

リング材・縦通材を有する補強円筒殻の 自由振動特性に関する研究

康井 義明^{*1}・井上 徳^{*2}・中岫 泰仁^{*3}

Free Vibration Characteristics of Stiffened Cylindrical Shell

by

Yoshiaki YASUI, Satoshi INOUE and Yasuhito NAKAKUKI

(Received on Sep. 28,2001, accepted on Nov.21,2001)

Abstract

This paper describes about a free vibration characteristics of the stiffened cylinder shell. Though the cylindrical shell is used for much structure, it is reinforce in stringer and ring so that the most may supplement strength and rigidity. Therefore, the free vibration characteristics are grasped very important. It becomes a vibration characteristic unlike vibration characteristic of monocoque cylindrical shell. The natural frequency of various stiffened cylinder shells analyzed by finite element method because it grasps free vibration characteristics of the stiffened cylinder shell. In this study on the effect of the reinforcement on the free vibration characteristics in search of natural frequency of various stiffened cylinder shells in which cylindrical shell shape, type of the reinforcement, the number of the reinforcement differ it examines. And, by using cylindrical model in sweep experiment by point vibration, the examination was carried out. As the result, it was possible to clarify the stiffening effect in free vibration characteristics of cylindrical shell.

Keywords: Stiffened cylindrical shell, Free vibration characteristics, Natural frequency

1. 緒言

円筒殻は、航空宇宙分野をはじめ、原子力プラント、燃料タンクなどの構造物に多く用いられており、用途・形状・材質および構造様式は多種多様である¹⁾。

航空機体や液体貯蔵タンク等の実際の円筒容器は、高効率化や経済性の理由から薄肉化の傾向にあり、その剛性および座屈強度を保持するために縦通材、補強リングあるいはその両者により補強されている場合が多い^{2),3)}。補強円筒殻は、大きさ・用途により使用される補強材の形状・本数が異なるため、補強の形態によって異なる振動特性となる。そのため各種補強円筒殻の振動特性を把握する必要がある。

Mus と Sin⁴⁾は、補強円筒殻の数値解析について、これまで行われた多数の研究成果例をまとめた。研究のほとんどが解析手法についてであり、円筒殻の補強方法と振動特性の関係を研究した例は少なく、また補強材の種類による固有振動数の変化についてまとめたものはないと報告されている。

Joseph と Ganesan⁵⁾は、有限要素法(FEM)によりリング材と縦通材補強円筒殻の固有振動数の変化について本数を変化させ検討しているが、特定の補強方法に限定しており、十分な成果を得るに至っていない。また康井ら⁶⁾は加振実験により

円筒殻の補強効果を殻壁の周波数応答で示しているが、補強が及ぼす固有振動数への影響は論じていない。これまで行われてきた研究では補強材の方法、形態が限定されており、系統的には解決されていない。またモード変形に関する検討を行った報告もほとんど見当たらない。

そこで、本研究では円筒殻の形状、補強材の形態・本数を变化させたときの補強円筒殻の固有振動数を FEM 解析により求め、自由振動特性に及ぼす補強材の影響を固有振動数とモードに着目して検討した。また、点加振試験装置を用いて解析モデルと同様の円筒殻で、加振実験を行い比較検討した。

2. 解析方法

補強円筒殻の座標系と寸法を Fig.1 に示す。円筒殻の長さ L と板厚 t は、長さ L と半径 R の比 (L/R) 1.0, 2.0 および 4.0 の3種類、半径と板厚の比 (R/t) 400 とした。また補強材(縦通材・リング材)は、幅 b ・高さ h 共に4mmとした。円筒殻・補強材ともに材質はアルミニウム(ヤング率 $E=69\text{GPa}$, ポアソン比 $\nu=0.3$, 密度 $\rho=2670\text{kg/m}^3$)を想定した。

解析モデルは円筒殻と補強材は一体とし、縦通材は $\theta=0^\circ$ を基準に各本数を均等に配置した。またリング材も同様に円筒長さに対して等間隔になるように配置した。境界条件は両端固定(CC1), 両端単純支持(軸方向の拘束のない条件: SS2)で FEM 解析により固有振動数を求めた。振動モードは軸方向

* 1 工学部動力機械工学科教授
* 2 (株)東京アールアンドデー コンポジット事業部
* 3 工学研究科機械工学専攻博士課程前期

半波 m と周方向一波 n としている。

解析は汎用有限要素法ソフト MSC/NASTRAN を用い、円筒殻モデルには 4 辺形シェル要素を用い、要素分割は軸方向 (x 方向) は $L/R=1.0$ に対して 10 分割、周方向 (y 方向) は 60 分割し、ともに高次のモード数においても十分にモード波形が現れるように設定した。補強材においても円筒殻と同様の要素を用い、要素分割は縦通材では円筒殻の軸方向の分割数、リング材では周方向の分割数と同数で分割した。固有振動数はランチョス法による固有値解析により求めた。

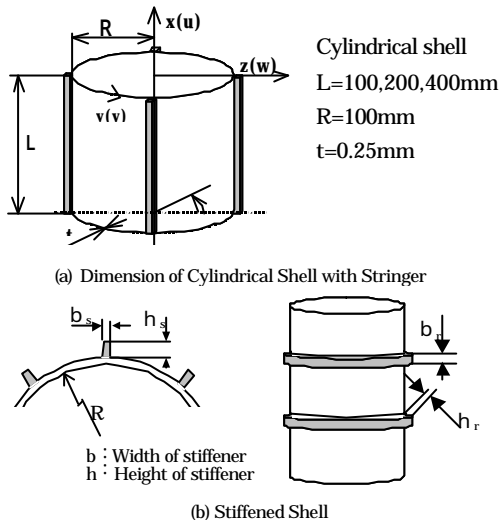


Fig.1 Geometry of Stiffened Cylindrical Shell

3. 実験方法

端板の影響を受けないように円筒を横置きにし、点加振による振動試験装置で実験を行なった (Fig.2)。円筒形状、補強材寸法は解析と同じものとした。円筒殻はポリエステルフィルム製ルミラー材 ($E=5.4\text{GPa}$, $\nu=0.3$, $\rho=1396\text{kg/m}^3$) の試験片を製作した。また補強材は縦通材、リング材共にアクリル製 ($E=1.5\text{GPa}$, $\nu=0.3$, $\rho=1180\text{kg/m}^3$) を用いた。

実験方法は円筒長さ中心に加速度計を取り付け、振動数を掃引させて加振させ、変位の時刻歴応答を取り、窓関数を用いた FFT 処理後、ノイズ除去のため平均化を行い、固有振動数を求めた。また各円筒につき、円筒長さ中心の円周上 3 箇所各々 10 回データを取った。

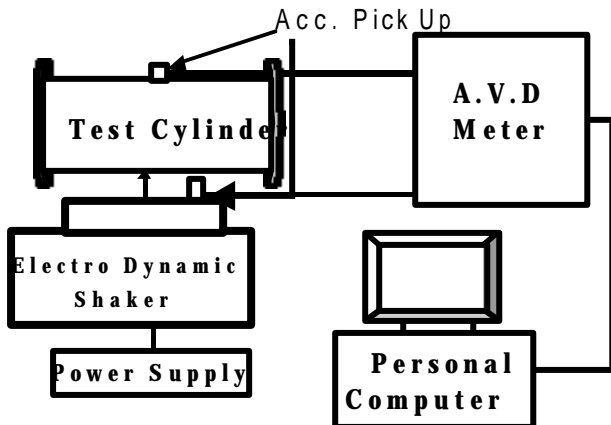


Fig.2 Test apparatus

4. 結果および考察

4.1 縦通材補強

Fig.3(a)は円筒殻の変形モードの例を示したものである。本報告では座標原点 ($z=0$) に対して対称に配置された縦通材を結ぶ直線について、モードが対称変形で表されるものを対称モード、それ以外を非対称モードと定義する。

Fig.4 は縦通材を付けた $L/R=4.0$ の円筒殻における対称モード、非対称モードの固有振動数の変化を示したもので、(a) は縦通材を 4 本、(b) は 5 本つけたものである。両者共に無補強円筒殻と固有振動数がほとんど変わらないことがわかる。しかし (a) では n が偶数、(b) では 5 の倍数において対称、非対称モードで固有振動数に違いが認められ、 n の増加と共にその差も増大する傾向にある。縦通材が偶数本時については、RINEHART⁷⁾らによって述べられているが、奇数本時には特に述べられてなく、奇数本時においても同様な傾向を確認することをできた。

非対称モードに比べて対称モードの固有振動数が低くなるが、これは対称モードでは縦通材が曲げ変形、非対称モードでは捻り変形が生じ、曲げ変形の方が構造全体の変形の抑制に寄与するためと考えられる。

モード変形に着目すると縦通材の本数よりも少ないモードにおいては、Fig.3(b)のように細かい波形を含む複雑なモード波形が認められた。

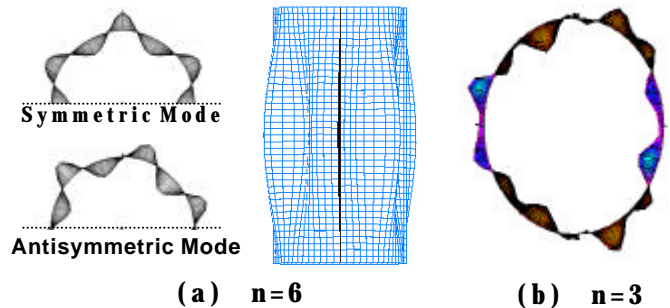
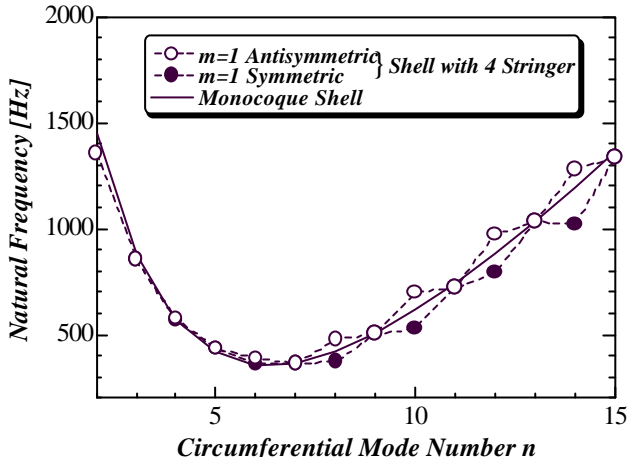


Fig.3 Modal Shape

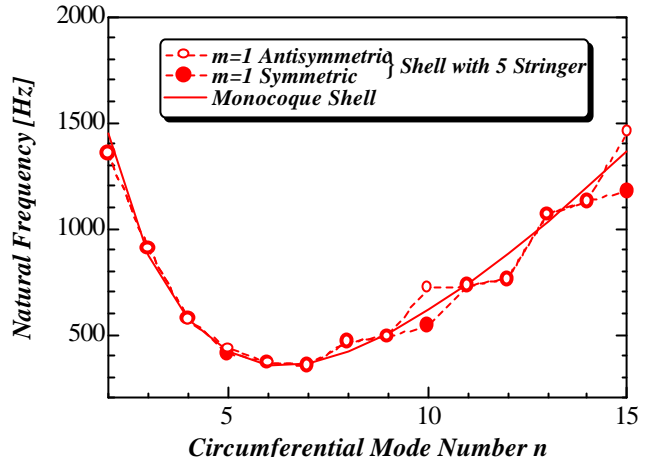
4.2 リング材補強

Fig.5 は、リング材補強 (2 本) の固有振動数の変化を示したものである。無補強に比べリング材補強では、リング材が節となる軸方向モード ($m=3$) において、固有振動数に変化はほとんど認められないが、リング材が腹となるモード ($m=1, 2$) では、リング材により変形が抑制されるために、固有振動数が上昇する。リング材自身の固有振動数は 4 次モード (1378Hz)、5 次モード (2231Hz) で無補強円筒殻と近接しており、この付近の振動特性には円筒殻とリング材の連成振動が影響していると考えられる。

Fig.6 は $L/R=4.0$ の円筒殻にリング材を 1~4 本補強した時の固有振動数 ($m=1$) を示したものである。リング材の本数が増加するに従い、次の固有振動数が高くなっていくことがわかる。これは円筒殻の振動において低次モードでは殻壁のたわみ振動が主であり、高次になると面内変形が主となることを考慮すれば、リング材の本数が増加することにより面内変形が抑制されるためだと考えられる。また $n=3$ 以下ではどの



(a) 4 Stringer



(b) 5 Stringer

Fig.4 Natural Frequency for Shell with Stringer (L/R=4.0,CC1)

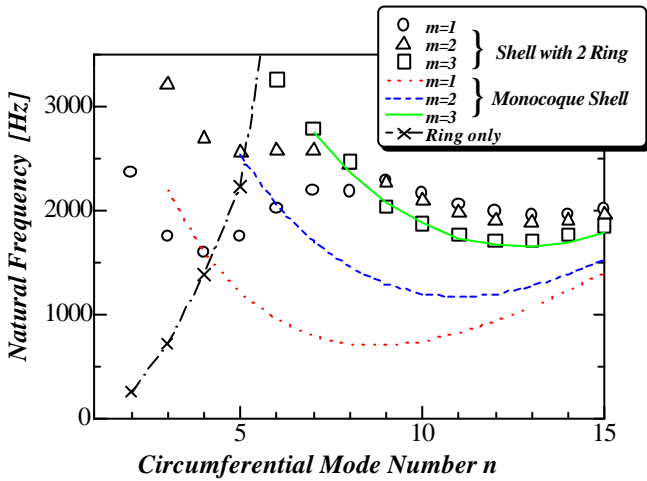


Fig.5 Natural Frequency for Shell with 2Ring (L/R=2.0,CC1)

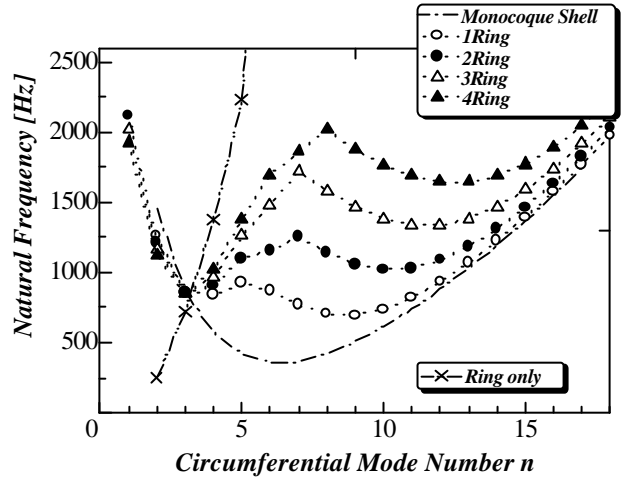


Fig.6 Natural Frequency for Shell with Ring (L/R=4.0,CC1)

本数においても固有振動数がほぼ一定となっており 特に $n=3$ の時には全ての本数において固有振動数が一致している。これは上記の連成振動に強く関与しており、リング材の固有振動数が構造全体の挙動に大きく影響することがわかる。

4.3 基本振動数

Fig.7 は、補強円筒殻の基本振動数 f_s を無補強円筒殻の基本振動数 f_c で除した f_s/f_c と補強本数との関係を示したもので、(a) では縦通材、(b) ではリング材のデータをそれぞれ整理したものである。ただし図の中の () 内の数字は基本振動数におけるモード (m, n) を示したものである。(a)、(b) より縦通材とリング材ともに円筒殻の L/R により基本振動数の変化が異なり、各長さで比較すると、CC1 条件より SS2 条件の方が補強材による影響が強く現れている。また縦通材では $L/R=1.0$ の時に、リング材では逆に $L/R=4.0$ の時に補強材による f_s/f_c 値の上昇がみられる。縦通材の $L/R=4.0$ (CC1) では、本数の増加に伴い f_s/f_c 値が減少しているが、そのほかの円筒殻では上昇傾向を維持している。補強効果を個別に評価すれば、縦通材補強の場合、縦通材の本数が増えても基本振動数・モード共に大きな変化は認められない。

一方、リング材補強では前述のとおり円筒殻の L/R により基本振動数の変化が異なるため (Fig.5, 6), $L/R=4.0$ のときにリング材による f_s/f_c 値の増加が顕著に現れる。しかし、ある程度本数が増加すると基本振動数への影響は小さくなっていく。

基本振動数のモードに関しては、リング材が一本のとき、すべての L/R において軸方向モード m は 2 となり、無補強円筒殻に対してモードが変化している。また、周方向モードに関しても無補強円筒殻が比較的高次モードを示すのに対して、2 本以上では低次のモードへと移っている。これは前述したとおり、リング材との連成振動、リング材による面内変形の抑制によって引き起こされるものと考えられる。 L/R が短くなるに従い基本振動数の周方向モードが 3 から 4 へと変わっているのは、円筒が短くなることにより固有振動数が上昇し、無補強円筒殻の基本振動数が高次に移行するためであり、それにともない連成振動も高次側に移行したのと考えられる。

4.4 直交補強円筒殻

Fig.8 は直交補強 (縦通材 4 本、リング材 1 本) を施した $L/R=4.0$ の円筒殻と比較のためにリング材補強 (1 本) および

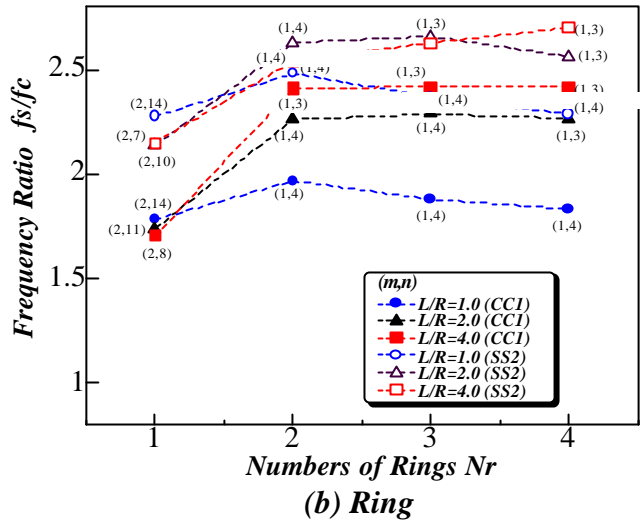
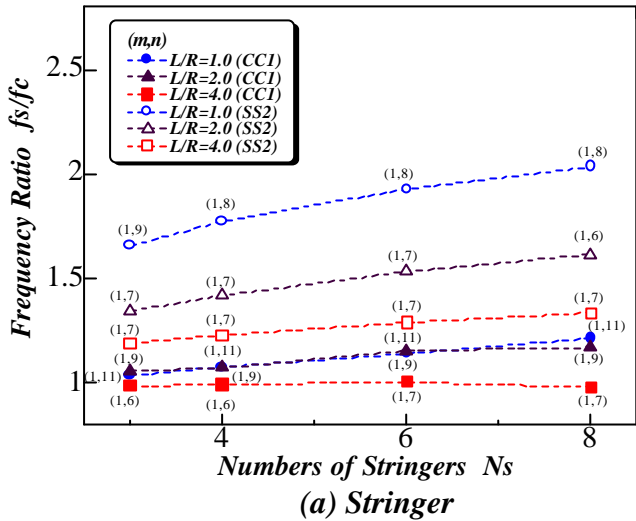


Fig.7 Influence of The Number of Stiffeners on Frequency Ratio

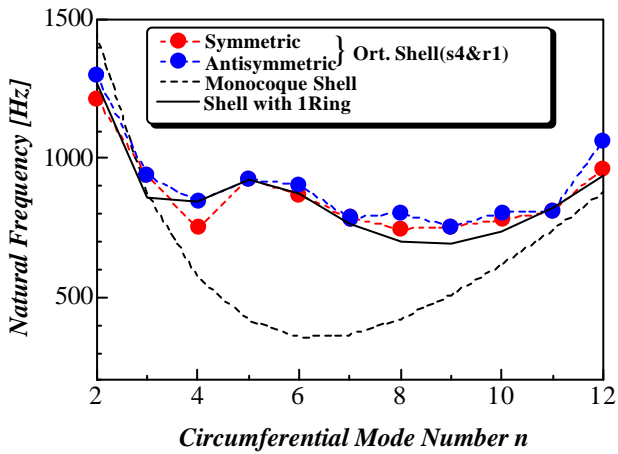


Fig.8 Natural Frequency for Orthogonally Stiffened (L/R=4.0, CC1)

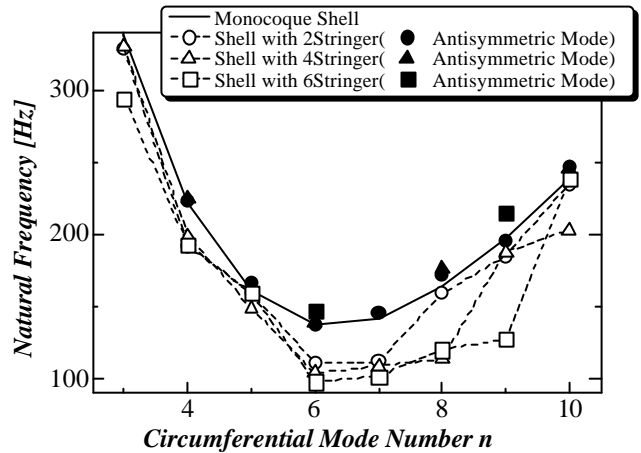


Fig.9 Experimental Natural Frequency (Shell with Stringer L/R=4.0, CC1)

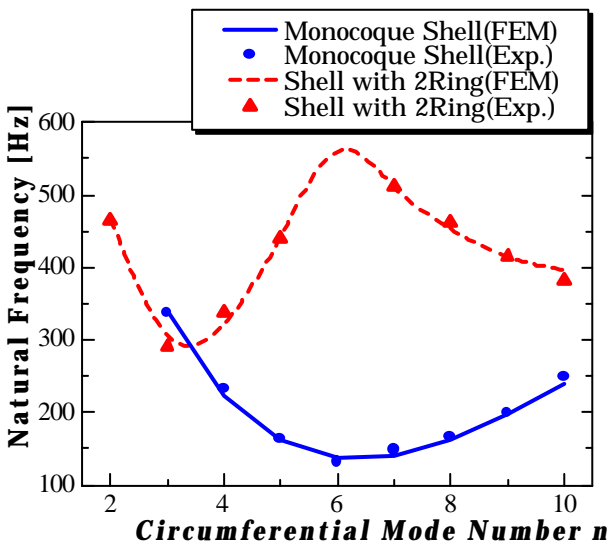


Fig.10 Experimental Natural Frequency (Shell with 2Ring L/R=4.0, CC1)

無補強時の固有振動数の変化を示したものである。リング材補強の円筒殻と直交補強円筒殻の値には、大きな変化は見られないことから直交補強円筒殻の縦通材の影響は少なくリング材の振動特性に強く依存するものと考えられる。しかし、固有振動数の生成モードには対称、非対称モードが表れ、縦通材の影響も認められる。また縦通材の曲げ剛性により固有振動数、モード共に変化していくことを考慮すると縦通材リング材を一体とした補強材と考えた場合、リング材が縦通材によって他リング材とつながれているため、より強い連成振動を引き起こす可能性があると考えられる。

4.5 掃引実験

Fig.9, 10 は、L/R=4.0 の円筒殻について、掃引実験により求めた無補強および縦通材(2, 4, 6本)、リング材(2本)補強の固有振動数の変化を示したものである。

縦通材補強円筒殻における基本振動数付近ではどの本数においても対称モードでは、無補強の固有振動数に比べて減少しており、縦通材の影響が現れている。n=7においても固有振動数が減少しているが、これは縦通材の固有振動数が30Hz

と低い円筒に片面を拘束されているため固有振動数が高くなり、連成振動を引き起こし、基本振動数付近では固有振動数が低下しているのではないかと考えられる。しかし本数による固有振動数の変化はわずかであり、解析と同様な傾向を示していることから本解析結果の妥当性はある程度証明できたといえる。

またリング材では解析結果と同様にリング材による固有振動数の上昇が見られ、解析結果と固有振動数が一致していることがわかる。しかし連成振動を起こしていると考えられる $n=3, 4$ においては、解析結果からはずれた結果が得られたが、実験においては構造系の非線形が強く現れたのではないかと考えられ、リング材が構造全体の挙動に大きく影響していることがわかった。

5. 結 言

本研究では補強円筒殻について、円筒殻形状、補強方法種々変化させ、FEM 解析より求めた固有振動数の観点から自由振動特性について検討した。また点加振実験により解析結果を検証することで以下の成果が得られた。

縦通材補強では、周方向モードのモード形状と固有振動数が変化するが、リング材では軸方向モードの形状と固有振動数が大きく変化し、連成振動の影響を受けることがわかった。

基本振動数に着目すると、縦通材は L/R が小さい時に、リング材では逆に大きな時に固有振動数に大きな影響を及ぼす。また補強本数がある程度増加するとほとんど変化しなくなることがわかった。直交補強ではリング材の影響が強く、縦通材により連成振動が促進する可能性がある。

掃引実験では補強円筒殻の固有振動数を求め、解析値と比較を行い、精度のよい結果を得ることができ、補強材との連成振動を確認することができた。

参考文献

- 1) ラプラス研究会編：“機械・構造物の振動（その工学的対策と解析手法）”，養賢堂（1989）。
- 2) 植村益次：殻構造の座屈（特に有限変形理論による最近の発展と問題点），日本航空学会誌，第12巻 第23号（1964），109。
- 3) 土木学会鋼構造委員会：“座屈設計ガイドライン”，土木学会（1987）。
- 4) G.Sinha and M.Muk：Proc. Indian natn. Sci. Acad., Vol.61, Nos.3&4(1995),195.
- 5) A.Joseph Stanley and N.Ganesan：Computers & Structures Vol.65, No.1 (1997), 33.
- 6) 康井義明他 3名：日本機械学会論文集 A 偏, Vol.62, No.593(1996),234.
- 7) S.A. Rinehart and J.T.Wang：J.Sound Vibr.(1972),151.