

太陽系・惑星科学の可能性*

堀 内 剛 二**

1. まえがき

「天気」誌上にこの種の報文が適当かどうかはいささか疑念もあるが、編集部への了解を得て読者の参考に供したい。天気 (weather) 現象は概ね地球大気の水蒸気に起因するものとして主にその対流圏に限定されるが「天気」は日本気象学会の機関誌である故、広く一般に気象学をカバーすると思われる。ところで「気象学」の名はアリストテレスと共に古きに遡り、語源的には「気中現象学」を意味する。いわゆる近代気象学 (meteorology) が地球大気低層の天気現象に重点を置いたのは、それが近代科学の発達の基本的志向として実用性を重視したことによるものでもあろうか。しかし、そうした発展過程を通じて、気象学は大気物理学となり、やがて地球物理学となって現在各大学において組織的にはほぼ固定されているのはすでに周知の通りである。この方向は、さらに、大気科学 (atmospheric science) ないしは地球科学 (earth science) の成立へと進展し、その傾向を最も適確に示す用語として「境界領域」また一種流行語として「学際的」などが見られる。総じて「用語」というものは、流行語であっても、それなりの存在意義を持つものである。

さて、筆者は特に新を追う徒ではなく「日の下に新らしきものなし」の深長なる意義を十分体しているものと自認し、むしろ好古癖にすんなりやまされているが、自然科学における新事実については自ら関心せざるを得ない。三世紀半以前ガリレオの望遠鏡発明が人類の視覚空間を拡大して以来、このところ宇宙空間飛翔体による人類の情報収集可能領域は第二の飛躍的増大を招来しつつある。このようにして得られた多くの新事実をわれわれはどのように受けとめ、これを既知のものへと繰込むのか。マリナー10号が1973年11月2日打上げられて、1974年2月5日金星大気フライバイ、つづいて3月29日水星至近距離 700 km に達したが、その間 146 日の空間飛翔である。パイオニア 10号は、打上げ後約 300 余日後の

1973年12月4日木星大気探査の後太陽系外への軌道を取り、続いて同11号は、昨74年末再び木星フライバイの後二年を費して土星に向う軌道にある。こうして太陽系内惑星 (inner planets) はすべてわれわれの探測範囲となり、外惑星 (outer planets) の特に巨大な木星・土星 (内惑星に比し進化度が小さいとされる) がほぼ探測可能となりつつある。日本の宇宙空間探査も独自の道を歩み、去る2月24日科学衛星3号 (熱圏探査衛星スラッ) を軌道に乗せ、空間科学探測の世界的連繋の下に多様なデータ収集を行いつつある。これらの客観的条件は、漸次、地球物理学ないし地球科学をして、内惑星物理学 (科学)、外惑星物理学 (科学)、さらに太陽系・惑星科学へと変貌せしめるかのごとくに見える。しかし筆者は徒らに誇大言辭を弄することを好まないで、かかる傾向を端的に示すものとして「比較惑星科学」とも称し得る最近の地球科学の傾向を指摘すでにとどめよう。すでに「比較文学」また「比較文化」の用語が知られており、それらはすべてグローバルな背景を持つが、「比較惑星科学」は大陽系とその生成・進化を前提とするものであり、いつかは「太陽系科学」となるはずのものである。

2. 太陽系をめぐる問題

気象学に関連したういわゆる「惑星気象学」の問題としては、すでに本誌で紹介もされたように、火星と金星の CO₂ 大気、また赤外観測による木星と土星の水素・ヘリウム大気、またこれらと共に NH₃, CH₄ が大気組成の一部として知られている。水星も CO₂ 大気と一応は推定されていたが、事実は水素・ヘリウムであったこと、しかも磁場を持つことが分り、惑星大気物理学者を驚かせた。この時点より比較惑星大気物理学は始まったといつてよく、これは惑星大気の生成過程に及び、さらには惑星系の生成と進化に不可避的に連ならざるを得ない。最近の報告は木星に水蒸気存在を報じたが、地球大気が酸素・窒素大気であることの必然性への追求は、固体地球を含めた地球惑星全体として考慮されねばならず、これは太陽系科学への道とならざるを得ない。

* Possibility of Solar-system and Planetary Science

** G. Horiuchi, 東海大学理学部

太陽系起原に関連する問題の提示は、実際には極めて多様多様であって、正直のところ至る所なぞに満ちているといえるが、ここに H. Reeves (1974) によって例示して見よう。

i) 太陽と惑星とはともに同じ星間物質雲から出来たか否か。これは近接星との遭遇 (encounter) による成分物質の附加の問題であるが、いまのところ否定的である。しかし Alfvén-Arrhenius は太陽がその磁場によって星間物質雲を捕獲し得ると考える。これは太陽と惑星の化学的・同位元素成分の問題で、系統的差異があれば起源を異にすることとなり、Ne の重要性が指摘される。

ii) 太陽原始星雲から惑星物質はどのようにして分離したか。例えば Scholz (1972) は太陽原初星雲の回転扁平板の外縁部が回転不安定によって、一部の重力収縮とケプラー軌道に残る部分とに分れるとした。この問題はカント・ラプラス以来の発想であるが、極めて困難なので、Safronov は太陽の周りをまわる原初惑星雲の存在を仮定し、中心的収縮のない回転運動のみを持つとした。現在あるような太陽が惑星よりも先に出来たかどうかについてすら、われわれはなお確答することを差控えなければならないことは後に述べる。

iii) 原初惑星雲の大きさの下限はどうか。

原初惑星雲の全質量 ($10^{-3}M_{\odot}$ 、太陽質量) に各惑星から逸散した揮発性元素を加算してその下限が得られ、ほぼ $10^{-2}M_{\odot}$ としてよい。しかし、上限として Safronov は例えば近接惑星による重力擾動による物体射出で角運動量再分布が生じ、太陽以外のものを太陽に近づけることになる。種々の想定で上限値は $0.5 \sim 0.6 M_{\odot}$ とされ、最近木星磁気圏尾部で可能性の指摘された planetary wind (また stellar wind) による大量の惑星物質の射出を考慮して (約 $10^{-6}M_{\odot}/\text{year}$) 数 10% の質量射出が $10^6 \sim 10^8$ Years で推算される。

iv) 星間物質雲が周囲から分れて単一の物体となるには、重力場が、熱的、磁氣的、遠心力的な力のバリアーを越える必要がある。

熱的なバリアーとしては、簡単なモデル推算で

$$M/M_{\odot} \geq 10T^{\frac{3}{2}}N_H^{-\frac{1}{2}}$$

M は物質雲質量で、 $T \sim 100^{\circ}\text{K}$ 、 $N_H \sim 100$ で $\geq 10^3 M_{\odot}$ となる。

磁氣的バリアーとしては、凝縮惑星 M_C 質量の可限として

$$M \sim B^3/G^{\frac{3}{2}}\rho^2 \approx 10^4 M_{\odot}$$

ただし、 G_c は重力定数空間磁場、 $B = 3 \times 10^{-6}$ ガウス、 $N_H = 10$ のモデル雲の場合である。原初星雲の凝縮がアーム領域に入ると星雲ガスは圧縮され、アームに平行な高密度リッジを形成し、それは磁力線に平行となる。

角運動量バリアーについては、凝縮星雲運動で $10^3 M_{\odot}$ の均質雲 ($N_H = 10^3$) の単位質量平均角運動量は $L_C/M_C = 0.4R_C^2\Omega_C$ 、 $\Omega_C = 10^{-15}\text{s}^{-1}$ (平均銀河系角速度観測値) に対して少くも $10^{22}\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ となる。一般に $L/M \sim \Omega R^2 \propto \Omega(M/\rho)^{2/3}$ と書いて、 $M_C = 10^3 M_{\odot}$ から $M_s = 1 M_{\odot}$ への fragmentation があつたとすると L/M は 10^2 減少して典型的スピン値 $10^{20}\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ となる。現実的には初期型と後期型の星を分け、前者では $L/M \sim 10^{18}$ が得られていて、fragmentation 後初期値の 10^{-2} 小さくなっていることになる。後期型は $L/M \sim 10^{16}\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ である。興味あることは、太陽は後者に当たるが、太陽系全体は前者に属し、従って太陽はその初期角運動量の大部分を惑星系に移したことが示唆される。現在太陽系角運動量の大部分は外惑星域にある。

v) 惑星雲の物理的条件

隕石の分離による物理化学的条件は、普通の宇宙空間 grain の温度 ($200 \sim 1,000^{\circ}\text{K}$) よりも高いガス温度の存在を示し、局所電離による 10^4K が示唆されていわば super corona としての星雲状態が想像される。中央面での温度・密度プロファイルは Larson モデルで得られ、低温での金属鉄 grain や氷晶の形成を考慮して $200 \sim 4,000^{\circ}\text{K}$ 低温ガスのオベシティーが調べられる。こうして、固体の高オベシティーによって、 $3 \sim 10 \text{AU}$ 領域に強い対流が発生し、一方水素分子解離による星雲中心部 ($< 1 \text{AU}$) にもいま一つの対流域が現れる。射線方向のガス圧の効果により、星雲内のガスの円運動は同一距離でのケプラー速度 (10AU で $5 \sim 10 \text{km/s}$) より小さく、ガスと固形物質との回転速度差 (約 1km/s) が生ずる。これによって凝集過程で固形物体によるガスの掃除 (sweep away) が起こる。内惑星体に特有な高密度金属元素の存在はこうした grain に起因すると推定され、ここに内惑星科学の独自性があるといえるが、詳細はなお今後に残されている。惑星体の形成に温度が重要な役割を演ずることはまた後にものべる。

3. 惑星形成をめぐる諸問題

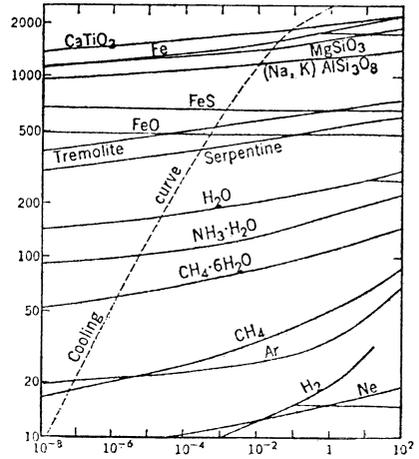
太陽系の原初形態がオリオン星雲の外形に類似したものであつたろうことは推測に難くないが、その年齢が約 4.5×10^9 年程度であること以外は、惑星形成過程についてほとんど手掛りがない。考え方としてほぼ二つのもの

があり、一つは、 $10^3 M$ (太陽質量) 程度の grain とガスを含む星間物質雲がいわゆる縮潰 (collapse) を起し、一部 $2 M$ のものが冥王星軌道程度のやや厚いディスクを形成、中心温度 $2,200^\circ\text{K}$ となって grain を蒸発させる一方、外縁は数 10°K 程度にとどまり、ディスク全体は収縮によって回転を早める。こうしたディスクの温度によって種々の金属鉱物が凝結し、現在の地球軌道付近はほぼ 600°K と推定される。大きい grain は漸次中央面に落下してディスク内により薄いディスクを生じ、これは大規模な不安定を起して細片に分れ、そして重力凝集で直径 1 km 程度のいわゆる微惑星 (planetesimal) を作る。この時点ではまだ太陽は存在したかどうかは分からない。微惑星はさらに結合生長して月よりもやや小さい原初惑星 (protoplanet) となり、さらに重力擾動によって衝突し地球型内惑星形成に至る。同時に、系中心部のガスは高温を保ち、縮潰して太陽を作り、ディスク外縁部のガスは木星、土星の巨大惑星形成に寄与する。太陽は初期段階に大量の質量射出を行い、回転は弱まる。

いま一つの考え方は、惑星形成前にすでに太陽は存在していたとするもので、この時惑星形成過程は太陽物質の射出効果を強く受けることとなるが、ここには省略に従うこととする。上記のような太陽系雲モデルの数値的シミュレーションについては Cameron, Pine, Larson などが行って、かなり詳細な過程が論議されている。

惑星体の縮合形成前に原初星雲物質が高温段階を経ているという仮定は、隕石組成その他種々の点でかなり根拠があるが、これに基づく惑星形成のいわゆる condensation sequence の理論は極めて注目されるものであろう。星間空間物質の重要成分である鉄化合物と珪酸塩 (シリケート) よりなる grain は凝縮加熱で一部蒸発し、つづく冷却によって物質雲から凝結するが、これは温度に依存する故初期太陽系での鉱物成分分布は惑星体近傍の温度できまるといえよう。原初太陽系星雲物質の15の最も多い元素について平衡温度を求め、温度と圧力の関数として凝結曲線を求めることが出来る。計算は Grossman, Larimer (高温部) と Lewis (高・低温部) が行い、結果はよく一致し、第1図に示す通り圧力にあまり関係しないことが知れる。冷却曲線として示したものは断熱過程のものである。これによって惑星密度が極く簡単に説明できることが注目すべき結果であって、地球型内惑星は $100\sim 200^\circ\text{K}$ 程度の狭い範囲で凝結したことになる。

ここで一応各惑星について見ると、



第1図 主要太陽系雲物質の condensation sequence

i) 水星: 密度 5.4 g cm^{-3} で、 $60\sim 65\%$ は鉄ニッケル合金のようで、 MgSiO_3 が凝結してしまはしない 1400°K 程度の高温でその組成物質が凝結したとするとその密度の説明がつく。しかしそうした温度では FeO はごく少ないはずであるが、マリナー-10号の高アルベド観測は FeO のかなりの存在を予想させるもので、これは恐らく二次的なものと思われる。

ii) 金星: 950°K 程度で凝結し、マントルにマグネシウムシリケート、核に鉄ニッケル合金、これらにアルカリ金属が加わるであろう。

iii) 地球: 約 600°K または以下程度の凝結温度が予想され、核外部は鉄でその 15% 程度は Fe-FeS を含み、マントルは FeO 約 10% とされる。地球の hydrosphere と crust には地球質量の 0.05% 相当の水が含まれよう。

iv) 火星: 密度はやや小さく鉄は FeO の形で、凝結温度 450°K 程度に当り、回数慣性モーメントから推定して核は FeS 、マントルは FeO が多いであろう。核は金属鉄を含まず、磁場の欠除が示唆される。

以上の要約で内惑星形成は一応系統立てられよう。しかし一方、惑星形成の物理的な問題はなお詳でない。微惑星形成にもなお不明の点があるが、数千年にわたって約 10^4 個の微惑星が除々にクラスターを形成し、直径 5 km または以上の二次的な微惑星となり、回転クラスター系では月質量の 10% 程度 (10^{25} g) にもなりうる。これらが惑星形成のいわばブロック材料となりうる。外惑星距離の場合は一次的に直径 100 km 程度、二次的に地球質量相当のものとなり、これらの数千個によって外惑

第1表 地球・太陽系組成
(a) 原初惑星大気モデル

気体元素	重量%
H ₂	63.5
He	34.9
H ₂ O	0.6
Ne	0.34
CH ₄	0.26
NH ₃	0.11
A ³⁶	0.15

(b) 全地球組成と太陽系組成 (対 Si 10⁴ 原子)
(Rasool, 1972 による)

元素	全地球	太陽系	欠損因子 log (b/a)
H	250	2.6 × 10 ⁸	6.0
He	3.5 × 10 ⁻⁷	2.1 × 10 ⁷	13.0
C	14	135,000	4.0
N	0.21	24,400	5.1
O	35,000	236,000	0.8
Ne	1.2 × 10 ⁻⁶	23,000	10.3
Na	460	632	≈ 0
Mg	8,900	10,500	≈ 0
Al	940	851	≈ 0
Si	10,000	10,000	0
A ³⁶	5.9 × 10 ⁻⁴	2,280	6.6
Kr	6 × 10 ⁻⁸	0.60	7.1
Xe	5 × 10 ⁻⁹	0.07	7.1

星形成に至ると想像されている。

微惑星より惑星系成立への過程は現在なお不詳の問題が多いが、内惑星について condensation sequence による組成が説明され、原初太陽星雲の grain 対流領域を考慮すれば外惑星が原初星雲により近いことが予想され、その意味でも外惑星探測は太陽系科学に重要な意義を持つのである。しかも外惑星は多くの衛星を持ち、またその衛星自体に大気を持つものもあって、これらの衛星についての知見は地球科学に今後興味ある問題を提示する可能性が十分にあるであろう。ここで参考までに原初惑星大気モデルと太陽系・全地球組成を第1表に掲げておこう。

4. 月をめぐる問題

われわれの宇宙探査のうち最も資料的に豊富なものは地球自体に次いで月ということになり、月面はすでに人類の足跡を印し、月面資料収集、地震波動探測その他の

科学結果が蓄積されている。しかし、それにも拘らず月に関するなどは逆説的には増大したかの感がある。

月面クレーターは望遠鏡発明以来知られていて、火山活動と隕石落下の説がなされ、前者は月内部の問題に関連して識者の興味をひいていた。最近マリナー10号による水星探査が成功し、その水星面写真は極めて月面に酷似し、明らかに隕石衝突によるクレーターであることを証した。火星面にもまたわれわれの地球にもこうした経過が認められ、これが惑星体形成に重要な物理的ないし化学的な進化因子の役割を演じたと推定されるに至った。そしてこの現象は太陽系・惑星形成の初期段階 0.6 × 10⁹ 年に集中しほぼ 3.5 × 10⁹ の年にはほとんど終了していたと考えられる。こうした隕石物体はおそらく太陽系外縁起源のもので惑星凝縮過程にかなり重要な寄与をしたと研究者は推定している。最近の小惑星帯(アステロイドベルト)測定によると直径 100~200 km 程度の石質・鉄アステロイドがかなり見られ、大部分が二つの面に分布していると報じている。それは兎に角として、太陽系形成の初期において原初惑星がこうした形での極めて大規模な物質交換 (matter exchange) を経たことはほぼ確実とされる。これは惑星トポロジと表面岩石の物理的性質に大きい効果を持った。

第二のより興味ある事実は、その年齢が約 4.5 × 10⁹ 年で隕石資料その他より得られる太陽系創生年齢に一致することで、こうして太陽系進化、さらに具体的には地球型内惑星進化が共通な問題として提示される。すなわち、月、火星、水星、金星のみならず、隕石の多くやいくつもの小惑星に至るまでが、すべて元素 separation、惑星内熔融 (melting) または火山活動、要するに地球化学・地球物理的なヒストリーを持つことが明らかになった。惑星が形成されて後金属性の核、シリケートに富むマントル、より軽い地殻物質となることを普通に differentiation と呼び、そこには加熱機構が関係する。熔融によって生ずる玄武岩のような火山性物質は惑星内で生成されることになるが、一方隕石のある種のものにはすでに differentiation 過程を経た物質が含まれ、ここで原初成分元素の separation や進化過程が惑星体の形成後かその凝縮過程と並行していたかが問題となる。しかしより根本的には、太陽系内物質の多くは化学的にいて原初性 (primitive) を持たず、系の生成と変化とは時間的にあまり違わなかったことは疑いの余地がない。鉄隕石の存在や最近の小惑星赤外線観測で示された玄武岩性の表面を持つものの存在は、こうした推測を裏づけ、

いわゆる微惑星 (planetesimal) より惑星への分裂をも含めた縮潰過程の複雑性を予見させる。

月面観測によってかつてそこに大規模な火山活動が存在したことは疑いを入れないが、熔融による crust, maria 形成も想定され、1,000 km 程度の深部には部分的熔融も否定されない。事実アポロ15号による磁場測定は双極モーメント 1.3×10^{18} gauss-cm³ 程度の上限值しか得られていないが、誘導磁場を考慮すれば後のような弱い電離層の存在を示唆している (C. T. Russel *et al.*, 1974)。また最近マグネトメーター資料により、内部温度プロファイルより弱いマントル対流が推定されていることを附記しておこう (A. F. Kuckes, 1974)。

いま一つ、月に関するミステリがある。月は現在地球の衛星として古人々の詩情と冥想をそそって来たが、その平均密度が地球型内惑星のものに比してかなり小さく、後者は約 30% の鉄を含有し、これは石隕石や太陽非揮発性成分とはほぼ近いのである。一つの考え方は月物質が熔解し難いもので、主としてカルシウム、アルミニウム、チタニウムなど、またバリウム、ウラニウム、トリウムなども少量ながら含まれるとされよう。しかし、月が内惑星の兄弟なのかどうかは依然不明であり、これは内惑星形成過程という難問に関連する。もし CaTiO₃ のような非溶解性のものを含むとすると非常に高温での凝結過程を要する。こうして、月はあまり衝突などによる二次的過程を経ない惑星系形成時の原初物体の一つであるという考え方、そしてまたこれが太陽系形成における原初的ブロック物体で、少くも現在の場所以外に起源を持つと考えてよい。それが地球の衛星となった時、その際の激烈な相互作用は地球地質的年代における決定的なイベントとなったであろう (Abstracts of the 4th Lunar Sci. Conf., 1972)。

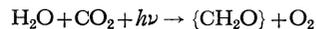
5. 惑星大気

さて、気象学に関係の深い惑星大気については、すでに若干のエキスパートもあり、かなり省筆してよいと思う。地球型内惑星についていえば、現在の大気はほとんどが二次的に形成されたもので、木星型外惑星は原初惑星ないし太陽系組成によってある程度説明されるとされている。内惑星大気進化について、軽元素ガス逸散、惑星内部よりの out gassing が主な役割を演じ、初期太陽風の効果なども考慮されよう。

i) 地球：地球大気組成と太陽系元素存在比を見ると、いわゆる noble ガスと軽元素 (水素、ヘリウム) の欠損が著しく、前者は地球が固体粒子の agglomeration

によって形成されたことを意味し、後者はいわゆる重力場よりの escape (最近 polar wind, 低エネルギープラズマ逸散も寄与するとされる) による。こうして地球大気は内部よりの out gassing によることとなり、火山活動とまた月 capture の際の大規模な不安定の可能性も否定されない。最多量のもは水蒸気で地球全表面平均で約 3×10^5 g cm⁻² に達し、海洋を形成する。次いで CO₂ は 5×10^4 g cm⁻² 程度で大部分が炭酸塩として地殻に含まれ、窒素放出はそう多くはなく 10^3 g cm⁻² のオーダーと見積られるが、一部は地殻に移るがその不活性のため大部分は大気に残留し現在主要成分をなしている。他のものについてはここには省略する。

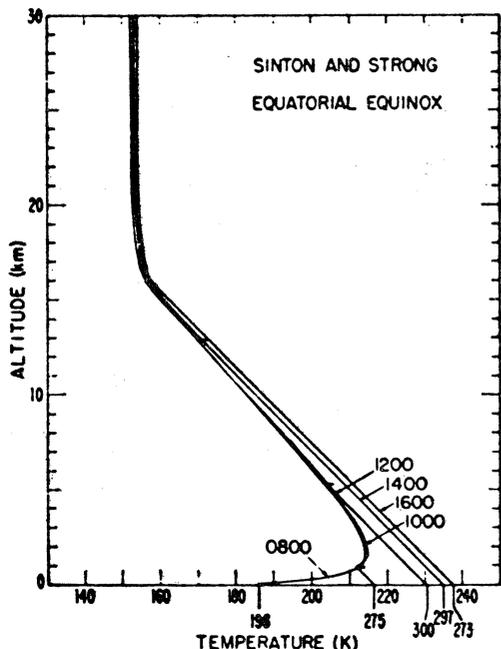
地球大気の酸素の問題は、生物の存在条件に関連して興味がある。大気生成初期には還元作用で CH₄, NH₃ が出来るとされる。自由酸素生成の可能性は H₂O 光分解が考えられるが、定量的には弱いソースで、酸素の蓄積自体が H₂O の光分解を遅らせるからである。これは危ななことであるが止むを得ない。いま一つの酸素源としては



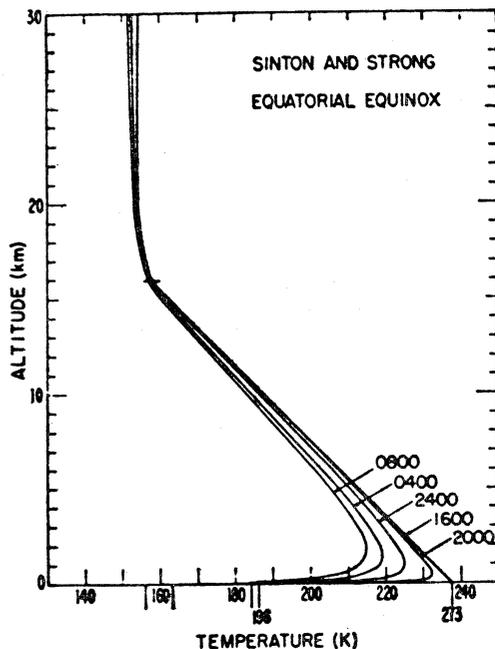
つまり Carbon hydrate と O₂ 生成である。しかし、酸素大気の問題でいつも提示されるのはいわゆる photo synthesis (光合成) であって、これは大気進化の time scale と海洋にも関係し、海洋中植物が酸素を光合成で放出した時点は 2×10^9 の年程度 (Cloud, 1968) とされている。カンブリア期 (6×10^8 年) 以前は酸素は現在の 1% 程度、後急増して 4.2×10^8 年前 (Silurian 期) で 10%、この期には O₃ による紫外吸収が始まるとされる。

ii) 火星大気：火星大気は主として内部よりの out-gassing によるものとしてよく、総量ははるかに少なく、H₂O 3×10^5 g cm⁻², CO₂ 5×10^4 g cm⁻², N₂ 10^3 g cm⁻², Ar 10 g cm⁻² 程度、平均表面温度はマリナー 4, 6, 7 号で 220°K 程度、成分と温度分布モデルは第 2, 3 図に示す。大気は薄く 3~8 mb ほぼ CO₂ 大気としてよい。1 mb 高度に温暖層、また 150 km に 10^5 cm⁻³ 程度の電離層がある。火星表面にはしばしば大規模な dust storm がありほぼ全面を掩うこともあり、気象学的に興味を持たれている。磁気はほとんど見られず、その衛星 Deimos, Phobos は極めて異形を呈していることが注目される。

ii) 金星大気：金星は雲に掩われ、空間飛行体によってようやくヴェールをはがれた惑星で、大気は CO₂ 大

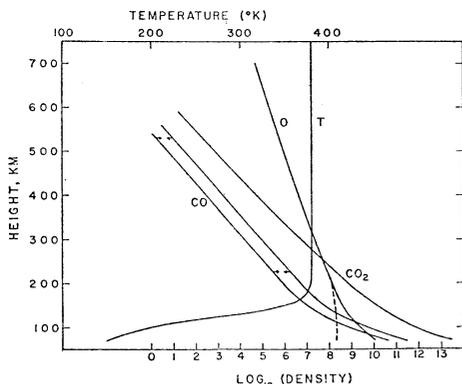


(a) 昼間分布



(b) 夜間分布

第2図 火星大気温度分布 (Gierasch and Goody, 1968)



第3図 火星 CO₂ 大気モデルでの CO₂, O, CO 分布 CO は上下限 (G.E. Thomas, 1971)

気としてよく、CO₂ 97%, N₂ 3% モデルが用いられる。表面気圧 90 ± 15 kg cm⁻², 温度 747 ± 20°K と高温で厚い大気である。気圧分布を第4図に示す。H₂O を少量含むことが注目され、out-gassing による H₂O は

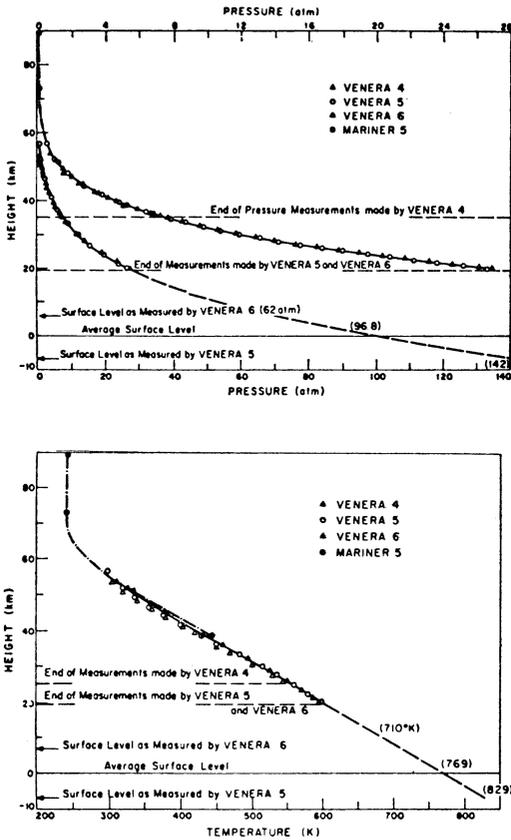
$$C + H_2O \rightarrow CO + H_2 : 2 CO \rightarrow CO_2 + C$$

または地球の場合同様の光分解が考えられる。

iii) 水星大気：水星はパイオニア10号による探測以

前大気を欠除しているとされていたが、少量の CO₂ 大気 の存在は推定されていた。しかし、パイオニアの結果は予想を裏切って、微量大気ながら大気柱粒子密度で Ne 3 × 10¹³ cm⁻², Ar 1 × 10¹³ cm⁻², Xe 1 × 10¹², H 1 × 10¹¹, O 1 × 10¹¹, He 7 × 10¹¹ cm⁻² その他が検出された。これは UV 測定のもので1974年3月29日 2028 GMT, 温度 550°K である (A.L. Broadfoot *et al.*, 1974). 注目すべきことはかなりの磁場 (至近域で 98γ, 表面より 704 km) を持ち、ボウ衝撃面と磁気圏を持つことが知られた。詳細はなお今後の資料にまたねばならない。

iv) 月：月についての最近の資料が多くの問題を提起していることはすでに述べたが、ここでは可能な月大気について記す。月は重力場も弱く、多少特殊な起源も予想され、ほとんど大気を持たないとされていたが、太陽風起源の薄い大気 の存在は可能である。水星に似て Ne が主要成分となるであろう。また気象的には日中変化が大きいといえる。太陽風起源大気をさらにモディファイするものとしては月大気象逸散であり、これは大気温度に強く依存するし、また太陽輻射による電離の寄与もある。月内部よりのガス放出を単位面積で地球と同程度とし、太陽風、日中温度変化、光解離などの効果を考慮すれば、月大気モデルが想定しうる。太陽風起源を主と



第4図 金星気圧、温度分布 (Avduvsky, et al. 1970)

した時, subsolar pt. での月大気組成は表面で $\text{Ne } 6 \times 10^4$, $\text{He } 6 \times 10^9$, $\text{H } 6 \times 10^9$, $\text{Ar } 1.2 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ となり, 内部ガス放出の場合では, CO_2 1.3×10^{10} , N_2 5.6×10^8 , $\text{H}_2\text{O } 3 \times 10^8$, $\text{Ar } 8 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ となる。前者では夜間は $\text{Ne } 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 程度となり得る (F.S. Johnson, 1971)。詳細は月大気の測定はその他の問題と共になお今後に残されている。

6. むすび

惑星科学のサーヴェーは、実は、以上ではまだ不十分で、パイオニア10号につづく11号の資料をまとめて外惑星に及ばなければならず、10号の予備的報告はすでに一部なされていて木星大気ないし衛星 Io との興味ある問題や木星磁気圏についての情報を得ており、エネルギー源や電波源について多くの論議がなされている現状である。しかし、太陽系科学についての資料についてはなお今後によく期待されるべきであって、この解説的拙文

は、一応この辺でむすびとしたい。筆者は最近空間物理について小著の草稿をまとめ、また1974年の気象学の動向について短文を草するに際し、「天気」12冊を卒読し、本誌読者に多少の参考になるかとも愚考して本文を匆々の間に起稿した。座右の書を参照する時間がなかったので、以下に二、三の文献を掲げて本稿を終る。

なお、最近の地球環境変動の問題に対しては、広義の evolution の観点も可能であることを付記しよう。

文 献

まず、一般的なテキストとしては、
 Haymes, R.C., 1971: Introduction to Space Science, John Wiley.
 Menzel, D.H. et al., 1970: Survey of the Universe, Prentice-Hall.
 Rasool, S. I. (Ed), 1972: Physics of the Solar System, NASA-SP-300.
 Reeves, H. (Ed), 1974: On the Origin of the Solar System, Center National de la Recherche Scientifique, Paris.
 Spitzer, Jr. L., 1968: Diffuse Matter in Space, Interscience Pub.
 総合報告としては；
 Hinners, N.W., 1971: The New Moon, Rev. Geophys Space Phys., 2, 447.
 Hubbard, W.B. and R. Smoluchoski, 1973: Structure of Jupiter and Saturn, Space Sci. Rev., 14, 599.
 Rank, D.M. et al., 1971: Interstellar Molecules and Dense Clouds, Science, 174, 10 Dec.
 空間飛翔体による科学測定では、
 Mariner, 9 1973: Science, 175, 21, Jan.
 Mariner 10., 1974: Science, 183, 29, March.
 Pioneer 10, 1974: JGR, 79, Sept.
 Pioneer 10, 1974: Science, 183, 25, Jan.
 啓蒙的レビューとしては；
 Exploring the solar system (1)~(V) Science 186, 1974.
 Geophysics, Physics Today, March, 1974.
 なお、本文に多少関係のあるもの若干を掲げると；
 Avduvsky, V.S. et al., 1970: JAS 27, 561.
 Radio Sci., 5, 333.
 Cameron, A.G.W., 1972: Accumulation Processes, in the Primitive Solar Nebula.
 Gierasch, P.J. and R.M. Goody, 1968: Planet, Space Sci., 16, 615.
 Johnson, F.S., 1971: Rev. Geophys. Space Phys., 2, 813.
 Larson, R.B., 1972: M.N. Roy, Astron. Soc., 157.
 Thomas, G.E. et al., 1971: JAS 28, Sept. pp. 859-1086. (3 March, 1975)