氣象集誌

第二輯 第二十七卷 第二號

論 文

1949.

海面の偏光と視程（後篇）*

川畑 幸夫 大谷 和夫 **

§ 1 序 言

これまで吾々は高空から見た空、海面・地面等の光の偏光について論じて來たが、今度は観測者が海岸にあつて 水平線近くの空、海面等の偏光を調べる。このため静岡県御前崎の海拔約40 mの崖の上から昭和19年10月下旬約10日間ほど測定を実施してみた。観測の対象としたのは、日中太陽と反対方向にあるNW-N-W方向の海面で、その他に太陽向帯（Sonnenstrich）の偏光を調べるためにSE-S-W-W方向の海面についても測定を行つた。

前篇の観測と違つて今回からは、偏光度を $(I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ で定義する。かうした場合の偏光度は我々の場合、從來のもの約2倍となる。

§ 2 観 測 結 果

(1) 海面の偏光と空の偏光の時間的並行性

この高度に立つて海面の光を観察してみると海面から観測者に送られる光の大部分は、同方向の仰角10°内外の空からの光の反射光で占められてゐるやうに思はれた。そこで最初に太陽を背にした方向のある一定方向に測器を向け同一垂直面内の仰角9°の空と伏角7°の海面の光を数日間に亘り連続的に測定してみた。結果はこの予想を裏書きして、両者の偏光度は常に極めてよく並行して變化することが看取された。

豊富な観測資料の全部を挙げることは出来ないで、特に偏光度が急激に變化した場合の資料を二三第1図に例示する。

空の偏光の機構は衆知の如く空気分子の散乱によつて起るもので、空の或る一点の偏光度は太陽の運行に應じて直線的に変る他に、雲の生成去來により大きい振幅で變化する。之に対し海の偏光を支配するものは、その小波面により空の光を反射する際に生ずる偏光であり、その偏光度は空のより大きいことも小さいこともある。全観測を通じて、この偏光度の振幅の範囲は空の光では0.0

* Y. Kawabata, K. Otani: Polarization and Visibility (Second Report).

** 福岡管区氣象臺。

第 1 図 海の偏光と空の偏光の並行性

～0.7であり 海の光では0.1～0.4であつた。

偏光面は、空の場合太陽の運行に伴れて直線的に変り 海の場合も大略之と並行して変化するが第2図に見る如く 日射が強くなると両者の並行が緊密になり、観測上空に雲が擴がり全天を覆ふに伴れて 海の光の偏光面が空との並行性より離れて垂直に近くなる事が認められた (偏光面の符号は垂直を0°, 水平を±90°とし、垂直より右へ傾くを(+), 左へ傾くを(-)ととつてある) 之はこの場合の海の光が同方向の高度10°附

第 2 図 雲の生成による偏光の変化

近の空を覆ふ白雲の反映なる事を考へれば Brewster の法則によるものとして理解出来る。この場合、白雲が不偏光なる事に意味があるのであつて、一般の場合の偏光面の並行性か、同一方向の空の光の海面による反射のためか、或は之に太陽からの光の直接の反射を含むか、といふ事は、尙研究の余地がある

尚こゝに面白い事は、筆者等の一人が嘗て注意したように⁽¹⁾ 空の偏光度は雲の生成、消滅去來を鋭敏に反映し、肉眼で雲の生成が認められる 20～30 分前に早くも偏光度が急減することを量的に捕へる事が出来た。第3図がこの例である

(2) 偏光度の方位的变化

さて以上述べた如く時間的経過に於て、空と海とが並行性を示す事から、両者の方位的变化もある程度並行するのではないかと思はれる 高度を空+9° +18° 海-3° -7°の如く選び、方位を変へて数多くの観測を行つた。その結果海面の偏光度と方位との間には前篇に於て述べた如き綺

(1) 天氣と氣候 第10巻3号。

麗な曲線を描く事は稀であつて第4図の如く顯著なのは、早朝日射に輝いた海面の場合に見られただけで、一般の晴天の場合には辛うじてこの傾向が見られる中に、不規則な凹凸が混つてゐるのが普通である。

曇天の場合には、太陽垂直面内で偏光度最小でこれと直角方向で最大といふ関係は全然見られず、方位に無関係に不規則な分布をなし、偏光面も方位に無関係にどこでも垂直となつてゐる

前篇に述べた高山よりの裾野、海面等の場合とこのように趣を異にするのは、前者の場合、中間大氣がその主要なる役割を演ずるに對し、今回は中間大氣による寄與はその量小さく、海面の反射機構と光源たる天空光の変化が大きく影響するためであらう。海面光の変化は暫く海岸に立つてこれを觀察すれば分明するが実に微妙極まりないものである。これはその波面分布、空の雲の去來、日射の強弱等がすべて影響してゐるためと考へられる

(3) 偏光度の高度分布

次に用ひ得る資料全部を使つて水平線を境とした空及び海の光の高度分布（全光量、偏光度、コントラスト）を調べてみると第5図の如く、四つの代表型、即ち太陽垂直面及び之と直角方向の夫々晴天及び曇天の場合である。図に於て、海と空の接続は連続的に変化してゐるようであるが、これは使用した測器の視野が廣いため水平線附近では空と海との光が同時に視野に入るためであつて、實際は、境界では偏光度は不連続に飛躍してゐるのである。

図に見らるゝ如く、全光量は海の方では常に同程度であるのに空の方は散乱の法則により方位により大小があり、偏光度は、晴天時、太陽垂直面と90°方向に於て著しく空の方が大きい、太陽垂直面に近づくに従つて両者は接近し、太陽垂直面では海の方が少しく大きい。又曇天時の偏光度は海の方が常に大である

§3 水平線視程改善の問題

水平線を挟む偏光度変化の概念がこのように明らかになつたので、前篇のコントラストの考へを再び用ひて、水平線視程改善の問題を論じてみよう

今空の輝度を B_1 、海のを B_2 とすれば水平線のコントラストは $(H_1 - H_2)/H_1 = 1 - \frac{H_2}{H_1}$ で表はされる。同様に偏光を除去した場合、即ち偏光板の透過軸を偏光面に一致させた場合の夫々の輝度を B'_1 、 B'_2 とすればこの場合のコントラストは $1 - H_2/H_1$ である。従つて $H_2/H_1 \geq H'_2/H'_1$ なるに

第3図 雲の変化に前驅する偏光度の変化

第4図 方位との関係 (晴天の場合)

第 5 図 偏光の高度分布とコントラスト

従ひ、偏光を除去することによりコントラストは取ひはよくなり、或は悪くなる筈である

実際その様になるかどうかを調べるために H_1 として仰角 9° の全光量の値を、 H_2 として伏角 7° の値を用ひ、 H_1 、 H_2 に夫々の P_{min} (図に於ける偏光せる光量) を使つて夫々の場合のコントラストの値を計算し、その良化 (又は悪化) を多にして当時の偏光度の差に対してプロットすれば第5図下欄に添付した如くなる。視程が良くなるのは、海面の偏光度が大きい三つの場合であつて特に曇天時、水平線を挟む空と海の輝度が殆んど等しく水平線が認め難い様な場合に効果が著しく、之は同時に行つた視程計による観測によつても立証された

こゝで一付注意しなければならぬのは、上のコントラストの計算には夫々の P_{min} を使つて居りそれは両者の偏光面の傾きを同一と仮定した事になつて居る事である。実際には勿論両者は一致せず例へば偏光板の透過軸を海の偏光面に一致させた場合、 H_2 は図の値であるが空の透過光は上の計算の H_1 より大きく従つてコントラストもより大きくなるわけである。また厳密にはもつと視野の狭い測器を用ふべきであらう

この他一般に、海面上に浮ぶ白帆、又は海中の岩などに対し、偏光板を用ひてその視度を高め得る事も確めることが出来た。

§ 4 太陽向帯 (Sonnenstrich) の偏光

太陽に面した方向の海面で主として太陽向帯の偏光の観測を行つた結果は第6図の如くである。太陽垂直面と之と直角な方向とに、偏光度の極大があるのは、前者は太陽向帯、即ち上方にある太陽といふ幾大な光源の海面による反射光による偏光のためであり、後者はこの方向の空の光が偏光度極大なるためその反射としての極大を示すものと考へて諒解出来る

太陽向帯はこのように甚だしく偏光してゐるので、偏光板によつてその向帯の異常光輝を相当に弱め得ることは明らかであり、大分観測その他航海利用價值が多いと考へる

太陽向帯の偏光面は垂直であり、之はこの場合の光が同一方位にある太陽の光の海面による反射光なることより当然首肯されるところである

太陽向帯の偏光度の観測資料のうち、偏光に対して擾乱を與へる雲の如きものが少なく偏光度が主として太陽高度に依關して變化したと考へられる或る一日の観測を Fresnel の反射の式で計算してみよう

今水平及び垂直方向に電気振動をなす偏光の入射成分の強さを單位にとると、海面反射光の水平及び垂直方向の強度 ρ_1 、 ρ_2 は夫々

$$\rho_1 = \left(\frac{\sin(i-r)}{\sin(i+r)} \right)^2$$

$$\rho_2 = \left(\frac{\tan(i-r)}{\tan(i+r)} \right)^2$$

となる i 、 r は夫々入射角及び反射角で海水の屈折率を $\mu (=1.335)$ とすれば i と r の間には

$$\sin i = \mu \sin r$$

なる關係がある、 i は太陽高度を α とすれば吾々の場合には第7図により

$$i = (175^\circ - \alpha) / 2$$

となる、かくて種々の太陽高度 α に対する i が分り、從つて ρ_1 、 ρ_2 が計算される、その ρ_1 、 ρ_2 を用ひると吾々が定義した偏光度は、この場合光源が不偏光であるから

$$(A_1 - A_2) / (A_1 + A_2)$$

となるから、これを計算して太陽高度に対してプロットすれば第8図に示す如く

観測と略々一致する、測器の視野が廣く視野内に太陽向帯外の空と海の光が入つて來ることや、使用した照度計の示度かどのような強い光量に対する部分では直線的になつてゐないことなどを考慮に入れると、兩者の一致は極めて良好であるといふことが出来る

以上の他に色々面白い現象も體驗された、例へば天窓に浮べる雲の反映が海面の偏光に微妙に作用することや、海面の色合によつて偏光が若干相違することなどは興味あるところであるが、未だ量的に明確化し得ないので後日の研究に譲ることとする。

第6図 太陽向帯の偏光

第7図

第8図
太陽向帯の偏光度と太陽高度

§ 5 結 語

以上を要約すれば次の如くである

(1) 富士山頂より海面を見下した場合と較べると このように海面の近く (高度 40 m) に立つた場合には海面より観測者に来る光は同一方位の仰角 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ の空の光を主なる光源としてそれの小波面による反射光の合成光であつて、従つてその偏光は主として光源たる空の光の偏光状態とその天空光が海の波面により反射される事により生ずる偏光とにより決つてゐるのであつて 前者の場合の如く Rayleigh の散乱則により説明さるべきものではなくて 天空光の偏光に、Brewster の反射則を附加して考慮さるべきものである

(2) 従つて海面の偏光度及び偏光面は、晴天の場合には同一方位の 10° 附近の空の光のそれに大体並行して時間的变化をするが、曇天の場合には偏光面は方位に関せず垂直となり偏光度は空の値より大となる。偏光度の範囲は海では $0.1 \sim 0.4$ であり、空では $0.0 \sim 0.7$ である

(3) 偏光度と方位に関しては、前者の場合 (即ち天空光又は高空より俯瞰した海面・雲海、裾野等) の如き明瞭な関係は認められず晴天の場合やこれに類似した傾向を示すのみである

(4) 太陽向帯 (Sonnenstrich) は著しい偏光を示し Fresnel の式から理論的に示される値に近い偏光度を示す。

(5) 偏光板の海に於ける視程改良への應用は、消極的には太陽向帯の輝度を弱めて 肉眼の刺激を少なくする効果があり 積極的には天候の状態により殆ど見分け難き水平線を明瞭ならしむる効果を有する

(6) 海面の偏光の問題は小波面の傾きの分布状態、海面への入射光の偏光状態、入射角による反射光の偏光の変化等を考へれば中々複雑であり、又一般に観測者に到達する光が果して如何なる要素の如何なる配合によるかといふ事についても詳かには分らない。Hulbert⁽¹⁾ はこれを論じて、観測者が水平近くにある場合は海からの光は主として同一方位の空の 30° 附近の光の反射なりと結論してゐるが、これには尙幾多の疑点がある 我々の観測では太陽と方位を異にする海面に於ても同一方位の空の光の他に太陽光の直接の反射も無視出来ないように思はれた。これについては尙今後の研究に待ちたいと思ふ。

本研究は學術振興会の援助によつて行はれたものである ここに記して深謝の意を表する次第である 尙観測に際して種々便宜を與へられた山頂観測所の方々並に瀧沢技官 御前崎測候所所長始め各位に厚く御礼申し上げる。

(1) Hulbert: The Polarization of Light at Sea. J. O. S. A. Vol. 24. 1934.