

火 星 の 地 質 学

⑦

小 森 長 生

19 地形発達からみた火星の地史

前回までは 火星表面の模様や地形の種類と その成因を中心にのべてきたが ここではそれらをまとめるようなつもりで 火星表面の地史(地形発達史)を考えてみることにしよう。

アメリカ合衆国地質調査所のマコーレーらは マリナー9号撮影の写真をもとに 火星面の予備的地形区分図を作成したが これは月面の地質図と同様に 地形や地質の重なりぐあいを層位的に読みとって いろいろな地形地質单元(Units)を区分したものである(第1図)。

火星面には 多くの地形地質单元の累重関係が読みとれるので それをもとに地史の解釈が可能である。さらに クレーター分布密度 それらの形態の新鮮さのていど その他の諸地形の状態なども 付加的要素として重要である。

そこで 各地形地質单元の累重関係をもとに 火星の地形区分とその発達史を組み立ててみると おもに6つの時代にわたる発達過程が明らかになってきたのである。

まず もっとも古い单元は 直径50~100kmの大型クレーターの密集した地域(densely cratered terrain 略記号 dc)である。一部は c_1 c_i lt mt kt などの单元に関係したクレーターやベイスンも入る。これは月でいえば 「最古代」層の地域である。

2ばん目に古い单元は クレーターが中くらいに集まった地域(moderately cratered terrain mc)である。一部は c_1 mt kt の单元のものも入る。ここではクレーターの直径は比較的小さくなり クレーターどうしの間かくもあいてくる。

ゴツゴツした山のような起伏の多い地域(mountainous terrain mt)や 丘陵状地帯(knobby terrain kt)線状地帯(lineated terrain lt)も ほぼ mc と同じ時代に入るものらしい。とくに mt は 以前に形成された巨大なベイスンの 縁辺部のもり上りが残されたものが多いようである。

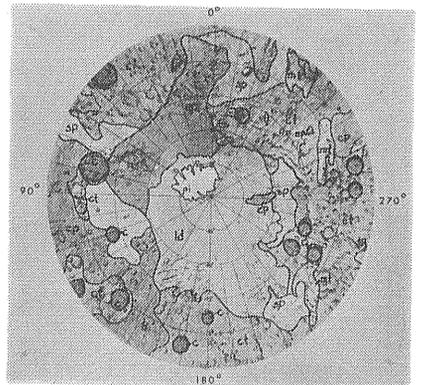
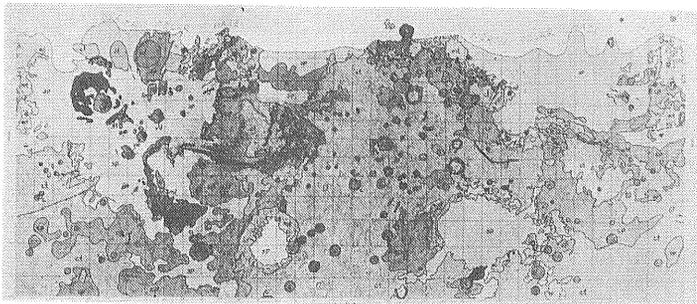
3ばん目の代の单元は クレーター平原(cratered plains cp)である。これは mc よりもクレーターの密度は低い。その構造といい アルベドといい クレーターの分布のようすといい 月面の海とよく似ているとマコーレーらはいう。いままでにあげた古い地形(とくにベイスン)の中の平原に このようなものがある。

クレーター平原よりも新しいと考えられる第4代の单元は 割れ目のある平原(fractured plains fp)と 細いみぞのある地帯(grooved terrain gt)である。これらは クレーター平原よりもクレーターの密度が低い。

無秩序地帯(chaotic terrain ct)はひじょうに新しく 第5代目の单元に入る。谷や水路をうめる物質はこの单元の形成と同時代か それよりあとである。

以上のすべての单元よりもさらに新しい 第6代目にあたるものが なめらかな平原(smooth plains sp)である。これは いままですべての单元をおおう関係で広がっている。その典型的な地域は タルシス地域とエリシウムを中心とした地域である。

これら sp 地域の一部に 目立ってそびえるのが オリンピア山をはじめとする巨大火山群である。これらは sp の上の上のっている つまり sp のあとに形成され



(a)赤道ぞいの全面
第1図 火星面の予備的地形区分図(アメリカ合衆国地質調査所作成)

(b)南極地域

たように思われるが sp によって 火山のほうがりまかされているようにも思われる。このあたりはまだどちらとも決めがたく 問題を残しているが sp の形成と火山群の形成とは それほど時代的にかけはなれたものではないことだけは 確かなようである。

sp は 本稿の第 5 回 (1973 年 12 月号) でのべたように オリンピア山のまわりに 溶岩流のフロントなどが観察できるところから 月面の海のように きわめて流動性の大きな溶岩流があふれて形成されたものと思われる。

以上が 歴史的にみた火星の地形単元の区分と その歴史的発展の経過のあらましである。これらは おもにマリナー 6・7・9 号の写真をもとに アメリカの科学者が組み立てた ごく大まかな予備的なもので くわしく正確な検討はすべて今後の課題であるが とにかく一応の目やすができた ということではできるであろう。

この火星の地形発達史を 月のばあいと比較してみると まったく同じというわけにはいかないが その傾向には類似点があるようにも思われる。すなわち 火星でも 古い地形单元ほど大型クレーターが密集し 複雑な様相を呈し 新しい時代の单元ほど平坦化・単純化しているようである。このような傾向は 月面地形についてもいえることであり 今後 惑星表面の地形発達史を組み立てるうえの 重要な手がかりとなるであろう。

20 火星の内部構造

火星の歴史と起源をさぐるにあたっては 火星表面の諸情報とともに 火星内部の状態を検討することも不可欠である。火星の内部構造については 本稿の第 1 回目 (1973 年 1 月号) で すでにそのあらましのべたがその後 新しい資料や考えもたくさんあらわれているし火星の起源についてのべる前に ぜひふれておかねばならないので ふたたびここでとりあげることにしたいと思う。

火星の内部構造をさぐるにあたって まず第一に考えねばならぬのは 火星の平均密度である。火星の平均密度は約 3.9 g/cm^3 で 地球型惑星の中ではかなり低く月に近い値である。このため 火星の内部構造は地球のばあいとは かなり異なっていると考えなければならぬ。

火星の内部構造については いままでいろいろの人が多くの仮説を提唱してきた。まず最初にあげられるのは ラムゼイ (W. H. RAMSAY 1948) とブレン (K. E. BULLEN 1949) によって それぞれ独立に唱えられた 相転移説である。

彼らによると 火星も地球も 化学組成は全体にわた

って同じであるが それぞれの重力場での物質の圧縮のちがいによって 密度のちがいが生じている というのである。つまり 地球のばあいには重力が大きいので核ではひじょうな高压となり マントル物質と同じ物質が相転移によって 非金属状態から より密度の高い金属状態に変っているだろう というのである。ところが火星のばあいには 重力が低く そのようなことはあまり期待できず 相転移によって核ができて もそれはきわめて小さいだろうというわけである。

この考えは 提唱されたころは新鮮な仮説として注目をあつめたが その後いろいろと困難な問題がたくさん出てきて 今日では支持する人は少なくなってきたようである。

これに対し ジェフリーズ (H. JEFFREYS 1937) やユーリー (H. C. UREY 1952) は 別の考えをのべた。火星も地球も 基本的には珪酸塩と金属鉄からできているが 火星の密度が低いのは 火星のほうがり金属鉄の割合が小さいためであろう というのである。

この考えも それなりの面白さはあるが 今日ではこんな単純なぐあいには説明できないだろうといわれている。

それでは 火星の密度の低さと内部構造を どう考えたらよいのであろうか。今日しだいに支持を得てきているのが リングウッド (A. E. RINGWOOD 1959 1966) らによって唱えられている “酸化説” である。

彼らによると Fe・Mg・Al・Si その他の一般的な金属元素の存在比は 火星・地球・金星などではよく似ているが それらの惑星の密度がちがうのは 酸素の量がちがうからだ というのである。つまり 火星の密度が低いのは 火星が地球や金星よりもずっと酸化されているためだ というのである。もう少しくわしくいならば 火星は 高度に酸化のすすんだコンドライト物質からでき上っている という考えである。

そこで このリングウッドらの考えを もう少し立ち入ってながめてみることにしよう。

彼らは タイプ I の炭素質コンドライト (金属鉄をほとんど含まず もっとも酸化の状態のすすんだ隕石で 惑星の始原物質と考えられているもの) をもとの物質にとり酸化状態の異なった 3 つのモデルを考えた (第 1 表)。

まず モデル I はもっとも酸化された状態のもので すべての鉄は磁鉄鉱 (Fe_3O_4) としてあらわれ 珪酸塩は鉄を含まないものである。つぎにモデル II は 中間的状态のもので 約半分の鉄は かんらん石や輝石の固溶体の中に FeO として存在し のこりの鉄が磁鉄鉱として存在するものである。モデル III はもっとも還元状

第1表 火星の3つのモデル

モデル	$\frac{\text{Fe}^{3+}}{\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+}}$	$\frac{\text{MgO}}{\text{MgO}+\text{FeO}}$	かんらん石	輝石	磁鉄鉱	転移圧力 (Kbar)	
	(原子%)	(モル%)	(重量%)	(重量%)	(重量%)	A	B
I	67	100	20	40	40	151	262
II	35	68	60	19	21	135	229
III	5	54	94	—	2	124	223

(A. E. リングウッド S. P. クラーク 1971による)

第2表 5つのモデルにおける平均密度と慣性モーメントの係数

モデル	平均密度	慣性モーメント係数
I	3.921	0.392
II	3.972	0.391
III	3.991	0.391
II A	3.942	0.377
II B	3.942	0.373
観測値	3.942±0.005	0.377±0.004

(A. E. リングウッド S. P. クラーク 1971による)

態のもので 極大量の FeO と極少量の Fe₂O₃ が存在する。このモデルでは カルシウムはラルナイト (larnite Ca₂SiO₄) の分子として存在する。

これらのモデルは それぞれ 火星内部の圧力分布に応じて 一連の組成鉱物の相転移をうけるものと考えられる。各モデルでは それぞれ鉱物組成が異なるので相転移のおこる深さとそれに伴う密度の変化は モデルによってちがいがあがるが 地球上での実験的な研究によるつぎの2つの段階が 火星の3つのモデルのばあいにもあてはまる と考えられる。

すなわち 最初の段階 (転移A) は かんらん石からスピネル構造への転移と 輝石からザクロ石構造への転移である。つぎの段階 (転移B) は スピネルとザクロ石から より高密度の珪酸塩同質異像への転移である。

リングウッドらは この2つの相転移を火星の内部にもあてはめ コンドライトモデルから見積った内部の温度分布の状態とをあわせて計算をすすめ 各モデルにおける転移AとBのおこる深さを決めた。さらに これにもとづいて 火星内部の密度分布を決定したのである。

その結果 3つのモデルにおける火星の平均密度と慣性モーメントの係数が 第2表のように求められた。これをみると これら3つのモデルの平均密度は 観測から得られた火星のじっさいの平均密度と かなり近い一致を示していることがわかる。

このうち モデルIIとIIIは 若干の手直しをすることによって さらによい一致を示すようになると思われる。また 各モデルにおける慣性モーメントの係数は 観測値よりも大きくなっている。このことは 火星の深さによる密度の増大が じっさいは モデルにおけるよりも大きいことを示しているにちがいない。

そこで リングウッドらは モデルをいっそうじっさいとよく合うものにするために 内部をさらに分層化したモデルを2つつくった。

まず モデルII Aは 火星のマントルから分化した密度 3.0g/cm³ の地殻の存在を考えたものである。こ

こで 地殻の厚さは 慣性モーメントの係数を 0.377 とするためには 約 200km としなければならないが これはやや厚すぎるようにも思われる。

もう一つのモデルII Bは モデルIIの磁鉄鉱が分離して 半径 1638km 火星の全質量の21%をしめる核を形成している とするものである。ここでの磁鉄鉱は どうぞん高圧相になっているものと思われる。慣性モーメントの係数は0.373で やや小さいので 0.377となるためには もう少し分化がすすんだと考えなければならないだろう。

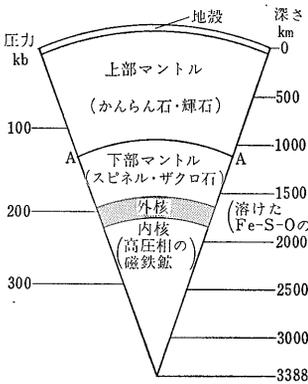
こうして 上の2つの分層モデルが 観測による平均密度と慣性モーメントの値に かなり近い値をもっていることがわかったわけであるが もし分化が 核を生み出すのに十分なほど進行したのならば どうぞん地殻をも生み出したであろうと考えられるから もっとも事実に近い確からしいモデルは II AとII Bを組み合わせたものになるだろう とと思われる (第2図)。

こうした考察から リングウッドらは 火星は酸化のすすんだコンドライト組成をもっており 内部はかなり分層していて 磁鉄鉱の高圧相で特徴づけられる核と地殻をもっているであろう と結論づけたのである。

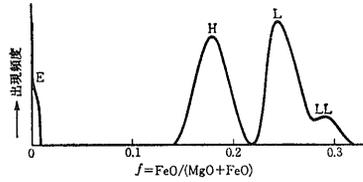
この結論は コンドライトモデルにもとづく火星の熱史の考察とも よく合うものであるという。もし火星がコンドライトと同じ U・Th・K の量をもっていたならば 放射能の熱は全歴史をつうじて生じつづけ 必然的に内部の溶融と分層化をおこしたであろうと思われるからである。

さらに 彼らは ヘラス地域にクレーターがほとんどないことは 活発なクレーターの消去作用 つまり 活動的な火成作用や分化作用が たえずおこっていたことを示すものであろうという (この点については多くの異論があろうかと思われるが ここでは何もふれないでおく)。

このモデルは 火星に目立った磁場がないという事実と合っている点でも 好つごうである。すなわち 磁場を生じさせるような 大きな流体核を考える必要はな



第2図 火星の内部構造の模式図。モデルII Bに手を加えたもの (A. E. リングウッド 1971による)



第3図 コンドライトの種類とその出現ひん度との関係 (都城秋穂 1967による)
E=enstatite chondrites
H=bronzite chondrites
L=hypersthene chondrites
LL=Lのなかのとくにfの大きい一群

いからである。

以上 火星の内部構造についての リングウッドらの最新の考えを紹介してきたが 火星の内部構造の問題はこの節のはじめにものべたように 火星の起源の問題とも深いつながりをもっている。そこでつぎには 火星の起源について考えてみることにしよう。

21 火星の起源

火星の起源は 地球をはじめ 他の惑星の起源とも深いつながりをもっており 太陽系の起源を統一的に考えていくなかで考察していかなければならない性質のものである。

太陽系の起源については よく知られているようにいろいろな仮説があるが 今日広く受け入れられているのは ごく大まかにいって ガスやこまかい固体粒子の集合体が 原始太陽系星雲を形成し その中で それらの物質が集積して惑星が生まれた とする考えである。

このとき 原始太陽系星雲は低温であったか高温であったかは 議論の分かれるところであり その後の発展過程についても さまざまな考えがあるが ここでは一応 原始太陽系星雲は低温であったとして 話を始めてみよう。

原始太陽系星雲における低温の固体粒子は おそらく $Si \cdot Fe \cdot Mg$ などがOと化合した珪酸塩をつくっていたであろう。このような原始物質は 今日われわれがみることのできる タイプIの炭素質コンドライトのようなものだったと考えられる。

これらの固体粒子は 原始太陽の高光度期 (林フェーズ) に 外側からの強い加熱 (あぶり焼き) をうけたと考えられる。そのため 固体粒子には2つの反応がおこったであろう。1つは脱水反応であり もう1つは還元反応である。そこで 都城秋穂氏 (1967) は つぎのような考えを出した。

隕石の大部分をしめているコンドライトには 還元状態のちがうものがいろいろある。それをわかりやすく分類して示すと 第3図のようになる。ここで f は珪酸塩鉱物の還元度をあらわす目じるしであり f が小さいほど 還元がすすんでいることを示している。

さて コンドライトの f の値は だいたい0.0~0.4のはんにわたっているが 第3図にみられるように $f = 0.01 \sim 0.14$ はんいのものと $f = 0.22$ 付近のものは欠除している。 f の値に なぜこのような欠除区間があるのかは 大きな問題であるが これを都城氏は つぎのように説明したのである。

$f = 0.01 \sim 0.14$ はんいの中間の値をとると $f = 0.07$ である。これは 地球のマントルの f の平均値と考えられている値と ほぼ一致している。これをつぎのように考える。

太陽系星雲のなかでは 原始太陽の高光度期の温度は原始太陽に近いところ すなわち内側ほど高く そのため 固体粒子の還元反応は 内側にゆくほど一般にすすんだ。地球はちょうど 太陽系星雲のなかで $f = 0.01 \sim 0.14$ はんいの位置にあった固体粒子が 集積してできた。そのため 地球のできたあとは このはんいの f の値をもつ固体粒子は ほとんどなくなってしまった。コンドライトの f の値に このはんいのものがないのは そのためである。

こう考えてくると 太陽系星雲のなかで 地球になった粒子よりも外側にあった粒子は 還元度ももっと低かったので f の値がもっと大きいはずである。そこで $f = 0.22$ のあたりの欠除は この付近の f の値をもつ固体粒子が集積して 火星をつくったのだ と考えればよいことになる。 $f = 0.22$ のコンドライトはじっさいには存在しないが その両がわの f の値をもつコンドライトの比重から推定すると そういうコンドライトが存在したとすれば その比重は約3.6のはずである。これは火星の平均比重を低圧に換算した値とほとんど一致していて つごうがよい。

以上が 都城秋徳氏の考えた火星起源論である。この考えは なるほどうまいところをついているように思われるし 先にのべたリングウッドらの火星内部構造論とも そう矛盾するものではなさそうである。しかしいかにも機械論のようなにおいがすることも 否定できない。今後のいっそうの検討が期待される。

さて いままでの議論は 原始太陽系星雲は低温である として展開されたものであった。しかし ことはそうかんたんにはこぼさないにも思われる。というのは 高温の原始太陽系星雲から惑星が生まれてきたという考えも かなり注目されているからである。

その代表は キャメロン (A. G. W. CAMERON 1962 1963 1966) らの考えである。すなわち はじめは低温であったガスや固体粒子の集合体は やがて重力による収縮や崩壊によって 高温の太陽系星雲になった。これがしだいに冷却していくなかで いろいろな物質が凝縮し 惑星や隕石が生まれてきた というのである。これは あるいみでは 一時否定し去られたかにみえたカント・ラプラスの星雲説に近いものである。

この高温起源論を統一的に説明するのが 平衡凝縮モデルである。これによると とくに地球型惑星の組成をきめたのは 原始太陽系星雲の中での生成時における温度による 固体粒子とガスのあいだの化学平衡であった ということになる。このモデルの詳細については最近よい紹介があるので (たとえば J. S. ルイス 「太陽系の化学」サイエンス 1974年5月号) それらを参照していただければ幸いである。

いまままでみてきたことからわかるように 火星の起源の問題は 太陽系の起源をさぐる中で考えていかなければ

ならないものである。しかしまたその中で 火星自身の知識が重要な役割をもっていることも否定できない。地球も含めて 月・火星・金星その他の惑星や彗星の探査と 隕石の研究のいっそうの発展が 太陽系の起源のなぞを 一步一步といていくことになるう。

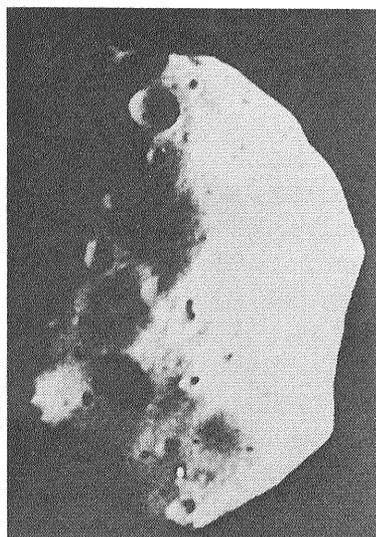
22 おわりに

長々と書かせていただいた「火星の地質学」もいよいよ終りをむかえた。

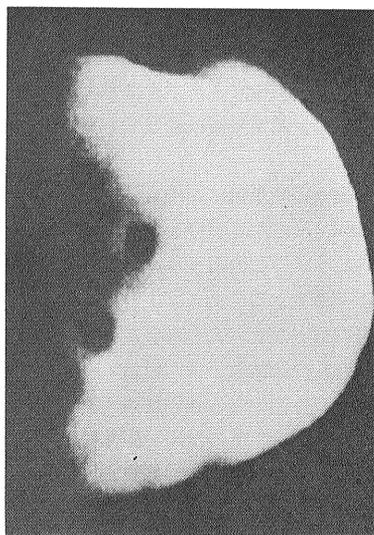
はじめは いろいろと欲ばったことを考えていたが 筆者の勉強不足のために その何分の一も果たせなかったことを おわびしなければならない。また 書いている途中で新しい資料が入ってきて 話題が前後したりし 内容が首尾一貫しないものになってしまった。さらに 火星の衛星については まったくふれることなく 終ってしまった。これらの点も 深くおわびしたいと思う。しかし それにもかかわらず 地質学からみた火星像をまとめる機会を与えていただけたことは 筆者にとってたいへん幸せなことであった。

火星は月にくらべたら 未知のことがあまりにも多い。ようやく 無人探査体による写真撮影や観測が 本格的にはじまったばかりである。しかし 今後は資料も加速度的にまし やがて 火星の岩石や土壌を持ち帰ることも可能になるであろう。いままでのべてきたことが 大きく書き改められる日も そう遠いことではないにちがいない。

火星だけでなく 他の惑星の探査もどンドンすすめられるだろう。つい最近では マリナー10号が水星の表面を撮影し 月面そっくりのアバタだらけの表面の写真



第4図
火星の衛星フォボス。ジャガイモのようなふしぎな形は何を物語っているのだろうか (マリナー9号撮影)



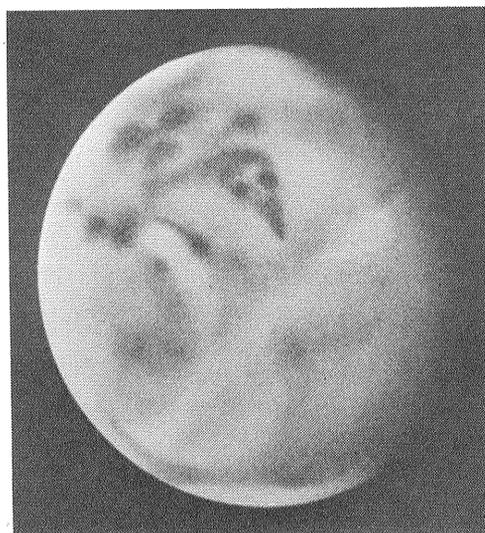
第5図
火星の衛星ダイモス。フォボスと同様クレーターがある (マリナー9号撮影)

を送信してきた。こうして 太陽系の惑星のなぞが一つ一つとかれていきつつある。

ここでとくに興味をそそられるのは 月・水星・火星のそれぞれには おびただしいアパタ(クレーター)が存在し 地球型惑星の特異な共通性を示していることである。最近のアメリカのジェット推進研究所の発表によれば 精度の高いレーダー観測の結果 金星の表面にも たくさんの大きなクレーターがみつかった ということである。地球とても例外ではなく かつては同じような性質を示していたことであろう。

しかしまた いっぽうでは月・水星・火星などのそれぞれには それぞれの個性 固有性があることも確かである。惑星のこのような共通性(普遍性)と個性性をさぐるものが これからの惑星研究の大きな課題となっていくであろう。

そして こうした比較惑星学的研究が 太陽系の起源のなぞを いっそう明らかにしていくにちがいない。しかも 私たちの地球のなぞも 惑星の研究からその解決の糸口がみつかるかもしれない。地球上の研究だけからではわからなかったことが 宇宙的視野での 外からのアプローチによって解けてくることは きっとあるだろう。火星の地質学は そのような意味でも 月に



第6図 アントニアジの画いた美しい火星スケッチは いまでも夢をさそう

ついで 宇宙地質学発展の礎石となるものである。

おわりに いろいろとお世話になった地質調査所の方がたに 厚くお礼申しあげるしだいである。(おわり)

(筆者は 東京都立武蔵高校教諭)

地学と切手



第20回
国際地質学会議
記念切手
P. Q.

第20回国際地質学会議は 1956年9月4日～11日の間 メキシコシティで2,100名が集って開かれた。日本からの出席者は 坪井誠太郎 遠藤隆次 松本達郎 兼子勝 佐々保雄 花井哲郎 西原寛治などが参加した。米国 カナダ 中南米からの出席者が多く盛大だった。記念切手は9月4日にパルクチン火山を画いたもの1種が発行された。

パルクチン火山の誕生は 火山の誕生が科学的に観察された珍しい例のひとつである。1943年2月20日メキシコのミコアカン州パルクチン村のとうもろこし畑の中に火山が生れた。昭和新山の誕生にわずか先立っている。それは戦争中ではあったが世界各地に伝えられて話題となった。

2月20日に先立つ2週間の間地震が感じられ それが次第に頻度が増えて 2月19日には300に達した。2月20日の午後パラングリクチロの農夫が耕していた畑に割れ目が開き 30分

位たつと直径1フィートの火口から灰色の煙が立ち上った。煙は次第に激しくなり 火花と高温の石が放り出され 夜になると電光と音をともなった爆発する円柱が火口から現われはじめた。翌朝になるとそこには高さ120フィートの火山錐が築かれていた。爆発は間断なく激しく続き ストロンボリ型の爆発となり 火山弾は1～2マイルの高さに及んだ。

2月22日には北側の割れ目から熔岩が出て来 火口からは依然として噴煙の立ち上る爆発がつづいた。それから10月まで主に抛出物による山体形成の活動がつづいたが それからは熔岩の流出が主になり 1944年4月には火山灰と岩滓の下に埋ったパルクチン村の上に拡がり 6月には6km はなれたパラングリクチロの村が30フィートの熔岩の流れの下にうまり ただ教会の先端だけがアア熔岩のブロックの上につき出していた。それから数年の間活動を つづけたが 全体としては次第におさまって行き 1952年2月に火山は活動をやめた。最後にはもとのとうもろこし畑から450mの高さになったが そのうち300mは火山灰と熔岩の台地 岩滓丘の比高は約150mである。

この火山は F. M. BULLARD によってくわしく研究された。9年の噴火の間に噴出物は次第に分化を示し 初期の SiO₂ 55%の橄欖石含有玄武岩質安山岩から末期の SiO₂ 60%の紫蘇輝石安山岩へと変化した。噴出物の総量は 2km³(約36億t)で うち熔岩は0.7km³である。