

人工磯の新しい近自然化シナリオへの水理解析の貢献

後藤 仁志*・酒井 哲郎**・仁木 将人***・八木 哲生****

既存の人工磯の多くは、内湾や防波堤に囲込まれた静穏域に造成され、波浪の直接的な影響を受けない構造となっている。一方、天然磯の多くは、時化には高波浪の直撃を受ける条件に有り、波食によって地形生成が成されている。単に天然磯の幾何的な形状を模倣するのではなく、波浪条件を始めとする物理環境も天然磯に近づける新しい人工磯の在り方を現実化するためには、碎波・越波といった激しい波浪条件でも対応できる水理解析手法が必要となる。本稿では、粒子法により、波食棚上の転石の越波・遡上に伴う運動と窠穴内の転石の挙動について数値シミュレーションを実施して、波浪の作用を積極的に活用した人工磯の環境改善を考える上での水理解析の有効性を示す。

1. 緒 言

自然との共生は、昨今の社会的要請に後押しされて、中長期的な水域環境の計画・設計において、必要欠くべからざる要素となりつつあるが、海岸域では先駆的な試みが、既に実施されている。その代表とも言えるのが、人工磯である。従来の大規模な人工磯、例えば、東京都お台場海浜公園(堀越, 1990)や大阪府淡輪箱作海岸(島田(広)ら, 1994)などは、波浪の直接的影響が少ない静穏域に造成されてきたが、岩礁に囲まれた天然磯は、外洋に面した厳しい波浪条件下に存在することが多い。港湾部の再開発が契機となって近自然・多自然型の人工海浜造成が行われていることから、人工磯の立地は一定の制約を受けるので、天然磯・人工磯間で立地の海象条件が異なることは致し方ないと言えよう。

人工磯の構造に関して頻繁に指摘されるもう一つの問題点は、天然磯と比較して微地形が単純なことである。人工磯の設計では天然磯の微地形の再現を理念上は重視しているが、天然磯の微地形は極めて複雑かつ多様であるため、設計情報としての定量化は容易ではない。人工磯の設計情報を天然磯に求める試みは端緒に付いたばかりであり(例えば、井上ら, 1996; 檜山ら, 2001)、微地形に関しての定量的な基準なしに進められてきた従来の人工磯の設計・施工では、造園・景観デザイン的な観点が重視され、『見た目の磯らしさ』が優先されてきた。

人工磯の評価上重視される指標の一つに生物相の多様性があるが、多くの人工磯では近隣の天然磯と比較して生物相の多様性は低く、特定の占有種の急激な繁茂など不安定な生物相が形成される傾向にあり(例えば、酒井ら, 2001)、その要因の一つとして、先に述べた微地形の貧困さ(天然磯のディテールを十分に再現していないこと)が指摘されている。天然磯を対象として微地形を定

量化する試みは重要であるが、磯を取り巻く海象条件や岩礁の質は磯ごとに異なるから、普遍的な特性を見いだすのは容易ではなく、これまでの地形学研究が定量化を目指さなかったことも必然と言えよう。

この問題を乗り越えるには、『天然磯をよりよく真似て、人工磯をディテールまで造り切る』のではなく、『天然磯を真似て人工磯の概形を造り、ディテールを自然の力を借りて修正・維持する』という発想への転換が必要ではないだろうか。

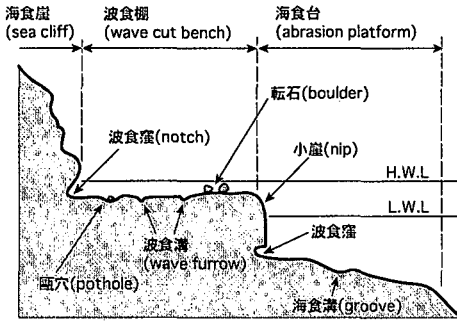
2. 磯浜岩礁の微地形特性の人工磯への導入

石積護岸や消波ブロックなど適度な空隙を有する海岸構造物は、生物生息機能を有しており、天然の岩礁との類似性が認められる。動植物の付着の容易さに配慮した護岸に関する既往の研究は、生物生息機能の評価に関連したものであり、人工磯の構成要素に関する基礎的情報を提供してくれる。例えば、産卵礁型の被覆ブロックの効果进行调查した谷野ら(1997)の研究、潮間帯に棚状の切込みを有するプレキャストコンクリート護岸での付着生物を調査した田中ら(1997)の研究、造成素材の生物付着への影響を検討した井上ら(1998)の研究など、興味深い報告が近年多く成されている。

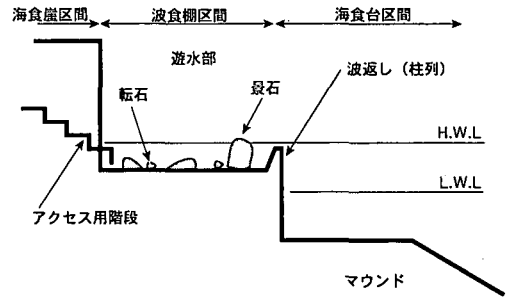
一方、天然磯の微地形を対象とした研究は最近始まったばかりであり、これまで主として出現生物との関連で磯場微地形が調査されている。井上ら(1996)は波食溝がタイドプールとして機能することにより生物相の多様性が確保されていることを天然磯での観測から指摘し、「斜面長比」(岩礁の表面積と鉛直上方からの投影面積の比に相当)と多様性指数の相関を調査している。檜山ら(2001)は、磯場微地形の中で内ひさし・波食窪(notch; 水平方向の窪み)に着目し、内部表面積と開口部面積の比で定義された隠蔽度が1.5~3が生物の生息に有利であると指摘している。このように、天然磯の微地形の特定の要素についての定量化の努力が進みつつある。

一般に天然磯は、基岩の性質や地質形成過程などローカルな特性を有し、それらが微地形とも関連するので、

* 正 会 員 工博 京都大学助教授 工学研究科土木工学専攻
** フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木工学専攻
*** 学生会員 工修 京都大学大学院工学研究科博士後期課程土木工学専攻
**** 学生会員 京都大学大学院 工学研究科土木工学専攻



図一 波食棚の地形特性

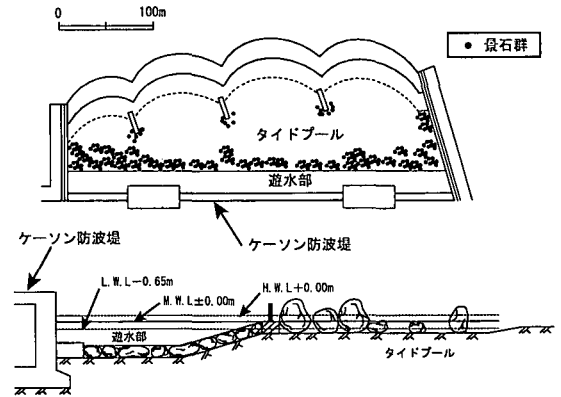


図二 人工磯断面

普遍的な記述は困難であるが、典型的な縦断形状として、図一1に模式的に示す波食棚 (wave cut bench) がある。水平なテラス状の波食棚の形状は、磯場への人のアクセスにも配慮の必要な人工磯にとって好都合でもある。波食棚は、潮間帯にあるほぼ水平な岩床面で、海食崖 (sea cliff) の下部から始まり、沖側末端の小崖 (nip) で海食台 (abrasion platform) へと接続する。波食溝 (wave furrow)、転石 (boulder) によって穿たれた罅穴 (pothole) など、波食棚には種々のスケールの窪みが存在し、ある程度以上の規模のものはタイドプールとして機能する。海食崖の足下には、波浪の侵食作用で波食窪が形成され、崖がオーバーハングの状態となることも少なくない。この状態が進行すると崖が崩壊し、砕けた岩石が崖の足下に堆積する。それらは波浪によって磨耗されながら徐々に移動し、波食棚に残存したものは転石となる。

波食棚を模して人工磯を造成するとすれば、断面形状は図二のようなになる。海岸線の面的防御が唱えられる昨今、護岸の低天端化・広幅化に伴って生じる空間を活用して人工磯が造成される敦賀港のような事例 (島田 (敬) ら, 1994) も増加するだろう。磯の微地形の再現は遊水部で実施し、底面に切欠きを配置して波食溝を模したり、大きな窪地を造ってタイドプールを再現するなど、遊水部床面には形状の多様性が求められる。また、護岸壁面の下部を一部切欠いて、波食窪を模擬することも可能だろう。大小様々な窪みが、低潮時に海水を保持して、水中の動植物の生存環境の確保に貢献することはよく知られるところである。さらに、転石や景石 (大型の自然石) を配置して適度な日陰を形成し、低潮時に水際生物の生存に必要な湿度・温度を保持できる空間を確保することも有効である。

図三は、明石市大蔵海岸に造成された人工磯の概形を示している。ケーソン防波堤の2カ所の開口部で外海と繋がる遊水部の岸側には、緩傾斜区間を経て大規模なタイドプール (潮間帯に位置) が設けられている。タイドプールの縁には景石が多数配置されている。また、タイドプールの底面は礫で構成され透水性が高いので、遊



図三 明石市大蔵海岸の人工磯

水部とタイドプールの水位差は比較的小さく、タイドプールの海水交換が潮位変動に依存した構造となっている。これに対して、波食棚では、タイドプールは岩床に刻まれた窪みであるから、岩床に亀裂などが無い限り保水性が高く、海水交換は高潮時に遡上する波浪による流れによって担われている。すなわち、波食棚の物理環境形成には、前面の小崖への波浪の衝突と越波・遡上が大きく貢献しているとは言うまでもない。

人工磯の多くは、湾内や防波堤で囲い込まれた静穏域に造成され、高波浪に直接曝されないように保護されている。人工磯では景石や護岸表面の被覆石などに自然石を用いるため、耐波性の評価が既存の方法では容易ではないので、磯の外部に設けた人工構造物で波力を受けて、自然石群への設計外力のレベルを下げることにより安全性を確保する方針が選択された結果であろう。

それでは、時化の折りの高波浪の来襲は、磯の環境に何の貢献もしていないのであろうか。河川における洪水は河道内の礫を洗浄し、底泥を押し流して、環境を初期化する機能を有している。生態系の不安定現象により特定の種が以上に増殖したとしても、洪水によって占有種は激減し、本来の均衡が確保される。自然河川では、散発する洪水によって、この種の環境の初期化が生じていたはずであるが、ダム建設後の洪水調節でこのような

機会が失われ、河川環境に変化が生じたとの考えから、ダム放流による人工洪水が計画されるに至った。このように生物の生存にとって危機と思われる事象でも、生態系を含めた水域環境の維持には一定の貢献が認められる。同様のことが、時化による高波浪の来襲についても言えないだろうか。仮に波食棚が特定の種に覆い尽くされたとしても、時化の高波浪の作用下で生存できるのは、窪みに退避できた僅かな動植物に制限されるので、特定種の占有状態は容易に解消される。仮に人工磯が波浪の直撃を受ける状態になれば、河川における人工洪水に期待されるのと同様の効果を時化に期待できるはずである。ただし、河川での人工洪水は規模を人工的に制御できるが、時化の高波浪は自然がもたらすもので、制御不可能である。

この点の困難さはあるにしても、人工磯への高波浪の越波・遡上過程の水理解析が可能なら、人工磯の個々の要素に作用する外力の推定も視野に入ってくる。元来、波浪によって磯が形成されてきたことを想えば、水理的な情報を軽視して人工磯を設計することの限界は、自ずと明らかであろう。例えば、天然磯の転石は時化の高波浪により移動するが、人工磯では設計波力に対して安定な固定の景石が配置される。人工磯への時化の際の高波浪の直撃を許容し、転石の移動を見込んで磯を計画すれば、転石群は当該サイトの自然条件に則した最適な位置に自ら移動する。先にも述べたように、『天然磯(波食棚)を真似て人工磯の概形(図-2)を造り、ディテールを自然の力(波力)を借りて修正・維持する』という発想への転換が成されれば、景観だけでなく、物理環境も天然磯に近い人工磯が造成できるだろう。たとえ初期の景観が巧妙に自然を写したものであったとしても、物理環境が伴わなければ、それに付随した生物活動も相まって、物理環境に則した景観へと変質が生じる。設計時に思い描いた景観を維持するためにも、物理環境評価、とりわけ水理解析の果たす役割は大きい。

3. 波食棚への越波・遡上と転石移動の水理解析

(1) 水理モデルの概要

解析の対象は、砕波を伴う非定常流れであり、水塊分裂を伴う自由表面流を解析できるモデルが必須である。基礎式は言うまでもなく、連続式と運動方程式(Navier-Stokes式)

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g} \quad (1)$$

($\mathbf{u}$: 流速ベクトル, p : 圧力, ρ : 流体の密度, $\mathbf{g}$: 重力加速度ベクトル, ν : 渦動粘性係数)であるが、複雑な水面形状を如何に追跡するかが問題の鍵となる。著者ら(例

えば, Gotoh・Sakai, 1999) はこれまで、この種の問題に対する対応策として、粒子法に注目し、MPS法(Koshizuka・Oka, 1996)を導入した水理解析を進めてきた。

MPS法では、計算領域に配置された多数の粒子(計算点)間の相互作用として基礎式の各項が離散化されるため、計算格子が不要である。まず、均一で質量が変化しない粒子を用い、粒子数を一定に保つことで、質量保存(連続式)は厳密に満足され、粒子数密度(単位体積あたりの粒子数)を一定値 n_0 に保つことにより、非圧縮条件が満足される。

一方、運動方程式については、粒子周囲の影響円内の他の粒子との相互作用を通じて離散化される(越塚, 1997)。移流項は粒子移動の追跡を通じて計算されるため、移流項の差分化に起因する数値拡散が生じない。

なお運動方程式中の圧力項と粘性項については、粒子周囲の影響円内の他の粒子との相互作用としてモデル化される。粒子 i の圧力項と粘性項は

$$-\frac{1}{\rho} \langle \nabla p \rangle_i = -\frac{1}{\rho} \frac{D_0}{n_0} \sum_{j \in i} \left\{ \frac{p_j - p_i}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} \cdot (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) \cdot \mathbf{w}(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \right\} \quad (2)$$

$$\nu \langle \nabla^2 \mathbf{u} \rangle_i = \frac{2\nu D_0}{n_0 \lambda} \sum_{j \in i} (\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i) \mathbf{w}(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (3)$$

のように書ける (D_0 : 次元数, λ : モデル定数)。粒子間相互作用が生じる範囲(影響円)は、重み関数

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & \text{for } r \leq r_e \\ 0 & \text{for } r > r_e \end{cases} \quad (4)$$

により規定される。また、粒子数密度は重み関数を用いて

$$\langle n \rangle_i = \sum_{j \in i} w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (5)$$

と定義される。なお、MPS法の詳細に関しては、越塚(1997)による解説が有用である。

MPS法では、流体から固定壁・移動壁まで全て粒子で記述される。流体の作用で移動する転石についても粒子の集合体として扱い、以下の剛体移動モデル(Koshizukaら, 1998)で表現する。

始めに、水粒子と転石構成粒子を区別せず、転石構成粒子間の連結関係も無いものとして、全粒子の運動を計算する。この結果、転石は変形し、転石構成粒子の相対位置に変化が生じる。そこで、以下の方法で転石構成粒子のみ座標修正を実施し、転石構成粒子の相対位置を変化させないようにする。

転石構成粒子の仮速度と仮座標を用いて、転石 k の時刻 $t + \Delta t$ における重心の位置 $\mathbf{r}_{kg}$ を求め、転石 k の重心の並進速度ベクトル $\mathbf{T}_k$ および重心周りの転石構成粒子

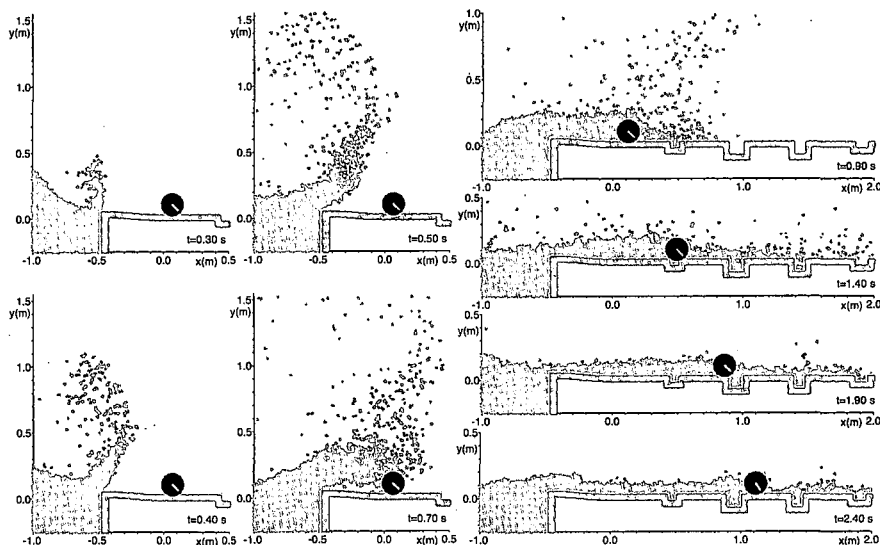


図-4 波食棚への越波・遡上過程のシミュレーションの結果 (各時刻の瞬間像)

の角速度ベクトル R_k

$$T_k = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} u_{ki} \dots\dots\dots (6)$$

$$R_k = \frac{1}{I_k} \sum_{i=1}^{N_k} u_{ki} \times (r_{ki} - r_{kg}) \dots\dots\dots (7)$$

$$r_{kg} = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} r_{ki} ; I_k = \sum_{i=1}^{N_k} |r_{ki} - r_{kg}|^2 \dots\dots\dots (8)$$

を算定する。ここに、 I_k ：転石の重心周りの慣性モーメント、 N_k ：転石構成粒子の総数である。並進速度ベクトル、角速度ベクトルを用いて、剛体的挙動を満足するための転石 k の粒子 i の移動速度は

$$\tilde{u}_{ki} = T_k + (r_{ki} - r_{kg}) \times R_k \dots\dots\dots (9)$$

と記述され、これを用いて粒子 i の座標は、

$$r_{ki}(t + \Delta t) = r_{ki}(t) + \tilde{u}_{ki} \Delta t \dots\dots\dots (10)$$

と修正される。MPS法による粒子の座標の更新が行われる度に、転石構成粒子に対してのみ上記の座標修正を施す。

(2) 波食棚への越波・遡上と転石の運動

図-2と類似の境界条件(小崖高0.3 m)で、水中崩壊によって造波した孤立波(波高0.6 m)が、波食棚前面を越波し、波食棚端部に置かれた直径0.15 mの転石(比重2.65)を巻き込みつつ遡上する様子をシミュレーションした。解析に用いた粒子径は $d=0.01$ m、粒子総数は約10,900である。計算された水塊と転石の運動の瞬間像を図-4に示す。波食棚前面の小崖への波浪の衝突に伴う激しい飛沫の発生のもと、撓るような形状を呈しつつ岩床を叩く越流水脈の挙動が明瞭に見える。このような水

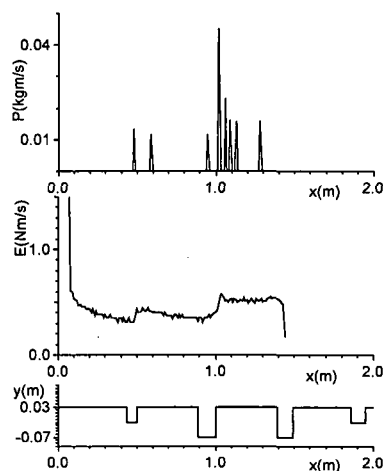


図-5 転石の岩床への衝突衝撃

塊の挙動に伴って、転石は、岩床の溝(波食溝を表現)と接触しつつ岸側に移動する。移動中には頻繁に岩床面と衝突するが、この際の衝突衝撃 P および摩擦力の仕事率 E の空間分布を図-5に示す。衝突衝撃は離散的で不規則ながら、転石が波食溝を乗り越える際に岩床に大きな衝撃が作用する様子が示されている。また、動摩擦力については、動摩擦係数の速度依存性を考慮しているので、波食溝を乗り越えるたびに転石がエネルギーを損失して減速することと対応して、摩擦による仕事率が増加している。このようなことから、特に人工磯ではコンクリートで形成した岩床より極端に硬質の転石を用いると岩床の磨耗が懸念される。

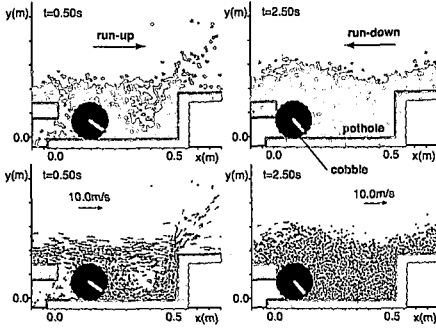


図-6 甌穴内流況のシミュレーション結果

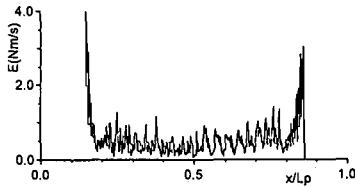


図-7 甌穴内の転石の仕事率分布

(3) 甌穴内の転石の運動

図-6に甌穴内の転石運動のシミュレーション結果の一部を示す。勾配1/10の岩礁に幅0.5 m、深さ0.15 mの甌穴が存在し、孤立波(波高0.12 m)の遡上(時化の高波浪を想定)によって直径0.15 mの転石(比重2.65)が甌穴内で移動する過程を時間発展的に追跡した。解析に用いた粒子径は $d=0.01$ m、粒子総数は約9,100である。遡上時には、遡上波の甌穴内への流入に伴って、転石を岸側に動かす表面流(転石上面に作用)と転石を冲向きに押し戻す落下流(転石右下面に作用)が干渉する複雑な転石移動の様子が示されている。一方、引き波時には、満水状態の甌穴内部での流速は小さく、転石は沖側へ壁面に押し付けられた状態で顕著な変位は見られない。同様のシミュレーションを転石の初期配置を変えて繰り返し、一連の数値データを基に、転石による摩擦力の仕事率の空間分布を推定したのが、図-7である。得られた仕事率分布は、甌穴の端部でピークを有し、中央に向かって減衰している。一方向流を対象とした甌穴の解析(後藤ら, 2002)では、甌穴深さに依存した転石による摩擦の偏在化が深掘れを集中させて甌穴の下方への発達を助長するという機構が示された。一方、波浪場では、遡上時の流れと戻り流れが共存するので、転石の運動も双方向的となり、甌穴両端にピークが生じるものと考えられる。

4. 結 語

本稿では、人工磯における波浪の作用の重要性につい

て考察し、天然磯のごとき時化に洗われる人工磯の在り方を可能とするための水理解析の役割の重要性を指摘した。具体的な解析対象として、波食棚上の転石の運動と甌穴内転石の運動を取り上げ、激しい碎波・越波の存在とそれに誘起される流れによる転石の移動やそれに伴う摩擦力分布に関しての解を得る手段として、粒子法が十分に有効であることを示した。磯場という複雑・多様な場における環境設計において、数値流体力学的方法論から得られる情報は実に有用である。計算機の演算能力の向上に伴って3次元化が可能となり、気泡混入に対応した気液二相流解析が導入できれば、本稿で示した手法の人工磯の設計ツールとしての役割が現在にも増して重要視されるものと期待される。

参 考 文 献

- 井上雅夫・島田広昭・桜井秀忠・柄谷友香 (1998): 生物との共生を目指した人工磯の造成素材に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1116-1120.
- 井上雅夫・鉄川 精・島田広昭・柄谷友香 (1996): 生物との共生をめざした人工磯の地形と造成素材について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1166-1170.
- 後藤仁志・酒井哲郎・林 稔・八木哲生 (2002): MPS法による甌穴形成過程の数値解析, 水工学論文集, 第46巻, pp. 767-772.
- 越塚誠一 (1997): 数値流体力学, インテリジェントエンジニアリングシリーズ, 培風館, p. 223.
- 酒井哲郎・佐橋 将・仁木将人 (2001): 生活史から見た人工磯浜の出現植物種, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1176-1180.
- 田中ゆう子・鈴木秀男・中田英昭 (1997): 護岸の生物生息場としての評価の試み, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 1120-1125.
- 谷野賢二・北原繁志・斉藤二郎・本間明宏・伊藤洋一・鳴海日出人 (1997): 防波堤のヤリイカ産卵礁機能に関する研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 1136-1140.
- 島田 敬・山口 豊・西田一彦・池田義紀 (1994): 敦賀港低天端多自然型護岸の設計, 海洋開発論文集, 第10巻, pp. 135-140.
- 島田広昭・中村克彦・鉄川 精・井上雅夫 (1994): 磯浜海岸の環境と生物相に関する調査研究, 海洋開発論文集, 第10巻, pp. 129-134.
- 檜山博昭・大塚哲哉・中瀬浩太 (2001): 磯場の微地形の定量的評価の試み, 海洋開発論文集, 第17巻, pp. 165-168.
- 堀越千里 (1990): お台場海浜公園における生物棲息環境回復を考慮した海浜設計, 造園雑誌, 54(1), pp. 51-56.
- Gotoh, H. and T. Sakai (1999): Lagrangian simulation of breaking waves using particle method, Coastal Eng. Jour., Vol. 41, Nos. 3 & 4, pp. 303-326.
- Gotoh, H., T. Shibahara and T. Sakai (2001): Sub-Particle-Scale Turbulence Model for the MPS Method—Lagrangian Flow Model for Hydraulic Engineering—, Computational Fluid Dynamics J., Vol. 9 No. 4, pp. 339-347.
- Koshizuka, S. and Y. Oka (1996): Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid, Nuclear Science and Engineering, Vol. 123, pp. 421-434.
- Koshizuka, S., A. Nobe and Y. Oka (1998): Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method, Int. J. Numer. Mech. Fluids, Vol. 26, pp. 751-769.