

光量, 航走波, 潮流環境変化による移植アマモ場の維持・拡大機構に関する研究

山本省吾*・中瀬浩太**・山本裕規***
羽原浩史****・岡田光正*****

広島県三原市地先の移植アマモ場は, 移植直後に大きく減耗したものの, 移植から 2~6 年が経過した現在も残存し, 種子による再生産が確認されている。本研究では当海域のアマモ場を対象として, 光条件および波・流れ条件からアマモ場物理環境を評価した。その結果, ①移植場所は, アマモ分布の光条件は満たすが, 周年濃密な群落を形成するには光量が不足していることが明らかになった。また, 川端 (1996) の光量によるアマモ場評価指標の適用性が確認された。②航走波作用回数と潮流を考慮したアマモ群落外縁におけるシールズ数により, 底質の流動安定性の向上を示すとともに, アマモ群落限界を評価できた。

1. はじめに

沿岸域の環境保全にとって多様な機能を有するアマモ場は, 埋め立てや水質汚濁による透明度の低下などによって消失, 衰退しつつある。これらアマモ場の保全, 修復, 創造の要請が高まり, そのための調査研究および技術開発が各研究機関で継続して行われ, アマモ場造成事業が各地で実施されてきた。

アマモ場造成検討では, 場の評価が重要である。この問題について, 外力については丸山ら (1987) をはじめとして中瀬ら (1993, 1999), 森口ら (1999), 田坂ら (2000), 島谷ら (2002), 金澤・森 (2003) が底面摩擦力と底質粒子の移動抵抗の比であるシールズ数を用いて評価している。光環境については, 石川ら (1988), 川崎ら (1990), 川端 (1996), 森田・竹下 (2003) の研究がある。

アマモ場造成事業では, アマモの生育環境を整備し, 株移植や播種を行う手法がとられており, その後のモニタリングが継続されることも多い。造成後, アマモ場が拡大したモニタリング結果および背景の環境要因に関して考察した文献もある (森田・深瀬, 1994; 平岡ら, 2003; 春日井ら, 2003) が, 移植後, 長期に及ぶモニタリング結果を報告した事例は確認できない。

本研究の対象である広島県三原市地先の 1997 年~2001 年度のアマモ移植では, 事前に物理環境調査と潮流シミュレーションを実施し, 適地評価を行った上で移植工を実施した。施工時には航走波の作用状況を検討している。移植後 2~6 年が経過しているが, その間も継続してモニタリングを行っており, 現在でも移植したアマモの生残, および実生株による群落の更新が行われ, 移植アマモ群落を含む天然アマモ群落の面積は当初よりも拡大している。これらの原因については, 1999 年 5 月の「しまなみ海道」開通によって移植場所から 200 m 離れた三

原航路を通過する定期船数がフェリー 40%, 高速船 69%, 全体で 56% に減便となり航走波の環境が変化したこと, 2001 年 9 月の貝野地区のケーソン据付による沼田川側護岸締切・延伸に伴ってアマモ群落付近の潮流流速が低下したことなどの外力的変化が考えられる。また, 移植水深による光量変化も懸念された。

本研究では移植アマモが残存している要因について, 水深別光条件および波・流れ条件の実測および数値計算結果より検討した。

2. アマモ移植工の概要

図一1 は広島県三原市の沼田川河口部における移植工前のアマモ分布域である。アマモ群落は地盤高 D.L.-2 m ~ ±0 m にかけて分布している。1998 年度から開始された尾道糸崎港貝野地区港湾工事に伴い消失する 1.2 ha のアマモ群落 (平均地盤高 D.L.-0.5 m) を近傍の浅場に移植することとなった。移植場所の選定については 1994 年に周辺海域のアマモ分布範囲, 底質, 光環境 (照度), 潮流, 波浪, 漂砂について実測および数値計算を行い, 適切と考えられる場所を移植場所に設定した。

移植場所は, 光条件からは極力浅い水深を確保することがアマモに必要な光量の確保の点より求められるが, 当該海域では近隣に航路があること, また浅い場所にも密度は低いもののアマモ群落が現存していたため, 移植先をアマモ分布の下限に近い D.L.-1.5 m 地点に計画した。また, 移植場所の底質は圧密を受けた粘土が露出している場所であり, 周囲はごくまれにしかアマモがみられなかった。

移植方法は, 3 m² の移植バケットを用いてアマモの株を底質 (層厚 30 cm) とともに採取し, 移植先に底質ごと移植するものである (中瀬・百瀬, 2002)。これにより, 底生生物の生息環境の保持が可能となり, また層厚 30 cm の底質の存在により, 地下茎の保護および光環境の改善ができた。

移植作業は, 波浪が安定しておりアマモ株が伸長する前の時期である 12~3 月に実施した。

* 正会員 工修 五洋建設(株) 東京支店
** 正会員 五洋建設(株) 環境事業部
*** 正会員 工修 復建調査設計(株) 環境技術部
**** 正会員 工博 復建調査設計(株) 環境技術部
***** 正会員 工博 広島大学教授 大学院工学研究科

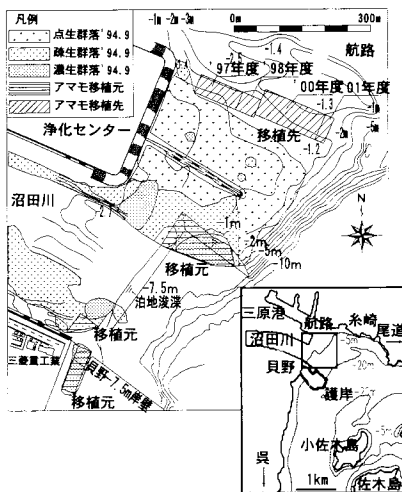


図-1 対象海域とアマモ分布域

3. 調査方法

(1) アマモのモニタリング調査

a) アマモ群落分布

1994年6月から2004年1月までに、浄化センター前面護岸から沖の海域を全15回にわたって潜水観察し、アマモ群落の被度別水平分布を調査した。

b) アマモの生育量

1998年以降、移植先および周辺海域に観測点を設定し、これらの点に2m×2mのコドラートを配置して4㎡当たりのアマモ株数と被度および標準草丈を潜水観察により計測した。なお、12月～3月までは実生個体を識別して記録した。

(2) 光環境調査

a) 海面直下光量の算出

最寄り気象台(広島市)の理科年表(1997年版)による全天日射量を光量に換算した(1MJ/m²・日=4.67E/m²・日)。また、石川ら(1988)と同様に、全天日射量の42%が光合成有効波長であり、空中から水面直下には空中の79%の光エネルギーが透過するとした。

b) 光の減衰率

水中の光量は、広島県による1998、1999年度の尾道糸崎港貝野地区藻場移植追跡調査業務において測定された水中照度の鉛直分布調査結果を用いて算出した。

水中の照度は波浪条件、天候、水質(懸濁物やプランクトン)により変化する。このため、光量の減衰率は調査期間中の各水深別最大減衰率を採用した。

(3) 波・流れ環境調査

a) 航行船舶速度

1998年3月24日8:30～14:00にかけて、三原航路

を通過する船舶を観察し、既知の2点間を航行する際に要した時間を計測し、船種別の航行平均速度を算出した。

b) アマモ群落内の潮流

現地での潮流観測は、2000年8月と2003年7月の大潮時に25時間連続で行った。観測は電磁流向流速計(ACM-4M及びACM-8M)により、2000年には海底面上0.5m、2003年では海底面上1.0mでの流向・流速を観測した。

c) 潮流数値シミュレーション

潮流計算は貝野地区護岸の建設進捗毎に平面2次元の運動方程式、連続式から検討した。計算領域は図-1右下のように5km×4km程度の海域を対象とし、計算格子間隔は30mとした。沼田川流量は4.2m³/sとし、水温・塩分による密度流は考慮していない。海底地形は海底面の地盤高を用いており、アマモの分布の影響は考慮していない。

4. 結果及び考察

(1) アマモ群落の経時変化

移植先を含む天然アマモ群落は図-2のように6月頃を最盛とする年変動を示しながら生育面積を増大させている。なお、生育面積は被度を考慮してアマモ分布面積に被度別の係数(濃生0.875、密生0.625、疎生0.375、点生0.15、極点生0.025)を掛けて算出したものである。また、図-1、図-3の比較から、2000年6月には移植先内でも繁茂しており、1994年9月のアマモ分布域のうち北東側の航路に面したアマモ群落は航路側へと拡大した。

(2) 移植アマモの生育状況

当該海域では、図-4に示すように移植したアマモ株数は移植直後に大きく減少したものの存続し、実生株も確認されている。

(3) 光環境

川端(1996)は、山口県柳井湾の調査等により、アマモ場造成の光環境として、年平均底層光量が2.5E/m²・日以上かつ、繁茂期である春～夏に3E/m²・日以上、衰退期である秋～冬でも1.5E/m²・日以上であることが望ましいとした。また、周年濃密に分布する場所では年間平均値4.4E/m²・日、最大光量月6.0E/m²・日、最小光量月1.6E/m²・日が観察されたとしている。これらの知見を、本研究の光量計算結果と比較して、移植アマモの状況を評価した。

各月の水深別日平均光量算定結果およびこれらの年平均値を表-1に示す。アマモ移植元の地盤高はD.L.-0.5m、移植先はD.L.-1.5mで、M.W.L.時の水深(D.L.+2.0m)を考慮すると、それぞれ水深2.5m、3.5mに相当する。移植元(水深2.5m)には濃密なアマモ群落が周年分

布し, 年平均光量 $6.3 \text{ E/m}^2 \cdot \text{日}$, 最大光量月 (5 月) 平均光量 $8.6 \text{ E/m}^2 \cdot \text{日}$, 最小光量月 (12 月) 月平均光量 3.6 E/

$\text{m}^2 \cdot \text{日}$ であった。一方, 移植先 (水深 3.5 m) では年平均光量は $4.2 \text{ E/m}^2 \cdot \text{日}$ で, 最大光量月平均光量は $5.7 \text{ E/m}^2 \cdot \text{日}$, 最小光量月平均光量は $2.4 \text{ E/m}^2 \cdot \text{日}$ であり, 移植元よりいずれの光量も少ない。

移植先の光量はアマモ場造成の際に望ましいとする基準を満足しているが, 周年濃密な群落のみられる場所に比べ, 年平均値, 最大光量月光量がやや下回る。このことから, 移植場所はアマモ分布の光条件は満たすが周年濃密な群落を形成するには光量が不足していることが明らかになった。実際に図-4 に示すように, 当該海域では当初移植した濃密な群落は次第に密度を減じていった。しかし, 移植群落は低密度で残存し, 種子による再生産も見られ, 川端 (1996) の光量によるアマモ場評価指標の適用性が確認された。

なお, 当該海域の現在の濁度や透明度は移植時と大きく変化していない。移植後に徐々にアマモの株数が増加していることは, 移植された株や供給された種子のうち, 低光量に適応した個体が生残しているためではないかと推察される。

(4) 航走波環境

船種別の航行平均速度はフェリーで 12.0 knot , 高速船で 17.6 knot であった。航走波波高はフェリー・高速船別に現地航走観測結果より計算 (日本港湾協会, 1999; 日本海運集会所, 2003) したところ, フェリーで $0.4 \sim 0.5 \text{ m}$, 高速船で 0.1 m 程度である。同時期に, 中瀬ら (1999) は航路から 250 m 離れた地点で水圧センサー付電磁流速計による 7 日間連続観測を行っており, 航走波観測最大波高は $0.4 \sim 0.5 \text{ m}$ であった。なお, 水位変動記録からは, 船種別の波高の違いは確認できない。

底質の安定性をシールズ数を用いて検討するにあたり, 航走波作用回数の底質への影響の程度を式 (1), 式 (2) で表した。航走波高は発生源からの距離の $-1/3$ 乗で減衰する (倉田ら, 1983; 日本港湾協会, 1999) とし, 被覆材安定に関する Van der Meer の式 (土木学会, 1999) を参考に, 航走波作用回数の累乗の関数とした。

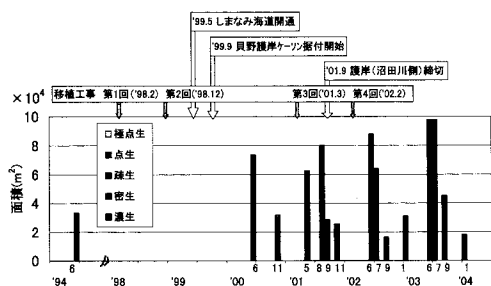


図-2 被度を考慮したアマモ群落面積の経年変化

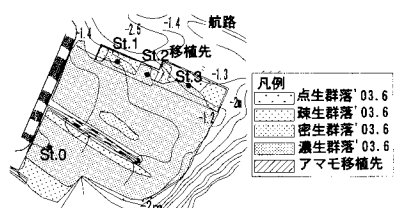


図-3 アマモ移植後の分布域と生育量観測点位置

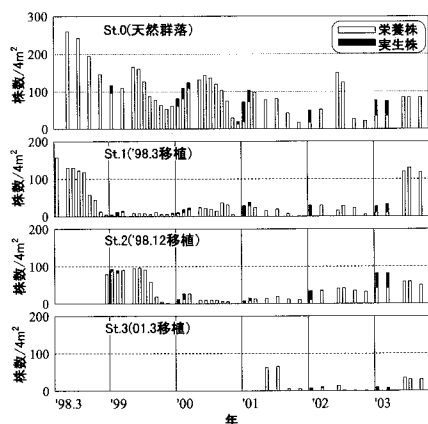


図-4 天然群落とアマモ移植先の株数の経年変化

表-1 各月および年間平均の水深別日平均光量算定結果

水深 (m)	水深 CDL 基準 (m)	光量減 衰 (%)	日平均光量月間平均値 ($\text{E/m}^2 \cdot \text{日}$)												年間 平均値
			4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	
海面直下	2.0	100.0	25.1	28.2	25.7	26.5	27.6	21.6	18.6	13.8	11.9	13.2	16.0	20.2	20.7
0.5	1.5	74.3	18.7	21.0	19.1	19.7	20.5	16.0	13.8	10.3	8.9	9.8	11.9	15.0	15.4
1.0	1.0	65.1	16.4	18.4	16.8	17.3	18.0	14.0	12.1	9.0	7.8	8.6	10.4	13.1	13.5
1.5	0.5	56.1	14.1	15.8	14.4	14.9	15.5	12.1	10.6	7.9	6.8	7.5	9.1	11.5	11.8
2.0	0.0	42.7	10.7	12.0	11.0	11.3	11.8	9.2	7.9	5.9	5.1	5.6	6.8	8.6	8.8
2.5	-0.5	30.3	7.6	8.6	7.8	8.0	8.4	6.5	5.6	4.2	3.6	4.0	4.8	6.1	6.3
3.0	-1.0	21.0	5.3	5.9	5.4	5.6	5.8	4.5	3.9	2.9	2.5	2.8	3.4	4.2	4.4
3.5	-1.5	20.1	5.0	5.7	5.2	5.3	5.5	4.3	3.7	2.8	2.4	2.6	3.2	4.0	4.2
4.0	-2.0	13.9	3.5	3.9	3.6	3.7	3.8	3.0	2.6	1.9	1.7	1.8	2.2	2.8	2.9
4.5	-2.5	9.7	2.4	2.7	2.5	2.6	2.7	2.1	1.8	1.3	1.2	1.3	1.6	2.0	2.0

$$y_1 = H_0(100/S)^{1/3} \cdot (\sqrt{N_1/N_2})^{0.1} \dots\dots\dots (1)$$

$$y_2 = H_0(100/S)^{1/3} \cdot (\sqrt{N_2/N_1})^{0.1} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 y_1 は以前の航走波最大波高、 y_2 は船舶数減少後の航走波最大波高、 H_0 は航走波の特性波高、 S は航跡中心線からの距離(m)、 N_1 は以前の航走波作用数、 N_2 は船舶数半減後の航走波作用数である。本研究では $N_1/N_2=2$ とした。

(5) 潮流環境

潮流観測時の流速計設置位置周辺はアマモが繁茂していた。図-5、図-6 に2000年8月と2003年7月における流速計設置位置及び同時期のアマモ生育調査点での標準草丈、被度をそれぞれ示す。2000年8月では標準草丈が43~96 cm、被度で最大75%、2003年7月では標準草丈が75~115 cm、被度で最大90%の生育が確認されており、アマモ草体が群落内の流れに影響を及ぼしていることが考えられた。

流向・流速計算結果と現地観測結果の流速絶対値は表-2のように、観測値は計算値の1/4~1/3を示している。森口ら(1999)は山口県大島郡で流速観測を行い、平均流速の最大値比較では密生区は無生区の1/2.3程度となり安定した環境を形成していると報じている。流速の低下の程度にはアマモ群落の存在が関与していると考えられる。

図-7は、移植先の計算潮流流速絶対値の1時間スカラー平均である。護岸延伸後の流速値は5~25 cm/sとなり、護岸延伸・締切によって、潮位変動にともなう潮流流速ピーク値が小さくなっていることがわかる。

(6) 底質安定性の評価

航行船舶の減少および潮流変化とアマモ群落分布範囲拡大との関連性を、4章4節のように評価した航走波および潮流作用時におけるシールズ数 ψ を用いて検討し、当該海域の波・流れ環境でのアマモ群落限界について評価することとした。比較対象時期は波・流れ環境変化前後の1994年9月と2003年6月とした。検討にあたり、アマモ群落分布調査結果から、6月、9月の季節の違いによるアマモ外縁位置の変動量が小さいことを確認した。

大潮時の1時間毎の潮位別にシールズ数を10 m格子間隔の平面領域で計算した。現地底質の中央粒径は0.18 mmとした。摩擦係数の評価には、田中・Sana(1996)の波、流れ共存場での摩擦則陽形式近似を用いた。航走波は航路から250 m離れた地点の波高が0.4 mに距離減衰する条件とした。また、中瀬ら(1999)の昼間、夜間の観測波高平均値から、定期船の航行しない夜間(22時~6時)の波高は昼間の0.4倍にした。

図-8にアマモ移植先全領域における平均シールズ数を潮位別に示す。これから、低潮時にシールズ数が増加することが分かる。

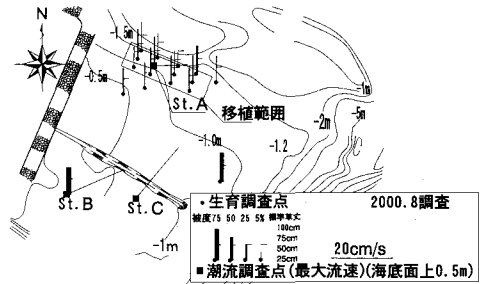


図-5 潮流観測地点とアマモ草丈・生育被度(2000年8月)

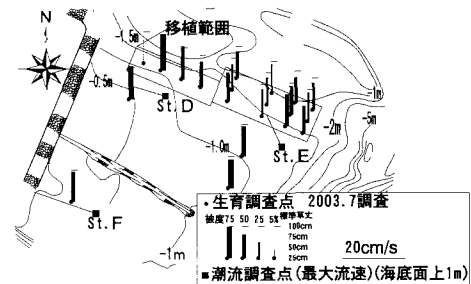


図-6 潮流観測地点とアマモ草丈・生育被度(2003年7月)

表-2 計算値と観測値の流速値比較によるアマモ群落の流速低減効果

対象期間	対象地点	流速値の期間平均(cm/s)		観測値/計算値
		計算値	観測値	
2000年8月	St. A	20.9	5.2	0.25
	St. B	18.6	6.6	0.35
	St. C	26.2	10.4	0.40
2003年7月	St. D	14.2	4.6	0.33
	St. E	22.5	1.4	0.06
	St. F	18.4	5.1	0.28

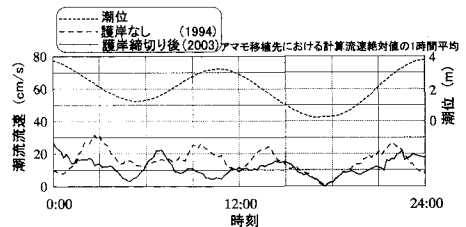


図-7 アマモ移植先の潮位別流速値の計算結果

なお、本研究では、アマモ群落の存在による波・流れの低減は考慮していない。潮流計算値の検証は行えていないが、潮流現地観測結果からもアマモ群落内の波動流速・潮流流速は周囲より低減しているため、以下の検討では面的にシールズ数を比較することは適切でないと考え、アマモ群落による波・流れの低減が生じにくい航路側外縁部(三原航路側)のシールズ数を評価した。

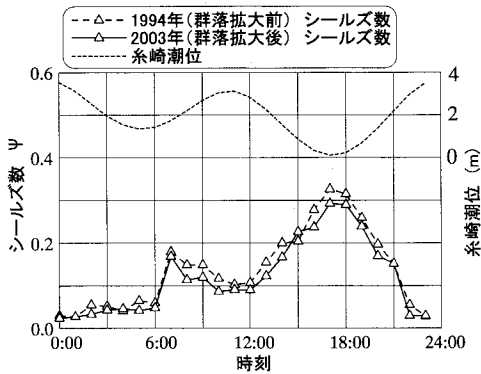


図-8 潮別別のシールズ数計算結果

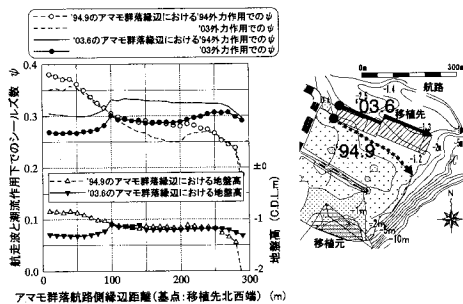


図-9 アマモ群落の航路側外縁におけるシールズ数

図-9 は、1994 年 9 月、2003 年 6 月での 2 つの群落外縁上において、1994 年、2003 年の 2 種類の外力条件下で計算した低潮時の最大シールズ数と地盤高である。地盤高は光環境からみた群落分布条件を満足している。また、波・流れ条件から当然であるが、2 つのアマモ群落外縁とともに、2003 年の外力作用でのシールズ数の方が 1994 年のものよりも小さい。1994 年での移植先北西端からの縁辺距離 100 m 以遠および 2003 年の全ての群落外縁上のシールズ数分布から判断して、アマモ群落限界シールズ数をほぼ 0.3 で評価できる。ただし、潮位、航走波波高、潮流条件（期望）により、シールズ数は変動するため、本研究でのシールズ数を既存文献と数値比較することは適切でない。

5. おわりに

移植直後に大きく減耗したものの、移植から 2～6 年が経過した現在も残存し、種子による再生産が確認されている広島県三原市地先の移植アマモ場を対象として、光条件および波・流れ条件からアマモ場物理環境を評価した。その結果、以下のことが明らかになった。

① 移植場所は、アマモ分布の光条件は満たすが、周年

濃密な群落を形成するには光量が不足していることが明らかになった。また、川端（1996）の光量によるアマモ場評価指標の適用性が確認された。

② 航走波作用回数と潮流を考慮したアマモ群落外縁におけるシールズ数により、底質の流動安定性の向上を示すとともに、アマモ群落限界を評価できた。

参考文献

- 石川雄介・川崎保夫・本多正樹・丸山康樹・五十嵐由雄（1988）：電源立地点の藻場造成技術の開発第 9 報 水中の光条件に基づくアマモ場造成限界深度の推定手法，電力中央研究所報告 U 88010，20 p.
- 春日井康夫・大山洋志・高畑利信・木邑聡美（2003）：尾道糸崎港人口干潟におけるアマモ場の回復，土木学会年次学術講演会講演概要集第 7 部，Vol. 58，pp. 71-72.
- 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，海工論文集，第 50 巻，pp. 1266-1270.
- 川崎保夫・石川雄介・丸山康樹（1990）：アマモ場造成の適地選定法，沿岸海洋研究ノート，Vol. 27，No. 2，pp. 136-145.
- 川端豊喜（1996）：水生植物による内湾域における環境修復，水産学シリーズ（110），厚生社恒星閣，pp. 79-93.
- 倉田克彦・小田一紀・平井住夫（1983）：浅海水路中の航走波の特性および繫留船舶に及ぼすその影響，第 30 回海講論文集，pp. 598-602.
- 国土交通省港湾局監修（1999）：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上巻），（社）日本港湾協会，pp. 132-138.
- 島谷 学・中瀬浩太・岩本裕之・中山哲蔵・月館真理雄・星野高士・内山雄介・灘岡和夫（2002）：興津海岸におけるアマモ分布条件について，海工論文集，第 49 巻，pp. 1161-1165.
- 田坂浩二・羽原浩史・高浜繁盛（2000）：ロジスティック回帰分析を用いたアマモ場造成適地の検討，土木学会中国支部第 52 回研究発表会発表概要集，VII-12，pp. 717-718.
- 田中 仁・Ahmad Sana（1996）：交差する波と流れによる抵抗則の検討，土木学会論文集，No. 533/II-34，pp. 273-277.
- 土木学会編（1999）：水理公式集，pp. 541-543.
- 中瀬浩太・田中裕一（1993）：海浜変形予測手法によるアマモ場成立条件の現地への適用，海工論文集，第 40 巻，pp. 1061-1065.
- 中瀬浩太・島谷 学・関本恒浩（1999）：船舶航跡波影響下のアマモ分布条件，海工論文集，第 46 巻，pp. 1196-1200.
- 中瀬浩太・百瀬泰彦（2002）：アマモの移植技術，電力土木，No. 298，pp. 66-69.
- 日本海運集会所編（2003）：日本船舶明細書 I，550 p.
- 日本海運集会所編（2003）：日本船舶明細書 II，350 p.
- 平岡喜代典・杉本憲司・玉置 仁・寺脇利信・岡田光正（2003）：防波堤建設による環境変化と移植アマモ場の拡大，水環境学会誌，Vol. 26，No. 12，pp. 849-854.
- 丸山康樹・五十嵐由雄・石川雄介（1987）：アマモ場適地選定手法一岸側の砂移動限界一，第 34 回海講論文集，pp. 227-231.
- 森口朗彦・高木儀昌・仲宗根琢磨・吉川浩二・團 昭紀・和泉安洋（1999）：分布特性の異なる 2 つのアマモ場における物理環境現地観測，水工研技報，Vol. 21，pp. 1-12.
- 森田健二・深瀬一之（1994）：広島市海域におけるアマモ場造成について，日本沿岸学会論文集，Vol. 6，pp. 97-102.
- 森田健二・竹下 彰（2003）：アマモ場分布限界水深の予測評価手法，土木学会論文集，No. 741，VII-28，pp. 39-48.