

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289312

研究課題名(和文) 海洋再生可能エネルギー利用のための洋上浮体VIM解析プログラム開発に関する研究

研究課題名(英文) A Study on Development of Numerical Code for VIM analysis of Floating Structure for Ocean Renewable Energy

研究代表者

平林 紳一郎 (HIRABAYASHI, Shinichiro)

東京大学・新領域創成科学研究科・講師

研究者番号：90463877

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：格子ボルツマン法に基づく3次元流体-物体連成運動解析数値計算コードを開発した。円柱、楕円柱、角柱をそれぞれ組み合わせた浮体について、流れと直交方向成分の振動変位が角柱において最も小さくなることが分かった。さらに、前方カラムから放出された渦と後方カラムの衝突が渦励起運動を抑制する傾向が捉えられた。これらの結果を検証するため、曳航試験水槽にて単独または4本カラム浮体を曳航し、各カラムに作用する3成分の力を計測した。

研究成果の概要(英文)：A numerical code for 3D coupled analysis of fluid-structure interaction was developed based on the lattice Boltzmann method. The cross-flow displacements were compared among floating structures with circular, ellipsoidal, and square columns and it was found that the floater with square column has the minimum amplitude. It was also found that interaction between the vortex shed by the front column and the rear column suspend the vortex-induced motion. To validate these findings, single column and four columns were towed in the towing tank and the hydrodynamic force was measured.

研究分野：工学

キーワード：VIM 浮体構造物 格子ボルツマン法 流体力

1. 研究開始当初の背景

広大な EEZ を有する日本にとって、膨大な資源やエネルギーの存在が期待される海洋の役割はますます重要なものとなってきている。特に東日本大震災後のわが国のエネルギー政策の見直しに伴い、再生可能エネルギーである海洋エネルギーには注目が集まっている。海洋再生可能エネルギーには海流・潮流・波力・海洋温度差・洋上風力などがあり、それぞれの特徴に合わせて効率良くエネルギーを回収する洋上発電プラントの設計・開発が急務となっている。

洋上では海流や潮流、波などの存在によって一般に構造物は陸上よりも大きな外力を恒常的に受けやすい。流れの中に構造物が位置するとき、境界層が剥離してできた後流渦によって構造物に運動が励起される。この現象は Vortex Induce Motion (VIM, 渦励起運動) と呼ばれ、浮体構造物の安定性や安全性に対する懸念材料の一つとなっている。特に渦の放出振動数が構造物の固有振動数に近い場合、前者が後者に引き込まれて同調するという現象（ロックイン現象）が起こることが知られている。一度ロックイン状態となると浮体の運動振幅が増幅し、浮体構造物の位置保持に用いられている係留索の損傷、破断につながる可能性もあるため、VIM 現象の把握とその同調回避は構造物設計における重要な課題である。

VIM 現象は流体運動と浮体構造物の運動との相互干渉運動であり、船舶海洋工学の分野では流体—構造連成解析問題として数値計算法の開発が行われてきた。構造物周りの流場を詳細に表現するため、流体解析には物体境界に沿った要素格子を配置する境界適合格子を用いるのが一般的である。物体運動を流体の相対運動として扱うことで比較的少ない要素数で物体周りの流体を精度良くすることができるという利点がある。しかしながらこの手法では自由表面の影響や複数物体存下での渦干渉、物体の変形などのように物体基準の相対運動として記述できない現象の効果を扱うことができず、応用性に課題を有している。一方、物体形状に関係なく格子を等間隔に配置する単純矩形格子を用いる場合、物体の運動に伴い固液境界を移動させることでこれらの問題は生じない。物体に働く流体力を精度良く求めるためには物体境界近傍の格子解像度を上げる必要があり、要素数は多くなるが、座標変換を有しないため要素当たりの計算量は少なくなる。物体境界の扱いが煩雑かつ精度が良くないため、これまでの研究では単純矩形格子を用いることはほとんどなかった。

2. 研究の目的

本研究では、任意形状の浮体構造物と流体との相互運動作用を精度良く再現する 3 次元流体—構造連成解析数値計算コードを開発する。数値計算の検証として水槽実験を行い、

流体中に置かれた浮体模型に作用する流体力の計測と PIV による流れの可視化を行う。

本研究の特色として、流体の支配方程式である Navier-Stokes 方程式を解く従来型の数値計算法に代わり、格子ボルツマン法を用いて流体解析を行う。格子ボルツマン法は流体を粒子の集合と捉え、空間上に離散化された格子点上でボルツマン方程式を解く比較的新しい数値流体解析法である。従来の流体解析手法に比べて界面の取り扱いが極めて簡便であるという特徴を有している。また、支配方程式に微分項がないため、精度は格子間隔のみで決まり、十分細かい格子を用いることで流体力を精度良く見積もることが可能である。本研究ではこのような格子ボルツマン法の利点を生かし、単純矩形格子を用いて VIM 解析を行う。

3. 研究の方法

(1) 流体—構造連成解析プログラムの開発

本研究では次の BGK モデルを用いた格子ボルツマン方程式を支配方程式とする。

$$f_{\alpha}(x + e_{\alpha}\delta t, t + \delta t) - f_{\alpha}(x, t) = -\frac{1}{\tau} [f_{\alpha}(x, t) - f_{\alpha}^{eq}(x, t)]$$

f_{α} は分布関数を表し、本研究では Fig. 1 に示すように、 $(\alpha = 1, 2, \dots, 15)$ の 3 次元 15 方向 (D3Q15) モデルを用いる。

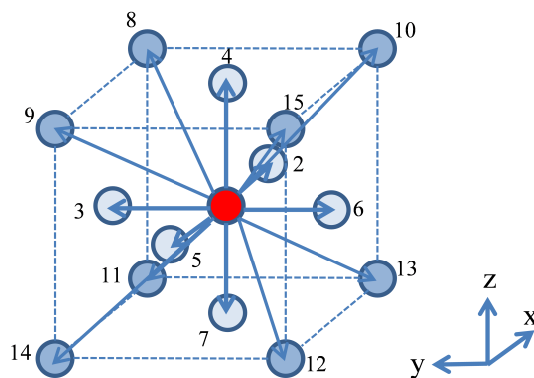


Fig. 1 D3Q15 モデル

f_{α}^{eq} は平衡分布関数を示し、次式で表される。

$$f_{\alpha}^{eq} = w_{\alpha}\rho \left[1 + \frac{3}{c^2} e_{\alpha} \cdot u + \frac{9}{2c^4} (e_{\alpha} \cdot u)^2 - \frac{3}{2c^2} u \cdot u \right]$$

ただし、 u は流速を、 ρ は密度を示し、 w_{α} は以下のように与えられる。

$$w_{\alpha} = \begin{cases} 2/9, & \alpha = 0 \\ 1/9, & \alpha = 2, 3, 4, 5, 6, 7 \\ 1/72, & \alpha = 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 \end{cases}$$

τ は緩和係数と呼ばれ、分布関数の平衡値である平衡分布関数への収束の速さを示すパラメータである。緩和係数は流体の粘性影響を司っており、流体の物性値である動粘性係数 ν とは以下の関係にある。

$$\nu = \left(\frac{2\tau - 1}{6}\right) c^2 \delta t$$

ここで c は音速を、 δt は計算時のタイムステップ幅をそれぞれ表す。

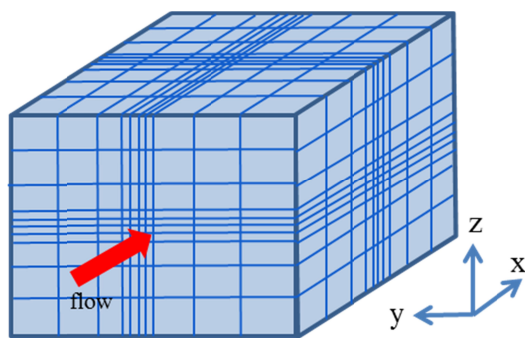
本研究で用いるモデルの計算領域は、 x, y, z 空間の直方体領域を設定している。その中で、 x 方向上流の境界に流入境界、それ以外の境界に流出境界を設定している。

流入境界の設定方法については、初期条件として設定された分布関数

$$f_\alpha = f_\alpha^{eq}(\rho_{water}, \mathbf{u}_{target})$$

を保存しておき、この分布関数を x 方向上流の境界に位置する格子点に毎ステップ与えている。ここで、 ρ_{water} は水の初期密度、 \mathbf{u}_{target} は流れ場の一様流速を意味する。流出境界については、境界に向かう方向成分における速度勾配および圧力勾配をゼロにするために、隣接する格子点に同一の分布関数を与えている。

格子は矩形格子を用い、**エラー! 参照元が見つかりません。**のように物体からある程度離れた地点より、格子間隔を等比数的に広げることによって、格子点数を増やすことなく格子間隔を広げる機能を備えている。格子間隔を δx よりも大きく取った場合においても、分布関数情報 δx だけしか並進しないため、格子点における分布関数には補完を施す必要がある。具体的な補完手法については橋浦ら¹⁾を参照されたい。



エラー! 参照元が見つかりません。 計算領域の模式図

物体境界条件については、流体ノードから物体ノードに向かう分布関数の物体壁での“跳ね返り”を推定する、Meiら²⁾によるBounce-back法を用いた。流体ノード x_f から物体境界 w に向かう分布関数を $f_\alpha(x_f, t)$ 、物体ノード x_b からの跳ね返り分布関数の推定値を $f_\alpha(x_b, t)$ とすると、点 w において物体が受ける力積は

$$F_w \delta t = e_\alpha [f_\alpha(x_f, t) + f_\alpha(x_b, t)]$$

で表される。Bounce-back計算が行われる全

ての物体境界における F_w を積算することで、物体が受ける流体力を算出することができる。

(2) 物体周りの流れの可視化実験

円筒の端部領域や自由表面領域がどのように流れに影響しているのか考察する為に、回流水槽にて固定円筒周りの流速分布をPIVにより計測することで、円筒の水平面(xy平面)と流れに平行な鉛直平面(xz平面)での計測を行った(Fig. 3)。円筒は三種類用い、その直径は26.0 mm、38.0 mm、60.0 mmで長さは16 cmである。回流水槽の流速は0.1~0.26 m/sに設定していたので計測の Re は2800~15700程度である。

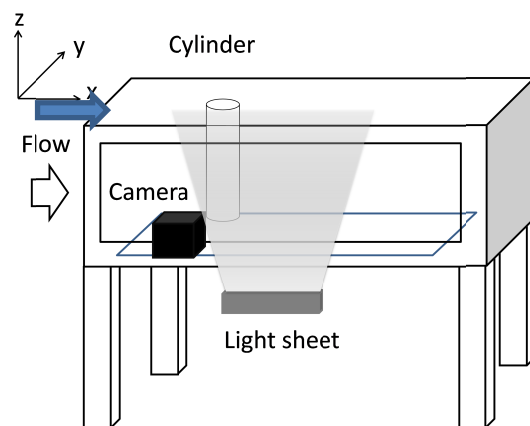


Fig. 3 PIV実験の模式図(xz平面)

(3) 物体に作用する流体力計測実験

曳航水槽にて半没水で流れ中に置かれた固定円筒に加わる流体力の計測を行った(Fig. 4)。本実験では三分力計を用いて、円筒に加わる流体力を計測した。用いた円筒の直径は0.2 m、0.3 m、0.4 mの3種類である。没水部のaspect比(AR)が0.25、0.5、1.0、1.25となるように円筒を設定し、Reynolds数(Re)が 4.0×10^4 、 1.2×10^5 、 1.6×10^5 となるように、さらにFroude数(Fr)が0.1、0.2、0.4となるように流速を設定して計測を行った。三分力計によって計測された時系列データを定常成分と変動成分に分離することで評価を行った。定常成分は平均値を用い、変動成分は平均値周りの二乗平方根で計算した。また、計測した時系列データから周波数解析を行い、その振動の原因となる現象を探った。

また、同様の流体力計測を4本の円柱および角柱で構成される浮体模型について行った。カラム直径(角柱の場合は円等価直径)は0.25 mで、カラム間距離は直径の3倍および4倍の2通りとした。三分力計は4本のカラムそれぞれに取り付け、各カラムに作用する力を独立に計測した。模型はばねにより係留することで流体力による運動を許容する構成とし、2台のカメラで撮影することで運動変位を定量化した。三分力計の計測値には模型の運動に起因する慣性力が入っている

ため、運度変位を用いて慣性力の影響を除去し、流体力を求めた。

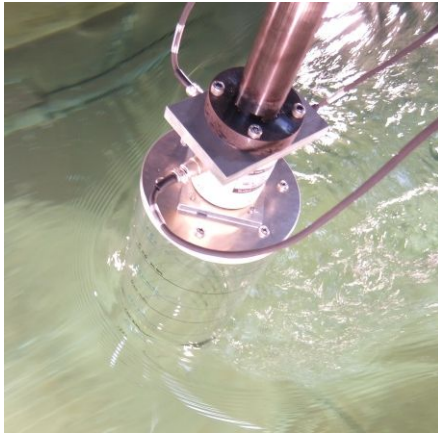


Fig. 4 円筒曳航実験の様子

4. 研究成果

(1) 数値計算による2次元円筒 VIM の再現
 作成した流体—構造連成解析プログラムを用いて $Re = 500$ の2次元円筒周りの計算を行なった。円筒は流れに直交方向 (y 方向) のみに動くものとし、線形ばねで係留した。Fig. 5 に振動振幅と周波数比の関係を示す。渦放出周波数 f_e と系の固有周波数 f_n が近くなると共振が起こり、振動振幅が大きくなる現象が再現されている。また、Fig. 6 に抗力係数・揚力係数と周波数比の関係を示す。共振域においては抗力係数が増大し、揚力係数の変動成分は減少する傾向が見られる。

Fig. 7 に瞬時の渦度コンターを示す。非共振時には 2S モードの渦の放出パターンが見られるが、共振時には2列の渦列が形成されていることが分かる。

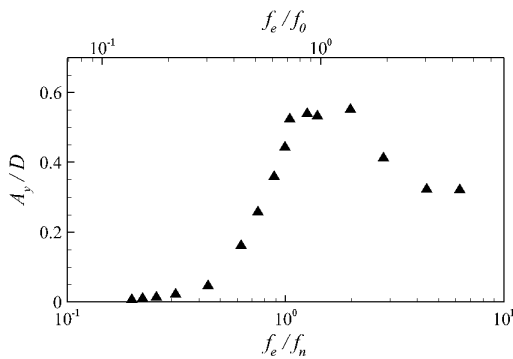


Fig. 5 y 方向振動振幅と周波数比の関係

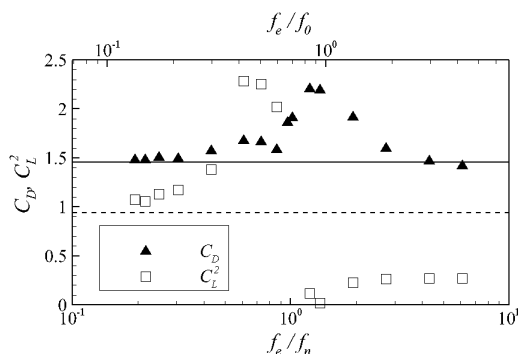
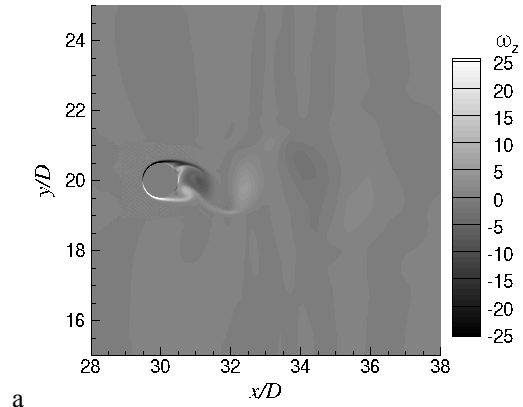
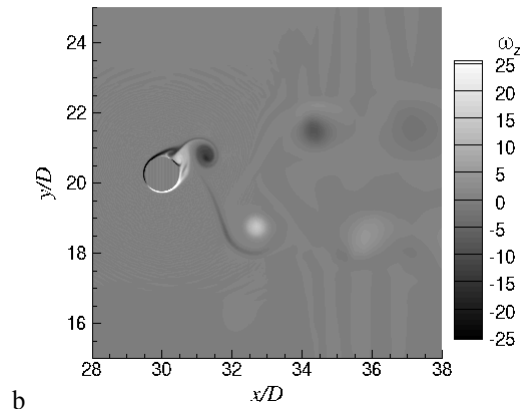


Fig. 6 抗力係数・揚力係数と周波数比の関係



a



b

Fig. 7 瞬時の渦度コンター、(a) $f_e/f_n = 0.20$ (非共振時) (b) $f_e/f_n = 1.25$ (共振時)

(2) 水槽実験による低 aspect 比固定円筒周りの流場に関する考察

PIV による流場計測の結果、円筒後方に巻き上げた流れの一部が再循環し、円筒に向かって逆流する現象が確認された。この流れが円筒を押し戻すことで抗力が低減をもたらすと考えられる。この逆流は円筒の aspect 比 (AR) および自由表面の影響を大きく受けることが分かった。Fig. 8 に逆流域の流速の最小値と Fr の関係を示す。 Fr が大きいほど自由表面で波が立ちやすくなり、逆流が弱くなる。

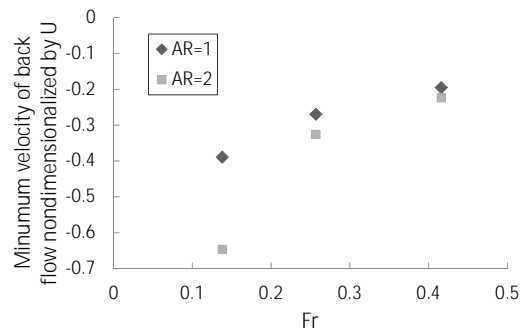


Fig. 8 逆流域の最小流速と Fr の関係

Fig. 9 に曳航試験により求めた抗力・揚力係数と円筒の AR の関係を示す。抗力係数の定常成分 (CD) は AR が大きくなると増加するが、これは円筒端部で発生する再循環流の影響が相対的に小さくなり、逆流による抗力の低減効果が弱くなるためであると考えられる。抗力係数および揚力係数の変動成分 (CDrms, CLrms) については AR の増加とともに減少しているが、この理由としては円筒端部から発生する端部渦による影響が相対的に小さくなること、渦の 3 次元性が強まることで力がキャンセルすることなどが挙げられる。

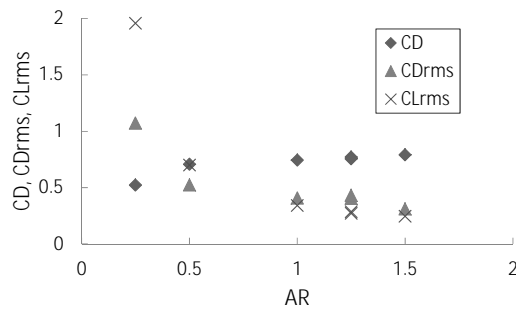


Fig. 9 抗力・揚力係数と AR の関係

(3) 4本カラム浮体のVIM挙動シミュレーション

より応用的な例として、4本のカラムで構成される浮体について、VIM挙動を再現した。問題は二次元で、 x 方向および y 方向に線形ばねにより係留した。カラム断面は円その他、円等価直径 D の等しい正方形および楕円について計算を行った。カラム中心間距離 L/D を4, 6, 8の3パターンとした。換算流速は5.2である。

Fig. 10 に円形カラム浮体周りの渦度コンターを示す。流れの向きは左から右で、上流側のAおよびCのカラムから発生した渦が下流側のBおよびDのカラムに向かって移流され、衝突している現象が見られる。このようなカラム間の干渉が流場に影響を及ぼし、さらに4つのカラムはお互いに接続され相対的な位置関係は変わらないため、浮体全体挙動としては複雑な挙動となる。

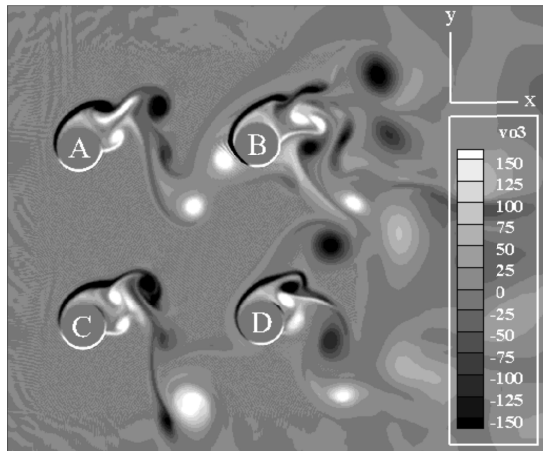


Fig. 10 円形カラム浮体周りの渦度 ($L/D = 4$)

Fig. 11 にカラム形状毎の振動振幅の比較を示す。形状の比較では、正方形カラムが最も振動変位が小さくなるのが分かる。これは今回対象とした換算速度は共振に近い条件であり、円形および楕円カラムでは共振が起こっているが、渦の放出場所が角に限定されている正方形カラムでは、共振が起きにくいせいであると考えられる。また、特に $L/D = 6$ の条件において振動が抑制されているが、このとき渦間の無次元距離は6.06で、カラム間距離と近い値となっている。よって、下流側のカラムは周期的にほぼ同じ位置で渦と衝突しており、結果的に振動変位が抑制されている可能性が示唆される。

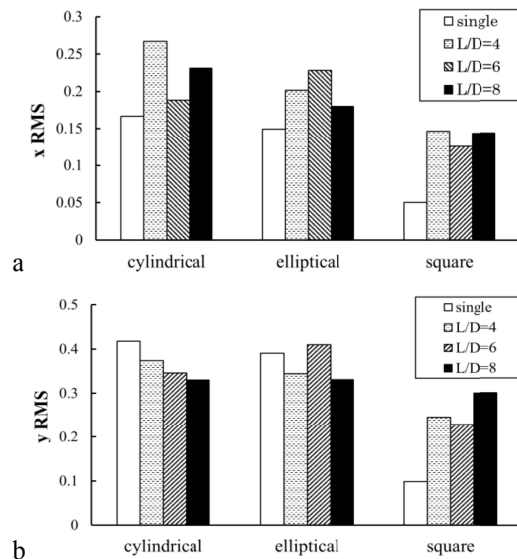


Fig. 11 カラム形状毎の振動振幅の比較、(a) x 方向変位、(b) y 方向変位

(4) 4本カラム浮体の曳航実験による流体力計測

円形および正方形のカラム4本より構成される浮体模型の曳航実験における力の計測結果より、浮体傾斜および慣性力の影響を補正し、各カラムに作用する流体力を Fig. 12 のように求めた。上流側に位置するカラムAおよびBの後流に位置するカラムCおよびDの効力が小さくなるのは数値計算と同様の結果である。また、鉛直方向の力がカラムAおよびBで上向きに、カラムCおよびDで下向きに出ているのは、浮体が流体力を受けて前傾しており、前方カラムに浮力が、後方カラムに重力がそれぞれ発生しているためである。

Fig. 12 に示す実験ケースはVIMの共振条件であり、流れ方向および流れ直交方向の流体力が周期的になっていることが分かる。カラムAおよびBについて抗力係数の平均値を求めると約2程度となり、通常の固定円筒周りの抗力係数 (~ 1) よりもずっと大きい。Fig. 6 に見られる共振時の抗力係数の増大と整合性がとれている。

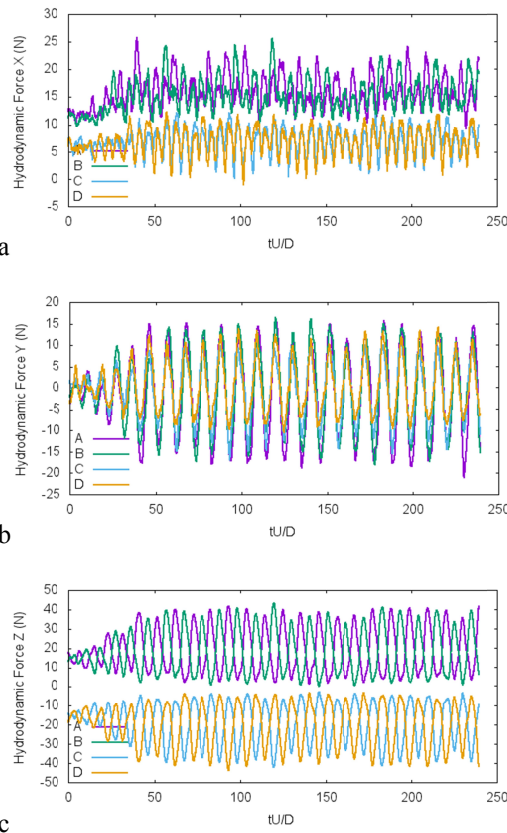


Fig. 12 各カラムに作用する流体力 ($L/D = 3$, $U = 0.5 \text{ m/s}$, $k = 20 \text{ N/m}$) (a)流れ方向、(b)流れ直交方向、(c)鉛直方向

参考文献

- 1) 橋浦穰、平林紳一郎、鈴木英之、渦励起運動に対する浮体形状およびカラム配置の影響、日本船舶海洋工学会論文集、22 (2015)、pp.75-82.
- 2) R. Mei, L. Luo, and W. Shyy, "An accurate curved boundary treatment in the lattice Boltzmann method", Journal of computational physics, 1999, pp.307-330.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計3件)

S. Hirabayashi, Numerical analysis of vortex-induced motion of two-dimensional circular cylinder by lattice Boltzmann method, Journal of Marine Science and Technology, 査読有, in press.

H. Fukuoka, S. Hirabayashi, H. Suzuki, The effects of free surface and end cell on flow around a finite circular cylinder with low aspect ratio, Journal of Marine Science and Technology, 査読有, 21 (2016), pp.145-153.

橋浦穰、平林紳一郎、鈴木英之、渦励起運動に対する浮体形状およびカラム配置の影響、日本船舶海洋工学会論文集、

査読有、22 (2015)、pp.75-82.

〔学会発表〕(計7件)

橋浦穰、平林紳一郎、鈴木英之、渦励起運動に対する浮体形状・配置の影響に関する数値的研究、日本船舶海洋工学会春季講演会、2015年5月25日、神戸国際会議場(神戸)。

福岡玄貴、平林紳一郎、鈴木英之、低Aspect比円筒周り流れに対する端部および自由表面影響、日本船舶海洋工学会春季講演会、2015年5月25日、神戸国際会議場(神戸)。

A. Miyamura, S. Hirabayashi, H. Suzuki, Numerical simulation of vortex-induced motion with free surface by lattice Boltzmann method, 33rd International Conference on Ocean, Offshore, and Arctic Engineering, 2014年6月9日, San Francisco (米国)。

平林紳一郎、宮村明孝、福岡玄貴、鈴木英之、自由表面を考慮した円筒型浮体のVIM挙動に関する研究、日本船舶海洋工学会春季講演会、2014年5月27日、仙台国際センター(仙台)。

宮村明孝、平林紳一郎、鈴木英之、自由表面を含む格子ボルツマン法によるVIM挙動解析手法の開発、第24回海洋工学シンポジウム、2014年3月14日、日本大学駿河台キャンパス(東京)。

S. Hirabayashi, A. Miyamura, H. Suzuki, Numerical Simulation of Vortex-Induced Motion of Floating Body by Lattice Boltzmann Method, International Symposium on Marine and Offshore Renewable Energy, 2013年10月29日、笹川記念ホール(東京)。

S. Hirabayashi, H. Suzuki, Numerical study on vortex induced motion of floating body by lattice Boltzmann method, 32nd International Conference on Ocean, Offshore, and Arctic Engineering, 2013年6月12日, Nantes (フランス)。

6. 研究組織

(1)研究代表者

平林 紳一郎 (HIRABAYASHI, Shinichiro)
 東京大学大学院新領域創成科学研究科・講師
 研究者番号：90463877

(2)研究分担者

鈴木 英之 (SUZUKI, Hideyuki)
 東京大学大学院新領域創成科学研究科・教授
 研究者番号：00196859

尾崎 雅彦 (OZAKI, Masahiko)

東京大学大学院新領域創成科学研究科・教授
 研究者番号：30529706