

大阪湾の潮流と汚染拡散

— 模型実験と数値計算とによる検討 —

金子 安雄*・堀 江 毅**・村 上 和 男***

1. はじめに

湾内沿岸部や海上に建設される大規模な埋立や海洋構造物等による湾内の潮流、汚染物質拡散の影響を予測することは、港湾整備計画上、また水質および環境保全の観点などから、きわめて重要である。このためにはまず、現況地形における水理特性を前もって十分把握しておく必要がある。本論文は、このような観点から、大阪湾の潮流と汚染現象について、水理模型実験¹⁾および数値模型²⁾の2つの異なった手法により検討した結果をまとめたものである。

2. 水理模型と数値モデル

大阪湾と、播磨灘および紀伊水道の一部とを含んだ領

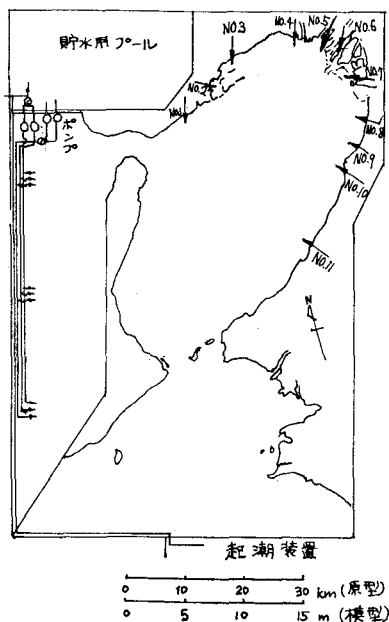
域における潮汐ならびに潮流の現地観測はすでに関係諸機関によって実施され³⁾⁴⁾、いくつかの特性が明らかにされている。これに対し、同海域における水質調査(COD, BOD, その他等)については、最近になってようやく本格的な調査が行われるようになったが⁵⁾⁶⁾、調査法、調査時期の問題および、水質汚濁機構を構成する物理的、生物化学的作用の複雑さ等から、その実態を把握することはきわめて困難である。このため、まず第一段階として、潮流および汚染物質の拡散を規定する要因のなかから主なものをとりあげて、単純化されたモデル内でおのの現象を分析せざるを得ない。また分析手法にもおののの違いがあり、結果の判断にはそれらの特徴を認識しておく必要がある。表-1は両モデルの特徴と実際適用した主な諸元を列挙したものである。両モデル間の根

表-1 水理模型と数値モデルの特徴とその取扱い

	水 理 模 型		数 値 モ デ ル	
	特 性	取 扱 い	特 性	取 扱 い
規 模	縮尺、ひずみ	水平1/2000,鉛直1/200,ひずみ10	原型、ひずみなし	
モ デ ル		3次元		2次元単層
地 形 表 現	比較的忠実にできる	(図-1)	細部の表現は無理	2×2 km メッシュ
潮 汐	複雑な潮汐を与えることは困難	和歌山沖にて空気圧式起潮機で平均大潮の振幅 (M ₂ +S ₂ =66.8 cm) を、二見一江井ではポンプにより与える。周期は 12 h 25 m.	比較的容易に与えられる	振幅 (M ₂ +S ₂) 遅角 海南 66.08 cm 188.19° 沼島 62.86 179.80 二見 28.46 294.64 江井 33.39 327.06
河 川 流		主要 11 河川より年平均流量を与える		省略
底 面 摩 擦	調整に時間と労力を要す	銅板およびブロックにて調整	数値的に変更することは容易であるが実測値が不明確	$C=\frac{1}{n}h^{1/6}$ (n: Manning, h: 水深)
コ リ オ リ 力	再現は容易でない	無 視	再現容易	$f=2\omega \sin \varphi$
開 境 界 での水および物質の交換	有限領域のため特殊な装置、工夫を要する	境界での流出入なし	任意に操作できる	流出入は Free とする
タ イ ム ス テ ッ プ				dt/2=90秒(潮流),180秒(拡散)
ト レ ー サ ー	非保存系物質の取扱い困難	保存系物質としてフルオレッセインナトリウムを使用,投入点は図-1	非保存系についても取扱い可能であるが諸係数が不明確	保存系物質
拡 散 係 数	粗度その他で調整の要あり		実測値が不明確	$K_x=K_y=10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$
測 定 お よ び 再 現 性	計測器の性能,計測技術,風,温度等の影響を受けやすい	流速—フロート,プロベラ流速計 水位—尖針式波高計 濃度—蛍光光度計	ラインプリンター,図化機の活用によりデーターの整理が容易になる 同一入力では同一結果が出る	ラインプリンターとドラフターを使用

* 正会員 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部海水汚染水理研究室室長
** 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部模型試験課課長
*** 正会員 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部海水汚染水理研究室研究員

本的な相違は、水理模型はひずみをもっていることであり、数値モデルは2次元の単層である点である。それぞれのモデルの取扱いの基礎となった基本式は、流体の運動式、連続式、および物質保存式を全水深にわたって積分し、海底および海面での境界条件を適用して得られる次の関係式である。



図—1 模型全図 (図中の番号は染料投入位置)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{g u \sqrt{u^2 + v^2}}{(h + \zeta) C^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{g v \sqrt{u^2 + v^2}}{(h + \zeta) C^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [(h + \zeta) u]}{\partial x} + \frac{\partial [(h + \zeta) v]}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial [(h + \zeta) p]}{\partial t} + \frac{\partial [(h + \zeta) u p]}{\partial x} + \frac{\partial [(h + \zeta) v p]}{\partial y} \\ &= \frac{\partial \left[(h + \zeta) K_x \frac{\partial p}{\partial x} \right]}{\partial x} + \frac{\partial \left[(h + \zeta) K_y \frac{\partial p}{\partial y} \right]}{\partial y} \quad (4) \end{aligned}$$

ここに、座標系は平均海面を原点に水平直角方向に x 、 y 軸を、鉛直上方に z 軸をとったものであり、 u 、 v はそれぞれ x 、 y 軸方向の断面平均流速、 t は時間、 f はコリオリ力、 C は Chezy 係数、 $z = -h$ 、 $z = \zeta$ は海底と海面の z 座標、 g は重力加速度、 p は物質濃度、 K_x 、 K_y は x 、 y 軸方向の渦動拡散係数をそれぞれ表わす。

水理模型実験は原型と模型との間に力学的相似が成立することを条件として、式 (1) にフルードの相似則を適用すれば、時間、流速、および流量の縮尺、 T_r 、 u_r 、 Q_r

はそれぞれ

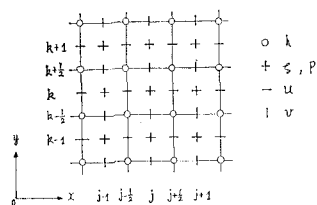
$$T_r = l_r \cdot d_r^{-1/2}, \quad u_r = d_r^{1/2}, \quad Q_r = l_r \cdot d_r^{3/2} \quad \dots (5)$$

と表わせる。また式 (4) より、拡散係数の縮尺 K_r は

$$K_r = l_r d_r^{1/2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 l_r 、 d_r ：水平および鉛直縮尺。

次に数値モデルでは、図—7 (後述) に示す領域を 2×2 km の格子に分割し、式 (1)～(4) を差分化して得られる循環式を利用して、図—2 のスキーム上で、流速 u 、 v 、水位 ζ および濃度 p を $1/2$ タイムステップごとに交互方向 (x 、 y 軸) に計算する。計算手法は Leenderste, J. J.⁷⁾ によって紹介された A. D. I. 法 (Alternating Direction Implicit Method) による解法を一部改変したものであるが、その詳細についてはここでは省略する²⁾。



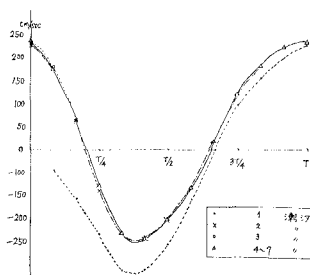
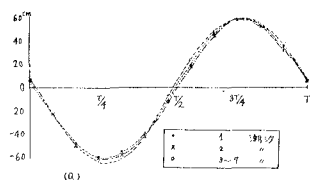
図—2 数値モデルのスキーム

3. 予備実験と予備計算

境界条件の主な項目については前節の表—1 に示したが、これらの決定に際しては予備実験および予備計算を行った内から最も適当と思われるものを採用した。

まず境界で潮汐を与えてから模型内の潮流パターンが定常状態になるのに模型実験では約 20～25 潮波、数値モデルでは 3～4 潮波を要した (図—3)。

また、模型の粗度は 50 cm 間隔に銅板を立てたが、淡



(b)

図—3 (a) 友が島の潮位変化 (計算)

(b) 明石の流速 (計算)

路島寄りの大水深域で不足傾向にあったので新たに5cm角のブロックを付設した。計算粗度は式(1),(2)中に現われる Chezy の係数を表-1に示す値の外、1/2 倍値, 2 倍値, 全域一定値($C=61$)等を試みた。これらの値に対して水位は数パーセントの変化であったが海峡部付近の流れの速い領域では流速, 流向ともかなりの影響が認められた。採用した C 値は湾奥部で 30~60, 湾中部で 60~70, 海峡部近傍で 80 前後(いずれも M.S.K. 単位)であった。

次にコリオリ力については模型実験では無視した。計算では, 考慮した場合としない場合について検討したところ, 水位, 流速とも変化はせいぜい数パーセントであり, 湾内数個所に見られる右回りの環流に対する影響等は特に認められなかった。

拡散係数については実測資料がないため, 原型との対比はできなかったが, 代表点における染料の瞬間的放出による拡散雲の面積から求めた拡散係数は図-4のとおりであり, 原型値に換算して $(5\sim14)\times10^4\text{ cm}^2/\text{sec}$ となり, オーダー的にはほぼ妥当と考えた。計算では全域一律に $10^5\text{ cm}^2/\text{sec}$ を与えた。

拡散実験のトレーサーには低濃度の測定が可能な螢光染料を用い, 比較的他の物質と反応しにくく, 吸着性が

小さく, 安定で, また入手しやすいフルオレンセンナトリウム(ウラニン)を採用した。

数値計算で問題となるメッシュ間隔(ΔS), タイムステップ($\Delta t/2$)については計算対象となる領域, 要求される精度, 計算機の容量, 性能, および解の安定性などから決定される。

本計算では, $\Delta S=2000\text{ m}$, $\Delta t/2=90\text{ 秒}$ (潮流), 180 秒(拡散)とした。なおタイムステップについてはこのほか, $\Delta t/2=60, 180, 300, 600\text{ 秒}$ について試算した。いずれも収束解は得られたが $\Delta t/2$ が大きくなるに従って定点での最大流速は減少し, 主として水位強制点付近(開境界)に流れの集中する傾向がみられた。

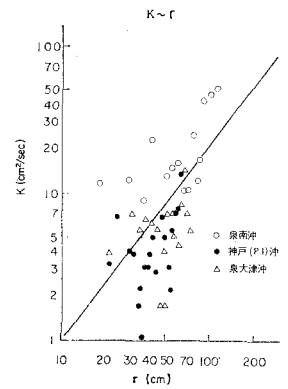


図-4 拡散係数(実験)

4. 結果

潮汐

表-2 は代表地点における実測値から求めた潮汐調和

表-2 潮汐の振幅と遅角(実測と計算)

	友ヶ島 (22,5)	淡輪 (15,11)	大阪 (6,29)	尼崎 (6,31)	神戸 (14,30)	明石 (22,25)	洲本 (26,10)
M_2+S_2 (cm) 実測	58.6	51.3	48.5	48.2	48.8	25.2	47.4
振幅 計算	60	51	49	49	35.5	35.5	49
振幅/ (M_2+S_2)	1.02	0.99	1.01	1.02	0.73	1.41	1.03
K (度) (実測)	192.5	205.0	213.3	215.7	215.9	240.3	193.5
K (度) (計算)	192.5	201.0	198.5	195.5	222.5	222.5	192.5
K (計算) (度) - K (実測)	0.0	-4.0	-14.8	-20.2	6.6	-17.8	-1.0

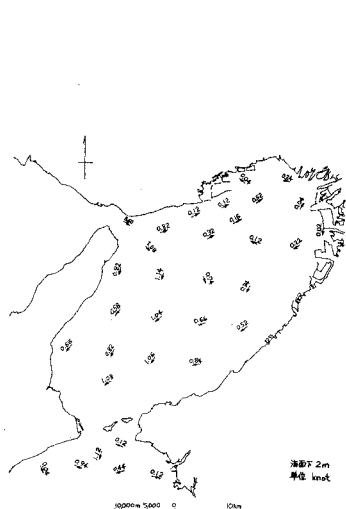


図-5 潮流図, 平均大潮, 明石東流最強時(実測)

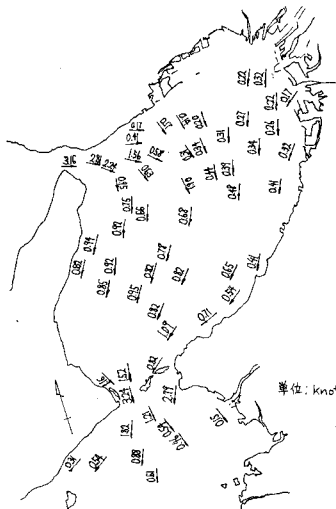


図-6 潮流図, 平均大潮, 友ヶ島南流最強時(実験)

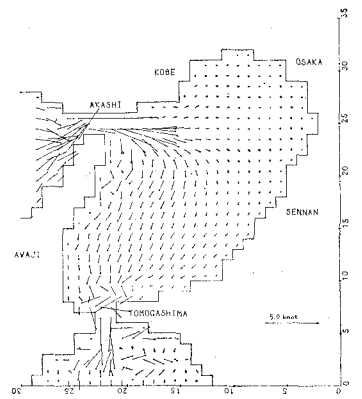
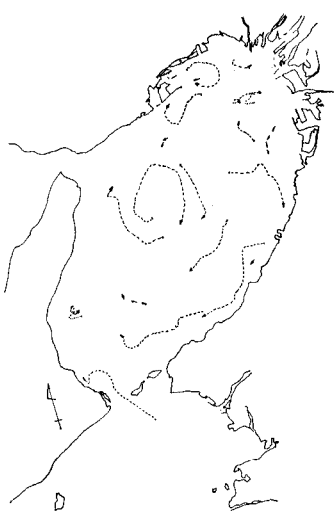


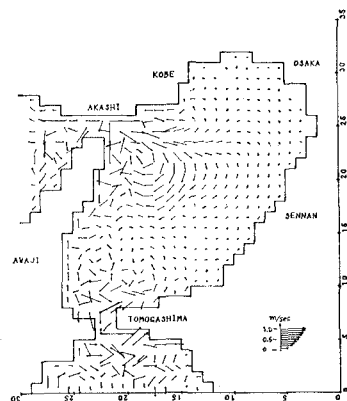
図-7 潮流図, 平均大潮, 明石東流最強時(計算)



図—8 流程図 (実測値より)



図—9 流跡図 (実験)



図—10 恒流図 (計算)

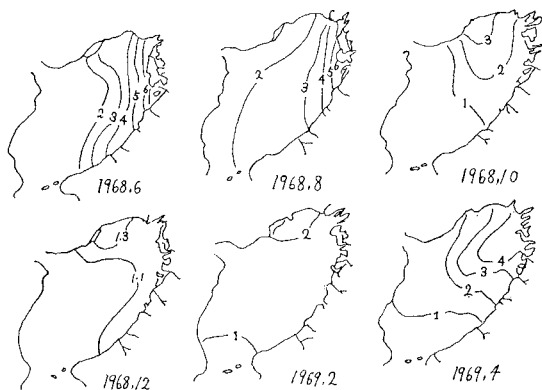
定数値 M_2 , S_2 , M_2 潮の遅角, および, それに対応する計算結果を示したものである。神戸と明石における水位は実測値と 3~4 割の誤差がある。明石については, 播磨灘側の両方にかけての振幅の場所的減衰が大きく, 代表点の取り方で説明できるが, 神戸については不明である。その他については潮位, 遅角とも満足できる結果といえよう。

潮 流

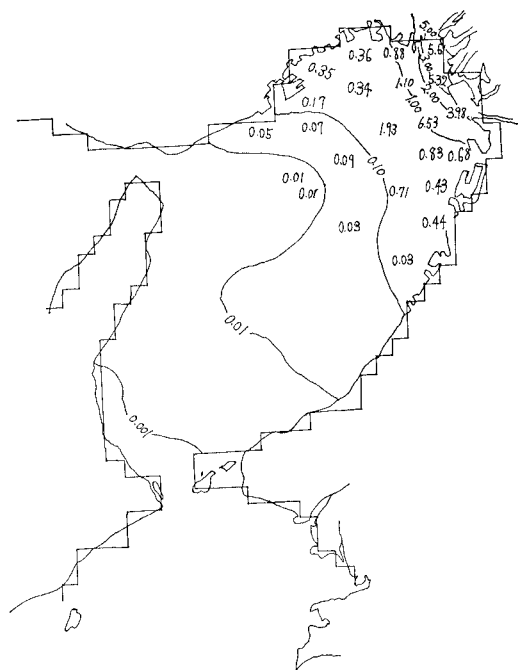
図—5, 6, 7 は, それぞれ, 明石海峡東流最強時(ただし, 図—6 は友が島南流最強時)の潮流の実測値, 実験値および計算値を示したものである。友が島と明石では, 表—2 から明らかなように, 潮汐に 2~3 時間の時間遅れがあるため, 実験値は直接実測値, 計算値と対応しないが, 明石海峡では 4~6 kt, 友が島では 3 kt 前後(それぞれ最強時)であり, また両海峡を結ぶ淡路島寄りの深部では 1 kt 前後, 大阪港, 西宮付近の湾奥部では 0.1~0.2 kt 前後, その中間の湾央領域では 0.5 kt 前後の流速となっている。次に物質拡散の移流項として直接影響を与えと考えられる恒流成分を調べたものが 図—8, 9 および 図—10 である。ここに 図—8 は山田⁹⁾が実測値をもとにして求めた恒流の流向線図, 図—9 は最干潮時のフロートの位置を 10 潮汐間追跡したもの, および, 図—10 は第 4 潮汐の 1 潮汐間の平均流速をそれぞれ示している。これら三者のもつ性質は互いに少しずつ異なるが, 共通して現われている特徴は, 沖ノ瀬(明石海峡の東)を中心とする大きな時計回りの環流, 湾奥西宮前面水域の小規模の環流, さらに湾東部の陸地に沿って南下する流れ等が明確に現われていることであり, また, 沖ノ瀬付近の恒流流速は約 0.5 kt と比較的速度いが, 湾奥部では小さく潮流速とほぼ同値となっていることである。

汚染拡散

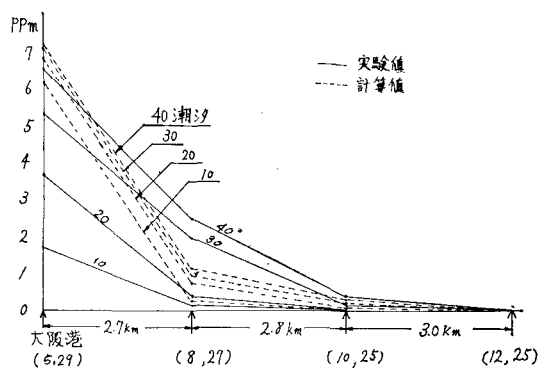
はじめに述べたように, 現地の水質汚染の実態を把握することはきわめて困難である。図—11 は昭和 43~44 年に大阪府が行った水質調査⁹⁾から COD 分布についてその一部を抜粋したものである。春から夏にかけては湾奥部から西に濃度勾配を成す。湾奥の大阪港, 西宮付近では 6 ppm 以上の高濃度を示し, 明石, 友が島付近では 1 ppm 前後である, 秋から冬にかけてはこの様相は変じ, 濃度は湾全体で一様化する傾向が認められる。図—11 で表わされる COD 分布は生物化学的作用を含めた非保存系物質の濃度分布であるのに対し, 図—12 は模型実験(図中の数字)および計算(図中の濃度コンター)によって得られた保存系物質の染料投入開始後 30 潮汐最干潮時の濃度分布を示すものである。実験値と計算値とは 0.01 ppm 以上では二, 三の例外を除いてほぼ一致しているが, 0.01 ppm 以下では, 実験ではほとんど検出されないのに対し, 計算では境界まで 0.001 ppm 以下の濃度が算出される。図—12 の濃度分布のパターンは, 実測値



図—11 水質汚濁状況 (図中の数字は ppm, 実測)



図—12 拡散物質濃度分布 (実験と計算)



図—13 濃度変化図 (実験と計算)

(図—11)では春～夏型のそれと近似しているが、濃度の絶対値は湾奥部付近の高濃度領域を除いては一般に、計算値が実測値に比してはるかに小さい。図—13は湾奥大阪港を原点とし、湾の長軸方向に3点代表点をとって10潮汐ごとの濃度の時間変化を実験と計算について表わしたものである。湾奥では実験値、計算値とも7ppm付近で収束し始めているが、湾中部ではなお増加傾向にあり、さらに長時間の濃度追跡を行う必要のあることを示している。

5. まとめ

以上、模型実験、数値計算ならびに現地実測資料から、大阪湾の潮汐、潮流および汚染拡散に関する次の諸点が確認、ないしは明らかにされた。

潮汐について、

(1) 友が島を北上する潮流の半日周潮成分($M_2 + S_2$)は約2時間で明石海峡に達するが、この間に振幅は約1/2~1/3に減ずる。湾奥部では10cm前後の減衰である。

(2) 大阪湾内の潮汐およびその遅角については、数値モデル(二次元単層)によっても十分再現し得る。

潮流について、

(3) 湾内潮流は、漲潮時友が島水道を北上して主流は淡路島寄りの大水深の濡筋を通過し、この海域では1kt以上で明石海峡に抜ける。湾奥の大阪、神戸水域へは主流より派生した流れが回流する形態を示し、湾奥では0.1kt以下となる。明石海峡では4~6ktと速く、友が島水道でも3kt前後となる。落潮時はほぼ漲潮時と逆の傾向を示す。

(4) 湾内の恒流は、沖ノ瀬を中心とした時計回りの大きな環流(流速0.5kt程度)、西宮前面水域の小規模な環流(0.1kt以下)、および湾東部で海岸線に沿って南下する流れが顕著である。

(5) 潮流およびその平均流ともいえる恒流は模型実験、数値計算ともに再現性は良好である。

汚染拡散について、

(6) 湾内の水質汚染の実態は、現象の複雑さ、測定技術、調査時期等の問題のため、把握し難い、数少ない実測例から判定すれば、春季から夏季にかけては湾奥の高度汚染地帯から西方にほぼ南北に近い等濃度線を形成するが、秋季から冬季にかけてはCOD濃度は一様化する傾向を示す。

(7) 模型実験および数値計算ではもっとも単純な保存系物質の拡散を取扱ったため、実測値との対応はつかないが拡散のパターンは夏型のそれに近似した東高西低型を呈した。模型と計算では、湾奥部の高濃度領域(0.01ppm以上)で両者はほぼ一致した。

6. おわりに

以上、水理模型実験、数値計算とともに潮汐、潮流の再現は良好であり、平均的な流況はほぼ一致していると思ふことができる。水質汚染現象については分布のパターンはおおむね同じ様相を示すけれども、濃度の絶対値に関してはまだ問題点が残っている。豊富な信頼すべき実測資料とともに、三者をうまく調和させ、さらに改良開発を加える必要がある。なお、本実験は運輸省航空局、第三港湾建設局の協力のもとに港湾技術研究所大型水工実験場で実施し、計算は当研究所所有のTOSBAC 3400にて行ったものである。最後に本業務を遂行する上において協力を得た関係諸氏に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 金子・堀江・村上他：大阪湾の潮流と物質拡散に関する模型実験，港湾技術報告第12巻3号，1973，9.
 - 2) 金子・堀江・村上：大阪湾の潮流と汚染拡散一数值計算による検討——，同上，第13巻4号，1974，12.
 - 3) たとえば，海上保安庁：大阪湾潮流図，海図第6201号，昭和44年5月.
 - 4) たとえば，運輸省第三港湾建設局：昭和46年度大阪湾潮流観測報告書，昭和46年12月.
 - 5) たとえば，大阪府，兵庫県：大阪湾環境調査結果報告書，昭和44年.
 - 6) たとえば，環境庁水質保全局：瀬戸内海水質汚濁総合調査結果(中間報告)，昭和47年7月，10月.
 - 7) Leenderste, J. J.: A Water-Quality Simulation Model for Well-Mixed Estuaries and Coastal Sea: Vol. II, Rand Corporation, 1971.
 - 8) 山田：大阪湾の潮流と流程図について，水路要報第92号，昭和46年.
 - 9) 大阪府：大阪府水産試験場報告，昭和46年6月.
-