

ヒビやアウストラロピテクスでは同じ同位体比の変異が大きく、開けた環境における多様な採食の重要性が伺われる。ラミダスの値はチンパンジーとあまり変わらない。

また、全身の形態から判断しても、ラミダスがアウストラロピテクスとは異なった生息ニッチェ（生息域と環境利用の特徴）を持っていたことが明らかである。ラミダスは、アウストラロピテクス以後の人類と異なり、樹上行動を優先した足と下肢の筋骨格構造を保持していた。このことは、ラミダスが他の類人猿と同様、原則として、樹上に巣を作って夜間休息していたことを強く示唆している。樹上巣に依存していたかどうかは、食性や採食行動のみならず、遊動パターン、群構造、個体関係、捕食者に対する防御行動など、様々な生活様式や社会性に影響した可能性が高い。アウストラロピテクスになって初めて樹上巣を放棄し、より開けた環境まで常時遊動するようになったと思われる。

歯と咀嚼器形態からもラミダスとアウストラロピテクスの適応の違いが明らかである。たとえば、ラミダスの臼歯はアウストラロピ

テクスより小さく、エナメル質は薄く、アウストラロピテクスのように平らに磨り減ることもなく、電子顕微鏡下の磨耗面の傷は弱い。すなわち、ラミダスは堅い食物、あるいは磨耗を促進する砂や埃混じりの食物を、アウストラロピテクスほどには摂取・咀嚼していなかったのである。こうした視点からも、アウストラロピテクスになって初めてより開けたサバンナ環境を常習的に利用するようになったものと考えられる。ラミダスからみると、アウストラロピテクスとは本格的にサバンナに進出した初めての人類であり、その中から打製石器を使用するテクノロジー依存型のホモ属が生じたのは、自然の流れかもしれない。

◆ 後の課題

現在までに得られているラミダスの化石は、出土部位や数量ともに上記の一連の進化仮説を導くのに、かろうじて足りている状態である。これらの仮説の検証には資料数の増加が望ましいし、未だ出土例のない部位の発見も必要である。さらに、現在わずかな化石で知られている 600 万年前

ごろの最初期の人類にもラミダスの状態がおおよそは当てはまるのか、今後さらに確認する必要がある。最後に、残された最も大きな知識の空白は、人類と類人猿の共通祖先周辺の実際の化石候補である。こうした空白を埋めるべく、化石資料のさらなる充実が必要である。

—参考文献—

White T. D. *et al.* (2009a) *Science*, **326**, 75-86.

White T. D. *et al.* (2009b) *Science*, **326**, 87-93.

Suwa G. *et al.* (2009) *Science*, **326**, 94-99.

Lovejoy C. O. *et al.* (2009) *Science*, **326**, 100-106.

■ 一般向けの関連書籍

諏訪 元, 洪 恒夫 (2006) *アフリカの骨、縄文の骨—遥かラミダスを望む*, 東京大学総合研究博物館.

TOPICS 雪氷学

「氷床コアを用いた天文学」の構築へ向けて

理化学研究所 仁科加速器研究センター／埼玉大学 大学院理工学研究科 望月 優子

氷床コアとは、南極大陸などに降り積もった雪が固まった氷床から円柱状に切り出した氷の試料である。雪が降った当時の大気を含み、深度と年代とが対応しているので、コア中の同位体やイオンなどの濃度を分析すれば、いつ、どのような大気成分の変動が起きたか知ることができる。一般に古気候・古環境変動の研究に用いられるが、我々は、氷床コアを用いて過去の銀河系内超新星爆発と太陽活動周期の探究を進めている。最近、基盤となる浅層コアの年代軸を構築したので、それを中心に、ここ数年の取組みを紹介する。

氷床コアで「超新星考古学」?

2003年4月3日の新聞に、南極ドームふじ基地（標高3810m；図1）において掘削された氷床コアの同位体比分析から過去34万年の気温変動が解明されたとの記事が載った（藤井，2006）。これを偶然目にした私は、それまであたためていたアイデアが実現できるかもしれないと直感した。氷床コア中の硝酸イオンを分析し、銀河系内超新星爆発の履歴を調べるというアイデアだ。超新星爆発とは星の死に相当する大爆発で、炭素（原子番号6）以上のほぼすべての重元素を宇宙空間にまき散らす。超新星

爆発を理解することは元素の起源研究の根幹であるが、我々の銀河系内の爆発や頻度を他の方法で検証するのは難しいため、成功すれば天文・宇宙物理学に与えるインパクトははかりしれない。このアイデア自体は新しいものではなく、30年前に南極点コアについてネイチャー誌に報告がある（Rood *et al.*, 1979）。ただし、雪氷学上の様々な強い批判が相次ぎ、このテーマの研究は廃れていた。2004年の初頭に、コア掘削を行った国立極地研究所にてセミナーをさせて頂く機会を得、幸いご協力を頂けて、4月から正式に共同研究を立ち上げた。銀河系内の超

新星爆発の痕跡の検証と、同時に見つかる期待される太陽活動の11年周期をドームふじコアを用いて調べることが目的だ。

道のり長し

日本南極地域観測隊は、ドームふじ基地において、2007年1月にほぼ氷床岩盤近くの深さ3,035mまでの深層コア掘削に成功した（図2）。コア最深部は72万年前に相当する。一方、ドームふじにおける浅層コア掘削は、これまで1993, 1997, 1998, 2001, 2010年の計5回なされている。我々はこのうち2001年掘削のコア（DF01コア）を用いて研究を行っている。DF01コアは、図2の深層コアの（同じ掘削孔の）上層部に相当する。表面付近の最上層部は、積雪が「しもざらめ」という脆い雪質で、残念ながら深度2-8mの部分は崩れて失われた。この部分は1998年コアで補完している。本稿では8m以深、年代で言うと1900年以前を扱う。

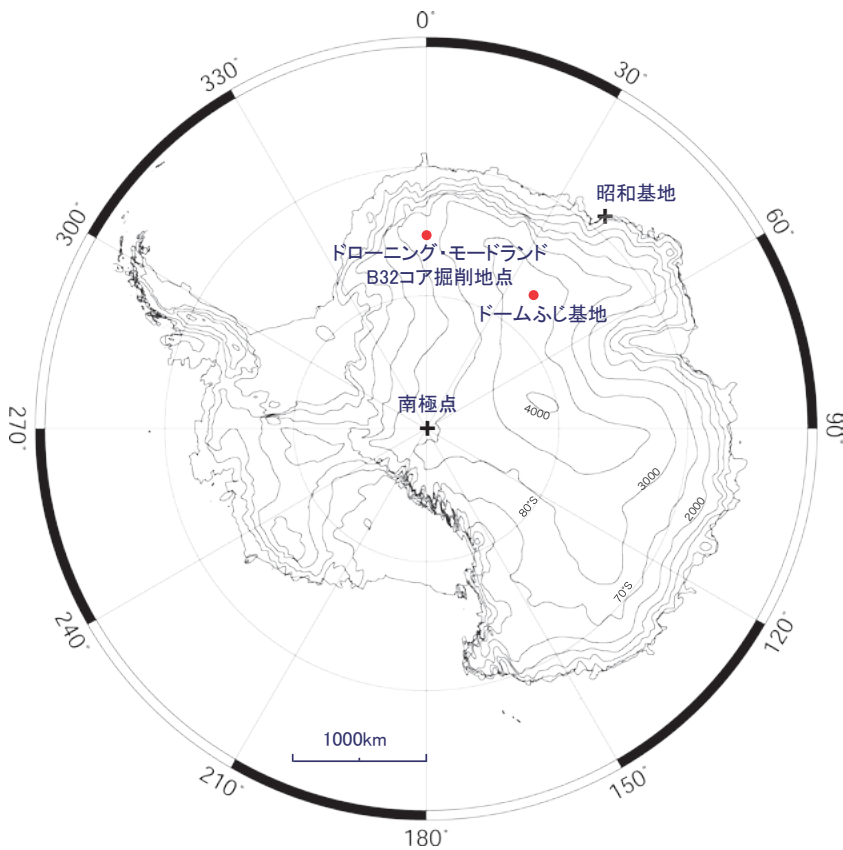


図1 南極大陸の本稿に関連する氷床コア掘削地点 (●印)。

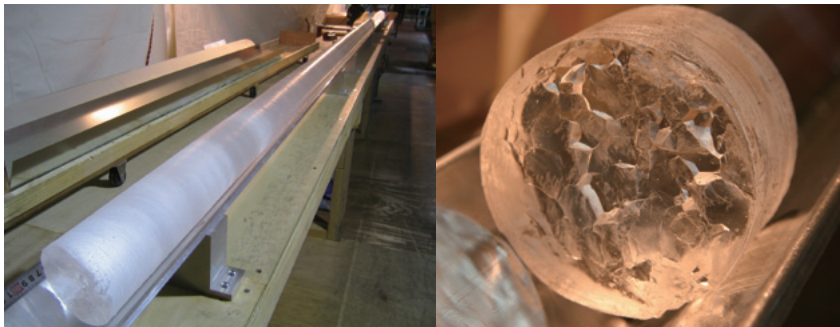


図2 南極ドームふじ基地で掘削された氷床コア。(左)2700 m付近。(右)2884 mのコアブレイク面。国立極地研究所提供。

さて、研究上まず最初に狙ったのは、もし想定が真ならばSN1006 (1006年)とカニ星雲 (1054年)という歴史上の2つの超新星爆発が硝酸イオン濃度にダブルピークとして検出されるはずの、10-11世紀にかけての約200年間である。当時ドームふじコアについて得られていた年代軸で、これらの超新星の候補となるスパイクと、さらに時系列解析により太陽周期と同じ約11年の周期性が得られた。この結果を年代軸のさらなる検討とともにネイチャー誌に投稿したが、過去2000年分を見せないと信用しない、というのがレフェリー側の強硬な主張であった。い

ずれにしても、分析は着実に進行し、分析開始からほぼ5年をかけて過去2000年分を越える結果を得た。とくに陰イオン分析については再現性確認のため2度遂行しており、これには共同研究者らと共に、毎年2週間程をかけて-20℃の低温室でのコアのサンプリング作業、イオンクロマトグラフと呼ばれる測定装置2台の理化学研究所への導入・立ち上げ、天文分野への応用に足る測定精度獲得への格闘、外部要因による装置の大故障等乗り越えた。しかしながら、次に立ち上がった壁は、得られた測定結果を生かすための氷床コアの年代決定であった。

ドームふじ浅層コアの年代決定

地層に貴重な化石が埋まっても、その地層の年代がわからなければ、その生物が地上でいつ存在したのか特定できない。同様に、氷床コアが内包する化学・物理情報は、氷床コアの年代がテーマに合った精度で得られて初めて、実のある議論が可能だ。ドームふじ浅層コアの超新星探索への応用上の弱点は、年代を決めにくいことであった。これは、雪の堆積量が水当量換算で約27 mm/yと少ないため、氷の「年縞」を計測するのが難しいことによる。涵養量が十分であれば、目視でも氷密度の疎密の年縞を数えることができるし、また時間分解能が1年を十分下回れば、陽イオン (特にNa⁺) や酸素同位体比の季節変動を抽出し、年層を数えて年代を確定できる。我々のイオン分析の時間分解能は、過去2000年分についてドームふじでは最も良いが、それでも0.7-1年程度である。これが手で連続的に行えるサンプル作りの限界であり、イオン分析のみから季節変動を調べるには不十分だ。

大規模な火山噴火では、噴出した火山灰やガスが高度10 kmを越えて成層圏に達する。火山ガス中の二酸化硫黄と水蒸気は光化学反応を受け、硫酸塩エアロゾルが形成される。噴火の緯度や季節にもよるが、生じた硫酸塩エアロゾルは大気循環によって運ばれて、0-2年後に南極氷床に沈降する。これは氷床コア中の硫酸イオンのスパイクとして検出される。ドームふじ浅層コアの年代決定は、まず、このような硫酸イオンスパイクを検出し、年代がわかっている噴火と対比し、同定する。これらをタイムマーカーとし、隣接するタイムマーカー間は涵養量一定という仮定をおいて年代を割り振っていく。現代からさかのぼって西暦1260年頃までは、火山活動も活発で、火山層序学上の噴火年の不定性も比較的小さいので、時間分解能のよい硫酸イオンデータがあれば、年代決定はさほど困難ではない。しかし1260年以前は火山活動が活発ではなく、噴火年の不定性も大きいため、この方法での年代決定は難しい。

何か解決の方法はないものかと考えめぐっていたところ、ドームふじ近郊のドローン・モードランド (図1) で掘削されたB32コア中に観測された火山噴火フラックス (Trauffer *et al.*, 2004) と、DF01コアの非海塩性硫酸イオン (nssSO₄²⁻) の濃度変動から示される火山噴火ピークの位置と変動の振幅とが見事に同期していることを見いだした。ここでB32コアの年代軸は、上述した陽イオンの年層計測により導出されており信

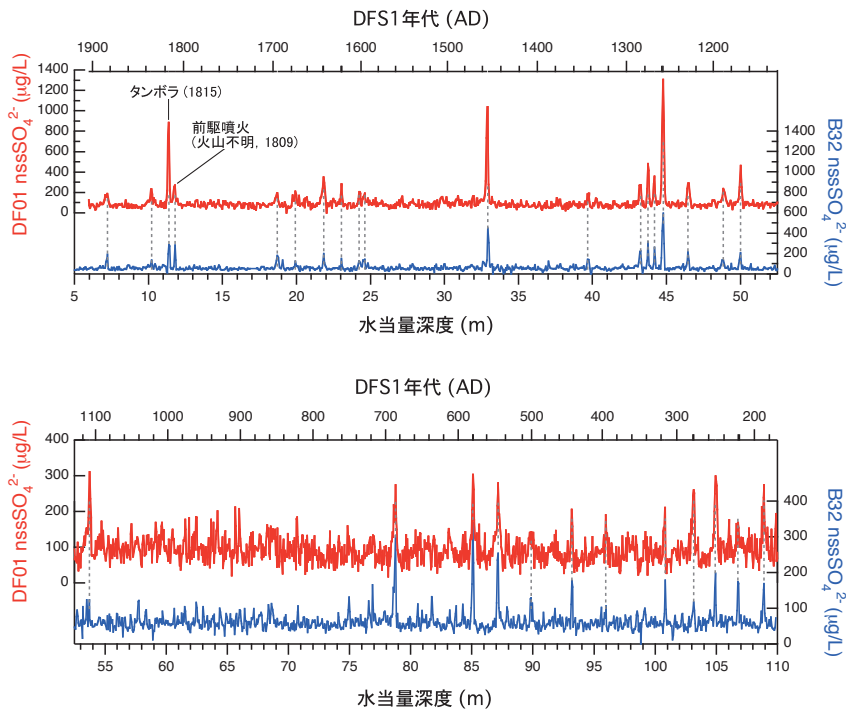


図3 ドームふじ (DF01) コアと B32 コアの非海塩性硫酸イオン (nssSO_4^{2-}) の濃度変動。両者の火山性ピークを詳細に同期させ、DFS1 (ドームふじ浅層コア-1) 年代 (上横軸) を導出した。下横軸は水当量深度で、DF01 コアに関しては同期区分ごとに定数倍した。

頼できる。両者の火山性ピークを詳細に同期させ、B32 コアの年代軸を DF01 コアに移行させればよい。こうして得られたのが、図3のDFS1 (ドームふじ浅層コア-1) と名付けた年代である。同期した噴火は31個になる。紙面の都合で省略するが、B32 コア年代に関連づけられた他コアの情報も利用し、西暦元年までさかのぼって DF01 コアの年代を決定することができた。総サンプル数は、2140個である。各火山噴火タイムマーカーの絶対年代不定性は、B32 コアの年層計測から決まっており、例えば1884年の噴火で1年、深くなるほど大きくなって186年の噴火で±23年程度である。DFS1年代では、この噴火タイムマーカーの絶対年代不定性に加えて涵養量一定の仮定からくる不定性が加算される。ドームふじ浅層コアに対してこれだけ詳しい年代が構築されたのは初めてで、この年代軸は、今後、超新星や太陽周期の探究だけでなく、過去2000年にわたる気候・環境変動に関するすべての研究の基盤となる。

図3をざっと眺めるだけでも、過去約2000年の地球上の火山噴火の歴史がわかって面白い。たとえば、1815年に起きたインドネシアのタンボラ火山噴火は世界的に気温を異常低下させ、翌1816年に「夏の無い年」を引き起こしたとされる。しかし実際の地球全体の平均気温は1810年から10年間にわ

たって低かったことがわかっており、このずれの原因として、1809年に供給源の特定されていない前駆的な火山噴火があったことが最近、指摘されている。これまでのドームふじのイオン分析では2つの噴火を分離できていなかったが、今回の分析では両者を明確に分離できており、なるほど1809年頃にも噴火があったことがわかる。また、図3の上段と下段とでは、縦軸のスケールが全く異なる。過去ざっと1000年は地球上の火山活動は活発で規模も大きかったが、そのさらに前の1000年はそれほどでもなかったことがよくわかる。

超 新星で硝酸イオンスパイク?

興味は硝酸イオンに戻る。超新星爆発では、爆発的要素合成により、不安定同位体ニッケル56 (^{56}Ni) が大量に合成される。この ^{56}Ni がコバルト56を介して安定な鉄56に崩壊する過程で、0.1-3 MeV程度の核 γ 線が放出される。この核 γ 線が超新星の光源である。 γ 線が地球に達すると、成層圏でコンプトン散乱および光電効果により吸収され、窒素化合物の生成を引き起こす。生成された硝酸をはじめとする窒素化合物は大気循環によって南極に運ばれて、氷床中に保存されると考えられる。

さて、新しく決まった年代軸で、歴史上の超新星の痕跡は捕まえられるのか? 予備的

な解析では、SN1006とカニ星雲超新星の候補となる硝酸イオンスパイクは、新しく得られた年代の不定性の範囲内にそれぞれ同定できる。成層圏に到達する γ 線光子フラックスのエネルギー分布は超新星爆発のタイプによって異なるため、より詳しくみれば、超新星の爆発タイプ、天球上の位置、超新星までの距離、爆発した季節等によってスパイクの形状は異なるだろう。過去2000年間について爆発年が正確にわかっている銀河系内超新星は8つあり、また巨大な太陽フレアに伴うプロトン現象 (高エネルギーの陽子が成層圏を直撃する現象) に対しても、同様の硝酸イオンスパイクが生じる可能性がある。今後の詳細な解析が楽しみである。

なぜドームふじか?

最後に、なぜ本研究にドームふじコアを用いるのか、重要な点を簡潔にまとめておこう。一般に、コア中の硝酸イオンの起源として雷や森林火災が知られているが、これらは対流圏に起源をもつ。グリーンランドや南極大陸の沿岸域で今まで掘削されてきた多くの氷床コアは、主に対流圏成分を捉えているので、これらの現象が大きく寄与してしまう。これに対し、ドームふじコアは成層圏成分が卓越する。これは、コア中に含まれる核実験の灰であるトリチウムの量が他基地コアに比べて圧倒的に多いことから知られている。また、いわゆる極域成層圏雲 (冬季極域に発達する極特有の雲) が、南極では北極に比べて毎年、安定に形成され、その内部で成層圏大気の沈降が効果的に起きることもわかってきた。つまりドームふじは、成層圏の大気成分変動を調べたい研究に非常に有利なのである。一方、硝酸は揮発性なので、涵養量の少ないドームふじでは、堆積表面から1m深までに濃度が1/10以下に減衰してしまう。以上を鑑みて、我々は、掘削したばかりの新しい氷床コアを用いてさらなる検証を計画している。信頼度の高い化学分析と物理的研究を重ね、新しい「雪氷天文学」を切り拓いてゆきたい。

—参考文献—

藤井理行 (2006) *Jpn. Geosci. Lett.*, 2(1), 3-5.

Rood et al. (1979) *Nature*, 282, 701-703.

Traufetter, F. et al. (2004) *J. Glaciology*, 50, 137-146.

一般向けの関連書籍

野上道男編 (2006) *環境理学*, 古今書院.