

ガラスファサードの形態と構成方法について ー環境的側面と構造的側面からー

Form and Structure in Glass Facade.

石井 久史^{*1}

1. はじめに

近年、建築のファサードデザインは透過性の高いものが多い。透明性・透過性は遠い昔から人々を魅了し続けてきたテーマであり、今もなおファサードにおける優先順位としては変わらない。しかしながら、一方で環境への配慮から建築における遮熱性能や断熱性能、さらには建築周辺環境への影響にも配慮する必要がある。つまりファサードには二つの大きなテーマが存在する。一つはデザイン性による観点から高い透過性を実現させる上で必要な構造工学や生産工学的側面、もう一つはペリメーターゾーンから受けるもしくは与える影響を調整する環境工学的な側面である。さらに最近ではエネルギー創出機能（PVや集熱）も併せて期待されており、今後の発展が見込まれている。

高い透過性を実現させるにはガラス素材、ガラス構成、ガラス支持構法、支持架構などの技術的要素が必要であり今日まで様々な提案がなされている。このような取り組みが、ガラスファサードの支持構法と支持架構を進化させ、繊細で洗練されたガラスファサードを数多く生み出してきた。また、透明ガラスによりフラットネスを追求してきた時代から、最近では複雑なファサード形状を構成するものも増加している（写真-1）。しかし、ファサードにはデザインとしての形状や透過性だけが要求されているわけではなく、外部と内部を仕切るエンベロップとしての機能や性能が要求される。すなわち、あらゆる外的な作用因子を遮断・減衰させ、または状況に応じて活用していくことで居室内における最適な環境を構築していかななくてはならない。JASS 14¹⁾ によれば、表-1に示す性能がファサードには要求されている。そこで、本

報ではファサードにおける要求性能のうち、熱環境に関連した「ファサードの構成方法」、透過性の高いファサードを構成するのに必要な「ガラスの支持方法」や「ガラスの支持構造」、さらにエンジニアの視点から最近のファサードデザインにおける「ファサードの形態」に着眼し、欧州の事例や弊社のグループ（以下Gr.）企業である新日軽が開発した構法と国内施工例などを踏まえながら、ガラスファサードの概要について解説する。



写真-1 複雑なファサード

表-1 要求性能一覧¹⁾

要求性能	要求性能細目
1 耐火性能	防火設備, 防火区画（上階延焼）
2 常時の構造安全性能	自重による安全性
3 耐風圧性能	外乱による部材の安全性
4 耐震性能	慣性力, 層間変位追従性, 鉛直相対変位追従性
5 耐温度性能	日射など温度変化による変形
6 荷重の組合せ性能	部位により長期, 短期荷重組合せ
7 水密性能	漏水防止
8 気密性能	漏気防止
9 遮音性能	透過損失
10 断熱性能	熱橋防止
11 結露防止性能	熱伝導率
12 耐久・耐用性能	
13 その他性能	撥音, 金属摩擦音防止, 避雷対策, 光・電波の反射防止

^{*1} ISHII Hisashi：(株)住生活グループ グローバルビジネス本部 チーフ 博士（工学）

2. デザイン的側面から「ファサードの形態」

2.1 ファサードの形態

ファサードの形態は、反射ガラスや金属パネルといった物質化されたデザインから、透過性の高いガラスによる非物質化への進化、さらには複雑な曲面や半透過という方向へ展開してきた。ファサードの形態はデザインを実現する構造や環境の観点から新たな広がりを見せはじめている。そこで、ファサードの形態概要を図-1にまとめた。以下、図-1に記したファサードの形態について簡潔に説明する。

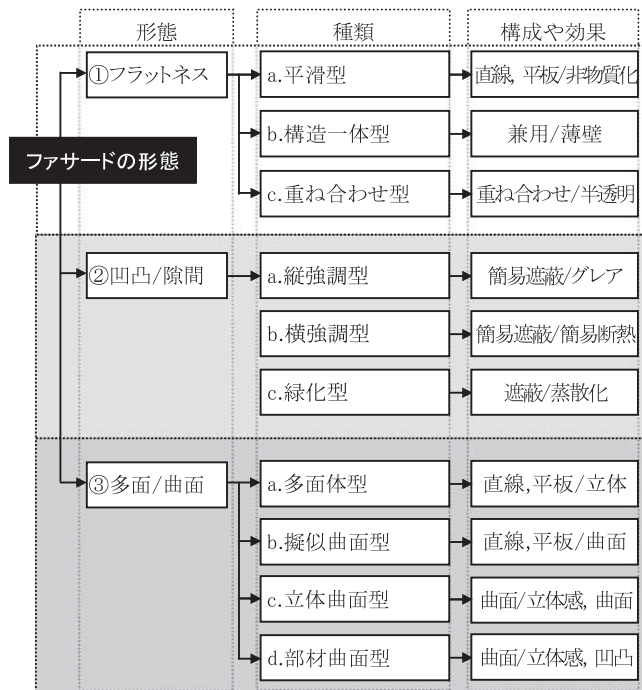


図-1 ファサードの形態

2.2 フラットネスファサード

平滑型は、現在でも主要な形態である。直線や平板によりフレームレスで平滑面を構成する（写真-2）。繊細な支持構法で透明化を図り非物質化を実現している。平滑なファサードは透過性と環境性能との両立が命題である。

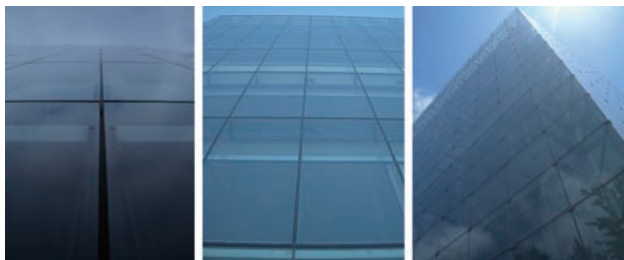


写真-2 平滑型ファサード

構造一体型はファサードが構造として機能するスキンである。実例としてはアルミニウム建築や耐震改修壁などがある。構造柱と方立を兼ねたカーテンウォール（以下CW）はあるが完全な構造化には至っていない（写真-3）。



写真-3 構造一体型ファサード²⁾

重ね合わせ型は〇〇越に見せるものであり、ガラスやパネル越しに物質を重ね合わせて表現するファサードである。視覚効果と環境性能が得られる。写真-4はスライスした石材をガラスにラミネートしたもの、パンチングパネル裏面に照明とパネルを設けたもの、ガラス越しにアルミルーバーを設けフラットネスでありながら厚みを表現したもの、PVパネルなど多様である。またガラス越しに構造をデザインして見せるものも多い。これらは、透過性を求めるだけではなく、ガラス越しに奥行きや揺らぎを表現した半透明的なファサードであり、最近、増加傾向にある。

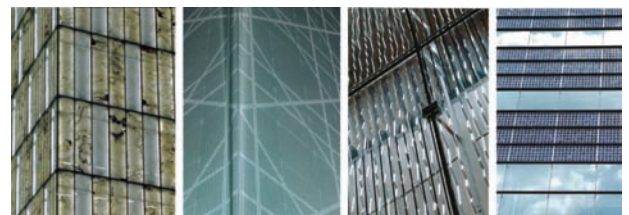


写真-4 重ね合わせ型（〇〇越に見せる）ファサード³⁾

2.3 凹凸や隙間によるファサード

縦強調型はファサード性能を担保するシングルスキンとその外部側に準スキンとして縦ルーバー（写真-5）やパンチングパネルなど（写真-6）で覆ったものを指す。熱的性能を期待するだけではなく凹凸や隙間により、半透明性やゆらぎなどの視覚効果が得られる。さらに縦ルーバーを可動させるなどの工夫で、季節に応じたモードによる遮蔽と集熱が期待でき、デザインと機能を融合した新しい形態となる可能性がある。

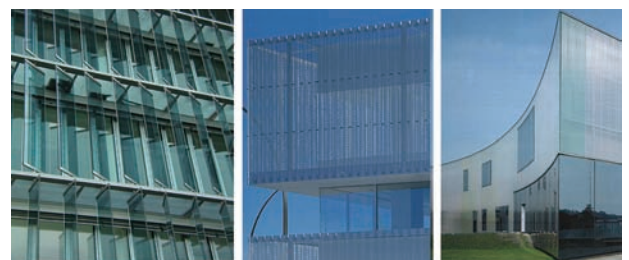
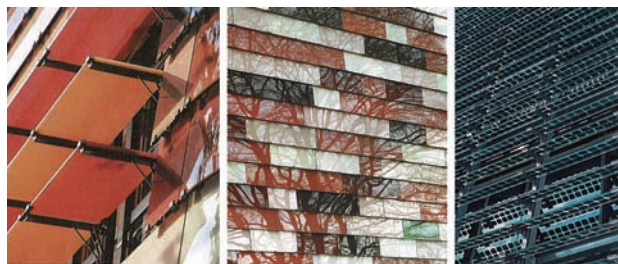


写真-5 縦ルーバー 写真-6 パンチングやポリカーボネート³⁾

横強調型も縦強調型と同様に簡易な断熱層を形成することが考えられる。ルーバーを可動する（写真-7）、ルーバーピッチを狭めるなどで遮熱効果や断熱効果を得ることが可能となる。さらにPVへの対応も許容される。

写真-7 横ルーバー³⁾

緑化型ファサードは不規則な凹凸と陰影がもたらされる。非常緑の場合、夏期は遮蔽効果、冬期は日射受熱と季節に応じて様相は変化する。しかし壁面は植物には過酷であり、灌水、土壌量、風、温度などの管理は繊細である。緑化は農場生育したユニットを施工する方法と現地生育する方法とがある（写真-8）。

写真-8 壁面緑化ファサード^{2), 3)}

2.4 多面や曲面によるファサード

多面体型は各々の要素が直線、平板として構成されたものを指す。ファサードが立体的で凹凸な形態は最近増えつつあり、さらに複雑化（写真-9）していくだろう。

写真-9 多面体によるファサード²⁾

擬似曲面型は適用事例が多い。各々の要素が直線や平板で構成され曲面を表現したもの（写真-10）を指す。立体曲面型は全体的、部材的にも曲線で構成される。

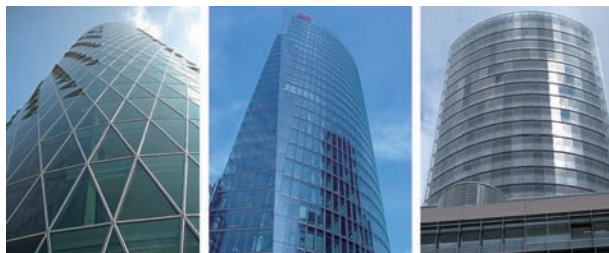


写真-10 直線や平面により曲面を構成するファサード

部分曲面型は構成部材が曲面状のものを指す。部分曲面による凹凸効果で立体感が得られる。写真-11は曲面ガラス、ETFEフッ素樹脂、SUSプレス成型を示す。

写真-11 曲面部材を組み込んだファサード²⁾

3. 環境的側面から「ファサードの構成方法」

3.1 ファサードの構成

今までのファサードはCW構法を用いてガラスや金属により密閉型のファサードを構成し、空調設備による人工的な快適環境を居住者に提供してきた。しかし、最近では環境への配慮や価値観の変化から外気を肌で感じたいという要望や中間期における冷暖房負荷軽減など設計手法が多様化し、従来の密閉型から半開放型へとそのあり方に変化の兆しが見えてきた。本章では、熱環境分野に関連したファサードの構成方法を図-2に示す3種類とし、さらに各構成方法における型を図-3に示すものに分類した。以上を踏まえながら、環境的側面からファサードの構成について簡潔に説明する。

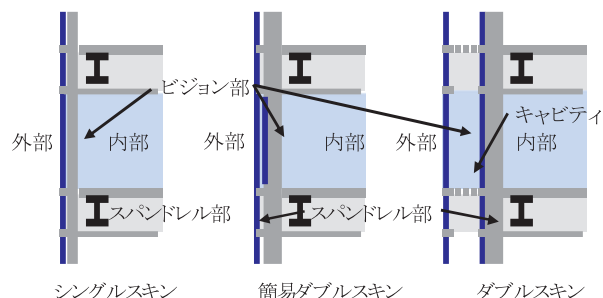


図-2 ガラスファサードの構成

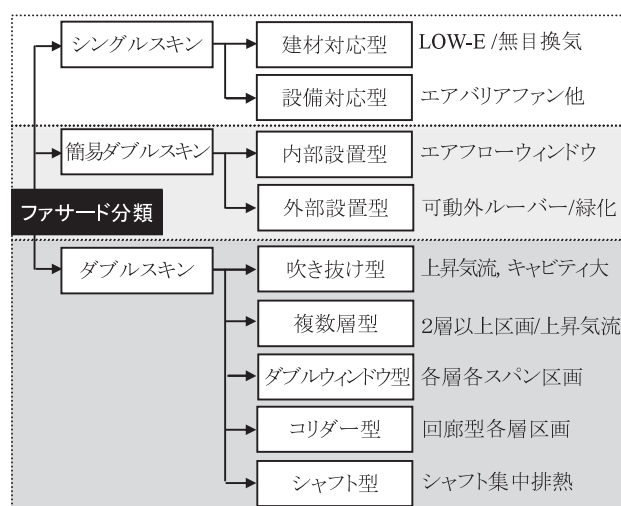


図-3 ガラスファサードの分類

3.2 シングルスキンファサード

ガラスファサードの熱負荷や熱損失は、主にビジョン部で生じる。そのため、シングルスキンファサードの熱的性能は高くない。しかし、コスト的アドバンテージにより、わが国では採用例が多い。組み込む建材製品や設備の工夫で大きく性能を損なわないようにすることが可能である。例えば建材対応型の場合、ビジョン部に断熱枠（熱橋切断）とLOW-E（低放射）ペアガラスを適用する、庇もしくはルーバー（写真-12左）を設けるなどが挙げられる。また、開閉による誘引効果を利用し内気排熱や外気導入をする窓もある（写真-12右）。図-4は横材から外気導入する無目換気を示す。運用時には遮音性が減少するが、外気取入れが可能となり、設備に頼る機会を減らすことが可能である。一方、設備対応型とはアクティブによるエアバリア効果（写真-13）で開口部の熱負荷を抑制するシステムである。

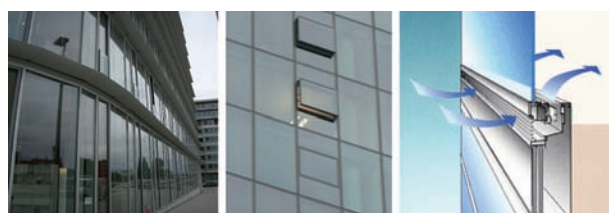


写真-12 庇（左）水平突出窓（右）

図-4 無目換気

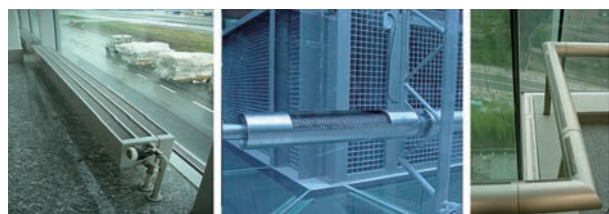


写真-13 エアバリアファンなどの事例

3.3 簡易ダブルスキンファサード

簡易ダブルスキンファサードは、基本的な性能を担保したシングルスキンファサードに必要な部位だけ簡便に二重化すること、もしくは完全に密閉することのない機能スキンを付与したものと定義する。例えば、前者であればエアフローウィンドウ型（図-5）、後者であれば可動外ルーバー型（写真-14）を指す。



図-5 エアフロー概略

写真-14 可動外ルーバー

エアフローウィンドウは、1960年代後半に実現され、欧州ではアクティブウォールと呼ばれている。エアフロ

ーウィンドウの構成は、シングルスキンのビジョン部内側にスキンが付与され、薄いキャビティを形成し室内のリターンエアが換気設備に戻される仕組み（図-5）である。詳述すれば、日射による熱エネルギーは外ガラスを透過したものがブラインドなどに吸収され、室内側へ放射される（外ガラスからの吸収による放射も含む）。夏期には室内の冷やされた空気がキャビティを通ることでこの熱エネルギーを回収でき、冬期には室内の暖められた空気がキャビティを通ることでコールドドラフトを解消する。そのため、ペリメーターゾーンに近い部分で快適性が増す仕組みである。エアフローウィンドウは閉鎖型ファサードである。つまり、高架道路や鉄道線路側にファサード面が向き、建築周辺環境として風・音・煙などで自然換気が困難な場合に有効である。そのため運用コストはやや高くなるが、内ガラスをスイング系ウィンドウやスライディング系ウィンドウ（写真-15）とすればキャビティ内のメンテナンス性や居室内の個別対応性が良好となり、運用上は有利に働く。



写真-15 エアフローウィンドウにおける内窓の開閉例

可動外ルーバーによる簡易ダブルスキンファサードは、エアフローウィンドウとは逆に外部側に設けられた完全に密閉されないスキンである。そのためキャビティ内の気密性や水密性は得られにくい。夏期には日射遮蔽用ルーバーが吸収した日射エネルギーを外側で放射し、冬期はバッファーを形成することで簡易な断熱層の役割（ルーバーピッチや風速など作用因子で変化）を果たす。しかし、風荷重や照明環境などに課題が残る。図-6にエアフローと可動外ルーバーの概略を示す。ファサードの性能ラインより内部側か外部側に簡便なスキンを設けるかの違いであるが、前者はアクティブに対応し、後者はパッシブに対応する。また緑化型ファサードで非常緑の場合、可動外ルーバーと同様な形態となる。

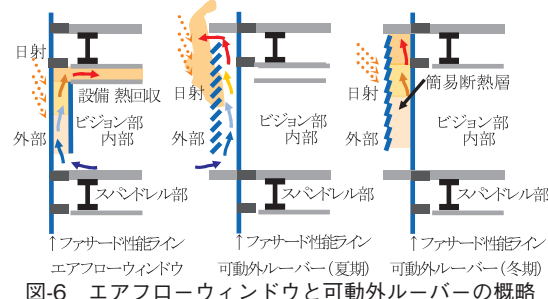


図-6 エアフローウィンドウと可動外ルーバーの概略

3.4 ダブルスキンファサード

ダブルスキンファサードは、1980年代に開発され、CWや躯体の外側にもう一層のスキンを設ける（図-7）ことで、熱環境に対応したファサードを構築したものである。そもそもダブルスキンファサードは、日除けルーバーの保護のために既存スキンの外側にもう一層設けたことが始まりとされる。ダブルスキンファサードは、夏の太陽熱エネルギーをキャビティ内で上昇気流に置換しキャビティ外へ排熱する仕組みであり、冬期は断熱層を形成して熱効率を向上させる技術手法である。

ダブルスキンファサードには、デザイン、遮熱、断熱および遮音のほか、高層ビルでの強風や降雨環境でも自然換気（図-7）を行えるメリットがあり、設備に頼らずにペリメーター領域で調整ができる。その結果、空調依存によるシックビル症候群を抑える効果があると考えられる。また直達日射による暑さや眩しさを和らげるため、日射遮蔽・遮光ルーバーやそれらを兼ねるPVを容易に設けられ、反射ブラインドやプリズム偏光装置を用いれば創エネ効果や照明エネルギーの削減にも寄与できる（図-7）。さらにキャビティを活用することでメンテナンス性が向上しランニングコストは有利にカウントされる。キャビティは採光、熱、外部騒音を緩衝し、プライバシー保護の役割も果たすが、キャビティ内の音や熱溜りと火災時の煙による課題は残る。

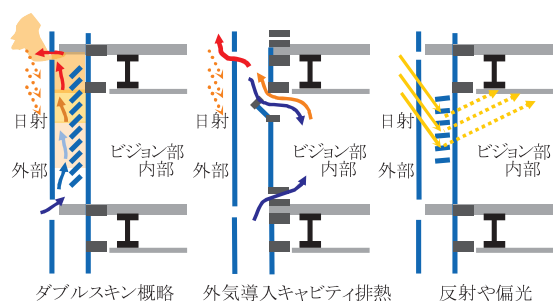


図-7 ダブルスキンファサード

4. 環境的側面から「ダブルスキンファサード」

4.1 分類

ダブルスキンファサードは熱環境対応の有効な手立てであり、欧州で多くの実績がある。ここでは、気候が異なるわが国において適用されているダブルスキンファサードも踏まえ、図-3に示した型（キャビティ種）ごとの特徴を簡潔に説明する。

4.2 吹き抜け型

最も一般的なダブルスキンファサードであり、わが国においても実績が多い。キャビティ奥行きは約600～1300mmで換気や外気導入方法は豊富である。写真-16は、キャビティ内の給排気口がない事例であり、欧州ではバッファ

ーファサードと呼ばれている。100年の歴史があり現在も用いられている。原理は複層ガラスと同じで換気は一切されないため、適用するには地域や部位が限定される。

写真-17は、鉛直水平方向に連続したキャビティを有し、区画が一切されていないファサードである。最下層から外気を導入して最上部で排熱するタイプである。適用事例は多くキャビティ内の上昇気流による排熱効果は高い。しかし、一般的に上層階になるほど高温状態が維持されやすく、さらに振動伝播による音の問題と火災時の煙に関する問題などが考えられるので、設計や設備と連動してプロジェクトごとに適切な対応しているものがほとんどである。



写真-16 完全密閉型吹き抜けキャビティ



写真-17 最下階開放給気、最上階排気によるキャビティ

ダブルスキンファサードにおいてアクティブ制御するものをインタラクティブウォールと欧州では呼んでいる。このシステムは冷房負荷が高く、暑い気候に極めて有効に機能すると考えられている。もちろん高層ビルにも開閉可能な窓を設け、自然換気を行えるメリットも併せ持つ。

一方、キャビティにおける上昇気流をアクティブなものに頼らずに同程度の排熱を得る方法として誘引効果を活用した事例がある。写真-18は、KLIMAATLAS（クリマアトラス：年間を通じた各地域の風向・風量）を元に設計が行なわれており、年間を通じてOST（東）側から吹く風をWINDSEGEL（風帆）により誘引し、キャビティ内排熱を促進させる機構である。つまり、キャビティ内の排熱を上昇気流と誘引効果を合わせて排熱能力を増大させ、上層階の熱的影響を和らげるものである。また図-8は各モードにおける外気導入、排熱、廃熱、断熱、蓄熱輻射暖房、熱回収、グレア対策、アンビエントなどの役割を示している。単にファサード性能だけではなく、建築設備を補助する仕組みとして重要な役割を果たしていることが見て取れる。

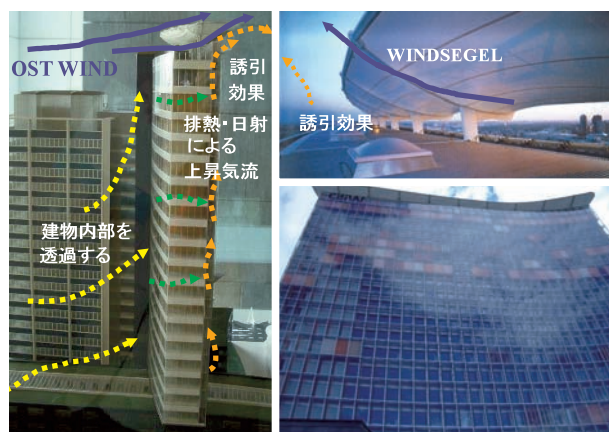
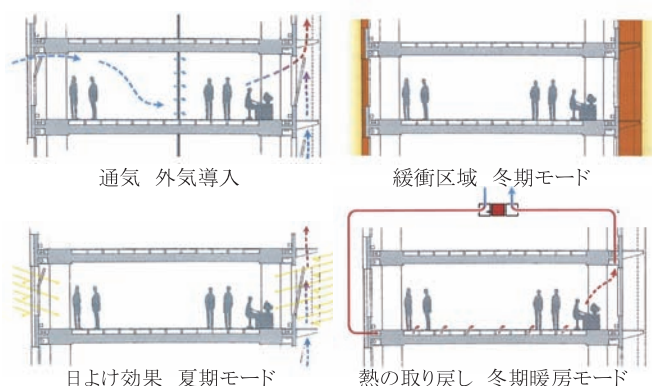


写真-18 誘引効果を付与した吹き抜け型キャビティ

図-8 誘引効果を付与した吹き抜け型キャビティのモード例⁴⁾

4.3 複数層型

複数層型は鉛直方向2層以上ごとに区画されたダブルスキンファサードであり、自然換気の吹き抜けタイプより上層階はキャビティからの熱的影響を受けにくく、音や煙に関する問題も区画により低減できる仕組みである。キャビティ内の外気導入、排気口に開閉機能を設けたものとそうでないものがあり、設備と連動したアクティブなものやパッシブなものがある。さらに内部側スキンでの開閉が可能となれば、個別対応により快適性が増す。写真-19は7層ごとに区画されたキャビティを持つ事例である。各層には外気導入用フラップが中層部に設けられており、キャビティ内は可動ルーバーにより遮光、遮熱調整ができるようになっている。



写真-19 複数階吹き抜け型キャビティ

4.4 ダブルウィンドウ (DW) 型

ダブルウィンドウファサードは、水平・垂直方向共に区切られており、互いに独立したユニットが縦横に並べられる。そのためコスト的には不利にカウントされる。給排気口はユニット上下に設けられ、ユニット内でクロスベンチレーション（図-9）としている。欧州では最も採用されているシステムであり、わが国でもダブルスキンCWとして開発されている。このシステムは細かく区画することで遮音や熱環境に対し個別制御が可能となる。また年間を通じて自然換気が可能であり、ナイトパーージなども有効である。さらに冬期には直達日射による温室効果で外気導入した新鮮空気を暖めること、寒い夜などでは給排気口（換気口）を閉じて暖気をダブルウィンドウ内に蓄積させ、そのバッファー効果で熱損失を防げる点などが特徴である。

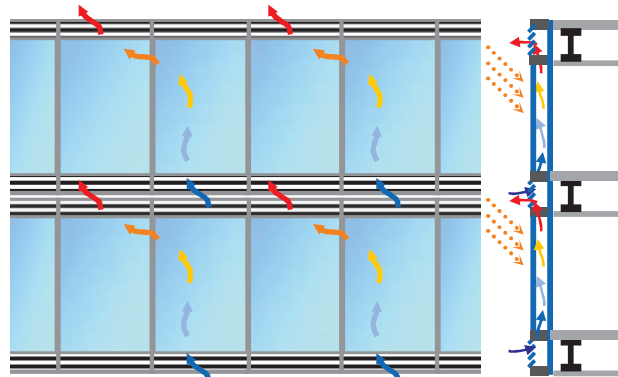


図-9 クロスベンチレーション概略

弊社Gr. 企業が(株)大林組と共同開発を行ったダブルスキンCW (NEXAT) の概要を図-10(左)に示す。見込みが200mmで従来型より格段にコンパクト化が図られ、1フロアー1ユニットのCWとしている。そのため建築面積を有効活用できる。また無目に組み込まれたローターの制御により夏期の日射遮熱、冬期の断熱とエアフロー、そして中間期の外気冷房とナイトパーージの機能を持つ。従来のシングルスキンに比べ年間消費エネルギーを34%削減可能である。図-10(右)は開発過程で行ったCFD解析例を、写真-20は適用事例を示す。

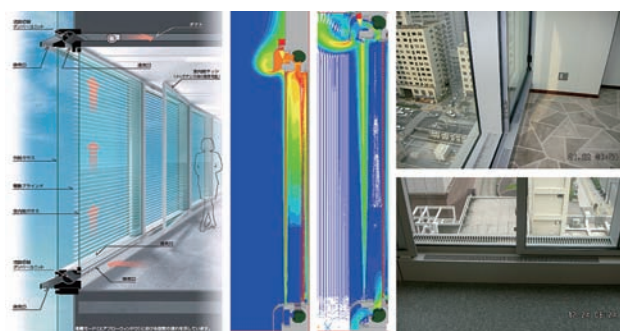


図-10 ダブルウィンドウ概略とCFD解析例 写真-20 適用事例内観

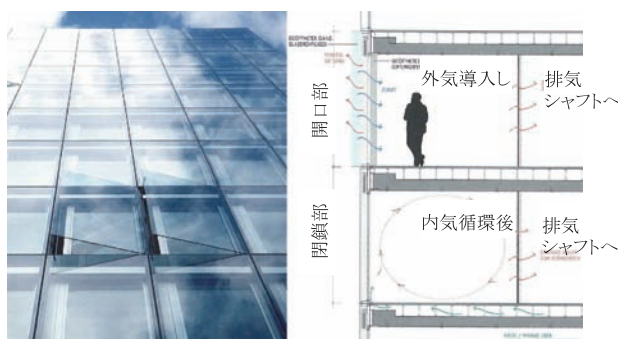
写真-21・図-11はダブルウィンドウ型であるが給気口が縦材に設けられている事例である。開閉の制御はできないが、クロスベンチレーションを考慮する必要がなくなる。



写真-21 縦型吸気上部排熱例

図-11 縦型吸気DW

また写真-22は給排気口を外開き窓と兼ねることで極めて平滑で透過性が高いファサードとした事例である。ダブルウィンドウ部だけで熱処理せず、内部のアトリウムを活用した全館換気システムとしている。開口部から外気が導入され居室へ供給し（図-12）、排熱はアトリウムで行う複合型の仕組みである。

写真-22 DW+全館形換気⁵⁾図-12 外開き窓DWの概略⁵⁾

4.5 コリダー型

わが国における適用事例は少ないが、欧州ではダブルウィンドウと同様に多く見られる。コリダー（回廊）型は、キャビティをフロアごとに仕切ったもので水平方向に連なるキャビティが特徴である（写真-23）。またスラブを活用してキャビティを構成する方法とスラブを活用しない方法がある。コリダー型は吹き抜け型に比してコスト高ではあるが、キャビティを各階で遮るため吹き抜け型で問題となっていた熱・音・炎・煙など上層階に対する諸問題が解消される。さらに補助的な役割として、外部スキン給排気口の開閉が可能ならば、キャビティの気積が小さいので冬期には断熱層として働き、日射を受けない面へ日射熱を供給することも期待できる。さらにメンテナンス時にはコリダーを活用できるので、ランニングコストは有利にカウントされる。コリダー型は、各階のスラブ部において外気導入とキャビティにおける排熱を行っている。そのためショートサーキットに対して配慮する必要がある。通常はクロスベンチレーションとして対処することが一般的である。写真-24は、コリダ

ーを大容量換気ダクト、そして風圧を調整する保護層として機能させている事例である。外気は縦に設置されている電動可動式ルーバーから圧力差によって導入される。コリダーはスラブによって形成し、無耐火被覆の構造柱を実現している。その柱をコリダー側へ出すことで室内空間は有効に活用されている。

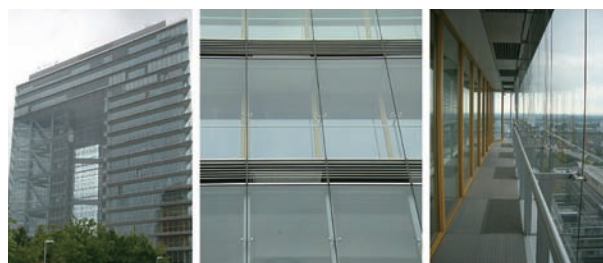


写真-23 コリダー型キャビティ

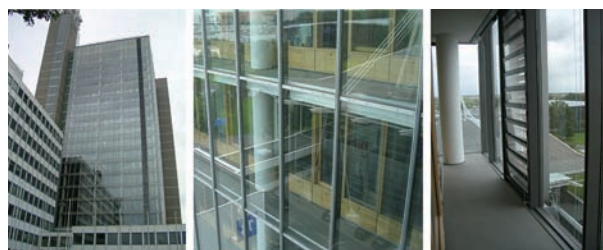


写真-24 大容量換気ダクトと風圧を調整保護するコリダー型の事例

4.6 シャフト型

シャフト型ファサードはキャビティが垂直方向に分割されており、ダブルウィンドウと交互に配置されている。シャフト内に上昇気流を生じさせ、居室内空気を外部へ排出する仕組みであり、わが国での適用事例は極めて少ない。写真-25はシャフト型の事例であるが新鮮空気は外部スキンにおけるガラスの下辺目地からシャフト外のキャビティへ給気され、内部スキンから居室へ導入する（写真-25）。シャフト型のメリットは、換気が促進される点にある。

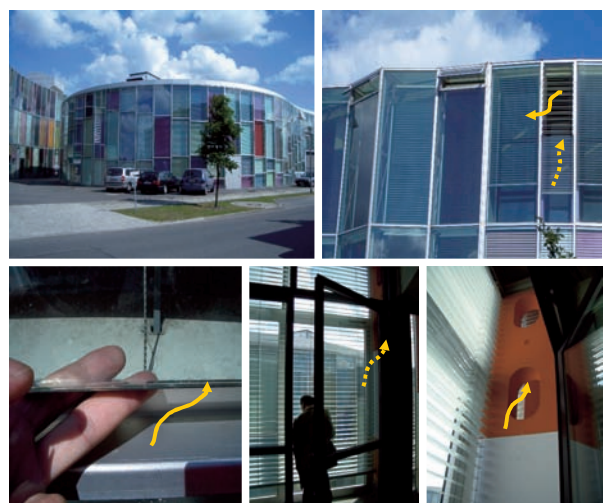


写真-25 シャフト型ダブルスキンファサード

5. ダブルスキンファサードにおける性能ライン

欧州では外部側スキンのガラス間目地は開放しており、そこから外気導入をしていることが多い。一方、わが国ではシーリング材などで密閉している場合が多い。外部側スキンのガラス間目地が開放ならば、性能ラインは内部側スキンとなるが、閉鎖されていれば一般的には外部側スキンとなる。表-2には、各要求性能におけるファサード性能ラインの位置を示した。基本的に行政判断によるものもあるが、ここでは防耐火、遮音および断熱は主に内部側スキンで決定され、耐震や耐温度、結露、耐用耐久などは内外ともに性能ラインとなることが見て取れる。また風荷重では、外部側スキンが開放ならば設計に際し風荷重を低減できる可能性はあるが、圧力状態が一樣でなく予測が比較的難しいため、内外とも風荷重を負担させるように設計する場合が多い。このようにファサードの性能ラインは、条件に応じて変化するため、適用には注意が必要となる。

表-2 ファサードの要求性能に対するファサード性能ラインの位置

	外部スキン	内部スキン	両方	備考
防火耐火性能		○		行政判断
耐風圧性能	外部閉鎖なら外部が○，外部開放なら両方が○			
耐震性能			○	内部厳しい
耐温度性能			○	外部厳しい
水密性能	外部閉鎖なら外部が○，外部開放なら内部が○			
気密性能	外部閉鎖なら外部が○，外部開放なら内部が○			
遮音性能	外部閉鎖なら両方が○，外部開放なら内部が○			
断熱性能	外部閉鎖なら両方が○，外部開放なら内部が○			
結露防止性能			○	内部厳しい
耐久耐用性能			○	

6. 構造的側面から「ガラスのとめ方」

6.1 分類

透過性の高いファサードを構築する上で、ガラスのとめ方（支持する方法）は種々に存在するが、大きく分ければ図-13に示すように線支持のものと線支持でないものに分類される。線支持はサッシ構法やCW構法に代表される慣用的なガラスのとめ方である。また、構造シーラントを適用することでアルミニウム合金製押出型材の枠材を外部表面に露出させず、構造上支持する構造シーラント接着構法（以下SSG構法）のほか、ガラス方立構法やガスケット構法などのようにガラス辺を線状に連続支持したものも同様に線支持に該当する。

一方、線支持でないものは点支持や部分支持であり、代表的なものとして孔明け点支持構法（以下DPG）や

挟み込み式点支持構法（以下MJG）が挙げられる。どちらも主にガラス隅部を点支持するだけで構造的に安定させる構法のことをいう。部分支持構法は線支持構法と点支持構法の間位置する構法である。線支持のようにガラス辺全長を連続支持するのではなく局部のみ点支持するものでもない中庸的支持形態であり、ある部分の長さだけ支持しているものを部分支持構法と称している。以下、図-13に記されているガラス支持構法について簡潔に説明する。

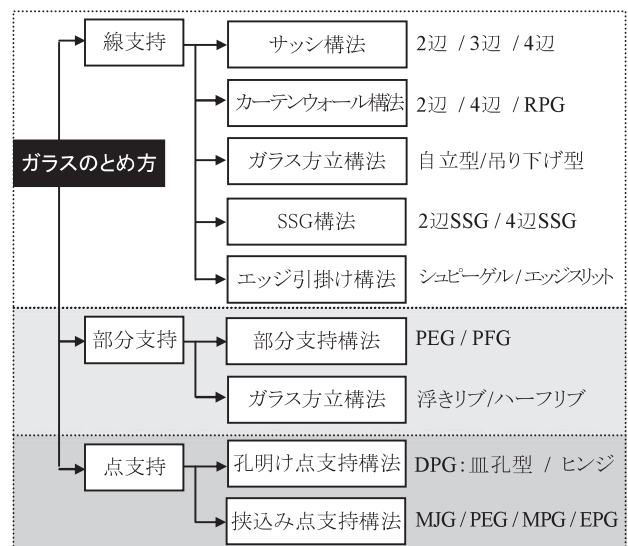


図-13 ファサードにおけるガラスのとめ方

6.2 線支持構法

一般的なサッシやCWのほとんどに適用されている代表的な構法である。ガラス辺端部を支持枠内に嵌め込み、支持枠とガラス間にシーリングやガスケットを介在させて外乱による面外、面内挙動を拘束する構法である。支持枠はアルミニウム合金製押出型材が用いられ、そのほかステンレス鋼製、鋼製もある。最近では断熱性が得られる樹脂製のものも増えつつある。線支持は4辺支持や横2辺支持が慣用的であり縦2辺支持もある（図-14）。縦2辺支持はガラス自重を受ける必要があるが、弊社のGr.企業が開発したRPG（Rocking Point Glazing）構法はガラス下辺隅部に嵌め込んだ金物で支持し、金物を縦枠内に納めることですっきりとしたファサード面を提供でき、かつ層間変位追従機構によりシール目地を小さくできる特徴を有する。

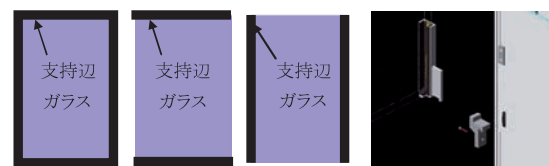


図-14 サッシにおける2辺支持および4辺支持例

SSG (Structural Sealant Glazing System) 構法は、線支持に分類され、外乱によりガラスに作用する面外、面内荷重を構造シーラントにより保持し枠材に伝達する構法である。外観上枠材が存在しないため、凹凸がなく平滑面が保たれすっきりしている (写真-26)。しかし構造シーラントは接着耐久性に依存するため、我が国で適用するには条件が付される⁶⁾。そこで4辺SSGにフェールセーフ機能を付与し、開発したのがシュピーゲルCW (図-15) である。これは4辺SSG構法とガラス辺端部分に斜加工を施したアルミ押出型材で機械的に保持するエッジ引掛け構法を併用したものである。4辺SSG構法と同様にフレームレスに近く凹凸のない平滑面を実現できる。シュピーゲルCWは、最近増えつつあるエッジ引掛け構法の先駆けである。

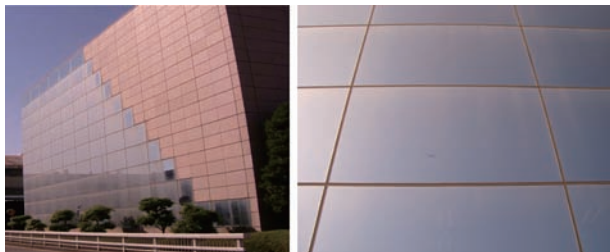


写真-26 SSG構法適用事例

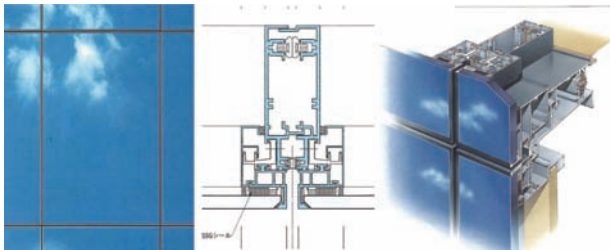


図-15 SSG構法+エッジ引掛け構法

6.3 部分支持構法

部分支持構法は線支持と点支持の間に位置する。部分支持構法の定義は、ガラスパネルを水平方向支持と想定すれば、支持金物の見付幅に対する見付高さ (見付幅/見付高) が2.0を越えるような場合と、ここでは定義する。

ガラスの力学的性状は点支持構法と同様の性状を示す場合があるため、ガラスは形状非線形を見込んだ有限要素解析で確認しておく必要がある。用いられる支持金物は、一般的にステンレス鋼の場合が多いが、弊社のGr. 企業ではアルミ支持金物を適用しており、PEG (Partial, Extrusion, Glazingの頭文字) 構法と称している。写真-27に適用事例を示す。アルミニウム合金を採用しているため周囲のサッシやCWとデザインを統一することも可能であり、コスト的にも切削加工やロストワックス製法による鋳鋼品に比べ低く抑えられる。最近適用事例が増えつつある。



写真-27 部分支持 (PEG) 構法

6.4 点支持構法

点支持構法には、孔明け点支持構法と挟み込み式ガラス点支持構法の2つがある。孔明け点支持構法は、DPG (Dot Point Glazing) 構法と呼ばれ、わが国独自の名称が既に定着している。DPGは一定板厚以上のガラス隅部に孔を明け、強化加工を施した孔明き強化ガラスを金物で支持拘束する構法である。孔部の支持拘束方法は2種類存在し、一つは支持拘束部がヒンジとなり応力を吸収する機構を有するもので、孔周辺の応力は緩和されるがガラスの変形は大きくなる。もう一つは、皿孔加工された部分をほぼ回転挙動が生じないように拘束し、金物側にヒンジを設けたものでガラスの変形は小さいが応力が孔部に集中しやすい (写真-28)。弊社のGr. 企業では後者を採用しており、その支持金物は、世界で唯一アルミニウム合金製押出型材 (A6963S-T5) を適用している。DPG構法はその加工上、強化ガラスを使う必要があるため、自然破損に対して合わせガラスや飛散防止フィルム (合わせガラスを推奨) などのフェールセーフ機能を付与する必要がある。また、適用にあたっては有限要素解析を実施し、ガラスの最大主応力などを確認する必要がある。図-16にガラス解析例を示す。

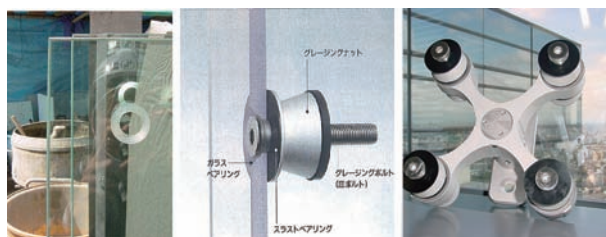


写真-28 DPG詳細 皿孔 (左)、皿ボルト型 (中)、アルミ金物 (右)

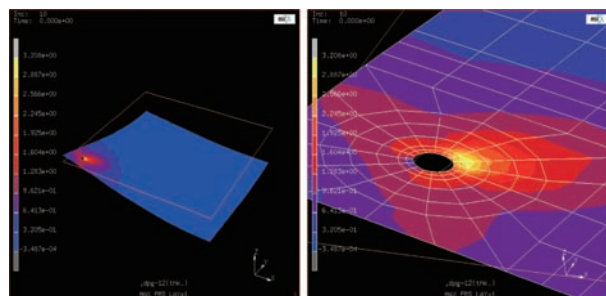


図-16 DPGの有限要素解析例 (形状非線形性を考慮)

挟み込み式ガラス点支持構法は、透過性の高いガラスファサードとするために用いられている構法である。MJG構法（Minimum Joint Glazing）、MPG、EPGと企業ごとに名称は異なるが、基本構造に差はなく、ガラス隅部を金物で挟み込み支持する構法である。支持拘束方法はボルトで締め込むもの（図-17）、もしくはボルト軸部付き押え金物により締め込むものが主流である。弊社のGr. 企業では施工性やメンテナンス性を考慮し、ボルトにより締め込む方式を採用しているが、ボルト軸部付き押え金物で締め込むものや押え金物を引っ掛けるだけで保持するものも実績がある。挟み込み式点支持構法はDPG構法とは異なりガラスに孔明け加工を施す必要がない。そのため強化ガラスを用いずに透過性の高いファサードが実現でき、強化ガラス特有の自然破損による心配がない点が特長である。さらに支持架構との適合性もよく、あらゆる支持架構に適用できる。特にケーブルグリッドのような変形の大きいテンション構造にも適用しやすい点は、DPG構法とは異なる。写真-29と図-17にMJG構法の適用事例と概要を示す。



写真-29 適用事例と支持金物部分

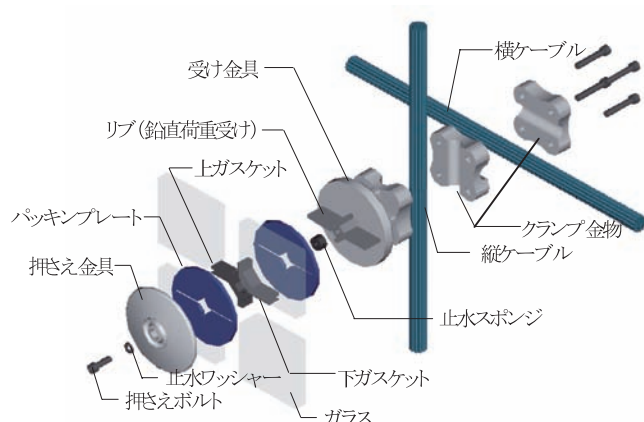


図-17 挟み込み式ガラス点支持構法（MJG構法）概略

アルミ点支持構法は、アルミニウム合金製押出型材の嵌め込み式ガラス点支持構法であり、部分支持構法と同様にPEG構法と称している。素材がアルミニウム合金であること以外にボルトの締め付けを要さず、嵌合方式で

対応できる特長を有する。また、押出型材の特性を生かして一つの型材で点支持や部分支持と柔軟に使い分けることが可能である。さらに地震時層間変位追従性能に対し、嵌合形式を応用すればロッキング機構を容易に設けることができることから、その汎用性が注目されている。写真-30にはロッキング機構付き点支持金物を示す。

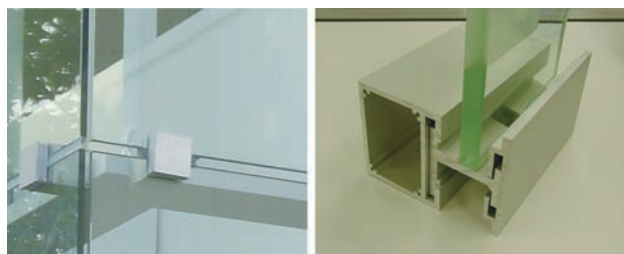


写真-30 ロッキング機構付きアルミニウム合金製点支持(PEG)金物

7. 構造的側面から「ガラスの支え方」

7.1 分類

透過性の高いファサードを構築する上で、ガラスの支え方（支持架構）は種々に存在するが、大きく分ければ図-18に示すように単一系・組合せ系・張力系の構造形式に分類される。

単一系は、サッシ構法やCW構法に代表される方立であり、曲げ抵抗系の支持架構である。ガラス面で受けた荷重は縦枠から方立（縦枠を兼ねる方立も多い）に、方立からファスナー部を介して構造躯体に伝達され、簡明な構造特性を有している。

組合せ系は、軸力抵抗系のトラスや曲げ抵抗系のフィーレンディールトラスがあり、最近では複合部材による方立などもある。どれも見込み寸法を大きく取ることができ、曲げ剛性を増えるため、吹抜け部のガラスファサード面に適用されることが多い。

張力構造は、ロッド材やケーブル材に予め張力を導入することで構造的に安定させ、外乱に抵抗する張力抵抗系の支持架構である。ロッド材やケーブル材は非抗压材として扱う必要がある。張力構造は、構成方法により用途に合わせた適用が可能である。例えば比較的低い張力でも剛性が得られるテンショントラス（束材見込み寸法に依存）や初期張力の反力を相殺する目的で圧縮材を設けたフィッシュボーントラス、トラス状テンション架構のテンセグリットトラス、さらにケーブルだけで構成され非物質化を図ったケーブルグリッドとどれも吹抜け部に適用され繊細な支持架構を形成するのに適している。以下、図-18に記されているファサードの支持架構について簡潔に説明する。

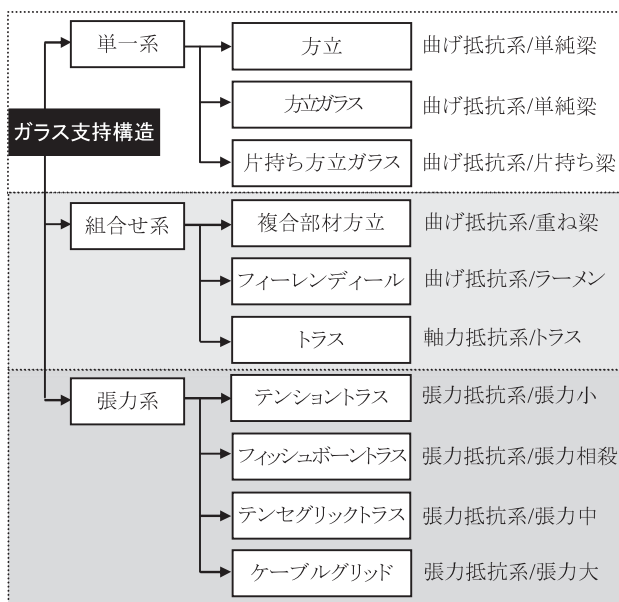


図-18 ファサードにおけるガラスの支え方

7.2 単一系構造

方立は縦支持部材であり、ガラス面で受けた風荷重はガラス辺支持によりシーリング材やガスケットを介してアルミ押出型材などの枠材で線支持される。枠材で受けた荷重は方立へ伝達し、最終的には方立が接合されている躯体へと伝達する。方立の境界条件は原則ピン・ローラーなので単純梁で簡明に評価できる（写真-31）。しかしながら、適用素材がアルミニウム合金・鋼・ステンレス鋼・ガラス・木と多岐に渡ることもあり、剛性や降伏値が異なる点に注意を要する。さらにCW構法では不静定構造である連続梁に近い性能を発揮できるゲルバー梁を採用し、断面や支点の効率化を図ったり、細長断面は横座屈対策としてのタイピング調整など、単一系構造部材は材種、形態ともに広く派生している。図-19に方立ガラスの座屈解析例を示す。

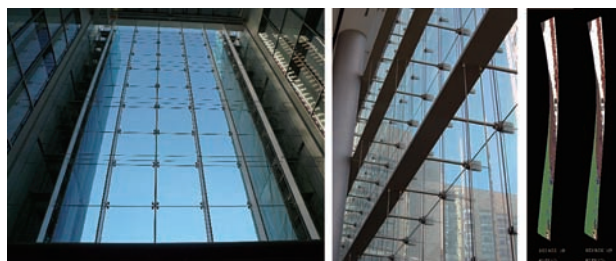


写真-31 方立架構形式（左） 横材架構方式（右） 図-19 座屈解析例

7.3 組合せ系構造

代表的な組合せ系構造としてトラスがある。トラスの構成は、弦材と斜材をヒンジで連結し三角形を成すことで軸力抵抗系となる。軸力しか伝達しないので簡明であるが、剛性はやや低下する。適用部位は吹き抜け空間などに多く（写真-32左）、一般的な居室周りにはあまり

使われない。一方、トラスと酷似しているが弦材と斜材、もしくは水平材の境界が剛接合となっており、曲げ抵抗系の構造を有するのがフィーレンディールトラスである（Vierendeel写真-32中と右）。トラスと称しているが構造特性はラーメン（Rahmen）であるのでトラスに比べ曲げ剛性が高い。

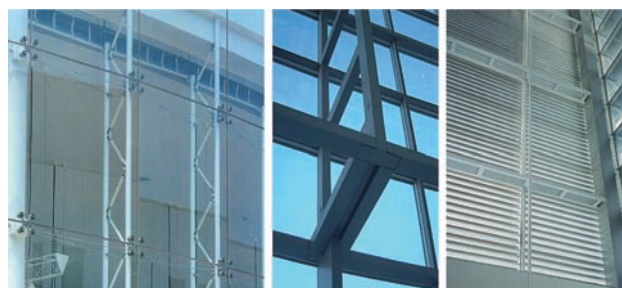


写真-32 組合せ系構造例 トラス（左） フィーレンディール（中、右）

複合部材方立は、例えば金属とガラスの素材をボルトなどで締結したものであり、最近増えている支持架構の一つである。写真-33に事例を示す。脆性材との接合なので接合方法や接合部位、各々の材料特性に注意が必要である。そのため、金属とガラスをボルトなどで締結する際は、基本的に強化加工したガラスを用いる必要があり、前述したDPG構法と同様に有限要素解析などを実施することで接合部近傍の最大主応力などを確認しておく必要がある。

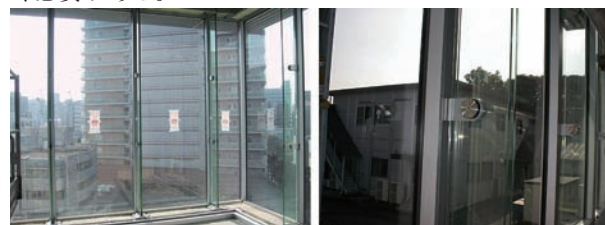


写真-33 組合せ系構造ガラス+金属

7.4 張力系構造

テンショントラスは、弦材と束材により構成され、弦材に予め張力を与えることで形状を安定させ、外力に対し抵抗する構造となっている。束材の見込寸法（サグ）をある程度設けることで剛性の上昇が期待できるので、弦材への初期導入張力も比較的小さくて済む。写真-34には適用事例を、図-20にはテンショントラスの解析例を示す。

フィッシュボートトラスは圧縮材を設けることによりテンショントラスの初期張力に対する反力を相殺できるメリットがある。圧縮材は座屈による検証を行なう必要があるが、通常は鋼管などとするため有利に働くことが多い。その一方で外乱などによる増分張力に対して局部座屈などの検討を要することとなる。

テンセグリティトラスは圧縮材を張力材で統合し、トラス要素としての剛性と張力系要素としてテンション材

との組み合わせにより、比較的少ない張力で構造的に安定化を図ったものである。写真-35には適用事例を、図-21にはテンセグリティトラスの解析例を示す。

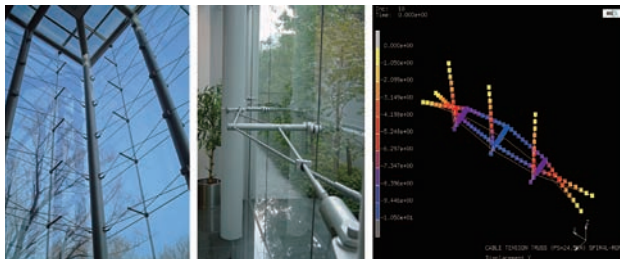


写真-34 テンショントラス 図-20 テンショントラス解析例



写真-35 テンセグリティトラス 図-21 テンセグリティトラス解析例

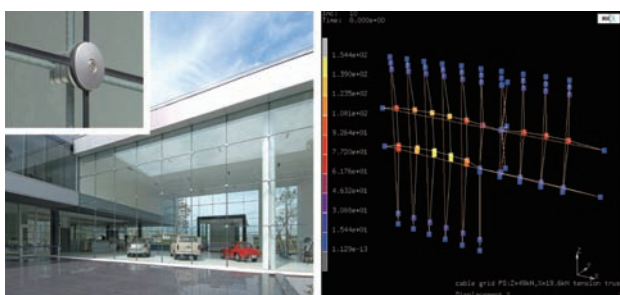


写真-36 ケーブルグリッド 図-22 ケーブルグリッド解析例

ケーブルグリッドは、ケーブル材を縦横に配し見込寸法を最小限にした支持構造である。縦横に導入する初期張力は極めて大きい、点支持構法と合わせると圧倒的な透過性によるファサードを実現できる構造である（写真-36）。

わが国より風荷重が低い地域では大規模なファサードに適用した事例（写真-37）が存在する。これがファサードにおけるケーブルグリッド構造の先駆けとなっている。



写真-37 欧州におけるケーブルグリッド

ケーブルグリッドは、剛性が小さく非線形効果が大きいので設計する際には注意が必要であり、剛性の低下現

象は補剛ケーブル（テンショントラス）などである程度拘束する手法を用いることもある（写真-38）。また、境界構造へ与える影響も大きい非線形解析（図-22）を実施し、導入張力や増分張力などを踏まえながら初期段階から構造設計者と綿密に調整をする必要がある。



写真-38 ケーブルグリッドにおける補剛ケーブル

8. おわりに

本報では、ガラスファサードの形態と構成方法について、欧州の事例と弊社のGr. 企業が開発した構法ならびに国内の事例などを交えながら、概要を述べてきた。ガラスファサードには様々なデザイン形態、環境システム、構法や構造および素材が活用されており、その様相は年々複雑に、そして繊細になってきている。特に透過性の高いファサードにおける熱環境との融合はここ数年取り組んできたテーマであり、これからもこの方向性に変わりはない。しかしながら、ZEB（zero energy building）などへ適用していくためにはガラスファサードの真の役割と意義を改めて明確にしていくことが求められる。そのために建築の計画段階から建築家や設備技術者と協働することが不可欠であり、その上でファサードエンジニアリングという概念と職能を定着させていくことが鍵となる。今後、各業種のファサードを掌る技術者たちは、ファサード全体に関わる技術を統合したエンジニアリング能力が求められてくることになるであろう。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：「建築工事標準仕様書・同解説 JASS14 カーテンウォール工事」, pp34pp114, 1996年1月
- 2) 株式会社新建築社：「新建築2007年1月号」他, 2006年
- 3) リード・ビジネス・インフォメーション(株)：「DETAIL JAPAN 創刊前特別号」他, 2005年
- 4) sauerbruch hutton architekten : gsw hauptverwaltung berlin, pp202-205, Mai 2000
- 5) schneider+schumacher : CUBUS/HOTEL-UND BÜROGEBÄUDE, DÜSSELDORF, pp31, 2001
- 6) 建築業協会：「SSG構法の採用にあたって」, 1993年10月