

海水の光学特性に関する研究 (第5報)
—船上分光型の水放射照度計および分光光束透過率計の製作—

佐々木保徳*¹ 宗山 敬*¹

軽量、小型で、かつ取扱いを簡便化することを目的として、海中の光をグラスファイバーで船上に誘導し、船上の分光器で分光して検出する方式の水放射照度計および光束透過率計を試作した。これらの測器は、主として表層における光学過程の研究に必要なパラメータの測定に供するものである。

水放射照度計の集光部の集光キャップは、強い内部光散乱特性を有するテフロン製のものと、少し弱いアクリル製のものとを用意した。両者が余弦法則をどの程度満足するか調べたが、テフロン製のものだけがきわめて満足できる結果がえられた。また、実海水に対する両測器の水密性試験、強度試験および水放射照度計による水放射照度測定を実施したが、十分実用に耐えうるものであった。重量は水放射照度計の集光部が約15 kg、光束透過率計が約10kg で共に軽量であり、1人でも取扱い可能である。

**Study on the Optical Properties of Seawaters,
(Report V) Onboard monochromating-type of
Underwater Spectro-irradiance meter and Transmissometer**

Yasunori Sasaki*², Kei Muneyama*²

Performing optical measurement at sea has required heavy and large apparatus and heavy work. For easier handling, we have devised an underwater spectro-irradiance meter and a collimated transmissometer of the type that light collected underwater is introduced to the monochromator followed by the detector utilizing a glass fiber as a light guide.

Two types of collecting caps (so called diffusers) were prepared as light collectors of the underwater spectro-irradiance meter; i.e., one is a teflon cap with an intense scattering property, and the other, an acryl cap which is a little less intense. The cosine law test was carried out for these two caps, and only the former gave satisfactory results.

The watertight test and the strength test of these two apparatus and the practical measurement of underwater irradiance by the irradiance meter were conducted at sea; and they were fit for practical use.

The weights are approximately 15 kg for the underwater light collector of the irradiance meter, and about 10 kg for the collimated transmissometer. They are so light and easy to handle on board that they can be operated with little effort.

*1 海洋保全技術部

*2 Marine Environmental Department

1. ま え が き

われわれは、この数年、海洋遠隔探査技術の開発を目的とした研究を進めており、飛行機やヘリコプター、その他の飛翔体に搭載した各種のリモートセンサーによる海面光の測定と合わせ、船による海面光の測定、水中光の測定および一般的海洋の測定をシステムチックに実施してきた。

大気から海面を通過して、海中へ光が進む過程と、海中の光の一部が海面を通過して再び大気中へ戻る過程を定量的にとらえ、整合性をもたせる上で、重要となる光学的過程を分けると、

- (1) 海面における太陽光と天空光の反射、透過および屈折
- (2) 海中における光の吸収、散乱およびこれらによる全消散
- (3) 海面における海中光の反射、透過および屈折

となる。これらの過程を定量的にとらえる上で、海面上および海面下における光の測定と、懸濁物、溶存有機物をも含めた場合の海水としての種々の光学特性の測定とは、最も基本的な測定である。

今日までに、多くの海洋光学研究者によって、種々の水中光の測定器が開発、製作されてきた。従来の水中照度測定装置（以下、測定装置を計と称する）は、集光部、分光部、光検出部、駆動部さらには電源部の一部が一体となっており、一つのケーシングに収納された型のものが大部分である。

したがって、これらを内蔵するため、ケーシングは、大きい内容積のものとなり、かつ水密性と耐圧性をもたせる必要上、外壁は肉厚ならざるをえなかった。そのため、重量が大きく、多くの信号や電力を送るためケーブルも太く、装置全体としては取扱いがきわめて難しい。この理由から、短時間内の繰返し測定や多地点における測定が制約を受け、その結果、高精度で高密度のデータを得難いのが現状である。

一方、光束透過率計についても、全く同様の理由から分光型で簡便なものは一般的には用いられていない。したがって、海水中懸濁物の種類別（生物性懸濁物、非生物性懸濁物）の光学特性が反映された透過率の測定データはほとんど見当たらない。

このような現状に鑑み、著者らは、軽量、小型

で、安価な簡易型的水中分光放射照度計および分光光束透過率計の製作を試みた。

2. 装置の設計

2.1 水中分光放射照度計

2.1.1 水中光集光部

水中集光部の断面を図1に示す。

Aは内部で強い光散乱特性をもつプラスチック製集光キャップである。BおよびCは透明アクリル製であり、Bは集光キャップを保持し、集光キャップで集光した光を内部へ伝え、CはガラスファイバーEを固定保持するためのものである。ガラスファイバーは藤倉電線株式会社製石英ファイバーSIF 80と類似規格のものである。Dは真鍮製で、反射光が集光キャップに入るのを防ぐ構造を持つとともに、外面は黒色塗料を塗布して艶消し処理が施されている。

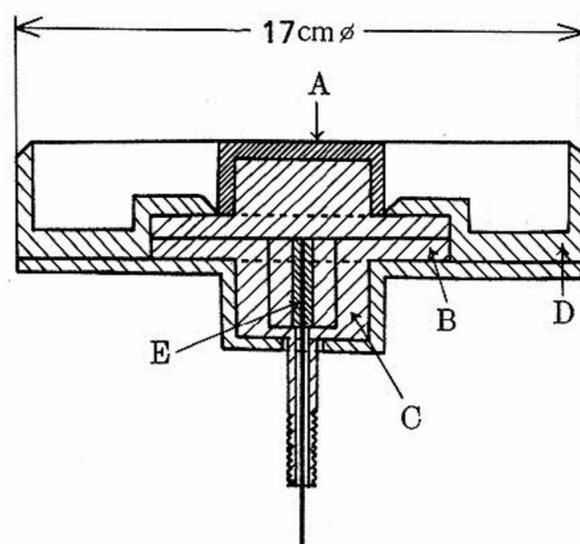
2.1.2 全体構成

水中分光放射照度計の全体構成を図2、また全体の概観を写真1に示す。

水中集光部で捕捉された海中光はガラスファイバーで船上に誘導され、分光器および検出器で分光し、検出したのち、増幅して記録計に記録される。

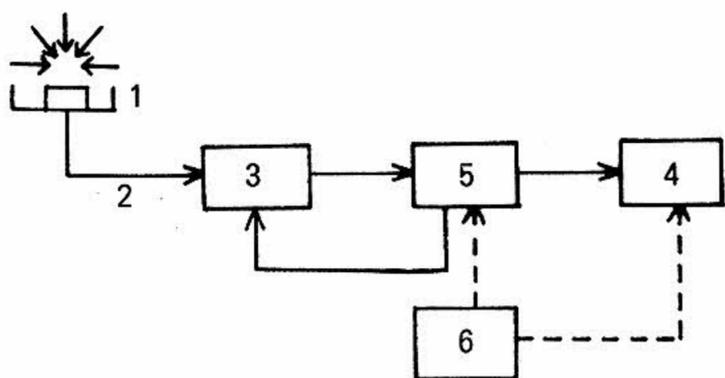
2.2 分光光束透過率計

2.2.1 分光光束透過率計



- A; 集光キャップ, collecting cap
- B, C; アクリル製保持部, acryl supporter for collecting cap and fiber
- D; 真鍮製遮蔽金具, brass shielding
- E; ガラスファイバー, glass fiber

図1 水中集光器の断面図
Cross-sectional sketch of underwater light collector



1. 水中集光器 underwater light collector
2. グラスファイバー glass fiber
3. 分光器および検出器 monochromator and detector
4. 記録計 recorder
5. 増幅器 amplifier
6. 安定化電源 stabilized power source

図2 水中照度計の構成ブロック図
Block diagram of underwater irradiance measurement system

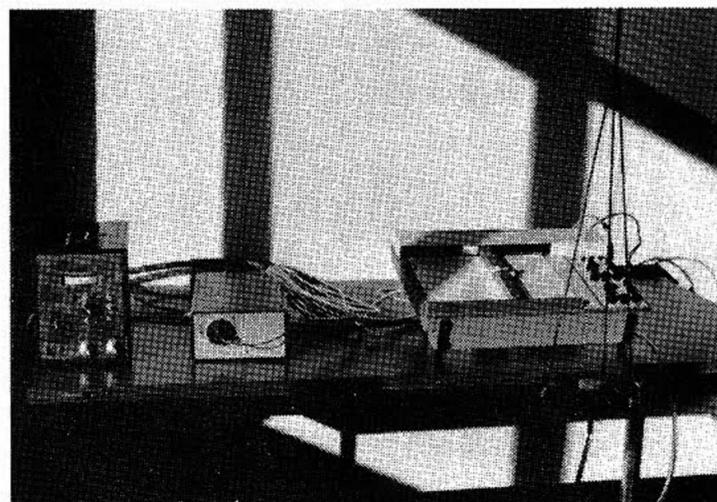
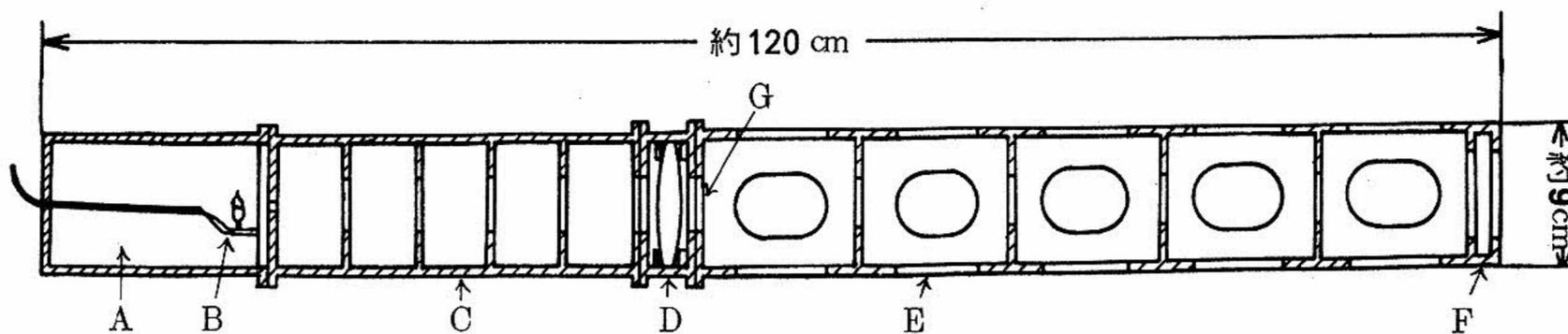


写真1 水中分光放射照度計の概観
Overview of the underwater spectro-irradiance meter



- A; 光源収納部, light source box
- B; 光源, light source
- C; コリメーター, collimator
- D; レンズ, achromatic lens
- E; 測定用光路部, measuring path
- F; 受光器装着部, light collector

図3 光束透過率計の断面図
Cross-sectional sketch of collimated transmissometer

分光光束透過率計の水中投入部の断面図を図3に示す。

Aは光源収納部であり、Bは光源である。光源としては、できる限り点光源に近いものが望ましい。ここでは、近藤電気(株)製プロジェクターランプJC-12V-50Wを用いた。Cはコリメーターでスリットを4枚もち、内

壁による反射光がレンズに入るのを防いでいる。Dは光を平行にするためのコリメーターレンズ(焦点距離 $f = 27.16 \text{ cm}$ のアクロマチックレンズ)である。Eは試水の透過率測定のための光路である。Fは受光器取付部で、水中分光照度計に用いたものと同じ集光器を装着する。なお、Eには5枚のスリットがあ

り、光束外の散乱光の侵入を防いでいる。

光源Bから発した光は孔径5 mmの細孔を通過したのち、レンズDで平行光となり、ガラス窓GからEの試水中を透過する。試水中を透過した光束はFの受光器で捕捉され、船上へ導かれる。

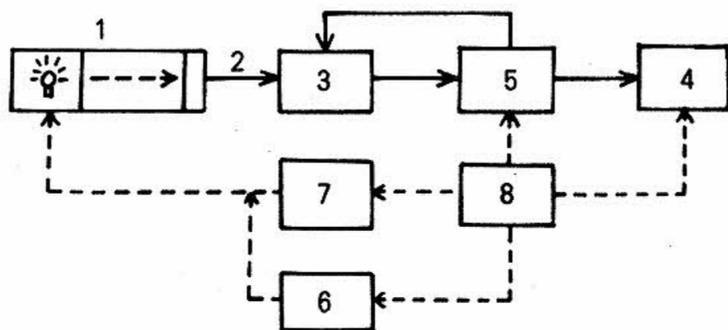
光束透過率計用材質は軽量にするため、硬質塩化ビニル管(JIS K 6741-1968)外径89 mm, 内径77 mm, 肉厚6 mmを用いた。

2.2.2 全体構成

分光光束透過率計の全体構成を図4, またその概観を写真2に示す。

図中の分光光束透過率計の受光器で捕捉された光束はガラスファイバーで船上に誘導され、分光器および検出器で分光し、検出したのち、増幅されて記録計に記録される。

光源に印加する電圧は12 Vであり、6の



1. 光束透過率計, collimated transmissometer
2. ガラスファイバー, glass fiber
3. 分光器および検出器, monochromator and detector
4. 記録計, recorder
5. 増幅器, amplifier
6. デジタルマルチメーター, digital multimeter
7. スライダック, slidac
8. 安定化電源, stabilized power source

図4 光束透過率計の構成ブロック図

Block diagram of collimated transmittance measurement system

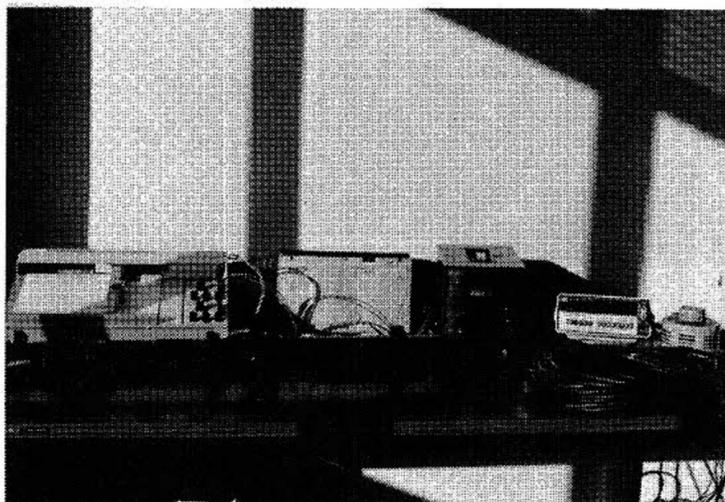


写真2 分光光束透過率計の概観

Overview of the underwater spectral collimated transmittance measurement system

デジタルマルチメーターでモニターする。将来は定電圧回路を予定している。

3. 測定装置の各種試験および結果

3.1 水密性試験および耐圧性試験

水中放射照度計, 分光光束透過率計ともに, 多くの接合面をもつために, 最も問題となるのが水密性である。グラスファイバーの長さによる制約のため, 7 m水深までの試験を実施したが, 漏水は認められなかった。また, 7 m水深までは耐圧性の点からも異常は認められなかった。

3.2 余弦法則に対する集光器の角度特性試験

図5に示す簡易型の試験装置で, 集光器(コレクター)が余弦法則をどの程度満足するか調べた。

試験に供した集光器は, 三菱レイヨン(株)製の内部における光散乱特性の強いテフロン製と, これよりやや弱い同社製のアクリル(No. 441, オーパール)製集光キャップを装着したものの2種類である。

コレクター法線が入射光となす角を 0° , 30° , 45° , 60° , 80° および 90° にとり, それぞれについて捕捉光強度を測定した。

0° のときの強度を1とし, これに対するそれぞれの角度における強度の相対値を求めた。この相対強度と角度の関係を示したものが図6である。ただし, 測定波長600 nmのときのものである。

この図からわかるように, テフロン製集光キャップを装着したコレクターはきわめてすぐれた光学特性を示し, ほとんど余弦曲線に一致し, アクリル製集光キャップを装着したコレクターの角度特性は余弦曲線から少しずれている。

3.3 実海域における測定試験

実海域における測定試験は, 測器の都合上,

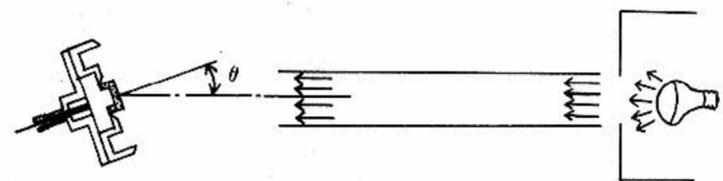
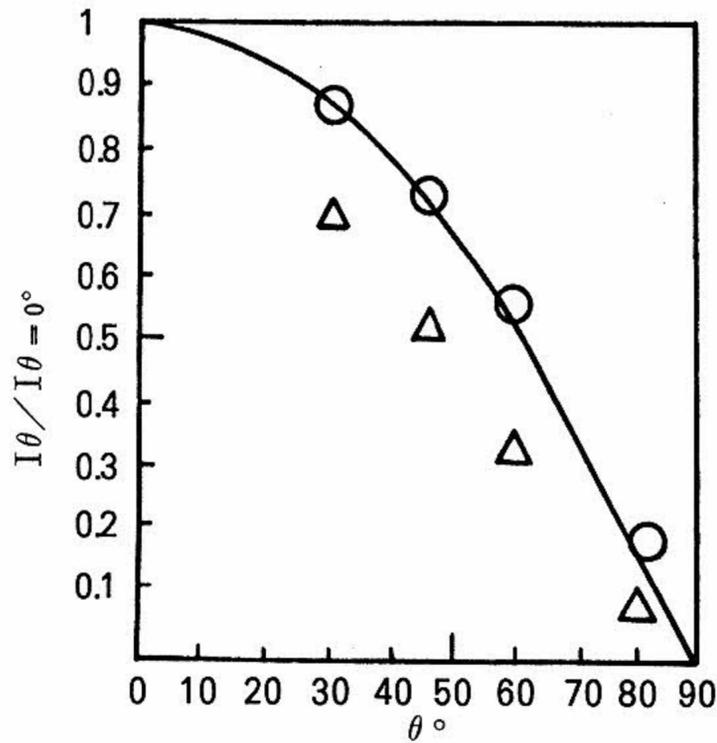


図5 余弦法則に対する光学特性試験模式図

Schematic sketch of optical property measurement for cosine law



θ ; 入射光とコレクター法線のなす角,
angle of the normal line of
collectors from the incident
beam

$I_\theta, I_{\theta=0}$; 角度 θ および $\theta = 0^\circ$ における入射光の照度
Intensity of incident irradiances at the
incident angles θ and $\theta = 0^\circ$ respectively
○ ; テフロン製キャップ, teflon cap
△ ; アクリルキャップ, a cryl cap

図6 入射角度に対するコレクターの光学特性
Optical property of collectors to the
incident angles.

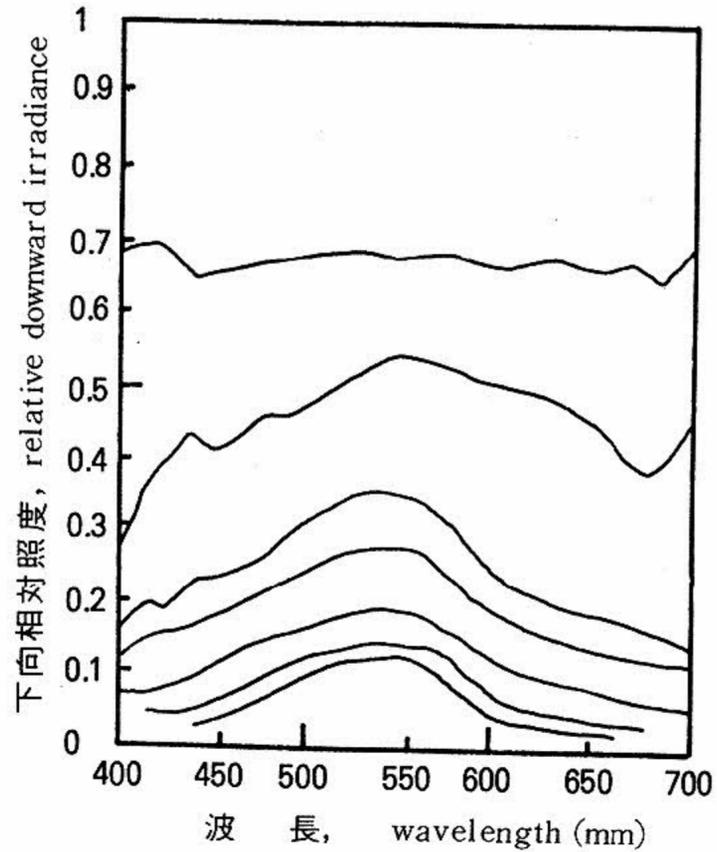
水中照度計による下向照度の測定のみ実施した。
実施日は昭和54年12月13日, 実施場所は横
須賀市猿島沖東方約3 kmの東京湾である。

図7は海面直上における下向放射照度を1と
し, これに対する比として求めた海面下0 m,
1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 mおよび6 mにお
ける下向放射照度の相対強度であり, また表面
から当該深度までの照度透過率である。

ガラスファイバーの長さによる制約のため,
水深6 mまでしか測定できなかったが, この水
深までは十分測定できることが認められた。

4. 今後の課題

水中照度計で最も問題となることはコレクター
の集光特性である。コレクターの材質として, 一
般に光散乱特性の強いものが適することは自明の
理であるが, 光散乱特性が強くなれば, 逆に検出
器に到達する光量が減少するという背反する問題
が残されている。



曲線は上から順に, 海面下0, 1, 2, 3, 4, 5, および6 mのと
きの下向の相対放射照度である。ただし, 海面直上下向
放射照度を1とした。

Curves from top to bottom correspond to rela-
tive underwater downward irradiances at the depths
0, 1, 2, 3, 4, 5, and 6 m beneath the sea surface respec-
tively. They are normalized by setting the downward
irradiance just above the sea surface unity.

図7 長尺近くの種々の深度における下向
相対放射照度

Relative downward irradiances at various
depths near the surface

この問題は形状効果を取り入れることにより多
少緩和することはできるが, これも限度がある。
現在のところ, コレクターの形状, 材質(光散乱
強度)と集光効果の関係については明瞭な結
論は得られていない。なお, コレクターの形状と
集光特性の関係を調べたものにはTylerの研究が
あり, 同一材質の場合は, 平面的形状のコレクター
よりも, われわれが用いたような円柱型の形状の
コレクターが余弦法則に近い集光特性を示すとさ
れている。このほか, ファイバーの受光角度の大
きさにも問題であり, できる限り広角にした上で,
集光特性の向上を考える必要がある。

光束透過率計は, 海表面近傍で迷光捕捉防止と
光束の形状を整えることが必要である。この光束
透過率計では, 細孔を用いて点光源としたが, 今
後, さらにコンデンサーレンズによる点光源も考え
ている。

5. あ と が き

細部について、まだ多くの問題が残されているが、水中光の測定に対するグラスファイバーの応用として、一先、その可能性を立証することができた。この方面にグラスファイバーを応用することの最もプリミティブな目的は、測器の簡便化ということであった。

この意図に関する限りでは、海洋光学で用いられている光学測器で簡便化の望まれるものはまだまだ多い。この種の問題はひとえに海洋光学のみにとどまらず、計測工学をはじめとする諸工学的立場から取組まれるべきであり、これによって不足している海洋光学に関するデータの充実を願うものである。

文 献

1) Duntley S. Q., 1963, "Light in the

- sea", *Journal of the Optical Society of America* 53(1), 214 - 233
- 2) Smith R. C., "Tyler J. E., 1967, "Optical properties of clear natural water", *Journal of the Optical Society of America* 57 (5) 589 - 595
- 3) Smith R. C., 1969, "An underwater irradiance collector", *Journal of Marine Research* 27 (3) 341 - 351
- 4) Tyler J. E., Smith R. C., Wilson W. H. Jr., 1972, "Predicted optical properties for clear natural water", *Journal of the Optical Society of America* 62 (1) 83 - 91
- 5) Wells W. H., 1977, "Diffusion of light in the sea", *Optical Engineering* 16 (2), 112 - 127