

# 特集4

## 南極の氷床コアから太陽活動と気候変動の関係を探る

人類の活動に伴う二酸化炭素の大气への放出が地球温暖化を進行させていると指摘される一方で、太陽活動の低下により地球が寒冷化する可能性も議論され始めている。

太陽活動と地球の気温にはどのような関係があるのか。

望月優子 研究ユニットリーダー(UL)たちは、南極氷床を掘削したコア(円柱試料)の分析から、太陽活動と気候変動の関係、さらには、銀河系内で起きた超新星爆発の歴史を解読しようとしている。



### 望月 優子(もちづき・ゆうこ)

仁科加速器研究センター

望月雪氷宇宙科学研究ユニット 研究ユニットリーダー

神奈川県生まれ。博士(理学)(東京大学)。1995年、理研基礎科学特別研究員。

仁科加速器研究センター研究員を経て、

2011年より現職(埼玉大学大学院連携教授を兼務)。

公益社団法人 日本天文学会副理事長。

理研ビデオ『元素誕生の謎にせまる』の著者(2001年、文部科学大臣賞、

2002年、英語版が米国クリエイティブ・エクセレンス賞受賞)。

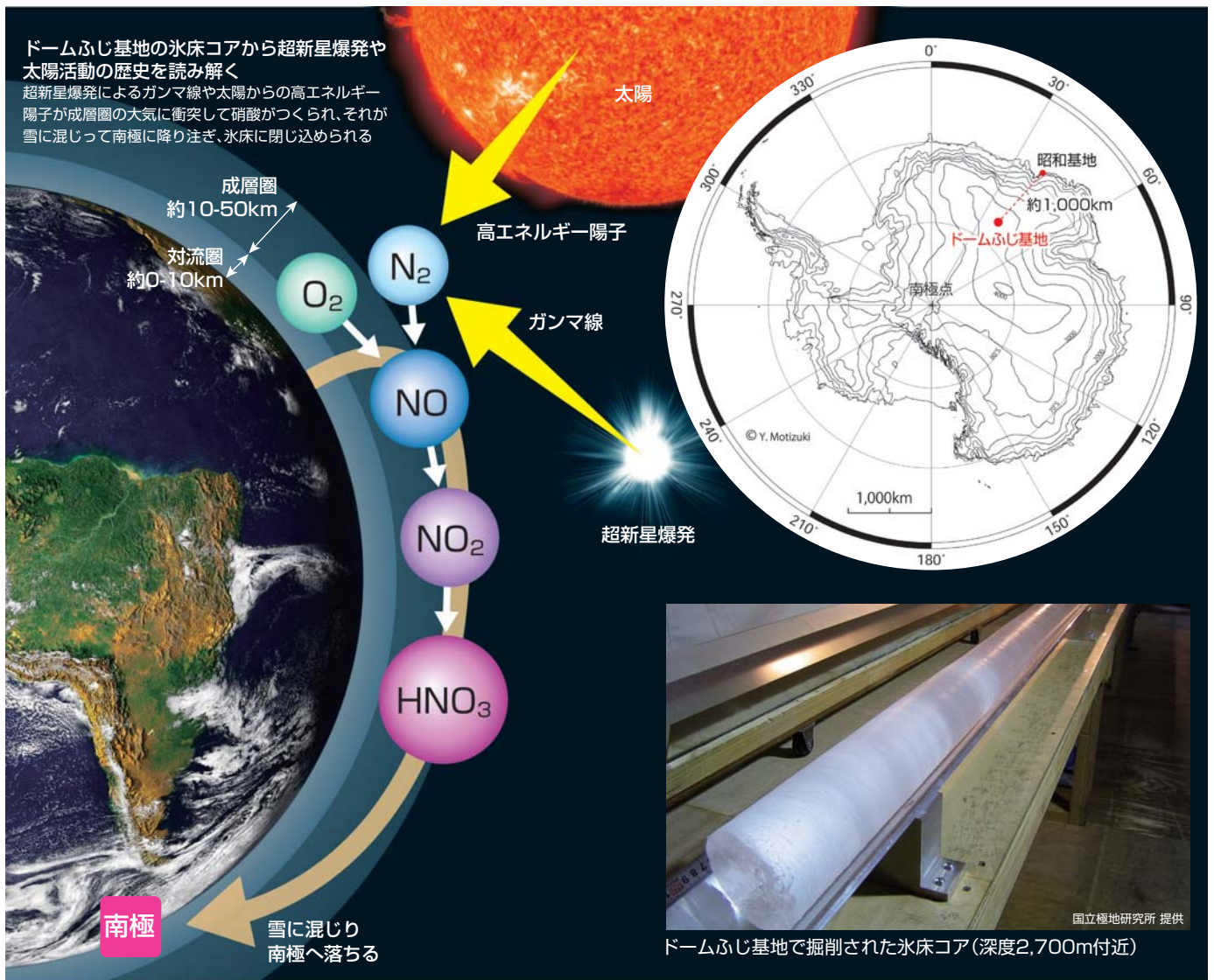
同ビデオはドイツ語・ハンガリー語にも訳され、

現在でも国内外で広く理科教育に使用されている。

その貢献により国際天文学連合が小惑星9109を“Yukomotizuki”と命名した。

文部科学省「ナイスステップな研究者2014」受賞。

〈タイトル図〉



## ■ 元素誕生の謎と氷床コア

元素誕生の謎を解明する理論研究を進めてきた望月ULがなぜ、南極の氷床コアの分析を始めたのか。「天の川銀河(銀河系)の中で、どれくらいの頻度で超新星爆発が起きてきたのか、それが知りたくて氷床コアに興味を持ち始めました。氷床コアはいわば宇宙を覗く望遠鏡のようなものです」と望月UL。

超新星爆発とは、重い星が進化の最後に見せる大爆発のことだ。そのときに鉄よりも重い元素がつくられると考えられている。「1発の超新星爆発でつくられるそれぞれの元素の量は、加速器実験や理論研究により明らかに<sup>いんせき</sup>なってきました。それは、隕石の分析と比較されて検証される、相対的な元素組成です。一方、銀河系に存在する元素の総量も、観測から明らかになっています」

超新星爆発1発当たりにつくられるそれぞれの元素の量と、銀河系が誕生してから現在までに超新星爆発が起きた回数の掛け算をすれば、銀河系に存在する元素の総量になるはずだ。「そこまで確かめなければ、元素誕生の謎を真に解明したことにはなりません。しかし私たちの銀河系については、超新星爆発が起きた頻度が分かっていないのです。ある研究者は数年に1回、別の研究者は300年に1回などと、推定値に大きなばらつきがあります」

1979年、超新星爆発の痕跡が南極点の氷床コアに残されている、という研究論文が発表された。超新星爆発に伴い大量のガンマ線が発生して、地球の成層圏に降り注ぐ。雲ができて雨が降るといったさまざまな気象現象は、高度約10kmの対流圏で起きる。その上層の高度約50kmまでが成層圏だ。そこに超新星爆発に伴うガンマ線が

降り注ぐと、大気の主成分である窒素(N<sub>2</sub>)や酸素(O<sub>2</sub>)と衝突して化学反応が進み、最終的に硝酸(HNO<sub>3</sub>)ができる(タイトル図)。

成層圏では、赤道域から上昇し高緯度域へと流れて下降する風が吹いている。その大気の循環に乗って硝酸は運ばれ、雪に取り込まれて南極大陸に降り積もる。その雪が固まり氷床となる。

その氷床を掘削したコアを分析したところ、硝酸イオン濃度が急激に高くなる“スパイク”があり、それが超新星爆発の痕跡の可能性があると、1979年の論文は主張していた。しかし、ほかの研究グループが掘削した別のコアにはそのスパイクは見えず、また論文の筆者グループ自らもコアを切断したときの汚染をスパイクだと見誤ったと発表したことから、その研究は否定された形になっていた。

「しかし、最新の超新星爆発の理論や分析技術を駆使すれば、超新星爆発の痕跡を見つけることができるかもしれないと考え、国立極地研究所から貴重な氷床コアを提供していただきました」

## ■ 太陽活動と気温の関係を探る

その氷床コアは、南極沿岸から約1,000km内陸に位置するドームふじ基地で掘削されたものだった(タイトル図)。「予備的な分析を始めてみると、その氷床コアには太陽活動の歴史も刻み込まれているらしいことが分かりました」

太陽が放射する光(電磁波)には、赤外線や可視光とともに、エネルギーの高い紫外線やX線、ガンマ線も含まれている。さらに太陽は高エネルギーの陽子も放出している。それらが成層圏にぶつかることによっても、硝酸がつくられる(タイトル図)。

「一方、水を構成する酸素の同位体比(<sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O)の分析により、雪が降り積もった当時の周辺地域の気温を復元する手法が確立されています。硝酸イオン濃度から太陽活動を知ることができれば、同一試料から太陽活動と気温の情報を得て、その関係性を探ることができるのです。ドームふじ基地がある南極の内陸は、地球温暖化の影響があまり見られず、太陽活動と気温との関係を調べるのに適した場所です。また、ドームふじ基地は、成層圏からの風がちょうど下降してくる場所に位置し、その氷床コアには成層圏から運ばれる物質が多く含まれています。さらに、内陸にあるため海からの物質による汚染も少なく、成層圏からの情報を得るのに最適の場所です」

望月ULは、内閣府・総合科学技術会議の最先端・次世代研究開発支援プログラム(NEXT)に、「南極氷床コアからさぐる過去2千年の太陽活動に関する分野横断的研究」を提案、高い競争率の中から採択された。そして2011年7月、理研仁科加速器研究センターに望月雪氷宇宙科学研究ユニットを立ち上げた。「人や装置がそろい、実際に分析をスタートできたのは、2012年2月です。それからNEXTの終了期限である今年3月末に間に合うように、氷床コア2,000年分の硝酸イオンと酸素同位体比の分析を1年半で行いました。それは通常、10年かけて行う仕事量です」

## ■ 太陽活動と気温は連動している！

氷床コアに太陽活動の歴史は刻み込まれていたのか。「ドームふじ基地の氷床コアとしては初めて、1年刻みの細かさでデータを得ました。年代を精度よく特定できる西暦1550～1900年の硝酸イオン濃度のデータを



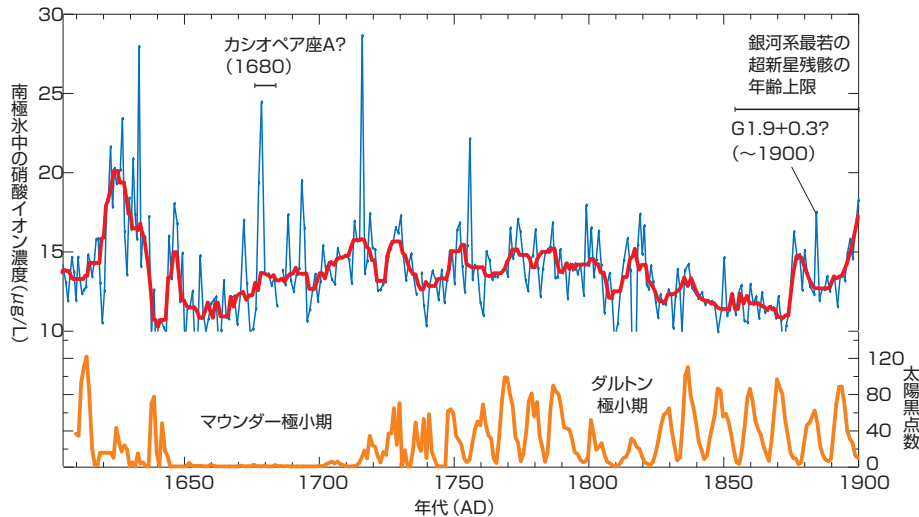


図1 太陽の黒点数(オレンジ)と硝酸イオン濃度(青:生データ、赤:ならされた値)

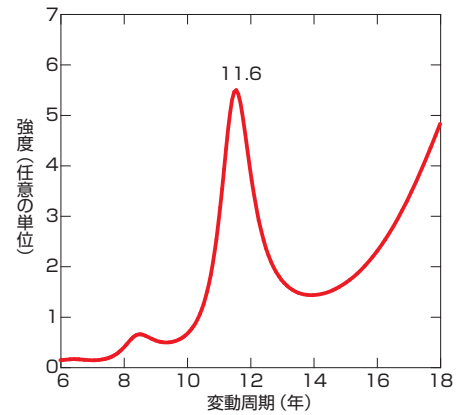


図2 硝酸イオン濃度の変動周期

まず解析したところ、約11年周期で濃度が高くなったり低くなったりしていることが分かりました(図1・図2)

太陽は、表面の黒点の数が多いほど活動度が高い。黒点数の観測から、活動度が高い極大期と低い極小期が11年の周期で繰り返されていることが知られている。「硝酸イオン濃度の11年周期は太陽の活動周期を反映していると考えられます。私たちは氷床コアの硝酸イオン濃度が太陽活動の指標となることを示すことができました」

一方、氷床コアの酸素同位体比の分析から何ができてきたのか。「1750～1940年のデータを分析したところ、約10年と約20年の周期で、気温が高くなったり低くなったりしていることが分かりました。その変動強度は約20年の周期の方が大きくなっています。実は太陽活動には11年周期の倍の22年周期もあります。現代の観測機器で計測された気温のデータも変動しており、その変動強度は22年周期が11年周期よりも強いことが知られています。つまり、酸素同位体比に基づく気温の代替データはまさに実測の気温の特徴を反映していると考えられます。そして太陽の黒点数の変動に、1年ほど遅れて同位体比から求められた気温も連動して変動する

傾向が見られます。私たちは、太陽活動と気温とが連動している証拠を得たのです」

### 太陽の異変で地球は寒冷化する？

太陽活動により光の放射量が変動すれば、地球の気温が連動して変動するのは当然だと思うかもしれない。しかし、極大期と極小期で光の放射量は0.1%しか変動しないことが、人工衛星による観測で確かめられている。「0.1%の変動が気温に影響を与えることはほとんどないと考えられます。ではなぜ、太陽活動と気温が連動して変動するのか。太陽活動が気温に与える影響について、いくつかの仮説がありますが、よく分かっていません」

太陽活動の指標となる黒点の観測が、ガリレオ・ガリレイたちによって始まったのは、1610年ごろだ。1645～1715年には黒点がほとんど現れない太陽活動の停滞期が続き、「マウンダー極小期」と呼ばれている(図1)。そのころのヨーロッパは、ロンドンのテムズ川が凍り付くなど、寒冷化したことが知られている。

太陽の11年周期は常に一定ではなく、9～14年ほどの幅がある。マウンダー極小期の前には、周期が11年より

も長くなったことが記録されている。

最近の太陽も、12.6年と活動周期が長くなっていることが報告されている。人類の活動に伴う二酸化炭素の大气への放出がもたらす温室効果により、地球温暖化が進行していると指摘されているが、太陽活動の低下により、逆に寒冷化が起きる可能性はあるのだろうか。

「それに答えるには、太陽活動の変動が気温に与える影響の大きさと、そのメカニズムを明らかにする必要があります。硝酸イオン濃度からは、過去の太陽の活動周期だけでなく強度も導き出せます。私たちが取得した酸素同位体比の生データの平均が示す気温の変動幅は±2℃程度です。ただしその数値が妥当かどうか、共同研究者と検証を進めているところです。そして、太陽活動の強度と気温の変動幅を比較することで、太陽活動が気温に与える影響の大きさを探っていきたいと思います」

ドームふじ基地では、過去72万年分の氷床コアが掘削されており、さらに過去100万年分の氷床コアを掘削する計画もある。そのコアを分析すれば、太陽活動と気温との関係を現在から過去100万年までさかのぼること

ができる。

「一方、太陽活動が気温に及ぼすメカニズムとして、私は、紫外線やX線、ガンマ線などの高エネルギーの光子、さらには高エネルギー陽子が大気に及ぼす影響に注目しています。私たちは、ガンマ線や高エネルギー陽子が成層圏の大気に衝突したとき、どのような化学反応が起きるのかについて理論研究を進め、成層圏を取り込んだイオン化学反応ネットワークモデルを世界で初めて構築しました。今後、そのモデルも駆使して、高エネルギーの光子や陽子が成層圏にもたらす影響が対流圏の気温にも及ぶのかどうかについても、研究を進展させていきたいと思っています」

気温に影響を及ぼす主な自然要因には、太陽活動のほか火山噴火がある。火山噴火による大量の噴出物が大気を覆うことにより太陽からの光が遮られ、寒冷化を引き起こす。「氷床コアには火山噴火によって放出された硫酸イオンも含まれていて、私たちはNEXTでその分析も行いました。火山噴火の影響も考慮しながら、太陽活動と気温との関係を探っていく計画です」

## 超新星爆発とスーパーフレア

一方、銀河系内の超新星爆発の痕跡は、氷床コアに残されているのか。「超新星爆発が起きると、大量のガンマ線が半年間以上、降り注ぎます。理論的に考えると、その影響で氷床コアに硝酸イオン濃度のスパイクが現れてもおかしくありません。実際、超新星爆発の記録がある1680年付近(カシオペア座A)や、最近発見された超新星残骸(G1.9+0.3)に相当し得る1900年付近などにスパイクが見られます。スパイクの中には、記録が残っていない南天で起きた超新星爆発の痕跡も

あるかもしれません。ただし、スパイクの要因としては、超巨大な太陽フレアも考えられます」

太陽フレアとは、太陽表面で起きる爆発現象のことだ。太陽フレアが起きると大量の高エネルギー陽子が地球に降り注ぎ、成層圏で硝酸がつくられる。「その期間は1週間ほどです。ドームふじ基地の氷床コアの時間分解能は1年なので、太陽フレアによる影響は埋もれてしまいます。例えば、1859年に記録史上最大規模の太陽フレアが起きましたが、対応しそうなスパイクは見えません」

大規模な太陽フレアは、地球に磁気嵐を引き起こし、電力・通信網に被害を与える場合がある。1859年と同規模のフレアに、電力・通信網が発達した現代社会が襲われれば、その被害額は最大2兆ドル(約200兆円)に上るとの試算もある。大規模な太陽フレアは、巨大地震・津波クラスの被害を社会にもたらす可能性があるのだ。

さらに、京都大学の柴田一成教授たちは2012年、太陽系外の惑星を探索するケプラー衛星の観測データから、太陽とよく似た148の恒星で、最大級の太陽フレアの100~1,000倍もの規模の「スーパーフレア」が365回起きていることを発見、太陽でも800~5,000年に1回の頻度でスーパーフレアが起きる可能性があるとして指摘している。

私たちの太陽もスーパーフレアを起こしたことがあるのか。氷床コアの中のスーパーフレアの痕跡を探するには、超新星爆発と区別する必要がある。

「太陽フレアでは高エネルギー陽子、超新星爆発ではガンマ線が成層圏に降り注ぎ、いずれも硝酸ができますが、硝酸を構成する窒素の同位体比( $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ )に違いが現れます。NEXTではその窒素同位体比も分析しまし

た。私がまず知りたいのは銀河系内の超新星爆発の頻度です。今後、窒素同位体比のデータ分析をさらに進めて超新星爆発によるスパイクを特定したいと思います。過去2,000年の分析で超新星爆発の痕跡を探し出すことに成功すれば、次に、過去100万年分の氷床コアの分析を進めたいと思います。頻度を知るには、100万年分をすべて分析する必要はありません。例えば1万年前、10万年前、100万年前など異なる時期を分析することで、頻度を割り出すことができます」

## 次世代を育て、新しい分野を拓く

望月ULは、日本学術会議研究連絡委員会幹事などを歴任し、自らのさまざまな体験から、ハラスメント問題などに取り組み、研究環境の改善を図っている(関連情報)。

また、若手研究者の指導・育成にも力を注いできた。「先日、ユニットに参加していた元教え子から、間違っただけ、あらためて感謝しているというメールをもらいました。うれしかったですね」

最後に望月ULは、研究の展望について次のように締めくくった。「理研には、雪氷学の父といわれる中谷宇吉郎先生が在籍しておられました。また、初期の南極観測隊に参加して、宇宙線やオーロラの観測を進めた研究者もいました(理研ニュース2001年7月号「記念史料室から:氷雪に散った若き研究者」)。そのような理研の伝統を受け継ぐとともに、新たな視点を加え、雪氷学と宇宙科学、気候学を融合した新分野を拓くことを目指していきます」

(取材・執筆:立山 晃/フォトンクリエイト)