

UDC 624.914

# 大スパン構造の研究と開発

川 股 重 也\*

生研における大スパン構造に関する研究の特色は、基礎理論の研究にとどまらず、構造設計法と直接関連する諸問題と取り組み、建設途上に生じる構造技術上の問題にいたるまで、あらゆる側面から力学的な検討を加え、現時点におけるテクノロジーに立脚した現実的な解答を見いだそうとする点にある。建築における大スパン構造について、研究と開発の特質を述べ、20年にわたる歩みを概観する。

## 1. 大スパン構造の発展とその研究開発

大スパン構造とは、へだたった2点間に橋を架ける場合や、広い面積をもつ床面に屋根をかける場合のように、中間に支柱や支壁なしに長い距離にわたって架け渡される構造物を指している。

海峡をまたぐ橋、柱や仕切にさえぎられない広々とした工場、集会場、マーケット、体育館、展示場の大空間をいれる建築など、大スパン構造はわれわれの生活と結びついているが、最近の構造材料の進歩と構造技術の発展により、その規模は刻々に拡大しつつあると言ってよい。橋は、支点間距離(スパン)が大きくなるにつれて、直線的な桁(またははり)形式から、曲線で構成されるアーチ、さらに吊り橋へと、その構造形式を変えて行くことはよく知られている。建築の場合も、ビル建築では柱とはりの直線的な構成が用いられるが、大スパンの建築では、曲面で構成されるシェル構造、吊り屋根構造、空気構造(Pneumatic Structure)や、直線材を任意の立体形状に構成する立体骨組構造などの多様な構造方式が用いられている。

大スパンの建築において、一般のビル建築と異なった構造形式がとられるのは、スパンが大きくなるにつれて、構造自体の重量(自重)の作用が、構造強度の上で大きな比重を占めることになり、自重に対して、より有利な構造形式が要求されるからである。このことは、一

つの構造体を、形状をそのままにして、比例的に拡大する場合を考えるとよくわかる。すなわち、構造体の重量は寸法の3乗に比例して増大するのに、構造強度を支配する各部の断面積は寸法の2乗の割合で増加するに過ぎないのである。

シェル構造にしても吊り屋根にしても、大スパン構造は大体において薄い曲面で構成されると考えてよい。この場合外から加えられた力は、曲面に沿って立体的な経路を経て地盤に達するが、この形式が自重に対して有利であるのは、力の伝達方式が板を曲げるような伝わり方ではなくて、板の伸縮を主体にした伝わり方となることが主な理由であり、立体的に連続して配置された構造物がむらなく抵抗するために、全体的な効率がよいことが副次的な理由である(図1)。

このような特質をもつ大スパン構造の原理は、ローマ時代のアーチとドームにすでに見られる。古代より石やれんがを主体とした重く、お厚い壁に閉じこめられていた西欧諸国の建築空間は、コンクリート、鉄、鋼の登場とともに、大きく明かるい窓をもつ近代建築によって解放される。第2次大戦後に至って、建築家は曲面を用いた大スパン構造の原理に着目し、壮かつ自由な建築空間を創り出し、その個性を競うことになる。ここでは、構造技術が建築の形式を縛る制約として見られた段階から、むしろ建築の目的や質を表現する素材として積極的にデザインに取り入れられるようになり、一方、平面に閉じこめられていた構造理論と構造技術が、立体的、空間的なものへと飛躍することになった。

わが国においては、関東大震災に端を発した耐震建築の技術と並んで、戦後に本格化した大スパン構造の研究と、建築家との協同による大スパン建築の開発に、近年世界的な注目を集めるようになった。1966年秋、レニングラードで開かれたシェル構造に関する世界会議において、日本から提出された一般報告<sup>1)</sup>に関心が集中し、また同じ日に上映された国立屋内競技場の吊り屋根構造の建設記録映画が人気を独占して盛大な拍手を受けるなど、あたかも日本デーの観を呈したことは、世界的な関心の深さの表われとして印象的であった。

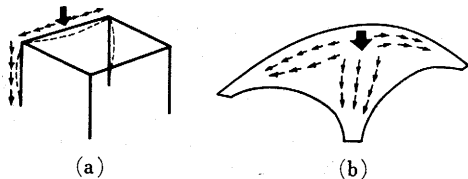


図1 (a) 柱—はりの構造では、力は部材を曲げながら平面的に伝わる。  
(b) 曲面の構造では、力は面に沿って立体的に伝えられ、板はほとんど曲げられない。

\* 東京大学生産技術研究所 第5部

さて、大スパン構造の力学を支える原理的、基礎的な研究とその数学的解析法の研究は、たとえばシェル（曲面、殻）の理論に見られるように、19世紀に始まっているが、建築的利用を目的とした研究は比較的新しく、ヨーロッパに初めて鉄筋コンクリートのシェル屋根が誕生したのが1924年である。

生研の建築構造学の研究グループは、発足当初よりシェル構造の研究を手がけ、さらに吊り構造、立体骨組等の大スパン構造の研究を続けて来た。このグループは、1953年当時の研究成果に基づいて、愛媛県民館（松山市）を構造設計した（写真1）。スパン50mの鉄筋コンクリートによる球形シェルである<sup>2)</sup>が、これは当時世界有数の大スパン構造であり、わが国の大スパン建築の建設活動を促すきっかけとなったものである。



写真 1 愛媛県民館

以来今日まで継続されている、生研における大スパン構造に関する研究の特色を要約すれば、基礎理論の研究にとどまらず、構造設計法と直接関連する諸問題と取り組み、建設途上に生じる構造技術上の問題に至るまで、あらゆる側面から力学的な検討を加え、現時点におけるテクノロジーに立脚した現実的な解答を引き出そうとする点にあるといつてよからう。

研究を基礎的段階と開発的段階に分けるとすれば、基礎研究は、シェル構造、吊り構造、立体骨組等の力学上の基本的性格を解明し構造計画の原則を見いだすこと、構造設計の手段としての理論解析と実験の方法を確立することなどが目的となる。

静的な荷重に対する存在応力と変形を解析するための線形弾性理論、吊り屋根の大たわみ問題やシェル構造の挫屈現象を解明するための非線形弾性理論、地震、風などに対する動的な現象を明らかにするための振動理論などの研究、それらの具体的適用に必要な数値解法の研究などが基礎研究の理論的側面である。また構造の破壊に対する安全度を論じるには、その破壊機構を知り、破壊耐

力を推定しなければならないが、鉄筋コンクリートシェルなどでは、現象が複雑であるために、理論的に追及することが不可能であり、主として模型実験の結果を相似則によって実物に適用することになる。

基礎的研究によってとらえられた各種構造の基本的性格は、具体的な建築構造の提案に反映される。開発研究の段階においては、構造の原形に対して、数値解析を行なって、基礎的性格に量的な裏付けを行ない、構造技術との関連においてその実現の可能性が検討される。また弾性的性状を確認し、破壊形式と耐力を推定するために模型実験が行なわれ、また部材の接合形式、建設途上の構造の挙動などに関する解析、実験が行なわれる。

基礎および開発段階での研究成果は、実際の建築設計の段階で、構造設計として数値化され、図面化される。この場合、構造設計の内容は、建築設計の他の側面、すなわち空間的な機能や、環境の機能、視覚的要求などと調整され、必要があれば数値解析や実験の段階へフィードバックされることになる。

さらに、構造設計の内容は、工場製作の過程を経て建設現場において実現されるのであるが、製作、建設の段階において生じる新しい問題が構造設計の修正を要求することがあり、問題によっては開発研究の段階にフィードバックされる。また逆に開発段階での数値解析、模型実験の結果を確認するために、建設段階の構造の実物について、変形、応力、振動等の測定が行なわれる。

このような研究、開発の形態は、プロジェクトごとに目標の方向と条件を異にする建築構造の開発に個有のものと思われる。住宅や高層ビルがすでに量産への方向をとり始め、研究開発も生産の合理化を目標としているが、大スパン構造については多少趣を異にして、当分は、スパン限界の突破を目指す構造原理そのものの拡大と、新しい提案、研究、開発の競争が続くものと思われる。

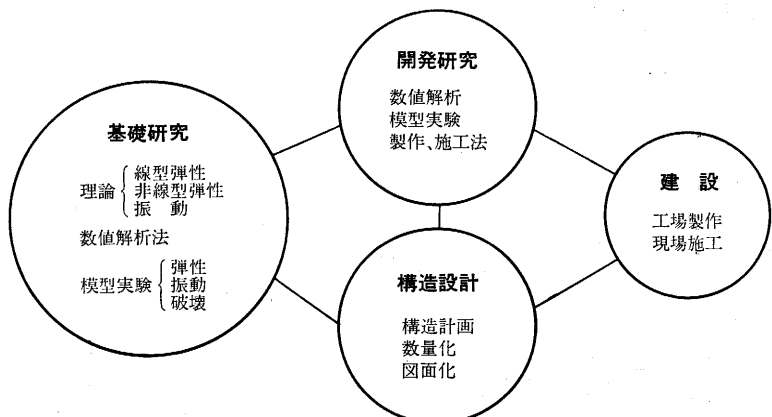


図 2 研究と設計、建設の関係

## 2. 基礎研究

立体的な曲面構造においては、力の伝達形式が複雑であるために、正確な応力解析を可能にすることが、構造開発の第一の条件である。

基礎研究の歩みを振り返ると、シェル構造の理論的解析が中心的課題として重視されたことが注目される。シェル力学の基礎として、形状に限定されない一般座標に基づくシェル理論が、線形および非線形弾性を対象として追求された<sup>3)</sup><sup>4)5)</sup>。また、各種座標系におけるシェルの弾性解析に関して、一般球殻<sup>6)7)</sup>変断面球殻<sup>8)</sup>、偏平球殻<sup>9)</sup>の曲げ理論の解が求められ、公式化され、また建築構造として重要な、方形プランをもつ偏平なシェルについて継続的に研究が行なわれ、E. P. (楕円放物面) シェル<sup>10)</sup>、H. P. (双曲放物面)<sup>11)12)</sup> シェルの応力解析法が提出され、構造の基本的な性格が解明された (図 3)。静的応力の解析は、偏微分方程式の境界値問題に帰着す

るが、これに対する数値解析の手段としては、差分法、フーリエ級数解、エネルギー法などが用いられた。特に差分法は、取り扱いの明快さと、種々の境界条件への適用性の点から実用的な解法として重視された。1956 年ころより電子計算機の使用が可能となり、シェルの数値解析の範囲を大幅に広げることができた。

シェルの解析的研究と併行して、弾性解の裏付けを求めて、多くの弾性模型実験が行われた。試験体の製作に

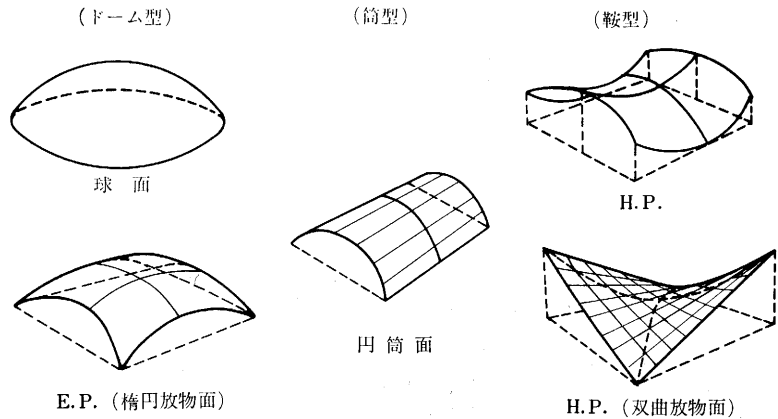


図 3 曲面の分類

### 開発研究の例

#### 1) 戸塚カントリークラブ

30 m×71 m のプラン、6 本の柱で支えられた鉄筋コンクリートの逆型円筒殻。逆型のシェルに特有な引張応力の処理法と、

耐震計画が重要な課題であった。引張応力に対しては主応力線に沿った配筋法が有効であり、また、地震力に対しては、支柱とシェル、支柱と横ばりを 2 方向の架構と考えた抵抗が成立することが解明された<sup>20)</sup>。

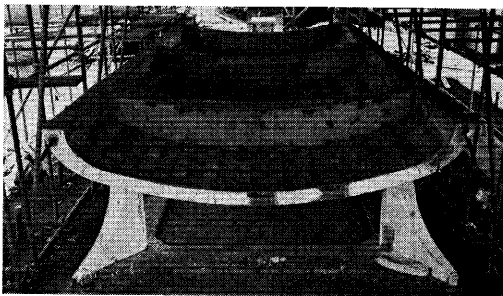


写真 2 セメントモルタルによる 1/10 模型試験体。4 角のブロックは鉛直荷重の載荷点

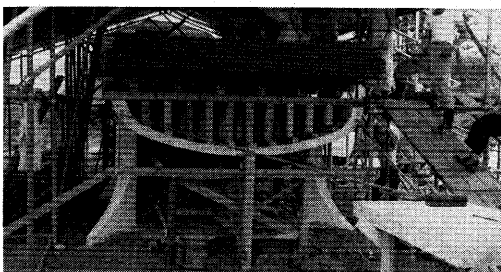


写真 3 鉄筋による載荷状況

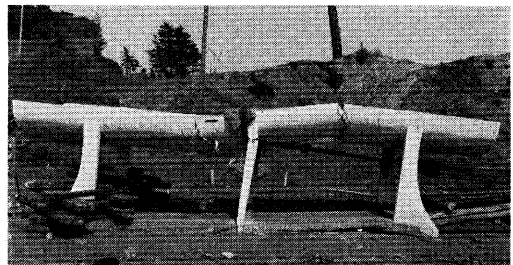


写真 4 模型の水平力 (地震力) による破壊状況水平力に対しては、柱脚ピンで、シェルをはりと考えたフレームに近い挙動を示すことがわかる。



写真 5 全景

は、当初はセルロイド板を曲げていたが、後になってアクリル樹脂板が、加工精度がよいことと実験に適した弾性係数をもつことから、多用されるようになった。

各種の鉄筋コンクリートシェルについて破壊を対象とした模型実験が多数行なわれ、破壊現象の解明に役立った。1 cm～2 cm 厚のセメントモルタルのシェルを試験体とし、シェルと縁材は鉄筋の代わりに焼きなました鋼線で補強された。特に E. P. および H. P. シェルについては多くの実験が繰り返され、ライズ（むくりの度合）や周辺の支持条件、シェルの脚部を結ぶつなぎ材などがシェルの終局耐力を左右する状況が明らかにされた<sup>10)13)</sup>。また、円筒シェル屋根構造の耐震性に関連して、水平力による破壊実験が行なわれ、特に殻体と支柱との接合部分の性状が究明された<sup>15)</sup>。

大規模な吊り屋根構造の基本形は、2 方向にワイヤーケーブルなどの引張材を配置して鞍型の曲面を形成し、これらのケーブルにあらかじめ張力（プレストレス）を与えて面を安定させるものである。このプレストレスを与える段階で形成し得る曲面はプレストレスを調節しても非常に限定されたものとなる。この曲面形成に自由を与えるために、引張材にある程度の曲げ剛性のあるものを導入することを提案し、この半剛性曲面についてプレ

ストレス導入段階での釣合式と、外部より荷重を受ける場合の基礎方程式を導いた<sup>16)</sup>。また最近に至って、吊り屋根曲面に幾可学的非線形性を取り入れ、差分法を用いて完全な非線形解析に成功している<sup>17)</sup>。この解析が、きわめて広い範囲の大たわみを追跡できることが、実験によって証明された。また、吊り屋根を連続曲面と見なす上記の研究のほかに、マトリックス法により、ケーブルの交点ごとに多元方程式を立て、プレストレス効果と非線形性を考慮した解析法が研究されている<sup>18)</sup>。

立体骨組は、曲面を鉄骨直線材の網目で構成する、いわゆる鉄骨シェルや、レードームなどに広く用いられ、工場生産の可能性と結びついて急速に一般化されつつある構造である。直線の網目による平面や曲面を、等価な剛性をもつ連続板に置換して解析する方法<sup>19)</sup>が、従来一般的であった。最近では、マトリックス法と電子計算機との結びつきにより、立体的な骨組の厳密な解析が可能となり、大量の未知数を含む数値計算の能率的な処理法について研究が進展している。

同じマトリックス法による有限要素解析 (Finite Element Method) は、シェル構造の解析から座標系に縛られた形状の制限をなくし、任意形状のシェル構造の解析を可能にし、またシェルの挫屈などの非線形現象の解明

## 2) 弓張岳展望台

正方形プランの3隅点で支持した鉄筋コンクリート H. P. シ

ェル。両翼がはね出している。隅点で支えられた場合、H. P. シェルは複雑な応力分布と破壊性状を示す<sup>21)</sup>。

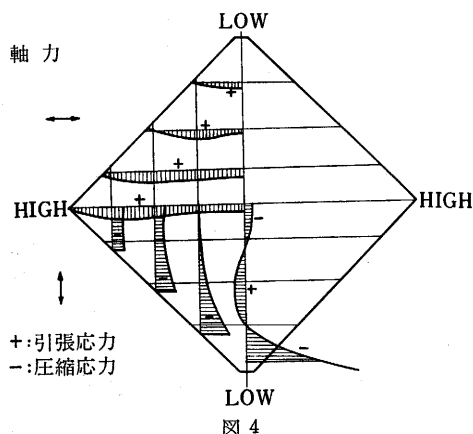


図 4 アクリル樹脂模型による弾性実験により測定された鉛直荷重に対する面内応力の分布 (LOW, LOW の2点で支持されている)

### 写真 6 モルタル模型の破壊実験

鉛直荷重による破壊形(2点支持)。曲げと引張のひび割れは殆んど同時に起り、支点部分の曲げ-圧縮破壊により強度が支配される。

### 写真 7 展望台全景、3点で支持されている。



写真 6



写真 7

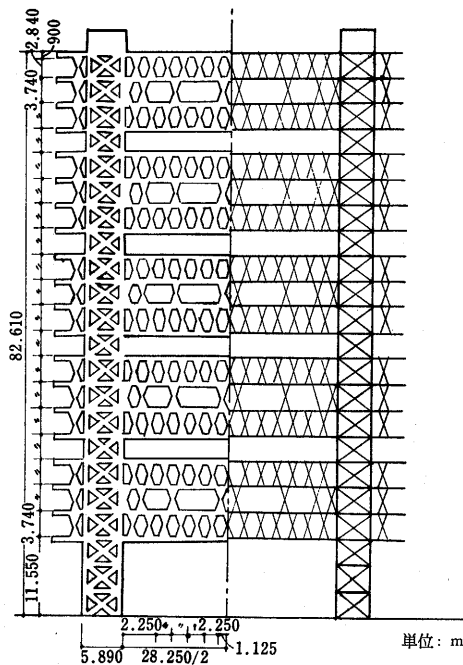


図 5

にも役立つものと期待されており、現在回転殻を初めとして、有限要素法によるシェルの解析が試られている。

### 3. 開発研究

大スパン構造の形式と規模が提示された場合に、その力学的な性格を数値的に明らかにし、構造設計の基礎となるデータを提供するのが開発研究の使命である。

別欄の記事 a)～c)は、曲面による大スパン構造の開発研究の中から、3つの例について、その主要なテーマを説明したものである。

図5は高層大スパンのビル（地上80m、スパン30m）の主要骨組を示したものである。数階にまたがって組まれた巨大な桁によって、床面が完全に解放されている。この骨組に関する静的な解析と実験、地震に対する動的解析により、このような構造が現実的に可能であることが証明された<sup>22)</sup>。これは曲面によらない大スパン構造の例で、この種の高層ビルによって、解放的な新しい街が誕生するのもそう遠いことではないだろう。

### む す び

大スパン構造は、吊り屋根や空気構造の出現によって、単に一つの建物を造るにとどまらず、一つの地域をおお

#### 3) 国立屋内総合競技場

中心線の全長214m、中央スパン126m、直角方向スパン120mの吊り屋根構造である。中央のメインケーブルより両翼に向かって、曲線型のビームが懸けられ、これと直角方向に配置した押さえケーブルにより締めつけられている。

半剛性曲面の原理（前述）より出発し、3段階の模型実験を通じて曲面形成の機構、面の剛性、振動性状等が克明に追及され、また部分模型に対する風洞実験によりフラッター現象（風による面のばたつき）の可能性が調べられた<sup>19)</sup>。風に対する防振機構としてオイルダンパの導入が計画され、ダンパの最適なパラメータが追及された。

写真8 ナイロン糸を用いた1/100模型による実験。変形状と振動特性が調べられた。

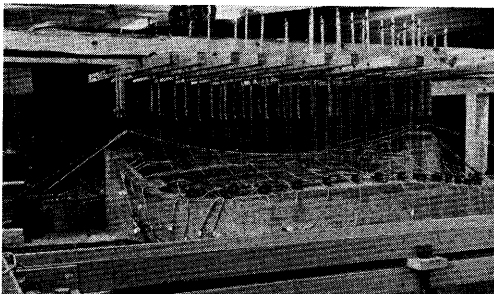
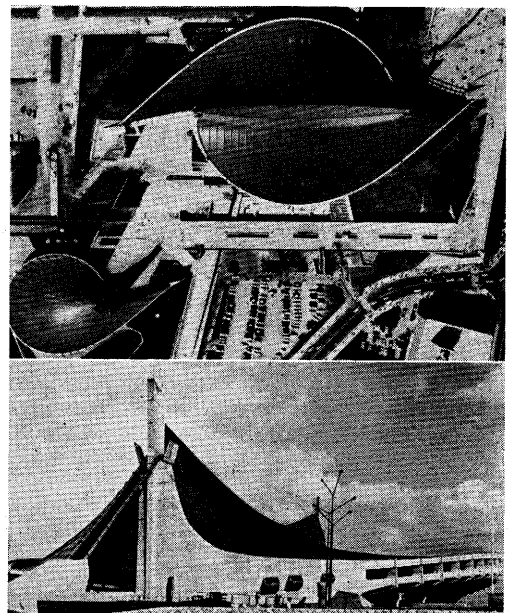


写真9 全景の俯瞰

写真10 アンカーブロックより全景を見る



って広大な人工空間を形造る可能性すら生み出している。これにともなう力学上の研究も複雑、高度な内容が要求されており、一そうち密で強力な研究体制を組織することがわれわれの課題であるとする。

(1969年2月26日受理)

### 文 献

- 1) Y. Tsuboi: Large Span Shell Structures in Japan, World Conference on Shell Structures, I.A.S.S., Leningrad, Sep. 1966.
- 2) Y. Tsuboi & K. Akino: Design and Construction of Reinforced Concrete Spherical Shell of Non-uniform Thickness Supported on Roller System, 生産技術研究所報告, 5, 4, 1955.
- 3) 坪井善勝: 曲面板基礎式の誘導, 応用力学, 4, 23, 1951.
- 4) Y. Tsuboi & K. Sumino: General Bending Theory of Thin Shells, Proc. of 10th Japan National Congr. for Appl. Mech., 1960.
- 5) 坪井, 角野晃二, 登坂宣好: 殻体の解析的非線型基礎方程式, 第17回応力連合講演会, 1967.
- 6) Y. Tsuboi & K. Akino: Theories and Applications of Antisymmetrical Bending State for Spherical Shell and Cylindrical Shell, 生研報告, 11, 2, 1961.
- 7) Y. Tsuboi & S. Kawamata: An Approximate Solution for the Asymmetrical Bending Theory of Non-Shallow Spherical Shell, 生研報告, 11, 3, 1961.
- 8) 坪井, 秋野金次: 変断面球殻の解, 日本建築学会論文報告集, 第48号, 1954.
- 9) 坪井: 偏平球殻理論とその応用, 生研報告, 14, 第1号, 1964.
- 10) 坪井, 青木繁: 截断球殻に関する実験的研究, 日本建築学会研究報告, 第32号, 1955 ほか
- 11) 坪井, 青木, 川設重也: H.P. シェルに関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第57号, 1957 ほか
- 12) 坪井, 高橋敏雄: 周辺固定支持された H.P. シェルのフーリエ解析, 日本建築学会論文報告集, 第103号, 1964.
- 13) 青木: 鉄筋コンクリートシェル構造に関する理論および実験的研究, 東京大学学位請求論文, 1960.
- 14) 高橋: 鉄筋コンクリート H.P. シェル構造に関する研究, 東京大学学位請求論文, 1960.
- 15) 坪井, 川口衛: 柱頭で曲げを受ける円筒殻の実験, 日本建築学会論文報告集, 第66号, 1960.
- 16) Y. Tsuboi & M. Kawaguchi: Design Problems of a Suspension Roof Structure—Tokyo Olympic Swimming Pools, 生研報告, 15, 第2号, 1965.
- 17) M. Kawaguchi & Y. Chin: On Nonlinearity of Prestressed Suspension Roofs, Recent Researches of Structural Mechanics—Contributions in Honour of the 60th Birthday of Prof. Y. Tsuboi, Uno-shoten, 1968.
- 18) 坪井, 大山宏: MATRIX 変位法によるテンション構造の解析, 第17回応力連合講演会, 1967.
- 19) R. Nasukawa: An Analysis of a Latticed Cylindrical Vault, Recent Researches of Structural Mechanics, Uno-shoten, 1968.
- 20) Y. Tsuboi & M. Kawaguchi: Design of a Concrete Shell Roof Structure in the Shape of an Inverted Cylinder, Proc. World Conf. for Shell Structures, San Francisco, Oct. 1962.
- 21) 坪井, 名須川良平: H.P. シェルの破壊機構, 日本建築学会論文報告集号外, Sep. 1965.
- 22) 坪井: Space Structure と Dynamic Architecture, 第5回生研講習会, 環境開発の技法, 1967.

## 東京大学生産技術研究所報告刊行予告

第 19 巻 第 3 号

今 岡 稔・山 崎 敏 子 著

### 3 成分系ガラス化範囲 (2) a-族元素ゲルマネート系

a-族元素ゲルマネートの3成分系ガラス化範囲のデータ集で、当研究室で長年にわたって調べて来た、1 gr. スケールのガラス化範囲のデータを整理して発表するもので、今回はその第2回である。ここに取扱われている a-族元素は無色の金属イオンとなるものの大部分で、K, Na, Li, Sr, Ca, Mg, Be, La, Al, Th, Zr, Ti, Ta, Nb, W の 16 元素を含み、それらの組合せの中でガラス化範囲をもつもののほとんど全部である。92 の 3 成分系が記載されている。なおこれらのガラス化範囲の統一的理解とガラス構造との関係については、すでに窯業協会誌に発表されておりこの中には含まれていない。

(1969年5月発行予定)