

Firestone, R.B., West, A., Kennett, Becker, L., Bunch, T.E., Revay, Z.S., Schultz, P.H., Belgia, T., Kennett, D.J., Erlandson, J.M., Dickenson, O.J., Goodyear, A.C., Harris, R.S., Howard, G.A., Kloosterman, J.B., Lechler, Mayewski, P.A., Montgomery, J., Poreda, R., Darrah, T., Que Hee, S.S., Smith, A.R., Stich, A., Topping, W., Wittke, J.H., Wolbach, W.S., 2007. Evidence for an extraterrestrial impact 12,900 years ago that contributed to the megafaunal extinctions and the Younger Dryas cooling. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104, 16016-16021.

### 大型動物相の絶滅とヤンガードリアスの寒冷化をもたらした 12,900 年前の地球外天体衝突の証拠

北米じゅうのクロービス期(Clovis-age)の 50 の遺跡において、12,900 年前の炭素に富む黒色層が以前から見つかっており、それらはヤンガードリアス(YD)の寒冷化の突然の開始と同時である。この黒色層の下から、絶滅した更新世の大型動物の原地性の骨が、クロービス期の道具類の集合体と共産するが、黒色層の中または上からは産しない。絶滅の原因、ヤンガードリアスの寒冷化、クロービス文化の終焉は、長い間議論的になっていた。この論文では、私たちは約 12,900 年前に地球外天体の衝突イベントの証拠を示し、それがヤンガードリアスの寒冷化、大規模な生態系の再編、広域にわたる絶滅、そしてクロービス期終焉における人間活動の急速な変化、を引き起こした突発的環境変動をもたらしたと推定する。北米のクロービス期の遺跡は、薄く、明瞭な層に覆われており、その層は(i)イリジウムを含む磁性粒子、(ii)磁性微小球体、(iii)木炭、(iv)すす、(v)炭素小球体、(vi) ナノダイヤモンドを含むガラス様炭素、(vii) 地球外のヘリウムを含むフラーレン、などの存在度のピークの様々な組み合わせを持ち、それらは全て約 12,900 年前の地球外天体の衝突とそれに伴ったバイオマス燃焼の証拠である。この層は、少なくとも 15 のカロライナベイズ(Carolina Bays)に存在しており、このカロライナベイズは大西洋沿岸平原に分布するユニーク(な地形)で、長円形をした窪みが多数あり、北西の方向性を持つ。私たちは、1 個または複数の、大きな、低密度の地球外天体が北米北部で爆発し、ローレンタイド氷床の部分的不安定化を引き起こし、ヤンガードリアスの寒冷化のトリガーとなったことを提示する。その衝撃波、熱パルスとイベントに関連した環境への影響(例、広範囲に及ぶバイオマス燃焼や餌不足)が、更新世末の大型動物相の絶滅と北米の古アメリカ人における適応性の変化を引き起こした。

約 12,900 年前(12,900 暦年代 BP)の年代値を示す、炭素に富む黒色層は、C. V. Haynes, Jr によって黒色マット、炭素を含むシルトまたは黒っぽい有機質泥として北米の 50 以上の遺跡で同定された。この黒色層の基底年代は、ヤンガードリアス(YD)の寒冷化の突然の開始と一致し、その後には絶滅した大型動物相の原地性の化石またはクロービス期の人工物のどちらかの証拠は全く存在しない。増え続ける証拠は、多くの哺乳類と鳥類の分類群の絶滅は、ヤンガードリアスの開始期に、急速におそらくは天変地異的に起こり、この絶滅は北米で顕著で、そこではマンモス、マストドン、地上ナマケモノ、ウマとラクダと鳥類や小型哺乳類を含む、少なくとも 35 の哺乳類の属が消えた。クロービス期の遺跡としてよく知られているアリゾナ Murray Springs では、マンモスの骨とクロービス期の石器が黒色層直下に埋もれており、Haynes は“更新世の大型動物の突然の絶滅は、その黒色マットが堆積する前に全てが忽ちのうちになくなったことを説明することで劇的に明らかにされるだろう”と記述した。

この絶滅の原因は長い間議論され、かなりの論点が残っているのは、一つには入手されたデータ

に限界があるためであり、また2つの大きな対立仮説、「人類による過剰殺戮」と「急激な寒冷化」が、多くの観察を説明するには至っていないからでもある。例えば、Grayson と Meltzer は、ラクダやナマケモノを含む絶滅した哺乳類の 33 属の殺害場所の無いことなどを過剰殺戮仮説の重大な問題としてまとめた。加えて、ヤンガードリアスに類似した規模の急激な寒冷事件は、過去 8 万年間にしばしば起こったが、大規模な絶滅を伴う事件は知られていない。汎世界的な疾病の可能性も提示されたが、しかし更新世の記録にはそのような証拠は見つかっていない。それゆえに、更新世末の絶滅事件は第四紀後期の中ではユニークであり、気候寒冷化と人類による過剰殺戮だけに起因することはありそうもない。これらの仮説を支持するには、絶滅はあまりにも広域で生態学的に難しすぎる。

地球外天体の天変地異もまた提示されている。例えば、LaViolette は我々の銀河の中心での大規模爆発が絶滅を引き起こしたと述べている。Brakenridge は、超新星爆発が哺乳類を死なせ、そして黒色層の汎世界的な堆積をもたらしたと主張した。Clube と Napier は、牡牛座流星群やエンケ彗星の大彗星の先駆物質の残存物との複数回の遭遇を提示した。地球外天体衝突イベントは、K/T 境界(6500 万年前)と P/T 境界(2 億 5000 万年前)などの大量絶滅のトリガーとして長い間提唱されているが、後期更新世の大型動物の絶滅とヤンガードリアスの寒冷化へのインパクトとを結びつける納得のいく証拠はない。

1990 年代、W. Topping が、ミシガン州(参照 15 も見よ)で Gainey の古アメリカ人の遺跡の堆積物に磁性微小球体や他の地球外天体の可能性のある証拠を発見し、また Loughheed と Bi は、類似の宇宙起源の小球体が更新世後期の氷河性岩層に含まれると報告した。私たちは、ここに北米じゅうの良く年代測定された複数の層位学的セクションから得られた約 12,900 年前の大きな地球外天体の空中爆発または衝突のあったことを支持する重要な付加的データを報告する。黒色マットのあるところではその直下から、私たちはバックグラウンドレベルよりも高い濃度を持つ磁性微小球体や粒子、ナノダイヤモンド、イリジウム、そして地球外ヘリウムを封じ込めたフラーレンを含む薄い堆積層(大抵 $\times 5\text{cm}$ )を見つけた。これらのマーカーは、木炭、すす、炭素小球体とガラス様炭素を伴い、それら全ては大規模な野火を示す。これらのマーカーのほとんどは、すでに記録されている隕石衝突(K/T 境界など)に伴っているが、いくつかは衝突イベントに典型的でないものもある。私たちは、この層をヤンガードリアス境界(YDB)とし、この出来事をヤンガードリアスイベントとした。

研究地域で、13,000 年前という年代に集中する傾向を示す独立した放射性炭素年代と光ルミネッセンス年代を、ヤンガードリアス境界の年代を確定するのに使った。例えば、クロービス期終焉の地層(ヤンガードリアス境界)の年代は、アリゾナの Murray Springs (8 つの年代値の平均は 10,890<sup>14</sup>C 年代または暦年代で 12,920 年前)や Lehner 周辺域(12 の年代値の平均は 10,940<sup>14</sup>C 年代または暦年代で 12,930 年前)で精度の高い年代値が得られている。Haynes は、黒色マットの基底(ヤンガードリアス境界)をヤンガードリアスの寒冷化の開始に対比し、この寒冷化の開始期はグリーンランド(SI Fig. 6 での GISP2 年代を参照)の GISP2 氷床コアでは 12,900 年前である。それゆえに、私たちはヤンガードリアスイベントの暦年代として 12,900 $\pm$ 100 年前を採用した。

私たちは、ヤンガードリアスイベントは地表面衝突を伴う地球外天体の複数回の空中爆発に起因する提示する。さらに私たちは、この地球外天体によるイベントの天変地異的效果とそれに関連したバイオマス燃焼が急激なヤンガードリアスの寒冷化を引き起こし、後期更新世の大型動物相の絶滅をもたらした、人類の文化圏の変化を促進し、ポストクロービス期の人口の即時的減少をもたらしたと示唆する。

## 結果

**研究地域.** 長い歴史を持つ考古学的かつ古生物学的な重要性とそれゆえに、研究者によってすでにかかなりの研究と年代測定がなされている (SI Table 2 を参照) ことから、10 のクロービス期の遺跡とそれに同年代の地点を選んだ。2 ヶ所は、独特な古アメリカ人の有舌尖頭器 (projectile point) の様式—ニューメキシコの Blackwater Draw のクロービス尖頭器様式とミシガンの Gainey のゲイニー尖頭器様式—を最初に命名したタイプ地点である。研究地域の 3 ヶ所は哺乳類の殺害地域と確認され、10 ヶ所のうち 6 ヶ所は黒色マットがヤングドリラス境界を覆う。Blackwater Draw と Murray Springs では、ヤングドリラス境界が黒色マットの直下にある、絶滅した大型動物の化石とクロービス期の遺物を覆っている。

他の試料地域はカロライナベイズとその周辺の 15 ヶ所である。カロライナベイズは大西洋海岸平原にある約 500,000 の楕円形の湖、湿地と窪みの集まりで、それらは長さ 10km 以下である (SI Fig. 7)。私たちは、これらの地域から試料を採取した。なぜなら Melton, Schriever そして Prouty は、カロライナベイズと北米北部の地球外天体の衝突との関連付けを提示したからである。しかしながら、いくつかのベイズでは、38,000 年前以上の年代値を記録し、ヤングドリラスイベントの年代よりも古いものもある。

10 のクロービス期の遺跡のそれぞれは、様々なマーカー (磁性微小球体と粒子、木炭、すす、炭素小球体、ガラス様炭素、ナノダイヤモンドと地球外のヘリウムを封じ込めたフラーレン) を含むヤングドリラス境界層を示す。イリジウムのレベルは全堆積物と磁性粒子の両方でバックグランドより高く、117 ppb まで達し、これは CI (Ivuna タイプ) コンドライト隕石のレベルの 25% に相当する。ヤングドリラス境界はまた、地殻の存在量の 25 倍以上に相当する高濃度のウラン (U) とトリウム (Th) を示す。調査した 15 ヶ所のカロライナベイズで、水底の堆積物やそれらの周囲の砂が、クロービス期の遺跡のヤングドリラス境界で見つかったのと同様の地球外起源物質のピークを持つ。

**ヤングドリラスイベントマーカー.** 様々なマーカーを Table 1 にまとめ、そして *SI Text* の“調査地域”に記載した。7 つの代表的な北米の堆積物の断面を Fig. 1 に示す。

**磁性を帯びた微小球体 (Magnetic microspherules).** 10–250  $\mu\text{m}$  の大きさの磁性微小球体は、9 つのクロービス遺跡のうち 8 つで、ヤングドリラス境界の中またはその近くにピークを持ち、また調査した 5 つのベイズの全ての堆積物中でピークが見つかった。Fig. 2 にカナダ、ニューメキシコ、ミシガンとカロライナ北部から発見された微小球体の典型を示す。いくつかの地域でもまた、ケイ酸塩と思われる微小球体が得られ、さらなる分析が必要である。微小球体の存在量は、平均 390 個/kg で、北部で最も多く、Gainey では 2,144 個/kg までになる。Gainey, Morley 氷堆丘 (drumlin) と Blackwater Draw の分析で、微小球体はチタン磁鉄鉱に富むことが分かった。

**磁性粒子 (Magnetic grains).** 磁性粒子は 1–500  $\mu\text{m}$  の大きさで、不規則な形でありしばしばほぼ円形で、微小球体よりも多く存在する。そして、それらはクロービス期の遺跡の全 10 ヶ所と 15 のベイズ全てのヤングドリラス境界で明瞭なピークを示し、4 つの研究地域ではカロライナベイズ以前の古土壌より上でピークに達する。すべての地点で、他の層準での存在量は低い。磁性粒子は、ほとんど暗褐色か黒色だが、磁性を帯びた破片はしばしば磁鉄鉱含有物と共に陸源起源のケイ酸塩を含む。ヤングドリラス境界の磁性粒子と微小球体の濃度は地域間でかなり変化し、平均は 3.4g/kg で Gainey, Chobot, Morley 氷堆丘のような北部の研究地域でより高い存在量を示す。カロ

ライナとアメリカ合衆国南西部では存在量が低い。いくつかのヤングドリラス境界の微小球体と共に、南部の研究地域や Lommel からの磁性粒子はチタン磁鉄鉱に富む。

**イリジウムとニッケル.** ヤングドリラス境界の堆積物のうち、磁性を帯びた破片でないものは、ニッケルにやや富む。イリジウムに関しては、12 の研究地域のうち 7 ヶ所からヤングドリラス境界の磁性粒子が、2(±90%)から 117(±10%) ppb の範囲を示し、これら 7 ヶ所のうち 3 つではヤングドリラス境界の全堆積物で検出可能な量のイリジウムが存在する。最も高いイリジウムの値は、典型的なコンドライト隕石の値(455-480 ppb)の約 25%相当で、地殻の存在量(0.02 ppb)の 5,000 倍以上である。これらの研究地域における 17 の測定では、イリジウムはヤングドリラス境界の上または下の磁性粒子中には検出されなかった。全堆積物に関しては、12 の研究地域のうち 5 ヶ所でヤングドリラス境界のイリジウムの存在量は、0.5(±90%)から 3.75(±50%) ppb の範囲をとる。しかしながら、全堆積物は中性子放射化学分析の検出限界に近く、今後さらなる研究が必要になる。

高濃度のイリジウム試料の一定分量の再検査で、9 つの研究地域から 5 地点では確認されたが、4 地点ではイリジウムの存在量は検出以下だった。試料のサイズが小さく、(値の)ばらつきは“ナゲット効果”による可能性がある。結局、全堆積物と磁性粒子の両方の 62 試料において、7 地点ではイリジウムはヤングドリラス境界と黒色マットの上または下から見つからなかった。遠く離れた 14 地点のうち 9 ヶ所ではヤングドリラス境界と黒色マットでのみ、高いイリジウム濃度が見つかった(Fig. 1, Table 1 と SI Table 3 を参照)。

**木炭** 木炭は、9 つのクロービス期の遺跡のうち 8 ヶ所のヤングドリラス境界でピークを示し、15 のベイズの全てで見られ、4 つのベイズでは古土壌中にピークがある。木炭は、明瞭な多孔性構造に基づいて光学的また SEM によって識別でき、その濃度は 0.06 から 11.63g/kg の範囲をとる。

**すすと多環式芳香族炭化水素(PAHs).** すすは、気相から炭素の直接縮合を通じて炎の中のみで形成され、K/T 境界で見られ、またそのブドウ状形態(SI Fig. 10 を参照)によって識別される。すすは、SEM 画像を用いて同定し、そして粒子のサイズ分析と重量測定によって定量化した。調査した 8 つの研究地域で、すすは 2 つの研究地域、Murray Springs(21±7 ppm)とベイズ T13(1969±167 ppm)のヤングドリラス境界にのみ確認され、その保存はおそらく無酸素の埋没状態に起因するのだろう。特徴的な多環式芳香族炭化水素は非常に高い温度での木の燃焼によって生成される。この高温の多環式芳香族炭化水素—K/T 境界で見ついている—は、3 つの研究地域(Daisy Cave, Murray Springs と Blackwater Draw)のそれぞれのヤングドリラス境界において、上または下では見つからないが、境界には存在し、このことはこれらの場所で強い火災があったことを示す。

**炭素小球体(Carbon spherules).** 炭素小球体(0.15-2.5 mm)は黒く、非常に多孔質で、亜球状から球状の形をしている(Fig. 3)。SEM 分析では、表面には割れ目や模様があり、薄い殻と内部の蜂の巣状(海綿)構造があることを示す。SEM/エネルギー分散型分光計とマイクロプローブ分析は、小球体がほとんど炭素(75 %以上)からなり、種子のような形態または木炭のような細胞植物構造の証拠はない。それらは 15 のベイズのうち 13 から発見され、9 つのクロービス期の遺跡のうち 6 ヶ所ではヤングドリラス境界からのみ見つかると、濃度は 1,500/kg に達する。また、私たちは 4 つの最近(modern)の森林火災(SI Text, “調査地域”を参照)の 1 つからそれらを回収し、激しい野火の高熱で炭素小球体が生成されることを確認した。P/T 境界で Miura は、90 wt%C までで 20 μm のサイズまでの炭素小球体を発見し、彼は議論的になっている約 2 億 5000 万年前の隕石衝突に帰した。さらに最近、Rösler ほかに、ヨーロッパじゅうの年代未定の堆積物からの炭素小球体の発見を報告し、これらはヤングドリラス境界からの小球体と同一のものである可能性が高い。その著者らは、そ

これらの炭素小球体がフラーレンとナノダイヤモンドを含むことを報告し、後者は地球上で非常に稀だが、隕石と地球外天体の衝突地域で見られることから、著者たちを炭素小球体と地球外天体とを結びつけた提案へと導いた。

**フラーレンと地球外のヘリウム (Fullerenes and ET helium).** 4つの研究地域の分析で、地球外起源のヘリウムを閉じ込めたフラーレン、それは隕石や地球外天体の衝突に伴うもので、3つのクロービス期の遺跡(Blackwater, Murray Springs と Daisy Cave)のヤングドリラス境界の堆積物に存在していることが分かった。ベイズM33では、それらはまた大気中の84倍にあたる地球外起源のヘリウム率を含むガラス様炭素が発見された。比較すると、Tagish湖の隕石のヘリウム率は、大気中の90倍だった。

**ガラス様炭素 (Glass-Like Carbon).** 直径数 cm に及ぶ破片が、ヤングドリラス境界とベイズに伴われることが明らかになり、それらのガラス質組織は形成時に熔融したことを示唆し、いくつかの破片は木炭になる (fragments grading into charcoal)。カロライナベイズM33のガラス様炭素の連続フロー質量分析では、主成分が炭素(71%)と酸素(14%)であることが判明した。ベイズM33のガラス様炭素の<sup>13</sup>CNMR(核磁気共鳴)分析で、芳香族(原子に含まれる割合)87%、脂肪族 9%、カルボキシ基 2%、エーテル 2%で、同試料は衝突に関連した物質(SI Fig. 11を参照)と推測されるナノダイヤモンドを含む。15のベイズ全てとクロービス期の遺跡9つ全てのヤングドリラス境界で、濃度は0.01から16g/kgの範囲をとり、黒色マットにも時々見られるが、これらはおそらく再堆積した物質と考えられる。いくらか類似した破片が、現在の4つの森林火災で見つかった(SI Table “調査地域”を参照)。

選択したマーカーの数値をTable 1に示し、全マーカーの存在量をSI Table 4に示す。

## 議論

**ヤングドリラス境界の年代.** 10のクロービス期の遺跡とそれと同時代の地域のヤングドリラス境界は、約12,900年前の年代値が得られているが、カロライナベイズで報告された年代にはばらつきがある。しかし、研究された15のカロライナベイズの堆積物は、その近くのトッパークロービス遺跡のヤングドリラス境界と同じマーカー(磁性粒子、微小球体、イリジウム、木炭、炭素小球体とガラス様炭素)のピークが存在する。トッパークロービス遺跡の堆積物は55,000年前以前まで遡れるが、マーカーの組み合わせが見られるのはヤングドリラス境界のみである。それゆえに、ベイズのマーカーは、12,900年前という年代が入った他の場所のヤングドリラス境界層で見られるものと同じだろう。ベイズは、長らく隕石衝突による地形と考えられてはいるが、議論の余地があるのは地球外天体に関連した物質が感知されるほどには無いからである。私たちは、ベイズの堆積物が衝突に関連したマーカーを含むことを報告するが、それがヤングドリラスイベントによって形成されたか否かを決定することは未だにできない。

**マーカーのピーク.** 私たちはヤングドリラス境界のマーカーのピークが、地球起源のプロセスによるかどうかを検討した。25の研究地域は、様々な堆積環境(河川、湖底、風成、沖積層、崩積層と氷河)、様々な土壌状態(好気性/よく乾燥から嫌気性/湿っている)、様々な堆積物の組成(高密度の泥から礫質砂)、様々な気候帯(半乾燥帯から寒帯)、様々なバイオーム(草原から森林)に及ぶ。このような様々な状態の下で発見された同一のマーカーの存在は、地球起源のプロセスでの形成に異を唱え、地球外天体による衝突起源とは調和的である。私たちはまたヤングドリラス境界が、堆

積物の減少期間を示すかどうかを調べた。堆積物が減少すると、イリジウム、ニッケル、地球外のヘリウムのような地球外マーカーに富む惑星間のダスト粒子が堆積物に付着するからである。Blackwater Draw では、13,300 年前から 10,990 年前の 24 の補正  $^{14}\text{C}$  年代を基に、Haynes はヤングードリアス境界を示すレベルにおけるいくつかのハイエイタスの継続期間はたいてい 10 年未満しか続かず、それは地殻の存在量の 100 倍以上の値を示す局地的イリジウムの全堆積物におけるレベルを生じるには不十分であると示唆した。さらに微小球体と磁性粒子の存在量は、五大湖から離れるにつれて減少している (SI Fig. 12 を参照)。この不規則でない分布は、地球起源の要因または惑星間のダストストームによるものではなく、北米北部での空中爆発/衝突と調和的である。

**磁性微小球体と粒子。** 微小球体(ガラス、クリノパイロキシン、スピネルまたは金属)の高濃度は、少なくとも過去 11 回の地球外天体による衝突イベントの証拠として受け入れられている。微小球体はしばしば火山活動に伴われるが、しかしヤングードリアス境界の微小球体を SEM/X 線蛍光による分析で、既知の隕石性と火山性の微小球体とを比較すると、それらは火山性でないように思われる。分析結果は地球外起源を示すものの、高いチタン(Ti)濃度から、その微小球体は典型的な隕石の濃度とは異なる。

磁性粒子と微小球体は、異常にイリジウムとチタンに富み (Table 1 と SI Table 5 を参照) また水に富んでおり (28% まで)、これは特に北部の調査地域で顕著である。微小球体と磁性粒子の  $\text{TiO}_2/\text{FeO}$  比はそれぞれ 0.48 と 0.76 で、アラスカの陸源磁鉄鉱 (347 試料で 0.12 未満)、地殻の存在量 (0.13)、CI コンドライト (0.003) と K/T 境界衝突層 (0.07) よりも 4 から 250 倍高い。北米じゅうの多くの研究地域からのヤングードリアス境界の磁性微小球体と磁性粒子 (例えば、高 Ti) の組成の類似性や  $\text{TiO}_2/\text{FeO}$  の比は現時点では説明できないが、ヤングードリアス境界での微小球体と磁性粒子の含有量は、未確認で、異常にチタンに富む地球起源域からの放出の流入あるいは新しくかつ未知のタイプの地球外天体からの放射物の流入に起因する可能性が高い。

**炭素に富むマーカー。** Murray Springs で、Haynes は初めて、黒色マット中にガラス様または“ガラス質”炭素の存在を報告した。さらに彼は、黒色マット層の化学分析を行い、それは炭化木材の腐敗あるいはまた長期に及ぶ藻類のブルームの腐敗したもので、それらは両方ともにイベントに関連したプロセス (例えば、気候変動やバイオマス燃焼) によるものだろうと結論づけた。いくつかの黒色マットは藻類の組成は全くなく、木炭しかない。ヤングードリアス境界内またはその付近での木炭の広域にわたるピークと特定の地域でのすすと多環式芳香族の炭化水素との組み合わせは、広範囲に及ぶ野火の有力な証拠を与える。私たちは、ガラス様炭素、炭素小球体とナノダイヤモンドは、ヤングードリアス境界で地球外天体の衝突とそれに伴うバイオマス燃焼で起こる高温によって形成されたことを提示する。

**イリジウムの異常値。** 堆積物や海洋コアのイリジウム濃度は、K/T 境界とチェサピーク湾 (約 3600 万年) のような、衝突イベントとして認められている多くのイベントで高い。しかしヤングードリアス境界の全堆積物でのイリジウムの値は、多くの K/T 境界地域 (例えば、イタリア、グッピオでは 9.1 ppb) より低く、ヤングードリアスの衝突物体のイリジウムがかなり低いことを示している。その証拠は、ヤングードリアス境界の全堆積物と磁性粒子の両方でイリジウムの異常値である。しかしながら全堆積物のイリジウムに関しては、まだ不確実性のレベルが高い ( $\pm 50-90\%$ )。対照的に磁性粒子の値の確実性はより高く ( $\pm 10\%$ )、より説得力がある。約 9,200km 離れたところまでの 14 の調査地域における 169 の測定で、イリジウムはヤングードリアス境界の堆積物、ヤングードリアス境界の磁性粒子と黒色マットにのみ検出された。イリジウムは決してこれらの層の上または下で

は検出されないことは、高い不確実さについての懸念を減らす一方で、ヤングドリラス境界または黒色マットのイリジウムの濃度はバックランドより高いことの有力な証拠である。ヤングドリラス境界に伴う相対的に低いイリジウムとニッケルのピークは、一般的に言われている彗星の組成とよく一致し、イリジウム含有量の高い特徴を持つ石質隕石、ニッケル—鉄隕石、またはコンドライト隕石とは一致しない。

イリジウムのピークは地球外天体の衝突が確認されていない主要な地質時代の境界層にもあり、それらのイリジウムの濃度の少なくともいくらかは、火山活動によるかもしれない。しかしながら、北米では 12,900 年前に大規模な火山活動が起きたことは全く知られておらず、Koeberl によると、そのようなイベントは 0.5 ppb 未満のイリジウム含有量を生成し、私たちがヤングドリラス境界で検出したものよりはるかに少ない。それゆえに、高濃度のイリジウムは、火山起源によるものではないようである。

私たちはまた、イリジウムに富んだ隣接する堆積物からの微生物濃縮を考慮した。このような現象は、Dyer ほかがイリジウムに富む火成岩と隕石物質中で微生物を培養した実験で起きている。だが分析した全ての地域で、非ヤングドリラス境界の堆積物中のイリジウムの値はとても低く (0.1 ppb 未満でおそらくは 0.02 ppb 未満)、地殻の含有量の 5,000 倍までのイリジウムレベルを説明するには不十分である。他のイベントに関連した一連のマーカーと高濃度のイリジウムの組み合わせを考慮すると、地球外天体との関連がよりもっともらしい。

**氷床コアの証拠** Gabrielli ほかが GRIP (グリーンランド) で報告したように、イリジウムと白金の大きな増加がヤングドリラス期に起き、Gabrielli ほかはこれらの増加を宇宙からの入力 (cosmic input) の増加に起因すると考えた。氷床コアの試料の分解能は、あまりに低いので、ヤングドリラスイベントのタイミングとイリジウムと白金のフラックスの増加の開始とを明確に関係づけることはできないが、その証拠はヤングドリラスイベントと一致している。

バイオマス燃焼の証拠として、Mayewski ほかはグリーンランド GISP2 氷床コアからヤングドリラス開始時の大規模なアンモニウムと硝酸塩スパイクを報告している。これら GISP2 のデータは、GRIP 氷床コアのヤングドリラス開始時の大量バイオマス燃焼に関する地球化学的証拠、特にアンモニアの大きなスパイク—これは硝酸塩、亜硝酸塩、ギ酸塩、シュウ酸塩と酢酸塩のピークを伴う—とかなり一致している。要するに、ヤングドリラスの開始は、グリーンランドの氷床コアから推測されたバイオマス燃焼の最も強い期間の 1 つだが、現在の樹木に覆われた北極域のほとんどは当時氷に覆われていたために、この燃焼シグナルの源は今日の源よりもはるかに遠くに遠くない。このバイオマス燃焼の原因はヤングドリラスイベントと一致する。

**放射性元素** ヤングドリラス境界のいくつかの大型動物の骨は、K/T 境界でのいくつかの骨で起きたように、他の層準区間よりも高い放射性がある (SI Figs. 13 と 14 を参照)。さらに高濃度のウランとトリウムが、分析を行った 6 つのクロービス期の遺跡全てのヤングドリラス境界の堆積物から見出され、4 つのベイズ全ての古土壌で確認されたが、これはまさにチェサピーク湾と K/T 境界での衝突層でも見つかっている (SI Fig. 15 を参照)。重鉍物、ジルコン、モナザイト、ガーネットや、チタン石とチタン鉄鉍とルチルのようなチタンに富む鉍物は、しばしば高濃度のウランとトリウムを含むので、私たちはこれらの鉍物の残留堆積物 (lag deposits) が高い放射能の起源かどうかを調べた。私たちは、残留堆積物がいくつかの地域のヤングドリラス境界の高い放射能を説明するかもしれないが、他の地域では説明できないと結論づけた。チタン鉄鉍とルチルとチタン石は、全堆積物の約 2% まで占めることを考慮すると、それらは (高い放射能) の運び手 (carriers) となり

えるが、ジルコンとモナザイトとガーネットはそれぞれ(全堆積物に対して)0.1%未満だから、(運び手になったことは)ありそうもない(SI Fig. 16 と 17 を参照)。ウランとトリウムの高い値は、残留堆積物の形成や衝突した地球外天体とまたはそのターゲット地域からの噴出物の拡散を含む、衝突/空中爆発に関連した複数のプロセスに起因するかもしれない。

**イベントの特性。** 証拠は、地球外天体の衝突によるイベントが大陸全域に及ぶ影響—特にバイオマス燃焼—を有したことを示すが、そのサイズ、密度組成はまだ理解しきれていない。だが、現在のデータはこの衝突物体が、良く研究されている鉄質隕石、石質隕石またはコンドライト隕石(例えば、K/T 境界)とはかなり異なることを示す。その証拠は、炭素に富み、ニッケル—鉄に欠いた衝突物体と調和的で、それゆえに彗星がもっともらしい。現在の地質学的また地球化学的証拠は衝突のダイナミックスを十分に理解するには不十分だが、私たちは今後の研究で新たな説を唱えうる。

Toon ほかは、大陸全域にわたるダメージを与える衝突には、 $10^7$  メガトンのエネルギーが必要で、それは4km より大きなサイズの彗星による衝突に相当すると示唆している(参照 46 の図 1)。そのサイズの衝突物体は、典型的には明らかに大きなクレーターを残すが、後期更新世にはそのようなクレーターは確認されていない。クレーターが存在しないことは、大きな衝突物体が(衝突より)先に砕けたことによるのかもしれない。その場合には多数の空中爆発またはクレーターを生じる。超高速斜め衝突実験(P. H. S., 未公開データ)は、氷床コアのような低インピーダンスの表面層は、その厚さが発射体の直径と同等ならば、その下の基盤の変形を著しく緩和することを示した。これらの結果は、もし複数の2kmの物体が厚さ2kmのローレンタイド氷床に $30^\circ$  未満の角度で衝突したならば、それらは退氷期後には無視できるほどの痕跡しか残さないかもしれないことを提示する。それゆえに、長く残る証拠は、カナダ楕状地(例えば、グレートレイクの湖底またはハドソン湾の海底)における不可解(enigmatic)な窪みまたは擾乱(disturbances)に限られ、一方、(衝突は)マージナル効果(marginal effect)あるいは無ショック効果(no shock effect)を生じ、そして衝突物体、氷床の破片、その下の地殻からなる細粒物質をまき散らす。

Toon ほかはまた、もし空中爆発が最適高度で  $10^7$  メガトンのエネルギーを放出したら、それらは  $10^9$  メガトンの地表面への衝突エネルギーに匹敵し、北米サイズの地域じゅうに及ぶ爆風ダメージを起こすだろうと記している(参照 46 の図 5)。このような空中爆発が衝突物体の運動エネルギーと大気または地表面と効果的に結合すると、ハリケーン級(70m/s)を優に上回る爆風波を生じる。1908年に、シベリアのツングースカ川で直径150m 未満の物体、それは炭素質の小惑星かまたは燃え尽きた小さな隕石のどちらかで、強烈な火球( $10^4$ °C)を伴う 15 メガトン未満の空中爆発事件を起こし、約 200km<sup>2</sup> の森林を焼き焦がし、2,000km<sup>2</sup> の森林をなぎ倒したが、クレーターも形成しなかったし、ショックによる変成作用も起こさなかった。激しく分裂した隕石からの岩屑のシャワーは、ツングースカ川と同様だが指数関数的により大規模な空中爆発の弾幕を生じる一方で、大陸全域にわたるバイオマス燃焼と氷床の崩壊を引き起こすが、典型的なクレーターは形成されない。

**環境への影響。** ヤンガードリアスイベントは、減圧に続いて、超加圧を伴う破壊的かつ高温の衝撃波を生み出し、強力な衝突起源の渦を伴った時速数100kmの強風は北米じゅうを吹きぬけた。さらに地球に衝突した物体が1つまたは複数であれ、熱い火球が衝突地点近くの地域に被害を与え、もし衝突の角度が斜めならば、さらに火球は激しかっただろう。比較するために、Svetsov はツングースカサイズの空中爆発は数秒以内に200km<sup>2</sup>の森林を焼き尽くすのに十分な放射フラックスをもって地面を吹っ飛ばしただろうと計算した。それゆえに、複数で、より大きな空中爆発は数千 km<sup>2</sup> を焼き尽くすだろう。遠く離れた所でも、ハイスピードの過熱した放出物の再突入が、激しい野火を



引き起こし、森林や草原の多くを破壊し、草食動物の餌の供給地を破壊し、木炭、すす、有毒ガスと灰をもたらした。12,900年前の大陸全域に及ぶ環境破壊を引き起こすのに必要な地球外天体の空中爆発または衝突の数は不明である。

**気候.** 多くの衝突に関連した影響が、たぶんヤンガードリアスの開始時の突然で大規模な寒冷化とその1,000年以上の持続をもたらした。より短い時間スケールで作用する寒冷化のメカニズムは、(i)オゾンの減少、寒冷化に応答した大気システムの変化をもたらし、その減少は地表面に生きる生物に極めて有害な紫外線量の増加という副作用をもたらす、(ii)衝突と大規模な野火による大気中への窒素化合物( $\text{NO}_x$ )、硫酸塩、ダスト、すすと他の有害化学物質の放出、それら全てが太陽光の障害となり寒冷化を誘発し、植物の光合成を低下させ動植物へ有害な化学物質を増加するという副作用をもたらす、そして(iii) 上部大気圏への大量の水蒸気と氷の注入は長期的な曇り空と夜光雲を形成し、太陽光の減少と地表面の寒冷化を引き起こす。これらの寒冷化のメカニズムは短命な傾向にあるが、それらはフィードバックメカニズムを通してより長期的な影響のトリガーとなりうる。例えば、夜光雲は高緯度の太陽放射を減少させ、積雪を増加しフィードバックループでさらなる寒冷化を引き起こす。最大の潜在的影響は、地球外天体の衝突に関連した氷床の部分的不安定化または溶解だろう。短期間で、これは北大西洋と北極海に氷山の流出や氷床の溶けた水を突然放出し、表層水の低塩分化を招き、結果的に地表の寒冷化を引き起こす。より長期的な寒冷化の影響は、北大西洋における熱塩循環の結果的な弱体化をもたらし、フィードバックメカニズムが海洋循環を回復させるまでヤンガードリアスの寒冷化が1,000年以上続いた。

**クロービスと大型動物相.** 地球外天体の衝突に関連した影響は、動物と植物に大きなダメージをもたらした。人間においては、12,900年前に推定人口の減少と適応性の大きな変化があり、それは劇的な生態系変化と重要な食料となっていた動物の絶滅、減少、移動のための生存戦略の変化であったのだろう。いくつかの地点では、クロービスの人々と絶滅した大型動物はともに、ヤンガードリアスイベントの直前まで見られたが、しかし稀なケースを除くと、その後の地質記録にはどちらも見られない。Murray Springs では、殺されたが関節はまだつながっているマンモスの骨、クロービスの道具、炉が黒色マットの直下に埋もれているのが見付き、それらは急に埋没したことを示している。Wally's Beach のクロービスが獲物をしとめた場所では、絶滅したウマの頭蓋骨の中に51 ppbのイリジウムを含むヤンガードリアス境界のマーカーが産出し、これもまたヤンガードリアスイベント後にすぐに埋積されたことを提示している。いくつかの絶滅動物は、保護されたニッチで生き残ったが、その後のえさ不足、過剰狩猟、気候変動、疾病、洪水と他の影響—これら全てはヤンガードリアスイベントによって引き起こされたか増幅された—のために絶滅した。

## 結論

私たちの主要な目的は、ヤンガードリアス衝突イベントを支持する証拠を示すことで、それは12,900年前の北米における大きな地球外天体の衝突で、ヤンガードリアスの寒冷化、北米の動物相の大量絶滅、古アメリカ人の適応性と人口減少、をもたらした。ユニークな、炭素に富むヤンガードリアス境界層は、衝突のトレーサの明確な組み合わせを結びつけると、ヤンガードリアス境界の基準層(datum)の同時性性を示し、それゆえに北米の後期更新世の対比と年代決定(dating)としての有用性を強調する。もし確かなら、これらの組み合わせは、地球外天体の衝突とその影響、例えば全球気候変動と動物相の絶滅、に関する最も完全に最新の地質学的記録を提供する。この証拠はまた、解剖学的に現代人に対する深刻で広域に影響の及ぶ大きな地球外天体の衝突イベントの記録を提示する。

## 方法

元素分析は、プロンプトガンマ線放射化分析、中性子放射化分析と誘導結合プラズマ質量分析計を用いて行った。微小球体、ガラス様炭素と炭素小球体は、SEM/X線蛍光によって分析した。これらの方法は、とても標準的で、*SI Text*, “方法” にさらに詳しく記述してある。

(大森明利・北村晃寿)