

秋吉台若竹山周辺におけるドリーネの 形状的特徴の予察研究

曽根原 崇文 1)

要旨 国の特別天然記念物である秋吉台の若竹山周辺において2020年3月に実施された現況調査(美祢市 教育委員会)によるUAV連続写真から作成した数値地形モデルデータおよびドリーネ形状データを借用し、 外縁形状が閉じたドリーネ90個の形状的特徴を検討し、次の予察的結論を得た.(1)ドリーネの大半は、 深さ(1-19m)が大きいほど外縁(平均半径10-55m)が大きく、浅いものは底が広い皿状を、深いも のはすり鉢状を呈する(底面の平均半径3-16m).平面形状は外縁・底面共に深いものほど円形度が高い ものが主体になる.これは秋吉台における溶食ドリーネの形状的特徴と考えられる.(2)上記とは異なり、 深さ(1-7m)に比べ外縁(平均半径4-17m)および底面(平均半径0.8-3m)が小さく凹みが目立つ小 規模なドリーネが存在し、それらの形成には溶食だけでなく陥没が影響していると推定される.

キーワード:秋吉台,カルスト,ドリーネ,溶食,陥没,GIS

1. はじめに

ドリーネ (doline: 北米ではsinkholeとも呼ばれる) は、 溶食という地質現象に起因して形成されるカルストを特徴 づける地形の一つである.溶食作用を受けやすい炭酸塩岩 や蒸発岩が本邦に比べ広く分布する海外では、Cvijić (1893)による研究に始まり、ドリーネをはじめカルスト地 形の成因に関する研究が進められてきた。ドリーネは円形 ~亜円形の平面形状を示す凹地形であるが、直径は数m-1 km, 側斜面の勾配は緩傾斜~垂直, 深さは数m-数 100 mで、その形状は浅い皿状・漏斗状・円筒状と多様で ある (Ford and Williams, 2007). ドリーネの形状の多様性 は、岩盤の溶食(solution)、岩盤やそれを被覆する非溶食 性帽岩あるいは土壌の陥没 (collapse), 陥没よりも緩慢に 進行する土壌の沈下(subsidence)といった形成過程を反 映していると考えられている (Ford and Williams, 2007). 一般的には主要な2つの形成過程に基づき溶食ドリーネ (solution doline) と陥没ドリーネ (collapse doline) に大 別され、前者は浅い椀状をなすのに対し、後者は側斜面が 急勾配をなすという特徴があるとされている (Ford and Williams, 2007).

日本最大の規模(東西15 km,南北8 km)を有する石灰 岩台地である秋吉台には、多数のドリーネが分布しており、 それらは溶食ドリーネに当たる(例えば, Matsushi *et al.*, 2010).秋吉台のドリーネについては、例えば室(1975)に よる10個のドリーネについてのCvijić式形状分類や Matsushi et al. (2010)による5個の地形断面プロファイル が報告されているが、ドリーネは一般的な地形図で示され る縮尺よりも小規模なものが多いため、定量的な調査は少 ない状況にある.しかし、近年の技術進歩により、UAVに よる写真撮影等により詳細な地形情報が容易に得られるよ うになってきた(例えば、渡邊ほか、2016).この論文で は、著者が携わった国指定の特別天然記念物である秋吉台 の地形地質に係る現況調査(美称市教育委員会)において 得られた数値地形モデルデータを用いて、若竹山周辺にお ける90個のドリーネの形状要素を抽出し、ドリーネの深さ と断面形状に着目して、それらの形状的特徴について予察 検討を行った.

2. 調査地の概要

調査地は山口県美祢市に位置し,国の特別天然記念物に 指定されている秋吉台南部の若竹山(標高253.4 m)を含む 北東 – 南西約1.0 km,北西 – 南東約0.8 kmの範囲である (図1).標高は230-270 m程度であり,地形面区分では若 竹面(三浦・浜田,1981)に該当する.秋吉台には若竹面 など複数の平坦面が発達しており,それらは河川営力の影

Engineering Geology of Japan, No.12, 19-31 (2022)

Preliminary study on geomorphological characteristics of dolines around the Mt. Wakatakeyama in the Akiyoshidai area, western Japan

Takafumi Sonehara1)

Corresponding author : T. Sonehara, sonehara@geohiruzen.co.jp ¹⁾ Hiruzen Institute for Geology and Chronology, Co. Ltd., 2-5

Nakashima, Naka-ku, Okayama 703-8252, Japan

2022年5月23日受付, 2022年7月28日受理. © 2022 Hiruzen Institute for Geology and Chronology. All rights reserved.

 ¹⁾株式会社蒜山地質年代学研究所 〒703-8252岡山市中区中島2番地5



図1 (a) 調査地(秋吉台若竹山周辺)の位置図. 基図は地理院タイルの白地図を使用.(b) 秋吉台若竹山周辺に分布するドリーネ等の 凹地形の分布図(平面直角座標系III). 本研究の対象である外縁が閉じたドリーネ(90個)は着色表示した. ドリーネに付した番号は 付表1に対応する. 基図は地理院タイルの標準地図を使用.

響によるものと考えられているものの,各平坦面の形成年 代を直接示すデータはこれまでに発見されていない(藤井, 2005; 藤井ほか, 2019). 秋吉台において, カルスト化が進 行したのは2,000万年前以降で、台地化が始まったのは426 万年前(前期鮮新世)という推定がなされている(藤井, 2008;藤井ほか,2019).調査地の南西側には、北東-南西 方向に伸びたウバーレである「ながじゃくり」が分布する. 秋吉台の植生は、本来常緑広葉樹林であると考えられるが、 農耕文化の発達に伴って草原へと変わり、やがて農家の共 同草刈場として春に山焼きが行われ、その慣行は現在へと 引き継がれ草原が維持されている(漆原編, 1996). 調査地 において、大規模な人工改変地は、カルストロード(県道 242号)や美祢市立秋吉台科学博物館の周辺以外に分布し ない. ただし、ドリーネの底は江戸時代に耕作地として利 用され(漆原編,1996),また,秋吉台はかつて陸軍演習地 として使用され(漆原編, 1996), 塹壕跡が存在するなど, 小規模な人工改変は多数存在する.

3. 解析データおよび方法

数値地形モデルデータは、2020年3月5日(山焼きが実施 された2月23日の11日後)に撮影されたUAV連続写真(813 枚,オーバーラップ率約80%,サイドラップ率約70%,解 像度約3.5 cm/px)から作成されたDTMデータ(約0.16 m メッシュの標高データ)を美祢市教育委員会より借用して 使用した.ただし、このUAV写真撮影は、高度な精度を必 要とする測量を目的としたものではなく、現況確認のため 実施されたものであり、作成されたDTMデータは当時の 公共測量で実施されるレベル(UAVを用いた公共測量マニ ュアル(案)(平成29年3月改正):国土地理院、2017)の正 確さはない.ドリーネの外縁および底面の形状については、 現況調査で作成された Shape ファイルを美祢市教育委員会 より借用して使用した.

本研究での解析対象は、ドリーネの外縁形状が概ね閉じ て独立した形状を有するものを対象とし、ドリーネ同士が



図2 GISを用いたドリーネの形状計測の概念図. Ar:ドリーネ外縁 (outer rim) で囲まれたポリ ゴンの面積 (単位:m²), Lr:ドリーネ外縁の外 周の長さ(単位:m²), Lr:ドリーネ外縁ライン の平均標高(単位:m), Hr:ドリーネ底面 (floor) のポリゴンの面積(単位:m²), Lf:ドリーネ底面 ポリゴンの中心(重心)座標(平面直角座標系Ⅲ) の標高(単位:m), θ_s :ドリーネの外縁と底面 の縁に挟まれた斜面(side slope)ポリゴンの平 均勾配(単位:[°]), Rr:ドリーネ外縁で囲まれ た範囲の平均半径(=(Ar/ π)^{0.5},単位:m), Rf: 底面の平均半径(=Hr-Hf,単位:m), Dp: ドリーネの深さ(=Hr-Hf,単位:m).

複合したものは統一的な形状要素が得られないことから対 象外とした.また、山焼きが行われていない調査地南部の 植生が残存するドリーネについても、地形情報が正確でな いため対象外とした.この他、底面標高が適切に得られて いない竪穴のような極小規模な凹地形も対象から除いた(例 えば、美祢市立秋吉台科学博物館近傍の恵藤穴).以上の選 別により、Shapeファイルとして抽出された全265個の凹地 形のうち、90個を本研究での解析対象とした(図1).

上記のDTM データとShapeファイルを元に、ドリーネ の外縁(outer rim)で囲まれたポリゴンの面積(Ar,単位: m²)およびその外周長(Lr,単位:m),外周長の平均標高 (Hr,単位:m),ドリーネの底面(floor)ポリゴンの面積 (Af,単位:m²)およびその外周長(Lf,単位:m),底面ポ リゴンの中心(重心)座標(平面直角座標系III)における 標高(Hf,単位:m),ドリーネの外縁と底面の縁に挟まれ た斜面(side slope)ポリゴンの平均勾配(θ s,単位:°)を 一次データとしてGISソフト(QGIS)により求めた(図 2).また,得られたデータから,外縁で囲まれた範囲の平 均半径(Rr = (Ar/ π)^{0.5},単位:m),底面の平均半径(Rf =

表1 秋吉台若竹山周辺における外縁が閉じたド リーネの形状に関する基本的な統計データ(N = 90). $(A_{f}/\pi)^{0.5}$,単位:m),ドリーネの深さ $(D_{p} = H_{r}-H_{f}$,単位:m)を二次データとして計算で求めた (図2).取得したデ ータの一覧を付表1に示す.

なお、データの誤差については、第5章で考察する.

4. 解析結果

解析した90個の外縁が閉じたドリーネについて、形状に 係る項目の基本的な統計データを表1に示す.この表には、 ドリーネの外縁形状の円形度($Cr = 4\pi Ar/Lr^2$,無次元)お よび底面の円形度($Cf = 4\pi Af/Lf^2$,無次元)の他、断面形 状の比(Rr/Dp, Rf/Dp, $Rr/Rf = (Ar/Af)^{0.5}$, Sh/Dp = 1/tan θ s)も掲載した.また、計測データ(Rr, Rf, Dp, θ s)のヒ ストグラムを図3に示した.

外縁で囲まれた面積 (Ar) の中央値は1,020 m² (最小50.3 m², 最大9,424 m²), 外周長 (Lr) の中央値は120 m (最小 25.7 m, 最大358 m), 平均半径 (Rr) の中央値は18.0 m (最小4.0 m, 最大54.8 m), 円形度 (Cr) の中央値は0.94

項目	記号 [単位]	最小值	第1四 分位数	中央値	平均值	第3四 分位数	最大値
外縁で囲まれた面積	Ar [m ²]	50.3	584.3	1019.9	1633.1	1997.5	9424.2
外縁の外周長	L _r [m]	25.7	91.7	119.6	134.8	161.9	357.5
外縁の平均半径	$Rr[m] = (Ar/\pi)^{0.5}$	4.0	13.6	18.0	20.6	25.2	54.8
外縁の円形度	$C_r = 4 \pi A_r / Lr^2$	0.73	0.91	0.94	0.92	0.96	0.98
底面の面積	$Af[m^2]$	2.2	127.2	210.6	232.7	310.2	840.3
底面の外周長	Lf [m]	5.7	44.8	56.0	56.0	66.9	106.3
底面の平均半径	$R_{f}[m] = (A_{f}/\pi)^{0.5}$	0.8	6.4	8.2	8.2	9.9	16.4
底面の円形度	$C_f=4\piA_f/L_{f^2}$	0.48	0.82	0.88	0.85	0.92	0.98
深さ	Dp [m]	1.1	2.2	3.7	5.1	6.5	18.7
斜面の平均勾配	$\theta_s [\circ]$	10.1	18.7	20.9	21.2	24.0	37.2
斜面勾配の標準偏差	std. θs [°]	5.2	7.4	8.2	8.1	8.8	11.5
外縁の平均半径 / 深さ	Rr/Dp	1.5	3.6	4.6	5.2	6.1	13.9
底面の平均半径 / 深さ	Rf/Dp	0.3	1.3	2.0	2.4	3.0	9.5
外縁の平均半径 / 底面の平均半径	$R_r/R_f = (A_r/A_f)^{0.5}$	1.4	2.0	2.3	2.6	3.0	6.0
水平斜面長 / 深さ	$Sh/D_p = 1/tan\theta_s$	1.3	2.3	2.6	2.7	3.0	5.6



図3 秋吉台若竹山周辺におけ る外縁が閉じたドリーネの形 状データのヒストグラム (N= 90). (a)ドリーネ外縁で囲ま れた範囲の平均半径 (Rr,単位 :m), (b)底面の平均半径 (Rf, 単位:m), (c)ドリーネの深さ (Dp,単位:m). (d)ドリーネの 外縁と底面の縁に挟まれた斜 面の平均勾配 (θ_s ,単位:°).

(最小0.73,最大0.98)である.外縁の平均半径 (Rr)のヒストグラムは,Rr=10-20mの区間のものが約6割を占め, 単峰性が顕著である (図3a).ただし,ヒストグラムは右 (平均半径が大きい方)に袖を引いた散らばりを示してお り,ピークは中央値 (Rr=18.0m)に比べ小さな区間 (Rr =10-15m)に位置する (図3a).また,Rr < 10mのもの は極端に数が少なく,ヒストグラムはピーク両側の非対称 性が顕著である (図3a).

底面の面積 (Af) の中央値は211 m² (最小2.2 m², 最大 840 m²),外周長 (Lf) の中央値は56.0 m (最小5.7 m,最 大106 m),平均半径 (Rf) の中央値は8.2 m (最小0.8 m, 最大16.4 m),円形度 (Cf) の中央値は0.88 (最小0.48,最 大0.98) である.底面の平均半径 (Rf) のヒストグラムは, Rf = 8-10 mの区間 (度数の割合は約3割) にピークをもつ 単峰性を示し,ピーク位置は中央値 (Rf = 8.2 m) と調和 的である (図3b). Rf \geq 12 mのものは少なく,ヒストグラ ムはピーク両側でやや非対称をなすものの,全体としては 正規分布に近い (図3b).

ドリーネの深さ (D_p) の中央値は3.7 m (最小1.1 m, 最 大18.7 m) である. 深さ (D_p) のヒストグラムは, D_{p=2} $-4 \mod O$ 区間 (度数の割合は約3割) にピークをもつ単峰性 を示し, ピーク位置は中央値 (D_p=3.7 m) と調和的であ る (図3c). ただし, ヒストグラムは右 (深さが大きい方) に袖を引いた散らばりを示しており, ピークの両側の非対 称性が顕著である (図3c).

外縁と底面で挟まれた斜面の平均勾配(θ s)の中央値は 20.9°(最小10.1°,最大37.2°)であり、その標準偏差(std. θ s)の中央値は8.2°(最小5.2°,最大11.5°)である。平均 勾配(θ s)のヒストグラムは、 θ s=17.5-25.0°の区間の ものが約6割を占め、中央値(θ s=20.9°)とも調和的であ り、全体としてはこの区間にピークを有する、左右ほぼ対 称な単峰性を示し(図3d)、正規分布に近い、ただし、細 かく見ると θ s=17.5-20.0°の区間と θ s=22.5-25.0°の 区間にピークが分かれる(図3d).

断面形状の比は,外縁の平均半径/深さ(Rr/Dp)の中 央値が4.6 (最小1.5,最大13.9),底面の平均半径/深さ (Rf/Dp)の中央値が2.0 (最小0.3,最大9.5),外縁の平均 半径/底面の平均半径(Rr/Rf)の中央値が2.3 (最小1.4, 最大6.0),平均水平斜面長/深さ(Sh/Dp)の中央値が2.6 (最小1.3,最大5.6)である(表1).断面形状の意味につい ては次章で検討する.

5. 考察

(1) データの誤差

今回使用した数値地形モデルデータは、高度な精度を必要とする測量を目的としたものではなく、公共測量並みの 精度はない.例えば、撮影範囲の中央付近の若竹山では三 角点標高との差は+25 cm以内に収まるものの、範囲の端 に位置する小丘頂部付近の標高(地理院地図での表記は 268 mだが、航空レーザ測量による5mメッシュデータでは 267.2 m)に対して-0.9 mのずれがあり、絶対精度は十分 ではない.しかしながら、本DTMデータは、モデル内の 相対誤差が±10 cm以内で、従来の地形図に比べて詳細な 地形情報を有していると言える.そこで、本研究では予察 的な検討には本DTM データは利用可能であると判断した.

ドリーネの外縁および底面の形状(Shapeファイル)は、 DTM データから作成した等高線図や微地形図を用いて著者 が地形判読により抽出した遷急線および遷緩線に基づき, GIS ソフト上で手入力したものである. この人間の視認に よる地形判読は、地形に関わる研究において用いられてき た実績のある手法である、しかし、判読者が異なれば抽出 される形状は多少なりとも異なり、人為的な誤差を内包し ている.今回の場合,とりわけドリーネの外縁の位置につ いては、傾斜変化が緩やかであることから判読による人為 的な誤差は相対的に大きいと予想される。これに対し底面 については、耕作地として利用された人工改変のためか地 形変化が明瞭であり、抽出における人為的な誤差は小さい と考えられる.ただし、多段状の底面を有するドリーネに ついては判読者によって底面位置の判断が分かれるかもし れない. そこで、本研究では、最も明瞭な最低位の平坦面 を底面として採用した.また,地形判読に係る誤差以外で も,Shapeファイルの作成における入力点の密度,すなわ ちどれだけ細かく形状を表現・入力するかによっても面積 や長さは異なる.これも人為的な誤差の要素となり.ドリ ーネの規模が小さいものほど影響は大きいものと予想され る.以上のように、本研究で用いるデータは数値(デジタ ル)として表現されるものの、その取得はアナログ作業に よるもので必ずしも再現性が高い訳ではない(人為性を有 する)ことに留意が必要である.

(2) データの相関性

本研究で対象としたドリーネは、若竹面(三浦・浜田, 1981)という同じ地形面に分布するものの、外縁の平均標 高には230-270m程度の差がある.しかし、ドリーネ外縁 の平均標高と計測データ(Rr, Rf, Dp, θs)の関係について 散布図(図4)を作成すると,標高230-270 mでは,計測 データの分布に標高の違いによる明瞭な差は認められない. したがって,本研究で検討するドリーネのサイズや斜面勾 配の計測データは,ドリーネが位置する標高の差が影響す るものではないと考えられる.

次に計測データの特徴を捉えるため、各形状計測データ (Rr, Rf, Dp, θ s, Cr, Cf) について散布図を作成し、関係性 を検討する(図5).

ドリーネの深さ(Dp)と外縁の平均半径(Rr)は相関性 が高く(相関係数:0.94),正の相関を示す(図5a).この ことは、図3のヒストグラムにおいて、ドリーネの深さ(Dp) と外縁の平均半径(Rr)が似た度数分布を示すことと調和 的である.図5aはドリーネが深いものほど外縁の平均半径 が大きいことを示しているが、その因果関係として、鉛直 下方の溶食量と外縁で囲まれた集水面積が比例することが 考えられる.

ドリーネの深さ(Dp)と底面の平均半径(Rf)は,正の 相関の傾向を示すものの,サイズの小さなものについては ばらつきが大きい(図5b).溶食程度の小さな浅いドリー ネでは,底部における溶食量がドリーネごとで大きく異な ると考えられる.

斜面勾配(θ_s)と深さ(D_p)については,浅いもので傾 斜のばらつきが大きく,深くなるにつれて25度付近に収束 するような傾向を示す(図5c).溶食程度の小さな浅いドリ ーネでは,底面だけでなく側斜面の溶食量もドリーネごと で大きく異なると考えられる.逆に,溶食程度の大きい深 いドリーネでは,25度程度の斜面勾配を形成することから, 溶食速度がほぼ一定になっていることを反映している可能 性がある.なお,図5には示していないものの,斜面勾配



図4 秋吉台若竹山周辺に おける外縁が閉じたドリー ネの形状データと分布標高 の散布図. (a)ドリーネ外縁 で囲まれた範囲の平均半径 (Rr,単位:m), (b)底面の平 均半径 (Rf,単位:m), (c)ド リーネの深さ (Dp,単位:m). (d)ドリーネの外縁と底面の 縁に挟まれた斜面の平均勾 配(θs,単位:°).



おける外縁が閉じたドリー ネの形状データの散布図. (a) ドリーネの深さ (Dp,単 位:m)とドリーネ外縁で 囲まれた範囲の平均半径(Rr, 単位:m),(b)ドリーネの 深さ(Dp,単位:m)と底面 の平均半径 (Rf, 単位:m), (c)ドリーネの深さ (Dp, 単 位:m)とドリーネの外縁 と底面の縁に挟まれた斜面 の平均勾配(θs.単位:°). (d) ドリーネ外縁で囲まれた 範囲の平均半径(Rr,単位 :m)と底面の平均半径(Rf, 単位:m), (e) ドリーネ外 縁で囲まれた範囲の平均半 径(Rr,単位:m)とドリー ネ外縁形状の円形度(Cr,無 次元), (f)ドリーネ底面の 平均半径(Rf,単位:m)と ドリーネ底面形状の円形度 (Cf, 無次元). (a) は正の相 関を示すため,回帰直線も 表示した.

秋吉台若竹山周辺に

図5

(θs) と外縁の平均半径(Rr)も図5cと同様な関係を示す が、斜面勾配(θs)と底面の平均半径(Rf)は明瞭な相関 は示さない.

ドリーネの外縁の平均半径 (Rr) と底面の平均半径 (Rf) は、ばらつきが大きいものの正の相関の傾向を示す(図5d). 集水面積(外縁の範囲)と水が集中する底面の大きさは概 ね比例すると考えられる.

円形度 (Cr, Cf) については、外縁形状も底面形状も、そ れらの平均半径(Rr, Rf)とは明瞭な相関は示さない(図 5e, f). ドリーネ底面の方がドリーネ外縁に比べて円形度の ばらつきが大きいことは、水が集中する底面の平面形状が 割れ目等の地質構造の影響を受けやすいことを反映してい ると考えられる.

以上の検討から、本研究の検討対象のドリーネのサイズ や形状は、溶食程度と密接な関係があると推定される。

(3) ドリーネの形状的特徴

ドリーネの形状的特徴を捉えるため、断面形状(図2)に おける図形的な相似性に着目する. ここで計測した長さの

比(例えばRr/Dp)のばらつきが小さい(一定の比に近い) ほど、ドリーネの形状は相似性が強いと考える。2種類の長 さを取った相関図(例えば図5a)において,原点を通るあ る直線上(例えばRr/Dp=2/1直線)にデータがプロットさ れる場合,断面形状における長さの比(以降,形状比と呼 ぶ)は常に一定であることになり、ドリーネの形状は大き さにかかわらず同じ形状比を有すること、すなわち図形的 に相似と言える.しかし、図5a,bを見ると、深さに対する 外縁や底面の平均半径の比(Rr/Dp, Rf/Dp)は、原点を通 るある直線上の分布は示しておらず、鉛直下方への溶食程 度(Dp)が異なればドリーネの形状比が異なると言える.

そこで、ドリーネの溶食程度と形状比(斜面勾配につい ては同じ表現とするため、正接の逆数で表示)の関係につ いて視覚的により理解しやすくするため、横軸に鉛直下方 への溶食程度を反映したドリーネの深さ(Dp)を取り、縦 軸に外縁の平均半径/深さ(Rr/Dp),底面の平均半径/深 さ (Rf/Dp), 外縁の平均半径/底面の平均半径 (Rr/Rf), および平均水平斜面長/深さ $(Sh/D_p = 1/tan \theta_s)$ を取っ た散布図を図6a-dに示す。また、縦軸に外縁の円形度(Cr)



秋吉台若竹山周辺における外 図6 縁が閉じたドリーネの深さに対する 形状比および円形度の散布図. 横軸 は溶食の程度を反映したドリーネの 深さ(Dp). 縦軸は、(a)ドリーネ外 縁の平均半径/深さ(Rr/Dp),(b) ドリーネ底面の平均半径/深さ(Rf/ Dp), (c)ドリーネ外縁の平均半径/ 底面の平均半径(Rr/Rf), (d)ドリー ネの平均水平斜面長/深さ(Sh/Dp =1/tan θs), (e) ドリーネ外縁の円 形度 (Cr), (f) ドリーネ底面の円形 度(Cf).(a)~(d)には図7の回帰直 線により求めた形状比のモデル曲線 (Dp=0.5-20 m) も示した.

図7 秋吉台若竹山周辺における外 縁が閉じたドリーネの深さ(対数) と形状比(対数)の散布図. 横軸は 溶食の程度を反映したドリーネの深 さ(Dp)の対数. 縦軸は, (a)ドリ ーネ外縁の平均半径/深さ(Rr/Dp) の対数,(b)ドリーネ底面の平均半 径/深さ(Rf/Dp)の対数, (c)ドリ ーネ外縁の平均半径/底面の平均半 径(Rr/Rf)の対数, (d)ドリーネの 平均水平斜面長/深さ(Sh/Dp=1/ tan θs)の対数.各散布図には全体 的な曲線状分布から大きく外れてプ ロットされる5つの計測値(ドリー ネ番号:109,179,230,237,260) を除いて求めた回帰直線も示した.

および底面の円形度 (Cf) を取った散布図を図6e-fに示す. ただし,円形度は値が同じでも図形的に相似であるとは限 らず,円形に近いかどうかの指標(1に近いほど真円に近 い)である.

ドリーネの深さと形状比の相関を見た場合,プロットされたデータは曲線状分布を示し,またこの分布から外れるデータも認識される(図6a-d).この曲線状分布は,グラフの両軸とも対数を取ると直線状をなすこと(図7)から,ベき関数曲線に近いと言える.また,図6a-dには両対数グラフ(図7)における回帰直線を元に算出した形状比のモデル曲線($D_P = 0.5 - 20 \text{ m}$)を参考として示した.なお,サイズにかかわらずドリーネの形状が図形的に相似である場合,図6a-dでは横軸に平行な直線上にデータがプロットされるはずである.すなわち $Rr = k \times D_P$ の場合, $Rr/D_P = k$ (kは定数)の散布図となる.図6a-dにおけるべき関数曲線状の分布は, D_P が大きくなると勾配が緩くなり,ドリーネの形状比はほぼ一定になると言える.

ここで図6におけるドリーネの深さと形状比および円形度 の関係について検討する.まず形状比については、ドリー ネが浅い場合 ($D_p = 1-5$ m)、ドリーネは深くなるにつれ、 外縁の平均半径/深さ (R_r/D_p)は14程度から4程度へ、底 面の平均半径/深さ (R_f/D_p)は10程度から1.5程度へ、外 縁の平均半径/底面の平均半径 (R_r/R_f)は1.5程度から2.5 程度へ、平均水平斜面長/深さ (S_h/D_p)は5程度から2.5程 度へと変化する (図6a-d). 一方, ドリーネが深い場合 (Dp =5-20 m), ドリーネは深くなるにつれ, 外縁の平均半径 /深さ (Rr/Dp) は4程度から2程度へ, 底面の平均半径/ 深さ (Rf/Dp) は1.5程度から0.5程度へ, 外縁の平均半径/ 底面の平均半径 (Rr/Rf) は2.5程度から4程度へ, 平均水平 斜面長/深さ (Sh/Dp) は2.5程度から2程度へと変化し, 形 状比の変化は小さく直線的な変化傾向を示す (図6a-d). ま た, 円形度については, 外縁が閉じたドリーネを解析対象 としたため下限に人為性が入っているものの, 外縁の円形 度 (Cr) も底面の円形度 (Cf) も, 浅い場合 (Dp = 1-5 m) は円形度のばらつきが大きく, 深い場合 (Dp = 5-20 m) は円形度の高いものが主体になる傾向を示す (図6e, f).

以上の検討から得られた形状比について,それを単純化 した模式的ドリーネ(円形度は1として表現)を図8に示し た.調査地におけるドリーネの形状的特徴として以下のこ とが指摘できる.①深いものほど外縁の範囲も大きい.② 断面形状は浅いものは底が広い皿状を示し,深いものはす り鉢状を呈する.また,平面形状の特徴としては,③深い ものほど円形度が高いものが主体になることが指摘できる.

上記のことを確認するため,図9には模式的形状を示すド リーネの例として,付表1のうち最も浅いもの(ドリーネ番 号:143, Dp=1.1 m, Cr=0.85, Cf=0.74),中間的な深さ を示すもの(ドリーネ番号:128, Dp=8.9 m, Cr=0.97, Cf =0.95),および最も深いもの(ドリーネ番号:32, Dp=



図8 秋吉台若竹山周辺における外縁が閉じたドリーネの深さと形状の関係を示した模式図.

18.7 m, Cr = 0.93, Cf = 0.93) を取り上げ,それらの平面形 状と断面形状を示した.これらは,深いものほど外縁が大 きく,浅いものは底が広い皿状を,深いものはすり鉢状を 呈しており,図8で示した模式形状の特徴と一致する.ま た,平面形状は,浅いものは円形度は低い(<0.9)のに対し,中間~深いものはそれに比べて円形度が高いこと(>0.9)が認められる.



図9 模式的形状を示すドリーネ(ドリーネ番号:143,128,32)の平面形状(上が北)と断面形状.深いものほど 外縁が大きく,浅いものは底が広い皿状を,深いものはすり鉢状を呈する.

(4) 形状的特徴から推定されるドリーネの形成過程

図8に示した現在におけるドリーネ形状の模式図は,溶食 ドリーネの形成過程を反映している可能性がある.その解 釈の一つとして,図8は現在進行形の溶食ドリーネの成長過 程を示しているということが挙げられる.この斉一説的考 えを取るならば,若竹山周辺に代表される秋吉台のドリー ネは,成長するにつれ,図8に示した形状変化が起こると考 えることができる.この考え方は,室(1975)が推定した 「小規模な皿状から大規模な漏斗状への形成過程」と同様で ある.

これに対し, Matsushi et al. (2010)は、原位置宇宙線 生成核種年代法(³⁶Cl)で求めた溶食速度に基づき溶食ド リーネの形成モデルを提案し、もともとの集水面積がドリ ーネの溶食速度を規制し、その結果、秋吉台における様々 なサイズの溶食ドリーネは数10万年オーダーの同じタイム スケールで形成されたと結論づけた.すなわち、「同一地域 に分布するドリーネの外形の大きさを決める要因は、時間 の長さではなくドリーネ生成初期に設定される集水面積で あることを示唆する」(松倉, 2021)というものである.し かし、溶食が進みドリーネが深くなれば、底部に水が集中 しやすくなり、ドリーネにおける溶食作用の環境が変化す ることも考えられ、その場合は溶食速度から元の地形を単 純に復元することはできない.

本論では、上記の斉一説的考えの立場から、図8で示した ドリーネの深さによる形状の違いが、溶食の進行に伴うド リーネの形成過程を反映していると仮定し、ドリーネの形 状的特徴が示唆する形成過程について検討する.

1)深いものほど外縁の範囲も大きいこと(規模の変化): ドリーネ底面が低下することで,周囲から水がより集まり やすい環境が形成され,単なる化学的な侵食(溶食)に加 えて重力や水に起因する物理的な侵食も作用することで、 ドリーネの外縁が拡大すると考えられる.外縁が拡大し集 水量が増えれば、ドリーネの溶食・侵食がより進む.そし て、さらに外縁が拡大すれば、中には隣接するドリーネと 外縁部が接合し、今回の検討対象から除いた複合形状を示 すドリーネが形成されると予想される.

2) 浅いものは底が広い皿状を示し,深いものはすり鉢 状を呈すること(断面形状の変化):溶食の進行に伴い底部 に向かって周囲から水が集中しやすくなり,ドリーネ下部 ほど下方への溶食速度が大きくなることを示唆していると 考えられる.底面の大きさが外縁に比べて大きくは変化し ないこと(図8)は,底面においては水平方向よりも鉛直下 方への溶食が進みやすいと理解することができる.なお, ドリーネの規模が大きくなると,斜面勾配は25度程度に収 束するような傾向がある(図5c)ので,溶食がある程度進 んだ段階で,溶食速度はほぼ一定に達している可能性があ る.

3)深いものほど円形度が高いものが主体になること(平面形状の変化):ドリーネの形成初期段階では,外縁や底面の形状は割れ目の分布など地質構造に規制されて成長が進みやすいため,その分布を反映した多様な形状を取りやすく,様々な円形度を示すと理解することができる.平面的に考えた場合,初期段階はある割れ目(円形度0の線分)にそって溶食が進むが,割れ目の周りの石灰岩の溶食速度に異方性が無いならば,割れ目から等距離をもって外形線が拡大していくことになる.この場合,拡大するにつれてその外形は円形に近づいていく.ただし,断層破砕帯などが存在する場合,母岩である石灰岩の溶食速度に異方性が生じ,拡大した外形は「ながじゃぐり」のウバーレのように地質構造に規制され,楕円形状を呈するものと予想される.



図10 模式的形状と異なるドリーネ(ドリーネ番号:237,109,179)の平面形状(上が北)と断面 形状.小規模で,深さの割に外縁および底面が小さく凹みが目立つ.

なお,浅いドリーネにおいて底面の大きさや側斜面の勾配 にばらつきが大きいこと(図5b, c)は、ドリーネ溶食の初 期段階では,溶食が進みやすい割れ目などの分布状況の影 響を受けやすく、ドリーネごとで溶食の進みやすさに差が あると考えることができる.

さて、図6において全体的な曲線状分布から外れるドリー ネは, 浅いもの(1−7 m) で目立つ. 特に大きく外れるも の(ドリーネ番号: 237, 109, 179) について, それらの平面 形状と断面形状を図10に示した.この図を見ると、図9で示 した模式的形状を示すドリーネに比べ,全体的に小規模で, 外縁(平均半径4-17m)に対して底面が小さく(平均半径 0.8-3 m), 顕著な凹形状を示す (図10). 実際に, 図7の散 布図では全体的な曲線状分布よりも、外縁の平均半径/深 さ(Rr/Dp),底面の平均半径/深さ(Rf/Dp)が小さく,外 縁の平均半径/底面の平均半径(Rr/Rf)が大きい傾向があ り、上記の特徴と一致する.室(1975)は、皿状や漏斗状 のドリーネ以外に井戸状のドリーネの存在を指摘しており, それらには石灰岩の風化土壌(テラロッサ)の陥没が顕著 に観察されると述べている。したがって、凹みが目立つ小規 模なドリーネは、その形成過程において溶食だけでなく、地 下空洞の天井崩落に伴う地表面の陥没が影響している可能 性がある.実際に番号109のドリーネの周りには人が立ち入 らないように柵が設けられており、その傍らには「ジバス」 の成因を問う秋吉台自然研究路の質問板が設置されている. 秋吉台では突然地面に凹地(穴)が形成されることがあり、 それをこの地方では「ジバス」と呼ぶとのことであるが、こ れは地下水により発達した地下空洞の天井が落ちること,す なわち陥没により形成されるものである.

6. まとめ

国の特別天然記念物である秋吉台の若竹山周辺において 2020年3月に実施された現況調査(美祢市教育委員会)に よるUAV連続写真から作成した数値地形モデルデータおよ びドリーネ形状データを借用し,外縁形状が閉じたドリー ネ90個の形状的特徴を検討し,次の予察的結論を得た.

- (1) 調査地におけるドリーネの大半は,深さ(1-19m)が 大きいほど外縁(平均半径10-55m)が大きく,浅い ものは底が広い皿状を,深いものはすり鉢状を呈する (底面の平均半径3-16m).平面形状は外縁・底面共に 深いものほど円形度が高いものが主体になる.これは秋 吉台における溶食ドリーネの形状的特徴と考えられる.
- (2) 調査地には上記の形状的特徴とは異なり、深さ(1-7 m)に比べ外縁(平均半径4-17 m)および底面(平 均半径0.8-3 m)が小さく凹みが目立つ小規模なドリ ーネが存在し、それらの形成には溶食だけでなく陥没 が影響していると推定される。

ただし、本研究で使用したデータは従来の地形図に比べ れば精緻であるものの、公共測量レベルの精度を必要とす る測量が目的で撮影された写真データを用いたものではな く、また、ドリーネの形状抽出には人為的な要素があり、 検討データはさまざまな誤差を有していることに留意が必 要である.

近年の調査技術の進歩は目覚ましいものがあり,また, 詳細な基盤地図情報の整備も進んでいる.加えて,多量の データを扱う解析手法もますます発展していくものと予想さ れる.秋吉台のカルストに限らず,今後さまざまな地形地質 を対象に,定量的な検討が進んでいくことが期待される.

謝辞

本研究で使用した数値地形モデルデータ(DTMファイ ル)およびドリーネ形状データ(Shapeファイル)は、美 祢市教育委員会から借用の許可をいただいた.調査に当た っては西山聖子さん(当時,美祢市教育委員会事務局文化 財保護課)にお世話になった.宿輪隆太さん(五島鉱業株 式会社)にはUAV写真撮影およびDTMデータ作成にご協 力いただいた.荒木(太田)陽子さん(当時,美祢市立秋 吉台科学博物館)には、現地調査において竪穴や塹壕、ド リーネ耕作地に係る情報をご教授いただいた.査読者であ る乙藤洋一郎さん(神戸大学名誉教授,地球史研究所所長) と井上善夫さん(株式会社蒜山地質年代学研究所)からは 建設的なコメントを,編集担当の八木公史さんからは不備 についての指摘をいただき,本稿は改善された.以上の方々 に心より御礼申し上げます.

引用文献

- Cvijić, J. (1893) Das Karstphanomen. Versuch einer morphologischen Monographie. Geographischen Abhandlungen herausgegeben von A Pench, Bd., V.H, 3. Wien, 218-329.
- Ford, D. C. and Williams, P. (2007) Karst Hydrogeology and Geomorphology. John Wiley, Chichester, 562p.
- 藤井厚志 (2005) 石灰岩地の侵食速度からみた中国〜北九州地方の カルスト発達史仮説. 洞窟学雑誌, 30, 1–28.
- 藤井厚志 (2008) 石灰岩地の侵食速度からみた中国〜北九州地方の カルスト発達史仮説(補遺).大阪経済法科大学科学技術研究 所紀要, 12, 31–41.
- 藤井厚志・中澤 努・上野勝美 (2019) 石炭-ペルム系秋吉石灰岩 の堆積作用とカルスト化作用. 地質学雑誌, 125, 609-631.
- 国土地理院 (2017) UAV を用いた公共測量マニュアル (案) (平成 29年3月改正). 42p.
- 松倉公憲 (2021) 地形学. 朝倉書店, 東京, 308p.
- Matsushi, Y., Hattanji, T., Akiyama, S., Sasa, K., Takahashi, T., Sueki, K. and Matsukura, Y. (2010) Evolution of solution dolines inferred from cosmogenic ³⁶Cl in calcite. *Geology*, 38, 1039–1042.
- 三浦 肇・浜田清吉 (1981) 西秋吉台鷹ヶ穴をめぐる台状地形と洞 窟. 秋芳町・秋芳町教育委員会編, 西秋吉台鷹ヶ穴石灰洞学術 調査報告, 27-40.
- 室 良雄 (1975) 秋吉台のドリーネ形態. 地理科学, 23, 45-49.
- 漆原和子編 (1996) カルスト―その環境と人びとのかかわり. 大明 堂, 東京, 235p.
- 渡邊達也・山崎新太郎・亀田 純 (2016) 小型無人航空機とGNSS を利用した数値地表モデルの作成実習. 地質学雑誌, 142, 643-649.

付表1 秋吉台若竹山周辺における外縁が閉じたドリーネの形状データ(N = 90). 凡例は表1および図2を参照. ドリーネの 番号は図1に対応する.

no.	H _r [m]	$A_r [m^2]$	$L_r[m]$	C _r	R _r [m]	$H_f[m]$	$A_f[m^2]$	$L_f[m]$	R _f [m]	C _f	D _p [m]	$\theta_{s}\left[^{\circ}\right]$	std. θ_s
1	234.91	5825.30	285.51	0.90	43.06	220.11	580.48	87.09	13.59	0.96	15.14	27.14	9.64
3	238.82	336.82	68.54	0.90	10.35	236.86	91.23	38.99	5.39	0.75	1.78	19.11	7.49
4	231.01	418.68	77.20	0.88	11.54	229.49	180.26	50.67	7.57	0.88	2.08	27.81	7.76
11	231.27	611.10	91.95	0.91	13.95	228.30	178.01	51.56	7.53	0.84	3.30	27.52	9.30
12	231.96	1019.12	117.27	0.93	18.01	227.36	207.63	54.41	8.13	0.88	4.71	25.57	7.93
14	230.80	1311.70	130.41	0.97	20.43	225.49	441.70	80.13	11.86	0.86	5.49	30.04	8.48
30	228.87	530.13	84.66	0.93	12.99	226.34	100.01	38.02	5.64	0.87	2.37	19.36	8.88
31	228.90	528.69	84.50	0.93	12.97	226.37	69.47	30.30	4.70	0.95	2.46	16.92	7.41
32	230.97	9424.19	357.47	0.93	54.77	212.45	840.25	106.30	16.35	0.93	18.73	26.11	7.58
39	246.66	830.69	104.52	0.96	16.26	242.76	186.16	53.38	7.70	0.82	4.04	28.59	9.11
41	239.17	1135.29	122.02	0.96	19.01	234.09	211.05	53.43	8.20	0.93	5.27	24.63	9.48
42	244.20	6215.00	287.51	0.94	44.48	228.37	662.71	93.94	14.52	0.94	15.15	24.85	8.42
44	257.76	362.54	68.72	0.96	10.74	255.78	107.49	39.04	5.85	0.89	1.89	19.26	6.00
47	237.11	2177.96	168.92	0.96	26.33	228.90	276.26	61.88	9.38	0.91	8.68	26.82	7.74
48	233.35	3209.21	219.24	0.84	31.96	224.88	429.85	76.99	11.70	0.91	9.11	22.65	7.10
52	229.22	539.72	84.12	0.96	13.11	227.53	127.43	43.13	6.37	0.86	1.80	15.71	8.79
53	229.26	595.18	92.06	0.88	13.76	227.81	125.36	44.83	6.32	0.78	1.54	13.60	5.23
54	228.35	1395.86	135.44	0.96	21.08	224.92	345.51	77.80	10.49	0.72	3.89	22.11	7.51
58	231.19	674.18	95.46	0.93	14.65	229.01	164.89	56.03	7.24	0.66	2.23	18.82	6.22
60	237.41	2435.31	178.33	0.96	27.84	229.05	201.82	52.27	8.02	0.93	8.77	24.74	8.64
61	241.75	1020.73	118.77	0.91	18.03	238.45	201.66	60.67	8.01	0.69	3.64	21.18	6.62
62	245.99	3659.51	218.59	0.96	34.13	233.61	313.80	65.84	9.99	0.91	12.55	28.10	8.02
63	243.93	1492.85	148.14	0.85	21.80	239.25	220.33	56.60	8.37	0.86	4.98	19.16	7.91
73	239.92	658.44	92.37	0.97	14.48	236.83	86.76	34.52	5.26	0.91	3.22	19.28	5.99
74	243.70	949.69	114.72	0.91	17.39	241.29	291.47	66.57	9.63	0.83	2.54	20.39	8.70
/5	240.75	686.28	98.67	0.89	14.78	238.54	338.49	/4.09	10.38	0.77	1.61	18.59	8.21
/9	239.12	070.10	128.75	0.85	18.86	234.75	195./1	56.29	/.89	0.78	4.54	22.67	9.96
81	239.43	8/0.10	113.39	0.85	10.04	230.17	125.85	55.54	0.33	0.39	3.15	19.99	7.55
02 02	239.00	1212.20	120.85	0.92	10.64	237.09	214.52	70.57	0.20	0.67	2.72	18.61	7.90
100	242.03	2860.22	106.31	0.89	30.22	239.01	208.01	62.48	0.74	0.05	3.00	16.01	7.12
100	230.12	1766.60	151.04	0.94	23 71	223.10	430.95	78.61	9.74	0.90	1.27	20.61	8.41
101	230.13	354 34	67.84	0.97	10.62	2224 58	84.83	33.23	5 20	0.00	2 46	24.03	8 41
103	227.29	1318 38	133.90	0.97	20.49	224.56	211 44	54 91	8 20	0.97	3 30	15.08	7 90
101	234 30	4189 52	233.83	0.92	36.52	223.00	425.08	77.18	11.63	0.00	11 59	23.83	8.60
108	234.09	543.01	85.10	0.94	13.15	232.49	147.09	46.87	6.84	0.84	1.87	17.97	7.50
100	236.62	208 44	52.64	0.95	8 15	232.13	9.28	11.76	1.72	0.84	4 16	28.37	10.50
112	230.18	403.45	74.55	0.91	11 33	228 71	161.24	48.15	7.16	0.87	1 73	23.85	8 43
117	240.27	1169 56	123.13	0.97	19.29	236.38	210.08	54.46	8.18	0.89	4.18	21.13	7.49
118	240.03	2195.99	168.23	0.98	26.44	232.56	324.36	65.05	10.16	0.96	7.63	24.09	8.66
119	242.72	751 39	113.91	0.73	15.47	241.55	351.59	90.82	10.58	0.54	1.11	16.04	8.47
120	241.90	538.22	87.80	0.88	13.09	240.74	210.21	60.86	8.18	0.71	1.08	15.23	9.19
121	242.14	1289.24	131.38	0.94	20.26	238.00	289.51	62.36	9.60	0.94	4.39	21.69	8.54
123	243.56	707.38	99.05	0.91	15.01	241.40	202.81	58.46	8.03	0.75	1.95	14.80	6.20
128	251.48	3601.46	215.89	0.97	33.86	242.95	328.31	66.01	10.22	0.95	8.86	20.58	8.80

付表1 (続き)

-													
no.	H _r [m]	$A_r [m^2]$	L _r [m]	Cr	R _r [m]	$H_f[m]$	$A_f[m^2]$	$L_f[m]$	$R_f[m]$	$C_{\rm f}$	D _p [m]	$\theta_{s}\left[^{\circ}\right]$	std. θ_s
129	244.78	942.62	112.98	0.93	17.32	241.74	87.05	35.05	5.26	0.89	3.15	16.29	7.57
131	242.24	1256.17	133.72	0.88	20.00	238.77	235.09	78.20	8.65	0.48	3.66	19.93	8.61
142	252.00	390.14	71.91	0.95	11.14	249.85	148.08	45.12	6.87	0.91	1.49	17.58	8.46
143	252.04	577.26	92.16	0.85	13.56	250.97	283.07	69.22	9.49	0.74	1.06	15.23	7.37
144	253.11	580.69	87.95	0.94	13.60	251.46	152.32	44.74	6.96	0.96	1.94	17.66	7.43
145	246.39	482.77	81.22	0.92	12.40	244.66	96.77	36.19	5.55	0.93	1.92	16.68	5.72
149	245.53	601.27	91.63	0.90	13.83	243.48	153.50	51.89	6.99	0.72	2.15	19.09	7.45
152	242.12	5096.63	263.25	0.92	40.28	229.63	299.43	70.03	9.76	0.77	12.81	22.79	9.22
154	242.69	1397.70	139.51	0.90	21.09	236.64	129.85	44.02	6.43	0.84	6.27	22.91	6.83
159	242.02	1102.40	120.44	0.96	18.73	237.25	176.12	48.74	7.49	0.93	4.83	25.14	8.25
162	245.58	1949.56	159.19	0.97	24.91	238.00	285.25	62.17	9.53	0.93	7.22	23.35	9.71
163	245.64	1252.59	127.00	0.98	19.97	241.84	271.77	64.62	9.30	0.82	4.06	21.97	8.39
164	245.61	958.09	115.31	0.91	17.46	242.00	215.92	54.30	8.29	0.92	3.87	23.06	10.06
165	246.08	514.74	83.04	0.94	12.80	243.72	101.80	39.43	5.69	0.82	2.49	21.03	8.89
170	245.45	6069.13	288.57	0.92	43.95	228.84	274.28	67.04	9.34	0.77	16.95	26.69	9.43
171	245.00	650.40	93.30	0.94	14.39	241.79	61.68	30.25	4.43	0.85	3.17	19.54	6.86
172	247.14	1256.83	131.35	0.92	20.00	242.50	82.85	34.32	5.14	0.88	4.78	19.95	6.71
173	251.76	494.07	81.91	0.93	12.54	248.96	82.40	36.48	5.12	0.78	2.95	20.99	8.85
177	248.39	3139.31	205.57	0.93	31.61	239.65	359.08	70.86	10.69	0.90	8.99	21.96	7.90
179	248.19	996.82	116.74	0.92	17.81	241.29	27.67	19.59	2.97	0.91	6.61	19.90	9.46
181	244.35	1201.38	128.68	0.91	19.56	240.40	239.56	56.33	8.73	0.95	4.49	23.05	6.64
182	245.96	1848.19	154.75	0.97	24.25	240.69	320.79	65.74	10.10	0.93	5.50	20.84	8.57
183	246.03	950.09	123.50	0.78	17.39	244.20	341.58	87.86	10.43	0.56	1.69	14.72	7.18
184	246.41	754.63	99.37	0.96	15.50	243.94	234.46	63.32	8.64	0.73	2.49	20.85	10.76
186	248.08	2567.04	190.30	0.89	28.59	238.65	191.11	52.58	7.80	0.87	9.75	24.81	9.23
189	247.14	1080.88	128.33	0.82	18.55	241.81	127.16	56.00	6.36	0.51	5.13	23.95	8.93
193	250.02	4393.97	240.27	0.96	37.40	240.41	389.27	70.83	11.13	0.98	10.05	19.67	8.12
196	250.78	1771.94	151.62	0.97	23.75	248.81	441.62	78.43	11.86	0.90	1.95	10.08	6.58
208	240.27	427.56	74.74	0.96	11.67	238.36	118.07	41.26	6.13	0.87	2.18	23.05	7.20
210	241.96	2013.49	162.75	0.96	25.32	237.58	586.85	90.16	13.67	0.91	4.82	22.62	10.35
230	271.95	85.62	33.51	0.96	5.22	270.82	25.64	18.33	2.86	0.96	1.14	26.95	11.49
233	268.67	893.01	108.76	0.95	16.86	265.72	231.57	59.58	8.59	0.82	2.96	20.32	8.72
237	282.28	50.27	25.67	0.96	4.00	279.26	2.23	5.67	0.84	0.87	2.66	37.25	10.50
241	267.69	524.96	84.02	0.93	12.93	265.19	88.39	34.39	5.30	0.94	2.49	18.14	(.()
243	266.00	441.30	/6.89	0.94	11.85	263.38	34.13	21.83	3.30	0.90	2.50	10.00	0.03
244	252.00	2111.40	100.91	0.95	25.92 42.72	240.10	251.30	57.48	8.94	0.89	5.95	19.21	/.44 0.61
245	252.44	2212.44	282.27	0.95	43.72	255.07	234.89	57.71 78.02	9.01	0.90	10.93	25.85	8.01 9.12
250	203.93	2044 50	204.01	0.90	20.72	230.37	436.92	70.16	11.82	0.91	1.00	21.03	0.12
252	203.40	2900.39	210.99	0.05	30./3 16.02	233.80	210 CO	/0.10	0.24	0.89	9.70	23.93	ð.3/ 7.16
253	204.78	800./9 2170 15	214.04	0.95	22.27	203.43	218.08	55.00 76.76	ð.34	0.91	1./0	13./1	/.10
254	208.19	34/8.43	214.94	0.95	35.27	237.33	415.96	/0./0	0.27	0.89	10.98	27.39	8.99 8.97
258	203.//	1233.11	129.00	0.94	19.99	200.25	214.81	38.70	8.27 7.24	0.78	3.73	10.80	ð.27 7.02
239	204.93	093.93	107.41	0.97	10.8/	202.00	109.04 26.70	47.00	2.02	0.94	2.23	13.45	1.92 5 77
200	203.70	2291.60	210.00	0.89	10.83	202.24	20.70	19.04	2.92	0.8/	0 50	11.42	J.//
203	∠04.40	3281.00	210.99	0.95	32.32	233.91	109.94	32.91	/./ð	0.80	0.38	19.90	0./8