# <sup>特集「月から始まる地球惑星進化学」</sup> 水星:還元的惑星の形成過程と地球型惑星 の多様性への展望

岡田 達明<sup>1</sup>

# 要旨

水星は月と似た外観をもつ小型の地球型惑星である が、高い平均密度、固有磁場の存在、高い反射率など の特異な性質をもつ.その原因は水星の形成環境と形 成過程にあり、水星が原始太陽系の内縁部の還元的な 環境下で,還元的な材料物質(例えばEコンドライト) から選択集積過程を経て形成されたためと考えられる. 事実、この仮定は水星の観測的特徴の多くを説明す る.この議論を地球型惑星へ展開するとき、地球や月 の材料物質はEコンドライトとHコンドライトの中間 的、または混合物を主成分とする可能性がある.また、 Fe/Siの大きい地球や金星でも、ある程度の選択集積 過程が起きた可能性がある.

## 1 はじめに

月や地球の形成・進化過程を解明するにはそれ自体 の研究のみならず,他の地球型惑星と比較することに よって,地球型惑星に共通する系統的特徴と各惑星に 固有な性質を調べることが重要である.本研究では特 に水星について考証する.

水星は、太陽系の惑星の中で最も内側の軌道を公転 する小型の地球型惑星である. クレータで覆われた表 面は月と似ており、月と同程度に古い表面年代をもつ と考えられる [1]. また平均密度が高く、固有磁場を もつのが大きな特徴である[2].

惑星の進化は惑星形成後の冷却過程に伴って起き

1. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部

るため、天体のサイズが重要なパラメータである.サ イズが小さいほど冷却されやすく、惑星形成後の比較 的初期の段階で進化が終焉すると考えられる.実際の 惑星進化はもう少し複雑である.惑星内部の分化過程 では、部分溶融による元素分配の程度が大きく影響す るが、溶融が開始する温度や各温度・圧力下での元素 分配係数は、元素組成、含水量、酸化還元状態にも強 く依存する.全ての地球型惑星の材料物質が同じなら ば熱的な問題、すなわち天体サイズの違いだけでも議 論が閉じる.しかし各惑星は原始太陽系内の異なる日 心距離にある場所で形成されており、温度・圧力の他、 含水量や酸化還元状態の異なる環境下であったと考え られる.水星は、原始太陽系の内縁部の特徴をもつ材 料物質により形成され、それがその後の進化過程に反 映されたと考える方が自然である.

本研究では、水星の平均密度が高い原因を説明する 水星起源モデル[3-5]と観測事実とを比較することで、 選択集積説[3]を採用し、そのモデルが成立する原始 太陽系の条件を考証する.Wasson(1988)[6]は各隕石 の酸化還元状態と原始太陽系の熱力学的条件から、隕 石母天体の形成位置を推定した.最近の研究で、Ebel and Alexander(2005)[7]による宇宙塵の分析と数値シ ミュレーションで、水星軌道域でEコンドライトの形 成に十分な還元的環境が実現することが示された.ま た、Agee and Draper(2005)[8]の高温高圧実験による SNC隕石のFeO存在度やCaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の傾向を説明する には、火星マントルがHコンドライト的(Mg#80)な 組成をもつ必要があることが示された.これらも参照 して、原始太陽系の酸化還元状態の日心分布について 再考する.その結果に基づくと,水星の材料物質は極めて還元的な隕石であるEコンドライトにHコンドラ イトが多少混合したものであると考えられるが,それ から現在の水星の内部構造が再現できることを確認す る.最後に,地球型惑星の起源・進化に対して,原始 太陽系の酸化還元状態の日心分布が与える系統的な特 徴とその展開について考察する.

## 2 水星の特徴と月との違い

水星と月の観測的な類似点と相違点について概説す る.表1に水星の主な特徴をまとめた.過去に行われ た水星の探査や観測例は他の惑星に比べて乏しく,水 星は最も未知な地球型惑星である.マリナー10号に よる1974-75年の3回のフライバイ時の探査[2,9-11]と, 地上からの可視近赤外および中間赤外分光・測光観測 [12-14]やレーダ観測[15-16],大気成分観測[17-18]など が行われた程度である.水星表面の半分は未だ撮像さ れていない.

水星の半径は2439kmで,月(1738km)よりも大き く,火星(3397)kmや金星(6052km),地球(6378km) よりも小さい.つまり水星は中小規模の地球型惑星で あり,進化過程は比較的早期に終焉したと考えられ る.水星の表面は月と同様に無数のクレータに覆わ れた古い高地Cratered Terrainと,相対的に平坦な平 原Inter-crater Plainがあり,前者の年代は40から42 億年前頃,後者は30億年よりは古いと考えられる[19]. 大規模な火山活動は発見されていない[16, 20].月の 平原には大規模な玄武岩質溶岩流の噴出の跡がみられ, 海を形成しているが,水星では小規模で,玄武岩質で はないかもしれない[19-20].巨大な多重リングを形成 するカロリス盆地内には月のオリエンタール盆地と同 様にメルト噴出の痕跡が見られるが,反射率が周囲の 高地と同程度であるため,玄武岩質ではなくインパク トメルトと考えられる[21].

水星表面の反射率は0.09~0.45と広くばらつく



図1: 地球型惑星の常温・非圧縮状態での密度と脱水した コンドライト隕石との比較([6]のFig.2を改訂. デー タの一部は[23]を参照).水星はコンドライトに比較 して非常に重く,金属Feが濃集している.地球や金 星もFeの濃集が見られるが,火星ではみられない. 小惑星が低密度なのは含水と空隙の影響と考えられ る.

	水星の特徴	補記	文献
半径 [km]	2439	月:1738,火星:3397,金星:6052,地球:6378	
平均密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	5430(非圧縮 5300)	月:3300,地球:4300(非圧縮)	[6,23]
磁気能率 [gauss cm <sup>3</sup> ]	2-6 x 10 <sup>22</sup>	月にはほとんど無し。	[24]
反射率[%]	12-13(平原)	月の高地と同程度。海は 6-9%	[14]
	16-18(高地)	月高地のクレータレイ程度	[14]
反射スペクトル	FeO(Fe <sup>2+</sup> )欠乏	非常に還元的	[12]
表面地質年代[Ga]	> 4	月高地と同程度?	[11,19]
表面温度[K]	90-700	表面はレゴリス	[30]
大気	Na, Ca, etc.	宇宙塵の衝突?	[17-18]
極域	氷?硫黄?	レーダ反射率が永久影地域で大きい。	[16]

表1 : 水星の主な観測的特徴と月・地話	求型惑星との比較
----------------------	----------

[14] 平原の反射率は0.12~0.13で、月の海(0.06~ 0.09)に比べて高く、月の斜長岩質の高地と同程度で ある.水星の高地の反射率は0.16~0.17で,月高地上 のクレータレイと同程度である. 平原と高地の反射率 の比は,月が1:2に対して水星は1:1.4と明暗差が小さい. 水星地殻は月地殻よりも高反射率の物質で構成されて おり、反射率を低下させる有色鉱物(FeO, TiO,など) の存在度が小さいことを示唆する.実際,FeOの特徴 である1ミクロン付近の吸収は小さく, FeO存在度は 0.5~6wt%と推定される[12-13]. 地殻物質がマント ル由来である場合、水星のマントル中のFeO存在度は 地殻よりも欠乏しているはずで,6wt%以下([13]によ れば3wt%以下)である.これは月のマントルの推定 値 (11.4wt%), 地球や金星 (8wt%), 火星 (18wt%) に比べて少なく、極めて還元的であることを示唆する [22].

その他の重要な特徴として,平均密度(非圧縮で 5300kg/m<sup>3</sup>)が極めて高いことである[23].図1に典 型的なコンドライト隕石の脱水状態での密度と地球型 惑星の平均密度をプロットした.元素の宇宙存在度か ら惑星の主成分元素はMg,Si,FとOの4元素であり, 高密度を説明するには,金属Feが大きな中心核(コア) を形成している必要がある.

また,水星には固有磁場の存在が確認されている [24].固有磁場の成因は未解明であるが、ダイナモ作 用によって生成し、維持されていると仮定すると、コ アの外縁部は流体であり、固体の内核が成長途中であ ることが必要である.コアにSが0.2 ~ 5wt%程度含ま れていれば、この条件を満足できる [25].

# 3 水星形成モデルと成立条件

水星の最大の特徴は平均密度が高いことである.各種のコンドライト隕石のFe/Siはせいぜい30%程度の ばらつきであるが,水星ではFe/Siの2倍以上の濃集 が必要である[6,26].その原因を説明するものとして, 選択集積説[3],蒸発説[4],巨大衝突説[5]の3つの代表 的なモデルがある. それらについて概説する.

- ・選択集積説:惑星の成長過程で固体どうしが衝
  突・合体を繰り返すが、金属と岩石の展性的、脆
  性的な特徴の違いによって金属は相対的に合体し
  やすく、岩石は破砕しやすい.破砕した岩石は原
  始太陽系のガス抵抗や太陽光輻射によるPoynting Robertson効果によって水星軌道域から散逸するた
  め、材料物質のFe/Siが大きくなったという説.
- ・蒸発説:水星が形成され、コアと地殻・マントル に分離後、当時の活発な太陽熱放射によって高温 になった表面の岩石が蒸発し、コアが相対的に大 きくなったという説。
- ・巨大衝突説:惑星系成後期に火星サイズ程度の原始惑星が多数形成され、相互に衝突したが、その結果として表層が破砕されコアと周辺のマントルのみ残存したという説。

蒸発説は、有色で難揮発性のTiO<sub>2</sub>を含む鉱物が表 面に濃集するため、反射率が下がる可能性がある。巨 大衝突説も同様に、FeOに欠乏する天体の衝突を仮定 しない限り、高い表面反射率を説明できない.以下の 議論では、選択集積説についてのみ考察する.

選択集積が起こるには、固体物質内部が金属相と岩 石相が分離した状態、すなわちEコンドライト、Hコ ンドライト、または既に微惑星レベルで金属コアが一 旦成長したとされる石鉄隕石のような形態でなくては ならない、CIコンドライト的な物質を想定する限り、 選択集積は起こらない、また、水星の高反射率を説明 するには、水星の地殻やマントル中で、有色鉱物(FeO やTiO<sub>2</sub>)の欠乏が必須である[12]. さらに、固有磁 場の存在から、金属核中にSの溶け込みが必要である [25]. これら全てを満足する共通の条件は、水星が還 元的雰囲気の原始太陽系中で形成され、その材料物質 が還元的であったことを示唆している.

#### 4 原始太陽系の酸化還元状態

水星軌道域である原始太陽系の内縁部の酸化還元状 態を考察する,小惑星は,表面反射率や反射スペクト ルの形状から型に分類されている.必ずしも隕石との 対応は自明でないが、日心距離の増大に伴って、E.S.C. P. D型と系統的に分布する傾向がある[27]. これは 還元的物質から酸化的物質,ドライからウェットへの 傾向と捉えるのが一般的である. 各型の小惑星が完全 には拡散されず,現在もこの分布が統計的に維持され ていることは重要である[28]. つまり,内惑星系での 重力散乱による物質の混合は不完全であり、惑星はそ の軌道域の物質を主成分として形成されると仮定して よい. Ebel and Alexander(2005)[7]は, 既に酸化作用 と水質変成作用を受けたCIコンドライトよりもクラ スター IDPと呼ばれる宇宙塵の方がより始原的とし た上で、炭素を豊富に含むクラスター IDPは少なく とも氷の凝縮できる温度環境(小惑星帯付近のSnow Line)から十分離れた場所である水星軌道付近ならば 原始太陽系の中で残存可能である. それが赤道面に集 積すると酸素分圧を下げ,極めて還元的な環境を実現 する、その結果、比較的低温でMgSやCaSが安定に 存在でき、またFeも金属相で安定であり、Eコンドラ イトの形成が可能であることを示した. また, Agee and Draper(2005)[8]は高温高圧実験を行い、火星隕石 のFeOとMgOの相関, Mg#, CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の傾向を最 もよく説明するのは、火星のマントル物質がLまたは LLコンドライト的な組成(Mg#=75程度[28])でなく, Hコンドライト (Mg#=80程度) が妥当であることを 示した. これらの結果は, 原始太陽系の内縁部の水星 領域が、極めて還元的であったことを強く支持する.

Wasson (1988) [6]では,隕石の特徴をもとに,母 天体の原始太陽系の日心分布モデルを提案した.それ は酸化還元状態の分布を示しているが,最新の結果も 参照して若干の修正が必要である.それを反映した結 果をWasson'88モデルと共に,図2に示す. 水星は、Eコンドライトを主成分とし、ある程度の Hコンドライト(および多少のより酸化的な物質)の 混合を受けて形成されたと考えられる.その結論は、 表面反射率が大きいこと、高原と平原の反射率の比が 小さいことから部分溶融時の元素組成変化に乏しいこ と、平均密度が大きくFe存在度が大きいこと、金属 Feが豊富でSを含有することなどの多くの観測的特徴 と極めて調和的である.

#### 5 水星内部構造

前章までの議論から、水星が還元的環境で形成さ れた物質(Eコンドライト)を主成分とし、より日心 距離の大きな物質(Hコンドライト)の混入を受けた と考えられるが、その端成分のEコンドライト、およ びHコンドライトを材料物質として、現在の水星の平 均密度と観測的特徴を再現できるかどうかを検証する。 方法は、水星を地殻、マントル、流体核、固体核に分 け、各層の密度と厚さを適当に与え、平均密度が水星 の平均密度に一致する解を探す.束縛条件が少ないた め解は一通りとは限らないが、現実的な解があるかど うかを確認するのが目的である.

Eコンドライトの例として, Indarch隕石(EHコン ドライト)を出発物質とした.その組成[29]を表2に 示す.推定した内部構造を図3aに示す.地殻はエン スタタイトと斜長石からなり,厚さ80km.マントル は主にFeOの欠乏するエンスタタイトからなり,厚さ 560km.金属コアの半径は水星半径の約3/4の1800km



図2: 原始太陽系における隕石形成位置の日心距離分布 ([6]のFig.9を改訂.)各種のコンドライト,鉄隕石中 の岩石成分(IAB),火星隕石(SNC),ベスタ起源 とされるエコンドライト(HED)をプロットした. (a)Wasson'88モデル,(b)今回提示の2005モデル.





図3: 水星内部構造の例. 各層の密度および厚さは図中に 示してある. (a)Indarch隕石(EHコンドライト)を 材料物質と仮定. (b)Forest City隕石(Hコンドライト) を材料物質と仮定. いずれも水星の平均密度を説明 できる.

で,外側240kmが流体コアである.この場合,表層物 質は無色の鉱物が支配的で反射率は高い.マントルの Mg#は100に近く,部分溶融や玄武岩の噴出は乏しい.

位:wt%) [29]				
	EH コンドライト Indarch	H コンドライト Forest City		
$SiO_2$	35.26	37.07		
$\mathrm{TiO}_2$	0.06	0.15		
$Al_2O_3$	1.45	2.09		
$Cr_2O_3$	0.47	0.54		
FeO	—	9.89		
MnO	0.25	0.28		
MgO	17.48	23.62		
CaO	0.95	1.75		
Na <sub>2</sub> O	1.01	0.99Z		
K <sub>2</sub> O	0.11	0.07		
$P_2O_5$	0.52	0.34		
Fe	24.13	16.21		
Ni	1.83	1.65		
Со	0.08	0.10		
FeS	14.20	5.21		
H <sub>2</sub> O	1.17	0.39		
合計	98.97	100.35		

表2	:	水星の材料物質として計算に用いた隕石の組成	(単
		位:wt%)[29]	

火成活動としては、斜長岩系のメルトの噴出が主にな る可能性がある. 選択集積によるFeの濃集度は、Eコ ンドライトの約1.5倍である. Fe金属相にSは約5wt% 含まれ、固有磁場形成のための条件を満足する. すな わち、Eコンドライトを材料物質とすれば、現在の水 星の観測的特徴をほぼ説明することができる.

次にHコンドライトの例として, Forest City隕石 を出発物質とした。その組成[29]を表2に示す。ま た、推定した内部構造を図3bに示す。この場合、水 星地殻は月地殻と同様に数wt%のFeOを含み、厚さ 100km. マントルも月と同様にカンラン岩的な組成を もち,厚さ660km. 金属コアの半径は水星半径の約 2/3の1680kmで、外側の220kmが流体コアである。こ の場合,表層物質はカンラン石,斜方輝石,単斜輝石, 斜長石などから構成される.表層のMg#は81かそれ 以下であり、月と同程度(月玄武岩のMg#は70前後) か、または若干FeOに欠乏すると考えられ、後者の場 合は反射率も月より高くなる可能性はある. マントル のMg#は81程度で、部分溶融による火成活動があり、 玄武岩の噴出や、それに伴う火山活動が起きた可能 性もある. 選択集積の程度はHコンドライトの約2.~ 2.5倍である.水星がHコンドライトを材料物質とす れば、過去において月並みの火成活動や溶岩流噴出が あった可能性があるものの,現在の水星の観測的特徴 の幾つかを説明することができる。しかし、インパク トメルトの周囲の高地との明度差,高い反射率などの 説明は容易ではない. 月と同様に水星にも二分性があ る可能性もあるので、火山活動の有無は完全には否定 できない、将来の水星探査で未撮像領域の特徴を明ら かにする必要がある.

# 6 月・地球型惑星の形成・進化 過程への展開

地球型惑星への展開として,水星が小型の地球型惑 星である点と,原始太陽系の内縁部で形成された点に ついて考察する.水星のサイズが小さいことから冷却 のタイムスケールが短く,早期に活動を終焉すること が予測される.実際,クレータ分布から表層年代を 推定する限り,月と同程度に古い時期で活動休止した ことを示している[11,19].水星の地殻形成に至る熱史 が天体サイズに強く依存することが示された.しかし, マグマオーシャン過程の詳細や,火成活動については 月と一致しない.

その不一致の原因は,水星と月との材料物質の違い によると考えられる.原始太陽系の内部における酸化 還元状態の違い,それに伴う惑星材料物質の酸化還元 状態の違いは,日心距離に伴って大きく変化する.一 般的傾向としては内側ほどより還元的,外側ほどより 酸化的になると考えられる.例えば地球の材料物質は, 図2のモデルに従えば,Hコンドライトよりもやや還 元的であったかもしれない.

水星が形成されるには、物質の選択集積を必要とす る.水星の場合、Eコンドライトに対し、1.5 ~ 2倍の 濃集が必要である.金星や地球でも普通コンドライト に比べてFe/Siが大きいが、火星は普通コンドライト と同程度である(図1).この事実は、原始太陽系の 内側ほど還元的な物質が多く、金属相の割合が大きい ため、内側ほど選択集積がより効果的に行われた可能 性を示唆するのかもしれない.

#### 7 まとめ

水星の熱的進化過程は月とほぼ同様で,古い時代に 終焉したと考えられるが,水星の材料物質は月に比べ てずっと還元的であった可能性がある.それは,小惑 星のスペクトル型の分布が現在でも維持されているこ と,太陽系内縁部ではEコンドライトが安定に存在で きるという報告[7],火星隕石の組成やMg#,Ca/Al などを説明するには,Hコンドライトが最も適合する という報告[8]があり,これらから判断すると水星は EコンドライトなどのFe金属相に富む還元的物質から, さらに選択集積を経て形成されたことを示唆する.水 星が仮に巨大衝突によって形成されたとしても,観測 事実を説明するには還元的な原始惑星が必要であり, 選択集積説との違いは衝突の起きた時期と規模が異な るだけで、今回の議論を本質的に変えることはない. 水星Eコンドライト起源であるとすると、現在観測さ れる水星表面の反射率やFeOに欠乏した表面反射スペ クトル、水星の大きい平均密度、固有磁場を維持する ための液体コアの存在を全て説明できる.一方、水星 をHコンドライト起源とすると、観測事実の多くを説 明できるが、玄武岩の噴出や表面反射率などで問題が ある.但し、いずれの場合も水星の現実的な水星内部 構造の再現が可能であることが分かった.

同様の議論は,他の地球型惑星にも適用できる.地 球や月の位置における典型的な化学組成は,Eまたは Hコンドライトの混合したものと考えられる.主要元 素のほかに,原始太陽系内で生じた重力散乱による 撹拌によって様々な酸化度,含水量の物質が後のス テージで付加された可能性はある.2011年到着予定の NASAの水星探査機Messenger,および2017年到着予 定の日米共同水星計画のBepi Colomboミッションで 水星の探査が行われ,上記の問題について検証し,結 論が出されることを期待したい.

#### 参考文献

- [1] Murry, B.C. et al., 1974, Science 185, 169.
- [2] Ness, N.F. et al., 1974, Science 185, 151.
- [3] Weidenschilling, S.J., 1978, Icurus 35, 99.
- [4] Bullen, K.E., 1952, Nature 170, 363.
- [5] Weatherill, G.W., 1988, Accumulation of Mercury from planetesimals. In Mercury, eds by Vilas F., Chapman, C.R., and Matthews, Univ. of Arizona Press, Tucson AZ, 670-691.
- [6] Wasson, J.T., 1988, The building stones of the planets. In Mercury, eds by Vilas F., Chapman, C.R., and Matthews, Univ. of Arizona Press, Tucson AZ, 622-650.
- [7] Ebel, D.S. and Alexander, C.M.O' D., 2005, Lunar Planet. Sci., XXXVI, #1797.

- [8] Agee, C.B. and Draper, D.S., 2005, Lunar Planet. Sci., XXXVI, #1434.
- [9] Gault, D.E. et al., 1975, J. Geophys. Res., 80, 2444.
- [10] Strom. R.G., 1977, Phys. Earth Planet. Int., 15, 156.
- [11] Spudis, P.D. and Guest, J.E., 1988, Stratigraphy and geologic history of Mercury. In Mercury, eds by Vilas F., Chapman, C.R., and Matthews, Univ. of Arizona Press, Tucson AZ, 118-164.
- [12] Vilas, F., 1988, Surface composition of Mercury from reflectance spectrophotometry. In Mercury, eds by Vilas F., Chapman, C.R., and Matthews, Univ. of Arizona Press, Tucson AZ, 59-76.
- [13] Sprague, A.L. et al., 1994, Icarus 109, 156.
- [14] Veverka, J. et al., 1988, Photometry and polarimetry of Mercury. In Mercury, eds by Vilas F., Chapman, C.R., and Matthews, Univ. of Arizona Press, Tucson AZ, 37-58.
- [15] Harmon, J.K. and Campbell, D.B., 1988, Radar observation of Mercury. In Mercury, eds by Vilas F., Chapman, C.R., and Matthews, Univ. of Arizona Press, Tucson AZ, 101-117.
- [16] Butler, B. et al., 1993, J. Geophys. Res., 98, 15,003.
- [17] Potter, A.E. and Morgan, T.H., 1985, Science 229, 651.
- [18] Sprague, A.L. et al., 1997, Icarus 129, 506.
- [19] Strom, R.G., and Neukum, G., 1988, The cratering record on Mercury and the origin of Impacting objects. In Mercury, eds by Vilas F., Chapman, C.R., and Matthews, Univ. of Arizona Press, Tucson AZ, 336-373.
- [20] Robinson, M. S. and P. G. Lucey, 1997, Science 275, 197.
- [21] Trask, N.J. and Guest, J.E., 1995, J. Geophys.

Res., 80, 2462.

- [22] Goettel, K., 1958, Present bounds on the bulk composition of Mercury: Implications for planetary formation processes. In Mercury, eds by Vilas F., Chapman, C.R., and Matthews, Univ. of Arizona Press, Tucson AZ, 613-621.
- [23] Reynolds, R.T., and Summers, A.L., 1969, J. Geophys. Res., 74, 2494.
- [24] Connerney, J.E.P. and Ness, N.F., 1988, Mercury's magnetic field and interior. In Mercury, eds by Vilas F., Chapman, C.R., and Matthews, Univ. of Arizona Press, Tucson AZ, 494-513.
- [25] Schbert, G. et al., 1988, Mercury's sthermal history and the generation of its magnetic field. In Mercury, eds by Vilas F., Chapman, C.R., and Matthews, Univ. of Arizona Press, Tucson AZ, 429-460.
- [26] Wasson, Meteorites (San Francisco, W.H. Freeman).
- [27] Tholen, D. J., 1989, Asteroid taxonomic classifications. In Asteroids II (R. P. Binzel, T. Gehrels, and M. S. Matthews, Eds.), pp. 1139-1150. Univ. of Arizona Press, Tucson.
- [28] Waenke, H. And Dreibus, G., 1985, Lunar Planet. Sci., XVI, 28-29.
- [29]小沼直樹,水谷仁(編)1978,「太陽系における 地球」,岩波講座地球科学(岩波書店),13, p.97.
- [30] Chase, S.C. et al., 1976, Icarus 28, 565.