

# 論文内容要旨 (和文)

2017 年度入学 大学院博士後期課程

地球共生圏科学 専攻 物理学 分野

氏 名 森谷 透



論文題目 AMSを用いた年輪中<sup>14</sup>C濃度の高精度測定によるシュペーラー極小期の太陽活動の研究

17世紀に望遠鏡が発明されてから現在までの約400年間、太陽表面に現れる黒点数の観測が継続されている。黒点数は、太陽活動が活発な時期は増加し、静穏な時期は減少するため、黒点数の増減は太陽活動の指標として用いることができる。黒点観測の結果、太陽活動は約11年の周期で変動していること(シュワーベサイクル)、それに加えて数十年以上の長期変動も示し、17世紀に太陽活動が極端に低下した時期があったことがわかっている。この時代はマウンダー極小期(1645-1715年)と呼ばれ、地球規模で平均気温が低下した時期にあたる。このような極小期は、数百年に1度発生することが判明してきており、今後も発生する可能性が高い。しかしながら、極小期発生の詳細なメカニズムはわかっておらず、予測手法は確立できていない。極小期発生のメカニズムを解明するためには、過去に発生した極小期の発生プロセスやその共通点を探り、太陽活動低下のメカニズムを明らかにする必要がある。しかし、黒点数のデータだけでは情報が不十分であるため、間接的指標に基づき黒点観測が始まる前の過去の時代についても太陽活動を調べるのが重要である。

過去の太陽活動変動の間接指標として広く用いられているのは、炭素<sup>14</sup>(<sup>14</sup>C) やベリリウム(<sup>10</sup>Be)などの宇宙線生成核種である。銀河系から地球に飛来する銀河宇宙線のうち数十GeV以下のエネルギーを持つ宇宙線は太陽磁場の変調を受ける。そのため、地球における宇宙線の強度は、太陽活動の変動を反映して変動する。<sup>14</sup>Cは、宇宙線と地球大気との核破砕反応で生じた中性子が窒素原子に捕獲されることで生成される。そして、二酸化炭素として大気中を循環し、光合成により樹木に吸収される。そのため、樹木年輪中の<sup>14</sup>C濃度は、その年輪が形成された年の宇宙線強度の変動を反映する。<sup>14</sup>Cの生成量変動に対する樹木年輪中の<sup>14</sup>C濃度の変動について炭素循環モデルを用いて評価すると、10年スケールの生成量の変動に対して、樹木年輪中の<sup>14</sup>C濃度の変動はわずか100分の1程度の振幅となる。したがって、過去の太陽活動の変動を精密に復元するためには、加速器質量分析装置(Accelerator Mass Spectrometry, AMS)を用いた高精度な年輪中の<sup>14</sup>C濃度測定が有効である。

樹木年輪中の<sup>14</sup>C濃度測定によって、過去1000年の間に、マウンダー極小期の他にシュペーラー極小期(1416-1534年)やウォルフ極小期(1282-1342年)などが発生していたことが明らかになっている。1年分解能で<sup>14</sup>C濃度を測定した先行研究からは、マウンダー極小期において、シュワーベサイクルの長さが極小期発生の3サイクル前から延びていたことが示され、太陽活動の低下に子午面循環の変化が寄与している可能性があることが示唆された。

太陽活動の11年周期は、磁束輸送ダイナモモデルによってある程度説明が可能である。磁束輸送ダイナモモデルは、太陽自転の差動回転により、南北方向に伸びるポロイダル磁場からトロイダル磁場が形成されるというものである。このトロイダル磁場が浮上し太陽表面を貫いた部分が黒点として確認される。その際、磁力線は太陽自転によるコリオリ力の影響を受け、経度方向に対して角度を持った黒点ペアを形成する。そのうち後行黒点の磁場が子午面循環によって極付近へ輸送されることで、太陽磁場の反転が生じる。先行研究は子午面

循環の速度の低下が極磁場の強度変化に関与していた可能性があることを示唆した。

本研究では、過去1000年間に発生した極小期の中でも最大規模のシュペーラー極小期に着目し、シュワーベサイクルの変動を明らかにすることで、子午面循環のふるまいについて手がかりを得ることを目的とし、樹木年輪中の $^{14}\text{C}$ 濃度を高精度で測定した。青森県下北半島太平洋岸猿ヶ森砂丘で出土した年輪年代が1270~1450年と判明したアスナロ埋没木(*Thujaopsis dolabrata*)のうち、1368-1420年の53年輪分を用いた。年輪中の $^{14}\text{C}$ 濃度を正確に評価するため、年輪間を移動せず、酸やアルカリに溶出しない化学的に安定な $\alpha$ -セルロースを抽出した。抽出した $\alpha$ -セルロースは、自動グラフアイト作製装置を用いて、Fe粉末を触媒とする水素還元法によりグラフアイト化した。そして、山形大学に設置されたAMS装置を用いて1.2%以下の精度で $^{14}\text{C}$ 濃度測定することで、シュワーベサイクルの変化を詳細に調べた。標準試料として、IAEA-C6、NISTを用い、 $^{14}\text{C}$ を含まないバックグラウンド試料としてIAEA-C1を用いた。セルロース試料は、1年輪に対して3個ずつグラフアイト化し、9年輪分のカソードをランダムな配置にすることで系統誤差を低減させ、また計数量を上げることにより高精度で $^{14}\text{C}$ 濃度を測定した。また、本研究では、従来のAMSデータの解析手法について見直しを行い、スパークなどによる影響を適切に除去するほか、1runごとに $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ に対して $\delta^{13}\text{C}$ 補正を行い $\Delta^{14}\text{C}$ を求めることで、高精度化を試みた。その結果、最終的に0.54~1.18‰という高精度でデータを取得することに成功した。

得られた高精度・高精度での $\Delta^{14}\text{C}$ 値をもとに、10年スケールの周期成分を抽出した結果、シュペーラー極小期開始前のシュワーベサイクルの長さは、極小期開始の3サイクル前から $12\pm 1$ 年、 $13\pm 1$ 年、 $17\pm 1$ 年となり、複数サイクルにわたって周期が遅くなっていたこと、またサイクルの長さが最大17年に延びていた可能性があることが判明した。この特徴は、マウンダー極小期についての先行研究と同じ傾向を示している。このサイクルの伸びは、極小期開始前に子午面循環の速度の低下が発生していた可能性を示唆している。太陽活動の低下をもたらすプロセスとしていくつかのモデルが提唱されているが、本研究の結果は、子午面循環が太陽活動低下のプロセスの重要な鍵を握っていることを示唆している。今後の極小期発生の予測において、太陽活動の11年周期の伸びや子午面循環の長期的観測が手がかりを与えるものと考えられる。

# 論文内容要旨 (英文)

2017 年度入学 大学院博士後期課程

地球共生圏科学 専攻 物理学 分野

氏 名 森谷 透



論 文 題 目 A study of solar activity at the Spoerer Minimum by high-accuracy measurement of  $^{14}\text{C}$  content in annual tree rings using AMS

Continuous sunspot observations from the 17th century have revealed that solar activity shows cyclic variation with period of 11 years (Schwabe cycle). In addition, solar activity shows long-term variations and sometimes experience periods of long-term sunspot disappearance (grand minima). One of such events occurred around the late 17th century to the early 18th century. This weakening in solar activity, called the Maunder Minimum (1645-1715), caused decrease in global temperatures and brought famine and serious damage to the society. It is therefore important to forecast the future event; however, the detailed mechanism of grand minima is unclarified. To understand the physical process of extreme weakening of solar activity, it is needed to investigate the variation of solar activity at around the onset of such event.

Cosmogenic nuclides such as carbon-14 ( $^{14}\text{C}$ ) and beryllium-10 ( $^{10}\text{Be}$ ) are used as proxies of solar variation in the past. Galactic cosmic rays with energies less than several tens of GeV, comes into the earth's atmosphere after being modulated by solar magnetic field. Thus, the fluctuations of cosmic ray flux on the earth reflect the variation of solar activity.  $^{14}\text{C}$  produced by the nuclear reaction between cosmic rays and the Earth's atmosphere diffuse in the atmosphere in the form of  $\text{CO}_2$  and is taken through trees by photosynthesis. The variation of  $^{14}\text{C}$  content in tree rings thus reflects the changes in cosmic ray flux. Therefore, solar activity can be reconstructed by measuring  $^{14}\text{C}$  content of annual tree rings. Absolute age of each of the tree rings can be determined by the dendrochronology.

Previous study suggested that the 11-year solar cycle had started lengthened 3 cycles before the onset of the Maunder Minimum, suggesting that the speed of the meridional circulation in the Sun might have been changed starting around the time. In order to understand the process of the grand minima and the role of the meridional circulation in weakening solar activity, we investigated the variation of the 11-year cycle before the onset of the Spoerer Minimum (1416-1534 CE), the longest grand minimum during the past 1000 years, by measuring YU-AMS system with high precision. We used the asunaro (*Thujopsis dolabrata*) samples which were excavated in the Shimokita Peninsula Aomori Prefecture and were dated based on dendrochronology. In this study, the 53 annual rings, corresponding to 1368-1420 CE, were measured for

氏 名 森谷 透

the  $^{14}\text{C}$  contents. In order to obtain accurate  $^{14}\text{C}$  content in annual rings, alpha-cellulose was extracted from each tree ring. The extracted cellulose samples were graphitized by reduction with hydrogen and an iron powder catalyst using the automated graphitization line. Then, we investigated the detailed variation of Schwabe cycle by measuring the  $^{14}\text{C}$  content with an accuracy of less than 1.2 ‰ using the YU-AMS system. NIST and IAEA-C6 were loaded at random position on a disk for standard samples to calculate  $\Delta^{14}\text{C}$ . IAEA-C1 were loaded on a disk to check the background level of  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ . To  $^{14}\text{C}$  achieve high precision, we loaded three cathodes for each cellulose sample at random position on a disk. In addition, we attempted to improve the accuracy by calculating  $\delta^{13}\text{C}$  and correcting  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  to obtain  $\Delta^{14}\text{C}$  for each run. Before the calculation, anomalies associated to discharge of accelerator are removed.

Based on the high-precision  $\Delta^{14}\text{C}$  data, we investigated the variation of the length of solar cycles. We found that the lengths of the three preceding solar cycle before the onset of the Sporer Minimum were 12, 13, and 17 years ( $\pm 1$  year). This result suggests that at least two preceding solar cycles were lengthened by several years before the onset of the Sporer Minimum. The result is consistent with the tendency previously found for the Maunder Minimum. The lengthened solar cycles suggest that the speed of meridional circulation in the Sun may have been slowed down before the onset of the Sporer Minimum. Several models to explain the decreasing in solar activity have been proposed, but our result suggests that the meridional circulation is an important parameter for elucidating the mechanism of solar grand minima.



学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

令和3年 8月 9日

理工学研究科長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 ..... 門叶 冬樹 ..... 印

副査 ..... 亀田 恭男 ..... 印

副査 ..... 郡司 修一 ..... 印

副査 ..... 宮原 ひろ子 ..... 印

学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

論文申請者	専攻・分野名	地球共生圏科学専攻・物理学分野	氏名	森谷 透
論文題目	加速器質量分析装置を用いた年輪中炭素 14 濃度の高精度測定によるシュペーラー極小期の太陽活動の研究			
学位論文審査結果	合格	論文審査年月日	令和3年 7月 20日～ 令和3年 8月 4日	
論文公聴会	令和3年 8月 4日	場 所	オンライン開催	
最終試験結果	合格	最終試験年月日	令和3年 8月 4日	

学位論文の審査結果の要旨 (1,000 字程度)

太陽活動は約 11 年の周期で変動していることに加え、数十年以上の長期変動を示す。その活動の中でも太陽黒点が数十年以上にわたって減少し、太陽活動が極端に低下する時代があることが知られており、太陽活動極小期と呼ばれている。極小期は地域によっては 2.5℃もの気温低下をもたらし、穀物等の収穫量の減少をもたらした。このような極小期は、数百年に 1 度発生することが判明してきており、今後も発生する可能性が高い。しかしながら、極小期発生の詳しいメカニズムはわかっておらず、その予測手法は確立できていない。本論文では、本学に設置した加速器質量分析装置 (YU-AMS) を用いて、極小期に生育した樹木年輪に含まれる炭素 14 を 1 年毎に 1.2‰を下回る世界最高レベルの精度で測定することにより、これまで困難であった太陽活動の 11 年周期の 1 サイクルごとの周期長の精細な復元が行われた。

第 1 章で太陽活動のメカニズム、宇宙線生成核種を用いた過去の太陽活動研究の歴史的背景を示し、樹木年輪に含まれる炭素 14 を用いて太陽活動の 11 年周期を復元するための手法と改善すべき課題を明らかにした上で目的を述べている。第 2 章では、太陽活動周期の変動と年輪中に含まれる炭素 14 濃度の依存性を地球の炭素循環シミュレーションモデルを用いて評価し、AMS 法に求められる測定精度について評価が行われた。第 3 章では過去 1000 年間に発生した極小期の中でも最大規模のシュペーラー極小期 (1416-1534 年) に着目し、青森県下北半島で生育したアスナロ埋没木 (1270~1450 年) を研究試料として選択し、単年輪試料を AMS 分析するための化学処理、セルロース抽出方法、自動化グラフィット作成法、AMS 測定の原理、高精度解析方法について詳しく示している。第 4 章では、YU-AMS を用いて 1.2‰以下の精度で測定したアスナロ単年輪試料の炭素 14 濃度測定の結果が述べられ、太陽活動の 11 年周期について詳細に調べられている。その結果、シュペーラー極小期開始前の 11 年周期は、極小期開始の 3 サイクル前から複数サイクルにわたって周期が長くなっていたこと、またサイクルの長さが最大 17 年に延びていた可能性があることを示した。この特徴は、マウンダー極小期 (1645~1715 年) についての先行研究と同じ傾向を示しており、太陽の対流層で生じる子午面循環の速度に遅れが生じていた可能性を示唆した。第 5 章では以上の研究について総括されている。

本論文で得られた研究成果は、筆頭著者の査読付き論文がすでに掲載され、国際会議においても発表がなされている。論文全体は適切に構成され、その成果は今後の太陽活動の研究の発展に寄与する事が期待でき、当該専攻の審査基準を満たしているため博士 (理学) 学位論文として合格と判定した。

本論文は、研究倫理又は利益相反等に係る学内規則に基づく手続きは必要ありません。

最終試験の結果の要旨

最終試験は学位論文の内容を中心とした 70 分の口頭発表、論文内容と当該分野に関連した幅広い研究内容に対する 40 分の質疑応答により実施した。口頭発表では、研究の背景と目的に続き、本研究による成果、そして考察と将来展望が論理的に展開され、明確な説明がなされた。口頭試問では、十分な専門的知識と研究遂行能力を伺うことができた。以上から、博士の学位を授与するのに十分な専門知識と理解力を有していることが確認できたため、合格と判定した。