

御池山隕石クレーターに検出された負の重力異常

坂本 正夫¹, 志知 龍一²

2010年7月20日受領, 2010年8月20日受理.

(要旨) 長野県飯田市上村にある御池山隕石クレーターでは、クレーター内の基盤岩チャート・砂岩とフォールバック層(クレーター形成時に空中放出した角礫岩類がクレーター内に堆積した層)内のチャート・砂岩の角礫とから衝撃変成石英が大量に確認され、インパクトクレーターとして発表された。このクレーターでは、海外のインパクトクレーターに共通する負の重力異常が検出された。負の重力異常が生じている現象を海外のインパクトクレーターと比較検討した。その結果、クレーター形成時の衝撃圧縮によって主に基盤岩が破碎されたために密度が低下して生じたと考えられる。

1. はじめに

長野県飯田市しらびそ高原で、赤石山脈西麓にある御池山(1905m)の山頂を含む南東斜面には直径約900mの半円形の地形が存在する(図1)。この地形内の角礫層や基盤岩に含まれる石英の単結晶内に幅1~3ミクロンの非晶質層が形成された Planar Deformation Features(PDFs)(正式な日本語用語は未定: 面状変形組織)をラマン分光分析と光学顕微鏡などを使って検出し、インパクトの決定的な証拠として御池山隕石クレーター(以下、御池山クレーターと呼ぶ)の存在が報告された(図2) [1]。PDFsは、クレーター内の基盤岩のチャート・砂岩の石英粒から確認されたが、フォールバック層内の角礫のチャート・砂岩の石英粒から確認されたものが最も良好に形成されている(図3)。

海外のインパクトクレーターは176ヶ所で確認されている。その内、最も多くのクレーターで石英のPDFsの検出が衝突の証拠として報告されている。他に、シャッターコーン(衝撃を受けて円錐形に変形した地表の岩石)や溶融ガラス類、隕石類、衝撃生成鉱物、

重力異常なども報告されている。中でも重力異常の検出は、物質的な証拠とは異なりクレーター地形の全体に関する地球物理学的な手法として貴重な情報を得ることができる。海外のインパクトクレーターの研究では、重力異常の研究成果は古くから報告がある。West Hawk Lake crater(カナダ, 直径3.2km)では、カナダに多く見られる湖水の中で特段に水深の深いことに注目し、最初に重力測定を行った結果がインパクトの仮説を支持する成果につながった。その後、クレーター内部にクレーター形成時の角礫層が存在してい



図1: 位置図
MTL: 中央構造線 ISTL: 糸魚川-静岡構造線 表示の無い一線: 道路
地形図: 国土地理院2万5千分の1「光岳」使用

1. 飯田市美術館
2. 元中部大学
ic90877@city.iida.nagano.jp

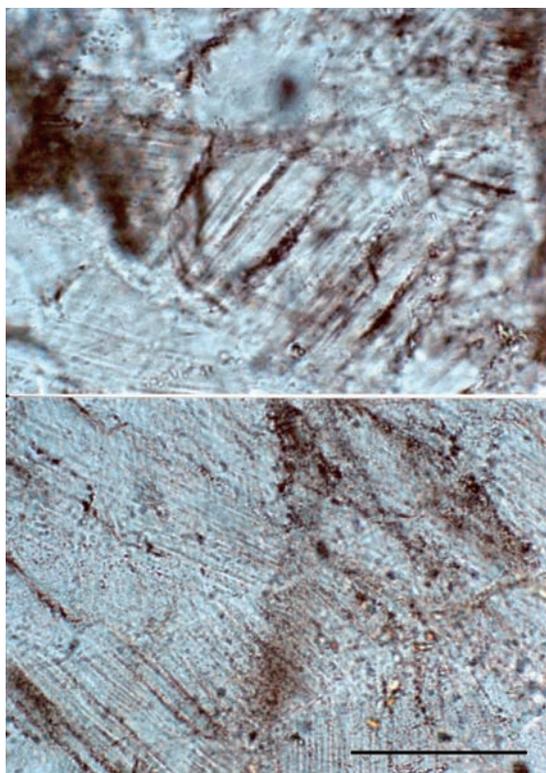


図2：PDFsの顕微鏡写真(2枚組) フォールバック層中のチャート礫の石英 スケールは0.1mm

ることを示した[2]. インパクトクレーターの研究では重力異常の検出だけで衝撃の証拠とすることは不可能であるが, クレーター内部に密度の低くなる堆積物が存在することを示唆したり, 基盤岩の破碎が広がって岩石の密度低下を招いている事などの情報が得られる[3]. また, Monturaqui impact crater(チリ, 直径460m)のような規模の小さいクレーターでも重力異常の検出が有効であることを示している[4].

御池山クレーター(図4)は, 急峻な山岳地帯にあって, クレーター形成後の早い段階でクレーター地形の崩壊が起こった可能性が高い. そのため, 衝撃によって形成された様々な物質や現象の多くが崩壊したり消失したりしてしまったと考えられている[1]. 衝撃を示す証拠類の中で, 重力異常の検出は御池山にも当てはめる事のできる数少ない現象把握の手段である. すなわち, 証拠の多くが消失したクレーター地形の中でも, 衝撃を受けた状態が検出できる可能性があるからである. そこで, 御池山一帯の重力測定を行って, 衝

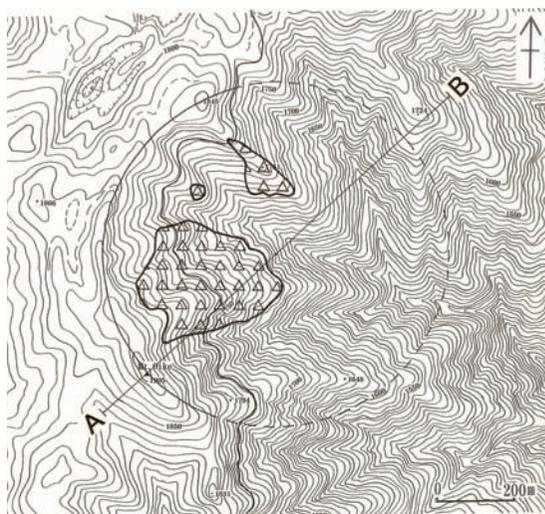


図3：御池山クレーター内に残存する理論的フォールバック層(△印の範囲) A,Bは図8の断面の位置

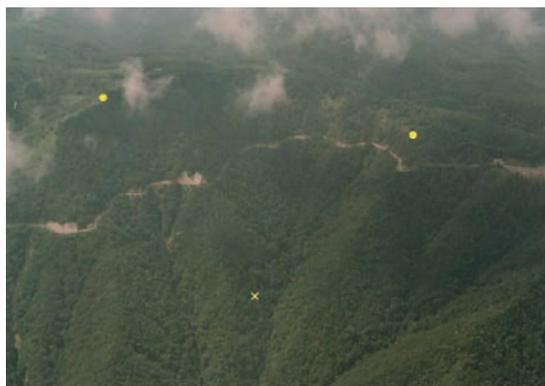


図4：御池山クレーターの空中写真 2点間を結ぶ弧がクレーター縁 ×印はクレーター中心

撃を受けたことによる重力異常の検出を試みた. なお, 海外に存在する大小様々な隕石クレーターで重力異常の報告はあるが, その内御池山クレーターの規模に近い小さなサイズのクレーターから報告のある重力異常と比較検討し, 御池山クレーターの地形的地質的な特性を示す.

2. 赤石山脈の重力分布の概要

赤石山脈の地質構造は, 中央構造線を西縁として, 東側へ三波川帯・戸台構造線・秩父帯・仏像構造線そして山脈の中軸をなす四万十帯, さらに東縁をなす糸魚川―静岡構造線へと帯状構造をなしている[5]. 大



図5：赤石山脈を中心にした重力分布図 Gravity Research Group (1994)より抜粋。太線コンターは重力異常値ゼロを示し、その北側が負、南側が正を示す。御池山周辺のみ円形が負を示す。白丸は飯田市中心地を示す。

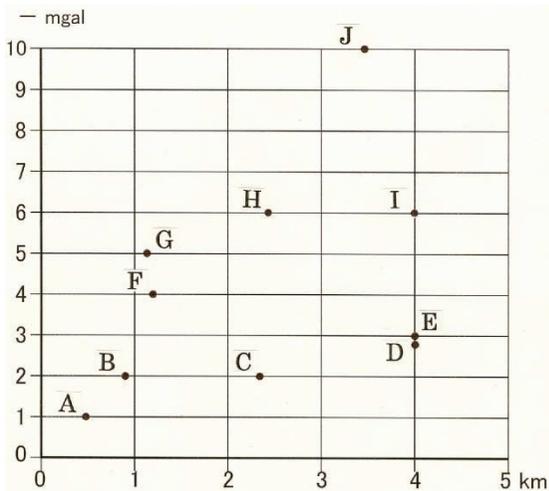


図7：シンプル型クレーターの直径と重力異常値の関係を示すグラフ
A：Monturaqui B：御池山 C：Holleford D：Suvasvesi N E：Gow Lake F：Darwin G：Pretoria Saltpan H：West Hawk Lake I：New Quebec J：Kgagodi

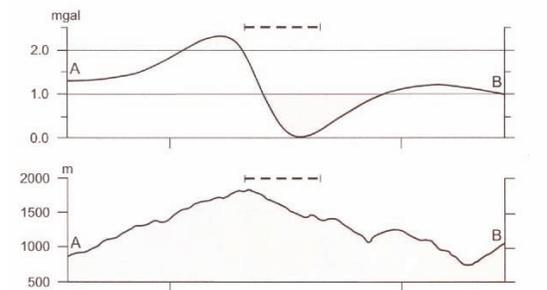
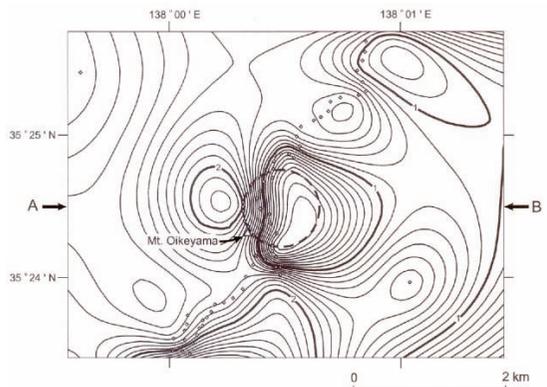


図6：御池山周辺の重力分布図(上図) 四角印：測定ステーション、破線：クレーター位置
A-B：中図・下図の断面位置、重力値断面図(中図) 破線区間：クレーターの直径と位置、地形断面図(下図)

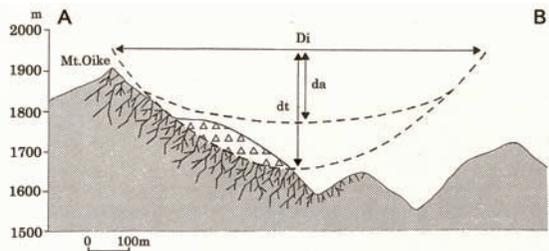


図8：御池山頂上とクレーター中心を通る地形断面 網目：基盤岩 ひび割れ線：基盤岩の割れ目 △印：フォールバック層 Di：直径 da：見かけの深さ dt：真の深さ A-B：図3の位置

規模な帯状構造は、太平洋側からのプレートによる強い圧縮を受けて形成されてきたもので、赤石山脈は日本の山地形成運動の中にあって最大の隆起量を示す[6].

こうした地質構造をもつ赤石山脈では、中部日本の内陸部で全体が負の重力異常を示す。それに対して、太平洋側と日本海側との両側では正の重力異常への転換が行われている。特に、赤石山脈を含む太平洋側では北から南へ徐々に負から正へ移り変わっていく。赤石山脈南部は太平洋寄りに位置し、負の異常域の周辺部に相当する(図5)[7].

赤石山脈では、山脈の走向方向に緩やかな重力の変化があるととともに側方にも緩やかな変化を示す。し

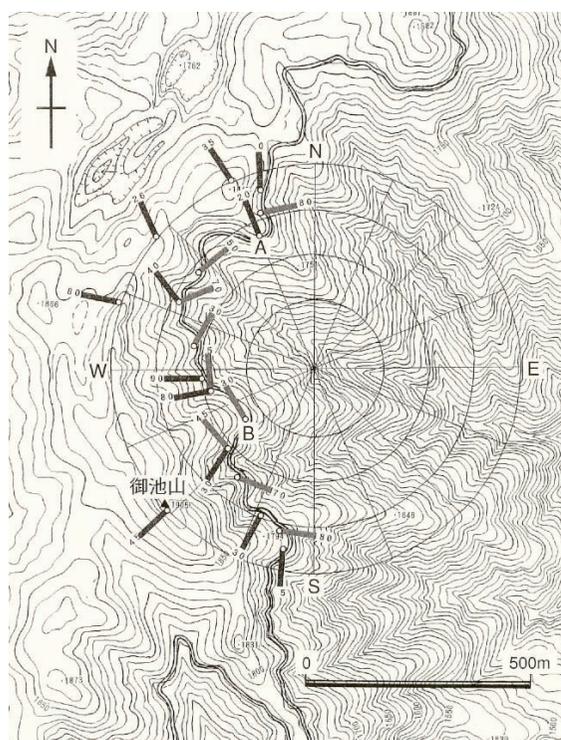


図9：御池山クレーター内の基盤岩に形成された割れ目の方向クレーターの中心から放射状(A)と同心円状(B)に割れ目が発達

かし、山脈の西縁を走る中央構造線沿いでは際だって高密度になっていて重力の変化が激しい。地表での中央構造線は縦谷の構造谷を形成しているが、地下では三波川帯や秩父帯に相当する領域までに高密度域が及び特異な重力場を形成しているとみられる。このことは、赤石山脈を走る中央構造線が右横ずれ運動を行う活断層[8]であることも原因と考えられる。

中央構造線に沿った重力異常域は幅の広い帯状を示すが、南北方向の変化では赤石山脈の全体的な傾向と調和し、北から南へ向かって負から正へと移り変わっていく。茶臼山塊の一角に位置する御池山付近でも似た重力異常の分布傾向にあり、赤石山脈全体の傾向性の範囲内にある。しかし、御池山付近には負の重力異常のスポットが表れている[7]。こうした相対的に負の異常は赤石山脈では他に認められない。御池山一帯は砂岩・泥岩を主体にしてチャートを挟む比較的単純な地質であり、全体が複合斜構造をなし、地質・構造上で特異な重力異常を生じる地質学的な要素は見当たらない[9]。



図10：割れ目の露頭写真 A：放射状(図9のA) B：同心円状(図9のB) 黒矢印：割れ目の方向

3. 重力測定結果

御池山エコーラインの起点はしらびそ峠(1831.7m)にあり、南へ延びた尾根沿いを通り上村下栗地区へつながっている。エコーラインの途中からは、大野地区を通して北又渡へ下る林道が分岐している。

起点のしらびそ峠を第1ステーションとして、エコーライン沿いとその分岐した林道それに半円形のクレーター縁沿いで、総延長15km間の114ステーションで重力測定を行った。測定には、LACOST & ROMBERG Gravity Meter 484を使用した。測定間隔は平均150mである。なお、測定区間内の標高は

表1：シンプル型クレーター重力異常表
mgal値：相対的な負の重力異常値 主な地質：重力異常を引き起こす原因相

記号	クレーター名 (国)	直径km	mgal	クレーター内の主な地質
A	Monturaqui (チリ)	0.46	-1	基盤岩
B	御池山 (日本)	0.9	-2	基盤岩
C	Holleford (カナダ)	2.35	-2	基盤岩・堆積層
D	Suvasvesi N (フィンランド)	4	-2.8	基盤岩・角礫層・熔融岩層
E	Gow Lake (カナダ)	4	-3	基盤岩
F	Darwin (オーストラリア)	1.2	-4	基盤岩・角礫層・堆積層
G	Pretoria Saltpan (南アフリカ)	1.13	-5	基盤岩・堆積層
H	West Hawk Lake (カナダ)	2.44	-6	基盤岩・角礫層
I	New Quebec (カナダ)	4	-6	基盤岩・熔融岩層・堆積層
J	Kgagodi (ボツワナ)	3.5	-10	基盤岩・熔融岩層・角礫層

1210mから1910mまでで、多くの区間が亜高山帯の中にある。測定したデータとともに、Gravity Research Group(1994) [7]が報告したデータの内、国土地理院発行の2万5千分の1地形図「光岳」「大沢岳」「上町」「上久堅」の範囲内で既に測定されている5ステーションのデータも含めた。ブーゲー密度は2.67で、Gravity Research Groupが採用した密度と同じである。

御池山エコーラインは御池山クレーターの内部を通過しているが、クレーター縁に近い部分を曲がりくねりながら縦貫している。重力分布をより詳細に測定するためには、クレーターの中心付近を通過するルートで測定したり、相互に交差するルートで測定したりすることが望ましい。しかし、クレーター周辺は標高1800m前後の山岳地帯であり急峻な地形であるために、エコーラインに沿ったルートとハイキングコースのあるクレーター縁以外には測定が不可能であった。

しらびそ峠から大野地区までの114ステーションでは、重力測定値についての潮汐補正・地形補正・フリーエア補正などすべての補正処理を行って重力異常図(図6)を作成した。図中の矢印で示した御池山々頂はクレーター縁に相当し、それより上方へ半弧を描くように8ステーションが示されている。その中央付近で重力値が最大になり、およそ+2mgalになる。それに対して、クレーター内のエコーライン沿いでは重力値が急激に減少し、最小でおよそ+0.1mgalになる。しかも、減少する方向に円形の重力異常域が認められる。そして、クレーターの縁から中心に向かって重力

の最大値と最小値の差はおおよそ2mgalになる。したがって、相対的に負の重力異常が円形に近い状態で存在する。

相対的な負の重力異常域が扁円状であり実際のクレーター地形より大きく表れている原因は、測定ステーションの位置的な偏りがあるためと考えられる。また、一般に低重力はクレーター縁を越えてわずかに広がる[10]ことも影響していると考えられる。しかし、クレーターを中心にした重力異常域が分布していることは確かである。そして、全長15km間での重力測定値では、相対的に負の値を示す部分は他に認められない。

4. 考察

4.1 負の重力異常が表れる原因

隕石クレーターに負の重力異常が表れる原因は、主に3種類あると考えられる。

1つ目は、クレーター内の堆積物による密度低下がある(表1, 図7)。Darwinクレーター(直径1.2km)の場合、インパクトによって形成されたDarwin glassを大量に含む厚さ100mの堆積物が存在し、クレーターに生じた-4mgalの負の異常のおよそ半分を占め、さらに残りの半分の異常も堆積物の下位にある低密度の角礫層の存在が推定されている。したがって、Darwinクレーターでの負の重力異常のほとんどが、クレーター内に堆積したインパクトに関係する堆積物

によって生じていると解釈されている[11][12]. また, Suvasvesi N クレーター(直径4km)でも角礫層と溶融岩層の存在によって -2.8mgal が報告されている[13].

West Hawk Lake クレーター(直径3.2km)では密度2.67に設定し, 合計194 ステーションの測定データを得て7方向の重力断面を作成した. 地域的な重力傾向を除いた結果, -6mgal の負の異常を得た. これは, クレーター内に厚くフォールバックして堆積した角礫層が主体の低密度物質によって生じたものである[2]. Gosses Bluff クレーター(直径22km)でも似たような現象が報告されている[14].

Pretoria Saltpan クレーター(直径1.13km)の場合, 34 ステーションでの重力測定が行われ, 重力の地域傾向を除いた残りの異常は -5mgal に達した. この主な原因は, クレーター内に厚く横たわるクレーター形成後の粘土層や泥灰岩層とその下に重なるフォールバックした角礫層によって密度低下を生じている[15]. このクレーターでは, インパクトによる角礫層の上に, その後湖成層が厚く堆積したため, それらの地層によって密度低下を生じている.

御池山クレーターの場合, インパクトガラスや溶融した岩石は発見されていないので, こうした密度低下の原因には相当しない.

2つ目は, クレーター内の堆積物と基盤岩の破碎との両方がもたらす密度低下である. New Quebec クレーター(直径3.4km)では, クレーターの東西を横断する方向の重力測定を行った. 地域的な重力傾向を取り除いた異常値は -6mgal に達した. この異常は, クレーター内に堆積した角礫層と破碎された基盤岩の両方が, 周囲の通常の基盤岩より密度が低いために生じていると考えられている[16]. Kgagadi クレーター(直径3.5km)では厚い角礫層の存在とその下位にある花崗岩基盤の破碎による密度低下で -10mgal の異常が報告されている[17](表1, 図7).

また, Lappajjarvie クレーター(直径17km)では, フィンランド地質調査所が重力探査を行い, 約 -10mgal の円形の負の異常を明らかにした. このクレーターは深く侵食を受けているために堆積物はあまり残っていない. しかし, 基盤岩の上にはインパクトによって形成された溶岩であるKarnaiteが覆っている. 負の異常はクレーター内を充填するこの溶岩と破碎された基盤岩とによって生じている[18].

御池山クレーターの場合, 急峻な地形で円形の約40%しか残っておらず, かなりの部分は崩壊してしまっている. そのような状況の中でもクレーター内にはフォールバック層としての角礫層が存在するか推測した. クレーターの直径(D)に対する見かけの深さ(da)と真の深さ(dt)は, 次の数式を使って計算した[3].

$$(1) da = 0.13 D^{1.06} \quad (2) dt = 0.28 D^{1.02}$$

クレーターの直径を900mとして計算値を現在の御池山の南東斜面の地形に当てはめた結果, フォールバック層がわずかに残っていることが推定され, 実際に現地で確認されている(図3). しかし, その角礫層はクレーター内の一部分に極めて薄く分布する程度で, クレーター内の負の重力異常を生み出すだけの体積として貢献しているとは考えにくい.

3つ目は, クレーターの基盤岩の破碎によって生じた密度低下である. Monturaqui クレーター(直径0.46km)ではインパクトによる角礫層は認められず, 基盤の花崗岩の破碎によって -1mgal の異常が報告されている[4]. たいへん規模の小さなクレーターでも負の重力異常が確認された事例である. Gow Lake クレーター(直径4km)の場合, 湖になった円形地形と負の異常の大きさが一致する. 地域的な重力傾向を取り除いた残りの異常は -3mgal であり, 湖の中心付近にだけ堆積している角礫層と負の異常の分布が一致しない. 異常の範囲がクレーター全域にまたがることから, 高度に破碎された基盤岩が主原因と考えられる(表1, 図7). さらに, Nicholson Lake クレーター(直径12.5km)でも同様の原因が考えられている[19]. こうした基盤岩の破碎が主原因で負の異常が生じる報告例は少ない.

御池山クレーターの場合, Gow Lake クレーターのように, 主として基盤岩の破碎によって岩石密度が低下し, 相対的な負の重力異常が生じていると考えられる. しかし, 破碎された基盤岩でさえも崩壊している部分が多いために, 密度低下を引き起こしている基盤岩の体積も少なくなっており(図8), それが直径900mの御池山のクレーターに表れた -2mgal という相対的に負の重力異常と考える. また, 堆積岩に形成されたクレーターは結晶岩に形成されたクレーターより負の重力異常が小さくなる傾向がある[10]. 御池山は堆積岩で構成され, 負の異常が小さいことの一因でもあると考えられる.

Grieve and Pesonen(1992)によると、地球上のインパクトクレーターで主な地球物理学的な特徴は負の重力異常が残っていることである。負の異常をもたらす主な原因は、インパクトによって形成された角礫層による密度低下や標的岩としての基盤岩の破碎による密度低下である。すなわち、一般的にインパクトによって角礫層と基盤岩の両方が負の異常を引き起こすと考えられるが、クレーターが形成されてから長い期間を経過する内に、クレーターの侵食やクレーター形成後の堆積物によって重力異常の表れ方が異なってくる。御池山クレーターでは、亜高山帯の急峻な山の斜面に形成されていることから、インパクト後の早い時期に多くのフォールバック層などが崩壊し、広く基盤岩がむき出しになり、さらに基盤岩自体もかなり崩壊を起こしていると見られる。

クレーターの侵食レベルは7段階あるが、重力異常とクレーター直径との間にはほんのわずかな影響しか現われない。しかし侵食レベル6～7ではその影響が目立つようになる[10]。御池山クレーターの場合、クレーター内に角礫層がわずかに残存しクレーター底が露出しているので侵食レベル6に相当し、負の重力異常が低下する原因になっていると考えられる。

4.2 基盤岩の破碎の形態

インパクトによって基盤岩が変形を受ける場合、断層や褶曲、多重リング、基盤岩の割れ目などとして表れることがある。断層として表れる場合、Gosses Bluff クレーター(直径22km)では断層が中央丘を取り囲むように同心円状に形成されているが、断層は網目状に連結した形状を示す[14]。Bee Bluff クレーター(直径2.4km)では、無数のスラストがクレーターを取り囲んでいる。Hico クレーター(直径9km)では、クレーターの外縁境界に明瞭なリング状の断層が取り巻いている。Decaturville クレーター(直径6km)でもほぼ円形の断層が取り巻いている。Serra De Cangalha クレーター(直径1.2km)では同心円状のリングがありそれに伴う環状の断層がある。Versailles クレーター(直径1.5km)では同心円状に取り巻く褶曲と断層があって放射状構造は認められない[20]。また、Wells Creek クレーター(直径14km)では、クレーター縁で放射状の断層があり、クレーターの中心部には外側に落ちるスラストがある[21]。

Popigai クレーター(直径100km)は大規模なインパクト構造であり、環状のオーバースラストが形成されているが、同時にクレーターを中心にした放射状の断層も多数形成されている[22]。このように、同心円状の断層と放射状の断層が同時に形成されているクレーターは、クレーターサイズに違いはあるが、他にHaughton クレーター(直径20.5km)、El' gygytyn クレーター(直径18km)、Sierra Madera クレーター(直径13km)、Riachao Ring クレーター(直径4km)、Pretoria Saltpan クレーター(直径1.1km)がある[21]。

さらに類似した構造で、同心円状の割れ目と放射状の割れ目が同時に形成されているものでは、Sythymenkat Lake クレーター(直径12km)とDeep Bay クレーター(直径10km)があり[20]、放射状の割れ目は、Gosses Bluff クレーター(直径22km)[14]とBeyenchime-Salata クレーター(直径7.5km)[22]がある。

御池山クレーターの場合、クレーター内の基盤岩の露頭で割れ目の方向を測定した結果、放射状と同心円状の両方の割れ目が同時に検出されている(図9)。割れ目は高角度に数cm単位で形成されていることが多い。御池山を含む茶臼山塊では構造運動で形成されている割れ目は粗い間隔で約N60W方向が一般的であるのに対し、クレーター内に限って特徴的な割れ方の方向を示している(図10)。御池山クレーターの場合には放射状と同心円状の断層を形成するまでには至らないが、海外のインパクトクレーターに見られる割れ目と同じ形成の仕方が認められる。この基盤岩の割れ目が負の重力異常の主な原因と考えられる。

4.3 基盤岩の破碎深度

Steinheim クレーター(直径3.4km)では高度に破碎を受けた中央丘でボーリング調査を行った結果、深度を増すことによってインパクトの影響が減少することが分かった。Brent クレーター(直径3.8km)では、衝撃で溶けた岩石領域の下に破碎された岩石が広がっていて、ボーリング調査の結果、地表より約1000m下までは破碎された岩相が認められた[21]。Gow Lake クレーター(直径4km)では、負の異常の多くは湖の下にある基盤岩が高度に破碎したためその深さは900mに達する[19]。Pretoria Saltpan クレーター(直径1.13km)ではインパクト後の堆積物が約140m積も

り，その下に破碎された花崗岩の基盤があり，クレーター底から約200mの深度まで続いている[23]. Pretoria Saltpan クレーターの直径が1130mであるのに対し御池山では直径約900mであり，規模がさらに小さいことから推定して，基盤岩の破碎はより少ないと見積られる(図8).

一般に，シンプルクレーターの底にある基盤岩の割れ目による密度減少は，重力異常の低下に十分に貢献していない[10]. 御池山クレーターが低い負の重力異常を示していることは，その重力異常のほとんどを基盤岩の割れ目が引き起こしていること，さらには侵食が進んでいることのあらわれと見られる。

5. まとめと今後の課題

海外に存在するインパクトクレーターで比較的多く報告されている負の重力異常は，地表付近の密度がインパクトによって低下する現象である。その主因がインパクトに直接関係した基盤岩の破碎によることは共通した現象である。また，インパクトによって形成された角礫層や溶融岩類による負の異常や，インパクト後の堆積物による負の異常が生ずる。御池山クレーターでは，円形地形の約60%が崩壊し，基盤岩が露出している部分が多く，インパクト時に空中放出された角礫層はわずかしか存在しない。従って， -2mgal の負の重力異常は，砂岩・泥岩を中心にした基盤岩の破碎による密度低下が主因と見られる。

御池山クレーターでは，すでに石英の結晶構造内に Planar Deformation Features(PDFs) (面状変形組織)が存在することを明らかにされている。また，フォルバック層での角礫層の存在や，地質構造上の放射状と同心円状の割れ目の形成，負の重力異常も確認されている。崩壊してインパクトに関わる証拠の存在が少ない中で，今後もさらに多面的な証拠を求める研究を行っていく。

謝辞

御池山クレーターの研究を推進する中で，インパクトクレーターの重力異常に関して有益なご示唆を下さった岡山理科大学西戸裕嗣教授と西ハンガリー大学アーノルドグチック准教授に感謝申し上げます。本稿に

対し有益なコメントと適切な指摘をして下さった査読者のイタリア ダヌンツィオ大学 小松吾郎教授に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Sakamoto, M. et al., 2010, *Meteoritics & Planetary Science* 45, 1, 32.
- [2] Halliday, I. and Griffin, A., 1963, *Geophys.Res.*, 68, 5297.
- [3] Grieve, R.A.F. and Pesonen, L., 1992, *Tectonophysics*. 216. 1.
- [4] Ugalde, H. et al., 2007, *Meteoritics & Planetary Science* 42, 2153.
- [5] 狩野謙一, 2006, 日本地方地質誌 4, 中部地方, 250.
- [6] 壇原 毅, 1974, 日本測地学会, 250.
- [7] Gravity Research Group in South West Japan, 1994, *Geol. Surv. Japan*.
- [8] 坂本正夫, 1977, 中央構造線の総合研究, 2, 103
- [9] 坂本正夫, 1980, 中生代造構作用の総合研究, 2, 31.
- [10] Pilkington, M. and Grieve, R.A.F., 1992, *Reviews of Geophysics*. 30. 161.
- [11] Fudali, R.F. and Ford, R., 1979, *Meteoritics*, 14, 283.
- [12] Howard, K.T. and Haines, P.W., 2007, *Earth & Planetary Science*. 260. 328.
- [13] Werner, S.C. et al., 2002, *Physics & Chemistry of the Earth*. 27. 1237.
- [14] Milton, D.J. et al., 1972, *Science*. 175. 1199.
- [15] Fudali, R.F. et al., 1973, *Journal of Geology*, 81. 495.
- [16] Marvin, U.B. and Kring, D.A., 1992, *Meteoritics*, 27, 585.
- [17] Brandt, D. et al., 2002, *Meteoritics & Planetary Science*. 37, 1765.
- [18] Lehtinen, M. 1976., *Geol. Surv. Finland. Bull.* 282. 1.
- [19] Thomas, M.D. and Innes, M.J.S., 1977, *J. Earth Science*. 14. 1788.
- [20] Seeger, C.R., 1972, *Geological Society of America Bull.* 83, 3515.
- [21] Hodge, P., 1994, *Cambr. Univ. Press*. 1.
- [22] Masaytits, V.L., 1976, *Geol. Rev.*, 18. 1249.
- [23] Reimold, W.U., et al., 1992, *Geology*, 20. 1079.