電離層におけるロケット排出物の拡散と電子減少^{*1}

Electron Depletion with Diffusion of Rocket Effluents in the Ionosphere

石川 芳 男^{*2}・井 上 正 史^{*3}

Yoshio ISHIKAWA, Masashi INOUE

小 宅 康 博^{*4}・山 極 芳 樹^{*5}

Yasuhiro OYAKE, Yoshiki YAMAGIWA

栗 木 恭 一^{*6}

and Kyoichi KURIKI

Key Words: Environment, Ionospheric Hole, Rocket Effluent

Abstract

In coming new space age, we will have frequent trips between the ground and mission orbits by large rockets to realize the large projects such as space stations and solar power satellite systems. In such cases a great deal of rocket effluents should be released in the atomosphere. But, its effects on our environment is still unknown, and therefore various studies on these problems are expected. About such environmental problems, some studies were performed which motivated by so called "ionospheric hole" observed when Skylab-I was launched, May 14, 1973. It was certified by later scientific studies that the phenomenon was caused by the chemical reaction between rocket effluents and ionized particles in the ionosphere, by which the electron density of the ionosphere suddenly decreased to about a half values of that in its normal state in the range of about 1,000 km in radius centering about rocket trajectory and it took about 4 hours to recover. In this study, the results of these fundamental studies are applied to the engineering problem, that is, the numerical simulation of the change in electron density in the ionosphere is carried out in consideration of the diffusion of rocket effluents released along arbitrary trajectory in upper atomosphere and their chemical reactions with the ionospheric constituents.

記 号

D_a : 電子の拡散係数, D_b : 磁場に垂直な方向の電子の拡散係数 (ボーム拡散係数), D_i : 気体 i の拡散係数, D_{ij} : 気体 i と気体 j との相互拡散係数, H : 酸素原子のスケールハイト, H_i : 気体 i のスケールハイト, I : 磁気伏角, K : 電離層内に存在するガスの種類数, $\vec{k}$: 高度方向の単位ベクトル, L_i : 気体 i の減少項, L_{e1} : 電子減少率, L_{e2} : 排出物による電子減少率, M : 電離層内を拡散するガスの種類数, $n[-]$: 一の密度 (例, $n[N_2]$: 窒素の密度), n_e : 電子密度, n_i : 気体 i の密度, n_0 : 通常状態の電子密度, P_i : 気体 i の生成項, Q : 電子生成率, Q_0 : 最大電離率, $R_1 \sim R_9$: それぞれの反応速度係数, S_i : 気体 i の排出項, T : 中性大気温度, $\vec{w}$: 中性風速度, $\vec{w}_i$: 気体 i の拡散速度, x : 水平距離 (南北方向), y : 水平距離 (東西方向), z : 高度, z_0 : Q_0 が現れる高度, α_i : 気体 i の熱拡散因子, χ : 太陽天頂角

1. は じ め に

近い将来に予想される本格的な宇宙時代においては、現在とは比較にならぬほど頻繁なロケットの打ち上げが必要とされるが、そうなれば地球大気中には大量のロケット排出物が放出されることになる。しかし、これが地球環境にいかなる影響を及ぼすかはほとんど未知であると言ってよく、したがって、ここに多くの研究課題が残されている。

現在知られているこの種の現象の一つに、いわゆる「電離層の穴」と呼ばれるものがある。これは 1973 年 5 月 14 日の Skylab-I の打ち上げの際に初めて観測されたもので、このとき電離層内のロケット軌道に沿

^{*1} 平成 3 年 10 月 31 日, 第 35 回宇宙科学技術連合講演会にて講演。平成 4 年 5 月 23 日原稿受理

^{*2} 日本大学理工学部航空宇宙工学科

^{*3} (株)トキメック

^{*4} 日本大学大学院

^{*5} 静岡大学工業短期大学部機械工学科

^{*6} 宇宙科学研究所

って電子が大幅に減少し、その影響は半径 1,000 km にまで及び、また回復までには 4 時間を要したとされている。その後の研究¹⁻³⁾の結果、ロケット排出物と電離層内の荷電粒子との間の化学反応が、こうした現象をもたらすことが知られるようになった。

本報告は、これらの基礎的な研究成果を、工学的な問題へ応用することを目的とする。すなわち、任意のロケット軌道に沿って放出されたロケット排出物(ここでは水および水素分子)の電離層内での拡散とそれに伴う化学反応を考慮して、そこでの電子密度の変動の数値シミュレーションを行った。

2. 電離層モデル

電離層の主成分は、酸素原子イオンと電子から成るプラズマである。それに加えて少数の中性分子が数種類存在している。これらの粒子は、電離層内で安定にその状態を保っているのではなく、絶えず太陽放射などのエネルギーを吸収して電離状態を増進させ、その一方、電離した分子や原子は中性分子と衝突して解離再結合反応を引き起こす。つまり、ある電子密度において、両者が釣り合うことによって電離層が形成されている。

2.1 太陽光線による電離 電離層の電離状態を記述するためのモデルには、チャップマン分布^{4,6)}を用いた。このモデルは、大気を等温の平衡水平大気と仮定し、高度と太陽天頂角 x を変数として電子生成率 Q を表したものである。すなわち

$$Q = Q_0 \exp \left[1 - \frac{z - z_0}{H} - \sec(x) \exp \left\{ -\frac{z - z_0}{H} \right\} \right] \quad (1)$$

ここでは、電離層の電子生成率 Q は、太陽による電離のみをもって表すものとする。

2.2 電離層内の電子減少反応 電離層内の電離状態を減ずる要因として、次のような反応を考えることができる。すなわち、イオンと原子の衝突によるイオン-原子交換反応

と、その生成化合物による解離再結合反応

である。前者の反応速度が後者のそれよりも遅いので、電子の減少に対しては、前者が律速段階反応とな

第1図 通常反応による電子密度分布

る。電子減少率 L_{e1} は、電子の密度と酸素原子イオンの密度が電離層内で同じであると仮定すると、律速段階反応の反応速度と中性分子密度および電離層の電子密度との積で表される。すなわち

$$L_{e1} = (R_1 \cdot n[\text{N}_2] + R_2 \cdot n[\text{O}_2]) n[e^-] \quad (6)$$

電子減少に関する反応はこれだけではないが、ここでは簡単のためこの2つの反応だけを取り扱う。

これらの反応を電離層内の「通常反応」と呼ぶことにする。通常反応は、後述の電子の拡散方程式に化学反応の項として組み込まれる。その拡散方程式を用いて、電離層の通常電子分布を計算することができ、高度に対する1次元分布を得る(第1図)。時間変動は太陽天頂角の変化に伴うものである。電子生成率 Q は米沢電離層モデル^{4,6)}の値を使用し、電子減少率 L_{e1} を計算するのに必要な中性粒子密度は CIRA 1972⁷⁾の外圏温度 1000 [K] モデルを用いた。また、場所としては鹿児島県種子島沖(北緯 30 度, 東経 135 度)を例にとった。

3. 排出物の拡散と電離層の穴

3.1 排出物による電子減少反応 ロケット排出物が引き起こす電子減少過程は、排出物の分子と背景分子によるイオン-原子交換反応

および、その生成化合物と電子による解離再結合反応

を通じて行われる。ただし、液酸・液水エンジンの理想的な燃焼を仮定して、分子状の水と水素のみを排出物とした。また、高高度ではロケットの進行速度とノ

ズル出口での噴気速度はほぼ等しいものとして噴気速度の影響は無視した。

排出物による電子減少率 L_{e2} は、(7)、(8)を律速段階反応として、

$$L_{e2} = \{R_5 \cdot n[H_2] + R_6 \cdot n[H_2O]\} n[e^-] \quad (12)$$

と表される。

前述の通常反応における電子減少率 L_{e1} に比べて、排出物による電子減少率 L_{e2} ははるかに大きいために電子減少率が高まり、電離層内の電子の生成と減少のバランスを崩す。これが、電子密度の著しい低下を引き起こす。

3.2 排出物の拡散方程式 K 種類のガスからなる大気中を拡散する中性ガスを考える。拡散する i 種のガスの拡散速度 w_i は、次式で表される⁵⁾。すなわち

$$\vec{w}_i = \vec{w} - D_i \left[\frac{1}{n_i} \nabla n_i + \frac{\vec{k}}{H_i} + \frac{1 + \alpha_i}{T} \nabla T \right] \quad (13)$$

ここで、拡散係数 D_i は、相互拡散係数 D_{ij} を用いて

$$\frac{1}{D_i} = \sum_{j=1}^K \frac{1}{D_{ij}} \quad (14)$$

のように表される。 i 種のガスについての連続の式は

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla(n_i \cdot \vec{w}_i) = S_i + P_i - L_i \quad (15)$$

で表される。

(15)に(13)を代入し、中性風、拡散係数および大気温度は高度のみの関数とし、また熱拡散因子の項を無視する^{8,9)}と、

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_i}{\partial t} = & - \left\{ w_x \frac{\partial n_i}{\partial x} + w_y \frac{\partial n_i}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} (n_i w_z) \right\} \\ & + \frac{\partial D_i}{\partial z} \left\{ \frac{\partial n_i}{\partial z} + \frac{n_i}{H_i} + n_i \frac{\partial}{\partial z} (\ln T) \right\} \\ & + D_i \left\{ \frac{\partial^2 n_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 n_i}{\partial z^2} \right. \\ & + \frac{1}{H_i} \frac{\partial n_i}{\partial z} + n_i \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{H_i} \right) \\ & \left. + \frac{\partial n_i}{\partial z} \frac{\partial}{\partial z} (\ln T) + n_i \frac{\partial^2}{\partial z^2} (\ln T) \right\} \\ & + S_i + P_i - L_i \end{aligned} \quad (16)$$

となる。ここで、 L_i は化学反応項であり、電子減少反応に伴う排出物の減少を表している。また、中性風を無視し、 n_i についてまとめると

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_i}{\partial t} = & D_i \frac{\partial^2 n_i}{\partial x^2} + D_i \frac{\partial^2 n_i}{\partial y^2} + D_i \frac{\partial^2 n_i}{\partial z^2} \\ & + \frac{\partial n_i}{\partial z} \left\{ \frac{D_i}{H_i} + D_i \frac{\partial}{\partial z} (\ln T) + \frac{\partial D_i}{\partial z} \right\} \\ & + n_i \left\{ \frac{\partial D_i}{\partial z} \frac{1}{H_i} + \frac{\partial D_i}{\partial z} \frac{\partial}{\partial z} (\ln T) \right. \\ & \left. + D_i \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{H_i} \right) + D_i \frac{\partial^2}{\partial z^2} (\ln T) \right\} \\ & + S_i + P_i - L_i \end{aligned} \quad (17)$$

となる。

3.3 電子の拡散方程式 電子の拡散には地球磁場の影響を考慮する必要がある。いま、扱う高度範囲では大気温度が一定であるとすると

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_e}{\partial t} = & Q - L_{e1} - L_{e2} \\ & - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (n_e \cdot w_{ex}) + \frac{\partial}{\partial y} (n_e \cdot w_{ey}) \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial z} (n_e \cdot w_{ez}) \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

ここで、 Q, L_{e1} は通常反応の化学反応項であり、 L_{e2} は排出物による電子減少反応項である。また、電子の拡散速度 w_e は

$$\begin{aligned} w_{ex} = & -(D_a - D_b) \sin I \cos I \left(\frac{1}{n_e} \frac{\partial n_e}{\partial z} + \frac{1}{2H} \right) \\ & - (D_a \cos^2 I + D_b \sin^2 I) \left(\frac{1}{n_e} \frac{\partial n_e}{\partial x} \right) \\ w_{ey} = & -D_b \left(\frac{1}{n_e} \frac{\partial n_e}{\partial y} \right) \\ w_{ez} = & -(D_a \sin^2 I + D_b \cos^2 I) \left(\frac{1}{n_e} \frac{\partial n_e}{\partial z} + \frac{1}{2H} \right) \\ & - (D_a - D_b) \sin I \cos I \left(\frac{1}{n_e} \frac{\partial n_e}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

と表される。 I は磁気伏角である。

反応の結果減少する分子と電子の数は一致するから、(17)と(18)の電子減少率の関係は、次のように表せる。すなわち

$$L_{e2} = \sum_{i=1}^M L_i \quad (20)$$

この電子の拡散方程式と、取り扱う排出物の種類数だけの拡散方程式を連立して解くことにより、電離層内での電子消滅を計算することができる。

4. 計算条件

まず、計算を行うに当たって設定した条件および仮定について述べる。

ロケット排出物の静止大気中での拡散を想定し、計算領域として高度方向に 200 km から 400 km、水平方向に 800 km × 200 km の 3 次元空間をとった (第 2 図)。数値計算には差分法を用い、空間ステップは 20 km とした。

電子の拡散係数 D_a は米沢電離層モデル^{4,6)}の値を使用し、拡散係数 D_i とスケールハイト H_i を計算するのに必要な中性粒子密度および大気温度は CIRA 1972⁷⁾ の外圏温度 1000 [K] モデルを使用した。

地理的位置は、太陽天頂角、磁気伏角を決定するのに必要であり、北緯 30°、東経 135° (鹿児島県種子島沖) の地点を例にとった。

第2図 軌道の設定および観測点の配置

第3図 排出物 (水) の等密度線 (○印は軌道通過点)

計算開始時間を昼夜平分時の正午と仮定して、太陽放射による電離が盛んな時間帯の計算を行った。

ロケット排出物の放出は、ロケットの前述の計算領域への進入から退出までの間、一定の割合で行われるものとした。したがって、後述の計算結果において排出直後と呼ぶのは、この計算領域への進入直後のことである。排出物は水分子と水素分子とし、その存在比は数密度で3:1とした²⁾。また、その量は軌道1 kmあたり 1.2×10^{26} 個であり、ロケットの速度は秒速4 kmの等速度とした。

5. 計算結果

5.1 軌道高度の変化による影響 ロケットがガスを放出しつつ加速している状態で、完全な水平軌道をとることは考えにくい、ここでは例として第2図の(A), (B), (C)のように高度の異なる水平軌道を仮

定し、軌道高度の違いが排出物の拡散と電子密度分布に及ぼす影響を調べた。計算結果は、第2図中のV平面内の水および電子の等密度線図として第3, 4図に示される。ただし、V平面はY軸に垂直であり、前述の計算領域を2等分する面である。また、静止大気中での拡散を仮定したので、水分子の等密度線図(第3図)には、軌道を含む半平面の結果だけを示したが、地球磁場の影響のため拡散に異方性を有する電子の等密度線図(第4図)には、軌道を中心として左右200 km範囲の結果を示した。このとき、磁力線はV平面内にあり、磁気伏角は45度である。次にV平面内に①から⑨の観測点を設定し(第2図)、各点における排出物と電子密度の時間変化を第5, 6図として示す。

第3図は排出物の等密度線である。ただし、これは数密度比3(水):1(水素)で放出された排出物のう

第4図 電子の等密度線 (○印は軌道通過点)

第5図 排出物密度の時間変化 (点線は(A)軌道, 実線は(B)軌道, 鎖線は(C)軌道)

ちの水分子についての例である。水と水素では反応速度係数の大きさはあまり変わらないが、水の方が量が多いことと拡散速度が小さいことのため、結果的に電子密度減少に大きく寄与することがわかっている。排出

物拡散速度は周辺大気密度と排出物密度の比によって決まるため、周辺大気に比べて極めて高密度である排出物は非常に速く拡散するが、第3図のどの場合にも上空方向に特に大きく拡散する傾向が見られる。これ

は高度が高い所ほど周辺大気密度が低く、拡散速度が高くなるためである。

上の排出物の拡散に伴う、電離層内の電子減少の様子を示したのが第4図である。図中に現れた密度の低い部分が「電離層の穴」である。また電子の等密度線が水平層を成している所は、まだ電子減少を引き起こすほどの排出物が到達していないことを示す。放出から10分後(図の左側)においては軌道を中心として電子減少が生じているが、1時間後(図の右側)には次第に高い高度にその影響が広がっていることが示されており、排出物の拡散状況と電子減少の傾向は一致している。

第5図は各観測点における排出物密度の時間変化である。横軸は時間[h]、縦軸は排出物の密度の対数値である。

排出直後についてみると、軌道に近い観測点①、④、⑦に対して軌道高度の違いによる差違がはっきりと現れている。すなわち、観測点①においては(A)軌道(340 km)からの排出物の密度が最も高く、観測点⑦においては(C)軌道(260 km)からの排出物の密度が最も高い。しかし、軌道からの水平距離が大きい観測点②、⑤、⑧においては高度の高い(A)軌道(340

km)からの排出物の密度が高い。水平距離がさらに離れた観測点③、⑥、⑨においてはその傾向はさらに顕著になる。

ところが排出から5、6時間経過すると、全ての観測点において逆に高度の低い(C)軌道からの排出物の密度が他からのものより高くなる。このことは、次の第6図の電子密度変化を参照することにより理解し易くなる。すなわち、高い高度で放出された排出物はすばやく拡散し、その結果短時間の内に電子密度の回復が行われるのに対して、低い高度で放出された排出物は拡散が遅いため、電子密度の減少の割合は小さいかわりにその影響が長時間続くことになる。

第6図について、さらに説明を加える。ただし、図中の横軸は時間[h]であり、また縦軸は通常状態の電子密度で無次元化されている。

まず、電子密度は全体的には4時間程度で回復することが示されている。軌道に近い観測点①、④、⑦では、排出物の放出と同時にほぼ壊滅的な電子減少を起こしているが、水平距離が大きくなるにつれ減少の傾きはゆるやかにまた減少量も小さくなってゆく。

また、同じ水平距離にある観測点でもその高度が異なると、電子減少の割合にかなりの変化が生じている。

第6図 電子密度の時間変化 (点線は(A)軌道、実線は(B)軌道、鎖線は(C)軌道)

このことは、軌道からの水平距離が大きい観察点において特に顕著である。観察点③と⑨を比較すると、20パーセント以上も③の減少量の方が大きい。

さらに第6図には、放出から5, 6時間後に電子密度の回復が鈍る傾向が現れている。特に、低い観察点⑦, ⑧, ⑨においてその傾向が強い。本計算例では、放出時刻が昼夜平分時の正午と仮定されているので6時間後には日没を迎える。そのため、新たな電子生成が抑制されて電子密度が回復しにくくなるためである。

5.2 軌道経路角の変化による影響 本モデルは3次元モデルであるため、様々な軌道に対して計算が可能である。例として、第7図の(D), (E), (F)のように0度, 30度, 60度の経路角を有する軌道についての計算を示す。結果を、軌道を含む垂直面(第7図のS平面)内の電子の等密度線として第8図に示す。

第7図 軌道の設定

第8図 電子の等密度線 (鎖線は軌道)

(a) 計算領域進入後6分

(b) 計算領域進入後16分

第9図 排出物(水)の拡散

2分後(図の上側)には, 軌道に沿って電子の減少が現れている. 10分後(図の下側)になると, 上下方向に電子密度の減少域が広がり, 大きく口を開いた「電離層の穴」を形成する. 特に, 経路角が急な場合(第8図(f))には, 局在的で電子減少度の急激な穴を形成している.

5.3 実際の軌道についての例 上では, 事柄を単純化するため仮想的な軌道についての計算結果を示した. 最後に, より実際の軌道について計算した例を, 排出物(水)の3次元的な密度分布として示す(第9図). 用いられた軌道は, Skylab-Iの打ち上げ軌道の一部分であり, 地表に対する経路角は約15度である. また, 排出物の量は水については軌道1kmあたり 9.0×10^{27} 個, 水素については 3.0×10^{27} 個である.

6. ま と め

ロケット排出物が環境に及ぼす影響を見積るための1つの目安として, 任意の打ち上げ軌道に沿って放出されたロケット排出物の電離層内での拡散と, これに伴う化学反応の結果生じる電子密度の変動の数値シミュレーションを行った. その結果, (1)低い軌道上で放出された排出物の電子密度減少への影響は, 度合としては比較的小さいが長時間にわたること, (2)逆に高い軌道で放出された場合には, 度合は大きいと比較

的短時間の内に回復する傾向があることがわかった.

また, 今回は電離層内における排出のみを考えたが, 排出物の拡散が上方に向かって大きいことを考えると, 電離層より低い軌道上から放出された排出物もやがては電離層に影響を及ぼすことが予想される.

参考文献

- 1) Mendillo, M., Hawkins, G. S. and Klobuchar, J. A.: A Sudden Vanishing of the Ionospheric F Region Due to the Launch of Skylab, *J. Geophys. Res.*, **80**, 16 (1975), pp. 2217-2228.
- 2) Zinn, J. and Sutherland, D.: Effects of Rocket Exhaust Products in the Thermosphere and Ionosphere, *Space Solar Power Review*, **1** (1980), pp. 109-132.
- 3) Zinn, J., Sutherland, D., Stone, S. N. and Ducan, L. M.: Ionospheric Effects of Rocket Exhaust Products HEAO-C Skylab, *J. Atmos. Terres. Phys.*, **44**, 12 (1982), pp. 1143-1171.
- 4) Yonezawa, T.: Theory of Formation of the Ionosphere, *Space Science Rev.*, **5** (1966), pp. 3-56.
- 5) Bernhardt, P. A.: Three-Dimensional Time-Dependent Modeling of Neutral Gas Diffusion in a Nonuniform, Chemically Reactive Atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **84**, A3 (1979), pp. 793-802.
- 6) Ferraro, V. C. A.: Diffusion of Ions in the Ionosphere, *Terr. Mag. Atom. Elec.*, **50** (1945), pp. 215-222.
- 7) COSPAR International Reference Atmosphere 1972, Pergamon Press, Oxford, 1972.
- 8) 永田 武, 等松隆夫: 超高層大気の物理学, 裳華房, 東京, 1973.
- 9) 堀内剛二: 超高層物理, 共立出版, 東京, 1969.