

金星・火星の分子過程

清水 幹 夫*

1. はじめに——マリナー4号での問題提起

分子過程などというしかつめらしい言葉を見ると、なじみのない方はもう興味をなくされましよう。特に複雑な化学式や分子の対称性などが出てくると、この雑誌の雄弁を持って鳴る前編集長は「こんなことがやりたくなくて天文屋になったのに、星間分子が発見されたばかりに、何の因果かまたつき合わされる」と言っしょっちゅうなげているくらいです。しかしお立ち合い、この問題は、10数年の論争に次ぐ論争の結果、例えば火星は何故赤いのか、金星の雲が濃硫酸なのは何故かといった手近な問題を解くのには有効なのだということが判り始めています。またヴァイキングの観測結果を、火星に昔大量の大気があり生物発生に都合よかったという風に解釈できるかどうかということの鍵にもなっています。面倒臭い専門用語は避け、物理的直感を主にして述べますから、まあ気軽に読んで下さい。ついでに、きれいな事書いてある総合報告などを読んでみると専門外の方はあまりお気付きになられないことなのですが、科学は人間が進めるものだけに、論争の裏でのどろどろと生臭い駆け引きがもの凄いのなのだというお話も混じえましよう。こうなると人名を出すのは差しつかえもあるので、著者の眼で見たという形で説明を進めます。しかし、学問の内容は客観的に書いてあります。

話をマリナー観測が始まる前の時期、1961年頃から始めましよう。その頃、原子分子の衝突断面積の小難しい計算に飽きた著者は、英国文化振興会の金を貰いロンドン入りした機会に、ついたマッセイ教授（ハリ卿）に何か宇宙の方面での応用をやってみたいと話をもちかけました。地球上層大気での分子過程に先鞭をつけられたこの大先生（それに止まらず、昨年迄英国宇宙空間研究のリーダーでもあったわけですが）のことで、すぐ金星の大気構造が多少判ってきているから、その辺の分子過程を調べたらヒントを与えて下さいました。東も西も判らぬところから出発していろいろ首をひねった結果、どうも金星にはかなりたくさんありそうな炭酸ガス（ CO_2 ——極めて簡単な化学式を使わせていただいた方が理解が容易です）が大気の上の方で太陽紫外線によってどのくらい壊れるかを調べてみようと思ひました。 CO_2 は CO と O に壊れるのですが、酸素原子同志の方が、

CO と O よりくっつき易いので、ある程度 O_2 ができます。この分子は炭酸ガスより紫外線を強く吸収することから、一種の自己遮蔽効果を起こして炭酸ガスの分解を少なくしてくれるだろうと期待したわけです。このために、 CO や O の量は、効果を入れないときより二桁近く少なくなります。この結果を英国の宇宙雑誌に投稿した後、ベルギーで開かれた第11回リエージュ会議に出席しました。この会は惑星が主題で、惑星探測機が出現する前のデータを整理した古典的な会議として、その後有名になりました。ここであるアメリカの油の乗り切った学者に会ったのですが、彼もちょうど火星の分子に関する計算をしたとのこと、詳しく話合っている内に全く同じものだということが判りました。途端に彼氏態度一変、以後は顔もそむけ放し。その後Ap. J.にのった彼の論文の欄外には、この話はアメリカ天文学会分科会で既に発表したという註がのる始末。太陽風吹き出し機構などいろいろな論争をくぐり抜けてきた人だけにこうも振舞うのかと仰天しました。ところでこれからの話はまさに彼の系譜をひく人達とのやり合いで、もう十数年、ヴァイキングに至って頂点に達したところなのです。

1964年マリナー4号が火星の裏を通った際、電波の屈折具合を利用して出した火星電離層中の電子分布は、地球のそれと比べものにならぬほど貧弱なものでした。早速さまざまな解釈が生まれ、いわゆる電離層論争になったのです。地球の電離層の主なイオンは O^+ ですから、

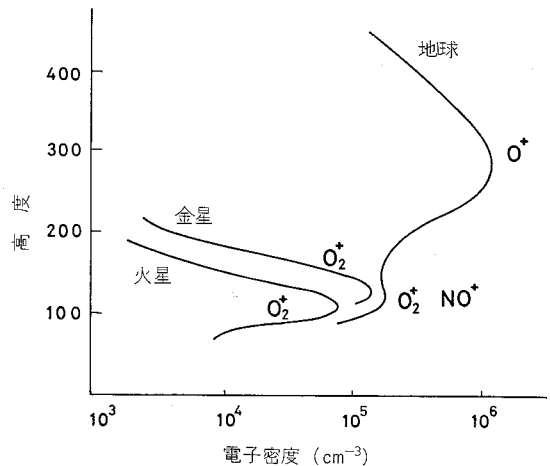


図1 地球・金星・火星の電離層の比較。地球の一番電子密度の濃い部分のイオンは O^+ 。金星・火星には、それに対応するものが無い。

* 東京大学宇宙航空研究所 M. Shimizu:
Molecular Processes in Venus and Mars.

火星大気主成分の炭酸ガスが分解してできた酸素原子がどうなっているかが問題です。火星もやはり O^+ が主イオンなのだが、ただ上層大気の温度が極めて低いので、しぼんだのだという説、 O^+ はできても炭酸ガスとすぐ反応して無くなるから、地球と違ってくるのだという説、さまざまでした。いろいろな計算が行われ、各説の当否が検討されました。その内、1967年マリナー5号とヴェネラ4号により、金星の酸素原子の大気光観測が行われ、どうも酸素原子が少ならしいということになりました。さらに1969年マリナー6,7号の火星酸素原子大気光観測も行われ、同じ結果が出ました。こうしてマリナー4号によって提起された問題は、結局、炭酸ガスが紫外線で壊れているのに、何故酸素原子が少ないのかという謎に帰着したわけです。Oの量は極めて少なく、 O_2 による自己遮蔽などではとても説明し切れません。何か別の効果がなければなりません。

2. マリナー10号にいたる迄の経過

今は、話を簡単にするため、観測結果を先に出しましたが、実際には理論的な議論の方が先攻しています。電子分布に合わせて、酸素原子量が決まるからです。まずマリナー5号の観測の直後、 CO_2 仮説が提起されました。炭酸ガスが壊れてできた直後の酸素原子は、励起状態にあるので反応性が強く、炭酸ガスと反応して、一種の触媒反応をひき起し、すぐ消えるのだというのです。



ということですが、結局 O と CO が速やかに再結合したことになります。手っ取りばやい解釈です。ちょうどその頃、炭酸ガス中で放電を起して後急に冷却して作ったドライアイスの中で、この CO_3^+ という分子が検出されたものですから、当時おおいに喧伝されました。おひぎもとのキットピーク天文台が、毎年アリゾナ会議という名で惑星の国際会議を主催していた時でもあり、時期もよかったです。この頃、前にちょっと話した学者を中心に、キットピークに集まった若い人達が、今アメリカの惑星探査に発言力のあるグループを形造っています(例の学者はその後、後輩にすべてをゆだね、分子過程からは手を引きました)。

ところで、分子論的に検討すると、上記の過程は非常に起り難いものです。 O^+ などは炭酸ガスとぶつかった時、前期解離というプロセスですぐ励起状態でなくなってしまい、反応性は消失する筈です。そこで著者は、金星や火星の上層大気は強く攪き混ぜられていて、分解してできた CO や O はすぐ薄められてしまうのだという説を出しました。実は地球の上層大気でも同じように大気攪拌が起っています。(攪拌強度は通常、渦拡散係数 K というパラメータで表わします。地球の値は $10^6 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$

です。) それなのに O がかなりあり、電離層が壮大である。これでは火星・金星と違いすぎるではないかという文句が出ました。しかし、炭酸ガスが主であるこれら惑星の事情は違うのです。炭酸ガスは(地球の)酸素と比べて紫外線に対しかなり透明なので、その分解は地球の場合よりかなり低い高度で起り、大気攪拌の影響を受けやすいのです。事実いろいろな観測に合うように決めた金星と火星の K の値は 10^6 と 10^7 であり、地球よりせいぜい一桁大きい程度で間に合います。

CO_2 仮説を実証しようとする多くの実験室内での追求が始まりましたが、誰も CO_3^+ をガス中で検出できません。固体中では周りの分子の影響(結晶場)があったからこそ安定だったのです。それに、酸素原子の励起状態は、やはり炭酸ガスとの衝突ですぐ脱励起することも確認されました。こうして CO_3^+ 仮説は雲散霧消しました。

勿論気の強い人達のこと、そんなに簡単に引込みません。今度は、極めて強烈な大気攪拌説を持ち出しました。これから追い追ひ説明しますが、金星と火星でそれぞれ 10^8 , 10^{8-9} だというのです。地球の100倍以上の猛烈なものです。

火星の大きな値は、マリナー6,7号の酸素原子大気光の結果をすぐ手に入れたこの派のある領袖が、それが電離層内の光電子の衝突によるものであるとして勘定し、酸素原子の分布にあうように決めたものです。ところが彼はその衝突の強さをちょうどその時出たばかりの実験値を使って計算しました。この実験値はしかし分子論的に大へん問題のあるもので、その後改訂され小さくなりました。すると、酸素大気光はむしろ太陽紫外線を反射して光っているとした方が無難です。この線は飽和している強いものなので、この場合、酸素原子の量はとても決めにくくなります。電子密度や電子温度の議論の方から出すか、もっと弱い線を使わなければいけません。しかし、この人は強引で、この値をたてにとり、後で述べるヴァイキングの話をやりますから、覚えておいて下さい。

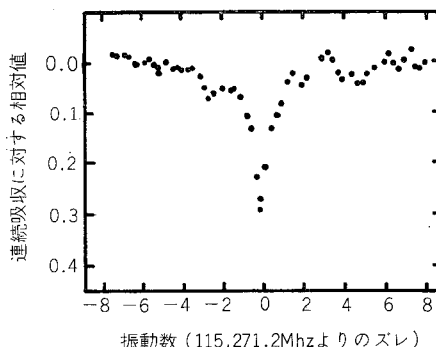


図2 金星の上層大気中のCOによるミリ領域ラジオ波吸収線。このプロファイルに合うには、 $K=10^6 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ くらいが適当である。

金星の場合ももっと話が混み入ります。酸素原子線は火星の時のように、マリナー4号、マリナー10号、ロケット観測などによって測られているのですが、結果がまちまちで混乱状態。そこで一緒に測られている水素原子線（ライマンアルファ線）から間接的に出そうというのが彼らのやり方です。水素は、金星の場合、塩化水素や水の光分解から出来る筈で、その辺の化学反応には、上の方から運ばれたCOやOが関係する。その運ばれる速さは K によって決まるという論旨です。いろいろの仮定が入るので一義的に決め難いのですが、大勢の人が一斉に同じような事を唱えると、知らない人は簡単に信じさせられてしまいます。

このへんの事情について一言つけ加える必要があります。前に攪拌で薄めるのだといいましたが、勿論物質不滅の法則があるから、OやCOは無くなるのではなく、攪き回される結果、下層大気へと運ばれ上層大気での量が少なくなるのです。その代りの分は下からCO₂が上って来て補います。下へ運ばれたOとCOは結局何らかの形でCO₂に戻らねばなりません。さもないと、45億年の間に火星や金星のCO₂はすべてCOとO₂になってしまったでしょう。しかし上層大気のように薄いガス(10¹²分子cm⁻³くらい)と違い、遙かに濃い下層大気中には、水のようにOとCOを速やかに再結合させる触媒がたくさんあります。また化学式をたくさん書かねばならぬので、具体的に式を挙げませんが、このことは実験室でも確認されているのです。ところでこの反応群の中には、オゾンなどが首を出します。これは生物に有害な紫外線を吸ってくれるガスです。また、地表にふれると砂を酸化しそうなガスもあります。火星が真赤な惑星だということが、酸化鉄の多いことに関係しそうですから、面白いことです。また金星大気中に何かの硫黄分が含まれていたら、それを酸化し、硫酸を作るでしょう。どういう過程が45億年の間続き、現在の火星の表面や、金星の雲ができあがったか。これにはCO₂からくる酸素だけではだめ(例えば火星の砂に皆酸素が使われたら、一酸化炭素がその分だけ大気中に余計残る筈だが、観測上はそうっていない)で、昔あったH₂Oから水素が逃げた分だけの酸素をも考慮しないとイケません。まだまだ将来の問題です。

話を戻すと、とにかく超強攪拌説がでてきました。それに金星の場合、上下の攪拌でなく、水平方向の風で太陽側から夜の側にOやCOが運ばれるという考え方もあります。2次元の計算をやると、上層大気では100m s⁻¹以上の風が吹く。風のtime constantは、攪拌のそれと同じオーダーですから、このメカニズムでもよいわけです。ダイナミックスを入れるといっても、また百花乱れ咲く状態になったわけです。

3. 地上観測の整備

そうこうする内に、前に述べたグループの勢力は実に強大になりました。一番頭の回転の早い人がハーバード大学に移り、発言力を強めた上、レビューを書けば自分のグループ以外の議論は無視し、専門誌のエディターとなれば都合の悪い論文は押え、惑星探測機の計画は……という具合です。それはお前のひがみだよといわれるかも知れませんが、実はこれはNASAの科学者達の悪口です。ある人は彼らにエアロノミー・マフィアという愛称?をつけました。コントラクトを取らないと月給すら出ないという競争社会の悪い面ばかり出たような感じです(競争の凄さについては、生物の関係ですが、細胞膜の滲透機構についての二派の争いが上院に持ち込まれたというScienceの76年6月18日号にのっている記事が参考になりましょう。)

そこでこの“競争”ですが、良い面に行くとうなるというのが惑星探測機と地上観測のそれでしょう。惑星上層大気といえば、これ迄探測機の独り舞台、地上観測の入り込む余地などありませんでした。探測機に押しまくられて、まだ誰も手をつけない惑星や衛星か、長期的なまたは局所的な変動を追っていた地上観測陣がこの二、三年精度を上げ、新しい観測手段を開発することによって、巻き返して来たのです。

まずフランスのコンヌ(賞めるだけの人は名前を挙げましょう)が、昨夏彼の名おうての干渉計をパロマーの大望遠鏡につけ、火星と金星から出る1.27ミクロンの大気光を検出しました。彼はアメリカで講演する際にも、俺の腕には手も足も出まいとうそぶきますが、実にその通りでアメリカの連中がぐうの音も出ないのが愉快なところです。1.27ミクロン帯は、オゾンが壊れた際にできる励起酸素分子が発光するものですから、これはオゾンの検出に当たります。この結果は上記の上層大気モデルのチェックに使えます。

星間分子の検出に電波が凄腕を発揮しているのは御承知の通りです。星間分子の中で一番多いのは(検出の難しいH₂を除けば)COで、この観測から銀河系内の星間物質の状態についての情報がたくさん集められています。ところで、このパラボラを金星・火星に向けたらどうなるか、丁度上層大気中くらいのCOの量が観測に一番向いているのです。JPLのカカール・ウォータースらはこうして、太陽光が吸収されてきたCO吸収線を検出し、その分布が、超強攪拌説で予言されたものから大変外れていることを証明しました。特に金星の場合は、バックグラウンドになる雲の温度がよく判っているのが確実です。火星の場合は、目下分析中ですが、地表40km迄は、再び同じ結果を出しています。残念なことに、

火星表面の温度は千差万別なので、平均の温度が求めにくく、40 km 以上での振舞いがよく決められません。

パークレーのタウンズ教授らは、電波天文から一歩抜けて、ヘテロダイナ技術を赤外天文の分野でも駆使して非常に解像力のよい分子スペクトルを取りつつあります。そして、最近遂に金星と火星の炭酸ガスが 10 ミクロンの辺でメーザー作用を起していることを発見しました。惑星科学史上初のメーザー線登場です。ところで、この辺の話の付録として、地上 100 km への風の速度が 10 ms^{-1} ほどであり、予測していた 100 ms^{-1} とは遠く離れていることが結論されました。ここではさし当り、この速度では O や CO を夜側へ運び切れないことだけを指摘しておきます。

このように、上層大気モデルの決定に地上観測データが大活躍しているのが現状です。やはり探測機と相補的な位置を占めていることが実感されます。

4. ヴァイキング・データの解釈

さていよいよ、最もホットなデータ、ヴァイキング 1, 2号の問題になります。ヴァイキングには2種類の質量分析器が積んであります。一つは上層大気を通過する

表 1 ヴァイキング 1, 2号によって決まった火星大気組成

ガス組成	アイソトープ比
CO ₂ 95 %	³⁶ Ar/ ⁴⁰ Ar=1 : 3100 (地球 ~1/300)
N ₂ 2.7 %	³⁶ Ar/ ³⁸ Ar=4-7 (地球 ~5)
Ar 1.6 %	
O ₂ 0.15%	¹⁸ C/ ¹² C, ¹⁸ O/ ¹⁶ O 地球の値から外れること ±10%
Ne < 10 ppm	¹⁵ N/ ¹⁴ N
Kr < 0.3 ppm	1号 1.36~1.74 (地球の比を)
Xe < 1.5 ppm	2号 1.65±0.10 (1として)

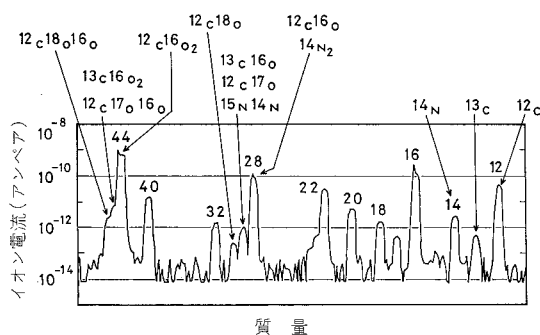
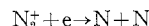


図 3 ヴァイキング 1号の上層大気質量分析計のデータ。¹⁵N/¹⁴N と ¹⁴N₂ からアイソトープ比を出す。

際、大気ガス組成を測定するもの、も一つは地上着陸後、大気分子や砂の中に含まれている有機分子の量を出すものです。この二つの測定器は 1号でも 2号でも順調に働き、第一表に示すような結果が出ました。地球・木星に続き、火星の大気主組成が決まったわけです。ところで、上層大気観測班に入っていた例の領袖、窒素同位体の結果を見て飛び上がって喜びました。重い ¹⁵N が地球に比べ数十パーセントも余計に入っているのです。彼は前から窒素や酸素原子は火星から逃げられるという説を出していました。例えば



という過程でできる窒素原子は、火星の重力を振り切って逃げられるエネルギーを持っています。そこで、仮に火星大気が出来た時、現在の 100 倍近い量だったとします。窒素・酸素（水素も勿論ですが）は、上記の過程でどんどん逃げる。その際少しでも重い逃げ方が遅くなるので、45億年経つと、大部分の窒素は失せ、始めは地球と同じだった ¹⁵N/¹⁴N の比は数十パーセントも増す。酸素の場合は、水が基だから、もともと大量なので、同位体比は目立って変わらない。こうすれば、火星の窒素は地球より重いという大発見と、生物発生に必要なような火星原始大気が大量にあったという唱い文句がうまく結びつくではありませんか。

ここで重要な点は、上記の窒素原子が本当にそのまま宇宙空間へと逃げられるか、です。もし酸素原子が少しでもあると、Nはこれと衝突し、跳ね返されてしまいます。逃げられる位酸素原子の量が少ないためには、Kは $10^8 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 以上なければなりません。彼はこれで自説が裏付けられたとって得意です。（ $K=10^8$ のもとになった実験室の値がもう嘘と判ったのに！）

しかし、そう簡単に間屋はおろしません。同時に出て来た希ガスのデータは、連続的大量大気説に疑問をなげかけます。もし地球と同様の過程で火星大気が出来たなら ⁴⁰Ar は 30% になる筈だという議論がヴァイキング以前にありました。観測されたデータはその十分の一、しかも ³⁶Ar, ³⁸Ar の ⁴⁰Ar に対する比は地球よりもこれまた十分の一も小さい。これらは火星大気進化が地球と違うのだということを示します。火星は質量が地球より一桁も小さいので、これは当然でしょう。Ar データの正しい解釈は、現在の火星大気が最近出現、しかもその時期から薄かったことを意味すると思われ、これは上記逃散説に反します（註：最近の ¹²⁹Xe 異常に関するデータで、この議論の裏付けができました。その内、天文月報の雑報欄にのります）。一方、米国の希ガス屋さん達は、¹⁵N のデータでショックを受け、しかも地球と火星のアナロジーばかりにこだわっているの、解釈にはしどろもどろです。

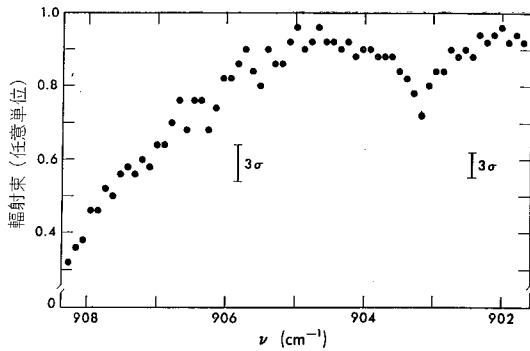


図4 木星で検出された $^{15}\text{NH}_3$ 線。 $^{14}\text{NH}_3$ 線の裾にある。

著者に言わせれば、そもそも窒素が逃げられる筈はないのです。そこでヴァイキングにはやや遅れながらも米国に来たのを幸い、永年培った情報網を動員して、反証探しにのり出しました。 ^{15}N は始めからたくさんあるのではないかと睨んだわけです。まず火星の原材料物質になりそうな隕石探します。ちょうど隕石中の同位元素の問題では、酸素の ^{17}O 、 ^{18}O が少ない隕石が見つかって宇宙化学者がひっくり返るような大騒ぎをしている時期です。まさに ^{15}N の大量検出がなされていたのです。見つかったのは、ただし、ただ一個のRenazzoと呼ばれる炭素質隕石だけです、17%ほど地球大気に比べ $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ が大きくなっています。これは上記の酸素問題をひき起したシカゴのクレイトンのグループの成果です。も一つ、パークレイのタウンズ教授のところを訪れた際、興味ある結果が出ていました。このグループは、ヘテロダイナミクス技術を駆使して木星の $^{15}\text{NH}_3$ の検出にも成功していたのです。木星の $^{14}\text{NH}_3$ は強く飽和しているので、 ^{14}N の量がはっきり決まらぬため、 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ の木星値はまだはっきり出せません。しかし、この値を地球と同じとして解析するとくい違いが出るといいます。この点を解決する一つの道は、比が地球と違うとすることです。勿論、帰りがけに、金星や彗星の ^{15}N をやって下さいと、お頼みして来ました。(金星の N_2 はヴェネラ9,10号が狙ったと言われていますが、どうなっているのか。ヴァイキンググループから問い合わせたのですが、返事が来ないそうです)。

こうしてみると、火星、炭素質隕石(～小惑星)、木星と太陽系の外側は窒素がより重くなっている可能性があります。これは、酸素の同位体について見ると外側で軽くなっているのと逆です。酸素の場合は、隕石中の塵が特に酸素について軽いので、太陽系ができた際、その基の原始太陽星雲を収縮させるきっかけになった、近くの超新星から出た塵が混じったのだらうというスペキュレーションがなされています。賛否両論あって喧いとこ

ろです。 ^{15}N の場合は、新星や晩期星程度のものが、原始太陽を作ったプロトクラスター(原始星団)中に混じっていたと考えても充分です。面白いことに、星が生まれつつあるところに晩期星が混じっているのではないかという例があります。オリオン星雲の後にある大分子雲中に SiO レーザーが見つかり、これが他の場所での晩期星の SiO レーザー作用と同じような振舞いをするというのが海部さんの観測です。こういう風な原始太陽の近くにあった星からの ^{15}N が太陽系の外側に紛れ込んだということは考えられないでもないと思えます。

とにかく、火星の大気攪拌が $K \geq 10^8 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ というのは、最近の観測にことごとく反します。また理論的に、 K を求めることも行われ(例えば内部重力波の分散方程式を惑星上層大気について解く)、これも火星で 10^7 、金星で 10^6 が K の上限であることを示します。この点を無視して、生物発生に都合よいという宣伝に結びつけ窒素逃散を叫ぶのは安易に過ぎるようです。

最後に、ヴァイキングの唱い文句、生物探査について一言つけ加えましょう。火星の砂に栄養液を加えたところ(あるいは、水蒸気をふれさせたところ)、 $^{14}\text{CO}_2$ や O_2 が発生したという実験は、砂が過酸化化物、超酸化化物を含んでいれば再現できることがはっきり示されました。これらの酸化物の基は、水なり炭酸ガスなりが、猛烈な紫外線に叩かれ分解してできたものです。大気中でたものが砂にしみ込んだのか、砂に吸着していたガスが分解して内部に拡散したのか、いずれにせよ、火星の砂は強い化学作用を持っています。永年の分子過程の結果です。水を使わない第三の実験、炭素同化実験ですら、この影響はまぬかれれないと言われます(検出した有機物は炭化カルボニルの誤認だと言う人もいます)。質量分析計での有機物の検出は、何らの根拠なしという結果です。砂の中の有機物は永い間大気中に漂っている間に、完全に酸化され、炭酸ガス化したのかも知れません。生物探査は、やはりこういう大気分子過程の影響が少ない場所で行うべきなのでしょう(と書いてそれは容易なことではありませんが)。

ヴァイキングは、太陽系の起源、生命の起源に結びついた諸成果を挙げました。そこへ行って見なければわからないことは、やはり探測機に頼るしかないのです。最近の飛び道具を用いた太陽系観測の成果として、も一つ別の興味ある結果は、ロケットによる紫外部でのウエスト彗星の観測です。これで CO 、 CS などが検出され、彗星ガスと星間分子の対応は一層完全になりました(昨年5月号の著者の解説参照)。こうやって、太陽系と近くの星の姻縁関係の調査は着々と進められています。81年に打ち上げられる木星探査機が、雲の下まで降下する際、 ^{15}N の量を定めるかどうか楽しみです。