

## 低次元モデルによる大気-海洋系の季節変動解析

著者	岡村 隆成
著者別名	OKAMURA Takanari
雑誌名	八戸工業大学異分野融合科学研究所紀要
巻	6
ページ	27-34
発行年	2008-02-29
URL	<a href="http://id.nii.ac.jp/1078/00002345/">http://id.nii.ac.jp/1078/00002345/</a>

# 低次元モデルによる大気-海洋系の季節変動解析

岡村隆成\*

## Prediction of Seasonal Variability in Atmosphere-Ocean System Using Low Order Model

Takanari OKAMURA\*

### Abstract

The seasonal variability in the coupled atmosphere-ocean system is studied with a simple low order model. The atmospheric component is based on Lorenz-84 model and has intrinsic variability at all time-scale. The ocean component models the wind-driven circulation. The interaction between the atmospheric circulation and sea surface temperature fields over the North Atlantic are characterized by the atmosphere leading the ocean by 1 week and 2-3 weeks of high-frequency. It is also estimated that the ocean interferes the atmosphere in low-frequency of interdecadal variability.

**Key words:** seasonality, atmospheric circulation, ocean, anomaly, low order model

### 1. はじめに

大気循環における季節的な気温変動や海洋での海面温度の変動は、我々の生活や産業に深く密着した現象であるため、極めて高い関心が払われている。これらの変動に関して、大気と海洋が連成した系として数週間の短期的あるいは数年、10年を越える長期的な変動周期の観測が行われている<sup>1)-3)</sup>。また、これらの現象をモデル化した解析的な取り扱いが行われており<sup>4)-12)</sup>、観測、解析の両面からこの変動機構を解明するための研究が盛んである。解析的な方法として、大気および海洋系の運動、エネルギー方程式から組み立てられたモデルを数値的に解く詳細な解法とこの連成系を単純化した低次元のモデルを用いた解析に大別できる。

ここでは、低次元モデルを用いて大気循環における気温の変動と海洋での海面温度の変動を大気-海洋の連成した系として、その変動周期や大気と海洋間の相互干渉に関する解析を行った結果について述べる。本論では、低次元解析モデルを第2章で述べ、解析の結果を第3章に示す。第4章で主に北大西洋と北太平洋における大気-海洋系の気温変動と海面温度の変動の発生と大気と海洋間の相互干渉に関する観測結果と上記の解析結果との比較を行い、結論を第5章に示す。

### 2. 解析モデル

#### 2.1 大気モデル

大気-海洋系のモデルを導く前に、大気および海洋モ

デルを個別に述べる。大気モデルを次の低次元常微分方程式で示す。これらの式は、Lorenz<sup>13)</sup>が導いた北半球を対象とした大気大循環モデルである。

$$\begin{aligned}\dot{X} &= -(Y^2 + Z^2) - aX + aF(t) \\ \dot{Y} &= XY - bXZ - Y + G \\ \dot{Z} &= XZ + bXY - Z\end{aligned}\quad (1)$$

独立変数  $t$  は時間であり、オーバードットは時間微分を表している。3変数  $X, Y$  および  $Z$  の内、 $X$  は子午線上の大気平均温度勾配の振幅値で、 $Y$  と  $Z$  は経線上の cosine と sine の振幅値である。この Lorenz-84 モデルにおいて、極方向の熱輸送は  $Y^2 + Z^2$  に比例しており、そしてこの項は平均温度勾配を減少させる働きがある。次式で与えられる  $F(t)$  は、太陽放射熱の赤道-極間の違いによる平均駆動力を表わしている。

$$F(t) = F_0 + F_1 \cos \omega t \quad (2)$$

この式は、季節的な時間スケールでの変化を表わしており、 $\omega = 2\pi/T \text{ yr}^{-1}$  である。 $T$  は周期ユニットである。 $G$  は東西の温度変化に基づく経線上の駆動力である。

#### 2.2 海洋モデル

次に、大気によって駆動される海洋の循環を表わす低次元常微分方程式の海洋モデルを次に示す<sup>14)</sup>。

$$\begin{aligned}\dot{P} &= -(\psi_r^2 + \psi_i^2)P \\ \dot{Q} &= 0 \\ \dot{\psi}_r &= -\sigma \psi_r - \Omega \psi_i \\ \dot{\psi}_i &= \Omega \psi_r - \sigma_i \psi_i\end{aligned}\quad (3)$$

ここで、 $P$  は海面での子午線上の平均温度勾配を表わしており、 $Q$  は平均海面温度を示している。海洋での極方向の熱輸送は大循環流によってなされ、そしてその量は

平成 20 年 1 月 7 日受理

\* 大学院工学研究科機械・生物化学工学専攻/生物環境化学工学科・教授

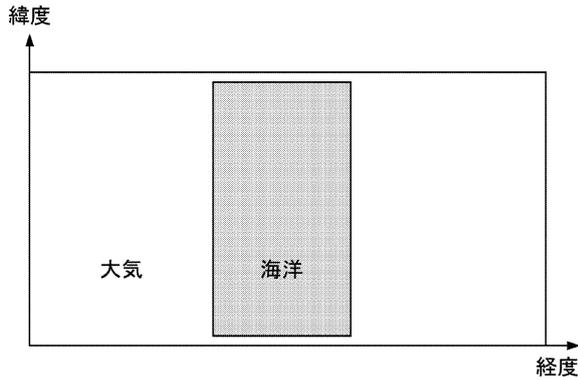


図1 大気-海洋系解析モデルの概念図

$\psi_r^2 + \psi_i^2$  に比例する。 $\psi_r$  と  $\psi_i$  は流れ関数で、次式で示される。この流れ関数に振動の周期  $\Omega$  と遅れ時間  $\sigma$  を持たせている。

$$\Psi = \psi_r + i\psi_i \quad (4)$$

### 2.3 大気-海洋系連成モデル

大気-海洋系の解析モデルの概念図を図1に示す。大気-海洋間の熱交換量が保存される系での大気-海洋系の連成モデルは、次式によって与えられる<sup>14)</sup>。

$$\begin{aligned} \dot{X} &= -(Y^2 + Z^2) - aX + aF(t) + rf(P - X - \gamma) \\ \dot{Y} &= XY - bXZ - Y + G + rf(Q - Y) \\ \dot{Z} &= XZ + bXY - Z \\ \dot{P} &= -(\psi_r^2 + \psi_i^2)P + fc^{-1}(X - P + \gamma) \\ \dot{Q} &= fc^{-1}(Y - Q) \\ \dot{\psi}_r &= -\sigma\psi_r - \Omega\psi_i + \alpha_r X + \beta_r Y \\ \dot{\psi}_i &= \Omega\psi_r - \sigma\psi_i + \alpha_i X + \beta_i Y \end{aligned} \quad (5)$$

大気-海洋間の熱輸送は大気と海洋間の温度差に比例しており、 $f(P - X)$  と  $f(Q - Y)$  の項で与えられる。このとき、 $f$  は熱伝達係数であり、この値は一定値と仮定する。極方向への大気と海洋による熱輸送の観測データの見直しが行われた<sup>15)</sup>。これによると、従来よりも高い値が算出され、北半球での大気の年間平均熱輸送は北緯 43° で最大となり、その見積値は  $5.0 \pm 0.14$  PW と推測されている。式中の熱輸送の項には、地球上の緯度方向の海洋が占める割合  $r$  を乗じている。 $c$  は大気と海洋の垂直方向に積分した熱容量の比である。また、 $\gamma$  は海洋によって直接吸収される太陽放射の熱量割合である。海洋に作用する風の応力は流れ関数に関する式の中で  $X$  および  $Y$  に比例する駆動力として表わされている。ここでの  $\alpha_r$ ,  $\alpha_i$ ,  $\beta_r$ ,  $\beta_i$  は定数である。

## 3. 解析結果

### 3.1 解析条件

大気-海洋系の連成モデルを表わす (3) 式の計算で使

表1 数値解析に使用したパラメータ

定数 $a$	0.025
定数 $b$	4
熱駆動力 $F_0$	58.5
熱駆動力 $F_1$	39.0
熱駆動力 $G$	1
バルク輸送係数 $f$	1
海洋割合 $r$	0.23
大気/海洋垂直熱容量比 $c$	200
海洋吸収太陽放射割合 $\gamma$	0.55
周期 $\Omega$	0.0162
遅れ時間 $\sigma$	0.00081
$\alpha_r$	8.40E-04
$\alpha_i$	4.20E-04
$\beta_r$	4.20E-04
$\beta_i$	8.40E-05
周期ユニット $T$	73

表2 数値解析に使用した初期条件

$X_0$	0.0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06
$Y_0$	0.0
$Z_0$	0.0
$P_0$	0.0
$Q_0$	0.0
$\psi_{r0}$	0.0
$\psi_{i0}$	0.0

用する解析パラメータを表1に示す。本解析モデルは北半球を対象としており、表中の海洋割合  $r = 0.23$  は、北大西洋に該当する値である。(3) 式の数値解析には Runge-Kutta 法を用いた。時間増分  $\Delta t$  の値として 0.02 を採用した。この値は 0.1 日に相当している。なお、大気-海洋系の連成がない場合の解析では、(3) 式の大気循環に関わる式に含まれる  $P, Q$  の項を固定値とした。

### 3.2 大気-海洋系連成モデル

解析を行うための初期条件を表2に示す。はじめに、計算開始の時間  $t = 0$  (year) における  $X$  の初期条件として、 $X_0 = 0.0$  から 0.01 ずつ増加して 0.06 まで 7 通りとした。この条件の下で計算を 1920 年まで行った。計算開始から 1 年の時間経過の間で、初期条件の違いによる  $X$  の値の変化の様子を図2に示す。時間経過が 0.3 年辺りまでは、初期条件が異なっても  $X$  の値に違いはほとんど見られないが、この時間を経過した以降では、 $X$  の値は、初期値の違いによって、お互い大きな違いを示すようになる。この時間経過における  $X$  の異なった変化の様子は、(3) 式のモデル式が非線形方程式であることの特徴を表わしている。ここで、 $X$  の初期値を  $X_0 = 0.01$  に特定して、計算開始から 1580 年経過した後の 20 年間の時間経過に伴う  $X$  の変化を図3に示す。1 年を周期とし

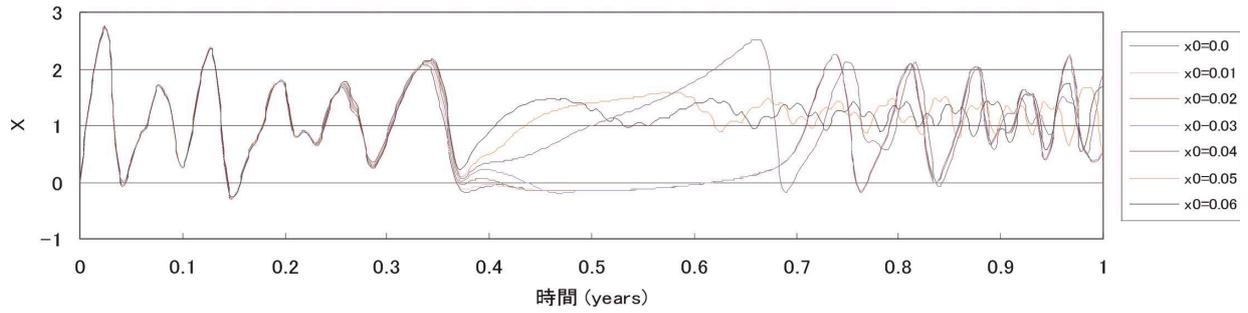


図2 初期値  $X_0$  が異なる場合の掲載開始から1年間の  $X$  の変化

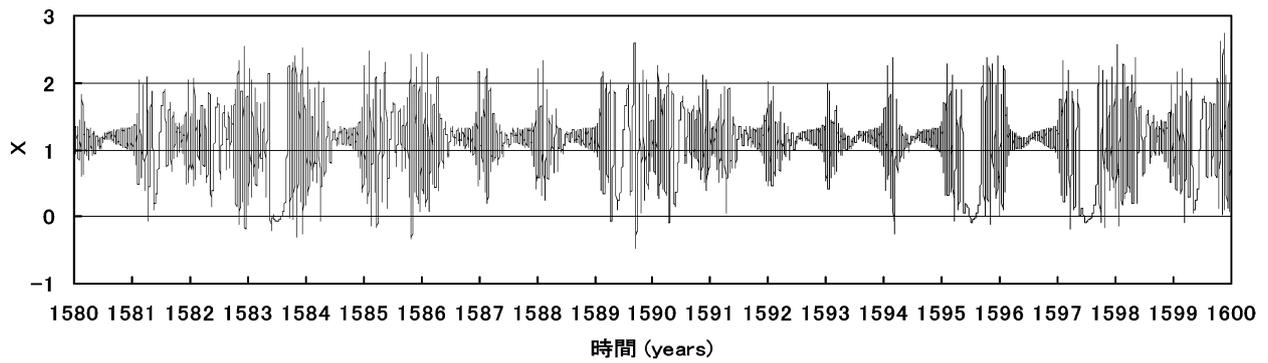


図3 計算を開始して1580年から20年間の  $X$  の変化

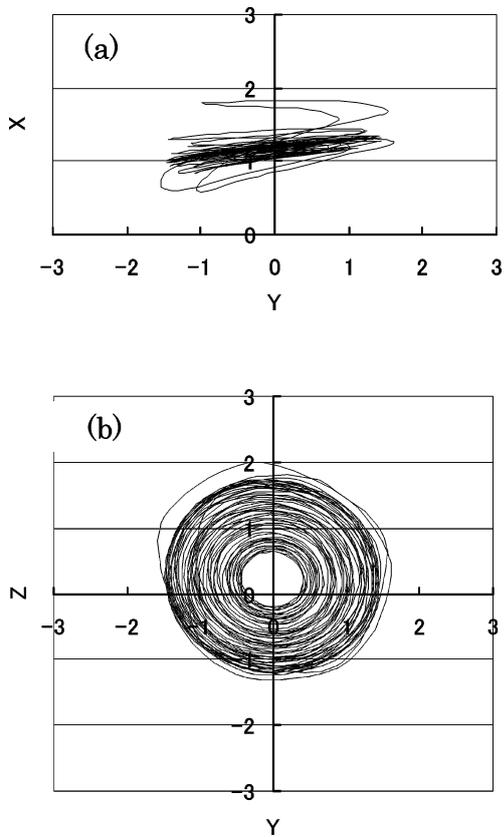


図4  $X$ ,  $Y$  および  $Z$  の計算を開始して1580年から1年間の変化の状態

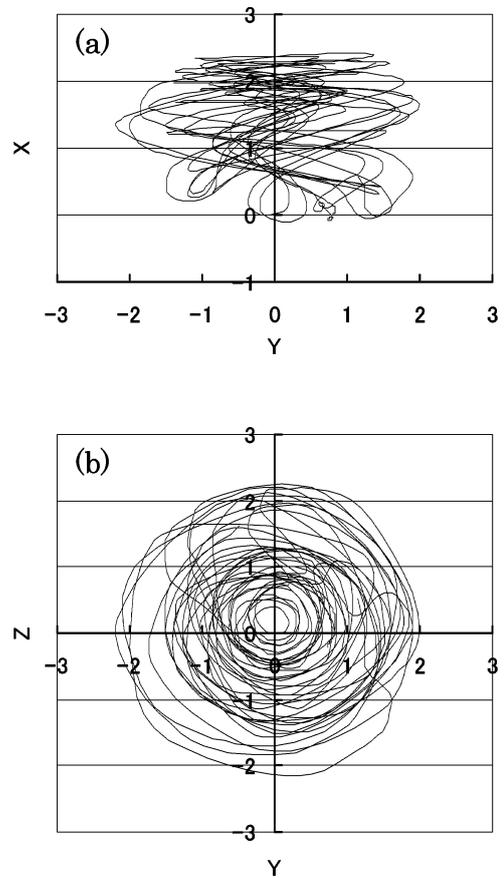


図5  $X$ ,  $Y$  および  $Z$  の計算を開始して1595年から1年間の変化の状態

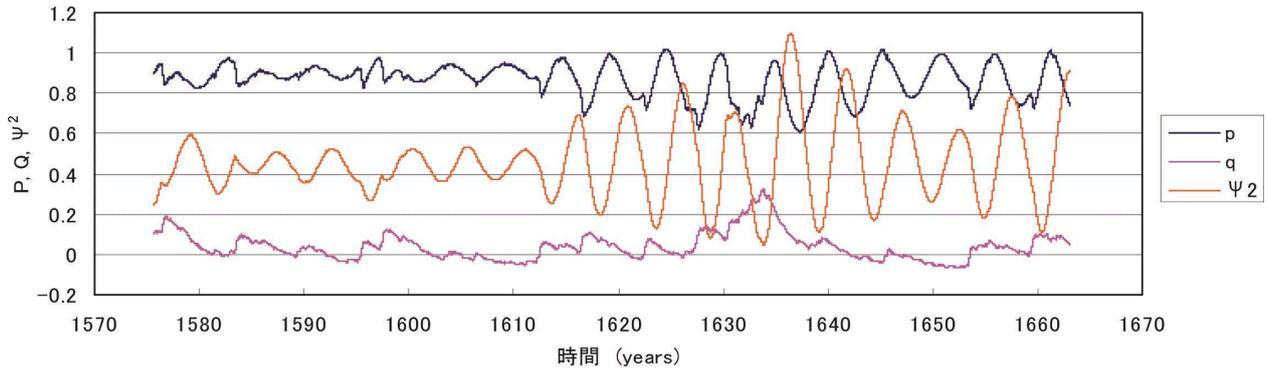


図6 計算を開始して1575年から88年間の  $P$ ,  $Q$  および  $\psi^2$  の変化

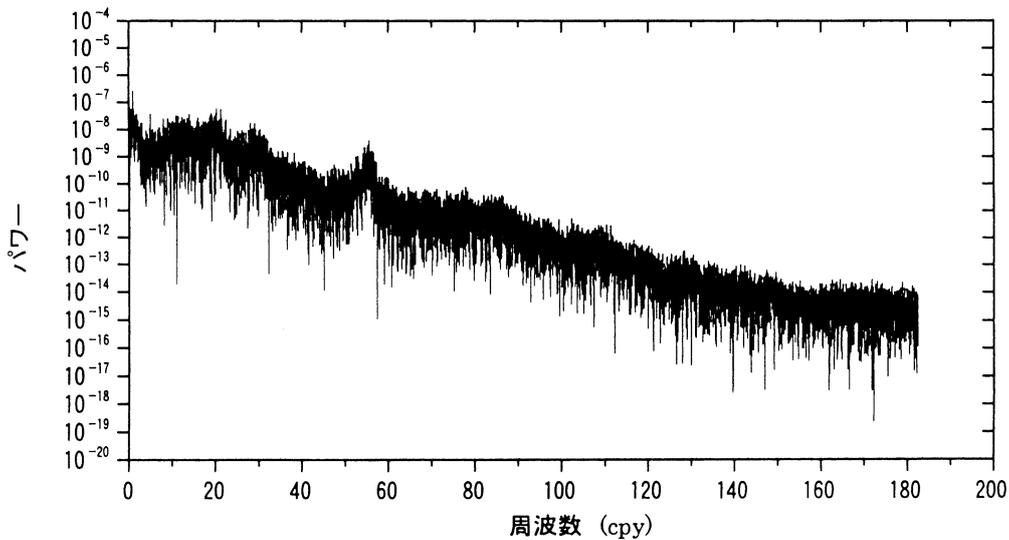


図7 計算を開始して1575年から1663年までの88年間の  $X$  のスペクトル解析

た変動の中で、 $X$  が小さい“静かな異変”の夏の時期である1583, 1595および1597年と、 $X$  がある値を保つ時期に分かれている。また、年間でも短期間の変動周期を持つことも分かる。

夏の期間に  $X$  がある一定の値を持つ場合として、計算開始から1580年の1年間の  $X$ ,  $Y$  および  $Z$  の変化の様子を図4に示す。図中の (a) は  $X$ – $Y$  面, (b) は  $Z$ – $Y$  面である。(b) の  $Y, Z$  の軌跡は、おおよそ  $Y=0.2$ ,  $Z=0.0$  点を中心とした円周上を滑らかに描いている。また、(a) で見られるように、 $X$  はおおよそ1.1を中心におおよそ0.0から0.3の狭い範囲で変動している。これに対して、夏の期間に静かな異変を持つ1595年の1年間の  $X, Y$  および  $Z$  の変化の様子を図5に示す。(b) の  $Z$ – $Y$  面で円の軌跡に乱れが現れており、位相が逆転している様子が見られる。また (a) の  $X$ – $Y$  面では、 $X$  は何度も0近辺まで到達しており、異変の状況を表わしている。

一方、海洋に関わる  $P, Q$  および  $\psi^2$  の変化状態を計算開始から1575年経過した88年間の期間に付いて図6に示す。いずれも大気の変化に較べて、長い周期を示して

いる。

ここで、 $X$  と  $P$  の周波数特性を調べるために、計算開始から1575年後の88年間のスペクトル解析を行った。解析でのウィンドウ法として、hamming関数を採用した。図7に  $X$  の解析結果を示す。高周波数領域で55.8 cpyの高いピークが現れ、これは約6.5日の周期に相当する。また、20.3, 29.1 cpyのピークも見られ、これらはほぼ18日と12.5日の周期に相当する。周波数の低い領域では、1 cpyを始めとして、4, 5, 8, 9… cpyの周波数が見られる。低周波数域では、0.187 cpyの周波数が見れており(ここでは低周波数域の詳細は示していない)、これは約5.4年の周期に相当する。次に、 $P$  のスペクトル解析の結果を図8に示す。高周波数域では、61.4 cpyのピークがあり、これは約6日の周期に相当する。また、約32, 22 cpyのピークも見られ、これらは11.4日と16.3日程度の周期に対応する。低周波数域では、1 cpyのピークよりも更に低い約0.19, 0.001 cpyの周波数が見られ、これらは5.3年、100年程度の長周期に相当する。この5.3年の周期は流れ関数の振動周期に依存している。

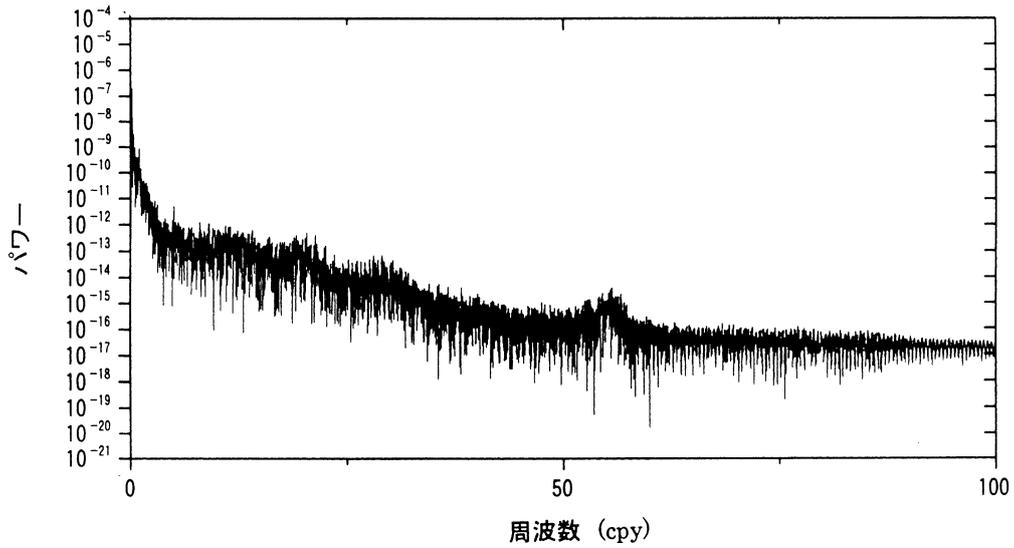


図8 計算を開始して1575年から1663年までの88年間の  $P$  のスペクトル解析

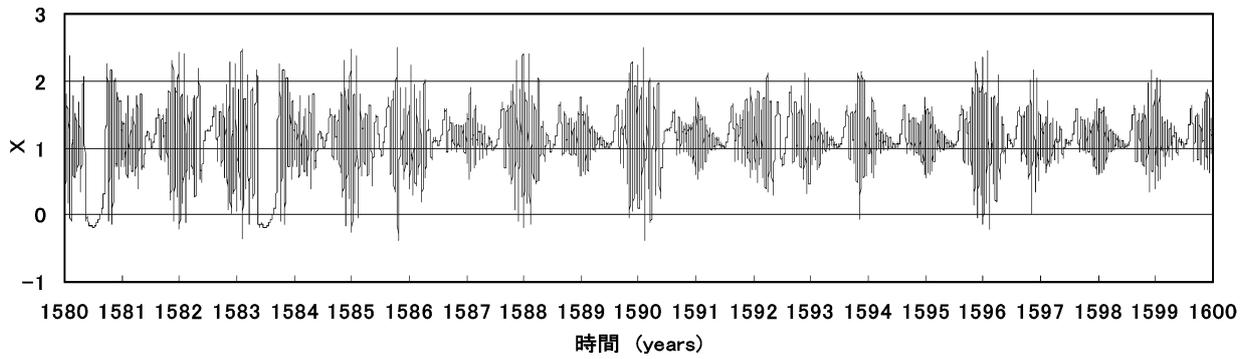


図9 計算を開始して1580年から20年間の  $X$  の変化  
非連成モデル: ケース1 ( $P=Q=0$ ) の場合

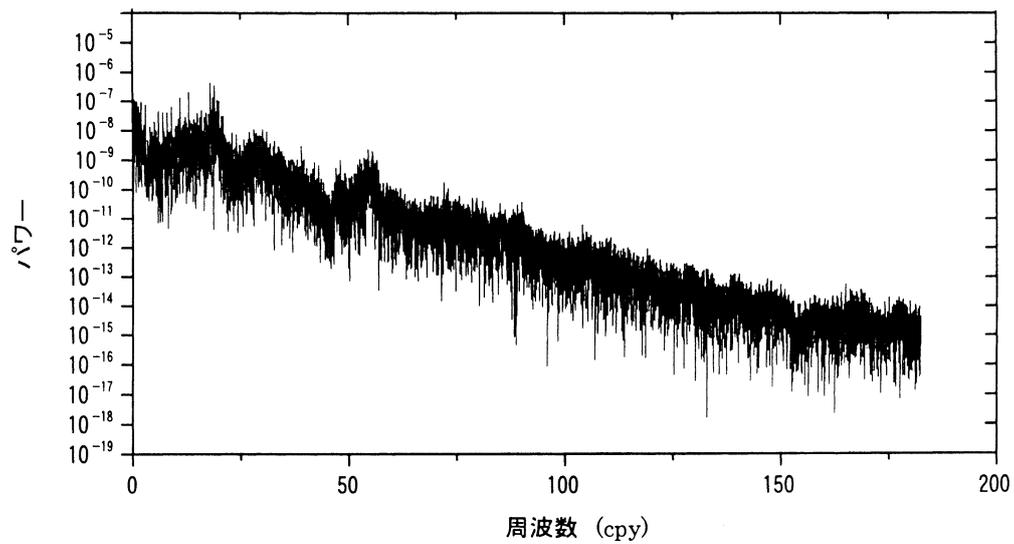


図10 計算を開始して1575年から1663年までの88年間の  $X$  のスペクトル解析  
非連成モデル: ケース1 ( $P=Q=0$ ) の場合

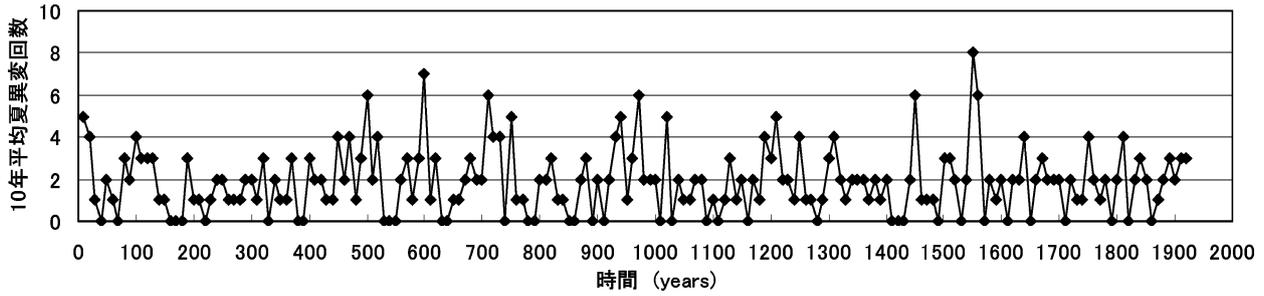


図11 計算開始から1920年までの時間経過における10年平均夏期間異変発生回数

### 3.3 大気-海洋系非連成モデル

大気と海洋とが互いに干渉し合っているかの有無を調べるために、大気-海洋系が非連成の条件で時間経過に伴う  $X$  の変化について計算を行った。計算条件として、 $P, Q$  の値を固定したケース1 ( $P=Q=0$ ) とケース2 ( $P=0.72, Q=0.08$ ) の2ケースとした。ケース1は、大気系のみの場合であり、ケース2の  $P, Q$  の値は、大気-海洋系連成モデルで1920年間の計算された  $P, Q$  それぞれの平均値のほぼ0.8倍の値に相当している。計算の初期条件として、連成モデルと同じ条件を採用した。 $X$  の初期値は、 $X_0=0.01$  である。

ケース1での  $X$  の変化の様子を図9に示す。ここで、時間範囲は連成モデルの場合と同様、計算開始から1,580年経過後の20年間である。連成モデルの場合と同じように夏期間の静かな異変の発生を見ることができる。

非連成モデルの  $X$  の周波数特性を調べるために、連成モデルと同様スペクトル解析を行った。ケース1の場合の結果を図10に示す。高周波数域で54.6 cpyのピークが見られ、これは6.7日に相当する。周波数の低い領域では、1 cpyを始めとして、2, 3, 4, ..., 7, 8, 9 ... cpyの周波数が見られる。低周波数域で約0.38 cpyのピークがあり、これはほぼ2.6年の周期に相当するが、連成モデルで見られた5.3年の長周期は見られない。ケース2の場合、ケース1と同様の傾向を示しており、低周波数域で約4.5年に相当する周期が見られ、大気-海洋の連成系での長周期の値に近い値を示している。

### 3.4 夏期間の静かな異変

大気-海洋系の連成モデルでの夏期間の静かな異変の発生周期を把握するため、計算開始から1920年までの期間の発生状況を調べた。また、大気-海洋系の連成の有無によってこの異変の発生に違いが生じるかを確認するため、非連成の場合であるケース1, 2についても同様の計算を行った。時間経過に伴う10年平均の発生回数を  $X$  の初期値が  $X_0=0.0$  から0.06までの7通りに付いて求めた。時間経過に伴う発生状況を初期値  $X_0=0.01$  の場合に付いて図11に示す。この結果から、異変発生回数が10年間で0回の場合がある一方、5回を越える多頻度で

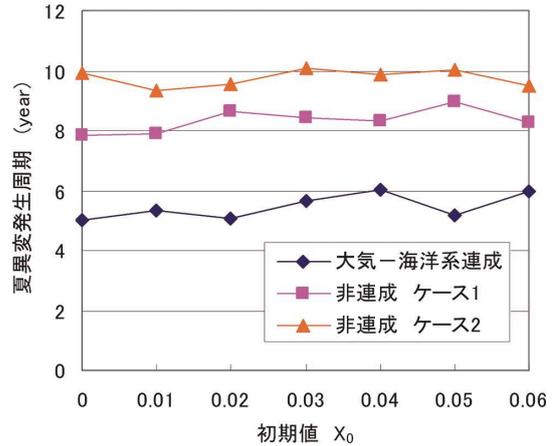


図12 計算開始から1920年までの時間経過における夏期間異変発生周期

発生する期間があることが分かる。

異変発生の周期を  $X$  の初期値が異なる7通りの場合に付いて図12に示す。これによると、大気-海洋系が連成あるいは非連成かによってその特性は異なることが分かる。連成モデルでは、異変発生は、 $X$  の初期値によって多少異なるが、ほぼ5~6年の周期を持っている。これに対して、非連成の場合の異変発生は、ケース1, 2共に連成の場合に較べて長い周期を持ち、ケース1で8~9年、ケース2では9~10年である。

## 4. 考 察

季節的な海洋の変動現象の最近の観察の一つとして、北大西洋と北太平洋での大気-海洋間の相互干渉に関する1981年から1995年までの14年間の観測データの解析がある。これによると、大気は海洋の混合層温度変動に2, 3週間の周期で、特に冬季の時期に強い影響を与えていることが認められた。大気循環の温度変動によって引き起こされる海洋表層の混合層の温度変動は大気の駆動力が最大に達した後に発生することが示された。そのシナリオは次の通りである。大気駆動力パターンが1, 2週間続く→この間、海洋混合層の温度変動が成長する→大気駆動力が減衰する→海洋混合層の温度変動の減衰項が大気駆動力に勝る→海洋の変動が減衰し始める

→海洋混合層の温度変動の最大値は大気駆動力のピークの後に発生, 2, 3 週間の時間遅れを持つ。この観測では, 海洋から大気への数年の時間経緯でのフィードバックは観測されなかったが, この理由として, 観測期間が充分ではなかったことを挙げている。また, 他の観測結果から北太平洋における年間の季節変化に伴う海面温度変動に対する大気と海洋の相互干渉に付いてその機構が示されており<sup>2)</sup>, この現象は, 夏季の海洋上の雲量による影響を受けることを観測結果の調査から明らかにしている<sup>3)</sup>。

スペクトル解析の結果で示したように, 北大西洋の海面温度の短期的な変動として, 6 日, 11.4 日, 16.3 日の周期が現れている。一方, 上述の海洋の観測結果では, 海洋の混合層温度変動, すなわち海面温度変動は 2, 3 週間の周期であり, 解析で得られた変動周期は, 観測結果の値よりも少し短い, これとほぼ同程度の値を得ている。数年あるいは 10 年オーダの長期の変動周期に関して, 大気-海洋連成モデルによる解析を主体とした研究成果がレビューされており<sup>12)</sup>, この中で大気と海洋との相互干渉の現象が認められることを述べると共に, 北大西洋で発生する約 15 年程度の周期変動に対して, 各種の解析モデルによって 10 年から 50 年の範囲の周期の解があることが示されている。3. 項で示した長期の変動周期に関する解析値は 5.3 年の周期であり, この値は観測された値に較べて小さいが, 数年オーダの値が得られている。解析では 100 年程度の極めて長期の変動周期が現れており, 実際にもこの長周期変動が存在する可能性がある。

大気-海洋系の非連成モデルにおける  $X$  のスペクトル解析の結果を連成モデルの結果と比較してみる。高周波数域では両者に余り違いは見られないが, 低周波数域で両者の違いが見られるようになる。この低周波数域では, ケース 1 の場合にほぼ 2.6 年の周期が現れ, ケース 2 では, 約 4.5 年の周期が見られ, どちらも連成モデルでの値に較べて周期は短い。但し, ケース 2 での値は, 連成モデルでの値に近い値となっている。この理由として, ケース 2 の  $P$  と  $Q$  の計算条件として, 連成モデルで計算された平均値の 0.8 倍の一定値を使用しており, この値の効果が出ていると考えられる。これらの解析の結果から,  $X$  の変動周期に関し, 特に, 数年オーダの長期周期に対して海洋から大気への干渉が存在することが推測される。

$X$  の時間経過に伴って起こる夏期間の静かな異変の発生を大気-海洋系の連成の有無によってその特性を比較すると, 異変の発生頻度は, 連成の有無によって明らかに異なっている。連成モデルでは異変発生はほぼ 5~6 年の周期に対し, 非連成モデルのケース 1 で 8~9 年, ケース 2 で 9~10 年で, 非連成モデルの方が 2 倍近く長い。これは大気と海洋の相互干渉によって, 夏期間の異変の発生頻度は連成がない場合に較べて増加することを

示唆している。上記に示した夏期間の異変発生の周期は,  $X$  のスペクトル解析で得られた 5.4 年の長期周期とほぼ合致する値であり, 解析で得られた値はこの異変発生の周期を捉えていると推測される。

## 5. 結 論

大気と海洋が連成した系における気温や海面温度の短期的あるいは長期的な変動に関して, 大気-海洋系の低次元モデルを使って北大西洋を対象とした解析を行い, 次の結論を得た。

- (1) 大気は, 短期の周期として 1 週間および 2, 3 週間の変動周期を持ち, また, 5.4 年の長期の変動周期も見られる。
- (2) 海面温度は, 大気温度の変動と同様に, 短期の周期として 1 週間および 2, 3 週間の変動周期を持ち, また, 流れ関数に依存した 5.3 年の長期の変動周期が見られる。
- (3) 海洋において 2, 3 週間の周期の海面温度変動が観測されており, 解析値はこの観測結果の値よりも少し短い, ほぼ同程度の値を得た。
- (4) 約 15 年程度の長期の周期変動の観測結果に対して, 解析値は 5.3 年の周期と観測値に較べて小さいが, 数年オーダの値を得た。
- (5) 大気のスベクトル解析の結果から, 高周波数域では, 大気-海洋系連成の有無による違いは余り見られないが, 低周波数域で違いが見られる。特に, 数年オーダの長期周期に対して海洋から大気への干渉が存在することが推測される。
- (6) 夏期間の静かな異変の発生頻度は大気-海洋系の連成の有無によって異なり, 連成モデルでほぼ 5~6 年の周期に対し, 非連成モデルの周期は 2 倍近く長い。これは大気と海洋の相互干渉による影響を示唆している。

## 参考文献

- 1) C. Deser, and M.S. Timlin, Atmosphere-ocean interaction on weekly timescales in the North Atlantic and Pacific, *J. Climate*, 10, 393-408, 1997.
- 2) Y. Zhang, J.R. Norris, and J.M. Wallace, Seasonality of large-scale atmosphere-ocean interaction over the North Pacific, *J. Climate*, 11, 2473-2481, 1998.
- 3) J.R. Norris, Y. Zhang, and J.M. Wallace, Role of low clouds in summertime atmosphere-ocean interactions over the North Pacific, *J. Climate*, 11, 2482-2490, 1998.
- 4) R. Saravanan, and J.C. McWilliams, Stochasticity and spatial resonance in interdecadal climate fluctuations, *J. Climate*, 10, 2299-2320, 1997.
- 5) A. Groetzner, M. Latif, and T.P. Barnett, A decadal cycle in the Atlantic Ocean as simulated by the ECHO coupled GCM, *J. Climate*, 11, 831-847, 1998.

- 6) F.M. Selten, R.J. Haasma, and J.D. Opsteegh, On the mechanism of North Atlantic decadal variability, *J. Climate*, 12, 1956-1973, 1999.
- 7) A. Groetzner, M. Latif, A. Timmermann, and R. Voss, Interannual to decadal predictability in a coupled ocean-atmosphere general circulation model, *J. Climate*, 12, 2607-2624, 1999.
- 8) R. Saravanan, G. Danabasoglu, C. Doney, and J.C. McWilliams, Decadal variability and predictability in the midlatitude ocean-atmosphere system, *J. Climate*, 13, 1073-1-97, 2000.
- 9) D.J. Walland, S.B. Power, and A.C. Hirst, Decadal climate variability simulated in a coupled general circulation model, *Climate Dynamics*, 16, 201-211, 2000.
- 10) D. Ferreira, C. Frankignoul, and J. Marshall, Coupled ocean-atmosphere dynamics in a simple midlatitude climate mode, *J. Climate*, 14, 3704-3723, 2001.
- 11) S. Panchev, and T. Spassova, Simple general atmospheric circulation and climate models with memory, *Advances in Atmospheric Sciences*, 22, 5, 765-769, 2005.
- 12) M. Latif, Dynamics of interdecadal variability in coupled ocean-atmosphere models, *J. Climate*, 11, 602-624, 1998.
- 13) E.N. Lorenz, Irregularity: A fundamental property of the atmosphere, *Tellus*, 36A, 98-110, 1984.
- 14) R. Ferrari, and P. Cessi, Seasonal synchronization in a chaotic ocean-atmospheric model, *J. Climate*, 16, 875-881, 2003.
- 15) K.E. Trenberth, and J.M. Caron, Estimates of meridional atmosphere and ocean heat transfer, *J. Climate*, 14, 3433-3443, 2001.