

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3報)

中 村 武 弘*・ 富 樫 宏 由**

1. ま え が き

大村湾水理模型の潮汐および拡散現象の再現性について前報¹⁾、²⁾で報告したが、潮流の測定はフロートを浮かべて、拡散係数の測定は染料を浮かべてというように水表面の測定に限られていた。またフロートによる流速測定では変動流速は測定できず、拡散係数の値も原型に比して1ケタ小さい値となっていた。

そこで本報告ではまず水面下の流速変動を熱線流速計を用いて測定し、得られた記録を統計的に解析し、エネルギースペクトル関数を求めて乱れの再現性の検討を行い、さらに自己相関関数より和田³⁾らの方法にならって拡散係数を求め、再度拡散現象の再現性を検討する。

続いて本報では少し視点をかえて、長期的で大局的な水質汚濁予測の目安となる置換時間を海水交換率を用いて求めてみることにした。その背景としては、従来の種々の海水交換率の定義を整理し直し拡散現象との関連の中で著者なりの海水交換現象の概念を得たからである。従ってその過程の中で、Parker 他⁴⁾および柏井⁵⁾の定義する海水交換率を用いて海水交流現象がどのように行われているかを考察する。

2. 乱れおよび拡散現象の再現

第2報においては染料の点源拡散実験により拡散係数の再現性を検討した結果を報告した。そこでは模型における拡散係数の値は原型と同様にリチャードソンの $4/3$ 乗則に従ってはいるが、原型に比して1ケタ程度小さい値となっていた。これは模型内の乱れが原型に比して小さいためと考えられる。これを確かめるために熱線流速計を用いて流速変動を測定し、エネルギーレベルを原型と比較した。

(1) 原型のエネルギースペクトルおよび拡散係数

大村湾における原型のエネルギースペクトルおよび拡散係数の値は、日本下水道事業団⁶⁾により図-1中の点AおよびBで求められている。図-2にA点でのエネルギースペクトルを報告書に記載されている通りに示す。

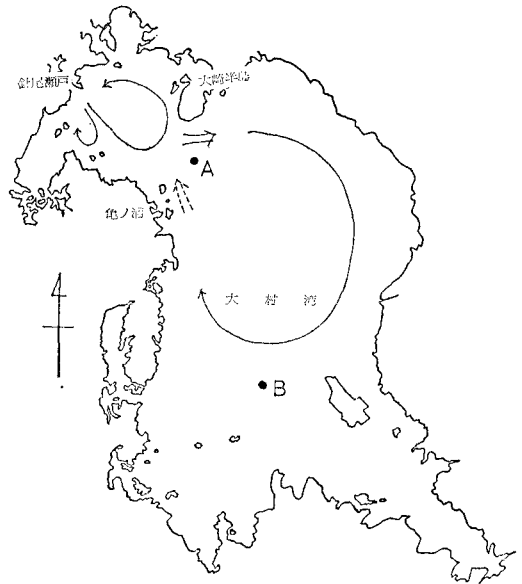


図-1 大村湾

このグラフの縦軸にはエネルギー (単位: cm^2/s^2) が取られており一般のパワースペクトル (単位: cm^2/s 又は m^2/s) の表示とは異っている。しかしこのグラフから約3時間より高周波数の領域で乱流相似理論による $-5/3$ 乗則が成立すると述べていることから推察すると、このグラフは縦軸の目盛りを読み変えることによって一般のパワースペクトルのグラフを表わすことができる。A点での M_2 潮の流速の振幅は東方成分が 13.1 cm/s 、北方成分が 7.1 cm/s であることから逆算すると、このグラフは縦軸の単位を m^2/s にとり、目盛りを約10倍程度にするとパワースペクトル関数を表わすと考えられる。そのように見なされたパワースペクトル関数は和田³⁾が瀬戸内海で得ている多数のスペクトル関数の内で最低のレベルのものと同程度となり、大村湾が袋状の内湾であることを考え合わせるとほぼ妥当であると考えられる。しかし客観的厳正な立場からするとこの様な解釈には少なからず疑問が残る。

(2) 模型のエネルギースペクトルおよび拡散係数

A点における模型のエネルギースペクトルを原型換算

* 正会員 長崎大学助手 工学部土木工学科

** 正会員 工博 長崎大学教授 工学部土木工学科

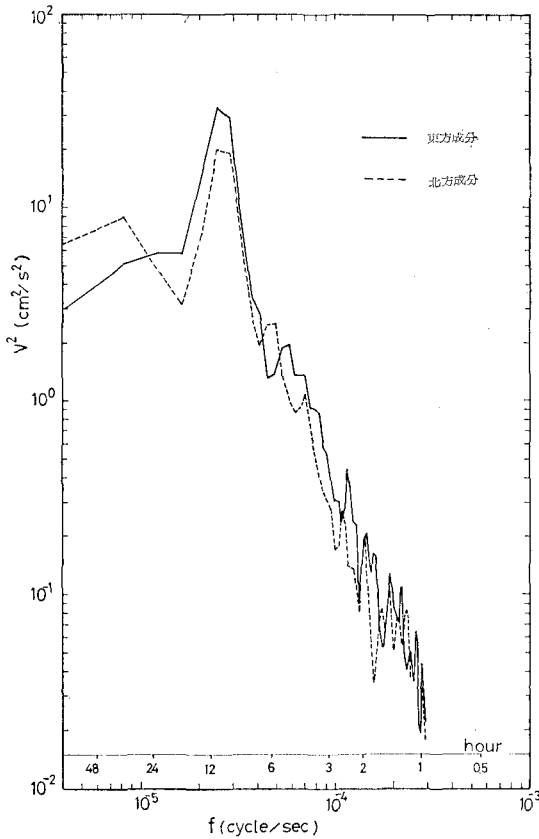
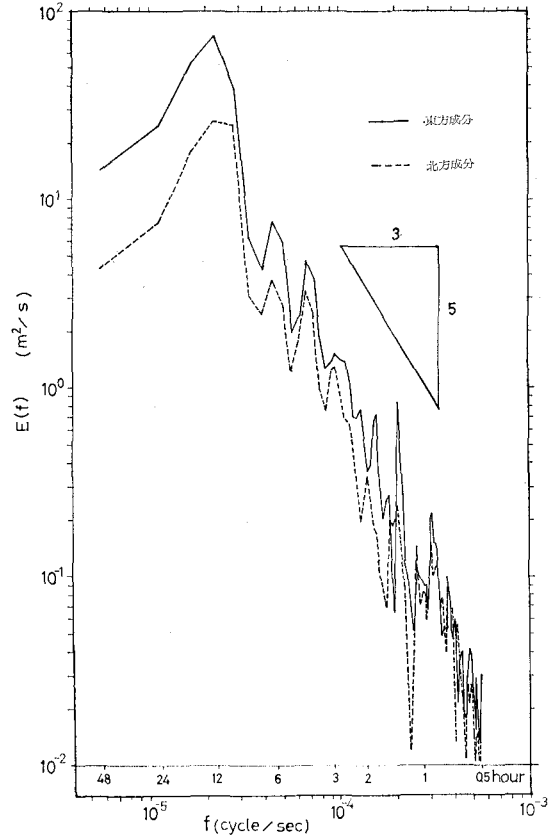
図-2 原型のエネルギースペクトル⁽⁶⁾

図-3 模型のエネルギースペクトル

値で図-3に示す。これよりエネルギースペクトル関数は約3時間より高周波数の領域で $-5/3$ 乗則をほぼ満足しており、東方成分の方が北方成分よりエネルギーのレベルが少し大きく非等方的であることがわかる。これらの傾向は原型のスペクトルと全く同様である。しかし、エネルギーのレベルは原型に比して1ケタ程度小さい値となっている。

表-1 拡散係数

	東方成分	北方成分
原型	9.0×10^4	4.5×10^4
模型	9.8×10^3	6.5×10^3

(単位 cm^2/s)

潮汐成分を除いた変動流速による拡散係数の値を原型の値と共に表-1に示す。拡散係数の値は原型、模型共に非等方で東方成分の方が北方成分より大きい。しかしそのオーダーは模型の方が1ケタ程度小さくなっている。これは染料の点源拡散の結果と同様であり、やはり模型内の乱れが原型に比して小さいことを示している。

3. 海水交流現象

海水交換率の定義はいろいろの研究者によりなされているが、ここではモデル化が簡単なParker他⁽⁴⁾の定義およびその定義を拡張した柏井⁽⁵⁾の定義を用いて交流現象を考える。柏井の定義は

r_E : 上げ潮による流入量(Q_F)のうち、初めて湾内に流入する外海水量(Q_0)のしめる割合。

$$r_E = Q_0 / Q_F \quad \dots\dots\dots (1)$$

r_F : 下げ潮による流出量(Q_E)のうち、初めて湾外に流出する内湾水量(Q_B)のしめる割合。

$$r_F = Q_B / Q_E \quad \dots\dots\dots (2)$$

である。そしてそれらは湾内から下げ潮時に流出する水塊の平均濃度を C_E 、上げ潮時に流入する水塊の平均濃度を C_F 、湾内水の平均濃度を C_B 、外海水の平均濃度を C_0 とし、交換現象に対して「上げ潮時に流入する水塊はその前の下げ潮時に流出した水塊と新しい外海水とで形成され、下げ潮時に流出する水塊はその前の上げ潮時に流入した水塊と新しい湾内水とで形成される。」とモデル化すると

$$r_E = \frac{C_F - C_E}{C_0 - C_E}, \quad r_F = \frac{C_F - C_E}{C_F - C_B} \quad \dots\dots\dots (3)$$

のように求められる。柏井はさらに考察を進め、連続の式を r_E, r_F を用いて(5)式のように表わすとともに新しい交換率 r_G を定義し、 r_G と拡散係数(広義)との関係についても述べている。

$$r_G = \frac{r_E r_F}{r_E + r_F - r_E r_F} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$V \frac{dC_B}{dT} = C_F Q_F - C_E Q_E = r_E \bar{Q} (C_0 - C_B) - R \left\{ \frac{r_E - r_F}{r_E + r_F - r_E r_F} \cdot \frac{C_0 - C_B}{2} + \frac{C_0 + C_B}{2} \right\} \quad (5)$$

ここに, $R = Q_E + Q_F$: 陸水流入量,

$\bar{Q} = (Q_E + Q_F)/2$: 平均交流量,

V : 湾内水量, T : 時間(周期)

著者らは上記の交換率 r_E, r_F を用いると湾口での交流現象がどのように説明され得るかを考察した。いま湾口での交流現象をみると, 初めて湾内に流入した外海水 Q_0 のうちのある量は引き続く下げ潮で流出している。そこでまず次の2つの量 P_F, P_E を定義し求めた。

P_F : Q_0 のうち(引き続く下げ潮で流出せずに)湾内に残留する外海水量 (Q_{EX}) の割合。

$$P_F = Q_{EX}/Q_0 \quad (6)$$

P_E : Q_B のうち(引き続く上げ潮で流入せずに)湾外に残留する湾内水量 (Q_{IN}) の割合。

$$P_E = Q_{IN}/Q_B \quad (7)$$

ここで Parker らの交流現象に対するモデル化は, 外海水 Q_0 が上げ潮時の流入量 Q_F に様に混り合っていることを仮定している。この P_F は「上げ潮時の流入量 Q_F のうち(引き続く下げ潮で流出せずに)湾内に残留する量の割合」と同一である。したがって Q_F のうち湾内に残留する量は

$$Q_F - (Q_E - Q_B) = Q_F - Q_E + Q_B$$

であるから

$$P_F = \frac{Q_F - Q_E + Q_B}{Q_F} = 1 - \frac{Q_E}{Q_F} (1 - r_F) = 1 - \frac{1}{\alpha} (1 - r_F), \quad \alpha = \frac{Q_F}{Q_E} \quad (8)$$

となる。同様に P_E は「下げ潮時の流出量 Q_E のうち(引き続く上げ潮で流入せずに)湾外に残留する量の割合」と同一であり, Q_E のうち湾外に残留する量は

$$Q_E - (Q_F - Q_0) = Q_E - Q_F + Q_0$$

であるから

$$P_E = \frac{Q_E - Q_F + Q_0}{Q_E} = 1 - \frac{Q_F}{Q_E} (1 - r_E) = 1 - \alpha (1 - r_E) \quad (9)$$

となる。

いま特別の場合として, 陸水流入量 R がない $Q_E = Q_F$ の場合つまり $\alpha = 1$ の場合を考えると, $P_F = r_F, P_E = r_E$ であるから,

$$Q_{EX} = Q_{IN}$$

を得る。これは交換量が等しいことを示している。

次に交換が起こるためには

$$P_F > 0, \quad P_E > 0$$

でなければならない。したがって (8), (9) 式より

$$1 - \alpha < r_F < 1 \quad (10)$$

$$1 - \frac{1}{\alpha} < r_E < 1 \quad (11)$$

でなければならない。すなわち, r_F, r_E の値は流入量と流出量の比によって制約されることがわかる。 r_F, r_E の取り得る範囲を図-4にスクリーンで示した。(11)式は松本ら⁷⁾によってすでに報告されている。

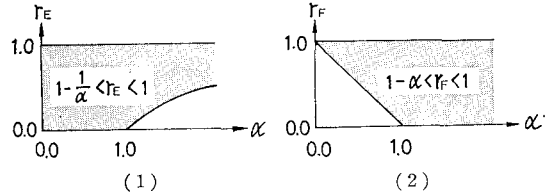


図-4

次に, ある上げ潮時(第1回目の上げ潮)に初めて流入する外海水 Q_0^1 に注目し, この Q_0^1 が下げ潮と上げ潮を繰り返すうちに, どんな割合で湾内に残留して行くかを考察する。まず引き続く下げ潮で流出せずに湾内に残留する量を Q_{EX}^1 とおくと, (6) 式より

$$Q_{EX}^1 = Q_0^1 P_F$$

となる。したがって Q_0^1 のうち

$$Q_0^1 - Q_{EX}^1 = Q_0^1 (1 - P_F)$$

という量が下げ潮で流出する。この量のうち, 引き続く第2回目の上げ潮で再び流入する量を Q_0^2 とおくと,

$$Q_0^2 = Q_0^1 (1 - P_F) (1 - P_E)$$

となる。この Q_0^2 は第1回目の上げ潮で初めて流入した外海水 Q_0^1 のうち, 引き続く第2回目の上げ潮で古い外海水として流入するいわば生き残りの外海水量である。

Q_0^2 のうち湾内に残留する量を Q_{EX}^2 とおくと

$$Q_{EX}^2 = Q_0^2 P_F = Q_{EX}^1 (1 - P_F) (1 - P_E)$$

となる。同様の過程を繰り返し, 第 n 回目の上げ潮で生き残っている外海水量を Q_0^n , また Q_0^n のうち引き続く下げ潮で流出せずに湾内に残留する量を Q_{EX}^n で表わすと

$$Q_0^n = Q_0^1 (1 - P_F)^{n-1} (1 - P_E)^{n-1}$$

$$= Q_0^1 (1 - r_F)^{n-1} (1 - r_E)^{n-1}$$

$$Q_{EX}^n = Q_{EX}^1 (1 - P_F)^{n-1} (1 - P_E)^{n-1}$$

$$= Q_{EX}^1 (1 - r_F)^{n-1} (1 - r_E)^{n-1}$$

となることがわかる。さらに Q_0^n のうち, この n 回の潮汐で湾内に残留した総量の割合を S_0^n で表わすと

$$S_0^n = \frac{1}{Q_0^1} \sum_{i=1}^n Q_{EX}^i = \frac{\{1 - (1 - P_F)^n (1 - P_E)^n\} P_F}{P_F + P_E - P_F P_E} P_F = \frac{\{1 - (1 - r_F)^n (1 - r_E)^n\}}{r_F + r_E - r_F r_E} \left\{ 1 - \frac{1}{\alpha} (1 - r_F) \right\}$$

となる。 $n \rightarrow \infty$ の極限を考えそのときの S_0^n の値を S_0^∞ で表わすと, $0 < r_F, r_E < 1$ であるから

$$S_0^\infty = \lim_{n \rightarrow \infty} S_0^n = \frac{P_F}{P_F + P_E - P_F P_E} = \frac{1 - \frac{1}{\alpha} (1 - r_F)}{r_F + r_E - r_F r_E}$$

となる。

他方、ある下げ潮時(第1回目の下げ潮)に初めて流出した湾内水 Q_B^1 についても同様に考えられる。 Q_B^1 のうち、第 n 回目の下げ潮時まで湾外にも湾内にも残留せずに生き残っている量を Q_B^n 、また Q_B^n のうち引き続き上げ潮で流入せずに湾外に残留する量を Q_{IN}^n で表わすと、それぞれ

$$\begin{aligned} Q_B^n &= Q_B^1 (1 - P_E)^{n-1} (1 - P_F)^{n-1} \\ &= Q_B^1 (1 - r_E)^{n-1} (1 - r_F)^{n-1} \\ Q_{IN}^n &= Q_{IN}^1 (1 - P_E)^{n-1} (1 - P_F)^{n-1} \\ &= Q_{IN}^1 (1 - r_E)^{n-1} (1 - r_F)^{n-1} \end{aligned}$$

となる。また Q_B^1 のうち、この n 回の潮汐の間に湾外に残留した総量の割合を S_B^n とし、 S_B^n の $n \rightarrow \infty$ の極限値を S_B^∞ で表わすと、それぞれ

$$\begin{aligned} S_B^n &= \frac{1}{Q_B^1} \sum_{i=1}^n Q_{IN}^i = \frac{\{1 - (1 - P_E)^n (1 - P_F)^n\} \cdot P_E}{P_E + P_F - P_E P_F} \\ &= \frac{\{1 - (1 - r_E)^n (1 - r_F)^n\}}{r_E + r_F - r_E r_F} \{1 - \alpha(1 - r_E)\} \\ S_B^\infty &= \lim_{n \rightarrow \infty} S_B^n = \frac{P_E}{P_E + P_F - P_E P_F} \\ &= \frac{1 - \alpha(1 - r_E)}{r_E + r_F - r_E r_F} \end{aligned}$$

となる。

4. 海水交換率および置換時間

実験により針尾瀬戸を通しての海水交換率を求め、さらにその値を用いて置換時間を算出する。

(1) 実験概要および実験方法

静水状態で針尾瀬戸の西海橋付近に仕切りを入れ、湾内もしくは湾外のどちらかが一方に染料(ウラン)を投入して一定濃度にし、起潮機を動かすと同時に仕切りを取り除いて実験を行った。実験は4回行った。それぞれの実験開始前の初期濃度を表-2に示す。採水地点は西海橋付近で、採水点の深さは静水面下2~3cmである。模型の採水点付近の横断面は静水面の幅約4cm、深さ約10cmの四辺形である。採水時間間隔は15秒で真空ポンプを用いて行い、濃度は分光光度計で計測し、1周期当り10個のデータを得た。大村湾内への陸水の流入量は非常に少ないので無視した。

(2) 実験結果および考察

濃度の経時変化の例として実験No.4の測定値を図-5に示す。実験No.4では1, 6, 11, 21周期

表-2 初期濃度

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
C_B	8.5	0.0	0.0	0.0
C_0	0.0	—	12.5	15.5

(単位 ppm)

目から各々2.5周期間の4回の測定を行った。このグラフではそれぞれの周期の上げ潮開始時刻を原点としている。(3)式を用いて計算した交換率 r_E, r_F の値を図-6に示す。平均濃度を求めるときに必要な流量分布関数は数値計算で求めたものを用いたが、流速計による実測値を用いたものとほとんど差はなかった。

図-6を見ると4回の実験とも r_E, r_F の値が起潮開始から10周期目くらいまでに急速に低下し、それ以後はほぼ一定の値になっていることがわかる。このことは模型内の交換状況を観察することにより次のように解釈できる。ここでは r_F について説明する。模型の針尾瀬戸・大崎半島・亀ノ浦に囲まれる水域には図-1に示すような大きな環流が存在している。上げ潮時に流入した外海水のほとんどはこの環流に乗り、いくらかの部分が大崎半島で別れて湾奥へ流入している。この環流が大きいため引き続き下げ潮時に湾口まで戻ってくる外海水の量はほんのわずかであり、下げ潮時に流出する流量の大部分はその外海水が流入する以前に環流を形成していた水塊である。このことは図-5の第1周期目の濃度変化からも裏付けられており、その時の交換率は非常に大きな値を示している。次に第2周期目について考えてみると、その下げ潮時に流出する水塊の濃度はそのほとんどが第1周期で湾内に残留した水塊によって形成されていることとなり、このような測定値を用いて算出した交換率の値は、(1), (2)式で定義された交換率とはなんら関係のない無意味な数値である。しかし大村湾口附近の流

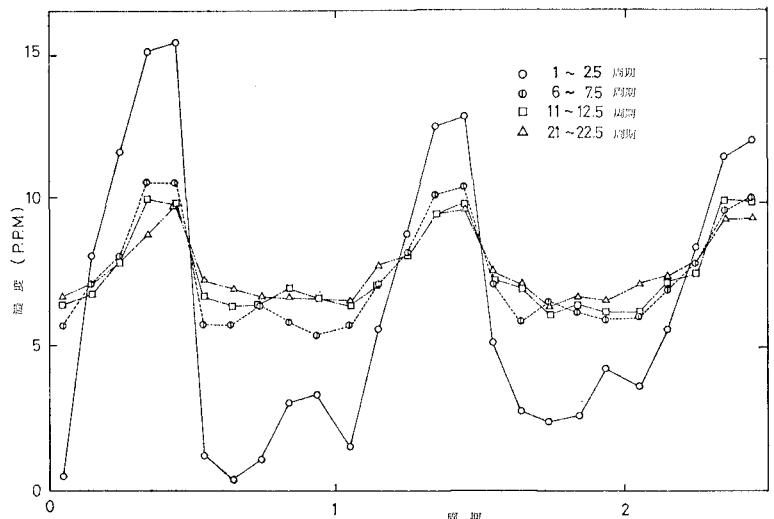
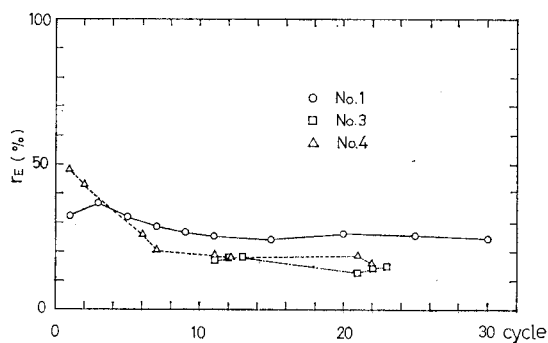
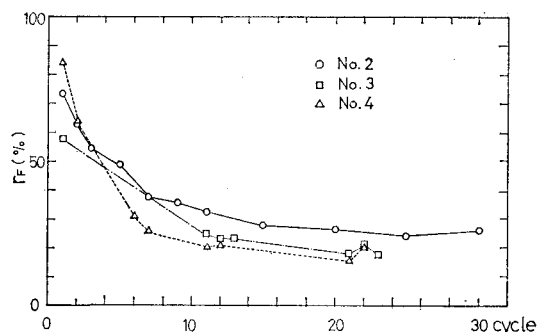


図-5 濃度の経時変化



(1)



(2)

図-6 海水交換率

況はこのように Parker らのモデル化とは異なった様相を示しているが、第 10 周期以降のように濃度の変化が周期的に定常状態となった場合の交換率の値は実質的にそのモデル化に対応していると考えられる。なぜならば、いま下げ潮で流出している水塊は前述した様にそのすぐ前の上げ潮時に流入した水塊では形成されず、それより以前に湾内に残留していた水塊によって形成されているが、濃度変化の周期的定常性によりあたかもすぐ前の上げ潮時に流入した水塊によって形成されているかのように考えられるからである。このときの交流状況は図-1 に示すように、上げ潮時には大崎半島側で環流から外海水が湾奥へ供給され、下げ潮時には亀ノ浦側から湾内水が環流に供給される。いわば環流が交換器の役割を果たしていると考えられ、またこれに対応して模型の湾奥部分には時計廻りの大きい環流が存在している。

20 周期以後の値を平均すると

$$r_E = 19\%, \quad r_F = 21\%$$

となり、この値が大村湾の海水交換率と考えられる。これらの値を用いると (4) 式より柏井の交換率は

$$r_G = 11\%$$

となる。また (5) 式より置換時間 τ (湾内水の濃度が $1/e$ になるまでに要する時間) は、 $V = 4.1 \times 10^9 \text{ m}^3$, $Q_F = 1.6 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{cycle}$ の値を用いると

$$\tau = V/r_G Q_F \approx 233 \text{ cycle}$$

となる。この置換時間が約 4 ヶ月という値は東京湾や伊勢湾で 1~3 ヶ月といわれているうちの最長のものよりもさらに大きく、大村湾がいかに閉塞的内湾であることを示している。

5. あとがき

大村湾水理模型における変動流速を測定して統計的に解析し、乱れおよび拡散現象の再現性を検討した結果、エネルギースペクトル関数は定性的にはよく原型と一致しているが、定量的にはエネルギーレベルが原型に比し 1 ケタ程度小さい値となっており、それに対応して拡散係数の値も原型換算値で $5 \times 10^3 \sim 10^4$ 程度で原型に比して 1 ケタ程度小さく、模型内の乱れがまだ十分でないことがわかった。

次に海水交換率 r_E, r_F を用いて海水交流現象を考察し、またその考察の過程で r_E, r_F は α (流入量と流出量の比) の値によって (10), (11) 式のように制約されることを示した。

次に海水交換率を求める実験を行い、大村湾の海水交換率として $r_E = 19\%$, $r_F = 21\%$, $r_G = 11\%$ を得た。さらにこの値を用いて置換時間を算出し、約 4 ヶ月という値を得た。

謝 辞: 本研究は長崎県環境部の委託を受けて行ったことを付記するとともに、実験に協力を頂いた元長崎大学工学部土木工学科学生江頭徳嘉・早川泰文・福元高治・近松明好並びに図面の作成に協力を頂いた長崎大学工学部土木工学科の平山康志技官に対して、ここに記して深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 富樫宏由・中村武弘・宇都幸一・田中清裕: 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), 第 23 回海講論文集, pp. 512-517, 1976.
- 2) 中村武弘・富樫宏由・田中清裕: 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 2 報), 第 25 回海講論文集, pp. 552-555, 1978.
- 3) 和田 明・角湯正剛: 瀬戸内海における流況と分散特性, 第 21 回海講論文集, pp. 297-302, 1974.
- 4) Parker, D. S., D. P. Norris and A. W. Nelson: Tidal exchange at Golden Gate, Proc. of ASCE, Vol. 98, SA2, pp. 305-323, 1972.
- 5) 柏井 誠: 潮汐による海水交換率について—その 1—, 海水交換の概念と海水交換率, 1977 年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, pp. 96-97, 1977.
- 6) 日本下水道事業団: 長崎県大村湾水質汚濁解析調査報告書, 160 p., 1976.
- 7) 松本輝寿・金子安雄・寺尾 健・川島 毅: 海水交流に関する現地観測, 第 21 回海講論文集, pp. 291-296, 1974.