

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05290

研究課題名(和文) マルチコプターを用いた沿岸域海色リモートセンシング技術の開発と実用化

研究課題名(英文) Development of ocean color remote sensing technology for coastal area using multi-copter

研究代表者

大石 友彦(Oishi, Tomohiko)

東海大学・清水教養教育センター・教授

研究者番号：20231730

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：沿岸域は物理的、化学的そして生物学的な時空間変動が大きい。この様な極めて複雑な沿岸域の環境モニタリングの手段の一つとして、海色リモートセンシングは有効な技術である。この目的のため標準光学部品のみで構築された新型分光放射計を開発した。また、重量も1Kg以下を達成しており、ドローンによる海色観測に適した性能を有している。

他方、沿岸水の光後方散乱特性は測定が極めて困難であるため、十分な理解がされていない。この事が沿岸域における海色観測を困難にしている。この様な観点に立ち、光後方散乱係数推定法を開発した。これによって、海色リモートセンシング技術を沿岸域に適用できる環境が整った。

研究成果の概要(英文)：It is known that coastal area has feature of large variabilities with time and space concerning with physical, chemical and biological processes. Further, it is very sensitive to human activities. To monitor such a complex area, it is useful to apply ocean color remote sensing. For this purpose, we developed a multi-wavelength imaging radiometer which consisted with optical parts only available on market. It suites for observing ocean color with a light plane, like a multi-copter, because it is robust and light weight, less than 1.0Kg.

On the other hand, the backward scattering coefficient of coastal water have not been well studied, because of instrumental difficulties. So that it is extremely difficult to develop the algorithm to retrieve water constitutes of coastal water from ocean color. Because of this reason we developed the method to estimate the backward scattering coefficient with high accuracy. Now, we are ready to apply ocean color remote sensing to coastal waters.

研究分野：海洋光学

キーワード：新型分光放射計 光後方散乱係数 沿岸域 海色リモートセンシング ドローン観測

1. 研究開始当初の背景

衛星搭載型海色リモートセンシングによる植物プランクトン観測は、その瞬時性、広域性において、他の測定法の追随をゆるさない。海色リモートセンシングは、広大な外洋を観測するには有効な手段である。一方、社会活動と密接に繋がっている沿岸域は時空間的変動が大きいと、高い空間分解能が要求される。このため、衛星による海色リモートセンシングでは対応困難である。

沿岸域の海色観測には小型飛行機を利用する方法がある。しかし、小型飛行機のチャータ代や高価な観測機器、熟練したオペレータの確保等を考慮すると、制約が大きい。模型飛行機を利用したアイデアは以前よりあるが、実用レベルに達したとの報告は国内外を通して皆無である。

2. 研究の目的

本研究では、ドローンを用いた沿岸域海色リモートセンシングを前提とした、小型軽量の分光放射計の開発を行う。また、沿岸域における海色データから情報を抽出するには、沿岸水の光学的特性に関する基礎データが必要となる。しかし、海色を決定する重要なファクターである、光後方散乱係数は、測定が困難であるため、外洋を対象とした簡便推定法はあるが、沿岸域には適用できない。このため、沿岸域を対象とした、高精度光後方散乱係数推定法の開発を合わせて行う。これが実現できれば海色リモートセンシングの新しい応用展開の道が開ける。

3. 研究の方法

(1) 多波長イメージ分光放射計の開発：

試作しているイメージ分光放射計は、特殊光学レンズを応用する事により1つの撮像素子を12領域に分割する。対象物からの放射光を分割されたそれぞれの領域に分光イメージ(近紫外～近赤外の波長範囲で任意の12波長)として記録する。試作した分光放射計の重量は約1Kgである。放射計の材料と設計を見直すことにより小型軽量化を行う。海色を観測対象にした場合、1つの撮像素子で広い波長範囲の分光イメージを解析に耐えうるS/N比で測定する方

法の開発を行う。また、実際の測定では、天候の状態で明るさが大きく変動する。マルチコプターに下向き照度を測定するセンサを搭載し、この照度データを参照し、自動的にイメージ分光放射計の積分時間(感度)を調整し、海色データを取得する計測プログラムを開発する。なお、本格的運用の準備として新型分光放射計を搭載したマルチコプターによる沿岸域の観測を行い、センサの性能評価を行う。

(2) 光後方散乱係数推定法の開発：

沿岸域の海水に含まれる物質構成は、外洋と比べ遥かに複雑である。このような海域に海色リモートセンシング技術を適用し、海水中に存在する物質の種類と濃度を推定するには、海色を決定する物質の光学的性質、特に光吸収係数と光後方散乱係数に関する基礎データが必要である。光吸収係数は測定原理も確立しており、大きな問題はない。一方、光後方散乱係数は、その定義から測定が困難であるため、データが皆無の状態である。本研究では光後方散乱係数を高精度で推定する方法の開発を行う。この開発には、ドイツと東海大学の共同研究で開発したイメージ散乱関数計を用いる。

4. 研究成果

(1) 多波長イメージ分光放射計の開発

新型分光放射計開発の考え方と特徴：

対象海域の海色を観測するには、1)海面の一点を観測し、海面上を機械的に走査する方法、2)飛行コースに対し、直角方向の海面ラインの分光像を多数の光センサで走査する方法、3)海面の2次元像を分光されたイメージとして測定する方法(イメージ分光法)がある。1)2)の方法は、観測位置と分光データの正確な同期が求められるため、小型飛行機に比べ姿勢制御・安定性が劣るマルチコプターには不相当と考えられる。3)のイメージ分光法はインターバル撮影が適用できるため、マルチコプターによる観測法としては有利である。イメージ分光法には、いくつかの方法が提案されているが、いずれの方法も1つの撮像素子で対象物(海域)の分光イメージを測定する。このため、可視域全体をカバー

する海色観測では、S/N が良好な分光イメージと悪い分光イメージが混在する欠点を持っている。本研究では、マルチコプターの特長、制約、そして海色観測で要求される信号特性を考慮した新規の多波長イメージ分光放射計を開発した。開発した多波長イメージ分光計は、ニュートラル・デンシティ・フィルタ(ND フィルタ)を用いる事により、既存のイメージ分光器の欠点を解決した。本報告書では、この多波長イメージ分光放射計を用いた観測データの解析結果を報告する。また、マルチコプターを用いた海色リモートセンシングに関する検討も行った。

多波長イメージ分光器放射計を用いればインターバル撮影や画像のオーバーラップ技術を応用することができ、飛行安定性などに弱点をもつマルチコプターにも対応することができる。多波長イメージ分光放射計の原理を Fig. 1 に示す。開発した多波長イメージ分光放射計は可動部が無く頑強である。さらに、1つのイメージセンサを用いるため、簡素なシステム運用が可能である。多波長イメージ放射計は400~800nm を、12波長のバンドパスフィルタを通して分光した。パノラマレンズとミラーを組み合わせ、14bit の分解能を有したモノクロ CMOS センサで各波長の分光イメージを1枚の画像として検出する。また、ND フィルタを装着し、各波長の信号が同じレベルになるように調整している。高度200m から海面を撮影した場合、1ピクセルあたり28cm×28cm の分解能である。なお、本装置は高さ：115mm、直径：128mm、重量：936g と小型軽量となっている。観測には最大積載重量5Kg、最大飛行時間15分のマルチコプターを使用した。また、多波長イメージ分光放射計は、アクティブジンバルを用い、常に鉛直下向きで観測するよう制御している。実際に測定された海面の分光イメージを Fig. 2 に示す。海面の波の様子が各波長のイメージとして捉えられている。

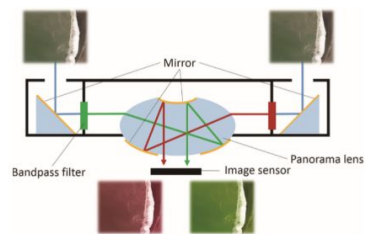


Fig.1 多波長イメージ分光放射計の原理

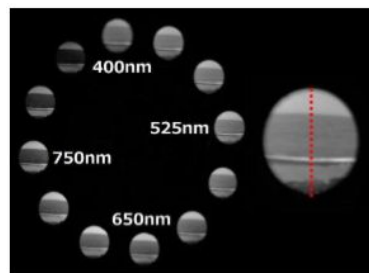


Fig.2 沿岸域の多波長イメージ分光生画像

イメージ分光放射計の現場観測による性能評価：

水平移動： 離陸地点から高度100mまで垂直上昇した後、高度を保持し、約3.0m/sの速度で水平移動しながら、海岸線より沖合300mの地点まで観測を行った。

垂直移動： 離陸地点から高度50mまで垂直上昇し、高度を保持しながら水平移動し、海岸線より沖合150mの地点で高度25mまで垂直下降した後、高度200m地点まで25m間隔で測定を行った。

海色データの解析方法：

画像の出力カウント値に対し、イメージセンサの分光感度特性・NDフィルタの透過率・干渉フィルタの透過率の補正を施した。また、観測画像データから海色の変化の様子を以下の式で指標化した。

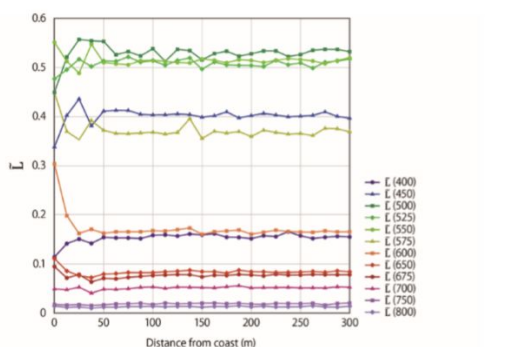
$$I(\lambda) = \frac{L(\lambda)}{L(450) + L(550) + L(650)}$$

ここで、 $L(\lambda)$ は波長 λ における観測画像データの100px当たりの平均出力カウント値に上記の補正処理を行った値である。また、イメージセンサの感度が最も高い525nmを基準に規格化し、相対的な海色の分光特性を求めた。

海色データの解析結果：

データの質を表す S/N は、450~675nm で >10 (S/N =1 は信号がノイズに埋没して信号分離できない限界に対応)であった。即ち、データ処理を行うには十分な S/N を確保している事を確認した。

水平移動の結果： 岸付近では長波長域の光で $I(\lambda)$ の沖合より高い値が検出された (Fig.3)。これは波による海底からの再懸濁した海水を捉えたものと思われる。一方、岸から 50m 以上の沖合では全ての波長で、 $I(\lambda)$ がほぼ一定である事から、光学的に均一な海水であったと判断される。

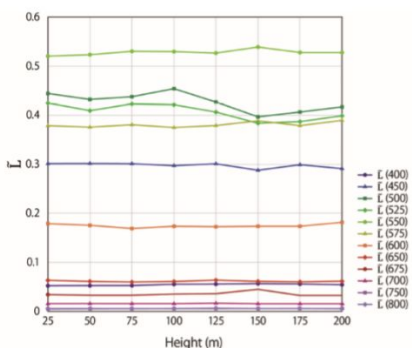


Date: 2015/11/6 Wind speed : 1 ~ 2m/s Solar elevation : 31°
Weather : Clear Sky Wind direction : 135° Solar azimuth : 214°

Fig

Fig.3 海色の空間変化の様子

垂直移動の結果： 観測高度の変化による $I(\lambda)$ の値を見ると波長 400~700 nm までは各波長の平均値に対して 30% 以内の変化であった (Fig.4)。この事から、高度 200m 以下では大気による影響が少ないと考えられる。すなわち、マルチコプターを用いた低空観測では、衛星観測のような大気補正が要求されない点で極めて有利である。



Date: 2015/9/19 Wind speed : 3 ~ 4m/s Solar elevation : 52°
Weather : Clear Sky Wind direction : 150° Solar azimuth : 145°

Fig.4 観測高度の違いによる海色測定の影響

海色の分光特性： 各観測方法における海色の分光特性を Fig.5 に示す。岸付近の場所では沖合と比べ明らかな分光特性の違いが見られた (Fig.5a, b)。岸から 50m 以上沖合では 500 ~ 550nm にピークがあり、これは沿岸域で多く見られる Case2Water の特徴を捉えている。加えて、675nm 付近に相対輝度の僅かな増加が見られ、これは植物プランクトンに含まれるクロロフィル a の影響と考えられる。

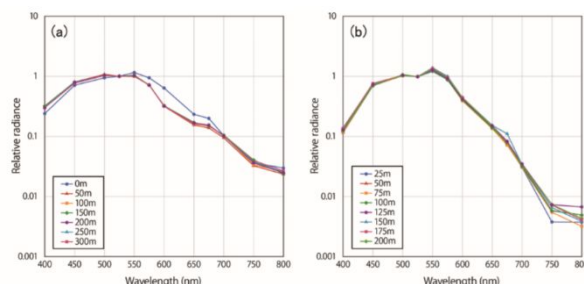


Fig.5 観測地点の違いによる海色分光特性

a: 海岸近傍 b: 沖合

まとめ

新規開発した多波長イメージ分光放射計をマルチコプターに搭載し、海色を観測することができた。懸濁物濃度が高い沿岸域で、高空間分解能かつ 450~675nm で良好な S/N のデータが得られた。また、高度 200m 以下では、複雑な大気補正アルゴリズムが必要ない事を確認した。さらに、50m 以上沖合での海色分光特性は、沿岸域で多く見られる Case2Water の特徴とほぼ一致していた。

本研究で開発した新型分光放射計はマルチコプターを用いた沿岸域の海色観測に耐えうる性能を有している事が確認できた。これらの結果は日本リモートセンシング学会誌 (論文) に発表した。

(2) 光後方散乱係数の高精度推定法の開発

海の色は、海水中に含まれる物質の組成 (無機性、有機性懸濁物や溶存有機物) とそれらの濃度によって決まる。光学的に言えば、物質の光吸収係数と光後方散乱係数の比によって決まる事が多くの研究者

によって示されている。沿岸域は高い基礎生産を有すると共に社会活動と深く関わっている。しかし、沿岸水に含まれる物質の光学的固有特性に関する知見が乏しい等の理由により適用が困難である。現在の所、沿岸性の強い海域の海色データをルーチ的に処理しているのは、北海を対象とした海域だけである。沿岸域に海色リモートセンシング技術を適用するには、光学特性に関する基礎データの収集・解析が必要となる。海水の光吸収係数を測定する方法は、ほぼ確立しており、製品としても入手でき、着実に多くの海域で基礎データが蓄積されている。一方、光後方散乱係数は、定義に従った測定が極めて難しく、乏しい知見しか得られていない。大石により開発された光後方散乱係数推定法は、簡便であるため、アメリカの2メーカーが製品化している。しかし、最近の研究によると大石の推定法は、外洋では十分な精度を有しているが、植物プランクトンが豊富な沿岸域では誤差が約20%になる可能性が示唆されている。これを受け、東海大学とHelmholtz研究所が共同で新しいタイプの体積散乱関数計を開発している。本研究期間中に、本散乱関数計で得られたデータを解析し、新しい推定法を開発し、アメリカ光学会誌(論文)に発表した。この方法は外洋から沿岸水まで、さらには植物プランクトンが異常増殖(例えば赤潮など)した海域でも誤差3%で推定できる。即ち、沿岸域の海色から情報を抽出するアルゴリズムの開発を行える環境が整える事ができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

Hiroyuki Tan, Tomohiko Oishi, Akihiko Tanaka, Roland Doerffer, Yasuhiro Tan, "Chlorophyll-a specific volume scattering function of phytoplankton", Optics Express, 査読あり, 2017, Vol.25, A564-A573

DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.25.00A564>

杉山 領, 大石友彦, 田中昭彦, 丹 佑之

“多波長イメージ分光放射計を用いた沿岸域海色リモートセンシングの試験研究”
日本リモートセンシング学会誌, 査読あり, 2016,

Vol.36,93-99

DOI: <https://doi.org/10.11440/rssj.36.93>

Hiroyuki Tan, Tomohiko Oishi, Akihiko Tanaka, Roland Doerffer, "Accurate estimation of the backscattering coefficient by light scattering at two backward angles", Applied Optics, 査読あり, 2015, Vol.54,7718-7733

DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.54.007718>

Syuusei

〔学会発表〕(計 1 件)

Ryo Sugiyama, Hiroyuki Tan, Akihiko Tanaka, Tomohiko Oishi, Yasuhiro Tan,

"Development and Application of Compact, Robust and Simple Multi-wavelength Imaging Sensor for Coastal Ocean Color Studies"

International Symposium on Remote Sensing 2017 at Nagoya University, 2017

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大石 友彦 (Oishi, Tomohiko)
東海大学・清水教養教育センター・教授
研究者番号: 20231730

(2) 研究分担者

なし ()

研究者番号:

(3) 連携研究者

なし ()

研究者番号:

(4) 研究協力者

田中 昭彦 (Tanaka Akihiko)
丹 佑之 (Tan Hiroyuki)
丹 康弘 (Tan Yasuhiro)
杉山 領 (Sugiyama Ryo)
ロランド ドルファー (Roland Doerffer)