

UDC 539.3:  
629.7.035

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-533

中空翼の構造解析

—ファン動翼のねじり応力解析—

小河昭紀・祖父江 靖・磯部俊夫

1978年5月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# 中空翼の構造解析\*

— ファン動翼のねじり応力解析 —

小河昭紀\*\* 祖父江 靖\*\* 磯部俊夫\*\*\*

## Structural Analysis of Hollow Blades

(Torsional Stress Analysis of Hollow Fan Blades for Aircraft Jet Engines)

By Akinori OGAWA Yasushi SOFUE and Toshio ISOBE

This paper presents the torsional stress analysis of hollow fan blades by the Finite Element Method. The fans are considered to be double circular-arc blades, hollowed 30% and twisted by a component of the centrifugal force at the rated revolution. There are 0-7 webs inserted in the hollow section.

The following became clear after stress and rigidity analysis of the hollow blades.

- 1) Making the fan blade hollow by 30% increases the torsional rigidity per cross section by 20-24%, and maximum shear stress by 17-27%.
- 2) The number and location of webs don't have a considerable effect on torsional rigidity.
- 3) There is an optimum web location for torsional rigidity, where the shear strain in webs is maximum.
- 4) Shear flows branch away to webs, and stress concentrations decrease.

## 1 まえがき

近年ファンジェットエンジンは大型化、大推力の趨勢にあるが、それに伴いファン動翼の直径も増大し、同時に強度・剛性上の配慮から翼弦長も増加して全体的に大型化の傾向がある。ファン動翼の大型化は必然的に遠心力を負担するファン翼車の肉厚増加をもたらし、さらに波及的に他の構造部分の重量を増加させる。このような重量増加は航空機用エンジンとして重大な性能低下となるので、ファン動翼の中空化が必要とされる。構造強度上の信頼性が高く、かつ軽量の中空翼構造の研究のために、例を当研究所でこれまで試験研究を行ってきた<sup>1) 7)</sup>テストファン動翼にとって、その中空化を強度・剛性上の観点から有限要素法数値解析によって検討した結果を報告する。

荷重としては遠心力成分によるねじりもどしモーメント荷重を想定した。解析方法は St. Venant のねじり問題

として、川井、吉村の方法による有限要素法で数値解析を行うものである。そのさい計算精度を上げるためと中空部の複雑化のために分割数が千個を越える場合がしばしば生じた。このように分割が多くなると、データの作製と誤りのチェックは人力では困難となるので、2次元図形自動分割プログラムを作製して入力処理の簡易化を図った。

強度及びねじり剛性の点で最適の中空化設計の資料を得るために、中空部に入れる補強用ウェブ(Web)の配置と数を種々変化させたモデルで解析を行った。

主にねじり剛性及び応力集中とウェブの位置、数の関連について検討した結果、最適ウェブの配置について資料を得ることができた。種々のモデル解析から、ねじり荷重に対して30%程度の中空化の見通しを得ることができた。

## 2 解析方法

### 2.1 荷重分布と翼のモデル化

テストファン動翼F-10(棚なし)の形状、寸法を図1に示す。翼根、翼先端間の260mmで約37°のねじれがある。ファン動翼はピンジョイント連結であれ、ダブティ

\* 昭和53年3月1日受付

\*\* 原 動 機 部

\*\*\* 計 算 セ ン タ ー

ル連結であれ、空気力による曲げモーメントは遠心力と平衡するように考慮されている。

遠心力成分によるねじりもどしモーメント荷重に起因する応力が主としてファン動翼に生ずる<sup>(1)</sup>。図2にねじりもどしモーメント分布を示す。

ファン動翼及びねじりもどしモーメントが図1, 2の様な場合、厳密な応力解析として3次元弾性解析が必要であるが、近似としてここでは最大ねじりもどしモーメントが作用する付近の翼断面に注目してSt. Venant<sup>(2)</sup>の2次元ねじり問題として解析を行った。その解析条件として次の様に考える。

ファン動翼は無限に長い一様断面棒と想定する。

その断面としては最大ねじりもどしモーメントが作用する位置付近の翼断面をとる。なお、翼根部拘束の影響は剛性向上の方向に作用するので上述のSt. Venant の2次元取的取扱いの結果は安全設計側になると考えられる。

### 2.2 中空翼形状

中空形状を決定するためにさいして次式で与えられる中空率

を決める。

$$\text{中空率} = \frac{\text{中空部断面積}}{\text{翼断面積 (中空部も含む)}} \times 100$$

膜理論の近似解析によって評価した結果、中空率を30%程度にすると図3の様なモデルでは最高応力が10 kg/cm<sup>2</sup>以下になる。

これから中空率を30%に取り、中空部の内の補強ウェブの位置と数を種々変化させた表1のモデルについて解析を行う。表1には解析モデルの番号と分割数、中空率、節点数等を示す。図4(a)~(j)で各モデルの形状を有限要素法の三角形モザイクで示している。

解析断面はY軸対称とみなせるので右半分についてのみ解析を行っている。

補強ウェブ(Web)の厚さは2mm, ウェブと翼面板(Chord)の付根の半径は0.6mm, 又中空部先端半径はウェブ無し0Bモデル以外は0.2mmと取っている。ウェブの数が增加すると中空率一定, ウェブ厚さ一定のため翼面板の厚さが減少する事となる。これからウェブの補強効果以上に翼面板厚の減少による剛性低下, 応力上昇が問題と

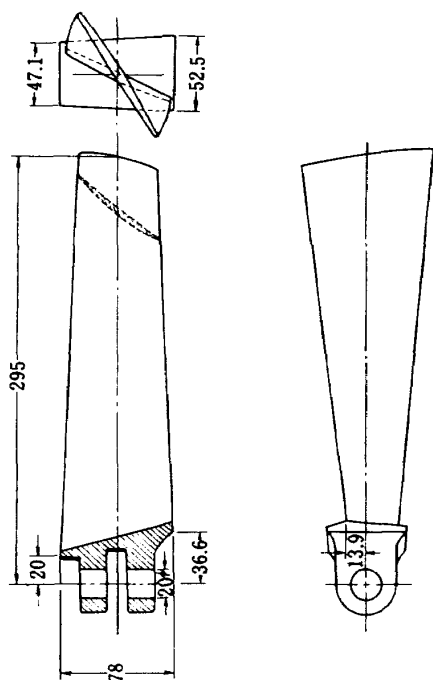


図1 テストファン動翼

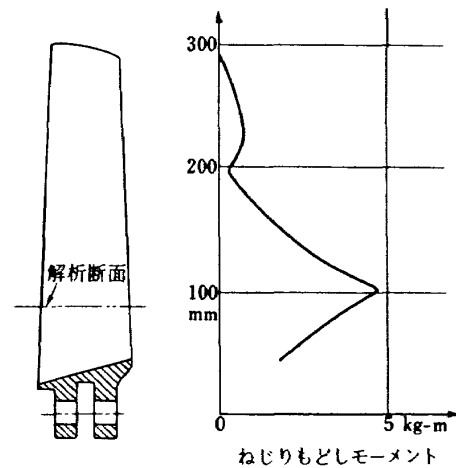


図2 ねじりもどしモーメント分布

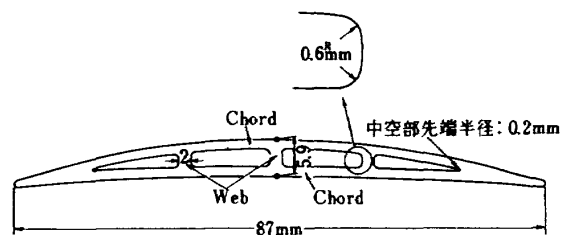


図3 中空翼モデルの1例(材質 T<sub>2</sub> 合金)

表1 解析モデル

ウェブ数	モデル	摘要	断面積(mm <sup>2</sup> )	中空率(%)	要素数	節点数
	Solid	中実モデル	367.08	0	233	153
0	0A	中空先端曲率=0.16mm	255.92	30.28	713	457
	0B	" =0.5mm	256.30	30.18	729	455
1	1A	中央にウェブ1本	255.40	30.42	921	568
2	2A	ウェブ2本	253.56	30.93	963	586
	Opt	最大歪設計によるウェブ2本	257.44	29.87	1229	734
3	3A	中央よりにウェブをおく	257.82	29.76	1103	668
	3B	均等位置にウェブをおく	258.38	29.65	1103	668
	3C	端よりにウェブをおく	257.98	29.72	1094	663
7	7A	ウェブ7本	260.18	29.12	1453	868

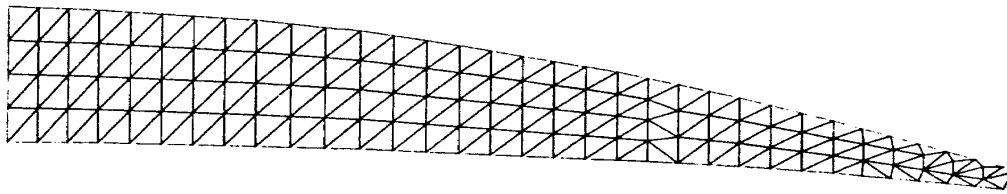


図4(a) 中央翼モデル(Solid)

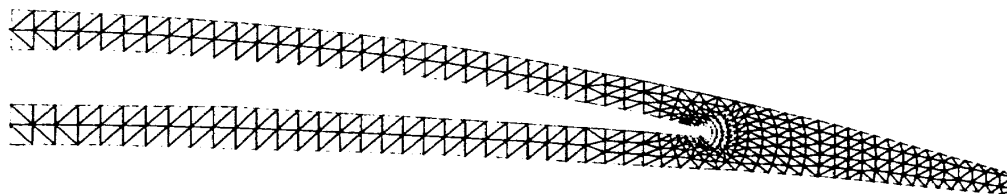


図4(b) ウェブ無しモデル(0A)

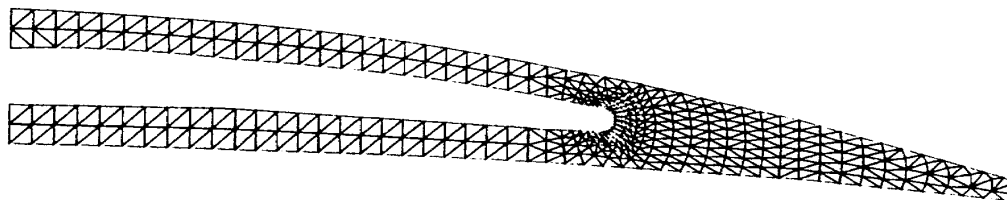


図4(c) ウェブ無しモデル(0B)

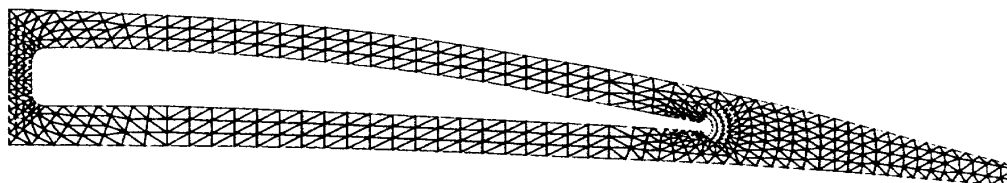


図4(d) ウェブ1本モデル(1A)

なる場合も考えられる。ウェブの板厚 2mm は加工上の制約から選定した。

なお中空率として 30% と想定したが、形状が複雑にな

る程一定に保つのは困難となってきたので ±1% 程度のばらつきがでている。

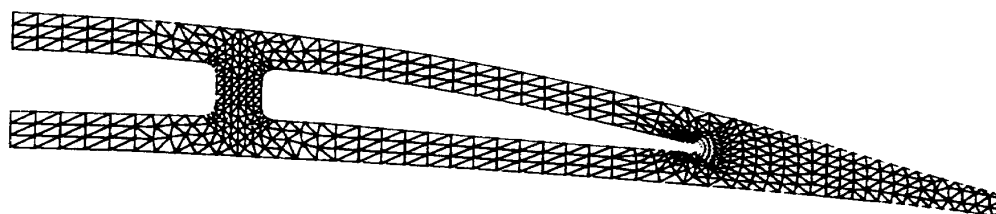


図 4(e) ウェブ2本モデル(2A)

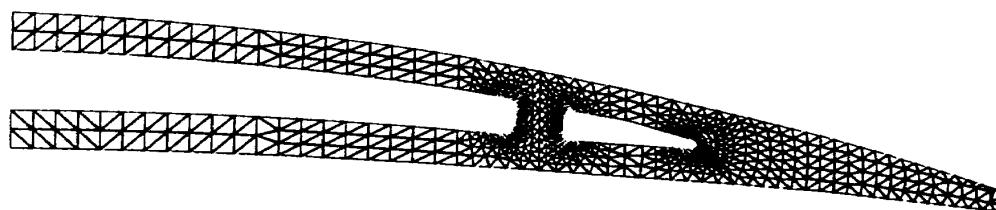


図 4(f) ウェブ2本モデル(Opt)

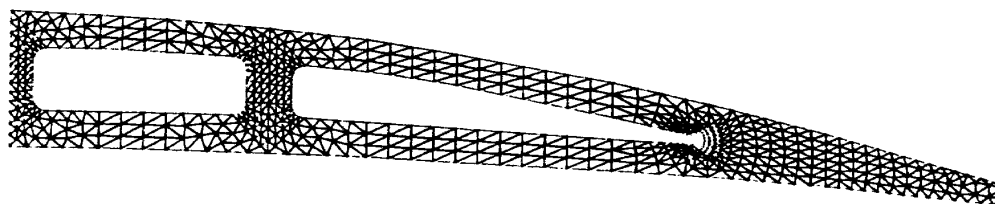


図 4(g) ウェブ3本モデル(3A)

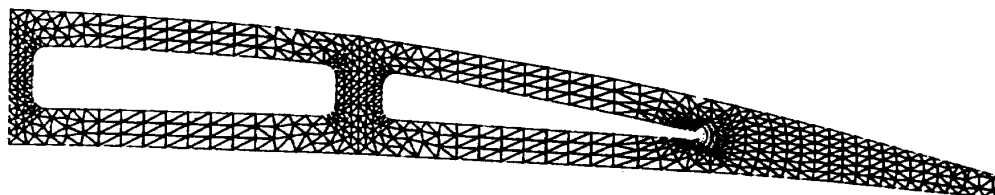


図 4(h) ウェブ3本モデル(3B)

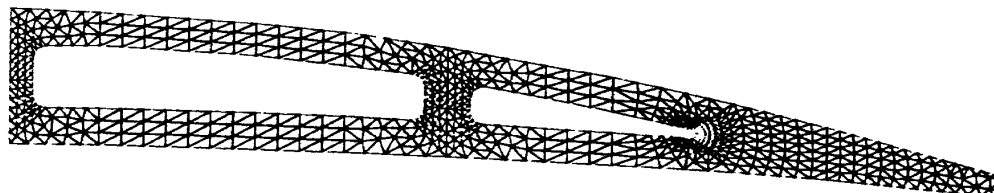


図 4(i) ウェブ3本モデル(3C)

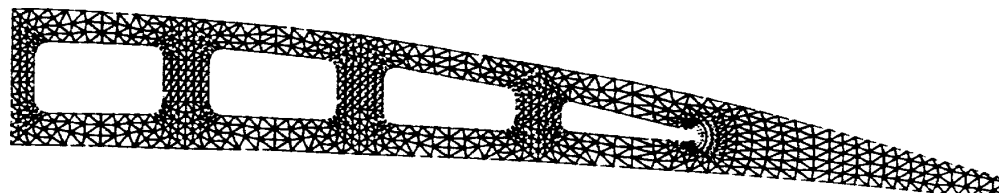


図 4(j) ウェブ7本モデル(7A)

2.3 有限要素法による2次元ねじり応力解析法

St. Venant の理論にもとづく一様断面棒のねじり問題を川井<sup>(3)</sup>吉村氏の方法にならって有限要素法で解く。

一様断面の棒から図5(a)にしめすように軸方向に単位長さ1の部分をかきだし図中にしめすように直交座標系をさだめる。そしてこれを図5(b)にしめすような三角柱要素の集合体としてモデル化する。

三角柱要素ijkを図6にしめす。この要素内の任意の1点Pの変位(u, v, w)はSt. Venant の理論により一般的につきのようにおくことができる。

$$u = -\theta y z \quad (2.1)$$

$$v = \theta x z \quad (2.2)$$

$$w = h(x, y) \quad (2.3)$$

ここに $\theta$ は“ねじれ率”と呼ばれる。

上式からあきらかなように、要素内の任意の1点Pのuおよびvは $\theta$ をかめればそのx, y座標値から決定されてしまうので、三角柱有限要素の節点変位の列ベクトルdはつき成分に簡単化される。

$$d = \{ \theta, w_i, w_j, w_k \}^T \quad (2.4)$$

(ここに、上添字Tは転置行列をあらわす)

dに対応する節点力の列ベクトルfは

$$f = \{ m_i, z_i, z_j, z_k \}^T \quad (2.5)$$

となる。ここに $z_i, z_j, z_k$ はi, j, k点におけるZ方向の節点力、 $m_i$ は三角柱要素に加わるねじりモーメントである。

さてwは(2.3)式にしめしたように、x, yのみの関数であるが、これをつぎのように仮定する。

$$w = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \quad (2.6)$$

以降の計算は一般の剛性マトリックスの導き方と同様にして行えばよいので、<sup>(4)</sup>結果のみをしめしていく。

$$\begin{Bmatrix} \theta \\ w_i \\ w_j \\ w_k \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & x_i & y_i \\ 0 & 1 & x_j & y_j \\ 0 & 1 & x_k & y_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{Bmatrix} = d = T \alpha \quad (2.7)$$

$$\begin{Bmatrix} \theta \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{Bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} 2A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x_j y_k - x_k y_j & x_k y_i - x_i y_k & x_i y_j - x_j y_i \\ 0 & y_j - y_k & y_k - y_i & y_i - y_j \\ 0 & x_k - x_j & x_i - x_k & x_j - x_i \end{bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \theta \\ w_i \\ w_j \\ w_k \end{Bmatrix}, \text{ or } \alpha = T^{-1} d \quad (2.8)$$

ここにAは三角柱の底面積である。

○ひずみと $\alpha$ の関係

$$\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_z = \gamma_{xy} = 0$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = -\theta_y + \alpha_2$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = \theta_x + \alpha_3$$

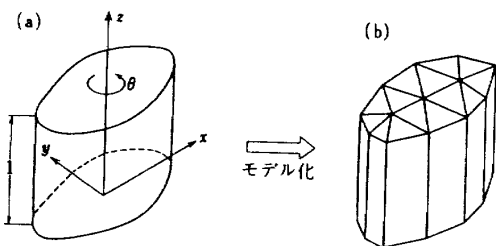


図5 一様断面棒のモデル化

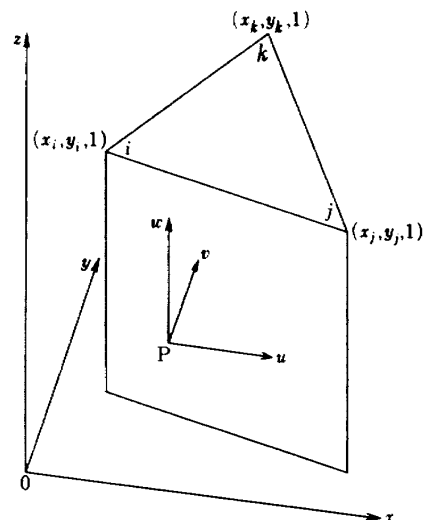


図6 三角柱有限要素



また(2.12)式より $M_t$ と $\theta$ について次の式が成立する。

$$M_t = \{K_{AB}\}^T \{w\} + K_B \theta = \left[ \{K_{AB}\}^T \left\{ \frac{w}{\theta} \right\} + K_B \right] \theta \quad (2.16)$$

(2.15)式を $\left\{ \frac{w}{\theta} \right\}$ について解いて、その結果を(2.16)式に代入して $\theta$ を計算すればよい。

### 2.4 曲げ剛性

表1の各モデルの断面二次モーメントは、三角要素について個別的に計算を行い後で断面全体の重心座標で総和を取って求めた。

三角要素ABC(図7)での重心Gを原点として、底辺と平行なX軸をもつ局所座標系 $x, y$ を考える。

X, Y軸に関する断面二次モーメントは次のようになる。

$$I_{xx} = \int_{\Delta ABC} y^2 dA = \frac{A_0 h^2}{18}$$

$$I_{yy} = \int_{\Delta ABC} x^2 dA = A_0 \times \frac{(a^2 + b^2 + c^2) - 2h^2}{36}$$

$$I_{xy} = \int_{\Delta ABC} xy dA = A_0 \times \frac{x_A h}{12}$$

但し  $A_0 = \frac{ah}{2}$  ,  $dA$ ; 面積増分

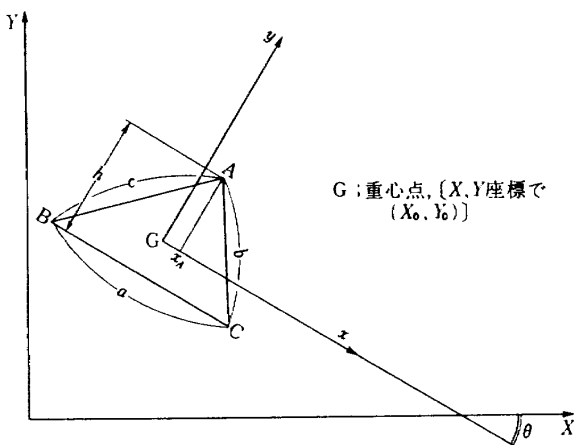


図7 三角要素ABCの断面二次モーメント計算

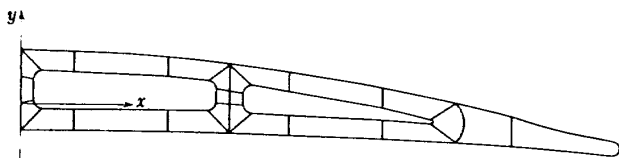


図8 モデルのブロック分割例

基準座標系 $X, Y$ について上式を変換する。

$$I_{XX} = I_{xx} \cos^2 \theta + I_{yy} \sin^2 \theta - 2I_{xy} \sin \theta \cos \theta + A_0 Y_0^2$$

$$I_{YY} = I_{xx} \sin^2 \theta + I_{yy} \cos^2 \theta + 2I_{xy} \sin \theta \cos \theta + A_0 X_0^2$$

$$I_{XY} = -(I_y - I_x) \sin \theta \cos \theta + I_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) + A_0 X_0 Y_0$$

基準座標系として断面全体の重心を原点に選んだ。図4のモデルはY軸対称であるので、X, Y軸は慣性主軸となる。

### 3 入力データの作製

図3のモデルは図8のようにブロックにまず分割される。ブロックは4個以上の節点からなる単一連結領域である。このブロックを適当な写像関数を用いて正方形領域に変換する。図9(a)は図9(b)に変換されている。辺上の黒点は節

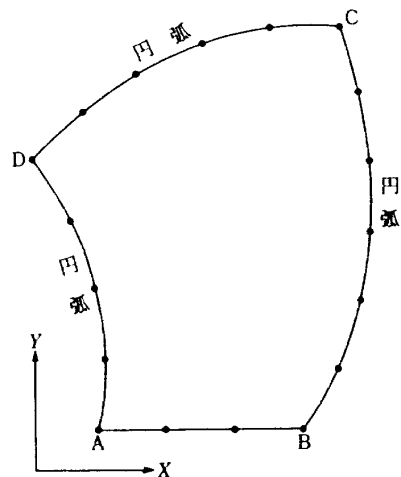


図9(a) 自動分割例(ブロック)

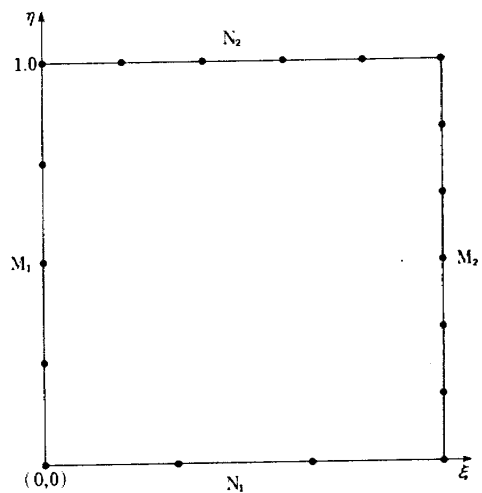


図9(b)  $\xi, \eta$ 面へのブロックの写像



点を示す。一般には正方形を回転させて左辺と下辺が対辺よりも少ない節点数となるようにする。図上で各々  $N_1, M_1, N_2, M_2$  で辺上の節点数を示すと、

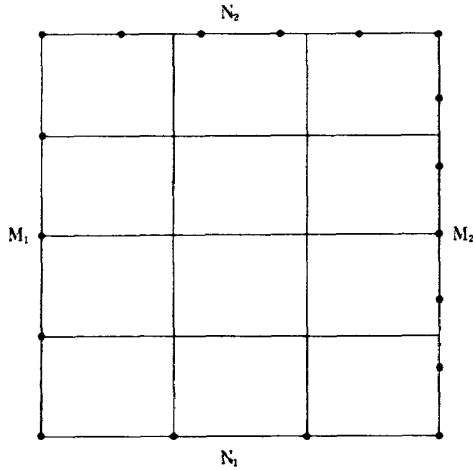


図 9(c) 経緯線によるブロック分割

$$N_1 < N_2, \quad M_1 < M_2$$

上述の正方形を適当な三角形に分割する為に、以下の手順に従う。

(1) 左辺と下辺の各節点を通る線分によってブロックを  $(N_1 - 1) \times (M_1 - 1)$  個の小ブロックに仮分割する。(図 9(c)参照)

(2) 緯線上に  $N_1$  から  $N_2$  まで節点が直線的に増加する様に仮節点を分布させる。(図 9(d)上で  $\circ$  で示す。経線上にも同様に  $M_1$  から  $M_2$  へ直線的に増加する様に仮節点を分布させる。(図 9(e)上で  $\times$  で示す。)

(3) 緯度及び経度線上の仮節点を図 9(f)で同時に示してある。

$\circ$  印の仮節点は図から 7 個、 $\times$  印の仮節点は 8 個ある。経緯度線の交点は 6 個ある。経緯度線の各交点に最も近い(但し距離はもとの X-Y 平面に換算)  $\circ$  と  $\times$  印の仮節点对を合体させて 1 個の実節点とする。

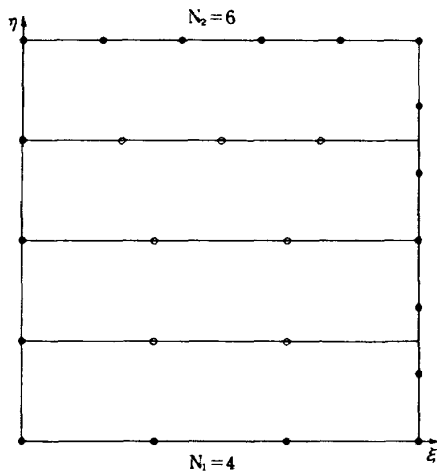


図 9(d) 緯線 ( $\eta = \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}$ ) 上の仮想節点分布

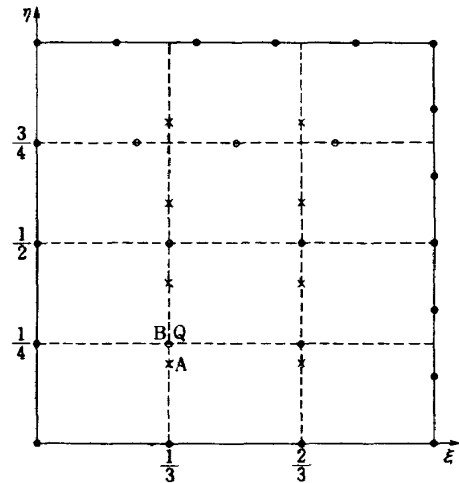


図 9(f) 仮節点分布

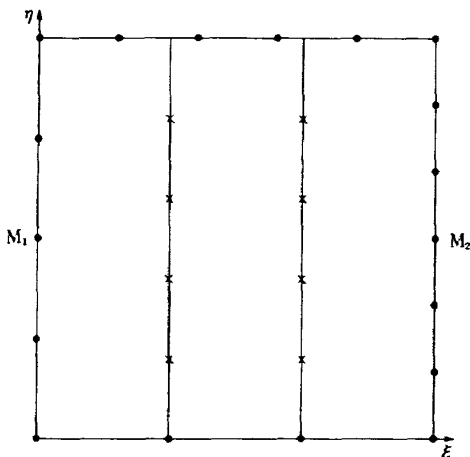


図 9(e) 経線 ( $\xi = \frac{1}{3}, \frac{2}{3}$ ) 上の仮想節点分布

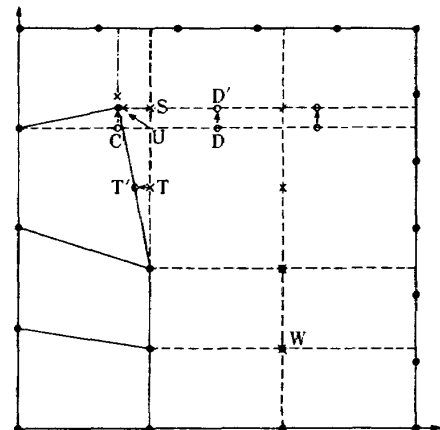


図 9(g) 実節点の決定

新しい実節点の座標は、図9(f)で交点Qに最も近い仮節点をA、B (BとQは偶然に一致している。)として座標をA:  $(\xi_A, \eta_A)$ , B:  $(\xi_B, \eta_B)$  とすれば、 $(\xi_B, \eta_A)$  となる。新生実節点はこの場合Aと一致する。経緯度線の交点Qを新実節点に移動させる。

図9(g)は左下隅の交点から走査を行って、3番目のUについて実節点Xを決めている。仮節点C、Sは合体してXになる。交点UはXに移ったので、仮節点D等も、新緯度線上のD'等に移る。仮節点TはT'に移り実節点となる。合体せずに残った仮節点は辺上の実節点となる。同様の操作を交点Wに移して行う。

(4) 図9(h)は、この操作が全交点について終了した状態である。初めのブロックは12個の小ブロックに分割された。さらに小ブロックの各々について、同様な分割が可能であれば(1)~(3)を繰返す ( $M_1$  又は  $N_1 > 2$ )。

(5) これ以上ブロックに分割できぬ状態になると、この

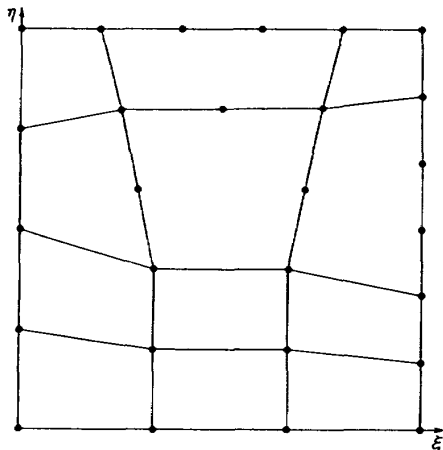


図 9(h) 最初のブロックの分割終了

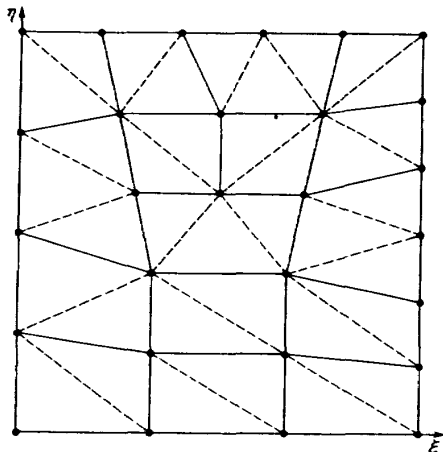


図 9(i) ブロック分割終了

基本ブロックを三角形に分割する (図9(i))。 そのさい分割対角線は、短い方を選ぶ。

以上によってブロックの分割が終了すると、逆写像によってもとの図形にもどす (図9(j)参照)。

従来の方法<sup>(5)(6)</sup>に比較して、この方法は次の利点をもつ

(i) 相対する辺の節点が等しい必要がない。

(ii) 分割線は図9(j)で見られる様に曲線的で、分割パターンにかたよりが少ない。

しかし次の様な制限があるので引つづき改良が必要である。

○ 1 辺上の節点分布密度が辺の中央で山又は谷になると、仮想節点分布の直線的分布方法では分割パターンにかたよりが生ずる。即ち細長いブロックができてしまう。

入力データは、自由フォーマット形式で、少いデータで、直観的に理解できるようにした。上述の例の場合の入力データを次に示す。

図8(a)自動分割例の入力リスト

- |   |                        |                   |
|---|------------------------|-------------------|
| ① | AUTO PARTITION EXAMPLE | タイトル              |
| ② | A = 0.0, 0.0           | } 節点名と座標<br>データ   |
| ③ | B = 3.0, 0.0           |                   |
| ④ | C = 3.5, 6.0           |                   |
| ⑤ | D = -1.0, 4.0          |                   |
| ⑥ | A > B = 3              | } 辺の形状と分<br>割数指定  |
| ⑦ | B > C = 6/4.0, 3.0     |                   |
| ⑧ | C > D = 5/1.0, 5.5     |                   |
| ⑨ | D > A = 4/0.0, 2.0     |                   |
| ⑩ | UNIT/NO. 1 = A/B/C/D   | ブロック<br>NO. 1 の定義 |
| ⑪ | END                    | データの終り            |

データ⑦~⑨は辺が円弧である事を指定している。円弧は両端の節点と/の後の座標値の点で決められる。入力自由フォーマット型式になっている。

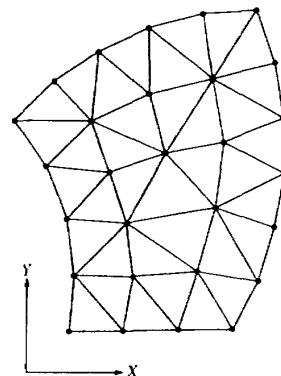


図 9(j) X-Y面への逆写像により自動分割の終了  
(節点数; 28, 要素数; 36)

### 4 解析結果

表3に解析結果を示した。

#### 4.1 剛性

表中のねじり剛性  $J$  は下の式で定義された量である。

$$M_z = JG\theta$$

- ここで,  $M_z$  ; ねじりモーメント [ kg - m ]
- $J$  ; ねじり剛性 [ m - mm / rad ]
- $G$  ; せん断弾性係数 [ kg / mm<sup>2</sup> ]
- $\theta$  ; ねじれ率 ( 単位軸長あたり ) [ rad / mm ]

中実翼に比較して 30% の中空化によってねじり剛性は 13 ~ 16 % 程度減少するが, 単位面積では中空化によってねじり剛性は 20 ~ 24 % 向上する。中空化による効果は充分あると考えられる。理想的な場合として中空円筒では同じ中空率 30% に対して単位面積あたりのねじり剛性は 30 % 向上する。

断面二次モーメントは 10 ~ 11 % 低下し, 単位面積比較では 27 ~ 29 % 向上する結果を得た。曲げ剛性の方がねじり剛性よりも中空化による効果が高いのは, 応力分布のちがいのためである。

補強ウェブはねじり剛性, 曲げ剛性にほとんど影響を与えない。後述するが, 補強ウェブは応力集中を分散させる効果があるが巨視的としての剛性への効果は少ない。しかし適当に配置すると 5 % 弱単位面積あたりのねじり剛

性は向上する。断面積一定 ( 即ち中空率一定 ) の補強ウェブ付き中空翼のねじり剛性は 2 つの相反する因子, 1 つは補強ウェブによる軸方向変位拘束での剛性増加, もう 1 つは, 翼面材の板厚減少による剛性低下の兼ねあいで決定される。ウェブが 0 本や 7 本よりも, 2 ~ 3 本の場合の方が剛性は高いのである。補強ウェブの配置は中央部よりも端に近い部分で効果的である。

中空翼のねじれ変形を図 10 に示す。図では変形は著しく拡大されている。中空翼の上板と下板で軸方向への変形がずれて, この為にウェブが軸方向のせん断変形を受けている。下側翼面板の変形が著しい。全体として中空翼先端

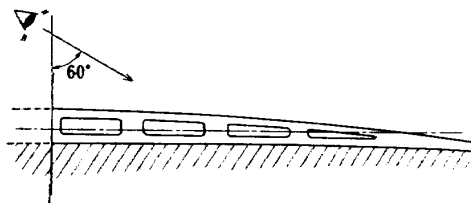


図 10 中空翼のねじり変形 (7Aモデル)  
(翼断面を俯角 60° で眺めた図)

表3 解析結果

モデル	曲げ2次モーメント I	ねじり剛性 J	単位面積あたりのねじり剛性	Mt = 3.65 kg - m	
				最大軸方向変位	最大せん断応力
Solid	1118.88 mm <sup>4</sup>	m - mm / rad 3.060	× 10 <sup>-2</sup> m - mm / rad 0.8336	× 10 <sup>-1</sup> mm 0.3581	kg / mm <sup>2</sup> 6.460
0A	996.58	2.548	0.9956	0.4622	8.0*
0B	988.70	2.609	1.018	0.4521	7.564
1A	1004.68	2.552	0.9992	0.4629	7.775
2A	989.94	2.585	1.019	0.4498	7.905
Opt	1020.38	2.661	1.034	0.4588	7.337
3A	996.76	2.611	1.013	0.4407	8.220
3B	990.38	2.636	1.020	0.4415	8.005
3C	993.28	2.660	1.031	0.4400	7.679
7A	990.72	2.592	0.9942	0.4499	8.229

\* 応力分布からの推定

で軸方向変位は最大となっている。この最大変位とねじり剛性の関係を図 11 に示した。大体の傾向として軸方向最大変位とねじり剛性の間に直線関係がみられて、軸方向変位が小さい程剛性は高い。

この事からウェブの形状としては図 12 のような斜めウェブも有効と考えられる。

今解析を行っている平行ウェブの場合のウェブの役割は図 10 で見られるように主に、上下翼面板の軸方向変位差の拘束にある。即ち上下翼面間で変位差がある程、ウェブ

は負荷を分担して働いている。中央部では対称性のために変位差は無く、端に行くにつれて増加して、中空部先端では上下翼面が会合してゼロとなる。最も平行ウェブが有効に働く最適位置はこの区間中に存在する事になる。

#### 4.2 応力分布について

合せ断応力  $\tau = \sqrt{\tau_{zx}^2 + \tau_{zy}^2}$  の流れを図 13 (a)~(e) に示す。図中の矢印は 1 つおきの要素についてプロット

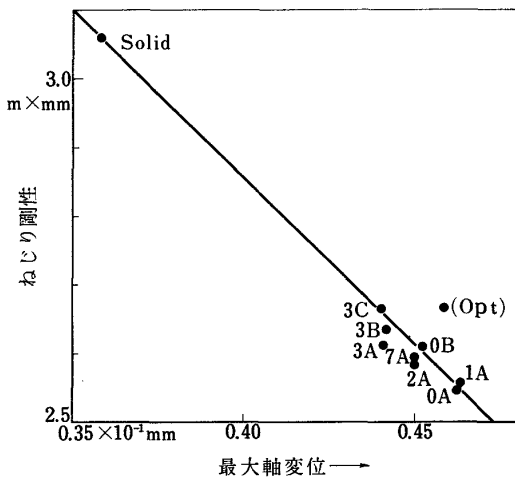


図 11 最大軸変位とねじり剛性

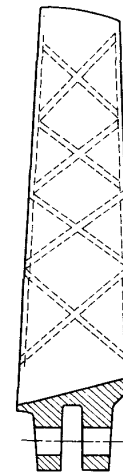


図 12 斜めウェブによる補強

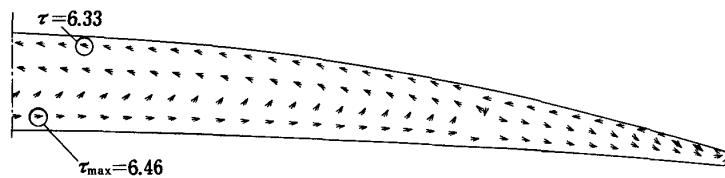


図 13 (a) Solid モデルのせん断応力流れ

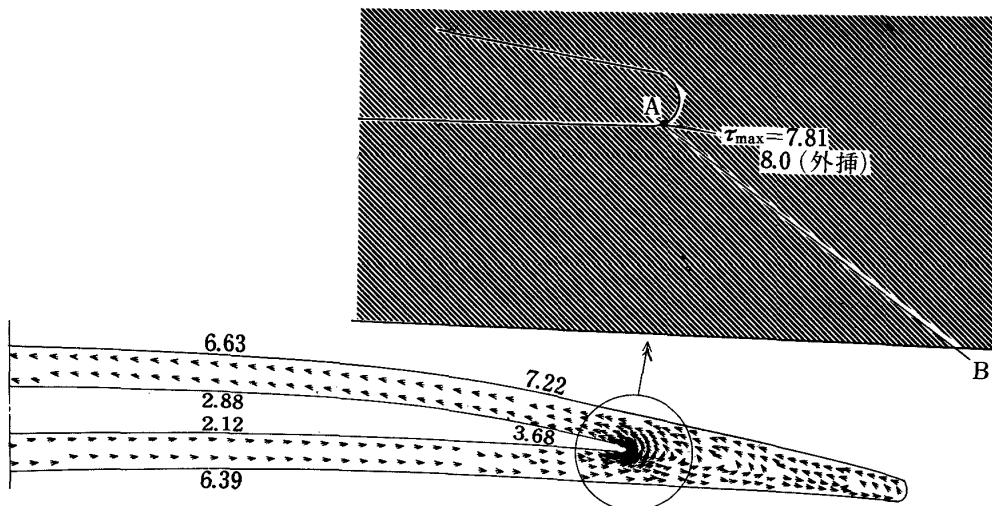


図 13 (b) 0A モデルのせん断応力流れ

されていて、要素の重心におけるせん断応力の流れる方向を示している。矢印の大きさは一定になっている。矢印の粗密はせん断応力の大小と関係がない。

ウェブ無し(0A)モデルの場合に最も高いせん断応力が中空部先端付近のA点で観察される(図13(b)参照)

断面A-Bのせん断応力分布を図14に示した。

点Aで最大となった応力分布は、内部領域に入ると減少して、B点付近で上昇している。点Bでの上昇は通常のねじり応力分布にみられる。この応力分布形に点Aでの応力集中(曲率半径 $\rho = 0.2$ mm)が加算された結果と考えられる。2つの応力分布が反対傾向にあるので最大応力は比較的小さい。

先端曲率 $\rho = 0.5$ mmのモデル0Bの場合、点Aの応力集中は低下して最大応力は別の部分で発生している。

ウェブを入れると応力は分流してウェブの方にも流れる結果中空部先端付近の応力は低下する事がみられる。

ウェブと上下翼面板の取付部の応力集中は今のモデル(丸味半径 $0.6$ mm)では低く、強度上問題にならない。

ウェブ内のせん断応力の流れは、7本モデル(図13(d))に見られるように、中央ウェブでは渦を描き、端のウェブ

では一方向流れが優越している。ウェブ内のせん断応力は低い。

## 5 考 察

ねじり剛性に及ぼすウェブの効果は、図10でみられるように上下翼面間の軸方向変位差を減少させる点にある。この効果が最大となる位置を求める。

ウェブが全く入っていないモデル(0A)について考察する。モデルがねじりモーメントを受けて変形する。翼弦中央よりX軸沿いに $x$ mmの位置の、たて方向のモデル切断面は図15のようになっている。図中で任意の $1$ mm厚さの $2$ 平面を考える(図中で破線で示す)と平面間の対応する点は $x\theta$ だけずれている。このずれ量から平面の回転角 $\Delta\omega/l$ ( $l$ :上下翼面板間の距離)を引いた量が仮想ウェブのせん断歪 $\gamma$ となるので、

$$\gamma = x\theta - \frac{\Delta\omega}{l} \quad (5-1)$$

詳細には仮想ウェブには $\theta$ だけのねじれ変形も生ずるが、断面で一様に生ずるので今の解析では無視してよい。

上式の各項について、モデル(0A)の計算結果を図16

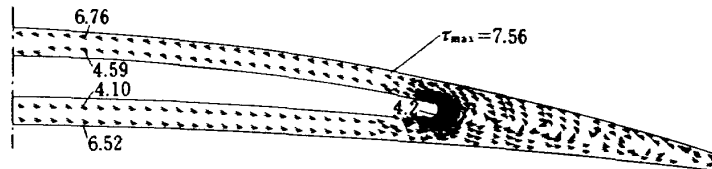


図 13(c) 0Bモデルのせん断応力流れ

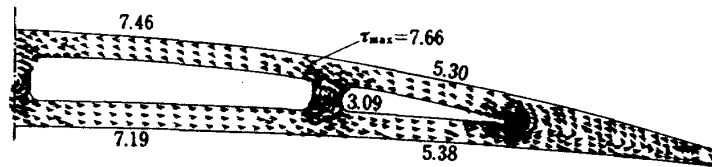


図 13(d) 3Bモデルのせん断応力流れ

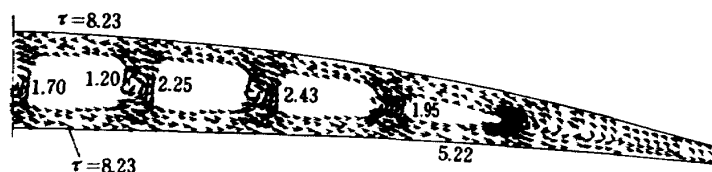


図 13(e) 7Aモデルのせん断応力流れ  
(内形線を省略)

に示した。

式(5-1)が最大となる点Oは、直線 $x\theta$ に平行な、歪曲線の接線の接点である。この位置はかなり中空部先端に近く、これまでの各モデルのねじり剛性解析結果の傾向と一致している。中央部ではウェブは最小の効果しか示さない。

点Oにウェブを配すると(0Aモデルのデータは厳密には使用できないが)、ウェブには最大にせん断歪が負荷されると考えられるので、最も剛性が高くなる。

モデル(Opt)は点Oにウェブを入れたモデルである。

表2から単位面積あたりのねじり剛性が最も高いし、ウェブの数が少ない事による上下翼面板厚さの増加から曲げ剛性と最大せん断応力も改善される事がわかる。

ねじり剛性をさらに向上させる方法として

1) 上下翼面板厚さ変化を考慮した最適設計(例えば全応力法)による総合的解析

2) 図12のような斜めウェブの使用

が考えられるが、円筒の場合の30%の(単位面積あたりの)ねじり剛性増加に対して、今の場合24%程度増加しているので大きな改善は望めない。

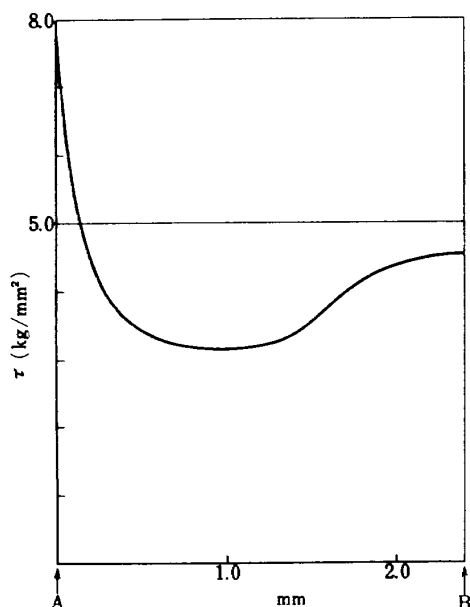


図 14 中空部先端域の応力分布(0Aモデル)

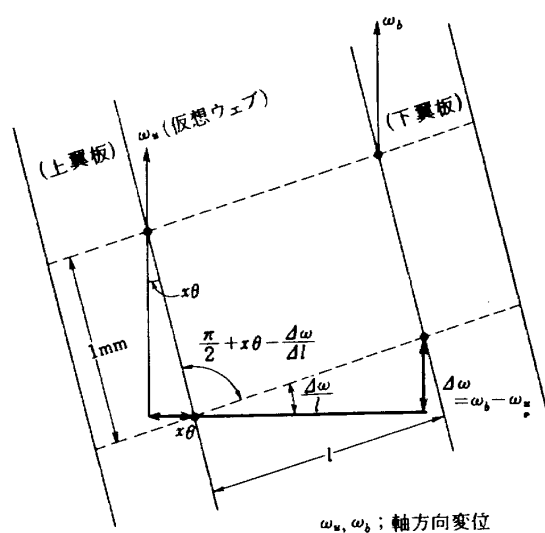


図 15 仮想ウェブのせん断変形  
(中央から $x$  mmでのたて断面)

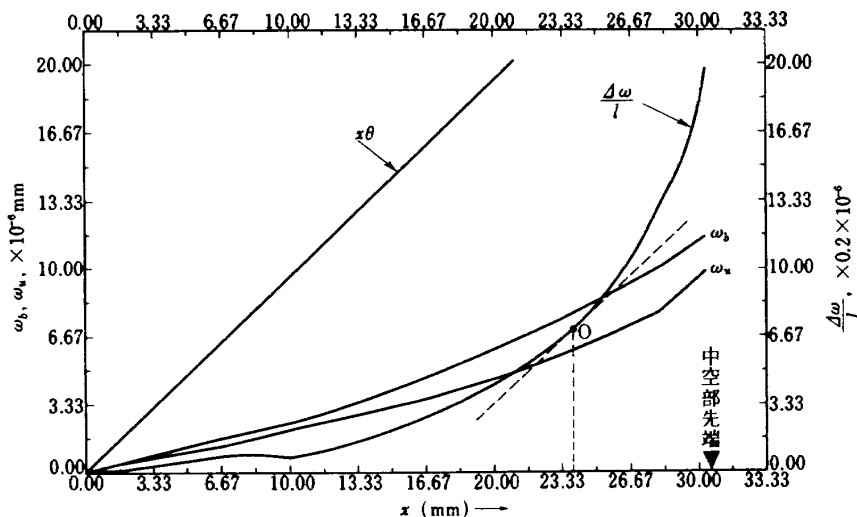


図 16 モデル0Aの上下翼面板間の変位と歪

曲げや面外荷重に対しての検討は重要で、例えば中央ウェブは、ねじりに関して不必要であるが面外力に対して有効と考えられる。

応力面から検討して、30%の中空化で最大応力は10 kg/cm<sup>2</sup>以内にあるので、想定したねじり荷重に対して30%程度の中空化は充分可能と考えられる。

## 6 まとめ

航空機用ファンジェットエンジン用として、軽量で構造強度上の信頼性の高い中空ファン動翼の研究のために、例をテストファン動翼にとり、その中空化模型のねじり応力及び剛性解析を行って次のような結論を得た。

1) 30%の中空化を行うとねじり剛性は13~16%低下し、曲げ剛性は10~11%低下した。最大せん断応力は17~27%増加する。しかし、単位面積あたりで換算するとねじり剛性は20~24%増加した。

2) 補強ウェブはねじり剛性にはほとんど影響しないが、応力集中の緩和に有効である。

3) ウェブの位置として、ウェブ内のせん断歪が最大となる場所を選ぶと、ねじり剛性に有効である。

4) 適当な中空形状を選ぶ事によって、30%程度の軽量化は想定したねじり荷重に対して可能である。

## 7 参考文献

- 1) 宮地他；軸流回転機の翼の振動について，航技研報告TR-176
- 2) 例えば，Timoshenko etc；Theory of Elasticity
- 3) 川井忠彦，吉村信敏；マトリックス法による棒のねじり解析，生産研究20巻，5号，p52~54
- 4) 例えば，O.C.ツィエンキーヴィッツ；マトリックス有限要素法，培風館（昭和50年）
- 5) O.C.Zienkiewicz etc；An Automatic Mesh Generation Scheme for plane and Curved Surfaces by Isoparametric Co-ordinates, International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol 3, p519-528 (1971)
- 6) 林泰通；有限要素法のための自動要素分割手法（平面構造），三菱重工技報，vol. 9, No5, p649
- 7) 藤井他；フロント・ファンの研究開発，航技研資料TM-290

---

## 航空宇宙技術研究所報告 533 号

昭和 53 年 5 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 東京プレス  
東京都板橋区桜川 2-27-12

---



