

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

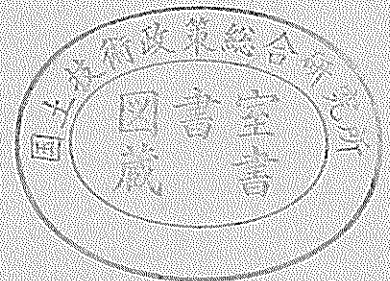
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 13

NO. 3

SEPT. 1974

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告第13巻第3号

正 誤 表

ページ	欄	行	誤	正
74	右	17	((式 (11))) $(p_s - p_a) / L \gamma_i = \bar{f} - 1 - R_{\text{loss}}$	$(p_a - p_s) / L \gamma_i = \bar{f} - 1 - R_{\text{loss}}$
"	"	21	……流速を次第で定義する。	……流速を次式で定義する。
75	左	下から 5	((式 (24))) $R_{\text{loss}} = \frac{\lambda}{2} \frac{u_i^2}{gD} (1 + R)$	$R_{\text{loss}} = \frac{\lambda}{2} \frac{u_i^2}{gD} (1 + R)$

港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第13巻 第3号 (Vol. 13, No. 3), 1974年9月 (Sept. 1974)

目 次 (CONTENTS)

1. 東京湾の潮流による物質拡散の水理模型実験
..... 金子安雄・堀江 毅・村上和男・亀山 豊..... 3
(Hydraulic Model Experiments on Substance Diffusion due to Tidal Currents in
Tokyo Bay.....Yasuo KANEKO, Takeshi HORIE, Kazuo MURAKAMI
and Yutaka KAMEYAMA)

2. エアリフトの揚水性能式に対する一考察
..... 岡山義邦・八木得次・佐藤義博..... 69
(A Consideration of Experimental Formula on Air-lift Pumping Characteristics
..... Yoshikuni OKAYAMA, Tokuji YAGI and Yoshihiro SATO)

1. 東京湾の潮流による物質拡散の数理模型実験

金子安雄*・堀江 毅**・村上和男***・亀山 豊***

要 旨

東京湾内における沿岸埋立地、湾口航路開削、横断道路架橋等各種プロジェクトの実施が、湾内潮流および汚染物質の拡散におよぼす影響を数理模型によって実験的に検討したものである。

実験模型は平面縮尺 1/2000、垂直縮尺 1/100 のコンクリート製で、東京湾全域（含河川感潮域）および外海の一部を再現している。実験手法のうち潮流現象は外海から空気正式起潮機で潮汐現象を与え湾内に潮流を発生させ、拡散現象については、湾内の拡散は潮流の流動に基く水平乱流拡散が主体であるとの観点に立脚し、汚染トレーサーとして蛍光染料（ローダミンB）を用い、潮流による拡散現象を扱っている。

この実験から、湾内潮流は、沿岸埋立地造成による影響は少なく、むしろ湾内浅海部浚渫によって潮流の流線が調整されて局部的に若干増速する。湾口航路開削は湾内潮流流速を現況に較べ約 10~20% 程増速させる効果となっている。また横断道路の架橋は海域をバンクによって分割する結果、各バンク間の水路は湾口部に匹敵する速い流速が出現し、現況の約 2~2.5 倍程度の流速となる。

汚染物質の拡散は湾内潮流の流動に対応しており、汚染物質投入後の拡散は湾内恒流に支配され、京浜沿岸側から湾外に流出する傾向があり、濃度は汚濁負荷量に対応し、湾奥京浜側が高濃度となっている。また横断道路の架設による影響は、東京港側海域で汚染濃度を上昇させる様相がみられるが、湾中央から千葉県側海域にかけてはむしろ汚染濃度が減少しており、道路橋バンクによる局所的な増速と、バンクから発生する渦乱流は拡散現象を促進する傾向が把握された。

* 海洋水理部 海水汚染水理研究室長

** 水工部 模型試験課長

*** 海洋水理部 海水汚染水理研究室

1. Hydraulic Model Experiments on Substance Diffusion Due to Tidal Current in Tokyo Bay

Yasuo KANEKO*

Takeshi HORIE**

Kazuo MURAKAMI***

Yutaka KAMEYAMA***

Synopsis

This paper deals with the experimental investigation on the change of tidal currents and pollutant diffusion in Tokyo Bay due to various projects such as longshore reclamations, new excavation of fairways at the bay inlet, cross-bay bridge, etc., which would be constructed in the future.

Model basin is made with concrete to the scale of 1/2000 horizontally and 1/100 vertically, and covers the whole bay (including estuarine regions of main rivers) and a part of the open sea. Tidal currents are exerted by a pneumatic-type tide generator at an open boundary. Fluoresceine (Rhodamine B) solution is continuously injected from main sources of water pollution along the coast. Dispersion experiments are conducted with the assumption that a diffusing substance is dispersed mainly by the actions of advection and turbulent horizontal diffusion of tidal currents.

From a series of experiments, the following points are found out; tidal currents have little change due to longshore reclamations, and locally increase their velocities in a slight degree owing to the regularization of flows due to the dredges in shallow water. The current velocity is increased by about 10 to 20 percent more than that of existing current due to the excavation of fairways at the bay inlet. The current velocities along causeways are also increased by 20 to 25 percent more than those of existing currents owing to the separation of waterways due to the construction of cross-bay bridge, and are nearly the same as velocities at the bay inlet. The diffusion of the solution is controlled by the behaviors of tidal currents, and the mean flow during the tidal cycle. The concentration distribution of the solution indicates high in the inner bay (such as Off-Tokyo and Off-Yokohama), decreasing low at the open mouth, and corresponds well to the amount of solution injected. The concentration of the solution is increased in the region of Port of Tokyo, whereas it is decreased in the region from the central bay to Off-Chiba Prefecture by the construction of cross-bay bridge, owing to the promotion of diffusion by the local increase of currents at the causeways and by turbulent eddies.

* Chief of the Marine Diffusion Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

** Chief of the Model Test Section, Hydraulic Engineering Division

*** Member of the Marine Diffusion Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

目 次

要 旨	3
1. ま え が き	7
2. 東京湾の潮汐・潮流および汚染状況	7
2.1 潮 汐	7
2.2 潮 流	8
2.3 汚 染 状 況	8
3. 実 験 手 法	11
3.1 実 験 方 針	11
3.2 相 似 律	12
3.3 現象因子の取扱い	13
4. 実 験 施 設	13
4.1 模 型	13
4.2 起 潮 装 置	14
4.3 計 測 装 置	14
5. 実 験 条 件 お よ び ケ ー ス	15
5.1 実 験 条 件	15
5.2 実 験 ケ ー ス	18
6. 予 備 実 験	18
6.1 潮 流	18
6.2 拡 散	19
7. 実 験 結 果	20
7.1 潮 流	20
7.2 各種計画に伴う潮流変化	36
7.3 拡 散	42
7.4 各種計画に伴う濃度分布の特性	59
8. 考 察	63
8.1 流 況	63
8.2 汚 染	65
9. 結 論	67
10. あ と が き	67
参 考 文 献	68

1. まえがき

1970年代における国土政策の基調は国土全体の有効利用と均衡ある発展を図ることを目途としているが、わが国の政治・経済・文化の中核地域として発展を続けてきた東京湾を囲む首都圏の中心部も全国的な開発可能性の拡大のなかで今後の国際化の進展に対処するため同湾岸地域の再編成を図ることが急がれている。

このような展望から首都圏整備計画・新全国総合計画等は首都圏の各地域がそれぞれ適切な役割を分担し、一体的かつ効率的な地域社会の機能をはたすために、広域的見地からの交通輸送体系の整備および臨海部の再開発と土地の高度利用を行ない、地域間交流の円滑化と有機的な連けいを図る必要があるとしている。このため川崎～盤州間を結ぶ東京湾横断道路の建設、東京湾沿岸地域再開発のための埋立計画などが立案されている。

また東京湾内海上交通は輸送量の激増とともに輻輳の一途をたどりつつあるが、特に同湾口は狭小なため(図-1 参照)航行船舶の安全な運航はますます困難となっ

ている現状から、東京湾総合安全対策の一環として湾口航路開削その他一連の安全対策なども計画されている。

他方、わが国近年の経済活動の高度成長は重化学工業の急速な発達と、都市化に伴う地域社会の過密化現象を引きおこし、この結果産業廃水、都市排水の増加による公共水域の汚濁が著しい。東京湾においても首都圏に生ずるこれら汚水の流入によって、湾奥一部水域では既に漁業価値が喪失したとさえ言われており、この被害は拡大し自然環境の破壊にまで波及し大きな社会問題となってきた。このため環境保全の立場から排出汚水の規制がとられるとともに、沿岸埋立地の造成、大規模海中構造物の建設など海洋環境への干渉行為に対しても再検討が迫られている状況にある。このような情勢の下で大規模海中建造物の構築にあたっては、これら計画による海域の数理現象および環境に与える影響を事前に十分検討しておかなければならない。

本報告は前記の諸点から、東京湾内大規模埋立地、横断道路橋ならびに湾口航路開削などの計画が湾内潮流、汚水の拡散におよぼす影響を数理模型実験によって検討したものであるが、湾内沿岸埋立地および湾口航路開削にともなう潮流の変化などについては既に一部実験が終了し、港研報告 Vol. 12, No. 1 東京湾口航路潮流模型実験に発表されているので、本報告では、その後の計画に関する実験のみを述べ、報告の主体は汚水拡散実験について記述することにする。

しかしながら海水汚濁の予測技術としての数理模型実験は最近の試みであり、原型における現象も複雑にしてその実態も明確に把握されておらず、また実験手法も確立しているとは言い難いけれども、広域な浅海湾における拡散現象は湾内の潮流流動に基く水平乱流拡散であるとの考え方に立脚し、潮流現象を再現し、実験を行なった。

2. 東京湾の潮汐、潮流および汚染状況

東京湾内の潮汐、潮流現象については既に東京湾口航路潮流模型実験報告書(Vol. 12, No. 1)に詳しく述べたので、ここではその主要点のみ記述する¹⁾。

2.1 潮 汐

湾内各地点の潮汐現象はいずれも半日周潮が卓越しており、日潮不等は著しくない。潮汐の振幅は湾外から湾口を通過して湾内に伝播する進行距離に比例して変化し、湾奥千葉港で、湾外房総半島先端の布良に対し約

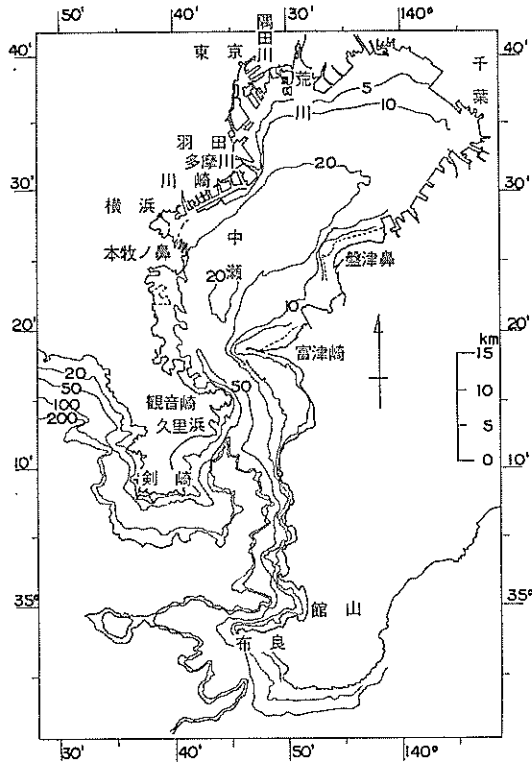


図-1 東京湾地形水深図

表-1 布良, 横浜, 東京の潮汐調和常数

地点 分潮	布良		横浜		東京	
	H cm	θ °	H	θ	H	θ
M ₂	35.6	141.3	47.3	153.6	50.9	155.0
S ₂	16.3	171.9	22.9	182.7	24.7	183.9
O ₁	16.7	158.5	19.6	160.4	20.0	161.4
K ₁	21.6	175.3	24.9	178.7	25.7	180.5

1.5倍となる。また潮汐位相は進行距離に比例して遅れ、横須賀港付近で約10分、千葉港で約30分を示す。この傾向は表-1の潮汐調和常数からも把握することができる。

2.2 潮 流

東京湾内の潮流の特性を要約すれば、およそ下記の通りである。

(1) 潮汐変化に順応して外海から湾口を通過し湾内に流入する潮流は半日周潮が卓越し、日周潮成分は小さい。この潮流は湾口狭搾部によってコントロールされ、第2海堡附近の流速が最も速く、平均大潮時約1.0~1.2ktであり、湾内では湾口からの流入距離に反比例して流速が低下し平均大潮時で1.0kt以下となり湾奥では0.1~0.2kt程度となる。また湾内流速は総体的に退潮流が漲潮流に比べ速い傾向を持つ。

(2) 湾内恒流の一般的傾向は中層から底層において流入し、上層は流出の様相を示すが、川崎—盤州を結ぶ線以北の湾奥部では時計方向に環流する傾向がみられ、以南水域では湾外に流出する様相を持っている。しかしこの流況も季節的に変動する傾向があり、特に河川流入水の影響が強い。

(3) 湾口および第2、第3海堡以南の観音崎近傍は海底地形が複雑なため渦流が発生し潮流の流れは複雑である。

以上の潮汐、潮流の特性から東京湾内の潮流現象は外海からの潮汐変動によって誘起され、さらに湾口狭搾部でコントロールされていることが理解される。この結果湾口部における潮汐、潮流の関係は位相で約90°差が生じ、低潮時および高潮時の近傍において憩流し、平均潮位付近で最大流速が生起する。そして湾口部第2海堡付近最大流速時に湾内各水域でも最大流速となる。図-2の各図に湾内潮流分布を示す²⁾。

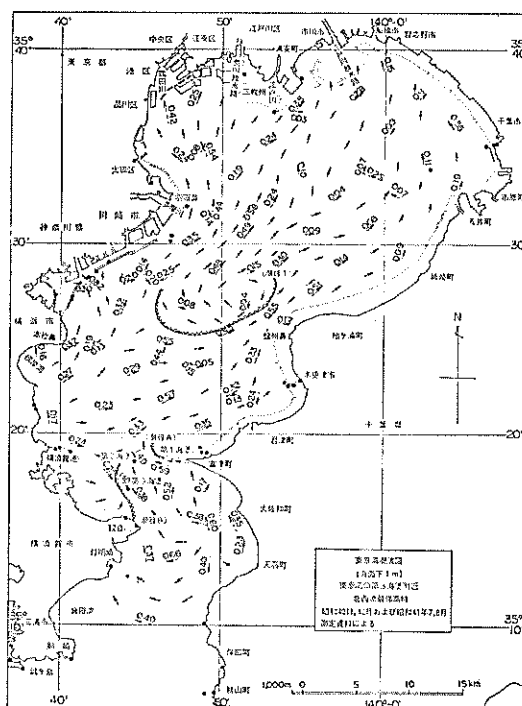


図-2-1 湾内潮流図

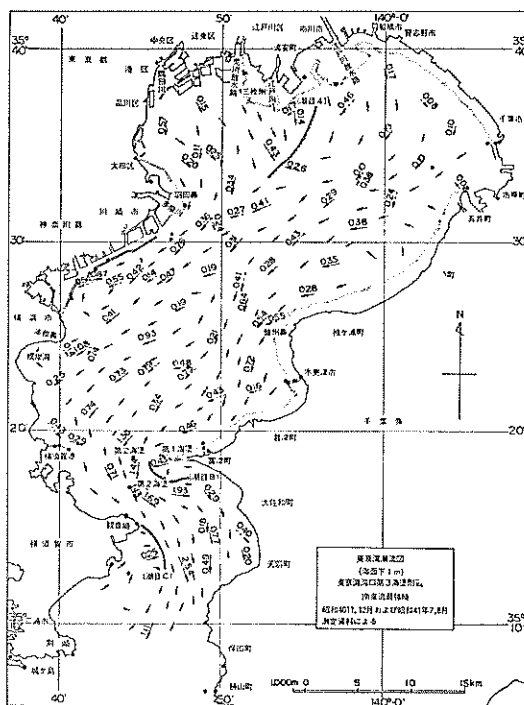


図-2-2 湾内潮流図

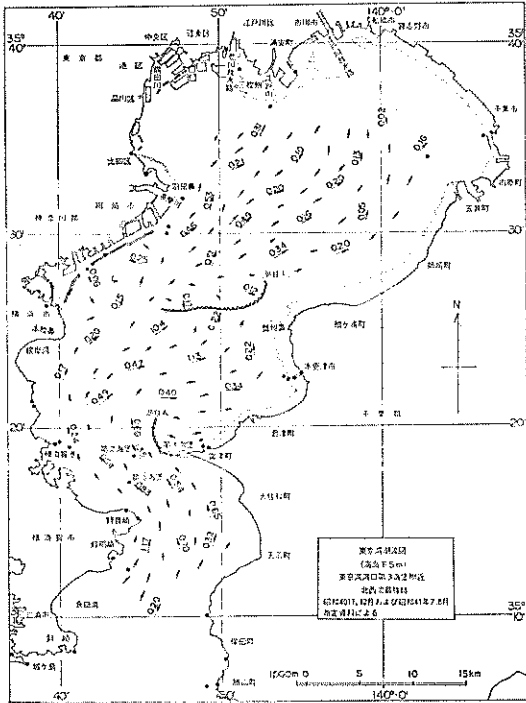


図-2-3 湾内潮流図

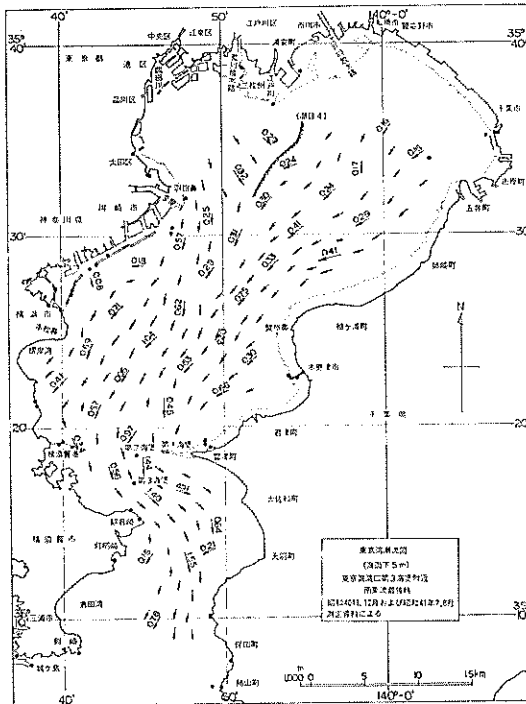


図-2-4 湾内潮流図

2.3 汚染状況

東京湾は 図-1 にみられるように三浦半島、房総半島に囲まれ、さらに観音崎と富津岬によって閉塞された袋状の湾形である。この湾奥部には隅田川をはじめ、荒川、江戸川、多摩川など都市部を流下した大河水が流入しかつ、この沿岸は巨大な臨海工業地域を構成しているため、これらより発生する各種排水の総てが流入することによる海域の水質汚濁が著しく、地形的に外海との海水交換作用も小さいため、わが国の水質汚濁ワーストケースとなっている。

東京湾の水質汚濁が問題化したのは、わが国の経済が急速に伸展した昭和30年半ば以降とされているが、それ以前には水質汚濁に関する系統的な調査が実施されていないため、過去の汚濁状況を正しく把握するのは困難であるが、昭和30年頃より隅田川の水質悪化が問題となり、東京都水産試験所が行なった東京港周辺の水質調査結果によれば、昭和35年には COD 値で、表層水約 5.0 ppm、底層水約 3~4.0 ppm を記録し、すでに局部的に強い汚染状況が現れている³⁾。

昭和35年以降、東京都水産試験場、神奈川県水産試験場、千葉県内湾水産試験場などによって、水産的立場から東京湾内の水質調査が続行されてきたが、各々が断片的な資料のため統計的解析も困難で、総体的な水質汚染状況の把握は難しいけれども、湾内水質悪化の傾向は認められ、特に $\text{NH}_4\text{-N}$ の増大が急激に生じている。

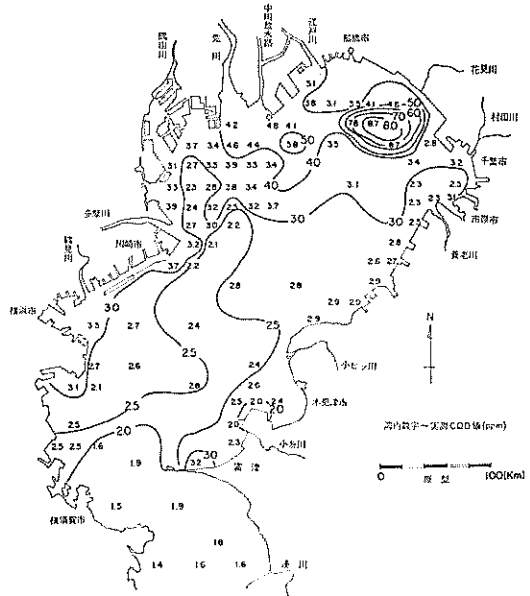


図-3 東京湾 COD 分布 (昭和44年)

図-3 は経済企画庁水資源局（現、環境庁）の資料から湾内の COD 分布を画いたものであるが、湾内は総体的に 2 ppm 以上の濃度を示しており、特に湾奥花見川沖には 8 ppm 以上の高濃度集中水域が出現している。そして横浜から川崎—東京—船橋にかけて 3 ppm 以上の汚染水域となっており、汚濁の根源がこの地域に流入する大河川および工業地帯であることが推察される。

その後昭和 45 年～46 年にかけて、東京湾沿岸一都二県（東京都、神奈川県、千葉県）協同の下に、湾内の総合的な汚染調査が実施され⁴⁾、続いて昭和 46 年～47 年にかけて建設省により調査が行なわれた⁵⁾。図-4-1 は一都二県の調査データから COD 値について、調査期ごとの表層の分布を示したもので、季節によって濃度分布は大きく変化しており、5 月および 8 月には湾奥から以北湾奥水域で 9 ppm 以上の高濃度汚染域が現われるが、気温、日照の低下する 10 月～2 月には 1～3 ppm と低下し光合成による生産物の影響が大きいことを示している。この現象の、特に高濃度を示す水域が、河水の影響であろうと考えられる地点に発生していることから、陸上からの有機物流出と栄養塩の供給による二次汚染によ

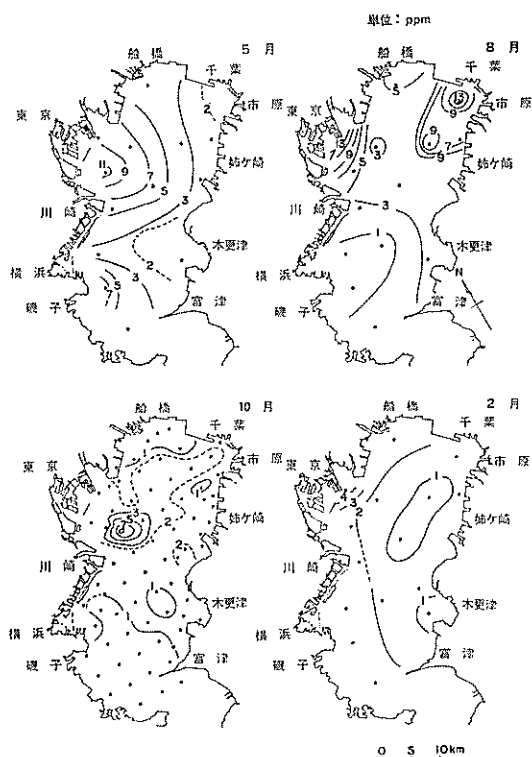


図-4-1 表層 COD 分布（昭和46, 47年）ppm

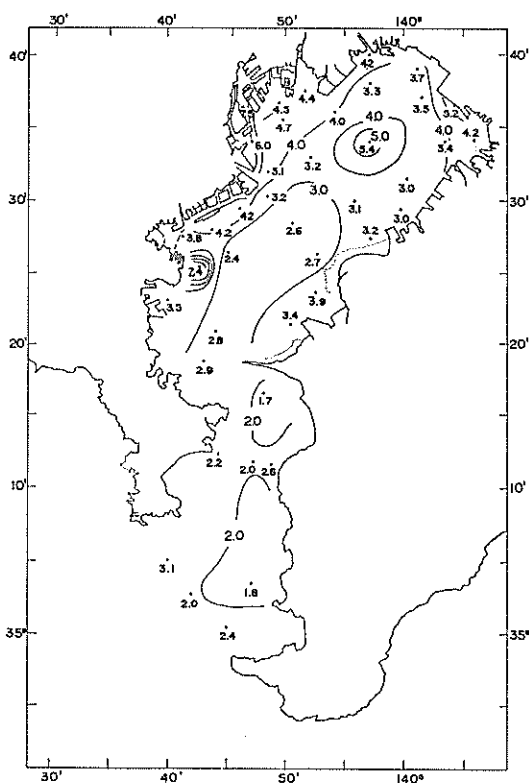


図-4-2 上層日平均 COD 分布 (ppm)

るものと推定される。

図-4-2 は建設省の調査記録から上層（水深の 20% 相当）の COD 平均値（2 時間毎、25 時間測定値）を示したもので（昭和 46 年 12 月測定）、湾内沿岸および川崎—盤州以北の湾奥は 3 ppm 以上の濃度を示し、図-3 の濃度パターンと類似の傾向であるが、濃度は総体的に上昇しており特に横浜山下地先の高濃度水域が目立っている。なおこの調査の 2 時間ごとの濃度分布によれば、横浜沖の高濃度水域は間ケツ的に発生しており、時間的変化が著しい。

他方、水質調査と同時にに行なわれた東京湾への流入汚濁負荷量調査によれば（建設省）表-2 のようである。表によれば COD 総負荷量は約 1200 t/日 に及んでおり、このうち約 45% が河川からの流入によるもの、またほぼ同量が臨海工場から直接流入となっており、残り 10% が下水処理場からの流入である。そして流入負荷量のおよそ 90% が江戸川以西横浜に至る東京港を中心とした東京湾西岸に流入している。

これらの水質調査結果から東京湾の汚染源は都市河川

東京湾の潮流による物質拡散の水理模型実験

表-2 東京湾流入 COD 負荷量表

分類 排水別		排水量 (×10 ³ m ³ /日)					COD負荷量 (ton/日)				
		河川	工場	処理場	その他	計	河川	工場	処理場	その他	計
東京都	T-1	6,016				6,016	77.6				77.6
	T-2	10,465		650		11,115	194.6		22.1		216.7
	T-3	*3,897	14			3,911	*89.3	4.7			94.0
	T-4	784		665		14,449	42.8		31.3		74.1
	T-5	*1,364				1,364	*41.9				41.9
神奈川県	K-1		3,861	210		4,071		292.6	21.0		313.6
	K-2	1,502	385			1,887	15.2	19.8			35.0
	K-3	1,695	1,154			2,849	38.1	149.2			187.3
	K-4	*1,304		203		1,507	*8.6		4.6		13.2
	K-5	364	23		178	565	4.3	0.9		3.1	8.3
千葉県	C-1	61	1,617		6	1,684	1.5	20.7		0.3	22.5
	C-2	493	1		14	508	3.7	0.01		0.7	4.4
	C-3		697		3	700		8.9		0.1	9.0
	C-4	1,378	2,822		12	3,212	18.2	39.7		0.5	58.4
	C-5	1,013	1,744		100	2,857	27.0	10.2		2.0	39.2
	C-6	225	36		29	290	5.6	3.3		0.7	9.6

ただし表中*印は一都三県公害防止協議会の資料より推定。

および臨海工場地帯からの汚水の流入によることは明らかであり、経年的な汚濁変化は各調査時期によって変動が著しいため明確に断定できないが、以然として汚濁は進行しているものと推察される。しかし湾中部で COD 濃度 5ppm 以上の高い数値の出現に関しては、この高濃度水域が時間的にも季節的にも変動することから、汚濁源として河川、工場などからの流入汚水の拡散とともに、光合成による生物(プランクトン)の増殖に関わる二次的汚染の効果が強く作用しているものと判断される。

3. 実験手法

3.1 実験方針

海域において汚濁物質が海水と混合拡散し希釈され浄化してゆく機構には多くの要素が関係しきわめて複雑であり、拡散分布の形態は海域の地形、水理、気象などの条件によって異なるとともに時間的にも変動する。また拡散した汚濁物質の濃度についても、汚濁物質の流入量、流入場所、初期濃度、海域の流速分布、拡散係数などが関係してくる。したがって実験ではこれら関係因子の総てを再現することが望ましいけれども、現在の実験手法、施設では到底不可能であるから、先づ原型における拡散現象に関して基本的な形態を明確に規定した上で、実験

で扱う範囲を定めておくことが必要である。

一般に海域で汚濁物質が混合拡散する基本的な要因は (i) 分子拡散 (ii) 重力または浮力により鉛直方向に働く渦動拡散 (iii) 水平方向に働く渦動拡散 (iv) 潮流、海流、吹送流などによる移流(一種の渦動拡散)に大別される。このうち分子拡散は渦動拡散に較べ効果が小さいので海洋拡散においては無視される。(ii)~(iii)の渦動拡散は流体の中に存在する乱れによって物理量が拡散される現象であるが、乱れの構造は3次元であり、流体中の圧力の効果は常に乱れのエネルギーを空間の3方向に等しく配分する働きをしている。しかし海域の構造は水平方向のデメンジョンが鉛直方向のデメンジョンに較べ遙かに大きく、また海中の密度構造も鉛直方向の乱れを押える作用が強いため、海洋乱流は非等方性であるといえる。さらに海洋の乱流は常に海流、潮流その他の流れおよび波浪、風さらには海底摩擦などによって外部からエネルギーを供給されてその勢力を保持しており、これら海流、潮流などは水平方向成分が鉛直方向成分より卓越しているため、拡散現象においても水平方向の拡散力が強く、水平乱流拡散係数は 10⁹ cm²/s にも達し鉛直拡散係数より遙かに大きいのが特徴である。

加えて放流された汚濁物質の海域中での行動を支配す

る要因の中に海流、潮流などの移流が重要な要素である。すなわち海域の流れが速ければ速い程拡散された汚濁物質が他の海域に移動させられることになり、特に内湾域における流体の恒流成分は、汚濁物質の終局的な流動方向を決定する場合が多い。

これらの事実から海域の汚濁物質の混合拡散を規定する主要因は海域に存在する乱流拡散と移流であると考えてよいであろう。

東京湾の場合は地形的に閉塞された内湾であり、湾内の乱流にエネルギーを供給する主体は潮流にして、河川流、吹送流、波浪などは局所的なエネルギーを与えるに止まるであろうと思われる。そしてこの潮流は平均流として汚濁物質の場所的移動を受持ち、その中に存在する乱れが汚濁物質と周囲の海水との混合を起しているものと見られる。しかし汚濁物質の長時間後の拡がり、潮流の excursion によって移動しながら最終的な分散方向は湾内の恒流に支配されているとみなすことが出来よう。

このような観点から東京湾内の汚濁物質の混合拡散現象の形態は、湾内潮流の流動に基く水平乱流拡散として扱うことにした。なお原型の汚濁濃度は前記の物理現象のほか、沈殿、吸着、化学変化などのいわゆる自浄作用を受けた結果であるが、実験ではこれら作用の再現は不可能であるため一切考慮しないことにした。

3.2 相似律

模型実験で重要なことは、原型現象と模型現象の間に力学的相似が成立することである。この実験は潮流および汚濁物質の拡散を扱うものであり、原型の流速と濃度分布は、それぞれ運動方程式、連続式、および拡散方程式に従うから、運動量および物質の収支に関する力学的な相似則が必要となる。

(1) 潮流

広域な浅海における長周期波にもとづく流れの平均的な流況は水平方向に卓越しておりかつ、海面は水平とみなされ、したがって圧力は静水圧分布とみなされる。ここで海面に水平座標 x, y をとり、地球自転の偏向力(コリオリ力)を無視し、鉛直方向に平均化した水平成分 U, V についての流体の運動方程式は (1) 式で近似できる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + mU \frac{\partial U}{\partial x} + mV \frac{\partial U}{\partial y} &= -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{cU^2}{2h} \\ \frac{\partial V}{\partial t} + mU \frac{\partial V}{\partial x} + mV \frac{\partial V}{\partial y} &= -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{cV^2}{2h} \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで U, V : x, y 方向の平均流速, η : 水面昇降量,

c : 海底摩擦係数, h : 水深, m : 流速の鉛直分布に関する係数

原型および模型に生ずる現象が相似であるためには原型に関する(1)式と模型についての(1)式に対応する各項の比がそれぞれ等しいことを要する。ここで原型と模型の関係 $l_r = x_p/x_m$ などを(1)式に代入すれば模型において(1)式が成立する条件が求まり、相似律は下記のように定まる。

$$U_r = h_r^{1/2} \quad (2-1)$$

$$l_r = l_r h_r^{-1/2} \quad (2-2)$$

$$c_r = l_r^{-1} h_r \quad (2-3)$$

ここで、添字 r は縮尺比を表す。

(2-2)式はフルード数を合せる関係式であり、時間スケールの縮尺を与え、(2-3)式は摩擦抵抗を規定する条件を表す。なお c_r を Manning の粗度係数 n で表せば(3)式となる。

$$n_r = h_r^{2/3} l_r^{-1/2} \quad (3)$$

(2) 拡散

海域中の汚濁物質濃度の変化は(4)式で表わされ、これは一般に拡散方程式とよばれる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} + w \frac{\partial s}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial s}{\partial x} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial s}{\partial z} \right) + W_0 \frac{\partial s}{\partial z} - cs \end{aligned} \quad (4)$$

ここで s : 物質濃度, t : 時間, u, v, w : x, y, z 方向の流速成分, k_x, k_y, k_z : x, y, z 方向の拡散係数, W_0 : 物質沈降速度, c : 自浄に係する係数

(4)式の左辺 2~4 項は移流項を、右辺 1~3 項は拡散項を表し、4項は沈殿、5項は自浄作用などいわゆる減衰項を示す。ここで前述の実験方針で仮定した水平方向成分のみを考慮し、沈殿、自浄作用を無視すれば、

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} = k_x \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} \quad (5)$$

汚濁物質の拡散に関する正しいモデル化とは、模型内の各点における濃度が原型の幾何学的対応点の濃度に等しくなるようなモデル化と定義することができよう。換言すれば、原型と模型について(5)式の各々に対応する各項の比が等しいことを要する。ここで原型と模型の関係を(6)式のようにおき

$$\left. \begin{aligned} s &= \frac{s_1}{s_2} & U &= \frac{u_1}{u_2} = \frac{v_1}{v_2} & t &= \frac{t_1}{t_2} \\ l &= \frac{x_1}{x_2} = \frac{y_1}{y_2} & k &= \frac{k_{x1}}{k_{x2}} = \frac{k_{y1}}{k_{y2}} \end{aligned} \right\} (6)$$

ここで suffix 1, 2 はそれぞれ原型, 模型を表わす

(6) 式の関係を (5) 式に代入し模型上で (5) 式が成立する条件は (7) 式となる。

$$\left(\frac{k}{lu}\right)_r = 1 \quad \therefore k_r = l_r u_r = l_r h_r^{1/2} \quad (7)$$

3.3 現象因子の取扱い

(1) 潮流現象

原型の流体運動を前記 (1) 式で近似したが、原型の現象はこれ程単純ではなく、特に広域な海域を対象とする場合に地球自転の偏向力(コリオリ力)は無視できない。ここで東京湾の海域規模を下記のように見積り (C.G.S. 単位)

長さ: 10^6 , 速度: $10^1 \sim 10^2$, 深さ: 10^3 , 時間: 10^4

これからコリオリ力の大きさを検討した結果、コリオリ力は 10^{-5} のオーダーとなり (1) 式の各項のオーダー ($10^{-3} \sim 10^{-4}$) に比べ $1 \sim 2$ 桁小さいことが判り、さらにコリオリ項は相似律から他の各項と同時に満足させることはできない結果にもなるので、実験では無視することにし、重力項、慣性項、粘性項を代表する摩擦抵抗についてのみ考慮することにした。けれどもコリオリ力は湾内潮流の恒流成分の流動に影響を与える筈であり安易に無視するのは好ましくない。しかし、模型上の恒流成分は地形と河川流の流入によって操作可能である。したがって実験では河川流を調整することにより、間接的に再現する方法をとった。

(2) 拡散現象

汚濁拡散の主因が、海域の流れの中に存在する乱れと移流にあるならば、模型内の流れは原型同様に乱流でなければならない。その再現については乱れのスペクトル形状を相似に保つことが最も望ましい。けれど原型海域の乱れに関する資料は皆無であり、拡散の度合いを示す拡散係数の実測値も僅か $1 \sim 2$ 例に過ぎず²⁾、これも局所的な海域で、東京湾としての傾向を把握するには不十分である。

模型海域の流れが、充分な乱流であり且つ前記 3.3(1) の流況が再現されたならば、水平混合は主として潮流の水粒子移動距離以下のさまざまな規模の乱れによって行なわれていると考えられる。この様な海域の水平拡散の再現は、流跡を含む平均的な流況の相似を図れば、内部混合を合致させることによって可能である。この際の内混合としては、潮流流動時に海岸、海底などの地形変化から生ずる水平渦流に基く水平混合が考えられ、地形の影響としての水平渦流の再現は、鉛直に平均した平均流に関する Froud 数と、海底の摩擦抵抗を合致させることによって可能である。

(3) 摩擦抵抗

前記 (1), (2) で述べたように、この種の模型実験では重力項とともに摩擦抵抗の設定は相似性を得るために重要な要素となっている。海底摩擦抵抗係数 (c) は一般に $c=0.01$ とされているが、実測によれば $c=0.03 \sim 1.0$ の幅を有し、海底の場所によっても異なっている³⁾。さらに n についても一般に $n=0.025$ とされているが、これまた不明確な数値である。まして東京湾内の抵抗値は不明なため疑問はあるが、一応 $n_p=0.025$ と見積り、相似律から n_m を決定し、模型に施す抵抗体の寸法は (8) 式から計算した。

$$\frac{n}{R^{1/3}} = \frac{1}{\sqrt{g}} \left(A_0 + \frac{1}{k} \ln \frac{R}{K_1} \right) \quad (8)$$

ここで R : 径深 \equiv 水深, A_0 : 常数 (6.0), k : カールマン常数 (0.4), K_1 : 相当粗度 (高さ)

さらに粗度係数 n 値は抵抗体の大きさと共に、その配置密度の関数でもある。抵抗体の配置間隔については河川等の実験例を参考に 50 cm 間隔の千鳥に配置した。抵抗体としては、流向が変化しても常に同じ効果を持つことが必要であることを基本条件とし、投影面積の一定であるパイプ形状を採用した。

(4) 汚濁指標, トレーサー

汚染実験において、原型の汚濁度を表わすものとしていかなる指標およびトレーサーを採用すれば、実験の相似性を高めることができるか重要な問題がある。けれども原型の汚濁状況を端的に示す指標がない現在、決定的な根拠もないが、海域の汚濁指標として最も一般的な COD 値を採用することにした。

実験上の汚濁トレーサーとしては、模型上の使用水によく溶解し且つ、水粒子運動に追従するとともに、化学的性質が安定して取扱い容易であること。さらに測定感度が良好であること等を条件として蛍光染料を選定した。蛍光染料にも各種のものがあるが、本実験では最も一般的なローダミン B を用いた。(溶解時の色彩はピンク)

なお汚濁負荷量は、原型 COD 値負荷量 (流量 \times 濃度) を縮尺しているが、濃度は $1/1$ として取扱っている。

4. 実験施設

4.1 模 型

この実験の目的は東京湾内の沿岸埋立地および大規模海中構造物の建設が、湾内潮流、汚濁物質の拡散におよぼす影響を把握することである。湾内の潮流は前述のように外海の潮汐変動に誘起されたものであるから、模型

に再現すべき海域は東京湾全域は勿論のこと、一部湾外を含めた広域を対象とする必要がある。さらに湾内の汚濁物質の拡散現象は水平乱流拡散に基づくものであるとする考え方から模型上の流れは原型同様に乱流でなければならない。これは模型の力学的相似性の保持の上からも必要な条件であり、このため表面張力、粘性の影響を除去し、模型上の Reynolds 数を大きくするため、その水深は大きいことが望ましい。

他方、実験水槽に制限があり、模型実験の基本原則である幾何学的相似の縮尺を採用すると前述の要求を満足させることは不可能となり、模型を歪めざるを得ないことになる。まして拡散現象に関する模型実験において、歪模型によって相似性が満足されるという理論的根拠もない。

模型実験で最も必要なことは、現象の再現を確立することであり、理論的に要求される縮尺模型でも必ずしも満足すべき現象の再現は期し難いので、むしろ条件を緩和して歪模型を作ることによって現象の再現を図る場合が多い。この実験においても、歪の少ないことを条件に実験目的、現象の再現性、測定技術などを検討したが、模型製作日数、経済的な理由から、すでに東京湾口航路模型実験の際に作られた水平縮尺 1/2000、垂直縮尺 1/100 の模型を利用することにした。

模型範囲は 図-5 に示すように東京湾全域から外海を含めたもので、昭和45年時点を現況として地形を再現している。なお湾口から外海にかけて水深 -100m 以深の水域は、模型上で -1.0m の一定水深としている。さらに湾内に流入する鶴見川、多摩川、隅田川、荒川（含放水路）江戸川（含放水路）、養老川、木比ツ川の各河川の感潮水域は潮汐現象到達地点までの河積を再現するとともに、東京港、川崎港、横浜港内の運河筋は出来る限り再現している。

ここで前記相似律による水理要素の縮尺は下記のようになる。

$$l_r=2000, h_r=100, u_r=10, T_r=200$$

$$Q_r=2 \times 10^6, n_r=1/2.08, K_r=2 \times 10^4$$

4.2 起潮装置

模型の潮汐現象は 図-5 の模型端に設置されている空気圧式起潮装置を用いている。起潮原理は、模型水槽の一端にあり底部で模型水面と接している空気室（幅：20m、高さ：±1.5m、奥行 4m のコンクリート製気密室）に外部から 22kW のブロワーで送られる空気を空気圧作動弁を通して室内に送入、吐出し、空気室内の水

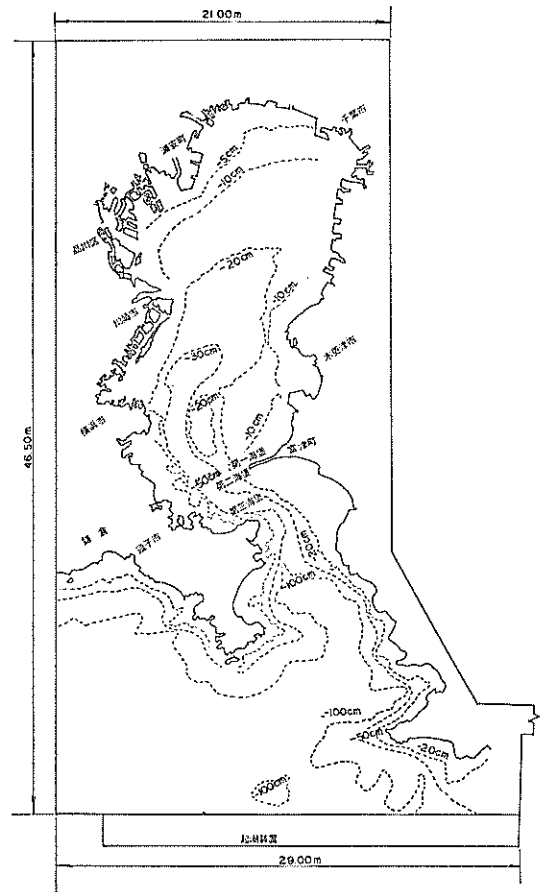


図-5 模型範囲図

位を強制変化させ、この変化を模型面上に伝播させ所定周期の水位変動を発生させる方法である。空気圧作動制御弁は他処にある制御室から、実験に設定した潮汐波の周期、振幅を自動制御装置を通して正弦波の電気信号として送り、運転している。

4.3 計測装置

(1) 潮汐、潮流

模型上の潮汐現象は、原型の検潮所に対応する第2海堡、横浜、晴海、千葉および起潮機前の5点で、小型容量式波高計を用いて計測し、ペン書オシログラフに記録した。

潮流は湾全体の流況を同時に記録する必要から、 $\phi=3\sim 5$ cm の発泡スチロール製の浮子を約100ヶ投入し、潮流によって流動する状況を、天井に設置されたカメラ(35m/m)で2~4秒間隔に2~3潮汐間撮影した。撮影されたフロートの流動はフィルム解析装置により、各

東京湾の潮流による物質拡散の数理模型実験

フロートの流跡図を画き、この図から所定時の流速、流向を算定した。

(2) 汚水濃度

陸岸および河川から流入する汚水（染料）が湾内潮流により拡散した後の濃度の把握は、湾内代表点（約60点）で同時採水し、濃度分析する方式を採用した。

採水は採水器により、水面下約5cm層の汚水を、0～

80 潮汐まで10 潮汐ごとに、ほぼ最干潮時に行ない、採水試料は蛍光濃度分析器（Turner 110型）で濃度測定をおこない、ppm または ppb 単位で表示した。

5. 実験条件およびケース

5.1 実験条件

(1) 潮汐

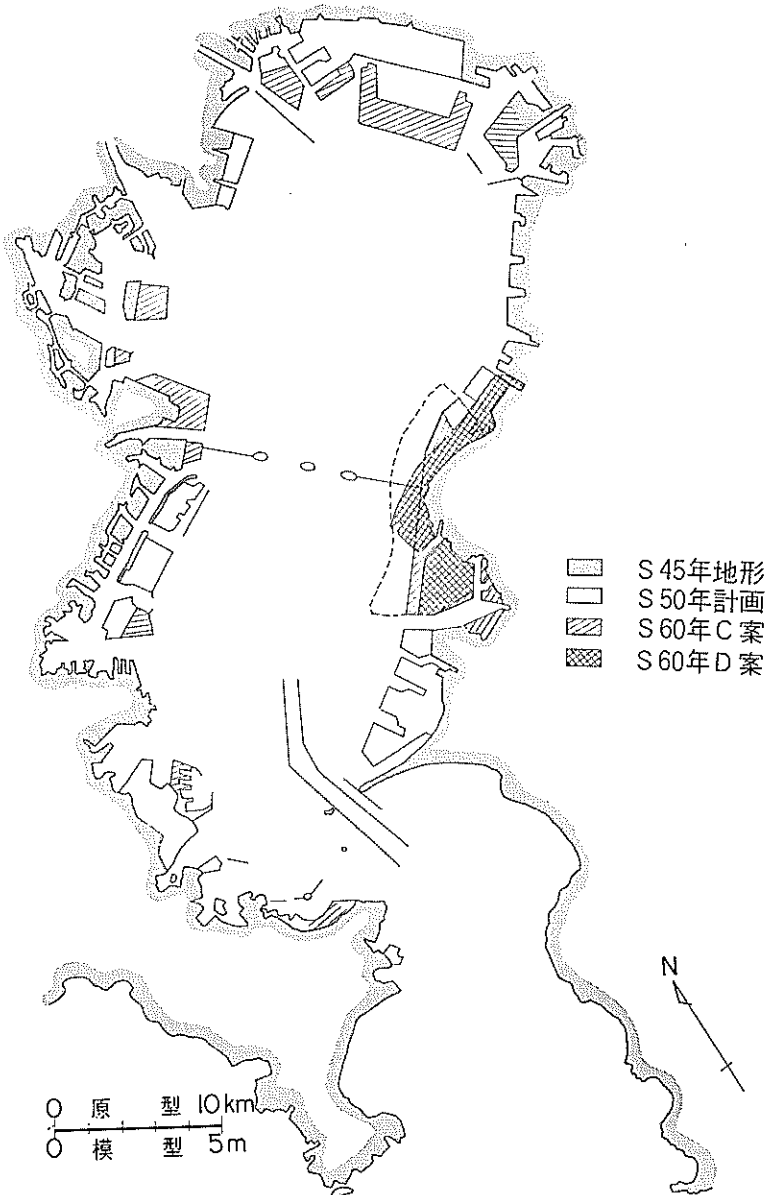


図-6 湾内、各種計画案図

東京湾内の潮流はさきに述べたように、外海の潮汐変動に誘起されたものであるから、実験の潮汐条件として湾外における潮汐特性値を採用することとし、布良における潮汐調和常数値を用い、周期は半日周潮をもって、起潮機のインプットデータとした。

潮汐の振幅は、小潮、大潮、年間のほぼ最大潮（以下大大潮と呼ぶ）の3種を選定したが、布良の潮汐調和常

数值から求まる振幅は下記のとおりである。

- 大大潮 ($M_2+S_2+O_1+K_1$) = 90.0 cm (1.0 cm)
- 大潮 (M_2+S_2) = 51.9 cm (0.5 cm)
- 小潮 (M_2-S_2) = 19.3 cm (0.19 cm)
- 周期 $12^h25^m = (3^m44^s)$

() 内の値は模型値

(2) 河川流量

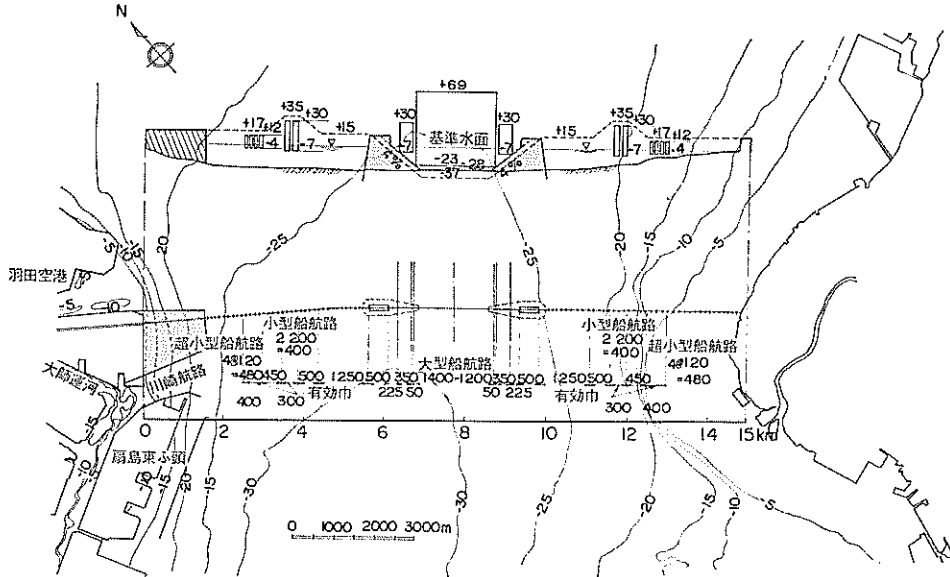


図-7-1 横断道路計画案, A

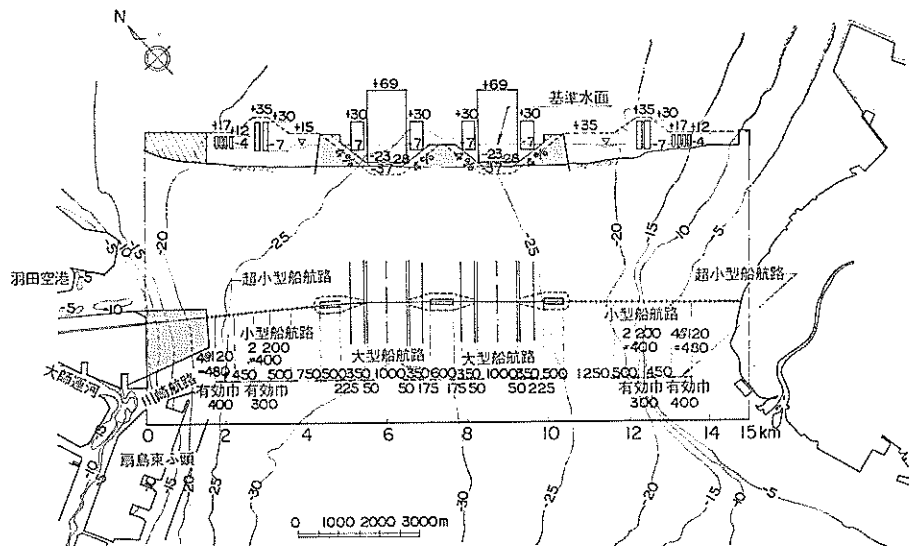


図-7-2 横断道路計画案, B

東京湾の潮流による物質拡散の水利模型実験

模型上の流況，特に恒流成分の再現を図るため湾内に流入する大河川を考慮し，下記河川の年平均流量を以って代表させたが，荒川，江戸川では下流感潮域での取排水量を考慮し決定している。ただし沿岸にある下水処理場からの排水量は相当大量にのぼるものと考えられるが詳細不明なため，河川流量としては考慮せず，汚濁実験負荷量を扱う際に考慮している。

鶴見川	$Q_p=20\text{ m}^3/\text{s}$	$Q_m=10\text{ cc/s}$
多摩川	$Q_p=30\text{ m}^3/\text{s}$	$Q_m=15\text{ cc/s}$
隅田川	$Q_p=30\text{ m}^3/\text{s}$	$Q_m=15\text{ cc/s}$
荒川	$Q_p=50\text{ m}^3/\text{s}$	$Q_m=22\text{ cc/s}$
江戸川	$Q_p=50\text{ m}^3/\text{s}$	$Q_m=22\text{ cc/s}$

模型河川流量は陸上に設置した貯水槽（水頭一定）からビニールホースで各河川の感潮域上流端に配水し，バルブによって流量を調整した。

(3) 沿岸地形，横断道路，湾口航路

湾内沿岸埋立計画は昭和60年時点とし，図-6に示す地形であり，模型は木枠を作り，モルタルで模型面に固定した。横断道路は図-7-1~2のようにA，B2案あり，バンクの部分は木枠で作製し沿岸埋立地同様にモルタルで固定し，橋脚部は針金で再現している。湾口航路は図-8にみられる主航路および副航路を考慮し模型製作の際に前もって作られ，取りはずし可能である。ただし航路掘削法面は鉛直としている。

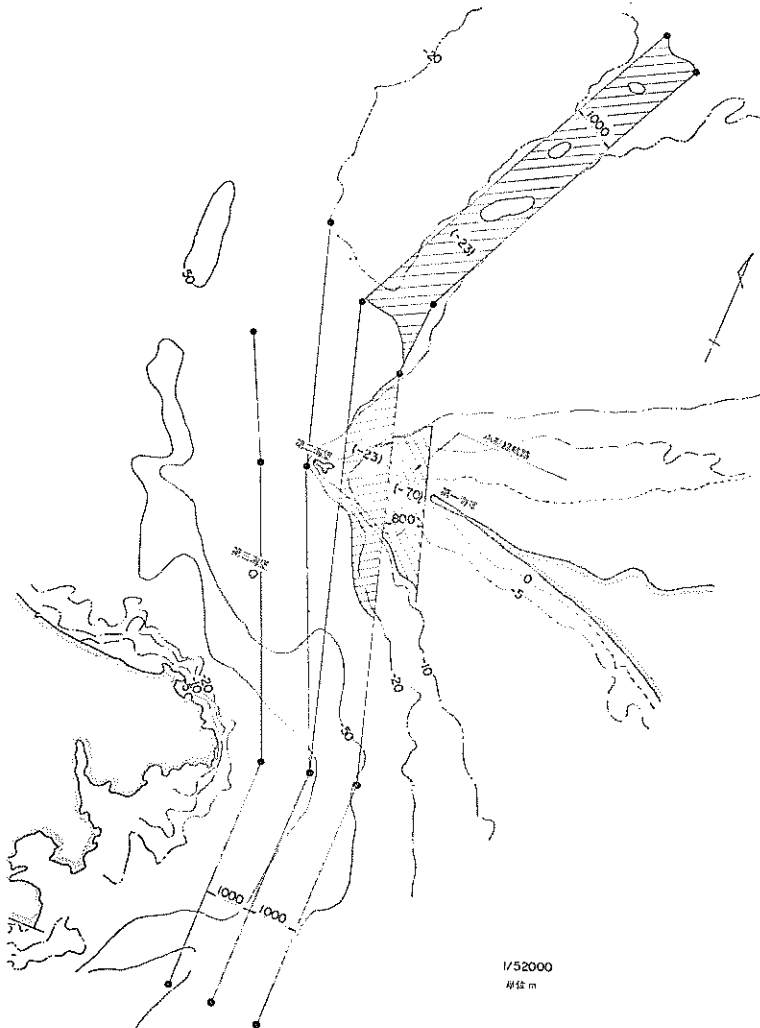


図-8 湾口航路計画図

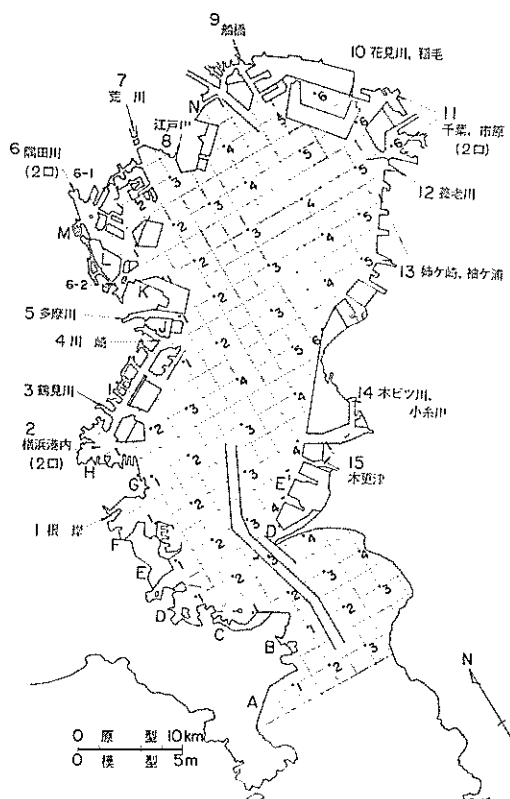


図-9 汚濁投入点および採水位置

(4) 染料投入位置および汚濁負荷量

模型上の染料投入点は、原形汚濁調査結果から汚濁負荷量 5 t/d 以上の流入量を持つ河川および沿岸工業地帯の代表点 15 を選出し、図-9 に投入位置を示す。

投入各地点の汚濁負荷量は昭和44年経済企画庁の資料に基づき COD 濃度を採用した。この結果、場所によって低濃度ながら放流量の多い地点、また逆に高濃度で流量の少ない地点があり、実験上不都合が生ずる。このため、実験上の汚水投入量 (Q) は全点で等しく 1.0 cc/s とし、各点で所定の負荷量 (Q×c) に合致させるため、濃度 (c) を高めている。この方法では流入量の相似が合致せず、そのため恒流成分への寄与が異なることが予想されるので、別途、汚水流入と同時に同位置で淡水量を与えている。これらの取扱量を表-3 に示す。

5.2 実験ケース

地形および潮汐と組合せた実験ケースを表-4 に示す。

6. 予備実験

6.1 潮 流

潮流実験についての詳細は、東京湾口航路潮流模型実験報告に述べられているので、ここでは要点のみを記述する。

この実験は重力項とともに粘性項が重要な要素であり実験には粘性項を代表させる量としての摩擦抵抗を、前

表-3 汚濁負荷量 (昭和 60 年値) 及び淡水流量

No.	地 名	D 負荷量 t/d	Q _p 流 量 千t/d	C _p 濃 度 ppm	Q _m 模型流量 cc/s	C _m 模型濃度 ppm
1	根 岸	6.77	96	70.5	0.55	19.4
2-1	横 浜 港 内	9.0	438	20.5	2.5	51.2
-2		"	"	"	"	"
3	鶴 見 川	40.3	1130	35.6	6.54	232.8
4	川 崎 川	44.2	372	119.0	2.15	255.8
5	多 摩 川	16.7	153.2	10.9	8.86	96.6
6-1	隅 田 川	93.36	6294	14.8	36.4	538.7
-2		"	"	"	"	"
7	荒 川	50.42	5460	9.2	31.6	290.7
8	江 戸 川	43.15	7994	5.4	46.3	249.8
9	船 橋	12.92	190	68.0	1.10	74.8
10	花見川, 稲毛	23.27	330	70.5	1.90	134.0
11-1	千 葉 原 川	15.60	718	21.7	4.16	90.3
-2		"	"	"	"	"
12	老 ヶ 崎 川	—	980	—	5.67	—
13-1	袖 ヶ 浦 川	18.47	324	54.0	1.87	101.0
-2		"	"	"	"	"
14-1	小 糸 川	13.0	1628	8.0	9.48	75.8
-2		"	"	"	"	"
15	本 郷 津	8.77	*200	43.8	1.16	50.8

注 * 仮定値 $Q_m = Q_p \times 1/2 \times 10^6$ $C_m = C_p$ 負荷量 = $C_m \times Q_m$
但し C_m は汚水量 1 cc/s 放流の場合の濃度, Q_m は別途淡水流量を流す。

東京湾の潮流による物質拡散の水理模型実験

表-4 実験ケース表

実験 No.	沿岸地形	湾口航路	横断道路橋	潮流		汚染		負荷量 (t/d)
				大大潮	大潮	大潮	小潮	
10	現況	無し	無し			○	○	44年値 (662)
13	60年 C	有り	無し	○	○	○	○	60年値 (405)
14	現況	無し	無し	—	◎	○	○	"
15	60年 C	無し	無し	—	○	○	○	"
16	現況	有り	無し	—	○	○	○	"
18	60年 D	有り	無し	—	—	○	—	"
19	"	無し	無し	—	—	○	—	"
103	60年 C	有り	B案	○	○	○	○	"
104	現況	無し	B案	○	○	○	○	"
105	"	無し	A案	—	—	○	—	"
106	60年 D	有り	B案	—	—	○	—	"

- 注 (1) No. 11, 12, 17 は欠番
 (2) 60年C案は盤州前面 -15m に浚渫
 (3) 負荷量44年値, 60年値とも投入点は同じ
 (4) ◎…前回実験のデータ

述べた粗度パイプで与えている。この方法も理論的に要求される数値を満足し得たか否か、原型の資料が無いため確認できなかった。そこで最終的には原型の潮流、潮汐記録によって、流速、流向、潮汐の振幅、位相の変化などについて、原型と相似になるよう粗度抵抗を試行錯誤で調整している。この結果当初見込みで付設した人工粗度のうち、外海部は全部撤去し、湾内部も約 1/3 を撤去した結果、潮流現象の再現がほぼ確認された。なおこの再現に要する時間は、模型潮汐発生後約 3~4 時間後である。この時間は潮汐振幅、水の粘性(水温)によって異なると考えられ、一律に決定できないが、この実験では各潮汐ともに 3 時間後とし、計測を行なっている。

実験水位は湾中央部横浜における平均水位(DL+1.71 cm)を採用し静水面とした。

6.2 拡散

拡散現象の相似性の検討は、流れの相似性は勿論のこと、乱れのスペクトル形状の再現が最も望ましいことであるが、模型上の計測が困難なため、この実験では染料の拡がりの時間的変化から(相対拡散)拡散係数(K)を求め、原型値と対比検討を試みた。原型のK値については、局部的水域で染料を用いて測定されており、それによれば $L^{5/4} \sim L^1$ に従う傾向がみられ、外海におけるコロモゴルフの $L^{1/3}$ 則とはやや異なっている⁸⁾。

模型上の海域で瞬間的に放出した染料雲(パッチ)はパッチの径以下のスケールの乱れによって拡散し、より大きなスケールの乱れによって流動させられると考えられ、時間経過につれて拡大したパッチのスケールと拡散係数(K)との関係は(9)式で示される。

$$K \doteq \frac{r_i^2 - r_{i-1}^2}{4(t_i - t_{i-1})} = \frac{s_i - s_{i-1}}{4\pi(t_i - t_{i-1})} \quad (9)$$

(9)式は拡ったパッチの面積を等値な円面積に換算したもので、この場合染料パッチ外縁での濃度は常に等しいと仮定している。ここで r_i, r_{i-1} はそれぞれ時刻 t_i, t_{i-1} における換算円半径であり、 s_i, s_{i-1} はそのパッチ

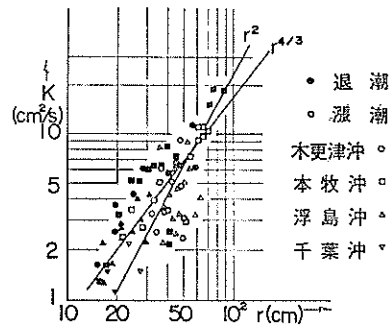


図-10 模型上の拡散係数

チ面積である⁹⁾。

図-10は模型内代表水域で染料を投入し、(9)式から K 値を算出し、染料パッチの相当半径 r との関係を示したものである。

図によれば、水域および潮流（漲潮、退潮）によって拡散の傾向はやや異なるが、全般的傾向として、流速の小さな水域（千葉沖）では r の範囲は狭少で且つ、その傾向も2乗に近い。しかし流速が比較的速い水域（本牧沖、木更津沖）では理論的な $4/3$ 乗則に合致する傾向があり、 r が大きくなるに比例して $4/3$ 乗則が成立する傾向がみられる。 r の小さな領域における K 値の傾向は他の実験¹⁰⁾においても同様であり、模型縮尺、模型歪などの影響によるものと考えられ、流れの中の乱れの構造が原型と異なった結果であろうと推察される。

なお海域の拡散係数は一般に(10)式で表現される。

$$K = \alpha L^3 \quad (10)$$

(10)式の比例係数 α は実測例によれば $0.01 < \alpha < 0.09$ であり、海域の地形、水理、気象などの条件によって異なる性質がある¹¹⁾。ここで、図-10の実験も $K \propto L^3$ に叶うものとして(10)式の α を求めると $\alpha \approx 0.035$ となり、外海領域の $\alpha = 0.01$ に比較してやや過大と思われるが、模型沿岸浅海域における人工粗度パイプの効果であろう。また図-10から求まる K 値(1.5~10 cm²/s)を原型値に換算すれば、 $3 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5$ (cm²/s)となり、一般に言われている原型オーダーとほぼ合致している。

7. 実験結果

7.1 潮 流

実験結果の潮流は総て原型流速値に換算して表示し(kt)分布状況は湾口部で最大値を示す時間帯の漲潮流および退潮流を図示した。

(1) 実験 No. 14 (現況地形)

この実験ケースの潮流実験は既でに実施されており、この実験では実施していないが、他ケースとの比較の必要上、前実験を再記する。(港研報告, Vol. 12, No. 1)

(i) 漲潮流 (図-11-1~2)

湾口の富津、観音崎付近の地形の凹部では主流の転流前すでに湾内へ流入がはじまり、特に富津岬の湾外域の沿岸水の流入が著しい。その後主航路筋の大水深域も一様に漲潮流となるにつれて、湾内各水域も一様に漲潮流となる。漲潮最盛期の流れは総体的に水深の大きな航路筋に集中する傾向にあり、第2~第3海堡付近の流速は大大潮時約3.5 kt、大潮時約1.4 ktとなり潮差に比例

する。第1~第2海堡間の浅海部は第2海堡よりの流速が速く、とくに漲潮初期から最盛期直前の時間帯で著しく、最盛期以後は第2~第3海堡よりの航路筋が流速大きくなる。

湾口部を通過した後の流れは湾内一様に拡がる様相があり、中の州上を速い流れが通過する。湾内流速分布は図-11に見られる様に湾への侵入距離に反比例して流速低下し1.0 kt以下となる。湾中央の川崎—盤州を結ぶ線以北湾奥部の流況は図-11の各図に見られるように東京港および千葉県側に偏向する2系統の流れがあり、それらの流れは湾奥船橋前面で合流する傾向がある。

これらの流況は、流速の相違はあるが、各潮汐（大大潮、大潮、小潮）とも共通した傾向であり、流速の一般的傾向として、湾奥部の流れは、湾口部流速の約1/10程度となっており、特に小潮時には微弱となって、模型上ではほとんど流動していない様相を呈する。

(ii) 退潮流 (図-11-3~4)

退潮流は、漲潮時反流域となっている富津前面水域および観音崎から横須賀にかけての沿岸水域からはじまり、湾内航路筋が一様に退潮流となる頃には、かなり速い流速で流出している。退潮最盛期には湾内水は一様に湾口に向かって流出する様相を示し、特に水深の大きな航路筋に集中するため沿岸域にくらべ、航路筋の流速が速い。湾奥部の退潮流は河川流出の影響を受け、東京港前面では湾中央部から千葉県盤州に向かって圧流する様相をみせており、湾奥船橋付近からの退潮流は千葉港よりに廻流する傾向はあるが、ほとんど真直に湾奥に流れる。

川崎—盤州以南の流況は一様に湾口に向かって流出する傾向にあり、その流速は湾口に近づくに従って増速し、漲潮流と全く逆な様相となる。湾口部の流速は最盛期大大潮約4.0 kt、大潮時約2.0 ktを示し、漲潮流より若干増速しており、河川流入量の効果を表している。

局所的な著しい流況は図-11-3~4に見られるように湾口外の観音崎~金田湾にかけて広大な反流域が出現し、反流と順流の境界は明瞭に観察され、久里浜港前面の流速が速い。この反流域は水深変化が著しい場所であり、模型上でも水平渦流、湧昇流、沈降流など複雑な流況を示している。

(iii) 流跡および恒流 (図-11-5~6)

図-11-5~6は大潮時一潮流時間内に流動したフロートの軌跡であり、図中の矢印が流動方向を示している。この図から湾内各水域の潮流の動きが把握され、大潮時湾口部で8~9 km、湾中央で約4.0 km、湾奥で1.0~

東京湾の潮流による物質拡散の水理模型実験

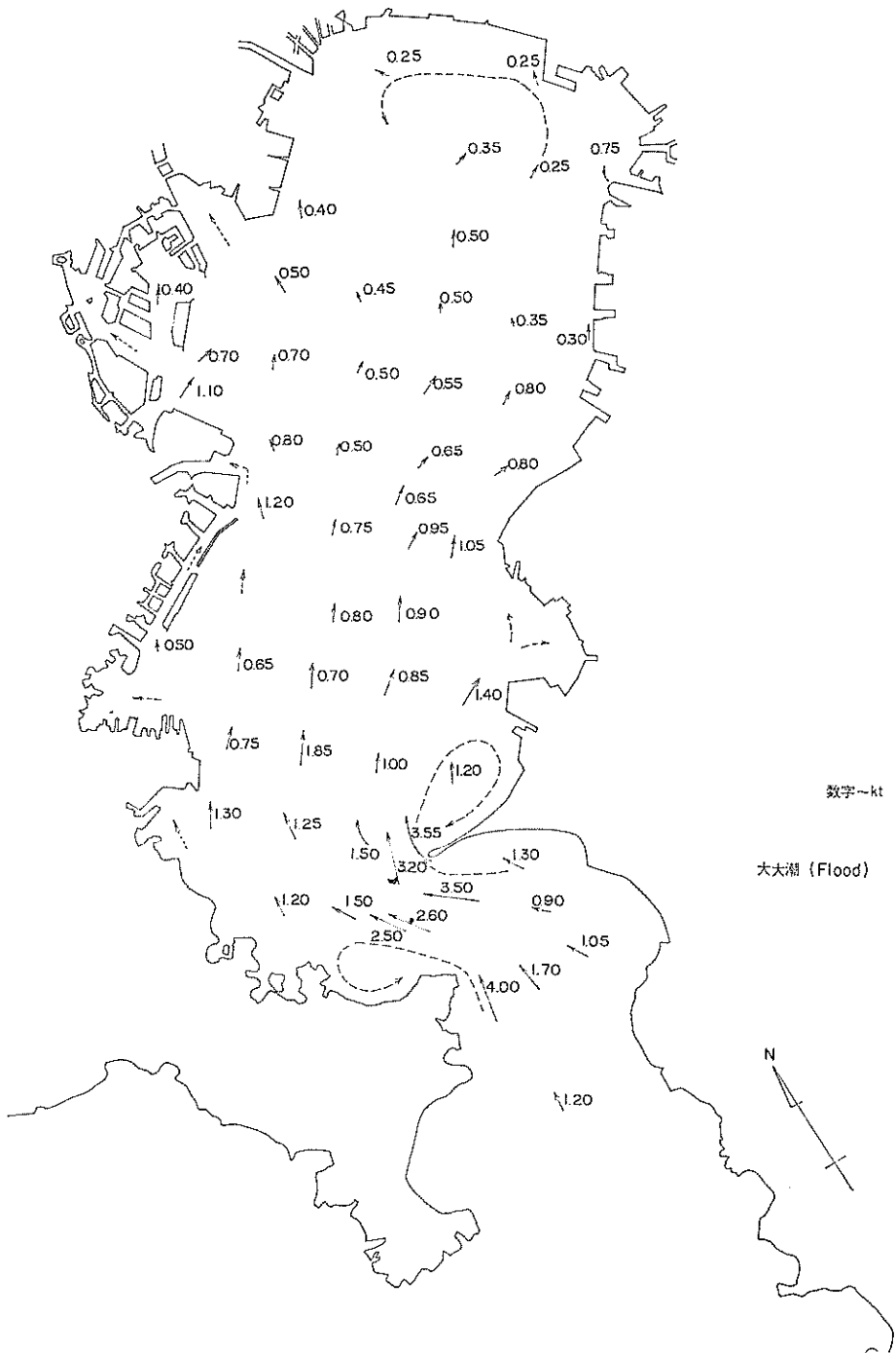


図-11-1 潮流分布図 (現況, 大潮, 漲潮)

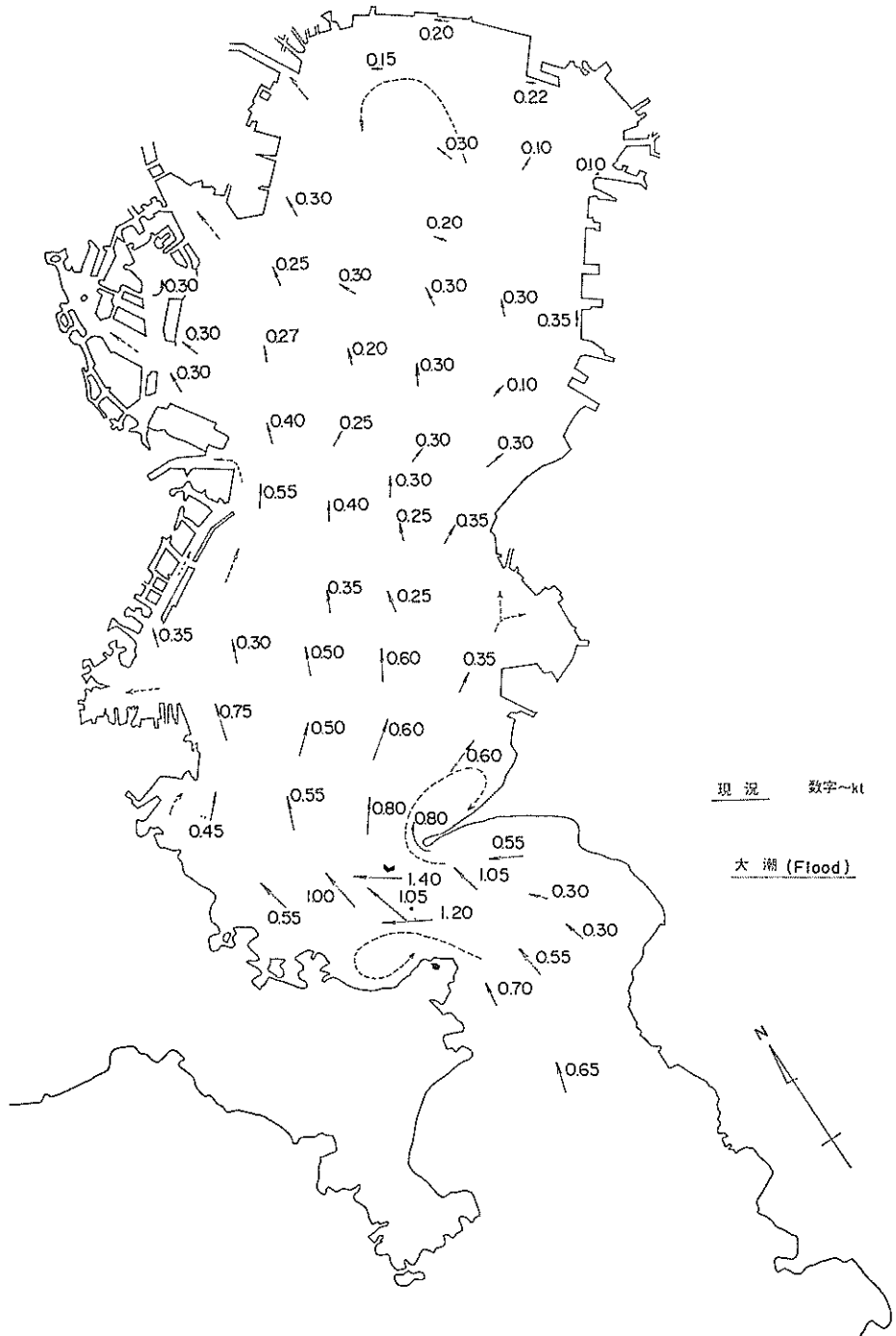


図-11-2 潮流分布図 (現況, 大潮, 漲潮)

東京湾の潮流による物質拡散の水理模型実験

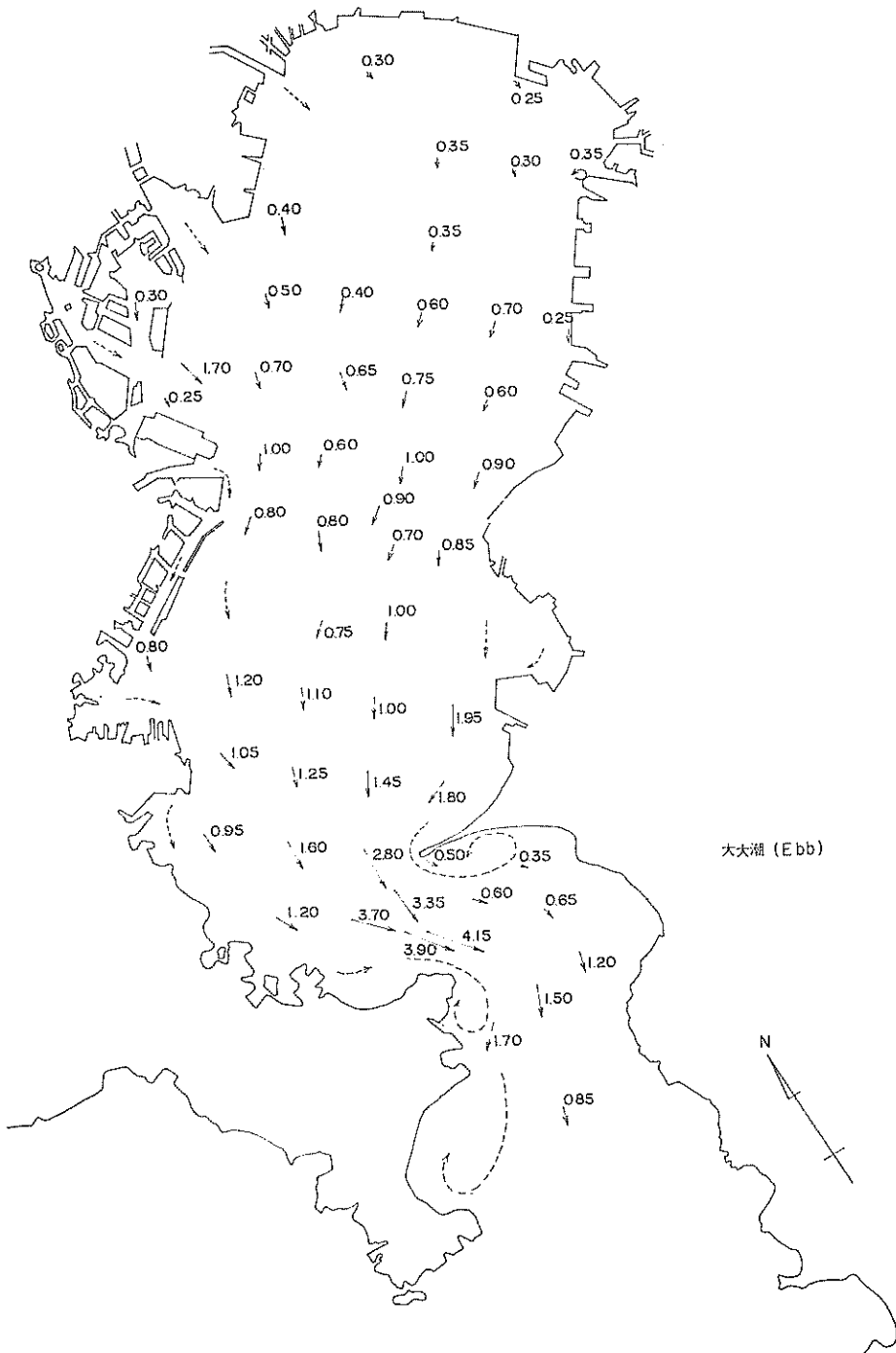


図-11-3 潮流分布図 (現況, 大大潮, 退潮)

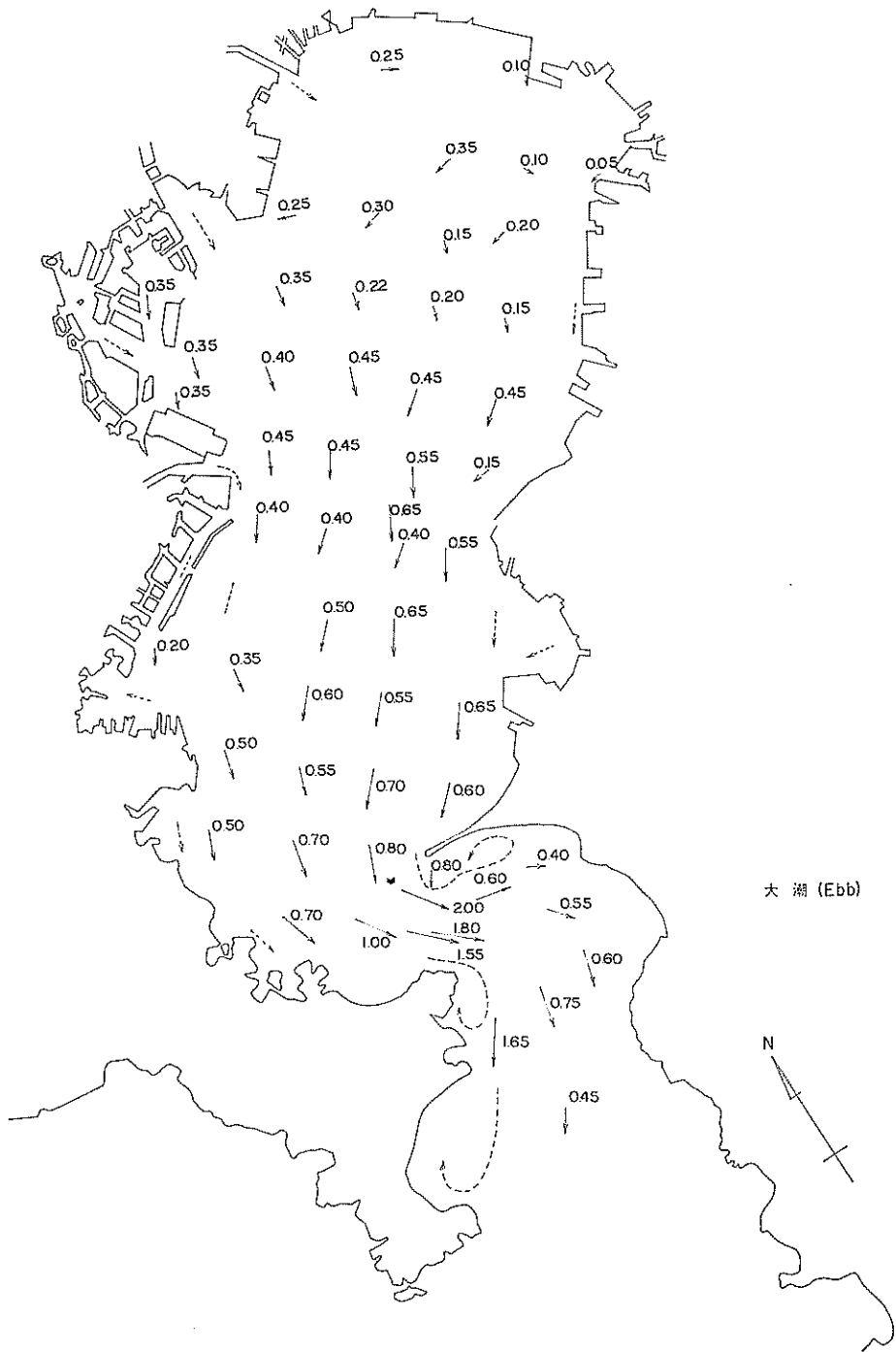


图-11-4 潮流分布图 (现况, 大潮, 退潮)

東京湾の潮流による物質拡散の水理模型実験

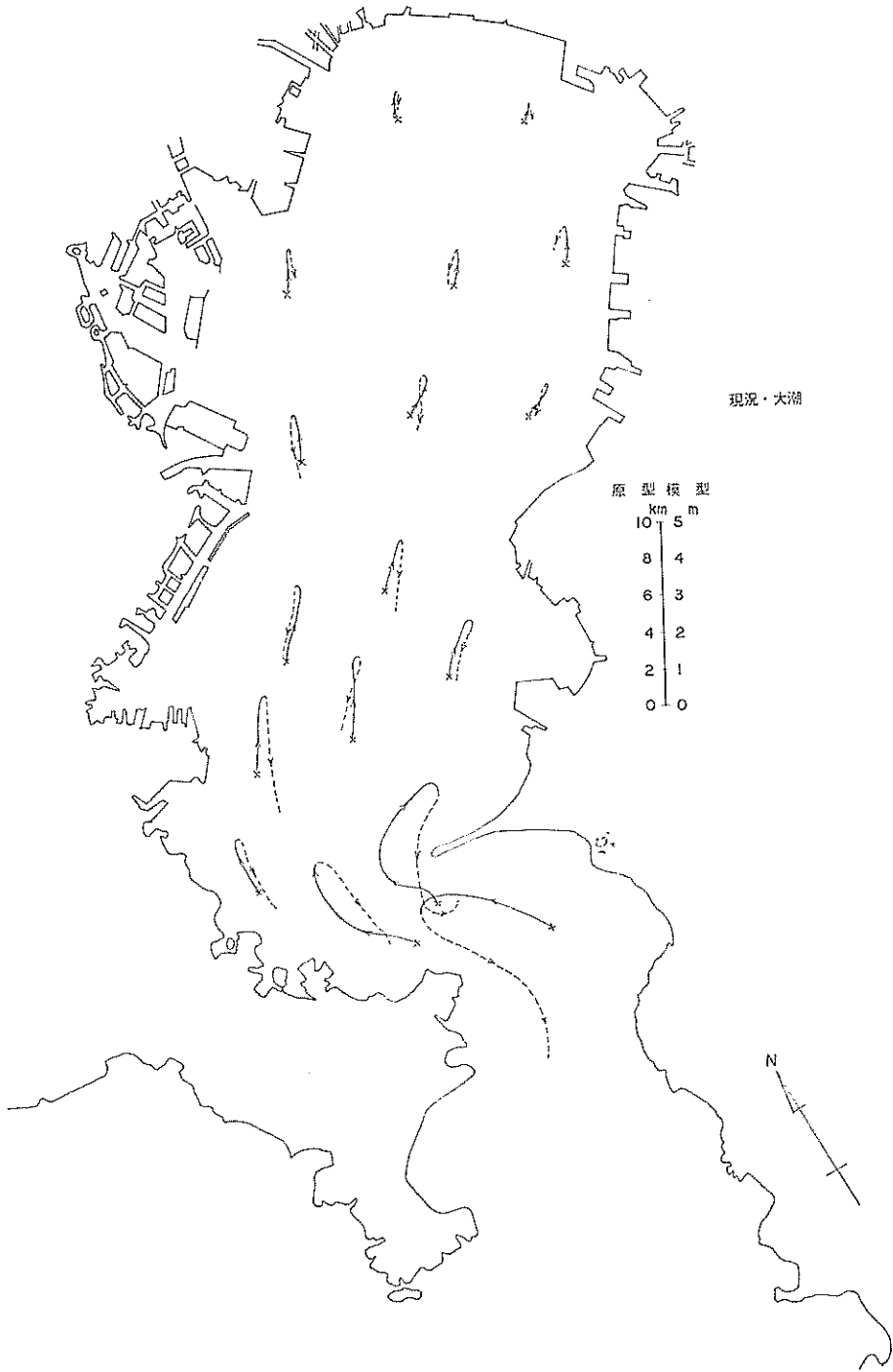


図-11-5 流跡図 (現況, 大潮)

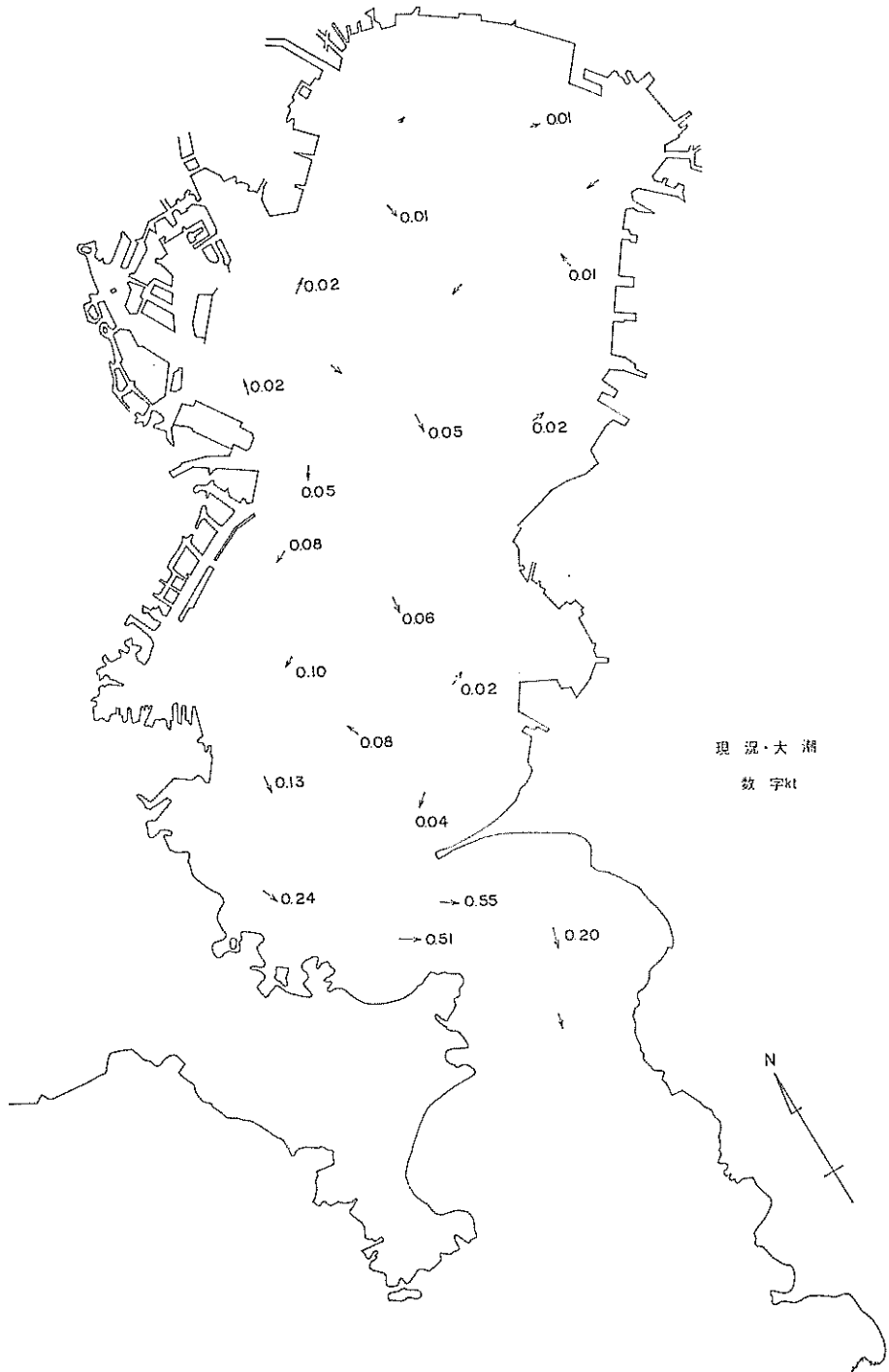


图-11-6 恒流图 (現況, 大潮)

1.5 km 程度と推定される。この結果湾奥部の水の流動がきわめて小さいことが理解できる。

さらに図-11-5の流跡の始点と終点（一潮流時）が一致していないのは、その場所における恒流の作用を示すものと判断し、この恒流を図-11-6に示す。図から湾内恒流は大別して、川崎—盤州を結ぶ線以北の湾奥部と以南湾口にかけての水域の2系統が存在するものと推察される。前者は湾奥水域で環流する様相が強く、この中には東京港前面水域で時計方向に環流する流れと、千葉県姉ヶ崎前面の沿岸寄りを北上する2つの流れがあり、後者は河川流の効果で流出する（南下）傾向にあり、京浜側沿岸の南下流と、一部湾奥から千葉県側に偏位する南下傾向の流れがあり、中の州上では環流する様相が見られる。また木更津港前面には富津沿岸から北上する恒流の分流が見られる。

これら恒流の流速は図に示すように、湾奥水域は微弱にして0.1 kt 以下であるが、湾口部では河川流の効果によって0.5 kt 程度の恒流としては大きな流速がある。

(2) 実験 No. 16 (現況地形, 湾口航路開削)

大潮時の模型潮流分布を図-12-1~2の各図に潮時別に示す。湾口航路開削によって、湾内潮流は現況に較べ総体的に若干増速傾向を示し、交流量の増加を示している。実験から得られた主たる特徴を列記すれば

(i) 漲潮流

(a) 新航路の法線は、外海から東京湾に向けて流入してくる漲潮流の流線と一致しているため、漲潮初期に新航路を通過する流量が著しく、最盛期の流速は1.5 kt ~2.0 kt に達する。

(b) 最盛期から以後の漲潮流は依然として旧航路を通過しており、湾内への交流量の主体は水深の大きな旧航路筋にあるが、新航路開削によって、横須賀側航路筋の流速は若干低下する。

(c) 湾口を通過して湾内に流入した潮流は、現況と相似な流況を示すが、新航路開削によって千葉県側富津、木更津前面海域の増速が目立っている。

(d) 新航路開削と同時に実施した第3海堡の撤去により、従来同海堡から発生した渦流は消失するが、新たに第2海堡から発する後流が顕著になる。この海堡から発生する後流は流速の変化につれて、その流向を変動させているが、影響範囲は約1.5 km 程度である。

(ii) 退潮流

(a) 湾奥から湾口に接近するにつれて増速する傾向は現況と同様であるが、新航路開削によって、退潮初期

に新航路を通過する流れが強くなり、退潮最盛期から以後の時間帯は京浜側沿岸の旧航路筋を流下する流れが強まる。

(b) 横須賀側旧航路筋の流速は新航路開削によって、漲潮時同様やや流速低下の傾向は見られるが、湾内交流量の主体は依然として旧航路筋を通過する。

(c) 湾内全般的な退潮流速は現況とほぼ同値であるが、湾口航路付近千葉県側の流速が若干増速する。

(d) 第2海堡から発生する後流は、漲潮時同様に現況より目立ってくるが、漲潮時に較べ後流帯の時間的変動は少ない。

(3) 実験 No. 15 (埋立60年C案地形)

埋立地形は図-6に示したように、千葉県盤州付近の埋立にともない、埋立地前面浅海部を-15 m に浚渫したケースである。実験から得られた湾内潮流分布を図-13-1~2の各図に示す。

湾内全般的な流況は現況と同様であり、沿岸埋立地による影響は見当らない。むしろ盤州前面の浚渫効果が現れたパターンとなっており、漲潮時には現況(実験 No. 14)に較べ総体的に増速傾向があり、退潮時には盤州埋立地以北の湾奥で減速している。局所的な流況変化の第1点は、現況時盤州前面の浅海を廻流して湾奥の姉ヶ崎側に流動した潮流が、浅海部浚渫により、換言すれば流路抵抗の削減により、スムーズに流動する傾向となる。第2点は羽田空港埋立地の拡大により、東京港への潮流の流入がやや制御される様相がみられ、特に港内の埋立地に囲まれた運河筋の流動が減少している。

(4) 実験 No. 13 (60年C案地形, 湾口航路開削)

前実験 No. 15 に湾口航路を開削したケースであり、湾内最盛期の潮流分布を潮位、潮流別に図-14-1~4の各図に示す。

湾口航路開削と盤州前面浚渫によって千葉県側の潮流の流線は一層整調されており、現況時に較べ盤州前面の流れがスムーズとなっている。この様相は図-12-1、図-13-1の各図と対比すれば明瞭である。流速に関しては実験 No. 16の現況地形に比して湾口部近傍で流速がやや小さいが、湾奥部では増速を示している。実験 No. 15との比較においても同様な傾向がみられる。

退潮時の流速分布は図-14-3~4に示したが、流れのパターンは漲潮時と全く反対に、湾奥から真直に湾口に向って流出する様相となり、新航路を通過して湾外に流出する傾向が強くなっている。流速的には漲潮流と同じ傾向で、前実験ケースより、湾奥部で増速し、湾口近傍

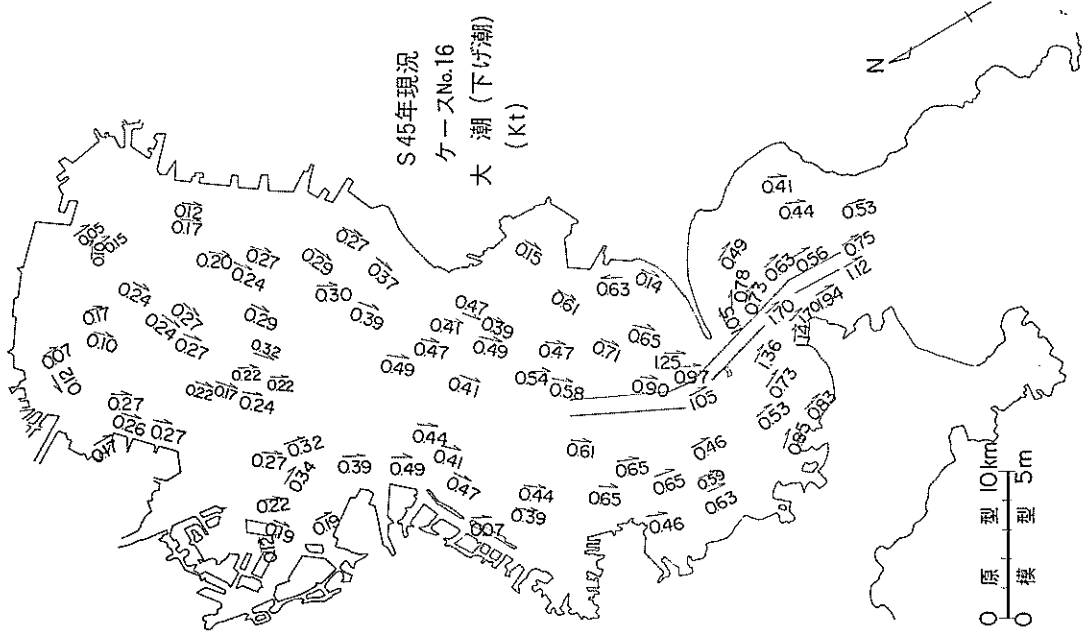


図-12-2 潮流分布図 (現況, 湾口航路, 大潮, 下げ潮)

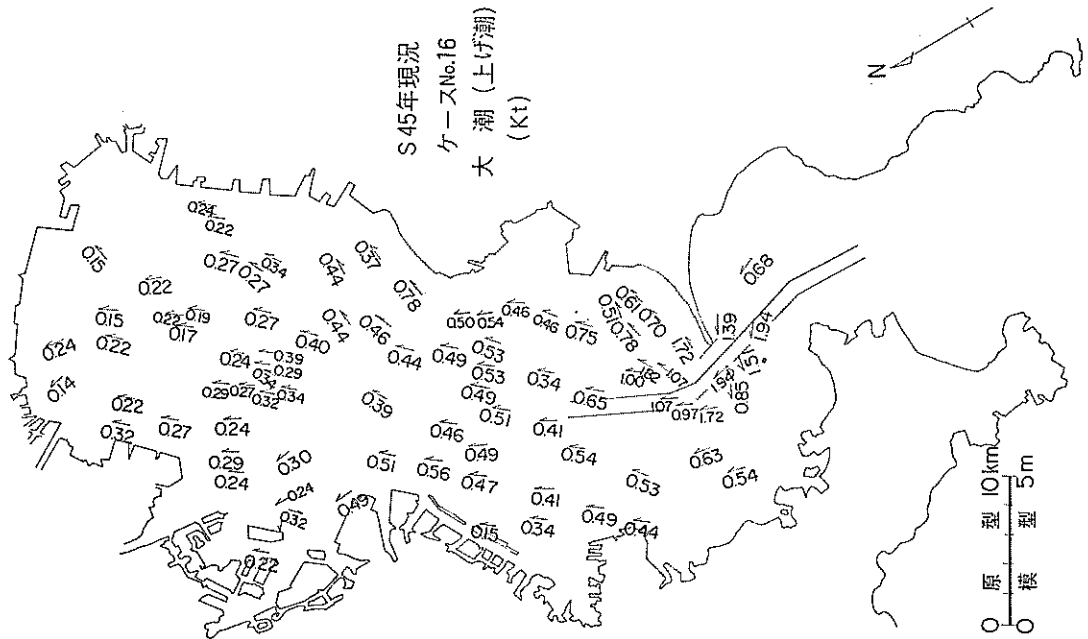


図-12-1 潮流分布図 (現況, 湾口航路, 大潮, 上げ潮)

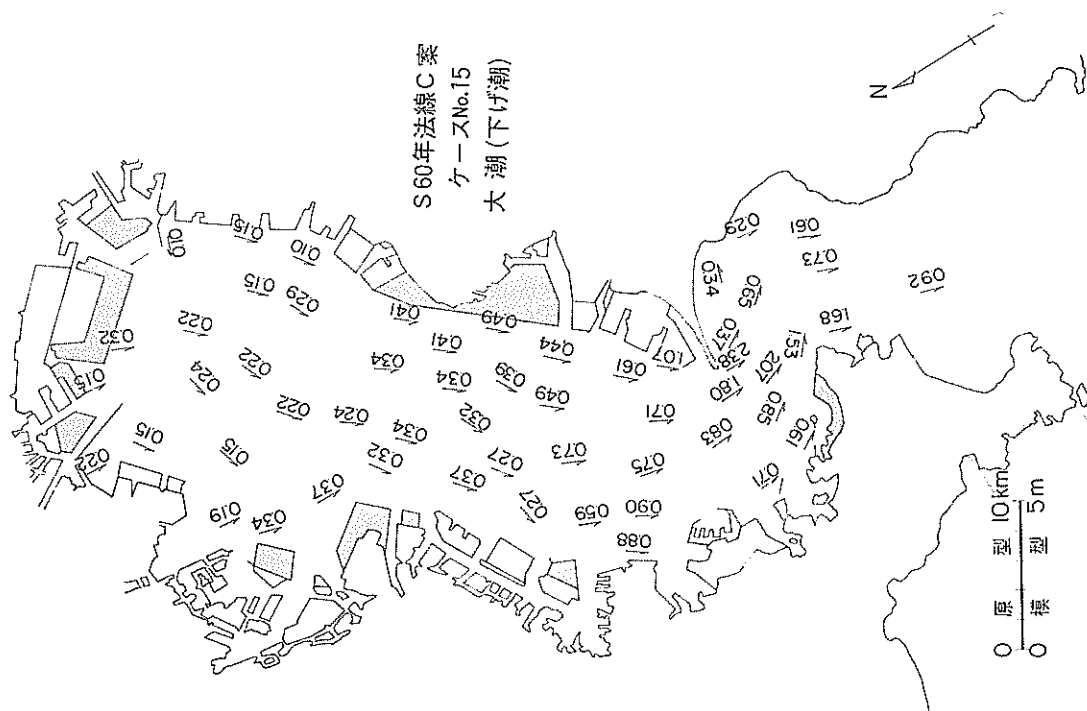


図-13-2 潮流分布図(60年C案, 大潮, 下げ潮)

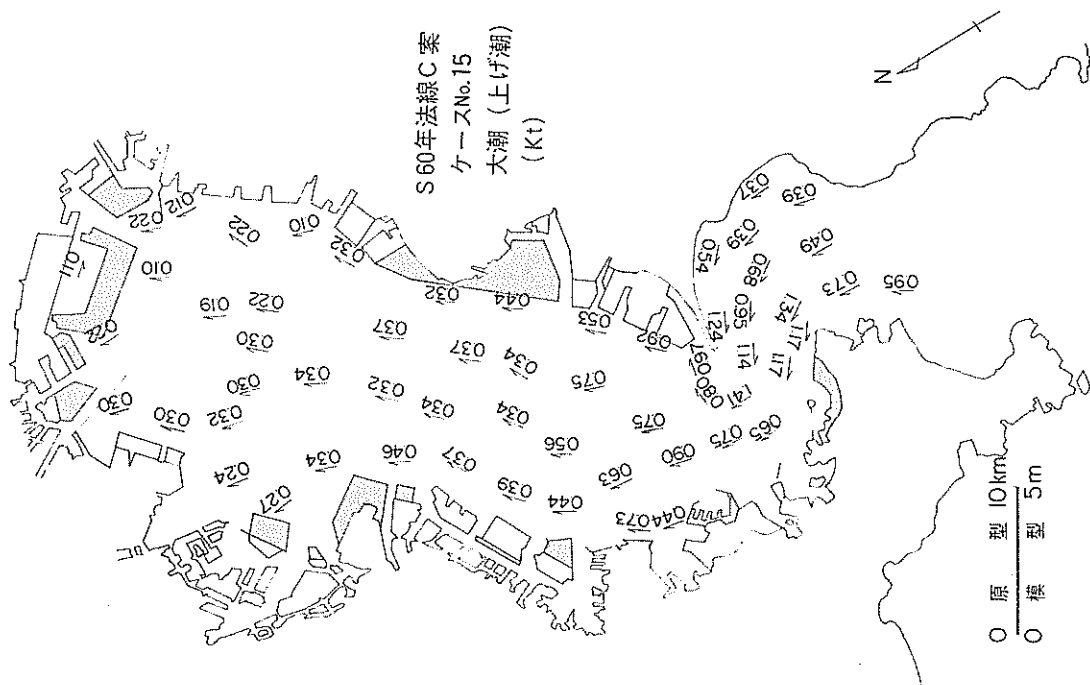


図-13-1 潮流分布図(60年C案, 大潮, 上げ潮)

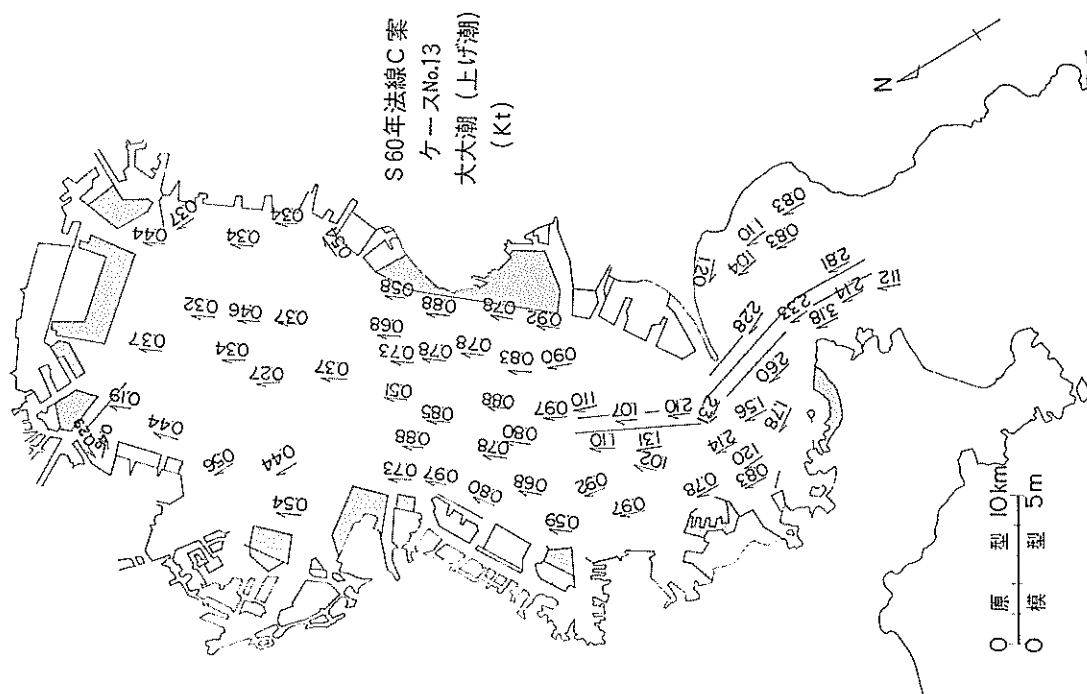


図-14-2 潮流分布図 (60年C案, 湾口航路, 大大潮, 上げ潮)

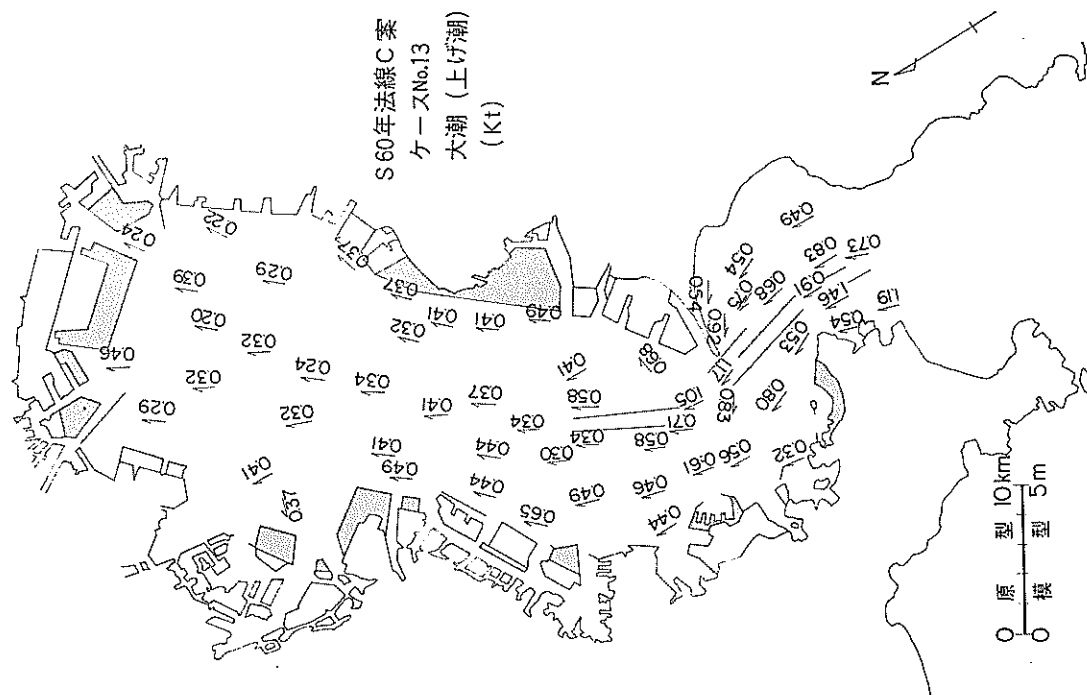


図-14-1 潮流分布図 (60年C案, 湾口航路, 大潮, 上げ潮)

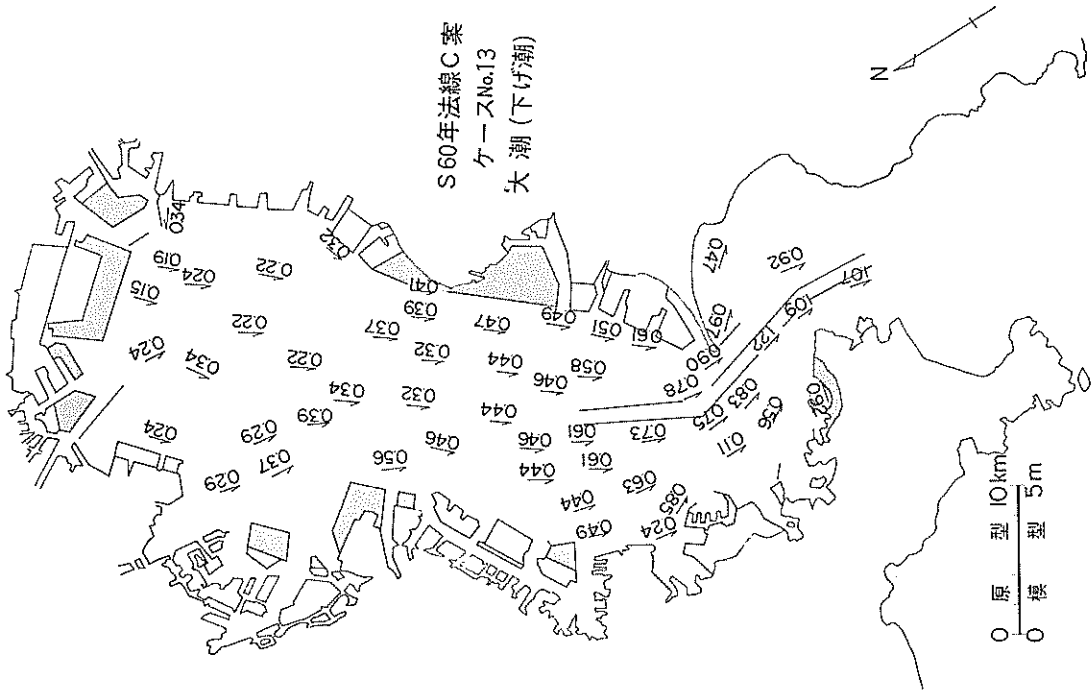


図-14-4 潮流分布図(60年C案, 湾口航路, 大潮, 下げ潮)

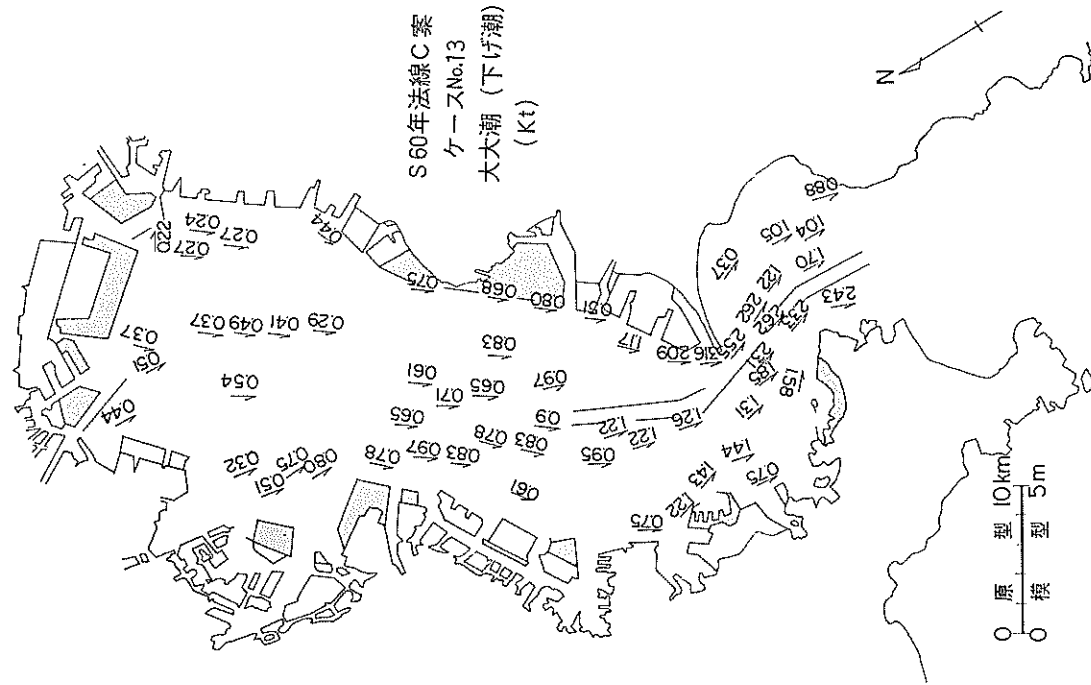


図-14-3 潮流分布図(60年C案, 湾口航路, 大大潮, 下げ潮)

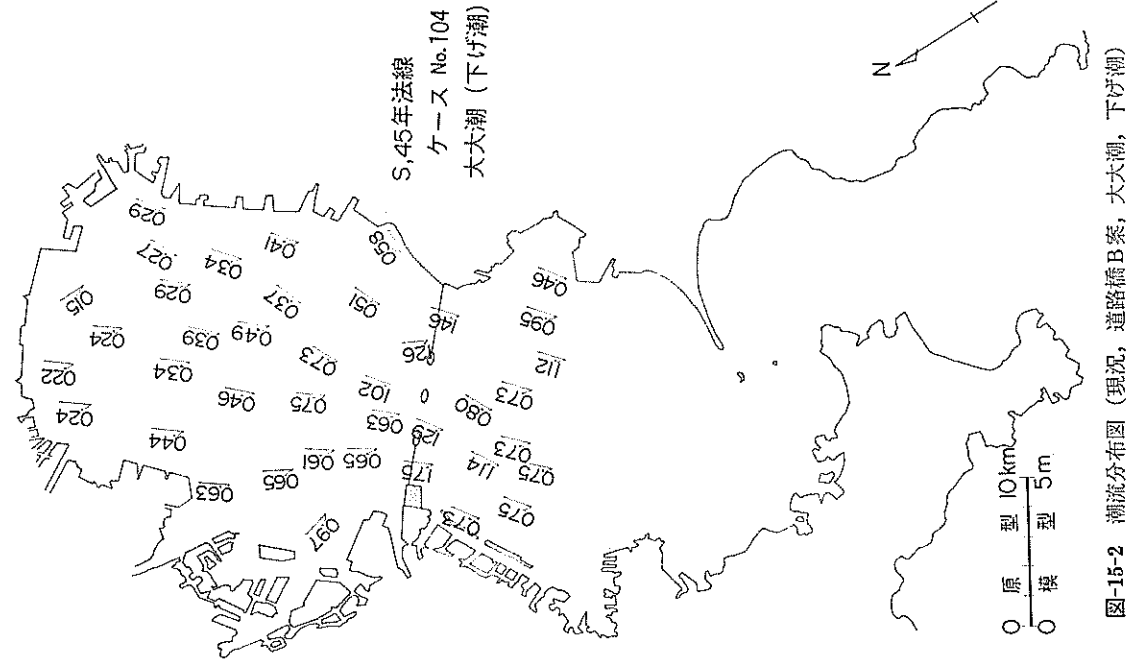


図-15-2 潮流分布図 (現況, 道路橋B案, 大大潮, 下げ潮)

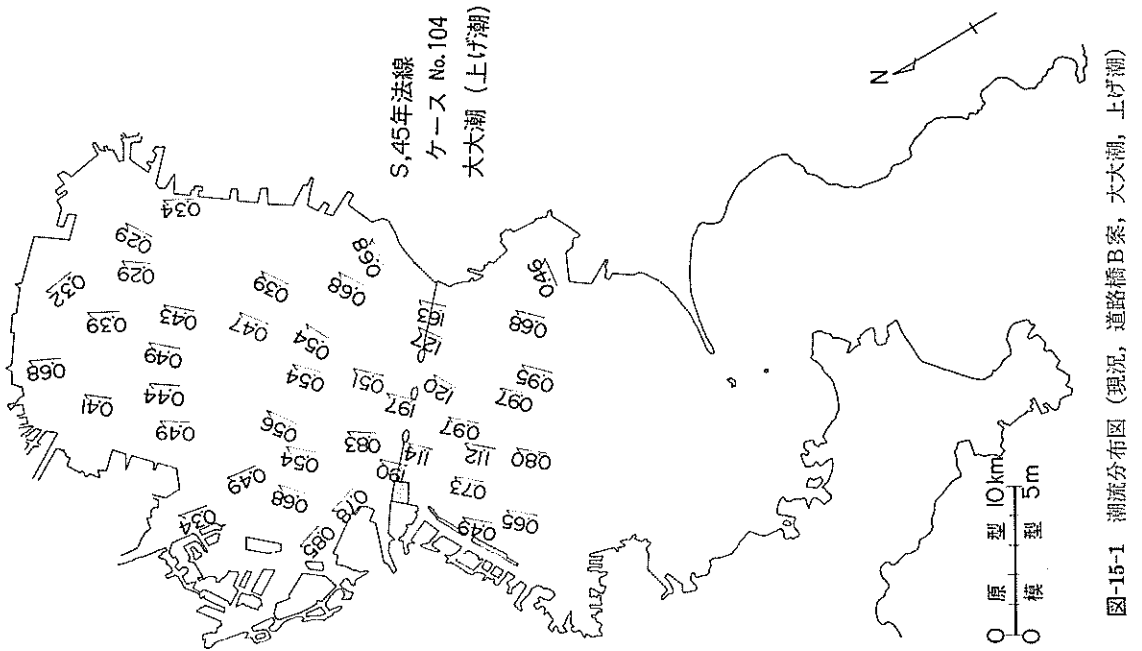


図-15-1 潮流分布図 (現況, 道路橋B案, 大大潮, 上げ潮)

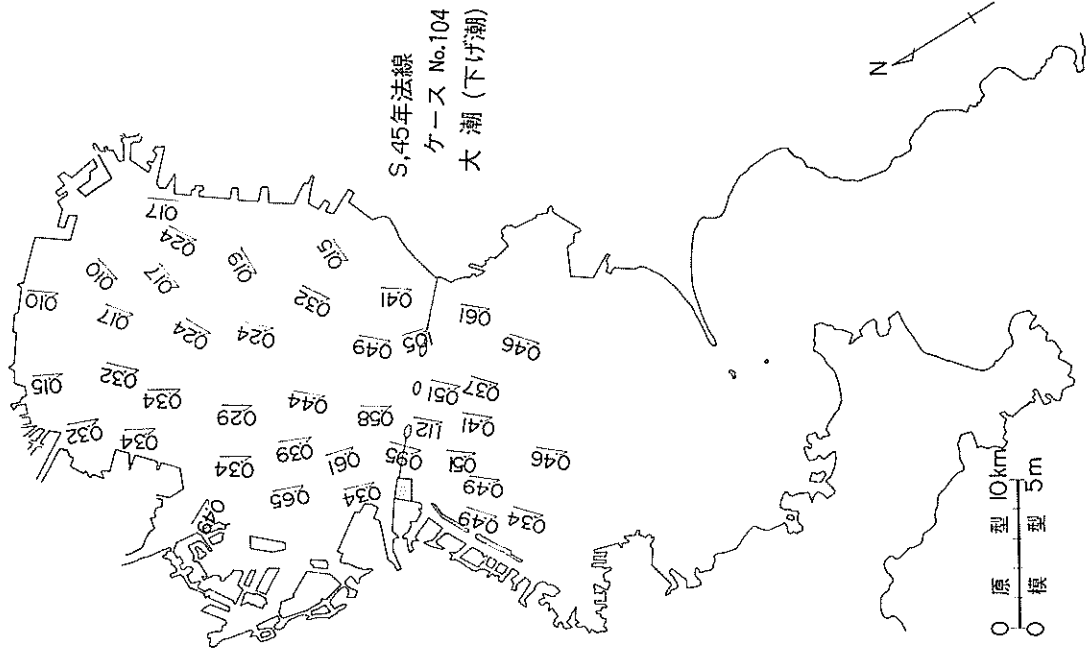


図-15-4 潮流分布図 (現況, 道路橋B案, 大潮, 下げ潮)

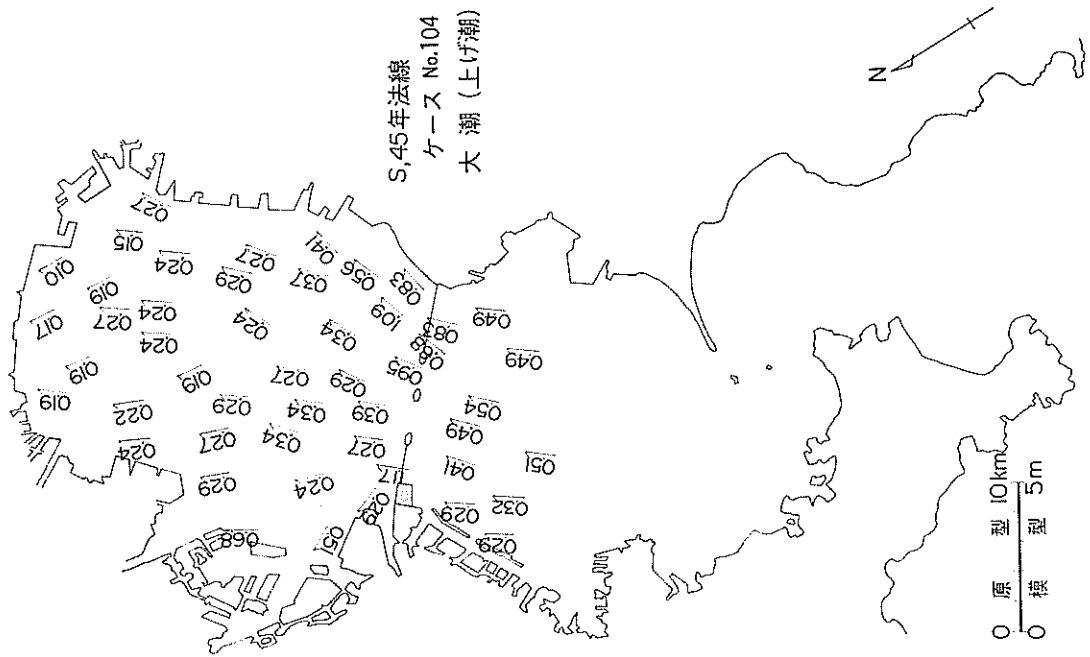


図-15-3 潮流分布図 (現況, 道路橋B案, 大潮, 上げ潮)

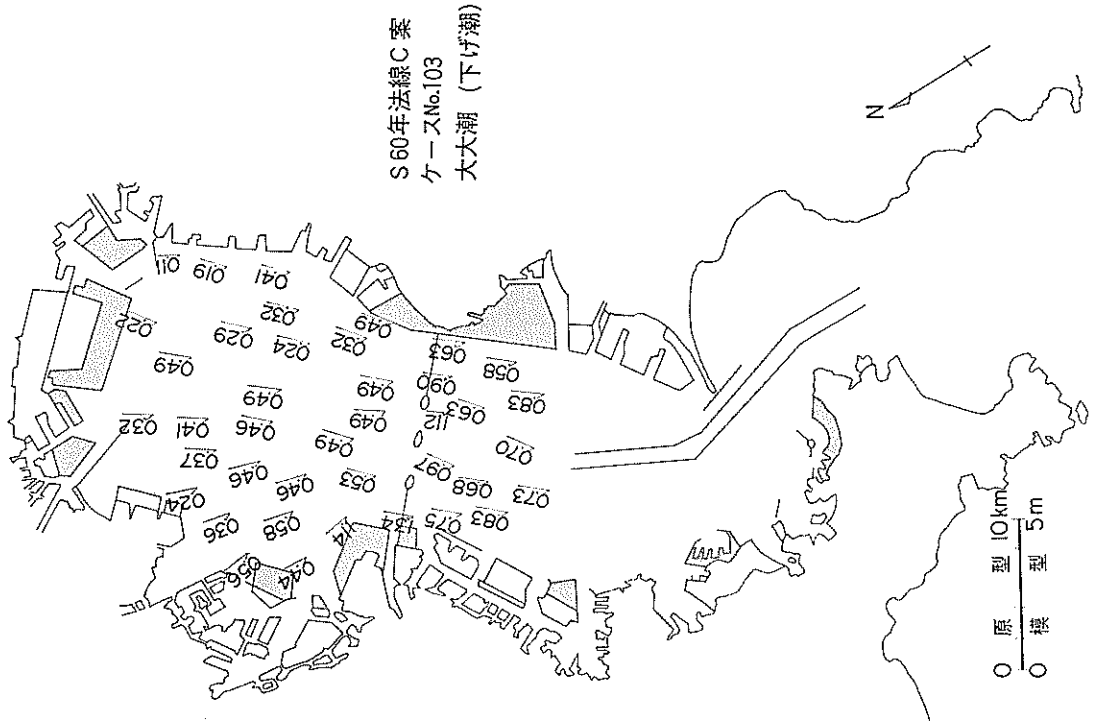


図-16-2 潮流分布図 (60年C案, 湾口航路, 道路橋B案, 大大潮, 下げ潮)

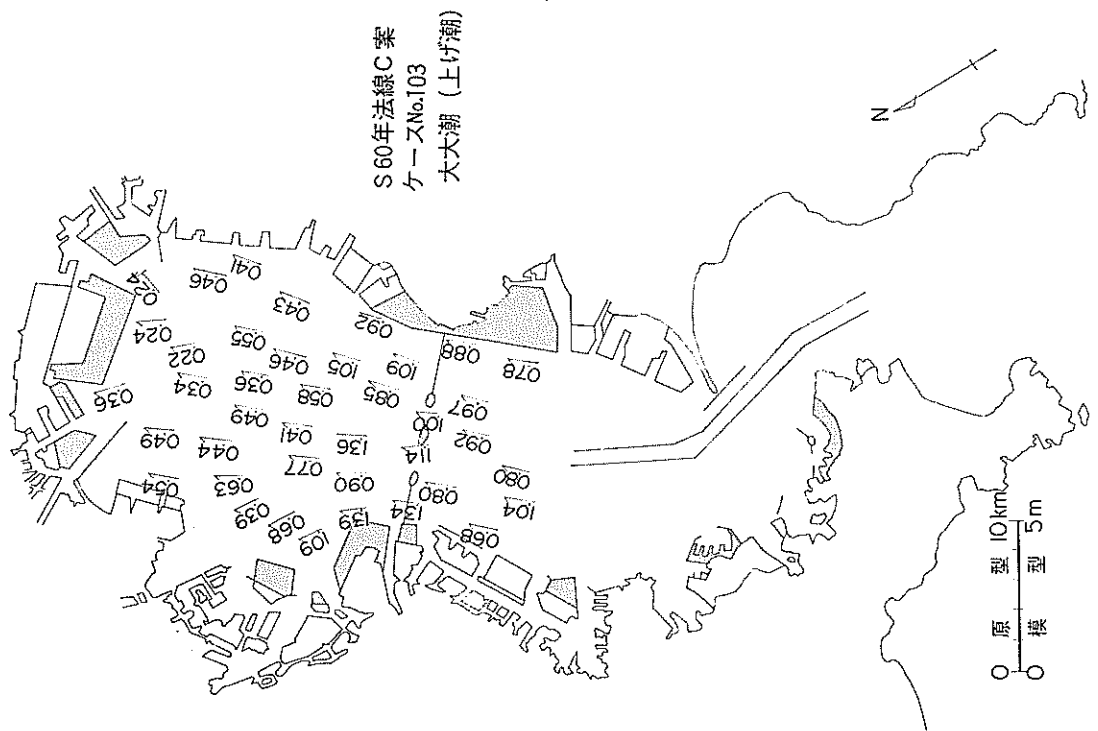


図-16-1 潮流分布図 (60年C案, 湾口航路, 道路橋B案, 大大潮, 上げ潮)

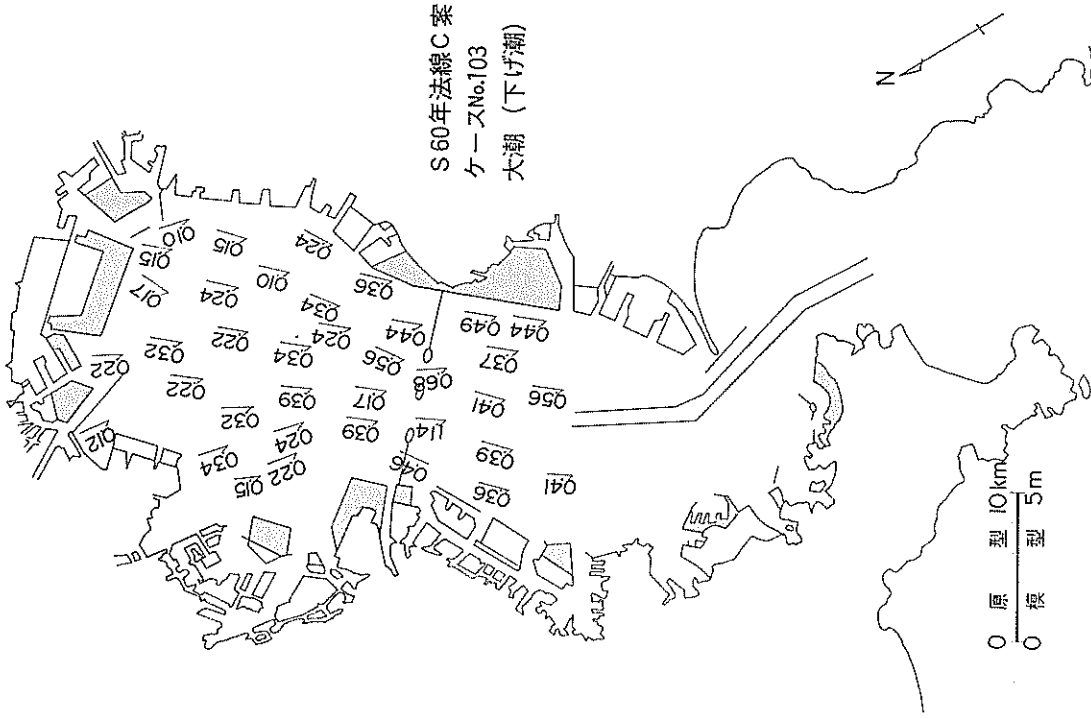


図-16-4 潮流分布図 (60年C案, 湾口航路, 道路橋B案, 大潮, 下げ潮)

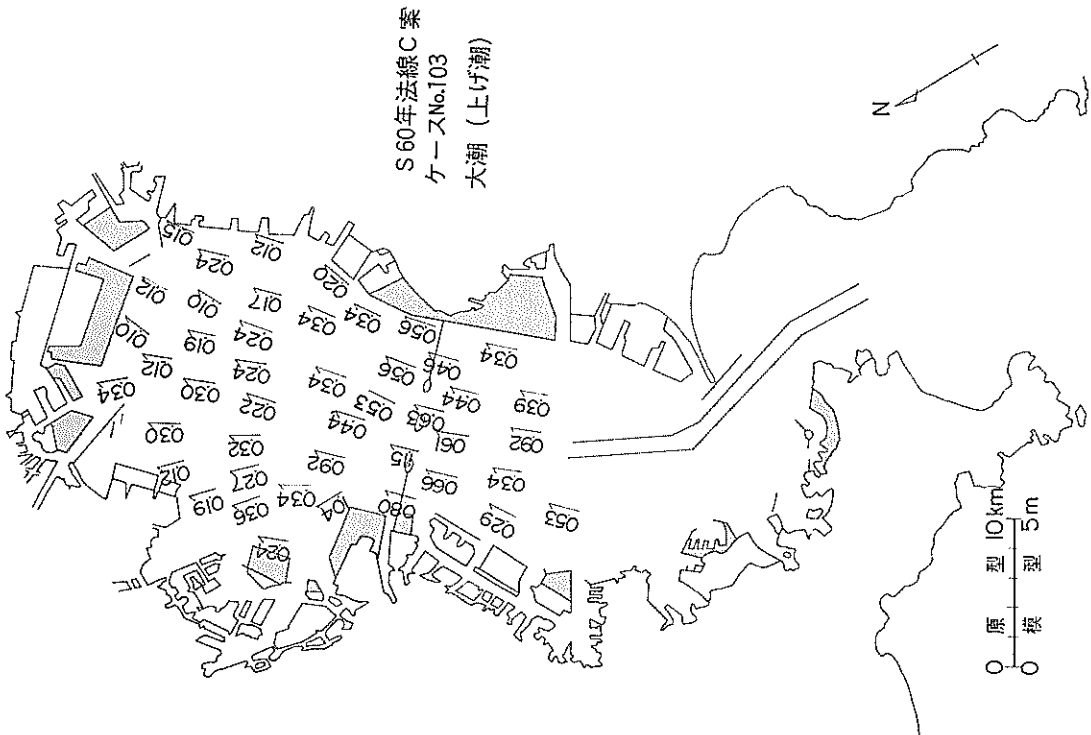


図-16-3 潮流分布図 (60年C案, 湾口航路, 道路橋B案, 大潮, 上げ潮)

で若干流速低下の様相がある。

この増速、減速は盤州前面の浚渫および湾口航路開削によって湾内への交流量の増加と新航路への交流量が増加した結果旧航路筋の減速によるものである。

潮位差の大きい大大潮においては盤州前面浚渫の効果は著しく、この付近水域の流線は殆ど一線となって流入流出を繰返す。

局部的な沿岸流況として顕著な傾向は、前実験 No. 15 で述べたように、羽田空港埋立地の拡大により漲潮流の東京港内への流入が抑制される傾向にあり、図-14-1~2の各図にみられる様に東京港中央防波堤前面の流線が乱れており、羽田空港埋立地の多摩川河口より沿岸に漲潮は最盛期以降に反流域が発生してくる。しかし退潮流時には反流域は消失し著しい変化は生じない。

(5) 実験 No. 104 (現況地形、横断道路橋B案)

現況地形に横断道路橋B案(図-7-2 参照)のみを設置したケースである。

道路橋付近から以北湾奥水域にかけての、模型上の流速分布を、潮位別に図-15-1~4の各図に示してあるが、湾口から道路橋付近までの水域における流況は現況(図-11)に較べ特に著しい相違が見当らない。しかし道路橋のバンク設置によって、この付近水域は当然のことながら局部的に増速となり、湾口部に匹敵する流速が現われる。図-15-1~2は大大潮の漲、退潮流を示しているが、道路橋各バンクにより分割された水路には1.5~2.0ktの速い流速が測定されており、特に川崎側埋立地とバンクの水路筋が速い傾向を示しており、漲潮流の増速が著しい。大潮時についても大大潮時同様に増速傾向は図-15-3~4に見られる通りであり、川崎側の水路に1.2ktの速い流速が出現する。

道路橋を通過して湾内に流入した潮流は現況と相似のパターンを示すが、総体的に若干増速した様相がみられる。

道路橋の各バンクおよび川崎側埋立地付近の局部的な流況に関しては、増速傾向は前述のとおりであるが、潮流のパターンは、流れの最盛期(漲潮、退潮とも)には各バンクの陰部(流れに対し)にいずれも反流域が出現しており、その範囲は大大潮1.0m(2,000m)、大潮0.5m(1,000m)程度に発達する。川崎側埋立地の反流域は速い潮流に制圧されて小規模となり沿岸に限定される。

また各バンクの両端からは漲、退潮流いずれの場合にも渦動が発生しており、渦のスケールは堤内側(漲潮時)が堤外側(退潮時)より大きく約5cm(100m)程度と見

積られる。この渦動は水表面より水底面の渦が大きく且つ、その乱れの強さも大きい様に観察される。なお橋脚からの渦動も微弱ながら発生している様相が認められるけれども、模型橋脚が小さなものであるため明確に判定し難い。

(6) 実験 No. 103〔60年C案地形、横断道路橋B案〕

この地形の潮流は実験 No. 13 で行なわれ図-13に示したとおり、盤州前面浅海部浚渫によって、当水域の潮流の流動がスムーズとなり、湾奥の流速が若干増速する結果が得られている。この実験においてもそれ等の傾向は明らかであり、図-16-1~4の各図にみられるように盤州側の流線は埋立法線に併行して流動している。

道路橋設置に伴う潮流への影響は、実験 No. 104と同様に道路橋バンクにより分割された各水路筋において増速する傾向は明らかであるが、実験 No. 104に較べ盤州側前面水域は浚渫による流水有効断面積の増加によって若干減速する結果とないている。この傾向は大大潮、大潮ともに同様である。

さらに道路橋バンクから発生する渦流および反流域の規模は実験 No. 104と全く同じであるが、千葉県側の水域は盤州側浚渫によって、現況時生じていた水表面の擾乱は消失しスムーズに流動するようになる。川崎側水域では羽田空港埋立地の拡張による潮流への影響は実験 No. 13で述べた様に東京港内への潮流の流入をやや抑制する様相があるけれども、道路橋設置に伴う川崎側埋立地の建設により、この水域の構造物先端法線が整調される形となり、前面海域の潮流は増速する結果、その流線はむしろスムーズとなる様相がみられる。

7.2 各種計画に伴う潮流の変化

既述した各ケースの潮流実験によって、湾内各種計画に伴う潮流変化の傾向は把握できるが、各ケースとの関連を示すため図-17のように湾内をA~Gの7水域に分割した水域の平均流速によって検討を試みる。

(1) 湾口航路開削の効果

航路の有無による湾内潮流の変化を実験 No. 13~16の各ケースから、(i)昭和45年法線(現況地形)、(ii)昭和60年C案法線の地形別による比較を図-18-1~4の各図に示す。図の横軸は図-17の水域を表し、縦軸は水域の平均流速を表している。図-18の各図によれば、前記(i)の場合上げ潮、下げ潮で潮流変化の傾向は異なるが、航路開削(実験 No. 16)によって湾内潮流速は、航路なし(実験 No. 14)に較べ増速傾向にあることが認められるが、下げ潮時 E.F 水域では若干減速している。こ

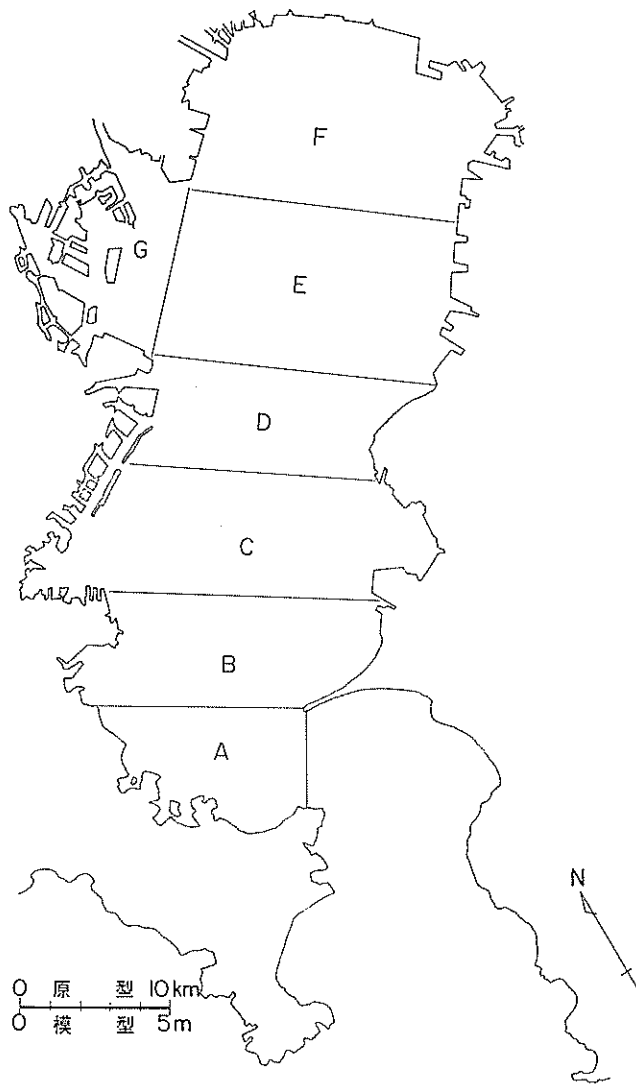


図-17 潮流濃度比較水域図

の要因はおそらくフロートが水域全般に分布せず、流れの遅い水域に集中しているために、これらを単純に平均した結果発生したものと推定される。前記(ii)の60年法線地形の場合も湾内C～F水域で航路開削ケース(実験No. 13)が加速しているが、湾口A、B水域では下げ潮の場合に減速が著しい。この原因は航路開削によって新航路筋を通過して流出する水量が増加すること、特にA水域は地形の影響で渦乱流の発生し易いため、フロートの計測上の誤差が加味された結果である。しかしながら湾口航路開削によって湾内潮流は総体的に若干増速

する傾向は認めることができる。

(2) 埋立地形による変化

図-19-1～4は湾口航路有無のケースについて現況地形(実験No. 14, No. 16)と埋立地形(実験No. 15, No. 13)の潮流を大潮時について潮時別に各水域で比較した図である。このうち1～2図は湾口航路なしの場合であるが、上げ潮と下げ潮で傾向が異なり、下げ潮時湾内の減速が目立っている。3～4図の湾口航路有りの場合は、上げ、下げ潮ともに湾口部で減速し、湾内で増速傾向がみられる。このようなそれぞれ異なった傾向から

埋立地の影響を判断するのは困難であるが、前述(1)湾口航路開削の効果に関する結果とも併せ考察すれば、一般論として、湾内埋立地の建設によって湾内への交流量は減少するため潮流速は若干減速するものと考えられ、他方湾口航路開削によって湾内への交流量は当然増加する筈であるから潮流は増速すると推定される。今回実験

で扱った湾内埋立は東京湾の水面積に対し僅かなものであり、反面湾口航路開削による断面積の増加が、埋立による湾内水面積の減少を上廻った結果、埋立に基く潮流の減速を、航路開削に基く潮流の増速がカバーし、湾内で若干増速傾向が現れたものと推察される。そこで埋立地、航路開削の総合効果を把握するため現況(実験 No.

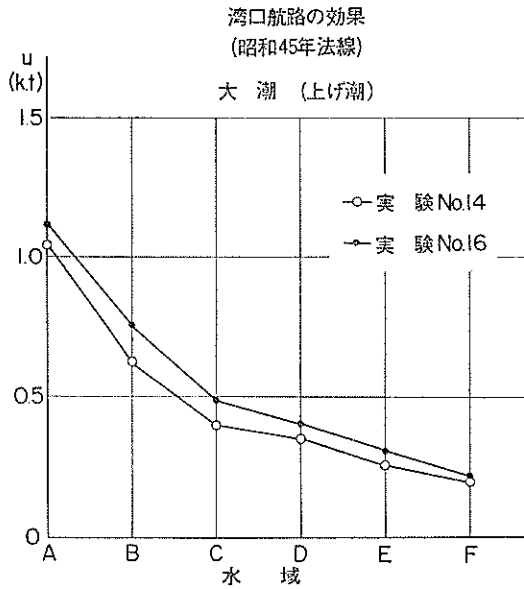


図-18-1 潮流比較図, 湾口航路の効果(大潮, 上げ潮)

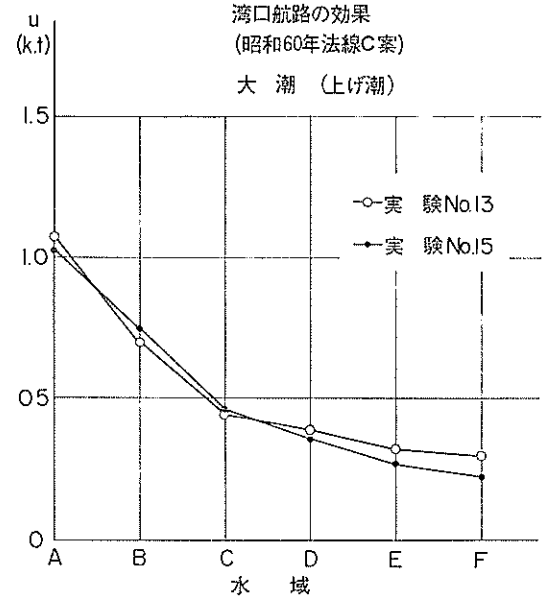


図-18-3 潮流比較図, 湾口航路の効果(大潮, 上げ潮)

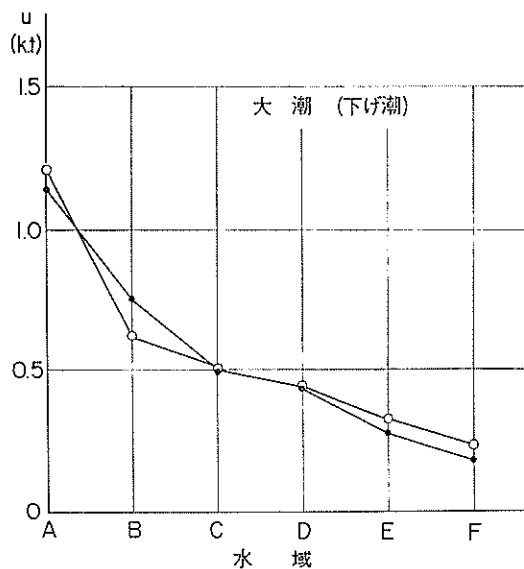


図-18-2 潮流比較図, 湾口航路の効果(大潮, 下げ潮)

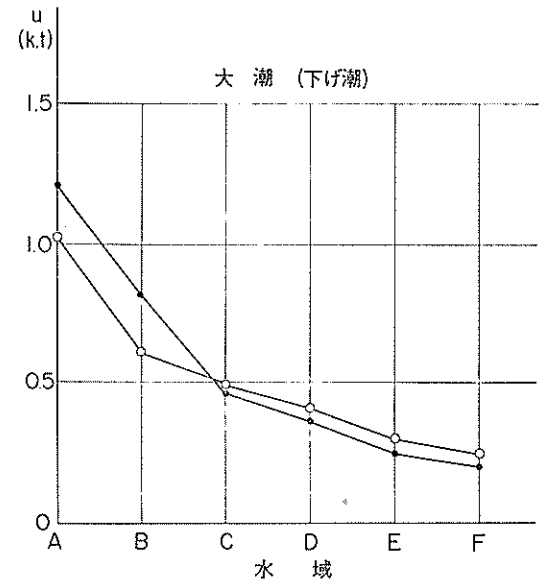


図-18-4 潮流比較図, 湾口航路の効果(大潮, 下げ潮)

14) と埋立地、湾口航路有り(実験 No. 13) の潮流を比較したのが 図-20-1~4 の各図である。図は潮汐別に示してあるが、各水域および上げ、上げ潮時で変化の傾向は異なっているが、流速の変化は小さくなっており、埋立地の造成による潮流の減速を、航路開削による潮流の増速がカバーし、結果的には若干増速傾向が強いもの

と推察される。

なお各実験で既述したように羽田空港埋立地の拡大は東京港への潮流の流入を抑制する様相がある点は充分留意しなければならない。

(3) 道路橋の影響について

横断道路橋設置に伴う湾内潮流におよぼす影響を、実

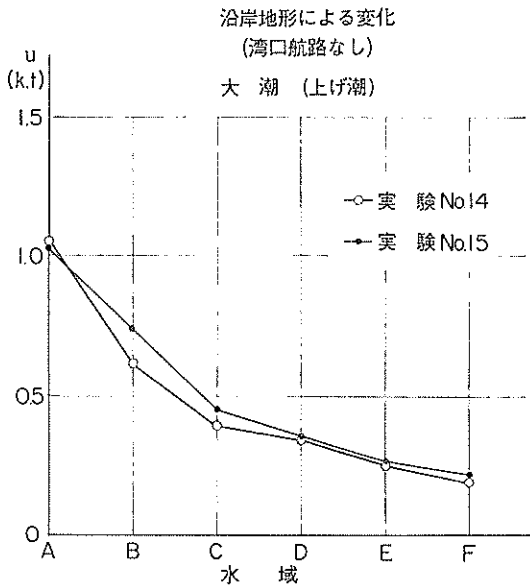


図-19-1 潮流比較図, 沿岸地形による変化 (大潮, 上げ潮)

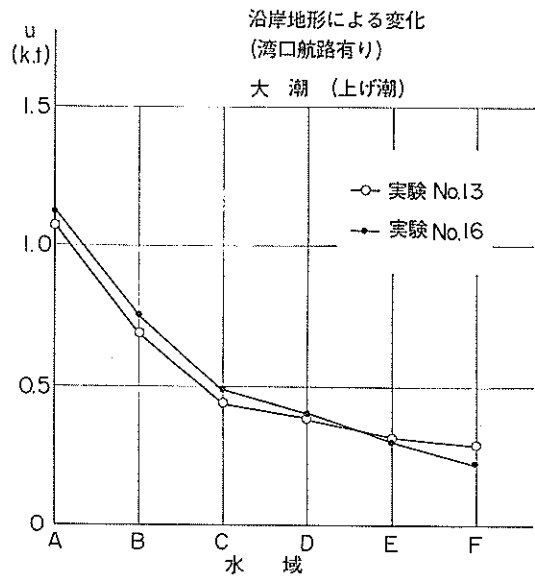


図-19-3 潮流比較図, 沿岸地形による変化 (大潮, 上げ潮)

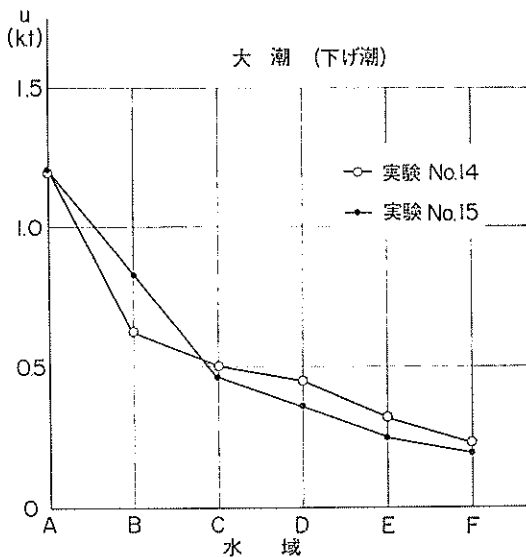


図-19-2 潮流比較図, 沿岸地形による変化 (大潮, 下げ潮)

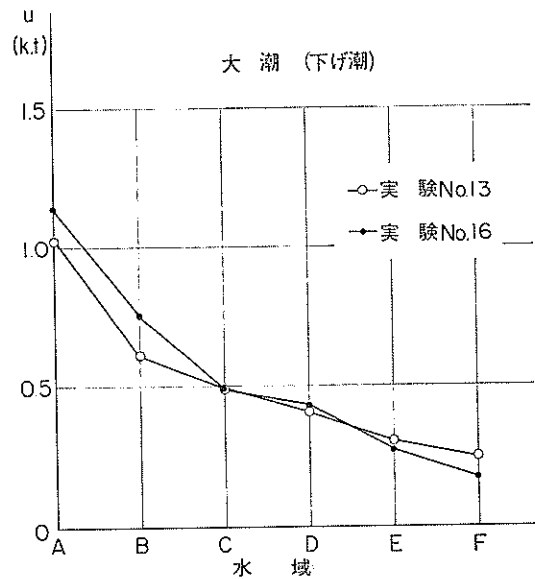


図-19-4 潮流比較図, 沿岸地形による変化 (大潮, 下げ潮)

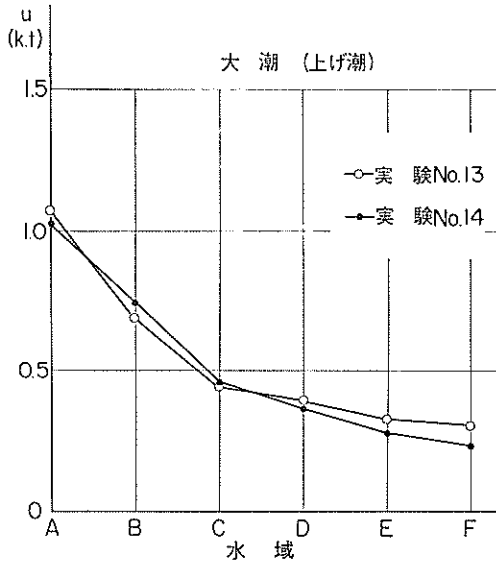


図-20-1 潮流比較図, 地形, 航路による変化 (大潮, 上げ潮)

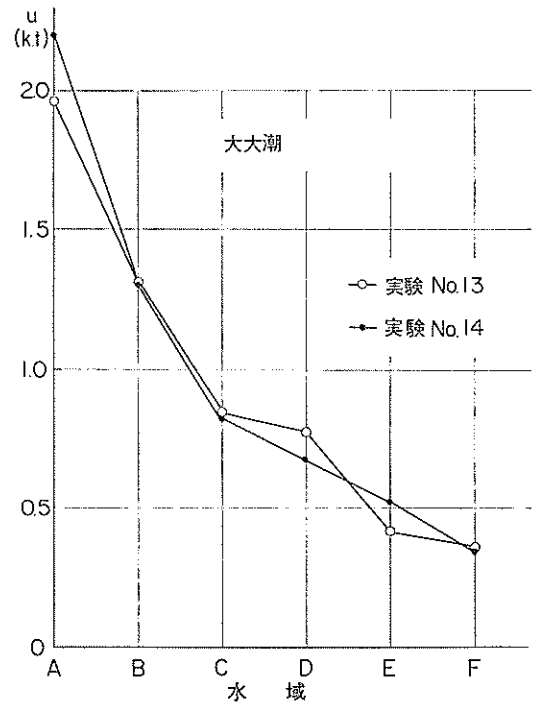


図-20-3 潮流比較図, 地形, 航路による変化 (大大潮, 上げ潮)

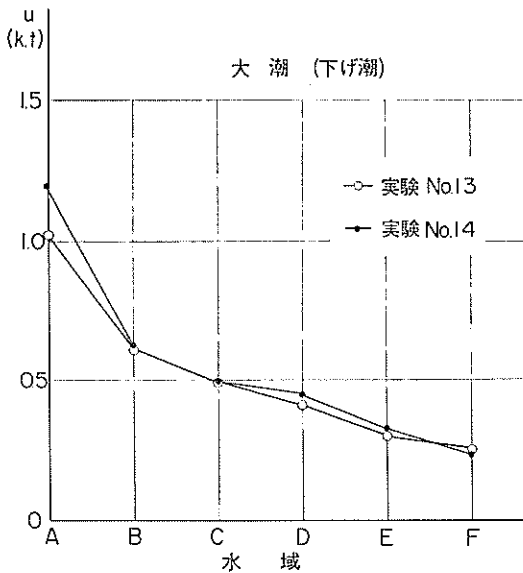


図-20-2 潮流比較図, 地形, 航路による変化 (大潮, 下げ潮)

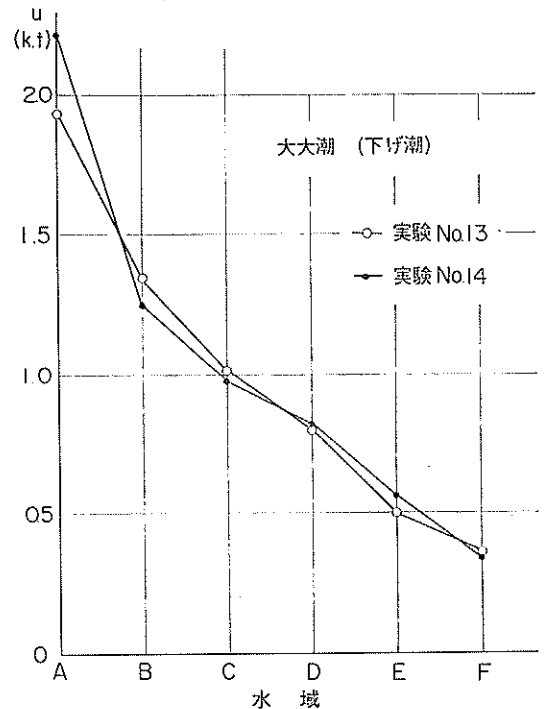


図-20-4 潮流比較図, 地形, 航路による変化 (大大潮, 下げ潮)

東京湾の潮流による物質拡散の水理模型実験

大潮 (上げ潮)

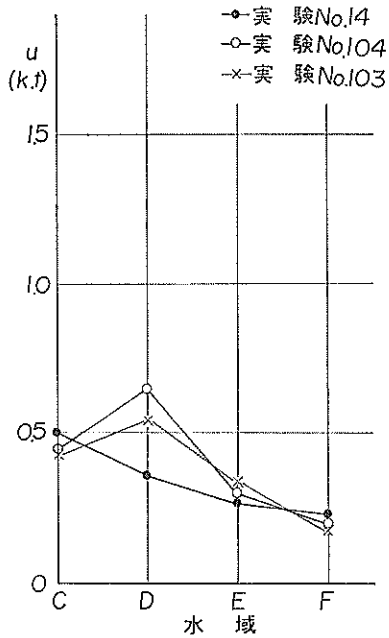


図-21-1 潮流比較図, 道路橋の効果 (大潮, 上げ潮)

大潮 (上げ潮)

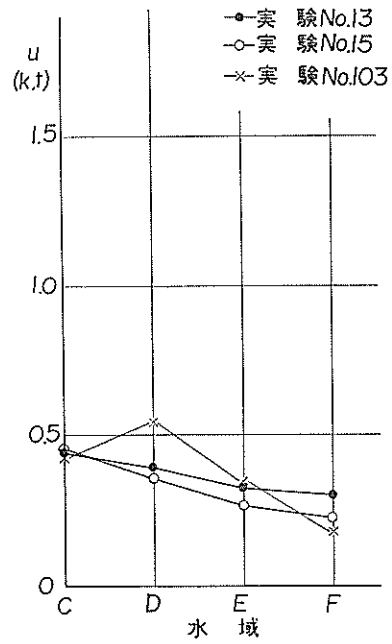


図-21-3 潮流比較図, 道路橋の効果 (大潮, 上げ潮)

大潮 (下げ潮)

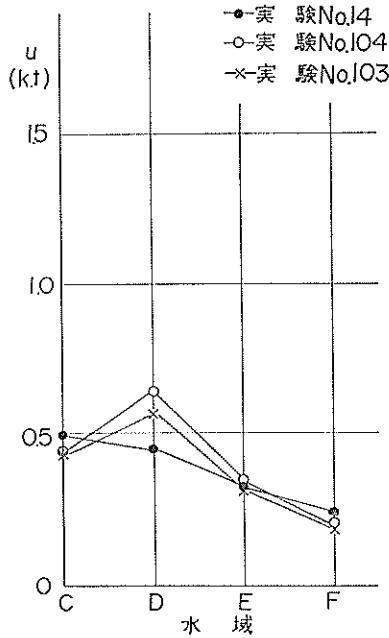


図-21-2 潮流比較図, 道路橋の効果 (大潮, 下げ潮)

大潮 (下げ潮)

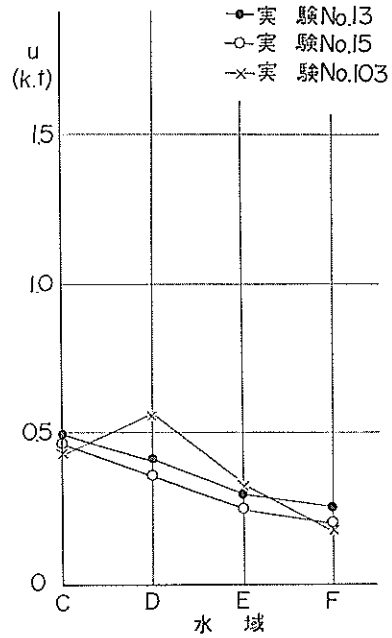


図-21-4 潮流比較図, 道路橋の効果 (大潮, 下げ潮)

験 No. 13~15, No. 103, No. 104 の各ケースから地形変化を考慮し、湾内水域の平均流速を示したのが図-21-1~4 の各図である。

道路橋設置による潮流変化は既述したように、道路橋バンクによって分割された各水路筋において増速されており、図-21 の各図も道路橋設置水域のD水域がいずれも増速となっており、そしてこの影響は湾奥のE水域にまで波及している。反面F水域は若干流速低下の傾向がみられる。さらに各実験ケース別に変化の特徴を求めると、現況地形に対する増速が顕著となっており(実験 No. 14 と 104)、埋立60年案地形の増速度が小さい。(実験 No. 14 と 103 および No. 13 と 103) このことは先述したように、湾口航路開削による湾口断面積の増加と、湾内埋立による水面積の減少および盤州前面浚渫による湾内通水面積の増加などが、横断道路橋の架橋に伴う潮流変化に強く関係していることを示しており、特に盤州前面浅海部の浚渫は現況地形についての架橋に伴う増速をかなり減少させる効果を持っている。

なお道路橋バンクから発生する渦流は、総てのケースに見られるが、水表面よりも形状の複雑な水底面に強い渦流の生ずることは充分注意しておかなければならない。

7.3 拡 散

前述した実験手法、条件に従って模型上の染料濃度を測定、80潮汐目(40日)の濃度を示す。実験濃度としては定常状態に達した濃度であることが最も望ましいが、定常状態に達する時間は潮汐条件、汚濁負荷量および模型内の測点によって異なり、且つ長時間の実験を必要とする。そこでこの実験では模型の湾口から染料が外海部に流出するのを一つの目安として80潮汐目を採用した。この時点では湾内各点の濃度はほぼ定常状態とみなすことが可能であったが、測点によっては(湾口に近い測点)いまだ過渡状態の場合もある。従って、実験時間を継続すれば、その地点の濃度はさらに上昇する筈であり、80潮汐目の濃度は最終濃度ではないことを充分留意する必要がある。このほか模型内の拡散過程を示すため適宜30潮汐目(15日)の濃度分布も示しているが、濃度分布図上の数字は染料(ローダミンB)の濃度であることも重ねて付記する。

(1) 実験 No. 10 (現況地形, 44年汚濁負荷量)

この実験ケースは湾内に流入する汚濁負荷量変動に伴う湾内の濃度分布の変化を把握するために、現況地形について、44年時点の汚濁負荷量を採用したもので、実験

表-5 昭和44年汚濁負荷量

No.	地 名	負荷量 t/d	No.	地 名	負荷量 t/d
1	根 岸	7.2	10	花見川, 稲毛	26.7
2-1	横浜港内	19.5	11-1	千 葉	} 23.5
2-2	"	"	11-2	市 原	
3	鶴見川	77.0	12-1	姉ヶ崎	} 10.0
4	川 崎	102.3	12-2	袖ヶ浦	
5	多摩川	36.6	13	木更津	11.4
6	隅田川	131.2	14-1	木ビツ川	} 8.8
7	荒 川	95.7	14-2	小糸川	
8	江戸川	67.2	15	養老川	11.3
9	船 橋	14.2	総 計		662.2

上の染料投入点は 図-9 と同じである、汚濁負荷量は 表-5 に示すように、昭和60年時点に較べ約63%増の約662 t/d である。

実験から得られた80潮汐目の湾内濃度分布を、大潮、小潮別に 図-22-1~3 に示す。

湾内濃度分布の一般的な傾向は湾口からの距離に比例し湾奥で高濃度となっており、80潮汐目で横浜~盤州を結ぶ線以北湾奥部では局部的に低濃度水域が点在しているけれども、総体的に1 ppm 以上の高濃度水域であり、沿岸汚染源近傍の水域は濃度3 ppm 以上となっている。特に隅田川が流入する東京港内の濃度が著しい。

川崎以南湾口にかけては、汚濁負荷量の大きい京浜側沿岸の濃度が高くなっており、さらに千葉県側から流出する污水も沿岸添いに南下し、湾口中の州付近で環流するため、中の州上には低濃度水域が残存している。これらの濃度パターンは湾内潮流、恒流の流動とよく対応しており、長期の汚水流動は湾内恒流に支配されている傾向が感得される。なお大潮、小潮時ともに湾奥稲毛付近に低濃度水域が残存しているが、この付近には汚染源がなく、水域の流速も小さいため、80潮汐時点でもいまだ拡散流動が微弱のためである。

図-22-2 の小潮時の濃度分布も 図-22-1 の大潮時と全く相似なパターンを示しているが、湾内潮流速は全般的に弱く、従って拡散力も小さいため、80潮汐目でも湾口から外海へ流出する割合が少ない。このため湾内濃度は大潮時に較べ総体的に高濃度となり、1 ppm 以上の水域は広範囲であるとともに、汚染源前面水域の濃度も大きい。

(2) 実験 No. 14 (現況地形, 60年汚濁負荷量)

東京湾の潮流による物質拡散の数理模型実験

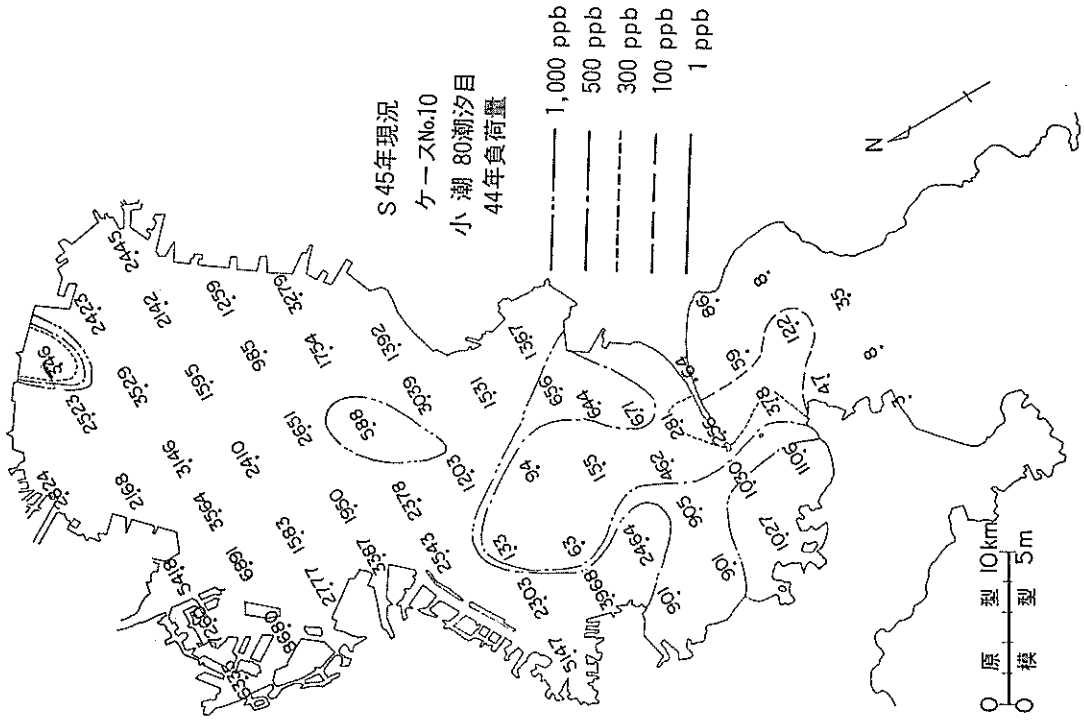


図-22-2 濃度分布 (現況, 44年負荷量, 小潮)

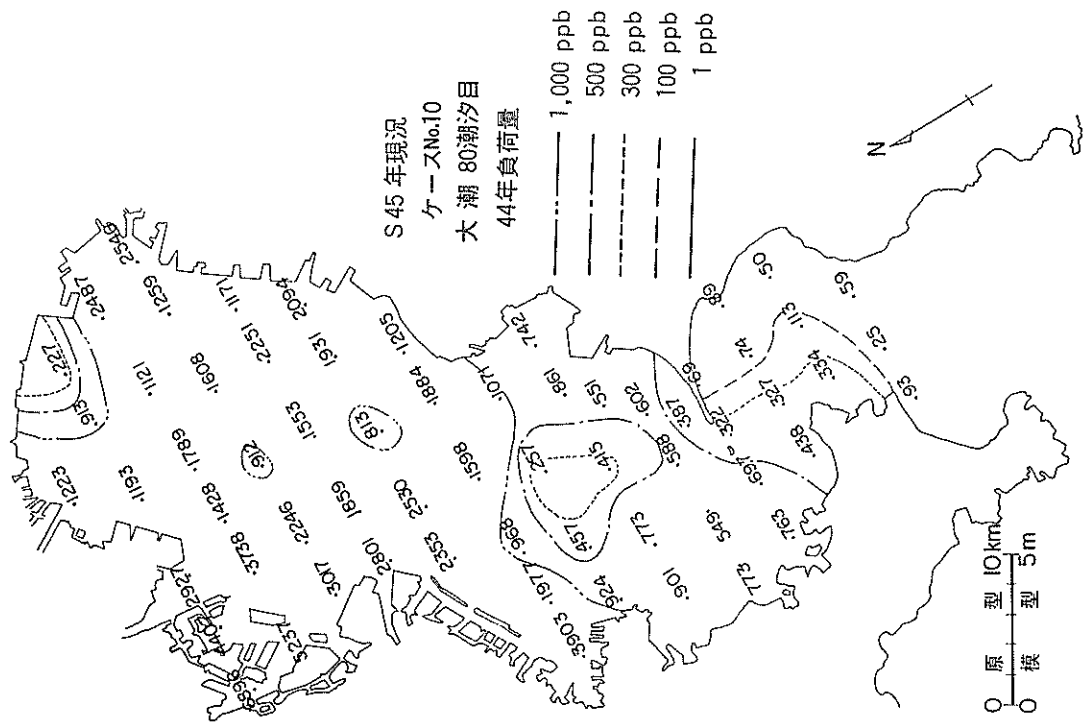


図-22-1 濃度分布 (現況, 44年負荷量, 大潮)

大潮時、30および80 潮汐目の濃度分布を 図-23-1~2 に示したが、30潮汐目の分布図によれば、染料投入後隅田川、荒川など河川からの汚水によって東京港および京浜沿岸にかけて汚染域が広がり、特に東京港および多摩川からの流出汚水が沿岸に拡散するとともに対岸の盤州に向って拡散してゆく傾向が的確に把握される。これらの流動は前述した湾内の恒流と対応している。さらに時間経過につれて沿岸汚染源からの拡散が進み、湾奥沿岸一帯は濃度 1ppm 以上となり湾中央に南下してくる様相を示している。図-23-2 の80潮汐目の濃度分布は前実験 No. 10 の分布と全く相似形であり、中の州上に低濃度水域が残存するとともに、京浜側沿岸が高濃度を示している。

小潮時の濃度分布は 図-23-3 にみられるように、湾内各所に低濃度水域が独立した形で点在しているが、これは流速の低下と、汚濁負荷量が44年値に比べ減少しているために生じた結果であるが、汚濁負荷量の大きな京浜側水域は以然として高濃度である。

この実験結果を前実験 No. 10 と対比してみると、80 潮汐目における濃度 1ppm 以上の占る範囲は、大潮、小潮実験ともに狭小となり、特に千葉県盤州近傍の濃度の減少が目立っており、東京港から川崎、横浜にかけては著しい変化が生じていない。この濃度分布の変化は流入する汚濁負荷量の変化に対応しており、表-5 に示した姉ヶ崎、袖ヶ浦、木ヅツ川、小糸川等の負荷量の減少(47%)減によるものと推定され、汚濁負荷量減少による湾内の汚染状況の変化が明確に把握することができ、汚染濃度と汚濁負荷量の強い相関が認められる。

(3) 実験 No. 16 (現況地形、湾口航路開削)

実験 No. 14 の地形に湾口航路を開削したケースであり、汚濁負荷量は60年値である。潮汐別の濃度分布は 図-24-1~3 に示す。

湾口航路開削によって湾内への海水交流が容易となり、湾内の潮流は若干増速したことが潮流実験によって把握された。汚染においても潮流変化にともなって、湾奥水域で濃度が減少し、湾口付近で若干濃度が上昇した様相がみられる。すなわち30潮汐目の時点では汚染源前面水域で拡散が進行しているけれども、航路なしの実験 No. 14 に比べ、拡散の進行速度が速まり、東京港から盤州方向への汚水の流動がみられる。80潮汐目には東京港と盤州前面の汚水域は一体となるが、湾奥の千葉港前面水域の高濃度水域との間に濃度 1ppm 以下の水域が広がっている。さらに中の州上にはスポット状に高、低

濃度の水塊が点在しているが、このパターンは一般に速い流れを有する海域での汚水塊は分散されてスポット状に散乱する傾向と一致しており、湾口航路開削によってこの付近の潮流が増速した結果生じたものと推定できる。

図-24-3 小潮80潮汐目の濃度分布も大潮と相似であるが、実験 No. 14 に比べ湾奥の清浄水域が拡大し、東京都と千葉県側の濃度 1ppm 以上を持つ汚染域が総体的に南下傾向を示している。

これらのパターンから湾口航路開削によって湾内の潮流が増速するため、汚水の拡散が促進され、湾奥からの汚水の流出が速まる結果、湾奥水域で濃度が低下するものと推察される。

(4) 実験 No. 15 (昭和60年C案地形)

盤州側埋立地前面残海部を -15m に浚渫したケースであり、潮流実験によれば浚渫の結果当該水域の潮流の流動がスムーズになっている。汚染実験でもこの効果はかなり明瞭に現われている。実験大潮時の30および80潮汐目の濃度パターンを 図-25-1~2 の各図に示してあるが、染料投入初期には千葉県側の濃度上昇は見られず、潮流によって十分に拡散されており、また東京港および京浜沿岸の汚水も沿岸に添って南下し、湾奥への流出は見られない。

さらに80 潮汐目に至っても、前実験 No. 14, No. 16 のように東京港から流出する汚水が盤州側に達し、広範囲な高濃度(1ppm 以上)水域の形成は消失し、潮流によって湾内へ一様に拡散される傾向となる。この結果濃度 1ppm 以上の高濃度水域は縮小されて湾奥にあり、反面湾口中の州付近に発生した低濃度水域も消失し、濃度は均一化され 0.5ppm 以上となっている。

小潮時80潮汐目の濃度分布は 図-25-3 にあるが、小潮時は潮流速微弱なため、湾奥濃度は前実験 No. 14, No. 16 とほぼ同様に東京都から千葉県側にかけて濃度 1ppm 以上となる。湾奥から湾口にかけては特に中の州上の低濃度水域は大潮時同様に消失し、京浜側から南下した汚水域に包含されている。

これらの結果、盤州前面浅海部浚渫は湾内の汚水拡散現象に極めて効果的であることが判り、潮流実験から把握された当該水域の流線の調整化が、流速の変化以上に汚水の流動に効果的であると推察される。なお実験で測定はなされていないが、盤州前面浚渫によって、此の付近の恒流が相当変化しているものと思はれる。

(5) 実験 No. 13 (60年C案地形、湾口航路開削)

実験 No. 15 の地形に湾口航路を開削したケースである。湾口航路の効果は既述したように湾内の潮流を若干増速させている。汚水の拡散にもその効果は現れており、特に千葉県沿岸の濃度は実験ケースのうち最も低くなっている。図-26-1 は大潮30潮汐目の濃度分布で濃度パターンは実験 No. 15 と全く同様にして、濃度 1ppm 以上の水域は東京港を中心にした沿岸にのみ存在している。80潮汐目の図-26-2でも濃度 1ppm 以上の水域は京浜側と湾奥千葉港付近に限定され湾奥から湾口にかけては前実験 No. 15 および No. 14 (現況)に較べ清浄化が目立っている。

図-26-3 は小潮時の濃度分布を示しているが、この図で著しい特徴は横浜港前面水域に濃度 1ppm 以上の水域が出現し、湾口の横須賀港前面にも濃度 1ppm 以上の水域がある。

これら60年C案地形における汚水の拡散傾向は、盤州前面浅海部の浚渫によって、湾奥水域の拡散が促進されて湾外に搬出される様相が明確に把握される。

(6) 実験 No. 19 (昭和60年D案地形)

沿岸埋立計画C案の盤州埋立法線が湾内に突出し、埋立地前面の浚渫計画がない地形である。実験も汚染実験のみで潮流実験は実施していないので、埋立による潮流変化は把握していないが、埋立地形および既述の潮流実験結果から推察するに、現況とほぼ似たような流況を示すものと考えられる。図-27-1~2 は大潮時の濃度分布図であるが、染料投入直後30潮汐目の濃度分布からも現況に近い傾向がみられ、80潮汐目では京浜側から湾奥千葉港にかけては濃度 1ppm 以上となり且つ、湾口中の州付近の濃度が低い傾向は全く現況時の濃度パターンと同様である。(図-23-2 参照)

(7) 実験 No. 18 (60年D案地形、湾口航路開削)

前実験 No. 19 地形に湾口航路を開削したケースであり、図-28-1~2 に濃度分布を示してあるが、図にみられるように、30潮汐目の時点では湾口航路の効果は湾口付近の水域に限定されている。濃度は前実験 No. 19 に較べやや低下の傾向にあるが、湾奥から湾奥にかけてはほぼ同値である。実験時間の経過につれて湾奥の高濃度汚水が東京港から船橋方面に拡散してゆく段階で湾口航路の効果が見れ、湾口航路開削ケース共通の傾向である。京浜側沿岸に添って湾口方向に南下する様相は、このケースにも現われている。

(8) 実験 No. 104 (現況地形、横断道路B案)

このケースの潮流は道路橋バンクによって局部的に増

速されており、汚水拡散にも増速の効果は現れて全般的に拡散速度を促進する様相がある。図-29-1~2 は大潮30および80潮汐目の濃度分布図であるが、図にみられるように、川崎側沿岸埋立地が突出したために多摩川からの流入水は東京港前面海域へ拡散し、また川崎港付近からの流出汚水は沿岸に添って南下してゆく。そして湾奥では道路橋バンクで増速された潮流の流動によって拡散が強く、この水域での汚水濃度は低下している。図-29-3 は小潮80潮汐目の濃度パターンであるが、この地形に対する実験は No. 14 で実施されており図-23-3 に濃度分布図を示したが、道路橋以北湾奥の濃度は東京港と千葉側が一大高濃度域を形成し、その中に低濃度水域が点在していた。この実験では前記高濃度水域が分断され、特に千葉県側で清浄な水域が残存している。道路橋バンクによって増速し拡散が促進される傾向にあるとはいえ、小潮時であることからして、図-29-3 の濃度パターンはやや異常である。しかし京浜側沿岸の高濃度水域は小潮特有のパターンである。

道路橋バンク付近の濃度は、潮流の交流により発生する渦流により混合拡散が活発に行なわれ、バンク背面に生ずる反流域内での停滞などの現象は全く見られない。

(9) 実験 No. 105 (現況地形、横断道路橋A案)

道路橋バンクが1基減少し2基となった型式で、その他の構造はB案と全く同じであり、地形も前実験 No. 104 と同じである。実験から得られた湾内の濃度分布は図-30-1~2 に30および80潮汐目のパターンを示してある。分布特性は実験 No. 104 と全く相似であり特出すべき傾向は把握できないが、湾内全般的な濃度分布の傾向は実験 No. 104 に較べ湾奥部の濃度が若干高く、反面道路橋以南湾口水域において濃度がやや低下しているように見られる。この実験ケースの潮流実験は実施していないため、道路橋バンクによって分割された各水路における潮流の増速度、渦乱流の発生状況等は不明であるが、道路橋B案の実験結果から推測して、バンク数の減少は、当該水域の潮流増速度およびバンクから発生する渦乱流の発生度は低下していると考えられる。従ってそれらによる拡散力の減少は明らかであり、このため湾内濃度が実験 No. 104 に較べ上昇したものと推察される。

(10) 実験 No. 103 (昭和60年C案地形、横断道路橋B案)

道路橋設置による局部的な流速増加と盤州前面浅海部浚渫による潮流の流動のスムーズ化によって、湾内の汚水拡散速度は一層強まり、他の実験ケースに較べ広域に

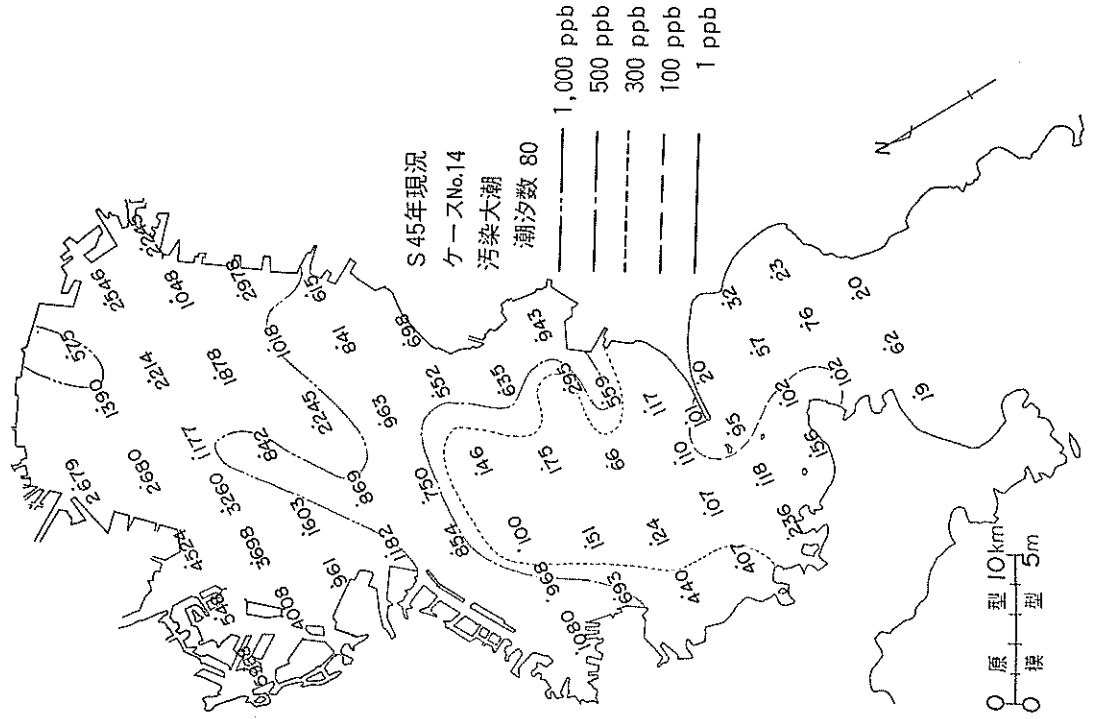


図-23-2 濃度分布 (現況, 80潮汐, 大潮)

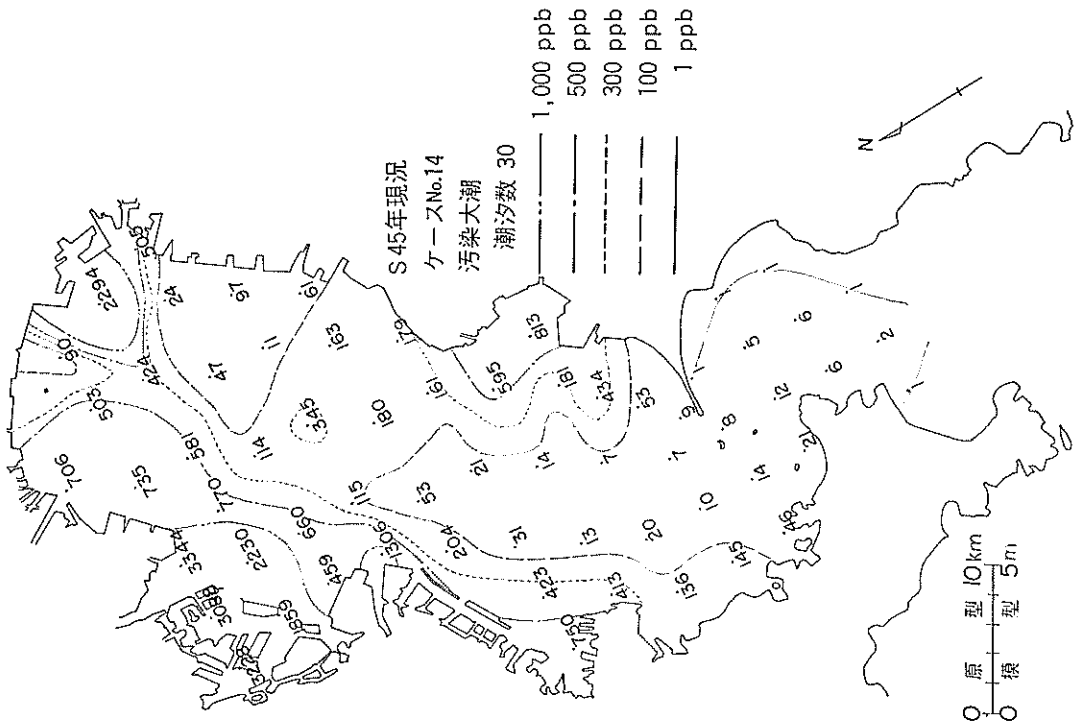


図-23-1 濃度分布 (現況, 30潮汐, 大潮)

東京湾の潮流による物質拡散の水理模型実験

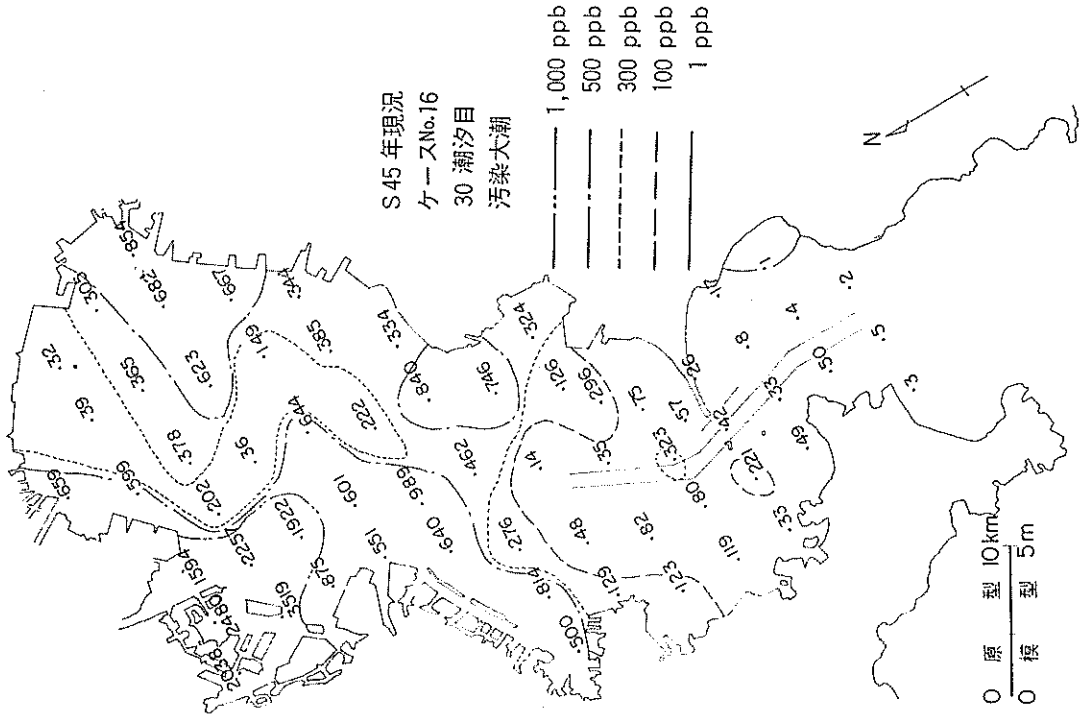


図-24-1 濃度分布 (現況, 湾口航路開削, 30潮汐目, 大潮)

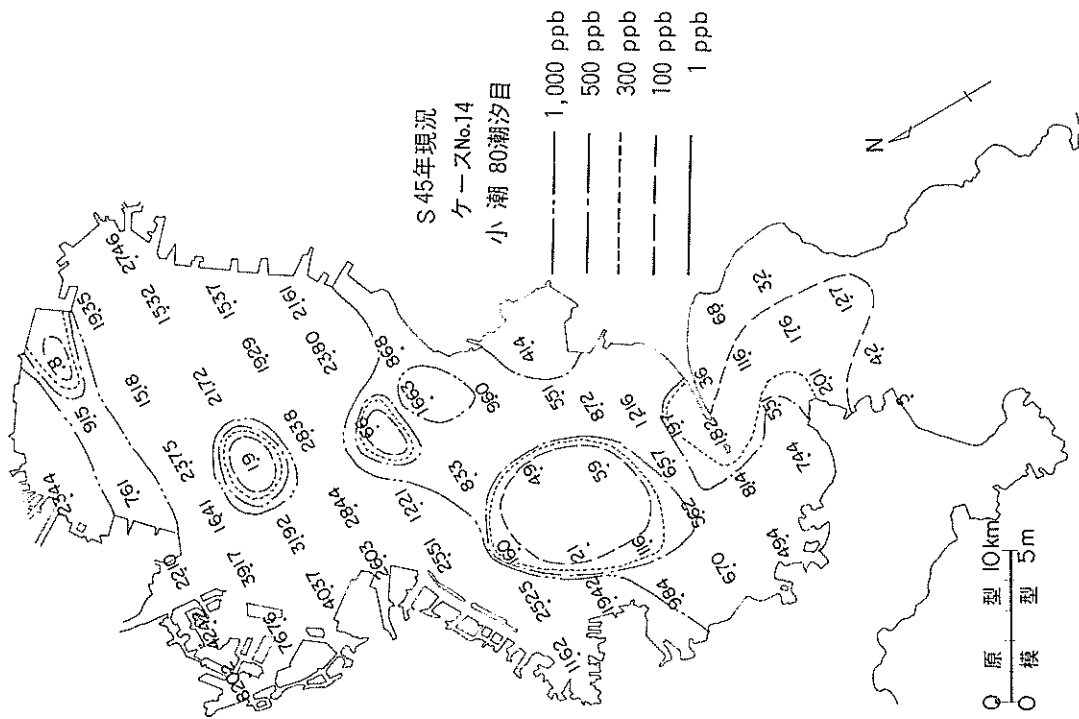


図-23-3 濃度分布 (現況, 80潮汐目, 小潮)

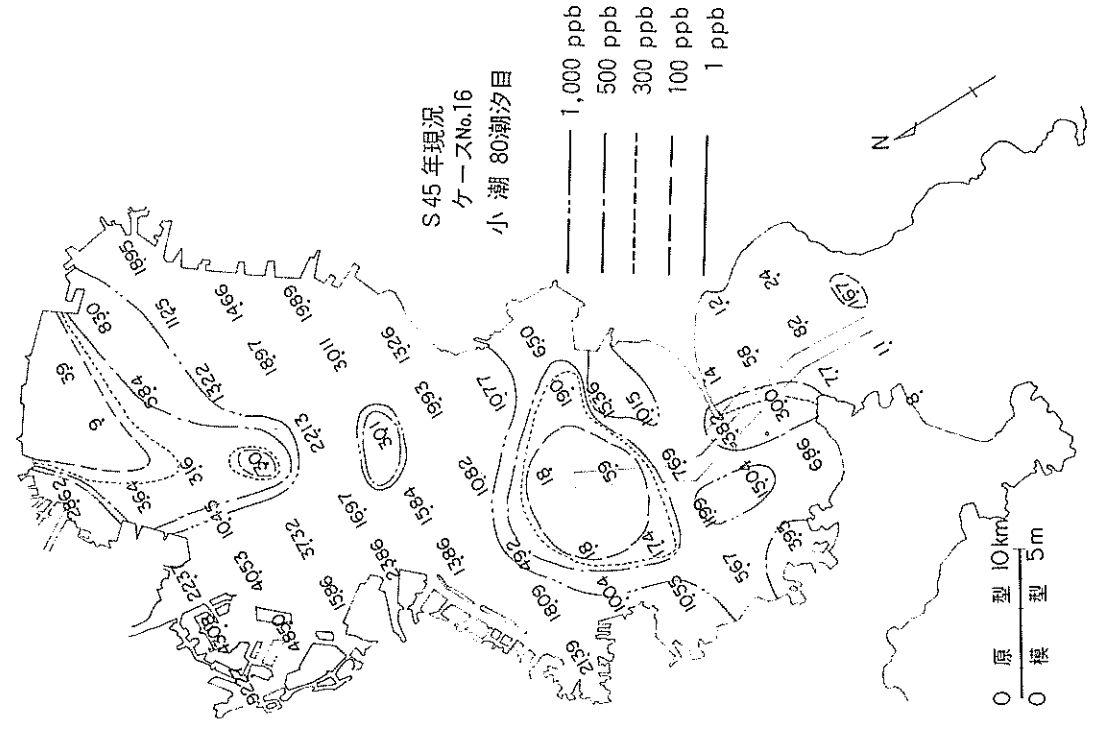


図-24-3 濃度分布 (現況, 湾口航路開削, 80潮汐目, 小潮)

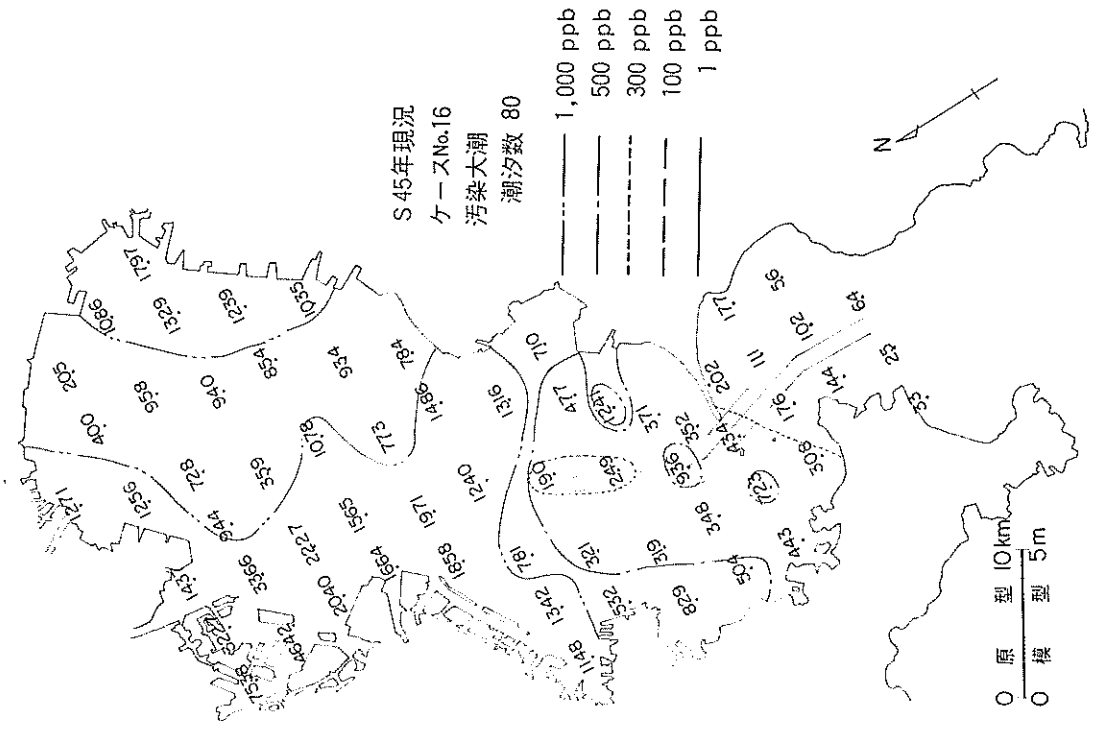


図-24-2 濃度分布 (現況, 湾口航路開削, 80潮汐目, 大潮)

東京湾の潮流による物質拡散の水理模型実験

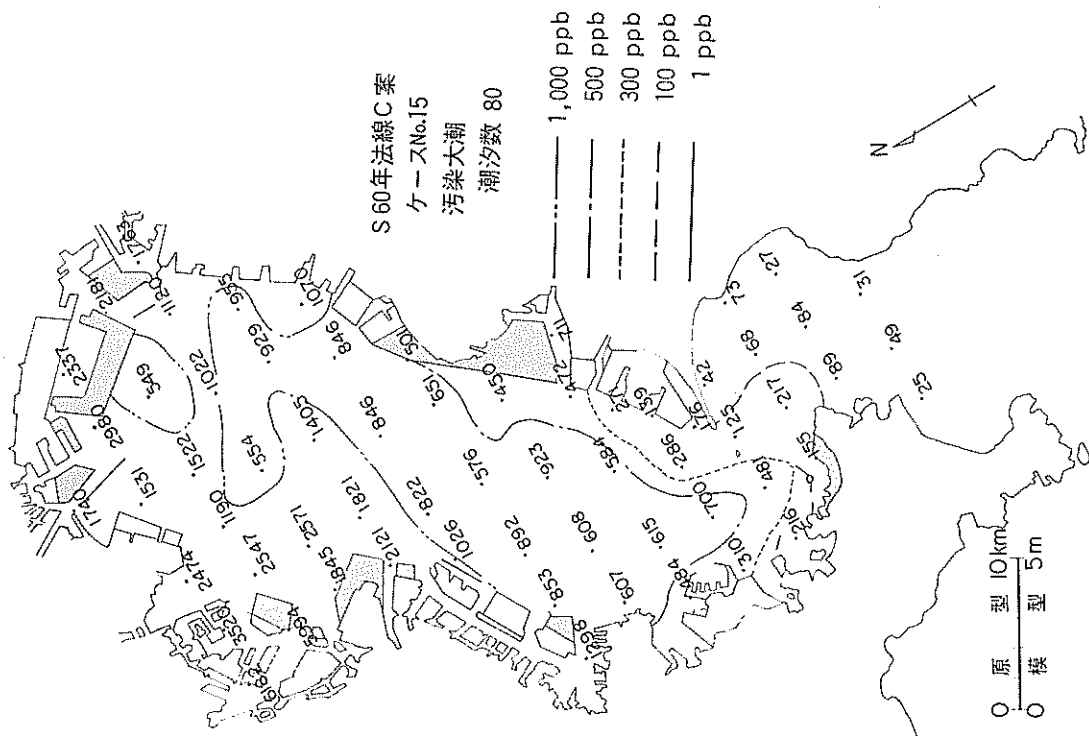


図-25-2 濃度分布 (60年C案地形, 80潮汐目, 大潮)

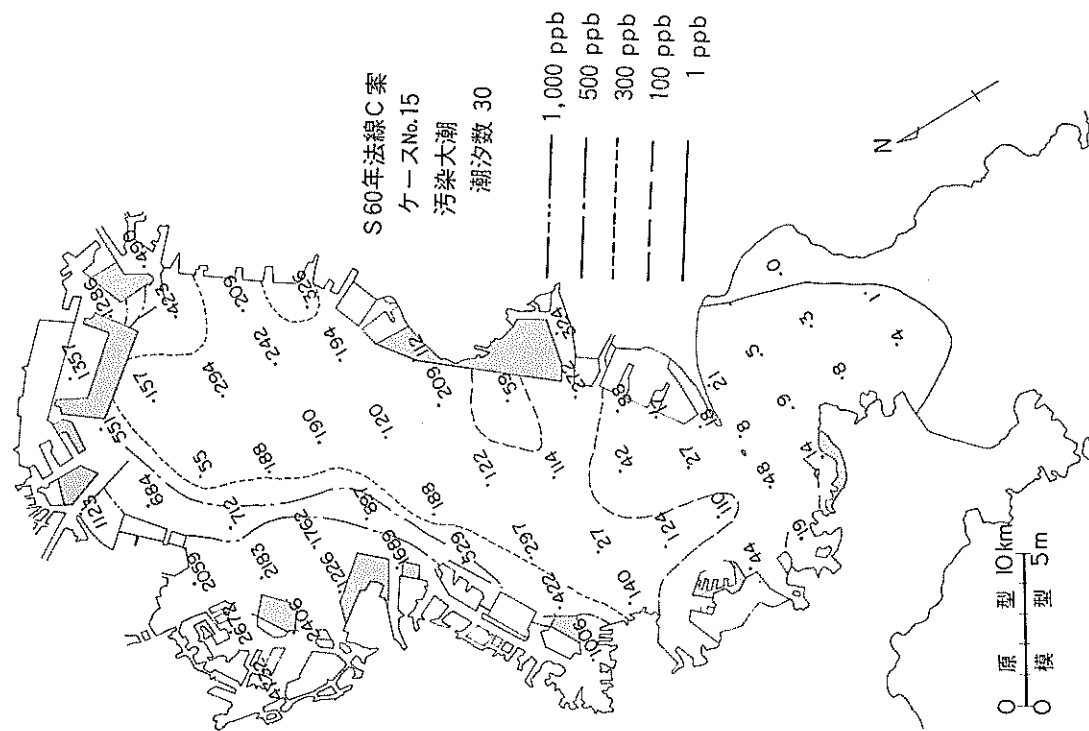


図-25-1 濃度分布 (60年C案地形, 30潮汐目, 大潮)

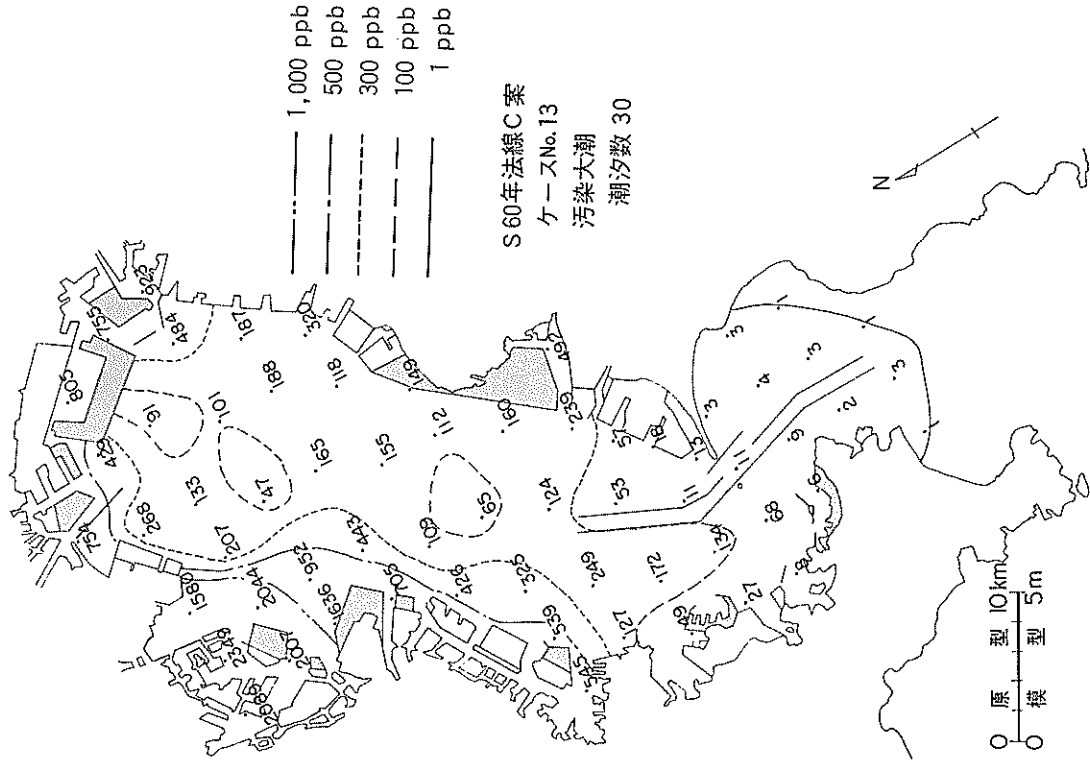


图-26-1 濃度分布 (60年C案地形, 湾口航路開削, 30潮汐目, 大潮)

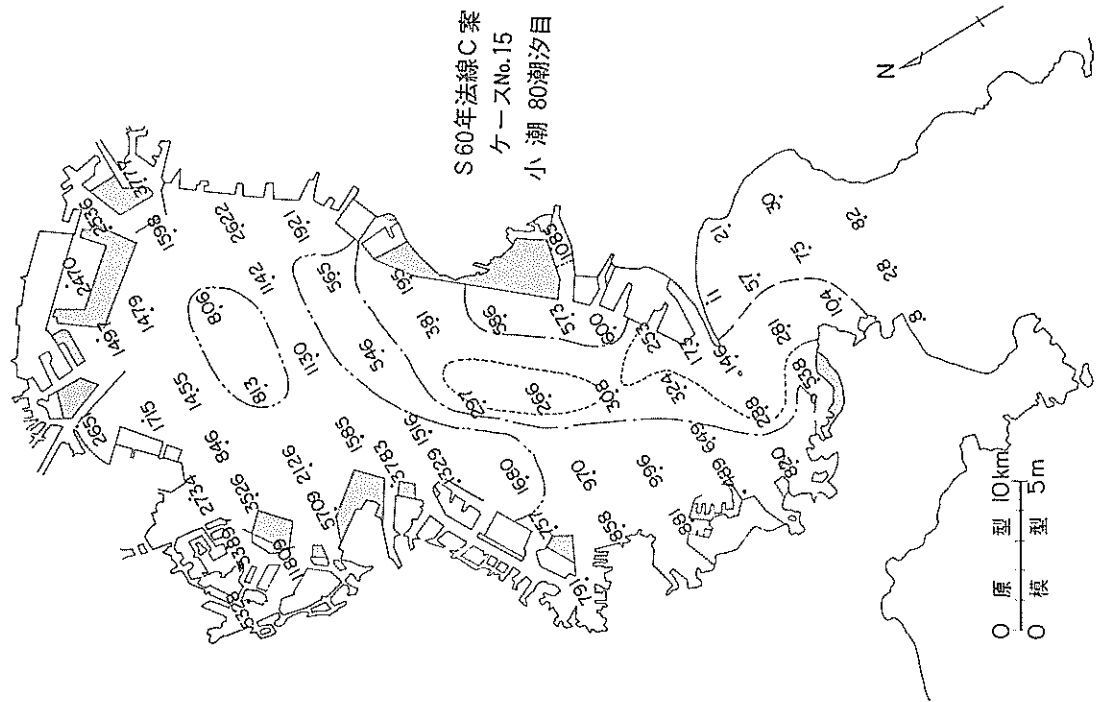


图-25-3 濃度分布 (60年C案地形, 80潮汐目, 小潮)

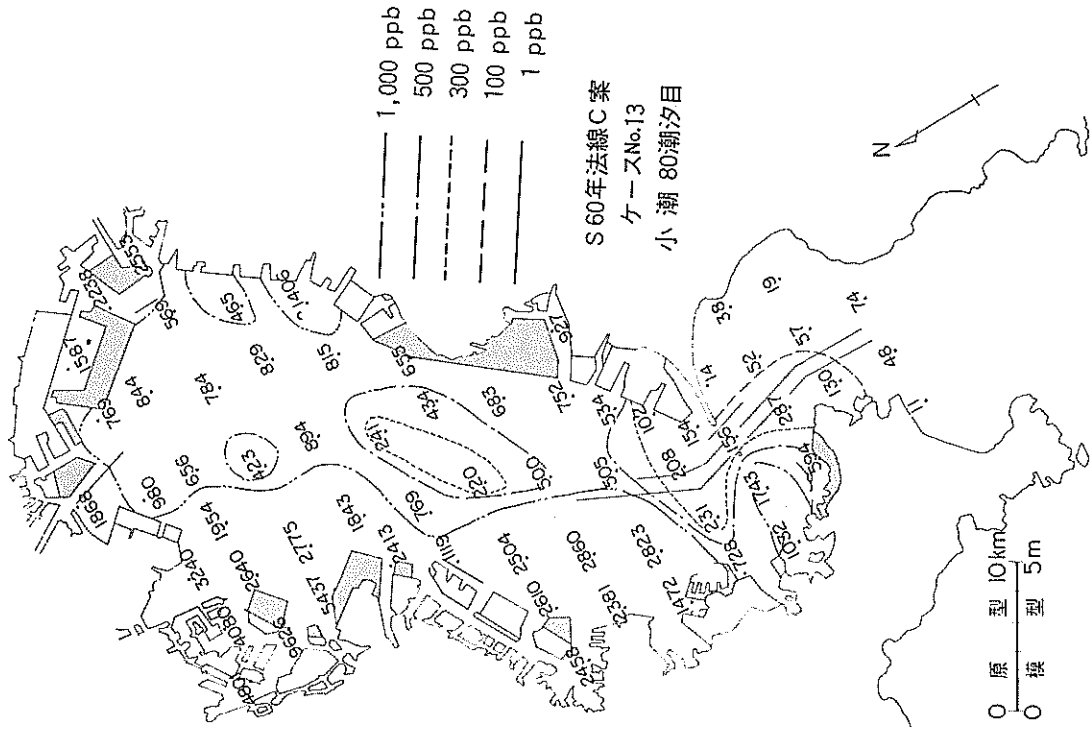


図-26-3 濃度分布 (60年C案地形, 湾口航路開削, 80潮汐目, 小潮)

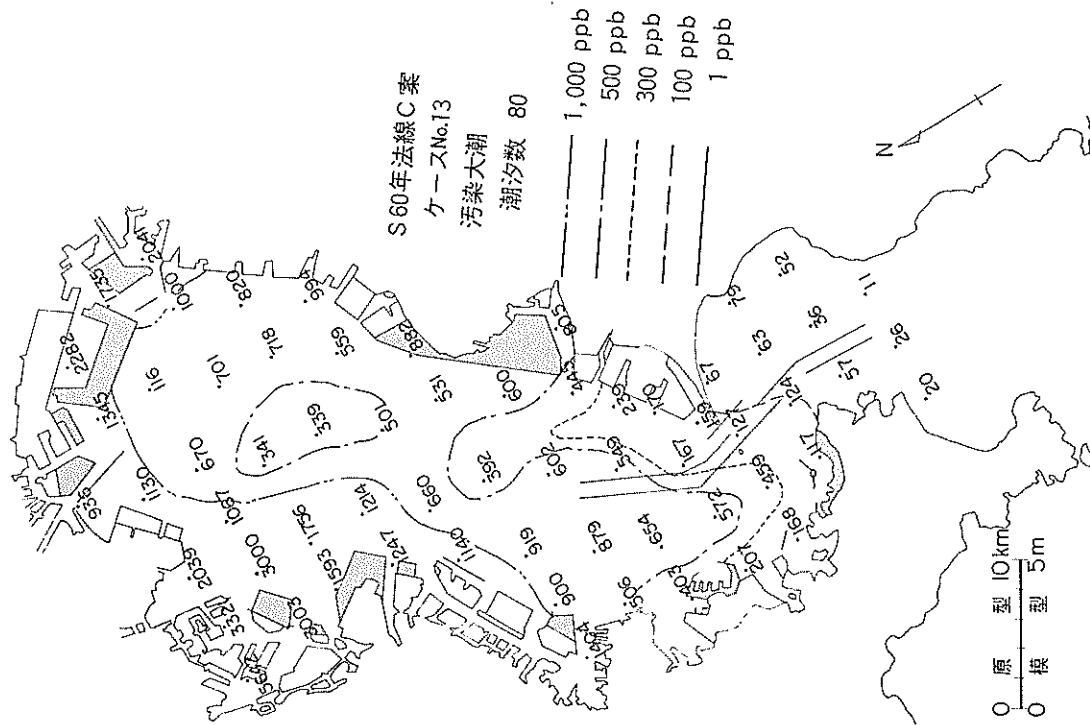


図-26-2 濃度分布 (60年C案地形, 湾口航路開削, 80潮汐目, 大潮)

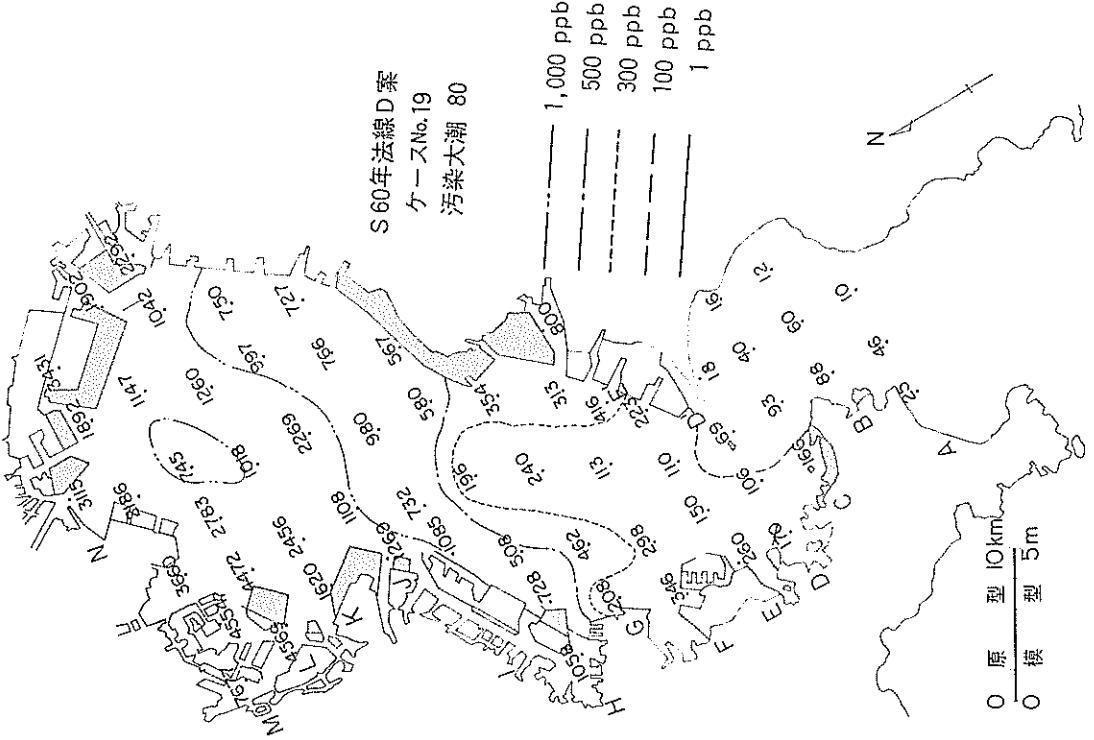


図-27-2 濃度分布 (60年D案地形, 80潮汐目, 大潮)

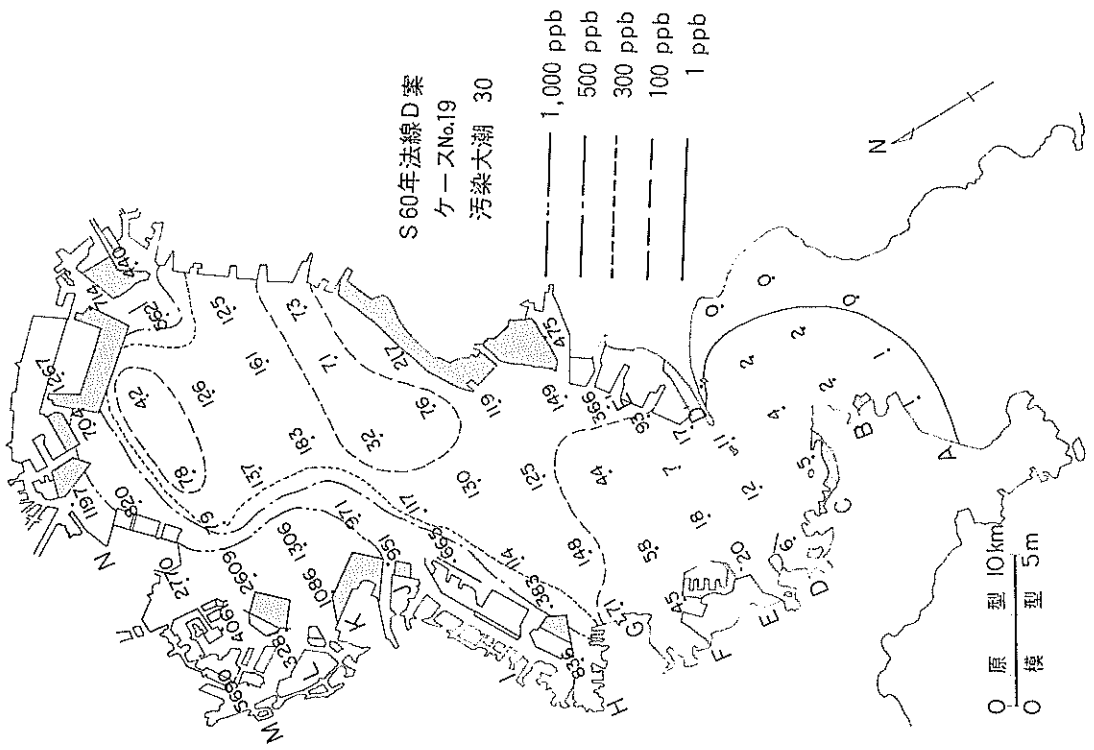


図-27-1 濃度分布 (60年D案地形, 30潮汐目, 大潮)

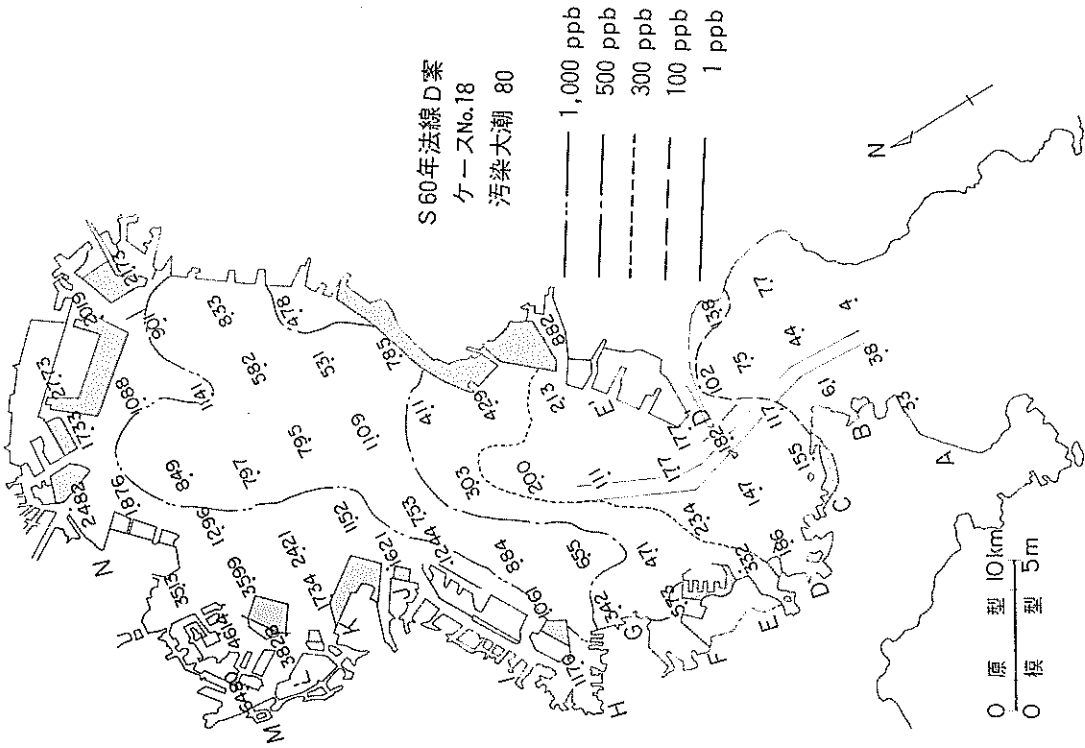


図-28-2 濃度分布 (60年D案地形, 湾口航路開削, 80潮汐目, 大潮)

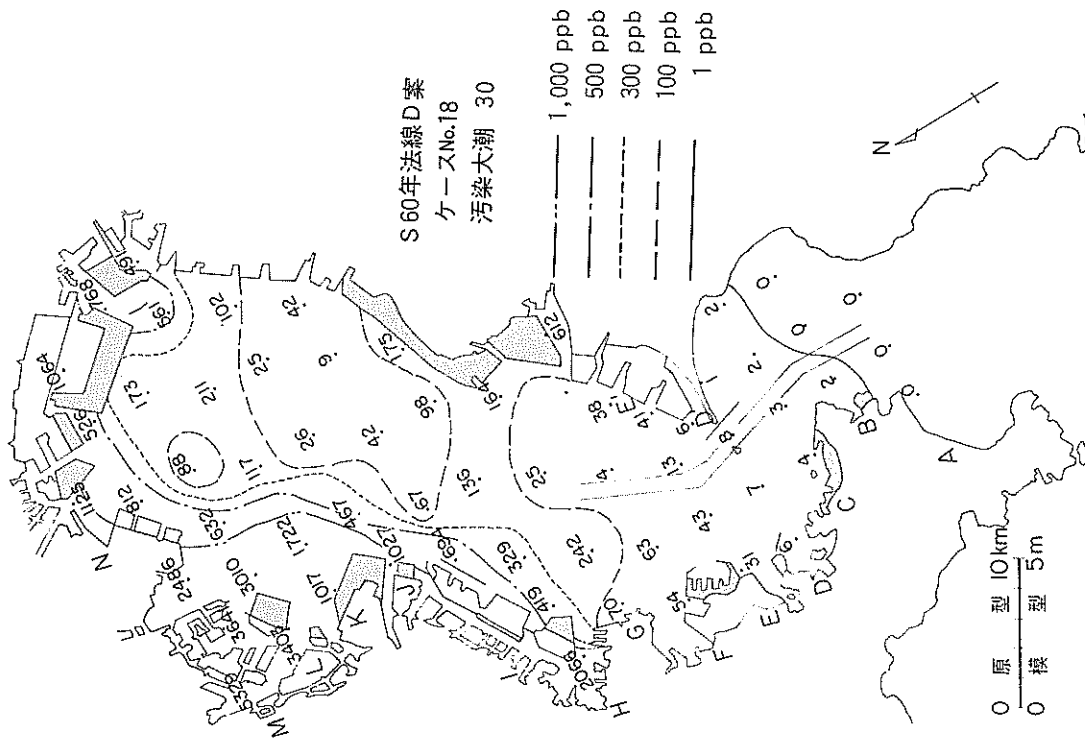


図-28-1 濃度分布 (60年D案地形, 湾口航路開削, 30潮汐目, 大潮)

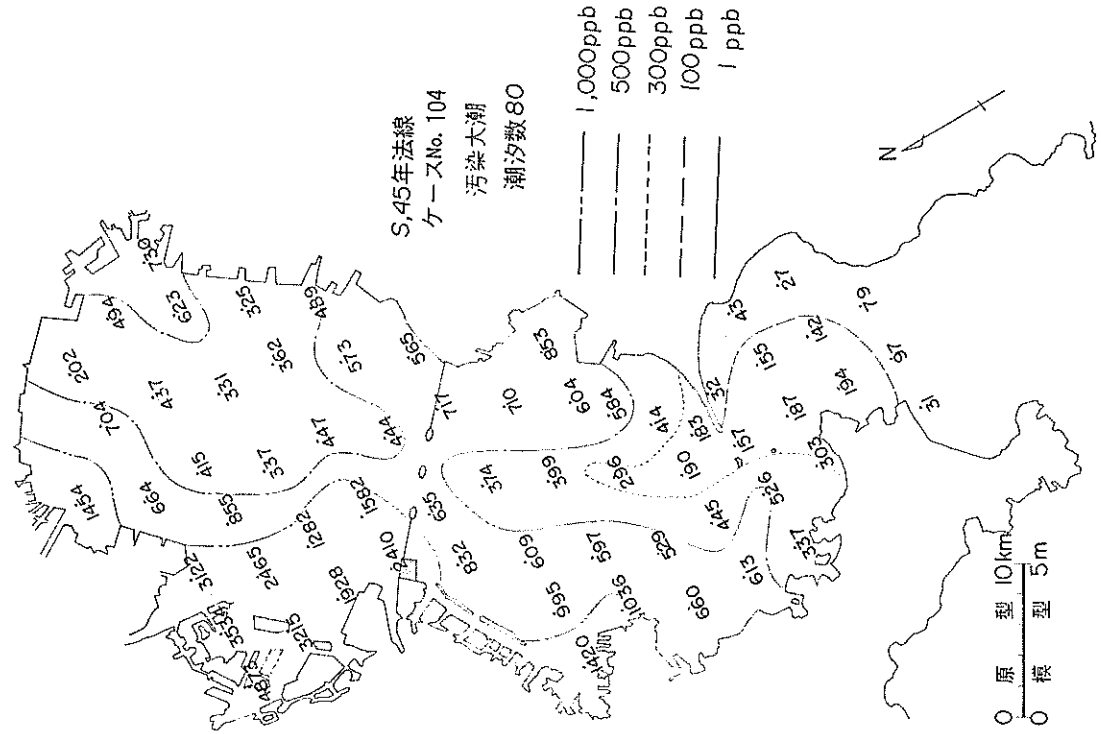


図-29-2 濃度分布 (現況地形, 道路橋B案, 80潮汐日, 大潮)

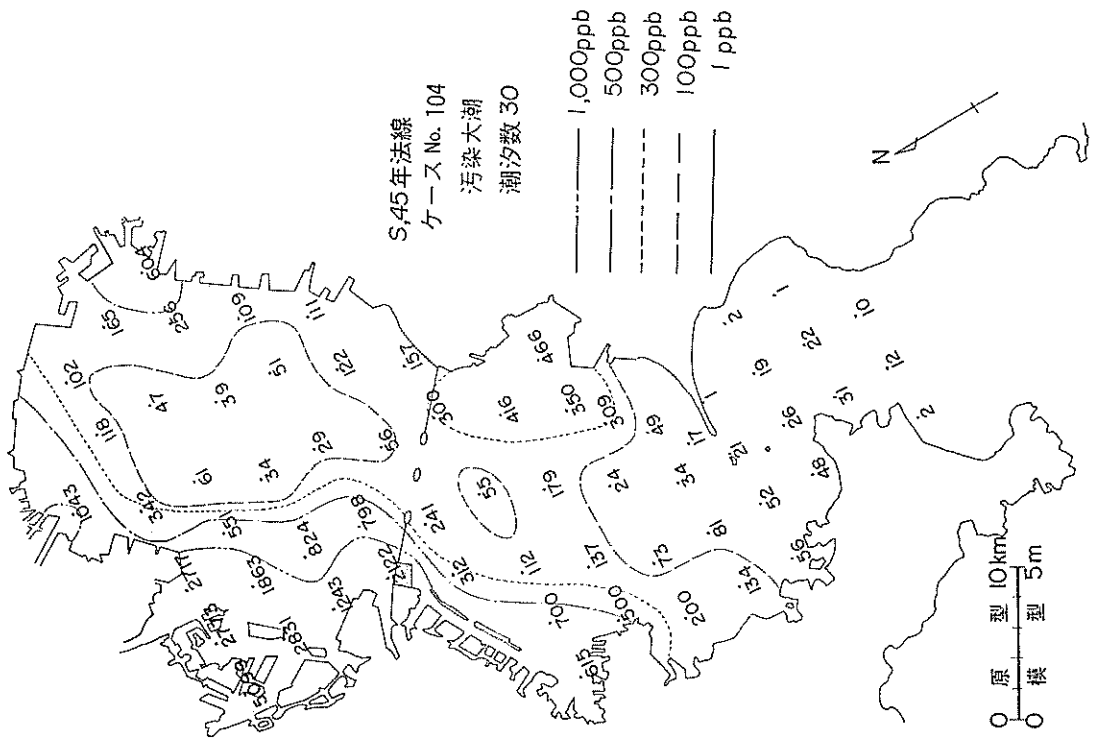


図-29-1 濃度分布 (現況地形, 道路橋B案, 30潮汐日, 大潮)

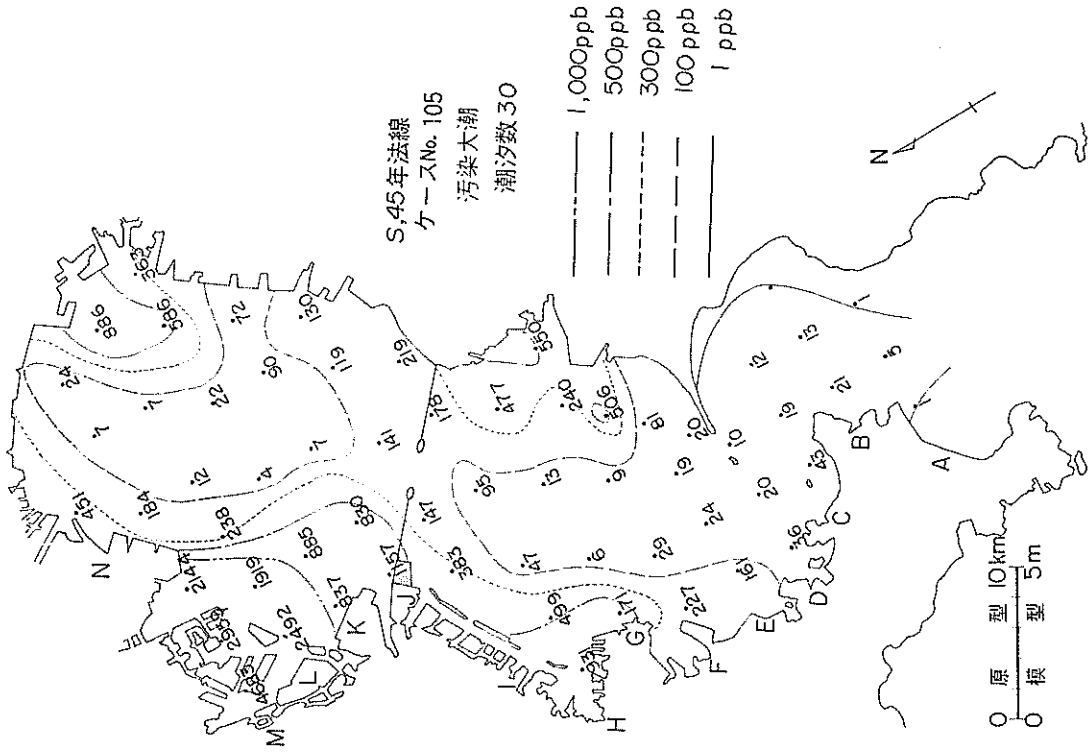


図-30-1 濃度分布 (現況地形, 道路橋A案, 30潮汐目, 大潮)

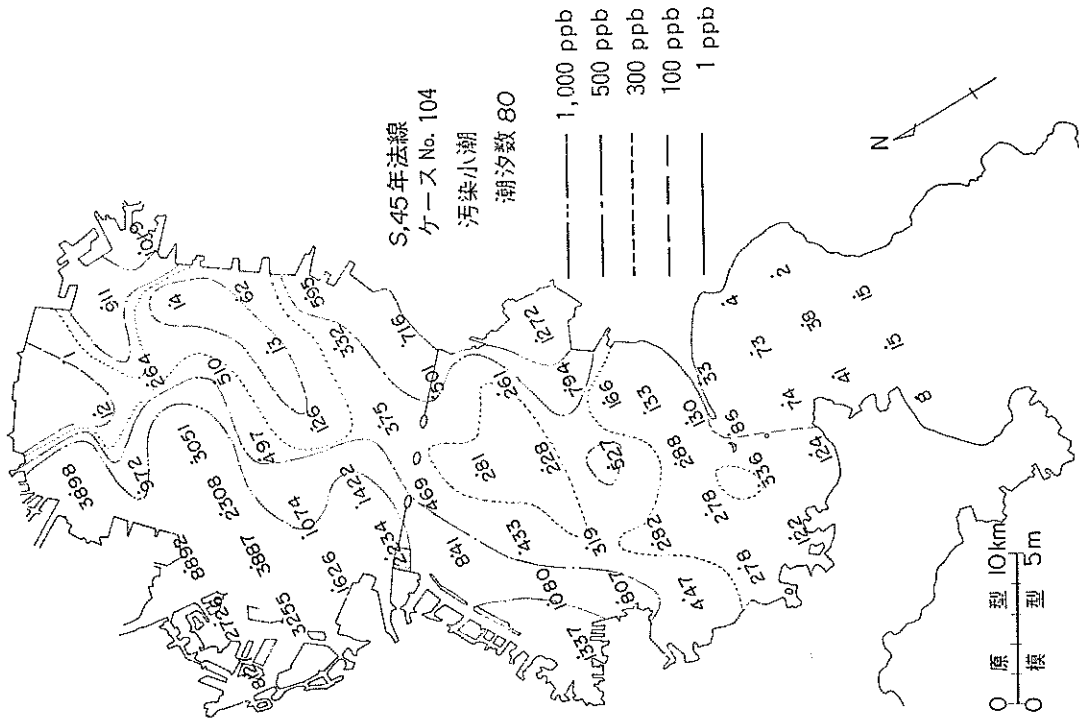


図-29-3 濃度分布 (現況地形, 道路橋B案, 80潮汐目, 小潮)

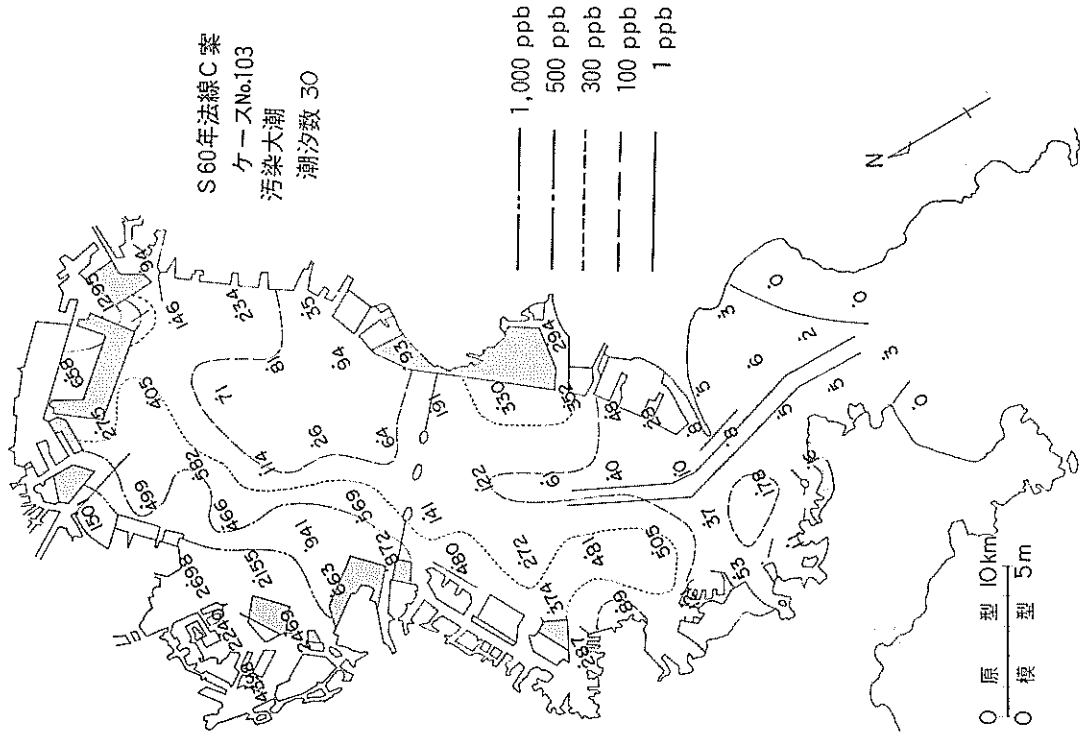


図-31-1 濃度分布 (60年C案地形, 道路橋B案, 30潮汐目, 大潮)



図-30-2 濃度分布 (現況地形, 道路橋A案, 80潮汐目, 大潮)

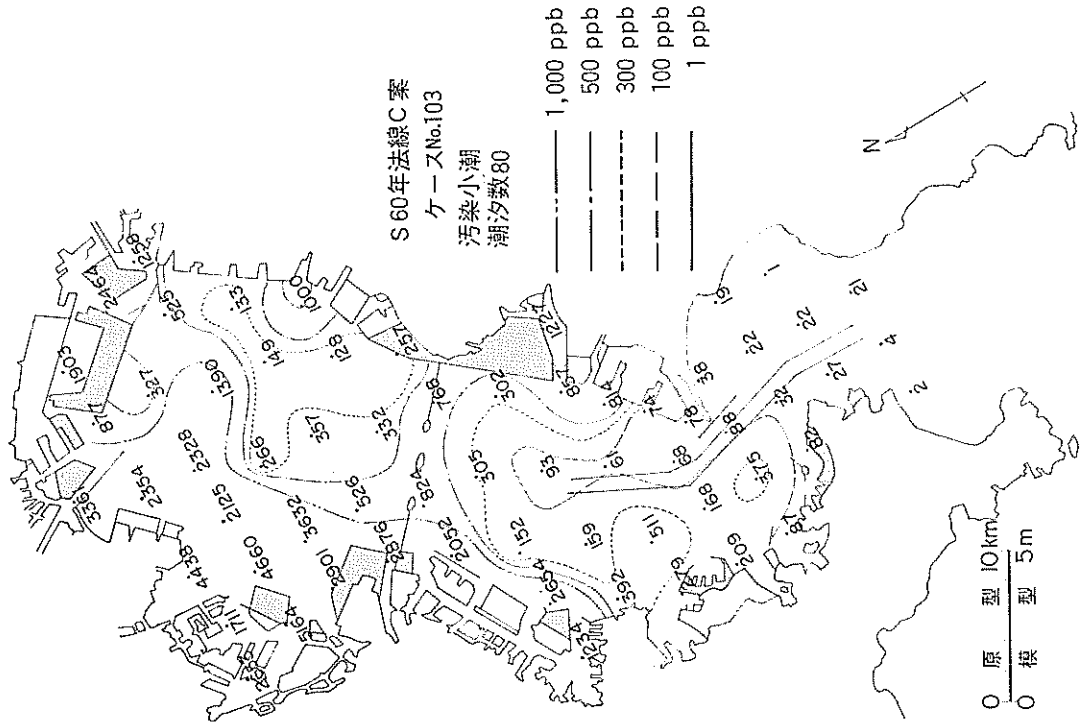


図-81-3 濃度分布 (60年C案地形, 道路橋B案, 80潮汐目, 小潮)

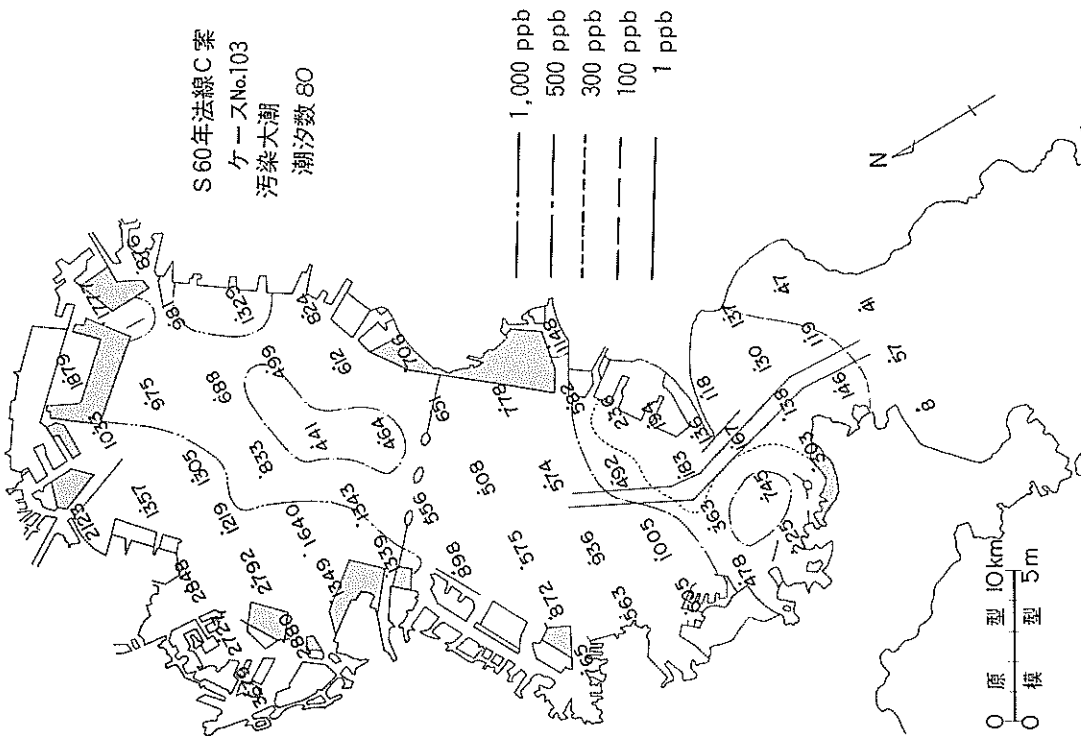


図-81-2 濃度分布 (60年C案地形, 道路橋B案, 80潮汐目, 大潮)

拡がる様相がある。図-31-1 の30潮汐目においても、東京港から湾奥千葉側水域で拡散が進んでいる。しかし千葉県袖ヶ浦付近前面海域には清浄海域が残存している。80潮汐目の図-31-2 では濃度 1ppm 以上 (1000ppb) の水域は東京港前面水域のみとなり、千葉県側の湾奥から、道路橋以南湾口にかけての水域は濃度 1ppm 以下となり、湾口外への流出も顕著である。

小潮時80潮汐目の濃度は図-31-3 に分布図を示したが、湾内の濃度分布は道路橋によって湾奥、湾口部の2水域に分断されるパターンとなるのは、横断道路橋に関

する他の実験ケースと同様であり、地形の同じ実験 No. 13 の図-26-3 と比較し著しい傾向であり、道路橋近傍水域の濃度が高くなるのは注目すべき現象である。

(11) 実験 No. 106 (昭和60年D案地形、横断道路橋 B案)

実験濃度分布図を図-32 に示したが、このケースの地形は前実験 No. 18 と同じであり、濃度分布は図-28-2 に対応する。この両図の比較によれば、濃度分布のパターンはほぼ相似であるが、道路架橋の場合、道路橋以北湾奥千葉県水域の汚水濃度が均一化された様相がみら

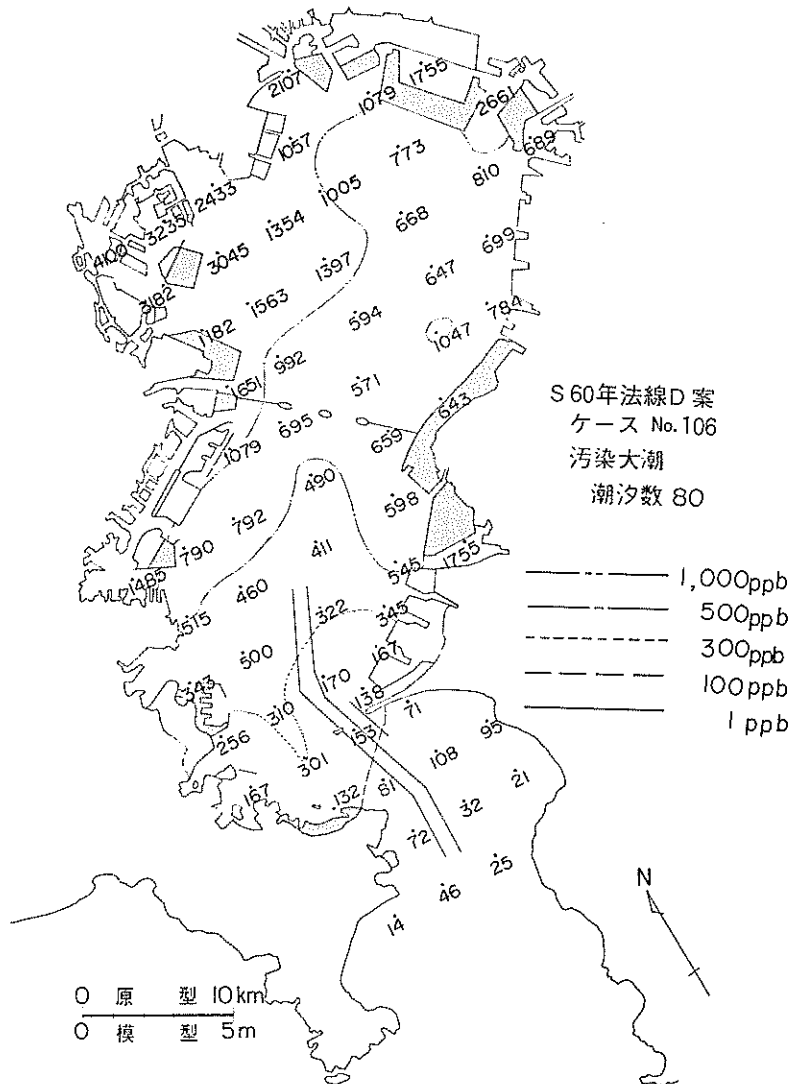


図-32 濃度分布 (60年D案地形、道路橋B案、80潮汐目、大潮)

れ、道路橋以南水域への拡がりも広域に亘っている。

また前実験 No. 103 の 図-31-2 の濃度分布に較べ道路橋以北湾奥水域の濃度が高く、以南湾口部にかけての水域では低濃度となっている。この原因は盤州前面浅海部の影響であることは明らかであり、浚渫による潮流流線の調整が、汚水の拡散現象にも極めて有効であることを示している。

7.4 各種計画に伴う濃度分布の特性

以上のように各拡散実験の経過と汚水濃度分布の定性的傾向を記述したが、ここで潮流比較を行なった 図-17 の各水域における平均濃度について、各実験の特性を検討してみる。

(1) 汚濁負荷量の変化による汚濁特性

実験に採用した汚濁負荷量は表-4 および表-5 に示したように、原型 COD 値で44年値 662 t/d、60年値で405 t/d であり、60年値は規制および浄化能力の向上を考慮したものであるが、44年値に対し約 39% の減少となっている。これら負荷量による湾内の濃度分布は 図-22, 23 の各図に示されているが、現況地形における44年値の拡散範囲は湾奥一帯に濃度 1 ppm (1000 ppb) 以上となって、60年値の分布に較べ広範囲に分散している。図-33-1~2 は湾内各水域の平均濃度を示したものであるが、大潮時の湾奥 E~G 水域では変化がほとんど見られないが、湾中央から湾口にかけて負荷量の減少に対応して濃度も減少している。また小潮時は湾内総体的に60年値が低濃度となっている。この潮位差による濃度変化の相違は明確でないが、湾内汚濁濃度は負荷量と強い相関を有することは明らかであり、濃度減少率も総平均で約 25% 程度となっている。

(2) 湾口航路開削の効果

潮流実験と同様に地形別に (i) 現況45年地形、(ii) 昭和60年埋立地形、C、D案別に湾口航路有無の実験ケースの濃度分布を比較したのが 図-34-1~5 の各図である。

図によれば各地形とも湾口航路開削によって湾奥 E~G 水域の汚濁濃度が低下し、反面 A~D 水域にかけて濃度が若干上昇する結果となっている。この傾向は大潮、小潮ともに同様であるが、その変化率は大潮時の方が大きい。この結果潮流実験では湾口航路開削の効果を的確に把握するのは困難であったが、汚染実験から航路開削は湾内の汚水拡散に非常に有効であることが明らかである。

(3) 沿岸埋立による影響

湾口航路有無を基本とし、地形変化をパラメータに各

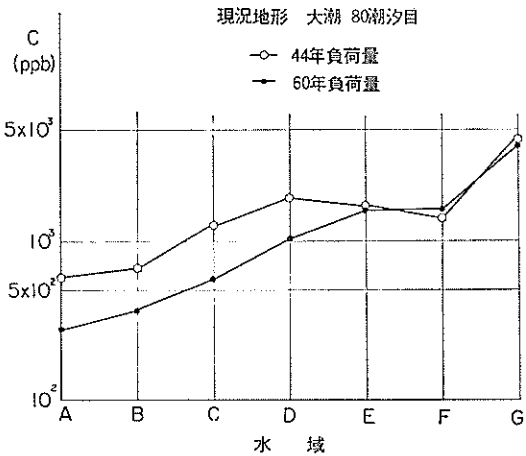


図-33-1 汚濁負荷量変化による濃度分布比較 (現況, 80潮汐目, 大潮)

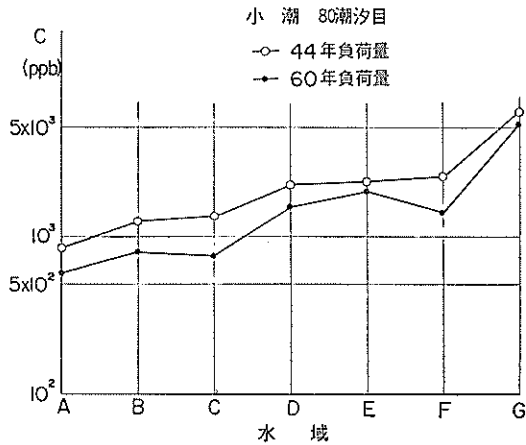


図-33-2 汚濁負荷量変化による濃度分布比較 (現況, 80潮汐目, 小潮)

水域の平均濃度の比較を 図-35-1~4 の各図に示した。

図-35-1 は湾口航路なしの実験ケースの比較であり現況 (No. 14)、60年 C案地形 (No. 15)、60年 D案地形 (No. 19) を併記してあるが、No. 15 ケースは湾奥で濃度減少し、湾中央から湾口 (A~D 水域) にかけて濃度増加を示しているが、No. 19 は全くその傾向とは逆に現況とほぼ同様であり、湾奥で濃度上昇を示している。No. 15、No. 19 両ケースの相違は盤州前面浚渫の有無であり、No. 19 は現況水深に埋立造成したケースである。これらの地形変形を考慮すれば潮流の流況変動からも濃度分布の傾向は納得できる。反面 図-35-2 の小潮時の濃度分布は各水域で濃度増減が生じており一般的な傾

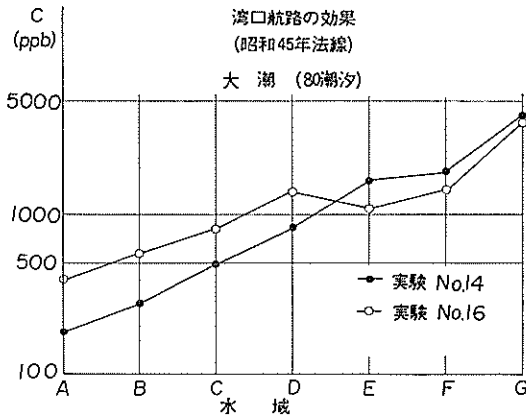


図-34-1 濃度比較図 (現況, 大潮, 80潮汐目)

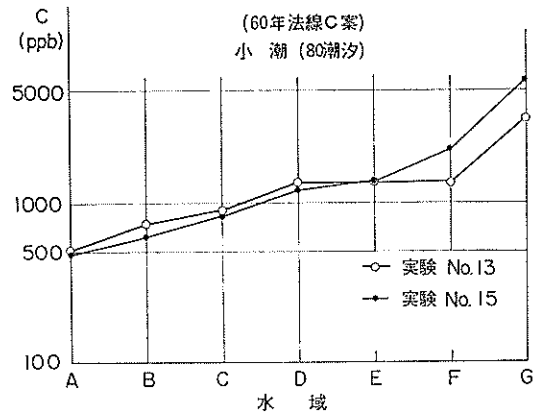


図-34-4 濃度比較図 (60年C案地形, 小潮, 80潮汐目)

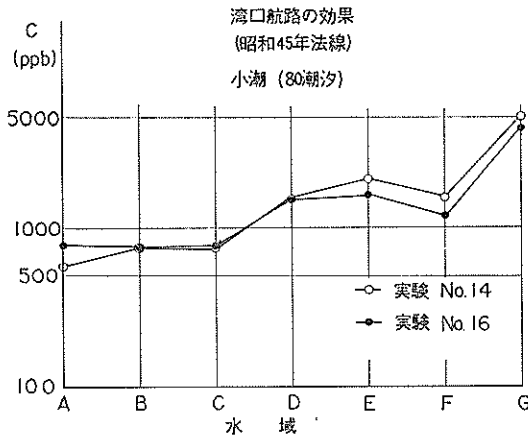


図-34-2 濃度比較図 (現況, 小潮, 80潮汐目)

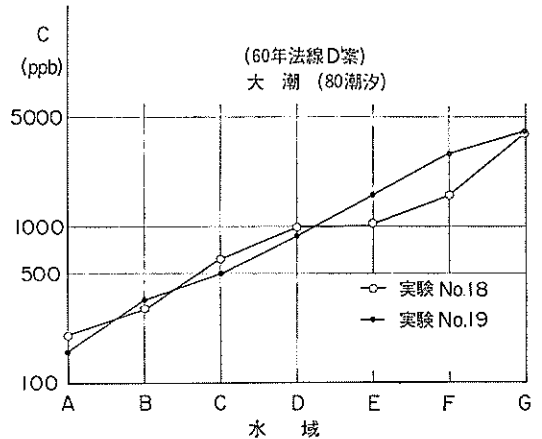


図-34-5 濃度比較図 (60年D案地形, 大潮, 80潮汐目)

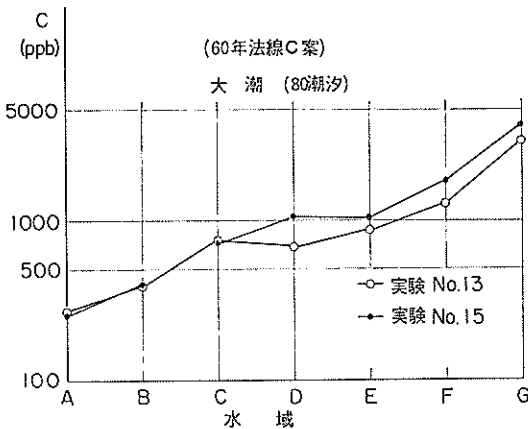


図-34-3 濃度比較図 (60年C案地形, 大潮, 80潮汐目)

向は判然としない。

図-35-3~4 は航路有りの埋立ケースの比較であるが、大、小潮とも各埋立ケース (No. 13, No. 18) は現況 (No. 16) より全般的に濃度が減少している。

この結果、沿岸埋立地造成によって湾内の特に湾奥の汚濁濃度を上昇させる傾向が見られ、湾中央から湾口への拡散速度を低下させていると推察されるが、湾口航路の開削は前記 (2) で述べた様に湾内汚水の拡散に非常に貢献していると同時に、湾内潮流の流通を阻害している盤州前面浚渫によって、湾内埋立による拡散力の低下を充分カバーしていることが判る。盤州前面浚渫の拡散への効果は No. 15~No. 19, No. 13~No. 18 実験ケースの比較によって、有効性を把握することができる。

東京湾の潮流による物質拡散の水利模型実験

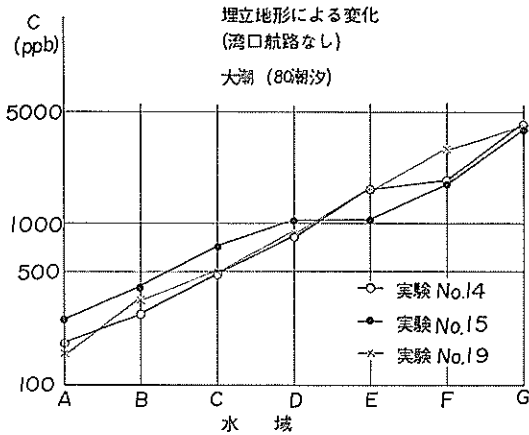


図-35-1 濃度比較図 (埋立地形による変化, 航路なし, 大潮)

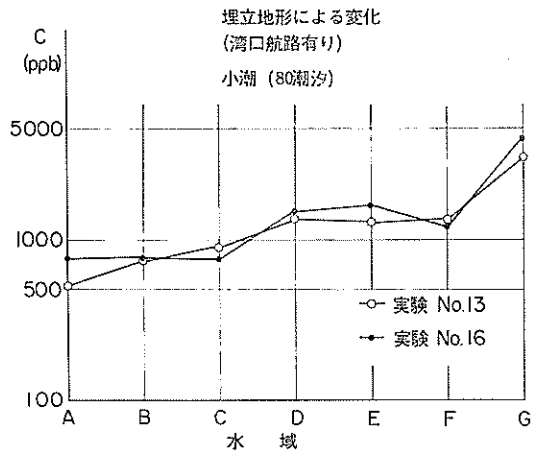


図-35-4 濃度比較図 (埋立地形による変化, 航路あり, 小潮)

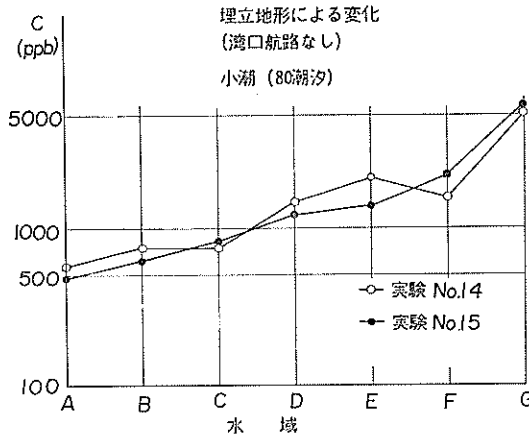


図-35-2 濃度比較図 (埋立地形による変化, 航路なし, 小潮)

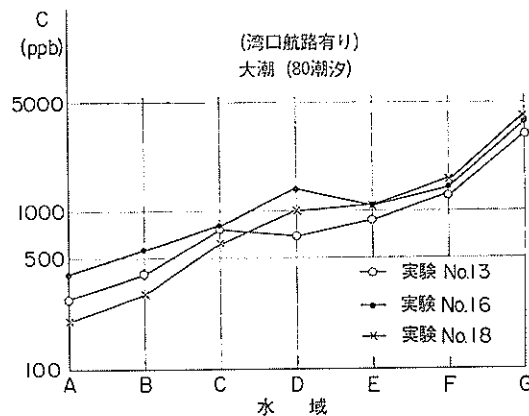


図-35-3 濃度比較図 (埋立地形による変化, 航路あり, 大潮)

(4) 構断道路橋の影響

(i) 現況地形に対する影響 図-36-1~2 は現況地形 (実験 No. 14) に道路橋型式B案 (実験 No. 104), A案 (実験 No. 105) 架橋による湾内濃度分布を潮汐別に示したものであり, 大潮時 (図-36-1) はA, B型式とも湾奥E~G水域で濃度の減少が著しく, 反面道路橋以南湾口にかけての水域でいずれも濃度が上昇しており, 道路橋設置水域Dにおいても僅かながら汚染濃度が高まっている。図-36-2 の小潮時の実験は1ケース (No. 104) のみであるが, 湾内総体的に濃度低下し特異な分布となっている。なおこれらの実験ケースはいずれも湾口航路開削なしのケースである。

(ii) 昭和60年C案地形に対する影響 図-36-3~4 の各図に大潮, 小潮別に比較してあるが, 大潮時の変化は小さく判定困難であるが, しいて傾向を求めれば, 湾奥で濃度上昇傾向にある。小潮時は湾奥のF~G水域で濃度上昇を生じているが, 他水域は前記 (i) 同様に総体的に濃度低下を起している。なお, このケースは湾口航路開削と盤州前面浅海部浚渫を行なった地形である。

(iii) 昭和60年D案地形について, 図-36-5 に湾口航路開削ケースの比較を示したが, 道路橋以北湾奥で濃度減少, 以南水域で濃度増加の傾向は 図-36-1 の傾向と一致しているが, 各水域での変化は小さい。

以上の実験比較から, 大潮時に関しては現況地形に対して架橋の効果は, 道路橋バンクによる潮流の増速によって, 道路橋以北湾奥水域の拡散力を促進させる結果, 以南水域への汚水の流出を増大させる様相が認められる

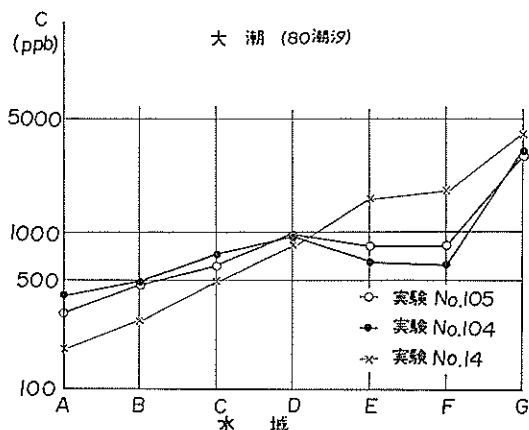


図-36-1 濃度比較図 (横断橋について、
現況地形、大潮)

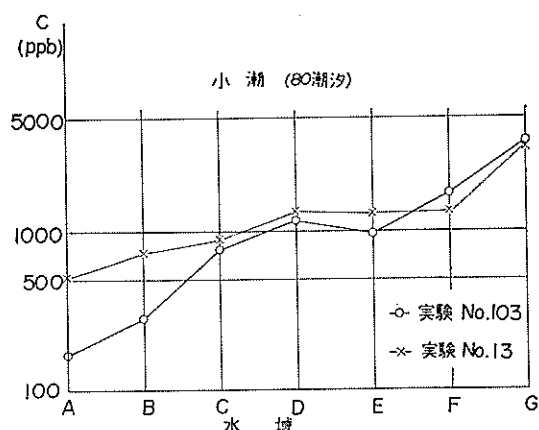


図-36-4 濃度比較図 (横断橋について、
60年C案地形、小潮)

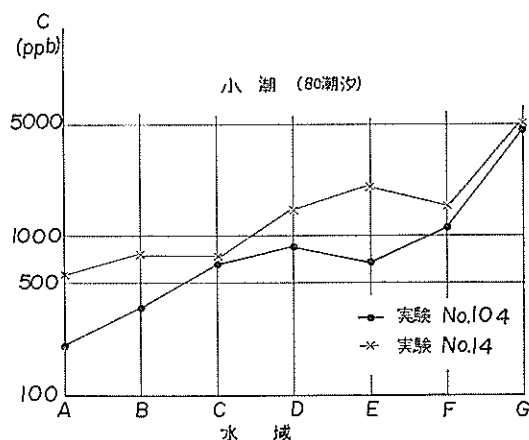


図-36-2 濃度比較図 (横断橋について、
現況地形、小潮)

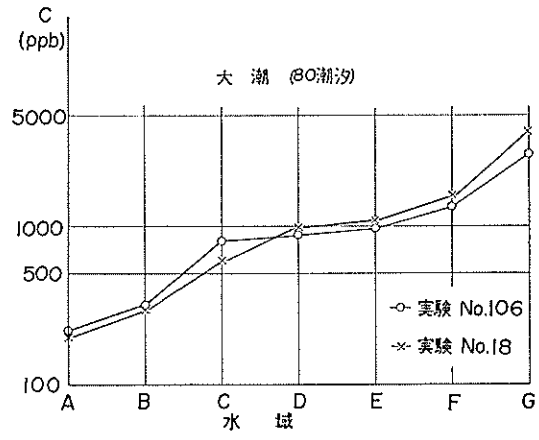


図-36-5 濃度比較図 (横断橋について、
60年D案地形、大潮)

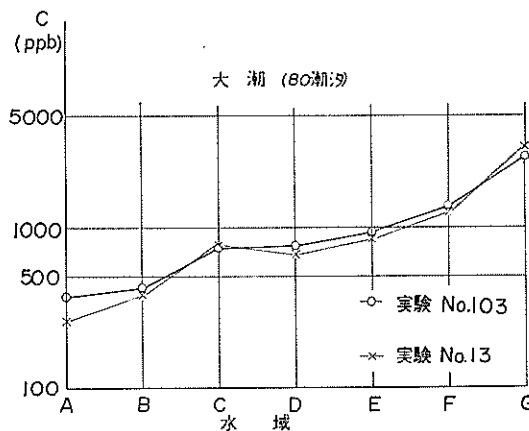


図-36-3 濃度比較図 (横断橋について、
60年C案地形、大潮)

(図-36-1 および 36-5)。しかし 図-36-3 に見られるように、道路橋法線に当る盤州前面浅瀬の昭和60年C案地形に関しては、道路架橋によって湾奥の汚水濃度は僅かながら上昇している。これは、盤州前面浅海部浅瀬によって当該水域の潮流の流動が容易となり且つ、流水有効断面積の増加によって潮流の平均流速が低減し、架橋バンクによる局所的な増速度も弱まった結果、それによる拡散力も低下したものと考えられることと、当水域の恒流が架橋によって幾分阻害されるのではなかろうかと推測されるが明確でない。

道路橋型式の比較は 図-36-1 で可能であるが、両橋とも湾全体に対する濃度変化の傾向は全く相似であるが、現況濃度分布に対する変化は実験 No. 105 の A 案が小さい。

東京湾の潮流による物質拡散の水理模型実験

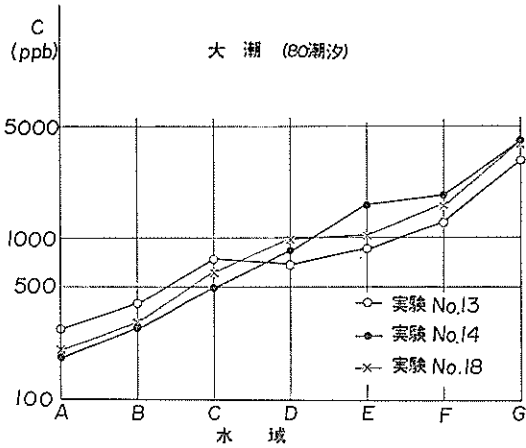


図-37-1 濃度比較図 (総合計画, 大潮)

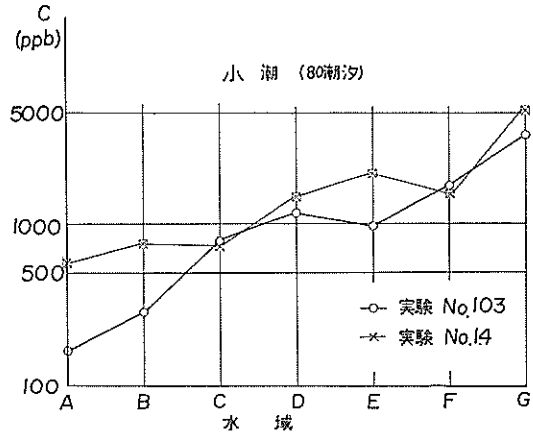


図-37-4 濃度比較図 (総合計画, 小潮)

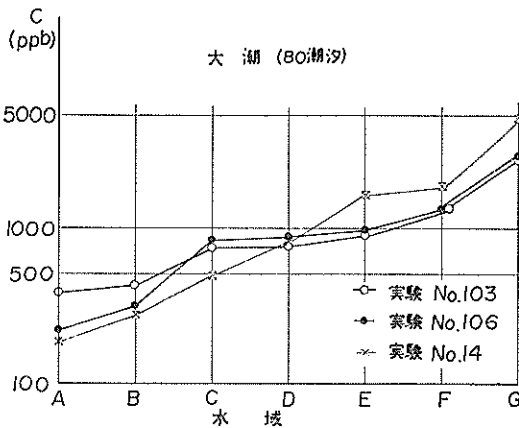


図-37-2 濃度比較図 (総合計画, 大潮)

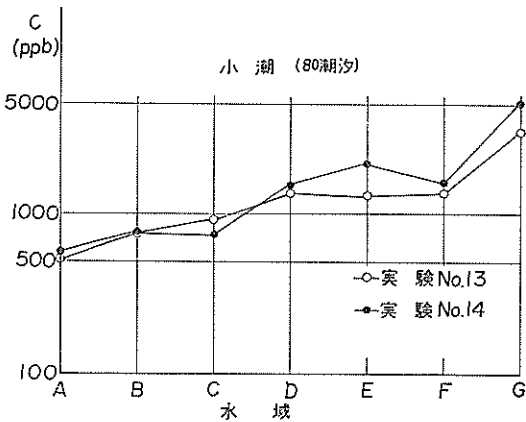


図-37-3 濃度比較図 (総合計画, 小潮)

(5) 各計画の総合効果

前記(1)~(4)ではそれぞれ単独に各計画の影響を検討したが、ここでは湾口航路開削、沿岸埋立地造成、横断道路架橋など総合して、現況地形に対して、湾内の濃度分布を比較すると 図-37-1~4 の各図である。

大潮時にお各計画、60年C案地形(実験 No. 13) 60年D案地形 (No. 18) およびそれら地形における架橋のケース(実験 No. 103, No. 106) はいずれも湾奥E~G水域で濃度が低下し、反面湾口から架橋水域のA~D水域で濃度上昇の傾向を示している。そして盤州前面浅海部浚渫ケース (No. 13, No. 103) はいずれも濃度の変化が大きい。

図-37-3~4 の小潮時は変化が複雑で明確な特性は把握し難いが、これは湾内の潮流速が弱いため汚水が沿岸に滞留し湾奥までは拡散していない結果と考えられる。

8. 考 察

8.1 流 況
(1) 現 況

東京湾内の潮流は外海の潮汐変化に誘起され且つ、湾口狭控部によってコントロールされている。したがって潮汐変化に順応して単調に上げ潮、下げ潮を繰返しているが、流速は湾口部が最も速く平均大潮時約1.5~2.0kt、大大潮時3.5kt~4.0ktを示し、湾内流速は、湾の横幅方向にほぼ一様にして、湾口からの流入距離に反比例して減速し、湾奥では湾口流速の1/10以下の緩流速となる。局所的な流況の最も大きな特徴は湾口部付近の地形変化による反流域の形成であり、潮流最盛期を除き、転

流時前後には、富津岬の湾内外の沿岸水域および観音崎から金田湾にかけては常に反流域が出現しており、特に観音崎側の反流域は 0.3 kt の強い渦乱状を示し、湧昇流、沈降流などが発生し流況は複雑である。

湾内恒流には、東京湾の形状および流入河川的位置が強い関係を示しており、湾央の川崎～盤州を結ぶ線によって 2 系統の恒流が存在している。川崎以北湾奥水域は東京港から時計方向に千葉県側に廻流する傾向の流れがあり、この恒流は湾奥部で環流する様相が強い。湾央から湾口にかけては、京浜沿岸を南下する河川流に起因する系統の恒流と、東京港から対岸盤州に向って南下する恒流があり、この恒流は中の州上で環流する傾向が認められる。さらに富津から木更津港前面沿岸には北上する弱い恒流もある。なお湾口部の神奈川県側沿岸を南下してくる恒流は最大 0.5 kt にも達して恒流現象としては速い流速を示している。

以上の模型潮流現象は 図-2 の原型流況図と対比して、湾全体的な傾向は一応満足できると考えられる。

(2) 各種計画に伴う流況変化

(i) 湾口航路開削および沿岸埋立造成の影響

新航路開削によって湾口の流水断面積は現況の約 15% 増となるので、湾内への潮流の流出入は容易になる筈である。既に実施した湾口航路潮流模型実験結果（港研報告 Vol. 12, No. 1）では湾内の平均流速は約 10~20% 程度増速を示しているが、今回の実験結果は 図-18 の各図に示した様に必ずしも前回と一致していない。しかし湾内では若干増速する傾向は充分認めることができるので、湾口航路開削は湾内外の海水の交流に有効であると判断される。

沿岸埋立地の造成が湾内潮流におよぼす影響については 図-19, 20 で各計画との関連で検討されたが、それぞれに影響の傾向が異なり、一般的な傾向の判定はむずかしい。換言すれば埋立地造成の潮流におよぼす影響が小さいことを示すものとも考えられる。

一般に湾口を通して外海からの誘因によって湾内の潮流が支配されるような閉鎖状地形の海湾では、湾口部の断面積を拡大すれば、外海から湾内への交流量は増加し、従って湾内の流速は増速すると考えられる。反面湾内埋立造成による内水面積の減少は、湾内への交流量を抑制する効果となり、従って湾内の流速を低下させるであろう。今回の実験ケースも湾口航路の開削、湾内埋立計画はそれらの現象を示すであろうと期待したが、埋立による水面積の損失は現況の 8.7% 程度にして極めて小さく

このため沿岸埋立造成の影響は潮流変化に現れなかったものと推定される。さらに盤州前面浅瀬は当該水域の流水有効面積を増加させることになるから実質的な埋立による水面積の減少は更に少なくなっているので、潮流現象への影響は一層削減していると考えられる。また湾口航路開削は約 15% の断面積増加となっているので、湾内交流量は埋立地造成による影響を充分カバーしていると判断され、潮流現象としては埋立造成による減速分を補足しなお若干増速する結果として把握されたものであろう。

以上のことから湾内埋立地の造成は湾内潮流におよぼす影響は少なく、潮流現象を阻害するとは考えられない。むしろ埋立計画に伴う盤州前面浅海部の浅瀬は有効であり、当該水域の潮流の流動をスムーズにする点は重要であり、湾奥水域の海水交換の上で必要なことと思われる。なお実験の上で測定はなされていないが、この浅瀬によって当該水域の恒流は相当変化しているであろうと推測される。

局所的な流況については羽田空港埋立地の拡大は東京港への漲潮流を抑制する様相が見られ、特に大井埠頭付近の潮流の流動が緩慢になるのは見落せない現象である。

(ii) 横断道路橋の影響

道路架橋による当該法線における埋立地およびバンクによって損失する流水断面積は D.L 以下で現況に対し約 20% 程度（B 案）であるから、この断面における海水の交流量の変化は考えられない。従って各バンクにより分割された水路筋は当然増速を示しており、 図-15, 16 および 図-21 の各図に示したように湾口部に匹敵した流速が出現し、現況に対し 1.5~2.0 倍の流速となる。しかし道路橋内外水域の流況は現況のパターンに較べても特に著しい変化は見受けられない。

道路橋バンクによる局所的な流況のうち、潮流に対してバンクの陸部となる水域には反流が出現するが、これは当然予想されることであり、反流域の範囲はバンク内外で 1.0~2.0 km 程度であり、反流域の動揺は少ない。これは当該水域の流線が比較的一様なためであるが、バンク両端から発生する渦乱流が底層において著しいのはバンクの形状が模型上で小幅（厚さ）であることが起因しているとも考えられ、潮流の流動に対しては幅を持たせる様な考慮が必要と思われる。

またしばしば述べた様に架橋とは別途な計画であるが、盤州前面浅海部の浅瀬は 図-13~16 の潮流図から感

得される様に、架橋によって生ずる当該水域の増速および流線の変化を、低下および調整するのに極めて有効であり、航行船舶の安全上からも好ましいので、架橋条件の一つになり得るのである。

以上のことから横断道路橋放置によって局所的な潮流の増速は起こるが、湾内潮流の流況に著しい悪影響をおよぼすとは考えられない。(航行船舶に対する影響は考慮しない)しかしながら架橋に伴う川崎側の埋立地の突出($L=1500\text{m}$)は過大であり、この埋立地と羽田空港埋立地の拡張と相まって、東京港への潮流の流入出をやや抑制、阻害している様相があるので計画の実施にあたり充分注意しなければならない。

8.2 汚 染

(1) 相似性について

この種の実験において、歪模型が拡散現象を正しく再現できるという理論的根拠もなく、また模型上の乱流現象を正当に再現し得たか、拡散の機構的な確認もできなかったが、拡散の度合いを表わす拡散係数は図-10に示すように局所等方性乱流理論から導かれるスケールの $4/3$ 乗則に近い傾向が得られた。しかし現象スケールの小さな領域では2乗に近い傾向があり、東京湾の実測値とは異なっている。これらの相違については、模型上の乱れの構造の再現性、模型縮尺などの影響が考えられ、原型に関する資料も少なく、模型上の乱れの測定も困難なため十分な検討が出来なかった。

海域の拡散係数は前記6.2で述べたように式(10)で表現され、比例係数 α は実測例によれば $0.01 < \alpha < 0.09$ にして水域の地形、水利条件によって異なり、外洋では一般に 0.01 とされている。そこで模型上の拡散係数も $K \propto L^{4/3}$ に叶うものとして実験値から α を求めると $\alpha \approx 0.035$ となり、外洋値に較べやや大きな値である。この原因は模型上の人工粗度によるものと理解される。しかし α は前述した $0.01 < \alpha < 0.09$ の範囲内に在る。

また図-10から求まる K 値を原型に換算すると $3 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5 \text{ (cm}^2/\text{s)}$ となり、一般に言われている内湾域の水平乱流拡散係数とオーダーは一致している。

これらのことから拡散についても、前述した湾内の平均的な潮流の流況の合致と相まって、湾内の拡散の相似性はほぼ満足できるものと考えられる。

(2) 現況地形における拡散

沿岸汚染源から湾内に流入した汚水は潮流によって混合し付近水域に拡散した後、時間経過につれて潮流の流動によって湾内に分散してゆくが、長時間後の流動方向

を支配するのは湾内の恒流であり、図-22~24の各図はこの傾向を明瞭に示している。すなわち汚濁負荷量の大きな東京湾奥東京港付近からの流出汚水は、時計方向に廻流する恒流によって船橋方向に流動するとともに、一部は川崎沿岸に流出して南下する流れと、対岸盤州側に向って東京湾を横断する恒流によって南下し、横浜付近からの流出汚水は沿岸を南下する恒流により湾口に向って南下する。潮流の微弱な小潮時は河川流の影響が現れ、大河川の流入する京浜側の沿岸を南下する様相が強くなっており、千葉県沿岸では拡散力の低下によって徐々に前面水域へ流出する傾向となる。

湾内の汚濁濃度については汚濁源の負荷量に強く関係しており、汚濁源の大きい東京港付近の濃度が高く、湾奥から湾口へ近づくに従って濃度は減少する。(図-22, 23の各図)

なお特に川崎—盤州を結ぶ線以北湾奥水域の汚濁濃度が高い理由として、汚濁負荷量、汚濁源が大きく、その上潮流流速が微弱であるとともに、この水域の恒流を規制する地形が重要な要因であり、盤州前面浅海部の存在が指摘できる。

(3) 各種計画に伴う拡散

(i) 湾口航路開削の効果

潮流実験では航路開削の効果が的確に把握できなかったが、汚染実験においては図-34の濃度分布図に示したように湾奥濃度が減少し、湾奥から湾口水域で汚濁濃度が上昇する傾向がみられる。これは潮流流速の僅かな増速によって拡散力が増大することが考えられ、大潮時、小潮時も全く同様な傾向を示していることから推察される。この結果湾口航路開削の効果は潮流現象よりも、湾内の汚濁拡散現象から把握され、湾内の汚濁清浄化に有効であると考えられる。しかし小潮時には航路開削後も湾口近傍の濃度レベルが大潮時に較べ高いことは、いまだ外海との海水交換が小さいことを示すものである。

(ii) 湾内埋立による影響

図-25~28の各図に示したように湾内濃度分布は、現況地形に較べ、千葉県側の濃度が低下しており、図-35の各水域の濃度分布図からも、湾内に著しい悪影響をもたらす様相はない。しかし実験No. 19(60年D案地形)のみは湾奥で濃度上昇がみられる。これは地形的に当然予測されることであり、盤州前面浅海部の浚渫効果が改めて認識させられる。

しかしながら埋立地造成によって潮流の流動が阻害される沿岸の局所的な水域では汚染度が著しく上昇し、濃

度が定常化している。この代表例として湾奥の幕張前面に計画されている広大な埋立地に囲まれた水域を挙げることができる。さらに羽田空港の大規模な拡張は東京港内大井埋立地近傍の海水流動を抑制する傾向から、この水域の汚染度を上昇させる様相がみられる。

いずれにしても湾内埋立計画について局部的な悪化水域は僅かにして、湾内全般的な濃度分布には著しい悪影響を生じていない。ただし湾内汚染の長期的な展望から考察しても、埋立計画の実施とともに、湾口航路の開削および盤州前面浅海部の浚渫は望ましく、浚渫不可能ならば現行線以上に湾内への埋立法線の進出は極力避けねばならない。

(iii) 横断道路橋の影響について

架橋に伴う湾内各水域の平均濃度は図-36~37の各図に潮位別、地形別に比較した図を示したが、これらの各図から架橋の影響は盤州前面の水深によって異なる様相を示している。

すなわち、現況水深(実験 No. 14)に対する架橋ケース(実験 No. 103~106)の実験結果は大潮時、各ケースによって程度の差はあるが、いずれも湾奥で汚染濃度が減少し、反面湾奥から湾口にかけて濃度上昇が生じており(図-36-1, 図-37-3)、小潮時には全実験とも湾内全域で濃度減少傾向を示している。(図-36-2, 図-37-4)

しかるに埋立地形(実験 No. 13 および No. 18)における架橋実験 No. 103 および No. 106 のなかで、盤州前面の水深が現況と同じケース(実験 No. 106, 湾口航路のみ開削)の大潮時の湾内汚染濃度分布は前述の傾向と同様であるが、その変化率は小さくなっており(図-36-5)、一方盤州前面浅海部浚渫後の実験 No. 103 の濃度分布は図-36-3 に示すように、他の傾向と異なり、湾奥で僅かながら濃度が上昇している。ただしこの増加は僅少であり実験誤差とも考えられるが、この実験ケースの湾内濃度分布図(図-31-2)からも、湾奥での汚染濃度の上昇傾向が認められる。

一般に流水中に構造物を設置した場合、構造物によって遮弊された内部水域は滞流が生じ易いので、この様な流況下にある水域の汚染現象は、汚染源の存在と、流水の停滞傾向から汚染濃度は上昇するであろうと予測される。この推論に従えば、図-36-3 にみられる湾奥水域の汚染濃度上昇傾向の結果が普遍的現象であり、湾奥での濃度減少傾向の結果は特異現象と言わざるを得ない。けれども、しばしば既述したように実験における湾内の濃度分布は、湾内潮流、恒流の流動によって規定されるので、

架橋の場合は道路橋バンクによる局所的な増速と、バンク両端から発生する渦乱流によって、この水域の流水の持つ乱れエネルギーは必然的に増強されていると予想でき、したがって乱れに基く水域の拡散力は当然増幅されている筈である。この結果当該水域から湾奥水域にかけて汚水の拡散が促進され、増速した潮流によって道路橋以南の湾奥水域へ分散させられることにより、湾奥の汚染濃度が低下したものであろうと推察される。このことは図-36-1の道路橋型式A, B案のうちバンク数の多いB案ケースの実験結果(実験 No. 104)からも一応納得することができる。

とすれば、同じ架橋に関する実験でありながら図-36-3の傾向は何故かの疑問が生ずる。盤州前面浚渫により当該断面の通水有効断面積が増加し、潮流の流速が、浚渫前に較べ若干低下するとともに潮流の流動が容易になったことは著しい効果であった。しかし架橋によって当該断面の潮流流速は図-21の各図に示すように増速されているので、前述した拡散効果は期待できた筈である。けれども図-21の各図から判るように潮流増速を架橋前後の実験ケースについて較べてみると(実験 No. 14; No. 104 および実験 No. 13; No. 103)、上げ潮、下げ潮の平均値で、実験 No. 103 ケースは実験 No. 104 の約1/2程度となり、さらに湾奥F水域での減速が大きい。この結果潮流の乱れの大きさ(変動流速)は流速に比例すると仮定すれば、乱れの大きさも約1/2となり、乱れの運動勢力は流速の2乗に比例することから、その運動勢力は1/4以下となって、拡散力への貢献は一層低下していると推測される。

加えて盤州前面浅海部浚渫により潮流の流動が容易になったことから、実験では把握していないが当水域から湾奥にかけて恒流現象が浚渫前に較べて相当変化しているものと考えられ、この恒流が架橋によって再び変化することも予想されるので、これらの複合作用によって、他の架橋実験ケースと異なる濃度変化を示したものと推察されるが、断定するに至らない。

それにしても図-36-1の結果は潮流分布から考察してやや過大と思はれるが、同じ湾内水深である図-36-5の結果および図-36-3の異なる濃度分布の傾向などを勘案しても、架橋によって湾内の汚濁物質拡散現象におよぼす影響は少ないと判断される。そして図-37-1~3に示すように湾内の水深によって効果が異なることから、汚水の分散には局所的な拡散力の増強よりも、潮流の流動効果が強いことが推察されたので、架橋には当該水域の

潮流を阻害しないよう、充分に配慮する必要がある。

なお東京港前面水域は架橋によって現況時より汚染濃度上昇の様相があり、この原因は架橋に伴う川崎側埋立地の突出が過大であることによるものであり、さらに架橋法線上の水域も汚染濃度が上昇する点は注意すべきである。

9. 結 論

水平縮尺 1/2000, 垂直縮尺 1/100 の模型を用い半日周期の潮汐現象の下に生じる潮流および染料をトレーサーとした拡散実験によって、東京湾内の湾口航路開削、沿岸埋立地の造成、横断道路架橋などのプロジェクトが、湾内潮流、汚濁物質の拡散現象におよぼす影響を検討した結果つぎの諸点が明らかになった。ただし実験の流体は淡水であり、汚濁物質のトレーサーは染料を用いており、原型現象の再現には海水の密度、波浪、風などの作用さらに、拡散機構において、沈殿、生物化学的変化などいわゆる自浄作用等を全く考慮していない。さらに濃度分布も実験の80潮汐目における染料濃度である。

- (1) 湾口航路開削によって湾内への潮流の流動は容易となり、従って湾内潮流は現況に比して約 10~20% 増速する。
- (2) 湾内埋立計画 C, D 案は湾内水面積を現況の約 8.7% 減少する結果、湾内潮流は若干減速する傾向は認められるが、特に著しい影響は見当らない。のみならず計画C案の盤州前面浅海部の浚渫は、当該水域の潮流流線を調整させる結果となり、その流動を容易にする点で極めて有効である。したがって埋立案の比較は潮流面からはC案が好ましい。
- (3) 道路架橋について潮流面からの検討によれば、湾内全般的な流況を著しく阻害する影響はないが、道路橋バンクにより分割される各水路筋の流速は増速され、現況の 1.5~2.0 倍程度の流速となる。またバンク近傍には反流域および渦乱流が発生し、その影響範囲は 0.5m~1.0m (1000m~2000m) におよんでおり、特に渦乱流の発生が底層近傍において強いことは注意を要する。
- (4) 湾内の汚水拡散機構は、潮流の流動によって混合希釈され広域に分散するが、長時間後の流動は湾内恒流に支配される。大潮時川崎~盤州以北湾奥水域では環流する傾向があり、以南水域では京浜沿岸に添って南下する。小潮時には潮流が弱まるため拡散力も弱まり、反面河川流の影響が卓越する傾向にあ

り、大川川の流入する京浜側沿岸を南下する様相が強まる。

また濃度分布は、汚濁負荷量、汚染源の位置に支配されており、汚濁負荷量と、濃度分布は強い相関が認められる。

- (5) 湾口航路の開削は湾奥水域の汚水の拡散を促進させるのに有効である。また湾内沿岸埋立地の造成による汚水拡散現象への影響は見受けませんが、局部的に埋立地に囲まれる水域の汚濁濃度は当然ながら上昇する。なお埋立計画に伴う盤州前面浅海部浚渫は湾奥水域の汚水の拡散を促進するのに非常に有効である。
- (6) 横断道路架橋に関しては、架橋によって湾内汚濁物質の拡散を阻害する傾向は少なく、むしろ現況水深時架橋の場合は、道路橋バンクによる局部的な潮流の増速と、バンクから発生する乱流は、湾奥で滞流傾向にある汚水を拡散させる効果を示しており、盤州前面浚渫後に架橋した場合は架橋による局部的な潮流の増速度が小さく、拡散力も弱まる結果、浚渫後の湾内濃度に比べ、大潮時において、僅かながら濃度上昇を生ずる傾向が見られる。

さらに架橋に伴う川崎側埋立地の突出は、羽田空港埋立の拡張と相まって、東京港前面水域の汚濁濃度を上昇させる様相があり、架橋法線上の水域でも現況に比べ汚濁濃度が上昇する傾向がある。

10. あとがき

以上記述した様に東京湾の潮流現象、汚濁物質の拡散現象について湾内の各種プロジェクトによる影響を把握することができたが、汚染実験は我々にとって初の実験であり、この遂行には二年余を費している。この間種々の難問題が発生しており、それらの解決にかなりの時間を浪費している。と云って此の種の実験手法を確立した訳ではなく、特に拡散現象におよぼす模型歪の影響、汚染トレーサーとしての染料の相似性、さらには実験時間の決定などの問題が残されている。この実験では湾内濃度表示に実験開始後80潮汐目を以て示してあるが、横断道路橋に関する実験ケースのうちには、湾内濃度が80潮汐目でもいまだ定常状態に達しない測点もあり、従って最終濃度としてはより高濃度に達するであろうと思われる。これらの問題はこの種の実験では早急に解決しなければならない点であり、別途研究を開始する予定であるが、東京湾の模型実験は引続き継続される予定であり、

今回実施できなかった点、不備な点は再検討したいと考えている。

最後にあたり、この実験を行うにあたり、運輸省第2港湾建設局横浜調査設計事務所の方々には熱心な協力を給わり、実験の実施に当っては日本テトラポット株式会社の藤島、岡部両君の協力を得た。これらの方々には深く感謝いたします。(1974年7月1日受付)

参 考 文 献

- 1) 金子安雄, 他: 東京湾口航路潮流模型実験, 港研報告 Vol. 12, No. 1, 1973
- 2) 東京湾潮流調査報告書(第1, 2報): 第2港湾建設局横浜調査設計事務所, 昭和41年, 昭和42年
- 3) 東京湾汚染調査報告書: 第2港建設局横浜調査設計事務所, 昭和43年3月
- 4) 昭和46年度, 水質汚濁共同調査報告書(東京湾総合調査): 一都二県公害防止協会, 昭和47年8月
- 5) 昭和46年度, 東京湾汚濁調査: 建設省関東地方建設局, 土木研究所, 昭和47年3月
- 6) 堀口孝雄, 他: 湾内における物質の拡散—東京湾の場合—, 第15回海岸工学講演会講演集, 1967年
- 7) 岩垣雄一: 現地海岸の海底摩擦抵抗係数について第12回海岸工学講演会講演集, 1965年
- 8) (6)に同じ
- 9) 平野敏行, 杉野健三: 河川流入のある小内湾の塩分分布について, 東海区水研報告, No. 22, 昭和33年
- 10) 金子安雄, 他: 大阪湾の潮流と物質拡散に関する模型実験, 港研報告, Vol. 12, No. 3, 1973
- 11) Wiegand, R. I.: Oceanographical Engineering Prentice Hall, Inc, 1964