

Zeeman 法による昼間上層風の観測*

中 村 純 二**

On the Zeeman photometer observing upper atmospheric winds in the daytime

By

Junji NAKAMURA

Abstract: In order to observe velocities and directions of upper atmospheric wind, it is the most precise and non-hypothetical method to photograph simultaneously the artificial luminescent cloud from several camera stations on the ground. This method, however, would not be applied to measure wind velocities in the daytime, because the sky background is too strong to find out the artificial cloud optically.

This time it was developed a Zeeman photometer to find out the artificial sodium cloud in the bright sky background. In the cold artificial cloud NaD line has sharp line profile, while in the sky background, it has diffuse one reflecting high temperature of the sun. So, if the sodium cell of moderate temperature be set in the magnetic field of about 4,000 gauss, NaD line from sodium cloud to this cell may be scattered mostly, on the otherhand, considerable part of NaD line from the sky will pass through this cell. Thus it will be able to detect the NaD line from artificial sodium cloud with s/n ratio of one several tenths to the sky background.

Some preliminary results of #K-9 M-39 rocket experiment in the evening are also mentioned.

概 要

人工発光雲によって上層の風を測定する方法は、他に比べて最も直接的かつ精密である。ただし唯一の欠点は地上からの写真撮影によるため、大気力学の立場から重要であると考えられる昼間の風を測定できないことであった。

今回われわれは NaD 線をゼーマン効果によって分離すると、Na ガスの温度によってガス槽に対する吸収率が異なる点を利用して、高温でひろがった青空からの NaD 線に対

* 東京大学教養学部

** 宇宙研特別事業費による論文

し、低温で鮮鋭な人工発光雲の NaD 線を検出するゼーマン受光器を開発した。これによれば空の背景に対し明るさがわずかに一万分の一しかない発光雲からの NaD 線を s/n 比数十分の一で検出することが可能である。

すでに K-9 M-39 号機による薄明時の Na 発光雲実験に際しテストを行なったので、その結果についても検討した。

1. は し が き

ロケットによる人工発光雲によって、電離層 E 層付近の風を測定する試みは、1956 年以来数多く行なわれ [1]、我国でもすでに Na 雲、Ba 雲、TMA 雲などの実験に成功している [2]。

しかしこれらはいずれも薄明時あるいは夜間の実験であって、大気力学特に S_q 電流系の立場から最も重要であると考えられる昼間の上層風については、これまで測定が全く行なわれていない。その理由は強烈な青空の背景の存在であって、これを除くため三重プリズムや、干渉計など、極めて狭い波長域の光だけを取り出す方法や、大出力のレーザーを利用するライダーの方法などが計画されているが、ここでは人工 Na 雲を Zeeman photometer によって検出する方法を述べる。すでに装置の製作と内之浦におけるテスト観測を終った段階であり、可能性と問題点についていくつかの点も明らかとなっているので、それらについて報告したい。

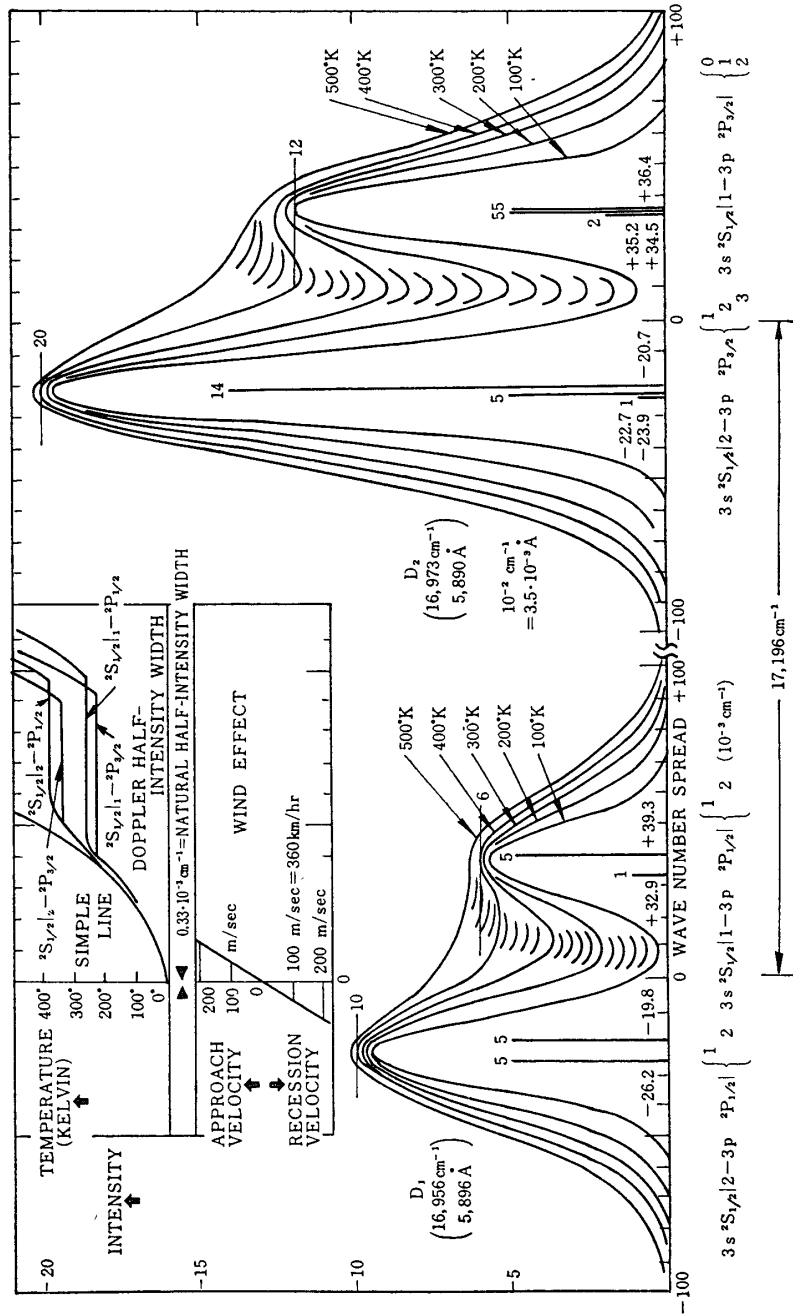
2. 昼間に於ける D 線付近のスペクトル

電離層 E 層付近に昼間、人工的な Na 発光雲を作って、これを地上から観測しようとする場合、一番問題となるのは D 線付近の青空の背景である。

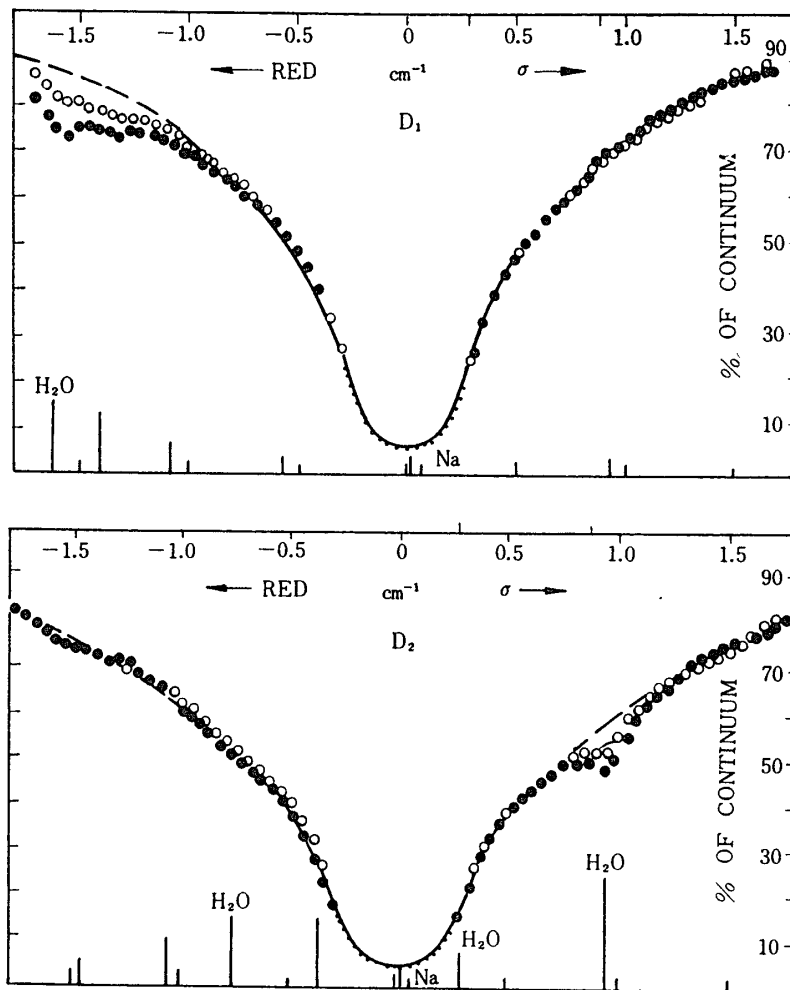
Na は D_1 λ 5,896 Å (空中波長) と D_2 λ 5,890 Å から成り、それぞれ相対強度が 10, 6 および 20, 12 の二重線から成る。これらはさらに 2P state の fine structure によって三線に分離しているが、ガスの温度が高い場合、Doppler broadning を起こし、第 1 図のような形をとる [3]。

太陽の表面温度は 6,000°K に近く、その周囲のナトリウムガスの温度も高いので Fraunhofer 吸収線は 1 Å 以上の幅をもっている。その様子をシーロスタットを用いて測定した結果の一例は第 2 図のとおりである [4]。すなわち吸収線の中心位置は、地球の運動やガスの重力運動の影響をほとんど受けず、その両側各々 0.1 Å の範囲では、ほぼ放物線形をしている。また吸収線に重なって地表の水蒸気によるいくつかの弱い吸収も見られるが、有効な吸収は 0.1 Å 以上離れていることがわかる。

青空からの光は、零次近似としてこれらの太陽光の Rayleigh scattering によるものと考えられる。さらに地上 90 km 付近には Na 原子が浮遊していて、これらが resonance radiation を起こすので、これに基くいわゆる dayglow の D 線がつけ加わってくる。



第 1 図 種々の温度におけるナトリウム D 線の形. 枠内は Doppler 半値幅と相対運動による幅.



第2図 Fraunhofer D₁ 線と D₂ 線のスペクトルの形。
 D₁ の最低値は吸収がない場合の 4.95%、D₂ の最低値は 4.44%。
 図中の点は湿度の異なる日の実測値。破線は水蒸気等の吸収がない
 と考えた極限の推定値。

Na dayglow についてはすでにロケットによる測定も行なわれ、その強度はおおよそ 15 kR の程度である [5]。ただし 1 R とは 1 \AA あたり $4\pi \times 10^6 \text{ photon/cm}^2 \cdot \text{sterad} \cdot \text{sec}$ の光子を発する面光源の強度であって、同じ単位で青空からくる連続光を測ればほぼ 10,000 kR である。

人工の Na 発光雲を上空に作った場合、太陽光の resonance による発光雲の明るさは 30 kR の order であると推定される。また dayglow の Na 原子はほぼ 200°K であるのに対し、人工発光雲の Na 原子はほぼ 300°K と考えられる。

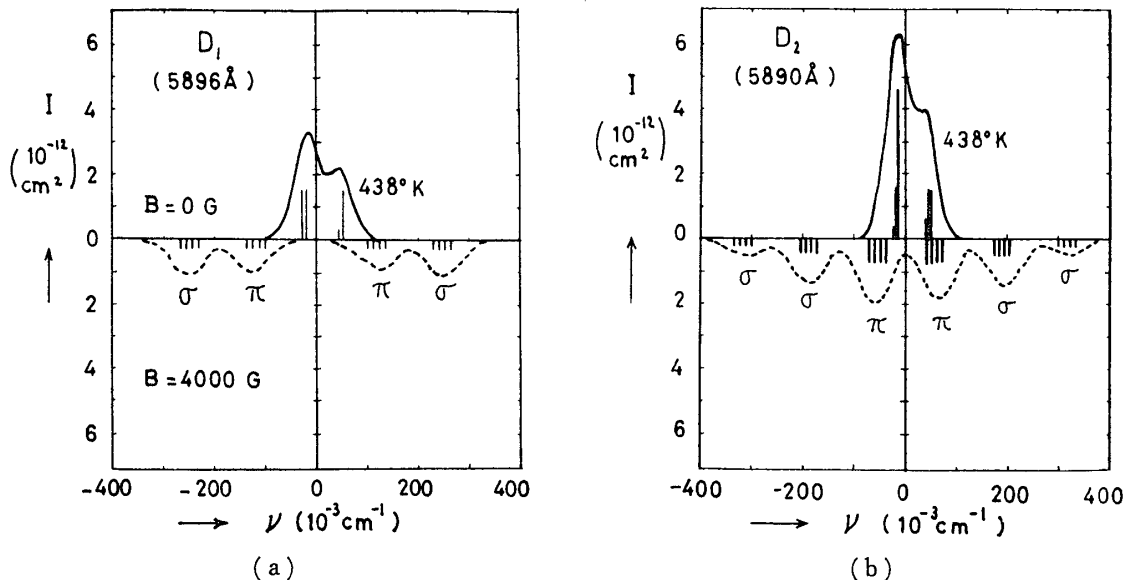
したがって昼間の人工発光雲を観測する場合、D₁ および D₂ 線を中心に波長幅がそれぞれ 0.07 \AA の波長域を選んだとしても、青空の背景が約 100 kR、dayglow が約 15 kR 存在する上に輝く、20 kR 程度の発光を見分けなくてはならない結論となる。

3. Zeeman 法の原理

ナトリウムガス槽に白色光が入射するとき、磁界 $B=0$ ならば、 D_1 および D_2 線付近の波長幅 0.045 \AA の部分の光のみガス槽は吸収して周囲へ scatter する。これに対し $B=4,000 \text{ G}$ (ガウス) になれば、第 3 図点線のように、 D_1 および D_2 線はそれぞれ 4 および 6 個の帯に分裂し、各帯の波長に相当する光を吸収したうえ周囲に scatter する。この場合 degeneracy と optical depth の関係で $B=0$ の場合 scatter される光量は少なく、 B が大きくなるにつれて次第に多くなり、 B がさらに大きくなって始めて scatter される光量は一定の飽和値に達する (第 4 図)。もちろんその模様はガス槽の温度 T にもより、温度が高いほど図に示すようにゆっくり飽和する。

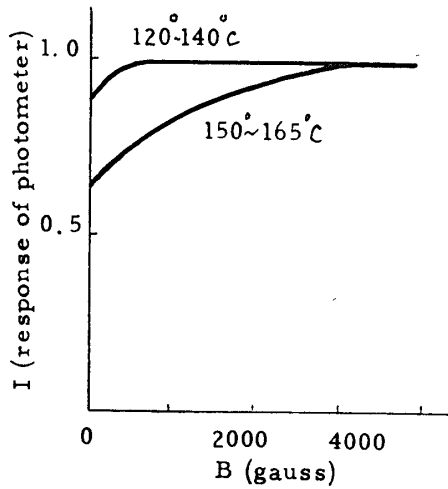
第 5 図はこのような Na ガス槽に Fraunhofer 線や発光雲からの光が入射した場合、scatter される π, σ 成分が磁界 B によってどのように変化するかを示したものである。Fraunhofer 線では D_1, D_2 付近で両側の強度が放物線的に増大するため、Zeeman 効果とともにガス槽に吸収される光量はますます大きくなって行く。これに反し dayglow や人工発光雲では Na 原子の温度が低く、半値幅はせいぜい 0.04 \AA であるため、 $B=0$ の時は大部分の emission がガス槽で吸収された後周囲へ scatter されるが、 B が強くなるとともに吸収の割合は急激に減少し、特に磁界に垂直な σ 成分の場合 $B=4,000 \text{ G}$ になると光はほとんど完全にガス槽を透過し、周囲に scatter される光量は 0 に近くなる。

青空から来る Fraunhofer 線と dayglow ではこのように Zeeman ガス槽に対する吸収散乱の様子が異なる性質を利用して、Blamont と Donahue [6] は dayglow の地上観測に成功

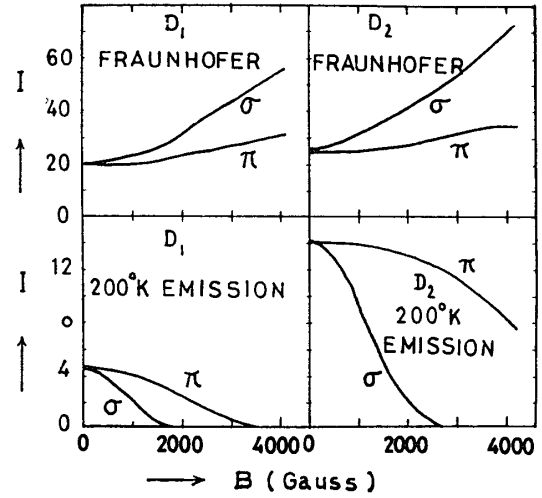


第 3 図 (a) $438^\circ\text{K}=165^\circ\text{C}$ の NaD_1 線の形 (実線) とこれが $B=4,000 \text{ gauss}$ の磁界によって Zeeman 効果を受けた場合の形 (点線). profile 中の線分は絶対温度 0°K における微細構造を示す。

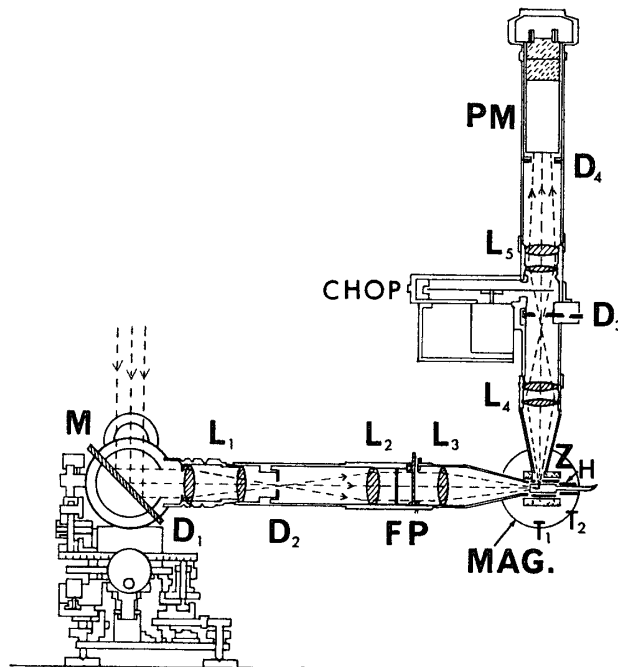
(b) (a) と同じ条件における NaD_2 線の profile.



第 4 図 一定強度の白色光を磁界中のナトリウムガス槽に入射した場合、ガス槽に吸収された後これと直角方向に散乱される光の強度の磁界依存性。



第 5 図 Fraunhofer 線および 200°K のナトリウム原子の放射による D_1D_2 線が、それぞれ 438°K のナトリウムガス槽に入射した場合、様々な磁界強度 B のもとに周囲へ散乱される σ 成分および π 成分の相対的な光の強度。



第 6 図 Zeeman photometer の原理。

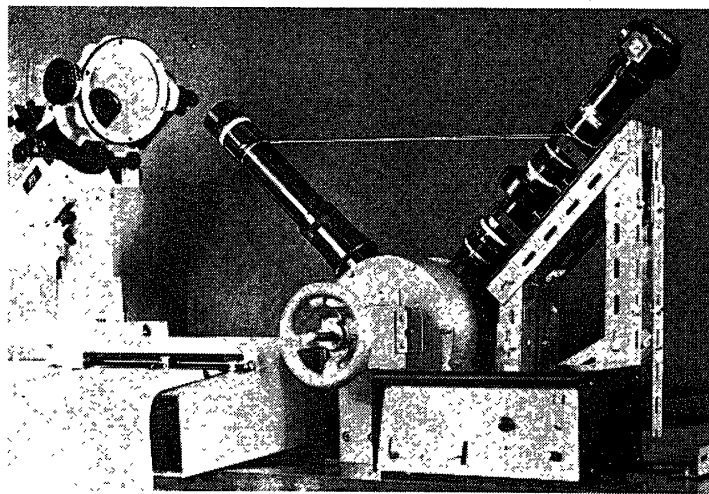
M: 平面鏡, 8° の 16 方位を 4 秒間づつ 96 秒周期で掃天する。 $L_1 \sim L_5$: レンズ。
 $D_1 \sim D_4$: 絞りダイヤフラム。 F: 干渉フィルター (半値幅 6 \AA)。 P: ポラロイド。
 Z: Na ガス槽, $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$ 。 $T_1 T_2$: ガス槽の温度, ($T_1 - T_2 = 15 \text{ deg}$)。
 MAG: ワイス型電磁石, (4,000 G)。 CHOP: チョッパー。
 PM: C-20 型 photomul.

した。

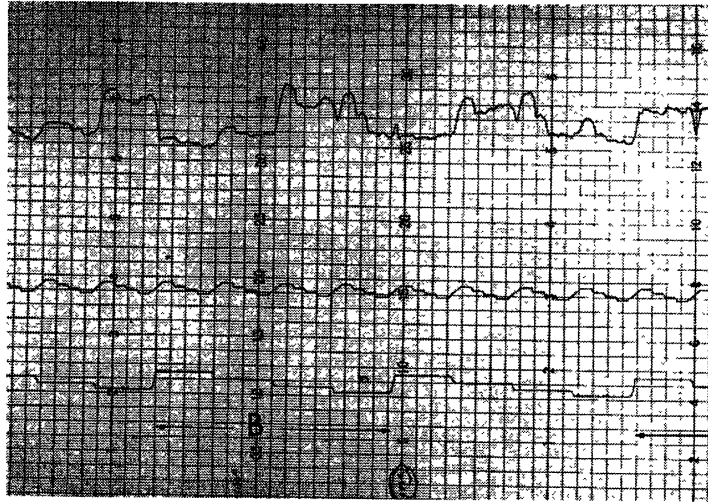
第6図は彼らと同様な方法によって昼間の Na 発光雲を観測するため製作した Zeeman photometer の原理図である。Mは間欠的に空の 16 方位を掃天する平面鏡で、各方位に向いている時間は 4 秒間、その中、最初の 2 秒間は電磁石が ON、後の 2 秒間は OFF になるようリレーが連動している。L₁ は F 2.3, f 135 mm のレンズで、その焦点面 D₂ には視角を 8°×8° にくぎる絞りがおかれている。L₂ と L₃ は F 2.3, f 125 mm のレンズで、これらの入射光を一たん平行光線とし、ここに半値幅 6 Å の干渉フィルター F と、ポラロイド P がセットされている。青空の偏光を利用して P により青空からの光量を減らし、F により乱反射光の影響を少なくするのが目的である。電磁石 MAG 内におかれたゼーマンガス槽 Z の大きさは 10 mm×10 mm×45 mm でヒーター H により T₁=165°C に保たれている。これには外径 5 mm の側管がつけられ、側管は T₂=150°C に保たれているので、Z 中では Na ガスが凝結することなくしかも常に飽和の状態にある。

Z に入射し、Zeeman 効果によって Z に一たん吸収された後、入射方向と直角に散乱された σ 成分の光を photomul PM 50 に導く。この際レンズ L₄ (F 1.2 f 55 mm) で一たん Zeeman ガス槽中、表面から 5 mm の点の像を作り、ここにダイヤモンド D₃ をおく。ただし D₃ は測定対象に応じて絞り面積が 4 段階に変えられるようになっている。D₃ 付近にはチョッパー CHOP が設けられ、散乱光を交流信号に変え、s/n 比の小さい状態で光電流を増幅する。レンズ L₅ も F 1.2 f 55 mm で散乱光を略平行にして PM に入れている。PM の近くには電磁石があるので、その周囲はチタンによって十分 shield されている。PM から出てくる光電流は交流アンプで増幅した後、平面鏡 M の架台から送られる高度並びに方位信号とともに記録計に同時記録される。第 7 図は Zeeman 受光器の外観、第 8 図は記録の一例である。

いま Fraunhofer, dayglow 並びに Na 発光雲の σ 成分に対する B=0 の場合と B=4,000



第 7 図 Zeeman 受光器の外観。
使用時は採光筒、受光筒共に水平に対し 45° 傾ける。



第8図 記録の一例.

最下段は高度，中段は方位，上段が各方位から来る NaD 線散乱強度．この場合は電磁石が手動切替のため，右の1サイクルが $B=0$ ，左が $B=4,000\text{ G}$ となっている．

G の場合の光量をそれぞれ $I_{0F}, I_F; I_{0G}, I_G; I_{0C}, I_C$ とおけば，発光雲のない方位については

$$I_0 = I_{0F} + I_{0G}, \quad I = I_F + I_G \quad (1)$$

発光雲の存在する方位については

$$I_0^* = I_{0F}^* + I_{0G} + I_{0C} \quad I^* = I_F^* + I_G + I_C \quad (2)$$

が観測される．観測方位により背景となる青空の偏光度や強度も異なり，dayglow も方位により僅かながら変化するので，(2) から (1) を差引くだけでは I_{0C} を求めることはできないが， I/I_0 と I^*/I_0^* は 20% 程度の差があるので，各方位につきこの比を測定することによって発光雲の存在を確かめることができる．

4. 観測上の問題点

1972年2月に行なわれた K-9 M-39 号機による薄明時の Na 発光雲ロケット実験において Zeeman 受光器のテスト観測を内之浦で実施した結果，次の諸点が明らかとなった．

- 1) 発光雲の視野は $30^\circ \sim 40^\circ$ あり，かつ数分間に 30° 近く方位が変わるので，これまでのように画角が $4^\circ \times 4^\circ$ かつ固定の掃天方法では十分発光雲を追跡できない．このため画角を $8^\circ \times 8^\circ$ に広げるとともに，手動によって平面鏡の仰角と方位角を任意の値に変更できるようにした．観測者は常に記録紙を注視し，発光雲が視野から外れそうになれば，平面鏡のクランプをゆるめてこれを追跡し，視野の中央に入ればクランプを止め，平面鏡の自動送りを続けるという方式である．
- 2) 昼間であっても，この方法によれば受光感度は決して高くないので，増幅方式を直流から交流に改め，さらに今後 photomul の冷却も行なう計画である．
- 3) 発光雲の空間位置は二観測点からの同時観測によって決定されるが， $8^\circ \times 8^\circ$ のメッシュでは 10 分間観測できたとしても，精度は数分しかないので，今後は水平スリットと

鉛直スリットをそれぞれ鉛直並びに水平に sweep する方式を用いて数百米の精度が得られるよう改造する。

- 4) この方法によれば、困難な分光的操作や、絶対測定を行わずに昼間の風向風速が直接測定できるが、Na 発光雲の立場から、測定可能な高度は 80~150 km であると考えられる。この高度を 60~300 km に広げるための Na 弾の開発も望まれる。

以上、装置の基礎開発が一段落した時点で報告を行ない、批判を期待する次第である。今後は 1973 年 2 月の K-9 M-42 号機実験の際、改良した装置を用いて最終予備観測を行なった上、昭和 48 年度から本観測に入る計画である。

1973 年 3 月 10 日

参 考 文 献

- [1] H. D. Edwards, J. F. Bedinger, E. R. Manring & C. D. Cooper; "The Airglow and Aurorae" 122 (1956)
N. W. Rosenberg; Science **152**, 1017 (1966)
- [2] M. Huruata, J. Nakamura, K. Akita & K. Saito; Proc. 6th Intern. Symp. Space Tech. & Sci. 697 (1965)
J. Nakamura & H. Kimura; Proc. 11th COSPAR Symp. 130 (1969)
J. Nakamura, H. Kimura, T. Matsuoka, T. Aso & S. Kato; Space Res. XII 1329 (1972)
- [3] J. W. Chamberlain; "Physics of Aurora & Airglow" 445 (1960)
- [4] McNutt & J. E. Mack; J. G. R. **68**, 3419 (1963)
- [5] D. M. Hunter & L. Wallace; J. G. R. **72**, 69 (1967)
- [6] J. E. Blamont & T. M. Donahue; J. G. R. **66**, 1407 (1961)
M. Gadsclen, T. M. Donahue & J. E. Blamont; J. G. R. **71**, 5047 (1966)