

平成 22 年 5 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19360398

研究課題名（和文）沿岸域環境モニタリングシステムの新展開

研究課題名（英文）New developments of Environmental Monitoring System  
in coastal sea area

研究代表者

中谷 直樹 (NAKATANI NAOKI)

大阪府立大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30326277

研究成果の概要（和文）：本研究では、沿岸海域における環境モニタリングシステムの問題点である、データの時間・空間解像度が不足していることや、計測項目が少ないことを解決するために、画像計測・化学計測・音波計測など様々な技術を拡張した、新しい計測技術の開発を行った。その結果、海水中の溶存無機態窒素(DIN)を簡易な方法で連続的に計測する手法を開発に成功した。また亜硝酸態窒素と硝酸態窒素の紫外吸光特性を用いて、化学的反応を使わずにこれらを計測する方法を開発した。一方、時間・空間解像度の拡充としては、海面の分光スペクトル画像を習得しその情報を使うことで、植物プランクトンや懸濁物の表層分布を取得する手法の開発した。さらに超音波流向流速計で計測される音響散乱情報を解析することで、水中の濁度分布を得ることに成功した。これらの新たに開発された計測技術を発展させ、利用することによって沿岸域環境の詳細な把握が期待される。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop the new measurements method of environmental factor for coastal sea area. Four types measurements method “Automatic measurement of dissolved inorganic nitrogen ions using simplified flow injection method”, “Nutrient profiler in sea water by ultraviolet spectrometry”, “Sea surface distribution measurement method for Chlorophyll-a using spectroscopic image” and “Measurement method of turbidity depth profiles using Acoustic Doppler Current Profiler” were constructed. These new method bring changes to manage and conservation the environment of coastal field.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2008年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2009年度	3,300,000	990,000	4,290,000
総計	11,300,000	3,390,000	14,690,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：海域環境，栄養塩，モニタリング，計測機器，環境シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

日本の沿岸域においては、閉鎖性の海域で

は富栄養化が進み、赤潮・青潮・貧酸素水塊・特定海産バイオマスの異常繁殖が発生して、海域の生態系にダメージを与えている。一方大洋に面している海域でも、磯焼けや養殖の収穫量下落など、原因が不明のまま環境変化が進んでいることも報告されている。これらの問題を改善していくためには、まず状況を詳細に把握し、シミュレーション技術などを使用して将来予測を行い、保全・修復する方法を検討し、実施後には経過状況を正確に監視していくことが必要となる。この一連の管理マネージメントにおいては、海域環境を正確に計測しそれを継続する環境モニタリングが不可欠である。

環境モニタリングの発展を振り返れば、水温・塩分などはセンサーが開発され、現地で継続的に計測がされるようになった。流向・流速についても超音波技術を用いて線計測が行われ、近年では短波レーダーも用いた海表面の流速分布計測が行われ始めており、環境因子の物理的項目については多くの発展がみられている。しかし、化学的因子や生物的因子は、現場における採取と研究室における分析が基本とされている。植物プランクトンなどは人工衛星を用いたリモートセンシング技術によって、表層分布が計測されているものの、物理的因子に比べて圧倒的に、時間的・空間的解像度が不足している。これらは海域で起こる現象を正確にとらえることができないばかりでなく、現象が生じる因果関係を誤ってとらえてしまう原因にもなる。

そこで本研究は、化学的因子や生物的因子を中心に、計測される環境因子の拡充と時空間解像度の向上をねらい、新たな計測手法の開発を目指した。

## 2. 研究の目的

(1) 海域における一次生産の制限要素である栄養塩を詳細に計測することは海域環境の把握には必要不可欠である。本研究は溶存無機態窒素に着目し、これを連続自動計測する手法及び、計測の時空間解像度を上げる計測手法を開発する

(2) 植物プランクトン濃度は海域の一次生産者であるため、この分布を把握する事は重要である。衛星リモートセンシングで表層分布が計測されるようになってきたが、沿岸域に対しては十分な時空間解像度がない。本研究では、画像計測手法を用いて、植物プランクトン分布を計測する手法を確立する。

(3) 水の中の濁りは、海域の中の光合成環境に影響を与えるために非常に重要な環境項目となる。これまで濁度計は存在するものの広域分布を計測することは困難である。また

濁りと流況は密接に関係しており、これらを同時に計測することが重要である。本研究では、ADCPを用いて流速と濁度の鉛直分布を同時に計測する手法を開発する。

## 3. 研究の方法

### (1) 溶存無機態窒素計測法の開発

本研究では、溶存無機態窒素の新たな計測手法を検討するにあたって、2種類の異なるコンセプトで開発を行った。

#### ①化学的手法を用いた自動連続計測器の開発

実験室で分析する計測精度が高い方法を、現場で自動連続的に行う計測システムの開発を行った。ただし、将来的に多点で連続計測を行うことを理想とするために、安価でメンテナンスも簡便であり小型である計測機器を目標とし、計測システムを検討した結果、以下のようになった。

- Flow Injection 手法を基本として、計測システムを構築する。
- 経路を簡便にするために、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素の三態を別々の FI 経路で計測するのではなく、その合算値である溶存無機態窒素(DIN)のみをターゲットとする。
- DIN を計測するために、Cu-Zn 還元カラムによって硝酸態窒素、亜硝酸態窒素をアンモニア態窒素に還元させる。
- 廃液に有害な物質を極力含めないために、サリチル酸法を用いた発色試薬によって発色させ吸光光度法によって計測する
- サリチル酸法を使用するにあたり、発色の妨害イオンとなる Mg イオンと Ca イオンは海水に大量に含まれているが、EDTA を用いてマスキングを行う

図1に構築した計測システムのフロー図、図2に計測器を示す。



図1 DINの自動連続計測フロー

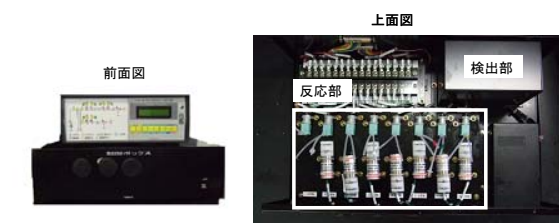


図2 試作した計測器

②紫外吸光法を用いた栄養塩プロファイラーの開発

沿岸域では鉛直方向の栄養塩の分布の変動が一次生産の重要な決定要素となっているために、それを計測する需要は大きい。しかし化学的手法は精度が高いものの、反応時間の問題から瞬時に計測値を得ることができないため、この手法を用いて CTD のような計測器を作成することは困難である。

したがって、化学的反応を用いずに溶存無機態窒素を計測するセンサーを検討し、それを用いた栄養塩プロファイラーを開発した。最終的な計測システムは以下のような特徴を持つ

- 硝酸態窒素、亜硝酸態窒素は 200-250nm の深紫外領域において、吸光特性を持つため、海水の紫外吸光特性を用いて、硝酸態窒素・亜硝酸態窒素の合算値 (DINox) を計測する。
- 重水素ランプで発生させた紫外光を光ファイバーで観測部に導き、海水に透過させた後に、透過光を光ファイバーで集約し、ダイオードアレイ型分光器で分光し紫外吸光スペクトルを計測する
- いくつかの海水の紫外吸光スペクトルをその固有ベクトル空間上に展開し、固有値が高い固有ベクトル成分を説明変数とする回帰分析を行い、濃度推定式を作成する。計測した海水の紫外吸光スペクトルから固有ベクトル成分を抽出し、それと濃度推定式を用いて DINox 濃度を算出する。

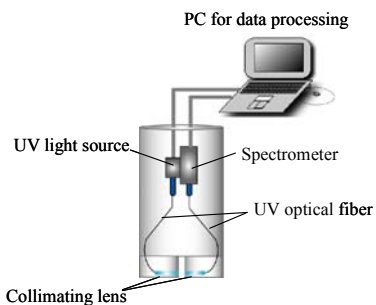


図3 試作した栄養塩プロファイラー

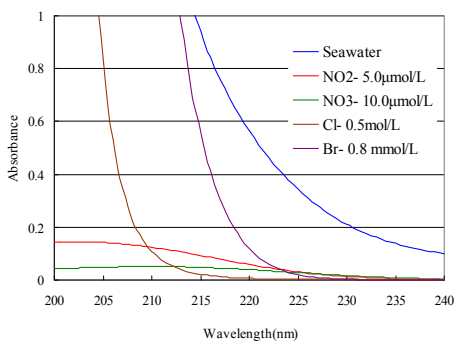


図4 海水の紫外吸光スペクトル

(2) 画像を用いた植物プランクトン分布計測手法の開発

植物プランクトン濃度の計測は、採水分析による点計測か蛍光センサーを使った面計測が主流である。一方、衛星リモートセンシングでは面計測が可能となっているものの、沿岸海域の環境の時間的空間的変動スケールを考慮すれば、その解像度は十分とはいえない。よって、これらの間を埋める計測手法の確立が重要となる。本研究では、海表面を撮影した画像からクロロフィル a 色素の分布を計測する手法を開発した。その手順は以下のとおりである。

- 海表面の詳細な色特性をとらえるために、液晶干渉フィルターと CCD を組み合わせた計測システムを構築し、可視域における分光画像を波長解像度 1nm で撮影する
- 分光画像より任意の位置での分光スペクトル分布を抽出する。
- 海面の分光反射輝度が、海水中の物質の分光特性に依存していること、撮影する角度によって強さが異なる海面の反射光に影響を受けることを考慮した、分光散乱過程の理論式を組み立て、それを元に、分光反射特性がわかっている画像上の点のスペクトルを使って、分光スペクトルから海水中の物質による消散スペクトルを抽出する。
- いくつかの海水の消散スペクトルをその固有ベクトル空間上に展開し、固有値が高い固有ベクトル成分を説明変数として、クロロフィル a 色素濃度との回帰分析を行い、消散スペクトルからクロロフィル a 濃度を推定する式を作成する。画像により計測した海水の消散スペクトルから固有ベクトル成分を抽出し、それと濃度推定式を用いてクロロフィル a 濃度を算出する。

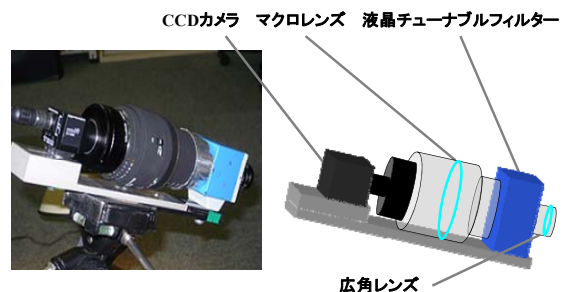


図5 海表面分光撮影システム

(3) 音響伝搬モデルによる濁度計測手法の開発

出水時や埋立浚渫工事にもなう水の中の濁りは、海域における生態系に与える影響

が大きいため、現地において空間的に密に計測すべきである。また、濁りの変動は流速と関係が大きいため、流速分布とセットで計測すべきものである。本研究では、超音波流速計と濁度計の二つの計測器を使うことにより、流速と濁度の鉛直分布を同時に計測する手法を開発し、その計測手法開発は以下のステップで行った。

- 海水中でトランスデューサーから放射された音波が浮遊懸濁物質によって散乱され、その結果が受信されるまでの伝搬過程を、いわゆる逆問題として捉えた計測モデルを構築する。
- この厳密なモデルは空間方向の差分を取ることによって未知変数やパラメーターの少ない実用的な計測モデルへ変換する。
- 超音波流速計と濁度計から得られる濁度情報を、その計測モデルの入力に用いることで、水中における濁度の鉛直分布を非接触で求める。

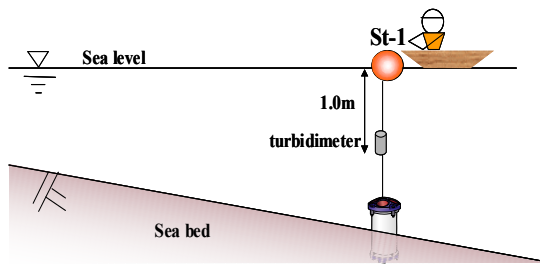


図6 現地における濁度分布計測

#### 4. 研究成果

##### (1) 溶存無機態窒素計測法の開発

##### ①化学反応を用いた自動連続計測器の開発

- サリチル酸を用いたインドフェノール法は、海水に含まれるカルシウムイオン・マグネシウムイオンのマスキング剤であるEDTAによって、発色妨害をうけないことが確認された。
- Cu-Zn還元カラムは高い還元性能を示すことが確認された。
- 本手法の結果と JIS 法による分析結果に有意な差がなく、DIN が計測できることが確認された。(図7)
- 現場において計測できる、DIN 連続計測装置を開発し、実海域において計測することで、その有効性を示した。(図8)

以上の結果より、本研究成果で完成させた小型・安価でメンテナンス性の良い小型栄養塩連続計測器によって、海域の栄養塩分布の詳細な把握が可能になることを示している。

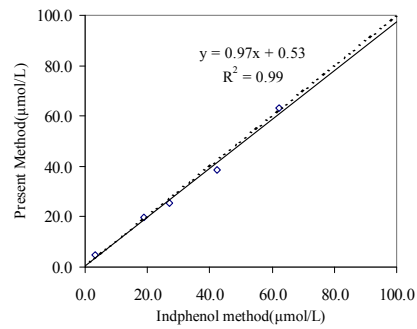


図7 本手法と JIS 法による分析値の比較

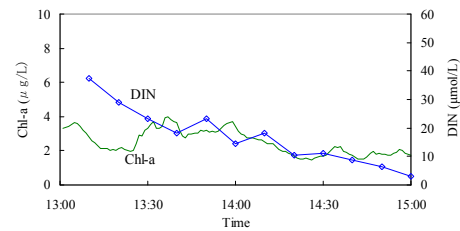


図8 東京湾における計測結果例

##### ②紫外吸光法を用いた栄養塩プロファイラーの開発

- 固有ベクトル成分を用いた回帰分析手法では、回帰式を作成した時に与えた供試サンプルと水質が大きく異なる海水の DIN<sub>ox</sub> 濃度の推定精度が落ちることが確認された。
- 海水の紫外スペクトルをモデル化し、それを固有ベクトル空間上に変換したのち、海水のサンプルの固有ベクトル成分になるように、固有ベクトル空間上で最適化を行う手法を開発した。これにより供試サンプルに大きく依存せずに精度を高めることに成功した。
- 開発した手法を用いて、栄養塩プロファイラーを開発し、大和川河口域で栄養塩の鉛直分布計測を行い、計測器の有効性を確かめた。(図9)

以上の結果より、本研究によって開発した、栄養塩プロファイラーによって、これまで明



らかにされてこなかった現象の発見や、環境変動のメカニズムの解明が期待される。

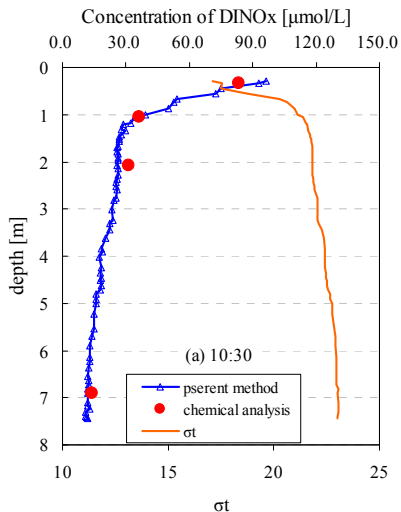


図9 大和川河口域における計測結果例

(2) 画像を用いた植物プランクトン分布計測手法の開発

- 海面を滑らかな平面と仮定した場合、スネルの法則とフレネルの法則を考慮した光伝搬関数を考えれば、それを用いてカメラと水面の角度による海面分光放射輝度への影響を取り除けることがわかった。
- 液晶干渉フィルターの特性により、本計測システムはわずか数分で可視域を 1nm という高解像度で分光画像を得ることができる。
- 画像情報から、海中の消散スペクトルを抽出することができれば、PCR 手法を使って、クロロフィル a 濃度や懸濁物濃度を抽出することができると確認された。
- 尼崎港において本手法を適用した結果、分光画像から植物プランクトン分布を得られることが示された。(図 1 0)

以上の結果より、これまで不足していた時空間解像度の植物プランクトン分布の変動が得られることが示唆され、本計測手法によって赤潮や青潮の監視などが可能になることが期待される。

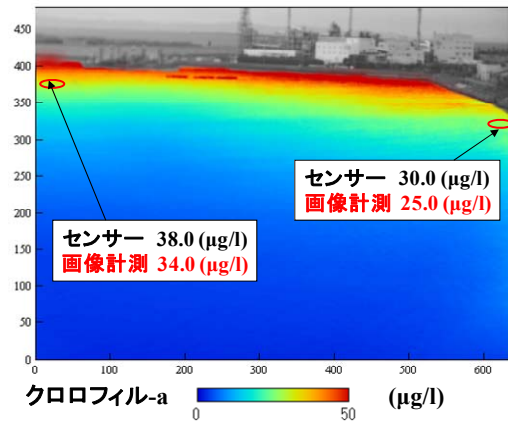


図 1 0 尼崎港における植物プランクトン分布計測例

(3) 音響伝搬モデルによる濁度計測手法の開発

- トランスデューサの放射特性、指向特性、海面反射、粒子密度などを考慮した音響伝達過程を表す計測モデルを構築した。
- 海面反射を考慮した音響伝達過程を表す計測モデルを、水深方向に離散化すればある 1 点の濁度が計測されれば、漸近的に各観測層における濁度を求めることが可能となることがわかった。
- 超音波流速計と濁度計を尼崎港に設置し、超音波流速計から得られる散乱強度と、濁度計で得た濁度の時系列情報を入力データとして、濁度の鉛直分布を非接触で求めることに成功した。(図 1 1)

以上の結果より、本手法は、河川断面等をスキミングし河川断面流速分布等を計測する、いわゆる H-ADCP 流量観測装置に濁度計を用いることで断面濁度分布が計測できることを示唆するものであり、さらに ADCP の本来の計測対象である 3 次元流向流速データと統合することで、濁度のフラックスを計測できることを示している。

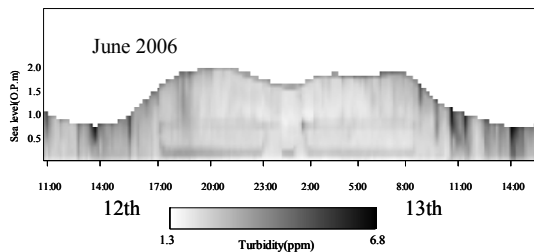


図 1 1 本手法による、濁度分布計測結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- ① Arai, R., Tada, T., Nakatani, N., Okuno, T. and Ohta, K., “Automatic Measurement of Dissolved Inorganic Nitrogen Ions in Coastal Field Using Simplified Flow Injection Method”, International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 19, No. 1, pp. 71-76, 2009, 査読あり
- ② Arai, R., Nishiyama, T., Nakatani, N. and Okuno, T., “Spectrophotometric Determination of Nutrients Using Principal Component Regression”, Proceedings of 28th International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 79304, 2009, 査読あり
- ③ Arai, R., Nakatani, N. and Okuno, T., “Measurement Method for Nutrient by Ultraviolet Spectrometry”, The Proceedings of 18th International Offshore and Polar Engineering Conference, pp. 539-544, CD-ROM, 2008, 査読あり
- ④ 新井 励, 中谷直樹, 奥野武敏, 可視域における海水の光学的特性を用いた物質濃度の計測手法, 日本船舶海洋工学論文集, 第7号, pp. 15-22, 2008, 査読あり
- ⑤ 新井 励, 中谷直樹, 奥野武敏, 海域モニタリングに適したADCPを用いた濁度の鉛直分布計測手法, 日本船舶海洋工学論文集, 第7号, pp. 23-30, 2008, 査読あり

〔学会発表〕(計 6 件)

- ① Arai, R., Nishiyama, T., Nakatani, N. and Okuno, T., “Measurement Method of Nutrient Using Principal Component Regression”, OCEANS'08 MTS/IEEE Techno-Ocean'08, April 8, 2008, Kobe, Japan.
- ② Arai, R., Nakatani, N. and Okuno, T., “Measurement Method of Turbidity Depth Profiles Using ADCP for Monitoring of Coastal Sea Area”, OCEANS'08 MTS/IEEE Techno-Ocean'08, April 7, 2008, Kobe, Japan.
- ③ 中谷直樹, 新井 励, 三谷俊輔, 分光スペクトル画像を用いた沿岸域表層の物質濃度の計測, 日本船舶海洋工学会秋季講演会, 2008年11月13日, 大阪
- ④ Arai, R., Nakatani, N., Takeshita, S., and Okuno, T., “Ultraviolet Spectrophotometric Measurement of Nutrient in Coastal Field”, Techno-Ocean 2006/19th JASNAOE Ocean Engineering Symposium, October 6, 2006, Kobe, Japan.
- ⑤ Arai, R., Ohta, K, Tada, K, Nakatani, N. and Okuno, T., “Automatic Measurement

of Nitrogen Ion at Coastal Field Using Simplified Flow Injection Method”, Techno-Ocean 2006/19th JASNAOE Ocean Engineering Symposium, October 21, 2006, Kobe, Japan.

- ⑥ Nakatani, N., Fujihara, M., and Okuno, T., “An Image Measurement Technique of Marine Environment in Coast”, Techno-Ocean 2006/19th JASNAOE Ocean Engineering Symposium, October 20, 2006, Kobe, Japan.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中谷 直樹 (NAKATANI NAOKI)

大阪府立大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30326277

奥野 武俊 (OKUNO TAKETOSHI)

大阪府立大学・工学研究科・教授

研究者番号：60081395

(H20年度中谷直樹に代表者交代)

### (2) 研究分担者

馬場 信弘 (BABA NOBUHIRO)

大阪府立大学・工学研究科・教授

研究者番号：1019894

大塚 耕司 (OTSUKA KOJI)

大阪府立大学・工学研究科・教授

研究者番号：90213769

有馬 正和 (ARIMA MASAKAZU)

大阪府立大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70264801

山田 智貴 (YAMADA TOMOKI)

大阪府立大学・工学研究科・助教

研究者番号：90240027

新井 励 (ARAI REI)

大阪府立大学・工学研究科・助教

研究者番号：60508381

### (3) 研究協力者

西山 武一 (NISHIYAMA TAKEICHI)

(有) 丸智 社長