

成層期における伊勢湾口での海面温度低下と鉛直混合

大澤 輝夫* ・ 伊藤 秀文** ・ 水谷 英朗***
西部隆一郎**** ・ 安田 孝志*****

夏季成層期の伊勢湾口に見られる海面温度低下を NOAA 衛星データより検出した。湾口での海面温度低下は、冬季非成層期には確認されず、また小潮期と比較すると大潮期に顕著に現れることが明らかになった。大気海洋結合モデルによる数値計算により、観測結果と同様な海面温度低下を再現することができ、湾口付近において鉛直流及び鉛直拡散係数が大きくなることを示した。この湾口での海面温度低下は、成層化した内湾水及び外洋水が湾口付近の速い潮流と狭く複雑な海底地形によって鉛直混合し、相対的な低温水塊が表層に現れた結果であると結論付けた。また湾口で混合された水塊は湾の東側から湾内に進入する傾向があることも示された。

1. はじめに

伊勢湾では、高橋ら (2000) や Fujiwara ら (2002) 等の研究によって、昨今大きな沿岸環境問題のひとつとなっている夏季の貧酸素水塊の形成が、湾口における海水の鉛直混合と混合水の進入深度と密接に関わっていることがわかってきた。伊勢湾は湾奥に木曾三川が流入し、淡水供給が他の内湾に比べて極めて大きいため、夏季には非常に強い密度成層が発達する。そしてこの成層の強い海水は伊良湖水道を通して外洋水と接し、さらに狭い湾口部で強化された潮流が海水の鉛直混合を促進している。混合された水塊は、内湾水の密度との関係から中層進入になる場合もあれば、低層進入になる場合もある。特に中層進入になる場合に、低層の水塊が孤立停滞し貧酸素化が起こる。このように、湾口での潮汐による鉛直混合は、湾内の海水流動・沿岸環境を決定付ける大きな役割を果たしている。

本研究では、先行研究であり直接的に扱われていない伊勢湾口での鉛直混合そのものについて調べた。特に鉛直混合を海面温度低下という観点から検討することで、その鉛直的な構造のみならず水平構造についても検討を行った。後半では大気海洋結合モデルにより、海面温度低下及び鉛直混合の再現計算を行い、その3次元的な構造の解明を試みた。

2. NOAA 衛星データによる解析

湾口において成層化した内湾水が鉛直混合するのであれば、低温の下層水と高温の上層水が混合し、湾口付近の海面温度が周辺温度に比べて低くなるものと期待でき

JUL-SEP AVERAGE

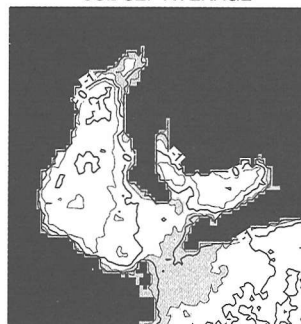


図-1 夏季 (2001 年 7 月～9 月) における平均海面温度の分布。コンターは 0.5°C 間隔で、偏差が -0.5°C 以下の低温領域を灰色トーンで示す。

JAN-MAR AVERAGE



図-2 冬季 (2001 年 1 月～3 月) における平均海面温度の分布。表示は図-1 に同じ。

る。そしてこの拡がり調べることによって、鉛直混合が生じる範囲を面的に捉えることが可能になる。ここではまず、NOAA 衛星データを用いて、湾口付近の海面温度低下の検出を試みた。NOAA 衛星データには JAFIC (漁業情報サービスセンター) で一次処理された NOAA 海面温度データを用いた。このデータの空間解像度は約 1.3 km、時間解像度は 1 日であり、撮影時刻は世界標準時で 23:00 である。図-1 に夏季 (2001 年 7 月～9 月) と図-2 に冬季 (2001 年 1 月～3 月) の平均海面温度の分布を示す。

* 正会員 博(理) 岐阜大学助手 大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻

** 岐阜大学 大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻

*** (株)ハイドロソフト技術研究所

**** 正会員 博(工) 岐阜大学助教授 大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻

***** 正会員 工 博 岐阜大学教授 大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻

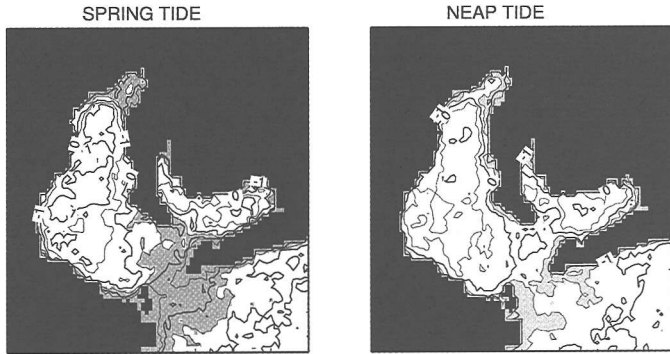


図-3 海面温度偏差の分布。(左)大潮期、(右)小潮期。表示は図-1と同じ。

ここでは領域内の相対的な海面温度分布に興味があるので、各格子での海面温度平均値からそれらの領域平均値を差し引き、温度偏差の形で示している。夏季には湾口付近に相対的な低温領域がはっきりと検出され、 -0.5 度以下の領域で見れば、湾口を挟んで20 km程度の拡がりを持っていることがわかる。この温度低下は、伊勢湾全体が相対的な低温領域になっている冬季には見られない現象である。伊勢湾では夏季に強い温度成層が形成される一方で、冬季にはほとんど鉛直一様となる(Sekine・Mizutani, 1993)ことから、図-1に見られる海面温度低下は明らかに成層に関係した現象であると言える。

次にこの海面温度低下と潮流との関係について考える。もし図-1に見られる低温領域が、湾口付近の潮流と関係しているのであれば、潮流が強くなる大潮期と弱くなる小潮期とでは温度低下の程度に差が出るものと考えられる。そこで、2001年7月から9月までの3ヶ月の間に含まれる大潮期と小潮期のそれぞれについて、海面温度の平均値を求めたものが図-3である。この図より、大潮期には湾口で -1.5 度以下の低温領域が現れ、低温化が図-1よりも一層明瞭になっていることがわかる。一方、小潮期には低温領域が湾口両岸に分離して不明瞭になっている。これらの事実は、この海面温度低下が明らかに潮流の強さに関係した現象であることを示している。

以上より、NOAA衛星データの解析によって検出された夏季の湾口付近での海面温度低下は、成層と潮流の強さに明確に依存することから、湾口での鉛直混合に伴う相対的な低温水塊であると考えられる。

3. 数値計算による解析

3.1 計算条件

湾口での海面温度低下と潮流による鉛直混合の関係を明らかにするために、伊勢湾大気海洋結合モデル(水谷ら, 2003)を用いて数値計算を行った。この大気海洋結合モデルは、メソ気象モデルMM5(ペンシルベニア州立

大学・米国大気研究センター)、海洋モデルPOM(プリンストン大学)及び潮汐モデルNAO(国立天文台)を結合し、気象場・海洋場の同時計算を可能にしたものである。このモデルを用いて2001年7月10日から7月25日までの半月間の数値計算を行った。初期温度場は深さのみの関数とし、簡単な指数関数により内湾と外洋でそれぞれ一様に与えた。関数型の決定には、第四管区海上保安本部による7月10日の観測結果(第四管区海上保安本部水路部, 2001)と気候値(Sekine・Mizutani, 1993)を参考にした。初期場を単純に与えているため、時間軸としての月日はそれ程大きな意味を持たないが、海面境界過程、河川水流入、潮汐を計算するのに使われる1時間毎の中部・近畿地方気象場データ(深尾ら, 2003)及び河川流量データは7月10日から25日までの実データを与えて計算を行った。尚、モデルの中の時間の取り扱いの都合から、以降の時刻に関するすべての記述は世界標準時に統一する。

3.2 海面温度低下の再現性

POMでは格子の関係上、海面温度を直接的に計算しないため、ここでは格子値を鉛直内挿して求めた水深1

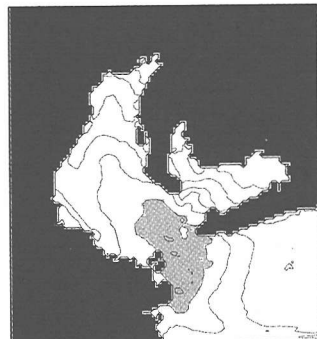
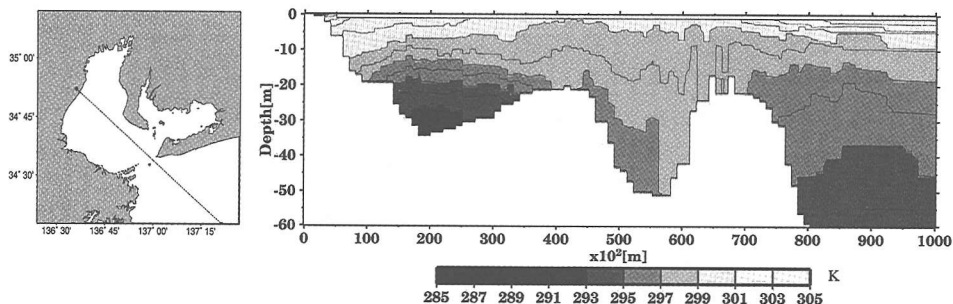
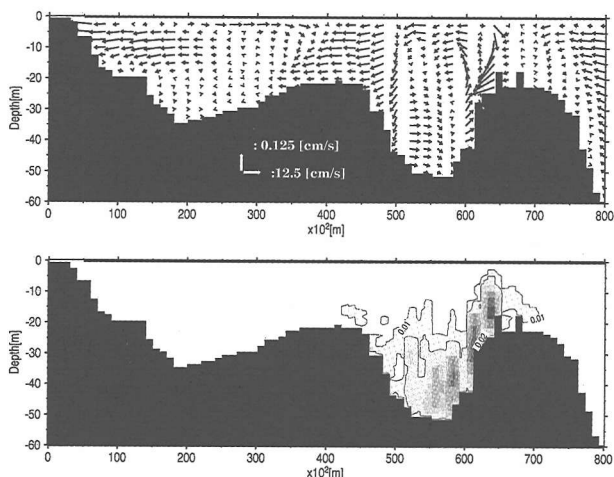


図-4 計算期間中の平均表層温度偏差(水深1 m)。コンターは 1°C 間隔で、 -2°C 以下の低温領域を灰色トーンで示す。



図一5 大潮時の温度の断面図 (2001年7月22日5時~17時の平均)。左図は断面のライン。



図一6 大潮時の(上)流速ベクトルと(下)鉛直拡散係数の断面図 (2001年7月22日5時~17時の平均)。断面のラインは図一4に同じ。鉛直拡散係数のコンターは、 $0.01 \text{ m}^2/\text{s}$ ごと。

mの表層温度をその代用として用いた。図一4に計算期間中の平均表層温度分布を示す。ここではNOAA衛星データの解析と同じく、領域平均温度を引いた温度偏差として表示している。灰色トーンで示される温度偏差が -2°C 以下の領域が湾口付近に見られる。絶対値に違いはあるものの、これは、湾口での表層温度低下が数値計算においても再現され得ることを意味している。数値計算結果(図一4)とNOAA観測値(図一1)との大きな違いは、計算領域内の空間的な温度変動幅が計算値の方がかなり大きく算出される点である。これは水谷ら(2003)で指摘されているように、POMで計算される鉛直混合とMM5で計算される日射量が共に過大評価気味であることに起因する。つまり、鉛直混合が強いために湾口の低温化が顕著になり、また日射量が大きいために浅海域の高温化が顕著になっている。こうして計算領域全体で空間的な温度変動幅が大きくなり、湾口での低温化に差が生じる結果となっている。

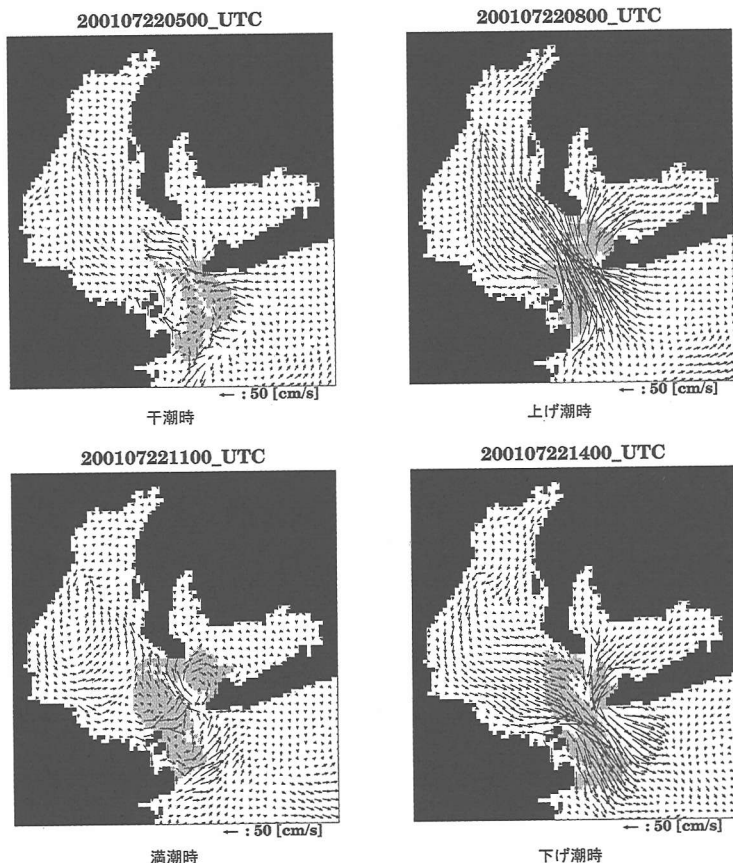
3.3 鉛直混合と表層温度低下

数値計算の結果では、NOAA衛星データの解析結果と

同様に、湾口の表層温度低下は小潮期に比べて大潮期に顕著になる傾向が見られた。以下では大潮期の中でも潮差が最大となった7月22日の5時の干潮から17時までの干潮までの1周期分について解析を行った。

図一5は湾口を縦断する面における温度分布である。初期場を比較的単純に与えたにも関わらず、温度分布はこれまでに報告されている観測値(例えば、Sekine・Mizutani, 1993)に似た分布となっている。比較的成層の強い湾内と弱い外洋に挟まれる形で、湾口付近では成層が弱くなっている様子が伺える。湾口付近では鉛直混合により、同水深の周辺値と比べて表層では温度が低く、低層では高くなっている。表層に見られる相対的な低温領域がまさに図一4で示される湾口付近の低温領域に対応する。

図一6に同じ縦断面上での流速ベクトル及び鉛直拡散係数を示す。湾口付近の狭く複雑な地形によって、複雑な鉛直流が発生していることがわかる。また湾口の深みとその周辺において鉛直拡散係数の値が $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ のオーダーとなっており、極めて強い鉛直拡散が起こって



図一7 大潮時における水深2mでの流速ベクトルと水深1mの表層温度。表層温度が25°C以下の領域を灰色トーンで示す。

いることを示唆している。

3.4 潮汐との関係

数値計算では干満の各位相における表層低温化の移動・消長を追跡することができる。図一7に干潮、上げ潮、満潮、下げ潮の各位相における表層流速ベクトルと表層温度を示す。干潮時に伊良湖水道(渥美半島-志摩半島間)よりも外洋側にあった低温領域は上げ潮流と共に湾口へと移動し、1m/sを超える潮流の下で更なる温度低下が起こっている。同時に、中山水道(渥美半島-知多半島間)にも低温領域が見え始めている。こうして潮の止まる満潮時には、湾内に2つの低温領域中心が存在することになる。この2つの低温領域は下げ潮時に伊良湖水道で再び合流するが、完全にひとつにはなっていない。詳細を見ると、5時の干潮の段階においても既に大きく2つの領域に別れていることがわかる。

2つの低温領域が見られることについては、次の2つの解釈ができる。ひとつは、単純に、伊良湖水道で起こるのと同じような低温化が中山水道でも生じているというマクロな見方である。もうひとつは、鉛直混合が潮流の最大流速軸上ではなくその両側の水平シアの強い領

域で起こりやすいために、伊良湖水道で生じる2つの低温領域の東側のものがたまたま中山水道付近に見えるという、よりミクロな解釈である。中山水道付近で2つの低温領域が見られないという事実は後者の説と矛盾するが、NOAA衛星データの解析結果(図一1と図一3)を良く見ると、確かに伊良湖水道の中心よりも、両岸近くで海面温度が低くなっていることがわかる。計算に用いた結合モデルには、前述したように鉛直混合と日射量の算出にやや問題があり、その両者の影響が計算領域内で最も顕在化する中山水道では、この疑問を解決するのに必要なミクロな解析は現段階では不可能である。それ故、鉛直混合に関するミクロな構造を含めたより詳細な解析は今後の課題とする。

3.5 湾口混合水の流入経路

NOAA衛星データの解析結果(図一1と図一3)において特筆すべき点として、伊勢湾南部では東側の方が西側よりも相対的に海面温度が低いという事実が挙げられる。これは湾口で形成された低温の表層水が湾南部では主として東側から進入することに対応している。図一8に計算期間中の表層残差流を示す。水深2mでは、湾口

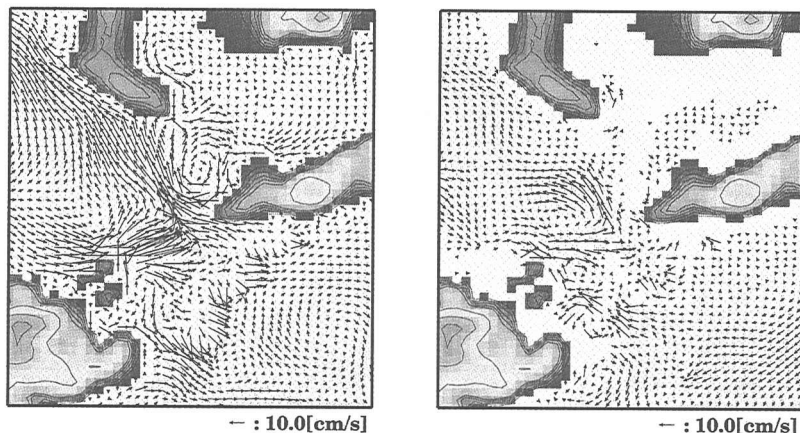


図-8 伊勢湾口付近における計算期間中の残差流。(左)水深2m, (右)水深15m.

での混合水が知多半島に沿って湾内に流入している様子がきれいに見られる。水深15mの流れにもほぼ同様な傾向が見られるが、東側で流入、西側で流出する傾向は結局どの水深においても認められることがわかった。すなわち、夏季成層期であっても上層流出・下層流入(あるいは中層進入)という一般的なエスチュアリー循環(鉛直循環)が見られる訳ではなく、むしろこの計算結果は水平循環の方が卓越することを示唆している。この結果は、Fujiwaraら(2002)による ADCP 観測や、寛ら(2002)による診断モデルによる数値計算の結果とも良く一致している。

4. おわりに

夏季成層期における伊勢湾口での海面温度低下と鉛直混合について、今回得られた結果を以下にまとめる。

- 1) NOAA 衛星データの解析から、夏季成層期の伊勢湾口において、周辺海域に比べて温度偏差が -0.5 度以下であるような海面温度の低い領域が20km程度の幅を持って検出された。この海面温度低下は冬季非成層期には見られず、また大潮期に顕著になる。
- 2) 大気海洋結合モデルによる数値計算によって、湾口での海面温度低下を再現することができた。湾口では狭く複雑な地形によって鉛直流が複雑になり、また鉛直拡散係数が大きくなることを示し、NOAA 衛星データで見られた海面温度低下が、成層化した内湾水の潮流による鉛直混合に起因するものであると結論付けた。
- 3) 湾口で鉛直混合された水塊は湾の東側から湾内に

流入する傾向があり、湾南部では一般的なエスチュアリー循環(鉛直循環)よりも、東側流入・西側流出という水平循環が卓越する様子が示された。

謝辞：河川流量データは国土交通省中部地方整備局より提供して頂いた。また、本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金若手研究(B)(2)14750426による成果であり、ここに併せて謝意を表する。

参 考 文 献

- 寛 茂穂・藤原建紀・山田活且(2002): 伊勢湾における密度・流動構造の季節変化, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 386-390.
- 第四管区海上保安本部水路部(2001): 海洋概報, 平成13年度第7号.
- 高橋鉄哉・藤原建紀・久野正博・杉山陽一(2000): 伊勢湾における外洋系水の進入深度と貧酸素水塊の季節変動, 海の研究, vol. 9, pp. 91-100.
- 深尾一仁・大澤輝夫・安田孝志(2003): メソ気象モデルMM5を用いた局地気象場のデータベース化とその精度検証, 第11回地球環境シンポジウム講演論文集, 土木学会地球環境委員会, pp. 111-116.
- 水谷英朗・大澤輝夫・村上智一・小林智尚・安田孝志・藤原建紀(2003): 伊勢湾大気海洋結合モデルの構築とその精度検証, 海岸工学論文集, 第50号, pp. 431-435.
- Fujiwara, T., T. Takahashi, A. Kasai, Y. Sugiyama and M. Kuno (2002): The role of circulation in the development of hypoxia in Ise Bay, Japan, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 54, pp. 19-31.
- Sekine, Y. and H. Mizutani (1993): Seasonal variations in vertical distribution of temperature, salinity and density in and off Ise Bay, Bull. Fac. Biores., Mie Univ., No. 10, pp. 147-164.