

離散渦法による円筒構造物の VIV 応答解析

正員 林 昌 奎*

Numerical Analysis of Cylindrical Structure VIV Response by Discrete Vortex Method

by Chang-Kyu Rheem

Summary

A quasi 3 dimensional VIV response analysis method which combined 2 dimensional hydrodynamic force simulation by discrete vortex method with 3 dimensional finite element method has been proposed. Use of discrete vortex method and its limitation have been shown. Usefulness and characteristics of the quasi-3D VIV response analysis method have been investigated. The most important thing of 3D VIV response analysis with a strip theory is hydrodynamic correlation length of a riser axis direction. If correlation between strips of the hydrodynamic force shows a result completely different from real phenomena, it is difficulty that a strip theory applies to 3D VIV response analysis. Generally, the phase of hydrodynamic force acting on each strip obtained by the method is random, because hydrodynamic force is simulated at each strip independently. Actually, the hydrodynamic coefficient of lift force on a fixed circular cylinder is different from the average of the hydrodynamic coefficients of lift force on each strip. However, the phase of hydrodynamic force on each strip align at the resonant frequency that the natural frequency of a circular cylinder becomes equal to the frequency of vortex separation. In a VIV response matter, a simulation of hydrodynamic force on a circular cylinder by a strip theory is valid under the resonance condition of a natural frequency and vortex separation. The quasi-3D VIV response analysis method enables 3D VIV analysis with a less computation load. It is clear that the quasi-3D VIV response analysis method is useful at only a resonance condition, but it is enough in engineering, because the biggest VIV response takes place at a resonance condition.

1. 緒 言

海洋ライザー、フリースパンパイプライン、半潜水型海洋構造物など多くの海洋構造物には円筒構造物が広く使用されている。流れ中におかれる円筒構造物には、下流に生成されるカルマン渦列の影響により、周期的に変動する流体力が作用する。流体力の変動による円筒構造物の振動、すなわち渦励起振動 (VIV, Vortex Induced Vibration) は代表的な流体関連振動問題として多くの研究が行われている。特に、円筒構造物から放出される渦の周波数が円筒構造物の固有振動数に近づくと起こる、円筒構造物の振動に同期して渦が放出されることにより流れと直角な方向への構造物の振動振幅が増大する、ロックイン現象は有名である。

近年、水深 1000m を超える大水深海域 (米国内務省鉱物管理局 (MMS : Minerals Management Service) は、水深 1,000 フィート (305m) 以深を大水深 (Deepwater)、同 5,000 フ

ィート (1,524m) 以深を超大水深 (Ultra Deepwater) としている) での海洋資源開発が進められている。大水深海域での海洋資源開発には、主に TLP、FPSO、SPAR などの浮体式生産システムとライザーシステムが用いられる。大水深海域に使用されるライザーシステムは、従来のライザーと同等のものが使用されているため、ライザーが長くなることによりシステムの剛性が相対的に低くなり、固有振動数が低下する。また、大水深海域においては、深さごとに海水の流れの様子が異なる場合が多いため¹⁾、ライザーから放出される渦の周波数が深さごとに異なり、ライザーには複数成分の振動が発生する。そのため、大水深海域に設置するライザーには、ライザーの振動と渦放出との共振による、ライザーの振動振幅の増大に起因する、疲労による損傷が起こりやすい。

海洋ライザーの VIV 応答解析方法として、ライザー模型や実スケールライザーを用いる実験法^{2),3)}、円柱の強制振動実験によって求められた流体力パラメータを用いてモード法または有限要素法で VIV 応答を求める Semi-empirical 法^{4),5),6)}、CFD と応答解析を練成した数値シミュレーションにより直接 VIV 応答を求める方法^{7),8),9)}がある。実験法は、ライザーの応答を直接計測できる利点はあるが、縮尺の問題、設置海域の自然環境条件の再現など実用化への課題が多い。

* 東京大学生産技術研究所

Semi-empirical 法は限られた条件において比較的簡単にライザーの応答を求めることは出来るため、現時点において、最も広く利用されている海洋ライザーの VIV 応答解析法である。しかし、応答解析結果の入力パラメータ依存性が高く、深さごとに海水の流れの様子が異なる場合のような複雑な環境条件への対応が困難である。数値シミュレーションにより直接 VIV 応答を求める方法は、海洋ライザーの VIV 応答解析において最も理想的方法である。しかし、応答解析のための計算負荷が膨大になるため、現時点において、完全な3次元解析は不可能に近く、ライザーを2次元要素に分割して、2次元要素の流体力解析とライザーの3次元応答解析を組み合わせる準3次元 VIV 応答解析方法が提案されているが、実用のレベルには達していない。

本研究では、2次元要素の流体力解析に離散渦法 (DVM, Discrete Vortex Method) を用い、有限要素法 (FEM) による弾性構造解析により3次元運動解析を行う、いわゆる Strip 理論による準3次元 VIV 応答解析方法の開発を目指し、離散渦法の利用方法、利用時の注意点、Strip 理論による準3次元 VIV 応答解析の有効性及びその特性を明らかにする。

2. 離散渦法による流体力解析

離散渦法は連続的に分布する渦度を離散的な渦要素に置き換え、渦要素の移動や渦度変化を Lagrange 的に追跡する手法であり、格子を必要としないため移動境界の取り扱いが必要な流れ場の解析に適した手法である。海洋ライザーの VIV は、ライザー表面での剥離渦に起因する振動現象であるため、離散渦法の利用に適した流体関連振動問題と言える。しかし、レイノルズ数変化への対応及び3次元問題への拡張は容易ではない。

本研究で用いる離散渦法は、Chorin¹⁰⁾が提案した RDVM (Random discrete vortex method)をベースにしている。離散渦法の支配方程式は(1)式の Navier-Stokes 方程式に回転をとって得られる渦度方程式であるが、この渦度方程式を直接解いて、円筒に働く流体力を求めてはいない。

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \mathbf{q} \cdot \nabla \mathbf{q} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 \mathbf{q} \tag{1}$$

ここで、 \mathbf{q} は流体運動の速度ベクトル、 ∇p は圧力勾配、 ν は粘性係数である。離散渦法において、2次元固定円筒に働く流体力を求める手順は次のようである。

1) 円筒表面の渦分布を求める

境界要素法を用いて物体境界での No-Slip 条件を満たすように円筒表面での渦度を求める。このとき用いる2次元任意形状物体を有する完全流体の準定常流れ場における境界積分方程式の離散型は以下のものである。

$$\sum_{n=1}^M K(s_m, s_n) \gamma(s_n) = -(U_\infty \cos \beta_m + V_\infty \sin \beta_m) - \sum_{j=1}^Z \Delta \Gamma_j (U_{mj} \cos \beta_m + V_{mj} \sin \beta_m) \tag{2}$$

ここで、 $K(s_m, s_n)$ は要素 s_n の渦シートにより要素 s_m に誘起される単位渦度あたりの接線方向流速、 U_{mj} 、 V_{mj} はそれぞれフリー渦要素 j により要素 s_m に誘起される単位渦度あたりの流速である (Fig.1)。 (U_∞, V_∞) は流れの流速、 β_m は円筒表面要素 s_m の傾斜角、 M は円筒表面要素の数、 $\gamma(s_n)$ は円筒表面要素 s_n に分布する渦シートの渦度、 Z は流体空間中のフリー渦要素の数、 $\Delta \Gamma_j$ はフリー渦要素の循環である。

$$K(s_m, s_n) = \begin{cases} \frac{\Delta s_n}{2\pi} \left(\frac{(x_m - x_n) \sin \beta_n - (y_m - y_n) \cos \beta_n}{(y_m - y_n)^2 + (x_m - x_n)^2} \right) & m \neq n \\ -1/2 & m = n \end{cases} \tag{3}$$

$$U_{mj} = \frac{1}{2\pi} \frac{y_m - y_j}{(y_m - y_j)^2 + (x_m - x_j)^2} \tag{4}$$

$$V_{mj} = -\frac{1}{2\pi} \frac{x_m - x_j}{(y_m - y_j)^2 + (x_m - x_j)^2} \tag{5}$$

運動する円筒に対する流体力解析は、固定円筒に対する流体力解析に、円筒運動による円筒に対する流体の遠方での相対流速の変動を考慮すれば良い。(2)式を用いて円筒表面渦シートの渦度を求めるとき、拘束条件として次の渦循環保存式を加える。

$$\sum_{n=1}^M \gamma(s_n) \Delta s_n + \sum_{j=1}^Z \Delta \Gamma_j - \Gamma_{circ} = 0 \tag{6}$$

ここで、 Γ_{circ} は計算中に消散及び消滅させたフリー渦要素の循環の和である。

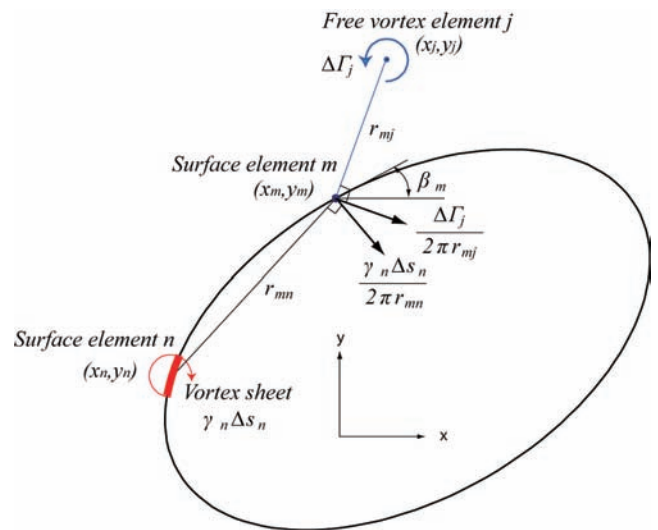


Fig.1 Induced velocity by vortex sheet on surface element and free vortex element

2) フリー渦要素の生成、移流、拡散

流体の流れ中におかれる物体表面からは、流体の粘性に起因する渦が剥離する。渦の剥離は物体形状、流速勾配などに影響されるため、渦が剥離する場所を特定することは非常に困難である。本研究の離散渦法では、計算ステップごとに (2) 式で求めた円筒表面要素の渦度と同じ強さ $\Delta\Gamma_m = \gamma(s_m)\Delta s_m$ を持つフリー渦要素を円筒表面付近に生成させる。それにより計算ステップごとに円筒表面要素と同数のフリー渦要素が生成される。生成されたフリー渦要素は、流体の流れ、円筒、他のフリー渦要素の影響より移流・拡散する。フリー渦要素の移流は 4 次の Runge-Kutta 法を用いて求める。また、粘性拡散は拡散式の解が $\sqrt{2\nu t}$ の標準偏差を持つ確率密度関数と同様であることから、random walk 方法を用いて表す。

3) 円筒に働く流体力を求める

円筒に働く流体力は、円筒表面の流体流速の時間変動をベルヌーイ方程式と同様の考えで求めた円筒表面圧力の積分から求める¹¹⁾。手順 2) にて (1) 式の対流項 $\mathbf{q} \cdot \nabla \mathbf{q}$ と粘性項 $\nu \nabla^2 \mathbf{q}$ は処理済みとなり、この段階で数値解析上の (1) 式は次のようになる。

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} = -\frac{\nabla p}{\rho} \tag{7}$$

円筒表面圧力は (7) 式から求める。円筒表面要素 s_m に分布する渦シートの渦度 $\gamma(s_m)$ は No-Slip 条件を満たす前の要素 s_m の接線方向の流速成分である。そのため、No-Slip 条件の適用による要素 s_m での速度変化は $\gamma(s_m)$ となる。これを (7) 式に適用すると要素 s_m 上における圧力勾配は次のようになる。

$$\frac{\partial p}{\partial s} = -\rho \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} = -\rho \frac{\gamma(s_m)}{dt} \tag{8}$$

$$\Delta p_m = -\rho \frac{\gamma(s_m)\Delta s_m}{dt} = -\frac{\rho}{dt} \Delta\Gamma_m \tag{9}$$

また、ある要素 s_m にかかるある基準点に対する相対圧力は次のようになる。

$$p_m = p_0 + \sum_{n=1}^m \Delta p_n = p_0 - \frac{\rho}{dt} \sum_{n=1}^m \gamma(s_n)\Delta s_n \tag{10}$$

円筒に働く流体力は、(10) 式から求まる各円筒表面圧力の積分から求める。

4) フリー渦要素の消散、融合、消滅

流体中の渦はエネルギーの供給がないと徐々に弱くなるはずである。しかし、RDVM では渦の強さを弱める過程がないため、人為的に渦のエネルギーを消散させる必要がある。また、計算ステップごとにフリー渦要素の数が増えるため、計算が進むにつれて計算負荷が増加する。離散渦法では、領域中のフリー渦要素の数を抑えるため、隣接するフリー渦要

素同士を融合させたり、有限の計算空間を設けて計算空間外のフリー渦要素を消滅させる。

離散渦法による円筒に働く流体力の数値解析における重要な外部入力パラメータとしては、円筒表面要素の数、時間ステップの大きさ、フリー渦要素の生成場所、フリー渦要素のエネルギー消散率、渦要素の融合距離、計算空間の広さが挙げられる。本研究では VIV 応答解析に重点を置き、円筒での渦剥離周期 T_v の 50 分割程度の時間ステップ ($dt \div T_v/50$) とし、計算ステップごとに円筒表面要素付近に新たなフリー渦が生成されることから計算時間ステップと流れの流速の積が円筒表面要素の大きさと等しくなるよう円筒表面の要素分割を行った。

$$U_\infty dt = \Delta s \tag{11}$$

$$M = \frac{\pi D}{\Delta s} = \frac{\pi D}{U_\infty dt} = \frac{\pi S_t T_v}{dt} \tag{12}$$

この関係を 1m/sec の一様流におかれる直径 D が 1m の円筒に適用すると、カルマン渦の剥離周期を表すパラメータであるストローハル数 $S_t = f_v D/U_\infty$ を 0.2 と仮定すると、渦の剥離周期 f_v は 0.2Hz となり、円筒表面要素の数は 32、時間ステップは約 0.1 秒となる。この条件で求めた円柱に働く流体力の時間変動を Fig.2 に示す。Fig.2 の流体力は (13) 式と (14) 式に示す無次元値である。

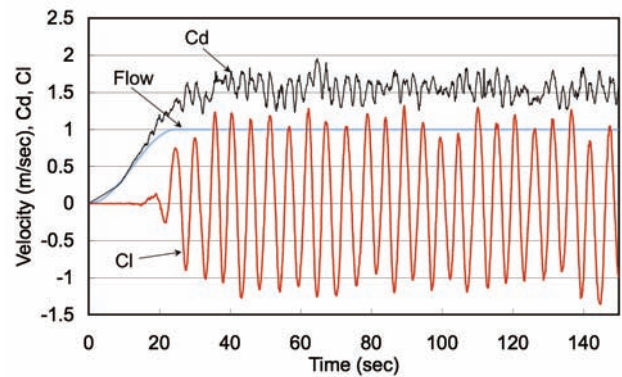


Fig.2 Time history of hydrodynamic force on 2D circular cylinder

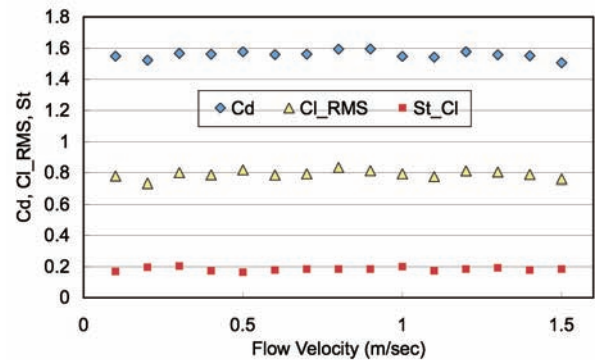


Fig.3 Hydrodynamic coefficient and Strouhal number of 2D circular cylinder with flow velocity

$$Cd = \frac{Fx}{\frac{1}{2}\rho DU_{\infty}^2} \tag{13}$$

$$Cl = \frac{Fy}{\frac{1}{2}\rho DU_{\infty}^2} \tag{14}$$

完全流体中の 2 次元計算であるため、平均抗力係数が 1.55、揚力の RMS が 0.79 と大きい、渦の剥離周期を表す揚力のストローハル数は 0.2 と実験結果と近い値となっている。完全流体中での計算でありながら渦剥離の影響を表現できていることが離散渦法の最大の特徴である。また、一様流の流速を 0.1m/sec から 1.5m/sec まで変化させたときの流体力係数とストローハル数の Fig.3 に示す。完全流体中での計算であるため、流速が流体力係数及びストローハル数に与える影響はほとんどない。流体力の数値解析結果に影響を及ぼすパラメータの 1 つが円筒表面の要素数である。Fig.4 に示すように円筒表面要素数が変化すると、離散渦法による円筒に働く流体力は変化するが、渦剥離特性を示すストローハル数はほとんど変わらない。円筒 VIV 応答解析において最も重要視されているのは、流れによる円筒からの渦剥離周期と円筒固有周期の共振であるため、計算付加が増加する実機への適用を考えると、流体力の評価精度が極端に落ちることのない範囲で円筒表面要素数を少なくした方が有利である。

円筒表面の過度分布からフリー渦要素を生成して流体空間に離すとき、フリー渦要素は円筒表面要素の中心点から法線方向のある高さに生成する。Fig.5 にフリー渦要素の生成高さが計算結果に及ぼす影響を示す。示された条件の範囲においてはフリー渦要素の生成場所が計算結果に及ぼす影響はほとんどないと思われる。フリー渦要素の生成場所を円筒表面により近づけることも計算上は可能であるが、それよりは円筒表面要素の大きさを小さくした方が物理的に妥当と思われる。また、フリー渦要素の生成場所を円筒表面からより遠く離れた場所にするのは、渦の剥離が円筒表面から起きていることから良い選択とはいえない。本研究では円筒表面要素の大きさの半分の高さにフリー渦要素を生成した。

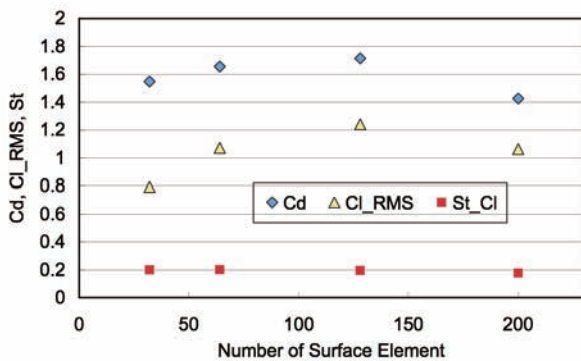


Fig.4 Effect of surface element number on hydrodynamic coefficient and Strouhal number of 2D circular cylinder with 1 m/sec of flow velocity

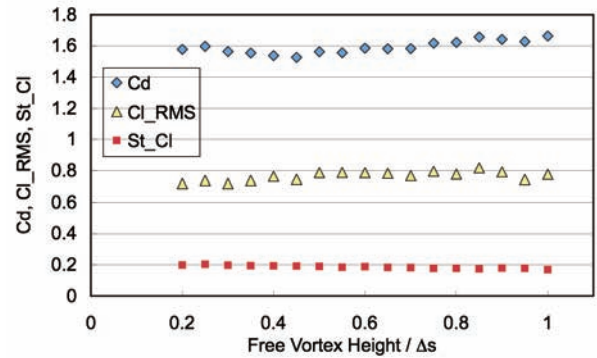


Fig.5 Effect of free vortex element generation height

計算進行中にフリー渦要素の生成予定場所付近に、既に別のフリー渦要素が存在することが考えられる。本研究ではフリー渦要素同士が隣接する場合、これらのフリー渦要素らを 1 つのフリー渦要素に融合させている。フリー渦要素の生成予定場所からフリー渦要素の融合距離より近い場所に既にフリー渦要素が存在する場合は、新たにフリー渦を生成せず、生成予定の渦の強さを既存のフリー渦要素に与えることとした。

隣接するフリー渦同士を融合させるとき、フリー渦同士が隣接しているかどうかの判定基準は経験則により決められることが多い¹¹⁾。渦同士の隣接判定基準が近すぎるとフリー渦の数があまり減らないので計算時間の短縮効果が期待できない。また、隣接判定基準が遠すぎると後流渦構造が崩れてしまう。本研究では、系列計算により、後流渦構造が維持されつつ、計算時間の短縮効果が最も期待できる、円筒直径の 1.5 倍以内では円筒表面要素の大きさの 0.15 倍、また円筒直径の 1.5 倍以外では円筒表面要素の大きさの 0.3 倍より近くにあるフリー渦同士を融合させた。

Fig.6 は計算ステップごとのフリー渦要素強さの消散率影響を示す図である。横軸は渦の剥離周期に対する渦のエネルギーが完全に消散される時間の比 (消散時間比) である。消散時間比が 1 の場合を除くと消散率の抗力係数とストローハル数への影響はほとんどない。しかし、消散率が小さくなる (消散時間比が大きくなる) につれて、揚力係数の RMS 値は渦エネルギー消散を行わない結果に近づく。渦エネルギー消散率は適用する環境条件を考慮する必要があると思われる。本研究では、円筒中心から円筒直径の 25 倍以内を計算領域とし、フリー渦要素が計算領域の外に達したとき、エネルギーがなくなるよう、フリー渦要素の渦エネルギー消散率 DR を決定した。

$$\Delta\Gamma_j^{t+dt} = \Delta\Gamma_j^t (1 - DR) \tag{14}$$

$$DR = \frac{dt}{5T_v} \tag{15}$$

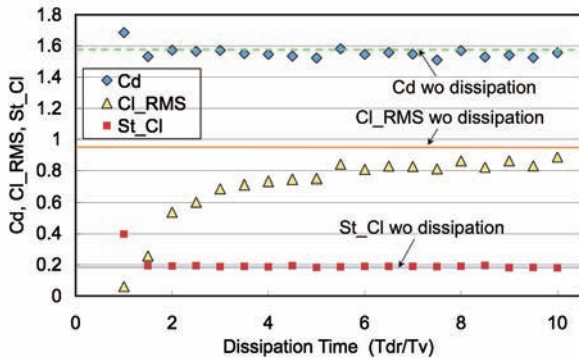


Fig.6 Effect of vortex strength dissipation rate

3. 準 3 次元法による VIV 応答解析

3.1 一様流中単一円筒の VIV 応答

海洋ライザーの準 3 次元 VIV 応答解析法では、ライザーを軸方向に要素分割して、個々のライザー要素を 2 次元円筒として流体力を求め、ライザーの運動は全要素を連成した運動方程式から求める。このとき、ライザー要素の長さや軸方向の流体力学的相関長 (correlation length) が重要となる。隣り合うライザー要素が全く異なる流体力学特性を示している準 3 次元 VIV 応答解析法の適用は困難であろう。固定する円筒を軸方向に要素分割して、各要素の流体力を求めると要素ごとに完全に独立した結果が得られる。Fig.7 に上端を固定した直径 1m、長さ 1m の円筒を軸方向に 6 要素分割して解析を行ったときの各要素の揚力及びその和を示す。また、円筒を分割無し、2 分割、4 分割、6 分割、8 分割、11 分割したときの、各要素及び全円筒の抗力係数、揚力係数、ストローハル数、及び全円筒に働く揚力に対する各要素の揚力の位相差を Fig.8 に示す。分割数が増えても、円筒全体に働く抗力や揚力変動の周期特性はほとんど変わらないが、揚力は小さくなる。円筒全体に働く揚力が小さくなる原因は各要素に働く揚力の位相差にある。各要素に働く揚力はランダムな位相を持つため、要素の数が増えると円筒全体に働く揚力は小さくなる。これらの結果からは、準 3 次元方法の円筒 VIV 解析への適用は困難と言える。

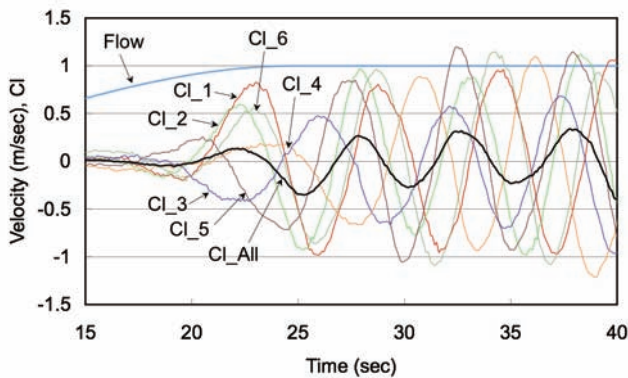
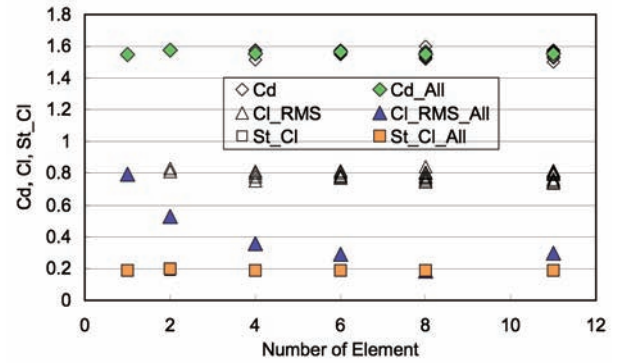
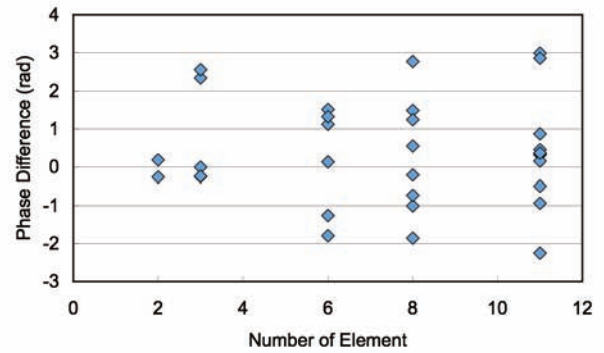


Fig.7 Time history of lift force on circular cylinder and each element



(a) Hydrodynamic coefficient and Strouhal number



(b) Phase difference

Fig.8 Effect of cylinder partition

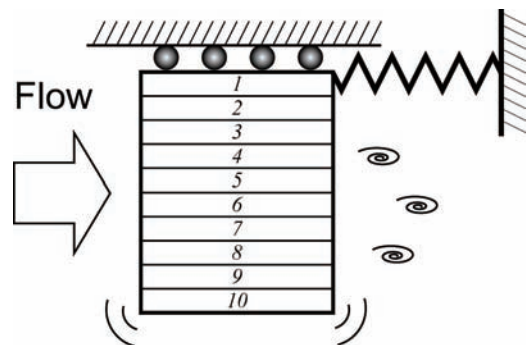
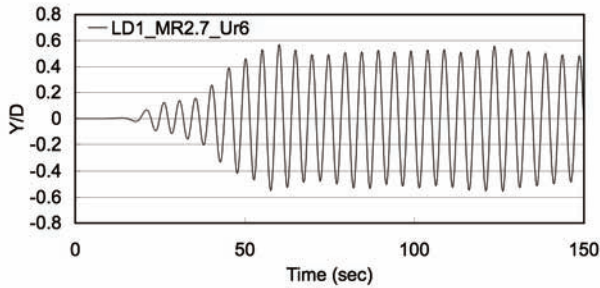


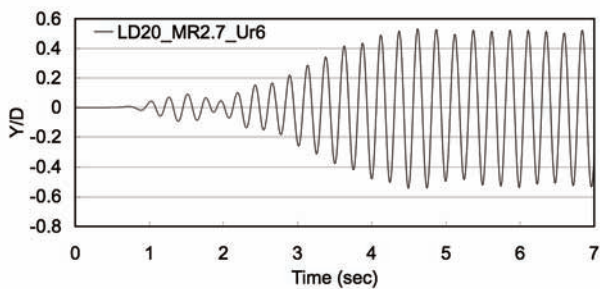
Fig.9 Conceptual diagram of circular cylinder VIV response simulation

離散渦法を適用する円筒の振動特性を調べるため、Fig.9 のような上端をばねに支持された一様流中におかれた円筒の VIV 応答解析を行った。円筒の上端は並進運動のみを許し、鉛直移動及び回転は拘束する条件で解析した。円筒を軸方向に 10 分割し、各要素の流体力を独立に求め、円筒の運動は仮想仕事理論に基づく 3 次元有限要素法による弾性構造解析から求めた¹²⁾。解析は長さ L が 1 m、直径 D が 1 m ($L/D = 1$) のアルミニウム棒 (比重 2.7)、直径が 5cm ($L/D = 20$) のアルミニウム棒、中を水で充填した直径が 5cm、肉厚 3mm のアルミニウムパイプの 3 種類の円筒を対象にして行った。また、流速 U_{flow} が 1m/sec のとき、換算流速 $U_r = U_{flow} / F_n D$ が 5 になるよう質量-ばね系の固有周波数

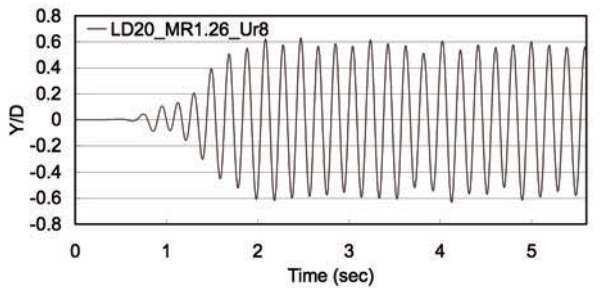
を設定した。円筒の付加質量係数を 1.0 とし、拘束条件を片持ち梁と仮定すると、各円筒の弾性応答 1 次モード固有周波数と質量-ばね系の固有周波数との比はそれぞれ約 3050、7.6、6.0 であり、取扱う振動は剛体円筒振動となる。



(a) Diameter 1 m, Mass Ratio 2.7, Ur 6



(b) Diameter 5 cm, Mass Ratio 2.7, Ur 6

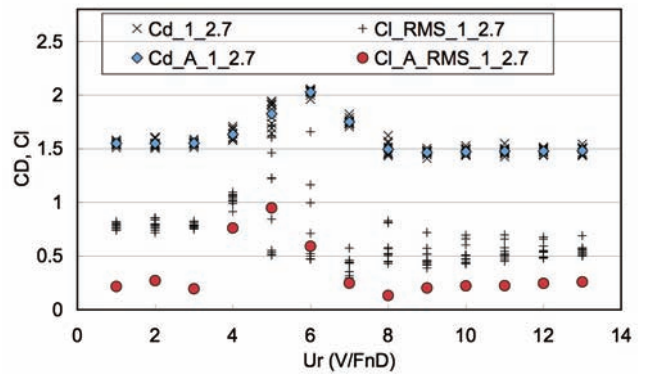


(c) Diameter 5 cm, Mass Ratio 1.26, Ur 8

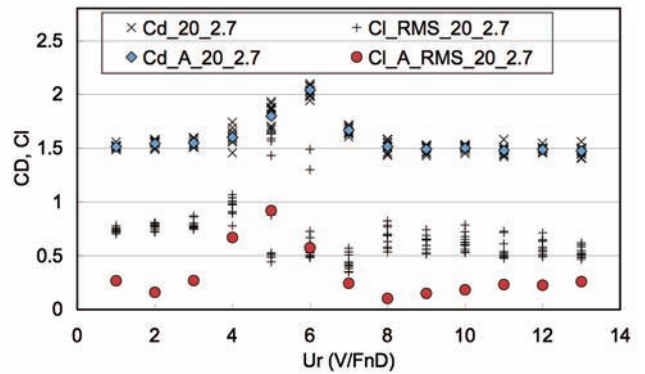
Fig.10 Time history of spring supported circular cylinder cross flow (CF) motions

Fig.10 に各円筒の振動振幅が最も大きかった条件における流れ方向と直角方向 (cross flow ; CF) の振動パターンを示す。図の中の質量比 MR は円筒の質量と、円筒と同じ体積を持つ水の質量との比である。全ての条件において安定した振動が得られている。Fig.11 に換算流速を変化させたときの各円筒の各要素に働く流体力と全流体力を示す。固定円筒の場合と同様に各要素に働く揚力の平均と円筒全体に働く揚力が異なるケースが多く見られる。ところが、MR2.7 の換算流速 5 から 7、MR1.26 の換算流速 5 から 9 においては各要素に働く揚力の平均と円筒全体に働く揚力の値が近づいている。その原因として各要素に働く揚力の位相差が考えられる。Fig.12 に円筒全体に働く揚力に対する各要素に働く流体力の位相差を示す。MR2.7 の換算流速 5 から 7、MR1.26 の換算流速 5 から 9 において、各要素に働く揚力の位相が揃

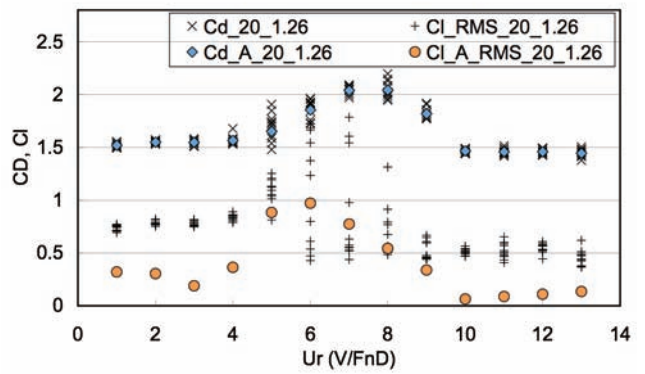
えていることがわかる。以上のことから、MR2.7 の換算流速 5 から 7、MR1.26 の換算流速 5 から 9 において、各要素に働く揚力の位相が揃い、円筒全体に働く揚力と各要素に働く揚力の平均値が等しくなる。即ち、ある条件においては準 3 次元解析の結果と 2 次元解析の結果が同等な結果になることを意味する。円筒に働く流体力の 3 次元効果が明確になっていない現状においては、本研究で提案する準 3 次元 VIV 応答解析方法の有効性について明確な答えを出すのは困難である。しかし、ここで得られた結果から海洋ライザーの挙動解析において、要素間の相互作用が極めて重要であることは確かである。



(a) Diameter 1 m, Mass Ratio 2.7



(b) Diameter 5 cm, Mass Ratio 2.7



(c) Diameter 5 cm, Mass Ratio 1.26

Fig.11 Hydrodynamic coefficient of circular cylinder and each element

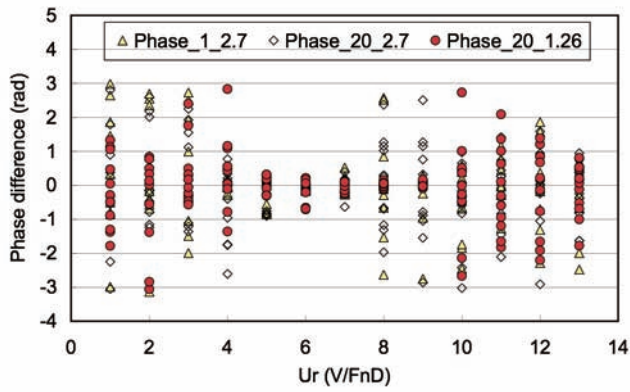
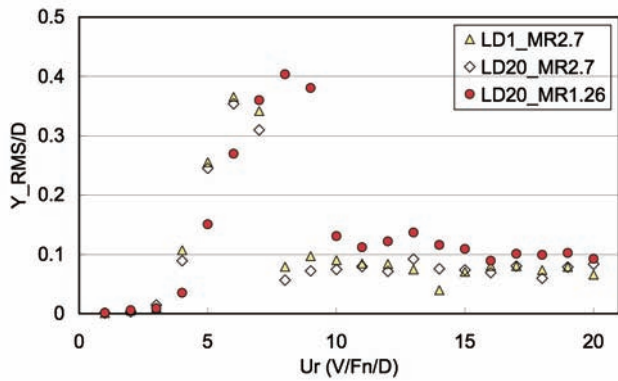
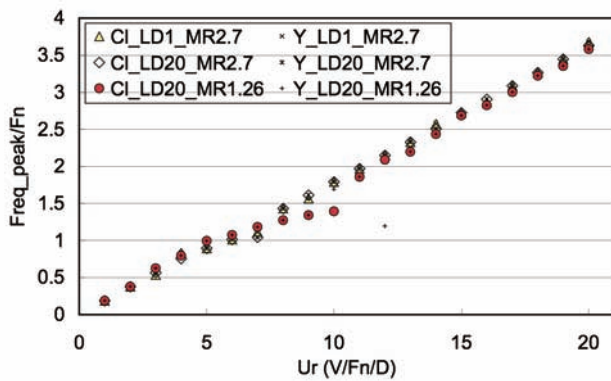


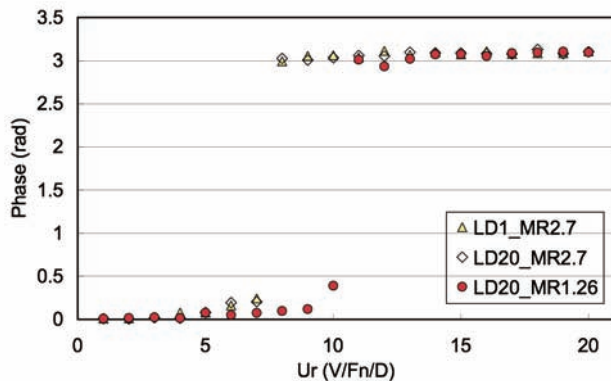
Fig.12 Phase difference of total lift force and each element



(a) RMS of CF displacement



(b) Oscillation frequency of lift force and CF displacement



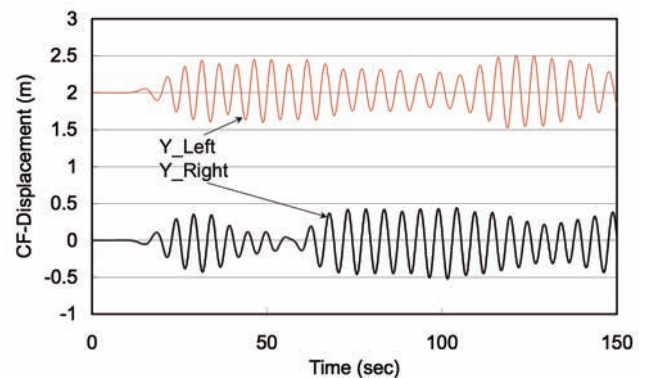
(c) Phase difference of lift force and CF displacement

Fig.13 Characteristics of circular cylinder VIV response

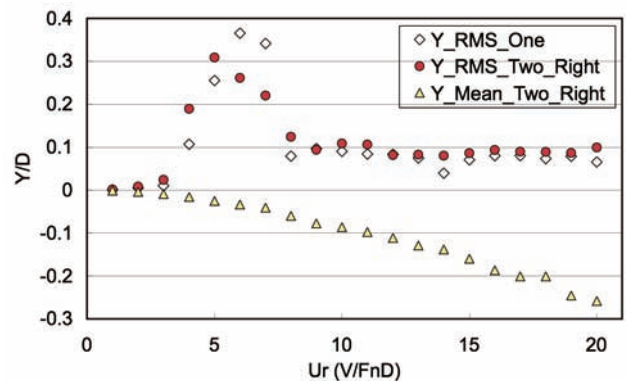
Fig.13 に円筒の CF 方向の振動振幅、揚力及び CF 方向変位の振動数、揚力と CF 方向変位の位相差を示す。これらの結果は、実験で明らかになっている²⁾、渦剥離周期と系の固有周期が等しくなる共振点付近での振動振幅の増大、ロックインと言われる渦剥離周期の拘束、ロックイン領域外での揚力と CF 方向変位との位相差の急激な変化など、VIV 応答の最も重要な特徴そのものであり、準 3 次元 VIV 応答解析方法の有効性を示すものである。

3.2 一様流中 2 つ円筒の VIV 応答

離散渦法のもう 1 つの特徴は拡張性である。前述のように離散渦法の 3 次元への拡張は容易ではないが、2 次元空間での拡張性は高い。複数の円筒を取り扱う問題や円筒に付加物がある場合等への拡張が容易である。Fig.14 に直径 1 m の 2 つの円筒を、3.1 節の 1 つ円筒の場合と同じ下端フリーの条件で、流れ方向に直角においた場合の VIV 応答特性を示す。2 つの円筒の固有周期は同じであり、中心距離は円筒直径の 2 倍である。



(a) Time history of CF displacement, Ur5



(b) Mean and RMS value of CF displacement

Fig.14 CF displacement of two circular cylinders with 2 diameter of initial distance; diameter 1 m

Fig.14(a)は、CF 方向振幅が最も大きくなる換算流速 5 での CF 方向変位の時間変動である。2 つ円筒間の相互作用がよく

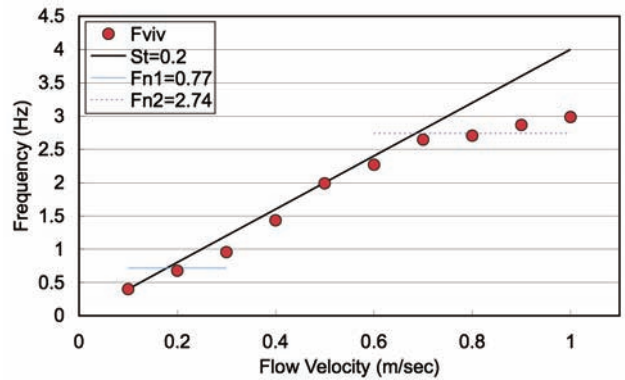
現れている。円筒はもう1つの円筒の影響を受けながら振動振幅が大きくなったり、小さくなったりする。片側の円筒の振幅が大きくなると、もう1つの円筒の振幅が小さくなる。Fig.14(b)は初期中心(0,0)円筒のCF方向平均変位“Y_Mean_Two_Right”と平均変位に対する変動量の振幅“Y_RMS_Two_Right”である。参考のために1つ円筒の振動振幅“Y_RMS_One”を一緒に示す。換算流速と円筒の振動振幅との関係は1つ円筒の場合とほぼ同様であるが、両円筒の相互作用により、換算流速4、5の共振領域では1つ円筒の場合に比べて振動振幅が大きくなり、換算流速6、7のロックイン領域では振動振幅が小さくなっている。換算流速がさらに大きくなりロックイン領域を外れると、振動振幅に両円筒の相互作用による影響はほとんど現れず、振動振幅は1つ円筒の場合と同等の値となる。しかし、両円筒間の中心距離(初期中心間距離+“Y_Mean_Two_Right”絶対値の2倍)には両円筒の相互作用による影響が顕著に現れ、換算流速の2乗に比例して中心間距離が広がる。

3.3 一様流中弾性構造物のVIV応答

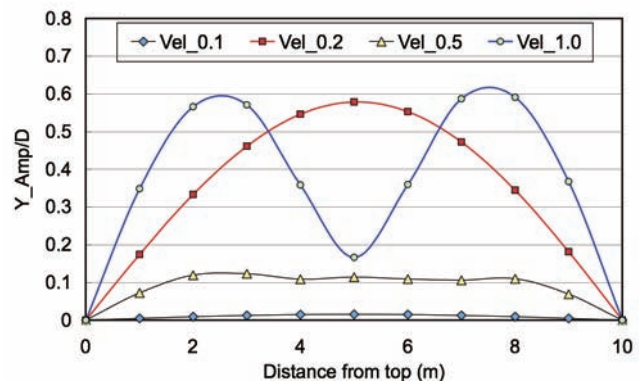
3.1、3.2節においては準3次元VIV応答解析方法による剛体円筒VIV応答特性について考察を行った。しかし、海洋ライザーのような直径に比べて長さが長い構造物のVIVは弾性応答を伴う振動現象である。この節では、準3次元VIV応答解析方法の弾性応答を伴う振動現象解析への有効性を確認するため、弾性応答を伴う構造物のVIV応答解析を行った。解析に用いた構造物の中を水で充填した直径が5cm、肉厚3mmのアルミニウムパイプで、長さは10m、鉛直方向に設置、両端は回転のないピンジョイントで拘束し、上端には構造物の水中重量の1.5倍の張力をかけた。付加質量係数を1.0と仮定してTensioned Beam理論¹³⁾で求めた、構造物の1次モード固有振動数は0.77Hz、2次モード固有振動数は2.47Hzである。流れによる渦剥離周期が、構造物の1次及び2次モードの固有周期の前後になる、流速0.1m/secから1.0m/secの条件で解析を行った。構造物は軸方向に10要素に分割し、接点での変位を求めた。

Fig.15に各流速での構造物CF方向の振動数と各接点の振動振幅を示す。CF方向の振動数は両端と2次モード時の節点を除いて、全ての接点で同じ値を示す。流速ごとのCF方向の振動数は、基本的にストローハル数0.2に相当する振動数を示しているが、各構造物固有振動数に相当する振動数を超えた、いわゆるロックイン領域では、構造物の固有振動数に拘束されている値を示している。CF方向の軸方向形状モードは、渦剥離周期が構造物の1次モード固有周期付近で1次モード形状を、2次モード固有周期付近では2次モード形状となり、1次モードと2次モードの間となる流速

0.5m/secでは1次モード形状と2次モード形状が混在する。CF方向の振動振幅は、剛体円筒の場合と同様に、共振点付近で極大値を示し、振動振幅と直径との比は剛体円筒振動の場合とほぼ同じであった。



(a) Oscillation frequency of CF displacement



(b) Amplitude of CF displacement

Fig.15 VIV response of 3D flexible structure

4. 結 言

本研究では、2次元要素の流体力解析に離散渦法を用い、有限要素法による弾性構造解析により3次元運動解析を行う、Strip理論による準3次元VIV応答解析方法を提案し、離散渦法の利用方法、利用時の注意点、Strip理論による3次元VIV応答解析の有効性及びその特性を調査した。

Strip理論を用いた3次元VIV応答解析の最も重要なところは、軸方向の流体力学的相関長である。各要素にて求めた流体力の要素間の相関が実現象と全く異なる結果を示すのであれば、Strip理論の適用は困難である。本研究で提案する方法では、軸方向に分割した各要素の流体力を独立に解析するため、求められる流体力の位相がランダムであり、3次元挙動解析への適用は困難と考えられる。実際、固定円筒に対して求めた、各要素に働く揚力の平均と全円筒に働く揚力が異なる値を示している。しかし、振動円筒の固有周期と流

れによる渦剥離周期が等しくなる共振点付近では、独立に求めた各要素の流体力の位相が揃い、各要素揚力の平均値と全円筒に働く揚力が等しくなる。即ち、2次元要素の流体力解析と3次元運動解析の組み合わせにより、VIV 応答解析を行う準3次元 VIV 応答解析は共振点付近では有効であるが、それ以外の領域では有効ではない可能性が高い。

離散渦法と有限要素法による準3次元 VIV 応答解析は、小さい計算負荷で3次元 VIV 応答の直接解析を可能にする手法である。固有周期と渦剥離周期が等しくなる共振のような限られた条件においてのみ有効性が確認されたが、振動振幅が最も大きくなる共振点付近での VIV 応答解析に有効であることは、工学的側面から十分な性能と言える。

謝 辞

本研究で提案する VIV 応答解析方法では流体力の解析に離散渦法を採用している。離散渦法の利用においてご指導していただいた李昶燮先生に御礼を申し上げる。

参 考 文 献

- 1) Cooper, C., Forristall, G.Z., Joyce, T.M.: "Velocity and Hydrographic Structure of Two Gulf of Mexico Warm-Core Rings", *J. Geophys. Res.*, Vol. 95, No. C2, pp. 1663-1679, 1990
- 2) Bearman, P.W. : "Vortex Shedding from Oscillating Bluff Bodies", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 16, pp. 195-222, 1984
- 3) Williamson, C.H.K. and Govardhan, R.: "Vortex-Induced Vibrations", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 36, pp. 413-55, 2004
- 4) Vandiver, J.K: "SHEAR7 Program Use Manual", Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1999
- 5) Triantafyllou, M.S.: "VIVA Extended User's Manual", Massachusetts Institute of Technology, Department of Ocean Engineering, Cambridge, MA, 2003
- 6) MARINTEK: "VIVANA -Theory Manual", 2005
- 7) Blackbourn, H.M., Govardhan, R.N. and Williamson, C.H.K.: "A Complementary Numerical and Physical Investigation of Vortex-Induced Vibration", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 15, pp. 481-488, 2001
- 8) Al-Jamal, H. and Dalton, C.: "Vortex Induced Vibrations using Large Eddy Simulation at Moderate Reynolds Number", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 19, pp. 73-92, 2004
- 9) Yamamoto, C.T., Fregonesi, R.A., Meneghini, J.R., Saltara, F. and Ferrari, J.A.: "Numerical Simulations of Vortex-Induced Vibration of Flexible Cylinders", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 19, pp. 467-489, 2004
- 10) Chorin, A.J.: "Numerical study of slightly viscous flow", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 57, pp. 785-796, 1973
- 11) Lewis, R.I.: "Vortex element methods for fluid dynamic analysis of engineering systems", Cambridge, 1991
- 12) 鈴木英之、吉田宏一郎: "水中線状構造の挙動解析法とその評価について"、*日本造船学会論文集*, 第168号、pp.379-387、1990
- 13) Timoshenko S. et al: "Vibration Problems in Engineering", John Wiley & Sons, 1974

