

本実験を行う前に実験値と現地観測値を比較し、現地での現象の再現性を確認した。その後、表－1に示す20ケースの実験を行った。また上記実験および数値解析結果で見られた人工島周辺の循環流を確認するために、人工島周辺に染料を連続投入して流れの可視化実験を行った。

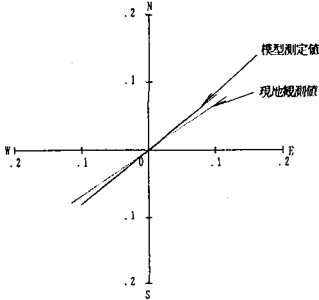
表－1 実験ケース一覧

ケース	実験条件	実験観測	ケース	実験条件	実験観測
1		流速測定	11		流速測定
2		フロート	12	人工島	フロート
3	現況	トレーサー	13	人工島+掘削	トレーサー
4		河川拡散	14		河川拡散
5		海水交換	15		海水交換
6		流速測定	16	人工島	流速測定
7		フロート	17	人工島+掘削	フロート
8	人工島	トレーサー	18	人工島+掘削+パイプライン	トレーサー
9		河川拡散	19		河川拡散
10		海水交換	20		海水交換

表－2 現地観測値と実験値
(潮位と流速の数値比較)

項目	現地観測値	模型測定値
潮位差		
豊橋	1.27m	1.30m
蒲郡	1.24m	1.26m
潮流楕円		
長軸流速	0.14kt	0.13kt
短軸流速	0.00kt	0.00kt
長軸方向	56°	51°

(磁北0°)



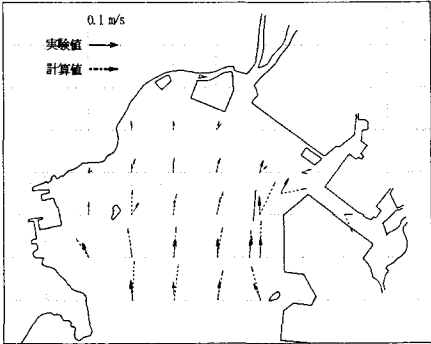
図－3 現地観測値と実験値
(潮流楕円による比較)

(2)現地再現性確認実験

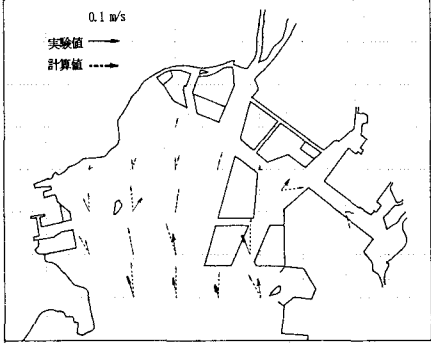
図－3および表－2にそれぞれ現地観測と実験によって得られた潮流楕円および数値比較表を示す。流速、潮位ともによく一致しており、模型実験の現地再現性が確認された。

(3)流速測定実験

流速測定実験では対象湾内を格子状に分割して、その格子点上にて流速を測定した。流速計の台数的制約から微流速電磁流速計を移動台車に固定し、各測定ポイントを1点ずつ台車を移動させながら測定を行った。流速測定点の深さは干潮時に水表面から1cm程度下の位置とした。



図－4 現況上げ潮最強時



図－5 人工島上げ潮最強時

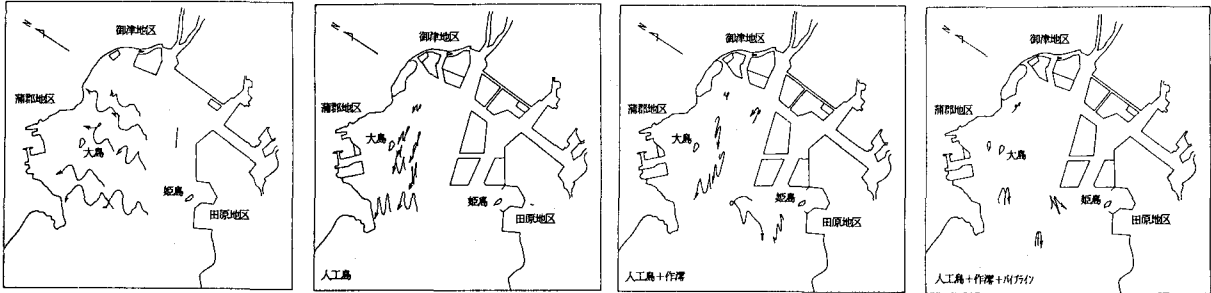
別々の時刻に測定した流速データの位相を対応づけるため、湾外の固定点で潮位変化を測定しておいて、これをもとに各点における流速測定値の位相を対応させた。測定データは0.5秒毎に約2潮汐分コンピュータに取り込んだ。流速データにはかなりばらつきが見られたので移動平均を行いデータの平滑化を行った。

図－4、図－5にそれぞれ現況と人工島建設後の上げ潮最強時の流速測定結果をベクトル図(実線)として表現したものを示す。現況と人工島建設後で流速には大きな差はないが、人工島の影響で流向が変化している。

(4)フロート実験

フロート実験は長期的な流況特性をラグランジュ的に調べることを目的として行った。20cm角の黒く塗装した発泡スチロールを湾内に静かに浮かべ、フロートが流れと共に移動する様子を天井クレーン(水面上約5mの位置)に据えつけたCCDカメラで数潮汐間ビデオ録画し、実験終了後ビデオトラッカーを用いてフロートを追跡することによって長期的な流れの傾向を可視化した。

図－6にケース2、7、12、17の実験結果を示す。ケース2の現況ではフロート全体が北方へ輸送される傾向が見られるが他のケースではこの傾向は見られない。



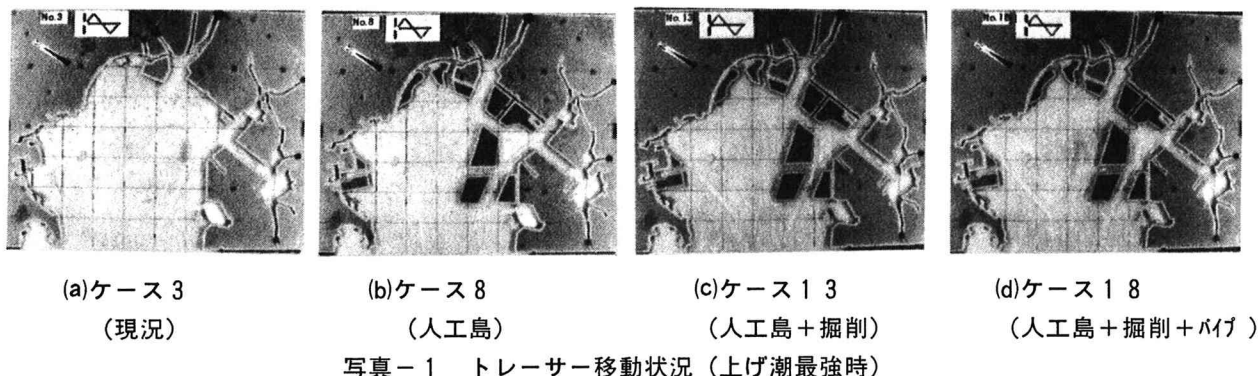
(a)ケース2 (現況) (b)ケース7 (人工島) (c)ケース12 (人工島+掘削) (d)ケース17 (人工島+掘削+パイプ)

図－6 フロート軌跡図

(5) トレーサー実験

トレーサー実験は湾内全体の流れを可視化するために実施した。対象とする湾内に蛍光塗料を塗った約10cm角の紙片を散布し、カメラの絞りを30秒間開いたままの状態では撮影することによりその軌跡を可視化した。撮影は上げ潮最強時、下げ潮最強時、満潮時および干潮時に行った。

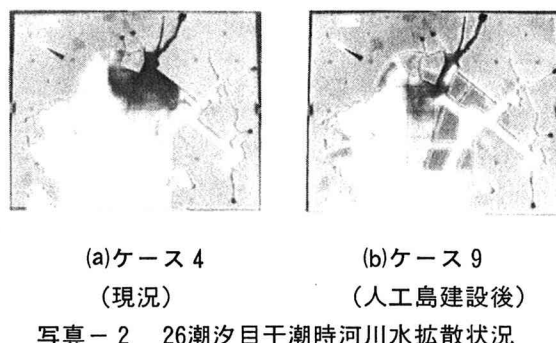
写真-1にケース3、8、13、18の上げ潮最強時に撮影した写真を示す。人工島を設置すると人工島が障害物となり、その周辺で流れの回り込みが起こって流速が増大する傾向が見られる。一方航路の掘削やパイプラインによる強制循環を施したことによる流況の違いはほとんど見られなかった。航路の掘削の流況に対する影響がほとんど見られなかった理由として、三河港での潮流がもともと小さく流況への影響が現れにくかったことが考えられる。またパイプラインによる強制循環については流量は大規模（豊川37.3m³/sに対してパイプライン流量 150m³/s）であるが流入方向を与えていないので湾全体の流況に流れを及ぼすには至らなかったものと考えられる。



(6) 河川水拡散実験

河川水拡散実験は三河港に流れ込む河川のうち最も流量が多く湾内の海水循環に大きな影響を及ぼすと考えられる豊川に着目して行った。実験方法は豊川からの流入水に染料を混ぜた着色水を使用し、着色水が湾内において拡散する様子を写真およびビデオ撮影により調べた。

写真-2にケース4、9の実験において26潮汐後の干潮時に撮影した写真を示す。現況では豊川からの水は半円状に湾全体に拡がっているが、人工島を設置したケース9では河川水が湾に流入するとすぐに人工島とは逆方向に輸送され、その後は逆に2つの大きな人工島の間の水路部分に吸い込まれる傾向が見られる。この原因として人工島を設置することによって人工島周辺の流れの構造が変化し、人工島の周辺を循環する流れが発生していると考えられる。なおこの現象については数値解析によりさらに検討を試みたので詳しくは後述する。

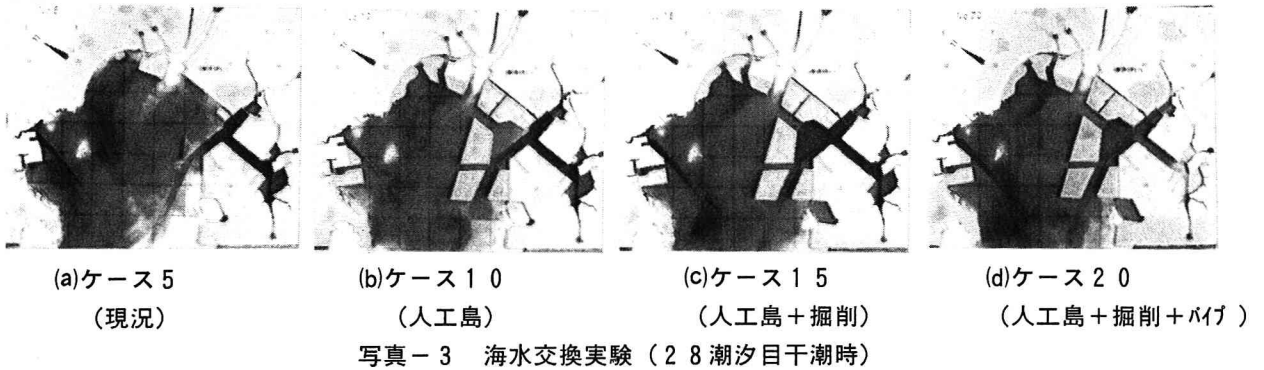


(7) 海水交換実験

海水交換実験は湾内水の外海水との交換性を調べるために実施した。実験手順としてはまず湾内と外海との境界をしきり板で塞ぎ、湾内外の水の混合が起こらない状態で湾内水を染料で一様に着色しておき、実験開始と同時に潮汐を作用させ、すみやかに仕切り板を撤去して湾内外の水の交換を可能にする。潮汐により湾口付近の水粒子は湾口を挟んで往復運動をするが一部は非線形作用により湾内外で混合されていく。染料粒子がそれを取り囲む小さな水塊と同じ動きをしていると考え、染料の濃度を調べることで湾内の水粒子の残存率を知ることができる。実験では濃度低下の過程を写真およびビデオ撮影し、実験終了後に画像解析を行い濃度の数量化を行った^{5) 6)}。写真-3にケース5、10、15、20について28潮汐後の干潮時に撮影した写真を示す。どのケースにおいても湾の右下部の濃度の低下が著しく、海水交換が活発に行われていることがわかるが、人工島を設置することによって濃度の低下が抑えられる傾向がある。

ここでは初期に湾内にあった海水が一定時間経過後に湾内に残っている割合を表す海水残存率を画像解析によって求めた。図-7に海水残存率を求めるのに用いた領域1～3を示す。湾全体および領域1～3の各ケースにおける海水残存率の経時変化を表したものを図-8に示す。人工島の表側にあたる領域1ではどのケースも海水

残存率の進行にほとんど差はないが、人工島の影の部分にあたる領域2ではケース5の現況に比べ人工島設置後のケース10やケース15では海水交換の進行に遅れが見られるが、パイプラインによる水質改善を施したケース20では海水交換がよく行われていることがわかる。



領域2に加え湾奥を含んだ領域3の海水残存率の経時変化図において、ケース5、10、15に関しては領域2とほぼ同様の傾向が見られるがケース20のパイプラインにより外海水の導水を行ったケースでは海水交換の進行が著しく、パイプラインによる外海水の導水は局所的な海水交換率の改善に有効であることがわかる。

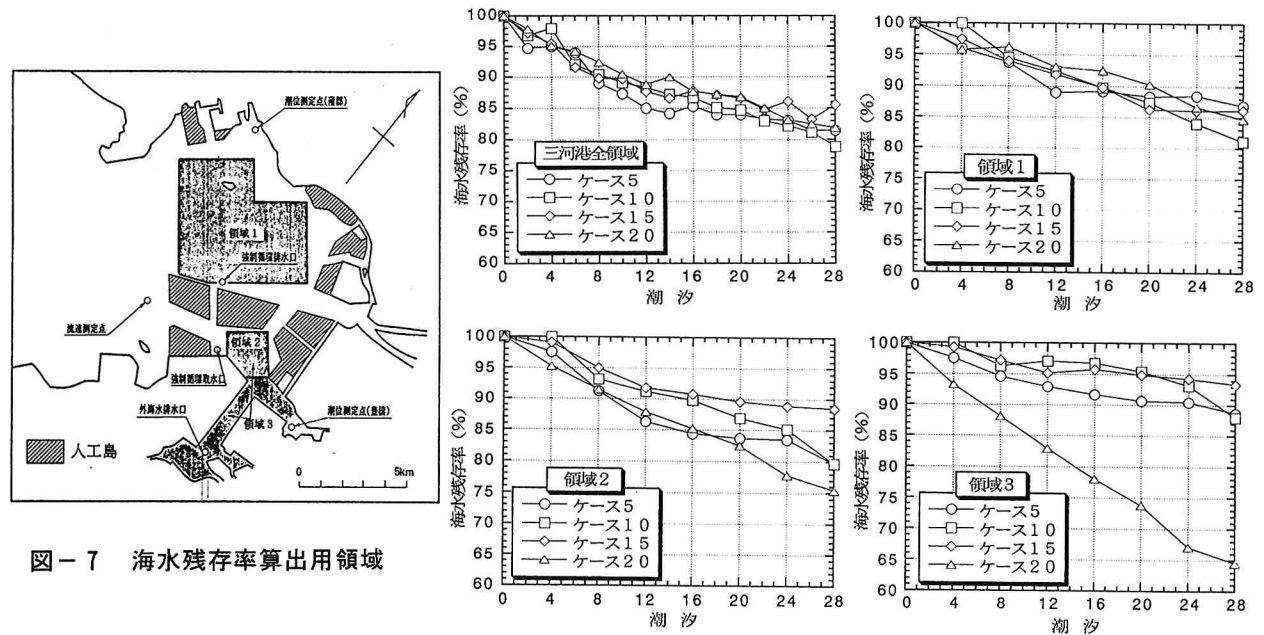


図-8 海水残存率経時変化

(8)人工島周辺循環流可視化実験

人工島周辺の潮汐残差成分としての循環流が発生していることを確認するため、人工島周辺に染料を連続的に投下して長期的な物質輸送を可視化した。染料の投下点は3ヶ所とし2ヶ所に青色染料、1ヶ所に赤色染料を用いた。2色用いたのは長時間経過後染料が混合した際に染料投下源を区別するためである。写真-4に染料の人工島周辺の移動状況を示す。染料は湾全体に拡がっているが、人工島周辺では人工島を取り囲むように一方向に輸送される傾向が見られる。

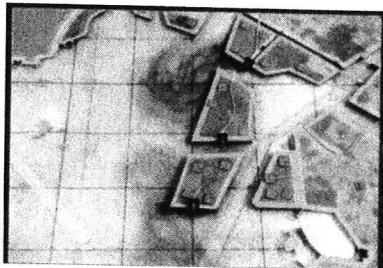


写真-4 人工島周辺の循環流可視化実験

3. 数値シミュレーション

(1)潮流計算

平均海面上の一点を原点としてX、Y軸を平均海面上にZ軸を原点から鉛直上方にとった直線座標系を定義する。Z=-hおよびZ=ξはそれぞれ海底および海面を表すものとする。またモデルの構築にあたっては以下の2つの仮定を用いている。①流体は粘性非圧縮性である、②圧力は静水圧分布である。基礎式はX、Y、Z方向の運動方程式及び連続の式であり、これらを水深方向に-hからξまで積分して平均化を行うことにより以下の

水平 2 次元の基礎式が得られる。

x 方向運動方程式

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

y 方向運動方程式

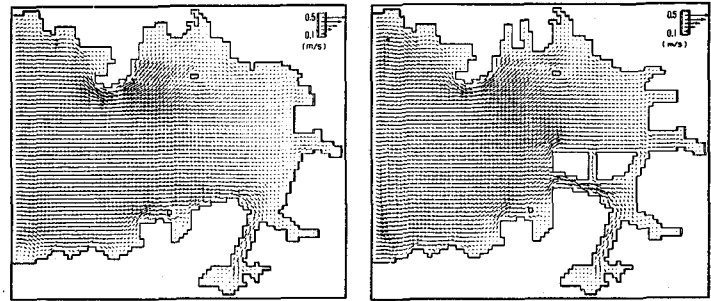
$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{g v \sqrt{u^2 + v^2}}{(\zeta + h) C^2} = 0$$

連続の式

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

ここに、 u 、 v はそれぞれ x 、 y 方向の流速、 ζ は水位、 h は水深、 g は重力加速度、 f はコリオリ係数、 A_h は水平渦動拡散係数、 C は $ch\epsilon z y$ の粗度係数を表す。

計算には平面 2 次元の差分モデルを用いた⁷⁾。計算格子にはスタッガードメッシュを用い、メッシュ間隔は X Y 方向とも 250m の等間隔、計算時間間隔は 60 秒とした。メッシュ分割数は 84×73 である。表-3 に計算条件の一覧表を示す。差分方程式の解法には ADI 法を用いた。図-9 に現況および人工島建設後の上げ潮最強時の潮流ベクトル図を示す。また前出の図-4 に現況と人工島建設後のケースにおける実験値と計算値が比較した上げ潮最強時のベクトル図を示す。流向はほぼ一致しているが人工島等の障害物周辺では一致していない。また全体に計算値の方が大きめの流速を示す傾向が見られた。



(a) 現況 (b) 人工島建設後

図-9 潮流計算結果 (上げ潮最強時)

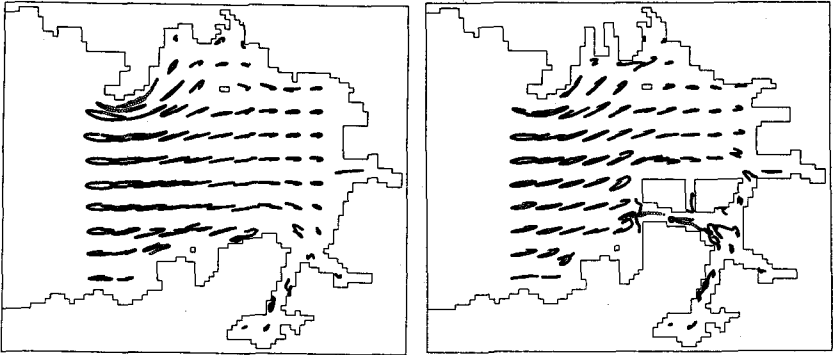
表-3 計算条件一覧

項 目	数 値	
タイムステップ $[\Delta t]$	60 (s)	
格子間隔 $[\Delta x, \Delta y]$	250 (m)	
メッシュ分割数 $[x \times y]$	84×73	
開境界潮位差 $[A]$	1.2 (m)	
位 相 差 $[\tau]$	0 ($^{\circ}$)	
潮 汐 周 期 $[T]$	1.2 (hr)	
粗 度 係 数 $[C]$	0.026 ($s/m^{1/2}$)	
コリオリ係数 $[f]$	0.000083 (s^{-1})	
河 川 流 入 量	豊川	37.30 (m^3/s)
	梅田川	5.99 (m^3/s)
	汐川	2.03 (m^3/s)
	音羽川	1.88 (m^3/s)
	佐奈川	1.08 (m^3/s)

(2) マーカー粒子追跡計算

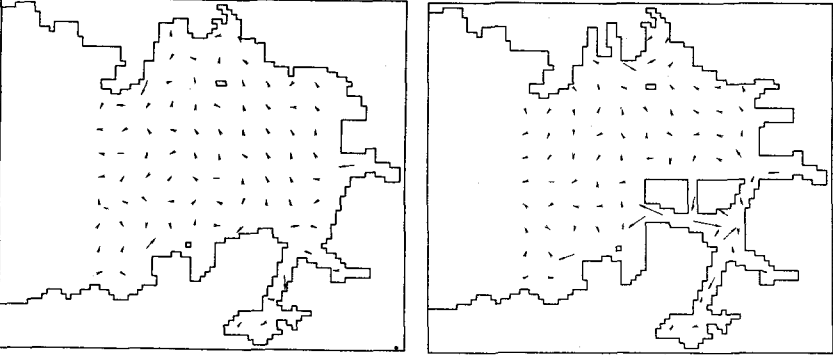
潮流計算結果を用いて、湾内の水粒子の移動をラグランジュ的に解析するためにマーカー粒子の追跡計算を 1 潮汐間行った。1 潮汐間の粒子軌跡を現況および人工島建設後について計算した結果を図-10 に示す。人工島の有無にかかわらず湾中央付近の粒子は 1 潮汐間に長楕円を描いて元の位置に戻っており、1 潮汐前後では大きな物質輸送は行われていない。一方現況の岸壁付近、特に陸が湾に対して凸になっている部分の周辺海域では流れの回り込みが見られ、上げ潮と下げ潮で潮流が非対称となり、1 潮汐前後で水粒子が大きく輸送されている。

図-11 に現況および人工島建設後の 1 潮汐前後における粒子位置を矢印で結んだ図を示す。この図はラグランジュ的に見た残差流に



(a) 現況 (b) 人工島建設後

図-10 マーカー粒子追跡計算



(a) 現況 (b) 人工島建設後

図-11 マーカー粒子の 1 潮汐間の移動

あたるものと考えられる。現況では大きな輸送は見られないが、人工島建設後のケースでは人工島周辺で大きな物質輸送が起きている。この輸送形態を概念的に描くと図-12のようになっていると考えられ、この傾向は人工島を設置した場合の河川水拡散実験においても見られる。このことより人工島が建設されたことによって人工島周辺の流況メカニズムが変化し、新たな物質輸送現象が起きているものと思われる。これから人工島などの構造物を適正に配置することによって海域の流況や海水交換が制御できるものと考えられる。

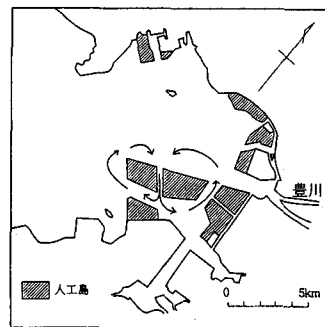


図-12 人工島周辺の循環流概念図

4. あとがき

三河港を対象として人工島建設が潮流や海水交換に及ぼす影響について実験的に調べた。また人工島建設後の水質改善策として航路掘削による作渚とパイプラインによる外海水の導水および強制循環を提案し、その改善効果について検討した。その結果人工島の裏側になる領域では海水交換の進展が遅れる傾向が見られた。航路の掘削による海水交換率の改善はほとんど見られなかったが、パイプラインによる外海水の導水によって湾全体の海水交換率はほとんど変わらないが局部的には海水交換率の向上が見られた。

また潮流の平面2次元数値解析を行い、実験で得られた流速と比較確認したところよく一致したので、湾内にマーカー粒子を配置して湾内水の輸送をラグランジュ的に計算するマーカー粒子追跡計算を行った。すると人工島の周辺を循環する潮汐残差成分見られ、同様の傾向は河川水拡散実験でも見られたので、人工島周辺に染料を連続投入する可視化実験を行った。実験においても人工島を循環する流れが発生していることが明らかになり、人工島の形状、配置次第では湾内の長期的な物質輸送を制御することも可能であることが示唆された。

今後は環境にやさしい人工島の計画づくりを目指して、人工島の形状や配置による湾内の長期的な物質循環の違いなどについてさらに検討を進めていく予定である。

なお、本研究は(株)東三河地域研究センターの多大なる援助を得て実施したものである。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 宝田盛康 (1993) : 大阪湾の環境改善に向けて, Sci.&Tech. Vol.6 No.4 pp.23-pp.30
- 2) 樋口明生, 杉本隆成 (1967) : 潮流による拡散の水理模型実験について, 京大防災研究所年報第10号B, pp.1-pp.21
- 3) 宇野木早苗 (1993) : 沿岸の海洋物理学, pp.129-pp.136
- 4) 村上和男 (1991) : 海水交換における水平・鉛直循環流の効果, 第38回海岸工学講演会論文集, pp.836-pp.840
- 5) R. E. Nece and R. A. Falconer (1989) : Hydraulic modelling of tidal circulation and flushing in coastal basins, Proc. Instn Civ. Engrs, Part 1, 1989, 86, Oct., pp.913-pp.935
- 6) Peter R. B. Ward (1973) : Measurement of dye concentrations by photography, journal of the environmental engineering division, pp.165-pp.175
- 7) 堀江 毅 (1980) : 沿岸海域の水の流れと物質の拡散に関する水理学的研究, 港湾技研資料 No. 360