

韓国竜院湾における水環境特性の解明

Characteristics of Water Environments in Yong-Won Bay of Korea

星尾日明¹・金キョンヘ²・李 寅鉄³・駒井克昭²・日比野忠史⁴

Akira HOSHIO, Kyung-hoi KIM, In-cheol LEE, Katsuaki KOMAI and Tadashi HIBINO

The characteristics of water environment of Yong-won Bay in Korea, where the coastal area has been largely reclaimed to construct Busan New Port, were investigated by means of field observation and numerical simulation. Low sea water exchange rate and stratification due to the residence of fresh water are found to be main causes of anoxic water in the western part of Yong-won Bay. Observed sediment which contains a lot of fresh organic matter, is possibly concerned with weak tidal current in the western part. Water-holding capability of organic sediment correlates with maximum current velocity. It seems possible to predict the sediment property by simulated current velocity.

1. はじめに

沿岸域においては活発な経済、産業活動が行われており、環境の破壊や汚染が問題となってきた。近年、アジア諸国においても開発が進む沿岸域における自然環境の重要性が高まり、環境保全、修復に関する技術が急速に発達してきている。本研究では韓国第2の都市である釜山に面する韓国最大の内湾である鎮海湾での釜山新港の水環境を課題としている。鎮海湾東部においては韓国四大河川の1つである洛東江が流入している。竜院湾は韓国最大の内湾である鎮海湾の入り口に位置しており、竜院湾周辺ではコンテナ取扱量世界第5位の釜山港に代表される活発な経済活動が行われている (図-1 (a))。

釜山港は長年アジアにおけるハブ港としての役割を担ってきたが、荷役能力は限界に達している。慢性的な滞船解消とともに今後の貨物量増加への対応を図るため、図-1 (b) に示す竜院湾沖に、釜山新港が建設中である。1995年から行われている釜山新港の建設により湾周辺においては大規模な埋め立てが行われており、地形の変動や湾奥部の閉塞が生じている。Kimら (2003) により釜山新港周辺では大規模な埋め立てによる洛東江起源の流れの遮断が報告されており、水質・底質環境の悪化が懸念されている。釜山新港の奥部に位置している竜院湾は最も環境の悪化が予想されている海域である。

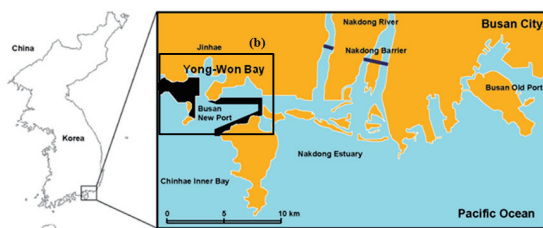
今後、釜山新港の奥部での有効な環境施策、ミティゲーション方法を提案するためには、まず、埋め立てによる水環境の変動を把握し、問題点を整理することが必要である。限られた現地調査結果と数値シミュレーションを用いて、当湾における水環境特性を把握することが本

研究の目的である。

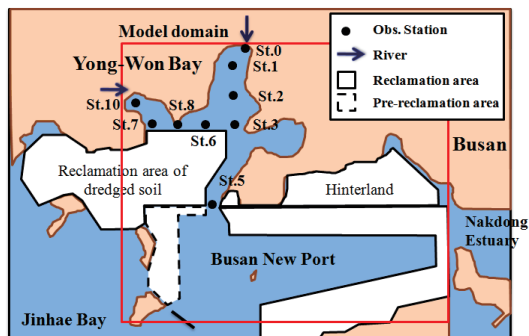
2. 研究方法

(1) 現地調査

3回の現地調査 (2009年8月19日 (大潮)、8月27日 (小潮)、11月1日 (大潮)) を湾内の8か所で行い湾内の水質・底質特性を検討した。調査地点は図-1 (b) に示している。なお、湾東部海域は調査範囲外である。水質 (水温、塩分、DO等) の測定は多項目水質計 (556MPS, YSIナノテック社製) およびクロロテック (AAQ-I183, JFEアドバンテック社製) を用いた。底質調査ではEKMAN採泥機を利用して採取した底泥の含水比、粒度分布、IL (有機物含有率)、POC、PONが分析された。



(a) 洛東江河口域周辺 (釜山新港～釜山旧港)



(b) 竜院湾の位置、調査地点、及び計算領域
図-1 調査対象海域の概要

1 学生会員	広島大学 大学院工学研究科
2 正会員 博(工)	広島大学助教 大学院工学研究科
3 非会員 博(工)	韓国釜慶大学校准教授 海洋工学科
4 正会員 博(工)	広島大学准教授 大学院工学研究科

(2) 流れ場の再現

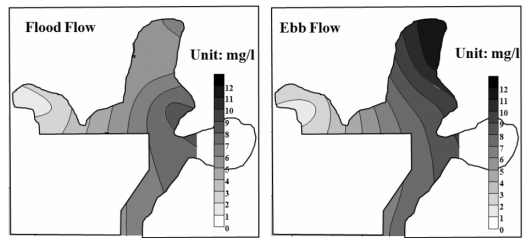
湾内の流れ場の再現には3次元数値解析モデル(ELCOM, Hodges et al 2000)を用いた。計算は図-1(b)に示す釜山新港を含む東西約6,700m, 南北約6,200m ($\Delta x = \Delta y = 50\text{m}$)の領域を対象とし、鉛直方向には深さを変化させながら13層に分割した。境界水位は釜山新港の南約1kmに位置している験潮所のデータ(最大潮差: 2m以上)、気象(気温, 日射量, 雨量, 風)は釜山気象庁のデータ(<http://busan.kma.go.kr/>)を用いて計算を行った。流入河川流量は釜山新港周辺(南西約20km)の河川(Yuho川)との流域面積比から求められた日ごとの値(年間平均流量: 湾北部河川 $1.0\text{m}^3/\text{s}$, 湾西部河川 $0.4\text{m}^3/\text{s}$)を用いた。

3. 湾内の水質・底質特性

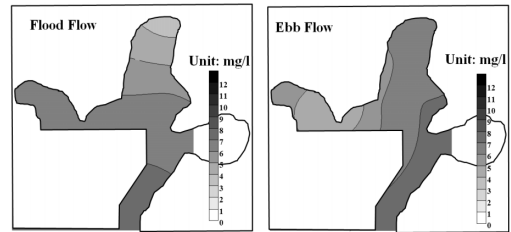
(1) 水質分布

図-2は8月19日および8月27日の現地調査により得られた海底に沿う層のDO分布を示している。大潮(8月19日)でのDOは $1\sim 11\text{mg/l}$ の広範囲に分布しており、上げ潮時と下げ潮時に 2mg/l 程度変動している。特に西部海域では 2mg/l 以下の貧酸素水塊が発生している。小潮(8月27日)になると全海域で底層のDO分布が 4mg/l 以上になり貧酸素水塊が無くなっていることがわかる。図-3には大潮期(8月19日)及び小潮期(8月27日)の西部海域(St.7)～湾中央(St.3)と開境界(St.5)～北部海域における(a)塩分と(b)DOの鉛直プロファイルが示されている。

湾内では二つの河川から流出があり、流量は湾北部河川 $1.0\text{m}^3/\text{s}$, 湾西部河川 $0.4\text{m}^3/\text{s}$ 程度である。8月の塩分は $25\sim 30$ PSUの範囲で分布している(11月においては河川流量: 湾北部河川 $0.09\text{m}^3/\text{s}$, 湾西部河川 $0.03\text{m}^3/\text{s}$ に対し塩分 $30\sim 34\text{PSU}$)。図-3(a)で示すように8月19日に貧酸素水塊が発生している西部海域(St.7周辺)では、塩分による成層が形成されており、表層塩分は底層塩分より2PSU程度低い。また、湾西部海域に流出する河川水は、湾北部海域に流入する河川水の4割程度であるにもかかわらず、湾北部海域(St.1)よりも表層で低い塩分状態である。この傾向は小潮期においても上げ潮, 下げ潮を通して生じており、西部海域に流出した河川水の滞留時間が長いことがわかる。一方、大潮期には上げ潮時に成層していた湾中央(St.3)での水塊構造が下げ潮により変化しているのに対し、西部海域の水塊構造は変化しておらず、西部海域では大潮期においても境界開口部の流れに対する水塊構造の応答が小さいことがわかる。湾西部海域において高塩分水塊が一潮汐間中、浅い海域であるSt.7の海底付近に存在できており(図-3), 重い水塊が浅場に存在できる流れ場が形成されていることが推



(a) 8月19日 (大潮期)



(b) 8月27日 (小潮期)

図-2 底層のDO分布

定される。さらに大潮期の上げ潮から下げ潮に向かうSt.3下層での塩分変化は開口部からの水塊の流入によるものであり、St.1～St.5のラインではエスチャリー循環が卓越した流れが起きていることがわかる。

一方、図-4に示すように8月27日(小潮期)には8月19日(大潮期)に比較して成層が弱くなっている。これは8月中旬の湾北部からの河川流入量($1.3\text{m}^3/\text{s}$)に対し、8月下旬の河川流入量($0.16\text{m}^3/\text{s}$)が減少したことによりSt.1～St.5ラインでの明確なエスチャリー循環が現れないためと考えられる。

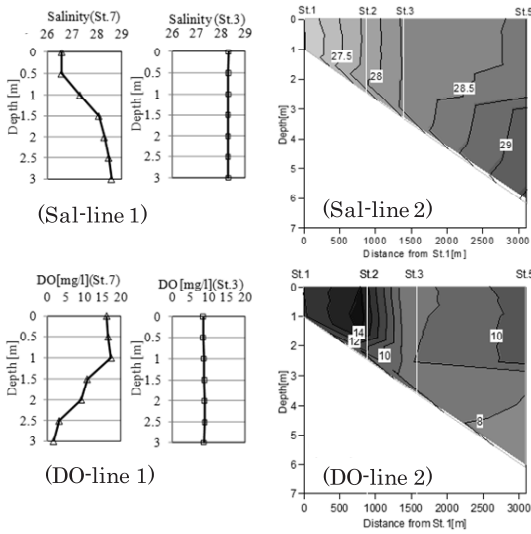
8月中旬から8月下旬にかけての河川流入量の減少により湾西部海域での成層も弱くなっているが、塩分, DO分布から湾西部海域において河川水の滞留時間が長く、開口部からの流れの影響を受けにくいという流れの構造は維持されていると考えられる。

(2) 底質分布

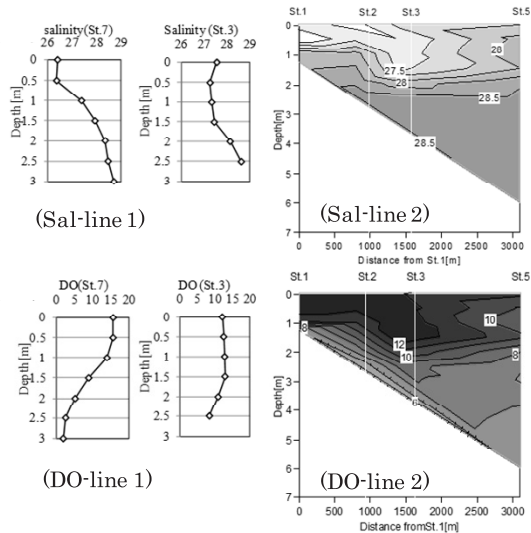
西部海域の浅場で成層が形成され、貧酸素水塊が出現するのは海底に堆積した有機泥との関係が考えられる。図-5には8月と11月に採取した底泥の(a)含水比, (b) IL, (c) C/N比, (d) $75\mu\text{m}$ 以下の細粒分含有率が示されている。

湾内の底質の平面分布は、北部河口域(St.1)および湾中心部(St.3)～湾口(St.5)においては含水比, ILとも比較的低い値を示している。

St.1においては、含水比, ILの値が他地点と大きく異なっており、細粒分含有率も低いことから、河川から流入した砂が海底に堆積することにより他地点と異なる底質性状となっていることが予想される。一方、西部海域(St.7周辺)においては他地点よりも高含水比, 高IL, 低C/N比である。



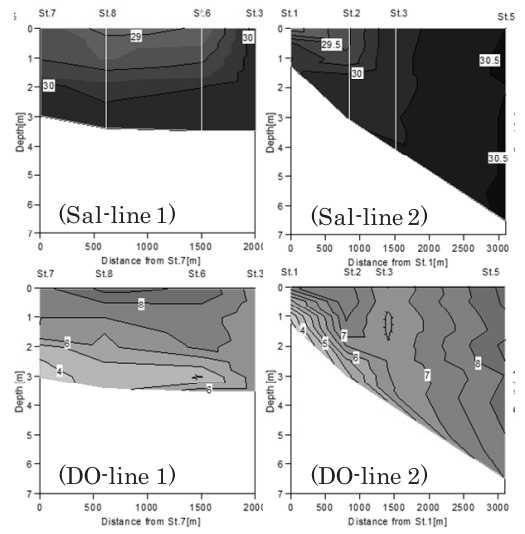
(a) 上げ潮時



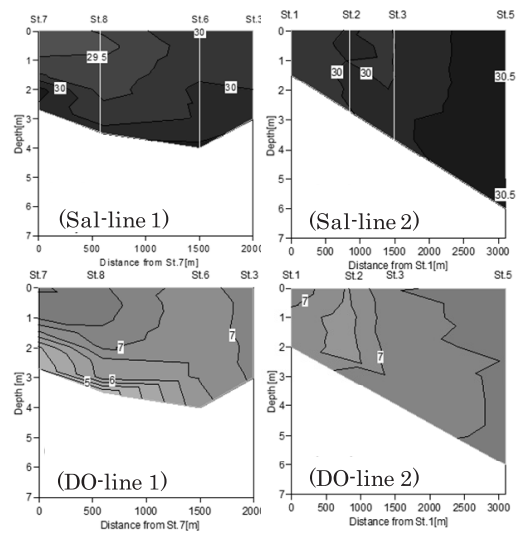
(b) 下げ潮時

図-3 大潮期 (8/19) の塩分・DO分布
(Sal) 塩分分布 (DO) DO分布 (mg/l)
(line 1) St.7, St.3 (line 2) St.1-St.5 断面

含水比とILの相関は0.85であり、保水能力の高い細粒分が底泥を構成していることがわかる。一般的にILと含水比には正の相関があるが、本調査結果ではILに対する含水比は北部海域で大きく、堆積泥には保水能力が高い有機物が含まれているといえる。湾内ではSt.1とSt.2での泥性状のみが8月～11月間に変化していることから、北部海域では海底の動きが大きく、その他の海域での底泥の動きは小さいこと、あるいは調査地点周辺に均一な底泥が分布していることが推定される。西部海域 (St.6とSt.7) では最も高い含水比であるにもかかわらず、有機物含有率が比較的小さい (ILが小さい) 傾向にある。さ



(a) 上げ潮時



(b) 下げ潮時

図-4 小潮期 (8/27) の塩分・DO分布
(Sal) 塩分分布 (DO) DO分布 (mg/l)
(line 1) St.7-St.3 断面 (line 2) St.1-St.5 断面

らに西部海域に堆積する有機泥のC/N比はSt.1～St.5ラインにある有機泥よりも値が小さいことから、一次生産起源による有機物が優先しているとすれば、西部海域には有機物含有量が多く分解が進んでいない有機泥が海底に堆積しているといえ、比較的新鮮な有機物が西部海域で生産あるいは輸送されて堆積していることが考えられる。水質分布と同様に底質分布にも地形の特性が現われており、底質分布が流れに依存していることが理解できる。次章では流れのシミュレーションによって流れによる水質、底質場の形成について考察する。

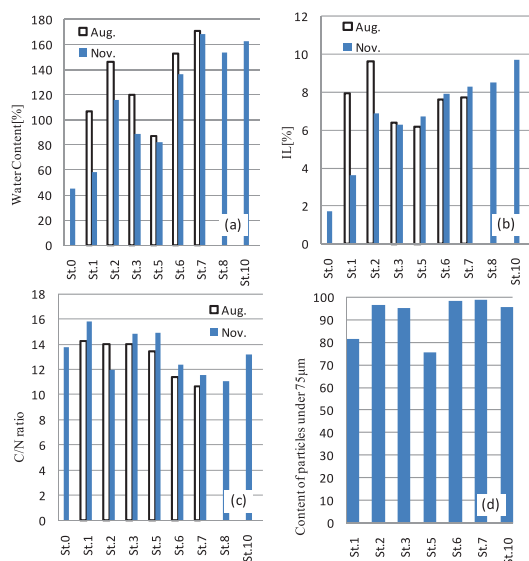


図-5 8月と11月の底質性状

(a) 含水比, (b) IL, (c) C/N比, (d) 細粒分含有率
(図中の値ゼロは欠測)

4. 流れ場と底水質環境

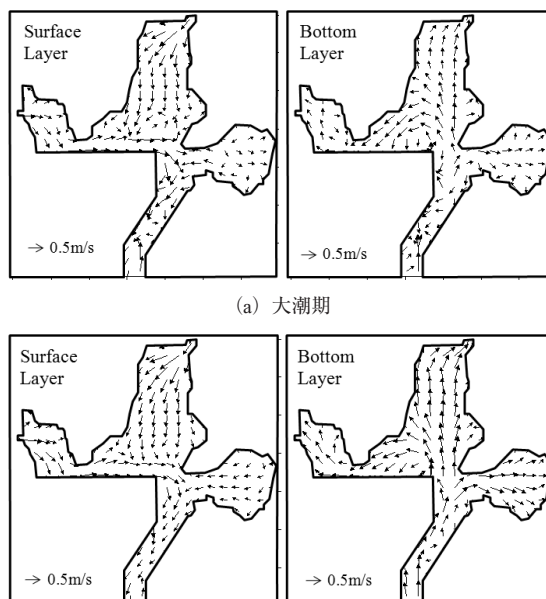
内湾での水環境の悪化の履歴は内部に堆積する底質性状を把握することで理解が深まる。底泥の堆積状態は過去の流れの履歴や、多くの物理的、生物的、人的擾乱を受けた結果であり、シミュレーションにより底質環境を再現することは極めて難しい。しかし、日々繰り返される流れ場に堆積状態が依存していることも明らかである。本章では大潮期、小潮期で行った塩分分布から推定された流れ場をシミュレーションで確認し、計算で求められる流速と各調査地点に堆積する底泥の性状を比較することで水環境の悪化のシナリオを探索する。

(1) 流れ場の特性

流動解析により感度解析および再現計算を行った。河川流量を与えていない場合、西部海域の最狭部における海水および塩分の流入は大潮期25時間において全層で流出、小潮期25時間において上層で流出、下層で流入である。

また再現計算により求めた底層流速のうち、8月の大潮期(8月19日)および小潮期(8月27日)の表層と底層の25時間の残差流を図-6に計算した。

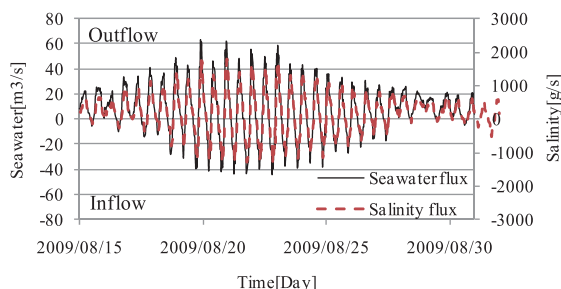
大潮期と小潮期の残差流分布の違いは河川流量の違いによるものである。河川流入地点では流出方向に強い残差流が存在しており、大潮期の湾中央部の表層では還流が形成されていることがわかる。残差流は湾全域で表層から流出、底層から流入する傾向があり、表層での河川水の流出、底層での外海水の流入が塩分成層の形成に大きく影響を与えていることが考えられる。



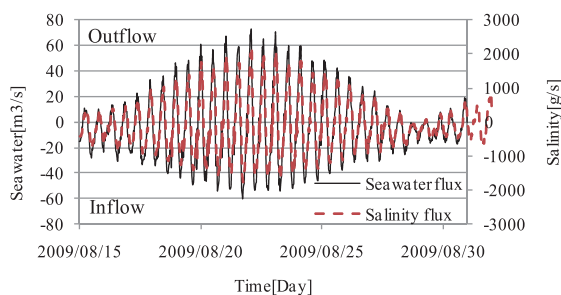
(a) 大潮期

(b) 小潮期

図-6 残差流の計算結果



(a) 上層



(b) 下層

図-7 西部海域の海水および塩分の移動量

西部海域の最狭部断面(St.8を含む南北断面)での流速と塩分分布の計算結果を利用して、上層と下層での海水および塩分の移動量の変動を図-7に示した。流速は南北成分より東西成分が卓越していることから、流速の東西成分のみを対象にした。また海水と塩分の移動量から大潮期と小潮期25時間の海水と塩分の収支を計算した。

西部海域の最狭部断面での海水と塩分の移動量は潮汐

と同じ形で変動しており、15日間の海水と塩分の総流出量はそれぞれ $598 \times 10^3 \text{ m}^3$ 、8.8tonである。そのうち、大潮期（8月19日）の25時間では上層において海水 $444 \times 10^3 \text{ m}^3$ 、塩分12.2tonが流出し、下層において海水 $320 \times 10^3 \text{ m}^3$ 、塩分9.6tonが流入している。小潮期（8月27日）の25時間では上層において海水 $514 \times 10^3 \text{ m}^3$ 、塩分15.1tonが流出し、下層において海水 $414 \times 10^3 \text{ m}^3$ 、塩分12.5tonが流入しており、西部海域の最狭部断面において上層からの流出、下層からの流入が生じている。断面全体では大潮期では海水は $124 \times 10^3 \text{ m}^3$ 、塩分は2.6tonが流出し、小潮期ではそれぞれ $9.9 \times 10^3 \text{ m}^3$ 、2.6tonが流出している。河川流量がない時、大潮期には西部海域にある水塊は外界方向へ流出する傾向が強くなる。これに対し、河川流量がある場合、大潮期、小潮期に関わらず西部海域への流入傾向が強くなり、その結果として西部海域への汚濁負荷の堆積が生じやすくなると考えられる。

(2) 湾内の流速分布と底質の関係

流動解析により求めた底層流速のうち、底泥採取日を含む1朔望潮間（15日間、8月14日～8月28日、10月25日～11月8日）において各地点での底層最大流速を求め、底質性状（含水量/有機物量）と比較した（図-8）。北部河口付近（St.0, St.1）を除き底層最大流速と底質性状（含水量/有機物量）の間には有意な相関が見られる。単位有機物量(IL)当りの含水量は有機泥に含まれる有機物の保水能力を示しており、この値が高い底泥は網状構造の発達した比較的新鮮な有機物を含んでおり、沈降速度が遅く、巻き上げも起り易い特性を有している（日比野ら、2008）。図-8から保水能力の高い有機物が底層最大流速の小さい領域に堆積していることがわかる。底層最大流速が小さい西部海域には沈降速度が遅い有機泥が輸送され、有機物の含有率が高い底泥が多く堆積していることがわかる。

これらの結果から、今後、数値シミュレーション結果を現地調査結果と共に活用していくことにより含水比及びIL等の底質性状や底質の分布特性、堆積履歴を把握することが可能であると考えられる。

5. 結論

本研究では韓国の釜山新港建設地周辺に位置する竜院湾において、埋め立てによる水環境変動を把握するため、水質、底質の現地調査および数値実験による流れ場の再現を行った。以下に得られた結論をまとめる。

(1) 湾西部海域においては成層が強く、底層では貧酸素水塊が発生しており、比較的分解の進んでいない

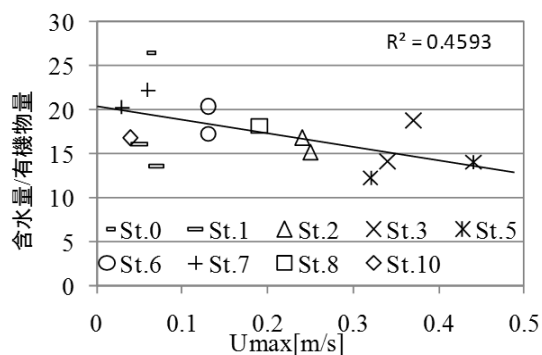


図-8 含水量／有機物量と底層最大流速の関係

有機物を多く含む有機泥が堆積していることが確認された。

- (2) 湾内流れ場は、潮汐以外に河川流量からも影響を受けるものの、西部海域においては海水交換率が弱いことから河川、海域（湾東部）からの流入負荷の蓄積があることが予想される。
- (3) 底泥に含まれる有機物の保水能力は底層流速に依存し、保水能力の高い有機物が底層流速の小さい領域に堆積している
- (4) 西部海域を除く海域においては海水交換が活発なため汚濁は進行していないと考えられる。西部海域においては、底層からの流出傾向が小さいことなどから、湾全体の中でも静穏で閉鎖性の強い海域であり、他地点と比べ汚濁が進行している。今後の釜山新港での産業活動を考慮すると、更なる汚濁の進行が予想され、西部海域で底質浄化事業を行うことが必要である。

謝辞：本研究は科学研究費補助金（研究課題番号：21404011、代表者：日比野忠史）による助成を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 日比野忠史・永尾謙太郎・松永康司（2008）：有機泥の分解を考慮した沈降と堆積過程のモデル化，土木学会論文集B，第64巻，pp.202-213
- DALLMORE, C.J., HODES, B.R. & IMEBERGER, J. (2003): Coupling an underflow model to a 3D hydrodynamic model. J. Hydraul. Eng. 129(10), pp. 748-757.
- Kim H., Park G.-Y. (2003) : Prediction of change in tidal system and deltas at Nakdong estuary due to construction of Busan new port, SIXTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER MODELLING AND EXPERIMENTAL MEASUREMENTS OF SEA AND COASTAL REGIONS, COASTAL ENGINEERING VI, pp. 91-100.