

特集

GLASS

ガラスの可能性

GA

素材空間

02

■素材空間へ

資料としての素材考／谷川渥
「物質」から遠くはなれて／鈴木了二
「見えること」について／榮久庵憲司

■素材最前線

21世紀のガラスタワー
ナノの世界から見る21世紀ガラス
／伊藤節郎
CFRPとは何か？／大西博十杉崎健一

■連載

記憶に残る素材とディテール／松村秀一
素材探訪／杉本賢司

特集：ガラスの可能性

■ガラス建築選集 19～20世紀を代表する72作品

■ガラスの空間 厳選作10題

■ガラス構造を巡るダイアローグ
／仁藤喜徳十岡村仁

■ガラスのシェルとチューブ
ジェームズ・カーペンターの挑戦

■ガラスをいかに構造として用いるか
／アラン・バーデン

■ガラスが好き／林昌二

■ガラスと近代建築の神話的關係
／鈴木博之

■DPG工法の確立と現況／横田暉生

■アンビバレンツなガラスの透明空間
／葉祥栄

■光とガラスを巡って／岡部憲明

■固い液体／赤坂喜顕

■ガラス素材—その軌跡と現在
／池内清治

■フロート法の仕組み
—旭硝子・鹿島工場

■環境工学から見たガラスの魅力と罪
／近藤靖史

■日本・欧州、異なるガラス事情
／コリン・ヤーカー



GLASS

ガラス構造を巡るダイアログ

ガラス建築の最前線を語る／東京～ニューヨーク

仁藤喜徳＋岡村仁

ニューヨークのデューハースト・マクファーレン事務所（以下、DMP）に勤務する仁藤喜徳氏と、東京で空間工学研究所を主宰する岡村仁氏は、ともにガラス構造に深い関わりを持つ構造事務所での経験を共有する新進のエンジニアたちである。

以下は、彼らのメール交換における「ガラス構造」を巡るダイアログである。

001 OKA（岡村） to NITO（仁藤）

今回の「素材空間」でガラスをテーマにすることなのですが、コンクリートやスチールと違って、ガラスは今まで構造材料というカテゴリーには入れられてなかったじゃないですか。ところが最近、日本でも海外でもガラスの面白い使い方の例を時々目にします。そこで少しガラスの構造的な可能性を探ってみませんか？

002 NITO to OKA

いいですね。ガラス構造の可能性について考えるというテーマは、本当に面白い企画だと思います。ほくたちのような実務の立場にいと、1つのプロジェクトの枠の中だけのガラスの可能性ばかり考えてしまいがちで、自分がこれまでやってきたことや、世界で何が起きているかを見直して、ガラスという素材を改めて考え直すのは、自分にとっても刺激になりますからね。

ガラス構造と言っても、ガラスを構造骨組みの一部として使用している例は世界的にも極めて少ないですね。ほとんどの建築家や構造家はガラスを外装材として使い、それを支える骨組みを可能な限り細くするような努力をしている。ほくにしてみると、最近はやりの透明建築でも、鉄という素材の長所を最大限発揮できる構造フレームを考えだし、ガラスの持つ透明性を「強調」しているだけで、ガラスという素材の使用方法を洗練させたものではないと思います。ところで岡村さんがガラスという素材を意識したきっかけは何だったんですか。

003 OKA to NITO

ほくが初めてガラスを構造部材として意識したのは、構造設計の仕事始めて1年目にパリに行って見たラ・ヴィレット科学産業博物館の温室でした。これは今ではどこにでもあって当たり前になってしまいましたが、穴開け点支持工

法（テンポイント工法・DPG工法などと呼ばれる）の元祖とも言っているものでした。建築的な面白さはさておいても、ほくが一番「すごいなあ」と思ったのは、ガラスが風圧を受けて変形することに対して、そこに発生する応力を極小にするためにガラスの芯で完全な球面のヒンジを形成して、ガラスを自由に回転させるという考え方、そしてそのディテールでした。今まで建築の構造にこれほどセンシティブな考え方やその表現としての機構があったでしょうか。ガラスという非常に繊細でかつ脆弱な素材に対して、それを構造体として見るときに他の素材とは根本的に考え方を考える必要があるのではないかなと強く思いました。

004 NITO to OKA

ピーター・ライスの書いたラ・ヴィレットの本を読みました。本当にひとつひとつがよく考えられていますね。ガラスの支持工法はもちろん、たとえガラスが割れた場合にも、安全に力を流せるようなフェールセーフの仕組みができていて、とても安全性の高い構造体だと思います。岡村さんの言う通り、この建築はガラスを構造体と意識して使用した最初の例だと思います。高さ32mのガラス壁を金物を介してガラスの引張力で吊り下げようという発想と、ガラスに穴を開けて支えることによって発生する穴周りの集中曲げ応力をヒンジボルトによって防ごうという発想が生まれたことが、ほくには信じられないほど凄いことです。

ピーター・ライスは本当に素材に対して理解が深かった人だと思います。ガラスそのものだけに限らずに、ガラス間で変形に追従するシリコン、風に抵抗して変形するケーブルトラス、スパイダー状の金物、そしてヒンジボルトと全ての要素が必要不可欠で、調和しているのが本当にスゴイ。あまりに完璧な完成度なので、世界中で商品化されて使われ始めましたね。ガラス構造の可能性のひとつの方向性をこのシステムは示してくれたと思います。

005 OKA to NITO

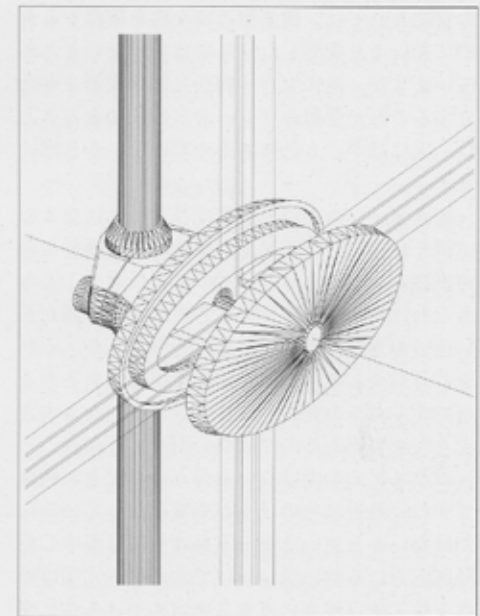
その通り完璧なシステムですね。しかも特筆すべきはその独創性がモノとしての技術だけでなく、その動機となる構造的な発想においても飛び抜けているという点だと思います。ガラス自身でガラスを吊ろうなんて、世界中で他に誰が考えつくでしょうか。純粋なガラスのカーテンです。あれができた後、雨後の竹の子のように

いろいろな類似システムが世界中でできましたが、商品としての価値は別にして、本質的にその工学的な考え方の点でラ・ヴィレット・システムを凌駕する例をほくは知りませんね。ピーター・ライスはラ・ヴィレットに限らず素材や工法をとことん追求した。その機能や特性をギリギリまで絞り込んでそこで新しい可能性を求めます。それはエンジニアというよりはサイエンティストに近いアプローチの仕方だと思います。ただなぜ彼がそういう発想ができたのかと考えると、一言で天才だということではなく、あるモノに対して徹底的に調べまくって格闘した末に見えてきた結果としての構造的アイデアじゃないかなと思います。そう考えるとガラスの可能性にしてもただ単に机の上で思いつくわけではなく、実際のガラスの建物の設計に関わってくる中で産まれてくるものなのではないでしょうか。

仁藤さんも、DMPで現在いくつかガラスのプロジェクトに直接関わっているそうですが、ちょっと教えてください。

006 NITO to OKA

ピーター・ライスはラ・ヴィレットでケーブルトラスを使用していますが、ほくが今やっているフィラデルフィアのコンサートホールとプリンストンの研究所では、単層レイヤーの鉛直ケーブルだけでガラス壁の重さと風荷重を支えています。ガラスはケーブルに固定されたクランプに乗せています。クランプが1枚のガラスの



プリンストンでのケーブル吊りガラス壁フィッティング

4隅にあり4点サポートで風に抵抗していません。

ケーブル構造というのは外力に対して変形することによって抵抗力を発揮するため、上記のプロジェクトでも変形とスパンの比率 (δ/L) が1/30から1/40となっています。ガラスはこうした大変形に追従する必要がありますので、ガラスとクランプの接合を工夫しました。ガラスとクランプの間に剛性のあるシリコンを挟むことによって、ガラスに局部的に曲げモーメントがかからないようにしています。鉛直のケーブルだけなので、ガラスパネル1枚に作用する風圧力の大小の差がケーブル同士の変形差を引き起こします。それでも上のシリコンがクランプによってガラスの回転を拘束しないので、ガラスに余計な力が働きます。風荷重の乱れが引き起こすケーブルの変形差は風洞実験の時刻歴の測定から得たデータをコンピュータ解析することによって決定しました。

鉛直のケーブルとクランプそしてガラスだけで構成されるガラスの箱は、ガラスに穴を開けなくてすむのでコストをかなり抑えることができました。これら2つのプロジェクトでは、ガラスは外装材であり構造体としては使っていません。最近ではヨーロッパのエンジニアたちは積極的にガラスを構造体の一部として、圧縮または引張材として使い始めていますね。

007 OKAtoNITO

1/30~40というのは凄いですね。アトリウムの高さ20m位のガラス壁を考えると50から60cm動くんだから相当な変形量ですね。その値だけ聞くと一見不安に感じますが、実際にその変形量で不具合が起こらなければ構造的な問題はないわけですね。ガランドウのアトリウムであればガラス壁自体の安全性さえ確保できれば良いということですね。強い風が吹くと、壁面が動くのを普通の人でも分かるのかも知れませんが、ガラスでできた文字通りのカーテンと考えれば逆に動いて当たり前で、案ずるより産むが易しかも知れませんが、ほくたち構造エンジニアの常識としては、建築物の安全性を確保するために動いたり変形したりしてはいけないとされていますが、逆に大きく動かし変形させたりすることが発想のブレークスルーになることは、実はほかにも色々あるのではないかと思います。

鉛直ケーブルだけの構造でひとつ気になるのは隣り合うケーブル同士がまったく無関係なため振動モードによっては互いに正反対のこともあるわけですね。そうするとガラスの4辺が互い違いの方向に大きく動く可能性があり、それをどう解決しているのかは大変興味があるところです。クランプのクリアランスはかなり大きくとる必要があるのではないのでしょうか。

ガラスに穴を開けないと言うのは大きな利点ですね。最近はそのほうが主流になっているのではないかと思います。本来ガラスは集中した局部応力に非常に弱いわけですから、穴開けの点支持工法は確実にガラスを留めつけることが



全景



室内

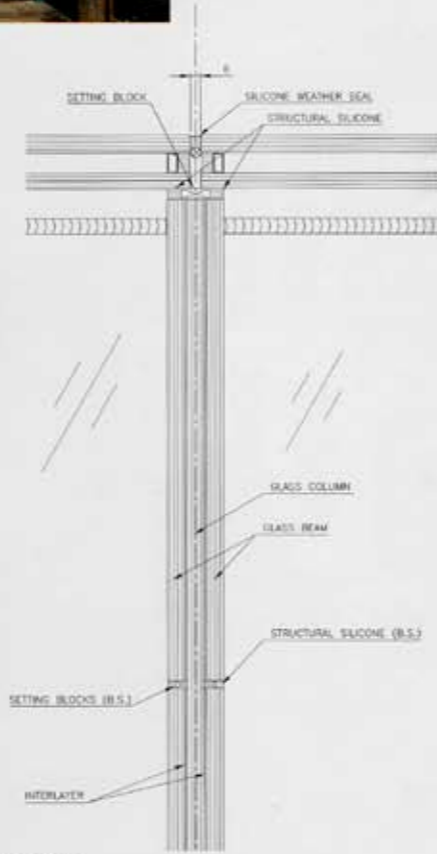


室内



ガラスの壁面

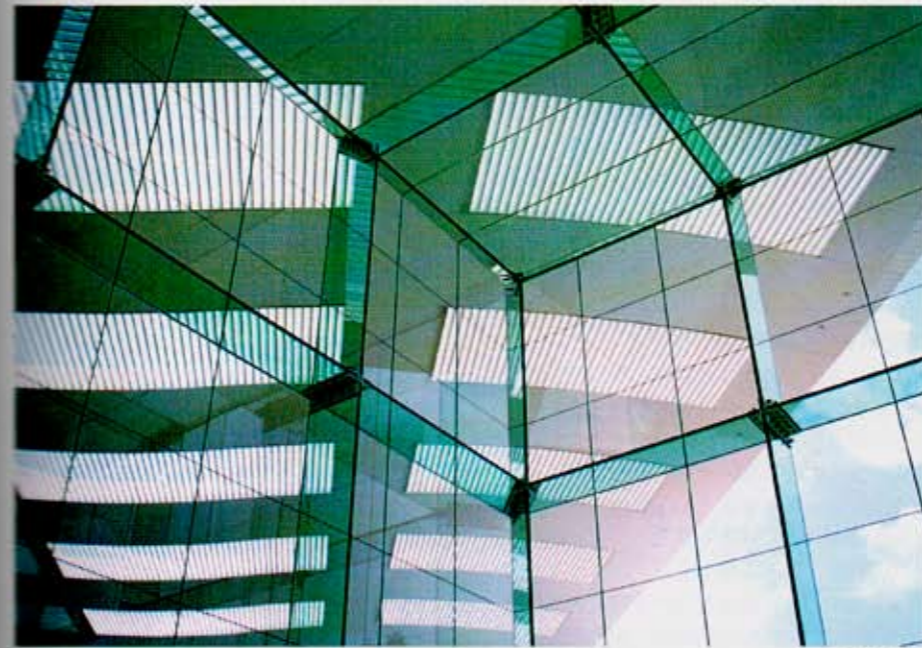
●ガラス博物館/West Midland, U.K./1994
この11m×5.5mの全物等の接合を一切使用しないガラス構造体は、1994年にDesign AntennaとDewhurst Macfarlane and Partners (以下、DMP) の設計によって完成した。構造体は1.1mごとに設けられた柱梁のL型ガラスフレームであり、梁成300mmのガラス梁は地上面より3.6m立ち上がる200mm成のガラス柱に接合されている。このガラス柱梁は1枚の厚さが8mmの3枚の合わせガラスである。柱梁の接合部で、柱の中ガラスが梁両側2枚のガラスの内側部分に入り込みラップして、現場でガラス間にレジンを流し込むことによって柱梁を一体にしている。
屋根ガラスは8mmの外側ガラスの内面に特別なコーティング、さらに10mmの空気層を設けて4mm×4mmの内側ガラスの外面にセラミックフリットを施すことによって、太陽光線を反射させ、ヒートゲインを防いでいる。
(YN)



ディテール



夜景



内部見上げ

●ガラスの読書室・アラブ都市開発協会/Riyadh, Saudi Arabia/1998
リヤドのアラブ都市開発協会の中核施設である図書館の一角にガラスの読書室が出現した。この8×8mのガラスの箱は、自立するガラス構造体としてはおそらく世界最大のものである。構造はシンプルで、厚さ15mmの強化ガラス2枚の合わせガラスを480mmの梁柱として、15mmのガラス屋根、ガラス壁を構造シーラントで取り付けている。東京国際フォーラム・キャンピのボルト接合とは異なり、ボルトに張力を導入することによってガラス同士を摩擦接合している。合わせガラスであるため、ボルトに張力を入れる部分のインターレイヤーには薄いアルミを挟み込み、局部的な変形および応力を発生させないようにしている。1998年5月に完成している。
(YN)



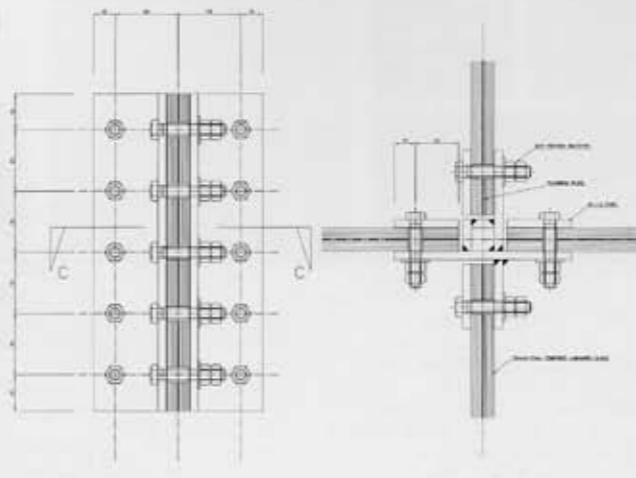
上景



上景およびディテール



天井見上げ



スプライス/接合部のディテール、断面

できる反面、そこが一番の構造的なウィークポイントであるという両刃の剣の面を持っています。ここ10年くらいこの点支持のガラスのフィッティングはずいぶん改良され、また新しいタイプも提案されてきているようです。ただ、今のところ金物にコーキングを含めてのバックアップ材を組み込んで留める方式がほとんどのようです。しかしここでも他の構造材や部材の留め方を参考にするとまだまだいろいろな可能性があるとと思います。

例えばガラスが容易に溶接できれば、様々な応用が利くと思いますし、ガラスだけのミニマなジョイントが可能になるでしょう。また接合金物(金物に限るわけではありませんが)をガラス面の中に一体化した物として組み込めれば接合の方法もまたいろいろな可能性を生むでしょう。このような取り組みは欧米では成されているのでしょうか。

008 NIToOKA

ガラス同士の接合方法ははくらのオフィスでもいろいろやっているし、世界中でも研究されていると思います。ガラス壁があまりに大きいとガラスをスプライス、つまり挟みつける必要がありますが、この時はボルトで接合している例が多いと思います。そのほとんどはシングルシート同士のスプライスです。

東京国際フォーラムのガラスのキャンピはあまりに有名ですね。これは合わせガラス同士をボルト接合しています。ガラスを構造として使うときは、フェールセーフの概念から合わせガラスにする必要があります。万が一ガラスが割れた場合でも、インターレイヤーがその落下を防止し、残った1枚のガラスに応力が伝達されても保持できる仕組みによって建物全体の崩壊を防ぎます。同じことを韓国のサムソン生命保険ビルでも試みました。合わせガラス同士がボルト接合された11mのガラス梁が柱間をスパンして風荷重に抵抗しています。

接合方法の異なる例として、1998年の5月に竣工したサウジアラビアのガラスのキューブがあります。8m×8mの自立するガラスの箱は、ガラス同士を摩擦接合することによって成立しています。合わせガラスにトルクを入れるとインターレイヤーが潰れてしまうので、トルクをいれる接合部分のガラスとガラスの間にアルミのプレートが設けられています。

ボルト接合でない例として、ティム・マクファーレンの設計したガラス博物館は3枚の合わせガラスからなるガラス柱と梁を現場でレジンを流しこむことによって一体化させた構造です。

今からほくたちが挑戦してみたいと思うガラス接合はいろいろあります。最近合わせガラスに使うインターレイヤーの技術開発が進んできて、従来のPVBより、かなり剛性があるものがガラスメーカーで使われ始めています。この中間層をボルトとガラスの穴に注入して、ラミネーションの過程時に隙間を埋めることでこのアルミより柔らかくゴムより硬いインターレイヤーが応力集中を起こさずに力を伝達できるた

め、一般のフロートガラスでもボルト接合が可能ではないかと考えています。ボルト接合するためには穴周りに大きな局部ストレスが発生しますから強化に必要があります。でも、この方法が可能なら、強化にすることはないのでコストのセーブができると思っています。インターレイヤーの素材を使って穴の大きさと位置をキャストしようという考えですが、実現性は大きいと思っています。

ヨーロッパでは大変高価な化学強化ガラスが使われ始めています。これは表面張力が普通の強化ガラスの2~3倍あるガラスです。この張力を利用して、ガラスとガラスのスプライス接合金物の代わりにこのガラスを部分的に使用すれば、完全にガラスだけのガラス壁が可能になるかもしれません。

化学強化ガラスについて説明を加えておきます。化学強化ガラスはその破壊荷重が普通の強化ガラスの2~3倍あるガラスです。強化ガラスの破壊荷重が1.5ton/cm²で、化学強化ガラスは、3~6ton/cm²です。強化ガラスの安全率の3を採用しても、1~2ton/cm²の許容荷重を使えることになります。これはおよそ鉄骨のそれに近い値になります。ただし衝撃荷重に関しては、普通の強化ガラス程度の耐力しか保証はできないようです。このガラスははくの知っている限り、ドイツのIONTECKで作ることができます。ヨーロッパでは一部でもうすでに使用実績があるそうです。今それを調べていますが、大変高価だそうなので、余程の必然性がない限り予算的に難しいでしょうね。

これはガラスが溶け始める温度以下、380度以上の塩化カリウムに浸されることによって、ガラスのナトリウム・イオンとカリウム・イオンが化学反応を始めます。その結果カリウム・イオンがナトリウム・イオンよりも大きいためガラスの表面に圧縮力が作用して、引張耐力が増大します。考え方は強化ガラスと同じです。しかし厚さ2.5mm以下もしくは曲率を持っているものはできないようです。

ガラスの全断面で3~6ton/cm²の耐力を得

ることは難しそうですが、ガラスに構造耐力が必要な部分にこの化学反応を起こさせて強化することができます。また違った可能性がありそうです。例えばガラスのベゼル耐力接合で弱点になる穴周りに化学反応を起こさせれば、東京国際フォーラムのガラスキャノピーのような構造体の安全率を上げることができる、もしくは、もっとスレンダーなガラスの構造体がこのボルト接合によって可能になるかも知れません。

009 OKAtoNITO

究極のガラス建築というのはある意味で、ガラスだけですべての構造体・仕上材ができてくるものなのかも知れませんが、一体ガラスで構造体を作ることは何でしょうね。

構造材料としてガラスという素材が優れているということは決してありません。まず脆いし衝撃に弱いし、熱にも弱い。まずもって破壊状態が確率的にしか予測し得ないと言うのは何ともやっかいです。ガラスの性能で優れている点は、経年変化しない、耐久性がいい(表面の傷の進展から来る破壊性状の点は除く)ということぐらいです。もしガラスが透明でなかったらこれを建築の構造で使うなんてことはなかったでしょう。その意味ではあくまで構造材料としてガラスを使うという言いかたよりもガラスを構造材として考えるというほうが正確な表現でしょう。

ガラスというのは一言で言えば「美しい」けれど脆い。その脆さをいかに工学的にカバーしセンシティブな性状を上手く扱うか、それによって美しさを引きだす。それがガラス構造の一番の面白さなんではないかな。だからコンクリート・金属・木材などの他の構造材とはある意味別の考え方が必要になるんでしょう。フェイルセーフや損傷許容設計、あるいは部材の交換可能性なども常に考えに入れなければいけません。

以前20mほどのガラス張りの三角アトリウムを設計したときに、コーナーのフレーム以外はすべてガラスで設計したんです。そこには10m

ほどの長さの強化ガラスの水平フィンがありまして。強化ガラスの熱処理可能長が5m程度だったため、ガラスを3分割し互いにラップさせることで全体の長さ10mの水平ビームを作ることになりました。構造的には十分な検討をして万が一ガラスが割れても全体の安全性は確保できていたのですが、割れた後それを取り替えることが非常に困難であることに気づき、また一からやり直したことがあります。

010 NITOtoOKA

ガラスを構造体として使う必要があるのかという岡村さんの意見にははくも考えさせられることが多いです。イギリスなどの温室を見ていると本当に美しい。そのフレームの繊細さとガラスとの絶妙なバランスには感動してしまいます。おそらく同じ規模の建物をガラスだけで作っても、あれほど美しくなるかは疑問です。ガラスを構造体として使う必然性を見つけることは難しいですね。その一方で、技術者が挑戦する課題としては本当に面白い。10mの水平ビームの割れた場合の取り換え作業や、割れても全体の構造が自立できる仕組みを構築する作業は、ガラスという素材を扱う場合には避けて通れません。それだけリスクを背負ってさえ、それが良いという理由が見つけられる設計者と理解してくれる施主が必要ですね。ガラスキャノピーは東京国際フォーラムの地下鉄入口に建つため、それ自体が視界を妨げないためにガラスになったと聞いています。無が求められたため建設された。それは立派な理由ですね。

011 OKAtoNITO

はくは5年ほど前ヨーロッパの透明建築を集中的に廻る視察ツアーに参加したことがあるんですが、その96年頃はDPGの全盛期でした。ヨーロッパの大都市にはもうごくありふれた形でフレームレスのガラス工法が普及していて、空港・駅・美術館とかちょっとした新築のパブリックな建物には必ずと言っていいくらい何処かしらDPGのあの点々がありました。サッシュ

がないだけフレームレスのほうが経済的なメリットもあるという話もしていましたね。

一方でDPGに対してガラスのみを構造として作られた建物、仁藤さんもガラスの接合で紹介されたイギリスのガラス博物館も非常に興味深かったですよ。これはガラス建築の最もビューアな形式で、ガラスの柱・梁・壁・屋根と全て強化板ガラスを使っていますね。板ガラスを上手く組み合わせることで構造フレームを組んでいますが、そのガラス空間のユニークさに加えて、ガラス同士をほとんどシールで緊結しているディテールが非常に印象的でした。一緒に行ったガラスメーカーのエンジニアも日本では考えられないと言っていました。建物に動きを考慮なくていい国で作ると非常に簡単なディテールで済む例だと思いました。

日本でこのような建物をそのまま作るのは無理ですが、ひとつ面白い可能性があります。それは免震の建物です。免震は基本的には地震に対する安全性を高めることが主眼ですが、その効果を上げるため免震層上部は大きな剛性を持たせる必要があります。その結果、大地震時でも上階の層間変形は非常に小さくなるため、ガラスにとっては大変有利な条件となり、通常の「逃げ」の大きさがかなり軽減されることとなります。このような建物であればほとんどフィックスの納まりにしたガラス構造が可能となるでしょう。まあそれがよいかどうかは別問題ですが……。

012 NITOtoOKA

ガラス博物館と地震時の逃げの話がでたので、シールについて話しておこうと思います。シールにはいろいろな剛性を持った種類があり、使い方によっては、その逃げに対して大変有効ですね。一般的に構造シールと言われているのは黒色です。アメリカの建築家は一般的に嫌いです。透明を含めて黒以外の7種類程度ある色のシールは構造シールではありません。では構造シールと普通のシールの違いは何なのかと言うと、それは剛性の違いだけです。基本的な引張

耐力は同等ですが、黒シールの場合だと剛性は3倍以上強いです。変形を許してしまえば、風などの荷重からくる力の流れ方は大きく変わってしまいます。黒シールを使わなくてはならない理由はそれだけです。

ガラス建築なんだから透明シールを使いたがる建築家が多いけど、透明は短期間でゴミを集めて黒く汚くなってしまいます。最終的にガラス面がものすごく安っぽくなってしまいます。だから個人的にはグレーを勧めます。

もうひとつの問題としては、その長期的な耐久性ですね。シールは切れる可能性がある。それは建設上の欠陥の場合もあり、長期的なシール自体の耐久性によることもある。シールメーカーは10年を限界としているのが一般的でしょうか。ある期間でシールを貼り直す必要がある場合のメンテナンスについては、設計当初から検討する必要があるでしょうね。特にシールに頼った設計をした時は絶対です。

プリンストンの研究所のガラスの壁面では、シールの違った使い方をしています。ガラスは各コーナーのクランプによって留まっていますが、そのクランプとガラスの間にシールを挟み、そのシールの剛性と厚さを調整することによってガラスがクランプの中で、最大7度回転できるように設計しています。ガラスは単層のレイヤーの鉛直ケーブルのみによって支えられているため(フィアデルフィアのコンサートホールと類似する構造)、風が吹いた時、中央で25cm動きます(ガラスの壁は12mの高さ)。その変形にガラスを追随させるために、このようなディテールを検討しました。ガラスをクランプで挟みこんだとしても、そのシールの剛性があるため、ガラスのコーナーに局部的な応力を発生させることなく、ピンとして扱うことができます。

013 OKAtoNITO

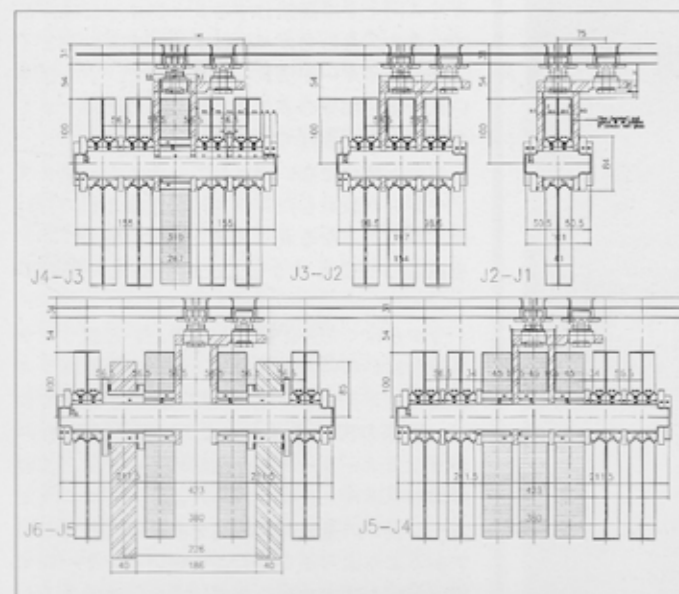
シールの使い方はすごく重要ですね。構造的な弾性(モジュラス)・強度・色・耐久性・施工性など考えなきゃいけないことはたくさんある。ガラス建築の性能はシールで決まってくる

面も多いんですね。今のところはシールに関してはあくまでもメーカー頼みですが、これからは設計プロセスの中でちゃんとシールの設計をやらないとガラスの構造はだめでしょう。現代のガラス建築とは、ある意味「シール建築」と言ってもいいくらいですからね。個人的な好みですが、はくはできることならシールは使いたくない。とは言っても、じゃあガラスの突き付けはどう処理するんだ、と言われると苦しいんですが、できることならドライな工法を追求していきたいと思っています。透明なガスケットみたいなものはできないのでしょうかね。あるいはガラスのオープン・ジョイントも追求してみたいですね。

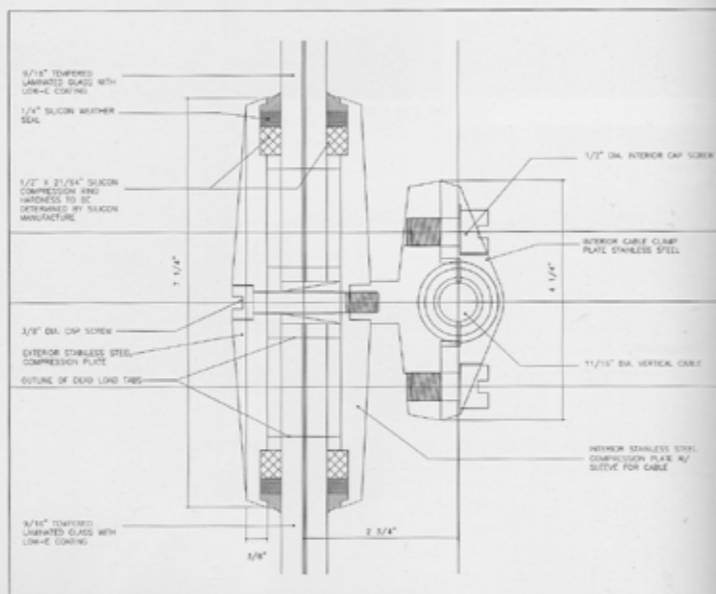
もうひとつ金物とガラスの緩衝材としてはシリコン・シーリングを使うことが多いですね。これはまったく性質の違うガラスと金属の間をブリッジする点では間違いではないのですが、仁藤さんの今の例のようにどんどんクリアランスが大きくなってシール目地幅も大きくなってしまおうように思います。別の考え方としては、ガラスに金属のフィッティングを緊結し、その機械的な逃げでガラスの変形を許容する方法が考えられます。これであれば構造的なシールは必要ありません。今は金物とガラスは別々な動きをとするケースが多いのですが、一体化させると楽になることもあると思います。フィッティングをガラスの裏側で接着等で一体化することができれば、ガラス表面は完全にフラッシュになるわけで、DPGやコーナーフィット工法などの支持材は表にはまったくでなくなります。接着で一体化するのは技術的に問題があるとしても、例えば合わせガラスの裏側のガラスを削り抜くとかインターレイヤーと繋げることは可能でしょう。ところでインターレイヤーは今どんなテクノロジーが使われているんでしょうか。

014 NITOtoOKA

合わせガラスのインターレイヤーは構造ガラスを考える時、必要不可欠な要素です。インター



ガラスキャノピーのベゼル接合部



プリンストン研究所の回転するフィッティング・システム



見上げたガラス・カーテンウォール (左) 見上げ

構造用ブラケットとディテール (下)

ガラスの吊りシステム (YN)

レイヤーについては、去年DUPONT社から従来のPVBより剛性が高く、強度があり、厚めの「SENTRYPLUS」というインターレイヤーを紹介されて以来、同製品をよく使っています。ガラスを構造体と考えた時、合わせガラスは1枚のガラスが崩壊しても、もう1枚のガラスとインターレイヤーでそのガラスが脱落することを防げる大変安全率の高いガラスです。インターレイヤーに優れたものがあれば、その信頼性はさらに上がります。

このSENTRYPLUSは合わせガラスのエッジを水中に露出しても、ガラス同士がはがれることのない、密着性と摩擦力の強い中間層です。これを使用することで、合わせガラスのエッジを露出するデザインが可能になります。

今、アメリカのグラックマン&メイナール事務所と現場監理をやっているヘルムート・ラングの南青山店ビルの新築工事では、縦方向の構造ガラスフィンを合わせガラスとして、ガラスのエッジを露出させています。内側のエッジに備え付ける照明からそのエッジを照らして、外側のエッジから光が漏れるというデザインをしています。ガラスのフィンエッジがあたかも光の線として見えるように工夫しているのです。このような設計ができるのも特殊な中間層が外部に露出されても、その性能を保証してくれるからです。

これだけ硬い中間層を使うことができると、DPGなどのボルト接合を考えたとき、今までのように2つのガラスを貫通する必要がなくなります。ボルトで留める側だけに穴をあけて、それとは反対側のガラスは中間層で留めればよいわけです。もちろん合わせガラスを作成するときに、片側のみ仕込んだボルトが多少回転したりする問題が起こりますが、幸い中間層が厚めで剛性があるため、ボルトがガラスに触って傷つけることはなく、製作できます。耐火の問題がある場合で、ワイヤーガラスを使用するケースがあっても、合わせガラスにすることによってボルト接合が可能になります。

もちろん合わせガラスをスカイライトとして使う場合、2枚のガラスを長期的荷重に対してもコンポジット断面として使用ができるはずですが、具体的にどれくらいの剛性を期待できるのかは、もう少し調査が必要だと思っています。

日本でのストラクチャルシール (SSG) 工法は脱落防止用のクランプを上下に付ける義務があるはずですが、しかし、この中間層をガラスのエッジから飛びださせ、ガラス背後の構造体にスクリューなどで固定すると、ガラスが破壊しても中間層が脱落を防止できます。すると外部に構造体が露出しない完全なガラスの壁面が可能になると思います。PVBでは柔らか過ぎてできませんが、旭硝子のEVAや上記のSENTRYPLUSだったら可能だと思っています。

015 OKAtoNITO

ガラスとコンクリートは構造材料の観点から見ると似ている点がありますね。どちらも珪酸・ソーダ・石灰などを含む無機セラミック材料で、力学的には圧縮に強く破壊性状は脆性であ



全体CG



工事中のガラス屋根



フィッティング金物



工事中の内部見上げ



工事中のガラス壁面



内部CG

●フィラデルフィア・パフォーミング・アートセンター/Penn. U.S.A./2001
フィラデルフィア交響楽団の新しい本拠地として大小2つの多目的コンサート・ホールを持つ複合施設は、アメリカのラファエル・ヴィニオリ事務所が設計して施工管理をしている。構造設計はDMPが行い、2001年12月のオープニング・コンサートに向けて急ピッチで現場作業が進んでいる。ヴィニオリは東京国際フォーラムの設計を行ったことは反対に、2つコンサート・ホールを巨大なガラスのアトリウムの内側に入れている。

紫外線カットコーティングされた合わせガラスを支える大屋根は、クリスタル・パレスを彷彿とさせるノコギリ状の断面を持った50mスパンのフィレンディール・トラスが主構造である。同屋根の両妻面には、鉛直方向単層レイヤー・ケーブルのみで支えられたガラスの大壁面がある。同ケーブルは風荷重時の大変形を考慮する必要があり、その変形は最大スパン (50m) 部分では面外に1m程度になる。ガラスを支える金物を工夫することによって、大変形時にも十分ガラスがケーブルの動きに追従できるように設計してある。

鉛直ケーブルのみでガラス壁面を支えることによって、構造体を最小限にすることに成功したと考えている。結果として施工は大変シンプルになり、ガラスをあげる必要もないことから、予算を抑えることにも成功した。(YN)

●プリンストン大学ゲノム研究所/New Jersey, U.S.A./2002
プリンストン大学敷地内に建設中の研究所は、建築をラファエル・ヴィニオリ、構造をDMPが設計している。実施設計が終了し、掘削が始まったところである。建物断面 (両側) の巨大可動式ルーバーがこのプロジェクトの特徴を示す。高さ13m、幅1.3mのルーバーが太陽の角度、季節、天気によって最大で90度回転する。そのルーバーと建物との間に、フィラデルフィアのホールと同様にガラスの壁を設置している。ガラスを支える構造体 (鉛直ケーブル) は、ガラスの目地に隠れてほとんど見えない。そのため、透明なガラスの壁がその建物の内側と外側の境界をはずしている。(YN)



外観



三階通路より見る

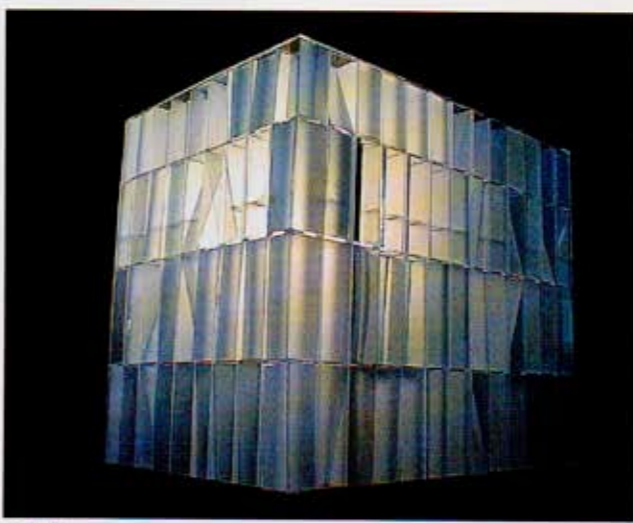


ルーバーを見る



1階ホール

●ヘルムート・ラング南青山店/東京都港区/2001
建築をグラックマン&メイナール、構造をDMPが担当している店舗ビル。ここでは1.25m間隔に設置されたガラスのフィンに様々な角度、傾き、そして色の異なるガラスを取り付けている。ガラスのスキンの反射を変換することによってファサードに表情を与えようと挑戦している。耐火の問題があるため、構造ガラスを考えると非常に重く、強いノコギリ状の断面と強化ガラスを合わせている。ガラスフィンのエッジを外側に露出させ、その反対側 (室内側) のエッジにライティング・ボックスを取り付け、外に面するエッジを照らすことを考えている。合わせガラスのエッジを露出することは通常は出来ないが、強度・剛性の高い新しいインターレイヤーを使うことで、こうしたニーズにも対応できるようになった。(YN)



外観模型

ることなどです。そうするとコンクリートの構造的な利用の方法がそのままガラスにも当てはまることは多いのではないかと思います。

まず考えられるのは鉄筋コンクリートの考え方です。つまりコンクリートの脆性的な性状とスチールの塑性・延性をうまく相互補完することで全体として優れた力学的特性を有しているわけですね。これはそのままガラスにも適用可能ではないかと思えます。文字通り鉄筋ガラスになるわけだけども、これだとガラスの構造というよりも透明な鉄筋コンクリートって感じで、かなり強烈です。できればすごいけど、現場で型枠組んでガラスを流しこむなんて無理でしょうね。でも一度見てみたい。コンピュータ・グラフィック上ではできるな。

現実的なことを考えるとスチールの補強と言ってもあくまで工場生産品の中に封入された状態を作らないといけないわけで、当然ガラスに入る鉄筋は細い繊維状にならざるを得ないと言ってしまうとすぐ網入りガラスが思い浮かぶんだけど、あれは構造的にはまったくだめです。もっと高強度な繊維を視覚的に障害がないくらいの細いものにしてガラスと一体化する必要があります。繊維材料は細くすれば細くするほど、格子欠陥や不純物等の破壊因子がなくなり強度が上がるので、超極細繊維あるいはウイスキーを組み込めればガラスの脆性はかなり制御できると思います。透光性については繊維がある程度以上の細さになれば、光の回折性によってほとんど気にならなくなるのではないかと思います。また逆に多少の不透明さを生かす方法もあるでしょう。繊維材料としてはスチールやカーボンもありますが、いっそのことガラス繊維、特に繊維素材としては最強の引張強度を有するシリカ繊維だと、母材としてのガラスとの相性もよいわけですね。これが可能になれば非常に優れた材料になるでしょう。一見夢物語のようでもあります。近年の材料工学・素材開発の発展を考えれば十分可能性があるんじゃないかな。

コンクリートとのアナロジーでもうひとつ可能性が考えられるのはプレストレストの技術です。これは特にプレキャスト・コンクリートのことを考えると分かりやすい。コンクリートの圧縮に強く引張に弱いという性状をアクティブに制御しようとする技術がプレストレストです。プレストレストを与えることによりコンクリートを純圧縮状態に保ち、その力学的性能を最大限生かす技術は今やコンクリート構造には必須の技術です。コンクリート構造のプレストレストでは現場打ちコンクリートに用いる場合と工場生産されたプレキャスト・コンクリートに用いる場合とありますが、ガラスに応用できるのは後者の方です。圧縮に強い構造ユニットとして考えればガラスとプレキャスト・コンクリートは同等に扱えます。さらに言えばセラミックや石も同様な扱いが可能でしょう。これはガラスを純圧縮状態のまま扱えるわけでガラスの力学的特性は変えずに外部からの制御でその不利な点をコントロールする。つまりガラスは今のままでいいわけです。これは大きな利点です。

もうひとつ、プレストレストはガラス部材自体を制御することに加えて部材同士の結合も可能にします。つまり部材同士を互いにある程度以上の力で押しつけば面圧縮力と摩擦力でバラバラになることなしに一体の部材になります。この点も非常に有効です。建築的にはガラスの純粋性とプレストレストの機構が絡み合って多彩なシステムができます。実際に数は多くないけれど、いくつかプレストレスト・ガラス構造はありますね。

016 NIToOka

多くの知っているプレストレスト・ガラスの例としては、レンジ・ピアノが作ったガラスのテーブルが思い浮かびます。あれはピアノ線でガラスの脚とテーブル板を緊接合した設計でしたね。アメリカのガラス彫刻家ジェームズ・カーベーターはガラスのチューブの中にピアノ線を通してプレストレストを導入し、絶えずチューブが圧縮束として働くように設計していました。ガラスの持つコンクリートの3~5倍の圧縮強度に注目することは、構造ガラスを考える時には大変大きな可能性だと思います。

017 OKAtoNITO

ガラスのプレストレスト技術で非常に興味深いものがあります。それはブラウン管です。テレビやパソコンのディスプレイは最近、ほとんどフラットになってきたでしょう。これはここ3年くらいのことで、ブラウン管は内部を真空に近い状態に保たなければいけないので、大気圧に耐えるためには必然的にある程度の曲率が必要です。これは仕方ないものだとばかりは長い間思っていたのですが、結構大きな画面のものでほとんどフラットなディスプレイが店頭にてているのを見て非常に不思議でした。最近その仕組みが分かったのですが、なんとブラウン管にプレストレストを入れて（正確に言うと圧縮リングをブラウン管の画面周囲に回し）画面表面に発生する応力を押さえることで、ほとんどフラットに近い画面を作り出すことに成功し

たと言うことでした。さらにガラスの厚みも変化をつけて、周囲に行くほど厚くし内面は浅い球面を形成し応力の緩和も図っています。これなどまさに建築的にはプレストレスト・シェル——ドームの原理そのものです。十分建築に応用可能です。

018 NIToOka

前回のガラスチューブについての技術について補足しますが、ガラスのチューブの作製はドイツのショット社が有名です。ジェームズ・カーベーターはガラスとガラスの間にレジンを流し込んで、合わせガラスチューブとしているのですが、それがなかなか難しいようです。レジンの収縮が外側のチューブにひびを発生してしまうようです。ガラスのチューブは断面で完結しているため、逃げがながいのが理由だと思います。失敗する可能性がかなり高いようです。これは単純にプロダクトの問題で、収縮の少ないレジンの開発により克服できると思います。

カタログには最大半径で325mmとなっていますが、長さを制限すれば450mmまで作れるようです。

合わせガラスの必要性は単純にフェールセーフの概念によるものですが、これは考え方であり、たとえば2本の同じ耐力を持つガラスチューブを並べて、構造的には1本のチューブで十分支えられるよう設計しておけば、例えば1本が破壊しても、もう1本で支えられるはずですが、もちろん1本が破壊した時には瞬間的に荷重の移動が occursりますが、これはディテールの問題で、パイプの上か下にバネを仕込んで、荷重を柔らかく移動させる工夫が必要だと思います。

安全率の問題になりますね。ガラスキャノピーは最終的にはベゼルの周りで破壊したので安全率は5でしたよね。それなら同耐力の5本のガラスのチューブを束にしてガラスの柱を作れば、それは同じ安全率です。それはもしかしたら、とても美しい柱かも？ ガラスチューブは構造部材として断面性能が非常にすぐれてい

ます。他の例として最近伊東豊雄さんが設計された仙台のメディアテークでも使用されたプロフィリット・ガラスがありますね。プロフィリットは古い技術でありながら、そのガラスの持つ特殊性が建築の外観に一味違った印象を与えるため、最近再び注目を集めてきているようですね。それはガラスという素材を単なる透明な間仕切りとしてだけでなく、建築を決めていく重要な要素として、人々の目にガラスのボリュームを意識させる面白い素材だと思います。ガラス単体がリブを持っていることで、曲げ性能や座屈耐力が非常に高く、ガラス自体が自立できる。それによってマリオンなどのない壁面が可能です。個人的には、そのガラス・リブの鉛直のラインが正確なリズムで壁面を切り裂く緊張感が好きです。

今現在このガラスを作れるのは、ビルキントン社とドイツのラムバート社だけです。ほくもプリンストン大学の研究施設の建物のインテリアの間仕切りに使っています。最初は外装材として設計していたんです。でも、その長さ6.5m、40mm×80mmのチャンネルは150kg/m²の風荷重に持たなかったのです。そこでガラスの背後に鉄骨梁を横に流して、そこから6mmの丸鋼をガラスとガラスの間に差し込み、外と内からクランプで挟んで固定しました。結果としては、そのクランプが小さいのでガラスの壁面が700cm自立したような外装となるはずだったのですが、予算の都合でなくなってしまいました。また他のプロジェクトでやってみたい。

製品自体はキャストでありながら、品質は非常に良く欠陥の確立は極めて少なく、最小長さで100cm、最大長さで700cmのものが手に入ることができます。おそらくビルキントンは30ft (10m) のものを作れる。

強化ガラスも長さ（最大2,750mm）とタイプに制限されますが可能です。強化ガラスが可能ということは、ボルトで固定することもできるわけです。合わせガラスの実績はないのですが、チャンネルの背中を2枚合わせにすることで、

ガラスのH型断面も可能です。強化ガラスなら、2枚をボルトで圧着することもできるはずですが、もちろんチャンネルを切断して、アングル断面も作れます。アングル4枚をすべて背中合わせにして十字断面もつくれますね。網入りは長手方向のみ作れるそうなので、耐火の問題による使用場所の制限もありません。もちろんこのガラスは強化にはできませんけど。

とても面白い素材なので、いろいろな可能性を構造設計者から提案できるかも知れません。合わせガラスが今はできないので、構造体として使用するにはフェールセーフの問題を克服しなくてはなりません。しかしその面外への剛性の高い断面性能は、ガラスを引張りだけでなく圧縮として使える十分な可能性を持っていますね。

019 OKAtoNITO

ガラス構造は現在のガラスとそれを取り巻く金属・シーリング材・プラスチックといった材料との上手な組み合わせによって、まだいろいろな可能性があると思います。さらにガラス自体の強度的な性能を上げることによって、新しい可能性が広がると思います。また、機能材料との組み合わせあるいは異種素材との組み合わせで構造的な性能を上げつつ、様々な機能を併せ持つこともできるでしょう。

020 NIToOka

今、日本で森ビルの再開発の仕事をアメリカの建築事務所・グラックマン&メイナーと一緒にやっています。美術館のエントランスですが、それは斜めケーブルと水平鉄骨圧縮リングからなるケーブルネット・シェルがガラスのスキンによって囲まれたものです。ガラスの持つ透明性がケーブルの細さも手伝って、あたかも水平のリングが浮遊して土星の輪のように映ります。ガラスの透明性がこれを実現させてくれます。

特殊なことに挑戦するとき、特にガラスのような脆い素材を使うとき、成功するためにはた

くさんの問題を抱え、それを解決する必要ができてきます。それでもガラスがガラスでなくてはならない場合があると思います。森ビルのエントランスでも、構造設計としては鉛直材をなくすことがテーマであり、そこではガラスの透明性が絶対に必要なんです。

岡村さんの考える通り、ガラス構造に挑戦していく限り、まだまだいろいろな可能性があると思います。ガラスを構造体として使用するとき、化学強化ガラスとプロフィリット・ガラスはまったく違う畑から育った素材だと思います。チャンネル・ガラスはその形状が持つ断面性能が優れているという理由で生まれたガラスで、ある意味建築のエンジニアが提案したであろうと想像できます。化学者が作ったケミカル・ガラスは、われわれエンジニアには全く想像もできないガラスですね。

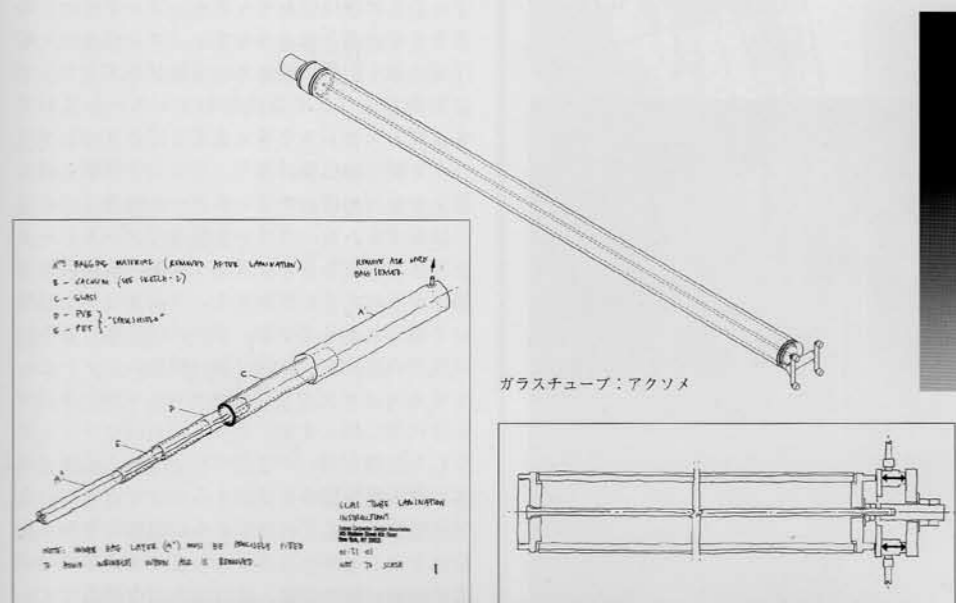
まったく異なったアプローチですが、それを統合することによって2つの可能性がさらに膨らむと思います。専門家の時代になり、仕事が細かく分担されてくると、それぞれの技術を組み合わせる面白くすることができる人間が少なくなると思います。しかし、それに挑戦することは建築、構造設計者の役割であり義務であると思っています。

建築業界の枠だけでなく、自動車やテレビなどのガラス技術をもっとオープンにして、それを組み合わせていくことが、これからのガラス建築、構造を進歩させるのに欠かせないことだと思っています。

また面白い話があったら連絡します。今回はこのへんで失礼します。

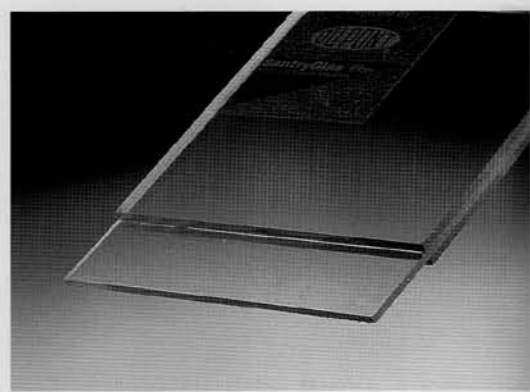
(2001年冬~春)

PROJECT DATA	
Project: The Pavilion, Broadfield House Glass Museum	Location: Dudley, West Midlands, U.K.
Client: Metropolitan Borough of Dudley/Broadfield House Glass Museum	Architects: Design Antenna
Structural Engineer: Dewhurst Macfarlane and Partners	Contractor: IB Construction
Glass Contractor: FA Firman (Harold Wood)	Glass Suppliers: Saint Gobain (UK), Solglass
Project: Reading Room, Arab Urban Development Institute	
Location: Riyadh, Saudi Arabia	Client: Arab Urban Development Institute
Architect: Nabil Fanous Architects	Structural Engineer: Dewhurst Macfarlane and Partners
Service Engineer: Buro Happold	Contractor: ICCO Riyadh
Glass Contractor: Zamil Glass Industries	
Project: Hanging Glass Facade, Samsung Jong-Ro Building	
Location: Seoul, Korea	Client: Samsung Life Insurance
Architect: Rafael Viñoly Architects	Structural Engineer: Structural Design Group Co., Ltd
Facade Engineer: Dewhurst Macfarlane and Partners	Facade Review Engineer: Arup Facade Engineering
Facade Consultant: Heitmann & Associates	Contractor: Samsung Construction
Glass Subcontractor: Hankuk Glass Industries	
Project: Regional Performing Arts Center	
Location: Philadelphia, Pennsylvania, U.S.A.	Project Client: Regional Performing Arts Center, Philadelphia
Architects: Rafael Viñoly Architects	Structural Engineer: Dewhurst Macfarlane and Partners
in association with Goldreich Engineering	Construction Manager: LFDiscoll
Services Engineer: Ove Arup and Partners	Acoustic Consultant: ARTEC
Theater Consultant: Theatre Projects Consultants	
Project: The Princeton Institute for Integrative Genomics	
Location: Princeton, New Jersey, U.S.A.	Client: Office of Physical Planning
Architect: Rafael Viñoly Architects	Civil Engineer: Van Note-Harvey Associates
Structural Engineer: Dewhurst Macfarlane and Partners	in association with Goldreich Engineering
Landscape Architect: Quennell Rothschild & Partners	Mech/Elec/Plumb/Fireprot Engineer: Burt Hill Kosar Rittelmann Associates
Construction Manager: Barr and Barr, Inc.	
Project: Helmut Lang New Retail Store	
Location: Minato-ku, Minami-Aoyama, Tokyo, Japan	Client: Prada Corporation
Architect: Gluckman Mayner Architects	Structural Engineer: Dewhurst Macfarlane and Partners
Contractor: Takenaka Corporation	

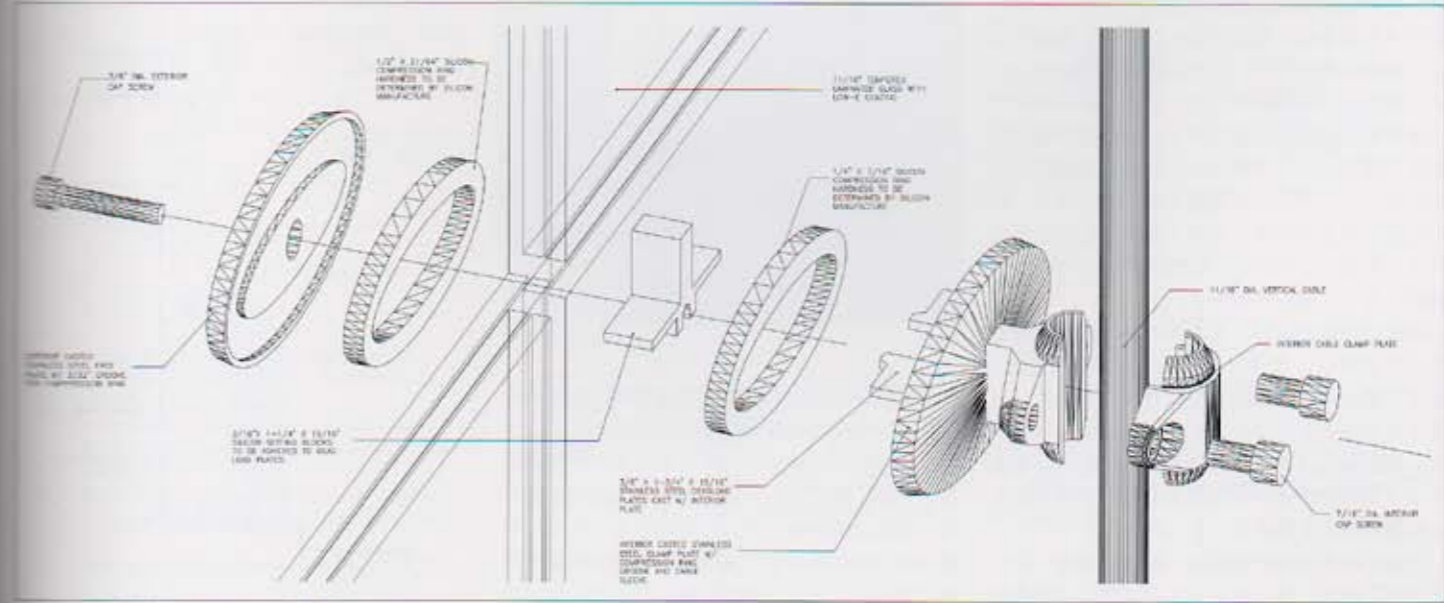


カーベーターによる合わせガラスチューブの提案

同左: ガラスチューブの構造断面



DUPONT社のインターレイヤー「SENTRYPLUS」



プリンストン研究所のフィッティング組立図