

# 搭載用セシウム雲発生弾の開発とそのロケット実験-II\*

堤 四郎\*\*・竹屋 芳夫\*\*・黒田 託三†

## HF Radar Observations of Cesium Plasma Cloud Released from the Rocket K-9 M-39

By

Shirou TSUTSUMI, Yoshio TAKEYA and Takumi KURODA

**Abstract:** The second experiment of the creation of the cesium plasma cloud in the upper atmosphere was conducted at K. S. C., on 18th, 1828 JST, Feb., 1972, with K-9 M-39 rocket which carried the improved type cesium vapourizer. The luminous cloud occurred at the altitude of 128 km and observed optically from the five ground points for the period of about 20 min. Ionosonde observations were made from three different sites; K. S. C., Yamagawa and Nishinoomote, simultaneously. Positive results of returning signals from the artificial irregularity were obtained in each ionograms. Using those data in slant range with time, the horizontal wind in this region was derived; the wind velocity is about 48 m/s and wind direction is about 245° N, which holds good agreement with optical results.

### 1. 序

セシウム電離雲による超高層風を中心とする電離層諸定数の観測実験はさきに K-9 M-33 号機によって初回の実験が行なわれ、セシウム電離雲の発生とその地上観測について有用な基礎資料が得られた [1]。今回これらの結果に基づいて放出弾の改良、地上観測法の改善を進め K-9 M-39 号機による実験を実施し成果を得たので報告する。すなわち放出弾についてはノズルよりの排出方式を採用して燃焼率の向上を計った結果薬量の減少にもかかわらず光学観測および電波観測に十分な密度と生存時間をもつ電離発光雲が発生した。天候など条件もよく予定通りの観測が実施され、電離雲の生長、拡散過程が把握できた。また地上の3地点からの同時電波観測も成功し解析によって 130 km 地点での風を導出した。この結果は、後節で述べるごとく光学観測による結果とほぼ合致した値を示しており、今後電波観測のみによる昼間風の観測実験において有用な結果が導けるものと考えられる。

---

\* 宇宙研特別事業費による論文

\*\* 大阪市立大・工学部

† 日本化薬株式会社・姫路工場

## 2. セシウム雲発生弾

上層大気観測に有用なセシウム電離雲を考える場合燃焼反応による中性セシウム原子の発生と、それに続く電離の相乗効果が重要である。ここで電離過程として燃焼反応のさいの熱電離と、発生した中性セシウム原子の太陽紫外線（電離エネルギーは  $3,200 \text{ \AA}$  以下）による光電離の二つが期待できる。前回の実験では主として前者の反応に重点を置き高い反応熱を得る目的で密閉型の放出弾を採用した。今回の実験では放出後のセシウム雲に対する太陽紫外線の照射が十分期待できることと、さらに今後の昼間時の実験に備えて後者の光電離反応に重点を置き燃焼率を向上することによって発生セシウム蒸気なるべく多量に放出する機構を目指した。このためにノズル穴よりの排出方式を採用すべく基礎燃焼実験を進めこの結果に基づいて搭載型放出弾を設計製作した。

### 2.1 基礎実験

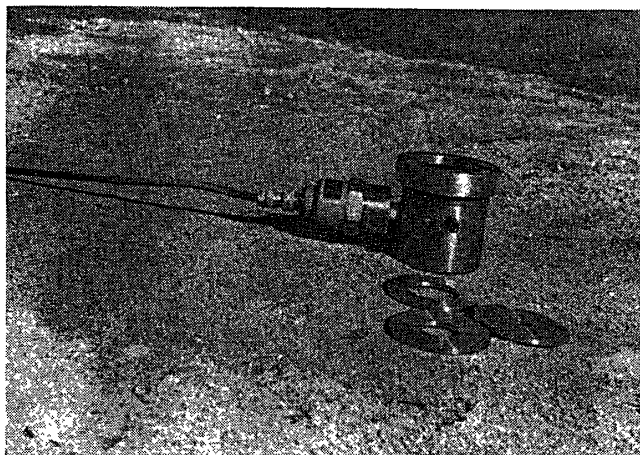
排出ノズルをもった燃焼容器による小規模試験結果について報告する。燃焼薬は前回同様の組成比および混合条件をもつ  $\text{CsNO}_3/\text{Al}$  (60/40) の混合粉体を使用した。第1図に示す装置により実験を行ない燃焼圧力の時間経過を記録した。燃焼試験はさらに大型の容器内で行ない残滓物の分析によって反応率を求めた。ここで排出ノズルの絞り率  $k$  (ノズル断面積  $S$ /容器断面積  $S_0$ ) が重要である。読みとりは容器内圧の最大値  $P_{\max}$  ( $\text{kg/cm}^2$ )、および燃焼の持続時間  $t$  (msec) である。第2図は 400 cc の容器の場合ノズル絞りに対する燃焼時間の関係であり、第3図は充填密度をパラメータとした容器内最大圧力との関係である。これらの実験結果を総合して絞り率  $k$ 、充填密度  $\rho$  と容器内最大圧力  $\rho_{\max}$  との間に

$$P_{\max} = 0.18 k^{-2.2} \cdot \rho^{1.2}$$

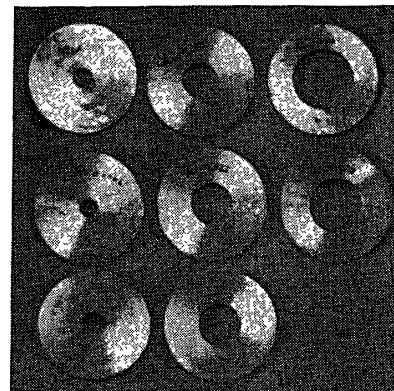
なる関係式が得られた。

### 2.2 搭載型セシウム弾

実際の搭載弾の設計に当たっては、燃焼時間があまり長くないこと (100 msec 以下が望ま

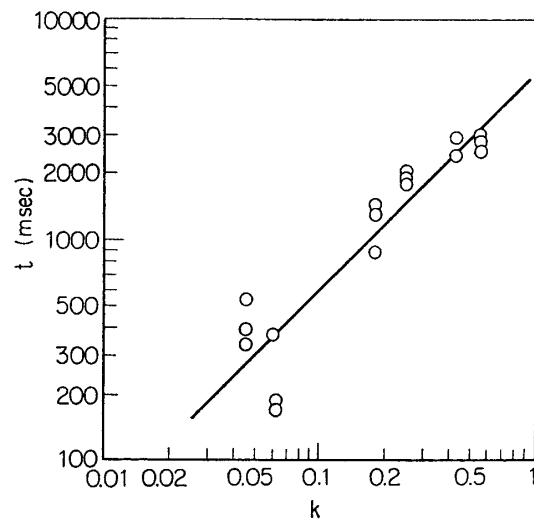
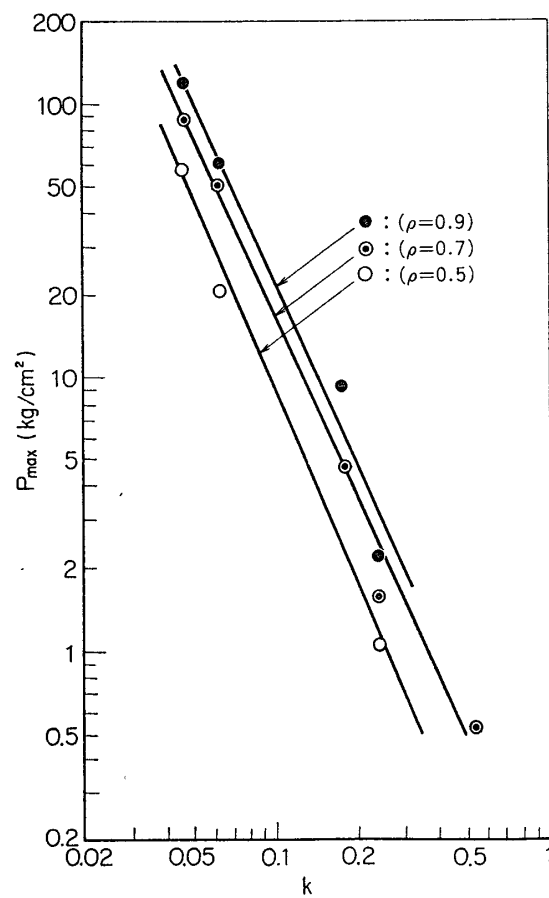


(a) 試験装置



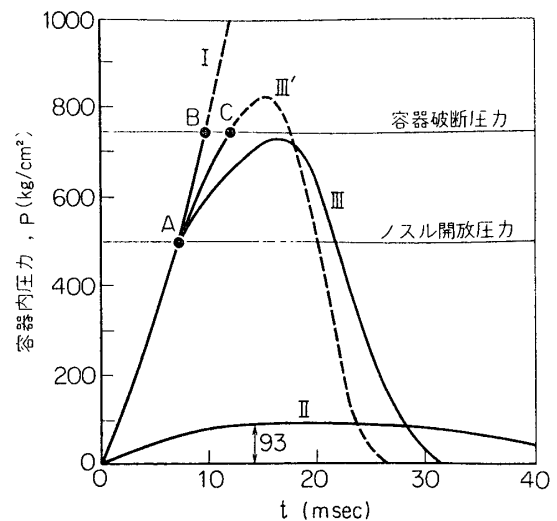
(b) 各種ノズル

第1図 排出ノズルをもつ容器による燃焼試験装置

第 2 図 絞り率  $k$ -燃焼時間  $t$ 第 3 図 絞り率  $k$ -最大圧力  $P_{\max}$

れる), 燃焼温度はなるべく高く保つことが望ましいことなどを考慮し, 容器耐圧の許す限り燃焼反応が進行してから排出ノズルが開放する方式を採用した. 搭載弾は  $350\text{ cm} \times 240\text{ cm} \phi$  の円筒形耐圧容器で静的耐圧設計値  $505\text{ kg/cm}^2$ , 内容積  $1,211\text{ cm}^3$  である. ノズルは  $9\text{ cm} \phi$  の円形 ( $k=0.124$ , 開放圧力は  $350\text{ kg/cm}^2$ ) とした. 燃焼主薬は  $6.75\text{ kg}$  でセシウム  $21\text{ mol}$  当量, 充填密度  $\rho$  は  $0.56$  である. このような容器による反応過程を検討する場合, 第 4 図において完全密閉の場合は (I) のごとく約  $10\text{ msec}$  の後に容器の破断に至り反応率は約  $8.5\%$  である. ノズル開放の場合は (II) となり実験結果より最大内圧  $93\text{ kg/cm}^2$ , 所要時間は約  $600\text{ msec}$  となる. 半密閉方式の場合は絞り率  $k$  および充填密度  $\rho$ , によって (III) あるいは (III)' の経過をとる

こととなる. 今回の K-9M-39 号機による実験では, 第 5 図の写真観測に見られるごとく一方向に燃焼気体の放出が行なわれ燃焼効率も前回に比べて向上し成功であった.



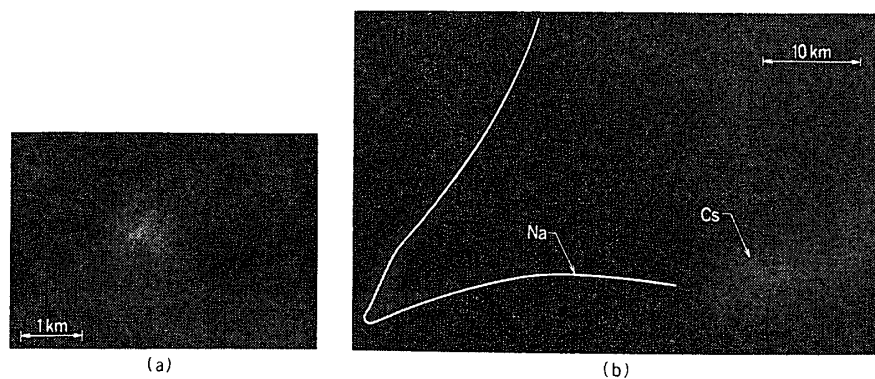
第 4 図 燃焼容器内圧力の変化

- I : 密閉の場合 B 点で容器が破断する (実験)
- II : 排出ノズル開放の場合 (絞り率  $k=0.124$ ) (実験)
- III :  $P=500\text{ kg/cm}^2$  で排出口開放の場合の想定
- III' : 絞り率の低い場合 C 点で容器が破断する

### 3. K-9 M-39 号機によるセシウム電離雲実験

#### 3.1 実験概要

K-9 M-39 号機は昭和 47 年 2 月 18 日, 18 時 28 分, 東京大学鹿児島宇宙観測基地より実効方位角  $142^\circ$ , 上下角  $79.5^\circ$  で打ち上げられた. ロケットの最高高度は  $310\text{ km}$  落下地点は内之浦東南  $343\text{ km}$  であった. 発射時の太陽高度は  $-6^\circ$  (前回は  $-10^\circ$ ) であり発生セシウムの光電離のための太陽紫外線の照射は 10 分間以上継続したものと考えられる. 発射後

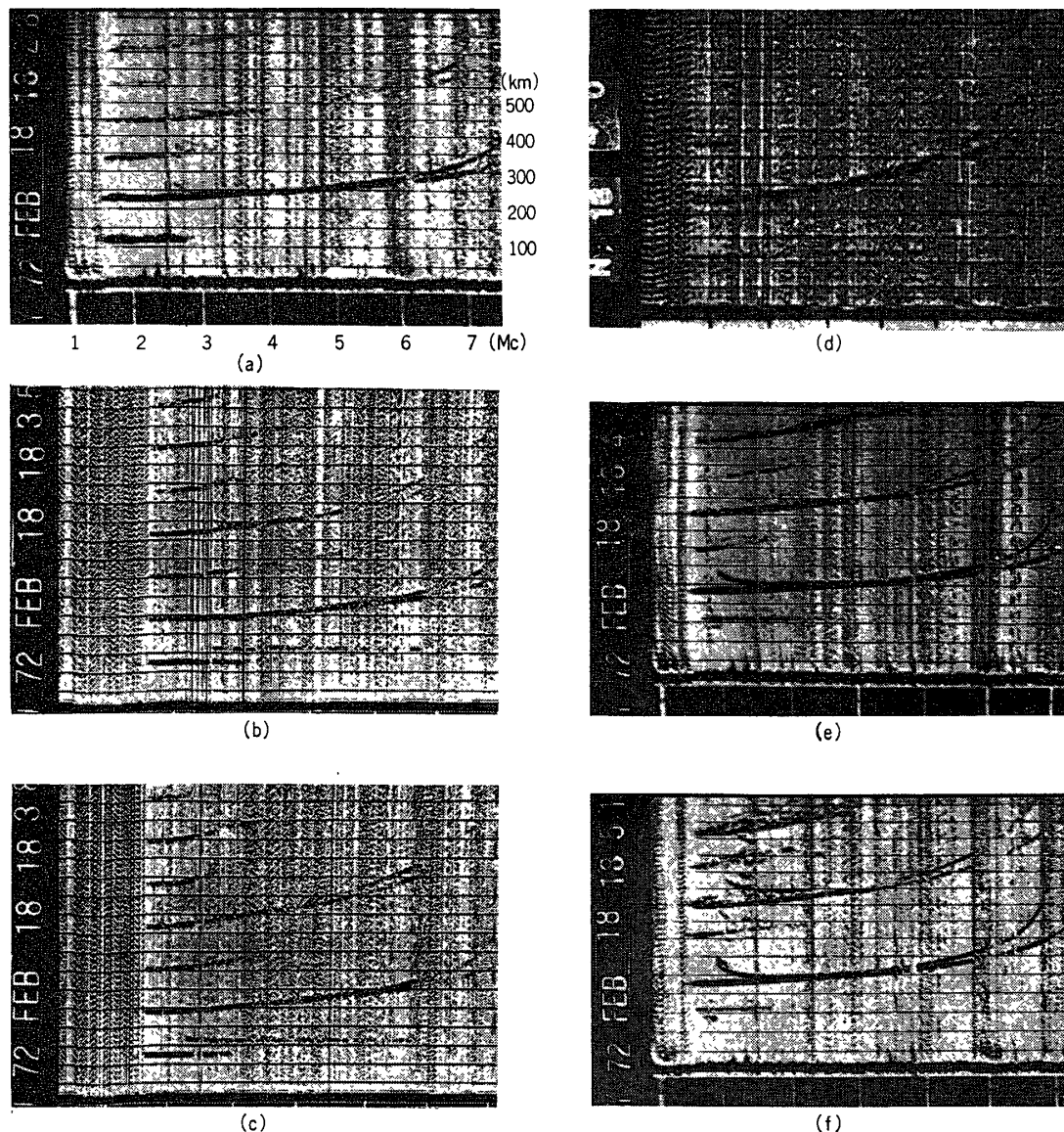


第 5 図 (a) 発生直後のセシウム電離雲 (内之浦にて)  
(b) B+11.5 min のセシウム, ナトリウム雲 (中村純二氏より)

64 秒でセシウム弾の延時管に点火，切断の後  $X+81$  秒で着火燃焼した．雲の発生地点はレーダ観測および光学観測によれば高度 128 km,  $131^{\circ}21' E$ ,  $31^{\circ}57' N$  であった．発生セシウム雲は初期半径約 600 m の青色 ( $4,555 \text{ \AA}$ ) の球形発光雲となり，磁力線方向に拡がり消滅するまで 20 分間以上目視によって確認された．(第 5 図)

### 3.2 地上観測結果

3.2.1 光学観測 セシウム雲を含む発光雲の光学観測は中村純二氏らによって内之浦他 5 地点でカメラ撮影法により予定通り実施され成功した．これによれば  $X+1$  分から  $X+$



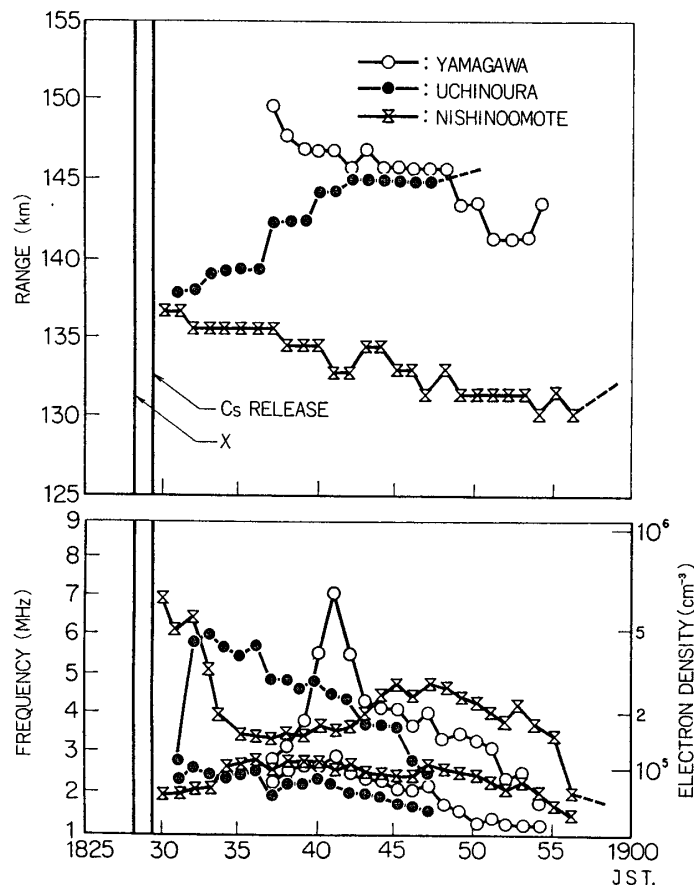
第 6 図 K-9 M-39 号機セシウム電離雲に対する Ionogram,  $X=1828$  JST, 18, Feb, 1972

(a) ロケット発射時，山川 (b), (c)  $X+7$ ,  $X+10$  min, 内之浦  
(d)  $X+12$  min, 西之表 (e)  $X+19$  分, 山川 (f)  $X+23$  分, 山川  
電離雲による直接波はほぼ消失し多重反射によるみだれが見られる．

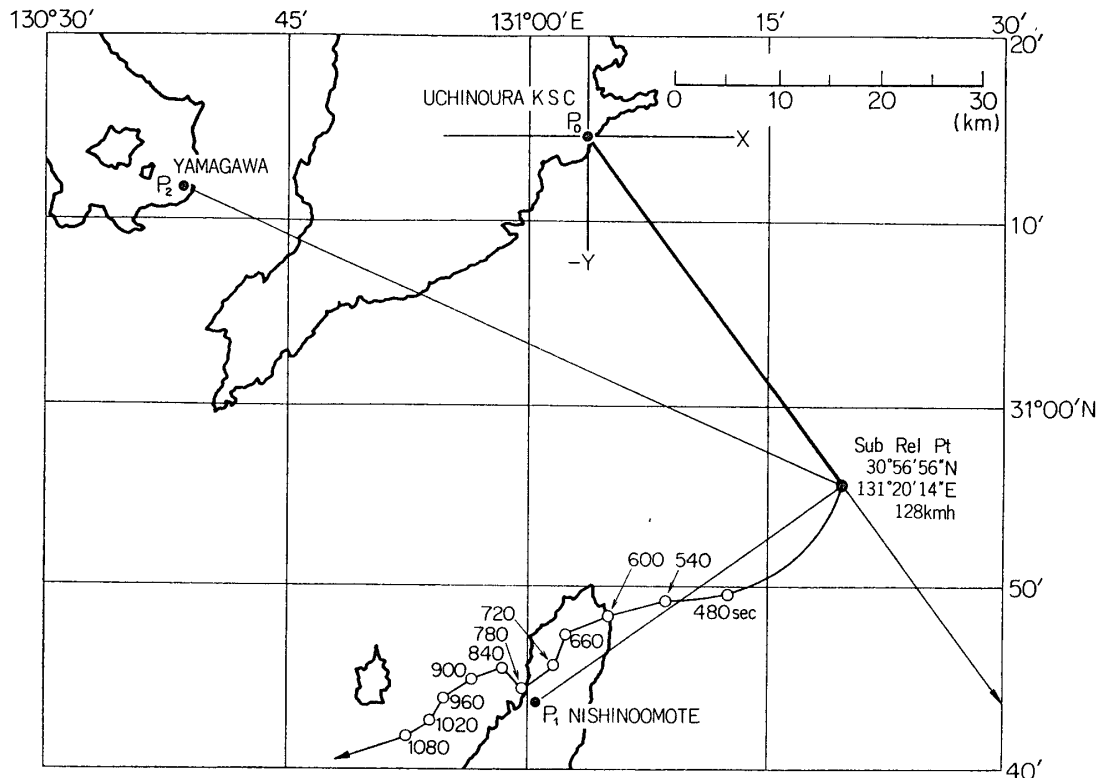
12 分 30 秒の間の全観測時間にわたって資料が得られ雲の形状の変化, 移動の状況が解析された [2].

報告によると高度 134 km での風はこの間ほぼ一様で, 風向は  $235^{\circ}\sim 245^{\circ}$ , 風速は 48~52 m/s である. なおセシウム発光雲のスペクトル分光写真によって Cs-4555, 4593 輝線が確認されている.

3.2.2 電波観測 一方セシウム電離雲に対する電波による追跡は内之浦 K. S. C., 山川電波観測所および西之表の 3 地点よりの Ionosonde の同時連続操作によって実施し, 毎分 2 駒の周波数掃引による記録を行なった. 各観測記録には電離雲による強い反射跡が見られるが, 時間経過にしたがって例示する (第 6 図). また第 1 表にその観測結果の概要を示した. 各観測記録から反射波の周波数領域および反射点までの直距離の変化は第 7 図のごとく示される. これによれば内之浦, 西之浦ではほとんど雲の発生と同時にエコーが現われるが, 山川では約 8 分間後に現われている. 各観測点とも時間の経過とともに反射波の最大周波数が減少している. また反射波の下限周波数も時間とともに低周波側に伸びている. このことは定性的には雲の拡散によって雲の電子密度が減少すると同時に雲のサイズが増大したことを



第 7 図 Time variation of slant range to the Cs cloud from the each Ionosonde Site and frequency extent of returning signals, K-9 M-39 on 18 Feb. 1972.



第8図 Locus of cesium cloud released from rocket K-9 M-39 on 18 Feb. 1972.

第1表 Summary of results by detection of cesium plasma cloud

	Ionosonde Obs.			Optical Obs.		
	Uchinoura, K. S. C.	Yamagawa	Nishinoomote	air craft camera	spectrum	eye-obs.
K-9 M-33	negative	X+2 min~ X+13 min 4 MHz*	failure	~4 min	good	~3 min
K-9 M-39	X+2 min~ X+19 min 6 MHz*	X+8 min~ X+25 min 7 MHz*	X+2 min~ X+27 min 7 MHz*	~12 min	good	~20 min

X firing time

\* maximum freqs. of returning singals

示している。バリウム電離雲の電波に対する散乱断面積については Klein (1972) [3] らによって理論的な取扱いの試みがなされているが、今回の実験では幸に光学観測によって雲の形状が同時に押えられているので、今後さらに総合的な検討を加えることが可能と考えられる。ここではこれらの結果から雲の位置を求め地図上にその移動状況を示した(第8図)。併記の数字はロケット発射後の秒時である。これより雲の平均の移動方向および移動速度を求めると  $235^{\circ}\sim 250^{\circ}$ ,  $45\sim 48$  m/s となる。

#### 4. あ と が き

以上ロケット搭載用セシウム弾の改良と、これに基づいた K-9 M-39 号機による観測実験の概要を記述した。

この結果セシウム雲の発生に関しては前回の K-9 M-33 号機の場合に較べて薬量の減少にもかかわらず、長時間持続する電離雲が発生し発生弾改良の効果が認められた。これによって3地点からの電波観測も計画通り実施され、3.2.1 および 3.2.2 で述べたごとく光学観測と電波観測とほぼ合致した風が導出された。電波観測による反射波の周波数の最大値から初期の電子密度は  $8 \times 10^5 \sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$  と推定される。

今後の課題としては放出弾重量の軽減を進め、より安定した効率の高いものにする必要がある。また観測法については雲の位置をさらに精度良く知るための方式の開発が望まれる。

本研究は主として東京大学宇宙航空研究所の特別事業費によって進められたもので、平尾教授、倉谷教授はじめ宇宙航研の方々には一方ならぬご指導とご協力をいただいた。また電波観測に当たっては電波研究所からは観測機の借用など多大のご便宜を賜わった。さらに資料の提供など御尽力をいただいた山川電波観測所、東京大学中村純二氏はじめ観測実験にご協力くださった方々に厚く感謝いたします。また特別のご理解と協力をいただいた日本化薬株式会社はじめ関係メーカーの方々にも御礼申し上げます。

終りに本研究に対し激励と助言をいただいた京都大学の加藤進教授に謝意を表します。

1973 年 1 月 31 日

#### 参 考 文 献

- [1] 堤・竹屋・黒田：搭載用セシウム雲発生弾の開発とそのロケット実験，宇宙航研報告，Vol. 8, No. 4(B), p. 74, Mar. 1972
- [2] 中村・松岡：K-9 M-39 号機による発光雲実験，日本地球電磁気学会，第 51 回講演会，May. 1972
- [3] M. M. Klein, Scattering of HF radio waves by a spherical electron cloud. Radio Science, Vol. 7, No. 2, p. 257, Feb., 1972