

(28) 人工海浜による閉鎖性内湾の水質浄化

Restoration of the Polluted Coastal Area by an Artificial Beach System

○徐 開欽¹, 坂口 芳輝², 西村 修³, 田中 裕作⁴, 細見 正明⁵, 須藤 隆一⁶
K. Q. Xu¹, Y. Sakaguchi², O. Nishimura³, Y. Tanaka⁴, M. Hosomi⁵ and R. Sudo⁶

ABSTRACT: The objective of this paper was to propose a new ecotechnologic method to recover the polluted coastal environment by using an artificial beach system. An artificial beach (5 m x 10 m) was constructed in the Matsushima Bay facing the Pacific Sea, about 300 km northeast from Tokyo. The area was polluted by fishery production and untreated wastewaters from rural district. The major merits of this system are simplicity of the structure, energy-free operation, capability to use tidal current cycle effectively, and ease of maintenance. The results of field investigation indicated that rapid removals of turbidity, suspended solids, phosphorus and ammonium nitrogen by the artificial beach system were achieved. The removal rate of total organic carbon was high because of the retention of the particulate matters. These performances were related to physical and biological filtration through the artificial beach system. It suggests that restoration of polluted coastal area may be expected using this artificial beach system.

KEYWORDS : Artificial beach; coastal restoration; chemical oxygen demand; dissolved oxygen; nitrogen; phosphorus; suspended solids.

1. はじめに

内湾は、波の穏やかさ、周囲を取り囲む地形の多様さ、複雑さなど、多くの生物にとっての好条件を備えており、安定した生態系を持つ豊かな海域である。人間にとっても、良い漁場が控え、高潮の心配も比較的少なく、景観も優れているという点で内湾は魅力的な場所であり、人々はその沿岸に集まるようになった。しかし、近年、内湾の汚濁が問題となっている¹⁻²⁾。これは、人口の集積、産業の拡大による海域への流入負荷の増大が大きな原因であるが、埋め立てやコンクリート護岸の建設などによる砂浜や磯、干潟の消失によって内湾の自浄作用が低下したこともその一因といわれている。内湾の汚濁を防止するために、下水道の整備や排水処理の徹底による汚濁負荷の削減は非常に重要で、今後いっそうの対策強化が待たれるところである。しかし、いったん湾内に蓄積された汚濁物質や栄養塩類は系外排出されにくいいため、すでに汚濁の進んだ内湾は直接浄化することが必要である。その方法として、近年、自然の持つ機能を利用、拡張することで生態系の修復を行うエコテクノロジーの概念が注目されている³⁻⁵⁾。この手法を用いた沿岸域の生態系修復例の一つに、人工海浜の建設がある。

失われた自然海浜を再生させようという動きは、我が国では1970年頃から始まり、自然帯の回復、レジャーの場の創出といった目的で、各地に人工海浜や人工干潟が建設された。このような動きの中、数々の人工海浜、人工干潟における生物相の変遷に関する調査報告がなされている⁶⁻⁹⁾。人工磯浜の建設により、貧弱であった現場の生物相が一変、多種の藻が藻場を形成し、以前には見られなかった回遊性魚類の寄りつき、岩礁性魚類の産卵等が認められた例¹⁰⁾などが知られている。これに加え、近年では人工海浜の建設と水質浄化機能を直接結びつけた議論がなされ、人工海浜はCODや窒素、リンの除去能力に優れていることや、CODの除去にはアサリなどの底生生物の存在が少なからず寄与していることなどが報告されている^{7, 11, 12)}。

こうした海浜の水質浄化能を応用した内湾浄化システムの開発も様々な形態で試みられ、人工海浜の構造、形状、材質といった要素が浄化能力を大きく左右するという報告がなされている¹³⁻¹⁷⁾。これまでに、砂浜と磯浜、石積み護岸といった海浜を構成する物質の粒径の違いによりその浄化特性が異なることや、砂浜は幅が小さければその浄化能を十分に発揮できないこと、また、海浜の断面形状として、緩斜面を持たせた構造は浄化作用にとって効率が良いことなどが明らかにされている。こうした研究結果は、内湾の水質浄化を意識した人工海浜や浄化構造物に関して、その設計条件を考える際に非常に重要である。しかし、これまでの研究では、磯浜内における水質パラメーターの挙動についての報告が少ない。このような海浜の水質浄化機能には磯浜内の好気性微生物の活動が大きく関

1) 東北大学大学院工学研究科 Department of Civil Engineering, Tohoku University (現 国立環境研究所)

2) 環境庁水質保全局 Water Quality Bureau, Environment Agency

3) 国立環境研究所 National Institute for Environmental Studies, Environment Agency

4) 東洋建設株式会社 Tokyo Construction Co., Ltd.

5) 東京農工大学工学部 Department Chemical Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

6) 東北大学大学院工学研究科 Department of Civil Engineering, Tohoku University

わっており、潮汐によって生ずる定期的な海浜内部への酸素供給が微生物の活性を保証している。このため、浄化作用を有効に機能させるうえで、砂浜や礫浜内部を通過した際の水質挙動の検討が重要と思われる。人工海浜における汚泥の蓄積、分解、再流出などに関する実験データは不足している。

本研究では、上記の点を踏まえ、実際の海域に人工海浜の現場実験装置を設置し、そこで見られる定期的な水質の変化及び礫浜内の連続的な水質変動について着目し、人工海浜内部での有機物分解、窒素、リンの挙動について検討を行った。

2. 人工海浜直接浄化システムの概要

人工海浜直接浄化システムはFig.1に示すように、透過型ケーソンと礫・砂浜によって構成され、ケーソンの内水面側には水門が設置される。これをFig.2(a)のように開口部をもつ閉鎖的な環境にある港湾等の防波堤に代えて建設する。

このとき、潮位の上昇・下降に伴ってケーソンの容積に相当する水量が強制的に礫・砂浜を透過することになる。したがってFig.2(a)に示すBのような往復流が発生する。さらに、水門の開閉によってAのような一方向流が発生させることも可能となる。

このように透過型ケーソンを付置することによって自然のエネルギーを効果的に利用した人工海浜内の水の流れを発生させることができる。この流れによって汚濁海水が礫・砂浜を通過する過程で懸濁物質のろ過や有機物質の分解・無機化、硝化等の、物理的および生物学的浄化作用が働き、浄化が行われる。

また、Fig.2(b)のような適用法も考えられる。これは海域の一部を人工海浜で囲み、この礫・砂浜によって浄化された内側の海域をレジャーなどに利用するもので、Fig.2(a)の透過型ケーソンを大きく拡大した形となっている。

3. 実験方法

3.1 実験現場の概要

実験は宮城県宮城郡七ヶ浜町東宮浜漁港の護岸堤外側沿岸で行った。当地は松島湾の南端に位置し、塩竈港に近接している。装置設置地点の水深は平均で1.0m、干潮と満潮の平均水位差は約1.5mである。付近の底質は有機物を多く含んだ泥で、特に夏季には風の影響で泥が巻き上がり、海水の透明度が著しく低くなることが多い。水質は、松島湾内

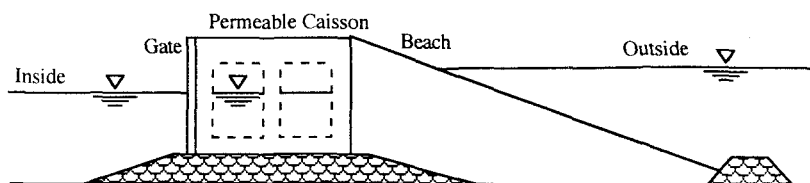


Fig.1 Schematic diagram of cross section of artificial Beach system conception

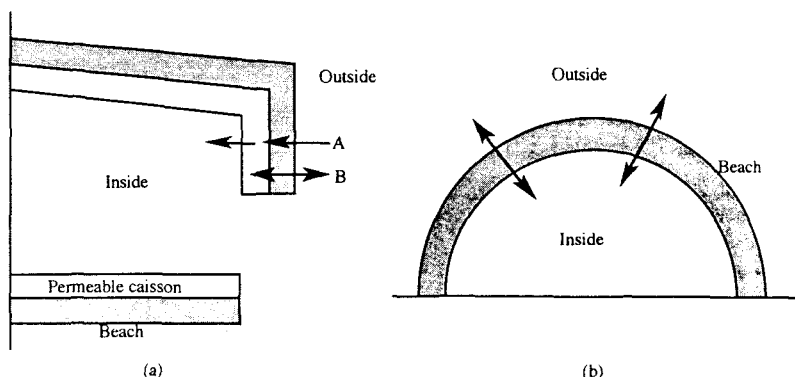


Fig. 2 Plain view of artificial beach conception

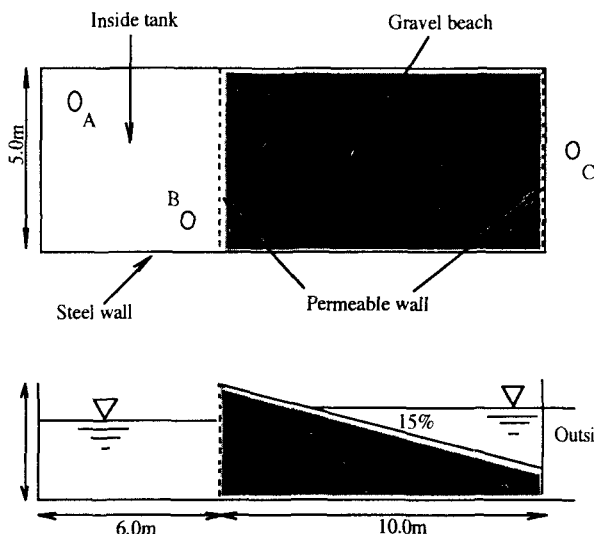


Figure 3 Schematic diagram of pilot plant apparatus of the artificial beach system

で最も汚濁の進行した海域である塩竈港に近いこともあって富栄養化が進んでおり、近年は年間に数回の赤潮を記録している。湾内の水質は、排水規制や下水道整備などにより水質向上が図られているが、昭和50年代以来大幅な改善は見られない。現在では特に沿岸部において環境基準を上回る有機汚濁が蓄積しており、沿岸地域の景観・観光や水産業等の発展の妨げになっている。また、秋から冬にかけてこの一帯ではノリの養殖が盛んであり、沖合い一面に養殖用の網が仕掛けられる。

3.2 実験装置

実験装置はFig.3に示すように、縦5m、横16m、高さ2.5mの鋼製の箱と礫で構成されており、直接海水中に設置されている。側面4面のうち1面は目開き約4cmの鋼製メッシュになっており、外側海域と実験装置内を自由に海水が入り出ることができるようにしている。この海水の出入口から10mの幅で斜面をつけて礫が敷き詰められ、礫浜が作られている。使用した礫浜は自然の海浜と同じように斜面をもった構造としており、材質には礫（碎石）を用いた。礫径は0.25cm~2.0cm、平均径（粒径加積曲線の50%値）は約0.8cmである。礫浜の奥部は内水槽になっており、外側海域との直接の海水の入り出しはない。このような構造とすることで、海水を流すための動力を人為的に加えなくとも、潮位の変動により外側海域⇄礫浜⇄内水槽の間で往復流を生じさせることができる。

礫浜中には、その間隙水の水質を調査するための採水孔がFig.4に示す13地点に設置されている。これらの採水孔はFig.4に示す各地点に塩化ビニールのパイプとゴム栓、またはガラス管を用いて固定されており、ここから地上まで引いたビニールチューブ（φ=3mm）とシリンジにより採水を行う。また、外側海域と水槽内のサンプルをこれらの採水孔からのものと同一条件で採水するため、実験装置の開口部付近と水槽内の水中に先端を固定したビニールチューブを地上まで伸ばした。

この実験装置を宮城県宮城郡七ヶ浜町東宮浜漁港に、1993年6月に設置され、1995年11月16日まで約2年半実験を行った。

3.3 水質実験方法

1) 定期観測

礫浜の持つ浄化効果の長期的な傾向を把握するため、定期的に水槽内と外側海域の海水をサンプリングし、水質の比較を行った。調査期間は、実験装置を設置した1993年6月20日から1995年7月12日までとした。採水地点はFig.3に示す3地点の表層とし、水槽内は2地点のサンプルを等量混合して水槽内のサンプルとした。採水にはバンドーン式採水器（21容積）を用いた。採水頻度は実験装置設置直後は週3回、その後水槽内の水質が安定したのちは週1回または2週間に1回に適宜移行した。分析項目はSS、Chl-a、DO、COD、D-COD、pH、TN、TP、DTN、DTP、NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N(NO₂-N+NO₃-N)、PO₄-P、水温の計15項目である。なお、分析方法は下水試験方法^[6]に準じて行った。また、採水地点の透明度も同時に測定した。

2) 礫浜内部の水質連続観測

礫浜内部での水質の詳しい挙動を知るため、連続調査を3回行った。調査日時は1993年8月14~15日（第1回）、1994年8月26日（第2回）、1995年8月27日（第3回）であり、いずれも海域の汚濁が進行し、また礫浜中の各種反応も活発に行われると考えられる夏季を選んで行われた。1回の調査における調査期間は12時間で、干潮の状態からスタートし、潮位が上がって満潮に達したのち、また干潮に戻るまでとした。調査はFig.4に示した13地点の採水孔のうち水面下にある全地点および外側海域、水槽内から2時間ごとにシリンジにより採水することにより行い、サンプルは必要に応じてその場で0.45μmメンブレンフィルターによりろ過した。なお、1回の採水量は80mlで、ビニールチューブに残留していた海水の影響を除くため、シリンジで採水した最初の3m分のビニールチューブの容積に相当する20mlは廃棄した。分析項目は

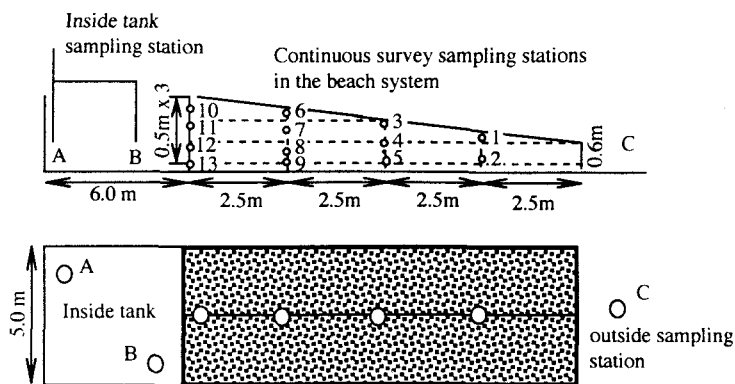


Fig. 4 Schematic diagram of sampling stations in the beach system

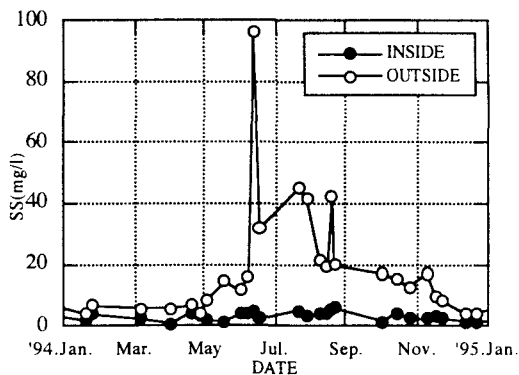


Figure 5 Variation of SS during the experimental period

DO, pH, TN, TP, DTN, DTP, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, 濁度の12項目で、このうちDO, pH, 濁度については現場において測定した。

4. 実験結果

4.1 定期観測実験結果

1) SS

Fig.5に水槽内外のSS濃度の経時変化を示す。水槽内では実験装置設置後約1カ月の間SS濃度の日変動が大きかったが、その後はおおむね 5mg/l という低い値で安定した。実験現場海域では夏季にSS濃度が非常に高い傾向があり、時として 100mg/l を超えるような日もあったが、それにもかかわらず水槽内のSS濃度に影響はなく、季節を通じて $2\sim 5\text{mg/l}$ の範囲で実験終了時まで推移した。

2) Chl-a

Fig.6にChl-a濃度の経時変化を示す。植物プランクトンの存在量の指標であるChl-aは、照度や水温などの気象条件によって大きく左右され、一般には水温の高くなる夏季に増大することが知られている。この実験対象現場海域でも、6月から9月までの間Chl-a濃度が高くなる傾向が見られた。これに対し水槽内のChl-a濃度は、実験装置設置直後は値が大きく変動したものの、その後はほぼ外側海域に比べて低い値を示した。ただし、夏季には水槽内でもChl-a濃度の上昇がみられ、外側海域よりも高い値を示すこともあった。

3) CODおよびD-COD

CODの経時変化をFig.7に示す。水槽内のCODは季節を通じて外側海域よりも低く、外側海域のCODが増加する夏季において、水槽内外のCODの差が顕著になっている。一方D-CODは、例外はあるものの水槽内外ではほぼ同様の値を示し、値の季節変動も小さかった。

4) 各態窒素

TNについては、夏季に外側のSSが非常に高いときを除いて水槽内外であまり明確な差は出ていない。また1994年7月頃から、外側に比べて水槽内のDTNが高くなるという傾向が見られはじめた。これは礫浜に蓄積した懸濁態有機物が分解し、その際に無機態窒素が溶出したものと考えられることができる。Figs.8,9にそれぞれ $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の経時変化を示す。外側海域では $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度よりも高い一方、水槽内では $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度に比べて高くなっている。このことは、海水が礫浜を通過する間に硝化が起こっていることを示唆している。ここに $\text{NO}_2\text{-N}$ のデータが示していないが、水槽内外ともに $\text{NO}_3\text{-N}$ に占める $\text{NO}_2\text{-N}$ の割合は非常に小さく、硝化が速やかに行われていることが分かる。また、実験開始後1年を経過したころから、水槽内外の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度差よりも、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の濃度差が大きくなっている例がしばしば見られるようになった。礫浜中に捕捉された懸濁態の窒素化合物が分解・硝化して水槽内に流入しているとも考えられ、礫に付着した懸濁物質の挙動の解析が必要と思われる。

6) リン

TP, DTP, $\text{PO}_4\text{-P}$ とも水槽内では季節を通じて外側よりかなり低い値になっており、礫浜による除去効果が認められる。夏季はTPの中に懸濁態のものがかなり存在しており、これが礫浜で捕捉されたことによる効果と考えられ、冬季はTPの内訳が主にDTP, $\text{PO}_4\text{-P}$ であり、これらが礫浜内で減少していることから、礫への吸着の影響が大きい

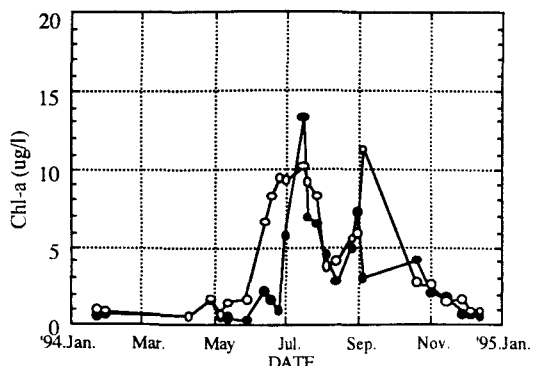


Figure 6 Variation of Chl-a during the experimental period

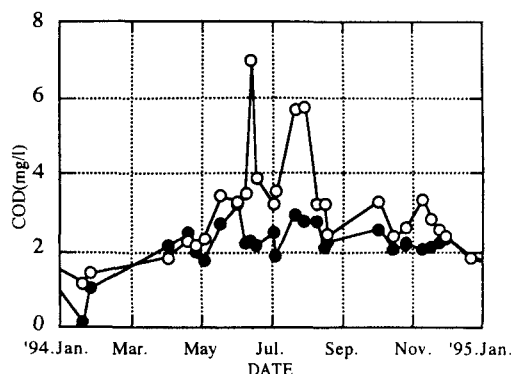


Figure 7 Variation of COD during the experimental period

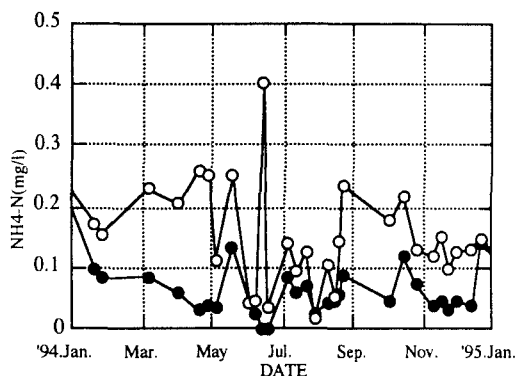


Figure 8 Variation of $\text{NH}_4\text{-N}$ during the experimental period

ものと考えられる（一例として、Fig.10に $\text{PO}_4\text{-P}$ の経時変化を示した）。

4.2 連続調査の結果

干潮から満潮、そして再度干潮に至るまでの約12時間にわたって3回調査を行ったが、潮位の変動による磯浜内の海水の往復に伴い、濁度、DOや窒素、リンがそれぞれ特徴的な挙動を示した。

1) 濁度

上げ潮、つまり潮位が上がり海水が水槽内へ入っていく時間帯に得られた代表的な磯浜内の濁度分布をFig.11に示す。磯浜表層付近で高濁度を、磯浜内部および水槽内では低濁度を示すという点で同じ傾向を示している。また、第1回調査では外側海域に比べると磯浜表層における濁度が同程度かやや低いのにに対し、第2回調査では磯浜表層の濁度は外側海域よりも高くなる傾向にあった。

2) DO

上げ潮、つまり潮位が上がり海水が水槽内へ入っていく時間帯に得られた代表的な磯浜内のDO分布をFig.12に示す。第1回調査では潮の流れがどちら向きでも、流れの方向にDOが減少していく様子が比較的是っきり表れている。また、DOの減少は上層より下層において著しい。これも流れの向きにかかわらず一致した傾向である。第2回の結果では、上げ潮時は海水が磯浜に流入したところでDOが急激に減少し、その後は流れの方向に緩やかに増加していく傾向となっている。これに対し、下げ潮時には第1回の結果と同様、流れの方向にDOが減少している。また、下層ほどDOが低いという傾向は第1回調査の結果と一致している。第3回調査の結果は第1回と同様、上げ潮、下げ潮どちらのときにも流れの方向にDOが減少している。下層ほどDOが低いという点は第1回、第2回の結果と同じであるが、全体的に前の2回に比べてDO減少が緩やかになっているという特徴がある。

3) TN

Fig.13には第2回調査における磯浜内のTN分布を示す。外側海域、磯浜内および水槽内ではほぼ同程度の濃度を示しているが、磯浜内の濃度分布を鉛直方向に見ると、下層よりも上層でやや濃度が高くなっていること、また、磯浜内の入口付近で特異的にTN濃度が低下していることが注目される。この入口付近の濃度低下は $\text{NO}_x\text{-N}$ の結果にも共通しており、下げ潮時において著しい。

4) $\text{NH}_4\text{-N}$

上げ潮、つまり潮位が上がり海水が水槽内へ入っていく時間帯に得られた代表的な磯浜内の $\text{NH}_4\text{-N}$ の分布をFig.14に示す。第1回調査では、上げ潮、下げ潮のどちらの時間帯でも、流れの方向にいったん $\text{NH}_4\text{-N}$ が減少し、また増加するという挙動を示した。第2回調査では、上げ潮時には流れの向きに $\text{NH}_4\text{-N}$ が減少しており、水槽内の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は非常に低くなっている。下げ潮時にはこの低 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の海水が磯浜に流入するが、磯浜中ではそれ以上の $\text{NH}_4\text{-N}$ の減少は見られず、磯浜の出口付近で外側海域と同じ濃度レベルまで増加している。第3回調査でもほぼ第2回と同じ傾向を示した。

5) $\text{NO}_x\text{-N}$

代表的な磯浜内の $\text{NO}_x\text{-N}$ の分布をFig.15に示す。流れの方向にかかわらず、外側海域よりも磯浜内で一様に高い濃度を示し、水槽内でもこれとほぼ同程度の値となっている。磯浜内では、上層よりも下層の $\text{NO}_x\text{-N}$ 濃度がやや高い傾向がある。第2回、第3回の調査における磯浜内の $\text{NO}_x\text{-N}$ 分布は、磯浜内の入口付近すなわち採水孔NO.1および2付近で低い値を示すという点で第1回の結果と同様である。また鉛直方向に見ると、時間帯によって少しずつ傾向が違っているものの、下層よりも上層で $\text{NO}_x\text{-N}$ 濃度が高くなる傾向が見られ、この点でも第1回と相反する結果となった。

6) TP, DTPおよび $\text{PO}_4\text{-P}$

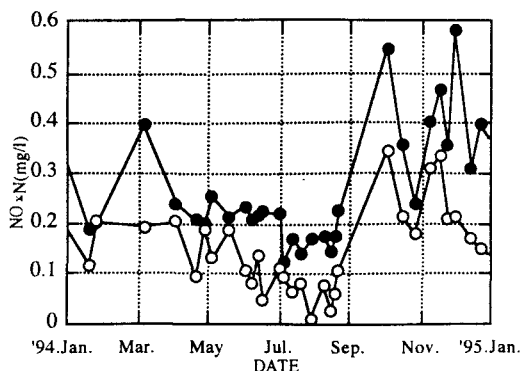


Figure 9 Variation of $\text{NO}_x\text{-N}$ during the experimental period

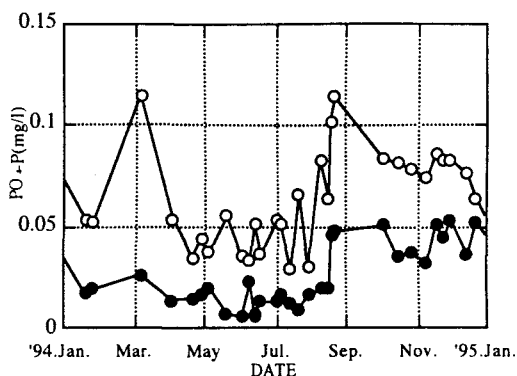


Figure 10 Variation of $\text{PO}_4\text{-P}$ during the experimental period

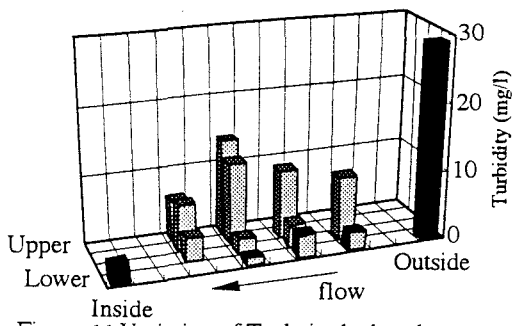


Figure 11 Variation of Turb. in the beach system

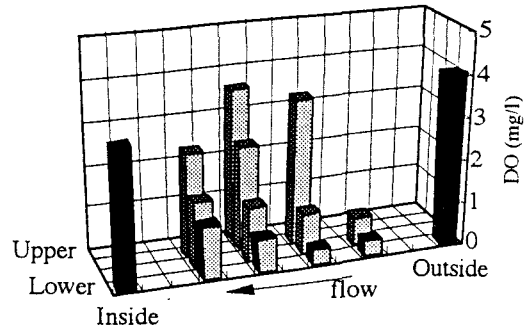


Figure 12 Variation of DO in the beach system

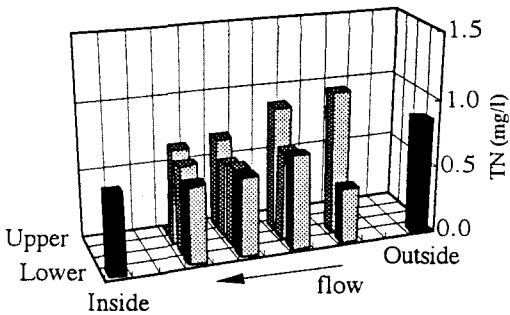


Figure 13 Variation of TN in the beach system

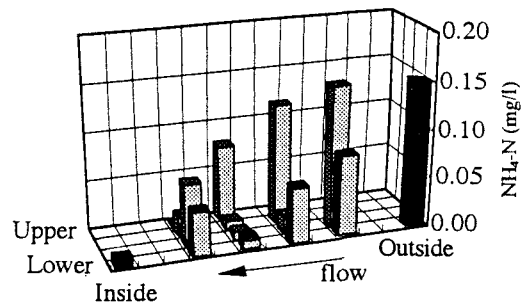


Figure 14 Variation of $\text{NH}_4\text{-N}$ in the beach system

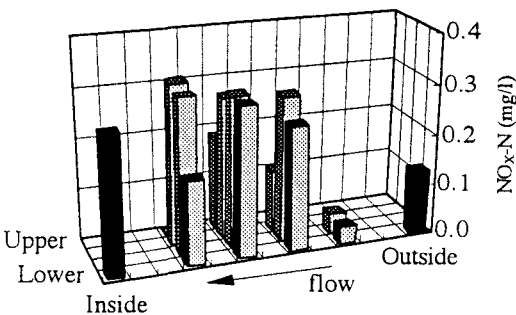


Figure 15 Variation of $\text{NO}_x\text{-N}$ in the beach system

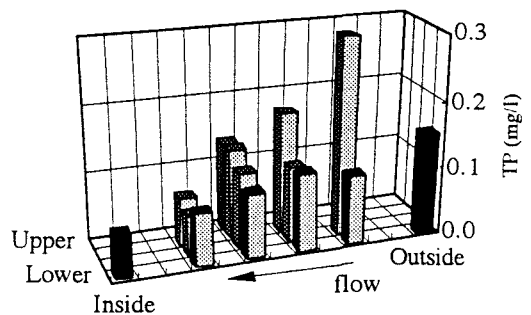


Figure 16 Variation of TP in the beach system

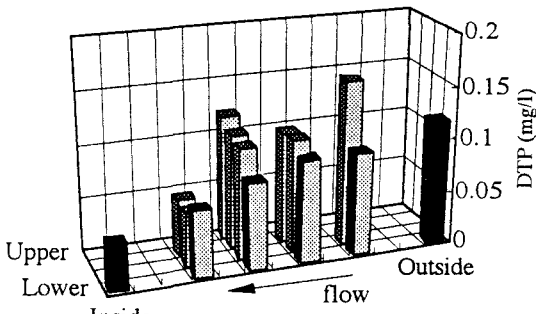


Figure 17 Variation of DTP in the beach system

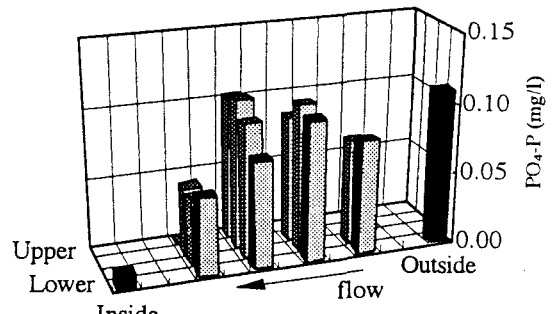


Figure 18 Variation of $\text{PO}_4\text{-P}$ in the beach system

Figs.16,17,18には礫浜内のTP、DTPおよび $\text{PO}_4\text{-P}$ の分布を示している。水槽内の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が外側海域に比べて低いのにに対し、礫浜内では一様に外側海域と同程度かやや高い値となっていることが特徴的である。これに対して第2回調査、第3回調査の結果は海水の流れの向きにかかわらず、内水槽に近づくにつれて $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が低くなる傾向は第1回の結果と異なるものである。また、この濃度分布は第2回の結果において、より顕著に現れた。

なお、本人工礫浜は現場に設置して約2年半を経た後、礫浜への泥の蓄積状況について、1995年10月末の時点での礫浜内の付着泥量分布を調べたところ、Fig.19のようになった。礫浜表面ほど泥の蓄積量が多くなっている傾向が明らかである。濁質の捕捉が主に礫浜表面で行われているといえる。この傾向は礫浜の下部ほど顕著であるが、これはこのような部分では1潮汐の間で水面下に沈んでいる時間が長く、絶えず濁質の多く含まれた海水に接していることが影響していると考えられる。また、連続実験の結果などから、水位の低いときほど海水のSS濃度が高くなるという傾向も見られており、このことも少なからず礫浜下部の濁質蓄積に関与しているものと見られる。また、そのとき各地点の礫浜表面に付着した藻類の分布はTable 1に示した。礫浜に多数の付着藻類が生息していることがわかった。これについて、今後物質収支等を含め、さらに検討する必要がある。

5. 考察

1) 定期調査

この定期調査の結果から、人工礫浜の主な機能を知ることができた。実験期間中の各水質の平均的な水質の変化をFig.20に示した。水槽内の低く安定したSS濃度、また高い透明度が実現されたことから、人工礫浜は懸濁物質の捕捉に効果的だと考えられる。また、この礫浜の濁質除去能力は、実験開始から2年半を経過しても衰えることはなかった。ただし、透明度の向上ゆえ水中の光条件が良くなるため、水温などによってはかえって藻類の光合成、増殖に有利に働いてしまうこともあることが分かった。

水槽内外のCODの差から、礫浜は有機物の除去能を持っていると考えられる。しかし、これに対しD-CODは水槽内外でほとんど変化がないことから、礫浜によるCODの低減は、主に有機懸濁物質の捕捉によるものであると考えることができる。礫浜に捕捉された有機懸濁物質は海水中の酸素を消費して無機化される。

$\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の調査結果から、礫浜中では速やかな硝化が起きていることが分かる。また、礫浜間隙に蓄積した有機物の無機化により $\text{NH}_4\text{-N}$ が生成すると考えられるが、ここで生じた $\text{NH}_4\text{-N}$ も硝化により $\text{NO}_3\text{-N}$ に変換されている。礫浜への有機懸濁物質の蓄積が進んできた実験期間後半、海水の礫浜通過に伴う $\text{NH}_4\text{-N}$ 減少量に比べ $\text{NO}_3\text{-N}$ 増加量が大きくなってきていることが、これを裏づけている。

リンについては、TP、DTP、 $\text{PO}_4\text{-P}$ とも明確に水槽内の方が外側海域より濃度が低くなった。またこれらのデータを比べた結果、水槽内外のDTP濃度の差はほぼ $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度差に等しく、有機態の溶存性リン(DOP)については水槽内外でほとんど差がないことが分かった。礫浜通過に伴って $\text{PO}_4\text{-P}$ の減少が起こる理由として考えられるものには、礫表面や付着泥、または水槽の内壁などへの吸着、礫表面生物膜による摂取などがある。ただし、この実験系では海水が礫浜中に滞留する時間が長くとも干潮一満潮間の6時間以内であることを考えると、速度の速い反応である吸着が主に $\text{PO}_4\text{-P}$ の減少に貢献していると考えられる。水中から個体表面への吸着反応は、吸着する物質の水中の濃度と、個体表面にすでに吸着している量によってその挙動が支配される。すなわち、水中の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が低い場合や、礫や泥の表面に十分に $\text{PO}_4\text{-P}$ が吸着してしまっている場合、吸着反応は起きにくくなる。1994年11月以降、水槽内外での $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の差が小さくなってきているのは、外側海域の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が低かったことだけでなく、それまでの1年半の間に礫浜への $\text{PO}_4\text{-P}$ の吸着が飽和状態に近づいてきていることもその理由の一つになっている可能性がある。

5.2 連続調査

連続調査結果から、礫浜内での諸物質の挙動が定性的に明らかになった。また、これらの挙動は永続的なものではなく、時間とともにしだいに変化していくことが示唆された。

上げ潮時に濁度が礫浜表層のみで高いことは、濁質の捕捉が主に礫浜の表面付近で行われていることを示している。また、下げ潮時においても礫浜表層における濁度が高くなっていることは、いったん礫浜に捕捉された濁質が、海水の逆流や波浪により洗われ、再び海域に流出している可能性を示唆している。この現象は、自然の砂浜において、砂粒子表面が有機性濁質の捕捉・遊離を繰り返しながら分解を進めていく挙動と類似している。第2回調査において礫浜表面の濁度が外側海域以上に高くなっているのは、第1回調査からの約1年間で礫浜表層への懸濁物質の蓄積が進んだためと考えられる。礫浜が懸濁物質の除去、透明度の向上に効果的であること、礫浜内では有機物の分解や硝化が起きること、リンが礫浜システムに吸着すること等が明らかにした。濁質の捕捉が主に礫浜表面で行われていることが示唆される。

礫浜内部でDOや $\text{NH}_4\text{-N}$ が減少し、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が増加していることから、礫浜内で捕捉された懸濁態有機物の分解や硝化反応が起きていると考えられる。外側海域に対して礫浜内での $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が0.1mg/lのオーダーで低くなっている一方、DO濃度は3~4mg/lほど低い。0.1mgの $\text{NH}_4\text{-N}$ を硝化により $\text{NO}_3\text{-N}$ にまで変化させるために必要な酸素量はたかだか約0.46mgであるから、この礫浜内におけるDOの消費は、主に捕捉された懸濁態有機物の分解・無機化によってなされているということが出来る。前に定期調査の項でも触れたように、この礫浜内では一般に $\text{NH}_4\text{-N}$ の減少量に比べて $\text{NO}_3\text{-N}$ の増加量が多い傾向にあるが、この $\text{NO}_3\text{-N}$ の過剰分は、礫浜内で盛んに起こって

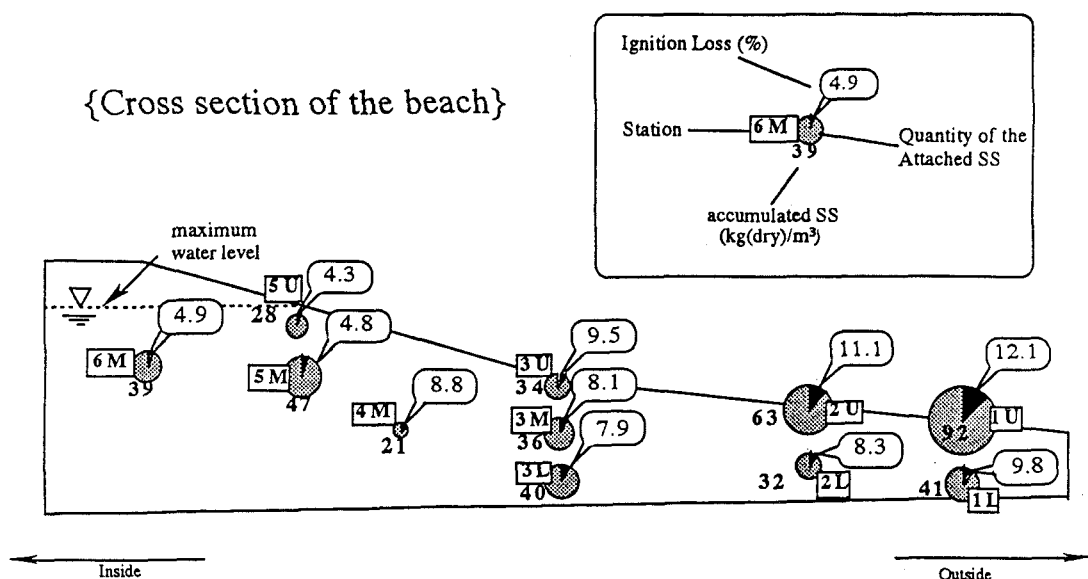


Figure 19 The distribution of the accumulated SS and Ignition Loss in the beach(Oct. 31, 199:

Table 1 Distribution of the attached epiphytic algae in the beach system (unit : cell/1g gravel)

Epiphytic algae	Stations	1L	2L	3L	1U	2U	3U
<Bacillariophyceae>							
<i>Achnanthes affine</i>							48,300
<i>Achnanthes microcephala</i>		96,600	96,600	338,200	144,900	96,600	
<i>Amphiprora hyperborea</i>						144,900	
<i>Amphora</i> sp.					48,300		
<i>Cocconeis placentula</i>		144,900			48,300		48,300
<i>Cymbella affinis</i>			48,300	48,300		48,300	48,300
<i>Diatoma vulgare</i>			144,900				
<i>Gomphonema constrictum</i>						48,300	
<i>Gomphonema exiguum</i>				48,300			
<i>Melosira nummuloides</i>		193,200	96,600	48,300		96,600	
<i>Navicula atomus</i>					48,300		
<i>Navicula</i> sp.					48,300	48,300	
<i>Nitzschia dissipata</i>						48,300	48,300
<i>Nitzschia palea</i>		96,600	48,300		48,300	96,600	193,200
<i>Pleurosigma affine</i>				48,300	48,300		
<i>Pleurosigma intermedium</i>						48,300	
<i>Rhoicosphenia marina</i>						193,200	144,900
<i>Thalassiosira gravida</i>		48,300					
<Prasinophyceae>							
<i>Nephroselmis pyriformis</i>			144,900	48,300			
<Euglenophyceae>							
<i>Eutreptiella gymnastica</i>			48,300				
<i>Eutreptiella</i> sp.					48,300		

いる有機物の無機化によって生じたものと考えるのが妥当であろう。DOの減少は上層よりも下層において著しい傾向にあったが、これは流下距離の違い、流速の違い、再曝気の有無などによるものと考えられる。同様の傾向は $\text{NH}_4\text{-N}$ にも見られるが、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は硝化による減少と有機物の無機化による増加が同時に起こっていると考えられ、その挙動はDOよりも複雑である。

第1回調査に比べて、第2回調査の結果では礫浜の先端部（入口付近）におけるDOの消費がより激しくなっている。この地点では濁度も著しく高いことから、礫浜表層の下部における有機懸濁物質の大量に蓄積が1年間の間に起こったことが分かる。また第2回調査以降、このようにDOが低下する地点において、 $\text{NO}_x\text{-N}$ およびDTNの局所的な低下が見られた。これは脱窒反応が起きているためと考えられる。

$\text{PO}_4\text{-P}$ は底泥粒子に吸着することが知られており、本実験で用いた現場実験装置においてみられた $\text{PO}_4\text{-P}$ の減少は、この吸着反応によるところが大きいものと考えられる。礫浜において $\text{PO}_4\text{-P}$ を吸着させる物質として、礫、礫間に蓄積した泥粒子があるが、吸着量に大きく関わるのがその表面積であることを考えると、礫そのものよりも蓄積した泥粒子による吸着が卓越するはずである。第1回と第2、3回の調査結果で $\text{PO}_4\text{-P}$ の分布が異なっているのは、この泥粒子の蓄積が第1回調査の段階ではあまりなされていなかったことが理由と考えられる。しかし、第1回調査の結果を見ると、礫浜内に比べて水槽内の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度がかかなり低くなっている。これは、水槽内での吸着と考えられる。現場実験装置の外枠には鋼が使われているため、水槽内の底には海水との接触で内壁が錆びて生じた酸化鉄の粒子が沈殿しており、これは $\text{PO}_4\text{-P}$ を吸着する可能性が十分に考えられる。

礫浜は濁質の濾過・捕捉能力が非常に高い。また、海水が潮汐により礫浜内を往復することで礫浜が洗浄されるため、いったん捕捉された濁質の一部は海域へ再流出することになる。この間に礫浜内では上記のように懸濁性有機物質の分解が起こるため、海域に戻される濁質に含まれる有機物は礫浜流入以前に比べると少なくなっている。このようにして、礫浜は内湾の有機汚濁物質の削減に貢献できるといえる。

6. まとめ

人工礫浜を用いた現場実験装置における、時間的・空間的に視点を変えた2つの調査について述べてきた。定期調査では、実験装置全体を一つの系として、長期的なスパンからこの礫浜の持つ様々な浄化効果を探ることができた。連続調査では、実験期間を1潮汐という短い期間に限定し、礫浜内の各地点の水質を経時的に追うことで、礫浜内で起こる諸反応の様子をより詳細に知ることができた。得られた知見をまとめると、次のようになる。

- 1) 人工礫浜は、懸濁物質の捕捉に非常に大きな効果を発揮する。この効果は主に礫浜の表層において大きく、捕捉された濁質のうち一部は海水の逆流や波浪によって剥離し、海域へ再流出する。また蓄積された濁質のうち有機成分は、酸素を消費して分解・無機化される。
- 2) 礫浜内では、 $\text{NH}_4\text{-N}$ が硝化反応により速やかに $\text{NO}_x\text{-N}$ に変化する。また、生成された $\text{NO}_x\text{-N}$ は、DOが減少する地点で脱窒反応により N_2 に変化し、系外排出される。
- 3) 有機物の無機化や硝化によるDO消費量は、泥の蓄積が増加するにつれて増加する。また、DOの減少は下層において著しい。
- 4) 礫浜は $\text{PO}_4\text{-P}$ を吸着させる能力を持つ。この効果は、礫間に泥が蓄積し、海水と接触する表面積が増加することにより増強される。しかし、単位表面積あたりの吸着量には限りがあるため、この吸着能は次第に衰える可能性がある。

このように、礫浜が懸濁物質の除去に効果的であること、また礫浜内で有機物の分解や硝化が起きること、リンが礫浜に吸着することは定期調査と連続調査の結果から確認できた。今後これらのシミュレーション等による定量

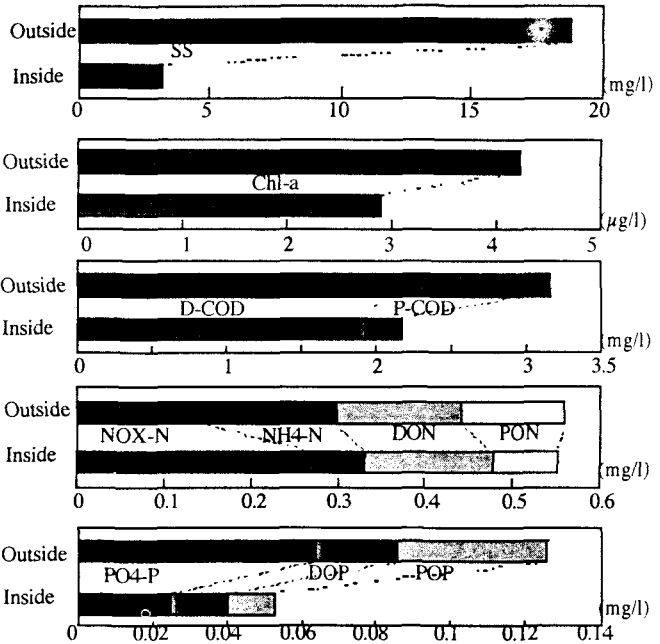


Fig. 20 Average water quality in the experimental periods

的な評価を行い、人工海浜が内湾の浄化にどれほど寄与できるものかを探っていく必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 栗原 康：河口・沿岸域の生態学とエコテクノロジー，東海大学出版社，1988.
- 2) 須藤隆一監修：内湾・内海の水環境、ぎょうせい、1996.
- 3) Mitch W.J. and Jorgensen S.E. : Ecological Engineering, John Wiley & Sons Inc. 1-56, 1989.
- 4) Kai-Qin XU, T. Sakaguchi, O. Nishimura, Y. Tanaka and R. Sudo: Testing an artificial beach system for removal of pollution in a coastal zone, Water Science and Technology, Vol.34, No.7, p.245-252, 1996.
- 5) 岡田 光正：沿岸域の水質保全技術，用水と廃水，35, p.56-61, 1993.
- 6) 稲森悠平，木村真子，須藤隆一：干潟における底生動物の役割と保全のための対策のあり方，用水と廃水，36(1), p.15-20, 1994.
- 7) 三好 康彦，嶋津 之，木村 賢史：人工海浜の浄化能力について，東京都環境科学研究所年報，p.120-125, 1990.
- 8) 佐々木克之：干潟の水質保全と物質循環，用水と廃水，36(1), p.21-27, 1994.
- 9) 徐 開 欽，藤沼紀敏，須藤隆一：干潟システムによる養魚場排水の浄化に関する実験的研究，環境工学研究論文集，Vol.32, 273-281, 1995.
- 10) 森政次，野田頭照美，新井洋一：人工護岸の造成とその生物的效果について，沿岸海洋研究ノート，29(1), 37-50, 1991.
- 11) 木村賢史，三好康彦，島津暉之，赤沢豊：人工海浜の浄化能力について(2)－葛西人工海浜およびその地先における底生生物の現況とその浄化能力の検討，東京都環境科学研究所年報，pp.141-150, 1991.
- 12) 赤沢豊，三好康彦，島津暉之，木村賢史，紺野良子：人工海浜の浄化能力について(4)－人工海浜と自然海浜における底生動物の現況とその浄化能力の検討，東京都環境科学研究所年報，pp.124-134, 1991.
- 13) 西村 修，田中 裕作，坂口 芳輝，細見 正明，須藤 隆一：人工海浜の浄化特性に関する基礎的研究――礫浜内部のDO分布と海浜形状――，水環境学会誌，17(10), p.661-668, 1994.
- 14) 小田一紀，貫上佳則，重松孝昌，大屋博史，綱潔之，倉田克彦：礫間生物膜の海水浄化効果と現地への応用に関する研究，海岸工学論文集，39, pp.991-995, 1992.
- 15) 赤井一昭，上田伸三，和田安彦，上嶋英機：人工環礁（海洋の空）の機能について，海洋開発論文集，6, pp.71-75, 1990.
- 16) 毛利光男，須田有輔，上原功，門倉伸行，田中裕作，細川恭史：汚濁海水浄化における礫間接触水路内の抑留物の分布と閉塞について，水環境学会誌，16(7), pp.516-525, 1993.
- 17) 堀江毅：海岸性状と水質浄化能，沿岸海洋研究ノート，28, pp.152-158, 1991.
- 18) 日本下水道協会，下水試験方法，東京，1984.