

## 超 高 層 大 気 に つ い て

石 井 千 尋\*

### 1. 超高層大気概念

高層大気 (upper atmosphere) という概念は人によって相当異っている。従来の気象学では気球観測のできる範囲を大体高層大気として取扱って来た。一方地球物理学的にはオーロラ現象や電離層の附近を高層大気として取扱っている。このときは超高層だの超高空などというが、その時々によって取扱う範囲が異っている。ここでは一応成層圏から上、大気の無くなるどころ、あるいは地球の重力場が大気構成粒子に作用し得るところまでを超高層大気と名づけて考えることにする。

便宜のためこれらの範囲の大気層を分類している名称とその概略を示すと次のようになる<sup>1)</sup>。

1) **Exosphere (極外圏)** 最上層と考えられるもので、地球大気の構成粒子が最後の衝突をしてから後完全に自由に地球の外方に飛び出し、そのまま衝突なしに重力場の作用で帰って来る範囲とされている。上限は明らかでないが、大体 2,500 km ぐらいであろう。

2) **Ionosphere (電離圏あるいは電離層)** これは上から F 層、E 層、D 層に分れ、F 層の上は 400 km 以上、E 層は 200 km から 100 km ぐらい、D 層は 100 km から 75 km ぐらいまでである。

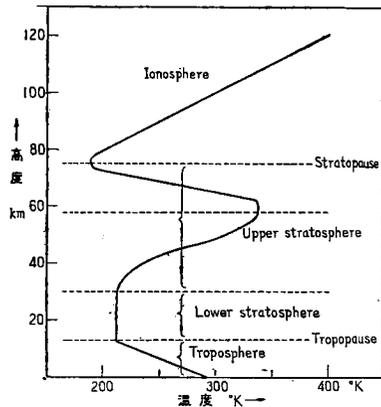
3) **Upper stratosphere (上部成層圏)** 上限を成層圏界面 (stratopause) と称し 75 km ぐらいで、温度の極小約 180°K のところから、その下の ozonosphere と呼ばれることのある、温度の極大 340°K ぐらいの所を通過して再び温度の極小 210°K ぐらいになる辺 (30 km) までの範囲をいう。人によっては中間圏 (mesosphere) とも名付けている。

4) **Lower stratosphere (下部成層圏)** 30 km ぐらいから下の一定温度 (210°K ぐらい) の範囲で等温層 (isothermal layer) とも、また人によってはここだけを stratosphere とも名付ける。

5) **Troposphere (対流圏)** Stratosphere の下限、すなわち対流圏界面 (tropopause) から地表までで、地上から一定の気温減率 (lapse rate) で温度の下降する範囲である。tropopause は東京附近では冬 9 km、

夏は 15 km ぐらいの高さにある。

以上の区分と温度との関係をモデル的に示したのが第 1 図である。最近これらの超高層大気についての物理的性質 (例えば温度、気圧、密度) や、組成に関して多くの観測が行われ、特に V-2 ロケットの観測は



第 1 図 中緯度の気温垂直分布

これらについて非常に有意義な資料を提供してくれた。最近の人工衛星の観測はさらに多くの精密な資料を得たことであろうが、今日未だ発表されていないので従来のデータに基づいて以下若干述べることにする。

### 2. 大気温度、気圧、密度

1) **気球による 30 km までの測定** 30 km 付近までは気球観測が可能である。その資料は、まだ測定精度についていろいろの難点はあるが、世界的な比較資料もあり相当信頼できる。

a) 温度については  $\pm 5^\circ\text{C}$  ぐらいの精度で信頼できると考えられる。問題になるのはゾンデなどの測定器械が太陽輻射を受けて測定値にどんな影響を生ずるかということであるが、たびたびの世界的な比較観測などもあって次第に解決されつつある。

b) 気圧に関しては一般に空盒式の計器が用いられる。日本の気象用ゾンデについて見るならば、検定曲線からは  $\pm 0.5 \text{ mb}$  ぐらいまでは信頼できる。しかしこれも温度の補正に問題が残っているし、現在用いら

\* 気象研究所

れているものでは 5mb 以下の気圧では誤差が大きい。最近液体の沸点を利用した気圧計も用いられている。これも利害得失いろいろあるが数 mb まで使える点では空盒よりも良い。

c) 密度は気圧と気温から計算されるので上記両方の誤差の集積はまぬがれない。

2) 流星の観測から算出した密度 50~120 km ぐらゐの範囲については流星の観測から相当正確な密度の算出ができる。

2 台のシュミットカメラを据えつけて、これに入る光を相互に同期させた回転シャッターで切つて、流星の速度、加速度、輝度を求め、次の式から大気密度を出すのである。

$$\rho = KV^{-\frac{10}{3}}(-V)^{\frac{2}{3}}I^{\frac{1}{3}}$$

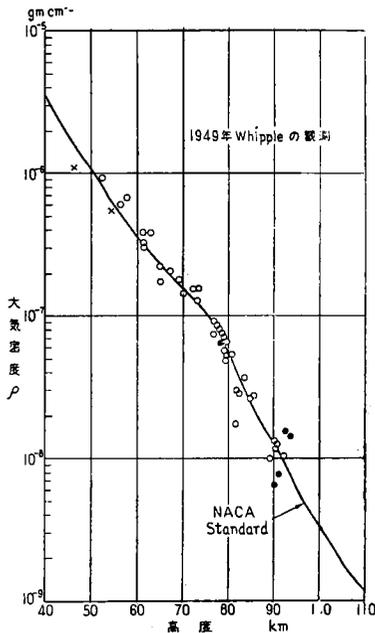
V, 流星の速度

V', 流星の加速度

K, 流星の質量の失い方に関する係数

流星観測から得られた密度の例を第2図に示す<sup>2)</sup>。

3) 音波の伝播速度から求めた温度 戦争中に観測された砲声の異常伝播から上空に高温部の存在が推論される。これらから逆に温度を出すので、40~50 km および 80~90 km の温度が計算されている<sup>3)</sup>。



第2図 流星観測から求めた大気密度

4) ロケットによる観測 最近非常に多くの data がロケット観測から出されている。この場合気圧範囲が非常に広いので (1~10<sup>-8</sup> 気圧), 気圧計あるいは密度計としていろいろの真空計が用いられる。

a) 空盒型気圧計 760~10 mm Hg 附近で割合に

成績の良いことは先にも述べた。ただロケットのように急に気圧の変化する場合にはヒステリシスの影響が大きい点で注意を要する。さらにこれをテレメータで送る場合にはその構造によっては機械的なバック・ラッシュの問題も無視できない。

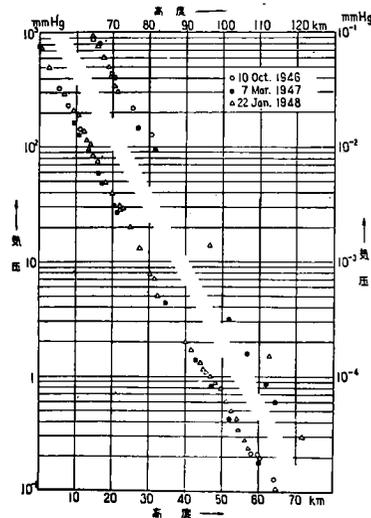
b) ピラーニ真空計 (Pirani gauge) これは熱電導と気圧との関係を利用するもので<sup>4)</sup>, 2~3×10<sup>-3</sup> mmHg ぐらゐまでは割合に便利に使えるが、早い変化に応ずるため特に熱容量の小さいものが要求される。

c) フィリップス電離真空計 (Phillips ionization gauge) 10<sup>-3</sup>~10<sup>-6</sup> mmHg ぐらゐまではこれがいられる。初め地上で真空に封じて置いて、10<sup>-3</sup> mmHg ぐらゐになって開口する装置が必要で、しかも低圧になって開口部附近の物体の表面から出るガスの影響も小さくない。

d) アルファトロン真空計 (Alphatron gauge) これは近来盛んに用いられ、ピラーニ真空計に代るようになって来た。使いやすといわれている。

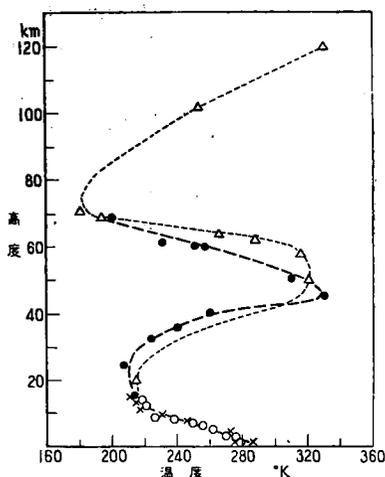
これらの真空計をロケットの先端と、側面の適当な位置につけたもの(これからはその場所の気圧を出す)から、非可逆断熱変化を仮定して、マッハ数→音速→温度と計算できる。ただし比熱比、すなわち大気組成を仮定する必要がある。

ロケットによる気圧、密度等の測定はその都度かなりの開きがあるが、これにはそのときの実際の変化も含まれているであろう。実測の例を第3、第4図に示す。



第3図 V-2 ロケットによる大気圧の観測例

なおこの他にロケットから爆薬を打ち出して、その音を地上のマイロフォンで受けて音の速度から温度を求めることや、4ft (1.2m) ぐらゐの直径の球を投下



○ 観測気球 7 Mar 1947 ● V-2 7 Mar 1947  
 × " 22 Jan 1948 △ V-2 22 Jan 1948

第4図 大気温度の観測例

し、その落下を実測して空気密度を出すことも行われている<sup>5)</sup>。

5) 電離層の観測から求めた温度 非常に高いところについては後に述べるような電離層の観測から電子の衝突周期を求め、これから温度の推算ができる。電離層の観測から計算した温度とオーロラから求めた温度を第1表に示す。

第1表 電離圏温度

高度 (km)	電子衝突周期から求めた値 (°K)	オーロラの scale height* から求めた値 (°K)
100	300	219
150	825	531
200	1,350	1,580
250	2,175	2,073
300	2,400	2,455
350	3,225	2,704
400	3,450	—

\* scale height  $H = kT/mg$ ,  $k$  = ボルツマン常数,  $m$  = 平均分子質量,  $g$  = 重力加速度,  $T$  = 絶対温度,  $H$  はいいかえると温度  $T$  の等質等温大気の厚さ。

6) オーロラのスペクトルから求めた温度 オーロラの三角測量とそのスペクトルの Doppler line 効果とか、rotation line の強度などから高度とその温度を求めることができる。

7) 太陽光のスペクトルから求めた温度 太陽光の分光からオゾンの吸収を用いて、オゾン層の存在とその温度の推定ができる。

8) 大気自由振動から求めた温度 大気の半日周期の振動が 60~80 km の高度の温度に強く影響される外に、大気中を伝播する衝撃波の速度に 60 km までの温度が影響することから、火山爆発や原水爆実験

の波動の観測からも温度の推算ができる。

以上のような各種の手段で大気密度あるいは気圧と温度が測定されているが、上に昇るに従っていろいろ誤差の原因が増して来るので確実なものが掴み難い。今日までのところでは、一応ロケット観測と、流星観測等を基とした NACA その他の機関の発表するものを信用するほかあるまい。

### 3. 大気の組成

大気の成分としてどれだけを標準のものとするかはいろいろ問題がある。従来気象学では水蒸気を度外視して大気を論ずることができなかつたが、現在では CO<sub>2</sub> も相当問題になって来ている。ところが地表附近では CO<sub>2</sub> は人工的に非常な変動を示すので問題はきわめて複雑になってしまう。これについては今ここにふれないとして、いろいろな成分の存在比は成層圏と対流圏では多少異っていることが知られている。第2表に一応対流圏での大気の成分表を、第3表に酸素、窒素の混合物の高さとの関係を示す。

第2表 対流圏内の組成

成分	百分比 (容積比)	備考
N <sub>2</sub>	78.09	} 99.97%
O <sub>2</sub>	20.95	
A	0.93	
H <sub>2</sub> O	1~10 <sup>-2</sup>	変化大
CO <sub>2</sub>	2.6×10 <sup>-2</sup>	地上では変化する
Ne	1.8×10 <sup>-2</sup>	
He	5.24×10 <sup>-4</sup>	
CH <sub>4</sub>	1.6×10 <sup>-4</sup>	
Kr	~10 <sup>-4</sup>	
H <sub>2</sub>	(5×10 <sup>-5</sup> )	存在に疑問あり
N <sub>2</sub> O	3.5×10 <sup>-5</sup>	地上では変化する
CO	2×10 <sup>-5</sup>	変化する
Xe	8×10 <sup>-6</sup>	
O <sub>3</sub>	~10 <sup>-6</sup>	変化大
Rn	6×10 <sup>-18</sup>	放射性

第3表 酸素窒素混合物の 100 km までの表

高度 km	温度 °K	気圧 mb	分子数 /cm <sup>3</sup>	平均自由行程 cm	衝突頻度 sec <sup>-1</sup>
0	288	1.013×10 <sup>3</sup>	2.5×10 <sup>19</sup>	6.3×10 <sup>-6</sup>	7.3×10 <sup>9</sup>
11*	218	2.3×10 <sup>2</sup>	7.8×10 <sup>18</sup>	2.1×10 <sup>-5</sup>	1.9×10 <sup>9</sup>
32	218	8.6	2.9×10 <sup>17</sup>	5.6×10 <sup>-4</sup>	7.1×10 <sup>7</sup>
62	330	2.0×10 <sup>-1</sup>	4.5×10 <sup>15</sup>	3.6×10 <sup>-2</sup>	1.4×10 <sup>6</sup>
84**	200	1.2×10 <sup>-2</sup>	4.4×10 <sup>14</sup>	3.7×10 <sup>-1</sup>	1.0×10 <sup>5</sup>
100	300	1.5×10 <sup>-3</sup>	3.6×10 <sup>13</sup>	4.5	1.0×10 <sup>4</sup>

\* 対流圏界面, \*\* 成層圏界面

#### 1) 水 蒸 気

低いところ、すなわち対流圏内では日々の天気予報にも直接関係するので、毎日定時に観測されている。日本では毛髪湿度計を用いて、稚内から鹿児島に到る十数箇所毎日2回観測されている。しかしこれはせいぜい 10 km ぐらまでのことでそれ以上の上空で

は露点計を用いる必要がある。これとても 30 km ぐらいまでしか使えない。

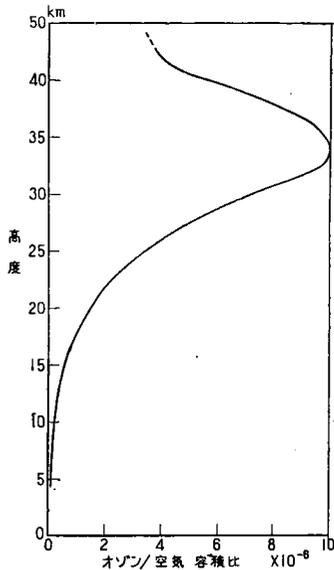
もっと高い所では太陽スペクトルの中で  $6.3\mu$  の吸収線から推算したり、真珠雲の存在から推定するとか、あるいはロケットに空気採取器をつけて打ち上げ、その回収を待って分析する必要がある。

2)  $\text{CO}_2$  直接測定が信頼されているらしい。相当古い資料だが、人の乗った気球 Explorer が、21.5 km で、 $0.029\% \pm 0.002\%$  という値を出しており、おそらくこの値がそのまま超高層まで及ぶのではないかと推定されているが、一方超高層では光化学的に分解されて存在は疑わしいともいわれる。

3) オゾン 太陽のスペクトルが  $3,000\text{\AA}$  でカットオフされていることから、上空にオゾンの存在が考えられ、気球につけた分光器の観測からこれが確認されるに到った。

また一方有名な DOBSON の分光器を用いて地上にしながら吸収曲線の比較によりオゾンの総量が測られるようになっている。

第5図にオゾンの高さに関する分布図を示す。



第5図 高度によるオゾンの分布

#### 4. 電離層について

地上から打ち上げられたある一定周波数の電波は上空の電子密度の大きい層（すなわち電離層）から反射して来る。打ち上げる電波をパルスにして往復の時間を測ってその高さが求められる。

もしこの打ち上げる電波の周波数を上げるとさらにこの層を通過して再び反射して来る。

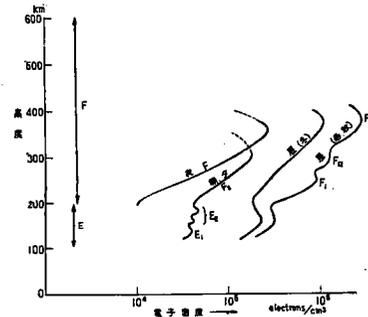
最大電子密度  $N_{\max}$  と打ち上げる電波の周波数  $f_0$  の間には

$$N_{\max} = k(f_0)^2 \quad (k = 1.24 \times 10^8)$$

なる関係があるので、上層に電子密度の大きい層がある限り  $f_0$  を上げればつぎつぎに上の方の層から反射するのが測定される。しかし上の方に電子密度の割合に小さい層がある場合には観測することはできない。

現在わかっている層は 200~400 km に出現する F 層、100~200 km に出現する E 層、60~80 km に出現する D 層などで、これらが昼夜である程度変化をする。

現在知っている平均的な値を第6図に示す。



第6図 高度による電子密度分布

電離層については電波の垂直打上げによる観測の他に、ロケットで直接電子密度を測定することも行われるが、ロケット自体が推進剤の放出によって荷電されたり、太陽光線で光電子が出たりするため測定そのものに相当疑問が残されているようである。

#### 5. むすび

結論的に見て、地球大気に関する現在の物理的・化学的知識は、当然のことながら地上から 30 km ぐらいまでの気球の到達する範囲が最も確実で、ついでロケットで直接観測され、しかも度々観測された 100 km ぐらいまでは誤差はあるにしても信頼性が割合に大きい。

300~400 km あるいはそれ以上になると、観測資料も少なくなるし、測定自体にも問題が多い。なおロケット観測の場合等はロケット自体の持って上った地上のガスの影響とか、太陽輻射の影響等が予想外に大きいことを覚悟しなければならない。その上ロケットは時間の非常に短い間に広い範囲を測定するという無理もある。

さらに大気の世界を考へる場合、われわれの日常の気温と大部異った感じのものである点に留意しなければならない。もちろん測定された温度は気体論的には定義どおりの温度であるが、その空間に物体を置いたとき、地上と同じような温度平衡が成立するかどうかということとは別問題である。上空では輻射が主要な要素で熱の出入は主として輻射によるものである。

第4表 超高層大気成分の number density

高度	$n(O_2)$	$n(O)$	$n(N_2)$	$n(N)$	$n(A)$
km	cm <sup>-3</sup>				
0	$5.34 \times 10^{18}$	.....	$1.99 \times 10^{19}$	.....	$2.37 \times 10^{17}$
10	$1.80 \times 10^{18}$	.....	$6.71 \times 10^{18}$	.....	$7.99 \times 10^{16}$
20	$3.87 \times 10^{17}$	$1.61 \times 10^8$	$1.44 \times 10^{18}$	.....	$1.72 \times 10^{16}$
30	$7.78 \times 10^{16}$	$8.66 \times 10^9$	$2.90 \times 10^{17}$	.....	$8.45 \times 10^{15}$
40	$1.74 \times 10^{16}$	$2.97 \times 10^{10}$	$6.50 \times 10^{16}$	.....	$7.74 \times 10^{14}$
50	$4.72 \times 10^{15}$	$3.45 \times 10^{10}$	$1.76 \times 10^{16}$	.....	$2.09 \times 10^{14}$
60	$1.62 \times 10^{15}$	$6.42 \times 10^{10}$	$5.67 \times 10^{15}$	.....	$6.75 \times 10^{13}$
70	$4.37 \times 10^{14}$	$1.90 \times 10^{11}$	$1.63 \times 10^{15}$	.....	$1.94 \times 10^{13}$
80	$9.48 \times 10^{13}$	$2.15 \times 10^{11}$	$3.52 \times 10^{14}$	.....	$4.17 \times 10^{12}$
90	$1.74 \times 10^{13}$	$2.30 \times 10^{11}$	$6.49 \times 10^{13}$	$3.71 \times 10^{10}$	$7.73 \times 10^{11}$
100	$1.40 \times 10^{12}$	$3.40 \times 10^{12}$	$1.16 \times 10^{13}$	$2.09 \times 10^{10}$	$1.37 \times 10^{11}$
110	$1.62 \times 10^{11}$	$1.06 \times 10^{12}$	$2.58 \times 10^{12}$	$1.07 \times 10^{10}$	$3.06 \times 10^{10}$
120	$3.00 \times 10^{10}$	$3.13 \times 10^{11}$	$6.95 \times 10^{11}$	$6.02 \times 10^9$	$8.23 \times 10^9$
130	$9.08 \times 10^9$	$9.46 \times 10^{10}$	$2.10 \times 10^{11}$	$3.65 \times 10^9$	$2.49 \times 10^9$
140	$2.62 \times 10^9$	$3.12 \times 10^{10}$	$6.94 \times 10^{10}$	$2.28 \times 10^9$	$8.21 \times 10^8$
150	$8.61 \times 10^8$	$1.29 \times 10^{10}$	$2.87 \times 10^{10}$	$1.43 \times 10^9$	$3.40 \times 10^8$
160	$3.41 \times 10^8$	$6.19 \times 10^9$	$1.38 \times 10^{10}$	$9.75 \times 10^8$	$1.63 \times 10^8$
170	$1.54 \times 10^8$	$3.80 \times 10^9$	$7.33 \times 10^9$	$6.35 \times 10^8$	$8.68 \times 10^7$
180	$7.73 \times 10^7$	$1.90 \times 10^9$	$4.23 \times 10^9$	$3.24 \times 10^8$	$5.01 \times 10^7$
190	$4.32 \times 10^7$	$1.37 \times 10^9$	$2.52 \times 10^9$	$1.77 \times 10^8$	$2.46 \times 10^7$
200	$2.51 \times 10^7$	$1.01 \times 10^9$	$1.55 \times 10^9$	$2.41 \times 10^8$	$1.27 \times 10^7$
210	$1.50 \times 10^7$	$7.62 \times 10^8$	$9.84 \times 10^8$	$1.85 \times 10^8$	$6.80 \times 10^6$
220	$9.27 \times 10^6$	$5.82 \times 10^8$	$6.41 \times 10^8$	$1.45 \times 10^8$	$3.78 \times 10^6$
230	$5.87 \times 10^6$	$4.51 \times 10^8$	$4.27 \times 10^8$	$1.15 \times 10^8$	$2.16 \times 10^6$
240	$3.81 \times 10^6$	$3.54 \times 10^8$	$2.90 \times 10^8$	$9.28 \times 10^7$	$1.28 \times 10^6$
250	$2.52 \times 10^6$	$2.81 \times 10^8$	$2.01 \times 10^8$	$7.54 \times 10^7$	$7.72 \times 10^5$
260	$1.70 \times 10^6$	$2.25 \times 10^8$	$1.42 \times 10^8$	$6.18 \times 10^7$	$4.78 \times 10^5$
270	$1.17 \times 10^6$	$1.83 \times 10^8$	$1.01 \times 10^8$	$5.11 \times 10^7$	$3.03 \times 10^5$
280	$8.16 \times 10^5$	$1.49 \times 10^8$	$7.36 \times 10^7$	$4.26 \times 10^7$	$1.95 \times 10^5$
290	$5.78 \times 10^5$	$1.23 \times 10^8$	$5.42 \times 10^7$	$3.58 \times 10^7$	$1.28 \times 10^5$
300	$4.15 \times 10^5$	$1.02 \times 10^8$	$4.03 \times 10^7$	$3.03 \times 10^7$	$8.58 \times 10^4$
320	$2.21 \times 10^5$	$7.19 \times 10^7$	$2.31 \times 10^7$	$2.20 \times 10^7$	$3.98 \times 10^4$
340	$1.24 \times 10^5$	$5.19 \times 10^7$	$1.38 \times 10^7$	$1.64 \times 10^7$	$1.96 \times 10^4$
360	$7.20 \times 10^4$	$3.82 \times 10^7$	$8.49 \times 10^6$	$1.25 \times 10^7$	$1.01 \times 10^4$
380	$4.38 \times 10^4$	$2.87 \times 10^7$	$5.39 \times 10^6$	$9.63 \times 10^6$	$5.44 \times 10^3$
400	$2.68 \times 10^4$	$2.20 \times 10^7$	$3.52 \times 10^6$	$7.56 \times 10^6$	$3.04 \times 10^3$
420	$1.70 \times 10^4$	$1.71 \times 10^7$	$2.35 \times 10^6$	$6.00 \times 10^6$	$1.75 \times 10^3$
440	$1.11 \times 10^4$	$1.34 \times 10^7$	$1.60 \times 10^6$	$4.88 \times 10^6$	$1.04 \times 10^3$
460	$7.38 \times 10^3$	$1.07 \times 10^7$	$1.12 \times 10^6$	$3.92 \times 10^6$	$6.33 \times 10^2$
480	$5.02 \times 10^3$	$8.58 \times 10^6$	$7.92 \times 10^5$	$3.23 \times 10^6$	$3.97 \times 10^2$
500	$3.47 \times 10^3$	$6.97 \times 10^6$	$5.70 \times 10^5$	$2.68 \times 10^6$	$2.54 \times 10^2$
520	$2.44 \times 10^3$	$5.71 \times 10^6$	$4.16 \times 10^5$	$2.24 \times 10^6$	$1.65 \times 10^2$
540	$1.74 \times 10^3$	$4.72 \times 10^6$	$3.08 \times 10^5$	$1.88 \times 10^6$	$1.09 \times 10^2$
560	$1.25 \times 10^3$	$3.93 \times 10^6$	$2.30 \times 10^5$	$1.59 \times 10^6$	$7.37 \times 10^1$
580	$9.17 \times 10^2$	$3.30 \times 10^6$	$1.74 \times 10^5$	$1.36 \times 10^6$	$5.04 \times 10^1$
600	$6.80 \times 10^2$	$2.78 \times 10^6$	$1.34 \times 10^5$	$1.17 \times 10^6$	$3.50 \times 10^1$

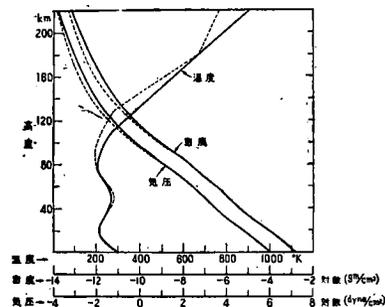
第5表 超高層大気分子数, 密度, 気圧, 気温及び分子量

高度	分子数 $n$	密度 $\rho$	気圧	温度	分子量
km	cm <sup>-3</sup>	gm cm <sup>-3</sup>	dynes cm <sup>-2</sup>	°K	(gm/mole)
0	$2.55 \times 10^{19}$	$1.23 \times 10^{-3}$	$1.013 \times 10^6$	288.16	28.966
10	$8.60 \times 10^{18}$	$4.14 \times 10^{-4}$	$2.649 \times 10^5$	223.26	90 km
20	$1.85 \times 10^{18}$	$8.89 \times 10^{-5}$	$5.528 \times 10^4$	216.66	まで
30	$3.71 \times 10^{17}$	$1.79 \times 10^{-5}$	$1.185 \times 10^4$	231.24	一定
40	$8.32 \times 10^{16}$	$4.00 \times 10^{-6}$	$2.997 \times 10^3$	260.91	
50	$2.25 \times 10^{16}$	$1.08 \times 10^{-6}$	$8.784 \times 10^2$	282.66	
60	$7.26 \times 10^{15}$	$3.49 \times 10^{-7}$	$2.581 \times 10^2$	257.55	
70	$2.09 \times 10^{15}$	$1.00 \times 10^{-7}$	$6.320 \times 10^1$	219.93	
80	$4.50 \times 10^{14}$	$2.17 \times 10^{-8}$	$1.223 \times 10^1$	196.86	
90	$8.31 \times 10^{13}$	$4.00 \times 10^{-9}$	$2.257 \times 10^0$	198.86	28.966
100	$1.65 \times 10^{13}$	$7.12 \times 10^{-10}$	$4.629 \times 10^{-1}$	203.06	25.975
110	$3.88 \times 10^{12}$	$1.59 \times 10^{-10}$	$1.187 \times 10^{-1}$	224.28	24.957
120	$1.05 \times 10^{12}$	$4.28 \times 10^{-11}$	$3.609 \times 10^{-2}$	250.09	24.632
130	$3.20 \times 10^{11}$	$1.30 \times 10^{-11}$	$1.260 \times 10^{-2}$	285.13	24.511
140	$1.06 \times 10^{11}$	$4.80 \times 10^{-12}$	$5.343 \times 10^{-3}$	364.19	24.378
150	$4.42 \times 10^{10}$	$1.80 \times 10^{-12}$	$2.697 \times 10^{-3}$	441.79	24.225
160	$2.14 \times 10^{10}$	$8.56 \times 10^{-13}$	$1.531 \times 10^{-3}$	517.94	24.062
170	$1.15 \times 10^{10}$	$4.57 \times 10^{-13}$	$9.429 \times 10^{-4}$	593.87	23.942
180	$6.69 \times 10^9$	$2.65 \times 10^{-13}$	$6.178 \times 10^{-4}$	669.37	23.842
190	$4.28 \times 10^9$	$1.65 \times 10^{-13}$	$4.110 \times 10^{-4}$	695.89	23.229
200	$2.85 \times 10^9$	$1.07 \times 10^{-13}$	$2.831 \times 10^{-4}$	720.97	22.636
210	$1.95 \times 10^9$	$7.16 \times 10^{-14}$	$2.007 \times 10^{-4}$	744.29	22.072
220	$1.38 \times 10^9$	$4.94 \times 10^{-14}$	$1.461 \times 10^{-4}$	766.76	21.537
230	$1.00 \times 10^9$	$3.50 \times 10^{-14}$	$1.089 \times 10^{-4}$	788.33	21.038
240	$7.41 \times 10^8$	$2.53 \times 10^{-14}$	$8.281 \times 10^{-5}$	809.16	20.574
250	$5.60 \times 10^8$	$1.87 \times 10^{-14}$	$6.417 \times 10^{-5}$	829.75	20.146
260	$4.31 \times 10^8$	$1.41 \times 10^{-14}$	$5.056 \times 10^{-5}$	850.03	19.753
270	$3.37 \times 10^8$	$1.08 \times 10^{-14}$	$4.061 \times 10^{-5}$	874.20	19.395
280	$2.67 \times 10^8$	$8.44 \times 10^{-15}$	$3.278 \times 10^{-5}$	890.87	19.067
290	$2.14 \times 10^8$	$6.66 \times 10^{-15}$	$2.698 \times 10^{-5}$	911.37	18.769
300	$1.73 \times 10^8$	$5.33 \times 10^{-15}$	$2.230 \times 10^{-5}$	931.92	18.498
320	$1.17 \times 10^8$	$3.51 \times 10^{-15}$	$1.576 \times 10^{-5}$	974.1	18.031
340	$8.22 \times 10^7$	$2.41 \times 10^{-15}$	$1.154 \times 10^{-5}$	1017.0	17.644
360	$5.93 \times 10^7$	$1.71 \times 10^{-15}$	$8.68 \times 10^{-6}$	1061	17.324
380	$4.38 \times 10^7$	$1.24 \times 10^{-15}$	$6.68 \times 10^{-6}$	1106	17.059
400	$3.31 \times 10^7$	$9.25 \times 10^{-16}$	$5.26 \times 10^{-6}$	1151	16.838
420	$2.54 \times 10^7$	$7.03 \times 10^{-16}$	$4.20 \times 10^{-6}$	1198	16.653
440	$1.98 \times 10^7$	$5.44 \times 10^{-16}$	$3.41 \times 10^{-6}$	1244	16.496
460	$1.57 \times 10^7$	$4.27 \times 10^{-16}$	$2.80 \times 10^{-6}$	1291	16.364
480	$1.26 \times 10^7$	$3.40 \times 10^{-16}$	$2.33 \times 10^{-6}$	1340	16.265
500	$1.02 \times 10^7$	$2.74 \times 10^{-16}$	$1.96 \times 10^{-6}$	1387	16.165
520	$8.37 \times 10^6$	$2.23 \times 10^{-16}$	$1.66 \times 10^{-6}$	1435	16.070
540	$6.91 \times 10^6$	$1.84 \times 10^{-16}$	$1.41 \times 10^{-6}$	1483	15.988
560	$5.81 \times 10^6$	$1.52 \times 10^{-16}$	$1.22 \times 10^{-6}$	1519	15.809
580	$4.88 \times 10^6$	$1.27 \times 10^{-16}$	$1.05 \times 10^{-6}$	1555	15.737
600	$4.13 \times 10^6$	$1.07 \times 10^{-16}$	$9.18 \times 10^{-7}$	1611	15.670

すでに 20 km 辺からもうこの点が問題になって来る (たとえば気球に吊った黒く塗った物体は気温  $-60^\circ\text{C}$  附近のところまで日射によって  $+40^\circ\text{C}$  あるいはそれ以上になることは度々経験している).

以上のようにいろいろ問題が残されているが, 今日一応信頼すべき超高層の知識としてまとめたのが第7図<sup>6)</sup>である.

なお, 本稿をまとめた後に, L. E. MILLER<sup>7)</sup> がさらにロケット以外に本稿で述べた各法にもとづいて再検討した, 高度 600 km までの超高層大気標準を発表したので, 第4, 5表および第7図(点線)のように掲げる. 実線の米国超高層ロケット研究委員会 (Upper Atmosphere Rocket Research Panel, 略称 UARRP)



第7図 Upper Atmosphere Rocket Research Panel (UARRP, 実線) および L. E. MILLER (点線) による超高層大気標準

が先に発表した結果とかなりの開きが見られるが、これも進歩しつつある超高層探測の象徴であろう。

文 献

1) R. M. Goody: *Physics of Stratosphere*, Cambridge Univ. Press (1964), p. 6.  
 2) 同上 p. 40.  
 3) 同上 p. 32.

4) 佐賀亦男: 観測ロケットの計器装備, 日本航空学会誌, 第4巻第31号 (1956), 204頁.  
 5) 同上  
 6) Upper Atmosphere Rocket Research Panel: *Pressures, densities, and temperatures in the upper atmosphere*, Phys. Rev., Vol. 88 (1952), p. 1027.  
 7) L. E. MILLER: *Molecular weight of air at high altitudes*, J. Geophys. Res., Vol. 62 (1957), p. 351

抄 録 (続き)

(126頁より続く)

成分としては僅かだが、赤外部を強く吸収して、あたかも温室のように日射を透過し、赤外部を吸収するので保温作用を行って地球の温度をたかめる傾向がある。

炭酸ガス説は 1861年 Tyndall によって提唱されたが、現在全世界にわたっておこっている気候温暖化をよく説明するものは、気候変化に関する諸説のうち炭酸ガス説のみであるように思われる。炭酸ガスの量が現在の倍になると地球温度は3.6°C上昇し、炭酸ガスの量が現在の半分になると3.8°C下降するはずである。炭酸ガスの吸収スペクトル線の強さと幅とは極めて複雑である。炭酸ガスが大気中に混合している割合は、少なくとも対流圏内では、高度にかかわらず一定であるけれども、炭酸ガスの吸収スペクトル線の強さと幅とは温度と気圧との函数であるので、炭酸ガスの吸収効果は高度によって異なる。したがってこれらの状況を考慮して炭酸ガスの地球温度に対する影響の正確な解は、詳しい赤外線部の測定、理論の進歩、高速度の電子計算機の利用をまって始めて可能になった。

現在光合成による炭酸ガスの消費は毎年  $60 \times 10^9$  トンで、同量の炭酸ガスが動植物の呼吸および腐敗により大気中に返還されるといわれる。現在無機界からの炭酸ガスの寄与は火口および温泉からの噴出、火成岩の風化による炭酸塩の形成で、この両者はプラス・マイナス零になるといわれる。しかるに Callender によって指摘された如く、工業活動の活潑化により石炭石油の燃焼を通じて毎年  $6.0 \times 10^9$  トンの炭酸ガスが添加されつつある。このようにして大気中に増加しつつある炭酸ガスは大洋の海水中に解離することが考えられるが、それが急に平衡に達するとは思われない。何故

なら放射線炭素による年代測定から、大洋の海水循環は数千年もかかると考えられる。したがって海水中に炭酸ガスが十分吸収されるまでには数万年を要する。現在大気中の炭酸ガス圧は  $3 \times 10^{-4}$  気圧、大気中にある炭酸ガス量は  $2.3 \times 10^{12}$  トン、海水中にある炭酸ガスと炭酸塩とは  $130 \times 10^{12}$  トンであるといわれている。地球における全炭酸ガス量の数%の減少により、地球上の広範囲にわたり、氷河期を説明し得るといわれる(気候変化に関する炭酸ガス説)。

前述のごとく  $6.0 \times 10^9$  トンの炭酸ガスが年々大気中に増えていくと、地球の温度は総体として百年につき  $1.1^\circ\text{C}$  の割合で上昇することが期待されるが、今世紀に入っては、ほぼこの位の割合で暖かくなってきていることが実証された。もし地球上の知られた石炭・石油資源が今後 1,000 年間に消費しつくされるとすると、地球の全炭酸ガス量  $132 \times 10^{12}$  トンから  $172 \times 10^{12}$  トンへ増加するし、大気中の炭酸ガス圧は  $3 \times 10^{-3}$  気圧となり、温度は  $13.4^\circ\text{C}$  だけ上昇することが考えられる。理論的に考えられる最低の温度上昇でさえ  $7.0^\circ\text{C}$  に達する。

今世紀に入ってから、大気中の炭酸ガス量の増加は、実測によっても 50 年間に 10% くらい増しているらしい。地質学的研究によるとカンブリア紀から最近までの時間のうち、すくなくとも 10 分の 9 の期間は現在よりも暖かかった。それは大気中の炭酸ガス量が現在よりも多かったからだと思われ、炭酸ガス説では考える。放射性炭素による年代測定は、大気中の炭酸ガス量が現在と同じと仮定しているから、氷河時代またはそれ以前の年代測定は、再検討を要することになるかも知れない。(荒川 秀俊)

第6巻 第50号 Growth Factor (増大係数) について (3) の正誤表

頁	行	誤	正
15 左	16	翼面荷重重 lb/ft <sup>2</sup>	翼面荷重 80 lb/ft <sup>2</sup>
19 右	-22	重量推定誤差は誤差は	重量推定誤差は
25 右	5	(6.9)	6.9.