

# 海水の光学特性に関する研究(第6報) — 反射率に及ぼす波, 雲量および太陽 高度の影響に関する定性的考察 —

佐々木保徳\*<sup>1</sup> 宗山 敬\*<sup>1</sup>

本研究は, 海の反射率に対する波浪, 雲量および時刻(太陽高度)の影響を, 定性的に把握する目的で行った。反射率の測定は, 以下の五つの条件下で行った。すなわち, (1)晴天で波がないとき, (2)晴天で多少の波があるとき, (3)やや雲があり, 波が多少あるとき, (4)濃い雲があり, 波がないとき, および(5)晴天で波がなく, 太陽高度が低いときである。

これらの測定によって, 次のような定性的結論が得られた。すなわち, 晴天で, かつ波がない場合の海の反射率が最も小さい値および変動幅を示し, 再現性が最も良い。雲量の増加とともに反射率の値および変動幅ともに増大する。また, 反射率の値および変動幅は, 波によっても増大する。波が存在する場合でも, 晴天下であれば, 数回の測定における反射率の波長別最小値を選ぶことによって, 海域の水質を十分反映する反射率のパターンが得られる。また, 晴天であっても, 太陽高度の減少とともに, 反射率の値および変動幅ともに増大する。

## **Studies on the Optical Properties of Sea-water., (Report VI), Qualitative Estimations on the Effects of Waves, Cloud Amounts, and Sun Elevation on Reflectance**

Yasunori Sasaki\*<sup>2</sup>, Kei Muneyama\*<sup>2</sup>

This work was carried out for the purpose of qualitative estimations on the effects of waves, cloud amounts, and sun elevation on total reflectance of the ocean. Reflectance measurements were conducted under the following 5 sky conditions and sea surface states, i.e., 1) clear sky and calm sea surface, 2) clear sky and a slightly waving sea surface, 3) a slightly cloudy sky and a slightly waving sea surface, 4) completely cloudy sky and calm sea surface, and 5) clear sky, calm sea surface and relatively low sun elevation.

Through these measurements we arrived at the following qualitative conclusions. Measurements in the case of a clear sky and calm sea surface showed the lowest average values and the narrowest fluctuation ranges of reflectance that were able to provide the most reproducible results. Average values and fluctuation ranges of reflec-

---

\*<sup>1</sup> 海洋保全技術部

\*<sup>2</sup> Marine Environment Department

tance increase in accordance with the increase of the cloud amount. Waving of the sea surface also causes an increase in average values and fluctuation ranges of reflectance, so as does low sun elevation even for clear sky. Because sea surface is waving, separate measurements provided the fluctuated values. This fluctuation, however, makes it possible to select the lowest reflectance values at every wavelength under clear sky conditions providing a reflectance pattern sufficiently showing water qualities.

### 1. ま え が き

現在、海洋のリモートセンシングでは、リモートセンサーをあらかじめキャリブレーションし、上向光を絶対エネルギー量に相当する量として取扱う場合と下向光に対する上向光の比（すなわち、一般に反射率と呼ばれる量）で取扱う場合がある。

リモートセンシングデータの取扱い { 絶対値としての取扱い  
相対値としての取扱い (= 反射率)

いずれにしても、水質に関する情報を得るには、上向光の本質に関して、正しい認識を持たなければならない。

リモートセンサーで測定する上向光は、本来、太陽直達光と天空光の海表面における鏡面反射分を含んでおり、これらは水質を反映する海面直下の上向光、もしくは海面直下上向光の海面通過分を推定するうえで、ノイズとなっている。

これら鏡面反射光の大きさは、(1)海面に入射する太陽直達光と天空光の割合（大気中のヘイズの量や雲量により変化する）、(2)海面の粗度（海面の波浪状況は海表面における太陽直達光と天空光の鏡面反射率を変化させる）、(3)太陽高度などによって変化する。

ここでは、太陽直達光および天空光の鏡面反射に及ぼす、(1)、(2)および(3)の影響について、見かけの反射率の変化から定性的考察を加えたので報告する。

### 2. 理 論

海面で一般的な光学過程を図1に示す。

海面直上で、太陽直達光による照度を  $E_s(\lambda)$ 、天空光による照度を  $E_c(\lambda)$  とすれば、全下方向照度  $E(\lambda)$  は、

$$E(\lambda) = E_s(\lambda) + E_c(\lambda) \quad \dots\dots(1)$$

であり、白色板を Lambertian であると仮定し、分光放射輝度計で測定される全下向光による白色板表面の輝度  $H'(\lambda)$  は、

$$\begin{aligned} H'(\lambda) &= E(\lambda)/\pi \\ &= [E_s(\lambda) + E_c(\lambda)]/\pi \\ &= H'_s(\lambda) + H'_c(\lambda) \quad \dots\dots(2) \end{aligned}$$

である。 $H'_s(\lambda)$  および  $H'_c(\lambda)$  はそれぞれ太陽直達光および天空光による白色板の放射輝度である。

ここで、海の表面が微小な平面の集まりであると仮定し、分光放射輝度計の視野海面上の多くの平面に対して入射する太陽直達光および天空光のうち、分光放射輝度計の方向に向かう海面反射光を生じさせる入射光を与える方向の太陽直達光と天空光の輝度を、一般的に  $H_s(\theta, \phi, \lambda)$  および  $H_c(\theta, \phi, \lambda)$  とする。

ただし、分光放射輝度計の視野海面内に上記のような光学法則のなり立つ、平面が多数存在するため、 $H_s$  と  $H_c$  とはそれらのすべての面について集合的に取扱うものとする。また、 $\theta$  は天頂からの角度であり、 $\phi$  は任意に定める水平方向からの角度である。さらに、これらの微小平面における  $H_s$  と  $H_c$  の反射率をそれぞれ  $r_s(\theta, \phi, \lambda, \beta)$ 、 $r_c(\theta, \phi, \lambda, \beta)$  とする。ただし  $\beta$  は  $r_s$  および  $r_c$  の海面粗度依存性を表わすパラメーターである。また、海面直下上向光の海面通過成分による分光放射計方向の輝度を  $H_{u_0}$  とおく。

これによって分光放射輝度計に入射する海面直上上向光は、

$$\begin{aligned} &r_s(\theta, \phi, \lambda, \beta) \cdot H_s(\theta, \phi, \lambda) \\ &+ r_c(\theta, \phi, \lambda, \beta) \cdot H_c(\theta, \phi, \lambda) + H_{u_0} \quad \dots\dots(3) \end{aligned}$$

となる。したがって、われわれが通常、分光放射輝度計によって測定し、反射率 (Rとする) と呼んでいるものは、

$$R = \frac{r_s \cdot H_s + r_c \cdot H_c + H_{uo}}{H'_s + H'_c} \quad \dots\dots(4)$$

で表わされる。

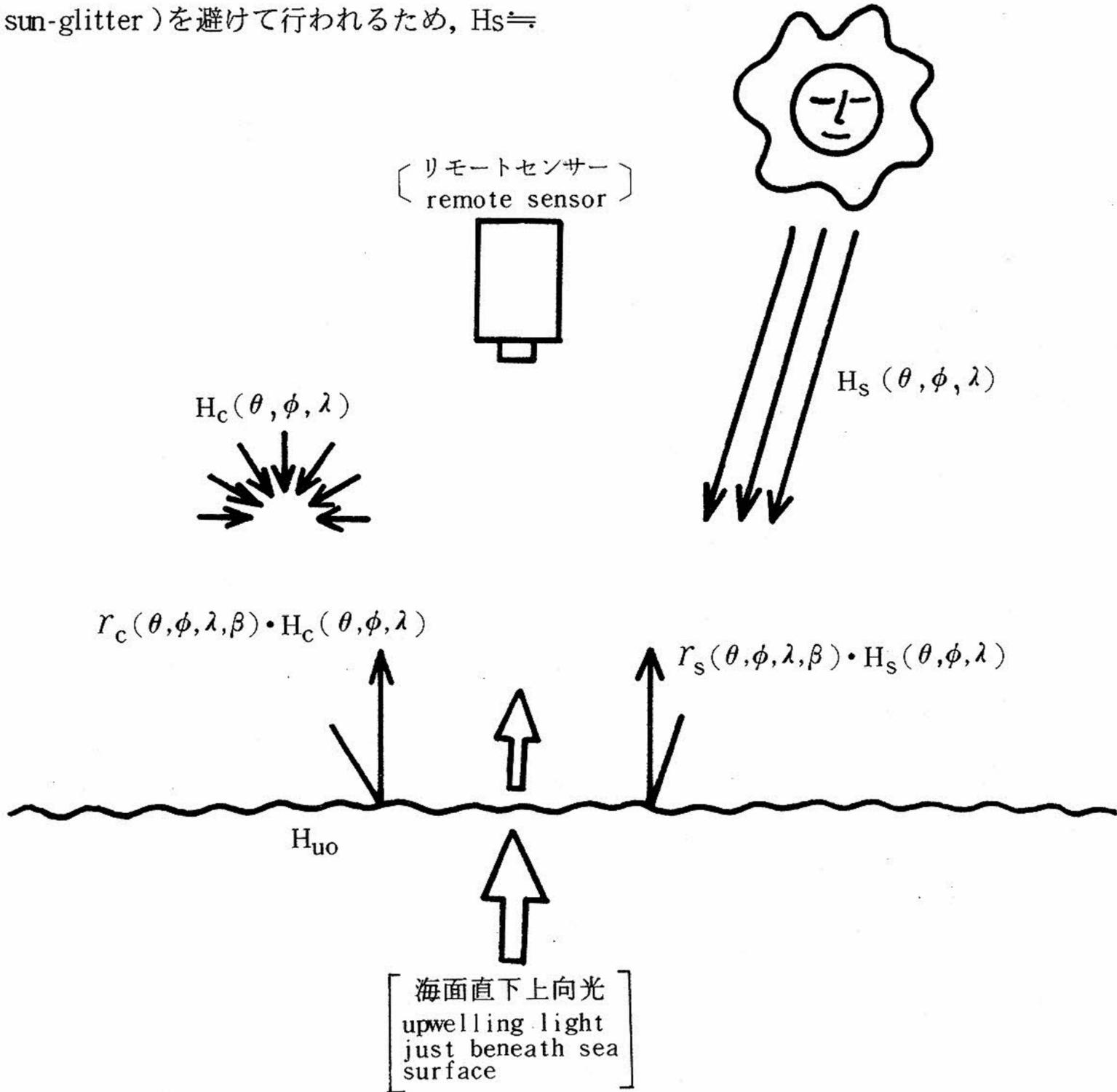
通常、海面直上上向光の計測は、太陽直達光の反射 (sun-glitter) を避けて行われるため、 $H_s \approx$

0とすると、

$$R = \frac{r_c \cdot H_c + H_{uo}}{H'_s + H'_c} \quad \dots\dots(5)$$

となる。

ここで、われわれが測定した晴天の日の全海面直上下向光中の天空光の割合を示したものが図2である (白色板に対する輝度比として求めたもの)。



- $H_s(\theta, \phi, \lambda)$  ; 太陽直達光の輝度, radiance of sunlight
- $H_c(\theta, \phi, \lambda)$  ; 天空光の輝度, radiance of skylight
- $r_s(\theta, \phi, \lambda, \beta) \cdot H_s(\theta, \phi, \lambda)$  ; 太陽直達光の海面反射分, specular reflection of sunlight
- $r_c(\theta, \phi, \lambda, \beta) \cdot H_c(\theta, \phi, \lambda)$  ; 天空光の海面反射光, specular reflection of skylight
- $H_{uo}$  ; 海面直下の上向光の海面通過分, upwelling light just above sea surface due to passing of that just beneath sea surface

図1 海面における光学過程  
Optical processes at sea surface

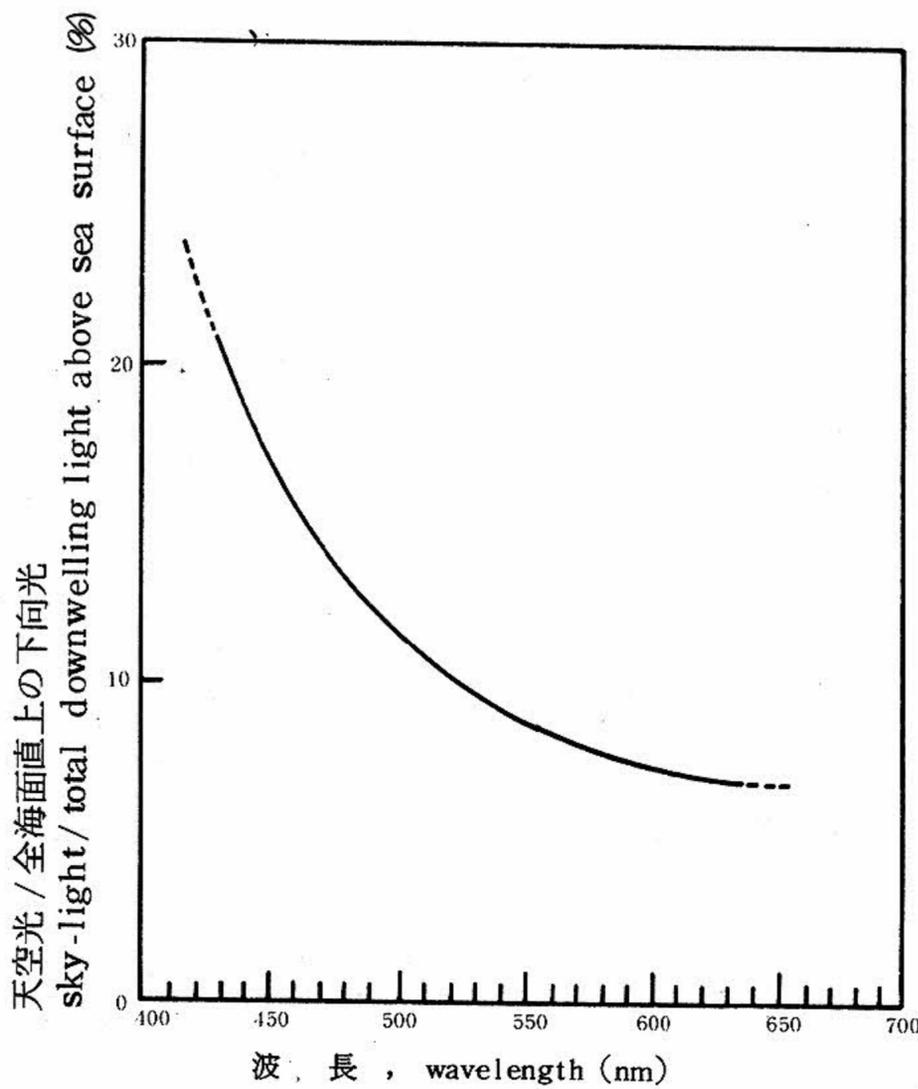


図2 全海面直上下向光中の天空光の割合 (晴天のとき)

Fraction of sky-light in downwelling light just above sea surface (when clear sky)

短波長光ほど大気中の気体分子や水分子によるレイリー散乱を強く受けるため、波長が短くなるほど、全海面直上下向光中の天空光の割合が増大している。これは理想的状態に近い気象条件下の測定例であって、天空光の割合は大気中の水蒸気やダストおよび雲量によって大きく変化する。

(5)式において、全海面直上下向光中の太陽直達光と天空光の割合の変化を考慮すると、以下のよう考えられる。すなわち、天空光は、すべての方向について同じ輝度をもっと仮定すれば、 $H_c = H'_c$ であるから(5)式は、次のようになる。

$$R = \frac{r_c \cdot H'_c + H_{u0}}{H'_s + H'_c}$$

$$= r_c \cdot \frac{H'_c}{H'_s + H'_c} + \frac{H_{u0}}{H'_s + H'_c}$$

.....(6)

上記の式の中の  $H'_c / (H'_s + H'_c)$  は、全海面直上下向光中の天空光の割合を示し、大気中のヘイズや

ダスト、雲量の増加とともに、大きくなる。 $r_c$ は海面における反射率であり、海面の波の状態に依存すると考えられる。波のない海面に鉛直に入射する成分の海面における反射率として、Austin<sup>4)</sup>の0.021という値を与えている。この値と、海面の状態との間に定量的な関係は、まだ報告されていないが、われわれは波の発達とともに大きくなると考えている。また、 $H_{u0}$ は  $H'_s + H'_c$  にほぼ比例すると考えられる。

これらの関係から、波、大気中のヘイズや雲等の発達または増加とともに、反射率も増大することが予想される。

一方、太陽高度が低い場合は、一般に波高が大きくなると、海面において海中に入射する光の透過率が大きくなると言われ、この効果は太陽直達光において著しい。そのため、全海面直上下向光に対する海面直下上向光の海面通過分の比も、波高の増加とともに、大きくなると予想される。すなわち、波高の増加とともに反射率の増大が予想される。さらに海表面における鏡面反射光の寄与も加わるが、太陽高度と波の大きさを鏡面反射量と結びつけることが現段階では難しいため、これ以上の推定はできない。

本研究では、これらを踏まえてデータの解析をおこなった。

## 2. 測定

本報告中の測定は、昭和53年11月20日から22日までの3日間に亘って実施したものである。実施場所は図3のStn. AおよびStn. B (Stn.; Stationの略)である。また、これらの測定のほとんどはマルチスペクトルスキャナーによる測定の実施時刻に合わせて11時~13時ごろに実施したが、一部は15時~15時30分ごろ実施した。

測定に用いた測器は、阿部設計製2702型分光放射計(輝度計型)である。全海面直上下向光と天空光の強度の測定は、イーストマン製白色反射コーティングを塗布した白色板をLambertianであると仮定し、その輝度測定によった。

海況は、Stn. Aが湾内に位置しているため通常はほとんど波がないのに比べ、Stn. Bが湾口部に位置しているため外洋からくる波が十分到達した。そのため、波による影響を調べる上で、両地点を

選んだことは好都合であった。

なお、本報告中の“やや波がある”という場合は、目視観測による50~100 cmの波高に相当している。また、測定中はいずれの場合ともホワイトキャップは認められなかった。

### 3. 結果

#### (1) 晴天で波がほとんどない場合

この条件下で海面直上下向光と海面直上上向光の測定チャートを図4に示す。

この図からわかるように、海面直上上向光は数回の測定で、ほとんどばらつきを示さず、きわめて再現性がよい。なお、650 nmにおけるスパイクは、測定中にクラゲが流れとともに通過したことによるものである。

また、波長別の反射率（ここでは海面直上下向光に対する海面直上上向光の比として定義し、以下同義で用いる）の最大値と最小値をグラフに示したものが図5である。

反射率のばらつきが小さく、580 nm付近にショルダーをもち、Stn. Aの水質(内湾水)の特徴を十分によく反映している。

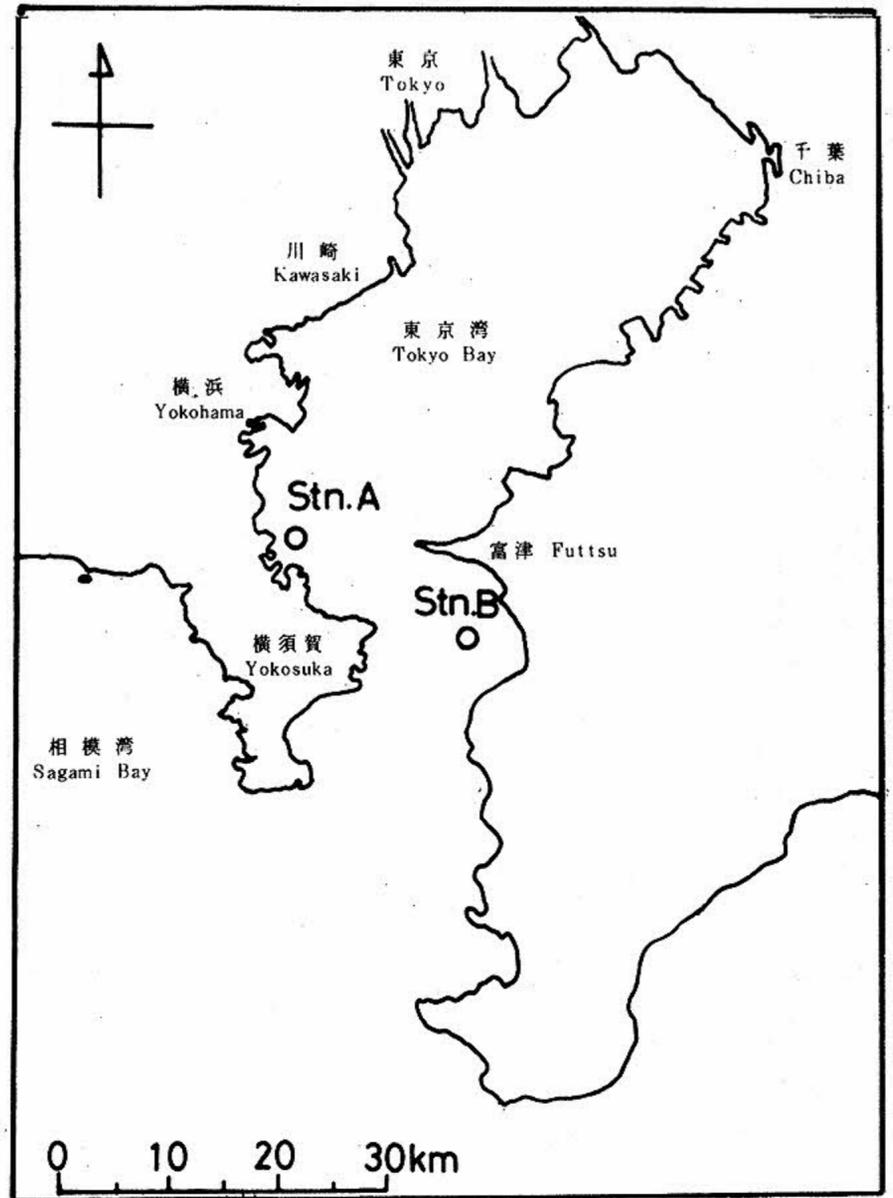
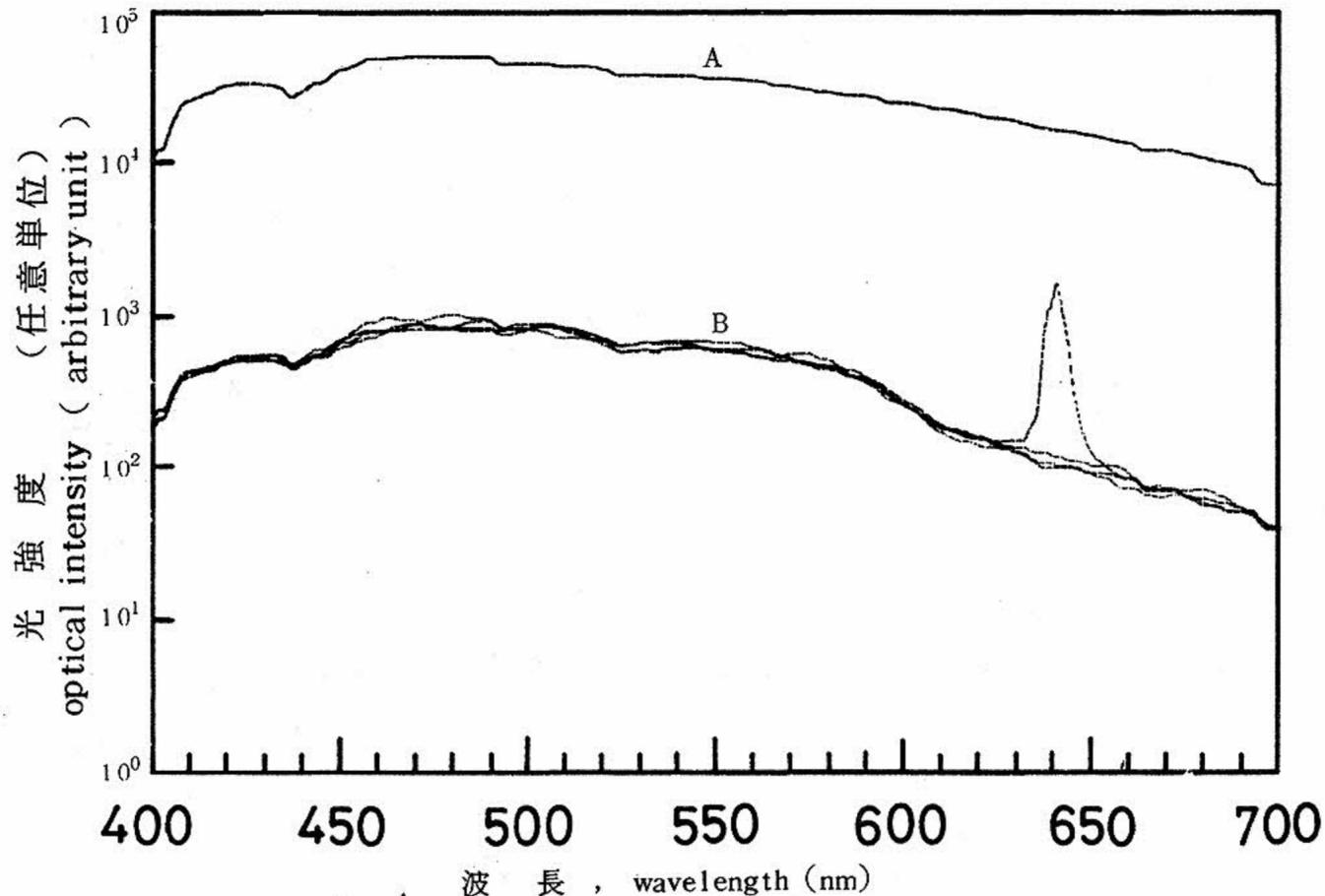


図3 観測点 (A点およびB点)  
Observation point  
(Stn. A and Stn. B)



A ; 海面直上下向光 , downwelling light just above sea surface  
B ; 海面直上上向光 , upwelling light just above sea surface

測定日, date ; 1978年11月20日, 11時30分, A点  
AM 11° 30', 20. Nov., 1978., stn A

図4 晴天で波がないとき

Clear sky and clam sea surface

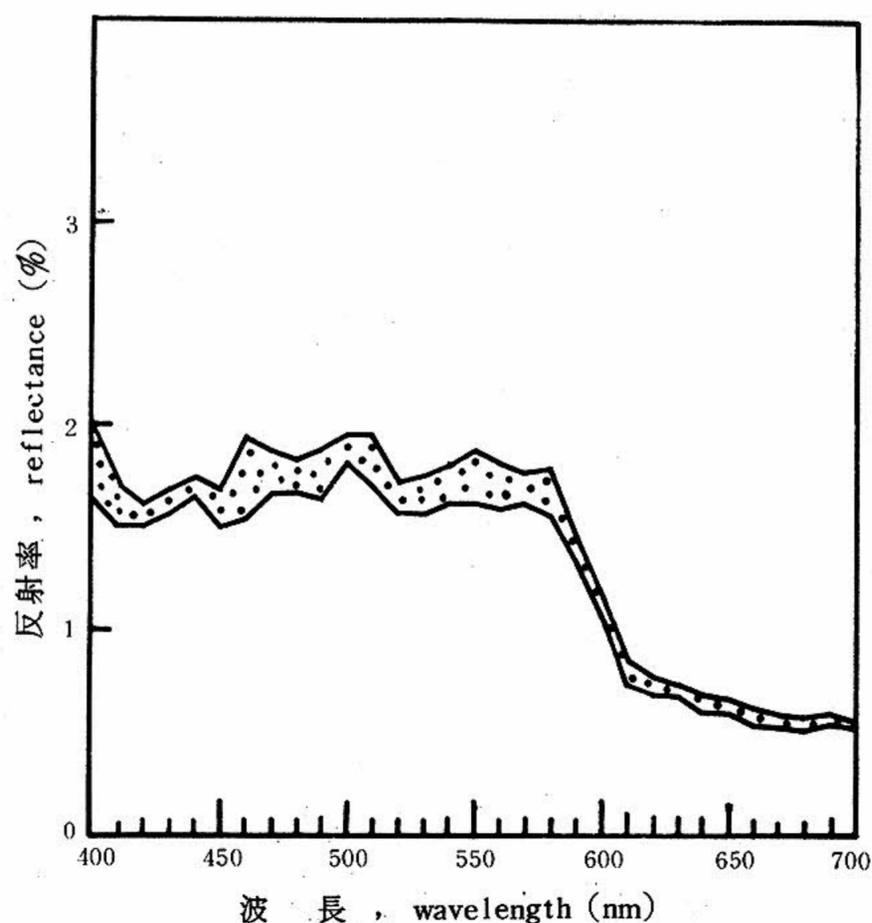


図5 図4をもとに計算した反射率の最大値と最小値  
Maximum and minimum values  
of reflectances calculated  
from Fig. 4

(2) 晴天で波がややある場合

この条件下で海面直上下向光と海面直上上向光の測定チャートを図6に示す。

図4と比較すると、海面直上下向光の強度は同じであるが、海面直上上向光は明らかに波の影響を受けて大きく変動している。

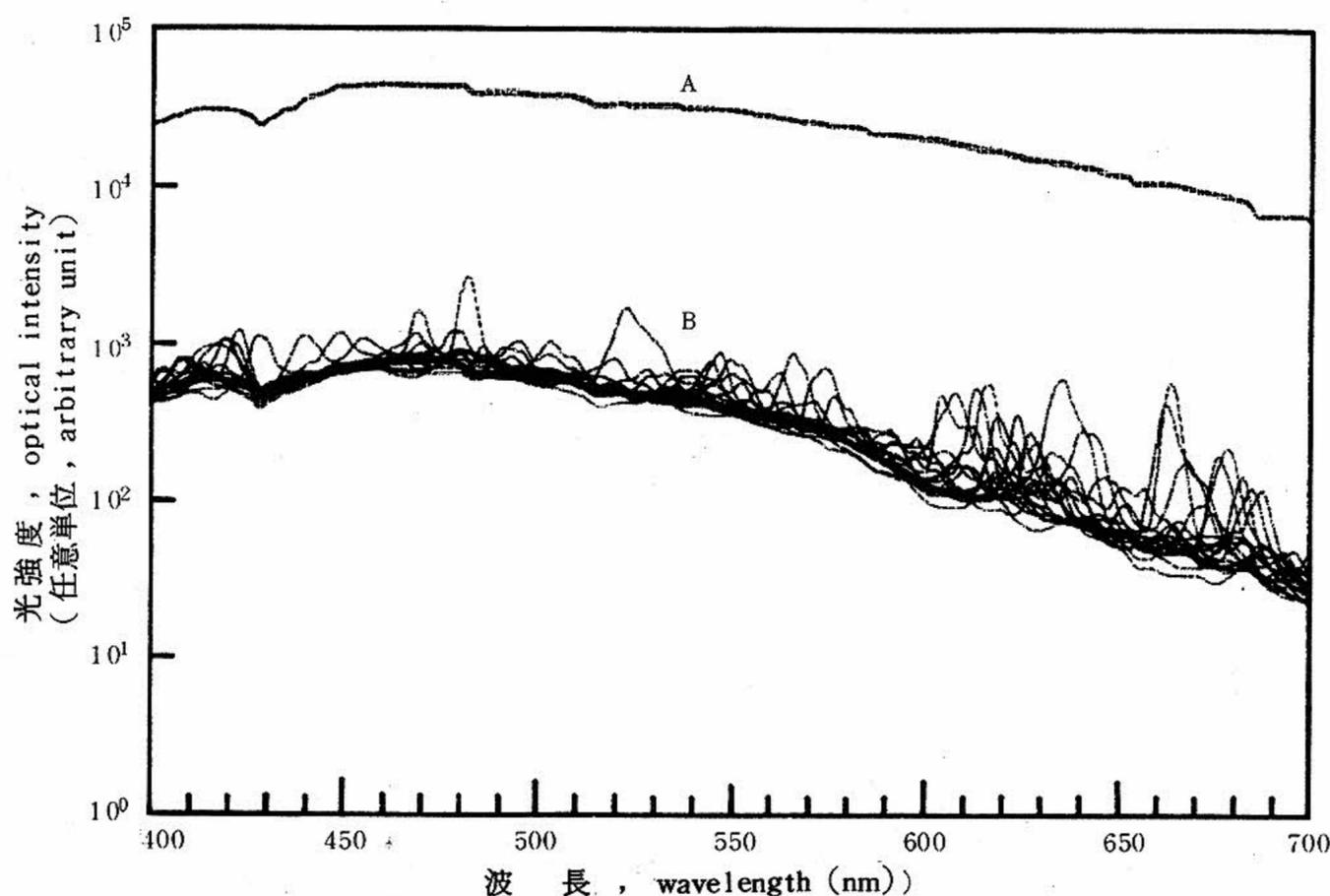
また、波長別の反射率の最大値と最小値をグラフにしたものが図7である。

最小値を見る限りでは、外洋の影響を受けるStn. Bの水質をよく反映した反射率のパターンを示すが、全体として、反射率の変動の幅が波の影響で大きくなっている。

(3) 雲またはヘイズが存在し、波がある場合とない場合

この条件下で全海面直上下向光と海面直上上向光の測定チャートを図8と図9に示す。

図8は雲、波ともにやや存在する場合で、測定時の雲量や大気中のヘイズ量の変動による全海面直上下向光の変化が認められる。海面直上上向光についても波によるばらつき



A ; 海面直上下向光 , downwelling light just above sea surface  
B ; 海面直上上向光 , upwelling light just above sea surface

測定日 , date , 1978年11月21日 , 11時41分 , B点  
AM 11° 41', 21. Nov. 1978, stn B

図6 晴天でやや波があるとき  
Clear sky and a little waving sea surface

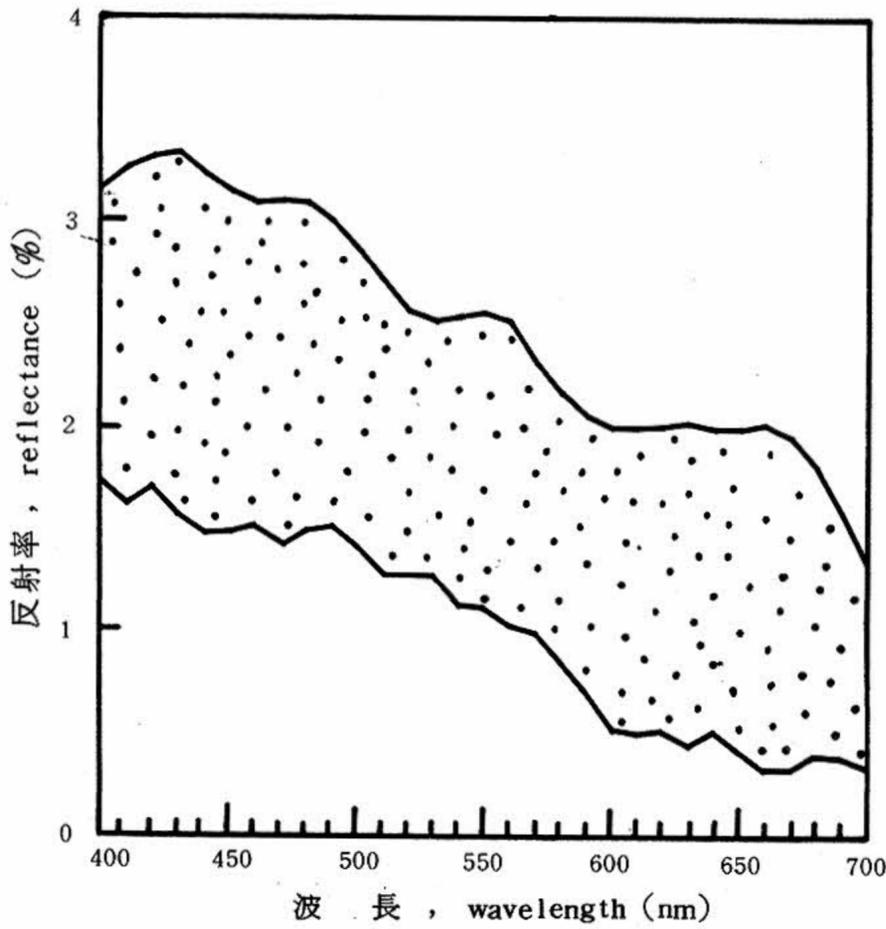


図7 図6をもとに計算した反射率の最大値と最小値  
Maximum and minimum values  
of reflectances calculated  
from Fig. 6

大きいことが明らかである。ただし、海面直上上向光の測定中に全海面直上下向光に変動があればそれによる影響が加わっている。

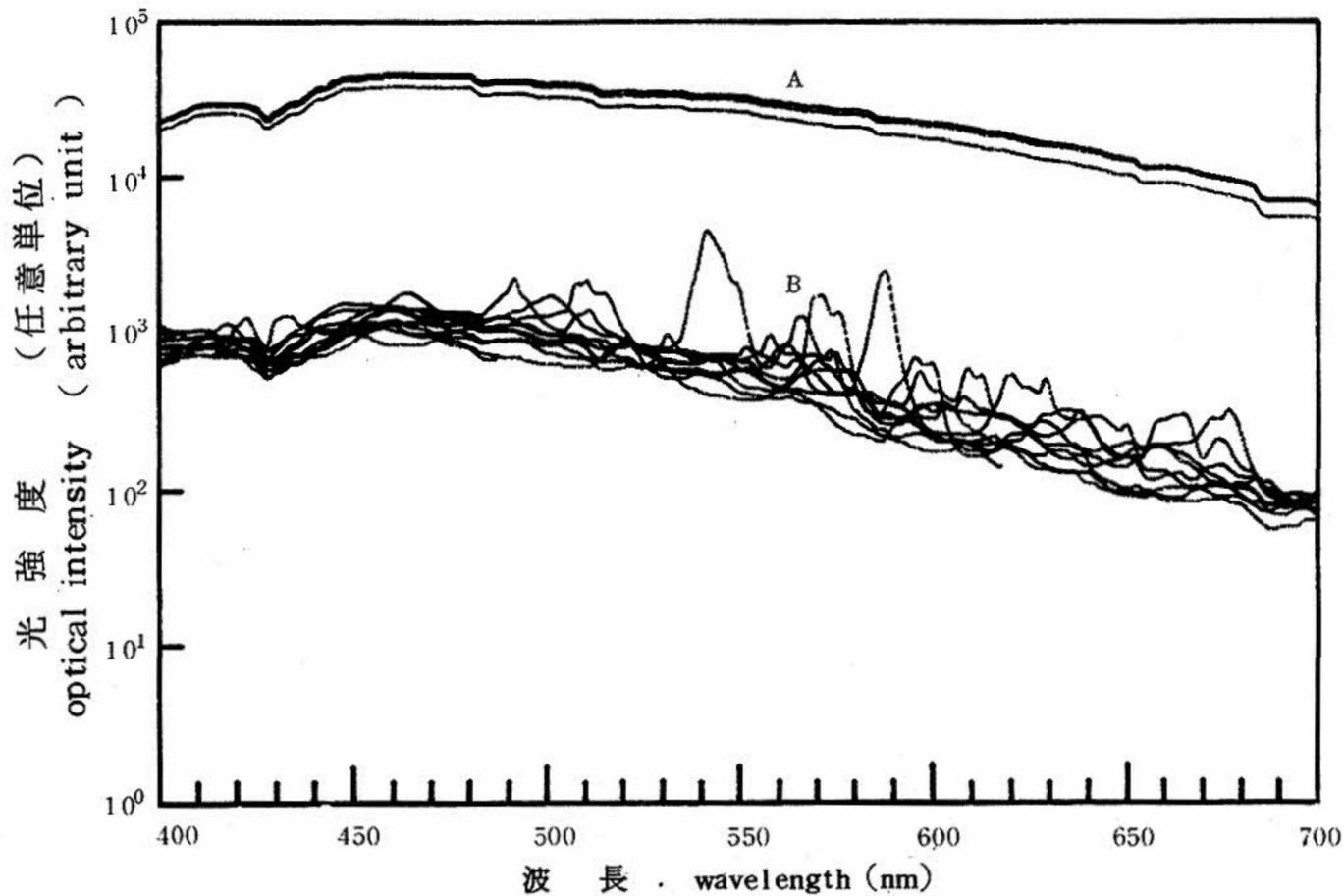
図10は濃い雲が全天に亘って存在し、波はほとんど認められない場合で、海面直上下向光の強度に変化は認められない。しかし、この場合は図4、図6および図8に比べてエネルギーはかなり減少している。

また、それぞれの測定における波長別反射率の最大値と最小値をグラフにしたものが図10と図11である。

これらと図5、図7とを比較すると、雲量や大気中のヘイズの量の増加とともに、反射率、最大値、最小値および変動の幅ともに増加することが認められる。

#### (4) 反射率と太陽高度との関係

15時20分に Stn. B で測定した海面直上下向光と海面直上上向光の測定チャートを図12に示す。

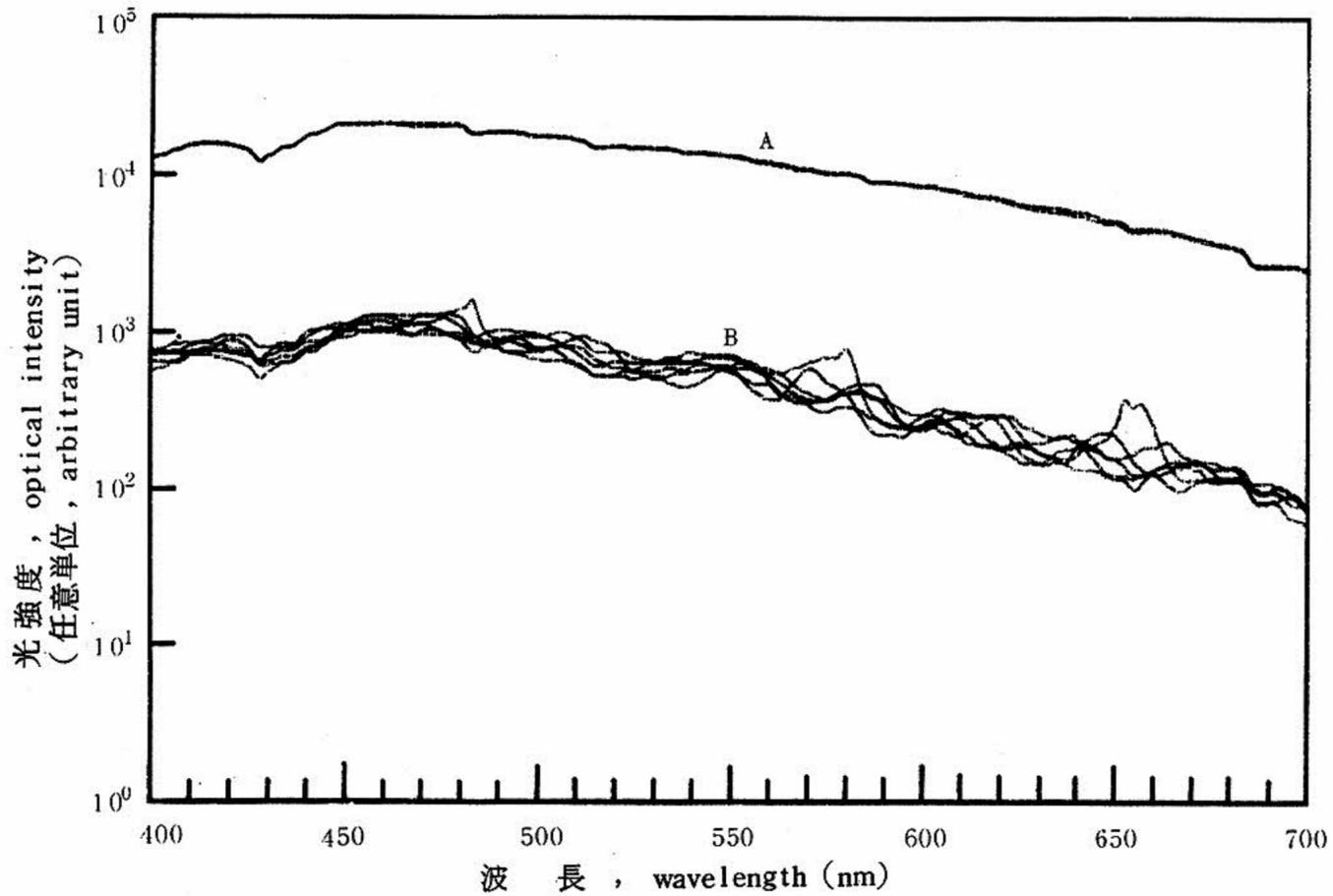


A ; 海面直上下向光 , downwelling light just above sea surface  
B ; 海面直上上向光 , upwelling light just above sea surface

測定日 , date ; 1978年11月22日 11時30分 B点  
AM 11<sup>0</sup> 30', 22. Nov. 1978, stn B

図8 やや曇りやや波があるとき

A little cloudy sky and a little waving sea surface



A ; 海面直上下向光, downwelling light just above sea surface  
 B ; 海面直上上向光, upwelling light just above sea surface

測定日, date ; 1978年11月22日 12時00分 B点  
 AM 12 00, 22. Nov. 1978, stn B

図9 濃い雲におおわれ波がないとき  
 Completely cloudy sky and calm sea surface

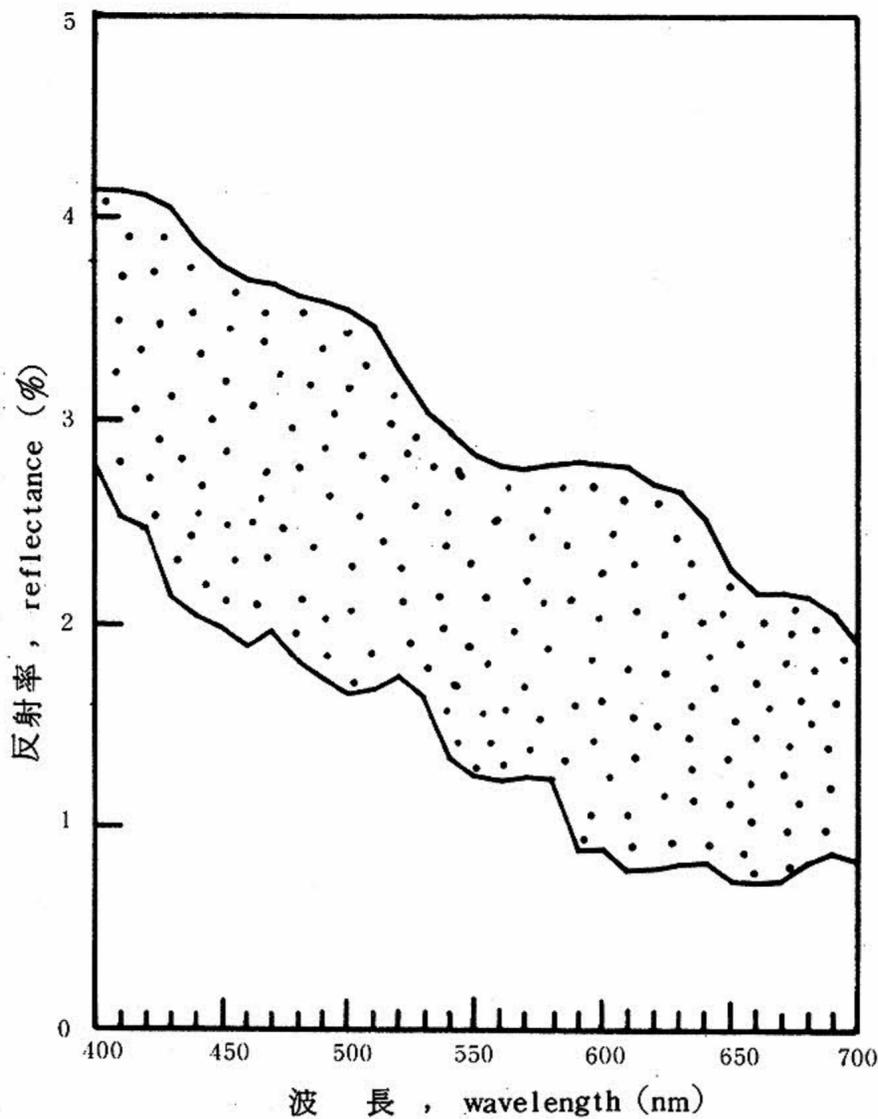


図10 図8をもとに計算した反射率の最大値と最小値  
 Maximum and minimum values  
 of reflectances calculated  
 from Fig. 9

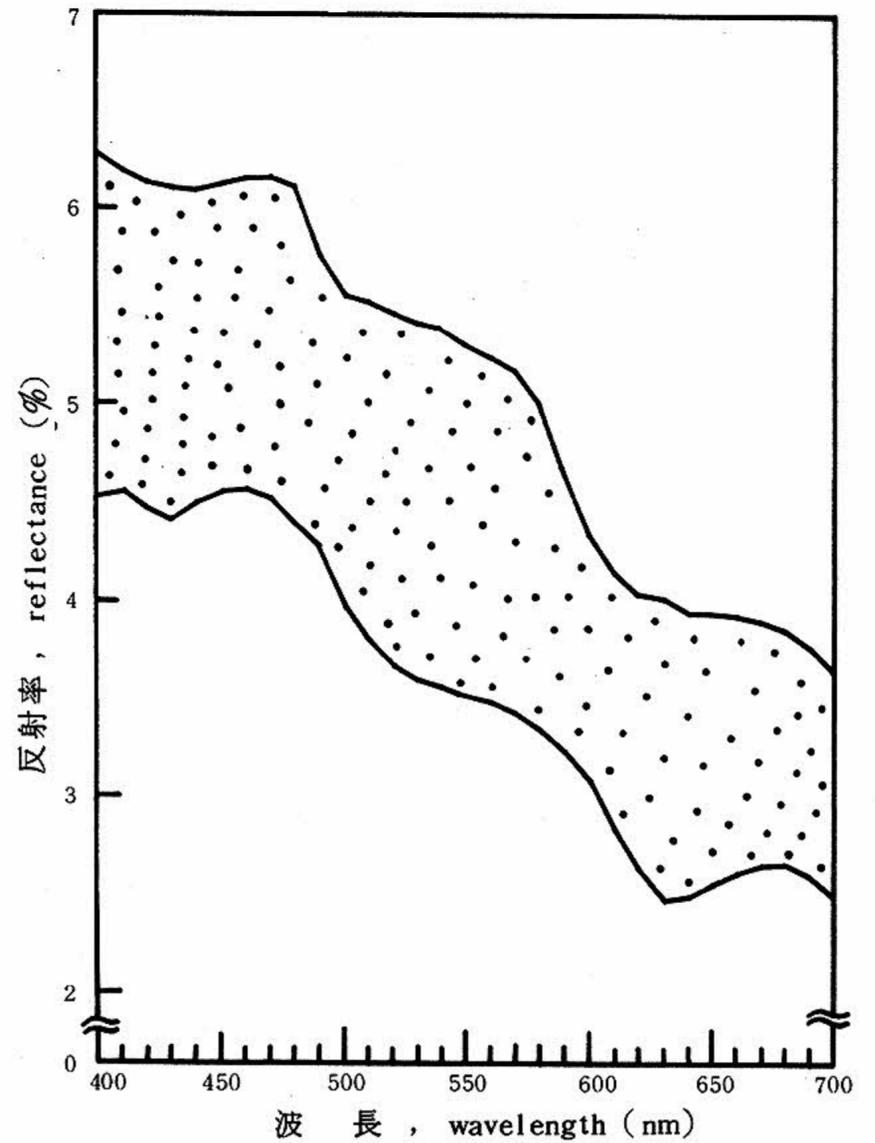


図11 図10から計算した反射率の最大値と最小値  
 Maximum and minimum values  
 of reflectances calculated  
 from Fig. 10.

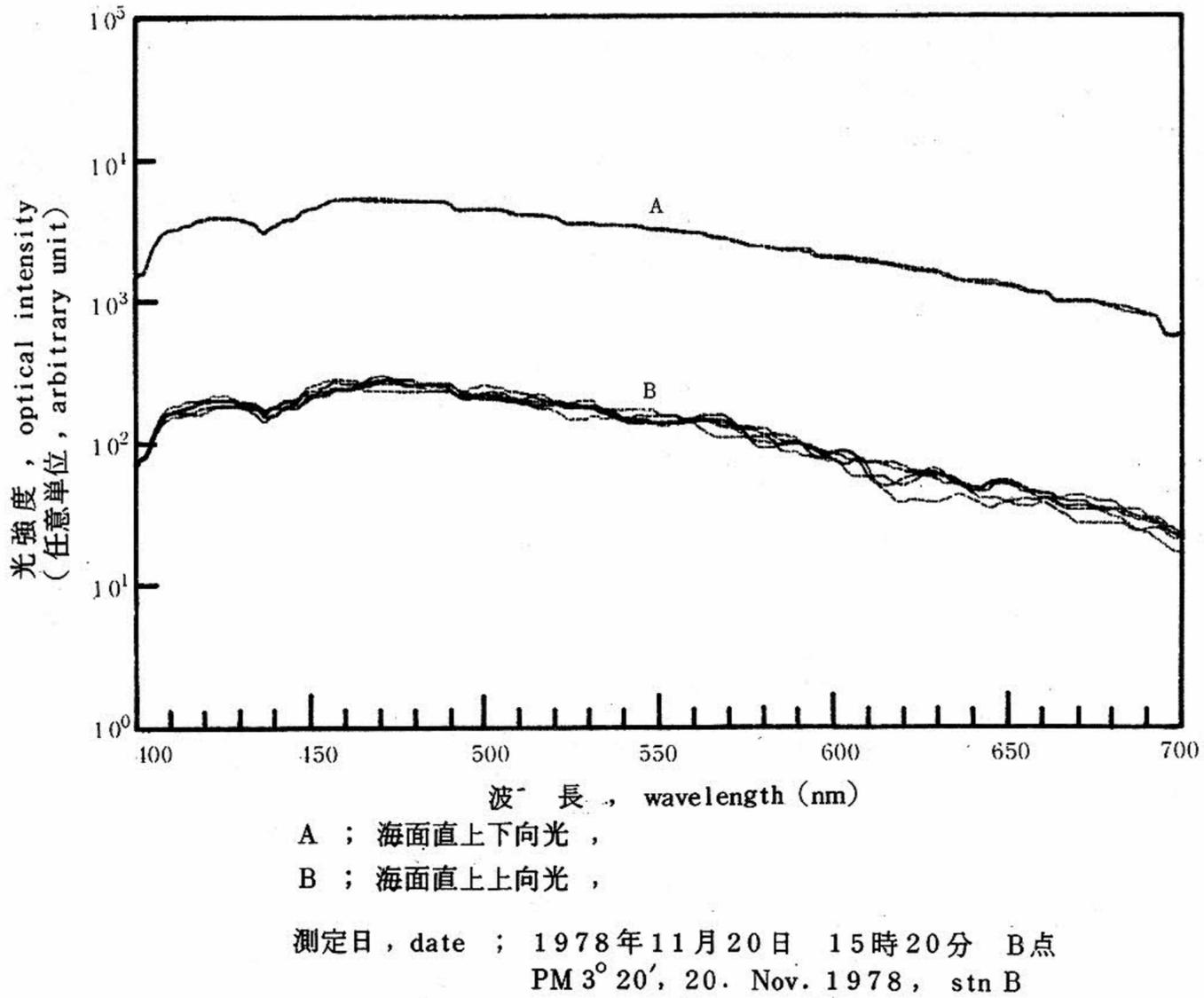


図12 晴天で波がなく太陽高度が低いとき  
Clear sky, calm sea surface and low sun elevation

上記(1)~(3)の測定は11時20分~12時にかけて実施し、11時20分の Stn. Aにおける太陽高度が $35^{\circ} 05'$ であるのに対して15時20分における Stn. Bの太陽高度は $12^{\circ} 30'$  (いずれも11月20日)である。この太陽高度の減少に伴う海面直上下向光エネルギーの減少も図12で明らかである。

また、反射率の最大値と最小値をグラフにしたものが図13である。

この図から晴天でかつ波がほとんどないリモートセンシングに好都合な気象条件下であっても、太陽高度の減少とともに、反射率の平均値および変動幅ともに大きくなることが認められる。

#### 4. 考察

以上の結果から定性的に判断されることは、以下のとおりである。

- (1) 反復測定したリモートセンサーデータを相対的に取扱う場合、特に反射率は、その最小値が水質を最もよく反映したパターンを与える。

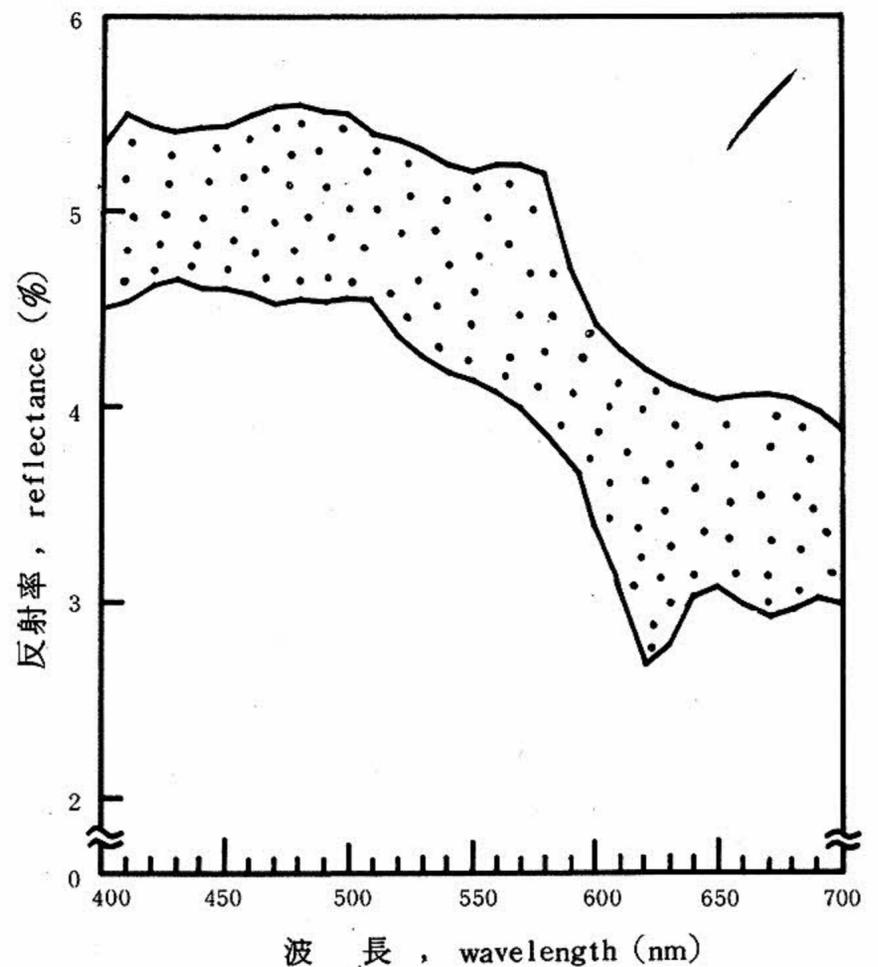


図13 図12から計算した反射率の最大値と最小値  
Maximum and minimum values of reflectances calculated from Fig. 12

ただし、最小値であっても、鏡面反射光の影響が加わっている。

(2) 波浪，海面直上下向光の光組成，太陽高度等によって反射率が大きく変動する。

特に波の発達，天空光（大気中の拡散光）の割合の増大，太陽高度の減少によって反射率の平均値，変動の幅とも増大する。波，天空光の割合等は定量化するには，きわめて難しい量であり，反射率との関係を定量化することは容易ではない。

## 5. あとがき

以上述べてきたように，反射率に対する波，大気状態，特に雲量に着目して，太陽高度の影響を定性的にはとらえることができた。

しかし，間接測定であるため，絶対値の測定が難しいリモートセンシングでは反射率は最も基本的で，重要なパラメーターであり，海水の水質を規定する物質の特性や量を最もよく反映するパラメーターとして用いられる。この量の不正確な見積りは，これから推定されるマクロオプティクス，およびマイクロオプティクス上の諸量の推定に対しても，不正確な値を与えることとなる。このことを考えると，今後は反射率と，それに影響を与える上記諸条件の間に，さらに一歩進んだ関係を

見出さなければならないことは必然である。

今後は，これまでのデータにもとづき，さらに検討を進めたい。また，同様の測定を，このうち，実施する場合は，気象，海象上のパラメーターについても，なんらかの方法によって，必ず測定がなされることが望ましいことを勧告したい。

## 文 献

- 1) “海洋遠隔探査技術の開発研究報告書” (1978), 昭和53年度受託研究, 海洋科学技術センター
- 2) 岡見登, 1977, “海の色のスเปクトルについて”, 沿岸海洋研究ノート, 15(1) 56
- 3) Gordon, J. I., “Directional radiance (luminance) of the sea surface” (1969), Scripps Inst. Oceanogr. Ref. 69-20
- 4) Austin, R. W., “The remote sensing of spectral radiance from below the ocean surface” (1974), In: Jerlov, N. G. and Nielsen, E. S. (Editors), Optical Aspects of Oceanography., Academic Press., New York, N. Y.
- 5) Gilbert, N. P. and George, W. K., 1969, “Radiative transfer in an atmosphere-ocean system”, Appl. Opt., 8 (2), 455