

搭載用セシウム雲発生弾の開発とそのロケット実験*

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-33

By

Shirou TUTUMI, Yoshio TAKEYA and Takumi KURODA

Abstract: The basic chemical processes and engineering techniques concerning with the generation of the artificial cesium plasma clouds in the upper atmosphere were investigated.

After some prior ground tests, it was designed and constructed the effective rocket-born type vapourizer as to be satisfied the requirement of payload conditions.

The total chemicals weighted 8.1 kg consist of cesium nitrate, aluminium granuels and sodium nitrate with small percentage.

The K-9 M-33 rocket carrying this payload and another barium cloud source was launched on 26, Aug. 1971, at Kagoshima Space Center at 19 35 JST.

Visible and photogenic plasma clouds were successfully created at the altitude of 117 km and 240 km, respectively. The optical data was obtained for the period of about 300 sec. at the five observing points.

HF Radio wave tracking for them was tried by the some facilities, ionosonde at K. S. C. and synchronous receivers at K. S. C. and Nishinoomote City and ionospheric facility at Yamakawa, simultaneously operated.

The echoing traces accompanied with the generation of the plasma clouds were appered for the period of about 13 min. in the records of Yamakawa Station.

The predicted electron density at the initial phase of the Cs plasma cloud was consistent with observational results.

1. 序

セシウム電離雲による上層大気運動その他の電離層定数の観測を目的として、搭載型セシウム雲発生弾の基礎開発研究を進め [1][2], その結果に基づくロケット実験を K-9 M-33 号機によって行ない成果を得たので報告する. 今回のロケット観測結果に対する総括的な解

* 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

析は目下進められつつあり、ここではセシウム雲発生弾についての基礎開発に重点を置いて報告し、観測結果に関してはそれを裏付けるものとして preliminary なものとどめた。

ionization potential の低いセシウムはロケットによる電離雲の発生には最も有利な材料であり、昼夜にかかわらず電離雲実験が可能である [3]。とくに電波による追跡方法の採用によって従来より望まれている昼間風の直接測定を行なうことも主たる目標の一つである。

今回のロケット実験は薄明時に行ない光学観測の併用によって両者の identification をねらった。上層大気中での電離雲の発生と成長、拡散と消滅の過程の観察によって、単に雲の移動の検知のみでなく、多くの研究者によって関心のもたれてきた電離層の諸現象の検証が可能である。たとえば bast wave の発生 [4]、上層大気中での化学反応と電離現象 [5]、磁場中での拡散と変形 [6]、 E_s 層の形成過程 [7][8]、電波の回折と散乱 [9]、電離層風、などである。

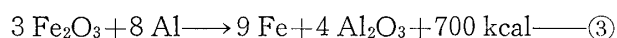
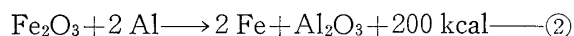
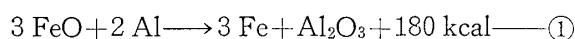
2. セシウム発生弾

セシウム電離雲を得る機構は、実際の観測条件、熱イオン生成率、または光イオン生成率を考慮して決定されるが、ここでは熱電離反応に対する各種セシウム化合物と還元剤の反応性を検討した。反応主薬に望まれる特性は、主薬自体の燃焼速度が速いこと、重量容積当りの含有セシウム量が多いこと、かつ熱イオン生成のためには高い発熱量をもつ反応効率の高い混合物であることなどである。これらの観点より、燃薬およびその組成比決定のため行なった実験結果についてのべる。

2.1 燃焼主薬の検討

A) セシウムクロム酸塩、重クロム酸塩と還元剤にテルミット剤を添加した場合

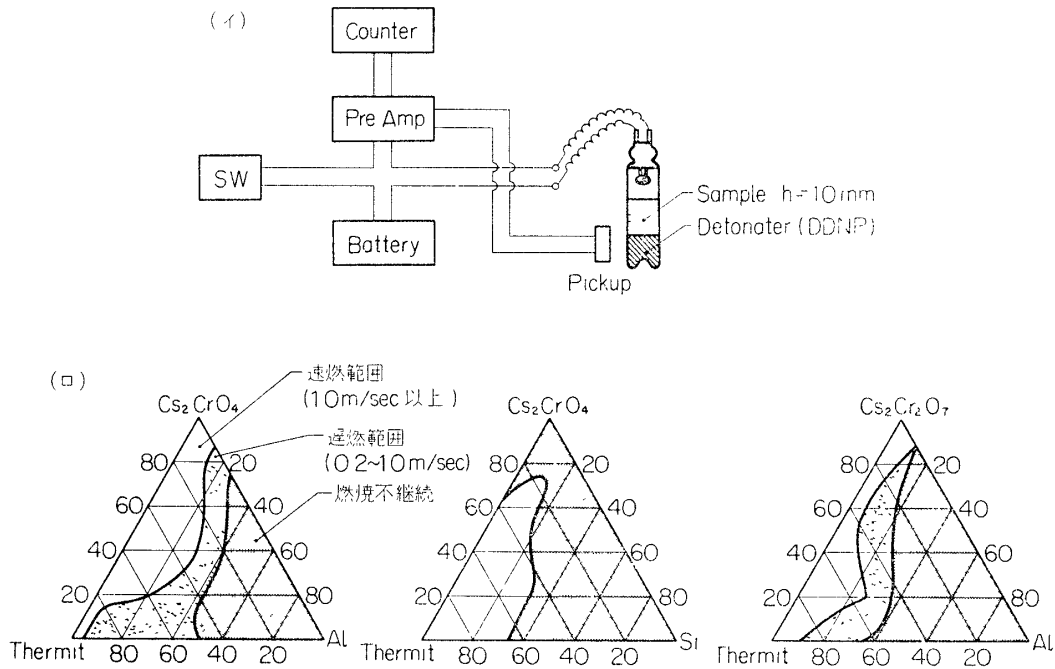
テルミット反応を安定に継続させるには、着火過程と伝ぱん過程が安定して進行しなければならない。セシウムのクロム酸塩または重クロム酸塩と還元剤では自己加熱や熱損失などによる熱量不足により燃焼が中断する。ここでは高熱量を持つテルミット剤の添加によりこれらの問題点を解決しようとした。



これらテルミット剤の内単位重量当りの発熱量が最も多いものは②であり発熱剤としての添加物に適している。使用した原料の Al 粉末はリン片状 325 メッシュパス、比表面積 3,450 cm^2/g 、純度 99.5% のものであり、酸化第二鉄は 250 メッシュパス、吸油率 46%、純度 99.0% のものを用いた。混合に当たっては理論比よりもアルミニウムを小過剰とし 24 K かくはん播潰機で 5 時間混合、この結果燃速 $V=2.0 \text{ m/sec}$ となり高燃速で再現性も良好であることが判明した。

A・1) 三種混合と燃焼性

燃速測定は酸素バランスが負となるため開放状態と密封状態では測定値に大差を生じ一般に開放状態の方が自給酸素以外のふん囲気中の酸素による酸化の影響、燃焼波の影響などによって早くなる傾向が表われる。したがって実際の使用条件に近い形で測定する様第 1 図



第 1 図 (イ) 燃速測定方法および (ロ) その結果

(イ) に示す装置で実験を行なった。すなわち、密閉管体中に試料を充填し通電により点火源、主薬、起爆へと燃焼が伝播し起爆薬の爆発音を停止信号に導き、デジタルカウンタで経過時間を読み取る方法で測定した。

A・2) 三種混合による代表組成

第 1 図(ロ)に示した実験結果による代表的な組成を第 1 表に示す。テルミット剤の混合により単位重量当りの有効セシウム量は当然減少するが燃焼速度の向上と燃焼中断が完全に防止できる。第 1 表 3 組成の内燃焼速度、含有セシウムの点で $\text{Cs}_2\text{CrO}_4 \cdot \text{Al} \cdot \text{Thermite}$ 系が有利であり、この組成に決定した。

以上の結果をもとに地上燃焼実験を実施したが、その詳細については省略する。

この結果、発生圧力、燃焼完了時間ともに設計値に近似した結果が得られ実用化に対する一応の目どはついた。ただし主薬中の有効セシウム量が少なく多量の薬剤を搭載しなければ

第 1 表 3 種混合の場合の代表組成に対する特性

組成および配合比 (Wt)	ρ (g/cm^3)	V (m/sec)	含有セシウム量 (Cs/kg)	$\text{cm}^3/\text{Cs mol}$
$\text{Cs}_2\text{CrO}_4 + \text{Al} + \text{Thermit}$ 33.3 : 16.7 : 50.0	0.51	1.67	1.74	1,137
$\text{Cs}_2\text{CrO}_4 + \text{Si} + \text{Thermit}$ 41.7 : 8.3 : 50.0	0.42	1.60	1.45	1,642
$\text{Cs}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{Al} + \text{Thermit}$ 40.0 : 10.0 : 50.0	0.59	1.15	1.65	1,034

ならず、また緩燃性のために多数の点火栓を必要とする。これら点火栓の完全斉発に対する信頼性の向上、大きな点火電源の確保が不可欠であり実用化に際してはさらに検討の余地のあるものである。これらの問題点を解決するため、次項で述べるセシウム硝酸塩と還元剤との反応性について検討した。

B) CsNO₃-Al 系薬剤に対する検討

B・1) CsNO₃ と還元剤の選択

CsNO₃ を酸化剤として還元用にアルミニウム粉末、ジルコニウム粉末、硅素鉄粉末、炭素粉末を使用しその反応性を把握した。第2表は代表組成における諸特性である。第2表よ

第2表 硝酸セシウムと各種還元剤との代表混合比に対する特性

組成	特性 V (m/sec)	ρ (g/cm ³)	Q (cal/g)	Csmol/kg	cm ³ /Csmol
CsNO ₃ +Al (60:40)	0.37	0.51	1,065.5	3.63~4.02	528~479
CsNO ₃ +Zr (50:50)	1.25	1.39	915.0	3.02	238
CsNO ₃ +FeSi (75:25)	0.10	0.79	675.5	3.60	352
CsNO ₃ +C (82:18)	0.14	0.84	321.4	4.83	246

り Zr が還元剤として優れていることが判明する。ただし Zr は CsNO₃ と混合中にたびたび発火事故が発生し、また混合ずみの薬剤に対してもその取扱い安全性は決して良いものではない。よってわれわれは Zr よりも不活性で兼備な還元剤として Al 粉末を使用することに決定した。

B・2) CsNO₃-Al 系薬剤の取扱い安全性

薬剤の製造、取扱い、保存中に対する安全性を確認するために実施したものである。一般に可燃物、爆発物を点火したり爆発させるためには一次活性化エネルギーとしてある程度以上のエネルギーを与えねばならない。しかしこれらを正確に測定することはそれぞれの計算とこれを吸収した物質の測定が困難なため容易ではない。そこで比較的信頼でき、実用的な目安として実施されている方法について試験をおこなった。

(イ) 発火点試験 (熱感度試験)

薬剤が高温に加熱されたり直接高温、赤熱体に接触するなど、単純な形で熱エネルギーを受けた場合におこる分解に対する抵抗性を知る目的でクルップ式定温加熱試験器で実施した。試料発火時間は高温になるにしたがって指数関数的に短くなり発火時間 t (sec) と加熱温度 T (°K) の間には $\log t = A/T - B$ の関係がある (A, B は試料定数である) 本試料は 500°C において 4 秒間、800°C において 0.5 秒の待時間で発火する。粉状黒色火薬は 320°C において 4 秒、400°C において 0.5 秒であり、粉状黒色火薬などに比較すれば相当鈍感である。

(ロ) 衝撃感度試験

製造, 運搬, その他取扱い中における打撃, 衝撃に対する感度の相対比較として裸薬剤に落槌する方法により実施したところ粉状黒色火薬は 5 kg 鋼球発火の落高 120 mm に対し $\text{CsNO}_3\text{-Al}$ は 800 mm と鈍感であることが判明した.

(ハ) 摩擦感度試験

裸薬剤をヤスリ間にはさみ加圧のもとにヤスリ面を所定速度で移動させる山田式摩擦感度試験器で実施したところ, 粉状黒色火薬はヤスリ加圧 475 kg/cm^2 で全数発火するが $\text{CsNO}_3\text{-Al}$ は発火せず安定していることを示すものである.

(ニ) 火花着火試験

試料を所定断熱容器に入れその中心部に火花源をうめ込み瞬時のエネルギー付与による発火の有無を確認したところ 20 joule で黒色粉状火薬, $\text{CsNO}_3\text{-Al}$ 混合物のいずれも全数 ($N=5$) 発火する.

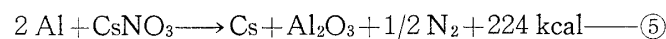
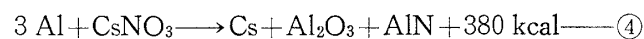
B・3) $\text{CsNO}_3\text{-Al}$ 系薬剤の取扱い安全性に対する結論

以上の検討方法は安全性に対する相対的な目安でしかないが次の結論を導き出すことができる.

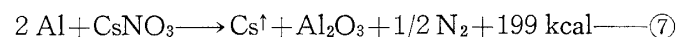
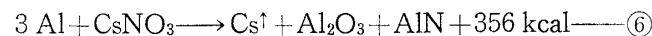
- Ⅰ. 保存中は安定しており所定の熱, 衝撃, 摩擦を与えない限り安全であり自然分解する危険性はない.
- Ⅱ. 摩擦, 衝撃など, 機械的な励起に対しては鈍感であるが熱感度, 特に火花に対する着火性は敏感であり, 裸薬剤の取扱い中は火気に十分注意する必要がある.
- Ⅲ. 総体的に火薬類中の黒色粉状火薬の取扱いに準じ取扱えば安全である.

B・4) $\text{CsNO}_3\text{-Al}$ の反応機構

この場合の反応式は



Cs が蒸気の場合は



Cs^\dagger が高温のもとで電離反応をおこすさいの平衡定数を K_N とすれば

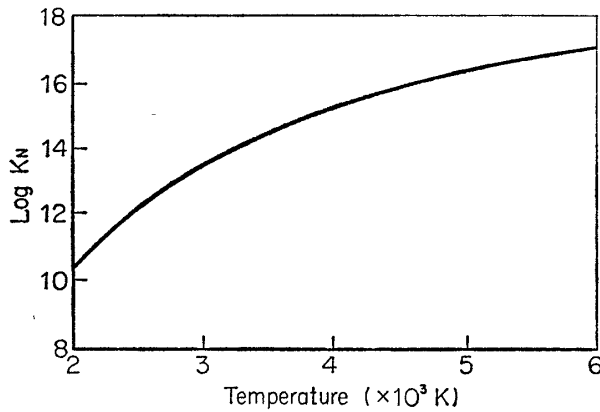
$$K_N = \frac{[\text{Cs}^\dagger][\text{e}^-]}{[\text{Cs}^\dagger]} \text{---} \textcircled{8}$$

であり, $[\text{Cs}^\dagger][\text{e}^-][\text{Cs}^\dagger]$ はそれぞれセシウムイオン, 電子, 中性セシウム原子の個数濃度を示す. K_N の値は④⑤⑥⑦式に関する Saha 実験式によって第 2 図のごとく与えられる. すなわち Saha によれば

$$\log K_N = \log(g^+ \times g^- / g^0) - 15.38 - 1.5 \log T - 5040 V_i / T \text{---} \textcircled{9}$$

で与えられ g^0 は Cs^\dagger の g^+ は Cs^+ の g^- は e^- の統計力学的重量, T は絶対温度, V_i は ionization potential (eV) である. 第 2 図および⑨式より明らかのように温度が高くなれば K_N の値が急激に増加し, 電離が進行する.

なお⑧式で $[\text{Cs}^\dagger] \gg K_N$, であることを考慮すれば



第2図 Cs原子電離に対する平衡定数 K_N と温度との関係 (Saha の式より)

$$[e^-] = \{K_N [Cs^\dagger]\}^{1/2} \text{---⑩}$$

となる。すなわち電子濃度 $[e^-]$ は温度 T によって定まる平衡仮数 K_N と Cs 蒸気の濃度 $[Cs^\dagger]$ との積の 1/2 乗で示されることになる。いま断熱条件のもとで反応が生じた場合、反応生成物の比熱が約 40 cal/g mol とすれば理論的に発生蒸気温度が 9,000°K~5,000°K となることがいえる。しかし実際には断熱条件が完全に満たされず、反応に伴って反応系外への熱の放散現象があるので Cs^\dagger の温度は 2,000°K~

6,000°K 程度と考えられる。

B・5) $CsNO_3$ -Al の物性

密閉、真空容器中で Al と $CsNO_3$ 混合物を点火燃焼させ、それに伴う圧力および温度の時間的变化を測定するとともにイオンギャップ方式により燃速を求めた。その結果のみを第3表および第4表に示した。

B・6) $CsNO_3$ -Al 反応性に対する結論

実験で得られた結果を検討し密閉容器内での $CsNO_3$ と Al が燃焼する場合、最終的に以下の関係式を導いた。

第3表 圧力、温度測定による実験結果

実験 No.	圧力、温度波形	ポンベ容積 V (cm ³)	装薬量 W (g)	装填密度 ρ (W/V)	最高圧力 (kg/cm ²)	P_{max} までの時間 t_0 sec	W/t_0 (g/sec)	最高温度 (°K)	$1/T_{max}$
1	省略	320	1.6	0.005	12.5	0.13	12.3	683	14.6×10^{-4}
2	"	320	3.2	0.010	24.8	0.12	26.6	1,183	8.45×10^{-4}
3	"	320	4.8	0.015	34.0	0.14	34.2	1,350	7.40×10^{-4}
4	"	320	6.4	0.020	41.7	0.12	53.2	1,373	7.28×10^{-4}

第4表 鋼管中における燃速、温度、測定による実験結果

実験 No.	鋼管径 D (cm ϕ)	初期装填密度 ρ (W/V)	初期薬長 L (cm)	イオンギャップの距離 l (cm)	平均燃速 \bar{V}_e (cm/sec)	温度 T (°K)
5	0.6	0.52	25	0.5	125	—
6	0.6	0.71	25	0.5	150	—
7	0.6	0.80	25	0.5	185	—
8	1.5	0.70	25	5	4,170	1,570~1,670
9	3.5	0.70	25	5	12,500	1,670~1,870
10	5.0	0.70	25	5	12,500~13,000	1,800

$$\textcircled{\text{C}} \text{残存薬密度 (g/cm}^3\text{)} \quad \rho = \rho_0 e^{-K_0 t} \text{--- (I)}$$

$$(T > 800^\circ\text{K では } K_0 \doteq 20)$$

$$\textcircled{\text{C}} \text{反応温度 (}^\circ\text{K)}. \quad T = \frac{1}{a} \left(277.5 \times 10^3 - 324 \frac{Q}{w} \right) \text{--- (II)}$$

$$\textcircled{\text{C}} \text{圧力最高値 (kg/cm}^2\text{)}. \quad P_{\max} = n \frac{W}{aV} \left(70.5 \times 10^3 - 82 \frac{Q}{w} \right) \text{--- (III)}$$

$$(n = 1 \sim 1.5)$$

$$\textcircled{\text{C}} \text{線燃焼速度 (cm/sec)}. \quad v = a_0 \rho D_3 = a_0 \frac{W}{V} D^3 \text{--- (IV)}$$

ただし

W = 初期装填薬量 (g)

V = 容器体積 (cm^3)

ρ_0 = 初期の装填密度 (g/cm^3)

T = 温度 ($^\circ\text{K}$)

a = 反応物の平均比熱 ($\text{cal/g} \cdot \text{mol}$)

w = 反応薬量 (g)

Q = 反応系外への散逸総熱量 (cal)

D = 容器管内径 (cm)

t = 時間 (sec)

である。

2.2 搭載用セシウム雲発生装置の設計と製作

上層大気中に作られるセシウム電離雲を電波で観測する場合、電波の散乱に寄与する電離密度すなわち燃焼反応により発生する全電子数 $[e]_{\text{tot}}$ が重要である。これに関しては前項で述べた通り第⑧式から導くことができるが、実さいには一定量の薬量については、反応温度を $T^\circ\text{K}$ とすれば $\propto 10 T/2$ の形で決定されることとなる。すなわち反応温度の増大が必須条件であり、これを実現するためにはセシウム弾容器の耐圧を許される限り高くする必要がある。以上の観点から実さいに搭載可能なセシウム弾を設計・製作した。

(イ) セシウム弾容器

K-9 M-33 号機搭載のセシウム弾は頭胴部先端部に組込む必要上容器の外形は上半分が錐形をなした円筒形である。材質は M. B. S 170, 壁部厚み 3.5 mm, 重量 10.15 kg, 内容積 13.1 l, 静的耐圧 500 kg/cm^2 である。

(ロ) 爆破圧力, 温度および反応率

圧力容器の耐圧性は数 m sec 程度の動的加圧の場合、静的な耐圧に対して少なくとも 1.5 倍程度増大することが知られている。したがって今回の場合その破かい内圧を前項に示した値の 1.5 倍、すなわち 750 kg/cm^2 と考えた。

すると容器破かいに至るまでの反応薬量は (III) 式によって $w = 680 \text{ g}$ となる。次にこのときの温度は (II) 式より求め $T = 3,400^\circ\text{K}$ となる。さらに発生する熱電離による全電子数 $[e]_{\text{tot}}$ は (IX) 式によって求めることができる。すなわち反応温度 $3,400^\circ\text{K}$ に対する平衡

定数 $K_n=5 \times 10^{14}$, 反応薬量 $w=680 \text{ g}$ より発生するセシウム原子総個数を $[\text{Cs}^\dagger]_{\text{tot}}$ で表わせば

$$[\text{Cs}^\dagger]_{\text{tot}} = (680 \text{ g}) \cdot (3.08 \times 10^{-3} \text{ mol/g}) \cdot (6 \times 10^{23} \text{ 個/mol}) = 1.2 \times 10^{24} \text{ 個}$$

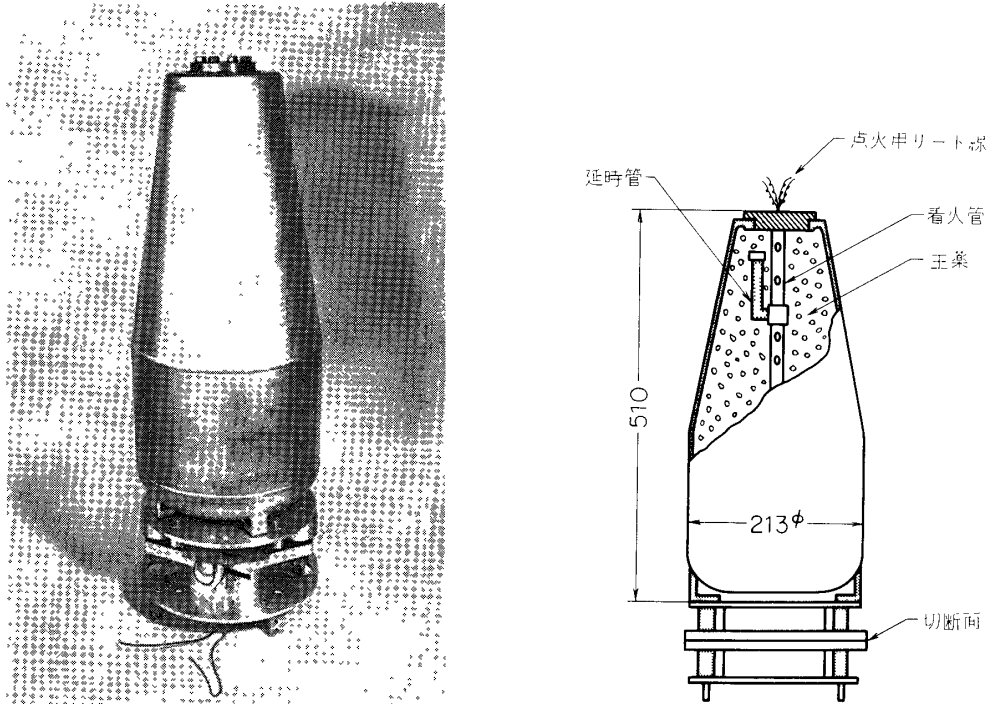
したがって

$$[e]_{\text{tot}} = \{K_n \cdot [\text{Cs}^\dagger]_{\text{tot}}\}^{1/2} = \{(5 \times 10^{14}) \cdot (1.2 \times 10^{24})\}^{1/2} = 2.5 \times 10^{19} \text{ 個}$$

が求められた。セシウム雲発生初期の雲を直径 800 m 程度の球形とし、そこに一様に分布するものと仮定すれば、単位体積当りの電子密度は $8.3 \times 10^5 \approx 10^6 \text{ 個/cm}^3$ 程度と考えられる。実さいには太陽紫外線による光電離によってさらに電子密度が増大することになるが、これに関してはここではふれない。

(ハ) 反応時間

燃焼反応の所要時間は (I) 式より反応温度 $T=3,400^\circ\text{K}$ の場合について算出すると $9.3 \times 10^{-3} \text{ sec} \approx 10 \text{ m} \cdot \text{sec}$ となる。



第3図 K-9 M-33 号機搭載セシウム雲発生弾の外観と構造

これ以外に延滞管，着火管に関する基礎開発を行なったがここでは省略する。以上の成果に基づいて第3図に示すセシウム発生弾を製作し，K-9 M-33 号機によるロケット実験を実施した。実さいに搭載したセシウム発生弾の総重量は 19.0 kg であった。

3. K-9 M-33 号機によるセシウム電離雲実験

3.1 実験概要

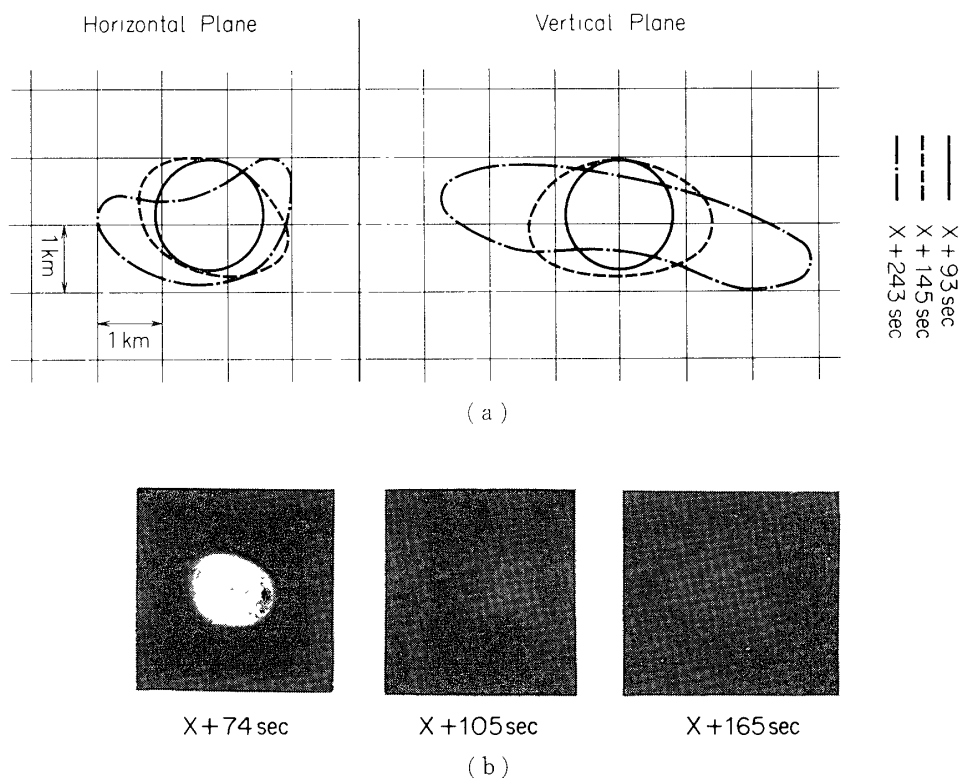
K-9 M-33 号機は昭和 46 年 8 月 26 日，19 時 35 分，東京大学鹿児島宇宙空間観測基地

(131°04' E, 30°15' N) より実効方位角 145°, 上下角 79° で打ち上げられた。ロケットは正常に飛しょうし最高高度 323 km に達したのち 9 分 16 秒後に内之浦南東 367 km の海面に落下した。

発射時の太陽高度は -10° であったが発生した電離雲の life-time との関連については別項で検討する。この間 51 秒後に開頭, 53 秒後にセシウム弾頭の切斷が行なわれた。セシウム弾の点火は 52 秒に行なわれており, 19.5 秒間の延時のあと 71.5 秒に着火燃焼したセシウム弾はロケットより切斷後 2.0~2.5 m/sec の速度で本体より離れ, 約 40~50 m の地点で爆破したと考えられるので, 放出地点をレーダによるこの時刻のロケット位置とみなせば, 雲の発生点は 131°18' E, 31°06' N, 高度約 117 km である。発生初期には直径約 1.0 km の黄白色の球形雲が目視によって確認され, 約 3 分のあとに日照のかけりによって消失した。

3.2 観測結果の Preliminary Report

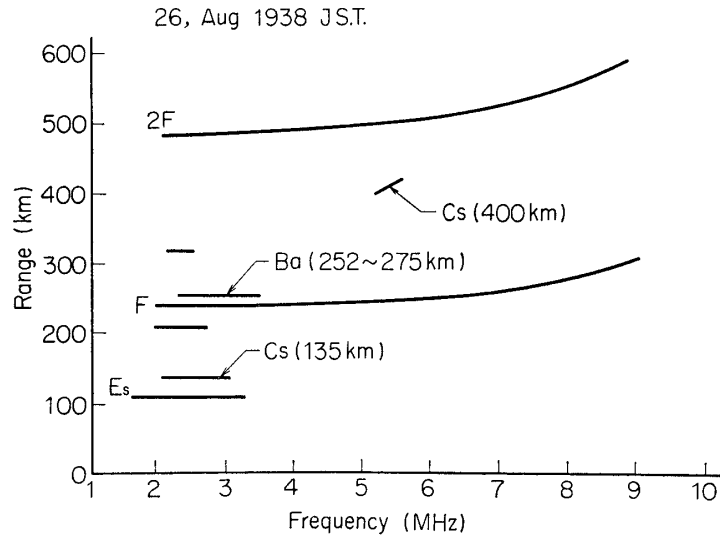
A. 光学観測 セシウム雲に対する光学観測は中村純二氏ほかによって内之浦, 南郷, 西之表, 谷山, 山川の 5 地点からのカメラ撮影によって実施されて成功した。これによる雲の位置および雲形の時間経過については目下解析が進められており別項の報告が待たれるが, 現在までの報告によれば 4 分 30 秒間にわたって記録されている。これによる形状変化の概略は第 4 図のごときもので時間の経過とともに磁力線方向に elongate しつつ高度が上昇し



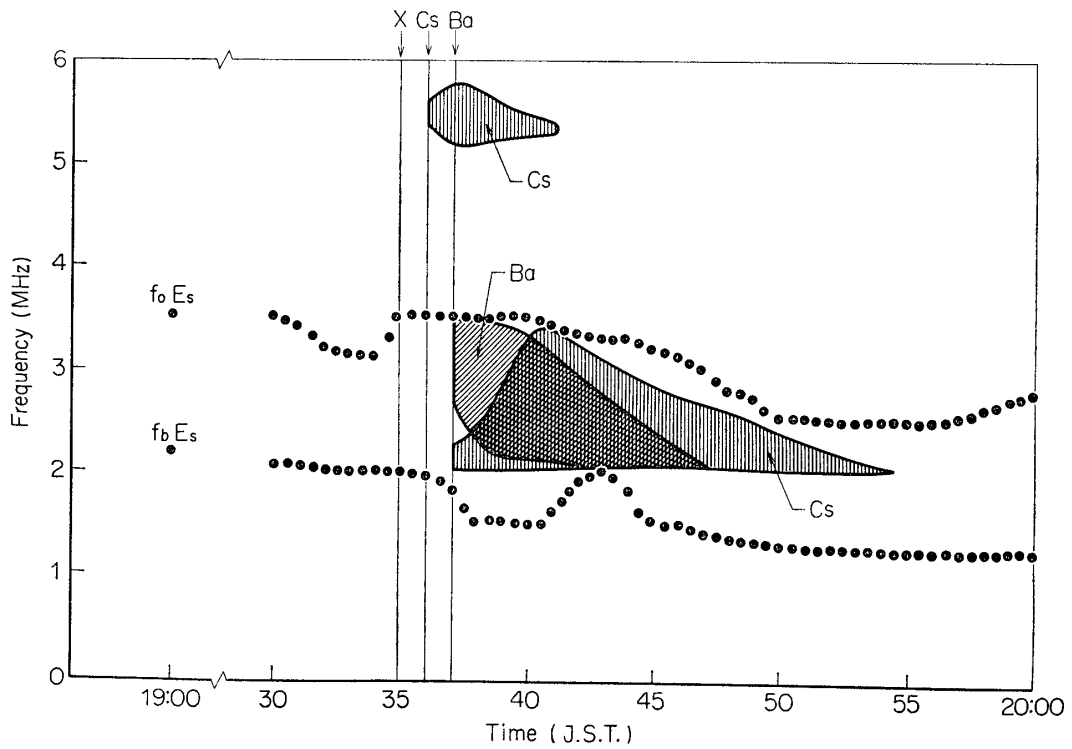
第 4 図 (a) セシウム電離雲の形状の変化 (中村純二氏提供による)
(b) 山川より撮影したセシウム電離雲 (中村純二氏提供による)

ていることがわかる [10].

B. 電波観測 一方発生電離雲の電波による観測についてはセシウム雲および同機によって作られたバリウム雲を対象として, (1) ionosonde, 山川, 内之浦, (2) ionosonds に同期

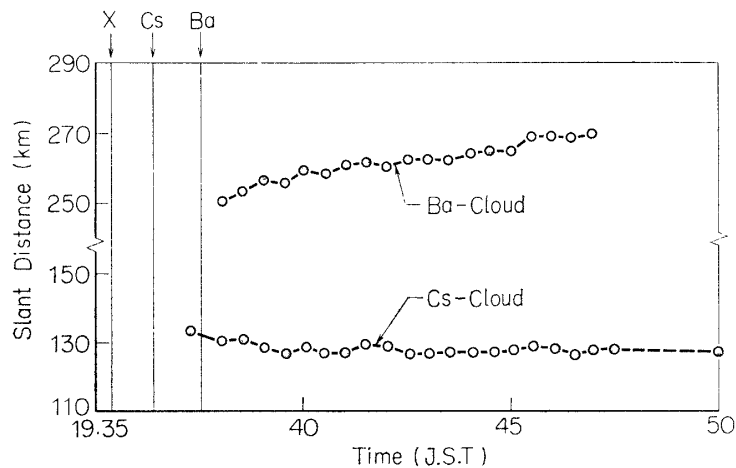


第5図 Ionograms obtained at the time of 108 sec. after Cs release and 48 sec after Ba release by ionosonde located at Yamakawa.

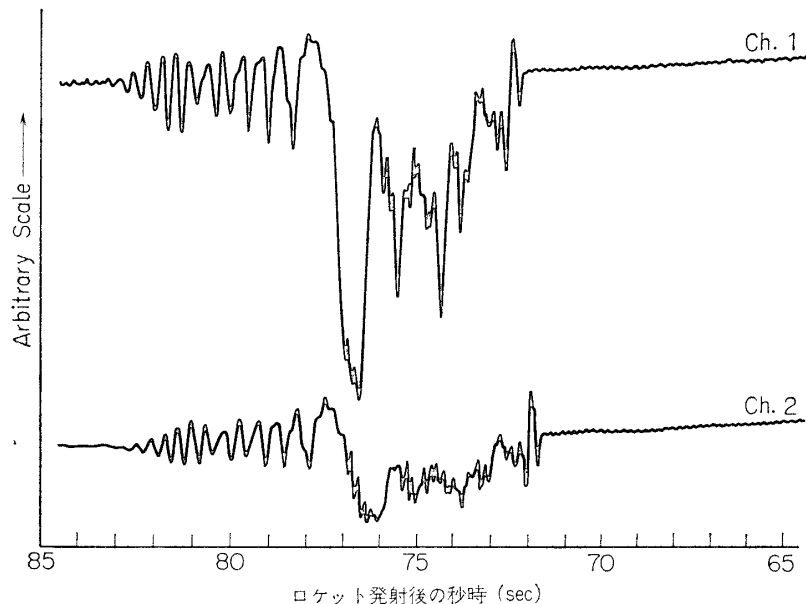


第6図 Frequency extent of echoes observed for Cs and Ba releases.

した受信機，内之浦，西之表，によって実施した．西之表での受信は同期信号の異状により失敗したが，他の観測機は正常に作動した．このうちセシウム雲およびバリウム雲による反射が山川で記録された．以下この山川での記録について述べるが，その一例を第 5 図に示した．これらの連続観測（25 sec/駒）の記録から反射波の周波数範囲の変化を読み取り図示したものが第 6 図である．図中には f_oE_s , f_bE_s の読み取り値を併記した．これによれば反射の持続時間はセシウム雲については約 17 分間，バリウム雲については約 10 分間である．



第 7 図 Slant distance to Cs cloud and Ba cloud.
vs time relation from Yamakawa station.



第 8 図 ロケットより送られる Telemeter 信号 (295 MHz) の
Cs 雲発生に伴う受信電界強度の変動
(Ch. 1 では X+72.0 sec から Ch. 2 では X+71 7
sec から減衰が始まっている.)

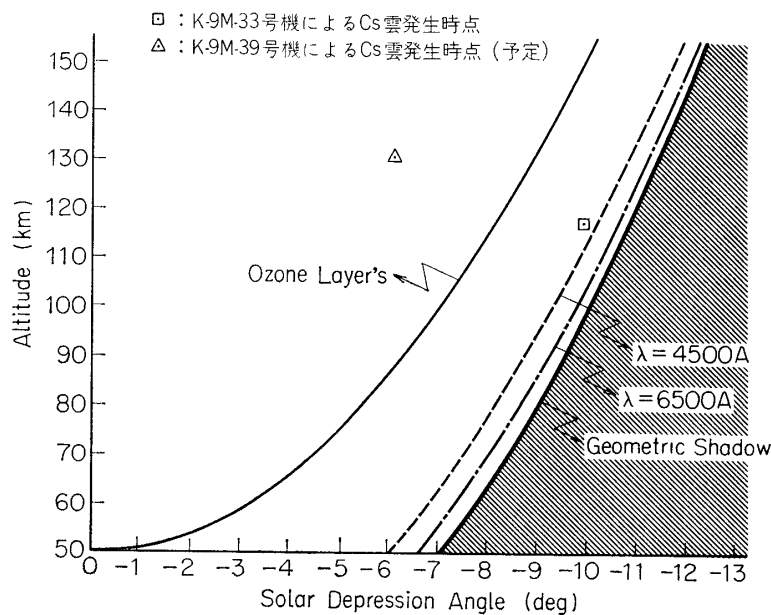
さらに山川 station から電離雲までの直距離は第7図のごとく変化し、バリウム雲については約 35 m/sec で離れる方向に、セシウム雲についてはやや近づく方向に移動したことを示している。今回は残念ながら一地点での記録しか得られていないが、定速度の水平風を仮定すれば一応風のベクトルは導けるはずであり今後光学観測結果との対比が必要である。

つぎにロケット本体より送られる telemeter 信号 (295 MHz) の受信電界強度記録によれば、セシウム雲の放出とともに急激な減衰と振動が現われ約 11 秒間にわたって持続している。この地点でのロケットの上昇速度が約 2 km/sec であったことから約 22 km にわたって雲離雲の回折効果が見られたこととなり発生した雲離雲の初期の密度分布、形状などの情報を含むものとして興味もたれる (第8図)。

3.3 検 討

以上ロケット搭載用セシウム発生弾に関する基礎開発結果およびこれに基づく K-9 M-33 号機による実験の概要と、その観測結果の Preliminary なものを記述したが、一応セシウム電離雲の発生を光学的小よび電波的小確認した。今後の解析によって風、電界などが導出可能と思われるが、発生したセシウム電離雲については前述のごとく搭載薬量の約 8.4% が反応したことになり発生した全電子数は 2.5×10^{19} 個と予想される。放出時の雲の半径を約 500 m として (光学観測より) 一様に分布するものとするれば、電子雲密度として $5 \times 10^5/\text{cc}$ となる。実さいの電波観測の結果から推定してセシウム雲の初期の電子密度は ionogram の記録からほぼ同程度と考えられ、一応算定値に合致した結果が得られた。

次に今回の実験における shadow height とセシウム雲の観測時間との関係について検討する。K. H. Lloyd は薄明時の実効的な shadow height を、波長別に理論計算によって求め、ほぼ Rosenberg の提案のものに合致することを述べているが [11]、第9図からもわかるとおり今回の場合放出の時点から見て約3分でいわゆる geometric shadow には入ったことと



第9図 太陽高度角に対するかげの高さ

なり目視観測結果と合致する。今後薄明時に実験を行なう場合はオゾン層の吸収効果を考慮してさらに約 50 km の高さを見込む必要がある。この点で今回は発生した中性セシウム原子の光電離による増殖はなく、熱電離のみによる電離雲が作られたこととなり、結果的には夜間の実験に相当するものであった。

今後行なわれる電離雲の電波による昼間観測については、光学観測法の開発の進展とともに期待がもたれる [12]。

謝 辞

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、大林・平尾両教授はじめ宇宙研の方々には一方ならぬご指導とご協力をいただいた。またロケット観測に当っては資料の提供などご協力をいただいた山川電波観測所栗城所長、東京大学の中村純二氏はじめ神戸大学松本治弥氏、大阪市大鈴木 裕氏、福原敏行氏および関係の方々に厚く感謝いたします。

また基礎開発段階から特別のご理解とご協力をいただいた日本化薬株式会社をはじめとする関係メーカーの方々にもお礼申し上げます。

終わりに本研究に対し常々激励と助言をいただいていた京都大学の加藤教授に謝意を表します。

1972年1月14日

参 考 文 献

- [1] 竹屋, 梶 CsNO₃ による Cs 弾の開発, 宇宙観測シンポジウム, 359, 1969.
- [2] 梶 CsNO₃ による Cs 弾の開発II, 宇宙観測シンポジウム, 30, 1970.
- [3] Davis, J. R. and J. C. Moore: Decameter and meter wave length radar studies of artificial plasma clouds in the lower ionosphere, 1 and 2, J. Geophys Res., **75**, 171, 1970, **76**, 5292, 1971.
- [4] Brode, H. L.: Blast wave from a spherical charge, Phys. Fluids, **2**, 217, 1959.
- [5] Marmo F F, et al: Artificial electron clouds, Planet. Space Sci. **1**, 227, 1959.
- [6] Kato S. and H. Sakurai: Motion of ion-clouds in the ionosphere, J. Atmo. and Terr. Phys., **32**, 1117, 1970.
- [7] Whitehead, J. P.: Instabilities in a gradient of ionization and sporadic-E, J. Atmos. Terr. Phys., **29**, 1285, 1968.
- [8] Kato, S. and S. Matsushita: Space charge waves and ionospheric irregularities, J. Atmo. Terr. Phys., **30**, 857, 1968.
- [9] Matsumoto H.: Study of ionospheric irregularity from scintillation of Jupiter's decametric emissions, Rept. iono. and Space Res. in Japan, **19**, No. 4, 433, 1965.
- [10] 中村他 K-9 M-33 号機による発光雲の光学観測, 宇宙観測シンポジウム, 1971, 未出版.
- [11] Lloyd K. H.: Calculation of the effective height of the earth's shadow Planet.Space Sci. **16**, 1071, 1968.
- [12] 加藤, 中村, 梶 電離層ダイナミックスに関するロケット実験, 宇宙観測シンポジウム, 336, 1969.