

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

TIME SERIES FLUCTUATION CHARACTERISTICS OF THE ATMOSPHERIC CO₂ CONCENTRATION BASED ON COVARIANCE STRUCTURE ANALYSIS

富永 綾乃¹・清水 保²・長谷部 正彦³・鈴木 善晴⁴

Ayano TOMINAGA, Tamotsu SHIMIZU, Masahiko HASEBE, and Yoshiharu SUZUKI

¹学生会員 宇都宮大学大学院 工学研究科エネルギー環境科学専攻 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

²正会員 工修 ジェイアール東日本コンサルタンツ(株) (〒171-0021 東京都豊島区西池袋 1-11-1)

³正会員 工博 宇都宮大学大学院 工学研究科エネルギー環境科学専攻 (〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

⁴正会員 工修 宇都宮大学 工学部建設学科建設工学コース (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

It is very important to grasp the behavior of CO₂ concentration considered to affect global warming. The IPCC reports that the anthropogenic CO₂ has affected the steep global warming. Therefore, many researches have been carried out about CO₂. But there are many unclarified factors in CO₂ behavior. So the fluctuation of atmospheric CO₂ concentration is not grasped yet. In this paper, time series analysis and covariance structure analysis have been carried out using the observation data. And we have aimed at getting a hold of the fluctuation characteristics of atmospheric CO₂ concentration and clarifying factors affecting it. As a result, we confirmed quantitatively the cause of seasonal cycle in atmospheric CO₂ concentration. Moreover, by covariance structure analysis, we discussed the effect of global environmental factors and economic activity on unclarified long periodic behavior.

Key Words : *atmospheric CO₂ concentration, time series analysis, spectral analysis, cross correlation analysis, covariance structure analysis, CO₂ emissions*

1. はじめに

近年,地球温暖化は急激に深刻化しており,気候変動を引き起こすことが懸念されている.その地球温暖化は,温室効果ガスであるCO₂の影響が大きいとされており,その中でも,人為起源によるCO₂排出が,近年の地球温暖化に影響を与えていると報告されている¹⁾.そのため,CO₂の挙動を把握することが,地球温暖化の対策を講ずる上で大変重要となっており,CO₂に関する研究が様々な分野で行われている.

従来の研究としては,全球移流拡散モデルを駆使し,大気中CO₂濃度観測値から吸収・放出域を逆推定するインバースモデル(トップダウンアプローチ)が主軸となっていた²⁾.しかし,この手法は,観測値の質や量,全球移流拡散モデルに依存している³⁾にも関わらず,観測地点が十分ではなく,移流拡散モデルや逆解析手法に課題が残されているため,解析精度に限界があると考えられる.一方では,データ解析により,季節変動以外に経年変動が存在することが明らかになっている⁴⁾.しかし,その経年変動のメカニズムは,未だ解明さ

れていないのが現状である.

そこで,本研究では,充実してきた大気中CO₂濃度の観測データを用い,共分散構造分析等の統計処理を行うことにより,大気中CO₂濃度の短期及び長期の変動特性及びそのメカニズムの解明を試みる.

2. 大気中CO₂濃度データと時系列解析

(1) 大気中CO₂濃度データ

本論文では,WDCGG(温室効果ガス世界資料センター)及びCDIAC(二酸化炭素情報解析センター)によって収集された全93地点における大気中CO₂濃度の月平均実測データを用いた.これらには,現場で継続的に測定されたもの(*INSITU*),現場でサンプリング後,室内で測定されたもの(*Flask Sampling*),の2通りの測定手法のデータが混在しているが,両手法で測定された地点で検討を行った結果,双方に大きな相違がなかったため,同様のものと考えた.また,同データの欠損部分は,スプライン関数とフーリエ級数を用

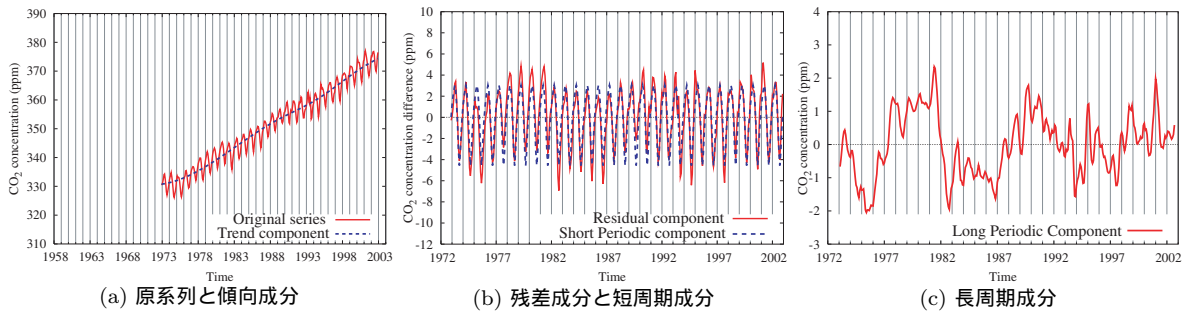


図-1 大気中 CO₂ 濃度の各時系列成分 (Key Biscayne)

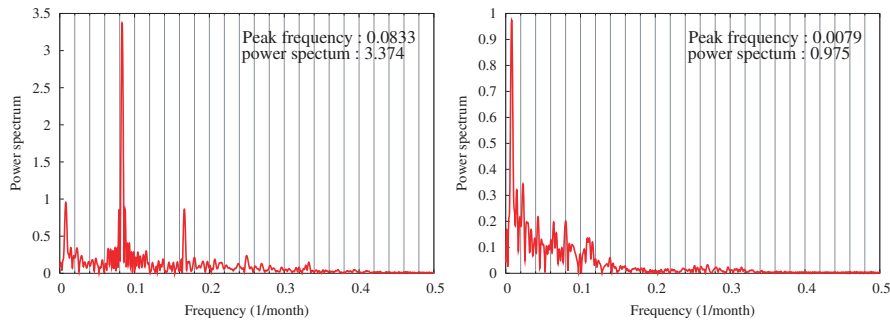


図-2 周期成分のスペクトル強度 (Key Biscayne)

いて補間した。なお、解析地点毎で詳細な解析を行う際は、ある程度長時間のデータを要するため、データ期間が 200 ヶ月以上の 29 地点のデータを用いた⁵⁾。

(2) 時系列解析

本研究では、大気中 CO₂ 濃度の原系列 y_t は、式 (1) のように、曲線的な増加傾向を表す傾向成分 (trend component)、1 年周期を持つ短周期成分 (short periodic component)、長期的な周期を持つ長周期成分 (long periodic component)、不規則変動を表す確率変動成分 (stochastic component) の 4 成分から構成されたと考えた。

$$y_t = T_t + SP_t + LP_t + \xi_t \quad (1)$$

ここに、 T_t は傾向成分、 SP_t は短周期成分、 LP_t は長周期成分、 ξ_t は確率変動成分を表している。以下に、これらの算定方法を述べる。

傾向成分は、原系列にスプライン関数を適用し、曲線トレンドを用いた⁵⁾。原系列から傾向成分を除いた成分 (残差成分) に対して、1 年を基本周期としたフーリエ級数を求め、この成分を短周期成分とした。更に、残差成分から短周期成分を除いた成分に対して、移動平均を適用することにより、長周期成分と確率変動成分とに分離した。なお、本研究では、確率変動成分を白色雑音とみなした。

3. 大気中 CO₂ 濃度の時間・空間変動特性

(1) 時間変動特性

次に、時間変動特性について解析を行った。本論文では、解析地点を代表して、Key Biscayne (25°39' N 80°12' W) についての解析結果を示す。

図-1(a) は、CO₂ 濃度の原系列と傾向成分を示している。また、原形列から傾向成分を除いた成分 (残差成分) と、1 年を基本周期としてフーリエ級数をあてはめた短周期成分を示した図-1(b) より、両者にずれが生じている部分が確認できる。

そこで、周期変動を定量的にみるために、FFT を用いて、残差成分のスペクトル解析を行った結果を図-2(a) に示す。この図から、1 年周期が卓越していることが明らかである。ここで、1 年以下の周期を表す高周波領域でもピークを持っているが、後で述べるように、これは 1 年以下の見かけ上の周期であると考えられる。それに加え、ほとんどの地点で 1 年周期より低周波領域でピークを示した。この周波数より、長期的な周期は約 10 年周期であることが確認できた。

更に、残差成分から短周期成分を除いた成分、つまり、確率変動成分を含む長周期成分に対して、移動平均を適用することにより抽出した長周期成分の時系列を図-1(c) に示す。また、図-2(b) は、長周期成分のスペクトルを示す。この図から、10 年周期に相当する低周波領域にピークが存在していることが確認できる。また、高周波領域でピークが存在していないことから、先に述べた残差成分スペクトル (図-2(a)) の高周波数域に存在したピークは、先に除いた 1 年以下の見かけ上の周期を表していたことが推定される。なお、見かけ

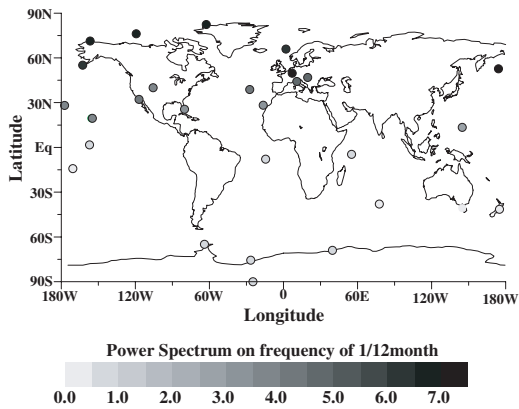


図-3 1年周期に相当するスペクトル強度分布

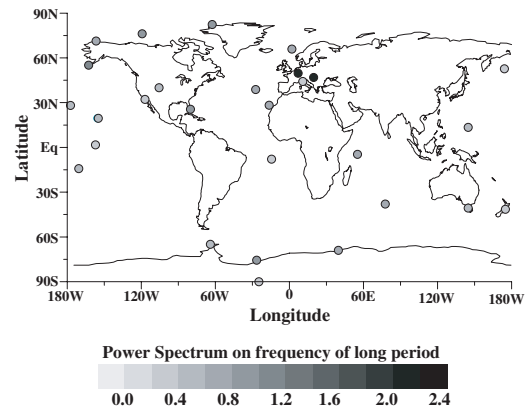


図-4 10年周期に相当するスペクトル強度分布

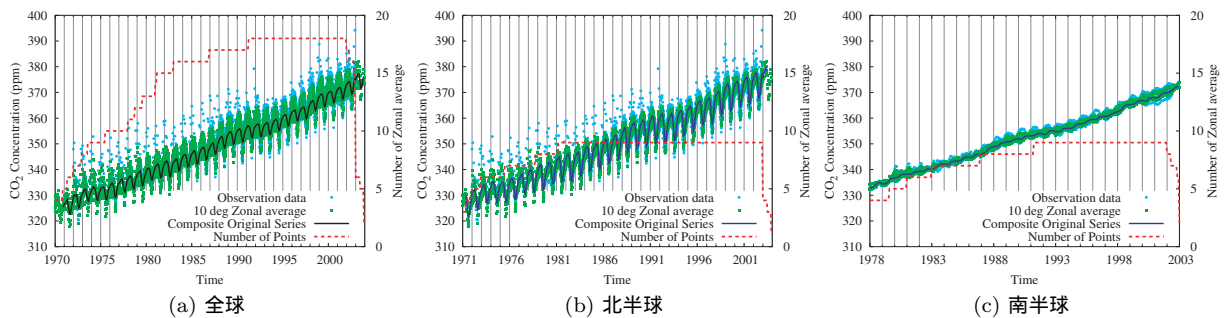


図-5 領域別に求めた大気中 CO₂ 濃度の月単位平均

上の周期には、物理的な意味はないと考えられる。

(2) 空間変動特性

本章では、全 29 地点における大気中 CO₂ 濃度データを用いて、大気中 CO₂ 濃度の全球的な空間変動特性の検討を行った。

緯度帯による違いを検証するために、大気中 CO₂ 濃度の周期性の違いに着目した。原系列から傾向成分を除いた残差成分について、スペクトル解析を行った結果を用いて、周期性の空間的変動を把握する。

大気中 CO₂ 濃度の変動には、明確な 1 年周期が存在しているが、その振幅の大きさは地点によって大きく異なっている。そこで、1 年周期に相当する周波数のスペクトル強度について色分けし、全球地図上に分布させたものを図-3 に示す。北半球では、南下するにつれて 1 年周期の弱化することが顕著に見られた。それに対して、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、半球全体で同程度のスペクトル強度を示していることが分かった。これは、陸地と海洋の占める割合や植生量が南北で異なることや、風向の影響に起因するものであると考えられる。

また、長期的な周期（10 年程度の周期）に相当する周波数が卓越したスペクトル強度について色分けし、分布させたものを図-4 に示す。この図より、ヨーロッパの一部地域を除いて、全球でほぼ一様のスペクトル強度を示していることが確認できる。つまり、長期的な周期の存在が、全球規模のものであることが確認された。

4. 大気中 CO₂ 濃度に影響を与える因子

前章において、大気中 CO₂ 濃度の周期変動における時間・空間的な特性を明らかにした。そこで本章では、大気中 CO₂ 濃度の変動のメカニズムを解明すべく、大気中 CO₂ 濃度に影響を与えと考えられる因子との相互相関分析及び共分散構造分析を行った。

なお、3 章で述べた空間変動特性を踏まえ、図-5 に示すように、全球、北・南半球の領域平均時系列を作成した。領域平均時系列とは、まず、全観測地点の観測値を緯度帯 10°毎に月単位で平均化することにより、緯度帯平均時系列を作成し、更に、その緯度帯平均時系列を用いて、領域毎に平均化したものである。

(1) 影響因子データ

a) 衛星データ（NDVI、地表面日射データ）

一般的に、大気中 CO₂ 濃度の季節変動に影響を与えと考えられるのは、植生活動である。植生の見かけ上の生産量を示す NPP（純一次生産量）を推定する際、栗屋らの方法⁶⁾では NDVI（正規化植生活動）と日射量のデータが必要となる。NDVI とは、植生の有無・多寡・活性度を示す指標である。本研究では、NDVI に NOAA/AVHRR の 1°×1°の全球月単位グリッドデータを、地表面日射量には SeaWiFS の 2.5°×2.5°の全球月平均グリッドデータを用いた。また、長周期成分の解析を行う際、NPP ではデータ期間が短いため、同様の傾向にある NDVI を用いた。なお、CO₂ 濃度に対する影響過程により、NDVI の正負を逆転させている。

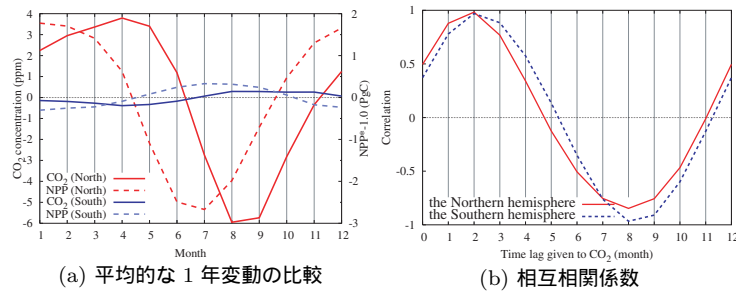


図-6 半球毎の短周期成分と NPP の季節変動

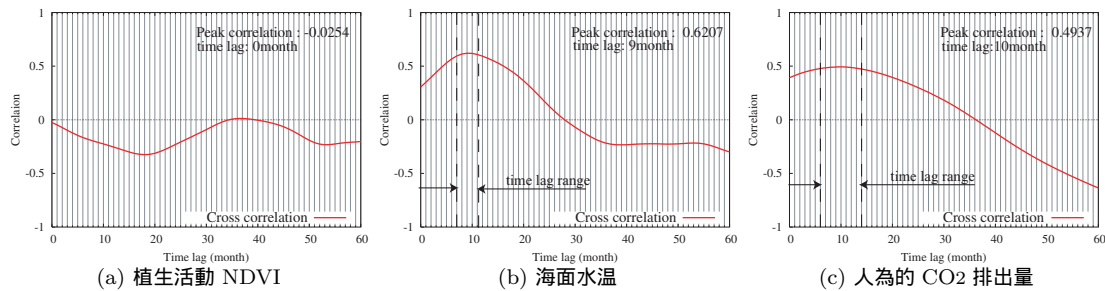


図-7 各因子と大気中 CO₂ 濃度の長周期成分との相互相関図

b) 土壌呼吸量

土壌呼吸量とは、土壌中の有機分解や植生の根の呼吸による CO₂ の放出量であり、大気中 CO₂ 濃度に影響を与えるのは必至である。本研究では、CDIAC が公表している回帰モデルによる 0.5×0.5 の全球土壌呼吸量グリッドデータ (1980.1-1994.12) を用いた。

c) エルニーニョ現象

経年変動の影響因子として、全球規模の異常気象により、大気中 CO₂ 濃度を増加させると報告されているエルニーニョ現象に着目した。エルニーニョ現象を表す指標として SOI (南方振動指数) がある。これは、Tahiti と Darwin との地上気圧の差を指数化したもので、エルニーニョ現象時に負、ラニーニャ現象時に正を示すため、解析する際には、正負を逆転させた。本研究では、気象庁が公開している SOI 月平均時系列データ (1946.1-2003.12) を用いた。

d) 気温及び海面水温データ

一般に、気温と大気中 CO₂ 濃度の経年変動は良い対応を示すことが報告されており⁴⁾、海面水温は海洋の CO₂ の溶解度に影響を与えることから、気温と海面水温を影響因子とした。気温データは、Climate Research Unit が公表している 1961 年から 1990 年の平均値を基準とした全球、北・南半球平均偏差データ (1856-2002) を用いた。また、海面水温のデータは、気象庁から得られた GPV データ (1946.1-2002.11) を基に、全球、北・南半球平均時系列データを作成して用いた。

e) 太陽活動

太陽活動は、気温や海面水温、その他にも様々な部分で地球環境変動に影響を与えており、その結果、大気中 CO₂ 濃度に対しても、影響が及んでいると考えられる。本研究では、太陽活動を表す指標として、NGDC

(National Geophysical Data Center) が公表する日射強度の人工衛星合成データ (1978.11-1998.6) を用いた。

f) 人間活動

経済活動を表す指標として、世界銀行がまとめた「世界開発指標 2004」内の各国の GDP (1960-1999) から作成した全球、北・南半球に位置する国々の総 GDP 時系列データを用いた。また、人間活動によって排出された CO₂ 量も同様にして、Global Environment Outlook で公開されている各国の人為的 CO₂ 排出量 (1960-2000) から、領域単位の総排出量を作成して用いた。

(2) 短周期成分の要因

大気中 CO₂ 濃度の短周期成分に影響を与えていると考えられる NPP と土壌呼吸量について、相互相関係数を求め、遅れ時間 (周期変動の位相差) を推定する。

NPP と土壌呼吸量に対し、北・南半球別で解析を行い、結果例として NPP を図-6 に示す。これを見ると、半球毎で NPP と CO₂ 濃度の短周期成分は変動の形が類似していると共に、NPP の南北間の多寡と CO₂ 濃度の短周期成分の多寡がよく対応していることが分かる。また、相互相関係数について見ると、北・南半球共に、CO₂ 濃度の短周期成分の位相を 2ヶ月ずらすことにより、相関係数が明確なピークをとることが分かる。一方、土壌呼吸量の結果からは、NPP ほどの変動の類似性は見られなかった⁷⁾。

故に、大気中 CO₂ 濃度の短周期成分と NPP の変動及び多寡の対応の良さを考えると、短周期成分に対する主な影響因子は NPP であると考えられる。つまり、半球毎で見ると、植生の生産活動は、2ヶ月の遅れ時間を持って、大気中 CO₂ 濃度の短周期成分に影響を与えていると推定される。

表-1 CO₂ 濃度の長周期成分と各因子との相互相関分析結果

影響因子	略記	遅れ時間の範囲	考察	決定した遅れ時間
植生活動	NDVI	-	相関係数がピークを取らず、相関も悪い．	9ヶ月
土壌呼吸量	Soil	3～9ヶ月	気温と同等の高い相関を示す．	9ヶ月
SOI	SOI	13～17ヶ月	従来の報告とは反して、相関は悪い．	13ヶ月
気温	Temperature	6～10ヶ月	従来の報告にあるとおりの位相差を示す．	9ヶ月
海面水温	SST	7～11ヶ月	気温と類似した変動を示す．	11ヶ月
太陽活動	Solar Irradiance	0ヶ月	高い相関を示すが、位相差を生じていない．	11ヶ月
GDP	GDP	1～8ヶ月	従来の報告にあるとおりの高い相関を示す．	4ヶ月
人為的 CO ₂ 排出量	Emissions	6～14ヶ月	GDP と同様な変動を示し、相関は高い．	6ヶ月

表-2 因果関係モデルを構築するために検討したモデル

モデル名	AIC	GFI	CFI	RMR (独立)	寄与率	備考
直接影響モデル	108.688	0.758	0.822	0.317(0.474)	0.85	長周期成分に直接影響を与える因子に因るモデル
Model-1	93.302	0.878	0.904	0.256(0.481)	0.86	直接影響モデルに日射量を考慮
Model-2	165.053	0.803	0.823	0.262(0.442)	0.86	Model-1 に SOI を考慮
Model-3	116.800	0.876	0.886	0.235(0.434)	0.86	Model-1 に太陽活動を考慮

(3) 長周期成分の要因

a) 長周期成分と各因子の相互相関解析

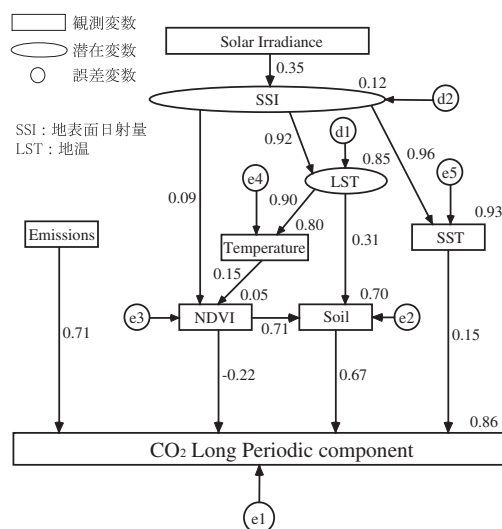
大気中 CO₂ 濃度の長周期成分に影響を与えと考えられる因子について、相互相関解析を行った。その際、空間変動特性を考慮して、全球における大気中 CO₂ 濃度の長周期成分と各因子の経年変動データを用いた。

本研究では、長周期成分に対する影響因子として、植生活動、土壌呼吸量、エルニーニョ現象、気温、海面水温、太陽活動、経済活動、そして人為的 CO₂ 排出量を用いて相互相関解析を行い、長周期成分についての遅れ時間を検討した。相互相関解析の結果を図-7、表-1 に示す。この結果より、大気中 CO₂ 濃度の短周期成分と NPP との相関ほど良い対応を示す因子はなく、長周期成分は様々な因子の複雑な因果関係の上に生じる変動であると考えられる。そこで次に、遅れ時間を考慮した共分散構造解析を行い、その因果関係の解明を試みた。その際、各因子の遅れ時間を決定する必要があるが、ピークが明確でないものや、位相差を示さない（即ちタイムラグを生じない）ものが存在するため、相関係数が最大値から 0.02 以内の値を示す期間を、遅れ時間の範囲とした（図-7、表-1）。

そして、幾つかの因子間の影響過程に矛盾が生じないように、再度、各因子間の相関解析を行い⁷⁾、これを基に、表-1 に示す各因子の遅れ時間を決定した。なお、位相差が生じなかった太陽活動は、遅れ時間が生じないとは考え難いため、見かけ上の相関であるとした。

b) 共分散構造分析

共分散構造分析は、データから得られる分散・共分散と、モデルの母数で表現される分散・共分散を適合させるように、最尤法で母数を決定する。本研究では、モデルの評価として RMR（残差平均平方根）、GFI（適合度指標）、CFI（比較適合度指標）、AIC（情報量基準）を用いた。GFI 及び CFI は、1.0 に近いほど優位なモ



※変数の右上の値は分散、矢印の値はパス係数(回帰係数)を表す。
AIC=116.800 GFI=0.876 CFI=0.886 RMR=0.235(<0.434)

図-8 最終的な因果関係モデル (Model-3)

デルを表し、一般的に 0.9 以上で適合が良いとされる。AIC は、値が小さいほどモデルの適合度が良いことを示すが、特に基準値はなく、値に絶対的な意味はない。

まず、大気中 CO₂ 濃度の長周期成分に直接影響を与える因子として、植生活動、土壌呼吸量、海面水温、人為的 CO₂ 排出量を用いて、直接影響モデルを考えた。しかし、同モデルの適合度はあまり良い値を示していない。この理由としては、人為的 CO₂ 排出量と海面水温、土壌呼吸量間の相関係数がやや高く、各因子が独立ではないことが影響していると考えられる⁷⁾。しかし、人為的因子と地球環境変動因子が物理的に影響し合うとは考えられないため、本研究では、GFI と CFI の基準を 0.8 以上として対応することで解析を進めた。

表-3 各影響因子の長周期成分に対する寄与率

影響因子		寄与率	総寄与率
地球環境因子	太陽活動	1.86 %	36.10 %
	太陽活動の影響を受けない日射量	13.43 %	
	日射量の影響を受けない海面水温	0.15 %	
	日射量の影響を受けない地温	0.89 %	
	地温の影響を受けない気温	0.03 %	
	気温・日射量の影響を受けない植生活動	6.15 %	
	植生活動・地温の影響を受けない土壌呼吸量	13.58 %	
人為起源因子	人為的 CO ₂ 排出量	50.41 %	50.41 %
全寄与率		86.51 %	

より詳細な因果関係を表すモデルを構築するために、直接影響モデルを基に、幾つかのモデルを検討した結果を表-2 に示す。これにより、適合度が高く、潜在変数である地表面日射量を説明付けられることから、図-8 に示す Model-3 を本研究における最終的な因果モデルとする。更に、同モデルから得られた寄与率について表-3 に示す。この結果から、地球環境に関する因子の総寄与率に比べて、人為起源因子の総寄与率の方が高く、人為的な CO₂ 排出量が大気中 CO₂ 濃度の長周期成分に大きな影響を与えていると考えられる。また、このモデルで取り上げた因子によって、大気中 CO₂ 濃度の長周期成分の 86.5 % を説明付けることができた。

最後に、この解析結果を用いて、実際の大気中 CO₂ 濃度の長周期成分とモデルによる再現結果の比較を行い、その結果を図-9 に示す。これにより、大きな変動だけでなく、細かな変動もある程度再現出来ていることが確認でき、大気中 CO₂ 濃度の長周期成分は、本研究で考えた因子の複合的な影響に因るものであることが示された。

5. 結論

本研究では、様々な因子が影響を与えていると考えられる大気中 CO₂ 濃度変動のメカニズムを解明することを目的として、時系列解析の考えを基に解析を行った。まず、大気中 CO₂ 濃度変動を傾向成分、短周期成分、長周期成分及び確率変動成分の 4 つの構成成分に分け、特に周期性に着目したスペクトル解析を行い、大気中 CO₂ 濃度の時空間変動特性を見出した。更に、その特性を踏まえて、相互相関解析及び共分散構造分析を行い、大気中 CO₂ 濃度のメカニズムについて検討した。以下に、得られた結果を示す。

1. 大気中 CO₂ 濃度の周期変動には、1 年周期と 10 年程度の長期的な周期が存在している。
2. 大気中 CO₂ 濃度の 1 年周期は、南下するにつれて弱化する傾向にある。ただし、赤道以南においては、半球全域で同程度の周期を示す。この 1 年周期変動は、2ヶ月の遅れ時間を経て、植生の生産活動の影響を支配的に受けたものであることが明らかとなった。
3. 大気中 CO₂ 濃度の長期的な周期は、全球規模で同

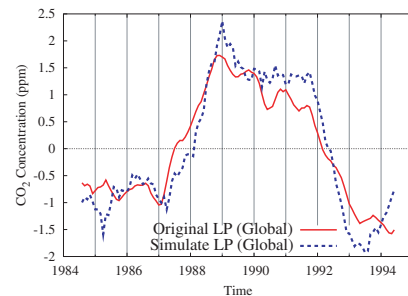


図-9 大気中 CO₂ 濃度の長周期成分とモデルによる再現結果

程度の周期である。これは、地球環境変動と人為的 CO₂ 排出の影響を複合的に受け、生じるものであることが分かった。

参考文献

- 1) IPCC: Climate Change 2001 : The Scientific Basis (Summary for Policymakers), Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC, 2002.
- 2) Kevin Robert Gurney et al. : TransCom 3 CO₂ inversion intercomparison: 1. Annual mean control results and sensitivity to transport and prior flux information, TELLUS, vol.55B, pp.555-579, 2003.
- 3) 神沢博, 菅田誠治: インバースフォワードモデルによる炭素吸収源分布の推定, 地球環境研究成果報告書 B-4, pp.105-122.
- 4) C.D. Keeling et al. : Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980, Nature, vol.375, pp.666-670, 1995.
- 5) 清水保, 富永綾乃, 長谷部正彦, 鈴木善晴, 日野幹雄: 大気中 CO₂ 濃度の時系列変動特性とそのメカニズムに関する基礎的研究, 水工学論文集, pp.31-36, 2005.
- 6) 栗屋善雄, 田中邦宏: 純一次生産力の全球分布の実態を見る, 平成 12 年度森林総合研究所研究成果選集, pp.38-39, 2000.
- 7) 富永綾乃, 清水保, 長谷部正彦, 日野幹雄, 鈴木善晴: 大気中 CO₂ の時空間変動特性とその排出機構について, 土木学会論文集, 2005. (投稿中)

(2005. 9. 30 受付)