

建築の絵本

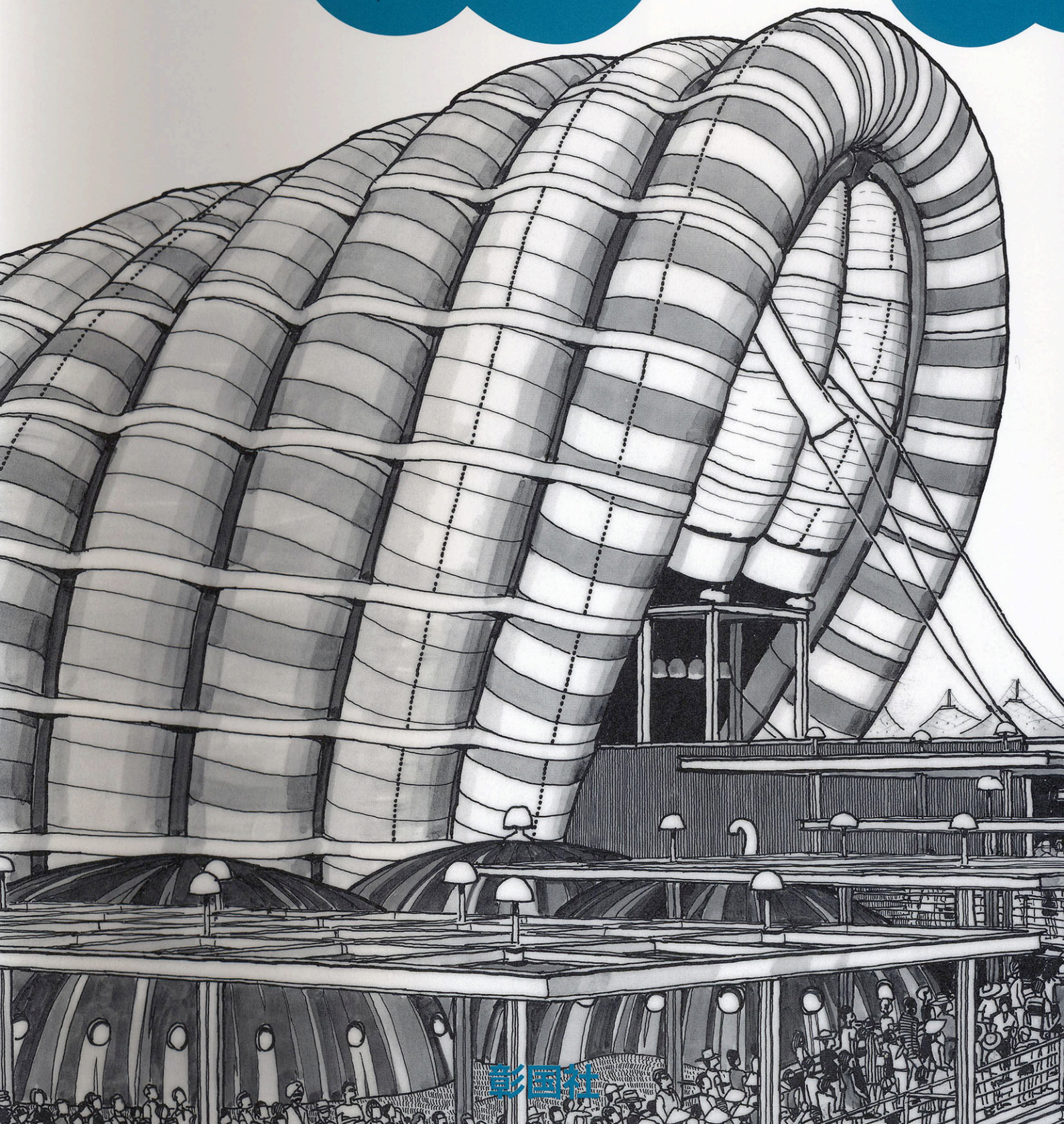
建築構造のしくみ

第二版

力の流れとかたち

川口 衛・阿部 優

松谷宥彦・川崎一雄



建築の絵本

建築構造のしくみ

第二版

力の流れとかたち

川口 衛・阿部 優
松谷 宥彦・川崎 一雄

彰国社

まえがき

この本は、構造力学、構造設計の立場から建築のかたちについて述べたものである。

構造の技術は建築の世界で次の二つの大切な役割を果たしている。その一つは安全性の確保である。建物が地震や台風的作用に耐え、果たすべき機能を十分に発揮するためには、構造の知識や技術が不可欠である。

構造が果たしているもう一つの重要な役割は、建築の美しさに対する貢献である。

建物は彫刻などとは異なり、スケールの大きな実体である。したがって彫刻のように作者の望むかたちをそのまま表現することは一般に不可能で、その中を流れる力の大きさや原理に適合した造形だけが実現可能である。逆に、構造の中を流れる力の原理を直接、間接に表現することによって、建築に固有の、美しい造形を得ることが可能になる場合が少なくない。

このように、建築におけるちかるとかたちは、古くから相互に深いかかわりを持ちながら発展してきている。本書ではこのあたりの関係を、わかりやすく書いてみたいと思った。

本書の企画・構成と文章は川口と阿部が、描画は松谷と川崎が担当した。

中学生、高校生にも楽しく読め、かつ、建築、構造の専門家にとっても、ある程度読みごたえのあるものとなるよう努力したつもりである。

執筆に当たっては多くの資料を参考にしたが、類書の傾向に流されることは避け、できるだけ筆者ら独自の思想と知見によって筋の通ったものとなるよう留意した。また従来取り上げられることの少なかった日本の伝統建築についても積極的に考察を行い、われわれの祖先たちの技術や思想について、理解を深めることができるよう試みた。

本書ができるだけ多くの人に読まれ、建築と構造の理解に役立ってくれることを祈っている。

1989年12月

第二版の出版に当たって

初版以来、20年を超える歳月が流れ、この間に、世の中にも、建築にも多くの変化が見られた。有名な建築が姿を消したり、無名だった場所に新しい特長を持つ構造物が姿を現わしたり、また、構造設計の考え方や手法にも、変化が感じられた。

このような変化に対応するために、本書も今回、はじめての改訂を行った。

改訂の内容は、種々の情報を、現状にふさわしいようにアップデートしたほか、この20年間に長足の進歩を見せた、耐震、免震、制震などの考え方を紹介したことなどである。改訂の作業は、初版とまったく同じメンバーが、同じ分担で行った。

今回の改訂を含め、本書が、初心者にもわかりやすく、建築のプロにとっても読みごたえのあるものであってほしいというわれわれの願望は、変わっていない。読者のご叱正を期待している。

2014年4月

川口 衛

1 梁と柱 7

- 8 梁の理論と応用
- 10 梁の中の力
- 11 梁の材料とかたち
- 12 梁の種類
- 13 梁の応用—橋梁—
- 14 日本建築における梁の原理
- 16 寺院建築の屋根構造
- 17 組物
- 18 野小屋と桔木
- 19 法隆寺の軒と組物
- 20 梁と柱の構造
- 21 柱の役割とかたち
- 22 装飾としての梁、柱
- 23 イツワリの梁、柱
- 24 方杖で支える軒



2 トラス 25

- 26 迫り持ちトラスの原理と応用
- 28 迫り持ちトラスの発想
- 29 迫り持ちトラスの例
- 30 迫り持ちトラスの種類と力の流れ
- 31 梁トラスの種類と力の流れ
- 32 梁トラスの原理
- 33 混沌から分離へ—梁トラスの出現—
- 34 梁トラスの発展
- 36 現代のトラス構造
- 38 フィーレンデール・トラス



3 ラーメン構造 39

- 40 木を使った本格的ラーメン構造
- 42 ラーメン構造の原理
- 43 伝統的木構造におけるラーメン効果
- 44 近代建築をもたらしたラーメン構造
- 45 ラーメン構造のはたらき
- 46 現代のラーメン構造



4 アーチ、ヴォールト 47

- 48 組積アーチの出現
- 50 組積アーチの原理と応用
- 52 ヴォールトの展開
- 54 交差ヴォールト
- 55 リブの造形
- 56 日本のアーチ構造
- 58 ヨーロッパの木造アーチ
- 59 鋳鉄のアーチ
- 60 練鉄のアーチ
- 62 鋼鉄のアーチ
- 64 アーチの造形—建築—
- 66 アーチの造形—大スパン建築—
- 67 アーチの造形—橋梁—



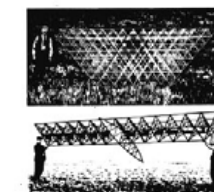
5 ドーム、シェル 69

- 70 組積ドームの出現と発展
- 72 大ドームの規範、パンテオン
- 73 ペンデンティブとスティンチ
- 74 ルネサンスの先駆け、フィレンツェ大聖堂
- 75 サン・ピエトロ大聖堂、その改修と科学的手法のはじまり
- 76 現代のドーム、シェル構造
- 78 シェルのかたちと力の流れ
- 80 シェル構造の古典的試み
- 82 より自由なかたちを求めて
- 84 イスラーのシェル
- 85 シェルの形態とコンピュータ
- 86 折板構造の原理と実例
- 88 折板構造の造形



6 スペースフレーム 89

- 90 スペースフレームとは
- 92 骨組パターンの構成
- 94 ジオデシックドーム
- 96 スペースフレームのジョイント
- 97 古典的スペースフレーム
- 98 スペースフレームのパターンとデザイン



梁と柱

あるスパンを架け渡そうとするとき、最も単純な方法は、太い棒のようなものを横にして、二つの支点の間に置くことである。われわれの祖先はこのような方法をおそらく何万年も昔から知っていたことであろう。それは彼らの原始生活の中で、たとえば風倒木が偶然に丸木橋として役に立ったことなどがきっかけとなって、小川や谷を渡る手段として用いられるようになったのであろう。

このように棒状の部材を横（水平）にして支点間に架け渡して使うとき、この部材は梁（または桁）と呼ばれる。梁は、現代の建築や橋の構造の中で、最も多く用いられている部材の一つである。

梁をある高さに支えるためには柱が必要である。柱は、棒状の部材を縦（鉛直）に使って荷重を支持する方法である。柱の歴史も梁と同じように古く、また現代の構造の中で最も一般的な部材である。



1 風倒木の丸木橋

7 ケーブル構造 99

- 100 ケーブル構造の出現と発展
- 102 ケーブル構造の原理—橋—
- 104 近代の吊り橋
- 105 斜張橋
- 106 吊り屋根構造の出現と発展
- 108 吊り屋根構造—いろいろなしくみ—
- 110 吊り屋根構造の展開
- 112 アーチとケーブルの組合せ—サスペン・アーチ構造—
- 114 サスペン・アーチのロマン



8 膜構造 115

- 116 膜構造へのチャレンジ
- 118 空気膜構造のメカニズム
- 120 空気膜構造の展開
- 122 空気を用いない膜構造



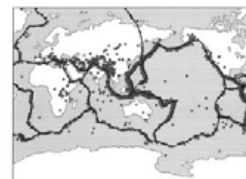
9 タワーと超高層建築 123

- 124 日本の塔
- 126 高さを競うタワー
- 128 宗教とタワー
- 128 電波塔
- 130 タワー建築の力とかたち



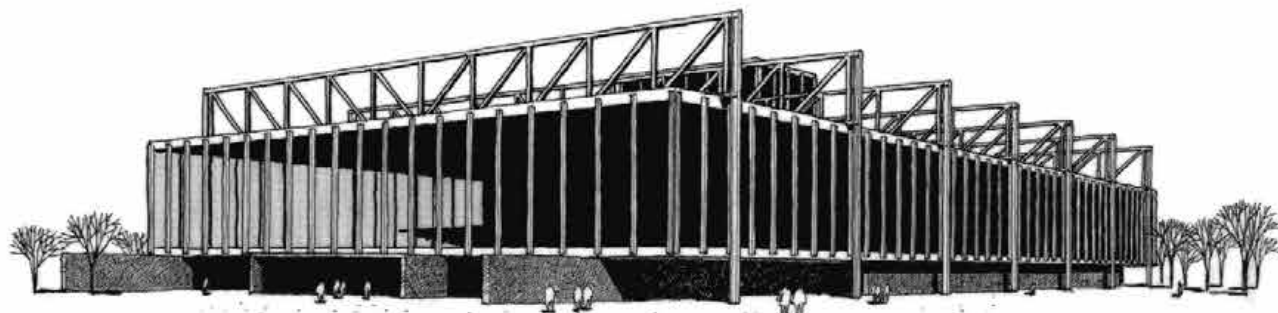
10 耐震・免震・制震 131

- 132 耐震構造
- 134 免震構造
- 136 制震（振）システム

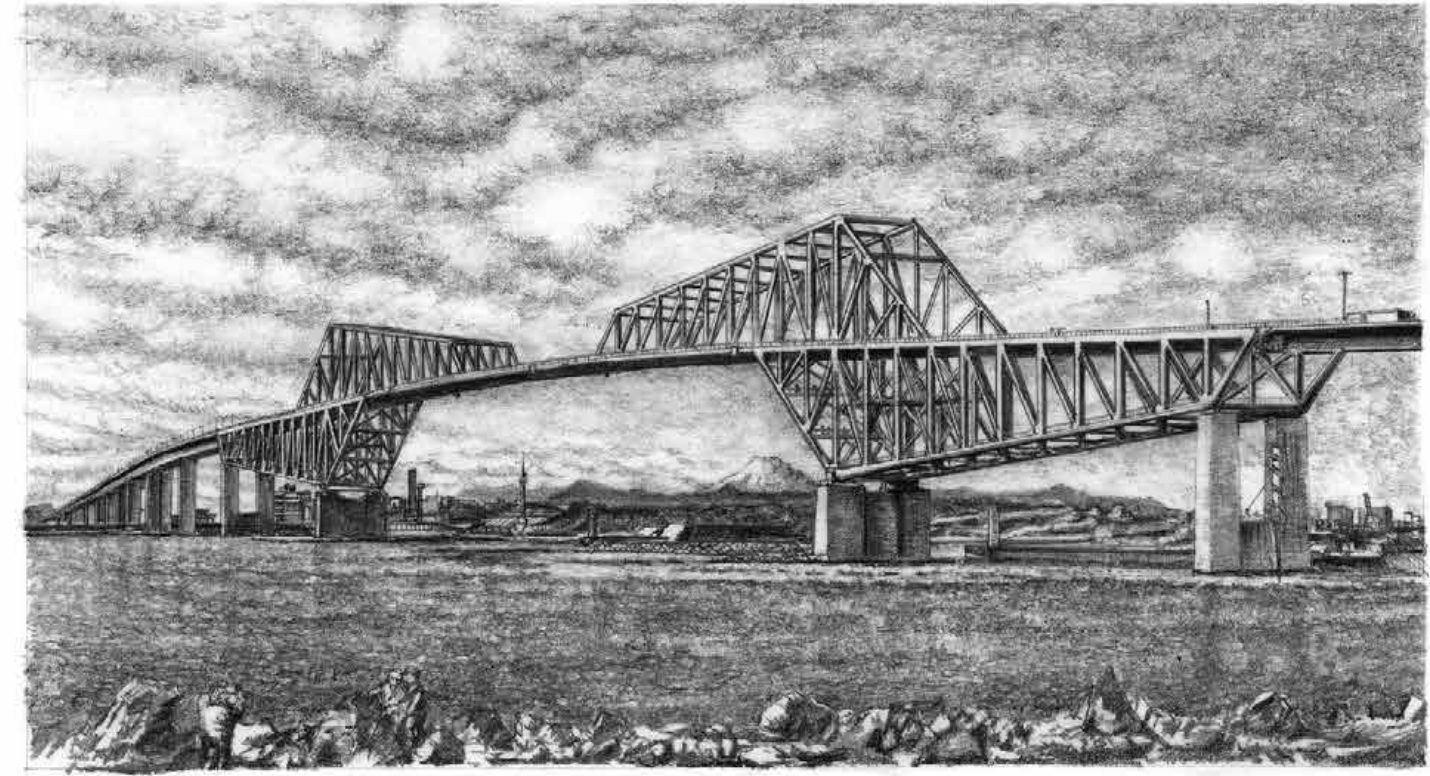


参考文献 138

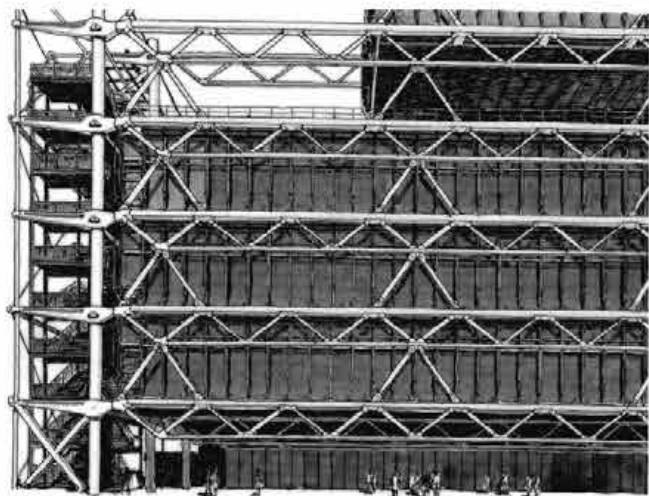
索引 140



10(a) マンハイムの国立劇場案 (1953年, ミース・ファン・デル・ローエ)



10(e) 東京ゲートブリッジ (2012年, 東京)



10(b) ボンポドゥセンター (1977年, パリ)



10(c) IBMビル (1952年, ピッツバーグ)



10(d) 30セント・メアリー・アクス (2003年, ロンドン)



10(f) 東海道山陽新幹線富士川鉄橋 (2012年, 東京)

現代のトラス構造

19世紀の中葉にアメリカを中心に発明された梁トラスは、ヨーロッパにおけるトラス理論のめざましい発展を促した。トラス理論の下では迫り持ちトラスも梁トラスも区別はなく、まったく同じ条件で解析することができたから、迫り持ちトラスの組み方にも、直感と経験だけの時代には考えられなかった数多くのパターンが出現するようになった(30, 31ページ)。また、鉄の普及と発展によって、木造トラスでは考えられなかったような自由度も大幅に増加した。鉄製トラスの部材の接合は、当初、アメリカでは理論通りのピン接

合、ヨーロッパではリベットを用いた剛接合と
いうように、好みが多岐にわたった時期があったが、
次第にリベット接合が主流になった。

第二次世界大戦後は溶接技術が進歩し、部
材の力を溶接によって100%伝達することが
可能になり、トラスの形が非常にスマートに
なった。

鉄骨構造をそのまま建物のデザインに用い
る傾向は、19世紀には多く見られたが、20世
紀に入ると、構造は仕上げ材の裏に隠される
ことが多くなった。第二次世界大戦後、鉄骨
構造をデザインのモチーフとして積極的に表
現したのは、建築家ミース・ファン・デル・
ローエである。図10(a)は、ミースによるド

イツのマンハイムの国立劇場設計案で、スパ
ン80mの大屋根を支える単純なプラットト
ラスが、建物全体のデザインを決定づけている。
図10(b)は、建築家レンゾ・ピアノらによ
ってパリにつくられたボンポドゥセンターで
ある。各階の床を支えるワーレントラスと、建
物側面のブレース(筋違)群が、構造的モチ
ーフとして表現されている。

トラス構造を、より積極的にファサードの
デザインに使用した初期の例としては、アメ
リカのピッツバーグのIBMビル(後にテナ
ント会社の推移に伴い、鉄鋼労働者連盟ビル等
と変名、構造:L.ロバートソン)がある(図10
(c))。この建物は、鉛直荷重を内部の鉄筋コ

ンクリート造のセントラル・コアと、外皮を
構成しているトラス構面とで支持し、水平力
は、主にこのトラス構面に負担している。ト
ラス構面は脚部で2点のヒンジに集約されて、
明快な力の流れを印象づけている。このト
ラスは、実際には三角形ユニットで構成され
ているが、意匠上、水平部材の印象を消して、
ダイヤモンド形ユニットの構面に見えるよう
にデザインされており、この手法は「ダイヤ
グリッド」システムと呼ばれている。ダイヤ
グリッド・システムは、ノーマン・フォスター
による、ロンドンの30セント・メアリー・
アクス(図10(d))にも使われている。

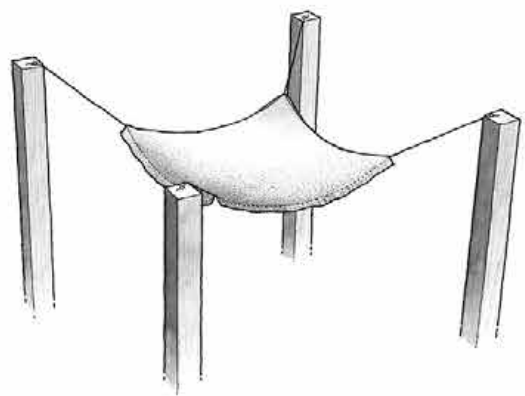
トラス構造による橋梁の例としては、新幹

線の一連の鉄橋を挙げることができる。

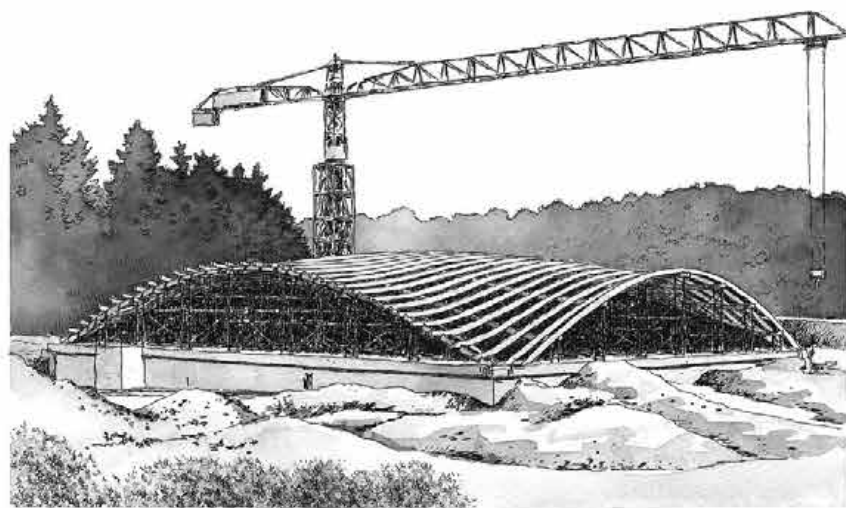
図10(f)は、ワーレントラスを用いた東海
道山陽新幹線の富士川鉄橋の例である。ト
ラス節点は全溶接でつくられており、上述の
ように、20世紀前半のトラス構造に比べて、
すっきりとした印象を与えている。

図10(e)に示す東京ゲートブリッジは東京
港に架かるトラス道路橋で、中央スパンが
440m、両サイドスパンが160m、全体的な構
造概念はフォース鉄道橋(34, 35ページ)の
カンティレバー・ブリッジに近い。トラスの全
体形状は、羽田空港に近いことによる高さ制
限と、中央部を航行する船舶のための航路確
保の条件から、独特の形態となっている。中

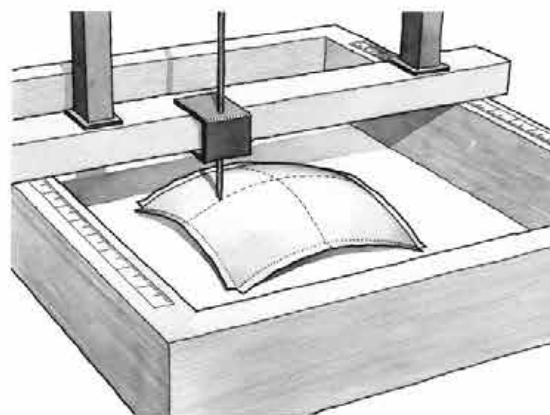
央スパンでは下路橋、サイドスパンでは上路
橋の形になるが、橋全体を連続梁として考
えた場合、いずれのスパンでも道路面が圧縮側
になるので、道路をボックス・ガーターにし
て、トラス弦材と一体化している。中央スパン
のトラス上弦材は引張り側となるので座屈の
心配がなく、したがって両側のトラス頂部を
相互につなぐ部材は、通常のトラス橋に比
べて軽微となり、橋の利用者から見て開放感
がある。中央スパンでトラスのカンティレバー
に支えられる長さ120mの中央部材はボク
ス・ガーターで、トラス下弦をなすボクス
・ガーターと連続した構造になっており、全
体として明快な形態をつくり出している。



14(a) イスラーの手法1：石膏模型作成



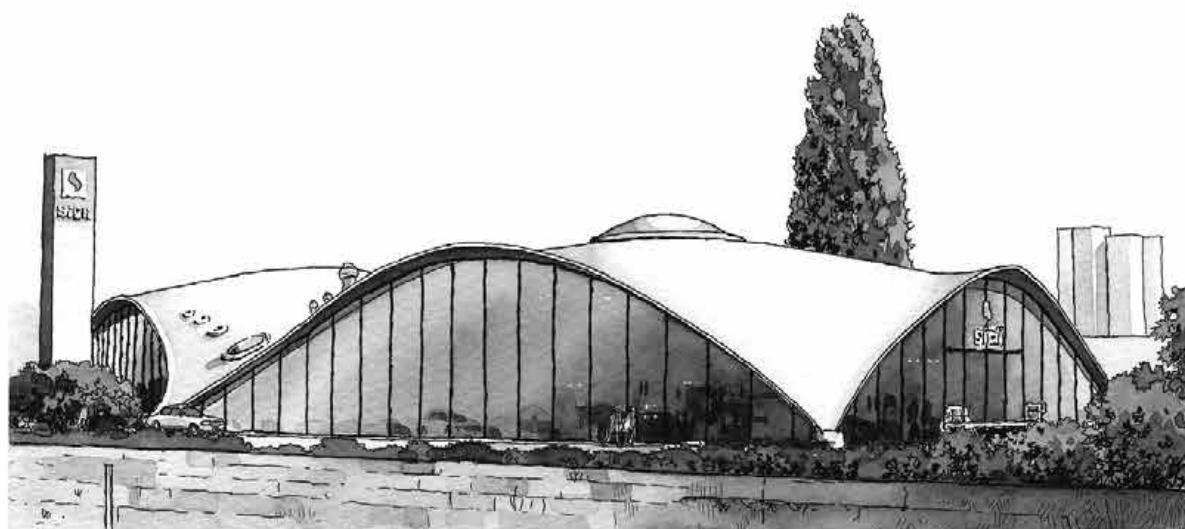
14(c) イスラーの手法3：正確な型枠制作



14(b) イスラーの手法2：正確な形状計測



15(a) ハイムベルクの屋内プール (1978年, スイス)



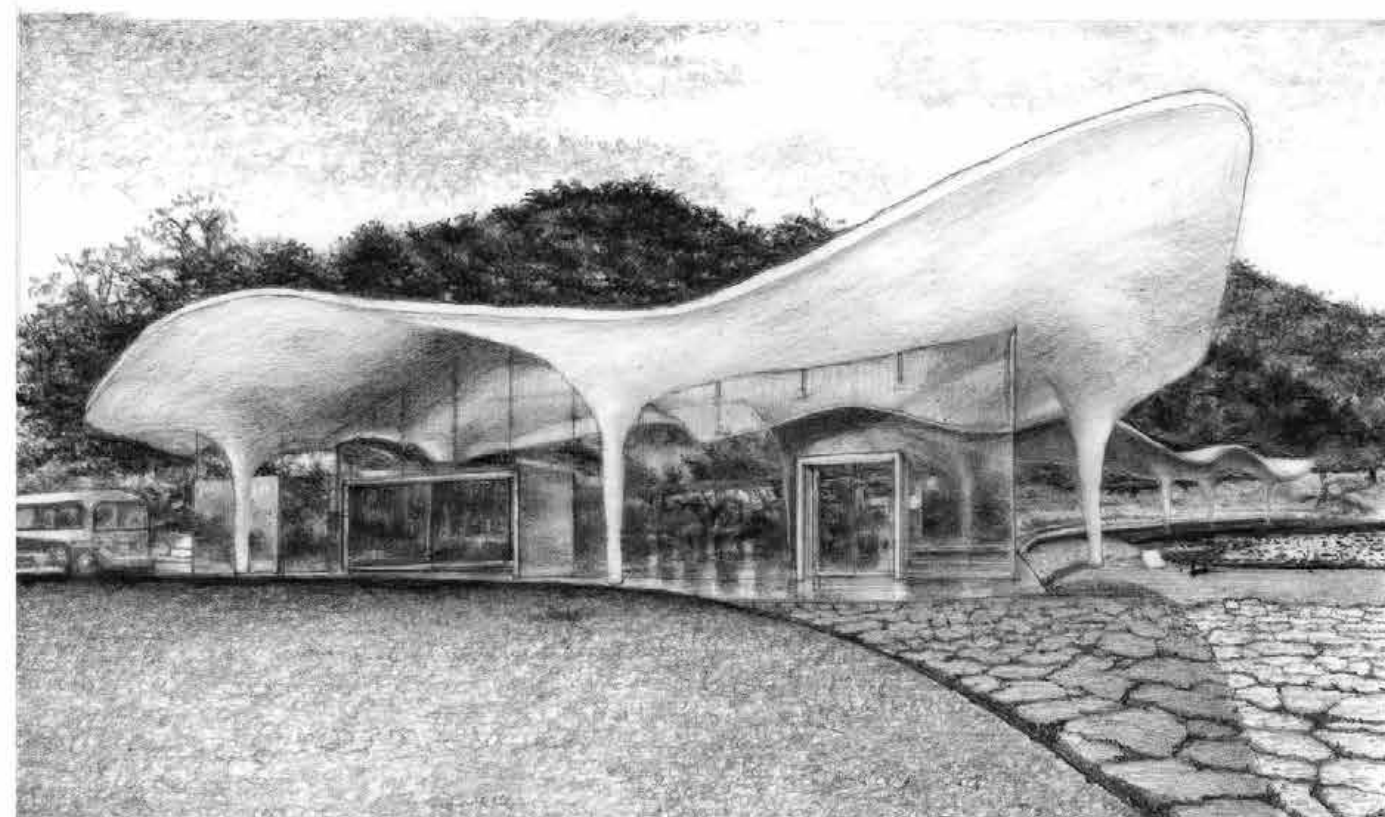
15(b) シクリ社社屋 (1969年, スイス)

イスラーのシェル

ハインツ・イスラーは、20世紀後半に活躍した、スイスのすぐれた構造エンジニアである。イスラーは、ガウディが用いた「逆さ吊りアーチ」の手法をシェル構造に応用して、シェルの理想的な形態を求めようとした。すなわち、ガーゼ等の「膜」に石膏を塗り込ませて、

何点かで支持すると、膜はその重みで垂れ下がる(図14(a))。この時、どの点をとっても膜には引張応力だけが働いている。石膏が硬化した段階で模型を上下逆さにして、模型の形状を精密に計測し(図14(b))、そのかたちを忠実に拡大して作製した型枠(図14(c))にコンクリートを打設すると、いたるところ圧縮応力のシェルが得られる。これがイスラーの「逆さ吊りメンブレン・シェル」の手法であ

る。こうして得られたシェルには、原則として引張応力は生じないから、クラックも発生しない。イスラーはさらに、非常に固練りのコンクリートを打設することで、防水仕上げの不要なシェルを数多く実現している。図15(a)はイスラー・シェルの代表例、ハイムベルクの屋内プール、図15(b)はやや複雑な曲面屋根をもつ、シクリ社(消火器販売会社)の社屋である。



16 各務原市営瞑想の森斎場 (2006年, 岐阜)



17 豊島美術館 (2010年, 香川)

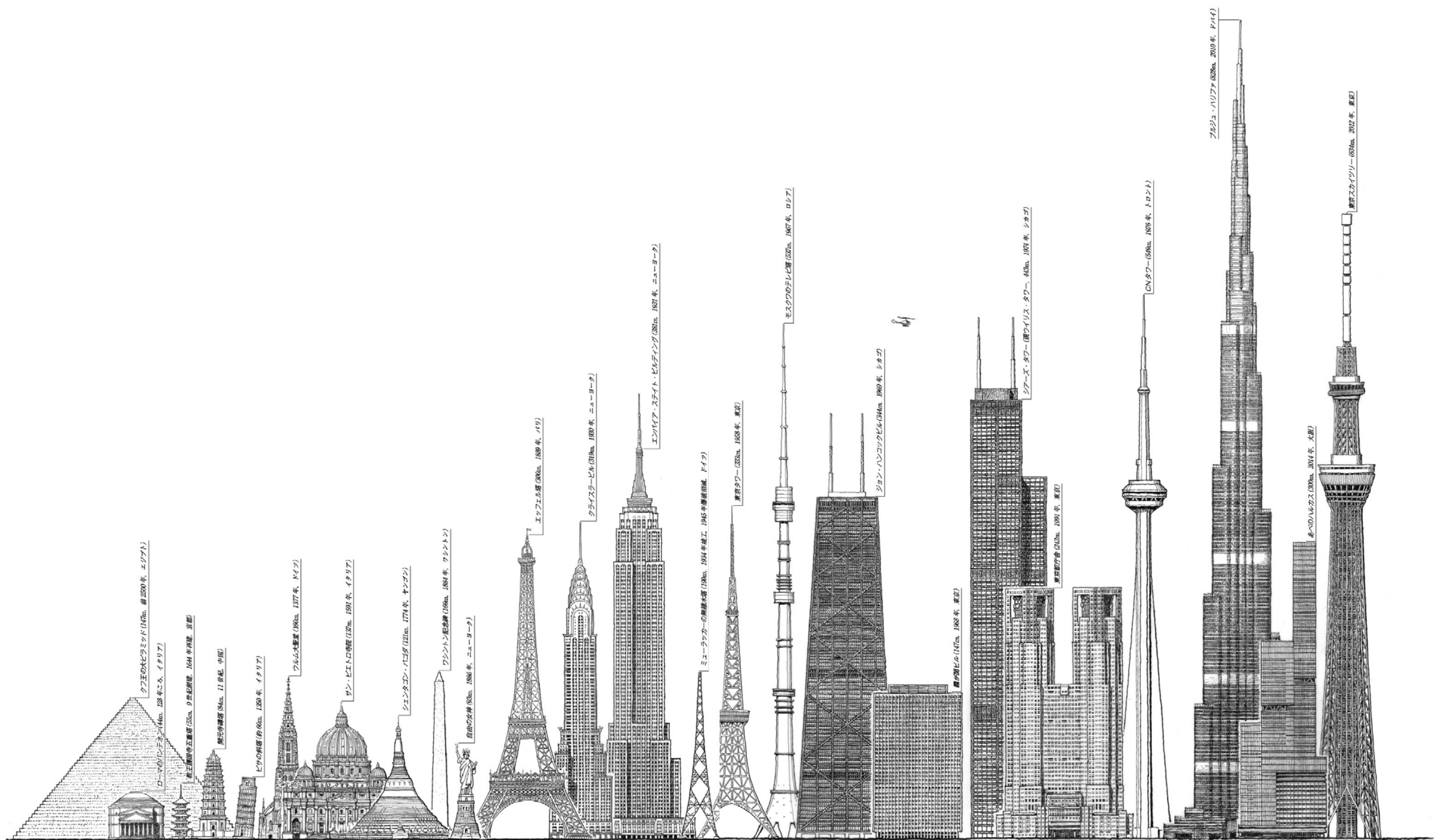
シェルの形態とコンピュータ

これまで述べてきたように、構造の合理的形態を求める手法としては、ガウディやイスラーによる模型実験的方法が知られているが、一方、コンピュータの長足の進歩や、解析ソフトの普及にともなって、シェル構造の合理的な形態を、コンピュータを用いた解析によって求める例も、多くなっている。これらは

構造最適化手法と呼ばれており、与えられた条件下で、計算された弾性ひずみエネルギーが最小となる形態を見つけようとするのが一般的である。実際には、建築家によって示唆された形態の近傍に、より合理的な構造形態を見出そうとする場合が多い。

図16の各務原市営瞑想の森斎場(建築設計：伊東豊雄、構造設計：佐々木睦朗)および図17の豊島美術館(建築設計：西沢立衛、

構造設計：佐々木睦朗)は、このような例である。前者は起伏に富んだ厚さ250mmの鉄筋コンクリートシェル屋根を漏斗状の柱および壁で支持した構造で、柱心には鋼管が埋め込まれ、雨樋を兼ねている。後者は水滴をイメージした全体形状を持つ、最大スパン41m、最大ライズ5m、シェル厚250mmの偏平なシェル屋根で、シェル裾部は基礎に固定され、2個の大きな開口を有している。



高さを競うタワー

大昔から人びとが築き上げてきたタワーには、精神的にも物理的にも、自然の重力に抗しながら、少しでも高い所に登りつめたいという思いが込められている。この思いを最も顕著に表現した宗教建築の一例として、ゴシックのカテドラルをあげることができる。中でもケルンの大聖堂の2基の尖塔は、156mの高さを持っており、また、ウルムの大聖堂

の西正面を飾る1基の大塔は(128ページ)、宗教建築としては最高の160mという高さを誇っている。エッフェル塔が出現する以前の世界最高のモニュメントは、アメリカのワシントン記念碑であった。これは1884年につくられた、高さ169mの組積造のオペリスクである。木造のタワーとしては、ドイツのミュラーッカーに1934年につくられた電波塔が最高で

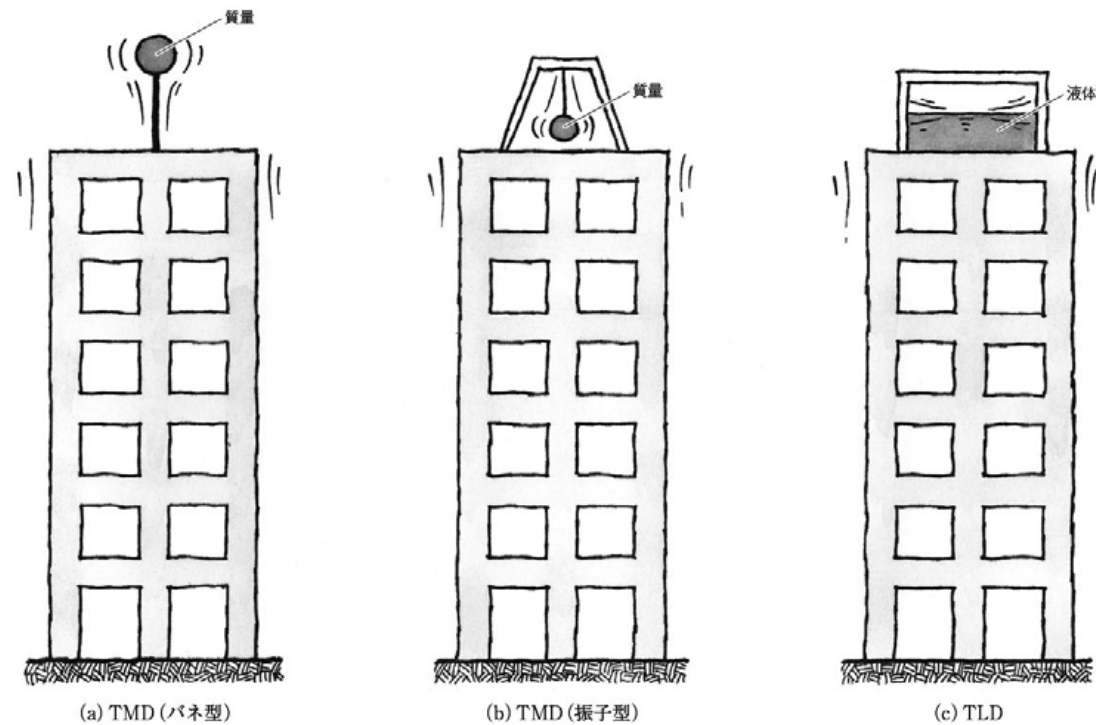
あったが、第2次世界大戦末期の1945年に、軍事的理由からドイツ軍により爆破された。1889年に完成したエッフェル塔(129ページ)の300mは、約40年間、世界最高の高さを誇っていたが、1930年竣工のニューヨーク、クライスラービル(319m)、およびその翌年に完成したエンパイア・ステイト・ビルディング(381m)によって、その王座を失った。

1972年にできたワールド・トレード・センターは、高さ417mの双子のビルで、エンパイア・ステイト・ビルディングの本体部を凌駕する高さをもっていたが、2001年にテロ事件により消滅した。1974年竣工のシカゴのシアーズ・タワー(現名称: Willis Tower、130ページ)は、高さ443mである。現在、世界最高の建造物は、2010年竣工の

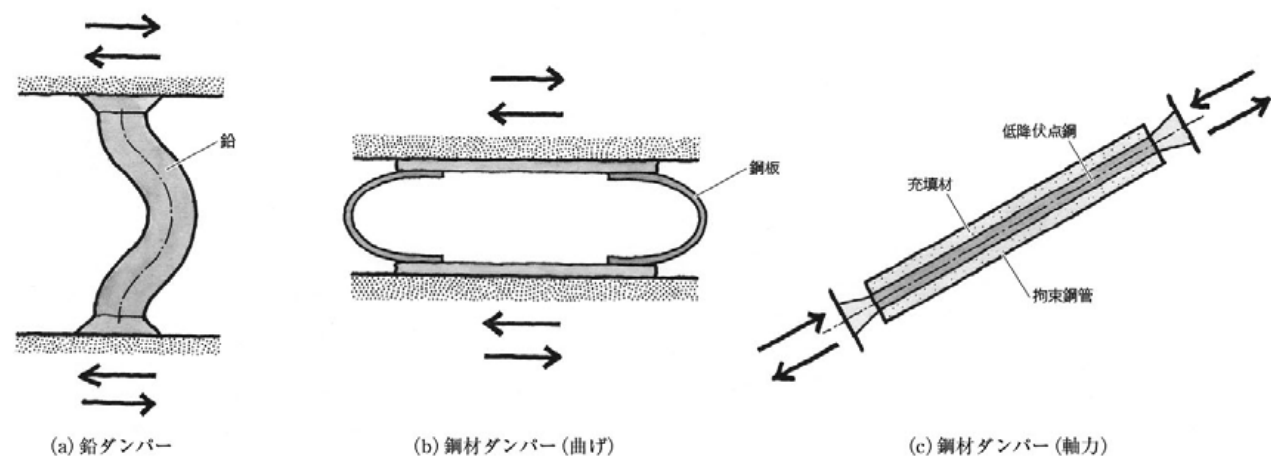
ドバイのブルジュ・ハリファ(828m、130ページ)である。日本国内の建築物としては、2014年に大阪に竣工した、あべのハルカス(300m、46ページ)が最も高い。ラジオ、テレビなどの発信、中継を行う、いわゆる電波塔の中で、エッフェル塔より高いものとしては、1958年に完成した東京タワー(333m、129ページ)、1967年竣工のモスクワ

のオスタンキノ・テレビ塔(鉄筋コンクリート造、537m)、1976年のトロントのCNタワー(アンテナを含めて549m)などがあるが、現在は、2012年竣工の東京スカイツリー(634m、129ページ)が最高である。なお、電波塔の中で世界最高(646m)を誇っていたワルシャワのステイ式無線鉄塔は、1991年、ステイの張替え工事中に倒壊し、現存しない。

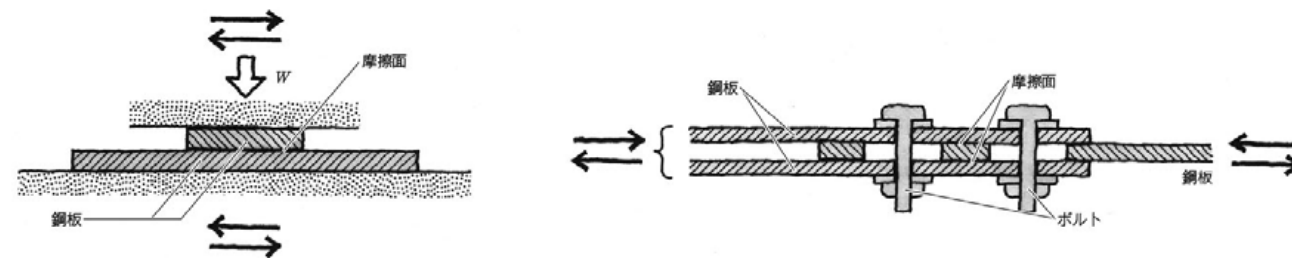
5 タワーの高さ比較図



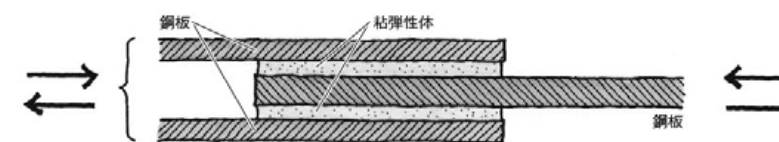
8 マスダンパーの例



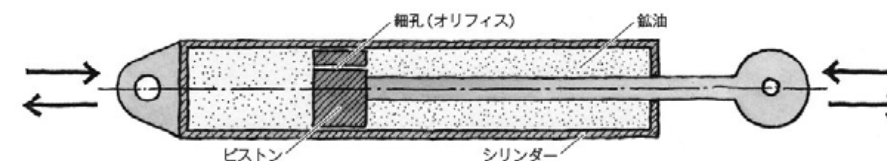
9 履歴ダンパーの例



10 摩擦ダンパーの例



11 粘弾性ダンパーの例



12 流体抵抗ダンパーの例(オイルダンパー)

制震(振)システム

耐震構造の節で述べたように、現行の建築基準法では、きわめて稀に起きる大地震の場合でも建物の倒壊は生じないように設計されるが、それには構造部材自身の塑性変形によるエネルギー吸収が前提となっているため、構造部材が大きな損傷を受けることは避けがたい。これは、人命保障を究極目標とする現行設計法の限界であると言えるが、災害後の社会活動の継続性に対する要求や、財産としての建物価値の永続性についての願望からは、大地震時といえども、構造体の損傷をできるだけ小さくしたいという要望があることは否定できない。

このことは、言葉を換えて言えば、現状の

設計では、大地震の際に構造体が自らを傷つけることによって吸収することになっている大きなエネルギーを、そうなる前に、構造体に代わって吸収・消費してくれるような「しくみ」が求められているということである。

また、地震の際に2次的な構造部材や仕上げ材に生じる破損、脱落、家具の転倒などの防止、居住者の不安感の減少等々の目的からも、地震時の揺れをできるだけ小さくする方法が望まれている。このような状況下で試みられるようになってきたのが、制震(振)システムの採用である。制震システムは従来、機械分野において、機械構造の振動制御の目的で利用・発展されてきた技術である。また、建築、橋梁の分野では、風や人的動荷重による過剰な揺れを制御する手法として、制振技術が用いられてきた。制震システムの中には、

電力などの外部エネルギーを利用するタイプ(アクティブ制振)もあるが、ここでは、現在最も一般的で外部エネルギーを用いない、パッシブ制振システムについて述べる。マスダンパー(図8)

振動する物体にバネを介して小さな質量を付け加え、小質量の固有振動周期を本体の振動周期に合わせておく(「同調-tuning-」という)と、本体が外作用によって大きく振動しそうなとき、小質量が振動を先取りして大きく揺れ、振動エネルギーを吸収して、本体の揺れを減殺するという現象がある。この現象を利用した制震システムをTMD(Tuned Mass Damper: 同調マスダンパー)、または、考案者の名前をつけて、Frahm アブソーバと呼んでいる(図8(a))。TMDは振り子の形でも実現できる(図8(b))。また、建物に造り

つけの水槽を、マスダンパーとして利用しようという試みもある(図8(c))。水槽内での水の移動がダンパーとしての役割をするので、TLD(Tuned Liquid Damper: 同調液体ダンパー)またはスロッシングダンパーと呼ばれている。

これに対して、材料やシステムの力-変形関係の特性を利用した数多くのダンパーも考案されており、これらのデバイスは、構造体の中で相対変位を生じる2点間に挿入することで変形を生じさせ、エネルギーを消費・吸収するように配置される。

この場合、力-変形関係のメカニズムと特性によって、次のいくつかのものがある。履歴ダンパー(図9)

金属材料の降伏現象を利用するもので、鉛や鋼材などが用いられる。デバイス両端の変

位によって曲げやねじれを生じさせるタイプや、圧縮、引っ張りを生じさせるものがある。後者の場合は降伏点の低い鋼材などが用いられ、圧縮力が作用しても材料が降伏するまでは座屈を起こさないように鋼管等で拘束した、座屈拘束型と呼ばれるものもある。これらのデバイスでは、変位のサイクルに伴って消費する(熱に換える)エネルギーが大きいほど効果が高いが、この量は力-変形関係をグラフにした際、カーブが包含する面積の大きさに対応する。

履歴ダンパーでは、ひずみ量や繰返し回数が大きくなると材が変質して弱くなり、クラックや切断につながる危険があるので、注意が必要である。

摩擦ダンパー(図10)

建物重量を利用して、あるいは一定の締付

け力によって、相互に圧縮された金属面を滑らせる際の摩擦力を利用したダンパーである。力-変形関係は矩形になる。

粘弾性ダンパー(図11)

ゴムなどの粘弾性材料を複数の鋼板の間に挟んで接着し、鋼板の相対変位によって生じる粘弾性材料のせん断変形に伴って発生する抵抗でエネルギーを吸収するダンパーである。流体抵抗ダンパー(図12)

鉱油、高分子流体などをピストン、シリンダーからなるデバイスに封入し、ピストンの動きに伴って移動する流体が隘路を通過する際の流動抵抗によってエネルギーを吸収するダンパーで、このうち、鉱油を用いたオイルダンパーは、車両のショックアブソーバなどとして、最も古い歴史と数多くの実績を持つ制震デバイスである。