上層大気中のイオンの質量分析

Mass Spectrometry of the Ionized Constituents of the Upper Atmosphere

伊藤 富 造*

TOMIZO ITOH

1. 緒 言

上層大気中に生じているいろいろな物理現象をしらべるためには、まず上層大気がどのような物質から成立っているかを知らねばならない。その意味で第二次大戦後まずロケットが科学観測に利用できるようになったのは、ただ上層大気物理学にとって画期的なことがらであっただけでなく、さらに人工衛星が次々と宇宙空間の実態を探り出すようになって、あらたに宇宙空間科学という広大な学問分野が生れた。これら飛翔体により日々新しい観測事実が提供され、宇宙空間の物理像は次々に書きかえられつつある。

本文の主題である上層大気の組成もその例外ではなく、飛翔体技術、質量分析技術のこゝ、二年の急速な進歩にともなう、近々数年の間にどの位新しいデータが得られるかは全く予測を許さない状態にある。また上層大気の組成は太陽活動度に大きく依存しており、日変化、季節変化、太陽の11年周期にともなう変化が考えられている。これらの変化の状態の観測は始められたばかりであり、今後の発展に大きな期待がもたれている。

この小文ではまず飛翔体用の質量分析器の特徴について述べ、次に従来の観測結果により新しくクローズアップされている上層大気物理学上の二、三の問題について解説したい。

2. 飛翔体搭載用質量分析器

現在研究室や工場では非常に分解能や感度の高い分析器が用いられているが、もちろんこのような大型の装置をそのまゝ飛翔体にのせられる筈はなく、特有の

技術が必要となる。飛翔体搭載用観測機器に共通の技術的要請を先ずあげると、

i) 小型、軽量であること。

現在各国で使用されているロケットの payload はふつう数10kg である。大きさも直径数10cm程度であり、しかもこの中に数種の観測機器が同時に搭載されることが多い。したがって各機器はできるだけ小型で、軽量であることが先ず要請される。最近の我が国の例では特殊なものは別として、電子回路部を含めて重量5 kg,あるいはそれ以下になっている。衛星搭載用ともなればさらに制約はきびしい。使用電力も数 Watt 以下である。

ii) 振動、衝撃に耐えること。

これも当然のことではあるが、ロケット発射時の数10Gにおよぶ急加速や、推進薬の燃焼、各段の切離しにともなう振動、衝撃に十分耐えられる検出器、電子回路でなくてはならない。実際各国の実験でも、この振動、衝撃により観測不能となった例は少なくない。通常は打上げ前に振動試験機等でテストが行なわれ、合格したもののみが搭載されるのであるが、それでも不測の事故は絶えないようである。

iii) 掃引速度が速いこと。

ロケットや衛星の速度は1~10km/secの程度であるから、質量分析器のように掃引を必要とするものは掃引時間が1秒以下でないと空間的な分解能が悪くなる。特に後にのべる Narcisi の観測のように電離層の微細構造をしらべたい時にはさらに高速の掃引が必要となる。一方観測されたデータを地上に送信するテレメータの応答速度にも限界があるので、掃引時間をむやみに短くすると却ってデータの忠実度が失な

* 東京大学宇宙航空研究所 (東京都目黒区駒場町)

Institute of Space and Aeronautical Science, University of Tokyo. (Komaba, Meguro-ku, Tokyo)

われてしまう。掃引時間をきめるにはこの二つの条件を考慮しなければならない。

次に質量分析器特有の問題がいくつか考えられる。

i) 飛翔体と空間との間の電位差

電離層中を飛翔するロケットや衛星は周囲のプラズマより 1 volt 程度負の電位になる。したがって正イオンは加速され、負イオンは減速されるので、電界型の分析器を使用するときは結果の解析に注意を要する。

ii) 進行方向と取入口の角度

この角度により分析結果は大きく影響される。特に角度が180度近くなると飛翔体の陰の中で測定することになり、極端に誤った結果を与える。

iii) 飛翔体からの放出ガス

これは特に中性分子の分析に大きく影響する。今までの衛星による観測結果からみると、約1カ月間は地上から持ち上げたガスの放出が続くらしい。したがって極めて短時間(数分)で終るロケットでの中性分子の分析には特に注意を要する。

iv) 下部電離層でのガス圧対策

D 層附近ではイオンや中性分子の平均自由行程は分析器の寸法よりはるかに短かいので、真空ポンプを分析器に併用しなければならない。今までイオンポンプ¹⁾とソーブションポンプ²⁾を用いた例がある。E 層に入っても高電圧を使用する分析器では放電が起ってしまうことがあり、注意が必要である。

これまでに述べたいろいろな制約を受けながらも、現在までに数種の質量分析器が使用されている。それらについて簡単にふれてみよう。

i) 偏向型

偏向型は主として Nier 教授により開発使用されており、昨年本誌に同教授による詳しい解説¹⁾が掲載されているので説明は省略する。

ii) Bennett 型

この型の特長は構造が簡単でしかも取入口を広くすることが出来、したがって電流効率がよいので搭載機器化し易いことである。1954年に Johnson³⁾等が最初にこの型で上層大気の分析を試みて以来、今日に至るまで各国で行なわれた観測の多くは Bennett 型を用いているのもこのためであろう。しかし分解能や感度などで次に述べる四重極型に劣るので次第に大勢は四重極型に移りつつある様に思われる。

iii) 四重極型

1963年に Narcisi²⁾らは四重極型質量分析器をはじめて上層大気中のイオンの分析に使用し、成功した。

この型の搭載機器としての利点は、磁場が不要であり、軽く、構造が簡単で機械的強度も強くできること、またイオンの初期条件は透過率と分解能に影響するだけで、質量の表示には関係しないこと、電子回路も比較的簡単であること、などである。しかし一方直流電圧と高周波電圧との比を正確に一定に保ちながら、それらの絶対値を広範囲に変化させる必要があること、しかも直流電圧より高周波電圧の方が数倍以上大きくなければならないことなどが欠点で、特にその構造寸法の精度や付属回路にきびしい条件が要求される。

Narcisi らはこれらの欠点を克服して搭載用四重極型分析器を完成し、液体窒素を用いたソーブションポンプや電子増倍管を併用して高感度、高分解能の下部電離層用質量分析器として用いている。(Fig.1)

Fig.1. A Cross Section of the Quadrupole Mass Spectrometer in the Rocket Sampling Configuration.

iv) そ の 他

これらの他にオメガトロン型⁴⁾も試作されたが、殆んど用いられていない。また逆電界型イオントラップもイオンの質量分析に用いられることもあるが、測定精度や信頼性の点で本来の質量分析器より劣っている。

3. 超高層大気内のイオン組成

Fig.2 は現在までの観測結果を総合して作られた、イオン密度の標準的な分布である。地上から500km附近より上の部分をふつう 外気圏(Exosphere)とよんでおり、大気組成は主に酸素原子、ヘリウム原子、永

Fig.2. Density of ionospheric ions at altitudes between 70 and 1000 kilometers in the daytime.

素原子，およびこれから生じた正イオンと電子である。この中で最も重い酸素原子と酸素イオンは外気圏の底での主要成分となっているが，高さが増すにつれてヘリウムの原子，イオンが主となり heliosphere とよばれ，さらに高いところではいちばん軽い水素の原子とイオンが大気の大部分を占めていて protonosphere とよばれている。これら原子，イオンの高さに対する分布は大気温度とともに変化する。であるから太陽活動度の盛んな年と静かな年では分布に違いが生ずる筈である。実際太陽活動度の盛んな年であった 1960 年⁵⁾ の質量分析器による観測では heliosphere の存在が認められているが，その後の観測では Fig.2 のように protonosphere からすぐ酸素原子が主成分をなしている層に移行している。protonosphere の底は 1960 年には 3000 km であったが，1964～66 年⁶⁾ の観測では 500～1000 km にまで下って来ている。太陽活動度の低下とともに heliosphere が消失することは理論的にも予想されていた。しかし前回の極大期にはまだ観測技術が初期の段階にあり，また観測回数も少なくデータの間のくいちがいが大きく，heliosphere の存在は確認されるまでには至らなかった。

た。1969～70 年の太陽活動の極大期に現在の進んだ技術でふたたび heliosphere の存在が観測されるかどうか興味あるところである。この期間を IASY (International Active Sun Years) と名付けて国際的な協力により飛翔体による観測，地上観測を行なって太陽—地球間のいろいろな物理現象を研究する計画が進められており，直前の太陽活動極小期 IQSY (International Quiet Sun Years)，前回の太陽活動極大期 IGY (International geophysical Years) 中の観測結果と総合すれば太陽活動 1 周期間の太陽，超高層物理現象の変化の様相がかなり明らかになるであろう。

上層大気中のヘリウムについてはまだ解決されていない大きな問題がある。現在大気中には地表から放射性物質の崩壊によって生ずるヘリウムが毎秒 $2 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ の割合で供給されていると考えられている。したがって大気中のヘリウムの含有量が定常的であるためには平均してやはり同じ割合でヘリウムが大気圏外に失なわれていかなければならない。しかしヘリウムイオンは地球磁場の作用を受けてその磁力線のまわりをらせん状に運動するように拘束を受けるので，地球の勢力範囲外に飛出すことはないと考えてよい。したがって地球からのヘリウムの脱出は中性原子の形で，しかも地球の重力の拘束を断ち切るに必要な最小エネルギー

2.4 eV 以上の運動エネルギーをもつものに限られる。けれども上層大気温度は 1000°K～3000°K であるので熱的な分布からはこのような運動エネルギーをもつヘリウム原子の数はごく少数しか考えられない。そこで Bates と Patterson⁷⁾ は次の様な反応により高速ヘリウム原子が生成されるとした。

この反応にともなって生ずる 5.9 eV のエネルギーの中から 2.4 eV をこえる運動エネルギーを与えられたヘリウム原子は脱出の可能性をもっている。この反応の反応係数 k_1 はその後の Ferguson^{8), 9)} らの実験室での測定によると

$$k_1 = 1.1 \sim 1.5 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1} \quad (300^\circ \text{ K において})$$

の程度である。

一方 Sayers,¹⁰⁾ Ferguson^{8), 9)} によれば

の反応の方がむしろ反応係数 k_2 はやや大きく，

$$k_2 = 1.3 \sim 1.7 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1} \quad (300^\circ \text{ K において})$$

であり、しかもこれらの反応が生ずると考えられる 300km 以上では N_2 と O_2 の量の比は1よりはるかに大きいので、(1)の反応の結果でヘリウムが大気圏外へ脱出する可能性は極めて少ない。

また一方 Bauer¹¹⁾ によれば(2)の反応がそのまゝ生じているとすれば実際観測されているヘリウムイオンの量から逆算すると、(2)の反応係数は $10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$ 以下でなければならず、Sayers, Ferguson らの室内実験の結果と大きくくい違っている。

いずれにせよヘリウムの脱出の問題は全く解決されていない。おそらくまだ知られていない反応が生じているのであろうが、IASY 期間中にヘリウム原子、イオンの量の直接観測がより精しく、より数多く行なわれることが解決のいとぐちとして必要であろう。

次の話題ははるかに高度の低い 100km 附近でのスボラディックE層中でのイオンの分析結果、特にその中の金属イオンについてである。

スボラディックE層とは 100km 附近の高度に短時間出現する電離層で、電子密度は $10^5 \sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$ でかなり高く厚さはたかだか数kmである。この層については以前から地上からの電波観測やロケットによる電子密度の直接観測が多数行なわれ、またその生成機構についてもいくつかの理論がたてられていた。

Istomin¹²⁾ は1960年に高感度 Bennett 型分析器で 100km 附近で昼間 10^4 cm^{-3} 程度のカルシウム、マグネシウム、鉄のイオンを検出し、これらは meteoric origin のものであろうと推論した。また夜間の観測でも 103~126km で質量数 42 のイオンを検出し、これを $Mg^{26} O^{16}$ と考え、これから全 MgO の密度は 10^9 cm^{-3} 程度と推定している。

次いで1963年に Narcisi²⁾ らが四重極型分析器に電子増倍管、ソーブションポンプを組合わせて D 層および E 層下部 (64km~111.7km) の観測を行なった。このロケットにはラングミュア探針も搭載され、電子密度、イオン密度の同時観測を行なっている。その後最近にいたるまで毎年10機近くのロケットをこの観測のために打上げ、下部電離層のイオン組成の時間変化、日変化、季節変化について多くのデータが得られつつある。金属イオンについては後にくわしく述べるが、それ以外に 85km 以下の D 層中では H^+ (H_2O)_n の型のイオンが主になっていることがわかり、また昨年からは負イオンの分析もはじめられ、 16^- , 35^- , 37^- , 46^- が検出されている。これらのデータは今まであまり手をつけられていなかった D 層の物理に新たな問題を

提供している。

Narcisi¹³⁾ によれば金属イオンおよび金属酸化物のイオンは常に 82km~120km の高度で観測され、時には 140km でも検出されることがある。95km 附近の厚さ約 10km の層は主としてマグネシウムと鉄とからなり、このほかに少量のナトリウム、アルミニウム、カルシウム、ニッケルを含んでいる。これらの金属イオンの存在比はコンドライト隕石中の存在比に極めて近い。この層はかなり安定に存在するが、これより高いところにやゝ不安定ではあるが主としてシリコン、マグネシウム、鉄から成る薄い層が存在する。これらの金属イオンが meteor origin であることは流星群が地球に遭遇している時にはイオン量が増大することからもいえる。

一般に E 層では NO^+ , O_2^+ がイオンの主成分であるが、金属イオンの量が多くなりしかも薄い層に集中してスボラディックE層として電子密度の観測でも認められるほどになると分子イオンの量はその場所では著しく減少している。今までの観測ではスボラディックE層はすべて金属イオンから成っており、分子イオンで形成されたスボラディックE層は見出されていない。

Fig. 3 The positive ion composition during the Leonid meteor shower in percent of the total ion density.

Fig. 3 は1965年の獅子座の流星群の中でとられたデータである。この図では金属イオンとして一括して示されているが、主成分は鉄とマグネシウムで、他に少量のナトリウム、アルミニウム、カルシウムを含んでいる。94kmでの全イオン密度に対する百分率は、 Na^+ (0.55), Mg^+ (10), Al^+ (0.58), Ca^+ (0.26), Fe^+ (18.8) であった。しかし 98kmの金属イオン層の中では

$$[\text{Mg}^+] / [\text{Fe}^+] = 1.3 \pm 0.1$$

で、軽い Mg^+ の量が多くなっていた。111kmに近い層ではシリコンが主成分となっている。(昨年の観測ではこのシリコン層は上下に移動することが見出された。) 特に注目されるのは 98km 附近で前述のように金属イオン量の極大が丁度 NO^+ と O_2^+ の極小と対応していることである。

Narcisi はこの分子イオン分布の極小について次の様な考察を行なった。

荷電交換反応

が生じているものとしてその反応係数 K_3 と金属中性原子密度 $[\text{M}]$ との積 $K_3[\text{M}]$ を観測データから逆算すると 98km では(3)に対しては $K_3[\text{M}] = 1.2 \times 10^{-2} \text{ sec}^{-1}$, (4)に対しては $K_4[\text{M}] = 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ となり、 NO^+ に対する反応の方が速いことがわかる。また同様な計算を各高度について行なうと、イオンのみではなく中性金属原子自体が層を形成していることになった。

ここで得られた荷電交換による分子イオンの損失の割合は再結合による損失の割合よりも大きくなっている。したがって中性金属原子の層が存在しているところで分子イオンが形成されれば金属原子層の部分だけ分子イオンの量が減少し、逆に金属イオンの層が出来、それがスプラディックE層となる。

この様な考え方を立証するために Narcisi は中性大気分析器、イオンの分析器、電子、イオン密度測定器、風の観測器を同一のロケットに搭載して日出、日没の前後に観測を行なっている。この観測は季節毎に繰返され、現在もなお継続しているが、¹⁴⁾ 結果の詳細はまだ発表されていない。この一連の観測結果が整理されれば、これまで決定的な説明のなかったスプラディックE層の生成機構の解明に極めて有力な手がかり

を与えることになるだろう。

4. 結 言

これまでに述べたように、質量分析器による上層大気中のイオン組成の研究はようやく本格的な段階に入りつつある。しかもイオン組成には時間変化、日変化、季節変化、年変化があり、また緯度、高度によっても変る。したがってその全貌をとらえるのは容易なことではなく、分析器の感度、分解能の向上はもとより、観測をルーチ的に数多く行なうことが望ましい。その意味でたかだか数分間の測定しか出来ないロケット観測よりも、人工衛星による観測の方が格段に有利である。衛星で観測を行なえば長時間にわたり地球上各地の上空での分析をくり返し行なうことができ、このために地域的な分布や、ほぼ同一地点での時間変化も測定できる。また衛星はふつうだ円軌道をとるのである程度高度変化をも知り得る。特に中性大気分析を行なう場合には約1カ月後には地上からもち上げたガスの影響もなくなるのでロケットに比べてはるかによい条件で測定できることになる。

これらの点から測定上からは衛星による観測の方がはるかに有利であるが、一方衛星の打上げには多額の費用を要するし、重量、電力等の制限もきびしい。また準備期間として少なくとも3～4年は必要である。この様な理由から比較的容易に上げられるロケットによる観測の方が実際には数多く行なわれているのである。

わが国でも今までに畚野氏が Bennett 型分析器を用いて3回ロケット観測¹⁵⁾を行なっており、また今後のロケット、衛星による観測計画も進められつつある。しかし本文中にのべたことからわかるように、すぐれた観測結果を得るためにはより高精度の質量分析器の開発がわが国でも行なわれなければならない。その意味で質量分析の専門の方々がより積極的に飛翔体搭載用質量分析器の研究に御協力下さることを切望する。

(昭和43年7月1日受理)

文 献

- 1) A.O.Nier, 質量分析, 15, 67(1967).
- 2) R.S.Narcisi and A.D.Bailey, J.Geophys. Res., 70, 3687(1965)
- 3) C.Y.Johnson and E.B.Meadows, J.Geophys. Res., 60, 193 (1955).
- 4) H.B.Niemann and B.C.Kennedy, Rev. Sci.

- Instr., **37**, 722 (1966)
- 5) W.B.Hanson, J.Geophys. Res., **67**, 183 (1962)
 - 6) J.H.Hoffman, Science, **155**, 322 (1967)
 - 7) D.R.Bates and T.N.L.Patterson, Planetary Space Sci., **9**, 599 (1962)
 - 8) E.E.Ferguson, F.C.Fehsenfeld, D.B.Dunkin, A.L.Schmeltekopf, and H.I.Schiff, Planetary Space Sci., **12**, 1169(1964)
 - 9) F.C.Fehsenfeld, A.L.Schmeltekopf.P.D.Goldan, H.I.Schiff, and E.E.Ferguson, J.Chem. Phys., **44**, 4087(1966)
 - 10) J.Sayers and D.Smith, Discussions Faraday Soc., **37**, 167 (1964).
 - 11) S.J.Bauer, J.Geophys. Res., **71**, 1508(1966).
S.J.Bauer, Ann. Geophys., **22**, 247 (1966).
 - 12) V.G.Istomin, Space Reseach, Vol. III, 209 (1963)
 - 13) R.S.Narcisi, Space Reseach, Vol. VIII, (1968)
 - 14) United States Space Science Program, Report to COSPAR (1968)
 - 15) 平尾邦雄, 宮崎 茂, 春野信義,
河島信樹, 宇宙観測シンポジウム (1967)