

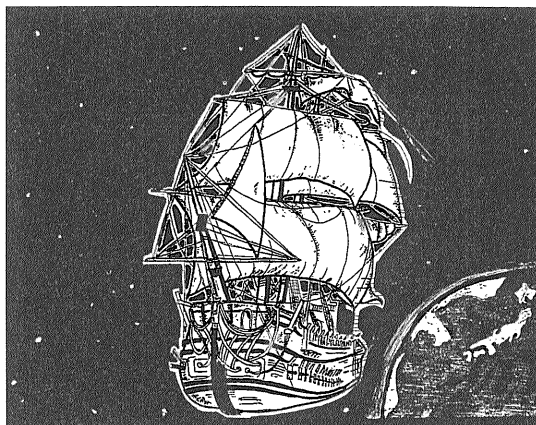
宇宙資源—地球外惑星に おける水の存在とその意義

田中 剛¹⁾

1. はじめに

人類は、いま宇宙にのりだそうとしている。1つには、我々の知らない地球以外の世界を知りたいゆえに。また1つには、宇宙に存在するであろう価値のあるものを手に入れたい欲望のゆえに…。これは地球に住む人類にとって、ヨーロッパにおいて16世紀に始まった、あの大航海時代にたとえられよう(第1図)。冒険心と欲望、かってそれをかき立てたのは金であり香辛料であった。宇宙にも金・白金はもちろん、ダイヤモンドやサファイヤ・ルビーなどあらゆるものが存在する(田中, 1983)。炭素質コンドライト隕石中の白色インクルージョンには、白金やイリジウムなどが10 ppm (10グラム/トン)程含まれる。これは鉱石として扱われる含有量である(田中, 1982)。最近の分光観測データは星間空間に浮遊する炭素の主体はダイヤモンド(ただしミクロンサイズの)である可能性を示唆している(Allamandola et al., 1993)。また、月表面にはクリーンな核融合燃料としてのヘリウム3が100万トン以上存在し、これは全地球で消費される電力を10000年以上賄える量と見積もられている。(太陽系の資源については Planetary exploration through year 2000 (1986)に多くの可能性が語られている)このような物質はすべて貴重なものである。

しかし、これらはまず第一に手をつけねばならないものだろうか? 大航海時代を思い起こしてほしい。まず世界を知るその航海に何が必要であったかを。船、航海技術、食料そして水である。難破した船上で何が人を死にいたらしめたか…飲める水は金銀に優先する。



第1図 私たちは今、宇宙への大航海に乗り出そうとしている。16世紀、かつての大航海に何が必要であったかを思い出そう

2. 隕石の水は地球の水!

では隕石中で分析されている水はどのようなのだろうか? 文献から隕石中に分析された水の量を調べてみた(第1表)。ここには隕石をタイプ別、変成度順に並べてある。まず、炭素質隕石(第1表のTypeでC1, C2, C3)に水が含まれること…これは宇宙科学者大方の合意を得ていることであり、コメントを控えよう。しかし、炭素質隕石以外では妙なことに気がつく。まず①何とエンスタタイトコンドライト隕石(第1表のTypeでE4, E6)にも水があふれている。エンスタタイトコンドライトに含まれる鉄の大半は金属鉄である。金属鉄と水の共存はなにを意味するのだろうか? また②おなじTypeの隕石が同じ母天体に由来するなら、その変成度(再結晶化)が進むにつれ(E4, L6などの数字が大き

1) 名古屋大学 理学部:
〒464-01 名古屋市千種区不老町

キーワード: 宇宙, 資源, 水, ガスハイドレート, 隕石, 月, 火星,

第1表 各種隕石中に分析された“水”(文献値)

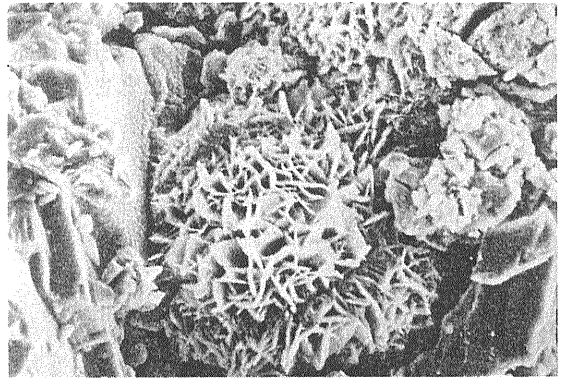
Meteorite	Type	H ₂ O(+)	H ₂ O(-)	Total H ₂ O
Indarch	E 4			1.17 (%)
Pillister	E 6			0.12
Daniel's Kuil	E 6			0.34
Forest City	H 5			0.39
Oakley	H 6			0.21
Guarena	H 6			0.15
Fukutomi	L 5			0.21
Duwun	L 6			0.55
Satsuma	L 6			0.27
Leedey	L 6			0.05
Cherokee Springs	LL6			0.15
Nas	LL6			0.13
Orgueil	C 1			19.89
Mighei	C 2			12.86
Murry	C 2			12.42
Mokoia	C 3			2.07
Allende	C 3			< 0.1
Nakhla	Euc	0.07	0.17	0.24
Serra de Mage	Euc	1.71	0.01	1.72
Moon				0.002
Earth				0.1

なる), 水の含有量が少なくなると考えられるが, ここには特にその傾向は見られない。

ここで我々は24年前の月試料中の“水”に関する出来事を思い起こさねばならない。月における水の有無は生命の存在などの基礎条件として, 月探査最大の関心事の1つであった。“水”や含水鉱物 goethite や lepidocrocite の存在が何度か報告された(第2図)。しかし, 結局, 水素と酸素同位体からの検討で, それらの数百 ppm の水はいずれもヒューストンの“クリーンルーム”において再梱包された時のものであると判明した。ほとんどが安定な鉱物で構成される月の岩石でさえ! である。ましてやオルダマイト(CaS)などあつというまに水を吸う鉱物を含む隕石においておや!

さらに話を進めよう。先に触れたように, 炭素質隕石に地球外の水が含まれることは確かである。極めて重い水素の同位体比がそれを物語る。しかし, 水に含まれる水素は炭素質隕石に含まれる有機物にも由来する。さまざまな補正計算はなし得るものの, つまるところ“水”として含まれるものの量はいまだ定量的に把握されていない。

3. 太陽系の水 I 一月でおいしい水割りは飲めるか?



第2図 月試料中に見いだされた含“地球水”鉱物 goethite と lepidocrocite の集合体。写真の長辺約10 μm (Taylor, 1975)

宇宙において水分子そのものが存在しなくても, 水素と酸素から水を作ることができる。岩石の主成分は酸素だから, 酸素はふんだんにある。わずくなら, 酸素の同位体を測定する実験室でなされるように, フッ化物で岩石を分解し, 酸素を取り出すことが考えられる。もし, 初期条件として少しだけ水素があれば, FeO の水素還元($\text{FeO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$)が可能になる。できた水を電気分解すれば, 酸素と水素が得られる。水素は再度 FeO の還元用に用いられる。酸素は得られた。問題は水素である。

宇宙の元素存在度としてよく知られているように, 宇宙の93.4%は水素であるが, 太陽系において水素は極めて偏在している。地球での水素はその0.01%にも満たないし, 月では見積もりすらなしえない。太陽系で最もたくさん水素をもつのは太陽である。太陽からは太陽風として常にたくさんの陽子(水素原子)が放出されている。月面上でその量は 10^8 個/cm²・秒にも達するものの, これを資源として捕捉し, 使えるだけの量に集めるのはとても難しい。ところが天然のシステムはうまく働くもので, 相当量の太陽風は月のレゴリスと呼ばれる岩屑中に取り込まれている。レゴリス中には水素75 ppm, 窒素120 ppm, 炭素200 ppmが含まれる(このようなデータは Proceedings of the Lunar Science Conference として現在までに22巻が刊行され, 地質調査所地質情報センターに所蔵されている)。このレゴリス100トン进行处理すれば, 7500 g の水素が得られる。これはロケットの燃料や, 上記のような工業プロセスに大いに役立つであろう。しかし, 人間が

これから作った水でおいしい水割りが飲めるか？となると、答えはNOである。その水素の中には水素の放射性同位体トリチウムがたくさん含まれる(第3図)。トリチウムの半減期は12.5年と長く、100年保存しておいてやっと使える水になる。…となると、地球外での人間の生活には地球から持っていった水をリサイクルして使うほかないのだろうか。

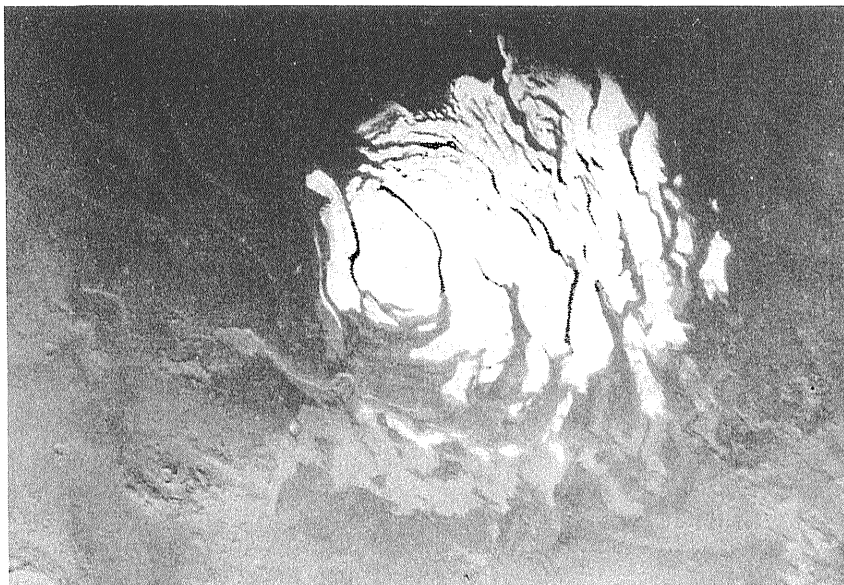
4. 太陽系の水Ⅱ—今どこに水があるか

地球近くの天体で直接に水の存在が確認された所はない。しかし、多くの天体にはそのどこかには水が存在すると思われる。最もその可能性が高いのは火星である。かつて火星は高等な知能をもった生物が住み、大運河によって火星全体の灌漑をしているとの想像がなされていた。現在、生命はその兆候すら確認されていないが、火星には液体が流れたと思える大規模な川床の跡がたくさんみられる。しかし、そこに見られるクレーターの頻度との関係から、川の流れの多くは20億年も前に形成されたものと考えられる。今、水が存在するのは火星の極地である。火星には極冠と呼ばれ、その地方の夏には小さくなり、冬には大きくなる、氷のように輝いたところがある。熱の量と蒸発の早さから、極冠の大部分は二酸化炭素の霜(ドライアイス)と考えられるが、夏でも北極に残っている部分は氷と考えられる(第4図)。

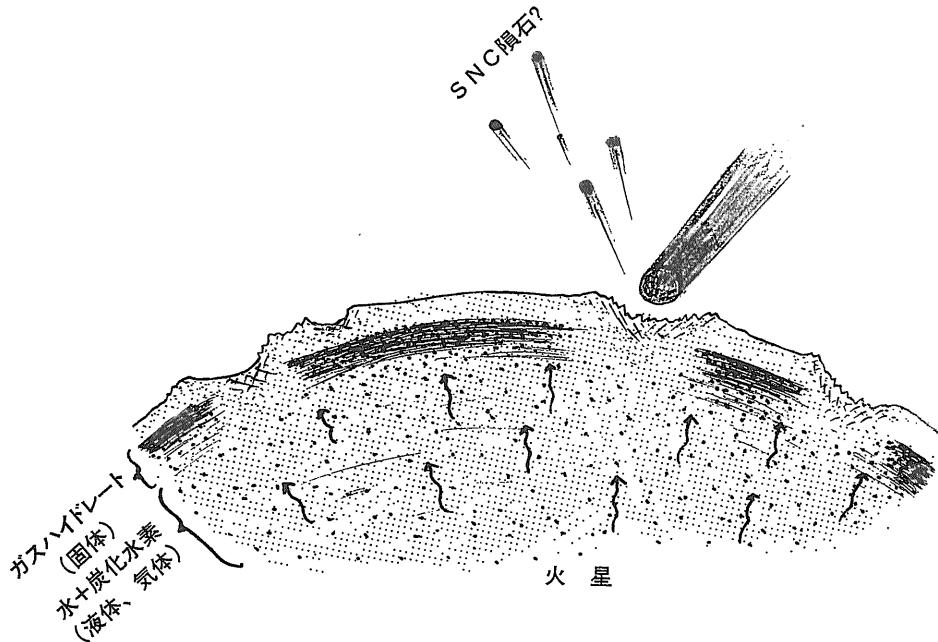


第3図 月の水素をもちいて作った水で水割りを飲むとへべれけになるどころか、生きて地球に帰れないかも！

火星にはその地下にも水が存在すると考えられる。地下に氷として存在した水が過去において大規模に熔融、流れ出した跡も存在する。地下に存在するのは純粋な水の氷ではなく、地球のツンドラ地帯の地下に多量に存在する炭化水素と水の包接化合物(ガスハイドレート)と考えられる。いわゆる SNC 隕石は火星に由来すると考えられているが、隕石を溶かすことなく火星から打ち出すには火星表面への単純な隕石落下だけでは困難である。大きな隕石落下エネルギーだけで火星表面物質を打ち出そうとすれば、地球におけるテクタイトのように、そのエネルギーで火星表面物質は溶けてガラスになる。しかし、SNC 隕石はショックで溶かされてはいない。



第4図 火星の極冠
季節によって大きくなったり小さくなったりする。水と二酸化炭素の霜であると考えられている。(NASA 原図)



第5図 火星の地下には多量のガスハイドレート(水と炭化水素の包接化合物：固体)が存在し、隕石落下によるその爆発的な気化は、火星の重力に打ち勝って隕石を打ち出すのに十分な力をもつ。

いっぽうガスハイドレートは少しの熱で爆発的に気化する。火星の表面物質を溶かすことなく火星から打ち出した原動力は火星への隕石落下に伴う地下ガス水の瞬間的な気化かもしれない(第5図)。

月と水星にも氷の存在が示唆されている。月には、年中日光のあたらない場所が、極地の火口底を中心に、月面の0.5%ほどあり、そこではいつも100 K以下の温度と計算される。Arnold氏(1979)によれば 10^{16} ~ 10^{17} gの水が存在するという。最近、水星の永久影地帯に3.5 cm電波の反射が異常に強い部分が見つかり、氷による反射ではないか!とされている(Slade et al., 1992)。このように乾いた天体にも少しずつではあるが水の存在する可能性が認められつつある。

5. 太陽系の水Ⅲ—過去の月には水があふれていた?

月試料のさまざまな化学的・鉱物学的証拠から(たとえば金属鉄の存在)、月の岩石は極めて還元的な環境で形成されたと考えられている。これは現在の状態として事実である。しかし、過去にまで水がなかったか? 答えはNOである。筆者らは月試

料中の稀土類元素、特にセリウムの存在度異常と同位体組成の精密測定から、月の岩石14310には南極隕石が氷上で被った元素の移動と同じ変化がみられることを見いだした(第6図)。すなわち、①通常3価が安定な稀土類元素の中で、唯一4価でも安定なセリウムの挙動異常が見られること、②その異常は試料片の外側ほど、また③長石よりも輝石に顕著であること、④水に関係した稀土類元素の挙動に特徴的な、重稀土のテトラト効果が見られること、⑤熱によるアルゴンのリリースパターンが不規則で、それは試料片の外側ほど、また長石よりも輝石に顕著なこと、⑥Lu-Hf同位体系に変動があるが、Sm-Nd系は影響を受けていないこと、である(Tanaka et al., 1986)。

多数の月試料のうち、上記の特徴に1つである、正のセリウム異常を示す岩石が月の高地の古い岩石に多く、若い海の岩石にはきわめて少ないことから、もし月の表面で南極隕石に見られるような変質作用があったとしても、それは月の歴史のごく初期の出来事と思われる。海の地域に熔岩が噴出したころには、月はすでに完全にdryであったのだろう。月の高地の変質鉱物は後の高真空下の加熱や宇宙線の照射などにより、還元された鉱物に再変成(還元

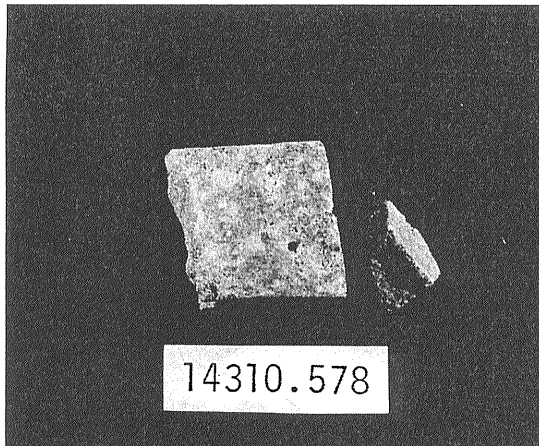
変成)されてしまったものと考えられる。

6. 水と地質調査所—鉱床学, 宇宙化学, 生命科学の鍵を握る“水”の存在

これまでに水が宇宙で最も重要かつ基本的な資源であることを述べてきた。宇宙での人類の生活, ロケットの推進…などなど。加えて, 水は宇宙開発のみならず学問の第1歩を左右する。岩石の成因と水の有無, 水と鉱床のできかた, 水と生命の発生…。水はさまざまな考察の基盤である。しかし, 6桁の同位体比やppbの分析値が一般的になった昨今でさえ, 月の試料中はもちろんのこと, 隕石中にさえどれほど水が存在するのか? 正確には誰も知らない。水や大気に対するクリーンルーム, 微量水分のリモートセンシング, 宇宙の含水鉱物, ガスハイドレート, 天体の永久影地帯の探査…地質調査所の宇宙開発に期待するところは地球上でもっともありふれた物質“水”に関する研究である。

文 献

- Allamandola, L. J., Sandford, S. A., Tielens, A. G. G. M. and Herbst, T. M. (1993): Diamonds in dense molecular clouds: A challenge to the standard interstellar medium paradigm. *Science* **260**, 64-66.
- Arnold, J.R. (1979): Ice in the lunar polar regions. *Jour. Geophys. Res.* **84**, 5659-5668.
- 増田彰正, 中川直哉, 田中 剛(1991): 宇宙と地球の化学. 大日本図書 pp. 253.
- Slade, M.A., Butler, B.J. and Muhleman, D.O. (1992): Mercury rader imaging: evidence for polar ice. *Science*, **258**, 635-640.



第6図 地質調査所でそのセリウム同位体が分析された月の玄武岩14310.578

Solar system exploration committee of the NASA advisory council (1986): *Planetary exploration through year 2000*. U.S. Government Printing Office, Washington pp 239.

田中 剛(1982): 明日の資源と新材料—地質調査所における宇宙物質の研究. *地質ニュース* **333**, 24-30.

田中 剛(1983): 宇宙の宝石箱. *地質ニュース* **341**, 表紙の写真と説明.

Tanaka, T., Shimizu, H., Shibata, K. and Masuda, A. (1986): Water in ancient moon?: possible oxitic alteration of 14310. *Lunar and Planetary Science*, **XVII**, 867-868.

Taylor, S.R. (1975) *Lunar Science: A Post-Apollo View*. pp 372. Pergamon, New York.

TANAKA Tsuyoshi (1994): "WATER" the fundamental of planetary exploration.

〈受付1993年9月29日〉