

## 最近のシェル構造とくに吊り屋根構造の国際会議

坪 井 善 勝\*

## I.A.S.S. および W.C.S.S.

I.A.S.S. とは International Association for Shell Structures (国際曲面構造会議) を意味し、現在本部はオランダのデルフト市にあり、同市の工科大学教授 A. M. Haus 博士が会長を務めている。Shell Structure は曲面板構造、広義には曲面構造の意義で比較的薄い鉄筋コンクリートや、せいの低い鉄骨トラスや、二方向に数多く張った鋼線で大きな空間をつつむドームやボルトのような構造であって、第2次大戦前(この種の構造として実現したのは1910年)から工場、市場、飛行機格納庫などを対象としてドイツを中心に欧州諸国で発達していたが、今次大戦を境として、砲弾や空爆に対してその構造物の致命的被害がなかったという事実は別としても、多くの建築家達が伝統的建築の殻を破るための有力な手段としてシェル構造をもち立てたことが本構造の発展に拍車をかけたといえることができる。

I.A.S.S. は1959年に設立された。創立者はスペインのトロハ(E. Torroja)教授である。トロハ博士は第2次大戦以前からスペインの内乱を空爆下のマドリッド市内で体験しながら、シェル構造初期の作品としていくつもの名建築を残した。

当時は西ドイツのディッカーホフ・ビドマンに属する特許であった、円筒形コンクリートシェルについてのZ.D.工法が広く宣伝されていた時であるが、トロハはコンクリートシェルについては、独特な構造美を狙ってこれを作り上げて成功した一人である。氏は1961年物故し、会長は前記ハース教授に代ったが、存命中トロハ教授は常に構造技術家と建築家との協力がシェルの発達をうながすことを述べ、欧州における建築教育が構造技術家の教育を軽視していることから起こる、建築家の構造技術家への無理解、逆に構造技術家の建築家への無関心に対してI.A.S.S.は常にこれを解消してゆく役割を持つべきであると主張した。

ハース教授もまたトロハ教授の遺志を引きついでいるからI.A.S.S.はトロハの蒔いたタネで育っているともいえる。副会長はポーランド、米国、スペインから各1人選出され、実行委員は欧州10人、インド1人、日

\* 工博 東京大学教授、生産技術研究所

本1人(筆者)で、会員は準会員は入会自由であるが、正会員は委員会から推薦される。会員は世界各地に分散し、その会員数は約400名である。シンポジウムは年に一、二回欧州で開かれ、そのProceedingsは年1回発行されている。次に会議の性格と会議における筆者の体験を述べよう。

1. シェル、曲面板とは応用力学におけるシェルの定義がそのまま本構造の内容にまで適用される。厚さが他の寸法にくらべて非常に小さい連続体で変形において法線保持の仮定が成立する範囲での理論展開の可能な対象物で、面内力の釣合いと変形における適合条件とで成立する2次元応力問題と、法線保持の仮定のもとに面に直角な荷重を受ける二方向の曲げねじりを取扱う平面板の問題とは、ともに曲率0の場合の特別なシェルに関する理論に入る。シェル理論は早くから圧力容器、航空機体その他金属薄肉構造において発展した。極端に薄い殻では、もちろん座屈の解明と、座屈が当然避け得られぬ場合の座屈後の強度や変形についての解析もまた古くから行なわれ、これらの多くは力学書に詳細に記されている。

しかし古典的シェル理論では、シェルの形が回転体であるか可展開曲面を持つシェルについての論議が大部分であった。そしてその基本となる応力は曲げ剛性が小さい理由で膜応力状態の成立を条件としたものが多い。対象として取りあげる構造物の形が複雑になるにしたがって、曲面自身と力を受けて変形した曲面との相関性を追求する一般的な問題が提出されてきた。

シェルの一般論については、E. Trefftz (1935)、および筆者の曲率線座標に関する理論(1951)、W. Zernaの一般斜交座標についての理論式(1952)などがありI.A.S.S.の会員の1人であるZerna教授(ハノーバー)のA.G. Greenとの共著Theoretical Elasticity (1960)は現代の応力書として高く評価されているが、本書はテンソル解析またはベクトル解析で一貫した応力書で、これらの方法はシェルの性質をとり逃がさないためには、きわめて有効であるから、見方によってはシェル理論の展開のために書かれた応力書であるともいえる。

しかしこの方面の研究者は数からいえば航空機体関係の力学専攻者に多くまた応用力学(Applied Mechanics)だけを担当している教授に多い。例えばI.A.S.S.とは

別に開かれた I.U.T.A.M. (力学連合) の Symposium on theory of thin elastic shells (1959) ではオランダのデルフトの Koiter 教授, W.C.S.S. (World Conference on Shell Structures 1962) ではイリノイ大学の L.H. Donnell 教授, スタンフォード大学の W. Flügge 教授が会長あるいは司会者をつとめていた。しかし Flügge 教授以外は I.A.S.S. には余り関心がないようで, Flügge 氏もまた I.A.S.S. の会員ではない。

World Conference on Shell Structures は建築構造におけるシェルを主体として, 1962 年 10 月 1 日~4 日, サンフランシスコで開催された。カリフォルニア大学の Popov 教授 (土木) の肝入りで同大学および米国の National Academy of Science ならびに I.A.S.S. が共同主催であったので, 研究題目を限定して毎年開かれている I.A.S.S. とは違って, あらゆる分野におけるシェルの構造の総合会議といったものであった。この会合で上記 Donnell や Flügge などが出席したが, 機体関係の出席者は少なく, また理論解析においては特に目立ったものはなかった。要するにシェルの微分方程式を解くことは微分幾何学で曲面を解く以上に困難であるからであり, 一般座標によるシェルの基本微分方程式もせんじつめれば立てばなしである。微分方程式の解法がこれにはるかに追いついていないのが現状である。もちろん二次元応力問題や平板問題で応用される数学的技巧を尽し果しての結果なのである。ところが W.C.S.S. で最も印象的であったのは英国の技師 R.S. Jenkins および H. Tottenham が "The Solution of Shell Problems by Matrix Progression Method" で  $x, y$  座標の変数一つについてシェルの微分方程式を差分形式に直して問題を多数の線型一次方程式に変換し electric digital computer にかけるためのプログラミングを行ない, この方法が曲率線座標にも拡張できると述べたことである。最近英国におけるシェルの書物にシェルの略算式のいろいろな形をアナログ コンピューターにかけるのに, 有利な形に変える技術的な取扱いだけを論じたものが見かけられたが, この論文もまた行きつまった微分方程式の解法の工学的解決策に先鞭をつけている英国の研究の現状を報告しているともいえる。

2. 鉄筋コンクリート シェルでは, 戦後数多くの実験が各国で行なわれたので, 特定の形たとえば半円筒やハイパボリック パラボロイドの形をもつシェルの性質は, ほぼわかってきて, あまり精密な計算は必要でないと考えられる人が多くなった。この人達には理論組立てが一般的に過ぎ, また式を複雑にするとシェルのもつ経験的な性質がその理論の過程でつかみきれないためであり, 他のコンクリート構造物の取扱いとの相関性が無視されるのに

耐えられないからだと解釈しておこう。この種の系統の人は米国のコンクリート関係の技術者に多いかと思うが, 何とんでもその筆頭は I.A.S.S. 実行委員の 1 人であるコペンハーゲン工科大学の K.W. Johansen 教授であろう。氏は 1962 年の I.A.S.S. にも W.C.S.S. にも出席しなかったが, 1959 年の I.U.T.A.M. ではじめて会ったときも, Koiter, Donnell, E. Reissner らの理論派の講演に対して, これらの議論はシェルを設計する上には何も役に立たない, このようなシンポジウムよりも I.A.S.S. のシンポジウムがマドリッドで近く開かれるからその方へ出た方が得る所があるといっていた。筆者の I.A.S.S. との関係はヨハンセン氏によるものといっただけだが, 建築土木の応用力学担当教授や実務家と機体関係の応用力学者とでは, Flügge, Zerna らを除いて非常に性格が違う。

前者の中には物を造るだけに力学を利用しようとしていて, エレガントな弾性論でも, 少し理解しにくいと, その価値を低く評価しがちなせつかな人もたくさんいる。

この傾向の技術者の要望に応えるように I.A.S.S. のシンポジウムの課題は 1961 年 (ブラッセル) では次のようであった。

Simplified methods available for all kinds of shells for surfaces of zero gaussian curvature (シリンダー, コーンなど), surfaces of positive gaussian curvature (ドーム, 球殻など), and for surfaces of negative gaussian curvature (パラボロイド, ハイパボロイド形の曲面屋根, 吊り屋根など) すべての曲面の工学的解析にあったように, いかにして曲面を簡単に, かつ早く解くかに論議の中心が移されたのである。これらの題目は重苦しい微分方程式に包まれたシェルを早く明かすみに出す目的をもつものといえることができる。

3. さらに筆者が出席した 1962 年の I.A.S.S. の会合は 7 月パリで開催された。筆者の渡欧は 1961 年にトロハ教授からの勧誘で論文二つ以上をもって出席して貰いたいとのことで, その計画を進めていたところ氏の急逝でがっかりしたが, 論文一つだけは本会に提出することにした。

本会での題目は

- a) Hanging roofs
- b) Metallic superficial lattice frames
- c) Roofing materials
- d) Continuous metallic shells

であって, 一般にはシェルの実際設計と施工経験, 模型実験の報告が多く, シェルの材料施工の問題もまた討議された。対象となった構造物は吊り屋根と金属シェル

(主体トラス)であって、b) についていうならば部材の生産と組立方法の簡易化をねらった、スペース フレーム (space frame) について欧州を中心とした諸国の現状の報告があった。この方面の研究では米国のフーラー、ワックスマンらに対し英国ではマコウスキーらが活発に動いていることがわかる。特にアルミニウムで作った四面体や五面体その他の単位を組立てた構造物が連続体に近い性状をもつことは、この種立体トラスがシェル構造の分類の中に入ることを裏づけするが、もちろんその組立てのためのジョイント (接合部) にそれぞれ特殊の技巧が施され、またこれがこの種構造の生命ともいえるのである。これら b), c), d) はほとんど実験的のものであって純理論派の入り込む余地は少ない。したがって本会への出席者約 100 名中大半は実務家であったようである。

a) の課題は大スパン構造に対し、吊橋の原理に類した吊り屋根が薄肉コンクリート シェルや、鉄骨造シェルに活発に利用されるようになったので主題の一つとされたものである。生前トロハ教授がシェルの形を定めるのに、液体膜理論の拡張を試みたことがある。液体膜は境界の形と表面張力とで形を保つから、逆にいえば液体膜でできた曲面と相似なシェルでは、特定の荷重に対しては、一様な応力状態となり、面内せん断力が存在しないことになる。しかし氏は自分の経験では、この方法は理窟はともかくとして、非常に不経済な非工学的な考えに帰着すると述べていた。一方吊り屋根は  $x, y$  二方向に数多く張られた鋼線で作られる曲面であり、コンクリートにおける元応力 (プレストレス) 工法が発達した今日では、いろいろな方法で十分これを実現できる。この構造は液体膜同様、面内せん断力はないが、 $x, y$  方向にはそれぞれ別個の応力が存在する点でも、 $x$  方向および  $y$  方向で水平面上に写影した応力が、それぞれの方向で一定であることでも、液体膜のもつ性質が人工的に拡張された構造である、とみなすことができる。ただし曲面の形については曲面の剛性を保つために、ガウス曲率を負にすることが理論からも工法からも必要となる。これらの方法に関連して上下弦材に圧縮応力の存在しないトラスが工夫されている。そしてこの応力状態を実現するには元引張力を与える必要があり、元引張力の与え方にも 2 本の鋼線を平行させ中央から両者を引きつけて行くのと、2 本をくっつけておき両者の間に銅い物 (ストラット、圧縮材) をはさんで広げるとのとおりあって、前者は中央がくぼんだトラスになり、後者は中央がふくらんだ形をとるが、この両者の特質について多くの議論が行なわれた。また吊り屋根の構造形式によっては、自動振動 (フラッダリング) の危険があるか無いかについても同時に論じられた。

本議題については F. Otto (西独の技師) がその経験談をシンポジウムのプロローグとして述べたが、筆者が講演の終りの時間を借りて映写した、現在計画中のオリンピック競技場の構造概要を示す吊り屋根のスライドは、参会者の数人の言葉によれば、好評であったようである。このように I.A.S.S. は 1, 2, 3 と大別したとおりの理論家、実際家と混然と入りまじったシェル構造全般についての同好者の集まりといったもので、明年の課題は Non-classical Shell Problems であり、再び理論および組織的実験の研究報告が、シェルの塑性問題を中心としてポーランドのワルソウで開かれることになっている。前に述べたとおり、W.C.S.S. は、I.A.S.S. が欧州を中心として大きくまとまっているのに対して、その総合会議として催されたもので、各国のシェル構造の実施例が展示され、日本から晴海国際見本市 (村田、坪井)、静岡体育館、愛媛県民館 (丹下、坪井)、新潟体育館 (宮川、加藤) 等を出品したが、欧米のそれらに対して遜色を感じたとは思わなかった。なお W.C.S.S. ではボーイング会社の研究所の機械技師らも球殻の実用解についての論文を提出し、また筆者らの研究の立場からの批判を求めるなど、I.A.S.S. にはほとんど加入していない技術者 (Mechanical Engineer) たちとの理論的、技術的交流がはかられたことは W.C.S.S. の一つの特色であったといえる。

しかし W.C.S.S. については次の開催期の約束はなく、シェルの論議のすべては I.A.S.S. にかけている。

以上、I.A.S.S. の性格を中心として、筆者の出席したシェル会議の概要を述べ、理論の展開と実用面での理論の応用とが、必ずしも多いとはいえない会員でままとまっている I.A.S.S. によって健全かつ急速に成長しつつあることを報告した次第である。

1962 年における I.A.S.S. は前述のとおり吊り屋根を主題としてそのシンポジウムを開いている。したがってここでは吊り屋根関係の論文だけを紹介しようと思う。

- 1) H. Bandel (New York) : Hung Roofs and their Structural Solution  
吊り構造の設計例数種。
- 2) R. Sarger (Paris) : Etude Theorique de Constructions en Toitures Suspendues et Voiles Pretendues  
二方向のメイン ケーブルを吊り綱および押え綱で構成し、これらでできるパネルの間をまた吊り綱と押え綱とで綱目を造る。したがって二方向メイン ケーブルは立体的には交っていない。数多くの凹凸のある吊り屋根が構成できることを示している。
- 3) Eras, 他 (Berlin) : Berechnungs verfahren für vorgespannte, doppelt gekrümmte seilnetz werke  
つなごの水平面への射影が (元応力状態および載荷時とも)