

特集 「火星生命存在の可能性」

火星隕石の岩石・鉱物学

三河内 岳¹、宮本 正道¹

1. SNC隕石から火星隕石へ

これまでに人類が手に入れた隕石の総数はおよそ2万個に達しようとしている。特に南極から毎年大量の隕石が発見・回収されているが、その中からはいくつもの非常にまれな種類のもが見つかっており、南極隕石の価値を高めている。その中でも特に研究者たちが注目するのが、火星や月などを起源とする隕石である。特に火星起源の隕石に関しては、昨年の夏にNASAジョンソン宇宙センターのDavid McKay博士らが、南極産火星隕石ALH84001中に太古の火星に存在した生命の痕跡を見出したと報告し、隕石学の分野にとどまらず広く社会的な反響を巻き起こしている[1]。火星隕石に属するものは、これまでに合計で12個見つかったが、南極と南極以外で見つかったものがそれぞれ6個ずつである。南極以外で見つかったものは、いずれも1970年よりも以前に落下したり、拾われたりしたもので、最近30年ほどは火星隕石の落下は報告されていない。その代わりに南極から現在まで6個の火星隕石がプラスされたわけである。歴史的経緯から言うと、火星隕石が、「火星隕石」、つまり火星起源の隕石と言われるようになったのは1970年代の後半からである。それまでは、現在我々が火星隕石と呼んでいるうちの6個の非南極産火星隕石は、「SNC隕石」というグループ名で呼ばれており(現在は、「火星隕石」、「SNC隕石」の

両方の呼び方が使われている)、「火星隕石」とは言われていなかった。「SNC」は、シャーゴットイト(Shergottite)、ナクライト(Nakhlite)、シャシナイト(Chassignite)という3つの隕石グループの頭文字をとったものである。6つの内訳は、シャーゴットイトに属するものがShergottyとZagamiであり、ナクライトに属するものがNakhla, Lafayette, Governador Valadares, シャシナイトに属するものはChassignyただ一つである。これらの隕石がどのような経緯で火星起源と唱えられるようになったかは、[2]や[3]などを参照していただくこととし、ここでは省略するが、南極隕石の中にこれまでのS, N, Cのどのグループにも属さないが、火星起源と考えられるものが見つかったことが、火星隕石として再分類される背景となった[4]。今回の話題となっているALH84001こそが、まさにその契機となった隕石なのである。

2. 火星隕石の分類

南極で新たに発見された火星隕石を加えた12個は、現在その岩石学的特徴により大きく5つに分けられている[5]。これまでシャーゴットイトと呼ばれていたものが、玄武岩質シャーゴットイト、レールズライト質シャーゴットイトの2つに分けられ、さらにALH84001が斜方輝石岩として新たなグループとして加わった。ナクライト、シャシナイトに関しては、SNCのときのままである。[6]に火星

¹東京大学大学院理学系研究科鉱物学専攻

隕石のいくつかの特徴をまとめた表があるので、こちらも参照されたい。

2.1 玄武岩質シャーゴッタイト

玄武岩質シャーゴッタイトは、主に輝石(ピジョナイトとオージャイト)とマスケリナイト(斜長石が強い衝撃を受けてガラス化したもの)から成るドレライト質の岩石である。現在、Shergotty, Zagami, EETA79001, QUE94201の4つがこのグループに属する。このうち輝石が80%, マスケリナイトが20%程度含まれるShergottyとZagamiは、お互いに比較的細粒の組織を示し、構成鉱物の化学組成もよく似ていることが分かっている[7]。これらの隕石は集積岩の組織を示しており、輝石のMgに富んだ中心部分が最初に結晶化し、集積したものと考えられる。EETA79001は、1979年に南極で見つかった7.9 kgの比較的大きな隕石であるが、2つの組織の異なった岩相AとBが接触して存在していることで知られている(図1)。岩相Aの方は、輝石とマスケリナイトの量比が4:1ほどで、前述のShergottyとZagamiに組織・組成ともよく似ているが、外来結晶としてMgに富むカンラン石、斜方輝石、クロム

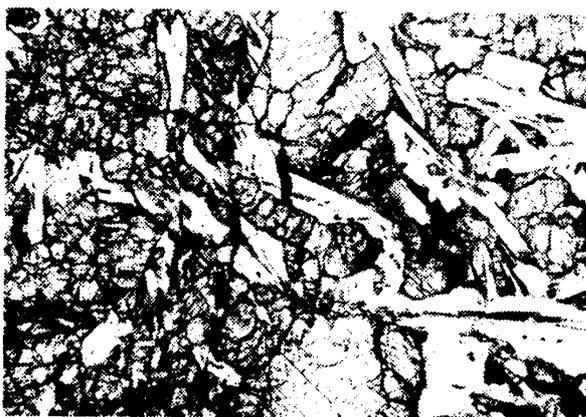


図1. 玄武岩質シャーゴッタイトEETA79001に見られる2つの異なった岩相。グレーの色の部分が輝石で、白く透明な部分がマスケリナイトである。写真中央部に接触面が垂直に走っているのが分かる。写真左側の細粒で、輝石に富んでいる方が、岩相Aで、右側の粗粒の輝石とマスケリナイトがほぼ等量ずつ含まれている方が、岩相Bである。写真の横幅は約3 mm。

鉄鉱を含む点で少し異なる。これらの外来結晶は、後述するレールゾライト質シャーゴッタイトに見られるこれらの鉱物とよく似たMgに富む化学組成を持つことから、両者の岩石学的起源は共通であると推測されている[8]。大まかに言って、これらの3つの隕石は、少し深いところでもまず輝石が結晶し、集積した後に輝石を含んだマグマが浅いところに噴出して、輝石のエッジの部分や、斜長石が結晶して形成されたものだと考えられる[7]。

一方、EETA79001の岩相Bの方は、岩相Aよりかなり粗粒であり、輝石に対するマスケリナイトの量もShergotty, Zagami, EETA79001の岩相Aに比べて多く(輝石:マスケリナイト≒1:1)、集積岩的な特徴は示さない[9]。最近南極で新しく見つかったQUE94201もEETA79001の岩相Bと組織・化学組成とも非常によく似ており、輝石とマスケリナイトをほぼ等量に含んでいる。これらの隕石は、特に輝石の化学組成に関して特徴的な化学ゾーニング(ひとつの輝石結晶で、中心から端に向かって、Mgに富むピジョナイト～Mgに富むオージャイト～Feに富むピジョナイトと変化する)を示す点からも共通点が示唆され、Shergotty, Zagami, EETA79001岩相Aとは明らかに異なっている[9]。両者の差を図2に示す。QUE94201とEETA79001岩相Bの輝石の化学ゾーニングは、過冷却したマグマからこれらの隕石が形成されたことを示しており、元マグマの組成を反映しているものとも考えられている[10]。おそらく、もともと化学分別作用を受けたマグマが溶岩流のような急冷される環境で急速に結晶化して形成されたと考えられる[9, 10, 11]。

これらのことから、玄武岩質シャーゴッタイトは、マスケリナイトに乏しいサブグループ(Shergotty, Zagami, EETA79001の岩相A)とマスケリナイトに富むサブグループ(EETA79001の岩相B, QUE94201)の2つに大きく分けることが可能である[9]。

2.2 レールズライト質シャーゴッタイト

レールズライト質シャーゴッタイトは、カンラン石と輝石(斜方輝石, ピジョナイト, オージャイト)が主要構成鉱物であり, その他に少量のマスクェリナイトとクロム鉄鉱を含んでいる。岩石学的にはレールズライトやハルツバージャイトに分類されるものである。レールズライト質シャーゴッタイトに属する火星隕石は, 現在ALH77005, LEW88516, Y793605の3つで, いずれも南極で見つかったものである。それぞれ南極では遠く離れた地点で見つかり, 別々の落下で地球に落ちてきたものと考えられる。特徴は, 丸いMgに富むカンラン石と自形のクロム鉄鉱がセンチメートルサイズの大きな輝石に取り囲まれているポイキリティックな組織である。これらの組織の間を部分的にインタースティシャルな部分が埋めている。構成鉱物の量比は, 3隕石ともおおよそ, 50%が輝石, 40%がカンラン石, 10%がマスクェリナイトで, はほぼ共通である。輝石は斜方輝石からピジョナイトに連続的に化学ゾーニングしており, 主にエッジの部分でオージャイトを離溶している。輝石に取り囲まれているカンラン石は丸い形状で, 組成

はほぼ均質である。ポイキリティックな部分には, マスクェリナイトはほとんど見られない。一方, インタースティシャルな部分は, マスクェリナイトとカンラン石が主要構成鉱物となっており, 輝石はあまり含まれない。おそらくこの3つの隕石は火星の同じ岩体で形成されたものが, 同じインパクトで火星からはじき飛ばされ, 別々の時期に南極の異なった地点に落下したものと考えられる[12, 13]。また, これらの隕石の形成史は, 以下のように推測される。最初にカンラン石とクロム鉄鉱が結晶化して, その後に結晶化した輝石がこれらの鉱物を取り囲みポイキリティックな組織を形成した。これらポイキリティック組織の間に残った残液から, まず斜長石が結晶化し, カンラン石と最後に結晶化した少量の輝石とでインタースティシャルな部分を形成した。最後に再加熱により, オージャイトの離溶が起こった[12, 13]。

玄武岩質シャーゴッタイトとレールズライト質シャーゴッタイトは, 岩石学的に関係があると考えられ, マグマが冷却する過程で, まず結晶化したカンラン石や輝石が集積してレールズライト質シャーゴッタイトを作り, カンラン石の晶出後の

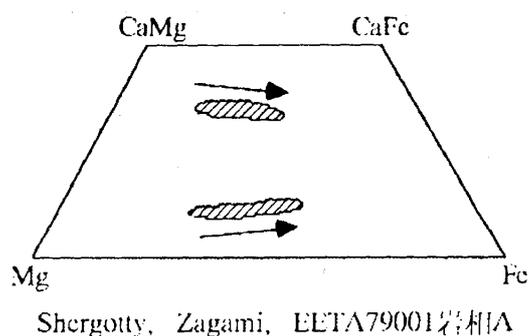
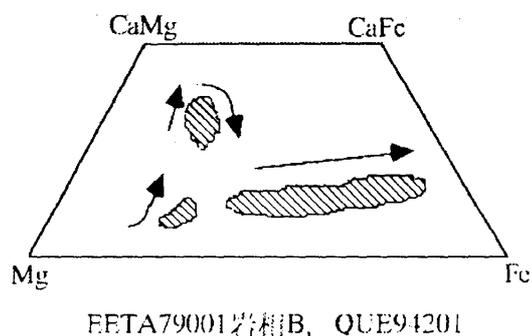


図2. 玄武岩質シャーゴッタイトの輝石の化学ゾーニングパターン。いずれも組成を輝石台形にプロットしたもの。Mg: エンスタタイト, Fe: フェロシラーライト, CaMg: ダイオプサイド, CaFe: ヘデンバージャイトに対応する。台形の上のものほどCaに富んでいる。Shergotty, Zagami, EETA79001岩相Aでは, ピジョナイ



ト(下側の斜線)とオージャイト(上側の斜線)が矢印の方向に組成の変化を示す。一方, EETA79001岩相BとQUE94201では, Mgに富むピジョナイト, Mgに富むオージャイト, ややMgに富むピジョナイト, Feに富むピジョナイトという矢印に沿った変化を示す。

マグマから結晶化した輝石や斜長石(マスケリナイト)が玄武岩質シャーゴットイトに対応するものと考え、うまく2つのシャーゴットイトの関係を説明することができる(図3)。

2.3 ナクライトとシャシナイト

ナクライトは、主に80%以上がややMgに富むオーザイトでできている単斜輝石岩で、10%程度のFeに富んだカンラン石を含む。また少量のメソステーシスの部分には、斜長石が存在するが、シ

ョックの影響はあまり見られず、結晶質である。オーザイトの結晶は、配向性を示し、典型的な集積岩の組織である。3つのナクライト(Nakhla, Lafayette, Governador Valadares)もレールゾライト質シャーゴットイトと同じく、お互いによく似た化学組成、岩石組織をしており、火星の同じ岩体から来たものと考えられる[14]。その形成過程も同じと考えられるために、特に顕著な差がない限り、ここでは、ナクライト一般のこととして記述する。オーザイトは、わずかな化学ゾーニングを示す

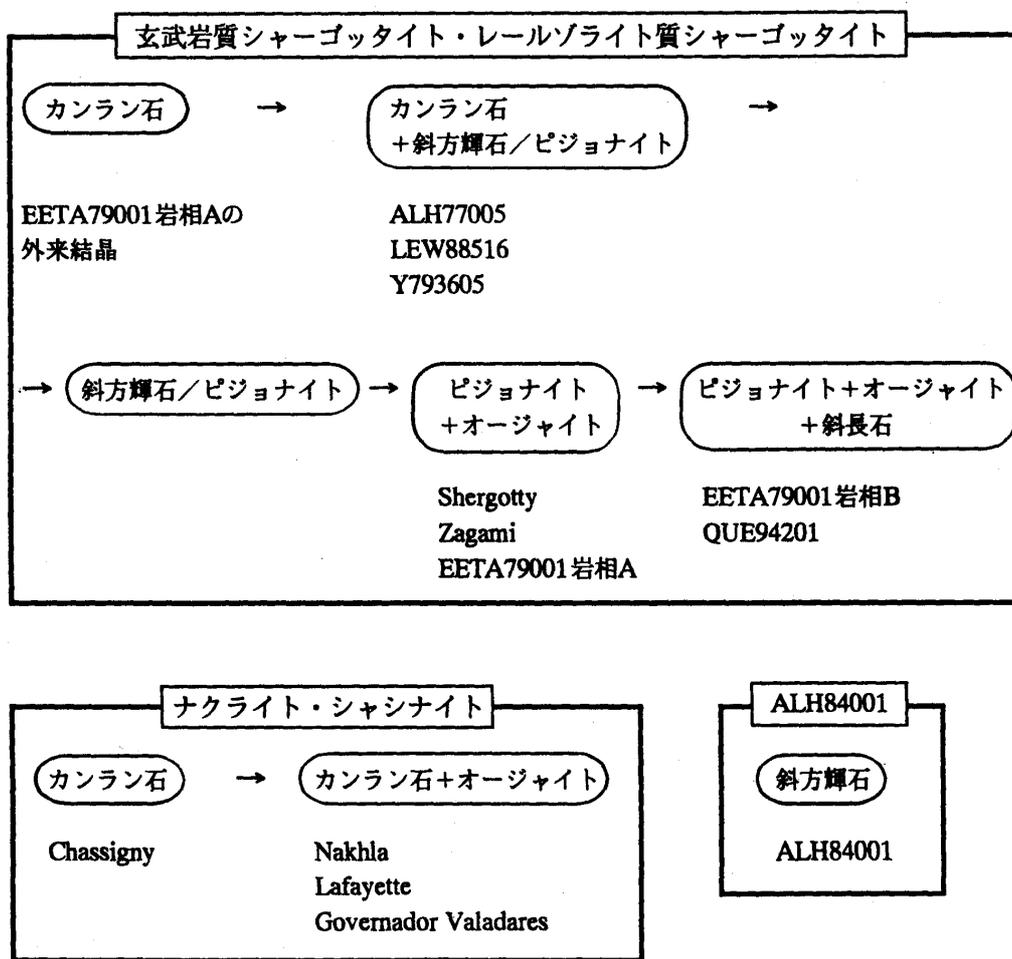


図3. 火星隕石の岩石学的関係。2種類のシャーゴットイト、ナクライトとシャシナイト、ALH84001という大きく分けて3種類がある。矢印は、結晶化過程の進む方向を示し、その段階に存在する鉱物名が枠の中に記されている。また、それぞれの段階に対

応する隕石名を枠の下に付記した。2種類のシャーゴットイトは、カンラン石の結晶化から始まる矢印で示された一連の結晶化過程のさまざまな段階でのサンプルに対応していると考えられる。

が、カンラン石は、ほぼ均質な化学組成である。カンラン石の組成とオーザイトの組成は非平衡の状態にあるが、これは、サブソリダスの冷却の際か、再加熱の際に元素拡散の起こりやすいカンラン石の方だけ、Feに富む均質な組成に変化したためと考えられている[14]。この非平衡の度合は、3つの隕石で異なっており、Nakhlaが最も再平衡の影響が小さく、Lafayetteが最も大きい。Governador Valadaresは、2つの中間である。ナクライトの形成過程としては、まずオーザイトと少量のカンラン石が結晶し、これらの鉱物が集積し、インターステイショナルな残液部分で斜長石が結晶化した。その後、元素拡散によりカンラン石がFeに富む均質な組成に変化し、オーザイトは弱冠の化学ゾーニングを残したものと考えられる。ナクライトは、溶岩流ではなく、表層よりは、やや深いところで結晶化したことが推測される[5, 14]。

火星隕石の中で、唯一のカンラン岩であるChassignyは、90%以上がFeに富むカンラン石からなり、その他に少量の輝石、長石などを含む。カンラン石は、120°の角度で接触している部分が見られ、徐冷されたことを示している。カンラン石の量の多さと組織からChassignyも集積岩と考えられる。Chassignyの形成過程は、カンラン石と輝石の量比がナクライトと異なるだけで、基本的にはナクライトと同じだと考えられており[15]、同じ結晶化系列の過程で生じた可能性がある(図3)。

2.4 ALH84001

そして、最後のグループに属するのが、90%以上が斜方輝石から成るALH84001であるが、この隕石は、他の火星隕石とは異なった特徴がいくつか見られる。これらはいずれも、McKayら[1]が報告した生物の痕跡を含むかの議論に強く関係している。ALH84001以外の火星隕石がいずれも結晶化年代が1.8～13億年前と隕石の中では著しく若いのに

対して、ALH84001だけが45.6億年前という結晶化年代を示す点がある[16]。また、ALH84001には体積比で1%にも及ぶ炭酸塩鉱物が含まれる点も他の火星隕石にとどまらず、隕石全体を見ても特異な点である[4, 17]。これらの炭酸塩鉱物は火星大気の主成分であるCO₂を溶かしこんだ水から沈殿したものと考えられている。ALH84001は、このようにそれまで見つかった“SNC隕石”とは、明らかに少々異なっており、そのため最初は、小惑星Vestaが起源と考えられているHED(howardites-eucrites-diogenites)隕石の一つであるダイオジェナイトに分類されていた。その後の再検討[4]によって、SNC隕石の仲間であることが判明したわけであるが、逆に言うと、これまで我々が知らなかった火星に関する未知の情報を秘めており、大変興味深いサンプルと言える。ALH84001は、その岩石組織などから、45.6億年前にマグマから結晶した後に、ショックによる衝撃変成(40億年ほど前に当たると考えられている)、それに引き続く熱変成、低温での変質(炭酸塩の形成はこれに相当する)、2回目のショックという一連の履歴を持つと考えられている[17]。ALH84001に関する鉱物学(特に炭酸塩)、また生物の痕跡の詳細については、[6]や[18]で詳しく議論されているので、そちらを参照されたい。

3. 火星隕石の多様性と類似性

このように、火星隕石は12個あるというものの、いくつかの隕石に岩石学的・鉱物学的類似性が見られるのは明らかである。特に前述したように、レールズライト質シャーゴットイトに属する3隕石(ALH77005, LEW88516, Y793605)と、ナクライトに属する3隕石(Nakhla, Lafayette, Governador Valadares)は、それぞれ火星の同じ岩体を起源とするものであろう。また、玄武岩質シャーゴットイ

トは、大きく2つに分けられるとしたが、EETA79001にその両方のグループに属するものが火成岩的に接触していることを考えると、玄武岩質シャーゴットイトも火星のある1つの地点を起源とする可能性は高い。さらに、EETA79001の岩相Aに含まれる外来結晶(カンラン石・斜方輝石・クロム鉄鉱)が、レーゾライト質シャーゴットイトに見られるこれらの鉱物と組成的にほぼ一致することは、玄武岩質シャーゴットイトとレーゾライト質シャーゴットイトの間に何らかの岩石学的関係があることを示すと考えられるのは、図3で示した通りである。しかし、これらの2グループの隕石の宇宙線照射年代は、お互いよく似ているものの、有為な差があるという報告もあり[19]、さらに両者の関係を決定づける、もしくは、否定するためには、新たな火星隕石の発見が必要であろう。ナクライトとシャシナイトに岩石学的関係が存在することも、すでに前述した通りである。ナクライト・シャシナイトとシャーゴットイトの間の直接的な岩石学的関係は明らかではないが、結晶化年代を考えると、13億年前の年代を示すナクライト・シャシナイトはやはり大きなまとまりとして考えられ、1.8億年前の年代のシャーゴットイトとは、別の起源だと解釈されている[20]。

このように、12個の火星隕石は、それぞれが火星での全く別々の地点のサンプルではなく、おそらく全部で3~4カ所の地点からやってきたものと考えられており、最近発見された南極産火星隕石のQUE94201やY793605もこのカテゴリーに入るものと言えらる。岩石学的に見ると、玄武岩質シャーゴットイトが最も表層で形成されたものであり、特にEETA79001の岩相BとQUE94201は、元のマグマの組成を反映しており、表層もしくは、それに近い溶岩流で結晶化したと考えられる。これらの2つ以外の火星隕石は、すべて集積岩的成分を含んでいる。Shergotty, Zagami, EETA79001の岩相A

は、EETA79001の岩相BやQUE94201よりもやや深いところで結晶化し、その後浅いところに噴出し急冷されたものだと考えられる。これらのシャーゴットイトに対して、ナクライト、シャシナイト、ALH84001はかなり深いところで形成されたものであり、ALH84001に関しては、年代的に見て、火星で生じた最初の相分化過程で生じたマグマオーシャンが固結した際の地殻深部で形成されたものかもしれない。

4. 火星隕石と生物の痕跡存在の可能性

最後に、これらの火星隕石に生物の痕跡が発見できるかという点で少し記述したい。これまでに見つかっている火星隕石はいずれも火成岩であるために、生物の痕跡を含むという点では、どれも可能性は非常に低いと言わざるを得ない。その中で、今回、McKayらの発見があったALH84001は豊富な炭酸塩鉱物を含んでいるという点で、他の火星隕石とは大きく異なっており、もし見つかるのであれば、やはりこの隕石からの可能性が一番高いであろう。ただし、その確率が12個の中で一番高いからといって、McKayらの発見が正しいと言えるわけではない。しかし、火成岩の中から化石を発見しようという通常では考えもしないことを行なったにもかかわらず、彼らの研究は非常に高く評価できるものであることは間違いなく、その着眼点の鋭さには感服せざるを得ない。

それでは、他の火星隕石に対してALH84001と同等の研究を行なった際に、意味を持つものはあるだろうか？ 残念ながら、他の火星隕石については、ほとんどが火成起源の鉱物しか含まれていないためにALH84001と同じような“発見”をすることは難しいだろう。ただ、火星での風化で形成された二次鉱物を弱冠量含んでいるものはいくつかあるので、行なうとすればこれらの鉱物がターゲット

トとなるだろう。例えば, ALH84001と同じく炭酸塩鉱物を微量ながら含んでいるのは, EETA79001であり, 実際に有機物が含まれるとの報告もある[21]。また, 日本の極地研が所有するY793605は角レキ化した部分を含むことから, このような部分に二次鉱物を探すことも重要であろう。

謝辞

本年3月の地球惑星科学関連合同学会(名古屋大)で開催されるシンポジウム「火星生命存在の可能性: 物質科学的, 生物学的, 惑星科学的側面からのアプローチ」が本稿を書く契機となった。このシンポジウムの開催に当たっては, 多くの皆さんの協力を得ている次第である。特にコンビーナーとして参加して下さっている方々, 学会の運営委員の方々に感謝致します。本研究に用いられた南極隕石は, 国立極地研究所及びMeteorite Working Group (NASAジョンソン宇宙センター)から配分されたものであり, 両機関に対し, 御礼申し上げます。また, 本研究は, 文部省科学研究費(奨励研究(A) No. 08740410)及び伊藤財団による援助を受けた。

参考文献

- [1] McKay, D. S., Gibson, E. K. Jr., Thomas-Keppta, K. L., Vali, H., Romanek, C. S., Clemett, S. J., Chillier, X. D. F., Maechiling, C. R., and Zare, R. N., 1996: Search for Past Life on Mars: Possible Relic Biogenic Activity in Martian Meteorite ALH84001. *Science* **273**, 924-930.
- [2] 池田幸雄, 1994: 火星表面物質とSNC隕石。『固体惑星物質科学の基礎的手法とその応用』(武田弘, 北村雅夫, 宮本正道編), 179-186.
- [3] 武田弘, 1991: 『失われた原始惑星』, 中公新書, 216 pp.
- [4] Mittlefehldt, D.W., 1994: ALH84001, A Cumulate Orthopyroxenite Member of the Martian Meteorite Clan. *Meteoritics* **29**, 214-221.
- [5] McSween, H. Y. Jr., 1994: What We Have Learned about Mars from SNC Meteorites. *Meteoritics* **29**, 757-779.
- [6] 土山明, 1997: D. McKay の講演要旨の和訳と総合解説。遊星人 **6**, 21-28.
- [7] McCoy, T. J., Taylor, G. J., and Keil, K., 1992: Zagami: Product of a Two-stage Magmatic History. *Geochim. Cosmochim. Acta* **56**, 3571-3582.
- [8] McSween, H. Y. Jr. and Jarosewich, E., 1983: Petrogenesis of the Elephant Moraine A79001 Meteorite: Multiple Magma Pulses on the Shergottite Parent Body. *Geochim. Cosmochim. Acta* **47**, 1501-1513.
- [9] Mikouchi, T., Miyamoto, M., and McKay, G., 1997: Similarities in Zoning of Pyroxenes from QUE94201 and EETA79001 Martian Meteorites. *Lunar Planet. Sci.* **28**, in press.
- [10] McSween, H. Y. Jr., Eisenhour, D. D., Taylor, L. A., Wadhwa, M., and Crozaz, G., 1996: QUE94201 Shergottite: Crystallization of a Martian Basaltic Magma. *Geochim. Cosmochim. Acta* **60**, 4563-4570.
- [11] Mikouchi, T., Miyamoto, M., and McKay, G., 1996: Mineralogy and Petrology of New Antarctic Shergottite QUE94201: A Coarse-grained Basalt with Unusual Pyroxene Zoning. *Lunar Planet. Sci.* **27**, 879-880.
- [12] Mikouchi, T. and Miyamoto, M., 1996: A New Member of Lherzolithic Shergottite from Japanese Antarctic Meteorite Collection: Mineralogy and

- Petrology of Yamato-793605. *Antarctic Meteorites* **21**, 104-106.
- [13] Mikouchi, T. and Miyamoto, M., 1996: Comparative Mineralogy of Antarctic Lherzolithic Shergottites ALH77005, LEW88516, and Y793605. *Meteoritics and Planet. Sci.* **31** (Supplement), A89-A90.
- [14] Harvey, R. P. and McSween, H. Y. Jr., 1992: Petrogenesis of the Nakhlite Meteorites: Evidence from Cumulate Mineral Zoning. *Geochim. Cosmochim. Acta* **56**, 1655-1663.
- [15] Floran, R. J., Prinz, M., Hlava, P. F., Keil, K., Nehru, C. E., and Hinthorne, J. R., 1978: The Chassigny Meteorite: A Cumulate Dunite with Hydrous Amphibole-bearing Melt Inclusions. *Geochim. Cosmochim. Acta* **42**, 1213-1229.
- [16] Nyquist, L. E., Bansal, B. M., Wiesmann, H. and Shih, C. -Y., 1995: "Martians" Young and Old: Zagami and ALH84001. *Lunar Planet Sci.* **26**, 1065-1066.
- [17] Treiman, A. H., 1995: A Petrographic History of Martian Meteorite ALH84001: Two Shocks and Ancient Age. *Meteoritics* **30**, 294-302.
- [18] Mikouchi, T., Tsuchiyama, A., Akai, J., Nakashima, S., Tazaki, K., Itaya, T., and Yanai, K., 1997: Mineralogical Consideration on Possible Microfossils in Martian Meteorite ALH84001. *Min. Jour.* **19**, submitted.
- [19] Eugster, O., Weigel, A. and Polnau, E., 1996: Two Different Ejection Events for Basaltic Shergottites QUE94201, Zagami and Shergotty (2.6 Ma ago) and Lherzolithic Shergottites LEW88516 and ALH77005 (3.5 Ma ago). *Lunar Planet. Sci.* **27**, 879-880.
- [20] Treiman, A. H., 1995: S≠NC: Multiple Sources Areas for Martian Meteorites. *Jour. Geophys. Res.* **100** E3, 5329-5340.
- [21] Wright, I. P., Grady, M. M., and Pillinger, C. T., 1989: Organic Materials in a Martian Meteorite. *Nature* **340**, 220-222.