

アポロ月岩石のこと

久 城 育 夫*

On the Apollo Lunar Rocks

Ikuo KUSHIRO*

I. はじめに

アポロ計画により人類がはじめて月に降り立ち月の岩石を地球に持ち帰ってから今年で45年になる。はからずも私はこのアポロ計画に参加することになり、月の岩石の研究という貴重なそしてエキサイティングな経験をした。この経験は私の研究歴のなかでは比較的短い期間ではあったがきわめて強い印象として記憶に残っている。そこで2回目の回顧録としてこの経験について記すことにする。

私は大学院の時から、またその後ワシントン・カーネギー研究所に行ってから、地球のマグマの成因やマントル物質についての研究を続けており、月の岩石などは研究の対象としてまったく考えていなかった。しかし、私がアメリカから帰国した翌年の1966年に、久野久先生はアポロ計画の月岩石の研究に参加することを決め、私に共同研究者にならないかと尋ねられた。私はその時になってはじめて月の岩石を研究対象として考えてみた。そして、月の岩石が地球の岩石と比べてどのように違うのか、またどのようにしてできたかを探るのも面白いと思い、共同研究者となることを承諾した。しかしその当時は月の岩石が地球に持ち帰られ、それについての研究が実際にできるとは期待していなかった。そして1967年末に再びカーネギー研究所に行き、マグマの成因につ

いての実験的研究に取り組んでいた。ところが、1968年12月にアポロ8号が月を周回して地球に帰還することに成功し、月の岩石の研究が現実的になってきた。そして、1969年7月にアポロ11号が月面に着陸し、月の岩石試料を持ち帰った。その後、以下に書くように、私が久野先生の後を引き継いで月の岩石研究を行うことになり、それから1974年までの約5年間、日本およびアメリカで月の岩石についての研究を続けることになった。以下は、私が共同研究者とともに行ったアポロ月岩石の研究およびそれにかかわる事柄についての回想である。最初にアポロ計画について簡単に述べる。

II. アポロ計画

アポロ計画は、1960年7月にNASAの長官T.K. GlennanがAdvanced Space Programをアポロ計画として承認したことから事実上スタートした。その計画を最初に示唆したのは、NASAの宇宙飛行計画部長のA. Silversteinであった。そしてソ連の宇宙計画の進展に対抗する意味もあって、1961年5月25日にJ.F. Kennedy大統領が議会において、アメリカが宇宙開発計画を推進させ、1960年代中にアメリカ人を月に送り無事帰還させることを提案した。また、何年にもわたって多額の予算を要するこの提案を議会とアメリカ国民が支持することを要請した。このKennedy大統

* 東京大学名誉教授

* Professor Emeritus, the University of Tokyo

領の提案は議会で承認され、その後 NASA はただちに MIT にアポロ宇宙船の運行システムの開発を依頼し、また、それまで開発されていたサターン・ロケットエンジンをさらに強力にするようマクドネル・ダグラス社、ボーイング社、およびノースアメリカン・ロックウェル社などに委託した。

一方、これより前の 1959 年にはレインジャー計画がスタートし、1962 年にレインジャー 4 号がはじめて月面に到達した。その後レインジャー 7, 8, 9 号が観測成功後月面に衝突した。1966 年 2 月にはロシア（当時、ソ連）のルナ 9 号がはじめて月面（嵐の大洋）に軟着陸し月面の写真を送ってきた。レインジャー計画を引き継いだサーベイヤー計画もスタートし、1 号機が同年 6 月に月の嵐の大洋に着陸して月面の写真を多数送信してきた。その後も 1967, 1968 年にサーベイヤー 3, 5, 6, 7 号機が月に着陸して写真や観測データを送信し、アポロ計画の有人月着陸船の着地に支障がないことが確認された。

アポロ計画は、1966 年 2 月に主力ロケットであるサターン IB 型ロケットと指令船の大気突入テストのための無人のアポロ 1 号を打ち上げた。1967 年 1 月に 3 人の宇宙飛行士が指令船内の火災で死亡する事故が起こったが、その後はアポロ 7 号までのテストのための打ち上げが予定通り行われ、計画は着実に進展した。1968 年 12 月には、3 人の宇宙飛行士を乗せたアポロ 8 号が月を回る軌道に入ることに成功し無事地球に帰還し、さらに 1969 年 5 月 18 日にはアポロ 10 号が打ち上げられ、月を回る軌道に入り月着陸船のテストを成功させた。そして同年 7 月 16 日に、Neil A. Armstrong, Edwin E. Aldrin および Michael Collins の 3 人が乗ったアポロ 11 号がケネディー・スペースセンターから午前 9:32 EDT（アメリカ東部標準時間）に打ち上げられ、7 月 20 日（日本時間 7 月 21 日）午後 4:18 EDT に指令船コロンビアから切り離された着陸船イーグルが静かの海（the Sea of Tranquility）に着陸した。そして Armstrong が “That’s one small step for man, one giant leap for mankind” という有名な言葉

とともに月面に降り立った。月面では Armstrong と Aldrin が岩石やソイルの試料採取を行った。採取された試料は約 60 kg であった。また、月震計やレーザー光線反射装置などの設置も行った。その後、21 日午後 1:54 EDT にイーグルは月面を離れ月周回軌道を回っていた指令船コロンビアとドッキングして地球に向け飛行し、24 日午後 12:51 EDT に太平洋に着水した。

アポロ計画の試料分析の準備も並行して進められていた。日本における月の岩石の研究計画は 1966 年から久野先生が中心になって進められた。その計画には、岩石学的研究、岩石磁気的研究、岩石物性的研究、および地球化学的研究が含まれていた。この研究計画の大部分は 1967 年 NASA によって正式に認められ、主任研究者（Principal Investigator, 以下 PI）として、久野 久教授と東大理学部地球物理学教室の永田 武教授、および東大地震研究所の金森博雄助教授が選ばれた。全体としてはアメリカをはじめ世界 9 개국から 141 人の PI が選ばれた。1968 年 4 月にはメリーランド州ボルチモアで月の岩石・鉱物関係の研究計画の会議が開かれ、久野先生が出席した。また 1969 年 4 月 27-30 日には、ヒューストンの Manned Spacecraft Center（1973年に Lyndon B. Johnson Space Center（JSC）に改名）で PI の会議が開かれた。私は PI である久野教授の共同研究者になっており、ちょうどワシントン・カーネギー研究所に滞在していたので、久野先生の代理として出席した。そこで、アポロ 11 号の計画および持ち帰った月試料の各研究者への配分方法やとり扱い方、および具体的研究方法および成果発表等につき説明と質疑応答が行われた。また、Lunar Sample Receiving Laboratory（図 1 左）の見学も行われた。月試料をとり扱う箱形の真空容器（図 1 右）はよく考えてつくられており、とくに試料に含まれているかもしれない未知の細菌による汚染について極度に注意が払われていた。私はその会議の後カーネギー研究所に戻って実験の整理をし、6 月に帰国した。

1969 年 7 月 11 日には、アポロ 11 号月試料を研究する世界の研究グループおよび研究者名が正



図 1 (左) NASA の Lunar Sample Receiving Laboratory. (右) 月試料をとり扱う真空容器。

式に発表された。日本からは3グループが選ばれていた。すなわち、岩石磁気の永田 武グループ(共同研究者:小嶋 稔,石川義和),岩石物性の金森博雄グループ(共同研究者:竹内 均,水谷 仁),および岩石・鉱物の久野 久グループ(共同研究者:久城育夫)である。ところが、久野先生は7月には病気が重くなり、8月6日に亡くなられた。もう少しで月の岩石を手にとって研究できるところであったのに、まことに残念で惜みても余りあることであった。私はその後どうするかについて考え、また教室の人とも相談した。その当時すでに、久野先生が購入したX線マイクロプローブ分析装置も設置されるなど研究の準備も進んでいたこともあり、私はやはり久野先生の遺志をついで研究を行うべきであると思った。そして久野グループが計画していた岩石学的研究を行う意志のあることをNASAに伝えた。それを知ったプリンストン大学のHarry H. Hess教授は私をPIに推薦してくれ、また、そのことを私に手紙で知らせて下さった。Hess教授はアメリカ科学アカデミー・月表面岩石研究委員会の委員長を務めていた。またNASAのElbert A. King博士も私をPIに推薦してくれた。そのこともあってか、私が久野先生の後を継いでPIになることが決まり、8月14日にNASAから東大の久保亮五理学部長にその旨の電報が送られてきた。そこで私は、岩石学講座の中村保夫さんと化学分析の原村 寛さん、および東大物性研究所の秋本俊一

さんに共同研究者になってもらうことにし、研究計画もやや変更した。

その10日あまり後の8月26日にHess教授も急病で亡くなられたことを聞いて大変驚き悲しんだ。世界的な岩石学者である久野先生とHess教授とが続けて亡くなられたことは世界の岩石学界にも大きな衝撃を与えた。両先生は1951年から輝石やマントルなどの研究を通じて親交があり、輝石に関しては共著論文もあった。また、両先生とも月の岩石の研究に強い関心をもたれ、Hess教授も同じくPIとしてアポロ月岩石の研究に参加することになっており、多くの期待が寄せられていた。本当に残念なことであった。

III. アポロ11号の月岩石の分析

月試料の初期分析は約2週間の検疫期間の後、月試料初期分析チームによってなされ、その結果は断片的にわれわれに知らされ、また、全体の結果は*Science*誌に発表された。世界の研究者への配分は9月からはじめられ、私は10月1日にヒューストンのNASAに受けとりに行った。私が受けとったのは、岩石と細粉(ソイル)とを合わせて約15gと岩石の薄片4枚であった。各研究者は持ち帰るに際して安全を期するためいろいろと工夫をこらしていた。例えば英国の研究者の場合、5つのグループに配分された月試料を2人の研究者が持ち帰ったが、以下のような工夫をしたと聞いた。すなわち、一人が見かけのよい空の

鞆を持ち、その鞆を鎖で手と結びいかにも大事なものを持っているように見せ、他の一人は見かけの悪い鞆に月岩石試料を入れその上にほろ布か紙かを被せ、飛行機内ではその月の石の入った鞆を持った人が前に座り、空の鞆を持った人が斜め後ろに座って監視をするというような工夫であった。私は一人で、しかも途中で一泊しなければならず大変心配した。ホテルで寝るときは試料の入った容器を枕の下に置き、飛行機内では試料の入った鞆を膝の下に置いていた。後で聞いたことであるが、当時在米のある東大教官を私に付き添うよう手配しようとしていたとのことである。しかしその手配は結局されなかった。10月5日の夕方、無事羽田についたが、私が最初に月の岩石試料（以下、'月の石' もしくは '月岩石'）を日本に持ち帰ったために大変な騒ぎに巻き込まれた。まず、飛行機の出口のドアまで知人が迎えにきており、その人と一緒に一般の人と違った税関に導かれ、月の石の入ったプラスチック容器や岩石の薄片を税関の人に見せ、その後空港からはバトカーの先導で大学の友人の車に乗って虎ノ門の教育会館に直行し、そこで記者会見をさせられた。共同研究者の秋本俊一さんが同席して下さった。記者会見では、容器に入った月の石の試料の一部を見せ、いくつもの質問に答えた。その後ただちに本郷三丁目の銀行に行き、その地下金庫に月の石を保管し、やっと緊張から解放された。何しろ当時、月の石は、どう計算したかわからないが、1gが2億円などと新聞に書かれていたので、それを真に受ける人がいないとは思えない緊張したわけである。実際にアメリカのロスアンゼルスでは月の石約2gが盗難にあいアメリカ中で大騒ぎになり、日本でも大きく報道された。幸いその月の石は数日後にある人の家の郵便箱で発見されたが、この事件は月の石の研究者に強い緊張感を与えた。

次の日の10月6日の各新聞に月の石が日本に来たとのニュースが大きく載り（図2）、少々大げさすぎると思った。朝日新聞の横山泰三さんの社会戯評のマンガにも描かれた。そのように世間で騒がれているなかで月の岩石の研究をはじめ



図2 筆者が受けとった月岩石試料、およびそれを持って羽田に到着した筆者（1969年10月6日の毎日新聞記事）。

た。毎朝銀行の地下金庫から月の岩石試料をとりだし、東大の資料館（現在の博物館）の実験室まで持っていき、夜にはまた銀行の地下金庫に返すという面倒なことを続けた。そのようなことは必要ないとは思ったが万一のことを考えたわけである。研究の間にマスコミの記者の取材の希望が多くて大変わずらわしく、それに一々対応しては研究に支障を来すので、理学部および地質学教室の配慮で取材制限をしてもらった。

10月16日には、永田先生が月の石を持ち帰った。永田先生の試料は岩石磁気の研究のためのもので、11gと2.4gの岩石試料と細粉5gであった。この時は2番目ということで、それほど大きくは騒がれなかった。

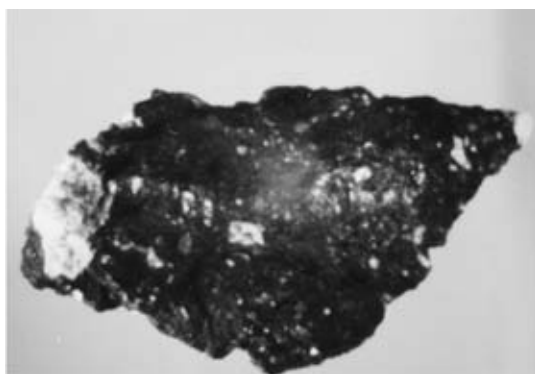
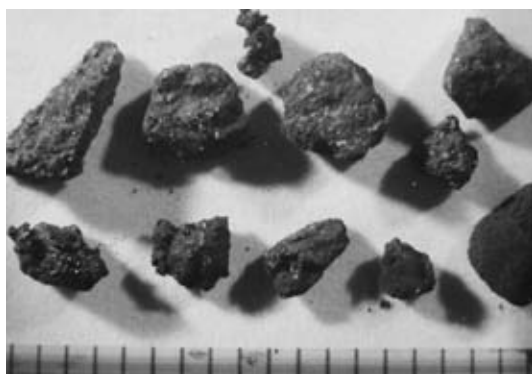


図3 (左) 岩石の小片 (目盛りは1 mm). (右) 白い岩片を含む角礫岩 (横幅約5 mm).

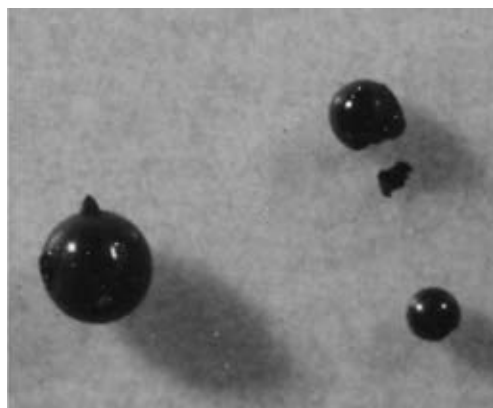
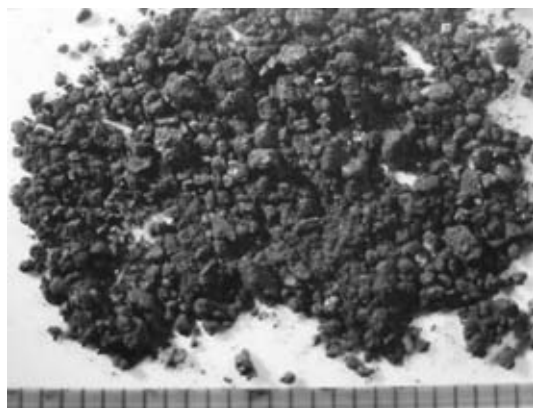


図4 (左) 粗粒なソイル (目盛りは1 mm). (右) Moon pearl (大きな球の直径1.5 mm).

私達の月岩石の研究は、岩石薄片の顕微鏡観察、岩石・細粉の化学分析、X線マイクロプロブ分析装置による鉱物やガラスの分析、および岩石の高温・高圧下での融解実験である。岩石試料は玄武岩質岩石（タイプAの玄武岩とタイプBの細粒のガブロ）、および角礫岩（タイプC）であった。図3、図4に私達のグループに配分された試料の一部の写真を示す。岩石のなかには異なる岩片や鉱物片を含む不均質な角礫岩も含まれていた。角礫岩のなかには白い岩片を含むものもあった（図3）。細粉（ソイル）には粗粒なものと同細粒のもの2種類があり、両者に黒真珠のようなガラス球が含まれていることが興味を引いた（図4）。このガラス球は、マグマの噴出あるいは

天体衝突による衝撃で生じた液滴が飛び散り急冷されたもので、月の真珠（moon pearl）と呼ばれるようになった。玄武岩の表面には気泡状の丸いくぼみがあり、その表面がガラスで被われていた。それとは別に、所々小さなクレイター状のへこみもあり、その周囲に流れ出したようなガラスが付着しているのも見られた。少なくとも後者は微小隕石の衝突によって生じた可能性も考えられる。

顕微鏡観察でまず驚いたのは、いずれの岩石も生じた年代が30億年以上古いのに、鉱物やガラスの変質はまったく見られず、最近マグマが固結して生じたようにきわめて新鮮であることであった。地球上の火成岩では数百万年以上古ければガラスなどは何らかの変質作用を受けているのが普

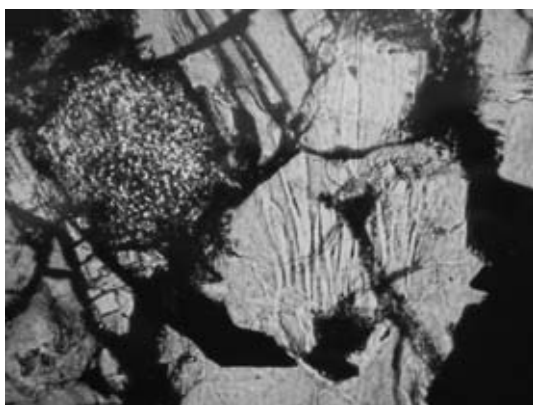
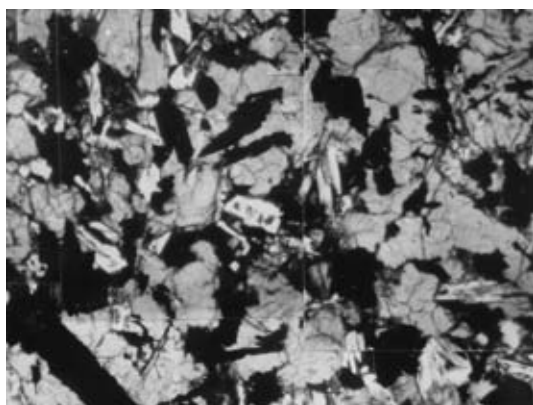


図5 岩石の顕微鏡写真。(左) イルメナイト(不透明鉱物)に富む玄武岩。(右) 粗粒なガブロ質岩石。中央の鉱物は不規則なピジョン輝石のラメラを含む普通輝石。両写真の横幅約1 mm。

通である。また、イルメナイトというチタンと鉄に富む不透明鉱物が多量に含まれていることも異常であった(図5左)。

X線マイクロプローブで岩石試料の分析をはじめると驚くことが次々と出てきた。まず地球の火成岩にはほとんど存在しない金属鉄やトロイライト(FeS)が含まれていること、輝石の組成変化がきわめて大きいこと、シリカとKに著しく富むガラスが結晶の間に存在することなどである。とくに、輝石のMg/Fe比の変化は驚くほど大きく、地球上の火成岩では一つの岩石試料ではこれまでに見られないほど大きかった。また、普通輝石とピジョン輝石とが互に入り組んだ蝟の足のような異様な組織を示すものもあった。粗粒なガブロ質な岩石でも、鉱物内の組成変化は大きく不均質であった(図5右)。これらの組成変化や組織は、月のマグマが冷却するときに結晶が急速に成長したこと、そしてその結果、マグマと結晶とが非平衡状態で結晶作用が進みマグマの組成が著しく変化した、つまり、ごく小さなスケールで極端な分別結晶作用が起こったことを示している。結晶が急速に成長したのは鉄やチタンに富む静かの海のマグマの粘性が著しく低かったことが主要な原因と考えられる。またマグマが過冷却した可能性も考えられる。いずれの岩石中にも金属鉄が含まれていることからマグマの結晶時に酸素分圧が低

かったことが推察される。岩石の化学分析ではシリカとナトリウムが少なく、鉄とチタンが非常に多いことが地球の玄武岩に比べて異常であった。

その当時のマイクロプローブの分析は、今のようにボタン押すだけで分析値が自動的にプリントされるかコンピューターに表示されるのとは大違いで、試料からのX線の強度を補正する方法すら確立されていなかった。そのため、中村保夫さんは独自に各元素について標準試料に基づき補正係数を求めねばならなかった。そして、分析試料のある部分を分析するときは、その部分の一定時間のX線のカウント数(強度)を書き写し、その値を最初は手動計算機を使って補正計算して分析値を得るということで、一点の分析値を求めるのにも大変手間がかかった。後に補正計算はコンピューターを使うようになり能率はあがった。また、中村さんは月の岩石が来る前に、テストとして地球の火山岩の鉱物の分析をして分析方法を確立していたので月の岩石の分析も順調に進めることができた。

月のタイプAの玄武岩の融解実験では、1気圧下において1225℃で最初にCrを含む(Mg, Fe)Ti₂O₅相が晶出し、温度が下がるに従って、クロマイト、単斜輝石、カンラン石、イルメナイト、斜長石が晶出した。(Mg, Fe)Ti₂O₅相は地球の火成岩には知られていないので、私達は単に(Mg,

Fe) Ti_2O_5 相として記載していたが、下に記すように月の玄武岩で実際に見いだされ新鉱物となった。高压下では、この玄武岩の液は単斜輝石とルチルと共存し、この玄武岩がそれらを含む岩石の融解で生じた可能性が示唆された。

月の石の研究は、研究グループごと独立して行い、研究成果は互いに、また一般に知らせないことを原則にしていた。日本では、永田グループと私達のグループだけで（金森さんはアメリカで研究）、しかも分野が異なっていたので何も問題はなかったが、アメリカでは同じ大学内や地理的に近い研究グループの間で研究成果の情報が漏れることに大変気をつけていたと聞いた。どのグループにも属さないある著名な研究者が、あるグループの成果を他のグループに漏らしたので問題になったことを聞いた。これらの月岩石の研究では、同じ岩石試料について世界のいくつもの優れた研究グループが同じ分析や測定を行い、結果は国際的レベルで‘審査’されるので、他のグループに勝るとも劣らない結果を出さなければならない。私達の研究においては、中村保夫さんのマイクロプローブによる精緻な分析や原村 寛さんの化学分析が高いレベルの研究遂行に大いに役立った。

11月7日に、東大宇宙航空研究所で開かれた月・惑星シンポジウムにおいて、永田先生と私は、月岩石についてそれまで得られた研究成果を報告した。しかし上記のような原則があるので、新しい成果を詳しく発表するわけにはいかず、主として初期分析チームの結果を確認したような話をした。永田先生は、月の石に弱い残留磁気があることを話された。私は一つだけ初期分析チームが記載していなかった鉱物（燐灰石）が含まれていることを話した。これは地球の火成岩には少量ながらごく普通にある鉱物なのであまり気にしなかったが、それが日本の新聞に出、さらにそれが英訳されてアメリカの新聞にも出たため、シカゴ大学に滞在していた小沼直樹さんからそのことを問題にした研究者がいたことを後に知らされた。韓国の新聞社（中央日報）からも月の石の写真と簡単な記述が欲しいとの要請があり、写真の公表は問題ではなかったので、その要請に応じて資料を送っ

た。その写真は同新聞社発行の11月25日の新聞に大きく載った。

11月26日～12月7日には、上野の科学博物館においてアメリカ大使館協賛、朝日新聞社後援の月の石の一般公開の展示が行われた。主要な月の石はNASAから貸し出されたものであったが、永田先生と私に配分された試料の一部も展示することになり、私は月の石についての説明を書いた。ずいぶんたくさんの方が列をつくって来館し、また皇族の方も来られ、月の石にたいする人々の関心が高いことにやや驚いた。また、その頃に宮内庁から理学部長を通じて永田先生と私に、月の石を皇居で昭和天皇にご覧に入れたらどうかとの問い合わせがあった。私は分析その他で準備が間に合わないこともあり、永田先生お一人にお願いすることにした。しかし、東大内での総長主催の学部長、研究所長の会議での月の石の開示と説明は引き受けた。このような対外的な対応でも時間をかなり費やした。そして、研究をはじめて約2か月後の12月はじめにNASAから1月に発表する論文の要旨を送れとやってきた。そこで、それまでの研究成果の要点を書いて送った。

IV. ヒューストンの第1回月科学会議

1970年1月5日から4日間ヒューストンで月科学会議が開かれ、そこで各研究グループの成果が発表されることになっていた。そのためにそれまでに得た研究成果をまとめなければならないので、私達は3か月足らずの間、緊張しながら、また新事実に興奮しながら研究を続けた。そして充分ではなかったが、一応の成果をあげたので、それを5ページの論文（Kushiro *et al.*, 1970）にまとめて会議に出席した。会場はアルバート・トーマス・コンベンションホールで、会議に出席して発表するには、まず受付でその論文原稿を提出しなければならない。その論文はそのまま *Science* 誌に発表されることになっていた。つまり提出した論文に書かれていないことを発表しても認められないわけである。また、会議で聞いたことを論文に書くことを防ぐためでもあった。私が発表する第1日目の会場は巨大なホールで、それが

2000人以上の参加者でぎっしりと埋め尽くされていた。後ろの方は人の顔もわからないほどであった。そこで発表するには大変緊張した。英語圏の経験豊かな研究者でも緊張のため硬くなったり、あがったりしていた。もちろん落ち着いて得意になって発表する研究者や冗談を交える研究者も多くいた。私のすぐ前に発表した英国の研究者は手に持った原稿が震えており（武者震いだったかもしれないが）、私にも彼の緊張感が伝わってきた。私はあがらずに何とか無事発表を終え、いくつかの質問にも答えた。これだけ多くの研究者のいる会議で発表したのももちろんこれが最初であり、その後もない。2日目からは2会場に分かれて研究分野ごとの発表が行われた。

この会議でとくに議論が活発にされたのは月の岩石と月の年代、チタンに富む玄武岩の成因や高地の岩石、および月の成因等であった。立本光信らとG.J. Wasserburgらのグループが月の年代が45-46.6億年であることを示したことがとくに大きな注目を引いた（Tatsumoto and Rosholt, 1970; Albee *et al.*, 1970）。この年代は月の表面のソイルと角礫岩から求められたものであり、議論が盛んに行われた。Wasserburgらは45億年は月の地殻が生じた年代と考えた。また、J.A. Woodがソイル中の多くの岩石片を観察し、アノーソサイト（斜長岩）の岩石が含まれることから、高地の主要岩石はアノーソサイトであることを予言したことも特筆すべきことであった（Wood *et al.*, 1970）。これは後に正しいことが実証された。さらに、岩石や細粉に水の痕跡がまったくないことや、玄武岩の密度が月全体の密度よりやや大きいことなども注目の対象となった。玄武岩の密度の大きいことはマグマの結晶分化により鉄やチタンに濃集した結果生じたと容易に説明できる。私達が分析したシリカに富むガラスは、月の玄武岩マグマの分別結晶作用の後期に、鉄に富む液とシリカおよびKに富む液に分離する液相の不混和現象によって生じたことがE. Roedderらの観察と実験から示された（Roedder and Weiblen, 1970）。玄武岩の成因については、月の深部の輝石に富む岩石（パイロクシナイト）の部分融解によって生じ

た液がほぼそのまま噴出したか、あるいは深部で生じた液が著しい分別結晶作用を経た後に噴出したかで、A.E. RingwoodとM.J. O'Haraが激しく議論し合った（Ringwood and Essene, 1970; O'Hara *et al.*, 1970）。月の成因についての議論も盛んに行われが、結論には達せず、議論の最後にH. Ureyが、私が30年前にいったことと少しも変わっていない、と発言したことが印象に残った。ただしUreyは月は低温で生じ高温を経ていないと主張していたので、その点は間違っていたといわざるを得ない。

この会議でのレセプションは、有名な天体物理学者のF. Hoyleや化学者のH. Ureyをはじめ、世界の多くの著名な地球惑星科学者を交えて大変に盛大であり、印象深いまたユーモアに富むスピーチがいくつもあった。会議後、ヒューストンで朝日新聞社による日本人研究者による座談会が開かれ、永田先生と私、および当時MITにいた金森博雄さんとハーバード大学にいた伊藤 順さんの4人が出席し、会議で発表された成果や問題点や疑問点などについて話し合った。また、シカゴ大学から来ていた小沼直樹さんは独立に記者からインタビューを受けていた。

ヒューストンの会議から帰国してからも月の石の研究を続け、会議で発表された新事実を確認したり、さらに新しい事実を見いだしたりした。一つ残念だったことは、私達に配分された岩石試料のうち、会議までに分析できなかった試料のなかに会議で発表された新鉱物、アーマルコライト [armalcolite, (Fe, Mg) Ti₂O₅]を見いだしたことである（図6左）。この新鉱物名は3人の宇宙飛行士の名（Armstrong, Aldrin, Collins）の最初の部分をとって命名された（Anderson *et al.*, 1970）。もし会議前にその試料を分析していれば新鉱物発見グループに入っていたかもしれない。上に書いたように私達は実験ではこの鉱物が月の玄武岩のメルトから結晶する結果を得ていたが（図6右）、分析した岩石中にはみつけていなかった。

月科学会議をはさむ約半年間の私達の岩石学的小および実験的研究の結果は3つの論文にまとめ、Apollo 11号月科学会議の特集号に発表した

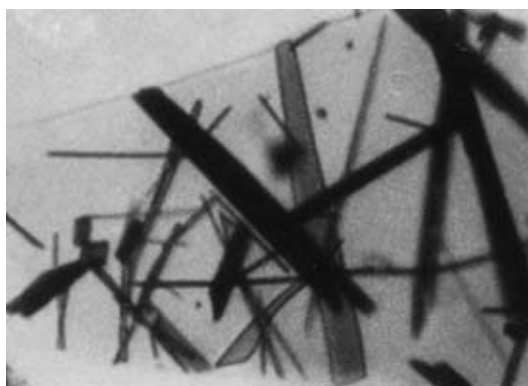
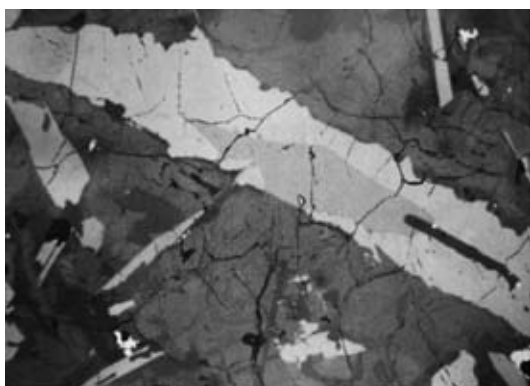


図 6 (左) アポロ 11 号の玄武岩中のアーモルコライト. 柱状のイルメナイト結晶 (白色) の中央部の灰色の部分
がアーモルコライト (写真の横幅約 1 mm) (反射顕微鏡写真). (右) 実験で結晶したアーモルコライト (写
真の幅約 0.5 mm).

(Kushiro and Nakamura, 1970; Akimoto *et al.*, 1970; Haramura *et al.*, 1970)。この特集号は、Vol. 1 Mineralogy and petrology, Vol. 2 Chemical and isotope analysis, および Vol. 3. Physical properties の 3 巻よりなり、*Geochimica et Cosmochimica Acta* の別冊号として出版された。この論文を書き上げた後、研究の済んだ試料は、研究で消費した量を 1/100 g までの精度で記載した報告書とともに NASA に返還した。そして、間もなく配分されるアポロ 12 号の岩石の分析の準備に入った。

V. アポロ 12 号以後の月岩石の研究

1969 年 11 月 14 日にはアポロ 12 号が打ち上げられ、同 19 日に月面の嵐の大洋に着陸した。着陸地点はサーベイヤー 3 号が 1967 年に着陸したサーベイヤー・クレイターの北西の縁であった。そこはまた、コペルニクスからの白い光条が伸びてきている場所でもあった。2 人の宇宙飛行士 C. Conrad, Jr. と A.L. Bean は約 4 時間の船外活動で、岩石試料の採取と地震計やイオンゲージや磁気測定装置などの設置を行った。また、サーベイヤー 3 号の部品の一部を回収した。持ち帰った試料は約 35 kg の岩石およびソイルであった。

私達のグループへ配分されたアポロ 12 号の岩石試料は 9 種類の玄武岩で、1970 年春に NASA

から東京のアメリカ大使館を通して私に届いた。一般の人も新聞記者もアポロ 12 号の月の石にはもうあまり興味がなかったようで、比較的静かに研究を行うことができた。それらの玄武岩はカンラン石の斑晶に富むカンラン石玄武岩からカンラン石の少ない玄武岩まで鉱物組成の範囲が広がった。図 7 にカンラン石の少ない玄武岩の写真を示す。この玄武岩には針状の輝石や斜長石が含まれており、アポロ 11 号の玄武岩と同様に結晶が急速に成長したことがわかる。これら 9 種の玄武岩の主要元素組成を原村さんが分析した結果、初期分析チームが分析した結果 (Lunar Sample Preliminary Examination Team, 1970) とかなり違っていた。とくにシリカの量が初期分析チームの結果は全体的に低く、5 重量%も低いものもあった。初期分析チームは直接サンプルには触れずにスペクトル分析で行ったために誤差が大きくなったと考えられる。チタンはアポロ 11 号の静かの海の玄武岩よりずっと少なく (TiO_2 , 2.5-4.5 重量%), 地球の玄武岩に近かった。Mg 量の範囲は広く (MgO, 6.6-16.7 重量%), この広い組成変化は $\text{Fo}_{74}[(\text{Mg}_{0.74}\text{Fe}_{0.26})_2\text{SiO}_4]$ のカンラン石の分別結晶作用でよく説明できることがわかった。それらの分析結果は次の月科学会議を待たずに論文に書き投稿した (Kushiro and Haramura, 1971)。アポロ 12 号試料の研究ではアポロ 11 号



図 7 アポロ 12 号の玄武岩の顕微鏡写真 (写真の横幅約 2 mm)。

の時のような発表の制約はなく、各研究者は新しい研究結果を次々と発表していた。私達はさらに、玄武岩の組成変化から初生玄武岩マグマの組成を求め、その組成につき秋本さんと高温高压下での融解実験を行った。その結果、アポロ 12 号の初生玄武岩組成のマグマがカンラン石 ($\sim \text{Fo}_{75}$) と輝石よりなる月のマンツルの約 100 km の深さで生じた、あるいは平衡に達した可能性のあることがわかった。つまり、月のマンツルは地球のマンツルと同様にカンラン岩である可能性が示された。

そして 1971 年 1 月 11 日から 4 日間にわたってヒューストンで開かれた第 2 回月科学会議で、これらの研究成果を発表した (Kushiro *et al.*, 1971)。出席者は約 1000 人で、第 1 回会議の半分であり、また緊張感も少なかったが、出席した研究者は第 1 回の会議より落ち着いてより深い議論を行うことができた。この会議では、組成範囲の広い玄武岩の成因について私も含め何人もの研究者により議論がなされた。発表でもっとも注目を引いたのは、43 億年の年代を示すカコウ岩質部を含む 82 g の不均質な岩石であった。そのカコウ岩質部分がどのようにして生じたか、またこの岩石が高地に由来するのではないか、あるいは高地にカコウ岩が存在するのではないか、などについて多くの議論がなされた。しかし、その化学組成がアポロ 11 号の玄武岩の鉱物間に存在するシリカと K に富むガラスと酷似していること

から、玄武岩マグマの結晶分化作用の最後期に濃集した液の可能性が高いというのが多くの研究者の意見であった。会議後この岩石片 1 個についての研究をまとめた *Earth and Planetary Science Letters* の特集号 (Vol. 9, No. 2) が出版された。また、K や P や希土類元素に富む岩石 (KREEP と呼ばれた) が見いだされたことも研究者の興味を引いた。その KREEP 岩石の成因や月の地殻における重要性につき多くの議論がなされた。

1970 年 4 月 11 日に打ち上げられたアポロ 13 号は事故のため月着陸どころか地球帰還も危うくなり、飛行士の懸命の努力で地球に帰還した。しかし 1971 年 1 月 31 日に打ち上げられたアポロ 14 号は高地に近い地形のフラマウロ丘陵に着陸し、その岩石試料を持ち帰った。岩石試料には角礫岩が多かった。その岩石の私達のグループへの配分試料は、アポロ 12 号の岩石試料と同じようにアメリカ大使館から私に届けられた。この 14 号の月試料はアポロ 11 号や 12 号の玄武岩とは異なり、斜長石に富む岩石が多く、高地に近い特徴をもっており興味を引いた。私達は斜長石に富む 3 種の玄武岩の鉱物組成変化をマイクロプローブで詳しく調べた。この研究の途中で共同研究者の中村保夫さんがニュージーランドの Otago 大学での研究のために日本を離れたので、マイクロプローブによる分析は池田幸雄さんが引き継いだ。そしてその少し後の 1971 年 9 月に、私もカーネギー研究所に行くことになり、その後の月の岩石の研究はそこで続けることにした。

カーネギー研究所では、P.M. Bell が PI として、また F.R. Boyd, H-K. Mao, L.W. Finger および D. Virgo らが彼の共同研究者として月の岩石中の輝石や鉄チタン鉱物の組成や結晶構造などについて詳細な研究を行っていた。カーネギー研究所に行ってから私は、私達が分析した斜長石に富む玄武岩の一つ (14310, 図 8) について高温高压下での融解実験を行った。その実験の結果、この玄武岩組成のメルトはカンラン石とは共存できず、マンツルで直接生じたマグマに由来しない可能性が高いことがわかった。そしてさらに実験と考察を続けた結果、この玄武岩質岩石は斜長石



図 8 フラマウロ丘陵の斜長石（白色結晶）に富む玄武岩（写真の横幅約 5 mm）。

に富む岩石の再融解によってのみ生じ得ることがわかった。そのもとになる斜長石に富む岩石は、Wood が示唆したように月のマグマオーシャンにおいて斜長石が浮上集積して生じた高地の地殻の一部であろうと考えた。アポロ 14 号の岩石の分析および実験の結果は、ヒューストンでの第 3 回月科学会議で発表し、またその会議の特集号に載せた (Kushiro, *et al.*, 1972)。

アポロ 15 号から 17 号までの岩石についての私の研究は、すべてカーネギー研究所において行うことにしたので、私に配分される岩石試料はカーネギー研究所に届けられることになった。そして、私は NASA から研究費をもらい、J.J. Papike の推薦による F. Hodges をポストドクとして採用した。

アポロ 15 号の着陸地点はアペニン山脈の麓で、ハドレー峡谷の近くという興味ある場所で、高地由来のアノーソサイト、角礫岩、KREEP 玄武岩および海の玄武岩などが採取された。アノーソサイトは 41 億年の年代を示し、研究者の関心を惹いた。また、'green glass' と呼ばれる Mg に富んだガラス球もあり、初生マグマの可能性があると指摘された。私には 3 種の海の玄武岩の試料が配分された。私はこれら 3 種の玄武岩の輝石をマイクロプローブで詳細に分析し、結晶作用に伴う Ti と Al の変化を明らかにし、また輝石中に Ti^{3+} の存在の可能性を指摘した。この研究所のマイクロプローブは専属のテクニシャンによって

自動化されており、分析結果はすぐにプリントされるので大変便利であった。私でも問題なく分析できた。さらに、私は配分された玄武岩試料のなかのもっともカンラン石成分に富む玄武岩 (15016) について高温高压実験を行った。その結果、この玄武岩の液は約 1 GPa (深さ約 200 km) で比較的 Fe に富むカンラン石 ($Fe_{0.72}$) と輝石と共存することがわかった (Kushiro, 1972)。この結果はアポロ 12 号のカンラン石玄武岩についての実験と調和的であり、月のマントルが地球のマントルに比べて Fe に富むカンラン岩である可能性がさらに強くなった。

次のアポロ 16 号はデカルト高地に着陸し、多くの高地の岩石試料を持ち帰った。そして私には、アノーソサイトやカンラン石と斜長石よりなるトロクトライトなど興味ある岩石が送られてきた。私達はそれらを分析するとともに融解実験を行った。スピネルを含むトロクトライトの実験で驚いたことは、この岩石組成のメルトが非常に Mg に富むカンラン石 ($Fe_{0.93}$) と共存することであった。もしこのトロクトライトが月のマントルの直接の融解物ならば、デカルト高地の下のマントルは地球のマントルとほぼ同じ Mg/Fe か、あるいはさらに Mg に富むことになる。一方、海の下のマントルはすでに述べたように、比較的 Fe に富むカンラン石 ($\sim Fe_{0.75}$) を含む。このように、高地のマグマあるいは岩石を生じた月のマントルの Mg/Fe 比は、海の玄武岩を生じたマントルに比べてずっと高くなければならず、月のマントルが、少なくとも Mg/Fe 比に関して不均質でなければならないことになる (Hodges and Kushiro, 1973)。この月のマントルの Fe/Mg 比の大きな違いの問題については、その後多くの議論がなされ、いくつかのモデルも提唱されている (例えば, Elkins-Tanton *et al.*, 2011)。しかし解決されたとはいえない。

アポロ計画最後のアポロ 17 号は、晴れの海の東縁の山に囲まれた平らなタウラス・リトロウ谷に着陸し、Ti に富む玄武岩や高地の岩石試料を持ち帰ってきた。またほとんどカンラン石よりなるダンカンラン岩や 'orange glass' と呼ばれる小ガラス球を持ち帰った。このガラス球は Ti に

富むとともに、green glassと同様にMgにも富んでおり、未固結の溶岩（マグマ）に隕石が衝突して飛び散って生じた可能性が指摘された。アポロ17号では、地質学者でアメリカ地球物理学連合の会員である宇宙飛行士H.H. Schmittが地質調査や岩石試料の採取を行った。私に配分された岩石は、玄武岩質岩石2個と角礫岩1個であった。玄武岩質岩石の一つは粗粒でガブロとも呼んでいいものであった。組成はアポロ11号のTiに富む玄武岩と類似しており、全岩組成でTiO₂が約14%にも達するものもあった。私達はそれらのなかの鉱物の分析を行った。アーマルコライトやTiO₂が6%にも及ぶ普通輝石も含まれていた。

私はその頃、アポロの岩石試料より月の全化学組成と月のマグマオーシャンの分化に興味をもつようになった。とくに月の高地の形成過程に興味があった。月の斜長石に富む高地の成因についてはWoodやS.R. Taylorなどによりすでに議論されていたが、私は実験的に検証できないかと思った。月の斜長石に富む地殻が生成するためには、マグマオーシャンの冷却過程の比較的初期に斜長石が晶出する必要がある。私はそれを検証したいと思った。月の全化学組成については何人かの研究者が推測していたが、私は当時もっとも論理的に月の全化学組成を推定していると思われたシカゴ大学のグループのリーダーであるEdward Andersと連絡をとり、彼のグループが推定した月の全化学組成(Krähenbühl *et al.*, 1973)について実験を行ってみることにした。ところが、その組成について融解実験を行ったところ、斜長石はどの温度圧力条件においても晶出しなかった。そこで、Andersにその結果を伝えたと、彼らは仮定を変えて計算をし直し、改訂した化学組成(Ganapathy and Anders, 1974)を送ってきた。それについて実験をしたところ、約0.8 GPa以下の圧力(約160 km以浅)で斜長石がカンラン石と輝石に続いて晶出することがわかった。したがってマグマオーシャンにおいて月の高地の地殻を生じ得ることになる。この結果をAndersに知らせると大変喜んでくれた。Andersとはその後月の組成について手紙で議論をした。私達はAn-

dersらの改訂した組成のマグマオーシャンにおける結晶作用を考察し、それによって生成される月の地殻とマン틀の成層構造を示した(Kushiro and Hodges, 1974, Hodges and Kushiro, 1974)。S.R. TaylorとP. Jakesもほぼ同じ頃にマグマオーシャンの結晶作用によって生じる成層構造を提案した(Taylor and Jakes, 1974)。

月の斜長石に富む高地の地殻の成因については、その後多くの研究がなされている。最近、東大の酒井理沙さんらが、月のマグマオーシャンにおいてアノーサイトが晶出し浮上して約50 kmの厚さのアノーサイトの地殻をつくるための条件から、月のマグマオーシャンの組成、とくにFeとAl量について制約を与える結果を得ている(酒井ほか, 2010; Sakai *et al.*, 2014)。私もこの研究のはじめの段階に参加させてもらい、久しぶりに月に関する実験をすることができた。月のマグマオーシャンにおいて斜長石が大量に晶出し約50 kmの厚さのアノーサイトの地殻が生じたのは、月の重力が小さく圧力勾配が小さいために、マグマオーシャン内で斜長石の晶出する深さが約200 kmまで及んでいるためである。地球ではその深さがわずか35 kmであり、マグマオーシャンで斜長石が晶出し浮上してアノーサイトを生じたとしても、そのアノーサイト層の厚さはずっと薄く、せいぜい数kmと考えられる。

この1974年のアポロ17号の試料の分析および月の分化の研究を最後に私の主要な研究は地球のマグマの問題に戻った。しかし月への興味はもち続け、また地球以外の惑星や隕石への興味も湧いてきて隕石についての実験的研究も行うようになった。

VI. おわりに

アポロ計画の月岩石研究に参加できたことは大変幸運であり、私にとって貴重な経験となった。また、上に書いたように私はその後、月だけでなく地球以外の惑星や隕石への興味をもつようになった。アポロ計画に参加した世界の多くの地球科学研究者も惑星についての研究をするようになった。月および惑星はアポロ計画が実施される

までは地球科学の対象ではなかった。しかし、アポロ計画により月物質の研究が進み、またそれと並行して行われた火星や金星の探査、さらには土星や木星およびそれらの衛星の探査等により惑星表面の状態や物質についての情報が得られるようになってからは月や惑星は地球科学の対象になった。そして、その研究が進展することによって実質的に地球惑星科学が生まれたといえる。

また、アポロ計画においては月の岩石試料を世界の研究者が競い合って種々の分析を行ったが、より高精度の分析を行なうために分析法や技術の改善あるいは分析装置の改良等を行ない、それらの分析技術が一段と進歩した。このことは地球物質の研究の進歩にも貢献することになった。さらに、月の岩石の研究から地球についての理解も深まったこともある。例えば、月の地殻の形成のためにはマグマオーシャンが生じなければならないことが推論されたが、そのことから地球形成の初期にもマグマオーシャンが生じ、その固結過程において地球の成層構造が形成された可能性がより現実的に考えられるようになった。また小さな問題ではあるが、月の岩石でみつかった液相の不混和現象が地球の火成岩にも普通に起っていることがわかった。月は地球の解明、とくに地球の初期状態の解明にヒントを与えてくれる身近なそして貴重な天体である。ヒューストンの会議に出席しているときに、ある夜、私の側にいた研究者が空に上った満月を見て、「あそこに outcrop (露頭)がある！」と叫んだことが印象に残っている。

アポロ 11 号から 17 号の科学的成果の詳細については、第 1～8 回の月科学会議およびその後の月・惑星科学会議の特集号に掲載されている。また、アポロ月岩石の研究に携わった日本人研究者によって書かれた『月の科学』に主要な成果がまとめて書かれている。その内容と著者は、掲載順に、月の地質と鉱物 (武田 弘)、岩石 (久城育夫)、化学組成 (小沼直樹)、力学的性質 (水谷 仁)、熱的性質 (宝来帰一)、磁氣的性質 (永田 武)、内部構造 (水谷 仁)、月および月の石の年代 (中村 昇)、および起源と進化 (水谷 仁) である (久城ほか、1984)。本稿の大部分は筆者が関わったアポロ岩

石の研究についてであるので、成果全体に関心のある方は上記の特集号や著書を参照されたい。

月岩石の研究はアポロ計画終了後も続いている。もちろん、アポロが持ち帰った岩石試料についての研究は現在でも行われているが、特筆すべきことは、月由来の隕石の発見とその研究である。南極やサハラ砂漠などにおいて発見された月隕石のなかには、アポロ計画やルナ計画では採取できなかった月の裏側から来たと考えられる貴重な試料もあり、それらの研究は月の地殻の形成過程の解明に重要な手がかりを与えている。月を周回する月衛星による観測も進展してきている。1990 年に日本が打ち上げた月周回孫衛星「はごろも」を搭載した工学実験探査機「ひてん」は月に到達したものの観測は行わなかったが、1994 年にアメリカが打ち上げた「クレメンタイン」探査機や 1998-1999 年の「ルナ・プロスペクター」探査機は観測を行い成果をあげた。2000 年以降は、欧州、日本、中国、インドなどの国々による探査機が月の観測を行っている。とくに、2007 年に打ち上げられたわが国の観測衛星「かぐや」による鮮明な月表面の写真は目を見張るほど素晴らしいものであり、また各種の観測や分析でも貴重なデータを得ている。月にかなりの水がある可能性がわかったのも最近のアメリカの探査機、「ルナー・リコネサンス・オービター」と「エルクロス」による実験と観測である。月については月の成因のほかまだいくつもの未解決の問題が残されている。今後さらに有人、無人の探査機が打ち上げられ、未解決の問題の解明にむけての研究が進展するであろう。楽しみである。

文 献

- Akimoto, S., Nishikawa, M., Nakamura, Y., Kushiro, I. and Katsura, T. (1970): Melting experiments of lunar crystalline rocks. *Proceedings of the Apollo 11 Lunar Science Conference, Geochimica et Cosmochimica Acta, Supplement 1, 1*, 129-133.
- Albee, A.L., Burnett, D.S., Chodos, A.A., Eugster, O.J., Huneke, J.C., Papanastassiou, D.A., Podosek, F.A., Price Russ II, D., Sanz, H.G., Tera, F. and Wasserburg, G.J. (1970): Ages, irradiation history, and chemical Composition of lunar rocks from the Sea of Tranquillity. *Science*, **167**, 463-466.
- Anderson, A.T., Boyd, F.R., Bunch, T.E., Cameron,

- E.N., El Goresy, A., Finger, L.W., Haggerty, S.E., James, O.B., Keil, K., Prinz, M. and Ramdohr, P. (1970): Armalcolite: A new mineral from the Apollo 11 samples. *Proceedings of the Apollo 11 Lunar Science Conference, Geochimica et Cosmochimica Acta, Supplement 1*, **1**, 55-63.
- Elkins-Tanton, L.T., Burgess, S. and Yin, Q-Z. (2011): The lunar magma ocean: Reconciling the solidification process with lunar petrology and geochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, **304**, 326-336.
- Ganapathy R. and Anders, E. (1974): Bulk compositions of the moon and earth, estimated from meteorites. in *Lunar Science*, V, The Lunar Science Institute, Houston, 255-256.
- Haramura, H., Nakamura, Y. and Kushiro, I. (1970): Composition of lunar fines. *Proceedings of the Apollo 11 Lunar Science Conference, Geochimica et Cosmochimica Acta, Supplement 1*, **1**, 539-540.
- Hodges, F.N. and Kushiro, I. (1973): Petrology of Apollo 16 lunar highland rocks. *Proceedings of the Fourth Lunar Science Conference, Geochimica et Cosmochimica Acta, Supplement 3*, **1**, 1033-1048.
- Hodges, F.N. and Kushiro, I. (1974): Apollo 17 petrology and experimental determination of differentiation sequences in model moon compositions. *Proceedings of the Fifth Lunar Science Conference, Geochimica et Cosmochimica Acta, Supplement 4*, **1**, 505-520.
- Krähenbühl, V., Ganapathy, R., Morgan, J.W. and Anders, E. (1973): Volatile elements in Apollo 16 samples. Implications for highland volcanism and accretion history of the Moon. *Proceedings of the Fourth Lunar Science Conference, Geochimica et Cosmochimica Acta, Supplement 4*, **2**, 1325-1348.
- Kushiro, I. (1972): Petrology of some Apollo 15 mare basalts. in *The Apollo 15 Lunar Samples* edited by Chamberlain, J.W. and Watkins, C., The Lunar Science Institute, Houston, Texas, 128-130.
- Kushiro, I. and Haramura, H. (1971): Major element variation and possible source materials of Apollo 12 crystalline rocks. *Science*, **171**, 1235-1237.
- Kushiro, I. and Hodges, F.N. (1974): Differentiation of the model moon. *Carnegie Inst. Washington, Yearbook*, **73**, 454-457.
- Kushiro, I. and Nakamura, Y. (1970): Petrology of some lunar crystalline rocks. *Proceedings of the Apollo 11 Lunar Science Conference, Geochimica et Cosmochimica Acta, Supplement 1*, **1**, 607-626.
- Kushiro, I., Nakamura, Y., Haramura, H. and Akimoto, S. (1970): Crystallization of lunar mafic magmas and generation of rhyolitic liquid. *Science*, **167**, 610-612.
- Kushiro, I., Nakamura, Y., Kitayama, K. and Akimoto, S. (1971): Petrology of some Apollo 12 crystalline rocks. *Proceedings of the Apollo 12 Lunar Science Conference, Geochimica et Cosmochimica Acta, Supplement 2*, **1**, 481-495.
- Kushiro, I., Ikeda, Y. and Nakamura, Y. (1972): Petrology of Apollo 14 high-alumina basalt. *Proceedings of the Third Lunar Science Conference, Geochimica et Cosmochimica Acta, Supplement 3*, **1**, 115-129.
- 久城育夫・武田 弘・水谷 仁編 (1984): 月の科学. 岩波書店, 231p.
- Lunar Sample Preliminary Examination Team (1970): Preliminary Examination of lunar samples from Apollo 12. *Science*, **167**, 1325-1339.
- O'Hara, M.J., Biggar, G.M. and Richardson, S.W. (1970): Experimental petrology of lunar materials: The nature of mascons, seas, and the lunar interior. *Science*, **167**, 605-607.
- Ringwood, A.E. and Essene, E. (1970): Petrogenesis of lunar basalts and the internal constitution and origin of the Moon. *Science*, **167**, 607-610.
- Roedder, E. and Weiblen, P.W. (1970): Silicate liquid immiscibility in lunar magmas, evidence by melt inclusions in lunar rocks. *Science*, **167**, 641-644.
- 酒井理沙・久城育夫・永原裕子・小澤一仁・橘 省吾 (2010): 月地殻形成条件を用いたマグマオーシャン化学組成制約への試み. *日本惑星科学会誌*, **19**(2), 82-88.
- Sakai, R., Nagahara, H., Ozawa, K. and Tachibana, S. (2014): Composition of the lunar magma ocean constrained by the conditions for the crust formation. *Icarus*, **229**, 45-56.
- Tatsumoto, M. and Rosholt, J. N. (1970): Age of the Moon: An isotopic study of uranium-thorium-lead systematics of lunar samples. *Science*, **167**, 461-463.
- Taylor, S.R. and Jakes, P. (1974): The geochemical evolution of the Moon. *Proceedings of the Fifth Lunar Science Conference*, **2**, 1287-1305.
- Wood, J.A., Dickey, J.S., Marvin, U.B. and Powell, B.N. (1970): Lunar anorthosites. *Science*, **167**, 602-604.