

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

山本 聡¹, 松永 恒雄¹, 中村 良介², 関根 康人³,
平田 成⁴, 山口 靖⁵

2014年9月17日受領, 2014年11月29日受理.

(要旨) 本論文では, かぐや地形カメラで取得されたデジタル地形モデル(DTM)を使った, 回転ピクセルスワッピング法を基にした衝突クレーター自動検出手法の開発を行った. この手法は, DTMから斜面勾配と斜面方位を計算し, それらの空間分布の回転対称性に着目して, クレーター形状を自動検出するものである. 大きな特徴としては(1) 欠損クレーターや複数個重なったクレーター集団であっても高い精度で検出できること, (2) ノイズ除去等の前処理が不要であること, (3) 従来のクレーター自動識別法と比べて100倍以上の高速処理が可能であることが挙げられる. また, 本手法を月面上の海・高地領域に対して適用し, 実際にモデル年代を算出したところ, クレーター手動カウンティングによるモデル年代結果と調和的な結果が得られた.

1. はじめに

衛星データを利用した惑星科学研究の一つに, クレーター年代学が挙げられる. これは画像上の衝突クレーターのサイズ毎の個数分布を測定し, その分布の大小から各表面の年代を推定するものである. 一方, 最近のリモートセンシング技術の向上により, 惑星・衛星探査による大量の画像データの取得が行われている. これらの大量データを基にした, より詳細かつ広範囲の領域に対するクレーター年代学研究を行う上では, 衝突クレーターの検出・測定時において, 手動カウンティングではなくプログラムによる自動検出手法が重要となる.

これまで, 衝突クレーターの自動検出に関する様々な手法が提案されてきた(過去の自動検出研究についての文献は, [1-4]などで引用されているものを見て頂きたい). 一方で, 従来の手法は, 実際のクレーター年代学への適用に耐える精度がない, または精度検証

が十分行われていないものが多い. また処理を行う前に人為作業による様々な前処理を必要とする場合や, 処理速度に膨大な時間がかかるといった問題もある. そのため, 大量データへの応用という意味では, これらの自動検出手法はまだ実用段階にあるとは言えないのが現状である. 実際, 過去に行われてきたクレーター年代学を使った月科学研究の多くは, 手動カウンティングによるものが主である[5,6].

我々は最近, ピクセルスワッピング法[7]を基にした, 新しい円形パターン検出アルゴリズムの開発を行った(回転ピクセルスワッピング法; Rotational Pixel Swapping = RPSW と呼ぶ) [4]. この方法では, 従来の自動検出手法で使用されてきたアルゴリズム(例えば, ハフ変換やパターンマッチング法など)とは異なり, 円形パターンを検出するにあたって, 画像のもつ様々な情報(例えばスペクトル情報, 地形情報など)の水平空間方向の回転対称性に着目する. このRPSWの特徴として, 様々な構造が複雑に重なっている場合であっても, 個別の円形パターンを独立かつ同時に検出できること, ノイズ除去などの前処理が不要であること, また従来の衝突クレーター自動検出手法と比べて, 桁違いでの高速処理を行えることが挙げられる[4]. そこで本研究では, RPSWを月周回衛星「かぐや」搭載

1. 国立環境研究所
2. 産業技術総合研究所
3. 東京大学
4. 会津大学
5. 名古屋大学
yamachan@gfd-dennou.org

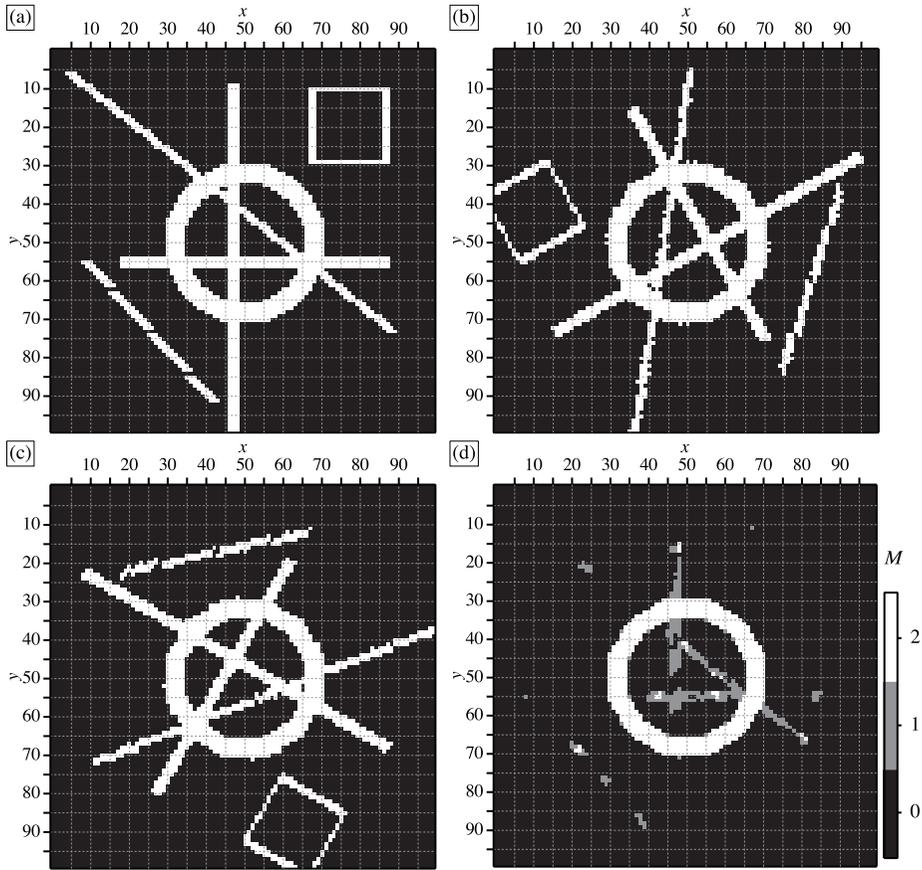


図1：1：(a)白黒画像の人工パターン(画像サイズ $L \times L=100 \times 100$ ピクセル)。値0を黒、値1を白とした。(b)画像(a)を反時計回りに120度させた画像。(c)画像(a)を反時計回りに240度回転させた画像。(d)画像(a)と(b)の論理積 $M_{\phi=120}(x,y)$ と(a)と(c)の論理積 $M_{\phi=240}(x,y)$ を足し合わせた抽出画像。いくつか円形パターン以外のノイズ成分が見られるが、これは回転画像を2枚($N=2$)しか使用していないことによる。 N を増加させることで、円形パターンのみをより強調することができる。

の地形カメラ(Terrain Camera=TC) [8]で取得された、デジタル地形モデル(Digital Terrain Model=DTM)へ応用し、クレーター年代学を視野に入れた新しい自動クレーター検出手法の開発を行った。

2. 回転ピクセルスワッピング法(RPSW)

まず最初に、RPSWがどのようなアルゴリズムで円形パターンを検出するかについて、図1(a)の白黒画像 $A(x,y)$ を使って説明する。図1(a)の中には、円形パターンと4本の直線パターンおよび四角パターンが見られる。この画像に対して、画像の中心点($x_n=50, y_n=50$)に対して反時計回りに回転角 $\phi=120^\circ$ および $\phi=240^\circ$ で画像回転処理を行ったものを図1(b)および(c)に示す(それぞれの画像の座標 (x,y) の階調値を $B_{x_n,$

$y_n, \phi=120(x,y), B_{x_n, y_n, \phi=240}(x,y)$ とする)。次に ϕ 毎の $M_\phi(x,y) = A(x,y) \cdot B_{x_n, y_n, \phi}(x,y)$ を計算し、 $M_{\phi=120}(x,y)$ と $M_{\phi=240}(x,y)$ の足し算を行った結果を図1(d)に示す。図1(d)を見ると、回転対称パターン(Rotational symmetric pattern=RSP)、つまり円形パターンのみが強調され、その他の非回転対称パターン(non-RSP)は強度が弱められたり消去されているのが分かる。このようにRPSWは画像データの持つ回転対称性に着目し、円形パターンを抽出するものである。

図1の例では、予め画像の中心(50, 50)にRSPの中心点(Center of RSP = CRSP)が位置することが分かっていたので、ここを中心に回転処理を行った。一方、画像中のどこにCRSPがあるのかを知るには、次の回転対称性関数 $R(x,y)$ を用いる。 $R(x,y)$ は次のように定義される[4]:

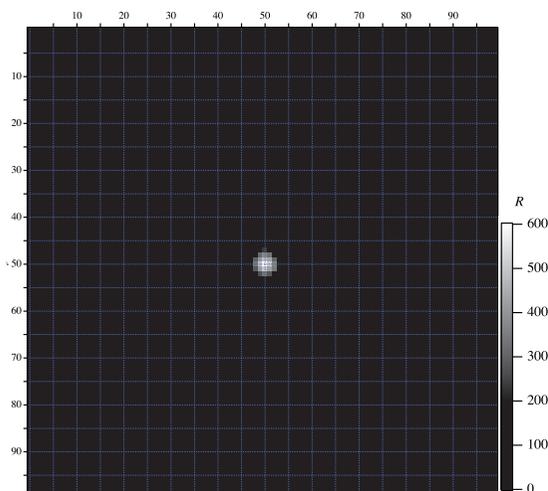


図2：図1(a)に対する回転対称性関数 $R(x, y)$. $N=2$ および $\Delta\phi=120^\circ$ とした場合.

$$R(x, y) = \sum_i \sum_j \prod_{k=0}^{N-1} B_{x, y, \phi+k\Delta\phi}(i, j) \quad \dots\dots (1)$$

ここで $\Delta\phi$ は増分回転角、 N は回転画像の総数である($k=0$ は元画像に相当する). ある点 (x, y) がCRSPの近傍に位置する場合、 R 値は大きな値となるが、CRSPから離れている場合は R 値は小さくなる. つまり R 値の大きさからCRSPの位置を知ることが出来る. 図1(a)に対して計算した $R(x, y)$ を図2に示す($N=2$, $\Delta\phi=120^\circ$ とした). この図において、 R 値の最大値は $R(50, 50)=602$ であり、図1(a)の円形パターンのCRSPと一致する. また円形パターンが幅を持っていることから、 $(50, 50)$ から少し離れた位置であっても、高い R 値($R=300\sim 500$)を持っている. 一方 $(50, 50)$ から数ピクセル離れると R 値は急激に減少し、画像のほとんどの場所で $R=0$ となる.

RPSWの実行において、一番計算時間がかかるのがこの $R(x, y)$ の計算である. そこでRPSWでは、計算時間の短縮のために、いくつか工夫を行う. まず、回転画像の計算においては、各点 (x, y) に対して個別に $B_\phi(x, y)$ を作成しない. 代わりに予め $A(x, y)$ の中心(図1の例では $(50, 50)$)で $\Delta\phi$ ずつ回転させた N 個の回転画像を作成し、実際の計算においてはそれぞれ R 値を求めたい場所 (x, y) へ画像を水平移動させる. また R 値の計算も以下の限られた範囲 (i, j) のみ行うとする:

$$l_{\min} < \sqrt{(i-x)^2 + (j-y)^2} < l_{\max} \quad \dots\dots (2)$$

ここで l_{\min} および l_{\max} を局所RPSW最小半径および最大半径と呼ぶ. l_{\min} と l_{\max} の導入は、計算時間の短縮だけが目的ではなく、探したい円形パターンのサイズを限定する目的としても用いられる(次章ではこれを使って、検出するサイズ範囲を複数に分けた多段階処理を行っている). さらに、 $R(x, y)$ の計算において、全てのピクセルについて計算するのではなく、 s ピクセルごとに計算を行うことで、計算時間の短縮を行う(s を探索ステップと呼ぶ). 例えば、 $s=1$ の場合は全画素を計算するが、 $s=2$ では一つおきに計算する.

回転角によっては、 $B_\phi(x, y)$ の多くのピクセルが $A(x, y)$ の外側に対応するが生じる. この場合、 $A(x, y)$ の外の領域は値を全て0として演算する. なお、 N を大きく設定すると計算時間が長くなるが、その代わりに回転対称性の高いものだけを選別抽出する. 逆に N を小さくすると計算時間が短くなる分、回転対称性が低いものも同時に検出される可能性が高くなる(つまり、楕円形状のものや欠損円などを検出したい場合は、 N を小さくしておくことで対応できる).

次に、計算された $R(x, y)$ からCRSPの位置についてリストアップを行う. 複数のCRSPを同時検出するために、まず最初に $R(x, y)$ の中の最大値 R_{\max} を探し出し、 R 値が $f \cdot R_{\max}$ 以上のものを全てCRSPとして検出する(f は0~1の範囲で与えられる閾値分率).

以上がRPSWによる円形パターン検出のアルゴリズムである. RPSWで使用される変数を表1にまとめた. その他のRPSWに関する細かい計算手法の説明や、パラメータに対する挙動については[4]で詳しく議論されているので、興味ある読者の方々にはそちらを見てもらいたい.

ところで、自動検出した結果を使ってクレーター年代学を行うには、検出されたCRSPに対してRSPの大きさ(つまりクレーター径)を決定する必要がある. し

表1：RPSWで使用されるパラメータ[4].

変数	定義
N と $\Delta\phi$	回転画像の総数と増分回転角
l_{\max} と l_{\min}	局所RPSW最大半径と最小半径
s	探索ステップ
f	閾値分率

かし、[4]ではRSPの二値化画像を抽出することに主眼が置かれており、RSPのサイズ決定までは行っていない。RSPのサイズを測定するには、例えば各CRSPの近傍に対してハフ変換[9]を適用しRSPの半径決定を行うなどが考えられる[4]。一方、本研究ではDTMデータの高度および斜面勾配を使って、クレーターのリム径を直接測定する方法を用いた(次章で具体的に説明を行う)。

3. RPSWのDTMへの応用:DTMを使ったクレーター自動検出

上で紹介したRPSWでは、二値化データにおける円形パターンの回転対称性に着目した方法であった。一方次の方法では、DTMデータの斜面勾配分布の回転対称性に着目して、クレーター検出を行う。以下ではこの手法をRPSD法(RPSW for DTM)と呼ぶ。

3.1 基本概念

これまでDTMデータを使ったクレーター検出手法は提案されてきた。例えば、[2,3]ではDTMデータからエッジ検出などいくつかの前処理を行い、DTMの持つ3次元情報データを一旦2次元データの白黒画像に変換し、その画像に対してハフ変換を適用することでクレーターを検出する。一方、ここで提案するRPSD法では、DTMデータの持つ高度および斜面勾配の情報そのものから直接クレーター検出を行う。

RPSD法の具体的な説明を行う前に、まず最初に基本概念について説明する。ちょっとばかり想像していただきたい。あなたは今おわん型のクレーターの中央にまっすぐに立って、ある水平方向を観測していると(クレーターの直径や深さは観測者より十分大きいとする)。今観測者の視線方向には、斜面勾配が $10^\circ \sim 40^\circ$ くらいのクレーター内壁が位置すると考えられる。また、その斜面のなす法線ベクトルの水平成分の方位角(斜面方位と呼ぶ)は、クレーターの中心つまり、観測者の方向を向いていると予想される。さて、今観測者が右に 90° 回ったとする。その場合、観測されるクレーター内壁の斜面勾配と斜面方位は、最初に観測したものと同じであることが予想される。つまり 90° の回転に対して斜面勾配と斜面方位は「回転対称性」を示す、と考えることが出来る。このことは回転角度や回転方向(時計回りか反時計回り)によらずで成り立

つであろう。逆にいうと、任意角度の回転を行った時に、斜面勾配と斜面方位の「回転対称性」が観測された時、観測者の立っている場所がクレーターの中心に位置していると予想することができる。一方、実際のクレーター形状は完全なおわん型ではなく、また局所的には斜面が凸凹している可能性もある。そこで、斜面勾配と斜面方位の対称性に対して、ある程度の「遊び」を許容する。その代わり複数の回転角に対して対称性を同時に調べ、クレーターの壁面のうちどれくらいの領域が「回転対称性をもっているか」を調べることで、「回転対称性の度合い」を定量化する。この回転対称性の度合いが高い場所を探し出すことで、クレーターを見つけ出そうというのがRPSD法の基本概念である。

3.2 RPSD法の定式化

上で説明した概念を定式化してみよう。まず、大きさ $L \times L$ のDTMデータ $T(x, y)$ を使って、斜面勾配マップ $S_0(x, y)$ と斜面方位マップ $F_0(x, y)$ を計算する。これらの計算においては微分フィルタの一つであるSobelフィルターを用いた:

$$S_x = \frac{T(x+1, y-1) + 2T(x+1, y) + T(x+1, y+1) - T(x-1, y-1) - 2T(x-1, y) - T(x-1, y+1)}{8} \dots\dots (3)$$

$$S_y = \frac{T(x-1, y+1) + 2T(x, y+1) + T(x+1, y+1) - T(x-1, y-1) - 2T(x, y-1) - T(x+1, y-1)}{8} \dots\dots (4)$$

$$S_0(x, y) = \arctan \sqrt{S_x^2 + S_y^2} \dots\dots (5)$$

$$F_0(x, y) = \begin{cases} \arctan \frac{S_y}{S_x} & (S_x > 0) \\ \text{sgn} S_y \cdot \left(\pi - \arctan \left| \frac{S_y}{S_x} \right| \right) & (S_x < 0) \dots\dots (6) \\ \text{sgn} S_y \cdot \frac{\pi}{2} & (S_x = 0) \end{cases}$$

次に、 $S_0(x, y)$ と $F_0(x, y)$ について、ある点 (x_n, y_n) を中心として ϕ だけ回転した画像をそれぞれ $S_{x_n, y_n, \phi}(x, y)$, $F_{x_n, y_n, \phi}(x, y)$ とする(回転処理の手順などは2章で述べたRPSWと同じである)。これらの画像を使って、次の抽出マップ $H_{x_n, y_n}(x, y)$ を計算する:

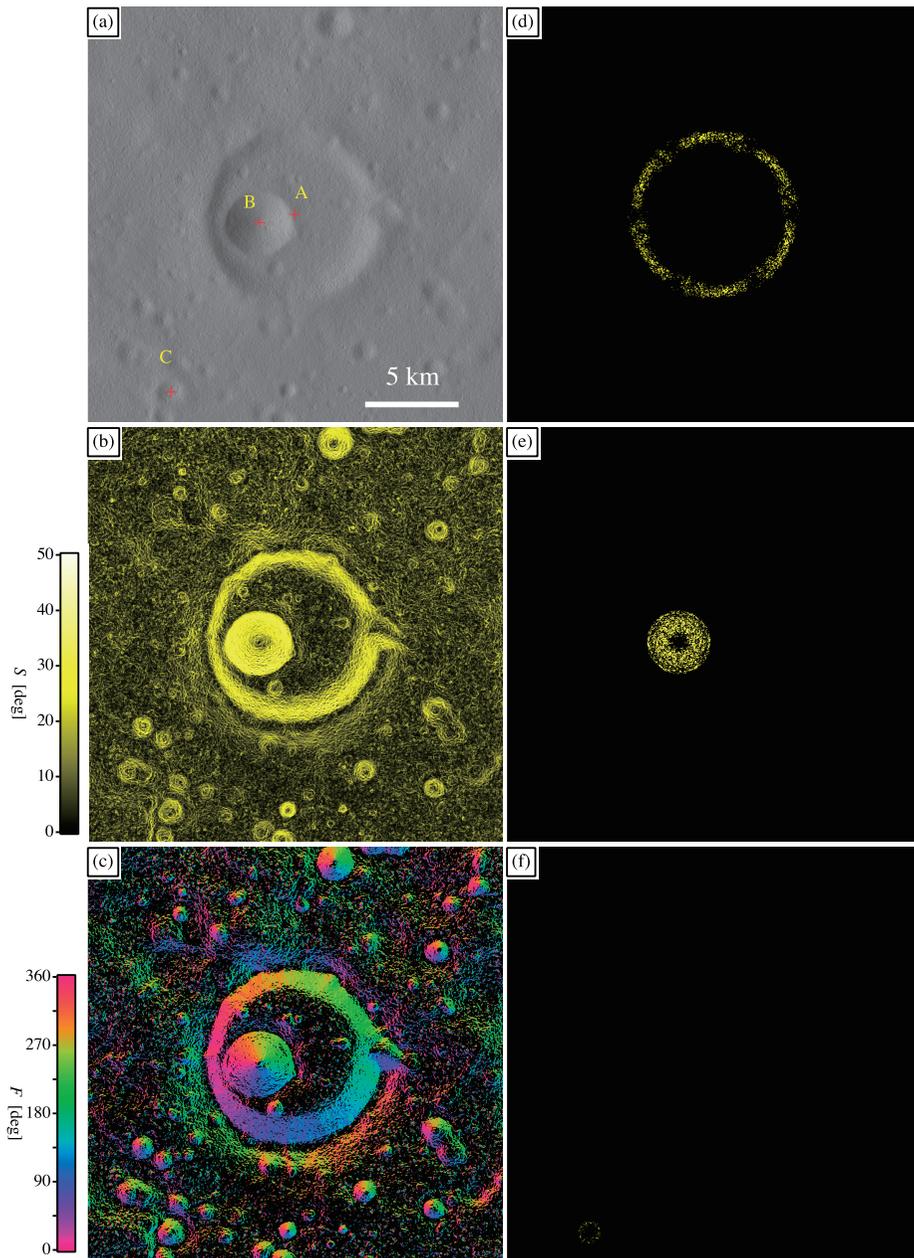


図3 : (a)DTMデータを基にした形状イメージ. (b)斜面勾配マップ $S_0(x,y)$. (c)斜面勾配が $\theta_L=10^\circ \sim \theta_U=33^\circ$ にあるものについて傾斜方位マップ $F_0(x,y)$ を色分けしたもの. 斜面方位は図の右方向を0度とし反時計回りで定義(大雑把に, 赤, 青, 緑, 黄がそれぞれ画像上の右, 上, 左, 下向きに対応). 黒色は斜面勾配が対象外の領域(つまり $U(x,y)=0$). (d) (a)のA点を中心として計算した抽出マップ $H(x,y)$. $\omega=30^\circ$, $\Delta\phi=60^\circ$ および $N=5$ とした. $H(x,y)$ の値1を黄, 値0を黒で示している. (e)B点で $H(x,y)$ を計算した場合. (f)C点で $H(x,y)$ を計算した場合.

$$H_{x_n, y_n}(x, y) = \prod_{k=0}^N U_{x_n, y_n, \phi=k \cdot \Delta\phi}(x, y) \cdot V_{x_n, y_n, \phi=k \cdot \Delta\phi}(x, y) \quad \dots (7)$$

$$U_{x_n, y_n, \phi}(x, y) = \begin{cases} 1 & (\theta_L \leq S_{x_n, y_n, \phi}(x, y) \leq \theta_U) \\ 0 & (S_{x_n, y_n, \phi}(x, y) < \theta_L \vee S_{x_n, y_n, \phi}(x, y) > \theta_U) \end{cases} \quad (8)$$

$$V_{x_n, y_n, \phi}(x, y) = \begin{cases} 1 & (|F_0(x, y) - F_{x_n, y_n, \phi}(x, y)| \leq \omega) \\ 0 & (|F_0(x, y) - F_{x_n, y_n, \phi}(x, y)| > \omega) \end{cases} \quad \dots\dots (9)$$

$U_{x_n, y_n, \phi}(x, y)$ は $S_{x_n, y_n, \phi}(x, y)$ から、斜面勾配が $\theta_L \sim \theta_U$ の範囲にあるピクセルだけを抽出したものであり、 $V_{x_n, y_n, \phi}(x, y)$ は斜面方位について回転角 ϕ に対して回転対称となっているピクセルだけを抽出したものである (ω は斜面方位に対する遊び角。つまり、この範囲内の角度差は同じとみなす閾値)。 $H_{x_n, y_n}(x, y)$ は、RPSW で言えば図1(d)に相当し、斜面勾配が θ_L から θ_U にあり、かつ斜面方位が N 個の回転角に対して回転対称条件を満たすピクセルだけを抽出したマップである。

図3(a)にDTMデータによる地形マップの例を示す。中央に直径7 km程度のクレーターがあり、そのクレーターの内部や周辺には2~3 km以下の多数のクレーターが分布している。図3(b)は図3(a)から求めた $S_0(x, y)$ である。さらに図3(c)は $S_0(x, y)$ の値が $\theta_L=10^\circ$ から $\theta_U=33^\circ$ にあるピクセルに対して、 $F_0(x, y)$ の値ごとに色分けをしたものである(大雑把に言うと、赤、青、緑、黄がそれぞれ画像上の右、上、左、下向きに対応。また斜面勾配が θ_L と θ_U の範囲外のピクセルは黒色とした)。この図より、クレーターの内壁部分に対応する部分において、赤→青→緑→黄と一定の周期変化のパターンを示すことがわかる。本手法では、この一定周期変化パターンの回転対称性に着目する。

図3(d)は、図3(a)のA点を中心にして $H(x, y)$ を計算した結果である ($\omega=30^\circ$, $\Delta\phi=60^\circ$ および $N=5$)。この図より図3(a)で見られる最大クレーターの内壁部分に対応する部分のみが抽出されているのがわかる。一方、周辺にあった小さなクレーター構造はいずれも消えている (H 値は0)。また、別の位置(例えばB点やC点)で $H(x, y)$ を計算すると、図1(d)で検出されていたパターンが消え、B点やC点に位置するクレーターの壁面のみが検出されている(図3(e)および図3(f))。このように各クレーターの中心で $H(x, y)$ の計算を行

うと、そこを中心とするクレーターの壁面部分のみが検出される。

ここで強調しておきたいのは、図3(d)~(f)の $H(x, y)$ の計算の前後において、ノイズ除去処理など特別な処理を行っていないことである。それにも関わらず、各抽出マップにおいてA、B、C点を中心としたクレーターの内壁だけが抽出され、他の構造やノイズなどは全て除去されている。他の構造(ノイズ成分)は、式(7)~(9)の演算においては非回転対称とみなされ、 H 値が0になってしまうからである。このように、大小様々なサイズのクレーターが多数分布し、またノイズ成分が複雑に重なっている場合であっても、なんら特別な処理を必要とせず、対象クレーターだけを個別に分離して検出することが可能である。

画像のどこにクレーター中心があるかについて調べるために、各 (x, y) について次の回転対称性関数 $R(x, y)$ を計算する：

$$R(x, y) = \sum_i \sum_j H_{x, y}(i, j) \quad \dots\dots (10)$$

この $R(x, y)$ の計算においても、RPSWの処理方法と同様に、 s , l_{\min} および l_{\max} を使用することで計算時間の短縮をはかる。また、全ての画素値に対して $R(x, y)$ を計算した後は、 R 値の高いものから閾値分率 f を使ってCRSPをリストアップする。

なおこの方法では、クレーター(凹構造)だけでなく丘や山(凸構造)も検出する可能性があるが、斜面方位と中心点の関係から排除することができる。ただし、今回は $R(x, y)$ の計算段階で凹構造と凸構造を区分せず、次章のクレーター径を決定する段階で排除するということにした。これは $R(x, y)$ の計算後に判別するほうが計算時間の節約になるからである。

3.3 クレーター径の決定

次に、各CRSPに対してクレーター径を求めるために、DTMデータを使って、以下のようにクレーターリムの位置決めを行った。まずCRSPからある同径方向への高度プロファイル $P(n)$ を求める (n はCRSPからのピクセル数)。そして $P(n+1)$ と $P(n-1)$ の差分から斜面勾配プロファイル $Q(n)$ を計算する。次に、ノイズの影響を低減するために、 $P(n)$ と $Q(n)$ についてそれぞれ前後1ピクセルの範囲(つまり合計3ピクセ

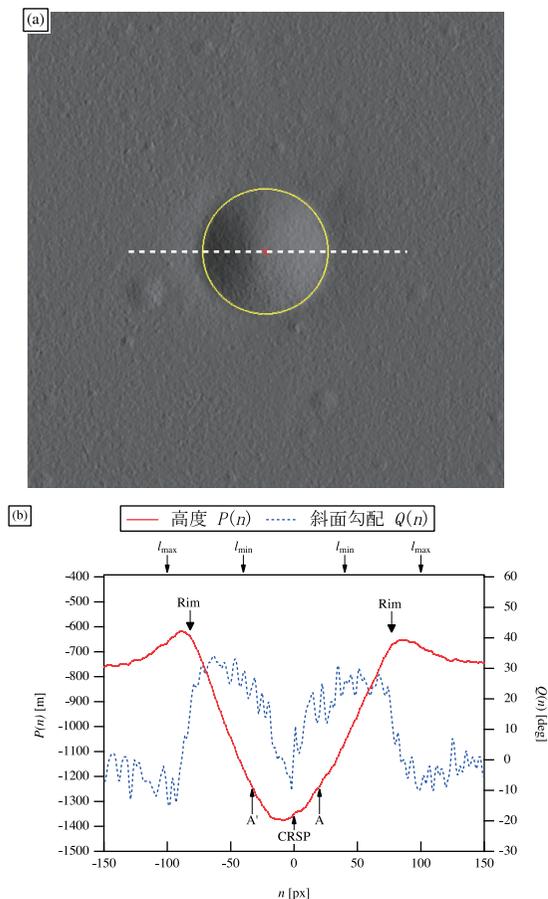


図4：(a)DTMデータを基にした形状イメージ。x印がCRSP、黄色丸が決定されたリム径。(b)(a)の白点線に沿った高度 $P(n)$ (赤実線)と斜面勾配 $Q(n)$ (青点線)。CRSP、リムと判定された場所(Rim)および P_{min} に相当する場所(AとA')を矢印で示す。また、この例で使用した l_{max} 、 l_{min} に相当するCRSPからの位置を上軸に示した。この例での Q_{max} は 34° (n が負の領域)および 31° (n が正の領域)であった。

ル)で移動平均をとった。 $P(n)$ と $Q(n)$ についての例を図4に示す。図4(b)の $n=0$ がCRSPに相当するが、この例で示されているように、必ずしも高度の一番深い位置がCRSPとなるわけではない。この図の $Q(n)$ を見ると、クレーター内壁部分では斜面勾配が約 20° 以上になっているが、リム付近で 0° 付近まで急激に減少する。本手法では、この斜面勾配が激減する場所をリムと定義する。

まず最初に、 $n>0$ 方向においてCRSPからDTM上での実距離が l_{min} に相当する位置を計算し、そこでの斜面勾配 $Q(n)$ を最大斜面勾配 Q_{max} とする。そこから n

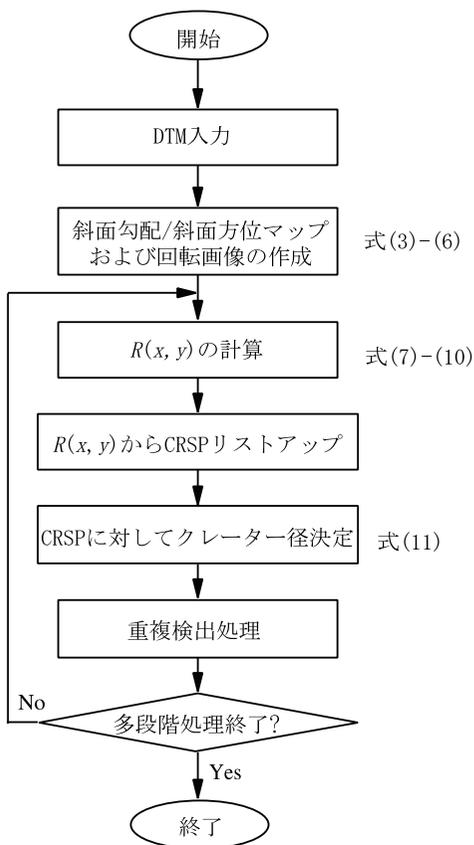


図5：RPSD法のフローチャート。

を順次増加させ、その過程で $Q(n) > Q_{max}$ となったら $Q_{max} = Q(n)$ とする。この Q_{max} を使って次の両条件を満たすまで n を増加させる：

$$\begin{aligned}
 P(n) &> P(n=0) + P_{min} \\
 Q(n) &< Q_{max} - \sigma \vee Q(n) < 0
 \end{aligned}
 \quad \dots (11)$$

ここで σ は斜面勾配閾値、 P_{min} は最小深さ閾値である。つまり、CRSPの高度から P_{min} より高く、なおかつクレーター壁面の最大勾配 Q_{max} から σ だけ勾配が緩くなる、または $Q(n) < 0^\circ$ になる最初の場所をリムとみなす。 n の負側についても、CRSPから n を減少させな

から同様の計算を行う。σの値は、典型的安息角の半分程度と仮定しσ=15°とした(σ=30°とした場合でも、次章で議論するクレーター年代学の結果に大きな影響を与えない。σを大きくした場合でもQ(n)<0°の条件を満たせばリムと判断されるため、大抵の場合リム径に大きな差が生じないからである。またσの違いによっていくつかのクレーターのリム径が変わった場合であっても、クレーター年代学は統計的処理に基づいているため、年代決定への影響が小さいからである)。最小深さについてはP_{min}=0.05・l_{max}と仮定した。リムを探す為のプロファイルの搜索方向については、処理時間の短縮化を重視してx方向およびy方向の二方向のみとし、それぞれ4箇所決定されたリムのCRSPからの平均距離をクレーター半径とした。図4(a)の黄線がこの方法で決定されたリム径である。なおプロファイルの端(例えば1.5・l_{max}に相当する位置)に至っても、式(11)の条件を満たさない場合はそのCRSPをクレーター候補リストから除外するとした(これにより凸構造は排除される)。

ところでRPSD法では、一つのクレーター地形に対して複数のCRSPが検出される(図2で見たように、高いR値を持つ領域はある程度広がった分布を示す)。この重複検出を防ぐために、R値の高い順に各CRSPに対するクレーター径の決定を行い、そのリム半径の内側に既にクレーター径が決定されたCRSPが存在する場合は重複検出とみなし、後から検出されたCRSPを候補リストから削除するとした(この手法を重複検出処理と呼ぶ)。

3.4 多段階処理による高速化

様々なs, l_{max}とl_{min}を組み合わせ、RPSD法の処理を多段階のスケールに分けることで、処理の高速化を行える。以下に例を示そう。L×L=1000×1000ピクセルのDTMデータに対して、一回の処理で半径1~200ピクセルのクレーターを検出する場合、s=1, l_{max}=200, l_{min}=0の条件における計算時間T₀は

$$T_0 = T_{\text{all}} \left(\frac{l_{\text{max}}}{sL} \right)^2 = \frac{T_{\text{all}}}{25} \quad \dots\dots\dots (12)$$

となる。ここでT_{all}はl_{max}=L, l_{min}=0, s=1として処理した場合にかかる計算時間である。一方、ある程度大きなサイズを検出する場合、sはある程度大きくても

構わない。というのは[4]では、RPSWを使って円環パターンを検出する場合、sが円環の幅に相当するピクセル以下であれば、sによらず円環パターンを検出できることが示されている。このことから、例えば検出したい最大クレーターサイズの1/10程度の大きさのsを使って、クレーターの中心の位置を大雑把に捉え、その後のリム径決定時の段階で改めて正確なクレーター中心を推定すればよいわけである。この場合大幅な時間短縮を図ることが出来る。例えば、s=10, l_{max}=200, l_{min}=20で処理を行うと、計算時間T₁は

$$T_1 = T_{\text{all}} \frac{l_{\text{max}}^2 - l_{\text{min}}^2}{(sL)^2} \approx \frac{T_{\text{all}}}{2500} \quad \dots\dots\dots (13)$$

となり、T₀の約1/100で済む。一方、小さな構造を検出する場合はsを細かくする必要があるが、この場合はl_{max}を小さくすることができるため計算時間が短くなる。例えば、s=1, l_{max}=20, l_{min}=0とすれば計算時間T₂は

$$T_2 = T_{\text{all}} \left(\frac{l_{\text{max}}}{sL} \right)^2 = \frac{T_{\text{all}}}{2500} \quad \dots\dots\dots (14)$$

となり、T₀の1/100で済む計算となる。つまり、2段階に分けて処理を行うと、全計算時間はT₁+T₂=T_{all}/1250となり、正味の計算時間はT₀と比べて1/50になる。このように複数に分けて処理(多段階処理)を行うことで、大幅な計算時間の短縮が可能となる。次章の計算では、3段階の処理を行っている。なお、多段階処理では、同一クレーターが異なる段階で複数検出される可能性があるが、リム決定時の重複検出処理の段階で排除されるので問題ない(ただし、多段階処理自体を大きなスケールから小さいスケールの流れで行うという制約条件が付加される)。

3.5 RPSD法のまとめ

以上3.2~3.4章までの処理がRPSD法のアルゴリズムの流れである。図5にRPSD法のフローチャートを示す。ここで再び強調しておきたいのは、このアルゴリズムにおいては、従来の円検出手法で用いられてきた前処理および後処理(ノイズ処理、細線化処理など[2,3])が一切使用されていないことである。

図3(a)に対してRPSD法を適用した例を図6に示す。この図より、大小様々なサイズのクレーターを同時検

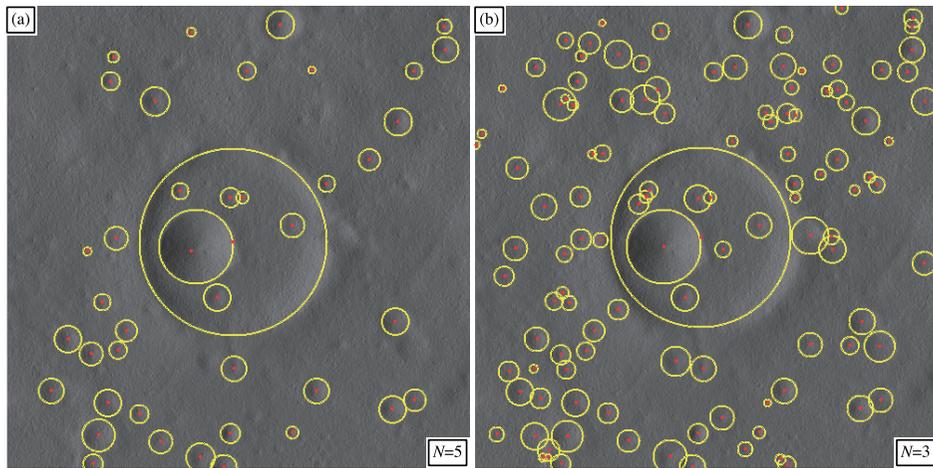


図6：図3(a)に対してRPSD法を適用した例。CRSPを赤点、検出リムを黄色丸で示す。(a) $N=5$ ($\Delta\phi=60^\circ$)の条件の検出結果。全部で42クレーターを検出。(b) $N=3$ ($\Delta\phi=90^\circ$)の条件の検出結果。117クレーターを検出。 N を小さくすると回転対称性の厳密性が下がるため、より多くの(ただし不規則形状の)凹み構造がクレーターとして検出される。

出しているのがわかる。一方で、 $N=5$ の場合(図6(a)), 幾つかの凹み構造が検出されていない。これは、これらの形状が不規則であることから $N=5$ の条件では回転対称とみなされなかったことによる。実際、回転対称性の条件を緩めると、これらの凹み構造が検出される(例えば図6(b)の $N=3$ の場合)。つまり N を小さくすると回転対称性の厳密性が下がるため、より多くの(ただし不規則形状の)凹み構造がクレーターとして検出される。このように、RPSD法では、どの程度の形状までを対象クレーターとみなすかを、 N 値を使って定量的にコントロールすることが可能である。

4. 結果：クレーター年代学への応用

4.1 海領域への応用例

諸田ら[5,6]は、TCの画像データを使って、手動カウンティングから月の様々な領域に対してモデル年代決定を行っている。そこで、同領域に対してRPSD法を適用し、それを基にしたモデル年代の結果と[5,6]の手動カウンティングの結果の比較を行う。まずターゲット領域として雨の海の西部にある溶岩流ユニット

表2：図7および図8で使用したパラメータ。

		図 7			図 8		
処理段階		1	2	3	1	2	3
対象勾配範囲 θ_L, θ_U		10°~33°			10°~33°		
$N(\Delta\phi)$		5 (60°)			5 (60°)		
ω		30°			30°		
局所 RPSW 半径 [ピクセル]	l_{\max}	80	40	20	200	60	25
	l_{\min}	40	20	1	60	25	1
s [ピクセル]		10	4	2	10	4	3
f		0.01			0.01		

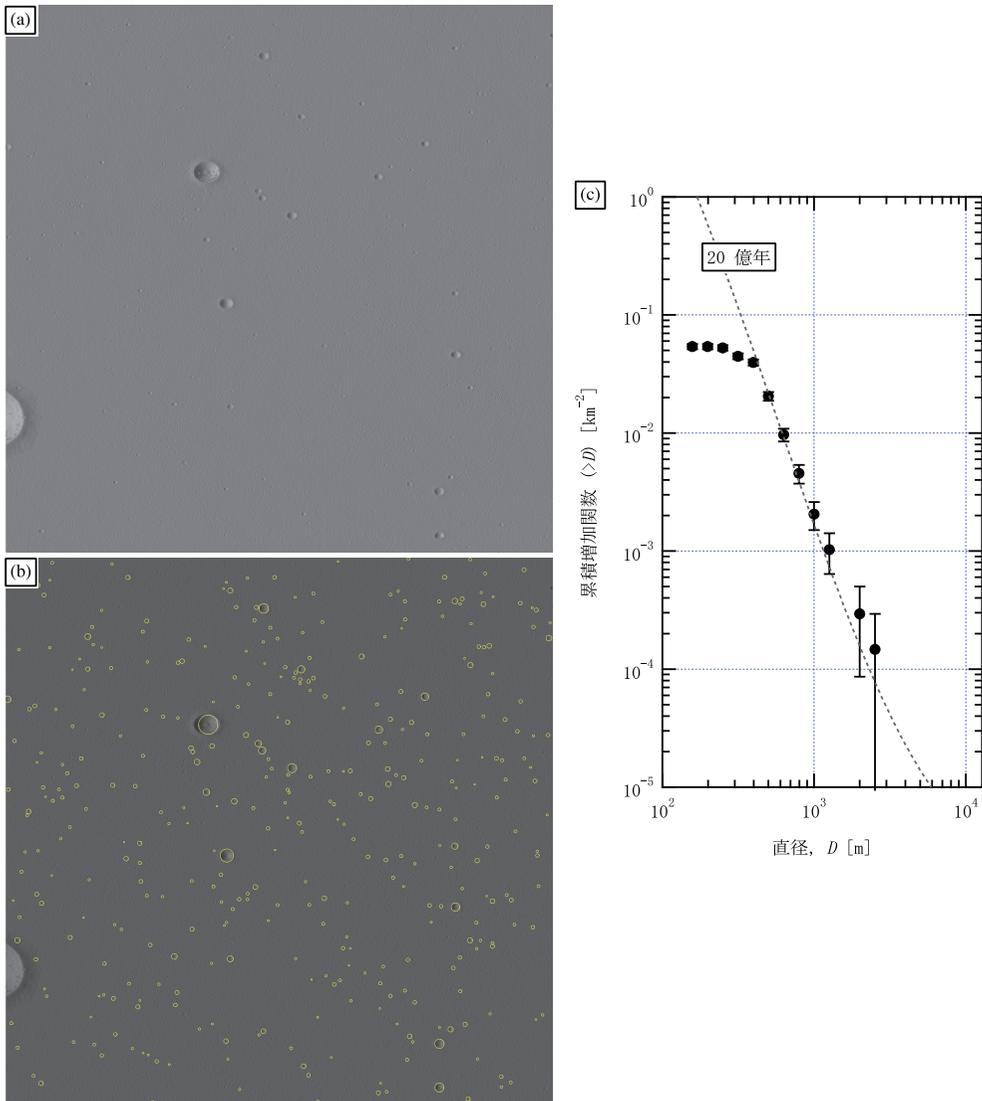


図7：(a)雨の海西部の溶岩流に対するDTM画像(DTM_MAP_02_N36E336N33E339SC.dtm;[5,6]のunit 128に相当)。(b)RPSD法を適用した結果。(c)クレーターサイズ分布。また20億年でのモデル年代([6]のModel Aによる場合)を破線で示している。

([5]の図2)のDTMデータを使用する(図7(a)). JAXAで公開されているDTMデータは1画像あたり $L \times L = 12,288 \times 12,288$ ピクセル(月面上で約 $3^\circ \times 3^\circ$ に相当)であるが、今回RPSD法を適用するに当たって、 $L \times L = 4,096 \times 4,096$ ピクセルにリサンプリングしたものを使う(空間分解能で22 m/ピクセルに相当). RPSD法で使用したパラメータを表2にまとめた. またモデル年代の推定を行う際に使用するクレーター年代学のモデルおよびパラメータは[6]のModel Aに準ずると

した. なお, [5,6]では二次クレーターと思われる物について目視判断で排除を行っているが, ここでは二次クレーターを除くということを行っていない(二次クレーター問題については5章で述べる). 一方で, 今回のRPSD法では比較的回転対称性の厳密性が高い条件($N=5$)で処理を行っているので, ある程度不規則形状は排除されると考えられる.

図7(b)にRPSD法による検出結果を示す. この図では369個のクレーターが検出されている(黄色丸が

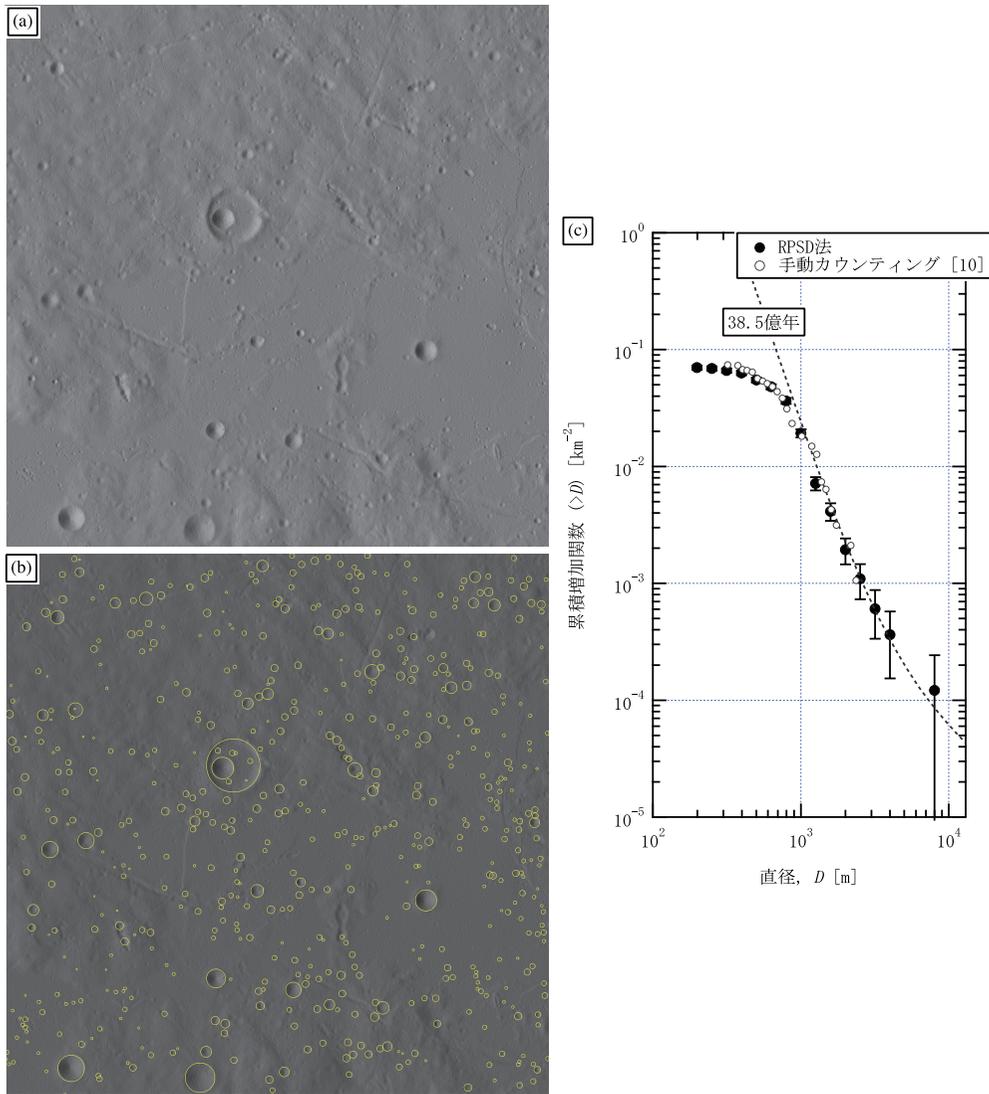


図8：(a)熱の入江の高地領域に対するDTM画像(DTM_MAP_02_N06E351N03E354SC.dtm)。(b)RPSD法を適用した結果。(c)クレーターサイズ分布。比較のために手動カウンティングによる結果[10]も示した。38.5億年によるモデル年代([6]のModel Aによる場合)を破線で示している。

検出されたクレーターリム)。概ね、画像から識別できるクレーターはほぼ網羅しているように見える。図7(c)に369個のクレーターのサイズ分布を示す。この図をみると約300 m以下のサイズで分布の折れ曲がりが見られる。これはRPSD法による検出限界に起因すると考えられる。一方、TCの画像を使った手動カウンティング[5,6]の結果においては、この折れ曲がりはいくぶん小さいサイズ(～200 m)で起こっている。つまりRPSD法による識別限界サイズは、手動カウン

ティングによる解析と比べて若干大きい。画像を使った識別では、識別限界は水平方向の空間分解能だけに依存する。一方RPSD法はクレーター内壁の斜面を利用しているため、ある程度深さ方向の変化が必要である。そのため、画像認識による水平方向の識別限界よりもある程度大きなサイズでなければ、回転対称性を識別できなかったと考えられる。

一方で、図7(c)の折れ曲がりより大きなサイズ領域に対して、モデル年代を求めると20.4億年となった。

この結果は、手動カウンティングによる[5,6]の結果(20.1億年)と概ねよい一致を示すものである。つまり、折れ曲がりが起こるサイズよりも大きなクレーターであれば、RPSD法で得られるモデル年代は、手動カウンティングによる結果と調和的であるということが分かった。

4.2 高地領域への応用例

次に高地領域への適用を行った。[10]では熱の入江の高地領域に分布する鉄/クロムに富むスピネルを含む火砕堆積物の解明研究が行われているが、その中で高地領域に対して手動カウンティングによるモデル年代決定が行われている。そこでこの領域を含むDTMデータを使って、RPSD法からクレーター自動検出を試みた。結果を図8に示す。図8(b)では、578個のクレーターが検出されている。この領域はクレーター形状以外に不規則な谷や山構造などが見られるが、クレーターと誤判断されることなく、クレーター形状のものだけをうまく検出できている。図8(c)に578個のクレーターのサイズ分布を示す。また、比較のために、手動カウンティングによって求められたクレーターのサイズ分布[10]についても示した。両者は完全に同じ場所に対してカウンティングを行ったものではないが、手動カウンティングによる結果とRPSD法による結果は、概ね誤差の範囲内で一致する。またRPSD法の結果に対してモデル年代を求めたところ、38.1億年であった。一方[10]による高地領域に対するモデル年代は38.5億年であった。つまり、RPSD法の結果は手動カウンティングによる結果と調和的である。なお、この熱の入江の高地領域は雨の海盆地形成に伴う放出堆積物起源であると考えられているが[10]、38.1億年という結果は雨の海盆地の形成年代の推定値(38.5億年[11])ともよい一致を示すものである。

4.3 処理時間について

上記の例における計算時間は図7で320秒、図8で352秒であった(計算環境はMac OS X 10.9, 2.93-GHz 6-Core Intel Xenon, C++プログラム Xcode version 5.0.2)。これと同条件で、月面の緯度±60度内の全領域に対するDTMデータに適用したとすると、総計算時間は約18日および20日と見積もられる。一方、[2]で提案されているハフ変換を使った、DTMデータか

らのクレーター検出手法の場合、同条件における総計算時間は27年と見積もられている。このことから、RPSD法は従来の手法と比べて、約500～600倍程速い。

この計算時間の差はどの効果によるものかを知るために、以下の様に特徴的時間の見積もりを行った。まず画素点数 $m=L \times L$ の画像に対して本手法を適用する場合、 $m^2 \cdot N$ に比例した計算時間が必要である(厳密にいえば、計算時間は $m^2 \cdot N$ に対する単純な比例関係ではないが、ここではオーダ見積りとして比例関係を仮定した)。一方、RPSDで導入されている高速パラメータである、 s 、 l_{\max} 、 l_{\min} を使った場合の特徴的時間 T_{rpsd} は

$$T_{\text{rpsd}} \propto m \left(\frac{l_{\max}}{L} \right)^2 \cdot m \left(\frac{1}{s} \right)^2 \cdot N = m \left(\frac{l_{\max}}{s} \right)^2 \cdot N \dots (15)$$

となる($l_{\min}=0$ とした)。一方、ハフ変換[9]の場合、各画素点それぞれに対して位相空間上への変換が必要であるため、計算時間は m^2 に比例する。ただし値を持たない画素については位相空間上への変換を行う必要が無いため、例えば値がゼロでない点(ノイズも含む)が m/β ピクセル程度しかない場合、特徴的時間 T_{hough} は

$$T_{\text{hough}} \propto \frac{m^2}{\beta} \dots (16)$$

となる。式(15)と式(16)より、特徴的時間の比 η は

$$\eta = \frac{T_{\text{rpsd}}}{T_{\text{hough}}} \propto \frac{\beta N}{m} \left(\frac{l_{\max}}{s} \right)^2 \dots (17)$$

となる。例えば $\beta=100$ を仮定し、 $m=4096 \times 4096$ 、 $l_{\max}=20$ 、 $s=1$ 、 $N=5$ の場合は $\eta \sim 0.01$ となり、これはRPSD法の方が二桁程度速いことを意味する。重要なポイントは、本手法では高速パラメータを導入したことにより T_{rpsd} は m に比例するのに対して、 T_{hough} は m の二乗に比例することである。そのため、取り扱う画像サイズ m が大きくなればなるほど η がさらに小さくなる。つまり、従来の方法と比べて桁違いでの高速処理を可能としているのは、高速パラメータ変数によるところが大きいと考えられる。

5. まとめと今後の展開

本研究ではDTMデータを使ったRPSD法により、クレーター自動検出およびクレーター年代学の自動化プログラムの開発を行った。また月面上の海および高地領域に対して適用したところ、自動検出によるモデル年代の結果は、手動カウンティングによる結果と調和的であることが示された。

RPSD法の大きな利点を3つ上げると以下である。

- (1) 回転対称性に着目した手法により、欠損クレーターや複数個重なったクレーター集団であっても高い精度で検出ができること。
- (2) この手法を適用するに際して、ノイズ除去、細線化処理などの特別な前処理を必要とせず、直接DTMデータを使って処理が出来ること。
- (3) 従来の自動検出手法と比べて数100倍以上の高速処理が可能であること。

また、従来行われてきた手動カウンティングでは、検出結果が作業者の熟練度に依存するという問題があった[1]。一方RPSD法では、使用されるパラメータを使って、検出条件を全て定量化できる。つまり、RPSD法は、クレーター年代学使った惑星科学研究の再現性の検証においても重要になると期待される。

一方、いくつか改善されなければならない問題もある。一番大きな問題は、やはり二次クレーター問題をどうするかである。二次クレーターとは、大きな衝突クレーターが形成された時の放出物が地表面へ再落下することで形成される付随的な衝突クレーターであり、クレーター年代測定の解析においてはカウント対象から外す必要がある[12]。手動カウンティングにおいては、連なったクレーター構造や不規則形状のクレーターを二次クレーターとして目視判別する方法が用いられている[5,6]。一方、全自動化を考える場合は、最初にRPSD法を使って二次クレーターも含む全クレーター候補を検出し、定量化された数値データに対して、これまで行われてきた二次クレーター自動判別手法(例えば、階層凝縮型クラスタリングやボロノイ図を利用した手法[13])を適用するといったことが一つの解決策になるかもしれない。

また極域などのようにマッチングの精度が悪い、または影領域でマッチングが行えないなどの理由で、

DTMの品質がよくない(有効な標高値を得ることができない領域が広い)場合は、RPSD法による検知精度が落ちる可能性もあるので注意が必要である。極域への取り扱いや、二次クレーター問題への対処も含め、今後さらなる改良を進めていくつもりである。最後に、このプログラムのソースコードは、関連するコミュニティーに向けて公開する予定である。

参考文献

- [1] 沢辺頼子ら, 2004, 遊星人 13, 87.
- [2] 原田直人ら, 2008, 遊星人 17, 69.
- [3] Salamuniccar, G. and Loncaric, S. 2010, IEEE TGRS 48, 5, 2317.
- [4] Yamamoto, S. et al., 2015, IEEE TGRS 53, 2, 710.
- [5] 諸田智克, 2011, 遊星人 20, 324.
- [6] Morota, T. et al., 2011, EPSL 302, 255.
- [7] Iisaka, J. and Sakurai-Amano, T. 2000, in The Proc. Asian Conf. Remote Sens., Singapore, Paper OMPOO-13.
- [8] Haruyama, J. et al., 2008, EPS 60, 243.
- [9] Hough P. V. C., Patent 3069654, Dec. 18, 1962.
- [10] 山本聡ら, 2013, 遊星人 22, 186.
- [11] Stoffler, D. et al., 2006, in New Views of the Moon (eds Jolliff, B.L. et al.), 60, 519 (The Mineralogical Society of America).
- [12] Melosh, H. J., 1989, Impact cratering (New York: Oxford Univ.).
- [13] 木下達生ら, 2013, 日本惑星科学会 秋季講演会予稿集, O11-12.