

伊勢湾湾央部の残差流系に関する一考察

杉山陽一*・中辻啓二**・藤原建紀***・高木不折****

1. はじめに

伊勢湾の残差流系はいくつかの環流が連なって構成されている(宇野木, 1978)。このうち最もはっきりしているのは湾奥に存在する時計回りの環流であり, 著者ら(1994)はこれが高気圧性の渦であり, 四季を通じて存在することを指摘している。また, 伊勢湾全域の残差流系の概要については, 伊勢湾潮流図(海上保安庁, 1995)の中に四季毎に整理されて掲載されている恒流図から知ることができる。これを見て興味深いことは, 伊勢湾の湾央において秋季や春季には時計回りの大きな環流しか存在しないのに対し, 夏季には時計回りの環流の南東に隣接する形で逆回り(反時計回り)の大きくて明瞭な環流が存在することである。湾央部における残差流系のこのような違いは, 伊勢湾全域の残差流場の印象を決定づける重要な要素であるが, その実態についてこれまであまり議論されたことがなく, その機構もよくわかっていない。本研究では伊勢湾湾央部の残差流場の3次元構造とその決定機構を明らかにすることを目的として, 現地観測を実施するとともに, 3次元パロクリック潮流モデルを用いた数値実験を実施した結果について報告する。

2. 湾奥部の時計回り渦の水平規模

湾央部にも湾奥部にみられる時計回りの渦が広がってくることがある(杉山ら, 1995)。この渦の大きさについて, Fujiwara ら(1997)は三方を陸岸で囲まれた矩形湾を例に説明している。上層中にはエスチュアリー循環に伴う発散性の流れと高気圧性の時計回りの流れが重なることでよどみ点が生じこれより奥部では渦状の流れになる。よどみ点の位置は次式で表せる。

$$L_x \approx \frac{B\omega}{2A} \dots\dots\dots (1)$$

ここで, Bは矩形湾の幅であり, ωは渦度, Aは水平発散である。よどみ点の位置 Lxは渦の規模を幾何学的に規

定する指標であり, 湾奥からの距離になっている。本式より, 湾奥に存在する渦の規模は, 渦度が大きいほど, また水平発散が小さいほど大きくなることがわかる。

表-1は過去に伊勢湾で実施された測流結果から求められた各季節の渦度と水平発散の値から, 式(1)を使ってよどみ点の位置を算出したものである。ここで, Bは伊勢湾を想定し20 kmと仮定しており, 春季は同精度のデータが少なかったので省いている。この表によると, 冬季のよどみ点は約20 kmの位置にあり, 伊勢湾潮流図(1995)の冬季の恒流図にみられる渦規模とほぼ一致している。一方, 夏季と秋季は約80 kmと大きく, 伊勢湾全域が時計回りの渦で占められることになるが, これは伊勢湾潮流図(1995)に見られるような, 湾央以南において季節毎に変化する残差流の傾向と一致しない。つまり湾奥部の時計回り環流の盛衰だけで湾全域の残差流場の変化を説明することが難しいことを示唆している。

表-1 渦度, 水平発散, 渦の規模

Season	Vorticity (×10 ⁻⁶ s ⁻¹)	Divergence (×10 ⁻⁶ s ⁻¹)	Length of Gyre (km)
Summer	-13.3	1.6	85.5
Autum	-14.5	1.9	78.4
Winter	-28.7	13.2	21.8

3. 現地観測による湾央部の残差流構造の把握

(1) 観測の概要

実施した観測はADCPを用いた12時間連続の走航式流況調査である。観測日は第1回目が1994年10月29, 30日であり, 第2回目が1995年8月28, 29, 30日である。図-1は観測対象地形と測定断面である。第1回目は断面Aと断面Bの2断面で実施し, 第2回目はそれに断面Cを加えた3断面で実施した。このうち第1回目の観測については既に詳述しており(杉山ら, 1995), 観測方法等の詳細はこれに準じている。なお2回の観測期間ともに, 海上風は概ね3 m/s以下であり, 海況は非常に平穏であった。ただし, 1995年8月28日は終日強い北西風が吹いていたため, 平穏時の残差流を議論する本論文ではこのデータを対象外とした。また, 観測当時の伊勢湾

* 正会員 工博 中部電力株式会社 電力技術研究所
** 正会員 工博 大阪大学工学研究科 土木工学
*** 正会員 農博 京都大学農学研究科 海洋生物環境学
**** 正会員 工博 名古屋大学工学研究科 地圏環境工学

への淡水流入量は月平均値で第1回目が約 $400 \text{ m}^3/\text{s}$ であり10月の平年並みであった。一方、第2回目は約 $200 \text{ m}^3/\text{s}$ であり8月の平年値(約 $600 \text{ m}^3/\text{s}$)の1/3程度の少ない量であった。さらに、潮汐は第1回目が小潮期であり四日市港での潮差が約1mであったのに対し、第2回目は大潮期に近く潮差が約2mと大きかった。本章では外的条件がかなり異なるこの2回の観測結果を対比することで湾中部における残差流構造の特徴を整理した。

(2) 観測結果

図-2に観測された残差流の海面下5m, および25mの水平分布図を示す。まず、上段に示す1回目に観測さ

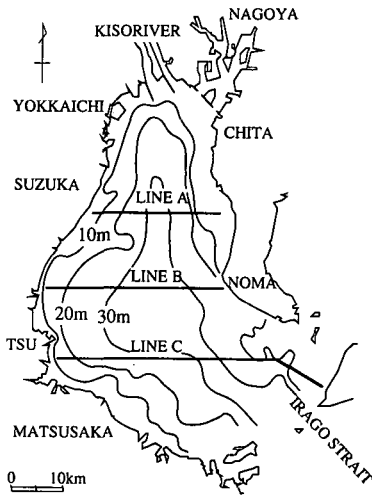


図-1 観測対象断面と地形

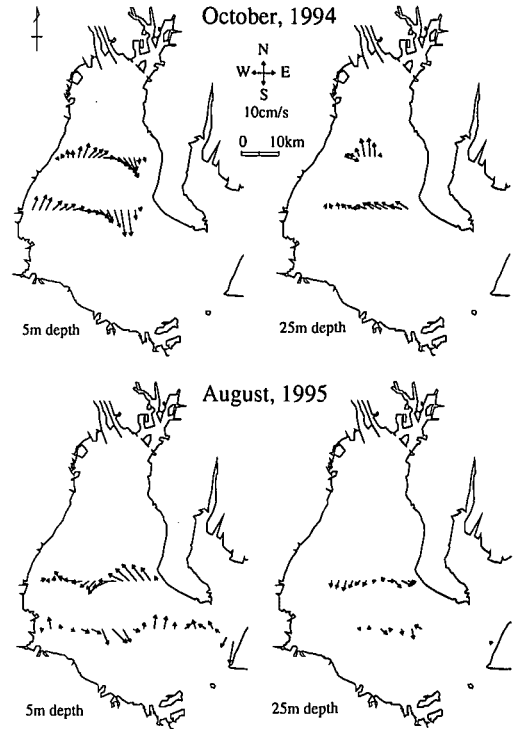


図-2 観測された残差流の平面分布図

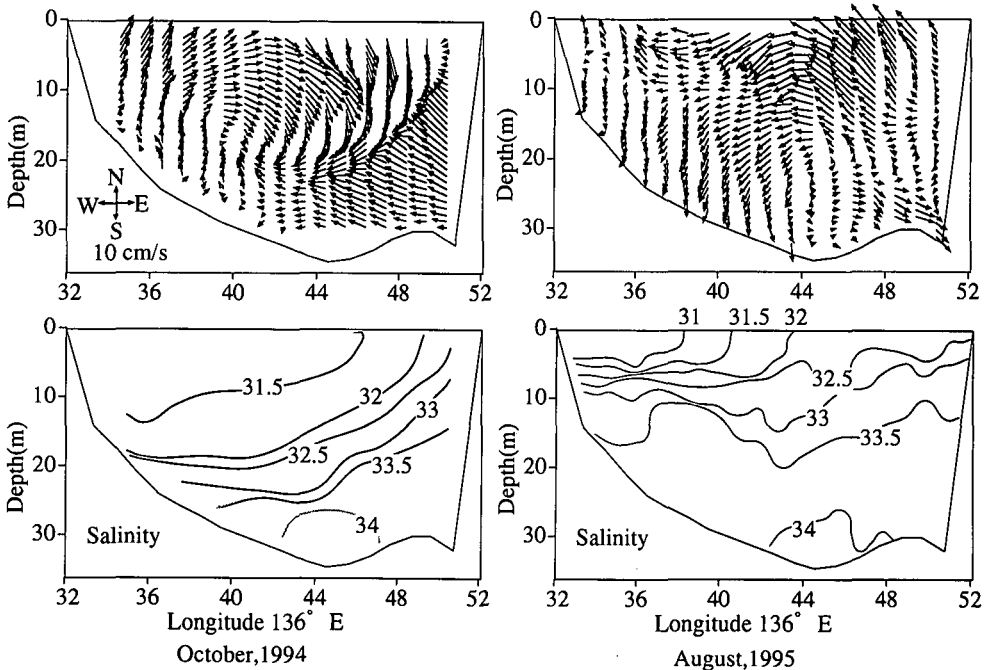


図-3 観測された残差流と塩分の断面分布 (B断面)

れた残差流場は、海面下5 mにおいて全域が大きな時計回りの水平環流となっているのが特徴的である。一方、海面下25 mの流況は一変し、湾奥へ向かう流れとなっており、A断面では強い北向きの流れとなり、B断面では北西向きに湾奥へ流入する流れとなっている。次に下段の2回目の観測結果についてみると、海面下5 mでは1回目の観測とは逆回りの大きな反時計回りの水平環流が湾中央部に存在する。また、B断面西側では小さいながらも時計回りの水平環流が特徴的である。一方、海面下25 mには流向のはっきりしない小さな流れしか存在していない。

次に各季節における断面分布の特徴について述べる。ここでは代表断面として2回の観測で共通している断面Bの分布状況を図-3に示す。図-3(左図)は第1回目の残差流と塩分の鉛直分布を示す。塩分分布を見ると、32.5 psu 付近が躍層になっている。また、この躍層面は三重県側では水深20 mに存在するが、愛知県側に向かうほど浅くなり、やがて水面に現れフロントを形成している。躍層より上の層では大きな時計回りの流れとなっており、下の層では北西向きに湾に流入する形となっている。二つの流れは躍層面でぶつかり大きなシアを形成している。また、躍層が水面に現れるフロント付近では20 cm/sを越える強い南下流が存在する。

図-3(右図)は第2回目の残差流の断面分布を示している。この観測時の際立った特徴である反時計回りの循環は海表面から海面下20 m前後まで鉛直的に厚く分布していることが見てとれる。特に東側(図面の右側)の浅い層で流入(北上)傾向が強く、西側の深い層で流出傾向が強い。ただし、西側(図面の左側)のおよそ海面下8 m以浅の層内にはこれとは性質が異なる時計回りの循環がみられる。対応する部分の塩分分布をみると海面下7 m付近に等値線が密に分布しており、この位置に躍層が存在することが伺われる。この躍層付近と見なされる塩分32 psuの等値線は東に行くに従って海表面に達し塩分フロントを形成しており、この付近の流れは南西向きに20 cm/sを越える強い流れが存在する。

第1回目の観測は外的条件が平年値に近く、また過去に実施された様々な潮流観測の海面下3~5 mの流れを集約した海上保安庁発刊の伊勢湾潮流図(1995)とも良く一致しているため、秋季の平均的な流況に近いと考えられる。一方、第2回目の観測は夏季に特有の反時計回りの渦が見られるものの、伊勢湾潮流図の反時計回りの渦とはその規模や位置がかなり異なる。また、淡水の流入条件も夏季の平年値からは大きくずれており、必ずしも夏季を代表する流れとは言えない。

(3) 2つの観測結果の共通点と相違点に関する考察

ここで示した2つの観測結果は一見大きく異なる印象

を受けるが、断面の詳細な構造をみると基本的な構造はよく似ていて、次のような特徴を持っている。

○塩分32~32.5 psu 付近の躍層を境として流況が大きく異なる。

○躍層は断面西側で深く、東に向かうほど浅くなり、やがて水面に達しフロントを形成する。

○躍層より低塩分な水塊(上層:フロントより西)中には時計回りの環流が存在する。

○躍層より高塩分の水塊(下層:フロントより東)中には湾に流入する形の北~西向きの流れが存在する。

○躍層が海表面に達するフロント部分には20 cm/sを越える強い流れが存在する。

低塩分水塊の時計回りの環流は、前報(杉山ら;1995)において高気圧性渦であることを指摘している。一方、高塩分水塊の流れは基本的には湾に流入する傾向であり、エスチュアリー循環における下層流れと考えられる。次に上層と下層の境界部の流れについて考える。図-4は秋季に観測されたフロント付近の密度分布から圧力分布を計算し、地衡流平衡の仮定から算出した流速と実際に観測された残差流を鉛直的に比較したものである。図を見ると両者が良く一致していることがわかる。このことより、フロント付近の流れは地衡流的であると推察される。

観測された2つの残差流場の見た目の印象は、躍層やフロントの位置がどこにあるかで大きく変化する。特に海面下5 m付近では、フロント位置が東に移動すると、第1回目の観測のように、高気圧性の時計回りの環流が支配的になり、西に移動すると、第2回目の観測のように、フロント部での強い南向きの地衡流性の流れと湾に

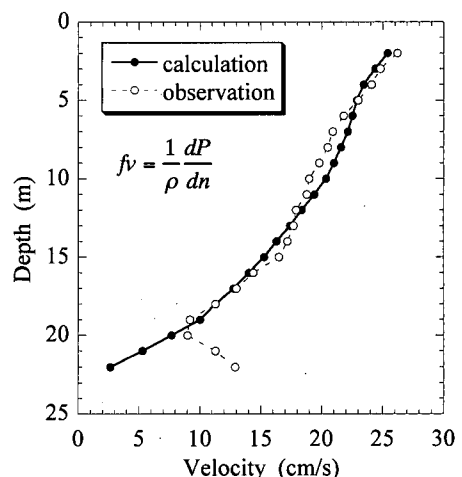


図-4 密度場から算出した地衡流と観測された残差流の比較

流入する北西向きの流れによって反時計回りの流れが形成されると考えられる。

4. 観測された残差流場に関する数値実験

(1) 観測結果の再現に必要なとされる条件

観測された2つの残差流の違いはフロント位置の違いによって特徴付けられることが指摘された。これは上層の体積の違いと考えることができ、上層の体積は河川水の供給状態が最も影響すると考えられる。その他の残差流生成要因として風の効果と潮汐残差流が考えられるが、観測当時の平穏な気象状態を考えると、直接的な駆動力としての風の効果は小さいと考えられる。また、今回対象としている湾中央部は比較的単純な地形で潮流も弱いいため潮汐残差流も小さいと考えられる。以上の理由からここでは淡水の流入状態の差異に着目したケーススタディを行うことにした。

表-2は観測時に伊勢湾に流入していた主要河川の月平均流量である。両者の最も顕著な差異は総流量であり、秋季が夏季に比べてほぼ倍多い量となっていた。また、伊勢湾奥部に流入する河川(Aグループ:庄内川,木曾川,揖斐川,長良川,鈴鹿川)と伊勢湾中西部に流入する河川(Bグループ:榑田川,雲出川,宮川)の流入量の比が大きく異なることも特徴の一つである。すなわち、第1回目の観測を行った10月にはBグループに属する河川の流量は100 m³/sを越え、Aグループの300 m³/sに対し無視できない量であるが、第2回目の観測を行った8月にはAグループの流量も少なくなっているものの、BグループはAグループの1/20程度の無視しうる量にまで減少している。Bグループの流量がAグループに対し無視できなくなるほど大きくなる傾向は、通常台風期の8~10月に顕著になる。今回観測した1995年の8月は極めて降雨の少ない異常年であり、このような結果となった。

(2) 計算条件

観測からも分かるように伊勢湾の残差流場には下層流入、上層流出という古典的なエスチュアリー循環の他、

上層の高気圧性循環やフロント部の地衡流などが存在し、密度流と共に地球自転効果が極めて重要な働きをしていると考えられる。このような流れ場の解析には、運動方程式にコリオリ力の項を付加することや密度成層による強いシアを再現できる高精度の鉛直粘性、拡散の表現方法が必要となってくる。そこで本研究では、室田ら(1988)によって開発された3次元バロクリニック潮流モデル:ODEM(Osaka Daigaku Estuarine Model)を利用することにした。

モデル地形は伊勢湾全域を包含するように設定し、縦横共に1 km メッシュに分割した。境界条件として河川流量は表-2に示した観測時の月平均値を用い、その他の条件は次のようにした。まず、開境界では12時間周期の潮汐を与えることとし、潮汐調和定数表(海上保安庁, 1983)に記載された愛知県側の赤羽(位相遅れ170.09°; 振幅44.94 cm)と三重県側の矢的(位相遅れ171.00°; 振幅44.0 cm)でのM2潮の値を用いて、この間を補完して境界上のメッシュに与えた。陸岸ならびに海底面での境界条件はnon-slip条件とした。なお、均質流体に対する渦動粘性係数および拡散係数は水平方向に1.0 m²/s、鉛直方向に0.002 m²/sとした。計算は、時間増分間隔

表-2 観測時の淡水流入量

	River	August	October
A	Shonai	12.6	17.7
	Kiso	139.6	122.9
	Ibi	13.5	49.0
	Nagara	41.7	102.9
	Suzuka	1.4	7.7
	A total	208.8	300.2
B	Kumozu	3.5	15.8
	Kusida	5.6	25.0
	Miya	3.2	77.9
	B total	12.3	118.7
	Total	429.9	719.1

unit: m³/s

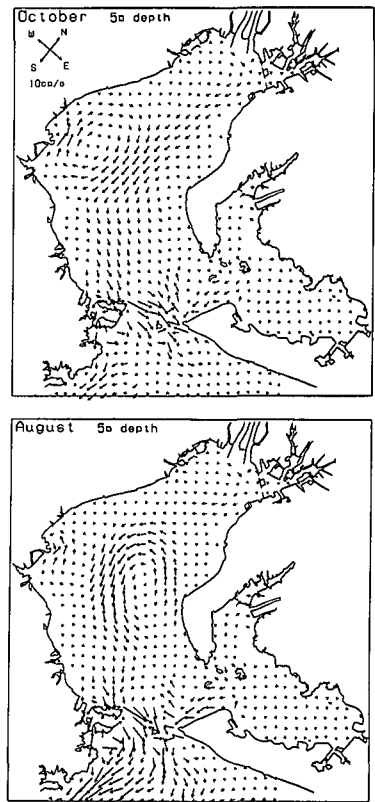


図-5 計算された海面下5mの残差流 (上図:1994/10, 下図:1995/8)

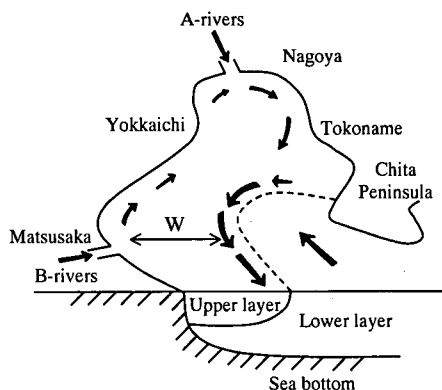


図-6 伊勢湾残差流の模式図
(図中破線はフロント)

は30秒で40潮汐続け、最後の1潮汐分を平均して残差流を算出した。なお、本検討は淡水供給による違いを明らかにすることを目的としているので風の効果は熱交換にのみ反映されており、外力としての効果は無視した。

(3) 計算結果と考察

図-5(上図)に秋季の計算結果を、図-5(下図)に夏季の計算結果を示す。図は高気圧性循環やフロント部の流れが現れる上層の代表層(海面下5m)を選択して掲載している。2ケースとも湾奥部を中心とした高気圧性渦やその境界であるフロント域での地衡流性の流れなどの特徴的な流れは見られるがその配置が異なる。特に湾中央部の流れに着目すると、10月の結果は南向きの強い流れが東に寄った形となって湾中央部まで時計回りの水平渦が顕著である。これに対して8月は南向きの強い流れが西に移動し、湾中央では反時計回りの渦が顕著である。このように計算結果は観測された残差流場の傾向と概ね一致していた。

最後に、本論文で検討した結果を図-6に示す。図は伊勢湾湾中央部までの残差流の様子を模式図にしたものである。湾奥部で発達している高気圧性渦を伴う上層は、湾中央部の塩分(密度)フロントまでをその範囲としている。一方、下層水は湾に流入する形で流れている。図中の破線はフロントの位置を表し、Wは湾中央部の上層の幅である。海表面に近い水深ではWが大きくなると上層が湾中央に広がることになり、時計回りの流れが顕著になる。逆にWが小さくなると、西側に移動したフロントでの

強い流れ(南向き)と東側で海表面まで現れた下層の流れ(北西向き)によって形成される反時計回りの環流が顕著になる。そして、本章の数値実験からWに対し河川流量の変化が有効に働いていることが確認された。特に変化が大きかったBグループに属する河川の影響は大きいものと推察される。

5. まとめ

1) 伊勢湾の残差流場の基本的な構成要素は上層における高気圧性の時計回りの環流と下層における湾に流入する流れの2つが考えられる。

2) 上層と下層の間の躍層面は東に行くほど浅くなり、やがて海面に達しフロントを形成する。フロントは上層の分布する境界であるとともに高気圧性渦の境界にもなっている。また、フロントには地衡流性の速い南向き(あるいは南西向き)の流れが存在する。

3) フロントが東に寄ると上層が湾全体に広がり、時計回りの循環が大きくなる。逆にフロントが西に寄ると時計回りの環流は小さくなり、反時計回りの環流が大きくなる。

4) フロントの位置に対し、河川流量の変化が有効に働いていることが確認された。今回の観測結果については三重県中部から流入する河川流量の変化が強く影響しているものと推察された。

参考文献

- 宇野木早苗(1978): 伊勢湾・三河湾の物理環境: 沿岸海洋研究ノート, 第15巻, 第2号, pp. 143-154.
- 海上保安庁(1995): 伊勢湾潮流図, No. 6215.
- 海上保安庁(1983): 日本沿岸潮汐調和定数表.
- 杉山陽一・藤原建紀・中辻啓二・水島雅文(1994): 伊勢湾北部海域の密度成層と残差流, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 291-295.
- 杉山陽一・藤原建紀・中辻啓二・福井真吾(1995): ADCPによる伊勢湾の流動調査, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1101-1105.
- Fujiwara, T., L. P. Sanford, K. Nakatsuji and Y. Sugiyama(1997): Anti-cyclonic circulation driven by the estuarine circulation in a gulf type ROFI, J. Marine Systems 12, pp. 83-99.
- Murota, A., Nakatsuji, K. and Hoh, H. Y. (1988): A three-dimensional computer simulation model of river plumes, Refined Flow Modeling and Turbulence Measurement, University Academic Press, pp. 539-547.