

3次元弾性円柱の流体構造連成解析

川本英樹¹・吉田秀則²

¹正会員 川崎重工工業(株) 明石技術研究所 (〒673-8666 兵庫県明石市川崎町 1-1)

²川崎重工工業(株) 明石技術研究所 (〒673-8666 兵庫県明石市川崎町 1-1)

本研究では、橋梁等3次元構造物の耐風性検討に適用できる空力弾性解析技術の確立を目指して、3次元非定常流体解析コードと梁要素を用いた構造解析コードをカップリングし、流体構造連成解析コードを開発した。さらに開発した解析コードの実現象への適用性を検討するために、片持ち支持された3次元弾性円柱の流体力励起振動を解析し、カルマン渦励振については本解析コードによって高精度で再現できることを確認した。しかし高風速渦励振については十分に現象を再現できず、構造系のモデル化、格子解像度、等について詳細な検討が必要である。

Key Words : *three-dimensional simulation, fluid-structure interaction, circular cylinder, aerodynamic characteristics*

1. はじめに

近年、明石海峡大橋に代表されるような長大橋梁、あるいは高層ビル等の大型構造物の建設が相次いでいるが、これらの構造物では風による振動・変形等の耐風性に対する事前検討が不可欠となっている。従来、構造物の耐風性検討は風洞実験を中心に実施されてきており数多くの成果が得られているが、風洞実験には多くの費用と時間を要すること、および流れの可視化の困難さから実際の現象理解が十分とはいえないこと、等の問題も残されている。そこで最近では急速に発展している数値流体解析(CFD)技術を積極的に取り入れて、風洞実験と解析を有機的に組み合わせて、より高度かつ効率的な検討を実施しようという機運¹⁾が高まってきている。

このような状況に対応するため、各研究機関では構造物まわりの流れへのCFD技術の適用研究が盛んに実施されてきた。当初は解析対象として構造物要素の基本形状である矩形断面や円形断面まわりの流れに着目して、2次元解析において広範なレイノルズ数範囲での物体が静止した状態に関する空気力やストローハル数を実験結果と比較・検証する研究^{2), 3), 4), 5)}が数多く実施され、解析手法、解析格子、乱流モデル、等について多くの有益な知見が得られている。さらに最近では2次元断面に対しても3次元解析が必要である、という意見が多くなってきている。これは2次元解析ではスパン方向への流れを表現できないことから剥離渦を強めに評価してしまうとい

う観点から主張されているものである。実際2次元解析と3次元解析の比較によって3次元解析の有効性を示した報告^{6), 7)}もでてきており、今後は3次元解析を用いた研究が主流になってくると思われる。

一方、上で述べたような静止した構造物まわりの流れだけでなく、移動する物体まわりの流れを解析する研究も精力的に実施されてきた。この理由は、構造物の耐風性検討においては物体の振動によって生じる渦による自励的な現象の評価が非常に重要であるため、移動境界を取り扱える解析技術が必要となるためである。このような流れ場を解析するために移動変形格子法を用いた解析が実施されている。この場合も矩形断面や円形断面を対象に、物体を一樣流中で強制的に加振して、物体に作用する動的空気力や位相差をCFD解析で求めたり、あるいは流体力による構造物の振動を流体構造連成解析によって求める研究が実施されてきた。物体に強制的に変位を与える解析では、筆者らがたわみモードで強制的に加振した辺長比4の矩形断面まわりの流れを2次元解析で求め⁸⁾、空力減衰が負になる風速領域を高精度で予測できることを示している他、田村らはねじれの強制振動を与えた辺長比5の矩形断面まわりの流れ解析を行い⁹⁾、非定常空気力および空力減衰の性状について検討している。さらに基本断面以外では渡邊らが実際の橋桁断面を簡略化した箱桁断面をたわみ振動させた場合の流れ解析¹⁰⁾を実施している。また流体構造連成解析については、野村らがばね支持された円形断面まわりの流れをLES (Large

Eddy Simulation) を用いた2次元解析で求め¹¹⁾, ロックイン現象を再現できることを示している他, 伊藤らがばね支持された辺長比2矩形断面まわりの流れを3次元解析によって求め¹²⁾, 渦励振, ギャロッピング等の現象を高精度で予測している. さらに物体自体が流体力によって変形するような現象に対する解析も試みられつつあり, 野村らは2次元解析ではあるが振動・変形する膜まわりの流れ解析¹³⁾を実現している.

このように構造物の耐風性検討へのCFD技術の適用研究は数多く実施されてきているが, そのほとんどは基本的な形状の物体を対象としており, 現実の複雑な構造物を扱ったものは少ないようである. さらに物体の振動・変形を扱う場合は3次元解析自体が非常に少なく, 特に物体の3次元的な運動までを考慮した研究はほとんどない. 以上のような背景から, 本研究では橋梁等3次元構造物の耐風性検討に適用できる空力弾性解析技術の構築を目的に, 流体力による構造物の振動・変形を解析できる流体構造連成解析コードを開発した. さらに, その適用性を検証するために, 片持ち支持された3次元弾性円柱まわりの流れ解析を実施し, 実験結果と比較・検討した. 本論文ではその内容について示す.

2. 解析手法

(1) 基礎方程式

橋梁等の構造物まわりの流れ解析においては, 比較的低速な流れを扱うことから非圧縮性 Navier-Stokes 方程式 (以下 NS 方程式) を採用することが多いが, 本研究では筆者らが開発してきた解析手法^{14), 15)}を有効に利用するために, 圧縮性 NS 方程式を採用する. 時間方向も含めて一般曲座標系変換した基礎方程式をベクトル形式で表現すると以下ようになる.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(E-Ev)}{\partial \xi} + \frac{\partial(F-Fv)}{\partial \eta} + \frac{\partial(G-Gv)}{\partial \zeta} = 0 \quad (1)$$

ここで Q は未知変数, E, F, G は ξ, η, ζ 方向の対流項, E_v, F_v, G_v は粘性項である.

$$Q = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ e \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$E = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho U \\ \rho uU + \xi_x p \\ \rho vU + \xi_y p \\ \rho wU + \xi_z p \\ (e+p)U - \xi_x p \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$F = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho V \\ \rho uV + \eta_x p \\ \rho vV + \eta_y p \\ \rho wV + \eta_z p \\ (e+p)V - \eta_y p \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$G = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho W \\ \rho uW + \zeta_x p \\ \rho vW + \zeta_y p \\ \rho wW + \zeta_z p \\ (e+p)W - \zeta_z p \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$E_v = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} 0 \\ \xi_x \tau_{xx} + \xi_y \tau_{xy} + \xi_z \tau_{xz} \\ \xi_x \tau_{yx} + \xi_y \tau_{yy} + \xi_z \tau_{yz} \\ \xi_x \tau_{zx} + \xi_y \tau_{zy} + \xi_z \tau_{zz} \\ \xi_x \beta_x + \xi_y \beta_y + \xi_z \beta_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$F_v = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} 0 \\ \eta_x \tau_{xx} + \eta_y \tau_{xy} + \eta_z \tau_{xz} \\ \eta_x \tau_{yx} + \eta_y \tau_{yy} + \eta_z \tau_{yz} \\ \eta_x \tau_{zx} + \eta_y \tau_{zy} + \eta_z \tau_{zz} \\ \eta_x \beta_x + \eta_y \beta_y + \eta_z \beta_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$G_v = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} 0 \\ \zeta_x \tau_{xx} + \zeta_y \tau_{xy} + \zeta_z \tau_{xz} \\ \zeta_x \tau_{yx} + \zeta_y \tau_{yy} + \zeta_z \tau_{yz} \\ \zeta_x \tau_{zx} + \zeta_y \tau_{zy} + \zeta_z \tau_{zz} \\ \zeta_x \beta_x + \zeta_y \beta_y + \zeta_z \beta_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$U = \xi_x + \xi_y + \xi_z + \xi_t \quad (9)$$

$$V = \eta_x + \eta_y + \eta_z + \eta_t \quad (10)$$

$$W = \zeta_x + \zeta_y + \zeta_z + \zeta_t \quad (11)$$

$$\tau_{xx} = \frac{2}{3} \mu (2u_x - v_y - w_z) \quad (12)$$

$$\tau_{yy} = \frac{2}{3} \mu (2v_y - w_z - u_x) \quad (13)$$

$$\tau_{zz} = \frac{2}{3} \mu (2w_z - u_x - v_y) \quad (14)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu (u_y + v_x) \quad (15)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu (v_z + w_y) \quad (16)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu (w_x + u_z) \quad (17)$$

$$\beta_x = \tau_{xx}u + \tau_{xy}v + \tau_{xz}w + \kappa T_x \quad (18)$$

$$\beta_y = \tau_{yx}u + \tau_{yy}v + \tau_{yz}w + \kappa T_y \quad (19)$$

$$\beta_z = \tau_{zx}u + \tau_{zy}v + \tau_{zz}w + \kappa T_z \quad (20)$$

ここに, x, y, z : 座標, ρ : 密度, u, v, w : 速度の x, y, z 成分, p : 圧力, e : 内部エネルギー, T : 温度, μ : 粘性係数, κ : 熱伝導率, U, V, W : 反変速度成分, J : ヤコビアン, ξ, η, ζ : 変換のメトリックス, τ : 粘性応力テンソル, である。なお, (12)~(17)における u_x, v_y 等は $\partial u/\partial x, \partial v/\partial y$ 等を表す。

圧縮性 NS 方程式を用いて非定常流を解く場合に有利な点として, 圧縮性 NS 式では方程式が放物型のため, すべての変数が時間発展形式で求まるということが挙げられる。このためプログラムの構造を非常にシンプルにすることができる。その点, 非圧縮性 NS 方程式では連続の式に時間微分項が入っていないために, 各時間ステップで連続の式を満たすように圧力に関するポアソン方程式を解く必要があり, プログラム構造がかなり複雑になる。

また非圧縮性 NS 式を圧縮性 NS 式と同様の解法で解く, 擬似圧縮性解法¹⁶⁾と呼ばれる手法もあるが, この手法は定常解析においてはプログラム構造をシンプルにできるが, 非定常解析に適用するためには, 擬似時間の概念を導入して, 圧力と速度に別々の時間刻み幅を適用する必要があるため, 定常解析の場合ほどにはプログラム構造が単純にならない。

また, 通常の風洞試験における風速は 3~20m/s 程度であり, たとえば風速 3.4m/s の空気 (音速 340m/s 程度) をマッハ数で表すと $M=0.01$ となるが, 圧縮性 NS 方程式を用いて $M=0.01$ のような低速流を解く場合, 計算効率, 数値安定性の点で問題があるため, 本研究では圧縮性の影響がほとんどでない $M=0.1$ で解析を実施した。低速流を $M=0.1$ の圧縮性流体として解くことの妥当性については, 過去に橋梁をはじめ, 数多くの低速流領域の流れ場に同様の手法を用いた解析を適用しており^{17), 18)}, 非圧縮性流体解析と同等の結果が得られることを確認している。

(2) 流体解析法

ここでは簡単のために, 1次元非粘性式について示す。有限体積法を採用し, セル番号 j の中心における時間ス

テップ n での物理量を Q_j^n とし, 左側のセル境界を通過する流束を $\bar{E}_{j-1/2}$, 右側のセル境界を通過する流束を $\bar{E}_{j+1/2}$ とすると, 次の時間ステップの物理量 Q_j^{n+1} は次式で表せる。

$$Q_j^{n+1} = Q_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta \xi} [\bar{E}_{j+1/2} - \bar{E}_{j-1/2}] \quad (21)$$

ここで Δt は時間刻み幅, $\Delta \xi$ は計算格子幅である。解析スキームとして, 圧縮性の CFD 解析では標準的な手法となっている, Roe の Flux Difference Splitting¹⁹⁾ を使用すると, 流束 $\bar{E}_{j+1/2}$ は次式で表せる。

$$\begin{aligned} \bar{E}_{j+1/2} &= \frac{1}{2} [E(Q_R) + E(Q_L) - |A|_{j+1/2} (Q_R - Q_L)] \quad (22) \\ |A|_{j+1/2} &= R_{j+1/2} |\Lambda|_{j+1/2} R_{j+1/2}^{-1} \quad (23) \end{aligned}$$

ここで Q_L, Q_R はセル境界 $j+1/2$ の左右の状態である。 Λ は $A = \partial E / \partial Q$ の固有値を成分とする対角行列で, R は固有値に対する右固有ベクトルを列とする行列である。さらに空間高次精度となるように MUSCL 内挿²⁰⁾ によって Q_L, Q_R を評価する。

$$(Q_L)_{j+1/2} = Q_j + \frac{s}{4} [(1+s) \Delta_- + (1-s) \Delta_+] \quad (24)$$

$$(Q_R)_{j+1/2} = Q_{j+1} - \frac{s}{4} [(1+s) \Delta_+ + (1-s) \Delta_-] \quad (25)$$

ここで s は Van Albada の制限関数²¹⁾ を用いて次式のように表す。

$$s = \frac{2 \Delta_+ \Delta_- + \epsilon}{(\Delta_+)^2 + (\Delta_-)^2 + \epsilon} \quad (26)$$

ここに, $\Delta_+ = Q_{j+1} - Q_j$ および $\Delta_- = Q_j - Q_{j-1}$ で, ϵ は 0 でない小さな数である。以上によって空間 2 次精度 TVD (Total Variation Diminishing) スキームとなる。TVD は本来, 超音速流の解析において衝撃波を安定に捕獲する目的で発達した手法であるため, 本研究で扱う低マッハ数流体の解析においては, あえて TVD スキームを適用する必要はないと考えられるが, 本研究においては格子の歪み等の何らかの原因で数値計算の不安定が生じたときに, それを抑えて計算を安定に進行させる役割を期待している。

次に時間積分について示す。(21)に陰的スキームを適用し, Beam-Warming の線形化²²⁾を施すと, 次式のようになる。

$$\begin{aligned} \left[\frac{I}{\Delta t} + \frac{\partial}{\partial \xi} A \right] \Delta Q_j^n &= \\ - \frac{1}{\Delta \xi} [\bar{E}_{j+1/2} - \bar{E}_{j-1/2}] &= -\delta_\xi \bar{E}_j^n \quad (27) \end{aligned}$$

(27)に Newton 反復法と Crank-Nicolson 法を適用すると, m を反復のインデックスとして, 次式のようになる。

$$\left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{\partial}{\partial \xi} A \right] \Delta Q_j = - \left[\frac{Q_j^{m1(\omega)} - Q_j^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} \delta_\xi \bar{E}_j^{m1(\omega)} + \frac{1}{2} \delta_\xi \bar{E}_j^n \right] \quad (28)$$

$$Q_j^{m1(m+1)} = Q_j^{m1(\omega)} + \Delta Q_j, \quad m = 0, 1, 2, \dots, M \quad (29)$$

$$Q_j^{m1} = Q_j^{m1(0)} \quad (30)$$

(28)を Gauss-Seidel 緩和法で解くことによって ΔQ_j を求め、収束 ($\Delta Q_j \rightarrow 0$) するまで内部反復を実施する。もし完全に収束したならば時間2次精度となる。ただし、本研究においては計算時間の短縮を優先し、内部反復回数を3回で打ち切った。この場合、流速の divergence は 10^{-4} 程度であり、また確認のために実施した2次元円柱まわりの流れ解析において、内部反復回数3回としたときのストローハル数、空気力係数が他の解析結果²³⁾と同様の値であったことから、3回の内部反復で十分であると判断した。

本研究では移動・変形する物体まわりの流れを解析するために移動・変形格子を採用した。基礎方程式(1)では時間方向も含めて一般座標変換しているため、具体的にはメトリクス、ヤコビアンに時間項を加えることで格子の移動・変形を考慮できる。移動・変形する格子において時間方向の保存則を満たすためには、一般に Geometric Conservation Law (GCL) と呼ばれる次式を満足するようにメトリクス、ヤコビアンを評価する必要がある。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\xi_t}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\eta_t}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\frac{\zeta_t}{J} \right) = 0 \quad (31)$$

ここでは田村らの手法²⁴⁾を用いてメトリクス、ヤコビアンを評価した。図-1において、 n ステップで小さな六面体であったセルが、 $n+1$ ステップで大きな六面体になった場合を考えると、時間方向の保存則を満たすためには、 n ステップのセル体積と、それを囲む6つの面が n から $n+1$ ステップの間にスワイプする体積の和が $n+1$ ステップの体積に一致する必要がある。すなわち、 ξ_t/J 、 η_t/J 、 ζ_t/J をそれぞれ ξ 面、 η 面、 ζ 面、が n から $n+1$ ステップの間にスワイプした体積と一致するように評価すればよいことになる。

移動する物体表面の境界条件としては、速度については物体の移動速度を与え、圧力については物体に垂直方向の運動量保存則から、

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho a_n \quad (32)$$

のように与えた。ここで n は物体表面に垂直な方向、 a_n は物体の移動加速度の、物体表面に垂直な方向の成分である。

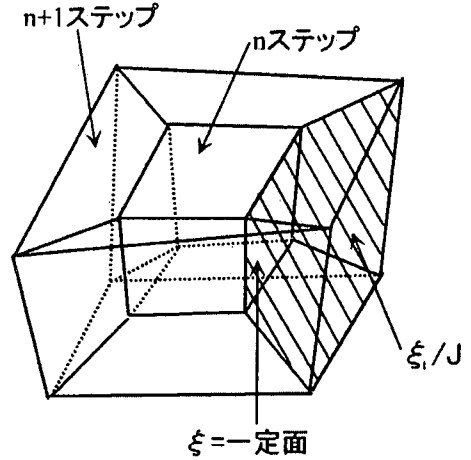


図-1 移動・変形格子におけるメトリクス時間項

(3) 構造解析コードの開発

流体力による構造物の振動・変形を解析するためには、流体解析コードと構造解析コードを連成させて解き進める必要がある。本研究においては、構造解析部分の計算負荷を軽減し、かつ流体解析コードとの連携を容易にするために、簡易的な構造解析コードの開発を実施した。

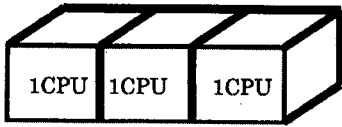
構造解析には有限要素法を採用した。有限要素法には梁、板、立体要素等さまざまな要素があるが、適用対象を現在想定している橋桁、塔状構造物等に限れば梁要素が使用できれば十分であると判断し、梁要素による弾性変形応答を解析できる有限要素法構造解析コードを開発した。なお、今回開発した構造解析コードにおいてはもっとも一般的な梁要素の剛性マトリクス、質量マトリクス²⁵⁾を用い、ねじりに関しては曲げねじりの影響を考えず、St. Venantのねじりのみを考慮した。また構造解析における時間積分法には Newmark β法²⁶⁾を採用した。

なお流体構造連成解析を扱う場合、大変形問題²⁷⁾も非常に重要であるが、今回は研究の第1段階ということで特に大変形問題は対象としていない。これについては今後の研究において、構造解析コードを高度化することで対応したい。

(4) 流体構造連成解析

流体構造連成解析²⁸⁾を実現するため、流体解析コードと構造解析コードをカップリングした。連成解析は以下の手順で実施する。

- ① 流体解析によって物体に作用する流体力を求める。
- ② 得られた流体力を構造解析の外力として与え、物体の変位を求める。



(a)領域分割(I方向のみの1次元分割 - 3CPU使用の場合)



(b)境界接合部での情報交換

図-2 並列計算手法の概要

③得られた物体の変位に応じて流体解析の格子を移動・変形させる。

④①に戻る。

なお、①での流体力は物体表面に作用する圧力および粘性による摩擦力を表面積分することによって求める。

今回は橋梁、構造物等の比較的剛性の高い物体を対象とするため、流体構造連成解析手法としてはもっとも簡単な、流体と構造を交互に解き進める方法を用いた。

(5) 並列計算

本研究で対象としている3次元構造物の流体構造連成解析は、特に流体解析の部分について流れ場の3次元的な変動を非定常解析する必要があるため、非常に多くの計算時間を必要とする。そのため大型計算機を用いたとしても実際の設計現場で要求されるような時間で結果を得ることは非常に困難である。そこで、計算時間の大幅な短縮を実現するために解析コードに並列計算技術を取り入れた。具体的には領域分割法を用いて計算空間を複数の領域に分割し、それぞれの領域について異なる計算機で解析を実行し、領域が接する部分については各計算ステップ毎に情報を交換しながら解き進める、という手法を採用した。並列計算手法の概要を図-2に示す。本研究では流体解析に構造格子を使用しているため、領域分割にはもっとも単純な1次元分割(例えば3次元の格子がI, J, Kの方向を持つ場合、I方向のみを分割する方法)を用いた。この方法で並列計算の効率を上げるためには領域分割において、できるだけ各計算機に配分される格子点数が均等になるように分割すること、I, J, K方向のうち各計算機間での通信量ができるだけ少なくなるような方向に分割すること、等が必要となる。

異なる計算機間で情報を交換するために必要なメッセージ・パッシング・ライブラリにはPVM(Parallel Virtual

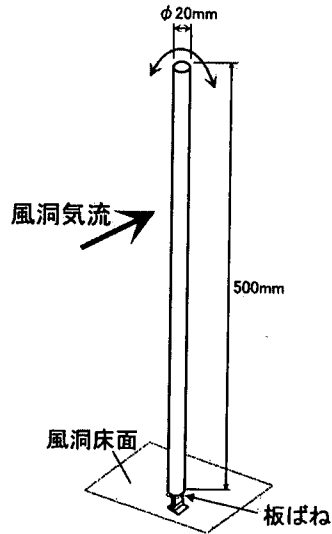


図-3 実験モデル概要

Machine)を用いた。メッセージ・パッシング・ライブラリとは、別々のCPU上で動作しているプロセス間の情報の授受を明示的に記述するための関数群を提供するライブラリである。PVMはアメリカのオークリッジ国立研究所とエモリー大学の研究者らによって開発されたもので、MPI(Message Passing Interface)と並んでもっとも標準的なメッセージ・パッシング・ライブラリの一つである。この並列計算技術によって、使用する計算機数にほぼ比例した計算速度の増加が実現でき、3次元構造物の流体構造連成解析が現実的な計算時間で実行可能となった。今回のケースでは、PC8台を用いた並列計算によって、1ケース当たり1週間の計算時間となったが、本手法は使用する計算機数やOS、CPUの種類等に特に制限がないため、使用する計算機を増やしたり、より高速なCPUによる並列計算を実施すれば、さらに高速化が可能である。

3. 解析手法の検証

(1) 解析モデルおよび解析条件

本研究で用いた流体構造連成解析手法に対する検証解析を実施した。本来ならば、より実際形状に近い物体の3次元的な振動・変形を取り扱うべきであるが、研究の第1段階であること、およびそのような実験がほとんどないことから、今回は片持ち支持された一様断面弾性円柱の空力弾性振動を解析し、北川らの実施した実験結果²⁹⁾と比較した。実験モデルの概略を図-3に示す。実験では換算風速 $Vr=5$ 付近の風速域でカルマン渦による渦励

振が発生している。また、 $Vr=17$ 付近の風速域において円柱端部の影響によるものと思われる高風速渦励振と呼ばれる限定振幅型の振動が発生している。このような現象を本解析手法によって、どの程度まで再現できるかについて検討した。

実験に用いられた円柱模型は風直角方向のみに自由度を持たせた1自由度ロッキング模型であり、円柱自体は変形しない。構造解析において、本来は板ばねモデルを用いてモデル化するべきであるが、本解析手法では梁要素を使用しているため、今回は円柱全体を1つの梁要素でモデル化し、変位していない状態において梁要素の中心軸と円柱の中心軸を合わせた。このとき、片端固定、片端自由の梁を1要素近似すると、以下の理論式²⁰⁾で示される固有振動数が存在する。

$$f_1 = \frac{1.88^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{gEI}{A\gamma}} \quad (33)$$

$$f_2 = \frac{5.9^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{gEI}{A\gamma}} \quad (33)$$

ここで、 f_1, f_2 : 1次, 2次の固有振動数, l : 梁の長さ, E : ヤング率, A : 円柱断面積, γ : 比重, g : 重力加速度である。ただし、実験で用いた円柱は剛体のため、流体解析における円柱は変形させず、構造解析で得られた円柱端部振幅に応じた回転変位に従って剛体回転させた。また実験の円柱は風直角方向のみに振動するので、梁要素に対しても風直角方向の力のみを与えた。なお梁に作用させる外力は、流体解析によって得られた固定端まわりの回転モーメントを、梁の長さ l で除した値を自由端への節点外力として与えた。構造系のパラメータを以下に示す。

円柱寸法 : 直径 $d = 20\text{mm}$ × 長さ $l = 500\text{mm}$
 円柱重量 : $m = 0.035\text{kgf}$
 断面2次モーメント: $I = 7.854 \times 10^{-9}\text{m}^4$

1次の固有振動数 f_1 は換算風速に応じて変化させ、そのときヤング率 E は(33)から求めた。

次に流体解析の条件を示す。

解析格子数 : 半径方向 76 × 周方向 101
 × 高さ方向 46 = 353, 096 点

レイノルズ数 : 1×10^4

換算風速 : $Vr = U/(fd)$
 $= 2.0, 4.5, 10.0, 17.0, 25.0$

U : 一様流速

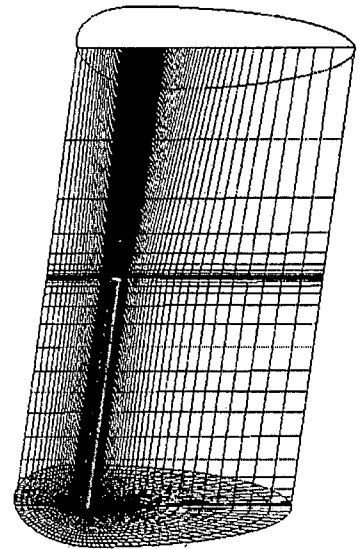
f : 固有振動数

D : 円柱直径

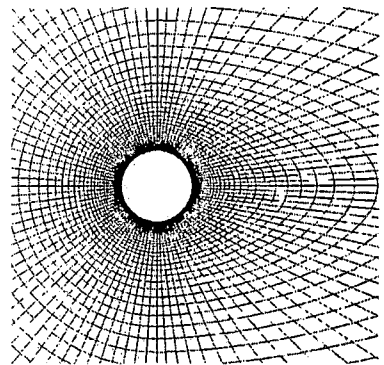
一様流マッハ数: $M = 0.1$ ($U = 34.0\text{m/s}$)

時間積分 : 反復陰解法 ($\Delta t = 7 \times 10^{-7}\text{sec.}$)

図-4に初期状態の解析格子を示す。今回の解析では特に流れの3次元性を評価する際に、高さ方向の格子数が十分でない可能性があるが、研究の第1段階であるこ



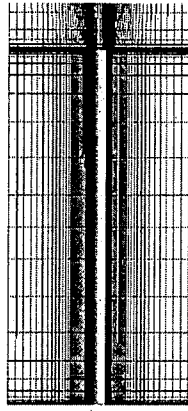
(a) 格子全体図



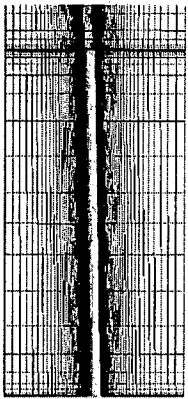
(b) 円柱付近格子拡大図

図-4 解析格子図

とから比較的少なめの格子数での検討を実施した。また格子は円柱の振動に応じて図-5に示すように変形させる。また、乱流モデルは使用していない。解析では、まず円柱を固定した状態での非定常流体解析を実施し、周期的なカルマン渦が放出されるような流れ場が得られた後、その状態を初期値として流体構造連成解析を実施した。なお換算風速 Vr の変化については、実験においては一様流速 U によって変化させることが一般的で、そのため特に渦励振等については U を増加させた場合と減少させた場合で異なる振幅となることが知られているが、今回は解析の効率化のために U は固定とし、固有振動数 f を変化させることで Vr を変化させ、かつ円柱が静止した状態から解析をスタートさせたため、上述したような流速の増減による現象の違いについては再現することはできない。



固定時



振動時(無次元振幅 $y/D=0.5$ の場合)

図-5 解析格子の変形

解析のレイノルズ数については、格子数を節約するために実験でのレイノルズ数 (1×10^5) より小さい値を用いたが、両者とも臨界レイノルズ数以下であることから、影響は少ないと判断した。

境界条件について、円柱表面および床面を固体壁とし、流体部分についてはすべて領域の外側に仮想的なセルを設け、そのセル中心に $M = 0.1$ の一様流を与えた。なお実験の流入風には発達した境界層が存在するが、解析ではそのプロファイルを厳密に再現することをせず、流入境界から円柱までの距離で発達する境界層で近似した。その結果、実験における境界層厚さ約 $200\text{mm}^{29)}$ に対して、解析では約 5mm と非常に薄い境界層厚さになった。

(2) 解析結果および考察

図-6に換算風速 V_r と円柱端部振幅の関係について、実験結果と解析結果の比較を示す。カルマン渦励振については、解析によって再現できており、本解析手法の有

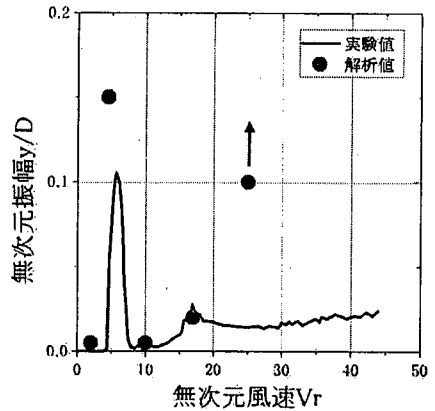


図-6 実験結果と解析結果の比較

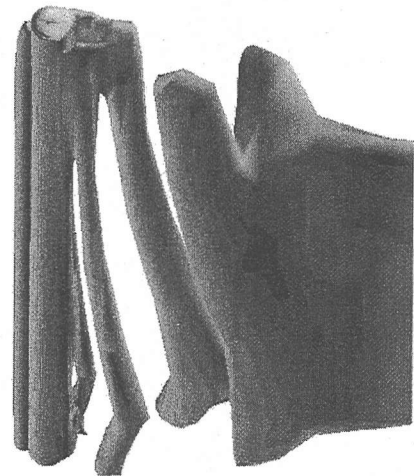
(風速と円柱端部応答振幅の関係)

効性が確認できた。振幅については解析結果が多少大きめになっているが、これは解析において乱流モデルを使用していないこと、および円柱高さ方向の格子が粗いために、渦の3次元構造を十分に表現できていない可能性があることが原因と思われる、さらに流入風のプロファイルが実験と解析で異なることの影響も大きいと思われる。また流れ場の3次元構造を理解するための一つの表現方法として、図-7にマッハ数等値面図を示す。渦励振が発生している $V_r = 4.5$ ではかなり2次元的な渦構造となっており、スパン方向の分布は少ない。 $V_r = 2.0, 10.0$ では、渦構造は比較的 $V_r = 4.5$ のものに近いが、渦の移流速度が高さ方向で異なっていることが観察できる。さらに $V_r = 17.0, 25.0$ のように風速が大きくなると渦の3次元的な構造が強くなっており、特に高風速渦励振発生風速である $V_r = 17.0$ では円柱端部から発生していると思われる渦構造が確認できる。

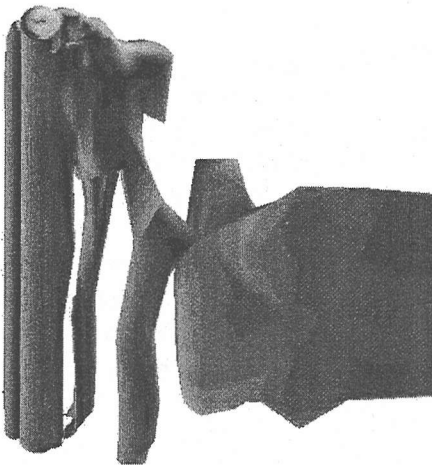
しかし図-6に示したように、換算風速 $V_r = 17$ 付近の高風速渦励振の振幅はほぼ実験に対応しているが、それより高い風速で再度振幅が小さくなるような現象を再現することができなかった。 $V_r = 25$ のときの振幅については、実験結果よりも大きな振幅で、さらにその振幅が時間が進むにつれて増大する傾向がみられたため、振幅が落ち着く前に解析を打ち切った。その原因を考察するために、円柱端部振幅および円柱に作用する揚力の時間履歴を図-8に、変位と揚力のパワースペクトルを図-9, 10に示す。 V_r が10以下のときは円柱の振動は1次の固有振動数によるものが支配的で、特にカルマン渦励振の風速では、円柱の振動周期と揚力の変動周期がほぼ一致しており、共振していることが確認できる。しかし換算風速が大きくなると構造系の高次モード振動の影響が大きくなり、 $V_r = 25$ では2次モードとの共振が発生

している。このことより高風速渦励振を再現できなかつた原因は円柱を1つの梁要素でモデル化したことによって、高次モードの振動が支配的になったため、と考えられる。さらに北川ら³⁰⁾によると、高風速渦励振の励振源である自由端渦は、円柱高さ方向の90%より上の部分で発生しており、その渦構造を正確にとらえる必要があるが、本解析では円柱端部での格子解像度が十分とはいえないために、自由端渦の評価が適切にできていないのではないかと、とも考えられる。

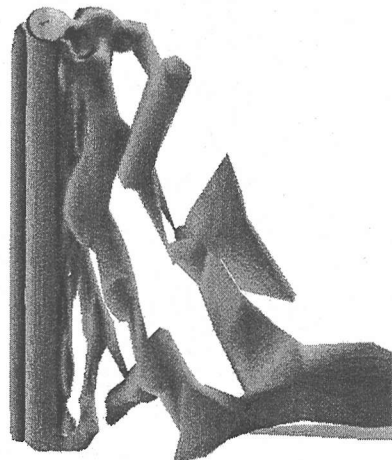
これらの結果より、適切な格子解像度、構造系のモデル化、乱流モデル等に課題はあるが、本解析手法によって3次元構造物の空力弾性現象をかなりの精度で評価できることが確認できた。



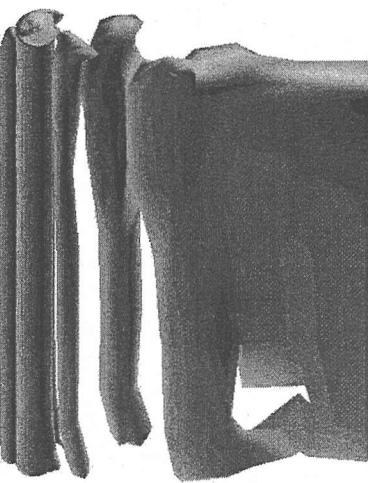
(c) Vr=10.0



(a) Vr=2.0



(d) Vr=17.0

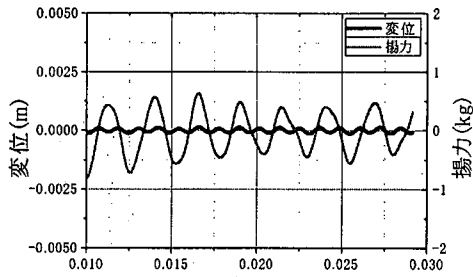


(b) Vr=4.5

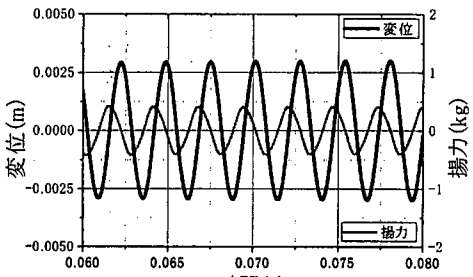


(e) Vr=25.0

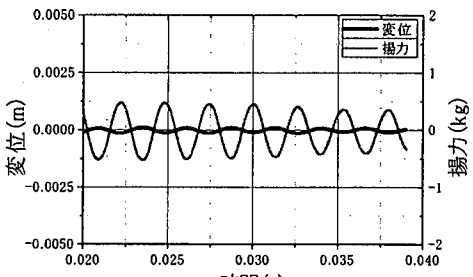
図-7 解析結果 (マッハ数等値面図)



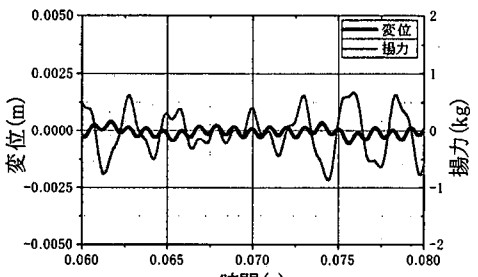
(a) $V_r=2.0$



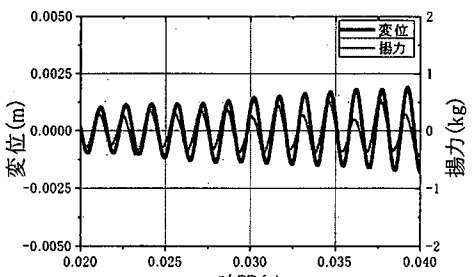
(b) $V_r=4.5$



(c) $V_r=10.0$

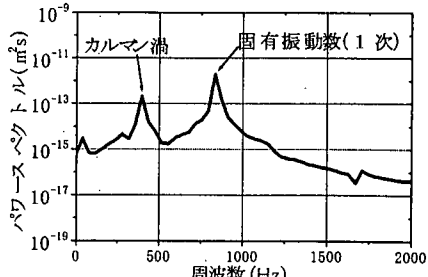


(d) $V_r=17.0$

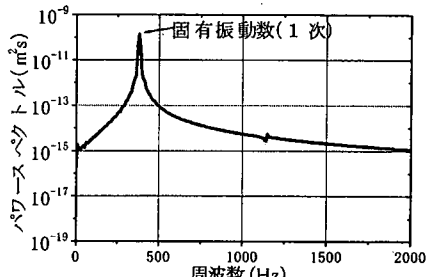


(e) $V_r=25.0$

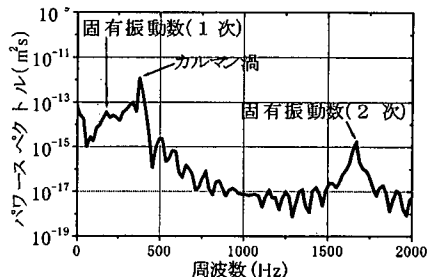
図-8 解析結果 (円柱端部変位および揚力の時間履歴)



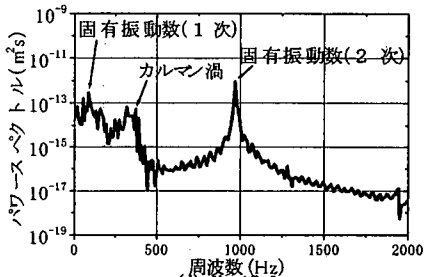
(a) $V_r=2.0$



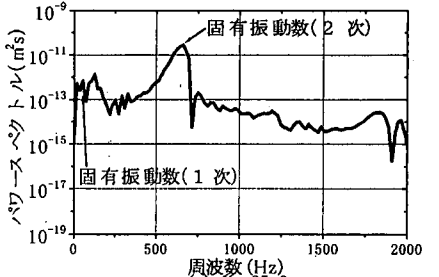
(b) $V_r=4.5$



(c) $V_r=10.0$



(d) $V_r=17.0$



(e) $V_r=25.0$

図-9 解析結果 (円柱端部変位のパワースペクトル)

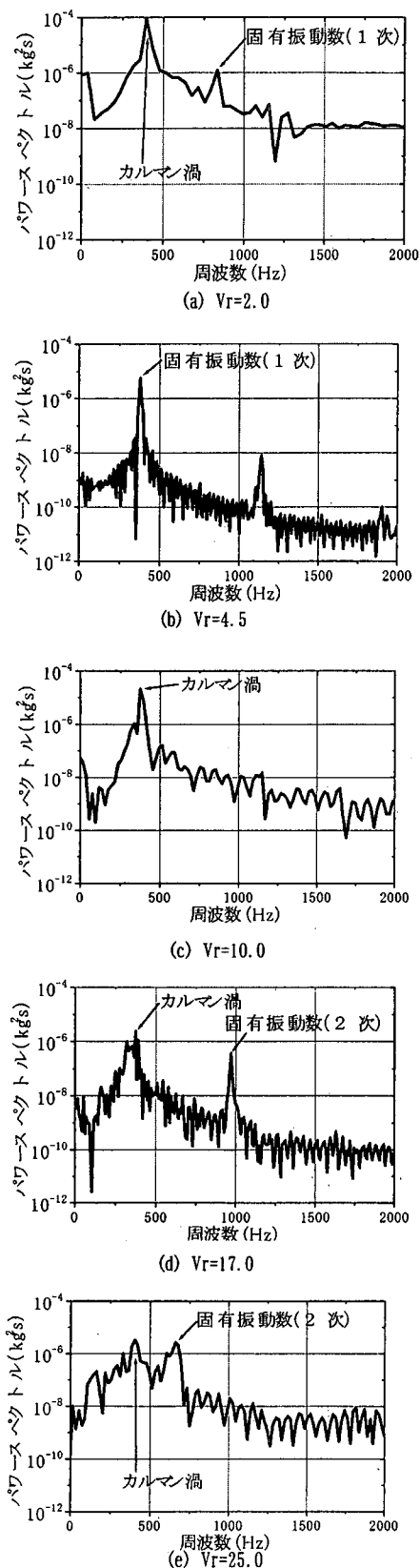


図-10 解析結果(揚力のパワースペクトル)

4. おわりに

本研究では、3次元構造物の空力弾性解析技術を確立することを目的に、3次元非定常流体構造連成解析コードを開発した。さらにその適用性を確認するために3次元円柱の流体力励起振動を、剛体を弾性棒におきかえて解析し、実験結果と比較した。この結果、本研究で用いた解析手法によって3次元構造物の空力弾性現象を高精度で解析できることを確認した。主要な結果を以下に示す。

- (1) カルマン渦に起因する渦励振については、本解析手法によって再現できることが確認できた。
- (2) カルマン渦励振における振幅については、解析結果が多少過大に評価している。この原因は円柱高さ方向の格子解像度不足、乱流モデルを使用していないこと、流入風のプロファイルの違い、等が考えられる。
- (3) 高風速渦励振については十分に再現することはできなかった。この原因は実験における板ばねで支持された円柱を、解析では1つの梁要素でモデル化したために、高風速においては高次モード振動の影響が大きくなったこと、および円柱端部近傍での格子解像度不足が考えられる。

今後は本解析手法の適用性拡大のために検証事例を蓄積する他、より複雑な形状の構造物や膜屋根等の柔構造物などの解析についても可能とするために、現在梁要素しか使用できない構造解析コードを高度化し、板要素、立体要素等も使用できるようにする予定である。さらに解析精度をよりいっそう向上させるために、3次元構造物の空力弾性解析に適した乱流モデルについて検討する必要がある。

謝辞：本研究を行うに際し、日本大学理工学部土木工学科 野村卓史教授、北川徹哉助手に有益な御意見をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 野村卓史, 平野廣和: 土木構造における計算流体力学, 日本風工学会誌, 第60号, pp.17-23, 1994.
- 2) 土木学会構造工学委員会: 風工学における数値計算の応用と評価研究小委員会報告書, 1994.
- 3) 日本機械学会: ワークショップ計算比較「矩形柱周りの乱流」成果報告書, 1993.
- 4) 岡島厚, 小畑哲也, 溝田武人: LES, $K-\epsilon$, DS 数値解析法による角柱の抗力係数とストローハル数, 土木学会第50回 年次学術講演会講演概要集共通セッション, pp.98-99, 1995.
- 5) 野村卓史, モンコル・ジラヴァシヤアラデット: Smagolinsky の渦粘性モデルを用いた円柱まわりの高レイノ

- ルス数流れの解析, 構造工学論文集, Vol. 40A, pp. 425-434, 1994.
- 6) 平野廣和, 渡邊茂, 丸岡晃, 佐野健一: 断面辺長比4の矩形断面の空力特性に関する2次元・3次元数値流体解析, 土木学会論文集, No. 598/1-44, pp. 401-411, 1998.
- 7) Edamoto, K. and Kawahara, M. : Finite Element Analyses of Two and Three-dimensional Flows around Box-type Bridge Sections, Fourth Japan-US Symposium on Finite Element Methods in Large-Scale Computational Fluid Dynamics, pp. 125-128, 1998.
- 8) 川本英樹, 吉田秀則, 尾立圭巳: 強制振動する辺長比4矩形断面まわりの流れ解析, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集, 第1部(B), pp. 18-19, 1998.
- 9) 田村哲郎, 桑原邦郎: 角柱の空力不安定振動のシミュレーション, 第4回数値流体力学シンポジウム講演論文集, pp. 523-526, 1990.
- 10) 渡邊茂, 平野廣和, 林健一, 池ノ内昌弘: 偏平箱桁橋の空力応答特性に関する数値流体解析, 第14回風工学シンポジウム論文集, pp. 205-210, 1996.
- 11) 野村卓史, 太田匡司, 志村正幸, 関根章義: ALE有限要素法による円柱渦励振の解析, 第8回数値流体力学シンポジウム講演論文集, pp. 447-450, 1994.
- 12) 伊藤嘉晃, 田村哲郎: 自由振動する角柱まわりの流れの3次元シミュレーション, 第9回数値流体力学シンポジウム講演論文集, pp. 413-414, 1995.
- 13) 新明正人, 野村卓史: 流体の作用による膜の大変形挙動の動的連成解析, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集, 第1部(B), pp. 24-25, 1998.
- 14) 吉田秀則, 河嶋敬, 坂川佳司: 圧縮機直線翼列流路の三次元粘性流れ解析, 日本機械学会論文集(B編), Vol. 59, No. 561, pp. 96-103, 1993.
- 15) 河嶋敬, 吉田秀則, 清瀬弘晃, 川本英樹: 極超音速風洞の流路全体流れの数値解析, 日本機械学会論文集(B編), Vol. 60, No. 580, pp. 104-110, 1994.
- 16) 黒田眞一: 橋梁まわりの流れの数値計算, 石川島播磨技法 橋梁特集号, pp. 26-33, 1995.
- 17) 川本英樹, 吉田秀則, 野上千秋: 圧縮性NS解析コードによる偏平箱桁まわりの流れ解析, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集, 第1部(B), pp. 22-23, 1997.
- 18) 川本英樹, 吉田秀則, 尾立圭巳: 橋桁断面まわり流れ解析への2次元定常乱流解析の適用, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, 第1部(B), pp. 748-749, 1999.
- 19) Roe, P.L. : Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors, and Difference Schemes, *Journal of Computational Physics*, Vol. 43, pp. 357-372, 1981.
- 20) Yee, H. : Upwind and Symmetric Shock-Capturing Schemes, NASA Technical Memorandum 89464, 1987.
- 21) Anderson, W.K., Thomas, J.L. and van Leer, B. : Comparison of Finite Volume Flux Vector Splittings for the Euler Equations, *AIAA Journal*, Vol. 24, pp. 1453-1460, 1986.
- 22) Beam, R.M. and Warming, R.F. : An Implicit Factored Scheme for the Compressible Navier-Stokes Equations, *AIAA Journal*, Vol. 16, pp. 393-402, 1976.
- 23) Rogers, S.E. and Kwak, D. : Upwind Differencing Scheme for the Time-Accurate Incompressible Navier-Stokes Equations, *AIAA Journal*, Vol. 28, pp. 253-262, 1990.
- 24) 田村善昭, 藤井孝蔵: 格子が移動・変形する場合の保存則について, 第6回数値流体力学シンポジウム講演論文集, pp. 519-522, 1992.
- 25) 川井忠彦, 藤谷義信: 振動および応答解析入門, 培風館, pp. 109-212, 1991.
- 26) 清水信行: パソコンによる振動解析, 共立出版, pp. 267-297, 1989.
- 27) Shimura, M. and Sekine, A. : Interaction Analysis between Structure and Fluid Flow for Wind Engineering, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 46 & 47, pp. 595-604, 1993.
- 28) Shimura, M. and Zienkiewicz, D.C. : Interaction Analysis between Structure and Fluid Flow using the Direct Laplacian Method, Proc. 4th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, pp. 267-274, 1991.
- 29) 北川徹哉, 若原敏裕, 藤野陽三, 木村吉郎: 円柱塔状構造物における高風速渦励振の発生メカニズムに関する実験的解明, 土木学会論文集, No. 543/1-36, pp. 195-207, 1996.
- 30) 北川徹哉, 藤野陽三, 木村吉郎: 自由端渦の形成特性に着目した高風速渦励振の発現メカニズムに関する研究, 土木学会論文集, No. 612/1-46, pp. 229-238, 1999.

(2000. 4. 20 受付)

FLUID-STRUCTURE INTERACTIVE SIMULATION OF THE 3-DIMENSIONAL CIRCULAR TOWER ELASTIC MODEL

Hideki KAWAMOTO and Hidenori YOSHIDA

The numerical simulation code was developed to simulate the aero-elastic phenomena of three-dimensional structures. To validate the accuracy of the code, the fluid-structure interactive simulations were carried out about circular tower elastic model. The results of the simulation were good agreement with experimental data as for the occurrence wind speed of the vortex-induced vibration that was caused by karman vortices. But the vortex-induced vibration at a high wind speed did not occur by the simulation, so further study is necessary about grid system and FEM modeling.