

オーストラリアの GOSSES BLUFF クレーターを訪ねて

白尾 元理

Motomaro Shirao

日本の 23 倍の面積をもつオーストラリア、その約半分を占める荒野のほぼ中央部にあるオアシスがアリススプリングスである。アリススプリングスは人口 23,000 人の小さな町だが、それでもオーストラリア中央部最大の町で、周囲 1200km 以内にはこれ以上の都市はない。そのため、近く（といっても南西 430km だが）にある世界最大の一枚岩、エアーズロックやマウントオルガへの観光拠点になっている。また、砂漠気候なので晴天率が高いこと、大気中に含まれる水蒸気量が少ないために、世界でもっとも星空が美しい場所として、最近では多くの天文ファンが訪れるようになっている。

このように、アリススプリングスはわれわれに身近になったとはいえ、この付近にゴッシズブラフ (Gosses Bluff)、ヘンバリークレーター (Henbury Craters)、ボックスホールクレーター (Boxhole Crater) という 3 つの衝突クレーターがあることは意外と知られていない。特にゴッシズブラフは、直径 20km の衝突クレーターの中央部の地下構造が、侵食によって露出した特異な環状構造である。7 月上旬、ゴッシズブラフを訪れる機会があったので、紹介する。

オーストラリアの衝突クレーターとアリススプリングス付近の地質

世界中には 100 以上の衝突クレーターが知られているが、オーストラリアはカナダ (17 個) に次いで衝突クレーターの多い国である。オーストラリアの衝突クレーターは、直径 200m 以下～20km 以上のものまでさまざまな大きさで、それらが形成されたのは最近 2 億年間である。オーストラリア東部には中生代や第三紀の火山活動がみられるが、中・西部では古生代以降、火山活動がなかった。また中・西部では中生代以降大きな地殻変動がなく、乾燥気候であるため、侵食

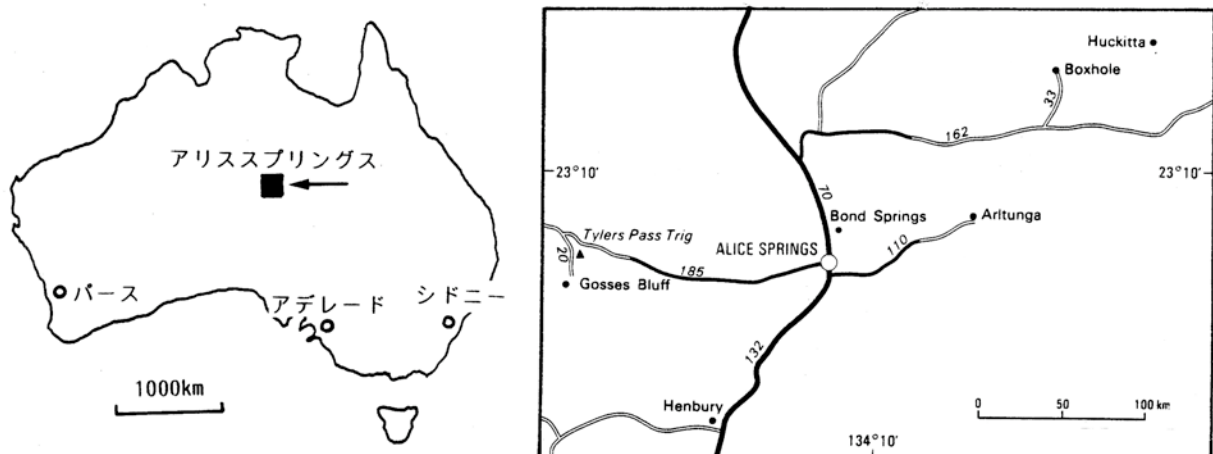


図 1 アリススプリングス付近の案内図。Huckitta では 1415 kg、Arltunga では 18 kg の隕鉄が発見されている。



図2 ゴッシズブラフの遠景。メサのように見えるが、内部は平坦で高さ 200 m の環状山列がとりまいている。

速度が遅く、衝突クレーターの保存の条件に恵まれている。オーストラリアの 9 個の衝突クレーターは、このような条件に恵まれた中・西部に発見されている。

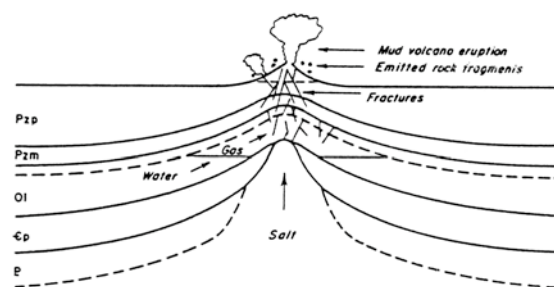
アリススプリングス付近の地質は、東西 800km、南北 320km に広がるアマデウスベイズンと呼ばれる堆積盆地に、古生代の海成層が堆積したものである。内陸部のこの地域は、古生代には内湾になっていた。オルドビス紀後期からデボン紀にかけてアリススプリングス造山運動があり、東西性の 2 つの山脈、北側がマクドネル山脈、南側がジェームズ山脈という 2 つの高まりが形成され、その内部に最大厚さ 9000m の海成層が堆積した。その後は大きな構造運動がなかったため、ゴッシズブラフ周辺の地層の傾斜は 10° 以下とほぼ水平である。このため、約 1.3 億年前のゴッシズブラフの形成が、周囲にどのような影響を与えたかを理解しやすい。

ゴッシズブラフを訪ねる

私がゴッシズブラフを知ったのは、日本放送出版協会刊『地球大紀行 2』の表紙からだった。荒野の中に突如としてそびえる直径 5km の環状構造はたいへん印象的であったが、キャプションには「直径 22km、1.3 億年前の衝突でできた」としか書かれておらず、本文中では触れられていない。ゴッシズブラフがアリススプリングスのすぐ近くにあるのに気がついたのは、出発の 1 ヶ月前で、急きょ、旅行の予定に組み込むことにした。

ゴッシズブラフは、アリススプリングスの西方 160km に位置する直径 5km の環状山列である(図 1)。私は、アリススプリングスでスズキの 1300cc の小型四輪駆動車を借り、ハーマンスブルグ (Hermannsburg) 経由のコースでゴッシズブラフへ向かった。前日の故障のためにエイビスの営業所で 1 時間待たされて、ようやくアリススプリングスを出発したのは 10 時 30 分過ぎだった。1 時間も走ると舗装道路は終わり、その後はところどころに穴のあいた簡易舗装の道进行することになる。午後 1 時にハーマンスブルグに到着し、ガソリンを補給した。ハーマンスブルグから赤い粉塵を巻き上げながら 30 分も走ると、突然目の前にメサのようなゴッシズブラフがあらわれた(図 2)。さらに約 30 分走ってようやくゴッシズブラフのへりにたどり着く。

麓に立つと、比高約 200m の環状山列は、ところどころ断層で切られてブロック上になっているのがわかる。破碎された赤褐色砂岩からできてはいるが、層理面がほぼ垂直に切り立っているのも認められる。環状山列は東側で低くなっており、内部の水系はこの場所から外側に排水される。道路は、この場所から内部に通じている。内部は緩やかな起伏が連続し、腰丈ほどもある半球状の草、スピニシュが覆っている。中央から少しはずれた低地には、錆びかかったガス試掘用の機械が転がっていた。



←図3 ゴッシズブラフのシャターコーン(長辺20cm)

↑図4 Ranneftの考えたゴッシズブラフの泥火山モデル。

ゴッシズブラフが普通の衝突クレーターと異なるのは、クレーター内部の高度が外側よりも約20m 高いという点である。たとえば直径1.2kmのアリゾナのメテオールクレーターでは、クレーター底は周囲の平原に比べて約200m も低い。この原因は、隕石が衝突して岩石を外に撒き散らしたことを考えれば理解できる。また、普通の衝突クレーターが外側になだらかな裾野を引くのに対して、ゴッシズブラフは外側にも内側にも50°をこえる急崖をもつ。ゴッシズブラフの bluff とは、英語で急崖という意味である。このようにゴッシズブラフが典型的な衝突クレーターと異なるのは、ゴッシズブラフが衝突クレーターそのものではなく、直径20kmの中央丘をもつ衝突クレーターが、1.3億年間の侵食によって厚さ2,000mの表層部が取り除かれ、取り残されたクレーター中央部の地下構造をみているためと考えられている。成因については興味深い研究がなされているので、あとで取り上げることにする。

ゴッシズブラフを構成する地層は砂岩、石灰質砂岩、泥岩などの堆積岩からできている。内側をすこし眺めた後、遅い昼食を食べながら、足元にある小石をみると、その表面に円錐の一部にスジをつけたようなシャターコーン (shatter cone) があるのに気がついた。ゴッシズブラフでシャターコーンが発見されているのは知っていたが、これほど簡単に見つかるものだとは思っていなかった。よくみると、付近にもシャターコーンをもつこぶし大の小石がたくさん散らばっている。シャターコーンのスジはかなり明瞭で、ごく最近、岩から剥離したようにみえる。すぐ近くの路上にほぼ垂直の砂岩層が露出していたので、岩の割れ目にそって引き剥がしてみると、割れ目そのものがシャターコーンの一部であった。嬉々としてシャターコーンを集めていると、あっという間に持ちきれないほどになってしまい、結局、形のよい3つだけ持ち帰ることにして、残りは捨てることにした。

オーストラリアの7月初旬は、一年中でもっとも昼間の短い季節である。午後4時にもなると、太陽高度は20° 足らずとなった。環状山塊にも登ってみたいという未練はあったが、帰路にもラフロードを何時間もドライブしなければならないと考えて、引き返すことにした。

ゴッシズブラフの成因

ゴッシズブラフを初めて地質学的に調査したのは、Pritchard と Quinlan で1956年のことである。かれらは、先カンブリア紀の地層が可動層としてダイアピール状に上昇し、ゴッシズブラフができたと考えた。その後しばらくこの考えは多数の研究者に支持された。Brunnchweiler

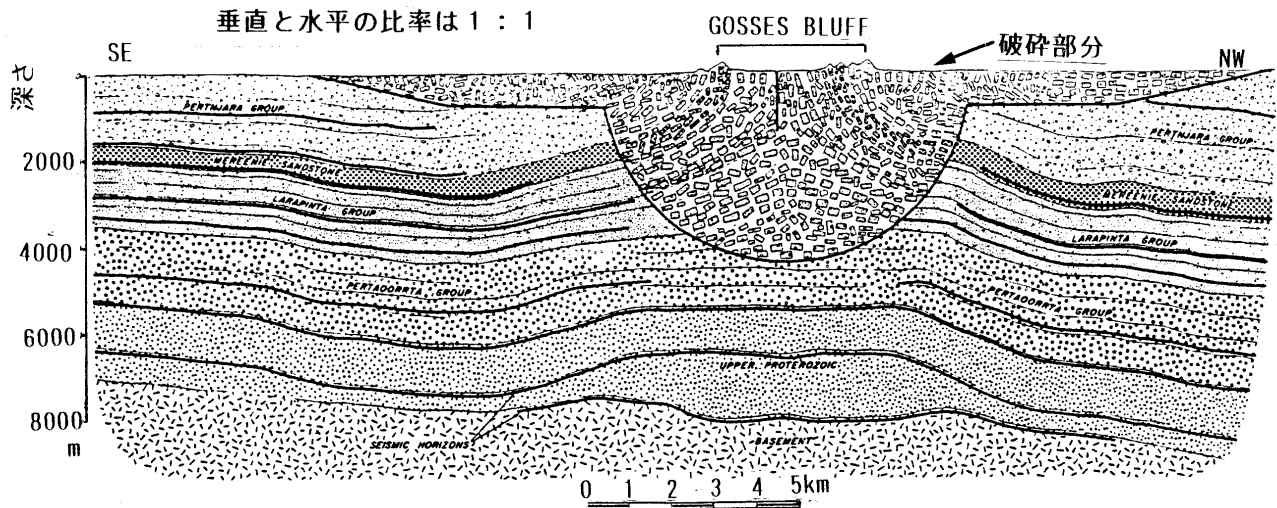


図5 地震反射面、重力測定、地質調査から求めたゴッシズブラフの推定断面図 (Milton, et al., 1972)

(1959) は、ゴッシズブラフを酸性火成岩の岩栓の貫入によって形成したと考えたが、周囲にまったく火成岩がみられないことから、ほとんど支持を得られなかった。

ダイアピール仮説が疑われはじめたのは、オーストラリア鉱物資源省の Crook や Cook (1966, 1968) が詳しい地質調査をおこなった 1966 年頃からである。彼らは、Dietz (1959) が cryptoexplosion 構造の特徴としてとりあげたシャターコーン、鉱物のラメラ状構造、ガラス状物質がゴッシズブラフにも存在することを示したからである。1964 年、Exoil 社が石油探査のために深さ 1000m のボーリングを掘ったのに加えて、彼ら自身も深さ 170m を 1 本、深さ 10m を 7 本の合計 8 本のボーリングを、ゴッシズブラフ周辺でおこなった。彼らはまた、重力測定もおこない、ゴッシズブラフに負のブーグ異常のあることを発見している。このように多くのデータが集まりつつあり、Cook (1968) は、はっきりした結論を出してはいないが、おそらく隕石の衝突が原因であろうとしている。

アポロ計画の最盛期である 1970 年頃になると、大部分の研究者は、ゴッシズブラフの隕石説を認めるようになっていたが、劣勢にもめげず地球内部に原因を求めたのは、オーストラリアの Ranneft (1970) であった。彼は、ゴッシズブラフが泥火山（でいかざん）であると考え、チモールやカスピ海西岸バクー地域の、高さが 400m にも達する大規模な泥火山とゴッシズブラフを比較している。

これらの地域の泥火山は、火成活動とは関係なく、岩塩ドームの上昇が原因となってできたものである。岩塩は密度が小さいので、周囲の岩石を持ち上げるように上昇する。地下浅くまで上昇した岩塩ドームの頂部には、石油・水・ガスなど軽い物質が濃集しやすい。これらの物質が薄い上層を破って噴き出したのが、これらの地域の泥火山である。バクー地域での泥火山の“噴出”は、激しい爆発をともなって間欠的に起こり、上空 14km まで噴煙を上げた例がある。また爆発的な噴出ではガスの燃焼を伴うことがある。このような記載を読んでも、非火山地域でも火山の類似現象がおこることがわかる。シャターコーンの成因などは説明してはいないが、ゴッシズブラフから SiO_2 の高压鉱物である coesite が発見されていないこと、ゴッシズブラフが背斜上に位置し、隕石説には不利であったことなどを考えると、Ranneft の論文は当時としてはそれなりに根拠のあるものであった。

ゴッシズブラフが隕石の衝突でできたことを最終的に明らかにしたのは、アメリカ合衆国地質調査所の Milton ら (1972) である。彼らは、徹底的な地質調査に加えて、鉱物の分析、重力探査、人工地震による地下構造の推定など総合的な研究をおこなった。シャターコーンの方向から、爆発圧力の中心がかつての地表付近にあったこと、石英に 100kb 以上の圧力が加わった証拠である不規則な劈開が発達すること、直径 22km にわたって破碎されて中央部の盛り上がった地層が、厚さ 500m 以上にわたって堆積していること、などを明らかにした。この頃までには衝突実験や地球上の他の衝突クレーターの研究も進み、衝突変成作用の理解も深まっていた。これらのことからゴッシズブラフは、1.3 億年前の衝突でできた直径約 20km の衝突クレーターの中央部の地下構造であると結論した。

アリススプリングス付近の見どころ

セントラル・オーストラリア博物館：アリススプリングス中心部のフォードプラザの2階にあり、オーストラリア北部特別地区の地質、動物、アボリジニ文化などの展示がある。ゴッシズブラフのシャターコーン、ヘンバリーの隕鉄 (46kg) とヒュキッタ (Huckitta) のパラサイト (約 40kg)、テクタイトの一種であるオーストラライト (Australite) 等の実物があるほか、ゴッシズブラフの立体模型や 1/25,000 の地質図なども展示してある。同じ建物の1階には政府観光局があり、有益な情報が得られる。とくに Alice Springs and Central Australia という地図と Astoro-Geological Features of Central Australia というパンフレットは役に立つ。

ヘンバリークレーター：アリススプリングスの南西 110km に位置し、普通自動車ですら約 2 時間の行程である。最大直径 200m をはじめとする 13 個のクレーター群である。同時の衝突によってできた地形の干渉が興味深い。

主要文献

- Cook, P.J., 1968: The Gosses Bluff cryptoexplosion structure. *Jour. Geology*, 76, 123-139
- Milton, D. J., Barlow, B. C., Brett, R., Brown, A.R., Glikson, A.Y., Manwaring, E. A., Moss, F. J., Sedik, E. C. E., Van Son, J., and Young G.A., 1972: Gosses Bluff impact structure, Australia. *Nature*, 175, 1199-1207
- Ranneft, T. S. M., 1970: Gosses Bluff, Central Australia, as Fossil Mud Volcano. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 54, 417-427.
-

文献紹介

金星のアフロディテ高地におけるプレート分離境界と地殻の拡大：予言の検査

Head, J.W., and Crumpler, L.S., 1989: Divergent plate boundary characteristics and crustal spreading in Aphrodite Terra, Venus: A test of some predictions. *Earth, Moon, and Planets*, 44, 219-231.

プレートテクトニクスと結びついた地形が金星にあるかどうかは、議論的になってきたが、著者らは、Aphrodite Terra 西部の地形とその構造が、地球の大洋底拡大を示す大洋中央海嶺の特

徴とよく似ていることを見いだした。

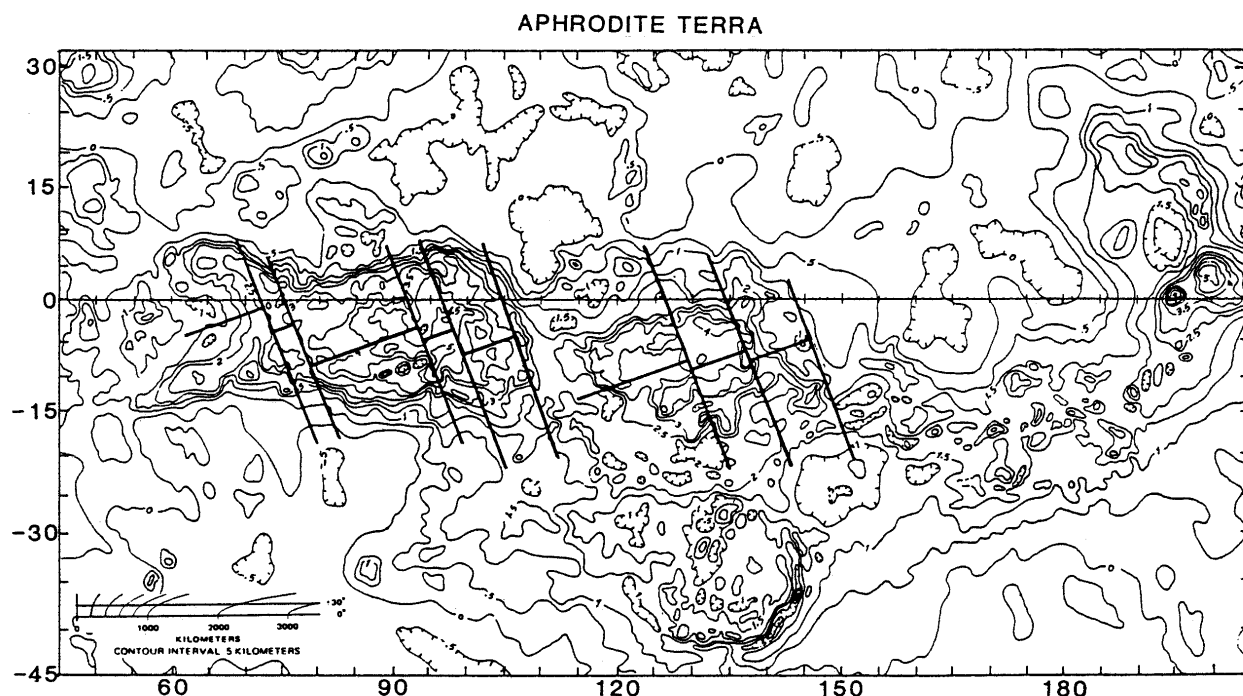
Aphrodite Terra は、金星の赤道地帯にそって東西に 約 14,000km のびる細長い高地である。とくに西部地域では、高地の一般的な EW 方向の高まりに NNW の方向で交わる CSD (cross-strike discontinuities) が何本もあり、CSD にはさまれる各領域では、左右対称の斜面をもつ高まりの軸の頂部が、右横ずれの関係で 200~1200km offset している (下図参照)。このようなすは、地球の大洋中央海嶺の軸部に発達する transform 断層のパターンと似た構造である。しかも、軸の頂部にはしばしば谷状の凹みがあり、この軸から南北に地殻が分かれていったような地形的特徴を示す。Aphrodite の西部からつづく東部地域にも、これと似たような特徴がある。

もし Aphrodite Terra を中心に、地殻がそこで生まれ、南北に広がっていったとするならば、①地殻は赤道から極地へ数 cm/年の割合で動かされ、金星の表面の平均年齢は 1.5by 以下と比較的若くなる、②表面の年齢は高緯度よりも低緯度ほど若い、③高緯度ほど地殻が圧縮され、そのために地殻の変形の事実がある、とそれぞれ予想される。著者らは以上の3点について検討をおこなった。

パイオニアビーナス号、ベネラ 15・16 号などの画像による、地形の検討や衝突クレーターの分布密度の検討、その他の観察事項の検査の結果は、上記3点の予言を支持するものである。ただし、南半球については未知な点が多いので、来たるマゼラン・ミッションによるデータを待たなければならない。

〈紹介者註〉著者らの議論のすすめ方は、それなりに論理的であると思われるが、議論の根拠になったパイオニアビーナス号の画像データから、Aphrodite Terra に大洋中央海嶺と同じ地形構造を認めるには、その解像力からみてかなり苦しいように思える。より確かな議論は、マゼランによる画像が得られればできるようになるだろう。

(小森長生)

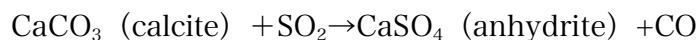


Aphrodite Terra 西部の地形と Aphrodite を NNW に横切る CSD の位置。等高線の間隔は 500 m。

反応レートの測定からみた金星の火山作用のおこり方

Fegley, B. Jr., and Prinn, R. G., 1989: Estimation of the rate of volcanism on Venus from reaction rate measurements. *Nature*, 337, 55–58.

金星大気中の SO_2 は、金星表面に存在する calcite などのカルシウム鉱物との次の反応によって、大気中からとり除かれていくと考えられる。



実験室で、 SO_2 – CO_2 混合ガス (SO_2 の体積比 1%) の中に純粋な calcite の結晶 (Iceland Spar) を入れ、600–850°C の温度でおこした上記反応の rate のデータから、金星表面での SO_2 の平均反応 rate を求めると、ほぼ 4.6×10^{10} 分子/cm²/s となる。これは、金星面上で 1 年間に厚さ 1 μm の CaSO_4 が堆積することに相当する。この反応 rate では、金星で観測される SO_2 の column density の値 (2.2×10^{23} 分子/cm²) からすると、金星大気中のすべての SO_2 は 1.9×10^6 年で金星大気から消失することになる。

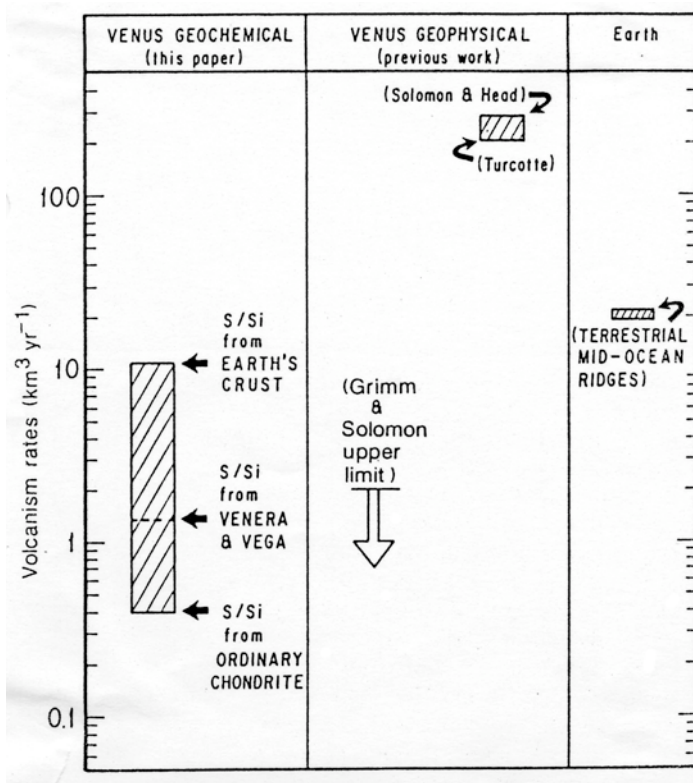
一方、金星大気中にグローバルに浮かぶ H_2SO_4 が存在し続けるためには、その雲の生成に見合う SO_2 がたえず供給されなければならない。そのための硫黄の源は、内因的な火山作用にあると考えられる。金星上の SO_2 の減少 rate は、硫黄の量にして 2.8×10^{13} g/年と計算されるが、宇宙からの降下物質は地球上で 7.8×10^{10} g/年、硫黄の量で 4.6×10^9 g/年 (最も硫黄の量の多い C1 コンドライトの組成として) 程度で、金星でもほぼ同様と考えられるので、宇宙物質で埋め合わせるのは困難である。

金星表面でのカルシウム鉱物との反応による SO_2 の減少をバランスさせるのに必要な火山作用の rate は、噴出物質 (ガスとマグマ) の硫黄含有量によってきまる。噴出物質がベネラ 13、14

号とベガ 2 号の表面物質分析値にもとづく S/Si 質量比 0.03 をもつならば、必要な火山作用の rate は $1 \text{ km}^3/\text{年}$ である。この rate は、地球の大洋中央海嶺の場合の 20 分の 1 である (中央海嶺では地殻の厚さ 6km、プレートの生成率 $3 \text{ km}^2/\text{年}$ して、火山作用の rate を $20 \text{ km}^3/\text{年}$ と見積った)。

噴出物質が普通コンドライトの S/Si 比 ≈ 0.1 をもつならば、火山作用の rate は $0.4 \text{ km}^3/\text{年}$ となり、地球の地殻と同じ S/Si 比 ≈ 0.004 ならば $11 \text{ km}^3/\text{年}$ の rate となる。したがって、硫黄を供給する火山作用の rate は、 $0.4 \sim 11 \text{ km}^3/\text{年}$ の範囲内にあるとみられる (図の左欄)。

火山作用の rate は、地球物理学的な方法でも見積られている。図の真中の欄の 200– $300 \text{ km}^3/\text{年}$ の rate は、地球の熱生産を金



地球と比較した金星の地球化学的、地球物理的な火山作用の rate の見積もり。

星に scaling し、熱放出をすべて火山作用によるとして見積ったもの、 $2\text{km}^3/\text{年}$ の上限値は、ベネラ 15、16 号画像の impact crater の分布密度の分析からの見積値である。これらはいずれも、著者らの地球化学的な見積値とは一致しない。著者らの結果によれば、金星は平均して、地球よりも火山活動が活発でないことを示している。(小森長生)

.....

NEWS

「第1回惑星科学夏のセミナー」開催される

7月31日夜～8月4日正午までの5日間、長野県車山高原で上記のセミナーが開催された。このセミナーの開催主旨は"惑星科学が………これからの宇宙地球科学の骨組みとなる新たな宇宙体系であることを強調し、所属する大字の教育体系ではカバーできない事柄を勉強することを目的としています"ということである。参加者は若手研究者を中心とした約50人で、そのうちの半数が大学院生であった。

日程は1日が惑星形成過程、2日が隕石と小惑星、3日が地球型惑星の進化・構造、4日午前は木星型惑星とその衛星および彗星のようにテーマ別に分け、それぞれ講演者が30分から1時間程度で、自分の研究紹介やレビューをおこなうという形式で進められた。普通の学会発表と異なり、十分用意されたはずの講演時間さえも不足することが多かったが、自由な雰囲気の中で活発なディスカッションがなされた。夜にも講演があったので、全体的にはかなりハードスケジュールであった。しかし2日午後には車山ハイキングなどのリクリエーション、4日夜の花火大会や天体観望会など高原ならではのイベントもあり、疲れた頭を休めるのに役立った。

最終日の反省会では、修士過程の院生から「多岐の研究者が集まるこのセミナーでは、各テーマの最初にレビューがあった方が、そのあとの講演を理解しやすくなる」という意見が多く聞かれた。当セミナーの講演内容は『惑星科学』（日本惑星科学連合機関誌）で紹介される。このセミナーは来年も開催される予定である。

「第22回月・惑星シンポジウム」開催のお知らせ

開催日時：1989年9月7日（木）～9月9日（土）

場 所：宇宙科学研究所2階会議場（神奈川県相模原市由野台 3-1-1 TEL 0427-51-3911）

詳しくは宇宙科学研究所まで直接問い合わせてください。

編集後記：第3号をおとどけします。今回からは8ページ建てで発行します。さて、ボイジャー2号が海王星を通過する劇的事件のさなか、インドネシアの田舎をさまよっていたので文明の動きは全くわからず、帰国後あわててたまった新聞を読んでいます。トリトンに氷の活火山が発見されたとか、惑星地質学はますます面白くなってきそうです。過日の惑星科学夏のセミナーでは多くの方々と交流でき、このニュースについても、いろいろなご意見をいただきました。これからは、日本惑星科学連合の『惑星科学』との協力を深め、広い視野で惑星地質学の動向を追っていきたいと思います。よろしくご協力をお願いします。(K)