

物体検出アルゴリズムを用いた 新しいクレータの検出手法の開発

田中研究室 森川 恵海

2021 年 2 月 26 日

1 はじめに

1.1 背景

近年、衝突に伴うインパクトフラッシュと呼ばれる発光現象などが定常的に観測されるようになり、月周回探査衛星による高分解能画像からその際に形成されたクレータを特定することにも幾例か成功している。これにより衝突現象の物理メカニズムやエネルギー分配の理解が進みつつある。また新しいクレータの数やその規模を調べることで、現在太陽系の物質分布を推定することができるなど科学的意義が大きい。

さらに、衝突の際に発生する地震を解析することによって内部構造の推定を行うことも可能である。月での地震である月震の観測はアポロミッション時に行われたのみであるが、将来の月探査で観測計画が本格的に検討されている。月惑星表面の衝突現象を観測し、その位置や規模を正確に決定することはこれらの観測と合わせて内部構造を高精度で解明するためにも科学的に非常に重要である。

1.2 目的

従来、新しく形成されたクレータを発見するには、Temporal pair と呼ばれる異なる時期に同じ箇所を撮影した月表面の画像ペアを用いて、その差分から新しいクレータを検出する手法が用いられた (e.g.[1])。しかしこの手法での検索領域はペアを作る際の条件に制約される。そこで本研究ではペアを用いずに、物体検出技術を用いて単画像から新しく形成されたクレータを検出するシステムを開発することを目的とする。この単画像の検出システムは様々な事例に応用可能であるが、本研究ではアポロミッション時に観測された大きなインパクト起源の月震の際に形成されたクレータの探索に適用した。

本研究で注目するのは、アポロ月震観測でインパクト起源とされる月震が 1744 個検出され、その中でも特に大きなイベントが 18 個確認されている事実である [2]。これらの震源となるクレータの位置は推定されているものの、観測点が少なく地震波が非常に弱いために波形の読み取り誤差が大きく、震源決定誤差の平均が 4.7° (140km

程度) と制約したい層の厚み方向の精度 (数 km 程度) に対して大きい。これらの震源のクレータを特定することによって月の内部構造推定精度向上に寄与する。

2 手法

研究の概略フローを図 1 に示す。Phase1 では先行研究 [1] と同様に Temporal pair を用いて差分から新しいクレータを検出した。探索する箇所は先行研究 [1] で図示されている 222 地点を参考にした。Phase2 では Phase1 で集めた新しいクレータの画像を教師データとして物体検出モデルに学習させることで、単画像からの新しいクレータ検出システムを作成した。Phase3 では応用として、Phase2 で作成したシステムをアポロミッション時に形成されたクレータの探索に適用した。アポロ月震観測において観測された 18 個の大きなインパクト起源のイベントから、推測されている震源地の誤差が小さく探索しやすいイベントを 3 つ選び、Place1, Place2, Place3 とした。

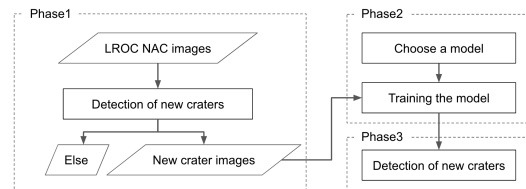


図 1 研究の流れ

3 結果

■Phase1 Temporal pair を 9279 個作成し、図 2 に示す 191 個のクレータを検出した。検出したクレータは直径 10m 以下のものが全体の 88% を占め、直径 2m まで検出可能であった。さらに splotches と呼ばれる小さい衝突や 2 次クレータだと考えられている詳細な月表面の変化も、クレータとは別に 1303 個検出した。

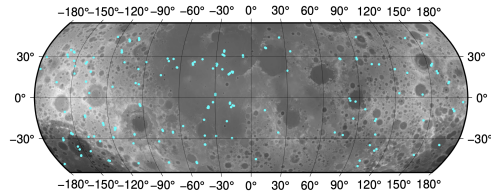


図2 検出した 191 個の新しいクレータ

■Phase2 Phase1 で検出したクレータの中でも外観に特徴があり規模が大きいクレータの画像 21 枚を増し、39 枚の教師データを作成した。物体検出アルゴリズムは YOLOv4[3] と SSD[4] の 2 つのモデルを実験した。両モデルとも教師データの少なさから学習が不安定であったが、学習に用いていない新しいクレータ画像で検証したところ Accuracy が YOLOv4 は 67%, SSD は 33% であった。また、Phase3 の 1 つの探索場所について実験したところ、SSD では影やボルダーなどの誤検出が多かったため、本研究では YOLOv4 を用いてシステムを作成した。

■Phase3 Phase3 では Phase2 の YOLOv4 を用いたシステムを用いて 3 地点を探索した。検出したクレータは Place1 で 417 地点、Place2 で 138 地点、Place3 で 20 地点であった。さらに推測されている大きさの条件に合うクレータは Place1 で 8 個、Place2 で 1 個、Place3 で 6 個であった。検出されたクレータを例として図 3 に示す。

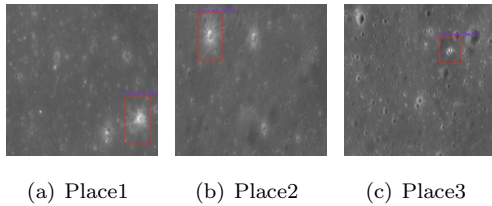


図3 検出されたクレータの例

4 議論

Phase3 で検出したクレータがアポロミッション時に形成された可能性について議論する。この時、Phase3 の探索対象のクレータの規模は大きく、例えば Place1 で推測されているクレータは推測された領域に約 10,000 年に 1 度の生成頻度である。したがって、検出したクレータの中で一番新しいクレータはアポロミッション中に形成された可能性がある。そこで新しいことが保証されているクレータとの類似性を調べることで、検出したクレータの新しさの序列が判断できるかを試みた。本研究では類似性を見るのにアルベドと呼ばれる入射光と反射光の比を表す値と、レイと呼ばれる線状の模様のクレータ周辺の減衰の様子を用いた。一般的に新しいクレータは

アルベドが大きく、レイがはっきり残っていることが知られている。

アルベドは下式にデータをフィッティングすることで算出できる [5][6]。これは I/F とアルベドの関係を表した式で、 I/F は画像の DN 値より算出可能である。本研究では背景の影響を除くために、アルベドをクレータ周辺と背景で算出し、クレータ周辺のアルベドを背景のアルベドで割った値を新しいクレータの値と比較した。

$$I/F = m e^{-\mu \alpha} \times \frac{2 \cos i}{\cos i + \cos e} \quad (20^\circ < \alpha < 80^\circ)$$

ここで Phase angle α , Incidence angle i , Emission angle e は画像の撮像条件から取得可能である。 m と μ はフィッティング係数であり、 m がアルベドを表す。

レイの減衰はクレータ周辺の取得する領域を変化させながら、それぞれ I/F の平均値を算出した。これを正規化した後、基準とする新しいクレータのそれとの平均二乗誤差を算出した。本研究では平均二乗誤差が小さいほど新しいクレータと類似性が高いと判断した。

各 Place で検出したクレータについて、新しいことが保証されているクレータとアルベドとレイの減衰の両観点で最も類似性が高いクレータを、各 Place の本研究における第 1 候補クレータとした。各第 1 候補クレータは図 3 に示した。特に Place3 の第 1 候補クレータは外観も典型的な新しいクレータの特徴を示している。

5 まとめと今後の課題

Phase1 では Temporal pair を用いて新しいクレータを 191 個検出した。Phase2 では物体検出技術を用いて単画像から新しいクレータを検出するシステムを作成した。Phase3 ではアポロミッション時に形成されたクレータの候補をいくつか検出し、アルベドやレイの減衰の観点から第 1 候補クレータを選出した。

今後の課題として Phase1 のシステムの精度を上げる工夫や、探索範囲を広げる事が挙げられる。Phase2 では少ない教師データでの学習に適したアルゴリズムの採用、Phase3 では検出したクレータを他の観点からも検証したい。

参考文献

- [1] Speyerer et al. Quantifying crater production and regolith overturn on the moon with temporal imaging. *Nature*, 538(7624):215, 2016.
- [2] Nakamura et al. Apollo lunar seismic experiment—final summary. *JGR*, 87(S01):A117–A123, 1982.
- [3] Bochkovskiy et al. Yolov4: Optimal speed and accuracy of object detection, 2020.
- [4] Liu et al. Ssd: Single shot multibox detector. In *ECCV*, pages 21–37. Springer, 2016.
- [5] LA Akimov. Light reflection by the moon. ii. *KFNT*, 4:10–16, 1988.
- [6] Shkuratov et al. Optical measurements of the moon as a tool to study its surface. *Planetary and Space Science*, 59(13):1326–1371, 2011.