

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

THE SPATIOTEMPORAL FLUCTUATION AND SPATIAL DISTRIBUTION CHARACTERISTICS IN ATMOSPHERIC CO₂ CONCENTRATION ON A GLOBAL SCALE

清水 保¹・長谷部 正彦²・鈴木 善晴³・日野 幹雄⁴

Tamotsu SHIMIZU, Masahiko HASEBE, Yoshiharu SUZUKI and Mikio HINO

¹学生会員 宇都宮大学院 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)

³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)

⁴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 progressing and increasing CO₂ concentration in the atmosphere is generally its major cause. Accordingly many researchers of various fields have been carried out on CO₂. But there are many uncertainties on CO₂. We considered that it is necessary to make a precise model to clarify these uncertainties. So we thought that it was significant to grasp the variation characteristics of atmospheric CO₂ concentration.

Then, in this paper we investigated to grasp the fluctuation characteristics of atmospheric CO₂ concentration, such as the spatiotemporal fluctuation and spatial distribution characteristics, by using the atmospheric CO₂ concentration practical data that has been equipped in recent years. Moreover we confirmed how much influence the Mt. Pinatubo Eruption would have had on the atmospheric CO₂ concentration fluctuation because it has not been clarified.

Key Words : *atmospheric CO₂ concentration, time and space fluctuation and spatial distribution characteristics, continuous wavelet analysis, spatiotemporal*

1. はじめに

産業革命以降の工業等の発展に伴い、大気中の CO₂ 濃度が次第に増加していった。ここ最近、CO₂ 濃度は人間活動の活発化により急激に増加しており、今後地球温暖化は深刻化していくことがほぼ確実であり、様々な気候変動を引き起こしていくと報告されている¹⁾。そのために、地球温暖化の適切な対策が早急に求められている。CO₂ の研究として、従来は CO₂ 濃度のデータが充実していなかったため、大気輸送モデルやインバースモデル等を用いた研究が数多く行われてきた²⁾。しかし、これらのモデルによる解析結果にばらつきが見られる。本解析では、このばらつきは CO₂ 濃度の変動特性を考慮していないからであると考え、変動特性を考慮した有意なモデルを構築することができれば、未だ解明されていない Sink and Source 等の解明につながると考えた。同時に、様々なイベント（1991 年ピナツポ山の噴火やエルニーニョ現象等）が CO₂ 濃度に影響を与えていると報告されている³⁾が、その影響は未だ明

確には示されていないと思われる。そこで本研究は、近年充実してきた実測データを基に大気中 CO₂ 濃度の時空間変動及び空間分布特性を把握し、様々なイベントに着目し、これらが与えている影響を明確に示すことを目的としている。

2. 解析地点

本研究では、WDCGG（温室効果ガス世界資料センター）によって収集された大気中 CO₂ 濃度の月平均実測データ（CD-ROM）を用いた。これらには、

- *IN SITU* : 現場で継続的に測定
- *Flask Sampling* : 現場でサンプリングしたもの
を研究所等に持ち帰り測定

の二通りの手法で測定されたデータが混じっているが、両手法で測定された 7 地点で検討を行った結果、表-1 にあるように双方に大きな相違がなかったため、本解

表-1 両手法での測定データの相関係数

Station	Latitude	C.C.(common term)
Alert	82° 27'N	0.9880 (1985-1992)
Zeppelinfjellet	78° 54'N	0.9757 (1994-1999)
Barrow	71° 19'N	0.9979 (1973-2001)
Mauna Loa	19° 32'N	0.9993 (1976-2001)
Tutuila	14° 15'S	0.9995 (1979-2001)
Amsterdam Island	37° 48'S	0.9966 (1982-1990)
South Pole	89° 59'S	0.9995 (1983-2000)

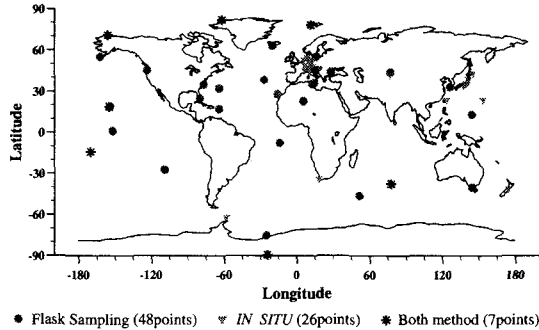


図-1 解析地点 (全 81 地点)

析ではこれらの解析地点を合わせた 95 地点を解析に用いた。本論文で用いたデータには欠損があるものがあるため、最小二乗法により求めた回帰直線とフーリエ級数を用いて内挿を行った。データの存在期間としては、ある程度の期間を有するものを用いているため、短いもので約 10 年程度、長いものでは 34 年間となっている。また、全解析地点 (95 地点) の中には、緯度は分かるものの経度が記されていない「Mobile」と属されたものがあるが、空間分布図など空間的な広がりを見る場合には、この Mobile データは除いた。図-1 には Mobile の解析地点を除いた 81 地点を示した。

3. 解析方法

(1) 時系列解析

一般に時系列は、傾向成分 (trend component)、周期成分 (periodic component)、確率変動成分 (stochastic component) の 3 成分から構成されている。ある時系列 (原系列) を y_t とすれば式 (1) となる。

$$y_t = T_t + P_t + \xi_t \quad (1)$$

ここに、 T_t : 傾向成分、 P_t : 周期成分、 ξ_t : 確率変動成分である。 T_t は最小二乗法、 P_t はフーリエ級数を用いて決定する。これにより、原系列から傾向成分、周期成分を除くことで非決定論的成分である ξ_t を決定するが、本解析では主に傾向成分と周期成分について解析を行ったので、本論文では扱っていない。

(2) スペクトル解析

各解析地点において、FFT により式 (2) を用いてパワースペクトル $P(f)$ (two-sided spectrum) を求め、周期を定量的に求めた。また、そこで得た卓越した周波数やそのパワースペクトルの違いを分布させることで、地球全体における変動の違いの把握を試みた。

$$P(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{T} F(f) F^*(f) \right] \quad (2)$$

ここに、 T : 定義域、 $F(f)$: フーリエ成分である。

(3) 連続ウェーブレット解析⁴⁾

式 (3) のような連続ウェーブレット変換 $T(a, b)$ により、ある周波数成分の振幅変動を時間的に捉えることで、その周波数成分が見かけ上の周期なのか、実際の長期的な周期なのかを明らかにしようと試みた。

$$T(a, b) = \frac{1}{\sqrt{c_\phi}} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi^{(a,b)}(t) f(t) dt \quad (3)$$

$$\varphi^{(a,b)}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4)$$

ここに、 $\varphi^{(a,b)}(t)$: ウェーブレット関数、 a : 周波数に相当するパラメータ、 b : 時間パラメータ、 $\varphi(t)$: アナライジングウェーブレット、 c_ϕ : アナライジングウェーブレットのフーリエ変換で定義される有限値の定数である。

連続ウェーブレット解析はアナライジングウェーブレットにより結果が変わるため、離散ウェーブレットを用いた方が良いが、データ数が 2 のべき乗でなくてはならず、CO₂ 濃度変動は 12ヶ月周期を持っているので、データを加工する必要がある。そのため、データを加工せずに使える連続ウェーブレット解析を行った。

幾つかのアナライジングウェーブレットで検討を行った結果、最適だと思われる、式 (5) で表されるメキシカンハットを用いた。

$$\varphi(t) = (1 - t^2) \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \quad (5)$$

本論文では、原系列から傾向成分と 1 年以下の周期成分を除いたもの (残差成分) について各地点で連続ウェーブレット解析を行った。これにより、局所的な周波数成分が時間とともにどのように変化しているかを示すことで、CO₂ 濃度の周期特性の把握を試みた。

(4) 相関行列

地点毎の CO₂ 濃度変動の相関関係を見るために、1994-1998 年の同時期における各解析地点同士の相関係数を基に相関行列で表した。ある 2 地点の CO₂ 濃度月平均変動の標準偏差を σ_i 、 σ_j とし、それらの共分散を σ_{ij} とすると、この 2 地点の相関係数 C_{ij} は式 (6) となる。

$$C_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sigma_i \sigma_j} \quad (6)$$

1994-1998 年の間に連続なデータのある計 56 地点で、相関係数を求め、それを色分けした行列で表すことで緯度による違いを示した。

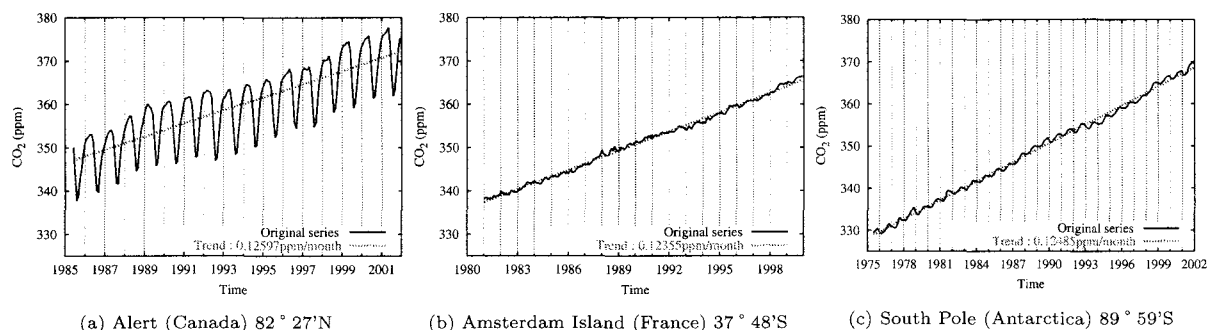


図-2 代表地点における CO₂ 濃度の原系列（実線）及び傾向成分（破線）

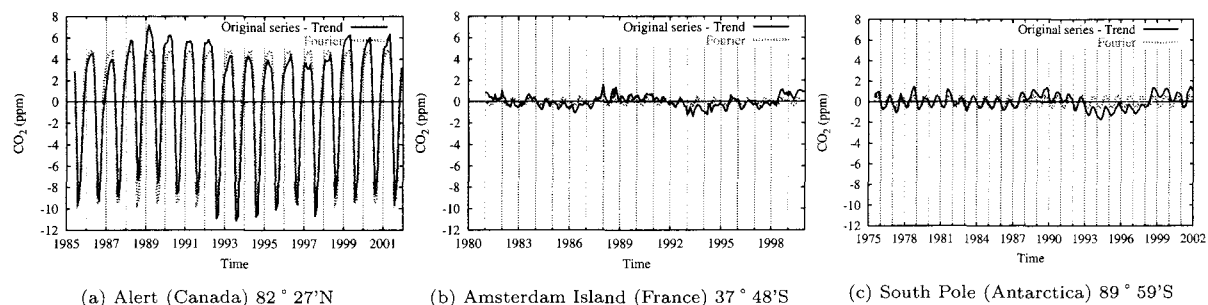


図-3 代表地点における CO₂ 濃度の原系列から傾向成分を除いたもの（実線）と周期成分（破線）

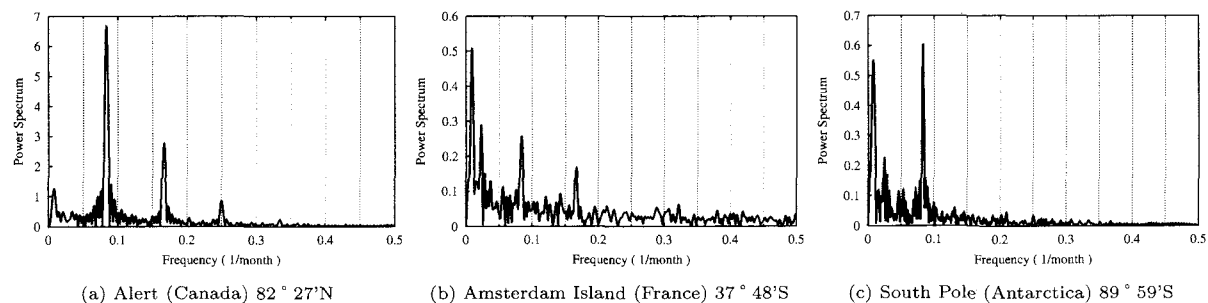


図-4 代表地点における CO₂ 濃度の原系列から傾向成分を除いたもののスペクトル（縦軸スケールを合わせずに卓越した周波数、スペクトル形状を見やすくしたもの）

(5) CO₂ 濃度空間分布図

CO₂ 濃度が世界全体でどのように変動しているのかを把握するために、Mobile データを除いた計 81 地点の生データを用いて、1997-2000 年において月毎に CO₂ 濃度のコンター図を描いた。これにより、等高線の状態や CO₂ 濃度の高さ等を見ることができ、CO₂ 濃度の時空間変動特性の把握を試みた。

4. 解析結果および考察

(1) 局所時間変動特性

本論文では、紙面の都合により、変動特性の違いが明らかな北半球の Alert、南半球の Amsterdam Island、South Pole の 3 地点についての結果のみを載せた。

各解析地点での時系列解析を行った結果、図-2 のような長期的な増加傾向があることを確認できた。また図-3 より、原系列から傾向成分を除いたもの（実線）と

周期成分（点線）を比較すると、特に図-3-b,c でずれている部分が確認でき、明らかに 1 年以上の長期的な周期を持っていると考えられる。

そこで、この長期的な周期を定量的に計るために、原系列から傾向成分を除いたものを基にスペクトル解析を行った結果が図-4 である。この図から、やはり 1 年周期が卓越していることが確認できる。その他にも、スペクトル強度に多少の相違があるものの、ほとんどの地点で約 10 年周期が検出された。これにより、長期的な周期とは約 10 年周期であることが確認できた。また図-5 から、北半球における 1 年周期のスペクトル強度は、約 10 年周期のスペクトル強度に比べ、非常に強いことが明らかである。

一方ある報告³⁾では、イベント（1991 年ピナツボ火山噴火やエルニーニョ現象等）が、CO₂ 濃度に影響を与えているのではないかとされており、このような理由から、約 10 年周期は見かけ上ではないかと考えられている。それを確認するために、図-6、図-7 のように

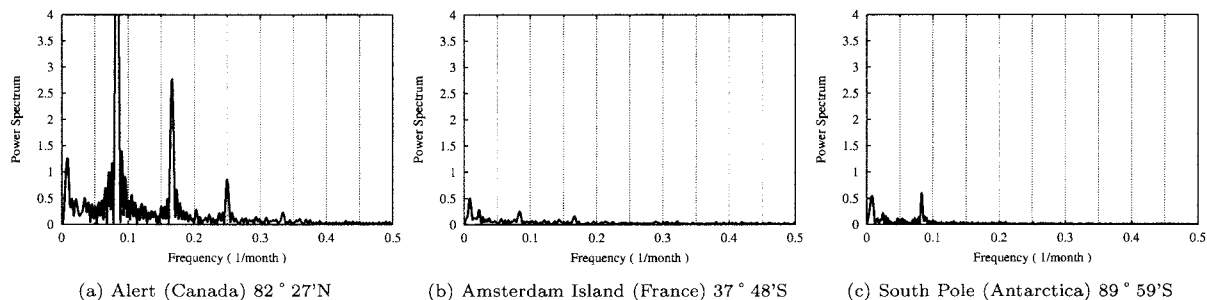


図-5 代表地点における CO₂ 濃度の原系列から傾向成分を除いたもののスペクトル（縦軸スケールを合わせてスペクトルの強さを比較したもの）

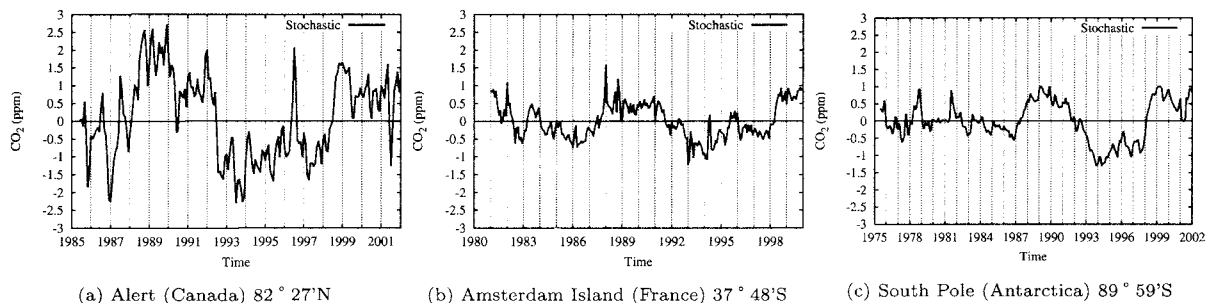


図-6 原系列から傾向成分と 1 年以下の周期成分を除いた成分（残差成分）の時系列図

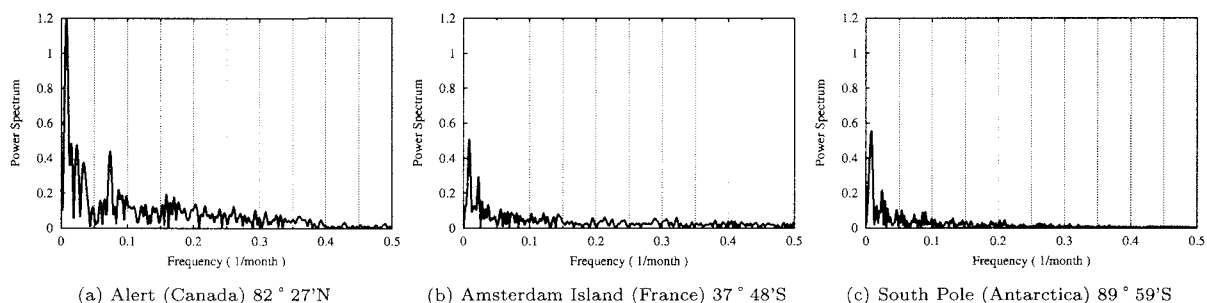


図-7 原系列から傾向成分と 1 年以下の周期成分を除いた成分（残差成分）のスペクトル図

原系列から傾向成分と 1 年以下の周期成分を除いた成分（残差成分）についてウェーブレット解析を行った。連続ウェーブレット変換したものを 3 次元表示したものを図-8 に示し、それを真上から見たものを図-9 に示した。連続ウェーブレット変換したものの約 10 年周期に当る周波数成分（図-9 中に示す実線部）を取り出したのが図-10 であり、この周波数成分の振幅が時間変動しているかどうかを確認した。すると、ほとんどの地点で振幅に時間変動があまり見られなかった。その反面、South Pole（図-10-c）の他数地点では、約 10 年周期の周波数成分において急激な振幅の時間変動が見られた。また、ピナツボ火山噴火の時期（1991 年 6 月）と重ねてみると、約 10 年周期の周波数成分は 1991 年 6 月において既にピーク（1989 年 8、9 月頃）を過ぎ減少傾向であることが確認でき、約 10 年周期はピナツボ火山噴火による見かけ上の周期とは言い難い結果であることが示された。これらの結果から、ピナツボ火山噴火の影響による振幅の時間変動はあるかもしれないが、約 10 年周期は実際に存在していると考えられる。

(2) 空間分布特性

空間分布特性を把握するため、Mobile データを除いた計 81 地点の解析地点で解析を行った。

原系列から傾向成分を除いたものを基に求めたスペクトルについて、卓越した周波数別に区別し世界地図上に分布させた結果が図-11-a である。これを見ると、北半球では 1 年周期に依存した変動、南半球では 1 年周期は弱く約 10 年周期の影響を受けた変動をしており、北半球と南半球とでは CO₂ 濃度変動の主たる周期に違いが明確に現れた。また、卓越した周波数におけるスペクトル強度のスケールを色で示した図-11-b を見てみると、南半球と北半球におけるスペクトル強度の変化の違いが明確である。北半球では南下するにつれスペクトル強度に顕著な弱化が見られ、スペクトル強度が同程度の緯度帯がいくつか確認でき、南半球では北上してもスペクトル強度に減少があまり見られず、南半球全体で振幅が一定であることが明らかになった。

次に、緯度順（90N から 90S に向けて）に並べた解析地点（計 56 地点）について各解析地点同士の 1994-1998

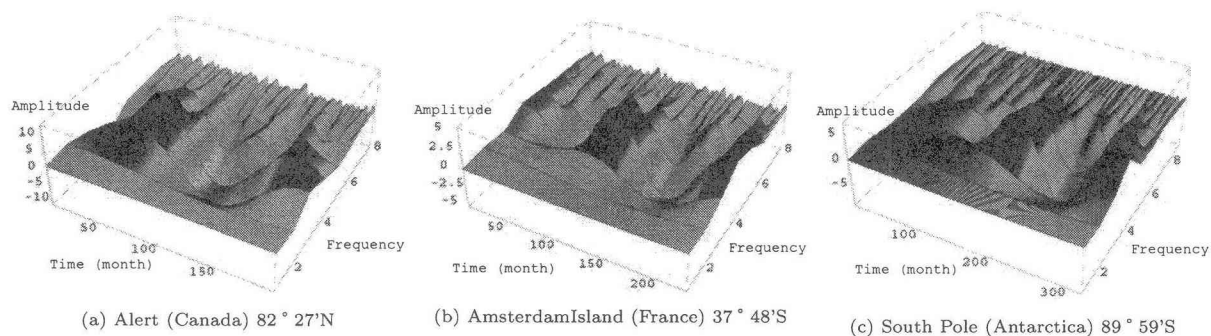


図-8 原系列から傾向成分と1年以下の周期成分を除いた成分(残差成分)の連続ウェーブレット変換3次元表示

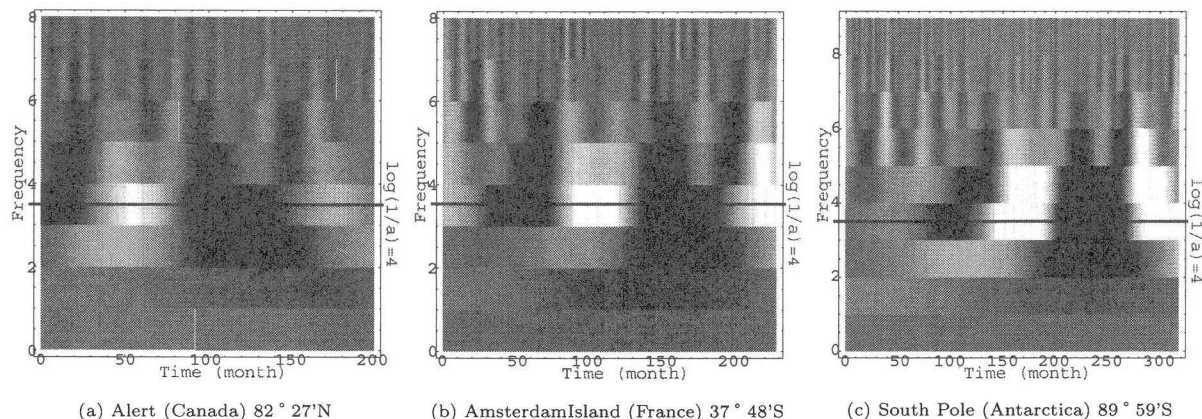


図-9 図-8を真上から見た密度プロット図※(残差成分) ※密度差(濃淡)が明確な周波数帯が卓越している。

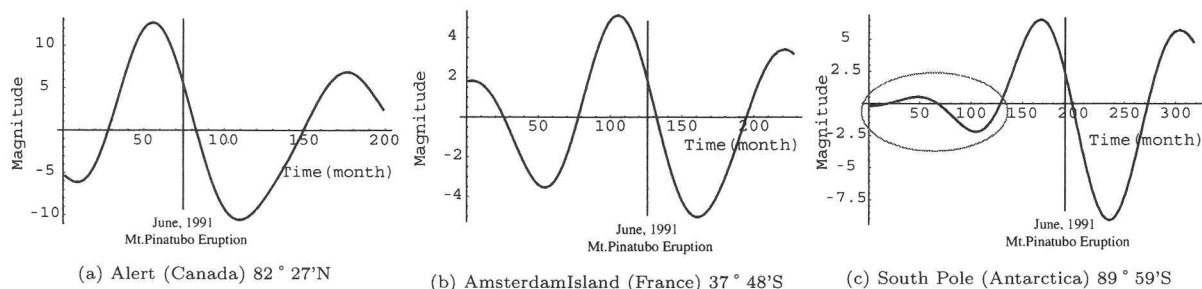


図-10 図-9における約10年周期の周波数成分($\log(1/a) = 4$)を取り出したもの

年における相関係数を求め、相関係数の値を色の濃淡で表した相関行列を図-12に示した。その結果、90N-60N, 30N-EQ, EQ-90S(南半球全体)で相関係数が高いことが確認できる。また60N-30Nでは、他の緯度帯に比べ相関係数は低く、ばらつきが見られた。これは、60N-30N(中緯度帯)では人間活動が活発であり、中緯度帯の解析地点毎の相関係数にばらつきが見られると考えられる。ここで、緯度帯別における地点数の違いが影響を与えていると考えられる点を注意しておく必要がある。

(3) 時空間変動特性

地球全体の時空間変動特性を把握することを目指した。そのため、Mobileデータを除いた81地点のデータを基に1996-2000年において月単位のCO₂濃度時空間分布図を描いた。図-13は、全球規模における空間分布

図である。本論文では紙面の都合上、季節的な変動の違いを明確に表している1997年の北半球における冬期(1月)、春期(4月)、夏期(8月)、秋期(10月)のみを図-13に示した。等高線の引かれ方について見てみると、北半球における冬から春にかけて(図-13-a,b)は緯度線に平行に引かれているが、夏から秋にかけて(図-13-c,d)は等高線が乱れていることが確認できる。また、北半球における秋から春にかけて(図-13-a,b,d)は、北半球の方が南半球に比べCO₂濃度が高いことが確認できる。しかし、北半球における夏期(図-13-c)に限り、北半球の方が南半球よりCO₂濃度が低くなっていることが確認できる。これは、北半球では、夏期に排出量より吸収量が上回るることにより濃度が急激に低下した結果であると考えられる。このように季節毎に違うCO₂濃度分布を示しているのは、季節によって植生の活性度が違うためだと考えられる。

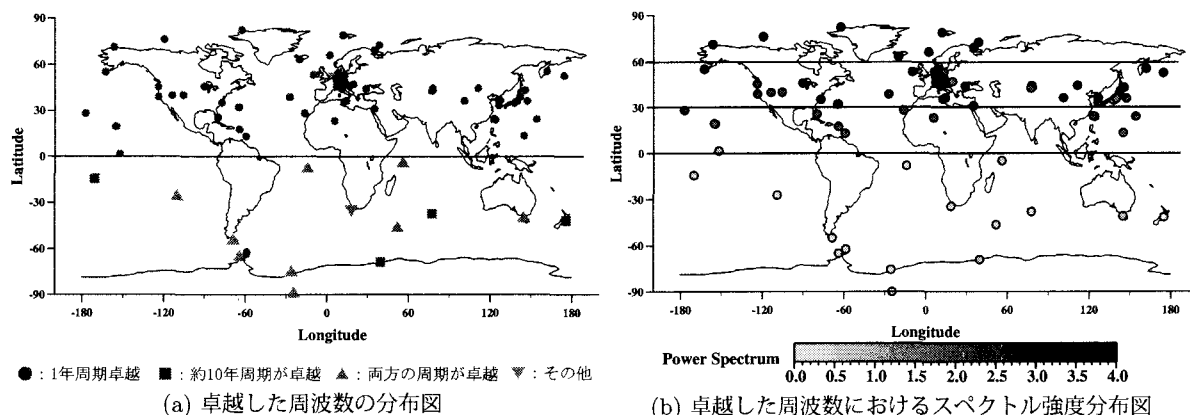


図-11 地球全体における卓越周波数に関する分布図

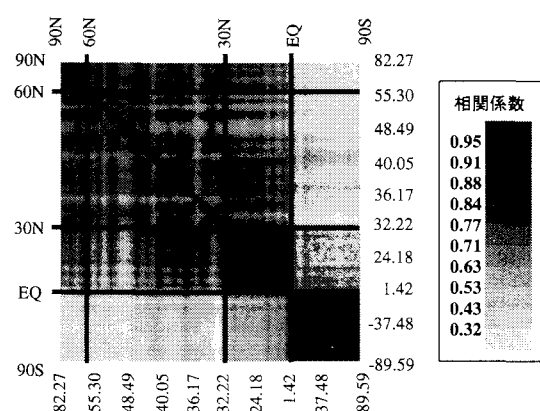


図-12 緯度順に並べた解析地点毎の相関行列

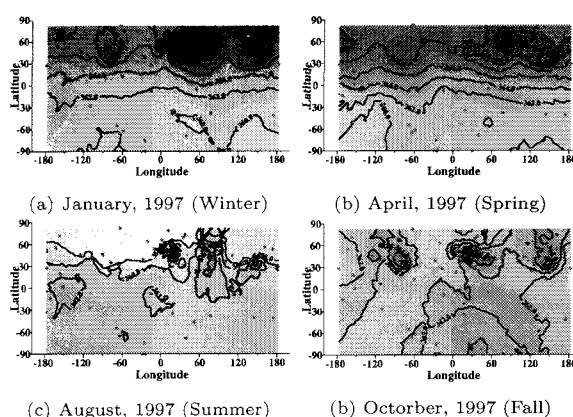


図-13 CO₂ 濃度時空間分布図

5. まとめと今後の課題

空間的分布特性として、北半球では約 30° 毎、南半球では全体で、相関係数の高い変動を示していることが明らかになったことにより、次のような緯度帯で CO₂ 濃度変動特性を分類することができると考えられる。北半球高緯度帯 (90N-60N) では、振幅の大きい 1 年周期を主とした変動である。北半球中緯度帯 (60N-30N) では、基本周期は 1 年であるものの人間活動の影響を強く受けているために周期や振幅にばらつきを持った変動である。北半球低緯度帯 (30N-EQ) は、1 年周期の振幅が北半球高緯度帯 (90N-30N) に比べ小さくなるため、約 10 年周期の影響も受けた変動である。南半球では、振幅の小さい約 10 年周期に依存した変動をしており、イベントの影響を大きく受けると考えられる。

時空間変動特性として、北半球における夏期 (主に 8, 9 月) に吸収が活発になることで、南半球より北半球の方が濃度が低くなること等、季節毎の空間変動特性を確認することができた。

本解析の結果により、約 10 年周期はピナツボ火山噴火の影響による見かけ上の周期とは言い難く、約 10 年周期は存在していると考えられる。

今後の課題として、その他のイベント (エルニーニョ

やラニーニャ現象等) や時系列的な経済変動との関係を考えることで、CO₂ 濃度変動特性をより細かく把握していく必要があると考えられる。

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) Thomas J. Conway et al. : Evidence for interannual variability of the carbon cycle from the National Oceanic and Administration/ Climate Monitoring Oceanic and Diagnostics Laboratory Global Air Sampling Network, Journal of geophysical research, vol.99, No.D11, pp.22831-22855, 1994
- 4) 斎藤兆古 : Mathematica によるウェーブレット変換, 朝倉書店

(2003. 9. 30 受付)