

人工海水池での自濁作用とその対策に関する調査研究

Study on Self-pollution Effects and Its Countermeasure in Artificial Sea Pond

上月康則¹・山中亮一²・平井 研³・中西 敬⁴・前田真里⁵・小崎隆志⁶・宮内勇児⁷

Yasunori KOZUKI, Ryoichi YAMANAKA, Ken HIRAI, Takashi NAKANISHI, Mari MAEDA
Takashi KOZAKI and Yuji MIYAUCHI

A lot of artificial coasts and the water front parks were created in Japan in order to improve the water amenity recent years. Contrary to expectation, some were polluted due to the self-pollution effects. The purpose of this study is to examine the self-pollution effects and its countermeasure to depress them in the artificial sea pond. One of them was control the inflow and the residence time of sea water in the pond. When a water level were raised more than now by 35 cm, the average maximum water temperature was provisionally calculated falls by 0.8 degrees. In addition, we could propose to change the bottom material of pond made of the concrete to the mud such as in a tidal flat where various living things lived and many materials circulated.

1. 緒論

兵庫県高砂市の海浜は、かつては白砂青松で名高い風光明媚な場所であったが、1960～70年代の高度経済成長期に埋め立てられた。高砂本港では、1973年に水銀汚染が起こり、さらに市民にとって海が遠い存在となった。こうした中、高砂市民からは「古来、海は万民のものであり、海浜に出て散策し、景観を楽しみ、魚を釣り、泳ぎ、あるいは汐を汲み、流木を集め、貝を掘り、のりを摘むなど生活の糧を得ることは、地域住民の保有する法以前の権利であった」という入浜権宣言（柳，2008；高谷，2007）がなされた。このような背景から1983年（昭和58年）には県立高砂海浜公園が整備され、人工的ではあるものの一部の海岸に砂浜が復元された。多様な生物が生息する場となっている一方で、海浜の一部に“ヘドロ”が堆積するなどの問題も生じている。

このように、近年市民の憩いの場所の創出を目的に各地で海浜公園の整備が行われているものの、環境面で問題が生じている所も少なくない（和野ら，1996；中谷ら，2004）。図-1に示す高砂市のあらい浜風公園は2006年に開園したものの、公園内の海水池では夏季に高温化が原因と思われる生物の斃死や池底の汚濁などが生じ、親水性を損ねるといった問題が生じている。

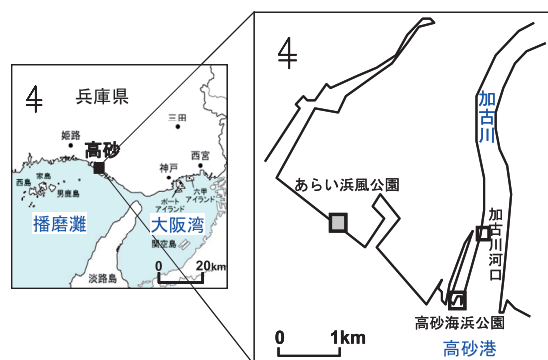


図-1 あらい浜風公園の位置

そこで本研究では、この海水池の環境悪化の原因解明と効果的な対策を提案することを目的に、調査、解析を行い、水深の浅い人工海水池を整備する場合の問題点、または現在問題が生じている池での効率的な対策について、特に“自濁作用（白鳥，2008）（自ら有機物を生産し、環境を汚してしまう作用）”に着目し、考察を行った。

2. 調査概要

(1) あらい浜風公園概要

研究対象地であるあらい浜風公園は、海辺へのアクセスの確保と海とふれあえる場の創出を目的とし、兵庫県によって全国2例目の“パブリックアクセス事業”として建設され、公園内には「この浦舟池」と呼ばれる、外海とつながった海水池がある。

この浦舟池の概要を図-2に示す。池はセメントの石張り構造となっており、池Cが47m²、池Dが272m²であり、両池は水路によりつながっている。流入出水量は、水路Aから池Cへ淡水が3.06m³/h流入、ポンプBからは水路A

- | | | |
|--------|------|-----------------------------|
| 1 正会員 | 博(工) | 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部教授 |
| 2 正会員 | 博(工) | 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部講師 |
| 3 非会員 | 修(工) | NPO法人人と自然とまちづくりと、理事 |
| 4 正会員 | 博(工) | NPO法人人と自然とまちづくりと、副理事長 |
| 5 学生会員 | | 徳島大学大学院先端技術科学教育学部環境創生工学専攻 |
| 6 非会員 | | 兵庫県県土整備部 |
| 7 非会員 | | 兵庫県東播磨県民局県土整備部加古川土木事務所 港湾課長 |

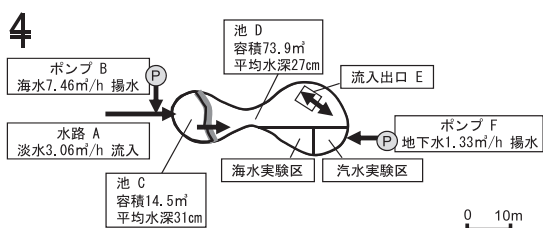


図-2 この浦舟池概要

を通り池Cへ外海水が $7.46\text{m}^3/\text{h}$ 流入する。またポンプFからは $1.33\text{m}^3/\text{h}$ の地下水が汽水実験区を通り、池Dへ流入する。ここで、池の容積をこれらの流入量で除したみかけの池内の海水滞留時間は約8時間である。また高さがDL+1.45mの高さにある流入出口Eは、外海とつながっているため、1.45m以上の潮位となると、池内へ海水流入が始まる。また池内の底の位置との関係を見ると、流入出口Eは、池内の底から15cmの位置にあり、つまり池内では常時15cm以上の水深が確保され、池の底が干出することはない。

このような海水池では、夏季は水深が浅いこともあり、水温の高温化が生じ、カニや小魚が斃死したことがあった。また付着藻類を食する生物量も少ないため、池内に有機物が堆積する“自濁作用”も生じている恐れがある。

(2) 調査方法

2009年2月から2010年3月までの期間、四季調査に加えて夏季に概ね1ヵ月間隔で調査を実施した。調査地点は池C、D並びに水路を対象とし、計26地点で、調査項目は、水温、塩分、栄養塩 (各態窒素、各態リン)、Chl.aの測定、生物調査では、生物の分布の目視観察、酸素法による底生微細藻類の一次生産の測定を行った。なお、海水実験区には塩分、池Dには水温の連続測定用ロガー計を設置し、連続調査も実施した。また、海水実験区、並びに汽水実験区においては生物生息場の創出試験として、アサリ、ヨシを設置し、生残試験を実施した。アサリについては、水面付近 (上段) と水底付近 (下段) に砂の入ったコンテナを設置し、それぞれにアサリを投入した。ヨシについては、植木鉢にヨシを移植し、植木鉢の土面がD.L.+1.55m, +1.45m, +1.35mになるように現地に設置した。

3. 調査結果及び考察

(1) 環境の現況

栄養塩については、池内において汽水実験区周辺で $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ が高く (図-3)、流入水である地下水に含まれるものと考えられた。しかし、池全体の栄養塩レベルをみると、富栄養状態ではなく、Chl.aについても低い値を示していた。この傾向は調査期間中を通じて生じ

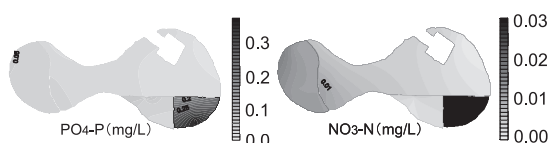
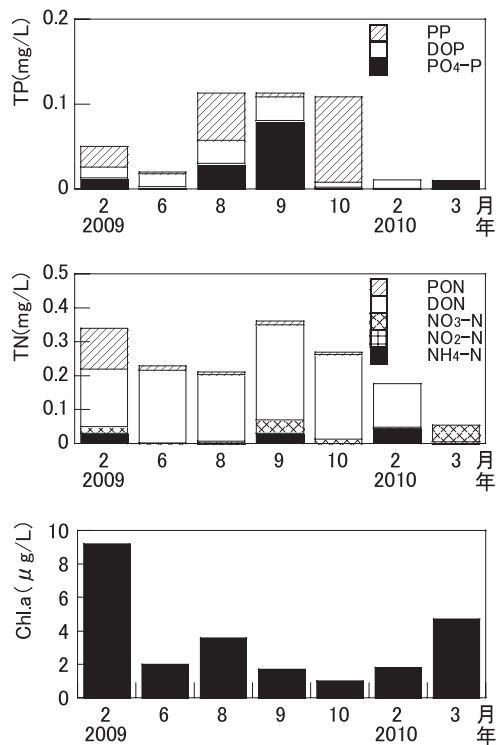
図-3 $\text{NO}_3\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ の水平分布 (8月)

図-4 各態窒素・リンおよびChl.aの推移

表-1 生物分布状況 (2月)

地点	種名	被度 (%)
水路A	多毛綱	1~5
	藍藻類	76~
	フジツボ類	6~25
	ムカデノリ	1~5
	コスジフシツナギ	51~75
ポンプB, 水路	ススカケベニ アナアオサ	局所的に密生 1~5
池C内	藍藻綱	76~
	珪藻綱	1~5
	カラマツガイ	1~5
池D内	タマキビガイ	1~5
流出口E付近	カキ	1~5
ポンプF, 水路	アオサ藻綱	76~

ていた (図-4)。生物の分布状況については、高水温により生物が斃死することのない冬季でも、主に一年性の海藻や小型の固着性の二枚貝が僅かに生息する貧弱なものであった (表-1)。

(2) 水質変動特性

a) 塩分

池内の塩分分布は池の東側で低く、これはポンプFから流入する地下水（約5psu）による影響と考えられた（図-5）。8月調査時の池内の最高塩分は25psuで、最低は汽水実験区5psuと池内の狭い範囲にあっても塩分の変化は大きいことがわかった。また、2009年8月6日～31日までの塩分連続観測結果からは、海水実験区の塩分は30psuで最も高く、最も低かったのは降雨後の19psuであった（図-6）。2009年8月6日～25日までの池内の水位変化と海水実験区の塩分変化をみると、潮位が上昇し、流入出口Eから海水が流入すると海水実験区の塩分は約3psu高くなっていた（図-7）。また、海水の流入終了後から約6時間は流入海水による塩分が保たれ、それ以後は塩分の低い地下水などの影響を受けて海水実験区の塩分は低下した。2009年8月25日～26日にかけて海水流入はなく、海水実験区の塩分は約26psuで推移していた。このように当該池は地点や外海水流入による塩分変化が大きく、特に流入出口Eからの海水流入による影響を強く受けていることが示された。

b) 水温

池内の水温分布は、汽水実験区周辺において値が異なり、冬季では、池内の水温よりも汽水実験区周辺において約5℃高く、夏季では約5℃低かった（図-8）。高水温化が問題となっている夏季について、2009年8月6日～31日までの水温連続観測結果から、池内の水温は昼と夜

で周期的に変化し、8月には最高33℃、1日の最大水温差は約8℃であり（図-9）、池の水深が浅いために、日射の影響をより強く受け、気温とともに変動することが考えられた。期間中に水温が低かった2009年8月9日～11日にかけては降雨と気温の低下が影響したと考えられ、2009年8月5日～31日までの水温変化をみると、海水位が流入出口Eよりも高く、海水の流入が始まると、池内の水温が低下していた（図-10）。さらに詳細な調査を9月に実施した結果、図-11に示すように、昼間に海水が流入出口Eから流入開始し、水位上昇が20cmを超えると、それ以後約0.1℃/cmの割合で池の水が冷却されていることがわかった。

以上結果より、海水の流入量を調整することで、夏場の高水温化を緩和できる可能性があることが示唆された。

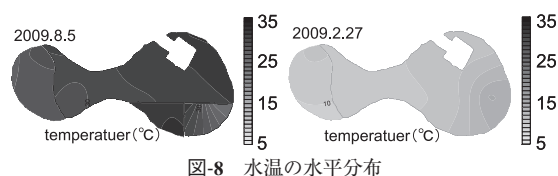


図-8 水温の水平分布

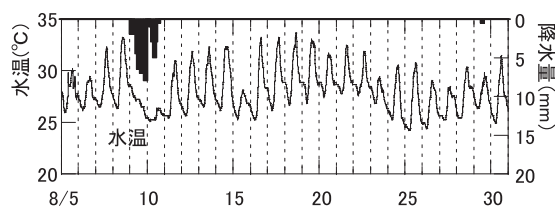


図-9 水温と降水量の推移

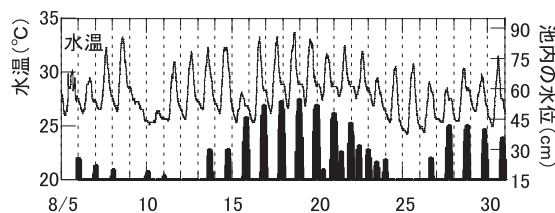


図-10 水温と水位の変動

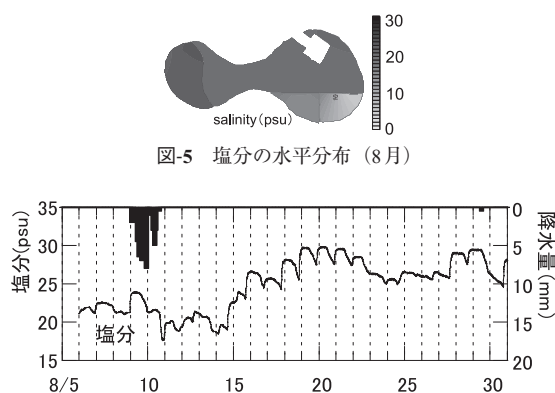


図-5 塩分の水平分布（8月）

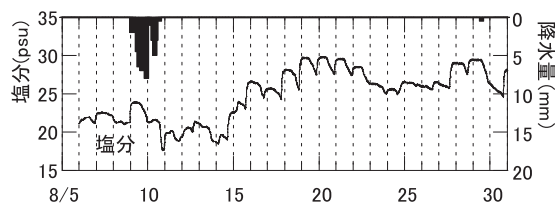


図-6 塩分と降水量の推移

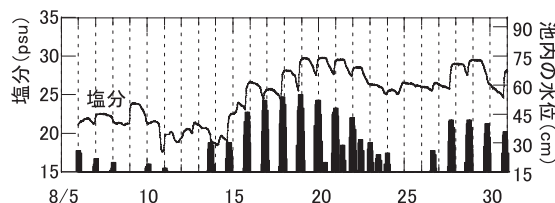


図-7 塩分と水位の変動

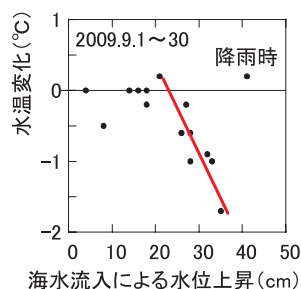


図-11 海水流入による水温変化

表-2 各干潟における一次生産速度

干潟調査地	一次生産速度 (mgC/m ² /h)
人工海水池	158.3
徳島県 勝浦川河口干潟	97.9
徳島県 吉野川河口干潟	9.7
兵庫県 御前浜人工干潟	34.9
瀬戸内海東部 河口干潟*	117±50.2

※門谷, 2005

(3) 一次生産

現地実験における池底の底生微細藻類の一次生産速度は、 $422.1 \text{ mgO}_2/\text{m}^2/\text{h}$ であり、炭素換算すると $158.3 \text{ mgC}/\text{m}^2/\text{h}$ であった。表-2に示したように自然、および人工干潟での一次生産速度と比較すると、これらの干潟より高い値を示した。このような結果になった原因としては池内の水深が浅く、日射が届きやすい環境に加え、波浪等による擾乱がないため底生微細藻類の生産に好適な環境であったことが考えられた。また生物相が貧弱なため、底生微細藻類を利用する生物の種数、量が少なく、藻類が蓄積する環境となっていることも原因の一つとして考えられた。このような活発な一次生産と底生微細藻類を摂食する生物が存在しないことによって物質循環が停滞した結果、“自濁作用”による有機物の堆積に伴う環境悪化が生じたと考えられた。

(4) 生物生息場の創出実験

海水実験区、汽水実験区にアサリ、ヨシを試験的に投入し、生残状況を実験した。なお、アサリを選定した理由については、自濁作用によって有機物が堆積している当該池において、懸濁物食性で濾水量の多い種が生育することにより、物質循環を円滑にすることを期待したためである。またヨシについては、栄養塩を固定し、物質循環に寄与するとともに、日陰を創出することによる高温化対策に期待したためである。

a) アサリ

図-12に汽水実験区、および海水実験区に設置したアサリの生残試験結果を示す。夏季から冬季にかけて試験した結果、設置から約7ヵ月後には汽水実験区の上下段において、生残率が約10%と低く、アサリの生息が困難であることが窺えた。一方、海水実験区の上下段において、生残率が約70%と高く、アサリの生息の可能性が示唆された。このような結果の原因には、塩分が考えられ、汽水実験区では大きい時に1日で0～28psuの変動があり、海水実験区では25～32psuを維持していた。アサリの生息条件は塩分20psu以上（(社)全国沿岸漁業振興開発協会, 1996）であることから、汽水実験区はアサリの生息には適さなかったと考えられる。一方、海水実験区

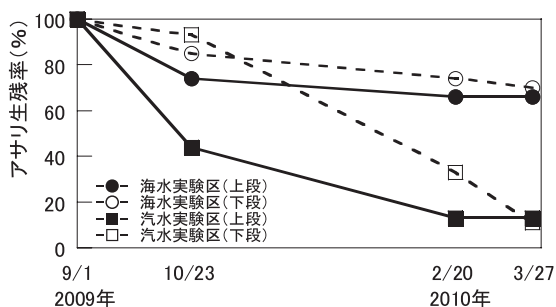


図-12 アサリの生残試験

はアサリ生息の可能性があるので、継続して調査を実施している。

b) ヨシ

図-13に汽水実験区、および海水実験区に設置したヨシの生残試験結果を示す。結果より、設置から約3ヵ月後のヨシの生残率は、汽水実験区D.L.+1.55mおよび海水実験区D.L.+1.35mにおいて0%であり、他の設置条件についても海水実験区のD.L.+1.55mを除き、約20%であった。このような結果の原因として、汽水実験区では、ポンプFから流入する地下水により水温変化が激しかったことが理由の一つとして考えられた。また、海水実験区では、塩分が高く、ヨシの生息条件である20psu以下（佐原ら, 2003）を上回っていたことから、ヨシの生育に適さなかったと考えられる。なお、海水実験区のD.L.+1.55mについては生残率が40%を示していた。これは当該池の極表層には水路AやポンプFから流入してくる低塩分水が密度躍層を形成していることがわかっており、この低塩分水の影響を受けて生残率が比較的高かったことが推察された。

(5) 高水温化対策

池内の高水温化の対策は、大きな改修を伴わないコスト面で優れ、さらに市民の利用を妨げない方法が要求される。そこで本節では、外海水との交換を制限している堰高さを変更した場合の効果と、地下水揚水量を増加させた場合の効果を検討した。検討には池内の水塊は混合状態であると仮定したボックスモデルを用いた。本検討では、堰における流入出、地下水の流入、上流からの淡

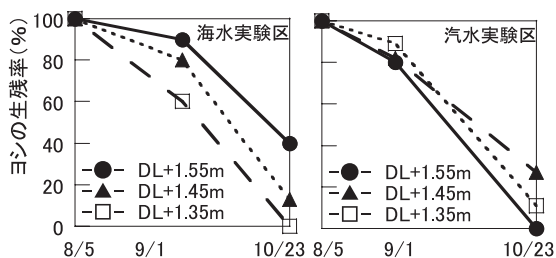


図-13 ヨシの生残試験

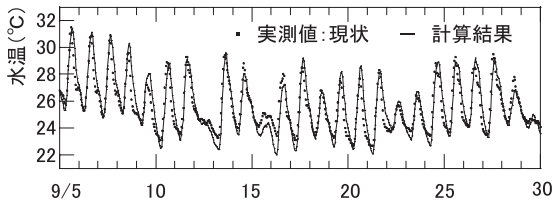


図-14 水温変動の再現性

水流入、水面からの熱収支を境界条件とし、池内の水温の時間変化を算出した。水面からの熱収支の算定は、村上（1987）に従った。境界条件として用いた外海水と地下水の水温は筆者らによる実測値を、水位と気象条件は近隣における実測値を適用した。計算対象期間は2009年9月5日～30日とし、1時間ごとの水温を求めた。解析対象領域は下池のみとした。

図-14に計算対象期間における水温変化の実測値と計算結果の比較を示す。実測による池内の水温は日射などの影響により日変動が認められるものの、その変動幅は不規則であった。図中に実線で示した計算値はこのような不規則な水温変動を再現できており、本モデルは評価に適用しうる精度を有していると判断した。つぎに、表-3に示す4種類の計算ケースを設定し、それぞれについて水温の経時変化を求めた。表-3に計算により得られた水温の経時変化より求めた期間内の平均水温、平均最高水温を示す。

堰の水位を下げた場合（Case2）は貯留水の体積が減り、環境条件の変化を受けやすくなり、現状と対策後の平均最高水温を比較すると0.5℃程度の水温が上昇する結果となった。一方、堰の水位を上げた場合（Case3）は、貯留水の体積が増えるため、熱しにくく、冷めにくい傾向が顕著となり、平均最高水温は0.8℃低下した。本研究の目的から考えること、この方法の適用性は高いと考えられる。さらに堰高が上昇するため現状より低水温の水塊が流入する可能性もあり、この効果が増幅される可能性がある。しかし堰高さを上昇させると子供の利用を妨げる可能性があるため利便性を考慮に加えて、今後検討していく必要があるだろう。また、地下水をより多く流入させる場合（Case4）は、流入量に従い水温低下や多様な塩分環境を創るといった効果も期待できるが地下水の揚水に電力が必要となることからコストは増加する。他、栄養塩の供給量も多くなることが懸念される。

4. 結論

1) 海水池は、生産された有機物が蓄積する自濁作用の進行する系となっていた。その原因には、藻類や堆積物を食する生物が不足していること、物理的に系外流

表-3 高水温化緩和効果

改善方法	平均水温 (Case1との差)	平均最高水温 (Case1との差)
Case1：現状	25.6	28.3
Case2：堰高15cm下げる	25.6 (0.0)	28.8 (+0.5)
Case3：堰高35cm上げる	25.9 (+0.3)	27.5 (-0.8)
Case4：地下水揚水量を2倍にする	25.4 (-0.2)	28.2 (-0.1)

出する作用が無いことなどがある。

- 2) 小さな水域であるが、塩分分布は幅広く、それに応じて生息できる生物も異なっていた。これは生物の生息場を適切に整えれば、生物多様性豊かな浅場を創出することを示唆するものである。
- 3) 滞留時間を変える、地下水の流入量を増加させることで、高水温化対策の効果を定量的に試算できた。他にも河口干潟にあるようなヨシ原を整備し、日陰といった避暑地を創ることも生物が生息する水辺創出には必要であると思われる。

今後、小規模な実験を繰り返すことで、ここで示された改善方法のプラス、マイナス面を整理し、最も実用的な方法やその組み合わせを見出していく予定である。

謝辞：本研究を進めるにあたっては、播磨マリノクルー代表、吉政静夫氏には多大なご支援を頂いた。ここに謝意を記します。

参 考 文 献

- 佐原雄二，細見正明（2003）：現代日本生物誌 10・メダカとヨシ，岩波書店，p.135.
- （社）全国沿岸漁業振興開発協会（1996）：増殖場造成計画指針－ヒラメ・アサリ編－（平成8年版），pp.136-141.
- 白鳥 実，上月康則，島田佳和，橘田竜一，佐藤 隼，村上仁士（2008）：ダム下流減水区間の付着藻類群集による河川の自濁作用に関する調査研究，土木学会論文集，Vol.64，No.3，pp.262-275.
- 高谷和彦（2007）：「瀬戸内海なぎさ回廊づくり構想について」，瀬戸内海，No.49，pp.47-51.
- 中谷直樹，大塚耕司，奥野武俊（2004）：生態系モデルを用いた環境修復技術の機能評価－りんくう公園内海の事例－，土木学会論文集，Ⅶ-30，pp.13-28.
- 村上真裕美，大西行雄，原島 省，國司秀明（1987）：瀬戸内海における水温，塩分分布の数値シミュレーション，沿岸海洋研究ノート，第15巻，第2号，pp.130-137.
- 門谷 茂（2005）：物質循環と生物生産から見た干潟生態系，月刊海洋，Vol.37，No.2，pp.97-106.
- 柳哲雄（2008）：里海に係わる慣習法，九州大学応用力学研究所所報，第135号，pp.105-108.
- 和野信市，吉田昌稔，寺中啓一郎（2007）：閉鎖性水域における海浜公園の生物生息について，海洋開発論文集，Vol.12，pp.457-462.