

43. 太陽活動，地球規模の大気中 CO₂ 濃度および 気温の因果関係に関する研究

CAUSE-AND-EFFECT RELATIONSHIP AMONG SOLAR ACTIVITY, ATMOSPHERIC CARBON DIOXIDE AND GLOBAL AIR TEMPERATURE

長谷部 正彦*・鈴木 善晴*・富永 綾乃†

Masahiko HASEBE, Yoshiharu SUZUKI, Ayano TOMINAGA

ABSTRACT; The present study conducted investigations using modern methods of time series analysis to clarify whether the increase of the atmospheric carbon dioxide is related to the observable change of the climate in recent years. The cause-and-effect relationship among the solar activity, atmospheric carbon dioxide in the global scale and global air temperature was investigated through correlation analysis and spectral analysis using time series datasets of them. It was confirmed that the average global air temperature is increasing, and that the air temperature and atmospheric carbon dioxide are significantly correlated with each other. The results of the spectral analysis showed that the variations of the air temperature and atmospheric carbon dioxide have an obvious one-year cycle (seasonal cycle), and that the spectral intensity of the one-year cycle in the air temperature is greater in the polar regions than in low latitudes, while that in the atmospheric carbon dioxide tends to be lower in southward regions.

KEYWORDS; atmospheric carbon dioxide, solar activity, global air temperature, correlation analysis, spectral analysis, seasonal cycle

1. はじめに

近年，観測されている“地球温暖化”の一義的な原因として，人間活動による CO₂ 排出の影響が報告されている¹⁾。これは，産業革命以降，石炭・石油の燃焼に伴って大気中 CO₂ 濃度が上昇し，CO₂ による温室効果が強まったことによって，気温上昇が起きている，という説である。そして，IPCC の第 3 次報告書（2001）によれば，このような現象によって，21 世紀中に地球の平均気温は，1.4～5.8℃上昇することが予測されており，その急速な気候変動が，地球に生息する生物に多大な被害を与えることが懸念されている¹⁾。また，ヨーロッパが共同で進めている EPICA（European Project for Ice Coring in Antarctica）の南極でのアイスコア分析によって，現在 380ppm に達した大気中 CO₂ 濃度は，約 65 万年前に遡っても過去最高であることが確認されている²⁾。そして，この大気中 CO₂ 濃度の傾向変動は，化石燃料消費による CO₂ 排出量の 55.9 %（industrial trend）とほぼ一致することが報告されており³⁾，CO₂ 濃度の増加原因は化石燃料消費に帰すると考えられる。

しかしながら，一方では，Keeling *et al.*⁴⁾によって，Mauna Loa の大気中 CO₂ 濃度から傾向変動と季節変動を除いた内的変化（internal variations）は，全球平均偏差気温に追随することが指摘されている（図-1 参照）。そして彼らは，この理由として，エルニーニョ現象や火山噴火によって気候が変動し，大気-陸上生物圏間の CO₂ 交換に不均衡が生じることを挙げている。また，清水ら⁵⁾の共分散構造分析によって，大気中 CO₂ 濃度の長期的な変動には，人為的 CO₂ 排出量の他に，太陽活動や気温が影響することが示唆された。

したがって，現在では「CO₂ 濃度の増加による気温上昇」が世界的に一致した見解となっているものの，気温上昇の支配的な原因が CO₂ 濃度の増加のみにあるとは言い切れず，そのメカニズムは未だ十分に解明されていないのが現状である。そこで，本研究では，気温，大気中 CO₂ 濃度，太陽活動の時系列変動に着目し，それらの相関関係について解析を行うとともに，特に気温と大気中 CO₂ 濃度の変動を長期的変動成分および短期的変動成分に分解して扱うことによって両者の因果関係に関する検討を行った。

* 宇都宮大学工学部建設学科 Department of Architecture and Civil Engineering, Utsunomiya University

† 住友林業ホームテック(株) Sumitomo Forestry Hometech Co., Ltd.

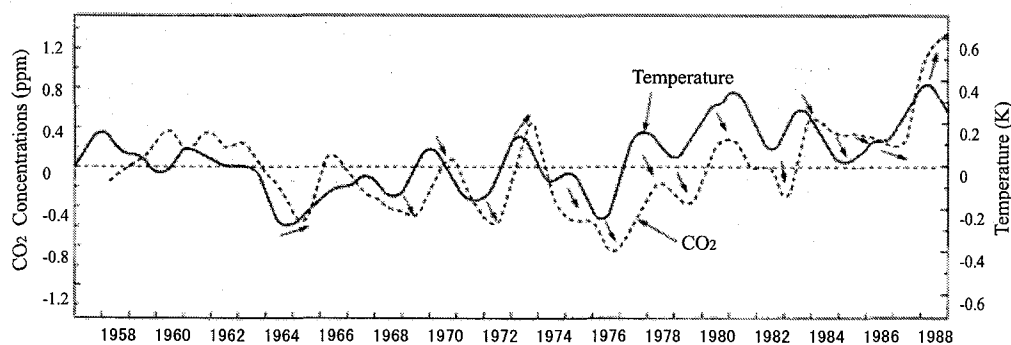


図-1 気温変動と大気中 CO₂ 濃度の内的変化⁴⁾

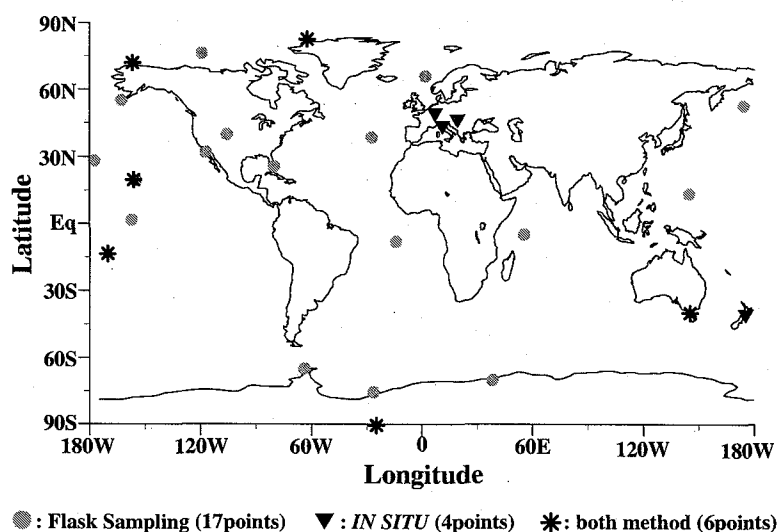


図-2 解析地点 (全 27 地点)

2. 解析データ

2.1 気温

本研究では、地球全域及び世界各地の気温変動を把握するために、Climatic Research Unit が公表している全球、北・南半球の平均偏差時系列データと、 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 格子の月平均時系列データを用いた。なお、全球、北・南半球の平均偏差時系列データは、1961 年から 1990 年の月毎の平均値を基準としており、緯度による地表面積の違いを考慮したものである。

2.2 大気中 CO₂ 濃度

地球温暖化の原因として、最も有力視されているのは CO₂ である。本研究では、WDCGG (World Data Center for Greenhouse Gases) 及び CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis) によって収集されたデータの中で、200ヶ月以上の観測期間を有する全 27 地点の大気中 CO₂ 濃度の月平均実測データを用いた。観測地点を図-2 に示す。これらには、現場で継続的に測定されたデータ (INSITU)、現場でサンプリング後、室内で測定されたデータ (Flask Sampling) が混在しているが、両手法で測定された 6 地点で検討した結果、双方に大きな相違がなかったため、同様のものとして扱った。

2.3 太陽活動

地球温暖化の原因として、CO₂ に次いで注目されているのが、太陽活動である。その代表的な背景としては、地球の気候は人類の活動が盛んになる以前から大きく変動していたことが確認されており、マウンダー極小期と呼ばれる 1645 から 1715 年まで続いた太陽黒点の異常な低減期が、西ヨーロッパ一帯を襲った長期的な極寒時代「小氷期」と同じ時期にあたること挙げられる。同様に、シュペラー極小期 (1420～1530 年)、ウォルフ極小期

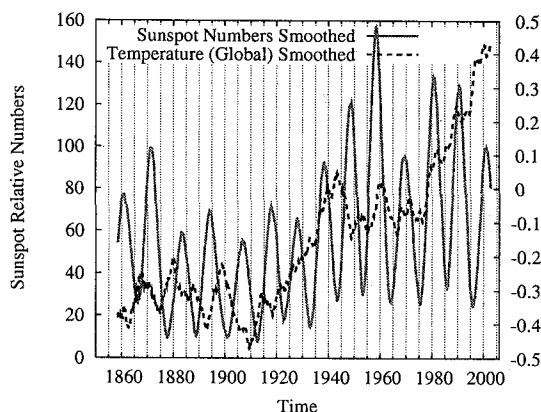


図-3 平均気温と太陽黒点相対数の比較結果

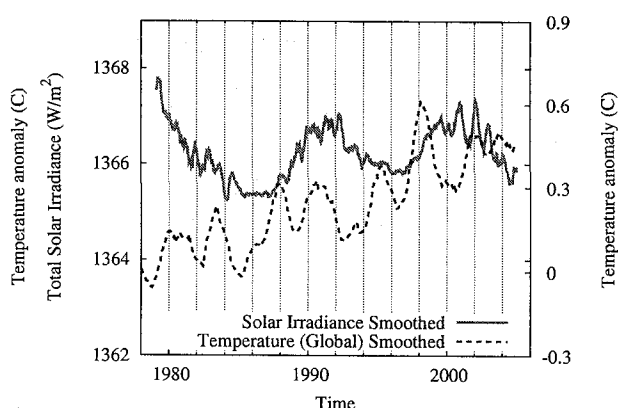


図-4 平均気温と太陽放射強度の比較結果

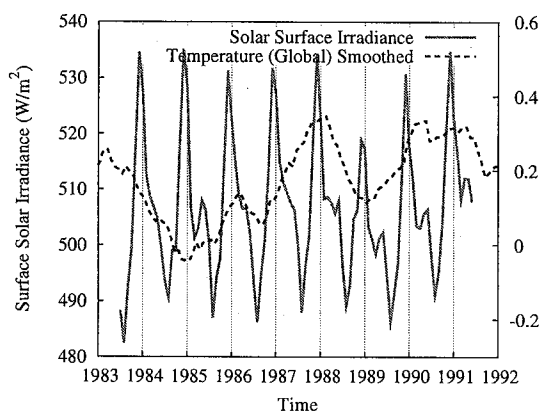


図-5 平均気温と地表面日射量の比較結果

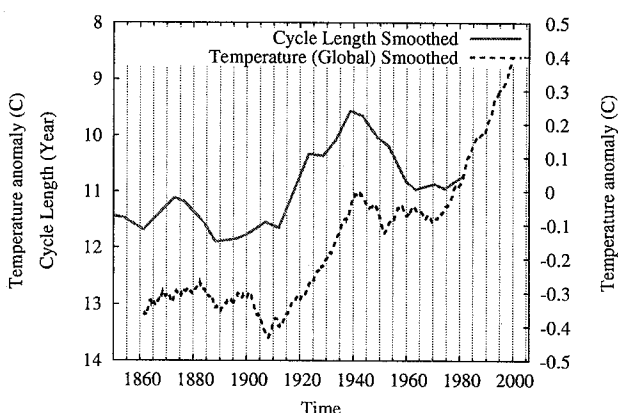


図-6 平均気温と太陽活動の周期長の比較結果

(1280~1340 年)，オーアト極小期 (1010~1050 年) についても，太陽黒点が減少していたと考えられている。

近年では，Svensmark *et al.* によって⁶⁾，太陽から吹き出される高温の太陽風の変動が，地球大気内に突入する銀河系宇宙線に影響を与え，これによって，雲被覆率が変動し，気温変動を招くことが報告されている。また，太陽活動の変動を考慮した数値シミュレーションが実施されており，その結果，太陽活動の変動も地球の気温変動に寄与し得るが，現在の気温変動を説明付けることはできないとしている。

つまり，太陽活動と地球上の気候の因果関係については，様々な議論がなされているが，未だに解明されていないことが多く存在している。そこで，本研究では，太陽活動を表す指標として，太陽黒点相対数，太陽放射強度，紫外線放射量，地表面日射量，太陽活動の周期長を用いることによって，太陽活動と気温の因果関係を検証する。

太陽黒点相対数 太陽黒点数は，他の指標と比べて観測期間が長く，太陽活動指標として最も一般的なデータである。本論文では，NGDC (National Geophysical Data Center) が公表している太陽黒点相対数の月平均データ (1858-2002) を用いた。

太陽放射強度 大気圏外において地球が太陽から受ける，全波長領域の放射エネルギーとして，NGDC の太陽放射強度を用いた。これは，人工衛星の観測値から作成された合成データ (1979-2005) である。

紫外線放射量 全波長領域の放射エネルギーを示す太陽放射強度の変化量は 1 % 以下であるが，紫外線領域のエネルギーは 50 % 程度変化するため，極紫外線放射量を用いた。これは，Space Environment Technologies によるモデルデータ (1947-2001) である。

地表面日射量 地表面および大気中の気体分子や雲，エアロゾルを介して，地表面に到達する太陽放射エネルギーとして，SeaWiFS が公開している $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 格子の月平均地表面日射量 (1983-1991) を用いた。なお，約 10 年の周期を持つ太陽活動の指標としては，データ期間が不十分である可能性が考えられる。

太陽活動の周期長 一般的に，太陽活動は 10 年の周期を持つと言われるが，実際の周期長には 9 年から 14 年程度の開きがある。そして，太陽活動の活発期に，その周期は短くなることが報告がされている⁷⁾。そこで，本研究

表-1 全球平均偏差気温と太陽活動指標の相関係数

平均偏差気温との比較対象	対象期間	相関係数
太陽黒点相対数	1858.5～2002.11	0.4109
太陽放射強度	1979.2～2005.1	0.3392
紫外線放射量	1947.7～2001.12	0.1412
地表面日射量	1983.7～1991.6	0.0941
太陽活動の周期長	1858.5～1981.1	0.7243

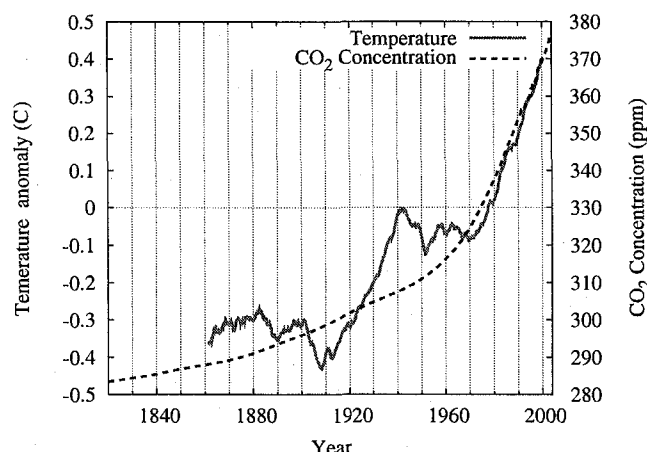


図-7 過去 140 年間ににおける気温変動と大気中 CO₂ 濃度変動

では、黒点相対数の極値から極値に至る期間を太陽活動の周期長（1858-1981）と定義する。なお、周期長に対する時間は、2つの極値を取る時間の中間点とした。

3. 気温と太陽活動指標の相互比較

本章では、気温変動の要因として太陽活動に着目し、これらの相互比較を行う。ここで、太陽活動は、局地的ではなく、地球全域に影響を与えると考えられるため、気温データとして、全球平均偏差気温を用いた。また、比較する際、それぞれのデータに対して移動平均を適用することにより、平滑化を行った。代表的な比較図を図-3～図-6に示す。また、各太陽活動指標と平均偏差気温との相関係数を求め、表-1に示した。なお、太陽活動の周期長については、気温と相反する変動傾向が見られたため、縦軸（周期長）を上下反転させて図示および相関係数の計算を行った。

これらの結果より、視覚的、定量的に、気温と太陽活動の周期長の相関が高いことが確認でき、太陽の活動周期が短くなると、地球の気温が上昇する傾向があることが分かった。同様のことは、Lassen *et al.*⁸⁾も報告しており、その理由として、太陽の活動周期が短い時、太陽活動が活発化しており、地球への放射量が増加することを挙げている。しかし、本研究では、気温と太陽放射強度の相関は確認できなかった。つまり、太陽活動の周期長のデータ期間が1858～1981年、太陽放射強度のデータ期間が1979～2005年であるため、1980年以前は、太陽活動の周期長と気温の相関が高く、両者の関連性が示唆できる。ただし、1980年以降に関しては、今後、周期長のデータを整えることにより、引続き解析が必要であると考えられる。

4. 気温と大気中 CO₂ 濃度の相互比較

4.1 過去 140 年における変動傾向

はじめに、過去 140 年の全球平均気温と大気中 CO₂ 濃度の変動を図-7に示す。なお、ここでは出来るだけ長い期間の大気中 CO₂ 濃度変動を把握するために、CDIAC で公開されている、Mauna Loa における観測値と南極

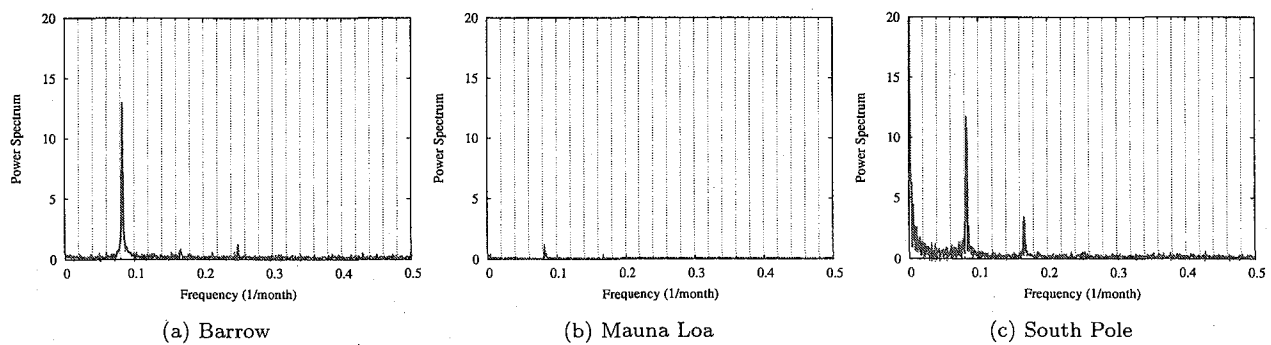


図-8 気温のスペクトル解析結果

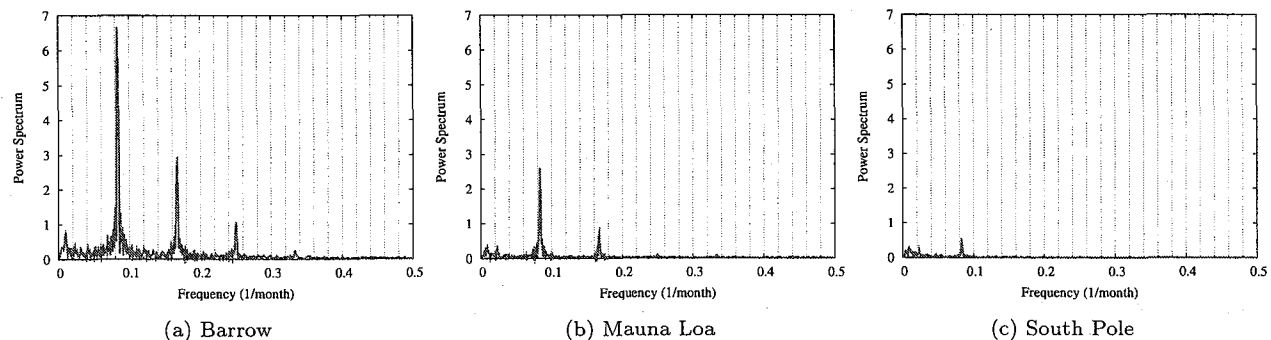


図-9 大気中 CO₂ 濃度のスペクトル解析結果

の Antarctica におけるアイスコア分析値の合成データ (1765.1~2003.6) を用いた。これを見ると、気温と大気中 CO₂ 濃度の相互関係を一概に捉えることはできないことがわかる。例えば、1970 年から現在に至る約 30 年間に於いて、両者は顕著な増加傾向を示しているが、大気中 CO₂ 濃度が急上昇する以前の 1910 年から 1940 年にも、現在と同程度の気温上昇があったことが確認できる。更に、大気中 CO₂ 濃度は 1700 年代後期から単調に増加していることが明らかにされているが、それとは対照的に、気温は 1940 年から 1970 年にかけて、一旦は下降傾向を示している。そこで、本研究では、長期的または短期的に捉えた場合によって、気温と大気中 CO₂ 濃度の因果関係は異なるのではないかと考え、両者の周期的な変動に着目してスペクトル解析を行った。

4.2 スペクトル解析

各解析地点における気温と大気中 CO₂ 濃度について、各々の周期的な変動特性を把握するためスペクトル解析を行った。結果の一例を図-8 および図-9 示す。同図は、代表地点 Barrow (71° 19' N 156° 36' W), Mauna Loa (19° 31' N 155° 35' W), South Pole (89° 58' S 24° 47' W) における、気温、大気中 CO₂ 濃度の周波数毎のスペクトル強度である。これにより、気温の周期変動は、1 年周期が卓越していることが定量的に明らかとなり、1 年周期の他に、6 ヶ月周期が存在する地点もあった。また、大気中 CO₂ 濃度の周期変動は、気温と同様に、1 年周期が卓越していることが確認でき、その他に、6 ヶ月周期、10 年程度の周期が存在する地点があった。よって、気温と大気中 CO₂ 濃度の変動には、共通する 1 年周期が存在することが分かったが、両者ともに、その 1 年周期に相当するスペクトル強度は、解析地点によって大きく異なっている。つまり、このことは、解析地点によって、1 年周期の振幅が大きく異なることを意味している。

そこで、気温と大気中 CO₂ 濃度の 1 年周期に相当するスペクトルの強度は、空間的にどのような変動傾向を示すのかについて検討を行った。図-10 の全球地図上に解析地点毎のスペクトル強度を示す。これにより、気温については、北・南半球の極地から赤道に近づくに連れて 1 年周期が弱化する傾向が確認できた。それに対して、大気中 CO₂ 濃度は北半球では南下するに連れて弱化する傾向が顕著に見られ、南半球では 1 年周期の空間的な違いは北半球ほど見られず、半球全域で一様であることが確認できた。よって、これらの 1 年周期変動の空間分布特性が異なることから、1 年周期変動つまり季節変動については気温と大気中 CO₂ 濃度の相互作用は少ないことが考えられる。

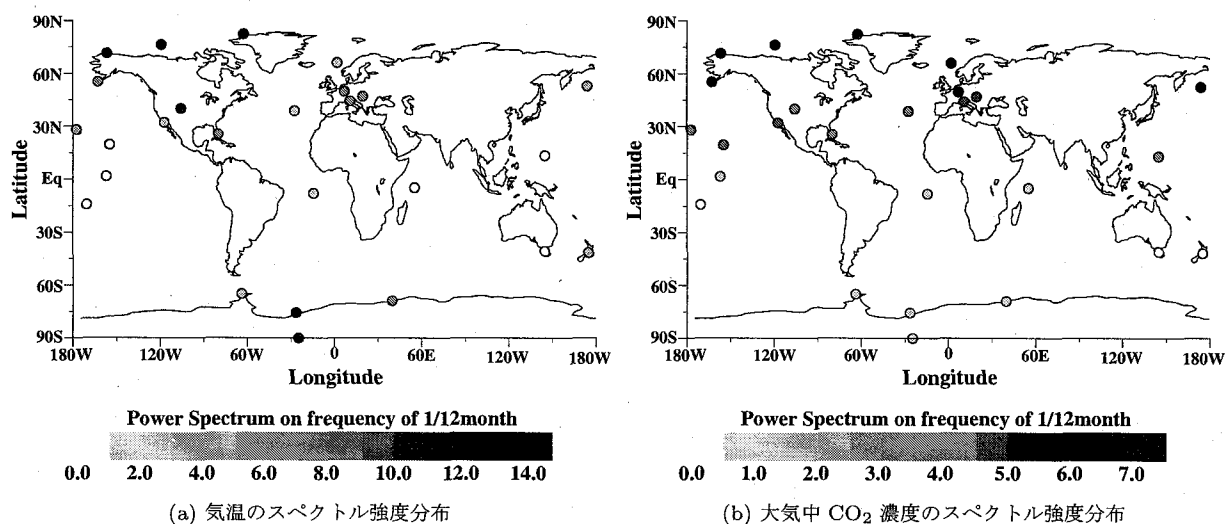


図-10 気温および大気中 CO₂ 濃度の 1 年周期に相当するスペクトル強度分布

5. まとめ

本研究では、気温変動の原因として、大気中 CO₂ 濃度と太陽活動に着目し、時系列解析の考えを基に相関分析およびスペクトル解析を行った。全球域における平均偏差気温と 5 つの太陽活動指標との比較を行ったところ、太陽活動の周期長と気温との相関が高いことが確認できた。ただし、太陽活動の周期長と気温との相関が確認が出来たのは、1980 年以前のデータであり、1980 年以降の太陽放射強度と気温の相関は低く、近年においては、太陽活動と気温に顕著な因果関係が得られなかった。

次に、各地点における気温と大気中 CO₂ 濃度のスペクトル解析を行った。その結果、気温と大気中 CO₂ 濃度の変動には明確な 1 年周期（季節変動）が存在することが定量的に明らかとなった。しかし、気温の 1 年周期は極地で強いものに対して、大気中 CO₂ 濃度の 1 年周期は南下するに連れて弱化する。つまり、両者の空間分布特性が異なることから、気温と大気中 CO₂ 濃度の 1 年周期（季節変動）の相互作用は少ないと考えられる。

参考文献

- 1) Climate Change 2001, The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC, 2002.
- 2) Hopkin, M. : Greenhouse-gas levels highest for 650,000 years, *Nature News*, doi:10.1038/news051121-14, 2005.
- 3) Keeling, C. D., T. P. Whorf, M. Wahlen, and J. van der Plichtt : Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980, *Nature*, Vol.375, pp.666-670, 1995.
- 4) Keeling, C.D., R.B. Bacastow, A.F. Carter, S.C. Piper, T.P. Whorf, M. Heimann, W.G. Mook, and H. Roeloffzen : A three-dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on observed winds: 1. Analysis of observational data, *Geophysical Monograph*, Vol.55, pp.165-236, 1989.
- 5) 富永綾乃・清水 保・長谷部正彦・鈴木善晴：共分散構造分析に基づいた大気中 CO₂ 濃度の時系列変動特性に関する研究，水工学論文集，第 50 巻，CD-ROM, No.77, 2006.
- 6) Svensmark, H., and E. Friis-Christensen : Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage - a missing link in solar-climate relationships, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol.59, No.11, pp.1225-1232, 1997.
- 7) Baliunas, S., and W. Soon : "Are variations in the length of the activity cycle related to changes in brightness in solar-type stars?", *The Astrophysical Journal*, Vol.450, pp.896-901, 1995.
- 8) Lassen, K., and E. Friis-Christensen : Variability of the solar cycle length during for the past five centuries and the apparent association with terrestrial climate, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, Vol.57, pp.835-845, 1995.