

密度成層流体中の海水交換機構に関する研究

中 村 充*・萩 野 静 也**

1. はじめに

湾における海水の交流交換は湾の水質問題における最も重要な現象である。湾軸に沿った長さ数 km～十数 km 深さ 10～50 m 規模の湾は全国に多数存在し、この海域は高度に利用され水質問題をもっている。一方このような湾では夏季、水温・塩分に起因する鉛直密度成層が形成されるのが普通である。そこでそのような密度成層下で流動環境がどうなっているかという実体を把握し、その海水流動を支配する要因およびその海水交流・交換に及ぼす機構を解明するために高知県須崎市野見湾ハマチ漁場において流速・流向・水温・塩分の連続観測を行った。

野見湾は須崎湾の湾口東側に位置し、面積 4.1 km²、平均水深 18 m の内湾である。その湾口は比較的広く、水深は湾奥に向かって浅くなっている。また春から夏季にかけ水深 10 m 付近に密度成層が形成される。湾口での流れは二層流になることが多く、その流速は比較的大きい。中村¹⁾はこの大きな海水流動は内部波エネルギーによるものであろうと推定している。また宗影²⁾は湾口の海水交流は黒潮の離接岸に関係がありそうだと推定している。一方当該地区は初秋の頃流動環境が悪化し、いわゆる漁民の言う“潮どまり”現象が起り、しばしばハマチのへい死を招いている。そこでこの湾の適正なハマチ養殖量を決める必要があり、そのためには夏季から初秋の交換の機構・交換量を調査した。

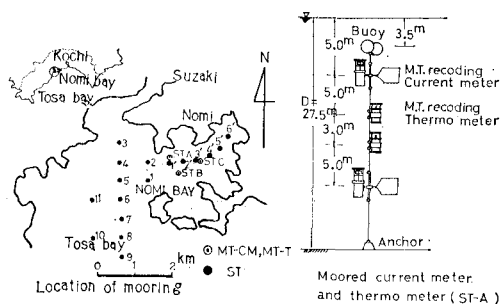
2. 調査結果およびその考察

(1) 調査方法

調査は 1977 年と 1978 年の 2 回行なった。それぞれの年度の調査方法の概要は以下の通りである。

a) 1977 年の調査

9 月 28 日から 10 月 28 日までの 1 ヶ月間図—1 の湾口 St.-A の地点に磁気テープ式流速計 (MTCM-5A) 2 台を中間ブイ式で係留し、流速・流向・水温・塩分の観測を行なった。流速計の設置水深は約 5 m と 17 m の上



図—1 野見湾調査地点および測器係留系

下二層で、サンプリング間隔は 5 分である。

b) 1978 年の調査

8 月 16 日から 10 月 12 日までの約 2 ヶ月間図—1 の湾内 3 点 (St.-A, B, C) に磁気テープ式流速計 (MTCM-5A) と水温計 (MT-T) を設置し、流速・流向・水温・塩分の観測を行なった。St.-A の測器の設置水深および係留方法は図—1 に示す通りである。また他の St. でも同じような係留方法を採用した。これらの観測の他に 8 月 17 日に図—1 の ● 印の 17 点で塩分・水温の鉛直分布調査を行なった。

(2) 調査結果および考察

a) 1977 年の調査結果

図—2 に 5 m 層と 17 m 層における 1 時間毎の東西方向の流速の時間変化を示す。また図—4, 5 に水温、塩分の時間変化を示す。いずれの図も実線が 5 m 層、点線が 17 m 層の観測値である。

図—2 より一見して言えることは上層と下層で流向が逆転していることである。また潮汐と流速の明瞭な関係をこの図から把握することは出来ないが、概して大潮時頃 (9 月 28 日～10 月 3 日, 10 月 13 日～10 月 18 日) は半日周期成分の 10 cm/sec 程度の比較的大きな流れが観測される。しかし小潮時頃 (10 月 4 日～10 日, 10 月 19 日～24 日) は流速も小さく、卓越周期も観測されない。またこの図より 1 ヶ月位の周期を持った長周期変動成分も認められるようである。すなわち観測期間前半の上層 5 m の流れは湾奥から湾口へ、後半は湾口から湾奥へ向う流れが卓越している。これに対し下層 17 m は上層と

* 正会員 農林水産省水産工学研究所水産土木工学部長

** 北海道開発局土木試験場水産土木室長

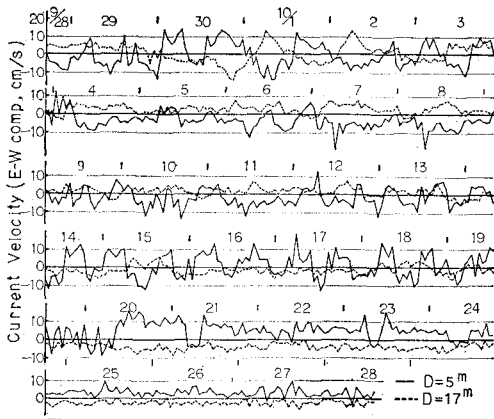


図-2 上下層の流速の時間的変化 (1977 年)

はまったく逆の流向で、前半は湾口から湾奥への流れが卓越している。また観測期間中 NW, SE 方向、風速 7~10 m/sec の風が卓越するが、これの表層流への応答はほとんど認められなかった。

St.-A での東西成分流速のパワースペクトルを 図-3 に示す。データは 1 時間平均をした流速データを用い、解析は Blackman-Tukey 法で行なった。これより 12 時間、25 時間周期の潮流成分が卓越していることがわかる。そこでこの流速データを用い Darwin 法により流速の調和分解を行なった。その結果 5 m, 17 m とも M_2 潮 (振幅 5 m 層; 2.7 cm/sec, 17 m 層; 0.9 cm/sec), K_1 潮 (振幅 5 m 層; 2.6 cm/sec, 17 m 層; 2.1 cm/sec) が卓越している。またこの観測期間中 (29 日間) の恒流は 5 m 層で E 方向 0.3 cm/sec, 17 m 層で W 方向 0.3 cm/sec であった。

上下層の水温の時間的変化を 図-4 に示す。この図より 10 月 4 日~6 日の期間を除いて上下層の水温差はほとんど見られなかった。また潮汐、潮流に関連した日変

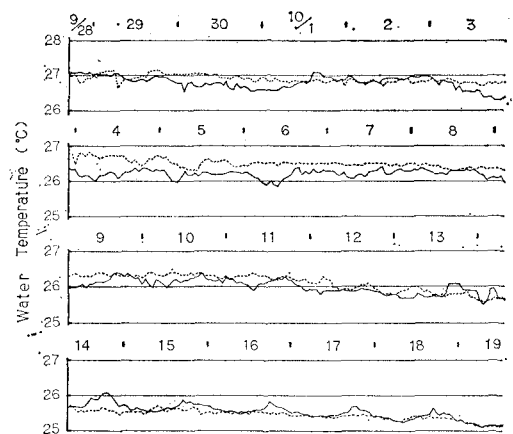


図-4 上下層の水温の時間的変化 (1977 年)

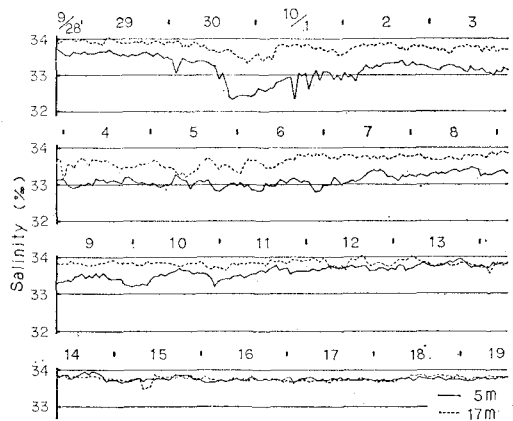


図-5 上下層の塩分の時間的変化 (1977 年)

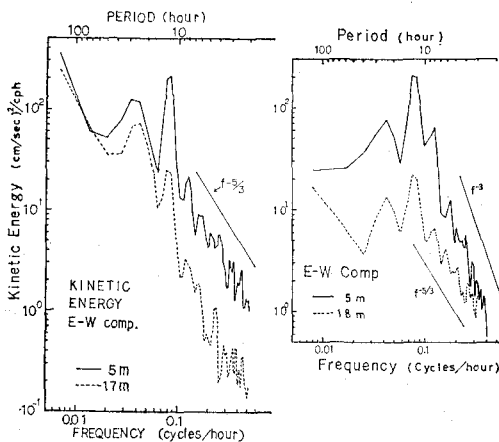


図-3 湾口流速のパワースペクトル (左 1977 年, 右 1978 年)

動もほとんど認められず、むしろ 10 月 14 日~19 日にみられるように気温変動が大きく影響しているようである。

図-5 に塩分の時間変化を示す。この図より 10 月 10 日頃までは上下層の塩分較差は大きい、それ以降その差はほとんどなくなる。この頃がこの湾の対流期に当るのかもしれない。また下層の塩分変動は小さいが、表層はかなり変動がみられる。特に 9 月 30 日の塩分低下は前日の雨 (雨量 87 mm) の影響と思われる。

b) 1978 年の調査結果

図-6 は須崎湾口から野見湾奥までの湾軸上で 8 月 17 日の上げ潮時に測定した水温・塩分・密度の縦断面分布である。この時期は成層が発達しておりそれぞれの等値線は水平に寝ている。また水温 29°C 以上、塩分 32.5% 以下の高温低かん水が野見湾表層を覆っている。

次に湾内 3 点での長期観測結果であるが、St.-B, C については St.-A の結果とほぼ同じなので、ここでは St.-A の観測結果のみ述べる。

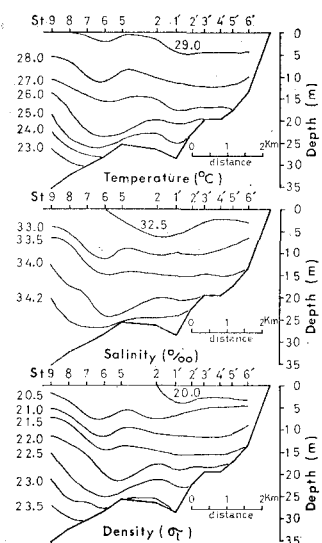


図-6 水温、塩分、密度の縦断分布 (1978 年)

図-7 は St.-A の 5m 層と 18m 層における 1 時間平均毎の東西方向流速の時間変化である。1977 年観測著ではないがこの図から上層と下層で流向が逆転していることが認められる。また大きな特徴として観測前半は半日周潮成分が卓越し、約 10 cm/sec 程度の流れが観測された。しかし 9 月 6 日以降この流れはほとんどなくなり、いわゆる“潮止り現象”が始まった。今回の観測で

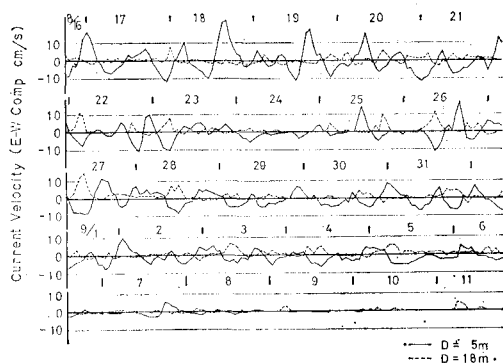


図-7 上下層の流速の時間変動 (1978 年, St.-A)

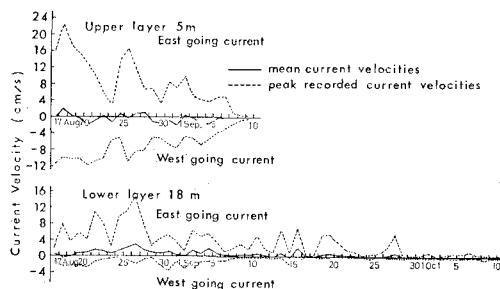


図-8 平均および最強流速の変動 (1978 年, St.-A)

は 1977 年に認められたような長周期の流速変動はなかった。

次に St.-A の上下層の東西方向の 1 日当りの peak 流速、平均流速を示すと 図-8 のようになる。まず上層 5 m であるが、日平均流速は 3 cm/sec 以下であり、卓越方向は認められなかった。peak 流速は約 1 週間位の周期をもって減衰振動をし、9 月 10 日以降その振幅は 0 になっている。下層 18 m はいくぶん様相を異にしている。すなわち平均流速は 3 cm/sec 以下であるが、東流の卓越流向をもつ。peak 流速は上層より小さいが、著しい減衰振動らしきものは認められない。また東流の方が西流より卓越している。

東西成分流速のパワースペクトルを求めると 図-3 のようになる。これより上下層とも 12 時間周期成分が卓越している。

図-9 は St.-A で測定した水温データから推定した isotherm depth の時間的変化である。これより 8 月 27 日から 9 月 3 日まで 28°C の等温線はほぼ 10 m 深を、27°C の等温線はほぼ 15 m 深を 1 日 2 回の割で振動している。その振幅は 5~6 m である。しかし 4 日以降 28°C、27°C 両深共 1 日 2 回の振動は見られなくなり、しかも 28°C 深は浅くなった。丁度この現象が起った時期は流速が小さくなり始めた時期とほぼ一致する。このことは“潮止り現象”を解明するための重要な鍵を示唆しているものと解釈でき興味深い。

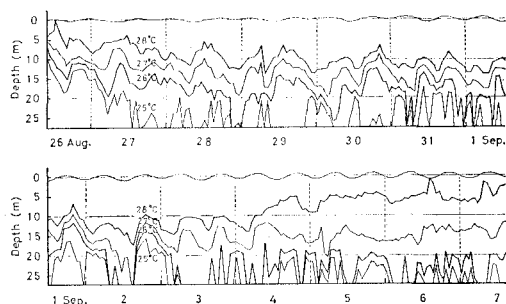


図-9 水温の時間的変動 (1978 年, St.-A)

3. 内部潮汐に関する理論およびその適用

野見湾では水温、塩分に起因する内部潮汐らしきものの発生が見られた。内部潮汐の周期が湾の固有周期に近い場合共振することが多く、湾の海水流動を支配する可能性がある。ここでは内部潮汐の共振周期、振幅の計算法を示し、これを野見湾へ適用してみる。

(1) 長方形湾の内部潮汐の理論

いま 図-10 に示すように湾口 ($x=a$) で内部潮汐振動 ζ_i がある場合、湾奥 ($x=0$) に向けての強制振動を考えよう。 $x=a$ における内部潮汐振動 ζ_i を

$$\zeta_t = A_t \cos \sigma t \quad \sigma = 2\pi/T \quad \dots\dots\dots (1)$$

で与える。ここで T は内部潮汐周期。

定常波の基本式は

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + k^2 \zeta = 0 \quad k = \frac{2\pi}{L} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで L は湾における内部潮汐波長。

ζ の x 方向分布を求めるのであるから

$$\zeta = F(x) \zeta_t \quad \dots\dots\dots (3)$$

とおいて $F(x)$ を求める。ここで以下 $F(x)$ を F とかき (3) を (2) に代入すると

$$F = A e^{ikx} + B e^{-ikx} \quad \dots\dots\dots (4)$$

湾奥 $x=0$ で $\partial \zeta / \partial x = 0$ であるから $A=B$ が得られ (4) 式は

$$F = 2A \cos kx \quad \dots\dots\dots (5)$$

湾口 $x=a$ で $\zeta = \zeta_t$ であるから

$$A = \frac{1}{2 \cos ka} \quad \dots\dots\dots (6)$$

(5) 式に代入して

$$F = \frac{\cos kx}{\cos ka} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで $k = \sigma/c$, c は内部潮汐の波速で

$$c = \sqrt{\varepsilon g \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2}} \quad \varepsilon = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに h_1 , h_2 は上下層の水層の厚さ, ρ_1 , ρ_2 は上下層の密度, 湾の内部波の自由振動周期を T_f とかけば

$$\frac{1}{c} = \frac{(2m-1)}{4a} T_f$$

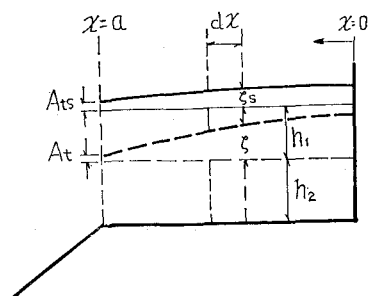
$$k = \frac{\sigma}{c} = \frac{(2m-1)\pi T_f}{2aT} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに m は湾内内部振動の節数である。(3), (7), (9) 式から次式を得る。

$$\zeta = \frac{\cos \frac{(2m-1)\pi}{2} \frac{T_f}{T} \frac{x}{a}}{\cos \frac{(2m-1)\pi}{2} \frac{T_f}{T}} \zeta_t \quad \dots\dots\dots (10)$$

湾の固有振動周期 T_f は次のようになる。

$$T_f = \frac{4a}{c(2m-1)} \quad \dots\dots\dots (11)$$



図—10 モデルおよび記号の説明

上層, 下層の単位幅当りの流量を q_1 , q_2 , 流速を u_1 , u_2 とする。表面潮汐を湾口で $\zeta_{ts} = A_{ts} \cos \sigma t$ とすれば同じ展開で x 点の水位変化 ζ_s は

$$\left. \begin{aligned} \zeta_s &= \frac{\cos \frac{(2n-1)\pi}{2} \frac{T_{fs}}{T} \frac{x}{a}}{\cos \frac{(2n-1)\pi}{2} \frac{T_{fs}}{T}} \zeta_{ts} \\ T_{fs} &= \frac{4a}{(2n-1)\sqrt{g(h_1+h_2)}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (12)$$

x 点における下層流量 q_2 , 流速 u_2 は

$$q_2 = \int_0^x \frac{d\zeta}{dt} dx = \frac{4a A_t \sin \sigma t}{(2m-1) T_f} \frac{\sin \frac{(2m-1)\pi T_f x}{2aT}}{\cos \frac{(2m-1)\pi T_f}{2T}} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$u_2 = \frac{q_2}{h_2 + \zeta} \quad \dots\dots\dots (14)$$

である。同様に上層流量 q_1 , 流速 u_1 は次のようになる。

$$q_1 = \int_0^x \left(\frac{d\zeta_s}{dt} - \frac{d\zeta}{dt} \right) dx$$

$$= 4a \sin \sigma t \left[\frac{A_{ts}}{(2n-1) T_{fs}} \frac{\sin \frac{(2n-1)\pi T_{fs} x}{2aT}}{\cos \frac{(2n-1)\pi T_{fs}}{2T}} - \frac{A_t}{(2m-1) T_f} \frac{\sin \frac{(2m-1)\pi T_f x}{2aT}}{\cos \frac{(2m-1)\pi T_f}{2T}} \right] \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$u_1 = \frac{q_1}{h_1 + h_2 - \zeta} \quad \dots\dots\dots (16)$$

(2) 野見湾における適用

野見湾における湾口流速について上記理論を適用する。いま $h_1=10$ m, $h_2=15$ m, $\rho_1=1.0205$, $\rho_2=1.0225$, $A_t=A_{ts}=1.0$ m, $T=12$ hr 25 min, $a=3.5$ km とすれば内部潮汐の波速は (8) 式より $c=0.34$ m/sec となる。また湾内では単節の振動が卓越するとすれば $m=n=1$ である。従って湾内の固有内部振動周期 T_f , 表面潮汐による固有振動周期 T_{fs} はそれぞれ (11), (12) 式より次のようになる。

$$T_f \doteq 11 \text{ 時間 } 26 \text{ 分}, \quad T_{fs} \doteq 15 \text{ 分}$$

野見湾口は湾奥から $x=2.7$ km であるからその点の潮汐, 内部潮汐の水位変化はそれぞれ (10), (12) 式より

$$\zeta = 3.55 \cos \sigma t, \quad \zeta_s = \cos \sigma t$$

上下層流量 q_1 , q_2 および流速 u_1 , u_2 は (13)~(16) より

$$q_1 = -2.09 \sin \sigma t, \quad q_2 = 2.47 \sin \sigma t$$

$$u_1 = -\frac{2.09 \sin \sigma t}{10 - 2.55 \cos \sigma t}$$

$$u_2 = \frac{2.47 \sin \sigma t}{15 + 3.55 \cos \sigma t}$$

したがって最大流速は

$$u_{1\max}=0.22\text{ m/sec}, \quad u_{2\max}=0.17\text{ m/sec}$$

となり、ほぼ実測値と一致する。

3. 野見湾における海水交換

(1) St.-A の乱れ特性

野見湾の海水交換について検討するために St.-A の乱れの特性を調べる。ここでは 1978 年のデータのみについて述べる。毎日の測得流速および塩分データは 1 日の平均値とその偏差の和であるとし若干の統計処理し、各変動の 1 日の平均量、乱れ等を求めたものが図-11 である。これより日平均流速 $\bar{u}$ は上下層共 3 cm/sec 以下で、下層は東流の卓越流向をもつ。塩分の日平均変動量はあまり大きくなく、下層 18 m でほぼ 34‰ 前後、上層 5 m で 32.6‰ 前後である。平均流による塩分の移流 $\bar{u}s$ は平均流のパターンと同じであり、あまり大きな変動は認められなかった。概して下層は東流で、上層は西流で塩分の輸送が行なわれる傾向にある。乱れ運動による塩分輸送 flux $\bar{u}'s'$ は移流項に比べて小さい。

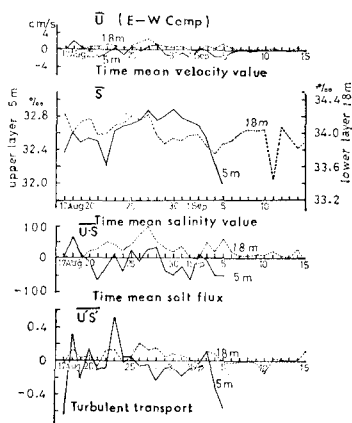


図-11 乱れ特性の変動 (1978 年, St.-A)

(2) 海水交換率

一潮 (25 時間) 当りの海水交換率を調べるために野見湾を単純な二層モデル (上層厚 10 m, 下層厚 15 m) と考えた。また St.-A の観測値を野見湾湾口部の代表値と仮定し、上下層の塩分 flux より海水交換率を推定した。すなわち一潮当りの湾内の残留塩分量と全流入塩分量との比を海水交換率と定義して次式より求めた。

湾内に残留する塩分量 ΔQ , 塩分の全流入量 Q は

$$\Delta Q = \int_0^T [h_1(v_1s_1 - v_1's_1') + h_2(v_2s_2 - v_2's_2')]dt$$

$$Q = \int_0^T (h_1v_1s_1 + h_2v_2s_2)dt$$

海水交換率 α は

$$\alpha = \frac{\Delta Q}{Q} \dots\dots\dots (17)$$

ここで v, s は湾口での流入流速および塩分で、上層を添字 1, 下層を添字 2 で表わす。また ' は流出量を表わす。 h_1, h_2 は上, 下層の水層の厚さ, T は一潮汐周期 (25 時間) である。

1977 年, 1978 年の観測データを用い (17) 式より海水交換率を計算した結果は図-12 の通りである。これより交換率の値はバラツキが大きいが、流れが比較的大きい時期の交換率は平均 0.3 であった。

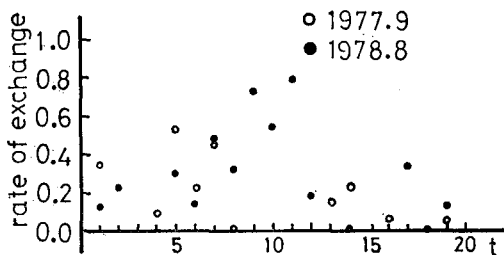


図-12 海水交換率

4. あとがき

密度成層流体中の海水交換機構を解明するため高知県野見湾において調査をした。そしていくつかの興味ある現象がわかった。またこの湾の流動環境を支配しているのは内部波であるらしいということが確認できた。

今後に残された問題として湾内の entrainment mixing の問題、内部波の発生機構について解明することによって海水流動・交換機構を明確にする必要がある。

最後にこの調査に当って高知県水産試験場森田場長、窪田、生田両科長はじめ漁場環境科の皆様、水産工学研究所上北征男室長・杜多哲技官には御協力をいただいた。またデータ整理においては内藤治男君 ((株)日本環境科学研究所) に協力して頂いた。ここに記して関係諸氏に深甚の謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 中村 充: 漁場造成のための内部波エネルギーによる湧昇流の利用, 沿岸海洋研究ノート, Vol. 15, No. 2, pp. 116~124, 1978.
- 2) 宗景志浩: 野見湾における海水交流調査, 昭和 52 年度水産学会秋季大会講演要旨, 1977.