

水星極領域における H₂O 氷と彗星衝突

Comet Impact and Water-ice in the polar region on Mercury

(平成 16 年 9 月受理)

道上達広* (MICHIKAMI Tatsuhiro)

Abstract

The high radar reflectivity observed at the pole of Mercury has suggested the presence of water-ice in the permanently shadowed floors of the polar craters. In this paper, we will discuss the origin of water-ice. In particular, impact cratering of comet on Mercury surface is considered as the origin of water-ice, and the amount of water-ice is estimated.

1. はじめに

レーダー波の反射特性の地上観測により、水星の極領域に反射能の大きい部分が見つかった。この原因として、極領域にあるクレーターの底面には太陽光の射さない部分（永久影）が存在し、そこに H₂O 氷が存在するという仮説が出されている。本研究では、永久影の温度と H₂O 氷の供給源について言及し、次に彗星衝突を H₂O 氷の供給源とした場合の検討を行った。

1.1 水星の特徴

まず水星観測（探査）の現状とこれまで知られている水星の特徴および謎について簡単に述べる。水星は太陽に近いため、地球からの観測は一般に難しい。探査機による観測も、アメリカの探査機マリナー10号が1974年から翌年にかけて水星近傍を通過したときに行った3回だけである。しかもそのとき撮影された領域は半球分（Fig.1）だけであり、全体像はよくわかっていない。水星、金星のいわゆる内惑星に、探査機を送り込むにはスピードを減速する必要があるため力学的に難しく、探査が遅れてきた。しかしながら最近ではアメリカの探査機「メッセンジャー」が2004年8月に打ち上げられ、2011年に水星の周回軌道に投入予定、また日本、ヨーロッパ共同の探査機「ベピ

コロンボ」が2012年に水星に到着予定と、水星探査が本格的に始まっている。

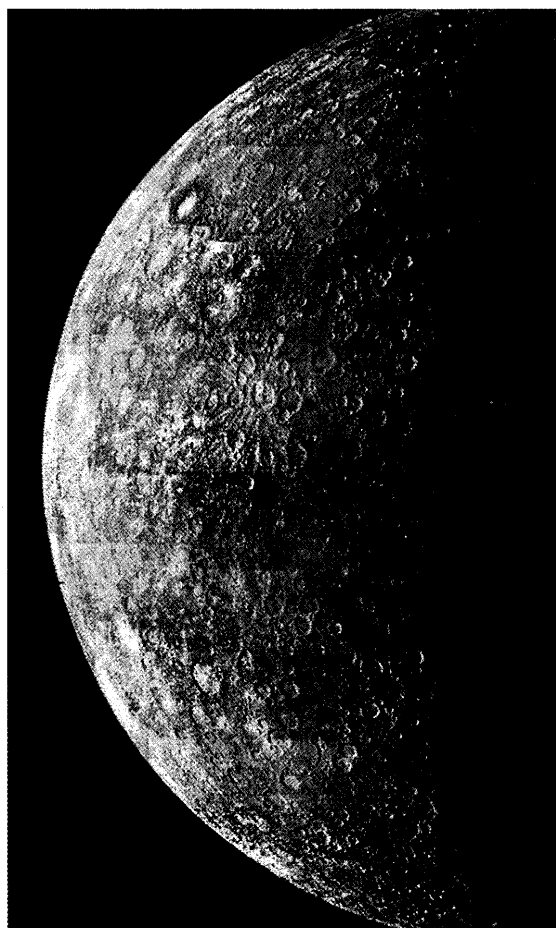


Fig. 1 マリナー10号が撮影した水星画像。月と同じく多くのクレーターに覆われている。

*福島工業高等専門学校 一般教科 (いわき市平上荒川字長尾 30)

水星は太陽系の中でいちばん内側をまわる惑星である。大きさは月よりわずかに大きい(半径 2440km)程度である。重力は地球の 0.38 倍、密度は 1 倍程度である。自転周期は 58.65 日、公転周期は 87.97 日で、この両者は 2:3 の共鳴関係にあり、ある特定の季節に特定の表面が太陽を向く。水星には大気がなく、太陽からの距離が地球までの距離の 4 割程度と近いので、昼夜の温度差が極端である。強烈な日射にさらされる昼は約 430℃、夜はマイナス約 170℃になる。しかし水星の自転軸は黄道面にほぼ垂直(2度)であるため、極域では太陽光の入射は地平線すれすれの角度となり、クレーターのような凹地の底は、一年中直射日光のささない「永久影」になる。そこでは一年中温度環境が変わらず、氷があると考えられている。

水星の大きな特徴として、永久影の他に 2 つ挙げられる。1 つは巨大な核を持っていることである。密度の高い核が大きいということは、水星の平均密度が太陽系の惑星の中で最大であることを示している。このような大きな核がどのようにして生まれたのかよく分かっていない。またもう一つの謎として「固有磁場の存在」がある。金星には固有磁場がなく、火星も地殻の局所的残留磁場が最近ようやく発見された程度である。それにも関わらず、より小さな水星に磁場が存在することは大きな謎とされている。地球も固有磁場を持っており、そのお陰で大気が宇宙空間に放出されるのを防いでいる。一方、火星は地球のように強い固有磁場を持っていなかったために、大気が無くなったと考えられている。このように水星の固有磁場の解明は、地球の固有磁場の解明にも必要である。

本研究では水星の特徴として知られている永久影、巨大核、固有磁場のうち、永久影の H₂O 氷について述べることにする。

1.2 水星の永久影と温度

地球から水星に向けて電波を放射し、そのエコーを観測した結果、極領域のクレーター部分にレーダー異常が見られた。これは揮発性物質の存在を示唆している(Hartmon et al. 1994)¹⁾。その揮発性物質としてもっとも考えられるのが H₂O 氷である。H₂O 氷以外の揮

発性物質、例えば二酸化炭素氷や二酸化硫黄氷は、高い揮発性のため蒸発しやすく残りにくい。

H₂O 氷が存在するための必要条件である永久影の温度は、次のように求めることができる。永久影部分には、太陽光に照射されたクレーター壁面からの太陽反射光と、熱放射がやってくる。また水星内部からの熱もある。これらの熱の流入が、熱放射による熱放出と釣り合って、平衡温度が決まる。Mukai et al. (1997)²⁾では、太陽光と熱の吸収、反射に対して、角度依存性、波長依存性を検討したより詳細な計算を行い、平衡温度を求めた。その結果、水星の緯度 87.5 度にある直径 155km のカオメンフー クレーターにおいて最高温度でも 50K 以下になることがわかった。H₂O 氷の昇華作用は約 100K 以上にならないと活発にならないため、この永久影の温度は、H₂O 氷を十分長い時間保持できることを意味している。

1.3 H₂O 氷の供給源

H₂O 氷の供給源としては以下のものが考えられる。

- (1) 彗星衝突による供給
彗星本体が直接、水星表面に衝突することによって H₂O 分子が供給される。
- (2) H₂O 分子を含む宇宙塵による供給。
彗星からまき散らされた塵が宇宙空間にある。これらには H₂O 分子が存在し、また隕石にも H₂O 分子が含まれている。これらが供給源となる。
- (3) 太陽風による酸化鉄の還元
水星表面の酸化鉄と太陽風の水素が反応して水が生成される。
- (4) 水星内部からの噴出
水星内部はよく分かっていないが、地球型惑星の一般的な化学組成を考えた場合、H₂O 分子の存在は考えられる。それが形成時から存在し、水星が形成した後に水星の内部から噴出した。

いずれの説が正しいか、今のところよくわかってい

ない。Mose et al. (1999)³⁾は上の(1)から(3)の可能性について計算を行った。彼の研究によると、

(1)の彗星衝突による供給、特に木星ファミリー彗星の衝突による供給がもっとも可能性が高いとしている。この理由として木星ファミリー彗星がもっとも水星に衝突する確率が高く、H₂O氷を多く含んでいることが挙げられる。木星ファミリー以外の彗星は衝突確率が低いためにその可能性は低いと考えられる。

(2)の宇宙塵による供給は、H₂O氷の供給量としてはよい。しかし水星極領域のレーダー観測は不純物のないきれいな反射能を示しており、宇宙塵がH₂O以外の不純物を多く持つことからそれを説明できない。

(3)の太陽風による化学的な反応は水を供給するが、観測されているH₂O氷の量を説明するには、十分な量でないと考えられる。

1.4 本研究の目的

本研究では一般にH₂O氷の大きな供給源として期待される(1)彗星衝突による供給について言及する。過去において彗星衝突による供給の研究は、Mose et al. (1999)によって詳細に行われた。彼らの計算は現在の彗星の軌道要素から水星への衝突確率を計算、彗星の数を現在よりも多めに見積もることで、H₂O氷の供給量を見積もった。しかし彼らの計算には実際に存在する水星のクレーター分布との対応ができていない。一般に水星上のクレーターは、小惑星衝突によるものと彗星衝突によるものが考えられる。そこで本研究では衝突した彗星とクレーターの関係を明らかにするため、彗星起源のクレーターが全クレーターの何%あるのか計算を行う。具体的には、極領域におけるH₂O氷の観測量の推定値とモデル計算を比較検討することで、彗星起源クレーター割合を見積もることにした。

2. モデル

2.1 衝突天体の質量の見積もり

水星表面上に形成されているクレーターの大きさから衝突天体の大きさを見積もる。クレーター衝突実

験はこれまでも数多く行われているが、kmサイズのクレーターの形成は実験室におけるcmサイズのクレーター形成と異なる。それゆえ私たちは衝突現象を天体スケールまで適用できるスケーリング則が必要となる。スケーリング則とはある物理現象を決める物理量を次元解析によって求め、関連付けることである。スケーリング則の目的は、実験データを外挿あるいは実際には実験で無理な他の条件にスケールし、正確な骨組みを作ることにある。この研究では、クレーター体積について広いサイズ範囲で適用が期待できるHolsapple(1993)⁴⁾のスケーリング則を採用することにする。

Holsapple(1993)によればクレーターの体積と衝突する天体質量との関係は次の式で表される。

$$V = 0.095 \frac{m}{\rho_T} \left(\frac{ga}{U^2} \right)^{-0.65} \left(\frac{\rho_T}{\rho_P} \right)^{0.22} \quad (1)$$

ここで、V(m³)はクレーター体積、g(m/s²)は水星の重力加速度、a(m)は衝突天体半径、U(m/s)は衝突速度、m(kg)は衝突天体質量、 ρ_T (kg/m³)は水星密度、 ρ_P (kg/m³)は衝突天体密度である。この(1)式からクレーターの体積が分かれば、衝突天体質量を求めることができる。ちなみにクレーターの半径R(m)と体積V(m³)の関係は観測結果からV=0.19R³になるので、クレーターの体積を求めれば、クレーターの半径(直径)を見積もることができる。

2.2 極領域に供給するH₂O氷の量

衝突天体が1回衝突した場合、極領域に供給するH₂O氷の量は以下の式で見積もることができる。

$$F = m \times f_{H_2O} \times f_{Stay} \times f_{Pole} \quad (2)$$

ここで、F(kg)は1回の衝突における極領域へのH₂O氷の供給量、m(kg)は衝突天体質量、 f_{H_2O} は衝突天体のH₂O氷の割合、 f_{Stay} は衝突直後に水星に残る割合、 f_{Pole} は極領域の永久影に到達する割合である。それぞれのパラメーターについてみる。

衝突天体質量に対してH₂O氷の質量の占める割合(f_{H_2O})は、彗星と小惑星で異なる。彗星は「汚れた雪だるま」であり、H₂O氷の占める割合はよく分かっ

ていない。また小惑星は彗星に比べると H_2O をほとんど含まないと考えられる。そこで簡単のため、衝突天体が彗星の場合、Mose et al. (1999) に基づき $f_{H2O} = 50\%$ と仮定した。衝突天体が小惑星の場合は、 $f_{H2O} = 0\%$ と仮定した。以下、小惑星は $F=0$ とし、 F を求める際、衝突天体として彗星のみを考えることにする。

水星への衝突は秒速数 10km にも及ぶため、もともと彗星にあった H_2O 氷は衝突により高温になりほとんど蒸発してしまう。蒸発した水分子のうち、水星の脱出速度を超えたものは水星の重力を振り切って逃げ、一方、脱出速度を越えなかったものは水星にとどまり、放物線を描く。Mose et al. (1999) によれば衝突直後、水星にとどまる水分子の割合は $f_{Stay} = 6.0\%$ であり、今回はこの値を用いることにした。

わずかに残った水分子は、ランダムな方向に放物運動を描き分散する。水分子が移動している間、一部は光乖離を受けて水星から脱出する。一部は再び地面に着地する。着地した水分子は再びランダムな方向に放物運動を行う。このときの速度は、着地した表面の温度に比例した平均速度を持つとして、速度分布をマックスウェルの速度分布則で与えることにする。このように何度も放物運動を繰り返しながら、永久影に到着する水分子の割合は、衝突直後残った水分子の数を 100% として $f_{pole} = 10\%$ で与えた (Butler 1997)⁵⁾。ここで、一度極領域の永久影に到達した水分子は着地した表面の温度が非常に低いため、速度を持たずそのまま動かないで残るとした。

3. 結果と考察

(1)、(2)式より 1 回の衝突で極領域の永久影に供給される H_2O 氷の量を具体的に示すことにする。緯度 87.5 度にある直径 155km のカオ・メン・フークレーターを例にとり示す。このクレーターが小惑星によって作られたとした場合、小惑星の密度 2600kg/m^3 、衝突速度 37km/s (いずれも小惑星の代表的な値) として、直径 10 km の小惑星が衝突したことになる。この場合の H_2O 氷の供給量は 0kg となる。一方カオ・メン・フークレーターが彗星によって作られたとした

場合、彗星の密度 1000kg/m^3 、衝突速度 39km/s (いずれも彗星の代表的な値) として、直径 14 km の彗星が衝突したことになる。この場合、 H_2O 氷の供給量

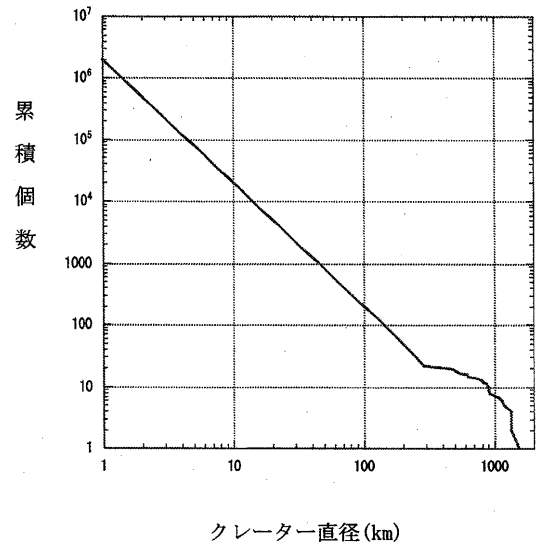


Fig. 2 水星クレーターのサイズ分布。横軸にクレーター直径(km)、縦軸にそのサイズよりも大きいクレーターの数(累積個数)をとってある。Pike(1988)では直径 200km 以上のクレーターサイズのみについて示してある。ここでは、直径 200km 以下のクレーターについては指数・2 のべき乗分布でサイズ分布を与えた。

は $4.3 \times 10^{12}\text{kg}$ となる。彗星の方が小惑星よりもサイズが大きくなるのは密度が低いためである。

以上は 1 回の衝突、すなわちある一つのクレーターが形成されたとき期待される H_2O 氷の供給量であるが、これらを水星にあるすべてのクレーターについて計算を行うことにする。

水星クレーターのサイズ分布は、はじめに述べたとおり半球しか調べられていない (Pike(1988))⁶⁾。Fig. 2 は Pike(1988) のデータを一部改編して得られたクレーターサイズ分布である。このサイズ分布から全体を 2 倍することで、水星表面にある全クレーター

体積を求めた。その全クレーター体積から(1)式を用いることで衝突天体の全質量を $7.8 \times 10^{19} \text{kg}$ と見積もった。さらに衝突天体の全質量から、(2)式を用いて極領域における H₂O 氷の供給量を推定した (彗星起源クレーターが 100% の場合、 $3.34 \times 10^{17} \text{kg}$ となる)。水星クレーターのうち、彗星起源のクレーターが占める割合と、予想される極領域における H₂O 氷の量の関係を示したのが Fig. 3 である (ここでは観測されている北極領域のみを示し、彗星起源クレーターが 100% の場合、H₂O 氷の供給量は両極領域の半分の $1.17 \times 10^{17} \text{kg}$ とした)。実線が今回計算によって得られた値、点線が観測によって見積もられている値になる。Fig. 3 の見方としては、水星表面にあるクレーターがすべて小惑星起源としたとき、横軸の値は 0% になる。逆にクレーターがすべて彗星起源としたとき、横軸の値は 100% になる。このグラフから観測値が $4.0 \times 10^{14} \text{kg}$ の場合、彗星起源クレーターの占める割合は体積にして 0.1% 台であることが分かった。これは、ほとんどが小惑星起源のクレーターであることを示している。観測値を満たすには、直径 40km の大きな彗星の 1 回の衝突によって十分な量であることがわかった。

参考文献

- (1) Hartmon, J. K., et al. Science 258, 640-642. 1994
- (2) Mukai, T., et al. Adv. Space Res 19, 1497-1506. 1997
- (3) Mose, J. I., et al. Icarus 137, 197-221. 1999
- (4) Holsapple, K. A., et al. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 21, 333-373. 1993
- (5) Butler, B. J. J. Geophys. Res. 102, 19283-19291. 1997

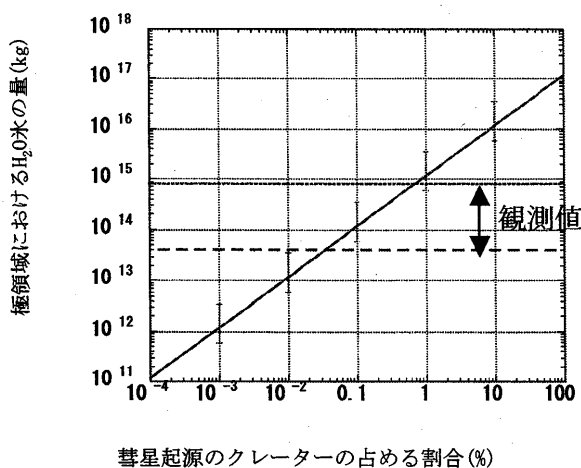


Fig. 3 彗星衝突による H₂O 氷の供給量。横軸は水星表面にあるすべてのクレーターの全体積を 100% とした場合の、彗星起源と考えられるクレーターの全体積の割合を示している。縦軸は予想される H₂O 氷の供給量 (kg) で、実線が今回の計算値、点線が観測値を示す。