

大潮期におけるマングローブ水域の溶存酸素と 栄養塩の時空間変動

SPATIAL AND TEMPORAL VARIATION OF DISSOLVED OXYGEN AND
NUTRIENT IN MANGROVE ESTUARY DURING SPRING TIDE

寺田一美¹・鯉渕幸生²・磯部雅彦³

Kazumi TERADA, Yukio KOIBUCHI, Masahiko ISOBE

¹学生会員 環修 東京大学新領域創成科学研究科 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

²正会員 工博 東京大学講師 東京大学新領域創成科学研究科 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

³フェロー 工博 東京大学教授 東京大学新領域創成科学研究科 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

In the Fukido-river mangrove area in Ishigaki Island, Japan, field observations and water, sediment analyses were conducted to investigate spatial and temporal variations of physical environment (salinity, Dissolved Oxygen) and dissolved nutrient ($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{SiO}_2\text{-Si}$, DOC-C). In addition, through experiments in the field, we quantified the nutrient release from sediments in mangrove creeks. DO in mangrove creeks increased with high DO seawater flowing into creeks, and decreased during ebb tide by consumption. Continuous observations in mangrove creeks showed $\text{NO}_3\text{-N}$ and DOC-C increased in the dense mangrove area. $\text{PO}_4\text{-P}$ also increased there, but was adsorbed to particulate matter and more likely to be diluted with seawater. Under aeration system, the release of $\text{NH}_4\text{-N}$ increased obviously and the average release rate was $28 \text{ mgN/m}^2/\text{day}$. This gave close agreement with $\text{NH}_4\text{-N}$ increase in creeks.

Key Words: Mangrove estuary, Dissolved oxygen, Nutrient release experiment, Tidal dynamics,

1. はじめに

熱帯河口域に群落を作るマングローブは、陸地の保全や水産生物の産卵・保育場として食糧資源確保に重要な位置を占めている。マングローブは、膝状の根や幹から垂らす支柱根などの特異な形態を持ち、樹木そのものが抵抗として働き河川の流れを変えるため、土砂の堆積量がきわめて大きく、河道内の土砂動態ならびにサンゴ礁などの沿岸生態系への影響も大きいと考えられる。近年、沖縄県では農地からの赤土流出¹⁾による沿岸域の土砂堆積やサンゴ枯死が問題となっており、上流河川、マングローブ、沿岸生態系すべてを含んだ総合的な水域管理が望まれている。

これまでマングローブに関する研究は生態・生理学的な調査²⁾からはじまり、近年では河川の土砂管理³⁾、エスチュアリー流動に注目した研究⁴⁾に加え、炭素や窒素、リンなどの栄養塩に注目した研究⁵⁾など、幅広い分野から研究が進められてきた。だがマングローブ水域を中心とした物質循環に関しては、オーストラリア東海岸⁶⁾や

フロリダ⁷⁾などの調査結果があるものの、物質収支は潮位差の大小に大きく左右されるため、その挙動には地域差が大きい。またクリーク内の流動だけでなく、マングローブ林の面積や、構成される樹種、後背地の影響などによっても違いが出てくることが予想され、様々な形態のマングローブ水域で調査を重ねることが必要である。さらにマングローブ水域の物質収支に関する研究⁸⁾⁹⁾の多くが、マングローブ林の上端、もしくは下端などでの水質変動を調査したものにとどまり、マングローブクリーク内でどのような現象が起こっているのか、その詳細はまだまだ明らかでない。

一方、窒素やリンの収支を、マングローブ水域のような感潮帯で検討するには、水-底泥間の交換量を把握する必要があるが、マングローブ底泥からの栄養塩溶出現象に関する知見は極めて乏しい。

底泥からの溶出現象については、中村ら¹⁰⁾や、井上ら¹¹⁾が、現象を水-底泥間の拡散現象とみなし、干潟のコアサンプルを用いた実験による拡散係数の推定や、ボックスモデルでの湾単位の溶出フラックス算定などを試みている。しかし、現地での溶出フラックスの実測データ

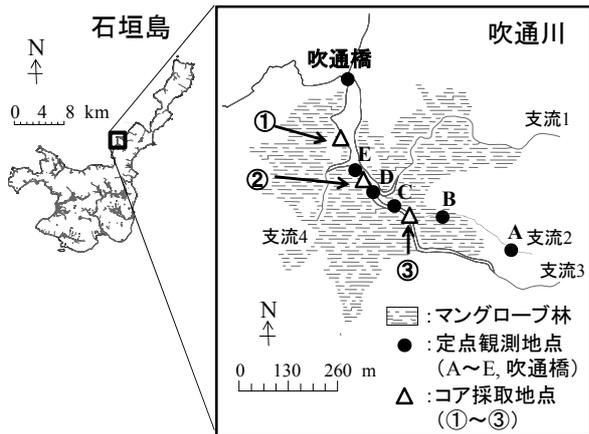


図-1 観測地点

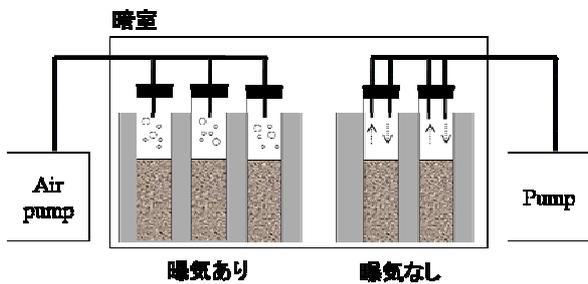


図-2 実験装置の概略図

は圧倒的に不足しているのが現状であり、一般的な干潟とは違い複雑な地形と生態をなすマングローブ水域での栄養塩溶出の挙動はいまだ十分に明らかにされていない。

本研究では、マングローブクリーク内での窒素、リン、炭素の挙動を把握するため、沖縄県石垣島マングローブ河川において、クリーク内で多点連続調査を行った。さらに現地での栄養塩溶出実験を行うことで、マングローブ水系におけるより詳細な栄養塩循環の解明を試みた。

2. 観測・分析方法

(1) 現地観測・分析の概要

沖縄県石垣島北西部に位置する吹通川において現地観測を行った。吹通川には、ヤエヤマヒルギ、オヒルギ、メヒルギの3種のマングローブがおよそ13 haに渡って分布しており¹²⁾、4本の主な支流と湿地とによって構成されている。吹通川および観測地点を図-1に示す。最も流量の大きい支流2に沿って上流から、マングローブ以外の陸生植物が繁茂する地点にStn.Aを、マングローブ林の上端域にStn.B、マングローブが密生する2点にStn.C、Stn.D、3本の支流が交差する主流域にStn.Eを設けた。

2006年7月より2008年6月まで、吹通橋と、上流域のSt.Aに、自記式水位計、塩分計、DO計、濁度計を設置すると同時に、2006年7月、2007年1, 3, 6, 8月、2008

年6月にそれぞれ約1~2週間にわたり、上流と河口での流量測定、栄養塩等のフラックス計測を行い、マングローブ域内における底質採取・採水を行った。流量測定はKENEK製の電磁流速計 (VP2000) ならびに、SonTek製のFlowTrackerを用いて行い、水位はOnset製U20-001-04-Ti、塩分水温はAlec電子製COMPACT-CTCW、溶存酸素(DO)はCOMPACT-DOW、濁度はCOMPACT-CKUをそれぞれ使用した。係留系はすべて、設置地点の水底に設置した。さらにAlec電子製AAQ1183を用いて、各観測地点での水質鉛直分布の時間変化を測定した。

採取した底質や水サンプルは採取後直ちに冷蔵保存・空輸し、東京大学の実験室において栄養塩濃度、SS濃度、TOC濃度等の分析を行った。栄養塩はブランルーベ製のAACS3を、TOC (全有機体炭素)、DOC (溶存有機体炭素) については島津製作所製のTOC-Vを用い定量した。

(2) 溶出実験方法

2007年3月13日~20日には栄養塩溶出実験を行った。実験に用いるコアサンプルは、図-1に示す3地点(△①~③)で採取した。地点①は吹通橋近くのマングローブ林の下端域、地点②はマングローブの密生度が高い地点、③は流量の大きい2つの支流が交わる地点で、これら3地点でほぼ同時にサンプリングを行った。各地点で、計4本ずつコアサンプルを採取し、うち3本は代表性を良くするため同じ条件下(曝気あり)で実験し、残り1本は曝気なしの条件で実験を行った。

溶出実験は、現地で採取した泥・水をそれぞれ冷蔵状態で現地実験室へ速やかに持ち帰り、サンプリングから6時間以内に実験を開始した。具体的な実験装置を図-2に示す。実験は現場付近の状況に合わせて暗室で行い、恒温水槽内は採泥時の現場水温に合わせ24度と設定した。サンプルコア内の水の攪拌は、エアポンプを使った曝気によるものと、密閉した状態で小型液体ポンプによるものと2種類行い、どちらも底泥の巻き上げが起こらないよう調節し、供給水は採泥現場の底層水を濾紙で濾過したものを用いた。

3. 結果及び考察

(1) マングローブ水域の物理環境

2008年6月10日~2008年6月20日にかけてStn.A~E、吹通橋の各観測地点において連続観測を行った。2008年6月11日前後は小潮、2008年6月19日前後が大潮であった。大潮観測中の石垣島伊原間における気温・降水量と、吹通橋・Stn.A・Stn.Cにおける水位(吹通橋の標高基準)、塩分、DOの時系列を図-3に示す。2008年6月16日には26.5 mm/dayの降雨が記録された。吹通橋とStn.Cの水位はほとんど差がなく潮汐の影響を大きく受け、上流域にあたるStn.Aでは、満潮時に海水が流入することがわか

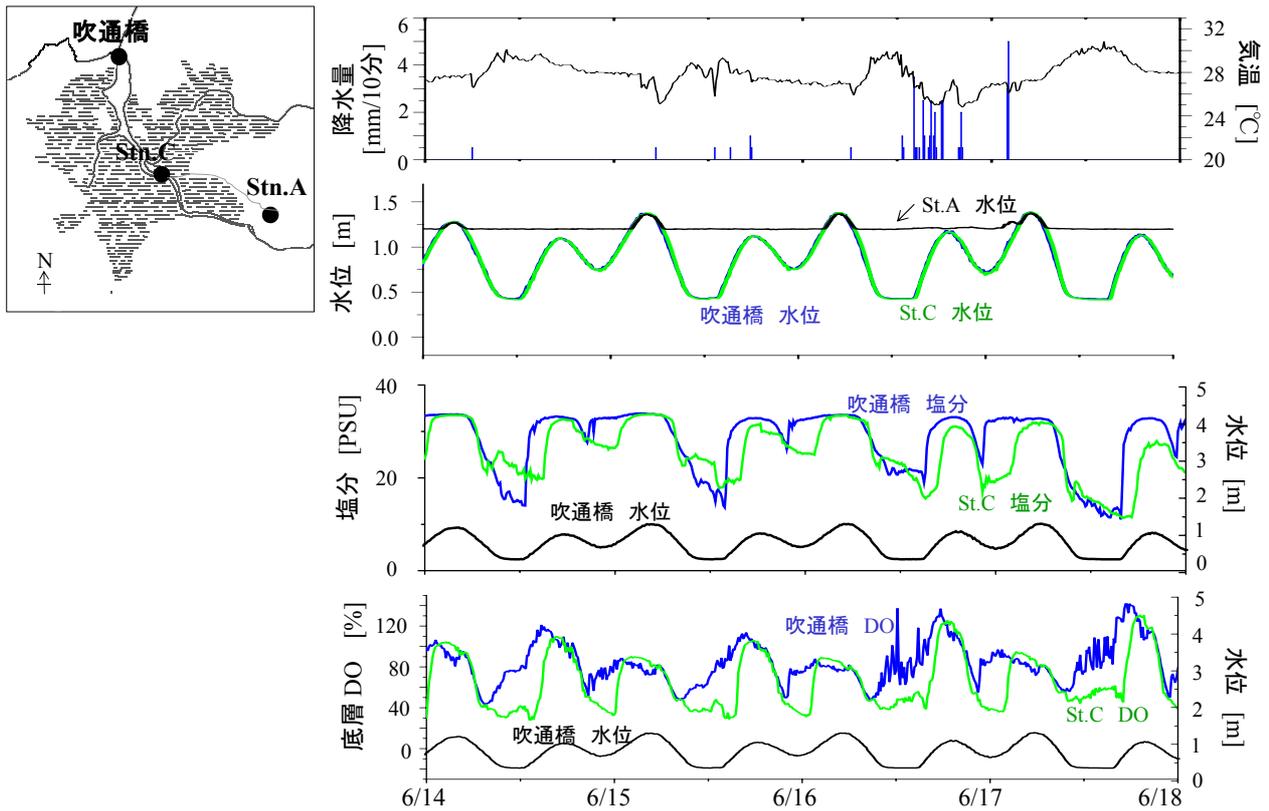


図-3 2008年6月大潮期間中の降水量、水位、塩分、底層DO

る。吹通橋の塩分は水位変動と同期し、下げ潮時以外は33 PSU程度であった。干潮時には時間経過とともに塩分が減少していることから、この時間帯には上流から流れてきた河川淡水が吹通橋に到達していると思われる。一方、Stn.Cの塩分も潮汐に同期して塩分が変動するが、吹通橋に少し遅れていることがわかる。

DOも同様に水位と同期して変動しており、海水が流入するとDOが増加し、潮が引くとDOは約30%前後まで減少した。下流域である吹通橋のDOは、マングローブ中流域のStn.Cに比べて水位変動に対する反応が早く、DOの変化が緩やかであった。このことから上げ潮とともに酸素を豊富に含んだ海水がマングローブクリーク中に流入することで、クリーク中のDOが上昇し、さらに下げ潮で高DO水塊が下流方向に流されるとともに、クリークのDOは減少したとみられる。

吹通橋の干潮時（潮止まり）のDOをみると、水位変動がないにも関わらず、徐々にDOが上昇していた。このとき吹通橋の塩分は減少していたことから、上流から河川淡水が流入していたと思われる。よって海水と同じく、河川淡水もDO濃度が高く、マングローブクリーク中のDOは高DOの海水、淡水が潮汐によって流動することで、大きく変化することが明らかになった。一方、Stn.CのDOも同様に下げ潮時に減少するが、干潮時には増減の明確な挙動がみられなかった。そこでStn.C～Dの鉛直DO分布をみたところ、干潮時の底層で貧酸素となっていたこと、さらにStn.D周辺に堆砂がありStn.C～

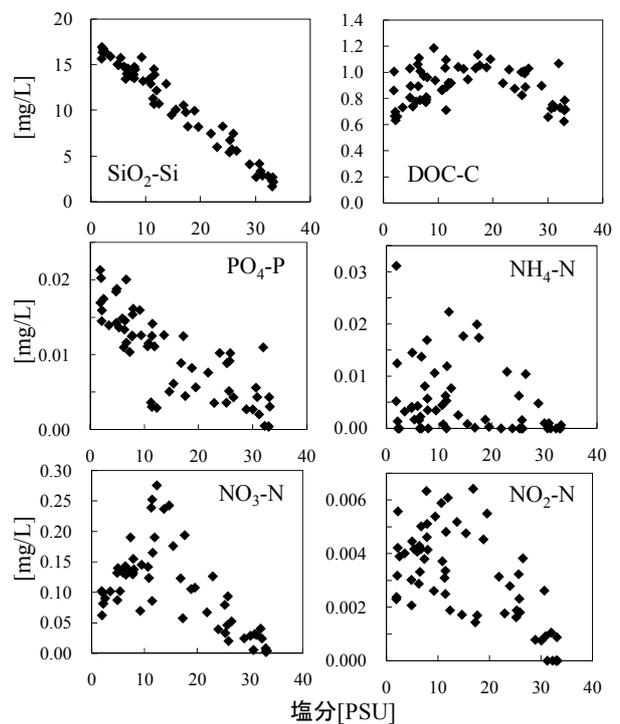


図-4 栄養塩と塩分の相関

Dが窪地状になっていたことから、干潮時にはクリーク底層で溶存酸素が消費され、そこで低DOとなった水塊と上流から流れてきた高DOの淡水との混合が生じていると考えられた。

(2) マングローブ水域の溶存態栄養塩と塩分

2008年6月16日（大潮期）に、Stn.A～E、吹通橋の計6地点において、同時連続観測を行った。潮が下げ始める朝7:00から観測を始め、1時間間隔で計13時間採水、AAQ1183による水質の鉛直分布の測定を行った。その溶存態栄養塩の結果を図-4に示す。

SiO₂-Siは塩分と負の相関を持ち、海水によって希釈されていることがわかる。一方NO₃-Nは河口域が最も濃度が低く、塩分12 PSU付近にピークをもつ特徴的な傾向を示した。上流域よりも中流域のほうが高濃度であることから、マングローブ中流域もしくは下げ潮時の河口域などでNO₃-Nが溶出している可能性が示唆された。NH₄-N、NO₂-Nについても、SiO₂-Siにみられたような海水希釈とは異なり、ばらつきが大きいもののNO₃-Nと同様の傾向がみられた。一方、PO₄-Pについては、窒素態に比べ海水希釈の影響を受けやすいと考えられた。DOC-Cは10～20 PSUの中流域が最も高く、NO₃-Nと同様にマングローブ中流域等から流出していると考えられた。また、この日は26.5 mm/dayの降雨があったが、水質に明確な影響は見られなかった。そこでマングローブ中流域での栄養塩変動の原因を把握するため、マングローブクリーク内での時空間変動についてさらに詳細に検討を行った。

(3) 溶存態栄養塩の時空間変動

マングローブクリーク内での多点連続観測結果を図-5

に示す。観測は13時間連続で行ったが、ここでは潮汐変動の代表的な6点（7:00、9:00、11:00、14:00、16:00、19:00）における、NO₃-NとNH₄-Nの変動を表す。図-5上図は、各時間帯におけるNO₃-N、NH₄-Nの各観測地点（Stn.A～E、吹通橋）の値を、図-5下図は2008年6月16日の吹通橋における水位変動と降水量を示す。

a) 硝酸態窒素

NO₃-Nの結果をみると、潮が下げ始めた7:00には、Stn.C、Dが一番高く0.04 mgN/L前後を示し、AからE、吹通橋までほぼ変わらず低濃度であった。ところが、9:00から11:00と水位が下がるにつれて、Stn.B～E、吹通橋にかけて徐々に高濃度になっていき、下げ止まりの14:00には0.25 mgN/Lと、7:00の最大値の約6.3倍も高くなった。下げ潮時にStn.B～Dのマングローブ密生域でNO₃-Nが流出し、Stn.Eや吹通橋では他の支流からの流出量も加わって、高濃度となったと思われる。また、16:00、19:00には、上げ潮とともに貧栄養の海水が流入し、一気に上流まで流される様子が表れている。これは図-4のNO₃-Nの結果と傾向が一致し、NO₃-Nがマングローブ中流域から流出する様子が確認された。

b) アンモニア態窒素

NH₄-Nの結果をみると、下げ始めの7:00に0.06 mgN/Lを示したStn.Aを除いた全地点が0 mgN/Lであった。9:00にも0.06 mgN/Lを示した吹通橋以外は0 mgN/Lだったが、下げ止まりの11:00、14:00、上げ潮の16:00、19:00には、

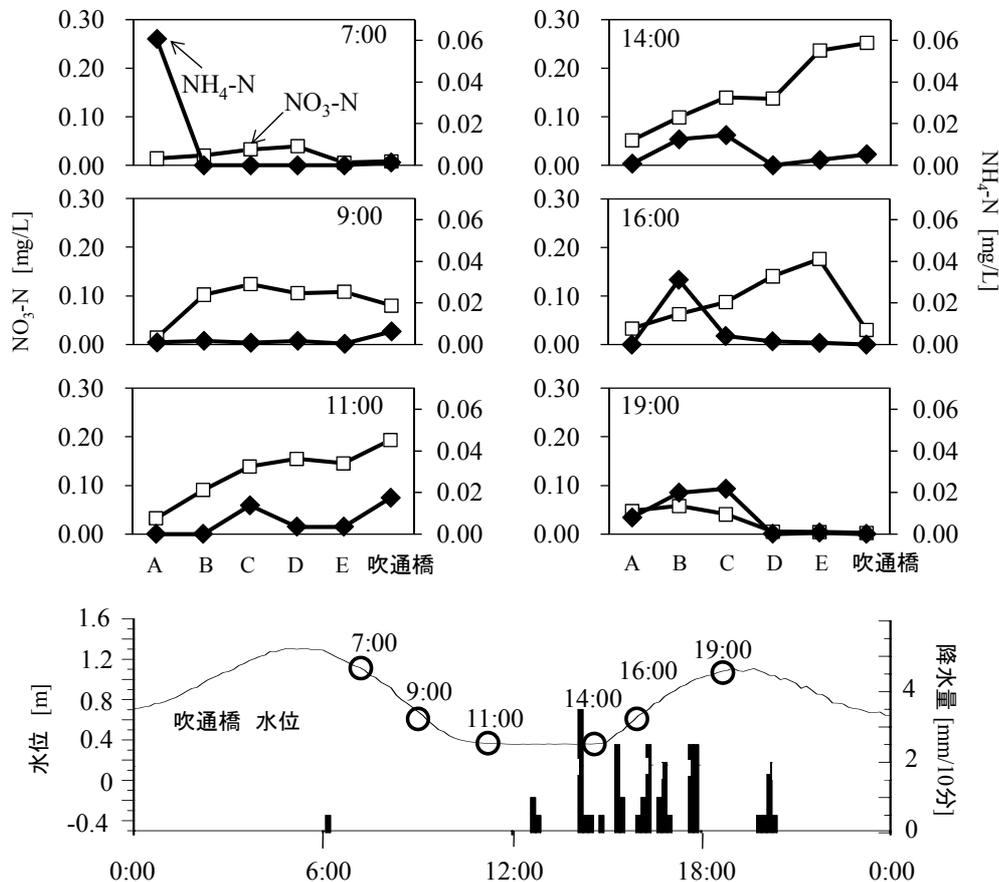


図-5 NO₃-N、NH₄-Nの時空間変動

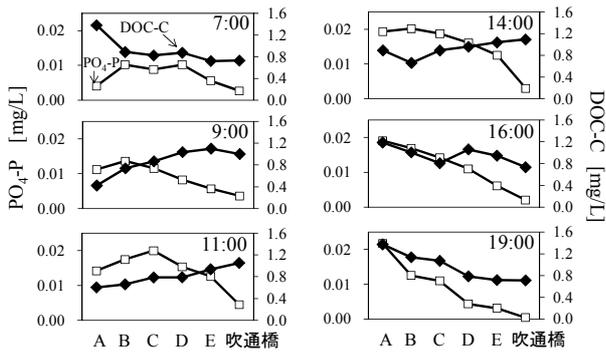


図-6 PO₄-P, DOC-Cの時空間変動

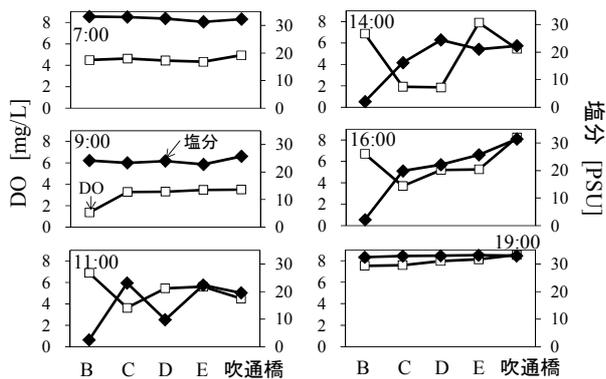


図-7 底層DO, 塩分の時空間変動

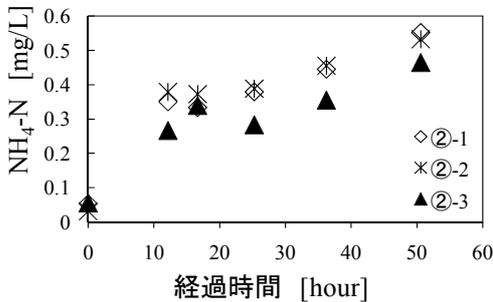


図-8 溶出実験におけるアンモニア態窒素濃度変化

Stn.B, Cで濃度が高くなった。すなわちNH₄-NもNO₃-Nと同様に、下げ潮止まりから上げ潮にかけてマングローブ中流域で増加していることが明らかになった。

c) リン酸態リンと溶存有機炭素

同様に2008年6月16日の、Stn.A～E、吹通橋におけるPO₄-P, DOC-Cの結果を図-6に示す。図-5上図と同様に、7:00～19:00の各時間帯でのPO₄-P, DOC-Cの結果を表している。DOC-CはNO₃-Nと同様にマングローブ中流域で増加し、それが下げ潮時に下流方向に流され河口域で高濃度となり、上げ潮時には逆に上流方向に高濃度となった。一方PO₄-Pはマングローブ中流域で増加する傾向にあるが、河口域では減少した。PO₄-PはNO₃-NやDOC-Cに比べて土砂等に吸着しやすいため、河口域では懸濁態となって沈降している可能性が考えられ、その挙動は

NO₃-NやDOC-Cなどとは大きく異なることが示唆された。

d) DO, 塩分濃度と硝酸態窒素, アンモニア態窒素

次に図-5の結果と同時に測定した、Stn.B～E、吹通橋における底層のDO, 塩分の結果を図-7に示す。図-5上図と同様に、7:00～19:00の各時間帯でのDO, 塩分を表す。これをみると、下げ潮止まりの11:00, 14:00, 上げ潮の16:00で、Stn.C, DのDOが低くなっているのがわかる。これは図-5でNH₄-Nが高濃度となった時間、場所とほぼ一致することから、底層が貧酸素となったことで、NH₄-Nの溶出が促進された、もしくは溶出したNO₃-NのNH₄-Nへの還元が促進されたことが考えられる。一方19:00は全地点が高塩分、高DOの状況で、Stn.B, CでNH₄-Nが高濃度となっていたが、19:00はほぼ満潮であり、Stn.B～Dなどのマングローブ密生域で溶出し高濃度となったNH₄-Nが、上げ潮とともに遡上してきたのではないかと考えられた。そこで次に、マングローブ水域の土壌-水間のNH₄-N溶出を確認、定量化するため、コアサンプルを用いた栄養塩溶出実験を行った。

(4) 栄養塩溶出実験

図-8に、曝気ありの栄養塩溶出実験で得られた、NH₄-Nの時系列を示す。ここで、図中の②-1～3は、図-1の地点②で採取した3本のコアを意味する。コアサンプルごとのばらつきは多少あるものの、すべての地点でアンモニア態窒素濃度が増加し、底質からの溶出が起きていることがわかった。そこでQin¹³⁾による式(1)を用いて栄養塩溶出速度を算出した。

$$R = \left[V(C_n - C_0) + \sum_{j=1}^n V_{j-1}(C_{j-1} - C_a) \right] / S \cdot t \quad (1)$$

ここで、R: 溶出速度 mg/m²/day, V: 直上水の体積 L, C_n, C₀, C_{j-1}: n, 0 (初期状態), j-1回目の直上水中の栄養塩濃度 mg/L, C_a: 直上水に注水した水の栄養塩濃度 mg/L, V_{j-1}: j-1回目の採取したサンプルの体積 L, S: コアの表面積 m², t: 溶出時間 dayである。

その結果を図-9に示す。図中のバーは各地点での平均値を、バー先端の太線が最大値と最小値を意味している。NH₄-Nの溶出速度は地点間の差はほとんどなく、全地点で相当量のNH₄-Nが溶出していることがわかる。これは、マングローブ域でNH₄-Nが増加した図-5の結果と傾向が一致し、図-5から濃度上昇が起こった空間 (Stn.B～D), 干潮時 (11:00～14:00) の水塊中のNH₄-N増加量を換算すると、約1867 mgNとなった。同様に図-9の溶出速度から、同じクリーク面積、同じ時間間隔で溶出するNH₄-N増加量を換算したところ、約1914 mgNとなり、クリーク水中のNH₄-N濃度上昇量の約102%となった。これらの結果から、マングローブクリーク内では、干潮時に貧酸素状態となることで、NH₄の溶出が促進され、その結果クリーク内のNH₄が上昇することが明らかとなった。

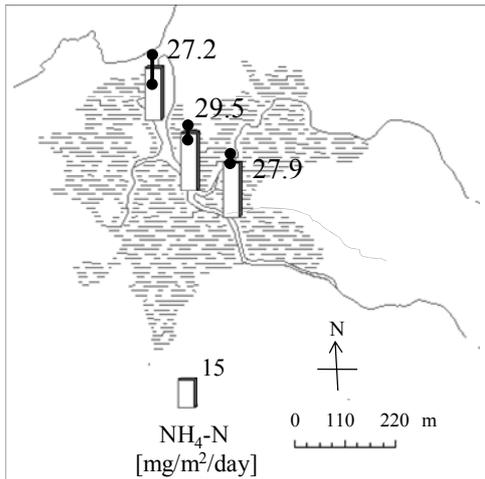


図-9 アンモニア態窒素溶出速度

4. 結論

沖縄県石垣島マングローブ河川において、クリーク内での多点連続観測を行い、マングローブクリーク内での物理環境・栄養塩の時空間変動を調査した。さらに現地での栄養塩溶出実験を通して、マングローブ水域における底泥-水フラックスの算定を行った。

マングローブクリーク中のDOは、酸素を豊富に含んだ海水と上流河川水が潮汐変動とともに移動することにより上昇し、一方マングローブ密生域の窪地等で滞留する際には河道内の嫌気土壌の影響を受け低酸素濃度になった。クリーク内での栄養塩の変化はこのようなDOの変化と対応しており、貧酸素時に溶出が促進される。PO₄-PはNO₃-NやDOC-Cと同様にマングローブ密生域で増加するが、河口域で懸濁態に吸着し沈降するなどして、沿岸域への流出が緩和される傾向がみられた。NH₄-Nもマングローブ密生域で増加しその増加量は現地実験で得られた溶出速度（平均28 mgN/m²/day）から換算した溶出量とほぼ一致することがわかった。

マングローブ水域では、マングローブ樹木が存在することで流動抵抗が増し、河道に多量の有機物が蓄積され、貧酸素化が誘引され、栄養塩が徐々に放出されていることがわかる。これは沿岸域の栄養塩放出をマングローブ水域が平滑化していることを意味している。

本研究の研究対象である沖縄県では、河川上流域のダム管理から沿岸域への赤土流出、生態系破壊などの問題が多発し、陸から海まで広域での総合水域管理、物質循環の把握が必要とされているが、本研究で明らかになったマングローブ水域内での物理環境、栄養塩の挙動は、マングローブ河川が多い沖縄県での沿岸水域管理の基盤情報としても利用可能であると期待する。

謝辞：本研究の一部は科学研究費（課題番号：19686032、

研究代表者：鯉淵幸生）、（財）河川環境管理財団の河川整備基金助成事業および（財）アサヒビール学術振興財団からの研究助成により実施致しました。ここに謝意を表します。また、吹通川の現地観測において、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ば代表の兼村憲次氏に大変お世話になりました。ここに深謝します。

参考文献

- 1) 比嘉榮三郎, 仲宗根一哉, 大見謝辰男, 満本裕影: 沖縄島の河川河口から海域へのSS及び栄養塩の流出, 沖縄県衛生環境研究所報, 35号, pp.111-119, 2001.
- 2) Tomlinson, P. B.: Rhizophora in Australia - some clarification of taxonomy and distribution, Journal of the Arnold Arboretum, 59, pp.156-169, 1978.
- 3) 二瓶泰雄: 宮良川マングローブ水域における土砂輸送特性に関する長期連続モニタリング, 海岸工学論文集, 53, pp.1086-1090, 2006.
- 4) 松田義弘: マングローブ干潟の流体力学, 月刊海洋/号外, 40, pp.94-99, 2005.
- 5) 中嶋洋平, 池田駿介, 赤松良久, 宮本泰章, 山口悟司, 戸田祐嗣: 石垣島名蔵川における土砂・栄養塩の流出に関する現地観測, 土木学会論文集, No.747/2-65, pp.173-185, 2003.
- 6) Boto, K. G. and Wellington, J. T.: Phosphorus and nitrogen nutritional status of a northern Australian mangrove forest, Mar. Ecol. Prog. Ser., vol.11, pp.63-69, 1983.
- 7) Davis, S. E., Childers, D. L., Day, J. W. Jr, Rudnick, D. T. and Sklar, F. H.: Nutrient Dynamics in Vegetated and Unvegetated Areas of a Southern Everglades Mangrove creek, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 52, 753-768, 2001.
- 8) 下田徹, 福岡弘紀, 飯泉佳子: 石垣島マングローブ汽水域における水質浄化機能の解明に向けて, 水産海洋研究, 第71巻, 第4号, pp.310-311, 2007
- 9) Kurosawa, K., Suzuki, Y., Tateda, Y., Sugito, S.: A model of the Cycling and Export of Nitrogen in Fukido Mangrove in Ishigaki island, Journal of Chemical Engineering of Japan, vol.36, No.4, pp.411-416, 2003.
- 10) 中村由行, 井上徹教, 山室真澄, 神谷宏, 石飛裕: 未攪乱底泥コアを用いた連続培養系での酸素消費・溶出実験, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.1091-1095, 1996.
- 11) 井上徹教, 中村由行: 流速が堆積物からの栄養塩溶出速度に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.1001-1005, 2002.
- 12) 中須賀常雄, 大山保表, 春木雅寛: マングローブに関する研究.日本におけるマングローブの分布, Japanese Journal of Ecology, Vol.24, No.4, pp.237-246, 1974.
- 13) Qin, B., Zhu, G., Zhang, L., Luo, L., Gao, G. and Gu, B.: Estimation of internal nutrient release in large shallow Lake Taihu, China, Science in China : Series D Earth Sciences, Vol.49, pp.38-50, 2006.

(2008. 9. 30受付)