

太陽黒点周期長とスウェーデン・ルンド市における 気温との相関関係について

A Relationship Between Sunspot Cycle Length and Temperature in Lund, Sweden

松本 実*, Ronny Berndtsson**, 河村 明***, 神野 健二****, 許 士国*****

By Minoru MATSUMOTO, Ronny BERNDTSSON, Akira KAWAMURA, Kenji JINNO and Shiguo XU

Recent research on climate and solar activity has suggested a close relationship between Northern Hemisphere land air temperature and sunspot cycle length. To find similar evidence for local data, we investigate 241-year monthly series of sunspots and temperature from south of Sweden. Three different sunspot cycle length and four different temperature data (same source) are used for the analysis. We find that different smoothing techniques yield different results. Results of the analysis display a certain relationship. We view that possibilities exist to better reconstruct temperature systems by regarding the solar cycle length.

Keywords: sunspot, solar cycle length, temperature, smoothing, correlation

1. はじめに

19世紀以降の地球温暖化は、温室効果ガスの増加等といった、いわば人為的な影響によるものである¹⁾というのが一般的な通説である。しかし一方で太陽活動と地球規模での気候変動との関係は近年の大きな関心事であり、とりわけ太陽黒点数を活動の指標として取り扱った研究は数多く見られ、中には太陽黒点時系列のカオス的特徴を明らかにしたものもある^{2),3)}。著者らはこれまでに、この太陽黒点時系列を非線形力学系からの出力として捉え、その時系列を生成するシステム方程式を再構築し、拡張カルマンフィルターによりパラメータを逐次修正することにより太陽黒点時系列の予測を試み、精度良い結果を得ている⁴⁾。

さて太陽活動の指標としては、黒点数の代わりにその周期長を用いたほうが解析に大きな影響を与えることが示唆されており⁵⁾、Friis-Christensenら^{6),7)}によって北半球の平均気温と太陽黒点周期長との強い相関が示された。さらにその仮説はアイルランドの一観測所で得られた気温データにより、同じ周期長を用いて検証されており⁸⁾、その報告では過去149年来北半球の気温については太陽活動が大きな影響を及ぼしていると結論づけられている。

太陽黒点周期長と気温との相関性が認められれば、周期長を気温の予測モデルの外力として取

*	学生員	九州大学大学院 工学研究科修士課程学生	(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)
**	理博	ルンド大学助教授 工学部水資源工学科	(Box 118, S-22100 Lund, Sweden)
***	正会員 工博	九州大学助教授 工学部建設都市工学科	(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)
****	正会員 工博	九州大学教授 工学部建設都市工学科	(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)
*****	正会員 工博	八千代エンジニアリング(株) 九州支店	(〒810 福岡市中央区天神1-6-8)

り入れることにより、予測精度の向上に役立つものと考えられる。そこで本論文では上記仮説を確認する意味で、スウェーデン・ルンド市において241年間にわたり観測された月平均気温データを用い、太陽黒点周期長との相関関係について検討をおこなった。なお解析にあたり太陽黒点周期長については、生データから得られた周期長および、これまでに気温との高い相関の得られているFriis-Christensenらの周期長⁹⁾に加え、非線形スムージング法¹⁰⁾から得られた周期長の3つを取り上げた。また気温については月平均生データ、11年移動平均データをそれぞれ線形トレンドを残した場合と、除いた場合にわけて検討をおこなっている。

2. 対象データとその取り扱い

2. 1 太陽黒点時系列に対するスムージングと周期長の取り出し

図-1に月平均太陽黒点の生およびスムージングされた時系列を示す。データについては1957年まではChernoskyら¹¹⁾に、以降はJournal of Geophysical Research に逐次報告されたものである。なお1848年以前の観測データに関しては観測基準が異なるため、それ以降に比べ信頼性が劣るといわれている。一般的にいかなる観測時系列も雑音を含んでおり、解析にあたってはその雑音を取り除かれていることが望ましい。太陽黒点時系列のスムージングに関しては今のところ普遍的な方法は見当たらず、これまでも様々な方法が採られている^{2),9)}。Friis-Christensenらは、まず月平均データから12ヶ月の移動平均操作をおこない、さらに3ヶ月の移動平均をおこなった時系列を対象に、その時系列から取り出した太陽黒点周期長時系列に係数1,2,2,2,1で加重移動平均をおこない、最終的な周期長を求めている⁹⁾。ここで周期長とは時系列中の相前後する2つの極大・極小値間の距離(年)である。

本論文では新たに周期長を求めるために、Schreiberにより最近紹介された非線形スムージング法¹⁰⁾を太陽黒点時系列に適用した。この非線形スムージング法は非線形力学の分野で、特に次元推定の理論から発展させたものであり、単純なアルゴリズムであるにもかかわらずカオス時系列のノイズ低減にきわめて有効なものである^{4),10)}。本アルゴリズムを5回繰り返して得られたのが図-1に示すスムージング後の太陽黒点時系列である。

ここでFFTによる生データおよび非線形スムージング後の太陽黒点時系列のスペクトル解析の結果を図-2に示す。本スムージング法により時系列の高周波数成分は低減されているのがわかる。また本スムージングは低周波数成分にはほとんど影響を与えておらず、時系列の大まかな特性は保たれている。パワースペクトルは鋭いピークを保ちながら連続的に分布しており、これはカオス

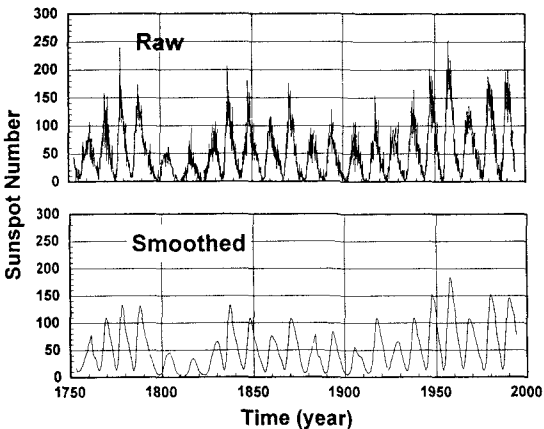


図-1 太陽黒点時系列

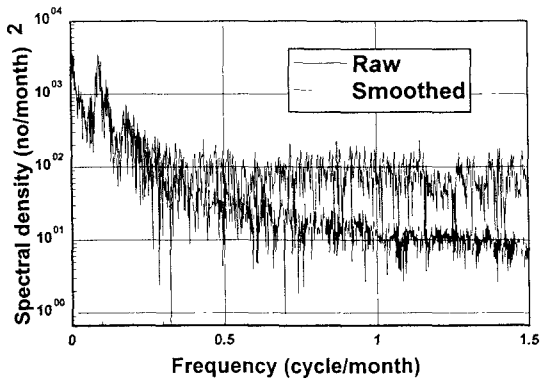


図-2 太陽黒点時系列のパワースペクトル

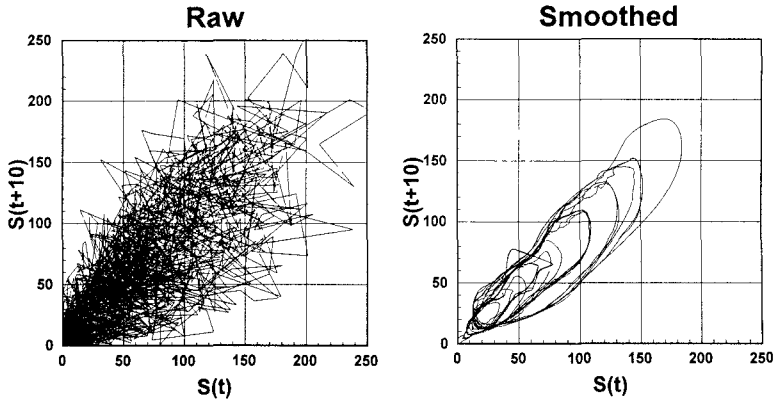


図-3 太陽黒点時系列のアトラクター

ス時系列の特徴であるといえる¹²⁾。

図-3には生データおよび非線形スムージング後の時系列について、遅れ時間を10ヶ月としたストレンジアトラクターを示している。生データではアトラクターはノイズの中に隠れているが、スムージング後の時系列からははっきりとそれが確認できる。なお太陽黒点時系列のアトラクターについては参考文献4)に考察を加えている。

次に図-4に3つの太陽黒点周期長を示す。周期長とは時系列中の相前後する2つの極大・極小値間の距離(年)であり、その極値間の中心に周期長をプロットしている。Friis-Christensenらの周期長に比べ、生データおよび非線形スムージングからの周期長は全期間において大きな振幅を持っており、特に1850年以前はほぼ同様な値を取りながら大きな変動をしている。全体的な傾向として周期長は1800年頃まで増加し、その後減少傾向にある。またFriis-Christensenらの周期長からは"Gleisberg period"¹³⁾と呼ばれる約80年のゆったりとした周期が確認できる。

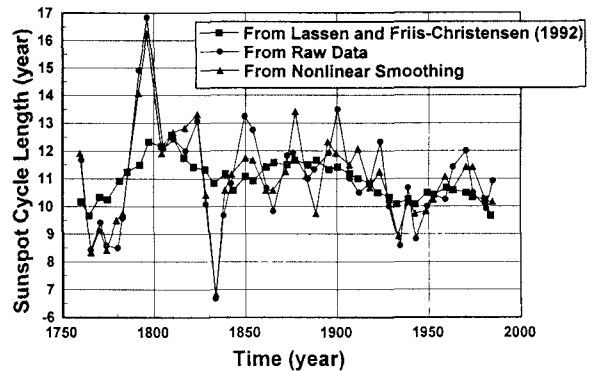


図-4 太陽黒点周期長

2. 2 気温時系列

本報で取り扱う月平均気温データは1741年以来スウェーデン国南部のルンド市で観測されているものであり、長期にわたりよく整備されている点で国内では得ることができない貴重なものである。データの内1860年までは参考文献14)から、1861年以降はスウェーデン気象水文研究所の報告から得た。観測開始当初においてはいくつか欠損が見られるため、解析には

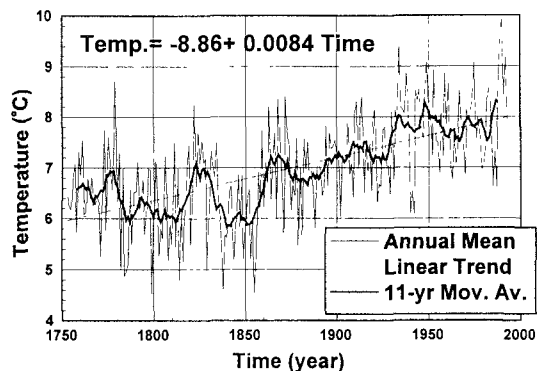


図-5 年平均気温および線形トレンドと11年移動平均

1753年から1993年までの241年間の時系列を対象とする。観測施設についてはこの間1867年、1940年、1971年の3度にわたって移動があり、施設の水平方向の移動は最大2km程度、垂直方向には最大数m程度である。1950年頃の両設置場所での6年間の同時観測によると両地点間の値の差は平均0.16℃程度であると報告されている。このような長期にわたる観測では施設移動に伴う物理的な諸観測条件の変化は避けられないもので、この観測場所の移動による観測量の差は、主に時系列の平均値の変化として表れ、他の統計諸量への影響は少ないものと考えられる。これよりも恐らく重要であると考えられるのは、観測施設周辺の環境の変化による系統誤差であろう。その中には都市化の影響が含まれ、河村ら^{15),16)}はこれまでに同市の238年間の気温・降水時系列について変動解析をおこない、その影響を示唆している。

図-5に生データから得られた年平均気温、11年移動平均および線形トレンドを示す。なお11年移動平均は太陽黒点周期が約11年であることから、それよりも短い周期の影響を軽減するために採用した。図-5より年平均気温は明らかに上昇傾向にあり、増加量は100年間で約0.84℃である^{15),16)}。この上昇傾向の原因の一つとして、前述のように18世紀以降のルンド市における急速な都市化の影響が考えられる。事実、同市の人口はコンスタントに増加し、近年はめざましい工業化を遂げている。気温上昇の原因を特定することは非常に困難であるが、本論文では試みとして線形トレンドを除いた時系列も併せて解析に用いる。

3. 太陽黒点周期と気温との相関関係

表-1に太陽黒点周期長とその周期間における平均気温との相関解析の結果を示している。周期長は生データ、Friis-Christensenら⁹⁾、非線形スモーキングの3種について、気温は生データ、11年移動平均、生データから線形トレンドを除いたもの、線形トレンドを除いた11年移動平均の4種についてそれぞれの相互相関係数を計算したものである。太陽黒点周期長が異なるため相関係数は多少ばらついているが、どの場合も負の相関を持っており、中でもFriis-Christensenらの周期長と各気温データとの場合が比較的高くなっていることがわかる。これはすなわち太陽黒点周期長が長くなると、気温が低くなるという傾向にあることを示している。ここで図-6に太陽黒点周期長と、その周期間の平均気温の時系列を示す。3つの周期長はすでに図-4に示したが、図-6の太陽黒点周期長については軸を上向きに減少するようにとっている。どの図からも、両時系列が1800年付近まで下降し、その後増加に転ずるという傾向がかなり明確にわかる。

次にこの3つの中で最も高い相関(-0.436)が得られた図-6中a)の生データからの周期長に対して平

表-1 太陽黒点周期長と気温との相関
(上段：相関係数，下段：相関係数が0であるという仮説を検定した場合の確率)

Temperature Data	Sunspot Cycle Length		
	Raw Data	Lassen and Friis-Christensen	Nonlinear Smoothing
Raw Monthly	-0.320	-0.564	-0.287
	0.0386	0.0001	0.0655
11-yr Moving Average	-0.269	-0.577	-0.238
	0.0878	0.0001	0.1345
Linear Trend Removed Monthly	-0.436	-0.418	-0.354
	0.0039	0.0059	0.0215
Linear Trend Removed 11-yr Moving Average	-0.388	-0.415	-0.325
	0.0121	0.0070	0.0382

均気温をプロットしたものを図-7に示す。図中では前述のように黒点の観測信頼性の問題から、1848年以前とそれ以後を区別してプロットしており、さらに両期間および全期間にわたり得られた一次回帰直線を併記している。1848年以前のデータから求めた相関は-0.395であるのに対し、それ以降のデータからの相関は-0.544であり顕著な違いがある。

さてここで図-7で全期間を対象として得られた回帰直線より、太陽黒点周期長が気温に影響を及ぼす平均的度合いを時系列的に算出した結果を図-8b)に示す。図-8a)には実際の周期長からの影響を視覚的に捉えるため、年平均気温時系列とその線形トレンドを示している。両時系列は図-6と同様に非常に似通った変動傾向を示している。特に1800年付近の気温が大きく低下している時期に、太陽黒点周期長の影響量が負の最大値である約-0.5℃を示している。

むすび

本論文ではスウェーデン・ルンド市において241年間にわたり観測された月気温時系列と太陽黒点時系列との相関関係について検討をおこなった。その結果、黒点時系列のスミージング法の違いによってそれぞれ異なった周期長が得られたことにより、相関係数にはばらつきがみられたが、気温との負の相関関係が認められ、太陽黒点周期長の気温に対する影響を確認することができた。すなわち1800年頃は太陽黒点の影響で、およそ0.5℃の温度低下が生じることが示唆された。

本研究は今後、気温時系列に対して太陽黒点周期長の影響を考慮した再構築モデルを作成する際の基礎となると考えられる。

最後に本研究の一部はスウェーデン政府による援助を受けたものであることを記し、深謝申し上げます。

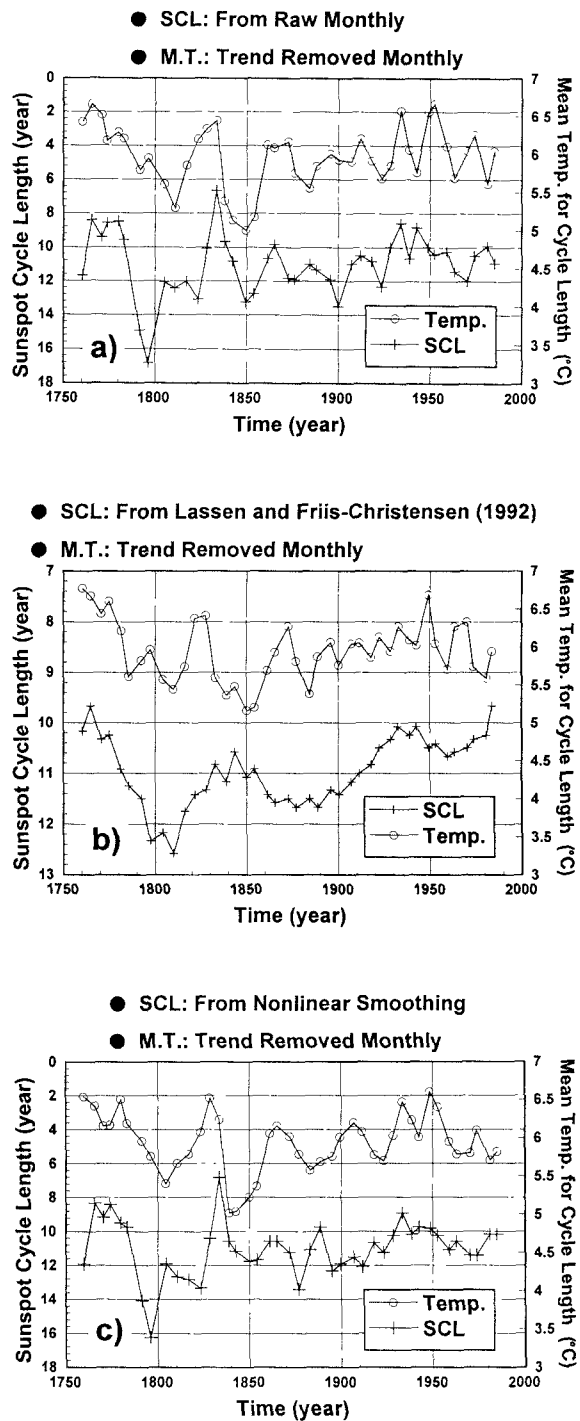


図-6 太陽黒点周期長とその周期間の平均気温の時系列 (線形トレンドを除いた月気温データ)

参考文献

- 1)例えば Kelly, P. M. and Wigley, T. M. L., Solar cycle length, greenhouse forcing and global climate, Nature, 360, 328-330, 1992.
- 2) Mundt, M. D., Maguire II, W. B., and Chase, R. R. P., Chaos in the sunspot cycle: Analysis and prediction, J. Geophys. Res., 96, 1705-1716, 1991.
- 3) Berndtsson, R., Jinno, K., Kawamura, A., Olsson, J., and Xu, S., Dynamical systems theory applied to long-term temperature and precipitation time series, in Trends in Hydrology, edited by J. Menon, pp. 291-297, counc. Sci. Res. Intrgr., Trivandrum, India, 1994.
- 4) Jinno, K., Xu, S., Berndtsson, R. Kawamura, A., Matsumoto, M., Prediction of sunspots using reconstructed chaotic system equations, J. Geophys. Res., 100, 14773-14781, 1995.
- 5) Kelly, P. M. and Wigley, T. M. L., The influence of solar forcing trends on global mean temperature since 1861, Nature, 347, 460-462, 1990.
- 6) Friis-Christensen, E. and Lassen K., Length of the solar cycle: An indicator of solar activity closely associated with climate, Science, 254, 698-700, 1991.
- 7) Friis-Christensen, E. and Lassen K., Global temperature variations and a possible association with solar activity variations, Danish Met. Inst. Scientific Report, 92-3, 1992.
- 8) Butler, C. J., Armagh observatory, 1844-1992, and the length of the sunspot cycle, Solar Phys., 152, 35-42, 1994.
- 9) Lassen, K. and Friis-Christensen, E., Solar activity parameters used in geophysical studies at DMI, Danish Met. Inst. Technical Report, 92-8, 1992.
- 10) Schreiber, T., An extremely simple nonlinear noise reduction method, Phys. Rev. E. Stat. Physics, 47, 2401-2404, 1993.
- 11) Chernosky, E. J., and Hagan, M. P., The Zurich sunspot number and its variations for 1700-1957, J. Geophys. Res., 63, 755-788, 1958.
- 12) 河村 明, 松本 実, 神野健二, 許 士国, カオス時系列のダイナミクスの推定と予測(第一報), 九州大学工学集報, 第67巻, 第5号, 513-521, 1994.
- 13) Gleissberg, W., A table of secular variations of the solar cycle, Terr. Magn. Atm. Electr., 49, 243-244, 1944.
- 14) Tidblom, A. V., Einige Resultate aus den Meteorologischen Beobachtungen, angestellt auf der Sternwarte zu Lund in den Jahren 1741-1870, Lunds Universitets Årsskrift, tom, XII, Afd. Mathem. Naturvetenskap, 1-78, Lund, 1876.
- 15) 河村 明, 神野健二, Ronny Berndtsson, スウェーデン・ルンド市における238年間の気温および降水時系列の長期的変動解析, 第4回水資源シンポジウム前刷集, 769-774, 1992.
- 16) Kawamura, A., Jinno, K. and Berndtsson, R., Analysis of a 238-year long monthly precipitation time sequence by use of filtering techniques, in Extreme Hydrological Events (proc. Yokohama Symp. 1993), IAHS Publ. 213, 103-111, 1993.

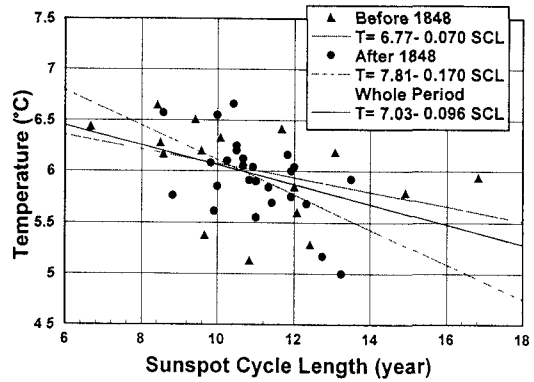


図-7 太陽黒点周期長と平均気温のプロット

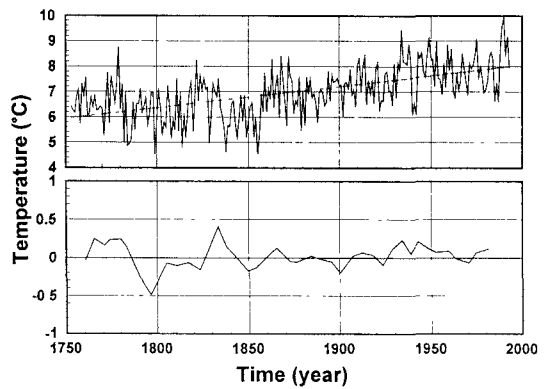


図-8 太陽黒点周期長の気温に対する影響