

マングローブ水域における水表面浮遊物の濁質環境に関する連続モニタリング手法の提案

二瓶泰雄*・堀内重樹**・中村武志***

マングローブ水域における水質環境に大きな影響を与える水表面浮遊物の濁質環境に関する連続モニタリング手法として、光学式濁度計を鉛直上向きに置き、それを水面変化に追従する形で設置する、というモニタリング手法を提案した。本手法の基本的な有効性を調べるために室内実験を行ったところ、本手法による濁度計測値は水表面付近の濁質量と良好な相関関係を有していた。次に、現地マングローブ水域において本手法に基づく水表面浮遊物の濁質調査を実施し、本手法と採水観測による濁度計測値は良好な相関性を持つことが示された。これより、マングローブ水域における水表面浮遊物の濁質環境調査に対する本手法の基本的な有効性が検証された。

1. 序論

熱帯・亜熱帯沿岸域に位置するマングローブ水域は、マングローブ植物の光合成に伴う二酸化炭素固定効果や周辺海域への栄養塩・有機物供給機能などを有している。このようなマングローブ水域の環境機能を定量評価するためには、マングローブ水域における水質環境や物質輸送過程を明らかにする必要がある。そのため、現地調査が精力的に行われている（例えば、Boto & Bunt, 1981; Woodroffe, 1985; Furukawa ら, 1997; 赤松ら, 2002）。これらの研究の多くは、リターや粒子態物質、溶存態物質に分離した形で、マングローブ水域における水質環境や物質輸送を評価している。

それに対して二瓶ら（2004）は、上記の成分と異なる、水表面に浮遊する油状の濁質である**水表面浮遊物**（**図 1**）に着目した現地調査を行った。その結果、水表面浮遊物に含まれる SS 値そのものや SS 輸送量は、水柱全体と比べて有意な大きさであり、水表面浮遊物がマングローブ水域の水質環境や物質動態に大きな影響を与えることが示された。この観測では採水調査を実施したが、様々な環境条件下における水表面浮遊物の濁質環境を把握するには、採水調査のみでは多くの作業を必要とするため現実的ではない。そのため、水表面浮遊物の濁質環境に関して、何らかの形で長期間にわたる連続モニタリングを行うことは不可欠であるが、水中ではなく水表面付近に集中している浮遊物質の連続調査法に関する本格的な検討例は皆無である。

本研究では、水中の濁度調査に一般的に用いられる光学式濁度計を通常推奨されない水表面に向けた形で計測する、という考えに基づいて、水表面浮遊物の濁質環境に関する連続モニタリング手法を提案する。まず、室内実験を実施し、水表面浮遊物の濁質環境に対する本モニタリング手法の基本性能や有効性を検証する。次に、現地のマングローブ水域において本モニタリング手法の適用性を確認するために、沖縄県石垣島吹通川マングローブ水域において現地



図 - 1 河道部 (creek) における水表面浮遊物の様子

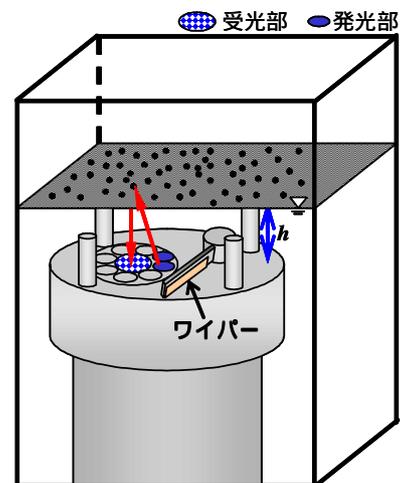


図 - 2 本モニタリング手法の概念図

調査を実施し、別途行われた採水観測結果と比較する。

2. 本モニタリング手法の概要

一般的な後方散乱光タイプのセンサーを有する光学式濁度計を用いて水中の濁度を計測する際には、濁度センサーが日射や水表面の影響を受けるため、センサー面を鉛直上向きに設置することは推奨されておらず、センサー面を水平方向(横向き)か鉛直下向きにして設置することが多い。しかしながら、光学式濁度計を鉛直上向きに設置して水表

* 正会員 博(工) 東京理科大学助教授 理工学部土木工学科
** 非会員 学(工) 株式会社対支研究所
*** 非会員 修(工) 清水建設㈱

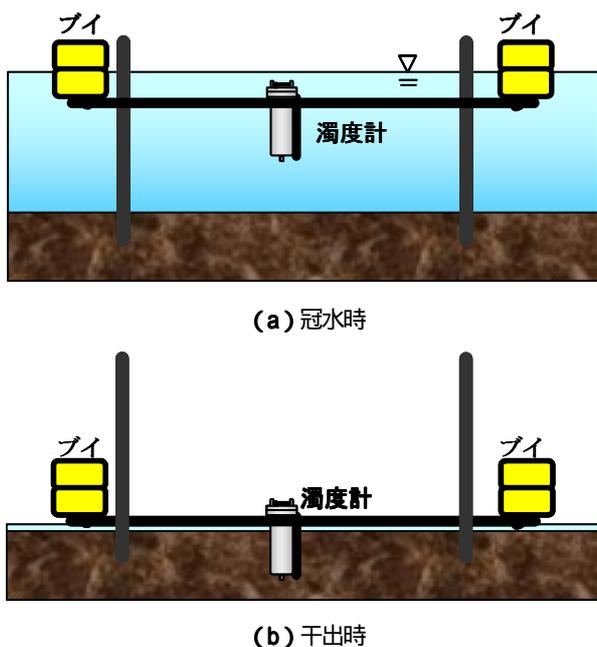


図 - 3 現地観測における本モニタリング手法の概要

面近傍の濁度計測を行えば、濁度センサーの計測値には何らかの誤差は含まれるものの、水表面浮遊物の濁質環境を測定し得るものと考えられる。そこで本モニタリング手法は、図 - 2 のように、鉛直上向きの光学式濁度計を水表面近傍に設置する、という方法とする。この際に、濁度計の計測値には、水表面からの反射光や外部光（日射）の影響を受けることが予想されるため、室内実験によりこれらの影響を検討する。ここで用いる光学式濁度計として、後方散乱光型センサー及びセンサー面清掃用のワイパー機能を有する自記式濁度計（COMPACT-CLW，アレック電子株）とする。この濁度計の計測範囲は、水道水の場合では、センサー面より 1cm 程度とされ、計測単位は FTU である。

実際に現地観測において本モニタリング手法を適用するためには、潮汐に伴う水位変動に合わせて、常に水表面から濁度計センサー面までの高さを一定に保つ必要がある。そこで、自記式濁度計が水面変化に追随するために、図 - 3 に示すように、十分な浮力を有するフイをつけた形で自記式濁度計を上向きに設置する。これにより、水面から濁度計センサーの位置が変わることなく、水表面近傍の濁度を連続計測することが可能となる。

3. 室内実験

(1) 実験方法

水表面浮遊物の濁度計測に対する本モニタリング手法の基本的な有効性を調べるために、室内実験を実施する。ここでは、濁質として選定された中立粒子が水表面付近に浮遊している状態を作成し、中立粒子混入量や外部光条件を様々に変化させて水表面浮遊物の濁度計測を実施する。こ

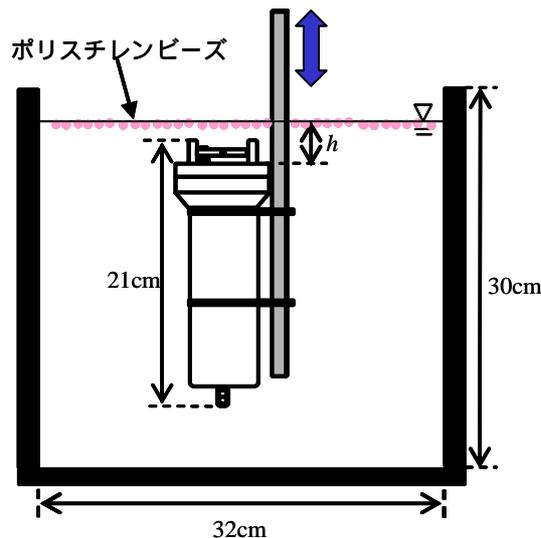


図 - 4 実験装置の概要

の実験を行う際には、図 - 4 に示すような小型水槽内に中立粒子であるポリスチレンビーズ（比重：1.005，粒径：0.8mm）を浮かべ、自記式濁度計により濁度を計測する。前述したように、中立粒子混入量 M_{PB} と外部光量 I の条件を変化させて実験を行うために以下の 2 ケースを設定する。

まず Case1 としては、外部光を一定条件とし、0.2～3.0g の範囲にわたり計 15 ケースの中立粒子混入量条件を設定する。この Case1 では、室内光にさらされた状況で実験を行っている。一方、Case2 では、外部光条件が濁度計の測定誤差に及ぼす影響を見るために、中立粒子を混入しない状況（水道水のみ）において外部光量 I を 0, 10, 100W/m² と 3 種類変化させることとする。この光量条件の範囲は、マングローブ氾濫原上における日射環境を想定して決定されている（二瓶ら, 2002）。光量を調節する際には、明条件（10, 100W/m²）の場合には実験水槽の上部に設置された白熱灯の高さを変化させ、また暗条件の時には水槽全体を暗幕で覆っている。

なお、濁度計センサー面から水面までの高さ h により、同じ濁質環境でも計測される濁度値に違いが出ることが予想される。そこで、上記の 2 ケースの実験を行う際には、自記式濁度計を上下させて設置高さ h を 0.5～2.0cm まで変化させて実験を行う。また、中立粒子を水表面上でほぼ均一に分布させるために、水槽内を棒により一定速度で攪拌する。

(2) 中立粒子混入量を変化させた時の実験結果 (Case1)

図 - 5 は、Case1 における水道水のみ ($M_{PB}=0g$) 及び水表面に中立粒子を混入している場合 ($M_{PB}=0.9, 2.1g$) の実験結果である。図中の縦軸は濁度 $Turb$ ，横軸は濁度センサーから水面までの高さ h を示す。まず、水道水のみの結果を見ると、設置高さ h が小さくなるとともに濁度 $Turb$ は増加している。これは、センサー発光部から照射された赤

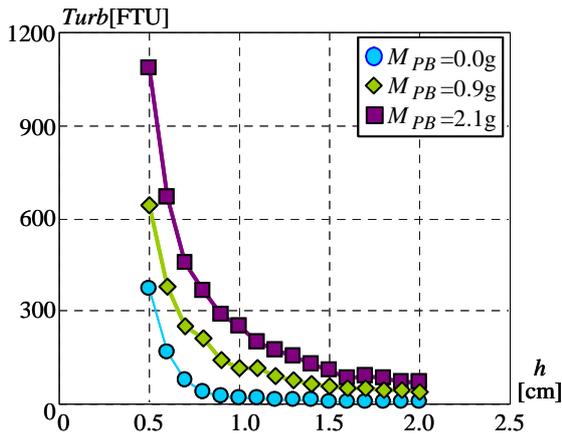


図-5 濁度 $Turb$ とセンサー設置高さ h (Case1)

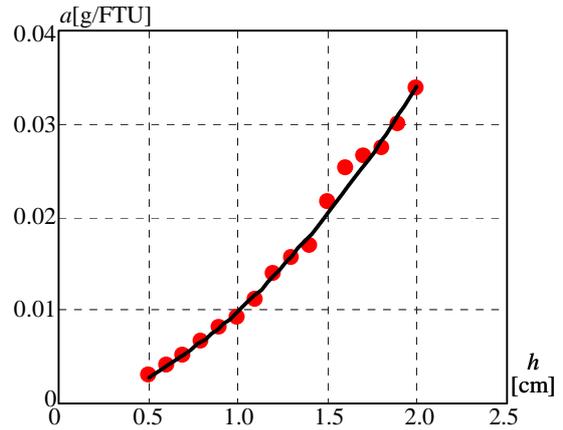


図-7 設置高さ h と傾き a の相関図 (Case1)

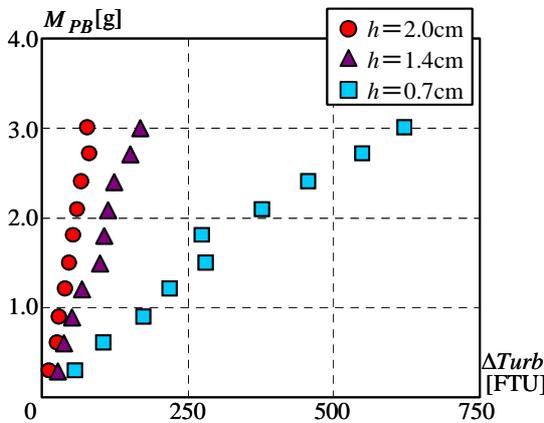


図-6 $\Delta Turb$ と M_{PB} の相関図 (Case1)

外光が水表面にて反射してセンサー面で受光されるためであり、水表面自体の存在により有意な濁度値が計測されてしまうことが分かる。一方、中立粒子を混入すると、同一の h の場合には、混入量 M_{PB} が大きいほど濁度 $Turb$ は大きくなっており、その差は h が小さいほど増加する。これは、濁度計のセンサー面と水表面に浮かぶ濁質の距離が近いほど、濁質からの反射光の強度が大きいためであり、 h が小さいほどセンサーの感度が向上する。以上の結果から、水表面を浮遊する濁質量が大きくなること、もしくは、センサーから水面までの高さ h が小さくなることにより、濁度計測値は大きくなる事が分かる。

このように、濁度計の測定値は水表面浮遊物の濁質量のみならず、水表面自体の存在の影響を受ける。そのため、濁度値から水表面の影響を合理的に取り除くか、もしくは、水表面からの反射光の影響を含めた形で濁度計測値の検定を行うことが可能かどうかを検討する必要がある。まず、濁度計測値から水表面の影響を取り除くために、中立粒子を混入している時の濁度計測値から、同一の h における水のみでの計測値を差し引いた値 $\Delta Turb$ を求めて、その結果と中立粒子混入量 M_{PB} を比較したものを図-6に示す。この

$\Delta Turb$ は、水表面の影響を含まず、濁質量のみの効果を反映していると考えられる。図中には $h=0.7, 1.4, 2.0$ cm における結果が図示されている。これを見ると $\Delta Turb$ とともに M_{PB} はほぼ直線的に増加しており、両者には次のような相関関係が存在することが分かる。

$$M_{PB} = a \times \Delta Turb \quad (1)$$

ここで、 a は係数であり近似直線の傾きに相当している。図-6より、 h が大きくなると、傾き a も大きくなる事が分かる。そこで、両者の関係を詳細に見るために、 a と h の相関図を図-7に示す。ここでは、実験結果がプロットされるとともに、両者に対する近似曲線も実線で図示されている。これより、 a と h の間には良好な相関関係が存在しており、次のように示される近似式が得られている。

$$a = 0.0099h^{1.78} \quad (2)$$

上式で用いられる単位としては、 a は g/FTU 、 h は cm である。式(1)と(2)を用いれば $\Delta Turb$ と h から水表面浮遊物の濁質量を算出することが可能となる。このように、光学式濁度計を水表面近傍に鉛直上向きに設置すると水表面からの反射光の影響を受けるものの、本手法ではそれらの影響を除去した形で水表面浮遊物の濁度計測を行えることが示された。

前述の手順により、水表面からの反射光の影響を除去して濁度を抽出し得るものの、そのためには、濁質が存在しないときの濁度計測値や時々刻々のセンサー設置高さ h のデータを必要とする。現地観測の状況を想定すると、それらのデータセットを完全に取り揃えることは困難である。そのため、水表面の影響を含む濁度計測値の検定精度を調べる必要がある。そこで、図-6と同様に、濁度計測値 $Turb$ と中立粒子混入量 M_{PB} の相関図を図-8に示す。ここでは、2つの h (0.7, 1.4cm) の場合を対象としており、各データに対する近似直線も合わせて図示している。これを見ると、 $Turb$ と M_{PB} の相関性は極めて高く、 $r > 0.98$ となっている。

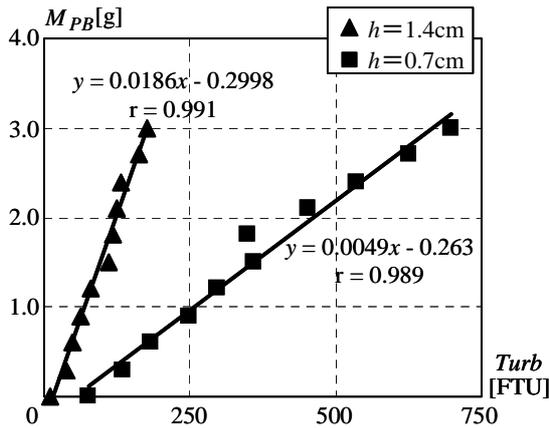


図 - 8 $Turb$ と M_{pb} の相関図 (Case1)

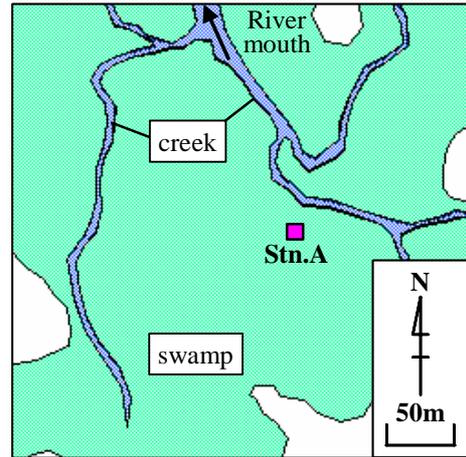


図 - 10 観測地点

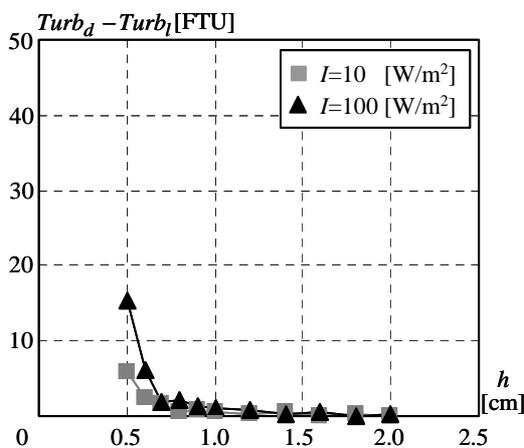


図 - 9 暗条件と明条件における濁度差 $Turb_d - Turb_l$ (Case2, I : 光量)

他の h に関しても同じ結果が得られている。この図中の $Turb$ は、図 - 6 中の $\Delta Turb$ に水道水のみ場合の濁度値を足しただけなので、 $Turb$ と M_{PB} の相関性が高いのは当然の結果と言える。このように、センサー高さ h を固定できるならば、たとえ水表面の影響を濁度計測値から除去できない場合でも、本モニタリング手法により水表面浮遊物の濁質環境を精度良く計測できるものと考えられる。

(3) 光量条件を変化させたときの実験結果 (Case2)

次に、外部光条件が本モニタリング手法における濁度計測精度に及ぼす影響を見るために、Case2 により得られた結果を図 - 9 に示す。ここでは、暗条件 (0 W/m^2) における計測値 $Turb_d$ から明条件 ($10, 100 \text{ W/m}^2$) での値 $Turb_l$ を差し引いた結果を図示している。これを見ると、 h が小さくなると共に暗・明条件の濁度差は大きくなり、その最大値は $I=10 \text{ W/m}^2$ では 5FTU、 $I=100 \text{ W/m}^2$ では 15FTU となる。これらの濁度差を暗条件における濁度で基準化すると、その値は $I=10 \text{ W/m}^2$ の場合には 3~4%、 $I=100 \text{ W/m}^2$ の場合には 5~8% となり、明条件の結果は 2 つ共に暗条件とほぼ同一の結果となっていることが分かる。二瓶ら (2002) によると、

マングローブ林が繁茂する氾濫原上では、地面に到達する日射量は林上端の 10% 弱であり、夏季日中の最大日射量をおよそ 1000 W/m^2 とすると、地面や水面に到達する日射量は最大 100 W/m^2 程度となる。したがって、マングローブ植物が存在するような光環境下では、光量条件は本手法の濁度計測に対して有意な誤差を与えないものと考えられる。

4. 現地観測

(1) 観測概要

実際のマングローブ水域における水表面浮遊物の濁質調査に対する本モニタリング手法の適用性を検証するために、沖縄県石垣島吹通川マングローブ氾濫原において現地調査を実施した。観測地点は、図 - 10 に示すように、吹通川マングローブ水域南西部に位置する氾濫原であり、河道部 (creek) から約 50m 離れた Stn.A とする。ここでは、図 - 3 に示すように、上向きに設置された自記式濁度計に浮きを固定しており、濁度計センサー面が水表面から常に約 1.0cm の高さに来るように設置した。観測期間は 2004 年 8 月 29~30 日の大潮期とし、上げ潮時 (8/29 17:55~19:05) と下げ潮時 (8/30 7:15~10:15) に分けて行った。自記式濁度計による計測精度を検証するために、この観測と同期して採水観測を実施した。ここでは二瓶ら (2004) と同様に、表層 (水表面より 2cm) において採水を行い、得られたサンプル水の濁度を多項目水質計 (WQC-24, 東亜データケー-株) により計測しており、このときの計測単位は NTU である。さらに、自記式水位計 (Diver, Eijkelkamp 社製) を Stn.A に設置し、水位を連続計測した。

(2) 観測結果

Stn.A における本手法と採水観測により得られた濁度値及び水深の時系列変化を図 - 11 に示す。なお、図化の関係上、濁度値は対数表示している。まず、本手法による濁度計測値を見ると、上げ潮時の冠水初期に濁度が大きくなる傾向が見られ、二瓶ら (2004) により見出された特徴と

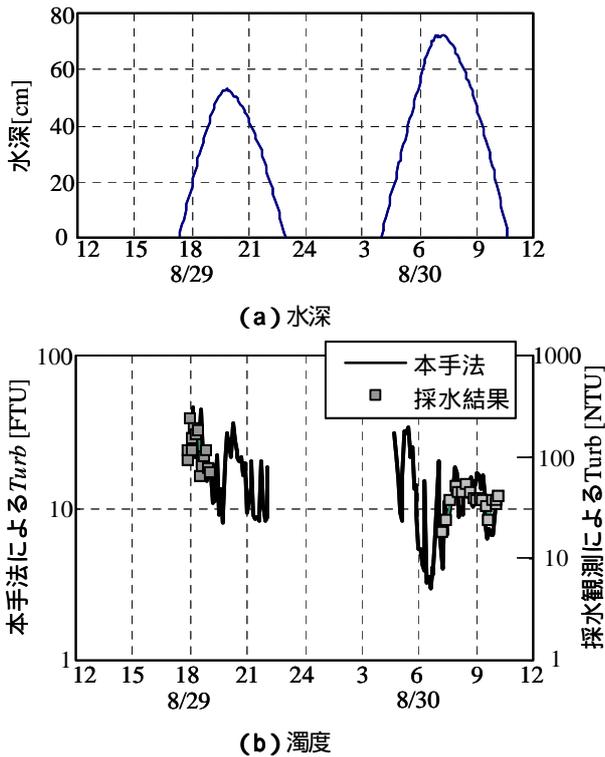


図 - 1 1 本手法及び採水観測による濁度の時系列変化

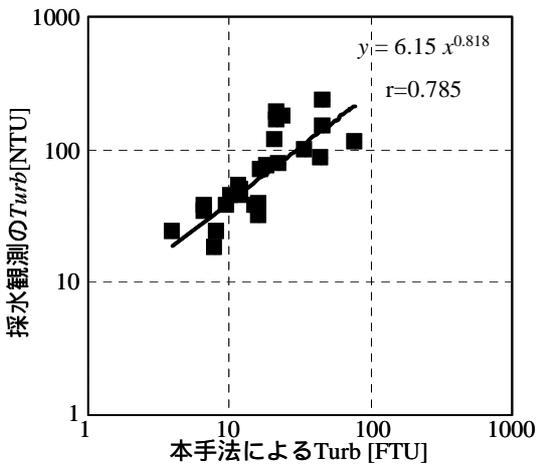


図 - 1 2 採水観測と本手法による濁度計測値の比較

一致している。一方、採水観測結果においても類似する傾向が見られるとともに、本手法の結果と概ね一致する時間変動パターンが生じている。なお、本モニタリング手法による計測値にはスパイク的なノイズが見られる。このノイズの一部は、水表面上を流れるマングローブの葉がセンサー面を覆いかぶさったためである。次に、本手法と採水観測の濁度値の相関性を定量的に検討するために、両者の相関図を図 - 1 2 に示す。これを見ると、両者は概ね良好な相関関係を有しており 相関係数 r は 0.8 程度となっている。このことより、マングローブ水域における水表面浮遊物の濁質モニタリングに対して光学式濁度計に基づく本手法の

基本的な有効性が検証された。

5. 結論

本研究で得られた主要な結論は以下のとおりである。

- (1) マングローブ水域における水表面浮遊物の濁質環境に関する連続モニタリング手法として、光学式濁度計を鉛直上向きに置き、それを水面変化に追従する形で設置する、というモニタリング手法を提案した。
- (2) 水表面浮遊物の濁質環境計測に対する本手法の基本的な有効性を検討するために、濁質として中立粒子（ポリスチレンビーズ）を用いた室内実験を実施した。様々な条件下で実験を行った結果、本手法による濁度計測値は、水表面付近の濁質量と良好な相関関係を有していた。
- (3) 沖縄県石垣島吹通川マングローブ水域を対象として、本手法に基づいて水表面浮遊物の濁質環境調査を行った。別途行われた採水観測結果と本手法による濁度計測値を比べたところ、両者の相関係数は約 0.8 と高い値となった。
- (4) 以上の結果から、マングローブ水域における水表面浮遊物の濁質環境調査に対する本モニタリング手法の基本的な有効性が検証された。

なお、ここで提案されたモニタリング手法は、マングローブ水域における水表面浮遊物の濁質環境調査を念頭において検討されているが、アオコなどの他の水域における水表面浮遊物に関する調査方法にも応用できるものと期待される。これらに関する検討を今後取り組む予定である。

謝辞：現地観測の実施に際して、東京理科大学理工学部土木工学科元学部生宮部皓太氏（現株式会社竹中土木）をはじめとする水理研究室学生諸氏には、大変な採水作業を手伝って頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 赤松良久・池田駿介・中嶋洋平・戸田祐嗣（2002）：現地観測に基づくマングローブ水域における有機物・栄養塩輸送に関する研究 - 大潮期に着目して - , 土木学会論文集 , No.698 / -58 , pp.69-80 .
- 二瓶泰雄・綱島康雄・佐藤正也・青木康哲・佐藤慶太・瀬岡和夫（2002）：現地観測に基づくマングローブ域の水温・放射環境に関する研究, 海岸工学論文集, Vol.49, No.2, pp.1206-1210 .
- 二瓶泰雄・太田和裕介・中村武志・今野篤（2004）：吹通川マングローブ水域における水表面浮遊物の水質環境に関する現地観測, 海岸工学論文集, Vol.51, No.2, pp.1076-1080 .
- Boto, K. G and Bunt, J. S. (1981): Tidal export of particulate organic matter from a northern Australian Mangrove System, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol.13, pp.247-255.
- Furukawa, K., Wolanski, E. and Mueller, H. (1997): Currents and sediment transport in mangrove forests, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol.44, pp.301-310.
- Woodroffe, C. D. (1985): Studies of a mangrove basin, Tuff Crater, New Zealand: III. The flux of organic and inorganic particulate matter, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol.20, pp.447-461.