

いは河川出水)に伴う湾内水温構造の変化は、ブイKのみの記録ではあるものの1997年9月においても計測されていることから、一般的に成層状態から弱成層状態への湾内水温の遷移過程は、季節変化に伴うゆっくりとした形ではなく、非定常性が強い現象であるものと考えられる。

続いて、このような急激な水温変化、特に底層水温の上昇を引き起こす要因について考察する。ブイ3における水温を見てみると、わずか1日程度の間には表層から水深30m付近まで水温がほぼ一様化していることが分かる。このことから、この急激な水温変化が単純な水塊の鉛直混合のみによって引き起こされたものとは考え難い。そこで、ブイ3、ブイ5およびブイYNにおける水温データを基に、湾口部～湾中央部における湾軸方向水温の空間構造の時間変化を調べてみた(図-4)。図を見ると8月31日から等水温線が湾口部に向かって傾き始め、まず湾口部(ブイ3)下層の水温が上昇し、続いて、湾中央側底層の水温が徐々に上昇していることが分かる。つまり、各ブイ(ブイKは除く)で計測された底層水温の上昇は、基本的には、北東風の連吹によって湾内表層の高温水塊が湾口部神奈川側側に堆積したことが原因であり、観音崎の張り出した地形がこの堆積過程を助長しているものと考えられる。一方、この北東風に伴い湾奥では沿岸湧昇が発生し、ブイKの水温が低下したものと考えられる(図-5)。ところで、8月においても幾度か北東風が数日間に渡り連吹しているにも関わらず、このような大きな水温変動は見られない。この原因として、まず、それぞれの時期における風速レベルの違いが挙げられる。特に、海水の運動にとって重要な風速の2乗値は、8月末の水温急変時においては8月上旬～中旬での北東

風連吹時に比べ約2～3倍の値に達している。さらに別の要因として、北東風が吹き始める8月31日以前の8月28日から大量の河川出水が起きており、この大量の出水に伴って、表層で湾外に流出し、底層で湾内に流入する形の重力循環が顕著になっていたことが考えられる。ここでは示さないが、実際に、28日から31日にかけて各ブイの表層塩分は大きく低下し、逆に底層塩分は上昇している。したがって、水温急変時には、この強化された重力循環に加え、強い北東風が連吹することによって湾内表層水の湾口部への堆積が顕著になったものと考えられる。

なお、ここで述べた水温急変現象に対する移流効果の果たす役割の他に、成層期から弱成層期の遷移過程に水塊の混合作用がどのような役割を果たしているのかという点に関しては検討中である。

3.2 成層期(Run 1)、弱成層期(Run 3)における残差流構造

次に、3.1で述べた急激な湾内の水温構造の変化に伴う残差流構造の変化を、日潮不等がほとんど無い大潮期に実施したRun 1(8月11, 12日)およびRun 3(9月8, 9日)における断面観測結果に基づいて述べる。観測期間中の気象状況や河川流量(図-2)、さらに各ブイにおける水温変動(図-3)から判断して、Run 1, Run 3における残差流構造は、それぞれ成層期、弱成層期を代表しているものと考えられる。図-6, 7にそれぞれRun 1, Run 3におけるLine 1, 2での水温、塩分、残差流の断面内分布と、各観測断面中央部における密度の鉛直分布を示す。

成層期(Run 1)では、水温、塩分層が共に発達しており、観測断面内で等水温線、等塩分線がほぼ水平になっ

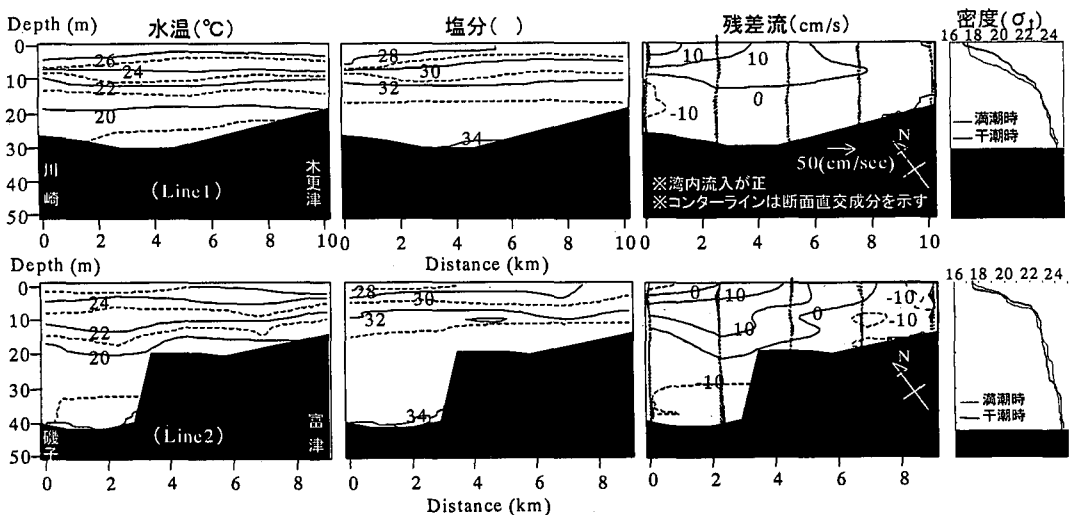


図-6 成層期(Run 1)における水温、塩分、残差流、密度分布

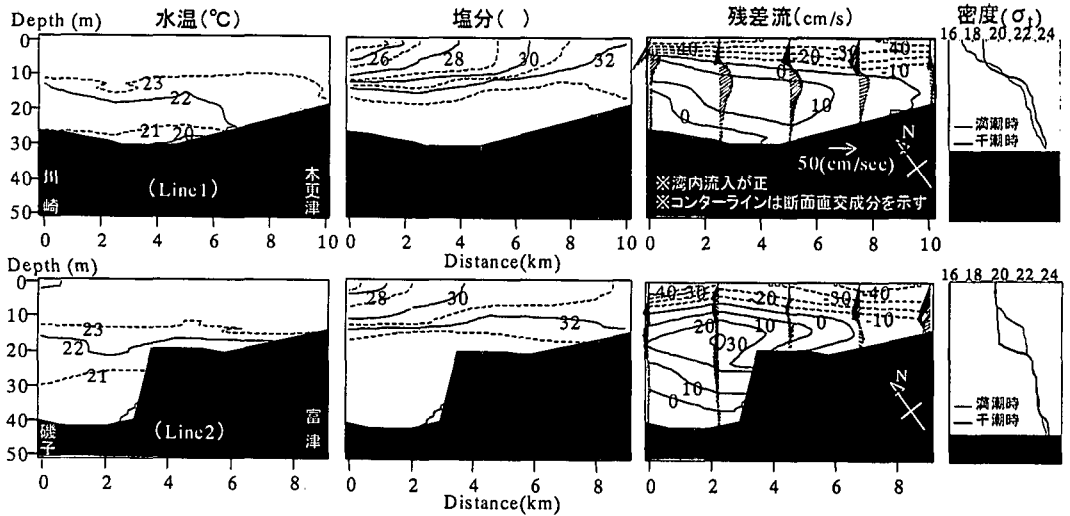


図-7 成層期 (Run 3) における水温、塩分、残差流、密度分布

ていることが分かる。また、密度分布は Line 1 では exponential 型をしており、表層ほど密度の鉛直勾配が大きい。一方、Line 2 では水深 10 m 付近で密度勾配が急激に変化しており、密度はその上下層においておおよそ直線的な分布をしている。残差流分布を見てみると、Line 1, 2 とも流速が非常に小さいことが分かる。Line 1 での残差流パターンは、鉛直的には、密度勾配が大きな水深 10 m 以浅で湾内に流入し、10 m 以深において湾外へ流出している。水平的には、神奈川県側表層で湾内に流入し、千葉県側全層で湾外に流出していることが分かる。Line 2 における流動パターンも、神奈川県側表層の一部を除いては Line 1 と同様であることが分かる。この表層で流入し、底層で流出する形の鉛直方向の残差流パターンは、南よりの海上風の影響を受けたものと考えられる。

弱成層期 (Run 3) では、水温成層は成層期 (Run 1) に比べて非常に弱くなっている。これに対し、塩分は 8 月末から 9 月上旬にかけての大量の河川出水に伴い、30‰以下の低塩分水が神奈川県側表層に 10 m 程度の厚さで存在しており、その下層で塩分躍層を形成している。密度分布はおおよそ塩分分布に対応しており、神奈川県側での密度躍層は水深 10~15 m 付近に存在し、密度はその上下層で鉛直的にはほぼ真っ直ぐな分布をしている。ただし、Line 2 では潮汐と共に密度界面が鉛直方向に大きく変動している。一方、塩分分布から分かるように、千葉県側では明確な密度躍層は存在しない。残差流の断面内分布を見ると、流向・流速とも成層期 (Run 1) とは大きく異なっていることが分かる。残差流パターンは、両断面とも鉛直的には表層で流出し、底層で流入する形になっており、最大流出速度は 40 cm/s 以上、また、最

大流入速度は Line 1 では 16 cm/s 以上、Line 2 では 30 cm/s までに達する。水平的にみると、Line 1 では、密度界面付近の水深において神奈川県側から流入し、千葉県側から流出する時計回りの循環流構造が形成されている。この湾中央部から湾奥部における時計回りの循環流構造は、著者らが、96 年 9 月に実施した同様な観測においてもとらえられており (中川ら, 1997)、弱成層期における湾中央部~湾奥部での特徴的な残差流構造であるものと考えられる。なお、その発生メカニズムに関しては藤原ら (1994) を参照されたい。また、Line 2 の神奈川県側における残差流を見てみると、平均的な密度界面の存在する水深 15 m 付近で湾内に流入する流れが顕著になっていることが分かる。このように、基本的には Run 3 では強い北よりの風と、大量の河川出水によって表層で流出し、底層で流入する形の鉛直循環流が顕著になっているものと考えられるが、単純な吹送流や重力循環流だけを考えた場合、この密度界面付近での顕著な流れを説明することは困難である。密度界面付近における流れを引き起こす要因としては、表層水と底層水の間での密度を持った水塊が密度界面に貫入する形の密度流や、密度界面付近に発生する内部重力波が考えられる。特に、内部波による進行方向へ向かう平均流の存在が五ヶ所湾などで指摘されており (藤原ら, 1995)、また、本観測においても湾口部に位置するブイ 3 付近で、波高 20 m 以上に達する内部潮汐波が観測されている (田淵ら, 1999) ことから、この内部潮汐波が海面付近にその進行方向 (湾奥) に向かう平均流を発生させている可能性が十分に考えられる。

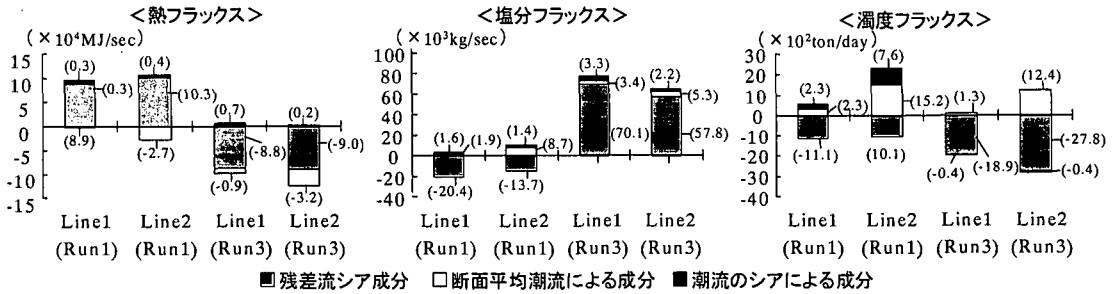


図-8 成層期 (Run 1), 弱成層期 (Run 3) における分散フラックス

3.3 成層期 (Run 1), 弱成層期 (Run 3) における熱, 物質フラックスおよびその輸送特性

続いて, 8月末の水温急変現象以前の成層期 (Run 1) と変化後の弱成層期 (Run 3) における湾内の熱, 物質フラックスおよびその輸送特性について調べる. 解析にあたっては, 物質輸送特性を明らかにするために流速 V , 水温や物質濃度 C を 1 潮汐平均 (残差流) 成分 \bar{V}, \bar{C} と時間変動成分 V', C' に分ける.

$$V = \bar{V} + V', \quad C = \bar{C} + C' \quad \dots\dots\dots (1)$$

さらに, それぞれを断面平均成分とそれからの偏差 (シア) 成分に分解する.

$$\bar{V} = \langle \bar{V} \rangle + \bar{V}_a, \quad V' = \langle V' \rangle + V' \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\bar{C} = \langle \bar{C} \rangle + \bar{C}_a, \quad C' = \langle C' \rangle + C' \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで, $\langle \rangle$ は観測断面内の空間平均を表す. 最終的には, 1 潮汐間における熱および物質フラックスは以下のようになる.

$$F = \langle \bar{V} \rangle \langle \bar{C} \rangle + \langle \bar{V}_a \rangle \langle \bar{C}_a \rangle + \langle V' \rangle \langle C' \rangle + \langle V'_a \rangle \langle C'_a \rangle \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで, 添え字 A は観測断面内における積分を意味する. 第 1 項は移流項であり, 第 2 項以下が分散項である. さらに, 分散項は残差流シア項 (第 2 項), 断面平均潮流項 (第 3 項), 潮流シア項 (第 4 項) に分けられる.

熱, 塩分, 濁質フラックスの分散成分の計算結果を図-8 に示す. 熱, 塩分フラックスについてみると, 両観測時とも残差流シアによる輸送量が, 潮流成分に比べ卓越している. しかし, 成層期 (Run 1) では, 熱は湾外から湾内へ, また塩分は湾内から湾外へ輸送されているのに対し, 弱成層期 (Run 2) では, それぞれ Run 1 と反対方向の輸送が生じている. これは, Run 1 では高温・低塩分の水塊が表層から湾内に流入し, 低温・高塩分の水塊が底層から湾外に流出する形の残差流構造であったのに対し, Run 2 では高温・低塩分の水塊が表層で流出し, 低温・高塩分の水塊が底層で流入する形の残差流構造が顕著であったためである. 濁質フラックスを見ると, 両観測時とも主に残差流シア成分により湾内から湾外へ向う輸送が生じているのに対し, 同程度, あるいはそれ以上

の濁質が断面平均潮流成分によって湾内へ輸送されていることが分かる. これは上げ潮最大時に Line 2 底層付近において高濁度の水塊が発生しているためである.

4. まとめ

本観測によって, 以下のことが明らかとなった. 1998 年 8 ~ 9 月にかけての湾内の水温構造は, 季節の変化に伴って漸変する形ではなく, イベント的な出水や風向・風速の変化による複合作用によってわずか数日間のうちに成層状態から, 弱成層状態へ急激に遷移する非定常性の強い過程である. また, 水温急変の前後では, 湾内における残差流構造が大きく変化し, その変化に伴って熱や物質輸送過程が大きく変わる. 今後は, 数値計算等によって, 水温急変現象や残差流の形成メカニズム, また内部波が湾内の物質輸送に果たす役割について調べていく予定である.

なお, 本研究を行なうに当たり, 第 2 海保における風速データを運輸省第 2 港湾建設局から提供していただいた. 記して謝意を表します.

参考文献

田淵広嗣・日向博文・灘岡和夫・吉岡 健・八木 宏・古川恵太 (1999): 夏季の東京湾における内部潮汐波, 日本海洋学会春季大会講演要旨集, p. 76.

中川康之・八木 宏・鯉淵幸生・日向博文・稲垣 聡・小倉久子 (1997): 東京湾内湾部における成層期の流動特性に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 44 巻 pp. 401-405.

日向博文・八木 宏・吉岡 健・灘岡和夫 (1999): 黒潮系暖水波及時における冬季東京湾湾口部の流動構造と熱・物質フラックス, 土木工学論文集 (投稿中).

藤原建紀・沢田好史・中辻啓二・倉本茂樹 (1994): 大阪湾東部上層水の交換時間と流動特性, 沿岸海洋研究ノート, 第 31 巻, 第 2 号, pp. 227-238.

藤原建紀・高橋鉄哉・阿保勝之・杜多 哲 (1995): 内部潮汐による五ヶ所湾の海水交換, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 1111-1116.

Guo, X. and T. Yanagi (1996): Seasonal variation of residual current in Tokyo Bay, Japan-diagnostic numerical experiments, J. Oceanogr., Vol. 52, pp. 597-616.