

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

SELENE (かぐや) 地形カメラオルソ画像とDEM におけるクレータ検知手法

A method of crater detection using SELENE (Kaguya)
Terrain Camera ortho images and DEM

春山 純一, 原 誠一

HARUYAMA Junichi and HARA Seichi

2022年1月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目次

概要	1
1. はじめに	2
2. SELENE TC データ	2
3. 月面クレータ自動抽出	3
3.1 クレータの画像からの抽出	3
3.2 傾斜方向パターンによるクレータ判定	8
3.3 クレータの重複判定	10
3.4 クレータ抽出例	10
4. まとめ	12
参考文献・サイト	12

SELENE (かぐや) 地形カメラオルソ画像と DEM におけるクレータ検知手法

春山 純一^{*1}, 原 誠一^{*2}

A method of crater detection using SELENE (Kaguya) Terrain Camera ortho images and DEM

HARUYAMA Junichi^{*1}, HARA Seiichi^{*2}

ABSTRACT

It is possible to investigate when the lunar surface was formed or when it was covered with lava by the amount of lunar craters per unit area. Thus, crater detection (counting) is important for planetary science. Based on the data obtained by the Terrain Camera onboard the Japanese lunar orbiter SELENE (nicknamed "Kaguya"), visible ortho-rectified image data and elevation data (Digital Terrain Model or Digital Elevation Model; DTM or DEM) have been produced. In this paper, we will introduce a method for automatically detecting lunar craters using these data. In this method, shadowed and illuminated areas of possible craters are emphasized in the ortho-rectified images, the crater candidates are extracted from them, and then they are narrowed down from the patterns of their inner walls, improving the accuracy of crater detection.

Keywords: crater, automatic detection, SELENE, Kaguya, Terrain Camera

概 要

月面のクレータの単位面積当たりの多寡により、月面がいつ出来たか、あるいはいつ熔岩によって被覆されたかを調べる事が可能である。したがって、クレータの検知（数え上げ）は、惑星科学にとって重要である。日本の月周回探査セレーネ（SELENE；愛称「かぐや」）に搭載された地形カメラによって得られたデータから、月全球の10m/画素の月面の可視画像データ（オルソ画像）と標高データ（数値地形/標高モデル；DTM/DEM）が得ら

* 2021年11月24日受付 (Received November, 24 2021)

^{*1} 宇宙科学研究所 太陽系科学研究系
(Department of Solar System Science, Institute of Space and Astronautical Science (ISAS))

^{*2} 株式会社NTT データ CCS 社会・科学システム事業部
(Societal & Scientific Systems Division, NTT DATA CCS CORPORATION)

れている。本稿では、これらのデータを使って月面のクレータを自動検知する手法を紹介する。この手法では、まずオルソ画像についてクレータの影・日向を強調し、そこから、クレータ候補を抽出、その後、クレータ候補の傾斜パターンから、クレータ候補を絞ることで、クレータ検知の精度を上げるというものである。

1. はじめに

月表面の形成、熔岩被覆年代を推定するのに、月面帰還試料の放射性年代と、試料の存在する場所のクレータの個数密度を比較し、クレータ個数密度から、月面の形成年代を推定するというクレータ年代学が開発されている（例えば、諸田 2011 [1]）。月面の年代は、月の地史を読み解くために必須とあってよい重要な情報である。クレータの年代決定には、数多くのクレータの検知、整理が必要である。しかし、クレータ年代の精度良い決定には、多数のクレータの検知（数え上げ）が必要であり、時に膨大な時間を要する。また、クレータ検知の際に、人的作業ゆえの数え落としや重複数え上げの問題が起きたりするため、クレータ検知には熟練が必要となる。更に、クレータ検知に熟練した研究者でも、太陽高度や、画像の明るさの違いで、検知に違いが生じることも考えられる。そこで、クレータ検知を自動に、そして出来るだけ客観的に行うことが求められる。

これまで、クレータの自動抽出は、画像データや、標高データを使っての研究が各種行われてきた（例えば、山本他 2015 [2]、その中での記載参照）。最近では、画像について、深層学習を用いてクレータを抽出する方法なども研究されている（Yang ら [3]）。

我々は、月面については、セレーネなどにより、画像データと標高データのセットが月全球について得られていることから、これらの両方のデータを用いて自動でクレータを検知させる手法を開発した。本稿にその手法を紹介する。

2. SELENE TC データ

2007 年に打ち上げられた日本の月周回衛星セレーネ（SELENE : Selenological and Engineering Explorer , 愛称「かぐや」）には、二本の前方視と後方視からなる可視パナクロマチックカメラである「地形カメラ」(Terrain Camera: TC) が搭載された (Haruyama et al. 2008 [4], [5])。地形カメラによって、10m/画素（セレーネのノミナル高度 100km において）の解像度で、月全面についてステレオペア画像が得られた。このステレオペア画像は、立体視処理を施され、正射（オルソ ; Ortho）画像と、標高データである数値地形モデル (DTM: Digital Terrain Model) または数値標高モデル (DEM: Digital Elevation Model) として、アーカイブされている [6]。DTM はステレオペア画像の取得後に作られたもので有り、DEM は全球分の取得後に改めて、セレーネや米国月周回探査機 LRO に搭載された高度計

との比較検証，共用をすることで精度を高めて補正されているという点で用語が使い分けられている。

3. 月面クレータ自動抽出

本節では，SELENE 搭載地形カメラ (TC) の取得したステレオデータによって作成されたオルソ化画像と，数値地形・数値標高モデル (DTM・DEM，以後 DTM とのみ言う) を使った月面クレータの自動抽出用に開発した手法について述べる。

3.1 クレータの画像からの抽出

本手法では，平均化縮小処理により，画像と DTM のサイズ (縦横サイズ) を元データの $1/N$ (N は整数) に変換し，繰り返し計算の最初の段階では解像度の高い画像を用いて小規模のクレータを抽出し，繰り返し計算ごとに徐々に解像度を落としながら，中規模，大規模のクレータを抽出していく。

まず，抽出するクレータのサイズに最適なウィンドウサイズで，Local Auto-Correlation (LAC) フィルタ処理を行う。LAC フィルタ処理を行うことで，特定の大きさのクレータの影・日向のコントラストを強調させることができる (図 1-1)。

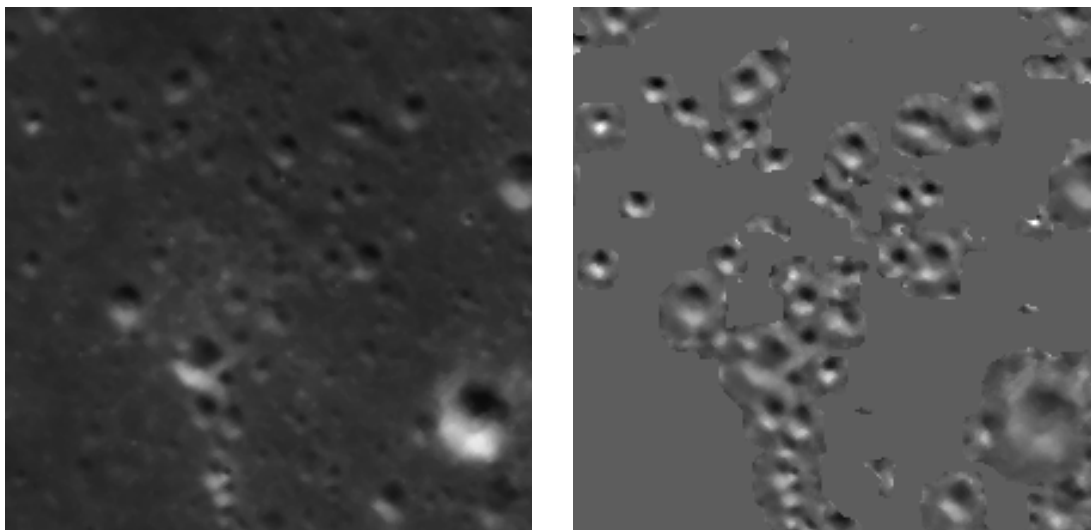


図 1-1 LAC フィルタにより微小クレータのみを強調した例
左は原画像，右は LAC 処理後

LAC フィルタ処理後の画像から，影領域と日向領域をピクセル単位に抽出する．

$$\text{影領域} < m - \sigma \cdot s1 \cdot s2$$

$$\text{日向領域} > m + \sigma \cdot s1 \cdot s2$$

ここで， m ， σ はそれぞれ，LAC 処理後の画像の輝度平均と輝度標準偏差である．また， $s1$ および $s2$ は抽出感度を調整するパラメータである．実際の処理では，標準偏差 σ に対するゲインとしてパラメータで指定する． $s1$ は繰り返し計算の全ての段階において共通の値で指定し， $s2$ は繰り返し計算の各段階で指定する．すなわち，感度を調整しない場合には 1.0，感度を高めたい場合には 1.0 以下，感度を下げたい場合には 1.0 以上に設定する．図 1-2 に LAC フィルタ処理後画像(左)からの影・日向領域の抽出(右)例を示す．

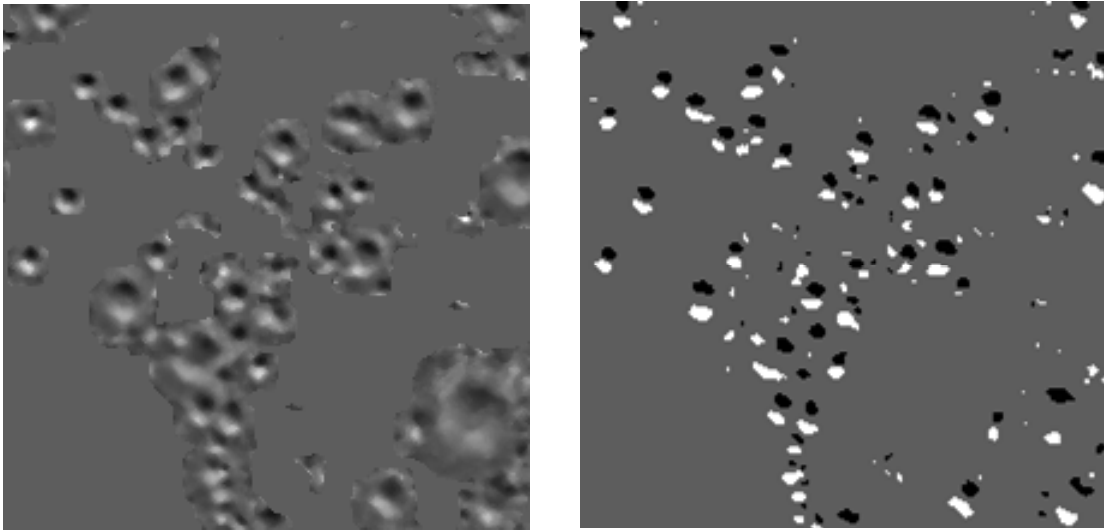


図 1-2 LAC フィルタ処理後画像(左)からの影・日向領域の抽出(右)例．ここでは，LAC 処理後の画像が輝度平均 $m=128$ ，輝度標準偏差 $\sigma=32$ となるように出力した．

以上の前処理の後，影・日向パターン抽出画像から，以下の様にして，対をなす影領域と日向領域を抽出する．

- ① 影・日向パターン抽出画像から 1 つの影領域（複数のピクセルから構成される閉領域）を抽出する．
- ② 抽出した影領域のサイズ（幅 $w1$ および高さ $h1$ ），画像縦横方向それぞれの最小値と最大値の中心として中心座標 $(cx1, cy1)$ を求める．また，横方向の最小座標値 $(xmin1)$ 及び最大座標値 $(xmax1)$ を求めておく．
- ③ 影領域の中心座標 $(cx1, cy1)$ から，日向領域の方向の $(cx1, cy1+w1)$ までの範囲にある日向領域（閉領域）を抽出する．（図 1-3）

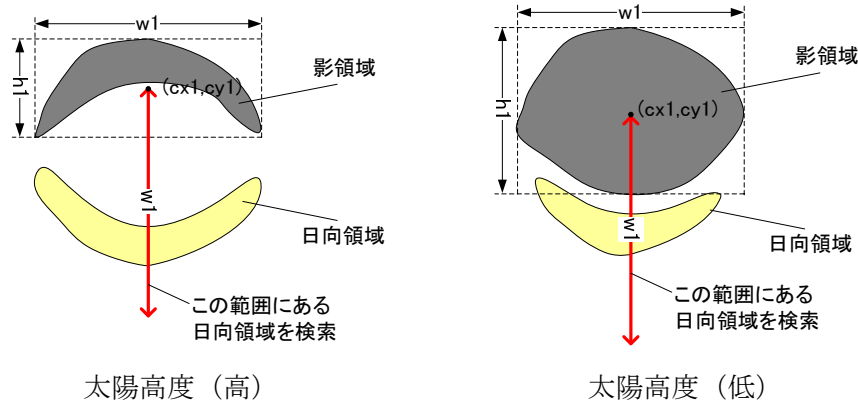


図 1-3 日向領域の検索範囲

- ④ 日向領域のサイズ (幅 w_2 および高さ h_2) を求める. (図 1-4)
- ⑤ 影領域と日向領域の両方を含む領域のサイズ (幅 w_3 および高さ h_3), 縦方向の最小座標値 (y_{min3}) と最大座標値 (y_{max3}) を求める.
- ⑥ 影領域のサイズと日向領域のサイズから, 以下のような条件を用いて, 「対をなす影領域と日向領域」を識別する.

条件 1 : 日向領域と影領域の横サイズ比 (w_1/w_2) および縦サイズ比 (h_1/h_2) による判定

$$0.25 \leq w_1/w_2 \leq 4.0 \text{ かつ } 0.25 \leq h_1/h_2 \leq 4.0$$

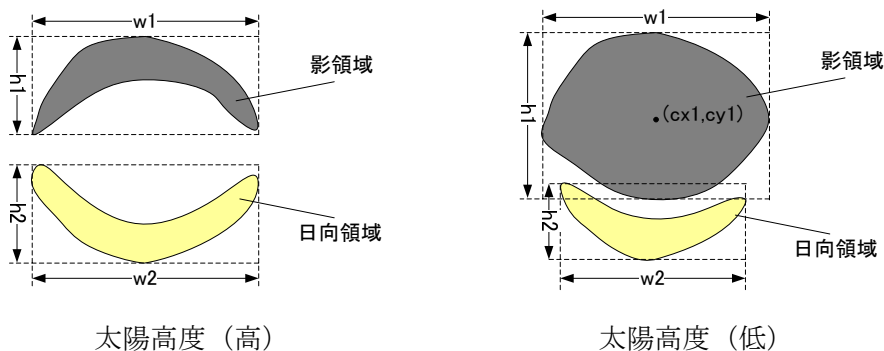


図 1-4 日向領域と影領域の縦横サイズ

条件 2 : 影・日向領域の縦サイズ (クレータ直径) による判定として,

$$\min_diam \leq h_3 \leq \max_diam$$

を用いる. ここで, \min_diam と \max_diam は抽出するクレータの直径の最小サイズおよび最大サイズで, 繰り返し計算ごと (画像解像度ごと) に指定する. (図 1-5)

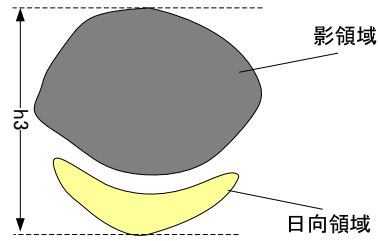


図 1-5 影・日向領域の縦サイズ

- ⑦ ⑥の条件を満たす場合，対をなす影領域と日向領域のサイズからクレータの中心位置 (cx, cy) および直径 (D) を求める (図 1-6)．ここで求めるクレータ中心位置は暫定であり，⑧に述べるクレータ抽出位置の調整によってクレータのより正確な位置を求める．

$$cx = (xmin1 + xmax1) / 2 \quad (\text{影領域の横方向の中心座標})$$

$$cy = (ymin3 + ymax3) / 2 \quad (\text{影・日向領域の縦方向の中心座標})$$

$$D = h3 \quad (\text{影・日向領域の縦方向サイズ})$$

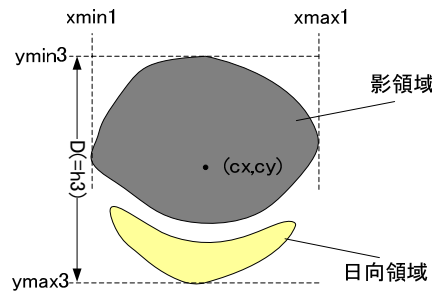


図 1-6 クレータ中心座標と直径

図 1-7 に，影・日向領域画像から対となる影・日向領域を抽出した例を示す．左は影・日向領域抽出画像で，そこから上記処理によって，対となる影・日向領域の抽出を行った結果が右側に示されている．

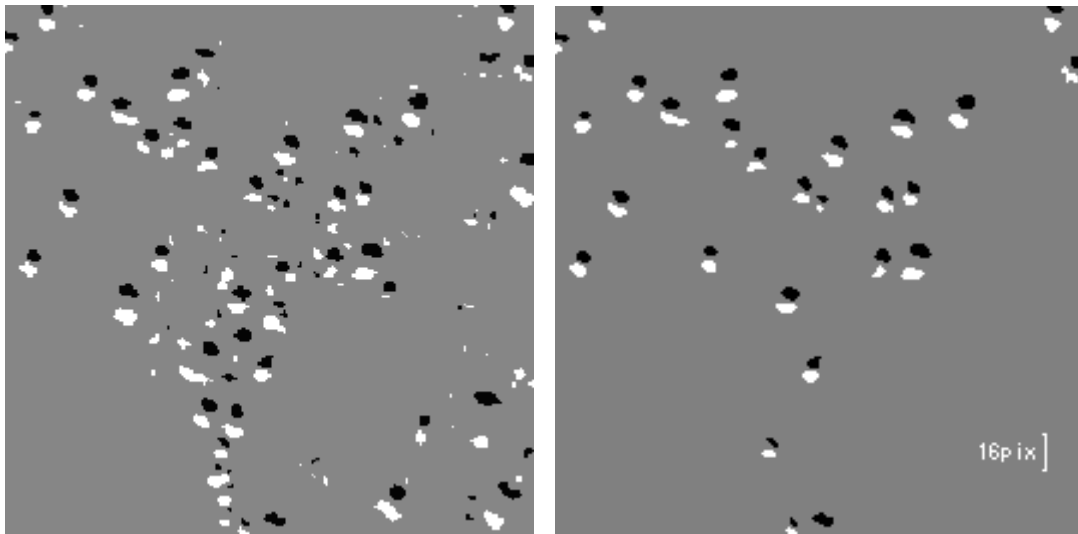


図 1-7 影・日向領域画像から対となる影・日向領域を抽出した例
 左は影・日向領域抽出画像，右は対となる影・日向領域の抽出例。
 (220×220pixel) (直径 4～16pixel のクレータのみを抽出)

- ⑧ これまでの処理で抽出した 1 対の影・日向領域について，直径 D となる円の中に最も多くの影・日向領域の画素が入る位置を，円の中心をずらしながら検索しクレータ抽出位置を調整する (図 1-8)。

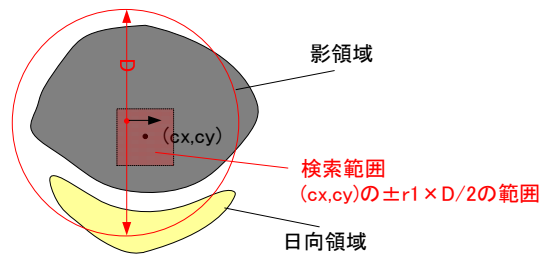


図 1-8 クレータ抽出位置の調整
 (直径 D の円と影・日向領域の形状が最も合う場所を検索)

図 1-9 に，クレータ抽出位置の調整結果の実例を示す．左側が調整前で，右側が調整後である．ずれが補正されているのがわかる．

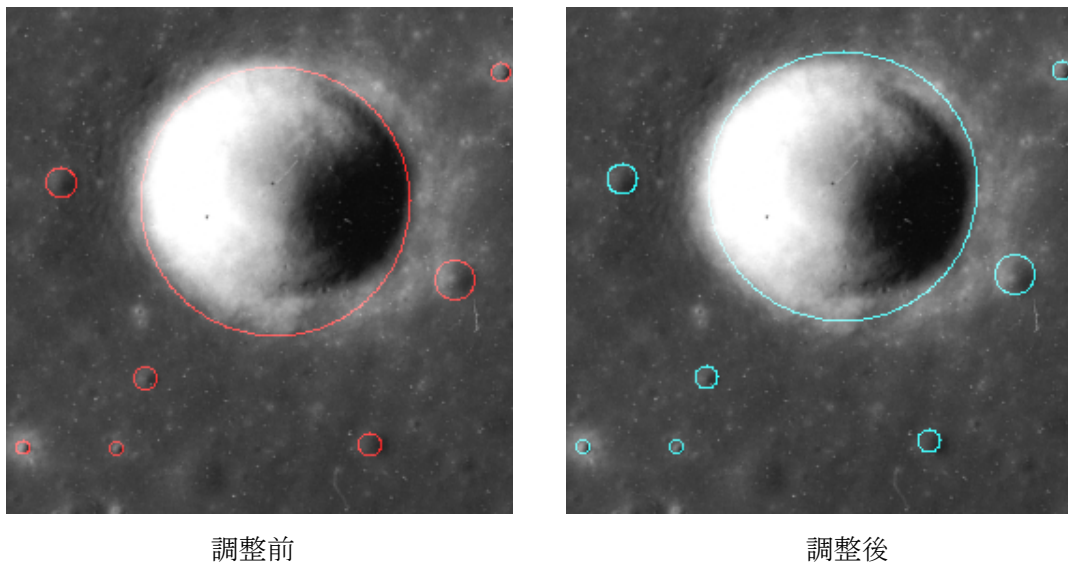


図 1-9 クレータ抽出位置の調整結果の例

3.2 傾斜方向パターンによるクレータ判定

ここでは、3.1 において抽出されたクレータ（候補）を、SELENE DTM データから得られる傾斜方向パターンを用いてクレータかどうかを判定することで、クレータ抽出の精度を高める手法を説明する。

画像とともに、解像度を変えた DTM から、各ピクセルの傾斜方向を求め、傾斜方向マップを作成する（図 1-10）。

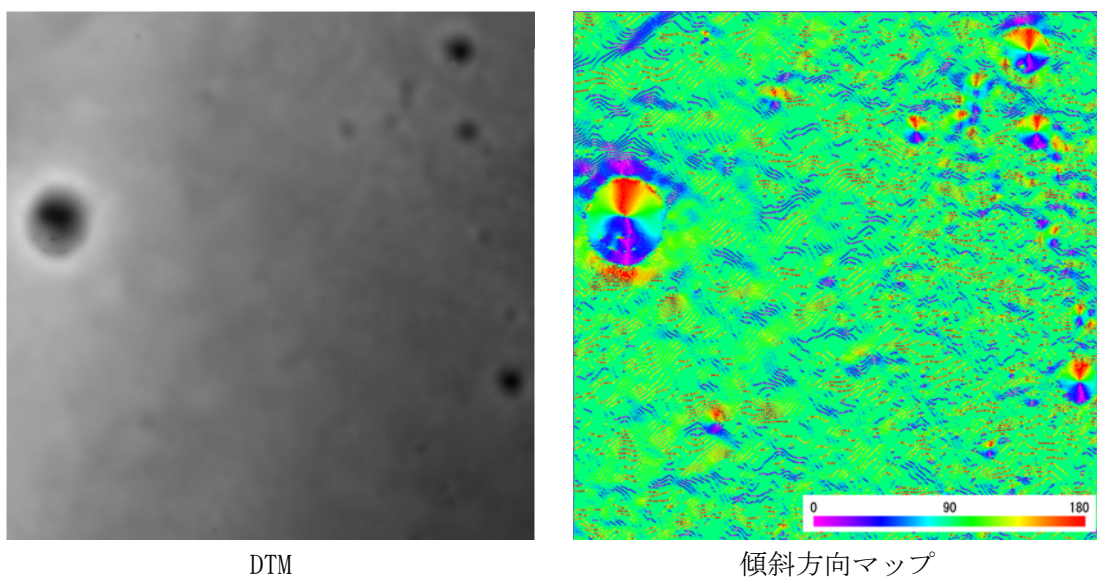


図 1-10 DTM から求めた傾斜方向マップ

傾斜方向は、求めたい画素を中心とした 3×3 画素の標高値から最小二乗法で近似平面を求め、その平面の向きから傾斜方向を算出していくが、傾斜方向（下り方向）は画像上方から右回りに 180 度、左回りに 180 度（画像上方からの角度の絶対値）として求める。 0 から 180 度としていて、 0 から 360 度としていないのは、後の処理で傾斜方向パターンをマッチングさせるために折り返しパターンとするからである。

3.1 の処理で抽出したクレータについて、傾斜方向マップを用いて傾斜パターンをマッチングし、クレータの形状を呈しているか（クレータ中心に向かって傾斜しているか）を判定する（図 1-11）。

抽出したクレータの中心から半径 $\times r_2$ および半径 $\times r_3$ の円上において、画像上方から右回りに適当な角度刻みで、傾斜方向のプロファイルを作成する。 r_2 および r_3 はパラメータで、クレータの規模によって 0.0 （中心） ~ 1.0 （リム上）の値を与える。この2つの傾斜方向プロファイルと理想的なクレータ形状をもつクレータの傾斜方向プロファイルとの間で相関係数を求め、相関係数の高い方の値がパラメータで指定した閾値より大きい場合にはクレータとして判定し、小さい場合には、クレータ抽出結果から除外する。

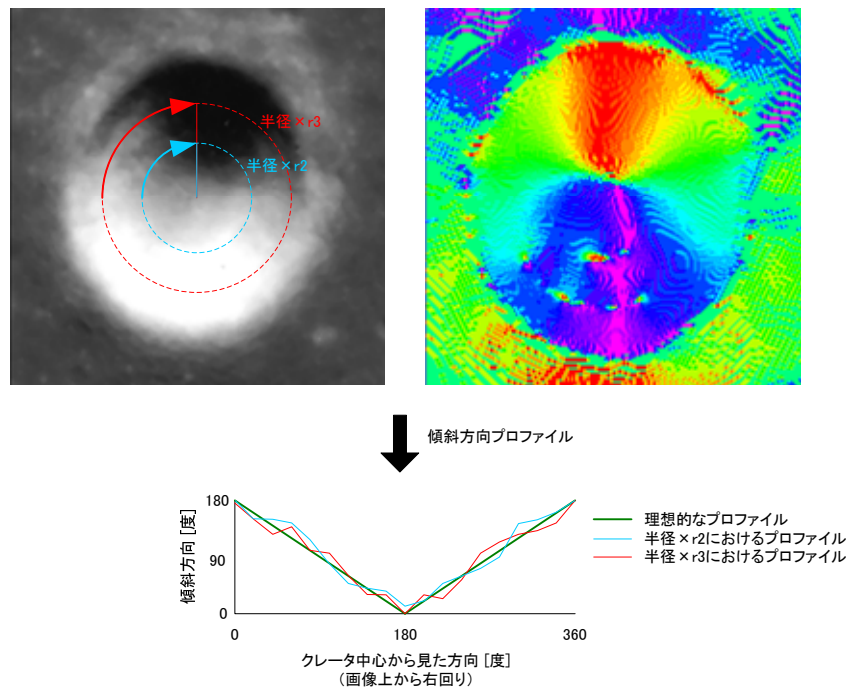


図 1-11 傾斜方向プロファイルによるマッチング

3.3 クレータの重複判定

画像解像度を変えた繰り返し計算により、同じクレータが重複して抽出されないように、抽出したクレータの重複判定を行う。

新たに抽出したクレータの中心位置を (cx, cy) 、直径を $D1$ として、 (cx, cy) を中心とする同じ半径のクレータを調べ、既検出のクレータとして除外する。検出で、同じクレータでも、若干の中心決定に誤差が生じることが有る場合は、検索したクレータの直径を $D2$ として、以下の条件にある場合、重複クレータと判定し、新たに抽出したクレータを、抽出結果から除外する。

$$\text{条件} : \text{min_ratio} \leq D1/D2 \leq \text{max_ratio}$$

min_ratio と max_ratio は直径比 ($D1/D2$) の最小値と最大値で、適当な値を指定する。

3.4 クレータ抽出例

以上の手法をもとにクレータ抽出をおこなった結果の例を、図 1-12 に示す (図 1-13 がクレータ抽出前の元画像)。使用した画像データは、SELENE データアーカイブ[6]から取得した SELENE 地形カメラによるオルソ画像 (データセット id: SLN-L-TC-4-DEM-ORTHO-V1.0) で、入射角 79.25 度 (太陽高度 10.75 度) で撮像されたものである。クレータ抽出にあたっては、画像を縦横 10m/画素にリサンプリングし、トランスバースメルカトル図法に投射している。画像の左上の最大のクレータが約 3km である。

クレータ抽出では、輝度平均 m は 128、輝度標準偏差 σ は 32 にするように出力している。条件 1 「日向領域と影領域の横サイズ比 ($w1/w2$) および縦サイズ比 ($h1/h2$) による判定」では、 $0.25 \leq w1/w2 \leq 4.0$ かつ $0.25 \leq h1/h2 \leq 4.0$ とした。⑧におけるクレータ位置調整におけるクレータ中心の検索は、画像からの影・日向クレータ中心位置 (cx, cy) を中心とする、縦横 $\pm r1 \times D/2\text{pixel}$ の範囲で行った。 $r1$ はパラメータで、0.2 とした。また、傾斜方向のプロファイルを作成する際、クレータの中心から $r2$ を 0.4、 $r3$ を 0.8 とした、半径 $\times r2$ および半径 $\times r3$ の円上において、画像上方から右回りに 10 度間隔で 360 度分抽出した。重複判定を除外するために、3.3 に述べた重複クレータの除外条件における min_ratio を 0.5、 max_ratio を 2.0 とした。

非常に精度よくクレータが抽出されているのがわかる。一方で、画像左上にある直径 3km ほどのクレータは、位置のずれなどがみられる。これは、このクレータが極端な平底で、お碗型クレータとなっていないために生じたといえる。本稿に述べた手法によってクレータを抽出する際に注意すべきことである。

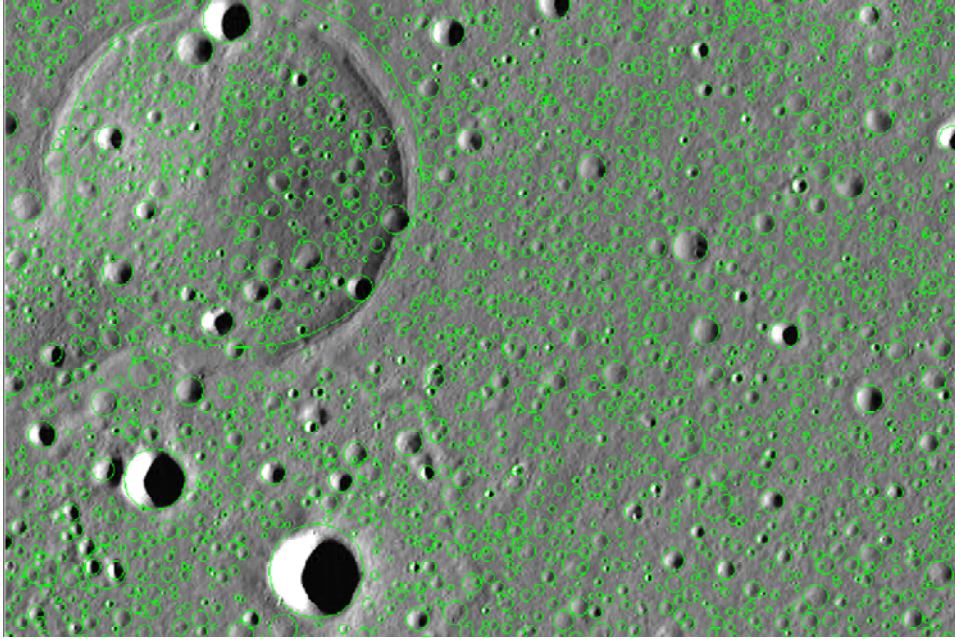


図 1-12 SELENE 地形カメラによるオルソ画像に対するクレータ抽出結果の例. 左上の画像内最大のクレータは、直径約 3km. データセット id : SLN-L-TC-4-DEM-ORTHO-V1.0, 画像データは、太陽高度 10.75 度で取得されたもの. トランスバースメルカトル図法に投射し、10m/画素にリサンプリングされている. (プロダクト id:DTMTC0w01_00900N333E3084SC_IMG)

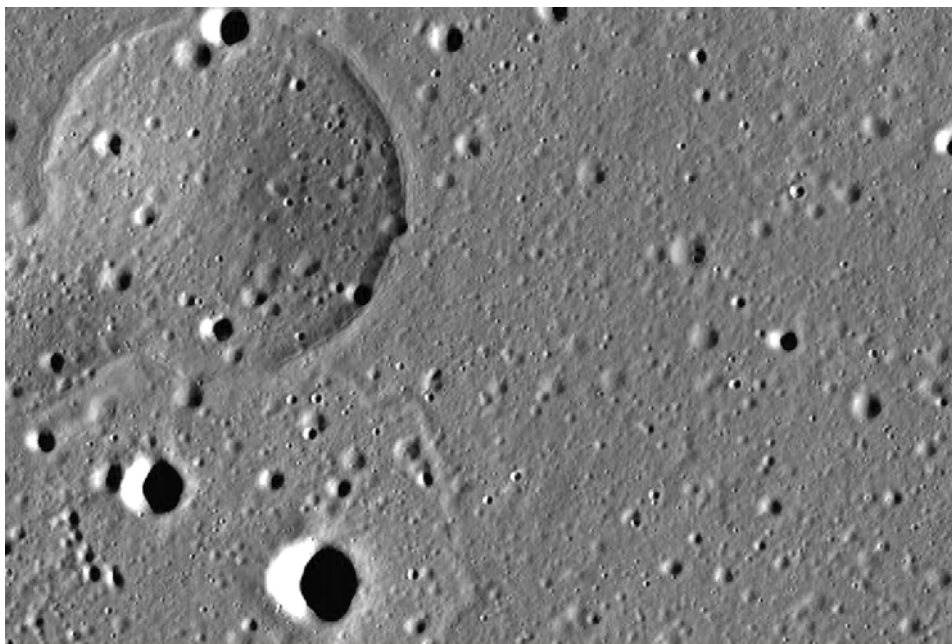


図 1-13 図 1-12 のクレータ抽出前の画像

4. まとめ

本稿では、セレーネなどにより得られている画像データと標高データのセットを利用し、自動でクレータを検知させる手法について紹介した。本手法は、画像データにより影・日向の対を抽出してクレータ候補として見做し、標高データによりクレータの内壁形状を示すかどうかを確認することで、クレータ検知精度を確かめるというものである。この手法によって、膨大なクレータの検知を自動で客観的に行うことができるようになる。ただし、お碗型クレータではなく、極端な平底クレータや、いびつなクレータについては、中心位置のずれなどが生じる可能性があることを注意すべき点として指摘しておく。

本稿で紹介した手法は、セレーネデータアーカイブ[6]に登録アーカイブされている以下のデータに（解像度や投影法変換が必要だが）対して適用できる：

- ・ オルソ画像データ：TC オルソマップ、DTM/TC オルソと DEM/TC オルソのオルソ画像、TC 低太陽高度(夕)反射率マップと TC 低太陽高度(朝)反射率マップ（これらのうち朝夕マップデータのオルソ化は、画素ごとではなく、画像全体を球面近似することでおこなっている）。
- ・ DTM オルソ/DEM オルソデータ：DTM オルソ/DEM オルソの DTM/DEM データ、SLDEM2013。

参考文献・サイト

- [1] 諸田智克 “「かぐや」が切り開く月面年代学”，日本惑星科学会誌 Vol. 20, No. 4, 2011.
- [2] 山本聡 他 “回転ピクセルスワッピング法を使ったクレーター年代学”，日本惑星科学会誌 Vol. 24, No. 1, 2015.
- [3] Chen Yang et al, “Lunar impact crater identification and age estimation with Chang’E data by deep and transfer learning”, NATURE communications, 2020.
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-20215-y.2015>.
- [4] Junichi Haruyama et al. “Global Lunar-Surface Mapping Experiment by the Lunar Imager/Spectrometer on SELENE”, Earth Planets Space 60(4), 243.256, 2008.
- [5] 月周回衛星「かぐや (SELENE)」ホームページ/地形カメラ：
https://www.selene.jaxa.jp/ja/equipment/tc_j.htm
- [6] かぐや (SELENE) データアーカイブ：
<https://darts.isas.jaxa.jp/planet/pdap/selene/index.html.ja>

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-21-007

JAXA Research and Development Memorandum

SELENE (かぐや) 地形カメラオルソ画像とDEMにおけるクレータ検知手法

A method of crater detection using SELENE (Kaguya) Terrain Camera ortho images and DEM

発行 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

URL: <http://www.jaxa.jp/>

発行日 2022年1月31日

電子出版制作 松枝印刷株式会社

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。

Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

