

## 格子 Boltzmann 法による浮体の VIM 挙動解析法の開発

## A numerical study on Vortex-Induced Motion of floating body by lattice Boltzmann method

学籍番号 47-126682 宮村 明孝

指導教員 鈴木 英之 教授, 平林 紳一郎 講師

(平成 26 年 2 月 4 日発表予定)

Keywords: 格子 Boltzmann 法, VIM, 浮体, 流体力, 自由表面

Keywords: Lattice Boltzmann Method, Vortex-Induced Motion, Floating Body, Fluid Force, Free Surface

## 1. 序論

風力発電は発電時の二酸化炭素排出が無いことに加え、風は枯渇することのない再生可能エネルギーであるという点において、地球温暖化問題や化石燃料枯渇問題に対する有効な解決手段の一つであり、今後さらなる導入が見込まれている。膨大なエネルギー賦存量を持つ洋上風力発電は、景観や騒音といった環境問題が少なく、大型風車の運搬・設置に関わる道路等の制約を受けない等の利点がある。日本近海は水深が深く、施工性やコストの面から浮体式の洋上風車の導入が有望とされている。

浮体式洋上風車は、浮体部が受ける波・潮流影響と、風車部が受ける風影響により複雑な運動挙動を示す。それらの連成応答を数値解析するプログラムとして、NREL が開発した「FAST」や、本研究室が開発した「UT-wind」などが存在する。しかしこれらの数値解析プログラムにおいては、浮体が自身の運動に及ぼす造渦影響を考慮することができなかった。特に渦励振運動である Vortex-Induced Motion (VIM) は、張力のかかった係留や浮体自身へ疲労影響を与えることが懸念されており、その正確な挙動予測を行うことが求められている。本研究は CFD の一種である格子 Boltzmann 法により、無限長さを持つ円柱の並進運動を二次元的に解析した平林ら[1]の数値解析プログラムを先行研究とし、没水浮体周辺の流体挙動を解析し、浮体の VIM 挙動を再現する数値解析プログラムを開発することを目的としている。実際に VIM が問題となるスケールにおいては、浮体サイズと渦スケールの比が大きく、数値解析のためには多数の格子点を設定する必要がある。現在の計算機 1 台の処理能力ではこれを扱うことは難しく、複数の計算機を用いた並列計算を行うことが適当であると考えられる。格子 Boltzmann 法は支配方程式の特徴により、計算機間で共有すべき情報量を抑えることができ、将来的には並列計算による計算高速化が期待できる。本研究は、格子 Boltzmann 法に基づく VIM 挙動解析法の開発を行い、各手法について検証を行う。

## 2. 数値解析プログラムの概要

## 2.1 支配方程式

本研究で用いた数値解析プログラムの支配方程式は、BGK model を用いた格子 Boltzmann 方程式である。本研究では三次元 15 方向成分を持つ直交格子を設定している (Fig. 1)。格子 Boltzmann 方程式は、格子点上の仮想的な流体粒子の存在を、密度の次元を持つ分布関数  $f_\alpha$  によって表現し、タイムステップごとに他の流体粒子との衝突および隣の格子点への並進を行うことで流体挙動を再現する数値計算手法である。 $\alpha = 1 \sim 15$  は Fig. 1 における方向成分と対応している。格子 Boltzmann 方程式は、流体粒子の衝突を表す Collision step および流体粒子の隣の格子点への並進を表す Streaming step に分けて以下のように記述することができる。

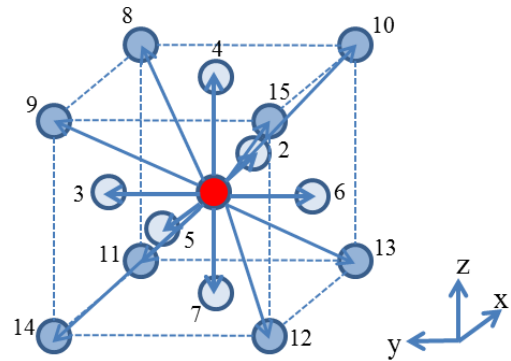


Fig. 1 3-D fifteen direction model

$$\text{Collision step:} \quad \tilde{f}_\alpha(\mathbf{x}, t) - f_\alpha(\mathbf{x}, t) = -\frac{1}{\tau} [f_\alpha(\mathbf{x}, t) - f_\alpha^{eq}(\mathbf{x}, t)] \quad (1)$$

$$\text{Streaming step:} \quad f_\alpha(\mathbf{x} + \mathbf{e}_\alpha \delta t, t + \delta t) = \tilde{f}_\alpha(\mathbf{x}, t) \quad (2)$$

$\tilde{f}_\alpha$  は Collision step 後の分布関数、 $f_\alpha^{eq}$  は平衡分布関数を表す。 $\tau$  は緩和係数と呼ばれ、粘性影響を表す。

## 2.2 物体境界条件

Fig. 2 は本解析プログラムの計算フローである。Streaming stepにおいて、分布関数が隣の格子点へと並進するが、物体中の格子点は分布関数を持たないため、物体中の格子点から流体格子点へ向かう分布関数の情報が欠損してしまう。このような分布関数の補完を行うため、流体側から物体へと向かう流体粒子の物体壁での跳ね返りを想定し、分布関数を推定する手法が Bounce-back method である。ここで、格子点から物体までの距離および物体壁の運動速度が考慮されているため、物体近傍の流体が物体運動に追従する様子を再現することができる。また、この過程において流体粒子の物体への衝突を想定しているため、流体が物体に及ぼす力を計算することができる。また、物体運動によって新たに生成された流体格子点の初期値を推定する際にも、一部で Bounce-back method を用いている。

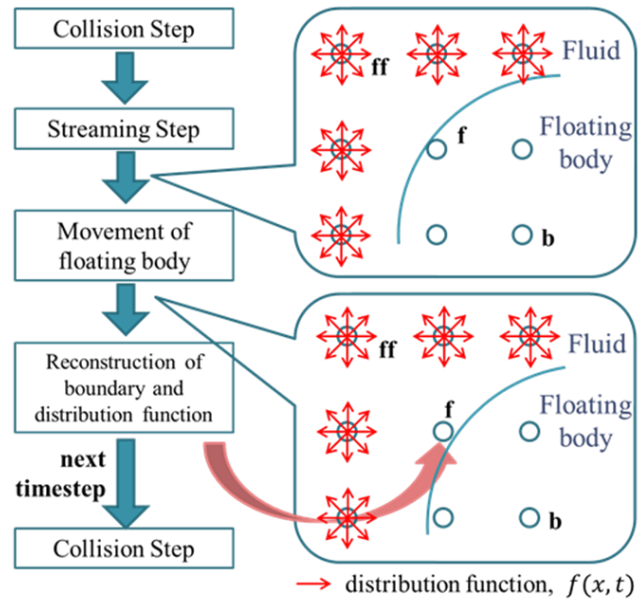


Fig. 2 Flow chart of analysis

## 3. 格子 Boltzmann 法の検証

### 3.1 音速依存性

格子 Boltzmann 法において、分布関数は音速  $c$  で並進するため、格子間隔  $\delta x$  とは以下の関係がある。

$$\delta x = c \delta t \quad (3)$$

ただし、 $\delta t$  はタイムステップ幅である。 $\delta x$  は、解像する流体现象のスケールに合わせて決定され、音速も物性値であるため、式(3)によって  $\delta t$  が決定される。しかし、実音速を用いた場合の  $\delta t$  は非常に小さく、実用に適さない場合がある。そのため、実際の物性値よりも小さい音速を仮想的に設定することで  $\delta t$  を縮め、数値計算内での時間経過を速める手法が取られる。一方で音速を下げることは、流体に仮想的に大きな圧縮性を設定していることになるため、圧縮性が解析結果に重大な影響を及ぼしていないかを検証する必要がある。本研究では Fig. 3 に示す円盤物体を用い、四種類の音速 (Table 1) を設定して、マッハ数  $Ma$  と抗力係数  $Cd$  を比較した。解析結果 Fig. 4, Fig. 5 より、 $Ma < 0.067$  においては、圧縮性による有意な影響が出ないことが分かった。また、文献値  $Cd \approx 1.1$  [2] と近い結果が得られ、本解析プログラムの正当性も併せて確認された。

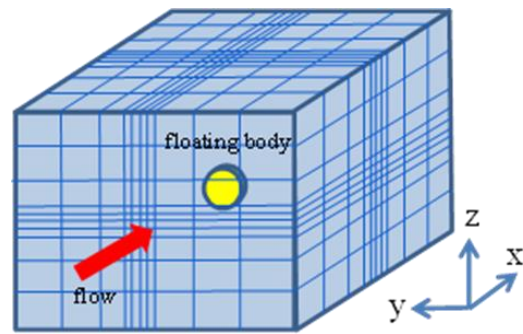


Fig. 3 Analysis model

Table 1 Sound speed of each model

	$c_{amp}$	$c$ (m/s)	$Ma$
model 1	$2.0 \times 10^{-4}$	0.3000	0.033
model 2	$1.0 \times 10^{-4}$	0.1500	0.067
model 3	$5.0 \times 10^{-5}$	0.0750	0.075
model 4	$2.5 \times 10^{-5}$	0.0375	0.267

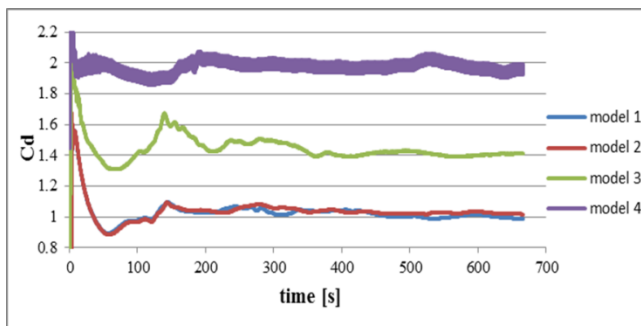


Fig. 4 Time variation of drag coefficient

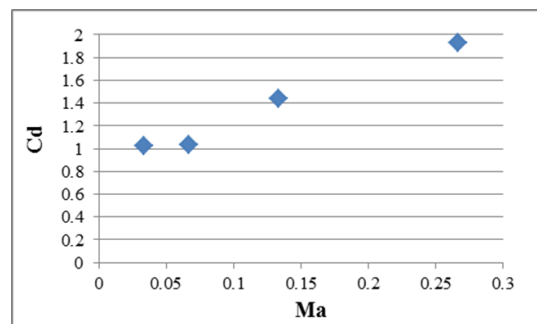


Fig. 5 Relationship between drag coefficient and Mach number

### 3.1 物体-流体移動境界

本解析プログラムにおいては、固定座標系上を浮体が運動する。この手法は、流体格子点と物体壁との位置関係が変わることへの対処が求められるが、物体追従座標系を設定する場合と比較して、将来的に複数の要素を弾性的に組み合わせることができる、現象が直感的に理解しやすい、などの利点がある。本手法においては物体-流体境界の移動により、格子点状態が物体から流体に変化する際に流体力の振動が生じる (Fig. 6)。この流体力振動は、

- 1) 流体としての分布関数の初期値の外挿
- 2) Bounce-back method の切り替え

に起因すると考えられる。本研究では、1)の初期値の与え方について、周囲の流体情報から補完する手法や、浮体内に仮想的な分布関数を保持する手法など四種類の手法を提案し、等速運動する円盤に作用する流体力を用いて比較を行った。その結果、物体内に仮想的な分布関数を保持し、仮想的な Bounce-back 計算を与えることで、流体力の振動を最も抑えることができることが明らかになった。

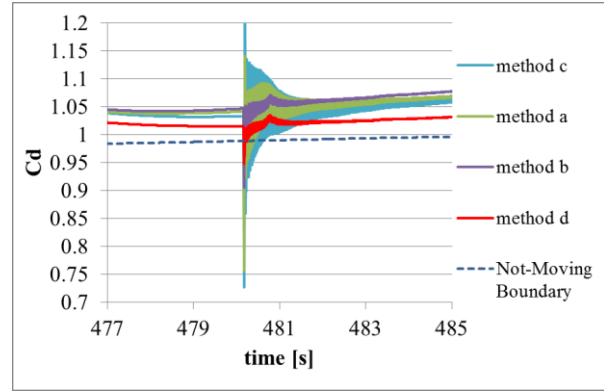


Fig. 6 Time variation of drag coefficient

## 4. 円柱形物体の VIM 挙動解析

### 4.1 全没水円柱形物体の VIM 解析

一様流中に係留を模した線形ばねによって拘束された円柱形物体を設置し、物体付近の流体挙動および、流体力とばね張力を受ける円柱の運動挙動についても検証した。Fig. 8 は円柱の並進変位を、Fig. 9 は回転角をそれぞれ表している。Fig. 8 の  $x, y$  並進変位について、物体の固有周期とは異なる周期を持つ VIM が観測される。Fig. 10 は  $x-z$  平面における  $z$  軸方向流速を示しており、円柱後面において、端部より中央へ向かう流体挙動が観察される。Fig. 11 は  $x-y$  平面の渦度コンター図である。この渦放出の様子は、円柱の高さ方向で異なる分布を示しており、複雑な流体挙動を示している。

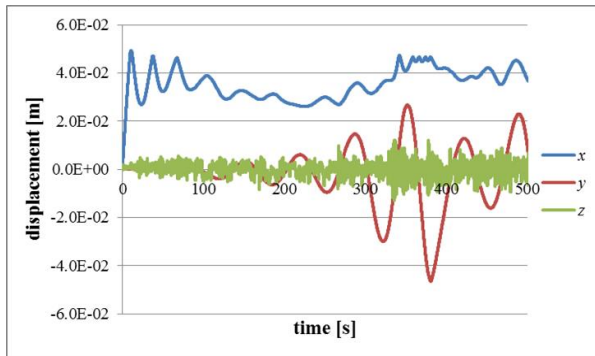


Fig. 8 Displacement of floating body

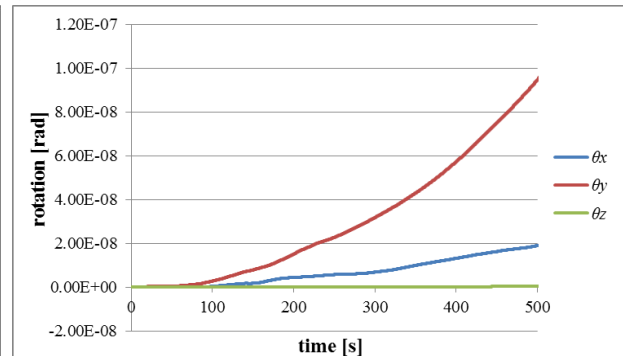


Fig. 9 Rotation of floating body

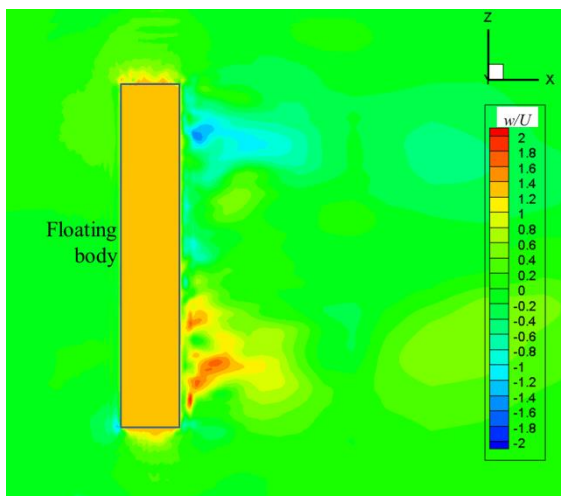


Fig. 10  $z$ -directed velocity on  $y=-0.04$  m, at  $t=400$  s

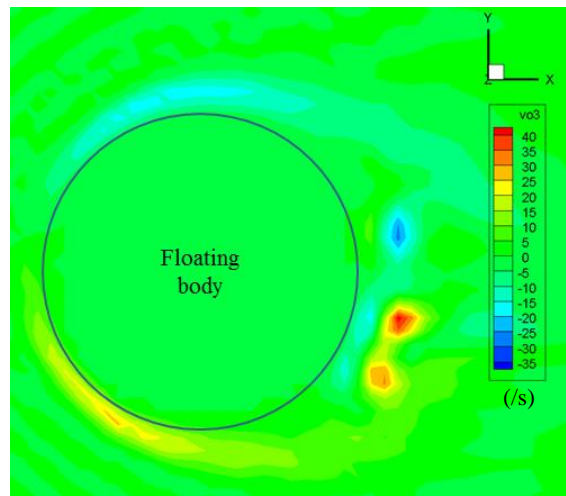


Fig. 11 Vorticity on  $z=-0.22$  m, at  $t=400$  s



## 4.2 半没水円柱形浮体の VIM 解析

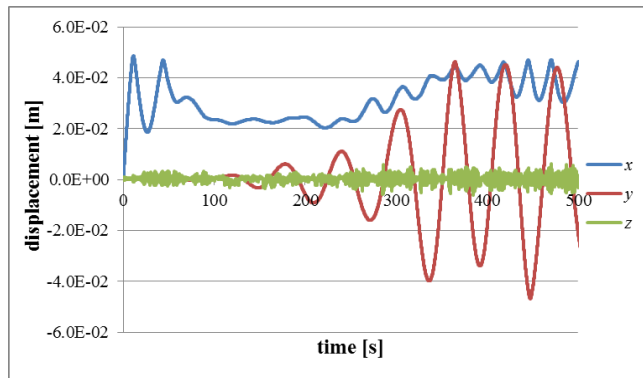


Fig. 12 Displacement of floating body

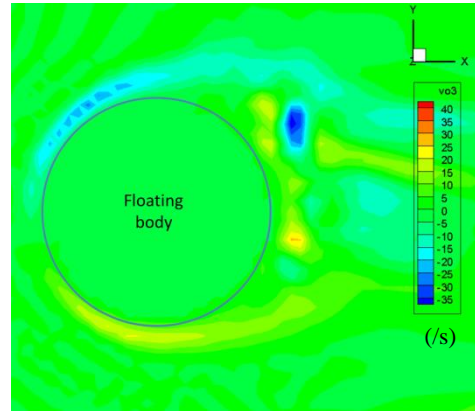


Fig. 13 Vorticity on x-y plane at  $t=400$  s

円柱を水との比重 0.5 の半没水浮体とし、鏡像条件を適応した自由表面を設けて 4.1 と同様の解析を行った。Fig. 12 は浮体の並進変位を表したものである。全没水の場合に比べて没水体積が半分になっているが、特に 150 s 以降の渦放出による起振力が支配的であると考えられる時刻において、振幅が大きく出ている。Fig. 13 は  $x$ - $y$  平面の渦度コンター図であるが、水面付近においては高さ方向に渦放出挙動の類似性が見られた。これは水面の存在により、渦放出の様子が変わっていることを意味している。

## 5. 自由表面挙動計算

自由表面計算においては、Fig. 14 のように隣接する格子点間に境界を設け、格子点周りに体積を持った cell を設定する。cell 中に占める液体の割合を示すのが fill level,  $\varphi(\mathbf{x})$  であり、流体 cell の状態は fill level に基づいて判別する。

$$\begin{aligned} \varphi(\mathbf{x}) = 0 & : \text{gas} \\ 0 < \varphi(\mathbf{x}) < 1 & : \text{interface} \\ \varphi(\mathbf{x}) = 1 & : \text{liquid} \end{aligned} \quad (4)$$

interface cell は分布関数に基づいて、隣の cell と液体質量のやり取りをしており、各時刻における cell の含有質量から fill level を計算する。

本手法を実装し、左側から流入する一様流中に配置した固定円柱周りの流体挙動の観察を行った。Fig. 14 は自由表面変動後の水面形状を表している。定性的には、一様流が衝突する円柱全面にて水位が上昇し、後方で水位が下降する様子が再現されているが、予想される水面変動よりも大きな水面変動が生じる傾向がある。隆起・沈降した水面形状の復原力として作用する重力について、現在は気液境界面における境界条件にてその影響を考慮しているが、実現象との整合性が取れていない可能性を検討している。



Fig. 14 Example of state of fluid nodes

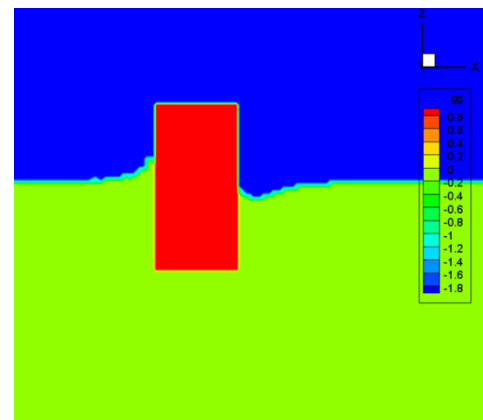


Fig. 15 Shape of free surface

## 6. 結論

本研究により、流体力によって運動する物体の三次元運動が解析可能となった。全没水円盤を用いた解析においては、本数値解析プログラムの音速依存性を明らかにするとともに、抗力係数の文献値との比較から、本解析の妥当性を示した。物体-流体の移動境界についても比較検討を行い、流体力評価に影響を及ぼしづらい手法を提案している。以上を踏まえた浮体運動計算において、渦放出およびそれに励起された浮体運動が観察されたが、自由表面の有無によって解析結果に有意な差が生じた。そのため、自由表面形状の変化を含めた、自由表面影響を考慮する必要がある。自由表面形状の変動を表現する手法については基礎機能の実装を行った。境界条件等の改善により、正確な自由表面挙動が再現されることが期待される。

## 参考文献

- [1] 平林紳一郎, 鈴木英之: 格子 Boltzmann 法による高 Reynolds 数 VIM 解析, 2012
- [2] M. Potter, D. C. Wiggert, *Schaum's outline of fluid mechanics*, (The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008) pp. 148