

運輸省港湾技術研究所	正会員	金子安雄
同	正会員	堀江 毅
同	正会員	○ 村上和男

1. まえがき

海洋汚染の問題が叫ばれてから久しい。特に大都市に隣接する内湾とか、大工業地帯の沿岸部の汚染は著しく、大きな社会問題となっている。この問題に対処するために数多くの研究がなされている。汚濁物質の拡散の問題もその一つである。沿岸埋立地の造成や沿岸構造物の建設による潮流の変化、それに伴う水質の変化などの予測、更には、積極的に循環流を発生させて、湾内の拡散を促進させるような浄化工法の検討などを行なう場合には、潮流及び物質拡散の予測手法の確立が必要となる。通常この予測の有力な手段として、水理模型実験と計算機による数値シミュレーションがある。著者らも、東京湾模型¹⁾、大阪湾模型²⁾、による水理模型実験や、ADI法による数値計算³⁾等によって汚染拡散問題を取扱ってきた。

水理模型実験では、拡散の主因は平均流による移送、流れの乱れ成分による乱流拡散、および、流れの水平、鉛直分布に基づく分散が主体であるとし、平均的な流れのパターンや乱れ機構の再現に重点をおく。ところが、潮汐、河川流量、染料負荷などを全く同一の条件で実験を行っても、模型をとりまく条件（気温、水温、風、その他）が微妙に作用し、必ずしも同じ結果が得られるとは限らない。

一方、染料拡散実験による濃度分布の線型重ね合わせが成立すれば、拡散実験により海域の汚染度に対する沿岸汚染源の寄与率を知ることができ、これらを予め調べておくことにより、将来の汚濁負荷量の変化に伴う海域の新たな汚染度を求めることが可能となる。一般に、拡散方程式は濃度に関して線型であると考えられ、この線型性の仮定に基づいて拡散実験を行っている例⁴⁾もある。

本研究は、大阪湾模型を用いて、拡散実験における濃度分布の“繰返し再現性”と“線型重ね合わせ”についての検討を行ったものである。

2. 実験施設及び実験方法

大阪湾模型の概要を図-1に示す。同模型は、紀伊水道から播磨灘にかけての領域を覆い、縮尺は、水平1/2000、鉛直1/200で、表面モルタル仕上げとなっている。模型には、領域内の主要10河川について、背水到達地点としての感潮水域までの河積を再現している。起潮方法としては、紀伊水道側では気圧式の起潮装置に依り、また、播磨灘側では給排水ポンプを設置して、貯水用プールと播磨灘との間の水の出し入れに依った。河川流については、各河川とも年平均流量を連続的に投入した。実験潮汐は大潮を対象とし紀伊水道側では和歌山の潮汐（振幅6.84cm）を起潮装置によって与え、播磨灘側では、模型内の潮流が原型の潮流⁵⁾に合うように、給排水ポンプの流量、位相遅れを調節した。このような方法による潮流の現況再現は、ほぼ満足できる結果を得ている。²⁾

実験方法は、潮流の流速・流向については、湾内にフロートをつかべ、その位置を天井に設置したカメラでもって追跡した。汚染拡散実験については、蛍光染料（ウラニン）をトレーサにし

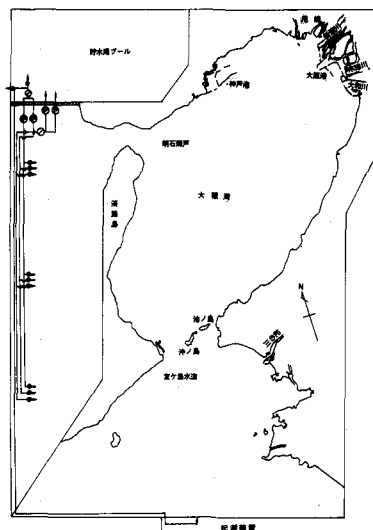


図-1 大阪湾水理模型水槽

て、現地のCOD汚濁負荷相当量を連続的に投入して行った。濃度は湾内約70ヶ所に設置した採水器により、一定時間間隔毎に同時採水を行ない、蛍光分析器(Turner社製110型)によって測定した。図-2は、採水点の位置(・印)、染料投入点位置(矢印)、および、その投入量を示している。

3. 実験の繰返し再現性について

埋立地や防波堤等の建設に伴う潮流の変化、および拡散パターンの変化を調べる場合に、模型の大きさに比して、構造物の変化が小さいと、その沿岸地形付近での、流況の局所的な変化は認められたとしても、それが湾全体に及ぼす影響にまで拡張して考えることは容易でない。染料を用いて拡散実験を行なう際に、地形、潮汐、染料投入量などの条件を同一にした実験を繰返し行っても、必ずしも同じ結果が得られるとは限らず、この同一条件での実験値のバラツキが、小規模な地形変化に伴う拡散パターンの変化よりも大きくなることは稀ではない。この原因としては、拡散現象そのものがランダムな現象であることや、気温、水温の制御が、大きな模型の場合非常に困難となることなどが考えられる。この他、実験担当者のミスとか、実験装置の不備も当然考えられる原因の一つである。そこで、できうる限り上記の実験条件を同一にし、実験を行った場合どの程度の差異まで、実験の繰返し再現性を維持するために許容しうるのかについて、濃度の再現係数を指標にして、検討してみた。

図-3に、Case 1(表-1)の濃度分布の一例を示す。これは、大阪港からの汚染負荷の場合で、投入開始から60潮汐(約30日)後の濃度を、単位ppb(10^{-9})で示したもので、同一条件の3回の実験結果を、各測定点に並記している。測点46、Dを除いて、各測点3つの値は、かなり近い結果が得られており、このケースの実験の繰返し再現性は、ほぼ満足できる結果であった。しかしながら、後で述べるように、同一条件で行った実験でも、各回の濃度はかなり異なった分布を示す場合がある。そこで、このような濃度分布図から、実験の繰返し再現性の良し悪しを示す指標として、(1)式に示すような採水点の濃度の相関を求め、これを再現係数とした。

$$r^{(j)} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^j - \bar{x}^j) (y_i^j - \bar{y}^j)}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^j - \bar{x}^j)^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i^j - \bar{y}^j)^2}} \quad \dots (1)$$

(j=1, 2, 3)

ここで、 x_i, y_i : 測点*i*での1回目の濃度、2回目の濃度、 $\bar{x}, \bar{y}$: それぞれの平均値、*N*: 測点の個数を示す。*j*=1は、そのままの濃度値(単位ppb)、*j*=2は、*j*=1の値の平方根($x_i^{(2)} = \sqrt{x_i^{(1)}}$)、*j*=3は*j*=1

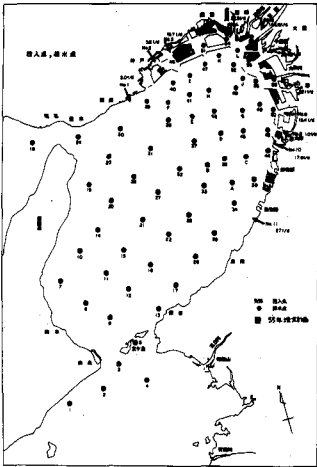


図-2 採水点の位置、染料投入点

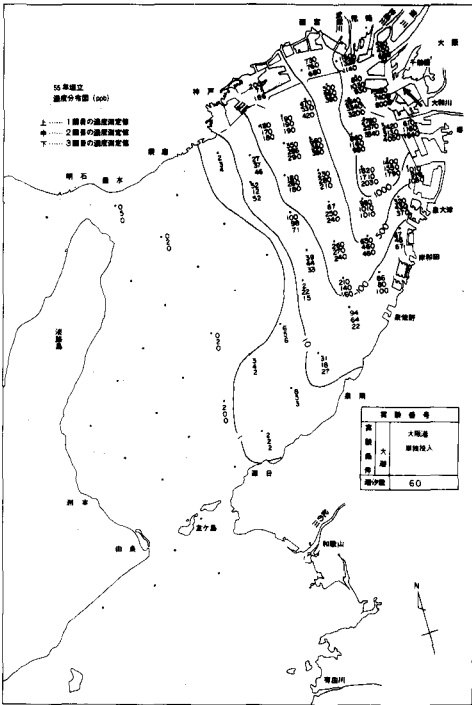


図-3 濃度分布図 単独投入実験 (単位ppb)
投入点一大阪港

の値の対数値($x_i^{(3)} = \log_{10} x_i^{(1)}$)を示す。これらの結果を表-1に示す。表-1の最右欄の○印は、実験時の観察、および濃度分布図から、繰返し再現性が良好と思われるケースを意味している。 $r^{(1)}$ は濃度の高い測点での結果に支配され、また $r^{(3)}$ は濃度の低い測点での結果に左右されるので、繰返し再現性を表わす指標としては、濃度結果(ppb)の平方根の相関 $r^{(2)}$ が、最も適切と思われる。この表から、 $r^{(2)}$ が0.96~0.97以上の値を示せば、実験の繰返し再現性は良好であると、みなしうる。再現係数 r の値は、測点の数とか位置が変れば、それに伴って変るものと考えられるので、定量的には明確なことは出来ない。しかしながら、定性的には、この値が実験の繰返し再現性を表わす指標と考えることは、妥当であらうと思われる。

4. 線型重ね合わせの検討

拡散方程式は、一般に(2)式で表わされる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + Q - R \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 C :濃度、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 K_x, K_y, K_z : x, y, z 方向の拡散係数、 Q :流入負荷量、 R :減衰量($R=0$, 染料での拡散実験の場合、保存系と考える)。
 海洋での拡散を取扱う場合は乱流拡散であるから、 K_x, K_y, K_z は一般に流れの場によって決定されるものであり、濃度には依存しないものと考えられる。故に、(2)式は濃度に関して線型な方程式である。もし、線型重ね合わせが成立すれば、各汚染負荷地点からの実験を個別に行ない、それらの結果を重ね合わせれば、全部の汚染源から投入した場合の湾内の濃度分布が求められる。また、或る海域の汚染は、どの汚染源からの影響が強いかという、汚染源の寄与率を求めることもでき、将来汚染源からの負荷量が変化した場合でも、(3)式を用いて湾内の濃度分布が容易に求められ、将来の排出規制に役立てることができる。

$$C_i = \sum_{n=1}^N M_n S_{ni} = M_1 S_{1i} + M_2 S_{2i} + \dots\dots\dots + M_N S_{Ni} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 C_i : N 汚染源全部から投入した場合の測点 i の濃度、 M_n :汚染源 n での負荷強度、 S_{ni} :単位負荷強度を汚染源 n から投入した場合の測点 i での濃度、 N :染料投入点の数を示す。

実験では、代表汚染源として大阪港、淀川河口、西宮、堺~大和川地区を取り上げ、4点同時に投入した場合の濃度分布と、4点を個別に単独投入した結果を重ね合わせた濃度分布とを比較した。60潮汐目の濃度分布の一例を、単独投入点(淀川河口)については図-4に、4点同時投入の場合を図-5に示す。図-5の測点Gの2回目の濃度10340ppbは、分析ミスと思われ、比較対象から除外した。それぞれ、3回ずつ行った実験結果の平均値を表-2に示す。⑧欄に、⑦欄(単独投入実験の和)に対する⑥欄(4点投入実験)の比を示した。この結果、ほぼ1に近い値が得られており、実験誤差等を考慮すれば、線型重ね合わせは成立すると考えても、差し支えないと思われる。さらに、(1)式を用いて再現係数を求めてみると、 $r^{(2)}=0.99$ の値が得られる。この相関図を、図-6に示す。縦軸に4点同時投入の結果を、横軸に単独投入の重ね合わせた結果を示す。図-6から判断しても、重ね合わせが可能であることがわかる。以上の結果は、

表-1 “繰返し再現性”再現係数

Case	地形	投入点		$r^{(1)}$	$r^{(2)}$	$r^{(3)}$	繰返性
1	55年計画	大阪湾	I-II	0.980	0.978	0.944	○
			I-III	0.983	0.980	0.954	○
			II-III	0.990	0.987	0.969	○
2	"	淀川河口	I-II	0.993	0.990	0.986	○
			I-III	0.978	0.989	0.986	○
			II-III	0.976	0.982	0.983	○
3	"	西宮	I-II	0.953	0.964	0.969	○
			I-III	0.856	0.932	0.945	○
			II-III	0.922	0.960	0.960	○
4	"	堺~大和川	I-II	0.993	0.987	0.961	○
			I-III	0.959	0.948	0.932	
			II-III	0.961	0.942	0.935	
5	"	4点投入 (1+2+3+4)	I-II	0.954	0.974	0.969	○
			I-III	0.928	0.962	0.965	○
			II-III	0.938	0.969	0.969	○
6	現況	大阪湾	I-II	0.927	0.945	0.948	
7	"	淀川河口	I-II	0.968	0.922	0.768	
8	"	神戸東部	I-II	0.990	0.984	0.966	○
9	"	堺~大和川	I-II	0.978	0.983	0.985	○
10	"	4点投入	I-II	0.850	0.897	0.923	

(注) I-II:1回目と2回目の実験の再現係数

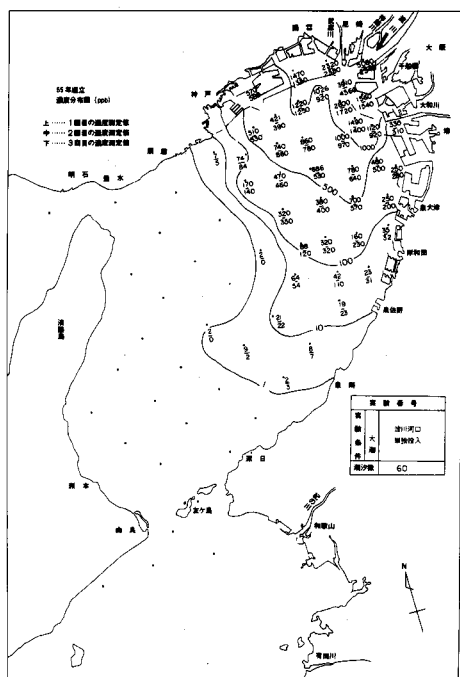


図-4 濃度分布図 単独投入実験 (単位ppb)
投入点-淀川河口

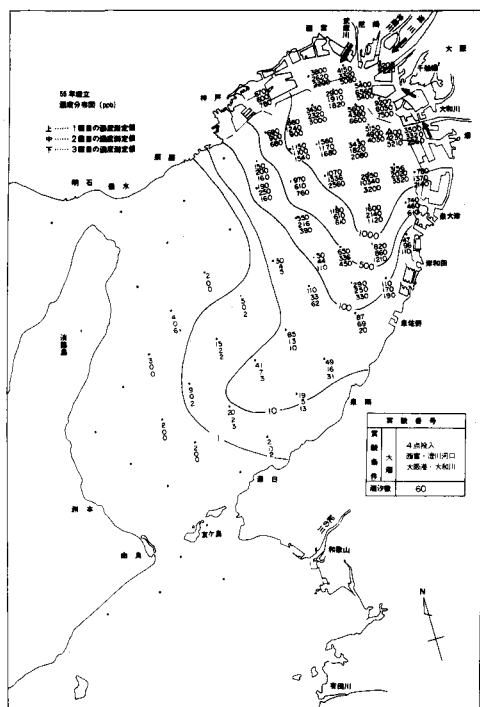


図-5 濃度分布図 4点投入実験 (単位ppb)
投入点-大阪港, 淀川河口, 西宮, 堺

表-2 重ね合わせの濃度と4点投入の濃度の比較

測点	単独投入				4点投入	重ね合わせ	比
①	② Case.1	③ Case.2	④ Case.3	⑤ Case.4	⑥ Case.5	⑦-⑧+⑨ +⑩+⑪	⑫-⑬/⑭
57	550	3810	10	13	6210	4380	0.71
56	1040	320	15	1500	3230	2880	0.89
55	6860	1550	36	120	7600	8570	1.13
L	920	4240	101	19	5790	5280	0.91
54	1210	2350	350	25	4180	3940	0.94
53	3200	1020	40	183	4630	4420	0.96
52	3060	2260	45	73	5530	5440	0.98
K	620	970	210	16	2210	1820	0.82
51	720	1410	300	15	2870	2440	0.85
50	980	265	8	270	1430	1520	1.06
49	1580	490	14	400	2830	2490	0.88
J	2900	1450	62	82	4690	4490	0.96
48	1000	990	117	19	2440	2130	0.87
47	470	1235	230	12	2940	1950	0.66
46	150	580	113	2	680	850	1.24
45	370	225	7	136	600	740	1.23
G	1850	710	42	280	3090	2880	0.93
H	470	820	220	5	1470	1520	1.03
I	183	410	107	3	1000	703	0.70
44	61	34	0	22	84	117	1.39
43	990	640	58	171	1620	1860	1.15
42	240	610	130	3	1650	980	0.60
41	310	800	200	4	1260	1310	1.04
40	177	520	133	3	750	830	1.11
C	530	195	15	137	960	880	0.91
D	186	390	93	8	800	680	0.85
E	210	470	120	2	780	810	1.03
F	37	79	42	0	170	158	0.93
39	89	27	2	28	157	146	0.93
38	260	320	46	36	480	660	1.38
37	90	335	73	1	380	500	1.31
36	39	155	57	0	200	250	1.25
35	3	6	3	0	0	12	-
A	170	91	16	41	290	320	1.10
B	39	104	47	0	68	190	2.79
34	60	21	3	25	58	109	1.88
33	13	59	32	0	68	104	1.53
32	0	1	5	0	13	6	0.46
29	25	8	2	9	32	44	1.38
28	6	22	12	0	36	40	1.11

※ 60 潮汐の採水に失敗したため、2 回の平均値をとっている。
50 潮汐の濃度分布の繰返し再現性がよいため、再実験は行っていない。

Case1~Case5までの、比較的繰返し再現性の良い実験について述べたものである。

一方、Case6~Case10の実験についても、同様の検討を行ったが、重ね合わせの結果は余り好しくはない。これは、つぎのような事実起因するものと、考えられる。表-1から明らかなように、実験回数は各ケース2回のみであり、繰返し再現性の良くないケースがある。実験時に行った染料の拡散範囲のスケッチと比較すると、スケッチから2回の拡散のパターンが、明らかに異っていると判断できるものがあり、また、

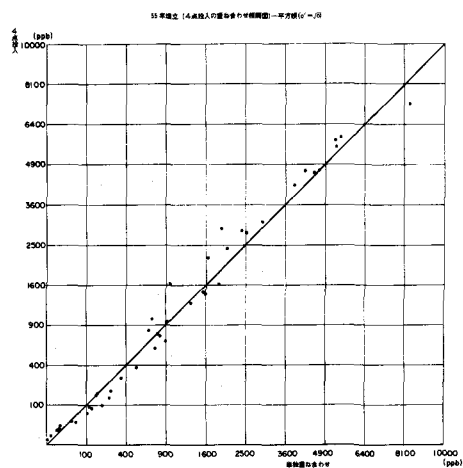


図-6 4点投入と単独投入の重ね合わせの相関図(55年埋立地形)

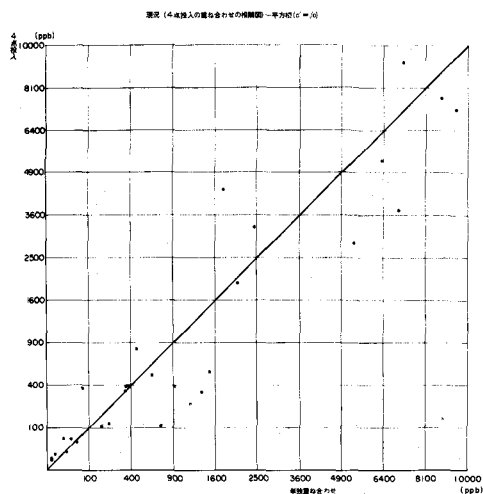


図-7 4点投入と単独投入の重ね合わせの相関図(現況地形)

スケッチではかなり類似したパターンを示すものでも、拡散範囲の境界と採水点の位置の関係から、大きな差異となって現われるものもある。図-7は、図-6と同様にして相関図を作り、(1)式より再現係数を求めたものである。この結果、グラフ上のバラツキが大きく、 $r^{(2)}=0.945$ となって、重ね合わせの結果も良好でない。このように、重ね合わせが良好でないのは、各々の実験の再現係数(表-1)が示しているように、実験の繰返し再現性に問題があるためであり、線型重ね合わせの仮定を否定するものではない。

以上、2つのシリーズの実験を考えあわせると、各々の実験の繰返し再現性が良いということを最低必要条件として、注意深く実験を行えば、線型重ね合わせの仮定に基づいて拡散実験を行なうことは、妥当であると思われる。図-8(a)~図-8(d)は、汚濁負荷量を100 ton/dayに換算した場合の濃度分布を、各投入点別に示したものである。図中に、例として、測点642の濃度(ppb)を示した。

このように、全投入点からの単位強度の汚染負荷による濃度 S_{0i} が、全海域でわかっていれば、(3)式を用いて濃度分布が計算できる。例えば、測点642で、8つ(残りの3点の負荷量は全負荷量の約2%なので、今回の実験ケースから除外した。)の汚染源から投入した場合の濃度は(3)式より、1084 ppbとなり、これは、全投入点(11点)からの拡散実験での濃度1320 ppbと比べると、かなり近い値である。

5. 結論と今後の問題点

模型実験によって、現地の現象を解析、又は予測を行なう場合、模型の原型に対する再現性が極めて重要な問題となる。この拡散現象の相似則の問題とか原型の再現性については、樋口ら⁶⁾、和田ら⁷⁾のすぐれた研究がある。著者らもこれらの問題に取り組んではいるが、今回は、一応この問題から離れて、拡散実験の繰返し再現性と線型重ね合わせについて検討し、以下に述べるような結果を得た。



図-8(a) 淀川河口



図-8(b) 大阪港



図-8(c) 堺~大和川



図-8(d) 神戸東部



図-8(e) 西宮



図-8(f) 大津川



図-8(g) 泉比



図-8(h) 須磨

(1) 繰返し再現性について

拡散実験は、流れ、気温、風などのまわりの条件の変化や、採水法、分析法等の取扱ひ上の誤差のため、同一条件で実験を行ったつもりでも、必ずしも同じ結果が得られるとは限らない。このため、同一条件の実験を少なくとも2~3回行って、繰返し再現性の確認をする必要がある。繰返し再現性を表す指標として、濃度の再現係数を考え、著者らの実験結果にあてはめると、 $r^{(2)}$ が0.96~0.97以上であれば、繰返し再現性は良好となる。ただし、この $r^{(2)}$ の値は、採水点の数とか位置により変化するものであり、絶対的な指標ではない。しかし、こうした検定によって、実験データの選択を行なうことにより、実験の精度があがり、また水理模型による拡散実験の、有意性の限界を知ることができる。

(2) 線型重ね合わせについて

実験の繰返し再現性が良い場合は、汚染物質の拡散現象の線型重ね合わせは成立するものと考えられる。このことより、各汚染源からの湾内の汚染の寄与率を求めることができ、この寄与率より湾内の汚染の分布を重ね合わせによって求めることが可能となる。また、将来の負荷量の変化に伴う湾内の汚染分布の予測が簡単な計算で求めることができる。

以上述べてきたことは、染料による汚染拡散実験についてであり、沈降、吸着等の減衰作用を除けば、保存系物質の拡散であると考えられる。しかし、現実の海水汚染の拡散は、非保存系の物質拡散であり、自浄作用による減衰とか生物生産による増加等の問題があり、かなり複雑である。また、流れに関しても夏季の躍層の現象を模型で再現することは、現段階では不可能であり、まだ不明確な点も多く、今後に残された研究課題である。

最後に、本実験を実施するにあたり、運輸省第三港湾建設局の協力を得た。また、実験およびデータの整理には当研究所、亀山豊、入尾野幸雄両技官の協力を得た。これらの方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 金子, 堀江, 村上, 亀山: 東京湾の潮流による物質拡散の水理模型実験, 港研報告, 13巻, 3号, 1974.9
- 金子, 堀江, 村上, 上野, 久保: 大阪湾の潮流と物質拡散に関する模型実験, 港研報告, 12巻, 3号, 1973.9
- 金子, 堀江, 村上: ADI法による潮流汚染拡散の数値計算, 港研報告, 14巻, 1号, 1975.1
- O'Connell, R.L. and C.M. Walter: Hydraulic model tests of estuarial waste dispersion, Proc. of A.S.C.E., SA-1, Jan. 1963.
- 海上保安庁: 大阪湾潮流図, 海図第6201号, 昭44年3月刊行
- 樋口, 杉本: 潮流による拡散の水理模型実験について(Ⅲ), 京大防災研年報第12号B, 昭44年3月.
- 和田, 加藤, 片野: 潮汐水理模型による沿岸海洋現象の再現性, 第18回水理講演会, 1974.2