

発光雲法による風の観測

中村 純二*

Observation of Upper Atmospheric Wind by the Method of Artificial Luminescent Clouds

Junji NAKAMURA*

Abstract: Observation of the upper atmospheric wind velocity, diffusion constant and electric field by the method of artificial luminescent clouds has been carried out at Kagoshima Space Center for the past several years. From the viewpoint of the upper atmospheric dynamics, it is considered important that measurements of neutral wind velocities at the altitudes between 120 km and 200 km and also of electric fields at the altitudes of about 200 km are performed in the auroral zone, especially at Antarctica.

In this article the writer suggests the following rocket experiments at Syowa Station: at the first stage, artificial sodium, barium and strontium cloud experiments in the evening using S-210 or S-310 rockets, and at the second stage, trimethyl-aluminum cloud experiment at night time and also sodium cloud experiment with Zeeman photometers at day time.

1. は し が き

ロケットによって人工発光雲を 80~250 km の上空に作り、その動きから中性分子、あるいはイオンの運動を知る実験は、1956年以来各国で行われ (EDWARDS *et al.*, 1956; BROGLIO, 1961; BLAMONT, 1962), わが国でも内之浦で数回の実験が行われ成功している (HURUHATA *et al.*, 1965, 1966; NAKAMURA *et al.*, 1969, 1972a). 現在大気力学の立場からは、特に極光帯における高度 120~200 km の中性分子の運動、およびその付近の電界の強さと方向を知ることが重要である。また、南極圏ではまだ一度も発光雲のロケット実験は行われていない。そこでみずほ観測拠点の開設されたこの機会に、発光雲実験を南極昭和基地において実施することを提案したい。

2. 発光雲法の概要と特徴

* 東京大学教養学部物理学教室. Institute of Physics, College of General Education, University of Tokyo, Komaba, Meguro-ku, Tokyo.

ロケットからナトリウム (Na), バリウム (Ba), トリメチルアルミニウム (TMA) などの蒸気を噴射すると, 最初 1~2 秒間は, ショックウェーブとなって直径数キロに広がるが, その後, 数十分間は周囲の大気と混り合ったまま極めてゆっくり周囲に拡散を続けてゆく. この状態においては, 人工雲と周囲の大気とは全く同じ運動を行う. さらに高度 150 km 以上になると大気密度が低く, 分子の衝突回数が少なくなるため, 電界が存在する場合, 中性分子とイオンは互に異なる drift motion を行うに至る. それゆえこの高度でイオン雲を作れば, 中性雲の運動との差からその点の電界を求めることもできる.

太陽高度が -8° ~ -12° であって, 地上は薄明であるが, 上空にはまだ日射がある場合, ロケットから Na, Sr 原子あるいは Ba^{+} , Cs^{+} 等のイオンを噴射すると, これらの原子やイオンは, 太陽光によって励起され, 特有の線スペクトルを発する. これを地上から見ると, 薄明時の星空を背景に, さまざまの色に輝く発光雲が十数分間にわたり肉眼でも観察される. この発光雲の空間的位置を決めるには, 地上にある二地点以上の観測点から同時撮影する必要がある. 南極の場合, 昭和基地と約 300 km 南南東のみずほ観測拠点, ならびに数十キロ南方の大陸露岸地帯の 3 点を観測点に選べば丁度都合がよい. 撮影に際しては, 各観測点に用意した水晶時計をあらかじめ交信によって 0.2 秒以内の精度で合わせておく. そうすればあとは, 水晶時計自体の接点が 30 秒おきに約 30 コマの写真を自動撮影してくれる. このような方法により, 発光雲の 30 秒おきの位置が決まるので, その時間的変位, すなわち上空の風速を求めることも比較的容易である.

発光雲法の第一の特徴は, それが直接測定であって, 何らの仮定もおかないで絶対値が求められる点であり, 第二の特徴は, 測定精度が極めてよいことである.

たとえば, ロケットの航跡は通常レーダートランスポンダを用いて追跡計算されるが, ロケットエンジンや発光弾は, 燃焼終了後も緩慢燃焼を続け光っていることがあるので, これを 2 地点から同時撮影することによっても, ロケットの位置を決めることができる. 図 1 は 1970 年 9 月 2 日 1914 JST に, 内之浦から打ち上げられた K-8-16 号ロケットの航跡の立面図を示すもので, 黒丸はレーダーの結果, 他の印は地上の 2 観測点からの同時撮影から求めた値である. 大体一致はいいと思われるが, 高度 145 km 付近のレーダー観測結果のバラつきは, ロケット機体の異常運動によるものではなく, 追跡用パラボリアンテナのオーバーラン, その他の原因によるものであることがほぼ確定的である. この場合の光学観測の精度は, 高度 150 km で約 30 m である.

次に発光雲の位置や速度は, どのようにして求められるであろうか. 図 2 は円筒状にひろ

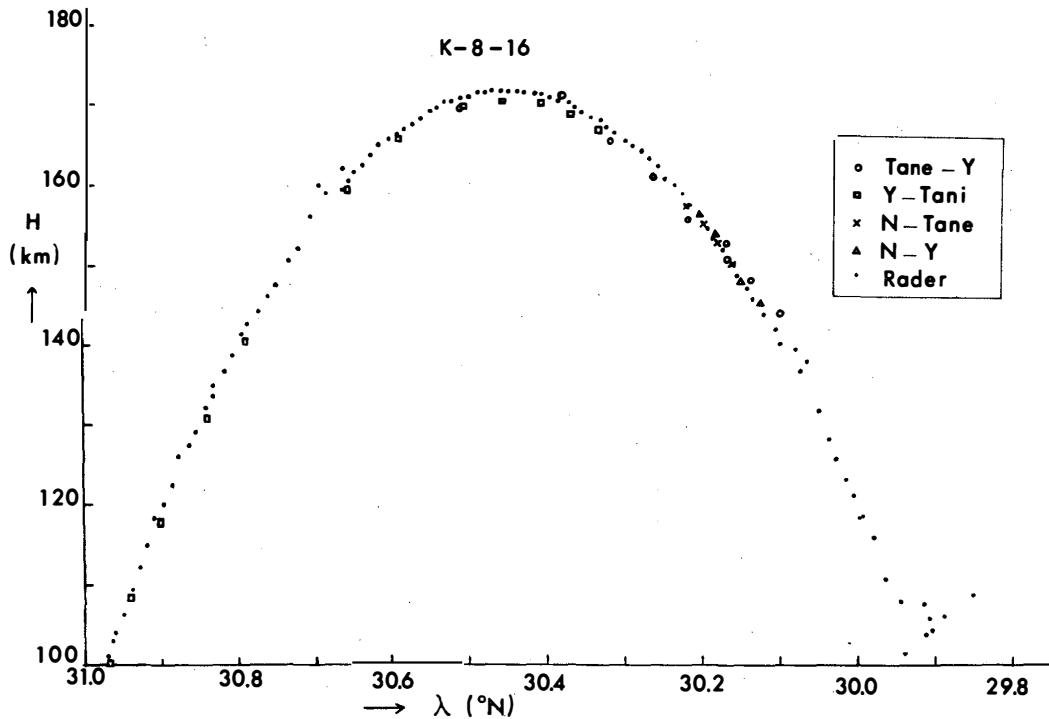


図 1 1970年9月2日1914 JST に打ち上げられた K-8-16 号機の航跡の立面図

・印はレーダートランスポンダによる値, 他は2観測点からの同時撮影から求めた値. ただし観測点は, Tane が種子島, Y が山川, Tani が谷山, N が南郷を表わし, 例えば・印は種子島と山川の対写真から求めた値であることを示す.

Fig. 1. Vertical profile of #K-8-16 rocket trajectory.

Tane=Tanegashima, Y=Yamagawa, Tani=Taniyama, N=Nango

dots denote the data deduced from the rader method.

H is altitude in kilometers and λ is north latitude in degrees.

がった発光雲 (点線) を2観測点 A, および B から同時撮影した2枚の写真を並べたものである. この場合, 2枚の写真のどの点とどの点が1対1に対応しているかが問題である. そこで背景の星空に refer して図3のように, A, B 2地点を通る平面, いわゆる μ 平面でこれを切断する. その時, 同じ μ 平面, たとえば μ_5 にある断面は, A と B で全く同じ断面であるはずである. いま μ_5 -面内において, A から図2の $\sigma_{A1}, \sigma_{A2}, \sigma_{A3}$ を望む単位ベクトルが, それぞれ図3の $\vec{P}_{A1}, \vec{P}_{A2}, \vec{P}_{A3}$ であり, これらのベクトルが AB を結ぶ Z 軸となす角が, $\sigma_{A1}, \sigma_{A2}, \sigma_{A3}$ であるとする, 図2における対写真において, μ_5 断面上の6コの σ ($\sigma_{A1}, \sigma_{A2}, \sigma_{A3}, \sigma_{B1}, \sigma_{B2}, \sigma_{B3}$) の値を読むことによって, 図3における四辺形の空間的位置を決めることができる (NAKAMURA *et al.*, 1972b). このとき図3に見られるように, 発光雲の断面は丁度この四辺形に内接している.

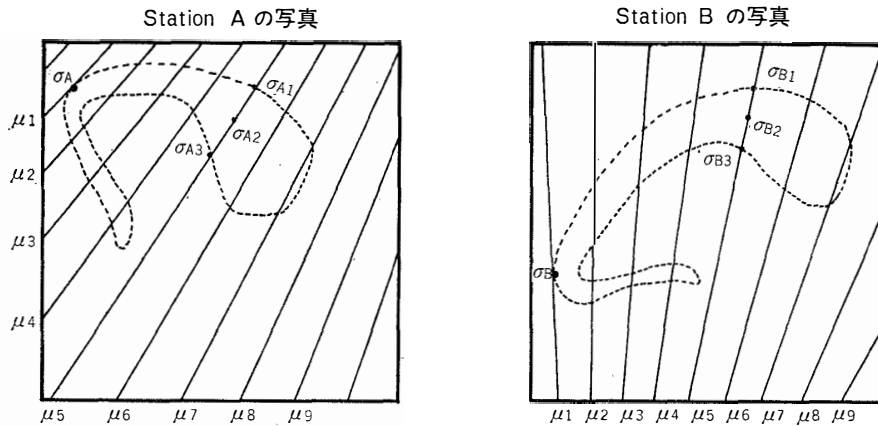


図 2 観測点 A, B から同時に撮影した対写真における μ 平面の投影状況。
 点線は円筒状に広がった発光雲の概形を示す. μ, σ の値はすべて背景の星を基準に決められる。
 Fig. 2. μ -plane projections to the films of camera stations A and B.

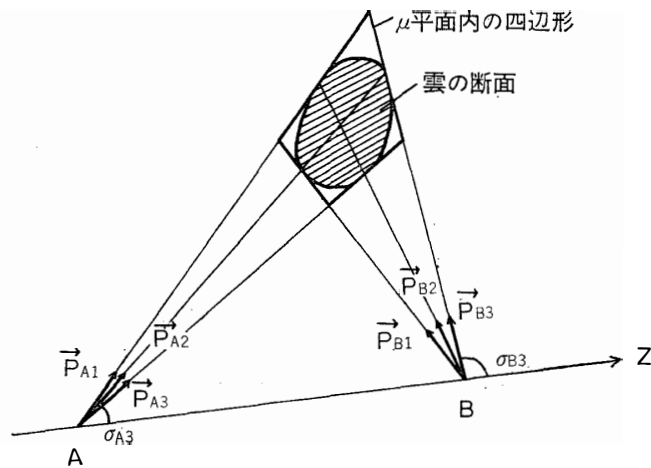


図 3 観測点 A, B を含む平面 (μ 平面) で切った発光雲の断面
 直線 AB は一般に地球を貫いている。
 Fig. 3. A cross section of the cloud in a μ -plane which contains both stations A and B.

図 4 は種子島と山川の同時撮影写真対から求めた発光雲の断面を平面図の上に列べたもので、各断面を包む包絡面 (点線) がこの時の Na 発光雲の概形を表わしている。他の観測点対からの断面もこの点線枠の中にはいり、この場合の位置の精度は約 50 m であった。このような高い精度の測定は現在のところ、他には見当たらない。

さて次の時刻における同様な包絡面と組み合わせることにより、各点の風速が求まるのであるが、今度はこのような連続発光雲のどの部分がどの部分へ移動したかを定める必要がある。図 4 における高度 103 km, 106 km, ならびに 110 km の付近にはひも状発光雲の折れ曲がりが見られるが、この折れ曲がり部分の高度はほとんど変化がなく、これからも上空でほぼ水平に大気は移動し、極めてわずかな鉛直成分しか持っていないことが判る。そこでまず、相次ぐ発光雲の折れ曲がり点に着目し、その部分の実質に大きい変化はないとして速度ベク

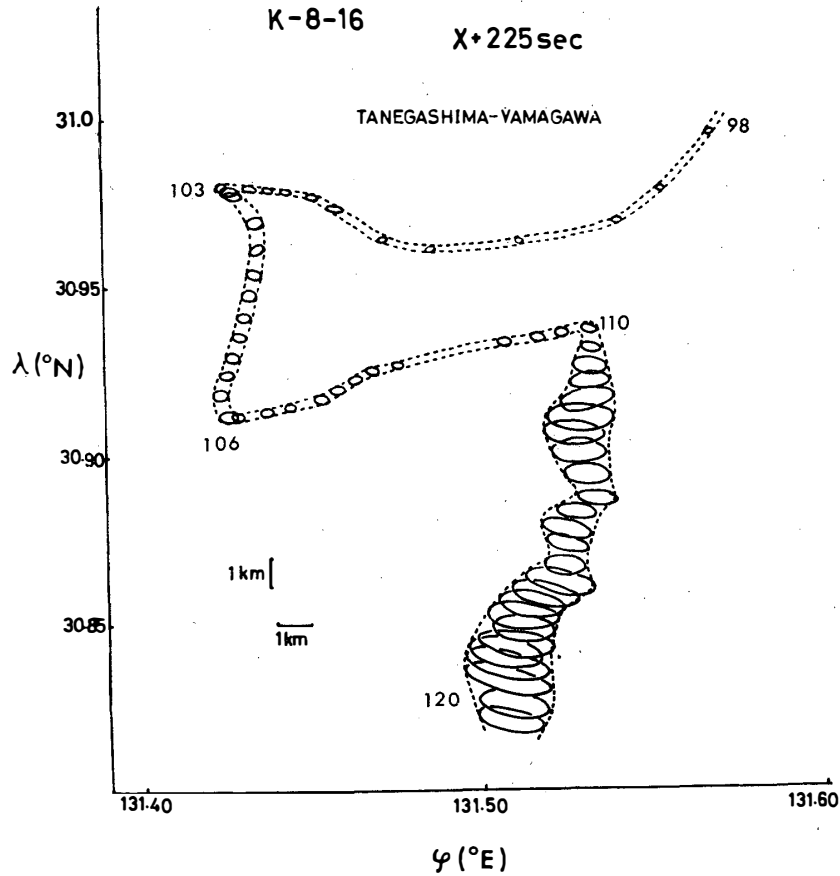


図 4 K-8-16 号機による発射後 225 秒の Na 発光雲の平面図

雲の傍の数字は高度 (km) を表わす。発光雲を示す点線の枠内の楕円は種子島・山川の観測点対から求められたものであるが、他の対から求めたものも精度の範囲内で一致し、点線の枠内に収った。

Fig. 4. Level projection of a sodium cloud in the K-8-16 rocket experiment, at X+225 s. X shows the launching time on 2nd September 1970, at 1914 JST. Cross sections of cloud deduced from station pair Tane-Y are also indicated. The numerals beside the projection represent altitudes of the cloud in kilometers. ϕ is east longitude in degrees.

トルを求め、これら特異点の中間部分では、発光雲を適当に比例的に分割し、おのおのの速度を求めることにした。まれに噴射が一様でなく、ひも状の発光雲がしま状構造をもつことがある。この場合には、たとえば密度の高い部分は同一の実体と見なせるので、確実に風速の鉛直成分を求めることができる。しかし、風速の測定結果は数+m/s~百数+m/sの水平成分に対し、鉛直成分は通常 3 m/s 以下であるから (NAKAMURA *et al.*, 1972 a), 大気の波動その他を問題にする場合以外は、水平成分だけを表示するのが通例である。図5は K-8-16 号機による風速測定の結果で、絶対値 $|V|$ と東西ならびに南北成分が高度によって

どう変わるかを示している．この結果高度 93 km, 102 km, 106 km には著しい風速の shear がみられる．

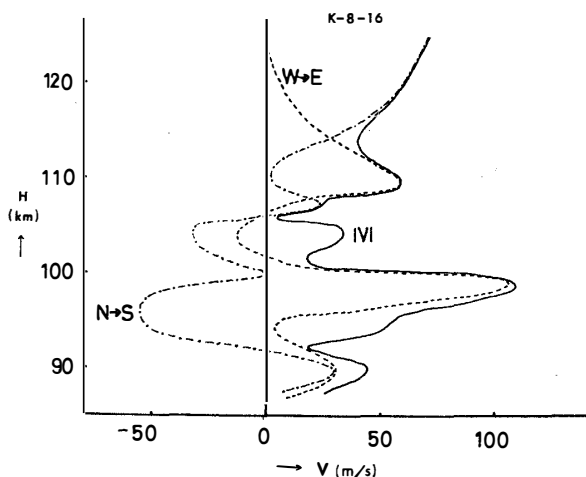


図 5 K-8-16 号機による上層の風速測定結果

実線は風速 V の絶対値，点線は東西成分（東向き），破線は南北成分（南向き）を示す．

Fig. 5. Wind velocity profile of #K-8-16 experiment.

The solid curve $|V|$ is the magnitude of the total velocity; the broken curve $W \rightarrow E$ is its component from west to east; the chain $N \rightarrow S$ is that from north to south.

K-8-16 号機では同時に電子密度，電子温度の測定器も積まれ，高度 101 km と 93 km で極大が，高度 107 km では小さい極大が見られ，Es 層の生成に風速の shear が直接関係していることが実証された (KATO *et al.*, 1972).

発光雲の実験では，さらに次のような解析を行うこともできる．図 6 は，1973年 2月 23日 1838 JST に打ち上げられた K-9M-42 号機の発光雲の投影図であって，ひも状の部分は，Na 発光雲，球状の部分は Cs 発光雲である．この中 Cs 発光雲の中心の高度変化を示したものが図 7 である．もし数秒で Cs が周囲大気と混合していたとすれば，大気自身が $X+1.5$ 分から 2.5 分位まで異常上昇したことになるが，その直下の Na 雲の drift の様子から考えても，これは大気の動きとは考えられない．そうだとすると，この部分の上昇速度はロケットから Cs 雲が放出されたときの初速度の慣性と見るべきで，Na 雲のように初速度の影響が数秒で消えなかった原因は，Cs が噴射の際，原子あるいは分子状に細分されず，数百ないし数千分子凝集したいわゆる微粒子の状態で飛散ったためであると考えられる．このことは図 8 によっても確かめられる．すなわち図 8 はこの球形 Cs 雲の半径の半値幅 r の自乗が，時間とともにどう変わるかを示したものである．もし三次元的に周囲大気に拡散が行われる場合，拡散係数を D とすれば，

$$r^2 = 2.77D(t+t_0)$$

の関係が成り立つはずであるから、図上の点は一つの直線上にならぶべきであるが、 $t=1.5 \sim 3.5$ 分の間は直線から外れていて、明らかに拡散以外の噴射の影響を示している。この部

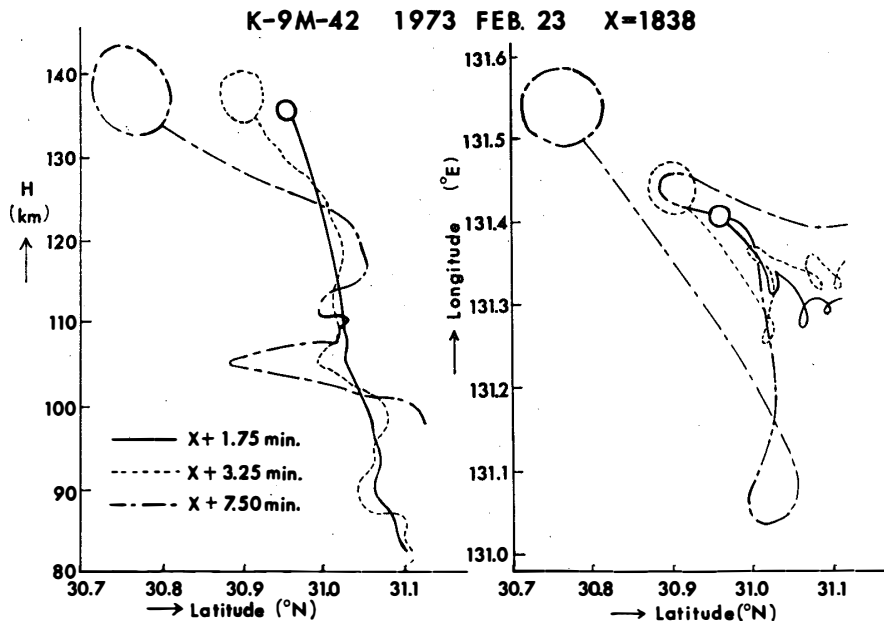


図 6 1973年2月23日1838 JST に打ち上げられた K-9M-42 号機による Na (ひも状), ならびに Cs (球状) 発光雲の立面図と平面図. X は打上時刻を示している.

Fig. 6. Vertical and horizontal projections of string-shaped sodium neutral cloud and spherical cesium ion cloud made by #K-9M-42 rocket.

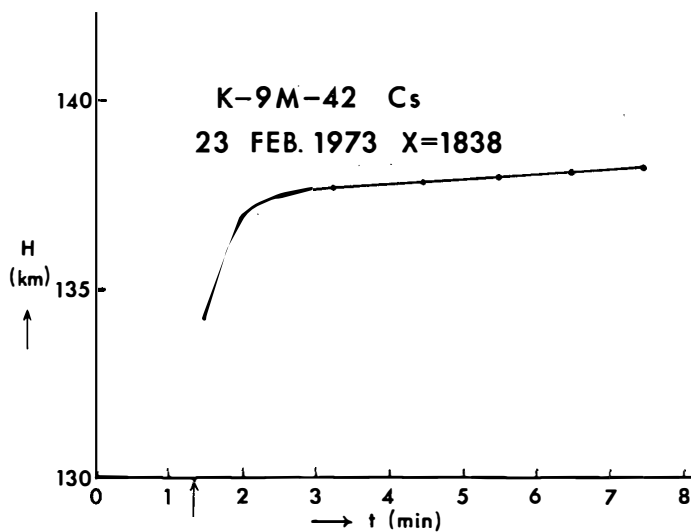


図 7 K-9M-42 号機 Cs 雲の中心高度の時間変化. 横軸上の矢印は Cs 雲が放出された時刻を示す.

Fig. 7. Variation of cesium clouds heights H with time.

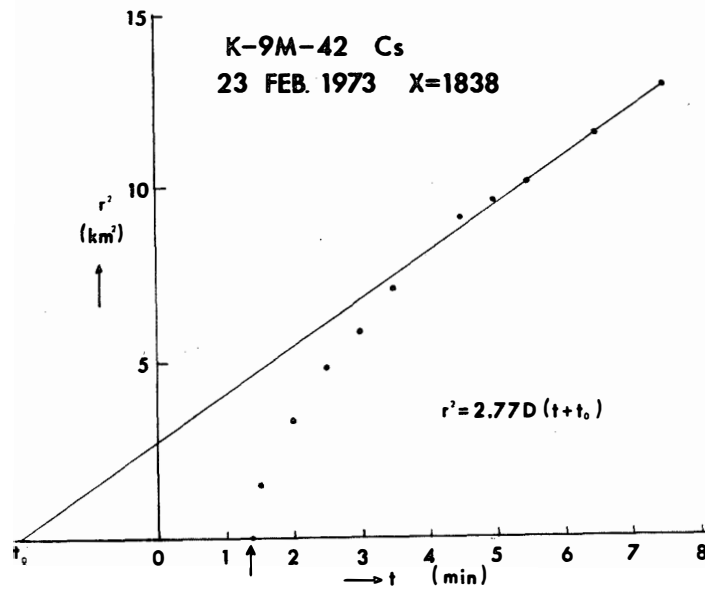


図 8 K-9M-42 号機球形 Cs 雲の半径の時間的变化
Fig. 8. Variation of square of cloud radius r with time.

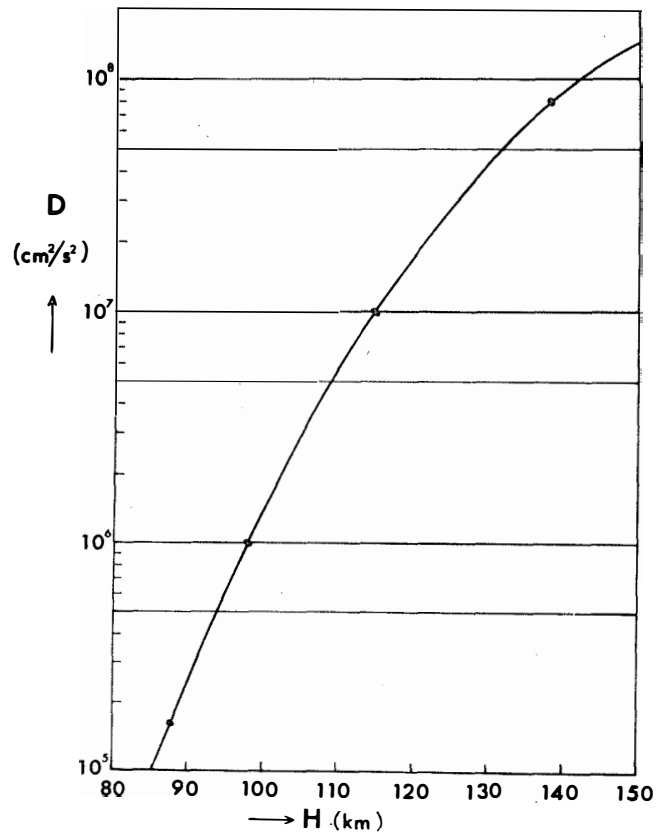


図 9 上層における拡散係数 D の高度変化
Fig. 9. Variation of diffusion constant D with altitude.

分を無視して直線部分から D を求めた結果は、図9の高度 138 km の点に示されている。上層における拡散係数 D は、これまでの発光雲実験でもいろんな高度において求められ、それらは図9に示すようにきれいな曲線の上に乗っている。その値は CIRA の値とも矛盾がない。なお、この実験で Cs 雲はイオン雲であるため、 $X+8$ 分後は次第に磁界方向に伸び始め、回転楕円体の形をとり始めた。この状態では拡散の式を適用できないので、上の計算には、 $X+8$ 分迄の完全な球状雲の状態におけるデータだけを使用した。

図10は、この Cs イオン雲をアイオノゾンデのエコーから捉えた場合の slant range R と光学観測による Cs 雲までの直距離を比較したものである。両者の間には、系統的なズレが見られるが、その原因が電波の E 層通過中の屈折によるものか、電離雲自体の性質によるものであるか、現在検討中である。光学観測の誤差が 50 m であることは、これらの検討を行う場合にも確かな論拠を与えるものと考えられる。

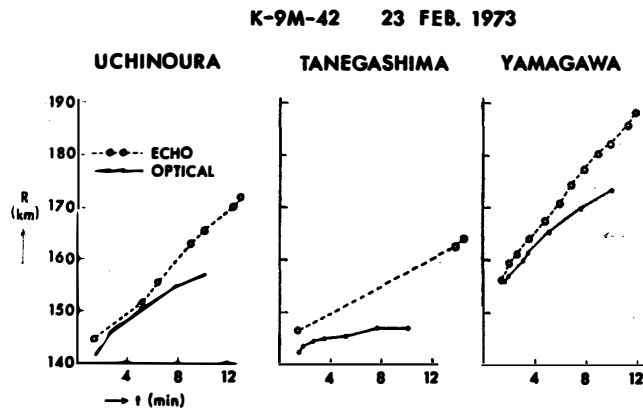


図10 K-9M-42 号機 Cs 雲と各観測点との直距離の時間変化。実線は対写真から光学的に求めた値。点線はアイオノゾンデのエコーから求めた値

Fig. 10. Time dependence of slant range R from camera station to cesium cloud.

上空に電離発光雲を作って、その drift から上空の電界を求める実験は、FÖPPL, HAERENDEL 等により始められて以来、各国で盛んに行われてきた (HAERENDEL *et al.*, 1967; FÖPPL *et al.*, 1967). 図11は1971年8月26日1935 JST に打ち上げられた K-9M-33 号機による中性 Sr 雲と電離 Ba 雲の立面図、ならびに平面図である。電離雲の drift から電界を求めるには、外部電界のため生じる電離雲内の分極電場の影響を考慮しない零次近似の計算法と、その影響をある程度考慮した一次近似の計算法があるが (NAKAMURA and KATO, 1974a), いずれにしても、この場合、電離度は低く分極電場は小さいので、電離雲の形は相似という仮定に立っている。このため電離雲の風速 \vec{V}_i は、発射後8分後と9分後の Ba 雲

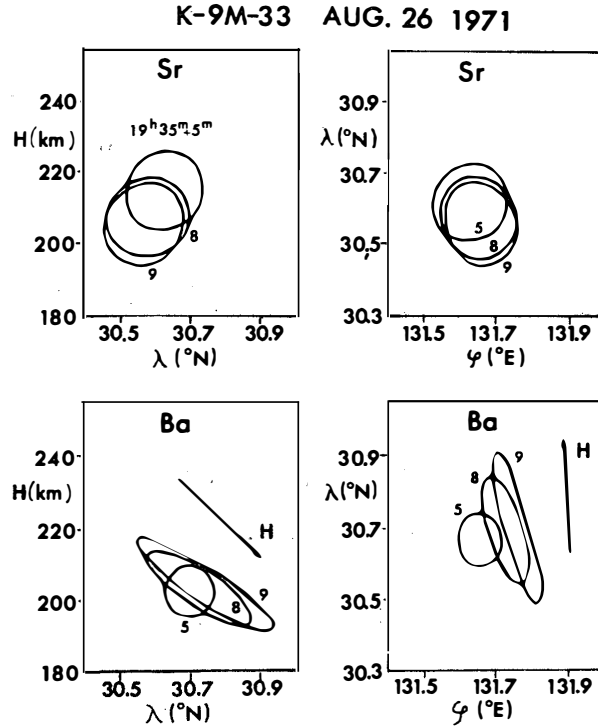


図11 1971年8月26日1935 JST に打ち上げられた K-9M-33 号機による中性 Sr 雲，ならびに電離 Ba 雲の立面図と平面図．雲の傍の数字は発射後の時間（分）を表わし，Ba 雲の傍のベクトルは付近の磁界 \vec{H} の方向を示す．

Fig. 11. Vertical and horizontal projections of the neutral strontium cloud and the barium ion cloud ejected from #K-9M-33 rocket. The numerals beside the cloud represent time after launching in minutes. Vector H is the direction of the magnetic field around the barium luminescent cloud.

表 1 K-9M-33 号機による電界の測定結果． E, N, Z はそれぞれ東向き，北向き及び鉛直上向き成分． \vec{B} は磁束密度， \vec{V}_i は電離雲の風速， \vec{V}_n は中性雲の風速， \vec{E} は電界（第一近似）， \vec{E}_0 は電界（零次近似）を表わす．

Table 1. Three components of magnetic induction \vec{B} , velocities of neutral wind \vec{V}_n , that of ion drift \vec{V}_i and calculated values of the electric field \vec{E} . The zeroth order approximate value of the electric field \vec{E}_0 is also shown.

Component	E	N	Z
\vec{B} (gauss)	-0.028	+0.318	-0.319
\vec{V}_i (m/s)	+40.0	+15.0	+5.2
\vec{V}_n (m/s)	+5.4	-23.1	-35.0
\vec{E} (mV/m)	+1.01	-0.44	-0.53
\vec{E}_0 (mV/m)	+0.83	-0.33	-0.40

の位置から計算した。結果は表1に示す通り，order として 1 mV/m 程度，向きは東南方向，上向きであることが分かった。

表2には，Ba 電離雲と Sr 中性雲から得られたこれまでの電界の観測値が比較してある。

表2 Ba 発光雲による電界測定結果の比較。KSCは鹿児島宇宙空間観測所の略。ev.は夕刻，mor.は明方薄明時の実験であることを示す。

この場合磁力線は等電位線であることを仮定し，その地点の磁力線に垂直な面内における電界成分が記されている。すなわちこの面内における東向き成分が E_E ，北向き成分が E_N である。

Table 2. Comparison of the electric field measurement in the upper atmosphere using luminescent barium clouds.

KSC: Kagoshima Space Center

E_E : east component of \vec{E} in a plane perpendicular to lines of magnetic field.

E_N : north component of \vec{E} in the same plane.

Location	Geogr. Latitude (°N)	Geomag. Latitude (°N)	Date	Time	Height (km)	E_E (mV/m)	E_N (mV/m)	E (mV/m)
KSC	31	26	'71 AUG.	ev.	220	+0.97	-0.70	1.20
Sahara	33	28	'64 NOV.	ev.	152	+0.20	-0.73	0.76
Sahara	33	28	'65 NOV.	ev.	159	+0.40	-1.80	1.84
Sardinia	40	36	'65 SEP.	mor.	225	-0.40	+1.75	1.79
Kiruna	68	64	'67 APR.	ev.	230	-3.7	-10.1	11.2
Kiruna	68	64	'67 APR.	mor.	230	-5.2	+15.0	16.0

ただし，ここでは磁力線が等電位線となっているとの仮定のもとにすべて磁力線に垂直な平面に電界を投影し，その面内での東向き，ならびに北向き成分が記されている。

これから電界の大きさは，中緯度で 1 mV/m，極地方で 10 mV/m，あるいはそれ以上であることが分かる。また北半球では夕刻には電界の向きは東南向き，明方にはそれとほぼ 180°異なる西北向きである。ただし，極地方の夕刻が東南でなく西南向きとなっているのは，極光帯に強い東南向きの electro-jet が存在するためであろう。これらの電界の向きから判断して，KSC は S_q -current の渦中心の北側にあるものと考えられる。

この他分解能 10Å/mm 程度の分光器により，発光雲の輝線スペクトルを撮影すれば，その profile から発光雲原子の温度，ひいては大気温度を求めることもできる。また，磁気圏における電離雲の伸びから，その地点の磁界の方向を知ることが出来る。

しかし，以上はいずれも薄明時の実験であって，大気力学上重要な昼間の風や，極光帯で必要な夜間の風を求めるには，もう少し手の込んだ方式を採る必要がある。すなわち，夜間の場合自ら周囲の酸素原子，分子と反応して発光する TMA 発光雲を作らなくてはならな

いが、それには TMA 装填パイプ系や乾燥窒素ポンペなどを用意する必要がある(中村, 1966). 一方昼間の風を検知するには、各観測点にゼーマン受光器を配置しなくてはならない (NAKAMURA, 1974b). したがってこれらの計画は、少なくとも第二年度、あるいはそれ以降に組み込んで行くのが妥当であると考えられる.

3. 南極における発光雲ロケット実験計画

発光雲ロケット実験を南極で行う場合のおおよその計画は下の通りである.

3.1. 観測地点

- (1) 昭和基地 (2) みづほ観測拠点 (3) 大陸露岩地帯の三点

打ち上げの条件はこの中、2観測点の発光雲観測方向が晴れていることである. 南極では天候は大陸的であって、数日間ブリザードが続くとあと数日間晴れることが多いので、この天候条件は相当有利である.

3.2. 観測設備

A. 各地点に

- (1) K-20 型カメラ (ロケット上昇時ならびに下降時に発光雲を作り、大気の波動性を観測するような場合は2台必要である.)
(2) カメラ架台 (カバー付)
(3) 水晶時計ならびにカメラ自動駆動装置
(4) 通信機

B. 昭和基地に

- (5) アイオノゾンデ
(6) 高分解能望遠分光計
(7) その他

3.3. 人員

各観測点とも2名

ただし、昭和基地とみづほ観測拠点は、打ち上げ3日前より要員が1日数時間協力すれば可. 大陸露岩地帯へは前後一週間の予定で、隊員2名がカブース付雪上車ででかけ、一時的前進基地とする.

表 3 発光雲ロケット計画表

時刻欄の ev. は夕刻, mor. は明方, n は夜間, d は昼間. 観測項目の \vec{V}_n は中性雲の風速, \vec{V}_i は電離雲の風速, D は拡散係数, T_n は中性大気温度, eddy は乱流のスケールを表わす.

Table 3. Some projects of artificial luminescent cloud experiments at Syowa Station, Antarctica.

TMA: trimethyl-aluminium

T_n : temperature of neutral atmosphere

n : night time experiment

T_e : electron temperature

d : day time experiment

発光雲	重量 (kg)	ロケット	高度 (km)	時刻	観測項目	共載機器	備考
Na, Cs, Eu	12	S-310 (S-210)	(80) 120 150	ev.	\vec{V}_n D T_n	T_e n_e	地上実験
Ba, Sr	12	S-310	180 230	ev. mor.	\vec{E} \vec{V}_i \vec{V}_n	T_e n_e \vec{B}	地上実験
TMA	15	S-210 (S-310)	80 120	n.	\vec{V}_n T_n eddy	T_e n_e	装填パイプ系一式
Na, Eu	12	S-310	120	d.	\vec{V}_n	T_e n_e	Zeeman 受光器

3.4. 実験計画

表3の通り

(1) 第一順位は S-310 又は S-210 による夕刻の Na 発光雲実験

大気力学的には問題となっている高度 120~200km の全域をカバーする S-310 が望ましいが, 120~150km の遷移層のみをねらって S-210 で最初の実験を行うのも止むを得ない. この場合, 航跡はカメラの同時撮影から求められるので, レーダートランスポンダは必ずしも搭載しなくてよい. むしろ電子温度および密度の測定器の同乗を希望する. 電波実験のため, Na 弾の中に Cs, あるいはさらに電離率のよいユーロピウム Eu を混入し, 同時に電離雲も作る.

なお, Na 弾は日本であらかじめ作り, 現地では点火栓を挿入するだけであるが, 長期保存ならびに寒冷気象に対する Na 弾の性能ならびに安全性をためすため, 日本における事前の地上実験が是非必要である.

(2) 第2順位は S-310 による Ba, ならびに Sr 発光雲実験 (電界の測定)

できれば夕方と明方の二回行って, 電界ベクトルの向きがどんな関係になっているかを調

べる。電界の方向の日変化は、超高層物理学では重要な課題であるが、内之浦では警戒その他の問題もあって、明方の実験は極めて困難である。この点昭和基地において、真夜中や明方のロケット実験を行う意義は極めて大きい。この場合も Ba 弾は日本で作り、一年後に実験となるので、あらかじめ日本で地上実験を行っておく必要がある。

(3) S-210 又は S-310 による TMA 発光雲実験

夜間の風を知るための実験である。昭和基地では薄明時が、夏から秋冬にかけて24時から14時に移動するので、季節を変えて Na 実験を行うことにより、地方時の様様な phase における風速を知ることも可能であるが、風系や電界は一方では太陽高度に依存する面もあるので、やはり夜間の風を求める実験が望まれる。ただしそのためには装てんパイプ系の基地持込も必要であり、発火の危険度も Na 弾 Ba 弾より大きいので、TMA 実験は、Na, Ba 実験が一応緒についた後に実施すべきであろう。

(4) S-310 による Na-Eu 発光雲実験

昼間の発光雲を検出するには、ゼーマン効果を利用したゼーマン受光器を各観測点に設置しなくてはならない。また、その取り扱いには自動カメラと異なり、多少の熟練を要するので、3カ所の観測点に、少なくとも1名ずつの超高層部門担当者を配置したい。このため必要度は大きいですが、順位としては後になる。

3.5. 危険度

各種発光弾は、数秒ないし数十分の一秒の間に、active な原子状高温ガスを噴射するので、その取扱いには十分気をつける必要がある。

しかしながら少なくとも Na 弾, Ba 弾などは点火栓を外しておく限り、ショックや熱のため発火したり、異常反応を起こしたりすることは全くない。発射直前に点火栓を挿入した後は、ロケット推薬と同様な取り扱いを行い、関係者以外立入禁止とし、特に点火栓に電流が流れ込まぬよう、雷や他電源からの漏洩電流に注意する。結局最も注意を要するのは点火栓を挿入後、これを内蔵電池に結線する瞬間だけである。このため現地に簡易防爆壁を設けて、壁を介して結線ならびに導通チェック、電圧チェック等を行うことを提案したい。

TMA 弾は Na, Ba に比べると、はるかに発火しやすいので、装てんは昭和基地において専任者が行い、装てん後は、ロケット推薬なみの保管が必要である。特に湿気を嫌うので、できれば装てん後、1カ月以内にロケット発射されることが望ましい。

Cs 弾は現在の方式をとる限り、爆発的燃焼を行い、管体も破壊するので、火薬と同等の取り扱いが必要である。このためクロム酸燃焼による安全な Na 弾方式を現在開発中である。

また近い将来, Cs や Ba に代わり, より電離度の高い Eu を用い, Eu II λ 205Å 輝線の検出を目指しているが, この場合も最初からクロム酸燃焼方式の弾を実験中である.

3.6. 発光雲実験の副産物

発光雲実験を行うべく, 3カ所の観測点に K-20 型自動カメラや水晶時計を配置した場合, この観測網を利用して, オーロラの同時撮影を行うことにより, 各種オーロラの高度を極めて詳しく正確に求めることができる. さらにカメラにオーロラの各スペクトルに相当する干渉フィルターをかぶせて同時撮影することにより, プロトンオーロラ, N_2^+ オーロラ, 酸素赤線オーロラ等の高度も独立に決めることが可能である. これらの原理は発光雲の位置を決める場合と全く同じで, 背景に星が写っていれば解析可能である.

このような方法で ray の上限の高さや ray の間隔, 場合によっては ray 自体の幅や pulsation の場合の高度の変動など, これまで測定されなかったオーロラの細部構造の幾つかが明らかになるものと期待される.

文 献

- BLAMONT, J. E. (1963): Turbulence in atmospheric motions between 90 and 130 km of altitude. *Planet. Space Sci.*, **10**, 89-101.
- BROGLIO, L. (1961): First Italian experiment using sodium cloud technique. *Space Res.*, **II**, 1125-1140.
- EDWARDS, H. D., J. F. BEDINGER, E. R. MANRING and C. D. COOPER (1956): Emission from a sodium cloud artificially produced by means of a rocket. *The Airglow and the Aurorae*, ed. by E. B. ARMSTRONG and A. DALGARNO, Pergomon Press, London, 122-134.
- FOPPL, H. *et al.* (1967): Artificial strontium and barium clouds in the upper atmosphere. *Planet. Space Sci.*, **15**, 357-372.
- HAERENDEL, G., R. LÜST and E. RIEGER (1967): Motion of artificial ion clouds in the upper atmosphere. *Planet. Space Sci.*, **15**, 1-18.
- HURUHATA, M., J. NAKAMURA, K. AKITA and K. SAITO (1965): Wind measurement by the sodium cloud method. *Proc. 6th Intern. Symp. on Space Tech. and Sci.*, 697-702.
- HURUHATA, M., J. NAKAMURA and K. SAITO (1966): Measurement of upper atmospheric wind by sodium cloud drifts. *Rep. Ionos. Space Res. Japan*, **20**, 214-222.
- KATO, S., T. ASO, T. HORIUCHI, J. NAKAMURA and T. MATSUOKA (1972): Sporadic-E formation by wind shear, comparison between observation and theory. *Radio Sci.*, **7**, 359-362.
- 中村純二 (1966): 電離層 E 層付近の風の観測. *東京大宇宙航研報告*, **2**, 1006~1016.
- NAKAMURA, J. and H. KIMURA (1969): Ionospheric wind and diffusion detected by the sodium cloud method. *Proc. 11th COSPAR Symp.*, North-Holland, 130-134.
- NAKAMURA, J., H. KIMURA, T. MATSUOKA, T. ASO and S. KATO (1972a): Wind shear and electron density measurements by rocket. *Space Res.*, **XII**, 1329-1333.

- NAKAMURA, J., T. MATSUOKA and H. KIMURA (1972b): A method for the analysis of artificial clouds in the upper atmosphere. *Rep. Ionos. Space Res. Japan*, **26**, 129-137.
- NAKAMURA, J. and S. KATO (1974a): Electric field measurements by artificial barium cloud. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **36**, 1927-1931.
- NAKAMURA, J. (1974b): On the Zeeman photometer observing upper atmospheric winds in the daytime. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **36**, 1877-1881.