

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

A BASIC STUDY ON THE FLUCTUATION CHARACTERISTICS OF ATMOSPHERIC CO₂ CONCENTRATION AND ITS MECHANISM

清水 保¹・富永 綾乃²・長谷部 正彦³・鈴木 善晴⁴・日野 幹雄⁵

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

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 宇都宮市陽東 7-1-2)

²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 宇都宮市陽東 7-1-2)

³正会員 工博 宇都宮大学大学院教授 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)

⁵正会員 工博 (〒 251-0033 神奈川県藤沢市片瀬山 4-20-6)

In recent years, global warming is aggravated and is feared to cause climate change. 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, a time series analysis has been carried out using observation data. And we have aimed at getting a hold of the fluctuation characteristics of atmospheric CO₂ concentration and clarifying factors affecting it.

In result, we confirmed quantitatively the cause of seasonal cycle in atmospheric CO₂ concentration. Moreover, we discussed effect of SOI, solar activity and economic activity on unclarified long periodic behavior.

Key Words : Atmospheric CO₂ concentration, seasonal cycle, long periodic component, SOI, solar activity, economic activity, global warming

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. その急激な地球温暖化は, 人為起源による CO₂ の影響が大きいと報告されている¹⁾.

従来は, 大気中 CO₂ 濃度のデータが充実していなかったため, 大気輸送モデルを駆使し, 限られた大気中 CO₂ 濃度観測値から逆解析を行い, 吸収・放出域を推定するトップダウンアプローチであるインバースモデルでの研究が主軸となっていわれてきた²⁾. しかし, 輸送モデルや逆解析手法に課題が残っているため, インバースモデルでは, 精度良く検証できておらず, 未だ大気中 CO₂ 濃度の変動やその変動に影響を与える因子を把握しきれていない.

そこで, 本論文では, 近年充実してきた大気中 CO₂ 濃度の観測データを用いて, 時系列解析により, 大気中 CO₂ 濃度に影響を与える因子を明らかにすることを目的としている.

2. 解析データ

(1) 大気中 CO₂ 濃度

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) の全 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 (INSITU), サンプリング後, 室内で測定 (Flask Sampling), といった 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 7 地点で検討を行った結果³⁾, 大きな相違がなかったため, 同様のものと考えた. 使用したデータには欠損のあるものがあるため, スプライン関数とフーリエ級数を用いて補間した. データ期間は, 短いもので約 5 年間, 長いものでは 45 年間であるが, 解析地点毎で詳細な解析を行う場合は, ある程度長時間のデータを要するため, データ期間が 200 ヶ月以上ある, 図-1 の 26 地点で解析を行った. また, 南北半球別等の広い領域で解析を行う場合, 図-2 のように, 領域毎に月単位で観測値を平均化した時系列データを用いた.

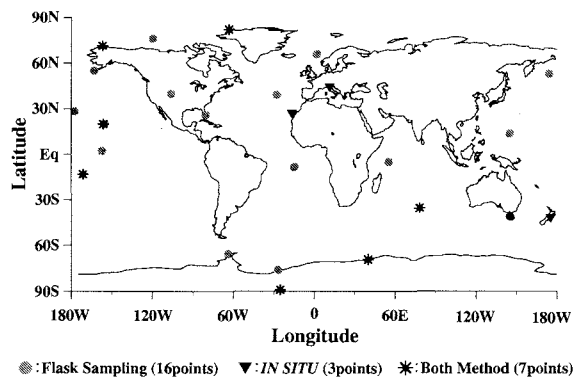


図-1 解析方法により制限された解析地点 (全 26 地点)

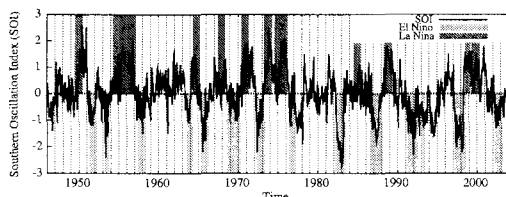


図-3 南方振動指数 (SOI) の時系列データとエルニーニョ/ラニーニャ現象の時期

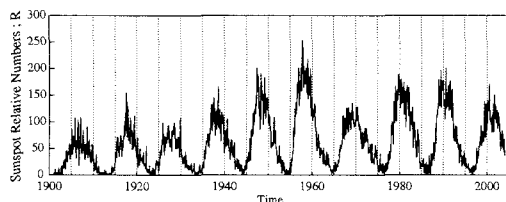


図-4 太陽黒点相対数の時系列データ

(2) 衛星データ (NDVI, 地表面日射量)

植生の見かけ上の生産量を示す純一次生産力 (NPP: Net Primary Productivity) を推定する際、栗屋⁴⁾の方法では NDVI と日射量のデータが必要となる。NDVI (正規化植生指標) とは、リモートセンシングのバンドデータから求められる植生の有無・多少・活性度を示す指標である。本論文では、NDVI には NOAA/AVHRR の全球における $1^\circ \times 1^\circ$ の月単位メッシュデータを、地表面日射量には SeaWiFS の全球における $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ の月平均メッシュデータ [$\text{W/m}^2/\text{month}$] を用いた。

(3) エルニーニョ/ラニーニャ現象

エルニーニョ現象とは、太平洋赤道域の中央部からペルー沿岸にかけての海域で、海面水温が平年より高くなる状態が 1 年程度続く現象で、逆に、海面水温が平年より低くなる状態が続く現象が、ラニーニャ現象である。ここで、南方振動指数 (SOI) は、Tahiti (太平洋東部) と Darwin (太平洋西部) 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は負、ラニーニャ現象時には正を示すと言われている。特に本論文では、気象庁が公開している月平均時系列データ (1946.1-2003.12) を用いた。図-3 は SOI の時系列変動と、エルニーニョ/ラニーニャ現象の時期も同時に示している。ここで、これまでに、エルニーニョ現象時、大気中 CO_2 濃度は増加すると報告されている⁵⁾⁶⁾。

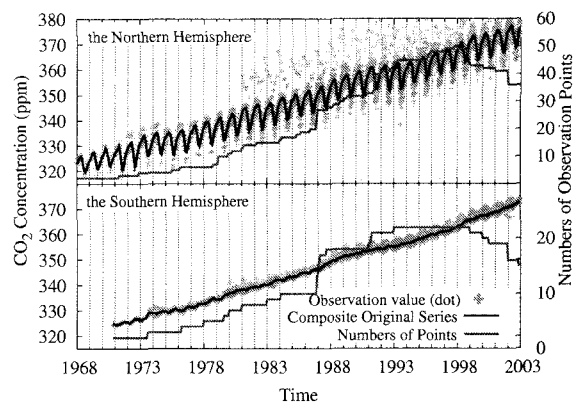


図-2 半球毎に求めた大気中 CO_2 濃度の月単位平均データ (上が北半球, 下が南半球)

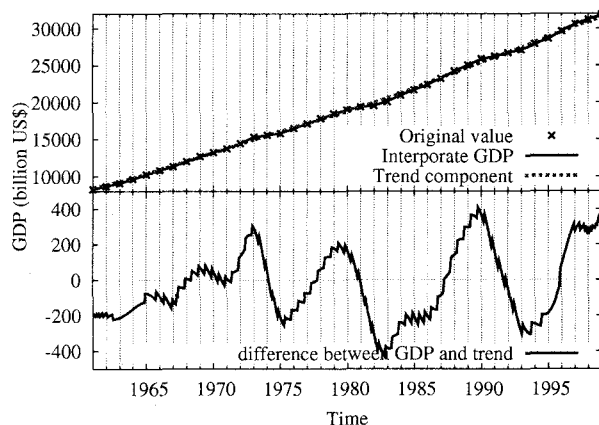


図-5 全世界総 GDP の時系列変動, 上は原系列とトレンド, 下は内挿月単位原系列からトレンドを除いたもの

(4) 太陽活動

太陽活動の状態を表す指標として、太陽黒点相対数や太陽電波強度、太陽極超紫外線が考えられる。本論文では、観測期間が比較的長く、一般的に広く知られている太陽黒点相対数を用いることとした。ウルフ (Wolf) の太陽黒点相対数 R の算出は、式 (1) で示される。

$$R = k(10g + f) \quad (1)$$

ここで、 g : 黒点群の数、 f : 観測した黒点の総数、 k : 観測器械や観測者等による補正係数である。

本論文では、図-4 に示す、SIDC が提供している太陽黒点相対数の 1901 年 1 月から 2004 年 2 月までの月単位データを利用した。

(5) 経済活動

経済活動を表す指標として、図-5 の上図に示す世界銀行がまとめた「世界開発指標 2004」の中にある全世界の GDP (Gross Domestic Product) を用いた。このデータは年単位であるため、解析の際は、比較しやすいように、スプライン補間により月単位データに変換した。また、トレンドが存在するため、3.(2) に示すようにトレンドを求めて除くことで、図-5 の下図のような振幅変動のみを取り出して比較・検討に用いた。

3. 解析方法

(1) 時系列構成成分

時系列は、一般に傾向成分 (trend component)、周期成分 (periodic component)、確率変動成分 (stochastic component) の3つの成分から構成されている。

傾向成分は直線的と考えられているが、直線的な傾向成分を用いた³⁾ときよりも、曲線的な傾向成分として解析を進めた方が良い結果が導き出されたので、本論文では傾向成分は曲線的なものを用いた。曲線的な傾向成分の方が良い結果をもたらした理由及びその傾向成分の決定方法は、次の3.(2)にて記述する。周期成分は、1年を基本周期としたフーリエ級数を求め決定した。そして、解析を進めていく上で、1年周期以外に長期的な周期が存在することが明らかになった³⁾ので、論文上では、1年周期を持つ成分を短周期成分 SP_t 、長期的な周期を持つ成分を長周期成分 LP_t と分類して表現している。つまり、大気中 CO_2 濃度 y_t は式(2)のように構成されているとして解析を行った。

$$y_t = T_t + SP_t + LP_t \quad (2)$$

ここに、 T_t は傾向成分、 SP_t は短周期成分、 LP_t は長周期成分を表している。この時系列構成成分では、どこまでが確率変動成分であるかを評価しにくいので、長周期成分の中に確率変動成分を含めて考えている。

本論文では、傾向成分の決定法、短周期成分と長周期成分、各々に影響を与える因子について解析を行った。

(2) 傾向成分の決定法

先にも述べたが、傾向成分は一般的に最小二乗法等により求めた回帰直線が用いられるが、長周期成分を考える際、直線の傾向成分により抽出したものは、10年程度の周期性が見えにくくなってしまふ。その要因は、図-6-aの模式図を見ると明らかである。このため、次の手法を基に、曲線的な傾向成分を導出した。

まず、原系列に対して12ヶ月の移動平均を求め12ヶ月周期を除く。次に、それについて、120ヶ月の周期が存在していると仮定し、120ヶ月の移動平均をさらに求め、長期的な周期を除く。これにより曲線的な傾向成分である移動平均トレンドを求めた。これは、図-6-bにある模式的に作成した傾向成分と一致しており、移動平均トレンドは周期性を明確に見ることができる理想的な傾向成分であった。しかし、この方法には、120ヶ月という長い期間で移動平均をとるため、両端60ヶ月ずつ合計120ヶ月のデータが欠損してしまうという問題点がある。そのため、次の方法で曲線トレンドを求めた。

まず、曲線トレンドの初期値と終値として、原系列の初め及び終わりの1年間の平均値を求める。その間の区間は、前後30ヶ月毎の60ヶ月平均値で表し、これらの点のつながりに3次のスプライン関数を当てはめ、それをスプライントレンドとした。このスプライン関数を導入することによって、実在するデータ期間の傾向成分を求めることが可能となった。

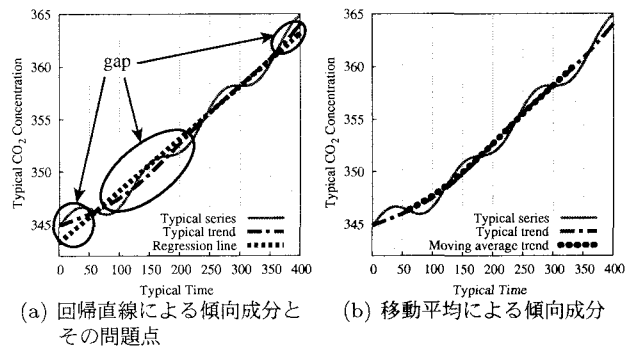


図-6 模式的に表した直線トレンドと移動平均トレンド

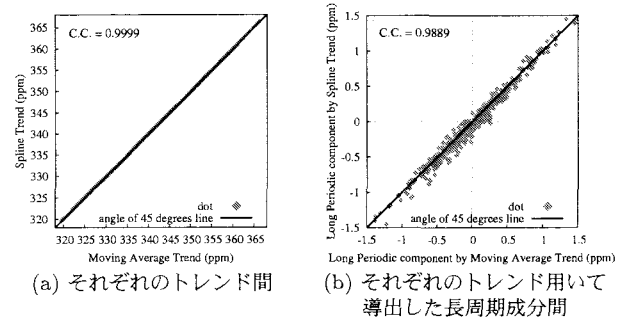


図-7 Mauna Loa における移動平均トレンドとスプライントレンドの相関関係

ここで、先に述べた長周期成分の解析を行うために理想的な傾向成分である移動平均トレンドを、スプライントレンドがどの程度表現できているかを確認した。その結果、トレンド間の相関係数、また双方の傾向成分を用いて抽出した長周期成分間の相関係数は、全解析地点で図-7のように共に1.0に近い値を示した。この結果を受け、なるべく長期間のデータの方がより良い解析を行うことができると考え、傾向成分(式(2)の T_t)は、スプライントレンドを用いた。

(3) 短周期成分の要因に関する解析方法

短周期成分の要因に関する解析では、大気中 CO_2 濃度の12ヶ月以下の周期を持つ短周期成分を導き、一般的に大気中 CO_2 濃度の季節変動の要因と言われている植生活動と比較した。比較した因子は、推定したNPP(純一次生産力)である。推定方法は、NOAA/AVHRRのNDVI値と、SeaWiFSの地表面日射量 [$\text{W}/\text{m}^2/\text{month}$]を用い、NDVIと日射量の積とNPPは比例関係であるという栗屋ら⁴⁾の方法を用いた。図-8に示すように、この方法により推定された全球の年間総NPP(1983.7-1991.6の月平均NPPの年間和)は64.2PgC/yr(Pは 10^{15} を表し、乾重量128.4PgDW/yrに0.5を乗じて炭素量換算)であり、IPCCが採用している正味の植生の生産量である60PgC/yrとほぼ同値であった。

その推定されたNPPの季節変動と大気中 CO_2 濃度の短周期成分の季節変動を全球及び半球毎に比較した。全球及び半球毎と広い領域について比較した理由は、循環風等の影響を少なくするためである。本論文では、半球毎による解析結果を示していく。

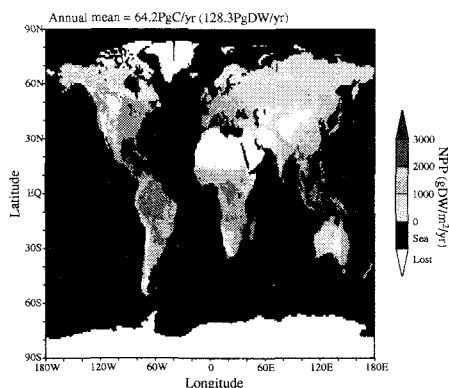
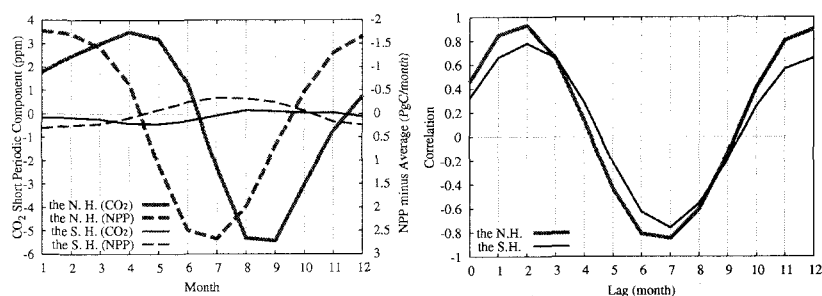


図-8 1983.7-1991.6におけるNPPの月平均変動の1年間の総和



(a) 短周期成分とNPPとの季節変動の比較 (b) 短周期成分とNPPとの相互相関

図-9 半球毎の短周期成分とNPPの季節変動

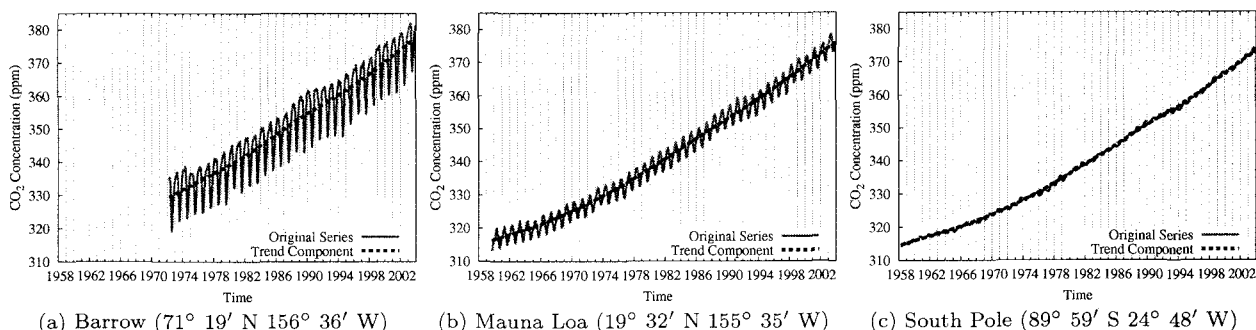


図-10 代表地点における大気中CO₂濃度の原系列と傾向成分

(4) 長周期成分の要因に関する解析方法

長周期成分の要因に関しては、各解析地点の大気中CO₂濃度の原系列から長周期成分を抽出し、幾つかの考えられる因子の時系列データと比較・検討を行った。

大気中CO₂濃度の長周期成分 LP_t は、式(2)を基に、式(3)について抽出することができる。

$$LP_t = y_t - T_t - SP_t \quad (3)$$

なお、幾つかの因子の時系列データの中で、トレンドが存在するもの(本論文ではGDP)に関しては、そのトレンドを除いたものと大気中CO₂濃度の長周期成分で、振幅変動について比較・検討を行っている。

4. 短周期成分の要因に関する解析結果

大気中CO₂濃度の短周期成分の要因について考えるため、図-9-aのように半球毎の季節変動について、NPPと比較した。また、これらの相互相関を求めた結果を図-9-bに示す。これらを見ると、NPPの変動に伴い、2ヶ月遅れで、大気中CO₂濃度の短周期成分が同様な変動していることが分かる。この結果、短周期成分に影響を与える因子は植生の光合成活動であり、光合成活動の2ヶ月後、大気中CO₂濃度に影響が現れることを定量的に確認することができた。

5. 長周期成分の要因に関する解析結果

本章では、解析期間の長い、北半球のBarrow(71° 19' N 156° 36' W)、赤道付近のMauna Loa(19° 32' N 155° 35' W)、南半球のSouth Pole(89° 59' S 24° 48' W)についての結果を示していく。これらの大気中CO₂濃度の原系列と傾向成分を図-10に示す。この原系列から図-11のような長周期成分を抽出し、解析を行った。

(1) エルニーニョ/ラニーニャ現象とピナツボ火山噴火

エルニーニョ/ラニーニャ現象とピナツボ火山噴火は、大気中CO₂濃度の変動に影響を与えたと報告されている⁵⁾⁶⁾。傾向成分は、緩やかな曲線なので突発的な影響は現れないと考えられ、短周期成分は図-9のように植生の光合成活動の影響であると考えられる。このため、エルニーニョ/ラニーニャ現象やピナツボ火山噴火の影響は、長周期成分に現れるのではないかと考えた。そこで、エルニーニョ/ラニーニャ現象の指標であるSOIと長周期成分とを比較すると共に、ピナツボ火山噴火時(1991年6月)前後の長周期成分の挙動を確認し、これらのイベントが与える影響を検討した。

図-12は、ピナツボ火山噴火の時期を示し、大気中CO₂濃度の長周期成分とSOI、それぞれの12ヶ月移動平均値について比較した図である。なお、SOIはエルニーニョ時に負、ラニーニャ時に正を示し、大気中CO₂濃度は前者で増加、後者で減少を示す⁵⁾⁶⁾ことから、SOIの値に-1.0を乗じている。これを見ると、SOIと大気

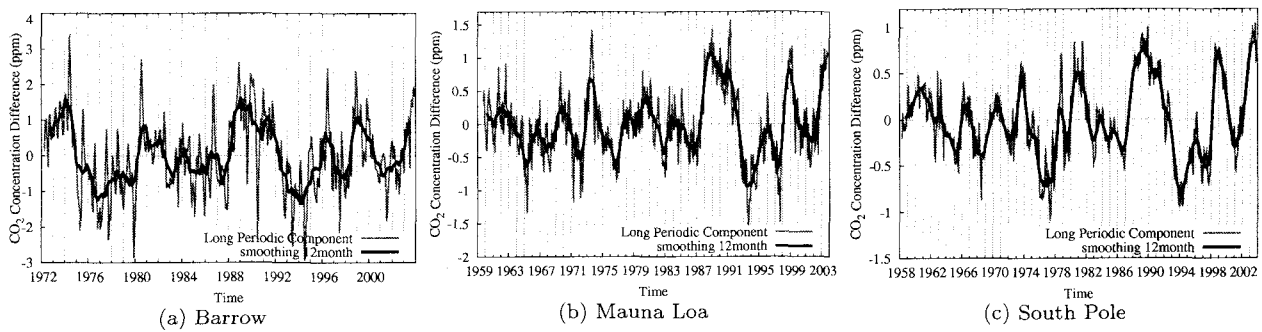


図-11 代表地点における大気中 CO_2 濃度の原系列から抽出した長周期成分

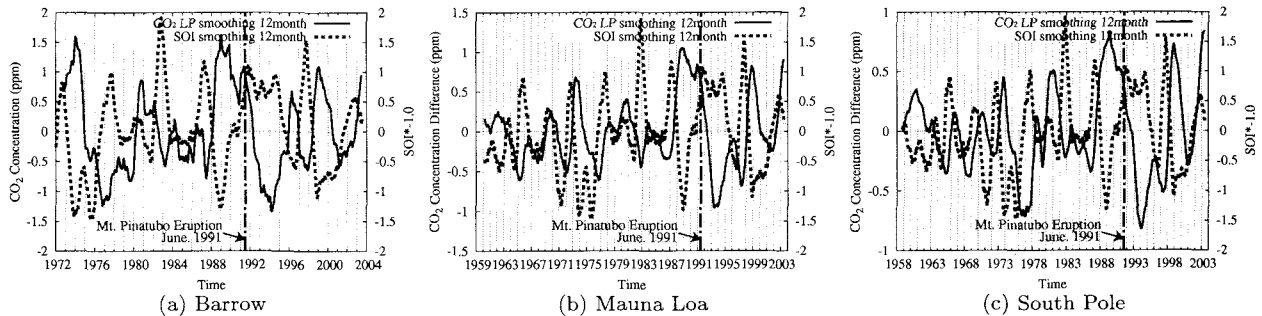


図-12 代表地点における大気中 CO_2 濃度の長周期成分と SOI、それぞれの 12ヶ月移動平均値での比較

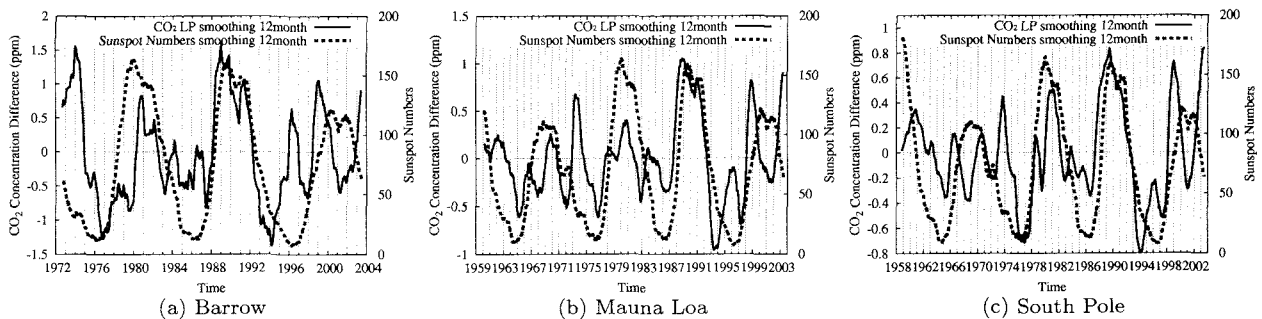


図-13 代表地点における大気中 CO_2 濃度の長周期成分と太陽黒点相対数、それぞれの 12ヶ月移動平均値での比較

中 CO_2 濃度の長周期成分はあまり対応して変動しておらず、報告されているエルニーニョ/ラニーニャ現象の影響を追認することができなかった。

次に、全球規模の気温低下により、植物呼吸や土壌有機物の分解を抑制し、大気中 CO_2 濃度を減少させたと報告されているピナツボ火山の噴火時期前後の長周期成分の挙動を調べた。すると、長周期成分は、噴火前に既にピークを迎えており、ピナツボ火山噴火による見かけ上の周期ではないことが分かった。しかし、影響が全くないという訳ではなく、噴火後の長周期成分の谷が、他の谷に比べ低くなっており、この部分はピナツボ火山噴火の影響ではないかと考えられる。

(2) 太陽活動

大気中 CO_2 濃度の長周期成分には、ほぼ 10 年の周期が存在している³⁾ので、同程度の周期変動を示す太陽活動に着目した。太陽活動を表す太陽黒点相対数と大気中 CO_2 濃度の長周期成分、それぞれの 12ヶ月移動平均値についての比較図が図-13 である。これを見ると、長周期成分と太陽黒点数の変動は、山谷ともにピーク

時期が一致して良く対応しており、相関係数はほとんどの地点で 0.7 前後の値を示すことが明らかになった。

そこで、図-14 のような、太陽活動が大気中 CO_2 濃度の長周期成分に影響を与えるメカニズムを考えた。それは、太陽活動が活発化すると、太陽放射の中で紫外線量が増加する。その際、地球上に降り注ぐ紫外線量も増加すると考えられる。ここで、紫外線内の UV-B (波長 280~320nm) は、植生に対して光合成・生長阻害等を引き起こすと報告されている⁷⁾。この結果、大気中 CO_2 濃度が増加するのではないかと考えられる。

次に、そのメカニズムを実証するため、NPP から季節変動を除いた成分と大気中 CO_2 濃度の長周期成分との関連性について解析を行った結果を、図-15 に示す。これを見ると、長周期成分に影響を与える因子が NPP であるとは考えにくい結果となったが、NPP のデータ期間が短いため、断定することができず、今後も検討を行っていく必要がある。本論文では、我々の考えたメカニズムの実証には至らなかったが、大気中 CO_2 濃度の長周期成分は太陽活動との対応が良く、太陽活動が何らかの影響を与えていると考えている。

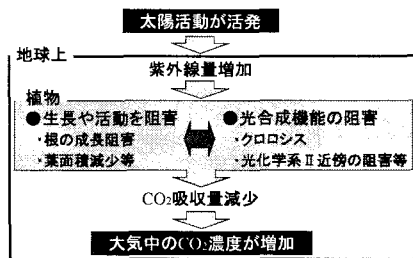
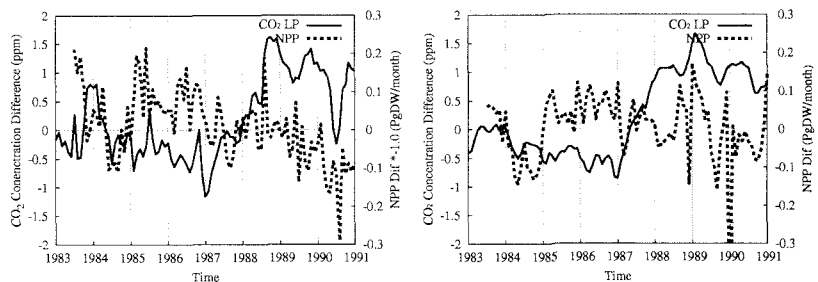


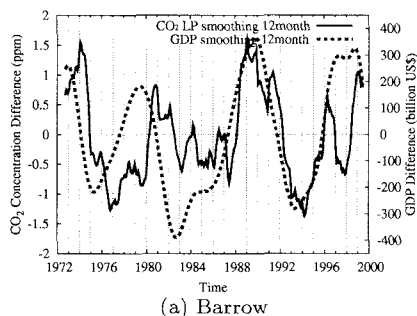
図-14 太陽活動活発時における大気中 CO₂ 濃度へ与える影響の概念図



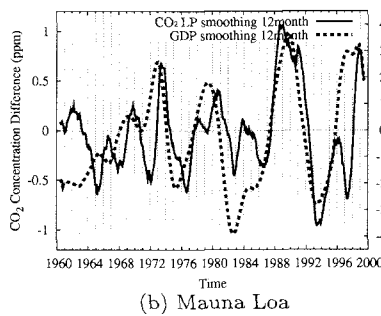
(a) 北半球における比較

(b) 南半球における比較

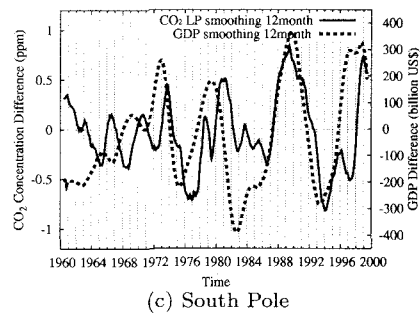
図-15 半球毎での大気中 CO₂ 濃度長周期成分と季節変動を除いた NPP の比較



(a) Barrow



(b) Mauna Loa



(c) South Pole

図-16 代表地点における大気中 CO₂ 濃度の長周期成分と GDP、それぞれの 12ヶ月移動平均値での比較

(3) 経済活動

これまでの結果から、大気中 CO₂ 濃度の長周期成分と太陽活動の変動が良く対応していることが明らかになったが、時期や地点によっては、対応の悪い部分も見られる。これに関して、人間活動が影響を与えているのではないかと考え、図-16 に示すように、トレンドを除いた GDP の振幅変動と比較を行った。その結果、経済活動も長周期成分と対応良く変動しており、大気中 CO₂ 濃度に影響を与える一要因ではないかと考えられる。これにより、従来から定性的に言われていた、人間活動（ここでは GDP）が大気中 CO₂ 濃度に与える影響を定量的に示唆することができた。

6. まとめと今後の課題

大気中 CO₂ 濃度の原系列から導いた 12ヶ月以下の周期を持つ短周期成分は、植生の純一次生産力（NPP）の影響を受けており、それは、短周期成分と NPP の変動には 2ヶ月の遅れ時間があったことから、植生活動の 2ヶ月後に大気中に影響が出ていることを確認した。

大気中 CO₂ 濃度の原系列から傾向成分と短周期成分を除いた長周期成分の要因について、幾つかの因子を考え、検討を行った。その結果、長周期成分は、太陽活動の変動と良く対応していることから、太陽活動の影響を受けて周期変動していると考えられる。これは、太陽活動活発時における UV-B の増加により、植生の光合成活動が抑制され、CO₂ の吸収量が減少し、大気中 CO₂ 濃度が増加するためではないかと考えられる。そのメカニズムを検証した結果、植生活動（NPP）が影響を与えているとは考えにくい、太陽活動と長周期成分の変動は良く対応しており、今後、他の比較方法かメカニズムを考え、検討していく必要がある。

一方、太陽活動だけでは説明がつかない部分も存在したが、GDP と良い対応を示したことから、経済活動も長周期成分に影響を与える要因であると考えられる。

今後は、大気中 CO₂ 濃度の長周期成分に影響を与える因子の把握と共に、その影響のメカニズムの解明や定量的な解析を進め、因子の寄与度の解明が求められる。

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) 清水・長谷部ら：地球規模における大気中 CO₂ 濃度の時空間変動及び空間分布特性，水工学論文集，第 47 巻，pp.91-96，2004
- 4) 栗屋・田中・小谷：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
- 5) 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
- 6) M.D.Dettinger et al. : Seasonal and interannual variations of atmospheric CO₂ and climate, TELLUS, vol.50B, pp.1-24, 1998
- 7) 環境庁気象研究部：オゾン層破壊，中央法規出版株式会社，pp.97-127，1995.

(2004.9.30 受付)