

スチールデザイン

No.2



森美術館 ミュージアムコーン

編集委員

委員長：高梨 晃一（東京大学名誉教授）

委員：隈 研吾（建築家）

委員：佐々木睦朗（構造家）

委員：手塚 貴晴（建築家）

委員：西沢 立衛（建築家）

委員：馬場 璋造（建築評論家）

委員：作本 好文（新日本製鐵）

委員：藤原 知貴（新日本製鐵）

委員：永田 匡宏（新日本製鐵）

委員：岡本 晴仁（JFEスチール）

委員：今泉 淳（JFEスチール）

委員：粟谷 公治（JFEスチール）

委員：藤澤 一善（JFEスチール）

委員：坪井 良平（住友金属工業）

委員：高田 啓一（住友金属工業）

委員：富樫 和伸（神戸製鋼所）

委員：唐津 敏一（神戸製鋼所）

建築設計

森ビル株式会社、Richard Gluckman + GMA、入江三宅設計事務所

構造設計

仁藤喜徳、藤川由美 + DMP

照明デザイン

豊久将三 + キルトプランニングオフィス

森美術館 ミュージアムコーンの 構造デザインについて

にとう よしのり
仁藤 喜徳 (engineers network)



ミュージアムコーンについて

ミュージアムコーンは今年の4月末にランドオープンを迎えた六本木ヒルズを中心とする超高層事務所棟ビル(森タワー)の最上層部分に位置する展望台、森美術館などで構成される森アーツセンターへ人々を導くエントランスとして森タワーの足元に建設された。

施主である森ビル株式会社(以下MBC)の要望で、森アーツセンター、森美術館は様々な芸術、技術、美術を一堂に会し、そこに参加する人々が、自由に話し、考え、刺激し合い、新しい可能性、未来を形作る斬新なアイデアの発信拠点を目指しており、その空間へのエントランスであるミュージアムコーンは、エレガントで求心力があり、集まった人々が創造力をかき立てることの出来る建築自体が美術品として美術館の一部になれるようなシンボリック建築の実現を目指した。

美術館もしくは展望デッキに向かう人々は、地下2、1階、地上1、2階のいずれからのフロアから、ミュージアムコーン内のエレベーターもしくは螺旋階段を使って3階のフロアまで

上がり、ブリッジを渡って森タワー内に入り、そこから直通のエレベーターに乗って、一気にビル最上層部へと進むプログラムとなっている。

ニューヨークでグラックマン・メイナー・アーキテツ(以下GMA)を主宰する建築家リチャード・グラックマンは六本木ヒルズの文化的側面を定義づけるとともに他の商業施設との

差異化を印象付ける目的で、ミュージアムコーンを楕円錐形状とした。

ミュージアムコーンは、正面にテレビ朝日本社ビルと日本庭園、後ろには森タワー、周辺には劇場、ホテル、店舗、オープンカフェ、テラス等があり、多くの人々に賑わう活気に溢れたスペースに位置している(写真1)。



写真1 ミュージアムコーン周辺の六本木ヒルズ

今までに例の無い 空間を目指して

基本計画当時、GMAと当時デューハースト、マクファーレン&パートナーズ(以下DMP)に所属していた私はMBCへの基本計画終了のプレゼンテーション用に、ミュージアムコーンに関して、現在実現した案を含む20以上の案をGMAと検討した。

ミュージアムコーンは自立した建物であるから、自重を支える圧縮材が必要であり、それを外周に配置するのか、内部にするかの検討から始めた。透明建築の場合、外周にガラス外装のみを支持する軽快な骨組、内側に主構造を配置するのが一般的であるが、設計のアプローチとして、常識的な考え方とは異なる視点で設計を進めたいと考え、外周に主構造材を設けて、その上部からエレベーターなどの内部要素を吊る案の検討を進めた。しかしフレームを軽快に設計しても内外部に構造色の強い線材が交差し、見る角度によって非常にうさぎスペースフレーム的印象となり、外部の構造は鉛直のラインが強調され、それが建物を支持しているという一般的な構造から抜け出せず、方針転換を余儀なくされた。

建物の用途上、エレベーターは必要不可欠であることから、それを自重受けとして建物中央部に設けて、その頂部から外装材を吊れば、外装材を支える骨組を耐火被覆の必要無い、純粋な露出鉄骨で構成でき、透明な外装材が生きる最適な設計になると判断した。



写真2 最初のコンセプト模型

外装材の設計に関しては、建物上下にスパンするケーブルトラスを、放射状に外周に並べた案を検討したが、これも今では一般的な構造であり、建物独自の形状特性を生かせない。

原点に戻って発想の転換をした結果、建物背後から、地震や風などの外力に抵抗する12枚の片持水平楕円鉄骨リングを、外装と一緒に鉛直ロッドで上部から吊る案を提案した。ロッドの細さによって、楕円リングが非常に強調されたユニークな構造であったが、外力をそれぞれが独立した強固な構造で無理やり押さえ込んだ設計となり、合理的ではなかった。

試行錯誤の末、折角建物外周全体に構造を廻し閉じることが出来るのだから、主構造である楕円リングを単層の斜めケーブルネットに接合すれば、外装が一つのシェルとして機能することが可能になると考えた。

リチャードはそのケーブルネットシェル(実現案)を高く評価してくれたが、建物上下方向のみにスパンするシンプルなケーブルトラスを外周に放射状に並べる案をプレゼンテーション用とした。

膨大な検討の末に行き着いた案を諦めては後悔すると思い、GMAの望むケーブルトラス案の計画書と図面を作成した後に、急遽シェル案の構造模型を作製し、GMAが日本に向かう前日に、その模型(写真2)を見せたところ、GMAは様々な検討案をMBCに評価してもらったほうが、建設的であると判断し、その模型を日本へもっていくことに快く賛成してくれた。その一週間後、シェル案が採用されたとの連絡を受けた。私は大きなチャンスを得たことに期待と責任を感じ、構造設計者の設計した建築物も素晴らしいと人々に評価してもらえることを夢見て納得出来るまでやり抜こうと決意した。もはや私個人の責任でなく、努力している構造設計者の一人としての責任に勝手に置き換えた。そうすることによって少しでも構造設計者の能力を人々に理解してもらいたいと考えたからだ。



写真3 構造模型

それ以後、GMAとは、より強い信頼関係と素晴らしいコラボレーションを構築し、設計を進展させることとなった。その設計過程の中で、建築家、構造設計者などの境界は自然と無くなり、建築家と構造設計者がお互いの立場を逆転させながら、純粋に良い建築の創造のためのワークショップを繰り返した。この時の密度の濃い貴重な時間と、様々な可能性に関する検討考察がその後の設計監理に大きく役に立ったことは言うまでもない。

ミュージアムコーンの 構造デザイン

ガラス外装を支える主構造は、直径17.5mmの単層ケーブルネットと厚さ22mm、最大径20×16mの12枚の水平楕円圧縮リングをクランプ金物で接合することによって構成される高さ20mのケーブルネットシェルと、ケーブルからの反力と建物の重量を支える高さ30mの圧縮エレメントであるファネル(エレベーターシャフト)によって構成されている(図1-4、写真3)。地下2階から自立するファネルは柱梁ブレースで構成された鉄骨造であり、楕円形状のエレベーターシャフトは3階レベルを超えた位置まで真直ぐ立ち上がった後、ゴルフのピンのように外側外周に広がり外周のケーブルネットシェルに接合される。鉄骨フレームは曲面GRC

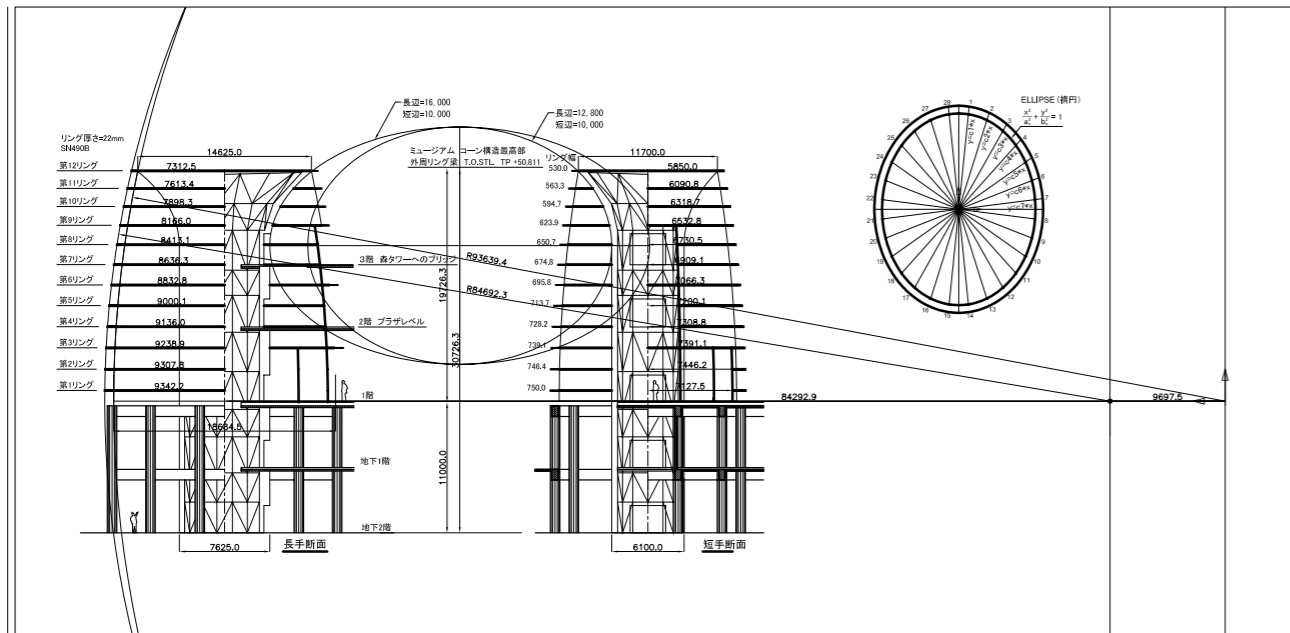


図1 ジオメトリー図

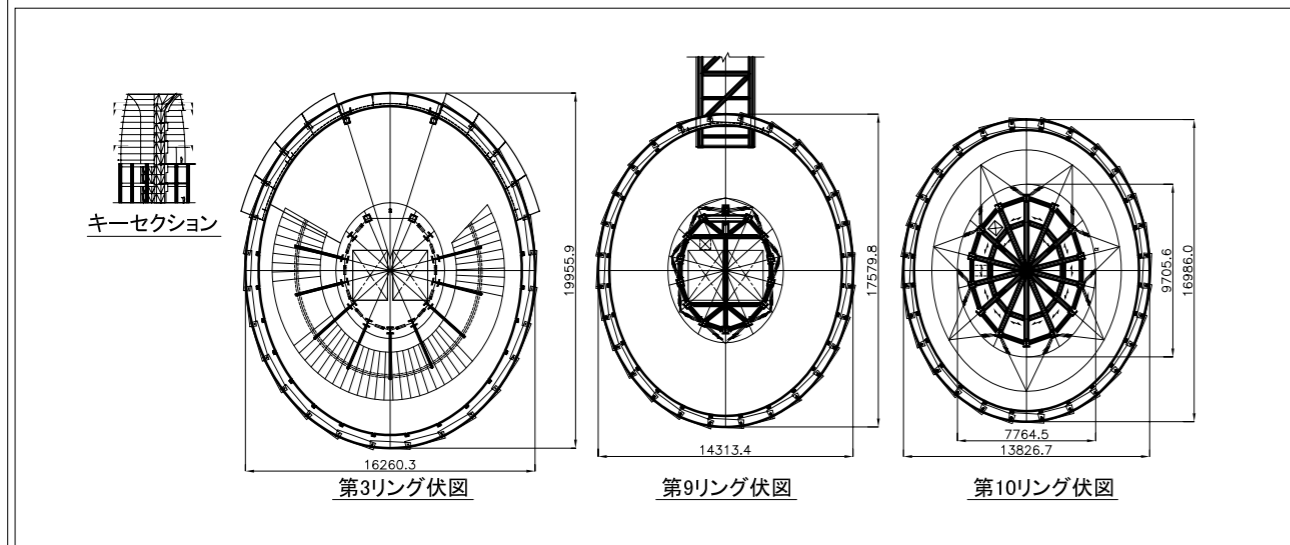


図2 平面図

パネルに覆われ、その目地部分には空調の噴出し口、照明器具が取り付けられている。

ファネルとケーブルネットシェル間には、1～2階、2～3階に上がるための主導線となる螺旋階段がある。階段の主構造は3次元に滑らかに曲げられたキールパイプであり、それらはファネル柱からの片持ち鉄骨プレートによって支持されている。パイプにそれぞれの形状が異なる三角プレート、踏み板、ガイドレールが溶接された手作りの彫刻のような鉄骨階段である(写真4、図5)。

ケーブルネットシェルの形状は建物

頂部に向かってテーパがかかる楕円錐形状であり、断面は外側に凸状であることから、ケーブルがリングとの各接合点を通過するとき内側に屈曲するために、リングの各点を内側方向に水平に引っ張る向心力が作用する。それらは圧縮リングの面内方向軸力となって釣り合うことによりバランスされている。最下部で750mm、最上部で幅500mmの圧縮リングはケーブルとの各接合点で面外方向に座屈補剛されている。

温度変化、風、地震荷重が建物に作用した時に、ケーブルの張力が抜けてリングと建物全体が不安定な現象を起

こさないように初期張力をケーブルに導入した。

ケーブル構造は一般的に変形量が大きくなり、むしろ変形させることによって外力を逃がす設計を行うが、ミュージアムコーンの場合、初期張力が導入されたケーブルネットシェルの効果により建物全体が一つの殻として機能することによって、ケーブルが主構造体であるにもかかわらず、非常に高い剛性を確保している。鉄骨総重量も軽量化できることから合理的な構造システムを実現できた。

構造デザインとして、斜めケーブルを可能な限り細くし、水平リングを浮

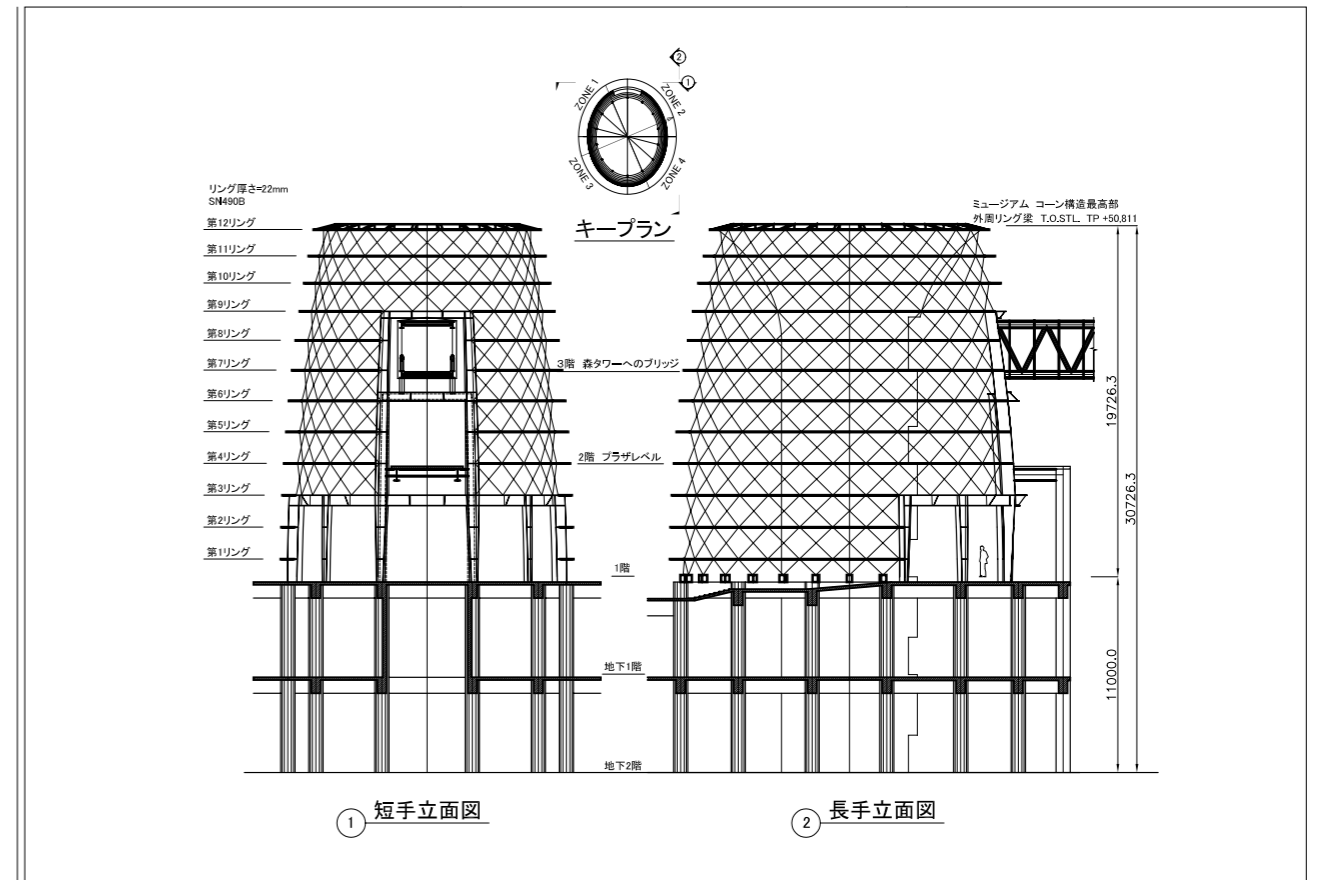


図3 立面図

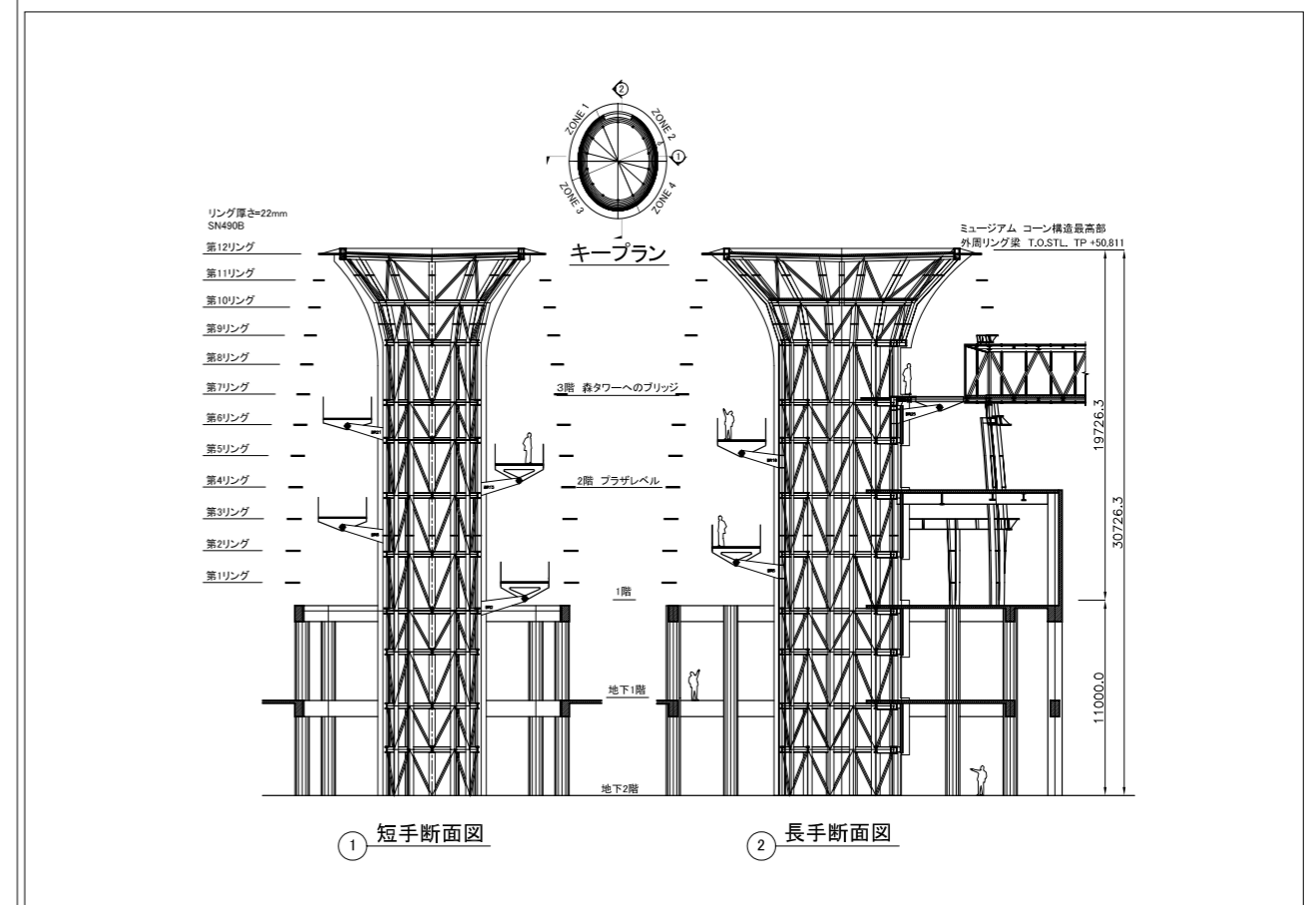


図4 断面図

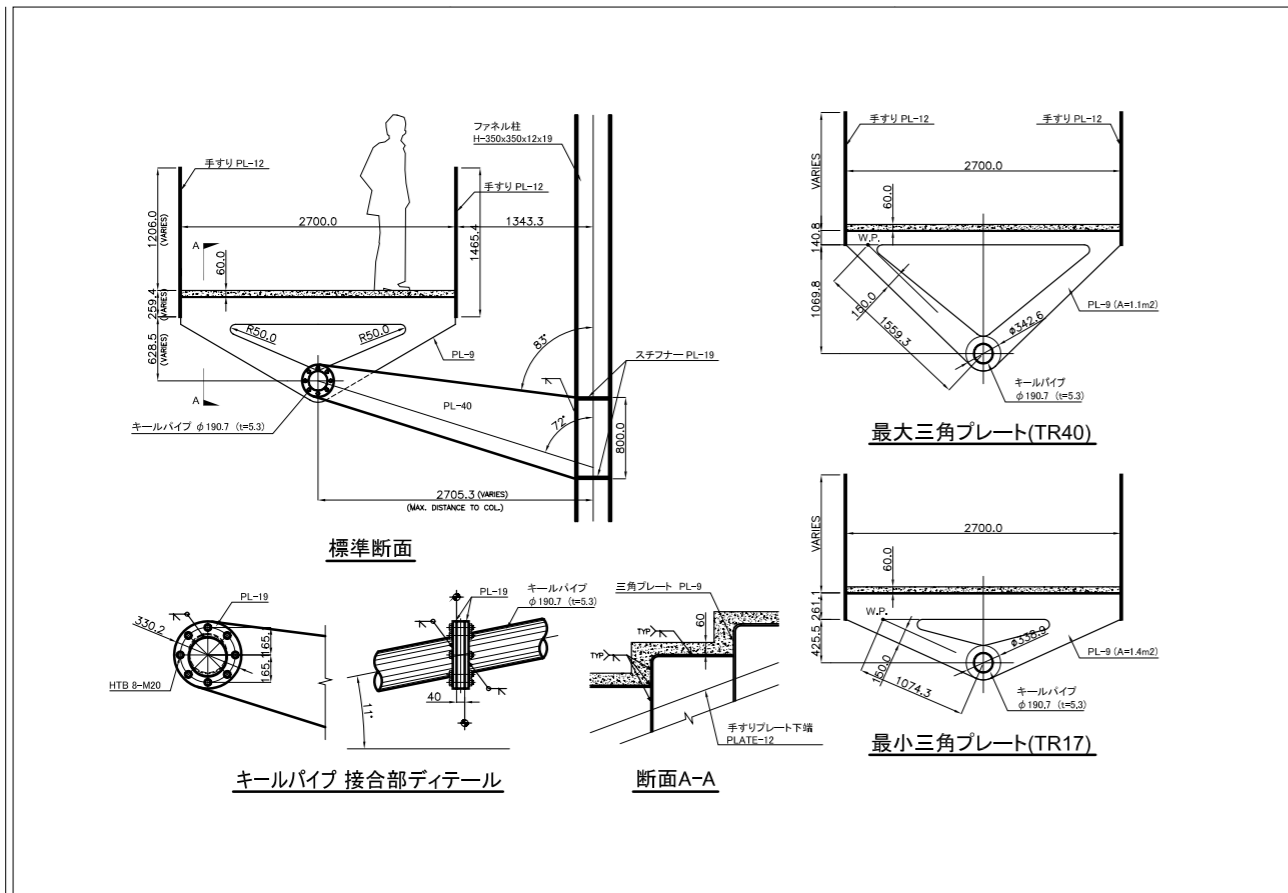


図5 螺旋階段構造図



写真4 螺旋階段を見上げる



写真5 内観 螺旋階段キールパイプと三角プレート



写真6 外観

遊させることの実現を目指した。リングの厚さも可能な限り薄くしたことによって見る角度によって表情が変化する大変ユニークな空間となった(写真5、6)。

設計当初、リングプレートの代わりにトラスを検討していたが、トラスにしてしまうとケーブルとトラスの組み合わせによって、線材から構成される3次元トラスの印象が強くなってしまい空間に馴染まないと感じた。更にトラスの接合部は補強プレートや溶接などによって、構造的なイメージが強くなってしまふ。それらの問題を一番シンプルに解決するのが鉄板から切り出した水平プレートであった。

各要素の形状と素材の特性を最大限まで効果的に発揮することによって、構成している各要素の力強さ、軽快さが強調され、それらが接合されることによって機能する合理的な構造の実現を目指した。何か目新しい素材や断面形状を特別に採用するのではなく、引張に強いが圧縮の場合座屈を考慮しなくてはいけない鉄の性質と能力の魅力

が伝わるような構造の実現を試みた。

ファサードの設計

リング外周の強化合わせガラスは、リングの上に乗っている表現ではなく、金物をリングから持ち出し、ガラスを点支持することによって、リングから切り離し、浮遊しているイメージを目指した。ガラス上端は全てリングの板幅内に納まり、ガラス下端は全てリン

グのエッジより外に飛び出す納まりとすることで、外装ガラスは断面上でジグザグ形状となりファサードに変化をつけている。リングとガラスの両下端のレベルを揃えることによって、外部から見上げたときにリングのエッジの連続性が妨げられないように設計監理を行った(図6)。

リチャードは半透明のフロストガラスをイメージしていたが、私はリング

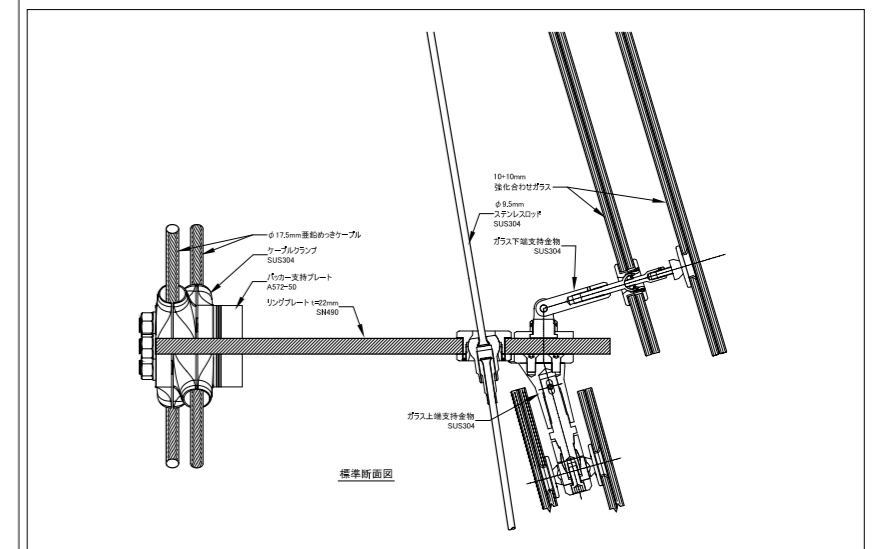


図6 リングの断面詳細図



写真7 昼全景（毛利庭園から）



写真8 夜全景（毛利庭園から）

出来る限り強調させたかったので、可能な限り透明なガラスをイメージしていた。様々な検討を重ねた結果、その中間となる25%の白色ドット柄セラミックを焼き付けたガラスを選択したことによって、昼と夜で全く表情を変化させる大変ユニークな外装となった（写真7、8）。日中は外に対して内の照度が暗くなるために、ガラスとセラブリが強調され、あたかもグリーンガラスシェルに見えるのに対して、夜は内側照明によって、内外の照度の具合が逆転するために、ガラスの透明性と、照明されたリングが強調される。

外装はレインスクリーンであり、ガラスが重なり合うことによって雨水の浸入を防いでいる。各リング間でのガラスは全て同形状であり、楕円錐状の影響により、各ガラスの傾き、オーバーラップ、色、モアレの程度が変わることによって外装に変化をもたらしている。

スケッチ、解析、図面、模型製作、評価の繰り返し作業

設計活動の中心は、スケッチ、解析、

図面、模型製作、打ち合わせの繰り返しであった。

私が当時所属していたDMPを含む海外の構造設計事務所は模型製作することの意味の理解が大変低い。構造設計者が模型を作ると、それは建築家の業務であるので、あなたは設計料を無駄遣いしていると嫌味を言われ続けた。設計料以上の時間を使って仕事をしていても、また嫌味を言われるので、私のチームには残業代はボランティアとして報告しないでくれるかと頼んだのを覚えている。私のチームは直ぐに了解し、それ以後彼らのタイムシートには最小時間のみ記載されているが、実際は倍の労働時間の日々が続いた。

設計には答えがなく、可能性は無限大で、時間がある限りその可能性を模索することが出来るので、楽しい反面、大変辛い。それはまさに興味があるか、無いかによって左右されることで、私は特に私のチームの一人一人が興味を失わないように、気を遣った。

解析をまとめるのは大変困難であった。風荷重は風洞実験の結果に基づいて決定したが、背後にある森タワーの

影響で、六本木ヒルズ敷地内で最も風荷重の強い風の通り道にミュージアムコーンと森タワーと接合するブリッジが位置していることが判明した。

外装を可能な限り軽量に設計した結果、地震ではなく風が支配的な設計荷重となった。風荷重は風の強弱の分布を可能な限り解析に反映させ、ケーブルの非線形を考慮した非線形解析を繰り返し行い、ケーブルとリングの最適断面の検討を繰り返し行った。

2次元の1方向のみにスパンする一般的な構造に関しては、部分を取り出し個別に検討を行えば直ぐに最適断面を見つけることが出来るが、ミュージアムコーンはシェルであることから、力が2方向に流れるために、それぞれの荷重方向、タイプに対して全ての構造要素を検討する必要があった。ケーブルとリングの剛性のバランスを模索しながら、初期導入張力値の決定を行い、外力に対して十分安全な断面サイズを決定する必要があった。ケーブルもリングも連続していることから、ある一部分がある荷重に対して満足していない場合は、全てのサイズを変更し、

再度解析を一からやり直す必要があるため、バランスのとれた最適断面を見つけるまで、根気強く、解を収束させていった。

構成している各要素を丁寧に設計し、必要最低限の断面サイズにするプロセスは結果的に設計者が荷重と構造体を深く理解することにつながり、それらの断面サイズで構成された構造は、力の流れや力強さ、繊細さが伝わってくる合理的でシンプルな大変美しいものであると常に考えている。私達はそれを信じて納得するまで解析を継続した。

ケーブルクランプ金物の設計と張力導入方法

ミュージアムコーンのように鉄骨が全て露出してしまふ場合、ディテールの見せ方によって建物全体の印象を決定してしまうことがあることを自分の失敗や数々のプロジェクトを見てきた。斜め材にロッドではなくケーブルを採用したのは、このディテールの見せ方のためである。

全部で約250のリングと斜め材との接合点において、建物形状が楕円錐状であることから、各斜め材はリングを通過するときに様々な角度に折り曲げられ次のリングに向かう必要がある。ロッドはケーブルのように自由に曲げることは出来ないため、各リング間で切断する必要があり、ロッドの端部には3次元の角度変化に対応できるボールベアリングなどの機能が必要であり、更に建設誤差に対応するために、ターンバックルなどの長さ調整機構を設ける必要がある。これらの条件を満たす接合金物を設計すると、どんなに頑張っても美しい金物の形状を設計しても、結果は全体とのバランスが非常に悪い巨大な鉄の塊になってしまう。ケーブルは3次元方向に自由に曲げることが出来るので、楕円錐状のジオメトリにも対応ができ、ケーブルの長さ調整は建物の上下端部のみで行えばよいので、結果的に大変コンパクトな接合金物を実現することができた（写真9、

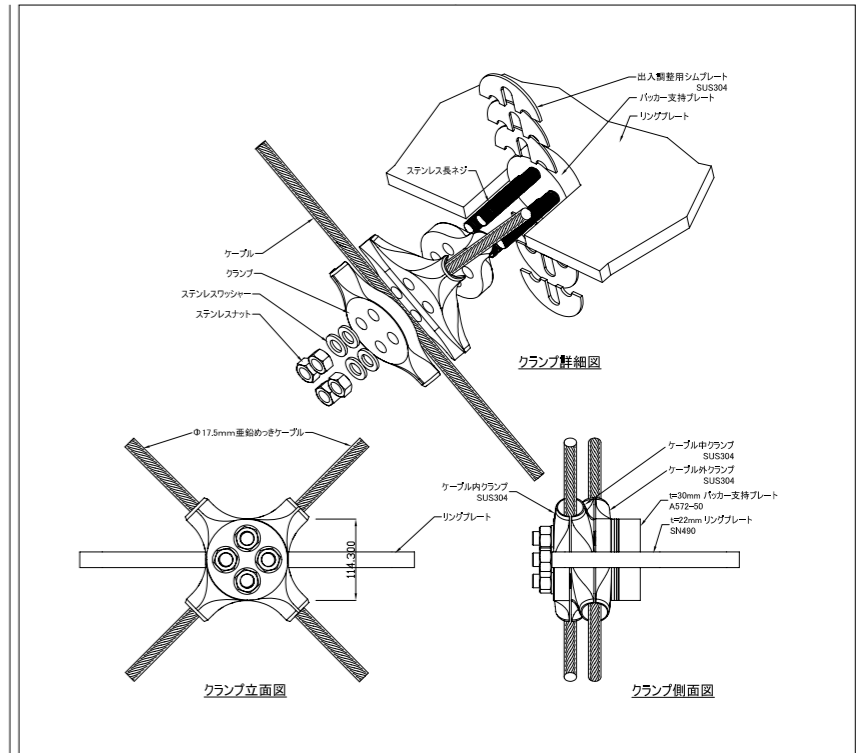


図7 クランプ詳細図

図7)。

ケーブルとロッドの比較検討には大変多くの時間を費やした。ディテールに固執するばかりで、全体のバランスが悪くなると折角のユニークな構造体も台無しになってしまう。ミュージアムコーンの場合、リングの連続性を損なわないケーブルとリングの最小接合金物を設計することが答えであることを、様々な検討を通して理解していた。

ケーブルクランプ金物の設計に関連するもう一つの重要な検討項目としてケーブルネットの初期張力導入を含むケーブルネットの初期張力導入を含むケーブルネットシェルが安定することはありえない。しかし従来通りケーブルを端部で引っ張る方法では、ケーブルが外周に巻きついているために、各リング間で均等に張力を導入することは不可能であった。

ミュージアムコーンは特殊な構造体であることから、設計者が設計段階から、どのような方法で行うのか提案しないと、施工者に施工不可能とねられる可能性があること危惧し、施



写真9 クランプ金物分解写真

工計画も提案した。

最初にケーブルを建物上下端で固定し、ケーブルを短く張る。あらかじめリングにノッチを切り、その部分に溶接したバックプレートから長ネジを出し、そこにケーブルとクランプをセットし、クランプを締め付けていくと、クランプがリングに引き寄せられて張力が導入される仕組みを提案した。

その妥当性は実大の施工試験で確認後、同方法で施工が行われた。

ケーブル端部のディテール

ケーブル端部のディテールに関しても楕円錐状の影響でそれぞれの位置で角度変化があり、それに対応ができ、なおかつケーブルのサグを取り除くた

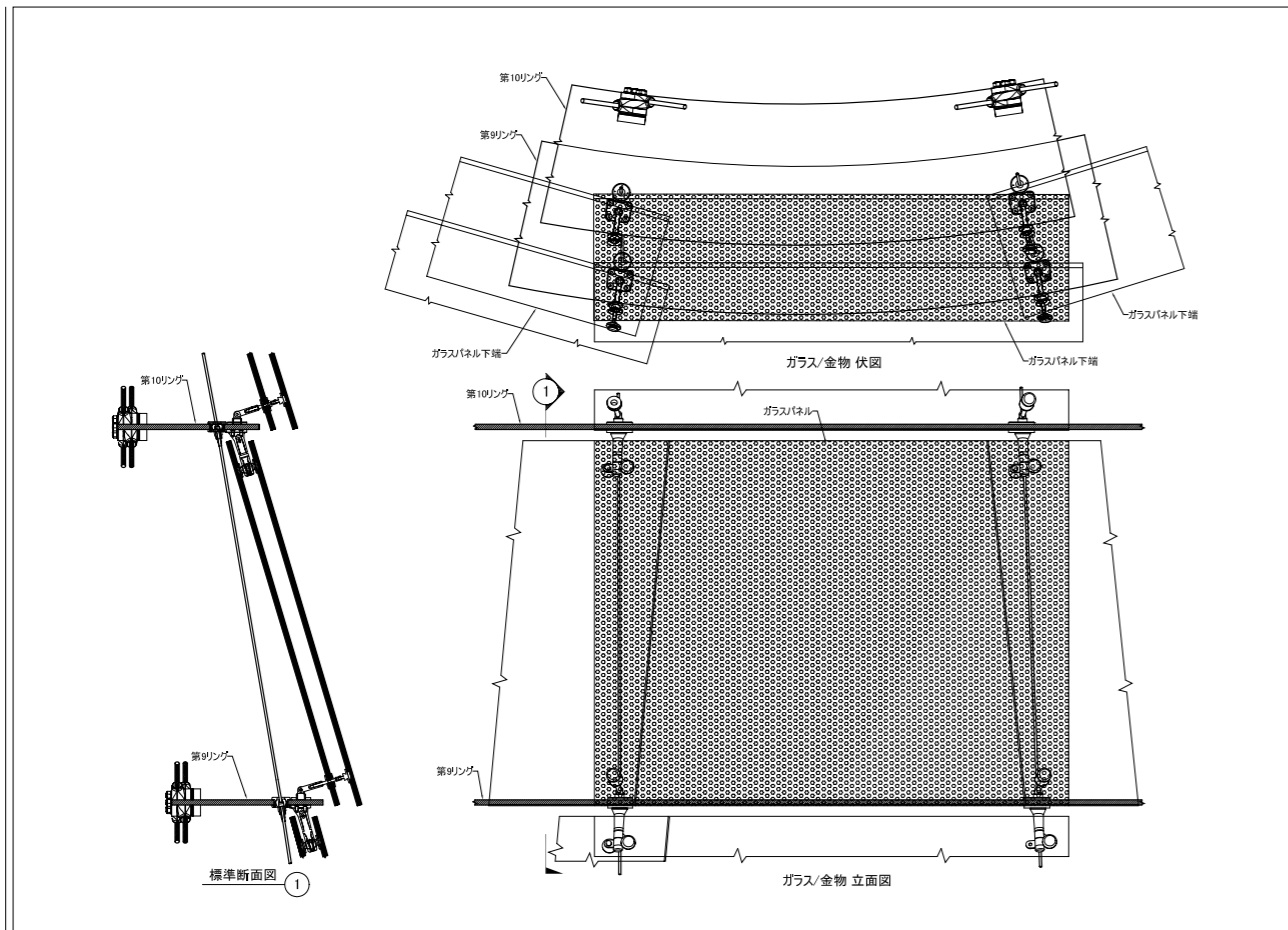


図11 一般部ガラス/金物配置図

設計監理を終了して

一般的に透明建築と言えば、適材適所に必要最低限の構造骨組が配置され、力の流れが明快な構造フレームに支持された外装をイメージするが、それらの骨組は一般的に外装のみを支持しており、主構造として機能するのは少ないと思う。ミュージアムコーンの設計においては、要求された性能を満足する外装材と建物本体との係わり合いを見つめなおし、外装材を支持しているケーブルネットシェルが建物全体の剛性に寄与し、一体として機能することによって耐震、耐風性能を向上させることで、より洗練された合理的な構造体を実現した。

コンピューターの進歩によって、3次元曲線や複雑なジオメトリの設計が可能となり、構造解析能力の向上、法規の柔軟性によって、柱梁、トラスなどに縛られることの無い自由な構造システムと造形の可能性を今後も探求

していきたいと思う。

軽量鉄骨フレームと機械的なディテールの設計に非常に興味があるが、これからの透明建築に代表される外装設計は、構造色の個性が強い要素を排除し、それらの要素が意匠表現の一部となる設計へと移行しているように感じている。ミュージアムコーンの設計に関しては、ディテールを脇役とし、主役であるジグザグのガラス、2次元楕円の鉄骨リング、3次元曲線のファネルコンクリートのそれぞれが素材と面の連続性を強調することで、独特な空間を実現できたと思う。

最後に

アメリカで主に活動したにもかかわらず、日本での物件の設計監理に成功できたのは、会社という枠を超えて、私たちの考えに共感してくれる個人との信頼関係を築いたことが最も重要であった。

最後まで共に設計をまとめ、サポートしていただいた森ビル株式会社の大森様、窪田様、田中様、竹下様、石塚様、土橋様、氣谷様、入江三宅設計事務所の渡辺様、兼藤様、橋本様、佐藤様、GMAのリチャード・グラックマン、サム・ブラウン、照明デザイナーの豊久様、そして、品質監理を行ってくれた構造計画研究所の西尾様、戸塚様、徹底した現場施工を行ってくれた鹿島大林JVの福留所長、菊田副所長、永野工事長、森岡工事長、必要不可欠であった旭硝子ビル建材エンジニアリング株式会社の伊勢谷様、舟岡様、和久井様、栗木様、鉄骨製作の東亜鉄工、ケーブル、金物製作のアメリカ、トライピラミッド社、そして、私のパートナーである藤川由美の努力があって実現可能となりました。この場を借りて、関係者全ての方へ深くお礼を申し上げます。ありがとうございます。



仁藤 喜徳 (にとう よしのり)
1969年8月4日、東京生まれ。1995年、東京電機大学大学院建築学科修了後、構造設計集団<SDG>。98年にデューハースト・マクファーレン・アンド・パートナーズ (米国)、2002年9月に藤川由美氏と engineers network を設立。主な構造設計作品に、サムソン生命保険ビル (韓国)、フィラデルフィアパフォーマンスアートセンター (米国)、プリンストン大学遺伝子工学研究施設 (米国)、森美術館ミュージアムコーン・東京シティビュー。森美術館ミュージアムコーンの構造設計で2003年度JSCA (日本建築構造技術者協会) 賞新人賞。

ミュージアムコーン建築概要
 ■森美術館ミュージアムコーン
 ■建築・延べ面積=300㎡・761.46㎡
 ■階数・高さ=地下2階地上3階・30m
 ■寸法=(第1リング)長辺20m/短辺16m、(第12リング)15.7m/12.7m
 ■設計者
 (建築) 森ビル株式会社、Richard Gluckman + GMA、入江三宅設計事務所、
 (構造) 仁藤喜徳、藤川由美 + DMP
 (照明) 豊久将三 + キルトプランニングオフィス
 ■施工者
 大林組・鹿島JV
 旭硝子ビル建材エンジニアリング (ケーブル・ガラス工事)
 東亜鉄工建設 (鉄骨工事)
 TriPyramid Structures, Inc. (金物製造)

写真提供：上田 宏、(株)新建築社、仁藤喜徳、藤川由美

