アップヒーバルドーム(U.S.A, ユタ州)は いかにできたか? - 地下の岩塩層によって修正されたインパクトクレーター -

坂本正夫¹,小川勇二郎²

2013年9月20日受領, 2013年11月4日受理.

(要旨) アメリカ合衆国ユタ州にあるアップヒーバルドームは、インパクトクレーターとして国際登録されている.この地形は、長い間地下深くに存在する岩塩層の上昇によって形成されたと言われてきたが、その後隕石の衝突によって形成されたとの説が広まってきた.文献研究で両説の言い分を踏まえた上で現地調査を行い、関連する諸現象との比較も行った結果、この地形はインパクトによって形成されたものの、地下に 岩塩層が存在することによってクレーター地形が修正されたとの結論に至った.

1. はじめに

ユタ州ソルトレイクシティの南方からアリゾナ州お よびコロラド州の西部にかけて,コロラド高原が広が る.その中央にコロラド川が大きく蛇行しながら南西 へ流れ下っている.ユタ州南部のコロラド川の中流で, 支流のグリーン川が合流する.両河川に挟まれた三角 地帯には、キャニオンランズ国立公園が広がっていて, その中にアップヒーバルドームがある(図1).キャニ オンランズ国立公園一帯の地質は、地表付近ではトリ アス紀上部からジュラ紀に及ぶ地層が広がり、ジュラ 紀よりも上位の地層はおそらく新生代以降の侵食で削 剥されてしまっている.

ドームの中心にある中央丘には、ペルム紀最上部の ホワイトリム砂岩層とトリアス紀のモエンコピ層が複 雑な構造をなして分布し、その周りにトリアス紀のチ ンリ層が囲んでいる.これら3層は、逆断層を主とす る複雑な構造を呈している(図2).内縁の壁はそそり 立った断崖地形をなし、そこから外側へは最大80度 に傾斜するジュラ紀のウィンゲイト砂岩層、さらに上 位へジュラ紀のカエンタ層とナバホ層が重なっている. これらの地層は、ドームの円形リムから外側へリング 状に地層が窪んでできた構造(向斜構造)をつくりなが

 飯田市美術博物館
元筑波大学 ic90877@city.iida.nagano.jp



図1:アップヒーバルドームの位置図.

ら、より外側では地層が徐々に緩やかに波うって平坦 となる.内側のリムから3 km以上離れるとほとんど 水平層となる[1](図3).

アップヒーバルドームの直径は約9 kmで乱された 範囲は約5 kmの説と、5.5 km以上の説と、7~8 km であるとする説があるが、インパクトクレーターの国 際登録では直径5 kmで登録されている.形成年代に ついてはさまざまな考え方がある.すなわち、ジュラ 紀中期カーメル層とエントラダ層の間の堆積時の説、 白亜紀マンコス層の堆積時の説があり、国際登録では 6500万年前(白亜紀最末期)と登録されていて、推定 にはかなり幅がある.このドームの直径と形成年代と の値のそれぞれには大きな幅があるのは、様々な研究 者によって地形や地質の解釈が異なっているためでも



図2: アップヒーバルドームの地質柱状図. Kriens et al.(1997) を簡略化して編集した図.

ある. 筆者らの調査によると, アップヒーバルドーム は, 直径約2 kmの内縁をもつとともにその外側にド ームを取り巻く向斜構造があり, さらにその外側に同 心円状に直径6~7 kmのリングが取り巻いた多重リ ング構造をもっていると言える. このドームの地形お よび地質を文献研究した上で現地調査し, インパクト クレーターの地形が修正されていく過程を議論して考 察する.

2. 研究史

2.1 両説の登場

アップヒーバルドームは、1930年代に地下の岩塩 層が地層を押し分けてドーム状に上昇してくることに



図3:アップヒーバルドームの内部、直径2kmの内縁までを連続 撮影した合成写真(上図)と地質断面図(下図)、上図写真の 内部は中央丘、写真はドーム南部の内縁の北から南に向け て全周を撮影、下図はKriens et al.(1997)を簡略化して編 集したもので、中央丘を面ってほぼ北東一南西で切った断 面を示す、矢印で示す内縁の外側に複数の大小の窪地がリ ング状に取り巻く、中央丘の部分には入り組んだ小断層が 密に形成されていて地層の変形も激しいが、その構造の詳 細は省略する、地層の模様は図2と同じ、

よって形成されたという岩塩ドーム説がMcKnightに よって提案された.以来,アップヒーバルドームの名 称は,隆起を意味するupheavalという普通名詞が domeになって上昇してきたというこの説を踏襲した 名称のまま現在のインパクトクレーターに使われてい る.

岩塩ドーム説によると、石炭紀後期にはすでに岩塩 層がドーム状に上昇を開始し、その後、トリアス紀、 ジュラ紀にかけて堆積時にも継続的に上昇した.それ らの時代には、まだ十分に固結していない地層を複雑 に変形させるに足る岩塩の上昇が続き、ジュラ紀にな ってそれが地表へ抜け出た後にピンチオフし、最後に 閉じる段階で生じた不安定地形により重力崩壊が生じ、 側方に短縮する構造が形成されたというシナリオであ る.この説では、現在見られる構造を形成するには、 石炭紀後期からジュラ紀まで、およそ1億年近くにわ たる非常に長い時間がかかったことになる。

一方,こうしたゆっくりとした構造形成説に真っ向 から対立する隕石による衝突説が提唱された[2]. そ れは、アップヒーバルドームとその周辺のすべての変 形構造が、隕石ないし小惑星の衝突によって、ほとん ど短時間に出来たとするものである.その後、詳細な 地質調査にもとづいて数種類の大小の地質構造が、隕 石衝突によってほぼ同時に形成されたとの構造形成モ デルが提出された[1]. しかし,岩塩ドーム説とイン パクト説の両説とも,直接的な証拠に欠けるきらいは あった.

2.2 岩塩ドーム説の限界

地震探査,ボーリングなどを含む地下物理探査では, 地下の岩塩層は現在約450 mもの深い位置にあって, 浅い部分には存在しないことが判明した[3][4].また, 岩塩層が地上に突き抜けてピンチオフする例は,現在 の地球上では知られていないことなどからも,岩塩ド ーム説は説得力に欠ける非現実的なことであると考え られるようになった.仮に浅所まで岩塩が上昇して来 たとしても,途中で地下水によって溶解して失われて しまう.つまり,岩塩ドームの上昇だけでは,アップ ヒーバルドームに見られる構造は形成しにくいことが 分かった[5].

2.3 インパクト説の証拠の発見

インパクト説の立場からはその後、ホワイトリム砂 岩層内に、衝撃で出来たと思われる砕屑岩脈がリムの 内側で発見された。砕屑岩脈は円摩された砂粒子から なる砂で構成されている事例がある中で、この岩脈内 では角張っている砂粒子であることから、衝撃によっ て短時間で岩脈が形成されたものであると考えられた。 また、重要なショックの指標としてのシャッターコー ンや衝撃変成石英に形成されたplanar deformation features(PDFs)(以下「面状変形組織」と記述)が、中 央丘や内側のリムの地層から報告された[1]. さらに、 地層の変形が著しい中央丘では、衝突時に水圧破砕が 生じ帯水層の基底部に衝撃波が走って生じた構造が示 された[6]、リムでのウインゲート砂岩層内での岩脈 構造や破砕して流動する構造、岩石の流動構造などの マクロからマイクロな構造観察とそれに伴う実験的な データから、それらのすべてはインパクトで形成され たと解釈できるとされた[7]. しかし, 石英の高圧相 の多くが侵食によって失われてしまっていること及び, その面状変形組織を結晶構造レベルでは未確認である ことがインパクト説の説得力を高められない原因にな っていた.

近年,面状変形組織がTEMで明瞭に確認され隕石 衝突説が決定的となった[7].見出された石英中の圧 縮変形バンドは,平均圧力が0.7 GPaと4.6 GPaとの 間で形成されたと推定され、インパクトによるもので あって、岩塩による静的なドーム状の構造で形成させ るには不十分であること[8]などインパクト説を支持 する報告が相次いだ.以上のように、衝突による高 圧で形成される組織が発見されたことによって、アッ プヒーバルドームがインパクトによって形成されたこ とは確実となった.

3. 両説の問題点

当初の岩塩ドーム説は、その後のインパクト説に沿ったさまざまな証拠が見出された結果、苦境に立つに 至った.インパクト説による形成過程は、岩塩ドーム 説の形成過程に比べて圧倒的に短時間である.しかし、 アップヒーバルドーム全体のありさまを広く考察して みると、すべての大小の地質構造がインパクトの衝撃 だけでできたものであるかの論証は、未だに不十分で あるように思われる.その最大の問題は、インパクト によって形成されたクレーターであることは確実であ ったとしても、地下にある厚い岩塩層がインパクトに 関わって何も影響を与えなかったのかということであ る.そこで、以下に問題点を整理して、インパクトク レーター地形の修正過程を提案する.

3.1 地形分類から見た隕石クレーター

地球上の隕石クレーターは、地形的に大きく3種類 に分類される[9]. クレーターの形成条件によっても サイズが異なるが、概ね直径4 km未満までのクレー ターは単純型クレーターで、お椀状の地形である. そ れより大きな直径で概ね100 kmまでのクレーターは 複合型クレーターで、円形クレーターの内部に中央丘 が形成されたものである. これより大きな直径のクレ ーターは多重リング型クレーターで、円形構造の周囲 にリング状の地形が複数取り巻く[10]. それぞれの直 径に対する分類は、地球上の大まかな傾向を示したも ので、クレーターの形成される地質の違いや衝突する 隕石の種類、速度、角度などによって異なる.

アップヒーバルドームの場合, 直径約2 kmの内縁 をもち, その外側に直径約5 kmのリング状の地形を もち, さらにその外側にも直径6~7 kmに同様な地形 が形成されている. また, 円形地形の中心には中央丘 が形成されている. アップヒーバルドームは地球上の



図4:水系図. 二本線はコロラド川とグリーン川,黒太線は主な 支流を示す.アップヒーバルドームから北西に流れる流系 を黒丸点で,また分水嶺を破線で示す.



図6:ドーム内縁の南縁における割れ目の写真. 細長いクリノ メーターの方向に発達した割れ目で,左の方向がドームの 中心.写真の垂直方向はナバホ砂岩層の地層面.



図5: アップヒーバルドームの直線的な排水地形. 奥正面に切れ た部分が唯一の排水路. 写真はドーム内縁の南東から北西 に向けて撮影.

クレーターサイズで見ると単純型クレーターに近いが, 中央丘をもつために複合型クレーターになっていて, しかもより外側のリングを含めると多重リング型に分 類される形態をもっている.

この形態は、衝突した大地の地質と地質構造が関係 しているものと思われる.すなわち、地下に厚い岩塩 層が存在し、インパクトによって岩塩層に刺激を与え た可能性がある.

3.2 水系から見たアップヒーバルドームの意義

アップヒーバルドームを中心として,その東西両側 に広がるコロラド川水系とグリーン川水系との河谷の



図7:カナダホートンクレーター (直径23km)の構造図. 黒い線 は、放射状と同心円状の断層. Osinski et al.(2005)の図を 簡略化し、断層線のみを表す.

侵食地形の違いを,現地の地形観察と62500分の1地 形図とを合わせて考察した.コロラド川は大きく蛇行 しているが,全体的な流れの向きは北東から南西であ る.その主な支流は概ね北西一南東方向の渓谷をなし ている.これに対して,グリーン川も大きく蛇行して はいるが,全体的な流れの方向は北西から南東に向い ている.その主な支流は概ね北東一南西方向の渓谷を なしている.つまり,それぞれの本流と支流はほぼ直 交する河谷の侵食を行っている(図4).コロラド川水 系とグリーン川水系との境にある分水嶺は,広大な平 原の中にあって視覚的には分水嶺と認識できにくいが, 地形図では確実に分水嶺が存在し,アップヒーバルド



図8:アップヒーバルドームの褶曲.内縁の壁に見られる砂岩層 の褶曲.内縁の南部から撮影.

ームはグリーン川水系に位置していることが分かる (図4).分水嶺からアップヒーバルドームを含んでグ リーン川までを直線距離で結ぶルートの高低差を測っ た結果,傾斜角は約2度である.視覚的に捉えること のできないほどの緩やかな傾斜で,グリーン川方向へ 傾いているといえる.これと同様の現象は,分水嶺か らコロラド川の斜面にも同じように生じ,分水嶺から コロラド川に緩やかな傾斜で傾いている.以上のよう に,アップヒーバルドームから発する排水路としての 河谷は1本であって,北西から南東に向かって形成さ れている(図5).

このことは、1方向に天水が集中する作用によって 形成されてきたものと考えられる。地下から岩塩層が 上昇してきて円形構造を形成する場合は、円形構造の 中心から全方向へ対象的な排水地形が作られるはずで ある.天水が1方向へ集中して1方向だけの河谷を形 成することからも、アップヒーバルドームの形成の仕 方は、まずインパクトによって導かれた可能性が高い.

3.3 岩石の割れ目と断層, 褶曲の形成

アップヒーバルドームの最も内側の直径約2 kmの 内縁には岩石の割れ目,断層,褶曲が発達している. 内縁では,三畳紀のカエンタ層に数 cm 間隔で割れた 砂岩層が露出している.緩やかに傾斜した砂岩層の走 向方向に対してそれに直交するような高角度で割れ目 が密に形成され,割れ目に沿って剥げやすくなってい るために剥げた部分の凹凸が明瞭に見える(図6).ド



図9:アップヒーバルドームの内縁の外斜面.外斜面の下部(写 真下部)から内縁(写真上部)を見上げた写真. 図9に見られ る100~150mの波長の褶曲は、小刻みに波打った形状に 換わっている.

ームの中心に向かって形成されている割れ目が顕著で あるが,砂岩の走向方向にできたドームの中心から同 心円状に形成された割れ目も不明瞭ながら観察できる. こうした割れ目は内縁の一部に明瞭に発達していて, インパクトによって形成される現象であることを示す. 放射状と同心円状の2成分の割れ目は,規模の小さい 御池山隕石クレーターでも報告されている[11].

アップヒーバルドームの断層は、大きく2領域に分 けられて形成されている。一つは、ドームの中心にあ る中央丘にのみ逆断層が密に発達している。そのため 同一地層が高角度に傾斜して繰り返す構造が形成され ている。この断層群は中央丘の部分にのみ形成され、 ドームの周囲にはつながっていない[1].

これに対して、内縁の周囲には放射状と同心円状の 逆断層がともに形成されている.放射状と同心円状の 断層は、規模の大きな隕石クレーターに形成されるこ とが多く、ホートンクレーター(Haughton crater,直 径39 km,カナダ)に典型的に現れている(図7).また、 規模の小さなタブン・カハラ・オボクレーター (Tabun-Khara-Obo crater,直径1.3 km,モンゴル) にも両方向の断層が報告されている.規模が大きいク レーターに形成される典型的な放射状と同心円状の断 層はクレーターの全域に形成される傾向がある.一方、 アップヒーバルドームの場合、これら2方向の断層は 内縁の付近に留まっている.特に放射状の断層は内縁 に短く形成されているのみである.この現象はこれら の断層がドーム全体に及ぶ形成機構によって形成され 30

たものではないことを示唆している.

さらに、褶曲構造に注目すると、アップヒーバルド ームでの地層の褶曲は、ドームの内縁の付近に際だっ ていて、内縁のほぼ全周で内縁に沿って褶曲を観察す ることができる.この褶曲はドームの中心から放射状 の褶曲軸をもち、1波長が100 m~150 m程度でくり 返す(図8).フリルのついたスカートのように内縁の 部分で放射状の褶曲になっているだけであり、縁から 離れると急激に褶曲が弱くなっていく.そのため内縁 の外斜面では褶曲が弱まり緩やかな波打った地形に変 わっている(図9).つまりこの褶曲の形態は、アップ ヒーバルドーム全体に及ぶ作用で形成されるものでは ないことを示唆している.また、この内縁の褶曲され た部分では放射状の短い断層が粗い間隔で形成されて いることから、これらの断層と褶曲は一連の形成機構 で形成されたことを示唆している.

クレーターに形成された褶曲の事例として、クロッ クドクリーククレーター(Crooked Creek impact crater, 直径7 km, U.S.A.)ではクレーター形成時にクレー ター壁が重力による崩壊によって中心へ押し出す時に センチメートル以下の褶曲がクレーター内に広く形成 されることが知られている[12]. アラグアイナインパ クト構造(Araguainha impact structure, 直径40 km, ブラジル)ではクレーター縁から中央丘に向かって最 上部の地層が横倒しになって広く褶曲している[13]. いずれもこれらはクレーターの形成時に内部の地層が 広く褶曲を受けたものでクレーターの内縁に沿って限 定して形成されているものではない.

以上のことから,アップヒーバルドームの断層と褶 曲は,内縁に沿った局地的に限定的な作用で形成され たものであり,インパクトクレーターの特徴としては 異例なものと言える.

3.4 衝撃角礫岩の存在

インパクトによって隕石クレーターが形成される時, 地表面が衝撃圧縮を受けその圧縮力の規模に応じて地 表から地下にかけての岩石類が角礫化して空中に吹き 飛ばされる.その角礫化した岩石類のあった空間がク レーターとなる.次の瞬間からはクレーターの外にも fall out して角礫化した土石が少し積もるが,多くは そのクレーター内に fall back してクレーター内を埋 積する[10].この角礫化した土石には強い衝撃を受け ていている礫が含まれ、衝撃角礫岩と呼ばれる.一般 的に、隕石クレーターには衝撃角礫岩が存在し、その 中に含まれる衝撃変成石英や溶融ガラスなどによって インパクトで形成されたことが証拠だてられる.

ロックエルム隕石クレーター(Rock Elm meteorite impact structure, 直径6.5 km, U.S.A.)では, 4億500 万年から4億年の間の形成年代が推定され深く侵食さ れているが, 衝撃角礫岩層がおよそ100 mの厚さで残 っている.その中の石英からは, 鉱物顕微鏡によって 面状変形組織が確認され, 衝撃圧縮力は5~10 GPaと 推定されている[14]. このように, アップヒーバルよ りかなり古い年代で深く侵食されたクレーターであっ ても, 衝撃角礫岩が存在し面状変形組織が確認できる 場合もある.

アップヒーバルドームでは現在までに多くの研究が 行われ報告されているが、衝撃角礫岩が発見されたと の報告はない.アップヒーバルドームがインパクトで 形成された時には、当然大量の衝撃角礫岩が形成され たことは疑う余地のないことである.それにも関わら ず衝撃角礫岩は現存しないようだ.その理由は、以下 のように考えられる.

アップヒーバルドームが形成された年代は,かなり 粗い形成年代の推定しかなされていないが,すでに述 べたように,およそ1億7000万年~6500万年までの 間とされている.この期間はジュラ紀中期から白亜紀 末にかけての大きな幅のある年代であるが,アップヒ ーバルドームの周辺には現在それに相当する地層は, 侵食によって失われ存在していない.現在は,ジュラ 紀下部と推定されているナバホ砂岩層が最上部層であ る.したがって,推定されているインパクトの年代の 地層は,現在は存在していないことになる.衝撃角礫 岩がどこかに発見されるかは今後の課題となるが,地 層の残存がないこと,および幅の大きなインパクトの 推定年代との関係からは衝撃角礫岩を発見することは, 現時点ではかなり難しい状況にあると言える.

3.5 衝撃を受けた基盤岩

地表の岩石が衝撃を受けてできた角礫岩とは別に, 衝撃を受けた基盤岩の中に含まれる石英が面状変形組 織を形成する事例もある.アリゾナ州のメテオールク レーター(Meteor crater, 直径1250 m)では, ココニ ノ砂岩層に石英の面状変形組織や高圧相としてのコー サイトやスティショバイトが報告されている. 御池山 隕石クレーター(直径900 m)では、チャートの基盤岩 にある石英脈に最高2方向の面状変形組織が確認され. そこからの衝撃圧縮力は8~10 GPaと推定されている。 フォルシュ構造(Foelsche structure, 直径6 km, オー ストラリア)では、クレーター内部を構成するブカラ ラ砂岩層の最下部層に含まれる石英粒の2~10%に面 状変形組織が確認され、最高5方向の変形が報告され ている. ヤーラブッバインパクト構造(Yarrabubba impact structure, 直径30 km, オーストラリア)では, 後期始生代のヤーラブッバ花崗岩の中に少なくとも3 方向の面状変形組織が確認され、強い衝撃を示す (1013)の結晶面に集中していると報告されている.フ レダフォートドーム(Vredefort dome, 直径300 km, 南アフリカ)では、基盤岩の始生代のペグマタイトか らの石英に2方向の面状変形組織が確認され、その内 (0001)の結晶面に集中していると報告されている.

アップヒーバルドームでは、カエンタ層の砂岩とホ ワイトリム砂岩層とに含まれる石英から面状変形組織 が報告されている[3]. ホワイトリム砂岩層からの石 英の約1%に面状変形組織が結晶面に対して平行から 準平行に1方向で形成されている. アップヒーバルド ームでの衝撃圧縮力は面状変形組織の形成状況から 10 GPa以下との報告があるが[7], この衝撃圧縮力は 直径5 kmのアップヒーバルドームでの石英に及ぼし た圧縮力としては弱いレベルである。また、後期始生 代のヤーラブッバ花崗岩に形成されたヤーラブッバイ ンパクト構造や始生代のペグマタイトに形成されたフ レダフォートドームのように、20億年以上の長い地 質時代を経ても面状変形組織が保存され消滅すること はない. 古く見積もっても1億年足らずのアップヒー バルドームに形成されている面状変形組織が、弱いレ ベルの衝撃圧縮力が保存されていると見てよい. した がって、アップヒーバルドームではインパクトによっ て形成されたものの大規模なリング構造を造るほどの 衝撃圧縮力があったわけでないと推測される.

4.議論

4.1 地形および大構造の形成について

キャニオンランズ国立公園一帯の水系から見た時,

アップヒーバルドームでは北西への一方向のみを直線 的に深く彫り込んだ排水路が存在することは、地下の 岩塩層が上昇してくることでは説明ができにくい、ア ップヒーバルドームの衝突現象の推定では、中央丘を 構成する地層にできた多くのスラストの運動方向から、 北西方向から南東方向への斜め衝突が議論されている [15]. 斜め衝突によってクレーターが形成された場合、 クレーターは円形に近い地形ができても放出された衝 撃角礫岩の分布はかなり偏ることが知られている[16]. すなわち、斜め衝突をした場合、斜めに進入してきた 隕石の衝突した向きに最も多くの厚い衝撃角礫岩が積 もり、逆に進入してきた方角には最も少なく積もる. ほぼ平坦な面に形成されたクレーターでのその後の天 水は、最も薄い衝撃角礫岩の分布域から排水すること になり1方向の排水路が形成される.

ドライアイス球体を使った地層中の上昇実験ではド ーム状の隆起が生じ、ドームの中心付近には多方向の 開口割れ目が形成される[17].地下からの上昇によっ てドームが形成された場合は、地表では円形かそれに 近い形状で上昇・隆起すると見られることから、排水 路は放射状に形成されるか少なくとも複数の排水路が 形成されるであろう. しかし実際はアップヒーバルド ームの中心から北西方向へ排水路が直線的に1本しか 形成されていないので、地下の岩塩層の関与は副次的 なものであると考えられる. なお、斜め衝突が北西か ら南西へ起きたことと排水路が北西方向にできている こととの関連は不明であるが、斜め衝突による衝突の 方向と大きく異なる方向に排水路が1本だけ形成され ている事例がある[18]. また, 直径39 kmもあるホー トンクレーターでも、アップヒーバルドームとよく似 た排水系をつくり最終的に1本の河川によってクレー ターから排水している、斜め衝突によるインパクトが 主原因で1本だけの排水路が形成された可能性が高い.

4.2 放射状の褶曲と断層の形成について

ドームの内縁に限ってドームの中心から放射状の小 規模な褶曲と、その間に同じく放射状の断層が内縁に 沿った領域にのみ形成されている.この褶曲と断層も やはり通常のクレーターでは認めがたい現象である. 放射状の褶曲が生じた原因を、半固結の地層か柔らか い地層であったためにインパクトに伴う衝撃に際して 流動して生じたとする報告もあるが[1][3]、クレータ



図10:アップヒーバルドームの形成モデル図.黒矢印:圧力と大 きさと向き.破線矢印:地層の上昇下降の方向.網目模 様:(岩塩層=パラドックス蒸発岩).A:宇宙からのイン パクトによる衝撃圧縮力(下向きの最も太い黒矢印)による クレーターの形成,次いでその圧縮力が地下の岩塩層へ伝 播(下向きの黒矢印)し,密度の低い岩塩層を刺激する.B: 圧力を加えられた部分の岩塩層を中心に少し上昇する.岩 塩層の上昇は、それより上部の地層を押し上げる.地表付 近ではクレーター縁を拡大させて直径を広げるとともに中 央丘を形成する.C:密度が低く流体的に振る舞う岩塩層 は、一定の高さまで上昇した後、重力によって下降に転じ る.それに伴って地層も下降していくために、最大に拡大 したクレーター縁に沿った部分に褶曲が生じ、褶曲で賄う ことができない量は断層ができる.

ーの内縁部分のみに形成されていることを説明するこ とはできにくい.特にクレーターの内縁に沿って放射 状の軸をもつ褶曲が取り巻くことは、インパクトだけ では説明し難い現象である.

一般に、単純型クレーターも複合型クレーターもク レーターが形成される時、衝突の中心から外側向かっ て衝撃圧縮力が広がっていくために、基盤岩はクレー ターの外側に向かって押し上げられ、クレーターの外 縁で傾斜がきつくなる[9]. 基盤岩が地層の場合はク レーター縁に沿ってロート状に広がった形状になる. 直径1250 mのメテオールクレーターでは, ココニ ノ砂岩層などの堆積岩層の中にクレーターが形成さ れているために典型的な形状が現れている[9].

インパクトによってクレーターの内部から外部に 放射状の断層が同心円状の成分と同時に形成されて いる事例は多く,ホートンクレーターに典型的に表 れている.しかし、インパクトだけの作用でクレー ターの縁に沿って褶曲が形成されている事例は無い. こうした点からも、インパクト現象以外に別の要因 が構造形成に働いたことが考えられる.それは岩塩 層の存在と挙動によるものと思われる.

4.3 インパクトクレーターが修正される過程

アップヒーバルドームは、一般的なインパクトク レーターの分類から見ると、小規模なクレーター地 形にも関わらず大規模なクレーターに相当する多重 リング構造を持っている.その形成過程は、衝突に よる跳ね返りで中央丘ができ、それに伴ったクレー ター壁の中心への崩壊が引き起こされることによっ て、周辺に多重リングが形成されたとの説がある [19].しかし、そうした考え方だけでは小規模なク レーター地形にどうして多重リングが形成されるの か、一般的な地球上のインパクトクレーターの特徴 からは説明できない、アップヒーバルドームの形成 は、インパクトの証拠が出されてインパクトクレー ターによって形成されたものであるとしても、地下 の岩塩層の挙動がクレーターの地形を修正していく ことに関与していると考えられる.

まず,アップヒーバルドームがインパクトによっ て形成された時,最初の衝撃圧縮力によって形成さ れたクレーターは現在よりいくらか規模が小さかっ たであろう.その理由は,最初の衝突で地表面にク レーターを形成するだけではクレーター縁に褶曲は 生じず,実際に褶曲している撓みの空間分だけ少な いクレーターの直径であったはずである.その衝突 の圧縮力は減衰しながらも地下へ進んで行く.もし 地下に岩塩層が無く,コロラド高原を構成する砂岩 を中心にした地層だけでできていた場合は,地下に 進んだ衝撃圧縮力はある所で反転して上昇に転じ, クレーターの中心の地層を引き上げて中央丘を形成 するだけで終わったはずである.

しかし、アップヒーバルドームの地下約1300 m

(現在の地表に対する相対的な深さ)には厚さ400 m にもなる岩塩層が存在している[3]. インパクトの 衝撃圧縮力は地下の岩塩層まで達してそれを刺激し たと思われる(図10A). 岩塩の密度は約2.2と比較 的軽い物質であり,わずかな差応力で流動を起こす [20]. この厚くて軽く柔らかい岩塩層の上昇はクレ ーター内縁の変形と併せ,それより外側でも同心円 状に地層をゆがませる効果をもち,リング状のクレ ーターを形成させたものと思われる.サイズの小さ な複合型クレーターにリング状の地形が形成された めには,地下に厚い岩塩層があって流体的に振る舞 うことで生じるものと考える.

さらに、岩塩層はコロラド高原を構成する砂岩層 よりはるかに柔らかい物性をもっているために、ア ップヒーバルドームの中心で地層が引き上げられて くると同時に岩塩層も引き上げられる.柔らかい岩 塩層はその上を覆う地層より流体的に振る舞うため に、岩塩層は中央丘の付近を中心に岩塩が厚くなり ながら上昇していく.流動性のある岩塩層は上昇の 勢いに乗って中央丘の隆起をわずかではあるが過剰 に押し上げる.それによってクレーターの直径を最 初よりわずかに大きくする(図10B).極端な例では、 個体と液体とを同時に動かした場合、停止する時の 慣性力の働きに差が出て液体の方が遅くまで流動す ることになる.

上昇の段階で中心に向かって流体的に振る舞って 上昇した岩塩層は、その反動でわずかではあるが過 剰に隆起した分だけ沈降する方向に押し下げようと 動く.その結果、わずかに膨らみ過ぎた岩塩層が下 がるのに伴ってその上の地層も少し下げられること になり、クレーターの直径はいくらか小さくなる. その動きによってクレーターを構成する地層も全体 的にわずかに下降する.すると、一端できた最初の クレーター縁は、延ばしたゴムが縮むように弛みが 生じて地層が褶曲する(図10C).つまり内縁の付近 にのみ生じた褶曲は、クレーターサイズが小さくな って撓んだ地層が造りだしたものである.そして褶 曲だけではまかない切れない分の歪みは放射状の断 層によって解消したものと考えられる.

この仮説は、小規模な複合型クレーターの地形に できたリング状の地形を説明することができるばか りか、斜め衝突による放出物の分布差から1本しか ない排水路を説明することができ、内縁の付近だけ にできた褶曲や断層をも説明することができる.こ うしたシナリオでは、インパクトの発生直後には内 縁までのクレーター地形と中央丘が形成されたと見 られるが、その後の岩塩層の伸縮やクレーターの直 径拡大と縮小は徐々に時間をかけて進められていっ たと考える.

なお,放出物としての衝撃角礫岩が現存しないこ ととインパクトが生じた時の地表面や地層が現存し ていないことで,本当のクレーター地形の全体像が 見えない.そのために,クレーター地形を含めた広 い範囲でどのような形状ができあがったかを正確に 把握してシナリオを組み立てることは困難である. 以上,従来の研究と我々の調査にもとづいてアップ ヒーバルドームのインパクト説に岩塩上昇説を加味 した新しい考察を行った.

今後,周辺の可能な地層群の地質調査を行うこと によって,上記の困難を克服できるかも知れないが 最も重要な点の一つは,いつの時代に天体衝突が起 こりその後どのような構造が形成されていったかの その関係を明らかにすることである.

5. まとめ

- (1)地球上の隕石クレーターの地形分類では、概ね 直径4 kmまでが単純型、それ以上で直径100 km までが複合型、それより大きなサイズでは多重リ ング型となる、アップヒーバルドームでは、直径 5 km程度にも関わらず多重リングの形状をもち、 通常のインパクト現象では説明できにくい。
- (2) コロラド川の水系と支流の水系の分布では、ア ップヒーバルドームとその周辺だけ支流の河谷の 形成方向が異なっている.1方向だけの河谷の形 成はインパクトによる形成の方が理解しやすい.
- (3) アップヒーバルドームの岩石の割れ目は、放射 状と同心円状に形成され、インパクトで形成され る現象と同じである.しかし、クレーター内縁に 限って断層と褶曲が形成されている現象は、イン パクトによって岩塩層が刺激され、比較的ゆっく りと上昇したためと考えられる.
- (4) 衝撃角礫岩は、アップヒーバルドームとその周辺では、インパクトが発生した年代の地層が削剥

されて残存しない可能性が高い.ドーム内の基盤岩 からは弱い面状変形組織は確認されている.これは, インパクト以外の原因でドームの大小の構造形成が なされたことを示唆する.

(5) アップヒーバルドームは、最初にインパクトが発生したことが諸現象から説明できる.しかし、地下に厚い岩塩層が存在したために、衝撃圧縮力が岩塩層を刺激してそれを過剰に上昇させ、内縁のクレーターの直径を広げた.その後、流動する岩塩が下降に転じたために内縁の直径が縮み、内縁に沿って地層の弛みができて褶曲と断層が形成された.

謝 辞

隕石クレーターの形成に関する全体的な指導をして 下さった岡山理科大学の西戸裕嗣教授,構造地質学の 観点から指導して下さった静岡大学の狩野謙一特認教 授に感謝申し上げます.また,匿名の査読者には有益 な指摘をしていただき内容が大きく改善でき感謝申し 上げます.

参考文献

- [1] Kriens, B.J. et al., 1999, J. Geophys. Res. 104, 18867.
- [2] Shoemaker, E. and Herkenhoff, K., 1984, Lunar Planet. Sci. 15, 778.
- [3] Kenkmann, T. et al., 2005, Geological Society of America Special Paper 384, 85.
- [4] Louie, J.N. et al., 1995, EOS (Transactions, American Geophysical Union) 76, 337p.
- [5] Fillmore, R., 2011, The University of Utah Press. 88.
- [6] Huntoon, P.W. and Shoemaker, E.M., 1995, Earth Sciences 33, 561.
- [7] Buchner, E. and Kenkmann, T., 2008, Geology 36, 227.
- [8] Okubo, C.H. and Schultz, R.A., 2007, Earth Planet. Sci. Lett. 256, 169.
- [9] French, B.M., 1998, Lunar and Planetary Institute Contribution 954, P.120.
- [10] Grieve, R.A.F., 1992, Tectonophysics 216. 1.
- [11] Sakamoto, M. et al., 2010, Meteoriti. Planet. Sci. 45, 32.
- [12] Kenkmann, T., 2002, Geology 30, 231.

- [13] Lana, C. et al., 2006, Geology 34, 9.
- [14] French, B.M. et al., 2004, Geological Society of America Bulletin 116, 200.
- [15] Scherler, D. et al., 2006, Earth Planet. Sci. Lett. 248, 43.
- [16] Poelchau, M.H. et al., 2009, J. Geophys. Res. 114, 39.
- [17] Komuro, H., 1987, J. Volcanologycal. Geothermal. Res. 31, 139.
- [18] Kenkmann, T. and Poelchau, M.H., 2009, Geology 37, 459.
- [19] Huntoon, P.W., 2000, Utah Geological Association Publication, 28, 1.
- [20] 狩野謙一·村田明広 2002, 朝倉書店.
- [21] Osinski, G.R. et al., 2005, Meteorit. Planet. Sci. 40, 1789.