

# 分布荷重負荷装置について

植 村 益 次・砂 川 惠  
市 田 和 夫・井 山 向 史

## 1. ま え が き

航空機の主要構造は周知のごとく薄板および殻等の薄肉構造であり、重量軽減の立場からその板（殻厚）は極限まで薄くすることを要求される。薄板および殻体構造はその重量に比して高い耐荷能力を有するが、必然的に大変形を生じ易く、荷重がある限界値を越すといわゆる不安定挫屈現象を呈する。しかし挫屈後も耐荷能力のあることを利用しており、従って、その変形および安定問題の研究は、学問的に興味深いのみでなく実用上の見地からも極めて重要である。そして、外荷重の算定とそれによって発生する構造内の変形・応力解析との両者を精度よく行うことは、材料強度の研究とも関連して、機体の安全性および信頼性の向上に寄与するところ大きい。

上述の観点からの研究を進めていた筆者等を含む構造研究グループは、航空安全委員会の発足に際し、材料研究グループと一緒に第三専門委員会を構成し、相互に連繫を保ちつつ研究成果をあげることにした。

この委員会に構造研究グループが提案し承認された研究課題は、次の二項目に大別することができ、それぞれ理論解析と共に実験的研究を行うものである。

(1) 補強薄肉構造の強度と剛性：薄板および殻体構造の変形および応力状態（構造の強度および剛性の問題）ならびに薄肉であるために起る挫屈現象（構造安定の問題）等の解明である。薄肉構造は変形し易く、その解析は非線形問題であるためモノコック構造においても極めて困難であり、殊に補強構造については明かでない点が甚だ多い。従って本研究では、補強平板、波板、膜構造、サンドイッチ構造、複合構造、ならびに球形殻、円筒殻および円錐殻等の各種の殻体の構造について、その強度、剛性および安定の問題の研究が行われる。

(2) 補強薄肉構造の動特性：航空機の離着陸時（飛行艇等の離着水時をも含む）、突風時、急激な操舵時、異物の衝突時および緊急の正常でない着陸・着水時等航空機構造に動的荷重が加わる場合の、外力の様相と構造の動的応答の解明であり、補強構造の減衰効果特性、着水衝撃ならびに動的挫屈の研究等も含まれる。

以上のごとく外荷重ならびにそれに対する構造の挙動の解明が進めば、単に航空機の設計・製造および運用時の安全性および信頼性の増大に寄与するのみでなく、万一事故が起きた場合にもその原因の究明に有用である。

以上の研究目的に対して設置された実験設備のうち、昭和43・44年度に設置された分布荷重負荷装置について報告する。従来航空機構造に分布荷重を負荷するには、鉛弾体、内圧をかけたゴムチューブあるいは接着パッドを用いたトーナメント方式等が用いられていた

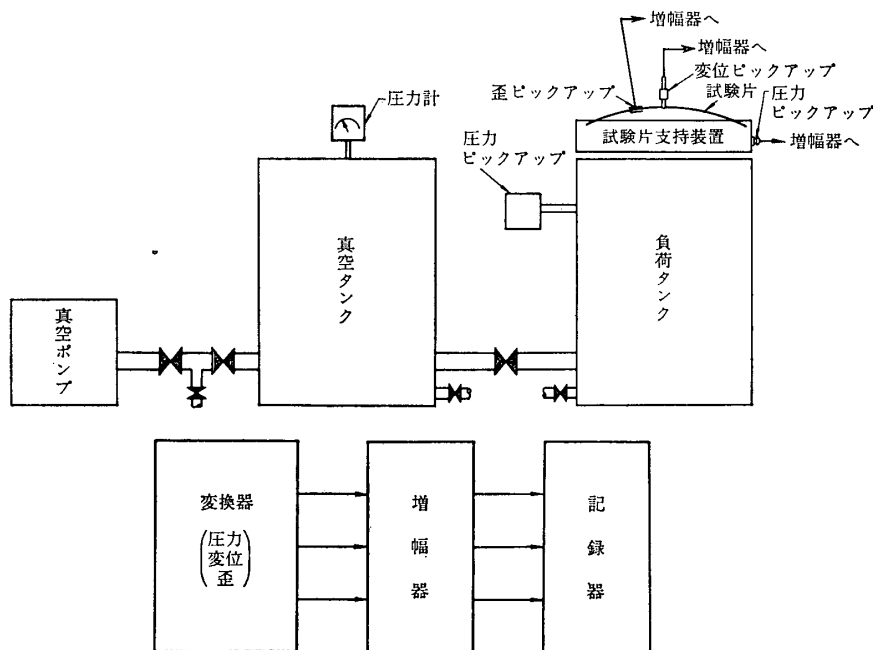
が、その様な方法では空気力に対応する外部荷重を局部的影響なしに与えるのは極めて困難であるので、本装置では真空装置を用いて片面に負圧を作用させる方式を採用している。この方式では面内分布が一様の荷重を、機械的に無接触で、静的から衝撃的まで与えることができ、薄板構造および殻体構造の強度、剛性および動特性の実験的研究に使用される。

## 2. 装置の概要

本装置は、薄板および殻体構造の要素あるいはそれらの模型に、機械的に無接触で、時間的に変化し得る一様分布の荷重を加える装置であり、次のものより構成される。

- |                   |                           |
|-------------------|---------------------------|
| (1) 真空ポンプ         | (5) 試験片支持装置               |
| (2) 真空タンク (緩衝タンク) | (6) 変換器 (圧力・変位・歪) および計測装置 |
| (3) 負荷タンク         | (7) 記録器                   |
| (4) 配管系           |                           |

第1図にその系統図を示し、以下簡単にその内容を説明する。



第1図 装置の系統概要図。

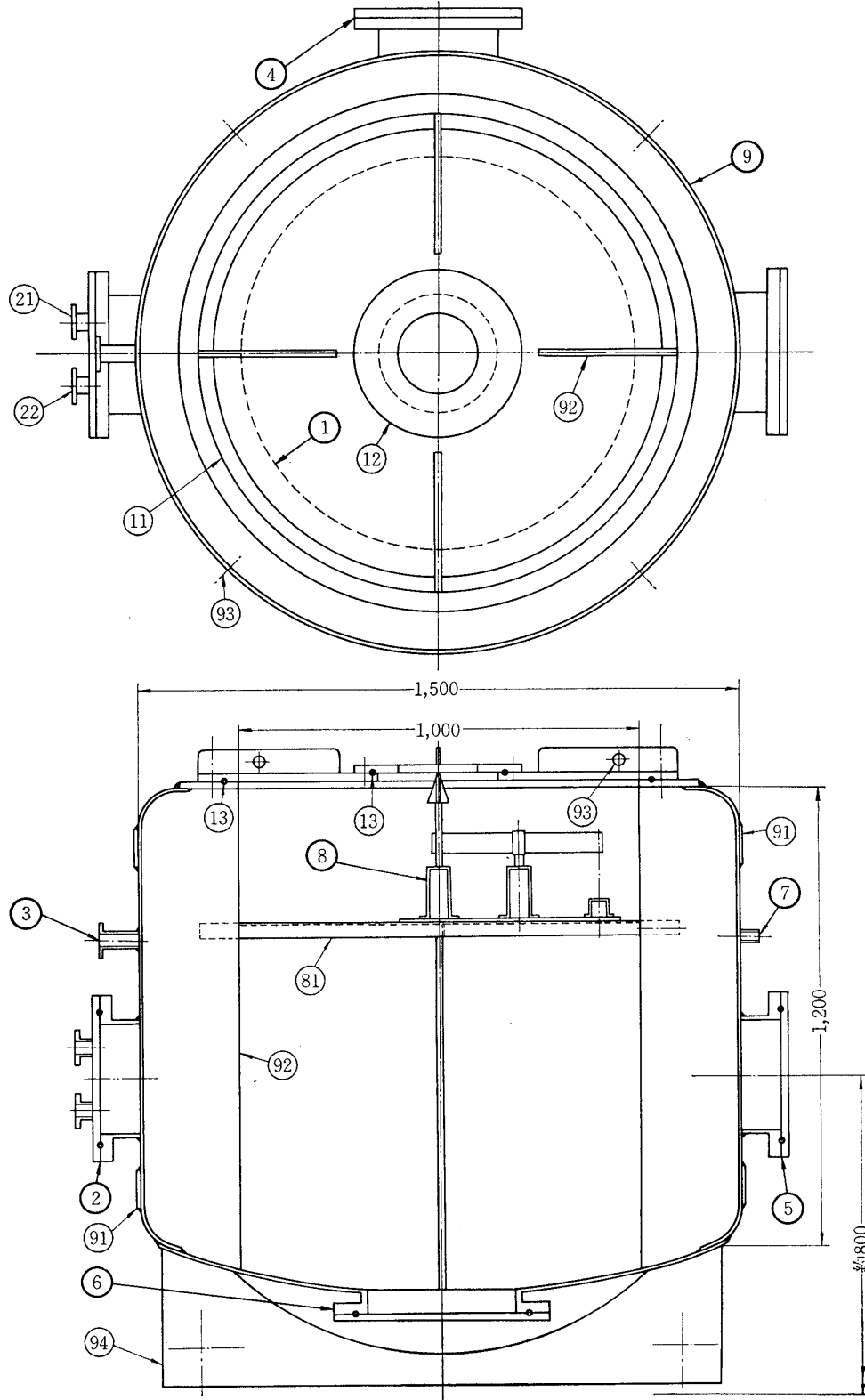
### 2.1. 真空ポンプ

本装置に使用している真空ポンプの概要を第1表に示す。

### 2.2. 真空タンク、負荷タンクおよび配管系

真空タンクおよび負荷タンクはほぼ同じ外形のタンク (概略の外形寸法: 1,500φ×1,500) であり、内容積は共に約2m<sup>3</sup>である。負荷タンク (それに附随して真空タンク) の容量を2m<sup>3</sup>と比較的大きくしたのは、試験片に与える負荷を微細に調節するためと、負荷による試験片の変形によるタンク内の圧力変動殊に試験片の動特性への影響を除くためとである。

真空タンクはトムバク管 (内径80φ) を介して真空ポンプと、弁用フランジ (内径300φ)



- |                 |                   |
|-----------------|-------------------|
| ① 上部開口部(試験片取付部) | ⑪ 殻体試験片(大)支持装置取付板 |
| ② 弁用フランジ        | ⑫ " (小) "         |
| ③ 除荷弁用フランジ      | ⑬ Oリング            |
| ④ 端子板用フランジ      | ⑭ ニードルバルブ         |
| ⑤ 外気導入用フランジ     | ⑮ リークバルブ          |
| ⑥ 透視用フランジ       | ⑯ 撃針装置支持材         |
| ⑦ 圧力ゲージ用ソケット    | ⑰ 補強帯             |
| ⑧ 撃針装置          | ⑱ 補強板             |
| ⑨ タンク本体         | ⑲ 吊上装置            |
|                 | ⑳ 台車              |

第 2 図 負荷タンクの概要.

第 1 表 真 空 ポ ン プ.

型式	回転真空ポンプ
到達真空度	$1 \times 10^{-3}$ Torr.
排気速度	1,500 l/min
所要モータ	2.2 kW (3 相)
回転数	400 rpm
吸気口内径	80 mm
油 量	6 l
外形寸法 (含台)	1,170×480×820

を介して負荷タンクと結合され、負の貯気槽であって緩衝の役目をする。弁用フランジの蓋には負荷タンクに通ずるパッキレスバルブ、U字管に通ずるパッキレスバルブおよびリークバルブがついている。後述の衝撃荷重を与える実験の場合には、弁用フランジを利用して蛇腹（内径 300φ）で負荷タンクと直結することもできる。

負荷タンク（第 2 図）には次のごとき開口フランジがある。

(1) 上部開口部（試験片取付部）①（番号は第 2 図を参照，以下同様）：内径 1,000 φ であり，薄板試験片支持装置が直接取付けられる。なお，殻体試験片支持装置は図示のごとき取付板⑩，⑪を用いて取付けられる。

(2) 弁用フランジ（内径 300 φ）②：その蓋に真空タンクに通ずるニードルバルブ②およびリークバルブ②がついている。なお上述のごとく，この蓋を取去り蛇腹で真空タンクと直結できる。

(3) 除荷弁用フランジ（内径 25 φ）③：負荷の微調節および精密な除荷のためのニードルバルブがついている。

(4) 端子板用フランジ（内径 300 φ）④：信号入出のための絶縁端子 12 対がその蓋に用意してある。

(5) 外気導入用フランジ（内径 300 φ）⑤：試験片に矩形波状の荷重を与える場合の外気導入口であり，使用しない場合は盲蓋で閉鎖しておく。

(6) 透視用フランジ（内径 400 φ）⑥：透明板を通して上部開口部に取付けられた試験片の内面が観察でき，さらに光弾性材料の試験片を用いて透過法による光弾性実験を行う場合の光路となる。使用しない場合は盲蓋で閉鎖しておく。

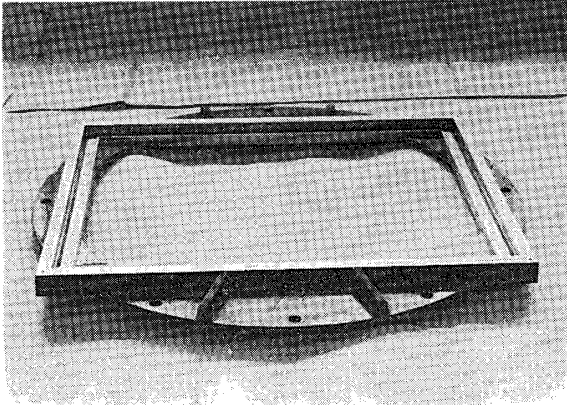
なお，負荷タンク内部には撃針装置⑧が 2 組（上部開口部および外気導入用フランジ部）用意され，衝撃分布荷重試験に使用される。

### 2.3. 試験片支持装置

本装置を使用して行う実験の試験片は，薄板構造と殻体構造とに大別することができ，それぞれに対して試験片支持装置が用意されている。これらを負荷タンクの上部に取り付け，試験片に負圧により分布荷重が負荷される。

#### 2.3.1. 薄板構造試験片支持装置

本支持装置は，長方形の補強板，波板，膜構造を取り付け，分布荷重を負荷するもので，周縁の四辺は樹脂系接着剤でかため，負圧の漏洩を防止し，気密を保っている。

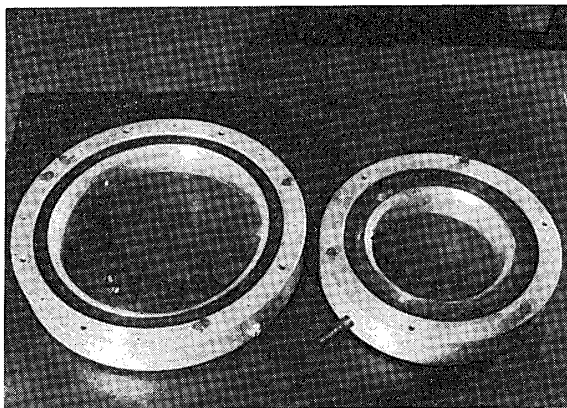


第 3 図 薄板構造試験片支持装置

長方形薄板試験片の大きさは長さ 1,000 mm, 幅 780 mm, 高さ 20 mm であるが, 分布荷重をうける試験片の有効長さは 920 mm, 有効幅は 700 mm である.

### 2.3.2. 殻体試験片支持装置

球形殻, 円筒殻および円錐殻のいずれに対しても使用できる支持装置であり, 半径 (球形殻および円錐殻の場合は底円の半径) 100



第 4 図 殻体試験片用支持リング (球形殻試験片が接着してある).

本支持装置は第 3 図に示すが, 支持装置の枠材は, Al-Mg 系合金鋳物 (ヒドロナリウム, AC7B) で製作されており, この合金は耐食性および機械的性質が優れ, 鋳造後の変形が少ない材料である.

試験片支持装置は, 負荷タンクの上部に 8 本のボルトを用いて締結されるが, この際支持装置と負荷タンクの間には O リングを用いて気密を保つように配慮している.

mm および 150 mm の両場合の試験片が使用できるように二種類用意してある. 試験片はまず支持リング (ヒドロナリウム製) に樹脂系接着剤で固定され, それを負荷タンクの上部開口部に装着された取付板に取付ける. 取付けは気密を保つため O リングを用いてボルトで緊締する. 第 4 図に支持リングの写真を示す.

なお, 試験片内面に接着の抵抗線歪ゲージ等よりの信号取出しのため, 絶縁端子 24 対を埋込んだ支持リングも用意してある.

第 4 図に支持リングの写真を示す.

である.

## 2.4. 変換器および計測装置

### 2.4.1. 圧 力

真空タンクの圧力は水銀柱真空計で監視する.

負荷タンクの圧力はタンク壁に取付けられた水銀柱真空計の他に, 試験片支持装置を介して試験片の近傍に取付けられた半導体小型圧力変換器を用いて測定する. 第 2 表に半導体小型圧力変換器の要目諸元を示す.

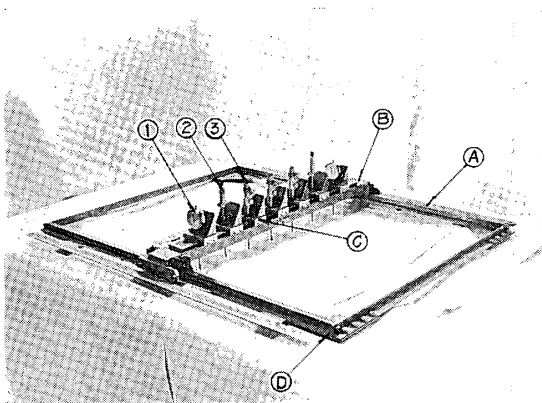
### 2.4.2. 変 位

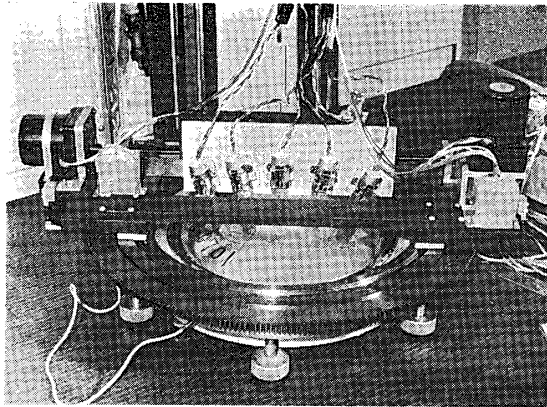
#### (1) 薄板構造試験片用

長方形の薄板構造試験片の変位測定装置は, 負荷タンクの上部に取りつけた試験片支持装

第2表 半導体小型圧力変換器.

受圧部直径	mm	5φ			3φ
測定範囲	kg/cm <sup>2</sup>	-0.2~+0.2	-0.5~+0.5	-1~+1	-1~+2
固有振動数	kHz	9	10	15	40
出力感度	mV/kg/cm <sup>2</sup>	250	125	115	25
使用温度範囲	°C		-30~+100		
零点移動温度補償範囲	°C		-10~+60		
零点移動温度特性	%FS/°C	±4	±0.1		±0.15
ヒステリシス	%FS		±1		
繰返し精度	%FS		±1		





第 6 図 球形殻用変位測定全面走査装置.

### 2.4.3. 歪

試験片の歪を測定するには通常抵抗線歪ゲージが使用される. そのために, 静的歪測定器および多点 (24点) 切替スイッチボックス, 動的歪測定器 (搬送波 20 kHz) および多点デジタル歪測定装置が用意されている.

なお上記の他に, 光弾性材料による模型実験のため, 第 3 表に示す光弾性装置がある.

### 2.4.4. その他

以上の他に, 加速度変換器およびメモリスコープがある.

第 3 表 光弾性装置.

品 名	内 容
大集光レンズ	$D=90\phi$ , $f=110$
小集光レンズ	$D=50\phi$ , $f=140$ , 5461Åフィルター, ロボングラス付
視野レンズ	$D=300\phi$
偏 検 光 子	$D=300\phi$ 連動式

第 4 表 X, Y-T 記録計.

基準測定電圧	X, Y <sub>1</sub> ~Y <sub>3</sub> 軸共 10 mV/FS
追 従 速 度	X 軸 1 sec/FS      Y <sub>1</sub> ~Y <sub>3</sub> 軸 0.7 sec/FS
確 度	各軸共 ±0.3%
時 間 軸	75 mm/hr~480 mm/min (10段)

## 2.5. 記 録 器

### (1) 多現象 X, Y-T レコーダ

X 軸を共通とする 3 素子の X-Y 記録計であるが, 切換えにより, 3 素子の時間的变化の記録計ともなる. 第 4 表に概要を示す.

第 5 表 カーブプロッタの概要.

入 査 器 走	走査点数	12点
	走査速度	2, 4, 8 秒及び手動送り (1点保持)
X レ コ ー ダ Y	入力レンジ	0.5 mV/cm~10 V/cm (14段)
	精 度	±0.25% FS
	感 度	±0.1% FS
	追従速度	X 軸 0.8 sec/FS,      Y 軸 0.5 sec/FS
	時 間 軸	0.1~2 cm/sec (5段)

## (2) カーブプロッタ

入力走査器, X-Y レコーダおよびマルチヘッドの組合せにより, 最大 12 点のアナログ量を特性曲線として記録できるものである. 第 5 表に概要を示す.

## (3) 直記式電磁オッシログラフ

第 6 表に電磁オッシログラフおよび振動子の要目を示す.

## (4) 高速カメラ

高速の過渡的現象の記録のために高速カメラが用いられる. その要目を第 7 表に示す.

第 6-a 表 直記式電磁オッシログラフ.

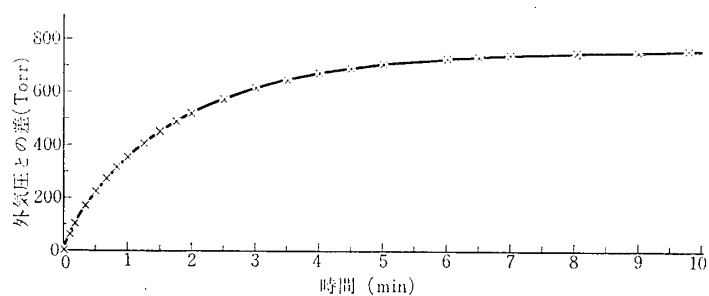
素子の数	12
光学レバー	約 450 mm
記録紙送り速度	5 cm/min~200 cm/sec (12段)
タイミング・ピッチ (sec)	0.01, 0.1, 1, 10 (4段)

第 6-b 表 振動子.

名称	感度一様な 周波数上限	電流感度
G-170 B	100 Hz	3.3 $\mu$ A/mm
G-1000 A-F	400	0.12 mA/mm
G-2500 A-F	1,000	0.46 mA/mm

第 7 表 高速カメラ.

撮影速度 マガジン	500~10,000 fps 120 m プレーキマガジン
タイミング・ライト・パルス・ジェネレータ	発振周波数 (Hz) 周波数精度 10, 100, 1000 $1 \times 10^{-5}$



第 7 図 真空ポンプおよび真空タンクの性能.

## 3. 性能および使用例

本装置は設置後の日が浅くさらに整備・調整中である. 第 7 図に真空ポンプの吸気による



真空タンク単体内の圧力変化を示す．図示のごとく短時間に負の貯気が可能であり，実験の能率向上に寄与している．なお通常の状態における真空タンクの漏洩は 3 Torr/day 以下である．

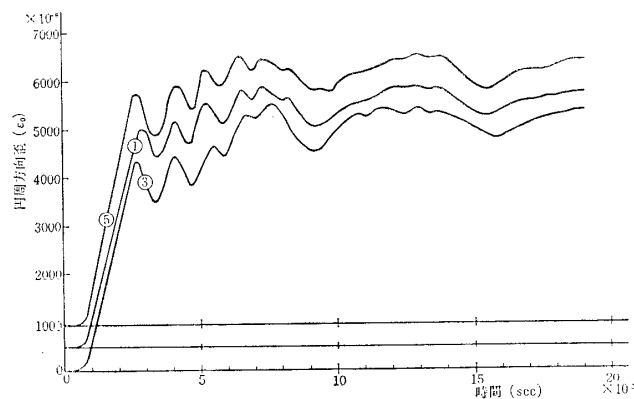
さて本装置は，補強平板，波板，膜構造，サンドイッチ構造および複合構造に一樣分布荷重，球形殻に一樣分布外圧，ならびに円筒殻および円錐殻に一樣分布外圧および半静水圧を加えることができる．現在までに行われかつ続行されている実験に次のごときものがある．

#### (1) 球形殻の静的座屈

従来から行われていた実験の継続として，外圧をうける球形殻の座屈前変形，応力分布，座屈圧力等の測定および座屈波形の観測が続行されている [1]．

#### (2) 球形殻の動的挙動

試験片接着リングと保持板との間に膜を挿入し，これを撃針で破って粘弾性球形殻に擬似ステップ状外圧を与え，その動座屈荷重，粘弾性の座屈値および動的挙動に与える影響，衝撃的に座屈しないでクリープ状座屈を呈するときの挙動および座屈波形の観察等が行われている．一例として，動座屈した場合の円周方向歪の時間的变化 [2] を第 8 図に示す．



第 8 図 円周方向歪の時間的变化の一例，粘弾性球形殻．

## 4. あとがき

本稿においては，航空機の安全性および信頼性向上のための研究の一環として設置された分布荷重負荷装置について述べた．

すでに述べたごとく本装置は現在整備および調節中であり，日を追って実験が進捗する予定である．

現在計画中の実験として，次のごときものがある．

#### (1) 薄板構造関係

薄板構造関係としては次のようなものである．

① 丸型・角型波板は，曲げ剛性を高めるために用いられる薄板構造形態であるが，圧縮側の局部座屈によって耐力がきまる．従来行われたように線荷重や鉛弾体では局部集中荷重

により局部的に破損したが[3]、本装置による分布荷重負荷によって上記の問題が解決できるので、真の曲げ耐力を検討する。

② 実験上最もよく用いられる補強板構造、すなわち縦通材、肋材で補強された平板の曲げ剛性の研究で挫屈に対する限界荷重と共に、挫屈後の耐荷能力を試験し、補強材の形状の影響など実用上重要な問題を検討する。

③ 曲げ剛性がなくとも、面内張力で耐荷する薄膜テンション構造が最近注目されているが、分布荷重と変位の非線型関係、異方性の影響、リンクリング発生後の膜の挙動などがさらに理論的に解析され[4][5]、本装置で実験的研究を行う。

## (2) 殻体構造関係

3において述べた実験をさらに発展させ、特に時間をパラメタにして、静的から衝撃的までを連続的に網羅した球形殻の挙動解明に関する実験を進める予定である。同様なことは円筒殻および円錐殻に関しても行われる。これらの研究は殻体構造の強度、剛性および安定問題に寄与するものと期待される。なお現在行っている実験はモノコック試験片に関してであるが、近い将来補強殻にも拡張される。

以上の実験が進むに従い、さらに装置の増強ならびに附属装置の補充の必要性が予想される。これらを逐次解決し、航空機構造の安全性および信頼性の向上に役立つ研究を推進していく所存である。

1970年7月17日 航空力学部

## 参 考 文 献

- [1] 砂川 惠, 市田和夫: 外圧による球形殻の挫屈に関する実験的研究, 第18回応用力学連合講演会論文抄録集, (昭43.11), 101.
- [2] 砂川 惠, 熊井 規: 動的荷重を受ける粘弾性球形殻の挙動, 第12回構造強度に関する講演会講演集, (昭45.7), 75.
- [3] 植村益次, 砂川 惠: 波板の曲げ剛性と強度, 「ステンレスと建築」第2篇第3章, (昭41.3), 技報堂.
- [4] 植村益次, 近藤恭平: 横圧による直交異方性膜の変形と膜張力, 航空機の構造強度及び振動研究委員会講演, (昭44.7).
- [5] 植村益次: 大型テント膜面に発生する張力について, 建築材料, (I)第6巻第11号 (1966/11), 39/44, (II)第7巻第12号 (1967/12), 14/20.