

超高層大気内 Chemical Cloud の電離率*

堤 四郎**

The Ionization Rate of a Chemical Cloud in the Upper Atmosphere

By

Shiro TSUTSUMI

Abstract : Recent observations of the ionized clouds using ionosondes in cesium release experiments with the rockets, K-9M-33, K-9M-39 and K-9M-42, suggested that the total electron number in the cloud increased with time after release due to photoionization by solar ultraviolet radiation. In this report, the two ionization processes, thermal and photoionization, of chemical cloud of various alkali species have been considered. The photoionization probability of an cesium atom by daytime solar flux has been estimated to be about $1.2 \times 10^{-4}/\text{sec}$ from the results of radar observation, while the theoretical estimation was about $2.8 \times 10^{-4}/\text{sec}$. The ionization rate due to heats associated with gas evaporation during initial period, which is considered to be $2.0 \sim 4.0 \times 10^{-4}/\text{sec}$, is very low in comparison with that of photoionization during the diffusion except the time period of an initial few seconds after gas release.

The comparison between the theoretical estimation and the real observational data concerned with ionization process provides us with some fundamental parameters of the ionized clouds necessary for planning a similar rocket experiment in the future.

1. 序

発光雲に対する通常の光学観測が行なえない昼間の電離層風の観測法の一つとして電波による電離雲の追跡法についてこれまでにセシウム雲による一連のロケット実験を実施し、上層大気の運動に関する諸定数の導出可能なことが示された[1]。これらの実験はいずれも薄暮時に行なわれ、地上からの同時光学観測によって発生した電離雲の位置、大きさ、拡散の状況等が確実に把握された。

これまでに行なわれた電離雲による電波の後方散乱に関する観測データ解析によって、電離雲の移動状況および基本的な諸定数を導き、今後の此種実験のための基礎的な資料を得ることができた[2]。本報告では前回でのべた解析手法をさらに進めることにより chemical cloud の電離定数について検討を行なった。

* 宇宙研特別事業費による論文

** 大阪市立大学・工学部

ロケットによって作られるアルカリ雲の電離過程は次の2つの段階によって進行するものと考えられる。すなわち第一段階は人工雲発生時の燃焼熱による熱電離反応によるものであり、第二段階は雲の拡散時の太陽紫外線による光電離によるものである。したがって実際の電離雲の電離率はアルカリ蒸気の種類、燃焼容器の構造、放出地点での日照条件等によって複雑に影響をうけることとなる。本報告ではこれらの電離過程について検討を行ない、実際の観測実験における諸定数のもとで電離定数を求めることを試みた。導かれた結果によると太陽紫外線の照射が充分である昼間実験の場合には光電離による電子生成率はセシウムの場合 $1.2 \times 10^{-4}/\text{sec}$ 程度と想定され、放出時の熱電離によって生成する電子量は実際問題として殆ど無視して良い程度に少ないことが判明した。

2. 超高層大気内 Chemical Cloud の電離過程

2.1. 熱電離

密閉容器内で熱平衡を保って中性原子、イオン、電子が共存する場合、その電離率を x 、全圧力を p [mmHg] とすると、Saha の関係および Nerrst の熱力学の定理によって

$$\frac{x^2}{1-x^2} p = 4.9 (g_{\text{ion}}/g_{\text{gas}}) 10^{-4} \cdot T^{5/2} \cdot \exp\left(-\frac{eV_i}{kT}\right) \quad (1)$$

なる関係が成立する[3]。ここで $g_{\text{ion}}, g_{\text{gas}}$ はそれぞれイオンおよび気体の統計的重率、 T は温度 [°K]、 V_i は電離ポテンシアル [volt] である。いま $x \ll 1$ の場合について、電離電圧 V_i なる気体の電離度 x とその温度 T および圧力 p の関係を第1図に示した。これまでに実施された各ロケット実験において放出機構の構造および薬量が一定ではなく理論的に確定することは困難であるが、地上試験の結果等から放出時の気体温度を $2500 \sim 3000^\circ\text{K}$ 、容器の破かい時の圧力を $100 \sim 200$ 気圧として上記の関係から x を求めると電子の発生比率はセシウムの場合全体の $0.002 \sim 0.004$ 程度と推定することができる。

2.2. 光電離

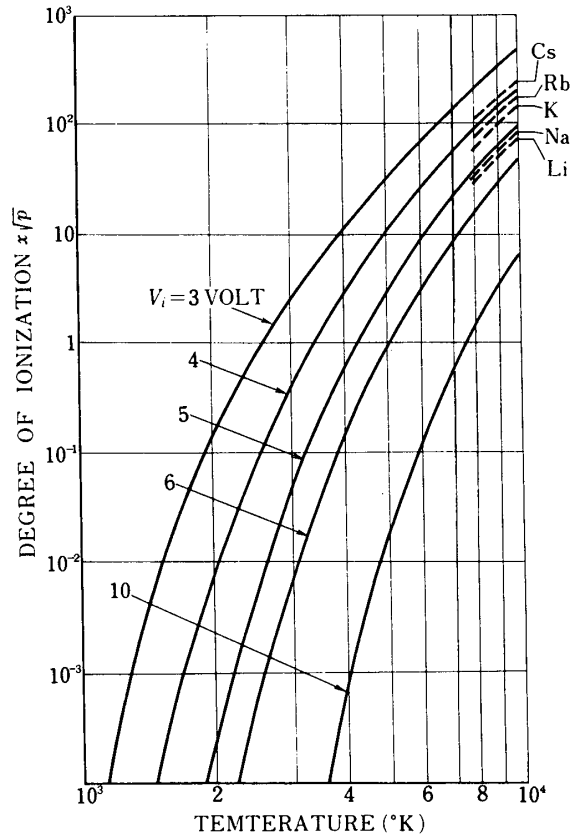
次に光電離反応によるアルカリ原子よりの自由電子の生成確率を q [sec^{-1}] は

$$q = \int_{\lambda} \sigma(\lambda) \cdot I(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

で与えられる。ここで $\sigma(\lambda)$ は原子の光吸収断面積、 $I(\lambda)$ は入射太陽光の強度である。

第2図に大気圏外部での太陽光強度を $\Delta\lambda = 50 \text{ \AA}$ 巾での光粒子数で現わしたもの[4]、および各アルカリ原子の吸収特性[5]を併せて図示した。この図においてセシウムの特性はその低い電離電圧のため最も長波長に迄吸収曲線が延びており、その値も高いことがわかる。

この図から $\Delta\lambda = 50 \text{ \AA}$ の巾で σ, I を読みとり $\sum \sigma(\lambda) \cdot I(\lambda) \cdot \Delta\lambda$ の値を求めたものを第1表に示した。 q の値は1個の原子の太陽光による電離確率である。なほ各元素のモル重量の差異を除去するため、単位重量のガス量についての電離率を q' として求め併せて表示した。



第1図 温度(°K)に対する電離電圧 V_i なる気体の電離度(x),但し p は圧力(mmHg).

3. 電離雲の電波観測結果と検討

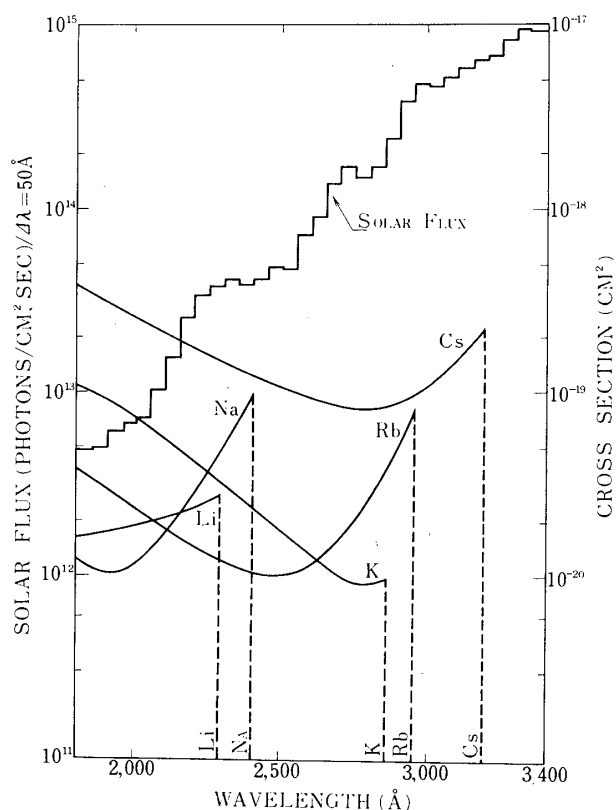
これまで実施したセシウムによる電離雲の実験はK-9M-33号機, K-9M-39号機, K-9M-42号機によるものであり, これに対する電波観測はいずれの場合もK・S・C内之浦, 山川電離層観測所, 西之表市の3地点からイオノグラムの連続操作によって実施され電波エコーが記録された[6]. ここでは山川電離層観測所で得られた結果に基づいて検討を加える. 前報告で述べた通り放出後の時間 t , 雲の中心より r なる地点での電子密度 $n(r, t)$ を

$$n(r, t) = \frac{N_t c + N_t (1 - c) \{1 - \exp(-kt)\}}{(4\pi Dt)^{3/2}} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right) \quad (3)$$

と想定する[7]. ここで N_t ; 放出された原子総数, D ; 拡散係数, c ; 熱電離率, k ; 光電離確率である.

各実験における N_t, D, c , の値は第2表に示す如く既知であり, 残る k のみが未知数である. 第3図に各実験の電波観測データと異った k に対する理論的な推定値を計算によって求め図示した.

一方第4図に各実験における電離雲の放出地点を示した. この図から高度50km附近に上限を



第2図 アルカリ原子の光吸収断面積 および太陽光線強度(Tousey,1963, による)

Table 1. Photoionization Probability for Various Alkali Metals

Element	I. P. (eV)	(Å)	At. Wt.	$q = \sum \sigma \cdot I \cdot \Delta \lambda$	$q' = q / A. W.$
Cesium	3.89	3184	132.91	2.81×10^{-4}	2.11×10^{-6}
Rubidium	4.18	2969	85.48	3.47×10^{-5}	0.41×10^{-6}
Potassium	4.34	2858	39.10	2.07×10^{-5}	0.53×10^{-6}
Sodium	5.14	2410	22.99	4.30×10^{-6}	0.18×10^{-6}
Lithium	5.39	2298	6.94	1.13×10^{-6}	0.16×10^{-6}

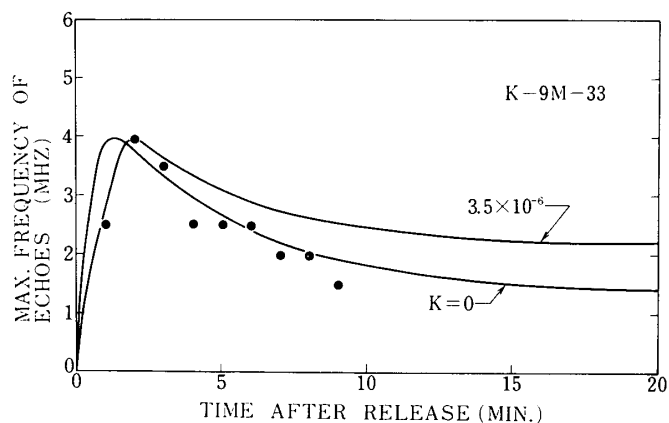
Table 2. Parameters of ionized clouds for each experimental event.

Experiment	N_t	c	D (m²/S)
K-9M-33	7.5×10^{23}	3.5×10^{-3}	1.8×10^3
K-9M-39	2.5×10^{24}	2.1×10^{-3}	4.0×10^3
K-9M-42	1.1×10^{24}	4.7×10^{-3}	8.0×10^3

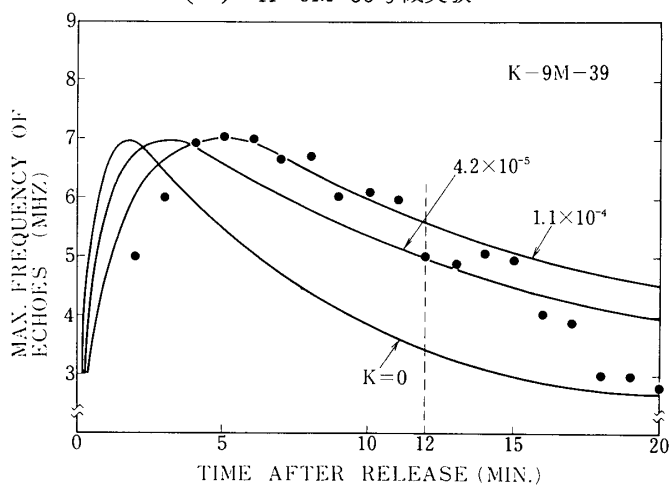
N_t ; Number of released neutral atoms.

c ; Rate of thermal ionization due to heats associated with gas evaporation.

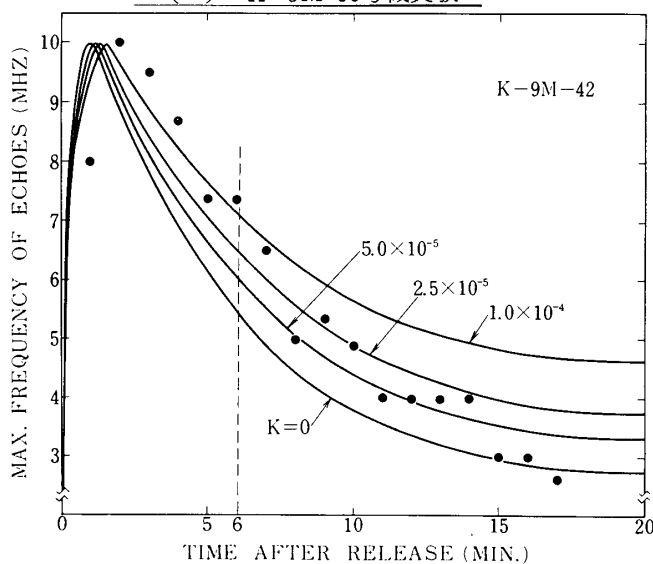
D ; Diffusion coefficient at an altitude of gas release.



(a) K-9M-33号機実験

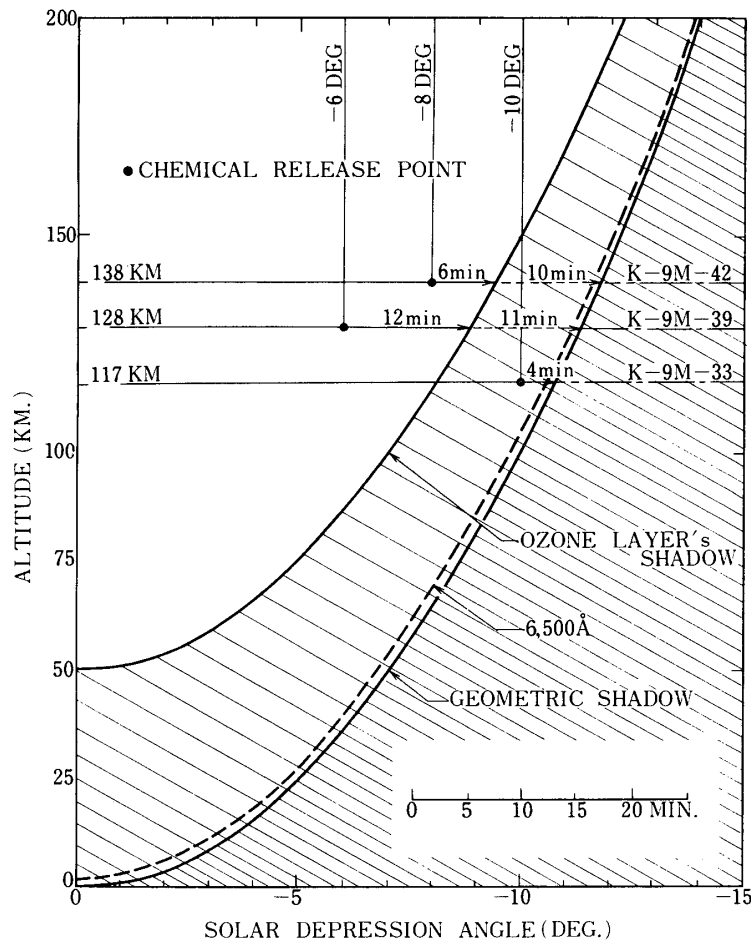


(b) K-9M-39号機実験



(c) K-9M-42号機実験

第3図 各ロケット実験における電波観測結果および異った k に対応したモデル計算による予想値. 破線はオゾン層の影が電離雲に到達した時刻を示す



第4図 太陽傾度角に対する影の高さ（●印は各実験での電離雲放出点を示す）

もつオゾン層の影に雲がかくれる迄の時間はK-9M-39号機実験では12分後、K-9M-42号機実験では6分後であることが知られる。とくにK-9M-33号機実験では人工雲の放出地点はすでにオゾン層の影の部分に入っていて、この場合は $k=0$ であることが明確である。したがって残る c の値のみが未知数であるから、電波観測データからその最確値を導出することができ $c=3.5 \times 10^{-3}$ が求まる。この値は2.1.で理論的に推定した値にほぼ合致するものである。再び第3図において破線で示されたこれらの時刻を境にしてそれ以後の電離の進行が停止し拡散の影響によって電子密度が急速に減少したことが示されている。逆にこの時刻以前では太陽UV光線の照射が充分であり昼間と同様に光電離が進んだことを示している。第3図(b),(c)からわかる通り太陽光の照射時の k の値はいずれの場合も約 $1.2 \times 10^{-4}/\text{sec}$ である。この値は第1表に示した値 $2.81 \times 10^{-4}/\text{sec}$ よりは低いものであるが、これは再結合による電子消滅過程を考慮していないためと考えることもできよう。

一方2.1.で述べたように熱電離率 c は0.002~0.004であったから、 $c \approx kt$ となる時間 t は1.7~3.3秒となり放出後数秒を経過すれば光電離によって作られる電子の総数が熱電離によ

って作られる電子の総数が熱電離によって作られる電子の総数を上廻ることとなる。すなわち太陽紫外線の照射の十分な昼間時において放出初期の短い期間を除けば中性アルカリ原子の光電離過程のみを考慮すれば良いこととなる。以上行なった検討結果が分後の人工雲実験の放出弾の設計および観測結果の解析において有用な資料となることが望まれる。

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あり、ロケット実験および地上観測において御盡力賜わった多くの方々に厚く御礼申し上げます。

1975年9月29日

参 考 文 献

- [1] Tsutsumi, S., Y. Suzuki, Y. Takeya and J. Nakamura, *J. Atmos, Terr. Phys.*, 36, 1911, 1974.
- [2] 堤, 竹屋, 黒田, 宇宙航空研究所報告, 第9巻, 2号(B)1973, 第8巻, 1号(B), 1972.
- [3] Engel, A. V., *Ionized Gases*, Clarendon Press, Oxford, 1965.
- [4] Tousey, R., *Space Sci Rev.*, Vol. 2, P22, 1963.
- [5] *Handbuch der Physik*, Bd. XXI, S 322, Springer, Berlin, 1956.
- [6] 堤, 宇宙航空研究所報告, 第10巻, 第3号(B), 1974.
- [7] Tsutsumi, S., *Rep. Ionosph. Space Res. Japan*, Vol. 28, 1974.