

# 波浪条件の厳しい環境下でのアマモ定着特性の解明と 耐波浪移植基盤の開発

Field Study on the Characteristic of the Eelgrass Bed under the Severe Wave Condition and  
Development of an Erosion-Proof Base for its Transplantation

山本克則<sup>1</sup>・新保裕美<sup>2</sup>・田中昌宏<sup>3</sup>・越川義功<sup>4</sup>・林 文慶<sup>5</sup>・中村華子<sup>6</sup>・小河久朗<sup>7</sup>

Katsunori YAMAKI, Yumi SHINBO, Masahiro TANAKA, Yoshinori KOSHIKAWA  
LIM Boon Keng, Hanako NAKAMURA and Hisao OGAWA

The field observation revealed that eelgrass bed was gravel, on which they can take root, in the place where strong wave was observed. This finding gave a new idea of the base for eelgrass transplantation using gravel. Laboratory experiments showed that the eelgrass planted in the base was stable against the strong wave action, which the maximum amplitude of bottom velocity was 1.2 m/s. An erosion-proof base for transplantation of eelgrass was developed. The field test of transplantation was conducted at the place where they cannot survive by any conventional transplantation procedure because of the strong wave action. It was confirmed that transplanted eelgrass by the developed base grew stably and increased the number there.

## 1. はじめに

アマモの生育環境は主に光と波浪に支配されるが、近年の沿岸海域の水質汚濁は海域の透明度の減少を招き、アマモの生育適地をより浅場へと追いやった。浅海域は相対的に波による影響が大きく、草体や種子が流出し易いため、生育環境を悪化させる。こうした水質汚濁による生育環境の悪化がアマモ場減少の大きな要因の一つであると同時に、今後のアマモ場造成の鍵は、こうした悪環境下でいかにアマモ場を再生させるかにあり、浅海域や外海の影響を受け易い地点では特に波による流出対策を講じる必要がある。これまでの報告事例として、大量の種子を植物繊維の基盤に固定する方法（金澤・森, 2003）、エキスパンドメタルで大量の種子が入った分解性の袋を挟み込んだもの（森口ら, 2006）などがある。これらの方法は、種子の流出防止策としては有効であるが、安定した発芽率の確保や発芽後の草体の定着等、解決しなければならない課題があった。

筆者らはこれまでに、遺伝子系群の保全やドナー藻場の保護に配慮したアマモ場再生手法として、限定量の種子からでも既定量の種苗を年間を通じて生産が可能な発芽促進技術を用いたアマモ種苗生産技術を開発した（山

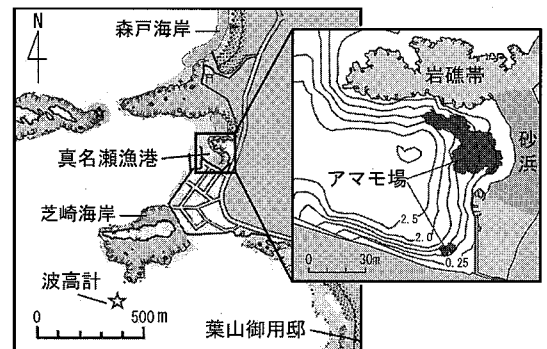


図-1 調整地点（神奈川県三浦郡葉山町真名瀬漁港）

木ら, 2004, 2006a)。本研究では、この技術により生産された種苗を、定着が難しい波浪条件の厳しい場に移植することにより、枯渇したアマモ場を確実に拡大する手法の確立を目指し、そのための移植基盤の開発を行った。新しい移植基盤は、まずそのコンセプトを、厳しい波浪条件下でもアマモが繁茂する天然のアマモ場での観測から見出し、コスト及び移植時の施工性を考慮して具体的な材料・形を決め、室内試験でその耐波性能を確認した。その上で現地試験を行い、有効性を検証した。

## 2. 天然アマモ場におけるアマモの定着特性

### (1) 対象アマモ場の概要と調査方法

図-1 に示す神奈川県三浦郡葉山町真名瀬漁港のアマモ場を対象に調査を実施した。ここは、岩礁帯と防波堤に囲まれた中に約 1000 m<sup>2</sup>の群落が存在し、平素は静穏な海域であるが、暴浪時は南西からの波が岩礁帯に沿っ

- |        |    |              |       |
|--------|----|--------------|-------|
| 1 正会員  | 工修 | 鹿島建設(株)技術研究所 | 主任研究員 |
| 2 正会員  |    | 鹿島建設(株)技術研究所 | 研究員   |
| 3 フェロー | 工博 | 鹿島建設(株)技術研究所 | 上席研究員 |
| 4 正会員  | 水博 | 鹿島建設(株)技術研究所 | 主任研究員 |
| 5 正会員  | 学博 | 鹿島建設(株)技術研究所 | 主任研究員 |
| 6 正会員  |    | 鹿島建設(株)技術研究所 | 研究員   |
| 7      | 農博 | 北里大学水産学部     | 教授    |

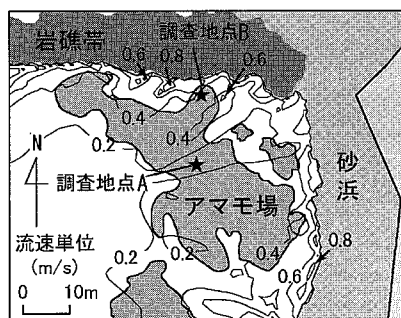


図-2 底面流速振幅の分布

てアマモ場に入射する。このため、狭いながらも暴浪時の底面流速振幅が幅広く分布しており、自然環境下におけるアマモの波浪に対する定着特性を見出すのに適した場である。まず、アマモ場周辺の底面流速振幅の分布を、沖側波高計設置地点（図-1 ☆印）における観測期間中（2004年2月12日～6月22日）の最大有義波（2004年4月27日： $H_{1/3}=4.05$  m,  $T_{1/3}=9.4$  s, 波向SSW）を入力条件として、Delft3D-WAVE (Delft Hydraulics, 2003) により波浪場解析を行って求めた。次に2006年11月、アマモの分布領域をD-GPSを用いて計測した。その際、同一深度（DL基準、0.5 m）で底面流速振幅が異なるアマモ群落2地点における表層から10 cmまでの底質の粒度分布を測定した。また両地点からアマモ草体を15株サンプリングして草丈、葉数、葉幅と地下茎の根長、節長について計測を行った。草丈と葉幅は1株あたりの最大長、節長は一番新しい節部から数えて第4節までの3ヶ所の節間の長さを計測した。得られたデータはt検定により有意差の有無を評価した。

## (2) 調査結果

底面流速振幅とアマモの分布を図-2に示す。調査地点Aを中心とするアマモ場の大部分のエリアでは底面流速振幅は0.2～0.4 m/sの範囲にあるが、岩礁帯に近いアマモの生育エリアである調査地点Bでは、局所的に流速が0.4～0.6 m/sと大きな値となっている。なお、アマモの生育が見られない地点は、水深が0.25 m以浅で底面流速振幅が0.6 m/s以上となる場所と水深2 m以深の光条件から生育限界である地点である。表-1に地点Aおよび地点Bの底質の粒度特性を示す。地点Aは、砂質が70%を占める細粒分質の底質である

表-1 調査地点 A, B における底質の粒度特性

| 調査地点 | 粒 度 (%) |           |              |          | 最大粒徑 mm | 50%粒徑 mm |
|------|---------|-----------|--------------|----------|---------|----------|
|      | 礫       | 砂         | シルト          | 粘土       |         |          |
|      | 2-75 mm | .075-2 mm | .005-.075 mm | <.005 mm |         |          |
| A    | 11      | 70        | 10           | 9        | 9.5     | 0.28     |
| B    | 43      | 38        | 14           | 5        | 26.5    | 1.36     |



写真-1 磯場で生育するアマモ（調査地点B）

のに対し、底面流速振幅の大きな地点Bは写真-1に示すように最大で26.5 mmの礫が表層部を覆っている。粒度分析結果も礫質が43%の礫場であった。地点Bは現地での観察から、底質表層に礫が堆積し、その数センチ下部には礫、砂及びシルト分が混在していた。また、アマモは地下茎が所々で表面に露出していたが根は礫質にしっかり活着している様子が観察された。表-2に両地点のアマモの地上部、地下部の比較を示す。アマモ地上部の草丈は地点Aの方が約120 mm長く、葉数は1枚多く、葉幅は1.8 mm広く、有位差が見られた。ただし、このアマモ場におけるアマモの実態調査（山木ら、2006b）では、同一水深の場でも観測地点によりアマモ栄養株の生長が異なることがわかっている。地下部は、根長および節間長は両地点で有意差は見られなかった。なお、草体密度についても両地点で平均150株/m<sup>2</sup>であり違いは見られなかった。このことから、地点Bにおけるアマモ場は、表層部が礫により覆われているために暴浪時でも底質が安定し、その礫に根が網目状に十分に活着していることが流速振幅が比較的大きな環境下でもアマモが安定して生育している理由と考えられる。

表-2 調査地点 A, B におけるアマモの生長特性

| 調査地点 | アマモ地上部 mean±SD |               |                | アマモ地下部 mean±SD |                   |
|------|----------------|---------------|----------------|----------------|-------------------|
|      | 草丈(mm)<br>n=15 | 葉数(枚)<br>n=15 | 葉幅(mm)<br>n=15 | 根長(mm)<br>n=75 | 地下茎節長(mm)<br>n=45 |
| A    | 554.2±128.9    | 5.1±0.3       | 7.5±0.8        | 56.0±16.4      | 16.3±4.8          |
| B    | 425.2±108.9*   | 4.1±0.3**     | 5.7±0.4*       | 53.6±23.3      | 15.24±3.6         |

\*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$ , n = 標本数

### 3. 新しいアマモ移植基盤の開発

#### (1) 種苗移植基盤によるアマモ場の再生

近年のアマモ場再生事業の計画では、事業の確実性に加え、遺伝子攪乱やドナー藻場からの種子や草体の採取による生態系への影響が問題視され懸案事項となっている（環境省，2004）．この事は、これまで行われてきた種子を大量に使用する手法や当該地域外からの苗の持ち込みはその趣旨に沿うものではない．

著者らのアマモ場再生手法の基本コンセプトは、再生予定地から遺伝的に最も近い種子を限定量用いて効率的に種苗を生産し、海に戻すために生態系保全の趣旨に合致した方法である．先に述べたように発芽促進技術を用いた種苗生産技術は既に確立されており、次は目的の場所に移植苗を確実に生育させることである．そこで、著者らは、アマモの本来の繁殖特性を生かし、次のようなコンセプトで移植を考えている．天然のアマモ場は一樣に広がるのではなく、パッチ状に拡大する．この拡大は地下茎による拡大が支配的であり、その核となるアマモを定着させることが肝要である．一旦定着すれば、アマモ自体に波浪減衰効果があるため、新しい株はより定着が容易になり、また種子による拡大も可能となる．つまり、アマモ場再生における種苗移植のポイントは、核となる小規模のアマモ群落をいかに定着させるかにある．本研究では、これを実現するために、“基盤”という手法を選択した．基盤の利点は、以下のような点である．

- ①事前に侵食対策が可能．
- ②施工性に優れ、短期間に効率的な移植が可能．
- ③対象場所に合わせて、基盤材料の最適化が可能．

こうした考え方から、図-3に示すような基盤を考案した．この基盤はエキスパンドメタルで外枠を作り、適当な間隔で種苗ポットを入れ、その周りに礫を入れて、苗の流出を防ぐものである．エキスパンドメタルは整形が容易であり、目的にあった大きさに作成でき、また施工時には複数のポットを同時に簡単に海底に置くことができる．礫の大きさは、波浪条件に合わせて最適な大きさを選択できる．

#### (2) 造波水路による耐波浪アマモ移植基盤の安定試験

##### a) 試験方法

本試験では、波浪条件の厳しい環境下でも移植株の流出が起き難い移植基盤を開発するために、基盤に用いる各種材料の安定性について流速振幅との関係を明らかにし、次に、現地での適用を想定した移植基盤モデルを製作して、その安定性について試験した．

試験は、図-4に示す大型造波水路（全長 62 m、幅 2 m）の中央底部の凹部に珪砂（ $d_{50}=0.27$  mm）を入れ、そこに試験材料を充填したエキスパンドメタルの籠

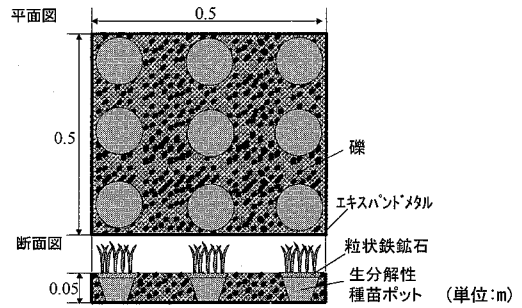


図-3 アマモ種苗移植基盤の概要

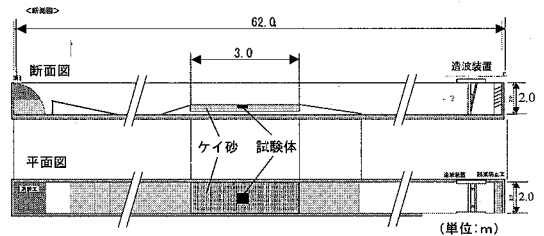


図-4 造波水路試験の概要

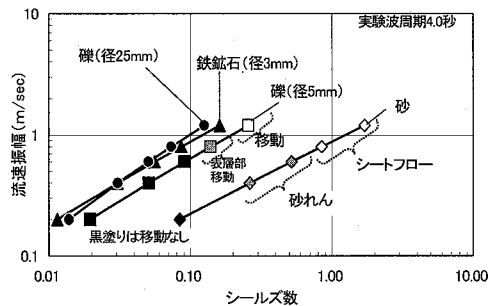


図-5 各種材料の流速振幅毎の安定性

(500×500×50 mm) を埋設した．材料は砂（ $d_{50}=0.27$  mm）、礫（粒径 5, 10, 25 mm）、鉄鉱石（粒径 3.5 mm）とし、規則波（周期 4 s）300 波に対する各材料の移動の有無を観察した．現地での適用を想定したアマモ移植基盤モデルは、エキスパンドメタルの籠に設置したアマモ種苗ポットの周囲に 25 mm の礫を充填した（図-3）．アマモ種苗ポット（ $\phi 90$  mm、高さ 50 mm）は、移植の際に使用する生分解性ポットに川砂を充填し、表層（10 mm 厚）には砂の流出防止のために鉄鉱石（粒径 3.5 mm）を被覆した．各ポットには、ポット内の底質の安定性を確認する目的で、ビニル製のアマモモデルを植え込んだ．また対照として、基盤を用いずに直接ポットを砂に埋める試験をした．

##### b) 試験結果

図-5に各種材料の流速振幅毎の安定性とシールズ数の関係を示す．これより、砂の場合は底面流速振幅が

0.4～0.6 m/s で砂れんの形成が見られ、0.8 m/s 以上でシートフローとなった。また、25 mm 径の礫および3.5 mm 径の鉄鉱石の場合では1.2 m/s でも移動は見られず、5 mm 径の礫では1.2 m から移動が見られた。一般に、アマモ場の分布限界の底面流速振幅は0.6 m/s 以下（森田・竹下，2003）とされるが、礫の粒径を大きくするか、または比重を大きくすることでそれ以上の流速振幅でも基盤の安定性が確保できる結果となった。

アマモ移植基盤モデルの試験では、底面流速振幅が0.6 m/s 以上から基盤周辺から基盤の中に砂が入り込んできたが草体の埋没までには至らなかった。基盤内のポットおよび充填した礫は安定しており、ポット内の底質（鉄鉱石）についても安定していた。ただし、200 波以上の時間経過後に基盤周囲の砂の砂れんが大きくなり、局所的な洗掘や砂の堆積が大きくなり、砂にポットを直接埋めた対照区では、0.4 m/s で一部のポットの周囲で洗掘が見られた。0.6 m/s では草体が埋没してしまうケースが観察され、1.2 m/s では多くのポットが流出した。

### (3) 耐波浪アマモ移植基盤によるアマモ場造成試験

#### a) 試験概要

岩手県越喜来湾浪板海岸において、2004 年 8 月に採取した種子を用いて淡水による発芽促進処理を施して得られたアマモ種苗 3000 株を用いたアマモ場造成試験を実施した。実施に当たり、今回検討したアマモ移植基盤を適用し、基盤の設置方法、安定性、アマモの生長と増殖過程を中心にモニタリングした。移植候補地点は、波・流れの現地観測と数値シミュレーションにより底面流速振幅の分布を求め、波浪条件が厳しく、アマモの群生が見られない地点を含む 3 点を選定した。波浪場の解析は、越喜来湾浪板海岸沖の水深約 15 m 地点における波浪観測点の波条件を入力条件とし、波浪観測期間中（2004 年 11 月 15 日～2005 年 1 月 18 日）の最大有義波（ $H_{1/3}=0.95$  m,  $T_{1/3}=9.0$  s, 波向：SSE）とした。

図-6 に移植地点と波浪時の底面流速振幅の分布を示す。移植地点はいずれもアマモの群生が見られない地点であり、特に地点 A は底面流速振幅が 0.6～0.8 m/s と大きい場である。移植基盤は、造波水路での試験で用いたモデルと同タイプのもの（図-3）を用い、アマモポット 9 個の周囲に礫を充填し、作業船の仮設クレーンにより海底面に設置した（写真-2）。充填する礫の粒径は、5～25 mm と 25～40 mm の 2 種類の試験区を設け、基盤の設置は海底面に基盤を置き、周囲に礫を播く方法と予め海底面を掘削して基盤を設置する 2 方法を実施した（表-3）。基盤周囲への礫の散布は、波浪による基盤の洗掘を防止のためである。また、海底面の砂地に直接ポットを埋設する従来法も併せて行った。移植基盤は、移植地点毎に 2 基ずつ設置した。基盤の設置は、2005 年 4

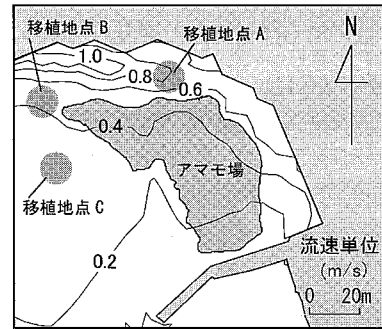


図-6 アマモ移植地点の底面流速振幅の分布

表-3 アマモ移植基盤の種類・設置方法

| 記号 | 礫径(mm) | 海底面への設置方法      | 移植地点    |
|----|--------|----------------|---------|
| a  | 5～25   | 基盤埋設           | A, B, C |
| a' |        | 設置（周囲に礫を配置）    | B, C    |
| b  | 25～40  | 基盤埋設           | A, B, C |
| b' |        | 設置（周囲に礫を配置）    | B, C    |
| c  |        | 基盤なし ポットによる直植え | A, B, C |

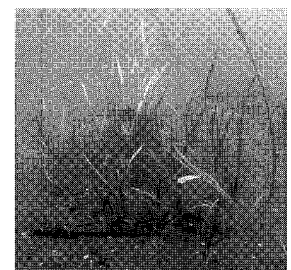
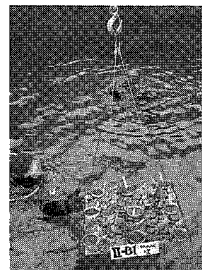


写真-2 基盤設置状況 写真-3 生育状況（2006年8月）

月に実施し、その後定期的なモニタリングを通じて各移植苗の生残、草丈の計測を行った。また、観測地点に最も近い場所における天然アマモの草丈の計測を行った。

#### b) 試験結果

アマモ移植基盤の海域への設置に伴う基盤の底質への埋設は、潜水土による海底土砂の掘削作業が必要であり濁りもあるため作業効率は悪かった。これに比較して、海底面への設置および基盤周囲への礫の敷き詰めは効率がよく、潜水土の作業量も少ないため、大量の基盤設置の場合でも十分対応が可能と考えられた。

観測期間中（2004 年 4 月～2006 年 12 月）、全ての基盤において礫の流出等もなく、この基盤の耐波安定性が確認できた。設置方法による基盤の安定性やアマモの初期生長には大差は見られなかったが、地点 B および C では予想外の出来事として、エゾバフンウニの食害を受けた。バフンウニは砂地を嫌い通常アマモは食べないと言われている。砂地に直植えした移植地点では殆んど被害がないことから、基盤材料に礫を用いたために、バフ

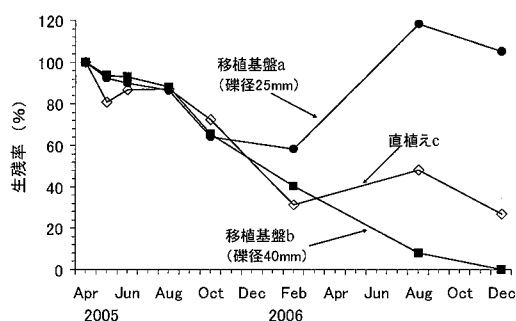


図-7 アマモ移植基盤2種と直植えの生残率 (地点A)

ンウニが基盤設置地点の近傍の岩礁帯から移動し、アマモを摂取できたと考えられる。一方、流速振幅の大きな移植地点Aでは被害は見られなかった。

図-7に移植地点Aにおけるアマモ移植基盤2種と直植えの生残率の推移を示す。移植後の生残率は、1年経過まで全ての試験区で同様に低下を示した。しかし、移植1年経過時点より移植基盤a(口径5~25mm)のアマモは2006年夏には基盤内外への地下茎の伸長が見られ、増殖が観察された(写真-3)。また、基盤内には流れにより自然に堆積した砂質が充填され、地下茎から伸長した根が砂礫に活着しているのが観察できた。一方、移植基盤b(口径25~40mm)のアマモは、2006年2月時点で地下茎および根が礫上に露出しており、その後は株数の増加は見られずに2006年12月時点で消失した。アマモの生長様式より、地下茎の伸長は一番新しい草体(栄養株)の基部で起こるものであり、大きな口径の場合は地下茎が浮いてしまい安定性が悪く、草体自身の波への抵抗から流出し易いものと考えられる。また、直植えの試験区cでは、一部のポットでアマモの生育は見られるものの、約半数の移植ポットは砂面変動により流出してしまった。

図-8に移植アマモと天然アマモの草丈の生長を示す。移植後の移植基盤aとcは同様な生長を示し、移植後およそ1年以降は、天然の草体との差は小さく、優位性が認められた( $t$ 検定,  $p < 0.05$ )。基盤bでは、移植後の生長は、殆ど見られなかった。草体が安定しないことに加え、基盤の礫中にできた空隙が大きいため砂が堆積し難く、地下茎および根が露出していることから栄養供給が減少したことが考えられた。

これまで報告のある波浪対策用のアマモ基盤として、基盤上部をエキスパンドメタルで覆う方法(森口ら, 2006)等があるが、地下茎の伸長による基盤内部の基材への定着は難しく、群落の維持拡大はし難いと考えられる。従って、基盤表面を人工物で覆うよりも、適切な粒径の礫と砂質が自然に混合された条件が波による流速振幅が大きい場合でもアマモにとって地下茎と根の伸長を

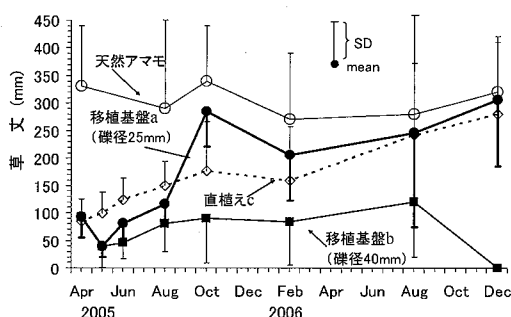


図-8 移植アマモと天然アマモの苗の生長 (地点A)

妨げずに安定した増殖ができるものと考えられる。

#### 4. ま と め

天然アマモ場における底面流速振幅とアマモの分布を調査した結果、底面流速振幅が比較的大きな地点のアマモは礫質を含む砂質に生育する傾向が見られた。底質内部では砂礫への根の活着が見られた。

造波水路において、砂、礫、鉄鉱石の安定性と流速振幅の関係を調べ、1.2 m/s までの流速振幅下でも安定するアマモ移植基盤モデルを提案した。

エキスパンドメタルに礫を充填したアマモ移植基盤について、造波水路試験および現地種苗生産アマモによるアマモ場再生試験を行った。高波浪条件下でも基盤および移植アマモは安定し、生長と増殖が確認できた。

本研究を進めるに当たり、現地調査にご協力頂きました神奈川県葉山町漁業協同組合、岩手県大船渡市越喜来漁業協同組合の関係者の皆様に謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 金澤 剛・森 鐘一(2003): 現地アマモ場造成試験と適地評価に関する研究, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 1266-1270.
- 環境省(2004): 藻場の復元に関する配慮事項, 100p.
- 森口朗彦・高木儀昌・山本 潤・大村智宏・吉田吾郎・寺脇利信・棚田教生・山野井秀夫(2006): アマモ場造成のための底質安定工法「鋼製マット」の開発, 水工研技報, 28, pp. 41-65.
- 森田健二・竹下 彰(2003): アマモ場分布限界水深の予測評価法, 土木学会論文集, No. 741, VII-28, pp. 39-48.
- 山本克則・小河久朗・難波信由・林 文慶・越川義功・田中昌宏(2004): アマモ場造成に向けた新しい種苗生産技術, 月刊海洋, 413, pp. 846-850.
- 山本克則・小河久朗・吉川東水・難波信由(2006a): アマモ種子における塩分および温度制御による発芽促進効果, 水産増殖, 54, pp. 347-351.
- 山本克則・新保裕美・田中昌宏・三富龍一・小河久朗(2006b): アマモ場拡大の実態把握と種苗移植による新規群落形成の試み, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 1006-1010.
- 吉田 司・芝修一・小山善明・新井義昭・鈴木輝明(2004): アマモ場造成に必要な生育環境条件に関する研究, 水産工学, Vol. 40, No. 3, pp. 205-210.
- Delft Hydraulics (2003): ELFT3D-WAVE, Simulation of short-crested waves with HISWA or SWAN, 249p.