

# Solar Planetary Relationships III

## — 宇宙ロケットデータの統一的解釈 —

お茶の水大物理 清水 幹 夫

(2月14日受理)

### § 1. はじめに

1964年, Mariner 4 は火星近傍をかすめ, 宇宙ロケットによる初の惑星大気測定を行なった。また1967年にはまず Venera 4 が金星大気中に突入, 観測を遂行するという成果を挙げ, その直后, Mariner 5 も flyby 測定を完成している。これで地球型惑星の大気に関する知見が飛躍的に増大した。今年も既に Venera 5, Venera 6 が打上げられており, Mariner '69 も2発火星近傍をかすめる予定である。Mars '69 も恐らく火星軟着陸をめざして打ち上げられるだろう。それに1975年に打上げ11年かかって木星・土星・天王星・海王星をつぎつぎと訪問させる great cruise project も, 何百年に一回のチャンスということを考慮して実現する見透しがある。

惑星ロケットの観測結果は, 地表付近から雲の辺にかけての下層大気データ, 太陽放射線との相互作用領域である上層大気の詳細データ, それに plasma environment についてのデータに三大別されよう。第1のデータ群に関するものは, Venera 4 諸データと Mariner 5 の S band radio occultation データだが, 曖昧さが残り, 定性的な段階にある。第2のデータ群は, 外からアプローチする場合に集め易い種類のものだから, これまでに一番多くて定量的でもある。第3のデータ群は惑星の磁場が小さいためスケールが貧弱になり, 観測結果もネガティブになり勝ち, ほんの一端が捉めたに過ぎない。

勿論, 昔から下層大気については, 地上よりの観測が続けられており, 例えば赤外吸収の分解能などは最近著るしく高くなって, ロケットデータ解釈に関する強い束縛条件を与えるようになった。また地球大気上にとばしたロケットからの紫外観測も, atomic なデータを補強しつつある。

この小論で問題にするのは, 上記の第2のデータ群すべてと第1のデータ群

の一部である。火星・金星の大気物性に関しては、ここ数年来論争が続いているが、その多くは個別現象の解析に追われた間に合わせ理論であり、現存するデータの統一的説明は殆んど試みられていない。我々は前に提出した分子素過程（IおよびII参照）の分析にもとづいて総合的解釈を試みる。また最後に最近の観測データを背景に木星大気物性をも論じたい。

## § 2. 惑星大気的数据と論争点

### 2.1 大気データ

ここでは以下の議論に必要なデータだけを簡約する。どのようにそのデータが得られたのかという点の解説は別の機会に譲る。<sup>1)</sup>

#### 火星 Mars

これに関してはIIにおいても述べたが、Mariner 4の最終データを中心にすると、次のようになる。

地表の大気圧は昼側の観測点で5 mb（約20分の1気圧）と地球の上空30 km位の辺の値。地表大気温度は180°K。一方地上観測による赤外データから地表そのものは200—300°Kの巾で日変化しておることが判り、大気の薄いことと摺まって下層大気は相当の乱流状態にあるらしい。（渦拡散常数でいって $10^8 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 程度という計算値がある。）大気成分は $\text{CO}_2$ が主で $\text{N}_2$ も相当にあらう。微量成分として $\text{CO}_2$ の $10^{-3}$ 程度のCOが見つかり、 $\text{O}_2$ もその程度あるという報告がある。 $\text{H}_2\text{O}$ 量は $\text{CO}_2$ の $10^{-4}$ 位の値を前後して変化している。 $\text{O}_3$ は見出されず、したがって大気温度の高度変化は高空に行く迄減少、mesopauseで反転上昇という簡単な構造であらう。

電子密度の最大値が $10^{-5} \text{ electron/cc}$ の電離層が地表上120 km辺に存在するが、これは異常に低い高さである。そして電子密度はplasma scale height 29 kmで指数函数型に上へ向かって減少しており、これから外気圏温度 $T_{\text{exo}}$ は200—300°Kと推定される。

#### 金星 Venus

地表大気圧、温度はVenera 4, Mariner 5, Radar echoの3つの観測データの組合せ方によって（20気圧、550°K）と（150気圧、800°K）位の2 setのどちらかということになる。大気温度は断熱的に上へ向かって下がる。

稠密な雲は何でできているのか依然不明。雲のレベルで  $100\text{ m/sec}$  で金星を回る風が吹き、且つこの辺の気体は非常に乱流化しているらしい。大気組成は殆んどが  $\text{CO}_2$ 、数%の  $\text{N}_2$ 。确实な微量成分は  $\text{CO}_2$  の  $10^{-5}$  程度の  $\text{CO}$ 、 $10^{-6}$  位の  $\text{HCl}$ 、 $10^{-9}$  位の  $\text{HF}$ 。 $\text{H}_2\text{O}$  は多分  $10^{-5}$  位で Variable。Venera 4 の  $\text{H}_2\text{O}$  データは  $10^{-3}$  と大きいと  $\text{O}_2$  のそれと共に赤外データと喰い違いすぎてやや疑問がある。

火星の場合と同様、昼側に異常に低い高度（重心より  $6190\text{ km}$ 、地表からの高さは Venera 4 と Mariner 5 プラス radar データの間の喰違いのためよくは判らないが、 $100\text{ km}$  見当。）に  $5 \times 10^6\text{ electron/cc}$  位の最大密度を持つ電離層がある。夜側のそれも  $10^3\text{ electron/cc}$  位の密度で見出されている。 $\text{CO}_2$  の分解でできる  $\text{O atom}$  は、昼の例でも極めて少ないと言われたが、フィルター collimation に失敗があることが判明。地球大気上のロケットで取ったデータからいうと、少ないながら存在する。（多分地球の  $100$  分の  $1$  程度の量。）また  $\text{H atom}$  からの airglow も測定され、地球程度の  $\text{H}$  量の存在が確認された。その分布から  $T_{\text{exo}}$  が  $650^\circ\text{K}$  と出る。但し、重心から  $8000\text{ km}$  以下の領域では airglow abnormality があり、大量の  $\text{H}_2$  か  $\text{H}$  の  $10$  倍位の  $\text{D}$  を仮定すると説明できそう。地表より得られる唯一の上層大気データである星のエン蔽データは以上のロケットデータとよく合わず、観測精度から言っても、捨てた方がよさそうである。

### 木星 Jupiter

雲上の大気圧、温度は数気圧、 $130 - 150^\circ\text{K}$  程度。主成分は観測にかかった  $\text{H}_2$  の外、ある程度の  $\text{He}$  があろう。微量成分として  $\text{CH}_4$  と  $\text{NH}_3$  が検出されている。 $\text{NH}_3$  の量が  $\text{CH}_4$  と比べてぐんと少ないから、 $\text{C}$  の量  $\sim$   $\text{N}$  の量という宇宙組成から考えて、 $\text{NH}_3$  が氷化して雲となっていると思われ、これは地球大気上のロケット観測からも裏付けられている。雲上の縞模様は大気運動を意味し、スペクトルデータから数  $\text{km/sec}$  の風速が示唆されてもいる。

電離層があることは電波観測データの説明にしばしば仮定されるが、その密度は人によって  $4 \times 10^4 - 10^8\text{ electron/sec}$  とまちまちである。 $\text{H}_2$  の分解による  $\text{H atom}$  の存在も、地球大気圏上ロケット紫外線側から推定されたが、定量化にはまだ一歩手前の段階である。

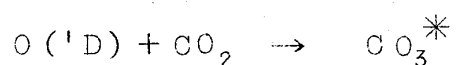
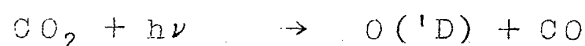
### 2.2 データ解釈についての論争点

宇宙ロケットの上層大気データは、電子密度分布、 $\text{O}$  および  $\text{H atom}$  分布、

外気圏温度  $T_{\text{exo}}$  のどれをとっても皆異常なものばかりである。I で述べた光化学平衡の仮定のもとでの計算結果は金星でも火星でも  $\text{CO}_2$  の分解が充分起っていることを示唆するが、このモデルではロケットデータと逆に電離層は非常に高く、 $\text{O atom}$  は容易に観測されることになる。Chamberlain や Marmo らによる我々と独立の火星についての計算も同じ答を与えている。

2) Mariner 4 データの判明后、Johnson<sup>2)</sup> はいち早く「 $\text{CO}_2$  完全分解、大気低温」を主眼目とする  $\text{F}_2$  layer Theory を打出した。地球の電離層で密度最大の部分は  $\text{O}^+$  が重力拡散効果とからんで出来る  $\text{F}_2$  layer で、地表上 250—300 km 辺にある。火星で大気下部の温度が低いことを仮定すると、大気の尾は外へのびず、 $\text{CO}_2$  の分解もぐっと低い地点で起ることになり、peak のある 120 km 辺では大気は  $\text{O}$  ばかりになっている。それに  $\text{O}^+$  が主イオンなら観測された plasma scale height の値と組合せて  $T_{\text{exo}}$  が 100 °K になり低温下層大気に consistent な温度分布が得られるという。ロケットグループの Eshelman らもやや遅れて同様の解釈を唱えた。

3) これに対して、Chamberlain—Moelroy<sup>3)</sup> は正反対の「 $\text{CO}_2$  見かけ上不分解、大気高温」の E layer theory を提出した。上記の説では下層大気の温度が  $\text{CO}_2$  の super cooling 状態以下まで下がるし、 $T_{\text{exo}}$  も彼らの計算では 400 °K 位で 100 °K とは低すぎる。電子分布も  $\text{CO}_2$  が仮に全然分解しないとして計算をしてみるとかえって結果がよいというのである。 $\text{O}^+ + \text{CO}_2 \rightarrow \text{O}_2^+ + \text{CO}$  という分子イオン反応が非常に速いため、火星では  $\text{F}_2$  layer は消えて無くなっているとする。何故  $\text{CO}_2$  が分解しないかという点については、いろいろと言っていたが、最終的に出したのは  $\text{CO}_3$  仮説である。<sup>4)</sup> すなわち



で、一旦壊れた  $\text{CO}_2$  は極めて速やかに元へ戻るからとする。壊れた際できる  $\text{O atom}$  が励起状態にあって反応性が強い点に着目したのだが、当時  $\text{CO}_3$  が固体マトリックス中の赤外吸収という形で初めて発見されたばかりであり、

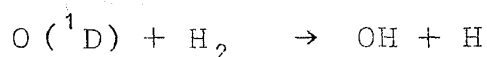
$\text{CO}_2$  に紫外線を当てた際  $\text{O}(^1\text{D}) \rightarrow \text{O}(^3\text{P})$  の  $6300\text{\AA}$  線が観測されないとする Young らの実験結果もあって有望にみえた。

$\text{F}_2$  説, E説の外にも  $\text{F}_1$  layer Theory という妥協案がある。<sup>5) 6)</sup> flux の小さい X 線で peak を作らせる E説よりも flux のより大きな紫外線での電離を考えた方がよいという訳だが, 折衷を狙っただけで新しい物理的内容はつけ加えられていない。(Donahue, Norton ら。)

Venera 4, Mariner 5 の結果は  $\text{F}_2$  説を殆んど不可能にした。観測データによると金星下層大気はかなり上の方迄温度が高い。一方電子分布の形は火星のそれに酷似し, しかも最大密度地点は極めて低い。火星も金星も  $\text{CO}_2$  大気だから事情は似ている筈で, 上記の事実から金星で  $\text{F}_2$  がだめ, そうすれば火星でもだめだろうという訳である。

しかし  $\text{CO}_3$  仮説にも難点がある。先刻の議論では  $\text{CO}_3^*$  が再び  $\text{O}(^1\text{D})$  と  $\text{CO}_2$  に分解もするということを見逃している。この過程を考えると, 実は全体の反応過程は三体反応になって少しも速くない<sup>7)</sup> (Shimizu)。McElroy は  $\text{CO}_3^*$  の寿命が  $10^{-3}$  sec 位に長ければ三体反応でもデータを説明できると逃げたが, 固体マトリックスのデータを使うとこれはとても不可能であることが unimolecular reaction theory から推定できる。その後, みつからないといわれた  $6300\text{\AA}$  の光が Noxon によって検出され,  $\text{O}(^1\text{D}) \rightarrow \text{O}(^3\text{P})$  が衝突によって脱励起する反応係数も判り, 上記の議論が確認された。 $\text{CO}_3$  を mass-spectrum で直接検出する試みが失敗しているのも余証の一つである。

<sup>8)</sup> Barth は自身検出したと称する  $\text{H}_2$  が



という形で  $\text{CO}_2$  の恢復に役立つと考えた。しかし airglow abnormality の解釈に極めて大量の  $\text{H}_2$  を持ち込むのはあまりにも難点がありすぎる。例えば  $\text{H}_2$  が分解してこれも多量にできる筈の H atom が, 観測では僅かに存在するだけである。(これについては後でも一度述べよう。) Donahue のいうように  $\text{H}_2$  でなく D を仮定した方が無難である。<sup>6)</sup>

我々はむしろ分解してできた CO と O が, 大気が攪拌されることにより薄め

清水幹夫

られる効果を重視したい。すれば、これらの分解生成物は下層大気に運ばれ  $\text{CO}$  と  $\text{O}_2$  になるだろう。また、何故そういった運動が上層下層を通じておきているかということの説明も必要である。(地球の場合には確かにそういう効果が見られるが、単なる類推では意味がない。) したがって上層大気の問題は下層大気との相互作用をも含めた総合的検討を必要とする。

木星に関しても同様の事情が存在する。この惑星大気中の分子素過程は I に述べたように皆遅いから分子拡散や大気攪拌効果はより強くなるだろう。今迄の Zabriskey,<sup>9)</sup> Rasool<sup>10)</sup> ら, Shimizu<sup>11)</sup> による計算はこの点に対する充分な考慮が払われていない。データは一応揃い始めているから、議論の精密化が要求される段階にある。

### § 3. データの解釈

#### 3.1 連続および運動方程式

上述のように火星・金星・木星各大気の問題の基本は  $\text{CO}_2$  や  $\text{H}_2$  という大気主成分の分解にあり、議論の混乱も、確実な中性大気モデルを作るという難点を避けてきたために起ったものといえる。諸大気成分の高度分布をきめる基礎方程式は、 $Q$  を production term,  $L$  を loss term として

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + v_0 \frac{\partial n_i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (n_i V_i + n'_i V'_i) + Q_i - L_i \quad (\text{連続})$$

$$\frac{\partial v_0}{\partial t} + v_0 \frac{\partial v_0}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (\text{運動})$$

$$\frac{kT}{n} \sum_{j \neq i} \frac{n_i n_j (V_j - V_i)}{D_{ij}} = \frac{\partial P_i}{\partial z} - \frac{\rho_i}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (*)$$

$$\sum \rho_i V_i = 0, \quad (\text{副条件})$$

であり (Hirschfelder, Curtis & Baird; Chapman and Cowling) 流束の乱流成分  $n'_i V'_i$  は近似的に

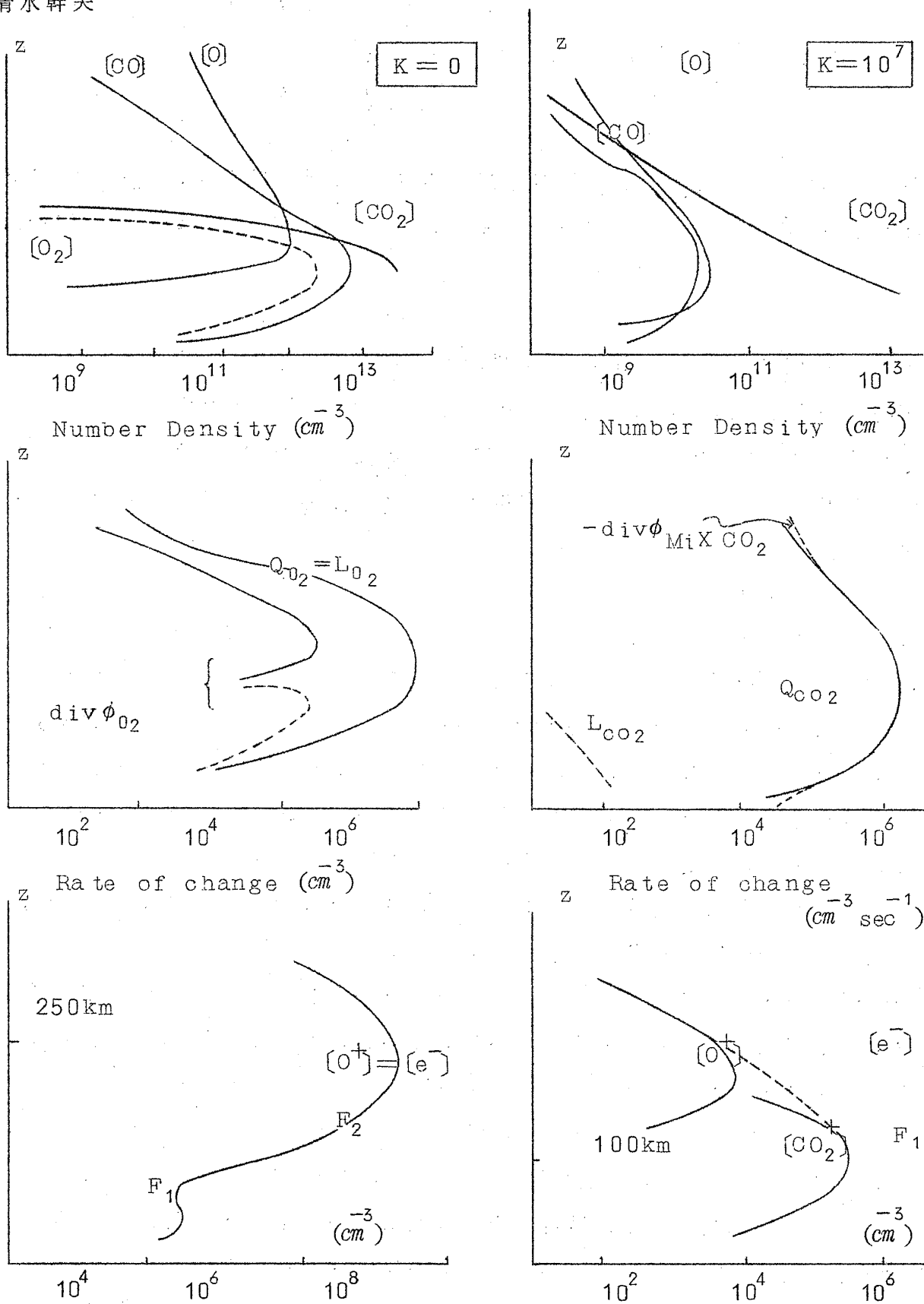
$$n_i' V_i' = - \kappa \left( \frac{\partial n_i}{\partial z} + \frac{n_i}{T} \frac{dT}{dz} + \frac{n_i}{H_{\text{mix}}} \right)$$

と書き表わせよう。 $D_{ij}$  は分子拡散常数,  $\kappa$  は平均渦拡散常数,  $H_{\text{mix}}$  は完全混合大気の scale height である。また,  $Q, L$  の具体的内容は I に現われたすべての分子素過程である。

上の式は non-linear, multi-coupled, partial differential equation であり, CDC6600 程度の超大型計算機を用いても解くのに大分時間がかかる。ただし, 大気微量成分や電子分布の計算に適用する場合には, かなりの部分が線型化できて多少楽になる。後者の場合には II で述べたような変分法も用い得るが, データが定量化した現在では直接精密解を求めることにした。そこで Richtmyer のいわゆる implicit method を用い, 適当な境界条件のもとに分布の定常状態を求めた。

この小論の目的は, 今迄のデータの総合的な定性解釈を試みることにあるから, 個々の計算結果は原著論文解に譲ることにしたい。<sup>7)</sup> ここでは極めて特長的な二, 三の結果だけを参考のために引用する。第 1 図には  $\kappa = 0$  すなわち光化学反応と分子拡散のみを考慮した場合と,  $\kappa = 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$  すなわち地球大気よりやや強い大気攪拌がある場合の二つについて, 大気成分分布・連続方程式の内容・電子密度分布をそれぞれ高度の函数としてプロットしたものである。 $\kappa = 0$  の場合には成分分布は I において導いたものと殆んど同じであり, 分子拡散の影響が小さく光化学平衡の仮定がよく成立することを物語っている。連続方程式の内容を見ても production term  $Q$  と loss term  $L$  が完全にバランスして上記の解釈を保障している。しかし,  $F_2$  層が著るしく発達している点は宇宙ロケットデータに反する。一方,  $\kappa = 10^7$  となると攪拌で薄められて  $O$  は  $CO$  は減少し, 連続方程式中でもバランスするのは  $Q$  と mixing term  $\text{div}_{\text{mix}} \phi$  であり, できた分解生成物は再結合することなしに下層大気へ運ばれてしまうことになる。この場合  $O$  の量は地球大気圏上で取ったロケットデータの値と一致し, 電子分布も Mariner 5 のデータに近くなる。

火星の場合にも似たような結果が得られるが, 輸送過程の影響は金星の場合よりも強く, 例えば  $O_2$  の sharp peak などは分子拡散だけでも消えてしま



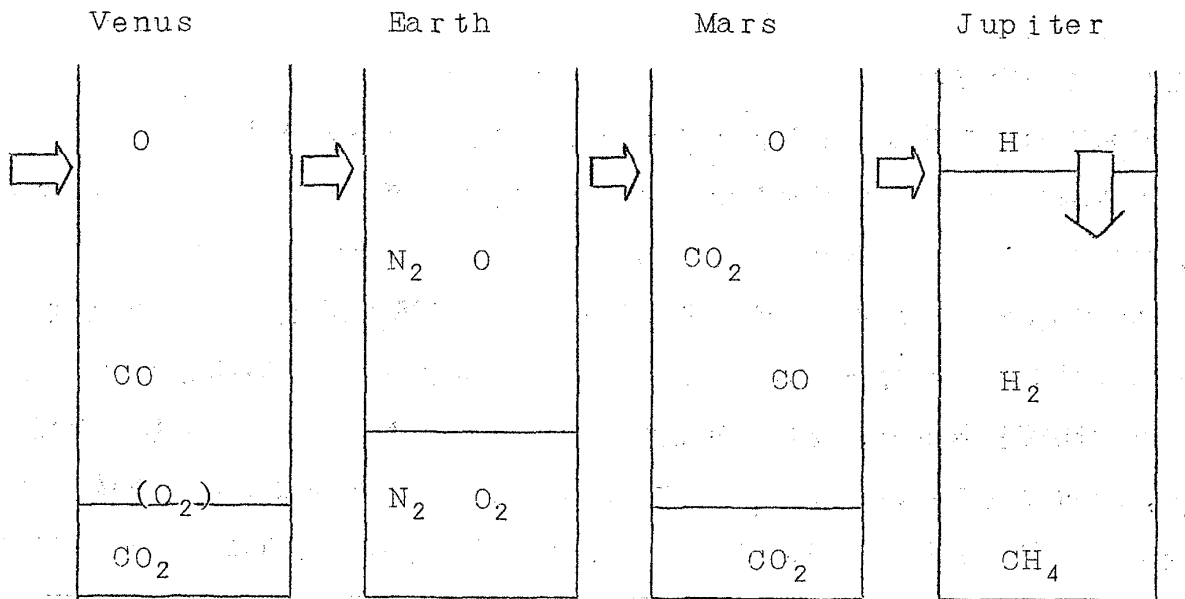
第1図 中性ガス分布，連続方程式，電子，イオン分布

う。木星の場合にはもっとその影響が強いという答えがでてくる。

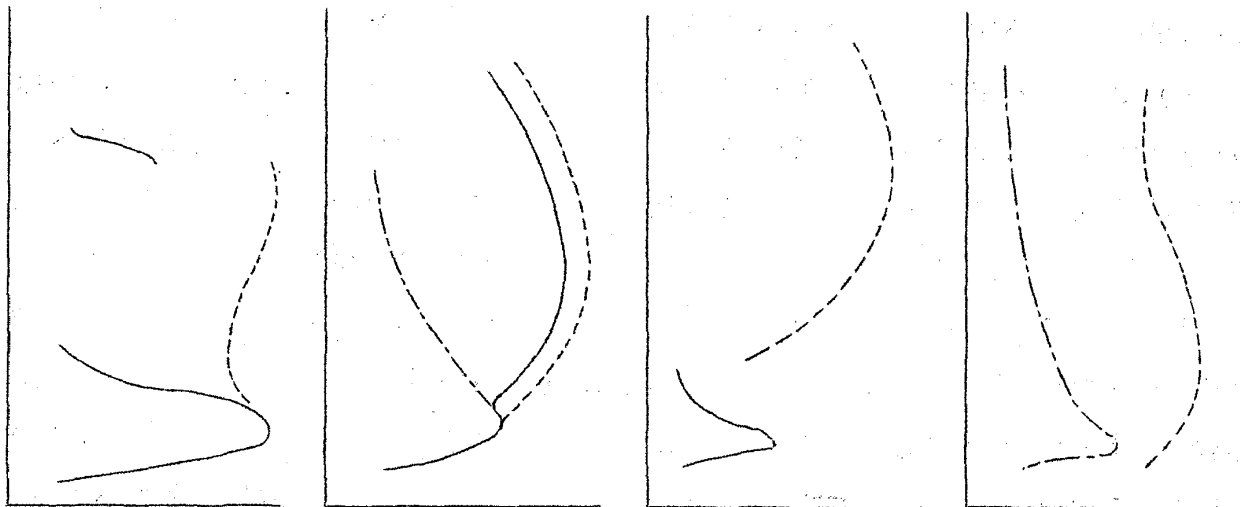
### 3.2 統一的解釈

前節における計算により、Iにおいて議論した分子素過程に対し、分子拡散および渦拡散の影響を考慮した場合の惑星大気モデル群が導かれた。我々がこの節において提出するのは、これらのモデルの相互比較および宇宙ロケットデータを中心とする惑星大気データの分析を通じて浮かび上がってきた大気中の諸過程に関する物理的描像である。その大要を第2図に集約しておく。

まず地球と金星を比較してみよう。地球の大気は  $N_2$  と  $O_2$  よりできているが、上層大気においては  $O_2$  が Schumann Runge 光線によって分解し  $O$  になる。一方金星大気は殆んど  $CO_2$  で、この分子も同じように  $CO$  と  $O$  に分解する。cross section を比べると  $CO_2$  の方が  $O_2$  より約2桁小さい。したがってこの紫外線は金星の方でより深く侵入するであろう。第2図の上側には、各惑星における中性大気分布が分子素過程と分子拡散をのみ考慮した場合 ( $\kappa = 0$ ) について象徴的に描かれている。分解層を示す横線が金星の場合、地球のそれに比べて下に置かれているのはこの間の事情を示す。するとこのレベルにおける大気密度は金星においては甚だ高い。すれば分子拡散の影響はこの惑星において小さい筈である。金星で光化学平衡の仮定が良いのはこの為である。金星は太陽に近いので光線束が大きく、 $CO_2$  分解生成物の量が多く、その結果  $Q$  のみならず  $L$  を大きくすることもこの点に寄与する。ここ迄は大気攪拌が無視できる場合の結論であるが、 $\kappa$  が大きくなると事情が変わってくる。第2図で左側についている矢印  $\rightrightarrows$  はいわゆる turbopause (分子拡散常数が渦拡散常数と等しくなるレベル。これより上側では前者が大きい。) の位置を示すが、これは大体大気密度だけで決まるから、結局同じ位の大気攪拌効果がある場合、その影響範囲は金星の方がずっと広く、大気分解は押えられる。前にも述べたように  $F_2$  層は  $O^+$  に基因する。したがって、 $F_2$  層を消滅させるのに要する渦拡散係数  $\kappa$  の最低値は金星の方が小さくてすむ。地球の場合、この最低の  $\kappa$  は我々の計算によると  $10^8 \text{ cm}^2/\text{sec}$  程であるが、実際の  $\kappa$  は観測で  $10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$  に過ぎず、このため地球には  $F_2$  層が充分発達している。一方 Mariner 5 の観測では金星には  $F_2$  層がない。その説明には  $\kappa$  が  $10^7$  程度



Neutral Atmospheric Constituents



Electron Profiles

第2図 惑星の上層大気および電離層

でよい。

次に金星と火星を比較する。この両者の違いは主に太陽からの距離の差による光線束量によっている。すなわち、火星では  $\text{CO}_2$  の分解量が少なく、その為  $\kappa$  も小さくなる。したがって分子拡散の相対的ウェイトが増し、例えば  $\kappa = 0$  でも dynamical effect は無視し得ず、光化学平衡の仮定は悪くなる。象徴的にいえば、分解レベルより上にも相当の  $\text{CO}_2$  が残っている。このため、 $\text{O}^+ + \text{CO}_2 \rightarrow \text{O}_2^+ + \text{CO}$  の反応が強く起り  $\text{O}^+$  を速かに除去するし、大体  $\text{O}$  の量が少ないのであるから、大気攪拌がある場合には  $\text{F}_2$  層を潰す  $\kappa$  の値は金星に比べてより小さくなる。第2図の下側の電離層の図の方に描いた通り、この最低の  $\kappa$  は  $10^6$  と金星のそれよりもう1桁小さい。地球と同程度の大気攪拌で  $\text{F}_2$  層は消滅するのであるから Mariner 4 の結果は理解し易い。

次に木星の場合に移ろう。この場合の大きな特長は主成分の  $\text{H}_2$  が Schumann-Runge 光線で直接分解しないということである。そのため I で述べたような次の過程を経て  $\text{H}_2$  の分解および再結合が行なわれることになる。



電離光線束は分解光線束より遙かに小さいし、電離の cross section は分解のそれよりずっと大きい。そのため分解レベルはぐっと高くなり、その辺の大気密度が大変低くなって、分子拡散の影響は極めて強い。そして、こわれてできた  $\text{H}$  は分解レベルでは一切再結合せず、分子拡散で下の濃い大気の辺に行って初めて分子化する。第2図中の木星の画の中にある縦の矢印はこの間の事情を示している。しかし、もし  $\kappa \neq 0$  であったらどうなるであろうか。この再結合レベルは turbopause の下側にあるので、 $\text{H}$  はここでも再結合できず、更に下の方迄運ばれてしまうであろう。この結果は電離層の方にただちにはね返る。 $\text{H}$  が少なければ電子を一番作る  $\text{H}^+$  が少なく電子密度が小さくなるからである。尚 I に述べたように木星の場合には  $\text{H}^+$  が分るイオンに転化され得ない事情があるので電子との再結合が非常に遅い。したがって拡散効果が中性

清水幹夫

大気を通じてでなく、直接に電離過程に響いてくる。これも電子濃度を薄める役割をする。こうして木星上のHの量、電離層の濃度決定には dynamical effect が極めて重要になる。大気圏上のロケット紫外データ結果はまだ曖昧であり、電波観測からの電子密度データも speculation の範囲をでていない現在であるが、我々の議論は低密度のH,  $e^-$  分布を示唆するといえる。特に電子密度 ( $CH_4^+$  をも考慮して) は報告された最低の値に favorable である。

以上の計算は金星の  $H_2$  の分解に対しても同じように適用される。結果は前述のように多量のHができる。(金星と木星の光線束の相異に注意されたい。) この結果は観測に全く相反するから、恐らく多量の  $H_2$  があるという仮定そのものが誤っている。

次に大気攪拌の原因について考えよう。これ迄に金星の場合には  $10^7$  以上、火星の場合には  $10^6$  以上の  $\kappa$  があれば電離層データを説明できることが判った。これらは地球の  $10^6 - 10^7$  という値に対して reasonable といえるであろうか? 地球の場合、約100Kmの上空迄大気が完全に均一組成であることが観測されているが、この攪拌の原因をなすものとして一番有力な現象は内部重力波である。地表近くにある乱流(水の潜熱放出、山脈近傍での非層流化などによる。)からの擾乱がこの波となって上層大気に迄上り、適当な energy conversion で再び乱流化し mass transport を行なうといわれる。火星の場合、このことは非常に行なわれ易い。まず海がないので、地表面の温度日変化が極端に強く、それに大気が薄いので、下層では大気が非常に乱流化し易く、前述のように  $\kappa$  が  $10^8$  位になる可能性がある(Goodyら)。内部重力波は大気の scale height の2倍の距離上る間に振幅をe倍増しながら指数函数的に増大する。したがって、途中で粘性のために振幅を減少する効果があったとしても上層大気中に強い乱流を惹き起せよう。しかも  $CO_2$  は赤外線を出しやすいので、上層大気は擾乱に対し不安定になり易い(Belltonら)。

我々はむしろ火星の上層大気においては渦拡散常数  $\kappa$  が  $10^8 - 10^9$  cm<sup>2</sup>/sec と非常に強い方が、多くのデータを説明する可能性が強くなると考える。まず第一が外気圏温度である。Chamberlain McElroyらは  $CO_2$  や CO の赤外輻射による大気冷却は有効であるが、それにもかかわらず  $T_{exo}$  は  $400^\circ K$  以下には下がらないと言う。しかし上記のように渦拡散が強い場合には、これ

に伴った熱輸送が赤外項より、より冷却に寄与する。plasma scale height から示唆される  $T_{\text{exo}}$  はむしろ  $200-300^\circ\text{K}$  であるから、連続・運動方程式に energy balance の式を加えて解けば、この現測値がきれいに説明されるのであろう。(我々は § 3.1 では適当な温度分布を仮定して解いている。) ただ、この計算は現存の計算機的能力をもってしては例え一次元の問題としても不可能であり、何らかの近似が必要である。次に高分解能赤外吸収観測で最近得られた下層大気中の CO 量の問題を考えよう。CO<sub>2</sub> の分解でできた CO と O は下層へと運ばれ、いずれ再結合するが、O 同志の再結合係数が一番大きい<sup>\*</sup>ので CO と O<sub>2</sub> になる。さて惑星の寿命は約 45 億年、その間ずっと太陽が同一光度で照りつけている。すると生産される CO と O<sub>2</sub> の量は観測された量より遙かに大きいという矛盾が生じる。我々はこの矛盾も  $\kappa$  が大きいことによっても救われると考える。∵ 太陽からの flux  $\phi$  は一定。 $\phi = nv$ ,  $v \sim \kappa/H$  ( $H$  は大気の scale height  $\frac{kT}{mg}$ ) であるから、下へ降る CO と O の密度  $\kappa$  が大きいほど小さい。下層大気に或る程度 CO と O<sub>2</sub> が貯ると  $[\text{CO}]_{\text{下}} \gg [\text{CO}]_{\text{上}}$  and  $[\text{O}]_{\text{上}}$  となるから O はむしろ下に貯っている CO と再結合して CO<sub>2</sub> に戻り、無くなった CO は降ってきた CO により補なわれるという "self buffering mechanism" を考えるのである。勿論観測の  $[\text{O}_2] \sim [\text{CO}]$  も説明される。(また、detail は省略するが plasma scale height が  $120 \sim 200 \text{ Km}$  領域で一定という事実の説明にも  $\kappa$  が  $10^9$  位の方が良いということもある。<sup>7)</sup>)

では金星の場合はどうか。この場合着目するのは、紫外および赤外写真によって得られた雲についての情報である。まず雲の縞模様からこのレベルに強い乱流があることが示唆された。Goody らは運動の non-linearity が強い<sup>8)</sup>ためと言い、Thompson が議論したように convection と wind shear の相互作用により運動量が雲のレベルに集中してくる機構も考えられるから、これはありそうなことである。すれば内部重力波で乱流が昇ってくるかも知れない。もう一つの可能性は大気循環に伴う水平方向の攪拌である。我々の計算

脚注米  $\text{H}_2\text{O}$  があると或る種の触媒反応で CO と O の方が速く再結合するのだが、観測された  $\text{H}_2\text{O}$  量は余りにも少なすぎる。

清水幹夫

は一次元に限ってやっと遂行できるので、三次元の運動としてはとても直接計算できない。しかし、次のようにその結果を推定することはできる。：垂直攪拌の time constant は  $H^2/\kappa$ ，一方水平攪拌のそれは，金星半径を  $R$ ，水平の風速を  $v$  として  $R/v$ 。両者を等しくおいて適当な数値を入れると  $\kappa=10^7$  に対して  $v=100\text{ m/sec}$  を得る。これは丁度雲上の観測値である。したがって金星の場合にはその周りを廻って吹く地衝風が上層大気においても起っておれば，これが  $\text{O}$  や  $\text{CO}$  を薄めている可能性がある。ちなみに地球上層大気においては  $200\sim300\text{ m/sec}$  の風が観測されている。

木星においても， $\text{NH}_3$  のスペクトル線の傾斜から，雲レベルで  $v\sim$  数 km/sec の風があるという報告があるが確実なものといえない。内部構造の理論計算から，地表部分は固体化せず対流状態にあるともいわれるが，これも一試論に過ぎず，観測データは無い。しかし雲に縞模様があることから言っても大気が何らかの運動状態にあることは確かである。したがって地球型惑星の場合同様，dynamical effect が起る可能性は充分にある。なお最近 Osawa らは海王星において乱流を示唆する現象を発見している。

#### § 4. 物理的描像のまとめ

以上の議論にもとずき，我々は惑星大気に関する次の描像を提出する。分子素過程については I と全く同一であるが dynamical processes が完全に考慮されている点で改良されている。この描像は今迄に出た宇宙ロケット・大気圏外ロケット・赤外・紫外・マイクロ波領域分光などのすべてのデータに何一つ矛盾しないものである。

火星大気は主に  $\text{CO}_2$ ，それに反応不活性の  $\text{N}_2$  から成り，極めて薄く，全体として強い乱流状態にある。このため太陽紫外線で分解してできた  $\text{CO}$  と  $\text{O}$  は下層大気に運ばれ，そこで再結合が行なわれる。貯まる  $\text{CO}$  と  $\text{O}_2$  の量は  $\text{CO}_2$  の  $10^{-3}$  位。また  $F_1$  タイプの電離層も薄く低くなり，外気圏温度も渦拡散に伴う熱輸送と大気成分の thermostat 効果でぐっと下がる。 $\text{O}$  の密度したがって  $\text{O}_3$  のそれが低いから，地球のように成層圏と mesopause の間に温度極大があることはない。

金星大気も殆んど  $\text{CO}_2$  から成るが，極めて濃く，また greenhouse 効果と

convection 効果が相いまって地表は高温。雲のレベルでは金星を一周する強風が吹き、乱流性も強い。 $\text{CO}_2$  の分解に対する大気循環または乱流の影響は強く、上層大気現象は上記の火星の場合によく似てくる。金星コロナとでもいうべき H ガスが囲りにあり、その下層部には質量の大きい D が逃げ遅れて取り残されている。

太陽から遠く低温の木星は、大質量の  $\text{H}_2$  と  $\text{He}$  が主成分。 $\text{NH}_3$  雲には明らかに大気循環と乱流の影響が見られる。これら下層大気運動の影響で、弱い太陽放射線による大気の解離・電離は非常に妨げられるであろう。

金星・火星は磁場が小さいが、薄いながら電離層があるため solar corpuscular stream との相互作用で shock front を周辺に持つ。そのスケールは地球のそれよりずっと小さい。木星の場合には大規模なものがありうるが、その電離層との関係は以前宣伝されたほど強くはないであろう。

以上の描像は近い将来再三試される機会がある。例えば Mariner '69 の塔載機器は、火星の  $\text{P}_{\text{exo}}$ , O 量,  $\text{O}_3$  量などを測定できるし、電離層の 64 年の時との差異は太陽活動の極大極小に対する response の度合を反映する。Venera 5 が昼側の測定をすれば、これも重要なデータをもたらす。I で夢想していたデータは僅か数年の内に集まってしまった。少なくとも地球型惑星に関する限り、ここ二、三年の内に realistic picture が確立しそうである。惑星大気モデルの真の意味は、太陽系の起源問題へのデータ、特に atmosphere, oceanosphere, biosphere の進化に対する洞察の手掛りにある。これに関する議論は別の機会に譲る。

最後に計算機使用その他の機会を与えていただいた Joint Institute for Laboratory Astrophysics, Environmental Science Service Administration, National Centre for Atmospheric Research (以上 Boulder) および Jet Propulsion Laboratory, CIT (Pasadena) の諸研究所、それにいろいろの情報を伝えていただいた上記の研究所や Harvard, MIT, Goddard Institute at New York, Stanford Research Institute, Ames Research Centre, La Jolla などの研究者の方々に厚く御礼申し上げる。

Reference

- 1) 清水幹夫：応用物理，1969年4月号
- 2) Johnson, F.S. : Science 150 (1965) 1445
- 3) Chamberlain J.W. & McElroy M.B. : Science 152 (1966) 21
- 4) McElroy, M.B. : Astrophys. Jour. 150 (1967) 1125
- 5) Norton R.B. et. : Plan. Space Sci. 14 (1966) 969
- 6) Donahue T.M. : J.Atmos. Sci. 25 (1968) 568
- 7) Shimizu, M : Icarus 9 (1968) 450, 10 (1969) 1 etc.
- 8) Barth, C.A. : J.Geophys. Res. 73 (1968) 2541
- 9) Zabusky : thesis, Princeton Univ. (1960)
- 10) Rasool S.I. & Gross S.H. : Icarus 3 (1964) 311
- 11) Shimizu, M : Prog. Theor. Phys. 32 (1964) 977