

水星や月に氷はあるのか？

上野 茂樹¹

1. 灼熱下の氷

最近、太陽系で最も灼熱の地である水星に、氷の極冠が存在することを示唆する観測結果が発表され、注目されている [1].

水星は、太陽に最も近い公転軌道を持つ惑星である。このため、地球からみた太陽と水星の最大離角は28度しかない。したがって水星の観測が出来るのは、光学望遠鏡にとって不利な日の出及び日没直後に限られる。そのため水星の姿は長い間、謎であった。地球からの水星の見た目が変わらないため、水星の自転周期がその公転周期88日と等しく、水星は太陽に対して常に同じ面を向けていると考えられていた。

しかし1965年になって、プエルトリコのアレシポ電波望遠鏡による観測が行われ、水星の自転周期が公転周期の3分の2にあたる58.65日であることがわかった。さらに1974年から75年にわたって、惑星探査機マリナー10号による、水星の近接探査が行われた(図1)。この探査によって、水星表面は月のように一面クレーターに覆われていることや、双極子型の磁場を持つことなどが明らかになった。また、水星は 10^{-9} mb以下という極めて希薄な大気しか持たないこともわかった。このため、水星上には水や二酸化炭素などの揮発性物質はほとんど存在しないと考えられてきた。

1991年8月、Sladeらがゴールドストンの70m電波アンテナとVLAを用いて水星のレーダーマッピングを行った。70m電波アンテナで電波を放射し、水星表面での反射エコーをVLAで測定したのである。この結果、水星の北極地方に電波アルベドの非常に高い地域が発見された。従来から



図1 惑星探査機マリナー10号によって撮られた、水星の北極地方の近接写真。図中の白点は北極点を示す。北極地方は無数のクレーターによって覆われていることがわかる。最近、この地域の地下に氷が存在することを示す観測結果が得られ、注目されている。(THE ATLAS OF THE SOLAR SYSTEM, Parck Moore *et al.*, Michell Bezley Publisher 1983より引用)

火星や木星のガリレオ衛星の水が、強力な電波の後方散乱を起こすことが知られていたため、彼らはこの観測結果は、水星の北極地方に氷の極冠が存在していることを示すと考えた。もっとも、マリナー10号による水星極地方の写真には極冠は写っていないため、氷は表層下数mの地中にあるものと思われている。

2. 月の永久影地域

水星に類似した、大気の無い天体である月の極地方に、揮発性物質が存在するという考えは以前から提案されてきた [2]。地上から月面を観測し

¹神戸大学理学部地球科学教室

ていると、クレーターやその周辺で、突然フラッシュを焚いたように光る現象 (TLP) が見られることがある。これを説明するものとして、月面での噴気活動があげられている。地中の揮発性物質が月震などにより表層のクラックを通して放出されるというのである。

また、このような観測結果を説明するためだけでなく、将来の月面有人基地の運用に備えて、水素の供給源としての氷の存在可能性が真剣に検討されてきた。月の自転軸は黄道面に対してほぼ垂直であり、またその白道面も黄道面に対して5度しか傾いていないために、極地域のクレーターの底部には一年中太陽光の当たらない永久影地域が存在する。永久影地域は非常に低温であるために氷が安定して存在できると考えられている [3]。従来、永久影地域の存在割合は、月軌道船から撮られた写真に基づいて、クレーターに太陽光が低角度で差し込む時にできる影の割合から推測されてきた。また、永久影地域の表面温度はクレーターの壁面からの熱放射及び地下からの熱流量から求められていた。

私たちは、図2のようにクレーターを円錐台で近似したモデルを用いて、月面における永久影地域の存在割合を求めた [4]。永久影地域の表面温

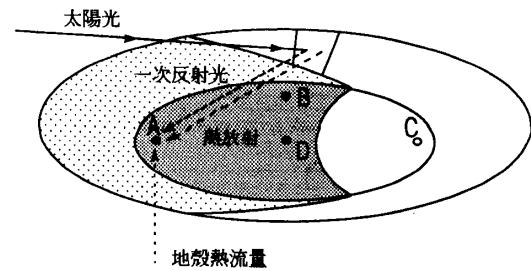


図2 クレーターの円錐台モデル。クレーターの低部の温度は地下からの地殻熱流量とクレーターの壁面からの熱放射及び一次反射光によるエネルギー流量から求めることができる。

度は、クレーターの壁面からの熱放射、地下からの熱流量に加えて、クレーターの壁面での太陽光の一次反射によるエネルギー入射を考慮して見積もった。これによると、緯度80度より高緯度の地域のおよそ4分の1が永久影地域になり、またクレーターの底部の低緯度側の地域は、氷が長期間にわたって安定に存在可能な低温状態にあることがわかった (図3)。

また、水の供給源についても多くの可能性が挙げられている。例えば、太陽風と月のソイルが反

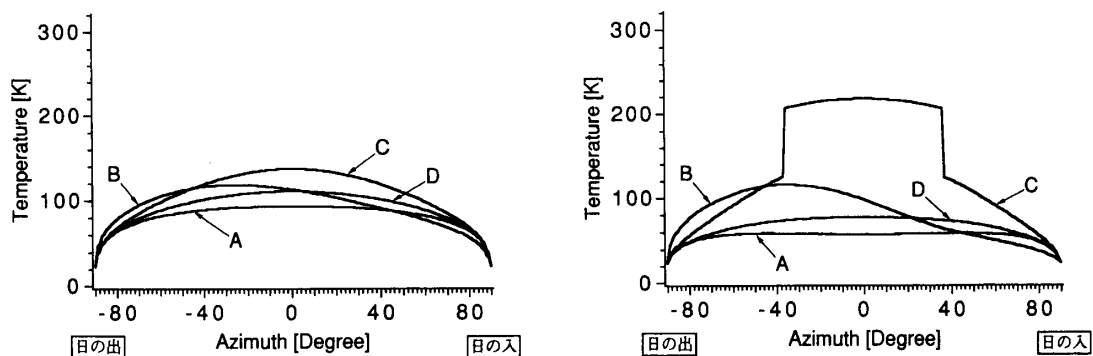


図3 月のクレーターの底部の表面温度の時間変化。左図及び右図は、緯度85度にあるクレーターの直径がそれぞれ20kmと80kmの場合。図中のA, B, C, Dは図2中の参照点を示す。永久影地域の最高温度が100K以下の地点が存在することがわかる。

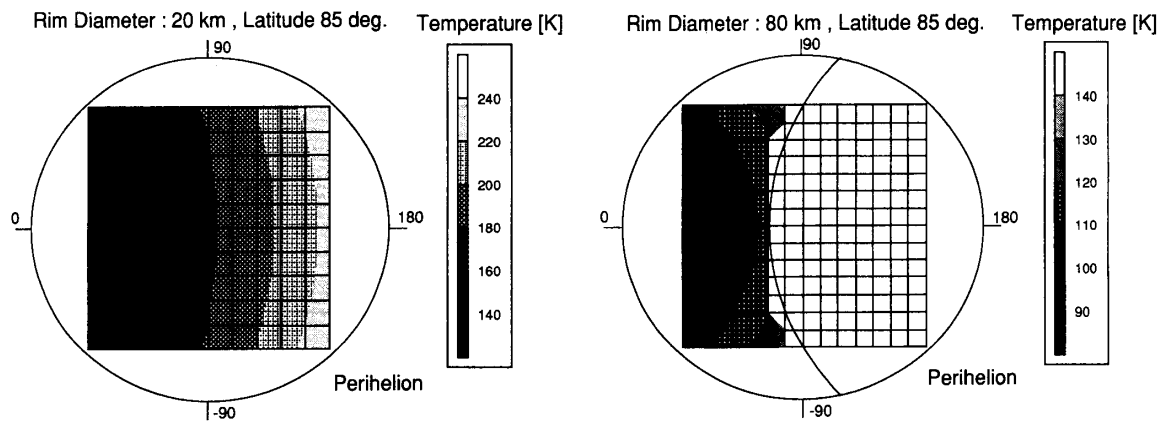


図4 水星が近日点に位置し、太陽が南中したときのクレーター底部の温度分布。左図及び右図は、緯度85度にあるクレーターの直径がそれぞれ20kmと80kmの場合。図中の方位角0度の方向が低緯度方向、すなわち太陽の方向を指す。クレーターの直径が80kmのとき、表面温度が100K以下の地点がクレーターの底部の低緯度よりの地域にあることがわかる。

応して水が生成されるという説、隕石や彗星の衝突によってもたらされるという説、更には、月内部から供給されるという説などである。この中のどれが最も効率的な水の供給源か、またどの位の水が生成され、どのようにして永久影地域で捕獲されるのかはまだはっきりとは分かっていない。しかし、ある見積によると月には 10^{16} - 10^{17} gもの水が氷として極地方に存在するという。これは琵琶湖の総湖水量とほぼ等しい膨大な量である。これらの水を有人月面基地で最大限利用するために、基地を高緯度地域に作るべきであるという提案がなされているほどである。

3. 水星の極冠

水星の場合、太陽からの放射が地球軌道付近のそれに比べて平均6.5倍と非常に大きい。また、水星の離心率が0.21と大きいために、太陽からの放射は遠日点に比べて、近日点では約2.5倍となる。前述のように、水星は自転周期と公転周期が2対3の共鳴状態にあるため、水星面上で経度0度及び180度の地域が常に近日点で南中を迎え、90度及び270度の地域が遠日点で南中を迎えることにな

る。このことは、水星面上では、月と同じような緯度方向の温度変化とともに、経度方向の温度変化が存在するというを示唆する。水星が球体であるとして極地方の表面温度を見積もると、200~400Kになる。このような温度下では氷のような揮発性物質は安定して存在できない。

実際は、水星の極地方は月面同様多くのクレーターに覆われている。また、水星の自転軸は黄道面に対して完全に垂直であるため、やはり極地方のクレーターの底部には永久影地域が存在すると考えられる。月面の場合と同様にその温度を計算してみた。直径が80km以上の大型のクレーターの底部の永久影地域は100K以下の温度の地域があるのに対して、直径20kmのクレーターでは全永久影地域に於いて100Kよりも温度が高くなることがわかった(図4)。これは太陽からの放射が強いため、クレーターの壁面からの熱放射や一次反射光の影響が強くなるからである。このようなことから、水星の極冠は極地方に広く存在するのではなく、極の近傍と高緯度地域の比較的大きなクレーターの底部の地中に氷が存在するのではないかと考えられる。

4. 月・水星探査に向けて

月や水星は1970年代中ごろ以降は惑星探査機による調査が行われていない。しかし、今世紀末から来世紀初めにかけて、NASA や ISAS による月探査が行われる予定である。更に、最近の水星での熱極や極冠の発見により、惑星探査機による水星の直接探査の必要性が出てきている。NASA ではデュアル・マキュリー計画という惑星探査計画が考えられているそうである。

これらの探査機により、水星や月の氷を検出するために、ガンマ線やアルファ線のスペクトロメータを搭載するべきであるという提案がなされている [5, 6]。今後、わが国において、探査機による水星や月の表層探査を行う場合には、これらの機器を搭載し、永久影地域の温度構造や氷の存在についてしらべてみてはどうだろうか。

参考文献

[1] Slade, M., Butler, B., Muhleman, D., and Jurgens, R., 1991: The Radar-Bright

North Pole of Mercury, *Bulletin 179th AAS Meeting Abst.*, **23**, 1449.

- [2] Watson, K., Murray, B.C., and Brown, H., 1961: The behavior of volatiles on the lunar surface, *J. Geophys. Res.*, **66**, 3033-3046.
- [3] Arnold, J.R., 1979: Ice in the lunar polar regions, *J. Geophys. Res.*, **84**, 5659-5668.
- [4] Ueno, S., Mukai, T., and Azuma, H., 1991: Temperature Distribution in the Permanently Shadowed Area in Lunar Polar Region, *Proc. 24th ISAS Lunar and Planet. Symp.*, ISAS, Tokyo, 190-196.
- [5] 柳沢正久, 1988: 月で水をさがす話, 昭和63年度科学衛星シンポジウム, 109-115.
- [6] Metzger, A.E. and Drake, D.M., 1990: Identification of Lunar Rock Types and Search for Polar Ice by Gamma Ray Spectroscopy, *J. Geophys. Res.*, **95**, 449-460.