

論文の内容の要旨

論文題目 Statistical and morphological analyses of impact craters
in the Alba Patera region of Mars

(火星のアルバ・パテラ地域における衝突クレータの
統計学的および形態学的解析)

氏名 石井 徹之

近年、火星探査機が数多く打ち上げられ、火星に関する大量の情報が得られた。そのひとつとして、2001年にNASAによって打ち上げられたマーズ・オッドセイに搭載されたガンマ線分光計による観測から、火星の ± 50 度以上の高緯度地域には、その地下の非常に浅いところに大量の氷が存在していることが示唆されている。この分布は、大気中の水蒸気がレゴリス中の空隙を拡散して地下に氷を形成したとする水蒸気拡散モデルによって説明することができる。

しかしながら、火星は過去において自転軸傾斜角が非常に大きく変動することが理論的に推定されており、自転軸傾斜角が大きかった時代には、地表の氷は火星の中緯度にまで広がるのが、水蒸気拡散モデルや大気大循環モデルから推定されている。実際、火星の中緯度には、氷に富む物質が関与していると考えられる様々な地形的特徴が観察される。特に、衝突クレータの極向きの壁面や底面には、氷堆積物が頻繁に観察される。氷堆積物は、少なくとも数百万年以内に形成されたと考えられている。しかしながら、もし氷堆積物が自転軸傾斜角の変動によって形成されたものだとすれば、火星史を通じて繰り返し発達し衝突クレータの形状を変化させていったはずである。

流水による地表の浸食率が大きかった可能性のある火星史初期を除けば、少なくともアマゾニア期以降においては、火星の大気は希薄で寒冷な気候状態が続いていたと考えられるため、火星表層における浸食率は非常に小さかったはずである。したがって、氷堆積物の形成や発達には、中緯度における衝突クレータの主要な修正プロセスであった可能性が高い。さらに、氷が地表付近で安定に存在できない低緯度、自転軸傾斜角が高い時にしか安定に存在できない中緯度、常に安定に存在できる高緯度、のそれぞれの緯度帯においては、衝突クレータ形状の修正の受け方は大きく異なっていることが予想される。衝突クレータは、修正前の形状を予想できる唯一の地質学的特徴であることから、どの

ような修正を受けたのかを正確に推定することが可能である。衝突クレータの形状を詳細に調査することは、火星の自転軸傾斜角変動史のシナリオを検証するうえでも非常に重要である。

本研究では、まず、ヘスペリア期後期～アマゾニア期初期の表層年代を示すアルバ・パテラ地域に存在する直径 5 km 以上の衝突クレータ 222 個について形状パラメータ（壁面傾斜角、キャビティの深さ、リムの高さ）を統計学的に調査した。これまでの衝突クレータの形状に関する研究では、1996 年に打ち上げられたマーズ・グローバル・サーベイヤーによって得られた高度 (MOLA) データを用いて研究されているが、そのほとんどはグリッド化されたデジタル高度モデル (Digital Elevation Models; DEMs) を用いている。しなしながら、DEMs は直径の小さい衝突クレータを正確に表現できない場合が多い。本研究では、トラックデータ (Precision Experiment Data Records; PEDRs) を用いて、衝突クレータの形状パラメータを調査する手法を開発した。これにより、アマゾニア期の表層年代を示す地域に形成された、小さい衝突クレータの形状を高精度で調べることが可能になった。

解析の結果、アルバ・パテラ地域の衝突クレータの壁面傾斜角は、緯度が上昇するにつれて小さくなることが示された。さらに、中緯度 ($33^{\circ}\text{N}\sim 52^{\circ}\text{N}$) では、極向きの壁面は赤道向きの壁面に比べて傾斜角が小さくなっていることが示された。また、 45°N より低緯度ではキャビティが深く (R 小)、 45°N より高緯度ではキャビティが浅くなっている (R 大) ことが明らかになった (図 1)。このキャビティの深さはクレータの直径が小さいほど緯度依存が強くなる。例えば、 45°N より高緯度において、直径 7 km 以下の小さい衝突クレータのキャビティのほとんどが非常に浅いが ($R > 0.8$)、直径 20 km 以上の大きな衝突クレータのキャビティは形成時の半分程度の深さを保っている ($R \sim 0.5$)。また、リムの高さは、大きな緯度依存はほとんどなく、極側と赤道側の高さの違いもほとんどみられなかった。

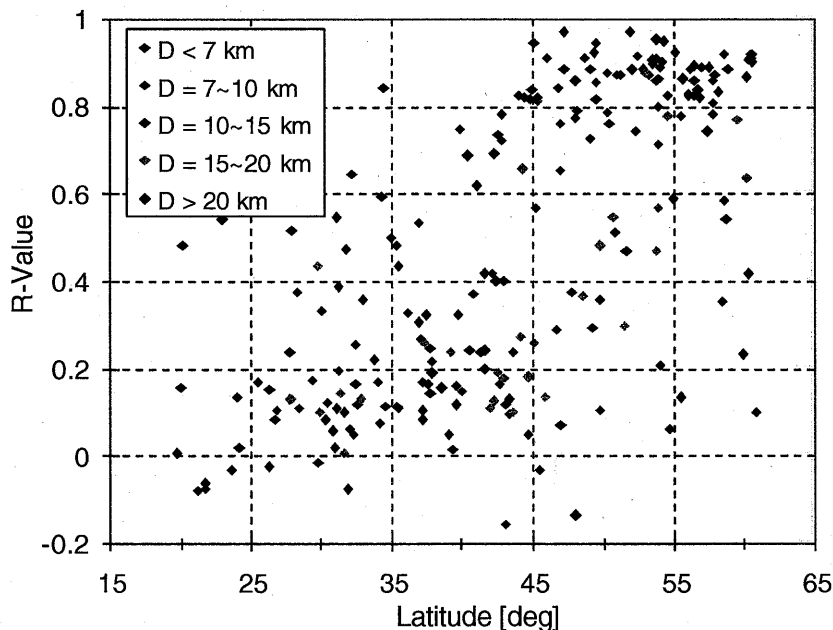


図 1. キャビティの深さの緯度依存. R-Value は形成初期からどれだけ浅くなっているかを示す指標. $R = 0$ は形成初期と等しい深さ, $R = 1$ はキャビティが完全に埋められているか緩和しきっていることを示す。

次に、形状を調べたすべての衝突クレータについて高度プロファイルを作成し、高解像度画像 (MOC, THEMIS) と合わせて地形学的・形態学的調査を行った。

その結果、低緯度地域に存在する衝突クレータは、ダスト堆積物で覆われており、壁面においてはこのダスト堆積物が雪崩を起こしたような地形が観察された。低緯度において例外的に浅いキャビティを示す衝突クレータは、非常に平坦な底面を示し、溶岩流によって埋められている可能性が大きい。中緯度の衝突クレータでは、特に 45°N 以下において、極向きの壁面から氷と岩石から成ると考えられる氷堆積物が粘性緩和した様子が観察された。粘性緩和の特徴は、衝突クレータの直径が小さいほど顕著に観察される。これらの特徴は、高度プロファイルにおいても確認することができた。キャビティが浅くなっている衝突クレータのほとんどは、極向きの壁面から赤道向きの壁面の麓まで、粘性緩和によって広がる氷堆積物で埋められており、その表面はわずかに極向きに傾いていた。 $45^{\circ}\text{N} \sim 52^{\circ}\text{N}$ においても、同様にわずかに極に傾く平坦な底面を示し、そのキャビティは氷堆積物で埋められていることが示唆される。中緯度の大きい衝突クレータでは、氷堆積物は極向きの壁面の麓に留まっている場合がほとんどであった。高緯度では、衝突クレータの内側も外側も氷堆積物で覆われていると考えられ、特に、キャビティ内の氷堆積物は、同心円状の模様を表面に示していた。

以上の衝突クレータの統計学的、形態学的・地形学的解析の結果から、アルバ・パテラ地域における衝突クレータは、主に氷堆積物によって埋められることによって形状を変えていると解釈される。低緯度地域においては、氷が安定でないために、衝突クレータはほとんど形状を変えない (図 2a)。中緯度地域においては、現在の気候条件では平坦な面においては、氷は安定に存在しない。しかしながら、極向きに傾いている壁面上では、太陽光の入射角が小さいために地面の温度が低くなり、氷が安定に存在できる。極向きの壁面上で発達した氷堆積物は、粘性緩和によってキャビティの底に流れ込む (図 2b)。キャビティの底は、太陽高度が低い時にはリムによって太陽光が遮られるため、平坦な面よりも温度が数度低いことが予想される。しかしながら、 45°N より低緯度側では、それでも温度が十分高いために、氷堆積物は不安定になる。緯度が高くなるにつれて地面の温度は低くなり、 45°N より高緯度側では、キャビティの底で氷が安定に存在し始めるため、急速に底面が埋められる。 50° 以上の高緯度では、水平面でも氷が安定であるために、キャビティにさらに速い速度で氷堆積物によって埋められる (図 2c)。このような修正過程が、寒冷希薄な大気条件が続いていたと考えられるアマゾニア期において支配していたと考えられる。中緯度 ($33^{\circ}\text{N} \sim 52^{\circ}\text{N}$) において極向きの壁面が赤道向きの壁面に比べて傾斜角が小さくなっている理由は、氷堆積物が温度の低い極向きの壁面上に卓越して発達するからであると考えられる。

氷成分の起源としては、地下水と大気中の水蒸気が考えられる。しかしながら、氷堆積物は、リムの峰付近から発達していることから、地下水よりも大気中の水蒸気が起源として妥当であると考えられる。岩石成分としては、大気中に巻き上げられたダストか衝突クレータ壁面が浸食されたデブリが考えられる。地球の氷河の場合は、浸食されたデブリが主要な構成物質である。しかしながら、クレータ形状の統計解析は、リムの浸食を示唆しない。特に、高緯度の衝突クレータのキャビティは、そのほとんどが埋められているが、もしその岩石成分が浸食されたデブリで構成されている場合、リムは大きく浸食されているはずである。したがって、大気中に巻き上げられたダストが主要な岩石成分である可能性が大きい。

しかしながら、低緯度の深いキャビティからは、ただ堆積しただけでは、ダストは再び大気中へ

巻き上げられることが示唆される。岩石成分は氷により固定され、全体として厚く発達することが可能になるものと考えられる。すなわち、キャビティを埋めている氷堆積物の厚さは、氷の凝結量と氷が地表付近に安定しダストを地表に固定する期間と対応していると考えられる。

50° N 以上の高緯度において、キャビティが深い 直径 15 km 以下の衝突クレータは、54 個中 4 個しかない。54 個の衝突クレータが 30 億年前から順次形成したと仮定すると、4 個の衝突クレータはおよそ 2.2 億年以内に形成したと見積もることができる。すなわち、直径 10 km 程度の小さい衝突クレータのキャビティは 2~3 億年程度のタイムスケールで、氷堆積物によって埋められると推定することができるだろう。直径 15 km 以上の大きい衝突クレータは、ある程度の深さを保っていることから、大きい衝突クレータのキャビティは、現在もなお浅くなる段階にあるのかもしれない。

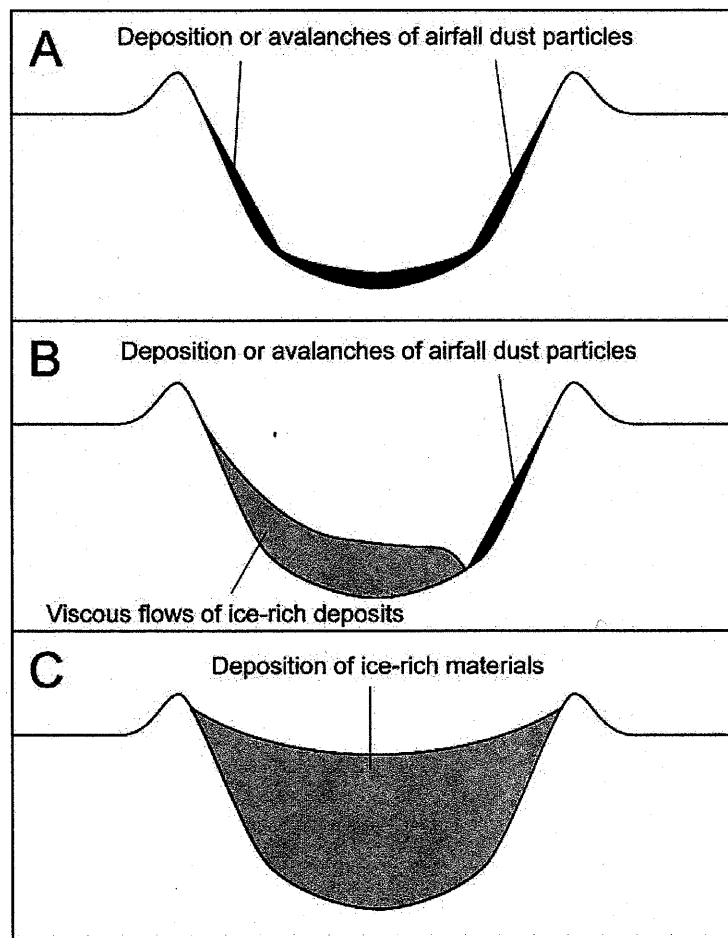


図 2. (a) 低緯度, (b) 中緯度, (c) 高緯度における, 衝突クレータの主要な修正過程.