

屋久杉の年輪から分かる 宇宙放射線量の変化



増田 公明

Masuda Kimiaki

(名古屋大学太陽地球環境研究所)

1 はじめに

我々の住む地球上は様々な放射線で満ちており、人類はこの環境の中で進化してきた。地球上の自然放射線の起源は2つあり、地球誕生以来残存する長寿命の放射性同位体によるものと、地球外から飛来する宇宙線（又は宇宙放射線）によるものである。残存する放射性同位体は、地球が誕生してから46億年の間にまだ崩壊しきれない長寿命の原子核である。代表的なものはウランやトリウムなどを筆頭とする崩壊系列に含まれるものや、 ^{40}K などである。宇宙線は、地球外から地球へ進入する高エネルギー粒子（電磁波を含む）であり、3つの種類に分けられる。太陽系の外から来る銀河宇宙線、太陽活動が活発なときに太陽から直接飛来する太陽高エネルギー粒子（又は太陽宇宙線）、そして地球近傍の磁気圏に捕捉されている放射線帯粒子である。地球大気を突き抜けて地上まで到達するのは、主に銀河宇宙線の影響によるものである。太陽高エネルギー粒子もそのエネルギーやフラックスが大きいと地上で観測されることがある。ちなみに宇宙線の存在は1912年にオーストリアのV.F.ヘスによる気球実験によって発見され、今年はちょうど100年目である。本稿では宇宙線が大気中で作る ^{14}C の測定から何が分かるかを述べ、最近屋久杉の年輪から得られた奈良時代の宇宙線増加の事象について

を紹介する。

2 銀河宇宙線と太陽活動

銀河宇宙線は、我々の太陽系を含む銀河系における超新星爆発などの高エネルギー天体現象によって発生・加速された粒子とそれに起因する電磁波と考えられている。そのエネルギースペクトルは、 10^{20} eVにまで延びていることが観測から分かっているが、その起源や性質はいまだ論争中である。一方、太陽表面からは常に陽子や電子などのプラズマ粒子（太陽風）が放出されている。プラズマ粒子は太陽の磁力線を引き出しながら惑星間空間へ拡がり、太陽系内に惑星間空間磁場を形成する。このように太陽風が磁場を作る範囲を太陽圏と呼ぶ。太陽はその自転と表面近くの対流層におけるプラズマ粒子の運動によるダイナモ機構によって磁場を作り、太陽活動は平均11年の周期変化をしている。太陽風も同様に11年周期で変化をするので、太陽圏全体が変動する。銀河宇宙線のほとんどは電荷を持った粒子なので、太陽圏に進入して地球へ届くまでに太陽圏の磁場の影響を受ける。こうして地球へ到達する銀河宇宙線の強度も太陽活動に同期して11年周期変動を示す。

地球へ到達した宇宙線粒子（一次宇宙線）は大気原子核と反応して空気シャワーと呼ばれる現象を起こす。これは高エネルギーの入射宇宙

線が、大気原子核との衝突で多くの粒子（二次宇宙線）を生成し、これらの粒子がまた大気原子核との反応や崩壊を繰り返すものである。その結果、一次宇宙線の入射方向に多数の粒子を生成する。この時、原子核との反応で核破砕反応が起こると、その原子核より軽い別の原子核ができる。 ^{10}Be や ^7Be は代表的な核破砕反応生成物である。一方、これらの反応では多数の中性子が発生する。中性子が弾性散乱を繰り返してエネルギーを失う過程で、 ^{14}N による中性子捕獲反応 $^{14}\text{N} + n \rightarrow p + ^{14}\text{C}$ が起こり、 ^{14}C が生成される。このように宇宙線によって生成される同位元素は宇宙線生成核種と呼ばれ、特に長寿命の放射性同位体は自然界にその痕跡を残す。 ^{10}Be （半減期 150 万年）や ^{14}C （半減期 5,730 年）のほかに、 ^{36}Cl （半減期 30 万年）、 ^{26}Al （半減期 72 万年）、 ^3H （半減期 12.3 年）などがある。

二次宇宙線の高エネルギー成分は大気層を突き抜けて地上まで達することができる。この

二次宇宙線に含まれる中性子や陽子（核子）を地上で測定することによって一次宇宙線強度を知ることができる。このような測定器を中性子モニターといい、世界中に設置されている。図 1 にグリーンランドのトゥーレ（Thule）の中性子モニターで測定された結果¹⁾を示す。横軸の時間（西暦年）に対して、縦軸の中性子強度が約 11 年の周期で変動しているのが分かる。同じグラフに書かれている太陽黒点数の変化と比べると、黒点数が多いとき（太陽活動が活発なとき）に宇宙線強度が小さくなっている。これは太陽活動と銀河宇宙線強度の逆相関を示しており、太陽活動による磁場によって宇宙線が太陽圏に入れなくなっていることが分かる。太陽磁場は一周期ごとにその極性を反転させていて、太陽活動の極大の時に変わる。宇宙線粒子のほとんどはプラスの電荷を持った陽子や原子核なので、太陽磁場の極性に対して異なった軌道をとる。その結果、宇宙線強度の変化の仕方

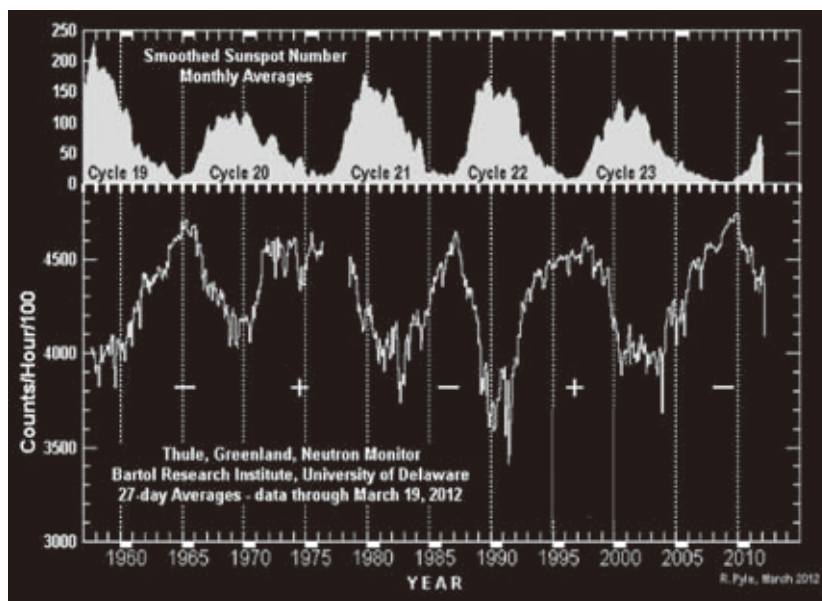


図 1 グリーンランドのトゥーレにおける中性子モニターのデータ（下）と太陽黒点数（上）の変化¹⁾

中性子モニターのデータは地球へ到来する宇宙線量の変化を表し、太陽活動による宇宙線のモジュレーションを示している。1 周期ごとにシャープなピークと平らなピークを繰り返しており、これは太陽磁場の極性（+ 指示）の違いによる

が一周期ごとに違うと考えられ、図1にその様子が見られる。

3 放射性炭素 ^{14}C

^{14}C は、銀河宇宙線により地球の高層大気で作られる。その生成率は平均的な太陽活動期において、 $2 \text{ atoms/cm}^2/\text{s}$ 程度²⁾であり、成層圏と対流圏でおおむね半々である。大気中で炭素はすぐに酸化して二酸化炭素となり、地球の炭素循環に含まれる。大気中の炭素は地表付近で生物圏及び海洋圏と相互作用し、そのため大気圏の ^{14}C は10年程度の時定数で変化する。何らかの原因で大気中の ^{14}C 量が変化するとその影響が数十年続くことになる。 ^{14}C は宇宙線によって生成されるとともに、最終的には5,730年の半減期で放射性崩壊しており、地球規模では長い年月の間にほぼ平衡状態となっている。その結果、地球大気中の ^{14}C の割合は $^{12}\text{C} : ^{13}\text{C} : ^{14}\text{C} = 0.99 : 0.01 : 1.2 \times 10^{-12}$ 程度である。

^{14}C は、炭素が生きている生物に取り込まれる物質であることと放射性崩壊の半減期が適当な長さであることから、考古学、地球科学などで年代測定の手段として用いられている。その原理的根拠として、地球大気中の ^{14}C 濃度が年

代にかかわらず一定であるか、その変化が既知である必要がある。つまり特定すべき年代における ^{14}C 濃度の初期値が分かっていなければならない。当初は、 ^{14}C 濃度は年代にかかわらず一定であると考えられてきたが、測定精度の向上もあって、正確には一定でないことが明らかになってきた。 ^{14}C 濃度に影響する因子は多くあり、それらを考慮する必要がある。特に影響の大きな因子は地磁気の変化と太陽活動の変動である。これらはどちらも地球に進入する宇宙線強度に影響し、 ^{14}C 濃度に変化を与える。そこで、主に年代測定の較正を目的として、過去12,000~50,000年にわたる10~100年ごとの ^{14}C 濃度が測定されてきた(IntCal³⁾)。過去3,000年分のIntCalデータを図2に示す。縦軸の $\Delta^{14}\text{C}$ は、現代の ^{14}C 濃度基準値からの偏差を千分率(%)で表した量である。1,000年オーダーの変化は地磁気によるもの、100年オーダーの変化は太陽活動によるものと考えられている。1645~1715年は太陽黒点がほとんど消失し太陽活動が特に弱かった時期でマウンダー極小期と呼ばれているが、このときに地球に到達する宇宙線強度が大きくなり、 ^{14}C 濃度も増えているのが分かる。このように ^{14}C 濃度が

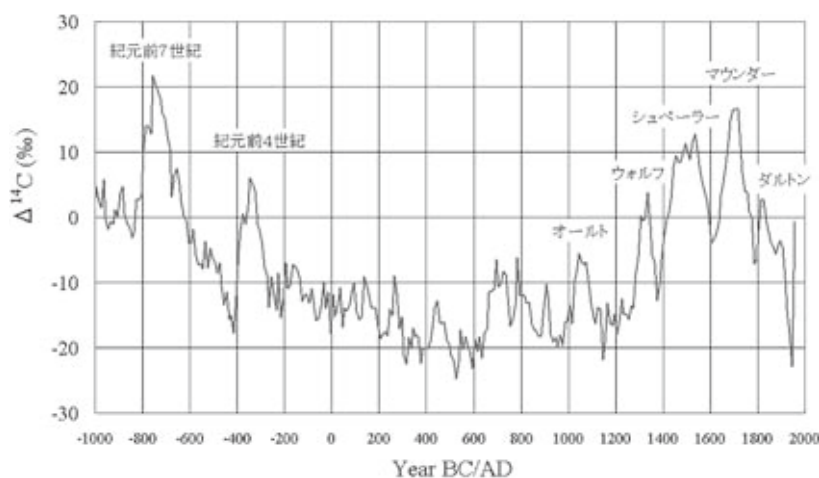


図2 過去3,000年の ^{14}C 濃度変動(IntCalデータ³⁾)
 ^{14}C 濃度のピークに対応する太陽活動極小期の名前を付してある

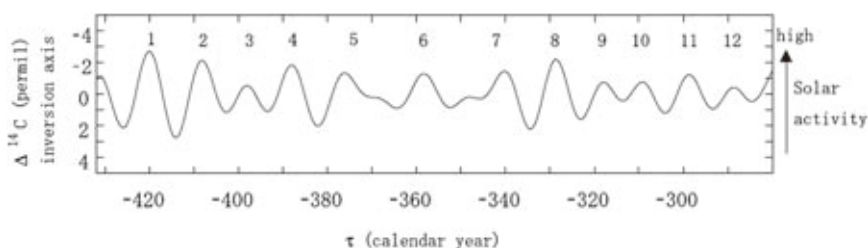


図3 紀元前4世紀の太陽活動極小期におけるシュワーベサイクル⁶⁾
¹⁴C濃度の時間変化データに8~18年のフィルターをかけてある。
 サイクル5~7において周期長が伸びている。太陽活動の高い方が上
 を向くように、縦軸の¹⁴Cのスケールが逆向きであることに注意

100年程度の幅のピークを示す時期は太陽活動の極小期と考えられており、その名称が図2に示されている。このような太陽活動極小期には地球の気候が寒冷化すると言われており、過去の太陽活動を調べるためにも¹⁴C濃度測定は重要である。

太陽活動の11年周期活動を調べるために、我々は更に1~2年ごとの¹⁴C濃度を測定している。時間スケールが短くなると、炭素循環による相対的な時間のずれが大きくなり、変動の振幅が小さくなるため、信号強度が測定精度と同程度になってしまう。したがって、このような測定は細心の注意を払って誤差を小さく押さえる必要がある。¹⁴C濃度の測定は加速器質量分析計⁴⁾を用いて行った。¹⁴C濃度の時系列データの周波数分析により雑音成分を遮断し、太陽活動に起因する成分を取り出すことに成功した。その結果、太陽活動極小期では通常11年の周期が、13~16年と長くなっていることを見いだした^{5,6)}。図3に紀元前4世紀極小期のシュワーベサイクルを示す。サイクルNo.5~7において周期長が長くなっているのが分かる。このように過去の¹⁴C濃度を調べることによって、宇宙線強度の変動を介して、太陽をはじめとする宇宙の様子を知ることができる。

4 775年の宇宙線増加⁷⁾

図2は過去の¹⁴C濃度、すなわち宇宙線強度変化を10年値で示している。太陽活動の極小

期は数十年続く変化であるが、¹⁴Cのデータにはもっと早い変化をしている年代がある。これは通常の11年太陽活動より早い、急激な変化による可能性がある。そこで我々は、7世紀極小期の直後の、やや不規則な変化をしている年代を選んで、1~2年の間隔で測定を試みた。

用いた試料は樹齢1,900年の屋久杉の年輪で(図4)、我々の研究室の廊下に置いてある。年輪年代法により年輪幅のパターンから決定された年代を用いて対象となる年輪を切り出し、1年ごとの試料に切り分けた後、試料ごとに洗浄、セルロース抽出、酸化して二酸化炭素に変換、精製の後、水素還元によってグラファイトに変換した。このグラファイトをターゲットとして名古屋大学の加速器質量分析計⁴⁾で¹⁴C濃度を測定した。測定結果を図5(Tree-A)に示す。図から分かるように、774~775年にかけて12%の¹⁴C濃度の増加が見られる。この増加量は測定誤差の8倍の変化であり、前述の太陽11年周期変動の20倍の年変化である。別の屋久杉個体(Tree-B)の年輪を測定してもこの増加が確認された。この1年の急激な増加後、¹⁴C濃度は数年かかってゆっくり減少している。これは地球上の炭素循環によるもので、成層圏、対流圏、生物圏、海洋圏の4つの領域を考慮した4-box炭素循環モデルによってよく再現できる。過去に起こった急激な¹⁴Cの増加は1960年代の大気圏内核爆発実験の際に見られるが、775年の¹⁴Cの変化は核実験の時の変化



図4 測定に用いた屋久杉の円板
直径 1.9 m, 樹齢約 1,900 年。1956 年に伐採され、
1995 年に入手した。残存年輪の年代は 100~1600
年である

とよく一致している。すなわち、775 年の事象は、1 年以内の極めて短期間に ^{14}C が増加し、炭素循環により徐々に大気中の ^{14}C 濃度が減少したと言える。このような増加は ^{14}C の 10 年値である IntCal データにも見られ、我々の 10 年平均値は欧米の試料を用いた IntCal データと一致し、また南極大陸のドームふじ氷床中の ^{10}Be の 10 年値データとも一致する。すなわち、この現象は地球上の様々な場所で観測されていることから、この事象が全地球的な現象であり、その原因は地球外の宇宙で起こった高エネルギー現象と考えられる。

今のところ、考えられる原因は、太陽近傍で起こった超新星爆発か、太陽表面で起こった特大のフレア（スーパーフレア）である。生成された ^{14}C の量から逆算することによって、これらの事象の総エネルギーを推定することができる。超新星爆発を想定した場合、荷電粒子は星間磁場により直接地球には到達しない。爆発総エネルギーの 1% が γ 線として等方的に放出されたと仮定し、地球からの距離がこれまで発見された中で最も地球に近い超新星 SN1006 と同じ 2 キロパーセク（1 パーセクは 3.26 光年）と

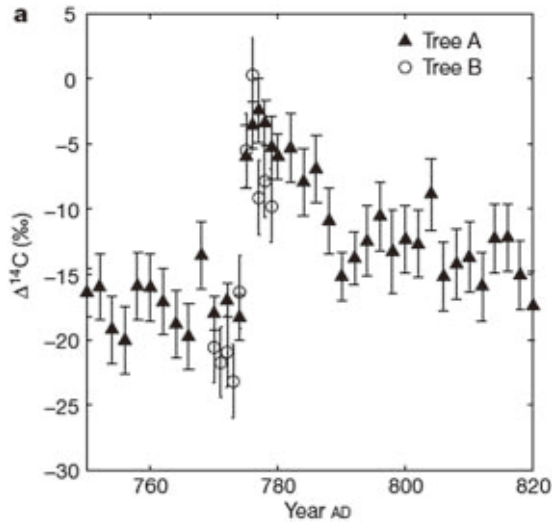


図5 750~820 年における屋久杉年輪中の 1 年又は
2 年ごとの ^{14}C 濃度変化⁷⁾

すると総エネルギーが 2×10^{53} エルグ（1 エルグは 10^{-7} ジュール）となり、通常考えられる超新星爆発の規模を大きく超えてしまう。距離が 200 パーセクならば総エネルギーは 2×10^{51} エルグとなり通常の超新星爆発と考えて矛盾がない。しかしこれだけ近距離で超新星爆発が起これば、かなり明るく天空に光り輝き、歴史記録に「客星」として記録される可能性が大きい。今のところそのような記録は発見されていない。一方、原因として太陽フレアを想定すると、フレアで作られた陽子が等方的に放出された場合、その総エネルギーは 10^{35} エルグとなり、通常の太陽フレアのエネルギーの 1,000 倍以上の大きさとなる。太陽フレアの場合、陽子はある程度限られた角度範囲に出てくるが、それを考慮してもまだかなり大きいフレアである必要がある。このような大きなフレアが起これば、低緯度オーロラが見えたり、紫外線による強力な影響が生じる可能性が高いが、そのような記録はほとんどない。原因の解明には更なる知見が必要である。

5 まとめ

屋久杉のような長寿の樹木年輪を1年分ずつ削り出し、その中の ^{14}C 濃度を測定することによって過去の宇宙線強度を詳細に調べることができる。その時系列データの周期解析から、地球へ到達する宇宙線を制御している太陽活動の長期・短期の変遷が分かる。11年周期のシュワーベサイクルが過去にどうなっていたかを知ることができ、実際にマウンダー極小期などの長く太陽活動が低下した時期に周期が長くなっていたことが明らかになった。このことは、最近の太陽活動の周期が長くなり黒点数が減ってきている原因を調べ、今後の地球気候への影響を予測する手掛かりとなる。年輪1年ごとの ^{14}C 濃度の測定は、775年に見いだされたよう

な突発現象を発見する手掛かりともなる。地球外の高エネルギー現象の特定につながる事が望まれる。

参考文献

- 1) URL : <http://neutronm.bartol.udel.edu/modplot.html>
- 2) Masarik, J. and Beer, J., *J. Geophys. Res.*, **114**, D11103 (2009)
- 3) Reimer, P.J., *et al.*, *Radiocarbon*, **51**, 1111–1150 (2009)
- 4) Nakamura, T., *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth.*, **B172**, 52 (2000)
- 5) Masuda, K., *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn Suppl. A*, **78**, 1–6 (2009)
- 6) Nagaya, K., *et al.*, *Sol. Phys.*, **280**, 223–236 (2012)
- 7) Miyake, F., Nagaya, K., Masuda, K. and Nakamura, T., *Nature*, **428**, 240–242 (2012)