

## [タイトル]

半世紀をこえる観測で初めてわかった！『静かな太陽は変わらない』

## [概要]

名古屋大学空電研究所豊川キャンパスで始まった太陽マイクロ波の強度モニター観測は、1994年国立天文台野辺山キャンパスへのアンテナ移設を経て、今日まで60年以上継続されています。国立天文台チリ観測所の下条圭美助教を中心とする、名古屋大学、京都大学、茨城大学からなる合同研究チームは、この半世紀以上にわたる太陽マイクロ波データを解析し、太陽極大期の活動度が太陽周期ごとに大きく変わるのに、極小期のマイクロ波強度およびそのスペクトルがここ5周期のあいだ全く変わっていないことを示しました。この観測結果は、黒点や太陽活動の源である磁場の太陽内部での生成・増幅を理解する上で、重要な鍵になると考えられます。

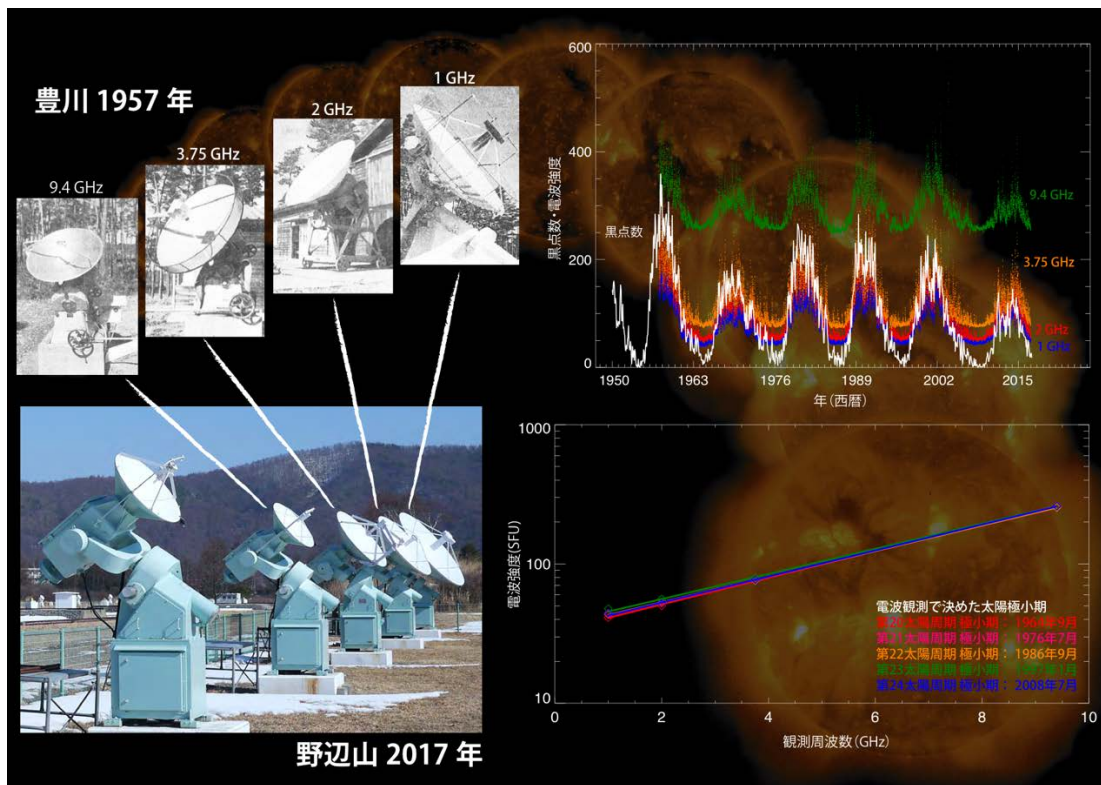


図1：60年間の太陽マイクロ波観測で得られた太陽の変動と、各極小期での太陽マイクロ波スペクトル<sup>1</sup>

[なぜ太陽からのマイクロ波を観測するの？]

人工衛星の活用に代表される科学技術の発達により、我々の生活は便利になりました。例えば、携帯電話のGPS機能を使って目的地までの道を調べたことがある方は多いと思います。一方、太陽フレア<sup>2</sup>やCME<sup>3</sup>などの太陽活動は、人工衛星や変電所の変圧器にダメージを与えることや、GPSの測地精度を悪化さ

<sup>1</sup>豊川でのアンテナの写真は、Tanaka H. and Kakinuma T., 1957, Proceedings of the Research Institute of Atmospherics, Nagoya University, 4, 60 から引用しました。また背景画像は、ひので衛星搭載X線望遠鏡が捉えた極小期から極大期に向かう太陽X線全面像を示しています。(Credit: NAOJ/JAXA)

<sup>2</sup> 太陽大気中で発生する太陽系最大の爆発現象。磁場エネルギーを熱や運動エネルギーに変換する現象。

<sup>3</sup> Coronal Mass Ejection(日本語名：コロナ質量放出)：太陽の上層大気であるコロナ中の大量の物質が、太陽フレア等の活動現象に伴って惑星間空間に放出される現象。

せることがあり、科学技術の普及に伴い、私たちの生活へ影響を及ぼしやすくなっています。可視光で観測できる太陽黒点の数は、ガリレオ・ガリレイがルネサンス期に発見して以来、太陽活動の指標として利用されてきました。しかし、太陽黒点は 1000 ガウスを超える強磁場かつ大規模な構造が無いと現れません。太陽フレアや CME など地球に影響する活動現象は黒点が無い領域でも発生することがあり、黒点数だけで太陽活動の状況を知ることは難しいです。また、当然ながら、黒点は曇りの日や雨の日などは観測することができません。

太陽から放射される電波、特にマイクロ波<sup>6</sup>は、太陽表面より数千 km 上空の彩層やコロナといった上層大気から放射されています。太陽フレアを発生させるような磁場が若干強い領域があれば、太陽から放射されるマイクロ波の強度は増加します。また太陽フレア発生した時には、強烈に強いマイクロ波が放射されます。このように黒点数より太陽活動に敏感なマイクロ波の観測データは、太陽活動を知るための非常に有用です。更に、マイクロ波には曇りや雨でも観測できるという強みがあり、特にカナダで 1947 年から観測されている波長 10.7cm (2.8 GHz) の太陽マイクロ波強度は、F10.7 という名前の太陽活動の指標として

---

<sup>6</sup> 波長 0.1mm~1m (周波数 0.3 GHz~3000 GHz) の電磁波。近年、電子レンジ・携帯電話・TV・衛星通信・車載用レーダー等、よく利用されている波長帯である。

世界中で利用されています。

#### [日本における太陽マイクロ波モニター観測]

日本における天文学的な電波観測は、1940年代末期に太陽を観測することから始まりました<sup>7</sup>。その数年後の1951年11月、名古屋大学空電研究所の田中春夫教授の研究チームが、豊川キャンパスにて3.75 GHzによる太陽マイクロ波モニター観測を開始します。その後田中教授は、国際地球観測年(IGY: 1957年7月~1958年12月)<sup>8</sup>での共同観測に向けてアンテナを増設、観測周波数を9.4 GHz・1 GHz・2 GHzに増やし、1957年6月から1, 2, 3.75, 9.4 GHzの4周波同時観測が豊川でスタートしました(図1: 左上の白黒写真)<sup>9</sup>。IGY以後もモニター観測は継続されました。

1988年、当時東京大学の付属天文台であった東京天文台の野辺山太陽電測所と名古屋大学空電研究所の太陽電波部門が合流し、国立天文台野辺山太陽電波観測が設立されました。この組織改編に伴い、1994年に豊川にあった1, 2, 9.4

---

<sup>7</sup>詳しくは、国立天文台ニュース 2017年6月号付録「アルマーの冒険」p.10-12「日本で最初の電波天文観測」

(<https://www.nao.ac.jp/contents/naoj-news/almar/data/almar07.pdf>)などをご覧ください。

<sup>8</sup> <http://www.sgepss.org/sgepss/kyoiku/sgepss/HistS32-2.html>

<sup>9</sup> Tanaka H. and Kakinuma T. 1957, PRIAN, 4, 60

GHz の太陽電波強度計も野辺山に移設されました<sup>10</sup>。野辺山では元々17, 34, 80 GHz での太陽マイクロ波強度観測を行っており、3.75 GHz の太陽電波強度計を新設しました。この結果野辺山では、1, 2, 3.75, 9.4, 17, 34, 80 GHz と7周波同時観測の太陽マイクロ波モニター観測が1994年5月から開始され、この7周波同時観測システムは”野辺山太陽電波強度偏波計”(Nobeyama Radio Polarimeters: NoRP)と名付けられました。2017年の現在でも観測を継続しています(図1:左下のカラー写真)。

1970年代初期に世界中の太陽電波研究者が自分の観測した太陽電波観測データを持ち寄り、観測所間の違いを議論し、正しい値を求めることが行われました<sup>11</sup>。その時、田中教授のチームが豊川で開発したデータ較正方法は非常に高いレベルのもので、豊川での観測結果は基準の一つとして使われました。世界中でもっとも信頼できる観測データだったのです。前記のカナダの観測データ F10.7 も豊川のデータを基に補正が行われたこともありました。この60年の間、野辺山太陽電波強度偏波計も装置の改良・修理やデジタル化などが行われましたが、デ

---

<sup>10</sup> 豊川に残された3.75 GHzのアンテナは、静岡県焼津市のディスカバリーパーク焼津天文科学館(<http://www.discoverypark.jp/>)で見ることができます。

<sup>11</sup> Tanaka, H. et al., 1973, Solar Phys., vol. 29, p. 243

一タ較正方法は豊川で確立された方法が現在も使われています。

#### [観測成果]

太陽は約 11 年ごとに活発な時期と静かな時期を繰り返します。この周期を太陽周期と呼んでいます。また、1775 年 3 月頃から始まる周期を第 1 太陽周期として、その後の周期に番号をつけています。図 1 右上の黒点数とマイクロ波強度グラフでも、約 11 年ごとに黒点数とマイクロ波の強度が増減していることがわかると思われます。本研究では、まずマイクロ波の強度から太陽が最も静かな時期を決めることから始めました。前述の通り、黒点だけでは太陽が本当に最も静かな時はわからないからです。実際には、1 ヶ月間のマイクロ波強度変動の標準偏差を指標として、太陽が最も静かな月を決めていきました。その結果、黒点数が最も少ない時期との差が、大きい時には 1 年をこえるような周期もあることがわかりました。黒点は無くても太陽フレアが起きることもあるので、この結果は特に驚くべきことではありません。

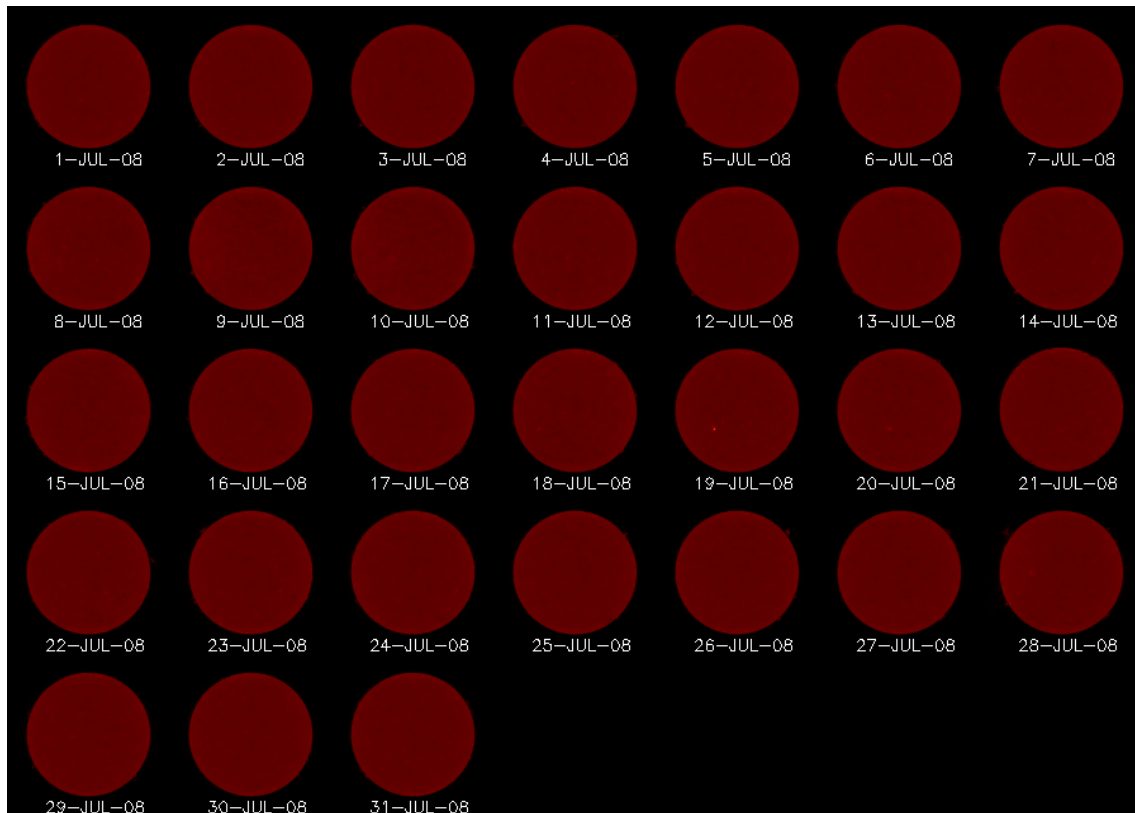


図2：マイクロ波観測で決めた第24太陽周期の極小期（2008年7月）の1ヶ月を野辺山電波ヘリオグラフ(17 GHz)で観測した図。19日と20日以外のっぺらぼうな太陽であることがよくわかる。

60年の観測期間中に、太陽が静かになる時期（極小期）は5回ありました。

マイクロ波で各太陽周期の中で最も静かになる月を決め、その月の平均マイクロ波強度を観測周波数毎ごとに計算しました。その計算結果をグラフにしたものが図1の右下です<sup>12</sup>。驚くべきことに、5回の極小期のスペクトル（色の違いが周期の番号を示している）がほとんど同一線上に並んでいるではありません

<sup>12</sup> 周波数（波長）による電磁波強度の変動をスペクトルと呼んでいます。

か。ちょっと線を太くすると他の線が見えなくなるぐらい同じです。実際に観測装置の精度とほぼ同じぐらいの差しかありませんでした。一方、太陽周期ごとにもっとも活発な時期の活動度は大きく異なります。活動度が高い時のマイクロ波スペクトルのグラフはこのページに示していませんが、太陽周期ごとにバラバラでした。

#### [観測成果の意義]

今回利用したデータのマイクロ波は、彩層からコロナにかけての領域から放射されます。この層がいつもより温度が高かったり、密度が大きくなった場合、マイクロ波の強度が大きくなります。彩層 (~1 万度)・コロナ (~100 万度) は、太陽表面 (6 千度) より温度が高い層です。なぜ上空の大気なのに温度が高いのか、未だに説かれていない太陽物理学の謎の一つです。しかし、磁場を用いて温度をあげていることはわかっており、マイクロ波の強度と磁場の強度には関係があります。今回スペクトルを示したのは、太陽周期でもっとも静かな時期のものであり、黒点など強く大規模な磁場が太陽表面にない時期のものであります。よって静かな時期の彩層やコロナを温めているのは、黒点の磁場を太陽内部で生成す



るメカニズム（グローバルダイナモ）で作られた磁場ではなく、もっと局所的な磁場生成メカニズム（ローカルダイナモ）で作られた磁場だと考えられています。今回の観測結果から、静かな時期の彩層・コロナ領域の平均的な様子は、太陽周期が異なっても全く変わらないことがわかりました。変わらないということは、太陽周期ごとに黒点の数がどんなに異なっても、静かになれば太陽磁場の状態が前の太陽周期の静かな時期と同じになることを意味し、さらに黒点を作るグローバルダイナモがローカルダイナモにあまり影響を及ぼさない事を示唆します。このような示唆は、現状では見ることができない太陽内部での磁場の生成・増幅を考える上で、重要な鍵になるでしょう。

黒点観測以外の太陽観測で継続的に長期に渡るものは珍しく、その周期性やその変動を見い出したことは非常に意義深いものです。また、人工衛星による観測も多くなっていますが、このような厳密な較正を行なった長期の地上の太陽電波観測はこれからも継続して行う必要性が求められています。今後も太陽マイクロ波モニター観測を継続し、世紀単位で太陽の長期変動がわかれば、新たな知見が得られると期待しています。

[論文・研究チーム]

この観測成果は、以下の内容で米国の天文学専門誌「アストロフィジカル・ジャーナル」2017年10月10日号に掲載されました。論文の題目、および著者と所属は以下の通りです。

論文名：

"Variation of Solar Microwave Spectrum in the Last Half Century", 2017,  
Astrophysical Journal, vol. 848, id. 62

研究メンバー：

下条圭美（国立天文台チリ観測所 助教）

岩井一正（名古屋大学宇宙地球環境研究所 准教授）

浅井 歩（京都大学理学研究科附属天文台 准教授）

野澤 恵（茨城大学理学部 准教授）

南谷哲宏（国立天文台野辺山宇宙電波観測所 助教）

齋藤正雄（国立天文台 TMT 推進室 教授）