



筑波大学

朝永振一郎記念

第15回「科学の芽」賞 応募用紙

受付番号 : SJ0026

応募部門 : 中学生部門

応募区分 : 個人応募

題名 : 火口・カルデラと隕石クレーターはなぜ似ているのか? ~構造の分析と形成過程の共通点~

学校名 : 東京都 私立武蔵高等学校中学校

学年 : 3年生

代表者名 : 山田 優斗

※ 個人情報保護のため、入力された項目から抜粋して出力しています。

火口・カルデラと隕石クレーターはなぜ似ているのか？

～構造の分析と形成過程の共通点～

武蔵高等学校中学校

山田 優斗

【研究のきっかけ】

天体観測が趣味の私は時折、望遠鏡で月面を観察する。月面にクレーターが発見されてから、20世紀までその起源をめぐって火山噴火説と隕石衝突説とで論争が繰り広げられてきたという。現在では隕石の衝突でできたものが月面及び太陽系のほとんどのクレーターであるとされている。しかし、かつての人々にそう思わせてしまうほど、実際に、隕石孔と火山性の窪みは類似している。外からの衝撃で穴をあけるものと、内からの衝撃で穴をあけるものがどうしてこれほどそっくりなのか、それぞれの形成にどのような共通点があるのかを明らかにしてみたいと思い、これらの一連の研究を行った。

§1 <調査1>火山起源、隕石起源の凹地の分類

目的：火山起源の陥没地形には様々な種類があるので、研究対象を明確にする。

結果：

《火山起源》 国土地理院のホームページに掲載されている「火山の活動による地形」に地形項目として挙げられている凹地には、火口、爆裂火口、カルデラ、火砕流凹地がある。火口、爆裂火口、カルデラの概観は図表 1-1 の通りである。本研究では隕石クレーターとの比較を行うため、環状で円に近い形をしている通常の火口、爆裂火口、カルデラを対象とし、火砕流凹地は扱わない。

図表 1-1 火山起源の陥没地形（国土地理院 HP の記述を基に作成）

地形名	大きさ	概要	形状
火口	～2km	マグマの地表への噴出口	ほぼ円形の凹地
爆裂火口	～2km	火山体の一部が吹き飛ばされて生じた火口	馬蹄形、漏斗状
カルデラ	2km～数十 km	火山性の火口状凹地で、直径が 2km より大きい	火口と同様

《隕石起源》一方、隕石起源の陥没地形には以下の図表 1-2 の種類があった。

図表 1-2 隕石起源の陥没地形（『太陽・惑星系と地球』の記述を基に作成）

地形名	大きさ	概要	形状
お椀型クレーター (単純クレーター)	～20km	お椀型をした簡単な構造	お椀型
複雑クレーター	～30km～300km	底面や壁面の変形、崩壊があり、中心部に中央丘、中央リングを有する	複雑な構造を包含
衝突盆地	300km～	同心円状のリング構造（多重リング）を有す	中に多重リング

図表 1-1、1-2 より、地形の大きさは、火口や爆裂火口がお椀型クレーターに、カルデラはお椀型クレーター、複雑クレーターに匹敵するといえる。火口とカルデラはその形状も大きさも違うので、隕石孔との比較も分けて考察する必要があると考えられる。まず、いくつかの種類陥没地形の構造の共通点、相違点を探るためにその直径と深さの関係の観点から分析してみる。

§2 <調査2>日本の火口、カルデラの直径と深さの関係

目的：火山による凹地の直径、深さの関係を明らかにする。

方法：国土地理院ホームページの「日本の典型地形について」の中の「火山の活動による地形」に掲載されている地形項目のうち、「火口」「カルデラ」に挙げられている日本の地形について、その外縁部の高まりの頂点の東西、南北間の距離を「地理院地図（電子国土 Web）」のツールの計測から測る。この平均値を凹地の直径（d）として扱う。また、その外縁部の東西南北の計測値（He,Hw,Hs,Hn）のそれぞれの標高を測り、この平均を外縁部の標高(H)とし、凹地内の最も低いと認められる地点の標高を凹みの標高(L)とする。そして外縁部の標高から凹みの標高を引いたものを凹地の深さ(D)とする（図表 2-1）。直径 d と深さ D の関係を分析する。

$$H = (H_e + H_w + H_s + H_n) / 4 \quad D = H - L$$

注）* 東西、南北の計測線は、おおよそ円形地形の中心を通るようにひいて計測した。

* ただし、崩壊した地形などでどうしてもその円形に近い凹地の構造が認識できなかった場合は、計測しない。また、最も低い地点が大きい湖の中だった場合は、湖内の等深線からおおよその標高を読み取る。海中の場合は等深線が表示されないため、今回はその地形は計測しない。小

図表 2-1 地理院地図での計測方法

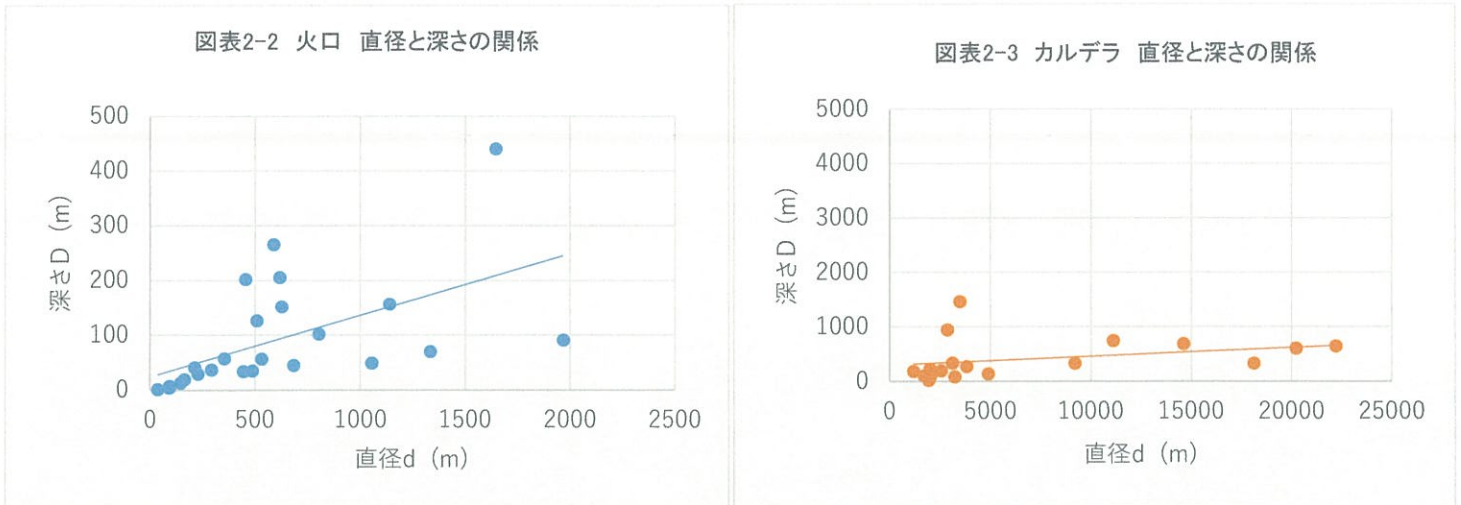


さい湖沼は、水深の情報を他資料などより得た。

* 爆裂火口は、環状ではない馬蹄形のものが多く、浸食によって崩壊しているものも多いため、今回は計測の対象としない。

結果：最終的に火口は 25 カ所、カルデラは 18 カ所を計測した。直径 d と深さ D の関係は、火口、カルデラそれぞれで、図表 2-2、2-3 のようになった。(計測値の詳細は巻末に掲載)

* 図表 2-2 と 2-3 で比較がしやすいようにグラフの縦軸と横軸の目盛りの比が一定になるようにしている。



考察：考慮しなければいけないこととして、下に挙げたことが考えられる。

- ・火口、カルデラとして掲載されているもののうち円形の凹地の構造が確認できたものに限り計測したため、火口やカルデラ形成後に崩壊せずに残っていたり、浸食をあまり受けていなかったりしたもののみを選択して調査している可能性がある。
- ・東西直径、南北直径、外縁部の各点の標高、凹みの標高(L)は、おおよその地点を筆者が選んで計測しているため、ずれが含まれていることが予想される。特に、凹みの標高は、確認できた範囲での計測値のため、実際の最深点とは異なっていることも考えられる。
- ・凹みの標高は、火口やカルデラ内部が深く浸食されていたり、その中により深い火口を内包していたりしても、なるべくその中の最深点を計測するようにしたため、その凹地の形成過程によって生じた元の深さよりも大きい値が出ている可能性がある。これらのことを念頭に置いたうえで、図表 2-2 と 2-3 より、火口もカルデラも直径が大きくなるにしたがって深さも深くなっているといえる。また、近似直線の傾きが大きいことから、直径に対する深さの比率はカルデラより火口の方が高くなっている。

§3 <調査3> 月面の中規模のクレーターの直径と深さの関係

目的：月面の隕石によるクレーターの直径と深さの関係を明らかにする。

方法：天文年鑑 2020 の月面図に載っている月の表側の東半球（第 I 象限・第IV象限それぞれ 28 個ずつ）の主なクレーターを RSIE 月惑星探査プロジェクトが公開している、カシミール 3D 用月地形データをカシミール 3D で表示し、位置を確認する。

その外縁部の東西南北端の地点(He,Hw,Hs,Hn)の標高と凹みの標高(L)を計測し、調査 2 と同様に凹地の深さ(D)を求める。また、クレーターの直径(d)のデータは天文年鑑 2020 に記載されているものを用いる。そして、調査 2 と同様に d と D の関係を分析する。

* 公開されているデータは標高データがマイナスの値にならないように、約 9.14km 足された値が出るようになっているが、この研究では H と L の標高の差である D を計測したいため、H,L の標高データは補正しないで扱う。

* 掲載されている主なクレーターは約 30km~300km なので、測定結果はおおむね複雑クレーターのものになる。

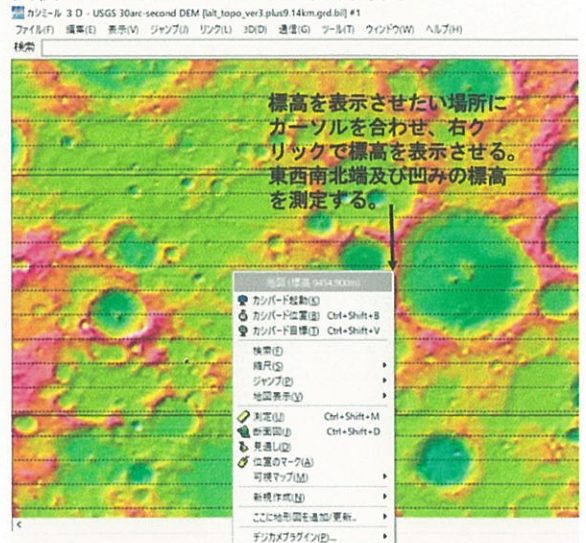
* 天文年鑑の月面図のクレーターと地形データ上の位置との確認が取れなかった場合は除外する。

結果：最終的に 50 カ所のクレーターを計測した。月面クレーターの直径 d と深さ D の関係は図表 3-2 のようになった。

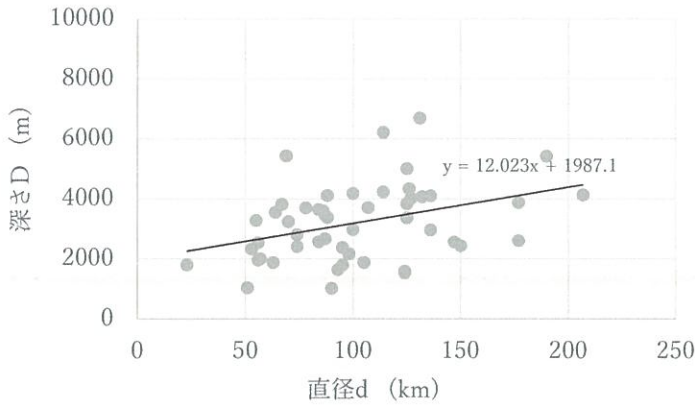
(計測値の詳細は巻末に掲載)

考察：調査 2 と同様に凹みの標高はなるべくクレーター内の最深点を計測するようにしているため、そのクレーター本来の深さではなく、内部のクレーター等の深さも含めた深さを計測している場合が多く考えられる(図表 3-3)。このことも考慮に入れた上で考察すると、おおむね凹地の直径が大きくなるほど深さも深くなっているという傾向は月面の複雑クレーターでも認められる。

図表 3-1 カシミール 3D での計測方法



図表3-2 月面 複雑クレーター 直径と深さの関係



図表 3-3 計測値の傾向



§ 4 <調査 4>月面のお椀型クレーター及び、衝突盆地の直径と深さの関係

目的：調査 3 の対象は複雑クレーターがほとんどだったので、比較的小規模なお椀型クレーターと大規模な衝突盆地の直径と深さの関係はどのようになっているのかを明らかにし、比較する。

方法：

- ① お椀型クレーター 規模が小さく計測が難しい上、数が多いので、平坦なお椀型クレーターの形状がわかりやすい、「晴れの海」上の図表 4-1 に示した 14 個のクレーターを対象に計測する。
 - ② 衝突盆地 クレーターとしての円状の形状が比較的わかりやすいものを対象に計測する。(対象：東の海、モスクワの海、スミス海、危難の海、神酒の海、晴れの海、雨の海、湿りの海)
- 計測方法は、①、②ともに、調査 2 と同様、東西、南北直径を計測し直径 d を求める。東西南北の計測値(H_e,H_w,H_s,H_n)のそれぞれの標高から H を求め、凹みの標高 L を引き、深さ D を求める。d と D を比較する。

*ただし、カシミール 3D では月の測地系でなく地球の測地系を使っていることから測定機能を使って求めた直径を 1/3.7 倍して実際の距離に補正する。

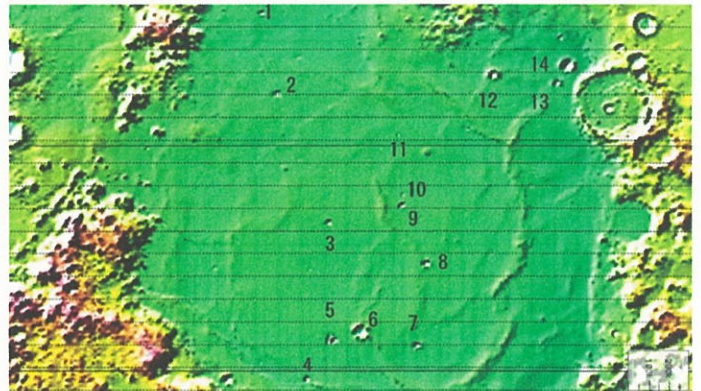
結果：計測した、14 個のお椀型クレーターと 9 つの衝突盆地の直径と深さの関係はそれぞれ図表 4-2、4-3 のようになった。(計測値の詳細は巻末に掲載)

考察：調査対象が少ないため安易に結論付けられないが、お椀型クレーターは直径が大きくなると深さも深くなるという傾向が認められる。一方で衝突盆地は、今回の調査では直径と深さの関係は明らかではなかった。調査 3 と比較するとお椀型クレーターと複雑クレーターでは近似直線の傾きがお椀型クレーターの方が大きいことから、直径の大きさの変化に伴う深さの変化がお椀型クレーターの方が大きいと言えるだろう。

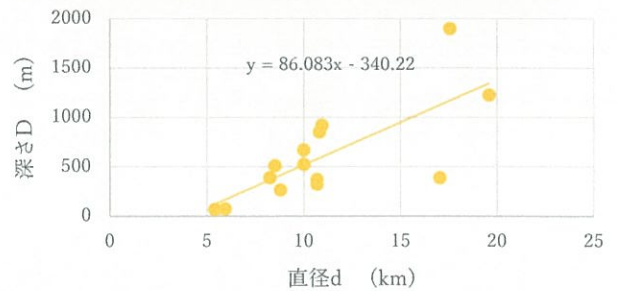
§ 5 調査 2~4 の考察

調査 2 より、火口もカルデラも直径が大きくなると深さが深くなっていったが、火口とカルデラでは直径の小さい火口の方が直径の変化に伴う深さの比率の変化が大きいことが分かった。また、調査 3、4 よりお椀型クレーター、複雑クレーターはどちらも直径が大きくなると深さが深くなっていったが、お椀型クレーターと複雑クレーターではお椀型クレーターの方が直径の大きさの変化に

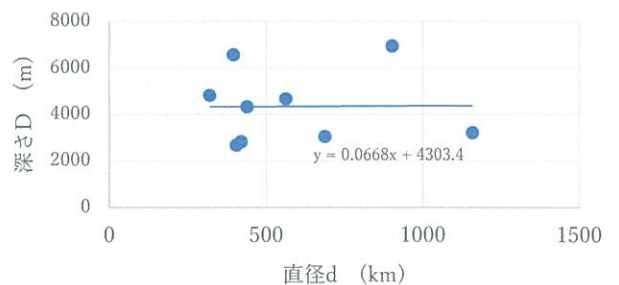
図表 4-1 計測対象のお椀型クレーター



図表4-2 お椀型クレーター 直径と深さの関係



図表4-3 衝突盆地 直径と深さの関係



伴う深さの比率の変化が大きかった。大規模なクレーターである衝突盆地では直径の大きさと深さに関係は確認できなかった。

図表 5-1、5-2、5-3 は火口、カルデラ、お椀型クレーター、複雑クレーター、衝突盆地の計測データをもとに直径を横軸に直径に対する深さの割合を縦軸にとり、各地形ごとにプロットしたものである。直径と深さの比が直径の大きさによって変化しない場合はプロット点が水平に並ぶ。これを見ると、

(1) 全地形に関して全体的に直径が大きくなると直径に対する深さの比が小さくなっている。特にカルデラ、複雑クレーター、衝突盆地はプロット点が明らかに右肩下がりに分布しており、凹地の規模が大きくなると直径に対する深さの比が小さくなっている。

(2) 火山起源の凹地と隕石起源のクレーターではお椀型クレーター、複雑クレーターの直径と深さの比はカルデラの比と近く、カルデラとお椀型クレーターは比率と規模がだいたい同程度の地形になっている。

データ分析により明らかになった(1)と(2)についてその理由を考察してみようと思う。

§6

(1)地形の規模が拡大すると直径に対する深さの比が小さくなるのはなぜか？

この傾向は地形の形成の仕方に起因するのではないかと考えた。火山起源のものは、火口は噴火の際に噴出口としてできたためその際に周りの物質を吹き飛ばしてできたと考えられ、カルデラは爆発的な噴火によって火山内部に空洞が生じ陥没してできると考えられている(図表 6-1)。一方隕石によるクレーターは佐々木晶ほか(2019)によれば図表 6-2 のようにまず天体が衝突した際に衝撃波が発生し、また衝突天体や衝突地点の岩石が融解、蒸発する。次に衝撃波の通過によって衝突点一帯が吹き飛ばされる。そして生じた凹地が安定な構造になるように一部崩れて修正され形成される。

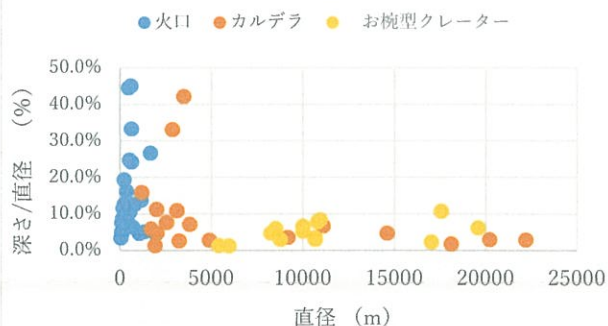
これらのことから、カルデラの直径が大きくなるほど直径に対する深さの比が小さくなる要因として考えられることとして、以下の①～③が挙げられる。

- ① カルデラの水平方向の規模が大きくなっても火山内部の垂直方向の規模はあまり変わらない。
- ② 大きなカルデラほど形成後の浸食による深さの拡大の影響が小さい。
- ③ 大きなカルデラほど形成後に崩壊しやすく、相対的に浅くなる。

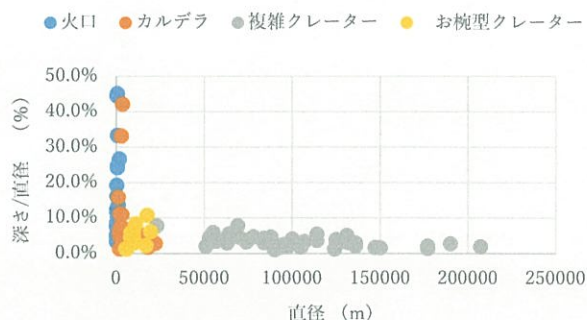
また、複雑クレーターや衝突盆地で直径が大きくなるほど直径に対する深さの比が小さくなる原因として考えられることとして、以下の④～⑦が挙げられる。

- ④ 佐々木晶ほか(2019)が述べているように「大クレーターほど底面の上昇や壁面の崩壊が大規模に起こるために最終的なクレーター直径に対してクレーター深さが小さくなっている」。
- ⑤ 表面の岩盤が表層と底層で底層の方が固く、クレーター形成時の破碎を受けにくい場合、直径が大きくなるほど深さの比率が小さくなる。
- ⑥ 直径が大きいほどその内部にできたクレーターや浸食による掘削の影響が小さい。
- ⑦ 衝突盆地の場合、小規模や中規模のクレーターとはことなりクレーター形成時の衝撃で溶岩が広がったと考えられる地形もある。溶岩の展開によってクレーターの深さが相対的に浅くなった。

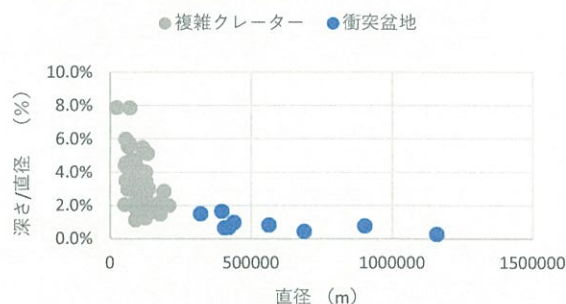
図表5-1 直径と深さ/直径の割合の関係1



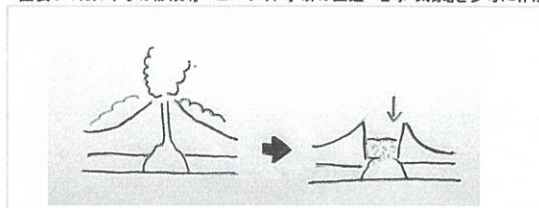
図表5-2 直径と深さ/直径の割合の関係2



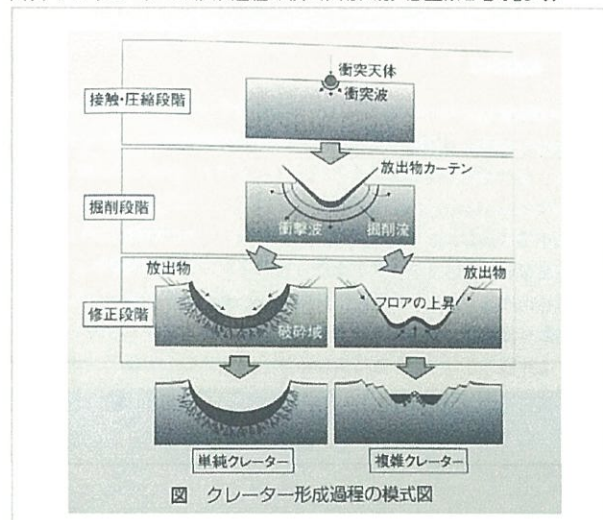
図表5-3 直径と深さ/直径の割合の関係3



図表 6-1 カルデラの形成(『ニューワイド学研の図鑑 地球・気象』を参考に作成)



図表 6-2 クレーターの形成過程の模式図(『太陽・惑星系と地球』より)



(2)なぜ隕石によるクレーターはカルデラと直径に対する深さの比や規模が類似しているのだろうか？

カルデラの形成は火山内部の不安定を打ち消すために陥没することによるものである。一方クレーターも形成後形状を安定させるために最終的に変形する。このことから、⑧ 円形の凹んだ地形はある安定した構造が決まっている可能性があり、最終的にその形に近くなるように変化するのではないかと考えた。

考えられた①～⑧の仮説を分類すると、①や⑤、⑦は形成時の特性によるもの、②や⑥は計測・調査方法の特徴に由来するもの、③、④、⑧は形成の終盤に起こる構造の安定化に起因するものである。

今回は考えた仮説の内、形成時の円形陥没地形の安定化（③、④、⑧）が特に重要だと考えたため、実験により、検証を行う。

§7 形成時の円形陥没地形の安定化について

凹地形成時の安定化の変化の様子を確かめるためには、様々な直径・深さ・形状の凹地を作り、そこに振動を加えることで不安定な構造の地形の一部が崩壊、変形し、安定な地形になる様子を実験するのが良いのではないかと考えた。そこで、小麦粉を地表面に見立て、そこに作った陥没地形に振動を加え、変化を観察する実験を行った。

<実験 1>円柱状の凹地の形状の安定化の実験

目的：直径が同じで深さが異なる円柱状の陥没地形は衝撃でどのように崩壊、変形し安定な構造をとるのかを確認する。

方法：縦・横 16.5cm、高さ 5.5cm のプラスチック製の容器に小麦粉（図表 7-1）を入れ、（図表 7-2）表面をならす。そこに直径 28.5mm のペットボトルキャップ（図表 7-3）を使って異なる任意の深さの凹地を 4 つ作り（図表 7-4）、その淵から最深点までの深さを測定する。この容器を浅い段ボールの箱に入れガムテープで中央に固定する（図表 7-5）。これの左右を両手で持ち、机の上で 1 分間、前後に揺する。（図表 7-6 上下方向には動かさない。）この後、凹地の淵から最深点までの長さを測る。

結果：図表 7-7 のように淵の一部が崩れるものが出てしまい、これでは「深さ」を正しく計測できないと考えられたため、実験方法を次のように修正して実験した。（下線部変更点）

修正後の方法：縦・横 16.5cm、高さ 5.5cm のプラスチック製の容器の淵まで小麦粉（図表 7-8）を入れ、表面をならす。そこに直径 28.5mm のペットボトルキャップ（図表 7-3）を使って異なる任意の深さの凹地を 4 つ作り、その容器の淵から最深点までの深さを測定する。（図表 7-9）この容器を浅い段ボールの箱に入れガムテープで中央に固定する（図表 7-5）。これの左右を両手で持ち、机の上で 1 分間、前後に揺する。（図表 7-6 上下方向には動かさない。）この後、容器の淵から最深点までの長さを測る。

全て崩壊してしまい、その窪地状の構造が認められない場合は計測しなかった。これを 5 回行った。なお、4 つの窪地は左奥から反時計回りに①、②、③、④とだんだん深くなるように作った。

結果：下の図表 7-10 のようになった。単位は mm で（元の深さ、変化後の深さ）と記した。1 回目の変化の様子は図表 7-11 のようになった。

図表 7-10 直径 28.5mm の凹地の計測値

1 回目	① (10.5, 5.5)	② (15.5, 14.0)	③ (22.0, 22.0)	④ (34.5, 13.0)
2 回目	① (11.0, 9.5)	② (13.0, 12.5)	③ (25.0, 24.5)	④ (34.5, 12.0)
3 回目	① (7.0, 6.5)	② (12.5, 7.0)	③ (18.0, 17.5)	④ (29.5, 20.5)
4 回目	① (8.5, 7.5)	② (14.0, 13.5)	③ (27.5, 25.5)	④ (31.5, 10.0)
5 回目	① (5.0, 3.5)	② (12.5, 11.5)	③ (21.5, 10.5)	④ (32.5, 21.5)

考察：図表 7-12 は元の深さを横軸に変化後の深さを縦軸にと

図表 7-1 使用した小麦粉



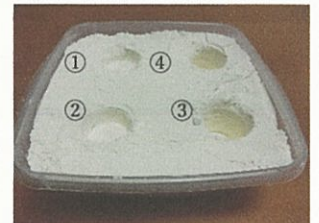
図表 7-2 小麦粉を入れた容器



図表 7-3 凹地をつくる際に使用したペットボトルキャップ



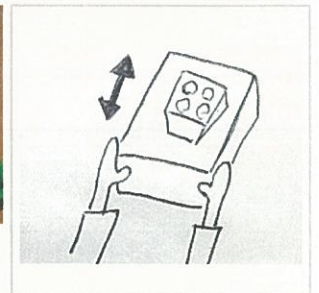
図表 7-4 作成した凹地



図表 7-5 容器を箱に固定



図表 7-6 箱を前後に振る。



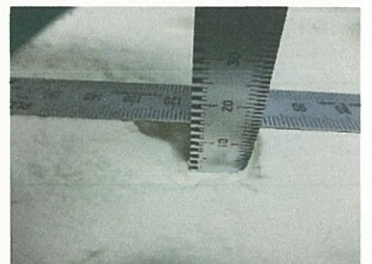
図表 7-7 振動後の様子



図表 7-8 淵まで小麦粉を入れた状態



図表 7-9 淵からの計測



図表 7-11 左：振動前 右：振動後の様子



りプロットしたものである。元の深さと変化後の深さが変わらない場合は図上の赤線の上にプロット点に来るはずである。これによると元の深さが 25mm 程度までは元の深さと変化後の深さはほとんど変わらないが、元の深さが 30mm 程度より大きくなるとその変化後の深さは浅くなるのがわかる。

§ 8 <実験 2>直径の異なる円柱状の凹地の安定化実験

目的：直径の異なる円柱状の陥没地形は深さによって衝撃でどのように崩壊、変形し安定な構造をとるのかを明らかにするため。

方法：実験 1 と同じ容器に容器の淵まで小麦粉を入れ表面をならし、直径 19.0mm のスティックのりの容器（図表 8-1）を使って異なる任意の深さの凹地を 4 つ作り、実験 1 と同様の方法で揺らし、計測する。これを 5 回行った。また、直径 55.0mm の茶筒（図表 8-2）では容器の面積に合わせて 1 回に作る凹地を 3 つにして同じ実験を 5 回行った。

結果：下の図表 8-3、8-4 のようになった。
単位は mm で（元の深さ、変化後の深さ）と記した。

図表 8-3 直径 19.0mm の凹地の計測値

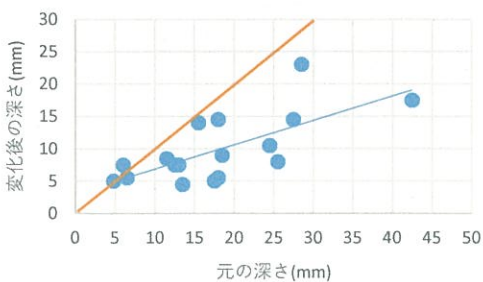
1 回目	① (6.0, 7.5) ② (13.5, 4.5) ③ (18.0, 5.5) ④ (24.5, 10.5)
2 回目	① (6.5, 5.5) ② (18.0, 14.5) ③ (25.5, 8.0) ④ (42.5, 17.5)
3 回目	① (6.0, 崩壊) ② (12.5, 7.5) ③ (18.5, 9.0) ④ (24.5, 崩壊)
4 回目	① (4.8, 5.0) ② (13.0, 7.5) ③ (17.5, 5.0) ④ (28.5, 23.0)
5 回目	① (6.5, 崩壊) ② (11.5, 8.5) ③ (15.5, 14.0) ④ (27.5, 14.5)

図表 8-4 直径 55.0mm の凹地の計測値

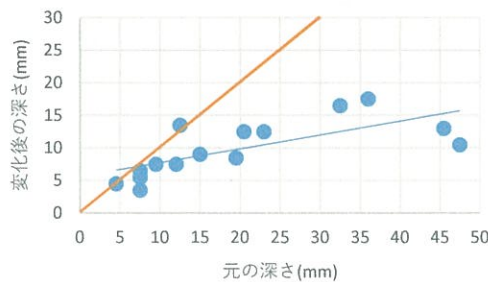
1 回目	① (9.5, 7.5) ② (20.5, 12.5) ③ (36.0, 17.5)
2 回目	① (7.5, 5.5) ② (15.0, 9.0) ③ (32.5, 16.5)
3 回目	① (4.5, 4.5) ② (19.5, 8.5) ③ (47.5, 10.5)
4 回目	① (7.5, 3.5) ② (12.0, 7.5) ③ (45.5, 13.0)
5 回目	① (7.5, 6.5) ② (12.5, 13.5) ③ (23.0, 12.5)

考察：図表 8-7、8 は直径が 19.0mm と 55.0mm のそれぞれの時について元の深さを横軸に変化後の深さを縦軸にとりプロットしたものである。変化がない場合赤線の上に点がかかるが、概ね元の深さに比べて変化後の深さは浅くなっており、直径が 19.0mm のときも直径が 55.0mm の時も各地形ごとの変化後の深さの差は小さくなっていることが分かる。図表 8-10 は横軸に直径、縦軸に「元の深さ/直径」と「変化後の深さ/直径」の値を取り、プロットしたものである。直径が大きいほど元の深さの直径に対する比率が低いケースが多いという傾向があるため、安易に判断することはできないが、これを見ると、円柱型の凹地では、直径が大きいほど、変化後の深さの直径に対する比率が低くなっていると言えると考えられる。

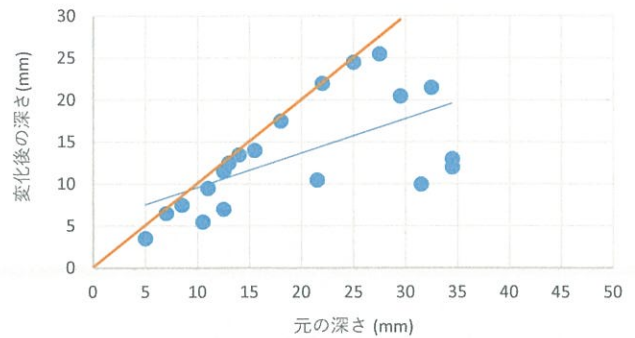
図表 8-7 直径 19.0mm の円柱状凹地の深さの変化



図表 8-8 直径 55.0mm の円柱状凹地の深さの変化



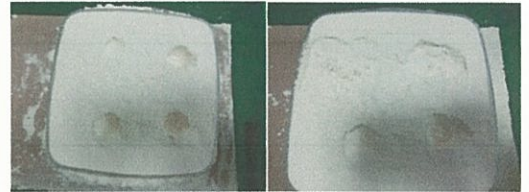
図表 7-12 直径 28.5mm の円柱状凹地の深さの変化



図表 8-1 凹地を作る際に使用したスティックのりの



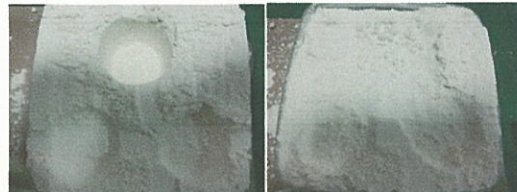
図表 8-5 直径 19.0mm の凹地の変化の様子
左：振動前 右：振動後の様子



図表 8-2 凹地を作る際に使用した茶



図表 8-6 直径 55.0mm の凹地の変化の様子
左：振動前 右：振動後の様子



図表 8-10 円柱状の凹地の直径の大きさによる振動前後の深さ/直径 (%)



● 変化後の深さ/直径
● 元の深さ/直径
— 線形(変化後の深さ/直径)

§9 <実験3>直径の異なる円錐状の凹地の安定化実験

目的：直径の異なる円錐状の陥没地形は深さによってどのように衝撃で崩壊、変形し安定な構造をとるのかを明らかにし、円柱状のものと比較する。

方法：実験1と同じ容器に容器の淵まで小麦粉を入れ表面をならし、紙製の円錐（直径20.0、40.0、60.0mm）の深さの異なる円錐(図表9-1)を使って異なる深さの凹地を4つ（直径60.0mmのものは面積の関係で3つ）作り（図表9-2）、実験1と同様の方法で揺らし、変化後の深さを計測する。元の深さは円錐の高さとする。これを直径ごとに5回行った。

結果：下の図表9-3のようになった。(単位はmm)

図表9-3 円錐状の凹地の計測値

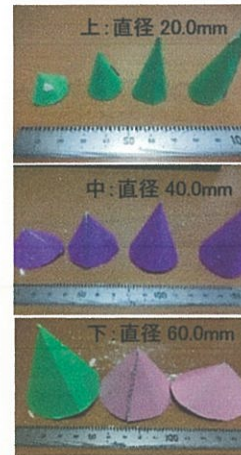
直径20.0mmの円錐	
元の深さ	①(18.0)②(28.5)③(39.0)④(48.5)
1回目	①(15.0)②(15.5)③(14.5)④(38.5)
2回目	①(9.5)②(16.5)③(22.0)④(36.5)
3回目	すべて崩壊
4回目	①(10.5)②(21.0)③(33.5)④(6.0)
5回目	①(15.5)②(26.5)③(26.5)④(27.5)
直径40.0mmの円錐	
元の深さ	①(22.0)②(35.5)③(46.5)④(56.5)
1回目	①(20.5)②(27.5)③(33.5)④(48.0)
2回目	①(19.0)②(8.5)③(26.5)④(31.5)
3回目	①(11.5)②(22.5)③(28.5)④(33.5)
4回目	①(11.5)②(21.5)③(25.5)④(33.5)
5回目	①(9.0)②(11.0)③(9.0)④(27.5)
直径60.0mmの円錐	
元の深さ	①(27.5)②(39.5)③(50.0)
1回目	①(12.5)②(16.5)③(38.5)
2回目	①(11.5)②(14.5)③(15.5)
3回目	①(12.5)②(11.0)③(35.5)
4回目	①(17.5)②(20.0)③(14.5)
5回目	①(14.5)②(20.5)③(24.5)

考察：図表9-5, 6, 7より円錐状の凹地も直径20.0, 40.0, 60.0mmのそれぞれで概ね、変化後の深さは元の深さに比べて浅くなっており、各地形ごとの変化後の深さの差も小さくなっていると言えるだろう。

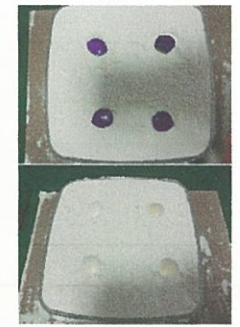
図表9-8は図表8-10と同様に横軸に直径、縦軸に「元の深さ/直径」と「変化後の深さ/直径」の値をとり、プロットしたものである。元の深さ/直径の値が直径によって異なりすぎており、このグラフで検討することは難しいと判断したため、元の深さ/直径が近い値をとる（直径20.0mm, 40.0mm, 60.0mmに対して元の深さ18.0mm, 35.5mm, 50.0mm）ケースの変化後の深さ/直径を同様にプロットした。（図表9-9）これを見ると、円錐状の凹地では、直径に対する元の深さの比が同じくらいでも、直径が大きいほど変化後の深さの直径に対する比率が小さくなっていると考えられる。

円柱状の凹地と円錐状の凹地は、計測方法の違いや、振動させるときの強さなどの微妙な差異もあり、その変化の違いは確認できなかった。

図表9-1 凹地を作る際に使用した厚紙製の円錐



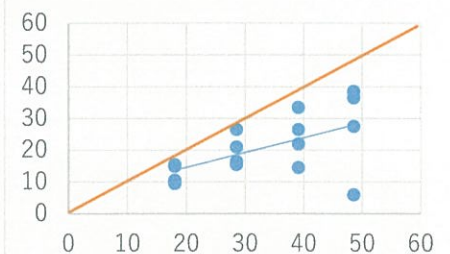
図表9-2 円錐を小麦粉にさして凹地を形成



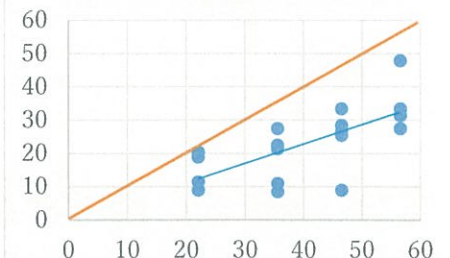
図表9-4 直径40.0mmの凹地の変化の様子
上:振動前 下:振動後



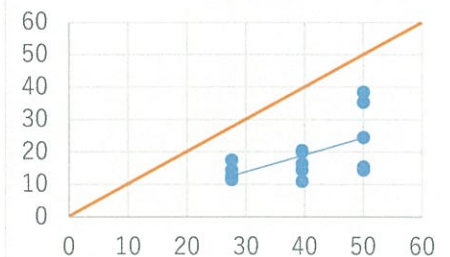
図表9-5 直径20.0mmの円錐凹地の深さの変化



図表9-6 直径40.0mmの円錐凹地の深さの変化



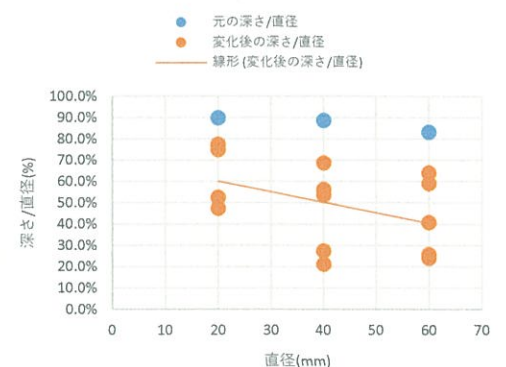
図表9-7 直径60.0mmの円錐凹地の深さの変化



図表9-8 円錐状の凹地の直径の大きさによる振動前後の深さ/直径



図表9-9 元の深さの比率が近い円錐状の凹地の直径の大きさによる振動前後の深さ/直径



§ 10 仮説の検討

実験 1~3 より、円柱状、円錐状のどちらの凹地でも、直径の大きさにかかわらず、振動を加えて変化した後の深さは元の深さに比べて浅くなっており、各凹地間の元の深さの差より変化後の深さの差の方が小さくなっている。また、直径が大きくなるほど変化後の深さの直径に対する比率が小さくなっている。

地表面の岩石を全く異なる物質である小麦粉と比較している上、各回の振動の強さ、周期を厳密に一致させられていないという面もある。このことを考慮に入れた上で、§ 8,⑧で考えた「円形の凹んだ地形はある安定した構造が決まっている可能性があり、最終的にその形に近くなるように変化するのではないか」という仮説に対して、同じ深さの比率には変化しないが、各陥没地形の深さの比率の差は小さくなるように変化する可能性が実験によって示されたのではないかと思う。

また、§ 8,③, ④で検討した、「大カルデラ・クレーターほど崩壊しやすく、深さの比率が浅くなる」という仮説は、小麦粉実験によって得られた直径が大きくなるほど変化後の深さの直径に対する比率が小さくなっているという結果から、同様のことが実際のカルデラ・クレーターでも適用される可能性を示したと考えられる。

【まとめ】

地球上の火口・カルデラと月面の隕石によるクレーターが似た地形に見えるが、実際はカルデラの直径と深さの比が、単純クレーターや複雑クレーターの直径と深さの比と近く、またそのカルデラの直径が単純クレーターと同様の規模になっている。このように類似している原因として、陥没地形が形成時の崩壊・変形によって比較的安定な地形になるにあたって、地形間の深さの比率の差が小さくなることが考えられる。

また、火山性・隕石起源の凹地はどれも直径が大きいほど深さの直径に対する比率が小さくなるという傾向が確認された。この要因として直径が大きいほどその凹地の内部に同じ窪みの形成や浸食が起こってもその深さの比率への影響が小さいということの影響もあると考えられる。その上、大きい凹地ほど崩壊しやすく、深さの比率が小さくなりやすいということが考えられる。今回はあまり検証できなかったが、各地形固有の形成時の特性によって生じている可能性も十分にあるだろう。

今後の課題として、計測は日本の火口・カルデラと月面の限られたクレーターでしかしなかったため、その他の惑星でのクレーター、カルデラなどの直径と深さの関係を探ってみたい。また、今回検証できなかった仮説も実験等で確かめてみたい。

【終わりに】

自然の地形は単純な形状ではなく、入り組んでいる。それをいかに「測定」すればよいのか、とても難しかった。今回は測定においてその円形地形のなるべく中心を通るように東西南北の高まり間に線を引き、その平均を「直径」、東西南北端の標高の平均から凹地の最深点の標高を引き「深さ」としてなるべく測定ごとに差がつかないように計測したり、実験でも「深さ」を容器の淵からの値をとったりと工夫したが、計測値の数学的な分析が不十分だったと思う。

しかし、頭上の月のクレーターと地上の火山地形の相違点を資料から分析し、その理由について仮説を立てて実験で試してみたことは非常に面白かった。再び小麦粉まみれになる実験に協力してくれた家族に感謝したい。

【参考文献】

- 齊藤隆夫 『スーパー理科事典<四訂版>』 受験研究社 2013
- 国土交通省 国土地理院 日本の典型地形について https://www.gsi.go.jp/kikaku/tenkei_top.html
- 佐々木 晶・土山 明・笠羽 康正・大竹 真紀子 『現代地球科学入門シリーズ 1 太陽・惑星系と地球』 共立出版株式会社 2019
- 神奈川県立生命の星・地球博物館 (編) 『神奈川の自然図鑑① 新版 岩石・鉱物・地層』 有隣堂 2016
- 天文年鑑編集委員会 (編) 『天文年鑑 2020 年版』 誠文堂新光社 2019
- DK 社 (編) 石井克弥・森富美子/中川泉/竹田純子 (訳) 『太陽系惑星大図鑑 CG が明かす新しい宇宙』 河出書房新社 2015
- JAXA JIPEDA 『COLOR OF THE MOON』
- RISE 月惑星探査プロジェクト カシミール 3D 用 月地形データ (bil 形式)
<https://www.miz.nao.ac.jp/rise/c/archive/download/lalt-topo-kashmir3d>
- 志村 隆 (編) 『ニューワイド学研の図鑑 地球・気象』 2008
- 東北森林管理局 仙台森林管理署の見所
https://www.rinya.maff.go.jp/tohoku/introduction/gaiyou_kyoku/annai/midokoro/midokoro_zaouokama.htm
- (公社)むつ市観光協会 HP http://mutsu-kanko.jp/guide/miru_01.html
- 地質調査総合センター 詳細火山データ集 沼沢火山 https://gbank.gsj.jp/volcano/Act_Vol/numazawa/index.html
- 群馬県 県立赤城公園 <https://www.pref.gunma.jp/01/e2310243.html>

火口・カルデラの直径と深さの計測値

名前	方位			直径					深さ	
	東	南	西	H ₀	H ₁	H ₂	H ₃	L	H	深さ
例 火口	1	2	1.5						3	1
白雲岳火口	549	423	486	2184.1	2229	2213.1	2183.1	2167.1	2202.33	35.225
有珠山火口	1992	1942	1967	544.6	476.9	469.7	472.4	399.9	490.9	91
知床硫黄山	×	×	×	×	×	×	×	×	×	火口の形状の推定が困難
地獄沼	102	76	89	901	897	900	903	896	900.25	4.25 湖面の標高変化→最低地点を測定
岩手山御室	513	549	531	1951.8	2001.3	1983.3	1938.9	1912.3	1968.83	56.525
刈田岳北東側 (中央巖王)	1016	1259	1137.5	1592.5	1745.8	1745.9	1623.2	1520	1676.85	156.85 https://www.rinya.maff.go.jp/tohoku/introduction/gaiyou_kyoku/anna/midokoro/midokoro_zauoukama.html より30mとし、 御釜の水深は東北森林管理局 仙台森林管理署の見所 水面の標高1550mから引いた 浸食により東端の確認及び計測が困難 火口の形状の推定が困難
不忘山北東側 (南麓王)	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
胡桃ヶ岳北側 (鳴子火山)	×	×	×	×	×	×	×	×	×	火口の形状の推定が困難
寒風火山第二火口	718	647	682.5	219	206.6	235	200.7	170.6	215.325	44.725
秋田焼山鬼ヶ嶽火口	1177	928	1052.5	1353.1	1344.1	1204	1322.6	1256.8	1305.95	49.15
秋田駒ヶ岳火山男女岳火口	99	86	92.5	1625.2	1628	1624.9	1633.4	1620.7	1627.88	7.175
太郎山火口	×	×	×	×	×	×	×	×	×	火口の範囲の推定が困難
草津白根山湖沼	513	373	443	2106.6	2160.1	2139.2	2113.5	2095.8	2129.85	34.05
浅間山	×	×	×	×	×	×	×	×	×	内側の山と火口により窪地としての形状を読み取ることが困難なため
本白根山 (草津白根山)	303	281	292	2114.8	2110.5	2108.9	2119.1	2076.3	2113.33	37.025
雄山	1573	1719	1646	706.8	663.4	744.3	682	259	699.125	440.125
鳥島	1282	1382	1332	315	352	220	292	225	294.75	69.75
西山 (八丈富士)	486	530	508	834	849.9	824.2	841.1	711.1	837.3	126.2
早雲山ピット	×	×	×	×	×	×	×	×	×	浸食により東端及び凹みの標高の推定が困難
焼山	×	×	×	×	×	×	×	×	×	火口の範囲の推定が困難
地獄谷	×	×	×	×	×	×	×	×	×	明瞭な火口の範囲の推定が困難
白山火口群	×	×	×	×	×	×	×	×	×	複数の小さな火口があり、それぞれの範囲が明瞭ではない上、火口湖も多く、水深データが得られなかった
富士山火口	590	643	616.5	3742.8	3724.5	3781.8	3713.3	3535	3740.6	205.6
片蘆山火口	205	219	212	1456.6	1443.3	1464.5	1447.3	1411.8	1452.93	41.125
幸助山火口	147	142	144.5	1893.9	1874.9	1883.2	1884.9	1871.3	1884.23	12.925
浅間山、釜山	490	418	454	2565	2523.2	2494.1	2542.8	2328.9	2531.28	202.375
七ツ池火口群 北横岳	220	235	227.5	2466.1	2458.4	2431.8	2445.3	2421.4	2450.4	29
宝永火口	×	×	×	×	×	×	×	×	×	傾斜、浸食のため南端の計測が困難
カワゴ平火口	×	×	×	×	×	×	×	×	×	傾斜、浸食のため北端の計測が困難
三瓶山	×	×	×	×	×	×	×	×	×	周りの山体の発達により火口の淵の位置、高さ共に確認が困難
鍋山	98	88	93	608	609.6	608.6	609.5	604	608.925	4.925
笠山	27	45	36	110	110	110	111	109	110.25	1.25
伏馬山 (フスマヤマ)	×	×	×	×	×	×	×	×	×	火口の窪みの形状が確認できない
鬼岳	298	407	352.5	310.4	310.6	250.5	304.2	236.6	293.925	57.325
白岳	184	142	163	106.4	113.9	96	109.1	87.3	106.35	19.05
箕岳	×	×	×	×	×	×	×	×	×	傾斜のため北端の計測が困難
中岳火口 (群)	×	×	×	×	×	×	×	×	×	複数の火口が重なっているため一つの火口の淵の位置の計測が困難
米塗	585	667	626	1611.9	1684.5	1660.8	1757.2	1526.4	1678.6	152.2
新燃岳	788	817	802.5	1416.1	1384.1	1390.6	1395.4	1294.5	1396.55	102.05
板島南岳	584	591	587.5	736.3	1005	944.5	1025.2	662.5	927.75	265.25
カルデラ										
屈斜路	24619	19783	22201	386	734	804	699	3	655.75	652.75 湖面の標高121m-最深点118m
阿寒	18457	17783	18120	696	655	790	689	375	707.5	332.5 湖面の標高420m-水深45m
俱多楽	3260	2971	3115.5	529.1	508.1	403.1	366.6	110	451.725	341.725 湖面の標高258m-水深148m
十和田湖	8885	9491	9188	409.2	404	407	410	73	407.55	334.55 湖面の標高400m-水深327m
宇曽利山湖	1912	1933	1922.5	210	207	217	210	185	211	26 湖面の標高205m-水深約20m 水深の情報は(公社)むつ市観光協会H http://mutsu-kanko.jp/guide/miru_01.html より
田代平	5571	4191	4881	651	646	578	630	487	626.25	139.25
鬼首カルデラ	14070	15148	14609	708	1002	1104	989	260	950.75	690.75
森吉火山山頂カルデラ	×	×	×	×	×	×	×	×	×	形状が不明瞭なため
秋田駒ヶ岳南麓カルデラ	2224	1769	1996.5	1328.2	1114.1	1451.4	1171.5	1040.7	1266.3	225.6
向町盆地	×	×	×	×	×	×	×	×	×	浸食のため形状が不明瞭なため
肘折カルデラ	2699	2407	2553	470.8	608.2	409.5	495.2	297.8	495.925	198.125
雄国	×	×	×	×	×	×	×	×	×	形状が不明瞭 湖面の標高475m-水深96m
沼沢	2143	1904	2023.5	476	479	479	477	379	477.75	98.75 最大水深のデータは地質調査総合センター 詳細火山データ集 沼沢火山 https://gbank.gsj.jp/volcano/Act_Vol/numazawa/index.html より 凹みの標高は湖面の標高1340.7m-最大水深19m 最大水深のデータは群馬県 県立赤城公園 https://www.pref.gunma.jp/01/e2310243.html より
赤城山カルデラ	2897	4063	3480	1485.3	1481.9	1471.6	1435.7		1468.63	1468.63 凹みの標高は塔ノ沢付近のものを使った。 日本の典型地形 カルデラには輪郭新期カルデラもあったが、 形状がほとんど残っていないため対象にできなかった。
三原山	2554	3905	3229.5	610.8	555.7	504.3	658.1	496.4	582.225	85.825
箱根古期カルデラ	11007	11221	11114	559.5	1053.2	915.8	975.3	125	875.95	750.95
滑河原カルデラ	×	×	×	×	×	×	×	×	×	形状が著しく崩壊しているため。
妙高カルデラ	2717	3010	2863.5	1723.4	2291.4	1905	2122	1060.1	2010.45	950.35
立山カルデラ	×	×	×	×	×	×	×	×	×	カルデラの西端が不明瞭なため。
黒姫山のカルデラ	1743	1667	1705	2039	1852	1803	1981	1816	1918.75	102.75
大峠コーロロン	×	×	×	×	×	×	×	×	×	形状が著しく崩壊しているため。
三瓶山	×	×	×	×	×	×	×	×	×	カルデラの凹地の地形の認識が困難だったため。
妙見カルデラ	984	1387	1185.5	1185.4	1314.1	1192.3	1068.7	1001.5	1190.13	188.625
野岳カルデラ	×	×	×	×	×	×	×	×	×	形状が認識できないため。
阿蘇	17921	22519	20220	907.4	815.1	858.3	986.1	281	891.725	610.725
加久藤	×	×	×	×	×	×	×	×	×	形状が著しく崩壊しているため。
始良	×	×	×	×	×	×	×	×	×	最深点が海中にあるため。
池田カルデラ	3990	3646	3818	104	114.6	76	140.2	-167	108.7	275.7 湖面の標高66m-最大水深233m

月の表面 東半球 (第I,IV象限) のクレーターの直径と深さ *小数第一位で四捨五入

第IV象限 名称	直径	深さ	Hc	Hw	Hh	L	H	備考
1 Abnetephus	136	1008.5	10559	10596	10598	10113	6458	10565.5
2 Aplanus	63	1882.75	9355	10392	9617	8050	9932.75	
3 Bouassargault	131	6715.25	10256	13248	11510	10747	4735	11450.25
4 Cathartes	100	2990	10002	10872	10454	9912	7320	10310
5 Cyllina	98	2168.75	9309	9883	9200	10127	7456	9624.75
6 Demona	114	6234.5	11045	12443	12386	10364	5325	11559.5
7 Fabricius	78	3710.5	9013	9001	11150	8646	5742	9452.5
8 Furnivus	125	3843.25	9705	10434	9520	9254	5885	9728.25
9 Fraastorius	124	1559.75	7792	8314	6653	5984	6401	7960.75
10 Gilbert	107	3717.25	8856	8219	8070	8774	4765	8482.25
11 Heclaenus	127	4023	9258	8962	6872	8756	4439	8462
12 Hipparchus	150	2446.75	9272	9877	9618	9940	7230	9676.75
13 Hommel	125	5017.75	10255	9394	9598	9650	4709	9726.75
14 Humboldt	207	4144	9037	8835	8656	8980	4733	8877
15 Janssen	190	5423.75	9344	10117	9709	9049	4131	9554.75
16 Karstner	105	1883.25	8531	9314	8622	8982	6979	8862.25
17 Langrenus	132	4016.75	8971	8472	8254	8482	4468	8544.75
18 Maurolycus	114	4236.5	9776	9746	10028	8512	5279	9515.5
19 Melius	88	4123.5	9051	10231	9347	10489	5656	9779.5
20 Petavius	177	2612.25	9357	10214	8336	9434	6728	9340.25
21 Piccolomini	88	3391	10310	11673	10420	11001	7460	10881
22 Rhiala	70	3285.5	7536	9398	8768	9076	5436	8694.5
23 Scott	108	x	x	x	x	x	x	楕に近く、判別が困難だったため。
24 Stoffer	126	x	x	x	x	x	x	クレーターが密集しており判別が困難だったため。
25 Theophilus	100	4184.75	7407	5602	8063	5987	4355	8538.75
26 Vendelinus	147	2574	8722	8592	8950	7500	5842	8416
27 Walter	136	x	x	x	x	x	x	楕面上での判別が困難
28 Zagat	84	2575	9950	12125	11397	11688	8715	11290

第I象限

1 Agrippa	46	x	x	x	x	x	x	楕面上での判別が困難だったため。
2 Apollonius	53	2342.5	9034	8882	9186	8872	6651	8933.5
3 Arnold	95	2381.25	8545	8597	8407	8024	6012	8393.25
4 Aristylus	55	3356.5	7954	7598	7880	8088	4586	7882.5
5 Aristoteles	87	3470.25	7482	7473	7809	8149	4258	7728.25
6 Atlas	87	2682.75	8666	8900	8453	8744	6008	8690.75
7 Bailland	90	x	x	x	x	x	x	楕に近く判別が困難だったため。
8 Barrow	93	1650	9138	10521	9203	8838	7775	9425
9 Barrossos	74	2421	8762	8917	8627	7902	6131	8952
10 Casali	57	2008.25	7402	6797	7065	7140	5093	7101.25
11 Chacernac	51	1048.75	8769	9149	8697	8532	7737	8786.75
12 Cleomedes	126	4346.5	9271	10492	9840	7903	5030	9376.5
13 Condercet	74	2821	9111	9461	8750	8698	6184	9005
14 De la Rue	136	2981.25	9093	8886	8823	8871	5562	8943.25
15 Endymion	125	3382	10303	10083	8292	9206	6089	9471
16 Eudoxus	67	3829	9165	7596	8368	9087	4725	8554
17 Francisc	55	1866.25	9463	8974	9283	9113	7242	9208.25
18 Franklin	56	2552.5	8473	8661	8521	8711	6054	8606.5
19 Gauss	177	3885.25	9988	8815	9385	8385	5258	9143.25
20 Geminus	86	3616.5	8610	9112	8704	9064	5256	8897.5
21 Hehn	84	3659.5	8692	9233	8406	9051	5186	8845.5
22 Hercules	69	5433.5	8698	8262	8045	8449	2930	8353.5
23 Julius Caesar	90	1027.5	8796	9871	8554	9613	8181	9208.5
24 Lime	3	x	x	x	x	x	x	楕が小さすぎため判別が困難
25 Macroclus	64	3560.5	9962	8955	9180	8969	5706	9265.5
26 Masalskalis	124	1813	8477	8421	8363	8363	6850	8447
27 Picard	23	1813	5659	5719	5682	5764	3893	5706
28 Psalidonus	95	1802	8753	6640	7527	7740	5863	7655

小規模クレーターの直径と深さ

番号	直径	南北	東西(直径の50%)	Hc	Hw	Hh	Hs	L	H
1	36	29	8.783783784	266.75	6341	6390	6374	6254	6338.75
2	45	34	10.675767668	326.5	6471	6502	6518	6385	6461.5
3	33	28	8.243243243	300	6544	6557	6657	6542	6185
4	35	39	10	528.5	6462	6461	6434	6373	6432.5
5	67	59	17.02702703	389.5	6476	6536	6522	6464	6489.5
6	71	74	19.59459459	1227.5	6752	6799	6755	6696	6750.5
7	40	34	10	671	6509	6435	6464	6396	6451
8	45	35	10.81081081	853.5	6605	6559	6625	6515	6626
9	32	31	8.518318314	513.75	6460	6599	6710	6804	6675.5
10	19	21	5.405405405	72.5	6523	6534	6615	6534	6526.5
11	18	26	5.945945946	76.25	6560	6523	6531	6507	6454
12	42	39	10.94594595	919.75	6742	6760	6645	6404	6493
13	37	42	10.675767668	375.75	6449	6381	6207	6210	6311.75
14	62	68	17.56756757	1900.75	6487	6492	6304	6360	6410.75

衝突盆地の直径と深さ

月の海	3323	3365	902.4324324	6647.25	9716	14722	11977	10294	4730	11677.25
モスコラの海	1533	1394	395.5405405	6974.5	12290	11103	9757	8876	3932	10500.5
スミア海	1608	1637	438.5135135	4323	8895	9056	7363	9714	4424	8747
急崖の海	2395	1770	562.8378378	4663.75	7767	9652	9605	8485	4236	8899.75
神酒の海	1566	1547	420.6756757	2886	7544	6975	7324	8981	5380	8206
球れの海	2674	2417	687.972973	3046.75	8862	9728	7417	8668	5622	8688.75
南の海	4332	4242	1158.648649	3213.25	8116	7284	7157	8584	4572	7785.25
返りの海	1574	1424	405.1351351	2667.25	7357	9198	7660	9598	5786	8453.25
ランゴルト海	1210	1158	320	4822	7491	6852	9191	8802	3622	8084

*距離、傾斜ともに計算値(修正値)を小数第一位で四捨五入