

ガラスファサードの設計法について — 構造・材料の側面から —

Design and Engineering Methods on Glass Facade.
— In perspective of structure and material —

石井 久史*1

1. 序

建築は支えるものと仕切るものに大別され、仕切るものは建築の外部側（envelope）である外壁と建築の内部側を区画する内壁とに分類される。外壁には壁と開口部の性能や機能が要求され、とりわけカーテンウォール（以下CW）構法は、その双方を併せ持った非耐力壁である。

CWは、外壁、外装、外皮、スキン、ファサードなどと呼称され、法令では外壁、政令や告示では外装材および屋外に面する帳壁と表記されている。一方、言葉の意味として、外壁（external wall）は建物の外側の壁、外装（facing）は建物の外部仕上げ、帳壁（curtain wall）は非耐力壁の総称と記されており、その役割や範囲は様々である。CWは、建築内外を隔てる壁としての性能的側面が強いこと、法令関連における表現、機能的な役割と複合性などを踏まえ、ここでは、開口部を内包して外壁と呼ぶことにする。

CWは、高層建築の外壁に多用され広く認知されている構工法の一つであるが、その一方で、この二十年の間にガラスファサードという新たな外壁形態も出現している。ガラスファサードとは、ガラス主体に構成されたファサードであり、それゆえガラスを多用したメタルCW（写真-1）も包含される。しかしながら、実務ではメタルCWがガラスファサードと呼ばれることは少なく、またその逆も先に同じである。そのため、今日まで両者間の位置付けは、ある一定の線引きがなされてきた。このような背景から、ここで取り上げるガラスファサードとは、建築の外壁において非物質化（物質的にフレームレス化）が図られた高透過な外壁を実現するための構工法（写真-2、図-1）と定義する。

ガラスファサードは、今までオフィスビルなどの低層部を中心に適用されてきたが、最近では中高層ビルのダブルスキンファサードにも適用されている。そのため、ガラスファサードにはメタルCWと同様の性能^{1),2)}が要求されているはずである。また、一方でCWの概念だけでは対応しきれない諸条件も満たす必要がある。本報では、外壁を構成するガラスファサードの設計法について、要求性能である荷重項目ならびにそこに適用される素材と構造を中心に、事例を交えながら概要を解説する。



写真-1 メタルCW事例 写真-2 ガラスファサード事例³⁾

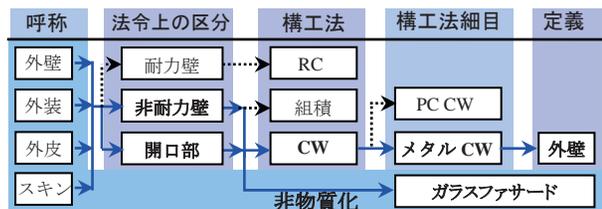


図-1 本報におけるガラスファサード位置付け

2. ガラスファサードの素材

2.1 ガラス

ガラスは、加工することで様々な機能を有する魅力ある素材であり、建築に適用されるガラスは、大半がソーダライムシリカガラス（SLSG:soda lime silica glass）である。

*1 ISHII Hisashi : 株式会社 LIXIL 総合研究所 主幹 博士 (工学)

ガラスの最大の魅力は、その透明性にある。ガラスが透明なのは、他の材料と比較して結晶の規則性がなく非晶質（図-2）であることに起因する。すなわち、分子間の結合状態が支配的要因であり、その状態は結晶化することなく冷却固体化したものといわれている。ガラスは結晶構造のものとは異なり、反射と吸収をほとんどせず光を透過させてしまう。そのため他の物質にはない魅力を備えている。

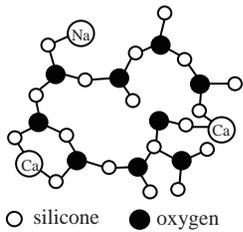


図-2 ガラスの組成⁴⁾

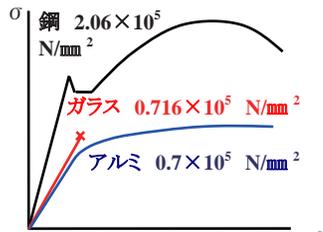


図-3 各種の応力-ひずみ関係

ガラスの力学的特性は、金属材料とは全く異なる性状となる。図-3にガラスと金属材料の応力-ひずみ関係を示す。金属は弾性域から塑性域へとその勾配を変化させ、降伏後ひずみ硬化領域で残余耐力が期待できる性状を示すのに対し、ガラスは弾性変形のように直線的な勾配をとった後、脆性破断する。すなわち、ガラスは靱性の乏しい素材であり、ガラスを扱う場合は、脆性材料であることを強く認識して構造的に不安定さに配慮した設計をする必要がある。

ガラスの理論強度（引張強さ）は非常に高く、その数値は30GPa⁵⁾と言われている。しかし、構造目的に適用された事例は極めて少ない。その理由は前述の通り脆性材料であることに起因する。現実的にガラスの引張強さは、エンジニアリング上の適切な性能として低く見積られている。

ガラスの許容応力度が低く見積られているのは、ガラスの引張強さがガラス表面の微細な傷（Griffith crack）に依存しているからである。ガラスの表面には製造時に無数の微細な傷がつく。その傷は、大きさや深さおよび方向などが不規則であり、さらに荷重時間や荷重速度ならびにガラス寸法にも依存するので、ばらつきが大きくなりやすい。そのため、ガラス強度は破壊試験を実施し、その結果を統計処理（Weibull）して強度が決定されている。

表-1にガラスの許容応力度を示す。ガラスの許容応力度は、ガラス種類、部位、板厚により数値が異なる。そのため、MJG構法⁶⁾やDPG構法⁶⁾など特殊なガラス点支持構法を採用する場合、最大主応力の発生位置と応力度を有限要素解析などにより確認しておく必要がある。こ

のように、ガラスファサードを扱う際には、ガラス強度だけでも注意深く検討を進める必要がある。

表-1 ガラスの許容応力度等一覧

項目 種類	板厚 (mm)	縦弾性 係数 (N/mm ²)	平均破壊応力 (N/mm ²)		短期許容応力 (N/mm ²)		長期許容応力 (N/mm ²)	
			面内	エッジ	面内	エッジ	面内	エッジ
フロート	3~8	71.6 ×10 ³	54.9	35.3	24.5	17.7	9.8	6.9
	10・12		51.5	35.3	22.1	17.7	8.8	6.9
	15・19		48.1	35.3	19.6	17.7	7.8	6.9
	22・25		46.6	35.3	18.6	17.7	7.4	6.9
強化	4~19		142.2	131.4	88.3	79.4	73.5	68.6
倍強度	6~12		78.5	70.6	44.1	35.3	29.4	24.5

ガラスの種類には、基板と呼ばれているフロートガラス（Annealed glass）と加工ガラスに大きく分類されている。加工ガラスは、熱処理を施して急冷・冷却することにより強度を増した強化ガラス（Fully tempered glass）や倍強度ガラス（Heat strengthened glass）、ガラスの構成により安全性や熱的効果を付与した合わせガラス（Laminated glass）や複層ガラス（Insulating glass units）に分類される。図-4はガラスの構成例を示し、以下ガラスの種類別に設計上の留意事項も踏まえながら解説する。

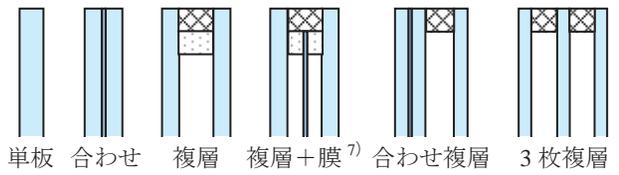


図-4 ガラスの構成種類

2. 1. 1 強化ガラス（Fully tempered glass）

強化ガラスは、フロート板ガラスや熱線反射ガラスを軟化点である650℃くらいまで加熱後、両表面に空気を吹き付けて急冷させた加工ガラスで、許容応力度はフロートガラスの3倍以上となる（表-1）。強化ガラスの特徴は、ガラス表面を圧縮応力層、ガラスコアを引張応力層で構成する点にある（図-5）。表面の圧縮応力層は、急冷による収縮効果を活用することで、それに伴いガラスコアに引張応力層が形成される。急冷後の応力の移り変わりを図-6に示す。横軸は時間を示し、時間経過と共にガラス内部の応力状態がわかる。また、圧縮層は板厚の1/6（図-5）であり、この圧縮応力層を設けたことによって曲げ力に対し進展する亀裂をキャンセルできる仕組みである（図-7）。すなわち、表面引張応力が増加しても残余圧縮応力より小さい限り、Griffith crackには効果

的引張応力が存在せず、それゆえに引張応力によく抵抗する。ただし、ガラスコアには傷の進展がないことが強化ガラスの構成条件となる。

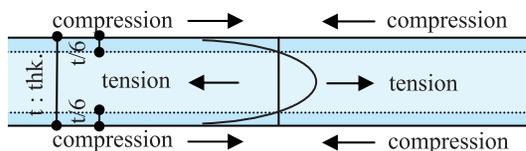


図-5 強化ガラスの応力状態

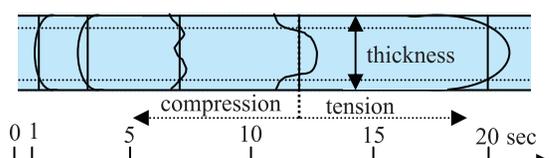


図-6 強化加工時の時間経過による応力状態⁴⁾

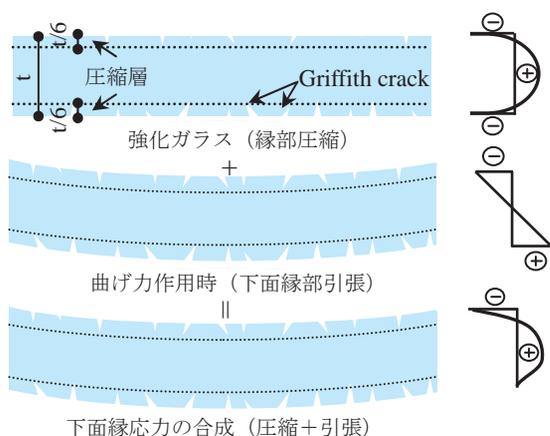


図-7 強化ガラスのメカニズム概要



写真-3 強化ガラス破損状態 写真-4 フロートガラス破損状態⁵⁾

強化ガラスには表面圧縮応力が存在するが、その表面圧縮応力の数値は、ASTM C 1048-04によれば69MPaの最小表面圧縮応力あるいは67MPa以上のエッジ部圧縮応力を要求している。また、僅かではあるが強化ガラスは製造して数年内に自然破損する危険性は無視できない。これは、ガラスコアである引張応力層に含有するNiS（硫化ニッケル）が日射熱などによる温度変化が生じることにより α 相から β 相に相転移し、その際、約4%の体積膨張をすることに起因した破損が生じる。この

NiSは製造工程において完全に除去することはできないとされるが、自然破損の危険性を予め減じるには、ヒートソーク試験を実施することである程度対処可能である。ヒートソーク試験は、わが国に明確な基準は無いが、国内での試験実施例を挙げると、強化ガラス製造後に再び加熱炉に入れ $280^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ くらいで3時間程度（加熱温度・加熱時間は各メーカーで異なる）加熱処理を行い、予めNiSが含有する強化ガラスを強制的に破損させてしまう試験方法がとられている。そのため、自然破損による発生確率を未然に減じることができ、品質の安定性に寄与することが可能となる。また、参考までに国外での基準を紹介すると、DIN、EN、BRL-A（ドイツ建築規格）は、 $290^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ を保持することとしており、保持時間はDINが8時間、BRL-Aは4時間、ENは2時間となっている。

強化ガラスは、破損すると粉々になる（写真-3）ため、強化ガラスを使用するにはヒートソーク試験を実施し、ガラスが破損した場合のフェールセーフ機構を設けておく必要がある。たとえば、一番望ましいのは合わせガラスとすることであり、仮に片側ガラスが破損しても他方の健全なガラスが強靱な中間膜の接着力によって破損ガラスを保持、飛散防止できる仕組みである（2枚同時破損は見込まない）。また、何らかの理由で合わせガラスが用いられない場合は、飛散防止フィルムによりガラスの飛散防止対策を施す。仮にガラスが破損した場合、フィルム貼りの破損ガラスが脱落しないように応急措置を講ずる必要がある。しかし、ここで注意しなければならないのは、飛散防止フィルムは完全なるガラス脱落防止機能は持ち合わせていないという点である。さらにフィルムは、点支持金物外周部をオフセットする形で貼られている。そのため、破損後は落下の危険性があり、応急処置を講じても長期間放置し続けることは避け、準備が整い次第速やかにガラスを交換すべきである。また、フィルムは劣化するという点を忘れてはならず、ある期間を経てメンテナンスする必要がある。いずれにしても使用部位や高さに応じて、安全対策（合わせガラスあるいは飛散防止フィルム）を講じる必要がある。

2. 1. 2 倍強度ガラス（Heat strengthened glass）

強化ガラスと同様に 650°C くらいまで加熱後、両表面に空気を吹き付けて冷却させる。応力勾配がガラス厚さに依存しているため、厚さ12mmを超えると一般過程で強化加工はできない。倍強度ガラスの表面圧縮応力は、ASTM C 1048-04では24MPaの最小表面圧縮応力あるいは52MPa以下のエッジ部圧縮応力を持つように要求し

ている。一方、JISでは、表面圧縮応力を60MPa以下と規定している。

ガラス破損パターンは、強化ガラスとは異なり、フロートガラスに近い破損パターン（写真-4）を示すが、ガラス点支持構法などへ適用する際には、安全性を考慮して強化ガラスと同じように合わせガラスとすることをお薦めする。

2. 1. 3 合わせガラス (Laminated glass)

合わせガラスは、ガラスと中間膜によって構成される（図-8）。合わせガラスに適用する中間膜は、その使用目的により異なるが、大きくはPVB系（Poly vinyl butyral）とEVA系（Ethylene vinyl acetate）の中間膜に分類される。PVB系中間膜は、破損時の保持能力や衝撃力に対応し安全性を高める目的で適用され、EVA系中間膜は、装飾PET（Poly ethylene terephthalate）樹脂やPV（Photovoltaic）セルを挟み込む目的で適用される。

PVBは紫外線を防ぎ、厚さは0.38mm/枚で普通は2枚分の0.76mm、場合によっては4枚分の1.52mmで使われる。PVBは、粘性のある弾性素材であり、温度や長期間荷重に依存する。常温では200%以上の破断伸びである。

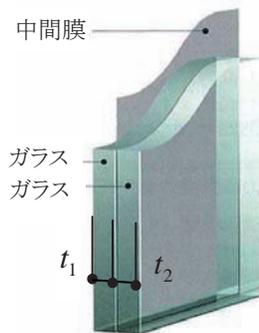


図-8 合わせガラス概略⁵⁾

合わせガラスにおける構造特性は、各々のガラス厚さ t_1 t_2 と中間膜における剪断耐力をある程度見込むことで、評価される。等価板厚 Teq は告示第1458号の式を解くことで導かれる。等価板厚 Teq の算定式を(1)式に示す。

$$Teq = 0.866 \times (t_1 + t_2) - 0.268 \dots\dots\dots(1)$$

最近では、等価板厚よりさらに曲げ耐力の上昇が期待できる強靱な硬質フィルムとしてアイオノマー系（Ionomer）中間膜があり、ガラス構造の利用価値を高めたものとして注目されている。図-9には、10mm単板ガラスと5mm+5mmの合わせガラスでの荷重 P -変位 δ 関係が示されている⁸⁾。Ionomer系合わせガラスは、PVBより剛性が高く、単板ガラス10mm以上の剛性を示していることが見て取れる。

一方、合わせガラスにおける設計上の留意事項として、中間膜フィルムとシーリング材との適合性が指摘されている⁹⁾。具体的には、合わせガラスの外周から剥離（写真

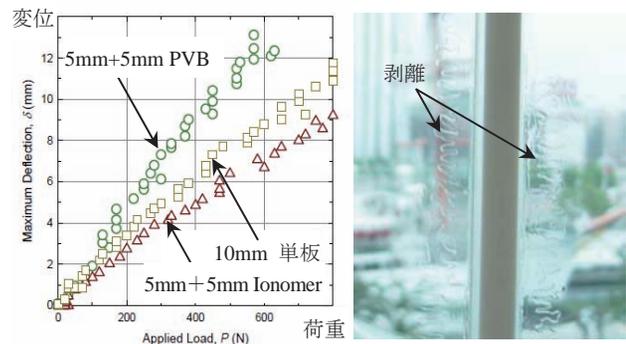


図-9 合わせガラスの荷重-変位関係⁸⁾ 写真-5 剥離(板硝子協会提供)

-5) が散見され、板ガラスに曲げが作用した場合、中間膜フィルムの剪断耐力減少による剛性低下が懸念される。

2. 1. 4 複層ガラス (Insulating glass units)

複層ガラス（以下IGU）の目的は熱的ロスを改善することであり、中空層は乾燥空気やガスで満たされている。最近のIGUは、2枚複層の熱貫流率が $1.1W/m^2K^4$ 、3枚複層で $0.7W/m^2K^4$ であり、2枚複層でも3枚複層並みの性能を有する機能ガラス⁷⁾もある。環境負荷低減が叫ばれている昨今のガラスファサードに提供され、重要度が増してきている。IGUは、ガラスと中空層により構成されているため、風荷重を直接受ける外部側ガラス t_1 の荷重 P_1 と直接受けない内部側ガラス t_2 の荷重 P_2 とは、内封気体のバネ効果により荷重負担が異なる。さらに設置高度や気象状況（大気圧の低下・気温変化）にも左右されるため、それらを踏まえてガラスの負担荷重を25%割増している。複層ガラスを検討する場合、下式にて各々のガラス負担荷重を算定し、その荷重に対してガラスの強度検討を行う。

$$P_1 = P \cdot t_1^3 / (t_1^3 + t_2^3) / 0.75, \quad P_2 = P \cdot t_2^3 / (t_1^3 + t_2^3) / 0.75 \dots\dots(2)$$

2. 2 金属系素材

ガラスファサードに適用される金属材料には、ステンレス鋼、アルミニウム合金、銅がある。各金属材料の性質は周知の通りであるので、ここでは、設計に必要な基準強度、材種ごとの適用部位などを中心に解説する。

2. 2. 1 ステンレス鋼

ステンレス鋼（以下SUS）は、自己酸化皮膜を形成し錆び難い金属のため、外部側に適用されることが多い。一般的な材種はオーステナイト系のSUS304とSUS316である。適用部位は、支持架構ならばウィンドニードルやストラット、ガラス点支持構法では点支持金物ならびに枠材である。ウィンドニードル等で活用するには、軸方向力による座屈検討が必要となる。許容圧縮応力度 f_c の

算定は、鋼の場合とは異なるため、参考までに許容圧縮応力算定式を示す。

$$\left. \begin{aligned} \lambda \leq 0.2 \quad f_c &= F/1.5 \\ 0.2 < \lambda \leq 1.5 \quad f_c &= \{(1.12 - 0.6\lambda)/1.5\} F \\ 1.5 < \lambda \quad f_c &= F/3\lambda^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、有効細長比 $\lambda = (l_k/i) \times \sqrt{F/\pi^2 E}$ l_k は座屈長さ i は断面二次半径、 F は基準強度、 E は縦弾性係数

点支持金物の場合は、鋳鋼と切削の2通り（写真-6）の製作方法があり、デザイン、コスト、数量および形状など考慮して決定される。また、部材を接合する上で重要なねじやボルトは、設計強度などに応じて材種や径を使い分ける。ねじやボルトが引張を受ける場合は、ねじ山の曲げと剪断およびかかりの検討を要する。表-2に機械的性質を記す。

表-2 ステンレス鋼の機械的性質等一覧

材種	項目	基準強度 F (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	適用部位 特徴など
鋳造	SCS13	205	480	33	支持金物
	SCS10	390	620	15	高強度
	SCS14	185	440	28	耐海水性
圧延	SUS304	205	520	35	束材・金物
	SUS304N2	325	690	35	ロッド材
転造	A2-50	210	500	0.6d ^{*1}	ボルト
	A2-70	450	700	0.4d ^{*1}	高強度

※1印のみ伸びの単位は mm であり、d はねじの呼び径を指す。



写真-6 MJG金物SUS鋳鋼(左) および切削(右)¹⁰⁾

形状が複雑な場合は、ロストワックスなどによるSUS鋳鋼品とする。鋳鋼品は、製造工程にて湯口が設けられ、円滑に流し込めるように配慮する必要がある。また、空隙やピンホールなどによる強度低下の懸念もあるため、十分な検討と製作後の検査が必要である。仕上げは、ブラスト処理とすることが多く、切削の場合とは仕上がりが異なる（写真-6）。

2.2.2 アルミニウム合金

建築に使用されるアルミニウム合金は、展伸用合金がほとんどである。アルミニウム合金は、5000系 (Al-Mg系合金)・6000系 (Al-Mg-Si系合金)・7000系 (Al-Zn-

Mg系合金) が構造用として使用され、各合金系で類似な性質を持つ。建材では、CWやサッシに代表されるように、押出性に優れた6000系が主流である。表-3に機械的性質を示す。アルミニウム合金の力学特性は、明瞭な降伏棚のないラウンドハウス型を示し、応力-ひずみ関係はBi-Linearで近似できる。ひずみ硬化は小さく、脆性的な破壊性状を示す。降伏値は0.2%オフセット強度もしくは80%強度で決めており、許容応力度は合金種ごとに異なる。

表-3 アルミニウム合金の機械的性質等一覧(カッコ内は溶接強度)

材種	項目	基準強度 F (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	適用部位
A6063S-T5		110(50)	185(115)	22	枠材・支持材
A6963S-T5		152(-)	185(-)	-	点支持金物
A6N01S-T5		175(110)	225(145)	17	支持架構
A6061S-T6		210(110)	310(145)	17	ブラケット

アルミニウム合金は、ガラス点支持構法の支持金物(写真-7) や支持架構に適用されているが、表-3の通り溶接強度が低く設計に際し注意を要する。また、板厚に応じて耐力低下があるため、厚肉の場合低下率を考慮する。さらに、圧縮材として用いる場合は、SUS鋼と同様に許容圧縮応力度 f_c が異なるため、ここでは、参考までに検討式を示す。

$$\left. \begin{aligned} \lambda \leq \Lambda \text{ の場合 } f_c &= \{1 - 0.5(\lambda/\Lambda)^2\} \cdot F/v \\ \lambda > \Lambda \text{ の場合 } f_c &= F/4.5(\lambda/\Lambda)^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

$v = 1.5(0.9 + 0.6\lambda/\Lambda)$ かつ $v = 1.5$,
細長比 $\lambda = l_k/i$ 限界細長比 $\Lambda = 1175/(\sqrt{F/10})$

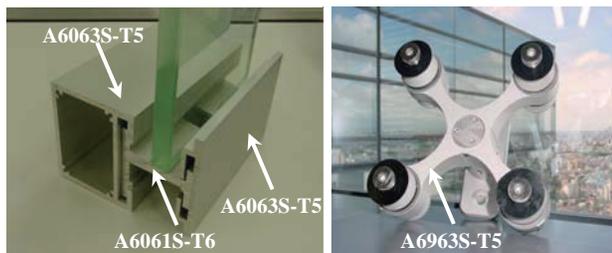


写真-7 アルミ点支持構法の支持金物PEG構法⁶⁾ (左)、DPG構法⁶⁾ (右)

2.2.3 鋼

鋼は、支持架構や躯体との連結部に主に用いられており、具体的には、方立、フィーレンディールトラス、テンション構造、ファスナー、ブラケット類に適用される。これらの材種は、一般構造用圧鋼材SS400である頻度が高い。しかし、支持架構やファスナー部において高張力

鋼を用い、かつ溶接を要する際は、SS490のように炭素を増加し高強度とした溶接性の劣るものではなく、Mnを加え溶接性を向上させたSN490BやSM490の材種を適宜用いる場合がある。また、テンション構造のように局部的に高い応力が発生する部位には、テンションロッド材としてPC鋼棒（C種1号）、端末金物としてCr、Moを含有して高強度となったSCM 材やS45CNなどが用いられる。さらに、方立の弱軸周りに水平地震荷重を受ける場合や横座屈防止の観点からタイイングロッドを設ける際は、テンション構造と同様な繊細さを要求されるため、比較的高強度なSS490やPC鋼棒で対処することがある。表-4には、ガラスファサードに適用される一般的な鋼材の機械的性質を示す。

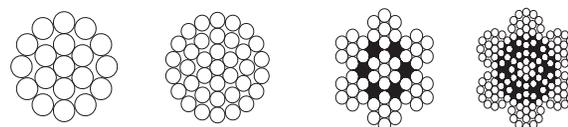
表-4 鋼の機械的性質等一覧

材種	項目	基準強度 F (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	特徴他
圧延	SS400	235	400	33	一般材
	SN490	390	490	15	溶接性良
熱処理	S45CN	345	570	28	高強度
	SCM415	380	540	20	高強度
鋳造	SCW480	275	480	20	溶接性良
熱処理	PC 鋼棒	1080	1230	5	C種1号

2.2.4 ケーブル（ワイヤロープ）

ガラスファサードの支持架構の一つにテンション構造があるが、そこにはケーブルが適用されている。ケーブル材は、ワイヤロープ、平行線ケーブル、PC鋼より線から成る¹¹⁾が、ガラスファサードにはワイヤロープが適用されている。ワイヤロープは、数本～数十本の鋼製素線を単層または多層により合わせたストランドを、通常は6本を心網の周りに所定のピッチでより合わせて作られる。ワイヤロープは、素線を数多く組合せた複雑な構造を有しており、そのワイヤロープには、①引張強度が高い、②耐衝撃性に優れる、③長尺物が得られる、④柔軟性に富み施工性が良いなどのメリットがある。一方、弾性係数が低く自転性があるなどのデメリットもある。ワイヤロープの種類には、構造用のスパイラルロープ、ストランドロープ、ロックドコイルロープおよび平行線ストランドがあり、テンション構造に採用されるのは、構造用のスパイラルロープとストランドロープである。図-10に代表的な断面形状、写真-8は種類別外観を示す。最近では炭素繊維ケーブルも開発されている。また、材種、構成、径、引張強さの区分で縦弾性係数と破断荷重

が異なるため、代表的なものを表-5に示す。ケーブル材の長期許容引張力は、破断荷重の1/3¹¹⁾としており、他材料の扱い方とは表現がいささか異なる。



スパイラルロープ（左） ストランドロープ（右）

図-10 ワイヤロープの種類例（断面形状）



写真-8 ワイヤロープの種類例（外観）

表-5 ワイヤロープの機械的性質等一覧

材種	項目	径 (mm)	断面 (mm ²)	破断荷重 (kN)			縦弾性係数 (N/mm ²)
				ST1470	ST1570	ST1670	
スパイラル ロープ 1×19	14	117	161	172	180	16000	
	16	153	210	224	236		
	18	193	265	284	298		
	20	239	328	350	368		
	22.4	300	411	439	462		
ストランド ロープ 7×7	12.5	76.1	101	108	113	14000	
	14	95.5	126	135	142		
	16	125	165	176	185		
	18	158	209	223	235		

2.3 副資材

ガラスファサードに適用される副資材には、防水目的と、構造目的（SSG構法^{6),12)}のシーラント、セッティングブロックとしての樹脂、ガラス点支持構法などの面支持部材、合わせガラス用の中間膜、強化ガラスの飛散防止フィルム、日射遮蔽・装飾フィルムなどがある。副資材において注意すべき点は、材料の機械的性質のみならず、接触する他部材との適合性（相性）を確認する必要がある。特に合わせガラスの中間膜とシーリング材の接触部位は、デラミネーションや黄変が生じる恐れがあり⁹⁾、実物件でも散見されている。そのため、設計に配慮すべきである。

ガラス点支持金物には、樹脂やゴムなどが緩衝材（写真-9）として板ガラスとの接触面に用いられる。点支持構法にて使用される代表的なものは、熱可塑性樹脂であるポリアミド（PA）、ポリアセタール（POM）、ポリカーボネート（PC）などである。これらは、圧縮強度が高いこと、摩擦や磨耗性が低いことなどの特徴があり、自重受け部材などに適している。さらに、強制的にロッキングを行なう際の緩衝材にも用いられることがある。



写真-9 MJG構法におけるゴム系部品¹⁰⁾

3. ガラスファサードへの作用荷重

3.1 作用荷重

近年、ガラスファサードの形態は複雑となりつつあるが、ガラスファサードに作用する荷重および外力の種類は直感的にもわかりやすく、固定荷重、積雪荷重、風圧力（以下、風荷重）、地震力（以下、地震荷重）、衝撃力（以下、衝撃荷重）ならびに温度による熱伸縮力（以下、熱伸縮荷重）の5つが主要である。そのうち、熱伸縮荷

表-6 荷重および外力がガラスに作用する方向との関係

荷重種類 \ 作用方向	鉛直方向	水平方向		その他
		面内	面外	
固定荷重	①, ④			
積雪荷重	④			
風荷重	④	③ ^{※2}	②	
地震荷重	①, ④	③, ⑥	②, ⑤	
熱伸縮荷重				○ ^{※3}
衝撃荷重		③ ^{※2}	②	

※2 出隅入隅コーナー部におけるガラス突合せの場合。

※3 熱伸縮荷重は、境界条件に依存するため、その他とした。

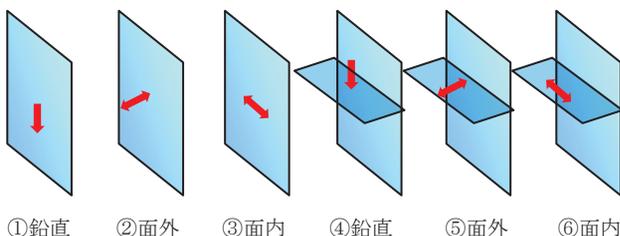


図-11 荷重および外力がガラス面に作用する方向

重はガラスファサードに適用される構法のほとんどが構造的負荷の生じない境界条件としており、さらにガラスの線膨張係数はアルミニウム合金に比して、熱伸縮による影響度合いが小さいため、ここでは現象として簡単に触れておく程度とする。一方、ガラスファサードにはガラス面の方向に応じて、屋根面や傾斜面のような風荷重や積雪荷重を見込まなくてはならない場合がある。たとえば、ガラスの庇やルーバーなどがそれに該当する。そのため、ここでは外壁に突出する水平面や庇なども含めてガラスファサードとして評価する。表-6と図-11に、各荷重および外力が作用する方向を示す。地震荷重による影響範囲が最も大きく、鉛直、水平、面外に作用しているが、構造的には風荷重が支配的となる場合が多く、風の剥離による振動にも注意を要する。

3.2 荷重伝達

ガラスは必ず何かに支持されており、その支持部材を介してガラスに作用する荷重および外力を構造躯体へ円滑に伝達できる仕組みとしている。たとえば、図-12に

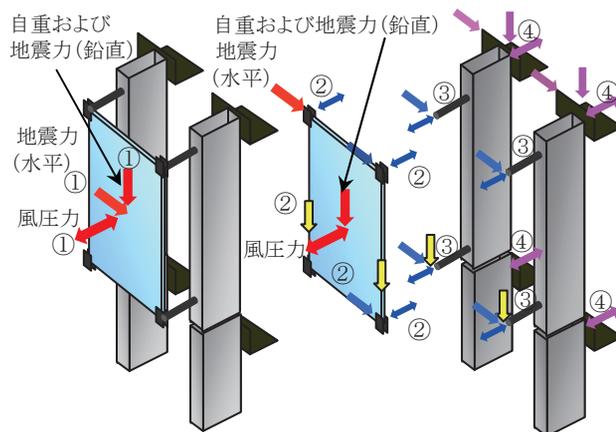


図-12 ファサードにおける荷重伝達の概略

示す概略図では、ガラス面に作用した荷重および外力①は、ガラスが支持されている部分②（ガラスの留め方）から支持部材③へと伝達され、支持部材（ガラスの支え方）から最終的には構造躯体（支えるもの）④へ流れる。これは地震荷重の場合も同様であり、設計者は、これらの荷重伝達が円滑に行えるよう部材と接合部へ配慮する必要がある。

ガラスの支持方法は、ガラスの留め方とガラスの支え方に分類され、数多くの構工法があることを既報⁶⁾では紹介した。ガラス面から支持構造への荷重伝達は、種々の構工法が存在するとはいえ、基本的な構造に対する概念や伝達方法は大きくは変わらない。

3.3 設計用外力

ガラスファサードを設計するに際し、被対象面に作用する外力を予め想定する必要がある。ここで想定される設計用外力とは、風荷重や地震荷重によって生ずる力と積雪荷重などが挙げられるが、部位によっては衝撃荷重も見込む必要がある。一方、層間変形角は、外力の一つである地震荷重によって骨組みにもたらされた変形角を表しており、この骨組みに生じた変形角に対して安全に変形追従することが要求されている。すなわち、ガラスファサードにおける設計用外力と層間変形角とは、「想定される力」と「想定される力による動きへの対処」のことであり、これらの設計を的確に行うことで、安全なファサードの構築に必要な要件を満たすことになるはずである。以下に各荷重における検討方法について設計者の視点から解説する。

3.3.1 風荷重

風圧力Wは、政令・告示で定められた式により算定され、ガラスファサードに適用される部材は、風圧力Wに対して許容応力度とたわみ制限を設けている。ただし、ガラスと特殊な支持架構における変形制限は、プロジェクトごとに安全性を踏まえ適宜判断されている。また、実務上風圧力の算定には、再現期間を予め見込むものが多く、基準風速の項に係数yを乗じて算定される(表-7)。その際、風荷重算定式を一つにまとめると下式のようなになる。

$$W=0.6 \times \underbrace{\left[1.7 \cdot \left(\frac{H'}{Z_G}\right)^a\right]^2}_{\text{平均風速の鉛直分布の項}} \times \underbrace{(V_0 \cdot y)^2}_{\text{基準風速の項}} \times \underbrace{(C_{pe} \cdot G_{pe} - C_{pi} \cdot G_{pi})}_{\text{ピーク風力係数の項}} \dots (5)$$

平均風速の鉛直分布の項
 基準風速の項
 ピーク風力係数の項
 平均速度圧の項

H': 高m Z_G a: 地表面粗度区分によって決定される数値

V₀: 基準風速m/s y: 再現期間係数

C_{pe}・G_{pe}: ピーク外圧係数 C_{pi}・G_{pi}: ピーク内圧係数

表-7 再現期間係数¹³⁾

再現期間	再現期間係数 y	再現期間係数に対応する用途
50年	1.00	戸建て住宅(告示 1454 号の基準風速)
100年	1.07	一般的な建築物(板硝子協会推奨値)
200年	1.15	高さ 60m を超える建築物(板硝子協会推奨値)
300年	1.19	極めて重要な建築物
500年	1.25	超高層建築物の構造体(告示 1461 号設計風速)

算定された風圧力は、ガラスファサードに適用される

各部材に生じた応力度σが許容応力度f以下となるように設計を行う。その際、支持架構には部材長L(支点間距離)に対する変位δの割合として、たわみ制限^{1),2)}が設けられており、δ=L/150かつ20mm以下、L>4000mmの場合δ=L/200である(特殊な支持架構は除く)。また、板ガラスは、剛性が低く平板要素として扱われるため、外力に対してよく曲がるが、たわみ制限は設けられていない。風荷重時の変形に対する不安感をいかに評価するかが今後の課題である。

3.3.2 地震荷重

地震力は、建築構造だけでなくガラスファサードへも影響を及ぼすことが想定され、文献^{1),2)}では耐震性能基準もしくは特記によるものとされている。耐震性能は、慣性力と層間変位追従性能に対してガラスファサードの主構成部材、躯体緊結部材、板ガラスなどが破損・脱落のないものとしている。ここでは、慣性力について記述し層間変位追従性能は後述する。地震力に対して文献^{1),2)}による慣性力は、水平方向F_{eh}と鉛直方向F_{ev}に分け、F_{eh}=1.0・DL、F_{ev}=0.5・DL(DLは自重を指す)としている。ここで、F_{ev}には自重成分が含まれるので、短期は1.5・DLとなる。また、近年F_{ev}=1.0・DL(短期で2.0・DL)とする事例もあり、さらに安全性が高められてきている。

3.3.3 積雪荷重

ガラスファサードにおいて積雪荷重の影響が想定されるのは、ファサード面に設けられた庇などである(写真-10)。庇は、片持ち梁形式で無目などに取り付けられることが多く、出幅の大きいものは自重と風圧に対して吊り材を設けることもある。



写真-10 庇の事例

積雪荷重Sは、政令・告示で定められた(6)式により算定される。庇における長期荷重については、表-8に示す通り政令・告示と文献¹³⁾に相違がある。文献¹³⁾では積雪荷重を短期ではなく長期として評価し、それを推奨している。表中Gは固定荷重、Pは積載荷重、Wは風荷重を示す。

また、庇は見た目の不安感を少なくする目的で、たわみ制限を設ける必要がある。たとえば、CWの無目を参考とすれば、およそδ=L/1000かつ2mm以下となるが、特に定めは無く、各社の仕様などに合わせて適宜決定している。

表-8 荷重および外力による設計基準

基準等	荷重	長期荷重	短期荷重
政令・告示		$G + P + 0.7S$	$G + P + 0.35S + W$
文献 13		$G + P + S$	$G + P + 0.35S + W$

積雪荷重 $S(N/m^2)$ の計算は、単位積雪荷重 $W_s(N/m^2 \cdot cm)$ を決定した後、告示第1455号により垂直積雪量 $d(m)$ と屋根形状係数 μ_b を算定し、さらに文献¹³⁾が推奨する再現期間換算係数 R_{snow} (表-9)も踏まえ算定する。政令・告示では、再現期間を50年と想定しているため、50年を超える再現期間を想定するならば、下表の数値を適宜採用する。

$$S = W_s \times d \times \mu_b \times 100 \times R_{snow} \dots\dots\dots (6)$$

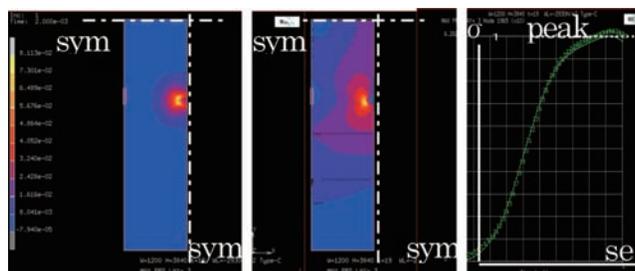
$\mu_b = \sqrt{\cos(1.5\theta)}$ ($\theta \leq 60^\circ$)で算定され、 $\theta > 60^\circ$ は0となる。

表-9 再現期間換算係数 R_{snow} ¹³⁾

再現期間	$d \geq 1.0$	$d < 1.0$
50年	1.00	1.00
100年	1.10	1.13
200年	1.20	1.27
300年	1.26	1.34
500年	1.33	1.44

3.3.4 衝撃荷重

近年、ガラスファサードに適用される板ガラスの大型化により透過性が高まり、人間が誤って衝突することが懸念されている。ガラスへ人体が衝突することを防止した人体衝突に関する安全設計法¹⁴⁾は、適用条件が記されている。たとえば、板ガラスの支持状況(サッシ枠による線支持)や対象サイズなどである。そのため、特殊な支持形態である点支持構法などは該当しない。そこで、安全性を確認するひとつの目安として、時刻層応答解析などによりガラス板厚や点支持金物数などの拘束条件をある程度予測しておく必要がある。その際の数値解析例を図-13に示す。



衝突時主応力図 0.5周期時主応力図 時刻層主応力

図-13 ガラスの衝撃荷重に対する数値解析例¹⁰⁾

3.3.5 熱伸縮荷重

熱伸縮による荷重は、素材の線膨張係数と拘束条件が支配的要因である。ここに、ファサードへ適用される素材の線膨張係数を表-10に示す。部材の熱伸縮量は、材種、適用部位、温度補正係数および部材表面温度にて決定される。

表-10 各素材の線膨張係数

材種	ガラス	ステンレス	炭素鋼	アルミ
線膨張係数/℃	9×10^{-6}	17.3×10^{-6}	11×10^{-6}	23.5×10^{-6}

3.4 層間変位追従性

政令において、建築構造に要求される層間変形角は、二次設計では1/200(主要構造部の著しい損傷の恐れがない場合は1/120)以内であることを確かめるとされている。また、限界状態設計法においては、さらに厳しい層間変形角となる。一方、ガラスファサードに要求される層間変形角は、層間変位追従性能として表現されている。これは、地震時に生じる骨組み(主要構造部)の層間変形角に対して、ファサードを構成する部材が破損・脱落することなく安全に追従し得る性能を指している。表-11に層間変位追従性能のグレード²⁾を、表-12にはグレードに応じた破損程度²⁾を示す。表中、層間変形角は1/100を上限としているが、これはプロジェクトごとに変わる場合がある。また、破損程度における1/300は、外観上目立った残留変形を生じないこと、水密性能の低下をきたすようなシールや気密材の剥離・離脱などもなく、全く補修を必要としない程度を指す。同じく1/150では、ガラス、板材、支持部材ならびに部品等の破損や脱落がなく、人命の安全および屋内の財産が保護される程度とされる。このように、ファサードに要求される層間変形追従性能は、詳細にグレードが設定されており、建築構造の層間変形角とガラスファサードのそれとは必ずしも一致するわけではないことがわかる。

層間変形追従性のテクニカルな対応として、板ガラスは隣り合う板ガラス、もしくは支持金物やフレームに接触して破損することを避ける目的で、相互間に地震挙動を考慮したクリアランスを設けている。また、強制的にロックさせる場合などは、ガラスが他部材と接触しても破損しないように緩衝材を予め設けることもある。図-14には、層間変位追従性能に関する基本的な挙動を記す。層間変形角に対して面材である板ガラスは、幾何学的にスライドおよびロックによる挙動で周辺部材に接触しないように動かす。しかし、実情はシーリング材などの拘束効果が高く、挙動も複雑になることがある。

サッシやCWなどのように枠にのみ込んでいる場合は、一般的に用いられているBouwkamp式において、設計検討が進められている。

表-11 層間変位追従性能グレード²⁾

性能グレード	-	1	2	3	4
層間変形角(rad)	1/300	1/200	1/150	1/120	1/100

表-12 層間変位追従性能グレードに応じた破損程度²⁾

CWの層間変位	1/400	1/300	1/150
CW破損程度	健全で再使用できる程度	健全で再使用できる程度	主要部が破損しない程度

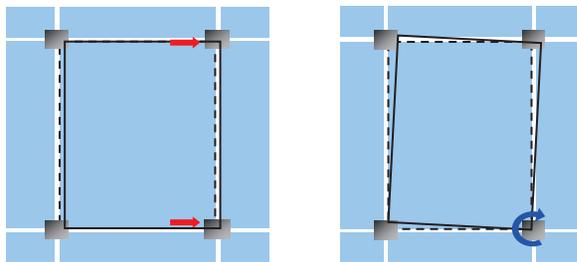


図-14 層間変位時のスライド¹⁰⁾ (左) とロッキング挙動¹⁰⁾ (右)

4. 設計

4.1 設計の流れと該当基準

ガラスファサードにおける構造的な設計検討の一例を図-15に示す。基本的に点支持構法などの場合には、支持点数が決定していない計画段階では、下図の通り外力を受けて荷重伝達していく順に検討を進めることが一般的であるが、支持点数が決定されている中での検討であれば、支持架構から検討を進めても差し支えない。また、特殊な構法や支持架構では、例外的な取り扱いとなるため注意が必要である。

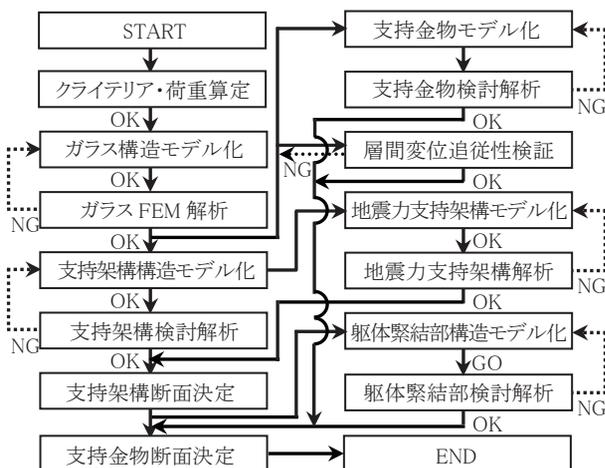


図-15 設計の流れ (構造検討の場合)

ここで、メタルCWとガラスファサードの設計に際し、適用される基準を表-13にまとめた。表中、○印は該当する、△印は適用される場合がある、-印は該当しないを表し、網掛部は告示や標準仕様書の領域である。ガラスファサードに適用される告示、基準、指針は、以下に示す通りであり、単にCWやガラス工事に当てはまらないことがわかる。

表-13 メタルCWとガラスファサードの適用基準等一覧¹⁵⁾

告示, 基準, 指針		構工法		ガラスファサード	
		メタル CW	ガラス	支持架構	ガラス
1	告示第 1458 号(ガラス厚)	○	-	-	-
2	CW工事 JASS14	○	○	-	△
3	ガラス工事 JASS17	○	-	△	△
4	ガラス方立構法技術指針	-	-	△	○
5	ケーブル構造設計指針	-	△	-	○
6	各種合成構造設計指針	-	△	-	○

4.2 支持金物とガラス

ガラスファサードには、様々なガラス支持構法があるが、ここでは、一般的な挟み込み式点支持構法 (MJG 構法⁶⁾ などが類似) に適用される板ガラスを検討する際に必要な内容について解説する。図-16には、ガラス点支持金物部における数値解析モデルの一例を示す。

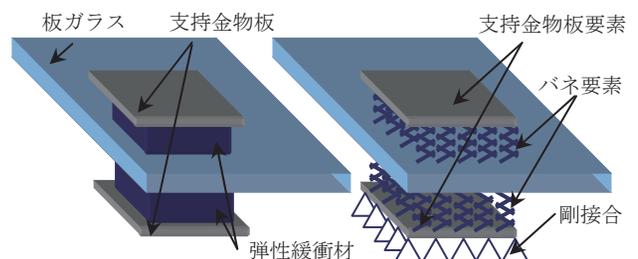


図-16 一般的な挟み込み式点支持構法の構造モデル例

ガラスは支持金物で拘束されており、ガラスと支持金物間には緩衝材が介在する。緩衝材は、支持金物とガラスに接しており、面ばねとして弾性接合される。さらに、ガラスを挟んで上下に配置された支持金物の境界条件は、解析上完全な剛体と仮定する。最大主応力の発生箇所は、ガラス長辺中央、ガラス中心、支持金物廻りと想定されるので、支持金物に回転などの自由度があると支持金物近傍の主応力が緩和される。その点を踏まえ、金物を完全固定した解析モデルとする。もちろんケースに応じて適宜相応しいモデル化を行う必要がある。緩衝材は、素材に応じて弾性係数やポアソン比が異なるため、機械的性質を確認し適用する。変形に伴うガラスの滑り出しは、実際は接着性のある緩衝材を除き摩擦力などで

拘束されるが、摩擦は締付力や摩擦係数に依存するため定量化は難しい。仮に剪断ばねとしても剪断ばね剛性が未知であるから、ここでは摩擦力や剪断ばねの拘束を解除してやると良い。その際、摩擦力などを解除すると剛体変位を起こすので、ダミーの拘束点を設ける必要がある。図-17(左)に解析結果例を示す。

SUS支持金物は、形状の自由度が高い鋳鋼品の場合、基本的には線形計算で安全性の確認が可能となるが、複雑な形状や接触領域が移り変わる場合などには数値解析を実施する場合がある。数値解析の事例を図-17(右)に示す。

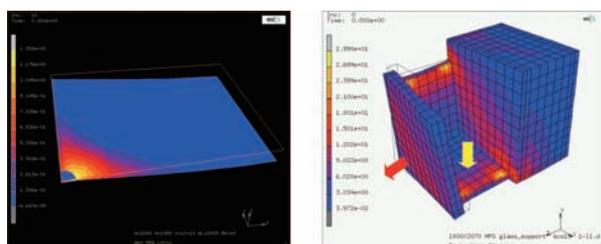


図-17 MJG構法ガラス解析例(左) 支持金物解析例(右)¹⁰⁾

4.3 支持架構

透過性の高いガラスファサードを構成する上で、支持架構の役割は大きなものとなっている。ここでは、一般的な方立から特殊なテンション構造まで事例を交えながら簡潔に解説する。

4.3.1 方立・マリオン

方立は、デザイン的にも構造的にもわかりやすく、採用実績が多い。素材には、アルミ、鋼、ガラスが用いられている(写真-11)。方立は、ガラス面で受けた風荷重や地震荷重が支持金物を介して伝達され、最終的にはファスナー部から構造躯体へと伝達される。境界条件は、ピン・ローラーであり、構造モデルも単純(図-18)である。ダブルスキンのように複数階に渡り方立を用いる際は、ゲルバー梁とすることで効果的に断面の省力化が図れる。また、最近ではハイブリッド方立として、ガラス方立構法¹²⁾の接着性に着眼した素材の組合せによるものもある(図-19)。

方立は、中空断面ならば横座屈検討が不要な場合がある。一方、平鋼(FB)のような細長材や弱軸周りの断面二次モーメントが強軸に比して著しく小さい場合などは横座屈の恐れがあり、方立の中間部をタイングロッドで拘束し、座屈長さ l_k を調整するなどの措置が必要となる(図-20)。また、吹き抜け部のように方立長 l が大きい場合、地震荷重に対して水平力を拘束してやる必要がある(図-20)。

方立の検討は簡便であり、モデル化されれば曲げモー

メントが算定でき、それに伴い応力に関する検討に進める。また、(7)式に示すたわみ曲線の微分方程式を(8)式のように何度か積分すれば、境界条件より積分定数が既知となり、たわみ角 θ やたわみ v を算定し評価が可能となる。

$$d^2v/dx^2 = -M/EI \dots\dots\dots(7)$$

$$v = -\iint M/EI dx dx + C_1 x + C_2 \dots\dots\dots(8)$$



写真-11 鋼製方立施工例

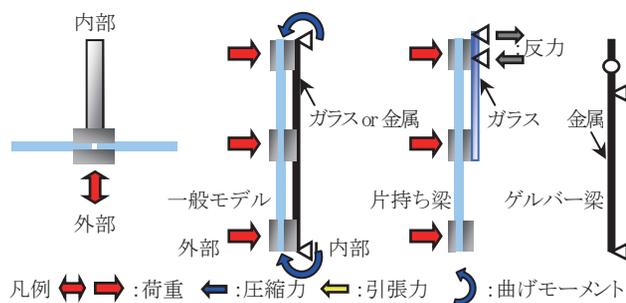


図-18 方立による構造モデルイメージ

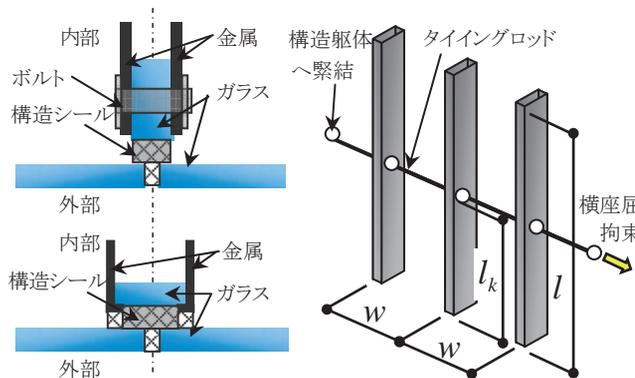


図-19 ハイブリッド方立例 図-20 水平拘束および横座屈防止例

4.3.2 トラス・フィーレンディールトラス

弦材と斜材により構成され(図-21)、節点がピンのもものはトラスであり、部材は軸力しか伝達せずやや剛性が劣る。一方、フィーレンディールは、剛接合により曲げ抵抗系となり、剛性も高く曲げによく抵抗する。溶接がしやすいか否かで見れば、トラス(写真-12左)は、溶接継手効率の低いアルミニウム合金に、フィーレンディール(写真-12右)は鋼に適しており、双方とも吹き抜け空間での適用が多い。

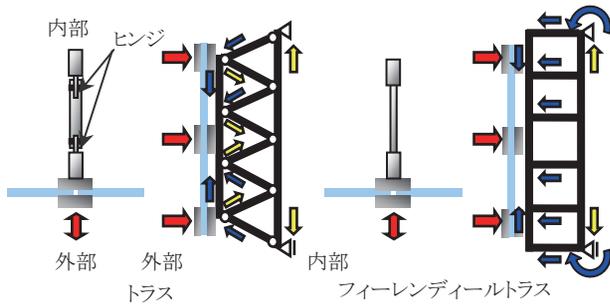


図-21 トラス・ファイレンディールトラス構造モデルイメージ

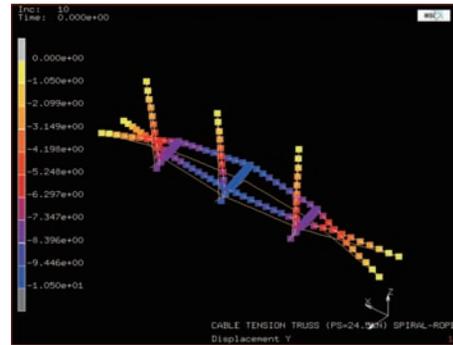


図-23 テンショントラス数値解析例



写真-12 トラス・ファイレンディールトラス施工例

4. 3. 4 テンセグリットトラス¹⁶⁾

トラス要素としての剛性とテンション材との組み合わせによって、比較的少ない張力で安定化が図れる構造である（図-24）。張力導入に際しては、ジャッキを要さない場合もある。設計では、張力消失が生じないように数値解析（図-25）を行いながら進める。写真-14に施工例を示す。

4. 3. 3 ケーブルテンショントラス（オープンシステム）

ケーブル材とストラット材により構成され、非抗压材であるケーブルに、予め張力を与えることで外力に対して抵抗する構造（図-22）である。サグにより高い剛性が期待できるので、初期導入張力も小さくて済む。しかしながら、増分張力による反力、温度やクリープ、施工誤差も踏まえ幾何学的非線形解析（図-23）を実施しながら設計する必要がある。張力導入方法は、端末部もしくはストラット材より導入するのが一般的あり、ケーブル材は連続させることができるので効率的に張力導入が可能となる（写真-13）。

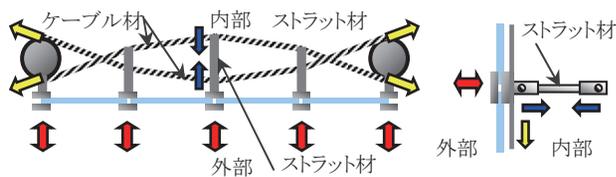


図-22 テンショントラス構造モデルイメージ

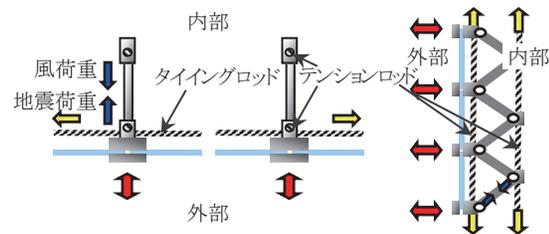


図-24 テンセグリットトラス¹⁶⁾ 構造モデルイメージ

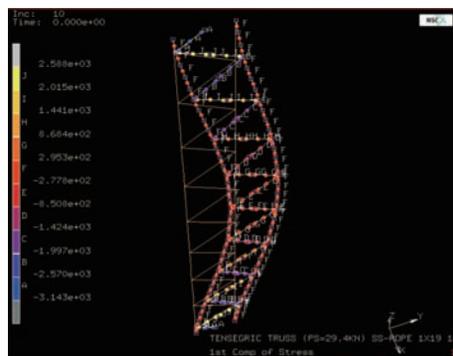


図-25 テンセグリットトラス¹⁶⁾ 数値解析例



写真-13 テンショントラス施工例



写真-14 MJG構法⁶⁾とテンセグリットトラス¹⁶⁾ 施工例

4.3.5 ケーブルグリッド (ケーブルネット)

非抗圧材であるケーブルを縦横に配して、見込み寸法を極めて小さくした構造である (図-26)。縦横への初期導入張力は、テンショントラスの約2~5倍になる。MJG構法⁶⁾と合わせれば、圧倒的な透過性のあるファサードが実現できる (写真-15、16)。剛性が小さく非線形性を示すため、ガラスとの関係が重要となる。設計は、幾何学的非線形解析 (図-27) を実施しながら進める。また、境界構造への影響も大きく、計画段階から構造設計者を交えて検討する必要がある。張力導入方法は、油圧ジャッキにより行う。ケーブル材は製作工場でプレストレッチングしてくるが、設計では、温度、クリープ、施工誤差、自重など様々な影響要因を考慮する。以下に導入張力 PS に関する式を示す。添字の c はケーブル、 s は構造躯体、 j は機器などを指す。

$$PS = cP_{stress} + cP_{glass} + cP_{creep} + sP_{creep} + cP_{temp} + cP_{install} + jP_{loss} \dots (9)$$

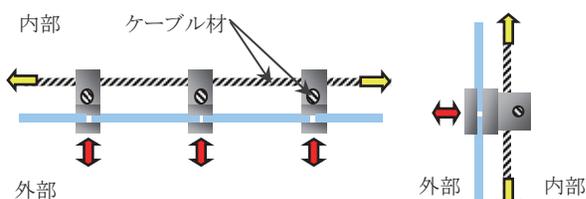


図-26 ケーブルグリッド構造モデルイメージ

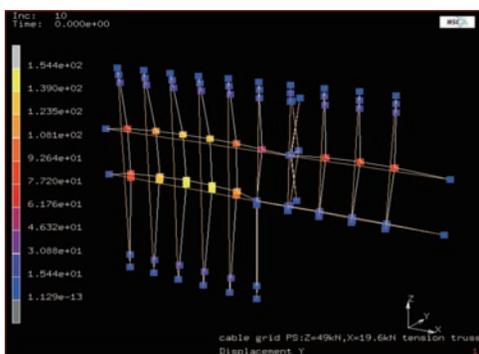


図-27 ケーブルグリッド数値解析例



写真-15 MJG構法⁶⁾+ケーブルグリッド施工例外観



写真-16 MJG構法⁶⁾+ケーブルグリッド施工例内観

4.3.6 ストラット+タイイングロッド構造

ガラス自重を吊るサスペンションロッド、風荷重に抵抗するストラット (ウィンドニードル)、地震時水平力に抵抗するタイイングロッドにより構成され、各部材で明確な荷重分担を行った構造システムである (図-28)。ダブルスキンファサードなどにおいて、MJG構法⁶⁾を適用すれば、透過性の高いファサードが実現できる (写真-17、18)。線材だけで構成されているためケーブルグリッドに似ているが、張力導入による反力処理が必要ない分、躯体に過大な負荷を掛けられない場合に有効である。また、地震時にはインナーとアウトースキンの間で相互の層間変位差を吸収する機構を設けアウトースキンの負担率を軽減、温度変化によるタイイングロッドの熱伸縮を吸収しつつ、地震力を伝達できる機構など荷重負担の単純化により、透過性を保ちながら様々な仕組みを設けられる自由度を有する。

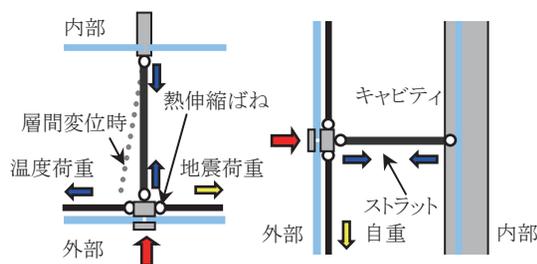


図-28 ストラット+タイイングロッド構造の構造モデルイメージ



写真-17 MJG構法⁶⁾とストラット+タイイングロッド構造施工例外観

写真-18 MJG構法⁶⁾とストラット+タイングロッド構造施工例内観

4. 3. 7 ガラス吊り下げ型構造

CW構法のように、板ガラスをDPG⁶⁾金物にて吊り下げた構造である。中間部は、MJG構法⁶⁾の支持金物を介してウインドニードルで風荷重に抵抗する(図-29、写真-19)。最下部は、ガラスがフレーム内に納まっているが自重を受けておらず、面外荷重のみ負担している。DPG⁶⁾金物は、ヒンジ機構ではないため、偏心距離がガラスに常時影響を与えることを考慮して設計している。ガラスを吊り下げること、薄板の大板ガラスに起こりやすい自重による凸状変形が軽減されるため、設計的にも力学的にも有意義となる。

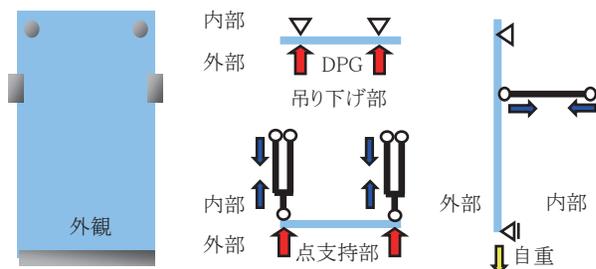


図-29 ガラス吊り下げ型構造の構造モデルイメージ

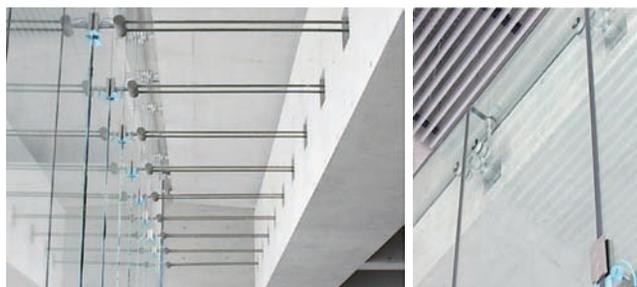


写真-19 ガラス吊り下げ構造施工例

5. 結

本報では、ガラスファサードの設計法について概要を解説した。ガラスファサードは、CW構法の性能や基準に加え、幅広い領域から適宜設計に必要な情報を得る必要があり、設計作業が煩雑となりやすい。また、明確な設計基準等が確立されておらず、過去の事例や各社の基

準により独自に設計がなされている場合も多い。ガラスファサードは、二次部材扱いではあるが、仮に部材の破損・落下が生じた際の社会的影響は大きいため、チェックするための仕組みやエンジニアが設計しやすい環境を整えていくことが、今後は必要となってくるのではないだろうか。

【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」, p34 p114, 1996年1月
- 2) カーテンウォール・防火開口部協会：「カーテンウォール性能基準2003」, p9-p11 2003年12月
- 3) schneider+schumacher:CUBUS/HOTEL-UND BÜROGEBAUDE, DÜSSELDORF, p31, 2001
- 4) M. Haldimann, A. Luible, M. Overend：「Structural Engineering Document 10 Structural Use of Glass」, p5-p16, IABSE
- 5) 旭硝子：「ガラス建材総合カタログ技術資料編」, 2003年5月
- 6) 石井久史：「ガラスファサードの形態と構成方法について－環境の側面と構造的側面から－」GBRC 2011年1月号 (Vol. 36 No.1), p12-p23, 2011年1月
- 7) Southwall Technologies：「Heated Miller Insulating Glass Catalog」, 2011
- 8) Dupont：「Glass Laminating Solutions Sentry Glass Catalog 2011」
- 9) 石井久史, 小野正, 檜垣恭一, 松尾隆士他：「ガラスファサードに適用される合わせガラス中間膜フィルムとシーリング材の適合性実験－その1実験方法－, －その2実験結果－」, 日本建築学会大会 (関東) 梗概A-1分冊, p.929-p932, 2011年8月
- 10) 日本鋼構造協会：「新しい建築空間－ハイブリッド構造の展開」, p253-p267, 2009年3月
- 11) 日本建築学会：「ケーブル構造設計指針・解説」, 2003年8月
- 12) 日本建築学会：「ガラス方立構法技術指針(案)」, 2011年1月
- 13) 板硝子協会：「板硝子協会推奨基準」, 2003年8月
- 14) 建設省：「ガラスを用いた開口部の安全設計指針」, 建設省住宅局建築指導課, 1986年5月
- 15) 田邊 浩輔, 石井久史：「ガラスファサードの設計法に関する研究－構成部材の強度検討について－」, 日本建築学会大会 (関東) 梗概E-1分冊, p.971-p972, 2011年8月
- 16) 斎藤公男：「空間 構造 物語 ストラクチャル・デザインのゆくえ」 p228-p229, 2003年10月

【執筆者】

*1 石井久史
(ISHII Hisashi)