土木学会論文集B2（海岸工学）
Vol. 68，No. 2，2012，I_1076-I_1080

マングローブ河口から海草藻場に至る複合水域内の栄養塩時空間変動

Spatial and Temporal Distribution of Nutrients from Mangrove River Mouth to Seagrass Bed

寺田一美[1]・清水啓一[2]・玖津見将史[3]・高瀬照久[4]・神野有生[5]

Kazumi TERADA, Keiichi SHIMIZU, Masashi KUTSUMI, Teruhisa TAKASE and Ariyo KANNO

Many subtropical estuaries have the interlinked ecosystem of mangroves, seagrass beds and coral reefs and have kept the delicate balance in nature. This study investigated the spatial and temporal variation of nutrients (NH_4-N, NO_3-N, PO_4-P, TOC and SS), physical parameters (DO) and water currents in discussing the differences in between mangrove river to seagrass beds. TN and NH_4-N in the mangrove river mouth were 2~5 times higher than in seagrass bed. PO_4-P increased in seagrass beds at the low tide. It means that the ebb tide could have triggered the elution of PO_4-P from the bottom in seagrass bed. Water current exhibited the strong seaward flow in the ebb tide and circulating flow in the northeast of the bay. These movements could have affected the material exchanges between the mangrove and adjacent seagrass beds.

1. はじめに

熱帯・亜熱帯沿岸域には，マングローブ，海草藻場，サンゴ礁から成る複合的な生態系が形成されており，これらは魚類の生息地提供（Verweijら，2006）や有機物や栄養塩等の物質交換（Kathiresan and Nabeel，2011）の観点から互いに深く関連しあうと考えられてきた．複数の生態系がこのように隣接して存在することは，生物相の多様性に貢献するだけでなく，津波や波浪等の軽減にも役立つと報告されている（Kathiresan and Rajendran，2005）．

このような複合生態系に関する研究例としては，マングローブ河川からサンゴ礁リーフ海域間の流動特性と水温変動を解析した例（田村・灘岡，2005）や，マングローブ河口からサンゴ礁に至るトランセクト上で植物プランクトンの生産性やDO，POC，TOCについて現地調査を行った例（Nabeel and Kathiresan，2012）があり，マングローブを起源とする有機物の存在が隣接生態系の一次生産に大きく寄与することが示唆されている．一方海草藻場に関しては，実験室内にて海草アマモの栄養塩吸収・溶出特性を調べた研究（井上ら，2002）や，海草葉内のδ^{13}C，δ^{15}Nを調査した例（Yamamuro，2005）がある．マングローブから海草藻場，サンゴ礁の各生態系における特徴把握，ならびに近接する生態系間での物質交換・相互関係は意欲的に研究が進められてきたが，現場における流動と水質，特に栄養塩に関する見識はいまだ不足しているのが現状である．またマングローブ河川は，降雨時の土砂流出を緩和し，溶存態栄養塩を沿岸域へ供給する機能を持つことが示唆されており（寺田ら，2007），本来貧栄養である亜熱帯海域において，マングローブ河川起源の窒素およびリン等の栄養塩は，海草藻場にとって貴重な栄養源であるはずだが，どの栄養塩がどこまで流出し，どの程度の濃度を保っているのか，その実態は不明な点が多い．そこで本研究ではマングローブ河口から海草藻場にいたる広域において詳細な現地観測を行うことにより，マングローブ－海草藻場間での水質変動を把握することを目的とした．

2. 研究方法

（1）観測概要

現地観測はマングローブ林，海草藻場，サンゴ礁の複合的な生態系が存在する沖縄県石垣島にて行った．石垣島北西部に位置する吹通川マングローブ沿岸域には約0.15 km^{2}のマングローブ林がクリークに沿って網目状に広がり，その優占種はヤエヤマヒルギ（*Rhizophora stylosa*），オヒルギ（*Bruguiera gymnorrhiza*），メヒルギ（*Kandelia candel*）である．マングローブ河口から海草藻場までの水質変動を検討するため，河口から約100～200 m間隔で計5つの観測地点を設け（Stn.A～E，図-**1**），満潮時（7:00）から干潮時（17:00）にかけて約10時間，定点調査を行った．観測は2011年7月31日から2日間の大潮期に行った（図-**2**）．観測期間中の有義波高は平均0.14～0.15 mと静穏状態であり，降水量は両日ともに0 mm d^{-1}であり，天候による観測への影響はないものと思われた．調査項目として，多成分水質計（AAQ125: JFEアドバンテック株式会社製）による塩分，DO等の鉛直分布計測，表層水の採水を行った．採取した水サンプルは採取後すぐに冷凍保存・空輸し，東海大学および東京大学の実験

1 正会員 環博 東海大学工学部土木工学科講師
2 非会員 学(工) 東日本旅客鉄道株式会社
3 学生会員 学(工) 東海大学大学院工学研究科土木工学専攻
4 非会員 学(工) (株)冨士土木
5 正会員 環博 山口大学大学院理工学研究科助教

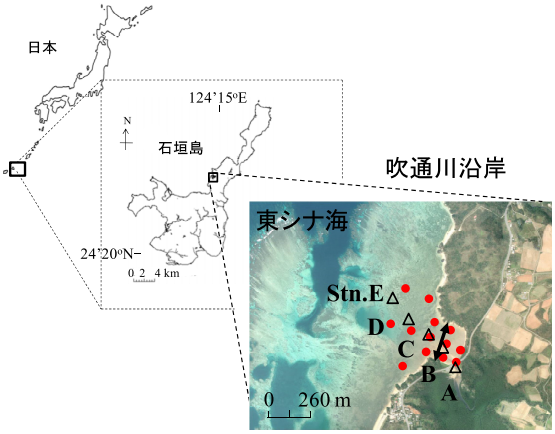

図-1　吹通川における観測地点（●：海草分布調査地点，△：水質調査地点Stn.A～E，矢印：流速測定地点）

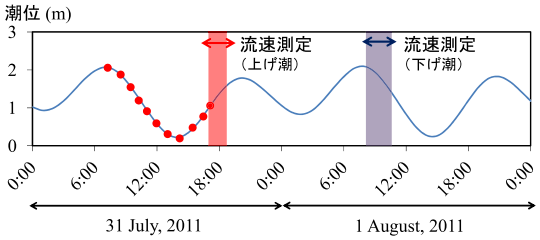

図-2　石垣島における潮位と観測時間（●：海草・水質調査時間）

室において窒素，リン，SS等の栄養塩分析を行った．栄養塩濃度は携帯型吸光光度計DR890（HACH社製），オートアナライザーAACS3（ブランルーベ社製），TOC-V CPH/CPN（島津株式会社製）を用いて定量化した．

（2）海草分布調査方法

環境省による平成23年度モニタリングサイト1000（モニ1000）沿岸域調査報告（環境省自然環境局，2012）によると，吹通川沿岸には約9種類（マツバウミジグサ，コアマモ，ウミヒルモ類，ベニアマモ，リュウキュウスガモ，リュウキュウアマモ，ボウバアマモ，ウミジグサ，ウミショウブ）の海草の生息が確認されている．だが具体的にどの地点に，どの種が，どれくらいの被度で生息しているのか，詳細な分布マップは明らかでなく，本研究ではまず吹通川沿岸域における海草分布調査を行った．調査は日本自然保護協会発行のジャングサウォッチ手法（日本自然保護協会, 2006）に基づき，シュノーケル，50 cm四方のコドラードを用いて，図-1中の●地点計12ヶ所において海草の種，被度の判定を行った．調査日時は水質調査と同日の2011年7月31日の干潮時とした．この現地調査結果を基に，航空写真（GEOSPACE：日本地図センター）の目視判定を行い，海草分布域を推定，マップ化を試みた．

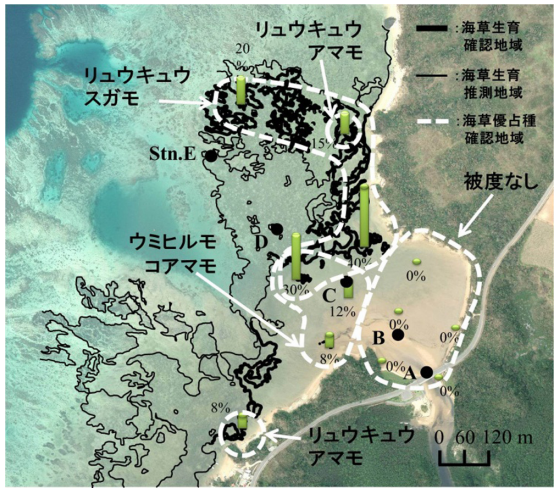

図-3　吹通川沿岸域の海草主要種分布と被度（%）

（3）流速測定方法

マングローブ河口から海草藻場までの流れ場を測定するため，ドップラー流向流速計（River Cat ADP：YSI/Nanotech Inc.）を用いて，河口断面の流速分布を計測した．測定はカヌー後部に取り付けたRiver Cat ADPを曳航し，図-1中に示す河川断面を往復することで行った．調査期間は2011年7月31日の上げ潮時と翌2011年8月1日の満潮～下げ潮時（図-2）とした．

3. 研究結果

（1）海草分布調査結果

海草分布の被度調査結果および空中写真を用いた分布推定地域を図-3に示す．図中棒グラフは各調査地点の被度を，破線は各分布域の優占種を表す．また，図中の黒（太）ラインによるトリミング領域は，現地で海草の生息が実際に確認された地域を示し，黒（細）ラインでトリミングされた地域は航空写真の目視判定による生息推定地域を示す．現地調査の結果，河口に近いStn.A，B付近では海草が生息していなかったものの（被度なし），その沖合の澪筋近辺（Stn.C，D）から小型のウミヒルモ・コアマモ等が，さらに沖合（Stn.E）では中型のリュウキュウアマモ，リュウキュウスガモ等の生息が確認された．またコドラード外の水深が比較的深い地点にウミショウブの生息が確認された．これらの分布調査結果を基に，マングローブ河口から海草藻場までほぼ等間隔になるよう水質観測地点を決め，水質変動を検討した．

（2）栄養塩平均値（地点間の比較）

各調査地点における調査期間中（計10時間）の栄養塩平均値を見ると（図-4），TN，NH_4-Nはマングローブ河口のStn.Aで最も高く，沖合に向かって減少傾向にあっ

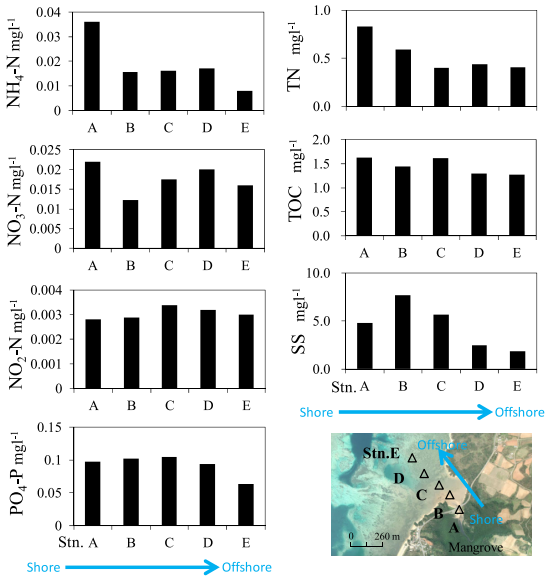

図-4　各調査地点における10時間平均栄養塩

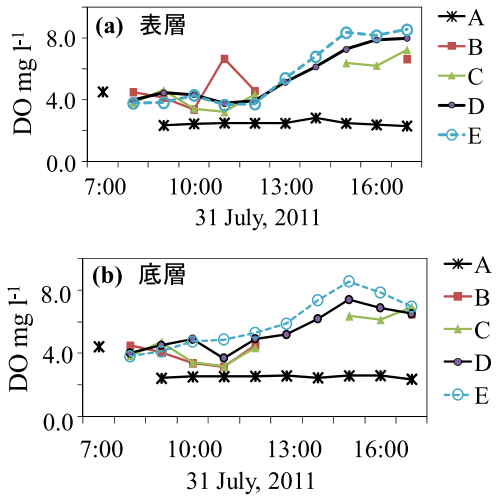

図-5　Stn.A～EにおけるDO（表層（a），底層（b））の時間変化

た．Stn.Aの平均濃度は，Stn.Eの約2倍（TN），5倍（NH_4-N）と高濃度であり，TN，NH_4-Nはマングローブ河川からの流出が支配的で，海草藻場に向かって海水希釈されていると推察された．またSSはStn.Bで最も高く7.7 mg l^{-1}を示した．これは干出後の巻きあがりによって高濁度の水塊が存在したことに起因すると思われる．その後Stn.C，D，Eと減少したことから，SSも同様に河川からの寄与が大きいと考えられる．一方NO_3-Nの平均値は，Stn.Aで最も高い0.022 mg l^{-1}を示し，Stn.Bでは0.012 mg l^{-1}と減少したが，その後StnC，Dと増加傾向に転じた．同様にNO_2-N，PO_4-Pも，海草が生息するStn.C近辺で増加したことから，NO_3-N，NO_2-N，PO_4-Pはマングローブ河川からの流出負荷だけではなく，底泥からの溶出や地下水の浸み出し等，他の供給源が大きく関与することが推察された．

次に，PO_4-P，NO_3-N，NO_2-Nは溶出し，NH_4-Nにはそのような傾向が見られない理由を，各地点の表層・底層でのDOの測定結果を用いて検討した．多成分水質計を用いて計測した各地点の表層DO（図-5（a））と底層DO（図-5（b））の時系列変動を見ると，Stn.Aは満潮の7:00を除いた全ての時間帯で，表層，底層共に2.8 mg l^{-1}以下の貧酸素状態であった．一方，Stn.B～Eは13:00以降には4.0 mg l^{-1}以上であり，沖合に行くほど高DO状態であった．つまり，Stn.C近辺では底層も高酸素状態であったため，窒素はNH_4-NではなくNO$_2$-NやNO$_3$-Nとして溶出したものと推測される．また，Stn.Aは貧酸素状態のためNH_4-Nが他地点よりも高濃度となったものと考えられた．

（3）栄養塩時空間変動（時系列変動）

上記で確認された水質変動をより詳細に把握するため，各地点における栄養塩の時系列変化（図-6）を検討した．図-6の左列の結果を見ると，Stn.AからStn.Eにかけて全地点で干潮時の14～16時にPO_4-Pが増加していた．16時の各地点におけるPO_4-P濃度は，河口のStn.Aで0.15 mg l^{-1}，Stn.Bは0.37 mg l^{-1}，Stn.Cは0.23 mg l^{-1}，Stn.Dは0.28 mg l^{-1}と，河口よりも沖合のStn.B，C，Dのほうが高濃度を示していた．これは図-4で見られた傾向と一致し，すなわち海草分布域でPO_4-Pが増加することを意味している．特にStn.B，Cは干潮時の13～15時に干出し，その直後にPO_4-Pが急増していた．Stn.B，Cは他の地点に比べ砂州状に土砂が堆積し，干出しやすくなっていたことから，底層の間隙水が下げ潮による沖向きの流れにより滲出し，結果的に濃度上昇につながったのではないかと推測された．一方SSは，Stn.B，Cの下げ潮時に大きな変動が見られ，特にStn.Bでは干出した直後に30.7 mg l^{-1}と高い値を示した．TOCは地点差および時系列変化はほぼ見られなかった．TNの平均値はStn.Aが最も高かったが，時間変動をみると干潮時の11:00~13:00にかけて急上昇し，ピーク値は2.6 mg l^{-1}を示していたことがわかった．

（4）流速プロファイル

地点毎の栄養塩変動が，流動によってどのように影響を受け得るのかを検討するため，湾口断面の流速プロファイルを測定した．測定した結果のうち，2011年7月31日18:14～18:24の上げ潮時（図-7（a）），2011年8月1日10:10～10:16の下げ潮時（図-7（b））の水平2次元流速分布を図-7に示す．左列は最上層0.40 m水深の結果を，右列は0.70 m水深の結果を表す．上げ潮時（図-7(a)）には，水深0.40 mの層で左岸から右岸にかけてほぼ一様に，陸

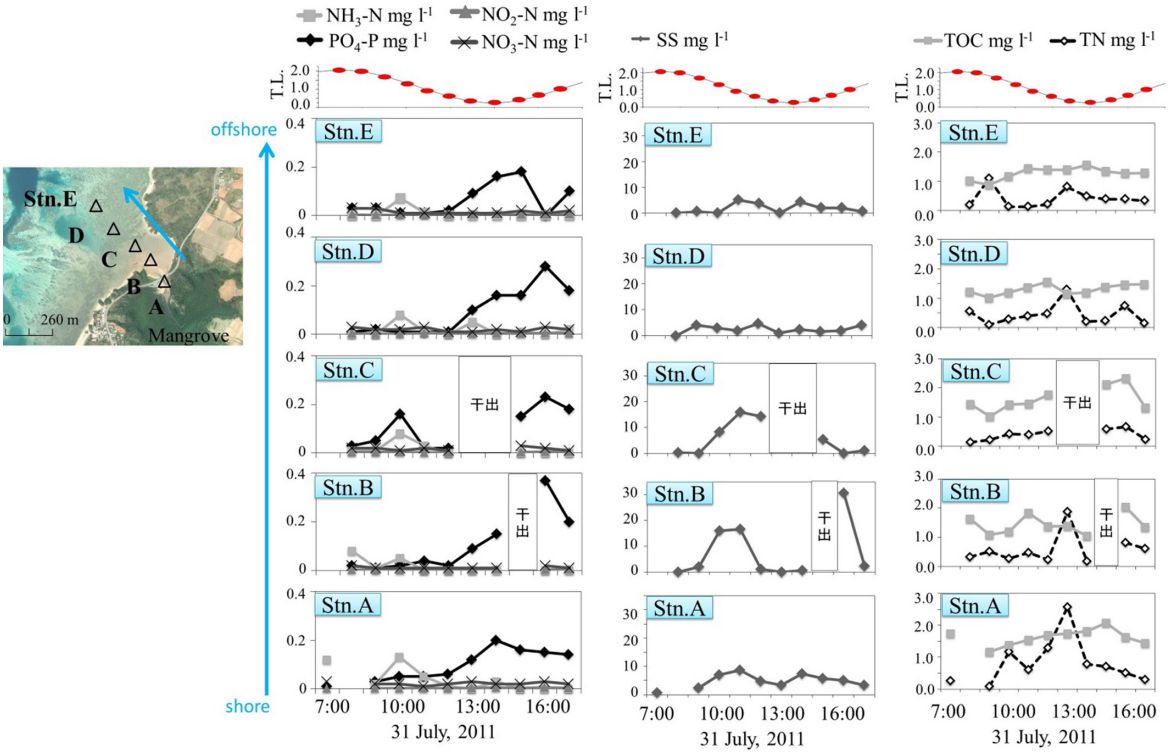

図-6　マングローブ河口（Stn.A）から海草藻場（Stn.E）における栄養塩時系列変動

向きに平均11.8 cm s^{-1}の流れが計測された．これは田村ら（2005）が同沿岸域で計測した流速（最大10 cm s^{-1}）とほぼ同レベルである．

下げ潮時（図-7(b)）は，断面中央の澪筋Stn.B－C近辺（図中測点番号5～10）で，平均17.3 cm s^{-1}の強い流れが確認された．右岸では北から南西方向の流れが見え，潮汐変動に伴う河川フラッシュにより，湾北東域に循環流が形成されていることが示唆された．

栄養塩の結果（図-4，6）と合わせて考えると，マングローブ河口Stn.A，Bから流出した栄養塩が，下げ潮時にはこの強い流れに乗って湾口の海草藻場域へ流出することが示唆された．ただしStn.D，E近辺の沖合リーフ域では，汀線に沿って北東から南西に向かう沿岸流が確認されており（井上ら，2006），湾外サンゴ礁域へどれほど流出しているかは現時点では不明である．

海草はSSを補集し，堆積物中の栄養塩を根から吸収し，自身の一次生産，周辺水域の浄化に役立てている（Evrardら，2005）．本調査地である吹通川では，下げ潮時の河川フラッシュにより循環流が発生することにより，湾内外からの流入物質が沈積しやすい環境であること，またその堆積物が分解され，底層から溶出することにより，PO_4-P等の栄養塩が海草藻場にて再利用され得

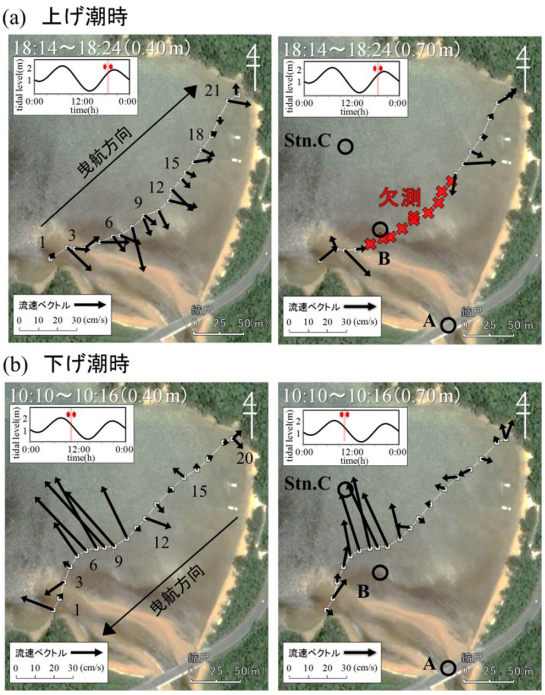

図-7　吹通川沿岸域における上げ潮（a），下げ潮（b）時の流速分布（左:0.4 m深，右:0.7 m深．図中の数字は測点番号を示す．）

ることが示唆された．

4. まとめ

本研究ではマングローブ河口－海草藻場間において，水質の時空間変動を検証するため，沖縄県石垣島吹通川沿岸域にて定点連続観測を行った．その結果，PO_4-P，NO_3-N等の栄養塩は，マングローブ河口から約300 m沖合の海草藻場近辺で増加したことから，これらの栄養塩はマングローブ河川からの流出に加え，海草底質・地下水等からの溶出の影響が大きいと推察された．またその傾向は干潮時に顕著であり，栄養塩溶出が引き潮によって促進される可能性が示唆された．

また流速測定の結果，下げ潮時には澪筋に沿って沖向きに強い流れ場が生じ，湾北東部に循環流が発生することが判明した．これらの流動によってマングローブ河川－海草藻場間の物質交換が促進されていることが示唆された．

謝辞：本研究の現地観測，化学分析の一部は東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻水圏環境デザイン研究室の機器を拝借し実施致しました．また現地観測を行うに当たり，流速測定にはYSI/Nanotech Inc.の中田正人氏に，カヌー傭船には石垣島シーカヤックツーリング＆ネイチャーウォッチング「めがろぱ」の兼村憲次氏にご助力いただきました．ここに記して深謝します．

参 考 文 献

井上公人・西村　修・須藤隆一・田中　仁（2002）：海草アマモの葉条部及び根茎部の栄養塩吸収・溶出機能，日本沿岸域学会論文集，14，pp.115-123．

井上徹教・細川真也・内村真之・神尾光一郎（2006）：サンゴ礁－海草藻場間でのリン・窒素輸送に関する現地観測，港湾空港技術研究所資料，No. 1148．46 p.

環境省自然環境局生物多様性センター（2012）：モニタリングサイト1000磯・干潟・アマモ場・藻場調査報告書，416 p.

田村　仁・灘岡和夫（2005）：石垣島吹通川河口域のサンゴ礁―藻場―干潟―マングローブ連成系における水理及び温熱輸送特性，海岸工学論文集，Vol. 52，No.2，pp.1016-1020．

寺田一美・鯉渕幸生・磯部雅彦（2007）：現地観測に基づく潮汐卓越型マングローブ域における物質収支，海工論文集，vol.54，pp.1056-1060．

日本自然保護協会（2006）：ジャングサウォッチハンドブック，36 p.

Evrard, V., W. Kiswara, T. J. Bouma and J. J. Middelburg (2005) : Nutrient dynamics of seagrass ecosystems : 15N evidence for the importance of particulate organic matter and root systems, Mar. Ecol. Prog. Series, Vol. 295, pp. 405-434.

Kathiresan, K. and M. A. Nabeel (2011) : Tropical coastal ecosystems: Rarely explored for their interaction! Ecologia, 1, pp. 1-22.

Kathiresan, K. and N. Rajendran (2005) : Coastal mangrove forests mitigated tsunami, ECSS, 65 (3), pp. 601-606.

Nabeel, M. A. and K. Kathiresan (2012) : Phytoplankton productivity in interlinked mangroves, seagrass and coral reefs and its ecotones in Gulf of Mannar Biosphere Reserve South east India, Marine Biology Research, Vol. 8, Issue 1, pp. 61-73.

Verweij, M. C., I. Nagelkerken, D. de Graaff, M. Peeters, E. J. Bakker and G. van der Velde (2006) : Structure, food and shade attract juvenile coral reef fish to mangrove and seagrass habitats: a field experiment, Mar. Ecol. Prog. Series, Vol. 306, 11, pp. 257-268.

Yamamuro, M., Y. Umezawa and I. Koike (2004) : Internal variations in nutrient concentrations and the C and N stable isotope ratios in leaves of the seagrass Enhalus acoroides, Aquatic Botany, Vol. 79, pp. 95-102.