

建設技術研究開発助成制度

中小建築物の良質ストック化と環境負荷低減を目指す
建築・外皮システムの開発

総合研究報告書

2010年9月30日

地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 北方建築総合研究所
株式会社 アルセッド建築研究所
神戸芸術工科大学
有限会社 金箱構造設計事務所
東海大学
旭硝子株式会社 AGCガラスカンパニー

もくじ

1．目的と概要	
1 - 1．背景と目的	..... 1
1 - 2．本技術の概要	..... 2
1 - 3．スケジュールと役割分担	..... 3
2．高耐久ガラスファサードを実現する外皮と建築構造システムの開発	
2 - 1．ノンシーリングによる高耐久ガラスファサードの開発	
(1)目的	..... 4
(2)動的圧力の基礎実験及びシミュレーションプログラムの作成	..... 7
(3)数値計算による分析の可能性検討	..... 13
(4)外装ガラスに関する工法的検討	..... 17
(5)ファサードの汚れの実態と防汚性能	..... 37
2 - 2．エネルギーポジティブな構造システムの開発	
(1)目的	..... 52
(2)事務所建築物を対象とする検討	..... 52
(3)学校建築物を対象とする検討	..... 61
3．エネルギー収支に優れる採光・断熱システムの開発	
3 - 1．暖冷房・照明エネルギー最小化のための目標性能検討	
(1)目的	..... 64
(2)検討概要	..... 64
(3)検討結果と目標性能の導出	..... 70
3 - 2．快適な光環境創出のための目標性能検討	
(1)目的	..... 81
(2)検討概要	..... 81
(3)検討結果と目標性能の導出	..... 81
3 - 3．日射熱と可視光の制御部材の開発	
(1)目的	..... 83
(2)日射熱の季節制御性に関する検討	..... 83
(3)可視光の入射角制御性に関する検討	..... 84
3 - 4．層構成の構築	
(1)目的	..... 87
(2)部材の基礎検討	..... 87
(3)壁体熱性能予測プログラムの作成	..... 89

4 . システム構築と試行・検証	
4 - 1 . 目的	.... 91
4 - 2 . 事務所を対象とする場合	.... 91
4 - 3 . 学校を対象とする場合	.... 94
5 . 総括	
5 - 1 . 高耐久ガラスファサードを実現する外皮と建築構造システムの開発	.... 100
5 - 2 . エネルギー収支に優れる採光・断熱システムの開発	.... 101
5 - 3 . システム構築と試行・検証	.... 102

参考資料 1 . 壁内圧力シミュレーションシステム 操作マニュアル

参考資料 2 . ガラス外皮のモックアップ図面

参考資料 3 . 外国先進事例調査

1. 目的と概要

1-1. 背景と目的

我が国におけるCO₂排出量の約4割を、建設・解体、運用エネルギー等の、建築関連が占めている(図1-1-1)。また、新築建築物の約8割は、5階以下の低中層建物である(図1-1-2)。これらのことから、わかるとおり、低中層建物における部材や建物の高寿命化、運用エネルギー削減は、地球温暖化防止の対策上、極めて重要な課題である。

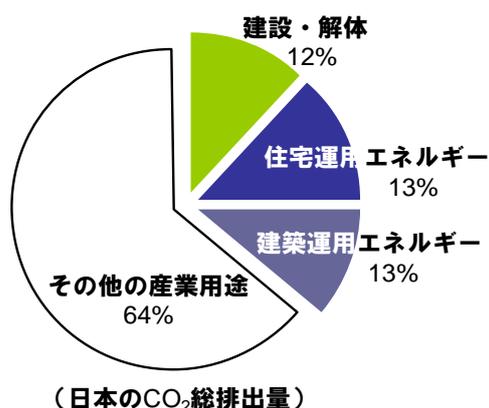


図 1-1-1 わが国の CO₂ 排出の比率

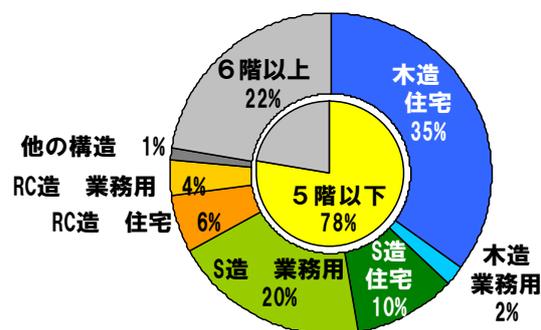


図 1-1-2 わが国の新築建物の階数と用途
(国土交通省 建築統計年報平成 18 年度版)

一方、日射熱や自然光等の自然エネルギーの採り入れに関する、建築外皮の制御性能は、暖冷房・照明エネルギーや室内環境に大きな影響を及ぼす。加えて、シーリングと外装材を含む外皮の耐久性は、建物の外観の維持、メンテナンス費用を左右する。

本研究開発では、わが国の主流を占める低中層の新築及び既存建築を対象に、耐久性と意匠性に優れるファサードを有し、日射熱や自然光の自然エネルギーポテンシャルを最大限に活かすことで、暖冷房及び照明エネルギーと維持管理の最小化を目指す、全く新しい建築外皮システムと、それを実現する建築構造システムの開発を行うことを目的とする。

なお、本研究開発は当初、3年間を予定していたが、事情により2年間で終了した。そのため、外皮システムの開発には至らず、各種検討も中途である。以降では、2年間の研究開発において実施した内容、及び残された課題について報告する。

1-2. 本技術の概要

本技術の概要を図1-2-1、及び以下に示す。

- ・ガラス外装

高耐久部材であるガラスを用いた、ノンシールの外装とする。外装ガラスは内外を等圧とすることで降雨の流入を防止し、汚れの付着を抑制し、メンテナンスを軽減する。

- ・ガラス外皮（外装を含む）

外皮全体の熱貫流率、日射熱取得率、可視光透過率の各性能を適切化することにより、日射熱、可視光の採り入れを制御し、暖冷房・照明の合計エネルギーの低減を図るとともに、良好な光環境を形成する。運用エネルギーに関しては、外皮面積当たり50MJ/m²・年削減、及び最小化の2つを目標とする。

- ・構造システム

本外皮システムを支える、エネルギーポジティブな構造システム。

このうちエネルギーについて、本外皮システムは以下の先進性を有する。外壁などの建築断熱外皮では、空調などで作り出した室内の熱が、熱貫流により屋外に流出するため、外皮部分でのエネルギー収支はマイナスとなる。断熱性能の向上によりエネルギー収支をゼロに近づけることができるが、それだけでは建物の省エネ化に限界が生じる。一方、本外皮システムは、貫流熱損失を考慮してもエネルギー収支がプラスとなるように、日射熱取得による暖房負荷の低減、採光による照明負荷の低減を図る。

以上の外皮システムを開発することで、省エネルギー、耐久性向上、維持管理性やファサードの意匠性向上が期待できる。

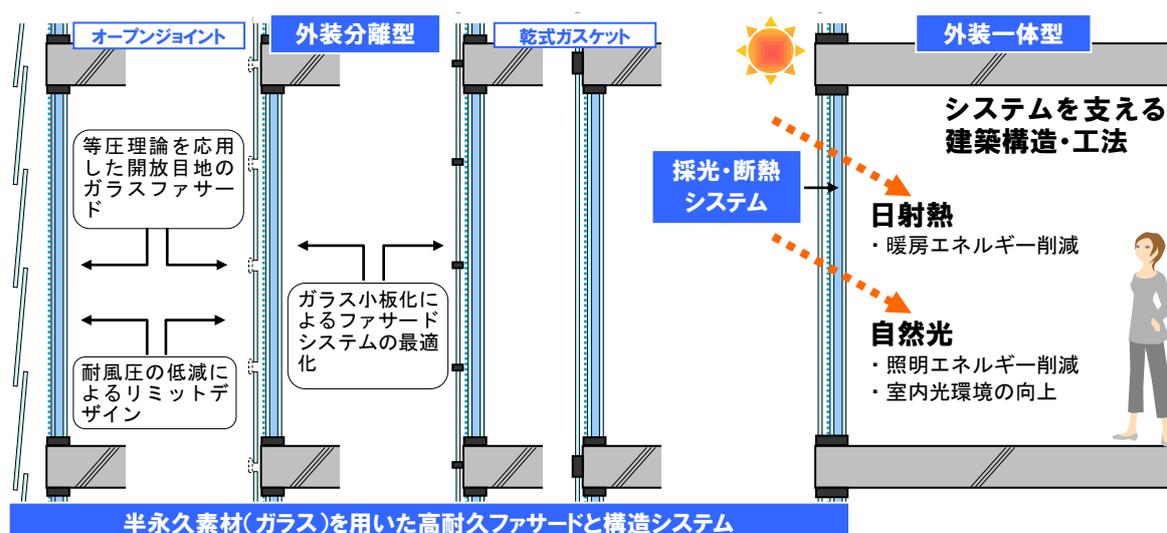


図 1-2-1 本技術の概要

1-3. スケジュールと役割分担

表1-3-1に開発項目とスケジュールを示す。また、表1-3-2に各機関の役割分担を示す。以降の2.～4.では、開発項目別に、目的や実施内容等について報告する。

表1-3-1 開発項目とスケジュール

開発項目	2008	2009	2010
(1) 高耐久ガラスファサードを実現する外皮と建築構造システムの開発			
A ノンシーリングによる高耐久ガラスファサードの開発			
1 課題整理と導入効果の把握	[Bar spanning 2008-2009]		
2 層構成の最適化検討とノンシーリング防水技術の開発	[Bar spanning 2009-2010]		
B エネルギーポジティブな構造システムの開発			
1 構造システムの再構築と提案	[Bar spanning 2008-2009]		
2 ガラスファサードの支持手法及び安全性評価	[Bar spanning 2008-2010]		
(2) エネルギー収支に優れた採光・断熱システムの開発			
1 暖冷房・照明エネルギー最小化のための目標性能検討	[Bar spanning 2008-2009]		
2 快適な光環境創出のための目標性能検討	[Bar spanning 2008-2009]		
3 日射熱取得率の季節制御部材開発	[Bar spanning 2009-2010]		
4 層構成の構築	[Bar spanning 2009-2010]		
システム構築と試行・検証		[Bar spanning 2009-2010]	

表1-3-2 役割分担

機関	役割分担
北海道立 北方建築総合研究所	プロジェクトの全体マネジメント (1) 高耐久ガラス外皮と建築構造システムの開発 A ノンシーリングによる高耐久ガラスファサードの開発 B エネルギーポジティブな構造システムの開発 (2) エネルギーバランスに優れた採光外皮の開発 ① 暖冷房・照明エネルギー最小化のための目標性能検討 ② 快適な光環境創出のための目標性能検討 ③ 日射熱取得率の季節制御部材開発 ④ 層構成の構築
アルセッド建築研究所	(1) 高耐久ガラス外皮と建築構造システムの開発 A ノンシーリングによる高耐久ガラスファサードの開発
金箱構造設計事務所	(1) 高耐久ガラス外皮と建築構造システムの開発 B エネルギーポジティブな構造システムの開発
東海大学	(2) エネルギーバランスに優れた採光外皮の開発 ② 快適な光環境創出のための目標性能検討 ③ 日射熱取得率の季節制御部材開発
神戸芸術工科大学	(3) システム構築と試行・検証
旭硝子株式会社	(1) 高耐久ガラス外皮と建築構造システムの開発 B エネルギーポジティブな構造システムの開発 (2) エネルギーバランスに優れた採光外皮の開発 ① 暖冷房・照明エネルギー最小化のための目標性能検討 ④ 層構成の構築

2. 高耐久ガラスファサードを実現する外皮と建築構造システムの開発

2-1. ノンシーリングによる高耐久ガラスファサードの開発

(1) 目的

1) 概要

中低層の一般建築に適用される代表的な躯体構造と外装は、建設工期の短縮化・ローコスト化等の視点から、鉄骨構造に軽量気泡コンクリート板や中空セメント板などの乾式外装材を張り付ける構成を採用するのが一般的である。これらの外装工法は、1950年代後半以降、日本の高度経済成長に伴うオフィス建築需要の高まりに併せて普及が進み、普及当初、問題とされた外装目地の防水、寒冷地での凍害も50年間の技術の進展から、建設後10年以内の短期的な視野に立てば、修繕の必要性がほぼ問題のないレベルに解決されている。しかし、近年、社会的な要求の高まりをみせている地球環境問題の配慮について視点を移すと、先に述べた建築物は、一般に外装を10～30年スパンで大規模改修する必要があるのが現状となっており、社会的に要求されている建築物の耐久性能を必ずしも満たしていない。大規模改修の項目には、軽微なものとして外壁面での塗装のやり直し、外装接合部でのシーリング防水の補修などがある。本格的な改修としては、同類の外装材による更新が一般的だが、これら大規模改修は、建築物のランニングコストの増加に繋がるとともに、補修作業や建材交換に伴うCO2排出量の増大に影響を及ぼし、建設系産業廃棄物が増加にも大きく関与する。従前の技術で建設されたオフィス建築物に用いられた技術は、新築時の建設工期の短縮化・ローコスト化に大きく貢献する技術であったと総括できるが、必ずしも最近の社会情勢が要求している地球環境問題を解決する手段にはなり得ていない。現状の中低層一般建築物の外装工法に関連する問題点を述べると次の通りである。

① 建設工期縮減を目的に外装材等を大型・一体化し、大型の建設機械を投じて工事を実施する。建設初期の工事合理化には大きく貢献するが、大規模改修時のパーツ交換にも新築時と同レベルの大型建設機械が必要な工法となっている。部品の一部交換が難しく、改修の合理化が難しい。

② 外装材の目地は、建築物の防水性能や劣化を大きく支配する部分である。我が国は、欧米に比べ年間降雨量が多い気候となっており、目地には高い防水性能が要求されるが、化学シーリング材を使用する欧米とほぼ同一の目地構成を採用しており、耐久性が低い。改修のサイクルが短くなる大きな要因となっている。また、外装材本体も吸水性の高い窯業系基材を使用しており、寒冷地などでは、凍害などの外装劣化の主因となっている。

①の問題点に関しては、外装材を小型化し、小型作業機械や作業員の人力でも施工可能な建築部品構成とする。この提案によって建築部品の交換の省力化が期待できる。さらに多種の材料を複合せず、リサイクルやリユースし易い外装とする。②に関しては、吸水率が

低く、耐用年数が建築物の構造と同等であるガラス材に着目し、この資材をシーリング剤で接合せず、改修サイクルの延伸化ができる目地構成の壁体にする。これらのことは、現在の建築物の常識的な技術を逸脱しているが、建築物の改修サイクルの延伸化、小作業化、産業廃棄物の発生量を抑制することを重点においた革新的開発によって、CO2排出量の減少に貢献できる建築外皮を提案する。

以上のように、本検討では国内の大部分を占める中・低層建物（小規模オフィスや学校、商業施設など）を対象に、これら建物で適応しやすい耐久性の高いガラスファサードの構成技術を提案する。

2) 高耐久ガラスファサードのイメージと課題

1)で示した目的に沿って、高耐久ガラスファサードの構成イメージと検討項目を概説すると次の①～③のとおりである。

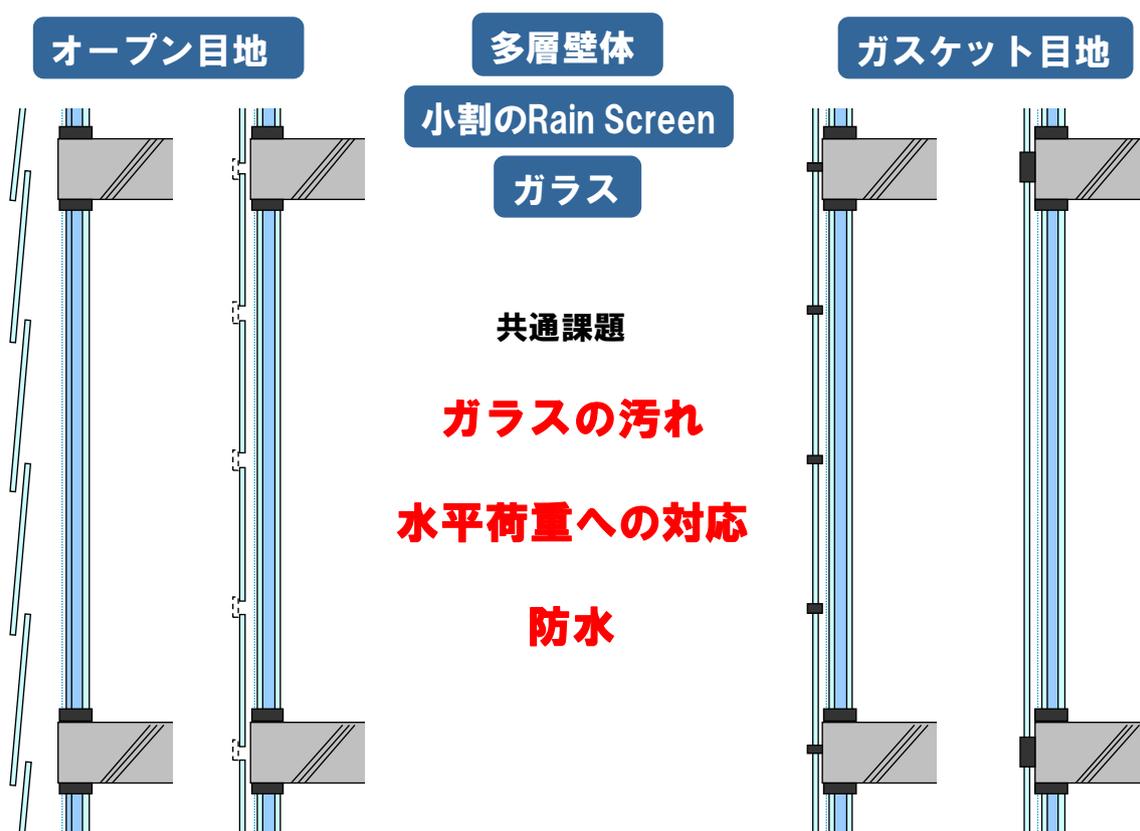


図2-1 高耐久ガラスファサードのイメージ

①目地の形状検討（オープン目地、ガasket目地）

外装材及び外装工法が担う大きな役割には、漏水防止がある。漏水防止を行う方法として最も一般的なものとしては、外装の目地部分にシーリング材を充填する方法があり、多くの建築物で用いられている。しかし、シーリング材の劣化に伴って、10年程度毎に補修が必要な現状となっている。本検討では、この現状を鑑みて、新たな外装工法の提案として、図2-1の通り、2種類のノンシール外装工法を検討する。一つは、オープン目地工法であり、もう一つは、ガasket目地工法である。ガasket目地工法については、高層ビルのカーテンウォールなどで一部実現されている経緯がある。一方、オープン目地工法については、その技術構築のための原理が明らかにされているのみであり、設計手法が明示されていない。以上のことから、本検討ではオープン目地工法の原理検証及びその原理を適用するための設計条件について検討する。この詳細は、（2）で検討を実施する。

②外装ガラスに関する工法検証

外装の表面材は、ガラスを利用する。ガラスは、建築物に用いる他の素材に比べ、耐久年限が高く、長期にわたってのメンテナンスが不要な特徴がある。また、その強度特性等も既知であることから、新規外装を提示するための素材開発等を行う必要が低い。課題としては、ガラス自体の重量が重いこと、脆性的な材料で、破損すると危険を伴うなどが挙げられる。実際の採用にあたっては、強度設計や寸法の選定に慎重を期す必要がある、この点課題は、（3）で検討を実施する。

③ガラスの汚損要因と防止策の検討

高層ビルなどのガラス外装の多くは、経年に伴って、ガラス表面が汚れ、清掃が必要になる。清掃コストは、維持管理費に大きな影響を及ぼすと考えられる。本検討では、各種建物の実態調査及びモックアップ試験体を用いたガラスの汚れ状況を観察し、ガラスの汚れの主たる要因について考察する。この点については、（4）で検討を実施する。

(2) 動的圧力の基礎実験及びシミュレーションプログラムの作成

ガラス外装は、乾式施工が可能なこと、耐久性が高いことから、市場で広く使用されている。但し、この材料の接合部に用いられるシーリング材は紫外線劣化しやすく、10年程度毎に修繕を要するなど、メンテナンス性が高くない現状である。

本技術開発では、ガラス外装工法の高耐久化・メンテナンス周期を長期化する技術の提案する手法として、等圧性理論を用いたシーリングレス外装に着目し、その外装評価技術のシミュレーションプログラム作成の検証モデルとするため、1)では、漏水に影響を及ぼす外装面・通気層内の圧力に関する実験を試みた。2)では、シミュレーションプログラムの作成と検証を実施した。その結果について報告する。

1) 等圧性理論に関する基礎的実験

a) 目的

外装目地のシーリングレス化は、建物のメンテナンスの回数縮減や省力化に大きく貢献できる。シーリングレス化を行う方法の一つには、等圧性理論を用いたオープンジョイント目地を採用することが考えらるが、その設計技術手法構築は必ずしも進んでいない。背景には、シミュレーションソフトウェアなどの設計ツールを開発・提案しようにも、技術構築の基盤となる実験データが不足しており、プログラムの妥当性が検証できない現状があるためと考える。このことから、本検討では、等圧性理論をささえる基盤データを提示することを目的に、各種壁体の動風圧試験を実施し、壁内外の等圧性に関する実験をした

b) 等圧性理論の原理概説

外装間の隙間から雨水侵入をもたらす要因のうち、風圧力に起因する壁面内外の圧力差は、浸水の量、範囲、拡散形態の面から最も大きな影響を及ぼすことが知られている。雨水の侵入口において、この圧力差を低くとどめ、これによって、隙間部分からの雨水侵入を防止する「等圧理論」は、カナダのGardenなどによって1960年代にその基礎概念が提唱され、その後、英国、北欧の国立建築研究機関の研究者による実験的な検討で有用性が確認され、実用化に至っている。わが国でも1979年に建設された新宿センタービル、三井商船ビルのカーテンウォール設計に等圧原理が初めて応用され、それ以来、シーリングによる水密化に依存する目地防水工法に対して、長期にわたり格段に高い信頼性を期待できる目地防水工法として、位置づけられ、現在では、高層建築物の外装設計への採用が常態化している。しかし、等圧設計の最も基礎となる等圧空間内部圧力と外部圧力の均衡に関する定量的計算法、また実験的検証は十分になされたとは言い難い現状にある。

ここで、石川の一連の研究¹⁾を参考に、一般的な住宅などの外装目地からの漏水原理を推察すると、図2-2のように整理できる。図のように、シーリングを用いた目地においては、目地自体がシーリングで密封されるため、外装表面に高い圧力が作用したとしても漏水が起こりにくい。一方、シーリングが劣化欠損したり、外装材の目地にシーリングを行わない場合、その目地から雨水が浸入し漏水事故が発生する。漏水の原因は外装と通気層内部

との圧力差であることから、図2-2右欄のように、外装表面と通気層内の圧力を等圧にするなどの工夫を行えば、シーリングに頼らずとも漏水を防止することが可能になると推察できる。

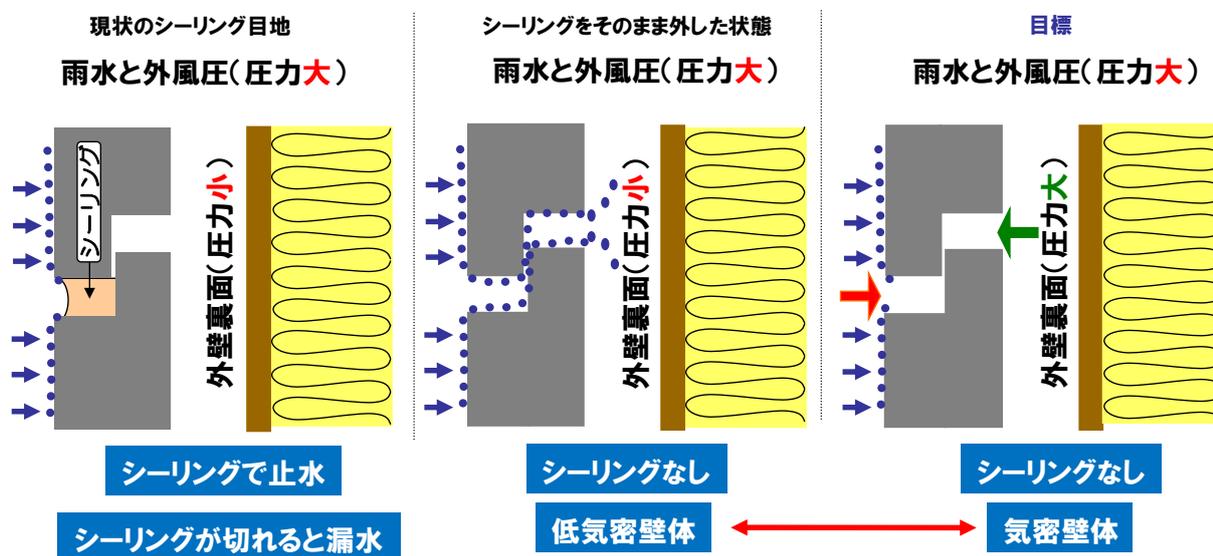


図2-2 等圧性理論の概念模式図

c) 検討のフロー

上記概説の考え方に従えば、外装の裏面の圧力が外風圧と等圧になれば、雨水の侵入がなくなると想定できる。等圧になるか否かは、建物の躯体の有効開口面積及び外装の有効開口面積のバランスが大きく関与する。以上のことから、外装及び躯体の隙間量が等圧に及ぼす影響を明らかにする目的で、外装の表面隙間量及び躯体の躯体の隙間量を明らかにするとともに、動風圧実験を行い、内外装の有効開口バランスに関する原理実験を実施した。なお、本来、実験は、本来ガラス外皮を想定したモデルで実験を行う必要がある。しかし現時点で、図2-1に示したガラス外装の具体ディテールは確定していない状況であることから、既往の等圧壁体に類するものとして、住宅の乾式外装（サイディング）を対象に、壁面各部の有効隙間量 αA の測定、さらにその隙間を持つ壁体での動風圧試験を行った。

・外装各部の有効開口面積 αA

外装表面の隙間量（有効開口面積 αA ）は、風圧力の作用割合に影響を及ぼすと考えられる。外装表面の隙間量は、写真2-1のように、小口部分を気密化した外装材を用いて、外装材目地の有効開口面積 αA を測定した。薄板外装材は住宅用に市販されるもののうち、乾式サイディングを選定した。写真2-1に示す北総研所有の気密測定装置を用い、気密箱内を減圧しながら、内外差圧および排気流量を測定し、 αA を算出した。

外装表面の隙間量 αA の測定結果を示すと表2-1になる。表のように、外装材の目地1m長さ

当たりの αA は、ガスケットの有無や目地形状によって大きく異なる。概ね $3\sim 10\text{cm}^2/\text{m}$ とみることができる、窯業系サイディングのように、目地にパッキンが施されている、もしくは外装目地にシーリング材が充填されている状況ではない限り、壁面積 1m^2 あたりには、 $1.5\sim 5\text{cm}^2$ の隙間がある。図2-1に示した等圧性理論の概念によれば、外装表面の隙間が大きいほど、内外圧差が少なくなり、雨水の侵入や耐風圧設計が有利になる。この観点からみれば、ガラス外装の目地は、従来の窯業系サイディングより隙間を大きくする設計とする必要がある。

表2-1 試験に用いた乾式外装材や役物類の αA

箇所	部位	状態	αA (cm ² /m)
外装表面目地	窯業系外装21mm	オープン目地	9.62
	窯業系外装15mm	突付目地 (ガスケットあり)	0
	窯業系外装15mm	突付目地 (ガスケットなし)	2.58
	窯業系外装端部 (ハット型ジョイナー部)	突付目地 (シーリングなし)	0.52
通気層出入り口	役物なし (18mm厚開口)		82.74
	役物なし (18mm厚開口)	1/2閉塞	38.56
	役物なし (18mm厚開口)	全閉塞	0
通気層上部	通気見切材 (窯業系外装用)		5.43
	通気見切材 (窯業系外装用)	通常品の孔面積を2倍	12.11
通気層下部	外装スターター		6.49



写真2-1 外装の有効開口面積の測定装置及び測定の様子

・動風圧実験の方法

裏面空隙を有する壁体モデルを用いて外装材に作用する風圧力の特性について実験を行った。圧力測定は、写真2-2に示す試験体を動風圧試験装置に設置し、JIS A 1517「建具の水密性試験方法」に準じた方法で図2-3、写真2-3による圧力ポート（美差圧変換器を実装）を使用して外装面 P_w 及び下地 P_c での圧力変動を測定した。測定条件は、平均風圧力を -500Pa （正圧）、突風率G.F.を1.5、脈動周期を2secとし、圧力のサンプリング間隔を0.1secとした。 P_c の圧力は、通気層上下の有効開口面積や外装表面の隙間量によって変動することが、既往の研究で指摘されている²⁾。このことから、実験にあたっては、通気層出入口の有効開口面積を測定するとともに、外装の隙間量を測定した表2-1に示す試験体とした。なお、この実験結果の分析に供した試験体は39体である（表2-2に記載）。

・実験の結果

実験で得られた P_w 、 P_c の各圧力の推移を整理し、風圧力の平均値に基づいて、外装面と通気層内の圧力差 ΔP を算出した。その結果、表2-2のように、通気層上下 αA 、外装表面の αA 、下地の有効開口面積が変化することによって、 ΔP は大きく変動（ $1.15\sim 369.53\text{ Pa}$ ）することが明らかとなった。



写真2-2 試験体の外観

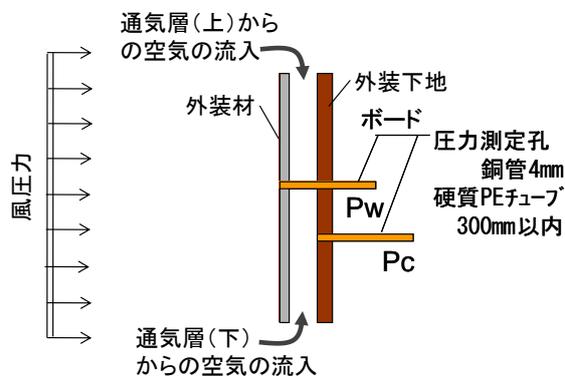


図2-3 圧力の測定位置と仕様



写真2-3 圧力ポートの設置及び、下地の隙間量の調整口

台風時などに作用する外装の表裏面の圧力差に対し、外装に有する隙間及び下地の有効開口面積（建物の気密度）が、どのような影響を及ぼしているのか明らかにするため、表3-1で示した実験結果を図3-3のとおり整理した。図中に示す αA 比は、通気層出入口を含む外装全体の隙間量に対する下地の隙間量の比である。図のように、圧力差 ΔP は、 αA 比が増加するに伴って、急激に減少する傾向を示す。 αA 比が大きくなる壁体とは、「建物の気密度が高い壁」もしくは、「建物の気密度が低くても、それ以上に外装の隙間が大きい壁」のことを示す。すなわち、図3-3の結果は、気密度の高い住宅や、外装面における隙間量が多い住宅では、外装表裏面の圧力差に起因する毛管現象などが発生しにくくなるため、漏水が発生しにくくなることを示唆している。

種々の建物の隙間が外装表面に作用する圧力を大きく支配することが把握できたことから、表3-1の実験データについて多変量解析（重回帰分析）を実施した。その結果を示すと、表3-2になる。表のように、目的変数 ΔP の上昇に対して、通気層上下の αA (aとb) の増加は、 $-0.25 \sim -0.32$ 程度の負の相関となっている。また、外装表面の αA の増加は -0.57 程度の負の相関、下地の有効開口面積の増加は、 0.76 の正の相関となっている。重相関係数は、 0.809 となっており、表中の説明変数で、 ΔP が増減する影響度合を推察することができる。これらの偏相関係数は、シーリングに頼らない外装を開発設計する際の開発重要度の順位を示していると考えられる。

表2-2 下地と外装の隙間量の変化による外装への外風圧の作用状況

試験体 No.	通気層下の αA	通気層上の αA	外装表面の αA	$\alpha A(a+b+S)$	下地の有効 開口面積	実験結果 $\Delta P=P_w-P_c(\text{Pa})$
	a(cm ²)	b(cm ²)	S(cm ²)	Total(cm ²)	下地 $\alpha A(\text{cm}^2)$	
1	0.00	150.59	57.72	208.31	10.32	14.70
2	0.00	150.59	57.72	208.31	30.96	104.20
3	0.00	150.59	57.72	208.31	10.32	18.52
4	0.00	150.59	57.72	208.31	30.96	103.52
5	0.00	150.59	57.72	208.31	10.32	2.63
6	0.00	150.59	57.72	208.31	30.96	90.47
7	150.59	150.59	57.72	358.89	10.32	0.51
8	150.59	150.59	57.72	358.89	30.96	40.01
9	70.18	70.18	57.72	198.08	10.32	4.69
10	70.18	70.18	57.72	198.08	30.96	67.77
11	0.00	0.00	57.72	57.72	10.32	56.12
12	0.00	0.00	57.72	57.72	30.96	195.06
13	150.59	150.59	57.72	358.89	10.32	3.41
14	150.59	150.59	57.72	358.89	30.96	41.98
15	0.00	0.00	57.72	57.72	10.32	58.66
16	0.00	0.00	57.72	57.72	30.96	206.74
17	11.81	9.89	57.72	79.42	10.32	31.84
18	11.81	9.89	57.72	79.42	3.44	2.86
19	11.81	9.89	57.72	79.42	6.02	12.35
20	11.81	9.89	57.72	79.42	10.32	28.30
21	75.46	22.04	57.72	155.22	10.32	1.15
22	75.46	22.04	57.72	155.22	25.80	25.63
23	75.46	22.04	57.72	155.22	30.96	37.30
24	17.15	4.01	57.72	78.88	3.44	2.87
25	17.15	4.01	57.72	78.88	6.02	8.51
26	17.15	4.01	57.72	78.88	10.32	25.19
27	17.15	4.01	57.72	78.88	17.20	58.21
28	17.15	4.01	0.00	21.16	3.44	18.53
29	17.15	4.01	0.00	21.16	6.02	57.63
30	17.15	4.01	0.00	21.16	10.32	130.09
31	17.15	4.01	0.00	21.16	25.80	369.53
32	17.15	4.01	15.48	36.64	3.44	15.71
33	17.15	4.01	15.48	36.64	6.02	50.20
34	17.15	4.01	15.48	36.64	10.32	115.62
35	17.15	4.01	15.48	36.64	25.80	330.59
36	2.11	4.01	3.12	9.24	3.44	8.39
37	2.11	4.01	3.12	9.24	10.32	62.48
38	17.15	4.01	57.72	78.88	10.32	30.00
39	17.15	4.01	57.72	78.88	17.20	46.75

(3) 数値計算による分析の可能性検討

a) 目的

外装裏面での圧力・風速は、外装目地からの漏水現象、外装表面への風荷重の作用、通気層内の換気回数などに大きな影響を及ぼす。このため、様々な屋外実測や実験が実施されている。しかし、屋外実測は、多様な気象環境をモデル化するのが難しいことや、熱式風速計が日射の影響を受けて精度よく測定できない等の課題がある。実験は、動風圧試験装置を使うのが一般的であるが、風圧係数(Cp値)を設定するのが難しいことや、試験体のサイズに限界がある。既往の実測や実験は、外装裏面に作用する圧力現象を明らかにする有用な知見を与えている。しかし、これらのみでは、外装の設計開発に直接反映できる予測検討が難しい。

以上のことから、本検討では、壁体の漏水や換気、風荷重に影響を及ぼす外装裏面の圧力状態について数値解析を試みた。その結果を先の39体の実験結果及び分析結果と比較し、外装裏面における圧力状態が数値解析によって予測可能かについて検討を行った。

b) 数値解析の概要

本研究に関連する既往の数値解析ソフトウェアには、VentSimがある²⁾。同ソフトは、住宅の空間や開口部をモデル化し、換気回路網を構築して換気量や通風量を予測し、計画換気の妥当性などを評価できる。住宅の換気や通風は圧力現象であり、本研究と解析の原理が近い。本数値解析では、同ソフトの考え方を応用し、図2-5を想定した壁体を想定した換気回路網を構築して、圧力の変動を数値解析を行った。圧力計算のモデルは、図2-4の通りである。このモデルを市販の表計算ソフトであるMS-Excelのマクロで反復計算させ、

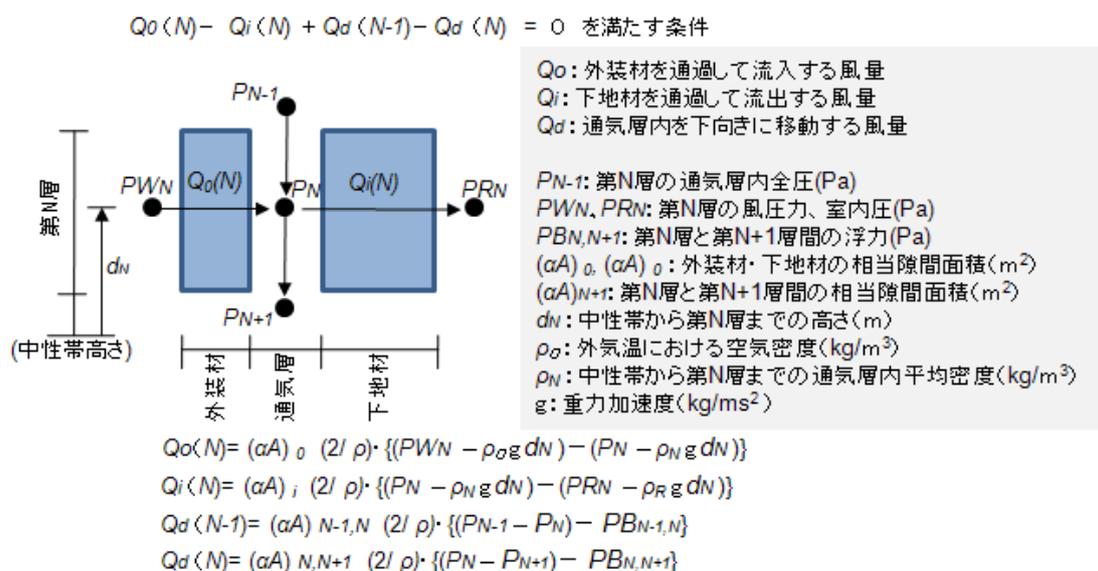


図2-4 動的圧力の計算モデル

結果を出力させるようにした。上記手法で圧力状態を予測した結果は、通気層を有する壁体の動風圧試験²⁾と対比して、その相関性について検討した。

なお、同エクセルファイルの詳細使用説明と計算ロジックの詳細は、取扱説明書として、参考資料1として別添したので、参照されたい。

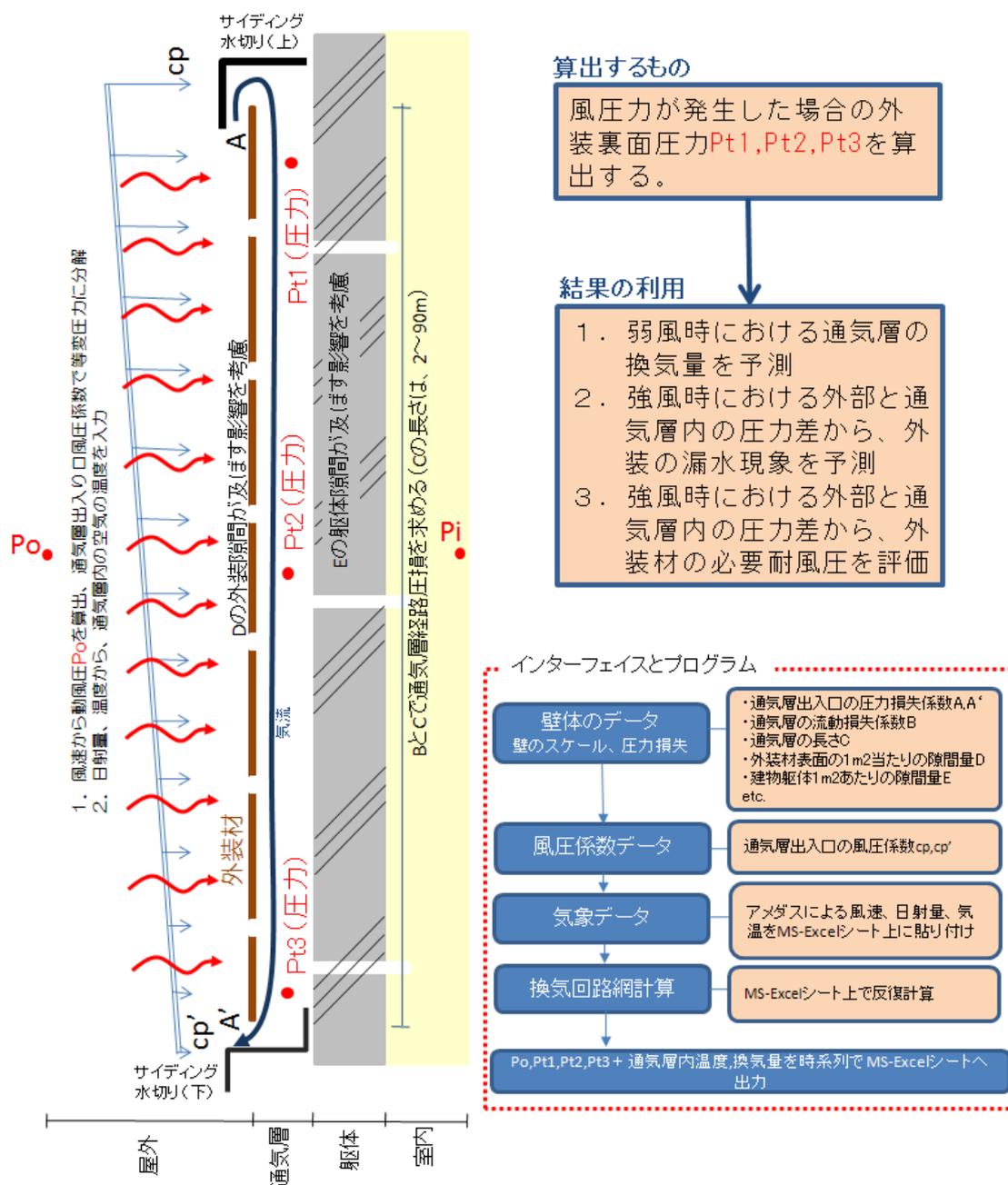


図2-5 プログラムの計算フローと壁体イメージ

C) 数値解析の結果

既往の動風圧試験の壁体条件を想定し、試験と同様JIS A 1517「建具の水密性試験方法」に準じた外風圧を入力して、外装裏面に作用する圧力状態を数値解析した。その結果の一例を図2-6に示す。図のように、実験時における外風圧は2sec毎に脈動しながら推移し、外装裏面の圧力も、それに追従するように脈動する。この傾向は、数値解析においても同様となる。出力された圧力値にも大きな違いがみられない。次に、既往研究で試験が行われている他の条件について数値解析を行った結果をみると、図2-7となる。表のように、壁体に存在する下地（躯体の気密度）、通気層出入口などの αA （有効開口面積）を変化させ、数値解析をしたところ、結果は一部分を除いて、実験で得た結果の10%以内の誤差で圧力が出力されている。実験結果と解析の結果を比較すると図4になる。図の通り、実験値と数値解析は、ほぼ1:1の良好な相関関係がみられる。

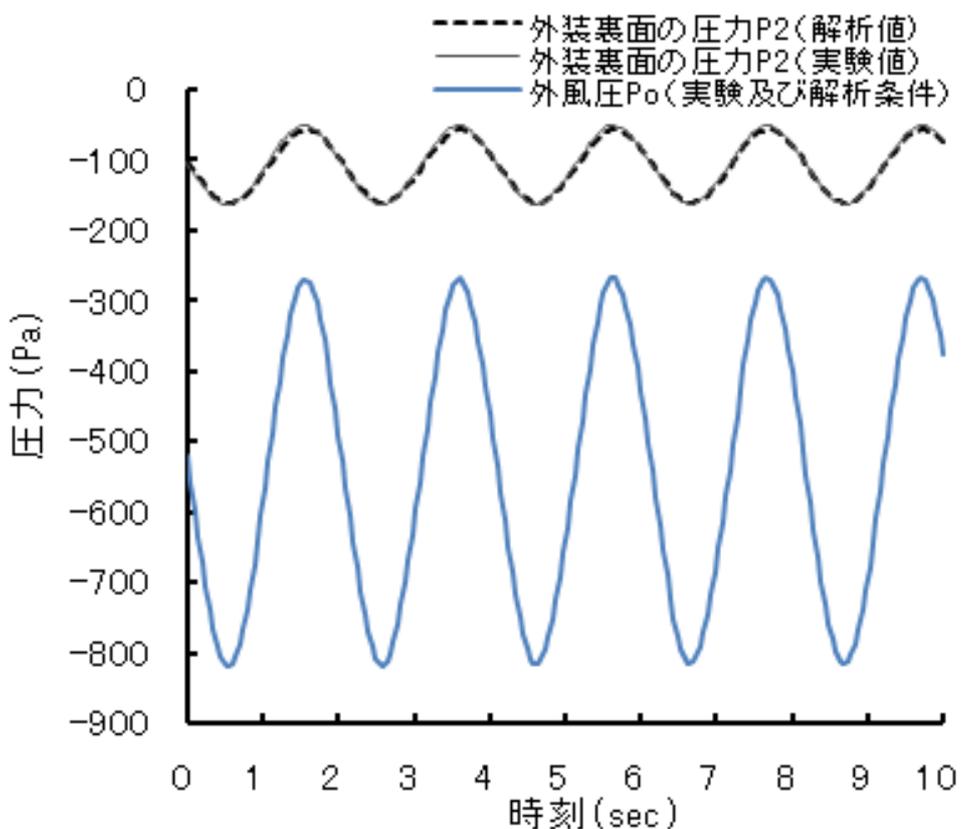


図2-6 JISに定められた2sec周期外風圧を作用させたときの実測及び解析値

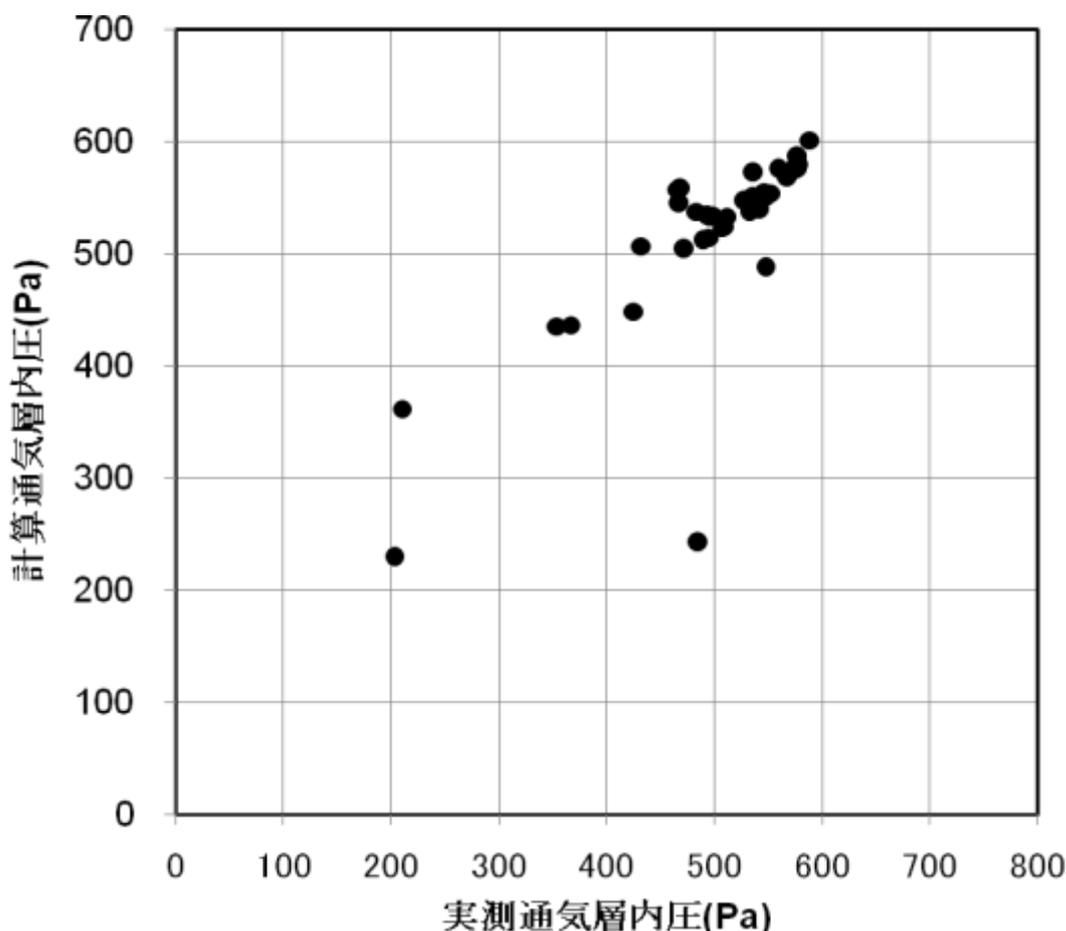


図2-7 シミュレーションと39体の実測結果との対比

以上の結果から、躯体の気密度や通気層の出入口における αA 、外装の隙間状態が把握できる壁体では、換気回路網計算を応用した数値解析を用れば、外装裏面に作用する圧力状態を概ね予測できると考える。このことは漏水や壁体の換気、外装材への風荷重負担などの検討が、実大試験を行わなくても可能となる。

d) 動的圧力の基礎実験及びシミュレーションプログラムの作成に関する考察

窯業系外装工法の高耐久化・メンテナンス周期を長期化する技術の提案を目的に、シーリングレス外装に着目して、漏水に影響を及ぼす外装面・通気層内の圧力に関する実験を試みた。その結果、毛管現象などの外装表裏面の圧力差に起因する漏水に対して、通気層上下の αA 、外装表面の αA 下地の有効開口面積（建物躯体の気密度）の増減が関与していることを明らかにした。今後は、この圧力差に対応する実際の漏水現象の定量化を試みる必要があると考える。さらに、本章では、換気回路網計算を応用して、外装裏面の圧力状態についての数値解析を試み、解析値は、実験室における風圧実験との相関性が高いことから、オープンジョイント外壁の開発設計用資料作成に一助できると考える。なお、今後は、追試や再検証等の必要があると考える。

(4) 外装ガラスに関する工法的検討

a) 2008～2009年に作成したガラスファサードモックアップ

本外装に用いるガラスは、建築物に用いる他の素材に比べ、耐久年限が高く、長期にわたってのメンテナンスが不要であることなどの特徴を有する。課題としては、ガラス自体の重量が重いこと、脆性的な材料で、破損すると危険を伴うなどが挙げられる。実際の採用にあたっては、強度設計や寸法の選定に慎重を期す必要がある。この点を勘案し、工法モックアップの試作を行った。

b) モックアップ作成のコンセプトと施工状況

旭川市（旭川市緑が丘東1条3丁目1-20）にダブルスキングラスファサードモックアップを作成した。概要を図2-8に示す（各施工工程の様子は表2-3～4を参照）。本モックアップ試験の各試験体におけるディテール図面一式は、参考資料2として、別添したので、参照されたい。

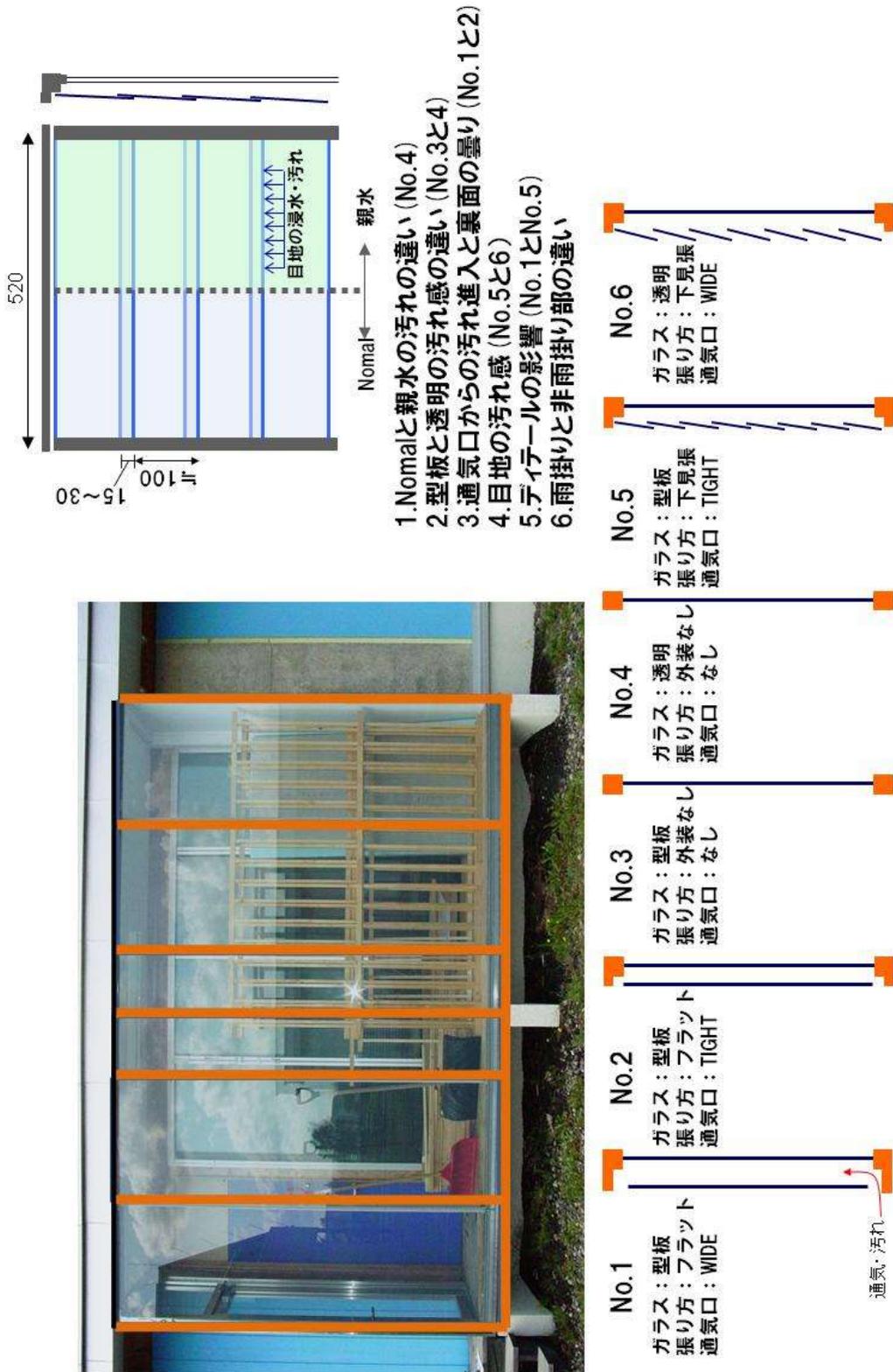


図2-8 ガラスファサードモックアップの概要

表 2-3 ダブルスキンモックアップ試験体の施工状況 2008~9 (木工事)

No.	写真	備考
1		<p>★2008/12/12 施工前(現地確認 及び採寸)</p>
2		<p>★2008/12/15 サッシ枠下地 木材切りこみ</p>
3		<p>2008/12/24 土台水切り、板金役 物の取り付け 。</p>

表 2-4 ダブルスキンモックアップ試験体の施工状況 2008~9 (施工・前後)

No.	施工前	施工後
写真 1 ・ 正 面		
写真 2 ・ 斜 視		
施 工 工 程 ・ 検 収		<p>■施工場所 北海道旭川市緑が丘東1条3丁目 1-20 北海道立北方建築総合研究所 敷地内</p> <p>■検収日：2008年12月24日</p> <p>■施工工程</p> <p>2008/12/12</p> <ul style="list-style-type: none"> ・現地試験体取り付け場所確認と採寸 ・図面と照合 <p>2008/12/12~19</p> <ul style="list-style-type: none"> ・試験サッシと及びガラスの製作 <p>2008/12/22</p> <ul style="list-style-type: none"> ・現地へ取り付け、竣工



写真2-4 2008～2009年に作成したモックアップ表面写真



写真2-5 2008～2009年に作成したモックアップ斜視写真



写真2-6 下見板張りのガラスファサード



写真2-7 下見板張り側面の収まり

c) 施工の結果と問題点

参考資料2に基づき、アルミニウムサッシと同様の素材を使用して、ダブルスキン外装モックアップを作成した。施工性は、前述の工程からみても概ね順調で、外装工法として大きな問題がないことが確認できた。一方、工法上の問題点として、写真2-8のように下見板ガラスの支持金具の強度不足が認められた。設計条件を精査して、材質変更や補強方法を再検討する等の措置を講じる必要がある。



写真2-8 ガラス支持金具の強度不足による垂れ下がり

d) 問題点の改善を施したモックアップの作成

先のcに基づくモックアップの支持金具強度不足の結果を踏まえて、2009年に新たにモックアップ試験体を作成した。作成のコンセプトは、a) で示したコンセプトの通りで、金具は、アルミニウム合金性のまま、写真2-10のように、リブを付けて補強した支持金具を作成した。各施工工程の様子は表2-4~5の通りである。金具の材質としてアルミニウム合金製を選定した理由は、低価格であることに加え、他金属に変更した場合に電食による劣化の可能性のあることを懸念したためである。



写真2-9 新たなモックアップ試験体を設置した建物



写真2-10 補強したガラス支持金具

表 2-5 ダブルスキンモックアップ試験体の施工状況 2008~9 (施工全体)

No.	施工前	施工後
写真 1 ・ 正面		
写真 2 ・ 斜視		
施工 工程 ・ 検 収	 	<p>■ 施工場所 北海道旭川市緑が丘東1条3丁目1-20 北海道立北方建築総合研究所 敷地内</p> <p>■ 検収日：2009年2月27日</p> <p>■ 施工工程</p> <p>2010/01/20 ・ 現地試験体取付け場所確認と採寸(図面と照合)</p> <p>2010/01/26~27 ・ 試験サッシと及びガラスの納入と移設作業</p> <p>2008/01/27 ・ 竣工</p>

表 2-6 ダブルスキンモックアップ試験体の施工状況 2008~9 (施工詳細)

	試験体の外観構成	
<p>詳細 写真 ・ 説明</p>	 <p>左より①、②、③、④、⑤、⑥</p>	<p>① 型板ガラス (一枚/上下通気) ② 型板ガラス (一枚/上下通気) ③ 型板ガラス (一枚/上下密閉) ④ フロート板ガラス (一枚/上下密閉) ⑤ 型板ガラスの下見板張 ⑥ フロート板ガラスの下見板張り</p>
	①,②の最下部納まり	③,④の最下部納まり
<p>細部 写真</p>		
	③ の最下部納まり	④ の最下部納まり
<p>細部 写真</p>		



写真2-11 2010年に完成したモックアップ試験体（奥側が下見板張り状）

e) 施工の結果と改善の効果

2009年のモックアップ作成試験では、写真2-12左側のように下見板ガラスの支持具の強度不足による垂下現象が認められた。重ね合わせるガラスの隙間や重なり寸法は、デザイン性だけではなく、等圧性理論を採用するガラス外装の防水と耐風圧性能の確保に大きな影響を及ぼす。写真2-10の支持具に交換することによって、写真2-12の通り、支持具の垂下現象が改善し、一定の隙間と重なり寸法を確保できるようになった。



改善前

改善後（中間部）

改善後（際下端部）

写真2-12 ガラス支持金具の改善写真

f) 外装表面の隙間が作用圧力に及ぼす影響に関するシミュレーション

ガラス外装は、薄ければその重量が軽減する一方、風圧力に対する耐風圧性能は著しく減少する。先に示した2年にわたるモックアップ試験の結果から、等圧性理論を使用したオープンジョイント外装の耐風圧設計の要点を(2)で作成したシミュレーションソフトウェアを使用して検討した。耐風圧設計の前提は以下の通りである。

・設計条件

- 建設地：東京、沖縄
- 用途：一般建築物（主にオフィスビル）
- 建物高：31m以下（10階建以下を想定）
- 既存外装をカバーする形で、当該ガラスファサードを施工する。

・設計風速

- 東京：基準風速を34m/sに設定、地表面粗度区分をⅢに想定
- 沖縄：基準風速を46m/sに設定、地表面粗度区分をⅢに想定

・風力係数(Cp値)

丸田らによる既往の風洞実験による研究成果●図2-8~9を参考に、図2-10のように建物下

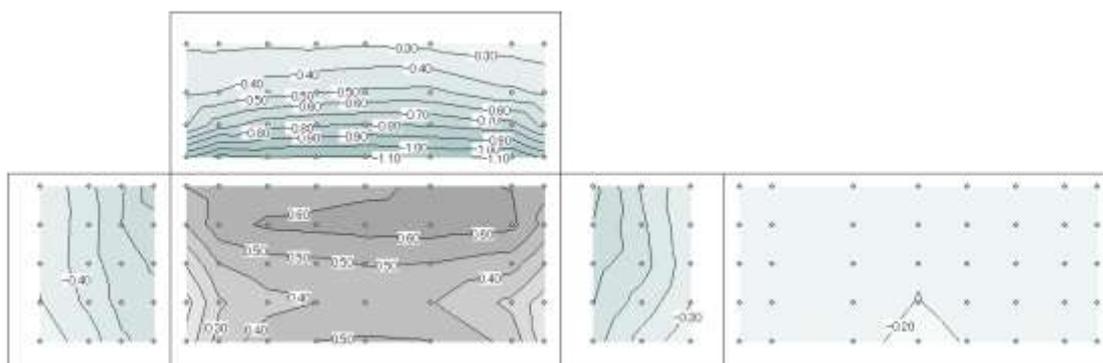


図2-8 低層5階建程度の一般的矩形建物の風力係数分布（正面風）

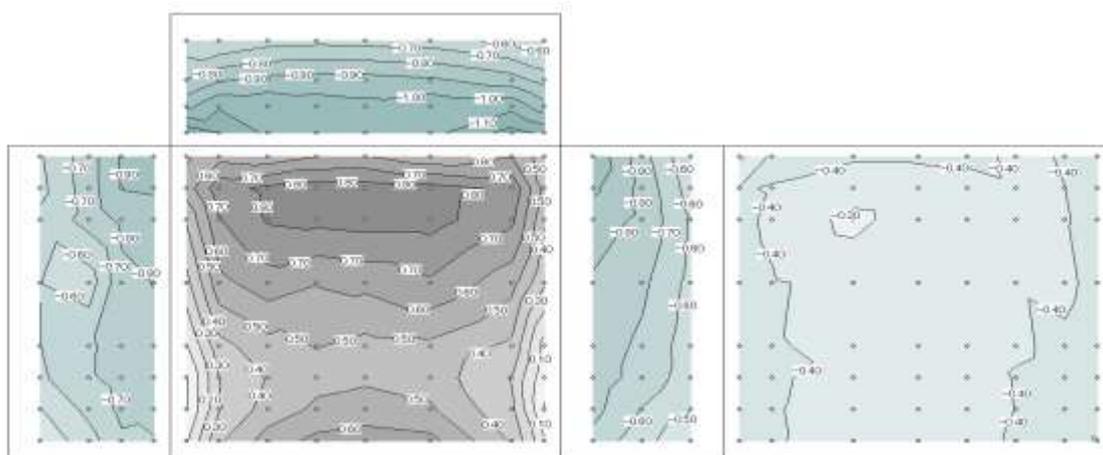


図2-9 中層10階程度の一般的矩形建物の風力係数分布（正面風）

部でCp値=0.5、建物上方でCp値=0.8、中央部のCp値=0.5に想定した。

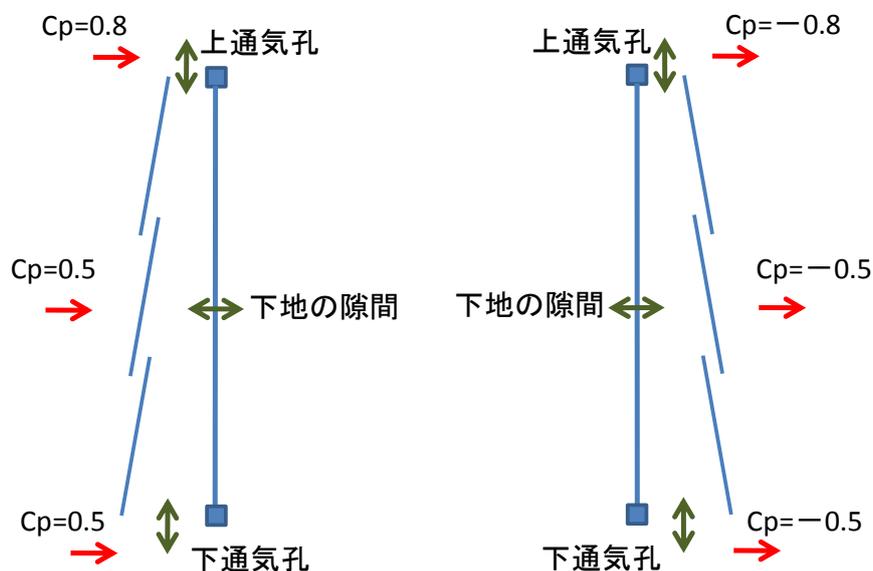


図2-10 シミュレーションで想定した風力係数Cp値

・ 建物の気密度の想定値

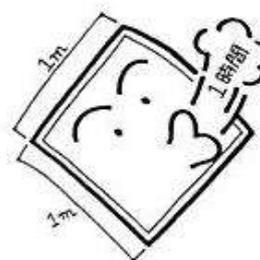
ガラスファサードは、既存壁面の上にカバーされるように施工される。建物の躯体気密度は、(2)の耐風圧実験等でも示したように、ガラス面に作用する風圧力に影響を及ぼす。実験結果によれば、建物の躯体気密度は低い方が、強い風圧力が外装面に作用する。このことから、次の想定で躯体気密度を設定した。まず、対象となる建物は、改修対象となる低中層建築物であることから、高い気密性能は期待できない。また、サッシ等の開口部を有していることから、そのサッシの気密性能に建物躯体の気密度は支配されると考えた。このような観点から、JIS A 4706に規定される最も気密度が低いサッシが前面に取り付けられている想定で、表2-7に示すA-1等級サッシが外壁面のすべてに取り付けられていると考えて、建物の気密度を想定している。A-1等級サッシが壁万全部に取り付けられている

表2-7 想定した外装の隙間量 (サッシA-1等級を想定)

サッシの等級		Q (9.8Pa時)	αA
		$m^3/h \cdot m^2$	cm^2/m^2
A-1サッシ	120等級線	120.00	82.42
A-2サッシ	30等級線	30.00	20.61
A-3サッシ	8等級線	8.00	5.49
A-4サッシ	2等級線	2.00	1.37

るとした場合の隙間量は、壁 1 m²あたり、82.42cm²となる。一般に市販されている高断熱サッシは、A-4等級であるから、58倍の隙間を有する想定をしていることになる。なお、JISに定められているサッシの気密等級の概念と位置づけは、図2-11の通りである。

- サッシのすきまから漏れる空気の色を示す値で、サッシ1m²における1時間当たりの通気量を、JISで定義する等級で表します。
A-1、A-2、A-3、A-4の順に気密性が高くなります。
- 窓(サッシ)から出入りする空気の量が少ないほうが良いということになります。夏や冬など外気と屋内の温度差が大きい場合、気密性が良くないと内外の空気の出入りによって冷房や暖房の効率が悪くなることになります。
- 建築物の気密構造化による酸欠、結露の被害が発生しており、これに対処するために換気装置(換気小窓、換気扇などを併用してください)。
- 基本的には、一般サッシはA-3等級、断熱サッシはA-4等級の性能が必要とされています。
例えば、風速4m/sの風が正面から当たっている時に、サッシ1m²あたりA-3等級では1時間に3m³以下、A-4等級では1時間に2m³以下の空気が入り出す性能ということです。



■ 必要等級の目安[JISグレード(JIS A4706 A4702)]

等級	A-1	A-2	A-3	A-4
用途	通気性を必要とする特殊部位			
		一般建築用		
			防音・断熱・防塵建築用	

※ 風速4m/sとは、木の葉や小枝などが動き続けるほどの風の強さです。

図2-11 サッシの気密等級の概念と位置づけ

・本開発で作成した動的圧力シミュレーションプログラムを用いた検証

前述2. で作成した動的圧力シミュレーションプログラムを使用して、図2-12に示すモデルで下見板状張りとしたガラス外装に作用する風圧力の負担力、すなわち、外風圧の軽減率を算出した。プログラムによって算出した外風圧の予測結果は、表2-8、2-9の通りである。表2-8は外装の目地設計の参考にするため、雨仕舞用として計算したもの、表2-9は、ガラスの必要強度を算出するための耐風圧設計用として計算したものである。

これらの表で示すように、外装の隙間量が下地サッシの隙間量の2倍（外装／下地隙間＝2）（グレー網掛け）の場合における、下地サッシへの風圧力の作用割合は80～86%となり、風圧力の概ね2割のみが外装表面に作用する。同様に、外装／下地隙間＝5の場合には、下地サッシへの風圧量の作用割合は96～98%となり、外装表面への風圧力の作用割合は4%となる。この傾向は、負圧状況で検討した表2-9についても同様のことが言える。

以上の結果をみると、ガラスを下見板張上に張る外装で、その表面隙間が、建物下地の隙間量の2倍を有する場合には、外装表面に外風圧の2割程度しか、荷重が作用しないことになる。耐風圧設計や雨仕舞いディテールを合理化・簡素化できることを示している。

本開発での下地の気密度は、サッシA-1等級を想定していることは、先に述べた。その気密度から、ガラス外装表面に必要な隙間量を算出すると、ガラス外外装表面1 m²あたり164.84cm²の有効開口面積が必要になる。

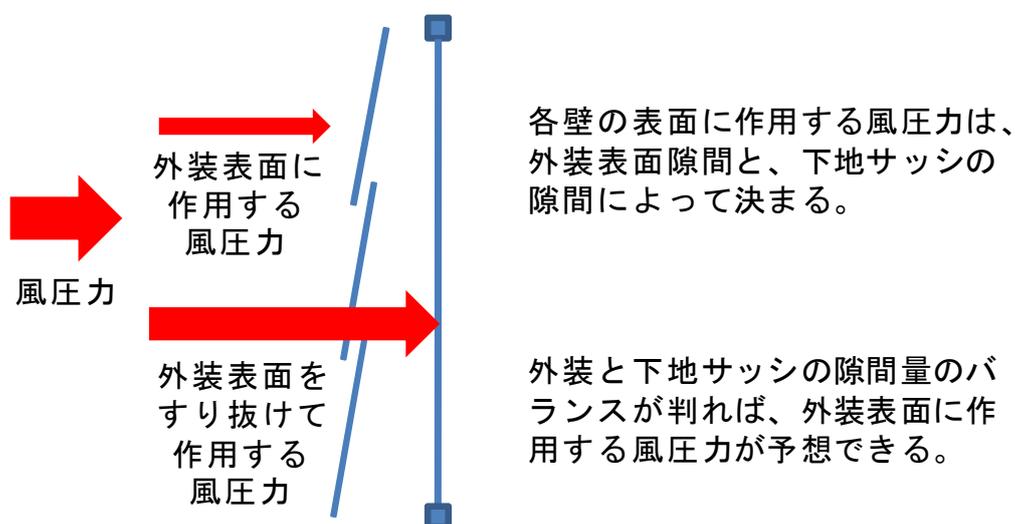


図2-12 ガラス外装に作用する風圧力の概念モデル

表2-8 正圧（雨仕舞用）作用時における外装下地面への風圧の作用割合

結果項目	雨仕舞用											
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	25	600
下地の隙間 $\alpha A(\text{cm}^2/\text{m}^2)$	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	25	600
上通気孔の $\alpha A(\text{cm}^2/\text{m})$	0.1	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
上通気孔の $\alpha A(\text{cm}^2/\text{m})$	0.1	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
圧力作用	正圧	正圧	正圧	正圧	正圧	正圧	正圧	正圧	正圧	正圧	正圧	正圧
CP上	1	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7
CP外装	1	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
CP下	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
結果項目	外装/下地隙間	DS内の圧力	外装/下地隙間	DS内の圧力	外装/下地隙間	DS内の圧力	外装/下地隙間	DS内の圧力	外装/下地隙間	DS内の圧力	外装/下地隙間	DS内の圧力
	0.01	0.0%	0.01	49.0%	0.01	49.0%	0.01	67.9%	0.04	78.2%	0.04	78.2%
	0.03	0.1%	0.03	49.0%	0.03	49.0%	0.03	68.8%	0.12	78.6%	0.12	78.6%
	0.05	0.3%	0.05	50.0%	0.05	50.0%	0.05	69.7%	0.2	79.0%	0.2	79.0%
	0.07	0.5%	0.07	51.0%	0.07	51.0%	0.07	70.5%	0.28	79.5%	0.28	79.5%
	0.1	1.0%	0.1	52.0%	0.1	52.0%	0.1	71.8%	0.4	80.1%	0.4	80.1%
	0.15	2.2%	0.15	54.0%	0.15	54.0%	0.15	73.7%	0.6	81.1%	0.6	81.1%
	0.3	8.3%	0.3	59.0%	0.3	59.0%	0.3	78.7%	1.2	84.1%	1.2	84.1%
	0.6	26.6%	0.6	66.0%	0.6	66.0%	0.6	85.7%	2.4	88.8%	2.4	88.8%
	1	50.1%	1	72.0%	1	72.0%	1	91.5%	4	92.6%	4	92.6%
	2	80.0%	2	83.0%	2	83.0%	2	97.8%	8	96.9%	8	96.9%
	3	80.0%	3	80.0%	3	80.0%	3	99.5%	12	98.5%	12	98.5%
	5	86.2%	5	86.0%	5	86.0%	5	100.0%	20	99.5%	20	99.5%
	10	89.0%	10	89.0%	10	89.0%	10	100.0%	40	99.9%	40	99.9%
	15	99.6%	15	100.0%	15	100.0%	15	100.0%	60	100.0%	60	100.0%
	30	99.9%	30	100.0%	30	100.0%	30	100.0%	120	100.0%	120	100.0%

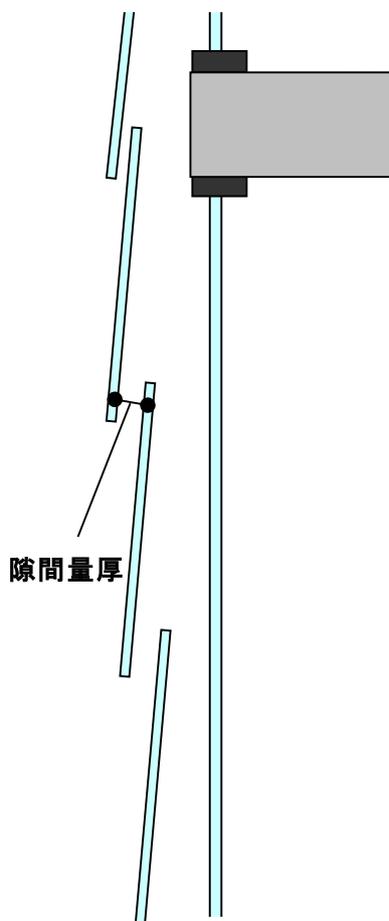
表2-8 負圧（耐風圧用）作用時における外装下地面への風圧の作用割合

結果項目	荷重用							
	100	100	100	100	100	100	100	25
下地の隙間 $\alpha A(\text{cm}^2/\text{m}^2)$	100	100	100	100	100	100	100	25
上通気孔の $\alpha A(\text{cm}^2/\text{m})$	0.1	600	600	600	600	600	600	600
上通気孔の $\alpha A(\text{cm}^2/\text{m})$	0.1	600	600	600	600	600	600	600
圧力作用	負圧	負圧	負圧	負圧	負圧	負圧	負圧	負圧
Cp上	1	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
Cp外装	1	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7
Cp下	1	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
結果項目	外装/下地隙間	DS内の圧力	外装/下地隙間	DS内の圧力	外装/下地隙間	DS内の圧力	外装/下地隙間	DS内の圧力
	0.01	0.0%	0.01	48.6%	0.01	67.9%	0.04	78.2%
	0.03	0.0%	0.03	49.4%	0.03	88.8%	0.12	78.6%
	0.05	0.1%	0.05	50.2%	0.05	89.7%	0.2	79.0%
	0.07	0.3%	0.07	51.0%	0.07	70.5%	0.28	79.5%
	0.1	0.6%	0.1	52.2%	0.1	71.8%	0.4	80.1%
	0.15	1.5%	0.15	54.1%	0.15	73.7%	0.6	81.1%
	0.3	6.4%	0.3	59.0%	0.3	78.7%	1.2	84.1%
	0.6	22.8%	0.6	66.2%	0.6	85.7%	2.4	88.8%
	1	46.1%	1	72.4%	1	91.5%	4	92.6%
	2	78.2%	2	83.1%	2	97.8%	8	96.9%
	3	89.2%	3	90.1%	3	99.5%	12	98.5%
	5	95.9%	5	95.9%	5	100.0%	20	99.5%
	10	99.0%	10	98.9%	10	100.0%	40	99.9%
	15	99.5%	15	99.5%	15	100.0%	60	100.0%
	30	99.8%	30	99.8%	30	100.0%	120	100.0%

・下見板張りガラスの必要隙間量について

先に示したシミュレーションによれば、ガラスを下見板張上に張る外装で、その表面隙間が、建物下地の隙間量の2倍（外装／下地隙間＝2）を有する場合には、外装表面に外風圧の2割程度しか、荷重が作用しないことになる。本開発での下地の気密度は、サッシA-1等級を想定していおり、外装表面に必要な隙間量を算出すると、ガラス外外装1m²あたり164.84cm²の有効開口面積が必要になる。この条件を満たす下見板の隙間量厚を試算すると、表2-10になる。表のように、1枚の下見板の高さが300mm前後であると想定すると、11mm以上の隙間が必要となる。上下ガラスの重なりしろは、その建設地における設計風圧力に依存すると考えられるが、外装に作用する風圧が外風圧力の2割であると考えれば、表2-12で示すように、設計基準風速が34m/sの東京では、14.2mm以上、基準風速が46m/sの沖縄では、26mm以上が必要となる。実設計においては、漏水に対する安全率等を考慮する必要もあるが、ガラスを下見板状にして外装面を構成する際のディテールの大枠は以上の結果から把握することができると考えられる。

表2-11 下見板状ガラスの必要隙間量



隙間量厚(mm)	1m長の面積(m ²)	有効開口面積(α=0.6)	1m ² に3LINE
1	10	6	18
3	30	18	54
5	50	30	90
7	70	42	126
9	90	54	162
11	110	66	198
13	130	78	234
15	150	90	270
17	170	102	306
19	190	114	342
21	210	126	378
23	230	138	414
25	250	150	450
27	270	162	486
29	290	174	522
31	310	186	558
33	330	198	594
35	350	210	630
37	370	222	666
39	390	234	702
41	410	246	738
43	430	258	774
45	450	270	810
47	470	282	846
49	490	294	882
51	510	306	918
53	530	318	954
55	550	330	990
57	570	342	1026
59	590	354	1062

表2-12 上下重なりしろの必要高さ (差圧×0.2)

No.	気圧 (hpa)	温度 (度)	空気密度	設定流速	差圧 (pa)	差圧 (mmH2O)	差圧 × 0.2 (mm)
1	1013	20	1.2046761	10	60.2	6.1	1.2
2	1013	20	1.2046761	12	86.7	8.8	1.8
3	1013	20	1.2046761	14	118.1	12.0	2.4
4	1013	20	1.2046761	16	154.2	15.7	3.1
5	1013	20	1.2046761	18	195.2	19.9	4.0
6	1013	20	1.2046761	20	240.9	24.6	4.9
7	1013	20	1.2046761	22	291.5	29.7	5.9
8	1013	20	1.2046761	24	346.9	35.4	7.1
9	1013	20	1.2046761	26	407.2	41.5	8.3
10	1013	20	1.2046761	28	472.2	48.2	9.6
11	1013	20	1.2046761	30	542.1	55.3	11.1
12	1013	20	1.2046761	32	616.8	62.9	12.6
13	1013	20	1.2046761	34	696.3	71.0	14.2
14	1013	20	1.2046761	36	780.6	79.6	15.9
15	1013	20	1.2046761	38	869.8	88.7	17.7
16	1013	20	1.2046761	40	963.7	98.3	19.7
17	1013	20	1.2046761	42	1062.5	108.3	21.7
18	1013	20	1.2046761	44	1166.1	118.9	23.8
19	1013	20	1.2046761	46	1274.5	130.0	26.0
20	1013	20	1.2046761	48	1387.8	141.5	28.3
21	1013	20	1.2046761	50	1505.8	153.6	30.7

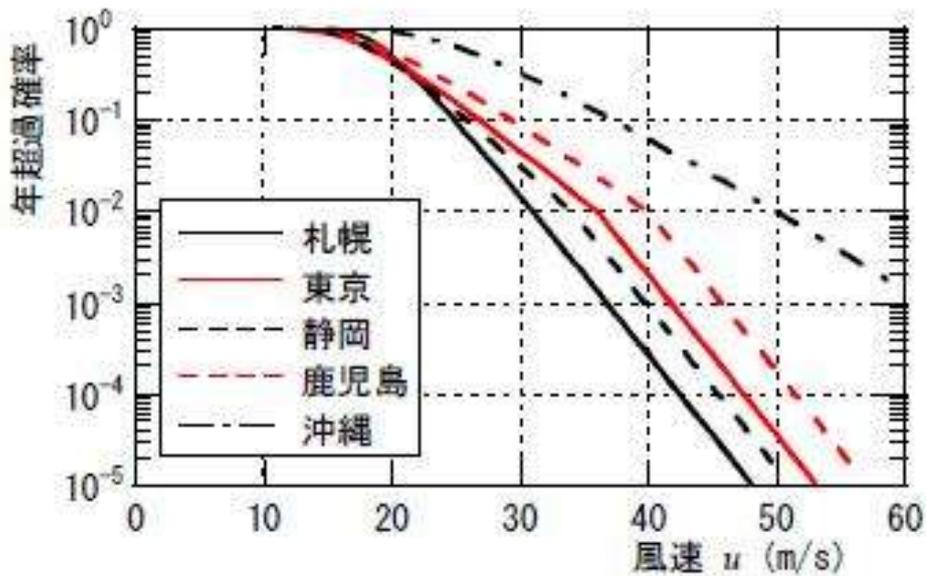


図2-13 全国主要都市の風速と年超過確率

・下見板ガラスの必要ガラス厚に関するFEM解析結果

ガラス外装は、使用されるガラスの種類やその厚さによって強度が異なるとともに、コストも大きく変化する。使用ガラスの耐風圧強度設計上の必要厚さについてFEM解析を行った結果を示すと、表2-13（東京の場合）、表2-14（沖縄の場合）となる。なお、ガラス

表2-13 ガラスの厚さ及び仕様に関するFEM解析結果（東京）

【条件】

- ・支持条件: 四隅点支持(支持部W25×H50mmの挟み込み)
- ・設計風圧: 2,450N/m²
- ※地表面粗度区分Ⅲ 再現期間100年 閉鎖型建物 基準風速34m/s(東京23区)



W1,600×H300mm の場合の使用可能範囲

ガラス品種	厚さ	風圧力負担率										
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	
単板ガラス	FL6 / PT6	6	◎	○	○	○	○	○	×	×	×	×
	FL8 / PT8	8	◎	◎	○	○	○	○	○	○	○	○
	FL10 / PT10	10	◎	◎	◎	◎	○	○	○	○	○	○
	FL12 / PT12	12	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	○	○	○
	FL15 / PT15	15	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○
	FL19 / PT19	19	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
合わせガラス	FL3+FL3 PT3+PT3	4.9	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×
	FL4+FL4 PT4+PT4	6.7	◎	○	○	○	○	○	○	○	×	×
	FL5+FL5 PT5+PT5	8.4	◎	◎	○	○	○	○	○	○	○	○
	FL6+FL6 PT6+PT6	10.1	◎	◎	◎	◎	○	○	○	○	○	○
	FL8+FL8 PT8+PT8	13.6	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	○
	FL10+FL10 PT10+PT10	17.1	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎

W800×H300mm の場合の使用可能範囲

ガラス品種	厚さ	風圧力負担率										
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	
単板	FL6 / PT6	6	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	○	○	○
	FL8 / PT8	8	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	FL10 / PT10	10	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
合わせ	FL3+FL3 PT3+PT3	4.9	◎	◎	◎	○	○	○	○	○	○	○
	FL4+FL4 PT4+PT4	6.7	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	○
	FL5+FL5 PT5+PT5	8.4	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎

※ ◎(青セル): フロート板ガラス可能範囲、○(黄色セル): 強化ガラスでの可能範囲

※ 合わせガラスの板厚は、強度的に等しくなる単板の厚さ(等価板厚 T_{eq})を用いた。 $T_{eq}=0.866 \times (\text{ガラス総厚}) - 0.268$

※ ガラスの短期許容応力: フロートガラス 17.7N/mm²、強化ガラス 79.4N/mm²

表2-13 ガラスの厚さ及び仕様に関するFEM解析結果（沖縄）

【条件】

- ・ 支持条件：四隅点支持（支持部W25×H50mmの挟み込み）
- ・ 設計風圧：4,484N/m²
- ※地表面粗度区分Ⅲ 再現期間100年 閉鎖型建物 基準風速46m/s（沖縄）



W1,600×H300mm の場合の使用可能範囲

ガラス品種	厚さ	風圧力負担率										
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	
単板ガラス	FL6 / PT6	6	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×
	FL8 / PT8	8	◎	○	○	○	○	○	×	×	×	×
	FL10 / PT10	10	◎	◎	○	○	○	○	○	○	○	○
	FL12 / PT12	12	◎	◎	◎	○	○	○	○	○	○	○
	FL15 / PT15	15	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	○	○	○
	FL19 / PT19	19	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	○
合わせガラス	FL3+FL3 PT3+PT3	4.9	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×
	FL4+FL4 PT4+PT4	6.7	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×
	FL5+FL5 PT5+PT5	8.4	◎	○	○	○	○	○	○	×	×	×
	FL6+FL6 PT6+PT6	10.1	◎	◎	○	○	○	○	○	○	○	○
	FL8+FL8 PT8+PT8	13.6	◎	◎	◎	◎	○	○	○	○	○	○
	FL10+FL10 PT10+PT10	17.1	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	○	○
	FL12+FL12 PT12+PT12	20.5	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○
	FL15+FL15 PT15+PT15	25.7	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎

W800×H300mm の場合の使用可能範囲

ガラス品種	厚さ	風圧力負担率										
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	
単板	FL6 / PT6	6	◎	◎	◎	○	○	○	○	○	○	○
	FL8 / PT8	8	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	○	○	○
	FL10 / PT10	10	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	○
	FL12 / PT12	12	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
合わせ	FL3+FL3 PT3+PT3	4.9	◎	◎	○	○	○	○	○	○	○	×
	FL4+FL4 PT4+PT4	6.7	◎	◎	◎	○	○	○	○	○	○	○
	FL5+FL5 PT5+PT5	8.4	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	○	○
	FL6+FL6 PT6+PT6	10.1	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○
	FL8+FL8 PT8+PT8	13.6	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎

※ ◎（青セル）：フロート板ガラス可能範囲、○（黄色セル）：強化ガラスでの可能範囲

※合わせガラスの板厚は、強度的に等しくなる単板の厚さ（等価板厚Teq）を用いた。Teq=0.866×（ガラス総厚）-0.268

※ガラスの短期許容応力：フロートガラス 17.7N/mm²、強化ガラス 79.4N/mm²

一枚の寸法は、表中左上に記載している通りであり、巾寸法は異なるが、(2)で示したモックアップ試験体とほぼ同様の縦寸法及び支持方法をとしている。低廉なガラスファサードを実現するためには、薄いガラスの方がコストに関する制約が少なくなる。先に示した検討では、A-1等級相当の低い気密度のサッシが取り付けられた建物の外側の外装に、ガラスを下見板張状に張る場合、その表面隙間が、建物下地の隙間量の2倍（外装／下地隙間＝2）を有する場合は、外装表面に外風圧の2割程度しか、荷重が作用しない。この検討に基づけば、外風圧の2割程度しか風荷重が作用しないことから、巾1600mmまでのガラスの場合、東京、沖縄ともに、フロート板ガラスのFL6においても、耐風圧強度の仕様範疇に入ることになる。6mm厚のガラスは、中小オフィスビルのサッシ用として一般的なものであることから、低廉になることが期待できる。なお、ガラスに求められる性能としては、風圧力に対する安全性以外にも、飛散物が直撃した際の安全性なども考慮されなければならない。このような観点から、合わせガラスとすることやガラス飛散フィルムを使用するなどして、ガラス脱落や落下に対する危険防止措置が必要なのは言うまでもない。

以上のように、モックアップによる検討や数値シミュレーションなどの結果から、オープンジョイントのガラスファサードの強度・漏水可能性について検討を実施し、モックアップ試験体をさらに改良することで、**中小建築物の良質ストック化に資する耐久性の高い建築・外皮システムが実現可能であることを示した。**

(5) ガラスファサードの汚れの実態と防汚性能

ガラス外装は、近年オフィスビルを中心に広く使われているが、経年による汚損が指摘されており、1年に何度か高所作業による清掃を行っていることも少なくない。本検討では、既存のガラスファサードの汚損の実態を把握するとともに、モックアップ試験体のガラス面に防損コート剤を塗布し、汚損の軽減状況の観察・測定を実施した。

a) 既存のガラスファサードの汚損実態

主に本州地域のガラスファサードを有する建築物の外観を観察し、汚れの実態を調査した。その結果を事例として示すと、写真2-13～19となる。これら写真の全般的な傾向をみると、雨かかりのない部分での汚れ、サッシ枠周辺部での汚れの蓄積が目立つことが明らかとなっている。近年、ガラス素材を雨避け庇に用いるケースがみられるが、写真2-18のように、雨がかりがなく、また鳥が常時、留まっている箇所では、ふん害と併せて汚れが目立ちやすいケースがみられた。ガラス外装設計を行う場合には、留意が必要である。



外観



屋外側より撮影



室内側より撮影

【コメント】

親水性防汚コーティングが施されており、雨がかりとなる表側は、汚れが軽減されているものの、裏面側は雨水がないために、汚れが流れ落ちず、曇った状態となっている。

写真2-13 防汚コートが施された地下鉄上屋



外観



屋外側より撮影



写真2-14 下見板張に近いガラスファサードを持つ駅前施設

【コメント】

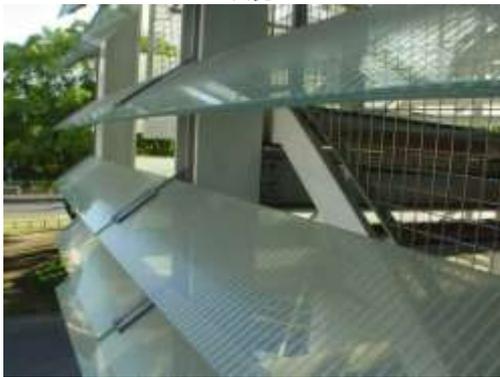
ガラス厚に対し、取付金具の強度が不足し、ファサード全体が変形している。内側は、汚れが進んでおり、金具周辺には藻が生えている状態であった。



外観



屋外側より撮影



室外側より撮影

【コメント】
 ツーバー状のガラス庇が設けられていたが、雨がかりのない部分については、埃やちりが堆積している状態であった

写真2-15 ガラスルーバーが施された建築物



外観



屋外側より撮影



写真2-16 ダブルスキンファサード有する建築物

【コメント】
 ガラス庇の非雨がかり部分では、埃が堆積している。また、ダブルスキン佐ファードの通風口では、落ち葉が侵入し堆積している状態であった。



写真 2-17 サッシュウ枠の周辺部に汚れが蓄積しやすい傾向を示す例



写真2-18 雨がかりとなりやすく、鳥が留まりやすい場所で発生する顕著な汚れ



写真2-19 視線制御と路面に滴下した雨粒の跳ね返りによる汚損を防止する
フィルム付ガラス

b) モックアップ試験体を使用した汚れの観察及び測定

- ・モックアップ試験体へのコーティング剤の塗布

既往のガラスファサードを有する建築物の外観を観察した結果に基づき、本開発で検討を進めているガラスファサード汚れの観察及び測定を実施した。モックアップ試験体のガラス面には、表2-14～17のように浸水コーティング剤を塗布し、2年間の汚れの様子を観察した。

表 2-14 2008 年度モックアップ試験体へのガラスコーティング施工現況

No.	施工前	施工の様子
写真 1 ・ 正 面		 <p data-bbox="938 719 1342 748">ガラス清掃後、マスキングしている状況</p>
写真 2 ・ 斜 視		 <p data-bbox="943 1272 1286 1301">コーティング剤を塗布している状況</p>
細 部 写 真	 <p data-bbox="400 1888 727 1917">非コーティング部分のマスキング</p>	 <p data-bbox="986 1888 1241 1917">コーティング剤塗布の様子</p>

表 2-15 2008 年度モックアップ試験体へのガラスコーティング施工現況

<p>詳細写真・説明</p>	<p>左より①、②、③、④、⑤、⑥</p> 	<p>⑦ 型板ガラス（一枚/上下通気）試験体 （ア）ガラス半面のみコーティング</p> <p>⑧ 型板ガラス（一枚/上下通気） （ア）ガラス半面のみコーティング</p> <p>⑨ 型板ガラス（一枚/上下密閉） （ア）コーティングせず</p> <p>⑩ フロート板ガラス（一枚/上下密閉） （ア）コーティングせず</p> <p>⑪ 型板ガラスの下見板張 （ア）ガラス半面のみコーティング</p> <p>⑫ フロート板ガラスの下見板張り （ア）ガラス半面のみコーティング</p>
<p>施工工程・検収</p>	 <p>使用したコーティング剤(TOTO 製)</p>	<p>■施工場所 北海道旭川市緑が丘東1条3丁目1-20 北海道立北方建築総合研究所 敷地内 実験棟</p> <p>■検収日：2008年1月14日</p> <p>■施工工程</p> <p>2008/1/9</p> <ul style="list-style-type: none"> ・現地試験体養生 ・図面と照合 <p>2008/12/13</p> <ul style="list-style-type: none"> ・施工温度確保のための加温開始 <p>2008/12/14 10:00~16:00</p> <ul style="list-style-type: none"> ・現地へコーティング剤塗布、竣工

表 2-16 2010 年度モックアップ試験体へのガラスコーティング施工現況

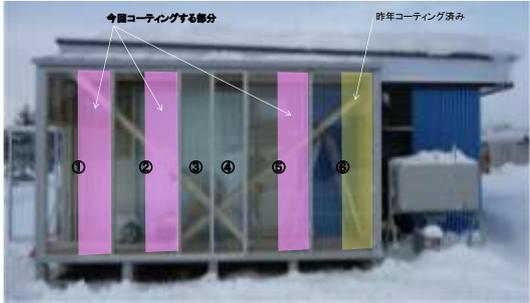
No.	施工前	施工の様子
写真 1 ・ 正面	<p>下記①②⑤の3枚のガラスの外右半分に塗布する。 ガラス ①②: フロートガラスFIX 900×2630mm程度 ⑤: フロートガラス下見板 900×300mm程度×9段</p> 	
写真 2 ・ 斜視		 <p>コーティング剤を塗布している状況</p>
詳細 写真	 <p>塗布面温度養生の様子</p>	 <p>ポンピングマシン</p>

表 2-17 2010 年度モックアップ試験体へのガラスコーティング施工現況

<p>詳細写真・説明</p>	<p>左より①、②、③、④、⑤、⑥</p> 	<p>⑬ フロートガラス試験体 (ア)ガラス右半面のみコーティング</p> <p>⑭ フロート板ガラス試験体 (ア)ガラス右半面のみコーティング</p> <p>⑮ フロストガラス (ア)コーティングせず</p> <p>⑯ フロート板ガラス (ア)コーティングせず</p> <p>⑰ フロートガラスの下見板張 (ア)ガラス右半面のみコーティング</p> <p>⑱ フロート板ガラスの下見板張 (ア)ガラス右半面のみコーティング</p>
<p>施工工程・検収</p>	 <p>使用したコーティング剤 (TOTO製:2008年次モックアップと同様)</p>	<p>■施工場所 北海道旭川市緑が丘東1条3丁目1-20 北海道立北方建築総合研究所 敷地内</p> <p>■施工工程</p> <p>2010/02/16</p> <ul style="list-style-type: none"> ・現地試験体養生 ・図面と照合 <p>2010/02/16</p> <ul style="list-style-type: none"> ・施工温度確保のための加温開始 <p>2010/02/17 10:00~16:00</p> <ul style="list-style-type: none"> ・現地へコーティング剤塗布、竣工

・汚れの測定結果

図2-20に示す屋外暴露したフロートガラス面における⑥試験体において、下端より2、6、9段目の防汚コート部及び非コート部の光沢度を測定し、それぞれの汚れ指数を算出した。なお、試験ガラスを取り付けたモックアップは、工法開発による改修のため、途中移設や取り外しが行われているが、⑤及び⑥の試験体については、表面の汚れに接触しないようにしている。汚れ指数は、既往の研究⁴⁾に基づき、式2-1)によって算出した。なお、ガラスの屋外暴露期間は、2008年3月17日～2010年の1月26日の約1年10カ月間である。

測定時のモックアップ試験体の外観を写真2-20、汚れ指数の測定結果を表2-18に示す。防汚コートは、紫外線によるコート表面の親水化と降雨による流水によって、汚れを流れ落とす。この汚れ度合を評価する汚れ指数は、一般に1.0以上になると、汚れの差が判別できるようになる。このことから、雨がかりのある部分において、防汚コートの有無による

$$Y = 10.25a + 0.67b + 0.62 \quad \dots \dots \text{式2-1)}$$

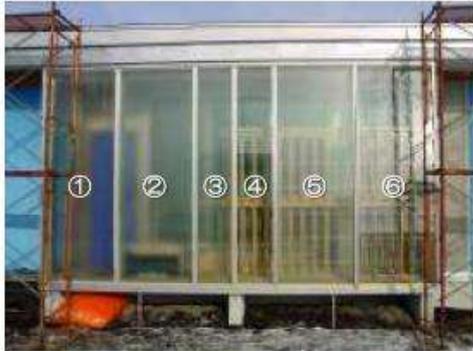
ここに、Y：汚れ指数、a：光沢度の減少率 b：光沢度の標準偏差

汚れ指数の差を見たところ、防汚コート有は無に比べて1.0以上の汚れ指数差となった。

また、防汚コート無は、下段に行くほど、汚れの程度が経度となり、防汚コート有では、上下ともに大きな汚れの差がない傾向がみられた。防汚コート剤は、その親水作用によって防汚コート無に比べて、汚れが中水により下方まで運ばれたと考えられる。

なお、雨がかり部分における目視による観察においては、何れの試験体においても大きな汚損感や曇り感は感じられなかった。同条件で施行された型板ガラス⑤は、同僚の汚れが付着していると予想されるが、同がらすは、表面に凹凸を有するため。光沢度計による汚れ指数の計測はできなかった。目視観察を行ったところ、型板ガラスは、表面に凹凸があることで、光が散乱している。その結果、透明のフロート板ガラスよりも汚れを感じにくいことが確認できた。

写真2-21～24に、測定したガラスの1年10カ月経過状況における汚損状況を示す。下見板張状にガラスを張る際の汚れは、雨がかりとならない、上下ガラス重なり部に集中していることが判る。



- ①型板ガラス（上下通気）：半面防汚コート
W909×H2635mm
- ②型板ガラス（上下通気）：半面防汚コート
W909×H2635mm
- ③型板ガラス（上下密閉）：コート無
W439×H2635mm
- ④フロートガラス（上下密閉）：コート無
W439×H2635mm
- ⑤型板ガラスの下見板張：右側半面ハイドロテクトコート
W916×H307mm ×9段
- ⑥フロートガラスの下見板張：半面ハイドロテクトコート
W916×H307mm ×9段

写真2-20 汚れ指数測定時の外観状況（1年経過時）

表2-18 汚れ指数の測定結果

サンプル	位置	光沢度平均			汚れ指数				
		初期 ^{※1}	2009 3/17	2010/1/26 雨掛り無 | 雨掛り有	初期 ^{※1}	2009 3/17	2010/1/26 ^{※2} 雨掛り無 | 雨掛り有		
⑥FL (コート無)	2段目	134.5	106.8	106.6	109.7	0.8	4.3	4.1	3.7
	6段目		108.3	107.2	110.5		4.1	5.2	3.4
	9段目		113.1	103.6	109.8		3.0	5.1	3.3
⑥FL (防汚コート)	2段目	119.0	109.7	105.7	107.8	0.9	2.2	4.1 (0.1)	2.4 (1.3)
	6段目		108.4	106.9	108.2		2.5	2.4 (2.7)	2.3 (1.0)
	9段目		110.9	105.3	109.7		2.6	4.7 (0.4)	2.0 (1.4)
⑥FL裏面 (室内側)	2段目	134.5	-	107.5	-	0.8	-	4.6	-
	6段目		-	107.1	-		-	3.8	-
	9段目		-	107.6	-		-	3.7	-

※1 過去汚れ性評価（FL）の初期値（09/03/26測定）を用いた。

※2 ()内は、コート無に対する汚れ指数の差を示す。

⑥フロートガラス 下見板張り 2段目

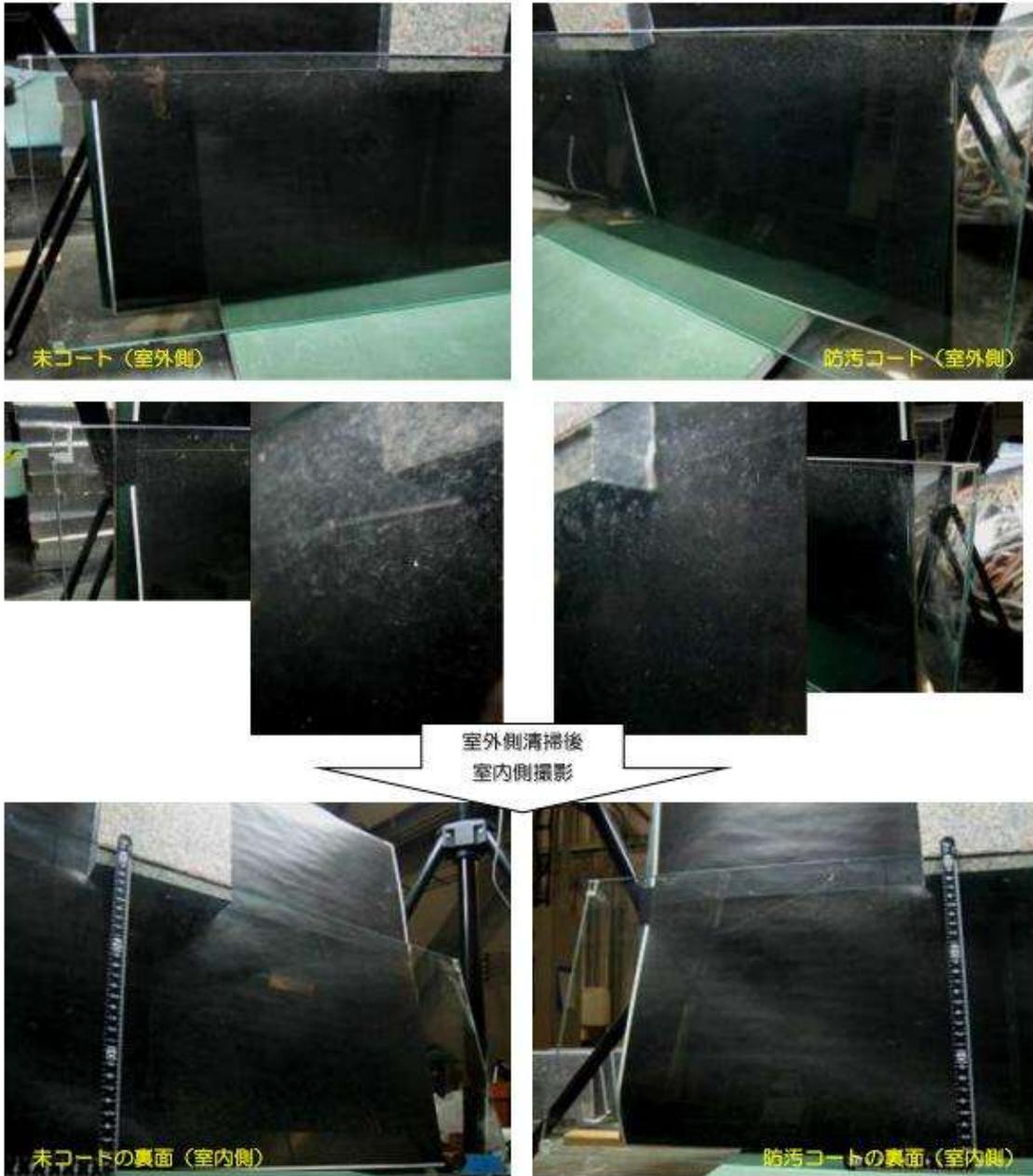


写真2-21 ガラスの汚損状況の詳細写真 (下段)

⑥フロートガラス 下見板張り 6段目

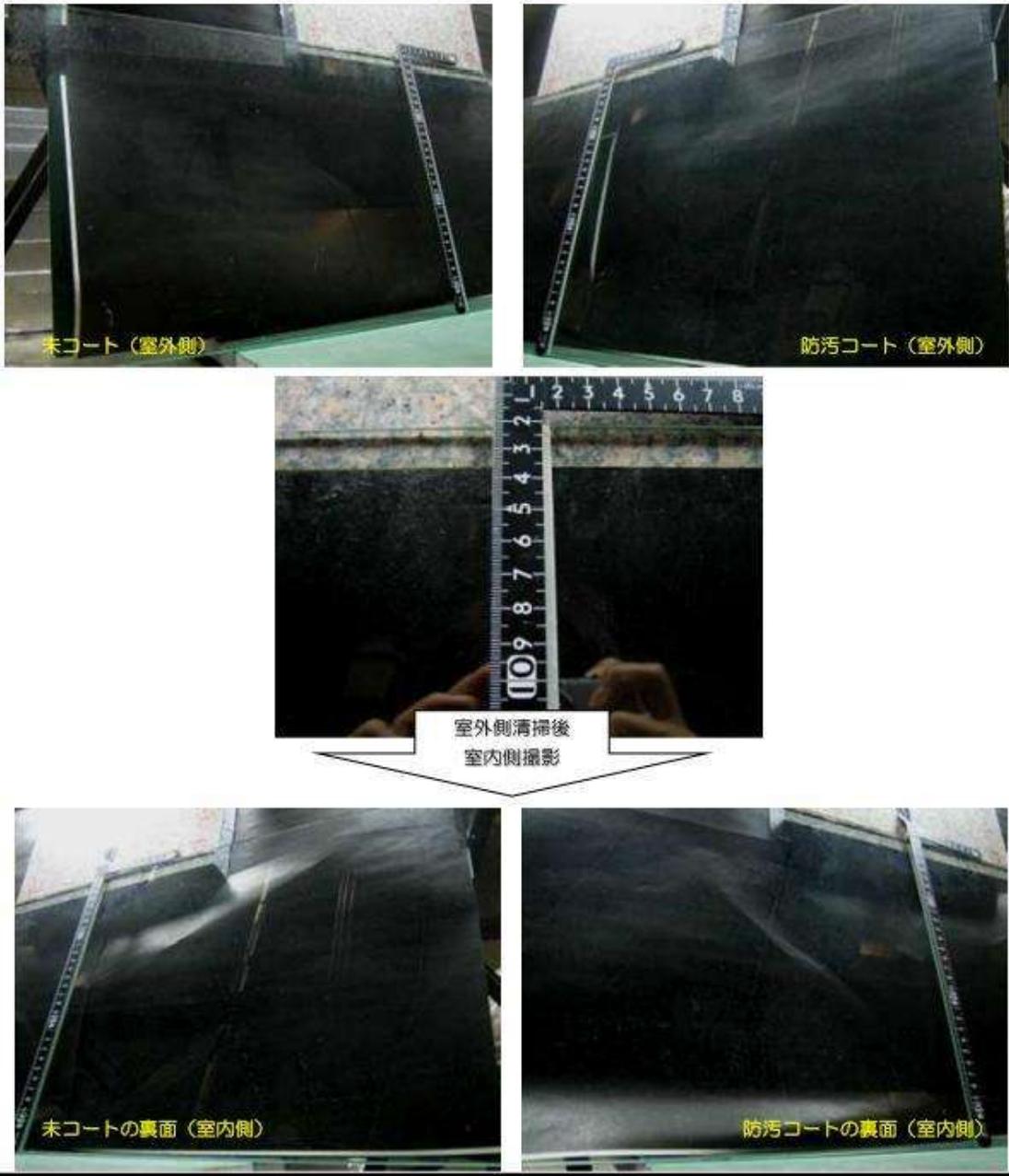


写真2-22 ガラスの汚損状況の詳細写真（中端）

⑥フロートガラス 下見板張り 9段目

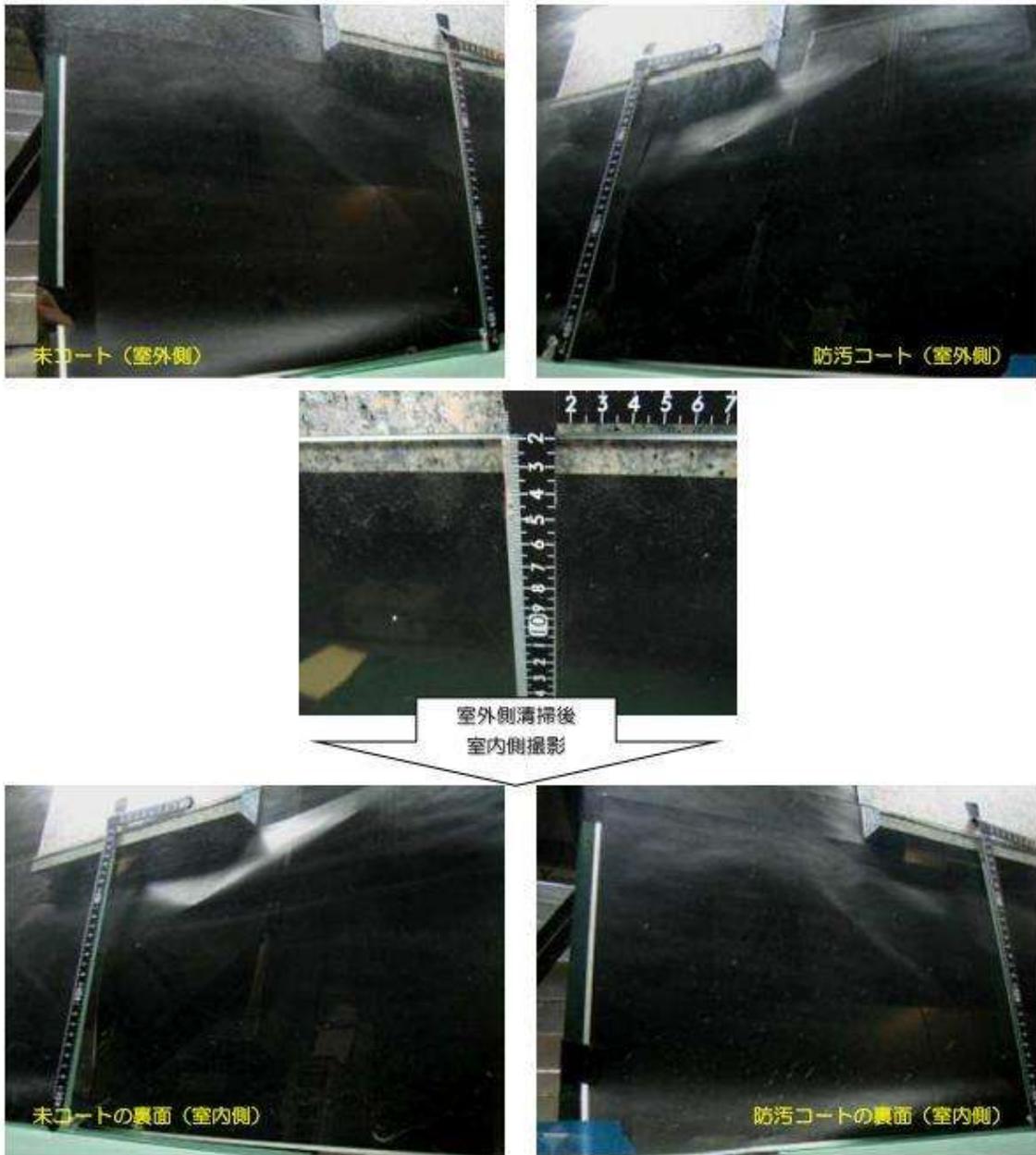


写真2-23 ガラスの汚損状況の詳細写真 (上端)

⑤型板ガラス 下見板張り 6段目

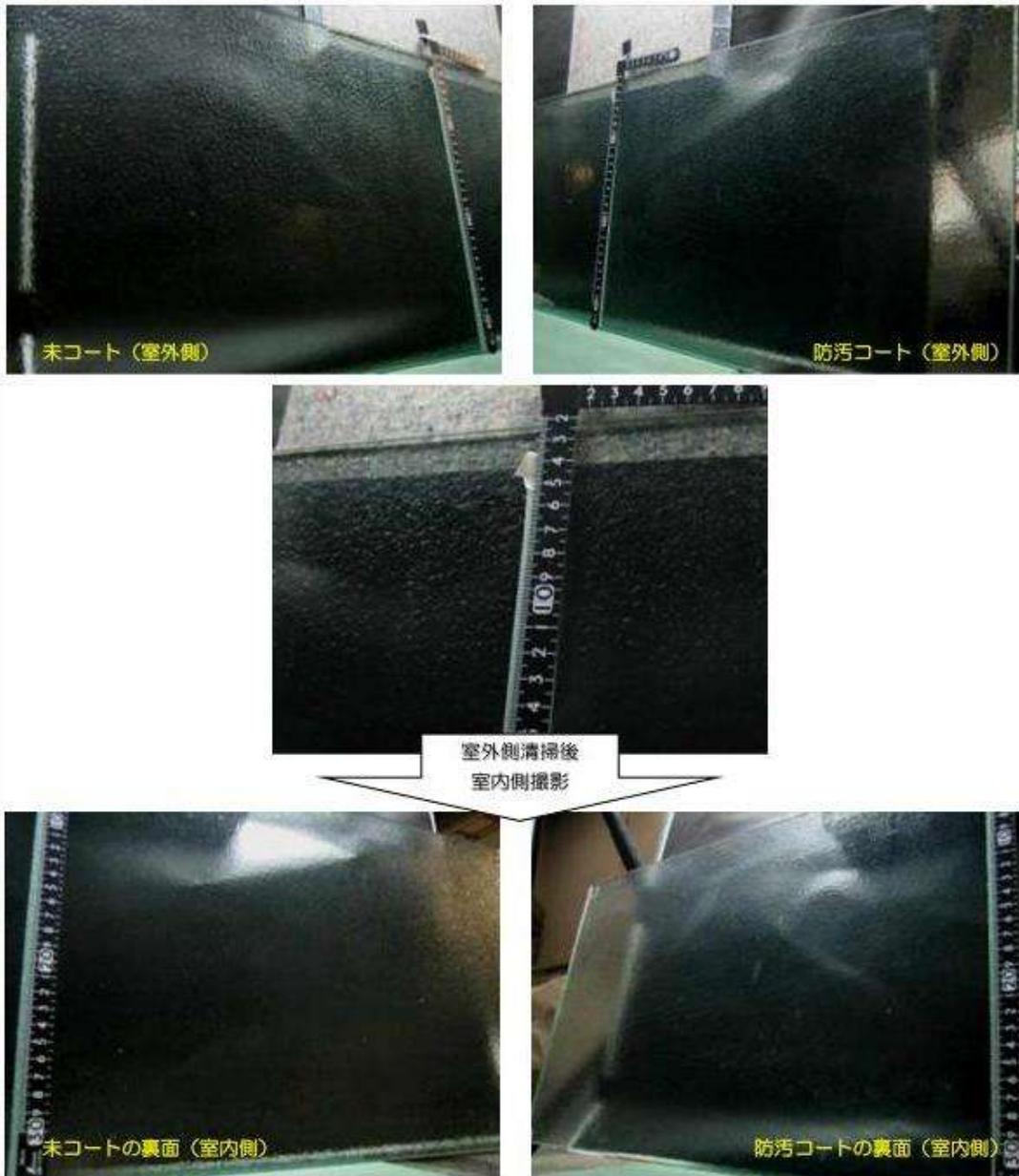


写真2-24 ガラスの汚損状況の詳細写真 (型板ガラス)

【2-1 参考文献】

- 1)石川廣三：雨仕舞のしくみ、彰国社,2004
- 2)建築研究所：換気回路網シミュレーションVentSim、山内設計室、2006.9
- 3)高倉政寛、鈴木大隆、福島明：外装裏面に作用する風圧力に関する数値解析手法の提案、D-2分冊、pp.57-58,2009.8
- 4)Nana Sato : A practical method for evaluating Self-Cleaning glass with a sensory assessment , International Conference on Coatings on Glass & Plastics, 2007

2-2. エネルギーポジティブな構造システムの開発

(1) 目的

建築統計年報によれば、我が国の建築ストックの代表的建物属性は、その3割が5階建以下の中小業務用建築物となっている。これら建築物で使用されるエネルギーから排出される二酸化炭素排出量の削減や、容易な維持管理や改修可能な構法の提案は、喫緊の課題となっている。本研究では、透光性を有するガラスに着目したガラスファサードを提案することによって、建築物の改修サイクルの延伸化、小作業化、産業廃棄物の発生量を抑制することを目的としているが、外装は、躯体の種類（鉄筋コンクリート造や鉄骨造）や柱梁の大きさなどの部材寸法などによっても、取付に制約を受ける。このような観点から本検討では、既往のガラスファサードの変遷などを踏まえた上で本開発で提案するガラスファサードが合理的に取り付けられる躯体構成の提案を目的に調査や積算検討を行った。

(2) 事務所建築物を対象とする検討

地方都市中心部に立地する中小事務所建築の一般的な設計条件として、表2-18の設計条件を想定した。次に、駅前商業地域の狭小地で、採光条件が不利であること、建物の改修に後いることができる工法であることを条件として、表2-19に示すペリメータゾーンを想定した。これらを総括して、ガラスファサードの設置方位、面数、平面プランの異なる計29種の建築間取りプロトタイプを構築した。このプロトタイプに基づいて、コア位置と採光面による構造類型化を実施した。

構造類型の評価軸は、次の①～③の方法を採用した。

表2-18 対象とした事務所建築物の設計条件

○断熱透光壁+メンテナンスフリーガラス外皮の適用範囲について	
・立地	: 地方都市の駅前商業地域
・採光面	: 採光面が限られる立地（2～3面まで）
・所有携帯	: 賃貸ビル（レントブル比90%以上）
・階数	: 5～8階（準防火地域4階以上で耐火建築物、31m以下）
・基準階床面積	: 300～500m ²
・延床面積	: 1,500～4,000m ²

表2-19 建築計画的な観点から想定したペリメーターゾーン

		○採光面とペリメーターゾーンの構成による平面類型（構造体のシステム化）			○吹抜きの断面形状代替案		
		2面採光-1	2面採光-2	3面採光	断面形状	2層吹抜	3層吹抜	全階吹抜
ダブルスキン	吹抜1面						
	吹抜2面						
ダブルスキン+吹抜							

--- : メンテナンスフリーガラス外皮
 — : 断熱透光壁

表2-20 想定したコア配置のプロトタイプ1

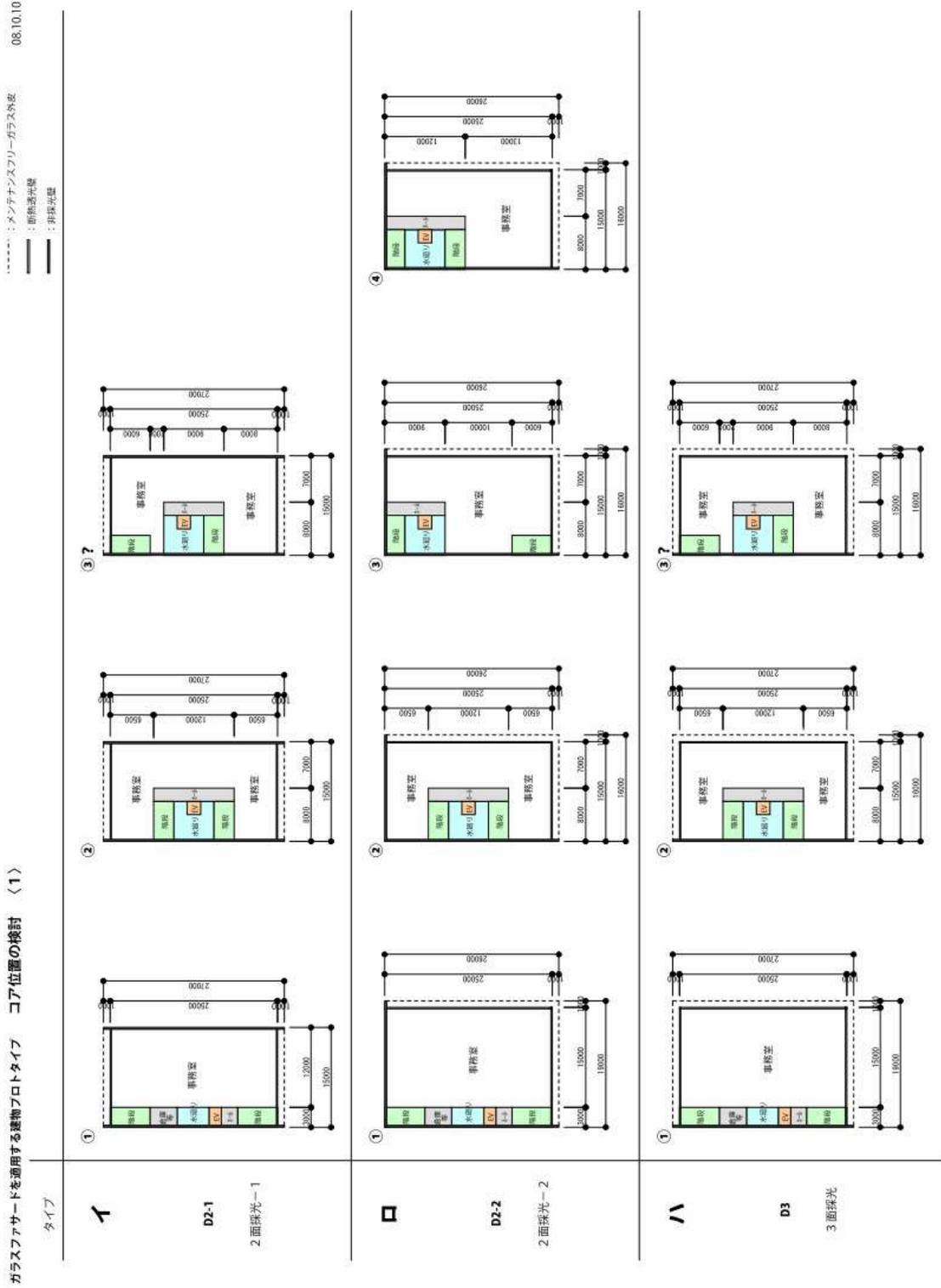


表2-21 想定したコア配置のプロトタイプ2

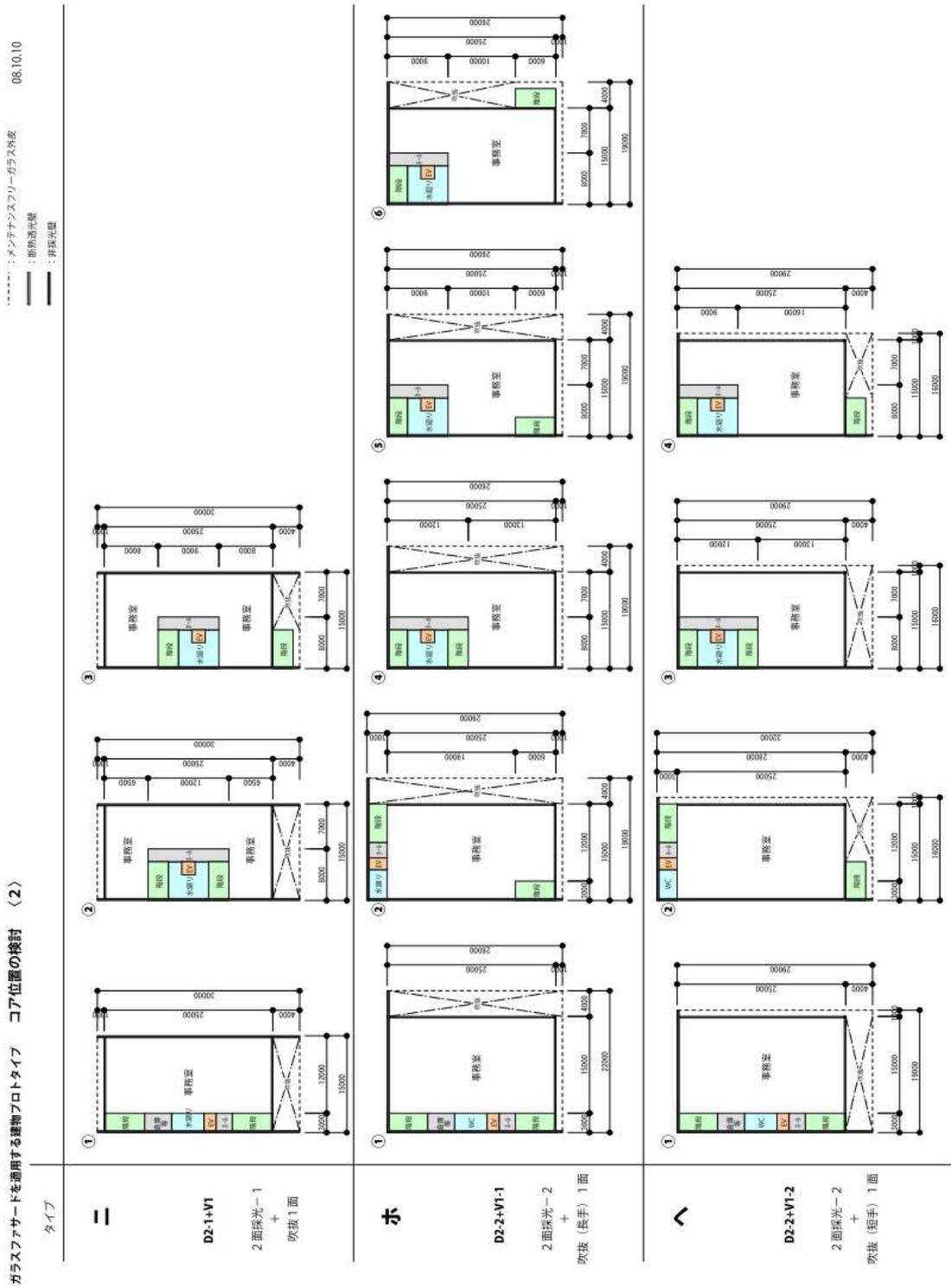


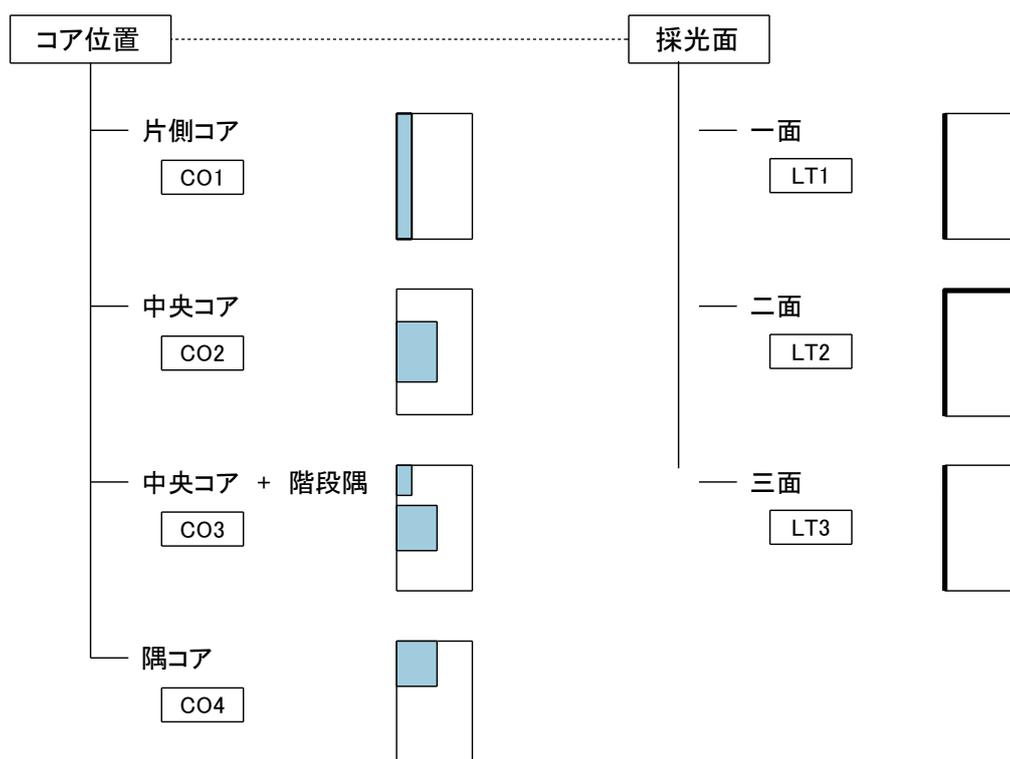
表2-22 想定したコア配置のプロトタイプ3



① 想定建物する建物

構造種別 : RC造、SRC造、S造
 構造形式 : ラーメン構造(RC,SRC,S造)
 耐震壁付ラーメン構造(RC,SRC造)
 ブレース構造(S造)

② 類型化のパラメータ



③ 評価係数

<1>ファサード有効度 … ファサードに占める構造の見えがかりの少なさ

$$\text{ファサード有効度 } Q_1 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3$$

α_1 …	梁せい	小	: 1.00
		大	: 0.92
α_2 …	構造種別	S	: 1.00
		SRC	: 0.92
		RC	: 0.88
α_3 …	構造形式	ブレース・耐震壁	: 1.00
		ラーメン	: 0.95

〈2〉コスト係数 …… 面積あたりの構造躯体に関わるコスト係数

コスト係数 $Q_2 = \beta_1 \cdot \beta_2$

β_1 ……	構造種別	S	: 0.90
		SRC	: 0.85
		RC	: 1.00
β_2 ……	構造形式	ブレース・耐震壁	: 1.00
		ラーメン	: 0.90

この評価軸に従って、間取りを構造的な観点から類型化し、ファサード有効度及びコスト係数を算出した結果は、表 2-28 の通りである。表のように、ファサード有効度（建物の見えがかりの多さ＝開口面の設置可能面積度合）とコストの関係は、コアの位置や採光面配置、構造種別と構造形式によって、相関関係がみいだしくいものの、図 2-14 のように、

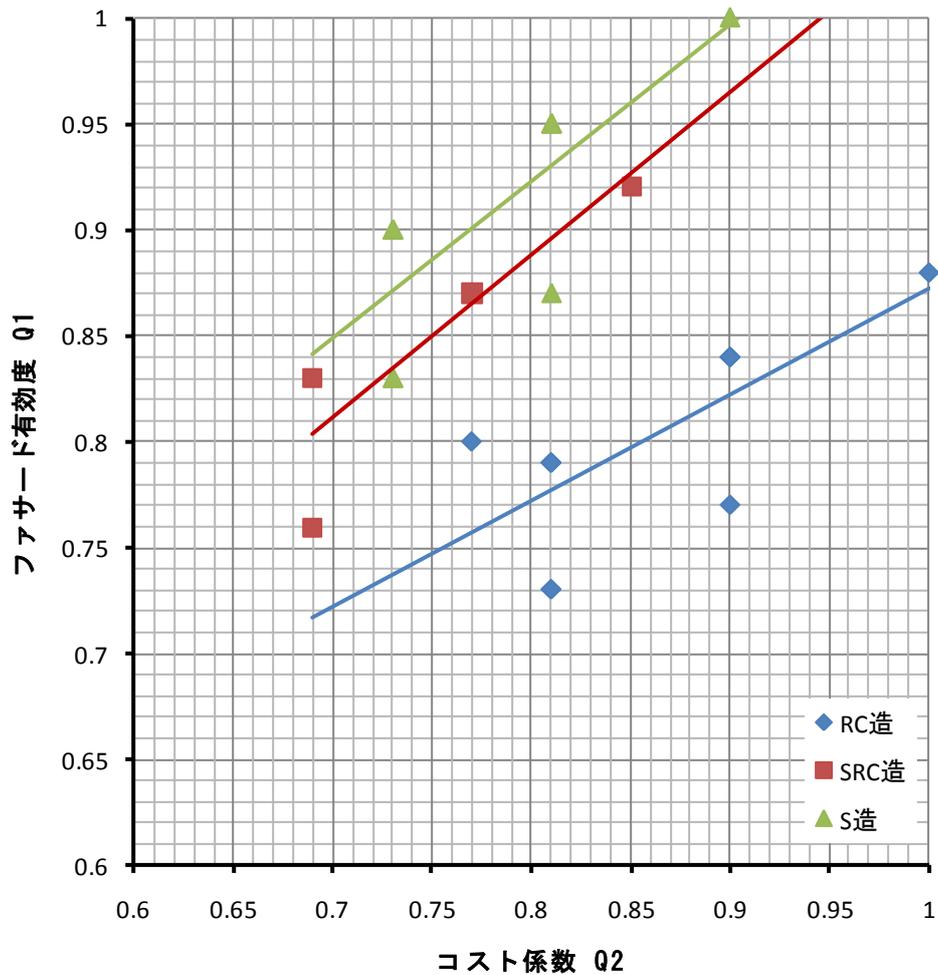


図2-14 構造種別ごとにみたファサード有効度とコスト係数との関係

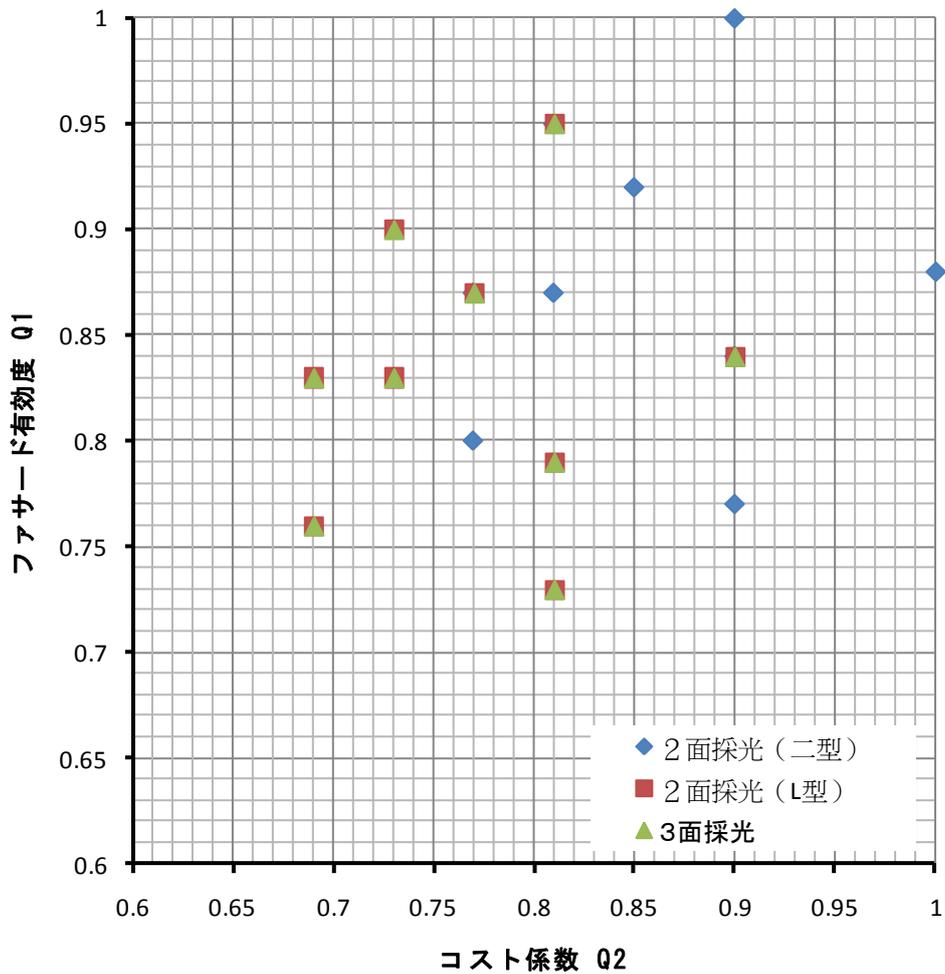


図2-15 採光面方式別ごとにみたファサード有効度とコスト係数との関係

ファサード有効度やコスト係数の関係を構造種別で整理すると、小スパン、鳥かご状の構造構成のS造orSRCが構造躯体コストを低廉に保ちながら、開口面積を大きく取りやすい傾向を見出すことができる。

次に、採光面数別に、ファサード有効度とコスト係数とを比較すると二型とL型に採光面を設けると、構造のコスト係数に比べて、ファサード有効度が増加しやすい傾向がみられる。建物の採光方位は、建築物の敷地条件に支配されるが、鉄骨造もしくは、鉄骨鉄筋コンクリート構造を採用し、骨組みを鳥かご状に配するなどの工夫を行うことで、低廉で採光の利点を大きく活かせるガラスファサードに適した構造形式を提案できると考える。

この構造を適用した外装の層構成と建物のイメージについては、別途4章で詳細を述べるので参照されたい。

表2-23 事務所建築物を対象とした構造プロトタイプのファサード有効度とコスト係数

		コア位置			
		CO1 片側コア	CO2 中央コア	CO3 中央コア + 階段隅	CO4 隅コア
採光面	LTI 2面採光-1				
	LTI 2面採光-2				
	LTI 3面採光				

※構造形式の記号

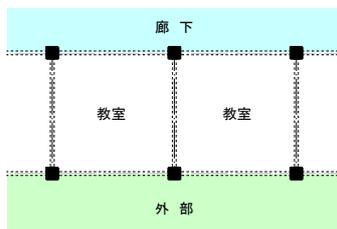
R ... ラーメン構造
W/B... 耐震壁付ラーメン構造、もしくはプレース構造

(3) 学校建築物を対象とする検討

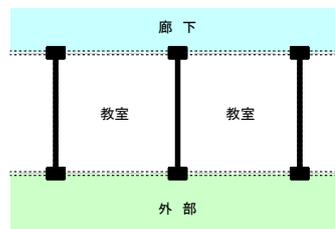
全国に建設されている小中高等学校などの学校を対象に、代表的なモデルケースを設計条件に、その構造の類型化を行った。設計条件は、次のとおりである。
構造類型の評価軸は、前節(2)の①～③の方法を同様の方法を採用した。

■設計条件

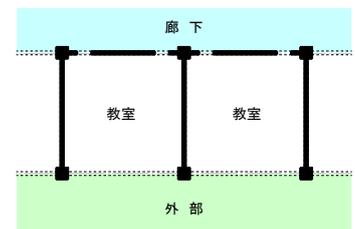
- ・断熱採光壁の適用が有効な構造種別、構造形式の検討を行う。
- ・学校の標準的プランとして片廊下型、中廊下型による一面採光型のプランを想定した構造形式とする。
- ・構造種別として以下の3種を想定する。
 - ・鉄筋コンクリート(RC)造
 - ・鉄骨(S)造
 - ・木(W)造
- ・構造形式として以下の3種を想定する。



純ラーメン
(木造では純ラーメンは一般的でないので省略)

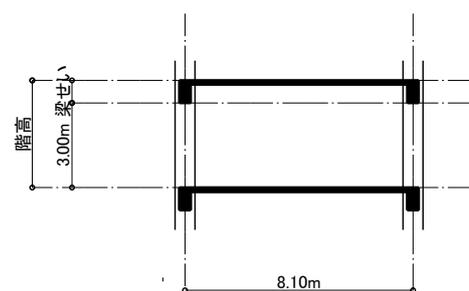
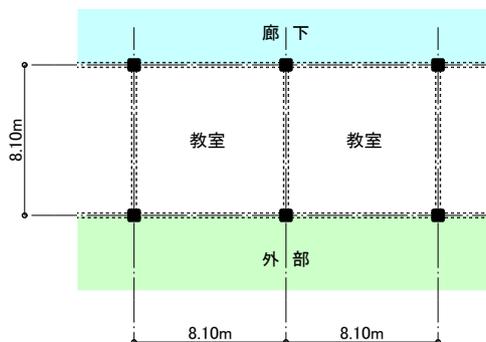


一方耐震壁付ラーメン



両方向耐震壁付ラーメン

- ・架構は以下の平面、断面寸法を想定する。



- ・それぞれの構造種別、構造形式対して、仕上げを含めた建築工事に関わるコストを「コスト係数」として評価する。

以上の条件で、コスト係数を算出した結果を表2-24に示す。表を構造種別にみると、鉄

筋コンクリート造（RC造）が最も低廉、木造（W造）、鉄骨造（S造）の順にコスト係数が増加してゆく傾向がみられた。構造形式別にみるとRC造、S造、W造の何れにおいても、両方向耐壁付ラーメン構造が最もコスト係数が低く、次に、一方向耐震壁付ラーメン／一方向純ラーメン構造のコスト係数が低くなる傾向がある。これら構造形式は、既に一般の学校建築で広く普及しているものであり、コスト的な観点からみれば、同建物は、最もコスト合理性の高い構造方法を採用していると考えられる。耐震壁付きラーメン構造は、最も低廉なRC造で建設しようとする、その耐震壁部分の壁がコンクリートで充填され、採光が確保しにくくなる。学校は、一般にその特有な平面形式から、南面を主採光面として、耐震壁を用いない一方、その他の部分は、耐震壁を用いて補強してゆく構造を採用するケースが多い。すなわち、南面に耐震壁が少ない学校建築物は、既に、採光を利用するガラス外装システムを採用し易い構造形態になっていると考えられる。

一方、教室内部の安定した光環境の快適性や省エネ性は、南面からの採光のみでは実現が難しい。このことから、事務所建築物で評価した「ファサード有効度」を室内の壁にまで追加適用し、各間仕切壁における有効度も算出した。この算出結果は、採光面の「適用面積係数（耐震壁・耐震ブレース以外の部分）」と定義し、表2-24中に示した。適用面積係数は、内壁の耐震壁の少なさと強い相関がある。すなわち、純ラーメン構造に近づくほど、この係数は増加し、ガラス使用可能面積は増加する。この構造システムからみた適用面積係数を活用した設計の考えや採用された場合の教室イメージは、4章で述べるので、参照されたい。

3. エネルギー収支に優れた採光・断熱システムの開発

3-1. 暖冷房・照明エネルギー最小化のための目標性能検討

(1) 目的

事務所、及び学校を想定し、下記①、②の1次エネルギー削減目標を達成する熱貫流率、日射熱取得率、可視光透過率の目標性能を、数値シミュレーションから導出することを主な目的とする。

- ・【1次エネルギー削減目標①】……事務所・学校

暖房・冷房・昼間の照明の年間での合計1次エネルギーを、ガラス外皮の設置面積1㎡あたり50[MJ/㎡・年]削減する。ただし、エネルギーの比較対象は、事務所の場合には、省エネ効果の高い既存の外皮技術であるダブルスキンとし、学校の場合には通常の仕様である窓とする。

- ・【1次エネルギー削減目標②】……事務所

事務所の場合は、現状のエネルギー原単位が大きいことから、50[MJ/㎡・年]にこだわらず、可能な限り省エネルギーを図る場合、つまり、暖房・冷房・昼間の照明の年間での合計1次エネルギーを、最小化する場合についても検討を行う。

(2) 検討概要

1) エネルギーシミュレーションの概要

a. 計算条件

表3-1-1にシミュレーションの計算条件を示す。立地は東京と札幌の2ヶ所を想定する。東京は、わが国の人口集積地域をカバーする、省エネ基準上のIV地域の代表とする。札幌は、IV地域とは大きく気候が異なる地域の代表としてとりあげる。また、暖房、冷房については非定常計算により負荷を算定し、1次エネルギーに換算する。照明については、机上面照度を算出し、700[lx]の設定照度に満たない分を、人工照明で補う制御を想定し、負荷、及び1次エネルギーを算出する。学校では冷房を行わないことが一般的であるため、暖房と照明の1次エネルギーを削減対象とする。

b. 建物モデル

図3-1-1に事務所の建物モデル、図3-1-2に学校の建物モデルを示す。なお、事務所の隣棟距離は、東京都23区内の地図情報を参考に設定した。

表3-1-1 計算条件

共通	1次エネルギーの換算係数		9.97 [MJ/kWh]	
	外皮の性能	熱貫流率[W/K・㎡]	0.5～6.0	
		日射熱取得率	0.1～0.9	
		可視光透過率[%]	① 透明ガラスを想定 : η 値と同値 ② Low-Eガラスを想定 : η 値の1.5倍	
	立地		東京都、札幌市	
	ガラス外皮が面する方位		南、西、北	
	隣棟による日影		① 隣棟なし : 日影を考慮しない ② 狭小敷地 : 日影を考慮する (事務所のみ)	
暖房 冷房	負荷計算		SMASH for WINDOWSにより算出する。	
	機器のCOP	東京	暖房3.0 冷房3.0	
		札幌	暖房2.5 冷房3.0	
	ガラスの透過特性		直達日射のガラスへの入射角を考慮する。	
	ガラス外皮以外の建築属性		・ 中間階に位置すると想定 ・ 外壁仕様 : アスロック75mm+ウレタン15mm	
	空調	設定温度	事務所	室温が22℃以下になると暖房ON 室温が27℃以上になると冷房ON
			学校	室温が22℃以下になると暖房ON 冷房は実施しない
		運転時間	事務所	平日の8時～18時
			学校	平日の8時～16時
	換気量		空調停止時 0.2回 空調運転時 0.2回+3.5m ³ /m ² h	
	内部発熱	事務所	在室人数	0.1人/㎡
照明			20 [W/㎡]	
その他			54 [W/㎡]	
学校			8.1 [W/㎡]	
照明	負荷計算		室内の中央点などの照度を算出し、設定照度 (700[lx]) の不足分を人工照明で補う。人工照明は5～100%の連続調光とする。	
	ガラスの透過特性		直射光のガラスへの入射角を考慮する。均等拡散透過を想定する。3-2.の検討により、グレアを防止するための輝度の上限を定め、それ以上の採光は行わないこととする。	
	部屋の使用時間	事務所	平日の9時～18時	
学校		平日の9時～16時		

c. 負荷の計算範囲

一般に、事務所などの業務建物の暖冷房負荷は、大部分がペリメーターゾーンで発生すると考えられる。ここでは、次項以降での計算対象範囲を定める目的で、窓もしくはガラス外皮からの水平距離（部屋の奥行き）と、暖冷房負荷との関係を考察する。負荷計算の条件、建物モデルは、それぞれ表3-1-1、図3-1-1に示した事務所の場合とする。表3-1-2に窓とガラス外皮の計算パターンを示す。

表3-1-2 窓とガラス外皮の計算パターン

		仕様	設置面積[m ²]
窓	FL3	アルミサッシ+単板ガラス	9 (窓周辺の18 m ² は外壁)
	SS20	アルミサッシ+熱反ガラス	
	FL3+ ブラインド	アルミサッシ+単板ガラス+ブラインド	
	SS20+ ブラインド	アルミサッシ+熱反ガラス+ブラインド	
ガラス 外皮	SS20	アルミサッシ+熱反ガラス	27
	U=1.0 η =0.15	U=1.0、 η =0.15	

窓もしくはガラス外皮から水平距離で0～2m、0～3.5m、0～5m、0～7.5m、0～10m、0～20mの各範囲における、床面積あたりの暖冷房、暖房、冷房の負荷を、それぞれ図3-1-3、3-1-4、3-1-5に示す。暖冷房負荷は（図3-1-3）、奥行きが大きくなるにつれて、徐々に小さくなる傾向がある。

窓もしくはガラス外皮から水平距離で0～2m、2～3.5m、3.5～5m、5～7.5m、7.5～10m、10～20mの各ゾーンにおける、床面積あたりの暖冷房、暖房、冷房の負荷を、それぞれ図3-1-6、3-1-7、3-1-8に示す。暖冷房負荷は（図3-1-6）、外皮から5mまでのゾーンでは、窓やガラス外皮の仕様により大きく変化しているが、5mより室奥側のゾーンでは、仕様による差は殆どない。

これらの傾向は、屋内外間での貫流熱量が小さいガラス外皮SS20を除くと、暖房負荷（図3-1-4、3-1-7）、冷房負荷（図3-1-5、3-1-8）においてもほぼ同様である。

以上のことから、窓及びガラス外皮の仕様が暖冷房負荷に与える影響は、一般的にペリメーターゾーンと言われる5m以内と考えてよい。よって、今後、ガラス外皮のU値・ η 値の最適性能を探る検討は、奥行き5mの計算モデルで検討を進めることとする。

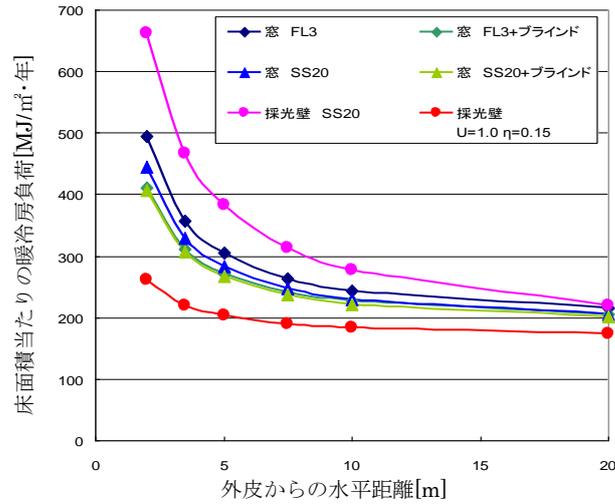


図3-1-3 窓・ガラス外皮から2、3.5、5、7.5、10、20mの範囲内の暖冷房負荷

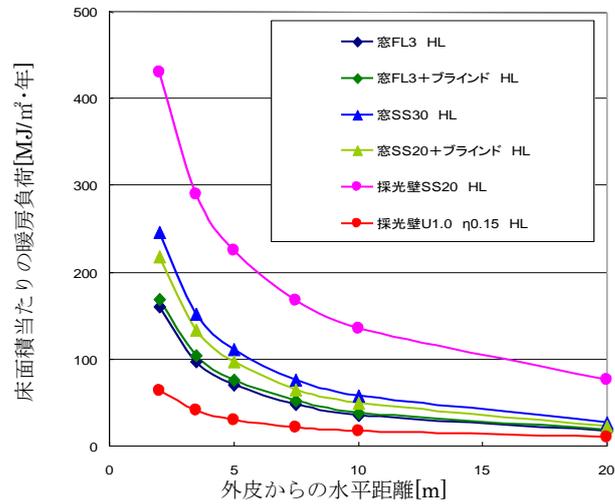


図3-1-4 窓・ガラス外皮から2、3.5、5、7.5、10、20mの範囲内の暖房負荷

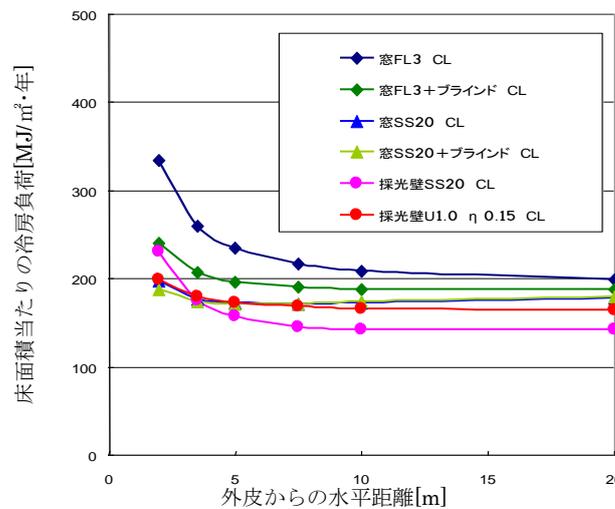


図3-1-5 窓・ガラス外皮から2、3.5、5、7.5、10、20mの範囲内の冷房負荷

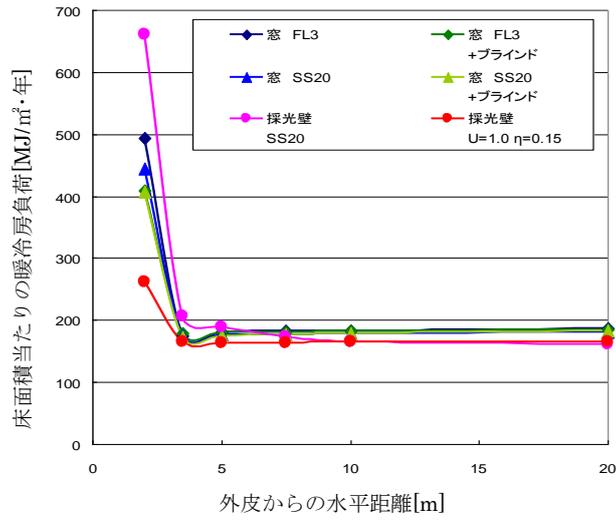


図3-1-6 ゾーン別の暖冷房負荷

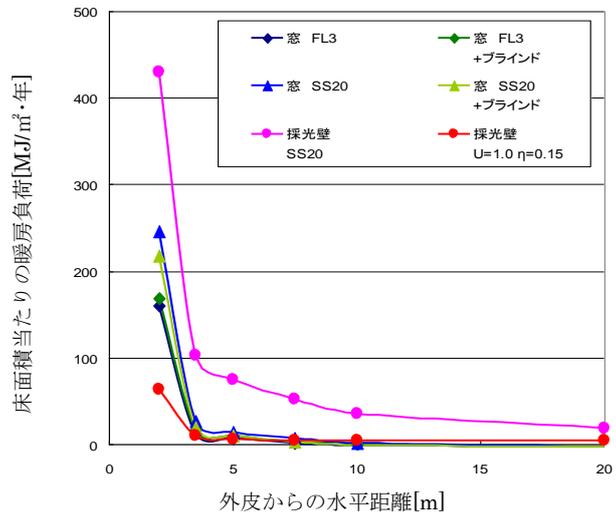


図3-1-7 ゾーン別の暖房負荷

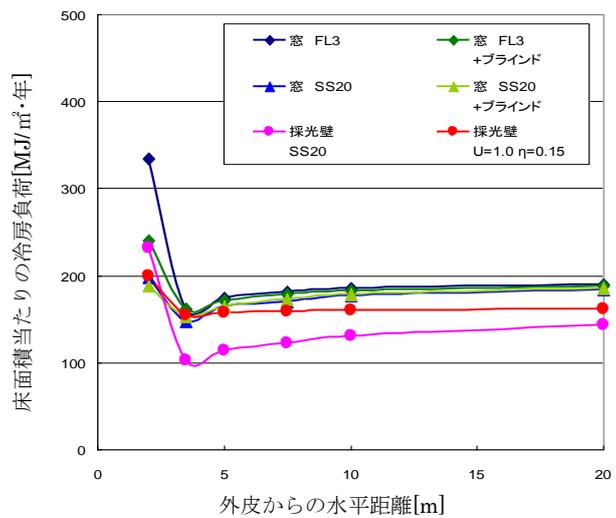


図3-1-8 ゾーン別の冷房負荷

(3) 検討結果と目標性能の導出

1) 事務所

a. ダブルスキンの場合の1次エネルギーの計算結果

前述のとおり事務所の場合には、目標性能を1つである外皮の設置面積あたり50[MJ/m²・年]削減を検討する際における、エネルギーの比較対象をダブルスキンとする。ダブルスキンは、季節により中空層の通気、及びブラインドの開閉制御を行うことで、熱貫流率を1.5～2.0[W/K・m²]、日射熱取得率を0.1～0.5の間で制御すると想定する。

図3-1-9に1次エネルギーの計算結果を示す。外皮の設置面積あたりで見た、暖冷房・照明の1次エネルギーは604[MJ/m²・年]である。

50[MJ/m²・年]の削減を達成する1次エネルギー消費量は、604－50＝554 [MJ/m²・年]以下と設定する。

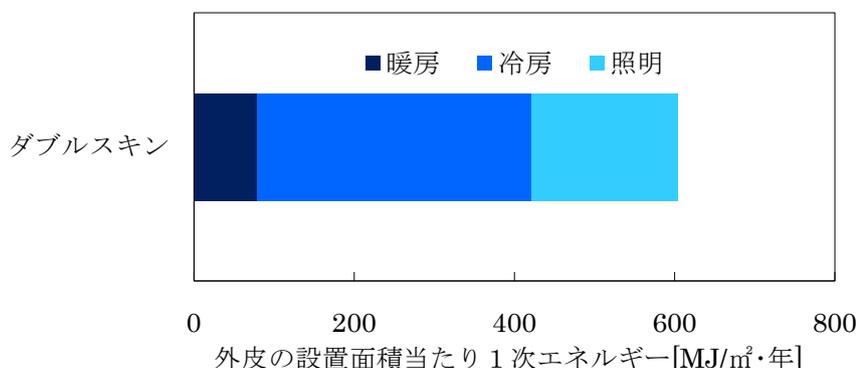


図3-1-9 ダブルスキンの場合の1次エネルギー

b. ガラス外皮の場合の1次エネルギーの計算結果

図3-1-10～3-1-14に、立地が東京、南向きのガラス外皮、隣棟なしの場合における1次エネルギーの計算結果を示す。暖房1次エネルギーは（図3-1-10）、熱貫流率が小さく、日射熱取得率が大きいほど小さくなる。これは断熱性能が高いほど室内の熱を逃がしにくく、また、日射熱取得が多いほど自然室温が高くなるためである。冷房1次エネルギーは（図3-1-11）、熱貫流率が大きく、日射熱取得率が小さいほど小さくなる。これは、断熱性能が低いほど室内の熱気（日射熱、照明や家電等から発生する熱など）を屋外に逃がしやすく、また、日射熱取得が少ないほど、自然室温が低くなるためである。照明1次エネルギーは（図3-1-12）、可視光透過率が大きいほど小さくなる。また、Tv（可視光透過率）=1.0の場合よりも（透明ガラス）、Tv=1.5の方が（Low-Eガラス）、照明1次エネルギーは小さくなる。これは、日射熱取得率が同一の場合、Tv=1.5の方が、可視光透過率が大きくなる、つまり採光量が多くなり明るくなるためである。

暖冷房、照明の1次エネルギーを合算すると（図3-1-13、図3-1-14）、熱貫流率1.0[W/K・m²]程度、日射熱取得率0.2程度、可視光透過率30%程度において、1次エネルギーが最も小さくなる。したがって、この値が1次エネルギー最小化のための目標性能となる。

一方、前述のダブルスキンと比較して50[MJ/年]削減を達成するための、1次エネルギー554 [MJ/年]以下となる性能は、熱貫流率0.5～1.5[W/K・m²]程度の範囲となるが、技術的な現実性を考慮して熱貫流率1.5[W/K・m²]程度とすると、日射熱取得率0.2程度、可視光透過率20[%]程度となる。

同様の手順により、立地（東京、札幌）、敷地条件（隣棟なし、狭小敷地）、ガラス外皮を設置する方位（南、西、北）の各条件について、暖冷房・照明の合計1次エネルギーを計算した結果を、図3-1-15～3-1-18に示す。

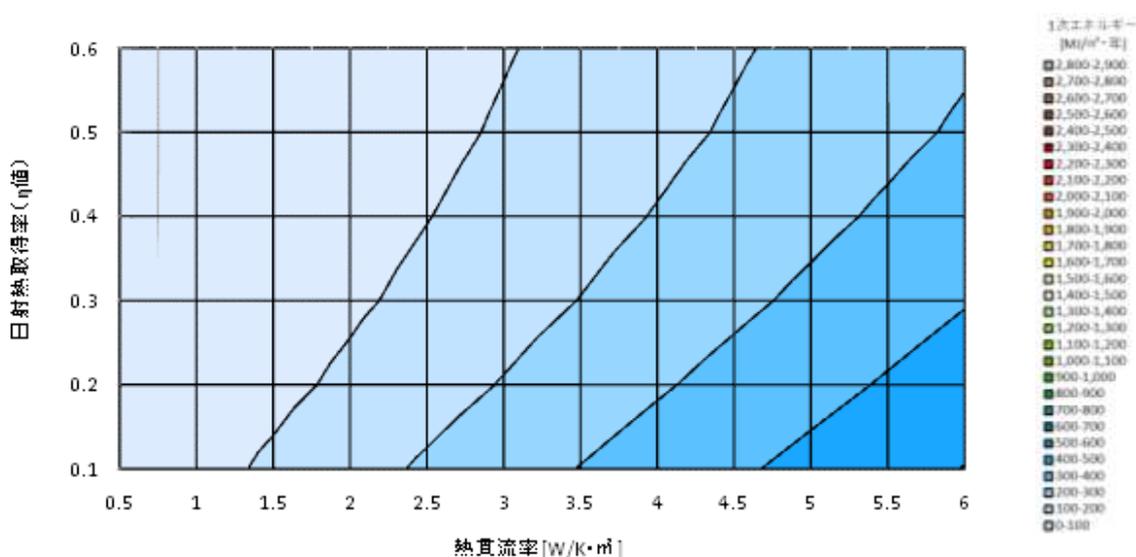


図3-1-10 暖房1次エネルギー（東京・南向き・隣棟なし）

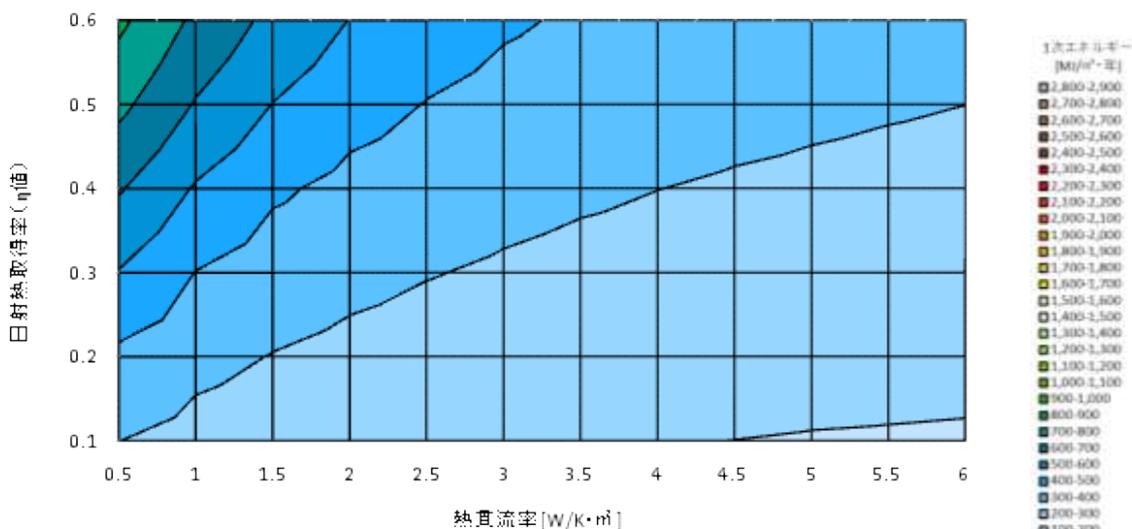


図3-1-11 冷房1次エネルギー（東京・南向き・隣棟なし）

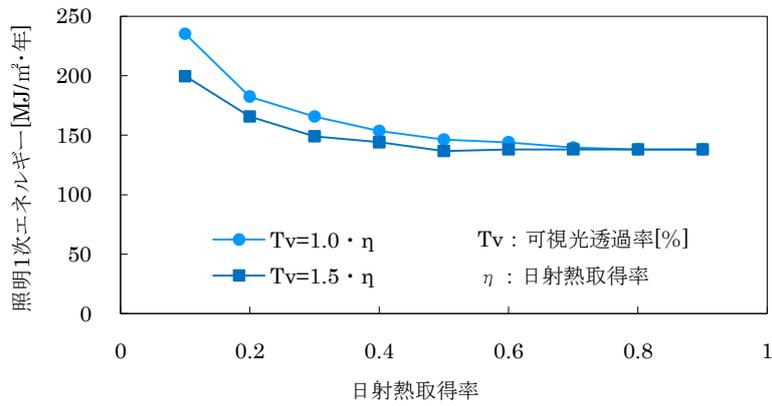


図3-1-12 照明1次エネルギー（東京・南向き・隣棟なし）

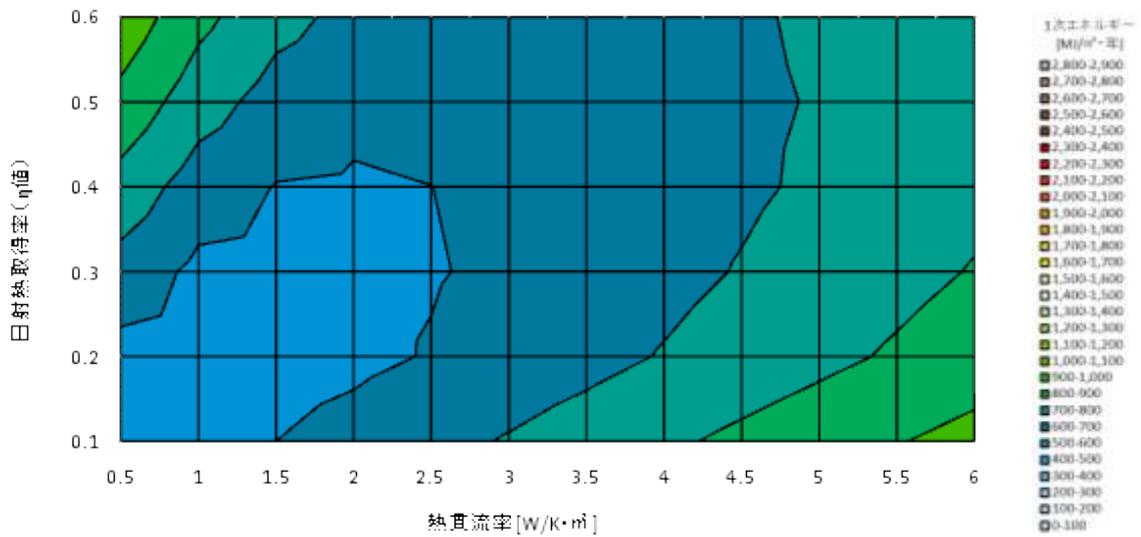


図3-1-13 暖冷房・照明の合計1次エネルギー（東京・南向き・隣棟なし・Tv=1.0・η）

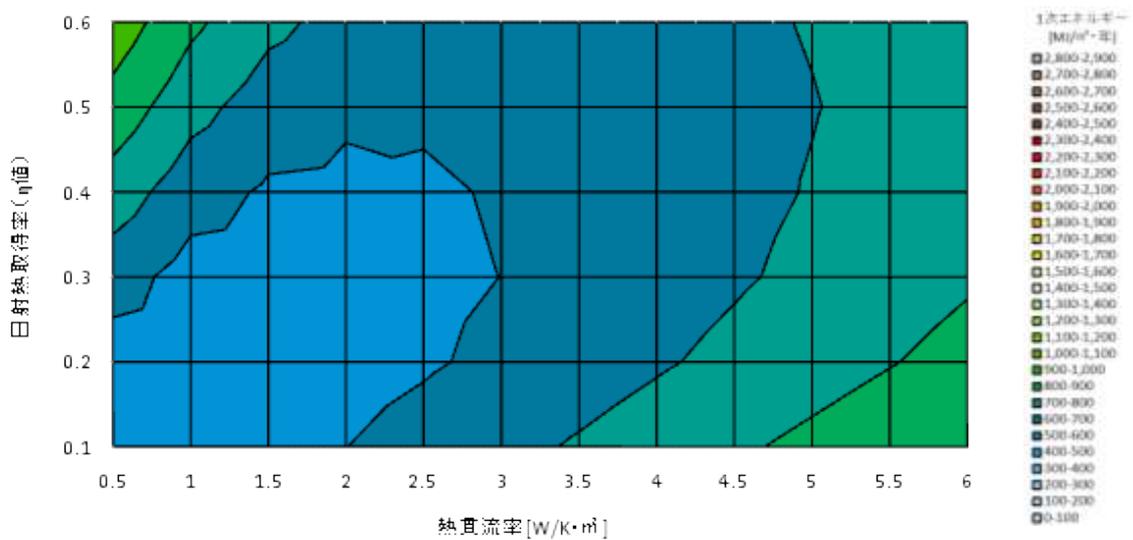


図3-1-14 暖冷房・照明の合計1次エネルギー（東京・南向き・隣棟なし・Tv=1.5・η）

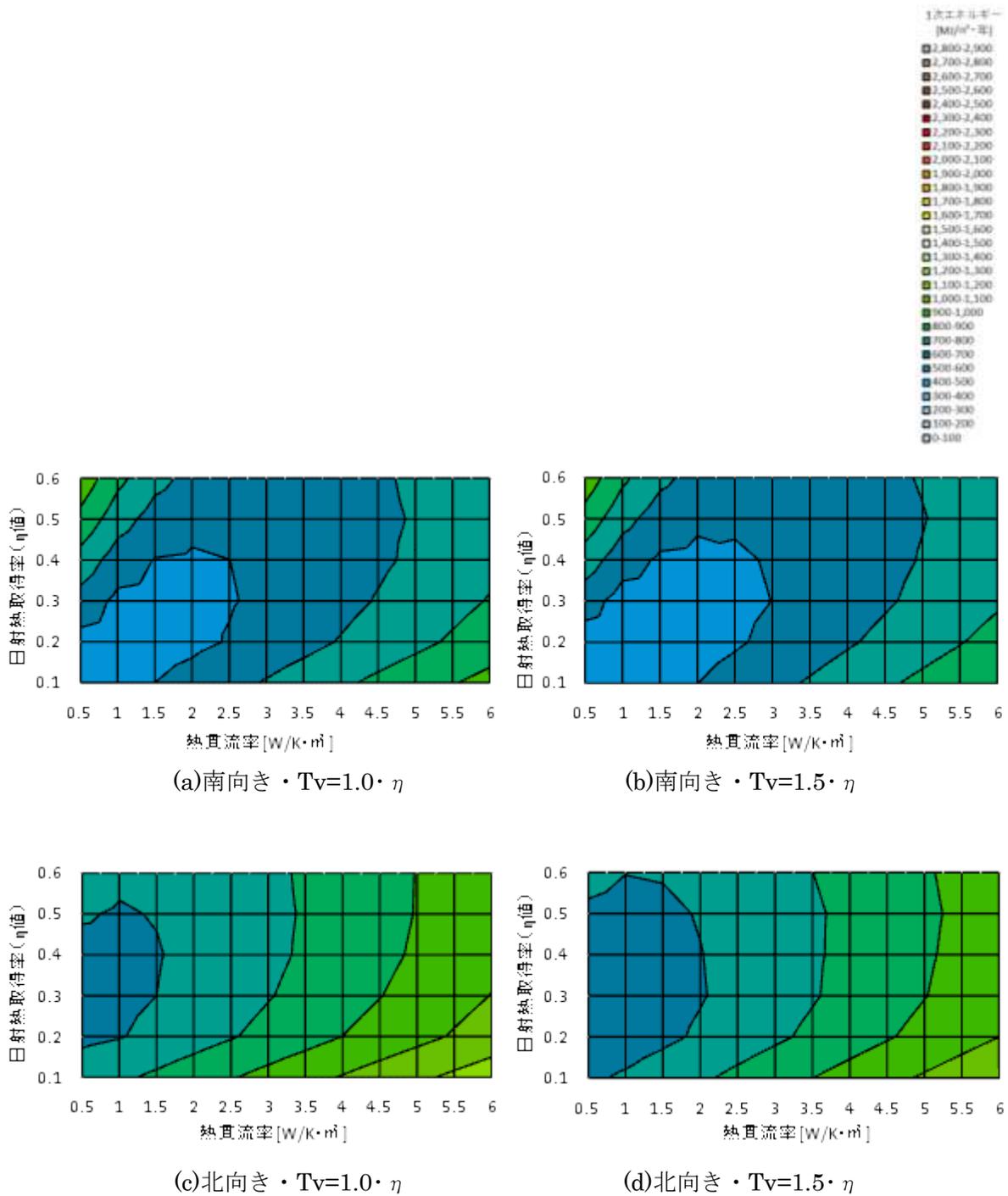
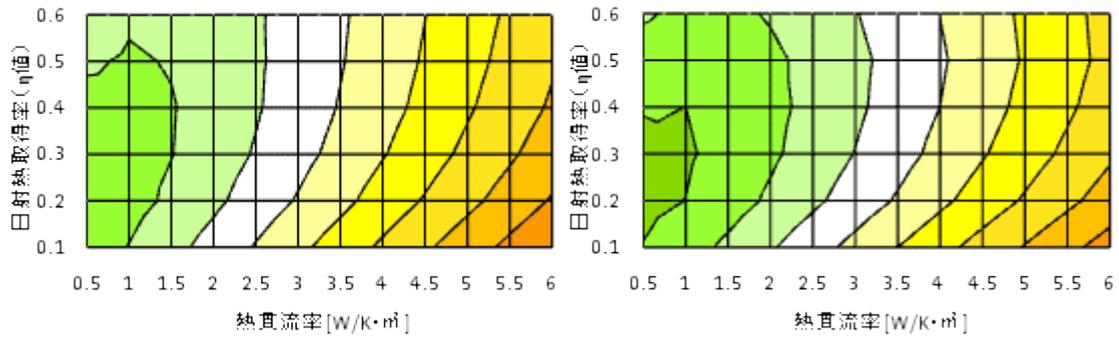
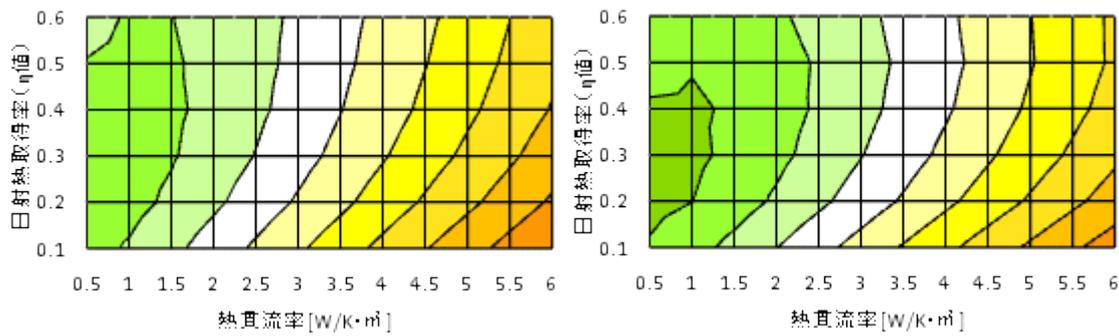


図3-1-15 合計1次エネルギー（東京・隣棟なし）



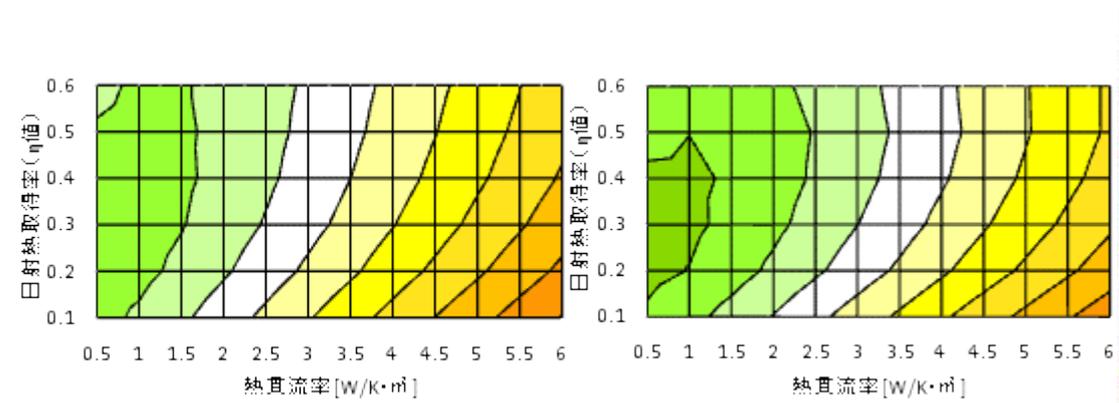
(a)南向き・ $T_v=1.0 \cdot \eta$

(b)南向き・ $T_v=1.5 \cdot \eta$



(c)西向き・ $T_v=1.0 \cdot \eta$

(d)西向き・ $T_v=1.5 \cdot \eta$

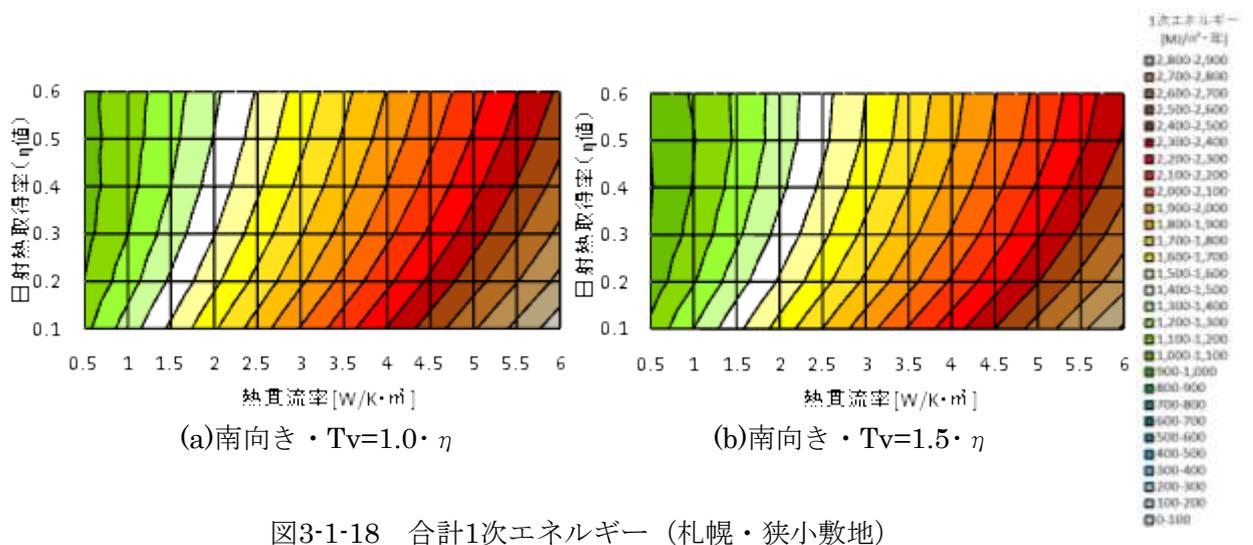
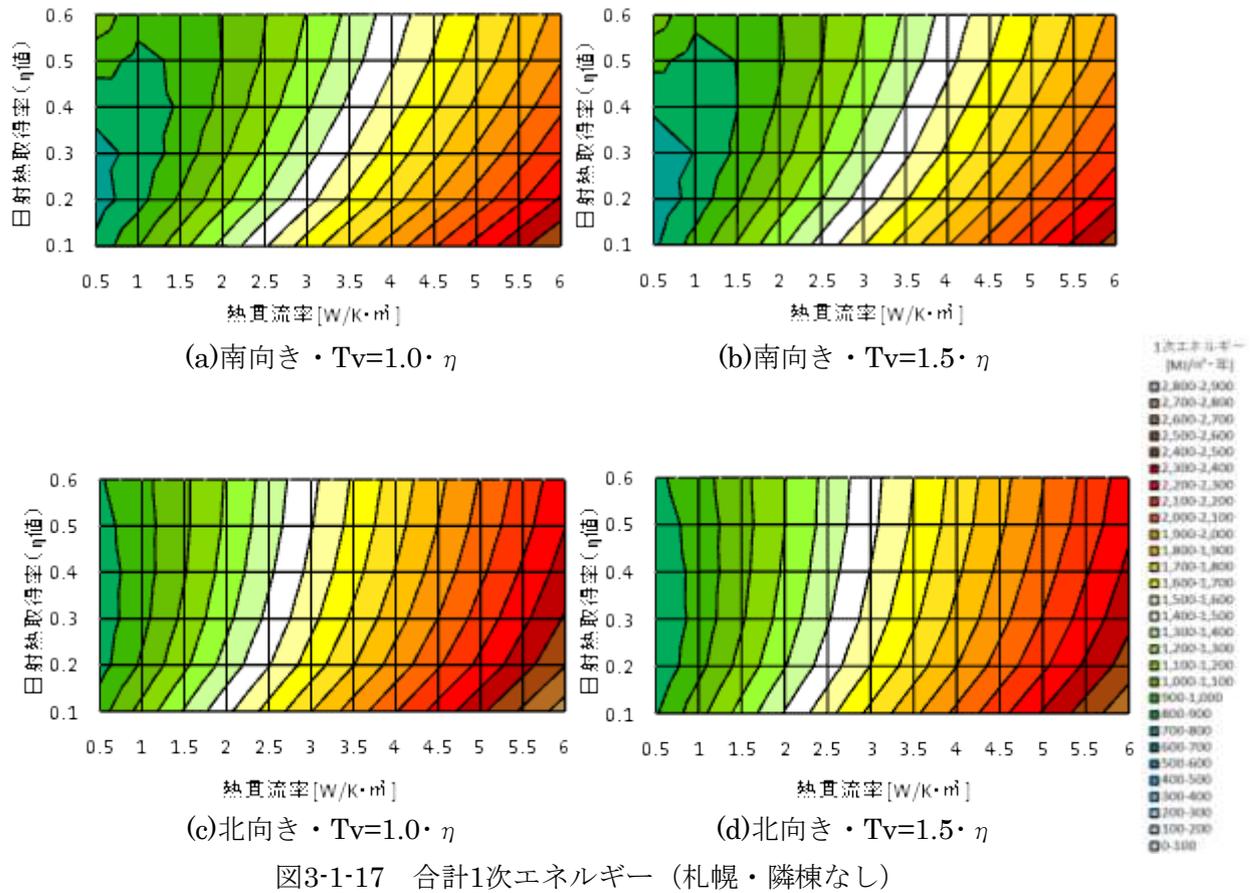


(e)北向き・ $T_v=1.0 \cdot \eta$

(f)北向き・ $T_v=1.5 \cdot \eta$



図3-1-16 合計1次エネルギー（東京・狭小敷地）



c. 目標性能

前項の計算結果から導き出された目標性能を、表3-1-3に示す。

表3-1-3 事務所の場合の目標性能

立地	外皮 の 方位	50[MJ/年]削減			エネルギー最小化		
		熱貫流率 [W/K・㎡]	日射熱 取得率	可視光 透過率 [%]	熱貫流率 [W/K・㎡]	日射熱 取得率	可視光 透過率 [%]
東京	南	1.5	0.2	20	1.0	0.2	30
	北	1.5	0.3	30	1.0	0.3	45
札幌	南	1.5	0.2	20	1.0	0.3	45
	北	1.5	0.2	20	1.0	0.4	60

2) 学校

a. 窓の場合の1次エネルギーの計算結果

50[MJ/m²・年]削減の比較対象である、窓の仕様と性能を、表3-1-4に示す。また、表3-1-5に、窓の場合の1次エネルギーの計算結果、及び50[MJ/m²・年]削減を達成する暖房、照明の合計1次エネルギーを示す。

表3-1-4 窓の場合の仕様（東京）

窓の仕様			窓の性能		
サッシ	ガラス	中空層	熱貫流率 [W/K・m ²]	日射熱取得率	可視光透過率 [%]
金属 熱遮断	Low-E	6 mm	3.49	0.6	70%

表3-1-5 窓の場合の1次エネルギー（東京）

方位	1次エネルギー[MJ/m ² ・年]		50[MJ/m ² ・年]削減を達成する 暖房・照明の合計1次エネルギー
	暖房	照明	
南	448	148	547
西	504	156	611
北	560	162	672

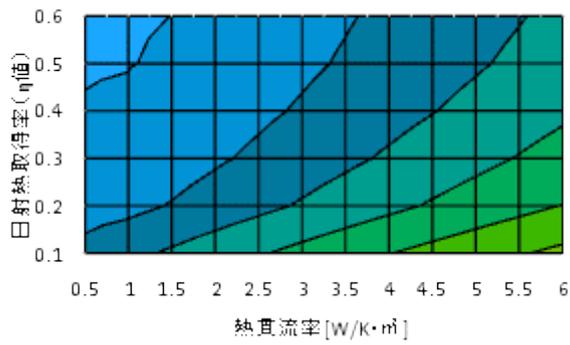
b. ガラス外皮の場合の1次エネルギーの計算結果

図3-1-19に、ガラス外皮の場合における、暖房と照明の合計の1次エネルギーの計算結果を示す。合計エネルギーは、南、西、北のいずれの方位であっても、熱貫流率が小さく、日射熱取得率が大きいほど小さくなる。これは、断熱性能が高く、日射熱取得量が多いほど暖房1次エネルギーが小さくなることと、日射熱取得率が大きいほど可視光透過率も高くなり、照明1次エネルギーが小さくなるためである。

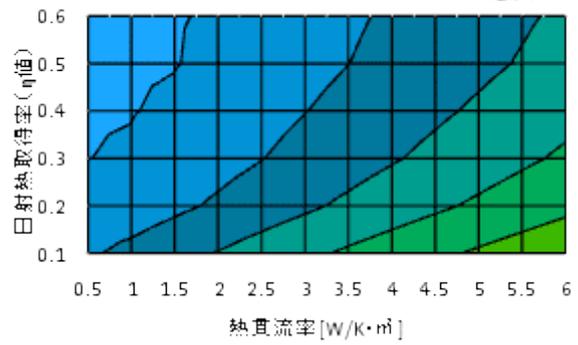
表3-1-6～表3-1-8に、50[MJ/m²・年]削減を達成するガラス外皮の性能を、熱貫流率0.5[W/K・m²]刻み毎に示す。50[MJ/m²・年]削減を達成する性能は、熱貫流率と日射熱取得率との組み合わせにより多数ある。

同表の右欄に冷房1次エネルギーを示す。学校の場合には冷房を行わないことが一般的であるため、削減対象には含めていない。しかし、教室内の夏季の温熱環境は、外皮の性能により大きく異なる。そのため、冷房1次エネルギーを指標として、夏季の温熱環境も考慮することとする。

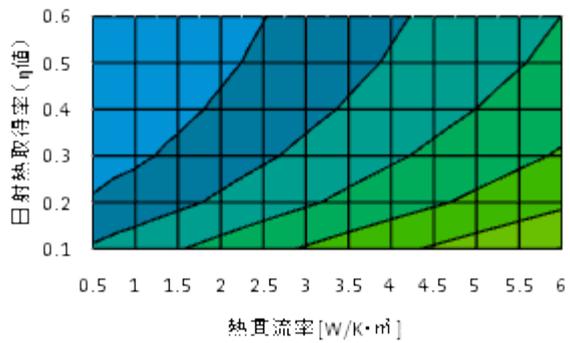
このような考え方に基づくと、例えば南向きの場合には、50[MJ/m²・年]削減を達成し、かつ、冷房1次エネルギーが最も小さくなるのは、熱貫流率1.0[W/K・m²]程度、日射熱取得率0.2程度、可視光透過率30%程度となる。



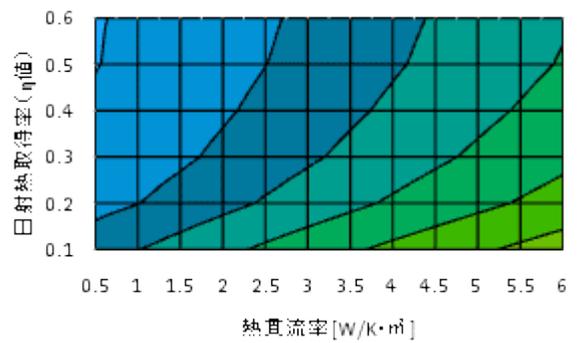
(a)南向き・ $T_v=1.0 \cdot \eta$



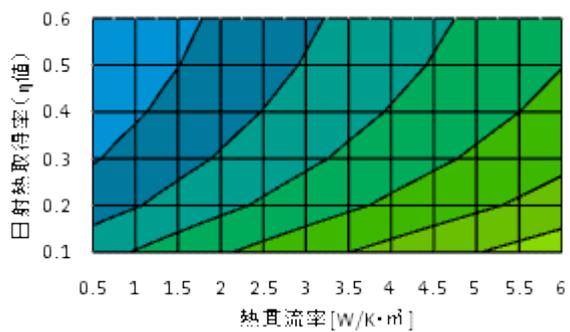
(b)南向き・ $T_v=1.5 \cdot \eta$



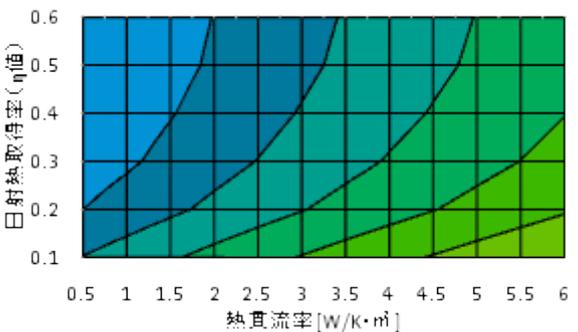
(c)西向き・ $T_v=1.0 \cdot \eta$



(d)西向き・ $T_v=1.5 \cdot \eta$



(e)北向き・ $T_v=1.0 \cdot \eta$



(f)北向き・ $T_v=1.5 \cdot \eta$

図3-1-19 合計1次エネルギー（東京・隣棟なし）

表3-1-6 50[MJ/m²・年]削減を達成する外皮性能と冷房1次エネルギー（東京・南向き）

	50[MJ/m ² ・年]削減を達成する外皮性能			冷房1次 エネルギー [MJ/m ² ・年]
	熱貫流率 [W/K・m ²]	日射熱取得率	可視光透過率 [%]	
Tv=1.0・η	0.5	0.16	24	107
	1	0.20	30	86
	1.5	0.28	41	97
	2	0.38	57	116
Tv=1.5・η	0.5	0.21	21	135
	1	0.26	26	121
	1.5	0.33	33	124
	2	0.43	43	138

表3-1-7 50[MJ/m²・年]削減を達成する外皮性能と冷房1次エネルギー（東京・西向き）

	50[MJ/m ² ・年]削減を達成する外皮性能			冷房1次 エネルギー [MJ/m ² ・年]
	熱貫流率 [W/K・m ²]	日射熱取得率	可視光透過率 [%]	
Tv=1.0・η	0.5	0.15	23	85
	1	0.19	28	70
	1.5	0.25	37	71
	2	0.33	49	80
Tv=1.5・η	0.5	0.20	20	109
	1	0.25	25	98
	1.5	0.32	32	97
	2	0.41	41	106

表3-1-8 50[MJ/m²・年]削減を達成する外皮性能と冷房1次エネルギー（東京・北向き）

	50[MJ/m ² ・年]削減を達成する外皮性能			冷房1次 エネルギー [MJ/m ² ・年]
	熱貫流率 [W/K・m ²]	日射熱取得率	可視光透過率 [%]	
Tv=1.0・η	0.5	0.13	20	64
	1	0.17	26	53
	1.5	0.22	33	49
	2	0.29	43	54
Tv=1.5・η	0.5	0.18	18	82
	1	0.23	23	73
	1.5	0.30	30	72
	2	0.38	38	78

c. 目標性能

表3-1-9に、前項での計算結果から導き出した、50[MJ/年]削減を達成し、冷房1次エネルギーが最小化される外皮の性能を示す。熱貫流率は、南と西向きが1.0[W/K・m²]程度となるのに対して、北向きの場合には1.5[W/K・m²]程度となる。これは、冷房負荷は熱貫流率が大きく、日射熱取得率が小さいほど小さくなるが、北向きの場合には南・西と比較して壁面日射量が少ないため、日射熱取得率を小さくすることよりも、熱貫流率を大きくすることが、冷房1次エネルギー低減につながるということが反映されたと考えられる。

ただし、学校では、校舎全体で窓の性能を統一する方が、実用的であることも勘案し、目標性能は、表3-1-10に示す値とする。

なお、札幌における目標性能についての検討は、3年目に行う予定であったが、本研究開発を2年目までの途中で終了したため、実施していない。

表3-1-9 50[MJ/年]削減を達成し、冷房1次エネルギーが最小化される外皮性能

	熱貫流率 [W/K・m ²]	日射熱取得率	可視光透過率 [%]
南向き	1.0	0.20	30
西向き	1.0	0.19	30
北向き	1.5	0.22	30

表3-1-10 学校の場合の目標性能（東京・50[MJ/年]削減）

	熱貫流率 [W/K・m ²]	日射熱取得率	可視光透過率 [%]
全方位	1.0	0.2	30

3-2. 快適な光環境創出のための目標性能検討

(1) 目的

昼間において快適性の高い光環境を創出するためには、人工照明に頼り切るのではなく、自然光を採り入れて、昼間にふさわしい明るさ等を形成することが重要である。そのためには、自然光によるグレアを抑制する必要がある。ここでは、グレアを排除しつつ、最大限の採光を行うために求められる、ガラス外皮の目標性能を明らかにすることを主な目的とする。

(2) 検討概要

まず、図3-1-1の事務所の建物モデルを用い、ガラス外皮の可視光透過率と、部屋の中央の位置からガラス外皮を見た時のグレア感評価との関係を推定する。立地は東京とし、ガラス外皮は可視光を均等拡散透過すると仮定する。グレア感評価の推定式を以下に示す。

y : グレア感評価 (0=グレアを感じない～3.5=ひどすぎると感じ始める)

A1 : -0.57 (Logistic回帰による定数)

A2 : 3.0 (Logistic回帰による定数)

X : 視野内平均輝度[cd/m²]

X₀ : 1100 (Logistic回帰による定数)

p : 1.70 (ガラス外皮のポジションインデックス※)

※ 観察点との位置関係による重み付け

$$y = \frac{A1 - A2}{1 + (X / X_0)^p} + A2$$

次に、不満者率、及び「グレアを生じる年間割合」を算出する。不満者率は総量グレアに着目し、オフィスを想定した場合に、グレアを許容できない人の割合である。また、不満者率はグレア感評価とほぼ比例の関係にある。「グレアを生じる年間割合」は、年間において、不満者率が設定値(0.1～0.4)以上となる合計時間の割合である。

(3) 検討結果と目標性能の導出

図3-2-1に「グレアを生じる年間割合」の計算結果を示す。南向きの場合には、「隣棟なし」、「不満者率0.1」、可視光透過率が30%の場合に、「グレアを生じる年間割合」が、30%程度となる。これは1割の人が、年間の30%程度の頻度で、グレアを感じることを意味する。また、「グレアを生じる年間割合」は南、西、北の順で大きい。これは、日照条件の良い方位の方が、ガラス外皮の壁面輝度が高くなるためである。

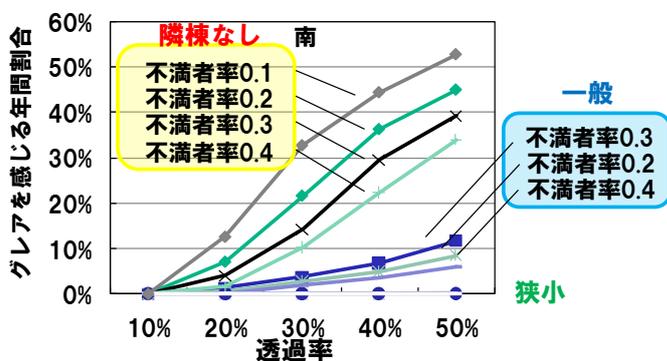
ブラインド等の付属部材は、室内の一部の人がグレアを生じた段階で閉じられるので、以降では不満者率が比較的小さい、0.1の場合を許容限界として設定する。

3-1において、エネルギーの観点から導出した可視光透過率の目標性能は、事務所と

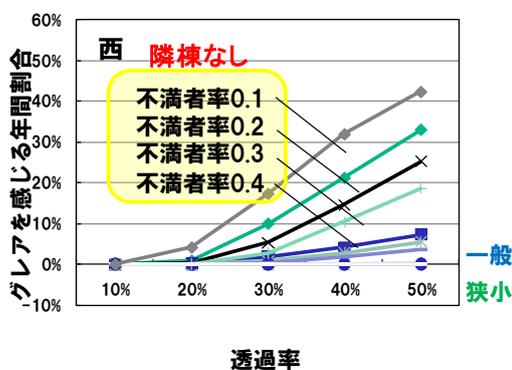
学校の50[MJ/m²・年]削減の場合で20~30%、事務所のエネルギー最小化の場合で30~60%であった。

このうち、可視光透過率20~30%の場合については、隣棟が無い場合には、グレアを感じる年間割合は南で30%、西で20%、北で0%程度と比較的小さくなる。この場合、グレア防止のためのブラインド等の制御が若干必要と考えられるが、許容し得る範囲と判断し、可視光透過率20~30%を目標性能の1つに設定する。

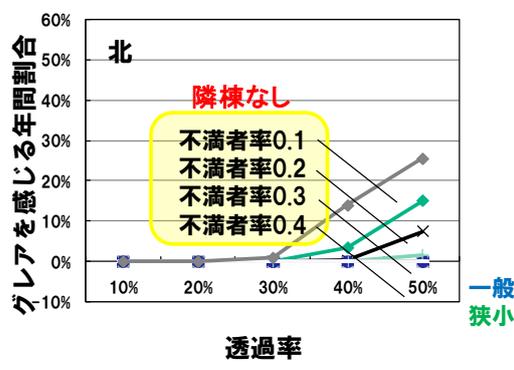
一方、可視光透過率30~60%の場合については、グレアを感じる年間割合は極めて高くなる。そのため、グレアの抑制をブラインド等の付属部材により行う場合には、採光を損なわないために、頻繁かつ適切な開閉制御が不可欠になる。しかし、居住者が手動で制御することは困難である。また、ブラインド等の自動制御については、既に既往の技術や製品があるが、コスト等の面から、中小規模建物への適用は難しいと考えられる。そのため、本研究開発においては、ガラス外皮に対し、グレアを抑制しつつ最大限の採光を得るような、可視光の透過特性を付与する技術について検討することとした。これについては、3-3(3)にて報告する。以上のとおり、可視光透過率30~60%で、グレアを抑制する機能を有することを、2つ目の目標性能とする。



(a)南向きの場合



(b)西向きの場合



(c)北向きの場合

図3-2-1 グレアを感じる年間割合

3-3. 日射熱と可視光の制御部材の開発

(1) 目的

日射熱取得率については、冬には大きい方が暖房負荷の低減につながり、夏には小さい方が冷房負荷の低減につながる。そのため、夏・冬で日射熱取得率の季節制御を行うことが、暖冷房1次エネルギーの低減に大きく寄与する。

また、自然光については、直射光によるグレアを抑制しつつ、なるべく多くの採光を行うことが、照明1次エネルギーの低減と、良好な光環境形成にとって重要である。

ここでは、暖冷房・照明1次エネルギーの低減と、良好な光環境形成を最大限に図るために必要な、日射熱、及び自然光の制御の目標性能を明らかにすることを主な目的とする。

なお、検討は中途段階で終了したため、実施した内容についてのみ報告する。

(2) 日射熱の季節制御に関する検討

日射熱の制御には、いくつかの方法が考えられる。1例として、ダブルスキンが挙げられる。この方法は、ブラインドや中空層の開閉制御が不可欠であり、本研究開発が主対象とする中小規模建物においては、初期コスト、システムの維持・管理等の点から、あまり現実的ではない。また、庇を設置する方法もあるが、敷地面積の有効活用等を考慮すると、この方法を選択できる建物は限られる。

そこで、本研究開発では、ガラスそのものが有する入射角度特性（日射の入射角により透過率が大きく異なる特性）や、屈折を活かした制御について、検討を進めることとした。

図3-3-1は、立地が東京、隣棟による日影の影響が無い場合における、太陽高度と壁面日射量との関係を示す。この場合、太陽高度40°前後を閾値とし、夏は遮蔽、冬は取得というように、制御することが望ましい。

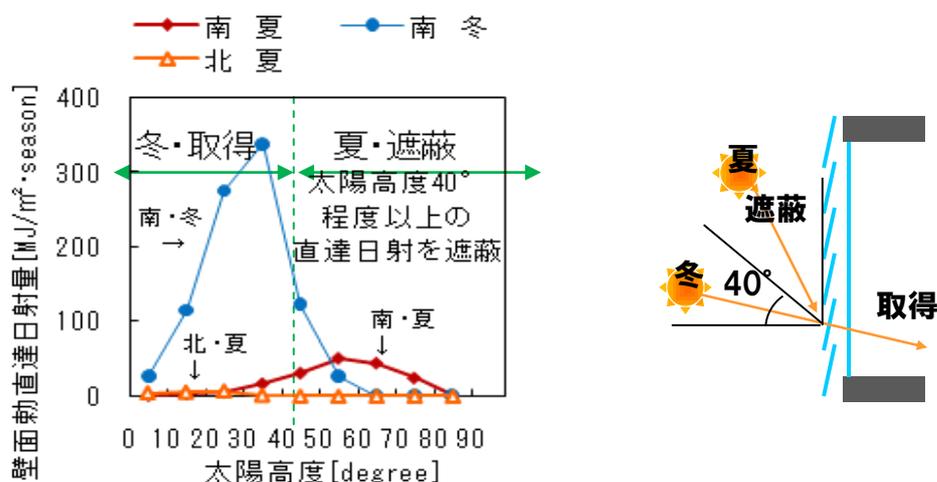


図3-3-1 太陽高度と壁面日射量（東京）

ガラス外皮の開発に向けては、こうした制御を可能とするよう、下見板張りのガラス外装や、次項で述べるガラスフィルムの場合も含め、ガラスの層構成を検討する方針とした。ただし、層構成についての詳細な検討には至っていないため、本報での報告は行わない。

(3) 可視光の制御に関する検討

室内において生じるグレアは、主にガラス外皮の輝度に由来する。輝度は、ガラス外皮から人の目の位置に放射される光の量である。したがって、ガラス外皮が多量の可視光を透過しても、それが、人の目の位置とは異なる方向に放射されるのであれば、輝度の上昇にはつながらず、グレアを抑制でき、かつ、室内の明るさは向上させ得る。

具体的イメージを図3-3-2に示す。透過光を均等拡散させる成分と、天井方向に透過させる成分に分ける。このうち、均等拡散させる成分については、グレアを抑えるために量的な制約が生じるが、室内全般に明るさをもたらすため、及び壁面を必要以上に暗く見せないために必要である。一方、天井方向に透過させる成分は、直接人の目に当たらないので、グレアを生じさせずに、通常は暗くなりがちな室奥ゾーンの明るさを向上させる。

このように配光（ガラス外皮の室内側面から放射される方向別の光量）を制御する技術としては、プリズムガラスのように表面形状を工夫したガラスや、微細な凹凸を有するガラスフィルムが考えられる。このうちプリズムガラスはガラスの金型が必要となり開発費用が現実的ではないことから、フィルムの開発が有力と考えられる。ここでは、フィルム開発に向けた、目標性能の検討を行った。



図3-3-2 可視光の制御のイメージ

まず、配光と室内照度との関係を把握するためのプログラムを開発した。図3-3-3はプログラムの入力画面である。プログラムは、エクセル上で計算条件の入力と計算結果の出力を行う。

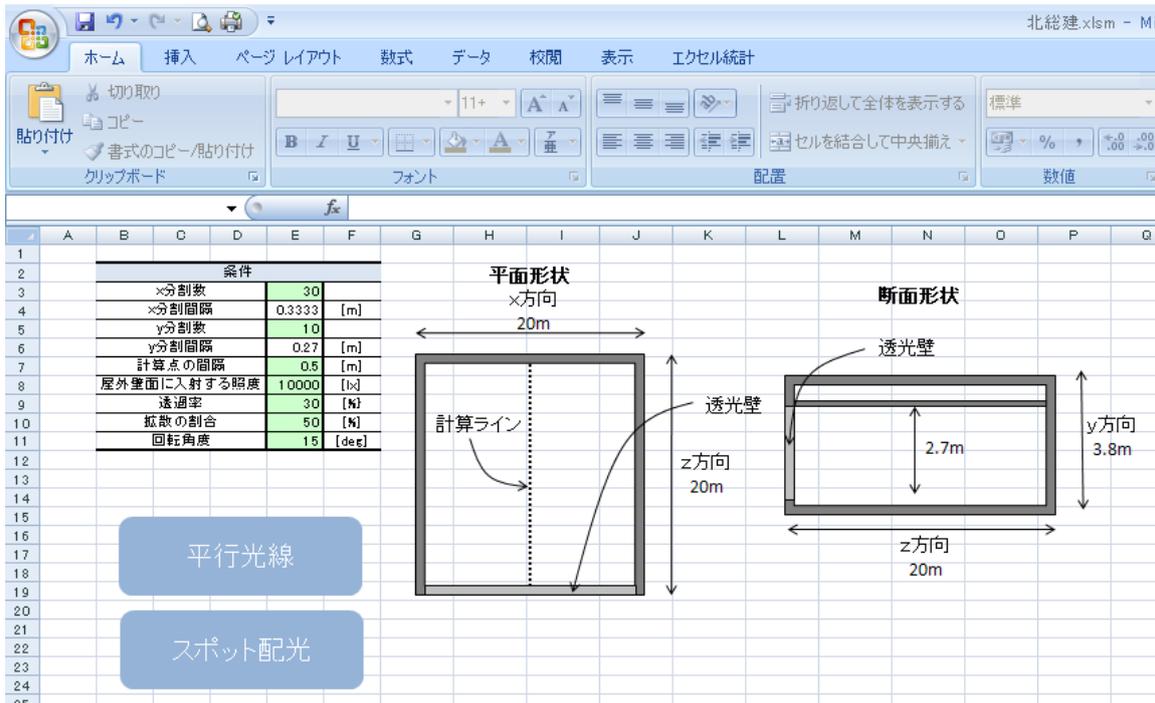


図3-3-3 配光計算プログラムの入力画面

次に、図3-3-4に示す2タイプの配光について検討を行った。両タイプともガラス外皮の下方部分は均等拡散とし、グレアを生じやすい上方部分は、50%を均等拡散、残り50%をスポットもしくは平行光線とする。

これら2タイプの場合の天井面照度の計算結果を、図3-3-5に示す。天井面照度は、ガラス外皮の上方部分も含めて、100%を均等拡散とする場合と比べると、50%をスポットの配光とする場合には、ガラス外皮から1.5m程度の範囲では低くなり、2m以上離れている範囲では若干高くなる。室奥側の天井面照度が高ければ、暗くなりがちなゾーンの机上面照度の向上につながる。また、50%を平行光線とする場合には、ガラス外皮から2~6m程度の範囲の天井面照度の向上効果が極めて高い。視覚的に明るさの明確な境界ラインがあることは、好ましいとは言えないため、若干はスポット配光のような拡散性を持たせる必要があるだろうが、基本的には平行光線に近い状態で、なるべく室奥側に自然光を導入すべきと考えられる。

以上を踏まえ、本研究開発では、フィルムの断面形状の設計を予定していたが、中途での終了となり実施には至らなかった。

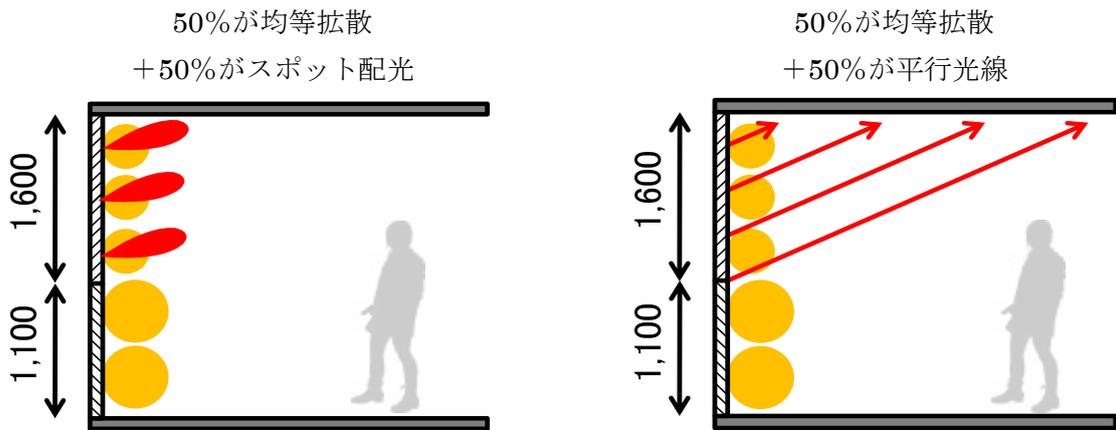
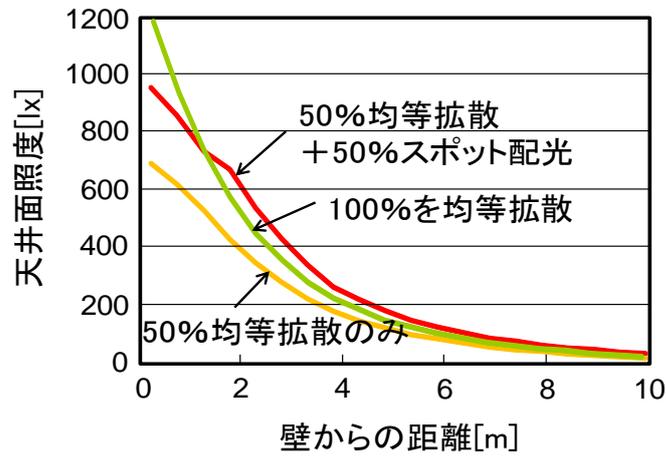
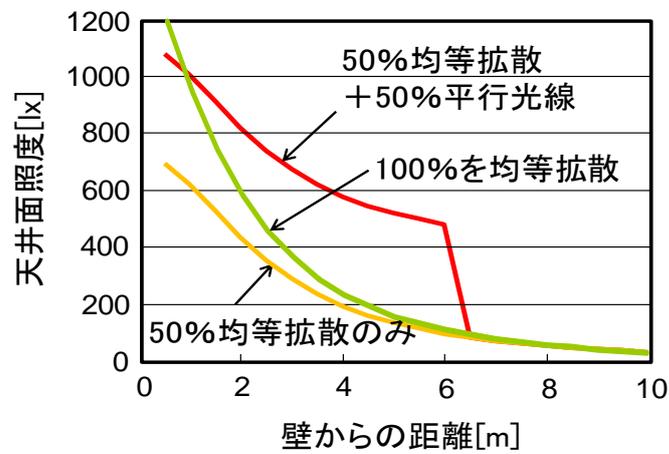


図3-3-4 配光のイメージ



(a)スポット配光の場合



(b)平行光線の場合

図3-3-5 天井面照度の計算結果

3-4. 層構成の構築

(1) 目的

2. 検討結果を踏まえ、かつ、3-1～3-3で導出したエネルギー・光環境面での目標性能を達成するガラス外皮を構築するため、断面層構成を検討する。

検討の大まかな流れとしては、1つめに、ガラス外皮に用いる各種部材の物性値等の調査を行い、2つ目に、どのような層構成の場合にどのような性能になるのかを予測するための「壁体熱性能予測プログラム」を作成し、3つ目に、それらを用いた層構成の検討を行う予定であった。しかし、中途での終了となったため、3つ目の実施は完了しなかった。

そのため、ここでは1つ目と2つ目の概要を報告する。また、3つ目の層構成の検討については、基本的方向性を示す1次提案について、次の4.において報告する。

(2) 部材の基礎検討

図3-4-1はガラスの可視光透過率と日射透過率の関係を示す。各値はメーカーカタログ値である。透明フロートガラスの場合には、可視光透過率と日射透過率に大きな違いはない。しかし、Low-Eガラスや熱線吸収ガラスの場合には、可視光透過率の方が日射透過率よりも高い。これはLow-Eガラスや熱線吸収ガラスの場合には、紫外線や赤外線を遮断して、可視光はなるべく透過するように、金属膜を施しているためである。また、可視光透過率は、日射透過率の1.5倍から2倍近くとなる場合もある。ただし、この倍率が大きいほど、金属膜の着色がきつくなり、視覚的な許容度合いが低下する傾向にある。

以上を勘案し、本研究開発では、可視光透過率は日射透過率の1倍、もしくは1.5倍の2種を想定することとした。この設定は、3-1における照明1次エネルギーの計算条件として用いている。

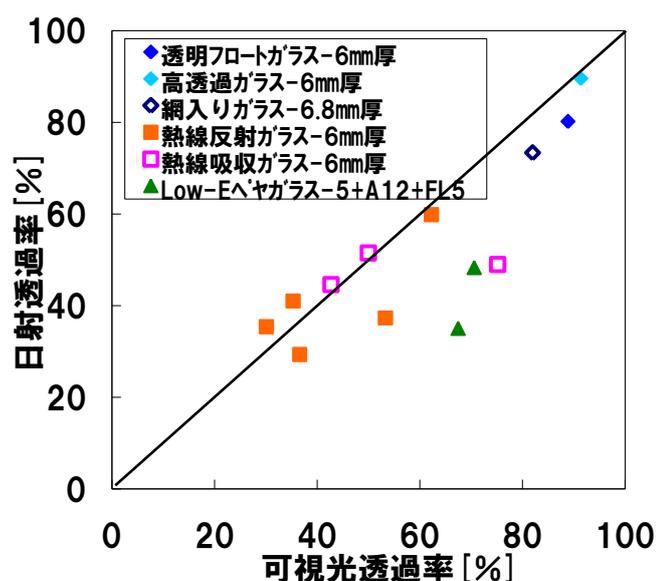


図3-4-1 ガラスの可視光透過率と日射透過率の関係

使用部材に関しては、断熱性能の向上のため、透光性断熱材の使用可能性も検討した。そのため、メーカーのカタログ等では把握できない、日射や可視光の透過率を実測した。

図3-4-2は、各種透光性断熱材の日射熱透過率の測定結果である。いずれの断熱材も、厚みが増すほど、指数関数的に日射透過率が低下する。

また、図3-4-3は可視光透過率と日射透過率の関係である。両者の間に違いは見られない。

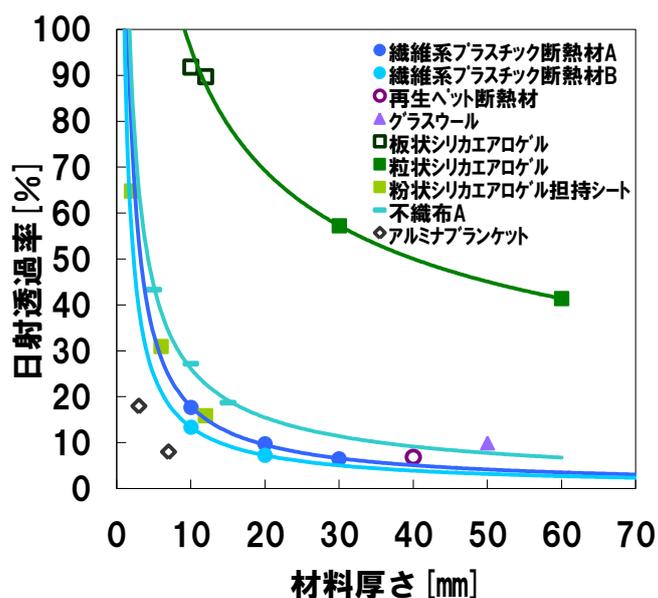


図3-4-2 透光性断熱材の日射透過率

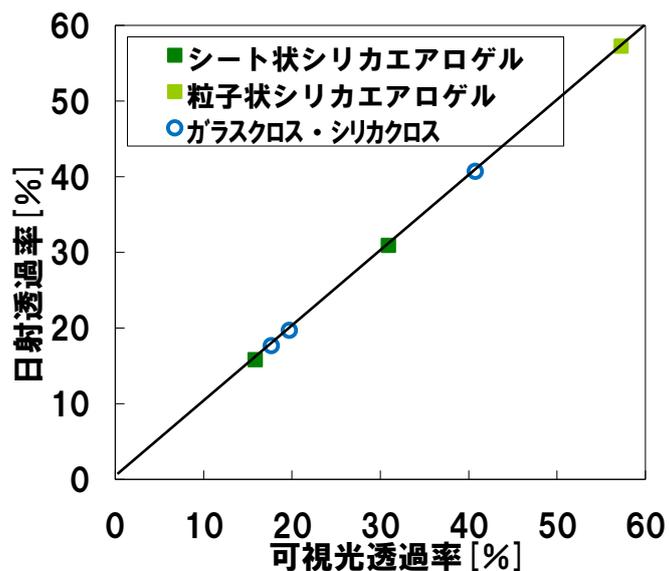


図3-4-3 透光性断熱材等の可視光透過率と日射透過率の関係

(3) 壁体熱性能予測プログラムの作成

「壁体熱性能予測プログラム」は、エクセル上で計算条件の入力と計算結果の出力を行う。図3-4-4はプログラムの層構成を入力するワークシートである。表3-4-1に入出力の概要を示す。プログラムは、ガラスの入射角度特性や、下見板張り状のガラス等、これまでに検討した手法や部材を入力、検討できるように作成した。

	A	B	C	D	E	F		
1			計算実行					
2		位置	大項目 (選択式)	中項目	小項目	値 (入力)		
3		全体		壁面方位角		-45		
4				窓高さ寸法			1000	
5				地表面反射率			10	
6				気象データ (SMASH形式)				
7				温度計算			0M	
8				助走開始日			1月1日	
9				計算開始日			1月2日	
10				計算終了日			1月3日	
11				第1層	外付けブラインド	外気側総合伝達率	第1層⇨外気	25
12						庇	庇先端の高さ(窓上端基準)		1000
13		庇の出(水平距離)					500	
14		庇面角度(水平が0, 先端が下がる方向を正)					15	
15		下面反射率					80	
16		外付けブラインド	スラット幅				30	
17			スラット間隔				25	
18			スラット角 (スラット角シートの列名)				E	
19		傾斜ガラス	日射反射率				70	
20			ガラス種類				test3	
21			ガラス幅				30	
22		傾斜ガラス	ガラス間隔				40	
23			傾斜角(水平が0, 外端が下がる方向を正)				45	
24			室内側対流熱伝達率			第1層⇨第2層	9	
25		第2層	空気(通気あり)	空気(通気あり)	上端有効開口面積	100		
26				空気(通気あり)	下端有効開口面積		50	
27				空気(通気あり)	上下端高低差		1800	
28				空気(通気あり)	厚さ		10	
29		第3層	ガラス	外気側対流熱伝達率	第3層⇨第2層or外気	25		
30				外気側放射熱伝達率	第3層⇨第1層or外気		2	
31				ガラス	ガラス種類		test1	
32				フィルム	フィルム種類		フィルム2	
33				室内側対流熱伝達率	第3層⇨次の空気 (第4層or第8層or室内)		2	
34				室内側放射熱伝達率	第3層⇨次のガラス・ブラインド・室内		2	
35		第4層	空気(通気なし)	共通	厚さ	10		
36				空気(通気あり)	空気(通気あり)	上端有効開口面積	40	
37					空気(通気あり)	下端有効開口面積		40
38				ガス	ガス	上下端高低差	1800	
39					ガス	ガス種類		gas01
40					透光性断熱材	断熱材種類		ins01
41					透光性断熱材	分割数		3

図3-4-4 「壁体熱性能予測プログラム」の層構成入力ワークシート (一部)

表3-4-1 壁体熱性能予測プログラムの入出力の概要

入力	層構成	最低で1層（ガラス1枚）の場合から、最大で8層（トリプルガラスと外付けの付属部材）の場合までが入力可能	
	各種部材	外付けの付属部材	庇、外付けブラインド、下見板張り状のガラスが入力可能。
		ガラス	直達日射の入射角度特性を入力する。
		ブラインド	外付けブラインド、室内のブラインド、ガラス内蔵ブラインドが入力可能。スラットの寸法、及び毎時のスラット角の設定値を入力する。
	ガラスの中空層	空気、ArやKrなどの各種ガス、透光性断熱材、外気との間の通気が入力可能。通気については、有効開口面積、毎時の風圧係数を入力する。	
その他	毎時の気象データ、室温と入力する。各種部材の熱伝導率、表面熱伝達率、日射透過率・吸収率など、熱物性値を入力する。		
出力	貫流熱	毎時の、室内と外気間の貫流熱量を出力する。	
	日射熱	毎時の、日射熱の取得量と出力する。	

4. システム構築と試行・検証

4-1. 目的

事務所、学校を対象に、本外皮の適用のためのシステムイメージ作りや、モックアップの1次試作と検証を行った。ここでは、その概要を報告する。

なお、当初の計画では前述の3-4で述べた層構成の検討をさらに進めた上で、モックアップの2次試作と検証を実施し、最終提案を行う予定であったが、中途での終了となったため、これらは実施しなかった。

4-2. 事務所を対象とする場合

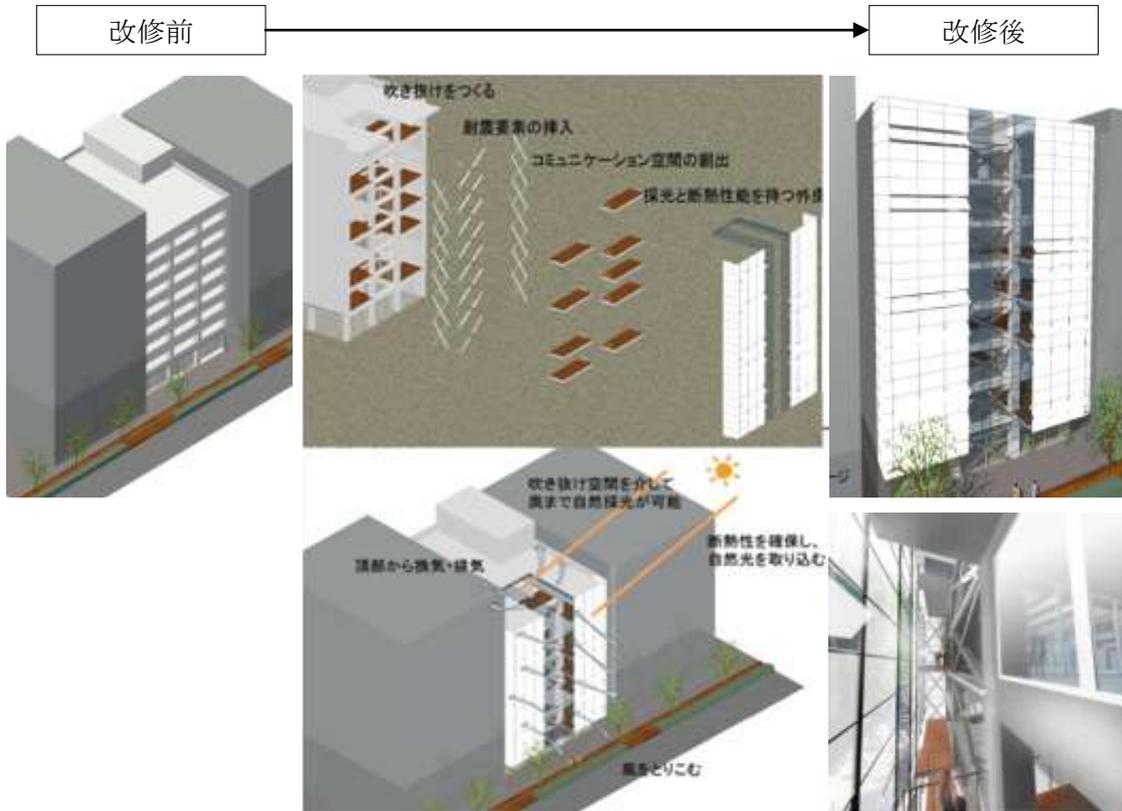
モックアップの1次試作と検証については、2. で述べたとおりである。

システムイメージについては、新築・改修の双方を対象に、工法、エネルギーと光環境、意匠等を考慮した層構成の1次提案を行った(図4-2-1)。また、改修の場合におけるコンセプトを検討した(図4-2-2)。

層構成の1次提案では、日照条件と階を考慮した大まかな方針を示している。(図4-2-3)。日照条件については、暖冷房・照明1次エネルギー、室内光環境に及ぼす影響が大きいため、日照条件が優れる場合、悪い場合の大きく2パターンについて提案する方針とした。また、階については、1階では歩行者などの視線の通り具合によって室内の快適性が異なること、屋内外空間の心理的な一体感の度合いが、街並みの形成に影響を及ぼすこと等に配慮することとした。



図4-2-1 新築、改修の場合の層構成の検討



<コンセプト>

- 1) 環境負荷の低減
 負荷を低減する採光・断熱システム
 ガラスを用いた高耐久ファサード
- 2) 耐震性の向上
 既存ストックを良質ストックにする
- 3) ハイコンタクト空間の創出
 コミュニケーション空間の創出
 知的生産性の向上

図4-2-2 改修の場合のコンセプト

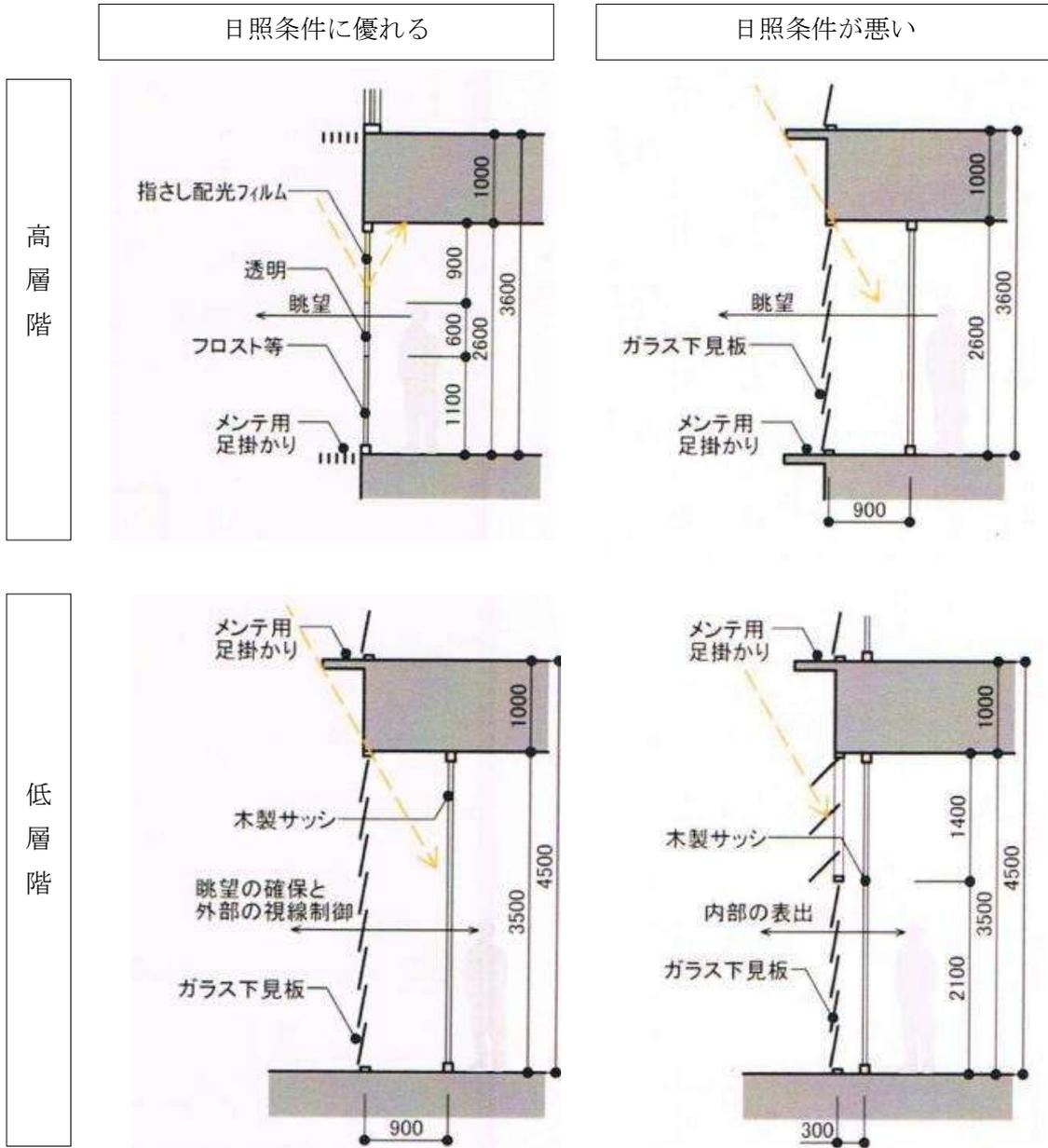


図4-2-3 層構成の1次提案

4-3. 学校を対象とする場合

学校については、児童や生徒の最も主要な使用スペースである普通教室を対象とし、外壁の他に、間仕切り壁への適用も含めて検討を行った。

図4-3-1は、本技術を適用した空間のイメージである。タイプ1、2とも、外壁にはガラス外皮と、眺望や通風などを採るための窓を配置している。また、隣室との間仕切り壁の一部、廊下との間仕切り壁も、透光性とすることをイメージしている。廊下との間仕切り壁については、片廊下型の場合には、廊下の窓からの採光を教室内にもたらず効果があり、中廊下型の場合には、教室の採光を廊下にもたらず効果がある。

また、タイプ2では、机のレイアウトにも工夫を施している。児童や生徒の机を斜めに配置することで、グレアを生じる窓面をあまり見ない角度とし、かつ、黒板も室奥側に配置することで、黒板面での光の照り返しを防ぎ、板書の視認性を増すことを意図している。

校舎の形態については、例えば表4-3-1のように、ガラス外皮の適用面積を大きくすることで、いっそうの自然エネルギー利用を図る可能性もある。また、学習時の空間利用等については、表4-3-2のような展開も考えられる。



(a)タイプ1



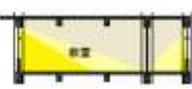
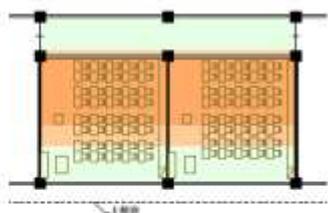
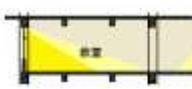
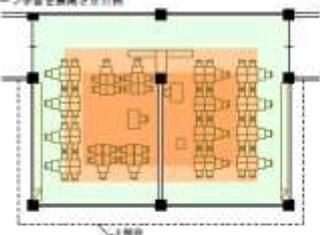
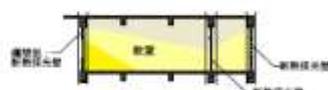
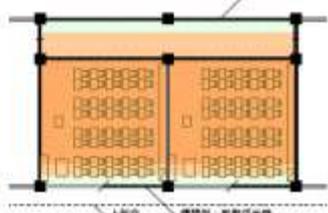
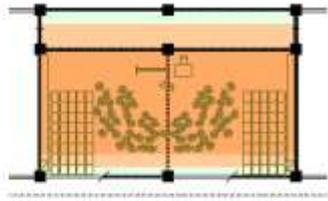
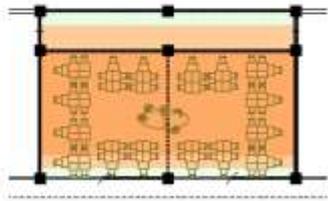
(b)タイプ2

図4-3-1 普通教室における適用イメージ

表4-3-1 校舎の平面形態

比較項目	東西軸配置			南北軸配置			比較評価
	並列型 1階採光	教室外壁率 25%	2教室型 2階採光	教室外壁率 30%	1教室型 3階採光	教室外壁率 75%	
教室構成							・教室の外壁率と採光性能、教室全体のバランスを検討するために、3種類の外壁率の教室配置と東西、南北軸を比較検討する。
光							・3階採光が可能なことで教室全体の照度は高まるが、開口付近と教室中央部での照度差が大きくなる。
							・3階採光が可能なことで教室全体の照度が高まる。教室の深い部手と前後のバランスを壁やガラス開口部で取りやすい。 ・自然光壁の光の配布効果により教室内の照度がほぼ均一になる。
熱							・3階開口により外壁率が高まり、熱負荷が高まる。
							・3階開口により外壁率が高まり、熱負荷が高まるが、自然ガラスをセッシン開口部などで行うことが考えられる。
自然採光							・自然採光を壁や天井、自然採光ガラスをセッシン開口部などで行うことが考えられる。
通風							・3階開口により通風、換気がしやすい。

表4-3-2 学習時の空間利用の展開

①	標準型校舎・改築・1面採光	オープン型校舎・新築・2面採光
シングルガラス使用	<p>光</p> <ul style="list-style-type: none"> ・教室前後が明るくなりすぎ、カーテンなどの利用頻度が高くなる。 ・教室内の温度による温度差がある。  <p>熱</p> <ul style="list-style-type: none"> ・冬には教室の窓側や下側が暑くなり、暖房器具まわりが暑くなりやすい。 ・教室内の温度による温度差があり、冬に集中しにくい学習空間になる。 <p>一般的な学習展開の例</p> 	<p>光</p> <ul style="list-style-type: none"> ・教室前後が明るくなりすぎ、カーテンなどの利用頻度が高くなる。 ・教室内の温度による温度差がある。 ・オープンスペースには照明の維持負担になりやすい。  <p>熱</p> <ul style="list-style-type: none"> ・冬には教室の窓側や下側が暑くなり、暖房器具まわりが暑くなりやすい。 ・教室での暖房による温度差があり、冬に集中しにくい学習空間になる。 ・冬にはオープンスペースより教室前後での学習活動が多くなりやすい。 <p>グループ学習を展開させた例</p> 
	断熱透光壁使用	<p>光</p> <ul style="list-style-type: none"> ・教室内がほぼ均等にあかるくなる ・教室内の温度による温度差が軽減され、冬に集中しやすい学習空間になる。  <p>熱</p> <ul style="list-style-type: none"> ・教室内がほぼ均等に温かく、夏も暑くなりやすい。 ・教室内の温度による温度差が軽減され、冬に集中しやすい学習空間になる。 <p>①一般的な学習展開の例</p>  <p>②クラス合同の学習で扉まで照明を受けている様子</p>  <p>③クラス合同のグループ学習活動を行う場合の例</p> 

校舎の構造については、RC造、鉄骨造、木造のそれぞれで、純ラーメン、一方向が壁、両方向が壁といったタイプが考えられる。構造の類型化については、2-2(3)を参照されたい。

構造タイプの違いにより、柱の見つけ面積が異なる等の理由から、ガラス外皮、及び透光性のある間仕切り壁を設置できる面積も異なる。そのため、構造タイプが設置面積や1次エネルギーに与える影響について検討を行った。

表4-3-3に検討に用いた構造タイプ、及びガラス外皮や間仕切り壁等の配置を示す。天井高は3000mmに固定し、構造タイプにより必要な梁せいを設定した。したがって、階高は構造タイプにより異なる。表4-3-4に、計算に用いた外皮や透光性のある間仕切り壁の性能と、設置面積あたりの1次エネルギーを示す。

表4-3-3 構造タイプとガラス外皮、間仕切り壁、窓の配置

	純ラーメン1	純ラーメン2	一方向	両方向
窓	断面 	断面 	断面 	断面
	平面 	平面 	平面 	平面
採光壁	断面 	断面 	断面 	断面
	平面 	平面 	平面 	平面

壁
 窓
 ガラス外皮
 透光性のある間仕切り

表4-3-4 ガラス外皮、間仕切り壁の性能と1次エネルギー消費量（壁面積あたり）

		熱貫流率 [W/K・m ²]	日射熱 取得率	可視光 透過率 [%]	方位	1次エネルギー [MJ/m ² ・年]		
						暖房	照明	冷房
主採光面	窓	3.49	0.6	30	南	448	148	137
					東	504	156	111
					北	560	162	85
	ガラス 外皮	1.00	0.2	30	南	374		86
					東	396		70
					北	417		53
腰壁、柱、梁	1.20	—	—	共通	458			
他	教室-教室 間仕切り壁			50				
	教室-廊下 間仕切り壁			50				
	廊下 窓			60				

※ガラス外皮は、暖房・照明の合計1次エネルギーを50[MJ/m²・年]削減し、夏季オーバーヒートに配慮するタイプ

※窓の性能は、防火を考慮し、金属熱遮断サッシ+Low-Eペア（A6mm）

※主採光面の窓の可視光透過率は、カーテンを加味

※透光性の間仕切り壁の可視光透過率は、日射熱取得率の制限がかからないため、外皮より高く設定

※廊下の窓の可視光透過率は、グレアの防止対策を教室より緩和して、主採光面より高く設定

表4-3-5に、1教室あたりの設置面積、1次エネルギーの計算結果を示す。ガラス外皮の設置面積は、S造、RC造、木造の順で大きい傾向にある。また、S造の場合には透光性の間仕切り壁も比較的大面積で設置できる。梁せいについては、RC造、S造、木造の順で大きくなった。そのため、RC造の場合には、非透光性の外壁となる部分の面積が大きく、この部分からの冬季熱損失が大きくなる。以上を概略まとめると、窓の場合における1次エネルギー消費量は、S造、木造で小さく、ガラス外皮を導入した際の1次エネルギー削減効果は、S造の場合に高いと考えられ得る。一方、コストの面ではRC造が有利と推定される。

表4-3-5 構造タイプ別の1次エネルギー消費量（教室あたり）と構造コスト係数

		RC				S				木			
		純ラーメン1	純ラーメン2	一方向	両方向	純ラーメン1	純ラーメン2	一方向	両方向	一方向	両方向		
設置面積	窓	15.2	15.2	14.9	15.8	16.0	16.0	16.0	16.3	14.5	15.8	m ²	
	ガラス外皮	21.8	21.8	21.3	22.5	22.8	22.8	22.8	23.3	20.7	20.7	m ²	
	隣室との透光性の間仕切り壁	5.4	10.9			5.7	11.4					m ²	
	廊下との透光性の間仕切り壁	21.8	21.8	21.3		22.8	22.8	22.8	17.1	20.7	4.8	m ²	
南	窓	照明	1857	1790	1898	3094	1782	1730	1804	2199	1942	3106	MJ/年・1教室
		暖房	14507	14507	14325	13945	13200	13200	13200	12640	12770	12757	MJ/年・1教室
		合計	16.4	16.3	16.2	17.0	15.0	14.9	15.0	14.8	14.7	15.9	GJ/年・1教室
	ガラス外皮	照明	1463	1481	1585	2590	1339	1432	1506	1840	1622	2733	MJ/年・1教室
		暖房	12830	12830	12683	12210	11442	11442	11442	10847	11174	11174	MJ/年・1教室
		合計	14.3	14.3	14.3	14.8	12.8	12.9	12.9	12.7	12.8	13.9	GJ/年・1教室
東	窓	照明	2165	2102	2214	3912	2079	2026	2101	2589	2264	3931	MJ/年・1教室
		暖房	15360	15360	15160	14827	14094	14094	14094	13552	13582	13639	MJ/年・1教室
		合計	17.5	17.5	17.4	18.7	16.2	16.1	16.2	16.1	15.8	17.6	GJ/年・1教室
	ガラス外皮	照明	1658	1687	1805	3294	1517	1623	1706	2134	1849	3441	MJ/年・1教室
		暖房	13298	13298	13141	12694	11933	11933	11933	11347	11619	11619	MJ/年・1教室
		合計	15.0	15.0	14.9	16.0	13.4	13.6	13.6	13.5	13.5	15.1	GJ/年・1教室
構造コスト係数		1	1	0.94	0.91	1.08	1.08	1.04	1	1.02	0.98	腰壁・窓・ガラス外皮を除く	

※面積 : 主採光面での設置面積

※窓 : 高さ900の腰壁がある

※ガラス外皮 : 床～天井まで全てを、ガラス外皮とする

※構造コスト係数 : RC造、純ラーメンを1として、構造部分で発生する建設コストの比率

5. 総括

本研究開発は事務所、学校の低中層建物を対象に、日射熱や自然光の自然エネルギー利用によるCO₂排出量の低減、耐久性の向上、維持管理やファサードの意匠性向上を図る、全く新しい建築外皮システム、及びそれを支える建築構造システムの開発を目的とした。

本研究開発は当初3年を予定していたが、2年で終了したため、実施し得なかった検討項目も多くある。本研究開発で得られた成果や、残された検討課題をまとめると、次のとおりである。

5-1. 高耐久ガラスファサードを実現する外皮と建築構造システムの開発

中低層の一般建築に適用される代表的な躯体構造と外装は、建設工期の短縮化・ローコスト化等の視点から、鉄骨構造に軽量気泡コンクリート板や中空セメント板などの乾式外装材を張り付ける構成を採用するのが一般的である。これらの外装は、建設後10年以内の短期的な視野に立てば、シーリング材や塗料の性能向上によって、漏水の補修や材料劣化による修繕の必要性がないレベルにまで問題が解決されている。しかし、近年、社会的な要求の高まりをみせている地球環境問題の配慮について視点を移すと、メンテナンス長期化は必須な条件であり、少なくとも30年程度はメンテナンスしなくてよい高耐久な外装が必要になると考える。

以上の視点から、本開発では、耐久性の高い建築外装資材であるガラスに着目し、板ガラスを外装材に用いたノンシーリング外装工法の開発を行った。多雨な気候の我が国で知られる代表的なノンシーリング外装工法には、木材の下見板張りが伝統的なものとしてよく知られている。しかし、この工法の防水や耐風圧性能の工学的な知見は少ないのが実情である。本研究課題で得た成果と課題は次のとおりである。

- ・本開発では、ノンシーリング外装工法で不足している知見を補うための実験を行うとともに、動的圧力の基礎実験及びシミュレーションプログラムの作成を行い、実験との整合性を確認した。
- ・プログラムの成果を活かして、板ガラスを外装に用いたノンシーリングのモックアップ試験体を作成し、支持金具の形状や材質を提案できた。短期的なガラスの防汚状況も把握もできた。
- ・明るい空間を確保できるガラスファサードが合理的に取り付け可能な構造躯体を提案するため、調査や積算検討を行った。検討の結果、中小事務所建築物では、S造（鉄骨造）が、他の構造に比べ、コスト係数が低いとともに採光に有利なことが明らかとなった。
- ・2階～3階建の学校建築の場合は、RC造、木造、S造の順にコスト係数が低いことが明らかとなったものの、室内部の安定した光環境の快適性や省エネ性は、外装面にガラスを多用するだけでは実現が難しく、内部耐力壁の配置に工夫が必要なが明らかとなった。

以上の通り、課題では、高耐久ガラスファサードを実現するための基盤データを整備することができた。一方、本研究開発は途中で終了したため、検討結果を勘案した建築実務設計者用の設計支援ツールを開発することに加え、長期的なガラスの防汚性能評価、第2次試作を通じた安全性評価に課題を残している。

5-2. エネルギー収支に優れる採光・断熱システムの開発

・本技術による1次エネルギーの削減目標は、次の①②の2つを設定した。

① 事務所・学校：ガラス外皮の設置面積あたり50[MJ/m²・年]を削減

② 事務所：1次エネルギーの最小化

また、対象とする1次エネルギーは、以下のとおりとした。

事務所：暖房・冷房・昼間の照明の年間での合計

学校：暖房・昼間の照明の年間での合計

(学校では冷房を行わないことが一般的であるため)

・1次エネルギーのシミュレーション検討から、前述のエネルギー削減目標を達成する熱貫流率、日射熱取得率、可視光透過率の性能について検討した。その結果、東京の事務所と学校、札幌の事務所の場合について目標性能を明らかにした(表5-2-1、表5-2-2)。札幌の学校の場合については、途中で終了したため検討を行わなかった。

表5-2-1 事務所の場合の目標性能

立地	外皮の方位	50[MJ/年]削減			エネルギー最小化		
		熱貫流率 [W/K・m ²]	日射熱取得率	可視光透過率 [%]	熱貫流率 [W/K・m ²]	日射熱取得率	可視光透過率 [%]
東京	南	1.5	0.2	20	1.0	0.2	30
	北	1.5	0.3	30	1.0	0.3	45
札幌	南	1.5	0.2	20	1.0	0.3	45
	北	1.5	0.2	20	1.0	0.4	60

表5-2-2 学校の場合の目標性能(東京・50[MJ/年]削減)

	熱貫流率 [W/K・m ²]	日射熱取得率	可視光透過率 [%]
全方位	1.0	0.2	30

・グレアの抑制を考慮した、可視光透過率の目標性能について検討を行い、以下の③④の2つの目標性能を導出した。

③ エネルギー削減目標①に対応：

可視光透過率20～30%

④ エネルギー削減目標②に対応：

可視光透過率30～60%で、グレアの抑制と採光を両立する透過特性を有する

・暖冷房1次エネルギーのいっそうの削減を図るため、日射熱取得率の季節制御につい

て検討を行った。その結果、太陽高度などによる制御が有効であることを明らかにした。また、ガラスそのものが有する入射角度特性（日射の入射角により透過率が大きく異なる特性）や、屈折を活かした制御について、検討を進めるよう方針を定めた。ただし、この検討は実施しなかった。

- ・前述の目標性能④に対応し、採光とグレアの抑制を同時に図るような、可視光の透過特性を付与するガラスフィルムについて目標性能の検討を行った。まず、ガラス透過後における可視光の配光と、室内照度との関係を把握するプログラムを作成した。また、そのプログラムを用いた検討から、均等拡散と、室内の天井面へ向かう平行光線とを組み合わせた配光が有効であることを明らかにした。このような配光となるガラスフィルムの断面設計等の検討を行う方針を定めたが、実施には至らなかった。
- ・ガラス外皮の層構成の構築のため、ガラスや透光性断熱材の物性値を、実測等により把握した。また、各種層構成の場合の外皮の性能を予測するため、「壁体熱性能予測プログラム」を作成した。

5-3. システム構築と試行・検証

- ・ガラス外皮の層構成について、1次提案を行った。この提案は日照条件と階を考慮した大まかな方針を示すものである。なお、詳細な層構成についての検討には至らなかった。
- ・事務所、学校を対象に、システムイメージを作成した。事務所の場合には、改修の場合のコンセプトについても検討を行った。また、学校については、構造タイプが導入効果やコストに及ぼす影響について検討、整理した。
- ・層構成の検討を進めて、モックアップの2次作成、検証、及び本技術の最終提案を行う予定であったが、実施しなかった。

参考資料 1. 壁内圧カシミュレーションシステム 操作マニュアル

壁内圧力シミュレーションシステム
操作マニュアル

目次

1	概要	1
1.1	壁体モデル	1
1.2	温度計算モデル	2
1.3	圧力計算モデル	3
2	シート構成と入力操作	4
2.1	動作環境	4
2.2	壁体シート	4
2.3	外乱シート	8
2.4	オプションシート	9
2.5	温度出力シート	9
2.6	圧力出力シート	10
3	計算理論	12
3.1	温度計算	12
3.2	圧力計算	14
3.3	温度計算と圧力計算との連成	17
4	プログラム構造	18

1 概要

1.1 壁体モデル

本プログラムは、通気層を含む壁体における温度および圧力変動のシミュレーションを行うプログラムです。

本プログラムで解析を行う壁体および通気層は、下図の断面形状（壁体を鉛直に切断したもの）を想定しています。図の奥行方向（壁体の幅）は単位長さを想定します。

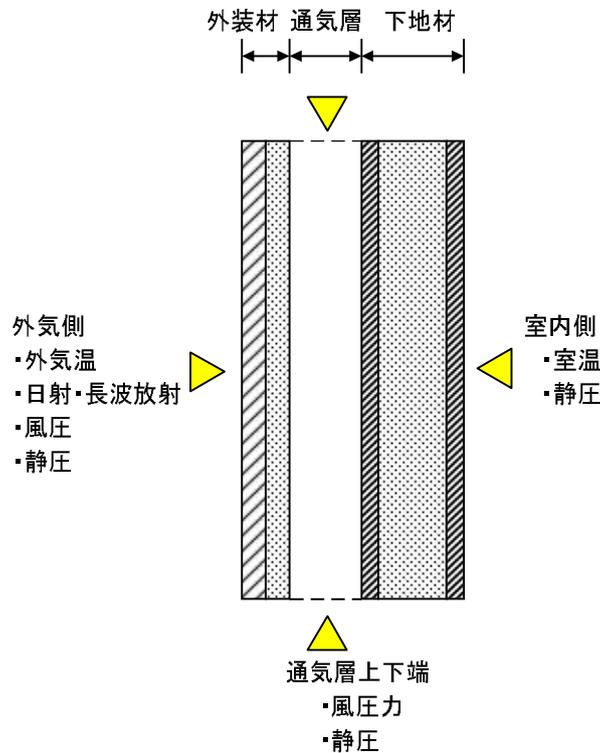


図 1：壁体モデル

以下のように用語を定義します。

外装材

1 つ以上の材料からなり、外乱（外気温・日射と長波放射および風圧力）を受け、表面熱伝達および熱伝導が生じるとします。隙間量を設定でき、内外圧力差による通気、およびそれに伴う熱移動が生じます。

通気層

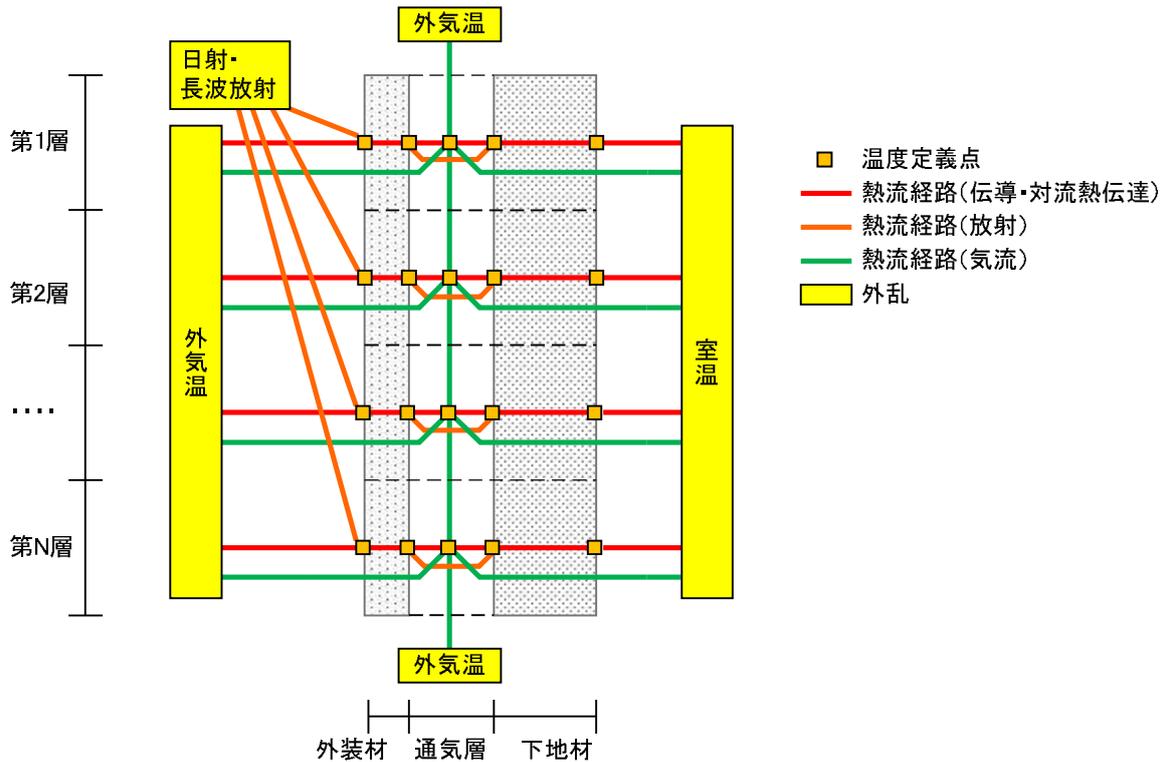
外装材および構造材表面との対流熱伝達が生じるとします。また、外気側・室内側それぞれとの圧力差に応じた通気、および上下方向の空気移動が生じます（浮力、摩擦損失の影響を含む）。上下端では、風圧力に応じて外気との通気が生じます。

外装材・構造材それぞれの表面間では、放射による熱移動も生じます。

下地材

1 つ以上の材料からなり、熱伝導が生じます。隙間量を設定でき、通気層と室内の圧力差による通気、およびそれに伴う熱移動が生じます。

1.2 温度計算モデル



前節で示した壁体モデルを、上図に示す温度計算用のモデルとして再構成して計算を行います。

上下方法の分割数は任意に設定でき、それぞれ外装材の両側表面、下地材の両側表面、通気層内空気が温度定義位置となります。温度定義点間の熱流量は、熱コンダクタンス・熱伝達率等に両側の温度差を乗じて計算されます。

外装材外側表面に対しては外気温と日射・長波放射が外乱として作用し、下地材室内側表面には室温が外乱として作用します。また、次節の圧力計算モデルを解いて得られる通気量に応じて通気層空気に対して外気温・室温が作用します。

以下の点にご注意下さい。

- ・通気層側の表面どうしの放射熱伝達も考慮しますが、上下方向の層をまたぐ放射熱伝達（たとえば第 1 層の外装材と第 3 層の下地材との放射熱伝達）は無視します。
- ・通気による熱移動が生じる場合も、通気層空気温度以外は直接その影響を受けないものとします（壁体を通過中の空気と壁体との熱移動は無視します）。
- ・外乱として作用する外気温・室温・日射および長波放射、壁体の表面特性・材料構成は高さ方向には変化しないものとします。

1.3 圧力計算モデル

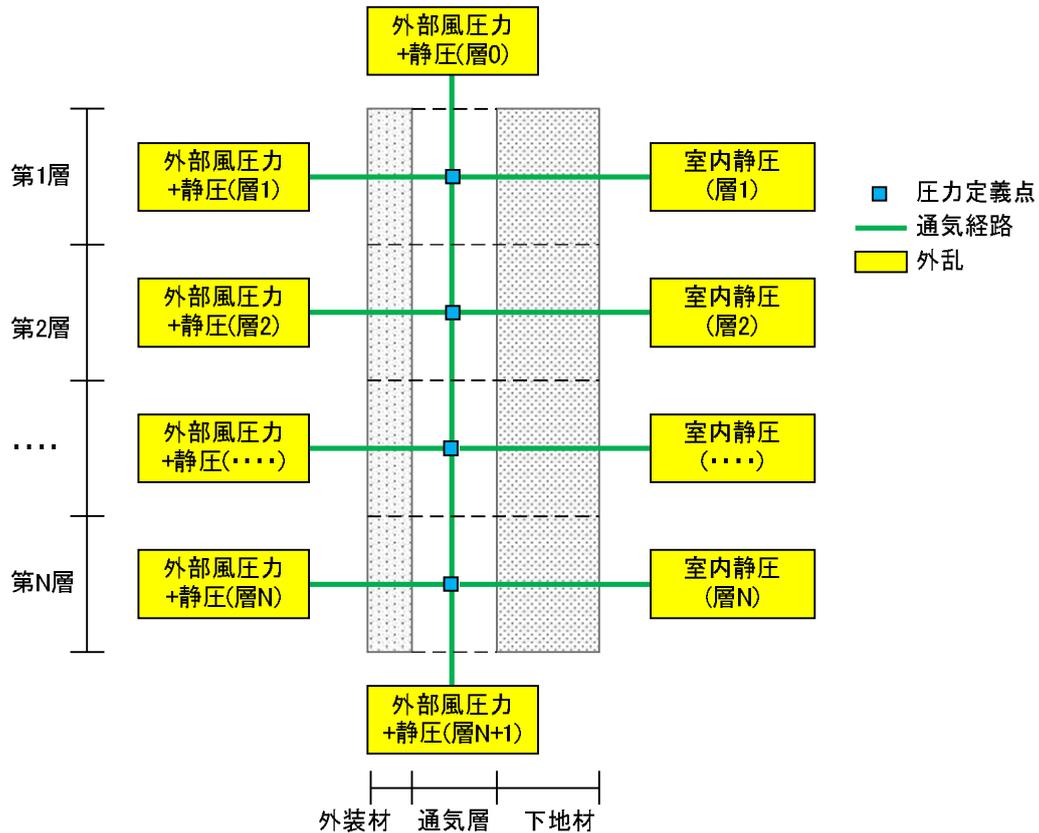


図 3：通気計算モデル

壁体モデルを、圧力計算用のモデルとして再構成すると上図のようになります。

上下方法の分割数は温度計算モデルと共通となり、各層の通気層内空気が圧力定義位置となります。

外装材外側表面に対しては風圧力が作用します。それ以外の位置には静圧が作用し、通気層内外に温度差がある場合には静圧差が作用します。

また、通気層内において上下方法に温度差がある場合には浮力の影響を考慮して計算します。

以下の点にご注意下さい。

- ・ 静圧差の計算においては、壁体の中央高さを中性帯としています。
- ・ 外部風圧力は、層ごとに設定することができます（入力は風圧係数で行います）。

2 シート構成と入力操作

2.1 動作環境

本プログラムは、Microsoft Excel 2003 および Microsoft Excel 2007 で動作確認を行っています。
インストールは不要です。Microsoft Excel のインストールされた PC で本プログラムを含む Excel ファイルを開き、マクロ機能を ON として使用して下さい。

プログラムは Excel VBA により作成されており、入出力は Excel で行います。Excel ファイルは以下のワークシートで構成されています。

- 「壁体」シート
- 「外乱」シート
- 「オプション」シート
- 「温度出力」シート
- 「圧力出力」シート

以下、各シートの書式等について説明します。

2.2 壁体シート

壁体シートは、計算対象となる壁体の熱および通気に関するパラメータを設定するシートです。

ユーザーが入力するセルは黄色の色で塗りつぶされています。ラベルとなるセルはパラメータの種別ごとに塗りつぶされています。

原則として、行・列の挿入・削除、ラベルのテキストの変更は行わないで下さい。

(1) 全体パラメータ

7	全体		
8	計算条件名	NO.4	
9	層数	4	-
10	外乱データの時間間隔	3600	s
11	温度計算時間間隔	3600	s
12	圧力計算時間間隔	3600	s
13	壁体方位角	0	度
14	空気密度	1.2	kg/m ³
15	空気比熱	1004	J/kgK
16	地表面日射反射率	10	%
17			

図 4：全体パラメータの入力項目

計算条件名

計算条件を識別する名称を入力して下さい。

層数

高さ方向の分割数を入力して下さい。

外乱データの時間間隔

外乱シート (p.8) のデータの時間間隔を整数 (秒単位) で入力して下さい。デフォルトは 3600 秒となっています。

温度計算時間間隔

温度計算の時間間隔を整数（秒単位）で入力して下さい。外乱データの時間間隔の約数となっている必要があります。

圧力計算時間間隔

圧力計算の時間間隔を整数（秒単位）で入力して下さい。外乱データの時間間隔の約数で、かつ熱計算時間間隔の約数となっている必要があります。

壁体方位角

壁体外表面の方位角を度単位で入力して下さい。真南向きを 0° とし、時計回りを正（真西向き= $+90^\circ$ ）とします。なお、壁体傾斜角は 90° （鉛直）で固定としています。

空気密度・空気比熱

それぞれ、適当な温度を仮定したときの値として下さい。通気層空気の熱容量や、通気量計算に使用します。

地表面日射反射率

地表面からの照り返しによる日射の評価に使用します。

(2) 外装材

18	外装材			
19	外気側日射吸収率	80	%	
20	外気側長波放射率	90	%	
21	外気側総合熱伝達率	25	W/m^2K	
22	外装材材料名	熱伝導率 W/mK	容積比熱 (比熱 \times 密度) J/m^3K	厚さ mm
23	Siding Board	0.170	1159200	14
24	END			
25	外装材初期温度	20	$^\circ C$	
26	外装材通気層側長波放射率	90	%	
27	外装材通気層側対流熱伝達率	9.1	W/m^2K	
28				

図 5：外装材の入力項目

外気側日射吸収率・長波放射率・総合熱伝達率

それぞれ、外装材表面における熱授受の評価に使用します。

外装材材料名・熱伝導率・容積比熱・厚さ

外装材を構成する材料とその物性値を、外気側から通気層側への順に記述して下さい。

この部分は行の挿入・削除等を行ってもかまいませんが、材料を記述し終わった次の行の材料名には"END"と記述して下さい。

外装材初期温度

計算開始時の外装材温度です。

外装材通気層側長波放射率・対流熱伝達率

通気層に面する側における熱移動の評価に使用します。

外装材の隙間量などは (5) 層ごと設定項目 で設定します。

(3) 通気層

29	通気層			
30	通気層幅	15	mm	
31	上端開口部風圧係数	-0.6	-	
32	上端開口部 αA	150	cm ² /幅m	
33	下端開口部風圧係数	-0.4	-	
34	下端開口部 αA	150	cm ² /幅m	
35	摩擦損失係数 λ	1	-	
36	通気層空気初期温度	20	°C	
37				

図 6：通気層の入力項目

通気層幅

通気層の幅（外装材と下地材の間隔）を入力して下さい。

上下端開口部風圧係数、開口部 A

通気層上下端の開口部に加わる風圧係数と、流量係数・面積を A （壁体幅 1m あたり cm²）の形で入力して下さい。

通気層摩擦損失係数

通気層内を上下方向に移動する空気の摩擦損失係数です。

通気層空気初期温度

計算開始時の通気層空気温度です。

(4) 下地材

38	下地材			
39	下地材初期温度	20	°C	
40	下地材通気層側長波放射率	90	%	
41	下地材通気層側対流熱伝達率	9.1	W/m ² K	
42	下地材材料名	熱伝導率 W/mK	容積比熱 (比熱×密度) J/m ³ K	厚さ mm
43	Plywood	0.160	1034000	12
44	GW	0.045	13440	100
45	GB	0.160	609000	9.5
46	END			
47	室内側総合熱伝達率	9.1	W/m ² K	
48				

図 7：下地材の入力項目

下地材初期温度

計算開始時の下地材温度です。

下地材通気層側長波放射率・対流熱伝達率

通気層に面する側における熱移動の評価に使用します。

下地材材料名・熱伝導率・容積比熱・厚さ

下地材を構成する材料とその物性値を、通気層側から室内側への順に記述して下さい。

この部分は行の挿入・削除等を行ってもかまいませんが、材料を記述し終わった次の行の材料名には"END"と記述して下さい。

室内側総合熱伝達率

それぞれ、室内側表面における熱授受の評価に使用します。

(5) 層ごと設定項目

層ごと設定項目(層は上から順に定義、必要に応じて下方に延ばしてよい)。

層No.	層ごと高さ[m]	外装材風圧係数 [-]	外装材隙間量 αA [cm^2/m^2]	下地材隙間量 αA [cm^2/m^2]
1	0.5	1	38.19	19.09
2	0.5	1	38.19	19.09
3	0.5	1	38.19	19.09
4	0.5	1	38.19	19.09
5	0	0	0	0

図 8 : 層ごとの入力項目

以下に示す各項目は、高さ方向の分割層ごとに異なる値を設定できます。全体項目の「層数」に入力された値に合わせて入力して下さい。層は壁体上部から下部に向かって昇順とします。

層ごと高さ

各層の高さ方向の幅を入力して下さい。

外装材風圧係数

各層に加わる風圧係数を入力して下さい。なお、外部風速は「外乱」シートで設定します。

外装材隙間量 A

外装材の隙間量を A (壁体 1m^2 あたり cm^2) の形で入力して下さい。各層の実際の隙間量は、これに層ごと高さ[m]および壁体幅 (=1m) を乗じた値となります。

下地材隙間量 A

下地材の隙間量を A (壁体 1m^2 あたり cm^2) の形で入力して下さい。各層の実際の隙間量は、これに層ごと高さ[m]および壁体幅 (=1m) を乗じた値となります。

(6) 計算実行

ここまでの各項目の設定が終了したら、「計算実行」ボタンを押して下さい。マクロ「Main」を実行しても計算できます。

2.3 外乱シート

外乱シートには、外気側と室内側の温度、日射量・長波放射量および太陽位置、外部風速等を記述します。1行目はラベル行となっており、2行目以降がデータ行となります。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	コメント (日付時刻等)	外気温 [°C]	法線面直達 日射量 [W/m ²]	水平面天空 日射量 [W/m ²]	夜間放射量 [W/m ²]	太陽傾斜角 (sinH)	太陽傾斜角 (cosH)	太陽方位角 (sinH)	太陽方位角 (cosH)	外部風速 [m/s]	風向変化等 による 風速低減率	室内気温 [°C]
2	0	20	0	0	0	0	0	0	0	30.20	1	20
3	1	20	0	0	0	0	0	0	0	31.30	1	20
4	2	20	0	0	0	0	0	0	0	32.39	1	20
5	3	20	0	0	0	0	0	0	0	33.45	1	20
6	4	20	0	0	0	0	0	0	0	34.45	1	20
7	5	20	0	0	0	0	0	0	0	35.38	1	20
8	6	20	0	0	0	0	0	0	0	36.19	1	20
9	7	20	0	0	0	0.013	0.999	-0.87	0.492	36.85	1	20
10	8	20	0	0	0	0.189	0.981	-0.778	0.627	37.34	1	20
11	9	20	0	0	0	0.335	0.942	-0.641	0.767	37.65	1	20
12	10	20	0	0	0	0.443	0.896	-0.45	0.892	37.80	1	20
13	END	20	0	0	0	0.506	0.862	-0.204	0.978	37.78	1	20
14	12	20	0	0	0	0.518	0.855	0.073	0.997	37.61	1	20
15	13	20	0	0	0	0.478	0.877	0.34	0.94	37.29	1	20
16	14	20	0	0	0	0.392	0.919	0.557	0.83	36.85	1	20
17	15	20	0	0	0	0.263	0.964	0.719	0.694	36.30	1	20
18	16	20	0	0	0	0.101	0.994	0.83	0.566	35.65	1	20
19	17	20	0	0	0	0	0	0	0	34.90	1	20
20	18	20	0	0	0	0	0	0	0	34.07	1	20
21	19	20	0	0	0	0	0	0	0	33.17	1	20

図 9：外乱シート

各列の内容は以下のようになります。

コメント

ステップ数、日付・時刻などを自由に記述して下さい。計算には直接関係はありません。なお、コメント欄が“END”となっている行があればそこで計算を終了します。

外気温

外装材外側の気温です。

法線面直達日射量

太陽光線に対して垂直な面に対して入射する直達日射量です。

水平面天空日射量

水平面に対して入射する天空日射量です。

夜間面天空日射量

水平面から放出される長波放射量と、入射する長波放射量との差です。

太陽傾斜角 (SinH・CosH)、太陽方位角 (SinA・CosA)

当該時刻の太陽位置を表します。

外部風速、風向変化等による風速低減率

外装材外側における風速とその低減率です。本プログラムでは、外装材および通気層上下端開口部に加わる風圧力を次式で計算しています。

$$\text{風圧力 [Pa]} = \text{風圧係数} \times 1/2 \times \text{空気密度 [kg/m}^3] \times (\text{風速 [m/s]} \times \text{低減率})^2$$

2.4 オプションシート

各種計算条件で、変更頻度が低いものや数値計算に関するパラメータを記述します。
行・列の追加や削除は行わないで下さい。

2.5 温度出力シート

各温度定義点における温度が時系列データとして出力されます。

列方向は、コメント・外気温に続き

外装材外気側表面温度

外装材通気層側表面温度

通気層内空気温度

下地材通気層側表面温度

下地材室内側表面温度

の順に並んでおり、それぞれ高さ方向の層数分だけ温度が出力されます。

	コメント	外気温	外装材外気側表面				外装材通気層側表面				通気層空気				下地材通気層側表面		
			層1	層2	層3	層4	層1	層2	層3	層4	層1	層2	層3	層4	層1	層2	
1		0	10	10.1	10.1	10.1	10.1	10.55	10.56	10.56	10.56	10.83	10.83	10.83	10.83	11.1	11.1
2	1	12.58	12.64	12.63	12.63	12.64	12.9	12.83	12.83	12.9	13.06	12.94	13.06	13.06	13.25	13.15	
3	2	15	15.04	15.02	15.02	15.04	15.21	15.11	15.11	15.21	15.31	15.16	15.16	15.31	15.45	15.3	
4	3	17.07	17.09	17.07	17.07	17.09	17.19	17.09	17.09	17.19	17.26	17.1	17.1	17.26	17.33	17.18	
5	4	18.66	18.67	18.65	18.65	18.67	18.71	18.63	18.63	18.71	18.74	18.61	18.61	18.74	18.78	18.65	
6	5	19.66	19.65	19.65	19.65	19.66	19.67	19.61	19.61	19.67	19.68	19.59	19.59	19.68	19.59	19.6	
7	6	20	20	20	20	20	20	19.97	19.97	20	20	19.96	19.96	20	20	19.96	
8	7	19.66	19.65	19.67	19.67	19.66	19.66	19.7	19.7	19.68	19.68	19.72	19.72	19.68	19.69	19.73	
9	8	18.66	18.67	18.69	18.69	18.67	18.72	18.8	18.8	18.72	18.76	18.87	18.87	18.76	18.78	18.9	
10	9	17.07	17.09	17.12	17.12	17.09	17.19	17.33	17.33	17.19	17.26	17.46	17.46	17.26	17.33	17.53	
11	10	15	15.04	15.07	15.07	15.04	15.21	15.4	15.4	15.21	15.31	15.59	15.59	15.31	15.45	15.72	
12	11	12.58	12.64	12.69	12.69	12.64	12.9	13.13	13.13	12.9	13.06	13.4	13.4	13.06	13.25	13.59	
13	12	10	10.07	10.12	10.12	10.07	10.41	10.68	10.68	10.41	10.62	11.02	11.02	10.62	10.89	11.28	
14	13	7.41	7.51	7.56	7.56	7.51	7.93	8.22	8.22	7.93	8.19	8.62	8.62	8.19	8.53	8.95	
15	14	5	5.11	5.17	5.17	5.11	5.62	5.92	5.92	5.62	5.93	6.37	6.37	5.93	6.33	6.77	
16	15	2.93	3.05	3.11	3.11	3.06	3.64	3.93	3.93	3.64	3.99	4.42	4.42	3.99	4.45	4.87	
17	16	1.34	1.48	1.53	1.53	1.48	2.12	2.39	2.39	2.12	2.5	2.9	2.9	2.5	3	3.4	
18	17	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.69	1.16	1.16	0.69	1.17	1.63	1.63	1.17	1.56	2.04	

図 10 : 温度出力シート

2.6 圧力出力シート

各圧力定義点における圧力と、その間の通気量が時系列データとして出力されます。

層	圧力 [Pa]	外部静圧 (高さ中央基準)	外部風圧力	外装材通過風量 [m³/h]											
層1	179	-12.23	-9.17	-3.06	3.06	9.17	12.23	547.11	547.11	547.11	547.11	547.11	547.11	21.45	21.77
層2	187	-12.12	-9.09	-3.03	3.03	9.09	12.12	587.91	587.91	587.91	587.91	587.91	587.91	22.24	22.58
層3	192	-12.01	-9.01	-3	3	9.01	12.01	629.33	629.33	629.33	629.33	629.33	629.33	23.02	23.95
層4	198	-11.83	-8.95	-2.98	2.98	8.95	11.83	671.18	671.18	671.18	671.18	671.18	671.18	23.77	24.12
層5	201	-11.86	-8.9	-2.97	2.97	8.9	11.86	712.23	712.23	712.23	712.23	712.23	712.23	24.49	24.85
層6	203	-11.82	-8.87	-2.96	2.96	8.87	11.82	751.13	751.13	751.13	751.13	751.13	751.13	25.15	25.82
層7	204	-11.81	-8.86	-2.95	2.95	8.86	11.81	785.81	785.81	785.81	785.81	785.81	785.81	25.72	26.1
層8	208	-11.82	-8.87	-2.96	2.96	8.87	11.82	814.55	814.55	814.55	814.55	814.55	814.55	26.18	26.57
層9	206	-11.93	-8.95	-2.98	2.98	8.95	11.93	836.59	836.59	836.59	836.59	836.59	836.59	26.53	26.93
層10	206	-12.01	-9.01	-3	3	9.01	12.01	850.73	850.73	850.73	850.73	850.73	850.73	26.76	27.15
層11	202	-12.12	-9.09	-3.03	3.03	9.09	12.12	857.13	857.13	857.13	857.13	857.13	857.13	26.85	27.25
層12	199	-12.23	-9.17	-3.06	3.06	9.17	12.23	856.46	856.46	856.46	856.46	856.46	856.46	26.84	27.24
層13	198	-12.34	-9.25	-3.08	3.08	9.25	12.34	848.51	848.51	848.51	848.51	848.51	848.51	26.71	27.11
層14	195	-12.45	-9.33	-3.11	3.11	9.33	12.45	834.31	834.31	834.31	834.31	834.31	834.31	26.49	26.88
層15	192	-12.54	-9.4	-3.13	3.13	9.4	12.54	814.88	814.88	814.88	814.88	814.88	814.88	26.17	26.57
層16	191	-12.61	-9.46	-3.15	3.15	9.46	12.61	790.63	790.63	790.63	790.63	790.63	790.63	25.78	26.17
層17	188	-12.66	-9.49	-3.16	3.16	9.49	12.66	762.38	762.38	762.38	762.38	762.38	762.38	25.31	25.7
層18	186	-12.67	-9.51	-3.17	3.17	9.51	12.67	730.74	730.74	730.74	730.74	730.74	730.74	24.78	25.16
層19	185	-12.66	-9.49	-3.16	3.16	9.49	12.66	696.5	696.5	696.5	696.5	696.5	696.5	24.19	24.56
層20	184	-12.61	-9.46	-3.15	3.15	9.46	12.61	660.06	660.06	660.06	660.06	660.06	660.06	23.55	23.91
層21	180	-12.54	-9.4	-3.13	3.13	9.4	12.54	621.61	621.61	621.61	621.61	621.61	621.61	22.86	23.2
層22	180	-12.54	-9.4	-3.13	3.13	9.4	12.54	582.01	582.01	582.01	582.01	582.01	582.01	22.12	22.45

図 11：圧力出力シート

反復回数

圧力計算の収束に要した反復回数です。

外部静圧 (高さ中央基準)

壁体外部における、壁体の中央と各層の中心高さまたは上下端開口高さとの静圧差 (重力加速度 × 外気密度 × 高さ差) [Pa]です。

外部風圧力

各層および上下端開口部に加わる風圧力 [Pa]です。

外装材通過風量

外装材を通過して通気層に流入する風量 [m³/h]です。

通気層全圧 (高さ分除く)

通気層空気の全圧 [Pa]です。ただし、壁体中央との高さ差による静圧差は含みません。

通気層精圧 (高さによる)

通気層内における、壁体の中央と各層の中心高さまたは上下端開口高さとの静圧差 (重力加速度 × 空気密度 × 高さ差) [Pa]です。

通気層内風量

上下端の開口部を通過する風量および通気層内を上下に移動する風量[m³/h]です。上から下へ向かうものを正とします。

通気層風量収支

反復計算終了時の、各層に流入する風量[m³/h]の和です。収束度合の目安として下さい(小さいほど収束性良)。

下地材通過風量

通気層から下地材を通過して室内に流入する風量[m³/h]です。

3 計算理論

3.1 温度計算

温度計算は、壁体内に設けた各温度定義点について熱収支式を考え、それらを連立させて解くことにより行います。

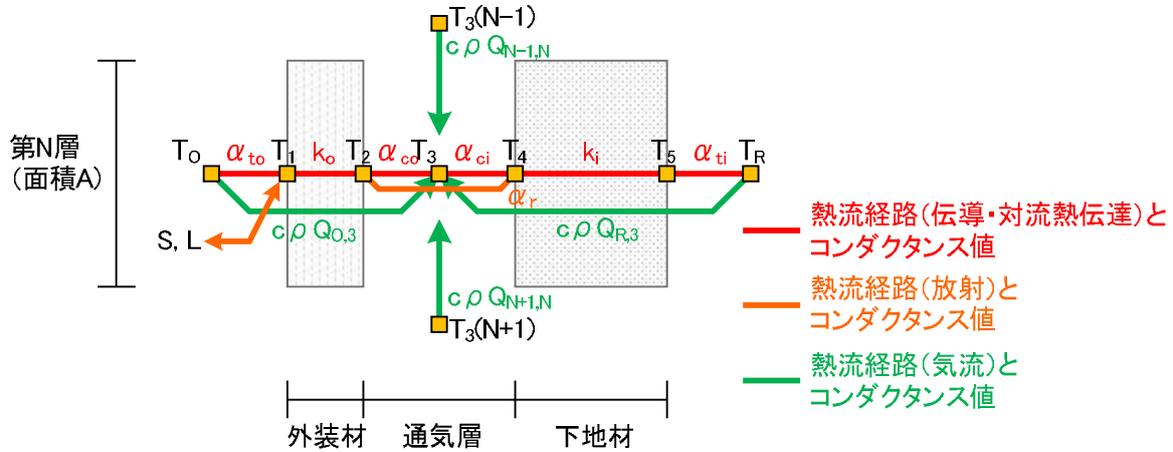


図 12：温度計算モデル

ある層(第N層、添字は省略)について、温度定義点と熱流の経路を模式的に表すと上図のようになり、各温度定義点について熱収支式は次のようになります。

外装材外気側 (添字 1)

$$(C_1/\Delta t) \cdot (T_1 - T_{1old}) = \alpha_{to} A (T_o - T_1) + k_o A (T_2 - T_1) + (aS - \varepsilon L) A$$

外装材通気層側 (添字 2)

$$(C_2/\Delta t) \cdot (T_2 - T_{2old}) = k_o A (T_1 - T_2) + \alpha_{co} A (T_3 - T_2) + \alpha_r A (T_4 - T_2)$$

通気層空気 (添字 3)

$$(C_3/\Delta t) \cdot (T_3 - T_{3old}) = \alpha_{co} A (T_2 - T_3) + \alpha_{ci} A (T_4 - T_3) + c\rho \left\{ \tilde{Q}_{N-1,N} (T_3(N-1) - T_3) + \tilde{Q}_{N+1,N} (T_3(N+1) - T_3) + \tilde{Q}_{O,3} (T_o - T_3) + \tilde{Q}_{R,3} (T_R - T_3) \right\}$$

下地材通気層側 (添字 4)

$$(C_4/\Delta t) \cdot (T_4 - T_{4old}) = \alpha_{ci} A (T_3 - T_4) + \alpha_r A (T_2 - T_4) + k_i A (T_5 - T_4)$$

下地材室内側 (添字 5)

$$(C_5/\Delta t) \cdot (T_5 - T_{5old}) = k_i A (T_4 - T_5) + \alpha_{ti} A (T_R - T_5)$$

記号の意味を以下に記します。

T, T_{old} : 温度定義点温度 (未知数) および各点の前ステップ温度 (既知) []。 $(N-1), (N+1)$ は上下隣接層の温度を表す。

T_o, T_R : 外気温および室温 []

S, L : 外装材に入射する日射量および夜間放射量 [W/m^2]

$C_1 \sim C_5$: 各温度定義点の熱容量 [J/K]。各材料および通気層空気の熱容量 (容積比熱 \times 厚さ \times 面積) を分配した値。

c, ρ : それぞれ空気の比熱 [J/kgK]、密度 [kg/m^3]

k_o, k_i : それぞれ外装材・下地材の熱コンダクタンス [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

α_{io}, α_{ii} : それぞれ外気側・室内側の表面総合熱伝達率 [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

$\alpha_{co}, \alpha_{ci}, \alpha_r$: 順に通気層の外装材側対流熱伝達率、下地材側対流熱伝達率、放射熱伝達率 [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

a, ε : 外装材の日射吸収率、長波放射率 [-]

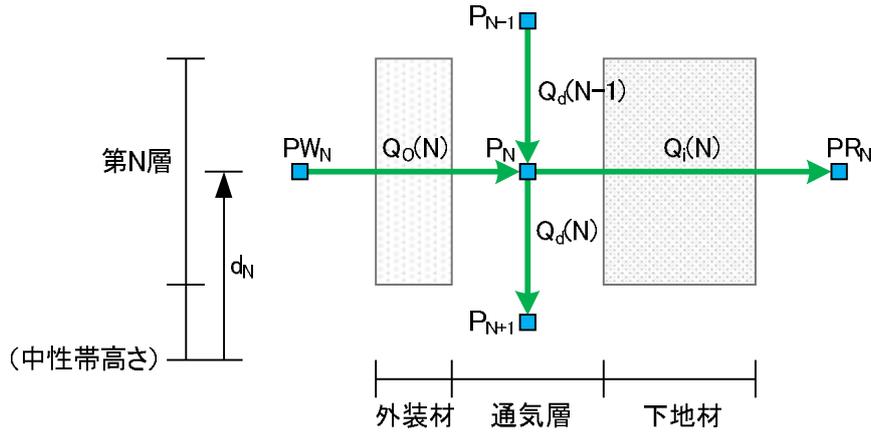
Δt : 温度計算時間間隔 [s]

A : 層面積 (高さ \times 幅 1m) [m^2]

$\tilde{Q}_{N-1,N}$: 第(N-1)層から第 N 層へ流入する風量 [m^3/s]。流出の場合は 0 とする。他の添字の場合も同様。

以上の (5 点 \times 層数) の温度に関する連立方程式を数値的に解くことにより各点の温度と熱流量が求められます。

3.2 圧力計算



まず、以下のように記号を定めます。

外装材を通過して流入する風量： Q_o 下地材を通過して流出する風量： Q_i

通気層内を下向きに移動する風量： Q_d

通気層内のある層（添字 N）に関して上記の風量を定式化すると以下のようになります。

$$Q_o(N) = (\alpha A)_o \sqrt{(2/\rho) \cdot \{(PW_N - \rho_o g d_N) - (P_N - \bar{\rho}_N g d_N)\}}$$

$$Q_i(N) = (\alpha A)_i \sqrt{(2/\rho) \cdot \{(P_N - \bar{\rho}_N g d_N) - (PR_N - \rho_R g d_N)\}}$$

$$Q_d(N-1) = (\alpha A)_{N-1,N} \sqrt{(2/\rho) \cdot \{(P_{N-1} - P_N) - PB_{N-1,N}\}} \quad (\text{上層から第 N 層へ流入})$$

$$Q_d(N) = (\alpha A)_{N,N+1} \sqrt{(2/\rho) \cdot \{(P_N - P_{N+1}) - PB_{N,N+1}\}} \quad (\text{第 N 層から下層へ流出})$$

これらが全体として空気の質量保存則を満たす、すなわち

$$Q_o(N) - Q_i(N) + Q_d(N-1) - Q_d(N) = 0$$

がすべての層について成り立つ必要があります。

記号の意味を以下に記します。

P_N : 第 N 層の通気層内の全圧 [Pa] (ただし、浮力および中性帯との高さ差による圧力は含まない)

PW_N, PR_N : 第 N 層の風圧力、室内圧 [Pa]

$PB_{N,N+1}$: 第 N 層と第 $N+1$ 層の間の浮力 (上向きを正) [Pa]

$(\alpha A)_o, (\alpha A)_i$: 外装材・下地材の相当隙間面積 [m^2]

$(\alpha A)_{N,N+1}$: 第 N 層と第 $N+1$ 層の間の相当隙間面積 [m^2] (摩擦損失係数などから換算)

d_N : 中性帯から第 N 層までの高さ [m]

ρ_o : 外気温における空気密度 [kg/m^3]

$\bar{\rho}_N$: 中性帯から第 N 層までの通気層内平均空気密度 [kg/m^3]

g : 重力加速度 [kg/ms^2]

風圧力 PW や相当隙間面積 (αA) 、外気温・室温は入力条件から与えられ、通気層内各層の温度が温度計算から求められるため、未知数は通気層内全圧 P となります。

各層の風量残差を $V_N = V_N(P_1, P_2, \dots, P_M)$ [m^3/s] とおき (通気層内全圧 $P_1 \sim P_M$ 、 M は層数。具体的には $V_N = Q_o(N) - Q_i(N) + Q_d(N-1) - Q_d(N)$)、すべての層 ($N=1 \sim M$) について $V_N = 0$ とすることを考えます。各層の圧力 $P_1 \sim P_M$ を適当に仮定すると当然 $V_N = 0$ を満たしませんが、それに対して適当な圧力 $\delta P_1 \sim \delta P_M$ を加えることにより $V_N = 0$ が満たされるものとする、次式が成り立ちます。

$$V_N(P_1 + \delta P_1, P_2 + \delta P_2, \dots, P_M + \delta P_M) = 0 \quad (N=1 \sim M)$$

これを变形すると

$$V_N(P_1, P_2, \dots, P_M) + \frac{\partial V_N}{\partial P_1} \delta P_1 + \frac{\partial V_N}{\partial P_2} \delta P_2 + \dots + \frac{\partial V_N}{\partial P_M} \delta P_M = 0 \quad (N=1 \sim M)$$

となります。これを $V_1 \sim V_M$ について連立させると、 δP を未知数とする連立一次方程式として表されます。

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial V_1}{\partial P_1} & \frac{\partial V_1}{\partial P_2} & \dots & \frac{\partial V_1}{\partial P_M} \\ \frac{\partial V_2}{\partial P_1} & \frac{\partial V_2}{\partial P_2} & \dots & \frac{\partial V_2}{\partial P_M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial V_M}{\partial P_1} & \frac{\partial V_M}{\partial P_2} & \dots & \frac{\partial V_M}{\partial P_M} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta P_1 \\ \delta P_2 \\ \vdots \\ \delta P_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -V_1 \\ -V_2 \\ \vdots \\ -V_M \end{bmatrix}$$

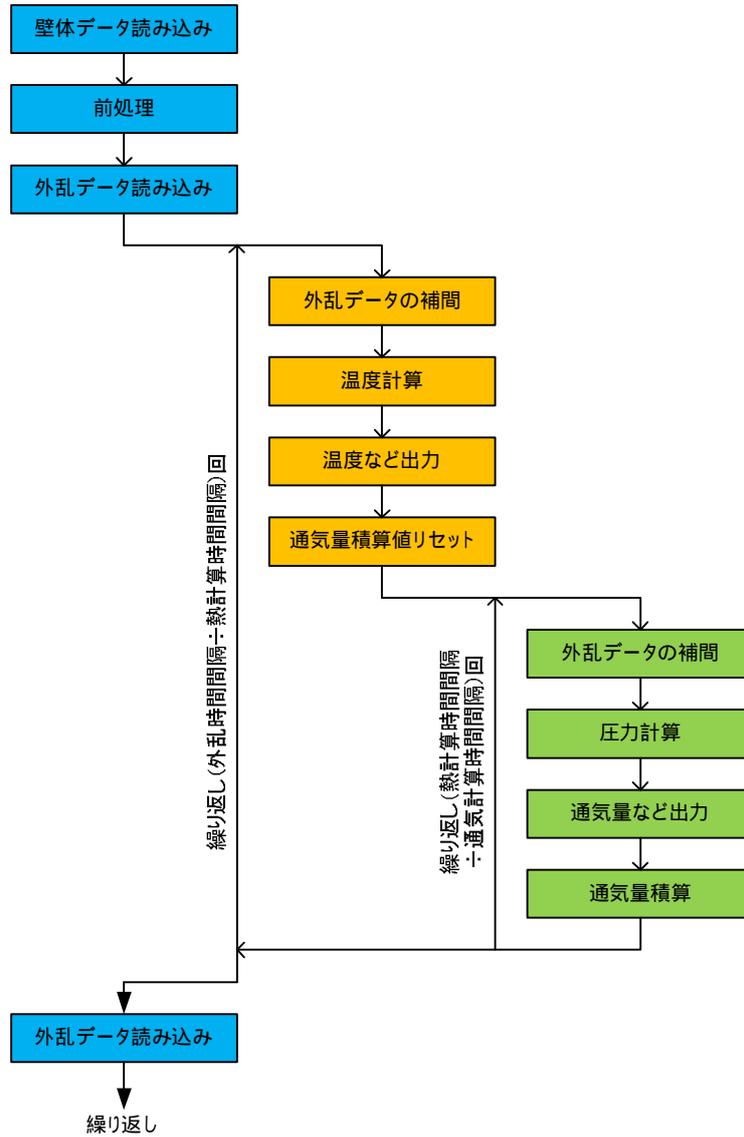
適当な圧力の初期値からスタートして上式を反復計算することにより、 $V_N = 0$ を満たすような

(P_1, P_2, \dots, P_M) の組が求まります。

本プログラムでは、通気層全体を単一の空間とみなして初期値(初期圧力)の計算を各ステップで行い、収束性を向上させています。

3.3 温度計算と圧力計算との連成

外乱データの読み込み、温度計算および圧力計算のフローチャートを以下に示します。
各計算ステップにおける外乱は、外乱シート上のデータを適宜線形補間して求めています。



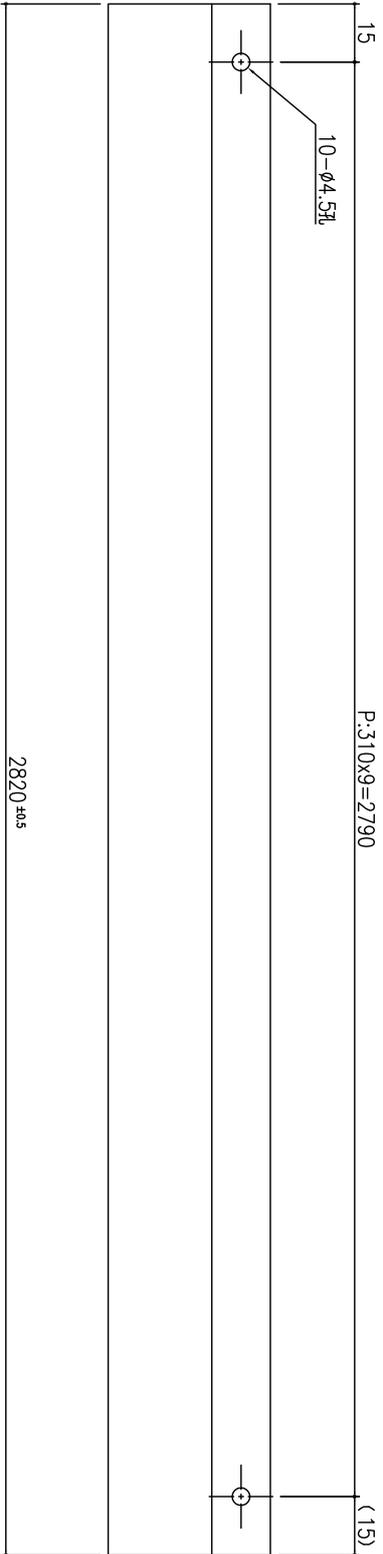
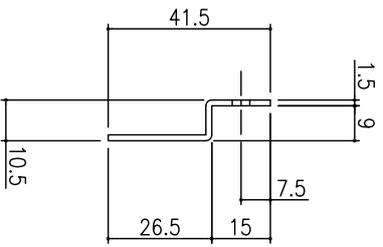
4 プログラム構造

プログラムのモジュール・サブルーチン等を以下に示します。
各サブルーチン等の詳細は、それぞれのプログラム中のコメント等をご覧下さい。

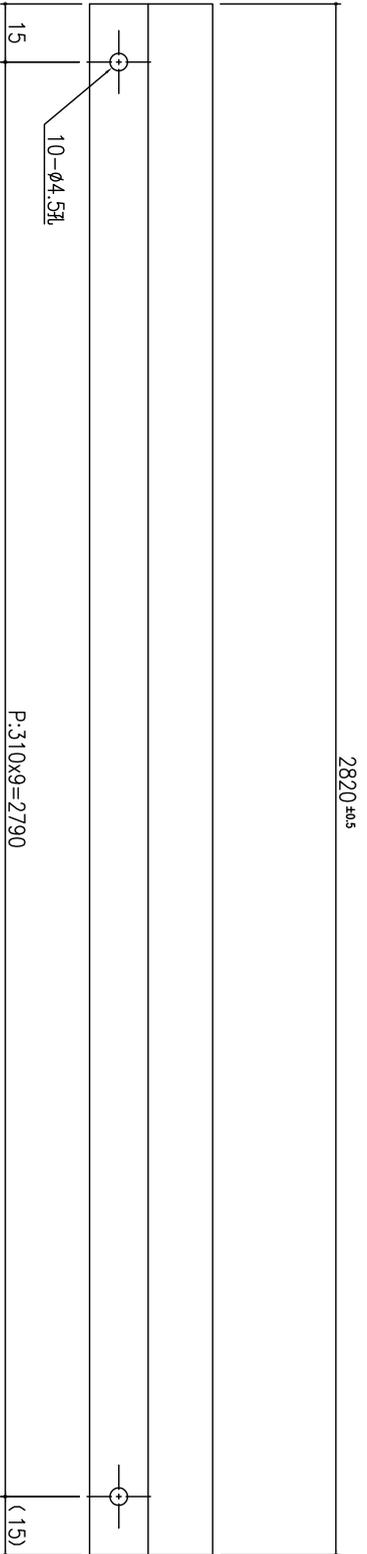
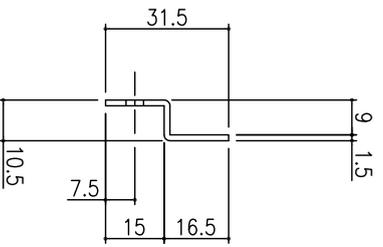
モジュール	関数・サブルーチン	処理概要
Mod01グローバル変数	-	定数、グローバル変数の定義
Mod03読み込みと前処理	M03_壁体シート読み込み	壁体シートの内容を変数に格納する
	M03_オプションシート読み込み	オプションシートの内容を変数に格納する
	M03_温度計算前処理	温度節点の熱容量、節点間の熱コンダクタンスを計算する
Mod11メイン	計算実行_Click	計算実行ボタンを押したときの処理(Mainの呼出し)
	Main	メインルーチン(各処理の呼出し、ループ処理)
Mod13温度計算	M13_温度固定マトリクス生成	温度マトリクスのうち時変動のない成分を作成する
	M13_変動マトリクスとソース項計算	温度マトリクスのうち時変動のある成分と、ソース項(蓄熱、日射等)を計算する
Mod15換気計算	M15_圧力計算Main	圧力計算のメインルーチン(各処理の呼出し、反復処理)
	M15_圧力計算前処理	圧力計算用配列の初期化
	M15_風量集計	圧力計算ループ中の通風量をストックする
	M15_集計風量リセット	圧力計算ループ中にストックした通風量をリセットする
	圧力初期値計算	圧力反復計算の初期値を計算する
	換気回路風量計算	各通気経路を通過する風量を計算する
	DVDP	各圧力節点の(DV/DP)(微小圧力変化に対する風量変化)を計算する
	Get	空気密度を求める
Mod17外乱読み込み	M17_外乱読み込み	外乱シートを1行読み込む
	M17_外乱補間	外乱シートの補間値を計算する
Mod21出力	M21_ラベル出力	出力シートのラベルを出力する
	M21_温度出力	温度の計算結果を出力する
	M21_圧力出力	圧力と通気量の計算結果を出力する
Mod51各種関数	M51_温度SOR	温度のマトリクスを解く
	M51_圧力SOR	圧力のマトリクスを解く

参考資料 2. ガラス外皮のモックアップ図面

1: 上枠 材質: A1100P (アルミト付き) 小口は生地 数量: 1

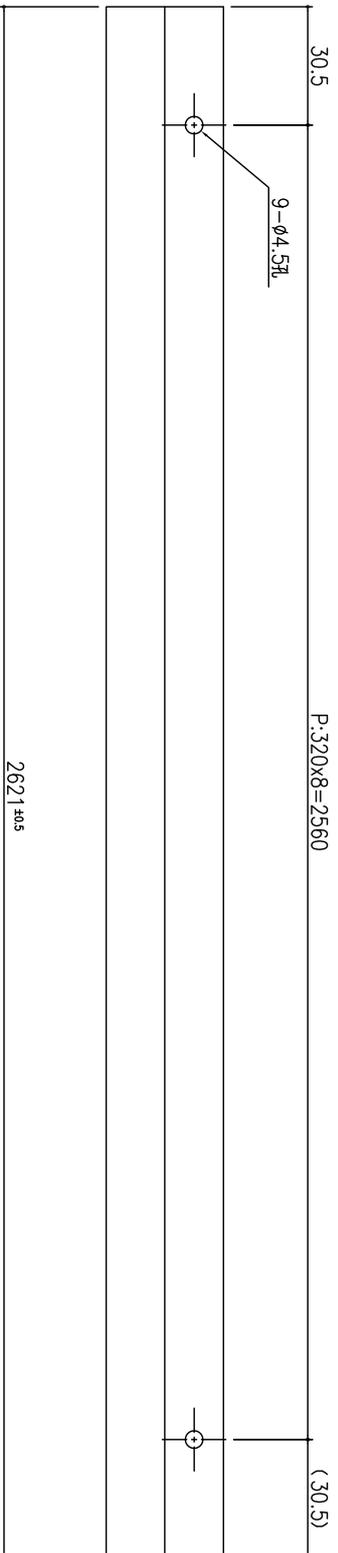
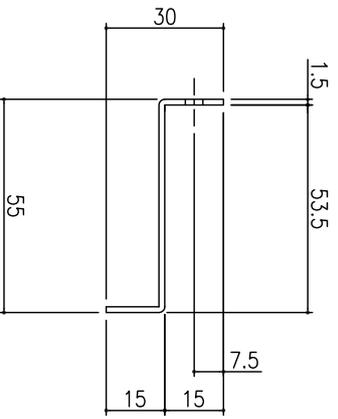


2: 下枠 材質: A1100P (アルミト付き) 小口は生地 数量: 1

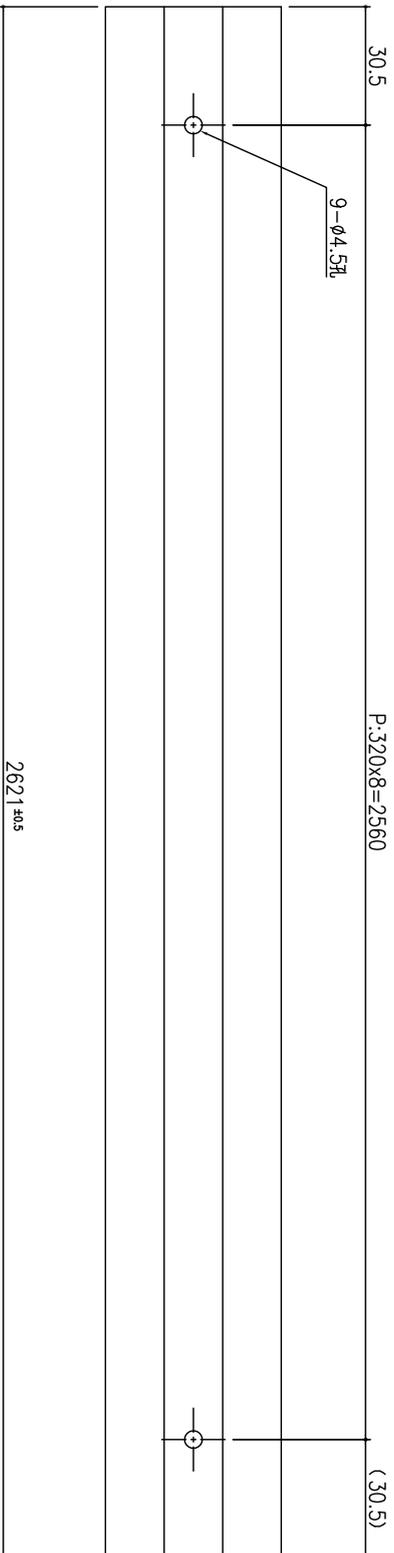
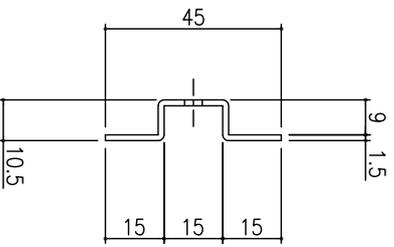


△内容	年月日	担当	 旭硝子株式会社 AGC板ガラスカンパニー		原種	サイズ	数量	単位	材料番号	数量	単位	
					図面番	北方総合建設研究所製鋼部品図-1	XX	A2 1/1	KG 11/100	XX	777.765g	XXX

5: 縦枠-C 材質: A1100P (アルミノット付き) 小口は生地 数量: 2



6: 中枠 材質: A1100P (アルミノット付き) 小口は生地 数量: 3



年月日	担当	 AEC 旭硝子株式会社 AGC板ガラスカンパニー	原種	サイン	数量	単位	仕様	材料	数量
			図面番	図面名称	XX	A2 1/1	1200×1100 100	数量	XXX
年月日			北方総合建設研究所 建築部 図面-3		XX	777/777			XXX

参考資料 3. 外国先進事例調査

平成21年3月9日から18日までの間、表1の日程で、ガラス外皮の先進事例調査を実施した。以下では調査結果について報告する。

表1 調査の日程と主な視察内容

日にち		用務地	主な視察内容
3/9-10	月		移動
3/10	火	シュツットガルト	シュツットガルト 21 再開発地区 及びガラスファサード建築の視察
3/11	水	シュツットガルト 及び郊外	環境建築コンサルタント森恵氏からの情報収集及び シュツットガルト郊外のエコロジカル住宅団地プロジェクトの視察
3/12	木	シュツットガルト	自然光利用型エコロジカル建築 及びガラスファサード建築の視察
			移動
3/13	金	ケルン及び郊外	自然光利用型エコロジカル建築 及びガラスファサード建築の視察
3/14	土	ケルン郊外	自然光利用型エコロジカル建築 及びガラスファサード建築の視察
			移動
3/15	日	ロンドン	自然光利用型エコロジカル建築 及びガラスファサード建築の視察
3/16	月	ロンドン	自然光利用・高断熱外皮システムに関する情報交換 及び透光性断熱壁を用いた建築の視察
3/17-18	火		移動

(1) 3月10日：シュツットガルト21再開発地区及びガラスファサード建築の視察

シュツットガルト市は人口 60 万人の州都でありドイツの代表的な最先端工業都市である。市とドイツ国鉄が主導し、都心部駅周辺の鉄道跡地約 100ha の再開発構想を 1994 年、コンペにより一般公募、冬季の大気汚染や夏季のヒートアイランドを防止するため、建物用地 50ha、道路・オープンスペースなど 30ha、緑地 20ha の「風の道」に配慮したマスタープラン（Stuttgart21）が採用された。現在、マスタープランに基づき、市が誘導し、シュツットガルトに本社のある金融保証機構 Landesbank Baden-Württemberg（LBBW）及び銀行 Baden-Württembergische Bank（BW-Bank）等の本社施設及び市供給公社などが建設する賃貸事務所ビルなどの建設などが行われている。多くは外皮の大面積にガラスを採用したガラス建築である。ガラス建築は、いずれもダブルスキン（写真 1-1）、高断熱ガラス（ $U=1.2$ 以下）を用いたシングルスキン（写真 1-2）、ガラスの取付角度を工夫することで日射入射量制御を試みた建物（写真 1-3）などであり、下地工法、ガラス仕様、ファサードデザインなどで様々な工夫を講じた建築群を視察した。殆ど全てのガラス建築で地盤面との取合い部にグレーチングなどが施されガラス下部の雨水等による汚損防止に配慮していた（写真 1-4）。また、主要な建物には 1995 年より EU 指令で運用が開始された EMAS（Eco-Management and Audit Scheme）に基づく事業主の環境スタンスに関するラベリング表示（任意制度）があった（写真 1-5）。

また、半戸外のアトリウム形式ではなく、一部オープンスペースをカバーする軽快な大規模ガラス架構を行った部分もあり（写真 1-6）、意匠性や機能性も含めガラス外皮の様々な可能性を感じた。



写真 1-1 BW-Bank 事務所棟



写真 1-2 LBBW 事務所棟



写真 1-3 市供給公社が経営する事務所建築



写真 1-4 ガラスファサード下部のディテール



写真 1-5 環境行動に関するラベリング



写真 1-6 LBBW 事務所棟の透明天蓋

(2) 3月11日 環境建築コンサルタント森恵氏からの情報収集

及びシュツットガルト郊外のエコロジカル住宅団地プロジェクトの視察
シュツットガルト近郊に在住する環境建築コンサルタントの森恵氏との情報交換により、最近のドイツのエコロジカル建築の動向として以下の情報を得た。また、森氏に同行し、最新の住宅団地再生プロジェクト事例を視察した。

- ・ドイツの住宅建築のエコロジカルデザインの最新トレンドは、様々な省エネルギー技術を導入し低負荷化を図るばかりでなく、都市のドーナツ化現象により居住率が低下している‘まちなか’の旧住宅地や遊休地の再開発を、基本構想段階から行政が主導し、事業者と建築家などがコーポラティブ方式で子供在住率を高めたオルターティブなエコタウンに再生するという視点である。
- ・現在、ドイツではフライブルグ、次いでシュツットガルト郊外のプロジェクトが完成し、本年からハイデルベルグでの数千人規模の大規模再開発が開始される。
- ・シュツットガルト郊外の再生プロジェクトは、市建築局の主導により、アメリカ軍旧駐屯地の兵舎、軍用施設群の跡地において、「終日、人がおり子供在住率の高いまちなか居住化」のための住宅等の生活施設の転用への改修、新築などが進められ、構想から竣工まで約10年程度を要して完成した。この団地の子供在住率は最大37%に達しており（一般は15%以下）、ドイツ国内では、このプロジェクトは成功したという見方が一般的である。
- ・既存、新築に係らず全建物は、ドイツの最新の省エネ基準を満たしており、専用住宅のほか、ブティックやカフェなどの店舗併用住宅、建築設計事務所・木工場施設・芸術家のアトリエなどの様々な機能を有する施設が混在しており、「終日、人の住む」良好な地域コミュニティが形成されている（写真2-1～2-2）。
- ・地区内にある建物には、様々な外装が施されているが、最近のトレンドはガラス・金属等の再生可能な無機素材、自然素材（地場木材等）、湿式の3種である。特に、近年、壁面全体をガラスファサードにする集合住宅も多く（特に店舗・事務所併用住宅）、それはこれまでのドイツに見られなかった傾向である。明らかに事務所建築のトレンドが住宅に移行してきている感がある（写真2-3～2-7）。

- Stuttgart21 に限らずドイツ国内の再開発地区の業務用新築建物では全面ガラスファサードが主流になりつつある。それは、素材としての高耐久性と再資源性、主として暖房及び照明エネルギーの削減、そして企業イメージの透明性に表現することなどが目的であり、全面的にガラスファサードを採用した建物の多くはエコロジカル建築の先端を担っている。
- しかし、今後、全ての建築物がガラスファサードになるかは疑問である。旧市街地及び都心部はまちなか景観条例の観点から、既存建物ではファサード改修の実施は難しい（ファサードの継承に関する規制）場合も多く、ガラスファサードで構成できるのは郊外や大規模再開発地区に限られると予想される。実際、ガラスファサードに関する都市景観上の国内議論は数多く、賛否は明確に分かれているのが現状である。伝統建築の保存・リノベーションが確実に実施できていることが、一方で、数少ない新築建物における新たな外皮を容認する土壌にもなっているのではないかと考えている。
- 2006 年以降、EU 指令により、ドイツ国内で建設・改修された一定規模以上建築物に表示義務付けされることになった省エネラベリング制度は、EU 統一規格制定前に、ドイツの市・州単位で既に制度化されたものもあり、どちらで規定していくかの判断はまだ明確ではない。国内の様々な地域事情・気候特性を考えると、この種の制度は、EU や国からのトップダウンではなく、地域単位で考えたラベリングを制度化していくことが望ましく、ドイツは基本的にはその方針で進んでいる。この考え方は他の EU 諸国では珍しいかもしれないが、小規模な都市国家の連合体からドイツが形成されたという背景が関係していると推測される。



写真 2-1 1階が商業施設の集合住宅（改修）



写真 2-2 街区の中にある幼稚園
引戸形式の雨戸付開口部



写真 2-3 建築家エブレ氏設計の集合住宅



写真 2-4 新進建築家設計の集合住宅



写真 2-5 囲込み型の集合住宅—比較的伝統スタイルの例



写真 2-6 ガラスファサードの集合住宅



写真 2-7 ガラスファサードの事務所併用集合住宅

(3) 3月12～14日 自然光利用型エコロジカル建築及びガラスファサード建築の視察

以下では、ドイツで視察した自然光利用型エコロジカル建築及びガラスファサード建築のうち、主要な建物に関して報告する。

ゾーベック研究所はシュツツガルト工科大学建築学科ゾーベック教授（軽量構造工学が専門）が主宰するファサードエンジニアリング＋ストラクチャーエンジニアリング事務所であり、ガラスファサードを用いた挑戦的かつ合理的な構造・環境デザインに定評があり、世界各国の著名な建築家と協働でエコロジカル建築を多数手がけている。現在、ドイツ、ロシア、アメリカなどの5箇所にブランチがあり、事務所員は約100名、ファサードエンジニアリングデザイン分野では世界的に最も著名で最大規模のエンジニアリング事務所である。

以下の①、②、③はゾーベック研究所が建築環境・構造デザインに係った建築である。

①シュツツガルト市立美術館

建築概要 Kunstmuseum Stuttgart	
基本設計: Hascher + Jehle	場 所: Kleiner Schlossplatz 1 Stuttgart
竣工年月: 2005年	建築構造: RC及び鉄骨造の混構造
延床面積: 約13,000㎡	階 数: 地上4階地下1階

この建物は空間的にも構造的にも巨大な入れ子構造となっている。外壁や屋根は全面ガラスでカバーされ、その内側に構造部材を積極的に表して見せ、さらに内側に構造壁を兼

ねる非透光性の間仕切耐力壁を設置し、独自の外観を形成している。1～3階における基本的平面は、ガラス外皮に接して来館者の主要動線があり、間仕切壁で囲まれた空間には展示スペースがある。最上階はレストランがあり、この空間と外周の主要動線部は自然光をふんだんに採り入れ照明エネルギーの大幅な削減を図ることをねらいとした独特な空間構成とファサードデザインとなっている（写真 3-1～3-3）。



写真 3-1 建物外観



写真 3-2 ガラスファサード



写真 3-3 建物内観

壁のガラスファサードはシングルスキンが基本の建築物で、基礎と屋根横架材間で設置する外周構造柱とそれに付随する下地材にガラスの自重を負担させ、大版合わせ低放射複層ガラス（幅 4m×高さ 2.2m）の横ジョイント部に水平応力を負担するトラス、縦ジョイント部に 20mm 程度の合わせガラス壁を用いて、軽快かつ非常に透明性の高いガラスファサードを構成しているのが特徴である（写真 3-4～3-6）。

フラットな大版ガラスを用いるガラスファサードはわが国にも数多いが、いずれも外皮としての質感や厚さ感は乏しい場合が少なくない。この建物では、透明性の高い外皮とコンクリートで構成される内皮の 2重構造が、一般的なシングルスキンのガラスファサード建築とは全く異なる、奥行き感のある外観意匠を形成している点が魅力的と感じられた。



写真 3-4 ガラスファサードの支持方法 1

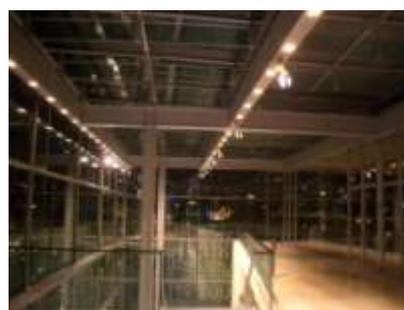


写真 3-5 ガラスファサードの支持方法 2

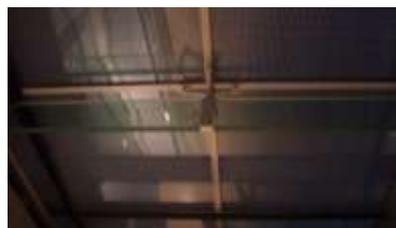


写真 3-6 ガラスファサードの支持方法 3

②バイエラー本社

建築概要	Bayer AG Konzernzentrale		
基本設計	Murphy/Yahn	場 所	Kaiser-wilhe-allee, Leverkusen
竣工年月	2002 年	建築構造	鉄骨造+RC 造の混構造
延床面積	23,100 m ²	階 数	4 階

この建物は国際的な薬品・化学企業、バイエラー新本社ビルである。全長約 180m に及ぶ C 字形のオフィス棟の中ほどに、やや変形した台形状のエントランスホールが配置された平面プランを有し、オフィス棟の建物躯体は、RC 造の柱-床梁構造からなり構造壁は殆んど設けられておらず、ポスト&ビーム形式の建物である。この建物では、地下水を熱源とする暖冷房、通風、自然光利用など、自然のエネルギーポテンシャルを最大限に活用しており、エコロジカル建築としてのポテンシャルも高い（写真 3-7）。



写真 3-7 建物外観

外皮においては、執務スペース部分は、この建物の設計主眼でもある自然光利用と通風の確保を両立するために、ダブルスキンを採用している（写真 3-8）。ダブルスキン外側のガラスには外気温センサー等で自動開閉する小型通風口（写真 3-9）を階高毎に設置し、ダブルスキン内部および各階の床面に暖冷房用のコンベクターを配管し適宜空調を行い、各階スラブの端部に設けられた導入口を介して、自然動力により新鮮空気を室内に導入する方式となっている。また、中空スペース内にはルーバー（写真 3-10～3-11）を設置しているが、このルーバーは日射熱取得・遮蔽、まぶしさの制御、屋外からの視線のカットなどの機能を有している。ルーバーの角度調整は機械制御で行われており、執務スペースに近い各階の下方部分の傾斜はきつく（垂直に近く）して屋外からの視線を完全にカットし、上方部分では緩く（水平に近く）することで自然光や眺望・日射熱を取り入れている。また、ルーバーは小口径の穴が多数設けられており、室内の光環境面では、ルーバー裏面の輝度や執務スペースの明るさ感や開放感の向上に大きく貢献している。

平板ガラスを用いた透明外皮の外側と内側の下見板張り状のガラスがもたらす外観意匠性には、一般の建築にみられないファサード上の魅力があり、本研究助成の目指すガラスファサードが低層建築物においては魅力的な外観意匠を創出する可能性が大きいことを感



写真 3-8 ダブルスキン部分の外観



写真 3-9 ダブルスキン内部の小型通風口



写真 3-10 中空スペースのルーバー（正面）



写真 3-11 中空スペースのルーバー（横）

じた。なお、ダブルスキン内部にはメンテナンス用のデッキが設置されているが、ディテールが複雑であるために、定期点検では清掃できない部分も多く、いくつかの場所には長期汚れも付着しており、メンテナンス上の課題もいくつか散見された。

また、エントランスホール及び北側の外皮は、低放射複層合わせガラスによるシングルスキンとなっているが、①の事例と同じく、大版ガラスを軽快な支持工法で支えている。その主たる機構は、屋根スラブ面にアンカーしたワイヤーを最下階スラブ面に設置したばねでテンションを与え面外変形に対して対応する方法を採用しており（写真 3-12～3-14）、それが、大面積なガラス外皮を軽快かつ開放的に見せることに大きく貢献している。

玄関ホールには、EU 指令で表示が義務付けになったドイツが制度化した **ENERGIE PASS** による省エネラベリングが表示されていた（写真 3-15）。表示内容としては、主要な建築属性に加えて、エネルギー需要のレベルや年間の暖房需要量、最終エネルギー消費量、CO₂ 排出量などが明記されているおり、総合的指標を意識した余りに情報が抽象化し、情報の内容が分かり難いわが国の CASBEE などに比べて、情報が定量的かつシンプルであるとの印象を得た。



写真 3-12 ガラスファサード支持方法 1



写真 3-13 ガラスファサード支持方法 2



写真 3-14 ガラス支持部材（ワイヤー）のばねを用いた引張機構



写真 3-15 ドイツ省エネラベリング

③ケルン空港 第2ターミナル

建築概要	Kern Bonn Airport	建築構造	鉄骨造+RC 造の混構造
設計	Helmut Jahn		
場所	Waldstrasse 247, Cologne		
竣工年月	2000 年		

この建築は、特殊な屋根トラス構造と壁面のガラスファサードを支持する構造材による大スパン型ポスト&ビーム構造により、搭乗スペースを除いても桁行 600m×幅 100m になる広大な空間が形成されている（写真 3-16～3-18）。折板形状の屋根は、その一部をライン

状に切り取り、日射遮蔽を考慮した独特のひさしを有する屋根形状に特徴がある（写真 3-19）。そのひさし形状により、室内には直達日射がほとんど入らず、穏やかな拡散光が導入され（写真 3-20）、内部空間に十分な光量をもたらしている。また、その形状は排気や音の吸収などの機能も付与されており、空調は屋根ガラスを支えるトラスと一体化されたダクトから供給されており、それらが明解かつ軽快な屋根架構を際立たせており、高い自然エネルギー利用・環境調整性能が付与されつつも、環境調整のための設備機器などが視覚的に気にならない空間が実現できている。

壁面を構成するガラスファサードのコンセプトは、上記①②の建築と比較して大差ないが（写真 3-20）、唯一異なる点は、ガラスファサードの室内側に構造材を配置していることであり、更にもその接合部は、ドイツのクラフトメイドによる地域生産型の FISH-BORN という新たな構造接合システムにより構築していることにある（写真 3-21～3-22）。これらの力の伝達を繊細かつ大胆に視覚化した構造システムが①、②と異なる独特のファサードを形成している原動力であると思われる。

また、空港ビルに近接する駐車場の壁面には、特殊な金物を用いた小版ガラスによる開放目地の下見板張りがあり（写真 3-23）、ガラス相互の隙間は多少大きすぎると感じたものの、単板ガラスを用いたガラスファサードの質感や表情を大幅に向上させる可能性があると感じた。

自然光利用の観点では、最上階屋根及びガラスファサードから導入される自然光を、乳白色の高強度合わせガラスを床材に用いて、各階に低照度で導光していることが、光環境上の均斉度を高め、照明エネルギーの最小化を実現している（写真 3-20）。また、上階の人の動きが分る程度の適度な透視性を有する床面は（写真 3-24）、建物内部の活動性を大きく向上させていると考えられる。最上階の照明設備は、各テナントブースの間仕切壁など、身長よりもやや高い位置に設置され、主に夜間において動線を照らすなど、極めてエネルギー効率の高い照明方法を採用している（写真 3-25）。

これらの要素技術で形成される建築の魅力が、ドイツの商都であるフランクフルト空港から、国の首都ケルン-ボン空港への新たな国際ハブ空港化の原動力になりつつあると感じた。



写真 3-16 建物内観



写真 3-17 屋根を支えるトラス構造①



写真 3-18 屋根を支えるトラス構造②



写真 3-19 建物外観と屋根形状



写真 3-20 建物内観



写真 3-21 ガラスファサードに用いられる金属部材 1

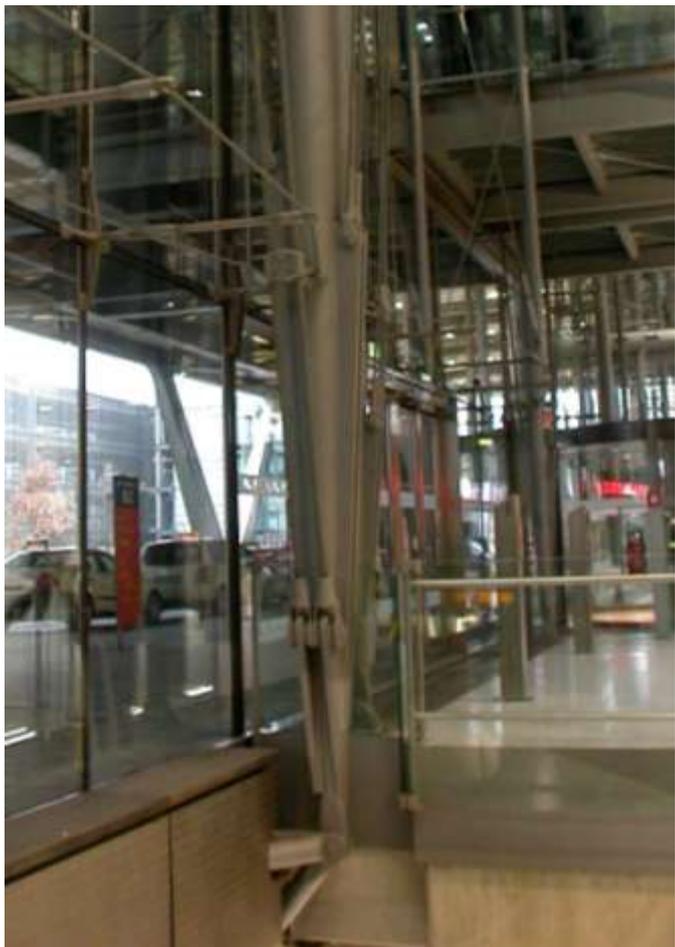




写真 3-22 ガラスファサードに用いられる金属部材 2

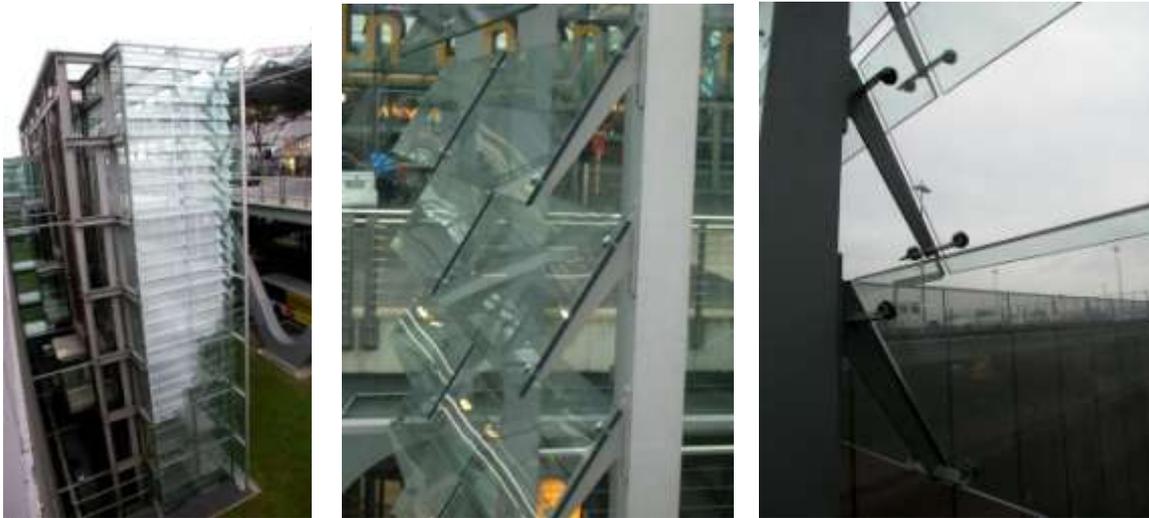


写真 3-23 ガラスの下見板張り



写真 3-24 中間階の透光性を有する床材



写真 3-25 全般照明の器具がない大空間

④事務所建築 Neven DuMont Haus（出版社）

建築概要	Neven DuMont Haus
基本設計	HPP(Hentrich-Petschnigg & Partner KG)
場 所	
竣工年月	1998 年
建築構造	鉄骨造+RC 造の混構造

この建物は出版社の複合施設であるが（写真 3-26～28）、①～③の建築で導入したガラスファサードとは明らかに異なる導入目的がある。ケルン都心部の大動脈道路に面するこの建築は、マスコミ・出版という創造的ビジネス機能を 24 時間発揮するため、都市・交通騒音からの緩和策として、建築本体とは独立したガラスファサードを防音壁として設けている例である。

通常、防音壁はサイディング、RC などの非透光性部材で構成されることが多いが、この事例のようにガラス素材を用いることで、自然光照明の実現や建物の透明性を高めることができ、ガラスファサードの新たな利活用方法を知ることができた。



写真 3-26 建物外観



写真 3-27 ガラスファサードの支持方法

⑤商業建築

シュツットガルトはメルセデスベンツの本社があり、市内にはテクニカルセンター・情報サービスセンターなどが数多く、いずれもガラスファサードを有する先鋭的な建築が多い。写真 3-28 はテクニカルセンターだが、採光面に庇等を多段設置したダブルスキンを配し、天井面を白色曲面形状とすることで室内までの自然光照明を実現している。また、写真 3-29 は情報サービスセンターだが、低放射複層高断熱ガラスを用いたシングルスキンの外側に幅 300mm 程度の金属製ルーバーを設置し、日射遮蔽と自然光照明の両立を図っており、エコロジカルデザインに対する意識の高さが伺える。



写真 3-28 曲面天井により自然光照明を実現 写真 3-29 多段階ルーバを用いたガラスファサード

(4) 3月15日 自然光利用型エコロジカル建築及びガラスファサード建築の視察

建築概要	London City Hall
設計	FOSTER & PARTNERS
場所	The Queens Walk 110, London
竣工年月	2002年
延床面積	18000 m ²
建築構造	鉄骨造+RC造の混構造
階数	地上10階・地下1階

イギリス政府は、1970年代の世界的な高度経済成長期の約10年間、工場等を除く非生産施設の一切の新築を禁止し、労働力を建設以外の産業に投入する政策を強力に展開した。その後、イギリスに本社がある様々な世界企業が保有する業務ビルの機能低下が顕在化し、旧市街地からややはずれたテムズ川の領域のウォータフロントと、イギリス国内への鉄道拠点の4エリアの再開発を開始し、ノーマンフォスターなど世界的にも著名な建築家を送り出した。

そのひとつがロイズ本社ビルであり（写真4-1）、機能を全面的にファサードに表現し、それを外観意匠とした建物だが、そのファサードデザイン手法は後のハイテクビルの先駆となった一方で、無機質なファサードが作り出す様々な功罪に対する議論も生まれたことは良く知られている。

その議論の過程で、旧市街地にあったロンドン市庁舎のテムズ川周辺への移転が決まり、国際コンペでこの庁舎の基本計画案が採用された（写真4-2）。

この建築物のエコロジカルコンセプトは、建物形状を傾斜化することによる日射遮蔽と自然光の導入、例



写真 4-1 ロイズ本社ビル

例えば螺旋状のスロープや空間構成を利用した自然光利用（写真 4-3～4-5）、そして、太陽光発電（写真 4-5）などの導入による zero-emission 化などである。それらは、前述のロイズ本社で導入した内と外との明確な境界を設けるエンベロープデザインとは明らかに異なるもので、視覚的開放性や空間的奥行きを保ちつつ、内と外の間領域を利用し、落ち着いたある執務スペースを確保しており、その空間は今もなお魅力的である（写真 4-6）。

しかし、当時はエコロジカルな面でも先駆的建築であったが、玄関ホールに表示されていた EU 指令の省エネラベリング表示によると、この建築は、既に EU の省エネスタンダードには既に合致せず（写真 4-7）、ここ数年の EU 諸国の一般建築に対する省エネルギー規制に関する急速な進展を感じる。



写真 4-2 ロンドン市庁舎の外観と再開発地区

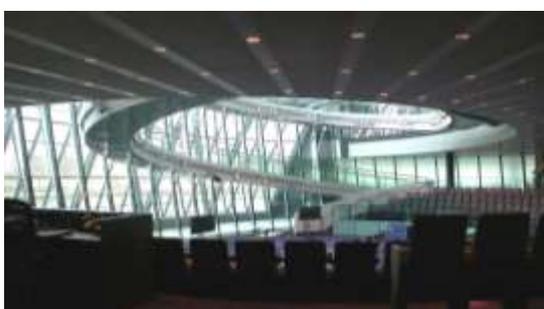


写真 4-3 建物内観 1



写真 4-5 建物内観 3（ホール上部）



写真 4-4 建物内観 2



写真 4-6 屋上の太陽電池パネル
(パンフレットより)

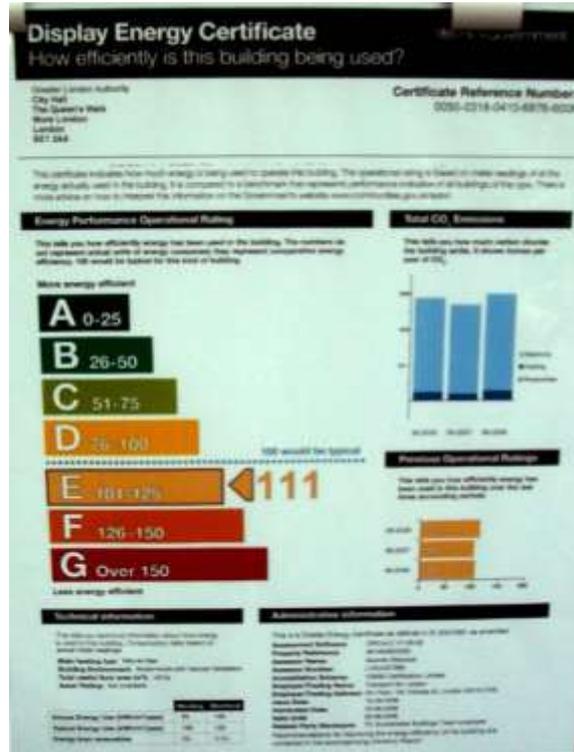


写真 4-7 省エネラベリング

(5) 3月16日 自然光利用・高断熱外皮システムに関する情報交換

及び透光性断熱壁を用いた建築の視察

調査対象技術は、イギリスで開発・販売されている KALWALL と呼ばれる自然光利用・高断熱外皮システムであり、この種の外皮としては世界的に最も量販化された技術である。

NEDO の委託で行った先導研究の実施以来、本研究の目指すべき外皮システムの一つの方向を提示しているものと考えており、KALWALL 社と設計・施工契約を結ぶ Blast-Resistant Construction 社を訪問し、本技術に関する情報交換を行い、本技術が適用された建物を視察した。

①Blast-Resistant Construction 社との情報交換

KALWALL 建築技術者である Bill Lempke 氏と情報交換した主な内容を以下に示す。

- ・ イギリスで普及する理由は、年間を通じ日照時間が低く、EU 諸国に比べ業務用建築の照明エネルギー比率が多いことが理由として考えられ、この状況は今後も変わらないと思われる。
- ・ 業務用建築では自然光による明るさが必要な学校等の教育文化施設、駅舎等の公共空間等への適用、住宅では台所やサニタリー空間などの採光に恵まれない非居室への適用が期待できる。

- ・ 透光性断熱材に用いるシリカ系ナノ空隙断熱材はアメリカの CABOT 社で生産しており、現在は高価であるが、今後、製造方法の革新により価格の低廉化が期待できると考えている。
- ・ 運用後の断熱材の温度的寸法変化に対しては、内外装を樹脂系材料にすることで変形に追従する方法を採用しており、外気温や日射受熱量により生じる外装のわずかな寸法変化(ふくらみ)に関しては事前に十分に説明することで設計者、施主の理解を得ており、クレームとはならない。
- ・ シリカ系ナノ空隙断熱材の壁体空隙への施工は、特殊な製造法(詳細情報を得ることはできなかったが充填時に振動を加えるなど)による。また、断熱材の寸法変化対応のため、日本の和風格子を参考に、樹脂系の格子部材を壁体空隙に挿入している。これらの対策により、断熱材の自然沈下は十分防止できている。格子風の意匠はヨーロッパやアメリカでも好評である。
- ・ 日本への導入に関しては、防耐火規制のハードルが高く、この技術のままでは適用不能で、それに準拠するにはコストアップは避けられないため、KALWALL 本社も想定していなく、今後もあり得ないと思われる。
- ・ 自然光利用に伴う照明エネルギーの削減効果予測は、事象者に本技術の説明をするには必須の情報である。現在は、事業者からの要求に応じて KALWALL 本社で計算している。

② KALWALL を導入した建築視察

・ 学校建築: City and Islington College

この建物は、ロンドン市立の総合デザイン(工業デザイン・建築デザインなど)カレッジ(日本では専門学校と同レベルと推測される)であり、市内 5 箇所到校舎が分散するうちのひとつである(写真 5-1)。

建物採光面の 70%以上、特に教室、教官室等に KALWALL を導入し、その導入意図は、モニターを多用する室内空間等に対し、まぶしさを防ぎつつ自然光を取り入れることによる、照明エネルギーの削減にある(写真 5-2)。特徴的なのは、居住域から外部の視認性を確保するため、壁の一部(腰高窓に相当する部分)に開閉できる透明ガラス入建具を用いている点にある(写真 5-2)。

外内観とも、一般的な建築と大きな相違点はなく、多くの使用者はこの特殊な技術が導入されていることに対する違和感などは一切ないとのことであった。

・ ロンドン地下鉄 Hounslow East 駅舎

この建物はロンドン・ヒースロー空港の周辺にある低所得者が居住する住宅地の駅舎である。主に駅舎上部の壁面にこの技術が導入され(写真 5-4)、曇天日及び夕方においても、人工照明は殆んど不要な明るさを確保できていた。



写真 5-1 KALWALL を用いたファサード

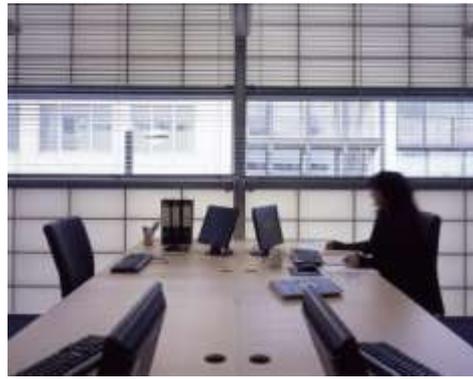


写真 5-2 建物内観



写真 5-3 ファサード近景



写真 5-4 KALWALL デイテール



写真 5-4 建物外観



写真 5-5 建物内観



写真 5-6 金属平板と皿ビスによる固定①



写真 5-7 金属平板と皿ビスによる固定②



写真 5-8 採光部の汚れ



写真 5-9 外装の変形

・上記 2 つの建物を視察した所感

室内に対する自然光の導入、室内の明るさ感に関しては、特に問題は感じなかったが、特に直射があたった場合の黄ばみ感汚れにも感じられ、視覚的には相当な違和感があった(写真 5-5)。これは、透光性断熱材の材質的特性によるものが原因と推測される。

また、KALWALL の躯体への取付けは、金属平板を用いて平皿ビスで露出して固定する方法であり、ビス及び金属平板の意匠的乏しさ(写真 5-6～5-7)、また、それに起因すると思われる採光部の汚れなど(写真 5-8～5-9)、ディテール面で改善する余地が散見された。

これと同類の技術を日本で展開していくには単に防耐火上の問題のみならず、直射が当たった際の透光性断熱材の視覚的印象、施工精度、意匠、長期汚損に対するディテールの改善などが必須と考えられる。

(6) 本調査から得たれた主な知見

現在進めている本技術開発に関連して得られた主な知見を簡潔にまとめると以下の通りである。

- ・ 北総研庁舎のファサードのような「構造を極力見せないガラスファサード」以外に、「支持工法や構造部材を積極的に見せるガラスファサード」の可能性を見出した。巧みな部材設計により、後者は前者に比べて意匠面、心理面での安定感、質感を向上させる可能性も有する。
- ・ わが国で汎用複層ガラスを用いた開口部の限界は $U=2.0$ (W/K) 程度であるが、それを上回る高断熱ガラスを用いることで、新たなガラスファサードデザインが可能である。
- ・ シングルスキンの場合は、構造・下地部材を視覚的に利用するあるいは下見板張り状のガラス等を採用することで、平板ガラスを使用した場合に比べて、大幅に質感

を向上できる可能性がある。また、大版の平板ガラスを用いた場合でも外皮近傍に動線ゾーンを配置することでの意匠性の向上が期待できる。

- ダブルスキンの場合は、わが国で普及している手法に比べ、ダブルスキン層内部にガラスファサード支持部材を積極的に配置する、ルーバーなどの環境調整部材をダイナミックに配置するなどの方法により、外側に平板ガラスを用いても、質感の高い魅力的なファサードデザインが可能である。また、構造面・環境面での合理性も両立できる可能性を見出すことができた。
- 画一的な標準部材を使わず、地域生産による高意匠なガラスファサード支持部材を用いることで、ガラス等のテクスチャー等に奇をてらわなくても、ガラスファサード及び外皮の個性を大きく引き出せる可能性がある。
- これらを考慮したガラスファサードは、高層建物よりも3～4階程度の低中層建築に導入した場合に、内外からの視覚的印象を向上させる効果が大きいと推測される。
- アメリカ、イギリス等で普及している自然光利用・高断熱外皮システム(KALWALL)は、室内環境面では自然光照明による明るさや照度、輝度等の均斉度の向上に大きく貢献し、高い照明エネルギー削減効果も期待できる。しかし、長期汚損防止の観点からは外皮技術としてのディテール上の課題は多く、直射光が当たった際の色彩的な違和感も含め、技術として改善すべき点は多い。
- 元来、建物の寿命が長いドイツ等において、近年、ガラスファサードが多用されている理由には、耐久性の高さも含まれると考えられる。一方、今回の調査において、ガラスの支持部材周りや雨が当たりにくい部分などに生じる汚れへの対策は特に見られなかった。これは、ある程度の汚れが常に見えること許容しつつ、定期的なメンテナンス(おそらくそのインターバルは長い)を前提としていると考えられる。我が国の建築を取り巻く状況を勘案すると、防汚性を極力向上し、かつ定期メンテナンスを容易にすることができれば、現在の国内の一般的な建築にはない長寿命、高い室内環境・省エネ性能、意匠性を有する外装や建築の実現可能性を感じた。
- シュツットガルトで視察した再開発地区では街区全体がガラスファサードの街並みを形成していた。それに対し、ロンドンでは年代の古い石のファサードの建物が込み入った街区の中に、ガラスファサードの建築がまばらに建つことで、大きな違和感を生じる街並みも散見された。わが国における街並みの美観の向上につながるガラスファサードデザインについても、検討する意義は高い。

上記は一部に過ぎないが、本調査で得た知見を活かし、わが国の低中層建築を対象に、本技術開発を進めていく所存である。