5.一般化したグリーン関数法を利用した温排水拡散モデルの潮汐流の再現

坪野　考樹[1]*・三角　和弘[1]・津旨　大輔[1]

[1]一般財団法人電力中央研究所　（〒270-1194千葉県我孫子市我孫子1646）

＊ E-mail: *tsubono@criepi.denken.or.jp*

本研究では，より一般化したグリーン関数アプローチ（GFA）を発電所から放水される温排水の拡散を計算するモデルに適用して，沿岸域における潮汐流および潮汐残差流を効果的に再現した．このGFAによる最適化により，観測結果と整合する潮汐流と潮汐残差流を再現する海面条件が推定された．潮汐流と潮汐残差流は温排水の移流および拡散に重要な役割を果たすことから，これら流動を再現できることで，温排水影響を効果的かつ正確に評価することが可能となる．

Key Words : *グリーン関数法, 温排水拡散モデル，潮汐流，環境影響評価*

1. はじめに

数値モデルのパラメータや境界条件は，モデル結果と観測結果や水理実験結果との比較によって決定される（Sato et al., 2006; Gaeta et al., 2020）．モデルパラメータや境界条件は，感度解析によって調整される(Gaeta et al., 2020) ことがが 多いが，その調整は客観的かつ効率的なプロセスであることが望ましい (Alonso and Solari, 2021).

グリーン関数アプローチ（GFA）は、感度解析の結果を用いて，モデルパラメータや境界条件を，オフラインで線形最小二乗法により最適化できる（Menemenlis et al.、2005）．そしてGFAによる最適化は、モデルのコードを変更したり，追加する必要がないことから，比較的低コストで推定値を得られることが知られている．以上のような特徴から，GFAはモデルパラメーターの最適化やキャリブレーションに用いられてきた（Hirose, 2011; Toyoda et al., 2015; 坪野ら，2015, 2016）

本報告では，実用的かつ効率的なGFAを用いたモデルの境界条件の最適化をするとともに，沿岸海域で代表的かつ支配的な流れの再現に適用した結果を示す．具体的には，グリーン関数行列の計算に用いる逆行列に，特異値分解（SVD）を用いた一般逆行列を適用し、GFAの最小二乗方程式を解くことで，温排水拡散モデルの潮汐流動の再現性を向上させる． 発電所から冷却水として放水される温排水は，放水直後は噴流として拡散するが，それ以降は沿岸流動により移流・拡散するため，沿岸流動の再現性の向上は，数値モデルによる予測には欠かせない．沿岸流動を計算する最適な境界条件を客観的・効率的に推定できれば，数値モデルによる温排水拡散予測の信頼性の向上が見込まれると考えられる．

2. GFAの概要（コスト関数とその最小化）

GFAにおいて設定する目的関数を，

$$J(\mathbf{a}) = (\mathbf{a} - \mathbf{a}^0)'\boldsymbol{Q}^{-1}(\mathbf{a} - \mathbf{a}^0) + \left(\boldsymbol{y} - \boldsymbol{\mathcal{H}}(\mathbf{a})\right)'\boldsymbol{R}^{-1}\left(\boldsymbol{y} - \boldsymbol{\mathcal{H}}(\mathbf{a})\right) \quad (1)$$

と表す．ここに，$\mathbf{a}$ は推定するモデルパラメータなどを示す制御変数からなるベクトル，$\mathbf{a}^0$はそのベクトルのベースライン，$\boldsymbol{y}$は観測結果，$\boldsymbol{\mathcal{H}}(\mathbf{a})$は$\mathbf{a}$で計算される観測値を表す関数，$\boldsymbol{Q}$ と $\boldsymbol{R}$はそれぞれ背景と観測の誤差共分散行列を示す．$\mathbf{a}$を$\mathbf{a}^0 + \boldsymbol{\delta}\mathbf{a}$とおくと，$\boldsymbol{\mathcal{H}}$は

$$\boldsymbol{\mathcal{H}}(\mathbf{a}) \fallingdotseq \boldsymbol{\mathcal{H}}(\mathbf{a}^0) + \frac{\partial \boldsymbol{\mathcal{H}}(\mathbf{a}^0)}{\partial \mathbf{a}}\boldsymbol{\delta}\mathbf{a} \fallingdotseq \boldsymbol{\mathcal{H}}(\mathbf{a}^0) + \boldsymbol{\mathcal{G}}\boldsymbol{\delta}\mathbf{a}. \quad (2)$$

と近似できる．ここに，$\boldsymbol{\mathcal{G}}$は制御変数それぞれに対する関数$\boldsymbol{\mathcal{H}}(\mathbf{a})$の差分で近似する．この差分は，制御変数を変更した感度解析結果から計算でき，本研究では，特異値分解した行列を用いた一般逆行列で計算することで，感度解析の回数が制御変数の数によらずに，式（2）の$\boldsymbol{\mathcal{G}}$を計算することができる(Tsubono et al.，2023)．式(1)

を$\boldsymbol{\delta a}$で１回微分して式⑵を代入し，そして停留の条件を考慮すると，

$$\boldsymbol{\delta a} = \left(\boldsymbol{Q^{-1}} + \boldsymbol{\mathcal{G}'R^{-1}\mathcal{G}}\right)^{-1}\left(\boldsymbol{\mathcal{G}'R^{-1}}\left(\boldsymbol{y} - \boldsymbol{\mathcal{H}}(\mathbf{a}^0)\right)\right) \qquad (3)$$

と$\boldsymbol{\delta a}$が計算される．本研究では，式（3）の右辺第一項の逆行列にも，SVDから得られる一般逆行列を用いた．これにより，式（3）の右辺第一項の逆行列の固有値が非常に大きい値となることを避けることができ，ロバストに制御変数の変動分$\boldsymbol{\delta a}$を計算することができる．

3. 温排水拡散モデルと観測データ

(1) モデルの概要

GFAの適用には，日本の沿岸発電所における環境影響評価に用いられている3次元温排水拡散モデル（坪野ら，1997）を用いた．モデルは水平に放水される浮力を持つ噴流を計算するために，非静水圧で計算し，乱流モデルに k-εﾓﾃﾞﾙを採用している．差分化では，移流項にTVDスキームを用い，地形の変化に合わせるためFAVOR法を用いている．そして，2wayネスティングでICCG法による圧力計算が可能なモデルとなっている．

モデルを適用した海域は**図－1**に示すように，3ブロック（格子幅が200mのブロック１から12-50mのブロック3）で構成され，それぞれのブロックがネスティングでつながっている．発電所からの取放水は，**図－1**に示す4の近傍の青矢印の方向に，24m の格子から0.4m/sで表層放水し，2の近傍の青矢印の方向に底層から取水している．環境水温は26.2℃と設定し，放水による上昇水温は8℃と設定した．また，赤矢印の位置の河川から0.1–22 m³/sの河川流量を，水温26.2℃，塩分0で設定した．

この海域が潮汐流（M2分潮）と潮汐残差流が卓越していたことから，海域流動にはその2つの流動を設定した．潮汐流と残差流を計算するために，別に準3次元モデルを設定して計算し，その水面形状を温排水拡散モデルに与えた．これは，潮汐流と潮汐残差流 の再現には，**図－1**の計算領域では地形の再現が十分ではないことが原因である．この計算領域よりも大きな海域を設定した準3次元モデルを用いて，潮汐を再現する水面形状を計算し，その水面形状を内挿補間して，温排水拡散モデルに設定した．

⑵ 観測結果

温排水拡散モデルで得られた流速との比較には，**図－1**の数字位置の水深2mにおける電磁流速計（INFINITY-EM）の結果を用いた．潮汐流については4つの潮時（M2, S2, K1, O1）について調和解析した結果のM2,成分を，および潮汐残差流は期間平均を観測値とした．流速計による観測は2，5，8，11月の15日間15分毎に実施されていたことから，この季節ごとの潮汐流と潮汐残差流を式（1）の観測値とした．

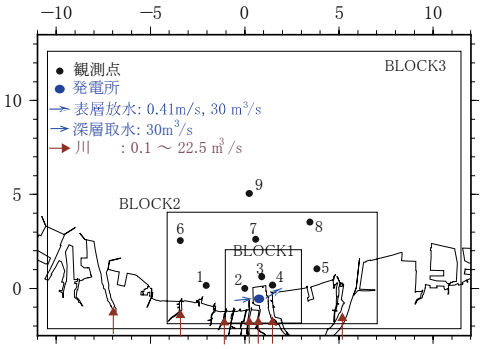
⑶ 制御変数

潮汐流と潮汐残差流を再現するために，温排水拡散モデルで設定する水面形状を推定した．3.（1） で示した準3次元モデルによる正弦・余弦・平均水位の3つの水面形状$\boldsymbol{\eta}_k$からの線形和でモデルに設定する水面形状を表現するとし，その係数を推定して，潮汐残差流を再現する水面形状を計算した．また，潮汐については正弦・余弦の水面形状に係数をかけることにより，潮汐流を再現した．このことから，制御変数は，潮汐残差流に対してが3つの係数，潮汐流にたいしては，2つの係数となる．

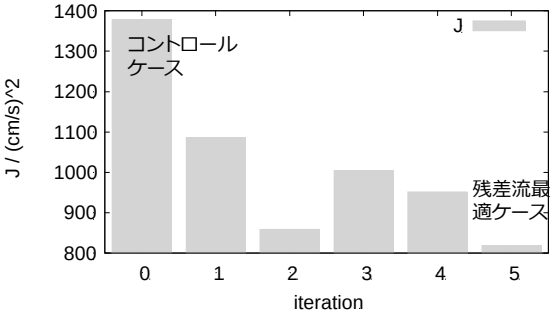
4. 結果

(1) 潮汐残差流

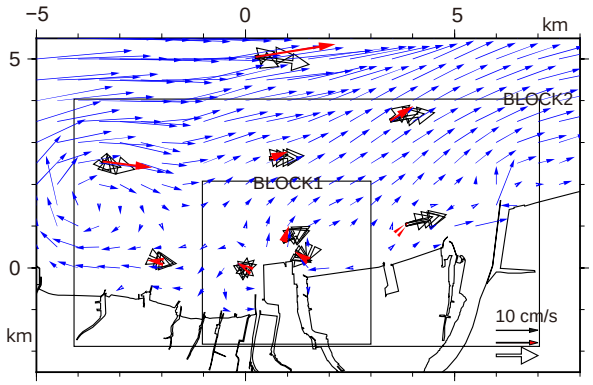
最初に，潮汐残差流のみについて最適化した．GFMの適用により，目的関数は徐々に低下した（**図－2**）．特に，1度目の適用で目的関数が大幅（約40%）に低下しており，観測結果と計算結果が近くなっていることがわかる． そして，GFMを5回適用して得られた制御変数を最適であると判断した．これは，これ以上の回数を試したが，コスト関数が小さくならなかったことからである．



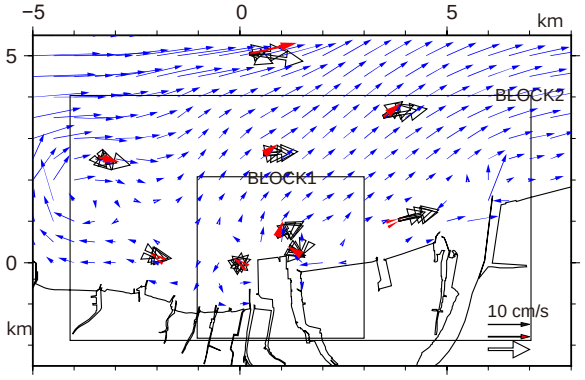
図－1　計算領域（3つのネスティング領域）と観測点



図－2　GFMの適用回数と目的関数



(1) コントロールケース



(2) 残差流最適ケース

図 - 3　潮汐残渣流の比較（青，赤：計算結果，白抜き：観測結果）

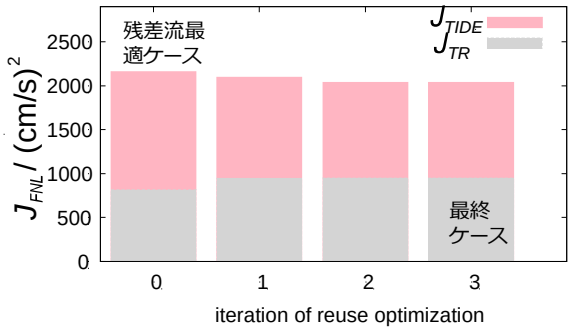


図 - 4　GFMの適用回数と目的関数

準3次元モデルで得られた水面形状を設定して計算したケースをコントロールケースとし，5回目のGFMの適用で得られたケースを残差流最適ケースとする．それらケースの潮汐残差流を比較する（**図 - 3**）と，残差流最適ケースは，コントロールケースよりも，St.6とSt.9において流速が小さくなり，St.1とSt.6周辺の時計回りの循環と沖合の流れが弱くなっており，残差流最適ケースは，より観測された潮汐残差流に近い流動を示した．

(2) 潮汐流

潮汐残差流と潮汐流を式（1）の観測およびモデル結果に設定したコスト関数を最小化するようにGFMを適用した．ただし，制御変数の係数の初期値を，潮汐残差流に対しては（1）の最適値を設定して，適用を開始した．その結果，コスト関数は，潮汐残差流ほど低下しないが，若干低下した（**図 - 4**）．3回のGFMの適用で，観測された潮汐残差流と潮汐流を再現する水面形状が推定された．以降，この潮汐流と潮汐残差流を同時に再現する水面形状を推定したケースを最終ケースと記す．

最終ケースの潮汐楕円の軸は，大きさと傾きについて観測結果と比較的良い一致を示した（**図 - 5**）．潮流楕円長軸の大きさ，傾きについて調べるために，観測結果で正規化した計算結果（**図 - 6**）を円筒楕円にプロットしたダイアグラム（Tsubono , 2022）を用いた．最終ケースの潮流楕円長軸は，残差流最適ケースよりも，観測された潮流楕円長軸の値を示すリファレンスの位置（0, 1）に近づいて（矢印の向き）いることが示されており，最終ケースの潮流楕円が観測結果と整合的となっていることが分かる．

(3) 温排水計算

コントロールケースと最終ケースの潮汐流および潮汐残差流で駆動される温排水の拡散を計算した（**図 - 7**）．ここに，図は表層における約1時間毎の水温1度上昇範囲を示す．発電所近傍では，両ケースで潮汐流も潮汐残差流が変わらなかったため，各コンターの形状はコントロールケースと最終ケースで大きく変わらなかったが，最終ケースでは、潮汐流と潮汐残差流が改善されたことにより，流動で駆動される上昇水温1℃コンター（青のコンター）は，コントロール実験（オレンジのコンター）に比べて全体的に西にシフトした．潮汐流および潮汐残差流動に関して，最終ケースはコントロールケースよりも観測結果に近づいていることから，得られるた水温の上昇範囲は，最終ケースのほうがより信頼できる結果であると考えられる．

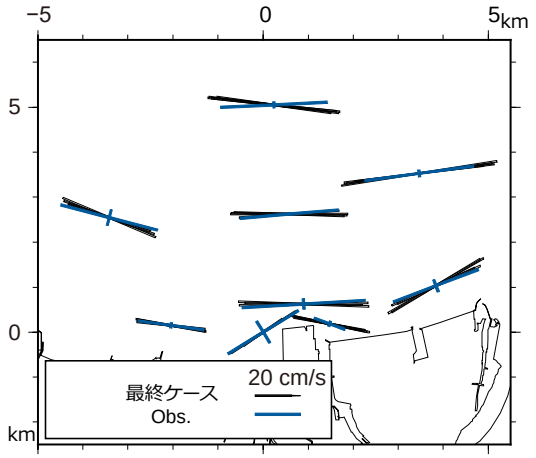
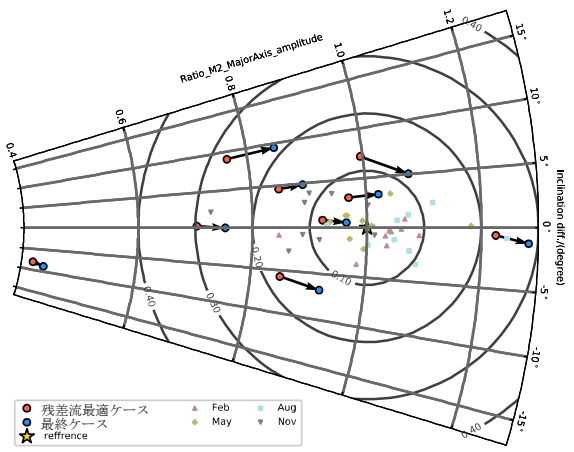
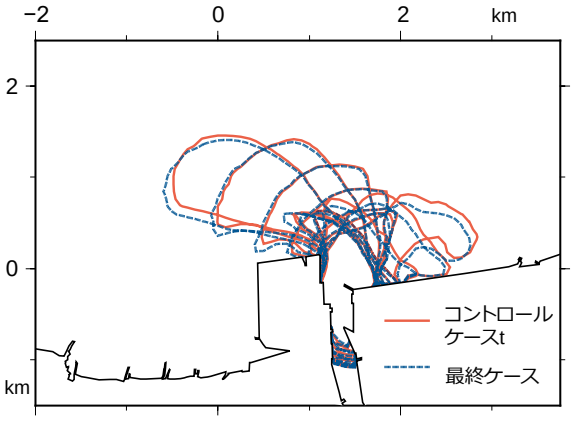


図 - 5　潮流楕円の主軸



図－6　観測された潮流楕円長軸で正規化したモデルによる潮流楕円長軸



図－7　表層における1時間毎の水温1℃上昇範囲

4. まとめ

温排水拡散モデルの潮汐流および潮汐残差流を再現する水面形状を推定するために，GFAを適用した．本研究で適用したGFAは，GFAに用いる逆行列に，SVDによる一般逆行列を使用したことから，これまで提案されたGFAよりも適用性やロバスト性が向上している．

GFAの適用により，観測された潮汐流や潮汐残差流を再現する温排水拡散モデルの水面形状が推定できた．これは，GFAがモデルパラメータや境界条件を効果的かつ適切に校正できたことを示している．1度目のGFAの適用で，モデル結果がかなり改善されたとことから，GFAを少なくとも1回適用することで，モデルの再現性を効果的に改善できる可能性が示唆された．最適化された水面形状から計算された潮汐流および潮汐残差流は，観測された潮汐流とよく一致し，これらの潮汐流が温排水の移流または拡散の駆動力となることから，GFAを用いた最適化は，沿岸域における温排水の環境影響評価に有用であると考えられる．

参考文献

1) Alonso, R., and S. Solari. 2021. “Automatic calibration and uncertainty quantification in waves dynamical downscaling”. Coastal Engneering, 169, 103944.
2) Gaeta, G. M., G. A. Samaras, and R. Archetti. 2020, “Numerical investigation of thermal discharge to coastal areas: A case study in South Italy.” *Environmental Modelling & Software,* 124, 104596.
3) Menemenlis, D., I. Fukumori, and T. Lee. 2005, “Using Green’s functions to calibrate an ocean general circulation model.” *Monthly Weather Review,* 133, 1224-1240.
4) Hirose, N. 2011, “Inverse estimation of empirical parameters used in a regional ocean circulation model.” *Journal of Oceanography*, 67, 323-336.
5) Sato, T., K. Tonoki, T. Yoshikawa, and Y. Tsuchiya. 2006. “Numerical and hydraulic simulations of the effect of Density Current Generation in a semi-enclosed tidal bay”. *Coastal Engineering*, 53, 49-64.
6) Toyoda, T., N. Sugiura, S. Masuda, Y. Sasaki, H. Igarashi, Y. Ishikawa, T. Hatayama, T. Kawano, Y. Kawai, S. Kouketsu, K. Katsumata, H. Uchida, T. Doi, M. Fukasawa and T. Awaji. 2015. “An improved simulation of the deep Pacific Ocean using optimally estimated vertical diffusivity based on the Green’s function method.” *Geophysical Research Letters*, 42, 9916-9924,
7) Tsubono, T. 2022, Diagram statistically displaying model performance for tides or quasi-periodic oscillations. Deep Sea Research Part I, 180,
8) Tsubono, T., T. Okada, Y. Niida, Y. Kino, and N. Nakashiki. 2023 Application of a generalized Green’s function approach to optimize modeled tidal and tidal residual currents for assesnment of the dispersion area of thermal effuluent discharges. Coastal Engineering Journal ,65 3,
9) 坪野考樹，仲敷憲和，松梨史郎. 1997，,複数管から放出された水平重力噴流に関する数値シミュレーション，水工学論文集，第41巻
10) 坪野考樹，三角和弘，津旨大輔．2015，グリーン関数法を用いた有明海でレーダ観測した視線方向のM2分潮流速の物理的内挿，土木学会論文集B1，第71巻，I_679-I_684.
11) 坪野考樹，三角和弘，津旨大輔．2016，潮汐計算モデルのパラメータ推定における再利用グリーン関数法の適用，土木学会論文集B2，第72巻，I_625-I_630