

特集「衝突現象・衝突地形」

複数の作業者によるクレータ手動抽出結果とクレータ自動抽出への展望

沢辺 頼子¹, 松永 恒雄², 六川 修一¹

1. クレータカウンティングとその問題点

近年、世界各国で月や火星、小惑星に向けて探査機が打ち上げられ、また SELENE (SELEnological and ENgineering Explorer) [1] 等の大型プロジェクトも計画されている。現在既に処理しきれないほどの画像データが蓄積され、今後も増え続けることが必至である。この莫大なデータからどのように欲しい情報を抽出すればよいのだろうか？ここではクレータに焦点を絞る。

クレータは、隕石の衝突や火山によって形成された円形状の窪み地形を言う。月においては、そのほとんどが隕石起源であるといわれている。クレータの情報を利用した分野として、クレータ年代学 [2-5] がある。クレータ年代学とは、クレータの面積密度からその惑星の表面が形成された年代を推定するもので、目視判読によるクレータ抽出結果を用いて発展してきた分野である。現在クレータの自動、または半自動抽出手法の研究 [6-8] が行われているが、未だ実用化されていない。そのため、現在でもクレータ抽出は手動により行われている。

手動クレータ抽出の際に、画像上の輝度パターンをクレータとして認識する判断基準を明確に定義し、かつそれを作業中一定に保つことは困難である。そのため、従来では米国地質調査所等の限られた専門家による結果のみが、クレータ年代学の議論等では用いられてきた。しかし、それでは増大するデータに対応しきれない。それを受け、非専門家により、人海戦術で多くのデータからクレータを抽出しようという動きがあ

る [9]。しかし、非専門家によるクレータ抽出には上記の判断基準の問題があり、注意が必要である。このため、自動クレータ抽出アルゴリズムを利用するという選択も考える必要がある。

自動抽出したクレータ情報の利用分野として、クレータ年代学以外にも Pieters [10] のようにクレータの中央、壁、リム等のスペクトル情報から、その場所の地殻の鉛直構造を推定することがあげられる。我々は、自動抽出したクレータに対し、スペクトル情報を用いて地殻の鉛直構造を自動解析するシステム開発を視野に入れている [11]。その他にも小さなクレータが自動抽出可能であれば、2次クレータ研究の効率化が図れる。また、天体表面への隕石フラックスの直径分布をさらに小さな領域まで広げて推測できる可能性がある。

そこで、本論文では目視によるクレータ抽出結果が人によってどれだけ違うのか、複数の人の同じ画像に対する結果を比較し、議論する。また同じ画像に、著者が提案している自動クレータ抽出アルゴリズム [12] を適用した結果との相違点を明らかにする。それらを踏まえ、今後増大する月惑星画像に対するクレータ抽出の一つの方向を提案したい。

2. 手動クレータカウント方法

複数の作業者が、Apollo, Lunar Orbiter, Clementine 画像について目視によるクレータ抽出を行った。ここではクレータを画像上の円形構造と定義する。目視判読の基準として、

- ・抽出するクレータの半径は2画素以上

1. 東京大学大学院工学系研究科
2. 国立環境研究所

	Lat/Lon	Sun Angle	Spatial resolution
Apollo (AS16-0873)	6.4°S /143.7°E	Large	100m
Clementine 海 (bi10s351)	11.5°S /11.5°W	Small	100m
Clementine 高地 (bi38s335)	39.2°S/25.0°E	Small	100m
Lunar Orbiter 海 (IV-127-H2)	40.3°S/20.6°E	68.20 °	280m
Lunar Orbiter 高地 (IV-136-H2)	39.2°S/25.0°E	70.50°	340m

表 1 : 使用画像詳細.

・ 疑わしいものは抽出しない

という2点を定め、後はそれぞれの作業者の判断にまかせた。この半径2画素以上とは、画像上で認識可能な最小円に対応し、自動アルゴリズム[12]においても最小円を半径2画素としている。複数の作業者は、2名の専門家（月画像を扱っている研究者をここでは専門家と定義。ただし月惑星地質図作成業務に携わっていない）、4名の非専門家（月画像は扱っていないが、画像を用いた研究を行っているリモートセンシング関係の研究者）からなる。ただし、全員が全ての画像に対して作業をしたわけではない。また、実際の作業は、自作の手動クレータカウント補助ソフトを使用し、パソコン画面の画像上にマウスを使って円を描くという方法を取った。このソフトは画像の拡大・縮小、画像のスクロール、コントラストの調整（今回は不使用）、仮入力した円の移動機能が付いており、抽出した円の中心位置、大きさを表データとして保存する。

3. 自動クレータカウント方法

著者が開発した自動クレータ抽出アルゴリズムを視判読に使用した画像に適用し、手動抽出結果と比較する。本アルゴリズムは、複数のアプローチを利用することにより、クレータの大きさ、形状、場所（海や高地）、カメラ、太陽高度によらず、安定して高い精度でクレータを抽出することが可能である。

4. 使用データ

月のほぼ全球を光学センサにより観測した衛星は、現在のところ Clementine 衛星, Lunar Orbiter 衛星である。また、Apollo ミッションで月周回中に撮影された写真がある。そこで、本研究では Clementine データ, Apollo データ, Lunar Orbiter データを使用した。使用データの詳細を表1に示す。

4.1 Apollo データ

1968年から1972年にかけて、Apollo 計画として8機の探査機が打ち上げられた。本研究ではそのうちの Apollo16号機が月周回時に撮影したものを利用した。これは、Metric Camera によって高度約110km で取得された写真をデジタル化した画像である。本研究では空間分解能の違いによる議論をしないため、Clementine 画像に合わせて100m 空間分解能にした海を撮影した画像を用いた。

4.2 Lunar Orbiter データ

1966年から1967年にかけて Lunar Orbiter 探査機5機が打ち上げられた。この5回のミッションによって月面のおよそ99%が撮影された。本研究で使用したデータは、Lunar Orbiter4号機に搭載された Medium Resolution カメラによる画像である。この画像を Bowker and Huges[13]により、空間分解能を約300m にデジタル化したデータを使用した。

4.3 Clementine データ

Clementine は、NASA が1994年に打ち上げた月・小惑星探査機である。搭載された観測機器は、UUVIS (紫外可視・近赤外カメラ) 等である。UUVIS は、5つの狭帯域バンドと一つの広帯域バンドを持つ。本研究では、USGS (アメリカ地質調査所) により測光補正、モザイク処理がすでに施されている UUVIS raw image collection の750nm バンドのデータを利用した。Clementine データは、高い太陽高度の下で撮影されており一般にクレータ抽出には不向きである。しかし、本論文では太陽高度が高い場合でも抽出が可能かどうか検討するため、また今後抽出したクレータに対しスペクトル情報を用いて属性を付加していくため、Clementine データを利用した。

5. 手動・自動抽出結果の比較

5.1 手動抽出結果

5.1.1 Apollo 画像

Apollo 画像に対して、専門家(1) (白) と非専門家(1) (黒) が手動抽出を行った結果の例を図1.(a)に示す。一致率は、全員が抽出したのべ個数に対し71%である。また、専門家同士の違いを見るため、専門家(1)(白)と(2)(黒)の抽出結果を図1.(b)に示す。専門家(2)が抽出したクレータ数は、専門家(1)の319個と比べ、197個と少なく、一致率は65%となった。ただし、直径2km以上のクレータは24個中20個一致しており、不一致はより小さいクレータのみであった。小さなクレータでは、専門家同士の抽出結果は、専門家、非専門家との抽出結果よりも一致しない。これは、クレータと認識する対象も異なっていたためである。専門家(1)は、クレータの明暗パターンが非常に薄い(よく見ればクレータに見えるかもしれない)ものをクレータとして認識する傾向にあり、専門家(2)はほとんどそういったものを抽出していない。また、専門家(2)のみが抽出したクレータは非常に小さく、明暗が比較的はっきりしているという傾向がある。非専門家(1)

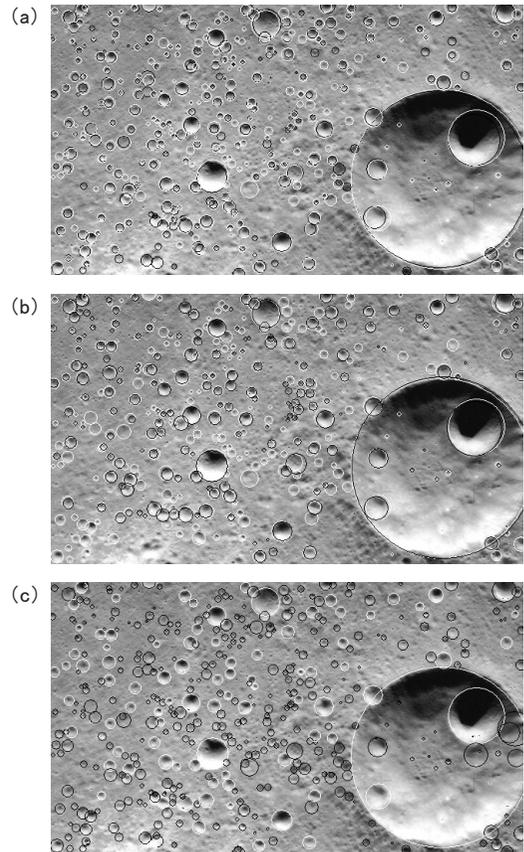


図1：Apollo 画像に対する手動抽出結果。(a) 専門家(1) (白) vs 非専門家(1) (黒), (b) 専門家(1) (白) vs 専門家(2) (黒), (c) 6人による抽出結果。白：全員が抽出したクレータ, 黒：5人以下が抽出したクレータ。

～(4)は、明暗パターンがはっきりとしているクレータを抽出し、あいまいなものや小さいものはクレータとして抽出しない傾向にあった。

また、6名が全員作業した Apollo 画像について、その結果の違いを図1.(c)に示す。ここで、白は6人も抽出したクレータ、黒は5人以下が抽出したクレータを表している。6人全員が抽出したクレータは、全員が抽出したクレータののべ個数に対し38%と非常に低い。

専門家、非専門家による抽出結果の頻度分布を図3(a)に、抽出個数を表4に示す。これより、直径2km以上までは非常に良く一致しているが、それより小さい

Apollo	一致人数	6	5	4	3	2	1
	抽出個数	87	48	45	45	63	149
	累積割合	38.6%	56.4%	69.7%	79.7%	89.0%	100.0%
Clementine 海	一致人数	-	5	4	3	2	1
	抽出個数	-	16	5	22	27	65
	累積割合	-	28.1%	35.1%	58.3%	77.2%	100.0%
Clementine 高地	一致人数	-	-	4	3	2	1
	抽出個数	-	-	11	0	9	38
	累積割合	-	-	44.0%	44.0%	62.0%	100.0%
Lunar Orbiter 海	一致人数	-	-	-	3	2	1
	抽出個数	-	-	-	30	23	24
	累積割合	-	-	-	56.3%	85.0%	100.0%
Lunar Orbiter 高地	一致人数	-	-	-	3	2	1
	抽出個数	-	-	-	9	17	70
	累積割合	-	-	-	2.0%	4.5%	100.0%

表 2 : 抽出人数別による手動抽出結果.

Apollo	一致人数	6	5	4	3	2	1	0
	抽出率	98.9%	83.3%	66.7%	42.2%	42.9%	28.9%	13.7%
Clementine 海	一致人数		5	4	3	2	1	0
	抽出率		93.8%	80.0%	90.9%	59.3%	61.5%	13.0%
Clementine 高地	一致人数			4	3	2	1	0
	抽出率			100.0%	0.0%	55.6%	47.4%	20.9%
Lunar Orbiter 海	一致人数				3	2	1	0
	抽出率				90.0%	26.1%	37.5%	28.8%
Lunar Orbiter 高地	一致人数				3	2	1	0
	抽出率				88.9%	5.9%	4.3%	0.9%

表 3 : 手動抽出人数毎の結果に基づく、自動クレータ抽出率.

(一致人数0の抽出率は、自動抽出のみが抽出したクレータ個数の全自動抽出個数に対する割合)

クレータでは、かなり個人差が見られることが分かる.

5.1.2 Lunar Orbiter, Clementine 画像

同様に、Lunar Orbiter, Clementine 画像について、目視判読結果を図2に、それぞれの抽出結果を表2に記す。一画像あたりのクレータ数が減ったせいもあり、一致率はさらに低い。特に Lunar Orbiter の高地画像 (図2 (d)) では、全員が一致したのは9個 (2%) となっ

た。これは、用いた地域の地形が複雑で、クレータが地表面の起伏かの判別が非常に難しいためと考えられる。この傾向は Clementine の高地画像 (図2 (b)) でも見られる。Clementine の海画像 (図2 (a)) は、太陽高度が高いこともあり、クレータのリムがはっきりと見えずクレータの認識が難しい。特に白く点状に見えるものの取り扱いによって結果に大きく差がでた。なお、同一人物による抽出結果から、同じ特徴をクレー

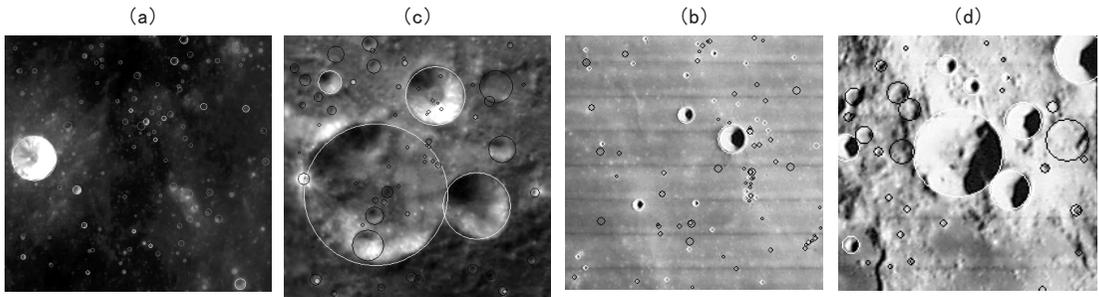


図 1 : Apollo 画像に対する手動抽出結果. (a) 専門家 (1) (白) vs 非専門家 (1) (黒), (b) 専門家 (1) (白) vs 専門家 (2) (黒), (c) 6人による抽出結果. 白 : 全員が抽出したクレータ, 黒 : 5人以下が抽出したクレータ.

タとする判断基準が一定ではない様子も一部見られた.

以上より, クレータであると人の目が判断するには個人差があることが, 非常に良く示された.

5.1.3 太陽高度が異なる画像

Clementine 高地と Lunar Orbiter 高地の画像はほぼ同じ地域を異なる太陽高度で撮影した画像である. 全員が抽出したクレータは, 両画像で同じである. しかし, 画像中央の最大クレータ内部に存在するクレータは, Clementine 画像では抽出できているが, Lunar Orbiter 画像では明度が高すぎて抽出できていない. 通常太陽高度が低い画像 (ここでは Lunar Orbiter 画像) の方がクレータ抽出に適しているといわれるが, このように明暗がはっきりしすぎてクレータが埋もれてしまう場合がある. 小さなクレータに関しては, Lunar Orbiter の空間分解能が低いこともあり, どちらが抽

出に適していたか述べることは難しい. 今後は, 同じカメラ, 同じ地域, 異なる太陽高度の画像により検討する必要がある.

5.2 自動抽出との比較

この節では自動クレータ抽出結果の信頼性及び人による抽出結果の相関について検討する.

表3に, 手動抽出結果と自動抽出結果の一致率を示す. 作業員全員が抽出したクレータを自動アルゴリズムも抽出した割合は平均で94%と非常に高い. また, 半数以上の人抽出したクレータを正解とすると, 自動アルゴリズムの抽出率は平均91%となった. ここで半数以上としたのは, 非専門家のみが抽出した不確かな抽出結果に大きく左右されるのを防ぐためである. 半数以上とすると, 今回用いた画像については, ほぼ少なくとも一人の専門家が抽出していた.

Bin diameter		Number of craters per bin					Surface area [km ²]
		Specialist 1	Specialist 2	Nonspecialist 1	Nonspecialist 2	Auto	
[pixel]	[km]						
4-8	0.4-0.8	45	40	38	27	122	2147
8-16	0.8-1.6	199	109	118	112	126	2147
16-32	1.6-3.2	68	43	32	26	29	2147
32-64	3.2-6.4	4	3	3	3	5	2147
64-128	6.4-12.8	1	1	1	1	1	2147
128-	12.8-	1	1	1	1	1	2147
total		319	198	190	170	284	

表 4 : Apollo 画像におけるクレータ抽出結果

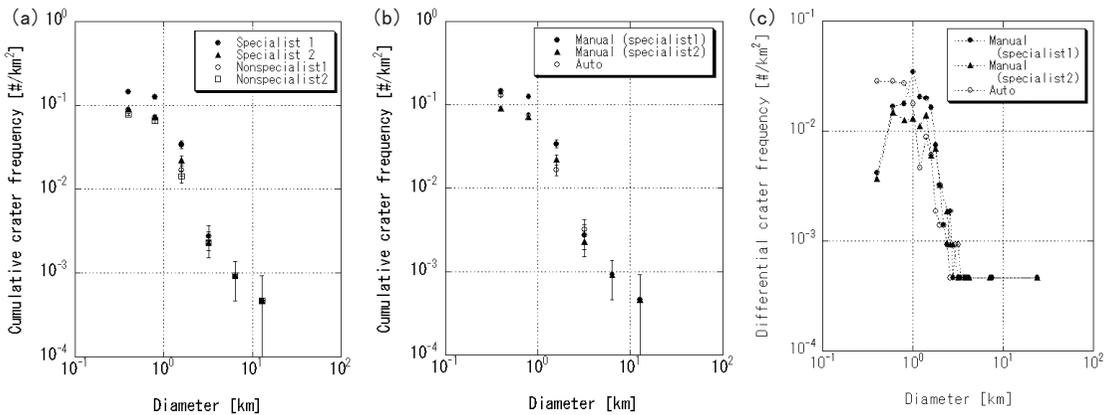


図3：Apollo 画像に対するクレータ抽出結果。横軸：クレータの直径，縦軸：単位面積あたりの抽出個数。(a) 専門家と非専門家による手動抽出の累積頻度分布。(b) 専門家による手動抽出結果と自動抽出結果の累積頻度分布。(c) 専門家による手動抽出結果と自動抽出結果の差分頻度分布。

Apollo 画像に対する専門家による手動抽出と自動抽出の累積ヒストグラムを図3(b)に、差分ヒストグラムを(c)に、抽出個数を表4に示す。これより、半径4画素以上の結果は非常に良く一致している。一方クレータの数と大きさは指数関数的な関係があると一般に言われているが、手動抽出結果は半径2、3画素になると不自然に減少していることが図3(c)から良く分かる。それに対し、自動抽出ではプロットが左肩上がりとなり、非常に小さいものも良く抽出できている。このことは、自動抽出によって、従来手動クレータ抽出の対象とならない小さなクレータも抽出できる可能性を示唆している。

また表4から、直径16から32画素のクレータでは、専門家による手動抽出個数に比べ、自動抽出個数が少ないことが分かる。この大きさで専門家のみが抽出したクレータは、クレータの明暗がはっきりとせず、エッジ抽出が困難であるものがほとんどであった。また、自動抽出の個数は非専門家が出した個数とほぼ同じである。このことから、非専門家が抽出したクレータについては自動抽出アルゴリズムにより抽出可能であったが、専門家のみが抽出した陰日向のコントラストが小さいクレータは抽出できなかったと言える。

自動抽出のみが抽出したクレータ(表2、一致人数0の列)は、ほとんどが小さなクレータである。また、

今回の手動抽出では画像のコントラスト変換機能を使用せずに作業を行ったが、自動抽出のみが抽出したクレータは、コントラストを変えたところ目視による認識ができるものがほとんどであった。このことから、自動抽出のみが抽出をしたクレータは必ずしも誤認識ではないことが分かる。

Apollo 画像に対して、自動抽出アルゴリズムは直径1.6kmより大きいクレータについては専門家による抽出と同程度抽出でき、0.8~1.6kmのクレータは非専門家が抽出した程度には抽出可能であり、さらに小さな0.8km以下のクレータでは専門家よりも多く抽出可能であった。なお、手動抽出の際、コントラスト調整の有無が抽出結果に及ぼす影響は、今回の画像では微小であった。

以上のことから、自動抽出アルゴリズムの精度は実用に耐えうるものと期待できる。

6. まとめ

複数の作業者による手動クレータ抽出を同じ画像に対して行ったところ、作業者全員が同じクレータを抽出した割合は、平均で3割であった。また、専門家同士であっても同じクレータを抽出した一致率は6割である。一致率の低下は、直径16ピクセル以下のクレー

タで目立った．自動抽出アルゴリズムの結果は，半数以上の作業者が手動抽出した結果に対し，9割以上の一致率となった．

今後の大量データに対するクレータ抽出には，客観的な自動クレータ抽出手法の重要性が示された．また自動抽出アルゴリズムは，専門家による限定された範囲の高品質なクレータ抽出を補完する役割を果たせる可能性を示した．

謝辞

本研究を進めるにあたり，JAXA，大阪大学の佐伯和人様より Apollo 画像をご提供いただきました．また，JAXA の春山純一様，東大の小林史歩様，東工大の小林秀樹様，筑波大の石原光則様にはクレータ抽出の作業にご協力いただきました．査読，編集担当の皆様には適切なご指摘，議論をいただきました．ここに感謝の意を記します．また，著者の一人（沢辺）は21世紀 COE 機械システムイノベーションによる補助を受けました．

参考文献

- [1] 松永恒雄, et. al., 1999, 日本リモートセンシング学会誌, 19, 5, 152.
- [2] Hartmann, W. K., et. al., 1972, *Astrophys. Space Science*, 17, 48.
- [3] Neukum, G. and Koenig, B., 1975, *The Moon*, 12, 201.
- [4] Lissauer, J. J., et. al., 1988, *JGR*, 93, B11, 13776.
- [5] Hiesinger, H., et. al., 2002, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 8, 10.1029.
- [6] Honda, R., et. al., 2002, *LNAI 2281*, 395.
- [7] Burl, M. C., et. al., 2001, *Proc. on Art. Intell. Robot. Auto. Space 6th*, AM118.
- [8] Magee, M., et. al., 2003. *LPSC 34th*.
- [9] <http://www.cirklo.com/space/seleneathome.html>
- [10] Pieters, C. M., 1991, *Geophys. Res. Lett.*, 18, 11, 2129.
- [11] 沢辺頼子, et. al., 2003, 第35回リモートセンシング学会学術講演会論文集.
- [12] 沢辺頼子, et. al., 2004, *リモートセンシング学会誌* (投稿中)
- [13] Gilles, J., et. al., 1999, *LPSC 30th*, 1770.