

発行人：惑星地質研究会 小森長生・白尾元理・出村裕英
事務局：〒193-0845 八王子市初沢町 1231-19-B-410 小森方

TEL & FAX: 0426-65-7128
E-mail: motomaro@ga2.so-net.ne.jp
郵便振替口座：00140-6-535608

インドの衝突クレーターを訪ねて

白尾元理 Motomaro SHIRAO

1. 「ルナー・クレーター」って何？

北インドの初冬は天気が悪い。乾期なのだが毎朝、濃い霧が漂い、丸い太陽が見えはじめるのは日の出から1~2時間も経った頃である。おかげでデリーに到着ははずの夜行列車の到着は午後3時過ぎになるし、濃霧による飛行機の遅れで乗り継ぎ便に乗り遅れるしで散々の2週間であった。

そんな訳で、朝日がまぶしく輝くデカン高原の大都市アウランガーバードについてたときには、久しぶりに晴々とした気持ちになった。空港からプリペイドタクシーのカウンターでアウランガーバード駅前の公営ホテルMTDCホリディ・リゾートまで頼む。するとカウンターの男性は、「公営ホテルの向かいにある新設のホテルはうちの系列なので安くするからどうだ」と熱心に勧める。道を隔てた反対側ならば、行き先は変わらない。「では見てから決めます」ということで、その男性と一緒にタクシーで行くことになった。タクシーの中でもらった名刺にはマカラムと書かれていた。

着いたのは、ホテル・クラシックという4階建てのホテルだった。大通りに面して少々騒がしいが、案内された部屋は悪くはない。「1泊1650ルピーですけれど、3泊で2400ルピーにデイスカウントしますから」という(1ルピー=約2.5円)。最初の言い値を信じてはいけませんが、3泊2400ルピー(約6000円)は悪くない。OKの返事をする、こんどはタクシーをチャーター

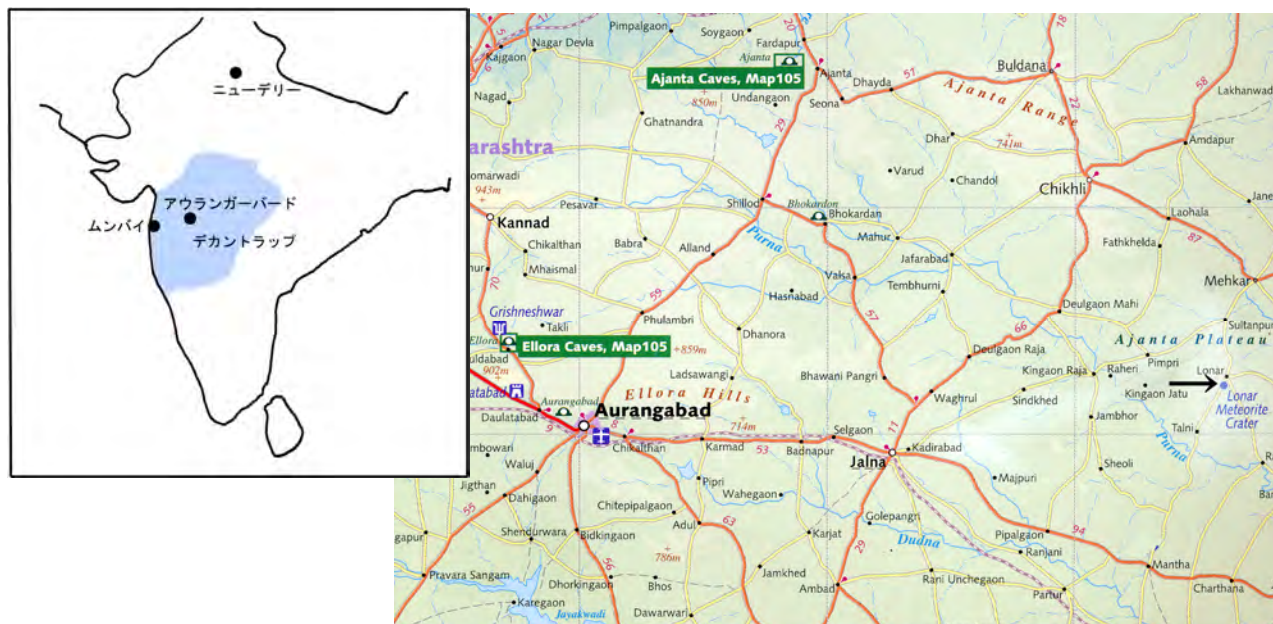


図1 ロナール・クレーターの位置図

する話をはじめた。まず私の予定を話す。1日目はアウランガーバードの北西100kmにあるアジャンター遺跡、2日目は北東40kmにあるエローラ遺跡に行くつもりだ。当初はバスを乗り継いで行く予定だったので、タクシーで回ると3日目が空いてしまう。「3日目にはどこに行ったらいいだろうか」、私はマカラムに尋ねた。

しばらく考えたあと「ルナー・クレーターはどうだろうか」という返事が返ってきた。クレーターと聞いただけで驚いたのに、その上にルナーが付く。「ルナー・クレーターてなに?」、私は聞き返した。「隕石の衝突でできた窪地だ」。デカン高原に衝突クレーターがあるなんて初耳だ。というよりも今回の旅行は、地質が目的ではないので事前に調査などしていない。詳しく聞くと「クレーターの周囲は1800フィート、深さは180フィートだ」という。詳細はあやふやであるが、どうやら本物の衝突クレーターらしい。アウランガーバードの東にあり、車で4時間ほどの所だという。結局3日目はルナー・クレーターに行くという約束で、3日分のタクシーのチャーター料3700ルピー、ホテル代2400ルピー、合わせて6100ルピーのところ6000ルピーにもらって交渉は成立した。

その晩、日本から持ってきた125万分の1スケールの道路地図(図1)を見ると、アウランガーバードの東100kmの場所に目的のクレーターが載っていた。名称は「Lonar Meteorite Crater」となっており、観光地のマークが付いている。ルナーではなく、ロナールと発音するのが正しいようだ。名前はすぐ北にある町「Lonar」にちなんで付けられたらしい。ここまで判れば、少しでも早く行きたくなり、3日目ではなく、2日目の12月22日に行くことにした。

2. ロナール・クレーターに向かう

22日の朝、約束の出発時刻は朝7時。ところが7時15分を過ぎてもホテル前にはタクシーは来ない。ホテルのフロントに問い合わせに行く。ボーイは電話でどこかとやりとりしたあと、「もう少し待ってください」と言い残し、慌てて外に飛び出していった。ようやく運転手が来たのは、7時50分。昨日、「また明日も頼むよ」とお願いした運転手アブドラではなく、ボガールという40歳ぐらいの長身のやせ男だった。起きたばかりなのか目が赤い。車はインドの国民車アンバッシュダーだ。連絡がうまくいっていなかったようで、ガソリンを入れたり、タイヤに空気を入れたりして、町中のあちこちによっていたずらに時間が過ぎてゆく。ようやく、クレーター



図2 南側から見たロナール・クレーターのパノラマ写真

に向かって出発したのは8時40分だった。

私の話しかける英語に対して、ボガールの反応が悪い。初めは不機嫌なのかと思ったが、どうやらボガールは英語がほとんどできないようだ。インドに来てはじめて知ったことだが、インドは英語が公用語になってはいるが、実際に英語を話せるのは5人に1人ぐらいしかいない。日常はヒンズー語などの現地語が使われている。こうなったら、地図帳に載っているロナール・クレーターの場所を何度も指さして、行き先を示すしかない。もっともインドのタクシー運転手は地図を読めないことが多い。というのは彼らは頭の中の記憶がすべてで地図を使わないのだ。こうなったらあとは運を天にまかせるしかない。

ボガールは80km/h以上のスピードで車を西に走らす。バックミラー越しに見える彼の目は血走っている。無言の時間が続く。鉄道の踏切や橋の位置などは地図と合っているので、どうやら道は間違っていないようだ。10時を回ったところで、マンタという集落で北に行く小道にはいる。一車線しかなく、対向車が来るごとに道をゆずったり、遅い車が前を走っていたりで、スピードがぐっと遅くなる。約1時間走ってようやくロナールの町が見えてくる。思っていたよりもずっと大きく人口は数万ありそうだ。町に入って数百メートルも走ると左側が高さ10m程度の土手になっている。その土手の切れたところの小道を入っていくと、展望台があった。時刻は11時15分。車を降りて、展望台に立つと火口湖のように絶壁に囲まれた湖が一望できる(図2)。これがロナール・クレーターか。思ったよりずっと大きい。

3. ロナール・クレーターを調べる

鉄の柵で囲まれた展望台には石碑が建っている(図3)。銘文には「ロナール・クレーター：玄武岩上にある世界で唯一の超高速衝突によってできたクレーター」とある。石碑が設立されたのは1976年4月、インド地質調査所によってである。これで正真正銘の衝突クレーターであることがわかった。しかし書かれているのはこれだけである。あとは、自分で推測するしかない。

まずは、直径だ。内部が湖になっているので比較しにくいだが、アリゾナのメテオールクレーターと同じぐらいの1.3km程度だろうか。深さは湖面までいける小道があるので、あとで腕時計についた高度計を使ってしらべることができる。クレーター底の湖面沿いには平坦な土地が2割ほ



図3 クレーター展望台に立つ石碑

どを占めるので、湖はあまり深くないのかもしれない。クレーター壁は 50° 程度の急崖になっている。クレーター壁は、乾期ということもあって灌木がまばらにはえているだけで、わずかな土壌におおわれてはいるが、玄武岩の基盤岩がみえる。リムから10~20 m下に玄武岩のフローユニットの境界のような境がみえる。これを基準にすると、6500万年前のデカントラップの洪水玄武岩は、その後の変動をまったくうけていないように水平を保っている。アリゾナのメテオール・クレーターにあるような、リムを切る断層もみられない。

同じ場所から見ていただけではわからないので、周囲を回ってみることにした。とりあえず300m北東のリム上にあるヒンズー寺院までは行けそうだ。そこまで行くと、リム上には車で1周できそうな小道がある。

3分の1周したところで車を止め、リムから内壁約20 mおりて観察する(図4)。わずかに発泡した玄武岩である。堆積岩とは違って層理がないので傾斜がわかりづらいが、少し離れてみると、玄武岩にも層理のようなものが見える。1つのフローユニットの中の溶岩の動きによってできた層理のようなものだろうか。この場所では、外側に向かって 45° 程度傾いている。ハンマーはもってこなかったので、転石をハンマー代わりにして、露頭の玄武岩を2 kg採取する。リム上に戻って、外側の地形を観察する。遠くに目をやると、10 m程度のゆるやかな起伏がある。周囲からみると、いま立っているリムは20 mぐらい盛り上がっているだろうか。リムから外側の傾斜は 10° 程度である。クレーターからの放出されたブロックなどは、残念ながら見あたらない。

さらに車を進めることにする。ところがボガール君は気が進まないようだ。タクシーの車高は余り高くないし、道路には転石もある。しかし、このクレーターは1周しても大した距離ではないし、すれ違いこそできないが道幅だって十分にある。英語が通じないのがはがゆい。「No problem. Please go straight.」何回か繰り返すと、ボガール君は観念したように運転をはじめた。クレーターを3分の2周したところでもう一度車を止めて、リム上の岩石をチェックする。玄武岩がオーバーターン(逆転)しているようにも見えるし、ここの岩石自体が大きなブロック



図4 (上) クレーター壁の玄武岩の露頭。 図5 (右上) ロナール・クレーターの衛星写真。真北に二次クレーターが、北西にロナールの町があるのがわかる(ロナール・クレーターのパンフレットから)

のようにも見える。リム上を100 mほど歩くと、石のベンチのある簡単な展望台に到着した。子供連れの5人のグループがクレーターをのぞき込んで騒いでいる。結局大した問題もなく、最初の展望台に戻ってきたのは13時10分だった。

4. クレーター底に降りる

あまり時間がないので、私はボガール君と別れてクレーター底に降りることにする。ボガール君は1km足らず離れた町に行って食事をするようにする。察するところ、非番だったボガール君は、運転手のやりくりができずにたたき起こされてやってきたようだ。だから朝食も食べていないはずだ。私は14時半には昇ってくるので、それまでに戻ってくるようにボガール君に伝える。数回英語で説明したが、ボガール君の反応は鈍い。最後に「14時半には私はここに戻ってくる」と野帳に戻ってくる時刻を書いたものを見せてから出発した。

クレーター壁の小道は、ところどころ石段になっていて、思いのほか降りやすい。3分の2ほど降りたところに、廃墟になったようなヒンズー寺院がある。入ってみると、私が来たことを気にすることもなしに青年が本を読み続けていた。さらに降り続けると、まもなくクレーター底についてしまった。高度計は625 m、リムでは730 mだったので、標高差は105 mということになる。道は続いているが、周囲には高さ10 m以上の木がうっそうと茂っている。その間から、クレーター壁が見え隠れするだけで、迫ってくるほどの迫力はない。

200 mほど進んで右に折れて湖面に出た。この部分の湖岸は幅が50 m以上もあり、枯れた樹木がまばらに立っていた。雨期には湖面が50 cm程度上昇し、この部分まで覆うのだろう。湖水は緑色で濁っていた。町に隣接しているが、生活排水が入ってきていないのは、幸いだ。このクレーターの価値を認めて、保護されているのだろうか。湖面には数十羽の水鳥が浮かんでいるところからみると魚が住んでいるらしい。リムからここまでは20分。倒木に腰を下ろし、ザックからカロリーメイトと真空パックに入ったチーズかまぼこを取り出して昼食とする。雲1つないが汗ばむほどでもなく、快適だ。

食後10分ほど休んで、戻ることにする。昇り口の広場の木陰では、インド人の家族10人がピクニックランチを広げていた。お祖父さんから2・3歳の坊やまでいて服装も皆きちんとしている。話しかけると、ロナールの町に住んでいて、よくここにピクニックに来るらしい。かなり豊かな生活をおくっているようにも見える。「一緒に食べないか」と誘われたが、残念ながら時間がないので遠慮することにした。

帰りはクレーター壁を観察しながら、玄武岩のフローユニット境界の土壤に注意しながら昇っていった。残念ながらフローユニット境界の土壤なのか玄武岩の表面が風化してできた土壤かが区別できなかった。展望台に到着したのは20分後で、時刻は14時15分。ボガール君はタクシーの中で寝ながら待っていた。どうも会話が通じなかったようで、心配なので食事に行かなかったらしい。帰りも4時間近くはかかるので、これからロナールの町まで行って、食事をさせる時間の余裕はない。申し訳ないがもう出発する時刻である。

今回この衝突クレーターを訪れたのは、まったくの偶然である。十分な下調べができなかったのは残念だが、やるだけのことはやった。あとは日本にもどってから、文献などで調べ直せばよ

い。「Let's go back to Aulangarbird.」帰りは、北回りの道を通ってアウランガーバードに向かった。

5. 帰国して

日本に戻ってから調べたところ、ロナール・クレーターについては、下記の論文があることがわかった。

Fredriksson, K., Dube, A, and Milton, D. J., and Balasundaram, M.S., 1973, Lonar Lake, India: An Impact Crater in Basalt. *Science*, 180, 861-864.

この論文によると、クレーターの直径は私の見積もりよりもだいぶ大きく 1830 m で、均質な玄武岩の上に衝突したためにまん丸に近い。北側 700 m には直径 300 m の分裂片によってできた二次クレーターがあるそうである (図 5)。湖底から 3 本のボーリングコアが採取されており、衝撃変成してできたマスケリナイトやガラス小球なども発見されている (図 6)。年代はフィッシュトラック年代から 5 万年以下と推定されている。

こうしてみると、アリゾナのメテオールクレーターに較べても見劣りしないほど、若くてオリジナルな構造を残した衝突クレーターであるといえるだろう。クレーターの内部や外側など自由に歩いて調査できることも魅力だし (現在、メテオールクレーターは、クレーターリム上はごく一部しか歩けず、またクレーター底に降りることはできない。)、月の海と同じような玄武岩をターゲットに衝突してできたクレーターであることも魅力的である。また、日本からのアクセスのしやすさの点でも有数のクレーターといえるだろう。

6. 実際に訪れる人のために

交通：日本からムンバイまではデリー経由のエア・インディアの直行便がある。ムンバイ＝アウランガーバード間は 1 日 3 往復、アウランガーバードからロナール・クレーターまでは、タクシーで約 4 時間である。タクシーを借りるのはアウランガーバード空港にあるプリペイドタクシーのカウンター、あるいはアウランガーバード駅のすぐ北にある Holiday Resort 内にある Classic

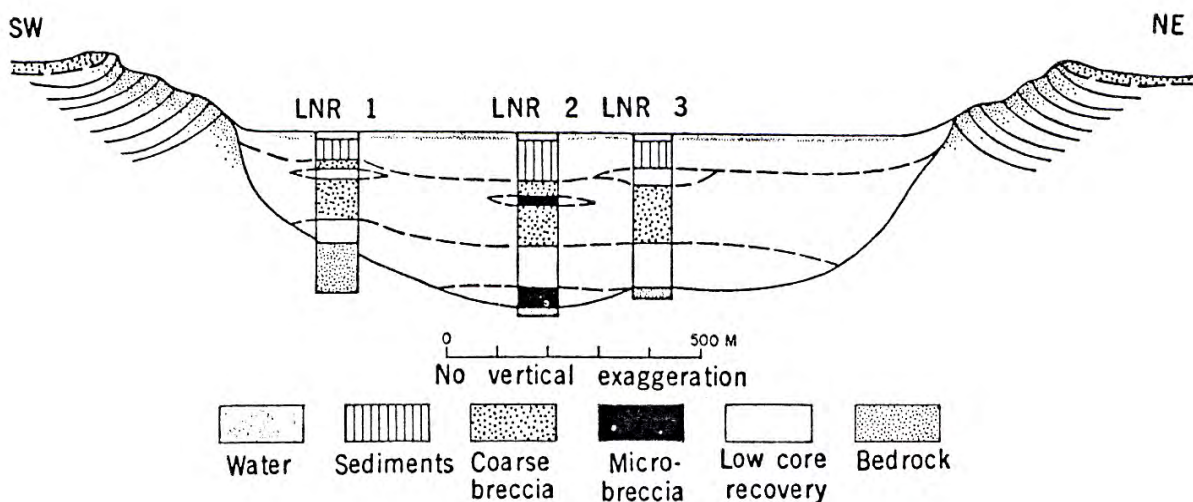


図6 ロナル・クレーターの断面図 (Fredriksson, K. et al., 1973)

Travelのカウンターで予約するのが便利。アウランガーバードからロナール・クレーターまでは、エアコンなしのタクシーを丸一日借りて1500ルピー程度。エアコン付だと5割増し。さらにもっと足回りのしっかりした4WD(1日5000ルピー程度)を借りたければ、旅行会社に相談すればよいだろう。予約のときに英語の話せる運転手を頼んでおこう。

宿泊：アウランガーバードは人口90万人の大都市なので、さまざまな宿泊施設がある。リッチに過ごしたいならば タージ・レジデンシーがおすすめ(一泊85米ドル)。その他、2000~3000円も出せば快適なホテルに泊まれる。アウランガーバードからの日帰りだと、ロナール・クレーターでの滞在時間は最大で4時間程度である。まじめに調べようと思う人はロナールの町(人口約2万人)に泊まるのがよい。旅行会社でもらったパンフレットによるとロナール・クレーターの展望台脇にはMTDC's Crater View Tourist Complexという宿泊施設があると書いてある。

その他の見どころ：アウランガーバードは、2~7世紀に建造された仏教の石窟寺院エローラ遺跡やアジャンタ遺跡への観光拠点としても有名である。いずれもデカントラップの玄武岩質溶岩をけずって作った寺院群で、世界文化遺産に指定されている。ロナール・クレーターを見るついでに、これらの遺跡によることをおすすめしたい。

なお、今回ロナール・クレーターのクレーター壁から玄武岩を採取してきました。薄片を作るなどして衝突変成作用を調べたい人には数十グラム程度を差し上げますので、メールアドレス motomaro@ga2.so-net.ne.jp にご連絡ください。

論文紹介

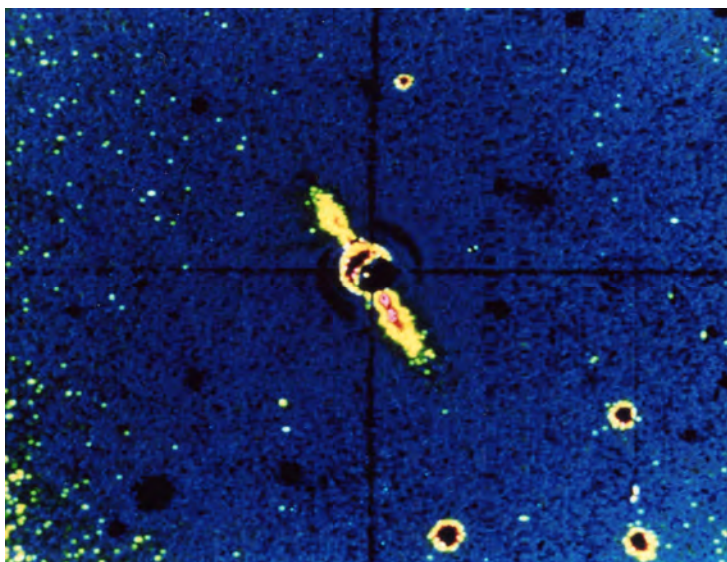
宇宙鉱物学の新展開

—がが座ベータ星のダストリングと惑星系—

Desch, S., 2004, Dust in another solar system. *Nature*, 431(7 Oct. 2004), 63-64.

宇宙鉱物学(Astromineralogy)は、天文学と鉱物学をつなぐ、エキサイティングな新しい分野である。その目ざすところは、主に中間赤外域(MIR)の波長(2~30 μm)の観測によって、しばしば原始星をとりまく宇宙のダスト粒子の大きさ、結晶構造、化学組成などを明らかにすることである。このような観測によって、原始惑星系円盤におけるダストの分布について、多くのことがわかってくるのである。すなわち、ダストの構成と進化、そして新しく太陽系をつくることになる岩石物質—つまり最終的に地球に似た惑星をつくる物質—についてである。赤外線探知には十分な技術的進歩が必要であったため、宇宙鉱物学的観測がすすんできたのは比較的最近のことである。しかし現在この分野は大きく進歩している。「Nature」誌2004年10月7日号の660ページで、日本の岡本美子(北里大、JAXA・ISAS)たちは、がが(画架)座ベータ星(β Pictoris, β Picとも略記)をとりまくダストディスクの中間赤外スペクトルの空間解像解析結果を報告している。それによると、星のまわりには岩石物質のベルトが存在し、その組成までもがわかったという。これは、太陽系と地球に似た惑星がいかにしてつくられたかという謎の解明に一石を投ずるものである。

がが座ベータ星系は若い星をとりまく始源的ダストディスクのよい例であり、そこにあるダストはすべて、より大きな天体から新しく生み出されている。これらダストは、微惑星同士の衝突破壊によってできるか、あるいは彗星の蒸発によって生まれているにちがいない。ダスト粒子のダイナミクスは、星



がが座ベータ星をとりまくダストディスク（側方から眺めた姿）。チリのラスカンパナス天文台 2.5 m 望遠鏡で撮影。（NASA）

の放射圧と重力の間のバランスだけで決まる。径 $1.5 \mu\text{m}$ 以下の小さなダスト粒子は、ベータ星の放射圧によって数十年のタイムスケールでディスクから吹き払われる。しかしながら、もっと大きなダスト粒子は、放射のエネルギーを吸収して再放射し、数千年かけて中心星めがけてらせん状に落ち込んでいく（ポインティング・ロバートソン効果）。がが座ベータ星の年齢は約 1200 万年で、上の両プロセスのタイムスケールを大きく超えているので、ディスク中のダストは彗星や微惑星からたえず新しく補充されているにちがいない。

これらダストのサイズ、結晶構造、そして化学組成は、中間赤外波長での観測によって決めることができる。小さな温かい（約 300 K）シリケート（珪酸塩）粒子は、波長約 $10 \mu\text{m}$ で強い光の放射を示す。アモルファス（非結晶質）なオリビン（かんらん石、 $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ ）は波長 $9.7 \mu\text{m}$ でとくに強い放射を示し、結晶質オリビンのフォーステライト（苦土かんらん石、 Mg_2SiO_4 ）は、 $11.2 \mu\text{m}$ を含むいくつかの特定の波長で強い放射を示す。このような発光特性は、半径 $\lambda/2\pi$ 以下の小さな粒子では最もはっきり現れる（ λ は放射光の波長）。より大きな粒子は、黒体放射に似た放射をおこなう傾向があり、波長域全体にわたっていっそう連続的に放射する。岡本たちは、さまざまなサイズと鉱物学的特徴（アモルファスか結晶質か）をもつダスト粒子について予測されるスペクトルが、がが座ベータ星のディスクのダストから放射される赤外線スペクトルの観測結果と一致することをつきとめたのだ。

じつはこれに先立つ観測で、がが座ベータ星のディスク中のダストは、星のまわりにはっきりした帯をつくるように集中して分布していることがすでに指摘されていた。このことは、ダストを補給するより、大きな天体が、別の離れた軌道を回っていることを示すものである。A.J. Weinberger たち（2003）によって先に観測されたダストの中間赤外スペクトルからも、半径 $10 \mu\text{m}$ 以下の小さなシリケート粒子からの放射が、星のまわりの半径 20AU 以内の領域に存在することが示されていた。岡本たちは、観測の空間解像度を 7.7AU から 3.2AU に改善し、いくつかの特定の鉱物についてのモデルを作成した。それらのデータは、波長 $9.7 \mu\text{m}$ で強い放射過剰を示すこと、それは小さなアモルファスシリケート粒子の存在を意味し、約 6.4、16、30AU という特定の半径の軌道領域にあることを示している。大きなアモルファスシリケート粒子は、ポインティング・ロバートソン効果から予測されるように、ベータ星の近くに集中しているようにみえる。

結晶質のシリケート粒子もまた、がが座ベータ星の近くに集中して存在する。これは、星の近くの温度が 1100K 以上と高いために、アモルファスなシリケート粒子が結晶質に転化しているためと考えられる。あるいはこれらの粒子は、がが座ベータ星系の内部に入り込んできた彗星によってもたらされたものかもしれない。ベータ星から放射される紫外線によってたやすく壊される一酸化炭素分子（CO）も、がが座ベータ星のディスクに探知されており、それらが、彗星の蒸発によってもたえず補充されていることを強くしめしている。われわれの太陽系でもヘール・ボップ彗星のような彗星から放出されるシリケート粒子のかなりの分（約 30%）が結晶質の粒子である。

16AUならびに30AUの半径の特定の領域に小さなアモルファス粒子が存在することは興味深い。これらの領域は、以前から知られていたダストの帯の位置と一致する。岡本たちは、ここに存在するダスト粒子はアモルファスなシリケートであり、それらは十分に小さいので、たえず補給されていなければならないと考えた。これらのデータは、このような半径の領域に彗星か微惑星の集合した帯があることを強く示唆する。しかしながら、岡本たちは、得られたデータの解像度をさらに上げることによって、半径6.4AUのところ、もう1つのダストの帯があることを見出した。著者たちがいうように、半径16AUと同様に6.4AUにも微惑星か彗星の帯が存在するというようなこの帯の配列は、半径12AUに羊飼い惑星が存在することを示唆している。

これらの帯にアモルファスなシリケートが顕著にみられるということは、(われわれの太陽系の彗星からも推測される状況とは異なって)、これらの半径の領域に結晶質シリケートがないということか、あるいは、シリケートが微惑星内部で結晶質からアモルファスに転化したことを示しているのかもしれない。この仮説は今後の研究によって確かめられるか否定されるだろう。とはいえ、宇宙鉱物学的な観測によって、がが座ベータ星や他の太陽系における岩石惑星の形成について、さらなる刺激的な知見がもたらされることは明らかであろう。

〈紹介者付記〉

ここに紹介したのは「Nature」Vol.431, No.7009 (7,Oct.2004)のNews and Views欄の記事のほぼ全訳である。話題の中心にとりあげられている原著は次の論文である。

Okamoto, Y.K., ほか9名, 2004, An early extrasolar planetary system revealed by planetesimal belts in β Pictoris. *Nature*, 431(7 Oct. 2004), 660-663.

この原著もあわせてご参照いただきたい。

がが座ベータ星は赤径5h47m17.1s, 赤緯 $-51^{\circ}03'59''$ (2000年分点)の位置にあり、みかけの等級は3.85等の星であるから、肉眼でみるには暗いが、すぐ近くにカノープスや大マゼラン雲があるので、見つけ出すことは可能であろう。絶対等級は2.78等、スペクトル型はA5Vの主系列星で、太陽よりもずっと大きな星である。距離は53光年(63光年とのデータもある)。この星が注目されてきたのは、星をとりかこむ大きなダストディスクがあり、原始太陽系のひな型のような存在だと考えられてきたことにある。とくに1983年、赤外線天文衛星IRASによって、星をとりかこむ領域からいちじるしい赤外線放射が観測され、ダストディスクの存在は確実にになった。

さて、ここに紹介された日本チームの観測は、すばる望遠鏡を使ってなされたもので、その成果は大変興味深い。注目されるのは、ダストディスクに三重のリング構造がみられること、6.4AUと16AUのリングの間の12AUに惑星が存在すると考えられることである。これが本当だとすると、12AUの惑星の公転周期は6.4AUリングの公転周期の2倍になるだろう。これと同じ共鳴関係は、わが太陽系の木星と小惑星帯メインベルト外縁の間に存在する。さらに12AUの惑星は16AUのリングとも2:3の共鳴関係にあり、これはちょうど海王星とエッジワース・カイパーベルト内縁の天体との共鳴関係に相当する(「Sky & Telescope」2005年1月号のNews Notesによる)。今後このような関係がさらに解明されていけば、ダストディスク内での共鳴ギャップの形成と、ダストリングや惑星の形成とのかかわりあいがいっそうよくわかってくるであろう。

なお、がが座ベータ星については、すでにいろいろなところで紹介されているが、まとまった知識を得るには、少し古くなったが次の論文が有用である。この機会に参照されるとよいと思う。

Artymowicz, P., 1997, Beta Pictoris: An Early Solar System? *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 25, 175-219.

火星の極冠にひそむ謎

Forget, F., 2004, Alien weather at the pole of Mars. *Science*, 306 (19 Nov. 2004), 1298-1299.

多くの点で、火星の気象は地球の気象とたいへんよく似ている。どちらの惑星でも、低緯度ではハドレー循環（貿易風をつくり出すプロセス）が重要であるが、その一方で、傾圧的（baroclinic）なプラネタリー波（低気圧帯と高気圧帯のつながり）が、中緯度における気象システムを支配している。もちろん、火星は地球よりも寒く乾燥しており、 H_2O の雲は火星では地球ほどには重要でない。それとは逆に、風で舞い上げられた鉱物質のダストは、大気からは容易にとり除かれず、大気の透明度や温度構造によく影響をあたえる傾向がある。こういったちがいにもかかわらず、火星の気象は、寒くて乾燥した地球上の砂漠のような場所に予想される気象にほぼ相当している。とはいえ、火星の気象学は、地球のそれとは似ていない一面もあるのだ。それは、火星の秋から冬の間、火星大気の主成分をなす二酸化炭素（ CO_2 ）が、極地では直接的に凝結することである。火星の CO_2 サイクルを理解する1つのステップとして、A.I. Spragueたちは「*Science*」本号の1364ページで、マーズオデッセイ搭載のガンマ線スペクトロメーター（GRS）による火星大気の詳細測定データの分析結果を報告している。それによると、火星大気の組成には、地球とはまったく異なった気象現象をひきおこすような、予期せざるゆらぎが存在することがわかったという。

毎年火星大気の30%もの量が凝結し、両半球の極冠を形成するが、これは火星全体にわたって表面気圧の大きな変動をひきおこす。ちょっとみると、この現象は単純なことのように見えるかもしれない。



図1 火星の南極冠。夏の終わりの縮小した姿。バイキングオービター撮影（NASA）

しかし、NASAのマーズグローバルサーベイヤー（MGS）とマーズオデッセイ、それにもっとも新しい探査機ESAのマーズエクスプレスなどによる多くの観測は、この現象がとても複雑であることを示している。このような現象を知れば知るほど、ますます謎が深まってくることは、火星探査にはよくあることだ。火星の CO_2 サイクルをきちんと理解するためには、伝統的な気象学と、雲と雪のミクロの物理学の、多くの側面が取り入れられなければならない。Spragueたちによる分析は、火星における CO_2 サイクルの新しい一面を明らかにしている。それは、南極地域では大気中のアルゴンが秋に増加し、冬から春にかけて減少していくということである。

このSpragueたちの発見は予想されていたものだった。 CO_2 は火星表面で凝結すると CO_2 氷（ドライアイス）を形成するが、火星大気の5%を構成するアルゴン（Ar）や他の非凝結気体—主として窒素（ N_2 ）と酸素（ O_2 ）—は、そうならない。このできごとは、これまでは過少評価されてきた。実際、Spragueたちは、冬の間アルゴンの平均混合比は6倍も増えるのに、春になると2～3倍に減少することを示したのである。その結果として、

大気の組成は場所と季節によって大きく変わることになる。実際、凝結しない気体の割合は、火星全体の平均約5%に比べて、冬の間南極大気全体で30%（おそらく局地的にはさらに多く）にも上昇するだろう。このような状況下では、CO₂の分圧は予想よりも低くなり、CO₂の氷点温度は数度K低下するであろう。そして表面の熱赤外放射による冷却は5%以上減少するだろう。より重要なことは、非凝結気体の平均分子量が（CO₂の44 g/molに比べて）32.3 g/molしかないこと、CO₂のほとんどが凝結する表面近くにこのような非凝結気体が多くなることは、大きな静止不安定性をもたらす、垂直方向の混合をひきおこすだろう、ということである。

こうした問題は、25年も前にS. Hess (1979) によって考察されたのであるが、火星大気の最新モデルではほとんど無視されてきたのだった。新しいGSRの測定は、火星の冬の大気が分子量の異なる気体の大きな緯度勾配によって特徴づけられ、それによって極のうず巻風のまわりに厚い成層堆積物を形成したことを示している。気象学者たちは、このような密度勾配を以前は考えようとしなかった。もっとも、海洋学者たちが計算に組み込んできた、海洋の塩分濃度の勾配は上記の密度勾配に似たものだったが。実際に冬至のころに観測されたより軽い非凝結気体の増加は、大気の循環に13 Kの温度勾配と同じ効果をもたらしたのである。この勾配は極のうず巻風の強さを減らし、非凝結気体を極域の外へはこび出す傾向が生じた。

もう1つ、ひじょうに理解を困難にしている火星の極地における夜の大気の問題は、CO₂の氷の雲の形成と降雪についてである。CO₂氷のほとんどは地表面で直接的に凝結すると考えられるが、一部のものは大気中でも凝結するだろう。こうしてできる雲のほとんどは極地の夜につくられる。だから、このような雲の存在の証拠は理論上のもの、あるいは間接的なものであった。空間的、時間的に変化するさまざまな雲の形を観測してきたのは、MGSのマーズオービターレーザー高度計（MOLA）である。これらの雲の複雑なふるまいをモデル化するために、いくつかの試みがなされてきた。それは、地形によっておこる上昇気流、山の風下側に浮力によっておこる波、あるいは特異な対流セルなどである。1つの困難は、CO₂が火星大気の主成分であるために、CO₂氷の雲のミクロの物理学が地球や太陽系の他の惑星の雲のものとは似ていないことである。

極地の夜が終わると凝結は止まるが、CO₂氷のふるまいは単純にはすまない。凍結した大気層の昇華は、はなばなしいアルベドの変化によって特徴づけられ、ガスの爆発的噴出は年ごとに地表面を浸食し、さまざまな形の奇妙な暗い斑点をつくり出す。南半球ではどの年も、極冠の大部分（いわゆる潜在地域）はきわめて透明で暗いままであり、そして急速に昇華する。これと対照的に、同じ緯度の他の地域はひじょうに明るくなり、夏の間も存続して最終的に南極にCO₂氷の永久氷冠を形成する。この地理的分布はまだ説明がつけられていない。しかも、CO₂氷の永久氷冠は比較的うすく、南極近くにこのような凍結した大気のリザーバーがあることは謎である。そのアルベドの何らかの変化、あるいは惑星軌道パラメーターの進化（それは大きく変化する）がCO₂氷冠を数年間のうちに消滅させるか大きく成長させるかするのだろうか。火星のCO₂氷冠の形成をコントロールする異境の気象学のどこかに、この問題を解くかぎがかくされているにちがいない。

〈紹介者付記〉

本稿は「Science」Vol.306, No.5700 (19 Nov.2004) のPerspectives欄のほぼ全訳である。著者のFrancois Forgetはパリ大学ラプラス研究所の気象学者。ここで紹介されている同時掲載の論文は次のとおり。

Sprague, A.I., ほか7名, 2004, Mars' south polar Ar enhancement: A tracer for south polar seasonal meridional mixing. Science, 306 (19 Nov. 2004), 1364-1367.

あわせてご参照いただければ幸いです。

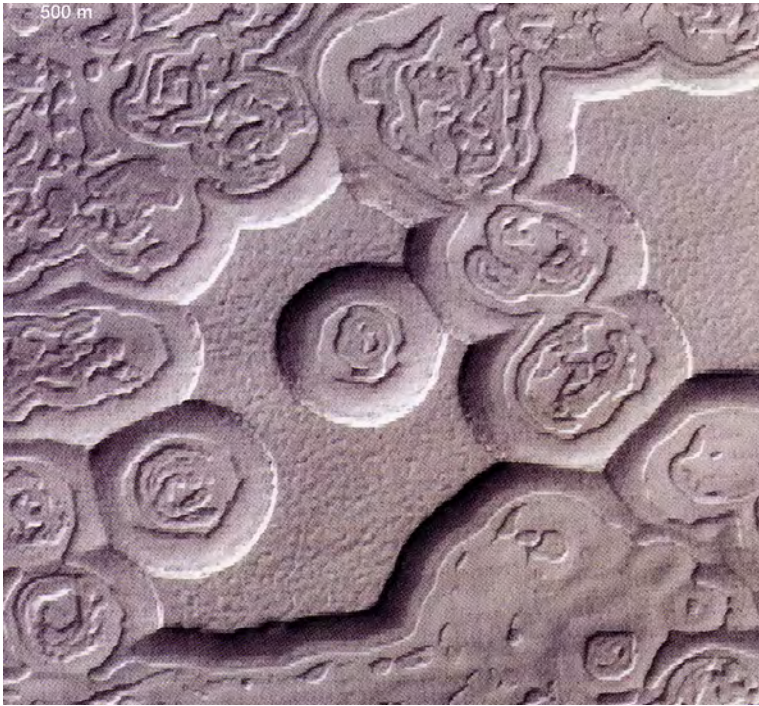


図2 南極冠地域に見られるスイスチーズ地帯。マーズグローバルサーベイヤー撮影。画面の幅は約2km。(NASA)

うすく残る。このことは、マーズオデッセイやマーズエクスプレスによってくわしく確かめられた(マーズエクスプレスの観測のくわしい報告がある。文末の文献参照)。

ところが、ここに大きな問題がある。火星の軌道の夏至点は遠日点の近くに、また冬至点は近日点の近くにある。このため南半球の夏は北半球の夏よりもかなり暖くなるはずである(火星の軌道は離心率が大きく、近日点は遠日点におけるよりも4000万km以上太陽に近い。そのため、近日点における太陽の受熱量は遠日点におけるよりも40%も大きくなる)。それなのに、南極冠の表層部のCO₂氷が、ごくうすいとはいえ、夏の間中も残っている(つまり南極冠の地域の夏は北半球の夏よりも寒い)のは、どうしてなのだろうか。これは、われわれをおおいに悩ます問題であり、まだ納得のいく説明は出されていない。

南極冠ではCO₂氷が夏でもどうして存在するかという問題のほかに、そのCO₂氷が春から夏にかけて昇華していくときできる奇妙な地形も、その生成をどう説明したらよいのか困ってしまう。そのような地形の代表として、MGSの撮影で明らかになった「スイスチーズ地帯」とよばれる穴ぼこ地形がある。直径数10mから数100mの、シャープなりんかくをもった深さ数mの凹地で、まるで打ち物の落雁の型のようにもみえる(図2)。MGSの観測によると、これらの中には、年に数mの割合で拡大しているものもあるという。こういった奇妙な地形の形成は、CO₂氷の昇華のしかたと関係しているのだろうか。著者ものべているように、南極冠一帯でおこる諸現象は、まだよくわかっていない、異境の特異な気象学の探究によって解明されていくのかもしれない。

なお、マーズエクスプレスによる南極冠の観測は、次の論文でくわしく報告されているのでご参照いただきたい。

Bibring, T-P., ほか13名, 2004, Perennial water ice identified in the south polar cap of Mars. Nature, 428 (8 April, 2004), 627-630.

(小森長生)

火星の極冠の実態については、望遠鏡観測時代からさまざまな議論があったが、最近のマーズグローバルサーベイヤー(MGS)以降の探査機の観測によって、かなり正確なことがわかってきた。ごく大まかにいえば、南北両極冠とも、主体の永年氷冠はH₂Oの氷、その上をおおう季節的氷冠はCO₂の氷である。ところが両極冠には注目すべき差異も存在する。

北極冠は、北半球が夏になると、表層部をおおうCO₂の氷は完全に蒸発(昇華)し、その下のH₂O氷が露出する。そしてこのH₂O氷も昇華しはじめ、大気中に水蒸気がふえる。しかし、南極冠ではいささか様子が異なる。南半球に夏が訪れると、南極冠の表面をおおうCO₂氷は昇華しはじめるが、夏の間中にも完全になくならず、表層部に

INFORMATION

●一番若い月隕石の発見

アフリカで発見された野球のボール大の月隕石 Northwest Africa 773 (NWA773) が、最も若い年齢をもっていることがわかった。この隕石は、インパクトメルトで固められた角礫岩で、その中の最大の破片であるかんらん石はんれい岩 (olivine gabbro) の年代が Lars Borg (ニューメキシコ大学) のチームによって測定された。その結果は、28.65 億年の年齢を示すことが明らかになった。この年齢は、これまでに知られている月のどの岩石よりも若く、これまでに一番若いとされてきた月の海の玄武岩よりも数億年若い。おそらく、あらしの大洋近くの海の部分から来たのではないかと推測される。「月にはまだわれわれの知らない若い岩石がもっとあるのかもしれない」と Borg はのべている。(「Astronomy」2005年3月号より)



●ニューホライゾンス計画に問題点

冥王星とカイパーベルト天体を訪れる NASA の太陽系外縁部探査機ニューホライゾンス (本誌 Vol.14, No.2, June 2002 にくわしい紹介あり) は、2006年1月打ち上げの予定で準備が進められているが、いくつかの問題点が生じ、計画進行が心配されている。この探査機の電源は、プルトニウム 238 を燃料とする原子力電池が使われるが、その製作の安全性の問題などで停滞しているのだ。NASA は、2006年1月の打ち上げを遅らせないためには、電源のプルトニウム搭載量を計画の80%におさえるしかないと考えている。そうすると、2015年の冥王星フライバイ探査は計画どおり実施できそうだが、その10年後になるカイパーベルト天体の探査はかなりの制約をうけ、データ送信のエネルギーが不足することになるという。計画の主任科学者 Alan Stern (サウスウエスト研究所) は、バックアップ用にもう1つの探査機が必要だという。ニューホライゾンス2号は、もしプルトニウム電源の製造がなお可能ならば、連星系をつくるカイパーベルト天体 1999Tc36 を目標とすることもできるだろうという。(「Sky & Telescope」2005年1月号による)

●ホイヘンスのタイタン着陸成功

昨年12月24日、カッシーニ本体から分離された小型プローブ「ホイヘンス」は、今年1月15日未明 (日本時間)、無事タイタンの表面に着陸した。タイタン大気圏を降下する2時間半の間、大気の種類、密度、組成などを観測、また降下中と着陸後にあわせて約350枚の写真を撮影した。降下中にとられた地表の画像には、丘の上に刻まれた樹枝状のチャンネル地形がくっきりと認められ、メタンの雨による浸食作用がはたらいてきたことをうかがわせる。液体のメタンやエタンなどの炭化水素からなる海や湖は、今回の画像でははっきりとは認められなかった。しかし、着陸地点は、海が最近干上がったか、乾燥地帯のプラヤの底のように、やわらかく湿った砂か泥のような物質の地帯だった。着陸時の衝撃の状況から推察すると、軟らかい砂か泥の上を干からびて固まったうすい皮膜のようなものがおおっているらしい。まさに「クレームブリュレ」だと John Zarnecki (イギリス、ケント大学) はのべた。大気の種類で注目されるのは、 ^{40}K の放射性崩壊で生ずる ^{40}Ar を除いて、始源的希ガス (^{36}Ar , ^{38}Ar , Kr, Xe など) が検出されなかったことである。これは何を意味しているのか。くわしい報告は次号以降に紹介したい。

●オポチュニティが火星で鉄隕石発見

メリディアニ平原で活躍中のローバー、オポチュニティは、エンデュランスクレーターに215ソル(約7.4地球月)も滞在し、岩石や土壌の調査をおこなった。その後2004年12月12日クレーターを脱出。その9ソル後、オポチュニティは、着陸時に自分自身をまもってくれた耐熱シールドの残骸と再会、落下後の状況をカメラに取めた。さらに1月2日、耐熱シールドから数mはなれたところで、バスケットボール大の石(ニックネームはHeat shield rock)を発見。化学分析の結果、鉄とニッケルの合金の鉄隕石(隕鉄)であることが判明した。地球外の惑星で、こうした小惑星帯起源と考えられる隕石が見つかったのは初めてのことである。火星は地球よりも小惑星帯に近く、そこを起源とする隕石は数多く存在するに違いない。今後の探査で、隕鉄だけでなく、石質隕石も発見されることが期待される。

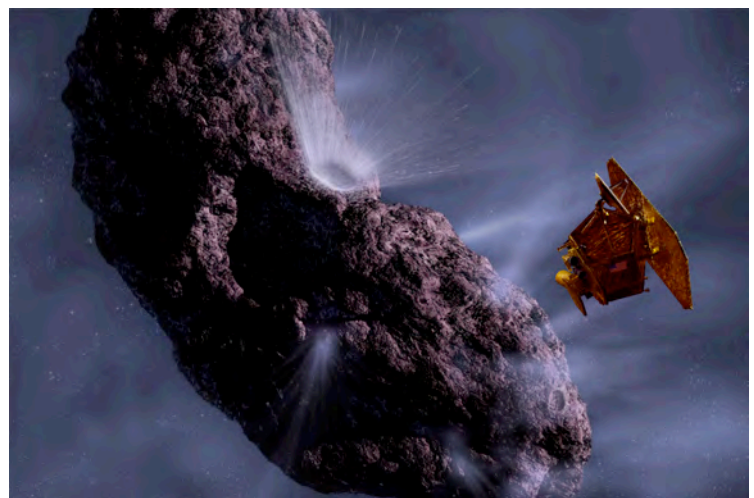
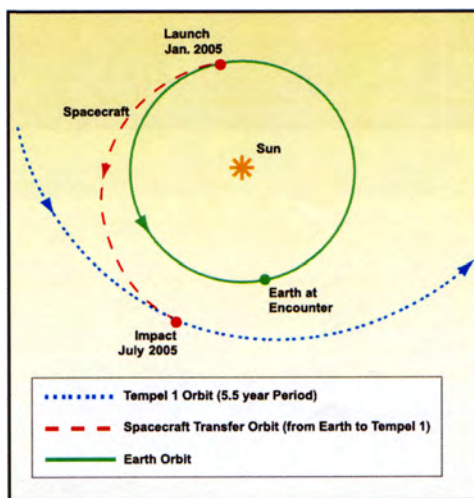


(NASA)

●NASAの彗星探査機ディープインパクト打ち上げ

NASAの彗星探査機ディープインパクトは、1月12日、フロリダ州ケープカナベラルからの打ち上げに成功し、目標であるテンペル第1彗星に向かって順調に飛行中である。ディープインパクトは、観測をおこなうフライバイ機とテンペル彗星の核に衝突する370kgのインパクターからなる。テンペル彗星の核の大きさは14×4×4kmで、これに向かってインパクターは毎秒10.2kmの速度で衝突し、直径数百m、深さ数十mのクレーターを形成させる。

クレーターの形成過程は、500km離れたフライバイ機によって観測されるほか、地球軌道上からはハッブル望遠鏡・スピッツァー赤外線望遠鏡・チャンドラX線観測衛星によって観測される。衝突の日時は今年7月4日6時10分が予定されており、これはハワイ島では7月3日20時10分に相当する。このため、観測条件に恵まれたマウナケア山上のケック望遠鏡、すばる望遠鏡、ジェミニ望遠鏡による観測計画も立てられている。(http://deepimpact.jpl.nasa.gov/mission/index.html等から)



地球、ディープインパクト、テンペル第1彗星の軌道

テンペル第1彗星に向かうインパクターの想像図(図はいずれもNASA/JPL)

編集後記：大地震など自然災害が相次いだなかで、ホイヘンスのタイタン着陸成功は明るいニュースでした。厚いもやにつつまれていた未知の世界が、いま明るみに出てきたことに、わくわくさせられました。惑星地質学の新しい地平がまた1つ開けてきた思いです。未知の世界を知る喜びと幸せを今ほど感ずることはありません。今年もよろしく。(K)