固体地球・惑星科学発展に関する展望と鉱物学的研究課題

武 田 弘*

A View for the Promotion of Solid Earth and Planetary Sciences and the Related Mineralogical Research Subjects

Hiroshi TAKEDA*

Abstract

A review on proposals for the developments of material sciences of Earth and Planets by mineralogical approaches is given on the basis of official proposals of Science Council of Japan and a committee for Ministry of Education. Discoveries of more than 10,000 Antarctic meteorites promoted researches in this field, but an establishment of research centers on the solid planetary materials will help promote mineralogy in future. Some examples of research projects of the author's group have been given as an example for a future direction of mineralogy. A principle on the evolution of materials in the solar system will be deduced from solid planetary materials by future mineralogical microanalysis techniques.

1. はじめに

鉱物学に関する将来研究計画の一つとして日本学術会議鉱物学研究連絡委員会および鉱床学専門委員会より、地球・惑星物質科学長期研究計画が提出されたのは喜ばしいことである。この計画自体については、鉱物学雑誌にも掲載されているのでここでは述べない。この計画案は関連分野とも大きな関わりあいを持つものである。この計画に関連した地球科学・惑星科学の分野でどのような計画が進行しているか、その動向をみることも大切なことである。筆者は、日本学術会議第4部地球化学・宇宙化学研究連絡会の鉱物学会からの委員として、これに関連した勧告案を作成し、また測地審議会の将来計画案に関連した「日本における地球科学の基礎研究のあり方に関する総括的研究」の惑星科学ワーキンググループのメンバーとして報告書の作成に携わった。これらの関係で、関連分野の動向と答申について紹介し、今後の鉱物学の発展に関し、

鉱物学的研究課題として何に取組めばよいか、我々鉱物学者の努力目標を見出してみたいと思う。

鉱物学は古来よりある自然史 (Natural History) の学問分野であり、近年の学問の細分化、再編成、新分野の発展にもかかわらず、その名前を保っている分野の一つである。地球・惑星物質科学という名前が前記研究計画案に使われているが、これは鉱物学と大部分の分野を共通に持つものとわれわれは思うが、関連分野からみるとこれは地球物理学、地球化学、宇宙化学、天文学、隕石学などにまたがる包括的分野という印象を受けるのではなかろうか。これは独立した分野を保ってきた鉱物学分野にとって、ある意味では、貿易における関税障壁のなくなることに似ており、よほどの体質強化をはからない限り、消失することもあり得る。

一方、固体地球・惑星物質である鉱物の物質科学的手法を使った研究は、地球・惑星科学の基礎科学ともなっている状況である。この「地球」が「惑星」の前に・で結ばれる表現も、地球は太陽系の第三惑星であることを考えれば、おかしい表現である。以後、惑星科学と書けば地球をも含んだ話である。実はこの惑星が「地球」をも含んだものであるという新しい視点と

1990年2月18日 受理

* 東京大学 理学部鉱物学教室

Mineralogical Institute, Faculty of Science, University of Tokyo, Hongo, Tokyo 113

発想が大切なことである。

1969年の Allende 隕石の落下、月探査、南極隕石の発見以後、プレートテクトニクスの発展も含め、太陽系に関する物質を中心にした研究は著しい発展をとげた。高圧発生装置の開発による地球内部物質研究の発展も著しい。種々の実験的、理論的研究も含め、我々の太陽系に関する物質分布と形成・進化に関する情報の増大は著しいものである。地球の鉱物も太陽系惑星の形成と進化においてとらえることができるようになった。この状況は19世紀中頃ビーグル号による探検などにより、地球上の生物に関する情報が、著しく増大し、ダーウィンの「種の起源」が提唱された前夜に似た様相を呈している。このような歴史的発展の先を考えれば、太陽系鉱物の分布、形成、進化を総括的に見て行く太陽系の物質進化論は、将来の重要な鉱物学的研究課題の一つにとりあげるのが自然なように思われる。

2. 固体惑星物質科学の推進案

さて、前書きが長くなったが、このような研究のきっかけの一つとなった南極隕石の研究の初期において提出された研究推進案に、すでに固体惑星物質科学の研究推進がうたわれている。この勧告書は昭和55年11月6日、日本学術会議会長伏見康治より当時の内閣総理大臣鈴木善幸に提出された「隕石科学及び隕石による宇宙科学の振興について（勧告）」である。

最近、鉱物学研連より提起された固体地球・惑星物質科学の研究推進案¹⁾は、直接・間接にこの勧告案と関連を持っているので、鉱物学的研究者の一層の関与が望まれる。

2.1 固体惑星物質科学振興の勧告案概要

学術会議の勧告案は公の刊行物に記載されたことがないので、その内容はよく知られていないのは残念なことである。この案は日本学術会議第4部のこの方面の関係研連で作成された案が、同会議第80回総会の議決にもとづいて勧告されたものである。この勧告案の内容は現在においても、そのまま通用するものであり、客観的事態はなお悪くなっている状況にある。この間の新しい隕石学の現状と課題については「惑星科学の展望と課題」(水谷他, 1988)²⁾によくまとめられている。

新しく持ち帰られた隕石が一万個を越えるようになった現在では、これまでのやり方では、どこかに歪みがたまり、破綻をきたす恐れがある。隕石の初期記載

は本質的には鉱物の記載である。この案が出された当時より、鉱物学会の新しい研究材料に対する強い関心と熱意があれば、事態は変わっていたかもしれない。

この勧告案の中に研究センターに設置すべき研究部門として「固体惑星物質科学」が明記されている。この案の有形・無形の効果は別として、それ以前とそれ以後の種々の研究教育に関し、文部省および日本学術振興会の配慮には特別のものがあつた、当時大学院生、助手であつた若手研究者が、今では国際的に活躍している。

前記勧告案の研究教育機関としての国立大学又は大学院講座、研究施設の新設に関しても、固体惑星物質科学は講座名としてあげられている。その後、わが国の大学の鉱物学関連の講座にもこのような分野を専攻するものもできてきている。

この勧告案のその後の処理状況についての意見として、1988年2月28日に日本学術会議運営審議会付置勧告等委員会委員長に提出された地化学化研連の意見書に、その後のこの分野の状況が述べられている。同じくこの分野の状況と課題については、昭和63年4月に測地審議会への提案に関係してつくられた「惑星科学の展望と課題」(代表者 樋口敬二)の報告書に述べられている³⁾。惑星科学の現状と課題のうち隕石学の現状が分析され、固体惑星物質である隕石の価値を生かすための研究センターの置かれることが、現状打破になることが述べられている。また推進すべき課題として、(1)大型計算機を利用した数値シミュレーション、(2)惑星形成・進化に関与した様々な要素の基礎過程についての実験室における実験的研究、(3)地球外物質の研究などがあげられている。また、微小鉱物中の同位体が分析出来る電子顕微鏡的高分解能・高感度イオンプローブなど最先端機器開発の重要性も指摘された。

2.2 科学研究費と固体惑星物質科学推進

現在進行中の文部省科学研究費重点領域研究「原始太陽系と惑星の起源」において、鉱物関係若手研究者が全国の多くの大学より参加している現状である。今後のアフターケアがよければ、先に挙げた総括的研究課題にむけてのたいなる発展が期待できるので、鉱物研連からの案の実現が一層望まれるところである。

この分野の研究では、単に固体惑星物質の詳細な鉱物学的研究ばかりではなく、これら物質の合成や衝突実験による「実験惑星物質科学」と理論的研究、コンピュータ・シミュレーションによる研究、イオンマイクロプローブによる希土類元素、同位体分析など、

固体惑星科学の基本的手法は出そろっている感があるので、これらの助長、発展は今後の課題である。

これらのプロジェクトには含まれていない萌芽的研究を育てることも重要であることはいまでもない。これらの問題は、また次の節で固体惑星物質科学における鉱物的研究提起として取上げてみる。これらの研究により蓄積された情報をより有効に活用し、前記の総合的研究課題である「太陽系の物質進化」の総論完成にむけての総合的研究を推進するための、「固体地球惑星物質データベース」の確立も考えておかねばならない。二次元化学組成像、鉱物組成像などを最近の情報科学と画像処理の手法で、画像データベースとして発展させることも重要な課題である。

日本には産出しないが、地球の物質を比較惑星物質科学的な目で見た時、重要となる斜長岩、カーボナイトの研究など、海外学術調査の推進も考えなければならない。地球形成初期に存在していたと仮定される斜長岩と温度が下がってきて熱い雨となって降った水との反応の研究も興味がある。風化してできた海水中のカルシウムと大気中の炭酸ガスとの結合による炭酸ガスの固定も地球環境の変化の原点として考えなければならない地球的な物質進化の過程である。

2.3 国際的学際的共同研究プロジェクト

現在進行中のプロジェクトとしてはリソスフェア探査開発計画 DELP (Development and Evolution of Lithosphere Project) があり、地球の原始地殻の形成と進化の過程を類似の他の原始地殻を持つ小天体の研究と比較するプロジェクトが進んでいる。これもそろそろ終わりに近く、これを継承するプロジェクトも提出されている。現在研究計画が立案されつつあるものは、いわゆる IGBP と略される地球圏—生物圏国際共同研究計画：地球環境変化の研究である。

この計画は、1986年9月ベルン（スイス）における ICSU 総会で創設の決まったもので、人間の住む地球環境の過去から未来にかけての変化を研究し、陸、海洋、大気、気候および生物圏と呼ばれる地表に関わる全地球システムの動態の広範な研究である。これは地表の鉱物と大気、水、生物との関わりをグローバルに研究するものである。粘土鉱物関係の研究者として重要なプロジェクトと思われる。水と鉱物の反応系の研究、風化などによる粘土鉱物の生成と植物とのかわり、熱水による粘土鉱物の生成、大気、水系とイオンを交換する鉱物の結晶化学、環境科学としての粘土鉱物学、例えばアスベストによる大気汚染問題、放

射性廃棄物とその遮蔽、とくに元素の吸着に関する粘土鉱物の問題などが提案された。これらの実現には鉱物研連からの強い提言が望まれるところである。

1992年はコロンブスがアメリカを発見してから500年、国際地球観測年 (IGY) から25年であるので、アメリカ、ハワイ州の松永上院議員を中心に、国際宇宙観測年 (ISY) が立案されている (McCord, 1987)⁴⁾。この立案にも筆者は関与したが、固体惑星物質データベースの国際利用、月資源等の将来利用についても今からの研究が提案されている。この方面の基礎研究は、資源の大消費国である日本の義務とも言える。国際鉱物学会の宇宙鉱物学作業部会でも、この方面の今後の活躍について計画が練られている。我々の研究室でも文部省予算の支援のもとに「固体地球・惑星物質データベース」の収集利用が行なわれている。

3. 鉱物学的研究課題

固体惑星物質科学における鉱物学的研究課題も、いってみれば鉱物学における鉱物学的な課題ということになってしまう。地球産の鉱物の問題をとらえて研究することが大切なことであるので、いちいち具体例をあげる必要もないことであろう。しかし、このステートメントが抽象的であると思われる読者に、少々われわれの行っている仕事や、こんな仕事ができればと思う課題をこの機会に紹介させていただくことにする。この他に興味ある課題があることは申すまでもない。

3.1 地球初期の斜長岩の形成冷却と風化

月の高地がほとんど斜長石でできており、マグマ大洋のモデルが提案された事、地球上の太古代（アーケアン）斜長岩が問題にされてきた。隕石の中でも分化した隕石の中には斜長石と輝石のみよりできている岩石が多い。太陽系初期にカルシウムとアルミニウムの挙動を左右している重要な鉱物である。

これらの試料は長石の電顕による微細構造の研究の波が引いた頃に入手されるようになったため、鉱物学的研究は強力に行なわれていない。最近 (Tagai et al., 1988)⁵⁾による一連の研究で、カナダ産の太古代斜長岩中の斜長石についての高解像度 X 線回折と電顕による観察が行なわれ、新しい衛星反射の発見とその冷却過程に関する研究が行なわれている。

この研究の過程を通じて、これら斜長岩中の斜長石は容易に変化を受け、Ca を溶脱し、粘土鉱物と SiO₂ に富む物質ができることが観察された。地球形成初期には、隕石の衝突による斜長石のガラス化と、大気の

温度が下がって液体となった熱い雨により、その風化がもっと強烈に起きた可能性がある。これらの熱水反応で溶脱されたカルシウムが、できたばかりの大洋に濃集され、大気中の炭酸ガスが炭酸塩として除かれ、シリカ、アルミナに富む地殻が形成された可能性の検討も今後の研究課題である。

3.2 地球をつくった始源的物質

地球の全体組成を推定することは、地球科学にとって、初期条件の一つをきめることで重要である。これに関し、地球に集積して来た太陽系の始源的物質は何かということを確認する必要がある。今まで、オーゲユなど炭素質コンドライトのうちCIタイプと言われるものがその候補と考えられていた。

最近、南極で発見された、この種の隕石の中には、酸素同位体比から言うとCIタイプであるが、鉱物学的・岩石学的には、もっと含水鉱物の少ないタイプのものに類縁のあるものがある (Tomeoka et al., 1989)⁶⁾。炭素質コンドライト中の始源的鉱物と考えられていた低温生成鉱物は、実は太陽系星雲からの低温凝縮物でなく、隕石の母天体中での水質変成の産物であることが提唱されている (Tomeoka and Buseck, 1988)⁷⁾。前記の新しいタイプの南極隕石が、水質変成をあまり受けていない、より始源的な鉱物の集まりであるのか、低温凝縮物の熱変質作用で脱水したものかなど、今後の研究に待つところが多い。このような低温凝縮の実験的研究、隕石母天体内での水質変化の実験など鉱物学的研究課題は多い。

炭素質コンドライトの中にはカルシウムおよびアルミニウムに富む高温で凝縮する鉱物が含まれていることはよく知られている。この中に酸素同位体の異常があり、それが太陽系外物質の混入によるのではないかとされている。この酸素同位体異常はどのような鉱物によりもたらされたかはよくわかっていない。

最近シカゴ大学のアンダースらのグループ (Wopenka et al., 1989)⁸⁾は炭素質コンドライトのマトリックスに微小なダイヤモンド、炭化ケイ素を発見した。その中の希ガスの同位体異常より、それらの鉱物は太陽系外よりもたらされたものであると言っている。これらの鉱物学的研究も今後の課題である。

地球に落下してくる物質にもっとも多いコンドライト隕石が、太陽系中にもっとも多い小天体だと考えられていたが、主ベルト小惑星帯にはこのようなものは発見されていないというパラドックスがある。この結論は小惑星の反射スペクトルと隕石の反射スペクトル

の比較により導かれたものであるが、その根拠となるカンラン石、輝石、金属鉄の反射スペクトルの研究も意外と未知の部分が多い。

これらの鉱物の近赤外領域での吸収は、鉄イオンの酸素配位多面体中でのd電子の軌道遷移によるものである。これらの基礎的研究と、各種の鉱物が混合したスペクトルからの各鉱物のモード分布を出すことが、正確に行なわれないと、小惑星の反射スペクトルの解析もうまく行なわれぬ。基礎となる理論的研究と、小惑星帯でのコンドライト母天体の候補であるSタイプの小惑星の研究も大切となってくる。Sタイプ小惑星にもっとも近いと思われるものに、原始のエコンドライトがあり、これらも南極隕石の中に多く発見されつつある。これらの研究より、Sタイプ小惑星は原始のエコンドライトではないかという提案がなされている (Hiroi and Takeda, 1989)⁹⁾。この方面の研究にも鉱物学的研究課題は豊富にあり、21世紀に盛んに行なわれるであろう小惑星の試料回収とも関連して、面白い鉱物学的研究課題である。

これらの研究においても、吸収スペクトルの帰属の結晶場理論の計算には、結晶構造とイオンの有効電荷が必要である。有効電荷は第一原理に基づく分子軌道法による計算、結晶構造の精密解析などにより求められるので、鉱物学的課題は多い。

3.3 地球・惑星深部物質の研究

地球深部物質、とくに下部マントルがどのような物質でできているかの研究については、日本における高圧装置の開発により、多くの成果が挙げられている。どちらかという、地球物理学関係者の仕事が多かったように思われる。しかし、現実の高圧での下部マントル物質、例えばペロプスカイト型 MgSiO_3 の構造変化などは、鉱物結晶学関係者の活躍の舞台である (e. g. Kudoh et al., 1987)¹⁰⁾。

これらの物質については直接深部からの物質を手にとって研究することは困難なので、理論的な研究が行なわれた。初期の静電エネルギー最小化法による地球深部物質の構造の推定 (e. g. Miyamoto and Takeda, 1984)¹¹⁾から、分子運動力学的(MD)方法を使った研究 (松井, 1989)¹²⁾や第一原理による分子軌道法(MO法)による計算まで行なわれるようになった。今後のこの方面の研究も、スーパー・コンピュータの発達で発展することであろう。

現在、MO法による研究は、まだ小さなクラスターからなる構造にしか適用できないが、有効電荷を計算

するには役立っている。X線による造岩鉱物の結晶構造が精密化され出してから問題となった、Si-O結合における $d\pi$ 結合の可能性も、MO法により確かめられた(廣井・武田, 1988)¹³⁾。MD法は SiO_2 の多形間の転移のシミュレーションに応用されている(Tsune-yuki et al., 1989)¹⁴⁾。

3.4 太陽系における物質進化のシミュレーション

始源的な物質が集積し、微惑星を形成し、その衝突合体により惑星を形成し、表層部の溶融と固化による分化過程を繰り返しながら現在にいたる過程を、鉱物を中心とした物質進化の考えでとらえ、その原理を説明していくことは、鉱物学における遠い将来までかかって解決しなければならない問題の一つである。

このための手法としては、太陽系初期のもっとも簡単な分化の過程を、いわゆる分化した隕石、エコンドライトの研究から、実例の過程を研究すること、コンピュータ・シミュレーションの手法によるモデル進化の研究をすること、および種々の分化の過程をたどった諸惑星の進化の比較研究を行なうことなどで徐々に進めていくしかない。

このような過程で基本となるのは、太陽系の主要元素の関与した、多次元の相図の完成と、気相-固相、固相-液相(部分溶融)、液相-固相(結晶分化)、固相-固相などの元素分配係数の推定であろう。分配係数は希土類元素、新鉄元素など微量元素も含めたものでなければならない。

多くの系で実験的に求めることも行なわれているが(Kato et al., 1987)¹⁵⁾、複雑な組成と濃度、圧力、酸素分圧のもとでの分配は理論的な手法による研究も大切である。これらの計算には前記の理論計算の手法が必要であったが、静電エネルギー的なアプローチがそろそろ可能な段階にきた。まだすべてを理論的に計算するわけにはいかないが、古いゴールドシュミットの元素の地球化学的挙動を支配する結晶化学的原理より、もう一歩ふみこんだアプローチが必要である。ペロプスカイトと溶液との希土類元素の分配に関する仕事は、この先がけとなるつもりで始められた(山田・武田, 1988)¹⁶⁾。

実験や理論的研究だけでなく、共存する鉱物間の元素分配やデータを測定することも重要な課題である。とくに微小な鉱物粒のX線回折と化学組成、同位体組成分析も開発されなければならない。これらのアプローチとして、高エネルギー研のSOR共同利用が行なわれている(大隅ほか, 1988)¹⁷⁾。微小領域の微量

元素の定量も同研究所飯田助教授の開発で可能となった。われわれは金属鉄とケイ酸塩鉱物のRuの分析を進めている(Hidaka et al., 1990)¹⁸⁾; Saito, et al., 1990)¹⁹⁾。

これらの実例は、われわれが関係した数例にすぎないが、将来計画については本号に土山明による将来的研究の話があるので参照されたい(土山, 1990)²⁰⁾。

4. 物質科学、無機材質工学などとの関係

ここではとくに地球科学、惑星科学とに関連した答申を述べてきたが、鉱物学のもう一つの方向であるこの標題についてもふれておくことは、鉱物学会の会員で、この分野で活躍している人口の多いことからしても必要と思われる。この分野の研究機関としては、すでに無機材質研究所、金属材料研究所、東大物性研究所、先端技術研究センターなど多くがあり、鉱物学会会員の活躍も大きい現状である。また企業における研究所も充実してきており、これらの機関と大学との共同研究など多くの実りある実績が期待できる。

もちろんこれをさらに推進するために文部省関係の研究所をつくることは有意義かとも思われるが、最近では寄付講座などで補充して行くという方向に進んでいるように思われる。これらの分野で物理学、化学、工学の研究者より鉱物学者がより特異な存在であるためには、人工ではつくりえない環境でつくられた地球・惑星物質の知識や扱いに秀い出ていることが大切であるので、これは、かえって固体惑星物質科学の教育研究体制を充実しなければならないという筋道にもどってくる。このあたりの議論は鉱物学会で十分検討の必要があろう。

5. あとがき

本講演のシンポジウムの題目は「固体地球惑星科学発展に関する答申」に関するものであったが、鉱物研連からの代表による答申案についての具体的な説明も討論もなかったのも、本稿でも答申よりも現状と展望の話を加えることにした。いくらい答申案や建議が出されても現実に興味ある具体的な研究課題が出されなければどうにもならないからと思ったからである。

具体的なこれからの研究案を書くのも、今までに終ってしまった、うまくまとめられた研究の話をするより、現に進行中でアブストラクトの形でしか公表されていないものを主に紹介させていただいた。

この他に多くのこの方面の研究がなされているのは

いうまでもない。ここに示された研究課題についての批評と助言をいただければ幸いである。

文部省に測地審議会より建議として出された「地球科学の推進について—地球科学の現状と将来」の中に鉱物学に関する部分の取扱われた方について議論があることが世話人から指摘された。実はこのもとになった特定研究の報告書にはもっと多くのことが書かれていたが、建議に圧縮する段階で、特定のことのみに強調されたのであろう。

建議によれば地球科学に新たな展開をもたらした研究として、宇宙からの物質を調査する惑星科学が取り上げられている。これは本稿でも述べたように、1969年よりはじまる他の惑星・月からの物質、南極隕石の研究の大きな発展があったためであろう。これは鉱物学分野だけの問題ではなく、科学史的にも特異な発展であったことを思えば不当な評価ではなからう。

これら始源的太陽系構成物質の研究において重要であるのは、重量に限りある貴重な物質から、太陽系の地球形成と進化に関する情報を最大限に引き出すためには、微量の試料を用いる高度の分析技術が必要なことである。前記建議に鉱物学的分野の問題として分析記載の問題が取り上げられているのはこのためであろう。

これは鉱物分野のこの方面の貢献が評価されたものであり、鉱物は分析だけやっている分野とされているという目くじらをたてる必要もなからう。

鉱物学における新しい研究方向として実験的アプローチ、理論的アプローチがとえられて久しいが、この分野でわれわれはどのような貢献をしたのであろうか。複雑な系を扱う実験岩石学、地球内部構造を明らかにする地球物理学者の貢献についてはよく知られているが、鉱物学者の貢献はむしろ半導体工学、ファインセラミックスの分野に大きかったという声もある。

物理学的、化学的方法を重要視することは大切なことはいまでもないが、天然に産するのと同じ人工物質の物理学と化学であったのでは鉱物学者の突出できる場は少ないであろう。最近この方面の物理学者、化学者のこの分野への進出をみれば明らかであろう。日本の科学には大学学科の偏差値によるランクづけの影響もあり、とかく自然に根づいた科学よりも物理学、化学指向になる傾向は強いと思われる。

固体惑星科学にとっては、とくに広範な天文学、物理学、化学、地球化学、宇宙化学、宇宙物理学などのバックグラウンドが必要であり、実験的、理論的アプ

ローチの重要なことは今までの地球科学以上である。しかし太陽系の形成と進化についての情報を残している唯一の物質である固体惑星物質そのものより、最大限の情報を引き出す立場にある鉱物学者が自然物質より学ぶ態度を忘れたらどうなるであろうか。

鉱物学は天然の物質に秘められた謎を解き明かす非常に魅力的学問であり、とくに固体惑星物質はそうである。面白い分野であるからこそ、二流の物理学者や化学者のお茶をにごす場であったり、偏差値的優越感にひたるために物理学的、化学的なことをやっていることに満足する場であっても困るのである。

この傾向は初等理科教育が自然の中にいたり、直接学ぶ態度をあまり教えなくなった影響にもあるのかもわからない。あるいは自然の謎解きよりもコンピューターゲームの謎解きに時間をとりすぎたためかも知れない。しかし、鉱物学者が直接自然物質から学ぶ態度や情報を最大限に引き出す技術の開発を怠ったらどうなるであろうか。鉱物学者がやりたい事と、他分野から望まれていることとの間にギャップがあるようになるのであろう。これらのことは鉱物学振興の建議以前の問題である。

最後にこのような発表の機会を与えられた世話人およびIGBPに関する案を提案いただいた上越教育大学自然系渡辺隆博士に感謝します。

文 献

- 1) 砂川一郎：鉱物学雑誌, 18, 221 (1987).
- 2) 水谷 仁他：惑星科学の展望と課題, 昭和63年度文部省科学研究費特定研究(1), 研究代表者 樋口敬二, 35頁 (1988).
- 3) 高木章雄他：地球科学の現状と課題Ⅲ, 昭和63年度文部省科学研究費特定研究(1), 研究代表者 樋口敬二, 61頁 (1989).
- 4) McCord, T. B.: Report on the Pacific ISY Conf., Kona, Hawaii, USA, 99p (1987).
- 5) Tagai, T., Ichikawa, J., Takeda, H. and Morrison, D. A.: Lunar Planet. Sci., XIX, 1167 (1988).
- 6) Tomeoka, K., Kojima, H. and Yanai, K.: Proc. NIPR Symp. Antarct. Meteorites 2, 36 (1989).
- 7) Tomeoka, K. and Buseck, P. R.: Geochim. Cosmochim. Acta, 52, 1627 (1988).
- 8) Wopenka, B., Virag, A., Zinner, E., Amari, S., Lewis, R. S. and Anders, E.: Abstr. 52nd Meteorit. Soc. Meet., Vienna, p. 271 (1989).
- 9) Hiroi, T. and Takeda, H.: Proc. ISAS Lunar Planet. Symp., 22nd, 187 (1989).
- 10) Kudoh, Y., Ito, E., and Takeda, H.: Phys. Chem. Minerals, 14, 350 (1987).

- 11) Miyamoto, M. and Takeda, H.: Am. Mineral., **69**, 711 (1984).
- 12) 松井正典：日本鉱物学会，講演要旨集，66頁 (1989).
- 13) 廣井孝弘，武田 弘：日本鉱山地質・日本岩鉱学会・日本鉱物学会，講演要旨集，119頁 (1988).
- 14) Tsuneyuki, S., Matsui, Y., Aoki, H. and Tsukada, M.: Nature, **339**, 209 (1989).
- 15) Kato, T.: Lunar and Planetary Sci., **XVIII**, 483 (1987).
- 16) 山田紀子，武田 弘：日本鉱山地質・日本岩鉱学会・日本鉱物学会，講演要旨集，132頁 (1988).
- 17) 大隅一政，荻谷健治，宮本正道，松田准一，上松瀬等，大政正明：日本鉱物学会，講演要旨集，72頁 (1988).
- 18) Hidaka, O., Takeda, H., Toyoda, K., Saito, J., Sato, H. and Iida, A.: Photon Factory Activity Report 1988, #6, KEK, 146 (1989).
- 19) Saito, J., Hidaka, O., Takeda, H., Nakamura, T., Yamaguchi, A., Sato, H. and Iida, A.: Photon Factory Activity Report 1989, #7, KEK, (1990).
- 20) 土山 明：鉱物学雑誌，**19**, 283, (1990).