

大村湾の潮汐水理模型実験による水質汚濁予測 に関する研究（第1報）

富樫 宏由*・中村 武弘**・宇都 幸一***・田中 清裕****

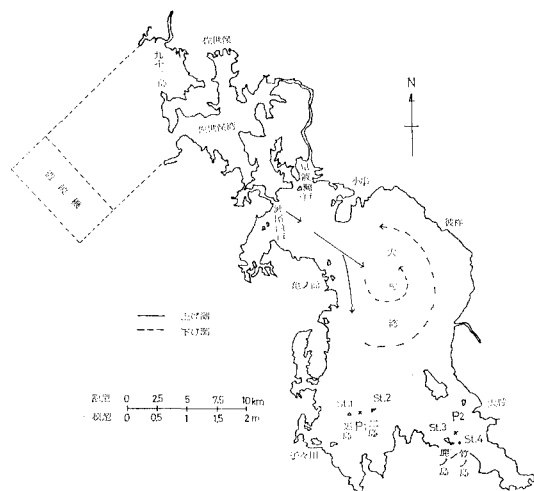
1. ま え が き

大村湾は海洋県たる長崎県内にある唯一最大の典型的な閉塞的内湾であるが、一見したところでは未だ清澄であるかに見える。しかし、大村湾・佐世保湾沿岸においては現に次第に汚染負荷が増加しつつあり、さらに各種の開発計画が構想、実施され、したがって湾内の水質汚濁が予想されるため、長崎県は「大村湾水質汚濁対策総合調査」を長崎大学に委託した。本実験はこの調査の一環として行われたものであり、湾内の汚染物質の混合拡散現象を潮流による水平乱流拡散現象として取扱い、水質汚濁予測を行うことを目的とした研究である。本論文はそのうちまず原型の潮汐現象の模型での再現性を調べ、併せて拡散係数を予知するために現地観測を行った結果について述べた第1報である。

本研究の主たる対象は大村湾であるが、大村湾は針尾瀬戸と早岐瀬戸という非常に細長い両瀬戸を通して佐世保湾に通じ、これまた狭い湾口部を通して外海と接続しており、したがって両湾での潮汐現象の特徴としては、大村湾の潮差は小さく（50 cm 前後）、佐世保湾のそれは大きく（3 m 前後）かつ両湾には約3時間の位相差があることである。また、近年特に西海国立公園の九十九島沿岸海域の汚染が意外に大きく目立ってきたが、この原因は目下不明であるが、一つには大村湾・佐世保湾の水質汚濁の影響が外海の浅海域にも目立って波及し始めているのではないかと考えられる。こうした理由から、外海を含めてできるだけ広い海域を対象とする必要があったが、その反面では予算、建て屋面積等による厳しい制約もあったので、潮汐と拡散の水理現象の相似性が保証される範囲で最小限度可能と思われる中縮尺（水平 1/5 000、鉛直 1/292）の模型で実験を行った。中・小縮尺模型による拡散の水理実験での最大の難点は乱流現象の相似性と高度の測定精度が要求されることである。前者については未だ検討する段階に至っていないが、後者については 1/10～1/100 mm オーダーの新しい測定用具を

開発した。現在のところ潮汐については相似性が極めて良好であるが、潮流については潮汐残差流による環流の向きが現地観測による解析結果と一致しないところがあり、目下さらに詳細に検討中である。

また、現地観測は水質汚濁予測に関する上記の大村湾の潮汐水理模型実験並びに別途数値シミュレーション解析を行うに当たって前提条件ともいえる現地の拡散係数を得るために行ったものであるが、ほぼ妥当と思われる結果が得られたので、ここに併せて報告する次第である。



図一 大村湾を含む模型海域

2. 原型の潮汐

大村湾は九州の西岸に位置し、その大きさは南北約 26 km、東西約 11 km、平均水深約 20 m の扁平な湾で底質は主に泥と砂およびその混合物よりなっている。この湾内での潮汐常数を表一に示す。

これより半日周潮が他に比して卓越していること、湾奥へ行くにしたがって振幅がわずかではあるが増大していること、また佐世保と大村では位相差が 84.3°（約 2 時間 54 分）、小串と大村では 2.5°（約 5 分）であることなどがわかる。現在までのところ湾内の潮流に関する観測資料は少なく、明確な状況は未だ把握されていないが、図一に示すような反時計回りの環流があると言わ

* 正会員 工修 長崎大学助教授 工学部土木工学科
** 正会員 長崎大学助手 工学部土木工学科
*** 長崎大学助手 工学部機械工学科
**** 長崎大学技官 工学部機械工学科

表—1 潮汐常数

潮汐常数	M_2		S_2		K_1		O_1	
	H	K	H	K	H	K	H	K
佐世保	84.3	242.3	38.5	267.9	23.7	214.6	18.2	194.3
小 串	21.6	323.5	7.4	352.9	9.8	281.2	7.8	260.5
亀ノ浦	22.6	—	10.5	—	1.3	—	1.8	—
東 彼 杵	23.0	—	10.7	—	1.3	—	1.8	—
子々川	23.5	—	10.9	—	1.3	—	1.8	—
大 村	24	326	9	358	11	275	9	266

(単位 H : cm, K : 度)れている^{1),2)}。

3. 相 似 性

潮流は水平方向に卓越し、圧力は静水圧分布をなすとし、海面から海底まで平均した流れについての相似を考えると、Froude の相似律と拡散の相似律とから次式が導かれる³⁾。

$$t_r = h_r = x_r^{2/3}$$

$$C_r = x_r^{-1/3}, \quad n_r = x_r^{-1/18}$$

$$v_r = x_r^{1/3}$$

ここで、 x は水平距離、 h は鉛直距離、 t は時間、 C は海底摩擦係数、 n は Manning の粗度係数、 v は流速を表わし、添字 r は原型と模型の比率を表わす。

本模型実験は水平乱流拡散現象を取り扱うため、模型上の流れは原型同様乱流でなければならない。一方対象とする海域を佐世保湾・九十九島附近を含む広範囲のものとしたため実験施設の大きさを考慮して縮尺を $1/x_r = 1/5\,000$ とした。よって相似律より決定される模型の縮尺は表—2 のようになる。

表—2 模型縮尺

諸 元	原 型	模 型
水 平 縮 尺	1	1/5 000
垂 直 縮 尺	1	1/292
平 均 水 深	約 20 m	6.8 cm
平 均 潮 差 (大 村)	48 cm	1.64 mm
(佐 世 保)	168.6 cm	5.77 mm
時 間 縮 尺	1	1/292
周 期	12 h 25 m	2 m 33 s
流 速 縮 尺	1	1/17.1
最 大 流 速	約 20 cm/s	1.17 cm/s
Manning の粗度係数縮尺	1	1/0.623
粗 度 係 数	約 0.02	0.0321
拡 散 係 数 縮 尺	1	$1/8.55 \times 10^4$
拡 散 係 数	$10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$	$1.17 \text{ cm}^2/\text{s}$

この縮尺での模型の Reynolds 数を検討しておく。原型では平均水深 20 m、湾内中央部での最大流速 20 cm/s であるから、いま代表長として水深と最大流動距離³⁾をとると原型における Reynolds 数は、それぞれ 4.0×10^6 、

5.7×10^8 となる。この値に対応する模型での Reynolds 数は、それぞれ 8.0×10^2 、 6.7×10^3 となり、模型における流れも乱流であると考えられる。

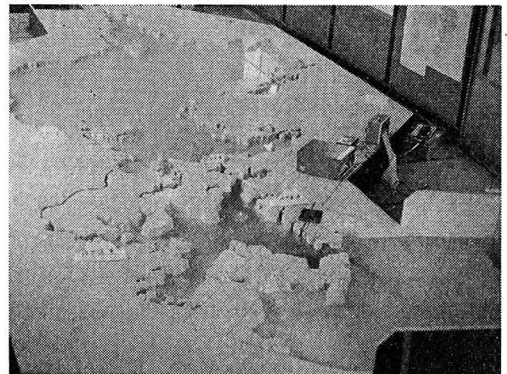
また、原型の粗度係数 n_p は不明であるが $n_p = 0.02$ 程度と推定される。よって模型における粗度係数は $n_m = 0.0321$ となり、これに対応する相当粗度 k の値は 3 mm 程度とみなされる。

4. 実 験 施 設

実験施設は、模型水槽、起潮機、計測装置よりなる。

(1) 模 型 水 槽

水槽の大きさは長さ約 10 m、幅約 5 m で、外壁をコンクリートで作り、その中に図—1 に示されるような大村湾、佐世保湾を含み九十九島の犬崎鼻に至るまでの水平縮尺 1/5 000、鉛直縮尺 1/292 の模型を作った(写真—1)。模型の作製にあたっては地形の整形が容易であるこ



写真—1 大村湾水理模型

と、修復が容易であること、粗度調整が容易にできること、漏水を完全に防げることを考え合わせ、模型の海底は自硬性鑄物砂を用いてその表面に FRP を貼ることとした。

模型製作の手順は次の通りである。

- 海図 (No. 1231, No. 1232) より水深と共に位置を読み取る。
- 読み取ったデータから、底に格子状に組むベニヤ板の原図を作る。
- 原図に合わせてベニヤ板を型取りする。
- 床にアルミニウムの引き棒を用いて基準レールを敷き、水平に保つ。
- 基準レールの上にベニヤ板を格子状に組む。
- 格子の間に自硬性鑄物砂をつめて整形する。
- FRP を貼る。

(2) 起 潮 機

起潮機はプランジャー式を用いた。潮差は佐世保において 5.50 mm~11.00 mm まで可変可能である。波形の一例を図—2 に示す。

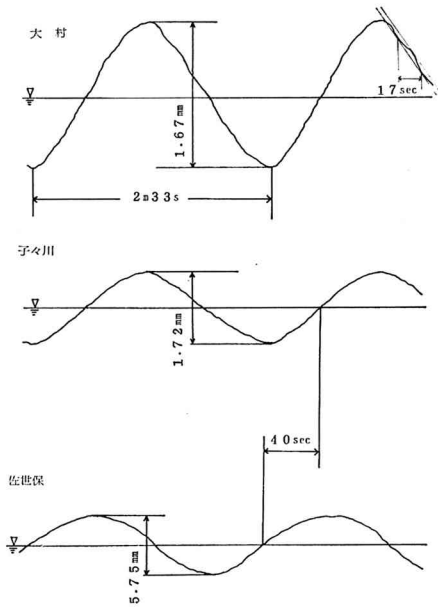


図-2 波形記録

(3) 計測装置

模型の水平縮尺を $1/5\,000$ としたため、他の縮尺は表-2 に示す通りとなる。このため大村での平均潮差は 1.64 mm 、最大流速は 1.17 cm/s と非常に小さくなり潮位、潮流の測定のための精密な計測器が必要となった。

潮位計については、モーターの軸の偏心等の測定に使用されるギャップセンサーを用い、水面に浮かべたアルミニウム板の変位量を測定する新しい潮位計を開発製作し、使用している。潮位計に使用されたギャップセンサーの原理は渦電流損を利用したもので、ピックアップ先端の高周波コイルにフロート上のアルミ板が接近すれば渦電流が生じ、高周波コイル内のインダクタンスは渦電流損により減少し、逆にアルミ板が離れると渦電流損は少なくなりインダクタンスは増大する。このインダクタンスの変化を利用してフロートの変位量を測定する無接触式の潮位計である。潮位計の構造は 図-3 および写真-2 に示されるようにフロート、フロート支持部、ピックアップ、ピックアップ支持部よりなる。

① フロートは円錐の一部を切り取った形状とし、その上部にアルミ板がはめ込んである。このアルミ板はピックアップに対する物でその表面粗さは 3μ 以下である。またフロートの底には 1 mm の穴があけてある。

② フロート支持部はフロートの水平方向の移動を防止し、フロートの中心とピックアップの中心を常に一致させておくためのものである。フロート支持部の中心には 0.8 mm の針を立ててあり、この針にフロートがさし込まれ支持される。

④ ピックアップ支持部はピックアップを保持し、フ

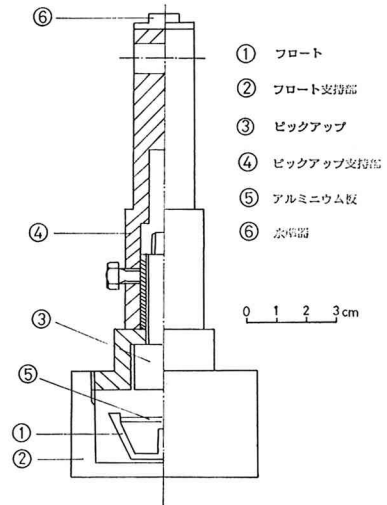


図-3 潮位計

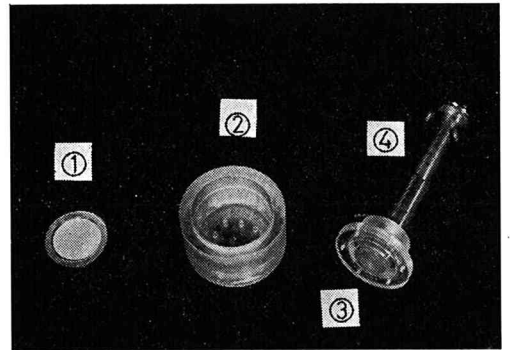


写真-2

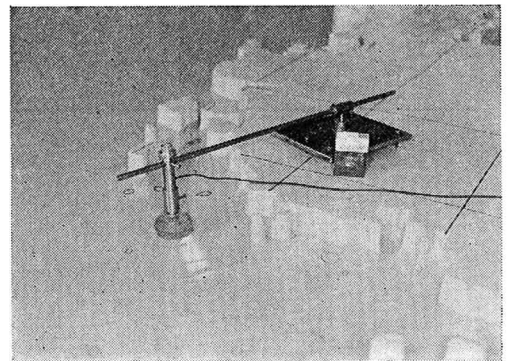


写真-3

ロート支持部とねじで一体化される。ピックアップ支持部それ自体 写真-3 に示されるように測定地点で外部からの支持棒により支持されて使用される。

⑥ 水準器は潮位計を測定地点にセットする時、潮位計を水面に対し鉛直にするためのものである。

この潮位計の誤差は現在のところ $\pm 0.02\text{ mm}$ 程度である。

潮流の測定は、多数の浮標を水面に浮かべ写真撮影に

よる浮標追跡法を用いている。

5. 実験経過

潮汐水理模型による拡散実験を行う場合、本実験に先立つ予備実験において潮流および拡散現象の再現性を確認しておくことが必要である。一般に水理模型実験においては相似則に定められた摩擦抵抗を完全に施し潮汐現象を与えた場合、模型内に生ずる潮位・潮流の現象は原型と相似になるはずである。しかし、原型についての粗度が全く不明であるため、再現性の確認は試行錯誤的に粗度の調整を行い、模型の潮位・潮流が原型における観測記録結果と合致する事によって首肯される。そこで、著者らは、まず粗度を付けない状態で実験を行い、続いて粗度を付けながら再現性を高めて行くという方法を取った。実験は現在この予備実験の段階にあり、まだ目的とする拡散実験を行う段に至っていない。したがってここでは現在までに得られたデータについて記すことにする。

原型においては半日周期が他に比して卓越しているの
で模型における潮汐は半日周潮だけを取り扱う。また潮
差は平均潮差 (2M₂) である。

(1) 潮 汐

原型における平均潮差を模型のそれに換算した値と実験値を表-3に示す。

表-3 平均潮差

	佐世保	小 申	亀ノ浦	東彼杵	子々川	大 村
換 算 値	5.77	1.48	1.58	1.58	1.61	1.64
実 験 値	5.75	—	1.52	1.65	1.72	1.67

(単位 mm)

これより原型同様模型においても潮汐が湾奥に進むにつれ振幅が増大していることがわかる。誤差は子々川で最大で6.8%程度である。また、模型における佐世保と大村の位相差は図-2に示されるように40秒(原型換算値:約3時間15分)で原型の約2時間54分と10%の誤差で一致している。また原型においては約80分の周期をもつセイシュが観測されるが、模型においても約17秒(原型換算値:約83分)のセイシュが再現されている。したがって潮汐についてはかなり良く再現されていると思われる。

(2) 潮 流

潮流の測定には浮標追跡法を用い、大村湾の中央部より北側の地域については写真の局所撮影により潮流槽円も求められるが、南側の湾奥については流速が小さいため現在のところ不可能である。しかし湾奥部においても潮汐残差流を表わす移動速度は求められ、原型の値とよく一致している。現在本実験で一番問題となっているのは、原型においては図-1に示されるような反時計回りの

の環流があると言われているのに対し、模型においては図-4に示されるように時計回りの環流が現われていることである。この原因については現在検討中であり、また原型においても長崎県の土木部により図-4の○印の10点で潮流の現地観測が昭和51年2月13日~4月4日に行われ、現在データの解析中である。

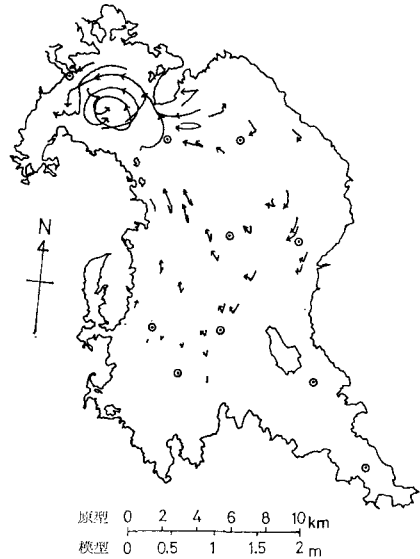


図-4 流跡線 (干潮時より1周期)

6. 拡散係数の現地観測

本観測は拡散に関する水理模型実験の前提条件ともいえる現地の拡散係数を得るために行った。観測方法は、染料を測定地点に投入し、一定時間間隔で染料の拡がった面積を測定し、経過時間との関係から拡散係数を算出するものである。面積の測定にあたっては、一方では6隻のボートで肉眼で色を識別できる最低濃度の染料の外縁上を追跡し、他方では二地点に据え付けたトランシット2台でボートの位置を読み取るという方法で行った。したがってここで求められた面積は六角形で近似した面積である。観測は昭和50年9月25、26日の2日間にわたり、二地点で計3回行った。染料はウラニンで1回の観測に5kgを投入した。

観測概要を図-1および表-4に示す。

本観測から拡散係数を求めるにあたり平野・杉浦⁴⁾の用いたと同じ解析法を使った。それによると拡散係数は次式で求められる。

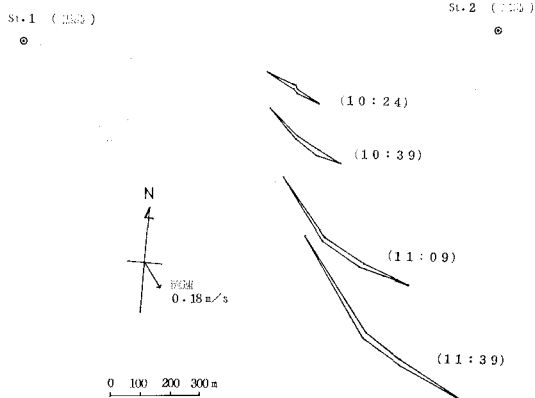
$$K \sim \frac{\Delta S_i}{4\pi \Delta t_i} = \frac{dr_i^2}{4\Delta t_i}, \quad \begin{aligned} \Delta S_i &= S_i - S_{i-1} \\ \Delta t_i &= t_i - t_{i-1} \end{aligned}$$

ここで、 K は拡散係数、 t_i は測定時刻、 S_i は時刻 t_i での染料域の面積、 r_i は S_i と等価な円の面積に換算した時の円の半径である。

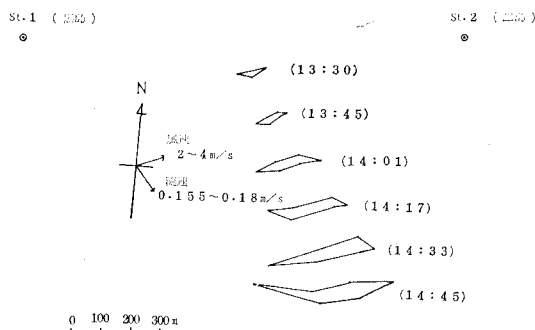
表—4 観測概要

	第1回目	第2回目	第3回目
観測地点	P_1	P_1	P_2
観測日	9月25日	9月25日	9月26日
観測時刻	10:09~11:39	13:15~14:45	11:01~12:31
天気	晴	晴	曇
波浪	なし	なし	なし
風	なし	WSW, 2~4 m/s	なし
潮流	325°, 0.18 m/s	320°, 0.155~0.18 m/s	なし*
トランシット据付位置	St. 1, St. 2	St. 1, St. 2	St. 3, St. 4
トランシット間の距離	1 620 m	1 620 m	1 020 m

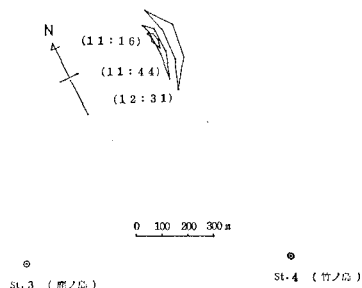
* 流向流速は小野式流速計で水深 2 m で計測した。
流速計の測定可能範囲は 0.09 m/s~0.71 m/s である。
従って「なし」とは測定範囲外の微流速である。



図—5 第1回観測

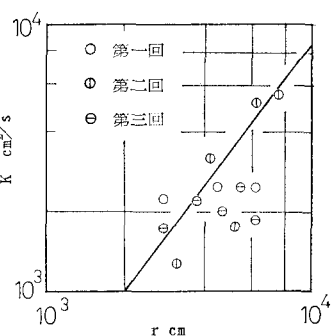


図—6 第2回観測



図—7 第3回観測

第1回, 第2回, 第3回観測での染料雲の移動状況をそれぞれ 図—5, 図—6, 図—7 に示す。また式より求めた拡散係数 K と換算半径 r との関係を図—8 に示す。これより染料雲は完全に潮流に乗って移動すること



図—8 拡散係数と換算半径の関係

とがわかる (図—5, 図—6)。このことは水理模型実験において潮流の再現性が汚染の予測に対して重要であることを示している。また染料雲の形は、鉛直濃度分布は別として、海面の表層部においては風の影響を強く受けることがわかる (図—6)。図—8 の中の直線の勾配は 4/3 であり、第2回目の K の値はこの直線によく乗っている。第1回目の K の値の勾配が小さい理由は、投入方法が悪く染料が下方に沈んでしまい可視範囲が急速に狭くなったためと思われる。また第3回目の K の値が小さい理由は、流速が小さいためと思われる。以上の理由ならびに 図—8 の K の値の分布が樋口・杉本³⁾ の値ともよく一致する事を考え合わせれば、拡散係数 K に対して r の 4/3 乗則が成り立つものと考えられる。これより大村湾における例えば 50 m 規模の拡散係数の値は $3 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度であると思われる。

7. あとがき

本論文は大村湾内の汚染物質の混合拡散現象を潮流による水平乱流拡散現象として取扱ひ、水質汚濁予測を行うことを目的とした実験的研究の第1報である。現在までに得られた結果をまとめると、

(1) 総じて潮汐現象の模型における再現性はほぼ確認されたが、潮流、特に大村湾の中央部にできる環流になお検討すべき余地が残されている。

(2) 潮位測定のために高精度の測定器具を開発した。

(3) 拡散係数の現地観測の結果、染料雲は完全に潮流に乗って移動し、したがって水理模型実験では潮汐現象の再現性が汚染予測に対して極めて重要なことを確認した。また、拡散係数に対して r の 4/3 乗則が成り立つことが確認され、大村湾における例えば 50 m 規模の拡散係数は $3 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度であることがわかった。

謝辞: 本研究を行うに当たり、実験を長崎大学に委託した長崎県環境部の部長以下公害規制課の諸氏、実験の推進に尽力された長崎大学工学部の栗須正登教授並びに実験を精力的に遂行した元長崎大学工学部土木工学科学生

の東 忠・山口弘太, 同じく機械工学科学生 of 能丸憲樹・林田俊幸の諸君に対して, ここに記して深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 辻田時美: Plankton の異常繁殖とその随伴現象の研究, 西海区水産研究所研究報告, 10, pp. 1~62, 1956.
 - 2) 長崎大学水産学部: 大村湾水質汚濁対策総合調査報告書, pp. 49~83, 1976.
 - 3) 樋口明生: 潮流水理模型実験, 第10回水工学に関する夏期研修会講義集B, 土木学会水理委員会, pp. 8-3~8-25, 1974.
 - 4) 平野敏行・杉浦健三: 河川流入のある小内湾の塩分分布について, 東海区水産研究所報告, 第22号, pp. 1~15, 1958.
 - 5) 樋口明生・杉本隆成: 潮流による拡散の水理模型実験について (IV), 京都大学防災研究所年報, 第13号B, pp. 457~470, 1970.
-