

大阪湾の底泥の覆砂・浚渫による水質・底質改善効果の検討

韓 銅 珍*・山 本 行 高**・中 辻 啓 二***

1. はじめに

汚染されている内湾の水質改善には多大な労力と時間が必要となる。大阪湾においても、流域からの流入負荷削減のために、これまで多くの施策が行われており、一定の成果を収めてきた。しかし、近年においてはそれら水質改善施策の効果も以前ほど顕著に見られなくなっている。毎年のように赤潮や青潮が発生するという現状は、水質が満足できる状態に改善されたものとは言えない。また、2010 年までに大阪府における下水の高次処理施設が完備されることを想定して水質の予測計算を丸谷ら(2000)が行っている。その結果、大阪湾の水質および底質は負荷量の削減政策によりある程度改善されるものの、大阪湾の水質は依然として悪い状態であることが明らかとなった。

閉鎖性内湾における水質汚染を惹起させる原因として栄養塩の陸域からの負荷、内部生産、底泥からの栄養塩の溶出等があげられている。水質改善を促進するためには、陸域からの負荷量の削減のみではなく、底泥の浚渫や覆砂などにより、底質の改善と底泥からの栄養塩の溶出を抑える必要がある。

覆砂・浚渫による底質改良は、底泥からの無機態栄養塩の溶出を直接的に抑制する方法として注目されている。三河湾や呉湾内のごく小範囲を対象に行われた覆砂の現地実験では、底生生物の生物量や、多様性の増加といった生物生態環境の改善がみられたという報告もある(堀江ら; 1996)。

本研究では、大阪湾を対象に数値シミュレーションを行い、覆砂や浚渫の底質改良を行った場合に水質・底質がどのように変化するかを定量的に検討し、それらの改善効果について評価を試みる。

2. モデルの概要

水質モデルは、三次元バロクリニック流れモデルで計算された流動場における窒素、リン、COD、溶存酸素等

の生物化学的な変化過程をモデル化している。また、このモデルでは、底泥内の溶出機構を取り込んで底泥と海水とを一体化している。図-1 に示すように、底泥と海水との相互作用は有機デトリタスの底泥への沈降と底泥からの無機栄養塩の溶出として考慮している。底泥からの窒素とリンの溶出機構は底泥における有機物のバクテリアの分解による無機化、間隙水中無機物の直上水への拡散過程としてモデル化している。

本研究で用いたモデルは、大阪湾における長期的な水質の水平・鉛直分布を再現し得るものである(丸谷ら, 2000; 韓ら, 2000)。また、大阪湾の底質調査で得られた実測値を、モデルの計算条件として用いることにより、より高い再現性をもたせている。

計算対象とする物質形態は、生物体有機物を代表する植物プランクトン量(PP)としてクロロフィル a, 栄養塩として無機態窒素(IN), 無機態リン(IP), 非生物体の有機態窒素(ON), 有機態リン(OP), 化学的酸素要求量(COD), さらに溶存酸素(DO)を設定している。各物質の収支式はいずれの物質にも共通する移流、拡散過程と生物化学的变化を主体とする内部変化過程に分けられる。用いた基礎方程式を以下に示す。

(a) 移流, 拡散過程

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\frac{\partial UC_i}{\partial x} - \frac{\partial VC_i}{\partial y} - \frac{\partial WC_i}{\partial z}$$

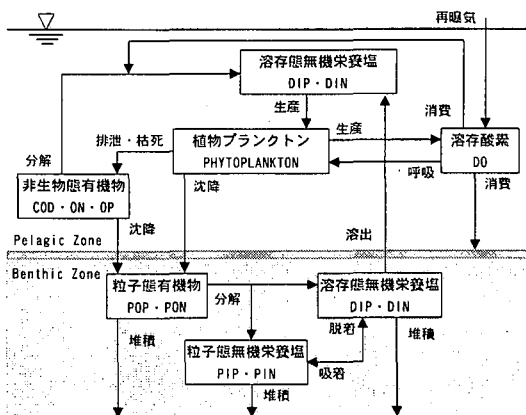


図-1 モデルの概要図

* 正会員 博(工) (株)ハイドロソフト技術研究所
** 正会員 修(工) (株)鹿島建設
*** 正会員 工 博 大阪大学大学院教授 工学研究科

$$+Kx\frac{\partial^2 Ci}{\partial x^2}+Ky\frac{\partial^2 Ci}{\partial y^2}+Kz\frac{\partial^2 Ci}{\partial z^2}+\sum Si(Cj) \\ \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 Ci は物質 i の濃度である。また、 U, V, W は x (東西), y (南北), z (鉛直) 各方向の流速成分, Kx, Ky, Kz は同じく各方向の渦動拡散係数である。これらは三次元パロクリニック流れの計算結果を用いており三次元空間的に、また時間的に変化する物理量である。 $Si(Cj)$ は内部変化過程を示し、物質 j の物質 i への変化量である。

(b) 内部変化過程

$$\frac{\partial PP}{\partial t}=\{Gp-Rp-Dp\}PP+Up\frac{\partial PP}{\partial z} \dots\dots\dots(2)$$

$$Gp=\mu_{\max}\times F_{NU}\times F_I\times F_T$$

$$F_{NU}=\text{Min}\left[\frac{IP}{K_{IP}+IP}, \frac{IN}{K_{IN}+IN}\right]$$

$$F_I=\frac{I}{I_s}\exp\left[1-\frac{I}{I_s}\right]$$

$$F_T=\frac{T}{T_s}\exp\left[1-\frac{T}{T_s}\right]$$

$$\frac{\partial IN}{\partial t}=-F_N G_N PP+K_N ON+\frac{W_{IN}}{H_b} \dots\dots\dots(3)$$

$$\frac{\partial IP}{\partial t}=-F_P G_P PP+K_P OP+\frac{W_{IP}}{H_b} \dots\dots\dots(4)$$

$$\frac{\partial OP}{\partial t}=F_P\{R_P+D_P\}PP-K_P OP+U_{OP}\frac{\partial OP}{\partial z} \dots\dots\dots(5)$$

$$\frac{\partial ON}{\partial t}=F_N\{R_P+D_P\}PP-K_N ON+U_{ON}\frac{\partial ON}{\partial z} \dots\dots\dots(6)$$

$$\frac{\partial COD}{\partial t}=F_C\{R_P+D_P\}PP-K_C COD \\ +U_{COD}\frac{\partial COD}{\partial z}+\frac{W_C}{H_b} \dots\dots\dots(7)$$

$$\frac{\partial DO}{\partial t}=F_{PDO}\{G_P-R_P\}PP-F_{COD}K_C COD \\ +K_S(DOS-DO_S)-\frac{W_{DO}}{H_b} \dots\dots\dots(8)$$

ここで、 PP ；植物プランクトン(クロロフィル a)濃度, G_P ；植物プランクトンの増殖速度, R_P ；植物プランクトン呼吸速度, D_P ；植物プランクトン枯死速度, F_{NU}, F_I, F_T ；増殖速度の栄養塩, 日射量, 水温依存項, IP, IN ；無機態リンおよび窒素濃度, K_{IP}, K_{IN} ；リンと窒素の半飽和係数, $U_{PP}, U_{OP}, U_{ON}, U_{COD}$ ；植物プランクトン, OP, ON, COD の沈降速度, OP ；非生物体の有機態リン, ON ；有機態窒素, COD ； COD 濃度, DO ；溶存酸素濃度 K_P, K_N, K_C ；リン, 窒素, COD の分解速度, K_S ；再曝気係数, H_b ；底層の層厚, W_{IP}, W_{IN}, W_C ；底泥からの窒素, リン, COD の溶出量, W_{DO} ；底泥による酸素消費量, DOS ；飽和溶存酸素濃度, DO_S ；表層の溶存酸素

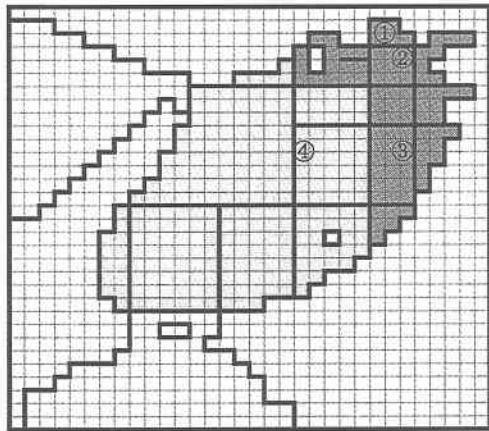


図-2 計算対象領域

濃度, $F_P, F_N, F_C, F_{PDO}, F_{CDO}$ ；クロロフィル a からの換算係数である。

3. 計算領域と条件

計算領域は、図-2に示す大阪湾を中心とした 64 km 四方を対象としている。水域分割は水平方向には 2 km メッシュ、鉛直方向には湾内の流動・密度構造を正確に表現するために、表層から 2 m 層厚×10 層、10 m 層厚、15 m 層厚×2 層の計 13 層とした。計算時間とメモリの容量を考慮すれば、格子の数は出来るだけ少なくする必要がある。しかし、大阪湾の特徴的な流れや残差流の再現が必要条件である。水平方向の間隔を 1 km, 2 km, 3 km とした予備計算の結果、2 km メッシュでも大阪湾のパロクリニック流れや残差流が十分に再現されることがわかった。

また、底質の計算においては、大阪湾の流動・密度構造および底質特性をもとに、水平方向を図-2に示すように 18 の領域に分割している。鉛直方向については、図-3に示すように覆砂・浚渫後の泥深 100 cm までを 2 cm, 2 cm, 6 cm, 5 cm, 15 cm, 20 cm, 20 cm, 30 cm

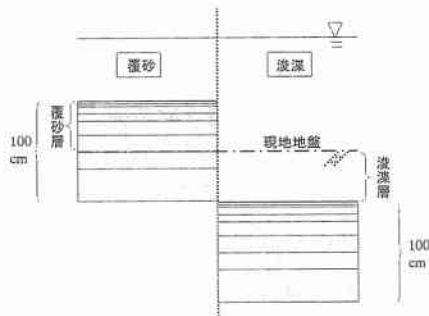


図-3 覆砂・浚渫による底泥の鉛直分割図

表-1 流動・水質モデルの境界条件

		境界条件		春季	夏季	秋季	冬季
流動モデル	海面境界	気温 ℃		16.3	26.7	15.2	5.5
		雲量		6.2	6.3	5.4	5.8
		風速 m/s		3.2	3.0	3.2	3.2
		水蒸気圧 hPa		12.2	25.8	12.1	5.8
		日射量 W/m²		184.6	193.4	109.0	96.6
	陸側境界	流入量 m³/s	淀川	273.8	367.9	165.7	142.1
			大和川	23.8	27.2	21.2	16.1
		流入水温 ℃		18.0	28.9	18.0	7.0
		流入塩分 psu		21.5	20.0	21.5	23.0
	海側境界	潮位変動		M₂平均潮			
		水温 ℃		13.0	22.0	22.0	11.0
塩分 psu		32.0	32.0	32.0	32.0		

水質モデル	海側境界	COD mg/l	明紀	2.0 1.5	2.6 1.9	2.0 1.5	1.3 1.1
			T-N mg/l	明紀	0.36 0.36	0.38 0.38	0.36 0.36
		T-P mg/l	明紀	0.034 0.030	0.039 0.031	0.034 0.030	0.029 0.029
		クロロフィル mg/l	明紀	0.004 0.004	0.005 0.005	0.004 0.004	0.005 0.005
			DO mg/l	明紀	8.6 8.6	8.1 8.1	8.5 8.5

(※表中の「明」明石海峡部、「紀」は紀淡海峡部を表す。)

の8層に分割した。覆砂に用いる砂中に含まれる栄養塩濃度は0とし、浚渫後の底泥中の栄養塩鉛直分布は1999年および2000年に実施した現地調査で得られた値を用いて、各底泥領域の鉛直濃度分布を与えた。

季節別の境界条件を表-1に示す。陸域から流入する負荷量は、大阪湾に流入する21河川に集約して与えた。流入負荷量は各河口境界において流入水量に各水質濃度を乗じて算定した。外海境界の水質条件として、明石海峡および紀淡海峡の水質を、浅海定線調査(1983-1992)および公共用水域水質の測定(1988-1997)をもとに水質項目毎に設定し、水深方向には一様与えた。

計算の手順は、まず流動モデルで季節毎の流速、密度ならびに拡散係数を求め、一年間の変動を与える。つぎに、それらの値を用いた水質・底質モデル計算より各栄養塩の変動を求めた。

覆砂と浚渫の底質改良方法と、覆砂を施す海域面積による水質改善効果を評価するために、表-2に示す3つの計算ケースを設定した。湾奥部とは、図-2で濃く色付けされた部分であり、現地調査において最も底泥の汚染がみられた海域である。

表-2 計算のケース

Case No.	改良方法	対象海域	改良層厚
1	浚渫	湾奥部	50 cm
2	覆砂	湾奥部	50 cm
3	覆砂	湾内全域	50 cm

4. 計算結果とその考察

各パターンの底質改良による水質改善効果は、COD、窒素、リンの各水質項目の濃度変化を評価基準とした。底質改良前後の水質の水平分布変化と、図-2に示す湾内の数ポイントにおける水質の経年変化を定量的に比較検討した。また同時に、溶出速度の経年変化にも注目した。

まず初めに、Case.1とCase.2の計算結果を示し、代表的な底質改良方法である覆砂と浚渫が、大阪湾の水質に与える改善効果の比較を行い、覆砂と浚渫の底質改良方法の違いによる水質改善効果を評価した。つぎに、Case.2とCase.3の結果の比較から、覆砂を施す海域面積による水質改善効果を評価した。

4.1 覆砂と浚渫による水質改善効果の比較

図-4は、夏季における現況水質および浚渫・覆砂実施1年後の計算結果の水平分布である。各水質項目について、底質改良前後の濃度減少量を示している。

覆砂と浚渫による水質改善効果の評価は、Case.1とCase.2の計算結果を比較することにより可能となる。

Case.1とCase.2を比較してみると、CODとT-Nについては、覆砂(Case.2)の方が多少濃度減少量は大きいものの、ほぼ同様な水質改善効果が得られていると言える。T-Pは、覆砂(Case.2)については湾奥部の防波堤内で約20%、その他の湾奥部で約15%、湾央・湾西部で約20%の改善がみられる。浚渫(Case.1)については湾奥部の防波堤内で約10%、その他の湾奥部で約7%、湾央・湾西部で約15%の改善率という計算結果が得られた。

図-5は、浚渫(Case.1)と覆砂(Case.2)の8月における表層のT-P濃度変化量の経年変化を示している。縦軸の値は覆砂・浚渫前からの濃度変化量を、横軸は覆砂・浚渫後の経過年数を表している。覆砂・浚渫ともに、直後に大きく減少した濃度が、その後数年かけて再び増加していく傾向がみられる。減少量が一定値となるのが、覆砂の場合約15年後であるのに対し、浚渫の場合は約5年後である。覆砂の方が浚渫よりも水質改善効果が持続することがわかる。しかしながら、施工直後には湾内の各地点で約5%の差があった覆砂と浚渫の効果は、15年後には約2%の差しかない。これは、経年的に減少する

ことなく流入しつづける外部負荷による影響と考えられ、より効果的な水質改善を実現するためには、底質改良と同時に流入負荷量を削減していくことが重要であると考えられる。

図一6は、リンの溶出速度の月毎の値を経年的に示している。覆砂・浚渫直後には溶出速度が両者とも0となっている。その後は春から夏にかけて増加し、秋・冬にかけて減少するという季節的な変化を繰り返しながら徐々に増加していく傾向がみられものの、溶出の抑制効果は覆砂の方が高いことがわかる。また、溶出速度がほぼ一定値となるまでの期間も覆砂の方が長く、浚渫よりも効果が持続することが考えられる。

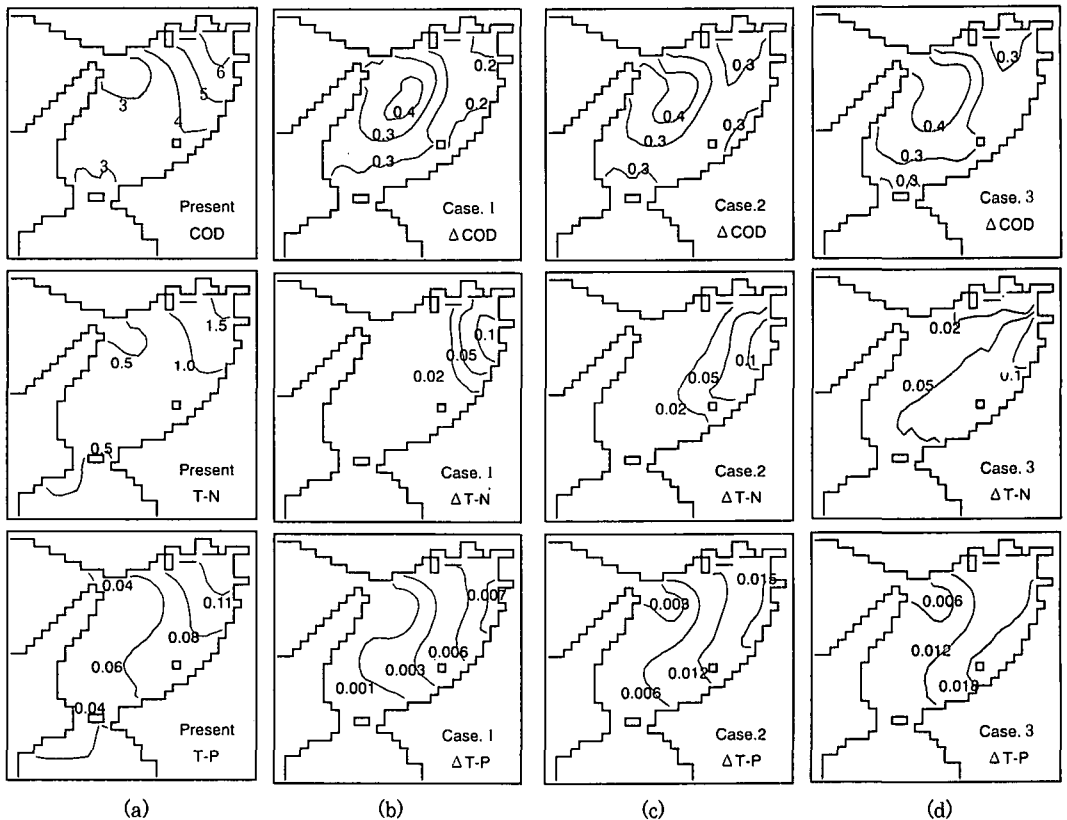
4.2 覆砂を施す面積による水質改善効果の比較

ここでは、湾奥部のみに覆砂を施した場合(Case. 2)と湾内全域に覆砂を施した場合(Case. 3)との水質計算結果を比較することにより、覆砂を施す海域面積による水質改善効果を評価する。

図一4(d)は、浚渫(Case. 3)の計算結果の表層における水平分布である。

CODはCase. 2とCase. 3で水質改善効果の差はほとんど見られず、湾奥部で0.3 mg/L、湾中央部で最大0.4

mg/Lの改善となっている。これは湾奥部で現況の約5%、湾中央・湾西部で現況の約15%の改善率にあたる。T-Nについても、湾西部で0.02 mg/L程度の差はあるものの、全体的にみてほぼ同様な水質改善状況となっている。しかしながら、湾内全域で現況の1%前後の改善率しか得られておらず、底質改良は窒素の削減にはあまり効果がないことがわかった。これは、窒素の底泥からの溶出による負荷量に比べ、陸域からの外部負荷量と、もともと海水中に存在する植物プランクトン態の窒素量が莫大に大きいためであると考えられる。T-Pは、両ケースとも湾奥部の防波堤内で約20%、Case. 3については、その他の湾奥部で約15%、湾中央・湾西部で約25%、Case. 2では湾奥部で約15%、湾中央・湾西部で約20%の水質改善率が得られた。1979年のリン削減政策によって、湾内に流入するリンの負荷量は、1970年代から現在までに半分程度まで削減された(大阪府算定値)。しかしながら、大阪府水産試験場で観測した浅海定線調査結果によると、湾全域で約25%程度しかリンの水質改善効果が得られていないことがわかる。このような現況から、さらに15~20%の水質改善効果が得られるということでは、覆砂はリンの削減に非常に有効な手段であると考えられ



図一4 夏季における現況水質および覆砂、浚渫による水質改善効果の水平分布 (単位: mg/L)

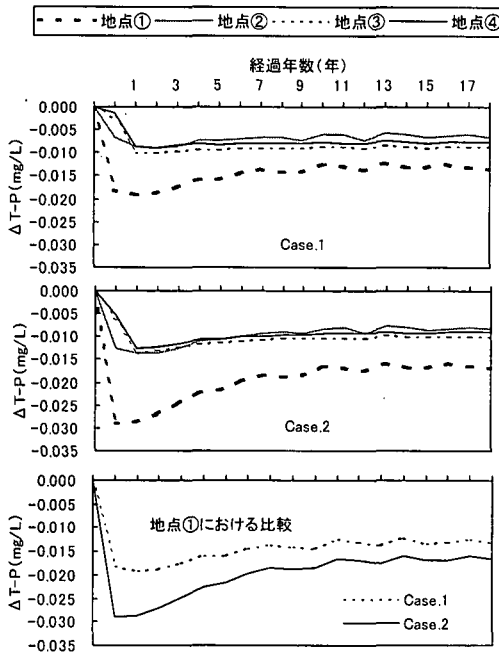


図-5 覆砂と浚渫による水質改善効果の経年変化の比較

る。Case.2とCase.3を比較すると、Case.3の方が約5%高い改善効果が得られるという結果となったが、覆砂面積にして約4倍もあることなど、事業の実施を考慮した場合、湾奥部のみの覆砂によっても大阪湾全体に対して有効な水質改善効果が見込めるものと考えられる。

本計算では、2000年の流入負荷量を覆砂後も一定値として与え続けている。覆砂後の流入負荷量が経年的に減少傾向を示すならば、得られる水質改善効果はより大きくなると考えられる。

5. おわりに

本研究では、大阪湾を対象に数値シミュレーションを行い、覆砂・浚渫といった底質改良を行った場合の水質・底質の改善効果について評価、検討を行った。

大阪湾においては、底質改良を行う場合、浚渫よりも覆砂の方の水質改善効果が高く、また、湾奥部の覆砂だけでも有効な水質改善効果が得られるという結果となった。

参考として、今回設定した覆砂の計算条件(湾奥部 348 km², 50 cm 覆砂厚)にかかる費用は、1 m³あたりの工費を2,000円とした場合、3480億円となる。

本研究の一部は文部省科学研究費補助(基盤研究(A))

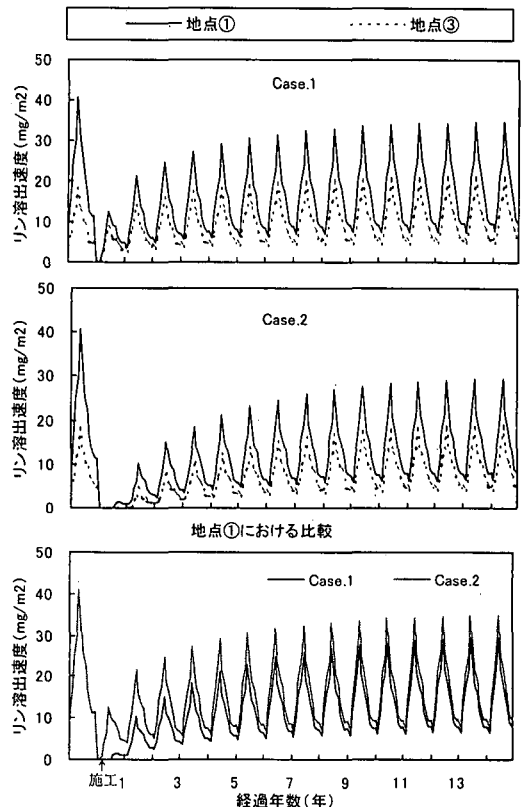


図-6 覆砂と浚渫によるリン溶出速度の経年変化の比較

11305036: 研究代表者 中辻啓二, (基盤研究(B))
12450201: 研究代表者 神田 徹(神戸大学))によって実施されたことを付記する。

参考文献

- 韓 銅珍・丸谷尊彦・中辻啓二(2000): 閉鎖性内湾における水質・底質モデルの構築とその検証, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 1091-1095.
- 城 久(1989): 大阪湾における富栄養化の構造と富栄養化が漁業生産に及ぼす影響について, 大阪府水産試験場研究報告第7号 pp. 28-38.
- 堀江 毅・井上晴史・村上和男・細川恭史(1996): 三河湾での覆砂による底質浄化の環境に及ぼす効果の現地実験, 土木学会論文集, No. 533, II-34, pp. 225-235.
- 丸谷尊彦・韓 銅珍・中辻啓二(2000): 大阪湾における水質の長期予測計算, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 1051-1055.
- 村上和男・細川恭史・高野誠紀(1998): 三河湾の覆砂による底質改善効果に関する追跡調査, 沿岸海洋研究, 第36巻, 第1号, pp. 83-89.
- 山根伸之(1998): 大阪湾の流動構造と生態系を考慮した水質予測モデルに関する研究, 大阪大学大学院工学研究科博士論文.