

冥王星における衝突クレーターの深さと直径の関係

北海道大学 理学部 地球惑星科学科 4年
宇宙惑星グループ 倉本・鎌田研究室
学生番号 02150366 樋口誠

2019年2月27日

アブストラクト

2015年7月14日、NASAのNew Horizonsの冥王星接近観測によって人類初のカイパーベルト天体の接近観測に成功し、その標高データが得られた。この標高データをもとに衝突クレーターの直径と深さを計測し、その関係性をクレーターの種別ごとに近似式として表した。こうして得られた近似式をこれまでに得られてきたエウロパ、レアなどいくつかの氷天体で作成されてきた近似式と比較して考察した。その結果、冥王星における小天体の衝突速度が遅いこと、衝突時点での冥王星の地殻の熱流量は極端に小さかったこと、冥王星のリソスフェアの厚さがおよそ80 km未満であること、地殻表面の地域差は直径と深さの関係の分散には大きく関与しないことが分かった。

目次

1	イントロダクション	2
2	クレーターの直径及び深さの測定方法	3
2.1	使用したデータ及びソフトウェア	4
2.2	クレーターの分類	5
2.3	直径 (D) の測定	5
2.4	深さ (d) の測定	6
3	測定結果	6
3.1	深さ-直径比	6
3.2	他の天体との比較	7
4	考察	7
5	結論	9
	付録 A.Moore et al. (2015) の逐語訳	10
	付録 B.ISIS3 の利用方法	17
	謝辞	19
	参考文献	19

1 イントロダクション

2015年7月14日、NASAのNew Horizonsが冥王星の接近観測に成功した。これにより初めて冥王星の地形を読み取ることに成功し、それらをまとめあげた Moore et al. (2015) によると、冥王星には断層など大規模な地殻変動の痕跡や内部構造を示唆する種々の地形がある(全文訳を付録Aに掲載した)。今回は浅部の内部構造を推定できる明確な手掛かりとなる衝突クレーターに着目した。衝突クレーターは生成時の直径に応じて、小さい順にボウル型の単純クレーター、底部が平坦で中央丘を伴うこともある複雑クレーター、そして複雑クレーターと似た構造ながら中央に高地と穴のいずれか、または両方を持ち、独特な多環構造を持つ巨大盆地と形が変化することが月のクレーターの観測を通して示されている(Pike, 1974, 1980; Williams and Zuber, 1998; White et al., 2013) (図1)。これは氷天体でも同様であり、クレーターの形状別に直径(D)と深さ(d)の関係を示す以下の近似式を作成することで、浅部の内部構造をある程度推定することができることが木星の衛星について示されている(Schenk, 2002)。この式において a 及び b は定数である。

$$d = aD^b \quad (1)$$

この近似式を作成し、定数 b の値などから次のようなことが議論できる。(1) 単純クレーターの近似式の累乗の指数(式1の b) はその天体における小天体の衝突速度と対応しており、衝突速度が大きいほど指数(式1の b) は大きくなる(Bray and Schenk, 2014)。(2) 単純クレーターと複雑クレーターの境界にあたる直径 D はその天体の表面重力や地殻の堅さに対応しており、表面重力が小さく、地殻が堅固であるほどこの境界の直径 D は大きくなる(e.g. Melosh, 1989)。(3) 複雑クレーターの近似式における累乗の指数(式1の b) は衝突当時の地殻の熱流量と対応しており、熱流量が小さいほど指数は大きくなる(Bray et al., 2014)。(4) 次に指数(式1の b) が変化する直径 D は形状自体は複雑クレーターから変化しないものの、この直径 D が大きいほどリソスフェア(本論文では地殻のうち弾性的にふるまう部分のことを示す)が厚いことを示している(Schenk, 2002)(本論文では今後複雑クレーターのうち、指数(式1の b) の変化前を中型複雑クレーター、変化後を大型複雑クレーターと呼ぶことにする)。(5) 複雑クレーターと巨大盆地の境界の直径 D も層の境界を示唆しており、氷天体においては他の境界と比べてかなり鋭く指数(式1の b) が変化するところから、固体と液体の境界などのはっきりした変化であると考えられる(Schenk, 2002)。

これらの研究は冥王星を含むエッジワース-カイパーベルト天体においては接近観測が最近までなされておらず、地形データがなかったために行われていなかった。最近になって冥王星とカロンの標高データが得られたが、いずれも未だ深さと直径の関係は明示されていない。冥王星には様々な特徴があるため、次のような結果が期待される。(1) 今まで接近観測されてきた他の氷天体と比較すると太陽からかなり離れた位置にあるために衝突速度が小さい。(2) 表面重力が木星の氷衛星であるエウロパ・ガニメデ・カリストと、土星の氷衛星であるレア・ディオネ・イアペトゥスの中間程度であるために単純クレーターと複雑クレーターの境界にあたる直径も中間になると予想される。さらに将来観測されるカイパーベルト天体の参考とすることもできるかもしれない。本論文では、New Horizons によって得られたデータをもとに作成された標高データを用いることで冥王星のクレーターの深さと直径の関係を求め、他の天体との比較を行い、その差異や共通点について考察する。

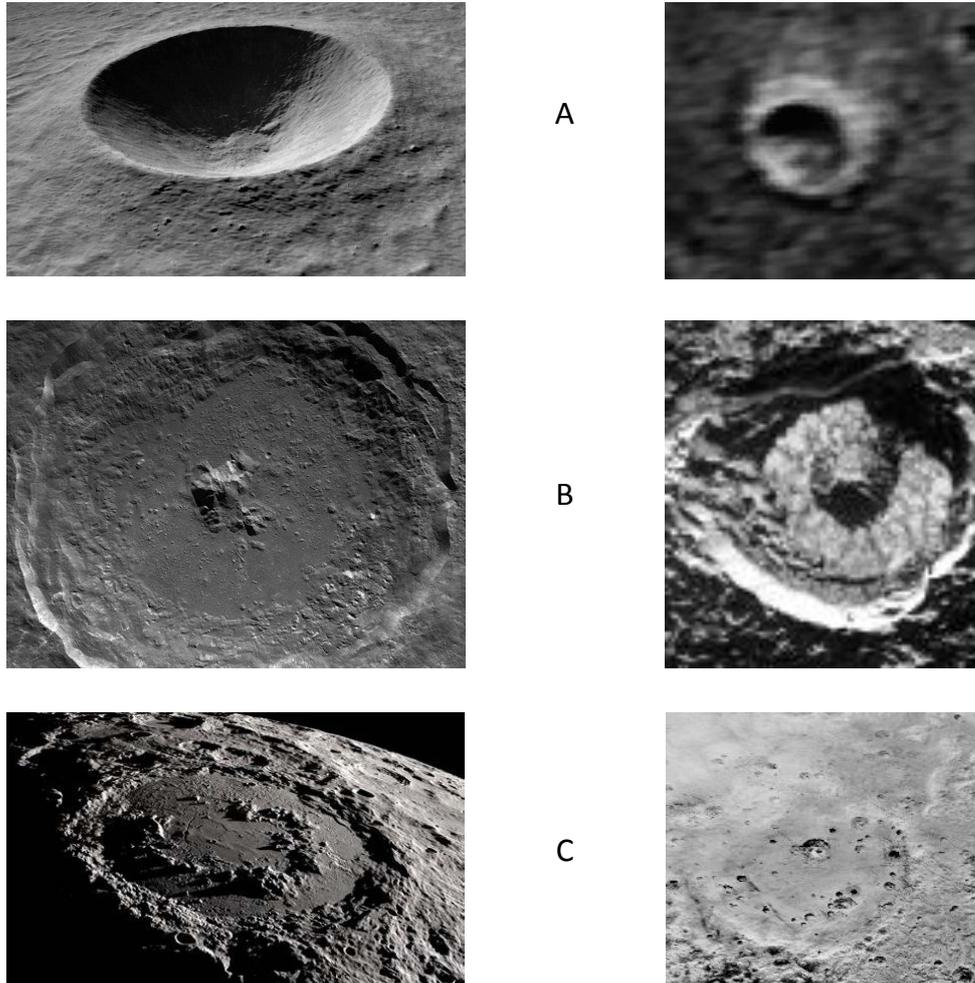


図1 各種衝突クレーターの例。いずれも左側は月、右側は冥王星に見られた衝突クレーターである。冥王星の衝突クレーターは見辛かったため、明度を調整している。(A) 単純クレーター。準ボウル型をしており、中央丘は見られない。月のものは直径 2.4 km の Linne (Credit: NASA/GSFC)、冥王星のものは直径 14.1 km の北緯 15.64°、東経 101.44°にあるクレーター。(B) 複雑クレーター。中心に中央丘が見られ、単純クレーターと比べて底部が平面に近い。月のものは直径 85.29 km の Tycho (Credit: NASA/Goddard/Arizona State University)、冥王星のものは直径 85.7 km の Elliot。(C) 巨大盆地。極端に浅く、準同心円状の複数のリムが見られる。月のものは直径 312 km の Schrodinger (Credit: NASA SVS)、冥王星のものは直径 229.2 km の Burney。冥王星のクレーターの直径及び位置は Robbins et al. (2017) から引用した。

2 クレーターの直径及び深さの測定方法

本研究においてクレーターの直径の深さの関係を求めるにあたって採用したデータや環境、クレーターの測定方法について本章に示す。

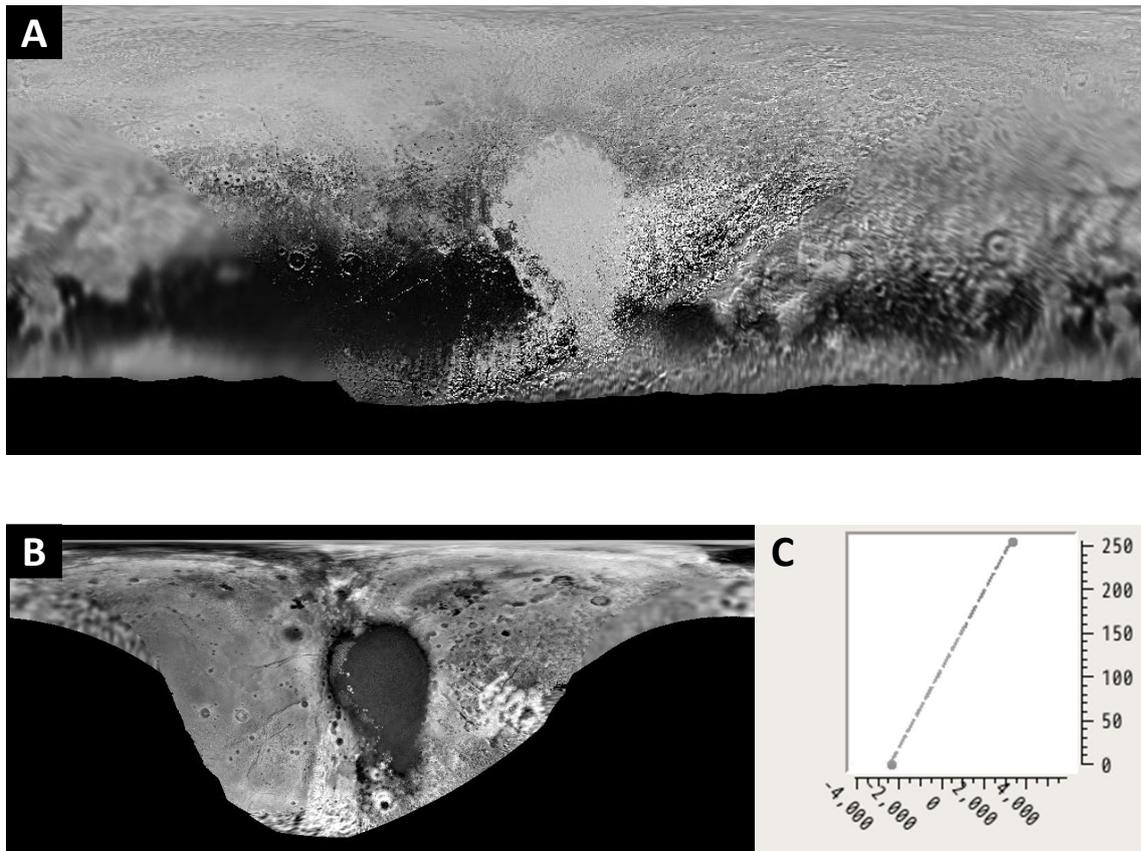


図 2 測定に使用した数値データを ISIS3 で画像化したもの。(A) モザイク画像である nh_pluto_mosaic.img (B) 標高データである/data/dtm/nh_pluto_dtm.img. 高いところを白く表示している。(C) 標高データ (B) の標高と明度の関係。横軸は標高 (m)、縦軸は明度 (0-255) を表す。

2.1 使用したデータ及びソフトウェア

NASA の PDS (The Planetary Data System) において公開されている New Horizons Pluto Encounter Geology and Geophysical Maps から、標高データである/data/dtm/nh_pluto_dtm.img を主に利用した。標高データのみではクレーターの目視が難しい場合などに画像データである/data/mosaic/nh_pluto_mosaic.img を補助的に利用した (図 2)。これらのデータファイルを USGS (アメリカ地質調査所: United States Geological Survey) が公開しているフリーソフトウェアである ISIS3 (Integrated Software for Imagers and Spectrometers v3, 詳細な利用方法は付録 B 参照のこと) を用いて画像化し、ISIS3 の機能である qview を用いて断面図及び断面の標高データの表を作成することで測定した (図 3)。クレーターの位置、信頼度 (衝突クレーターであることについての信頼度で、5 を最大として示される) は Robbins et al. (2017) に示されたものを利用している。本測定にあたって Robbins et al. (2017) において信頼度が最大であるものから合計 65 個のクレーターを抽出した。これはすべての大型複雑クレーター 8 個、先行研究 (e.g. White et al., 2013) から判断して近似式を作成するのに十分であると判断した中型複雑クレーター 52 個、解像度不足のため十分な個数とは言えないが測定できた単純クレーター 5 個の合計である。直径及び深さの計算や、各種グラフの作成については、Microsoft Office Excel 2013 を用いた。

2.2 クレーターの分類

深さ-直径関係の近似式を作成し、氷天体の内部構造について考察するにあたって、衝突クレーターを単純クレーター、複雑クレーター、巨大盆地に分類したのちに近似式を作成することが重要である (Schenk, 2002)。本研究では多環構造を持つものを巨大盆地とし、残りのクレーターのうち作成した断面図のうちひとつでも中央丘の見られるものを複雑クレーター、すべての断面図について中央丘が見られないものを単純クレーターとして分類した。各クレーターの例については図 1 に示した。

2.3 直径 (D) の測定

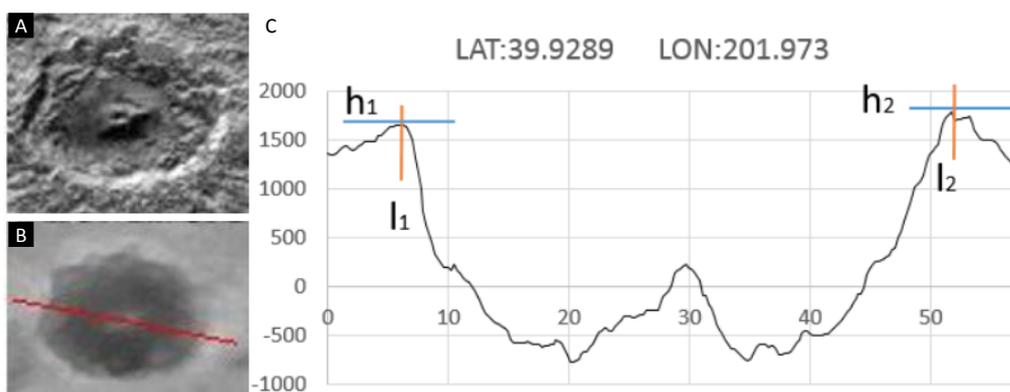


図 3 (A) 測定したクレーターの実際の画像。(B) 測定したクレーターの標高を可視化したもの。赤線は作成した断面を示す。(C) 実際に作成した断面図の例。赤線と青線の交点は左右リムの最高点を示す。縦軸の単位は m、横軸の単位は km。直径は $l_2 - l_1$ 、深さは $(h_1 + h_2)/2$ とクレーター全体の最底部との差とした。

本研究では、作成した断面図中の片方のリムの最も標高が高い点からその反対側に位置するリムの最も標高が高い点までの距離を 1 クレーターにつき複数の断面図について測定し、その平均値を直径と定義する (図 3)。これは Pike (1974) において、月のクレーターで提案された測定方法を応用したものである (Pike, 1974 では 1 断面のみの測定であったが、再現性を持たせるために複数測定した)。作成した断面図の数は、Robbins et al. (2017) 中の直径データを D_R として、 $30 \text{ km} \leq D_R$ で 6 つ、 $20 \text{ km} \leq D_R < 30 \text{ km}$ で 5 つ、 $D_R < 20 \text{ km}$ で 4 つとした。この作成数は、十分に大きいクレーターの測定においてそれ以上多くの断面図を作成しても平均値が 5% 以下しか変動しなかったために十分であると判断した。また、本研究とは直径の測定方法が異なっているため、モザイク画像から測定している Robbins et al. (2017) とは若干の誤差が生じている (図 4) が、深さと直径の比を作成するにあたっては無視できる程度である。参考として作成した断面図から測定され

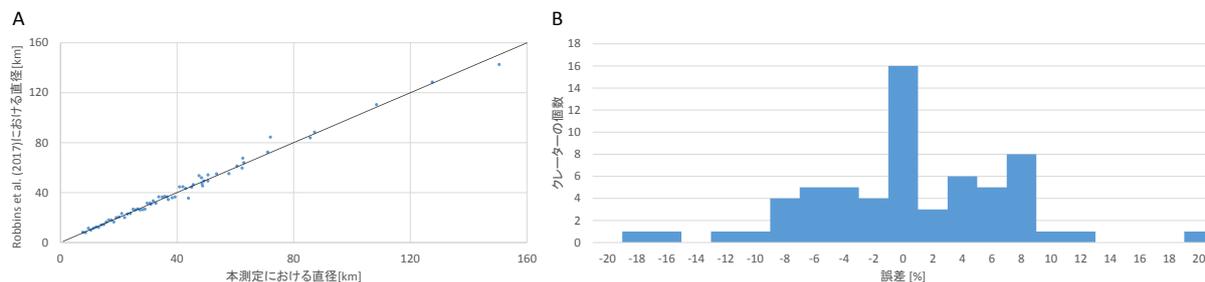


図4 本測定におけるクレーターの直径が Robbins et al. (2017) における直径とどれだけの誤差を持っているかを示した。(A) 直径と誤差の関係。横軸が本測定、縦軸が Robbins et al. (2017) による直径。いずれも単位は km。黒い点線は誤差 0 の場合を示している。(B) 誤差の大きさと個数の関係。横軸が誤差の大きさ (%)、縦軸がクレーターの個数。

る直径が明らかに 20% 以上の誤差をもっているようであると判断した場合はその断面図は除外して測定し直した。

2.4 深さ (d) の測定

本研究では、クレーターの断面図における 2 箇所のリムの標高の平均と、クレーター内で最も標高が低い点との差を 1 クレーターにつき数箇所測定し、その平均値を深さと定義する (図 3)。これも直径同様、Pike (1974) において月のクレーターで提案された測定方法を応用したものである。もっとも標高が低い点の測定に際して、クレーター内に別のクレーターがある場合やクレーターに断層が重なっている場合は、それらを除いた部分で最も低い点を測定した。深さの測定に際しても直径と同様、作成した断面図の数は Robbins et al. (2017) 中の直径データを D_R として、 $30 \text{ km} \leq D_R$ で 6 つ、 $20 \text{ km} \leq D_R < 30 \text{ km}$ で 5 つ、 $D_R < 20 \text{ km}$ で 4 つとした。

3 測定結果

3.1 深さ-直径比

図 5 に示す深さ-直径分布図が得られた。決して分散が小さいとは言えないが、直径が大きくなるごとに深さも増加し、クレーターの直径に応じた形状の変化にあわせて近似式の累乗の指数が小さくなっていくことが読み取れる。この分布図からクレーターの種別ごとに近似式を作成したときのそれぞれの直線の各パラメータを表 1 に示す。

表 1 各近似式の種々のパラメータ。境界は近似式同士の交点とした。

クレーターの種類	測定したクレーターの数	累乗の指数 (式 1 の b)	境界 [km]
単純	5	1.502	-
中型複雑	52	0.843	6.10
大型複雑	8	0.057	61.9

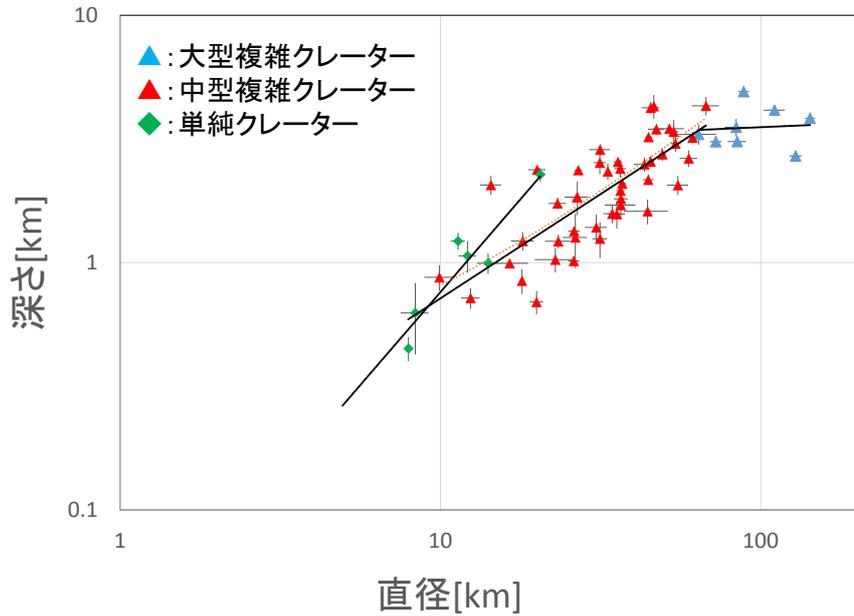


図5 本測定で得られた冥王星における衝突クレーターの深さと直径の関係。横軸が直径 (km)、縦軸が深さ (km)。単純クレーターをひし形、複雑クレーターを三角形で示した。複雑クレーターのうち大型複雑クレーターを青、中型複雑クレーターを赤で示した。エラーバーは各クレーターについて複数の断面を作成して計測したため、その標準偏差を示している。3種のクレーターそれぞれについて近似式を作成した。

3.2 他の天体との比較

得られた結果を先行研究によって得られている他の氷天体及び月と比較したものが表2である。単純クレーター及び中型複雑クレーターの累乗の指数は他の天体と比べてかなり大きく、中型複雑クレーターの近似式が他の氷天体における単純クレーターの近似式とほぼ一致するほどである。大型複雑クレーターや各境界については、ほぼ一致するようなことはないが、他の天体と大きくかけ離れてはいない。

4 考察

得られた冥王星における衝突クレーターの直径と深さの関係を示す近似式は、単純クレーターについて特に顕著に他の氷天体よりも大きい累乗の指数を示していた。Bray and Schenk (2014) で行われた衝突速度を変化させての衝突のモデリングは、速度が $10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ から $2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ に変化すると直径に対してより深い単純クレーターを作り出す (d/D が大きくなる) ことを示しており、カイパーベルト天体では太陽との距離が遠いために小天体の衝突速度が遅いことと調和的である。また、同論文において単純-複雑境界は表面地殻が十分に厚く、均質な場合にはその天体の表面重力のみに依存することが示されている。いくつかの天体の表面重力とこの境界の関係を図6に示す。これによると表面重力が大きいほどこの境界の直径は小さくなり、高解像度で観測された氷天体についてはこの関係はかなり小さい誤差で線形近似できる。しかし、冥王星の単純-複雑

表 2 得られた近似式の各パラメータを他の氷天体及び月と比較した。ガニメデは Schenk (2002)、レア、ディオオーネ、テテュス、イアペトゥスは White et al. (2017)、月は Pike (1980) 及び Williams and Zuber (1998) のものを引用した。各パラメータの関係性は、 $d = aD^b$ と表せる。

天体	クレーターの種類	測定したクレーターの数	累乗の指数 (式 1 の b)	境界 [km]
冥王星	単純	5	1.502	-
	中型複雑	52	0.843	6.10
	大型複雑	8	0.057	61.9
レア	単純	63	0.808	-
	複雑	48	0.492	4.5
	巨大盆地	5	0.039	96.0
イアペトゥス	単純	63	0.808	-
	複雑 (緩和されていない)	67	0.548	4.7
	複雑 (緩和されている)	2	0.019	79.2
ディオオーネ	単純	47	0.829	-
	複雑	38	0.529	16.8
テテュス	単純	55	0.832	-
	複雑	17	0.662	12.4
ガニメデ	単純	35	0.930	-
	中型複雑	40	0.422	1.9
	大型複雑	15	-0.026	24.8
月	単純	179	1.013	-
	複雑	47	0.313	11.7
	巨大盆地	0.149	2.056	48.5

境界はこの近似直線と比べて明らかに直径が大きい。地殻が氷天体よりも堅固な岩石天体である月ではこの直径は大きくなっていることなどから、冥王星の地殻が堅固である可能性が考えられる。しかし、冥王星に存在するメタンや窒素の氷が水氷と比べて明らかに剛性率の高い物質ではないため、なぜ剛性率が高いのかはわからない。ただし、他の氷天体についてもデータの解像度が不十分である場合この境界の直径が大きく判断されてしまう傾向が見られる (図 6) ほか、十分な数の単純クレーターの計測ができなかったため、正しい単純-複雑境界が予想の通りレアとガニメデの間になるという可能性もある。

中型複雑クレーターについても例示した他の氷天体と比べて累乗の指数がかなり大きい。Bray et al. (2014) のエウロパにおけるクレーター生成のモデリングによって複雑クレーターの深さと直径の関係に衝突の速度や埋積、掘削作用はほとんど影響しておらず、衝突が起こった当時の地殻における熱流量によって大きく左右されることが理解されている。このモデリングによると、エウロパの直径 20 km のクレーターについて、熱流量が $25 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ のとき深さ/直径はおよそ 0.4 であったが、熱流量を $75 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ に増加させると深さ/直径はおよそ 0.01 にまで低下する。冥王星においても同様のメカニズムがはたらくと仮定すると、中型複雑クレーターの近似式におけるこの大きな累乗の指数は衝突が起こった当時の時点で地殻の熱流量がかなり小さかったであろうことを示唆している。ただし、冥王星とエウロパでは天体の条件が異なるため、本測定で得た情報のみで具体的な熱流量を計算することはできないが、冥王星の静的強度と衝突時の脆弱化メカニズ

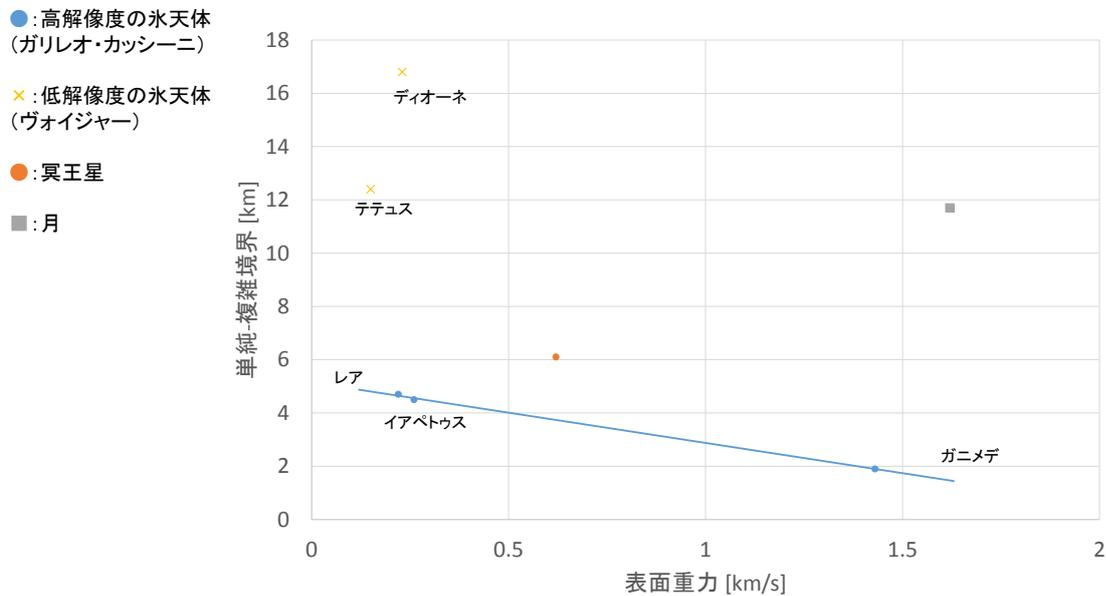


図 6 各天体の表面重力と単純-複雑境界の直径の関係。横軸が表面重力 (ms^{-2})、縦軸が境界の直径 (km)。ヴォイジャーによる低解像度のデータから測定された氷天体をバツ印、ガリレオ及びカッシーニによる高解像度のデータから測定された氷天体を丸、New Horizons のデータから測定した冥王星を赤丸、月を四角形で示した。高解像度の氷天体のデータから近似直線を作成した。

ムを得て Bray et al. (2014) に示される Hydrocode simulation を行うことで計算することができるだろう。

中型複雑クレーターから大型複雑クレーターへ推移する直径からはリソスフェアの厚さを推測できることがガリレオ衛星について提案されており、それはトランジエントクレーター (生成されてすぐ後の複雑クレーターの形状に変形する前のクレーターで、最終的にできあがる複雑クレーターよりも小さい) の 1-1.3 倍程度である (Schenk, 2002)。表面重力などの条件が異なるため、冥王星においてトランジエントクレーターの大きさを正確に計算することは難しいが、境界の直径がおおよそ 60 km であることから、 $60 \times 1.3 \approx 80\text{km}$ よりも薄いリソスフェアであると考えてもよいだろう。この数値は冥王星の長期熱進化モデルと調和的である (Robuchon and Nimmo, 2011; Kamata and Nimmo, 2014)。

深さと直径の関係の測定結果 (図 5) には十分な分散が見られたが、他の天体と比べると特に大きいわけではなく、分散の大きさは典型的ととらえても差し支えない程度のものであった。Moore et al. (2015) によると冥王星の地殻表面には窒素氷の有無などの地域差が大きいことが示されているため、分散が大きくなるという推測をしていたが、今回比較した各氷天体の地域差の度合にかかわらずクレーターの直径と深さの関係にはほとんど同等の分散が生まれている。したがって地殻表面の地域差はクレーターの直径と深さの関係性にはあまり関与しないと考えてよいだろう。

5 結論

本研究では、冥王星の標高データから衝突クレーターの断面図を作成し、その直径 (D) と深さ (d) の関係をクレーターの種類別に $d = aD^b$ の形で表せるよう近似式を作成した。この近似式を他のいくつかの氷天体と比較した結果、大きく以下の 4 点が考察できた。

- 恒星との距離から推定されていた通り、冥王星における小天体との衝突速度が遅いことが単純クレーターの直径と深さの関係を示す近似式の累乗の指数が大きいことから確認できた。
- 中型複雑クレーターにおいて深さ/直径が他の氷天体より明らかに大きいことから、冥王星に多くの小天体が衝突した時点の地殻の熱流量がエウロパなどと比べてかなり小さかったことが推測できた。ただし本研究から得られたデータのみでは具体的に数値を算出することは不可能であるが、冥王星の静的強度と衝突時の脆弱化メカニズムを得て Bray et al. (2014) に示される Hydrocode simulation を行うことで計算することができるだろう。
- 複雑クレーターにおける深さと直径の関係が変化する境界の直径が 60 km であったことから、冥王星におけるリソスフェアは 80 km 未満の厚さであることが計算できた。
- 比較した氷天体の地殻表面の地域差の極端さ度合にかかわらず、衝突クレーターの深さと直径の関係における分散はほとんど変わらないため、地殻表面の地域差はクレーターの直径と深さの関係性にはあまり関与していない。

付録 A. Moore et al. (2015) の逐語訳

New Horizons の目を通して見た冥王星及びカロンの地質学

Moore et al.

Abstract

NASA の New Horizons は冥王星及びカロンの複雑な地質学を明らかにした。接近観測がなされた冥王星の半球は、進行中の地質活動が広い盆地を中心としていたことを示した。この盆地は揮発性物質の氷の厚い層を含み、対流や移流を表しているように見える。そしてクレーター維持年代は 1000 万年以内と推定される。周囲の地形は活発な氷河の流動、浮力を持つ大きな氷塊の明白な移動や回転、そしてくぼみ形成を示す。この窪みは昇華浸食や崩壊によるものと予測される。さらに謎めいた特徴として、窪地の中心部の背の高い小丘がひよっとすると氷火山で、複雑な刺々しい質感の尾根であることが挙げられる。冥王星にはできてから 40 億年に達するクレーターに覆われている地形もあり、それは広い範囲で欠損しており、覆われている。そしておそらく氷河がそのほかの作用、あるいは両方によって浸食している。カロンは、現在は活動的でないが、大掛かりなテクトニクスと再浮上 (おそらく氷火山的作用によるもの) が 40 億年前付近に起こっている。冥王星とカロンのインパクトクレーターの数は、カイパーベルト (海王星の軌道より外側の帯域) に対して提案されたもっとも急な衝撃のサイズ-頻度分布と一致しない。私たちは NASA の New Horizons の 2015 年 7 月 14 日の接近通過時に集められた画像やその他のデータに基づく、冥王星とカロンにおける予備段階の地質調査結果を発表する。地質調査の核心を突く 2 つのカメラシステムは、広角マルチスペクトル可視カメラ (Multispectral Visible Imaging Camera : MVIC) と狭角モノクロ (可視光全色に反応) 遠距離偵察イメージャ (Long Range Reconnaissance Imager : LORRI) である。この論文では、太陽に照らされている表面のうち、冥王星では経度 180°、カロンでは経度 0°を中心とする、1km/pixel 以上の解像度を持つ領域に重点をおく。すべての地形の測定はステレオ画像測量技術を用いて行い、暫定的な写真傾斜測定や影や周縁の測量を利用して補った。頭字語リストは追加文書として用意した。本論文内のすべての地形的な特徴名は非公式のものであり、冥王星・カロンにおける命名された特徴的な地形の位置は図 S1,S2 それぞれについて示す。

また、各地質領域の位置は図 S3 に示す。

冥王星

冥王星の表面は驚くべき景色の多様性を示す (図 1A)。大雑把に言えば、接近観測された半球 (encounter hemisphere : EH) はいくつかの特徴ある地域を含む：(i) EH の中心にある差し渡し約 1000km のクレーターが見られない平地、スプートニク平原 (Sputonik Planum : SP)；(ii) SP の周りを 3 方から取り巻くゴツゴツした山のような弧状の地域；(iii) 被覆と浸食を受けた高緯度の平地；(iv) SP の西側にある不均質な表面、様々な度合のクレーター密度や表面の組織を持つ平原、傾斜面 (浸食または地殻変動に起因)、谷 (地溝)、起伏に富むクレーター被覆域が点在。

スプートニク平原とその周り

この 870000km² 程度の、反射率の高い平地の楕円形の部分 (20° N、175° N を中心とする) は揮発性の氷のユニット (固体の窒素、一酸化炭素、メタン) のようであり (5)、その高さは周りの高地より 3-4km 低い。SP の中心や北部の地域では、はっきり見分けられる細胞状のパターンを示している (5)。これは平原を横切るにつれて外見が変化する。明るい中心の一部 (図 S4A) では、その細胞が 100m 以内の浅い谷 (5) によって分けられている；少なくともいくつかの細胞の中心は、少なくともいくつかの細胞の中心はその縁に沿って 50m 程度持ち上がっているが、見たところほとんど起伏がないものもある。SP の南の地域や西の端は細胞状の地形を示さないが、代わりに特徴のない平地と高密度の窪みを示す。窪み自身は差し渡し数 km に達する (図 S4D)。SP 内で見られる様々な地形の形態の詳細は、補足資料に記述している。

390m/pixel スケールの連続マッピングの範囲では、SP 上に衝突クレーターが確認されなかった。(5) の議論によると、SP のクレーター保持年代はとても短く (1000 万年以下)、これについては補足資料で議論する。そのような地質学のごく最近の表面更新と地形緩和の一方、または両方は N₂ を中心とする氷 (6,7) の弱いレオロジー (物質の変形や流動特性) やそのような氷の厚い層におけるもしかすると活動的な氷 (補足資料) の固相対流の表現としての細胞の解釈と一致する。

途切れ途切れの山の連なりは、幅 40km、高さ 5km に及ぶ目立たない角ばった見たところ向きがばらばらの個々の塊から構成されており、SP の西端に沿って何百 km にもわたって広がっている。それらのうち南にあるものは取り囲む物質によって隔てられているものが多いが、北部にあるものは、特に最北の al-Idrisi Montes (AIM, 図 2) はわずかにしか分離していない。AIM では塊がぎっしり詰まっており、多くの塊の上部の表面が平ら、もしくは緩やかに傾いていて、周りの高地のいくつかと似た直線的で切られたような肌理を示している。これは過去にあった表面が分かれたことを示唆している。

北部のブロック間の物質は独特の赤みがかかった色 (図 2A) をしており、多くのより小さな塊を含んでいる。また、SP に対してやや標高が高い；似た地域が南へ向かっていくつかの山を囲んでいる。AIM 地域は、細かいブロック間の物質と小さな塊が広範囲に敷き詰められた二つの窪地 (図 2c) と、SP と似た肌理と色を持つ小さな平原 (図 2e) で占められているもうひとつの窪地を含む。内側を向いた段丘がこの窪地 (図 2d) を囲んでおり、平原の物質が、より高い水準にあったことを示している。

山のブロックの標高の高さと急な斜面が氷を基にした構造を必要とすることについては (5) で議論されていた；これは今回まさに分光することで確認できた (8)。エウロパのカオス地形の角ばったブロックのように、冥王星の山のブロックは、破断によって分離し、移送され、回転させられた先存の氷の地殻の欠片のように見える。SP の端にある混沌としたブロック状の山々の地域 (図 S3) がここにしか存在しないことは、SP は明ら

かに低粘性のかなりの厚さの氷を含んでおり、これらの氷が冥王星の地殻を破断する役割を果たしていることはもっともらしい。H₂O 氷は N₂ や CO の氷に関しては浮力を持っているが、CH₄ には持っておらず、固体の N₂ と CO のいずれか、もしくは両方に取り囲まれている、または埋もれている H₂O 氷の塊はアイススタシ的に持ち上がっていく傾向にある。小さなブロックは本質的には氷山として対流や移流の動きによって運ばれうる。そして大きなブロックは浸食され、移送・回転を受ける可能性がある。SP の西の端を縁取る最も大きな山々の起伏 (2-3km) は、それらの基底が地盤に”接地している”ことをほのめかす (補足資料) が、もし固体の N₂ /CO 氷が十分に深ければ、小さな山々のうちいくつかは平原の内部に漂っているかもしれない。なぜ SP 内の山状の地域がその西の端に限られるのかはわからない。

SP 東部の穴、刃、平原、氷河

入り組んでいて、アルベドの高い 500km に及ぶ穴がいくつも空いた高地 (多孔高地) と滑らかな平原は低アルベドの刃が並んだような起伏を持つ地域 (刃状地域) と隣り合っていて、Tombaugh Regio(TR) の東部のほとんどを形作っている。

多孔高地：最も大きな特徴は穴の存在 (図 3A の a) であり、そのほとんどは差し渡し数キロメートル程度だが、25km に及ぶものもあり、局地的には長くて直線的な谷を形作るように横切っている。予備段階の地形図を基にすると、穴は平均 1km 程度の深さである。穴と穴を分ける尾根の頂上は SP 上 2-4km の起伏に富んだ高地を形作っている。高地の一部では、明瞭な北東から南西に向かう尾根と谷からなる地域が形作られ、その尾根から尾根の間は 5km 程度である。穴の側壁は典型的には 30°に至る傾斜になっている。これは硬い物質が薄くて明るい表面の層の基礎になっていることを示唆している。

刃状地域：穴の空いた高地は、北東方向へ向かって、いくつかのかなりの広さ (100km 程度) の Tartarus Dorsa(TD) と名付けられた丘陵に推移する。TD の側面と頂上は、だいたい南北方向に向いている大量に並んだ荒削りの刃状の尾根で覆われている (図 3B)。個々の尾根は、典型的には数百 m の高さであり、頂上同士の間は 5-10km ほど空いていて、20°程度の斜面の V 字谷で隔てられている。多くの尾根は平面図では Y 字型の合流点を作るように鋭い角度で合流している。平原の TD の西側面に沿って、たくさんの三角形から長方形の面が東方向に向かってのぼるように伸びている。

滑らかな平原：最大 50km にわたってほぼ水平に広がる滑らかな平原は、SP の隣の段丘だけでなく、多孔高地の比較的低い位置にも存在している (図 3A の b)。それらは 300m/pixel の解像度では概して滑らかであるが、局地的にキロメートルスケールの丘の集合が平原から突き出している。これらはおそらく多孔地域の物質の欠片が、突き出たり埋まったものである。水平な平原の滑らかさは、それらがやわらかい氷で形成されていることを示しており、おそらく SP と組成が似通っている。

氷河：SP と穴の空いた高地との境界に沿ういくつかの場所では、滑らかな物質が幅 1.5-6km の谷の底に沿って SP につながっている。(図 3A の b)。これらの系の最南端における高位相角イメージングは、SP に向かって伸びている谷の中に顕著な内部流線を明らかにしており、谷内部の氷は 50km 以上にわたって 2°から 3°傾いている (補足資料)。このパターンは氷河のような平原の物質の SP に向かう流れを示唆しており、もしかすると地球上の氷床の端における氷の流れと類似しているかもしれない。今の時点では、流れる氷が谷を形成したのかどうかは明らかにされていない。

これらの地形の起源：穴の空いた高地も刃状の地域もかつては連続した堆積物だったものが昇華 (削り取られた地球上の氷雪地域と似た特徴を形作る-ペニテンテスやサンカップ-しかしそれらよりとても大きい) やもしかすると深部の融解による基盤浸食や崩壊を経て削り取られたものである可能性がある。追加の可能性として、カリストの尖峰の形成に似た、尾根の頂上への優先的な堆積による尾根の成長がある (3)。谷と尾根の両

地域について、向きが選択的であることはその起源が日照と大気循環のいずれか、あるいは両方の影響を受けたことを示唆している。刃状地域について言えば、もしこの地域を作る物質が、隆起や浸食によって露出したならば、それはかつて埋まっていた層であるかもしれない。多孔高地の高いアルベドは SP (SP 南部に広く分布している多数の穴は N_2 の氷が昇華することでできたかもしれない；補足資料を見よ) から昇華して運ばれてきた揮発性物質の凝縮したものを示唆する；これらの揮発性物質が堆積して滑らかな平原を作った可能性がある。

高地：洗濯板地域と細切れ地域

SP の北部と北西部に存在する高地は様々な地形を内包している。その中には平行な尾根と谷の広がり (今後洗濯板地域と呼ぶ)、網状に連なる谷の中に一部に細かく深く裂けた地域 (今後細切れ地域と呼ぶ) が組織されている。格子模様の地域と浸食されたマントルについては補足資料で議論する。

洗濯板地域：この地域の多くの広がりには平行な尾根と溝で特徴づけられており、頂上間の幅はおおよそ 1km である (図 4A)。この尾根は一貫して北東から南西に伸びていて、クレーター内部の底に見つかったものでさえ同様である。洗濯板地域表面のアルベドは近傍の溝のない地域と一致しており、溝がある場所でさえ、その下の層が見えたままであるという特色を持つ。これらの観測は、この地域の洗濯板のような特徴は表面のみの変形であり、下の層の浸食か、あるいは薄い局所的な堆積物の一部であることを示唆している。この溝は尾根やクレーター、細切れ地域のようなより激しい起伏の地形学的特徴を上書きする形でできたものである。時折直径 1-2km 程度のクレーターが洗濯板地域と重なっている。細切れ地域：谷によって細切れにされた地域は EH にありふれている。縦溝彫り、樹枝状組織、台地、高山、山脈もこれに含まれる (図 4B)。これらのうち 2 つのタイプは広域に存在している。そのうちひとつは、縦溝彫り地域は深さおよそ 2km、長さ 15-20km にわたって、谷が広い丘を浸食することで構成されている。これらの谷や縦溝は 3-4km 間隔で整然と並んでおり、最大で 20° の傾斜で下り坂になっている。いくつかのクレーターの内壁は似たような縦溝を持っている。これらの谷は窪地やクレーターの底で堆積の証拠もなく急に途切れている。同様に、並んだ谷の樹枝状組織も別のタイプの細切れ地域である。この組織は概して広い窪地で途切れている。細切れ地域は高地にあるすべての大き目のクレーターよりも後にでき、それらの地形を変化させたようである。その他の数少ない細切れの形態は補足資料に記されている。

これらの地形の由来：洗濯板地域の典型的なスケールや溝の向きを規定するメカニズムは不明である。細切れ地域では、縦溝地域と谷の樹枝状組織は共に移流プロセスの結果のようである。窒素に富んだ氷の流れである可能性が最も高そうであり、基部の溶解もそれに付随している可能性がある (補足資料)。谷組織の形のばらつきは、局地的な地形の状態、基盤の性質、日射の緯度変化、そして N_2 氷の深さや保持年代への応答になりそうである。

クトゥルフ地域 (Cthulhu Regio : CR)

CR は広くて暗いエリアで、大体 15° N から 20° S を帯状に覆っていて、160° E で TR に隣接して西方向へ 20° E までほぼ惑星の半周にわたって伸びている (図 S1)。CR の東部は明確な地形の領域ではないが、暗く覆われている地域である。これは横たわる地形を保存するのに十分なくらい薄く、樹枝状の谷、クレーター、地溝 (長くて狭い谷)、後退崖を含むいくつかの地形がその上に形成されている。この暗い表面は大気のソリンの堆積の結果のようである (8)。CR は色・アルベドと地形の間際立った相関関係を含む：明るい物質はいくつかの地域における標高が高い地形やその他の地域における北向きの斜面と関連している。これは部分的には暗い地域での物質の日射に依存した明るい物質の堆積の結果である可能性がある。その他の西部

の低緯度地域については補足資料で議論する。

中央に窪みのある大きな丘

Norgay Montes(図 S1C、S3)の南西には2つのほぼ円形の広い丘がある(図5)。北にある方の丘(Wright Mons ; WM)は3-4kmの高さで、直径約150kmである。その頂上には中心に窪みがあり、これは少なくとも5kmの深さがあつて、縁の部分は同心円状の構造を持っている。この丘の表面は小丘に富み、ずんぐりした起伏をしており、ほんのわずかながらクレーターがある。似ているが幾分か大きいもう一方(Piccard Mons ; PM)は300km南の薄明りの下でのステレオ画像に見られる。これは高さ6km、直径225kmに及んでいる。これらの山体や付随する構造の大まかな形は、構造的のものであるように見える。これらの起源には氷火山が伴っている可能性がある(3)が、含まれている物質はかなりN₂氷よりも丈夫である。

テクトニクス

冥王星のEHは、いくつもの数100kmの長さや数kmの高さに及ぶ整列した、しばしば弓状を呈する谷や傾斜面の帯の存在を示しており、しばしば先存する地形を横切っていることや、互いに枝分かれしている様子が観測されている(図S9と補足資料)。私たちはこれらの地形を、様々な浸食段階にある伸張性の割れ目(地溝と正断層)であると解釈する。注目すべきは3-4kmの深さの単一のV字谷であるVirgil Fossa(VF、図9C)で、少なくとも200kmにわたって壊れていない区画と、南斜面の非対称な上向き1-2kmの変位を持っている。谷の東端に向かってエリオットクレーターを横切っており、西部は小さくて準平行な割れ目と繋がっている。この急斜面は特異的な赤い色を持ち、水の氷を伴っている(8)。その他の伸張性の割れ目は図S9に示す。

圧縮性の地形は、存在していたとしてもあまり明瞭でない。1つの候補であるTD(図S9F、3B)はいくつかの細長い200km程度の広さの隆起で構成されていて、少なくとも1つの長くて顕著な伸張性の地形(Sleipnir Fossa)がその上を横切っている。TDは圧縮による褶曲が原因になりうるかもしれないが、岩塩を核とした背斜やアーチにも類似している可能性がある。これは密度の低い核物質がアーチ形成に寄与するものである。

断層の配向や劣化状態が異なることは、複数の変形の経験や長期の地殻変動を示唆している。私たちはこれらの起源についてここでは詳しく述べないが、赤道の正断層は自転が遅くなることによる応力のみでは生じないことを記しておく(9)。冥王星の個々の断層がとても長いこと、それらの傾斜が急であること(ステレオによると20°より大きい)、分光的な証拠(8)、そして局所的な側面の隆起が全くないことは、厚い氷のリソスフェアを強く示唆している(薄い氷のリソスフェアや、冥王星の揮発性の氷によって作られたものとは相容れない)。

衝突クレーター

冥王星は様々な大きさのクレーターや地形を示す(図S11,S12;補足資料)。全球的に認識できるクレーターの直径は0.5から250kmほどであるが、SPの下層にあるかもしれない太古の窪地については含まない。クレーターの密度は冥王星において、とてもクレーターの多いCRの一部から衝突クレーターの確認できないSPまで大きく変化する。クレーターのサイズ-頻度分布(size-frequency distribution ; SFD)を図S13Aに示す。ここから、私たちは冥王星の表面の歴史は後期重爆撃期(Late Heavy Bombardment ; LHB)の終わり付近か、カイパーベルトの文脈では、外部太陽系の再構成時期(おそらく40億年前;たとえば(10))までさかのぼると結論する。EHでは、CRの東部のみが飽和クレーター密度(大きなクレーターについて、図S13Bと比較)に達しており、これは現在よりも遥かにクレーターが多かったであろうLHBそのものの時代から生

き残った地形であると期待される。対照的に、TD、TR 東部、水氷の山脈、小丘 (ほんの少しくレーターがある)、そして特に SP (クレーターが確認されていない) はすべてとても若い地形である (図 S13C)。SP に少なくとも直径 2km を超えるクレーターは確認されておらず、前もって報告されたもの (5) とくらべてサイズが厳しく制限され、モデルクレーター保持年代は 1000 万年を超えていないか、さらに短い可能性もある (11) (補足資料)。

地質進化

複雑で大部分は目新しいものの、冥王星の地形は起源と歴史に多くのそれらの手がかりを示している。内部に SP が存在する盆地は内部の堆積物が若いにも関わらず大昔からある。その持ち上げられた山岳地帯の半円形の縁はおそらくそれが衝突盆地を著しく変形させたであろうことを示唆している。この山岳地帯にある、より大きな視認できるクレーターはおそらく SP の盆地より後にできたものである。西部を除いて、SP を取り囲む高地は、かなりの厚さで様々な表面様式の被覆物によって覆われており (8)、それらの一部ははぎ取られている。高地の変形の主要な手段には、おそらく昇華、霜の堆積、氷河による浸食が含まれている。私たちは 2 つの両極端の筋書を予想する: 1 つは、かつての厚い氷の層 (多くは N2) が SP を取り囲む高地を覆ったが、次第にそこから宇宙空間へ失われていったというものだ。氷が薄くなるにつれて、氷河の氷は細切れ地域を侵食し、SP の東に向かい、SP の内部に再び流れ込みながら後退し、残骸を滑らかな底の窪地に残した。もう 1 つは、氷が SP とその周辺とを循環することで、時折氷河や細切れ地域を形成した可能性である。この場合、揮発性の氷が宇宙空間に失われる必要はない (12)。表層環境が獲得できる窒素やその他の揮発性物質は、冥王星内部の供給源によって時折補充されているかもしれない (13)。CR やその他の局所地域の暗い被覆物は現在の地形に沿っており、浸食による地形の形成より後にできたか、活発に作り替えられていることを示唆している。SP の氷に型押しされた細胞状の組織はクレーターがないことからわかるように相対的に新しい特徴であり、SP 上の 100 メートルスケールの穴や尾根と共に冥王星に広がる最も若い地形を構成している。

伸張性の地形が相対的に若いことは、予測されるより若い時代の内部海のおそらく部分的な凍結 (14) が関連した最近の伸張性応力と整合的である。ただし、その他の説明もあり得るものである。VF の露出した側壁に沿うスペクトル解析で明らかになった水氷の存在や、SP を縁取る混沌とした険しい山々を含む多くの証拠が、冷たく強固な水氷を主とした地殻を示唆している。

カロン

カロンの EH (図 1B) は EH の東から西にわたる尾根や峡谷の集合で隔てられたに二つの州に大きく分けることができる。この地質構造の帯の北部は起伏が多く、クレーターが存在する地域である; 南部は比較的滑らかであるが、地質学的には複雑である。北半球は暗く、赤い Mordor Macula (MM) に覆われている。20km を超える起伏が側面の突起やステレオ地形図に見られ、これは強度のある冷たい水氷の存在や、カロンの弱い表面重力 (0.29ms^{-2} (15)) の証拠である。

クレーターのある北部の地域

カロンの北部の地域は、例外的に丈夫で、多角形で深さ 3-6km の谷組織を含んでおり、おそらく、 270° E 近くの MM のふちのすぐ南にある約 10km の深さの不規則な窪地と関連している (図 S14)。 58° N、 38° E に位置する直径およそ 230km、深さおよそ 6km の目立ったクレーター (Dorothy Gale) (図 S2) は MM のはっきりしたふちを跨いでいる (5)。カロンの北部の地域におけるこの累積的なクレーター分布は図 S14A に

示す。サイズが大きく、信頼性を持って数えられるクレーターの密度は、地表の年齢がおよそ 40 億年よりも高いことをほのめかしている (補足資料)。

MM の暗い堆積物全体は他のどの特徴的な地域の区画や地質学的なユニットとも関係していない。弧状で高さおよそ 5km の主要な尾根 (図 S14 の "a") は、主要なアルベドと色の区画 (図 S14 と図 1B を比較せよ) と一致しており、衝突盆地の外縁部や南部でより鮮明に見られる地殻変動の延長である可能性がある。その他の衝突を起源とする形態 (たとえば明確な放出物による被覆物 (Ejecta blanket) や二次クレーター) は見受けられない。

尾根、トラフ、谷

カロンの EH を両分する帯状構造は準平行な崖、尾根、広さの変化する谷を含んでいるが、広さ 200km にわたる (図 1B)。特筆すべきは 2 つの裂溝帯である：(i) 50km 以上の広さとおよそ 5km の深さを持ち、明白な rift-flank uplift を示す Serenity Chasma と、(ii) 断層で境されているように見える、深さおよそ 7km に達する Mandjet Chasma である (図 S2)。これらの裂溝帯はいくつかの中サイズの氷衛星にある伸張性の割れ目に似ている。我々は、この類似性を実質的に整理したカロンの氷地殻の伸張を代表する正断層と地溝の構造的な表現であると解釈する。裂溝帯を重ねたいくつもの大きなクレーターはこの伸張が地質学的に古いことを示す (以下と図 S15 を見よ)。この構造に水平方向と垂直方向のスケールを与えると、急傾斜の正断層は数 10km の深さまで伸びているようである。これらは 1% 程度のオーダーの全球的な伸張性地域を代表している。

南部の平原

滑らかなカロンの観測半球の南半分は明らかに Vulcan Planum (VP) と名付けられた浅い起伏と明らかに連続した表面を形作っている。北向きのはね上がった傾斜の近くで、平原はそれに沿って約 1km までゆるやかな下り坂になっている。高解像度で観察された平原の一部は、狭い間隔の複数の直線的な肌理の独特な溝を示す (図 6B)。南部の平原の形成の可能性の一つは、ガニメデやエンケラドスといった氷衛星に見られるような地殻の表面更新である (3)。平原より後に形成された深く、リル状の狭い谷や溝の明確な地形の集合も同様に形成されている。深くはあるものの、これらの谷は数多くの衝突クレーターと重なっている。したがって、これらの谷は比較的古い地形である。これらの谷の雁行状の地形と、北に向かう裂溝帯に対しておよそ平行であることは、地殻の起源や構造規制を示唆している。

複数の小さな丘 (直径 2-3 km) がある地域、比較的クレーター密度が低い地域、そして少なくとも一つのパンケーキ状のユニットが氷火山のはたらきによる表面更新と一致する (図 6 B) (16)。”堀”に囲まれた山々 (Kubrik Montes : KM と Clarke Montes : CM ; 図 S2 と図 6A のラベル b を見よ) を (5) に記す。この山々は堀の底から測って 3-4 km に及ぶ高さを持ち、堀は周りの平原より 1-2 km 低い。CM の堀はより起伏のある地域 (図 6B のラベル j) を晒しているようである。それは滑らかな平原で周囲を囲まれており、縁のうち 2 つは葉状である。この堀はおそらく山の重さとカロンのリソスフェアのたわみによるものである。丸い形、もしくは葉状の縁の近くに追加の窪みが 2 つある (図 6A のラベル a) ; したがって別の可能性として、堀と窪みの両方が、天王星の衛星であるアリエルとミランダに提案されていると同様、氷火山性の粘性を持つ物質の流動や、この物質の不完全な囲いの表現である可能性がある (3,17)。

南部の平原における衝突クレーターの SFD は、直径の大きいもの (50 km 以上、図 S15A) については北部を下回っているが、平原のモデル年代はおよそ 4 Gy を示している (補足資料) ため、それよりも北部の地域が古い地形であることや、VP に先立って形作られた (VP によって上書きされた) 裂溝帯に近いが、それよりも

古い年代の地形であることを暗示している。しかしながら、VP 上の限定的な地域はクレーターに乏しく (図 6B)、VP の表面更新が長い時間スケールで実行された可能性を暗示している。VP のクレーター SFD は冥王星系におけるカイパーベルトの衝突クレーター生成関数の最も確からしい表現であるようでもある (5)。また、カイパーベルトにある天体の通常の数-サイズ分布を除外している (補足資料)。

地質進化

カロンの表面は衝突、地殻の変動や表面更新、そして大雑把に言えば氷衛星の地質進化の容認されている状態と一致している (18,19)。このカロンは地質学的に独特ではあるが、変形のための熱源を要しているようである。そうでなければ、表面はかなりの数のクレーターに覆われているであろう。もしカロンの最も若い表面でさえおよそ 4 Gy の年齢であるとするならば、この活動は early warmer epoch までさかのぼる。地殻の記録は全球的な伸張との整合性があり、滑らかな平原は衛星内部からの揮発性の氷が湧き出したことと整合性がある。地殻の特徴の空間分布は、潮汐や回転を抑制する応力から期待できる地形と容易には一致しない (全くと予測される) (3)。カロンは太古にかつて内部海を持っていた可能性があり、それがのちに凍ることで全球的に存在する伸張性の特徴を生成し、もしかすると氷火山のマグマの噴火を許したかもしれないと推測できる (20)。

異なる特徴を持つ連惑星

冥王星とカロンは密度や推測されるバルク組成が似通っているにもかかわらず、表面の様子がかなり違っている (5)。MM の特例の可能性から、冥王星で見られる揮発性物質の移送によるダイナミックな地形の再形成はカロンでは見受けられない。その代わりに、カロンの表面は水氷の痕跡が不自然に満ちている (8)。これがカロンの表面付近の揮発性の氷が昇華し、重力が小さいために全体的に宇宙空間に失われたためである (21) のか、より根本的な連星の起源やその後の内部進化 (22) が重大であるのかは依然としてわかっていない。

我々が冥王星に見た多くのものは表面大気の相互作用と、内部からの揮発性氷の湧き出しの結果になりうる。他の地質学的な活動は内部加熱が関係しているか、過去に関係していた。SP 内での揮発性氷の対流や移流は最近の放射性元素の崩壊による熱損失が原動力である可能性がある (補足資料)。しかしながら、SP の西端にある主要な山々や、奇妙な高さ数キロメートルに及ぶ南向きの丘陵地域は両方とも地質学的に若く、おそらく相対的に強度の高い水氷を主とした物質で構成されている。これらの起源や、太陽系の歴史であまりに遅い時期に何がこの構造を動かしたのかは、依然としてわからない。より確かなことは主要なカイパーベルト天体 3 つ—冥王星、カロン、トリトン—はすべて (過去にせよ最近にせよ) 宇宙船によって踏破された。それらは似ているとはとても言い難く、将来的に行われるカイパーベルト領域の探査に多様性を見込みがあることの証明となっている。

付録 B. ISIS3 の利用方法

ISIS3 (正式名称: Integrated Software for Imagers and Spectrometers v3) は、アメリカ地質調査所 (United States Geological Survey : USGS) が無料で公開している Astrogeology に非常に有用な Linux 上で利用できるソフトウェアである。本ソフトウェアでは NASA などで公開されている PDS ファイルを可視化し、測定・画像編集などさまざまな操作を行うことができる。

本研究での利用環境

Windows 7 を搭載したコンピュータ上で Linux 仮想マシンを作成することで ISIS3 を駆動した。

使用したコンピュータ

OS : Windows 7 Professional

プロセッサ : Intel Core i7-3520M CPU @ 2.90GH z

メモリ : 8.00GB

システムの種類 : 64 ビット オペレーションシステム

作成した仮想マシン

仮想マシンを作成したソフトウェア : VMware Workstation 15

OS : Debian 9.x 64 ビット

デスクトップ環境 : MATE

使用シェル : bash

インストール

USGS isis isisinstalling(<https://isis.astrogeology.usgs.gov/documents/InstallGuide/index.html>) にてインストールが可能。Install script によるインストールが成功しなかったため、ページ下部にある Manual Installation の手順でインストールを行った。今回は自分のホームディレクトリ内で以下の順でコマンドを実行した。1 は isis3 本体、2 は isis3 のベースデータを入手するコマンドとなっている。

1. `$rsync -avz --delete --partial isisdist.astrogeology.usgs.gov::x86-64_linux_DEBIAN/isis .`
2. `$rsync -avz --delete --partial isisdist.astrogeology.usgs.gov::isis3data/data/base data/`

本手順をもってインストールが完了となる。

起動

本手順では使用するユーザー名を「hoge」として記述する。サイト内では isis3Startup.sh をすぐに起動しているが、このシェルスクリプト内では参照するディレクトリがデフォルト状態になっているため、適宜自分のワークスペースに書き換えてから実行する。

```
$. /home/hoge/isis/scripts/isis3Startup.sh
```

ここまでの作業で ISIS3 の各種パッケージの利用が可能になる。isis3Startup.sh はログインのたびに実行し直す必要があるため、ISIS3 を頻繁に使用する場合は、.bashrc に「. /home/hoge/isis/scripts/isis3Startup.sh」と追記してしまうことをおすすめする。isis3Startup.sh 自体はとても軽いため、他の作業に支障を及ぼすことは基本的にないと考えていいだろう。

本研究で利用したパッケージ

ISIS3 は非常に多機能であるため、本研究で使用した機能はほんの一部であるが、ここで紹介する。
\$PDS2isis FROM=[元ファイル名.lbl] TO=[出力先ファイル名.cub]

PDS で公開されている pds 形式や img 形式のファイルを isis3 で利用できる cub ファイルに変更する。img 形式の場合は、img ファイル本体ではなく付随する lbl ファイルを入力することに留意する。

\$qview [ファイル名.cub]

cub ファイルを可視化して閲覧する。画像編集、測定など様々な機能を GUI で実行できる。元ファイルの lbl ファイルが詳細であった場合は、一部機能において pixel ではなく latitude や longitude、m や km での表示も可能となる。

謝辞

本研究を進めるに当たり、指導教官の倉本圭教授、鎌田俊一特任助教からは多大な助言を賜りました。厚く感謝を申し上げます。また多くのアドバイスをくださった北海道大学理学部惑星宇宙グループの皆さまにも感謝の意を表します。

参考文献

- Bray, V.J. et al. (2014) Hydrocode simulation of Ganymede and Europa cratering trends –how thick is Europa’s crust? *Icarus* 231, 394–406.
- Bray, V.J. and Schenk, P.M. (2014) Pristine impact crater morphology on Pluto – expectations for New Horizons. *Icarus* 246, 156–164.
- Dombard, A.J. and McKinnon, W.B. (2006) Elastoviscoplastic relaxation of impact crater topography with application to Ganymede and Callisto. *J. Geophys. Res.* 111, E01001.
- Dombard, A.J. et al. (2007) Relaxation and the formation of prominent central peaks in large craters on the icy satellites of Saturn. *Bull. Am. Astron. Soc.* 39, 429.
- Kamata, S. and Nimmo, F. (2014) Impact basin relaxation as a probe for the thermal history of Pluto, *J. Geophys. Res. Planets* 119, 2272–2289.
- Moore, J.M. et al. (2004) Large impact features on middle-sized icy satellites. *Icarus* 171, 421–443.
- Moore, J.M. et al. (2016) The geology of Pluto and Charon through the eyes of New Horizons. *Science* 351, 1284–1293.
- Pike, R.J. (1974) Depth/diameter relations of fresh lunar craters: revision from spacecraft data. *Geophys. Res Lett.* 1, 291–294.
- Pike, R.J. (1980) Control of crater morphology by gravity and target type: Mars, Earth, Moon. *Lunar Planet. Sci.* 11, 2159–2189.

- Robbins, S.J. et al. (2017) Craters of the Pluto-Charon system. *Icarus* 287, 187-206.
- Robuchon, G. and Nimmo, F. (2011) Thermal evolution of Pluto and implications for surface tectonics and a subsurface ocean. *Icarus* 216, 426-439.
- Schenk, P.M. (2002) Thickness constraints on the icy shells of the galilean satellites from a comparison of crater shapes. *nature* 417, 419-421.
- White, O.L. et al. (2013) Impact basin relaxation on Rhea and Iapetus and relation to past heat flow. *Icarus* 223, 699-709.
- White, O.L. et al. (2017) Impact crater relaxation on Dione and Tethys and relation to past heat flow. *Icarus* 288, 37-52.
- Williams, K.K. and Zuber, M.T. (1998) Measurement and analysis of lunar basin depths from clementine altimetry. *Icarus* 131, 107-122.