

鹿児島湾奥牛根海域における夏季の海況と物質拡散*

茶 圓 正 明**・市 川 洋**

Oceanic Conditions and Material Dispersion in the Ushine Area of Kagoshima Bay in Summer*

Masaaki CHAEN** and Hiroshi ICHIKAWA**

Abstract

The purpose of this study is to investigate the oceanic conditions and the material dispersion in summer at the Ushine area, one of the fish-cultivated ground in Kagoshima bay. From the horizontal and vertical distributions of water temperature, salinity, and dissolved oxygen in 1977, a weak-vertical circulation accompanied with an upwelling near the coast of Ushine was found in the surface layer above a depth of about 50 m. The horizontal and vertical distributions of COD concentration indicated that the organic material dispersed from the fish-cultivated cages to the sea.

From the current observation at a depth of 10 m for a month in 1979, it was found that the tidal current had a dominant period of semi diurnal with the velocity up to 25 cm/sec in spring tides, and a nearly stagnant condition in neap tides. Mean direction and velocity for a month was obtained to be SW and 0.7 cm/sec. This result shows that the mean current direction agrees with the direction of the axis of the weak-vertical circulation.

The situation of COD distribution is not agree with those of water temperature, salinity, and dissolved oxygen, indicating the existence of the weak-vertical circulation. This result suggests that the material dispersion in the Ushine area in summer does not depend on the advection but on the eddy diffusion. Using the observed current velocities including the tidal current, the value of the horizontal eddy diffusion coefficient is estimated to be $4.8 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{sec}$.

1. まえがき

ハマチを始めとする養殖漁業は主として波の静かな内湾や入江で行われている。内湾や入江は生簀の設置、保守には好都合であるが、その反面、海水交流が不活発であり、水質の富栄養化や汚濁が進みやすい。養殖に適した水質を維持して行くためには養殖漁場付近の海水流動構造と養殖生簀からの有機物質の拡散状況を十分把握しなければならない。

本研究は、閉鎖性の強い内湾と云われる鹿児島湾の湾奥部にある牛根ハマチ養殖漁場において、成層が形成される夏季の海況の下で養殖生簀からの有機物質の拡散が如何なる機構で行われるかを知る目的で行った。用いた

資料は後述するように、1977年7月に行った鹿児島湾赤潮発生原因調査のための海洋観測結果(茶円, 1978)と1979年7月20日から8月20日まで、1カ月間にわたる1点での測流結果である。

2. 湾奥部牛根海域の地形、海水流動の概況とハマチ養殖の推移

鹿児島湾は長さ約 80 km, 幅 10~20 km で南北に長い湾であり、Fig. 1 にみられるように桜島の北と南にそれぞれ海盆を有している。牛根海域は大崎崎、牛根、太崎観音に囲まれた一辺の長さ約 6 km の三角形の海域で、鹿児島湾の最奥部に位置している。牛根海域の最深部の水深は 137 m で、その海底地形は桜島より北の湾奥部海盆の中であって、また 1 小海盆を成している。

牛根海域を含む湾奥部は鹿児島湾内でも特に海水循環に関して閉鎖性の強いことが指摘されている(例えば、

* 1984年8月13日受理

** 鹿児島大学水産学部 Faculty of Fisheries, Kagoshima University, 50-20, Shimoarata 4-chome, Kagoshima 890, Japan

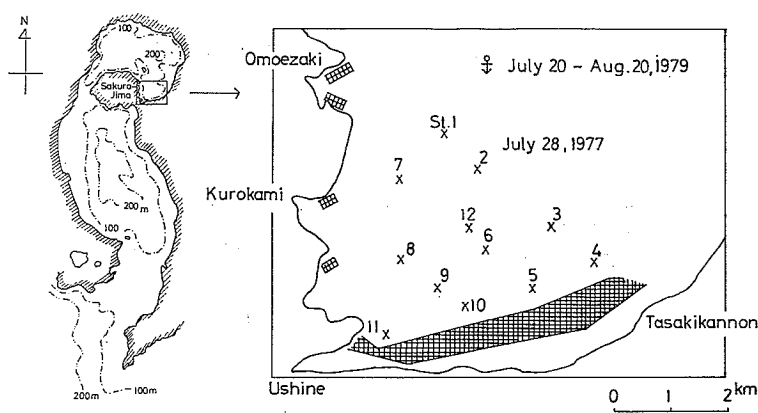


Fig. 1. Map of the Ushine area in Kagoshima bay. Crosses and anchor mark in the Ushine area indicate the oceanographic stations and current meter station. Cross striped area indicate the area located fish cages.

高橋, 1977)。潮流の1例を挙げると, 夏季の大潮時, 10 m 深で, 8~25 cm/sec の流速があり, 表層水の循環の状態を知ることができるが, 小潮時には流速は弱くなり湾奥部の流動状態は不明になる。牛根海域の潮流は湾奥部の中でも特に弱く, 同じ大潮時の 10 m 深で, 湾奥部中央で 19 cm/sec の流速の時, 牛根海域では 2 cm/sec の流速である (高橋, 1978)。また, 夏季の湾奥部底層では, 15日間の連続観測で, 使用した流速計の測定限界である 1.4 cm/sec 以下の流速の測定回数が全測定回数の 99% を占めた例がある。これは, 夏季の湾奥部の底層水は停滞に近い状態であることを示している (高橋・茶園, 1977)。

牛根海域は鹿児島湾で最初にハマチ養殖が行われたところである。1960年に養殖が開始され, 同年の生産高は 3 トンであった。その後, 生産は年々増加し, 1975年には年生産約 3,000 トンに達した。1977年 6 月, 鹿児島湾にホルネリアによる赤潮が大発生し, ハマチ多数が死に, 年生産高は約 1,900 トンに減少した。その後の年生産高は現在まで約 2,000 トンを維持している。これは鹿児島湾におけるハマチ年総生産 12,000 トンの約 20% に当る。

3. 1977 年夏季の海況

1977年 7 月 28, 29 日に行った赤潮発生原因調査での海洋観測は Fig. 1 に示すように牛根海域に 12 の測点を設定し, 鹿児島大学水産学部練習船 南星丸 (83 t) で行った。測点 1~11 で水温, 塩分, 溶存酸素と COD の各層観測を行い, 測点 12 では 3 時間ごと 5 回の各層観測, および 4 回の直読式流速計による測流を行った。COD は

水質汚濁調査指針 (松江吉行編, 1965) に記載のヨウ素滴定法により求めた。これらの測定結果より 10 m 深の水温, 塩分, 溶存酸素の水平分布を Fig. 2 (a), (b), (c) に示す。図中の格子縞域は観測当時ハマチ養殖生簀が設置されていたところである。現在もほぼ同じところに生簀が設置されている。

水温水平分布は牛根 (桜島と大隅半島が陸続きになっている付近の地名) より向って沖側で 26~27°C, 牛根岸寄りで 25°C 以下を示し, 沖側高温, 牛根側低温である。塩分水平分布は沖側 31.4~31.8‰, 牛根側 32.0~32.2‰ を示す。牛根岸寄りの塩分は沖側より約 0.5‰ 高塩分であり, 沖側低塩分, 牛根側高塩分である。溶存酸素の水平分布は沖側と牛根側 5.5 ml/L 以下で, 両者の中間で 5.5~5.7 ml/L を示す。10 m 深の水温, 塩分, 溶存酸素の水平分布は湾奥部沖合水が湾奥部の閉そく点である牛根海岸方向へ寄せている状態を示している。

そこで, 牛根 - 沖側を結ぶ断面の水温, 塩分, 溶存酸素と σ_t の断面図を作成し, Fig. 3 (a), (b), (c), (d) に示す。断面図を作るための海況要素の値は, 測点 1~4, 測点 5~7, 測点 8~10 の 3 列の観測線では, 観測線ごとに各層の平均値を求め, 牛根に最も近い点については測点 11 の値を代表値とした。

約 50 m 深以下では, 等温線, 等塩分線, 等溶存酸素線と等 σ_t 線はいずれも沖側より牛根側へ向って緩やかな上り傾斜の状態を示している。これらの等値線の分布と先に示した水平分布の状態から, 夏季の牛根海域では 50 m 以下で沖側から牛根側へ, 表面近くで牛根側から沖側へ向う海水流動があり, 鉛直循環が形成されている

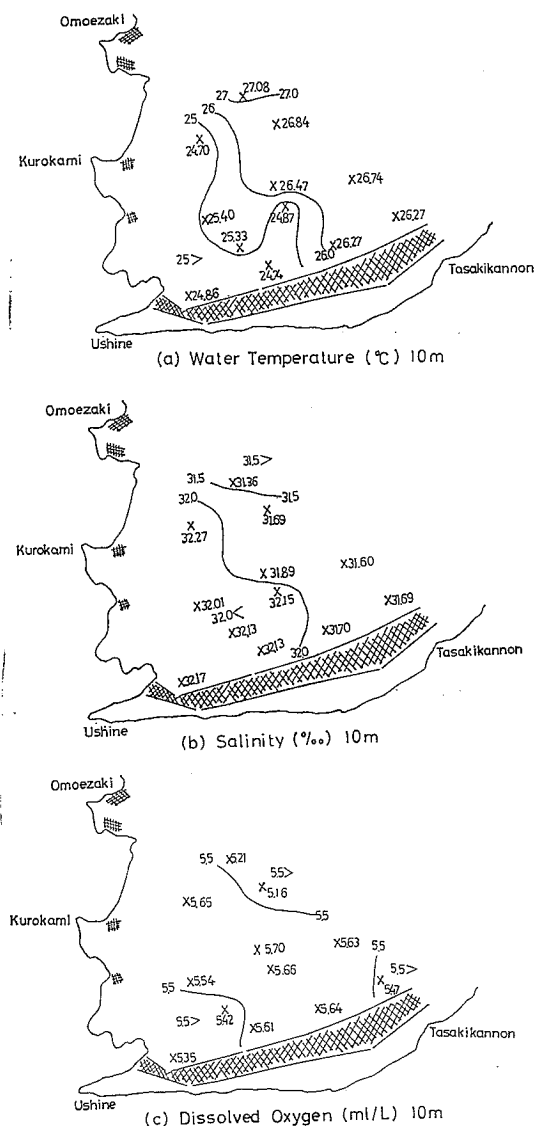


Fig. 2. Horizontal distributions of water temperature (a), salinity (b), and dissolved oxygen (c) at a depth of 10 m.

ことが示唆される。この鉛直循環系の牛根岸寄りには湧昇域が形成される。鉛直循環を生ずる外的要因として夏季に卓越する南風が考えられる。50 m 以深では、等 σ_t 線の傾斜はほとんどみられず海水は停滞に近い状態と思われる。

流速実測値として、測点12で行った測流結果を Fig. 4 に示す。測定は表面から 40 m 深まで 6 層で行った。下げ潮時に表面から 40 m 深まで南流が観測されている。

南流は沖側から大隅半島側へ向う流れであり、流速は表面と 5 m 深で約 15 cm/sec, 40 m 深で約 10 cm/sec である。他の時刻での測定では、干潮時に 10 m 深以浅で 7~10 cm/sec の東あるいは西方向への流れが得られている外、流れはほとんどない。第十管区海上保安本部 (1977) によると、鹿児島湾の潮流は、下げ潮時は南流、上げ潮時は北流である。湾奥部での転流は鹿児島港高潮、低潮時刻より約 3 時間半遅れるとされている。Fig. 4 に示した 21 時の南流は下げ潮が始まった直後に当たる。この観測期間中には、下げ潮時の南流に見合った上げ潮時の北流は観測されていない。潮流の変化については、後述する 1979 年の測流結果で検討する。

4. 1977 年夏季の COD 分布

表面と 10 m 深の COD 濃度水平分布を Fig. 5(a) と (b) に示す。COD は大隅半島側生簀近くで 0.7 ppm 以上、桜島側で 0.5 ppm 以上であり、両者の中間域で 0.4 ppm 以下である。COD は大隅半島側と桜島側に設置された生簀近くで高く、両者の中間域で低い。20~125 m 深の COD 分布も表面と 10 m 深の分布と同様の状態がみられる (茶 円, 1978)。COD の分布状態は水温、塩分、溶存酸素など海況要素の分布状態と異なっており、生簀からの有機物質は海況要素の水平、鉛直分布から推定される海水の鉛直循環によらずに生簀から牛根海域中央部へ拡散していく状態を示している。これは当海域の有機物質の拡散が平均的な海水流動による移流分散でなく、潮流による渦動拡散によることを示唆している。

次に、COD 濃度の平均鉛直二次元分布を Fig. 6 に示す。分布図は大隅半島側生簀から 1 列目 (測点 4, 5, 10, 11), 2 列目 (測点 3, 6, 9) と 3 列目 (測点 2, 8) の観測線ごとに平均した各層の COD の値を用いて作成した。生簀近くの表層で COD の値は高い。表層では、COD 濃度は生簀からの距離が増すと共に減少している。また、生簀近くの下層でも COD の値は高い。これは魚類養殖に起因する沈降物が生簀直下に多いことを示している。

表層での COD 濃度と生簀からの距離との関係を見るため、沖側の測点 1~7 の表面、10 m, 20 m 深の COD 値と生簀あるいは岸から測点までの距離との関係を Fig. 7 に示した。COD 濃度は生簀からの距離の増加に対し指数関数的に減少していることが認められる。

5. 1979 年夏季の測流結果

牛根海域の海水循環と生簀からの有機物質の拡散に関

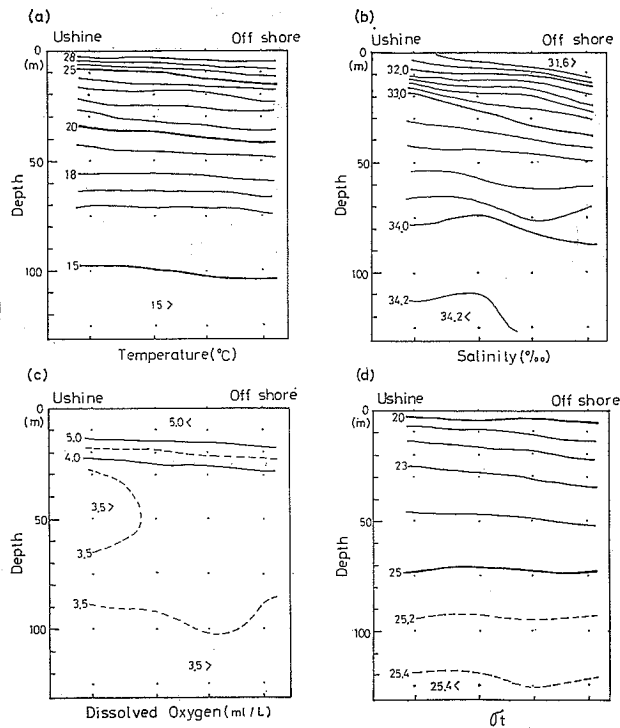


Fig. 3. Vertical sections of water temperature (a), salinity (b), dissolved oxygen (c), and σ_t (d).

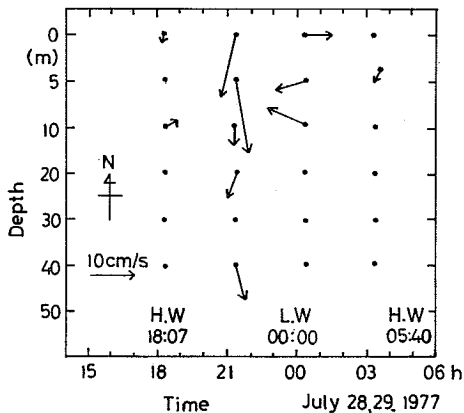


Fig. 4. Observed current vectors at Stn. 12.

係する表層の潮流の状態を把握するため、1977年夏季の観測の2年後、1979年7月20日から8月20日まで1カ月間、1点で測流を行った。測流点として1977年観測の測点12に設定するよう努力したが、養殖作業船の行動等の制約により許可が得られなかった。やむを得ず養殖漁場に可能な限り近い大燃崎より真東へ2.6 km、水深 137

m の地点 (Fig. 1 のアンカーマーク) に係留点を設定した。測流方法は鶴見精機製 MTCM-5 型自記流向流速計を表面ブイ方式で係留し、5 分間隔で流向流速と水温を測定した。測定は 10 m 深 1 層である。

測定結果のうち、大潮 (7月24日、新月) に近い7月25日～28日の流速の東西、南北成分と水温の時間変化を Fig. 8 に示す。東西成分より南北成分に半日周期の変化が明瞭にみられる。南北成分では北流より南流が卓越しており、最大流速は 20 cm/sec である。南流は下げ潮時に起こっており、1977年夏に行った養殖漁場内の測点12の結果と同様である。南流に対応して水温の上昇がみられる。これは下げ潮時に、湾奥沖側より岸側へ向う流れがあることを示している。東西成分には明瞭な半日周期の変化はみられないが、西方向の成分が卓越している。小潮時の結果は図示しなかったが流速はほとんど検知されず、流速計の測定可能限界である 1.4 cm/sec 以下であった。

次に、Fig. 9 に全測定の流速値の頻度分布を示す。流速 0～1.25 cm/sec が全測定の約 60 % を占め、夏季の牛根海域の海水流動が弱いことを示している。最大流速

は 25 cm/sec である。Fig. 10 に流向を36方位に区分し、流向別に流速を積算していった流程を示す。流程の卓越方向は南西であり、沖側-牛根を結ぶ線の方位に一致する。これは水温などの海況要素の分布状態から推定されたように、10 m 深では沖側より牛根へ向う流れが卓越することを示すものである。Fig. 10 の流程分布から求められた全測定値を平均した流れは南西方向へ 0.7 cm/sec

である。

流速変動の周波数構造を調べるために、測定開始より14日間の測定値（10分間隔で2,048個）を用いて流速変動スペクトルを求めた。南北成分についての結果をFig. 11に示す。パワースペクトル密度は12.6時間のところで高い。次いで6時間、4時間のところで高くなっている。12.6時間、6時間、4時間はそれぞれ潮汐周期、倍潮、3倍潮であり、牛根海域の流速変動には卓越した潮汐周期の変動の外に、より短時間の変動が存在していることを示している。

以上、牛根海域より沖側へ約 1 km 離れた点での潮流の特徴を示したが、1977年観測の測点12での結果にみられた南流が卓越する現象がほぼ同様に確認されることから、牛根海域内の潮流の状態も大略これらの結果と同じとみてよいと考えられる。牛根海域の海水循環は、1977年観測の海況分布図を合せ考察すると、平均的な海水循環像は10 m 深でも沖側から牛根側への流動があり、表面近くで牛根側から湾奥中央部へ向う流れがあると見なしてよい。潮流は大潮時に最大 25 cm/sec の流速

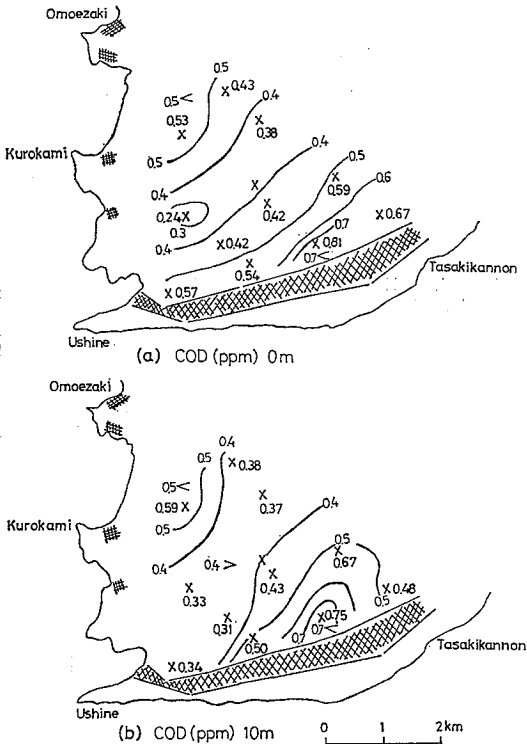


Fig. 5. Horizontal distributions of COD concentration at the surface (a) and at a depth of 10 m (b).

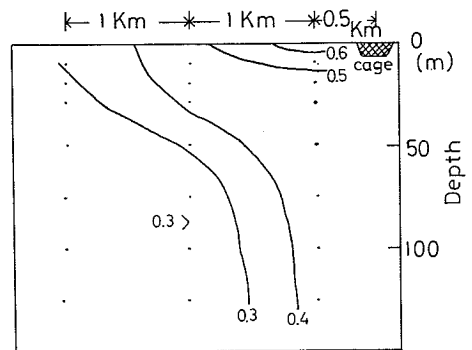


Fig. 6. Mean vertical distribution of COD concentration.

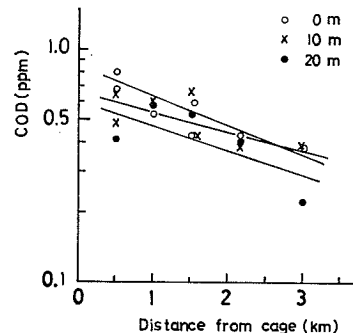
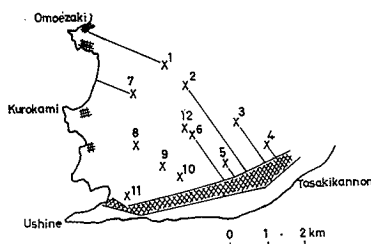


Fig. 7. Relationship between COD concentration and the distance from fish cage.

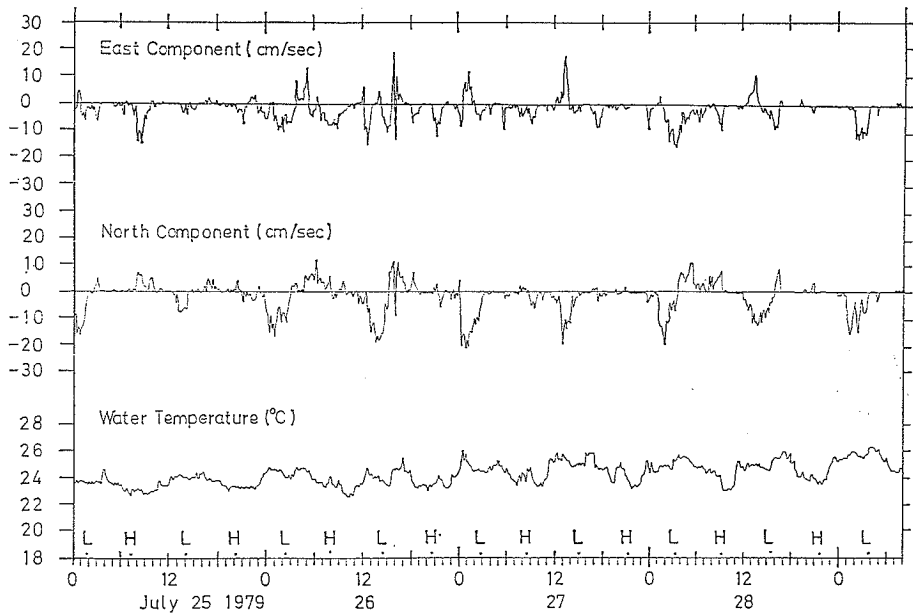


Fig. 8. Variation in time of east-west and north-south components of current, and water temperature at a depth of 10 m at the station indicated by an anchor mark in Fig. 1.

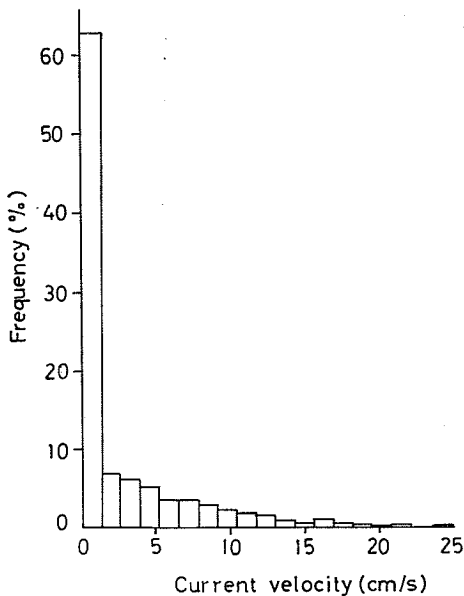


Fig. 9. Frequency distribution of current velocities.

が現われるがごく僅かで、小潮時の流速は 1.4 cm/sec 以下ではほとんど停滞に近いと考えられる。下げ潮時、10 m 深では南西流が卓越し、それに見合った沖側への流れ

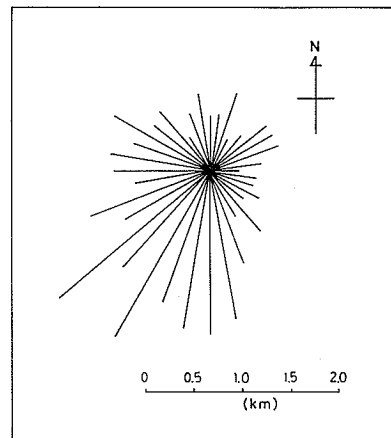


Fig. 10. Current distances (km) in the 36 directions.

が海面近くに存在すると思われるが、1 点 1 層での結果からでは牛根海域の潮流による海水循環像を知ることはできない。

6. 流速測定値より求めた拡散係数

海況要素の分布と COD の分布状態が異なることから、生簀からの有機物質の拡散は平均的な海水流動によ

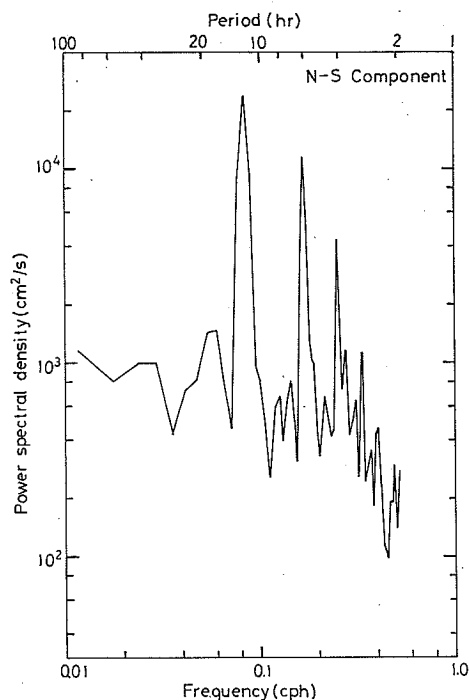


Fig. 11. Power spectral density in the north-south component of current velocities.

る移流分散でなく、潮流による渦動拡散と推定した。それで渦動拡散の程度を知るため、流速測定値より潮流の効果を含めた拡散係数を求める。ここで必要とするのは上げ潮・下げ潮の流速最強時付近の測定値のみを用いて得られる真の水平乱流拡散係数（柳・樋口，1982）でなく、潮流の変化の効果の入ったみかけの拡散係数である。

5 分間隔で得られた全流速測定値を用いて自己相関係数を求め Fig. 12 に示した。実線が流速の南北成分，点線が東西成分によるものである。自己相関係数の正の値から零になるまでの面積が潮流の効果を含めた拡散係数を示すものである。その値は，南北成分で $4.8 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{sec}$ となった。

鹿児島湾内において拡散係数を求めた例は，高橋ほか（1974）が沿岸部で染料拡散実験により 10^3 の桁の値を得ている。他の内湾の例として，中田・平野（1978）は潮流の速い瀬戸内海の布刈瀬戸周辺で，同じく染料拡散実験により $10^3 \sim 10^4$ の桁の拡散係数を得ている。海水流動が非常に弱いとされた牛根海域で， 10^4 の桁のみかけの拡散係数が得られたことは生簀からの有機物質の拡散には大潮時の潮流による渦動拡散が寄与していることを示していると考えてよい。

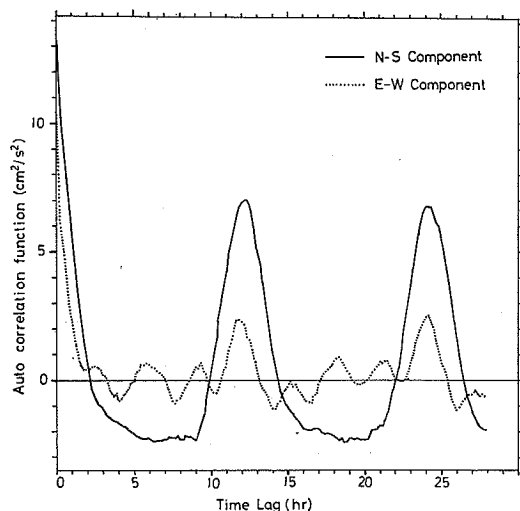


Fig. 12. Auto correlation functions in the north-south and east-west components of current velocities.

7. 結 び

本研究は閉鎖性の強い内湾として知られている鹿児島湾の湾奥部にあるハマチ養殖漁場の夏季の海況と養殖生簀からの物質拡散の状態を把握するために行ったものである。

水温，塩分，溶存酸素等の水平，鉛直分布から，牛根海域には 50 m 以浅に弱い鉛直循環が形成され，牛根岸近くに湧昇が存在することが認められた。30 日間の 10 m 深での測流結果では，大潮時は半日周期潮流の卓越がみられ，流速は最大 25 cm/sec になる。しかし，小潮時は潮流は非常に弱く，海水はほとんど停滞状態に近いと認められる。全流速測定値による平均では，流れは南西方向へ 0.7 cm/sec であった。これは 10 m 深でも沖側から牛根側への弱い流れがあることを示すものである。

COD の水平，鉛直分布は COD が養殖生簀付近で高濃度であり，牛根海域の中央部で低濃度になっている状態を示している。COD の分布状態が水温などの海況要素の分布と異なることから，生簀からの有機物質の拡散は沖側-牛根の線に沿う鉛直循環による移流分散でなく，潮流による渦動拡散によると推定した。流速測定値の統計解析によるみかけの拡散係数としては南北成分について $4.8 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{sec}$ の値が得られた。海水流動が非常に弱い牛根海域で， 10^4 の桁のみかけの拡散係数が得られたことは有機物質の拡散には大潮時の潮流による渦動拡散が寄与していることを示していると考えてよい。牛根

海域の拡散係数については、今後 COD 濃度分布から求める研究を行い、引き続き検討して別途報告する予定である。

以上の結果を導いた資料は、1 回の海洋観測、そして観測年が異なり、観測場所がやや沖側にずれた 1 点、1 層での測流結果である。観測資料の不足は否めないが、牛根海域の夏季の海況と有機物質の拡散状態の特徴の一端を把握できた。今後、養殖漁場内での長期の流速計係留について漁業者の協力を期待し、対流期である冬季に海況と物質拡散の観測を行い養殖漁場の海水交流と水質保全に関する研究を続けて行く計画である。

本研究を行うにあたり、牛根海域のハマチ養殖の状況、鹿児島湾の COD 負荷量などについて御教示頂いた鹿児島県水産試験場九万田一己氏に御礼申し上げる。

文 献

茶円正明 (1978) 夏期の鹿児島湾奥部牛根小湾の海況. 鹿児島湾赤潮発生原因調査研究報告書, 水産庁,

29-37.

第十管区海上保安本部 (1977) 鹿児島湾の潮流. 第十管区海上保安本部, プリント版 8pp. 付図 16 枚.

松江吉行編 (1965) 公共用水域保全のための水質汚濁調査指針. 増補・改訂・新版, 恒星社厚生閣, 468 pp.

中田英昭・平野敏行 (1978) 瀬戸水域における染料拡散実験. 水産海洋研究会報, 32, 1-18.

高橋淳雄 (1977) 鹿児島湾の水利. 沿岸海洋研究ノート, 14, 19-24.

高橋淳雄 (1978) 北錦江における海水の滞留. 鹿児島湾赤潮発生原因調査研究報告書, 水産庁, 19-28.

高橋淳雄・茶円正明・竹内兼仁・田代克憲・吉田賢二 (1974) 鹿児島湾における汚染進行に関与する海洋自然環境について. 鹿児島湾水域環境調査報告書, 鹿児島県, 6-84.

高橋淳雄・茶円正明 (1977) 鹿児島湾奥部海域底層の海水流動. 桜島北部海域の海底火山活動と環境の異常, 文部省科研費, 海底火山活動による桜島北部海域の環境変化に関する研究報告書, 43-47.

柳 哲雄・樋口明生 (1982) 現場海域の拡散係数の推定法に関する研究. 第29回海岸工学講演会論文集, 580-583.