

海洋の変動流場の再現に関する方法論の研究 Computational Reconstruction of Fluctuating Flow Field in the Ocean

佐藤 圭, 東大院環境海洋工学, 東京都文京区本郷 7-3-1, E-mail: sato_kei@triton.naoe.t.u-tokyo.ac.jp
 佐藤 徹, 東大院環境海洋工学, 東京都文京区本郷 7-3-1, E-mail: sato@triton.naoe.t.u-tokyo.ac.jp
 Kei Sato, Dept. Environmental & Ocean Engng. Univ. Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan
 Toru Sato, Dept. Environmental & Ocean Engng. Univ. Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan

A method for computational reconstruction of fluctuating flows in the ocean based on field measurement data is suggested. Here full-3D treatment with the spatial scale of O(100m) to O(1000m) is taken into account. To reconstruct fluctuating flows in the ocean, there are two important points. First is the initial and boundary conditions of the flow based on field measurement data. Second is the choice of appropriate turbulence models. In this method, the measurement data is divided into high frequency and low frequency parts, and then the high frequency part is used to generate fluctuating initial and boundary conditions by using a modified method of Kraichnan⁽¹⁾ and the value of mean flow. The low frequency part is used in changing the value of mean flow in time and rotating the computational domain in accordance with the change of the mean velocity direction.

1. 緒言

近年、二酸化炭素の海洋隔離や人口湧昇流による漁場の活性化といった海洋を舞台とした環境問題解決手法が提案されている。このような手法において、例えば二酸化炭素の投入による海水の酸性化といった、局所的な環境影響予測が必要となる。現在この予測において、100~1000m 程度の領域を解析対象とする局所海洋流動シミュレーションが有効な手段として考えられている。このような局所環境影響予測においては、海洋に既存の変動流場による拡散現象が重要となる。そこで、本研究では、局所海洋流動シミュレーションにおいて実海域の変動流場を再現するための方法論の構築を目的とする。

既存の局所海洋流動シミュレーションにおいて海洋の変動流場を取り扱うためには、次の2つのことが必要であると考える。1つは、実海域における計測に基づく流速等の初期条件・境界条件の生成と適用、今一つは適切な乱流モデルの適用である。初期条件・境界条件については、周波数空間において速度のパワースペクトル密度とクロススペクトル密度を満たすように速度場を生成し、その後連続の式を満たす操作を行う方法 (Kondo *et al.*⁽²⁾) や、波数空間においてエネルギースペクトルと速度相関及び連続の式を満たすように速度場を生成する方法 (Celik *et al.*⁽³⁾、Schumann⁽⁴⁾)、ラフネスブロックを設置したシミュレーション等により直接計算する方法 (Maruyama *et al.*⁽⁵⁾、大野ら⁽⁶⁾) 等が提案されている。乱流モデルについては、様々なモデルが提案されているものの、局所海洋流動シミュレーションにおいては高レイノルズ数の流れを専ら低い解像度の格子により解析するため、適切な乱流モデルの選定は難しい状況にある。

本報では、実海域における測定流速データをもとに、時間的・空間的に変動する初期条件・境界条件を生成する方法について記す。

2. 実測値に基づく初期条件・境界条件の生成法

実海域での流速測定データは少数の固定点測定によるため、空間的に疎である。また、平均流の速さ・方向は時間的に変動する。従って、実海域における測定データから直接空間的な流速変動は得られず、また、平均流の方向に応じて計算領域における流入境界面を変更することは困難である。これらを踏まえて、本研究では再現する変動流速をその周波数により分離し、それぞれ別々の方法で計算領域に再現する方法を提案する。この方法の手順を以下に記す。また、この方

法の概要を Fig. 1 に示す。

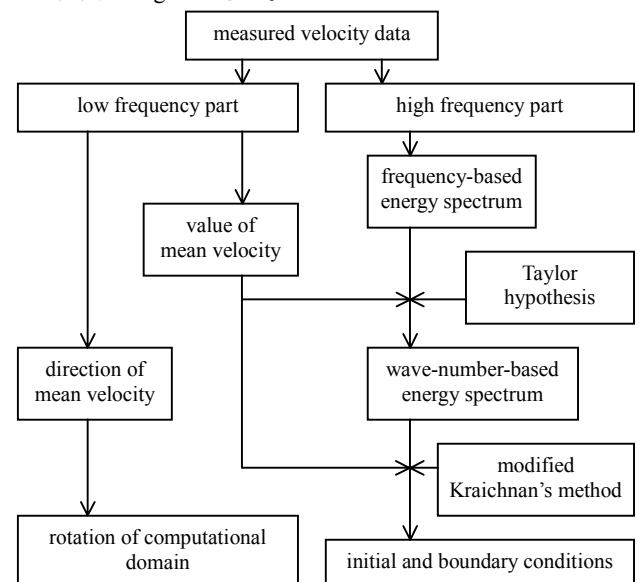


Fig. 1 Flow-chart of generation of initial and boundary conditions

手順 1

解析対象となる実海域において測定された時系列流速データを、フーリエ変換によって周波数領域へと変換する。この周波数領域における流速を、後に述べるテイラーの仮説⁽⁷⁾から計算領域に1波数程度の波長の成分を表すと考えられる周波数を基準として、高周波成分と低周波成分へと分解する。

手順 2

手順 1 で求めた低周波数成分について、逆フーリエ変換により実空間へと戻した後、この流速成分を計算領域のスケールに対して空間的には平均流とみなし、ここから平均流の大きさの時間変化と方向の時間変化を求める。

手順 3

手順 2 で求めた高周波数成分から、周波数ベースにおける

エネルギースペクトルを求める。

手順4

周波数ベースの、即ち時間的な情報としてのエネルギースペクトルについて、テイラーの仮説を適用することにより、波数ベース、即ち空間的な情報としてのエネルギースペクトルを求める。テイラーの仮説において用いる平均流速の大きさとして、手順2において求めた平均流の大きさを用いる。周波数 f と波数 k との関係は、式(1)で表される。ただし、 U は平均流速の大きさを表す。

$$k = f / U \quad (1)$$

手順5

手順4において求めた波数ベースのエネルギースペクトルをターゲットとして、これと連続の式とを満足する変動流場を生成し、初期条件・流入境界条件とする。これには Kraichnan の方法に改良を加えた方法を用いており、式(2)~(8)により任意の場所・時間における変動流場が求められる。

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \sum_{k=1}^{k_{\max}} \sum_{n=1}^N \left\{ \mathbf{v}(k, n) \cos(\mathbf{k}(k, n) \cdot \mathbf{x} + \omega(k)t) + \mathbf{w}(k, n) \sin(\mathbf{k}(k, n) \cdot \mathbf{x} + \omega(k)t) \right\} \quad (2)$$

$$|\mathbf{k}(k, n)| = k \quad (3)$$

$$\mathbf{v}(k, n) \cdot \mathbf{k}(k, n) = 0 \quad (4)$$

$$\mathbf{w}(k, n) \cdot \mathbf{k}(k, n) = 0 \quad (5)$$

$$|\mathbf{v}(k, n)| = \sqrt{\alpha(k, n) \frac{2E(k)}{N}} \quad (6)$$

$$|\mathbf{w}(k, n)| = \sqrt{(1 - \alpha(k, n)) \frac{2E(k)}{N}} \quad (7)$$

$$\omega(k) = 2\pi k U \quad (8)$$

ここで、 k_{\max} は計算領域で解像できる最大の波数を、 N はある波数 k を持つ波数ベクトル \mathbf{k} の数を、 $E(k)$ はターゲットとなる波数ベースでのエネルギースペクトルを、 U はテイラーの仮説において用いた平均流の大きさを表し、 \mathbf{x} は任意の位置ベクトルを、 t は任意の時間を表す。また、 α は 0 から 1 の間の任意の実数である。式(4)、(5)を満たすことにより、生成される流速場は連続の式を満たす。また式(2)~(8)では3次元等方的な流場が生成されるが、(6)、(7)において、波数ベクトル \mathbf{k} の方向に応じて $E(k)$ の配分を変更する、ベクトル \mathbf{v} 、 \mathbf{w} の向きを調整する等の方法により、非等方的な流場を生成することができる。

手順6

手順2において求めた平均流の方向の時間変化に応じて、常に平均流の方向が流入境界面に対して直交するように計算領域を回転させる。これにより流入境界面を計算領域のある1面に固定することができる。

以上の方法により、計算領域に比較して小さなスケールの渦は流入境界面において変動流場として生成され、計算領域に比較して大きなスケールの渦は、平均流速の大きさや方向の変化として計算領域に与えられることとなる。

3. 変動流場の生成

現状では平均流速の変化は取り扱っていないため、ここでは計算領域よりも小さなスケールの変動をもつ流場の生成結果を示す。

3.1. 計算方法の概要

Navier-Stokes 方程式と連続の式を支配方程式とする LES (Large-eddy simulation) であり、乱流モデルには Smagorinsky モデルを、モデル定数には 0.17 を用いている。アルゴリズムは MAC 法を、時間差分には 2 次精度の Adams-Bashforth 法を用いている。空間差分については、対流項では 2 次のアラカワ形式を、その他には 2 次中心差分を用いている。圧力解法には速度圧力同時反復法を用いている。また、流入境界面以外の面には数値減衰領域を設けることにより、境界における渦の反射を抑えている。

3.2. 使用する流速測定データ

用いる実海域データとして、ハワイ島西岸沖において実際に計測された流速データを用いる。このデータの概要を Table 1 に示す。

Table 1 Characteristics of the observed data

Depth [m]	about 830
Observed depth [m]	469.9
Mean velocity [m/s]	0.0394
Root-mean-square velocity [m/s]	0.0355

3.3. 計算条件

変動流場の初期条件・境界条件は、64 方向、16 波数の計 1024 種の波数ベクトルを用い、等方的に生成する。その他の計算条件の概要を Table 2 に示す。

Table 2 Condition of Calculation

Calculation domain [m]	100 × 100 × 100
Number of grid (without damping area)	32 × 32 × 32
Reynolds number (mean velocity based)	3.63 × 10 ⁶

3.4. 計算結果と考察

計算による変動流場の例を Fig. 2 に示す。但し、流入境界面は $x = 0$ における $y - z$ 平面である。

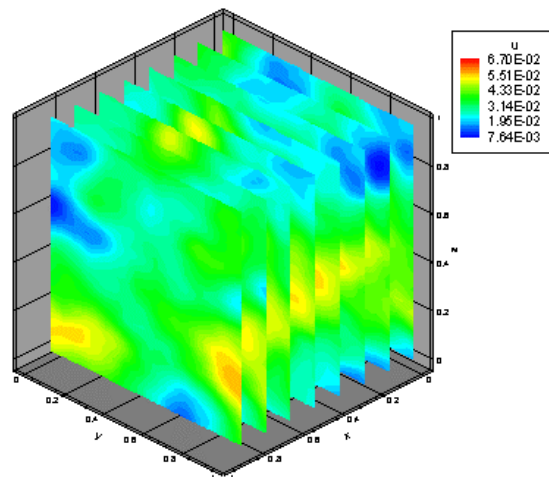


Fig. 2 Contour of velocity (x-component)

実海域データと境界条件として生成した変動流との、周波数ベースのエネルギースペクトルによる比較を Fig. 3 に示す。

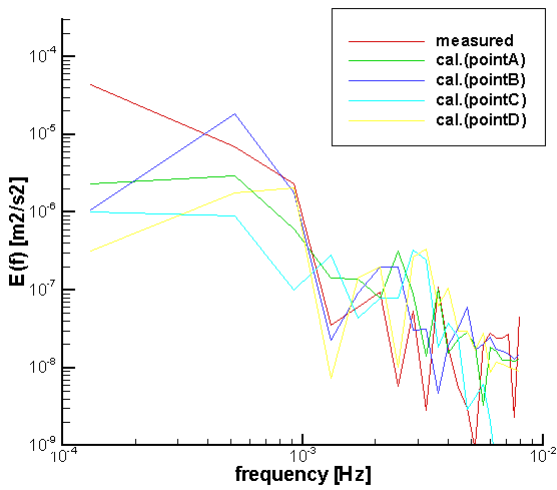


Fig. 3 Comparison of generated inflow at several points and target measured data in frequency-based energy spectrum

Fig. 3 において、生成した変動流速のエネルギースペクトルは、実海域データによるものに比較して周波数毎のばらつきが全般にやや大きいものの、エネルギースペクトルの形状、エネルギーの大きさはおおむね良く一致しているといえる。

流入境界面から計算領域の一辺の約 7.8%下流側における流速と、約 92.2%下流側における流速との、周波数ベースのエネルギースペクトルによる比較を Fig. 4 に示す。

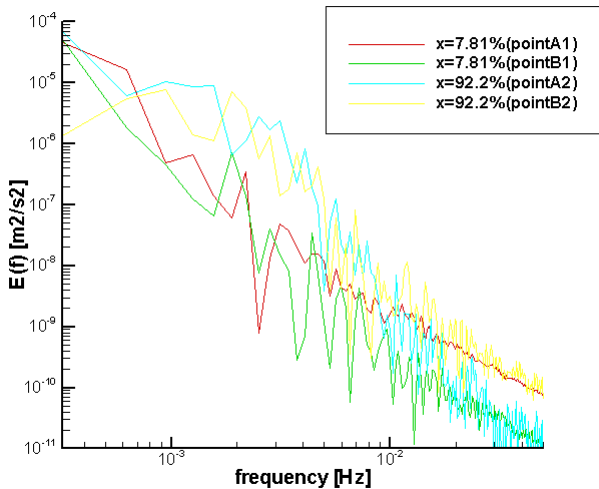


Fig. 4 Comparison of frequency-based energy spectrum at several points in $x=7.81\%$ and $x=92.2\%$

Fig. 4 において、上流側に比較して下流側では低周波数部分におけるエネルギーが増加していることがわかる。Fig. 4 におけるエネルギースペクトルは、生成している変動流速のうち最も低い周波数のものの周期の、約 2 倍の計測時間を設けて求められたものである。従ってこの低周波数におけるエネ

ルギーの増加は、流入境界で生成した変動流の性質が計算領域内で徐々に変化していることを示していると考えられる。

計算領域全体における、波数ベースのエネルギースペクトルの時間変化を Fig. 5 に示す。但し、Fig. 5 凡例中の数字は、計算領域の一辺の長さを平均流速で割った無次元時間を表す。

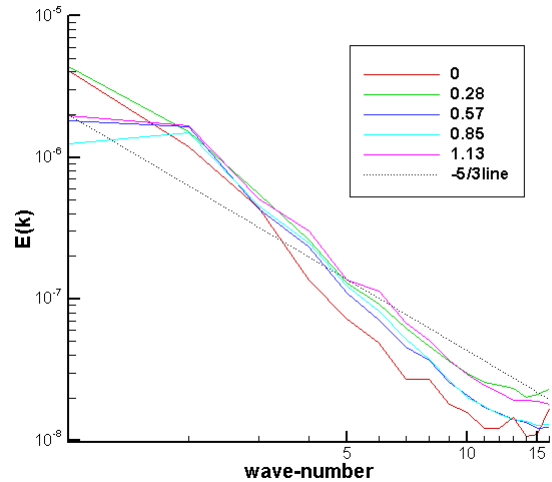


Fig. 5 Time variance of wave-number-based energy spectrum

Fig. 5 から、計算開始時に比較してエネルギーが波数 1 付近では低下し、波数 4 以上の領域では上昇しており、生成した変動流場の初期条件から計算が進むにつれ流場の性質が変化していることがわかる。また、高波数部分は 3 次元等方性乱流の慣性小領域の特徴である $-5/3$ 乗則に近づく傾向にある。

Fig. 4 及び Fig. 5 において、初期条件・境界条件として生成した変動流場から、実際に計算をすることにより、エネルギースペクトルにみられる流場の性質が変化する傾向がみられた。この原因として、実海域における流場は本来成層に伴う非等方性を有し、その影響を受けたエネルギースペクトルが生成されるにも関わらず、等方的な変動流として再現していることが考えられる。

4. まとめ

実海域における空間的に疎な流速測定データをもとに、実海域のエネルギースペクトルを満足する変動流場を生成する方法を示した。その結果、初期条件・境界条件として実海域のエネルギースペクトルを満たす流場を生成できることを示した。一方で、流入境界から離れるにつれエネルギースペクトルの形状が変化することが示された。この原因として、本来非等方性を有する実海域流場を等方的に生成していることが考えられる。今後、実海域流場の非等方性や密度成層、及び計算領域に比較して大きなスケールの変動成分を導入していく必要があると考える。

参考文献

- (1) Kraichnan R. H., "Diffusion by a random velocity field" Phys. Fluids, Vol. 3 (1970), No. 1, pp. 22-31.
- (2) Kondo K., Murakami S., Mochida A., "Generation of velocity fluctuations for inflow boundary condition of LES", J. Wind Eng. Ind. Aerodynamics, Vol.67&68 (1997), pp.51-67
- (3) Celik I., Smirnov A., Smith J., "Appropriate initial and

- boundary conditions for LES of a ship wake", Proc. 3rd ASME/JSME Jt. Fluids Eng. Conf. (1999)
- (4) Schumann U., "Algorithms for direct numerical simulation of shear-periodic turbulence", Lecture Notes Phys., Vol. 218 (1985), pp.492-496
 - (5) Maruyama T., Rodi W., Maruyama Y., Hiraoka H., "Large eddy simulation of the turbulent boundary layer behind roughness elements using an artificially generated inflow", J. Wind Eng. Ind. Aerodynamics, Vol. 83 (1999), pp.381-392
 - (6) 大野 修、野津 剛、田村 哲郎、「都市域での乱流境界層における 3 次元角柱まわりの流れ - 乱流境界層の作成と制御 - 」、日本建築学会大会学術講演梗概集 (1999) pp. 265-266
 - (7) 宇野木 早苗、「沿岸の海洋物理学」、東海大学出版会 (1993)