

| | |
|---------|---------------------------|
| 称号及び氏名 | 博士（工学） 新井 励 |
| 学位授与の日付 | 平成 20 年 3 月 31 日 |
| 論文名 | 「海域環境モニタリングにおける計測法に関する研究」 |
| 論文審査委員 | 主査 奥野 武俊 |
| | 副査 馬場 信弘 |
| | 副査 大塚 耕司 |

論文要旨

地球規模の環境問題やエネルギー問題、食糧問題などを考える際には海洋の役割が重要であり、国の政策の一つとして考える必要があるとの視点から、2007年7月20日に海洋基本法が施行された。その中には、「地球の広範な部分を占める海洋が人類をはじめとする生物の生命を維持する上で不可欠な要素である」ことが明記され、「海洋の持続可能な開発及び利用を実現するための国際的取り組みの中で、海洋の平和的かつ積極的な開発及び利用と環境保全との調和を図る新たな海洋立国を実現する」ことが謳われた。

海洋は様々な物理学的・化学的・生物学的なプロセスが共存するシステムであり、その中に人間活動が組み込まれている。それらの因果関係は非常に複雑であるため、海域環境における現象の変化を詳細に把握することは容易でない。とりわけ沿岸域においてはその変化速度が大きいと、なんらかの異常を認識した時には、すでに大きな問題が生じていることも多い。自然環境を十分に考慮した人間活動を行うためには、当然のことながら海域環境を保全することが重要であり、海域環境の変化を詳細に監視すると同時に、適切な予測や評価を行うことが求められる。そのためには、対象海域における物質循環の構成因子を時間的、空間的に密に計測し、計測された状況を表現するシミュレーションモデルを用いることで、海域環境の状況を把握し、人間活動がどのような影響を海域に及ぼすのか

を予測・評価する一連の行為、いわゆる海域環境モニタリングシステムを開発する必要がある。

しかしながら、その必要性の大きさにもかかわらず、その実用的なシステムは実現に至っていないのが現状である。その原因の一つには、広範囲におよぶ海域において時間的、空間的に高解像度で、しかも多項目にわたる環境因子を計測するための機器や手法の開発が十分に行われていないことがある。そのため、海域環境の状態を正確に把握する上で十分な計測データが得られず、シミュレーションモデルの有効性の検証や、高性能化された計算機を用いた予測結果の適切な評価が困難になっている。

もともと、最近では各種の高機能計測センサーが開発されており、これらを使って水温や流速などかなり多くの物理量は、時間連続的に密に計測できるようになっている。また、リモートセンシング技術の発展によって、時間解像度は粗いものの、海表面に限れば空間解像度は高く、かつ広範囲にわたる領域で各種の物理量を計測することができるようになっている。しかしながら、従来から実験室において分析により定量されている栄養塩濃度や動物プランクトン個体数のような化学・生物学的状態量をリアルタイムでモニタリングするために、現地で自動計測することは非常に難しいのが現状であり、深さ方向にも変化する空間構造を持っている海域の環境状況を、化学・生物的情報も含めて効率よく計測するシステムが望まれている。すなわち、海域環境モニタリングシステムにおける海域環境計測には、まず、多項目にわたる環境因子について、時間・空間的に密に計測できる新たな手法を開発し、計測データの拡充を図ること、計測によって得られる情報から環境因子に関わる情報を可能な限りの確に抽出するための研究や新しい手法を開発することが必要である。

本論文は以下の7章から構成されている。

第1章では、まず、海域環境におけるモニタリングシステムの必要性と環境問題解決のための位置付けをまとめるとともに、それを具現化するにあたり、海域環境計測から得られる時間的、空間的情報量の拡充と、計測できる環境因子数の拡大が大きな課題となることを指摘する。次に、計測モデルを用いて海域環境計測手法や特徴を一般化することで計測原理を概観し、情報量を拡充するための計測手法は、計測対象となる環境因子に特化した計測モデルを用いることで情報を抽出する選択的計測法と、多くの環境因子の複合情報

である計測値に対して、複数の変数を用いた計測モデルを用いることで情報を抽出する複合的計測法に分類できることを指摘し、本研究の背景および動機や目的について述べる。

第2章では、海域環境問題を考える上で最も重要な物質循環の因子である栄養塩濃度は、採水されたサンプルを実験室で化学分析に供するのが一般的であり、海域環境モニタリングを行うに当たってはデータ不足となる項目であることを指摘し、現地において時間連続的に栄養塩を計測できる新しい手法を提案する。これは、本論文で定義した選択的計測法の一つであり、化学分析にしばしば用いられているフローインジェクション手法を基にして、化学的な手法により選択的に溶存無機窒素を抽出し、その濃度を計測するものである。ここでは、計測モデルの関数を近似的に単純化して現地における自動計測を実現し、開発した計測装置を実海域で用いて、十分な計測精度があること、および計測項目の拡大が図られていることなど、その有効性を示す。

第3章では、海域における生態系に与える影響が大きい出水時や埋立浚渫工事にとともなう濁りは現地において空間的に密に計測すべきであることを述べ、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、濁度の鉛直分布を非接触で計測する手法を提案する。すなわち、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。つぎに、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の少ない実用的な計測モデルになることを示す。さらに、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られることを述べ、選択的計測手法の一つと位置付けられることを示す。また、本手法は、全く原理の異なるセンサーを融合的に使うことで新たな空間スケールの情報を抽出する、いわゆるセンサー・フュージョンの考え方を取り入れることで空間スケールに対する計測データの拡充を試みたものとなっていることを示す。

第4章では、まず環境計測から得られる情報は多くの環境因子の複合的な情報となっていることを説明し、その複合的な情報を整理・分離することで、計測対象としている環境因子に関わる情報を抽出する複合的計測法の重要性を示す。つぎに、環境因子と計測値との因果関係が物理モデルで表現可能であるか否かに応じて、その解法を考えるべきことを示す。さらに、それらの因果関係を物理モデルで表現できる場合は積極的にそれを用いて因子情報を抽出すること、また因果関係の関係式が明確でない場合には線形性を仮定し、

複数の計測値の固有ベクトル空間への射影を行うことで、因子と計測値の線形モデルを導き出す方法を提案する。

第5章では、可視光に対する海水の消散スペクトルの計測値と、海水中の植物プランクトン、懸濁物質、有色溶存有機物質など、可視光に吸光特性を有する物質濃度との関係に対して線形関係を仮定し、第4章で提案した固有ベクトル空間上に計測値を射影することで環境因子を抽出する具体例と、計測されたそれぞれの物質濃度の結果を使って、ここで開発された手法の有効性を示す。

第6章では、第4章で述べた手法のうち、計測によって得られる出力信号と環境因子の関係を表す関係が物理モデルとして記述できる場合の例について述べる。ここでは、まず紫外域における海水の吸光スペクトルと海水に含まれる物質の詳細な物理モデルを構築するために、スペクトル分布を詳細に調べ、環境計測ではしばしば問題になる想定外物質の影響がある場合にも有効な物理モデルを構築し、栄養塩濃度を計測する手法を提案する。つぎに、本手法を様々な海域における海水に適用し、その有効性を示す。本手法が時間応答性に優れていることから、栄養塩の鉛直分布の有用な計測手法となりえることを示す。

第7章では、本論文の全体的な総括を行い、得られた結論を要約する。

本研究では、海域環境モニタリングシステムを実現するためには海域環境計測における計測値を拡充することが必要であり、それには、選択的計測法と複合的計測法があることを述べ、それらの詳細を議論すると共に具体的な手法を提案した。まず選択的手法により計測モデルにおける変数や未知パラメータを減らすことで計測モデルの単純化を行い、精度のよい計測方法を開発した結果を示した。これらは、従来から現地における計測が難しいとされていた環境因子の自動連続計測を実現させることで、環境モニタリングにおける計測項目と時空間スケールにおける計測データの拡充を図ったものである。また、海域環境計測において得られる信号データが、多くの環境因子の影響を受けた複合データであることを前提にして、環境因子と計測値の因果関係を適切な計測モデルで表現することにより、計測精度を上げると共に、計測項目や計測の時空間スケールの拡充を図った。

これらの結果は、海域環境計測のみならず、各種の環境計測にも発展的に適応することが可能であり、海域環境モニタリングに関する計測法の十分な検討が行えたことを示している。

審査結果の要旨

本論文は、海域環境のモニタリングシステムを効果的に構築することを目的として、計測項目を拡大し、計測精度を高めると共に、計測現地における自動・連続計測を実現するための新しい計測・解析手法の開発を行ったもので、つぎのような成果を得ている。

- (1) 海域環境モニタリングのための計測手法は、計測対象となる環境因子に特化した数理モデルを用いて、情報を選択的に抽出する手法と、複合化された計測情報そのものを用いる手法に分類できることが明らかにした。
- (2) 従来から、採水したサンプルを実験室で解析することによって求めてきた栄養塩濃度を、現地で計測するための新しい計測機器を開発し、連続計測に有効であることを明らかにした。
- (3) 海水の濁度分布を非接触で計測するために、超音波を使った流速計 (ADCP) によって得られる計測データを使う手法を示すと共に、従来から用いられてきた光学式濁度による計測情報を融合的に使う手法を提案して、有効なことを明らかにした。
- (4) 環境計測で得られる情報に対して、計測対象の環境因子による影響との間に線形関係を仮定すれば、複数の計測値から求められる固有ベクトルを使って座標変換した解析手法を示し、その有効性を明らかにした。また、可視光域における海水の消散スペクトルから植物プランクトン、懸濁物質、有色溶存物質の濃度を求める手法を示して、その有効性を確かめた。
- (5) 紫外光域における海水の吸光スペクトル分布から栄養塩を求める手法を開発し、化学分析を使わない手法の有効性を示した。

以上の成果は、海域環境モニタリングシステムの構築に大きく寄与しており、海洋環境に関する研究分野に対する貢献が大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。本委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。