

成層圏よりの天頂輝度の偏光観測

齊藤国治・秦 茂・河野 毅

1. 緒 言

地球の大気圏を構成する原子、分子の状態を解析する手段の一つとして天空の輝度および偏光の観測を高々度にまで推し進めることは、特に Chandrasekhar¹⁾ の近年の理論を背景として、高層大気物理学に新しい研究の分野を提供するものである。

一方天文学の立場から考えてみると昼間の天文観測に関しては地上 100 km 以上の高空にあって発光していると考えられる day air-glow の存在が(もし実在するものならば)超高空より行なう天文観測の実施をはばむものと考えられる。したがってこの発光層の高さおよび輝線・連続スペクトルの調査は、昼間に天文観測をしようという企てに関連して、第1に採り上げられねばならない問題なのである。これに関しては、1950 年から 1953 年にわたって観測ロケット V-2 および Aerobee による 3 回の観測があり、夜光にくらべて異常に明るい輝度(夜光の 1 万倍)を示していると報告されている²⁾。しかし別の報告によると 100 倍というものもある³⁾。後者は発光層をつきぬけた時の値であるのかも知れない。なお発光層の実在についてはなお未解決のまま残されているというのが現状である。

本年度 I. G. C. の一環の研究としてロクーンの発射実験が試みられたので、そのバルーンに試験的に天頂輝度計を吊り下げ、天空の輝度および偏光の観測を行なった。実験中、計器の作動、観測データの受信記録等はほぼ完全に行なわれた。ロクーン実験は 15 号台風のために打揚げ予定がくれ、公示した終了予定期日の切迫のため、10 月 1 日早朝、実験場上空には、うすい高層雲(高さ 8 km ないし 10 km)があったにもかかわらず実験を強行することになった。したがって浮揚後 30 分間輝度計は雲の下にあって記録していたから、正当の観測値としては採用できず、高さ 10 km から 18 km の間の青空の観測値のみが正規の条件で得られたわけである。その後これらのデータを地上からの観測と比較のため、データをつなぐ必要を生じたので 11 月 17 日快晴の午後、毎日新聞社の協力を得て同社の金星号(ビーチクラフトスーパー)を利用して茨城県上空にて最高々度 6.7 km まで上昇し、地上からその高度までの天頂輝度について補足観測を行なった。この時使用した天頂輝度計はロクーン実験に使用したもの(これは実験中に太平洋に廃棄された)の姉妹品である。したがって以下に記される天頂輝度および偏光観測の総合曲線は 10 月 1 日

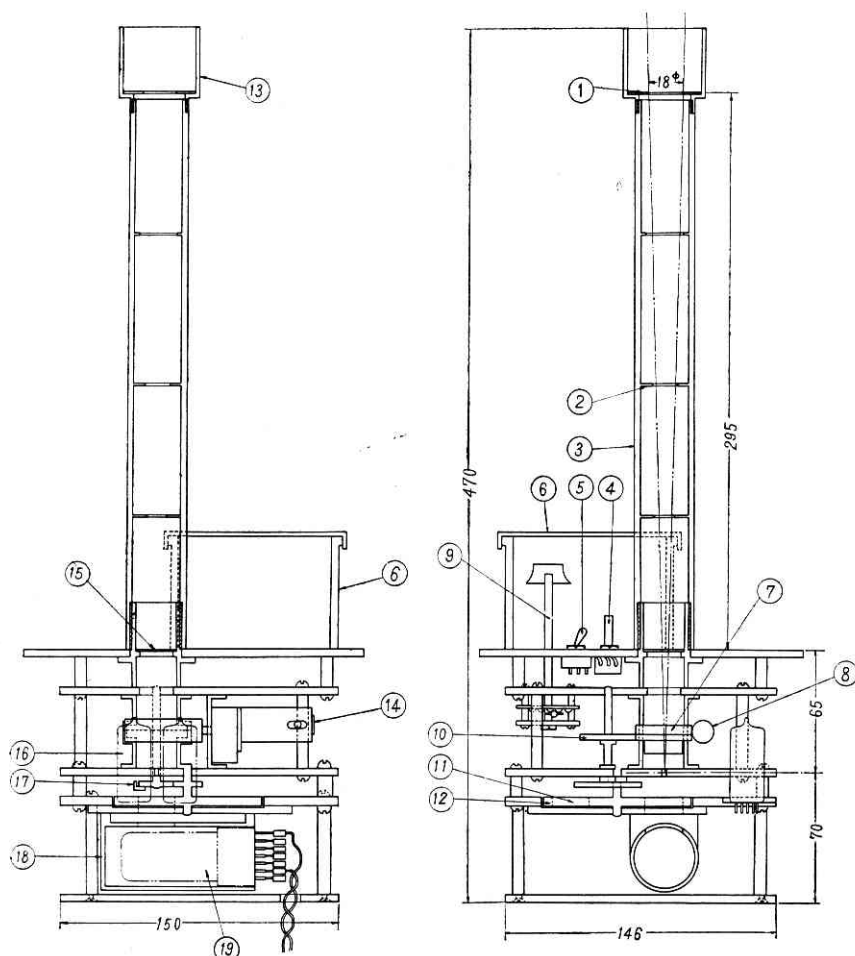
ロクーン用バルーンによる結果と 11 月 17 日の航空機による結果とを組み合わせ得られたものである。

2. 計測器

天頂輝度計の主要部の構造は受光筒、ポラロイド偏光板、三色フィルタおよび絞りから成る光学系、ならびに光電子増倍管(RCA 1 P-21)とカソードフォロアーとから成る電気回路とで成立している。

長さ 300 mm の円筒内には 3 枚のダイヤフラムが適当な間隔、位置に取められてあり、内壁は黒塗りとし先端にフードおよび交換可能な円形絞りが取り付けられている。観測当日の筒先の絞りは 17.9 mm で開角 $2^{\circ}45'$ にしてある。すなわちこの開角内の空の光が筒先の絞りの下方 372 mm にある直径 2 mm の絞りでしぼられて後、光電子増倍管に送り込まれる。なお光路の途中、筒の最下端には平面ガラスがあって外気との間を気密遮断している。その下には 2 枚の光学ガラスでサンドイッチされた偏光板(ポラロイド NH 32)があり、その下に上記 2 mm の絞り、つづいて三色フィルタ(黄、青、紫外 以下 Y. B. UV. と略称する)ならびに Sr^{90} 発光塗料(標準光源として使用し、硫化亜鉛のベースに Sr^{90} を刺戟剤として混入してある)を各象限に収めた回転板が取り付けられている。これらは天頂の輝度と同時にその偏光と色とを調べるためである。偏光板は周期約 6 秒で光軸内に連続回転し、偏光板が 360° 回転する毎にそれに連結したゼネバギヤーが作動してフィルタ回転板が 90° 回って、 Sr^{90} 発光体、Y. B. UV. 各フィルタが次々と光軸内に挿入される仕組となっている。 Sr^{90} 発光体は有効直径 18 mm でこれが光路に挿入されると天頂光は遮断される。これらの機構については第 1 図に示した。これらの駆動動力としては日本マイクロモータ(CL-3B 型 7.5 Volt) 1 個を使用した。マイクロモータ駆動用の電源はナショナル水銀乾電池(MY-6 型 7.2 Volt)であり、電池の低温対策としては輝度計全体を塩化ビニールフォームテックス板でかこみ、さらにポリエチレン袋内に格納した。

快晴時に地上から観測される天頂光の平均輝度(B)は約 0.2 stilb とされている。われわれの輝度計の光電子増倍管直前の絞りの開口面積 a (直径 2 mm)と空に対する立体開角($\omega = 1.81 \times 10^{-3}$ steradian)から概算すると光電子増倍管の光陰極面に落ちる光量(Baw)はフィルタの吸収を別にして 1×10^{-5} lumen の order であると考えられる。RCA 1 P-21 の総合感度を例えば 1 ampere/lumen



①: 絞り ②: 筒内絞り ③: 受光管 ④: 可変抵抗器 ⑤: モータスイッチ ⑥: 感度調整用気密室 ⑦: ポラロイド板, ウォームホイール ⑧: ウォームギヤー ⑨: 電圧調整ロータリースイッチ ⑩: 平歯車 (ウォームホイールをゼネバギヤーに連動する) ⑪: フィルタ (3色フィルタ, Sr^{90} 発光体) ⑫: 回転板 ⑬: フィルタを収容 ⑭: フード ⑮: マイクロモータ ⑯: 平行平面ガラス (気密用) ⑰: テレメータ用真空管 2本 ⑱: ゼネバギヤー ⑲: 光電管ケース ⑳: 光電管 (RCA 1P-21)

第1図 天頂輝度計 構造図

に取っても
(特に高電圧
供給を低くし
て使用する)
光電流は 10
 μA であって
テレメータ入
力のためには
電圧増幅は不
要となった。
しかしテレメ
ータの校正の
ためにインピ

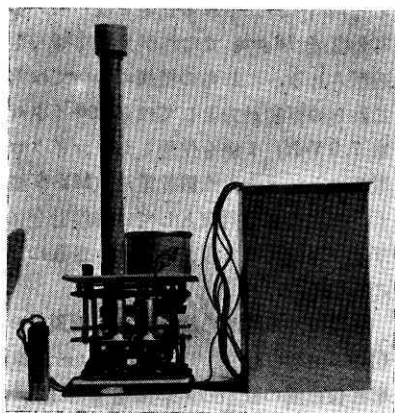


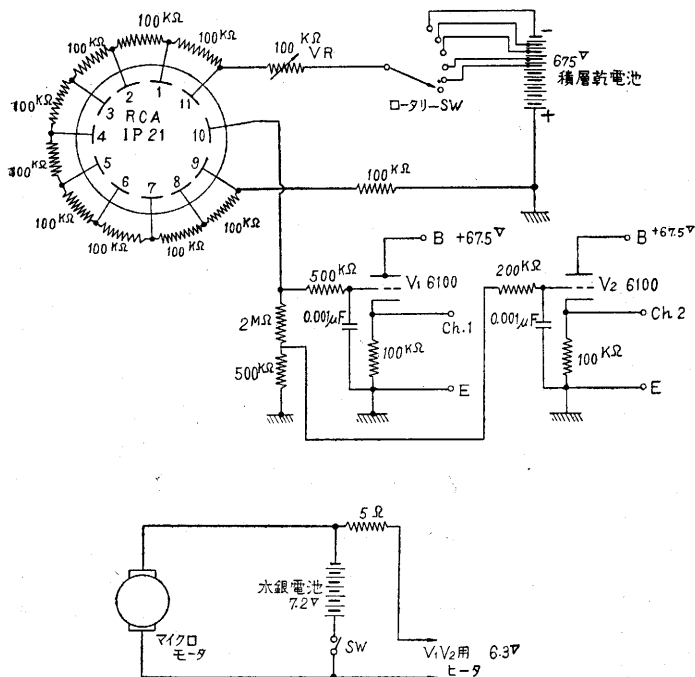
写真 1 天頂輝度計

ーダンスを数 $\text{k}\Omega$ に下げることが必要とされたので、高信頼管 (東芝 6100) 2本によるカソードフォロア回路を作って、カソード出力を日電テレメータに接続し

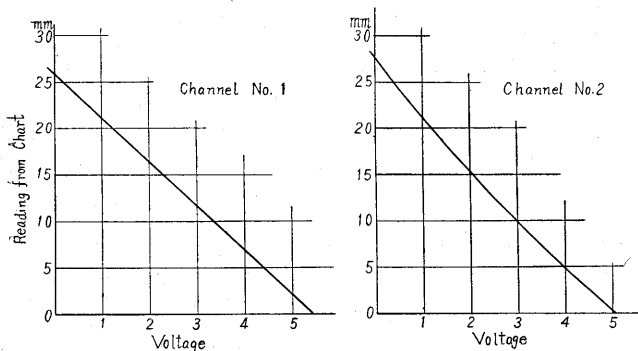
た。RCA 1P-21 および 6100 管による電気回路は第2図に示した。増幅回路中の入力抵抗はそれぞれ $2.5\text{M}\Omega$, $0.5\text{M}\Omega$ に取ってあって日電テレメータのチャンネル1および2に分けられている。したがってチャート上での感度比は 1:5 に保たれている。また光電子増倍管に信号が入るとテレメータの出力が減るようになっていて、信号の増減とチャートの記録が逆になっている。この方法によると、零変動が大きくなり易い欠点があるが、次の二つの利点を持っている。すなわち光電子増倍管を順方向に使用した時と比べて、低電圧で作動させ得ること、およびクリッピング回路が不要になることがそれである。RCA 1P-21 の電源としては積層電池 (BL-045, 67.5 Volt) 7個を使用した。 Sr^{90} 発光塗料の輝度は 0.04stilb であり、その発光量は気温・気圧の変化に無関係であると仮定できるから、光電装置・増幅回路・日電テレメータを通じての全電気回路の温度・気圧による変化、電源の変動等による観測値への影響を修正するために極めて有用な手段であった。

観測結果の整理によると暗電流は微変動を示しているが、暗電流を差し引いた Sr^{90} のレベルは今回の観測 66 分の間にはほとんど変動をみとめられなかった。またテレメータへの校正用として日電計器系より投入された標準電圧 0V, 2.55V, 5.1V に対するチャートの振れ幅はチャンネル 1, 2 のそれぞれに対して第3図のような特性を示しており、テレメータは全記録時間中不変かつ正規に作動していたといえる。

輝度の絶対測定のために後で必要になるのであるが、青空のエネルギー分布、RCA 1P-21 の波長感度 $P(\lambda)$ 等 (エネルギー光源に対するもの) および三色フィルタとポラロイド偏光板の透過率 $T(\lambda)$, $T_p(\lambda)$ を第4図に示しておく。ここに青空の色温度は第1近似として



第 2 図 輝度計電気回路



第 3 図 日電テレメータ特性曲線

20,000°K と仮定してある (本観測のデータを整理した結果, この仮定が正当であったことがのちに証明された)。これから測定された三つの波長領域における等価波長 (Equivalent Wave length) はそれぞれ

$$Y=5463 \text{ \AA}$$

$$B=4187 \text{ \AA}$$

$$UV=4089 \text{ \AA} \text{ と求められる。}$$

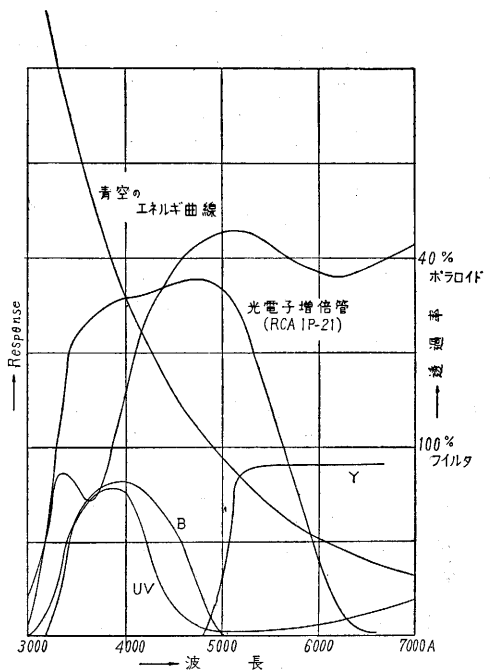
$$\text{ただし等価波長は } \lambda = \frac{\int \lambda \cdot T \cdot T_p \cdot P d\lambda}{\int T \cdot T_p \cdot P d\lambda} \text{ で定義されて}$$

いる。

3. 諸試験

今回の実験に関連して行なった諸試験については以下の通りである。

(1) 連続作動試験 バルーン放球からロケット発射



第 4 図 天頂輝度計の光学的特性

までの時間は約 1 時間と予定されていたので規定の電池を使用して 2 時間の連続作動試験を数回行なった。

増幅器用真空管 6100 のフィラメント電源およびマイクロモータの電源として、初めにマンガ電池 (単一) を 5 個直列にしてテストしてみたが、約 360 mA の電流を取るのので、1 時間後にはかなりの電圧降下を示す。Sr⁹⁰ の較正があるから差し支えないようなものの実技上おもわしいことではない。そこで本番用としては低温対策を考えた上で水銀電池 (ナショナル MY-6 型) を使用した次第である。

(2) 衝撃および振動試験 RCA 1P-21 は 9 個のダイオードとアノード、カソードを細い支柱で真空管中に立てた構造になっているので衝撃に弱いのではないかと心配された。そこでその衝撃試験を生産技研の衝撃試験機を使用して行なった。(最大衝撃 50 G) すなわち RCA 1P-21 に 720 V の高電圧を印加しておき、光源として Sr⁹⁰ 蛍光体を光電面に正対させて、同一ケースに収め落下の衝撃を加えて、衝撃時の光電流変化の有無を調べた。もちろんバルーン用としてなら衝撃はさして問題にならないであろうと思われたが、近い将来にロケットに組み込むことを考慮して以上の実験を行なったのである。この結果 RCA 1P-21 は 50 G の衝撃に耐えて、衝撃の前と後でなんらの光電流変化を示さないことが判明した。続いて帝国電波株式会社製振動試験機を使って振動試験を行なった。この時は加速度 5 G 一定のもと

に周波数を 5 cycle/second から 2,000 c/s に変化させ、前と同様に光電流の変化を調べた。RCA 1 P-21 は以上の範囲の振動に対してもなんらの変化を示さず極めて安定であった。これは光電子増倍管をロケットに搭載することの可能性を示している。

(3) 減圧試験 約 20 km 上空の予想気圧は 50 mb であって水銀柱 38 mm に相当する。われわれの輝度計において低気圧に対して特に危険と思われたのは積層電池の高圧電源の端子間の漏洩あるいはコロナ放電の発生であった。今回の天頂輝度計はその構造上、完全気密は困難であったので減圧の際のコロナ放電について予めテストをして置いた。

すなわち極間距離 2 mm の鋭端電極に最高 900 Volt まで徐々に電圧をかけておき、この放電電極全体をベルジャーに入れ、真空ポンプで減圧して放電開始の気圧を調べた。その結果極間電圧 500 Volt では 2 mm Hg で初めて放電を開始すること（したがって 38 mm Hg では全く安全である）、840 Volt では 17 mm Hg で初めてコロナ放電が見られた。ちなみにコロナ放電電流は 17 mA であった。以上の実験から RCA 1 P-21 の供給電圧として 500 Volt をこえなければ今回のバルーン実験には特に気密保持を必要としないことが結論された。

(4) 低温試験 昭和 34 年 7 月に行なわれたロクーン予備実験におけるサーミスタによる温度測定の結果によると、黒塗りの容器をポリエチレンで十分に包んだ場合、内部の温度は約 1 時間の浮游中ほとんど一定の 20°C に保たれることが分かっている。

それで今回の実験に当たっては、輝度計の周囲に断熱板塩化ビニールフォームテックスを入れ、全体をポリエチレンの袋で包み込んだ。念のためその外箱であるブリキ缶の周囲にもテックスを張り付けた。ただし受光筒のみは外につき出ている。日光直射のない場合も想定して、そのような低温大気内に放置した場合の輝度計容器内の温度低下の度合を一応参考に試験しておいた。実験は運輸技術研究所の低温実験室を借用して行なわれた。その結果によると輝度計（内部温度 25°C）を周囲温度 -20°C の低温室（大気圧のまま）に持ち込み、2 時間後に内部温度をサーモジャンクションで測ると計器内は -8°C になっていた。また温度低下のために計器内に水滴が凝集して回路に短絡を起こすことの懸念についても注意されたが、その恐れのないことなどが確認された。

(5) テレメータとの連合試験 輝度計を 34 年 8 月中旬および 9 月初旬に日本電気株式会社研究部に搬入して、日電テレメータと接続の上、研究所窓より見た天空を一応、測定の目的光源としてペン書きオシログラフで記録を取り、連合予備テストは良好であることを確認した。

(6) 直射日光の影響について 測定すべき天空の輝

度は太陽面平均輝度の 10^{-6} （地上からみて）ないし 10^{-7} （高度 18 km から見て）の order であるから、バルーンによる浮游観測中に斜めに輝度計受光筒に当たる直射日光が散乱して受光器に入り天空光の測定値に混入する可能性がある。

そこで地上のテストにより天頂を向いた受光筒に斜めに入射する直射日光の影響は、地上から見る天頂輝度の 0.38×10^{-3} 以下であることを確めた。これは高度 18 km の天頂輝度の測光に混入してくる誤差が 0.4% 以下であることを意味する。ちなみにこの実験は太陽高度 30° のとき行なったものであり、ロクーン用気球浮游中の太陽高度は 11.5° から 24.5° までであったから、実際の観測値への影響はさらに少ないと思われる。

(7) ポラロイドの偏光性について ポラロイド NH 32 は中庸色、透過率 40% の偏光フィルムであり、これを 2 枚の平行平面ガラスで挟みバルサム張りしてある。筆者らの実測によると 2 枚のポラロイドを直交した場合の透過率は 1 枚の時の 0.05% 以下であって偏光能力ははなはだ優秀であるといえる。

4. 観測

天頂輝度計は大気球の直下約 50 m の位置にある長さ 2 m の水平桿の先端に天頂角 9° で外向きに筒を向けて取り付けられた。

天頂輝度計であるから名の通り天頂に向けておきたいのであるが、直上方の大気球（直径約 10 m）が測定視野のじゃまにならないように十分安全な角度に取り付ける必要からこのようなことになったのである。

天頂の偏光を観測するためには日の出後 1 時間ぐらいが最も条件がよかったが、実際に放球された時刻は午前 6 時 36 分である。払曉まで快晴であった空は、日の出前後より高層雲が次第に発達していた。したがって気球浮上開始後 40 分間の記録は曇天空の測定であるから観測結果としての価値は少ない。

7 時 11 分気球は巻層雲に突入し、やがて 7 時 19 分頃から天頂輝度計は青天の正規の偏光曲線を記録し初め、気球が雲層を脱したことを示した。これに伴って紫外域の輝度が黄色のそれに較べて著しく増加した。

7 時 41 分吊下げタイマーにより輝度計のチャンネルがジャイロに切り換えられたので、輝度計の記録は高度 17.9 km を頂点としてここで終わった。これから 6 分後に吊下げ計器は桿もろとも気球から切断され、太平洋上に落下廃棄された。

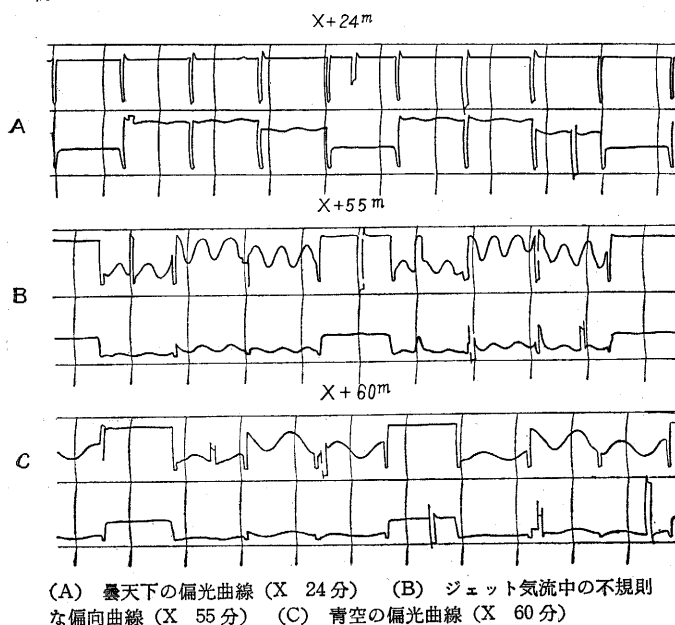
ロクーン実験の際は低空の観測は雲にさまたげられて不可能であったので、その範囲での観測を改めて飛行機を使って補充することにした。1959 年 11 月 17 日午後 2 時 48 分羽田空港より毎日新聞社の金星号にて離陸、3 時 23 分頃高度 6,700 m に達し、天頂輝度・偏光・色についての観測を行なった。ロクーン実験報告として

は直接関係がないので、飛行機観測の詳細は省略する。

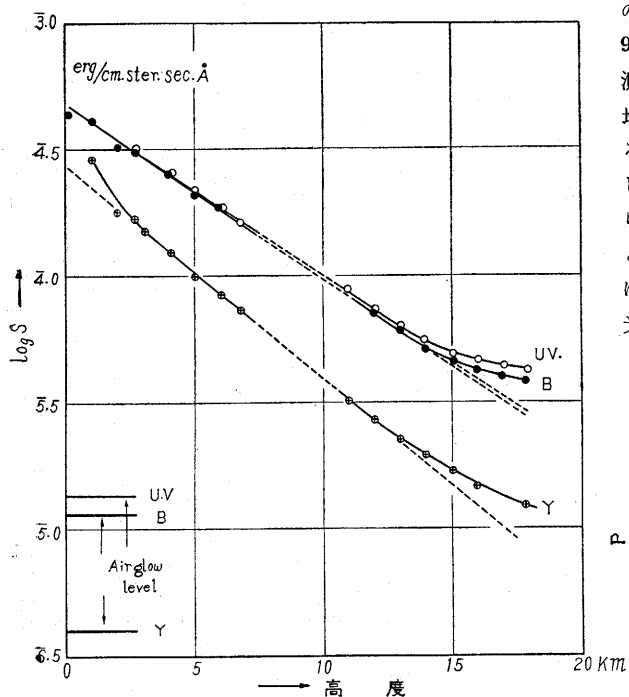
5. 結果

(1) 輝度、偏光および色温度 観測された輝度および偏光曲線は記録紙上では第 5 図の通りである。以下にデータの整理および結果について述べる (Sr^{90} のレベルは絶対測定のためのものであるからここでは省略する)。

初めに Y. B. UV. の 3 色フィルタのおのおのを通過し



第 5 図 観 測 記 録



第 6 図 天頂輝度の高度による変化

た偏光曲線の極大点、および極小点を読み取って、暗電流の補正をする。次に第 4 図のテレメータ校正曲線によってチャート上の振れ幅をテレメータ入力電圧に換算する。これが生の読み取り値であって極大値から得られたものを B_{\perp} 、極小値から得られたものを B_{\parallel} とする。記号については次のように定義する。すなわち、

B_{\perp} : 太陽と天頂と観測者の作る平面において、これに垂直な電気ベクトル成分の散乱光輝度

B_{\parallel} : 上記平面に平行な電気ベクトル成分の散乱光輝度

$$B: \text{天頂輝度} \quad B = B_{\perp} + B_{\parallel} \quad (1)$$

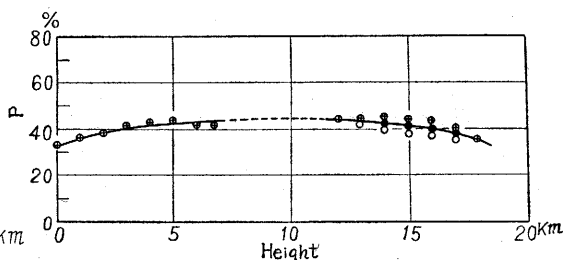
$$P: \text{偏光度} \quad P = (B_{\perp} - B_{\parallel}) / (B_{\perp} + B_{\parallel}) \quad (2)$$

したがって (1) 式によって天頂輝度 B , (2) 式によって偏光度を計算する。次に考慮された観測値補正について述べる。

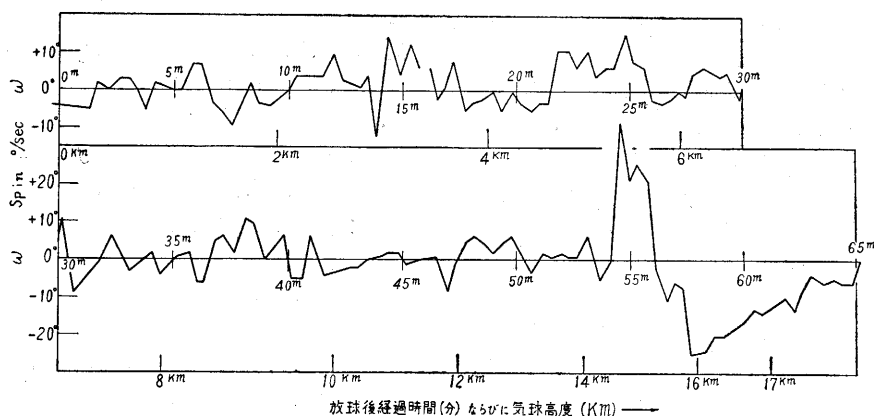
補正の主なものは太陽高度の変化によるものである。気球と飛行機による測定に要した時間は、それぞれ約 60 分と 40 分であったので、その間に太陽高度はそれぞれ、 11.5° ないし 24.5° と 17° ないし 12° に変化をしている。特に天頂偏光度は太陽高度によって相当の変化を示すものであるから、全体の記録を太陽の同一高度に換算する必要がある、そのためには別に地上において種々の太陽高度における天頂観測を行ない、太陽高度 22.5° の時の値に全部を引き直した。理論的に補正を行なうことも可能であって Tousey-Hulbert⁴⁾ の式によって補正

の検討を行なった。また気球の場合、止むを得ず天頂角 9° の天空輝度を測定したが、これも後日地上で補正観測を行ない天頂値に換算した。実験的に求めた補正値は地上における観測であるから、これの観測点の高さによる変化を理論的に推算して高空における観測の補正量としたのであるが、これは散乱理論上第 1 近似として認められるところであり、補正量としてならば正当性があると考えられる。したがって以上の補正を観測値に加えることによって太陽高度 22.5° における天頂の輝度および偏光度の気球の高さに対する変化を求めることができる (第 6, 7 図)。

天頂輝度はほとんど Rayleigh の散乱にしたがって指



第 7 図 天頂偏光度の高度による変化

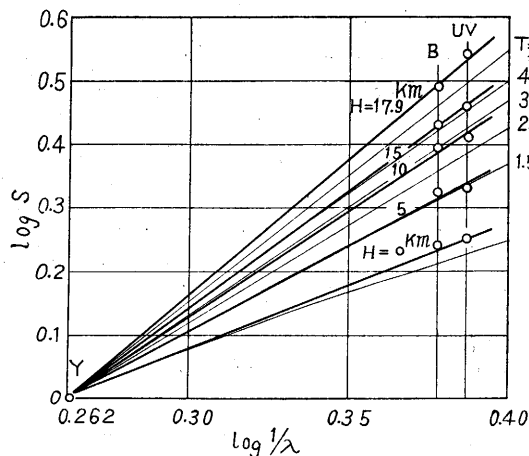


第9図 計測器のスピンの運動

数函数的に減少するがすでに 16 km 辺で散乱のみから予想される直線からの偏りが認められる。これは恐らくこの高度において、緒言で言及した day air-glow が散乱光に混入してきたことを示すものであろう。輝度曲線から推定される day air-glow の輝度を第6図左下に示した。

また偏光度対高度の曲線からは、(1) 偏光はほとんど色によらないこと (2) 成層圏領域では偏光度は高さとともに僅かずつ減少して行くことが分かった。

Y. B. UV. の三つの波長域についての観測値をエネルギー単位に換算してあるから、プランク曲線との比較によって青空の色温度が計算できる。計算によると地上では 11,500 度の色温度を持った空は次第に上空で青みを増し、高度 15 km で 42,000 度の色温度に達する。この色温度変化の様子を第8図にまとめた。



第8図 青空の色温度

(2) 計測器のスピンの運動について われわれの観測の主題は空の測光に関するものであるが、by-product として次のような結果が導き出された。太陽と天頂と計測器で作られる平面において、この面に平行な電気ベクトル

B_{11} と垂直な電気ベクトル B_{\perp} を定義することは輝度および偏光の項で述べたことであるが、吊下げ計器の桿がこの二つの電気ベクトルの作る平面内で回転を始める (すなわち計測器のスピンの運動によって) と静止状態の時の正規な偏光曲線 (ポラロイド板の回転周期6秒の間に極大、極小が2回ずつ起こる) は波長の変化を受けることになる (第5図参照)。第5図の偏光曲線から測定した波長を偏光板1回転の波長で割ると (A とおく) $\Delta=1/2$ は静止の状態に対応していることになる。 A およびチャート上で認められる山の数、計器のスピンの (w) の関係を次の表に示す。

Δ	観測される山の数	計器のスピンの w ($^{\circ}/s$)
∞	0	-60
1	1	-30
1/2	2	0
1/3	3	+30
1/4	4	+60
0	∞	∞

観測の時間に対する計器のスピンの量をグラフにする

と第9図が得られる。うすい曇天の下で空は僅かながら偏光を示していたから全浮游期間にわたってスピンの量を測定し得たわけである

第5図、第8図から分かるように X+55 分前後で計器桿は激しい動揺を記録している。この状態は約3分間継続して再び正常な偏光曲線に戻った。これはジェット気流の影響であろう。このことからこの時のジェット気流は高さ 15 km を中心に層の幅、約 1 km と出る。空の偏光観測は本来の目的の外に計測器のスピンの運動についてのデータをも提供し得ることは特に興味がある。

終わりに本実験を実施することを可能にされた生産技術研究所・平尾教授その他ロクーン班の方々に対し感謝の微意をささげたいと思う。

(1960. 1. 20)

- 1) S. Chandrasekhar, "Radiative Transfer" (1950)
- 2) H. A. Miley, E. H. Cullington, and J. F. Bedinger, Transactions American Geophysical Union Vol. 34, No. 5. (1953)
- 3) H. E. Newell, Jr. "Sounding Rockets" p. 42. (1959)
- 4) R. Tousey and E. O. Hulburt, J. O. S. A. Vol. 37 No. 2. (1947)