

英虞湾の干潟・アマモ場再生実験データに基づいた HSI モデルによる干潟生物環境評価

Assessment for Habitat of Benthos Class by HSI Model based on Field Study of Regeneration
of Tidal Flat and Eelgrass Zone in Ago Bay

高山百合子¹・小林昭男²・国分秀樹³

Yuriko TAKAYAMA, Akio KOBAYASHI and Hideki KOKUBU

As the assessment for the project of coastal regeneration, we have tried to expand HSI model (Habitat Suitability Index model) to the HSI model that is available for benthos group of class level. In this study, we determined the suitability ranges of IL, ratio of silt, and depth using the former model of HSI for each benthos such as *rudilapes philippinarum* and *batillaria multiformis*, and the HSI model was verified as the model for benthos group of class level such as groups of *polychaeta*, *gastropoda*, *bivalvia* using field data in Ago Bay. Further HU (Habitat Unit) of field study in Ago bay was calculated by these models. The result shows that the model may be a tool of general index for the project of coastal regeneration.

1. はじめに

干潟やアマモ場などの沿岸域再生事業の計画に際して、事業効果の事前評価の重要性が増している。その方法の一つとして生物生息地環境評価モデル (HSI モデル) の適用が増えつつあり、沿岸環境評価の有用な手法となってきた。しかし、干潟やアマモ場の評価には生息する生物を群集としてマクロに表現できるモデルが不可欠であり、現状の HSI モデルのようにアサリやゴカイなど個々の生物を対象にしている限り実用レベルに達するには時間を要する。一方、全国の再生事業の成果により、干潟生物に関しては分類学上の種 (species) だけでなく二枚貝類、多毛類など綱 (class) レベルの生物グループのデータ蓄積も相当進んでいる。そこで、既存の種レベルの HSI モデルをベースにして綱レベルの生物グループに適用できる HSI モデルへの拡張を試みた。既存の種レベルの HSI モデル (アサリ、ゴカイ、ウミナナ、アマモ) を選択し、生息条件を決定する各環境因子 (SI) に修正を加え綱レベルの HSI モデル (多毛類、腹足類、二枚貝類) への拡張を行った。対象とする生物、環境データは英虞湾で実施した干潟・アマモ場再生実験結果を用いた。本研究は、干潟・アマモ場を総合的に評価する手法の構築を目指すもので、既存の沿岸域環境評価や新規の再生事業の計画ツールへの活用を念頭に置いたものである。

2. 英虞湾の干潟・アマモ場再生実験

(1) 干潟再生実験

干潟再生実験では、浚渫ヘドロを有効利用した干潟を 7200 m² 造成し、底質、底生生物の追跡モニタリング調

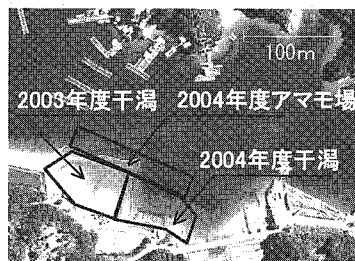


図-1 干潟再生実験の位置 (空中写真)

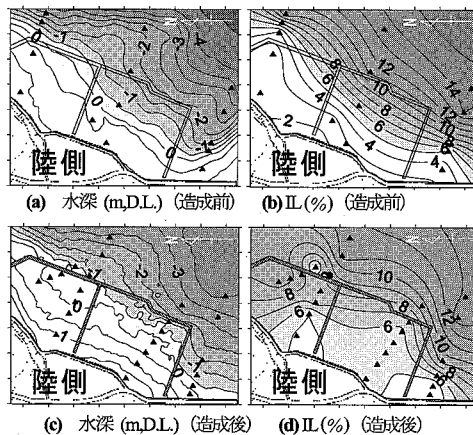


図-2 干潟再生実験前後の水深と IL の分布

査を実施した (図-1)。本調査では、干潟造成前の 2003 年 4 月から干潟造成後の 2007 年 10 月まで年 4 回 (4 月, 7 月, 10 月, 1 月) の追跡モニタリング調査を継続し膨大なデータセットを蓄積している (国分ら, 2005, 2007)。さらに、このデータセットは、浚渫ヘドロの混合により干潟の底質条件のみを変化させた生物の出現変化を示すデータであることから、HSI モデルの構築に最適と言える。

干潟造成前後の水深と底質の強熱減量 IL を図-2 に示す。干潟造成前後の IL はそれぞれ 2003 年度, 2005 年

1 正 会 員 大成建設(株)技術センター土木技術研究所
2 正 会 員 工博 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科
3 正 会 員 修(理) 三重県科学技術振興センター水産研究部

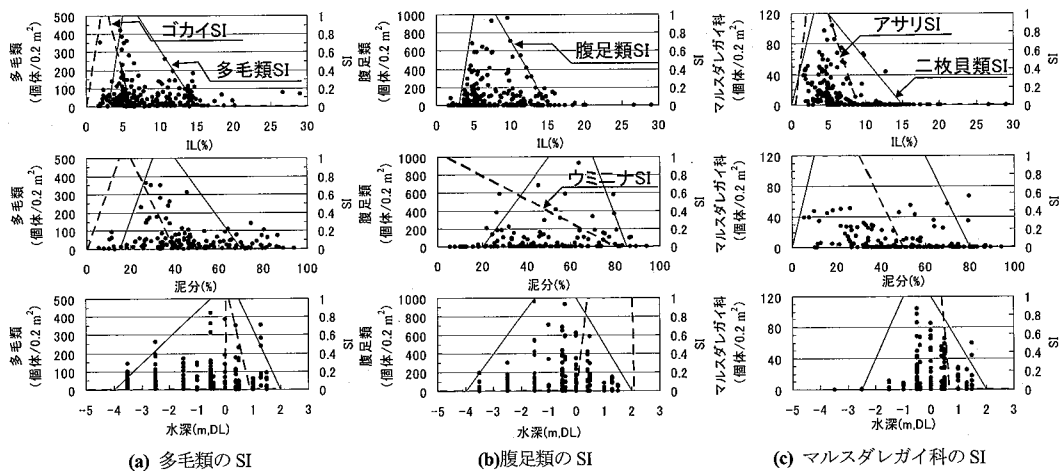


図-3 多毛類, 腹足類, マルスダレガイ科の SI (●は調査データ, —, ---- は SI)

度調査結果の平均値を用いた。図中には、干潟を囲む潜堤と各年度に実施した追跡モニタリング調査点 (▲) を示し、同図はこれらの調査点データをコンターとして図化した。また、比較のため干潟造成前の図中にも干潟潜堤の位置を示した。図-2 より干潟造成後の地形は、干潟造成前に対してほとんど変化していない。一方、IL は、干潟造成前は 2 ~ 10 % と広い範囲で分布しているのに対し、干潟造成後は 5 ~ 8 % と狭まった。本干潟造成における IL は、事前に実施した干潟再生実験結果から求めた底生生物の最適底質条件に基づいたものであり (上野ら, 2001, 2002; 国分ら, 2004), 追跡モニタリング調査の結果、干潟造成前に比べて、底生生物の種類、個体数ともに増加し維持された良好な干潟生態系が形成されたことが実証されている (国分ら, 2007)。

(2) アマモ場再生実験

アマモ場再生実験は、英虞湾においても近年アマモ場が減少している状況を受けて、アマモを効率よく移植し増殖させるアマモ移植技術 (高山ら, 2005; 前川ら, 2007) を開発し、2005 年 5 月までにこれらの工法により 1600 m² のアマモ移植を実施した (図-1)。本工法は移植用マットを移植場所に設置する工法であり、地形や底質など物理的環境の改変は行っていない。

3. 干潟生物 HSI モデル

(1) 干潟生物 HSI モデルへの拡張

既存の種レベルの HSI モデル (ゴカイ (新保ら, 2001) ウミナ (島多ら, 2004), アサリ (新保ら, 2000)) を選択し、生息環境を決定する各環境因子 (SI) のうち摂餌環境の因子として底質の IL, 泥分と水深の 3 項目で構成される HSI モデルに再構築し、各 SI に修正を加えて網レベルの HSI モデル (多毛類, 腹足類, 二枚貝類) への拡張を行った。図-3 に本干潟再生実験におけ

る 2005 年度までの全調査データ (IL, 泥分, 水深, 各生物グループの個体数) と SI を示す。

(2) 多毛類

新保ら (2001) のゴカイ HSI モデルをベースにした多毛類全体の HSI モデルへの拡張について示す。ゴカイ HSI の SI (IL, 泥分, 干出時間, 波の底面摩擦速度, クロロフィル量など) のうち、IL, 泥分と水深を抽出し SI に修正を加えた (図-3(a))。まず、底質と多毛類の関係は、IL は 5 % 付近、泥分は 20 ~ 40 % 付近に個体数のピークを持つ。これに対して、ゴカイ SI (図-3(a) 破線) は、IL, 泥分とも個体数ピークより低い範囲に SI = 1 となる最適値が設定されている。これは、多毛類の中で比較的有機物の少ない底質を好む種であるゴカイの生息特性を反映しているためである。そこで、多毛類 SI を底質に対する多毛類の出現特性から調整し、その最適範囲を IL 5 ~ 7 %, 泥分 30 ~ 40 % に再設定した (図-3(a) 実線)。また、ゴカイ HSI では水深に起因する因子として干出時間を抽出しているが、水深と生物出現の応答をより幅広く表現する因子として水深を抽出し、その SI の最適範囲を出現特性から -0.5 ~ 0.5 m (DL 基準) とした。なお、腹足類、二枚貝類についても同様の理由から水深を抽出した。

(3) 腹足類

島多ら (2004) のウミナ HSI モデルをベースにした腹足類全体の HSI モデルへの拡張について示す。ウミナ HSI の SI は底質 (IL, 泥分など), 地形 (地盤高, 干出率など), 水理 (シールズ数, 底面摩擦速度), 水質 (水温, 塩分など) の 4 つのカテゴリー別に選定されている。このうち、泥分と水深を抽出し SI に修正を加えた (図-3(b) 中, 下段)。ウミナ HSI の泥分と腹足類の関係として、泥分 5 % 以下で SI = 1 と設定されている。しかし、本調査データから得られた出現特性に合わせて泥分 SI の最適範囲を 50 ~ 70 % に再設定した。

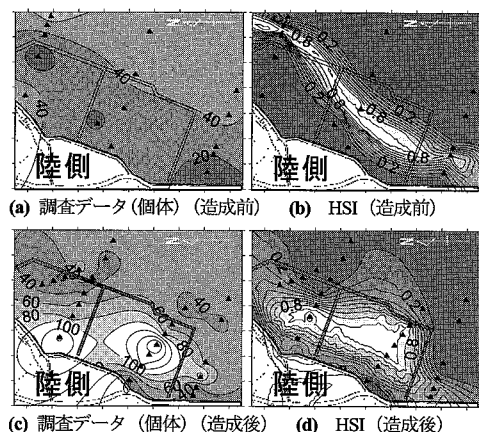


図-4 多毛類の調査データと HSI

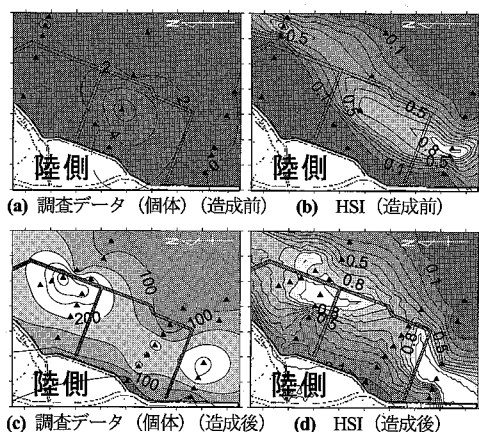


図-5 腹足類の調査データと HSI

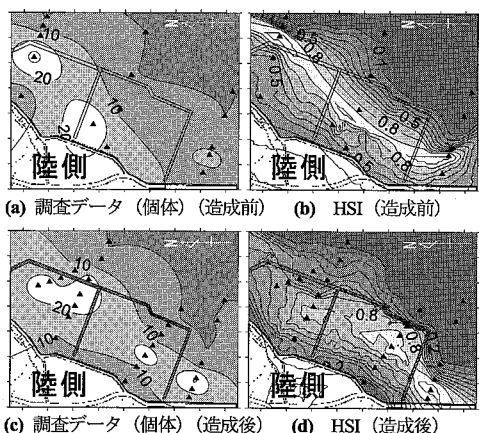


図-6 マルスダレガイ科の調査データと HSI

さらに、明確な個体数ピークを持つ IL の SI について、出現特性からその最適範囲を IL5～8%とした (図-3 (b) 上段実線)。なお、ウミナシ HSI における IL の SI 情報は得られなかった。水深 SI の最適範囲は、腹足類

の出現特性から -1.5 m～0.0 m (DL 基準) とした。

(4) 二枚貝類

新保ら (2000) のアサリ HSI モデルをベースにした二枚貝類の HSI モデルへの拡張について示す。本干潟再生実験結果より、二枚貝類の出現特性として干潟造成範囲より沖側の水深 -3 m (DL 基準) 付近にウメノハナガイ、シズクガイなどが非常に多く見られた。これらは比較的深い水深帯で生育する種である。ここでは造成した干潟の生物特性に着目するため、まず、アサリに類似した種類として分類されるマルスダレガイ科の HSI を構築することとした。本実験の事前調査では、二枚貝類のうちマルスダレガイ科に属するシオヤガイが優占していた。アサリ HSI の SI (IL, 泥分, 干出時間, 粒径, 波の底面摩擦速度, 水温など) のうち, IL, 泥分と水深を抽出し SI に修正を加えた (図-3(c))。底質とマルスダレガイ科の関係は, IL は 5% 付近に個体数のピークを持ち, 泥分は 5～80% の範囲に幅広く分布した。マルスダレガイ科の個体数とアサリの IL, 泥分の SI を見ると, アサリはマルスダレガイ科のうち比較的低い IL, 泥分の底質を好む種であることが伺える。そこで, マルスダレガイ科 HSI は, アサリより高有機物, 高泥分の底質にも生息することを反映し, その最適範囲を IL 3～5%, 泥分 10～60% に再設定した (図-3(c) 上, 中段実線)。水深 SI の最適範囲は, マルスダレガイ科の出現特性から -1.0～0.0 m (DL 基準) とした。

(5) 干潟生物 HSI モデルの検証

図-4～図-6 は、干潟造成前後の各干潟生物の個体数 (調査データ) と図-3 に示す SI により算出した各干潟生物の HSI 平面分布である。干潟生物個体数は、2003 年度および 2005 年度調査のそれぞれ平均値を用い、調査点におけるデータをコンターとして図化した。HSI は 1 を最適、0 を不適とした生物生息地の環境を示す指標である。

多毛類は、造成前は 40 個体程度であったのに対し、造成後には多い点で 100 個体以上の出現が見られ、干潟内全体で増加していることが分かる。多毛類 HSI は、HSI が 0.8 以上となる良好な生息地環境の範囲が造成前は狭いのに対して、造成後は干潟内全体に広がった。

腹足類は、造成前は 6 個体以下と僅かであったのに対し、造成後は干潟内全体において 100 個体以上に増加した。腹足類 HSI は、造成前は HSI が 0.8 以上の範囲は干潟外南側の狭い範囲であったのに対して、造成後は生物個体分布に対応して広がった。

マルスダレガイ科は、干潟造成前後で 10～20 個体程度と変化が見られなかった。これは、底質有機物の調整による本干潟造成が、マルスダレガイ科の生息環境に大きな変化を与えなかったことを示す。マルスダレガイ科 HSI は、造成前は HSI が 0.8 以上の範囲が狭い幅で沿

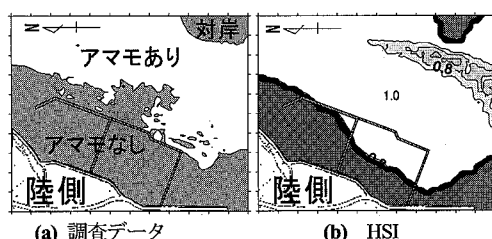


図-7 アマモの調査データと HSI

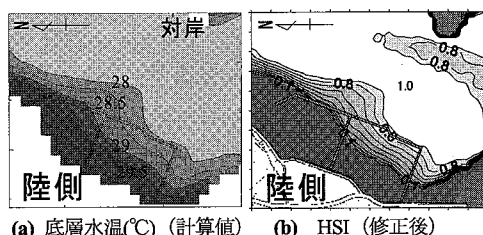


図-8 底層水温分布と修正 HSI

岸方向に分布していたのに対し、造成後は干潟内に広がった箇所が出現し、干潟の物理的環境変化に対応して HSI 分布変化が表現されていることが分かる。

以上より、干潟の代表生物グループである多毛類、腹足類、マルスダレガイ科の生息地環境は、底質に関わる IL、泥分、および水深の SI により構成される HSI で概ね表現することが可能となった。

4. アマモ HSI モデル

(1) アマモ HSI モデル

既存のアマモ HSI モデル(高山ら, 2003)を用い、アマモ移植実験地周辺の HSI 平面分布を求めた。アマモの HSI は、海底日射量 E 、シールズ数 ϕ 、水深 h 、水温 T 、塩分 S の 5 つの因子から構成される。本モデルの詳細は高山ら (2003) を参照されたい。 E は、年平均日射量から消散係数を用いて水中減衰を算出した海底面の日射量であり、ここでの消散係数は目視による繁茂期の透明度約 4 m から 0.46 と仮定した。 ϕ は、2 年確率波 ($H_{1/3}=0.15$ m, $T_{1/3}=1.17$ s) を入射波として算定し、本実験海域全体で 1.0×10^{-4} 以下と低くなった。 ϕ SI は、 ϕ が 0.1 以下で種子が埋没できず生育地として不適としているが、本実験海域ではアマモが広く良好に繁茂していたため除外した。 T , S は、本実験海域から沖合 200 m (水深 8 m) 地点の表層 -3 m における月、または年平均値を用いた。

(2) アマモ HSI モデルの検証

アマモ移植実験地周辺の調査データと HSI の平面分布を比較する(図-7)。図-7(a)は、マルチビーム測深システム (Leson 社製, Seabat8101 型) を用いたアマモ分布調査結果を元にアマモの有無を判別しアマモ分布を

白く表示した調査データである。このアマモ分布は移植されたアマモ場と天然のアマモ場を含む。図-7(a)よりアマモは干潟の沖側潜堤付近から対岸まで広く分布していることが分かる。HSI は、陸側で HSI=0、干潟付近で急激に HSI が増加し対岸まで若干の低下を除いて HSI=1 となった(図-7(b))。この HSI の低下は、陸側は干出による乾燥、対岸手前は日射量低下によるものである。調査データと HSI について、陸側境界位置を比較すると、調査データの方が沖に寄っていることが分かる。この陸側境界の差について考察する。本 HSI の SI のうち陸側でアマモの生育に影響を与える因子はシールズ数と水温が上げられるが、シールズ数は海域内で一様であったことから除外し水温の影響について検討する。既存の HSI モデルでは、2, 8 月の各月平均水温をモデル領域に一様に与えている。英虞湾では、近年夏季の表層水温が月平均で 29 °C を上回ることがしばしば起こるが、本モデルではアマモの生育する水深帯を考慮して表層 -3 m の表層より 1 ~ 2 °C 低い水温を用いている。しかし、極浅い水深帯では、表層の高水温の影響を長時間にわたり海底まで受けている。具体的には、11 月頃の発芽期を待っているアマモ種子や栄養株にダメージを与えることが予想される。したがって、HSI モデルでは水温の鉛直分布を考慮した底層水温を用いる必要がある。そこで、水温 SI において鉛直分布を考慮するために 3 次元流動・熱シミュレーションを実施した。計算プログラムはデルフト水理研究所で開発された Delft3D-FLOW を使用し(Delft Hydraulics, 2006)、水温の平面、および鉛直分布を求め、HSI モデルの修正を実施した。計算条件は、実験海域を含む約 0.3×0.7 km の枝湾全域を計算領域とし、枝湾口境界に潮汐周期 ($M_2=0.44$ m) と夏季の水温(表層 31 °C、底層 24 °C)、塩分(表層 28、底層 22)を与えた。また、夏季の気象条件として、津気象台の観測データから気温(30 °C)、湿度(76 %)、全天日射量(380 W/m^2)を全領域に与えた。

図-8(a)に計算結果の底層水温分布を示す。図-8(a)より、水深の深い範囲では 28.0 °C と一様分布であるが、干潟潜堤付近では、28.0 ~ 30.0 °C と高水温となることが分かる。この時、表層水温は一様に 30.0 ~ 30.4 °C であった。この結果を用いて再度求めた HSI の平面分布を図-8(b)に示す。図-8(b)より、干潟潜堤付近に HSI が低下する範囲が見られ、HSI=0.9 の位置が、調査データのアマモの分布境界とほぼ一致することが分かる。以上より、水深の浅い範囲(海底地形から HSI=0.9 の境界が水深 -2 m (DL 基準)に相当)では、表層水温の影響を海底まで受けることによりアマモの生育環境が悪化することが示され、HSI モデルに底層水温を用いる妥当性が示された。ただし、HSI=0.9 は生育環境とし

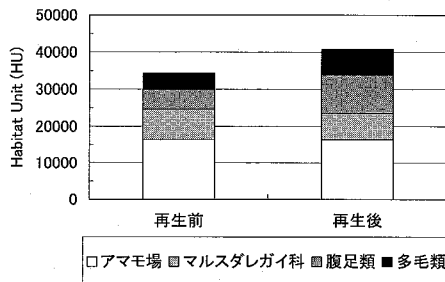


図-9 干潟・アマモ場再生実験前後の HU

て好条件であるにも関わらずアマモが生育していないことから、アマモの水温耐性はある閾値で敏感に応答することを考慮しておく必要がある。

5. 干潟・アマモ場再生実験の総合評価の試み

これまでに整備した干潟生物（多毛類、腹足類、マルスダレガイ科）HSI、アマモ HSI を用い本干潟・アマモ場再生実験の総合評価を試みた。ここでは、生物生息地の質を表す HSI に空間を考慮した HU (Habitat Unit, 生息地単位) を用い、次式 (1) より本実験の総合評価を実施した。

$$\Sigma HU = \sum_{i=1}^d \sum_{j=1}^n (HSI_{ij} \times \Delta A) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 a は多毛類、 b は腹足類、 c はマルスダレガイ科、 d はアマモ、 n は実験地分割数、 ΔA は単位面積 (m^2) である。 ΣHU は、図-4～図-6、および図-8(b)の各 HSI 分布を $\Delta A (m^2)$ の格子に分割し、格子点における各干潟生物 HU について実験地全体、および多毛類 HU、腹足類 HU、マルスダレガイ科 HU、アマモ HU の総和を算出したものである。式 (1) により求めた本干潟・アマモ場再生実験前後の HU を図-9 に示す。ここで、アマモ場再生実験では物理的な改変を行っていないため、実験前後で同じ HSI を使用した。本実験前後の HU を比較するとマルスダレガイ科は減少しているものの、多毛類、腹足類の HU が増加しており、総合的には実験後の HU が増加した。本干潟再生実験は、底質の有機物を増加させることにより、結果的には二枚貝類（マルスダレガイ科）に比べて多毛類、腹足類の生息を促した干潟であり、この干潟造成前後の生物出現特性を良好に表現できたと言える。

以上より、本干潟生物・アマモ HSI モデルは、自然再生事業等実施の前後における生物生息地環境を総合的に比較するための指標に利用できる可能性が示唆された。

6. 結 論

本研究では、従来の個々の生物種を対象とした HSI モデルを用いて、干潟の生物を群集としてマクロに表現

できるモデルへの拡張を行い、三重県英虞湾において実施した干潟・アマモ場再生実験データによる検証を行った。以下に、主な結論を示す。

- ① 従来の個々の生物種を対象とした HSI モデルについて、強熱減量、泥分、水深の SI を見直すことで、多毛類、腹足類、二枚貝類（マルスダレガイ科）の生物群 HSI モデルに拡張できた。
- ② 既存のアマモ HSI モデルについて、水温 SI に底層水温を用いることでモデルの精度が向上した。
- ③ 干潟生物・アマモ HSI を用いて英虞湾干潟・アマモ場再生実験前後の HU を算出した結果、多毛類、腹足類 HU の増加が表現され、事業実施効果の HU 予測に有効なツールとなる可能性が示唆された。

謝辞：本研究は三重県地域結集型共研事業の一部で実施された。また、英虞湾再生コンソーシアム、立神真珠研究会、志摩の国漁協立神支所、芙蓉海洋開発(株)から多大な協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 上野成三・高橋正昭・原条誠也・高山百合子・国分秀樹 (2001): 浚渫土を利用した資源循環型人工干潟の造成実験, 海工論文集, 第 48 巻, pp. 1306-1310.
- 上野成三・高橋正昭・高山百合子・国分秀樹・原条誠也 (2002): 浚渫土を用いた干潟再生実験における浚渫土混合率と底生生物の関係について, 海工論文集, 第 49 巻, pp. 1301-1305.
- 国分秀樹・奥村宏征・上野成三・高山百合子・湯浅城之 (2004): 英虞湾における浚渫ヘドロを用いた干潟造成実験から得られた干潟底質の最適条件, 海工論文集, 第 51 巻, pp. 1191-1195.
- 国分秀樹・奥村宏征・上野成三・高山百合子・湯浅城之 (2005): 英虞湾における浚渫ヘドロを用いた大規模造成干潟の底質と底生生物の特性について, 海工論文集, 第 52 巻, pp. 1196-1200.
- 国分秀樹・高山百合子・湯浅城之 (2007): 英虞湾の浚渫ヘドロを用いた人工干潟とアマモ場における底質と底生生物の変遷, 海工論文集, 第 54 巻, (印刷中).
- 島多義彦・袋 昭太 (2004): 干潟再生による生物生息環境改善効果の定量評価手法に関する研究, フジタ技術研究報告, 第 40 号, pp. 57-62.
- 新保裕美・田中昌宏・池谷 毅・越川義功 (2000): アサリを対象とした生物生息地適性評価モデル, 海工論文集, 第 47 巻, pp. 1111-1115.
- 新保裕美・田中昌宏・池谷 毅・林 文慶 (2001): 干潟における生物生息環境の定量評価に関する研究 - 多毛類を対象として -, 海工論文集, 第 48 巻, pp. 1321-1325.
- 高山百合子・上野成三・勝井秀博・林 文慶・山木克則・田中昌宏 (2003): 江奈湾の藻場分布データに基づいたアマモの HSI モデル, 海工論文集, 第 50 巻, pp. 1136-1140.
- 高山百合子・上野成三・湯浅城之・前川行幸 (2005): 播種・移植が不要なアマモ移植方法における移植マットの改良とアマモ定着効果, 海工論文集, 第 52 巻, pp. 1216-1220.
- 前川行幸 (2007): アマモ場造成技術, 第 16 回沿岸連ジョイントシンポジウム 三重県地域結集型共同研究事業 英虞湾再生プロジェクト, pp. 34-36.
- Delft Hydraulics (2006): Delft3D-FLOW User Manual.