



本件の取扱いについては、下記の解禁時間以降でお願い申し上げます。
新聞： 日本時間 1 月 10 日（月）朝刊
テレビ・ラジオ・インターネット：日本時間 1 月 10 日（月）午前 3 時

月の水の起源を解明

研究成果のポイント

- ・月の石から水が検出され、月内部に普遍的に水があることがわかった。
- ・月の水は地球の水より重水素成分に富んでいる。
- ・月内部の水は月形成直後に彗星がもたらした。

研究成果の概要

アポロ計画により採集された広範囲の月の石から微量の水が検出されました。これは、月内部に普遍的に水分が含まれている事を示します。この水の水素は重水素成分に富む特徴を持ち、彗星由来である事が判明しました。私たちは月を形成した巨大衝突の後で地球-月系に大量の水が彗星により供給された事を結論付けました。

論文発表の概要

研究論文名：Hydrogen isotope ratios in lunar rocks indicate delivery of cometary water to the Moon（月の石の水素同位体比は月に彗星の水が飛来している事を示す）
著者：氏名（所属）James P. Greenwood 1, 伊藤正一 2, 坂本直哉 2, Lawrence A. Taylor 3, Paul H. Warren 4, 塚本尚義 2
1 Wesleyan University, 2 北海道大学, 3 University of Tennessee, 4 UCLA
公表雑誌：Nature Geoscience 電子版（Advance Online Publication (AOP) on Nature Geoscience's website）
公表日：日本時間（現地時間）2011 年 1 月 10 日（月）午前 3 時（英国時間 2011 年 1 月 9 日午後 6 時）

研究成果の概要

（背景）

月は約 45 億年前、火星サイズの天体が地球に衝突し、その結果、地球の周りに作られた高温のガスとマグマの円盤から形成された説が有力です。このとき、水分のような揮発性成分は巨大衝突時に容易に蒸発するため、月には水は元々取り込まれなかったと考えられていました（図 1）¹。これまで月の石の分析により月内部の水の存在を報告した例がありましたが、地球の汚染の可能性を否定する事は困難でした。月岩石中にはアパタイト²という水成分を結晶中に含む事ができる鉱物を時々含

んでいますが、その席は塩素やフッ素でほとんど占められていることがわかっていました。

(研究手法)

我々は同位体顕微鏡を用いた新しく開発した分析法を用いてアポロ計画により採集された月岩石中のアパタイト結晶の水成分濃度とその水素同位体比³を測定しました。

(研究成果)

米国 NASA が 1961~72 年に実施した有人月探査であるアポロ計画では、アポロ 11, 12, 14, 15, 16, 17 号の 6 回の月岩石の回収に成功しています (図 2)。このうち、本研究ではアポロ 11, 12, 14, 17 号の回収試料を分析対象とし、月の海と高地の両方の試料を選択しました。月の高地の岩石は月の表面がマグマの海に覆われていた時代にマグマが固結した陸地部分 (斜長岩) であり、月の海は、その後月が冷却していきマグマの海の表面が全部固結した後、月の内部から噴出したマグマにより月の低地帯が覆われ固まった溶岩 (玄武岩) です。両方のマグマとも冷却し溶融部分が固結する最終期にアパタイトを結晶化します。これらの岩石の採集地点は月の表側の広範囲にわたっている (図 3) ため、今回のアパタイトの分析値のセットは月の内部の水成分を代表していると考えられます。また、これらの測定した岩石の形成年代は 43 億年前の月形成当時に近い年代から 32 億年までの約 10 億年間におよんでいます (図 4)。この長い年代範囲も今回の分析が月内部の水成分を代表していると考えられる理由です。

同位体顕微鏡により月の石の含水量を分析すると、鉱物の割れ目部に水が濃集している事がわかります (図 5)。この水は地球の水蒸気が鉱物表面を汚染した吸着水⁴です。鉱物間を比べると、アパタイトだけから水分の信号があり、周りの他の鉱物から信号がないことがわかります。ほとんどの月の石のアパタイト中に 0.01%~0.6 重量%の水が含まれている事が明らかになりました (図 6)。また、含まれている水は地球の水に比べて重水素を多く含んでいる (最大 2 倍) 事がわかりました。これほど重水素に富む水は地球上に存在しないので、月岩石固有の水である事は明らかです。したがって、月内部には 43 億年以上前から水が存在している事が明らかになりました。

水素同位体比は太陽系の天体により固有の値を持つ事がわかっています (図 7)。木星や土星のような巨大惑星の水素同位体比は地球に比べ軽水素に富んでいます。一方、彗星の水は重水素に富んでいます。隕石の水の同位体比は地球の水の値に近い。分析された月の水は重水素に富んでおり、彗星の値と重なっています。このように重水素に富む水を持つ天体は彗星の他に見つかりません。

巨大衝突により月が形成した時、月の表面はマグマの海に覆われていました。現在の月面のクレーターが多さから、このマグマの海にもたくさんの隕石が落下していたと考えられます (図 8)。これら隕石の中に多くの彗星が含まれていたと考えるのは合理的です。落下した彗星の水はマグマの海深くに持込まれ、月が固結すると、月内部に貯蔵されます。もし、月内部の水はこのようにして彗星により運ばれてきたのだとすると、観察された月岩石中の水成分の水素同位体比が彗星の水の水素同位体比と等しいことと整合的です。

この月の水の彗星起源説が正しいとすると、できたばかりの地球にも同様に彗星が衝突してきていたはずですが、このとき、地球もマグマの海に覆われていたと考えられている、地球と月の違いの一つは、地球は月よりも質量が大きいため、地球は水蒸気の大気に覆われていてマグマの海にも水分が元々とけ込んでいた事です。地球の水について未解決な事の一つは、地球深部の水は軽水素に富んでいて、海の水は重水素に少し富んでいる事です。もし地球の海の水の幾分か割合が、今回明らかにできた月内部の水の起源の様に、彗星からやってきたのだとするとこの重水素濃度の差を説明することができます (図 9)。

(今後への期待)

今後、月の石による月の水の研究をさらに進め、月内部に存在する水の量を決定したい。このことができれば、地球の水の起源についても明らかにできると期待されます。

脚注

※報道機関の方からご連絡をいただければ、図を提供させていただきます。

- 1 最近、月探査器により月表面の水の存在が明らかになっているが、表面の水は月の火山活動が終了した後の太陽風や彗星の衝突によりもたらされたと考えられており、月内部の水の存在について保証するものではない。
- 2 リン酸塩化合物で $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$ の化学式を持つ結晶。結晶中にフッ素や塩素や水酸基を含む。身近においては人体の歯の大部分がこの結晶の集合体である。地球の岩石中にも少量ではあるが普通に存在している。月においてマグマが固まり岩石になっていく時、最初のマグマの90%以上が固まった後に結晶する。つまり月のアパタイトは岩石中の結晶の中で最後にできた結晶の一つである。
- 3 水素は軽水素と重水素の2種類の同位体があり、地球上の重水素の存在度は約0.015%である。
- 4 この多量の吸着水が邪魔をしたため、今まで月の石から正確な含水量の分析ができていなかった。今回は新しい分析法を開発したため、吸着水の影響は無視できるほどに小さくなった。

お問い合わせ先

所属・職・氏名：北海道大学大学院理学研究院・教授 塚本 尚義（ゆりもと ひさよし）

TEL: 011-706-9173 FAX: 011-706-9173 E-mail: yuri@ep.sci.hokudai.ac.jp

ホームページ: <http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~g3/>

月の石の水素同位体比は月に彗星の水が
飛来している事を示す

**HYDROGEN ISOTOPE RATIOS IN LUNAR ROCKS
INDICATE DELIVERY OF COMETARY WATER TO
THE MOON**

JAMES P. GREENWOOD¹, 伊藤正一², 坂本直哉²,
LAWRENCE A. TAYLOR³, PAUL H. WARREN⁴,
 垾本尚義²

¹WESLEYAN UNIVERSITY, MIDDLETOWN, CT USA

²北海道大学, 北海道 札幌

³UNIVERSITY OF TENNESSEE, KNOXVILLE, TN USA

⁴UCLA, LOS ANGELES, CA USA

NATURE GEOSCIENCE誌電子版に英国時間1月9日6pm掲載
(日本時間1月10日3am報道解禁)

月の石の水素同位体比は月に彗星の水が
飛来している事を示す

**HYDROGEN ISOTOPE RATIOS IN LUNAR ROCKS
INDICATE DELIVERY OF COMETARY WATER TO
THE MOON**



NATURE GEOSCIENCE誌電子版に英国時間1月9日6pm掲載
(日本時間1月10日3am報道解禁)

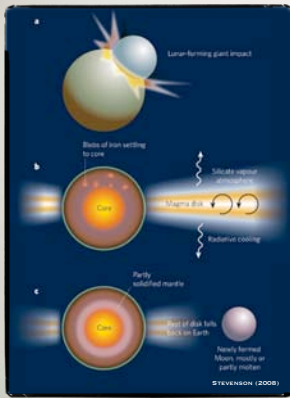


図1 月の起源

巨大衝突説(約45億年前)
地球の周りの高温のガス
マグマ円盤から月が形成
した

水は蒸発してしまい月には
元々水がなかった

本当に水がなかったのかを
検証してみよう



図2 アポロ宇宙飛行士
による岩石採集の様子

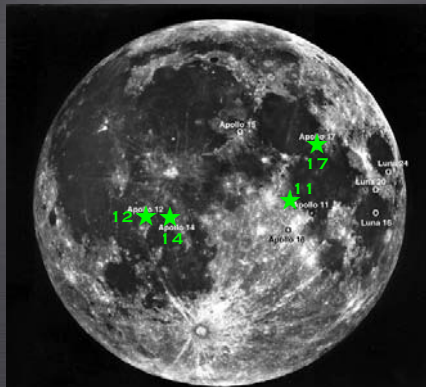


図3 アポロ宇宙船着陸地

図4 分析した月の石の一部

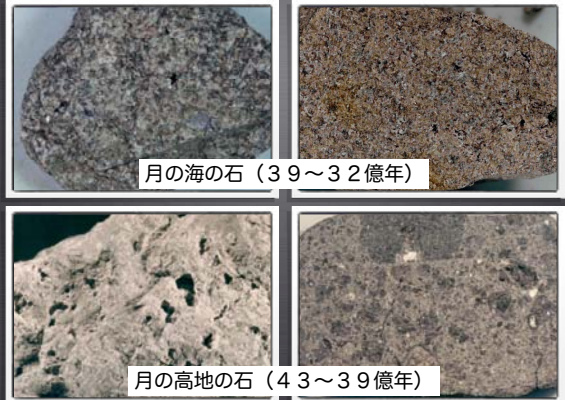
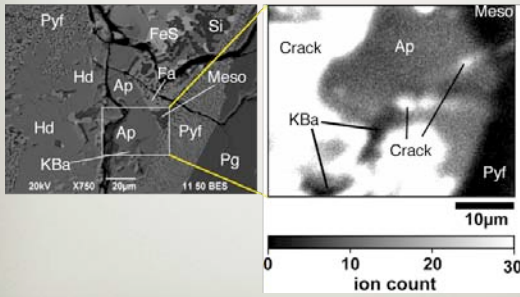


図5 同位体顕微鏡による月の石の鉱物の水分濃度



アパタイト $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F,Cl,OH})$

図6 月の石の水含有量と水素同位体比

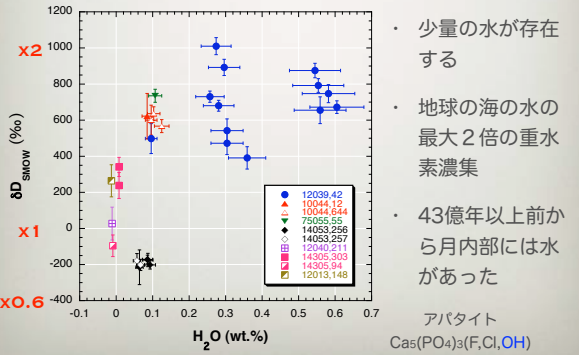


図7 月の水の起源

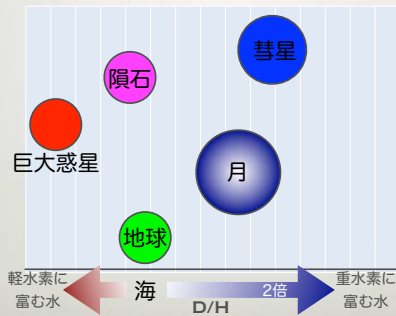
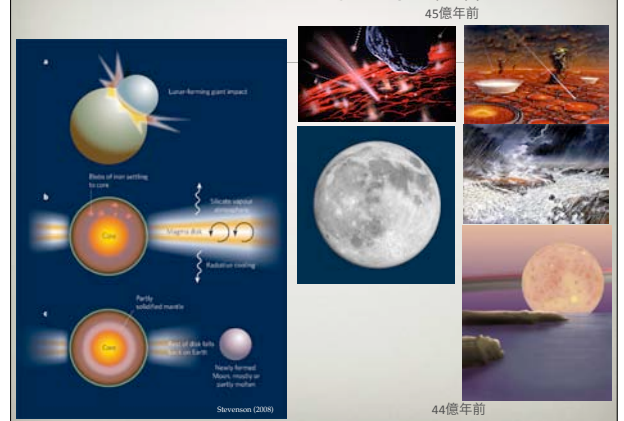
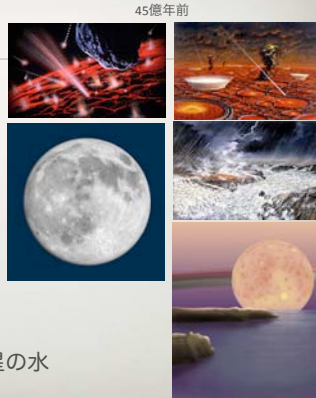


図8 月の水の起源と地球の海の関係



月の水の起源と地球の海の関係



月の水は彗星が運んだ
地球の水の約10%は彗星の水

44億年前