

UDC 621.452.322:
62-135:
62-213.7:
620.162

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-308

ファンジェットエンジンFJR710/10 静止部剛性試験第1報

—— 圧縮機・燃焼器・タービン等の静止部 ——

池田 為治 ・ 小河 昭紀
松末 勝利 ・ 宮地 敏雄

1976 年 9 月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

項目	担当者
計測装置	石垣 亨 ^{**} , 小林英夫 ^{**}
実験	池田為治 [*] , 小河昭紀 [*] , 宮地敏雄 [*] , 井上利昭 ^{**} , 小林英夫 ^{**}
解析および整理	小河昭紀 [*] , 松末勝利 [*] , 祖父江 靖 [*] , 藤沢良昭 [*] , 橋本良作 [*] , 勝又一郎 ^{**} , 小林英夫 ^{**}

* 原動機部

** 石川島播磨重工業(株)

ファンジェットエンジンFJR710/10 静止部剛性試験第1報*

—— 圧縮機・燃焼器・タービン等の静止部 ——

池田為治**、小河昭紀**
松末勝利**、宮地敏雄**

1. まえがき

ジェットエンジンの静止部、すなわち圧縮機、タービン、燃焼器などのケーシングおよび軸受を保持するフレーム類は重力、エンジン内部の圧力およびエンジンが発生する推力による荷重のほか、航空機の運動、離着陸、突風などの際の加速度による荷重を受ける。

これらの荷重による各部の変形が或る限度を超えると、動翼とケーシングとの接触、シール部の異常な接触などが生ずる可能性がある。

また、各フレームのストラットの付根部分、マウントの周辺部分などには、高い応力が生ずることが予測される。

上述のような変形あるいは応力については、設計時に理論解析などによって、できる限り検討されるが、形状も荷重条件もきわめて複雑な場合が多いので、理論解析などの結果の信頼性は必ずしも高くない。

したがって、エンジンの試作過程の、なるべく早い時期において、実用時の荷重に相似した荷重による各部の変形、応力などの実測を行なうことが必要と考えられる。

以上の理由により、FJR 710/10 エンジンの静止部について、実用時の荷重に相当する荷重を加え、各部の変形と応力の測定を行った。その結果からケーシングについてはこれを「はり (beam)」と考えた場合の等価曲げ剛性、軸受支持部については等価ばね定数を算出し、各種の解析に利用しやすくした。

なお、ファンケーシングおよびファンフレームについては第2報^①に述べることとし、本報告にはこれを除く高圧圧縮機前部フレーム、同前部ケーシング、同後部ケーシング、燃焼器ケーシング、高圧タービンケーシング、タービン中間フレーム、低圧タービンケーシングおよびエクゾーストフレームについて剛性の測定を行った結果

を述べる。

2. 試験体

付図 1.0 に FJR 710/10 エンジンの概略を示す。本報告に述べる剛性試験の対象としたものは本エンジンの高圧圧縮機前部フレーム (以下前部フレームと記す) からエクゾーストフレームまでの、エンジン外殻部を構成している部分で、表 1 および付図 1.1 ~ 1.8 に示す部分から出来ている。

なお、剛性に影響を与えない部材、たとえば燃焼器ライナなどは組み込まずに試験を行なった。

本エンジンは前部フレームに設けられた前部マウントとタービン中間フレームに設けられた後部マウントの 2 個所で支持されている。このうち前部マウントはエンジンの推力と重量を受け、後部マウントは重量のみを受ける構造となっている。

低圧軸の軸受は前部フレームの前端、同中央部、タービン中間フレームおよびエクゾーストフレームの 4 個所に設けられている。これらをそれぞれ軸受 01、軸受 02、軸受 03 および軸受 04 と呼ぶ。これらの軸受のうち、半径方向荷重のほか推力も受け持つのは軸受 01 のみで、他は半径方向荷重のみを受け持つ。

高圧軸の軸受は前部フレームの後端、燃焼器ケーシングの前端およびタービン中間フレームの 3 個所に設けられている。これらを軸受 1、軸受 2、軸受 3 と呼ぶ。これらのうち軸受 2 はころ軸受と玉軸受を組合せたもので、軸受 2R、軸受 2B と呼んで区別する。これらの軸受のうち、推力を受け持つのは軸受 2B のみで、他は半径方向荷重のみを受け持つ。

3. 試験装置と試験方法

この剛性試験のおもな目的は上述のマウントおよび軸受に運転時に作用する荷重による各部の変形を求めることである。このような剛性試験の方法としては、表 1 に

* 昭和 51 年 6 月 30 日 受付
** 原動機部

表1 試験体

付図番号	名 称	材 質	構 造
1.1	① 高圧々縮機前部フレーム	AMS 4215	鍛造品
	② 軸受01サポート	AMS 5613 (AISI 410)	
	③ 軸受02サポート	同上	
	④ 前部マウントハンガー	AMS 6415 (AISI 4340)	
1.2	高圧々縮機前部ケーシング	DS 1026 (クロモイ)	鍛造品, 上下二つ割
1.3	高圧々縮機後部ケーシング	AMS 5662 (インコネル 718)	鍛造品, 溶接, 上下二つ割
1.4	① 燃焼器ケーシング	AMS 5390 (ハステロイ X), AMS 5596 (インコネル 718)	鑄造品, 板金, 鍛造品, 溶接
	② 軸受2ハウジング	AMS 5663 (インコネル 718)	
	③ シールサポート	AMS 5665 (インコネル 600)	
1.5	高圧タービンケーシング	AMS 5662, AMS 5596 (インコネル 718)	鍛造品, 板金, 溶接, リベット
1.6	① タービン中間フレーム	AMS 5663, AMS 5596 (インコネル 718) など	鍛造品, 板金, 鑄造品, 溶接
	② 軸受3, 03ハウジング	AMS 5663 (インコネル 718)	
1.7	低圧タービンケーシング	AMS 5662 (インコネル 718)	鍛造品, 溶接, 上下二つ割
1.8	① エクゾーストフレーム	AMS 5754, AMS 5536 (ハステロイ X) など	鍛造品, 板金, 鑄造品, 溶接
	② 軸受04ハウジング	AMS 5662 (インコネル 718)	

示した8個の部分を1個ずつ、片側のフランジを固定して測定する方法がまず考えられるが、この方法によると固定されたフランジの条件が実機に組込まれた場合と異なるものとなるおそれがある。

また、高圧々縮機ケーシング、高圧タービンケーシングおよび低圧タービンケーシングのようにマウントも軸受ももたない部分がある。

これらの理由により、試験体は付図1.0にA, B, B', C, C', D, E, Fで示した8種類の部分組立とし、矢印の根元の・印で示したフランジを定盤に固定して試験した。この8種類の部分組立を区分A, B, …Fと呼ぶこととし、それらの区分に対し荷重点あるいは荷重方向を変えて行なった試験には一連番号を付け、試験1, 2…23と呼ぶこととする。これらを表2に示す。

試験体を図1のようにレール定盤の上に固定された厚さ50mm、1辺の長さ1500mmの正方形の鋼板の上に取り付ける。この鋼板には試験体の固定端とするフランジのボルト穴に対応するねじ穴が設けられており、試験体はこれによりボルトで固定される。

荷重は荷重点の種類と荷重方向により、次のような方法によって加えた。

(1) 軸受部に半径方向荷重を加える場合

図1に(区分A, 試験2の場合)示したように下端に支点をもつ軸をてことし、その上端にチェンブロックにより水平方向の力を加え、軸にはめられたつばと荷重点のフランジにボルトで固定された半月形板を通して試験体に荷重を加える。

荷重の値はチェンブロックと直列に接続されたロードセルによって測定した(荷重測定は以下同じ)。

(2) 軸受部に軸方向荷重を加える場合

軸の推力を受ける軸受01と軸受2Bを支持する部分には、図2に(軸受01の場合)を示すように、アイボルト付の円板を取付けて荷重を加えた。

(3) 前部マウントに軸方向荷重を加える場合

図3に示すように、区分B, 試験21において、ワイヤロープと滑車を用いて荷重を加えた。

(4) 後部マウントに半径方向荷重を加える場合

後部マウントは付図1.6に示したように3個の支持点をもっている。このマウントに対しては区分D, 試験13において中央の1個のみに荷重を加える方法と、試験14において図4に示すように、左右の2個にワイヤロープをY字形に掛けて荷重を加える方法の2種類を用いた。

(2)~(4)においても荷重はチェンブロックによって加え、荷重の値はチェンブロックと直列に接続したロードセルによって測定した。

荷重は最大荷重まで段階的に増加し、その都度測定を行なった。最大荷重を加えた後、荷重を段階的に減少させ、同様の測定を行った。

試験体の各部の変位は図5に示すように鋼板に固定された支持装置に取り付けられたダイヤルゲージによって測定した。

測定位置は付図1.0に示した①~⑥(section 1~26)である。

表2 試験条件

試験 No.	試験 体 区 分	荷 重 点	荷 重 方 向	最大荷重 kg
1	A	軸受 02	Bottom	400
2	"	" 01	"	600
3	"	" 1	"	500
4	"	" 01	エンジン前方	700
5	F	" 04	Bottom	400
6	"	" "	Right	400
7	E	" 3	Bottom	600
8	"	" 0.3	"	600
9	"	" "	Right	600
10	D	" 04	Right	400
11	"	" "	Bottom	400
12	"	中間フレーム 中央マウント	Top	200
13	"	" 左右マウント	"	300
14	C	軸受 03	Right	400
15	"	" "	Bottom	400
16	C'	" 2B	エンジン後方	600
17	B'	" 2R	Bottom	500
18	"	" "	Left	500
19	B	" 01	Bottom	200
20	"	" "	Left	200
21	"	前部マウント	エンジン後方	300
22	C'	軸受 2R	Right	500
23	"	" "	Bottom	500

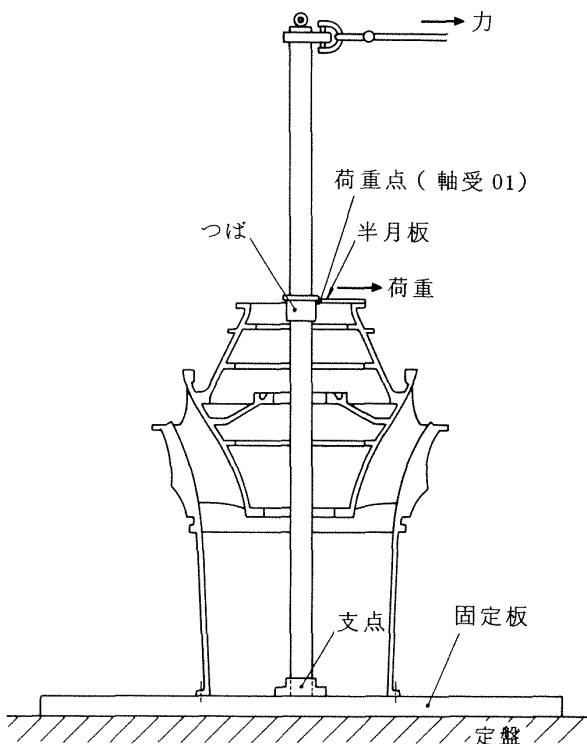


図1 荷重方法 1

(軸受部の半径方向荷重・試験2, 区分A)

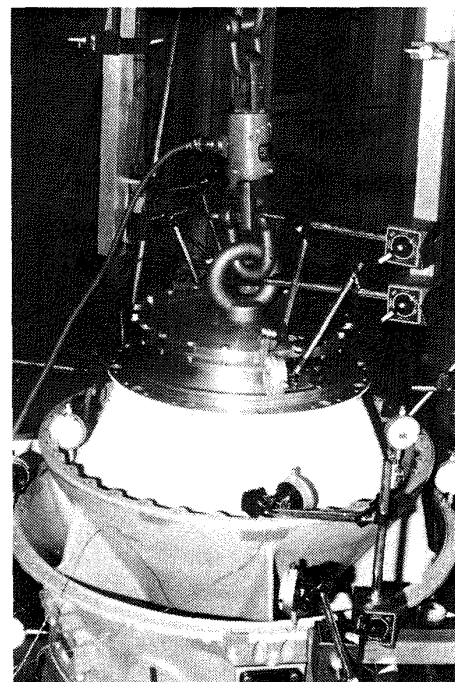


図2 荷重方法 2

(軸受部の軸方向荷重・試験4, 区分A)

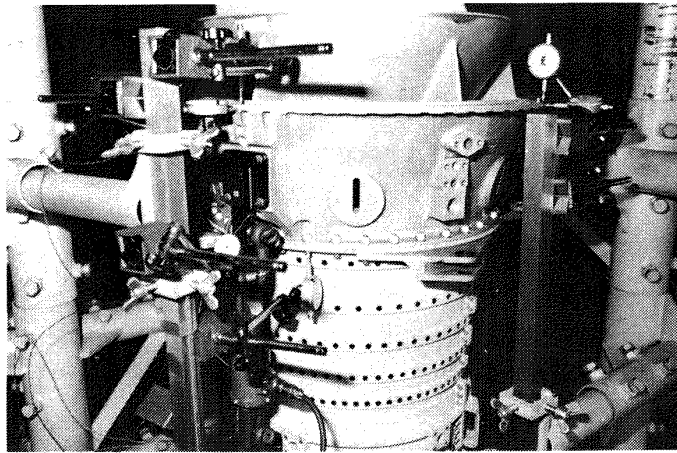


図3 荷重方法 3
(前部マウントの軸方向荷重・試験 21, 区分 B)

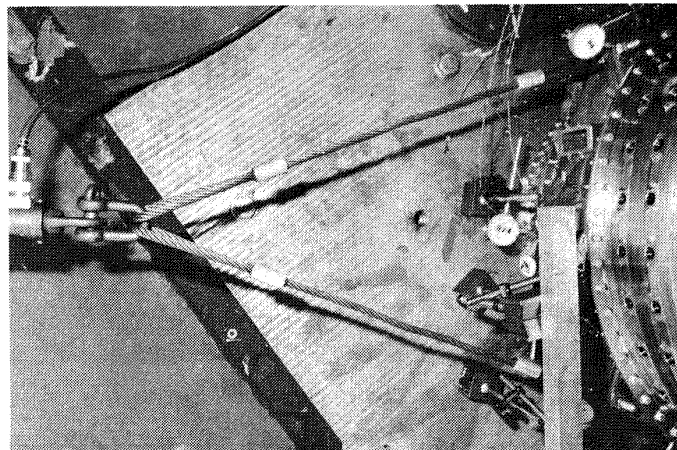


図4 荷重方法 4
(後部マウントの半径方向荷重・試験 13, 区分 D)

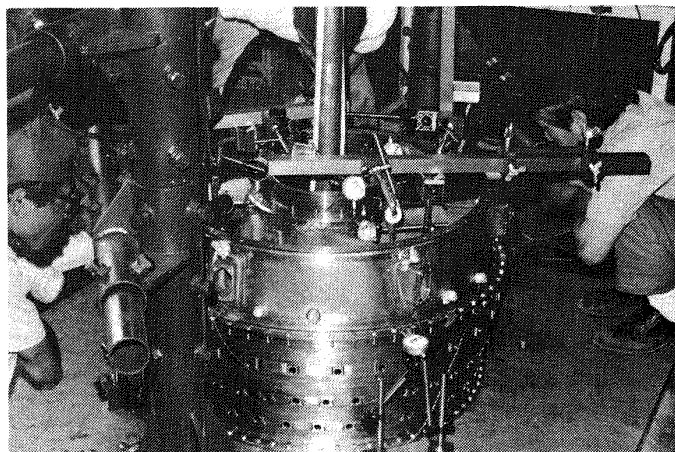


図5 試験状況
(軸受部の半径方向荷重・試験 6, 区分 F)

4. 試験結果

4.1 記号

試験体の円周上の位置を示すには、エンジンを前から見てTop, Left, Bottom, Right位置と記す。

ξ ; 単位荷重による測定断面中心のTop方向変位。

(1)式参照

ζ ; " " Right方向変位。

(2)式参照

u_T, u_L, u_B, u_R ; 測定断面のTop, Left, Bottom, Right各位置での半径方向変位, 半径が増す方向を正とする。

v_T, v_L, v_B, v_R ; 測定断面のTop, Left, Bottom, Right各位置での軸方向変位。試験体の長さが増す方向を正とする。

α ; 単位荷重による測定断面のRight-Left軸の傾斜角。(3)式参照。

β ; 単位荷重による測定断面のTop-Bottom軸の傾斜角。(4)式参照。

$z_\xi, z_\zeta, z_\alpha, z_\beta$; 比較する二つの断面の中心の相対変位 (ξ, ζ 成分) と相対傾斜角 (α, β 成分)。

(5)~(8)式参照。

添字;

T, L, B, R; それぞれTop, Left, Bottom, Rightを示す。

4.2 試験結果

表2に示した各試験の結果を付図2.1~2.23に示す。各々の付図に表示した数値は荷重と変位の実測値から最小二乗法によって求めた単位荷重1kgによる変位である。

なお、表示の中の一印はその試験において測定しなかったことを示す。

付図2.1~2.23は試験体の変形を立体図(軸測投影)に示したもので、実線は変形前、破線は変形後の測定断面を示す。

各点の変位は単位荷重1kgによる値を10万倍して図示した。なお、測定点は一つの測定断面につき4~8点なので、これらの図は測定断面の円周を20等分した点の変位を測定点の変位から内そうして求め、その20点を直線で結んだものである。また、下端の楕円は固定端のフランジを示す。

4.3 試験結果の解析

前述の試験結果から各ケーシングとフレームについて、それらをはりに置き換えた等価曲げ剛性(EI)および軸受から外殻までを1個のばねに置き換えたばね定数(K)

を計算した。

計算は次の3過程からなる。

(1) 各測定断面の変位の測定値から断面中心の変位と傾斜角を求める。

(2) 比較する2断面の相対中心変位と相対傾斜角を求める。

(3) 比較する2断面間をはりと考え、(EI)を求める。また、軸受と外殻の相対変位から(K)を求める。

以下に各計算過程について説明する。

(1) 測定断面中心の変位と傾斜角(図6, 7参照)

$$\xi = (u_T - u_B) / 2 \dots\dots\dots (1)$$

$$\zeta = (u_R - u_L) / 2 \dots\dots\dots (2)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \{ (v_T - v_B) / (2R) \} \dots\dots\dots (3)$$

$$\beta = \sin^{-1} \{ (v_R - v_L) / (2R) \} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、Rは測定点の試験体中心線からの距離である。

(2) 2断面の相対中心変位と相対傾斜角(図8参照) 断面iに対する断面jの相対中心変位と相対傾斜角を

求める。

$$z_\alpha = \alpha_j - \alpha_i \dots\dots\dots (5)$$

$$z_\beta = \beta_j - \beta_i \dots\dots\dots (6)$$

$$z_\xi = \xi_j - \{ \xi_i + (h_j - h_i) \tan \beta_i \} \dots\dots\dots (7)$$

$$z_\zeta = \zeta_j - \{ \zeta_i + (h_j - h_i) \tan \alpha_i \} \dots\dots\dots (8)$$

(3) 等価曲げ剛性(EI)と等価ばね定数(K)の計算

4.3.1 (EI)の計算

試験体を一樣なはりとして取扱い、図9(a)~(d)に示す4種の場合に分類して(EI)を計算した。

(a) 荷重点を持つフレームとケーシング(図9のa) 図10に示したように、基準とするフランジiに対する

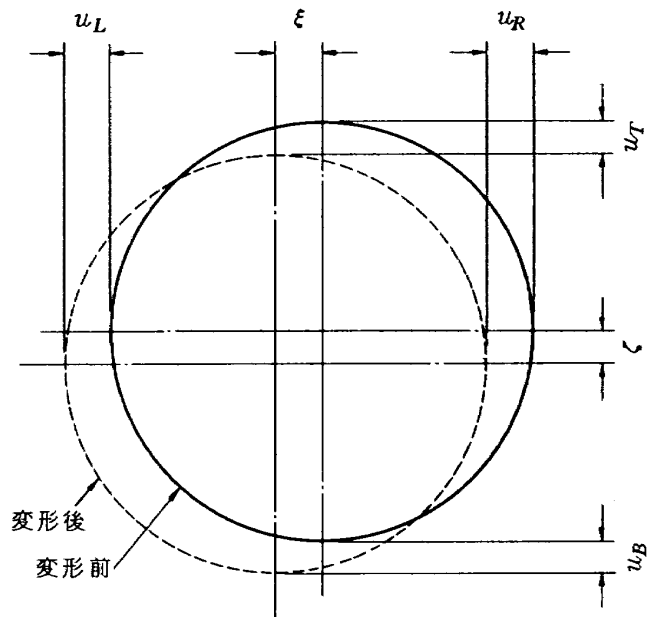


図6 測定断面中心の変位

荷重 W_2 が加わるフランジ j の相対中心変位と相対傾斜角は、

$$\Delta \xi = \frac{W_2 (h_j - h_i)^3}{3(EI)} \quad (9)$$

$$\Delta \beta = \frac{W_2 (h_j - h_i)^2}{2(EI)} \quad (10)$$

試験により、

$$\Delta \xi = z_\xi W_2 \quad (11)$$

$$\Delta \beta = z_\beta W_2 \quad (12)$$

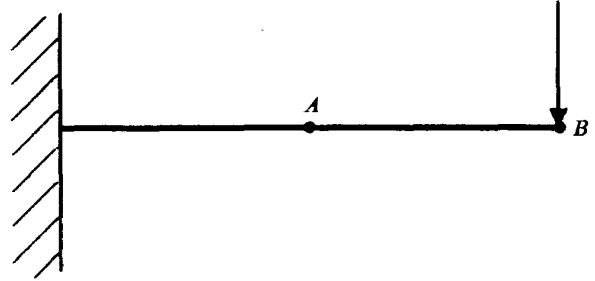
以上により (EI) は断面中心の変位による値 $(EI)_\xi$ と断面の傾斜角による値 $(EI)_\beta$ の 2 種が求められる。

$$(EI)_\xi = \frac{(h_j - h_i)^3}{3z_\xi} \quad (13)$$

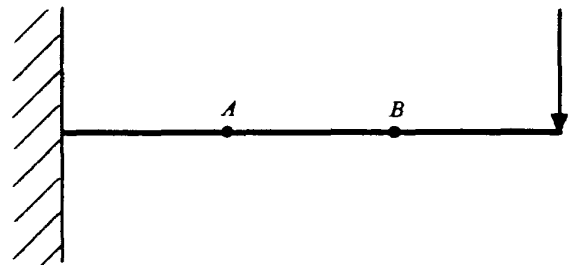
$$(EI)_\beta = \frac{(h_j - h_i)^2}{2z_\beta} \quad (14)$$

同様に、

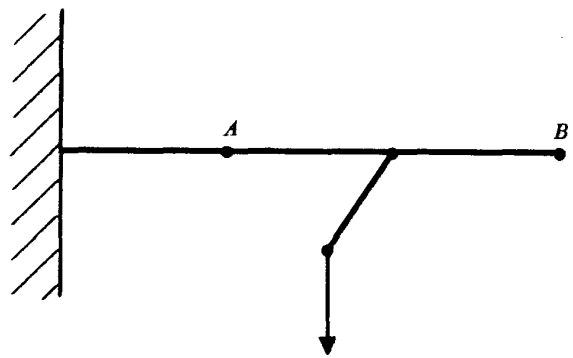
(a) 荷重点を持つフレーム、ケーシング



(b) 荷重点を持たないケーシング



(c) 燃焼器ケーシング、タービン中間フレーム



(d) 外そうによる場合

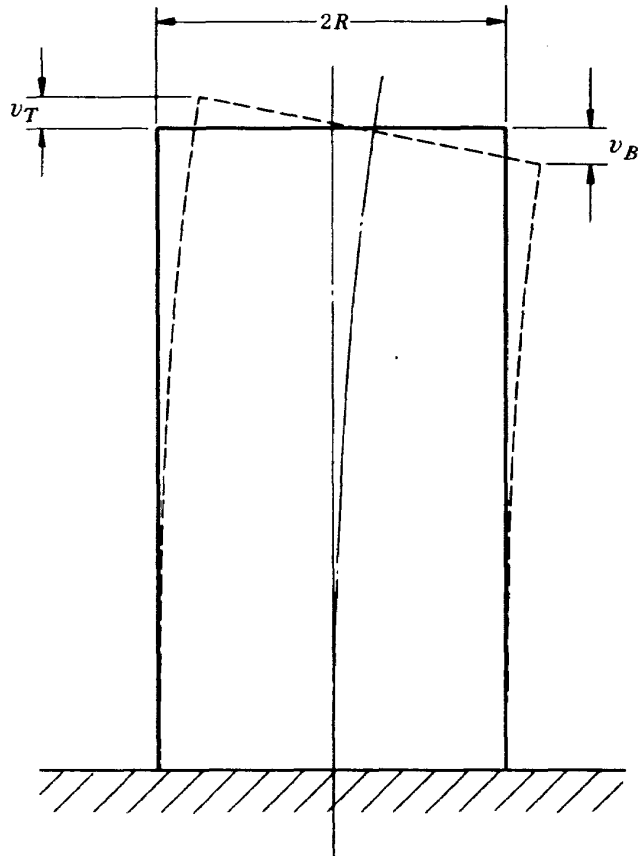
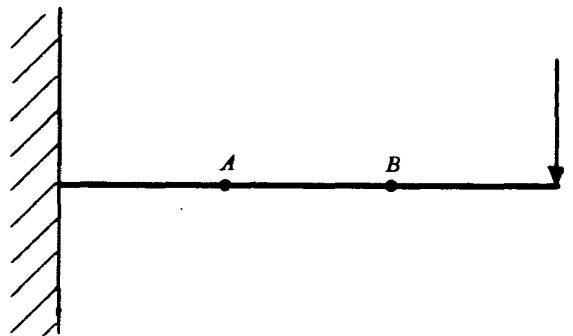


図 7 測定断面の傾斜角

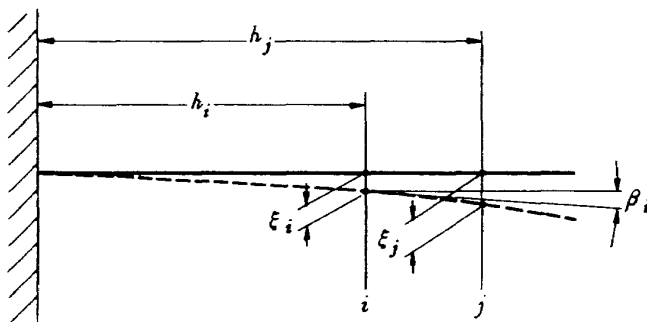


図 8 2 断面の相対中心変位と相対傾斜角

図 9 (EI) の計算法分類 a, b, c, d

$$(EI)_c = \frac{(h_j - h_i)^3}{3Z_c} \quad (15)$$

$$(EI)_a = \frac{(h_j - h_i)^2}{2Z_a} \quad (16)$$

(b) 荷重点を持たないケーシング (図9のb)

図11において、荷重フランジ*j*に加わる荷重 W_2 によってフランジ*i*に作用するせん断力 F_i 、曲げモーメントを M_i とすると、基準フランジ*i-1*に対するフランジ*i*の変位と傾斜角は次の式であらわされる。

$$\Delta\xi = \frac{F_i(h_i - h_{i-1})^3}{3(EI)} + \frac{M_i(h_i - h_{i-1})^2}{2(EI)}$$

$F_i = W_2$, $M_i = W_2(h_j - h_i)$ であるから、

$$\Delta\xi = \frac{W_2(h_i - h_{i-1})^2}{6(EI)} \cdot (3h_j - h_i - 2h_{i-1}) \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \Delta\beta &= \frac{F_i(h_i - h_{i-1})^2}{2(EI)} + \frac{M_i(h_i - h_{i-1})}{(EI)} \\ &= \frac{W_2(h_i - h_{i-1})^2}{2(EI)} \cdot (2h_j - h_i - h_{i-1}) \end{aligned} \quad (18)$$

したがって、

$$(EI)_\xi = \frac{(h_i - h_{i-1})^2}{6Z_\xi} \cdot (3h_j - h_i - 2h_{i-1}) \quad (19)$$

$$(EI)_\beta = \frac{(h_i - h_{i-1})}{2Z_\beta} \cdot (2h_j - h_i - 2h_{i-1}) \quad (20)$$

同様にして、

$$(EI)_c = \frac{(h_i - h_{i-1})^2}{6Z_c} \cdot (3h_j - h_i - 2h_{i-1}) \quad (21)$$

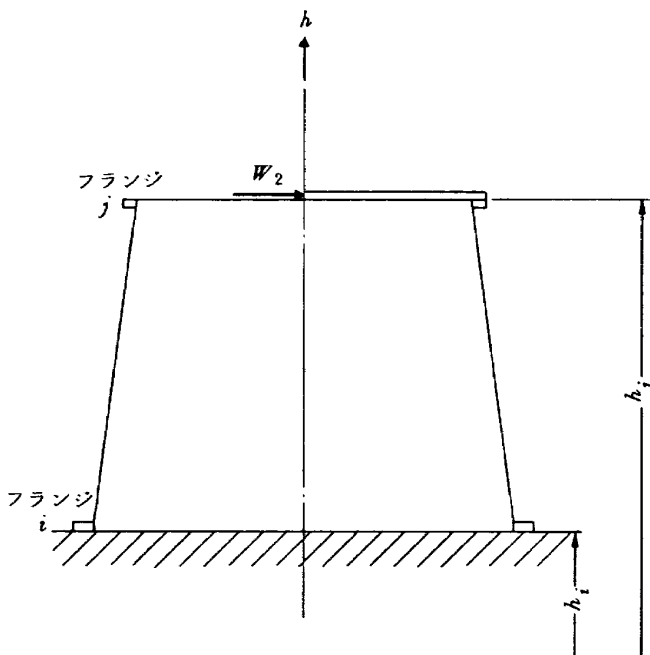


図10 (EI) の計算

(a) 荷重点を持つフレーム、ケーシング (図9(a))

$$(EI)_a = \frac{(h_i - h_{i-1})}{2Z_a} \cdot (2h_j - h_i - h_{i-1}) \quad (22)$$

(c) 燃焼器ケーシングとタービン中間フレーム (図9のc)

それぞれの前または後フランジを支点にして、軸受2に荷重を加えた場合については、下記の要領でストラットを中心前後に分割し (図12および付図1.4参照)、個

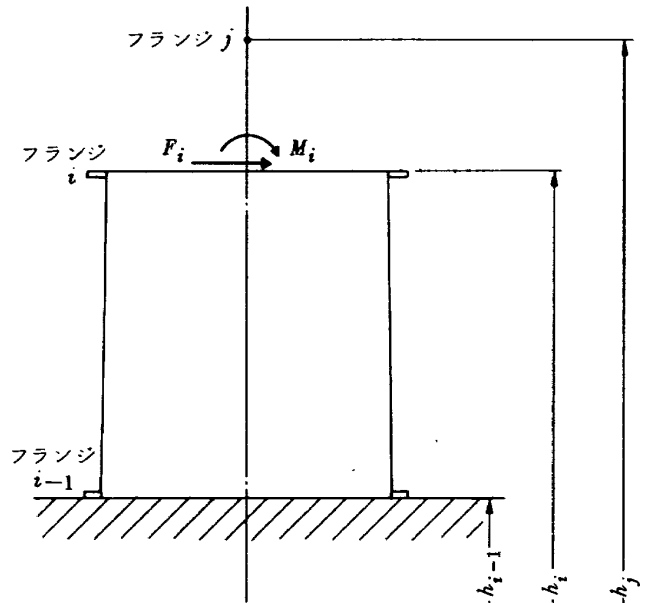


図11 (EI) の計算

(b) 荷重点を持たないケーシング (図9(b))

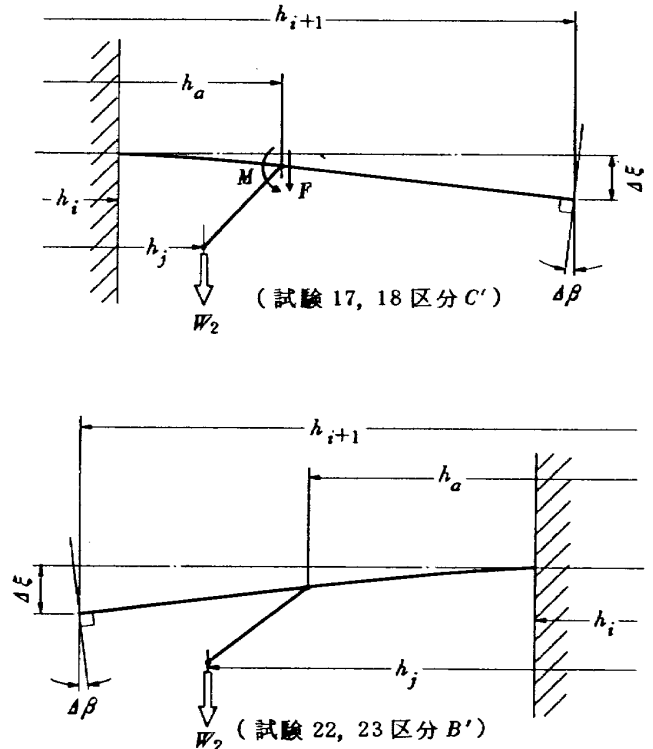


図12 (EI) の計算

(c) 燃焼器ケーシング、タービン中間フレーム (図9(c))

々に (EI) 計算する。

ストラット中心線での荷重

$$M = -W_2 (h_a - h_j) \quad (23)$$

$$F = W_2 \quad (24)$$

このときの先端フランジの傾斜角

$$\begin{aligned} \Delta\beta &= \frac{F(h_a - h_i)^2}{2EI} + \frac{M(h_a - h_i)}{EI} \\ &= \frac{W_2(h_a - h_i)}{2EI} \{ (h_a - h_i) - 2(h_a - h_j) \} = \beta W_2 \end{aligned} \quad (25)$$

ゆえに

$$(EI)_\beta = \frac{(h_a - h_i)}{2Z_\beta} (2h_j - h_i - h_a) \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \Delta\xi &= \frac{F(h_a - h_i)^3}{3EI} \left\{ 1 + \frac{3(h_{i+1} - h_a)}{2(h_a - h_i)} \right\} \\ &\quad + \frac{M(h_a - h_i)}{2EI} \{ 2(h_{i+1} - h_a) + h_a - h_i \} \\ &= \frac{W_2(h_a + h_i)}{6EI} \left[2(h_a - h_i)^2 \left\{ 1 + \frac{3(h_{i+1} - h_a)}{2(h_a - h_i)} \right\} \right. \\ &\quad \left. - 3(h_a - h_j) \{ 2(h_{i+1} - h_a) + h_a - h_i \} \right] \\ &= Z_\xi W_2 \end{aligned} \quad (27)$$

ゆえに

$$\begin{aligned} (EI)_\xi &= \frac{(h_a - h_i)}{6Z_\xi} \left[2(h_a - h_i)^2 \left\{ 1 + \frac{3(h_{i+1} - h_a)}{2(h_a - h_i)} \right\} \right. \\ &\quad \left. - 3(h_a - h_j) \{ 2(h_{i+1} - h_a) + h_a - h_i \} \right] \end{aligned} \quad (28)$$

同じく

$$\begin{aligned} (EI)_\zeta &= \frac{(h_a - h_i)}{6Z_\zeta} \left[2(h_a - h_i)^2 \left\{ 1 + \frac{3(h_{i+1} - h_a)}{2(h_a - h_i)} \right\} \right. \\ &\quad \left. - 3(h_a - h_j) \{ 2(h_{i+1} - h_a) + h_a - h_i \} \right] \end{aligned} \quad (29)$$

$$(EI)_a = \frac{(h_a - h_i)}{2Z_a} (2h_j - h_i - h_a) \quad (30)$$

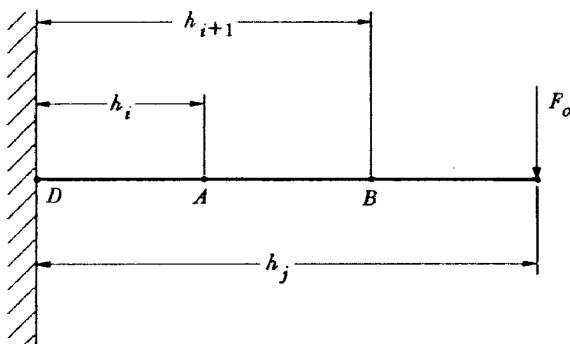


図13 (EI) の計算

(d) 外そうによる場合(図9(d))

以上はタービン中間フレームについても同様である。

(d) 外そうにより (EI) を求める場合(図9(d))

$A \sim B$ 間の相対変位は分っているが、測定データ不足で、相対傾斜角が未知の場合(図13参照)。

i) $D \sim A$ 間の $(EI)_A$

(b)の場合で、 $h_{i-1} = 0$ と置くことで求められる。

ii) $D \sim B$ 間の $(EI)_B$

i)と同様に求められる。

iii) A 点での傾斜角 β_A

$$\beta_A = \frac{F_0 h_j^2}{2EI_A} \left\{ 1 - \frac{(h_j - h_i)^2}{h_j^2} \right\} \quad (31)$$

(31)式の両辺を F_0 で割る。

$$z_{\beta A} = \frac{h_j^2}{2EI_A} \left\{ 1 - \frac{(h_j - h_i)^2}{h_j^2} \right\} \quad (32)$$

iv) A 点に対する B 点の変位

$$z_{B'} = z_B - \{ z_A + (h_{i+1} - h_i) z_{\beta A} \} \quad (33)$$

v) $A \sim B$ 間の $(EI)_{AB}$

(b)の場合の取扱いにより求める。

4.3.2 (K) の計算

ストラット等と軸受ハウジング間との (K) を次の(a)~(d)の4通りに分類して計算した。

(a) エクゾースフレームのストラット付根と軸受04ハウジングとの間(試験区分Fの場合; 図14および付図1.8参照)

B 点の変位

$$\delta_B = \frac{F_0 l_a^3}{3EI} + \frac{F_0 l_0 l_a^2}{2EI} = \frac{F_0}{EI} \left(\frac{l_a^3}{3} + \frac{l_0 l_a^2}{2} \right) \quad (34)$$

A 点の変位

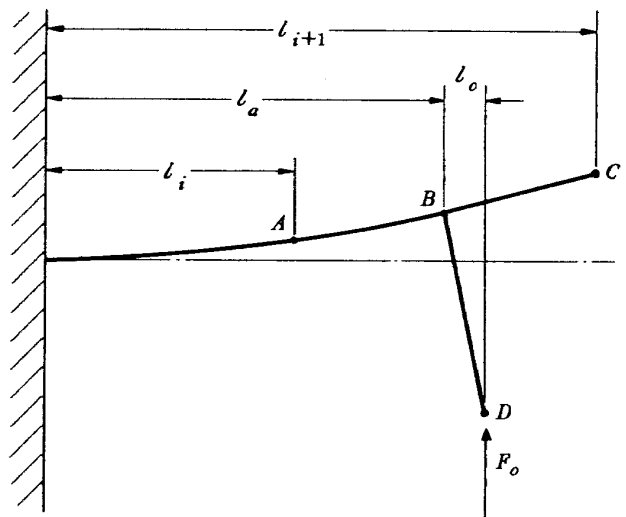


図14 (K) の計算

(a) エクゾースフレーム前部フランジ~軸受04

$$\delta_A = \frac{F_0 l_a^3}{3EI} \left\{ 1 - \frac{3(l_a - l_i)}{2l_a} + \frac{(l_a - l_i)^3}{2l_a^3} \right\} + \frac{F_0 l_0 l_a^2}{2EI}$$

ここで $\delta_A/F_0 = z_A$ は実験により求まるから、

$$EI = \frac{l_a^3}{3z_A} \left\{ 1 - \frac{3(l_a - l_i)}{2l_a} + \frac{(l_a - l_i)^3}{2l_a^3} \right\} + \frac{l_0 l_a^2}{2z_A} \quad (35)$$

$$z_B = \frac{\delta_B}{F_0} = \frac{1}{EI} \left(\frac{l_a^3}{3} + \frac{l_0 l_a^2}{2} \right) \quad (36)$$

A点の傾斜角は

$$\beta_A = \frac{F_0 l_a^2}{2EI_A} \left\{ 1 - \frac{(l_a - l_i)^2}{l_a^2} \right\} + \frac{F_0 l_0 l_i}{2EI} \quad (37)$$

$$z_\beta = \frac{\beta_A}{F_0} = \frac{1}{2EI_A} \{ l_a^2 - (l_a - l_i)^2 + l_0 l_i \}$$

$$= \frac{1}{2EI_A} (2l_a l_i - l_i^2 + l_0 l_i) \quad (38)$$

したがってA~B間の変位 δ_B' は

$$\delta_B' = \delta_B - \{ \delta_A + (l_a - l_i) \beta_A \} \quad (39)$$

ゆえに

$$z_B' = z_B - \{ z_B + (l_a - l_i) z_\beta \} \quad (40)$$

同様にA~D間の変位 δ_D' は

$$z_D' = z_D - \{ z_A + (l_a - l_i) z_\beta \} \quad (41)$$

A~B間(フランジ~ストラット付根)の (K_1) は

$$K_1 = 1/z_B' \quad (42)$$

A~D間(フランジ~軸受ハウジング)の (K_2) は

$$K_2 = 1/z_D' \quad (43)$$

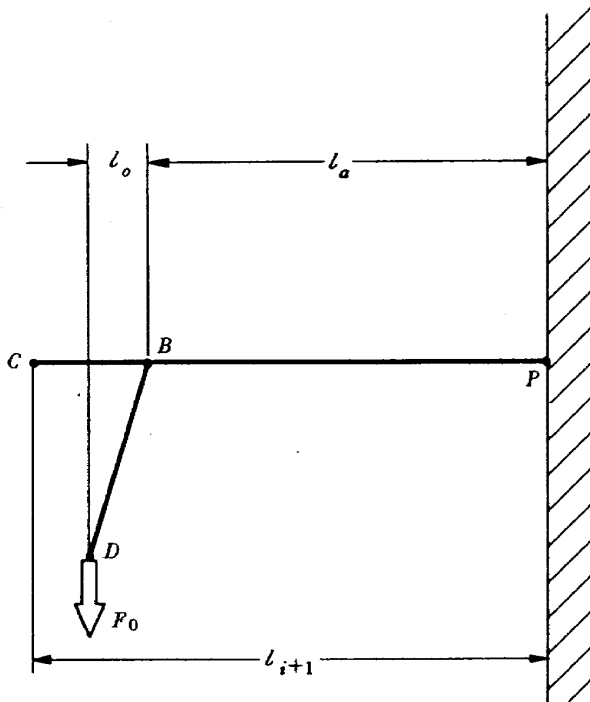


図15 (K)の計算

(b) 燃焼器ストラット~軸受2

B~D間(ストラット~軸受ハウジング)の (K_3) は

$$K_3 = \frac{1}{K_2} - \frac{1}{K_1} \quad (44)$$

(b) 燃焼器ストラットと軸受2ハウジングとの間(図15および付図1.4参照;試験区分B'の場合)

C点の変位より、P~C間の $(EI)_C$ を、燃焼器ケーシング(前節3.1, c項式28または式29)の場合と同様に求める。

P~C間の $(EI)_C$ とP~B間の $(EI)_B$ を同じ値であると考えた場合、B点の変位は

$$\delta_B = \frac{F_0}{EI_B} \left(\frac{l_a^3}{3} + \frac{l_0 l_a^2}{2} \right) \quad (45)$$

$$z_B = \frac{\delta_B}{F_0} = \frac{1}{EI_B} \left(\frac{l_a^3}{3} + \frac{l_0 l_a^2}{2} \right) \quad (46)$$

他方D点の単位荷重に対する変位 z_D は実験より求まるから、B~D間の相対変位 z_B' は

$$z_B' = z_D - z_B \quad (47)$$

したがってB~D間(燃焼器ストラット~軸受2ハウジング)の (K) は

$$K = 1/z_B' \quad (48)$$

(c) タービン中間フレームのストラットと軸受3および軸受03ハウジングとの間(図16および付図1.6参照;試験区分Eの場合)

この系を図16の様にモデル化し、これに荷重 F_1 または F_2 をかけた時の変位はA点を基準とする。

この時のB点の変位は

$$z_B = \delta_B/F_0 = z_C - (l_2 - l_1) z_\beta$$

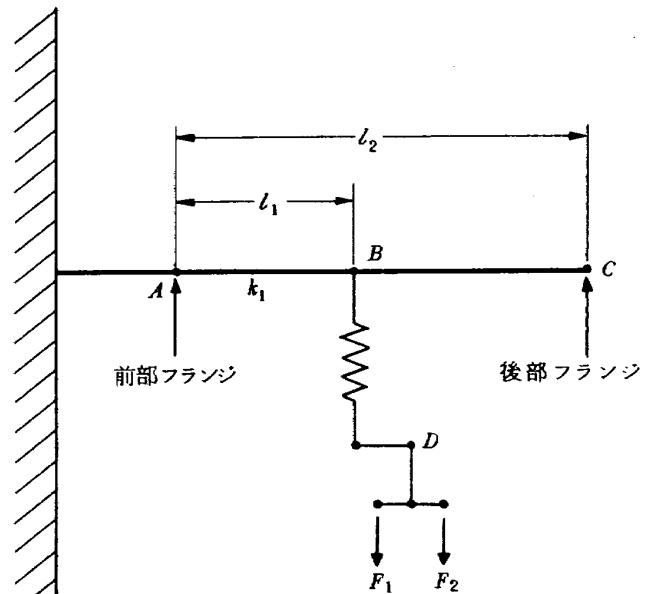


図16 (K)の計算

(c) タービン中間フレームストラット~軸受03

またB点に対するD点の相対変位は

$$Z_D' = Z_D - Z_B \quad (49)$$

したがってA~B間(前部フランジ~ストラット付根)

の(K_1)は

$$K_1 = 1/Z_B \quad (50)$$

B~D間(ストラット付根~軸受ハウジング)の(K_2)

$$は K_2 = 1/Z_D' \quad (51)$$

A~D間(前部フランジ~軸受ハウジング)の(K_3)は

$$K_3 = 1/Z_D \quad (52)$$

(d) 前部フレームの後部フランジと軸受01サポートとの間(図8および付図1.1参照;試験区分Aの場合)

この場合の(K)は前項4.3.2で求められるTop方向の相対中心変位 Z_ϵ ,式(7)から求められる。

$$K = 1/Z_\epsilon \quad (53)$$

前2項(4.3.1, 4.3.2)によって求めた(EI)と(K)を表3と表4に示す。表3には変位から求めた(EI) $_\epsilon$ または(EI) $_\zeta$ のみを示す。これらの値に比べて,面の傾斜から求めた(EI) $_\alpha$ または(EI) $_\beta$ は約2~10倍となり,不一致が大き過ぎるので表示しなかった。

4.4 考察

上述のように,測定断面の傾斜から求めた(EI)が,変位から求めた値より2~10倍大きな値になった。この相違のおもな理由として次の事が考えられる。

変位については,せん断変形を考慮していないが,薄肉設構造ではせん断変形を無視できない。この変形は条

件によっては曲げモーメントによる変形より大きくなる。すなわち,

$$\delta = \frac{C_1}{(EI)} (1 + C_2)$$

C_1 ; 曲げモーメントによる変形に関する定数

C_2 ; せん断応力による変形に関する定数

$$(EI)' = \frac{C_1}{\delta} = \frac{(EI)}{1 + C_2}$$

ゆえに変位から計算された(EI)'は,面の傾斜から計算される(EI)よりも(1+ C_2)だけ小さくなる。

また,断面中心の変位(ξ, ζ)は,厳密にはもとの中心の真の変位ではない事である。真の変位は ξ, ζ より小さいので,

$$\delta = C_3 \cdot \delta_0$$

δ_0 ; 真の中心変位

$$C_3 > 1$$

これらの事から,変位から求めた(EI) $_\epsilon$, (EI) $_\zeta$ は,面の傾斜から求めた(EI) $_\alpha$, (EI) $_\beta$ より1/ C_3 (1+ C_2)だけ小さくなる。

なお,その他,フランジ部のすべり等による試験条件の影響も含まれる。

実用上,いずれの(EI)を選択するかは問題であるが,この試験結果のおもな用途に対して便利なように,変位から求めた(EI)を表示した。

表3 等価曲げ剛性(EI)

範 囲	測定位置	試 験		Z_ϵ または Z_ζ mm/kg	$(EI)_\epsilon$ kg·mm ²	$(EI)_\zeta$ kg·mm ²
		No.	区分			
高圧圧縮機	前部フレーム後部F~軸受01サポート	⑥~①	2	A	0.2325×10^{-3}	0.1885×10^{12}
	前部ケーシング・後部F~前部F	⑨~⑥	19	B	0.3311×10^{-3}	0.2196×10^{12}
			20	B	0.4065×10^{-3}	0.1779×10^{12}
	ケーシング・前部~後部	⑪~⑥	20	B	0.5058×10^{-3}	0.3129×10^{12}
	前部フレーム後部F~ファン O.G.V・F	⑥~③	2	A	0.1063×10^{-3}	0.2106×10^{12}
前部フレーム後部F~バイパス・リップ・F	⑥~⑤	2	A	0.6657×10^{-4}	0.1389×10^{12}	
燃 焼 器	ケーシング後部F~前部F	⑪~⑭	14	C	0.2610×10^{-3}	0.1994×10^{12}
			15	C	0.2029×10^{-3}	0.2566×10^{12}
			17	B'	0.7378×10^{-4}	0.3028×10^{12}
	18	B'	0.8907×10^{-4}	0.2508×10^{12}		
ケーシング後部F~軸受2ハウジング	⑭~⑫	17	B'	0.9505×10^{-4}	0.2244×10^{12}	
高圧タービン	ケーシング前部F~後部F	⑭~⑮	14	C	0.4137×10^{-4}	0.6180×10^{11}
タービン中間	フレーム前部F~後部F	⑮~⑰	7	E	0.1718×10^{-4}	0.5006×10^{11}
			8	E	0.2945×10^{-4}	0.6538×10^{11}
			9	E	0.1814×10^{-4}	0.1061×10^{12}
エクゾースト	フレーム前部F~軸受04ハウジングF	⑳~㉔	5	F	0.3033×10^{-3}	0.3491×10^{10}
			6	F	0.4139×10^{-3}	0.2558×10^{10}
註・ F;フランジ, O.G.V;アウターガイドベーン		付図1.0参照	表2参照			

表 4 等価ばね定数 (K)

範 囲		試 験		Z_{ϵ} または Z_c mm/kg	$(K)_{\epsilon}$ kg/mm	$(K)_c$ kg/mm
		No.	区分			
高圧圧縮機	前部フレーム後部フランジ ～軸受 01. サポート	2	A	0.2325×10^{-3}	0.4301×10^4	
燃 焼 器	ストラット～軸受 2・ハウジング	17	B'	0.4774×10^{-4}	0.2095×10^5	
タービン中間	フレーム前部フランジ ～軸受 3, 03, ハウジング	8	E	0.1073×10^{-3}	0.9320×10^4	
		7	"	0.8692×10^{-4}	0.1150×10^5	
		9	"	0.1217×10^{-3}		0.8217×10^4
	フレーム前部フランジ ～ストラット付根	8	"	0.1872×10^{-4}	0.5341×10^5	
		7	"	0.7544×10^{-4}	0.1325×10^6	
	ストラット付根 ～軸受 3, 03, ハウジング	8	"	0.8858×10^{-4}	0.1129×10^5	
		7	"	0.7938×10^{-4}	0.1260×10^5	
エクゾースト	フレーム前部フランジ ～軸受 04, ハウジング	5	F	0.2977×10^{-3}	0.3359×10^4	
		6	"	0.4129×10^{-3}		0.2421×10^4
	フレーム前部フランジ ～ストラット付根	5	"	0.4461×10^{-4}	0.2242×10^5	
		5	"	0.2531×10^{-3}	0.3951×10^4	
	ストラット付根 ～軸受 04, ハウジング	5	"	0.2531×10^{-3}	0.3951×10^4	
		6	"	0.4118×10^{-3}		0.2428×10^4

5. あとがき

本報では、FJR710/10の実機ファンジェットエンジン静止部のケーシング等と、軸受サポート周辺の、半径方向荷重による等価曲げ剛性と等価ばね定数を、各々の実験結果から個々に解析検討した。これらの解析については、解析モデルの設定や測定値の取扱いその他が十分でない点もある。また実験上の制約もあり、得られた測定値だけでは十分に精度のよい解析を行うことはできない。しかし、本報に記述した解析結果では、いずれもほぼ妥当な (EI) や (K) があることがわかった。また現在続けられている実機の運転試験でも、静止部各部の (EI) や (K) の不足に起因する支障は現われていない。

本試験では、軸受サポートやマウントに作用する推力や自重相当の荷重による各部の変形や、ひずみゲージによる主要部分の応力測定も行った。前者の実験結果は付図に示した。後者については本報では省略した。しかし両者の測定値には特に異常であると思われるものは含まれていない。

なお本報で記述した解析法やその結果、また解析を行

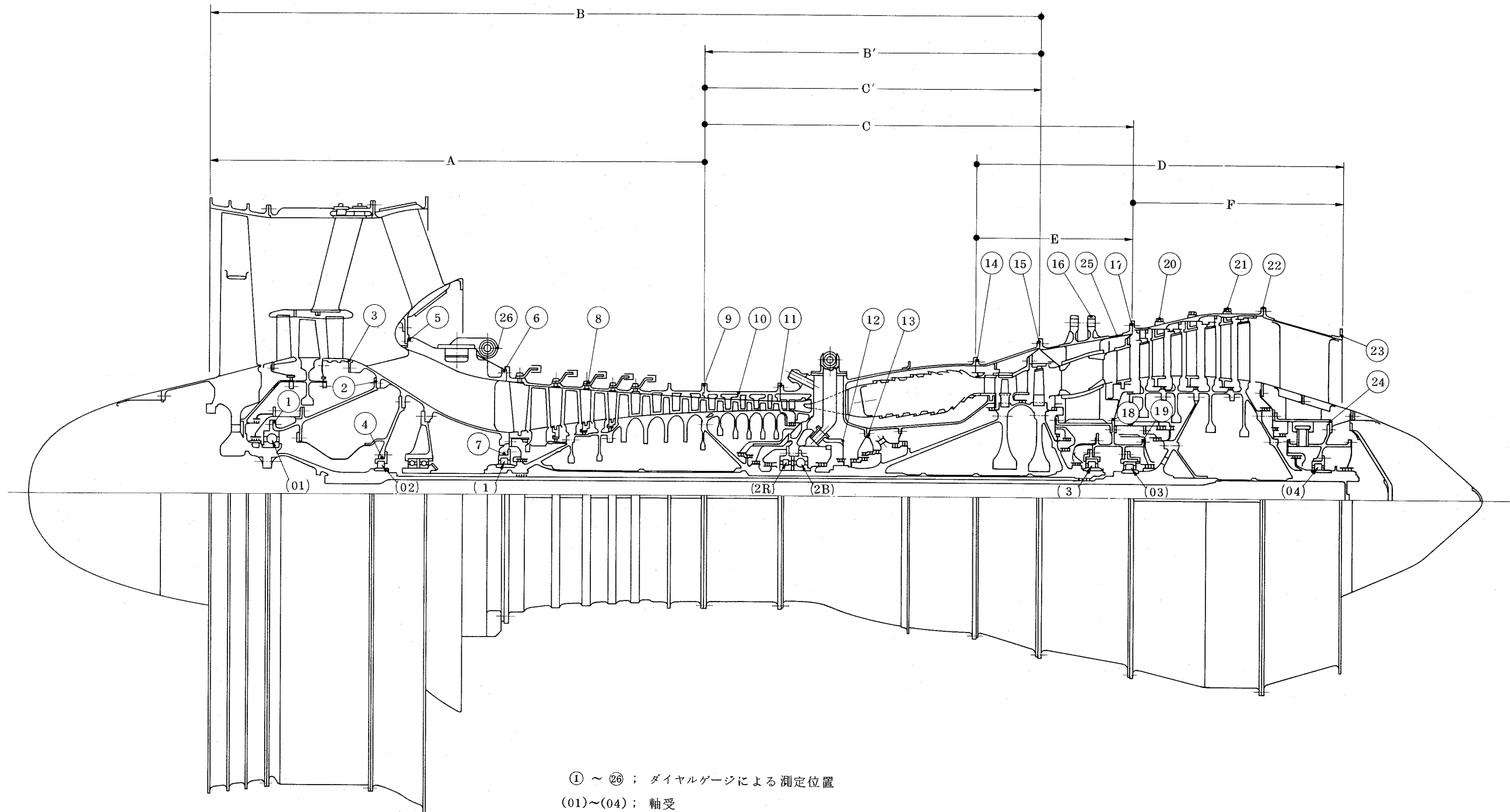
わなかった測定値および別報のファン静止部の試験結果も含め、さらに詳細に検討し、必要に応じて追加試験を行うこと等により、本エンジンの全体剛性や振動に対し、より精度の高い資料が得られると思われる。

本試験に供したエンジンは、通商産業省工業技術院の大型技術研究開発における航空機用ジェットエンジンの研究開発第一期計画により試作されたものである。従って本報に記述した剛性試験もこの研究開発に伴うものであり、エンジン全体にわたる総合試験として、その試験方法や測定値の解析および結果の検討等、今後のこの種試験および今後に期待されるファンジェットエンジンの研究開発のためにも有益な資料となるであろう。

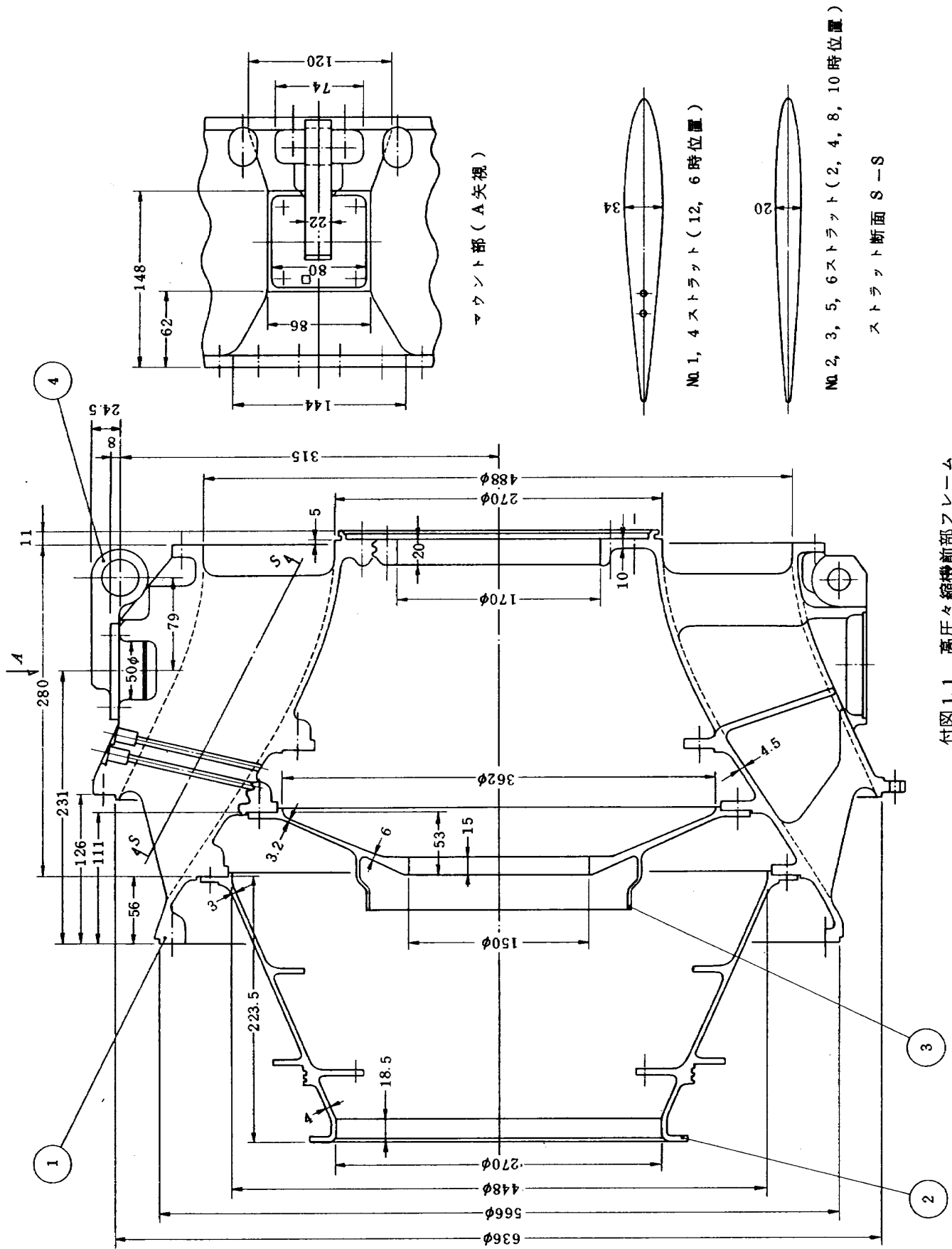
なお本試験にあたり、当所の松木原動機部長、鳥崎航空機公害研究グループ総合研究官の御指導をいただいた。末筆ながらお礼申し上げます。

参 考 文 献

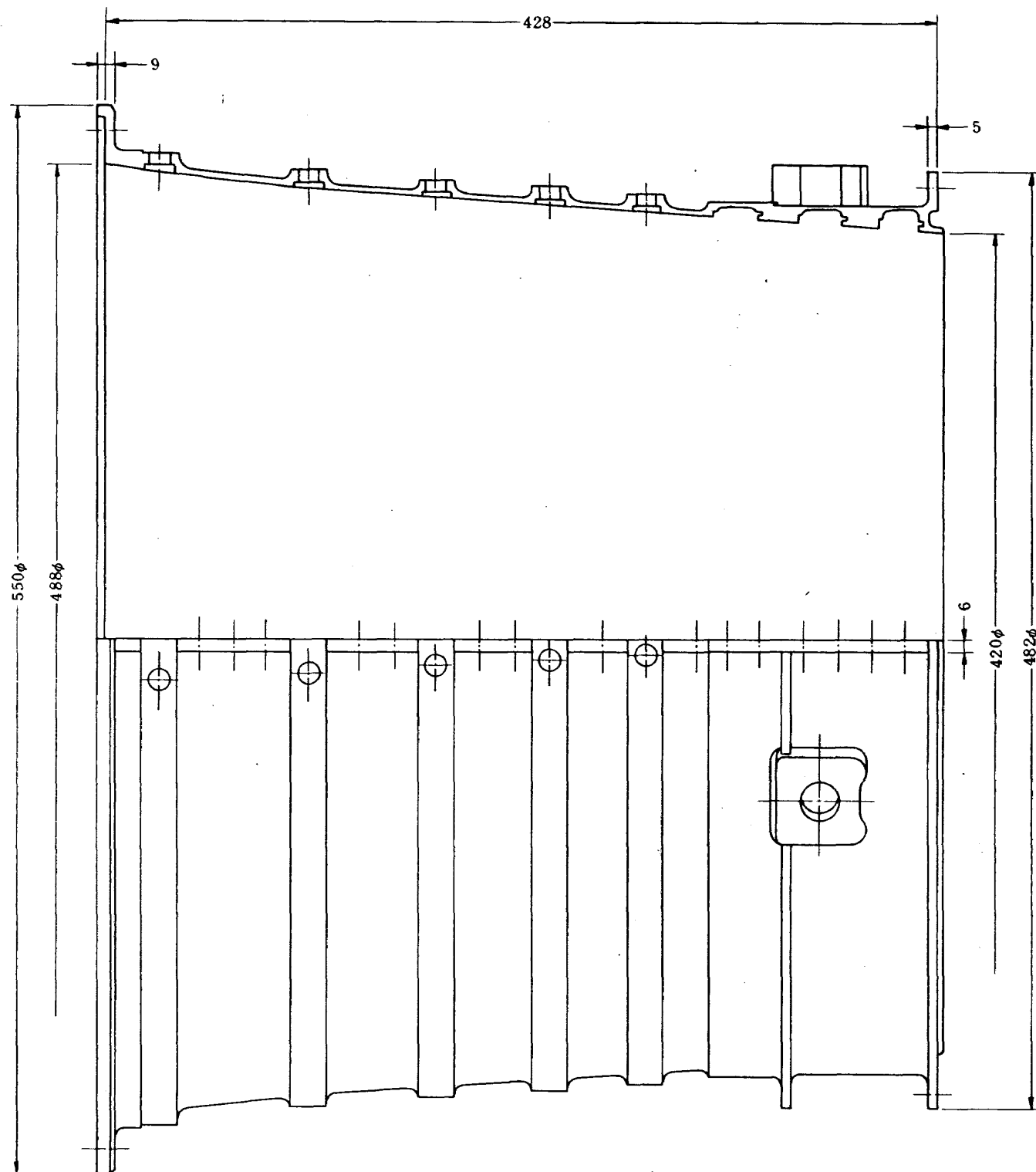
- (1) 「ファンジェットエンジン FJR710/10 静止部剛性試験第 2 報」池田、小河、松末、宮地；航技研資料 TM309 (1976/9)



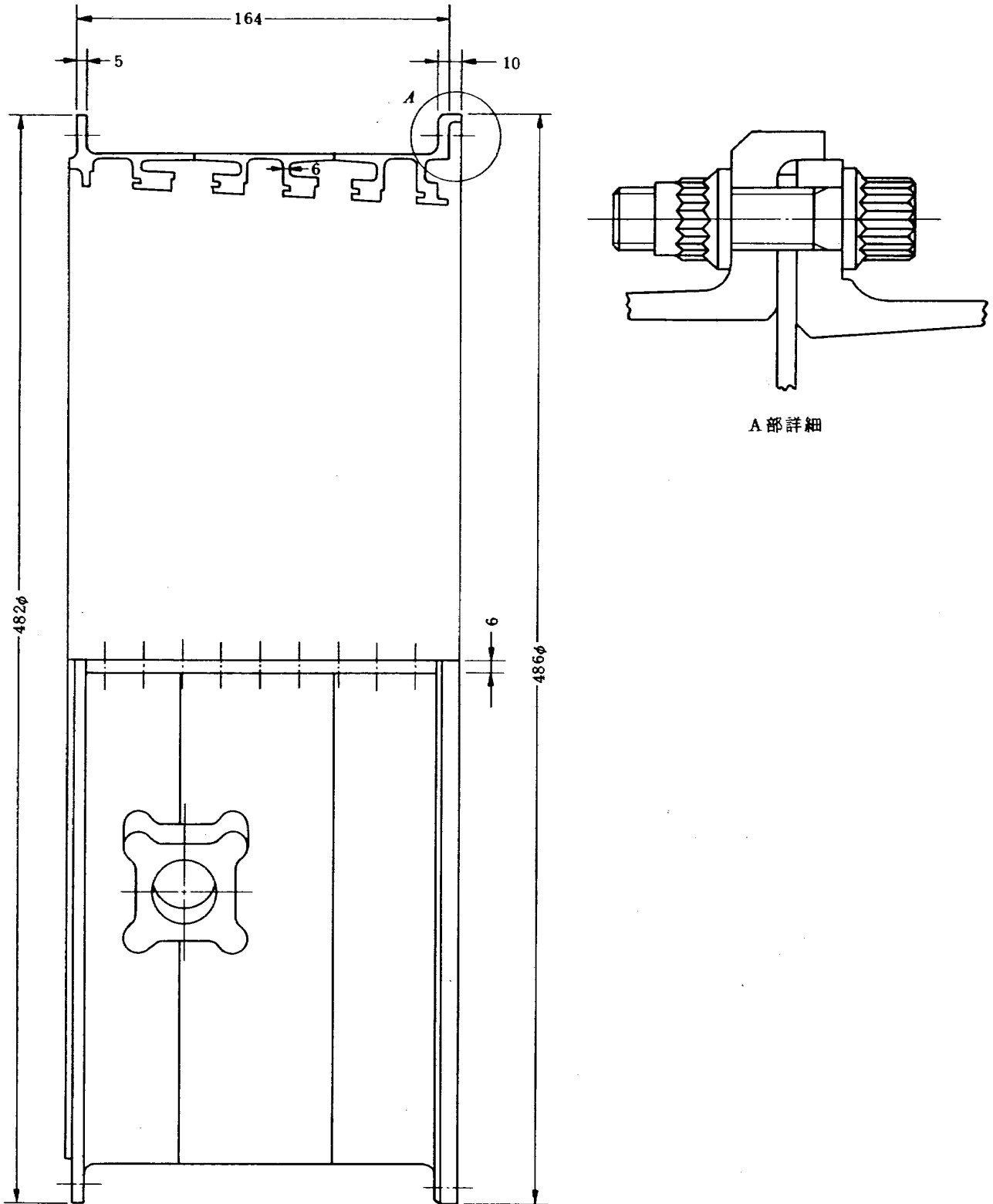
付図 1.0 FJR710/10 エンジン概略図



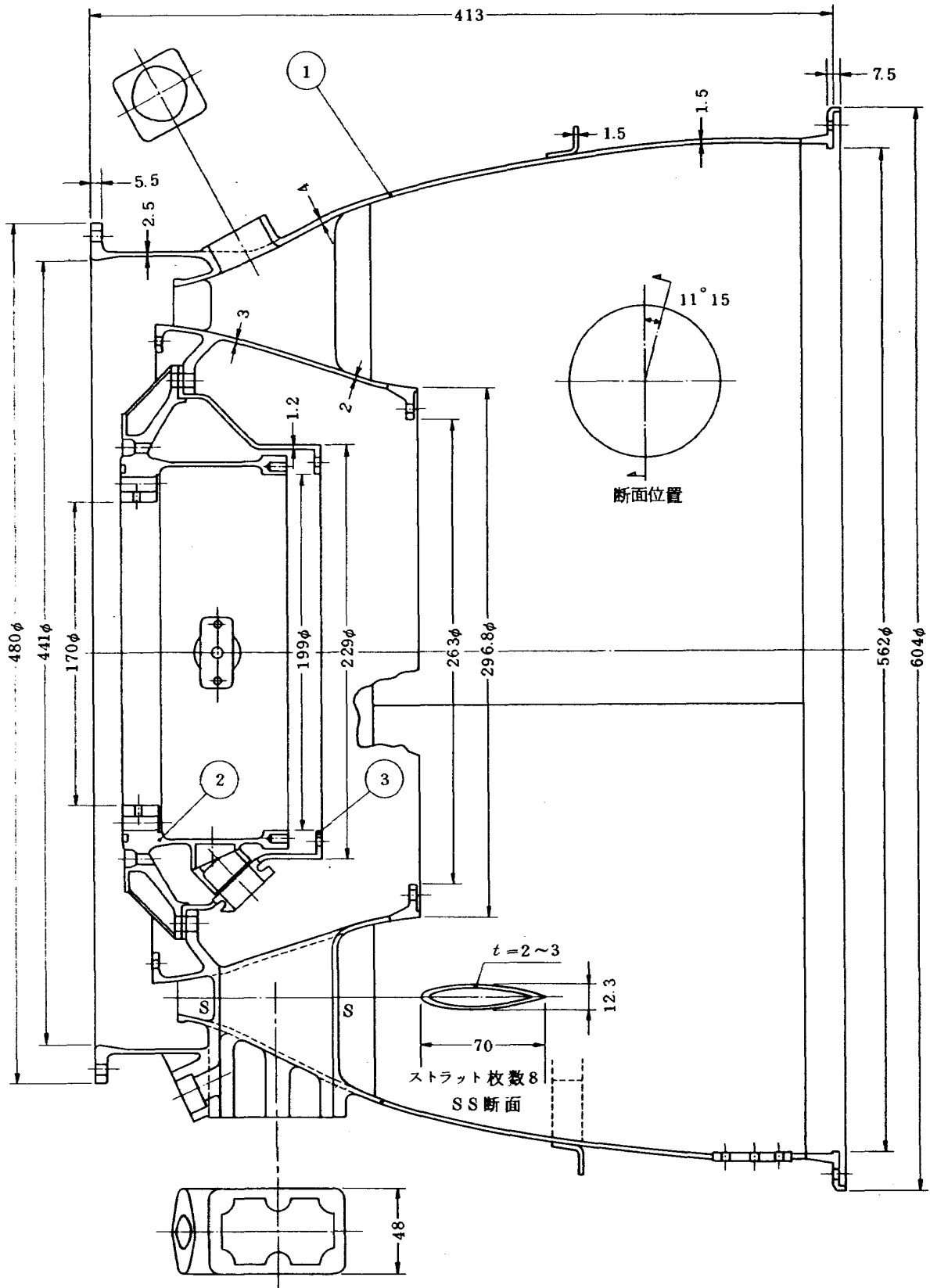
付図 1.1 高圧々縮機前部フレーム



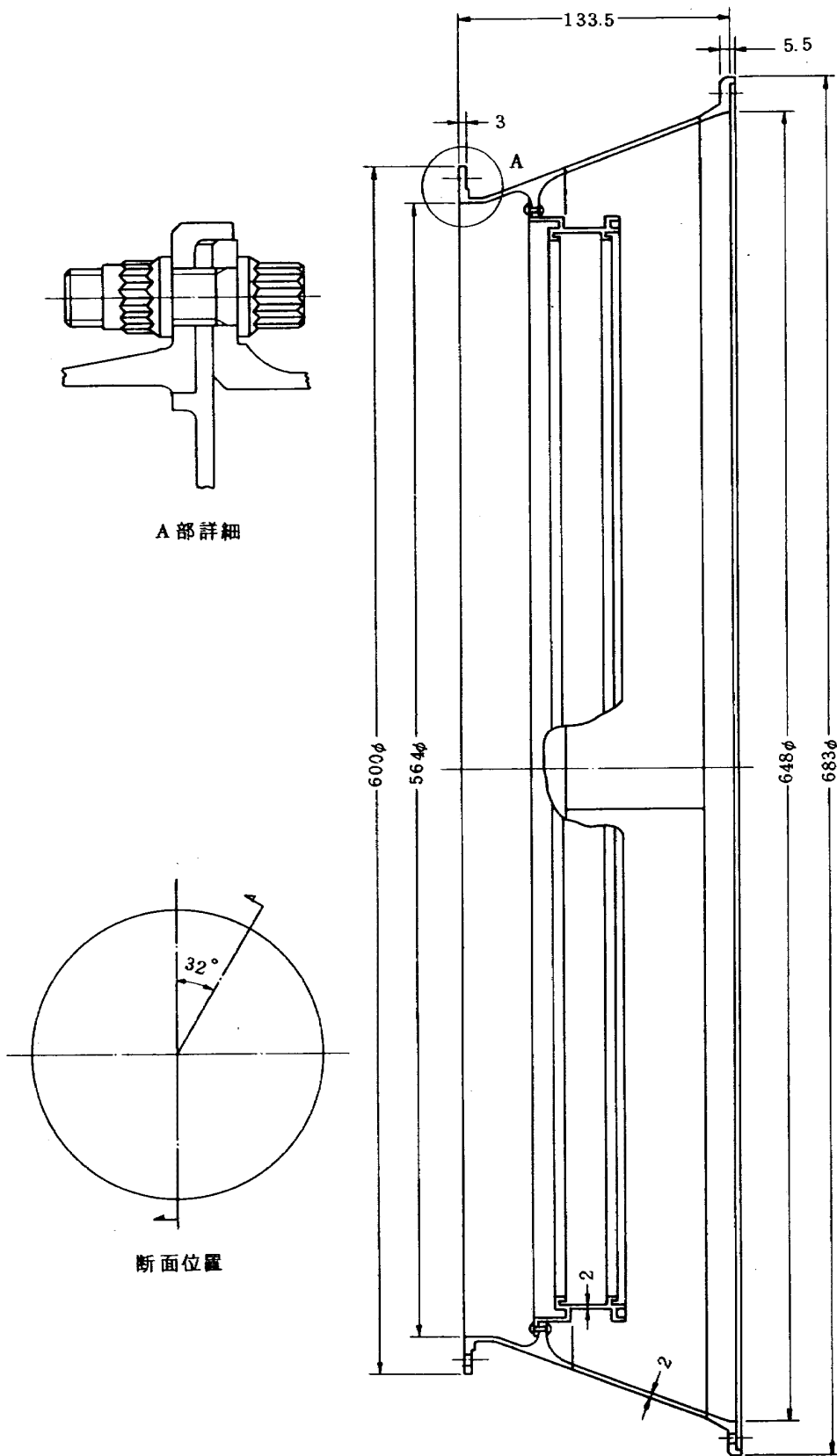
付図1.2 高圧々縮機前部ケーシング



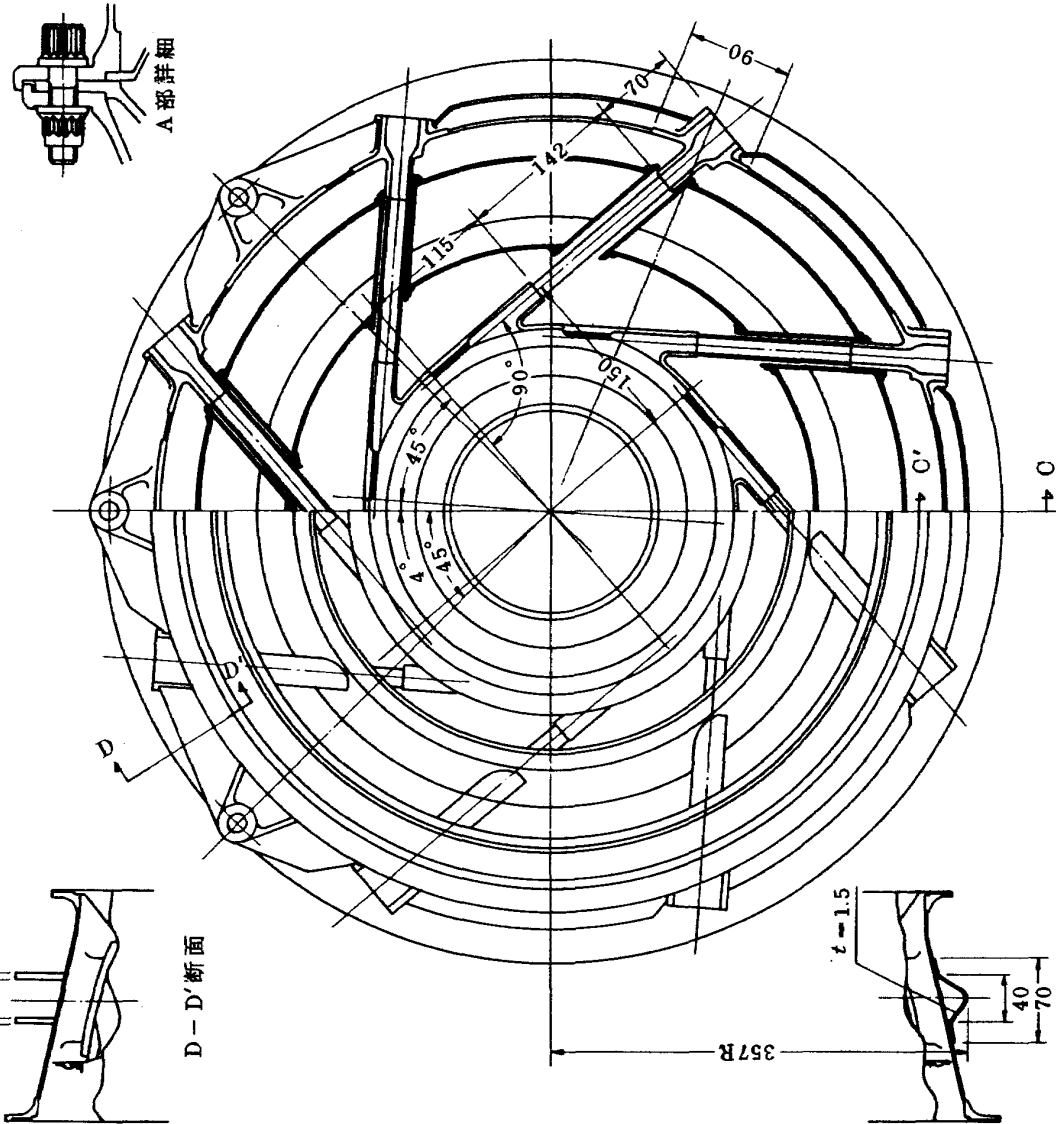
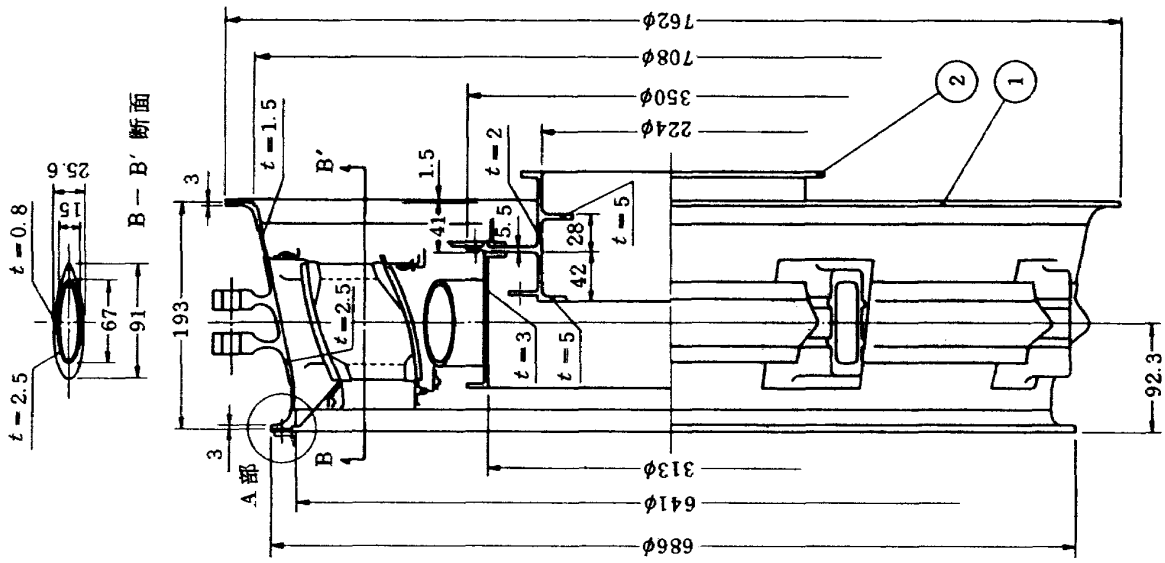
付図 1.3 高圧々縮機後部ケーシング



付図 1.4 燃焼器ケーシング

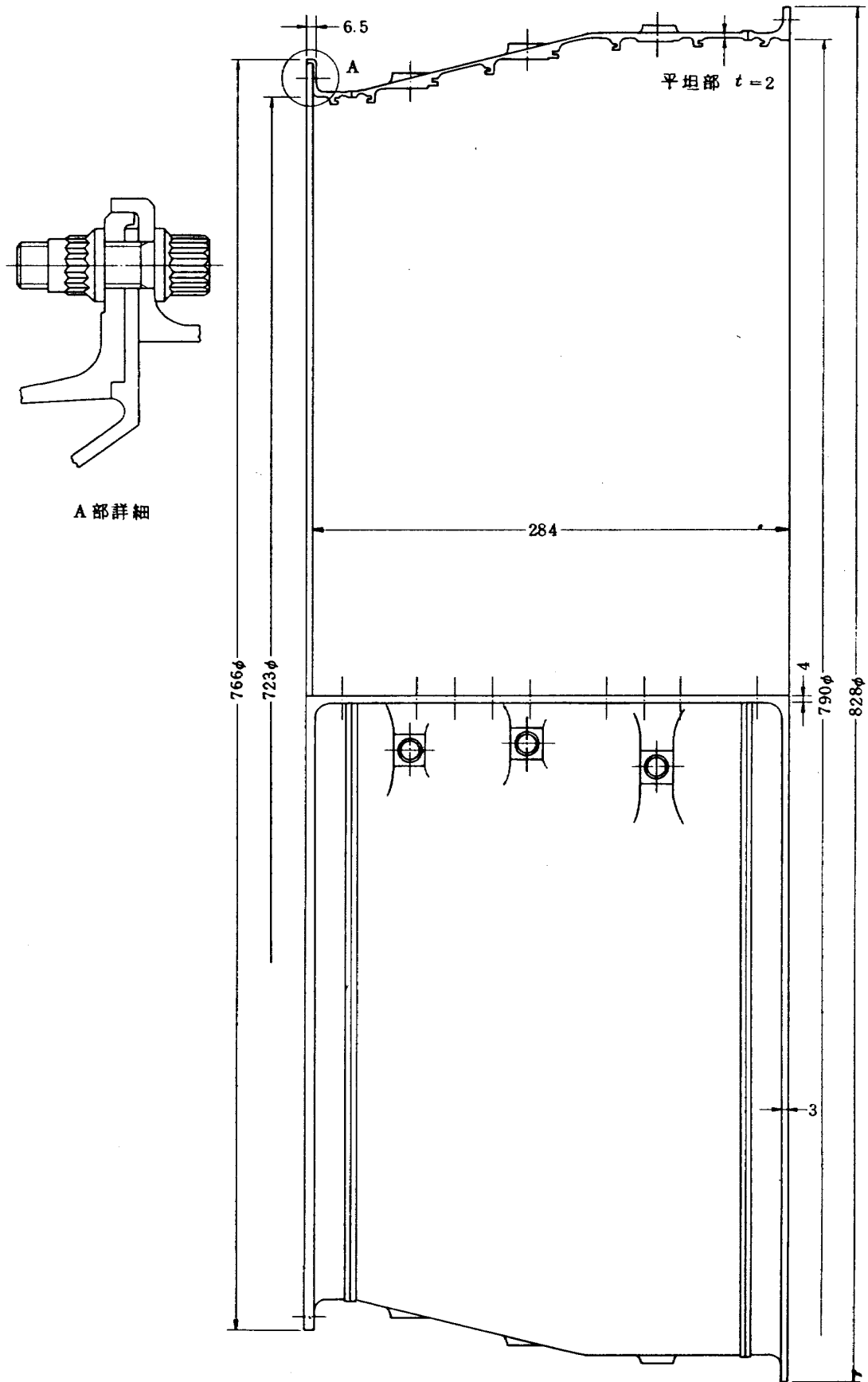


付図1.5 高圧タービンケーシング

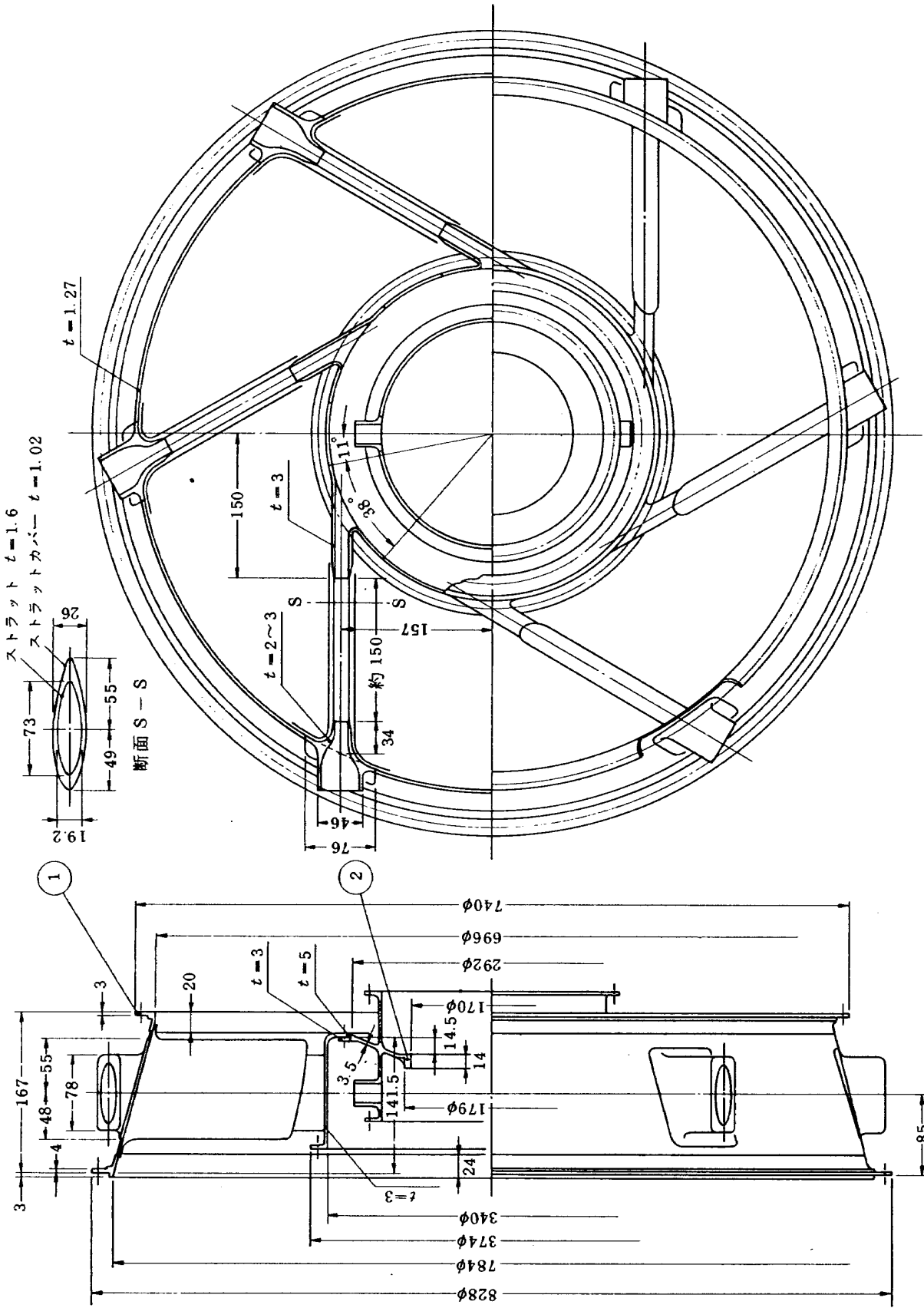


付図 I.6 タービン中間フレーム

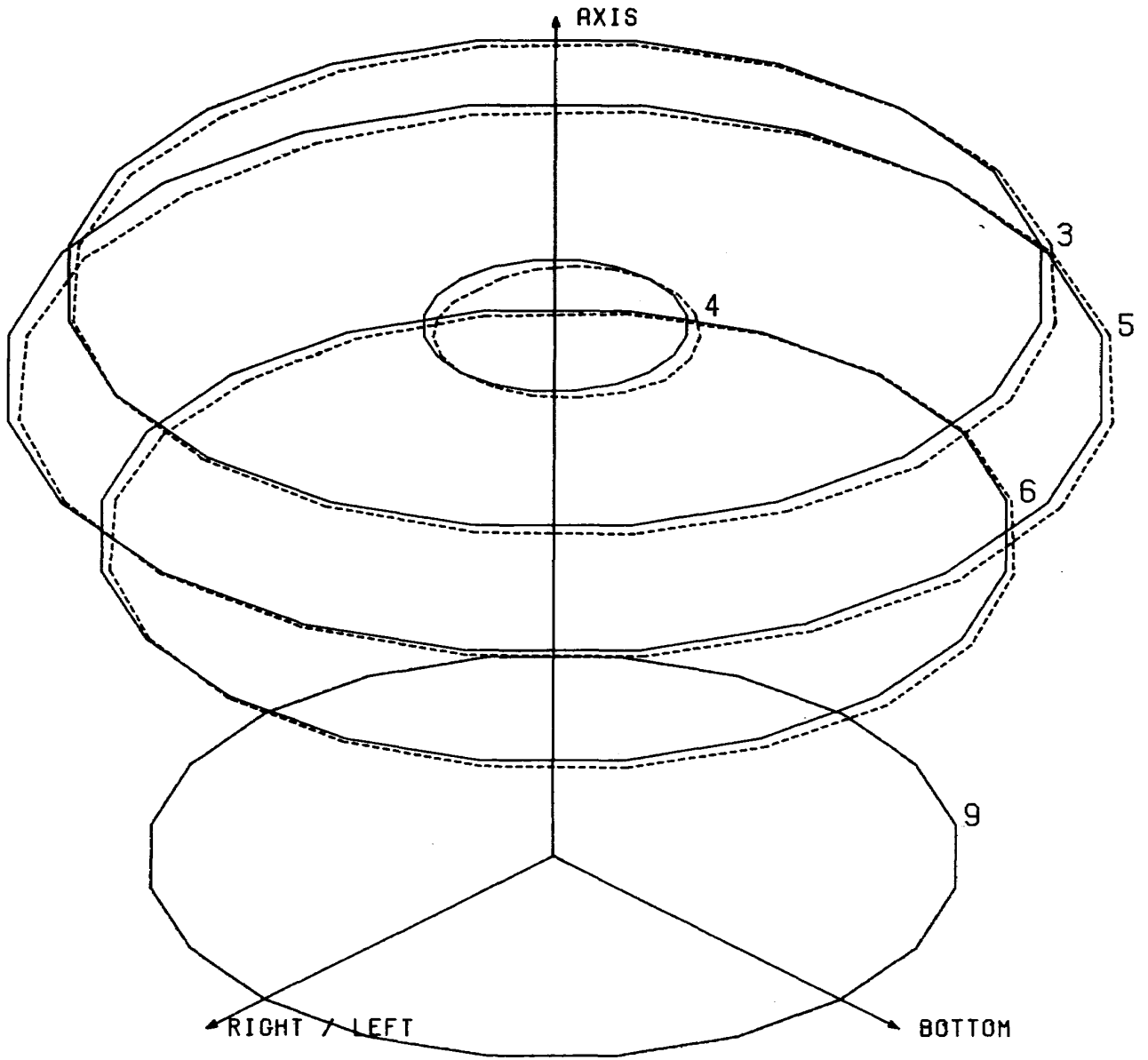
C-C' 断面



付図 1.7 低圧タービンケーシング



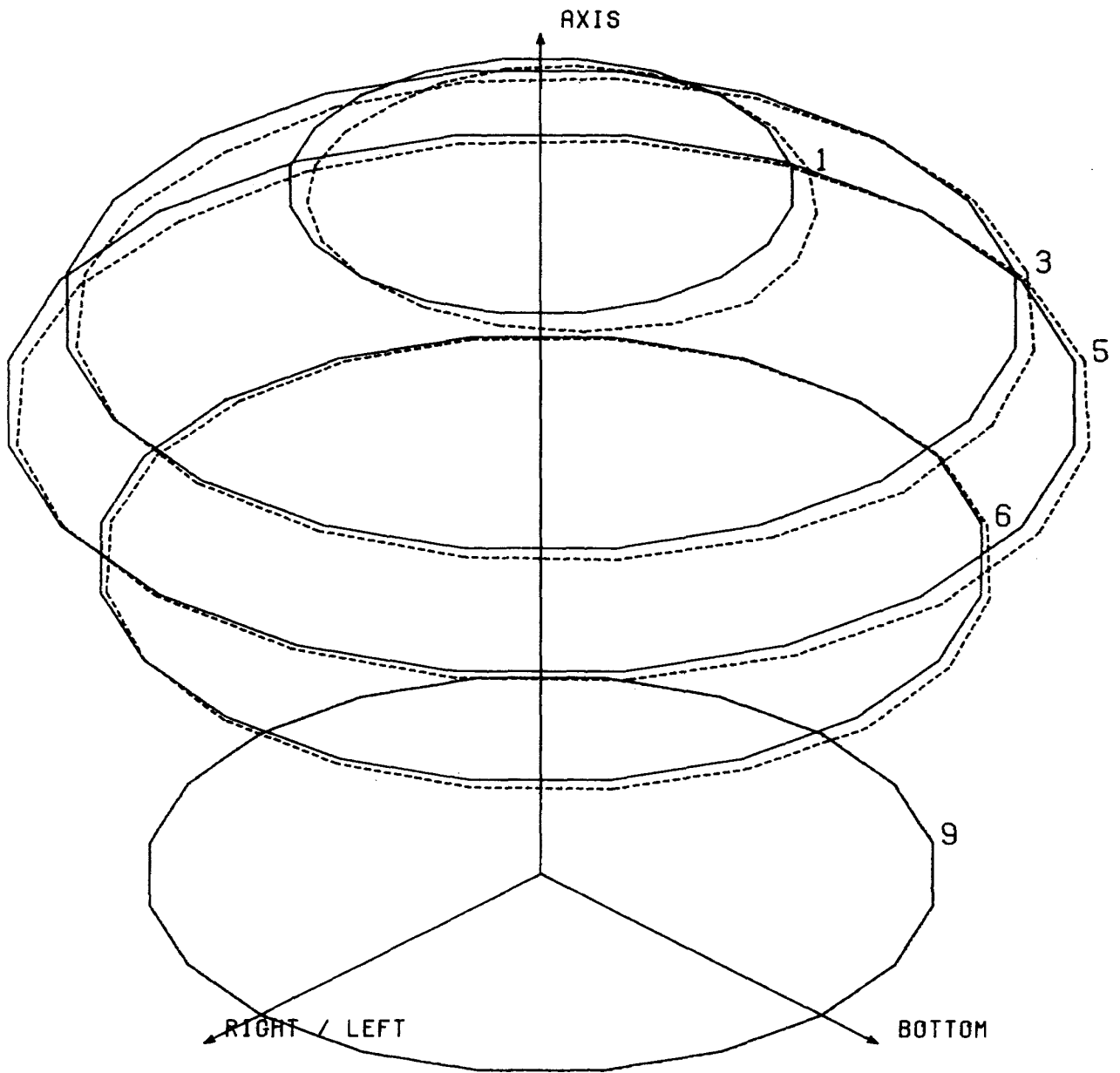
付図 1.8 エクゾーストフレーム



TEST No.1 02 BRG CASE A BOTTOM LOAD $\times 10^{-4}$ mm

SECTION No.	u_T	u_L	u_B	u_R	v_T	v_L	v_B	v_R
3	-2.406	0.695	2.830	-0.021	—	—	—	—
4	-2.689	—	2.604	—	-0.456	—	—	—
5	-3.752	0.321	2.234	0.042	—	—	—	—
6	-2.789	0.240	1.503	0.021	0.342	0.134	-0.565	-0.106

付図 2.1

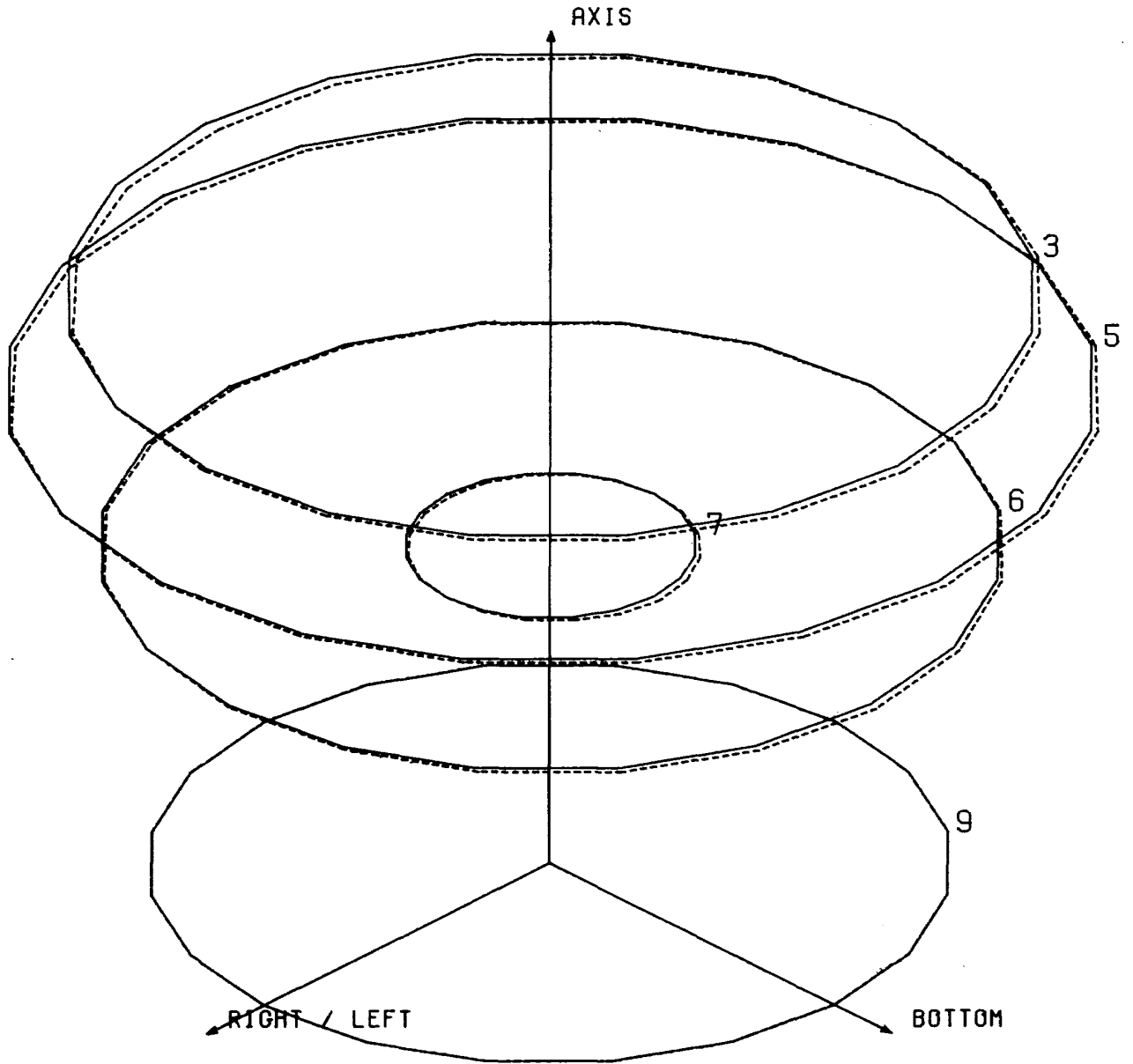


TEST No.2 01 BRG CASE A BOTTOM LOAD

$\times 10^{-4}$
mm

SECTION No.	u_T	u_L	u_B	u_R	v_T	v_L	v_B	v_R
1	-5.084	—	4.894	—	0.682	—	-1.417	—
3	-4.164	0.847	3.756	-0.160	—	—	—	—
5	-3.387	0.541	3.016	-0.056	—	—	—	—
6	-2.268	0.310	1.670	-0.011	0.723	0.013	-0.730	-0.249

付図 2.2

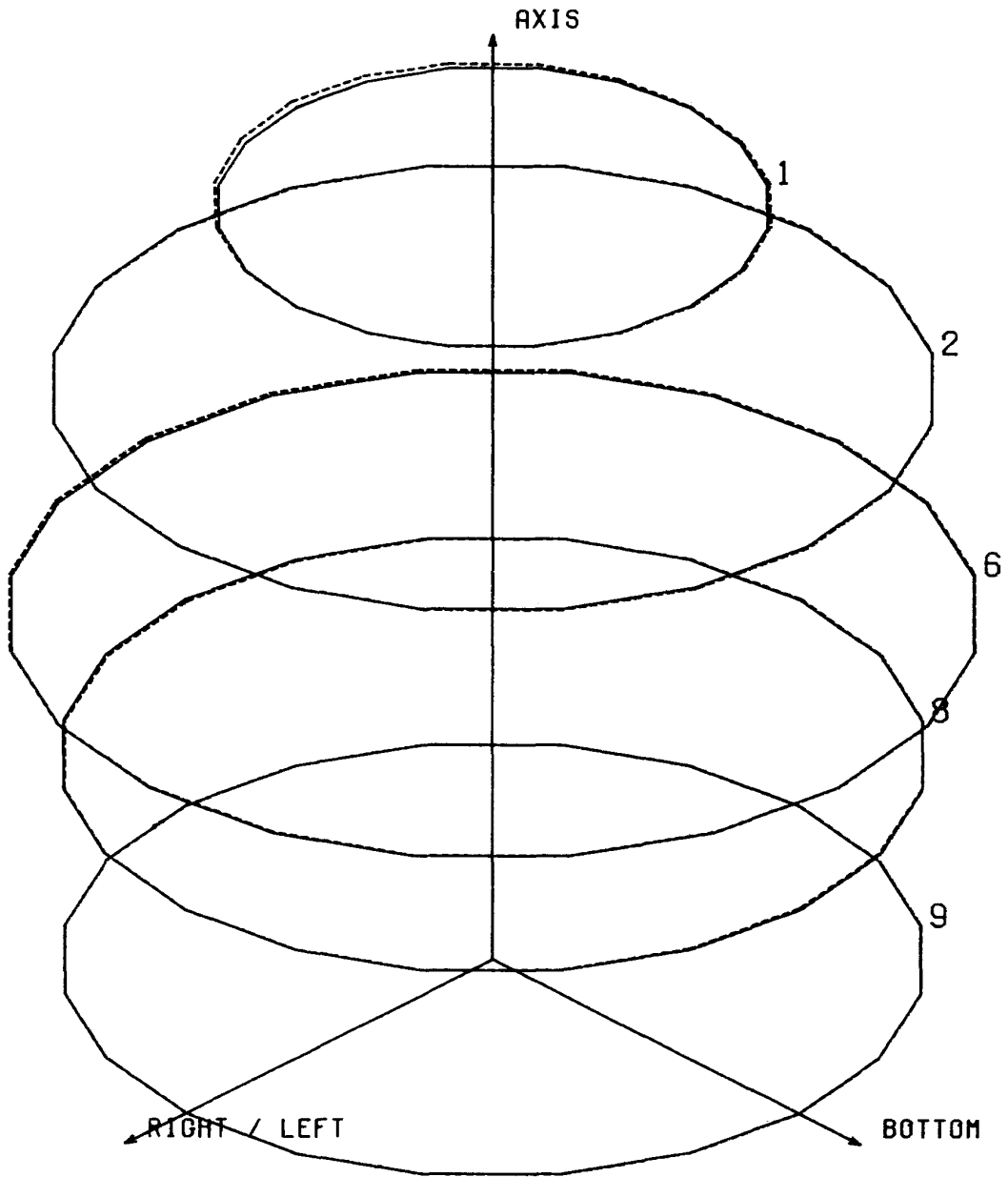


TEST No.3 1 BRG CASE A BOTTOM LOAD

$\times 10^{-4}$
mm

SECTION No.	u_T	u_L	u_B	u_R	v_T	v_L	v_B	v_R
3	-2.022	0.560	1.465	0.019	—	—	—	—
5	-1.453	0.439	1.324	-0.101	—	—	—	—
6	-0.895	0.140	0.900	-0.097	0.238	—	-0.256	-0.130
7	-0.732	—	1.084	—	0.028	—	-0.067	—

付図 2.3

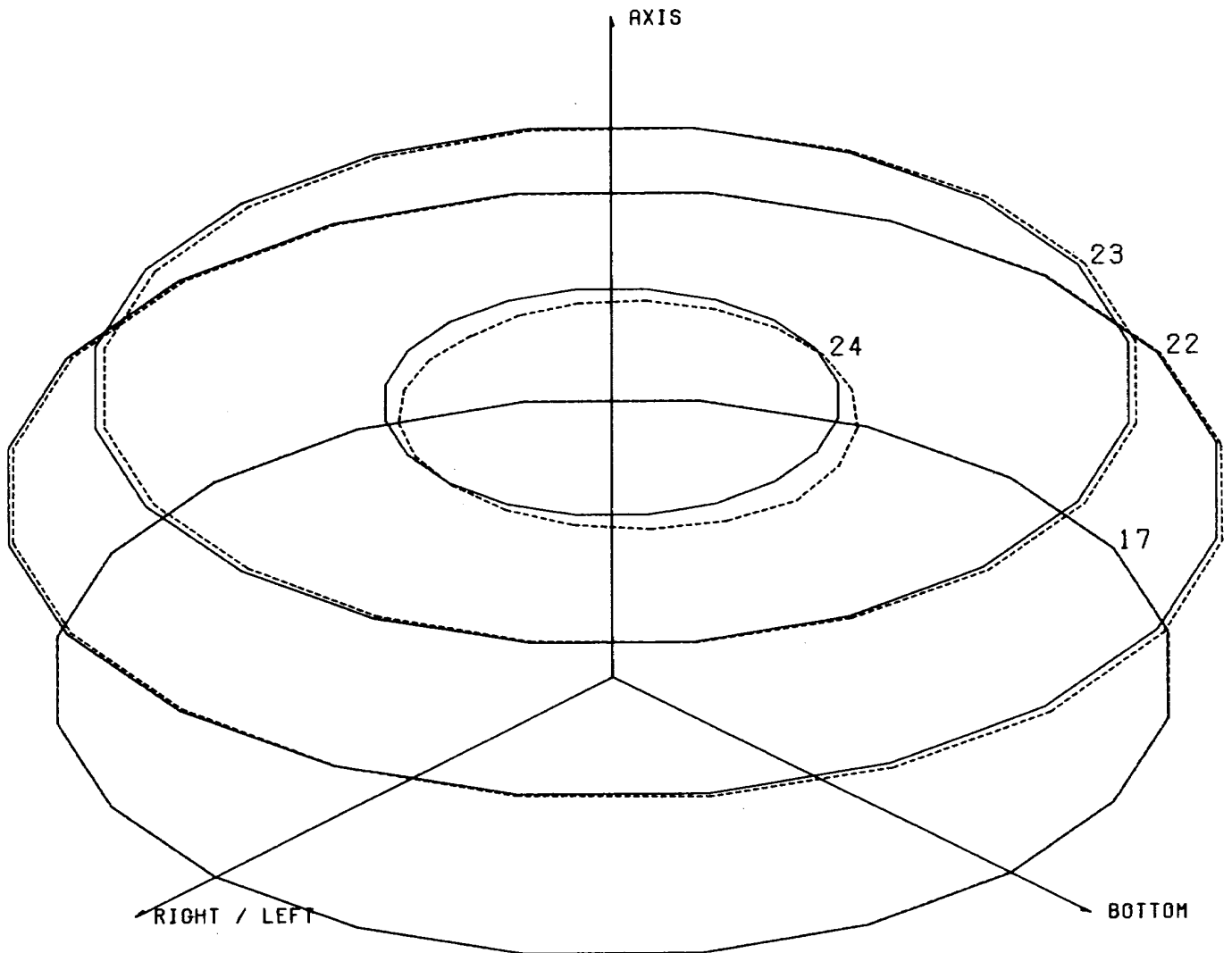


TEST No. 4 01 BRG CASE A BOTTOM LOAD

$\times 10^{-4}$
mm

SECTION No.	u_T	u_L	u_B	u_R	v_T	v_L	v_B	v_R
1	0.717	—	0.595	—	0.428	0.145	0.317	-0.039
2	—	—	—	—	-0.168	0.148	-0.190	0.068
6	0.389	—	0.153	—	0.150	0.145	0.119	0.132
8	-0.413	0.038	-0.307	0.177	—	—	—	—

付図 2.4

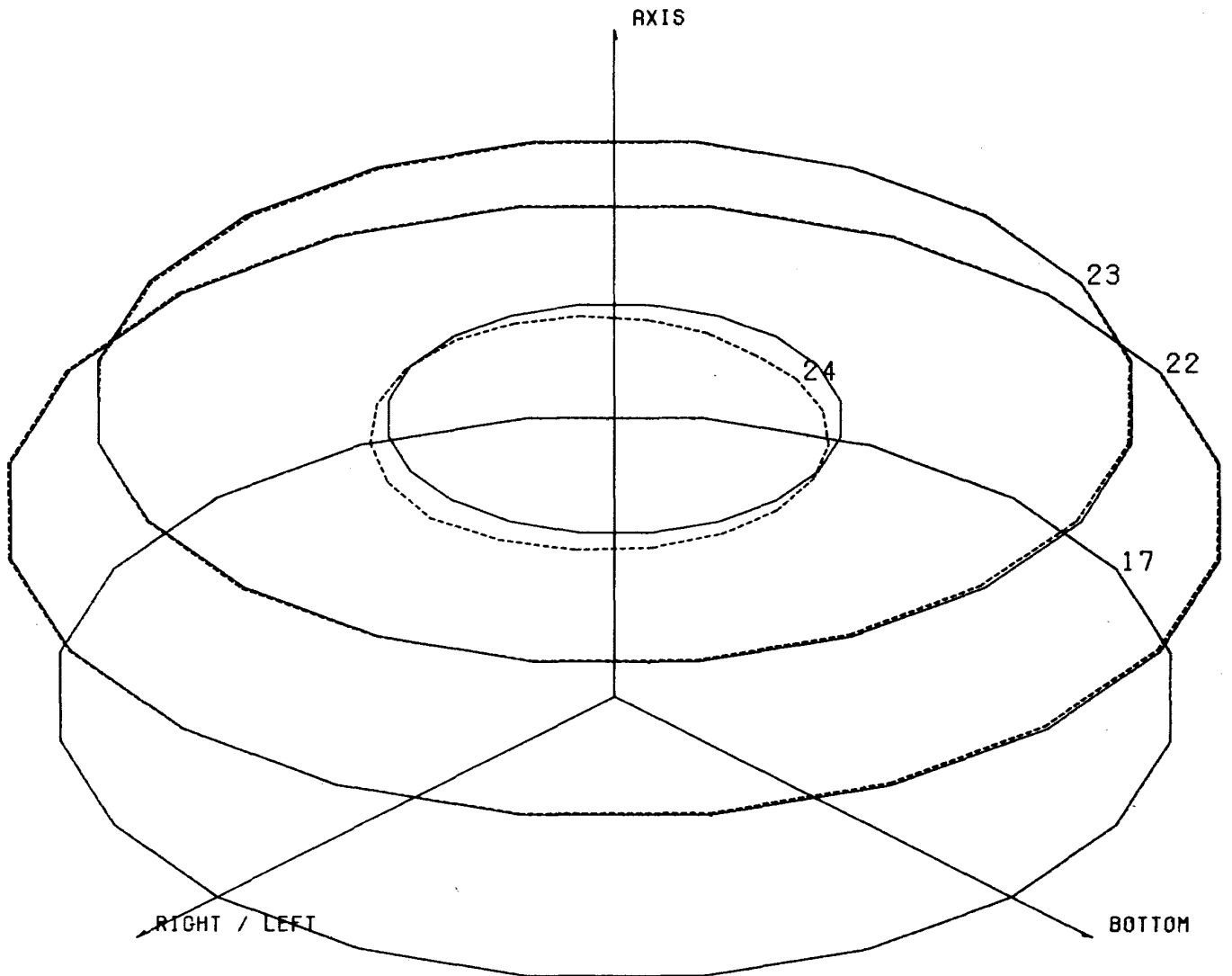


TEST No. 5 04 BRG CASE F BOTTOM LOAD

$\times 10^{-4}$
mm

SECTION No.	u_T	u_L	u_B	u_R	v_T	v_L	v_B	v_R
22	-0.941	-0.438	-1.042	0.210	0.313	0.028	-0.422	0.071
23	-1.397	-1.150	-1.066	0.849	—	—	—	—
24	-3.984	-0.363	-4.192	0.288	-0.557	-0.460	-1.181	1.270

付図 2.5

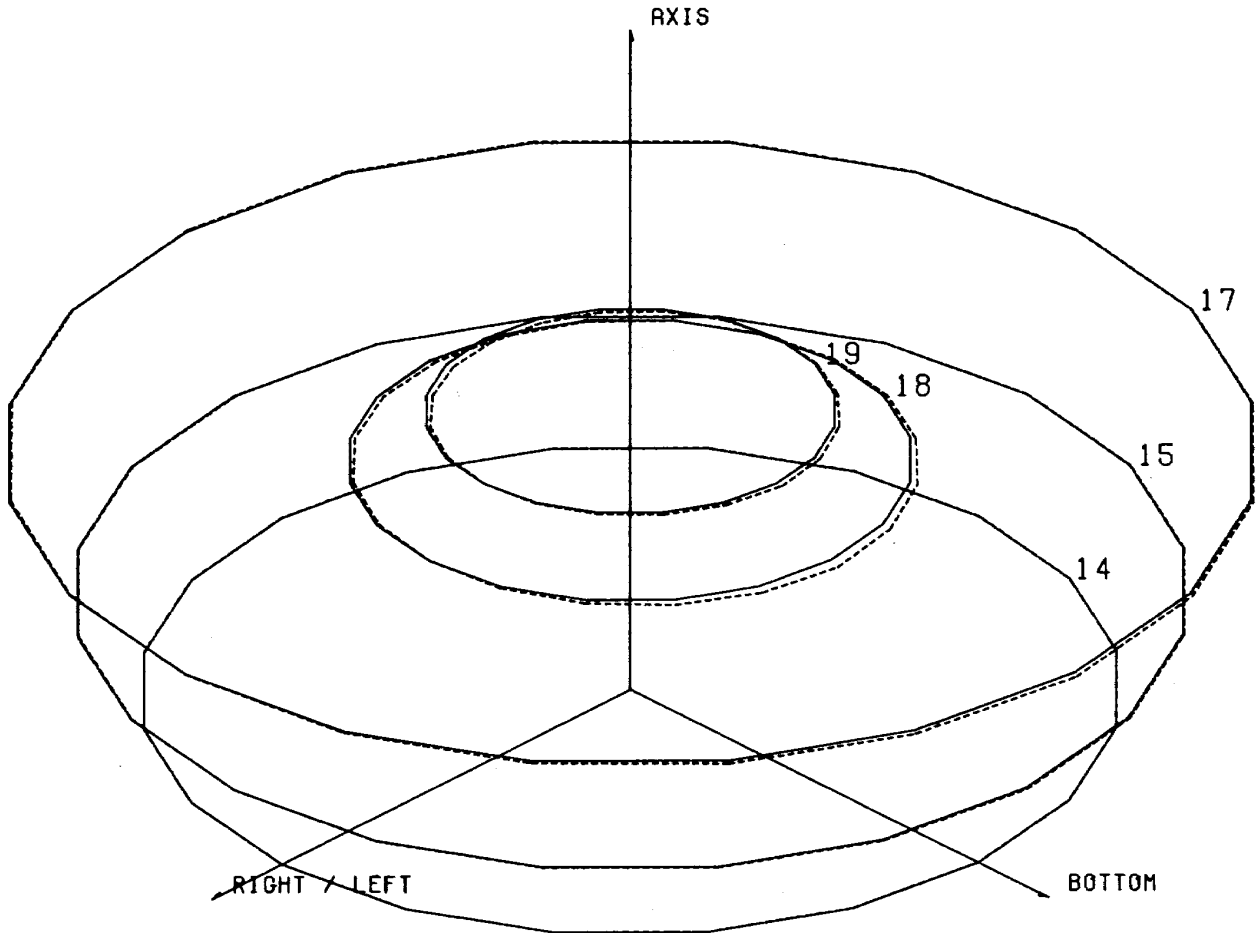


TEST No. 6 04 BRG CASE F RIGHT LOAD

$\times 10^{-4}$
mm

SECTION No	u_T	u_L	u_B	u_R	v_T	v_L	v_B	v_R
22	0.488	0.057	-0.542	-0.035	-0.086	-0.034	0.169	0.091
23	-0.637	0.388	-0.840	0.127	—	—	—	—
24	-0.233	4.234	0.104	-4.159	-0.531	-0.959	-1.516	-1.003

付図 2.6

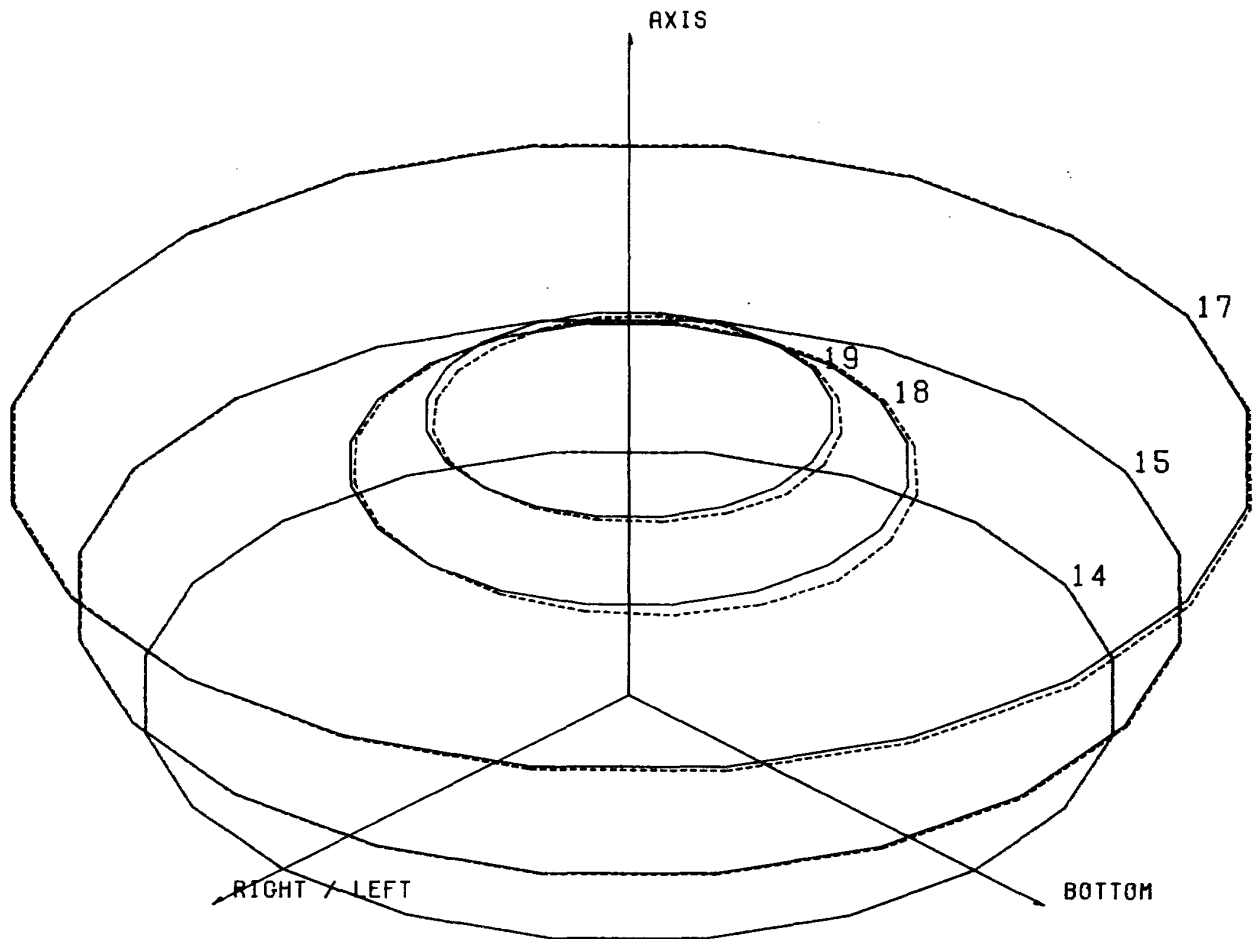


TEST No.7 3 BRG CASE E BOTTOM LOAD

$\times 10^{-4}$
mm

SECTION No.	u_T	u_L	u_B	u_R	v_T	v_L	v_B	v_R
15	-0.269	0.004	0.175	0.037	0.159	-0.013	-0.087	-0.014
17	-0.525	0.076	0.334	0.084	0.531	—	-0.445	—
18	-1.066	-0.018	1.185	0.299	0.273	—	-0.552	—
19	-1.243	—	0.953	—	—	—	—	—

付図 2.7

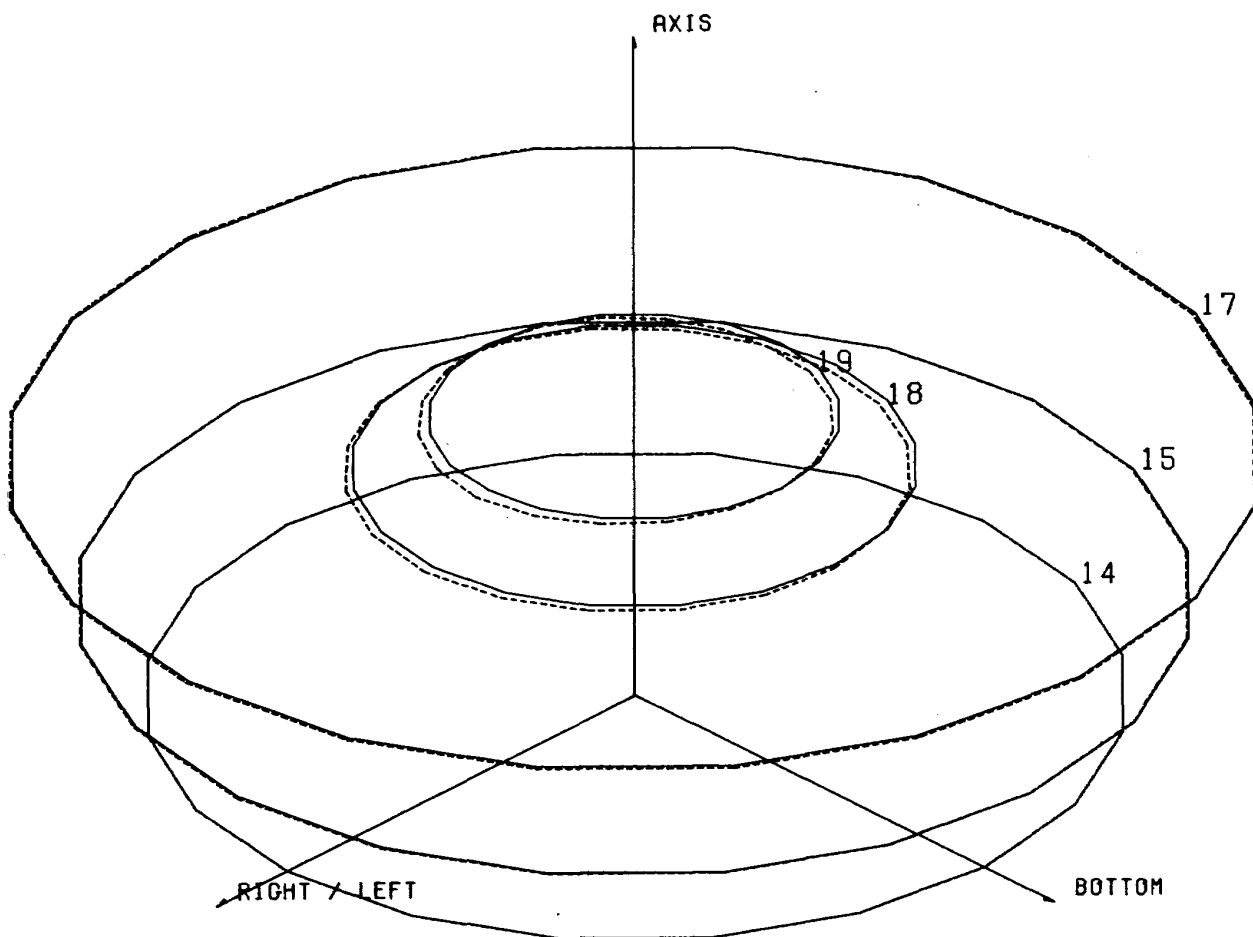


TEST No.8 03 BRG CASE E BOTTOM LOAD

 $\times 10^{-4}$
mm

SECTION No.	u_T	u_L	u_B	u_R	v_T	v_L	v_B	v_R
15	-0.311	0.004	0.237	0.014	0.190	-0.024	-0.117	—
17	-0.636	0.009	0.589	0.069	0.546	—	-0.577	—
18	-1.235	0.025	1.542	0.409	0.784	—	-1.548	—
19	-1.973	—	1.973	—	—	—	—	—

付図 2.8

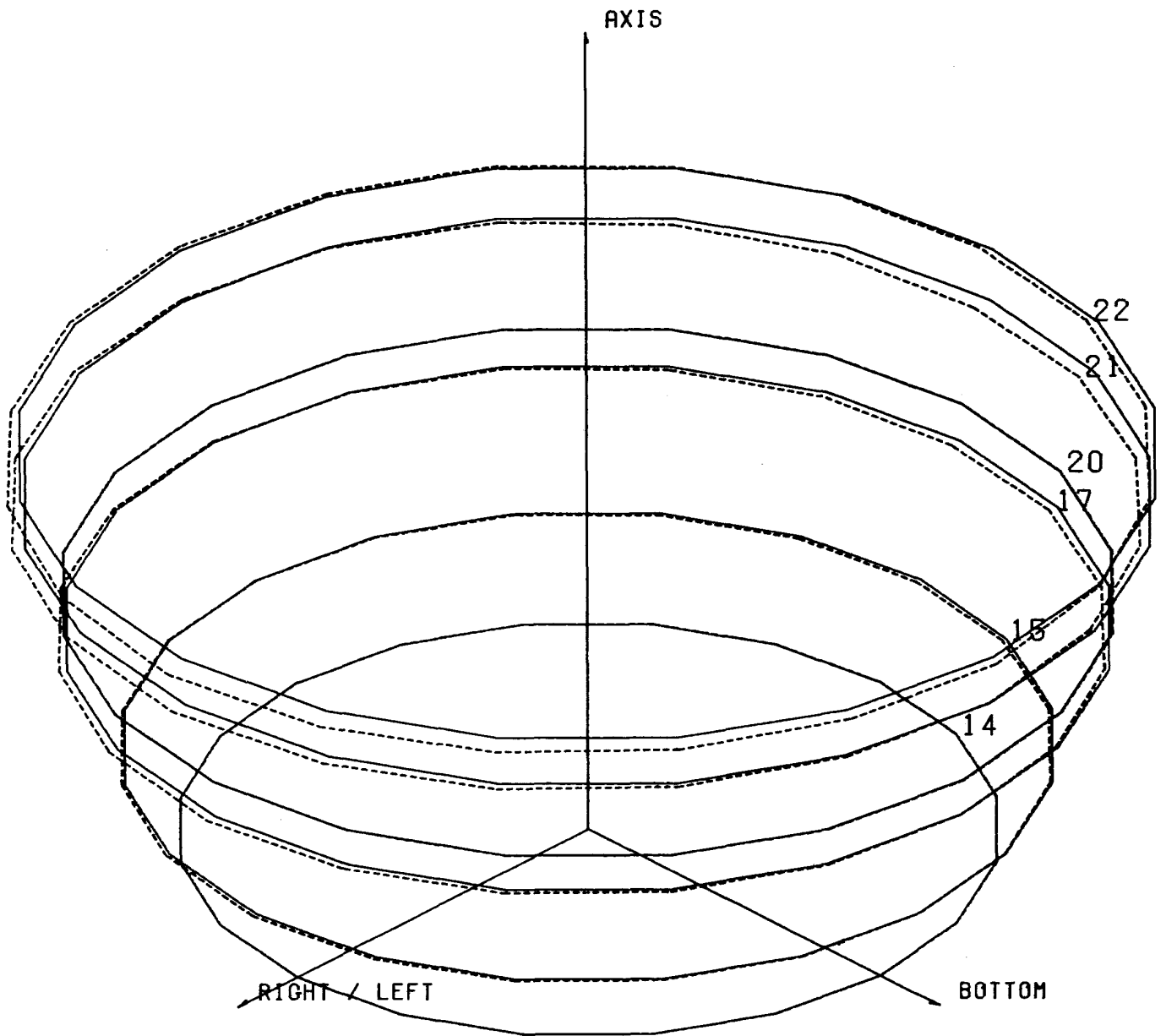


TEST No.9 03 BRG CASE E RIGHT LOAD

$\times 10^{-4}$
mm

SECTION No.	u_T	u_L	u_B	u_R	v_T	v_L	v_B	v_R
15	—	0.218	-0.037	-0.302	—	-0.101	-0.005	0.137
17	-0.014	0.494	-0.032	-0.458	0.275	—	-0.310	—
18	0.055	1.546	-0.142	-1.473	-0.119	—	-0.545	—
19	—	2.267	—	-1.719	—	—	—	—

付図 2.9

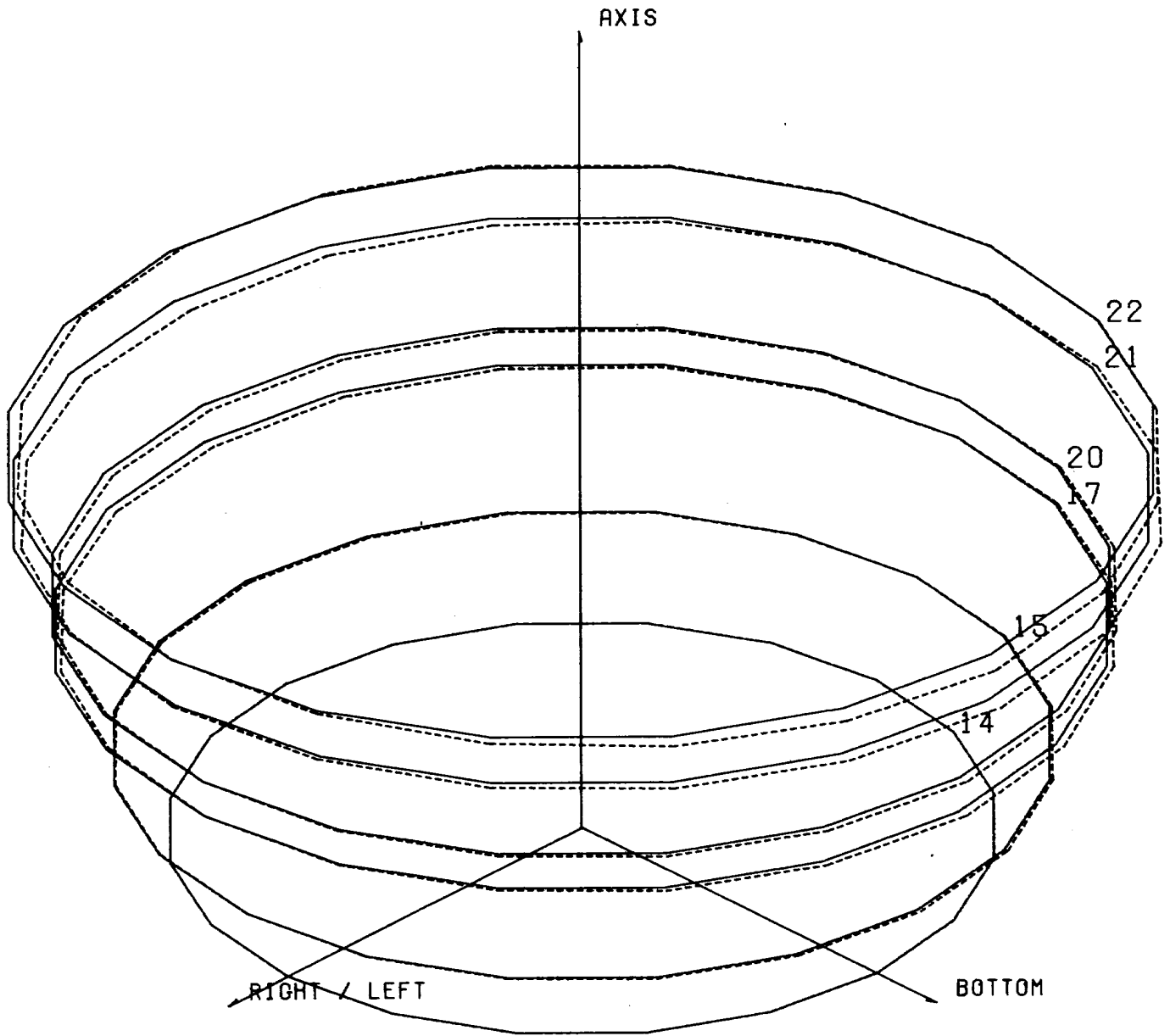


TEST No.10 04 BRG CASE E RIGHT LOAD

 $\times 10^{-4}$
mm

SECTION No.	u_T	u_L	u_B	u_R	v_T	v_L	v_B	v_R
15	-0.042	0.770	—	-0.853	—	—	—	—
17	0.201	1.685	—	-1.775	—	—	—	—
20	0.014	—	0.146	—	—	—	—	—
21	0.361	2.725	-0.118	-3.273	—	—	—	—
22	0.222	2.795	0.617	-2.691	0.513	-1.498	-0.825	1.373

付図 2.10

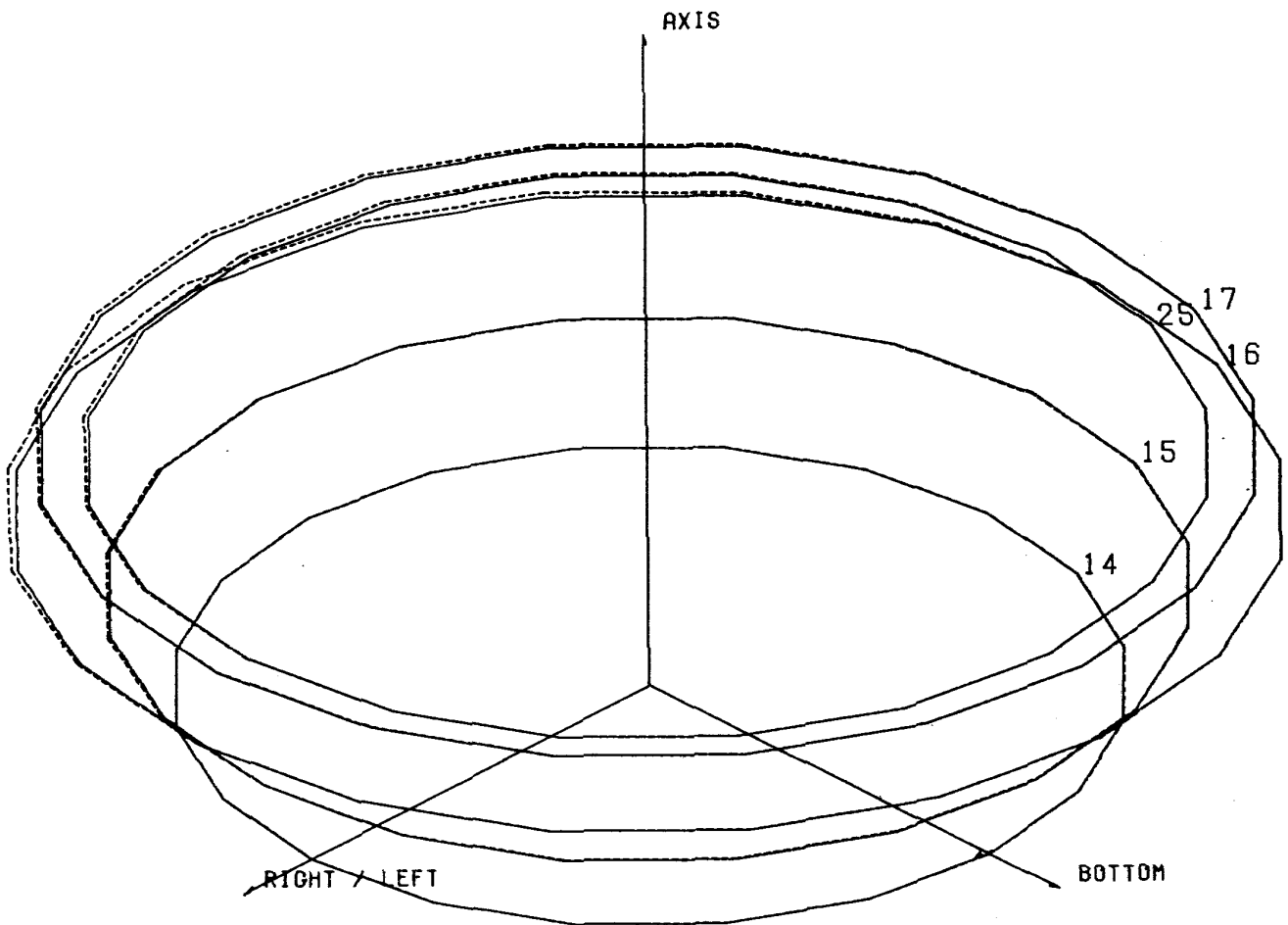


TEST No.11 04 BRG CASE D BOTTOM LOAD

$\times 10^{-4}$
mm

SECTION No.	u_T	u_L	u_B	u_R	v_T	v_L	v_B	v_R
15	-0.608	—	0.717	—	—	—	—	—
17	-1.910	—	1.628	-0.028	—	—	—	—
20	-1.765	—	1.538	—	—	—	—	—
21	-3.538	0.497	2.862	0.235	—	—	—	—
22	-3.221	0.041	1.021	0.179	2.269	0.069	-2.221	-0.083

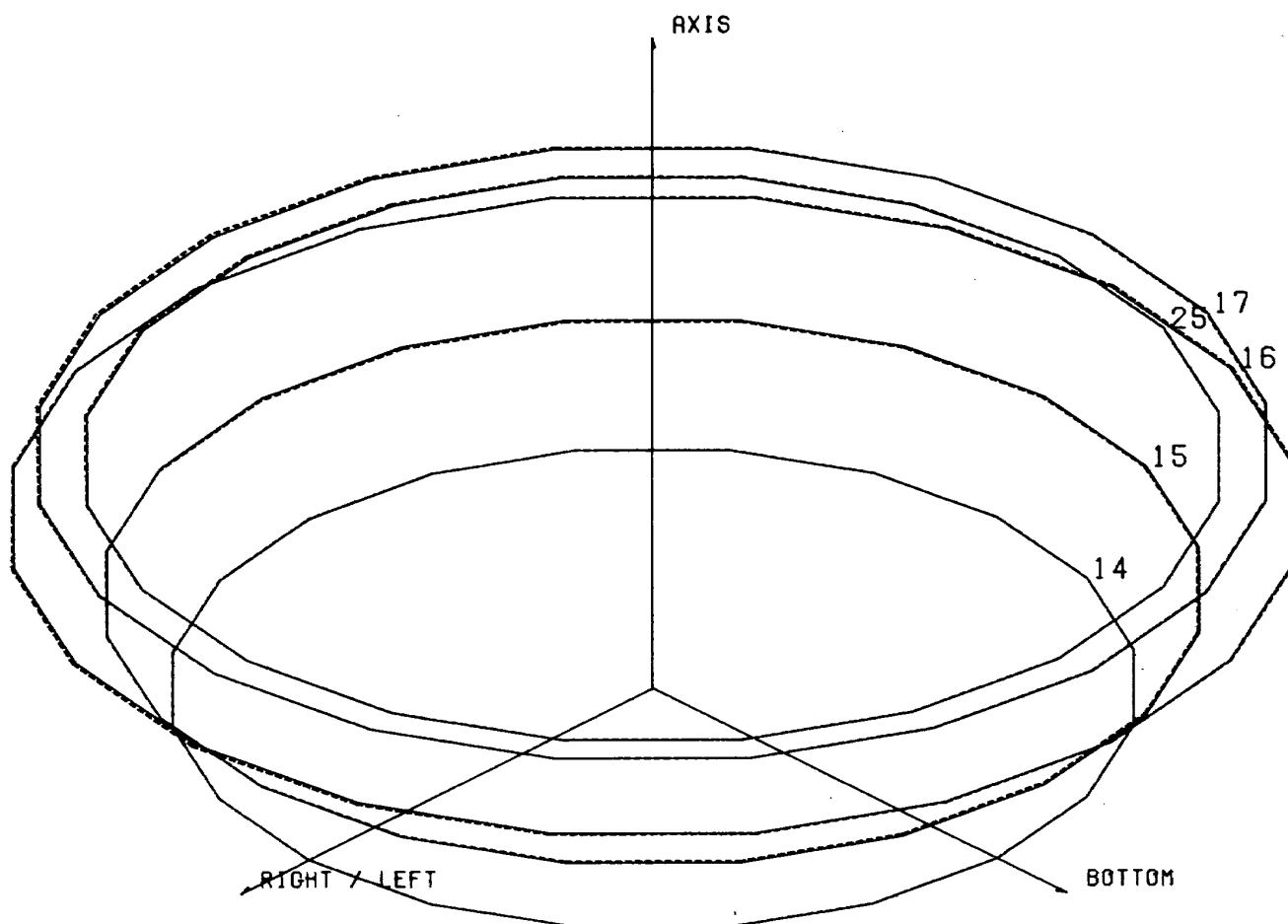
付図 2.11



TEST №12 MID FRAME MOUNT LOAD CENTRAL MOUNT CASE D $\times 10^{-4}$ mm

SECTION No	U _T	U _L	U _B	U _R	V _T	V _L	V _B	V _R
15	0.698	—	0.087	-0.203	0.510	—	0.203	—
16	1.786	—	—	—	—	—	—	—
17	1.091	-0.073	-0.014	0.029	—	—	—	—
25	1.031	—	—	—	—	—	—	—

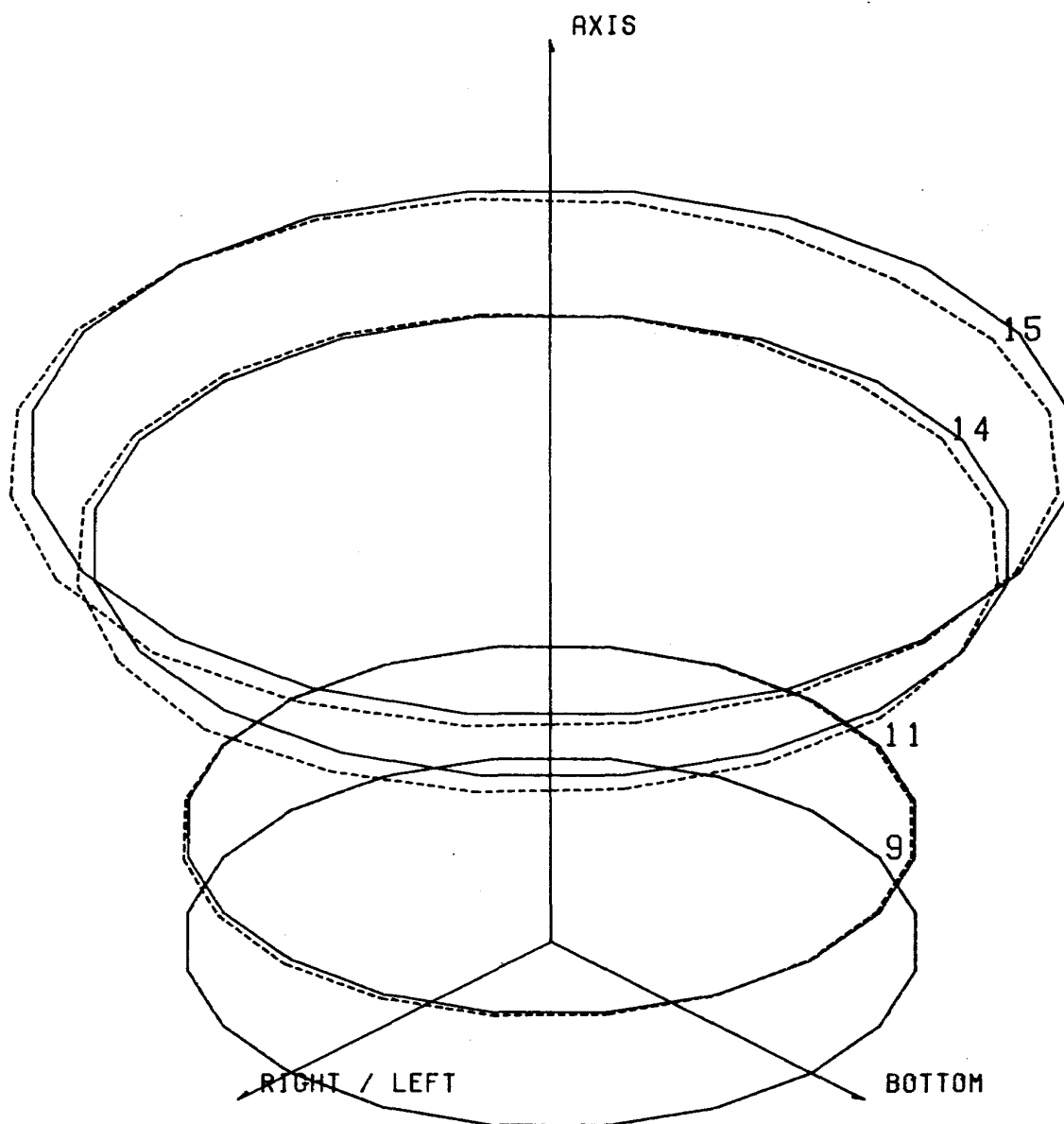
付図 2.12



TEST No.13 MID FRAME MOUNT LOAD L+R MOUNT CASE D $\times 10^{-4}$ mm

SECTION No	u_T	u_L	u_B	u_R	v_T	v_L	v_B	v_R
15	0.165	-0.077	-0.083	-0.317	-0.421	—	0.260	—
16	—	0.539	—	0.367	—	—	—	—
17	0.654	-0.004	-0.094	-0.160	—	—	—	—
25	0.360	—	—	—	—	—	—	—

付図 2.13

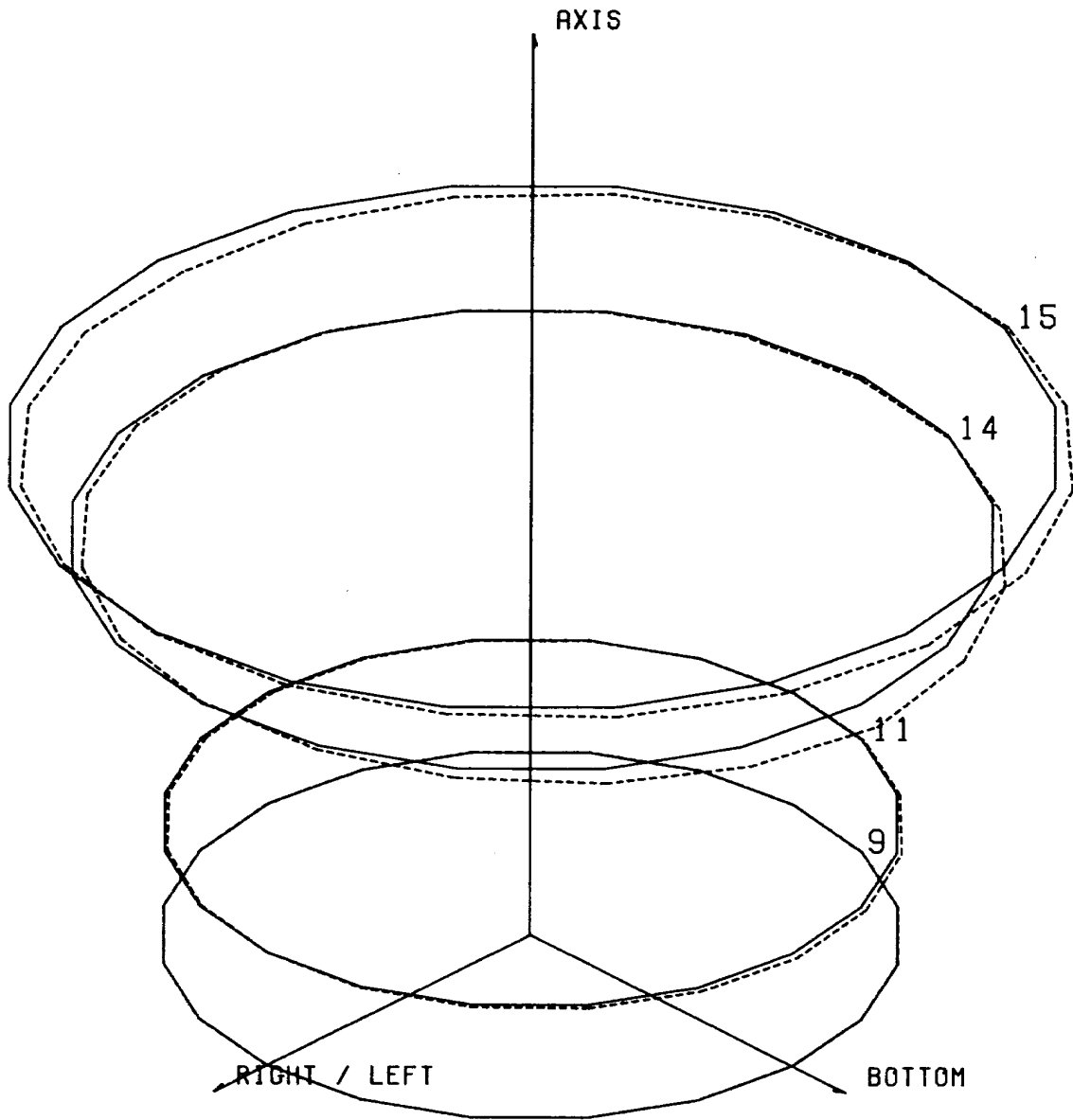


TEST No.14 03 BRG CASE C RIGHT LOAD

 $\times 10^{-4}$
mm

SECTION No.	u_T	u_L	u_B	u_R	v_T	v_L	v_B	v_R
11	—	0.956	-0.190	-0.750	—	-0.285	—	0.380
14	0.034	3.680	0.522	-3.835	0.881	-1.267	-0.834	1.437
15	—	4.762	0.615	-4.829	—	—	—	—

付図 2.14

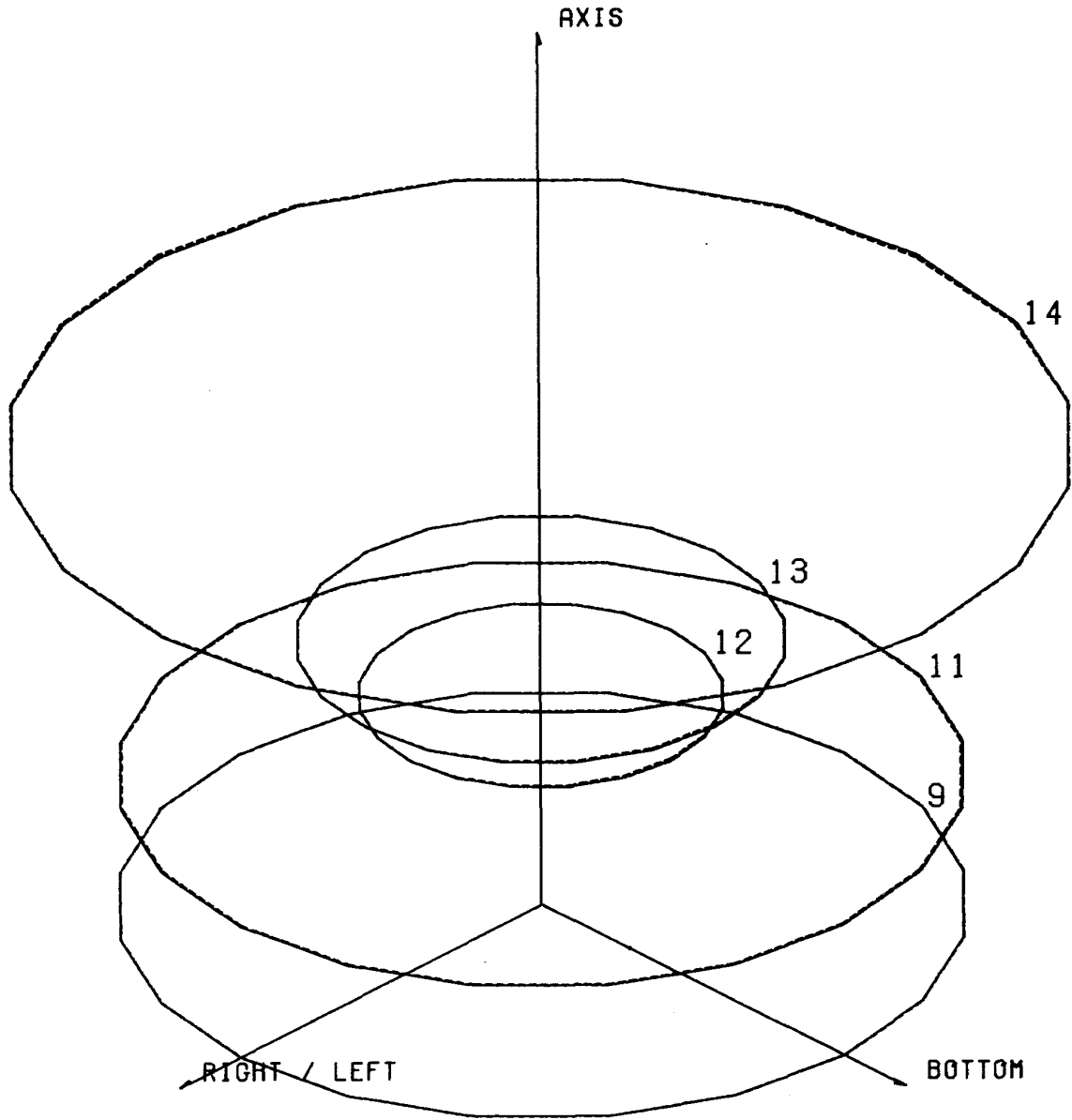


TEST No.15 03 BRG CASE C BOTTOM LOAD

$\times 10^{-4}$
mm

SECTION No.	u_T	u_L	u_B	u_R	v_T	v_L	v_B	v_R
11	-0.868	0.014	0.874	0.020	0.345	—	-0.285	—
14	-3.287	0.082	3.071	-0.501	2.195	0.279	-1.987	-0.098
15	-4.251	0.339	3.945	-0.419	—	—	—	—

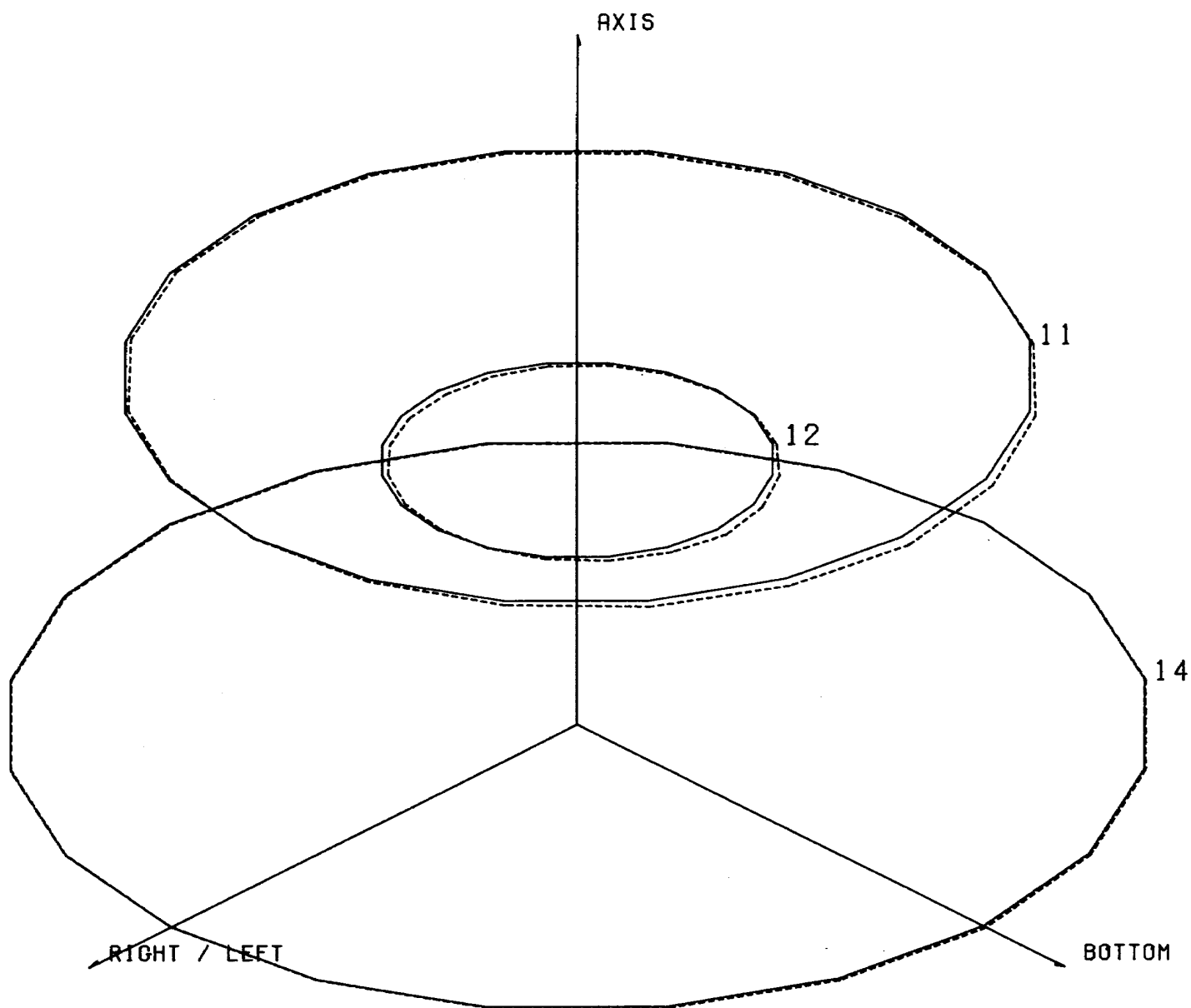
付図 2.15



TEST No. 16 2B BRG CASE C (WITHOUT MID FRAME) THRUST LOAD $\times 10^{-4}$ mm

SECTION No	U _T	U _L	U _B	U _R	V _T	V _L	V _B	V _R
11	-0.186	-0.136	-0.199	-0.200	0.023	0.025	0.006	0.025
12	—	—	—	—	0.027	—	0.289	—
13	—	—	—	—	0.044	—	0.269	—
14	0.272	-0.182	0.407	-0.504	0.122	—	0.318	—

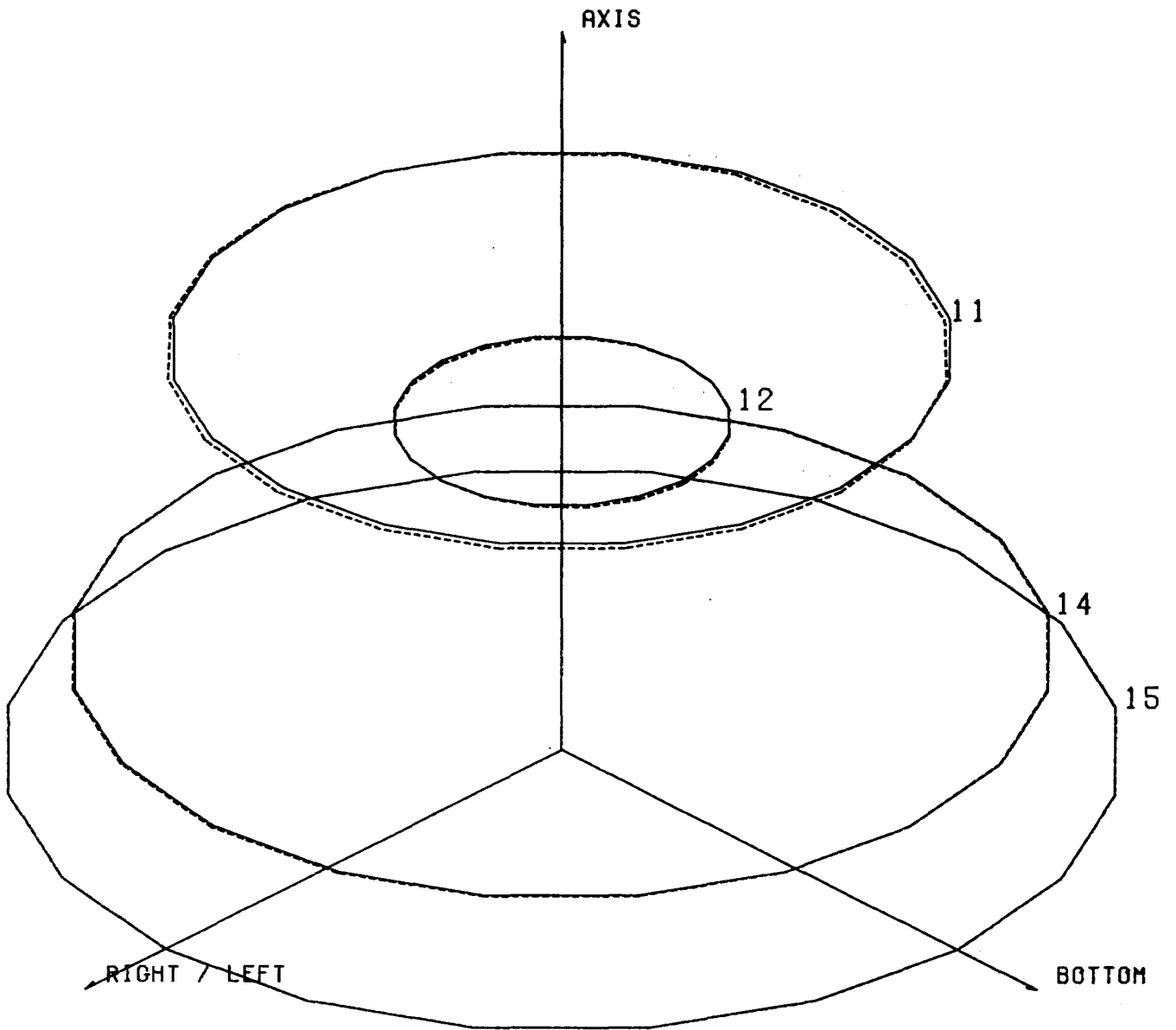
付図 2.16



TEST No. 17 2R BRG CASE B' (COMP-REAR CASING) BOTTOM LOAD $\times 10^{-4}$ mm

SECTION No.	u_T	u_L	u_B	u_R	v_T	v_L	v_B	v_R
11	-1.024	0.087	1.018	-0.076	0.419	-0.362	-0.545	—
12	-1.166	-0.247	1.276	-0.142	0.035	—	-0.119	—
14	-0.217	0.022	0.243	-0.105	-0.005	-0.046	-0.157	0.010

付図 2.17

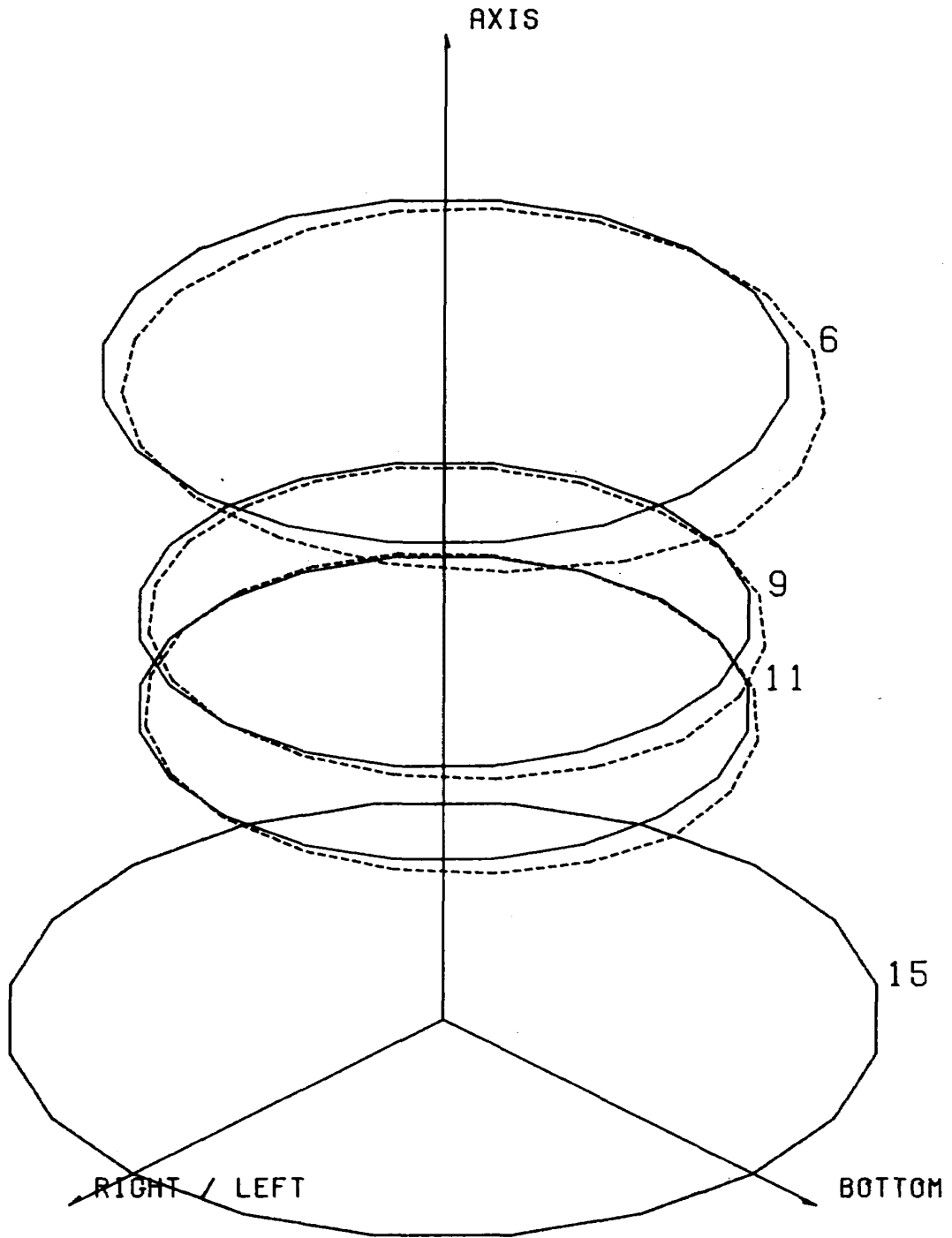


TEST No.18 2R BRG CASE B' LEFT LOAD

$\times 10^{-4}$
mm

SECTION No.	u_T	u_L	u_B	u_R	v_T	v_L	v_B	v_R
11	-0.147	1.247	0.101	-1.147	0.289	0.101	-0.550	—
12	-0.177	—	0.101	—	-0.381	—	-0.456	—
14	0.039	0.241	-0.077	-0.248	-0.023	0.063	-0.023	-0.112

付図 2.18

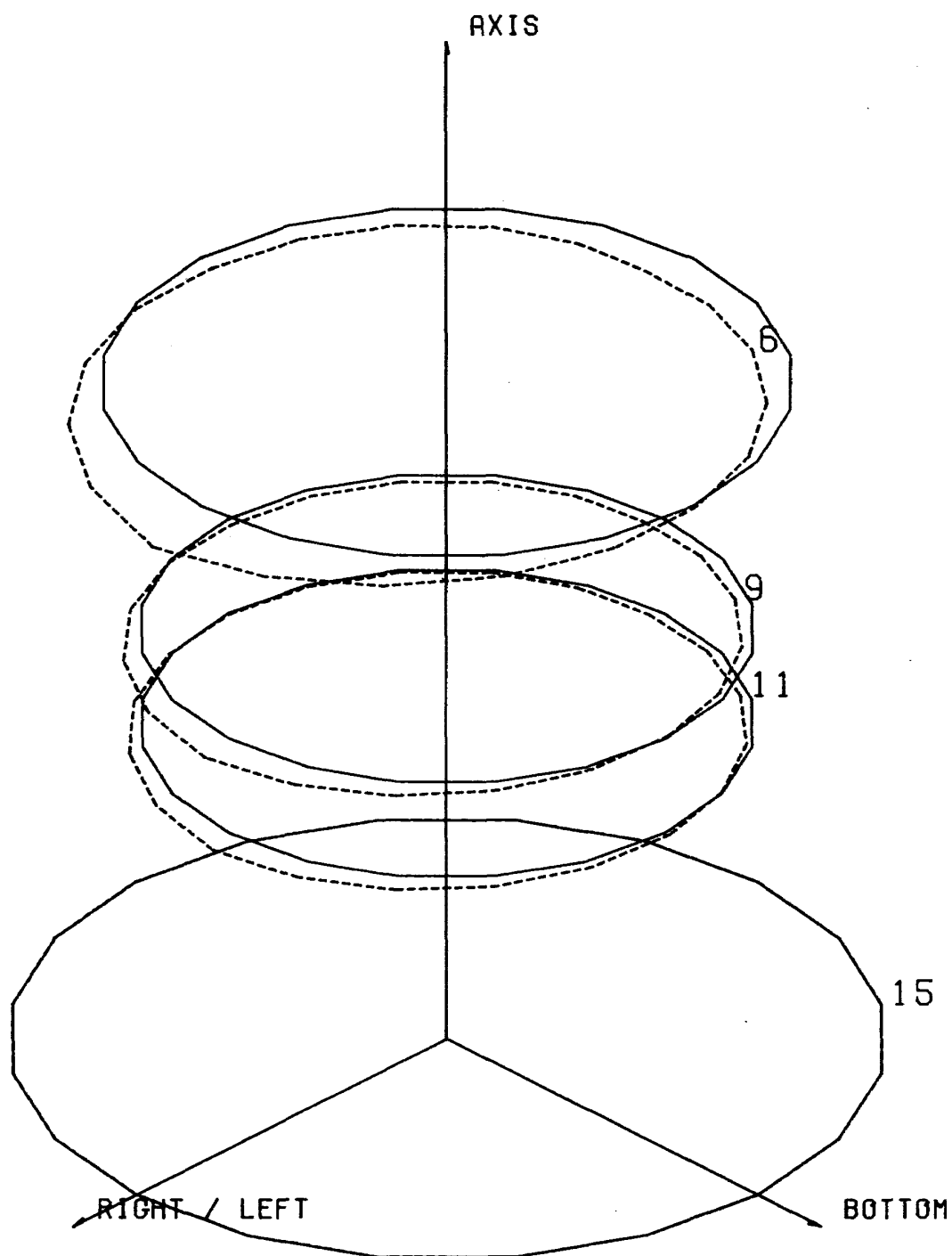


TEST No. 19 01 BRG CASE B BOTTOM LOAD

$\times 10^{-4}$
mm

SECTION No.	u_T	u_L	u_B	u_R	v_T	v_L	v_B	v_R
6	-9.064	1.177	9.187	0.354	2.202	-0.561	-2.955	-0.043
9	-4.314	0.393	4.482	-0.476	1.867	-0.771	-1.232	0.337
11	-2.942	0.477	2.706	-0.333	2.648	—	-2.466	—

付図 2.19

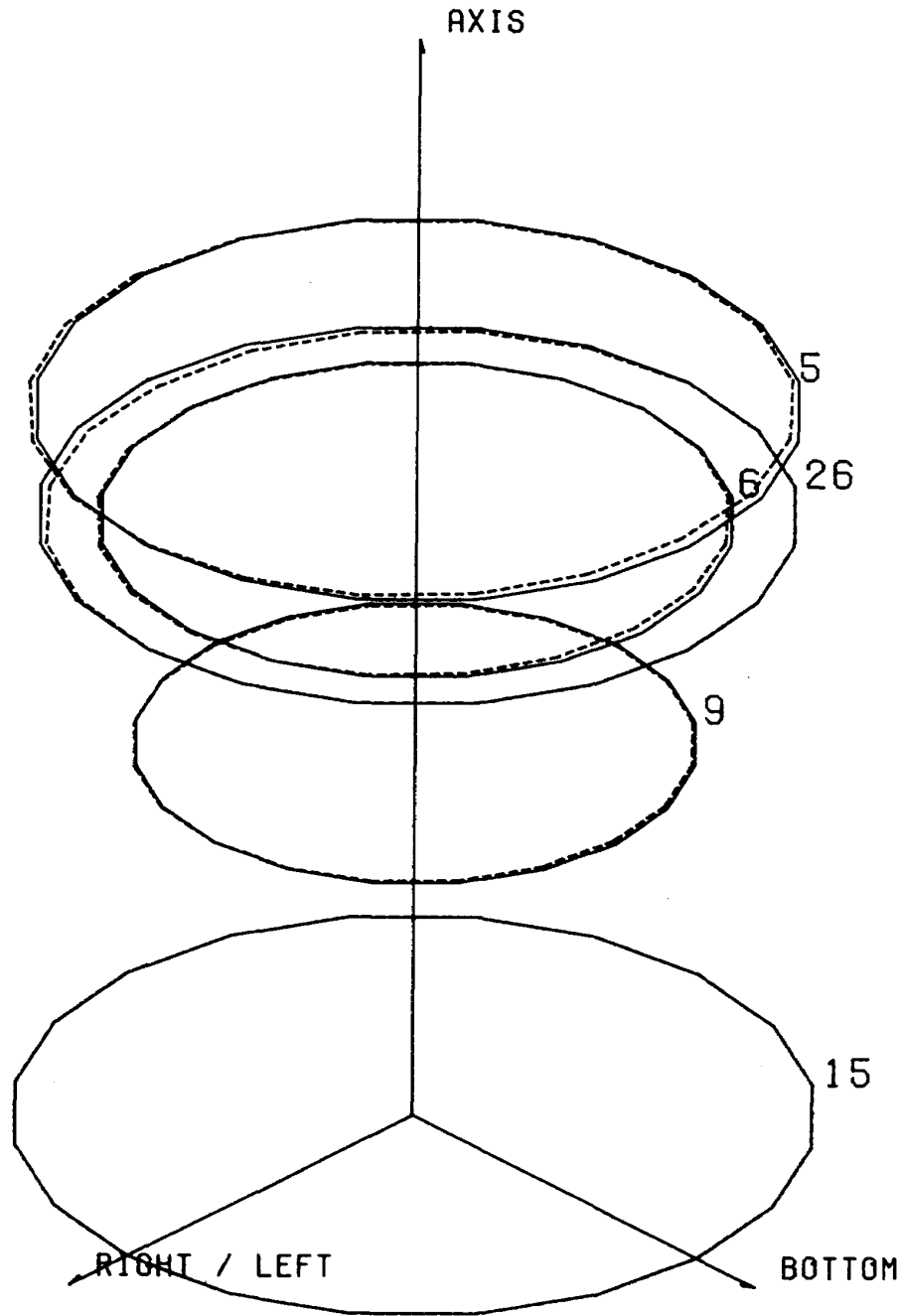


TEST No. 20 01 BRG CASE B LEFT LOAD

 $\times 10^{-4}$
mm

SECTION No.	u_T	u_L	u_B	u_R	v_T	v_L	v_B	v_R
6	-2.360	10.460	0.814	-10.220	-0.869	1.965	0.266	-2.767
9	-0.802	5.213	0.548	-4.776	-0.675	1.575	0.689	-1.236
11	-0.338	3.553	0.926	-3.440	—	1.249	—	-1.574

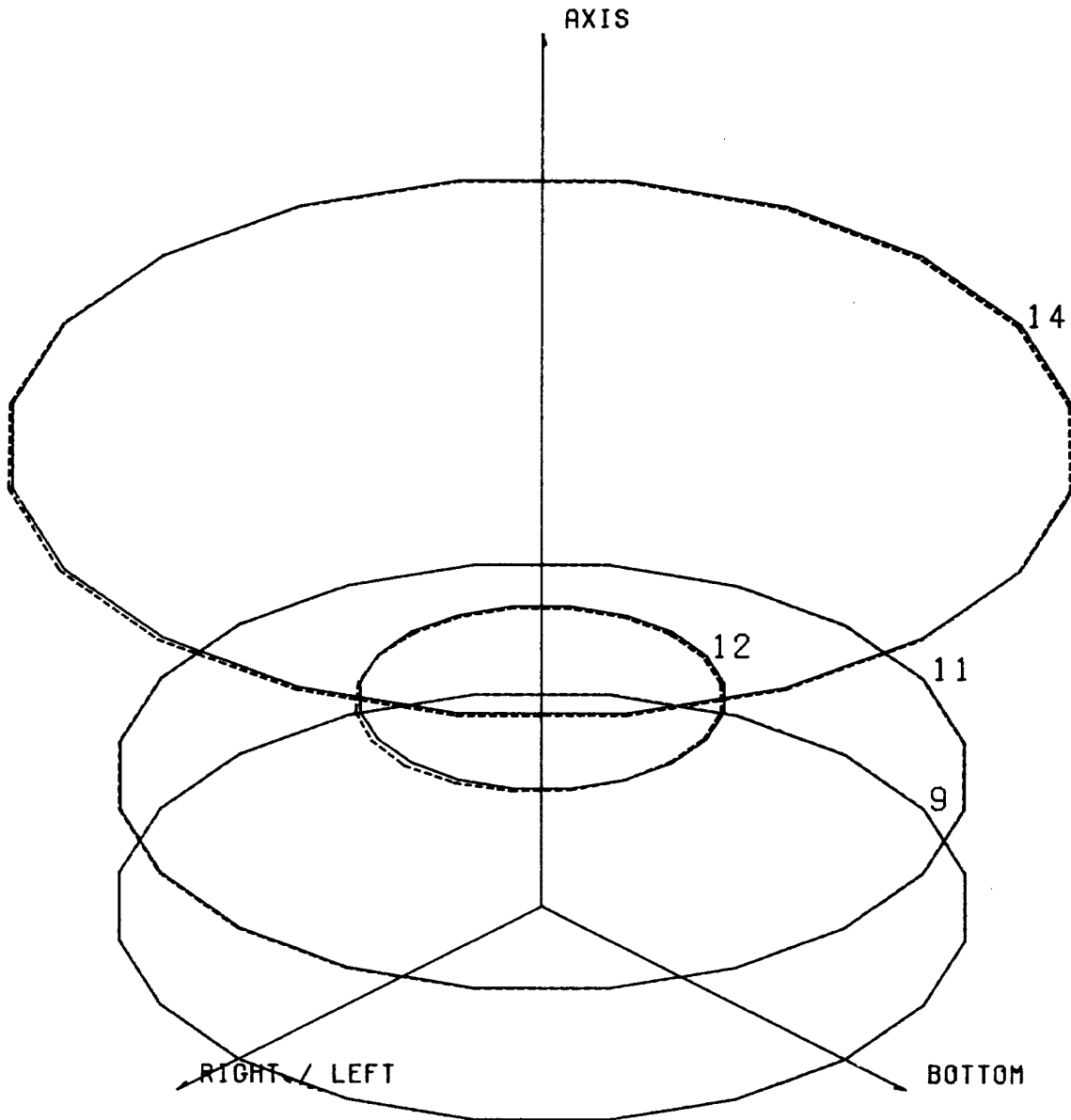
付図 2.20



TEST No.21 FRONT MOUNT THRUST LOAD CASE B $\times 10^{-4}$ mm

SECTION No.	U_T	U_L	U_B	U_R	V_T	V_L	V_B	V_R
5	2.317	-0.266	-2.031	-0.575	-1.379	-0.002	0.611	-0.042
6	1.235	—	-1.726	—	-1.073	-0.040	0.273	-0.408
9	0.377	0.042	-0.650	-0.228	-0.745	-0.112	0.305	—
26	-2.707	—	—	—	—	—	—	—

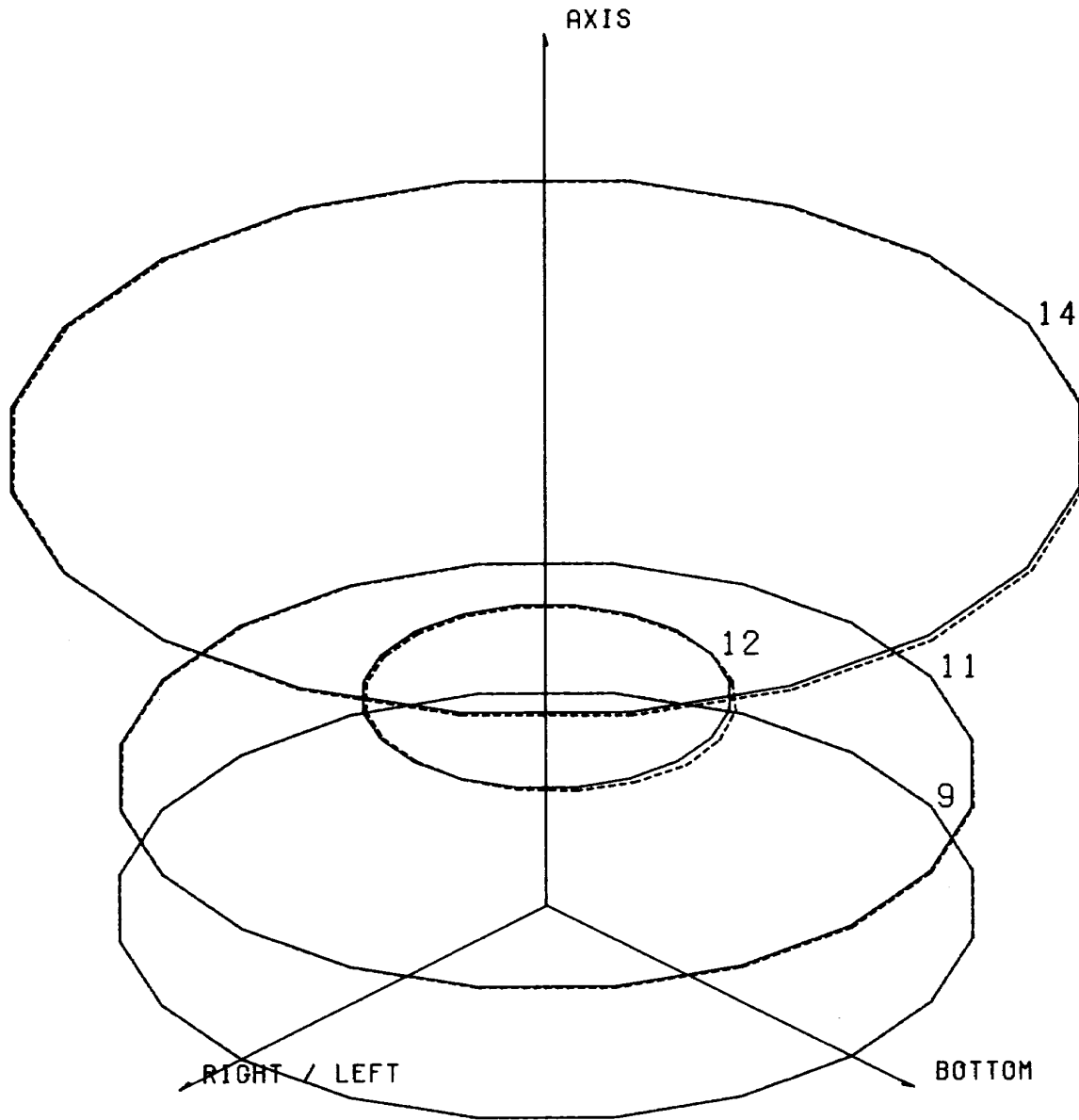
付図 2.21



TEST No. 22 2R BRG CASE C' (WITHOUT MID FRAME) RIGHT LOAD $\times 10^{-4}$ mm

SECTION No	u_T	u_L	u_B	u_R	v_T	v_L	v_B	v_R
11	0.002	0.201	-0.026	-0.126	—	—	—	0.029
12	-0.387	1.046	-0.254	-0.516	—	—	—	—
14	-0.016	0.705	-0.093	-0.673	-0.021	-0.020	-0.234	0.070

付図 2.22



TEST No 23 2R BRG CASE C' BOTTOM LOAD

$\times 10^{-4}$
mm

SECTION No	u_T	u_L	u_B	u_R	v_T	v_L	v_B	v_R
11	-0.267	—	0.208	—	0.047	—	-0.135	—
12	-0.561	-0.275	1.344	-0.317	—	—	—	—
14	-0.652	0.052	0.679	-0.115	0.266	—	-0.289	-0.058

付図 2.23

航空宇宙技術研究所資料308号

昭和51年9月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社 共 進
東京都杉並区久我山4-1-7(羽田ビル)
