

波高減衰および地形変化抑制効果を期待した人工海草設置法に関する研究

金澤 剛*・芳田利春**・川崎和俊***

アマモ場を人工的に造成する場合、海象条件の厳しい海域では底質移動によるアマモ地下茎の流失が確認されており、底質安定化対策が必要である。本研究では、アマモが群落として成長するまでの一時的な地形変化抑制効果を人工海草に期待して、2次元水路において固定床および移動床実験を行った。そして、人工海草が波高減衰と地形変化へ与える影響について、人工海草の揺動形態と関連付けて検討した。その結果、人工海草が岸沖方向に非対称に揺動する場合に、最大15%程度の波高減衰が期待出来ること、岸沖方向の底面せん断力を同程度にし、砂れん形状を小さく出来ることなどを確認し、効果的な人工海草設置法を提案した。

1. はじめに

藻場は海岸環境の保全に極めて重要であると指摘されている。しかしながら、高度経済成長期以前から沿岸開発が進められた結果、直接的には埋立によって、また間接的には水質悪化によって、現在では藻場がかなり減少してしまっている。このような藻場の減少に対して、近年では人工的な復元が検討されており、さまざまな試みが行われている。その内の一つとして、著者の一人は、アマモの種子を取り付けた「播種シート」を海底地盤に展張、設置して、アマモを発芽・生育させる「播種シートによるアマモ場造成法」を提案し、比較的大規模な実海域試験を行っている(芳田ら, 1998, 2002)。しかしながら、芳田ら(1998)によるとアマモがある程度まで成長する前段階において、底質が地下茎の最深部である約10 cmを越えて移動してしまうことにより、発芽したアマモの地下茎が根づかず、アマモ自体が流失してしまうことが確認されている。したがって、群落である自然の「アマモ場」が生息可能な海象条件であっても、点在したアマモにとっては厳しい海象条件となる可能性がある海域では、底質の安定化対策が必要である。

底質の安定化対策は種々あるが、菅原・入江(1990)は、人工海草が底質の移動を弱める効果を2次元水路実験で確認し、また小田ら(1991)は、硬質人工海草を用いて移動床実験を行い、人工海草の漂砂制御効果を明らかにしている。さらに、人工海草に関する研究としては、辻本(1992)は波に揺動する物体が波動場に存在するときの流れや砂移動について実験的・理論的に検討し、小林ら(1993)は岸沖方向に非対称な変形・動揺をなす非対称人工海草による流れ場の制御について検討している。また、人工海草周辺の波高や流れ場と漂砂に関する数値計算も数多くなされている(例えば、浅野ら, 1988; 伊福ら, 1994, 1995)。こうした人工海草は、主に

波浪制御構造物あるいは漂砂制御構造物といった長期間機能するものとして取扱われている。

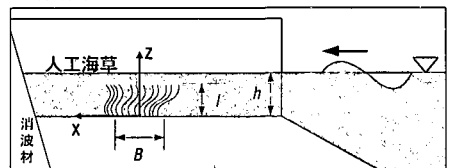
本研究では、「播種シートによるアマモ場造成法」の確度を向上させるため、アマモが群落として成長するまでの一時的な地形変化抑制効果を人工海草に期待して、「人工海草付き播種シートによるアマモ場造成法」を考案した。そして、2次元造波水路において固定床および移動床実験を実施して人工海草の地形変化抑制効果について検討した。さらに、波浪条件に対して効果的な人工海草設置法の提案を試みたものである。

2. 実験内容

(1) 実験水路

本研究では、東洋建設株式会社鳴尾研究所で保有している2次元造波水路(長さ40 m×幅1.0 m×高さ1.6 m)を使用した。図-1に示すように水路に一樣水深の模型床を設け、また、水路を幅方向に二等分(水路A, 水路B)して水路Aにのみ人工海草を設置した。実験の縮尺は1/3程度とし、Froudeの相似則を適用した。座標は人工海草設置位置中央から水平方向岸向きに x 軸を、底面から鉛直方向上向きに z 軸を設定した。

断面図



平面図

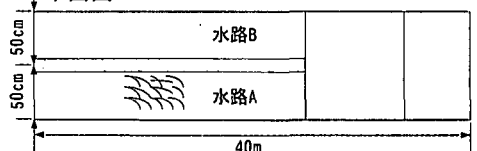


図-1 実験水路

* 正会員 工 修 東洋建設(株)鳴尾研究所

** 正会員 工 修 東洋建設(株)鳴尾研究所水域環境研究室長

*** 修(工) 元東洋建設(株)

(2) 人工海草

本研究で使用する人工海草は環境負荷の低減を目的とした生分解性の発泡素材であり、その諸元は自然のアマモが丈1 m、幅1 cm程度であることから、人工海草丈 $l=30$ cm、幅3 mmを標準とした。人工海草の厚みは0.5 mmで比重は0.098である。この人工海草3枚を1束とし、水路Aの一部に岸沖方向、水路幅方向ともに等間隔で設置した。人工海草諸元は表-1に示す様に、人工海草設置長 B 、人工海草設置間隔 d 、人工海草丈 l を変化させた5ケースとした。

(3) 実験条件

波浪条件は表-2に示す様に、周期 $T=0.8\sim 3.0$ s、波高 $H=4.0\sim 15.5$ cmの規則波とした。なお、移動床実験は、網かけの波浪条件を対象とした。水深 h は自然のアマモが水深1~2 m程度に多く生息していることから、40 cmとした。

3. 固定床実験

(1) 固定床実験方法

人工海草による波高減衰効果を検討するため、人工海草帯の沖側半波長の位置で人工海草への入射波高 H_i を、岸側半波長の位置で透過波高 H_t を容量式波高計にて計測した。また、人工海草が底面せん断力におよぼす影響を検討するため、水路AおよびBの人工海草帯中央($x=0$)の底面にせん断力計を設置して、直接、底面せん

断力を計測した。波浪条件は表-2の15ケース、人工海草諸元は表-1のCase 1~4を対象とした。

(2) 人工海草揺動形態の確認

予備実験の際、波浪条件により人工海草の揺動形態が大きく異なることを確認した。そこで、人工海草の揺動形態と人工海草が波浪などに与える影響に関連があると考え、人工海草の揺動形態を解析した。人工海草丈が同じCase 1~3および5は揺動形態が同じと考え、Case 1とCase 4の2ケースについて各波浪条件で検討した。

解析には人工海草の揺動と水面の動きを撮影したビデオ映像とパソコンの動体解析ソフトを使用した。これにより、波の一周期において人工海草が時々刻々変化する揺動の様子を把握した。その結果、人工海草揺動形態の違いを岸沖方向の最大移動量の差から、しきい値を海草丈 l の10%として「対称」および「非対称」に分類した。人工海草揺動形態の一例を図-2に、各ケースの分類結果を表-2の右端に示す。図-2中の番号は1/8周期毎の人工海草形状の順序と、その時の人工海草直上の水位の位相を示している。以後、各実験結果はこの分類に基づいて検討した。

(3) 人工海草による波高減衰効果

人工海草による波高減衰効果は、人工海草の存在による渦の発生に着目して、表面KC数 KC_s ($KC_s=u_{ms}\times T/D$, u_{ms} :微小振幅波理論による表面流速, T :波の周期, D :人工海草の厚み)により検討した。

図-3に、表面KC数と波高減衰率の関係を示す。波高減衰率は、入反射分離(合田ら、1976)により算定した入射波 H_i と透過波 H_t の比 H_t/H_i とした。図-3によれば、人工海草揺動形態が「対称」の場合、波高減衰率は1付近に分布し、人工海草による有意な波高減衰効果はほとんど認められない。一方、人工海草揺動形態が「非対称」の場合は波高減衰率が1より小さく、特に KC_s が大きい場合に顕著である。この波高減衰効果は最大で15%程度であった。こうした波高減衰効果は、渦の発生

表-1 人工海草諸元変化

ケース名	設置長 B (m)	間隔 d (cm)	海草丈 l (cm)	備考
Case 1	4.0	5.0	30	標準
Case 2	2.0	5.0	30	設置長短
Case 3	4.0	10.0	30	間隔大
Case 4	4.0	5.0	15	海草丈短
Case 5	4.0	2.5	30	間隔小

表-2 波浪条件・人工海草揺動形態分類一覧

実験(縮尺1/3)			現地		人工海草揺動形態	
水深 h (cm)			水深 h (cm)	1.2	人工海草の種類	
周期 T (sec)	波高 H (sec)	波長 L (m)	周期 T (sec)	波高 H (cm)	Case 1 標準	Case 4 海草丈短
0.8	7.5	0.99	1.39	22.5	対称	対称
	4.0			12.0	対称	対称
1.2	8.0	1.94	2.08	24.0	対称	対称
	13.0			39.0	対称	非対称
1.6	4.5	2.83	2.77	13.5	対称	対称
	10.0			30.0	非対称	非対称
	5.0			15.0	非対称	非対称
2.0	8.5	3.69	3.46	25.5	対称	非対称
	12.0			36.0	非対称	非対称
2.4	5.5	4.53	4.16	16.5	対称	対称
	10.0			30.0	非対称	非対称
	7.5			22.5	非対称	非対称
2.8	11.5	5.35	4.85	34.5	非対称	非対称
	15.5			46.5	非対称	非対称
2.0	5.0	5.76	5.20	15.0	対称	非対称

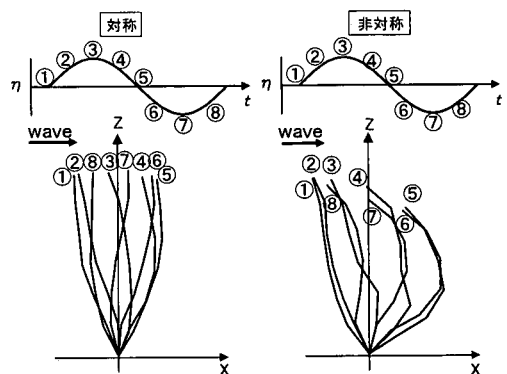


図-2 人工海草揺動形態

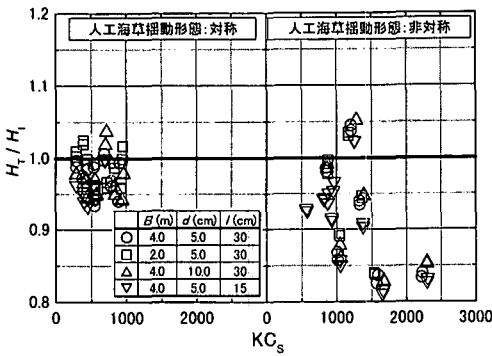


図-3 表面 KC 数と波高減衰率の関係

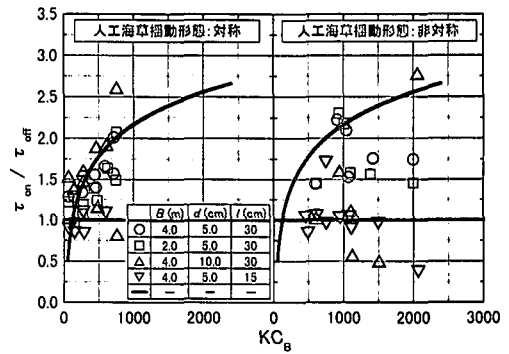


図-4 岸沖方向最大底面せん断力比の変化

により波浪のエネルギーが逸散されたことによるものと考えられ、人工海草揺動形態が「非対称」の場合は、渦が発生しやすくなっていると考えられる。なお、人工海草諸元に関しては、波高減衰効果におよぼす有意な差は見られなかった。

(4) 人工海草が底面せん断力におよぼす影響

人工海草が底面せん断力におよぼす影響についても、波高減衰効果と同様、人工海草の存在による渦の発生に着目して KC 数により検討した。ここで、KC 数には流速に微小振幅波理論による底面流速を用いた底面 KC 数 KC_B を使用した。底面せん断力には、各波浪条件および各人工海草諸元に対して計測した岸向きおよび沖向き最大底面せん断力 τ_{on} および τ_{off} の比を用いた。なお、 τ_{on} および τ_{off} は、波浪 6 波分の底面せん断力時系列データを基に、1 波毎の岸向きおよび沖向きそれぞれの最大底面せん断力から求めた平均値である。

図-4 に底面 KC 数に対する岸向きおよび沖向き最大底面せん断力の比 τ_{on}/τ_{off} を示す。図中、実線は人工海草がない水路 B で得られた τ_{on}/τ_{off} を対数近似した曲線であり、 KC_B の増加とともに底面せん断力の岸沖方向の非対称性が強くなる傾向が見て取れる。次に人工海草がある場合、人工海草揺動形態が「対称」の実験結果は、比較の実線付近に多く見られ、人工海草設置による有意な差は認められない。一方、人工海草揺動形態が「非対称」の場合は、 KC_B が増加しても τ_{on}/τ_{off} が実線より 1 に近いところに分布している。これは、人工海草の影響により、底面せん断力が岸沖方向に対称に近づくことを示している。

底面せん断力が増大すると、掃流移動する砂粒子が増加する。これは一周期内での最大底面せん断力に置き換えて考えても同様である。しかしながら、最大底面せん断力が増加したとしても、その逆向きの底面せん断力の大きさが同じであれば、すなわち τ_{on}/τ_{off} が 1 であれば、その場所での地形は変化しないと考えられる。すなわち、

岸沖方向に非対称に揺動する人工海草を設置することにより、人工海草帯内の地形変化を小さくする効果が期待できる。

4. 移動床実験

(1) 移動床実験方法

移動床実験は、固定床実験と同じ水路幅方向に 2 分割した 2 次元造波水路に豊浦標準砂 (粒径 0.2 mm) を敷き詰めて行った。水路 A および B ともに移動床の長さは、作用波浪の波長の 1.5 倍程度以上とした。人工海草が浮遊砂におよぼす影響について検討するため、この水路 A および B の人工海草帯中央 ($x=0$) で、容量式波高計、濁度計および電磁流速計を用いて水面変動量、浮遊砂濃度および水平流速を計測した。濁度計と電磁流速計は、底面付近 ($z=1.5$ cm) から水面付近 ($z=30.5\sim34.5$ cm) まで 1 cm 間隔で鉛直方向に同時に移動させ、それぞれの鉛直分布を計測した。計測は波浪を約 50 波程度作用させた後に開始し、各高さで 12 波分のデータを取得した。実験対象の波浪条件は表-2 の網かけをした 4 ケース、人工海草諸元は表-1 の Case 1 および Case 5 である。また、人工海草が地形変化におよぼす影響を検討するため、各波浪作用後に水路上を定速で走行可能なレーザー変位計により、形成された砂れん形状を計測した。

(2) 実験結果

a) 浮遊砂濃度

濁度計によって得た浮遊砂濃度の時系列データから、底面からの各高さにおける波一周期間の平均浮遊砂濃度を求め、その 12 波分の平均値をその高さの浮遊砂濃度 c とした。図-5 に浮遊砂濃度 c の鉛直分布の一例を示す。図の縦軸は底面からの高さ z と人工海草丈 l の比を示し、また図中○が人工海草あり、△が人工海草なしの場合を示す。図-5 の底面近傍に注目すると、人工海草がない場合に比較して人工海草がある場合の浮遊砂濃度が大きく低減されている。この傾向は人工海草設置間隔が狭

い場合に顕著に表れた。この底面付近での浮遊砂濃度の低減は、人工海草を設置することによって砂の巻き上がり量を少なくし、地形の安定化効果が期待出来ることを示している。

b) 漂砂量

浮遊砂濃度および水平流速の時系列データから、各高さでの net の漂砂量を求め、それを鉛直方向に加算することで各波浪条件における net の漂砂量とした。ここで、漂砂量は底面付近がその大部分を占めたことから、底面からの高さ z と人工海草丈の比 z/l が0.7以下の範囲で算出した。図-6に底面 KC 数 KC_B と人工海草がある場合の漂砂量 q_A と人工海草がない場合の漂砂量 q_B の比の絶対値 $|q_A/q_B|$ との関係を示す。図中、多くの点で $|q_A/q_B|$ が1以下を示していることから、人工海草の設置が漂砂量を低減させていることがわかる。なお、 $|q_A/q_B|$ が1以上を示す点が2点あるが、これは人工海草がない場合の net の漂砂量が多くの場合沖向きであったのに対し、この2点ではそれが若干の岸向きを示しており、分母が相対的に小さくなったために生じたものである。この2点の人工海草がある場合の net の漂砂量は、他のケースと定量的に似た値であった。

c) 砂れん形状

レーザー変位計で計測した各波浪作用後の岸沖方向の底面形状から、peak to peak 法により、個々の砂れんの波高および波長を算定した。図-7に底面 KC 数 KC_B と砂れんの平均波高 η および平均波長 λ の関係を示す。実

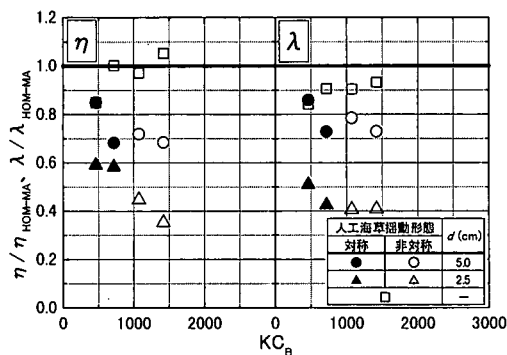


図-7 砂れんの波高比および波長比の変化

験結果は本間ら (1964) が実験によって導いた砂れんの波形勾配 η/λ および波長 λ に関する式 (1) から得た値 η_{HOM-MA} および波長 λ_{HOM-MA} で無次元化してある。

$$\frac{\eta}{\lambda} = 0.175 \left(\frac{\lambda}{2a_m} \right)^{0.190}, \quad \eta = \alpha T^\beta (2a_m)^\gamma \dots \dots (1)$$

ここで、 η : 砂れんの波高、 λ : 砂れんの波長、 $2a_m$: 底部水粒子移動の全振幅、 T : 周期である。 α , β , γ は底質の粒径によって変化する実験定数であり、本研究では底質に豊浦標準砂 (粒径約 0.2 mm) を使用しているため、 $\alpha=1.93$, $\beta=0.289$, $\gamma=0.422$ である。図中、●, ○, ▲, △が人工海草がある場合、□が人工海草がない場合を表す。この図によれば、人工海草がある全てのケースで、実験結果は本間ら (1964) の値より小さくなった。すなわち、人工海草により地形変化が抑制されていることが確認できた。また、人工海草揺動形態が「対称」より「非対称」の場合に砂れんの波高、波長ともに小さくなる傾向にある。さらに、人工海草設置間隔が狭い場合に砂れんの規模がより小さくなっている。こうしたことから、人工海草の設置によって地形変化が抑制されるが、人工海草の揺動形態が「非対称」、また人工海草設置間隔が狭い場合に、その効果が大きくなることがわかった。なお、人工海草がない場合の砂れんの波高比および波長比が1付近に分布していることから、本実験結果は妥当であるといえる。

5. 人工海草設置法

本研究では、固定床実験および移動床実験の結果から、人工海草による波高減衰効果および地形変化抑制効果が期待できる人工海草の諸元について、次の様に提案する。

人工海草設置長については、人工海草の揺動形態が「非対称」であれば人工海草設置長 $B=4.0$ m の Case 1 と $B=2.0$ m である Case 2 の固定床実験結果に同等の波高減衰効果および地形変化抑制効果が認められたことから、人工海草設置長は波長が最大で約 6.0 m 程度である

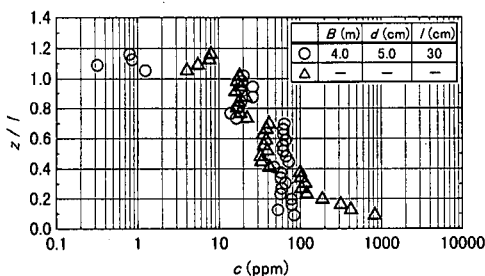


図-5 浮遊砂濃度の鉛直分布

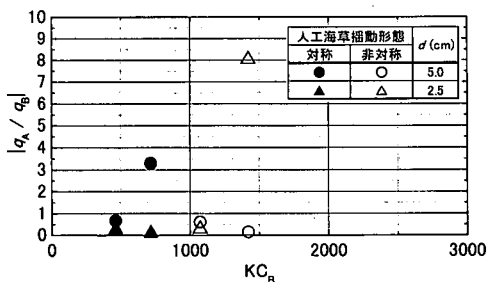
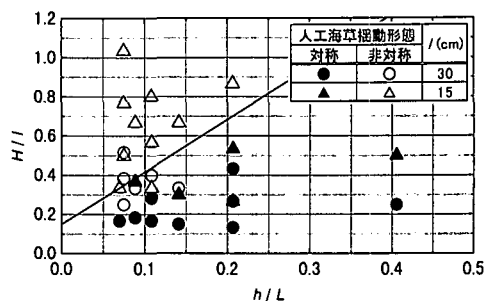


図-6 漂砂量におよぼす人工海草の効果



図—8 相対水深に対する波高と人工海草丈の比の関係

本研究での波浪条件を踏まえて、波長の 1/3 程度以上とする。

また、人工海草設置間隔については、人工海草設置間隔 $d=5.0$ cm の Case 1 と $d=10.0$ cm である Case 3 の固定床実験結果に同等の効果が認められ、かつ、移動床実験結果から $d=2.5$ cm である Case 5 の地形変化抑制効果が高かったことから、人工海草設置間隔を本間ら (1964) の実験式による砂れんの波長程度以下に小さくすることとする。

人工海草丈については、各実験において人工海草揺動形態が「非対称」の場合に波高減衰および地形変化抑制に対して効果が認められた。そこで、人工海草揺動形態が「非対称」となる場合の出現傾向を見出し、人工海草の設置条件に応じて揺動形態が「非対称」となるよう人工海草丈を設定すれば良い。図—8 に各波浪条件における相対水深 h/L に対する波高と人工海草丈の比 H/h の関係を示す。この図によれば、図中に示した直線によって人工海草揺動形態が「対称」あるいは「非対称」にほぼ分割できるため、「非対称」となる海草丈の範囲を決めることができる。すなわち、波浪条件と水深が与えられれば、この図から海草丈の上限を決定できる。海草丈の下限は本研究の実験条件ではほぼ $H/h < 1.0$ であるから、波高と同程度の丈が妥当であると考えられる。以上のように人工海草丈を決定すれば、人工海草の揺動形態は「非対称」となり、人工海草による波高減衰効果ならびに地形変化制御効果が期待できる。

6. 結 論

本研究では、人工海草が波浪および地形変化へおよぼす影響を把握することを目的とした水理模型実験を行い、効果的な人工海草設置法を提案した。

(1) 岸沖方向に非対称に揺動する人工海草は、最大

15%程度の波高減衰効果、および底面せん断力を岸沖方向に对称にする効果、すなわち、地形変化を小さくする効果が期待できる。

(2) 人工海草を設置することにより、底面付近の浮遊砂濃度、さらに net の漂砂量を低減する効果が期待できる。

(3) 人工海草を設置することにより、波浪による砂れんの波高 η および波長 λ を小さくできる。その効果は、人工海草設置間隔 d が狭い場合に、また人工海草の揺動形態が非対称である場合に大きい。

(4) 波高減衰効果および地形変化抑制効果が期待できる人工海草の設置方法は、波長の 1/3 程度以上の範囲に、本間ら (1964) の砂れんの波長より狭い間隔で設置した場合である。人工海草丈 h は、相対水深 h/L と波高人工海草丈比 H/h について整理した図—8 から人工海草揺動形態が「非対称」になるように設定すれば良い。

今後の課題として、提案した人工海草設置法に人工海草の物理的性能を加味するとともに、海底勾配の影響を考慮する必要があると考えており、今後検討を加えていく考えである。

参 考 文 献

- 浅野敏之・筒井勝治・酒井哲郎 (1988): 海藻が繁茂する場の波高減衰の特性, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 138-142.
- 伊福 誠・岩田充浩・米澤泰雄・坂田則彦 (1994): 人工海藻周辺の流れと漂砂, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 566-570.
- 伊福 誠・岩田充浩・小田一紀 (1995): 人工海藻周辺の流れと漂砂—LES と porous body model による解析—, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 461-465.
- 小田一紀・天野健次・小林憲一・坂田則彦 (1991): 硬質型人工海藻の漂砂制御効果に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 331-335.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池治 (1976): 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, 24 p.
- 小林智尚・仲座栄三・星野 仁・石塚昭彦・石原慎太郎 (1993): 非対称人工海藻による流れ場の制御, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 566-570.
- 菅原一晃・入江功 (1990): 人工海草による底質移動の制御効果について, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 434-438.
- 辻本剛三 (1992): 藻場が存在する場における流れと浮遊砂濃度, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 276-280.
- 本間 仁・堀川清司・鹿島遼一 (1964): 波による浮遊砂に関する研究, 第 11 回海岸工学講演会講演集, pp. 159-168.
- 芳田利春・田中裕作・寺田美香里・熊川四郎・森 鑑一 (1998): 播種シートによるアマモ場造成に関する研究, 土木学会第 53 回年次学術講演会, 共通セッション, pp. 204-205.
- 芳田利春 (2002): 「播種シートによるアマモ場造成法」の開発, マリンボイス 21, Vol. 225, pp. 14-16.