

日仏海洋学会賞受賞記念講演
海洋の光環境と生物生産に関する研究*

岸野元彰**

Studies on optical environment and biological production in the ocean

Motoaki KISHINO**

この度は思いがけず、日仏海洋学会賞を受賞させて頂き、まことに光栄に存じ心から感謝致しております。

受賞の対象になりました「海洋の光環境と生物生産に関する研究」は、海洋における光環境と植物プランクトンの相互関係を明らかにしようとしたものであります。本日は、その成果の基礎となりました光海洋学からお話をしたいと思います。

“Optical Oceanography” 一般に海洋光学と言っていますが、あえて光海洋学と言いたいと思います。これは、“Marine Optics” とはニュアンスが異なるように思います。ともすると海洋学を忘れてしまいますので、ここでは海洋学を強調し、次のように定義したいと考えております。

「光海洋学とは、海洋における光の振舞いを明らかにし、光の振舞いから海洋を知り海洋を理解する分野である」

海面に入射した太陽光と天空光は、海面で反射・屈折を受け海中に入っていきます。そこでは、波や泡が光の反射・屈折に影響を与えます。海中に透入した光は、海水中の種々の物質（例えば、植物プランクトン、その他の懸濁粒子、溶存物質と水分子）の光学的性質（吸収、散乱等）によって、指数関数的に強度が減衰し分光分布も変えて行きます（光場の形成）。これと同時に、海洋を見たときの色も海水中の種々の物質の濃度によって変化します。光場と光学的性質の関係、光学的性質と海水中の物質の関係、あるいは光場と物質との関係など様々な問題があります。それらの関係を明らかにすることが

大きなテーマと考えられます。その上で光が海洋においてその様な役割を演じているか明らかにしていくこととなります。

海洋に透入した太陽の光エネルギー全体の流れをみますと、大部分表層海水の吸収によって熱に変換されます。この熱エネルギーは大気・海洋系の境界層で重要な役割を演じているはずですが、一方、植物プランクトンに吸収され利用されるエネルギーはごくわずかです。わずかなエネルギーに見えますが、海洋における生態系を支えている唯一のエネルギー源です（厳密には光エネルギーを必要としない合成がわずかにあります）。したがって、海洋における光のふるまいを明らかにすることは、海洋の生態系にとって重要になります。

この観点から光と植物プランクトンの関係を眺めてみます。光エネルギーは、植物プランクトンの光合成のエネルギー源です。同時に植物プランクトンが増殖すると光の吸収が増加し光場を変えます。いいかえれば光と植物プランクトンは相互作用していることとなります。

海洋における光のふるまいを調べる方法として、海洋各層における分光放射照度の測定が考えられます。そのため、より精度の高い水中分光放射照度計を開発しました（KISHINO and OKAMI, 1984）。東京湾を始め日本近海において多くの測定を行いました。この装置は、パソコンでデータ収集出来るように改造しましたが現在も活躍しています。分光放射照度の測定結果から、深度と共にどの様に光エネルギーが消散していくかを研究しました。その結果、水分子とラマン散乱の分光放射照度に対する影響（SUGIHARA, *et al.*, 1984）、植物プランクトンの蛍光の影響（KISHINO *et al.*, 1984a,b）、などを明らかにしました。特に現場海洋における植物プランクトンの蛍光は、“Natural fluorescence” と呼ばれ、植物プランクトンの光合成と関係しており、活性の指標と

* 1993年5月31日 日仏会館(東京)で講演
Conférence à la remise du Prix de la Société
franco-japonaise d'océanographie

** 理化学研究所
The Institute of Physical and Chemical Research,
Wako-shi, Saitama, 351-10 Japan

して用いられ始めました (CHAMBELIN *et al.*, 1990)。

分光放射照度の測定と同時に理論計算を試みた。放射輸送理論を直接解くことは困難です。そこで各種試みが行われていますが、我々は薄層モデルと二流モデル(modified two-flow model)を試みました。リモートセンシングには、この二流モデルの適応が簡便であることがわかって来ました (OKAMI *et al.*, 1982)。

こういった理論計算には、光学的性質が必要です。そのため、海水中に含まれている各種物質の濃度と光学的性質の関係を明らかにする必要があります。溶存物質の吸収は、濾過海水の吸収測定で得られます。懸濁粒子の場合、原海水の吸収から溶存物質の吸収を差し引くか、または海水を濾過し濾紙 (GF/F) 上に残った懸濁物の吸収を測定することにより得られます。この場合、植物プランクトンとその他の懸濁物を分けて測定することはできません。

そこで、いわゆるオパールグラス法 (SSHIBATA, 1956) とメタノール色素抽出法 (TALLING and DRIVER, 1961) を組み合わせて、植物プランクトンとその他の懸濁物を分けて測定する方法を開発致しました (KISHINO *et al.*, 1985)。すなわち、はじめにグラスフィルター (GF/F) で海水を濾過し、フィルター上の懸濁粒子の吸収を測定します。次にメタノールで色素を抽出し、フィルター上の残ったものの吸収を測定します。両者の差が植物プランクトンの吸収と考えられます。この方法の欠点は、メタノールで抽出出来ない光合成色素、メタノールで抽出される植物プランクトン以外の色素があるために、過小または過大評価すること、およびフィルター上に集めたために起こるフィルター効果 (一般に pathlength amplification factor といわれています) を除く必要があること等です (MITCHELL and KIEFER, 1984)。これらの方法を使うことにより、海水の吸収係数についてモデルの作成が可能になりました。

次の問題は、散乱です。散乱関数の測定は、粒経分布の研究と共に古くから行われてきました (SASAKI *et al.*, 1960)。しかし、粒経分布測定技術の発達にともない、研究されなくなってきました。最近になり、光学的性質の一つとして再び注目されるようになりました。例えば、120°方向の散乱関数と後方散乱係数の関係を求めた研究などがあります (OISHI, 1990)。研究をさらに進める必要があります。

光と生物生産の関係を見ることにします。先に述べた様に、光エネルギーは、植物プランクトンの光合成のエネルギー源です。そこで、光エネルギーをどの様な

効率で植物プランクトンが利用しているか、明らかにすることが重要です。横軸にPARを縦軸に光合成速度をとるいわゆる光-光合成曲線の立ち上がり勾配は、量子収率と吸収係数で決まります。量子収率は、光合成速度を植物プランクトンが吸収した光子で割った値で定義されています。量子収率を求めるためには、光合成速度とともに、植物プランクトンが吸収した光エネルギー (光子単位, PUR) を知る必要があります。この植物プランクトンが吸収した光子は、プランクトンに入射する光合成に有効な光子 (PAR) と吸収係数がわかれば求められます。ここで重要なことは、入射する光エネルギーが深さによって特異的な分光分布を持っていること、および植物プランクトンの吸収係数が色素系によって選択的な吸収特性を持っていることである。従って、PURを求めるとき、分光特性を考慮した計算をする必要があります。

成層した大洋で現場において、光合成速度、植物プランクトンの分光吸収係数、各層の分光放射照度の測定を行い、量子収率を求めました (KISHINO *et al.*, 1986)。また、赤、緑、青色の各種光条件を作り、各色光下での量子収率を測定し、光条件と光合成の関係を検討しました (TAKAHASHI *et al.*, 1989)。

光海洋学の応用の最近の話題は、海色リモートセンシングです。先に述べたように、海の色は、海水中の種々の物質の濃度で決まります。海色には、理論的考察により、物質の吸収の分光分布が効いていることがわかってきました。そこで、海の色を人工衛星から測定し、海水中のクロロフィル濃度を求めようという試みが行われました。

本格的な試みは、1978年に打ち上げられた Nimbus-7 に搭載された CZCS に始まります。海洋から衛星に到達する放射輝度はごくわずかで、衛星のセンサーが測定する輝度の大部分は、大気散乱光です。多くの研究者によって、様々なアルゴリズムが提案されました (例えば、GORDON and MOREL, 1983)。現在は、CZCSのデータは、NASA/GSFC で整備され自由に使えるようになりました。大気補正後の値を用いて、全海洋のクロロフィル分布が得られています (NASA, 1989)。しかし、CZCSは、実験センサーであったため、常に測定していただけではありません。適時1軌道2分間だけ動かしてましたので、全海洋といっても、測定まったく無い海域、測定頻度の少ない海域が多くみられます。

NASAの本格的な海色センサー Sea WiFS が1994年7月に、日本の海色センサー ADEOS/OCTS が1996年

2月に打ち上げられる予定です。これらのセンサーは、CZCSの経験を踏まえて改良され、グローバルなクロロフィル濃度分布を得ることを目的としています。気象衛星と同様に、常に測定しているので、2日から3日に1回全球の分布が得られます。もちろん雲があるとクロロフィル分布は得られませんが。従って、これらの衛星データが利用出来る様になると、クロロフィル分布の時系列分布に関する情報が得られるようになります。OCTSはクロロフィル濃度だけでなく、海面温度が得られます。又、ADEOSには、NSCATが搭載され、海上風、波が明らかになります。これらを組合せることにより、海洋生物の研究に新たな1ページを加えることと思います。

将来の海色センサーの計画としては、1999年2月にADEOS-II/GLIがあり、アメリカ、ヨーロッパでも計画されています。従って、少なくとも10年以上の期間、グローバル海色データが得られると考えられます。これらのデータを遊ばせて置く必要はなく、大いに利用して行きたいと考えています。現在、日本とアメリカでは、毎年1回、海色リモートセンシングのワークショップを交互に開催し、検討を重ねています。衛星データの有効利用を特に若い研究者に大いに期待しています。

いままで行ってきた研究成果を中心に、述べてきました。少しずつ進んで来たと思いますが、まだまだ解決すべき多くの問題点があると肝に銘じています。今後の研究は、新しいアイデアに期待するところが多いと思います。新しいアイデアのもとに、種々の海域で、現場で各種のパラメータを同時に測定し、理論的考察と共に海洋中での光の振舞いを明らかにすることが次の前進に成ると考えています。

最後に、研究を始めた頃から多くの先生方にご指導ご鞭撻を賜りました。また、多くの共同研究者に恵まれ研究を続けることができました。ここに厚くお礼申し上げます。これを機会に新たな気持ちで研究を進めたいと思いますので、皆様方の一層のご支援、ご鞭撻をお願い致します。

文 献

- CHAMBERLIN, W. S., C. R. BOOTH, D. A. KIEFER, J. H. MORROW and R. C. MURPHY (1990): Evidence for a simple relationship between natural fluorescence, photosynthesis, and chlorophyll in the sea. *Deep-Sea Res.*, **37**, 951-973.
- GORDON, H. R. and A. Y. MOREL (1983): Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery: A Review. Springer-Verlag, New York, 114pp.
- KISHINO, M. and N. OKAMI (1984): Instrument for measuring downward and upward spectral irradiances in the sea. *La mer*, **22**, 37-40.
- KISHINO, M., S. SUGIHARA and N. OKAMI (1984a): Influence of fluorescence of chlorophyll a on underwater upward irradiance spectrum. *La mer*, **22**, 224-232.
- KISHINO, M., S. SUGIHARA and N. OKAMI (1984b): Estimation of quantum yield of chlorophyll a fluorescence from the upward irradiance spectrum in the sea. *La mer*, **22**, 233-240.
- KISHINO, M., M. TAKAHASHI, N. OKAMI and S. ICHIMURA (1985): Estimation of the spectral absorption coefficients of phytoplankton in the sea. *Bull. Marine Sci.*, **37**, 634-642.
- KISHINO, M., N. OKAMI, M. TAKAHASHI and S. ICHIMURA (1986): Light utilization efficiency and quantum yield of phytoplankton in a thermally stratified sea. *Limnol. Oceanogr.*, **31**, 557-566.
- MITCHELL, B. G. and D. A. KIEFER, (1984): Determination of absorption and fluorescence excitation spectra for phytoplankton. *Marine Phytoplankton and Productivity*, O. HOLM-HANSEN, L. BOLIS and R. GILLES, (eds.), Springer-Verlag, 157-169.
- NASA (1989): *Ocean color from space*.
- OISHI, T. (1990): Significant relationship between the backward scattering coefficient of seawater and the scatterance at 120°. *Appl. Opt.*, **29**, 4658-4665.
- OKAMI, N., M. KISHINO and S. SUGIHARA (1984): Analysis of ocean color spectra (I). Calculation of irradiance reflectance. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **38**, 208-214.
- SASAKI, T., N. OKAMI, G. OSHIBA and S. WATANABE (1960): Angular distribution of scattered light in deep sea water. *Rec. Oceanogr. Works Japan*, **5**, 1-10.
- SHIBATA, K. (1956): Spectrophotometry of intact biological materials. *J. Biochem.*, **45**, 599-623.
- SUGIHARA, S., M. KISHINO and N. OKAMI (1984): Contribution of Raman Scattering to upward irradiance in the sea. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **40**, 397-404.

- TAKAHASHI, M., S. ICHIMURA, M. KISHINO and N. OKAMI (1998): Shade and chromatic adaptation of phytoplankton photosynthesis in a thermally stratified sea. *Mar. Biol.*, **100**, 401-409.
- TALLING J. F. and D. DRIVER (1961): Some problems in the estimation of chlorophyll-a in phytoplankton. *Proceedings of the conference on primary productivity measurement, marine and freshwater*. M. S. DOTDY, (ed.), U.S. Atomic Energy Commission, TID-7633, 142-146.