用窓のエネルギー性能－計算手順, (一財)日本規格協会, 2018
- 2) Establishment of European Window Energy Rating System (EWERS) Final project report, European Window Energy Rating, 2000
- 3) BFRC Rating Calculation, British Fenestration Rating Council, 2004
- 4) CSA A440.2-04 -- Energy performance of windows and other fenestration systems
- 5) CSA A440.3-04 -- User guide to CSA A440.2-04, Energy performance of windows and other fenestration systems
- 6) ISO 18292: Energy performance of fenestration systems for residential buildings -- Calculation procedure, 2011
- 7) 経済産業省・国土交通省: エネルギーの使用の合理化に関する建築主等及び特定建築物の所有者の判断の基準, 平成28年経済産業省・国土交通省告示第1号, 2016. 1
- 8) 佐久間英二, 二宮秀與, 永田明寛, 萩原伸治: 窓に付属する日射遮蔽物の断熱性能に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第82巻第731号, pp31-41, 2017. 1
- 9) 窓の断熱性能実証試験・ISO化委員会: 平成24年度国際標準開発事業, 窓の断熱性計算方法に関する標準化「窓付属物の断熱性能評価報告書」, 一般社団法人日本建材・住宅設備産業協会, 2013. 3
- 10) JIS A1516 : 建具の気密性試験方法, (一財)日本規格協会, 1998
- 11) JIS A4706 : サッシ, (一財)日本規格協会, 2015

【本章に関連する既発表文献】

- 12) 高田和規, 羽山広文, 森太郎, 菊田弘輝: 住宅用樹脂製窓の熱的性能が寒冷地の窓の暖房負荷に与える影響, 日本建築学会技術報告集第26巻第62号, pp173-178. 2020. 2
- 13) 高田和規, 羽山広文, 森太郎, 菊田弘輝: 住宅用樹脂製窓の熱的性能が寒冷地の窓の暖房エネルギー性能に与える影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集環境工学Ⅱ, pp407~408, 2019. 09

第6章 総括

6.1 本研究のまとめ

本研究は、住宅用樹脂製窓において、寒冷地の空調エネルギーの大半を占める暖房負荷削減と低炭素化に寄与することを目指し、「住宅用樹脂製窓の高断熱化に関する研究」と題して、樹脂製窓の高断熱化に関する手法や樹脂製窓と躯体の間の線熱貫流率低減手法、さらに地域の気候特性や方位に応じて最適な熱収支を実現できる窓の評価手法に関する知見を与えることを目的としている。

第1章「序論」では、寒冷地を中心に普及している樹脂製窓の断熱性能は、窓の熱貫流率で $1.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 程度が主流であるが、外皮を構成するその他の部位と比べ大きく劣っているため、より高断熱な樹脂製窓の普及が望まれること、国内の高断熱な樹脂製窓製品は現状ヨーロッパの水準よりも低く、4層複層ガラス等ではさらに高断熱化すると考えられるものの住宅工事の観点から現実的ではない等の背景から、従来の3層複層ガラスを用いた窓重量よりも小さく、ヨーロッパの水準相当の断熱性能が実現可能な樹脂製窓が開発されれば、暖冷房負荷のさらなる削減や省エネルギー住宅の設計自由度の向上、さらに建築コストの削減が期待されること、一方で、窓の断熱性能が向上することで、窓から抜け難くなった熱流は流れやすい個所に集中し、その流れやすい個所の一つが窓と躯体との間であることが既往研究により明らかになっている点や、窓と躯体との間の熱流（線熱貫流率）は躯体の構成や窓の躯体への設置位置で変化することが既往研究やISOで示されている点から、窓の熱的性能や窓の躯体への設置位置が、窓と躯体の間の線熱貫流率に及ぼす影響を把握するとともに、窓と躯体の間の線熱貫流率を小さくするための方策を示すことは、今後の建築物の省エネルギー性や室内空間の快適性向上において意義があること、窓の高断熱化において複層ガラスの低放射（Low-E）化は一般的な手法であるものの、Low-E化に伴い、例えば冬季日射量の多い面においては熱損失の低減以上に日射熱の取得量が減って年間の暖房負荷が増加する場合もあることから、地域の気候特性や方位に応じて最適な熱収支を実現できる窓を消費者が選択するための有用な情報が望まれることを述べ、本研究の目的として、①軽量かつヨーロッパの水準相当の断熱性能を有した樹脂製窓を実現するに当たり、構成する部材の高断熱化への寄与が想定される各種要素技術の性能向上に及ぼす影響と最適条件（断熱性能向上に最も寄与

する要素技術と水準)を明らかにすること、②樹脂製窓と躯体の間の線熱貫流率の低減をはかるに当たり、窓や室内額縁の熱的性能や躯体への設置位置等の因子が線熱貫流率に及ぼす影響と最適条件(線熱貫流率低減に最も寄与する因子と水準)を明らかにすること、③地域の気候特性や方位に応じて最適な熱収支を実現できる窓の評価手法に関する検討として、寒冷地における樹脂製窓の暖房負荷に焦点をあて、窓の熱的性能が寒冷地の窓の暖房負荷に及ぼす影響と最適条件(暖房負荷低減に最も寄与する窓の熱的性能の因子と水準)を明らかにすることを挙げた。また、関連する既往の研究について概説し、本研究の位置付けとして、①国内の既存樹脂製窓を対象に、窓フレーム部の主要構成材料である枠、框、方立の形状や材質を変えずに高断熱化をはかるに当たり、窓フレーム部やガラス中央部、ガラスエッジ部の高断熱化への寄与が想定される各種要素技術の性能向上に及ぼす影響と最適条件(各部位の断熱性能向上に最も寄与する要素技術と水準)を明らかにするとともに、最適条件の組合せからなる窓の断熱性能を示し、さらに試験体の製作と性能検証によってその実現性の検討結果を報告したこと、②窓と躯体の間の線熱貫流率の低減手法に関する検討として、木造充填断熱工法に焦点を当て、「窓フレーム内部断熱材の熱伝導率」、「窓の躯体への設置位置」、「室内額縁の構成材料」といった因子が、窓と躯体の間の線熱貫流率に与える影響と最適条件(線熱貫流率低減に最も寄与する因子と水準)を明らかにするとともに、最適条件の組合せからなる窓と躯体の間の線熱貫流率を示し、さらに試験体の製作と性能検証によってその妥当性の検討結果を報告したこと、③地域の気候特性や方位に応じて最適な熱収支を実現できる窓の評価手法に関する検討として、寒冷地における樹脂製窓の暖房負荷に焦点をあて、「窓付属部材の付加熱抵抗」、「窓の断熱性能(熱貫流率)」、「窓の日射熱取得率」、「窓の気密性能(通気量)」といった因子が、窓の暖房負荷に与える影響とそれら最適条件(暖房負荷低減に最も寄与する因子と水準)を明らかにするとともに、最適条件の組合せからなる窓の暖房負荷を示し、さらに標準的な組合せからなる窓の暖房負荷との比較結果について報告したこと等が挙げられる。

第2章「品質工学とは」では、第3章～第5章で用いるタグチメソッドについて概説するとともに、窓開発にタグチメソッドを用いる利点や留意点、従来の検討方法との差異を示した。

第3章「各種要素技術による断熱性能向上の実現性に関する検討」では、国内の既存樹脂製窓を対象に窓フレーム部の主要構成材料である枠、框、方立の形状や材質を変えずに高断熱化をはかるに当たり、構成する部位(窓フレーム部、ガラス中央部、ガラスエッジ部)の影響を定量的に評価した。その結果、窓フレーム部については、タグチメソッドを用いて高断熱化への寄与が想定される複数の制御因子の各断面に対する通過熱流量の低減効果を検討し、各制御因子の最適条件(通過熱流量低減に最も寄与する水準)を導出するとともに、最適条件時の既存樹脂製窓からの低減率(障子部 19～21%、FIX部 6～10%、方立部 22%)を示した。さらに、SN比影響度から、障子部、FIX部は「窓フレーム内部断熱材の熱伝導率」が、方立部は「方立補強材の熱伝導率」が最も低減効

果が高いことを示した。ガラス中央部については、複層ガラスの中空層へ重量がほとんどない Low-E フィルムを挿入した仕様を検討し、Low-E 膜の効果と配置の最適化（視野性や日射特性等に配慮したうえで最大の断熱効果が期待できる配置）や充填ガス別の最適（最大の断熱効果が期待できる）中空層厚みを示すとともに、キセノンガスとフィルム 3 枚によるガラス中央部の熱貫流率 $0.29 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 仕様や、クリプトンガスとフィルム 2 枚によるガラス中央部の熱貫流率 $0.39 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 仕様を提案した。ガラスエッジ部については、窓フレーム部と同様にタグチメソッドを用いて、高断熱化への寄与が想定される複数の制御因子の各断面に対するガラスエッジ部の線熱貫流率低減効果を検討し、一窓あたりのガラスエッジ部の平均線熱貫流率を用いた SN 比平均値から各制御因子の最適条件（線熱貫流率低減に最も寄与する水準）を導出した。さらに、SN 比影響度から、各断面に共通して「ガラススペーサの熱伝導率」が最も低減効果が高いことを示した。次に、窓フレーム部、ガラス中央部、ガラスエッジ部の最適条件の組合せからなる窓の熱貫流率 $0.46 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ を示したが、現状の課題（製造上困難な技術や製造コスト上の課題）があることから、製品化を見据えた現実的な仕様で試験体による断熱性能の検証を行った結果、計算で熱貫流率 $0.65 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ の仕様で、 $0.63 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ の測定結果が得られたことを示した。

第 4 章「樹脂製窓と躯体の間の線熱貫流率低減手法に関する検討」では、木造充填断熱工法における樹脂製窓（FIX 窓、外開き窓、引違い窓）と躯体の間の線熱貫流率計算を行い、「窓フレーム内部断熱材の熱伝導率」、「窓の躯体への設置位置」、「室内額縁の構成材料」が窓と躯体の間の線熱貫流率に与える影響を、タグチメソッドを用いて定量的に評価した。その結果、窓フレーム部や室内額縁の断熱性能が高いほど、窓の躯体への設置位置を室内側に向けるほど、窓と躯体の間の線熱貫流率の低減につながることを明らかにするとともに、開口部一窓当りの窓と躯体の間の平均線熱貫流率を用いた SN 比影響度から、FIX 窓、外開き窓は「室内額縁の構成材料」が、引違い窓は「窓フレーム内部断熱材の熱伝導率」が最も低減効果が高いことを示した。さらに最適条件の組合せ（各制御因子の線熱貫流率低減に最も寄与する水準で構成される組合せ）からなる窓と躯体の間の線熱貫流率を示した。次に、FIX 窓における開口部一窓当りの窓と躯体の間の平均線熱貫流率を、試験体を製作し数値計算結果の妥当性検証を行った結果、測定値は計算値と同様に窓フレーム部や室内額縁の断熱性能を高め、窓の躯体への設置位置を室内側に向けることで線熱貫流率の低減につながることを明らかにするとともに、両者の乖離が 10%未満と良い整合性が得られたことを根拠に計算値の妥当性を証明した。また、窓の躯体への設置位置が窓の室内外表面熱伝達抵抗に与える影響を把握するため、窓に設置した 2 層複層ガラスを校正板に見立て、室内外の表面熱伝達抵抗の算出を試みた。その結果、窓の躯体への設置位置は室内外の表面熱伝達抵抗の放射成分より対流成分に多く影響を及ぼしているものの、線熱貫流率への影響は小さいことを明らかにした。

第 5 章「樹脂製窓の熱的性能が寒冷地の窓の暖房負荷に与える影響」では、地域の気候特性や方位に応じて最適な熱収支を実現できる窓の評価手法に関する検討として、寒

冷地（1、2、3 地域）における樹脂製窓の暖房負荷に焦点をあて、「窓付属部材の付加熱抵抗」、「窓の断熱性能（熱貫流率）」、「窓の日射熱取得率」、「窓の気密性能（通気量）」が窓の暖房負荷に与える影響を、タグチメソッドを用いて定量的に評価した。その結果、全ての地域・主方位・面・1 棟分に共通して、窓付属部材の付加熱抵抗が大きいほど、窓の断熱性能が高い（熱貫流率が小さい）ほど、窓の日射熱取得率が高いほど、窓の気密性能が高い（通気量が少ない）ほど、窓の暖房負荷の低減につながることを明らかにするとともに、1、2 地域は SN 比影響度から、3 地域は暖房負荷の平均値の最大と最小の差から、樹脂製窓の熱的性能を選択する際、1、2 地域では主方位や面によらず、まず断熱性能、次に気密性能を、3 地域では主方位によらず、南面はまず日射熱取得率、次に断熱性能を、それ以外の面はまず断熱性能、次に日射熱取得率を重視して選択するのがよいことを提案した。また、検討条件の範囲内において、最適条件の組合せ（暖房負荷低減に最も寄与する制御因子の水準の組合せ）とすることで、1～2 地域は標準ケースから最大 98%低減、3 地域は最大 100%低減かつ 148.4 kWh/m²の熱取得が得られることを示した。

以上、本研究では、従来の 3 層複層ガラスを用いた窓重量よりも小さく、ヨーロッパの水準相当の断熱性能を保持する樹脂製窓の開発が、タグチメソッドによる感度解析により、既存の樹脂製窓をベースに既存の要素技術を用いて実現可能であることを示した。また、窓を高断熱化したことによる他の要素への影響（木造充填断熱工法における窓と躯体の間の線熱貫流率に対する影響や寒冷地における窓の暖房負荷に対する影響）についてもタグチメソッドを用いた感度解析を行うとともに、それら最適条件を検討条件の範囲内において明らかにした。本研究で得られた知見は、生産者等の、今後の更なる高断熱な樹脂製窓の開発行為に対する、構成材料の選択時における客観的合理性や製品開発期間の短縮等や、建築物の低炭素化や省エネルギー性向上、さらに室内空間の快適性向上に寄与できるものと考えられる。

6.2 今後の課題と展望

本研究の今後の課題と展望について、以下に示す。

第3章に関して：

- 検討対象とした窓は連窓形式の縦すべり出し窓のみであるため、他の開閉形式（例えば引違い窓）においても同様の検討を行い、妥当性の検証を行う予定である。
- 試験体で断熱性能の検証を行ったが、今後の製品化に際しては第三者機関での検証などを重ねる必要がある。製品化のためには耐久性の検証（特に窓フレーム部の断熱性能が向上するため既存品より窓フレームの内外表面温度差が大きくなる可能性が考えられるため、窓フレームの線膨張等による変形の把握や開閉耐久妥当性の検証が必要）や、硬質発泡ウレタンフォームの充填性確認の方法の確立等が必要となる。
- 窓の高断熱化への寄与が想定される要素技術として、窓フレーム断面内部の空気層壁面に長波長放射率の低い金属膜の形成、窓フレーム断面内部へフェノールフォーム断熱材を隙間なく設置、複層ガラス中空層へのキセノンガス充填、硬質 PVC 製のガラススペーサについては断熱性能向上の効果があるものの、現状では製造上困難もしくはコスト上の問題があることから、試験体制作の対象外とした。将来、今回の試験体で実現した窓の熱貫流率 $0.63 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ を上回る断熱性能が求められるようになるとき、これら要素技術の再検討が必要となる。
- 3.3「測定による性能検証」において、ガラス中央部の熱貫流率と窓フレーム部の一窓あたりの平均熱貫流率は測定結果の室内外ガラス中央部表面温度や複層ガラスを熱抵抗の実測が可能な断熱パネルに置き換えること等により推定したが、ガラスエッジ部の線熱貫流率の推定は実施していない。なお、清水らの研究¹⁾では、ガラススエッジ部の冷橋の影響範囲をガラス中央部の温度低下率に対する各測定部位（ガラスエッジ端部の上辺中央、下辺中央、左辺中央と左下隅角部）の温度低下率の比率を求め、その分布状況から把握するとともに、その結果等から複層ガラスのガラスエッジ部の冷橋の影響をうけないガラス中央部の熱貫流率やガラスエッジ部の線熱貫流率を推定している。今後はこれらを参考に、測定結果からガラスエッジ部の線熱貫流率を推定し、計算結果の妥当性を検証する予定である。

第4章に関して：

- 樹脂製窓と躯体の間の線熱貫流率の低減手法に関する検討として、今回は木造充填断熱工法のみを焦点を当てた。さらに、実験室実験での再現が容易であることを考慮し、窓（窓フレーム部の断熱性能と窓の躯体への設置位置）と窓周辺部材（室内額縁）に絞って検討した。今後は躯体の構成材料（例えば充填断熱材や内装材、外装材等）の仕様や他の工法、構造（例えば外張断熱工法やRC造、鉄骨造等）等における窓と躯体の間の線熱貫流率に与える影響を検討していく予定である。

第5章に関して：

- 本章では、地域の気候特性や方位に応じて最適な熱収支を実現できる窓の評価手法に関する検討として、寒冷地住宅における樹脂製窓の暖房負荷に焦点を当てたことから、暖房負荷計算対象地域は1～3地域を設定した。近年、建築物の高断熱化が推進され、窓の断熱性能向上が室内温熱環境と健康の関係からも注目をされている。そのような背景もあり、今後は樹脂製窓が温暖地においても普及していくと予測される。そのため、今後は温暖地（4～8地域）においても本章と同様の検討を行い、温暖地の気候特性や方位に応じて最適な熱収支を実現できる樹脂製窓の暖房負荷に関する熱的性能条件を明らかにする予定である。
- 建築物の熱性能を総合的に評価するためには暖房負荷のみならず、冷房負荷の評価も必要である。そのため、今後は全ての地域を対象に、気候特性や方位に応じて最適な熱収支を実現できる樹脂製窓の冷房負荷に関する熱的性能条件についても明らかにする予定である。

【第 6 章の参考文献】

- 1) 清水則夫，成瀬哲生：複層ガラスの断熱性能に関する研究-スペーサ部の冷橋と表面熱伝達率について，空気調和・衛生工学会論文集，No72(1999-1)，pp75-84

謝 辞

本論文は、私が株式会社トクヤマ シャノン建材事業部に入社し、事業分社化により株式会社エクセルシャノンに出向となった現在に至るまでに行ってきた樹脂製窓の高断熱化に関する研究等の成果をまとめたものです。本論文をまとめるにあたり、指導教官としてご多忙の中にも関わらず、研究の方向性や論文の作成に至るまで昼夜を問わず懇切・丁寧にご指導頂きました北海道大学大学院工学院 羽山広文教授には深く感謝申し上げます。

北海道大学大学院工学院 長野克則教授、濱田靖弘教授、森太郎准教授、菊田弘輝准教授には、論文の審査委員として多くの有益かつ貴重なご意見・ご指摘を頂きました。また、森太郎准教授には、論文のまとめ方などで、なにかとご協力・ご助言を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

北海道大学大学院工学院 飯場正紀教授、千歩修教授、岡崎太一郎教授、菊地優教授、瀬戸口剛教授、森傑教授、小澤丈夫教授には審議委員として今後の展開を促す貴重なご意見・ご指摘を頂きました。ここに、深く感謝申し上げます。

本研究の端緒となった、2014 年度に実施された地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 建築研究本部（当時北方建築総合研究所）等との共同研究「住宅用樹脂製サッシの超高断熱化に関する研究」の鈴木大隆先生をはじめとした委員の皆さまには、多大なるご協力とご助言を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 建築研究本部 廣田誠一博士、北谷幸恵博士、村田さやか博士、立松宏一博士、遠藤卓氏には、2014 年度の「住宅用樹脂製サッシの超高断熱化に関する研究」において、立松宏一博士、下ノ藺慧氏には、2017 年度の「樹脂製窓と躯体の間の線熱貫流率軽減手法に関する研究」において研究をご一緒させていただき、多くの知見を得るとともに研究の奥深さを学ぶことができました。ここに深く感謝申し上げます。

アーキインネクスト合同会社 平川秀樹氏には、北海道大学大学院工学院の先輩として論文作成の進め方等多くのご助言を頂くとともに、将来の建築物のあるべき姿やそれに設置する窓について様々な視点で数多くの意見交換をさせて頂き、多くの気づき、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。

鹿児島大学大学院理工学研究科教授 二宮秀與先生、滋賀県立大学環境科学部講師 伊丹清先生をはじめ、一般社団法人リビングアメニティ協会 窓の熱性能審査委員会ならびに関係者の皆さまには、WindEye の開発や維持管理を通じて多くの意見交換をさせていただき、有益な知見が得られました。ここに深く感謝申し上げます。

株式会社エクセルシャノン 開発技術本部の中島久則氏、川村敦氏には、窓フレーム部の数値解析やデータ入力等で多大なるご協力を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

株式会社トクヤマ 横田浩社長、楠正夫相談役、末光嘉治氏をはじめ、株式会社エクスセルシャノン 隅地晃之社長、橋本幸登志開発技術本部長ならびに関係部署の方々には、私の博士号取得というチャレンジを支えていただきました。ここに深く感謝申し上げます。

最後に、私の博士号取得というチャレンジを応援し支えてくれた両親と家族に深く感謝申し上げます。

2020年2月 高田 和規