宇宙科学

(地球周辺の空間)

福島 直*

(昭和41年10月3日受理)

Space Science

(Earth's Environment)

Naoshi FUKUSHIMA

(Geophysics Research Laboratory, University of Tokyo, Tokyo)

(Received Oct. 3, 1966)

1. 最近の宇宙科学の発展と地球大気研究

地球超高層空間や宇宙空間の状態を知るためには、その状態を反映している何らかの情報を我々が把握しなければならない。我々の地球は厚い大気に包まれているので、ロケット、人工衛星のような飛道具が出現するまでは我々は地球大気の底にとどまっていた、地球表面にまで到達してくれるようないろいろな情報を受信して、それを解析し研究して、高空に関する知識を組みあげてきた。厚い大気を通してはるか彼方から地球表面にまで到達するものは、可視光線および超短波域電波、超低周波電磁波と宇宙線とであった。このうち可視光線を除く三つのものはいずれも研究の歴史が比較的浅く、宇宙線は1930年頃から具体的に問題になったものであり、超短波域電波は第二次大戦中、超低周波電磁波は1953年になって研究手段の仲間入りをしたものである。広い波長にわたる自然ふく射のうち、上記四種類の電磁波および粒子線以外のものは地球をかこむ大気中で吸収されてしまうので、情報が地球表面にまで届かない。そこで古くは気球をあげて、ともかくできるだけ高空に昇って、捕えう情報の範囲を少しでも広げようと努力した。1946年にロケットが実用に供されて、我々が把握できる情報の範囲が急にひろめられ、また人工衛星によって地球下層大気の影響を受けずに自然現象を直接に長時間にわたって観察しうようになり、地球を囲む大気に対する研究に

新時代が訪れた次第である。

地上での観測は、なにも情報の到達を消極的に受けているものばかりでなく、今世紀に入ってから電波技術の発達に伴ない、電波を地上から発射してその反射波を受け、電波に対する反応をみて大気中での電気的な状態を知る方法が広く行なわれてきた。電離層研究、レーダーによる大気の状態の研究はその代表的なものであり、最近ではレーザーによる研究も発達しつつある。しかしこれらの技術によっても地球大気の性質のすべてを知るわけにはゆかず、ただ地球大気の性質の一側面が知られるにすぎない。

地球周辺の空間に対する研究を行なうには、世界各国が協力して行なってはじめて能率をあげることができる地球上のある狭い一角において綿密な観測を続けることももちろん必要ではあるが、同種の観測を世界各地で行なってこそ、地球周辺の空間における現象をしっかりと把握することができる。1957年～58年に行なわれた国際地球観測年は、このような趣旨で計画され実施されたものであり、世界で64カ国が政治形態や思想の問題をぬきにして真に科学的目的のために協力したのである。このとき地球周辺空間研究のための具体的観測対象として取り上げられたのは気象、地球磁気変動、極光、大気光、電離層、太陽活動、宇宙線および放射能観測である。ロケットおよび人工衛星による観測を推進することもその事業の一環であったし、また南極観測も同様である。国際地球観測年期間中に世界各地で得られた観測資料はいまなお科学者の手によって引き続き解析がすすめられ、貴重

* 東京大学理学部地球物理研究施設 (東京都文京区弥生2-11-16)

な成果がつつぎに出されているのである。国際地球観測年事業の大成功のあと、そのような国際協同観測態勢をできるだけ維持しようとの希望により、1964年～65年は太陽活動極小期国際協同観測をも実施した。

とくに宇宙科学のための国際組織としては、1959年に国際学術連合 (ICSU) に宇宙空間研究特別委員会 (COSPAR) がつくられ、毎年1回総会およびシンポジウムを開いて新しい成果を互いに紹介しあい、また国際協力を推進している。1968年5月にはその総会を東京で開くことになっている。

現在は宇宙空間へ直接探究の手をのばし、また宇宙航行技術などの開発が大いに進められているので、宇宙時代ともいわれている。ロケットが地球の超高層大気研究にはじめて用いられたのが1946年、人工衛星がはじめて打ちあげられたのが1957年であり、その頃から地球をかこむ大気に関する知識が急に増大し、いままで想像の域を出なかったことも実証されるようになり、また全く予想をしていなかったようなことが発見されたりして、地球超高層大気に関する研究は長足の進歩をとげた。本稿では、最近の技術進歩に伴って知られてきた地球大気および地球周辺空間に関する知識の概略を紹介して読者の参考に供したい。

2. 地球大気の層構造

地球大気は下層から上層まで性質がちがう層が重なっている。大気の名づけ方にもいろいろあり、その性質に着目して命名するので、どれが標準的な呼び方であるとはいえない。ここでいくつかの代表的な呼名をあげ、その理由を簡単に附記してみる。

Troposphere (対流圏, 地上 0～約13km) 大気の上下攪拌運動が大きい。地上での天気や気候を左右する力学的、熱力学的、電気的現象はほとんどこの領域でおこっている。

Stratosphere (成層圏, 地上約13～50km) 雲もなく比較的安定している層である。水平方向には強い気流が流れているところがある。

Mesosphere (中間圏, 地上 約 50～80km) 温度が極大を示すあたりを中心としての称。

Thermosphere (熱圏, 地上 80km以上) 温度が上ほど高くなっている。

Ozonosphere (オゾン層, 地上 20～70 km) オゾンがかなり含まれているので、太陽紫外線を吸収し、また地球からの赤外線放射を吸収し、地球を温室に入れるような効果を及ぼしている。

Chemosphere (化学圏, 地上 20～110km) 化学的反応とくに光化学反応が活発な領域。

Ionosphere (電離層, 地上90～300km) 遊離した電子やイオンが比較的多く含まれている領域、地上100kmを中心とするE層、地上200～250kmを中心とするF層に分けられる。F層は夏季昼間は2層に分かれ、下からF₁層、F₂層とよんでいる。

Exosphere (逸出圏, 地上 300 km以上) 大気が稀薄になるので、上方に向けて運動する中性気体粒子が地球の重力にさからって逸出しようとする領域。

Magnetosphere (磁気圏, 地上 200km以上) 地球磁場がその領域での運動や現象に根本的な役割を果しているなのでこの名を用う。

このほか、地球大気組成が地上100kmあたりまでは主成分に関する限りほぼ一定なので **Homosphere**、それより上部を **Heterosphere** とよぶこともある。

図1 地上80kmまでの気圧分布。

図2 地上80kmまでの年平均温度の高度分布。

3. 地球大気密度・温度・組成などの高さ分布

地上数十kmまでの大気については、ロケット観測の初期から観測資料が集積され、まとまった結果が出されている。図1および図2に地上80kmまでの気圧と温度の高さ分布を示す。ロケット観測の初期においては、空盒気圧計、ピラニゲージ、電離真空計など、いろいろな測定範囲に適する計器をロケットに搭載して、いろいろな工夫をこらして観測が行なわれた。わが国でも1958年頃、富永が中心となってカップ6型ロケットでピラニゲージによる気圧測定を行なった。ロケット用気圧計とはいっても、地上での概念からすれば、真空計と称するものを高空での気圧測定には用いている。図3および図4は地上30~300kmでの平均気圧および気温分布を示す。地上200km以上では真空計による測定すら困難になるほど大気密度はうすくなる。現在地上200km以上での密度分布を求めるのは、人工衛星が飛行中に受ける空気抵抗を、人工衛星の軌道変化を精密に測定して求めているのが主流となっており、真空計の活躍の余地は今のところないのである。

図5は地球大気構成物質の粒子密度を地上80~300kmの間で示したものである。一般に地上約1000kmまでは地球大気はよく攪拌されていて大気組成成分比はあ

まり変らない。ただし O_3 とか CO_2 のように僅か混合されているものについては、含有量の分布は高さによって著しくちがっている。地上100km以上では高い所ほど軽い元素が占める割合が多くなっており、diffusive equilibriumに近い状態であろうと思われる。 O_2 は地上90km以上で解離している割合が著しく大きい。図には示されていないがもっと高空では N_2 も解離する。地上2000kmまでのところで各高さのところでもっとも多い元素は図6に示すようになっていると現在想像され

図5 大気構成物質粒子密度の高さ分布。

図3 地上30~300kmの間における平均的気圧分布。

図4 地上30~300kmにおける気温分布。

太陽活動静穏時

太陽活動極大期

図6 超高層大気中における最多成分元素。

図 7 電波の周波数を変えて打上げたとき、電離層から電波が反射してくる様子。

図 8 1965年7月27日12時10分発射の K-9M-13号機で測定された内之浦上空の電子密度分布(大家, 大林両博士による)。

ている。じつは地球大気の大気温度が太陽活動に左右されるので、太陽活動がはげしい時期にはヘリウムが主成分となっている領域がかなり広く(その領域を *heliosphere* ともよぶ)、太陽活動度が低ければ、地上1000kmぐらい以上で水素が主成分になってしまう。

4. 超高層大気の電離およびイオン成分

電離層領域を中心として、大気がある程度電離している。地上から短波電波を打ち上げてその反射を見ることにより、電子密度は F層すなわち地上200~250kmあた

図 9 ロケット搭載質量分析計による測定記録例(1963年10月21日正午、於フロリダ)。

りで最大であり $10^6/\text{cc}$ であることが分っていた。電離層を地上から観測するには、図 7 に示すように発射電波の周波数を変えながら打上げると、周波数 $f(\text{Mc/s})$ の正常波電波は電子密度 $N_e(\text{/cm}^3)$

$$N_e = 1.24 \times 10^4 f^2$$

の関係をみたすところで反射してくる。E層の最大電子密度のところでは反射する電波よりも周波数が高い電波はE層を突き抜けてF層内でE層最大密度よりも電子密度が高いところから反射してくるので、E層上半部とF層下半部の一部を測定することができない。またF層で電子密度が最大を示す所より高い空間の様子は絶対に測定できない。いいかえれば、地上からの電波観測では、電離層の下半面しか知り得ないわけである。最近は人工衛星に電離層観測装置をのせ、F層上部から下に向けて電波を発射してその反射波を人工衛星で受け、F層上半部の観測を行なっていて、いろいろと興味ある結果を出している。しかし人工衛星による電離層観測では一般にF層最大電子密度のところよりも下の部分は測定できない。よって地上観測と人工衛星観測とを併用しても、E層とF層の間は測定できず、ロケットによってその領域を貫いてこそ、はじめて測定が可能なのである。図 8 は、ロケットにより実測された電離層内電子密度分布の一例である。

電離層内で電子と共存しているイオンはどのくらいあり、どんな元素のイオンがあるかの問題は、ロケットによる実測ではじめて明らかにされつつあるといっても過言ではない。ロケットに質量分析計を搭載してそれを働かせるのであり、現在でもいろいろな結果が出されている。しかし本当に自然の状態でのイオン組成がはかられているであろうか。すなわちロケットから吹出した物質が混

図10 電離層領域における正イオン種類測定例.

在していないであろうかとの心配がとくにE層下部あたりでの測定にはつきまといっている。図9に測定の一例を示しておく。少量しか含まれていない成分のことを論じなければ、E層あたりではイオン主成分は O_2^+ と NO^+ 、F層では図10に示すように O^+ が多いことがいえる。このようにイオン主成分がはっきりわかってきたことは、電離層内で行なわれている原子分子反応を取扱う電離層構造論に非常な進歩をもたらしたのである。

ここで地球大気電離度について述べてみよう。図8、図9の電子密度およびイオン密度分布図と図5とを比べてみると、電離度に関する大体の値が求められる。すなわち地上100kmあたりのE層領域では、電離度は僅か 10^{-8} 、地上200~300kmのF領域では大きくても 10^{-3} にしかならない。すなわち中性気体分子の間にイオンや電子が少しまざっているにすぎない。F層より上部になると電子密度の減り方はゆるやかになっている。これは電離度が次第に大きくなってゆくことを意味する。地上10,000 kmあたりで電離が $\frac{1}{2}$ 、それより上空では中性原子数は、イオン数よりも少なくなるのであらうと思われる。そこでは地球大気の主成分はプロトンと電子になってしまうのである。

5. 超高層大気中の風

地表から成層圏下部までの風は、ラジオゾンデを用いる気象観測によって研究されている。それよりも高い場所における風は、最近では気象ゾンデをのせて発射する気象ロケットを用いて測定されているが、以前はロケットに積んだ手榴弾を適当な高さのところで何回かに分けて放出して爆発させ、その爆発音が地上までどのような経路をとって伝播してくるかをしらべて算出するという方法がよく用いられた。実際に高空での風を測ってみると、各場所における毎度毎度の観測値がかなりちがっている。世界各地での観測結果をまとめて、いろいろな

図11 地上30~120kmにおける各季節での東西方向への風速平均値(数字はm/sec).

図12 鹿児島県内之浦上空における超高層の風速、風向測定例。実線は1964年11月2日、破線は1964年7月26日の実測値(東京天文台古畑教授らによる)。

時刻での値を平均して東西方向へ全体として動く様子を求めてみると、だいたい図11に示すようなものであらうと考えられている。すなわち場所によってかなり強い東向きあるいは西向きの風が地球をとりまいて吹いていることになる。南北方向の風については図に示してはなが、やはり各高度でかなりちがう。また時刻によってちがう。超高層大気がどのような循環をして地球をとりまいて流れているかを知ることは非常に大切な問題なのであるが、まだ観測資料が不足で、というよりはむしろ

図 13 地球磁場の静穏日日周変化をおこすような電離層中の電流。左図は太陽の方から見た昼間側の電流分布図で、右図は夜間側の電流分布。電流流線間には 10,000 アンペアの電流が流れている。

図 14 磁気嵐のときに附加的にあらわれる電流系。左側の図は太陽の方から見た図で、右図は北極上空からながめた図。流線間の電流は 10,000 アンペア。実際には電流系の強さや形がかなりはげしく変わり、この図は理想化された平均図にすぎない。

観測が始められたばかりで、今後の研究の発展に待期しているのである。図 12 は超高空での風の実測をあげてある。朝方か夕方、薄明時、地球表面は日出前または日没後であって、地上数十 km 以上の高空では太陽光が斜にさしているような時刻を選んでロケットを打上げ、上昇するロケットからナトリウム蒸気を吹き出させると、太陽光に当って発光する雲となり、それが風に流されてゆく様子を地上の何カ所から写真を取り、その記録を解析して求めた結果である。この例でもわかるように、風速も風向も高度が少しちがっただけでかなりちがったものとなっている。他所における同種の観測例によっても、高さによる風向、風速の変化がきわめてはげしいということは変りない。発光雲を出す方式による観測は、いまでも世界で僅か数地点の上空で、時折しかも日出時

とか日没時の限られた時間だけの観測しかないのであり、将来は使用するトレーサを工夫し、また観測方法をも開発してゆかねばならない。

6. 電離層領域での諸現象

電離層より上の空間は、それよりも下の空間に比べて全くちがった性質を持っている。すなわちE層あたりでは電離度こそ小さいけれども、地球磁場内でのイオンや電子の運動が大気運動に大きな影響をもってくるからである。この領域は電波の反射層として大いに短波無線通信に利用されている。また地球をかこむ電離層にはふだん図13に示すような電流が流れている。このような電流にかこまれて地球は1日に1回転しているので、地上の各地ではこの電流が **Biot-Savart** 法則によって生じさせ

る磁場を規則的な日変化磁場として観測することになる。この変化磁場の大きさは $30 \sim 50 \gamma$ 程度 ($1 \gamma = 10^{-5}$ gauss, 本来磁場の単位としては Oe を用いるべきであるが、地球磁気学では功績顕著な Gauss の名を記念して、慣例として地球磁場の強さの単位を Gauss とよぶ) であり、地球永久磁場の値に比し $1/1000$ 程度である。ときどき磁気嵐とよばれる地球磁場の異常変化現象がおこるが、そのときには図14に示すような電流もしくはこれが部分的にあらわれたような電流が地球をかこんで流れるようになる。この電流は南北地磁気緯度(地球磁場を一つの双極子磁石で近似したときに、双極子軸を極軸として定めた座標のこと。地球磁軸は地球回転軸に対して約 11.5° 傾いているから、地磁気緯度は地理緯度に比べて最大 11.5° 異なる) $65 \sim 70^\circ$ あたりで非常に集中して流れ、地上での影響は時には 2000γ 以上にもなる。じつは、このとき、集中電流が流れる地域では美しい極光(オーロラ)が見える。また電離層も乱されるので、とくに高緯度地域を通る電波回線では通信障害が大きい。

極光は大気自身が発光しているのであり、極光のスペクトルを研究して超高層大気の組成や状態が知られる。極光にあらわれるいろいろなスペクトル線をしらべてみると、酸素原子とか窒素分子とかありふれた元素であり、ナトリウム D 線も出ている。1939 年および 1950 年に、極光スペクトルの中に水素の $H\alpha$ 、 $H\beta$ 線が時々見られることが知られ、しかもそれらの線は波長が短い方にずれている。そこでこれらの線は、地球磁力線に沿ってプロトンが外からとびこんできて、途中で電子と中和して水素原子となって発光すると思われる。極光研究者はこの発見に随喜の涙を流したのであり、侵入してくるプロトン流によって地球大気の原子・分子が励起されたり電離されたりして、極光を発生し、また磁気嵐のもとになる強い電流をつくるのであらうと予測して、プロトン流の影響を理論的に当ててみたところ、どうも期待したような結果はえられなかった。しかしプロトン流がくるならば電子流も入射してくるであらうと考え、電子流の作用を理論的に当ててみると、 10 keV 程度のエネルギーをもつ電子流が非常に有効であるとの結果が出た。このようにして高緯度地域の電離層に外から電子流が飛び込んできて一連の現象をひきおこすことが説明されるようになったのである。わが国が南極大陸に設置した昭和基地は極光がもっともよく見えるところであり、超高層大気中の諸現象を研究するのにきわめて地の利を得た場所である。極地方が地球超高層大気をのぞく窓口であると云われるのは、このような理由によるのである。

図 15 電離層内電子温度が観測場所の地磁気緯度によってちがうことを示す図。乱されている日の方が一般に電子温度は高くなっている(平尾教授による)。

図 16 各波長での大気光の発光層の高さを測定した例(古畑, 中村, 永田, 等松博士らによる)。

高緯度地方でのこのような特殊性は別としても、電離層領域はいろいろと興味深い問題をふくんでいる。たとえば温度についてみると、電子温度と中性気体分子の温度とがとくに昼間 E 層から F 層下部にかけてかなり異なっていることなどが実測されている。しかも電離層が乱されている日では、中緯度から高緯度地方にかけてとくに温度が高いことが示されている(図15)。熱が地球磁力線にそって外部から注入されていることを示すものであらう。

高緯度における極光ほど目立たないが、超高層大気は薄く発光しており、それを大気光とよんでいる。極光のように光の濃淡がはっきりしていれば、地上の数地点から三角測量の応用で発光層の高さを求めることができるが、薄くほぼ一様に発光している大気光ではそのような方法では発光層の高さを決め難い。ロケットを打ち上げて発光層を貫いてみるのが単刀直入である。わが国における観測例を示したのが図16である。

地球半径を単位として、地球中心からの距離をあらわした数

図 17 地球磁気圏内で電子密度が遠くで減少する割合.

図 18 荷電粒子が地球磁力線にまきついて南北両半球を往復し、しかも正荷電粒子は次第に西に移動し、負荷電粒子は東に移動してゆくことを示す図.

図 19 電磁波の周波数によって、地球超高層空間でどのような種類の波として伝播するかを示す図 (大林教授による).

7. 地球超高層空間での高速荷電粒子

地球の中心から地球半径の何倍も離れたところでは大気はほとんどプロトンと電子とから成っており、その粒子密度は図17に示すごとく遠くにゆくほど漸減している。この領域でプロトンや電子のエネルギー スペクトラムがどうなっているかはまだ完全には分っていない。

図 20 地球磁力線に沿って横波の性質を持つアルヴェン波、地球磁力線と直角方向に縦波の性質を持つ磁気音波とよばれる電磁流体波動が伝わることを示す。

図 21 地球磁気圏の形 (大林教授による) .

とくに低エネルギー部分の実測がまだ十分ではないからである。人工衛星観測初期の大発見として名高いヴァン・アレン帯とは、高エネルギー粒子 (MeV程度のもの) が 1m^3 あたり何個という程度存在し、それらが地球磁力線に捕捉されている領域である、赤道上で地上 3000km あたりを中心として内帯 (主として 高エネルギー陽子)、 20000km あたりに外帯 (高エネルギー陽子および電子) がある。荷電粒子は図18に示すごとく、一般に地球磁力線のまわりに円運動を行ない、磁力線に沿って南北両半球の間を往復し (mirror motion), さらにプロトンは西向きに、電子は東向きにドリフトして地球をかこむ運動をつづけている。このような運動を行なって地球磁気圏にとどまっているので、測定装置を超高空に打上げてみて始めてその存在が知られた。しかし理論的には双極子磁場内における荷電粒子運動であるから、ヴァン・アレン帯が見つかったとて決して不思議ではなく、ある意味では「コロンブスの卵」的な発見ともいえるが、実際には発見されるまでは誰もその存在を予言してはいなかったのである。磁気嵐の時にはヴァンアレン帯の内帯は

図 22 金星ロケットマリナー 2号が実測した太陽プラズマ流速度と地球磁気活動度との関係、A1~A5, B1~B5 と記したところは27日周期性を示す。

安定であるが、外帯はかなりみだされる。赤道上で地上数万 km 以上の高空が磁気嵐の時にかなり乱されることが、じつはひいては地球の極地方での極光出現、電離層および地磁気の大きな擾乱、自然超低周波電磁波の発生などと結びついているのである。

8. 低周波電磁波および電磁流体波の舞台としての超高層大気

電離層よりも上の空間は実験室内からの概念からすれば超高真空であるが、じつはそこは自然超低周波電磁波や電磁流体波が発生し伝播している舞台であり、それらは電離層をとおして地上まで伝わってきている。図19は地上どの高さでどのような電磁波が伝播するかを示したものであり、超高層大気内のプラズマ周波数 f_0 (電子密度の平方根に比例する)、地球磁場内における電子のジャイロ周波数 f_{He} 、およびイオンのジャイロ周波数 f_{Hi} の三つの量の相互関係により、伝播しうる電磁波が決っているのである。ホイッスラー電波はほぼ地球の磁力線に沿って伝播し、一方電磁流体波は図20に示すように磁力線に沿って伝播する横波振動と磁力線に直角に伝わる縦波振動とに分けて考える。電離気体すなわちプラズマは気体であるけれどもその中に強い磁場が通っていると、ちょうど筋金が入れられたように弾性体のような性質を示すようになるのである。

9. 地球勢力範囲としての磁気圏の限界

地球周辺の空間には地球磁場があり、イオンや電子はその磁力線にまきついている。太陽からは紫外線や可視光線、および準宇宙線とよばれる高速荷電粒子が出ており、また太陽風とよばれるプラズマ流が放出されている。金星ロケットマリナー 2号が測定したところによると、太陽風の主成分はプロトンと電子で、その平均粒子

図 23 惑星間空間に太陽プラズマ流が吹き出してゆく様子。

密度は $3\sim 30/\text{cm}^3$ 、速度は 500km/sec 程度であり、温度は 10^5K に相当するとの結果を示している。このようなプラズマ流が地球に向かっておしよせているのであるから地球磁力線は無限の遠くまでのびることはできず、図21に示すように地球の勢力範囲としての地球磁気圏はある限られた範囲に、ちょうど流星のような形になるように閉じこめられることになる。事実そのようになっていることは、最近の人工衛星観測で明らかにされており、磁気圏がかなり遠くまで尾をひいていることも知られた。この尾は地球半径の 50 倍すなわち月の軌道あたりまで達しているであろうと考えられている。太陽風は超音速流であるので、地球磁気圏の前には衝撃波面が生ずることになり、事実観測上の証拠もある。

太陽風の強さは一定ではない。金星ロケットマリナー 2号が実測したところによると (図22)、太陽プラズマ流の速度が大きいときには地上で地球磁場活動度が大きい、すなわち地球磁気圏がふだんよりも強く圧迫され、そのため磁気圏内荷電粒子の分布もかわってヴァンアレン帯外帯の変化をきたし、またそれらの影響が電離層領域にまで及んで、磁気嵐、電離層嵐、極光出現など一連

の現象をひきおこしているのである。

太陽は約27日の周期で自転している。すると太陽面上のところどころから放出されている強い太陽プラズマ流は、図23のように惑星間空間に拡がってゆくであろう。太陽のまわりをゆっくりと公転している地球がこのプラズマ流に襲われると、磁気嵐などの一連の現象がおこり、また太陽プラズマ流に含まれている磁場の大きさによっては、地球にふりそそぐ一次宇宙線の強度をも変えさせることになる。もし太陽が何週間もほぼ同じ個所からプラズマ流を放出しつづけていれば、磁気嵐・電離層嵐・宇宙線嵐（これらを総称して地球嵐とよぶ）は27日目毎に顕著になる。このような傾向はとくに太陽活動極小期において目立ちやすく、図22でも27日周期性が確かに見られる。太陽活動最盛期には、突発的な大爆発に伴うプラズマ流放出が頻繁におこるので、27日周期性はかくされることが多い。

太陽プラズマ流はどこまで達しているかについては、たぶん木星の軌道あたりまで及んでいるであろうと想像されている。いまは宇宙ロケットがせいぜい火星までしか達していないが、将来もっと遠くまで達する宇宙ロケットができればこの問題も明らかにされよう。

11. 結 語

地球をかこむ大気をここで再び総観してみよう。地球大気は太陽からのふく射を受け、また地球自身が出す長波長ふく射を受けている。下層大気ではそれらのエネルギー源による力学的および熱力学的な現象が主役を占めており、またそれに伴う電気的な現象(雷など)が目立っている。高層では光化学的反応が重要な役割を果すようになり、電離層およびそれよりも高い領域では大気密度が極めて薄く、分子原子の自由行程が著しく長くなるので、地球磁場が通っていることからくる電磁気的な作用が重要になっている。電離層あたりは下層からの力学的影響と上部からの電磁気的な影響とが重なり、さらに光化学的反応が入りまじって最も複雑な様相を呈している。さらに超高空にゆくと、中性気体はまだ多く含まれていてもプラズマ的に扱うべき問題が圧倒的に多くなり、荷電粒子の加速、粒子と電磁波の相互作用とか、プラズマ不安定などの基礎的問題を取扱うのに好適な自然現象がたくさんある。また地球磁場と太陽プラズマ流との相互作用については、collisionless shock とか、稀薄超音速プラズマ流の諸問題のように理論的興味が大い問題に富んでいる。

太陽からのプラズマ流や強い紫外線が時折地球周辺に襲来しても、地球磁場は太陽プラズマ流の侵入を阻止し

紫外線は厚い地球大気にさえぎられて、それらの影響は直接には地球上に住む我々にはほとんど及ばない。そのときじつは地球超高層大気はかなり乱されている。電離層を利用している短波無線通信はこのとき障害を蒙る。近年はこのような無線通信障害を避ける意味もあって人工衛星による確実な通信を行なう技術が開発されているから、地球嵐がおこっても我々の生活には何の不便もなくなる。

深海の底にすむ魚が海上の大嵐の影響を蒙らないごとく、我々は深い大気の底にいて大気の保護を受けている。このことは云いかえれば我々は宇宙からの情報についてほんの一部しか受取っていないということでもあり、限られた情報を頼りに築き上げてきた我々の宇宙観は「群盲象をなでる」の諺にあるように、宇宙の実体についてその一断面しか知っていないといえよう。ロケット、人工衛星がどんどん飛ぶようになって、我々は地球をかこむ大気に関する正確な知識を増したと同時に、X線とか γ 線とか今までとはちがった目で宇宙をながめ得るようになった。今後は新しい目でながめた宇宙像を取り入られて、我々の宇宙に対する物理像が大いに書きかえられることになる。

〔文 献〕

この方面の研究はいまや日進月歩であり、発表される論文の数が非常に多い。外国での専門誌としては

Journal of Geophysical Research (American Geophysical Union 発行)

Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics (Pergamon Press, London 発行)

Planetary and Space Science (Pergamon Press, London 発行。ソ連文献の紹介欄を設けている)

などがあり、わが国での研究成果は

Report of Ionosphere and Space Research in Japan (発行名義は Ionosphere Research Committee, Science Council of Japan)

Journal of Geomagnetism and Geoelectricity (日本地球電気磁気学会発行)

に掲載されるものが多い。

専門誌に掲載される論文が多いのに反し、教科書風に適当にまとめて最新の知識まで入れてある本は多くはない。最近刊行された図書としては

Physics of the Earth's Upper Atmosphere, (edited by C.O.Hines et al., Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J.) (1965)

Introduction to Space Science, (edited by W.N.Hess, Gordon and Beach Sci. Pub., New York) (1956) (同じ内容が *Space Science* という題で Blackie and Son, Ltd., London からも出ている)

などが地球高層および超高層大気諸現象を物理的に解説

している。また超高層大気の状態については
Satellite Environmental Handbook, (edited
by F.S. Johnson, Stanford Univ. Press,
Second edition) (1965)

がまとまっている。

ロケットおよび人工衛星による最新の観測結果は、毎年開かれる COSPAR (国際学術連合傘下の宇宙空間特別委員会)主催の国際シンポジウムに提出され、それらの論文はまとめて *Space Research* と題する部厚い本となって発売されている。発売元は North-Holland Publishing Co., Amsterdam で、1961年に Vol. I が出されて以来毎年刊行されている。ただし Vol. VI (1966) に限り、MacMillan & Co., London または Books Inc. Pub., New York から出ることになっている。本稿で、ロケットに質量分析計をのせて大気組成を直接にはかった例を少しあげたが、重い金属イオンの存在などは電離層構造論にとっても地球大気生成原因論の立場からも重要な関心が持たれている問題であるから、今後とも新しい観測結果がつつぎに発表されることであろう。また上記の国際委員会では大気モデルについての検討を行なっていて、新しい観測事実にもとづいて適宜大気モデルを修正している。本稿で述べた大気モデルは、その委員会で検討した結果発表されたものをまとめた本 CIRA 1965, (North-Holland Pub. Co., Amsterdam)

(terdam) (1966)

から引用したものである。CIRAとは COSPAR International Reference Atmosphereの略語である。

ロケット観測の意義・成果、あるいは人工衛星による観測の意義、当面の諸問題についての専門的解説は、日本学術会議宇宙空間特別委員会主催で開かれた

宇宙物理学シンポジウム(1965年6月19日)

科学衛星計画シンポジウム(1965年6月20日)

科学衛星計画シンポジウム(1965年10月19~20日)

の議事録にあり、これらは東京大学宇宙航空研究所から出版された。また東京大学宇宙航空研究所主催の

KおよびLロケット観測と超高層および宇宙空間物理学シンポジウム (1966年6月13~15日)

の報告は、同研究所報告第2巻第3号として発刊され、最近までの成果や現在直面している問題や将来の展望を知るのに好適である。なおわが国でロケット観測が始められた初期における諸成果は、東京大学生産技術研究所発行の「生産研究」で観測ロケット特集号を何度か出版してまとめて掲載している。

地球周辺の空間に関する解説として、「超高層大気の問題」と題して堀内剛二氏(気象研究所)が「天気」(日本気象学会機関誌)第13巻第10号(1966年10月)に執筆されたものがあるので、参照していただきたい。