

夏季同時観測による東京湾奥部と湾口部におけるアマモ生育条件の比較

Effect of Suspended Particles from River on Eelgrass Survive in Summer

神尾光一郎¹・中村由行²・細川真也³

Koichiro KAMIO, Yoshiyuki NAKAMURA and Shinya HOSOKAWA

Field observations were conducted to investigate environmental conditions associating with eelgrass survive in Futtsu where natural eelgrass distributes and in Sanmaizu, in which eelgrass meadow does not exist. Water temperature and salinity did not differ between these areas, but light irradiance was lower in Sanmaizu. In addition, high turbidity due to suspended particles loaded from the Arakawa River was observed. These results suggest that light conditions in summer in Sanmaizu may be not adapted for eelgrass survival because terrestrial suspended particles prevented light from reaching eelgrass.

1. はじめに

かつての東京湾沿岸部においては、干潟とアマモ場が広がり、沿岸部では二枚貝などの漁業が営まれていた。しかしながら、高度経済成長期における沿岸部の都市化に伴う埋立等によって湾奥の干潟・アマモ場の大部分は消滅した。東京湾において、現在、アマモ場が存在する海域は、富津・盤洲・走水といった湾口部に近い海域に限られている(環境庁自然保護局, 1997)。東京湾湾奥の三番瀬においては、アマモのパッチ群落が確認されているものの、8月以降になるとアマモは枯死・流失することが報告されている(森田ら, 2003)。東京都水産試験場は、平成2年度～平成7年度に三枚洲において多年性アマモの移植試験を行ったが(図-1参照)、冷夏であった平成5年を除き、移植されたアマモは、夏季(7～8月)に全て消失した(東京都水産試験場他, 1994)。東京湾湾奥部においてアマモ場が成立しない理由の一つとしては、夏季の高水温や懸濁物による光量の低下が挙げられるが(森田ら, 2003)、詳細は明らかではない。

本研究では、アマモ場が存在しない東京湾湾奥部の三枚洲と、周年を通してアマモ場が存在する湾口部の富津を対象として、アマモの生育環境について同時比較観測を行い、東京湾湾奥部におけるアマモの分布を制限する要因について明らかにすることを目的とする。

2. 方法

(1) 現地観測

東京湾湾奥に位置する三枚洲と湾口に位置する富津に

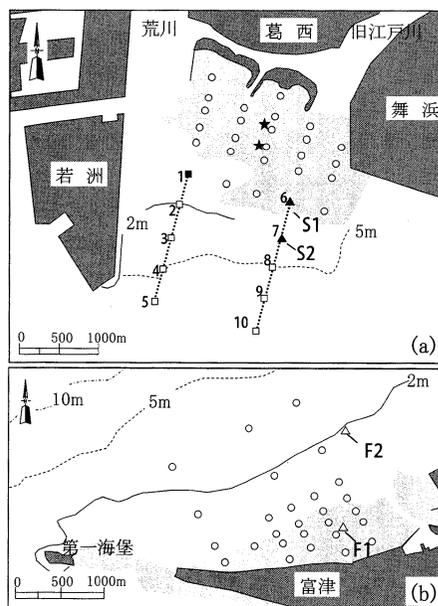


図-1 三枚洲(a)と富津(b)の調査測点。△: 定点観測, □: 鉛直分布観測, ○: 海草藻類調査, ▲: 定点観測・鉛直分布観測・海草藻類調査, ■: 鉛直分布観測・海草藻類調査。三枚洲(a)の点線は鉛直分布観測ライン(St.1～St.10)。★は東京都水産試験場によるアマモ移植試験場所(平成6年～平成7年度)。

おいて、2004年8月9日～9月9日の32日間に水質調査および海草藻類の分布調査を行った。水質調査においては、それぞれの海域で定点観測と鉛直分布観測を行った。定点観測の測点は、三枚洲の St.S1 と St.S2、富津の St.F1 と St.F2 とした(図-1)。St.S1 と St.F1 はそれぞれ D.L. ± 0.0m と D.L.+1.5m、St.S2 と St.F2 はいずれも D.L.-2m とした。すべての地点にメモリ式水質計を設置し、それらの水質計は St.S1 と St.F1 においては海底上0.1m、St.S2

1 (株)東京久栄環境創出部
2 正会員 工博 (独法) 港湾空港技術研究所
3 正会員 修(工) (独法) 港湾空港技術研究所

と St.F2 においては海底上1m に設置した。データは1分～10分間隔で取得した。測器は、水温・塩分・溶存酸素計 (MWQ-3: 三洋測器 (株)), 濁度・クロロフィル計 (CLW: アレック電子 (株)), 照度計 (MDS-Mk-V-L: アレック電子社 (株)) を用いた。鉛直分布観測は、三枚洲において、2004年8月17日に実施した。測定は、1潮汐間に計5回、多項目水質計 (ACL1183-PDK, AAQ1183-PDK, アレック電子 (株)) を用いて行った。測定項目は、水温、塩分、溶存酸素量 (DO), 濁度、クロロフィル a (Chl-a), 水素イオン濃度である。DO, 濁度、Chl-a については、各海域でランダムに採水を行い、採水サンプルの分析値を用いてキャリブレーションした。海草藻類の分布調査は、ダイバーにより30cm×30cm のコードラードを用いて海底面から約10cm の深さまでの底泥を採取し、1mm 目の網で篩をかけ網内に残留した海草藻類を採集した。採取した試料は、実験室に持ち帰り、種を同定した。

(2) データ解析

本研究では、定点観測地点 (St.S1, St.S2, St.F1, St.F2) においてアマモの生育下限水深を明らかにするため純光合成光量 (森田ら, 2003) を算出した。純光合成光量とは、水中光量から補償点光量を差し引いた光量であり、これが0となる水深がアマモの分布下限水深とされる。

$$I_n = I_z - I_c \quad (1)$$

ここで I_n は純光合成光量 ($\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$) , I_z は水深 z

表-1 各地点における水温と塩分の平均, 最大, 最小値.

測 点	水 温 (°C)	塩 分
三枚洲 (St.S2)	26.2 (23.2- 29.0)	28.2 (20.0- 32.8)
三枚洲 (St.S1)	26.8 (24.1- 29.7)	27.5 (12.3- 31.8)
富津 (St.F2)	25.5 (22.9- 27.8)	32.6 (29.5- 34.2)
富津 (St.F1)	26.9 (21.9- 33.8)	32.4 (29.4- 34.3)

対象期間: 2004/8/9 12:00- 9/9 11:50

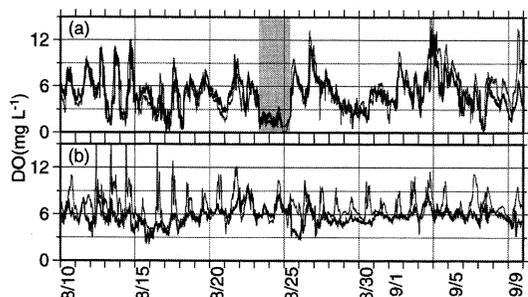


図-2 三枚洲 (a) と富津 (b) における DO の時系列。細線: St.S1 及び St.F1, 太線: St.S2 及び St.F2. 三枚洲において DO が3mg/l 以下が約2日間継続した期間をグレーで示した。

(m) における水中光量, I_c は補償点光量である。 I_z は、各測点で得られた水中光量のデータを用いた。補償点光量については、以下の式のとおりである (森田ら, 2003)。

$$I_c = 0.9712 \exp(0.10887z) \quad (2)$$

また、各点における光減衰特性を明らかにするため、次式により消散係数を求めた (杉森ら, 1985)。

$$K_d = \log(I_z / I_0) / z \quad (3)$$

ここで、 K_d 消散係数、 I_0 は海表面直下の光量である。海表面直下の光量 I_0 については、東京における1時間毎の全天日射量データから石川ら (1988) が用いた方法に従い推定した。

3. 結果

(1) 水温・塩分・DO の変動

各地点における水温の平均値は、25.5~26.9°C であり、富津の F1 において最も水温が高かった (表-1)。塩分の平均値は、三枚洲の方が富津よりも低く、三枚洲の St.S1 で12.3と最も低い値を示した (表-1)。DO は、三枚洲において8月23日~8月25日の約2日間にわたり 3mg L^{-1} 以下の低酸素状態が継続したが、富津においては 3mg L^{-1} を下回ることはほとんどなかった (図-2)。

(2) 純光合成光量

各地点における I_n は、富津の St.F1 において最も高く、三枚洲の St.S2 で最も低かった (表-2)。各地点における I_n の日変化は、富津の2点と三枚洲の St.S1 では、概ね正を示しているのに対し、三枚洲の St.S2 では大部分の期間において0以下を示していた (図-3)。観測期間の1日あたりの I_z は $4.0\sim 37.3 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ であり、 I_c に対して地

表-2 各測点における水中光量・補償点光量・純光合成光量

測 点	\bar{I}_z	\bar{I}_c	\bar{I}_n
三枚洲(St.S2)	1.4	1.5	- 0.1
三枚洲(St.S1)	3.9	1.6	2.4
富津(St.F2)	12.0	1.4	10.6
富津(St.F1)	37.3	1.6	35.7

単位: $\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

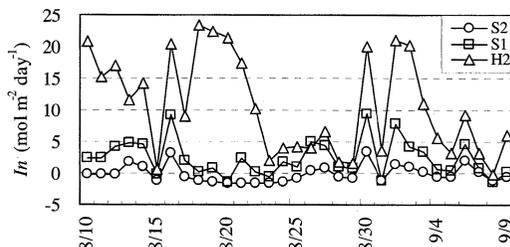


図-3 各地点における純光合成光量の日変化。St.F1については示していない。

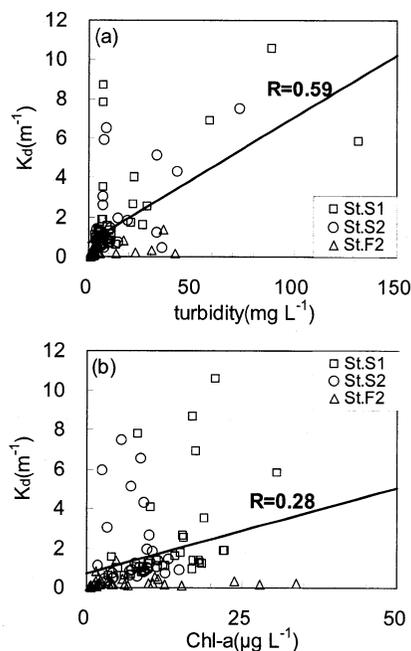


図-4 各地点における消散係数と濁度 (a) 及び Chl-a (b) の関係。図中の値は7:00~17:00の平均値、Rは相関係数を表す。

点間で大きな差が見られた(表-2)。Inは、富津よりも三枚洲において低く、両海域のIzの差がInの差を反映していた(表-2)。

(3) 消散係数と濁度・Chl-aの変動

St.S1, St.S2, St.F2の3地点で得られた消散係数と濁度・Chl-aの関係より、消散係数の変動はChl-aよりも濁度の変動によく一致していた(図-4)。また、三枚洲では、8月21日~23日(中潮~小潮)において濁度が低濃度であるにも関わらず、消散係数が著しく高くなっていった(図-5)。消散係数、濁度の日変化は、富津よりも三枚洲において高く推移していた(図-5)。

(4) 三枚洲における塩分と濁度の潮汐に伴う変動

三枚洲の荒川及び旧江戸川側の2断面における各潮時における塩分・濁度の断面を図-6に示す。荒川側の表層では塩分の低い水塊が分布していた。塩分躍層は、概ね海面下2m以浅にみられ、塩分の鉛直方向の勾配は、荒川側の断面において大きかった。濁度は、RUN3の荒川側の表層(海面下1m以浅)において 8mg L^{-1} 以上の濁度の高い水塊がみられた。また、底層においても濁度の高い水塊がみられ、特に荒川側のRUN4~RUN5において、底層の濁度が増加していた。

三枚洲の表層(海面下0.5m以浅)における濁度は、低塩分ほど高くなる傾向が認められ、一方、Chl-aは高塩分ほど高くなる傾向が認められた(図-7)。

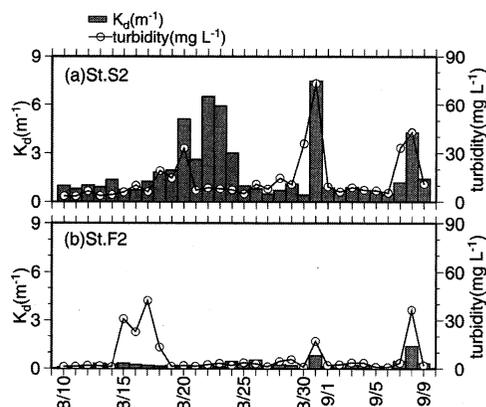


図-5 三枚洲 St.S2 (a) と富津 St.F2 (b) における消散係数、濁度の日変化。図中の値は7:00~17:00の平均値で示した。

(5) 海草藻類の分布

三枚洲において、植物類の出現は認められなかった。富津において、潮間帯を中心にアマモが確認され、St.F2に最も近い水深 D.L.-2m 付近の測点においても確認された。

4. 考察

(1) 両海域の特性から見たアマモ場の成立条件

純光合成光量は、アマモ場が存在する富津(St.F1, St.F2)において、アマモが生育していない三枚洲(St.S1, St.S2)よりも高く、概ね両海域のアマモ場の有無の違いを説明することができた(図-3, 表-2)。特に、三枚洲のD.L.-2m水深に相当するSt.S2(測器は海底上1mに設置)では、純光合成光量はほとんど0を示していたことから、この時期のD.L.-1m以深において、アマモは成立が困難であることが示唆される。一方、三枚洲のD.L.±0.0m水深に相当するSt.S1では、純光合成光量は正を示しているものの、過去に行われたアマモの移殖試験では、アマモは夏季に全て消失している(東京都水産試験場他, 1994)。アマモの生存は、個体における全呼吸量を補償する光量が要求されるのみでなく、葉の更新に必要な生産量を補償する光量が要求される(中村ら, 2005)。また、例えば葉の更新を補償する十分な光条件下であっても、生長点における局所的な酸素含量の低下によって、アマモは生存できなくなることが示唆されている(Graveら, 2003)。すなわち、純光合成光量は、これらの条件を含んでおらず、アマモの成立について過大見積となるため、St.S1における正の純光合成光量は必ずしもアマモ場の成立を意味するものではない。

三枚洲と富津の両海域における純光合成光量の差は、濁度による消散係数の増大(図-4, 図-5)によって生じ

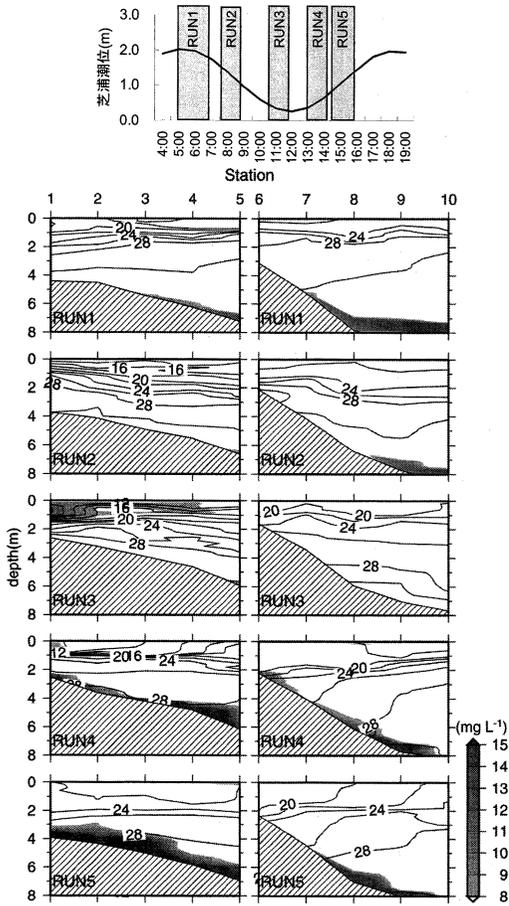


図-6 三枚洲における塩分と濁度の RUN1~RUN5での断面の変化 (2004年8月17日)。塩分は線、濁度は色コンター。左側は荒川側、右半分は旧江戸川側の断面の変化。

たものと考えられる。また、消散係数の変動は Chl-a よりも濁度の変動とよく一致したことから (図-4)、三枚洲の高い光量減衰に寄与する懸濁物粒子は、植物プランクトン等の生物態粒子ではなく、無機態粒子やデトリスといった非生物態粒子であることが示唆される。一方、アマモの生育を左右する光量の制限因子としては、水中の懸濁物粒子による光量減衰の他に、アオサ等の大型海藻類による光遮断の影響 (Hauxwell ら, 2003) やアマモ葉上の付着藻類の影響 (Brush ら, 2002; 杉本ら, 2006) が考えられる。三枚洲での生物調査結果からは、アオサ等の大型藻類は確認されなかったことから大型海藻による影響は無いと考えられる。付着藻類による光遮断については、アマモ葉上に付着した量の情報を把握する必要があるが、本研究では調査していない。今後、三枚洲において移植を行う上では、その影響についても把握する必要があると思われる。

溶存酸素は、三枚洲において、8月23日から25日の約2

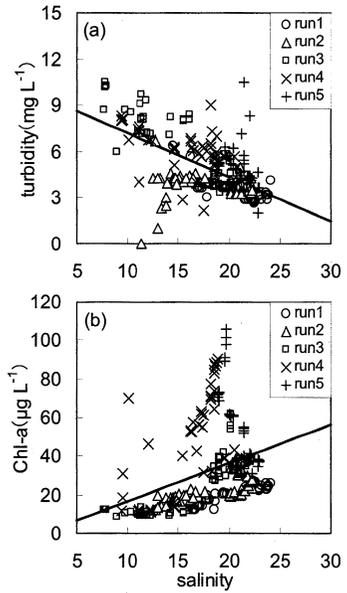


図-7 海面下0.5m以浅における塩分と濁度(a)、Chl-a(b)の関係。図中の実線は全データに対する近似直線を表し、相関係数 R は、(a) $R=0.62$ 、(b) $R=0.37$ 。

日間にわたり 3mg L^{-1} 以下の低酸素状態が継続していた (図-2)。アマモの生長点における酸素含量は、水温の上昇によって低下するとともに、水中の酸素濃度にも影響を受け、生長点の酸素含量の低下により、アマモの枯死を招くことが示唆されている (Grave ら, 2003)。夏季の比較的高い水温の条件で低酸素状態が継続した場合、アマモの生長点における酸素含量が低下し、枯死に至る可能性がある (Grave ら, 2003)。

一般に、高水温と低塩分は、アマモの生残に影響を与えることが知られている (Najrup ら, 2008)。しかしながら、水温は、地点間において約 1.4°C の差がみられ、アマモ場が存在する富津の St.F1において最も平均水温が高かったことから (表-1)、水温が三枚洲でのアマモの生育を制限する直接的な要因ではないと考えられる。塩分は、三枚洲において最も低い時で12であり、アマモは、塩分10%で枯死率は10%未満程度であるため (Najrup ら, 2008)、塩分が三枚洲でのアマモ生育を制限している要因になるとは考えにくい。

(2) 三枚洲における光環境を決定する要因

三枚洲において高い光量減衰に寄与する懸濁物粒子は、植物プランクトン等の生物態粒子ではなく、無機態粒子やデトリスといった非生物態粒子である可能性が高い (鷺見ら, 2001)。当海域は、荒川から淡水の流入を強く影響を受けている。鉛直分布観測の結果より、荒川側の断面の干潮 (RUN3) の表層 (海面下1m以浅) に

において、低塩分で濁度の高い水塊 (8mg L^{-1} 以上) が沖合へ流出していた (図-6)。これは、荒川から低塩分で濁度の高い水塊が表層へ供給されているためである (図-7)。このような表層における濁度の増加は、海面からの光量を減衰させ、アマモへの光量の利用を制限すると考えられる。また、中潮から小潮期に相当した8月21日~23日において、濁度・Chl-a が低濃度にも関わらず著しく高い消散係数が認められた (図-5)。三枚洲の底層において、例え低い濁度であっても、荒川河口においては小潮時に弱混合となることから (土肥ら, 1999)、この期間、荒川から淡水流入の影響により三枚洲の表層では高濁度となり、海底上において光量が低下した可能性が示唆される。一方、底層では、特に荒川側の断面において、上げ潮時 (RUN4~RUN5) に顕著な濁度の増加がみられたことから (図-6)、底層に沿って濁度の高い水塊が輸送されてきたことが考えられる。これは、荒川から海域へ流入した懸濁物が海水中で凝集され (鷺見ら, 2001)、一旦は河口流路部に堆積した粒子が、上げ潮時に巻き上げられながら輸送されてきた可能性が示唆される。RUN5でみられたように、表層で濁度が低く底層で濁度の高い層が発達した場合、底層付近において光量が大きく減衰することが想定され、アマモの草丈の高さに依存して、アマモへの光量の利用を制限する可能性がある。すなわち、アマモの草丈の高さが、底層付近の光量の減衰が大きくなる水深よりも下層に位置していれば、アマモ葉上に到達する光量は大きく低下するため、アマモは光量の利用を制限される可能性がある。実際には、アマモの生育水深における光量は、懸濁物粒子濃度だけでなく、海面から入射する光量と潮位振幅との組み合わせで決定されるため、これらを考慮して評価する必要がある。

以上の結果より、三枚洲周辺では、荒川を起源とする無機態粒子やデトリスといった非生物態粒子を主体とした懸濁物粒子が表層と底層から供給されており、それらが当海域の高い光量減衰を支配していると考えられる。

5. おわりに

本研究では、アマモが衰退する夏季を中心として、アマモ場が存在しない三枚洲と現存する富津において同時比較観測を行った。アマモ場の成立条件からみた二つの海域の違いは、純光合成光量で概ね説明できることが示された。三枚洲において、光量減衰を増加させる要因として、荒川を起源とした懸濁物粒子の供給が示唆される。水温の上昇によりアマモの呼吸量が増大し、より強い光量を要求する夏季においては、河川からの懸濁物粒子の

供給がアマモ場の成立条件に影響を与えていることが示された。

本研究の結果は、東京湾湾奥部においてアマモ場再生を目指す上で、栄養塩負荷量の削減だけでなく、河川や海底からの懸濁物による光量減衰の影響を無視できないことを示しており、光量の減衰に関わる河川や海底からの懸濁物の挙動について把握する必要性を示唆している。

謝辞: (独)港湾空港技術研究所の井上徹教氏には、現地調査並びに本論文作成にあたり有益な助言をいただいた。(株)東京久栄の森田健二氏には、本論文作成にあたり有益な助言をいただいた。資料収集に際しては、東京都島しょ農林水産総合センターの小泉正行氏から快く資料を提供していただいた。なお、本研究の遂行にあたっては国土交通省関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所の方々にお世話になった。

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法, 電力中央研究所報告 U88010, 20 p.
- 環境庁自然保護局 (1997) : 日本の干潟・藻場・サンゴ礁の現況 第2巻 藻場, 海中公園センター, 400 p.
- 杉本憲司・平岡喜代典・太田誠二・新村陽子・寺脇利信・岡田光正 (2006) : アオサ類の堆積によるアマモ場への影響, 水環境学会誌, Vol. 29, No. 5, pp. 269-273.
- 杉森康宏・坂本亘 (1985) : 海洋環境光学, 東海大学出版会, 356 p.
- 東京都水産試験場・株式会社東京久栄 (1994) : 内湾藻類移植等試験報告, 平成7年度, 79 p.
- 土肥学・志村光一・布村明彦・山田正・吉川秀夫 (1999) : 荒川感潮域における水質の縦断分布とその時空間変動特性に関する現地観測, 河川技術に関する論文集, 第5巻, pp. 47-52.
- 中村由行・細川真也・神尾光一郎 (2005) : メソコスム水槽を用いた光環境がアマモの生長に及ぼす影響に関する研究, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 1006-1010.
- 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.
- 鷺見栄一・鋤崎俊二 (2001) : 沿岸海域の懸濁物粒子の粒径分布の現地測定とデトリス分布, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1101-1105.
- Brush, M. J and S. W. Nixon (2002) : Direct measurements of light attenuation by epiphytes on eelgrass *Zostera marina*, Mar. Ecol. Prog. Ser., Vol.238, pp. 73-79.
- Grave, T. M., J. Borum and O. Pedersen (2003) : Meristematic oxygen variability in eelgrass (*Zostera marina*), Limnology and Oceanography, 48(1), pp. 210-216.
- Hauxwell, J., J. Cebrian and I. Valica (2003) : Eelgrass *Zostera marina* loss in temperate estuaries: relationship to land-derived nitrogen loads and effect of light limitation imposed by algae, Mar. Ecol. Prog. Ser., Vol.247, pp.59-73.
- Nejrup, L. B. and M. F. Pedersen (2008) : Effect of salinity and water temperature on the ecological performance of *Zostera marina*, Aquatic Botany, Vol. 88, pp. 239-246.