

ADCP による伊勢湾の流動構造調査

杉山陽一*・藤原建紀**・中辻啓二***・福井真吾****

1. はじめに

近年の計算機技術の発達が目覚ましく、ハード、コスト面において3次元の潮流数値計算はもはや実用段階にきている。内湾の環境変化予測においても、官公庁をはじめとして多方面で3次元数値シミュレーションは要求されるようになってきている。しかしながら、現実の内湾の流動現象について、3次元の計算の検証に足るだけの知識が蓄積、整理されていないようである。中でも、残差流の理解が不足している。一般に残差流を捕らえるには時間的に連続な長期にわたる観測が必要とされる。このため必然的に空間的には粗な観測しかなされてこなかった。近年、流れの鉛直分布を測ることができる音響ドップラー流速分布計(ADCP)が登場し、内湾の流動分布を密に測ることができるようになってきた。そして内湾の流動は水深によって大きく異なることが判ってきた(藤原ら, 1989; 金子ら, 1994)。

今回対象とする伊勢湾は既往の研究が少なく未解明な点が多い。そこで12時間連続の走航式流況調査を実施し、伊勢湾における残差流の三次元構造の解明を試みた。

2. 現地観測と残差流の算出法

観測に用いたADCPは走航しながら多層の流速を遠隔的に測ることができるという、他の流速計にない優れた特徴を持っている。この方法は空間的には密な情報を得ることができる反面、時間的には非常に制約がある。12時間という限られた時間から残差流を明らかにするためには、ADCPの特性を十分理解し、後の解析方法まで考えながら現地での観測工程を考える必要がある。

(1) 観測概要

a) 観測日時

観測日は、潮流振動成分の影響が小さくなるよう小潮期とし、かつ観測時間が12時間と制約されているため、日潮不等が小さい日として1994. 10. 29/30を選定した。

b) 観測対象海域

伊勢湾の上層の残差流の概要は、伊勢湾潮流図(海上保安庁, 1995)に四季に分けて整理されている。これを見ると、中部海域には知多半島沿いに強い南下流が現れており、逆に三重県側では弱いながらも北上流が現れている。しかし、これらの流れが生じる原因は不明である。今回観測対象としたのは図-1に示す北緯34°44', 34°50'の2つの観測線である。以後前者を南断面、後者を北断面と称する。

ADCPの観測を精度よく行うためには航行速度は遅い方が望ましく、残差流の観測には1時間に1回程度の観測が望ましい。しかし今回は観測範囲が広く(北断面17 km, 南断面25 km)、連続走航観測は難しい。そこで、観測線上にいくつかの測点を設けその点だけで観測を行うことにした。北断面には40'ごとに18の測点を、南断面には60'ごとに17の測点を設け、それぞれ測点の西端からST-N1, N2, ..., N18, ST-S1, S2, ..., S17, とした。

c) 観測方法

1日あたり1測線の観測を行った。測点間は全速力で

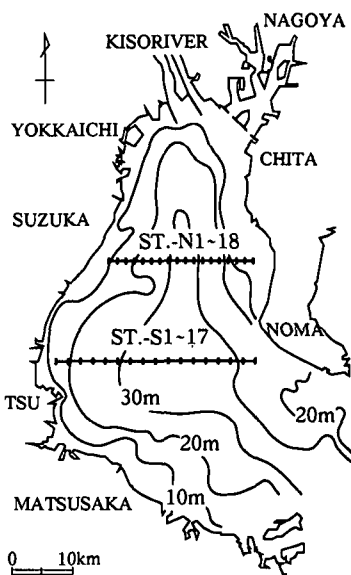


図-1 測点と地形

* 正会員 工修 中部電力(株)電力技術研究所 水理グループ
 ** 正会員 農博 京都大学助教授 農学部水産学科
 *** 正会員 工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科
 **** 京都大学大学院 農学部水産学科

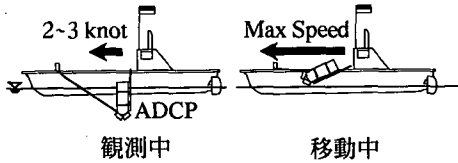


図-2 ADCP による観測

移動し、測点近傍では2～3ノットの船速で約90秒間走航観測した。ADCP観測用の作業船として9tクラス漁船2隻を用いた。作業船の舷側にADCP（RD Instruments社製、600 kHz トランスデューサー、ブロードバンド）を取り付け、観測時に降ろし、測点間の移動時は揚げるができるよう可動式にした（図-2参照）。2隻の作業船は観測線の東西端から同時にスタートし、交差するように往復観測を行った。なお、各測点では水深2mを第1層とし、以下水深1mごとに計30層観測した。なお、ADCPの観測と並行してSTD（アレック電子（株）製）による水温塩分の鉛直分布観測を周辺海域において行った。

（2）解析法（残差流の算出）

本観測では南断面をほぼ12時間にわたって観測した。一方、北断面では観測船が故障したため約8時間で観測を終了した。観測期間中、各測点において北断面では11回分、南断面では14回分のデータを得ることができた。観測期間は潮流の振動成分が小さくなるように小潮期を選定したため、測定された流速の残差流成分は潮流成分と同程度（10～20 cm/s）の大きさであった。

本観測では次の方法で潮流成分の影響を除去して残差流を求めた。以下では、“1点における流速”という言葉系を、ある特定の水深における流速という意味で用いる。

まず、断面平均流速を説明変数とする回帰分析により、各測点における潮流の強さの係数 B を求める。ここで断面とは、いま考えている測点を含む断面（北または南断面）である。断面平均流速 $X(t)$ は、断面を通過して流入出する流量を断面積 A で割ったものであり、

$$X(t) = S \cdot A^{-1} \cdot dh(t)/dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

で計算される。ここで、 S は断面と陸岸で囲まれる海域の面積であり、 $h(t)$ はこの海域の潮位（名古屋港の予報潮位）である。式（1）で求められる $X(t)$ をもとに、回帰式

$$\bar{u}(t) = B_0 + B \cdot X(t) + \varepsilon(t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

によってある測点における B の値を求める。ここで、 $\varepsilon(t)$ は誤差であり、被説明変数 $\bar{u}(t)$ は鉛直平均流速を用いた。式（2）は、説明変数が X のみの単回帰式である。これで得られた B （測点に固有）と1点における流速 $u(t)$ から、その点における残差流 u_r を次式で計算する。

$$u_r = \bar{u}(t) - B \cdot X(t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、バーは各点での測定データの平均である。右辺第1項は測定流速の平均値であり、第2項が潮流の影響にあたるものである。このような計算を流れの北方成分、東方成分それぞれについて行い、その点における残差流を求めた。

3. 観測結果

観測時はおおむね晴天であり風速も2 m/s前後と小さく、海況はほぼ静穏であった。

（1）水温・塩分分布

図-3に湾中央部（東経136°43'30"付近）の水温・塩分の鉛直分布を示す。温度の鉛直分布は、水深が深いと高温になるという降温期特有の構造であった。塩分分布を見ると湾内の水塊は鉛直的に3層に区分される。まず、塩分30 psu以下の河川プリューム、次に塩分約31 psuの上層、さらに塩分約33 psuの下層である。なお、水深30 m以深に低温水が見られるが、今回は下層に含まれるものとする。河川プリュームはおおよそ2 m以浅に分布し、上層は10～20 m以浅に分布している。

図-4に水深0.5 m、5 m、25 mの塩分水平分布を示す。水深0.5 m層の分布をみると塩分30 psu以下の河川プリュームが三重県側（四日市から津沖）に偏って分布しており、河川プリュームが三重県寄りに広がっていくことが伺われる。湾口がある南に行くほど塩分が高くなっていった。水深5 m層では全域にわたりほぼ均一に31 psu強となっており、全域が上層に入っているものと考えられる。水深25 m層では33 psu強の下層水が全域に分布している。

（2）流速の経時変化

ST-N9とST-S9（共に湾中央部）での流れの鉛直分布の経時変化を図-5に示す。本海域は地形的にみて主

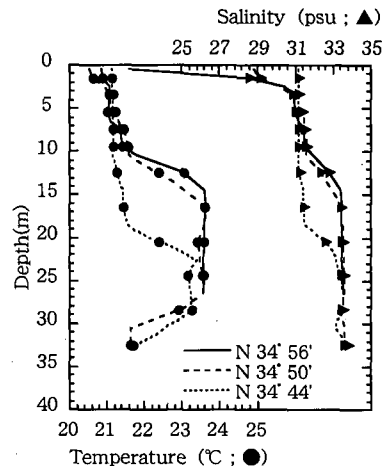


図-3 水温・塩分の鉛直分布

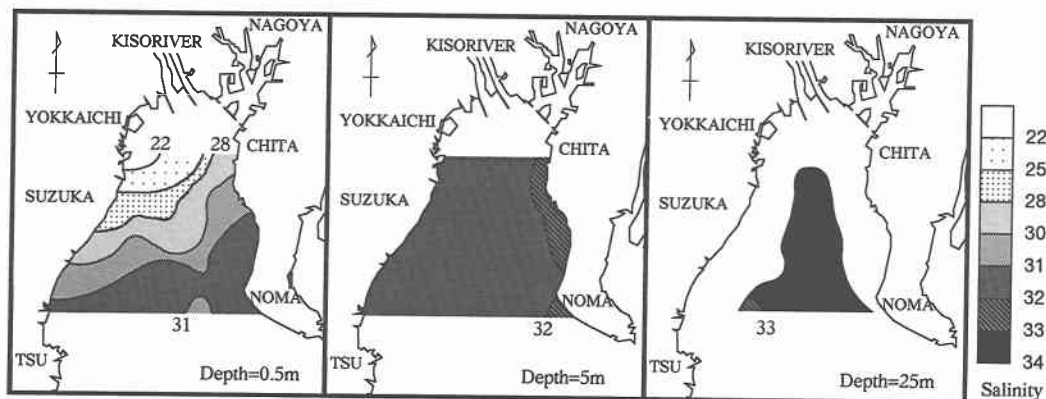


図-4 塩分の水平分布

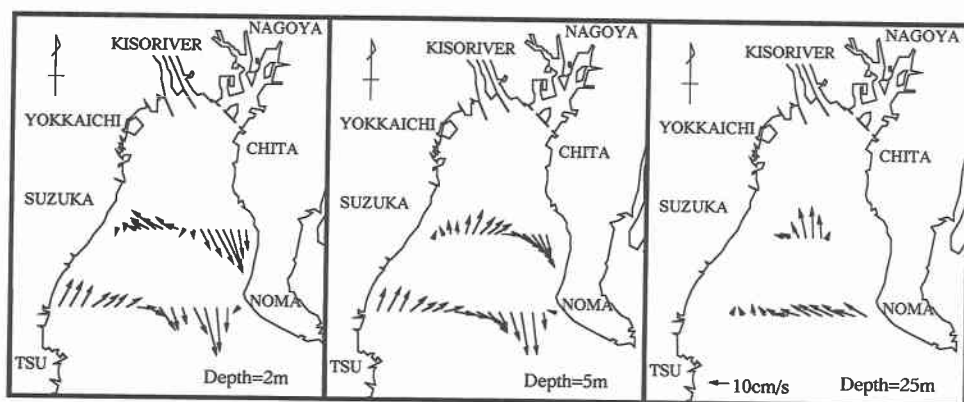


図-6 残差流の水平分布

流方向は南北であると考えられるが、実測値を見ると上げ潮時に北上流、下げ潮時に南下流になる訳ではなく、東西方向にも 10 cm/s 以上の大きな流速変動が見られる。また、流向流速とも鉛直的に大きく異なっており、時間によっては上下の流速差が 20 cm/s 以上の大きな値となった。

4. 残 差 流

(1) 残差流と塩分分布

図-6 に残差流の水平分布を示す。水深 2 m 層では北断面西側で西向きの流れが見られ、これは河川プリュームの流れを示していると考えられる(図-4, 0.5 m 層参照)。また、北断面東側および南断面では時計回りの流れとなっている。5 m 層は全域が時計回りの流れとなっている。この流況は伊勢湾潮流図(1995)(水深 2~5 m を表す)とよく一致している。一方、25 m 層は湾奥へ向かう流れとなっている。

図-7 に各断面における流速と塩分の分布を示す。本図において左が三重県側、右が愛知県側となっている。

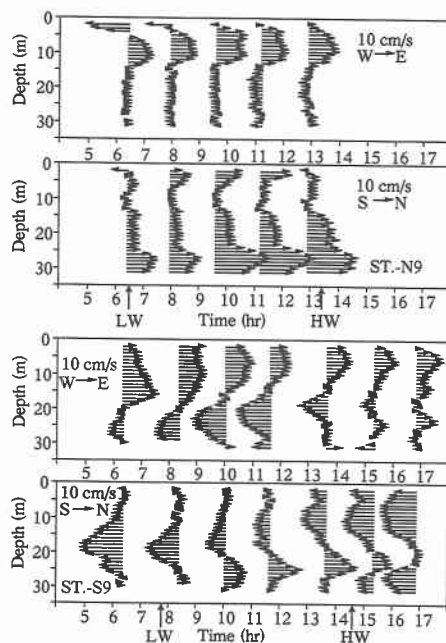


図-5 流速分布の経時変化

上段のベクトル図は上向きが北方向を示している。中段は流速の北向き成分を示す。下段は同断面における塩分の分布である。

北断面では海表面付近に 30 psu 以下の河川プリュームと判断される水塊が見られる。また、32.5 psu 付近に躍層面が存在し、これより上が上層、下が下層となっている。残差流を見ると上層では東向きの流れとなっているが、下層では北向きないし西向きの流れとなっている。また、特記事項として、狭くなった底層に強いジェット状の北向きの流れが存在することが分かった。いままで底層にこのような強い流れが観測されたことはない。

北断面に見られた表層の河川プリュームは南断面には存在しない。南断面の塩分分布を見ると北断面と同じように 32.5 psu 付近に躍層ができていいる。この躍層面は西側では水深 20 m に存在するが東側で浅くなっており、愛知県側で水面に現れフロントとなっている。残差流分

布はこの躍層面の傾きに対応して大きく変化している。フロントの西側では南向きに強い南下流が現れている。塩分分布から考えると圧力分布は西高東低となっていることが推測でき、このフロント域の流れは地衡流バランスしていると考えられる。

(2) 水平発散、渦度

本海域で得られた残差流について各水深ごとに水平発散、渦度を計算した(表-1)。各水深ごとに得られた残差流をすべて使用し各水深での平均的な値を出したものである。上層に含まれる水深 15 m より上では発散しており、それ以下では収束傾向を示しているが、上層で強くなっている。渦度は全層で時計回りの渦度が現れている。下層については値も小さく不明確である。上層で得られた発散の値は著者らが伊勢湾北部海域で求めた値(杉山ら, 1994)とオーダー的に等しく、今回の海域も含めて広い範囲で上層が発散傾向にあることが分かる。

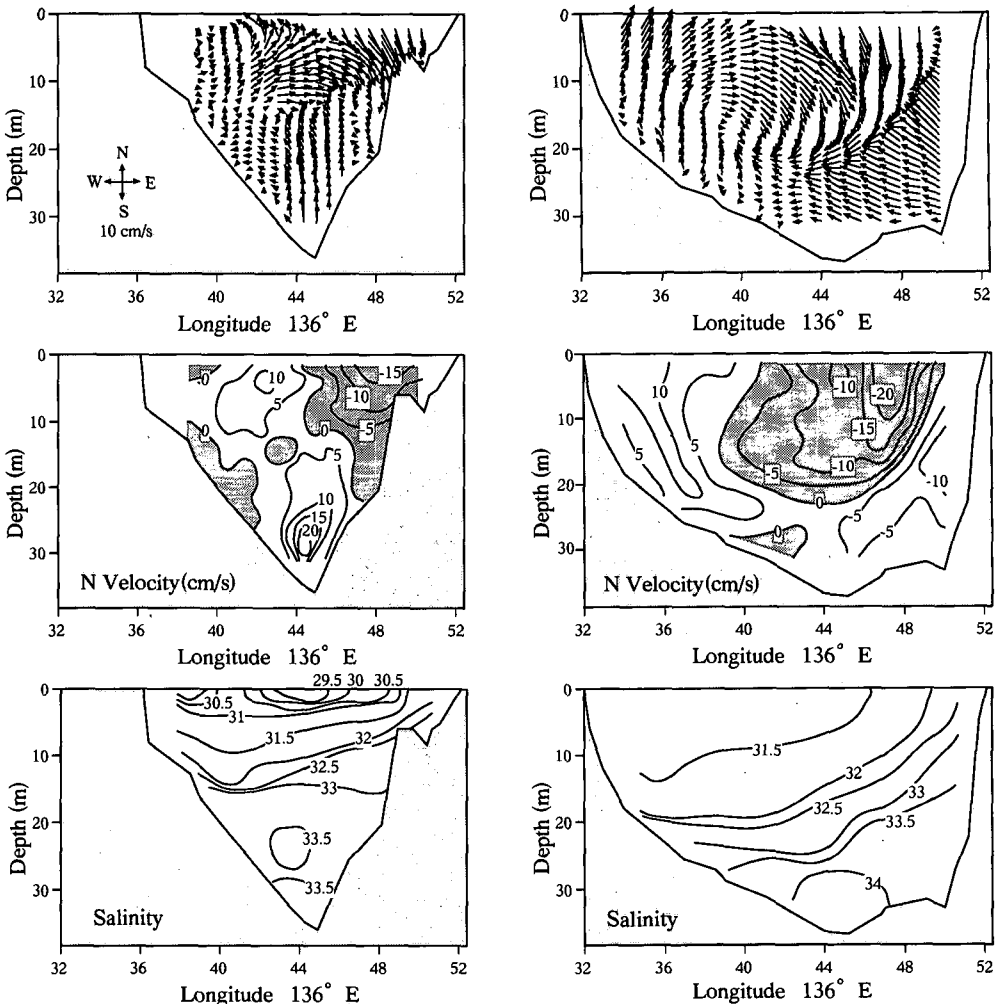


図-7 観測断面における残差流分布と塩分分布 (左図: 北断面, 右図: 南断面)

表-1 水平発散と渦度

水深(m)	水平発散($\times 10^{-4}$ /s)	渦度($\times 10^{-4}$ /s)
2	3.96	-7.29
5	5.49	-10.07
10	2.96	-7.48
15	-0.01	-3.64
20	-4.20	-4.91
25	-4.86	-4.53
30	-1.70	-3.42

5. 考 察

伊勢湾の残差流構造は密度構造と密接な関係があり、およそ次のように分割して考えることができる。まず、河川プリュームの層である。ADCPの測定では最浅層の水深が2mであるためこの層内の流れを明瞭に捕らえていない。しかし、北断面西側の2m層では西向きに10 cm/s程度の比較的大きめの流速となっており、これは河川プリューム層の流れを示すものと推察される。STD観測や、衛星写真によるSSの分布(和田ら, 1995)を見ると、河川プリュームの流れは三重県側に向かう南西向きの流れと想像でき、本報の結果と整合する。この層の水平的な広がりには鈴鹿ないし津沖程度までであると推測される。

次に上層について述べる。この層は河川プリューム層の下にあり塩分は31 psu程度である。また、場所によって異なるが、水深約15m以浅に存在する。層内の流れは三重県側で北上し、愛知県側で南下するという時計回りの流れとなっている。上層内の水は水平発散しているため、この層に向かって下層から湧昇した水は地球自転の効果によって時計回りの渦度を獲得することになる(藤原ら, 1994)。上層の時計回りの流況はこのメカニズムにより作られると考えられる。

上層の下に下層が存在し、この層の水は塩分が高く外洋系水であることが推察される。この層では知多半島先端沖から北西向きに強い流入があり、観測域全域で湾奥に向かう北上流となっている。北断面では海底付近にも関わらず20 cm/s以上の強い流速が観測された。この原因については定かでないが、海底地形が狭くなっていることも原因の一つと考えられる。

今回の観測範囲からはずれるが、知多半島先端沖にあるフロントより南側には外洋系の水塊が存在するものと推定される。伊勢湾潮流図(1995)を見ると、夏季にはこの海域に反時計回りの循環が見られる。

伊勢湾潮流図(1995)では、春、夏、秋季に本報とよく似た残差流の流況パターンが見られる。このことより、他の季節でも本報と同じような流況が存在することが予想される。ただし、成層構造には季節変化が見られるので、他の季節についても観測データの蓄積が望まれる。

6. ま と め

本観測から明らかになったことを以下にまとめて示す。

1. 伊勢湾の成層構造はその塩分分布より河川プリューム、上層、下層の3つに大きく分けることができる。
2. 残差流は鉛直的に大きく異なり、20 cm/s以上の鉛直シアを示すことがある。
3. 伊勢湾の流況は密度分布とよく対応している。
4. 上層には三重県側で北上し愛知県側で南下するという時計回りの循環が存在する。
5. 上層は水平発散しており、このために時計回りの渦度が生じると考えられる。
6. 南断面の愛知県側で上層と下層の間の躍層が海面に現れるところ(フロント域)で観測された南向きの流れは地衡流と考えられる。
7. 北断面底層にジェット状の強い北上流が存在する。

最後に、(株)テクノ中部・池田和彦氏と(株)東京久栄・森重輝氏には計画の立案からデータ整理まで協力していただきました。また、中部電力(株)・渡辺増美氏には経験豊かな助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

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.
- 金子 新・伊藤集通(1994): ADCPの普及と海洋学の発展, 海の研究, 第3巻, 第5号, pp. 359-372.
- 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.
- 藤原建紀・澤田好史・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-内湾奥部の高気圧性渦-, 沿岸海洋研究ノート, 第31巻, pp. 227-213.
- 藤原建紀・高杉由夫・肥後竹彦(1989): 超音波ドップラー流速プロファイラーによる沿岸域の流れの可視化, 海洋調査技術, 第1巻, pp. 57-65.
- 和田 清・杉山陽一(1995): 伊勢湾における木曾三川洪水流の流出過程と残差流, 海洋開発論文集, 第11巻, (印刷中)。