

海洋光学標準用語集の吸収係数，散乱係数，および消散係数の定義式における矛盾

田中昭彦*¹

Inconsistencies of definitions of absorption, scattering and attenuation coefficients
in the standard terminology of marine optics

Akihiko TANAKA

Abstract

Standard terminology of marine optics was recommended by IAPSO (International Association of the Physical Science of the Ocean) in 1985. We have found definitions of absorption, scattering and attenuation coefficients have inconsistencies in relation to other quantities in the IAPSO standard terminology. In this paper, the inconsistencies are pointed out and revised definitions of absorption, scattering and attenuation coefficients are proposed. Also, the revised definitions are validated. The validation shows that the revised definitions are consistent with other quantities.

1. はじめに

海洋光学は，海中の光の振舞いを知り海洋を研究する学問である．海洋光学の応用分野は広く，物理・生物あるいは工学・理学の分野を問わず多岐にわたっている．これらの学問の光学分野では，海洋光学で定義されている用語と同じ用語が用いられている．また，海洋学のみならず，陸水学の光学分野においても海洋光学と同じ用語が使用されている．海洋光学で定義されている用語は，様々な分野において共通の理解をもたらす重要な役割を担っている．

現在，海洋光学では，IAPSO (International Association of the Physical Science of the Ocean) で推奨された用語とその定義，記号，単位を用いることが標準となっている．現行の海洋光学に関する用語および概念を国際的に最初にまとめたのは，IAPO (International Association of Physical Oceanography) の海洋輻射委員会 (Committee on Radiant Energy in the Sea, chairman: N. G. Jerlov) である．1964年にまとめられたこのIAPO 海洋光学用語集は，Jerlov (1968, 1976) で発表されており，日本語訳は佐々木 (1967) に紹介されている．その後，海洋光学の応用範囲の拡大に伴い，IAPO による海洋光学用語を踏襲しつつ拡張したが，現在のIAPSO 海洋光学用語集 (IAPSO, 1985) であ

る．IAPSO 海洋光学用語集はIAPSO の光海洋学ワーキンググループ (Working Group on Optical Oceanography, chairman: A. Morel) によってまとめられた．以降，IAPSO によって推奨されている海洋光学用語を海洋光学標準用語，またその用語集を海洋光学標準用語集と記す．

海洋光学標準用語集には，概念を明確にすべく他の物理量との関係を表した定義式が記載されている．しかし，吸収係数，散乱係数および消散係数の定義式とそれに関連する物理量の定義式を比較すると，矛盾が生じることが分かった．吸収係数，散乱係数および消散係数は，物質の光学的固有性質であるすなわち，海洋光学およびその応用分野にとって，吸収係数，散乱係数および消散係数は，重要な物理量である．例えば，人工衛星で得た海洋の光学的情報から海洋表層のクロロフィル *a* 濃度や，懸濁物濃度，有色溶存有機物濃度などを推定する海色リモートセンシングのアルゴリズムでは，光学的情報と海洋表層の物質濃度を直接統計的に結び付ける経験的なアルゴリズムを除き，吸収係数，散乱係数および消散係数は必須である (例えば，田中ら，2001 ; Tanaka *et al.*, 2004)．本報では，海洋光学標準用語集の吸収係数，散乱係数および消散係数の定義式に見られる矛盾を指摘するとともに，定義式の修正案を提示し，修正した定義式の整合性を検証した．

2011年7月1日受付 2011年12月14日受理

* 1 清水教養教育センター非常勤講師 (General Education Center, Shimizu, School of Marine Science and Technology, Tokai University)

$$1 - C = T \text{ (beam transmittance)}$$

2. 吸収係数, 散乱係数および消散係数の定義

吸収係数, 散乱係数および消散係数とそれに関連する用語を, 海洋光学標準用語集 (IAPSO, 1985) から抜粋する. なお各用語の日本語訳は佐々木 (1967) を参考に付記した.

Radiant flux (放射束)

The time rate of flow of radiant energy (Q).

Symbol: Φ, F

Unit: W

$$\text{Relation: } \Phi = \frac{dQ}{dt}$$

Where t is time.

Note: The symbol Φ , rather than F recommended by IAPSO has been adopted by the International Organization for Standardization (ISO) and by the International Association of Meteorology and Atmospheric Physics (IAMAP).

Absorptance (吸収率)

The ratio of the radiant flux (Φ_a) lost from a beam by means of absorption, to the incident flux (Φ_0).

Symbol: A

$$\text{Relation: } A = \frac{\Phi_a}{\Phi_0}$$

Scatterance (散乱率)

The ratio of the radiant flux (Φ_b) scattered from a beam, to the incident flux (Φ_0).

Symbol: B

$$\text{Relation: } B = \frac{\Phi_b}{\Phi_0}$$

Attenuance (消散率)

The ratio of the radiant flux lost from a beam of infinitesimal width by means of absorption and scattering to the incident flux.

Symbol: C

$$\text{Relation: } C = A + B$$

Transmittance (透過率)

The ratio of the transmitted (Φ_t) radiant flux to the incident flux (in either irradiance or radiance form).

Symbol: T

$$\text{Relation: } T = \frac{\Phi_t}{\Phi_0}$$

Note: for a beam

Absorption coefficient (吸収係数)

The absorptance of an infinitesimally thin layer of the medium normal to the beam, divided by the thickness (Δr) of the layer.

Symbol: a

Unit: m^{-1}

$$\text{Relation: } a = -\frac{\Delta A}{\Delta r} = -\frac{1}{\Phi_0} \frac{\Delta \Phi_a}{\Delta r}$$

Note: for homogeneous medium of finite thickness r

$$a = -\frac{1}{r} \ln(1 - A)$$

(Total) scattering coefficient ((全) 散乱係数)

The scatterance of an infinitesimally thin layer of the medium normal to the beam, divided by the thickness (Δr) of the layer.

Symbol: b

Unit: m^{-1}

$$\text{Relation: } b = -\frac{\Delta B}{\Delta r} = -\frac{1}{\Phi_0} \frac{\Delta \Phi_b}{\Delta r}$$

Note: for homogeneous medium of finite thickness r

$$b = -\frac{1}{r} \ln(1 - B)$$

(Total) Attenuation coefficient ((全) 消散係数)

The attenuance of an infinitesimally thin layer of the medium normal to the beam, divided by the thickness (Δr) of the layer.

Symbol: c

Unit: m^{-1}

$$\text{Relation: } c = -\frac{\Delta C}{\Delta r} = -\frac{1}{\Phi_0} \frac{\Delta \Phi_c}{\Delta r}$$

and

$$c = a + b$$

Note: for homogeneous medium of finite thickness r

$$c = -\frac{1}{r} \ln(1 - C)$$

3. 矛盾

海洋光学標準用語集では, 吸収係数, 散乱係数および消散係数に対して以下の式で定義している.

$$a = -\frac{\Delta A}{\Delta r} = -\frac{1}{\Phi_0} \frac{\Delta \Phi_a}{\Delta r}, \quad (1)$$

$$b = -\frac{\Delta B}{\Delta r} = -\frac{1}{\Phi_0} \frac{\Delta \Phi_b}{\Delta r}, \quad (2)$$

$$c = -\frac{\Delta C}{\Delta r} = -\frac{1}{\Phi_0} \frac{\Delta \Phi_c}{\Delta r}, \quad (3)$$

ここで、 Φ_c は消散によって消失した放射束であり、 $C = \Phi_c / \Phi_0$ である。 $C = A + B$ であることから、

$$\Phi_c = \Phi_a + \Phi_b \quad (4)$$

が成り立つ。入射放射束 (Φ_0) が平行光線である時を考えると、 $T = 1 - C$ であることから、

$$\Phi_0 = \Phi_t + \Phi_c, \quad (5)$$

$$= \Phi_t + \Phi_a + \Phi_b, \quad (6)$$

となる。ここで、 Φ_t は透過した放射束なので、 $r=0$ のとき $\Phi_t = \Phi_0$ であり、 r が長くなるほど減少する物理量である。 Φ_0 は、 r に関係ない物理量なので、 Φ_a 、 Φ_b および Φ_c は、 $r=0$ のときいずれもエネルギーは 0 W であり、かつ、 r が長くなるほど増加する物理量である。すなわち、

$$\frac{\Delta \Phi_a}{\Delta r} > 0, \quad (7)$$

$$\frac{\Delta \Phi_b}{\Delta r} > 0, \quad (8)$$

$$\frac{\Delta \Phi_c}{\Delta r} > 0, \quad (9)$$

である。一方、吸収係数 a 、散乱係数 b 、および消散係数 c は、いずれも必ず正の値である。したがって、Eqs.(1)-(3) から、 Φ_0 は必ず正なので、

$$\frac{\Delta \Phi_a}{\Delta r} < 0, \quad (10)$$

$$\frac{\Delta \Phi_b}{\Delta r} < 0, \quad (11)$$

$$\frac{\Delta \Phi_c}{\Delta r} < 0, \quad (12)$$

となり、Eqs.(7)-(9) に矛盾する。

仮に、Eqs.(10)-(12) が正しい場合、 $r=0$ で Φ_a 、 Φ_b および Φ_c は 0 W であり、且つ、 $r \geq 0$ なので Φ_a 、 Φ_b および Φ_c はいずれも負の値となる。 Φ_a 、 Φ_b および Φ_c がいずれも負の値の場合、Eq.(5) および Eq.(6) において、 $\Phi_t > \Phi_0$ になる。すなわち、入射した放射束よりも透過した放射束の方が大きい、というあり得ない関係が得られることになる。以上から、 Φ_a 、 Φ_b および Φ_c の値が正であれ負であれ、いずれの場合においても、Eqs.(1)-(3) は矛盾する。

上記は、 Φ_a 、 Φ_b および Φ_c を吸収、散乱あるいは消散によって消失した放射束として考えた場合である。反対に、 Φ_a 、 Φ_b および Φ_c を吸収、散乱あるいは消散によって消失せずに残った放射束として考える。 Φ_0 が平行光線の場合、 Φ_t は透過した放射束なので、

$$|\Phi_t| = |\Phi_c| \quad (13)$$

となり、 Φ_c の正負に関係なく、Eq.(5) に矛盾する。さらに、同じ条件の場合、 Φ_a 、 Φ_b は

$$\Phi_a = \Phi_t + \Phi_b, \quad (14)$$

$$\Phi_b = \Phi_t + \Phi_a, \quad (15)$$

として表され、それぞれ両辺を Φ_0 で割ると

$$A = T + B, \quad (16)$$

$$B = T + A \quad (17)$$

となるので、Eq.(13) を考慮しても、 $C = A + B$ に矛盾する。

したがって、Eqs.(1)-(3) が正しいならば、 Φ_a 、 Φ_b および Φ_c を消失した放射束と考えようとも、消失せずに残った放射束と考えようとも、あるいは、 Φ_a 、 Φ_b および Φ_c を正負のどちらかに捉えようとも、Eqs.(1)-(6) の全てを満たす Φ_a 、 Φ_b および Φ_c を表す物存在しない。同様に、 Φ_a 、 Φ_b および Φ_c で定義されている A 、 B 、および C についても、正しい物理量が存在しないことになる。

4. 定義式の修正案と検証

定義式の修正として、以下を提案する。 Φ_a 、 Φ_b および Φ_c は、それぞれ吸収、散乱および消散によって消失した放射束とし、全て正の値とする。 Φ_t は、透過した放射束として、正の値とする。 Φ_0 を入射放射束とすると、 A 、 B 、 C 、および T は、

$$A = \frac{\Phi_a}{\Phi_0}, \quad (18)$$

$$B = \frac{\Phi_b}{\Phi_0}, \quad (19)$$

$$C = \frac{\Phi_c}{\Phi_0}, \quad (20)$$

$$T = \frac{\Phi_t}{\Phi_0}, \quad (21)$$

とする。ここまでは、海洋光学標準用語集と同じである。ここで、 a 、 b 、および c の定義式を次のように提案する。

$$a = \left. \frac{dA}{dr} \right|_{r=0} = \frac{1}{\Phi_0} \left. \frac{d\Phi_a}{dr} \right|_{r=0}, \quad (22)$$

$$b = \left. \frac{dB}{dr} \right|_{r=0} = \frac{1}{\Phi_0} \left. \frac{d\Phi_b}{dr} \right|_{r=0}, \quad (23)$$

$$c = \left. \frac{dC}{dr} \right|_{r=0} = \frac{1}{\Phi_0} \left. \frac{d\Phi_c}{dr} \right|_{r=0}, \quad (24)$$

海洋光学標準用語集と表記方法は異なるが、基本的には海洋光学標準用語集にある定義式から、マイナスの符号を取り除いたものである。

以下、Eqs.(22)-(24) が他の定義式と矛盾しないか検証する。 $a > 0$ 、 $b > 0$ 、および $c > 0$ なので、Eqs.(22)-(24) から、

$$\frac{d\Phi_a}{dr} > 0, \quad (25)$$

$$\frac{d\Phi_b}{dr} > 0, \quad (26)$$

$$\frac{d\Phi_c}{dr} > 0, \quad (27)$$

となり、Eqs.(7)-(9) に矛盾しない結果を得る。 Φ_0 が平行光

線の場合、透過した放射束は、消散せずに残った放射束と等しいので、

$$\Phi_t = \Phi_0 - \Phi_c \quad (28)$$

が成り立つ。この式は、Eq.(5)と同じであり、 $T=1-C$ に矛盾しない結果を得ることができる。したがって、提案した Eqs.(22)–(24)は、他の定義式と整合性がとれている。

なお、 Φ_0 が平行光線の場合、 c は T あるいは Φ_t を用いて、次のように表すこともできる。

$$c = -\frac{dT}{dr}\bigg|_{r=0} = -\frac{1}{\Phi_0} \frac{d\Phi_t}{dr}\bigg|_{r=0} \quad (29)$$

この場合、マイナスの符号は必要である。

5. 考察

海洋光学標準用語集に記載されている a , b , および c の定義式から、マイナスの符号を取り除くことによって、他の定義式と整合性が取れるようになった。他の定義式との整合性から判断すると、提案した定義式は吸収係数、散乱係数あるいは消散係数の正しい概念を表していると考えられる。同様に、吸収率、散乱率、消散率、あるいは透過率の概念、さらに、 Φ_a , Φ_b , Φ_c , および Φ_t に関する概念も正しいと考えられる。 Φ_0 を平行光線としたとき、 Φ_a , Φ_b , Φ_c , および Φ_t の概念図を Fig. 1に示す。

マイナスの符号は、現行の IAPSO による海洋光学用語集 (IAPSO, 1985) だけではなく、その前の IAPSO による海洋光学用語集 (Jerlov, 1968; Jerlov, 1976) においても a , b , および c の定義式にも記載されている。マイナスの符号がついた理由として、物質による光の吸収を定式化したランベルト・ベールの法則を模した、と考えられる。ランベルト・ベールの法則は次式で表される。

$$a = -\frac{1}{r} \ln\left(\frac{I_1}{I_0}\right), \quad (30)$$

ここで、 I_0 は媒質への入射する放射強度、 I_1 は媒質中を

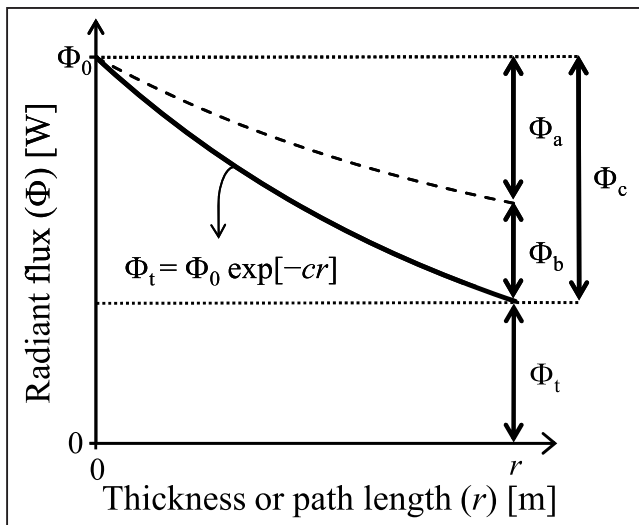


Fig. 1 Concept of relation among Φ_a , Φ_b , Φ_c and Φ_t if Φ_0 is beam.

距離 r 移動したときの放射強度を意味する。ただし、ランベルト・ベールの法則で扱われている I_1 は、吸収によって消失した放射強度ではなく、吸収せずに残った放射強度である。これに対して、海洋光学標準用語集では、分子に消失した放射束を用いている。この点が、ランベルト・ベールの法則で表された式と海洋光学標準用語集で定義された式の違いである。海洋光学標準用語集では、この違いを考慮せずにマイナスの符号をつけたまま定義式を表したものと考えられる。

IAPSO による海洋光学用語集が発行されたのが1985年である。この1985年以降に出版された海洋光学の代表的な本に、Kirk (1994) と Mobley (1994) がある。どちらの本にも、海洋光学標準用語集と同じ用語と記号を用いている。しかし、これらの本の中では、 a , b , および c の定義式にマイナスの符号はついていない。すなわち、定義式においては海洋光学標準用語集に則っておらず、著者独自の概念を定義式として表したものと考えられる。 a , b , および c の定義式からマイナスの符号を取り除いたことは結果として正しいが、上述の本に、海洋光学標準用語集の定義式の矛盾点や、異なる定義式を採用した理由は記載されていない。また、海色リモートセンシングでは、センサーの検証用に NASA が海洋光学のプロトコルを提示している (Mueller and Morel, 2003)。このプロトコルでは、Mobley (1994) の定義式を採用しているが、理由は明らかではない。海洋光学標準用語集の矛盾を指摘した上で、他の物理量と整合性のとれる定義式を提案したものはなく、本報が初めてである。

海洋光学標準用語集を用いた分野は広い。吸収係数、散乱係数および消散係数の概念と定義が最初に定めたのは、1964年の IAPSO の海洋放射委員会である。しかし、近年においても、海洋光学ならびにその応用分野の結果に顕著な矛盾は報告されていない。すなわち、吸収係数、散乱係数および消散係数の概念のみが正確に伝わっており、定義式は Kirk (1994) と Mobley (1994) のように各々独自で書きかえられたものと考えられる。したがって、本報で指摘した定義式の矛盾による他の研究への影響は無いと考える。しかし、自然科学において厳密な定義は理論の発展に欠く事のできない問題である。

6. まとめ

IAPSO によってまとめられた海洋光学標準用語集に記載された吸収係数、散乱係数、および消散係数の定義式の矛盾を指摘した。また、その矛盾を踏まえたうえで、整合性のとれる定義式を提案した。応用分野の広い海洋光学の標準となる用語集の定義式である。今後、修正されることを期待する。

謝辞

貴重なご意見を頂きました IAPSO 光海洋学メンバーであり、コペンハーゲン大学ニールス・ボーア研究所の Dr. Niels K. Højerslev に感謝の意を表します。また、草稿の誤りを指摘してくださいました査読者の方に感謝いたします。

引用文献

- IAPSO (1985): The international system of units (SI) in oceanography. UNESCO tech. pap. mar. sci., 45, 124pp.
Jerlov, N. G. (1968): Optical Oceanography. Elsevier Oceanogr. Ser., 5, 194pp.
Jerlov, N. G. (1976): Marine Optics. Elsevier Oceanogr. Ser., 14, 231pp.
Kirk, J. T. O. (1994): Light and photosynthesis in aquatic ecosystem, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 509pp.

Mobley, C. D. (1994): Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters. Academic Press, San Diego, Calif., 592pp.

Mueller, J. L. and A. Morel (2003): Fundamental Definitions, Relationships and Conventions. 11–30, *In* Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 4, Volume I: Introduction, Background and Conventions, J. L. Mueller, G.S. Fargion and C. R. McClain, eds. NASA Tech. Memo., TM-2003-21621 Rev-Vol I.

佐々木忠義 (1967): 海洋光学の用語について. *La mer*, 5, 270–273.

Tanaka, A., M. Kishino, R. Doerffer, H. Schiller, T. Oishi and T. Kubota (2004): Development of a neural network algorithm for the retrieval of concentrations of chlorophyll, suspended matter and yellow substance from radiance data of the Ocean Color and Temperature Scanner. *J. Oceanogr.*, 60, 519–530.

田中昭彦・岸野元彰・大石友彦・久保田正 (2001): 黄海を例としたケース 2 海域における海色リモートセンシングの多成分抽出. 東海大学紀要海洋学部, 52, 1–8.

要 旨

海洋光学では、IAPSO (International Association of the Physical Science of the Ocean) で推奨された用語とその定義、記号を用いることが標準となっている。IAPSO 海洋光学用語集の中で、光学的固有特性である吸収係数、散乱係数および消散係数の定義式が、他の物理量との関係において、矛盾することを明らかにした。これらの定義式に記載されているマイナスの符号を取り除いた定義式を提案した。提案した定義式は、他の物理量との関係において整合性がとれていることを検証した。