

三河湾の恒流とその成因

宇野 木 早 苗*

1. ま え が き

振動する潮流では海水は1周期後には元の位置にもどるので、実質的な物質輸送は予期されるほど大きくはない場合がある。一方、一方向に進む恒流では流速は小さくとも海水は時間とともに遠ざかり、乱れと恒流のシアとの相互作用のもとに大きな分散効果が期待できる。しかし、恒流は一般に弱く、必ずしも一定でなく、成因も多様であるので、内湾の循環流についてその全体像を描くのは容易ではない。このためには多数点における長期間の流れの連続観測が、季節を異にして必要である。三河湾では関係者の努力によりこのような資料がある程度蓄積されてきた。そこで著者の知り得た半月以上の観測結果を中心にして、これまでの多くの数値・水理実験の報告、海上保安庁のまとめた恒流図^{1),5)}、著者らの数値計算の結果などを参考にして、三河湾の恒流の実態と成因について考察し、それが季節に応じて特徴的性格をもつことを示そうと思う。

長期観測資料として、図-1 に示す愛知県水産試験場

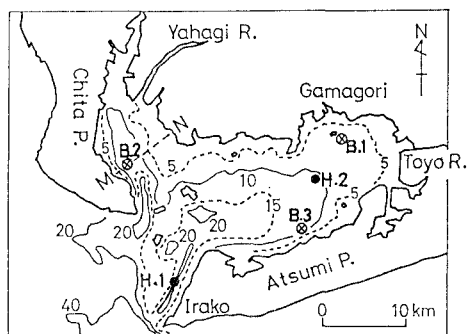


図-1 三河湾の水深分布 (m), B.1, B.2, B.3 は愛知水試のブイ観測点

の3つの係留ブイによる海面下1.5m層の、欠測を含むものの1年余にわたる流れの記録がある²⁾。一方、第五港湾建設局は湾内の多数点で半月を標準とする係留観測を数回にわたり実施し、成果を伊勢湾水理模型実験場報告に発表している³⁾。また、松村は少数点ながら長期の

観測を断続的に実施している⁴⁾。さらに第四管区海上保安本部の観測値も報告されているが、これは秋季のものである⁵⁾。これらが本報告の基礎となっている。

2. 恒流の変動

恒流は一定していないと述べたが、その季節変化を先ず調べる。図-2 は、愛知水試の3つのブイで得た月平

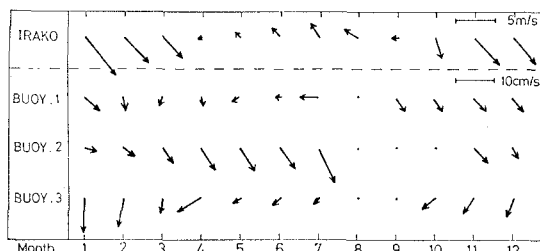


図-2 伊良湖の月平均風と3ブイ測定の月平均流 (1974年)

均流を示すが、流向流速とも系統的な季節変化をしている。上段の伊良湖の月平均風と比較すると、1号ブイと3号ブイでは流れは風と同じように寒候期に大きく暖候期に小さい。2号ブイでは対照的に暖候期に大きく寒候期に小さい。その大きさは1, 2, 3号ブイのそれぞれにおいて、1~5, 3~9, 2~9 cm/s の範囲にあり、かなりの大きさのものが見出される。

さらに短かい変化を知るため、1号ブイの流れの記録をMEMによってスペクトル解析した結果を、伊良湖の風の解析結果と併せて図-3に示す。流れでは卓越せる半日潮 (図では省略) と日周潮のほか、それより長い周期でも顕著なピークがいくつか認められる。ピークの位置は月により異なるが、2, 3日付近と5日付近に多く、特に5日付近のものが各月共通しているのが注目される。これらの数日程度の変動のエネルギーレベルは、4~5月は1~2月に比べ1桁高い。風の変動のエネルギーレベルも同様な傾向にあり、また4~6月では風と流れのピークの位置がほぼ一致することが多い。同様な傾向は秋にも認められる。これらのことから春と秋では風の変動に伴って数日程度の流れの変動が卓越することが推測できる。

* 正会員 理博 理化学研究所主任研究員

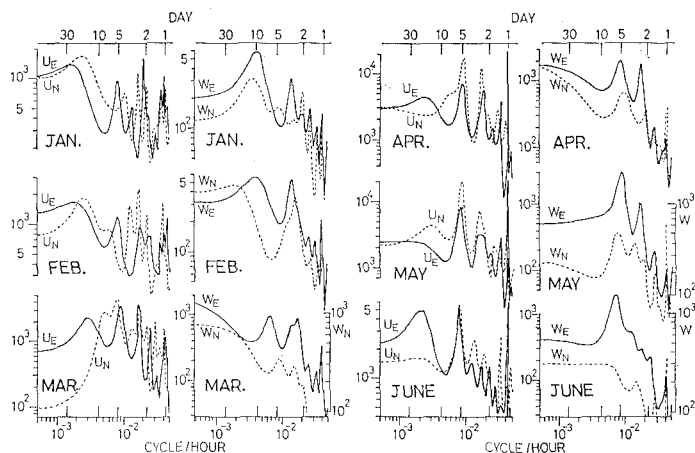


図-3 1号ブイの流れ(U)と伊良湖の風(W)のスペクトル、添字 E は東西成分, N は南北成分(1974年1月~6月), 縦軸の単位は流れは($\text{cm/s}^2 \cdot \text{hour}$), 風は($\text{m/s}^2 \cdot \text{hour}$). 各月のスペクトルは当該月を中心に前後60日のデータに基づいている。

3. 冬季と夏季の循環パターン

冬と夏にも時折の気象じょう乱に伴って著しい流れの変動が生ずるが, 全般的に変動のエネルギーが低いので, 雨季には平均的に見て特徴ある循環パターンが期待できる。そこで変動の影響をできるだけ避けるために, まえがきに述べた半月間以上の連続観測に基づく平均流のみを, 冬と夏に分けて集め同一図に書き入れた。結果を図-4と5に示す。観測値の間には矛盾も見出せるが, これ

までの諸報告を参照し, 後に述べる考察のもとに, 大まかに想定される循環のパターンを図中に破線で示した。資料と考察の不足により, 再検討を要する点も少なくないと思われるが, 大よその特徴は次のようである。なお実際には循環は変動を繰り返していること, 恒流はしばしば深さ方向に急変すること, および下層の観測層が同一面と見なされないことなどに注意する必要がある。

冬季には, 渥美湾の上層は南下流, 下層は北上流となり鉛直循環が南北に発達している。渥美半島沿いには上層にかなりはっきりした流出が見られるが, 下層の流入

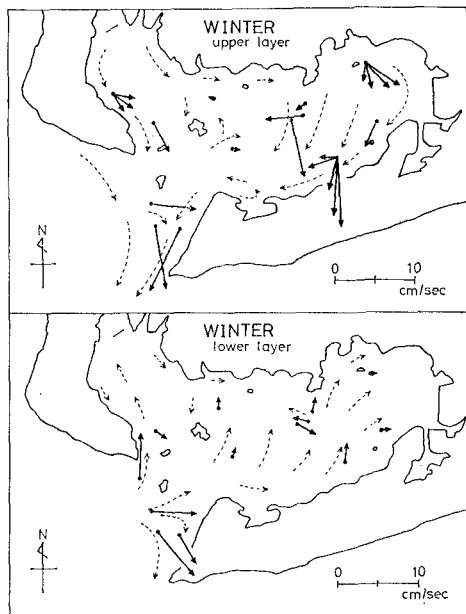


図-4 冬季(12, 1, 2月)の恒流図, 太い矢印は半月以上の連続観測の平均値, 上層は海面下1~3m(深い湾口の一部は5m), 下層は海底上1~5mの値(愛知水試²⁾, 五港建³⁾, 松村⁴⁾による)

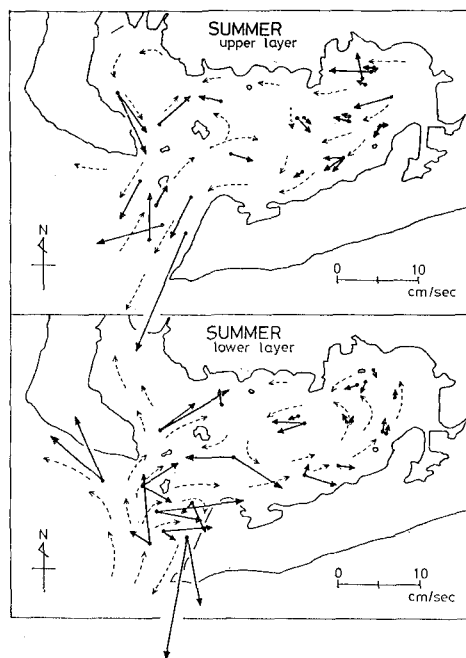


図-5 夏季(6, 7, 8月)の恒流図, 図-4の説明参照

は資料不足のため明らかでない。知多湾では上層は流出、下層の深みは流入と考えられる。三河湾口の海水の出入は一樣でなく、下層は流入、上層は流出で、上層中央部には流入の傾向も見られる。

夏季には、冬季より複雑さが増し、南北よりも東西方向の流れが目につく。渥美湾奥の上層には西流が多く、北半分に強い流れが見られる。渥美半島沿いには上層は流出、下層は流入となり、東西方向の鉛直循環が発達している。この下層の流れは、渥美湾内で反時計回りの環流を形成している。知多半島沿いでは上層は強い流出、下層は流入の可能性が高い。三河湾口部では上層の中央付近と下層の大部分で流入し、両半島側の上層で流出している。特に渥美半島先端付近には両季節とも全層にわたり強い流出が見られ、夏季には 16 cm/s に達する。

冬と夏の流速を比べると、三河湾東部の上層では冬の方が大きい、下層では全般的に夏の方が大きい。流速は $1 \sim 16 \text{ cm/s}$ の範囲に及び、 5 cm/s を越すものが少なくない。ちなみに M_2 分潮流の振幅は湾口部で $30 \sim 40$ 、湾中央部で $10 \sim 20$ 、湾奥部で数 cm/s であり、湾奥では潮流と同程度の恒流も現われている。

春と秋では、長期間の観測資料が乏しく、またすでに述べたように数日周期の変動が卓越している、季節を代表する平均的循環パターンは見出しがたい。四管水路部の秋の資料に基づく恒流図でも、湾内の恒流は微弱で顕著な傾向は見られないと述べてある³⁾。次に、上記のような循環の特性とその季節的差異をもたらし要因について考える。

4. 潮汐残差流

潮流の非線形性に起因する潮汐残差流はストークス流を含めて、その成因からして i) 常時存在する、ii) 潮流振幅の大小に関係して大潮で大きく小潮で小さい、iii) 全層にわたり同程度の大きさである、という性格を持たねばならない。実際には他の要因が加わるため変形を受けるが、三河湾で上記の性格が明瞭に認められるのは、湾口部の渥美半島寄りの沖向きの恒流のみである。そこでこの記録の例を 図-6 に示す。冬と夏のいずれの季節で

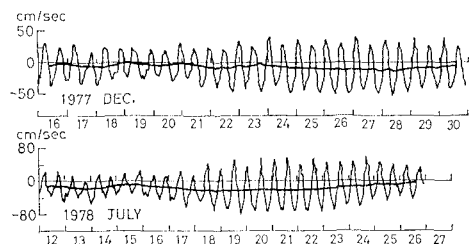


図-6 三河湾口測点 (H. 1, 図-1) における潮流の南北成分とその 25 時間移動平均, 上は 1977 年 12 月海面下 5 m, 下は 1978 年 7 月海面下 6 m の値, 五港建による³⁾。

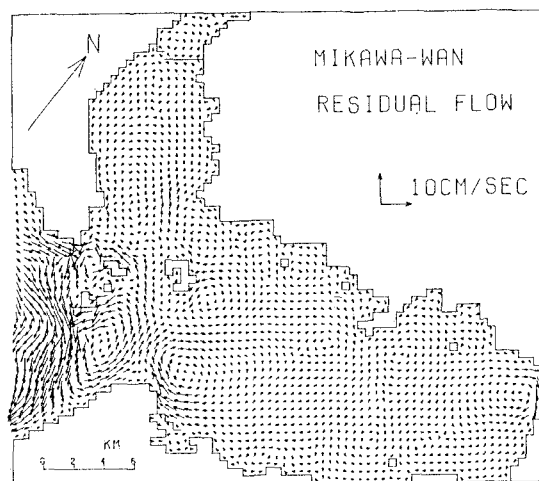


図-7 潮汐残差流の計算結果, 外部境界の潮位振幅 92 cm の場合。

も、恒流は大潮で大きく小潮で小さくなっている。

そこで 500 m メッシュの 1 層モデルを用い潮汐残差流を計算した結果を 図-7 に示す。上記の海域で潮汐残差流が発達することが認められる。境界の影響を避けるため計算領域をもっと拡げて、また、これまでの多くの数値および水理実験の報告を見ても、上記のことはほぼ認められる。図-7 では、湾内にもいくつかの環流が存在するが、いずれも微弱である。観測からも湾内の潮汐残差流の存在を明確に指摘することは困難である。

5. 風による流れ

風に応じて恒流が変動することは、図-3 のスペクトルから推測されたが、多くの観測記録にも明瞭に現われている。しかし、風に対する流れの応答は複雑な地形と水深分布、風の変動、成層状態に応じて単純ではない。長時間ほぼ一定の風が吹き続いたときの流れの変化例を 図-8 に示す。各ブイ地点とも表層では初めは風と同じ向きに流れるが、次第に風の方向とずれてある一定の向きに近づく。特に 2 号ブイでは最終的には風と逆に北向

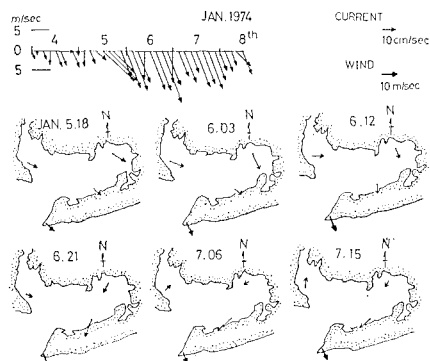


図-8 1974 年 1 月の 3 ブイ地点における表層恒流の変化, 最上段と渥美半島先端の矢印は伊良湖の風

きになっている。ほぼ定常に達するのに1号ブイと3号ブイでは1日余、2号ブイでは約2日を要している。風と恒流では数時間のタイムラグで相関が大きいことが多いが、この時間で定常に達することを意味するとは限らない。

冬の北西季節風と夏の南東季節風による定常循環を、1層モデルを用いて計算すると図-9と10を得る。図-

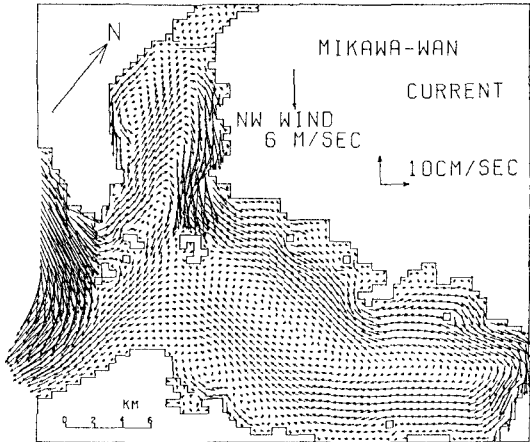


図-9 北西風 6 m/s による吹送流の計算結果

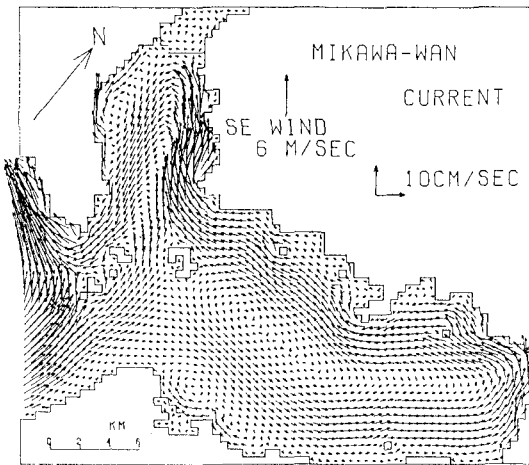


図-10 南東風 6 m/s による吹送流の計算結果

9を図-4の実測値と比べると、渥美湾の上層や知多湾の2号ブイの流れとは傾向は合っている。また、渥美半島先端付近の吹送流は潮汐残差流を強める働きをしている。夏の場合には渥美湾下層の反時計まわりの循環は計算とよい対応をしている。しかし、計算された吹送流と実際の対応がよくない部分も少なくない。これは風以外の要因があることのほかに、一層モデルは深さ方向の平均を与えることに起因する。

風が吹くと上下層逆向きの鉛直循環が内湾ではよく発達する。いま水深が変化する横断面を持ち、かつ奥が閉

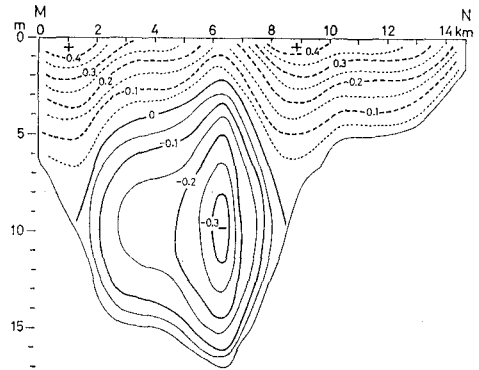


図-11 知多湾断面 (MN, 図-1) における流速分布, 断面に直交する成分で + は風と同じ方向, 流速は $v_0 = h_m \tau_s / \rho K_z$ (h_m は平均水深, τ_s は風の応力, ρ は海水密度, K_z は鉛直渦動粘性係数) で規格化した値, 長島の理論式による⁶⁾。

じている一様水路で、水路に平行に吹く風による断面内の定常な流速分布を、長島の理論式を用いて計算すると⁶⁾、図-11を得る。断面は知多湾を模している。鉛直循環が発達しているが、風と同じ向きの流れは浅海域の特に上層に集中し、下層の逆の流れは深海域の下層に顕著である。そして条件次第では、深海域の海面すぐ近くまで風と逆向きの流れが占めることもある。図-8に見られた2号ブイの風と逆の流れは、このような性格も含むかも知れない。実際の地形・水深分布をより考慮するには、三次元の取り扱いが必要である。和田らの三次元の数値計算では⁷⁾、冬季の北西風によって渥美湾には発達した南北方向の鉛直循環が現われた。これは図-4に示す同海域の南北方向の鉛直循環とよく対応している。

図-12は、蒲郡沖の一昼夜観測から求めた恒流の鉛直分布であるが、著名なエクマンの吹送流の傾向が認め

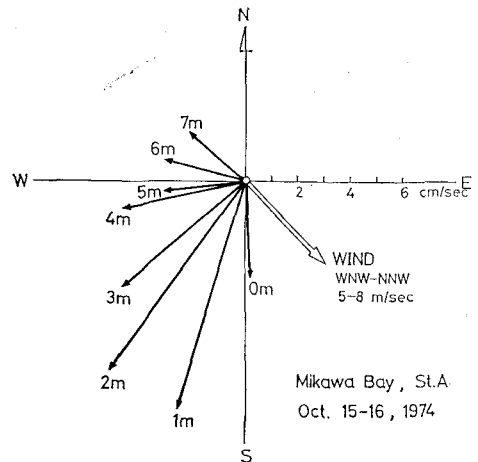


図-12 蒲郡沖 St. A (1号ブイのすぐ傍) における一昼夜観測による平均流の鉛直分布, 0 m の値は船体の影響を受けて小さい (宇野木・岡見・岸野)。

られる。詳しい解析は別に報告する予定であるが、内湾であるため海面傾斜に伴う傾斜流が加わり、底層近くでも流れの減衰は小さい。このような典型的な観測例は珍しいが、内湾でもコリオリの力の影響が無視できないことが分る。特に成層期ではその効果は大きい。

次に風の条件がほぼ同じ例を寒候期と暖候期にそれぞれ四例を選び、流速と風速の比を求めた。風向は北西、風速は平均 7.5 m/s、連吹時間は平均 20 時間である。比率の平均は 1, 2, 3 号ブイに対してそれぞれ寒候期には 1.2, 0.9, 0.9% であり、暖候期には 2.2, 2.0, 2.0% である。同じ風の条件で暖候期の値が寒候期の約倍になるが、これは次に述べる成層の影響と考えられる。

6. 密度成層に伴う流れ

湾外では、高塩分の重たい水が、湾奥では低塩分の軽い水が存在するため、重たい水は下にもぐり、軽い水は上を滑って外に出ようとして鉛直循環が形成される。その際の位置のエネルギーの減少が循環を維持する。図4と5の渥美半島沿いと知多湾の鉛直循環は、このような性格が強いと判断される。特に夏季には、河川流量の増大と海面の加熱のため、湾内外の密度勾配が強まり、この鉛直循環が発達する。

この鉛直循環も、実際には風などの変動に伴って変動している。松村による3号ブイ付近の夏季の観測によると⁴⁾、渥美半島沿いで下層流入上層流出の出現率は全期間の58%、逆の場合は4%、上下層とも流入は23%、上下層とも流出は15%となっている。全期間では下層は流入で2.3 cm/s、上層は流出で2.0 cm/sである。ただしほぼ一定流向の期間の平均流はこれよりもっと大きい。風に伴って密度流の強さ、鉛直分布が著しく変化することは、例えば Hansen の緩混合型エスチャリに対する相似解の結果からも認められる⁹⁾。なお、この理論で無視しているコリオリの力は、三河湾の規模で傾圧性が強い現象や流れを扱う場合には非常に大切である⁹⁾。

なお、密度成層を考慮した数値計算を実施していないので、本報告は定量的議論に至っていない。これについては次の機会に報告したいと思っている。

7. むすび

三河湾の恒流が系統的な季節変化をしていることを示し、またもっと短い時間で、特に春と秋では風の変動に応じて数日周期で顕著に変動していることをスペクトル解析によって示した。次に半月間以上の連続観測結果を中心にして冬と夏の平均的な循環パターンを作成し、そこに見られる流系が潮汐残差流、吹送流、密度流などどのように対応するかを検討し、本海域の循環の特性をある程度明らかにすることができた。しかし観測資料の不足と考察の不十分さのためあいまいな点も見出され、今後の補正訂正が望まれる。さまざまな素過程を含み、いろいろな時間スケールで変動する内湾の循環の全体像を総合的に描くことは、循環が海中の諸現象の基本と考えられるので、きわめて大切なことと思われる。

終わりに、貴重な観測資料や報告書を提供していただいた愛知県水産試験場や第五港湾建設局の関係者の皆様、スペクトル解析と第11図の計算に援助を賜った長島秀樹博士、および資料解析に協力してくれた元東海大学海洋学部学生の青山茂と加納 泉の両氏に対し、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 海上保安庁：伊勢湾潮流図，海図第 6215 号，1971.
- 2) 愛知県水産試験場：海況自動観測整理表，1974 年 1 月～1975 年 3 月.
- 3) 第五港湾建設局：伊勢湾水理模型実験場報告，No. 14, 195 p., 1978; No. 15, 351 p., 1979; No. 17, 99 p., 1980; No. 18, 128 p., 1981; No. 19, 104 p., 1982.
- 4) 松村皐月：渥美湾における富栄養化の機構—I，東海区水研報告，95 号，pp. 39～53, 1978; 三河湾における潮流の中期変動，海洋学会春季大会要旨集，pp. 83～84, 1979; 三河湾における冬季の流動特性，海洋学会秋季大会要旨集，p. 26, 1979.
- 5) 第四管区海上保安本部水路部：三河湾の潮流，水路要報，100 号，pp. 5～26, 1980.
- 6) 長島秀樹：傾いた底を持つ水道の吹送流，理研報告，58 巻，pp. 23～27, 1982.
- 7) 和田 明・宮地克人：吹送流による湾内水の循環特性，第 23 回海岸工学講演会論文集，pp. 534～538, 1976.
- 8) Hansen, D. V.: Salt balance and circulation in partially mixed estuaries, Proc. Conf. Estuaries, Jekyll Is., pp. 45～51, 1964.
- 9) 宇野木早苗：内湾における湧昇現象，日本海洋学会春季大会要旨集，pp. 10～11, 1983.