

地球規模の気温変動と大気中CO₂濃度変動 および太陽活動との相互関係に関する研究

INTERRELATIONSHIP OF GLOBAL AIR TEMPERATURE TO
ATMOSPHERIC CARBON DIOXIDE AND SOLAR ACTIVITY

長谷部 正彦¹・鈴木 善晴²・富永 綾乃³

Masahiko HASEBE, Yoshiharu SUZUKI and Ayano TOMINAGA

¹正会員 工博 宇都宮大学教授 工学部建設学科建設工学講座 (〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

²正会員 工修 宇都宮大学助手 工学部建設学科建設工学講座 (〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

³非会員 工修 住友林業ホームテック (〒 102-0073 東京都千代田区九段北 4-1-7)

The present study conducted investigations using modern methods of time series analysis to clarify how the increase of the atmospheric carbon dioxide is related to the rise in the air temperature. The interrelationship of the global air temperature to the solar activity also was investigated through correlation analysis using time series datasets of them. The results of 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. Through coherence analysis, it was found that there are different tendencies between short-term and long-term fluctuations in the interrelationship of the air temperature to the atmospheric carbon dioxide. The long-term fluctuations in the atmospheric carbon dioxide tend to be accompanied by those in the air temperature, and vice versa in the short-term fluctuations.

Key Words : *atmospheric carbon dioxide, solar activity, global air temperature, correlation analysis, spectral analysis, seasonal cycle*

1. はじめに

現在、世界中の注目を集めている地球温暖化の第一義的な原因として、人間活動による急速なCO₂排出量増加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、そのCO₂による温室効果が強まったことによって全球規模で気温上昇が起きているというもので、今世紀中に地球の平均気温は1.4~5.8 上昇すると予測されている。また、ヨーロッパが共同で進めているEPICA (European Project for Ice Coring in Antarctica) による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る²⁾とともに、過去約40年間におけるCO₂濃度の増加傾向は、化石燃料消費によるCO₂排出量の55.9%が大気中に残留すると仮定したときの濃度増加率とほぼ一致することが報告されており³⁾、近年の急速なCO₂濃度の増加は、人類による化石燃料消費に帰すことができると考えられている。

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濃度データから傾向変動成分と季節変動成分を除いた「内的変動成分」は、全球平均偏差気温の時系列変動に対して時間的な遅れを示

すことが指摘され、その原因として、エルニーニョ現象や火山噴火によって気候が変化し、大気と陸上生物圏との間のCO₂交換量に不均衡が生じた可能性が挙げられている。さらに、著者ら⁵⁾が行った共分散構造分析においても、大気中CO₂濃度の長期的な変動には、人為的CO₂排出量以外に、太陽活動や気温の長期的変動が少なからず影響していることが示唆された。

したがって、近年の気温上昇の支配的要因は大気中CO₂濃度の増加にあると考えられるものの、全球規模の気温変動およびCO₂濃度変動の詳細な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、気温と大気中CO₂濃度および太陽活動の3者がどのような相互関係にあるのかを明らかにするため、それらの観測値を用いた時系列解析を行った。特に、気温とCO₂濃度の変動を、長期と短期の変動に分けて捉えることで両者の因果関係の解明を試みた。

2. 気温変動と太陽活動の相互関係

はじめに、気温変動の要因として太陽活動に着目し、両者の相互比較を行う。本節では、地球全域およ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および北半球・南半球の平均

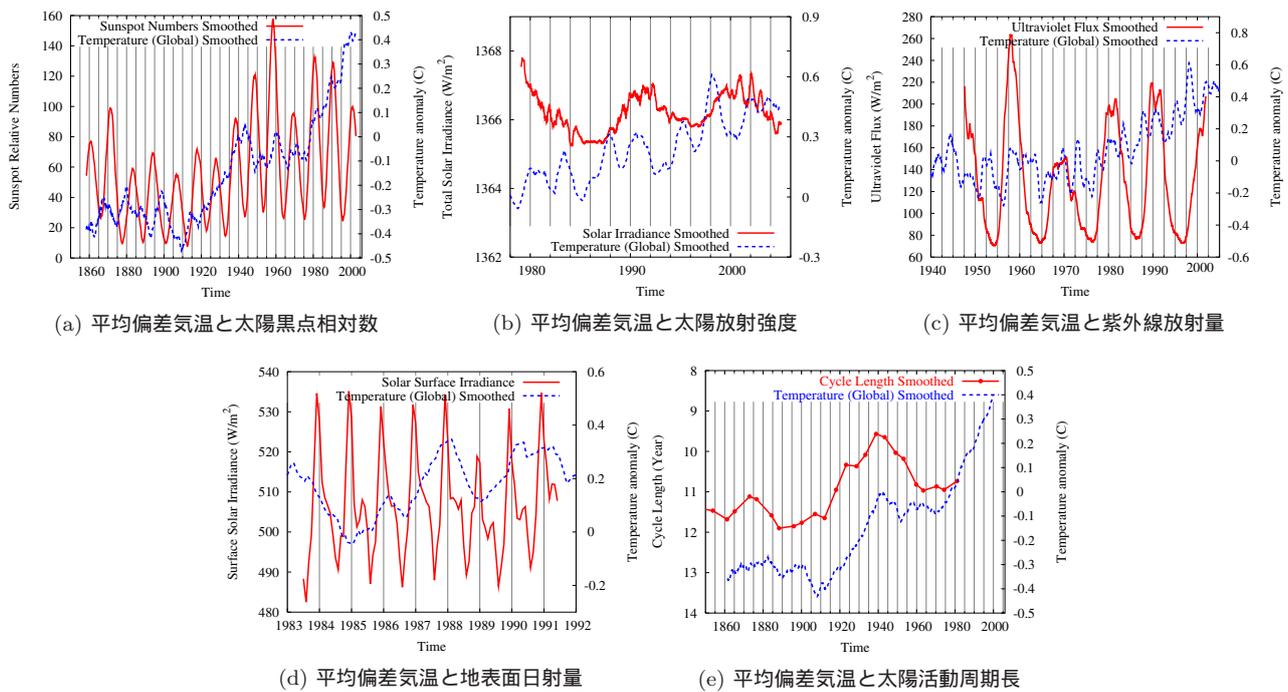


図-1 全球平均偏差気温と太陽活動指標の比較

偏差気温時系列データを用いた。これは、1961年から1990年の月ごとの平均気温を基準としており、緯度による地表面積の違いを考慮して算出されたものである。

(1) 太陽活動指標

気候変動の原因として古くから注目されているのが、太陽活動である。地球の気候は人類の経済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、例えば、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のが挙げられる。同様に、シュペラー極小期（1420～1530年）、ウォルフ極小期（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進入する宇宙線量に影響を与え、これによって雲の被覆率が変化し、結果的に気温の変動を招くことが報告されている。ただし、太陽活動を考慮した気候変動の数値シミュレーションの結果、太陽活動の変化は地球上の気温の変化に寄与し得るものの、現在の状況を完全に説明付けるものではないことが分かっている。

このように、太陽活動と地球上の気候変動との因果関係については、これまで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、太陽活動周期長の5つの指標に着目し、それらと気温との相関関係について検討した。使用したデータの詳細を以下に示す。

a) 太陽黒点相対数（1858-2002）

太陽黒点数は、他の指標と比べて観測期間が長く、太陽活動の活発度を表す指標として最も一般的なデータである。本研究では、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を用いた。

b) 太陽放射強度（1979-2005）

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による太陽放射強度データを用いた。これは人工衛星の観測値から作成された合成データである。

c) 紫外線放射量（1947-2001）

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、その変化を表すものとして紫外線放射量データを用いた。これはSpace Environment Technologiesによるモデルデータである。

d) 地表面日射量（1983-1991）

雲や大気中の気体分子、エアロゾルなどによる散乱の影響を受けた後に地表面に到達する太陽放射エネルギーとして、SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field of view Sensor) プロジェクトが公開している2.5°×2.5°格子の月平均地表面日射量データを用いた。ただし、データ期間が非常に短いため、約10年の周期を持つ太陽活動を表す指標としては決して十分なものではないことに注意を要する。

e) 太陽活動周期長（1858-1981）

一般に、太陽活動には10年の周期があると言われていたが、厳密には9年から14年程度の幅でその周期は変化しており、太陽活動の活発期に周期が短くなる傾向がある⁷⁾。そこで本研究では、太陽黒点相対数の時系

表-1 全球平均偏差気温と太陽活動指標との相関係数

太陽活動指標	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
太陽活動周期長	1858.5 ~ 1981.1	-0.7243

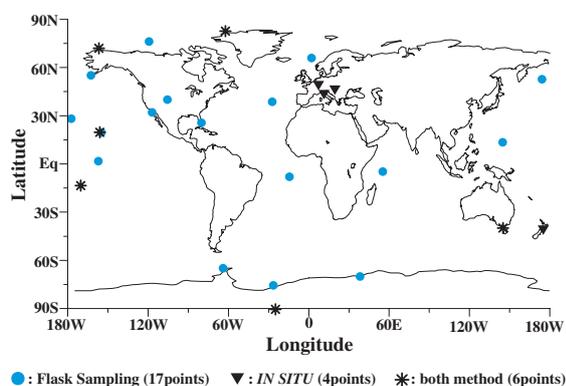


図-2 本研究で選定した観測地点 (全 27 地点)

列データを用いて、ある極大値から次の極大値およびある極小値から次の極小値までの期間の長さを太陽活動の周期長と定義してデータの算出を行った。ただし、グラフ上に図示する際には、2つの極値の中間点にデータをプロットした。

(2) 平均偏差気温と太陽活動指標の比較

太陽黒点相対数、太陽放射強度、地表面日射量、太陽活動周期長の各指標と全球平均偏差気温の時系列データを比較したものを図-1 に示す。ただし、移動平均を適用することにより、各データに対して平滑化処理を行った。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、太陽活動周期長については、気温と正反対の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した。また、同様にして相関係数の計算を行った。

これらの結果を見ると、太陽活動周期長以外の指標と平均気温との間には明確な相関を確認することができないものの、太陽活動周期長との間には相関係数 0.7 以上の高い相関があることが見て取れる。すなわち、太陽の活動周期が短くなる時期に地球の気温が上昇する傾向にあることが分かった。同様のことは、Lassen *et al.*⁸⁾ も指摘しており、その理由として、太陽の活動周期が短い時ほど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。

しかしながら、本研究の解析では、太陽活動周期長が気温に何らかの影響を与えている可能性は示唆されたものの、太陽放射強度と気温との相関は確認できていない。また、本研究で用いた太陽活動周期長と太陽放射強度のデータには、同一期間のものが非常に少ないため、両者の関係を明らかにすることはできなかった。したがって、太陽活動が地球上の気温変動にどの

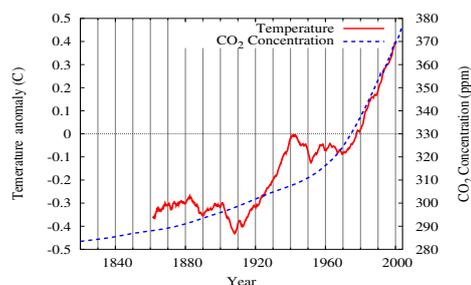


図-3 過去 140 年間における気温変動と大気中 CO₂ 濃度変動

ようなメカニズムでどの程度の影響を与えているのか、本研究の解析から結論を導くことはできないが、今後さらに観測データを蓄積することで、引き続きより詳細な解析を行うことが必要である。

3. 気温変動と CO₂ 濃度変動の相互関係

本節では、気温変動と大気中 CO₂ 濃度変動との相互関係を明らかにするため、時系列データを用いたスペクトル解析およびコヒーレンス解析を行う。用いたデータは、WDCGG (World Data Center for Greenhouse Gases) および CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis) によって収集された世界各地の月平均実測データで、特に 200ヶ月以上の観測期間を有する 27 地点を選定し、解析対象とした。観測地点を図-2 に示す。なお、解析の際には、富永ら⁵⁾と同様に、同データから傾向成分を取り除いた上で計算を行った。

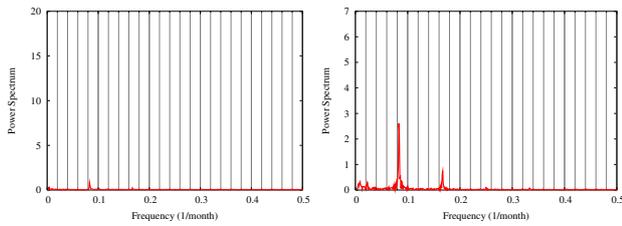
(1) 気温と CO₂ 濃度の変動傾向

はじめに、気温と大気中 CO₂ 濃度の定性的な変動傾向を見るため、過去 140 年間における全球平均偏差気温と CO₂ 濃度の時系列データを図-3 に示す。ただし、ここでは、出来るだけ長い期間の変動傾向を把握するため、CO₂ 濃度データは CDIAC で公開されている Mauna Loa における観測値と南極におけるアイスコア分析値の合成データを用いた。

同図を見ると、過去 140 年間の気温と CO₂ 濃度の変動傾向は必ずしも一致しているわけではないことが分かる。例えば、1970 年から現在に至る約 30 年間において、両者は顕著な増加傾向を示しているが、CO₂ 濃度が急上昇する以前の 1910 年 ~ 1940 年にも現在と同程度の気温上昇が確認される。さらに、CO₂ 濃度は 1700 年代後期から単調に増加しているのに対して、気温は 1940 年 ~ 1970 年において減少傾向を示している。このことは、気温変動と CO₂ 濃度変動の相互関係が、長期的な変動に着目した場合と短期的な変動に着目した場合で異なった傾向を示すことを意味しており、本研究では、両者の相互関係を解明するにはスペクトル解析・コヒーレンス解析が有効と判断した。

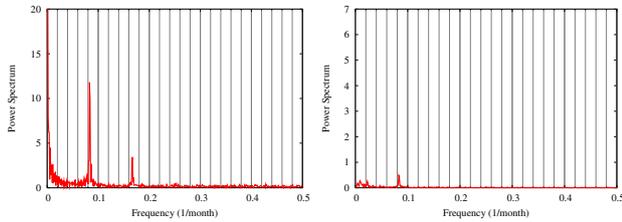
(2) スペクトル解析

世界各地における気温と大気中 CO₂ 濃度の周期的な変動特性を把握するため、選定した 27 の観測地点



(a) 気温のスペクトル強度 (b) CO₂ 濃度のスペクトル強度

(1) Mauna Loa (19°31'N, 155°35'W)



(a) 気温のスペクトル強度 (b) CO₂ 濃度のスペクトル強度

(2) South Pole (89°58'S, 24°47'W)

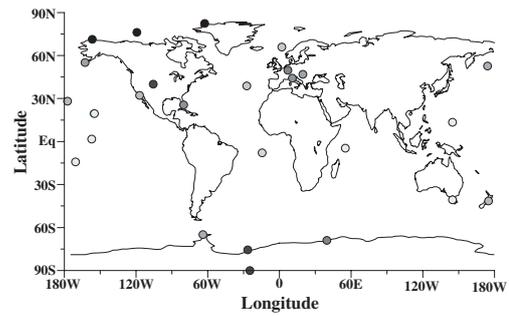
図-4 気温と大気中 CO₂ 濃度のスペクトル解析結果

を対象にスペクトル解析を行った．結果の一例として，Mauna Loa (19°31'N, 155°35'W) および South Pole (89°58'S, 24°47'W) における，気温と CO₂ 濃度のスペクトル強度分布を図-4 に示す．同図より，気温の時系列変動では，どちらの地点においても 1 年周期（周波数 0.083）の変動成分が卓越していることが見て取れる．また，CO₂ 濃度の時系列変動においても同様に，場所によってスペクトル強度は異なるものの 1 年周期変動の卓越が確認される．他の地点においても，気温と CO₂ 濃度の時系列変動では共通して 1 年周期の変動すなわち季節変動が卓越していることが確認されたが，そのスペクトル強度は観測地点によって大きく異なることが分かった．これは，季節的な変動の大きさが場所によって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 年周期変動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するため，各観測地点で算出されたスペクトル強度を図-5 に示した．同図からは，気温の 1 年周期変動には，南北のそれぞれの極地から赤道に近づくにつれて次第に弱化する傾向のあることが見て取れる．それに対して，CO₂ 濃度変動の場合は，北半球では南下するに連れて弱化する傾向が見られるものの，南半球では変化が非常に小さく半球全域でほぼ一様であることが分かる．CO₂ 濃度の季節変動におけるこのような特徴は，富永ら⁵⁾も指摘しているように，陸地と海洋の面積比率や植生量が南北半球間で異なることなどが原因と考えられるが，全球規模で気温と CO₂ 濃度の季節的な変動の大きさを比べたとき，両者の間に対応関係を確認することはできなかった．

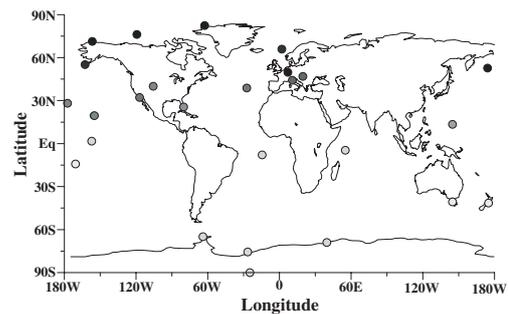
(3) コヒーレンス解析

次に，気温と大気中 CO₂ 濃度の変動特性についてさらに詳細な解析を行うため，コヒーレンス解析を行っ



Power Spectrum on frequency of 1/12month
0.0 2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 12.0 14.0

(a) 気温のスペクトル強度分布



Power Spectrum on frequency of 1/12month
0.0 1.0 2.0 3.0 4.0 5.0 6.0 7.0

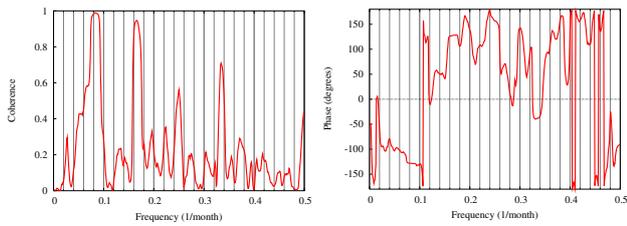
(b) 大気中 CO₂ 濃度のスペクトル強度分布

図-5 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の空間分布

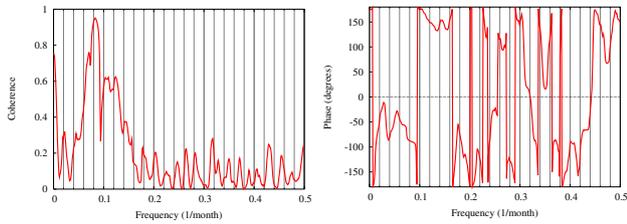
た．すなわち，気温と CO₂ 濃度の周波数成分ごとの相関（コヒーレンス）および位相差（フェイズ）を求めることで，両者の時系列変動がどのような対応関係にあるかを検討した．コヒーレンスは 0~1 の値を取り，1 に近いほど相関が高いことを意味する．またフェイズは $-2\pi \sim 2\pi$ の値を取るが，本研究の解析においてその値が正であれば，気温変動に対して CO₂ 濃度変動が時間的な遅れを持つことを意味する．

a) 短期的な変動特性

解析地点を代表して，Mauna Loa および South Pole における計算結果を図-6 に示す．同図より，どちらの地点においても，1 年周期（周波数 0.083）に相当する周波数域のコヒーレンスは 0.9 前後を示しており，気温と CO₂ 濃度の季節変動は非常に相関が高いことが分かる．同様に，ほぼ全ての解析地点で 0.9 前後の値を示し，その相関の高さが確認された．一方，1 年周期に相当する周波数域のフェイズを見ると，両地点とも負の値を示していることが分かる．同様に，他の多くの地点で負の値を示したことから，1 年周期変動に関しては，気温の変動に対して CO₂ 濃度の変動が先行していると考えられる．すなわち，各地点ごとに気温と CO₂ 濃度の季節変動を見たとき，両者の間にはある程度の位相差が存在するものの明確な相関関係が成立しており，先行する CO₂ 濃度の変化の影響を受けて気温が変動している可能性が明らかとなった．

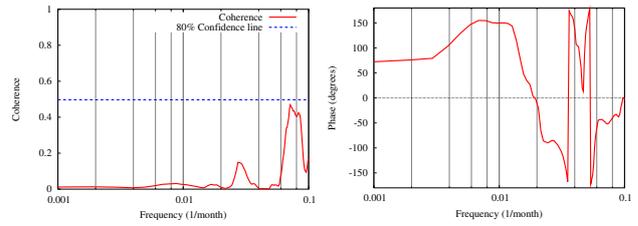


(a) コヒーレンス (b) フェイズ
(1) Mauna Loa (19°31'N, 155°35'W)

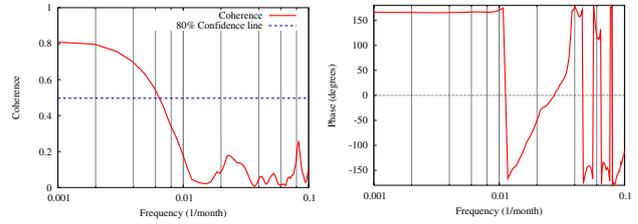


(a) コヒーレンス (b) フェイズ
(2) South Pole (89°58'S, 24°47'W)

図-6 気温と大気中 CO₂ 濃度のコヒーレンス解析結果

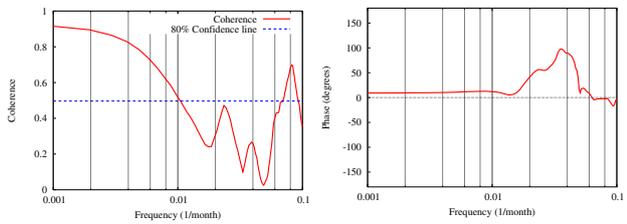


(a) コヒーレンス (b) フェイズ
(1) Mauna Loa (19°31'N, 155°35'W)



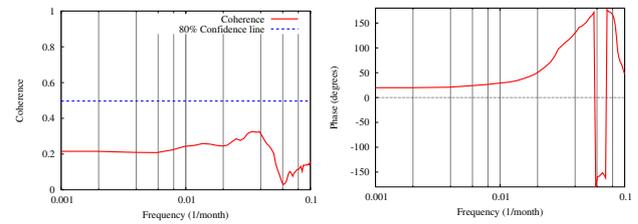
(a) コヒーレンス (b) フェイズ
(2) South Pole (89°58'S, 24°47'W)

図-7 季節変動を除いた気温と大気中 CO₂ 濃度のコヒーレンス解析結果



(a) コヒーレンス (b) フェイズ

図-8 全球域の気温と CO₂ 濃度のコヒーレンス解析結果



(a) コヒーレンス (b) フェイズ

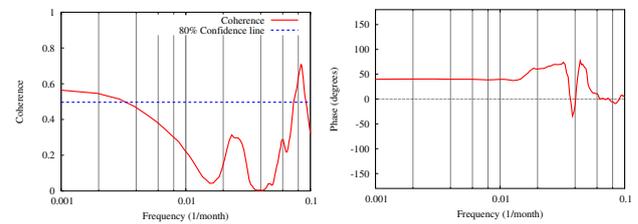
図-9 北半球の気温と CO₂ 濃度のコヒーレンス解析結果

b) 長期的な変動特性

次に、1年周期よりも長い周期を持つ変動成分について解析を行うため、気温と CO₂ 濃度の時系列データに12ヶ月の移動平均を適用することで季節変動を取り除き、再度コヒーレンス解析を行った。Mauna Loa および South Pole における計算結果を図-7 に示す。図中の破線は80%信頼限界線を示している。また、低周波数域におけるコヒーレンスについて考察しやすくするため、横軸の周波数は対数で表した。

同図からは、両地点におけるコヒーレンスの値が大きく異なっており、South Pole における低周波数域で、その値が80%信頼限界線を超えていることが分かる。同様にして、27の解析地点のうち6地点で80%信頼限界線を超える周波数領域が存在することが確認できた。すなわち、局地的に気温変動と CO₂ 濃度変動の相互関係を見た場合は、一部の地域において、1年以上の周期を持つ変動成分における両者の相関が高いことが分かった。また、そのときのフェイズの値は、1地点を除いた5地点において正の値を示した。したがって、季節変動を取り除いた気温と CO₂ 濃度の変動特性は解析地点によって異なり、両者の関係を一律に捉えることはできないが、両者の相関が比較的高い地点では、CO₂ 濃度の変動に対して気温の変動が先行することが分かった。

次に、より巨視的な観点から考察を行うため、第2節



(a) コヒーレンス (b) フェイズ

図-10 南半球の気温と CO₂ 濃度のコヒーレンス解析結果

で用いた全球平均または半球平均の偏差気温データと、地点観測された CO₂ 濃度データを用いて、両者の変動がどのような対応関係にあるか解析を行った。CO₂ 濃度データとしては、全球を代表して赤道付近に位置する Mauna Loa、北半球および南半球を代表してそれぞれの高緯度域に位置する Barrow および South Pole のデータを用い、12ヶ月の移動平均により季節変動を取り除いた上で解析を行った。

各領域における計算結果を図-8～図-10 に示す。同図より、全球平均の偏差気温と Mauna Loa における CO₂ 濃度のコヒーレンスが、周期長100ヶ月以上の領域において80%信頼限界を上回ることが確認できる。また、南半球における長周期の変動成分にも、同様に高い相関があることが確認されるが、北半球では80%信頼限界線を超える周波数領域は存在しなかった。一方、どの

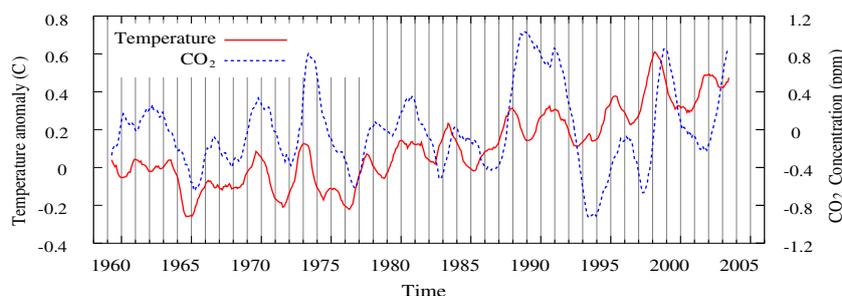


図-11 気温と大気中 CO₂ 濃度の内的変動の比較

領域においても、フェイズの値は全体的に正の値を示しており、観測地点ごとに計算した場合と同様、CO₂ 濃度の変動に対して気温の変動が先行している結果となった。このことは、気温および CO₂ 濃度の長期的な変動特性に着目した場合には、CO₂ 濃度の増加を起因として気温が上昇するのではなく、逆に何らかの要因で気温が上昇するとそれに伴って CO₂ 濃度が増加する「可能性」を示している。これは、第 1 節で述べた Keeling *et al.*⁴⁾ が指摘する「内的変動成分」の変動傾向を定量的に裏付けるものとなっている。

(4) 気温と CO₂ 濃度の内的変動

ここで、Keeling *et al.*⁴⁾ の解析と同様に、気温と CO₂ 濃度の内的変動成分について、両者の相互関係の検討を行った。季節変動が含まれていない全球平均偏差気温の時系列データと、Mauna Loa における大気中 CO₂ 濃度データから傾向成分および季節変動成分を除いたものを、それぞれの内的変動成分として図-11 に示す。同図より、Keeling *et al.* が解析を行った 1958～1988 年の期間以降も、CO₂ 濃度の変動に対して気温の変動が数ヶ月～一年程度先行している様子が見て取れる。

このように CO₂ 濃度の変動が気温の変動に追従して起こる理由としては、昇温による土壌有機物の分解促進や、昇温・早魃による陸域生態系の生産力低下、昇温・乾燥による森林火災の増加などを挙げることができるが、これらの影響によって、気温が上昇したときにある程度の時間的遅れを伴って、大気中 CO₂ 濃度が増加傾向に転ずると考えられる。また、ヘンリーの法則によれば、海面水温が上昇すると海洋の CO₂ 溶解度が低下し、海洋から大気への CO₂ 放出量が増加するが、このことも CO₂ 濃度の変動が気温の変動に追従する重要な要因ではないかと考えられる。

4. まとめ

本研究では、全球規模の気温変動と大気中 CO₂ 濃度変動および太陽活動との相互関係を解明するため、それぞれの時系列データを用いた相関分析やスペクトル解析、コヒーレンス解析を行った。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変動との間にある程度の相関関係が存在すること確認されたものの、そのメカニズムについては明らかにできなかった。今後さらに観測データを蓄

積し、詳細な解析を行うことが求められる。一方、気温変動と CO₂ 濃度変動の相互関係について検討したところ、両者の季節変動においては、先行する CO₂ 濃度の変化を起因として気温が変動している可能性が示されたが、長期的な変動特性に着目した場合には、逆に、気温の変動に追従するように CO₂ 濃度が変化する傾向にあることが明らかとなった。今後は、変動メカニズムの解明を目指して、引き続き解析を行う予定である。

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.

(2006. 9. 30 受付)