東海大学紀要工学部
Vol. 48, No. 1, 2008, pp.157-162

円形開口を有する複合材料積層円筒殻の軸圧縮座屈解析

石河　優[*1]　菊川　久夫[*2]　粕谷　平和[*3]

Buckling Analysis of Composite Laminated Cylindrical Shells with a Circular Cut-out under Axial Compression

by

Suguru ISHIKAWA[*1], Hisao KIKUGAWA[*2] and Hirakazu KASUYA[*3]

(Received on March 31, 2008 and accepted on June 5, 2008)

Abstract

Advanced fiber-reinforced laminated composite materials have been used for structural members in various fields because of their high specific strength and stiffness. In general, composite laminated cylindrical shells behave differently from homogeneous orthotropic cylindrical shells due to their anisotropy and asymmetric lamination. In this paper, we describe the buckling strength of cross-ply laminated cylindrical shells with a circular cut-out under axial compression by the finite element method. Consequently, we analytically clarified the effects of various factors such as hole-radius, stress concentration, stacking sequence, number of layers, and buckling mode of cylinder on the buckling strength.

Keywords: *Composite materials, Laminated cylindrical shells, Axial compressive buckling hole, Stress concentration, Finite element method*

1．緒言

先進複合材料のひとつである繊維強化プラスチック材は，省資源，省エネルギーの観点から軽量化を図る素材として世界的な注目を浴びている．特に炭素繊維からなる高性能繊維強化プラスチック(CFRP)材は，従来の金属材料よりも比強度，比剛性が高く，構造の軽量化が極限まで要求される航空宇宙をはじめとした各分野で数多く使用されている[(1)~(6)].

円形開口を有する円筒殻構造は,航空機などの飛しょう体構造等にしばしば用いられる．薄肉円筒殻に開口を設けると開口部付近に応力集中が生じ，剛性低下を引き起こす．また，薄肉軽量構造では，圧縮荷重が作用する場合に座屈現象が起こりやすく，座屈値が構造設計の基準となる．したがって，開口を有する薄肉円筒殻の座屈問題は軽量構造物の設計や開発に際して一層重要な課題である．しかし，この問題に対する報告の多くは等方性円筒殻であり[(7)~(11)],複合材料積層円筒殻を取り扱った報告は極めて少なく,いまだ未解明な部分が多いため設計基準の確立に至っていないのが現状である．

本論文では一例として，円形開口を有する複合材料積層円筒殻に軸圧縮荷重が作用する場合を例に挙げ，軸圧縮座屈現象を有限要素法により明らかにする．そして，開口半径，座屈モード，応力分布，応力集中，積層順序，積層数などが座屈値に及ぼす影響について検討する．

2．解析モデル

図１に示すような半径 *R*，筒長 *L*，板厚 *h*，開口半径 *a*

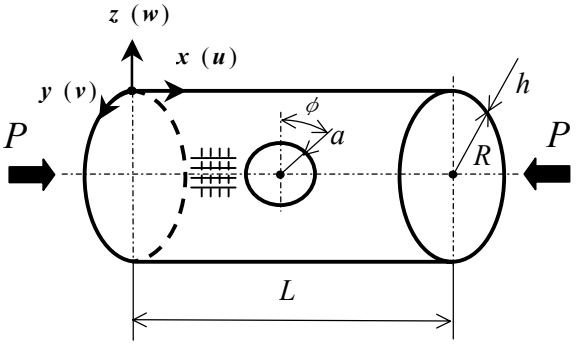


Fig.1 Configuration and coordinates of cross-pry laminated cylindrical shell with a circular cut-out.

＊１　工学研究科機械工学専攻修士課程
＊２　情報デザイン工学部情報システム学科准教授
＊３　工学部動力機械工学科教授

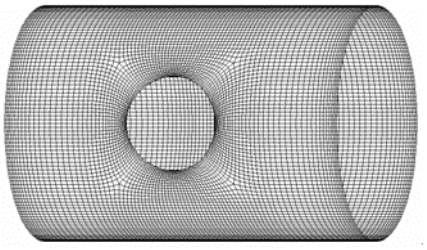


Fig.2　FEM model.

のクロスプライ積層円筒殻が両端単純支持され，軸圧縮荷重 P を受ける場合を考える．円形開口を有する複合材料積層円筒殻の軸圧縮座屈解析は，複雑な座屈モードや応力分布を求めなければならない．

そこで本解析では，任意の形状や境界条件および荷重条件による連続体内の面内・面外解析に有用な有限要素法非線形構造解析汎用プログラム MSC/MARC を用いて座屈固有値解析を行った．本解析に用いた積層円筒殻の要素分割の一例を図２に示す．要素分割が粗い場合には，一般的に開口部の縁における応力を正確に求めることは困難である．そのため急な応力こう配が予想される領域では，より詳細な解析が可能となるように要素分割を細かく施し，分割要素として四辺形薄肉線形シェル要素を用いた．

3．解析結果および検討

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)材で構成される積層円筒殻を考え，その基本となる材料定数(繊維容積含有率 V_f =60%)は，平均化近似解法により計算され，実験でも確かめられた数値を用いて行った[12]．

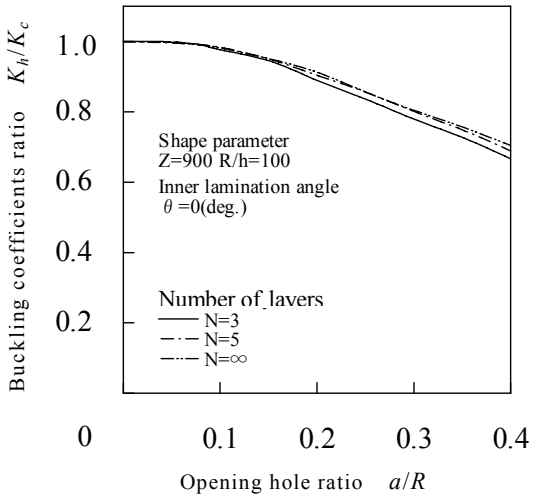
$$\left.\begin{array}{l} E_L=137\ (\mathrm{GPa}),\ E_T=8.17\ (\mathrm{GPa}),\ G_{LT}=4.75\ (\mathrm{GPa}) \\ \nu_L=0.316,\ \nu_T=0.0189 \end{array}\right\} \quad (1)$$

全板厚一定のもとで各構成層は等厚とし，積層数 N が奇数層の対称クロスプライ積層について扱っている．また本論文では，開口の影響を示すため，無開口積層円筒殻の座屈値 $\bar{\sigma}_c$を無次元座屈係数 K_c，有開口積層円筒殻の座屈値 $\bar{\sigma}_h$ を無次元座屈係数 K_h の形で示し，それぞれの値は式(2)で与えられるものとする．

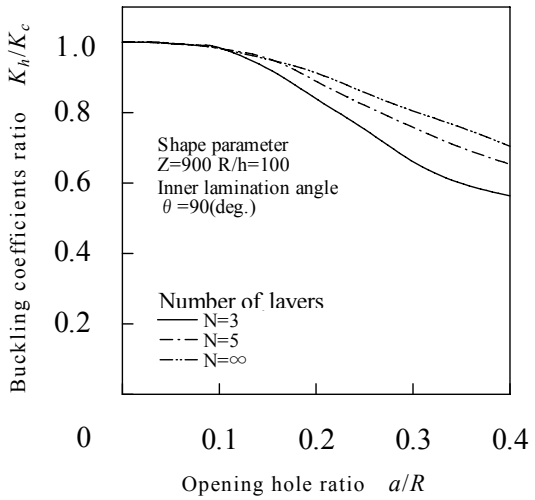
$$\left.\begin{array}{l} \bar{\sigma}_c=\dfrac{P}{2\pi Rh}\ ,\quad K_c=\dfrac{\bar{\sigma}_c R}{E_T h} \\ \bar{\sigma}_h=\dfrac{P}{2\pi Rh}\ ,\quad K_h=\dfrac{\bar{\sigma}_h R}{E_T h} \end{array}\right\} \quad (2)$$

3.1　開口比の影響

有開口クロスプライ積層円筒殻の無次元座屈係数比 K_h/K_c と開口比 a/R の関係を，最内層積層角 θ =0(deg.)とした場合を図 3(a)に，最内層積層角 θ =90(deg.)とした場合を図 3(b)に示す．



(a) Inner lamination angle θ=0(deg.)



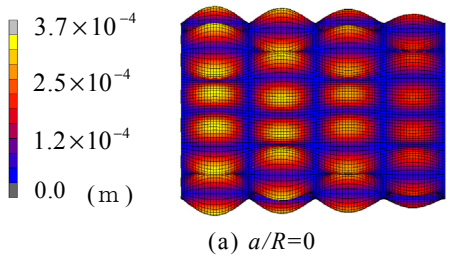
(b) Inner lamination angle θ=90(deg.)

Fig.3 Relation between buckling coefficients ratio K_h/K_c and opening hole ratio a/R.

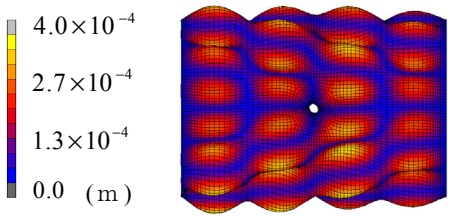
無次元座屈係数比 K_h/K_c は，開口比 a/R＜0.1 と非常に小さい領域において，積層構成の変化にかかわらず一定値を示す．しかし，開口比 a/R の増加にともなって無次元座屈係数比は低下する．積層順序においては，最内層積層角 θ =90(deg.)では，開口比 a/R の増加にともなって無次元座屈係数比 K_h/K_c が急激に減少するのに対して，最内層積層角 θ =0(deg.)では，なだらかな減少傾向を示す．このことから，最内層積層角 θ=90(deg.)とした場合では，奇数層の厚さの和と偶数層の厚さの和の比であるクロスプライ比の変化にともなって，積層数 N の減少により無次元座屈係数比 K_h/K_c は低下する．

3.2　座屈モードの影響

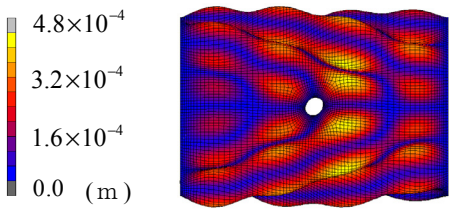
形状パラメータ $Z(=L^2/Rh)$=900 における積層円筒殻の



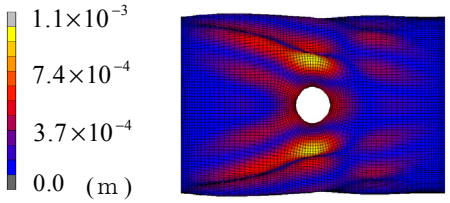
(a) a/R=0



(b) a/R=0.05

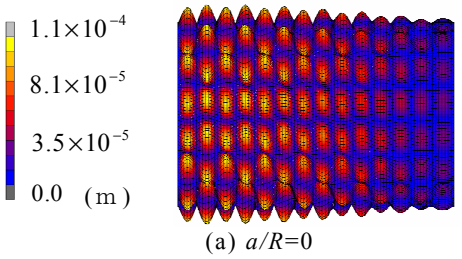


(c) a/R=0.1

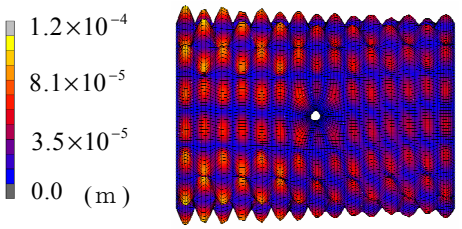


(d) a/R=0.2

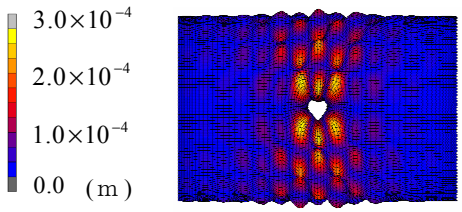
Fig.4 Model of deformation mode.[Number of layers N=3, Inner lamination angle θ=0(deg.)]



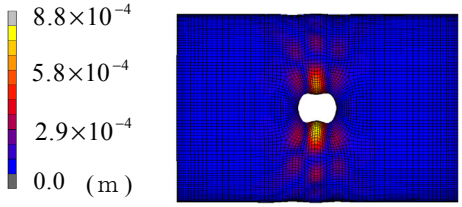
(a) a/R=0



(b) a/R=0.05



(c) a/R=0.1



(d) a/R=0.2

Fig.5 Model of deformation mode.[Number of layers N=3, Inner lamination angle θ=90(deg.)]

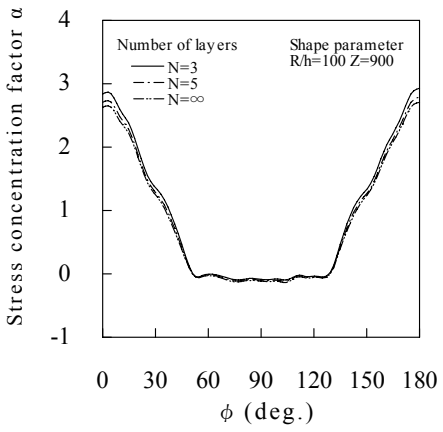
座屈モードを積層数 N=3 で最内層積層角 θ=0(deg.)とした場合を図 4 に，最内層積層角 θ=90(deg.)とした場合を図 5 にそれぞれ示す．

座屈モードの影響として，無次元座屈係数比 K_h/K_c が一定値を示した開口比 a/R＜0.1 と小さい場合では，いずれの最内層積層角でも無開口積層円筒殻とほぼ同様の波形を示し，開口の影響を受けにくいことがわかる．

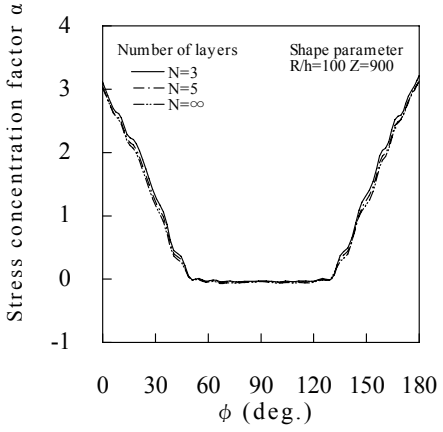
無次元座屈係数比 K_h/K_c が減少傾向を示した開口比 a/R≧0.1 と大きい場合では，最内層積層角 θ=0(deg.)では，開口付近で大きな変形がみられず，円筒殻全体で座屈モードを示す．一方，最内層積層角 θ=90(deg.)では，円筒殻全体で座屈モードを示さず開口部付近で座屈モードを示し，開口比 a/R が大きくなるにつれて，この傾向は顕著にあらわれる．これは，最内層積層角 θ=90(deg.)に比べて，最内層積層角 θ=0(deg.)では，円筒軸方向の変位が小さいため開口部付近で大きな変位を示さず，円筒殻全体で座屈モードを示すためである．それに対して，最内層積層角 θ=0(deg.)に比べて，円周方向剛性が大きい最内層積層角 θ=90(deg.)では，円筒軸方向の変位は大きく，さらに開口の影響を受けない部分に比べて，開口部付近で円周方向剛性が低下する．そのため，開口を中心としたその付近で面外変形を示し，無次元座屈係数比 K_h/K_c は開口の影響を受けるため，顕著な低下を示すものと考えられる．

3.3 応力集中の影響

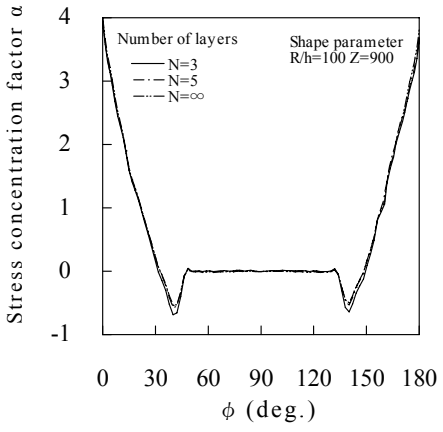
積層円筒殻の開口部付近で発生する膜応力 σ_ϕ と開口の影響を受けない基準応力 σ_∞ の比を応力集中係数 $\alpha=(\sigma_\phi/\sigma_\infty)$の形で示し，応力集中係数 α と開口部の縁に沿う角度 ϕ の関係を最内層積層角 θ=0(deg.)とした場合を図 6 に，最内層積層角 θ=90(deg.)とした場合を図 7 に示す．最内層積層角 θ に関係なく応力集中係数 α は ϕ=0(deg.)および ϕ=180(deg.)で最大となる．また，応力集中係数 α は開口比 a/R の増加にともない，全ての積層構成において



(a) a/R=0.1

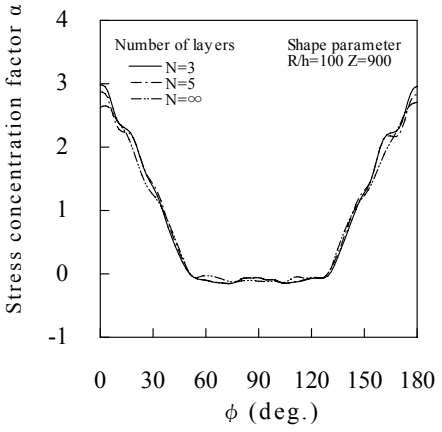


(b) a/R=0.2

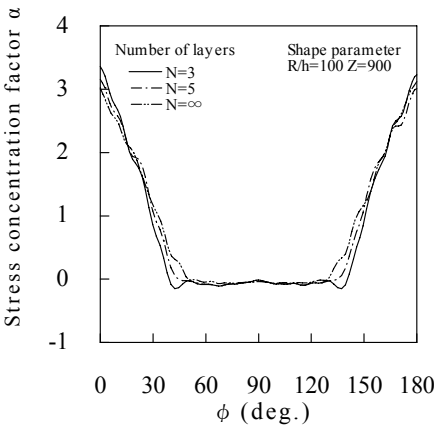


(c) a/R=0.4

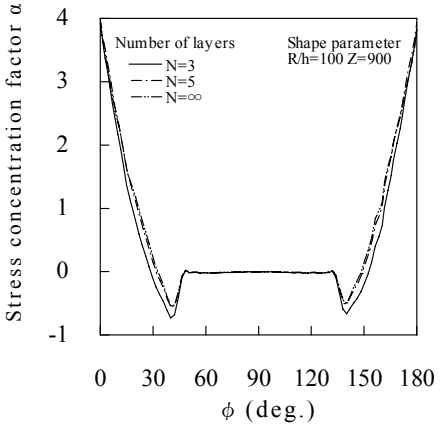
Fig.6 Distribution of stress concentration around a circular hole. [Inner lamination angle θ=0(deg.)]



(a) $a/R=0.1$



(b) $a/R=0.2$



(c) a/R=0.4

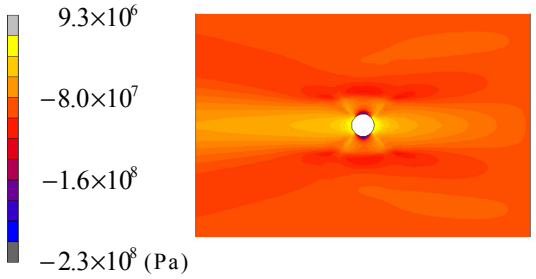
Fig.7 Distribution of stress concentration around a circular hole. [Inner lamination angle θ=90(deg.)]

増加する. ϕ=0(deg.), ϕ=180(deg.)において最内層積層角 θ=0(deg.)の場合と最内層積層角 θ=90(deg.)の場合を比較すると，最内層積層角 θ=0(deg.)の方が低い応力集中係数 α を示す．よって，最内層積層角 θ=0(deg.)の場合では，開口比 a/R の増加に伴う応力集中係数 α の増加が，最内層積層角 θ=90(deg.)の場合よりも低いことから，図 4 で示した無次元座屈係数比 K_h/K_c は最内層積層角 θ=90(deg.)に比べ，なだらかな減少傾向を示すと考えられる．

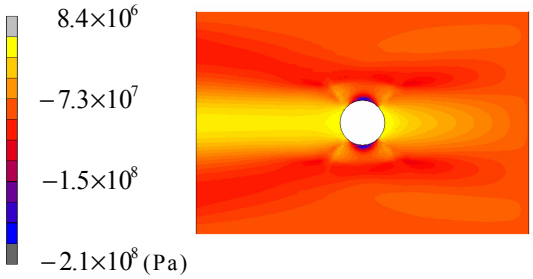
3.4 応力分布の影響

無次元座屈係数比 K_h/K_c が減少傾向を示した開口比 $a/R \geqq 0.1$ で形状パラメータ Z=900 における応力分布を積層数 N=3 で最内層積層角 θ=0(deg.)とした場合を図 8 に，最内層積層角 θ=90(deg.)とした場合を図 9 にそれぞれ示す．

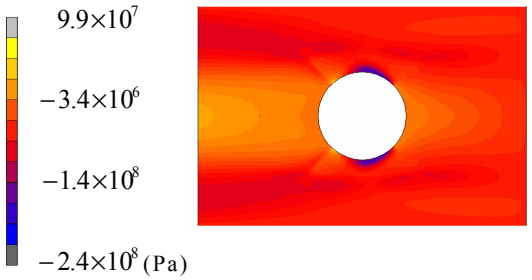
最内層積層角の相違に関わらず円孔端部で高い応力を示し，円孔部の縁に沿う角度 ϕ=90(deg.) および ϕ=270(deg.)で，引張応力が発生している．開口比 a/R が増



(a) a/R=0.1

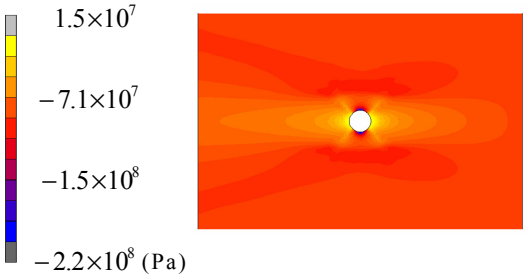


(b) a/R=0.2

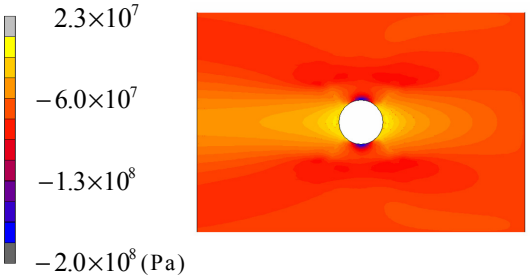


(c) a/R=0.4

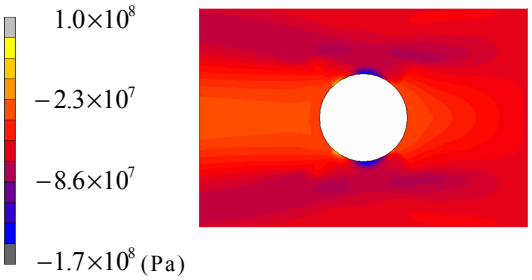
Fig.8 Stress distribution around the circular hole boundary.
[Number of layers N=3, Inner lamination angle θ=0(deg.)]



(a) a/R=0.1



(b) a/R=0.2



(c) a/R=0.4

Fig.9 Stress distribution around the circular hole boundary.
[Number of layers N=3, Inner lamination angle θ=90(deg.)]

大するにつれ，開口の影響を受け，広い範囲で応力集中が発生している．積層構成の違いとしては，最内層積層角 θ=90(deg.)は最内層積層角 θ=0(deg.)に比べて，全体として高い応力が発生している．

4. 結　言

本論文では，開口を有する複合材料積層円筒殻に軸圧縮荷重が作用する場合について，有限要素法により座屈現象を解析し，代表的な CFRP 材について論じた．開口半径が非常に小さい場合では，積層順序と積層数に関係なく座屈値は開口の影響を受けにくいことを示した．また，開口半径が大きい場合では，積層順序と積層数の違いが座屈モード，応力分布および開口部付近の応力集中に影響し，座屈値の低下に大きく影響することを系統的に示した．

参考文献

1) 粕谷・植村,日本航空宇宙学会誌, 30-346 (1982), 664.
2) 粕谷・植村,日本機械学会論文集, 51- 462, A(1984), 105.
3) 粕谷・植村,材料， 34-378 (1985)， 262.
4) 粕谷・植村，日本複合材料学会誌，12-2 (1986)，73.
5) 粕谷,日本複合材料学会誌， 17-8 (1991)， 74.
6) 粕谷・青山， 材料， 45-8 (1996)， 888.
7) Tennyson, R.C., ASME Journal Trans., 90(1968), 541.
8) James H & Starners Jr.， AIAA Journal, 10-11(1972), 1466.
9) 後藤・康井・粕谷，日本航空宇宙学会誌，22－247 (1974)， 337.
10) 小野田，日本航空宇宙学会誌 ，22 - 272 (1976) ，446 ．
11) 小野田，日本航空宇宙学会誌 ， 28 - 312 (1980) ， 41.
12) 植村・山田， 材料， 24 - 257 (1975)， 156.