

沿岸音響トモグラフィーによるデータ同化を利用した広島湾の流況解析

陸田秀実*・伊澤 亮**・土井康明***・金子 新****

本論文は、広島湾の中でも流況予測精度の比較的悪い湾奥部を対象に、沿岸音響トモグラフィー (CATS: Coastal Acoustic Tomography System) によって得られた観測データを基盤として、内湾の流況予測モデルにデータ同化手法を適用し、より良い初期値の推定および沿岸流況予測モデルの高精度化を図るとともに、その有用性を検討することを目的としたものである。その結果、これまで流況精度が悪かった広島湾奥部において、モデルの初期値の推定および流況予測精度の向上を図ることが可能となった。特に、過大評価となっていた太田川河口域および島周辺の潮流速に大幅な改善が見られた。

1. はじめに

内湾のデータ同化は、観測データと予測モデルを使い、沿岸の流れの最もらしい状態を推定するものである。内湾の流況予測では、よりよい初期値を与えることが予測精度の向上に対して重要な役割を果たす。また、より高精度な流況の状態を把握することが、内湾の物理環境、生物環境の把握・保全に重要な役割を果たす。

本研究の目的は、沿岸音響トモグラフィー (以下、CATS: Coastal Acoustic Tomography System) を用いたデータ同化によって、広島湾の流況予測の高精度化を図ることにある。従来の定点観測方式や航走観測方式では、漁業活動や航路、強潮流などのために十分な観測を行うことができないが、CATS は対象海域を横切って音波を伝播させるだけで観測が行えるため、湾内、海峡部あるいは水道部全体の潮流・水温変動の時空間変動を短期間及び長期間連続モニタリングができる有効な海洋観測技術と考えられる。この技術によって得られる観測データ (以下、CATS 観測値) を基盤データとして、内湾の流況予測モデル (以下、モデル予測値) とデータ同化し、精度の高い初期値を推定することが可能になると予想される。

本研究では、広島湾の中でも流況予測精度の比較的悪い湾奥部、特に太田川河口域を対象として、沿岸音響トモグラフィーを用いたデータ同化手法を沿岸流況予測モデルへ適用し、より良い初期値の推定およびモデルの高精度化を図るとともに、その有用性を検討することを主な目的とする。

2. データ同化方法

(1) 沿岸音響トモグラフィー

海洋音響トモグラフィー (Ocean Acoustic Tomography) は音波を用いて大規模～小規模の海洋現象を短・長期的モニタリングする有力な観測手法である。この観測手法は、観測海域を囲むように複数台の音波送受信システムを設置し、それらの間の音波伝播時間を精密に計測するものである。このシステム間を伝わる音波の伝播時間を双方向で正確に計測することにより、流速・水温の時空間分布を推定する技術である。

この観測・解析手法を、沿岸域に応用した沿岸音響トモグラフィーシステム (以下、CATS: Coastal Acoustic Tomography System) の開発・適応性検証観測が、1994 年以来、広島大学の金子ら (Zheng ら, 1998; Park・Kaneko, 2000; Yamaoka・Kaneko, 2002) のグループを中心に行われ、その実証がなされている。これまでに、瀬戸内海安芸灘猫瀬戸、東京湾、宇和海、関門海峡、ロンボク海峡等において、その適用性が示され、近年、8 基の音響局 (係留型、岸壁設置型など) を用いた沿岸流動場のモニタリングに成功している (Yamaguchi・Kaneko, 2005)。なお、本トモグラフィーシステムによる水温・流速場の計測原理、システム構成、データ解析法の詳細は、金子ら (2003) を参照されたい。

図-1 は、本研究で対象とした広島湾奥部における CAT 音響局の設置ポイントとカキ筏の配置を示したものである。図中の●は岸壁設置型および係留型の音響局 8 基、○は CTD 観測点、ラインは音線、点群は牡蠣筏をそれぞれ示す。なお、この CATS 音響局に囲まれた海域およびその周辺の流況が、本システムによって取得可能となる。

(2) Bratseth 法

データ同化手法には、Nudging 法、最適内挿法、Kalman Filter 法、変分法等、様々な手法が提案されているが、本研究では CATS 観測値の時間・空間分解能、アルゴリズムの簡便性、導入の容易さ考慮して Bratseth

* 正会員 博(工) 広島大学助教授大学院工学研究科社会環境システム専攻

** 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻

*** 正会員 工博 広島大学教授大学院工学研究科社会環境システム専攻

**** 正会員 工博 広島大学教授大学院工学研究科社会環境システム専攻

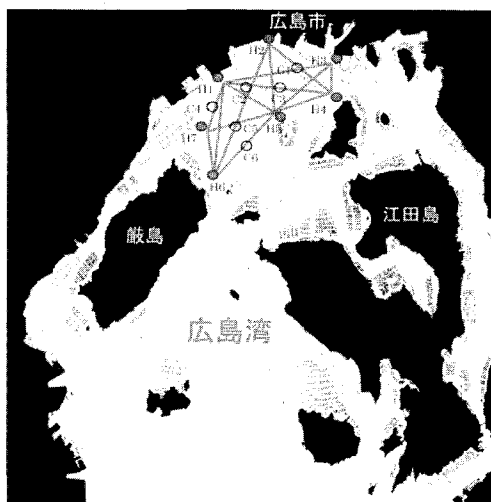


図-1 沿岸音響トモグラフィーの音響局とカキ筏の配置
(●:音響局, ○:CTD 観測点, ライン:音線, 点群:カキ筏)

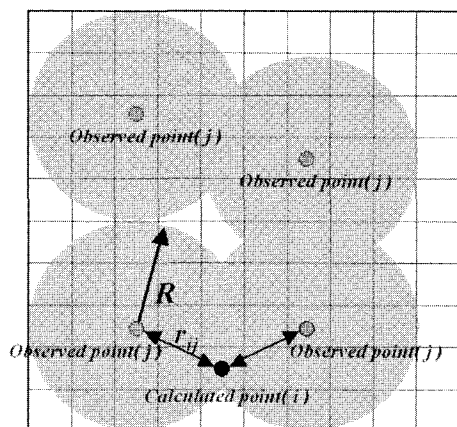


図-2 Bratseth法概念図 (r_{ij} :観測点と計算点の距離, R :影響範囲)

法 (Bratseth, A. M ら, 1986) を適用した。

この方法は、数段階にわたって第一推定値を修正していく方法で、段階を経るにしたがって、最適内挿法に収束していくことが理論的に証明されている。本手法の概念図を図-2 に示す。

この理論式は、CATS 観測値とモデル予測値の差に重み α をかけたものの和で、以下のように表記される。

$$s_x(n) = s_x(n-1) + \sum_{j=1}^{nobs} \alpha_{xj} [s_j^o - s_j(n-1)] \cdots (1)$$

ここで、 α は相関距離に基づく重みである。

また、グリッドポイント i における解析値 s_i は、 $nobs$ を観測データの数とし、次のように表される。

$$s_i(n) = s_i(n-1) + \sum_{j=1}^{nobs} \alpha_{ij} [s_j^o - s_j(n-1)] \cdots (2)$$

$$\alpha_{xj} = \frac{\rho_{xj}}{m_j} \quad \alpha_{ij} = \frac{(\rho_{ij} + \sigma_n^2 \delta_{ij})}{m_j} \cdots (3)$$

で表される。さらに、 σ_n^2 は観測誤差とモデル誤差の比、 δ_{ij} はクロネッカーデルタである。なお、 m_j は以下の式で表される。

$$m_j = \sigma_n^2 + \sum_{j=1}^{nobs} \rho_{ij} \cdots (4)$$

ここで、空間相関係数 ρ_{ij} は、相関距離 R の逆二乗に比例した指数関数として、

$$\rho_{ij} = \exp\left(-\frac{|r_{ij}|^2}{R^2}\right) \exp\left(-\frac{|\Delta z_{ij}|^2}{R_z^2}\right) \cdots (5)$$

で表される。 r_{ij} は沿岸音響トモグラフィーによるデータ取得地点とモデル計算点との水平方向の距離、 Δz_{ij} は同地点間の鉛直方向の距離、 R および R_z は水平および鉛直方向の同化影響範囲であり、同化反復回数とともに、以下のように設定される。

$$R(n) = \kappa_n \kappa_v R_0 \cdots (6)$$

ここで、 $\kappa_n = (2.0, 1.0, 0.8, 0.4)$ 、 $\kappa_v = 1.0$ と設定した。なお、本研究では、比較的浅く 2 次元性が卓越する海域場であることを考慮し、鉛直方向の同化影響範囲については無視することとした。

また、図-3 は、沿岸音響トモグラフィーシステムによって得られた観測データから、逆解析によって求められる流速データ地点を示す。なお、この海域は図-1 示す広島湾内で最も閉鎖性の高い海域であり、広島市沿岸部、厳島、似島、江田島によって四方囲まれている。本研究では、データ同化に関わる演算速度と同化精度を考慮して、これらの観測点を適当に間引いて、データ同化計算を行った。

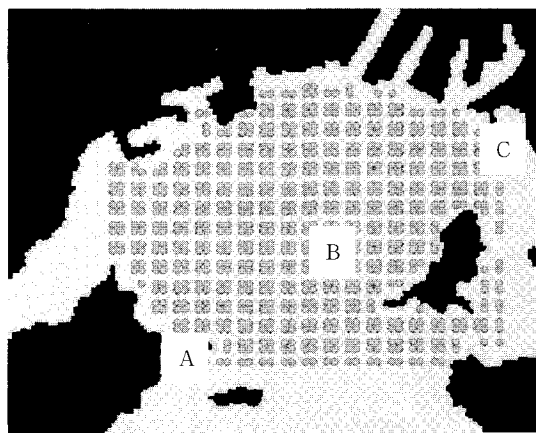


図-3 沿岸音響トモグラフィーシステムによって得られる流速データ取得地点

(3) 沿岸流況予測モデル

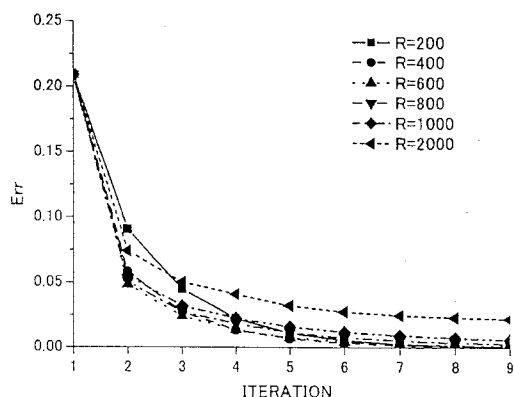
沿岸流況予測モデルには、これまで著者らが開発してきた広島湾環境シミュレータ (Mutsuda ら, 2003; 陸田ら, 2004) を用いた。本モデルは、高解像度沿岸流動モデルのみならず、養殖カキ筏群の流体抵抗およびカキモデルを考慮した水質・生態系モデル、さらには MSM データ同化を利用した局地気象モデルによって構成され、それぞれのサブモデルが統合された環境シミュレータとなっている。

計算領域は広島湾全域とし、沿岸音響トモグラフィデータが水平方向 2 次元データであることを考慮して、鉛直 4 層、水平格子サイズ 200 m とした。時間刻みは外部モード 1 s、内部モード 10 s とした。データ同化期間は、現地観測にあわせて 2003 年 9 月 18 日～19 日とし、データ同化時間間隔を 1 時間毎に設定した。また、生態系コンパートメントの初期値は観測開始時刻のものを用いた。潮汐変動は、別途、解析済みの瀬戸内海全域の数値計算結果を基に、ネスティングによって広島湾南部境界より与えた。さらに、流量年表を基に一級河川の太田川を始めとする 18 河川の流入量を考慮するとともに、衛星センサ ASTER のリモートセンシング画像を用いたカキ筏の抽出と計算格子への反映、水槽実験によるカキ筏の流体力係数の推定を行っている。

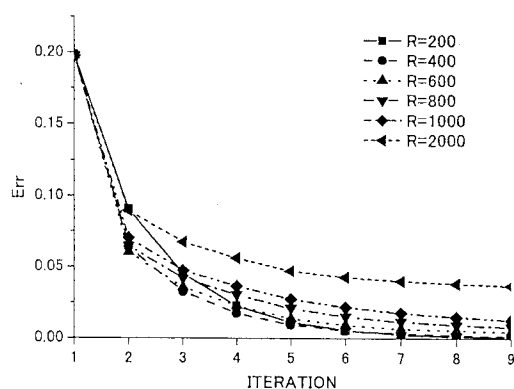
3. 沿岸音響トモグラフィによる同化結果

図-4 は、同化理論式における同化影響範囲 R に対するモデル予測値と CATS 観測値の平均二乗誤差 Err (同化対象の全海域) の比較を示したものである。図から、同化影響範囲 R に関係なく、反復回数が 4 程度で平均二乗誤差 Err は 0.05 以下となること、同化影響範囲 R が小さいほど初期値の推定精度が高くなることが分かる。この他、流速場の空間的な滑らかさ、同化演算時間についても考慮した結果、本同化計算では、計算格子サイズ (200 m) の 3 倍程度の同化影響範囲 R (600 m) が適切であることが明らかとなった。以下では、この条件下によるデータ同化結果について議論することにする。

図-5 および図-6 は、上げ潮 (11 時) および下げ潮 (17 時) におけるトモグラフィ観測結果および同化計算結果の潮流ベクトルを比較したものである。また、図-7 および図-8 は、図-3 に示す測点 A、B 及び C における潮流の東西・南北成分の時間変動について、データ同化の有無とトモグラフィ結果を比較したものである。これらの図から、CATS 観測値を利用したデータ同化によって、精度の高い初期値の推定およびモデル予測値の高精度化が可能となっている。特に、モデル誤差の大きい太田川河口域の微小な潮流速において大幅な改善が



(a) 潮流の東西成分



(b) 潮流の南北成分

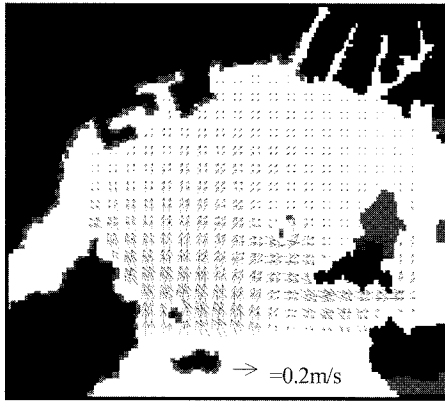
図-4 同化影響範囲 R に対するモデル予測値と CATS 観測値の平均二乗誤差 Err の比較

見られる。

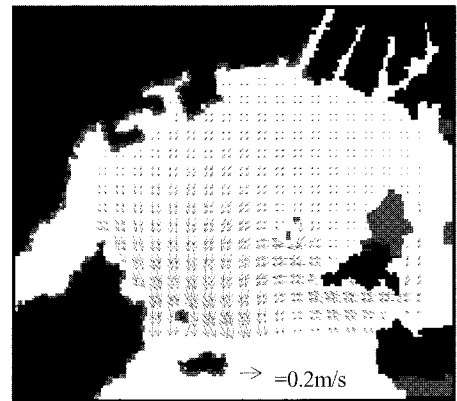
4. おわりに

本研究では、広島湾奥部を対象として、沿岸音響トモグラフィを用いたデータ同化手法の確立とその適用性を検討した。その結果、これまで流況精度の悪かった湾奥部において、モデルの初期値の推定および流況予測精度の向上を図ることが可能となった。特に、過大評価となっていた太田川河口域および島周辺の流速値に大幅な改善が見られた。しかしながら、計算格子サイズと同化影響範囲の関係、鉛直流速の予測精度に与える影響、同化領域と計算領域の関係などについて、さらなる検討課題が残されている。

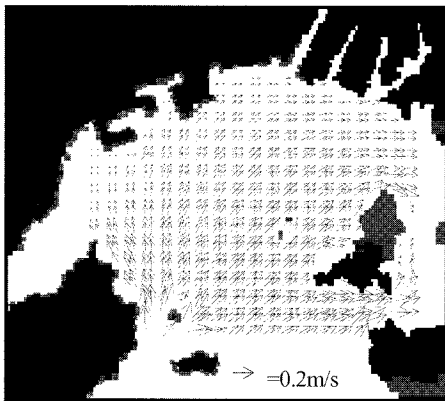
謝辞：合同現地観測を行った広島大学の観測グループ諸氏、観測沿岸音響トモグラフィの観測データおよび解析データを提供頂いた山口圭介氏 (元：広島大学大学院工学研究科博士後期課程) に謝意を表す。



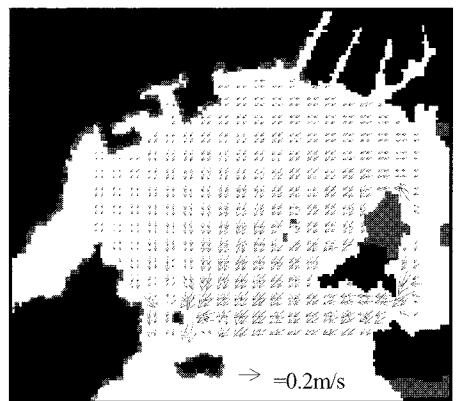
(a) 沿岸音響トモグラフィーによる観測結果



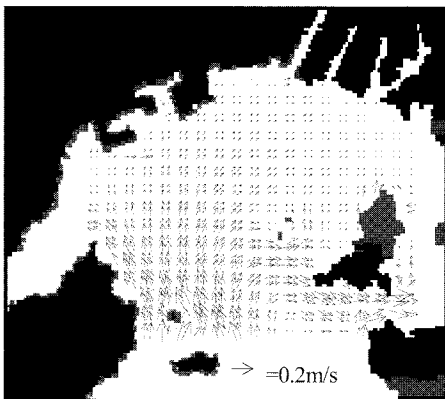
(a) 沿岸音響トモグラフィーによる観測結果



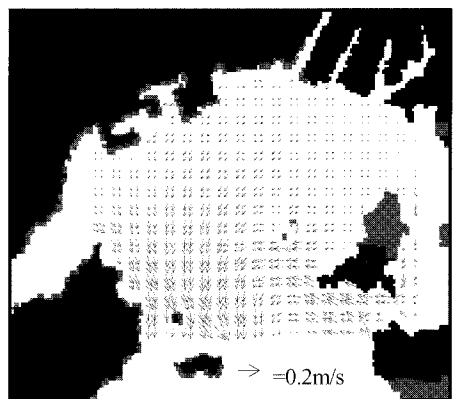
(b) 沿岸海洋モデルによる計算結果



(b) 沿岸海洋モデルによる計算結果



(c) データ同化結果



(c) データ同化結果

図-5 CATS観測値とデータ同化結果の比較 (上げ潮)

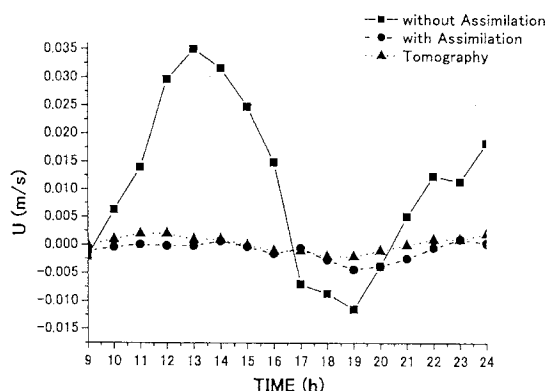
図-6 CATS観測値とデータ同化結果の比較 (下げ潮)

参 考 文 献

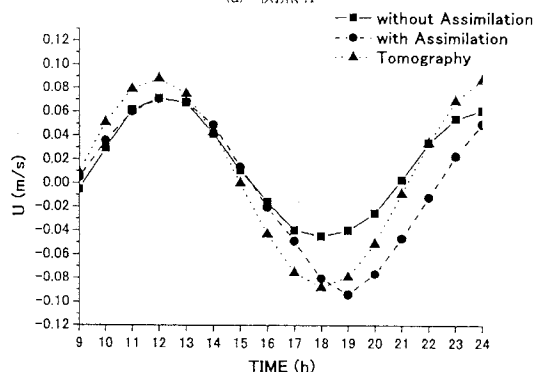
- 金子 新・江田憲彰・鄭 紅・高野 忠・山岡治彦・朴 在勲・山口圭介(2003): 沿岸音響トモグラフィー, 海の研究, 第12巻, 第1号, pp. 1-19.

- 陸田秀実・市井嘉崇・土井康明・内堀博之(2004): 広島湾の水質・生態系モデルとカキ養殖の影響, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 1111-1115.

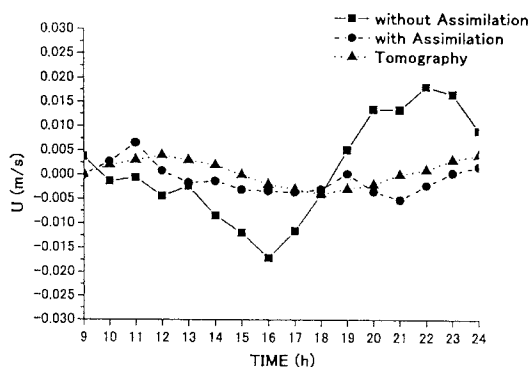
- Bratseth, A.M. (1986): Statistical interpolation by means of successive corrections, Tellus, 38A, pp. 439-447.



(a) 測点 A

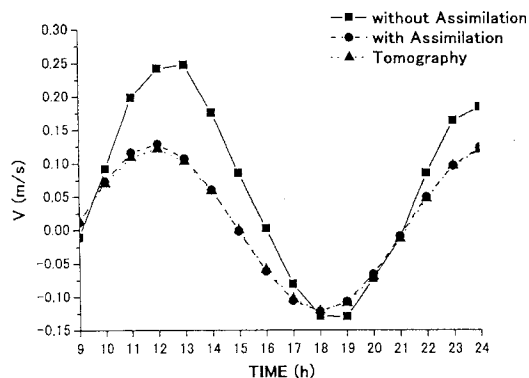


(b) 測点 B

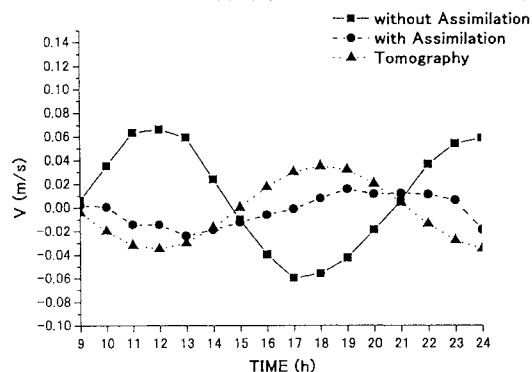


(c) 測点 C

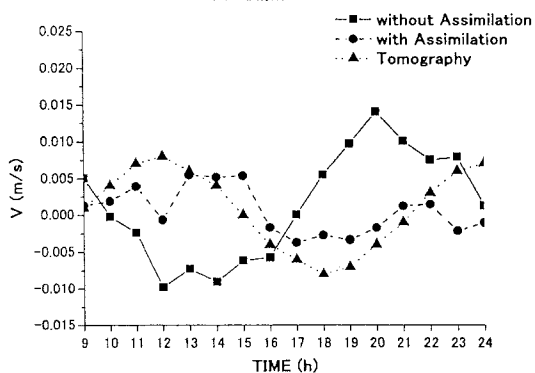
図-7 潮流の東西成分の時間変動の比較



(a) 測点 A



(b) 測点 B



(c) 測点 C

図-8 潮流の南北成分の時間変動の比較

- Mutsuda, H. Y. Ichii, Y. Akiyama and Y. DOI(2003) : Characteristics of Coastal Circulation in the Semi-Enclosed Seto Inland Sea Using Regional Atmosphere-Ocean Model, Proc. of the 8th International Conference on Estuarine and Coastal Modeling, ASCE, pp. 325-341.
- Park, J-H and A. Kaneko(2000) : Assimilation of coastal acoustic tomography data into a barotropic ocean model, Geophys. Res. Letters, 27(20), pp. 3373-3376.
- Yamaguchi, K., Ju Lin, A. Kaneko, T.Yamamoto and N.Gohda (2005) : A Continuous Mapping of Tidal Current Structures in the Kanmon Strait, Journal of Oceanography, Vo.61, pp.

283-294.

- Yamaoka, H., A.Kaneko, J-H. Park, H. Zheng, N. Gohda, T. Takano, X-H. Zhu and Y.Takasugi(2002) : Coastal Acoustic Tomography System and its Field Application, IEEE J. Oceanic Eng., 27(2), pp. 283-295.
- Zheng, H., H. Yamaoka, N. Gohda, H. Noguchi and A. Kaneko (1998) : Design of the acoustic tomography system for velocity measurement with an application to the coastal sea, J. Acoust. Soc., Japan(E), 19, pp. 199-210.