

博士（水産科学） 佐々木 宏 明

学位論文題名

高緯度海域における光環境と生物光学パラメータとの
関係に関する基礎的研究

学位論文内容の要旨

植物プランクトン・デトライタスなどの生物起源物質による吸収が海水の光学特性を支配する海水は Case-I water と呼ばれている。水柱内での照度の減衰の割合を示す拡散消散係数 $K_d(\lambda)$ と、物質がどれだけ光を吸収したのかを示す吸収係数 $a(\lambda)$ は光環境を特徴づけるのに有効であるだけでなく、植物プランクトンによる一次生産推定や海色リモートセンシングによる輝度情報を理解する上でも必要不可欠な光学パラメータである。

吸収係数 $a(\lambda)$ は、水分子による吸収 $a_w(\lambda)$ 、植物プランクトン・デトライタスなどの有機懸濁粒子やバクテリア・土砂などの無機懸濁粒子などを含む全懸濁粒子による吸収 $a_p(\lambda)$ 、溶存有機物 (CDOM) による吸収 $a_g(\lambda)$ に分けることができる。特に植物プランクトンによる吸収係数 $a_{ph}(\lambda)$ は、植物プランクトンの成長率、あるいは一次生産推定モデルにとって重要な光学パラメータとなっている。現在では光学測器の進歩により、現場観測で測定可能な光学パラメータも増加してきている。しかし $a_{ph}(\lambda)$ を直接測定する測器はなく、実験的に有機溶媒で色素を除去する方法、あるいは実験的に分離せずにスペクトル特性を考慮した波長比・植物色素濃度などの組み合わせを利用して、統計的手法による生物光学モデルを用いた方法に限定される。

植物プランクトンは利用可能な照度の放射分布による影響を大きく受けるため、一次生産を推定するためには、まず水柱内での光がどのように伝達されていくのか（光の振る舞い）を明らかにすることが非常に重要となってくる。

本研究では高緯度海域における海水の光学特性のスペクトル特性を評価し、海域特有の光環境を理解することで、

- ・拡散消散係数 $K_d(\lambda)$ と吸収係数 $a(\lambda)$ との関係
- ・植物プランクトンによる吸収係数モデル開発

以上の 2 点について議論する。

本研究では、光海洋学研究に関する知見がまだ非常に少ない北太平洋亜寒帯を含む高緯度海域の光環境に注目した。使用データは、7 つの研究航海で実施した水中分光放射計を用いた水柱内の照度測定と現場採水による植物色素濃度、および吸収係数測定データを用いた。研究対象海域は 7 つのエリア (北東北太平洋亜寒帯 (NEP), ベーリング海南部 (SBS), 北西北太平洋亜寒帯 (NWP), 日本海 (JPN), バフィン湾 (NOW), 噴火湾 (FUN), 北海道周辺海域 (AHK)) に区別した。全エリアの有光層深度 Z_{eu} は、NOW, FUN エリアでブルーム期を含むために 11-84 m で、 Z_{eu} 内のクロロフィル a 濃度 (Chl a) も 0.06-21.37 mg m⁻³ と非常に広範囲であった。しかし全サンプルの 70% 以上が <1.0 mg m⁻³ で、エリア別に見ると NEP, JPN, AHK エリアの多くが含まれていた。

1. 拡散消散係数 $K_d(\lambda)$ と吸収係数 $a(\lambda)$ との関係

$K_d(\lambda)$ は Chl a と経験的な関係があることが知られている。低 Chl a では $K_d(\lambda)$ の最小値は 490 nm 付近を示したが、高 Chl a になるにつれて $K_d(\lambda)$ は増加し、さらに最小値は長波長側にシフトした。これは短波長域に Chl a 、そして CDOM, デトライタスによる吸収帯があり、長波長域では水自身による吸収 (>580 nm) が強いために 565 nm 付近が一番透過することになる。従って $K_d(\lambda)$ は光環境の特徴を見るには最適なパラメータである。

Chl a から $K_d(\lambda)$ を求める Morel and Maritorena [2001] のモデルを用いると、実測値は低 Chl a のとき短波長域の $K_d(\lambda)$ は過大評価傾向を示すエリアが多く、また FUN エリアで多く見られた高 Chl a では逆に過小評価していた。

各エリアの単位 Chl a 当たりの植物プランクトンによる吸収係数 $a_{ph}^*(\lambda)$ は、短波長側の青色域 (436 nm) と長波長側の赤色域 (675 nm) の Chl a による二つのピークを含むスペクトルを示した。さらに補助色素による吸収帯がある波長域のスペクトル形状が各エリアで特徴的であった。従って $a_{ph}^*(\lambda)$ は群集構造の情報を提供するといえる。

吸収係数は物質濃度に比例する Beer の法則に原理的には従うので、 $a_{ph}(\lambda)$ の増加率は Chl a と共に一定になるはずである。しかし実際は Chl a が増加するにつれて、 $a_{ph}(\lambda)$ は偏

りが生じ非線形関係に変化する。主な要因は pigment package effect により吸収効率の低下を生じるためである。他のエリアと比較すると、特に FUN エリアの $a_{\text{ph}}^*(\lambda)$ は低い値を示していた。

従って各エリアで得られた吸収スペクトルと補助色素濃度データを、過去の知見により判断すると、NEP, SBS, NWP, JPN, AHK エリアでは diatoms も含むが主に小型の植物プランクトンが卓越した海域で、FUN エリアは低 $a_{\text{ph}}^*(\lambda)$ の diatoms に代表される主に大型の植物プランクトンが卓越している海域と示唆された。

CDOM・デトライタスによる吸収係数 $a_g(\lambda)$, $a_{\text{det}}(\lambda)$ は共に、短波長域に向かうにつれて指数関数的に増加し続ける傾向を示す。そのためにスペクトルを指数増加関数で近似させることができる。また海水の光学特性を理解する上で、Chl a の濃度変化により他の物質による光学パラメータがどのように変化するのかを明らかにすることが重要である。しかし $a_g(\lambda)$, $a_{\text{det}}(\lambda)$ はどちらも Chl a に伴う傾向は示さなかった。FUN エリアではブルームにより Chl a が 2 枝変化しても、 $a_g(\lambda)$ はほとんど大きな変化は見られなかった。 $a_p(\lambda)$ に対するデトライタスの寄与は、低 Chl a では平均 45% 程度であるが、高 Chl a になるとデトライタスも増加するにもかかわらず 20% まで減少していた。

$K_d(\lambda)$ のスペクトルは $a(\lambda)$ に大きく影響され、春季ブルーム期の FUN エリアでは低 $a_{\text{ph}}^*(\lambda)$ でかつ $a_p(\lambda)$ に対して低 $a_{\text{det}}(\lambda)$ であるために低消散になり、既存の生物光学モデルに合わない要因であると示唆された。 $K_d(\lambda)$ は、光環境の鉛直的な光学情報を含み、海色リモートセンシングへ直接リンクさせることができると考えられる。

2. 吸収係数モデル

青色域と赤色域での吸収の比 (ϕ_{ph}) と $a_g(\lambda)$, $a_{\text{det}}(\lambda)$ スペクトルの傾きを用いる Roesler *et al.* [1989] のモデルを参考にし、最初に $a_{\text{ph}}(\lambda)$ と Chl a は線形関係が成立するとして、シンプルに実測値の比 ($a_{\text{ph}}(436) / a_{\text{ph}}(675)$) から ϕ_{ph} を計算した。エリア毎に $a_{\text{ph}}(\lambda)$ を見積もると、実測値とモデル値はどのエリアも良い相関関係を示したが、やや過大評価傾向を示していた。特に FUN エリアでは 2 倍近くも高い値を見積もった。他のエリアと吸収特性が異なると思われる FUN エリアのみで ϕ_{ph} を求めなおすと、高 $a_{\text{ph}}(\lambda)$ で誤差が小さくなつたがまだ過大評価していた。

そこで pigment package effect を考慮に入れるために, $a_{ph}(\lambda)$ が非線形関係になることに注目し ϕ_{ph} を累乗関数で求めた。特に FUN エリアは高 Chl a 域が非常に良い関係を示し, 高濃度まで増加する Chl a に対応できることが示唆された。pigment package effect が顕著に表れる水塊に対しては, ϕ_{ph} は累乗関数の適用が有効であると思われる。

さらに外洋域で卓越している小型の植物プランクトンと沿岸域の diatoms に代表される大型の植物プランクトンを $a_p(\lambda)$ スペクトルの波長比から識別し, 適切なモデルの係数を選択する指標を用いて, 低 Chl a で過大評価をしていた AHK エリアの誤差を減少させることができた。

本研究で参考にした *Roesler et al. [1989]* のモデルは各エリアの光学特性を把握すれば, ϕ_{ph} と傾き (S_{det} , S_g) を変えることによってどのエリアにも適用可能なモデルとなる。スペクトル平均した \bar{a}_{ph} を求めると, 全エリアでは $a_p(\lambda)$ からは相対誤差 9-18%以内, $a(\lambda)$ からでも 14-38%以内の精度で見積もることが可能であった。

さらに精度のよい生物光学モデルが開発できれば, 間接的にでも高い精度で $a_{ph}(\lambda)$ を見積もることが可能で, 現場観測では作業時間と労力の節約による効率化につながり, さらに生物光学データの利用の増加による現場光学測器の技術面における測器開発の発展も期待される。

学位論文審査の要旨

主査 教授 齊藤 誠一
副査 教授 三浦 汀介
副査 教授 飯田 浩二
副査 教授 古谷 研 (東京大学)
副査 助教授 米田 國三郎

学位論文題名

高緯度海域における光環境と生物光学パラメータとの 関係に関する基礎的研究

水柱内での照度の減衰の割合を示す拡散消散係数 $K_d(\lambda)$ と、物質がどれだけ光を吸収したのかを示す吸収係数 $a(\lambda)$ は光環境を特徴づけるのに有効である。さらに、植物プランクトンによる基礎生産推定や海色リモートセンシングによる輝度情報を理解する上でも必要不可欠な生物光学パラメータである。特に植物プランクトンによる吸収係数 $a_{ph}(\lambda)$ は、植物プランクトンの成長率、あるいは基礎生産推定モデルにとって重要な光学パラメータとなっている。植物プランクトンは利用可能な照度の放射分布による影響を大きく受けるため、基礎生産を推定するためには、まず水柱内での光がどのように伝達されていくのか (光の振る舞い) を明らかにすることが非常に重要となってくる。

現在、海洋光学測器の進歩により、吸収係数ばかりでなく散乱係数も含め現場観測で測定可能な光学パラメータも増加してきている。しかし $a_{ph}(\lambda)$ を直接測定する測器はなく、実験的に有機溶媒で色素を除去する方法、あるいは実験的に分離せずにスペクトル特性を考慮した波長比・植物色素濃度などの組み合わせを利用して、統計的手法による生物光学モデルを用いた方法に限定される。

そこで、植物プランクトンによる吸収係数モデルを開発して、間接的にでも高い精度で $a_{ph}(\lambda)$ を見積もることが可能になれば、現場観測では作業時間と労力の節約による効率化につながり、さらに新しい現場海洋光学測器開発の発展や衛星海色リモートセンシングを応用した吸収係数分布観測への進展が期待できる。

本研究では、光海洋学研究に関する知見がまだ非常に少ない北太平洋亜寒帯を含む高緯度海域の光環境に注目し、1997年から2001年までの5年間に、7つの研究水域(北東北太平洋亜寒帯、ベーリング海南部、北西北太平洋亜寒帯、日本海、バ芬湾、噴火湾、北海道周辺海域)で水中分光放射計を用いた水柱内の照度測定、現場採水による植物色素濃度および吸収係数測定を実施した。本研究は、それらの観測結果を用いて、①拡散消散係数 $K_d(\lambda)$ と吸収係数 $a(\lambda)$ との関係、および、②植物プランクトンによる吸収係数

モデル開発を中心に、高緯度海域における海水の光学特性のスペクトル特性を評価し、海域特有の光環境を理解しようとしたものである。

特に審査員一同が評価した点は以下の通りである。

1. 知見がまだ非常に少ない北太平洋亜寒帯を含む高緯度海域の光環境に注目して、非常に広範囲で収集したデータを用いて解析して、その光環境の特性を明らかにした。
2. $\text{Chl } a$ から $K_d(\lambda)$ を求める *Morel and Maritorena [2001]* のモデルを用いて、実測値は低 $\text{Chl } a$ のとき短波長域の $K_d(\lambda)$ は過大評価傾向を示す海域が多く、また噴火湾海域では多く見られた高 $\text{Chl } a$ では逆に過小評価していることを示した。
3. 補助色素による吸収帯がある波長域のスペクトル形状が各海域で特徴的であり、 $a_{\text{ph}}^*(\lambda)$ は群集構造の情報を提供することを示した。各海域で得られた吸収スペクトルと補助色素濃度データを、過去の知見により判断して、珪藻類も含むが主に小型の植物プランクトンが卓越した海域、低 $a_{\text{ph}}^*(\lambda)$ の珪藻類に代表される主に大型の植物プランクトンが卓越している海域を区別した。
4. 拡散消散係数 $K_d(\lambda)$ と吸収係数 $a(\lambda)$ との関係について CDOM・デトライタスによる吸収係数 $a_g(\lambda)$, $a_{\text{det}}(\lambda)$ は共に、短波長域に向かうにつれて指數関数的に増加し続ける傾向があり、そのためにスペクトルを指數増加関数で近似させることができることを示した。
5. 植物プランクトンによる吸収係数モデル開発を試み、高クロロフィル a 濃度海域で pigment package effect が顕著に表れる水塊に対しては、青色域と赤色域での吸収の比 (ϕ_{ph}) は累乗関数の適用が有効であることを提案した。さらに吸収係数 $a(\lambda)$ または全懸濁粒子による吸収 $a_p(\lambda)$ から植物プランクトンによる吸収係数 $a_{\text{ph}}(\lambda)$ を求めるモデルを開発した。
6. 外洋域で卓越している小型の植物プランクトンと沿岸域の diatoms に代表される大型の植物プランクトンを $a_p(\lambda)$ スペクトルの波長比から識別し、適切なモデルの係数を選択する指標を用いて、低 $\text{Chl } a$ で過大評価をしていた海域の誤差を減少させることができた。
7. このような生物光学モデルを応用すれば、間接的にでも高い精度で $a_{\text{ph}}(\lambda)$ を見積もれ、現場海洋生物光学観測において作業時間と労力の節約ができ効率化につながり、さらに生物光学データの利用、さらには衛星海色リモートセンシングへの応用可能性を示した。

以上の諸点は高緯度海域における光環境と生物光学に関する重要な基礎的知見を得たものとして高く評価できる。

よって審査員一同は、本論文が博士（水産科学）の学位論文として価値あるものと認定した。