

水理模型実験による尼崎港の 海水交換促進技術について

HYDRAULIC MODEL EXPERIMENTS ON WATER EXCHANGE ENHANCEMENT TECHNOLOGY IN AMAGASAKI HARBOR

山崎宗広¹・上嶋英機²・村上和男³

Munehiro YAMASAKI, Hideki UESHIMA and Kazuo MURAKAMI

¹正会員 博(工) (独法)産業技術総合研究所 主任研究員 (〒737-0197 広島県呉市広末広2-2-2)

²正会員 工博 (独法)産業技術総合研究所 総括研究員 (〒737-0197 広島県呉市広末広2-2-2)

³正会員 工博 武蔵工業大学教授 工学部 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)

Amagasaki Harbor is enclosed coastal sea. Therefore water in a harbor basin is stagnant, and the water quality is deteriorated. In this study, we carried out hydraulic model experiments in order to enhance the water exchange of Amagasaki Harbor. The channel making technique is very effective to strengthen the flow in Amagasaki Harbor. This is because a Yodo River flows into harbour basin. And it is also highly effective to enhance water exchange of the harbor water.

Key Words : flow control, water exchange enhancement, hydraulic model experiment

1. はじめに

大阪湾奥部に位置する尼崎港は、昭和初期からの埋立てにより海岸線は大きく変化し、閉鎖性の強い海域が形成された。そのため、港内は停滞域が増し、また背後地の都市化の進行も相まって、水質環境は悪化した。この汚濁防止策として、陸側から各種の排水規制や下水道整備が実施されてきた。しかしながら尼崎港内では、有機性の汚濁物質による水質汚染は未だに改善されておらず、貧酸素水塊の形成や赤潮の発生といった、水質環境問題が依然として存在している¹⁾。

この水質環境問題の原因は、港内に流入する汚濁負荷量が、自浄作用や海水交換によって港外に出ていく量よりも多く、有機性の汚濁物質が港内に蓄積することにある。そして、その原因の主要なものとして、流れが遅い停滞域の存在があげられる。

以上のことから、停滞性の強い尼崎港の水質を改善するためには、港内の海水が流動し、港外の海水と交換する必要がある。

本研究では、環境修復技術における海水の流れの重要性に着目し、先ず、停滞域の流れを制御して海水交換を促進する技術について水理模型実験により検討した。次いで、尼崎港の水質は、下水処理場か

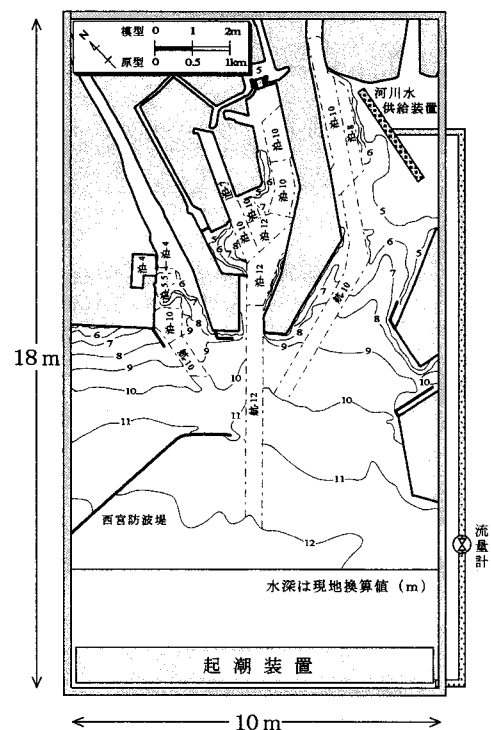


図-1 尼崎港水理模型の概観図

ら排水される処理水が大きく影響するため、この処理水の影響把握と、それを低減させるための放流口の位置や制御方策を水理模型実験により検討した。

2. 尼崎港水理模型実験施設

実験に使用した尼崎港水理模型の概観を図-1に示す。縦18m、横10mの平面水槽に、水平縮尺1/500、鉛直縮尺1/63の大きさにて尼崎港を製作してある。図の下端にあるのが空気圧式の起潮装置であり、また右端に設置されたポンプにより、簡易的に淀川の河川水の流出を再現することができる。

表-1に尼崎港水理模型の縮尺諸元を示す。水理模型の縮尺はフルードの相似則によっている。但し、乱流拡散の相似を満たすために、鉛直縮尺は水平縮尺の2/3乗に設定している。水平縮尺と鉛直縮尺を設定すれば他の変数の縮尺は自動的に表-1のように決められる。

3. 海水交換促進実験

(1) 実験ケースと実験条件

図-1に示す模型端に設置された空気圧式起潮装置により、半日周潮のM₂潮を模型内に発生させて尼崎港の潮流を再現している。実験条件は表-1に示すように、潮位振幅0.56cm（原型で35cm）、周期11分50秒（原型で12時間25分）に設定した。

海水交換を促進する工法として、表-2に示す4ケースについての実験を実施した。各々の実験ケースに関する工法を図-2に示す。Case0は、現況地形の場合である。Case1は、現況地形に尼崎港東部埋立地の一部に水路を開削し、水路内の海水の出入りによって海水交換の促進を狙った方法である。Case2は、港口部に突起状の剥離構造物を設置し、港内に渦を発生させて海水交換の促進を狙った方法である。なお剥離構造物は、大谷ら²⁾が提案したものであり、設置位置、設置角度についても彼らに習った。Case3は、埋立地の一利用法として遊水池（Wetland）を作り、港内に出入りする海水の流量を増加させて海水交換の促進を狙った方法である。

実験は淀川河川水を考慮し、図-3に示すように河川流量を与えた。水理模型では、淀川の感潮区域までの形状が全て再現されていないために、淀川の流入形態が潮時によって大きく異なることが予想される。そこで、淀川の感潮区域までの形状を再現している瀬戸内海大型水理模型（水平縮尺1/2000、鉛直縮尺1/159）に水路開削工法を適用し、淀川の港内への流入形態より、河川水の放流時間を判断し設定した。すなわち、M₂潮の1周期710秒において、満潮直前の121秒から干潮直後の590秒までの時間帯で配管バルブを開として河川水を流し、その他の時間帯でバルブを閉として河川水を止めた。なお、与えた河川流量の値は66ℓ/minであり、淀川の年平均流量275m³/sに相当する。

表-1 尼崎港水理模型の縮尺諸元

諸元	縮尺	現型	模型
水平縮尺	1/500	1km	2m
鉛直縮尺	1/63	10m	15.9cm
時間縮尺	1/63	1day	22m51s
流速縮尺	1/7.9	10cm/s	1.27cm/s
粗度係数	1/0.71	0.025	0.035
流量縮尺 (淀川)	1/250000	10m ³ /s 275m ³ /s	40cm ³ /s 1100cm ³ /s
潮位振幅	1/63	35cm	0.56cm
潮汐周期	1/63	12h25m	11m50s

表-2 海水交換促進工法の実験ケース

番号	ケース名 (海水交換促進工法)	工法の条件 (図-2参照)
Case0	現況地形	(a)面積1.75km ² 平均水深10m
Case1	水路開削工法	(b)水路幅100m 長さ475m 水深6m
Case2	剥離構造物設置工法	(c)港口幅330m 剥離点幅230m
Case3	遊水池造成工法	(d)面積0.53km ² 水深3m

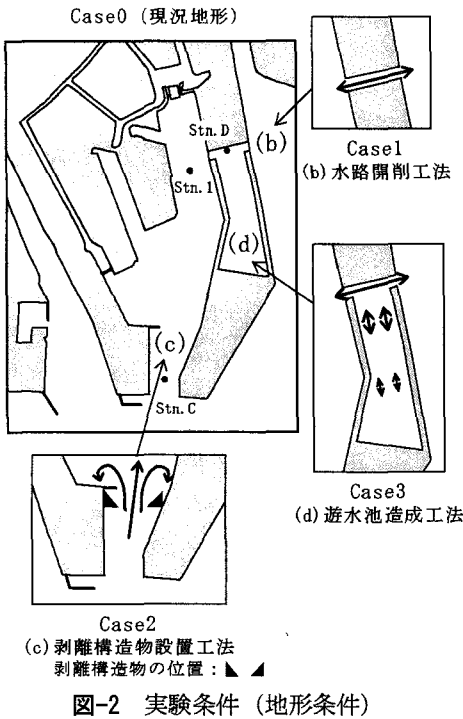


図-2 実験条件（地形条件）

実験は、水位計による潮位変動の測定（水位計：ケネック製SW-201型）、電磁流速計による潮流の測定（二次元電磁流速計：アレック電子製ACM-250型）、浮標の軌跡をビデオ撮影することによる流況測定（浮標ボール：直径35mm、比重0.92）、浮標の港内での残存率を求める海水交換測定を実施した。

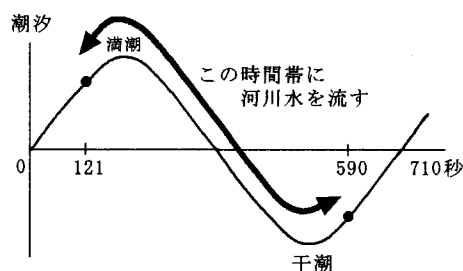


図-3 淀川河川水の放流条件

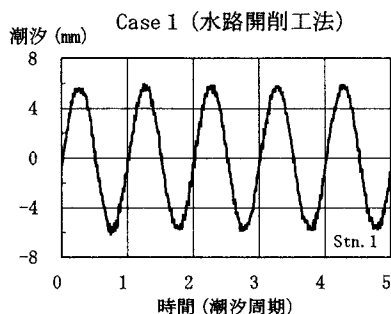
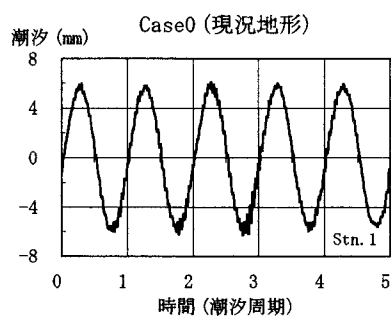


図-4 港奥部 (Stn. 1) における水位変化

(2) 水位測定結果

図-4は、現況地形Case0と水路開削工法Case1の港奥部Stn. 1 (図-2参照) における水位の時間変化曲線を示したものである。両ケースとも振幅・位相が殆ど同じ曲線を描いており、水路開削工法を適用しても潮汐には影響を及ぼさないことが分かる。なお、他の実験ケースも殆ど同じ傾向であり、工法による違いはみられなかった。

(3) 潮流測定結果

図-5は、水路開削工法Case1と遊水池造成工法Case3の水路開削部Stn. D (図-2参照) における流速の時間変化曲線を示したものである。Case1の場合は、大部分の時間は港内へ流入する (マイナスの値) 強い流れとなっており、上げ潮最強時の短い期間のみに港外へ流出する弱い流れとなっている。一方、Case3の場合はCase1と同様な結果を示しているが、遊水池からの海水の流入出の影響からか乱れている。

図-6は、港口部Stn. C (図-2参照) における主流方向の流速変化を示したものである。水路開削工法

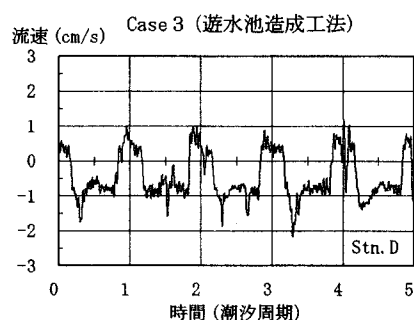
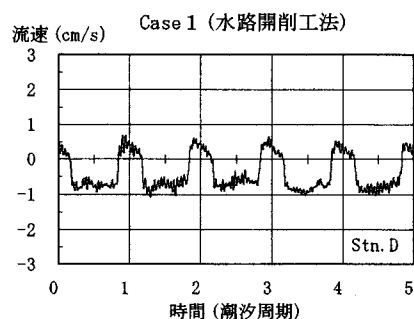


図-5 水路開削部 (Stn. D) における潮流変化

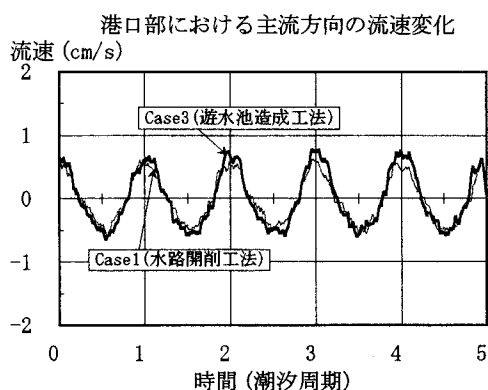


図-6 港口部 (Stn. C) における潮流変化

Case1に比べて遊水池造成工法Case3の方が、港口部での流速が速くなっている。港口部での流速は、断面流速を一樣と仮定すると港内の面積と潮位振幅、および港口部の断面積 (港口幅×水深) で規定される。遊水池の造成は、港内面積の増加となり、港口部を通過する海水の流量を増加させることができる。

このような、港口部および水路開削部からの海水の流入、流出による変化が港内の循環流を変化させ、海水交換を促進させるものと推論される。

(4) 港内の流況測定結果

図-7は、模型表面に浮かぶ浮標の動きを一潮汐周期間に渡って追跡して得た流跡図である。現況地形Case0の浮標の移動距離は、港口部で大きく港奥部に行くにしたがって徐々に小さくなり、港口部に突き出た防波堤の背後に小さな反時計回りの循環流が形成されている。剥離構造物を設置したCase2の場合は、流況のパターンは現況と似ているが、剥離構

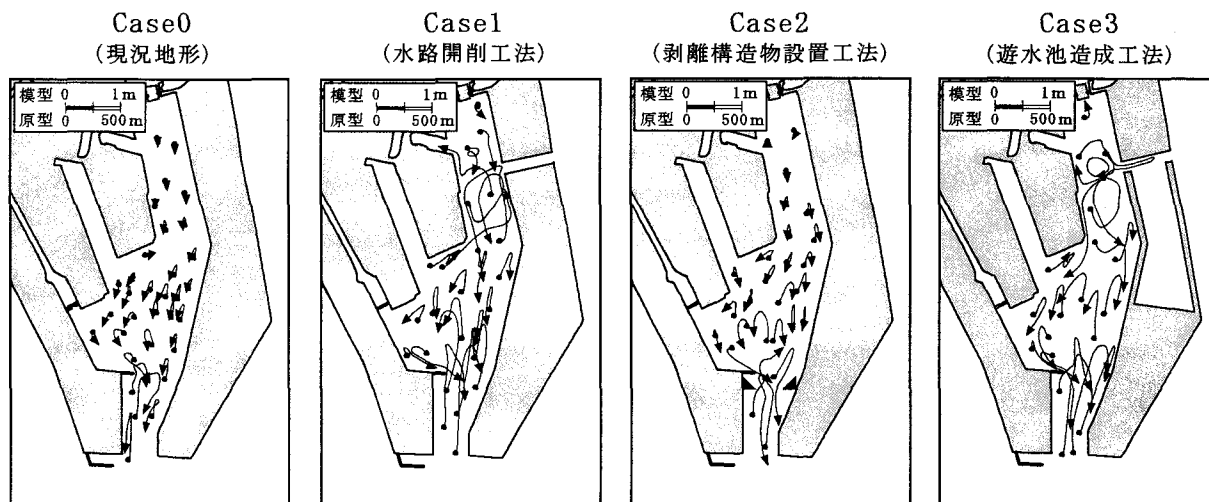


図-7 流跡図（浮標を一潮汐周期間追跡）

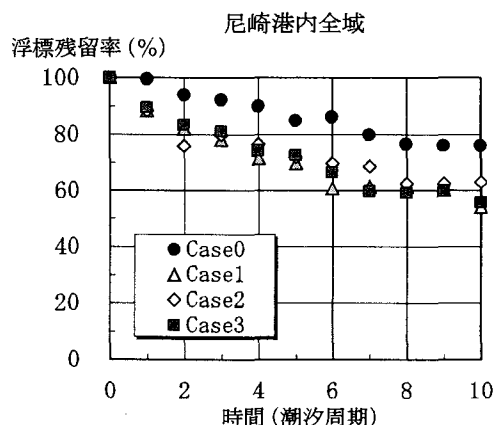


図-8 浮標残留率の時間変化

造物によって左側に反時計廻りの、右側に時計廻りの循環流が形成される。水路を開削したCase1の場合は、前の2ケースとは異なり、港奥部でも比較的大きな浮標の移動距離の結果となっている。これは、図-5でみてきたように水路内を通して上げ潮時に若干の海水が流出し、下げ潮時に大量の淀川河川水が流入したためである。

この傾向は遊水池造成工法Case3の場合でも同様であり、浮標の移動距離は更に大きくなっている。遊水池造成の場合は、水路開削部を通しての海水の流出入以外に、港内の面積の増大による港口部での流速増大が影響している。

(5) 海水交換測定結果

これまで述べてきた港内の流動が、港内水と港外水との交換にどのように寄与しているかを調べるために海水交換実験を実施した。

港内の海水交換の測定方法は、初期状態として港内に浮標を均一に分布させ、潮汐によってその浮標が港外に出ていく個数（ここでは逆に、港内に残っている浮標の数を数える）を測定することによって

表-3 平均滞留時間と50%交換時間

	平均滞留時間 (潮汐周期)	50%交換時間 (潮汐周期)
Case0 (現況地形)	33.4	23.2
Case1 (水路開削工法)	15.1	10.5
Case2 (剥離構造物設置工法)	17.9	12.4
Case3 (遊水池造成工法)	15.5	10.8

行った。

図-8は初期状態の浮標の個数（合計178個）で規準化された浮標の港内での残存率である。海水交換が大きいほど、この残存率の減少が速いことを意味している。この図から、黒丸で示したCase0における浮標の減少速度の遅いことが分かる。また、各工法の残存率の値は、Case0よりは小さく、海水交換が促進されていることが分かる。

表-3は、図-8の浮標残留率変化を $\exp(-at)$ 、(tは潮汐周期、aは定数)で近似し、0～∞まで積分して得られる平均滞留時間の値と近似曲線より求めた50%交換時間の値を示したものである。各工法とも、現況地形に比べ2倍ほど海水交換が促進している。

遊水池造成工法Case3は、図-7でみてきたように他の工法に比べ海水流動が最も大きく、海水交換が期待されたが、平均滞留時間の値からは顕著な違いはみられなかった。これは、水路開削部を通して、浮標の流入出の違いが影響したのではないかと推論される。Case1の場合は、水路開削部を通して港外へ出て行った浮標の大部分は港内へ戻ってこないが、Case3の場合は、遊水池へ一旦流出し、その後港内へ戻る浮標が多く存在した。

4. 放流口の位置に関する染料拡散実験

尼崎港の水質は、下水処理場から排水される処理水が大きく影響する。次に、この処理水の影響把握と、それを低減させるための放流口の位置や制御方策について、水理模型実験により検討した。

(1) 実験ケースと実験条件

実験は、現在操業している下水処理場を対象に行った。排水される処理水の可視化と濃度測定のために、インジゴカルミン染料20ppm溶液を定量ポンプにより連続放流した。放流した流量は、現地の排水量を模型換算した413.8cc/minである。

処理水の放流位置は、現況位置放流 (CaseD0)、現況位置から南東方向へ500m移動した沖合放流 (CaseD1)、現況位置から港口部へ移動した港口部放流 (CaseD2) とした。なお、現況位置における放流パターンの制御を目的に、港口部にある防波堤を100m (模型で20cm) 延長する実験 (CaseB0) も実施した。潮汐条件は、海水交換促進実験の時と同様に、潮位振幅0.56cm (原型で35cm)、周期11分50秒 (原型で12時間25分) に設定した。測定は、濃度計による染料濃度変動の測定 (光学式濃度計: 正豊工学製MT-CMI型, 4測点)、採水による染料濃度測定 (12測点)、染料の拡がりを把握するためのビデオ撮影を行った。

(2) 染料拡散測定結果

図-9は、ビデオ撮影より得られた処理水の染料拡散パターン図を示したものである。図は染料の前線をスケッチしたものであり、図中の数字は放流開始からの経過周期を示す。沖合放流CaseD1の場合は、CaseD0に比べて広範囲に染料水が拡がっている。港口部放流CaseD2の場合は、染料水は港外へ流出するものが多く、処理水の港内への影響が小さい。また防波堤を延長したCaseB0の拡散パターンは、CaseD0と同様であるが拡散スピードは速くなっている。これは、防波堤の延長によって防波堤背後にできる残差流が大きくなったことに起因する。

図-10は、このことを示した防波堤の延長の有無による潮汐残差流の変化図である。潮汐残差流は、浮標の一潮汐間の変位から求めた。このように潮汐残差流を大きくすることで、処理水の拡散パターンを速めることができる。

図-11に、放流開始から10周期後の染料濃度の水平分布を示す。この図は、光学式濃度計と一斉採水による合計16地点の測定結果より得たものであり、図中の数字の単位はppmである。現況位置放流CaseD0の場合は、放流口付近を中心に染料濃度の高い領域が広範囲に存在している。沖合放流CaseD1の場合は、CaseD0に比べて高濃度の領域は小さく、ま

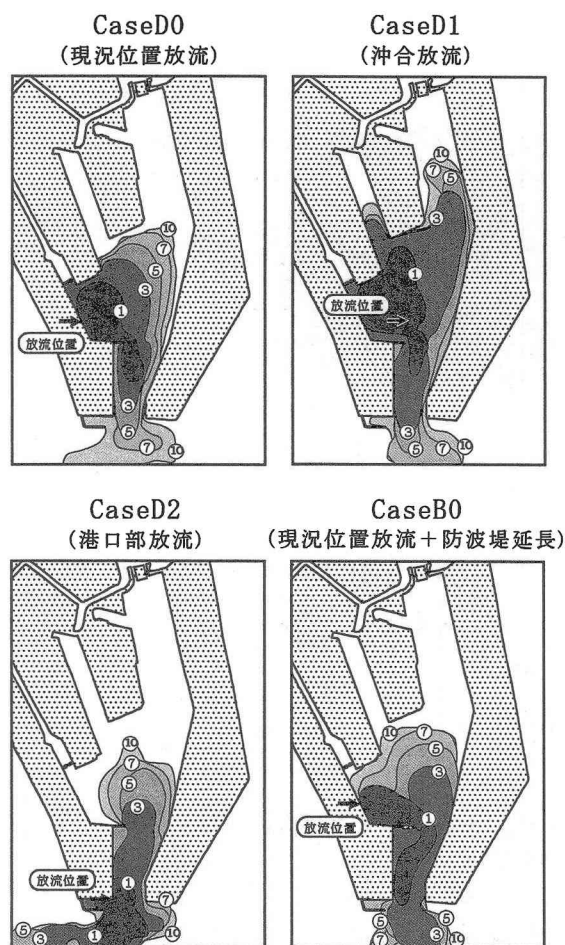


図-9 処理水の (染料水) の拡散パターン図

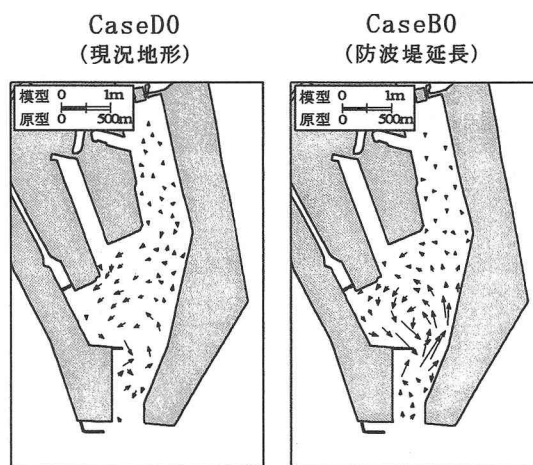


図-10 防波堤の延長の有無による潮汐残差流の変化

た染料水は湾奥の方まで拡がっている。港口部放流CaseD2の場合は、他のケースに比べて港内への影響が一番小さく、染料水の大部分は港外へ流出している。防波堤を延長したCaseB0の場合は、CaseD0に比べて高濃度の領域は小さく、染料水の港外へ流出が速まっている。

表-4は、港内における染料の存在量を示したものである。港内の存在量は、港内を34個のボックスに

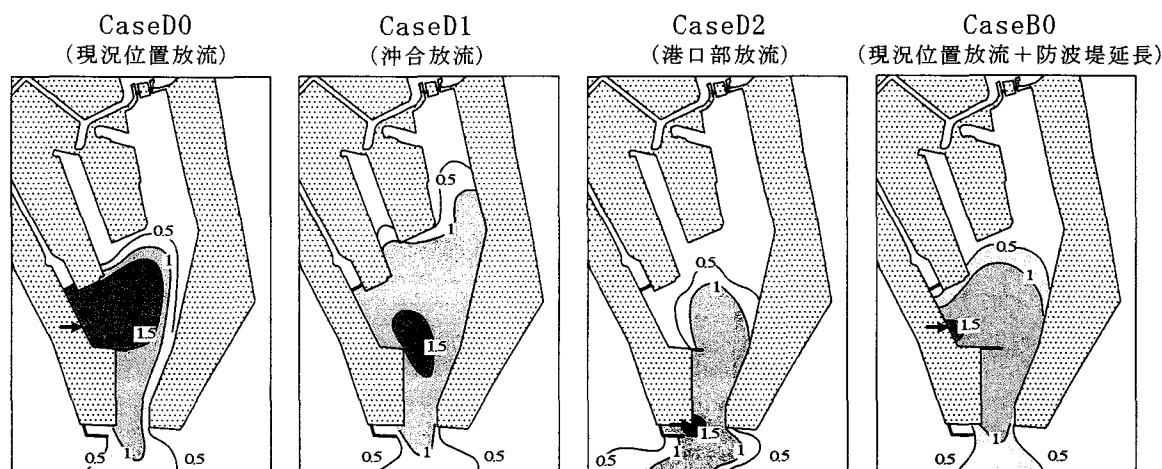


図-11 10周期後の染料濃度分布図（単位：ppm）

表-4 港内における染料存在量

	CaseD0	CaseD1	CaseD2	CaseB0
5周期後	1.00	1.06	0.51	0.82
10周期後	1.00	1.11	0.55	0.69

分割し、各ボックス内の容積と染料濃度から染料の重さを算出し求めた。なお表の値は、CaseD0で規準化している。港内における染料の存在量をみると、沖合放流CaseD1では、現況放流CaseD0と殆ど同じ値である。放流位置を現況位置から港口部CaseD2に変更すると、港内での染料存在量が約1/2に減少する。また防波堤を延長したCaseB0では、港内での染料存在量が約2～3割減少する。このように、港内での染料の存在量が減少すれば、港内の水質環境が改善されるものと思われる。

5. おわりに

尼崎港の水質改善を目的に、海水交換促進技術の検討と放流口の位置に関する検討を水理模型実験により実施した。実験結果をまとめると以下の通りである。

- ・海水交換促進実験より、
- (1) 港口部に設置した剥離構造物設置工法は、港内の循環流を形成させる。このため、海水交換促進効果がみられた。
- (2) 尼崎港東部埋地の一部に水路を開削する水路開削工法は、上げ潮時に若干の海水が流出し、下げ潮時に大量の淀川河川水が流入する。このことにより、港内の海水流動が大きくなり、海水交換に大きく寄与する。
- (3) 遊水池造成工法は、港口部での流速の増大と淀川河川水の流入により、海水交換促進の効果が

みられた。

- ・放流口の位置に関する実験より、
- (4) 下水処理場から排水される処理水は、放流位置によって拡散パターンが異なる。
- (5) 放流位置を港口部に変更すると、拡散パターンが大きく変化して港内の染料存在量が約1/2となり、放流口の位置の重要性を示すことができた。

本研究では、水理模型実験の結果について述べた。計算機の飛躍的な進歩により数値実験が数多くなされているが、水理模型実験は数値実験と比較していくつかの利点を持っている。その利点の中で、数値実験より細かい地形が再現できる点と、流況変化が容易に観察、評価できるという点を生かして水平循環流の海水交換に及ぼす効果について、水理模型実験を用いて実施した。しかし、密度流、吹送流等の鉛直循環流を水理模型内に再現することは非常に困難であるという欠点も持っている。簡略化したメッシュの粗い尼崎港の数値実験結果によると、海水交換の機構として密度流の効果も期待できることから、今後は、詳細な数値解析を実施し、水理実験結果との比較や、互いの利点を生かして環境修復技術の検討を行っていききたい。

謝辞：本研究は、環境省の環境技術開発等推進事業「閉鎖性海域における最適環境修復技術のパッケージ化プロジェクト（研究代表者：上嶋英機，事務局：国際エメックスセンター）」の一環として行ったものである。

参考文献

- 1) (財)国際エメックスセンター：閉鎖性海域における最適環境修復技術パッケージ化，平成14年度研究開発成果報告書，2003。
- 2) 大谷英夫，高山百合子，石野和男，勝井秀博，宝田盛康：流況制御のための湾口渦と水平循環流に関する実験的研究，海岸工学論文集，第42巻，pp. 1221-1225，1995。