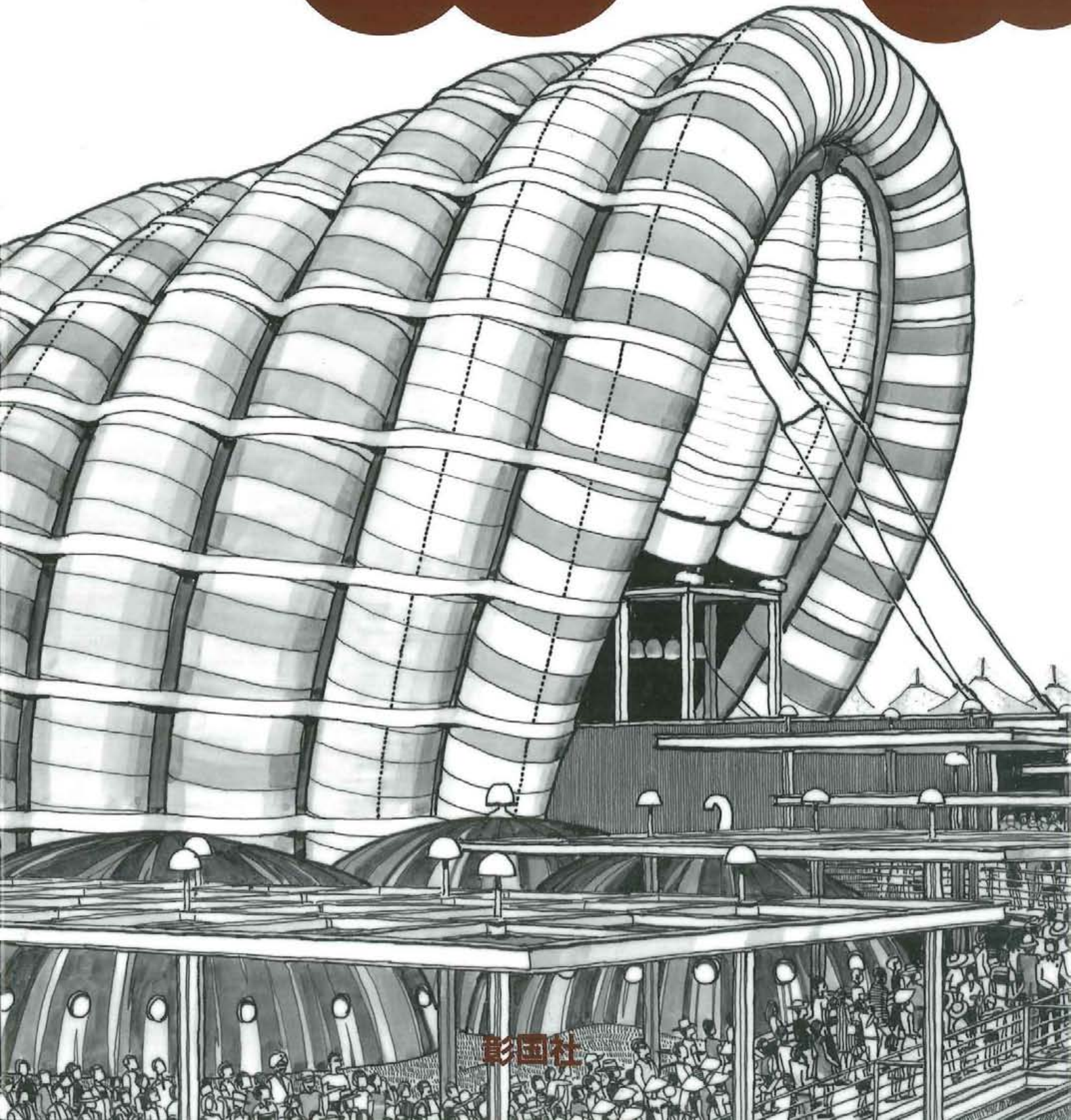


建築の絵本

# 建築構造のしくみ

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形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。建物が地震や台風の作用に耐え、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形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、建築におけるちからとかたちは、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、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

川口 衛

1 梁と柱

7  
 8 梁の理論と応用  
 10 梁の中の力  
 11 梁の材料と形  
 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 野小屋と枯木  
 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



3 ラーメン構造

37  
 38 木を使った本格的ラーメン構造  
 40 ラーメン構造の原理  
 41 伝統的木構造におけるラーメン効果  
 42 近代建築をもたらしたラーメン構造  
 43 ラーメン構造のはたらき  
 44 現代のラーメン構造



4 アーチ、ヴォールト

45  
 46 組積アーチの出現  
 48 組積アーチの原理と応用  
 50 ヴォールトの展開  
 52 交差ヴォールト  
 53 リブの造形  
 54 日本のアーチ構造  
 56 ヨーロッパの木造アーチ  
 57 鋳鉄のアーチ  
 58 錬鉄のアーチ  
 60 鋼鉄のアーチ  
 62 アーチの造形—建築—  
 64 アーチの造形—橋梁—



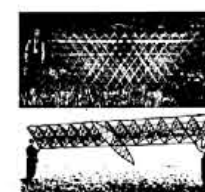
5 ドーム、シェル

65  
 66 組積ドームの出現と発展  
 68 大ドームの規範、パンテオン  
 69 ペンデンティブとスクインチ  
 70 ルネサンスの先駆け、フィレンツェ大聖堂  
 71 サン・ピエトロ大聖堂、その改修と科学的手法のはじまり  
 72 現代のドーム、シェル構造  
 74 シェルの形と力の流れ  
 76 シェル構造の古典的試み  
 78 より自由なかたちを求めて  
 80 折板構造の原理と実例  
 82 折板構造の造形



6 スペースフレーム

83  
 84 スペースフレームとは  
 86 骨組パターンの構成  
 88 ジオデシックドーム  
 90 スペースフレームのジョイント  
 91 古典的スペースフレーム  
 92 木造のスペースフレーム、繰返しパターン



7 ケーブル構造

93  
 94 ケーブル構造の出現と発展  
 96 ケーブル構造の原理—橋—  
 98 近代の吊り橋  
 99 斜張橋  
 100 吊り屋根構造の出現と発展  
 102 吊り屋根構造—いろいろなしくみ—  
 104 吊り屋根構造の展開  
 106 アーチとケーブルの組合せ—サスペン・アーチ構造—  
 108 サスペン・アーチのロマン



8 膜構造

109  
 110 膜構造へのチャレンジ  
 112 空気膜構造のメカニズム  
 114 空気膜構造の展開  
 116 空気をうけない膜構造



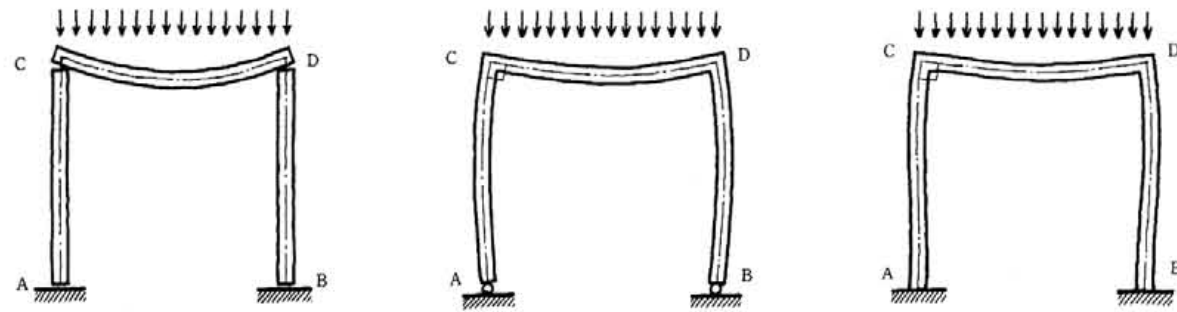
9 タワー

117  
 118 日本の塔  
 120 高さを競うタワー  
 122 宗教とタワー  
 123 鉄塔  
 124 タワー建築の力とかたち

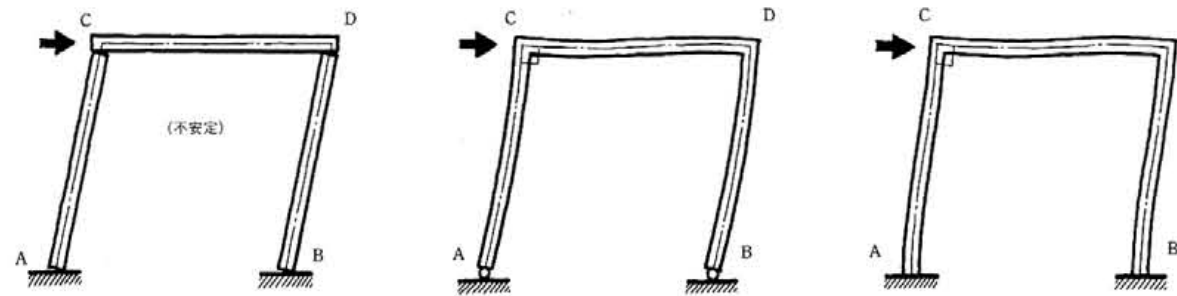


参考文献 125  
 索引 127

【鉛直荷重】



【水平荷重】

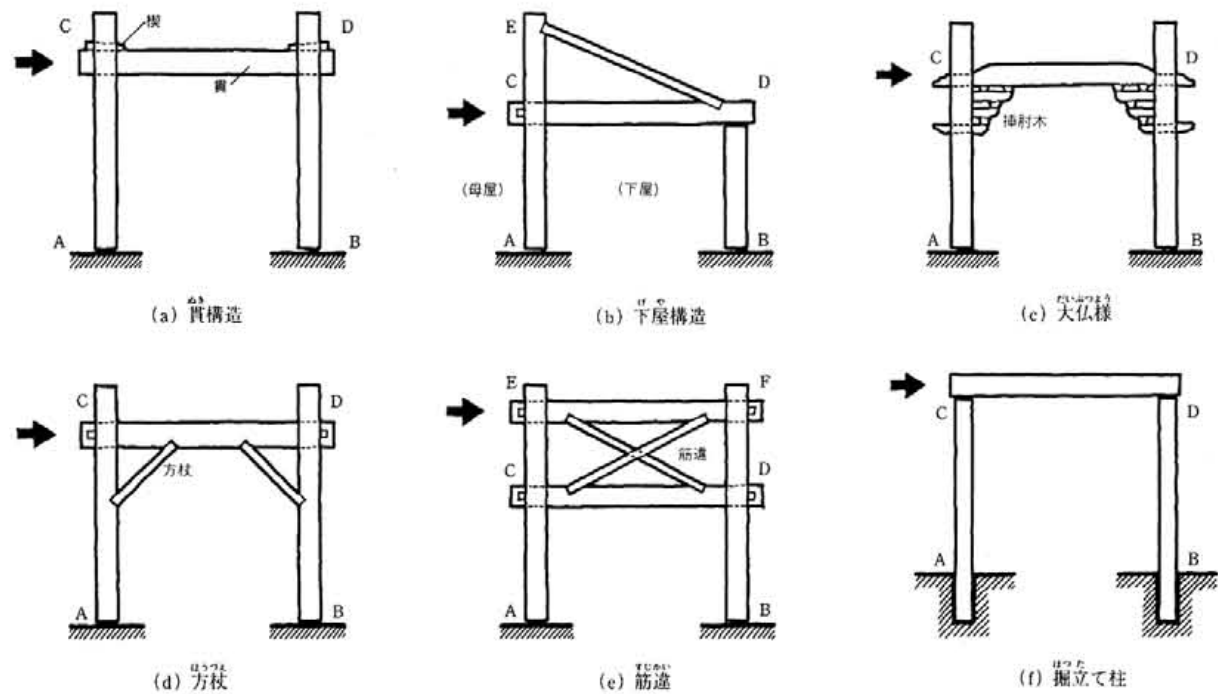


(a) 梁と柱

(b) ラーメン構造 (柱頭を剛接)

(c) ラーメン構造 (柱脚も剛接)

3 ラーメン構造の原理



(a) 貫構造

(b) 下屋構造

(c) 大仏様

(d) 方杖

(e) 筋違

(f) 掘立て柱

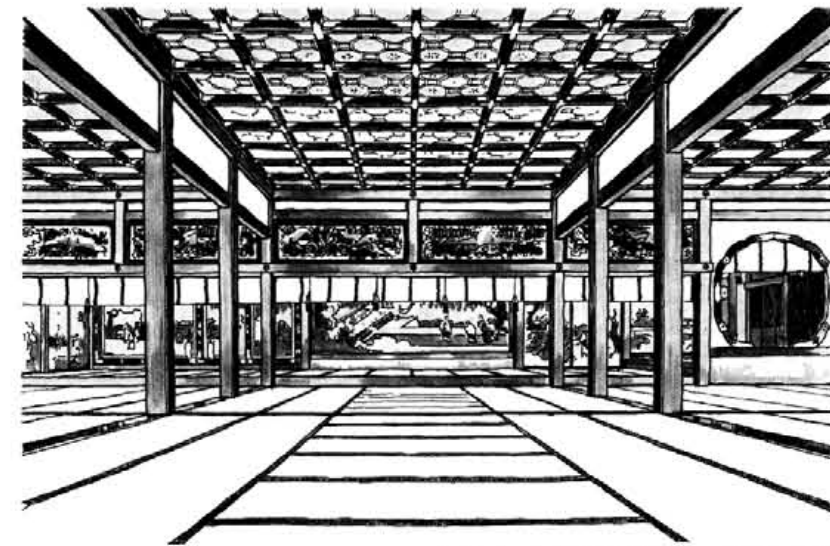
4 伝統的木構造におけるラーメン効果

ラーメン構造の原理

ラーメン構造は、梁と柱で構成される構造であるが、梁と柱が「剛接」されているのが特徴である。剛接というのは、文字通りガッチリと接合することで、ピン接合とは対照的に、節点で梁と柱の相対的な回転が不可能な接合方法である。単純な梁柱構造(図3(a))に鉛直方向の荷重が作用すると、梁だけが曲げ変形を生じるが、柱は梁を支持するだけで

曲げを受けない。これに対して、柱頭C,Dで梁と柱が剛接されたラーメン(図(b))では、梁の変形につれて、柱も変形を強制される。梁も柱もこのような変形に対する抵抗を示すから、梁のたわみは図(a)の場合より小さくなる。さらに柱脚も地盤に剛接されているようなラーメン(図(c))では、変形に対する抵抗が一層高まるから、梁のたわみはさらに小さくなる。水平荷重が作用する場合には、ラーメンの効果はさらに顕著である。単純な梁柱構造は不安定で、わずかな横力によって形が崩れてしまう(図(a))。これに対して、ラーメン構造は、水平力に対しても抵抗を示し安定である(図(b))。この場合も、柱頭だけ剛接のラーメンに比べて、柱頭も柱脚も剛接のラーメンの方が強剛である(図(c))。ここでは、1層(階)1スパンの簡単なラーメンについて原理を考えたが、ビル建築の骨組は、普通、多層多スパンのラーメン構造で造られている。

純な梁柱構造は不安定で、わずかな横力によって形が崩れてしまう(図(a))。これに対して、ラーメン構造は、水平力に対しても抵抗を示し安定である(図(b))。この場合も、柱頭だけ剛接のラーメンに比べて、柱頭も柱脚も剛接のラーメンの方が強剛である(図(c))。ここでは、1層(階)1スパンの簡単なラーメンについて原理を考えたが、ビル建築の骨組は、普通、多層多スパンのラーメン構造で造られている。



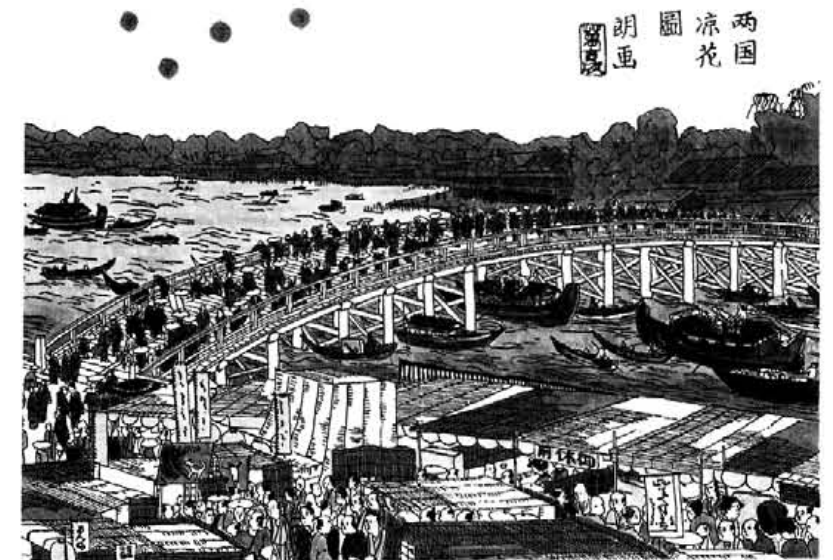
5(a) 西本願寺対面所(書院造り, 17世紀, 京都)



5(b) 法隆寺伝法堂(下屋構造, 745年, 奈良)



5(c) 浄土寺浄土堂(挿肘木, 1192年, 兵庫)



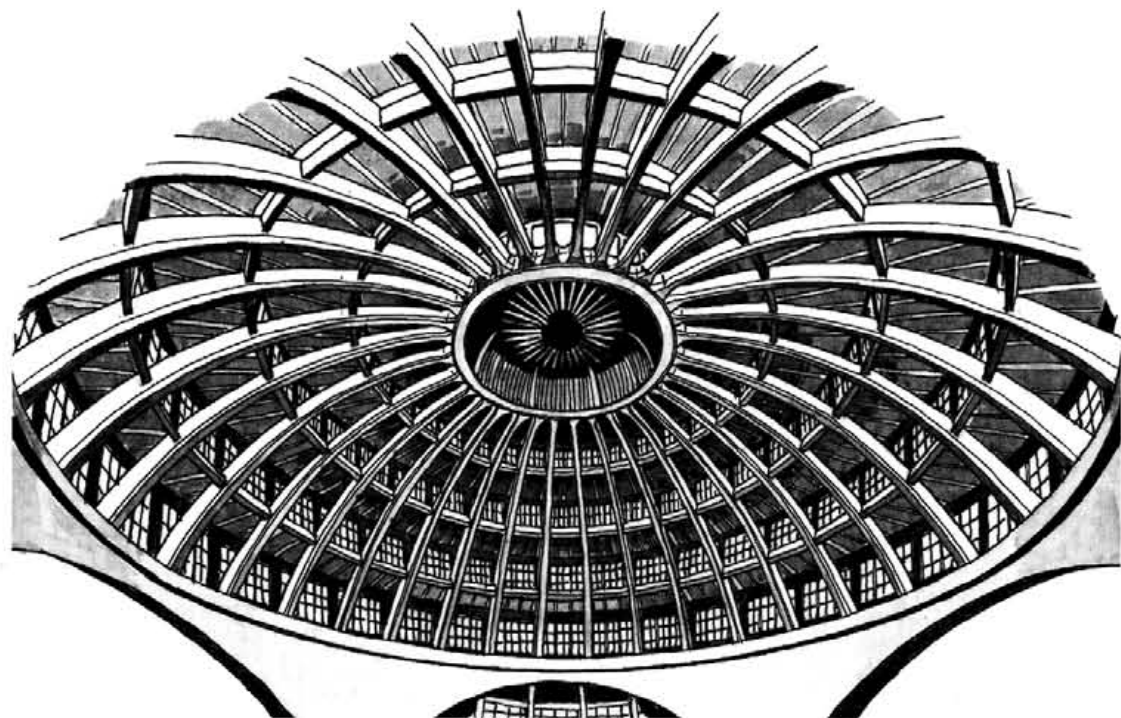
5(d) 両国橋(筋違, 江戸時代の浮世絵)

伝統的木構造におけるラーメン効果

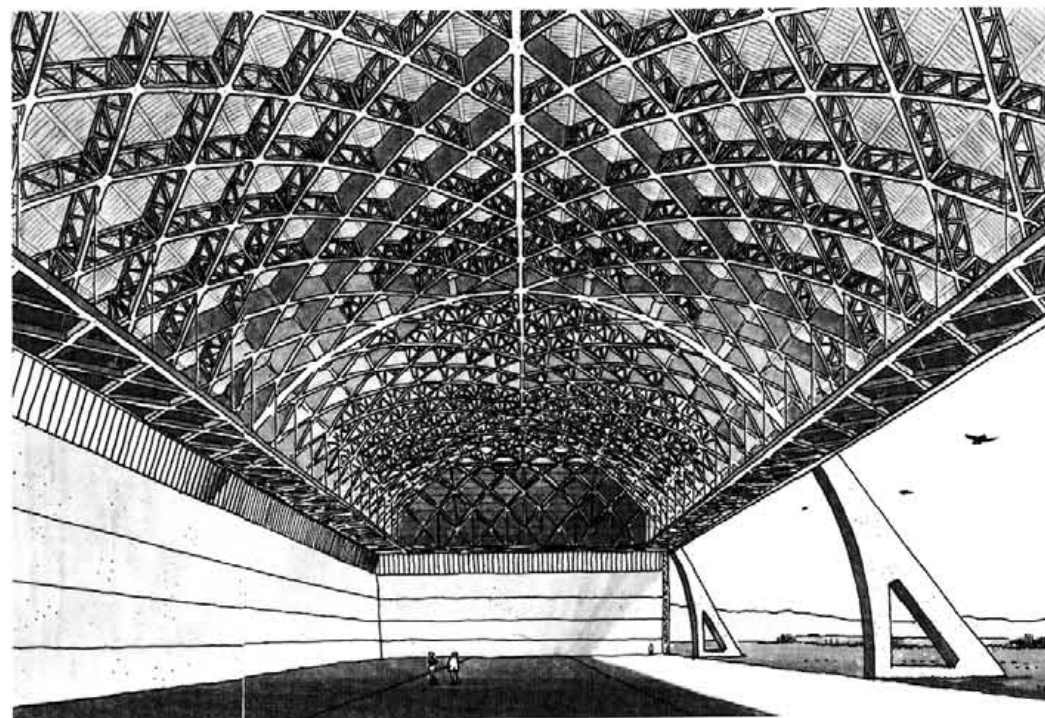
中国から伝来したばかりの初期の寺院建築(法隆寺など)では、柱自身がずんぐりと太く安定がよかったので、横力に対して、特別の配慮を必要としなかったが、時代が下がるにつれて細い柱が用いられるようになると、横力に対する骨組の安定は、非常に重要な問題になってくる。細い柱の骨組を、横力を受けても安定であるようにする目的で行われた工夫のいくつかを、前ページの図4に示す。

図4(a)は、いわゆる貫構造である。貫と柱をできるだけ強剛に接合するために、楔が用いられる。前に述べた清水寺の舞台は、最も大規模な貫構造の例である。貫構造は、その後住宅建築にとり入れられ、書院造りを完成させるのに大きな役割を果たした。西本願寺対面所(図5(a))は、洗練された書院造りの例である。図4(b)の下屋構造では、三角形CDEがトラスになることから、C点で柱と梁が剛接されたのと近い効果を持つ。法隆寺伝法堂(図5(b))の下屋構造の原理はこれに近い。図4(c)の大仏様のディテールは挿肘木を用いるもので、浄土寺浄土堂(図5

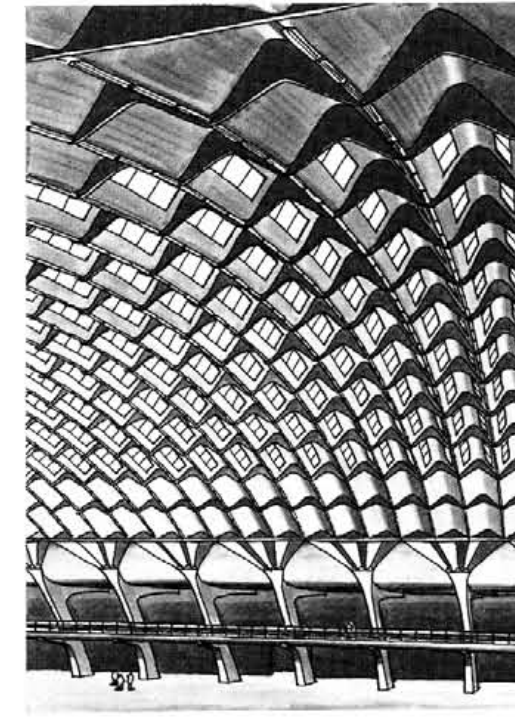
(c))のデザインを特徴づけている。方杖(図4(d))や筋違(図4(e))は、非常に有効な方法であるが、日本の伝統的構造では、斜めの材を用いることは好みに合わなかったらしく、ほとんど用いられず、橋や芝居小屋、仮設中の建物など、実用性に主眼を置く構造物に限って用いられる傾向があった。上図(d)の両国橋には筋違構造が使われていたことがわかる。柱を地中に埋める掘立て柱の方法(図4(f))は、ラーメンというよりは柱脚を剛にした片持ち梁状の柱であるが、古い民家や伊勢神宮に、その例を見ることができる。



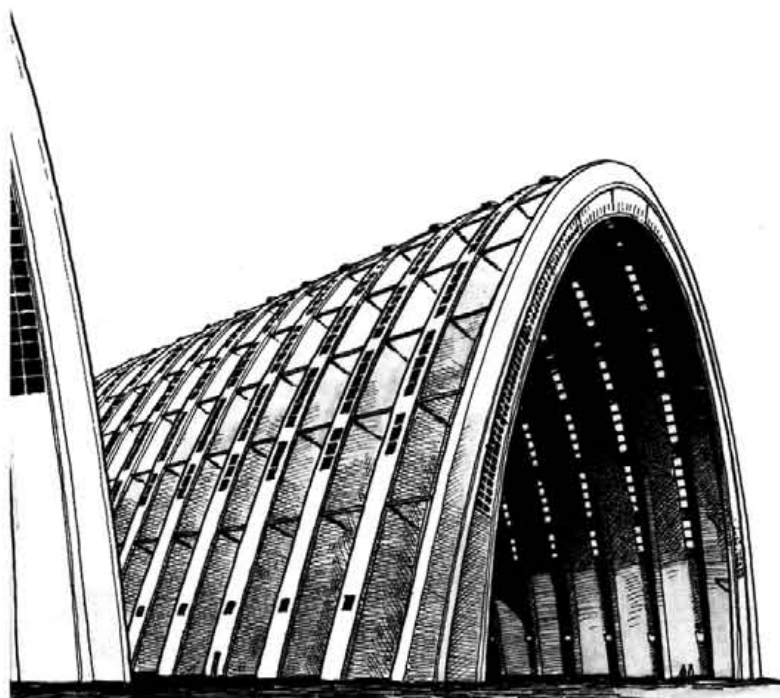
18(a) プレスラウの世紀館 (1912年, ポーランド)



18(d) イタリア空軍のための格納庫 (1939年, イタリア)



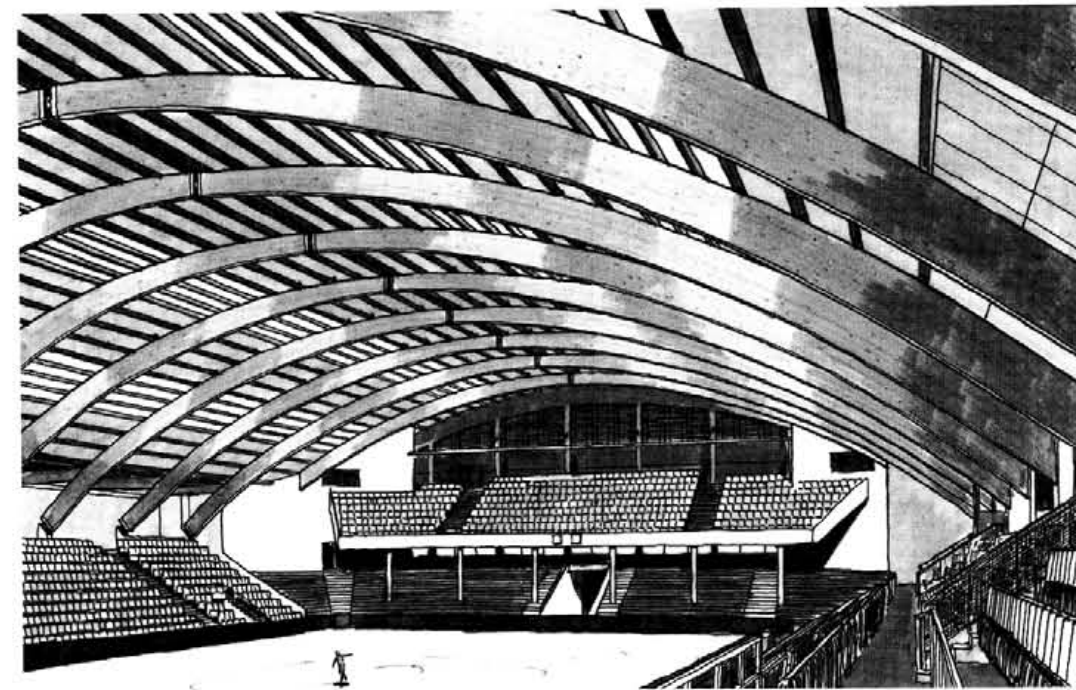
18(e) トリノの展示場 (1948年, イタリア)



18(b) オルリーの飛行船格納庫 (1921年, フランス)



18(c) コロニアル・グエル教会 (1914年, バルセロナ)



18(f) ケルンのアイススケート場 (ドイツ)

## アーチの造形—建築—

アーチは、近代の建築造形に対しても、いろいろの影響を与えている。鉄のアーチがすでに19世紀末において、すばらしい可能性を示唆したことはすでに述べたが、鉄筋コンクリートは、ややこれに遅れる形で発展した。人間が鉄筋コンクリートという構造技術を手にして、はじめてローマ時代のパンテオンを

超える規模の大空間を実現したのは、プレスラウ（現ポーランド領ヴロツワーフ）の世紀館（Jahrhunderthalle, 図18(a)）で、1912年のことであった。直径65mの大ドームを中心とする全架構を打放しコンクリートのアーチ群で構成したこの建物は、力の流れをそのまま表現しており、優雅さに欠けるものの、鉄筋コンクリートアーチのもつ力学的可能性を強く示唆する大胆な構造で、その後の大空間構造に大きな意欲を与える役割を果たした。フランスのユージン・フレシネは、1921年にパリ郊外のオルリーに飛行船格納庫2棟を造

った（図18(b)）。この格納庫はスパン86m、ライズ50mの放物線状の鉄筋コンクリート中空アーチを、多数、薄いスラブで連結して構成したものである。これらの格納庫の持つスケール感は、世界中のエンジニア、建築家たちに、大きなインパクトを与えた。

アーチの力学と造形とを最も直接的に探究した建築家は、スペインのアントニオ・ガウディであろう。本章のはじめにおいて、アーチの原理を説明する際に、吊った糸を頭の中で凍らせて、アーチの形を見いだす方法を述べたが、ガウディは、これを実際に行って、

自分がつくろうとする複雑なアーチの形を見いだしたのである。彼は、非常に入り組んだアーチのネットワークの模型を糸でつくり、これに必要なおもりを吊り下げて「逆さ吊りアーチ」の形を決め、これを測定することにより、最も合理的なアーチの形を得た。図18(c)は、彼の作品の一つ、コロニアル・グエルの教会堂であるが、この一見恣意的なアーチの造形も、実は慎重な実験から得られたものなのである。

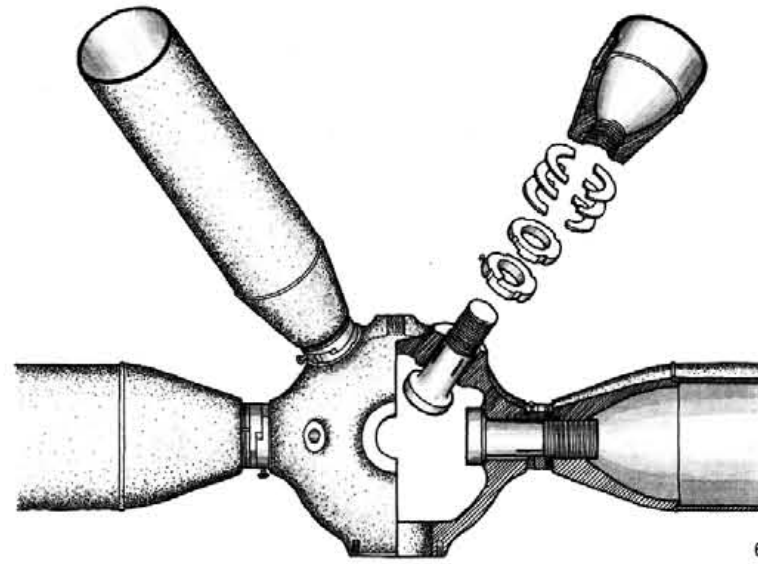
鉄筋コンクリートアーチの造形を語るべきイタリアのエンジニア、ピエール・ルイジ・

ネルヴィを忘れることはできない。彼は、自ら考案した、細骨材、細鉄筋を使ったコンクリート、「フェロセメント」を用いて多くの新しい構造、造形を提案した。図18(d)は、交差したアーチ群をフェロセメントで形成した「ラメラ・ルーフ」の一例で、飛行機の格納庫として造られたものである。ネルヴィは、この種の格納庫を数多く造ったが、第二次世界大戦で破壊され、現在は一つも存在しない。

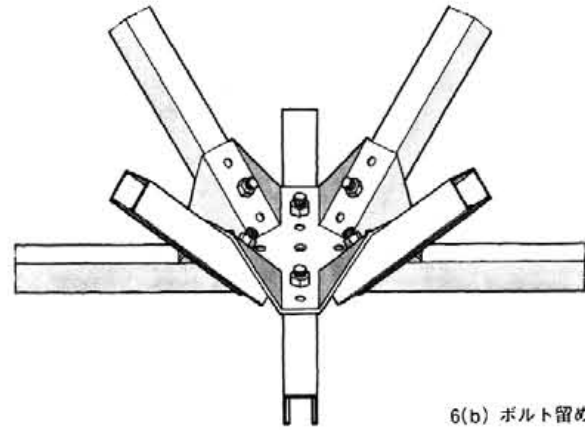
1948年ネルヴィはイタリアのトリノの大展示場を造ったが、その際フェロセメントのプレキャスト・パネルを現場打ちコンクリート

で接合して、巨大な波形ヴォールトをつくり出した。スパン80mの展示場を軽快にかけ渡すアーチは、両端で3本ずつがまとめられて1本の斜め柱に吸収され、力の流れが優美に表現されている（図18(e)）。

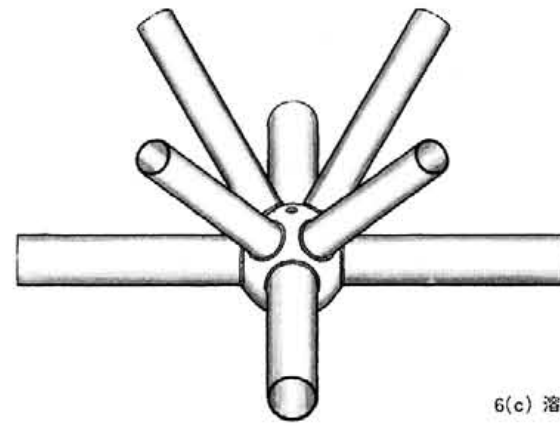
室内空間での造形を考える場合、集成木材によるアーチも重要である。木材の質感は人間の視覚、触覚に抵抗がないから他の材料で隠すことなく室内に表現することができる。またその構造上のディテールも造形上の重要なポイントになり得るであろう（図18(f)）。今後の発展が期待される場所である。



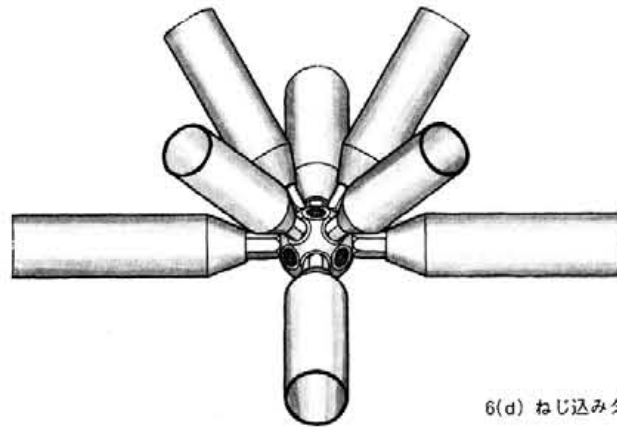
6(a) お祭り広場大屋根のジョイント



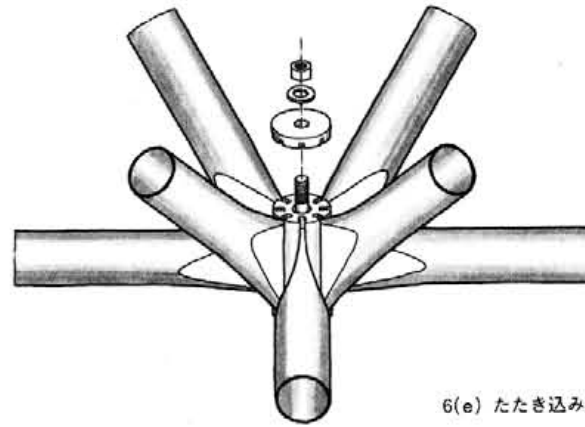
6(b) ボルト留めタイプ



6(c) 溶接タイプ



6(d) ねじ込みタイプ



6(e) たたき込みタイプ

### スペースフレームのジョイント

スペースフレームは、棒状の部材を立体的に結合することによって構成される。したがって、部材を結合する役割を持つジョイントはスペースフレームの重要な部品である。

ジョイントは、次のような条件を備えている必要がある。

- (1) 単純明快なメカニズムによって多方向からの部材を容易に結合できること。
- (2) 部材からの力（引張りと圧縮）を強剛に伝達できること。

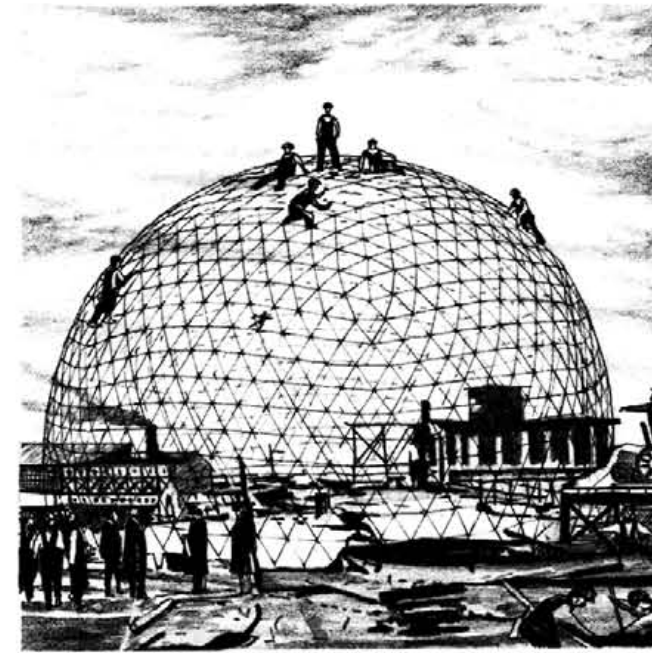
(3) 部材の長さに対して小さいこと。

(4) 部材の長さ、方向に対する誤差吸収能力を持つこと。

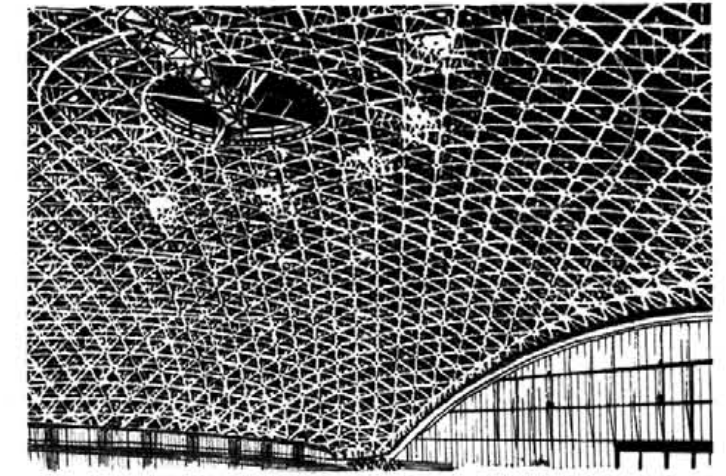
図6(a)は、前述の日本万国博お祭り広場大屋根のために設計されたジョイントである。骨組の規模も荷重も非常に大きいため、上記の条件をすべて十分に満たすように設計され、部材に作用する大きな力を支障なく伝達するよう工夫がなされた。

一方、比較的小規模なスペースフレームに対しては、市販のジョイントができています。この中、一般的なものを図に示す。図6

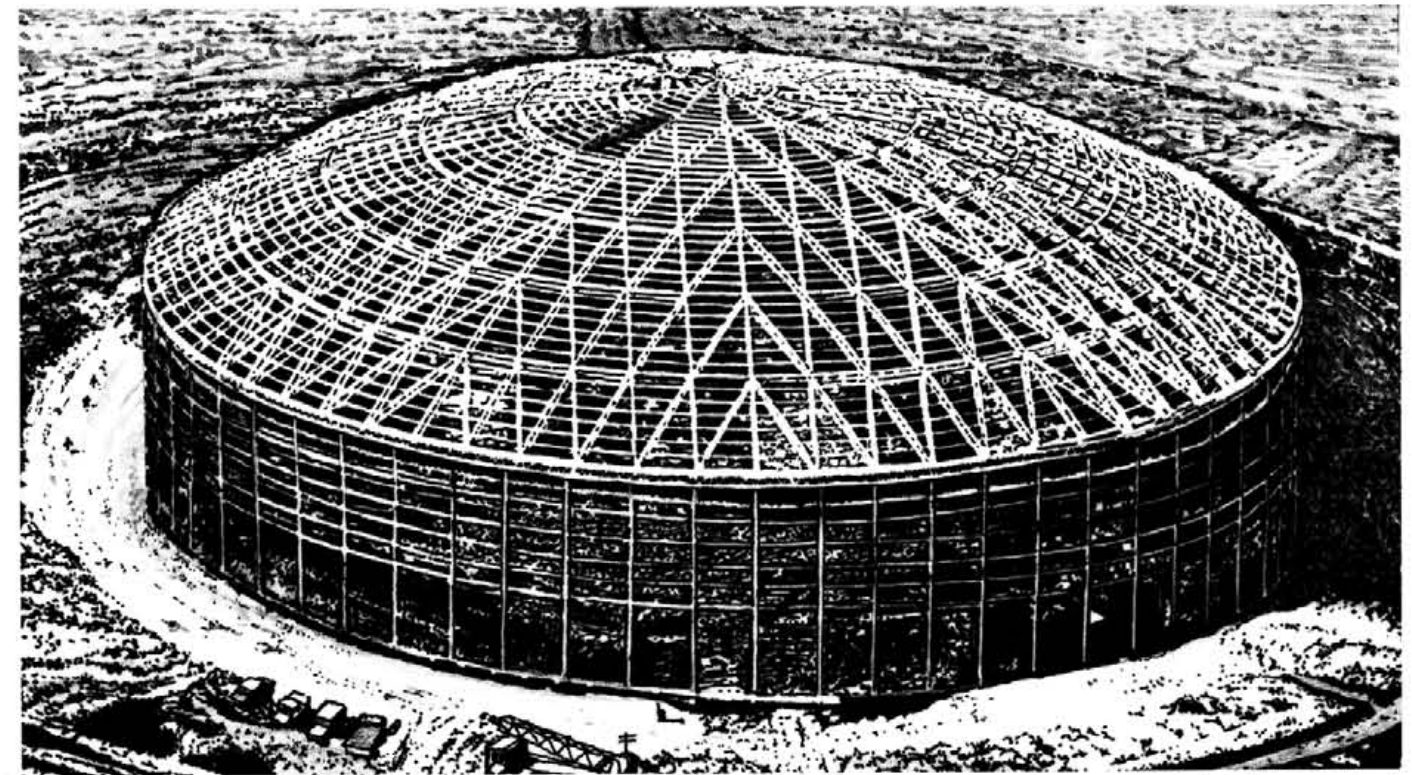
(b)は、鉄板をプレス加工して作ったジョイントに、部材をボルト止めするもの、図(c)は、中空の球形ジョイントに部材を直接溶接するもの、図(d)は、鍛造または、鋳造した鋼塊のジョイントに、部材をねじ止めるもの、図(e)は、アルミ合金のジョイントの歯形のついた溝に、やはり歯形加工を行ったアルミ合金の部材端部をたたき込むものである。これら市販のスペースフレームでは、ジョイントに誤差吸収能力は与えられておらず、代わりに部材の製作精度を高く保つよう努力している。



7(a) イエナのプラネタリウム (1922年、ドイツ)



7(b) 東京国際貿易センター (内観、1959年竣工、1997年解体、日本)



7(c) アストロドーム (1965年、ヒューストン)

### 古典的スペースフレーム

図7(a)は、1922年、ドイツのイエナに造られた、世界最初のジオデシックドーム（この名前は後年ブラーがつけたもの）である。このドームは、光学器械で有名なカール・ツァイス社が、自社で開発した世界最初のプラネタリウム装置をテストするために造ったプラネタリウムドームである。

このドームは直径が16m、正20面体を基本にして、球面を大円で分割した、文字通りの

ジオデシックドームであった。部材長は60cm前後（50種類）で、8mm×20mmの角鋼棒3,480本をボルト止め式のジョイントで結合している。この骨組にモルタルを吹き付けてプラネタリウムが造られた。図7(b)は、東京の晴海に1959年に完成した東京国際貿易センターにかかる直径110mの大ドームである（76ページ）。このドームの骨組パターンは、球を図7(f)(86ページ)の方法で3方向グリッドに分割したものである。骨組部材は、梁せい1mのトラスを通常鉄骨で造り、上下弦材を円板のガセットプレートにリベット接合

している。図7(c)はアメリカのヒューストンに1965年に造られたアストロドームで、フットボールおよび、野球のための競技場である。この建物の直径は200m、骨組のパターンは、典型的なパラレル・ラメラドーム（86ページ参照）である。図から明らかのように、12等分された部分円を、さらにラメラ状に6等分したパターン構成になっている。部材は、梁せい1.5mの鉄骨トラスで、通常の接合手法で組み立てられている。全く同じ方法がニューオリンズのスパードーム（直径213m）にも用いられている。