

# 自己組織化マップ (SOM) を用いた AO とNAOの違いの解析

2017年1月

須長 智洋

# 自己組織化マップ (SOM) を用いた AO と NAO の違いの解析

筑波大学大学院

生命環境科学研究科

地球科学専攻

修士(理学) 学位論文

須長 智洋



# **Analysis of the Difference between Arctic Oscillation and North Atlantic Oscillation using Self-Organizing Maps**

**Tomohiro Sunaga**

## **Abstract**

Arctic Oscillation (AO) is an oscillating phenomenon detected in sea-level pressure (SLP) fields between the North Pole and both North Pacific and North Atlantic. North Atlantic Oscillation (NAO) is a similar oscillating phenomenon detected in SLP fields between the North Pole and North Atlantic. Itoh (2002) and Ambaum et al. (2001) said that the oscillations of AO and NAO cannot be divided by PC1-PC2 plain of Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis of 3 point sea saw model.

In this study, therefore, the relationship and difference between AO and NAO are examined using Self-Organizing Maps (SOM). The SLP fields and the barotropic components of the atmosphere are analyzed using the Japanese 55-year Reanalysis (JRA-55) and National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) reanalyses. The analysis was conducted both for winter (December, January, and February: DJF) monthly data and their mean. First, an EOF analysis was conducted for the SLP fields and their barotropic components. Second a SOM analysis was conducted for the first 20 EOFs. Third, the results of the SOM analysis were plotted on the PC1-PC2 -plain that is EOF score. By using this plain, we examined the relationship and difference between AO and NAO.

It was revealed that structure of AO depends on the period of the analysis. Therefore, the definition of AO is not suitable. A blank area of the score of EOF was seen on the PC1-PC2 plane only in the analysis of DJF mean from 1960 to 2010. And it was found that the center of action of the SLP fields that is Atlantic Oscillation is negative, North Pole is positive, and North Pacific Ocean is positive. In this study, that center of action is named Pacific Atlantic Regime (PAR). But, the analysis of DJF mean from 1980 to 2010 and barotoropic component was not found a blank area, which could be because the data of DJF mean have baroclinity due to heat flux during three months over North Pacific Ocean. It was also revealed that the SLP anomaly over North Pacific Ocean becomes large positive or negative only when NAO index is negative.

**Key Words:** Arctic Oscillation, North Atlantic Oscillation, Self-Organizing Maps, Empirical Orthogonal Function

# 目次

Abstract	i
目次	iii
図目次	v
1 はじめに	1
2 目的	3
3 使用データ	4
3.1 JRA-55 . . . . .	4
3.2 NCEP/NCAR . . . . .	4
3.3 NAO index . . . . .	4
4 解析手法	5
4.1 展開係数 $w$ について . . . . .	5
4.2 EOF 解析 . . . . .	6
4.3 SOM 解析 . . . . .	7
4.3.1 SOM の導出 . . . . .	7
4.3.2 Sammon Map の導出 . . . . .	9
4.3.3 SOM の性質 . . . . .	10
4.3.4 SOM の構造マップの作成 . . . . .	11
4.4 SOM の大気場への適用方法 . . . . .	11
4.4.1 EOF の Score の入力 . . . . .	11
4.4.2 展開係数 $w$ を使った EOF の Score の入力 . . . . .	12
4.4.3 AO と NAO のアプローチ方法 . . . . .	12
5 結果	13
5.1 SLP の解析 . . . . .	13
5.1.1 DJF 平均の 50 年と 30 年の EOF 解析 . . . . .	13
5.1.2 DJF 平均の 50 年と 30 年の SOM 解析 . . . . .	15
5.1.3 Monthly の解析 . . . . .	18
5.1.4 順圧成分の解析 . . . . .	20
5.1.5 NAO-Index との比較 . . . . .	21

5.1.6	T 検定 . . . . .	22
6	考察 . . . . .	24
6.1	北極振動の定義である EOF1 の構造の期間依存について . . . . .	24
6.2	SLP と順圧成分の比較 . . . . .	25
6.3	レジームの存在と AO と NAO との関係について . . . . .	25
7	結論 . . . . .	28
	謝辞 . . . . .	29
	参考文献 . . . . .	30

## 図 目 次

1	単純な SOM の適用例と学習ステップ . . . . .	33
2	長方形の学習例 . . . . .	34
3	ローレンツアトラクタに SOM を学習させた例 . . . . .	34
4	JRA-55 を用いた SLP の DJF 平均値の 50 年間における EOF1 . . . . .	35
5	JRA-55 を用いた SLP の DJF 平均値の 50 年間における EOF2 . . . . .	35
6	NCEP/NCAR を用いた SLP の DJF 平均値の 50 年間における EOF1 . . . . .	36
7	NCEP/NCAR を用いた SLP の DJF 平均値の 50 年間における EOF2 . . . . .	36
8	JRA-55 を用いた SLP の DJF 平均値の 30 年間における EOF1 . . . . .	37
9	JRA-55 を用いた SLP の DJF 平均値の 30 年間における EOF2 . . . . .	37
10	NCEP/NCAR を用いた SLP の DJF 平均値の 30 年間における EOF1 . . . . .	38
11	NCEP/NCAR を用いた SLP の DJF 平均値の 30 年間における EOF1 . . . . .	38
12	SLP の DJF 平均値の 50 年間における PC1 . . . . .	39
13	SLP の DJF 平均値の 50 年間における PC2 . . . . .	39
14	SLP の DJF 平均値の 30 年間における PC1 . . . . .	40
15	SLP の DJF 平均値の 30 年間における PC2 . . . . .	40
16	JRA-55 を用いた SLP の DJF 平均値の 50 年間における構造マップ . . . . .	41
17	JRA-55 を用いた SLP の DJF 平均値の 50 年間における PC1-PC2 平面 . . . . .	41
18	JRA-55 を用いた SLP の DJF 平均値の 50 年間における PC1 の S-Map 平面 . . . . .	42
19	JRA-55 を用いた SLP の DJF 平均値の 50 年間における PC2 の S-Map 平面 . . . . .	42
20	NCEP/NCAR を用いた SLP の DJF 平均値の 50 年間における構造マップ . . . . .	43
21	NCEP/NCAR を用いた SLP の DJF 平均値の 50 年間における PC1-PC2 平面 . . . . .	43
22	NCEP/NCAR を用いた SLP の DJF 平均値の 50 年間における PC1 の S-Map 平面 . . . . .	44
23	NCEP/NCAR を用いた SLP の DJF 平均値の 50 年間における PC2 の S-Map 平面 . . . . .	44
24	JRA-55 を用いた SLP の DJF 平均値の 30 年間における構造マップ . . . . .	45
25	JRA-55 を用いた SLP の DJF 平均値の 30 年間における PC1-PC2 平面 . . . . .	45
26	JRA-55 を用いた SLP の DJF 平均値の 30 年間における PC1 の S-Map 平面 . . . . .	46
27	JRA-55 を用いた SLP の DJF 平均値の 30 年間における PC2 の S-Map 平面 . . . . .	46
28	NCEP/NCAR を用いた SLP の DJF 平均値の 30 年間における構造マップ . . . . .	47

29	NCEP/NCAR を用いた SLP の DJF 平均値の 30 年間における PC1-PC2 平面 . . . . .	47
30	NCEP/NCAR を用いた SLP の DJF 平均値の 30 年間における PC1 の S-Map 平面 . . . . .	48
31	NCEP/NCAR を用いた SLP の DJF 平均値の 30 年間における PC2 の S-Map 平面 . . . . .	48
32	JRA-55 を用いた SLP の DJF 平均値の 50 年間における sammonmap . .	49
33	JRA-55 を用いた SLP の DJF 平均値の 30 年間における sammonmap . .	49
34	NCEP/NCAR を用いた SLP の DJF 平均値の 50 年間における sammonmap	50
35	NCEP/NCAR を用いた SLP の DJF 平均値の 30 年間における sammonmap	50
36	SLP の monthly における EOF1 . . . . .	51
37	SLP の monthly における EOF2 . . . . .	51
38	SLP の monthly における PC1 . . . . .	52
39	SLP の monthly における PC2 . . . . .	53
40	SLP の monthly における構造マップ . . . . .	54
41	SLP の monthly における PC1-PC2 平面 . . . . .	54
42	SLP の monthly における PC1 の S-Map 平面 . . . . .	55
43	SLP の monthly における PC2 の S-Map 平面 . . . . .	55
44	SLP の monthly における sammonmap . . . . .	56
45	順圧成分における EOF1 . . . . .	57
46	順圧成分における EOF2 . . . . .	57
47	順圧成分における PC1 . . . . .	58
48	順圧成分における PC2 . . . . .	58
49	順圧成分における構造マップ . . . . .	59
50	SLP の monthly における PC1-PC2 平面 . . . . .	59
51	順圧成分における PC1 の S-Map 平面 . . . . .	60
52	順圧成分における PC2 の S-Map 平面 . . . . .	60
53	順圧成分における sammonmap . . . . .	61
54	JRA-55 を用いた SLP の DJF 平均値の 50 年間における PC1-PC2 平面 の NAOindex . . . . .	62
55	SLP の monthly における PC1-PC2 平面の NAOindex . . . . .	62
56	順圧成分における PC1-PC2 平面の NAOindex . . . . .	63
57	順圧成分における PC1-PC2 平面の AOindex . . . . .	63
58	最小 P 値の時の PC1-PC2 平面 . . . . .	64

59	最小 P 値近傍の平面図 . . . . .	64
----	------------------------	----

# 1 はじめに

大気中存在するテレコネクションパターンを統計的な線形関係で見える場合、Lorenz (1956) により使われた経験的直交関数 (Empirical Orthogonal Function: EOF) を用いた解析が広く使われている。しかし、大気には少なからず非線形応答が存在し、テレコネクションの間に存在する関係性について議論することには困難が付きまとう。したがって大気に内在する非線形応答を現象として明らかにできる別の視点のアプローチが必要になる。力学系の非線形応答の理論的研究は Lorenz (1963) で最初に試みられたが、決定論的カオスの初期値鋭敏性による誤差の増幅のため、長期予測を不可能にしていると結論づけられている。大気における予報限界は2週間程であるといわれているが、Tanaka and Nohara (1998) では大気中の順圧成分においてはカオス性が弱く2週間を超えた長期予報が一部可能であることを示している。また、Adachi and Kotani (1994) では多層型ニューラルネットワークを用いて予測を行う統計的な非線形手法を開発している。しかし、予測精度をもたらすニューロンの解釈が困難である。トポロジー (隣接関係) を保持することでニューロンの解釈を容易に行えるように、Kohonen (1982) では、非線形写像を行う自己組織化マップ (Self-Organizing Maps: SOM) という2層型ニューラルネットワークを用いた手法を開発している。

SOM は学習による最適化を行うことで、高次元データを低次元多様体にトポロジーを保持しながら写像することができる。また、低次元で可視化することで、高次元空間の非線形な分類を行うことができる。SOM の問題点としては、学習による最適化を行う過程でトポロジーが保持されない場合があることである。Sammon (1969) により開発されたサモン・マップを作成することで SOM のトポロジカルな精度検証を行うことができる。SOM が応用される例として、数理科学分野では、Jose et al. (1998) はカオスに対して局所線形モデルを適用するため、3次元のローレンツモデルを SOM で2次元に写像しカオス軌道の2次元表示を行っている。情報科学分野では、SOM を使って Web 文書を分類している例として佐野ほか (1998) があり、これらの他にも多くの分野で用いられる (Oja et al. 2003)。気象で応用されている例として、Bao and Wallace (2015) では SOM を用いて北半球の海面更正気圧場 (SLP) の分類を行い、クラスター分析のワード法による分類に比べ SOM による分類が優れていると述べている。EOF と組み合わせて使用される例として、Sakaki et al. (2010) では外向き長波放射 (OLR) 偏差場の EOF1 で示されたエルニーニョに対し、SOM を適用することで EOF2 のスコアもエルニーニョに寄与していることを示している。日本周辺での適用例として、井芹ほか (2010) では日本周辺の温度場に SOM を用いて分類し、大雪発生との関連を調べている。Polo et al. (2011) では SOM を用いて天候レジームを同定し、西アフリカ



降雨との関係を示している．北極振動 (Arctic Oscillation: AO) や北大西洋振動 (North Atlantic Oscillation: NAO) に関わる適用例として，Johnson and Feldstein (2008) では北半球の高度場に対し SOM による分類を行い，NAO の作用中心が 1958～2005 年までの間で東にシフトしていることを明らかにしている．Cavazos (1999) ではブルガリアを中心としたバルカン地方の降水と 500 hPa 高度場に対して，SOM を用いて分類し，NAO よりも AO の方がこの地域に降水をもたらすことを明らかにしている．

AO は Thompson and Wallace (1998) によって提唱され，北緯 20°以北の 11～4 月の平均 SLP の EOF1 で定義されたものである．北極域に対して，北太平洋と北大西洋の気圧が振動するモードである．NAO は Walker and Bliss (1932) によって古くから提唱されており，北極域に対して，北大西洋の気圧が振動するモードである．現在では Hurrell (1995) で定義されたインデックスが主に用いられる．しかし，Deser (2000) によると，大西洋と太平洋の SLP を別々に EOF 解析した score から北半球全域の SLP に回帰した結果，大西洋と太平洋の間でほとんど無相関であり，AO と NAO は互いに分離できないと述べている．Itoh (2002) や，Ambaum et al. (2001) では 3 点で変動する単純化されたモデルを用いて，EOF 解析を行うと，AO と NAO は区別できない事を述べている．Itoh (2008) では，独立成分分析を用いて，太平洋・北アメリカパターン (PNA) と NAO が実体であり，AO が虚像であることを述べている．一方，Tanaka (2003) では，AO の構造が順圧構造を有していることを示しており，Tanaka and Matsueda (2005) で，AO の順圧構造内の特殊な固有振動 (固有値 0) であることを明らかにしている．また，Suzuki and Tanaka (2007) では，順圧高度場を用いることで太平洋と大西洋の間で相関があることを示している．Woollings and Hoskins (2008) では太平洋の作用中心と大西洋の作用中心とは月平均データでなく日データを解析することで，北半球環状モード (NAM) すなわち AO が力学的につながっていると述べている．このように AO と NAO は，現在に至るまではっきりとした区別がなされていないのが現状である．

## 2 目的

本研究では, AO と NAO の実体について明確でないことから, 自己組織化マップ (Self-Organizing Maps:SOM) を用いて, AO と NAO の違いについて明らかにする事を目的とする. Itoh (2002) や Ambaum et al. (2001) で用いられた 3 点シーソーモデルによる結果や, Itoh (2008) で述べられた独立成分分析による結果において, AO が虚像で NAO が実像であるとの指摘は, 線形解析に基づく結果である。統計的に非線形な分布構造に対して分類を行なえる自己組織化マップ (SOM) を用いることで天候レジームを発見できることが期待される。天候レジームを捉えることで線形解析では見られなかった AO と NAO への影響を明らかにする。

### 3 使用データ

本研究では，再解析データを使用している．再解析データとは最新の数値予報モデルを用いて再度過去の大気の実行し，現在入手できるより高品質の観測データを同化させて作成されたデータのことである．これにより過去数十年間の均質な解析データを作成できる．

#### 3.1 JRA-55

気象庁では 1958 年から 55 年間を対象とした JRA-55 と呼ばれる長期再解析データを公開している．かつて JRA-25 と呼ばれる 1979 年から 25 年間を対象とした長期再解析データがあったが，本研究ではより新しい JRA-55 を採用した．

水平格子間隔	(経度 × 緯度) = (1.25 ° × 1.25 °)
使用要素	海面更正気圧 (SLP) の月平均値 (Monthly)
解析期間	1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月

#### 3.2 NCEP/NCAR

NCEP/NCAR とはアメリカの National Center for Environmental Prediction と National Center for Atmospheric Research が共同で開発した再解析データである．Tanaka (2003) で導入された順圧成分は NCEP/NCAR を使って解析されている．本研究では順圧成分を比較するため JRA-55 に加え NCEP/NCAR についても解析に利用した．

水平格子間隔	(経度 × 緯度) = (2.50 ° × 2.50 °)
鉛直解像度	1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 hPa の 17 層
使用要素	海面更正気圧 (SLP) の月平均値 (Monthly) ジオポテンシャル高度，東西風，南北風，気温の 6 時間毎のデータ
解析期間	1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月

#### 3.3 NAO index

AO に対して NAO を比較するため，アメリカの NOAA の National Weather Service Climate Prediction Center が公開している NAO index の月平均値を 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月まで使用した．

## 4 解析手法

### 4.1 展開係数 $w$ について

本研究では, Tanaka (2003) に基づき球座標系プリミティブ方程式を 3 次元ノーマルモード展開した展開係数  $w$  を用いる. 3 次元ノーマルモード関数は鉛直構造関数と水平構造関数のテンソル積であり, 以下のように定義される. 鉛直構造関数及び水平構造関数の導出については Tanaka (2003) を参照されたい.

$$\begin{aligned}\Pi_{nlm}(\lambda, \theta, p) &= G_m(p) \mathbf{H}_{nlm}(\lambda, \theta) \\ &= G_m(p) \Theta_{nlm}(\theta) e^{in\lambda}\end{aligned}\quad (1)$$

3 次元ノーマルモード関数は以下の正規直交性を持つ.

$$\begin{aligned}\langle \Pi_{nlm}, \Pi_{n'l'm'} \rangle &= \frac{1}{2\pi p_s} \int_0^{p_s} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} \Pi_{nlm} \cdot \Pi_{n'l'm'}^* \cos \theta d\lambda d\theta dp \\ &= \delta_{nn'} \delta_{ll'} \delta_{mm'}\end{aligned}\quad (2)$$

この関係により, 3 次元ノーマルモード関数展開が導かれる.

$$\mathbf{U}(\lambda, \theta, p, \tau) = \sum_{n=-N}^N \sum_{l=0}^L \sum_{m=0}^M w_{nlm}(\tau) \mathbf{X}_m \Pi_{nlm}(\lambda, \theta, p) \quad (3)$$

$$\mathbf{N}(\lambda, \theta, p, \tau) = \sum_{n=-N}^N \sum_{l=0}^L \sum_{m=0}^M n_{nlm}(\tau) \mathbf{Y}_m \Pi_{nlm}(\lambda, \theta, p) \quad (4)$$

$$\mathbf{F}(\lambda, \theta, p, \tau) = \sum_{n=-N}^N \sum_{l=0}^L \sum_{m=0}^M f_{nlm}(\tau) \mathbf{Y}_m \Pi_{nlm}(\lambda, \theta, p) \quad (5)$$

ここで,  $w_{nlm}(\tau), n_{nlm}(\tau), f_{nlm}(\tau)$  はそれぞれ, 従属変数ベクトル  $\mathbf{U}$ , 非線形演算子  $\mathbf{N}$ , 外部強制項からなるベクトル  $\mathbf{F}$  についての展開係数であり, それらは時間  $\tau$  のみの関数である.

式 (3) を成分で書くと以下ようになる.

$$\begin{aligned}u &= \sum_{i=0}^K w_i \sqrt{gh_{m_i}} U_i G_{m_i} e^{in_i \lambda} \\ v &= \sum_{i=0}^K w_i \sqrt{gh_{m_i}} (-iV_i) G_{m_i} e^{in_i \lambda} \\ \phi &= \sum_{i=0}^K w_i gh_{m_i} Z_i G_{m_i} e^{in_i \lambda}\end{aligned}\quad (6)$$

したがって、展開係数  $w$  は大気場の 3 次元構造のうち  $u, v, \phi$  の情報併せ持っている。AO は SLP を用いて定義されるが、本研究ではジオポテンシャル  $\phi$  項の他に風ベクトル  $u, v$  を考慮に入れ、地上だけでなく上空も含めた状態変数である展開係数  $w$  を使って解析を行う。 $w_i$  のうち順圧成分にあたる鉛直波数 0 の成分を用いる。

## 4.2 EOF 解析

EOF (Empirical Orthogonal Function) 解析とは、主成分分析を用いて対象となる高次元変量（本研究では再解析データの全格子点の時系列データ）間の分散共分散行列に対して、固有値問題を解くことで固有値と固有ベクトルを求め、それらを用いて主要な変動成分を抽出する手法である。

本研究では AO を抽出するため、北半球の北緯 20 °以北に対して 12 月・1 月・2 月の 3 か月を対象として月平均値と 3 か月平均値 (DJF) の SLP データに対して解析を行った。

高次元変量、すなわち SLP の時系列データの偏差を  $S(x, t)$  とおく、ここで  $x$  は任意の格子点であり (2 次元空間 grid データであるが、1 次元ベクトル  $x$  として置き換えても良い)、 $t$  は時間である。また格子点数を  $M$ 、時系列の長さを  $N$  とおく。 $S(x, t)$  を用いて分散共分散行列  $D$  を求めると、

$$D = SS^T \quad (7)$$

ここで  $T$  は転置である。この分散共分散行列に対して、固有値問題を解くことを考える。固有値を  $\Lambda$  とし、固有ベクトルを  $V$  とすると、

$$D = SS^T = V\Lambda V^{-1} = V\Lambda V^T \quad (8)$$

ここで固有ベクトル  $V$  の列ベクトルは互いに直交する正規直交行列となる。すなわち  $V$  のノルムは 1 となる。右辺は定義により  $V^T V$  は単位行列  $I$  に等しいので  $V^T = V^{-1}$  となる。また、固有値  $\Lambda$  の対角成分のみ値が入り、それ以外は 0 である。

固有ベクトル  $V$  が求まると、正規直交行列であることから、偏差  $S$  と射影することによって互いに直交する時系列  $Y$  を求められる。

$$S = VY, \quad Y = V^{-1}S = V^T S \quad (9)$$

$Y$  は  $M \times N$  の時系列行列であり、各々の  $M$  個の固有ベクトルに 1 対 1 に対応するパラメーターである。この  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$  を score と呼ぶ。これにより、 $V$  と  $Y$  の線

形結合で  $S(x, t)$  を表現することができる．

また，固有値問題の式を変形すると，

$$V^T D V = \Lambda \quad (10)$$

となり  $D = S S^T$  を代入して，

$$\Lambda = V^T (S S^T) V = (V^T S) * (V^T S)^T = Y Y^T \quad (11)$$

と表されるので，固有値  $\Lambda$  は score の分散を表していることが分かる．固有値  $\Lambda$  のトレース  $\text{Tr}(\Lambda)$  を全分散と呼び， $\text{Tr}(\Lambda)$  の任意の要素  $(\lambda_i)$  との比を百分率で表したものを寄与率と呼ぶ．

固有値  $\Lambda$  を大きい順に並べ， $Y$  も同様にする．本研究では  $Y$  の要素を大きい順に PC1, PC2, PC3 と呼ぶこととする．対応する固有ベクトルに対しては，EOF1, EOF2, EOF3 と順に呼ぶこととする．

## 4.3 SOM 解析

### 4.3.1 SOM の導出

自己組織化マップ (Self-Organizing maps: SOM) とは Kohonen (1982) により開発された，非線形写像を行う 2 層型ニューラルネットワークを用いた手法である．SOM が大気現象に応用される例としては，Sakaki et al. (2010) など EOF 解析と合わせて使われている研究があり，天候レジームの同定としてここ 10 年程で広く用いられている．

SOM は入力層・出力層が存在し，入力層には入力ベクトルを，出力層には SOM の 2 次元平面が位置する．

まず，入力層の入力ベクトルを  $X$  とする．本研究では 4.2 節で示した  $M \times N$  の時系列行列  $Y$  を使う．

$$X = Y(t) \quad (12)$$

ここで  $Y(t)$  は任意の時刻  $t$  での  $Y$  の列ベクトルである．また， $X$  の次元に score の PC1 ~ PC20 までの 20 次元ベクトルを入力データとする．すなわち  $X$  の要素  $a$  は  $a \in 1 \sim 20$  である．

次に，出力層を構成する行列  $O(a, m_{ij})$  を用意する．ここで  $\forall a$  は SOM の任意の node における高次元ベクトルであり， $\forall a$  の次元すなわち  $O$  の列ベクトルは学習を行う入力ベクトル  $X$  と一致させる． $m_{ij}$  は SOM の node 番号を示す変数であり， $i, j$  により 2

次元座標を示す．図1は例としてSOMの学習ステップを並べたものである．図1aの1,2,3,,,98,99,100がnode番号 $m_{ij}$ である．本研究では入力ベクトル $X$ の次元で構成される空間を $U$ ， $i,j$ 軸により構成される2次元空間をS-Mapと呼ぶことにする．S-Mapは図1aの空間に対応し， $U$ は図1b,c,dの空間に対応する．したがって，任意のnodeである $O(*, m_{ij})$  ( $*$ はすべての要素)は $a$ 次元の入力ベクトル空間 $U$ 上の点であり，S-Map上の点としても意味を持つ．図1は入力ベクトルを空間 $U$ に2次元正方形の等格子データ配置し，出力層に $(i \times j) = 10 \times 10 = 100$ 個のnodeをS-Mapに配置したものである．SOMの学習アルゴリズムは次のようなステップで行われる．

1. 行列 $O$ にランダムに値を与える．図1bは $U$ 上で見た $O$ の初期値である．
2. 入力ベクトル $X$ と $O(*, m_{ij})$ の差から $U$ 空間上の距離 $D(m_{ij})$ を計算する．

$$D(m_{ij}) = \| X - O(*, m_{ij}) \| \quad (\text{ここで } \| \text{ はユークリッド距離}) \quad (13)$$

3. 距離 $D$ の中で最少となる $m_{ij}$ を勝者nodeを $m'_{ij}$ として選出する．
4. 近傍関数 $h$ に従って勝者nodeを中心とした各nodeの学習の重みを決定する．近傍関数 $h$ とは

$$h(m_{ij}) = A * \exp((-D(m_{ij})^2)/(2\sigma^2)) \quad (14)$$

ここで $A$ は学習率係数と呼ばれ，学習の強さを調節するパラメーターである．指数関数の項は行列 $O$ をS-Map空間上すなわち図1a平面にて勝者nodeを中心とした正規分布を与える関数である． $D'$ はS-Map空間上での勝者nodeの $m'_{ij}$ からの距離である． $\sigma$ は正規分布の標準偏差を与えるパラメーターである．勝者nodeに近いほど学習は大きく反映され，S-Map空間で勝者nodeから離れるほど学習は小さくなる． $\sigma$ が大きいほどS-Map空間上の影響範囲が広がり，より多くの勝者nodeの近傍の学習の重みを上げることを意味する．

5. 近傍関数 $h$ を使って次の学習方程式により学習を行う．

$$O(a, m_{ij})_{\text{after}} = O(a, m_{ij}) + h(m_{ij}) * (X(a) - O(a, m_{ij})) \quad (15)$$

ここで $O(a, m_{ij})_{\text{after}}$ は1回学習後の出力層の行列 $O$ である．

6. 入力ベクトル $X$ に次の値を代入する．本研究では時系列データ $Y(t)$ を時間方向にランダムに並び替えたものを使用している．
7. 2～6を繰り返す．繰り返す時，学習率係数 $A$ と標準偏差 $\sigma$ は減少関数としてステップごとに値を小さくする．図1cは学習を500回させた例である．
8. 学習のステップ前後で $O_{\text{after}}$ と $O$ の差が小さくなったら終了する(図1d)

#### 4.3.2 Sammon Map の導出

SOM の学習の精度は減少関数の任意パラメーターに依存しており、学習結果の検証に関して厳密な最適解であるかどうかの指標は存在しない。しかし、SOM のトポロジー誤差を見積もる方法として sammon(1969) により開発された Sammon Map がある。

Sammon Map とは高次元空間に散布されたデータを各々のデータ間の距離を保持しながら、2次元空間に近似的に写像する手法である。各々のデータ間の距離を2次元平面上の距離に適当に置き、両者の差を示す誤差関数を最小化するように最適化することで得られる。通常3次元以下の空間であれば、SOM の空間位置を目視で確認することで隣接関係を把握することは容易である。しかし、4次元以上の高次元空間に対して隣接関係を確認するのは不可能である。そこで、Sammon Map に SOM の出力 node の値を入力して2次元平面に投影することで SOM のトポロジー誤差を確かめることが可能になる。

本研究では、SOM の入力ベクトル  $X$  と同じ空間  $U$  上に散布された行列  $O$  を S-Map 空間によらない新たな2次元距離空間 dis-Map を空間  $U$  から Sammon Map アルゴリズムによって作成する。

行列  $O$  の各列ベクトル  $O(\star, m_{ij})$  の  $U$  上の距離を距離行列  $d_{ij}$  とし、dis-Map 上で  $d_{ij}$  に対応する2点の距離行列を  $d_{ij}^*$  とする。 $d_{ij}^*$  は  $\text{Tr}(d_{ij}^*) = 0$  としてその他の要素に任意の値を与え、誤差関数  $E$  を次のような式で与える。

$$E = \frac{1}{\sum_i \sum_{j>i} d_{ij}} \sum_i \sum_{j>i} \frac{(d_{ij} - d_{ij}^*)^2}{d_{ij}} \quad (16)$$

誤差関数  $E$  は  $U$  空間での距離行列と dis-Map 空間での距離行列の差を表しており、 $E$  を最小化することで、 $U$  空間での  $O$  の各列ベクトルの距離を近似的に2次元の dis-Map 空間に写像することができる。

誤差関数  $E$  を最小化するため、最急降下法を用いた。dis-Map 上の任意の node に対応する点を  $r_p = (y_{p1}, y_{p2})$  とすると、

$$y_{pq\text{after}} = y_{pq} - C \times \left( \frac{\partial E}{\partial y_{pq}} \right) / \left| \frac{\partial^2 E}{\partial y_{pq}^2} \right| \quad (p = 1, 2) \quad (17)$$

ここで  $C$  はマジック係数と呼ばれ 0.3 ~ 0.4 の定数を入れることで高い精度で収束する。 $E$  を含む項は  $E$  の  $y_{pq}$  に対する変分を表す。

$y_{pq\text{after}}$  を  $\forall p$  について計算し、誤差関数  $E$  に代入することで、少しずつ  $E$  が減少する。



#### 4.3.3 SOM の性質

SOM は高次元データ空間を低次元の 2 次元平面にトポロジーを保持したまま写像することができる．出力層の S-Map 空間上の隣接した node は入力ベクトル  $X$  の空間  $U$  上の中でも隣接関係が保持されている．しかし，保持されているのは隣接関係であり，その方向については問われていない．したがって，空間  $U$  上でみた隣り合う node を連結すると，方向は様々な向きに点在することになる．例えば入力ベクトル  $X$  が 2 次元で，入力ベクトル  $X$  の 2 次元上の生データとする長方形の等間隔データを例とすると，図 1 や 2 のような空間  $U$  が形成する．図 2 を図 1 と比較すると，入力データが 2 次元正方形ならば node の広がりも正方形に学習されるところを，入力データが長方形ならば長方形の形をなぞるように学習されていることがわかる．この入力データのデータ構造が複雑になると出力層の node の隣接関係もより複雑な方向となるが，S-Map 上で隣り合う node は空間  $U$  でも隣り合うというのが SOM の特徴である．SOM は  $U$  から S-Map への写像関係を表しているのが各々の node であり， $U$  上の局所座標系を構成している． $U$  と各々の node による写像の対は 2 次元座標近傍と捉えることができ，2 次元位相多様体となっている．

高次元空間の複雑な入力データの分布構造がある場合，SOM はその構造の形に最適化されるようにして学習がなされる．この時，線形化を行うと隠れてしまった局所的な空間構造に対して，例えば，凸集合ではないデータ空間などにおいて，その特殊な形に最適化された結果を得ることが可能である．凸集合ではない形として半月よりもかけた三日月のようなデータ構造があげられる．図 2 の長方形と同様に，入力データ構造  $U$  が三日月の形をしているならば，SOM の各 node の  $U$  上の形も三日月に最適化される．一方で三日月の分布構造を EOF で線形変換した 1 つ 1 つの score だけでは曲線としての情報は引き出せない．

図 3 はローレンツアトラクタの  $x, y$  断面である．横軸は  $x$  成分，縦軸は  $y$  成分を示す．

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -10x + 10y \\ \frac{dy}{dt} = -xz + 28x - y \\ \frac{dz}{dt} = xy - \frac{8}{3}y \end{cases} \quad (18)$$

黒十字がローレンツアトラクタの生の値であり，点と実線が SOM の隣接 node を繋いだ  $x$ - $z$  断面上の点である．50000 回学習をさせた例である．ローレンツアトラクタの  $x$ - $z$  断面は図 3 の右上と左上を繋ぐ直線上を引いた場合，間にデータが存在しない領域があるため，凸集合とはならない．SOM 解析を行うと構造として三日月の形に最適化されていることがわかる．

本研究でSOMを使うのは、凸集合でないような入力データに対して議論を行うためであり、AOとNAOという線形化された方向の概念を逸脱するためである。

#### 4.3.4 SOMの構造マップの作成

SOMの出力層の行列 $O$ の各々のnodeに対応する列ベクトル $O(\star, m_{ij})$ は入力ベクトル $X$ と同じ空間 $U$ を共有しているため、各々のnodeは固有ベクトルとの積により時系列データの偏差 $S(x, t)$ と同じ次元を持つ大気場の偏差 $O_s$ を構成することが可能である。

$$O_s = VO(\star, m_{ij}) \quad (19)$$

$O_s$ をij軸上のS-Mapに表記することで、各々のnodeに大気構造の偏差を反映したSOMの構造マップが作成できる。

### 4.4 SOMの大気場への適用方法

#### 4.4.1 EOFのScoreの入力

本研究では、EOF解析を行ったscoreを入力データとして自己組織化マップ(SOM)を用いた解析を行い、出力された各々のマップ上の点であるnodeを解析することで、北半球に存在する代表となる低周波変動に対応する天候レジームの抽出を行った。

EOF解析を行ってSOM解析を行った経緯としてはいくつかあげられる。1つ目としてEOF解析を行うことでAOを定義されるindexをそのまま利用することが出来る。2つ目として再解析データをそのままSOMへ入力した場合、格子点数だけの次元の中でSOMの入力ベクトル $X$ に代入することとなり、計算負荷が増大する。しかし、EOFのscoreをPC1~PC20の20次元で解析を行うことで計算負荷が軽減される。

また、EOF解析を行うことによる線形変換で非線形性が失われる懸念があるが、適切な寄与率を確保したscoreの次元数を使用することで問題は回避される。EOF解析は元の高次元データを統計的な互いに直交する軸へ回転する線形変換であるが、再解析データが保有する非線形性が失われるわけではない。例えば2次元平面に「S」という文字の画像データがある場合を想定する。この時EOF解析を行うと、分散の最大軸がEOF1の固有ベクトルとなり、残りの直交方向がEOF2の固有ベクトルとなる。この座標変換によるscoreを用いても、Sという空間的位置情報は失われない。すなわち、Sという曲線は軸が回転しているだけであり、PC1-PC2平面に実在した状態で残る。こ

れは高次元で考えた場合でも同じであり，寄与率をきちんと確保した score を用いることで非線形性も保持した情報を抽出できると考えられる．

本研究では EOF による PC1-PC2 平面を解析することで，AO や NAO の方向について議論する．EOF は座標軸の回転であり，生の再解析データが有する天候レジームに関して score を使ってさらに解析することで，曲がった情報を取り出すことが可能である．その際，SOM を使用することで局所的に隠れた天候レジームを捉え，従来の AO の定義である EOF1 の AO 軸という方向が，どのように分布しているか解析を行った．

#### 4.4.2 展開係数 $w$ を使った EOF の Score の入力

再解析データを用いた解析では AO の定義である海面更正気圧 SLP を用いている．しかし，AO は力学的には Tanaka and Matueda (2005) で述べられるような順圧成分  $w$  の存在が重要視されている．AO は半球規模の現象であり，その力学は順圧成分で説明され Tanaka(2003)，3 次元ノーマルモード関数を用いて線形不安定性解析を行うと，解に関する固有値問題に帰着され，その固有値が 0 になるような解として示された．すなわち，増幅率と振動数が共に 0 となる固有モードであることが言え，増幅・振動は AO 自身の内部力学に由来しない外力によって生じるモードであることが明らかとされている Tanaka and Matueda (2005)．本研究では SLP に加えて Tanaka (2003) の順圧成分  $w$  を用いて EOF 解析を行った結果を使用し，その score を入力ベクトルとする SOM の解析を行った．SLP の SOM の結果と比較することで天候レジームに相当する曲がった構造の有無を確認し，AO が表現できているのかを確認する．

#### 4.4.3 AO と NAO のアプローチ方法

AO は Thompson and Wallace (1998) で提唱された定義である EOF1 として PC1 を解析することで従来の AO について直接議論が可能である．一方 NAO については Hurrell (1995) で定められたポルトガルとアイスランドの 2 点 SLP 差を考えると北半球全域における EOF 解析から得られる score には分離した値は求まらない．したがって，NOAA が公開している NAO index を用いて，本研究の AO の存在を議論する際に用いた．Itoh (2002) や Ambaum et al. (2001) で述べられた 3 点シーソーモデルで EOF 解析を行った場合，AO である PC1 軸から 30 ° PC2 軸側にずれたところが NAO であるという立場で SOM の結果を捉え，PC1-PC2 平面の解析を行い NAO index を比較する．しかし，3 点シーソーモデルと NAO index は現実の大気で比較する場合必ずしも一致しない点には注意が必要である．

## 5 結果

本研究では，SOM 解析で得られる特徴をわかりやすく表現するため次のような表記を用いる．Thompson and Wallance (1998) の AO の定義に対して，北大西洋と北太平洋が同程度に応答するものを「純粋な AO」と呼び区別する．これは EOF 解析で得られた結果から PC1-PC2 平面上の位置を議論するため混同を避けるためである．また，4.3.3 で示した SOM 解析で得られる凸集合でないデータ構造が PC1-PC2 平面上で一部見られた．そのデータ集合である score を任意の 2 点を直線で結んだとき，間にデータが存在しないような領域を「空白域」と呼び議論する．さらに，AO/NAO が負と対応する，北極が正，北大西洋が負の時，北太平洋で AO なら負，NAO なら 0 となるところが正となる（北大西洋，北極，北太平洋）=（-，+，+）となる node が現れた．このような構造を PAR: Pacific Atlantic Regime と定義する．

### 5.1 SLP の解析

JRA-55 及び NCEP/NCER の両方において，SLP のデータを用いて，1960 年 12 月から 2010 年 2 月までの DJF 平均値の 50 年について解析を行った．また，1980 年 12 月から 2010 年 2 月までの DJF 平均値の 30 年について解析を行った．

まずそれぞれにおいて EOF 解析を行い，得られた score を PC1 ~ PC20 までを入力ベクトルとした SOM 解析を行った．

#### 5.1.1 DJF 平均の 50 年と 30 年の EOF 解析

図 4 ~ 図 7 は 50 年の固有ベクトルである EOF1 ~ 2 を示す．図 4 ~ 図 5 は JRA-55 を，図 6 ~ 図 7 は NCEP/NCAR を用いた結果である．コンターは 0.5 間隔で，実線が正，破線が負を示す．シェードはコンターと同じく赤が正で青が負を示す．図上側が大西洋で，図下側が太平洋である．

図 4 の JRA-55 の EOF1 は北大西洋と北太平洋で正に，北極海を中心とした付近で負になるモードとなっている．北大西洋の西側のヨーロッパ上空では北大西洋と同じく正のモード，アメリカ大陸やユーラシア大陸では北極近傍を除いてほとんど 0 に近い値となっている．寄与率は 33.9 % となった．Thompson and Wallance (1998) によって提唱された AO に対応している結果となっている．北大西洋と北太平洋を比較すると，コンターの本数が北太平洋の方が少なく，シェードの赤も薄い．北大西洋の作用中心に最も近い閉じたコンターでは 3.5，北太平洋の作用中心に最も近い閉じたコンター

では 1.5 であり，北大西洋の方が 2 倍以上正の値が強いことがわかる．したがって，「純粋な AO」でない．

図 5 の JRA-55 の EOF2 は北太平洋を作用中心として正に非常に強い値 5.5，バレンツ海とその南のユーラシア大陸に作用中心に 1.5 の正，北大西洋の作用中心に -1 の負の値を持つモードである．寄与率は 14.9 % となった．図 4 の EOF1 の北太平洋に対して，ほとんど同じ位置に作用中心を持ち，正の値を持つ地理的分布も北大西洋の全域にわたっており，ほとんど類似した広がりを持つ結果となった．ただし，北太平洋において EOF2 の正の 5.5 と EOF1 の正の 1.5 を持つことになる．すなわち，PC1 と PC2 に同等の score となった場合，北太平洋における偏差場の時系列は，EOF1 よりも EOF2 の方が影響を受ける結果となった．

図 6 の NCEP/NCAR の EOF1 は図 4 と同じく北極で負，北大西洋と北太平洋で正となるモードとなっている．寄与率は 32.8 % となった．図 4 と同じく北大西洋の作用中心では 3.5，北太平洋の作用中心では 1.5 であり，「純粋な AO」でない．

図 7 の NCEP/NCAR の EOF2 は図 5 と同じく北太平洋で 5.5 の非常に強い正の値であった．北太平洋における偏差場の時系列は図 5 と同じく EOF1 と比べて EOF2 の方が影響を受ける結果となった．

図 8～図 11 は 30 年の固有ベクトルである EOF1～2 を示す．図 8～図 9 が JRA-55 で図 10～図 11 が NCEP/NCAR の結果を示す．コンターは 0.5 間隔で，実線が正，破線が負を示す．シェードはコンターと同じく赤が正で青が負を示す．図上側が大西洋で，図下側が太平洋である．

図 8 の JRA-55 の EOF1 は図 4 の 50 年と同じく北極で負，北大西洋と北太平洋で正となるモードとなっている．寄与率は 35.4 % となった．北大西洋の作用中心は 3，北太平洋の作用中心は 3 と同程度で正の値を持っている．図 4 の 50 年と比較して北太平洋の作用中心の値が大きく，「純粋な AO」に近いと言える．

図 9 の JRA-55 の EOF2 は北太平洋を作用中心として正に非常に強い値 5，バレンツ海とその南のユーラシア大陸に作用中心に 2 の正，北大西洋の作用中心に -1 の負の値を持つモードである．図 5 と比較してほとんど同じであるが，北太平洋で弱く，バレンツ海とその南のユーラシア大陸で強いことがわかる．

図 10 の NCEP/NCAR の EOF1 は図 8 と同じく北極で負，北大西洋と北太平洋で正となるモードとなっている．寄与率は 34.8 % となった．北大西洋の作用中心は 3.5，北太平洋の作用中心は 3 とほぼ同程度で正の値を持っている．図 4 の 50 年と比較して北太平洋の作用中心の値が大きく，図 8 と同様「純粋な AO」に近いと言える．

図 11 の NCEP/NCAR の EOF2 は図 9 と同じく北太平洋で 5 の非常に強い正の値であった．図 7 と比較してほとんど同じであるが，北太平洋で弱く，バレンツ海とその南

のユーラシア大陸で強いことがわかる。

次に 50 年の EOF 解析における時系列データを図 12～図 13 に示す。横軸は年代で、縦軸は score をそれぞれの期間における標準偏差で割った値を示す。実線・四角囲いは JRA-55、破線・十字点は NCEP/NCAR の結果である。

図 12 は 50 年の解析の PC1 の時系列である。JRA-55 と NCEP/NCAR 共にほとんど同じ値を示しており、1960 年代は絶対値 0.3 前後の差異があるもののわずかである。

図 13 は 50 年の解析の PC2 の時系列である。図 12 と同様に両再解析データとの差異はわずかである。

図 14 と図 15 は 30 年の解析の PC1・PC2 の時系列である。図 12 と図 13 とくらべ差異はより小さくなっている。30 年の解析では 50 年と比べて AO 正と AO 負が強調される結果となった。

50 年の解析と 30 年の解析では、固有ベクトルに差が見られ 50 年では「純粋な AO」ではなく、30 年では「純粋な AO」に近い結果となった。JRA-55 と NCEP/NCAR を比べても固有ベクトルと時系列共に両者の差異はごくわずかであった。

#### 5.1.2 DJF 平均の 50 年と 30 年の SOM 解析

入力ベクトルの PC1～PC20 までの累積寄与率は、50 年の解析では JRA-55 が 96.9 %、NCEP/NCAR が 96.5 % となった。30 年の解析では JRA-55 が 98.5 %、NCEP/NCAR が 98.4 % となった。いずれも 96 % を超えたデータが SOM 解析への入力ベクトルとなっている。

図 16～19 は JRA-55 を用いた 50 年の解析である。

図 16 は SOM 解析により得られた構造マップである。左上から右に向かって node1, node2 と並び、端に来たら下段に移り、右下が node20 となる 4 × 5 のマップである。1 つの node の中の大気場は偏差場と同等の意味を持つ。node16 に AO 正、node5 に AO 負と類似した構造が見られる。また、node20 に AO 負の構造から北太平洋の作用中心だけが符号が入れ替わった構造である「PAR」が見られる。北極と北太平洋の偏差が同じ符号を持つ構造である。node1 には node20 と反対になった偏差場が見られるが、node20 と比べて全体として偏差が弱く、北極の作用中心がバレンツ海側に少しずれている。

図 17 は PC1-PC2 平面を表す。黒の数字は score の年を表し、赤字と青実線は各々の node の持つ score と同じ次元の値（行列 O の空間 U 上の PC1-PC2 成分）で node 番号を表す。PC1 の値が最も大きい node16 が AO 正で、最も小さい node5 が AO 負に対応することが確かめられる。これは図 16 の結果と整合的である。node5 と node16 は PC1 軸からはそれぞれ少しずれていることが分かる。図 4 の「純粋な AO」でない固有ベク

トルよりも，図 16 と図 17 からそれぞれの構造マップの偏差場の北太平洋と北大西洋の値は同程度に近く「純粋な AO」に近い．また，PC2 が正に最も大きく，かつ PC1 の値が負にやや大きい node20 が見られる．図 4 の EOF1 の北太平洋の弱い固有ベクトルが PC1 で負に，図 5 の EOF2 の北太平洋で強い正の固有ベクトルが PC2 で正に働くことで，北太平洋において EOF2 の正の作用が強くて結果となった．また，node5 と node20 の間にはデータが存在しない「空白域」が見られた．

図 18 と図 19 は PC1 と PC2 の S-Map 平面で見た値である．図の左上が node1 で右へ順番に node2, node3 と続き，右端で下におり左から node6 となり，右下で node20 である．図 18 の PC1 では，左下の node16 で正に，右上の node5 で負にそれぞれなっており，右下の node20 でも負になっている．node16 から node5 に向かって連続的な値の変化が見られる一方で node20 は値が孤立していることが分かる．図 19 の PC2 では，右下の node20 で正に大きい値が見られる．右上の node5 で負の値が見られる．

図 20～23 は NCEP/NCAR を用いた 50 年の解析である．

図 20 は図 16 と同様の SOM 解析により得られた構造マップである．図 16 と同じく node20 に AO 負の構造から北太平洋の作用中心だけ符号が入れ替わった構造「PAR」が見られる．北極と北太平洋の偏差が同じ符号を持つ構造である．node5, node16 は図 16 と同じ結果となった．node1 には node20 と反対になった偏差場が見られるが，node20 と比べて全体として偏差が弱く，北極の作用中心がバレンツ海側に少しずれている．

図 21 は図 17 と同様の PC1-PC2 平面を表す．図 17 と同様に PC2 が正に最も大きく，かつ PC1 の値が負にやや大きい node20 が見られ，node5 と node20 の間にはデータが存在しない「空白域」が見られた．

図 22 と図 23 は PC1 と PC2 の S-Map 平面で見た値である．図 22 の PC1 では，node20 に負が見られ，node5 と同様である．図 23 の PC2 では，node20 に正が強く見られ，node5 と対称的である．

次に，図 24～27 は JRA-55 を用いた 30 年の解析である．

図 24 は SOM 解析により得られた構造マップである．node20 に AO 正，node1 に AO 負と類似した構造が見られる．固有ベクトルの「純粋な AO」に近い偏差場である．また，node16 に 50 年の解析の図 16 の node20 に対応する，AO 負の構造から北太平洋の作用中心だけが符号が入れ替わった構造が見られるが，北大西洋の作用中心が弱い上，北極の作用中心もバレンツ海に面したユーラシア大陸上となっている．node5 においても北極海の作用中心がバレンツ海に面したユーラシア大陸上にずれている．PC2 の固有ベクトルに対応する地域で偏差が見られる．

図 25 は PC1-PC2 平面を表す．PC1 の値が最も大きい node20 が AO 正で，最も小さい node1 が AO 負に対応することが確かめられる．これは図 24 の結果と整合的である．

また、PC2 が正に最も大きく、かつ PC1 の値がわずかに負な node16 が見られる。50 年解析における図 17 の node20 と比べて PC1 の負の値が 0 に近くなっている。図 17 と比較して node1 と node16 の間にはデータが存在しない「空白域」ははっきりとしない。

図 26 と図 27 は PC1 と PC2 の S-Map 平面で見た値である。図 26 の PC1 では、左上の node1 が AO 負、右下の node20 が AO 正に対応している。左下の node16 と右上の node5 では 50 年解析の図 18 のような明瞭な値の孤立は見られない。図 27 の PC2 では、左下の node16 で正に、右上の node5 で負の値である。

図 28～31 は NCEP/NCAR を用いた 30 年の解析である。

図 28 は構造マップで図 24 と同様の結果である。node20 に AO 正、node1 に AO 負と類似した構造が見られる。node16 にバレンツ海に面したユーラシア大陸に弱い PC2 に近い構造みられた、ただし、node5 は node16 に対称な偏差場ではなく node4 に見られた。

図 29 は PC1-PC2 平面で、図 25 と同様の結果である。ただし、PC1 が正で PC2 が負の領域で最も右下に node4 が対応している。図 28 で図 24 と同じく node5 が対応しなかったのと同様に、node4 が図 25 での node5 と置き換わっている。

図 30 と図 31 は PC1 と PC2 の S-Map 平面で見た値である。図 30 の PC1 は node1 で負、node20 で正である。図 31 の PC2 は node16 で正であるが、node4 で負の最大となっていることがわかる。これは 25 とも整合的である。

図 32～35 は SammonMap の結果である。図 32 は JRA-55 の 50 年を、図 33 は NCEP/NCAR の 50 年を、図 34 は JRA-55 の 30 年を、図 35 は NCEP/NCAR の 30 年をそれぞれ示している。横軸及び縦軸は Sammon Map の 2 次元距離空間であり、番号は SOM の各々の node を示している。図 32～35 のすべてで線が重なるようなことが生じておらず、トポロジー誤差は非常に小さいと確認できる。

JRA-55 と NCEP/NCAR 共に、50 年解析において図 4 の EOF1 の固有ベクトルは「純粋な AO」ではないが、図 16 と図 17 で「純粋な AO」に対応した偏差場を持つ node が PC1 とずれた方向に見られ、AO 負の構造の近くに「空白域」が見られた。空白域から PC2 が正の方向に「PAR」が見られた。30 年解析において図 8 の EOF1 の固有ベクトルは「純粋な AO」に近いが、図 24 と図 25 で「空白域」が見られない結果となった。JRA-55 と NCEP/NCAR を比べても SOM の node の構造は両者の差異がごくわずかであった。



### 5.1.3 Monthly の解析

Monthly の 50 年による解析では JRA-55 の SLP のデータを用いて、1960 年 12 月から 2010 年 2 月までの 12 月、1 月、2 月の 3 か月（4 月～11 月を含まない）データの monthly 平均を計算し、50 年間について解析を行った。

解析の流れは、まず EOF 解析を行って得られた score を用いて、PC1～PC20 を入力ベクトルとした SOM 解析を行った。

図 36～38 は EOF 解析の結果である。

図 36 と図 37 は固有ベクトルである EOF1～2 を示す。コンターは 0.5 間隔で、実線が正、破線が負を示す。シェードはコンターと同じく赤が正で青が負を示す。図上側が大西洋で、図下側が太平洋である。

図 36 の EOF1 は北大西洋と北太平洋で正に、北極海を中心とした付近で負になるモードとなっている。北大西洋の西側のヨーロッパ上空では北大西洋と同じく正のモード、アメリカ大陸やユーラシア大陸では北極近傍を除いてほとんど 0 に近い値となっている。寄与率は 23.5 % となった。北大西洋の作用中心に最も近い閉じたコンターでは 4、北太平洋の作用中心に最も近い閉じたコンターでは 2.5 であり、北大西洋の方が正の値が強いことがわかる。したがって、「純粋な AO」でない。しかし、SLP の 50 年の DJF 解析の図 4 と比べると差は小さく、SLP の 50 年に比較すると「純粋な AO」に近い。

図 37 の EOF2 は北太平洋を作用中心として正に非常に強い値 7、バレンツ海とその南のユーラシア大陸に作用中心に 2 の正、北大西洋の作用中心に -4 の負の値を持つモードである。寄与率は 13.1 % となった。図 36 の EOF1 の北太平洋に対して、ほとんど同じ位置に作用中心を持つ結果となった。SLP の 50 年解析の図 5 と同じく PC1 と PC2 に同等の score となった場合、北太平洋における偏差場の時系列は、EOF1 よりも EOF2 の方が影響を受ける結果となった。加えて、北太平洋では図 5 の北太平洋の作用中心よりもさらに固有ベクトルの値が大きい。

図 38 は EOF 解析の PC1 の時系列である。SLP 解析の図 12 と比べて全体の傾向、例えば 2010 年の負に大きく卓越している点などはほとんど一致している。

図 39 は EOF 解析の PC2 の時系列である。図 38 と同様に、SLP 解析の図 13 と傾向は一致している。

図 40～43 は SOM 解析の結果である。

図 40 は SOM 解析により得られた構造マップである。左上から右に向かって node1, node2 と並び、端に来たら下段に移り、右下が node20 となる 4 × 5 のマップである。1 つの node の中の大気場は偏差場と同等の意味を持つ。SLP の 50 年の DJF の解析である図

16 と類似する結果となった．node16 に AO 正，node5 に AO 負と類似した構造が見られる．また，node20 に図 16 と同様に AO 負の構造から北太平洋の作用中心だけが符号が入れ替わった構造「PAR」が見られる．しかし，ユーラシア大陸全域でわずかに負偏差を持っている．node6 には node20 と反対になった偏差場が見られるが，これも図 16 と同様に node20 と比べて北極の作用中心がバレンツ海側に少しずれている．

図 41 は PC1-PC2 平面を表す．黒の数字は score の年を表し，赤字と青実線は各々の node の持つ score と同じ次元の値（行列 O の空間 U 上の PC1-PC2 成分）で node 番号を表す．PC1 の軸上から少しずれているが，PC1 の値が最も大きい node16 が AO 正で，最も小さい node5 が AO 負に対応することが確かめられる．また，PC2 が正に最も大きく，かつ PC1 の値が負にやや大きい node20 が見られる．図 41 において，図 17 で見られたような node5 と node20 の間にデータが存在しない「空白域」が明瞭に見られなかった．図 40 と図 41 で node5 と node20 の間は空白域ではなく node10 と node15 が見られ，北極で特にグリーンランド東岸を中心とした正と北大西洋が負になる構造が node5・10・15・20 で共通して見られた．50 年の DJF 平均である図 16 は，node10 と node15 で北極と北大西洋の正負の関係があるが，北大西洋の偏差場は-2 と明瞭でない．図 17 の node5・10・15・20 の位置は「空白域」のへりを取り囲んでいることがわかる．

図 42 と図 43 は PC1 と PC2 の S-Map 平面で見た値である．図の左上が node1 で右へ順番に node2,node3 と続き，右端で下におり左から node6 となり，右下で node20 である．図 42 の PC1 では，左下の node16 で正に，右上の node5 で負にそれぞれなっており，右下の node20 でも負になっている．しかし，node16 から node5 に向かって連続的な値の変化が見られる一方で node20 は値が孤立しているが図 18 と比較して明瞭でない．図 43 の PC2 では，右下の node20 で正に大きい値が見られる．左上の node6 で負の値が見られる．

図 44 は SammonMap の結果である．横軸及び縦軸は Sammon Map の 2 次元距離空間であり，番号は SOM の各々の node を示している．図 44 では線が重なるようなことが生じておらず，トポロジー誤差は非常に小さいと確認できる．

Monthly 解析において図 36 の EOF1 の固有ベクトルは SLP の 50 年の図 4 と比較すると「純粋な AO」に近い．図 40 と図 41 で「純粋な AO」に対応した偏差場を持つ node が PC1 とずれた方向に見られた一方で，AO 負の構造の近くに「空白域」が見られなかった．node20 「PAR」が見つかり，node5 「純粋な AO」から node20 「PAR」の間の node5,10,15,20 にグリーンランド東岸を中心に正，北大西洋で負になる node が連続的につながっていた．

#### 5.1.4 順圧成分の解析

Tanaka (2003) の 3 次元ノーマルモード関数展開の展開係数である順圧成分  $w$  を用いて解析を行った．期間は 1960 年 12 月～2010 年 2 月の 50 年間の DJF 平均値を用いた．まず EOF 解析を行って得られた score を用いて，PC1 PC20 を入力ベクトルとした SOM 解析を行った．

図 45～47 は EOF 解析の結果である．

図 45 と図 46 は固有ベクトルである EOF1～2 を示す．コンターは 50 間隔で，実線が正，破線が負を示す．シェードはコンターと同じく赤が正で青が負を示す．図上側が北大西洋で，図下側が太平洋である．

図 45 の EOF1 は北大西洋と北太平洋で正に，北極海を中心とした付近で負になるモードとなっている．SLP の解析の結果と比較すると，北大西洋の西側のヨーロッパ上空では北大西洋と同じく正のモードであるが，よりヨーロッパ上空が強い．アメリカ大陸やユーラシア大陸はカスピ海の北側を除き正の値をとっている地域がほとんどであり，SLP の解析の図 4 や図 36 に比べ，環状に近い．寄与率は 29.7 % となった．Tanaka (2003) で述べられた結果とほぼ一致している．北大西洋の作用中心に最も近い閉じたコンターでは 300，北太平洋の作用中心に最も近い閉じたコンターでは 300 であり，「純粋な AO」である．SLP の解析結果の図 4 や図 36 よりも明瞭な結果となった．

図 46 の EOF2 は北太平洋で正，北極で正，北大西洋で負，シベリアで負，北アメリカで負を示すモードである．寄与率は 14.6 % となった．図 5 の SLP の 50 年解析の EOF2 と比べると，北太平洋の作用中心に対応する正の値が弱まり，相対的にその他の地域の絶対値が上昇する結果となっている．これより EOF2 の score が高い値となっても，太平洋を中心とした偏差場への影響力は SLP に比べると小さい．

図 47 は EOF 解析の PC1 の時系列である．SLP 解析の図 12 と比べて全体の傾向は一致しているが，1970 年が極小でなかったものの図 47 で 1970 年が 2 で極小であるなど，年により少し異なる点がみられる．図 48 は EOF 解析の PC2 の時系列である．SLP 解析の図 13 と比べて全体の傾向は一致している．

図 49～52 は SOM 解析の結果である．

図 49 は SOM 解析により得られた構造マップである．左上から右に向かって node1, node2 と並び，端に来たら下段に移り，右下が node20 となる  $4 \times 5$  のマップである．1 つの node の中の大気場は順圧高度場と同等の意味を持つ．SLP の 50 年の解析である図 16 と類似する結果となった．node5 に AO 正，node16 に AO 負と類似した構造が見られる．また，node1 に図 16 の node20 に見られた AO 負の構造から北太平洋の作用中心だけが符号が入れ替わった構造が同様に対応しているが，北太平洋の値が北極に比べて

小さい．北太平洋を考慮しないと NAO に類似の構造である．また，図 16 の node20 に見られない構造として，node1 はユーラシア大陸に大きな負が見られる．node20 には node1 と反対になった偏差場が見られるが，node1 と同様に北太平洋は弱く，NAO に類似の構造である．

図 50 は PC1-PC2 平面を表す．黒の数字は score の年を表し，赤字と青実線は各々の node の持つ score と同じ次元の値（行列 O の空間 U 上の PC1-PC2 成分）で node 番号を表す．PC1 の値が最も大きい node5 が AO 正で，最も小さい node16 が AO 負に対応することが確かめられる．また，PC2 が正に最も大きく，かつ PC1 の値が負にやや大きい node1 が見られる．図 50 において，図 17 で見られたような node5 と node20 の間にデータが存在しない「空白域」が確認できない．

図 51 と図 52 は PC1 と PC2 の S-Map 平面で見た値である．図の左上が node1 で右へ順番に node2, node3 と続き，右端で下におり左から node6 となり，右下で node20 である．図 51 の PC1 では，右上の node5 で正に，左下の node16 で負にそれぞれなっており，左上の node1 でも負になっている．しかし，node1 は図 18 と比較して孤立が見られない．図 52 の PC2 では，左上の node1 で正に大きい値が見られる．

図 53 は SammonMap の結果である．横軸及び縦軸は Sammon Map の 2 次元距離空間であり，番号は SOM の各々の node を示している．図 43 では線が重なるようなことが生じておらず，トポロジー誤差は非常に小さいと確認できる．

図 45 から順圧成分の EOF1 は「純粋な AO」に近く，図 49 の node1, 20 には NAO と類似の構造が見られた．図 50 から「空白域」は認められなかった．

#### 5.1.5 NAO-Index との比較

図 54～図 56 は PC1-PC2 平面に NAO index の大きさをシンボルで表現したものである．NAO index を標準偏差で基準化し，-1 以下を黒丸，-0.5 以下を丸十字，それ以上を十字で表現している．また，それぞれのシンボルの大きさは NAO index の大小に比例するように表現している．

図 54 は JRA-55 を用いた SLP の DJF 平均値を使った 50 年の解析の結果に対応する．図 7 の SOM の結果と比べると，node5 近傍と node20 近傍の両方の場所で NAO index が小さい．

図 55 は JRA-55 を用いた SLP の 12 月，1 月，2 月の 3 か月間それぞれの平均値を用いた 50 年の monthly の結果に対応する．図 41 の SOM の結果と比べると，図 54 の DJF 平均の結果と同様に node5 近傍と node20 近傍の両方の場所で NAO index が小さい．しかし，node20 は PC2 が正に大きい領域であり，NAO index が 1 を下回る領域は図

の左上の第二象限に偏っている．図 53 の構造マップと比較すると node10 と node15 の領域も NAO index が小さく，node10 は北大西洋と北極で値が大きく NAO に類似する構造に，node15 は北太平洋の北側とグリーンランドで正に北大西洋で負になる構造になっている．node5, node10, node15, node20 はすべて NAO index が負であることが分かった．

図 56 は順圧成分を用いた結果に NAO index を対応させた図である．NAO index は EOF1 が小さいとともに小さい傾向があるものの，EOF1 が低いものの中に NAO index が低くないものも多く存在することがわかった．

図 57 は順圧成分を用いた結果に DJF 平均値の 50 年の PC1 を対応させた図である．図 56 と同様に，EOF1 が小さいと DJF 平均値の 50 年の PC1 が小さい傾向があるものの，EOF1 が低いものの中に DJF 平均値の 50 年の PC1 が低くないものも多く存在することがわかった．NAO index と重ねた場合と分布が似ている．

#### 5.1.6 T 検定

「空白域」の存在が偶然に起こりうるものなのかを調査するため，PC1 と PC2 を用いてデータ集合を 2 つに分け，その集団の平均値に差が生じるかについて T 検定を行った．PC1 と PC2 は EOF の解析で得られた互いに直交する無相関な量であり，それぞれはもとの分散共分散行列の固有値により分散が最大となる方向である，したがって，各々が正規分布を仮定した上で分散を用いて計算されていることになる．「空白域」の存在は正規分布から外れていることに他ならないことから，正規性を仮定した場合，正規性を崩さない 2 つの集団として分割を行うことで，その平均値の差が有意であれば，標本は正規分布ではなく，空白域が偶然でないという存在を統計的に示せると考えた．

2 つの分け方であるが，PC1 の原点から標準偏差 の絶対値のところで， 以上か以下かで場合分けを行った．このとき，空白域をとらえられるように，PC1 - PC2 平面の原点を点対称とする回転を行い，回転後の PC1 である PC1' の標準偏差 を基準とした領域で分割を行った．

図 58 は，PC1 を横軸，PC2 を縦軸とする PC1-PC2 平面において，時計回りに  $11^\circ$  回転させた変量 PC1' の標準偏差 0.85 で分割を行った結果である．PC1 と PC2 は SLP の 50 年の解析により得られたものである．分割線から原点側を赤い四角の点で，分割線から原点側でない方向を黒い丸で表記している．図 59 は標準偏差を横軸に，回転角度（右回り）を縦軸にとった時の T 検定を行った P 値である．図 58 の標準偏差 0.85 で回転角が時計回りに  $11^\circ$  回転した時の T 検定の P 値は最小 0.0087 である．図 59 から図 58 の周囲においても P 値が低いことがわかる．図 58 の P 値最小の時，ちょうど

「空白域」を分割線から原点側の領域を覆っていることが分かる．このことから「空白域」はP 値 0.0087 に対応することが分かる．平均値に危険率 1 % で有意な差があることが示され、「空白域」の存在と対応している．

## 6 考察

### 6.1 北極振動の定義である EOF1 の構造の期間依存について

SLP の 50 年間の解析では JRA-55 と NCEP/NCAR の両方の EOF1 (図 4, 図 6) で北太平洋の作用中心が弱く, EOF2 (図 5, 図 7) で強かった一方で, SLP の 30 年間の解析では両再解析データの EOF1 (図 8, 図 10) で北太平洋の作用中心は北大西洋と同程度に近い「純粋な AO」であり, EOF2 (図 9, 図 11) で弱い. これは EOF 解析の結果が期間に依存しており, 構造が変化していると考えられる. 図 17 と図 21 の 50 年解析の PC1-PC2 平面を見ると node5,16 で PC1 の軸とはずれた方向に「純粋な AO」に近い構造 (図 16 と図 20) が解析されており, 「純粋な AO」の方向は PC1 の方向に対して PC2 の方向にわずかながら回転していると考えられる. 一方, 図 25 と図 29 の 30 年解析の PC1-PC2 平面を見ると node1,20 が PC1 の AO の方向に対応していることが分かり, 「純粋な AO」の固有ベクトル (図 24 と図 28) に対応し, PC1-PC2 平面で PC1 の方向が「純粋な AO」の方向に一致し, 回転していないと考えられる.

50 年解析と 30 年解析とで固有ベクトルが異なり, PC1-PC2 平面が回転するという事実は, 期間に依存して固有ベクトルが変化することを意味し, EOF1 を AO の定義とすることは適切でないと考えられる.

SLP の 12 月と 1 月と 2 月のそれぞれの月平均値を用いた monthly において, EOF1 (図 36) は北太平洋の作用中心が DJF の 50 年解析 (図 4, 図 6) と比較して強く, 「純粋な AO」に近かった. これは DJF 平均による 50 年解析と 30 年解析を比較する場合と同様に, EOF 解析の結果が期間に依存しており, 構造が変化していると考えられる. 図 41 の monthly の PC1-PC2 平面を見ると node5 と node16 が PC1 の AO の方向に対応していることが分かり, 「純粋な AO」の固有ベクトルと対応し, PC1-PC2 平面で PC1 の方向が「純粋な AO」の方向に一致し, 回転していないと考えられる. 図 38 と図 39 の monthly の PC1 と PC2 の時系列を見ると, 図 12 と図 13 による DJF 平均値の時系列と比べて各月による振れ幅が大きい. したがって monthly で回転が生じない原因は, 各月ごとに値の差が大きいことに由来して, DJF 平均の PC1 と PC2 の値の偏りに起因していると考えられる.

DJF 平均値と 1 か月毎の月平均値において固有ベクトルが異なる事実は, DJF 平均値の 50 年と 30 年の解析を比較した場合と同様に, EOF1 を AO の定義として適切でないと考えられる.

## 6.2 SLP と順圧成分の比較

Tanaka (2003) で用いられた同様の順圧成分を用いた DJF 平均において, EOF1 (図 45) は北太平洋の作用中心が DJF の 50 年解析 (図 4, 図 6) と比較して強く, 「純粋な AO」に近かった. これは順圧成分を用いることで EOF1 の構造がより環状に変化し, また, 傾圧成分を含んでいないためであると考えられる. AO は順圧成分と考ええると Tanaka and Matueda (2005) で線形不安定解析を用いて, 振幅も増幅率も成長しない特異固有解であると述べられている. EOF1 が特異固有解に対応したモードであると考えられる.

図 46 の EOF2 で SLP の 50 年解析と比較して特段に北太平洋の作用中心が強い値を示さなかった. これは図 4 と図 6 における北太平洋の作用中心の強い領域が主に傾圧成分に由来しているということが示唆される. 北太平洋には順圧成分で主要な変動としてあらわされないモードを含んでいることが考えられる.

図 49 の SOM の構造マップで node5 と node16 で AO が見られ, node1 と node20 で北極と北大西洋で偏差が見られ NAO が見られた. 図 50 において node5 と node20 で AO が対応し「純粋な AO」であることが確認できた. node1 は PC2 の方向に対応しており, NAO の構造は「純粋な AO」の方向だけでなく PC2 の方向にも反映されていることが考えられる. これは図 46 の EOF2 の構造が北極と北大西洋において NAO に近いことが考えられ, AO と NAO とともに順圧成分で表現されていると考えられる. 一方で図 49 で SLP の 50 年の解析 (図 17 と図 21) で見られたような「空白域」は存在せず, EOF1 は順圧成分による AO として SLP よりも明瞭に表現されている.

## 6.3 レジームの存在と AO と NAO との関係について

図 17 と図 21 の 50 年解析の PC1-PC2 平面から node5 と node20 の間に「空白域」が見つかり, PC1 という AO の定義上で負にふれている領域において大きくデータがないことが示された. 一方で, 図 25 と図 29 の 30 年の解析の PC1-PC2 平面から「空白域」は明瞭に認められなかった. これは図 17 と図 21 の 50 年解析で「PAR」が見られ, 図 25 と図 29 の 30 年解析で「PAR」が見られなかったことと, データが隣接していることから同じであると考えられる. 50 年解析で「PAR」が見られたことにより, PC1-PC2 平面上のデータ集合に突起した天候レジームが表れ, 凸集合でなくなったことが原因であると考えられる. 30 年解析で「PAR」が見られないということは, 「PAR」が 1960 ~ 1980 年の 20 年間にデータが集中していることがあげられる. 1960 年代および 70 年代のデータの品質を考えると, 図 12 ~ 図 15 の JRA-55 と NCEP/NCAR を重ね



た score の時系列を比べても再解析データ間に大きな違いは見られないことから再解析データの品質の問題とは考え難い．また、「空白域」の存在が偶然でないものとするために図 58 と図 59 による p 値の結果を示した．図 59 から図 58 による空白域に対応した領域で p 値が小さいだけでなく、その近傍においても p 値が小さいことが示され、「空白域」の存在が p 値の小さい領域を作っていると考えられる．このことから「空白域」は意味のある存在であると考えられる．

図 41 の monthly の PC1-PC2 平面を見ると「空白域」は明瞭に見られないが、同じ 50 年の期間である DJF 平均の図 17 と図 21 の結果と異なる「空白域」が見られないのは図 17 と図 21 を図 25 と図 29 と比較した場合の議論と同様に、凸集合から大きく外れていないためと考えられる．図 41 でわずかながら PAR のようなレジームがみられるが、DJF 平均ほど明瞭でない．図 41 の monthly の議論の結果で、図 17 と図 21 及び図 41 の node5,10,15,20 は「空白域」のへりを取り囲んでいると述べた．DJF 平均値と monthly では node10 と node15 において偏差場全体の強弱が異なる．これは DJF 平均の場合 node5 の「純粋な AO」と node20 の「PAR」の間でデータが存在しないため、間にあたる北極と北大西洋の偏差場が大きく、北太平洋が小さい構造が存在しないことになる．すなわち NAO が負となる構造において、北太平洋に偏差が生じない場が存在しないことを示していると考えられる．NAO が負となる場合、北太平洋が負の偏差場となれば「純粋な AO」になり、北太平洋が正となれば「PAR」となり、北太平洋が偏差 0 に近い場は存在しないということである．

図 54 の SLP の DJF 平均による NAO index は「純粋な AO」も「PAR」も NAO index は負の領域にあたり、NAO index では AO と区別ができないことがわかった．しかし、SLP の DJF 平均の 50 年の解析における EOF1 (図 4 と図 6) は北太平洋の作用中心が弱く、AO の定義はより NAO index の方向に近づいていると考えられる．すなわち「空白域」の方向は NAO の負であり、「PAR」と「純粋な AO」の方向の両方で NAO index の負の値が見られたと考えられる．

SLP の monthly の 50 年の解析において「空白域」が見られないが、NAO の方向は「純粋な AO」から PC2 の正の方向に傾いた方向に存在し、図 55 から PC2 の影響があることが示された．DJF 平均で見られた「PAR」と「純粋な AO」の間の NAO index の負にあたる構造が存在し、北太平洋の偏差場が 0 に近く、NAO index が大きく負になる場合が存在すると考えられる．

DJF 平均値で NAO index の負の時に北太平洋が偏差 0 になる時が存在せず、monthly で存在するのは、大気大循環において 1 か月変動では北極と北太平洋だけで応答することがありうるが、3 か月持続する北極と北太平洋だけで応答するような気候システムが存在しないと考えられる．DJF 平均値で見た場合、大気だけでなく海洋の影響も

大きくなることが推察される．順圧成分における解析で「空白域」は見られず、「PAR」という形で北太平洋の偏差場が海水温偏差の影響から傾圧成分にエネルギーが与えられていることが考えられる．

図 56 は順圧成分に対して NAO index を重ね、図 57 は SLP の DJF の 50 年の解析における PC1 を重ねたものに対応するが、両者の分布は順圧成分の PC1 の方向に一致しており非常に似ている．図 54 や図 55 と異なり、SLP の指標からみた AO と NAO が順圧成分の EOF1 上で同じ分布をしていることになると考えられる．すなわち、順圧成分では SLP における AO と NAO とは同じ成分を共有していることが考えられる．しかし、SLP における NAO は傾圧成分も含まれるため、ここでの議論は順圧成分内における議論にとどまることに注意したい．図 49 と図 50 で node1 は NAO に類似な構造を持つことを示したが、NAO index は node1 付近において負の値が大きい点が集まっており、SLP の NAO で北太平洋の構造が AO に対応しない場合の集合 (50 年解析で PAR が存在する位置) が node1 付近に集まっていることが考えられる．

## 7 結論

本研究では、Itoh (2002) や Ambaum et al. (2001) で述べられた AO の存在について否定的な研究において、SOM を用いて EOF の PC1-PC2 平面上における AO と NAO の関連性や違いについて解析を行った。

SLP の 50 年間の DJF 平均を用いた解析では北大西洋と北太平洋が同程度に応答する「純粋な AO」が PC1-PC2 平面に見られたが、PC1 の方向から PC2 の方向へわずかながら回転する結果となった。また、30 年間の DJF 平均を用いた解析では「純粋な AO」が PC1 の方向に一致し回転しなかった。このことから、50 年と 30 年とで PC1 と PC2 の方向が異なるため、解析の取りうる期間に依存して固有ベクトルが変化してしまうことわかった。一方、50 年の monthly による解析では、「純粋な AO」が PC1 の方向に一致することが分かり、DJF 平均を用いた解析と異なる結果となった。原因として各月ごと値の差が大きいことに由来して PC1 と PC2 の値に偏りが生じていると考えられる。さらに、Tanaka (2003) で用いられた順圧成分を用いた DJF 平均の 50 年の解析では、PC1 の方向は「純粋な AO」の方向と一致し、固有ベクトルは AO として SLP よりも明瞭に表現されている。SLP よりも順圧成分の方が「純粋な AO」を捉えていると考えられる。したがって、AO は SLP における EOF1 で定義することは期間依存してしまうため適切ではなく、順圧成分を用いて定義することが「純粋な AO」に近づきより適切であると考えられる。

SLP の 50 年間の DJF 平均を用いた解析では SOM の解析により得られた node5 と node20 の間に「空白域」が見つかり、PC1 で負に触れている領域において大きくデータが存在しない領域があることが示された。node20 は北極と北太平洋が正で北大西洋が負という構造を有しており本研究では「PAR」と定義した。DJF 平均の 50 年の解析では「PAR」が存在したが、30 年や monthly の 50 年及び順圧成分の解析では存在しなかった。「空白域」の存在が DJF 平均の 50 年の解析で偶然ではないものかどうかを調べた結果、T 検定で有意性が確かめられた。また、NAO index を重ねた解析により、DJF 平均の 50 年解析では「純粋な AO」と「PAR」の間の「空白域」に NAO index が大きく負になる領域があることが分かった。したがって、NAO index が負の時に限り、北太平洋の偏差場が正か負に大きな値をとり、0 に近くならないことが明らかとなった。原因として、SLP は北太平洋の偏差場は 3 か月という長期間において海洋の影響を受け傾圧成分にエネルギーが与えられていることが考えられる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり，指導教員である筑波大学計算科学研究センターの田中博教授には，私自身もまだ右も左もわからない中で入学の時から考えていた SOM の手法を使うことを暖かく受け入れていただき，先生の幅広い視点での助言をいただくことができました．また，研究に関する内容で行き詰りそうになった時も常に客観的に見てくださり，的確な方向性を導いていただきました．心より感謝申し上げます．

生命環境科学専攻の植田宏昭教授，加藤輝之教授には副指導として発表会を通じて研究の内容について助言をいただきました．心より感謝申し上げます．

さらに，大気大循環研究室の先輩にあたる，相澤拓郎氏，小柴厚氏，山上晃央氏には，ゼミでの助言や日々の研究を行っていく上での相談に乗っていただき大変お世話になりました．心より感謝申し上げます．

## 参考文献

- Adachi, M., and M. Kotani, 1994: Identification of chaotic dynamical systems with back-propagation neural networks. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, **E77-A**, 324-334.
- Ambaum, A. H. P., B. J. Hoskins, and D. B. Stephenson, 2001: Arctic Oscillation or North Atlantic Oscillation? *J. Phys. Oceanogr.*, **25**, 122-137.
- Bao, M., and J. M. Wallace, 2015: Cluster analysis of northern hemisphere wintertime 500-hPa flow regimes during 1920-2014. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 3597-3608.
- Cavazos, T., 2000: Using self-organizing maps to investigate extreme climate events: An application to wintertime precipitation in the Balkans. *J. Climate*, **13**, 1718-1732.
- Deser, C., 2000: On the teleconnectivity of the Arctic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 779-782.
- Hurrell, J. W., 1995: Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. *Science*, **269**, 676-679.
- 井芹慶彦, 西山浩司, 神野健二, 河村明, 2010: 種々のパターン抽出手法による日本周辺冬季 500 hPa 平均温度場のパターン抽出. *水工学論文集*, **54**, 439-444.
- Itoh, H., 2002: True versus apparent Arctic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 109-1.
- Itoh, H., 2008: Reconsideration of the true versus apparent Arctic Oscillation. *Journal of Climate.*, **21**, 2047-2062.
- Johnson, N. C., and S. B. Feldstein, 2010: The continuum of North Pacific sea level pressure patterns: Intraseasonal, interannual, and interdecadal variability. *J. Climate*, **23**, 851-867.
- Kohonen, T., 1982: Self organized formation of topologically correct feature maps. *Biol. Cybern.*, **43**, 59-69.
- Lorenz, E. N., 1956: Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction. *Statistical Forecasting Project, Scientific Rep. 1, Contract No. AF19(604)-1566*, Department of Meteorology, MIT, Cambridge, MA, 49 pp. [NTIS AD-110268.]

- Lorenz, E . N., 1963: Deterministic nonperiodic flow. *J . Atmos . Sci.*, **20**, 130-141.
- Oja, M., S. Kaski, and T. Kohonen, 2003: Bibliography of self-organizing map (SOM) papers: 1998-2001 Addendum. *Neural Computing Surveys*, **3**, 1-156.
- Polo, I., A. Ullmann, P. Roucou, and B. Fontaine, 2011: Weather regimes in the Euro-Atlantic and Mediterranean sector, and relationship with west African rainfall over the 1989-2008 period from a self-organizing maps approach. *J. Climate*, **24**, 3423-3432.
- Principe, J. C., L. Wang, and M. A. Motter, 1998: Local dynamic modeling with self-organizing maps and applications to nonlinear system identification and control. *Proceedings of the IEEE*, **86 (11)**, 2240-2258.
- Sakai, K., R. Kawamura, and Y. Iseri, 2010: ENSO-induced tropical convection variability over the Indian and the Western Pacific Oceans during the northern winter as revealed by a self-organizing map. *J. Geophys. Res*, **115**, D19125.
- 佐野綾一, 波多野賢治, 田中克己, 1998: 自己組織化マップを用いた Web 文書の対話的分類とその視覚化. 情報処理学会研究報告データベースシステム (DBS) 1998(57(1998-DBS-116)), **33-40**, 1998-07-08.
- Sammon, J. W., Jr., 1969: A nonlinear mapping for data structure analysis. *IEEE Trans. Comput.*, **C-18**, 401-409.
- Suzuki, I. and H. L. Tanaka, 2007: Teleconnections and the Arctic Oscillation analyzed in the barotropic component of the model and observed atmosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 933-941.
- Tanaka, H. L., and D. Nohara, 1998: Numerical simulation of realistic blocking and local Lyapunov stability analysis of the barotropic prediction model. *WMO Weather Prediction Research Programmes*, **26**, 6.23–6.24.
- Tanaka, H. L., 2003: Analysis and modeling the Arctic Oscillation using a simple barotropic model with baroclinic eddy forcing. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 1359-1379.
- Tanaka, H. L., and M. Matsueda, 2005: Arctic Oscillation analyzed as a singular eigenmode of the global atmosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, **83**, 611-619.

- Thompson, D. W. J., and J. M. Wallace, 1998: The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height temperature fields. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 1297-1300.
- Walker, G. T., and E. W. Bliss, 1932: World weather V. *Mem. Roy. Meteor. Soc.*, **4**, 53-84.
- Woollings, T. and B. Hoskins, 2008: Simultaneous Atlantic-Pacific blocking and the Northern Annular Mode. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **134**, 1635-1646.

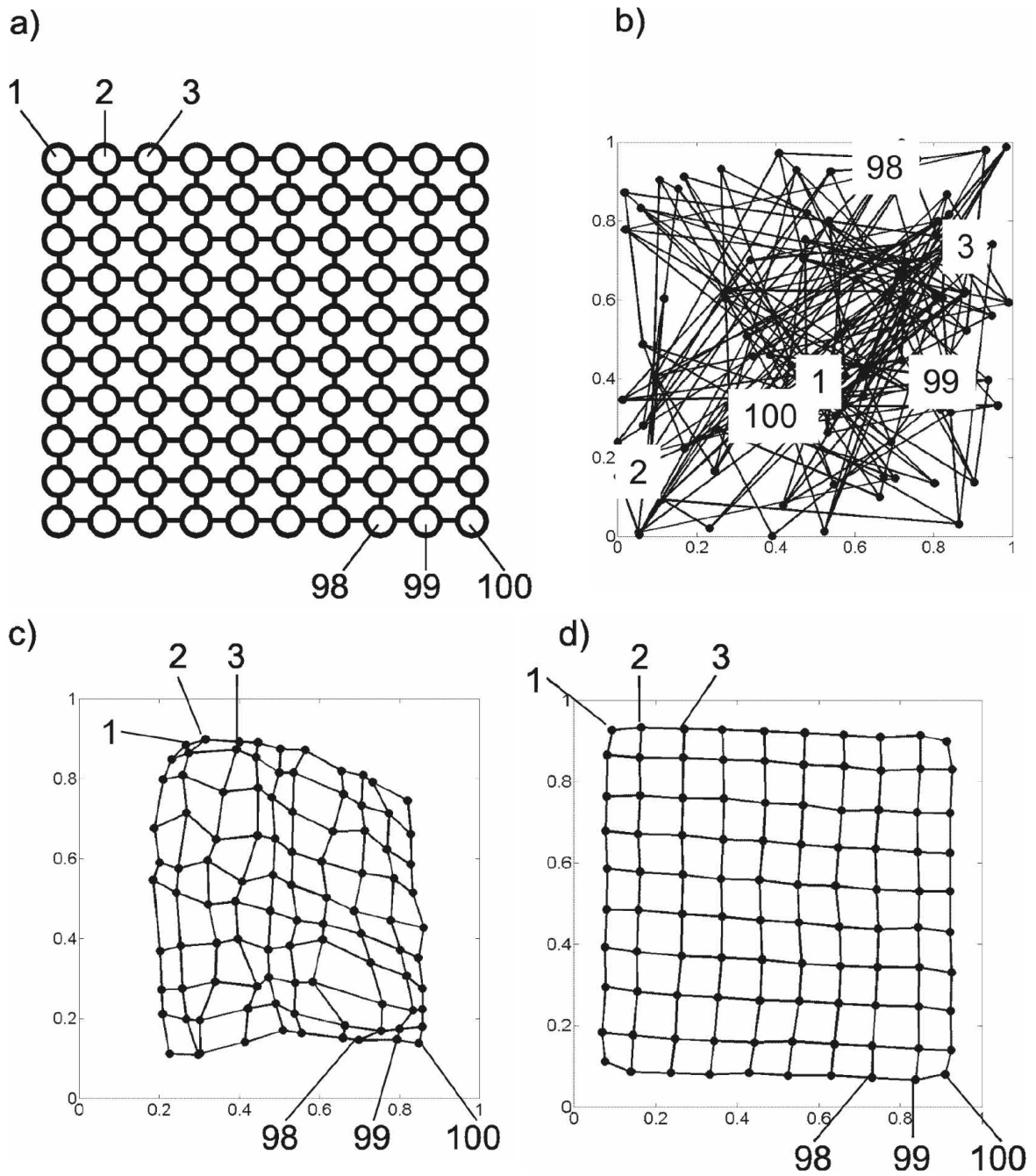


図 1: SOM の学習ステップを 2 次元正方領域で学習した例 .  $10 \times 10$  の node 数で計算 . a は S-Map 空間で node を並べたものである . b は空間 U として 2 次元正方形領域の上で見た初期の node 配置 . c は b を 500 回学習したもの , d は b を 50000 回学習したものである . (Johnson and Feldstein (2008) 引用)



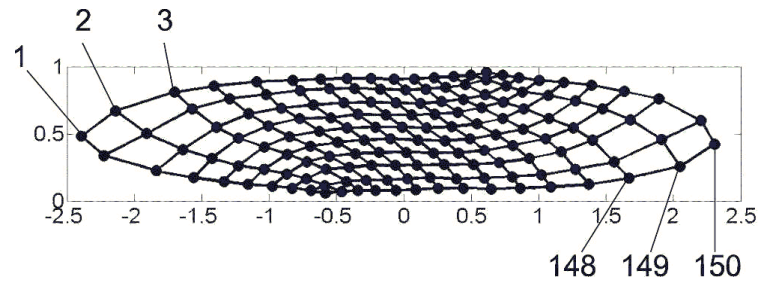


図 2: 図 1 において長方形領域で学習した例.  $10 \times 15$  の node 数で計算, (Johnson and Feldstein (2008) 引用)

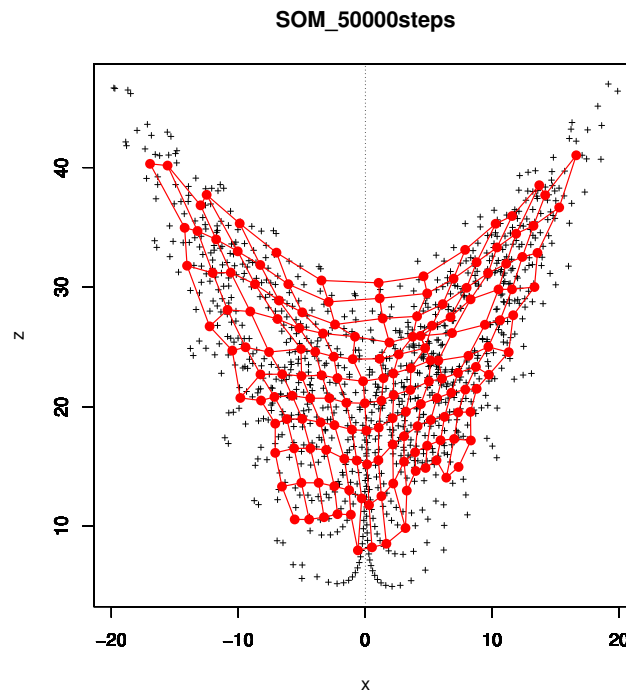


図 3: ローレンツアトラクタの  $x$ - $z$  断面であり, 横軸が  $x$  の値, 縦軸が  $z$  の値である. 黒十字がアトラクタの実際の値  $(x, y, z)$  で赤色丸と赤線がアトラクタ空間  $U$  上の node の位置を示す.

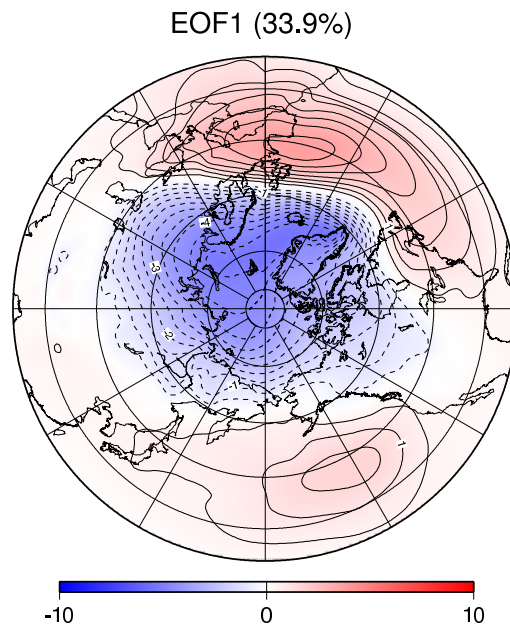


図 4: JRA-55 の 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 50 年の DJF 平均値を用いて EOF 解析を行った固有ベクトルの構造 EOF1 を示す．コンターは 0.5 間隔で，実線が正（赤），破線が負（青）を示す．

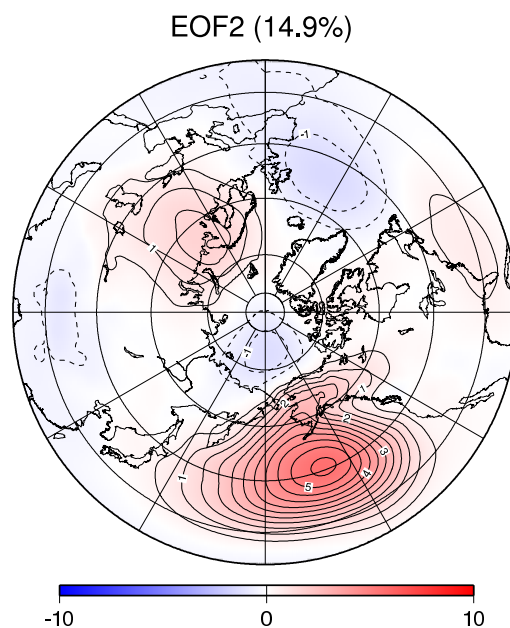


図 5: JRA-55 の 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 50 年の DJF 平均値を用いて EOF 解析を行った固有ベクトルの構造 EOF2 を示す．コンターは 0.5 間隔で，実線が正（赤），破線が負（青）を示す．

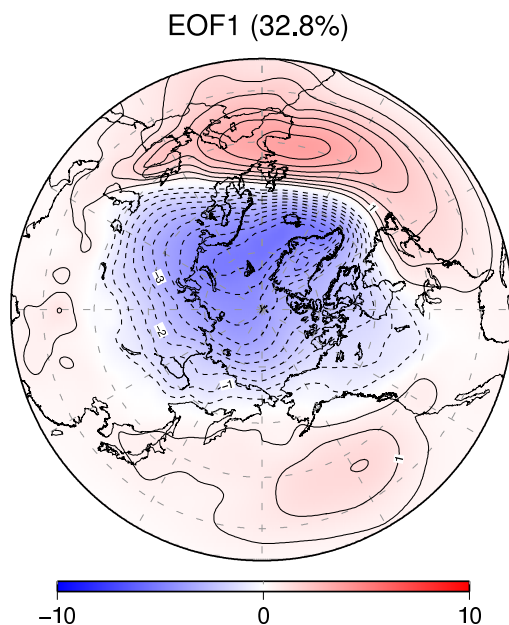


図 6: NCEP/NCAR の 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 50 年の DJF 平均値を用いて EOF 解析を行った固有ベクトルの構造 EOF1 を示す．コンターは 0.5 間隔で，実線が正（赤），破線が負（青）を示す．

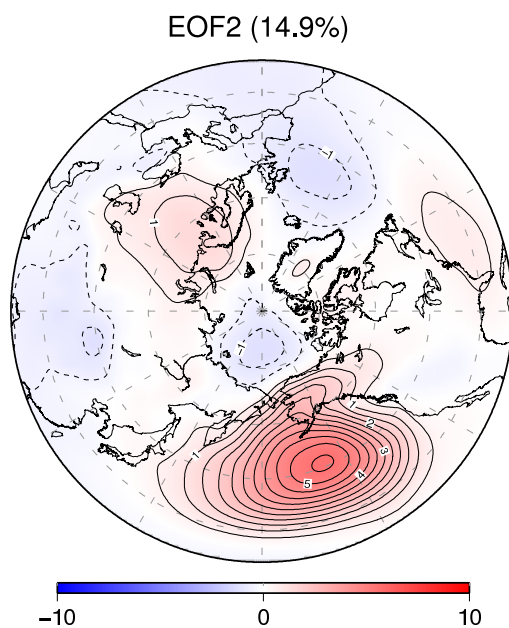


図 7: NCEP/NCAR の 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 50 年の DJF 平均値を用いて EOF 解析を行った固有ベクトルの構造 EOF2 を示す．コンターは 0.5 間隔で，実線が正（赤），破線が負（青）を示す．

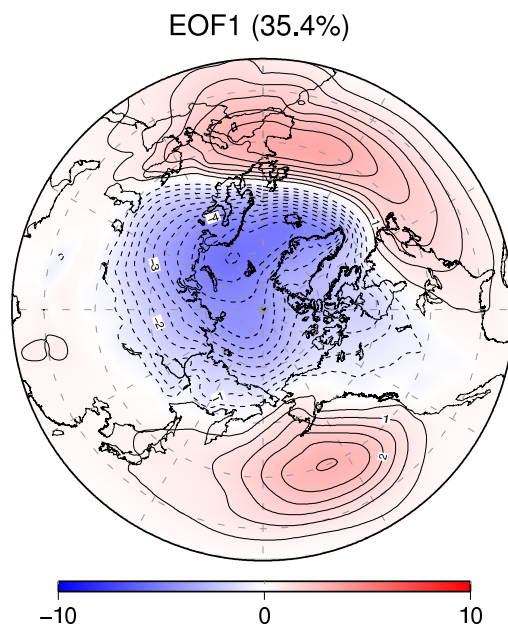


図 8: JRA-55 の 1980 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 30 年の DJF 平均値を用いて EOF 解析を行った固有ベクトルの構造 EOF1 を示す．コンターは 0.5 間隔で，実線が正（赤），破線が負（青）を示す．

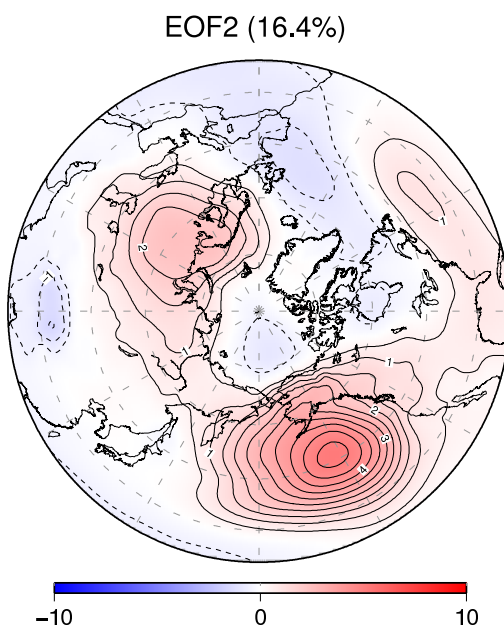


図 9: JRA-55 の 1980 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 30 年の DJF 平均値を用いて EOF 解析を行った固有ベクトルの構造 EOF1 を示す．コンターは 0.5 間隔で，実線が正（赤），破線が負（青）を示す．

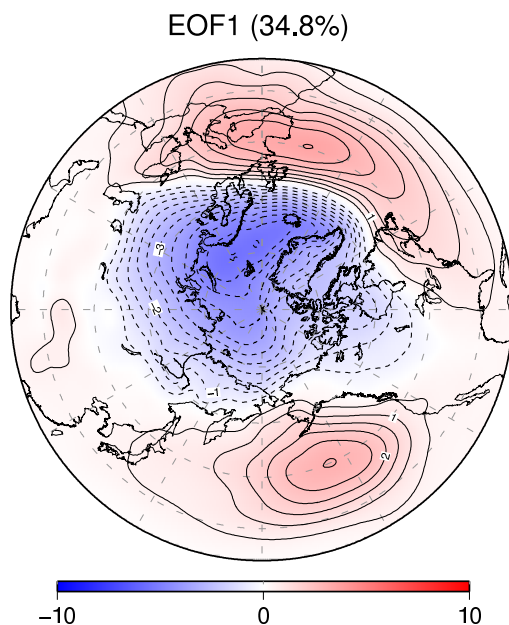


図 10: NCEP/NCAR の 1980 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 30 年の DJF 平均値を用いて EOF 解析を行った固有ベクトルの構造 EOF1 を示す．コンターは 0.5 間隔で，実線が正（赤），破線が負（青）を示す．

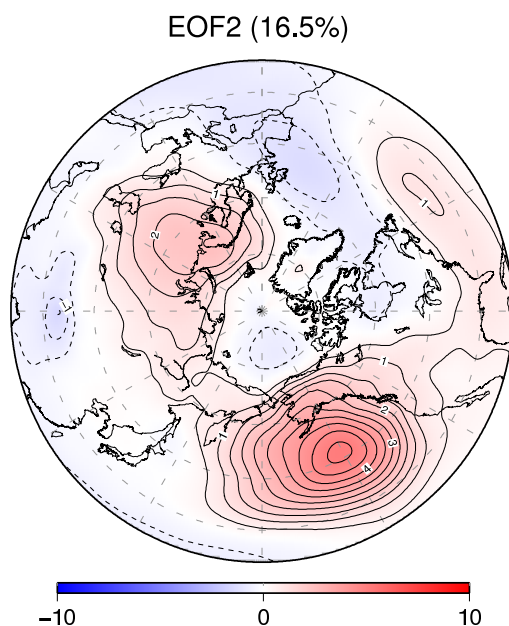


図 11: NCEP/NCAR の 1980 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 30 年の DJF 平均値を用いて EOF 解析を行った固有ベクトルの構造 EOF1 を示す．コンターは 0.5 間隔で，実線が正（赤），破線が負（青）を示す．

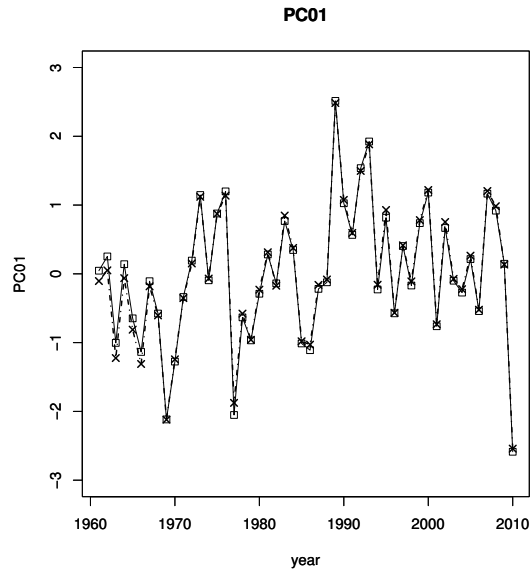


図 12: JRA-55 の 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 50 年の DJF 平均値を用いて EOF 解析を行った score の時系列である PC1 を示す．横軸は年代で，縦軸は score をそれぞれの期間における標準偏差で割った値を示す．実線・四角囲いは JRA-55，破線・十字点は NCEP/NCAR の結果である．

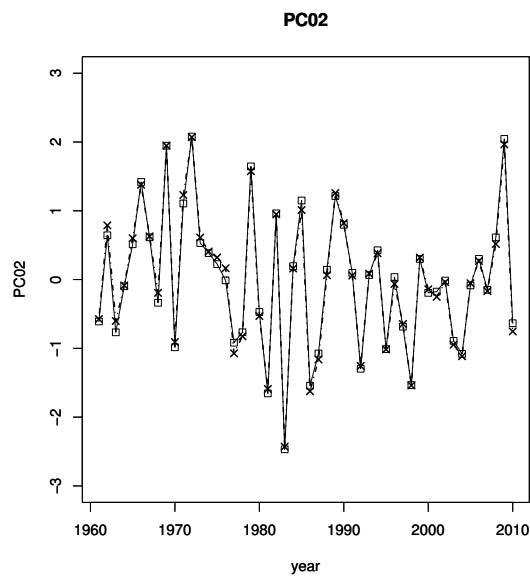


図 13: JRA-55 の 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 50 年の DJF 平均値を用いて EOF 解析を行った score の時系列である PC2 を示す．横軸は年代で，縦軸は score をそれぞれの期間における標準偏差で割った値を示す．実線・四角囲いは JRA-55，破線・十字点は NCEP/NCAR の結果である．

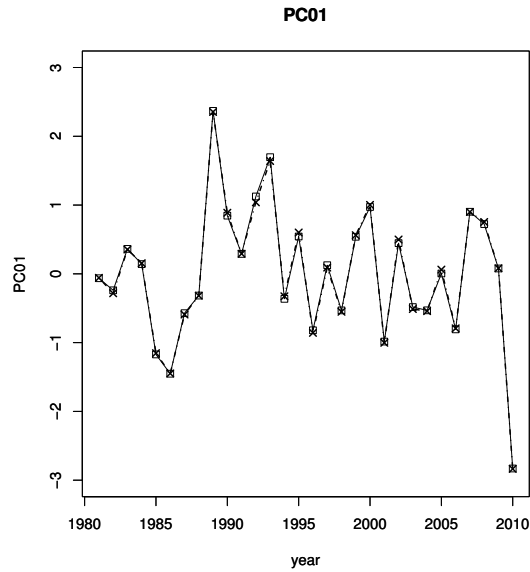


図 14: JRA-55 の 1980 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 30 年の DJF 平均値を用いて EOF 解析を行った score の時系列である PC1 を示す．横軸は年代で，縦軸は score をそれぞれの期間における標準偏差で割った値を示す．実線・四角囲いは JRA-55，破線・十字点は NCEP/NCAR の結果である．

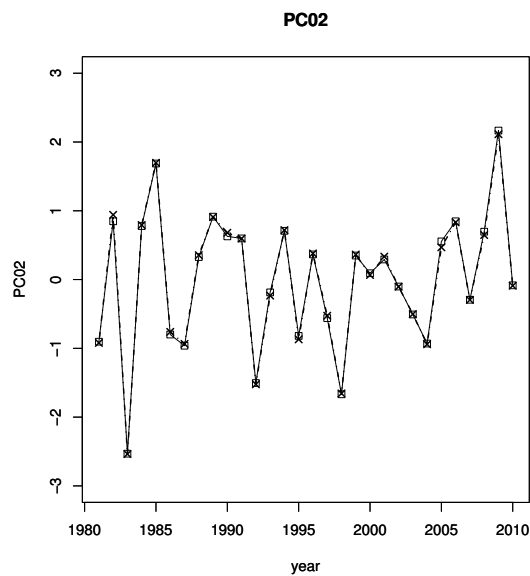


図 15: JRA-55 の 1980 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 30 年の DJF 平均値を用いて EOF 解析を行った score の時系列である PC2 を示す．横軸は年代で，縦軸は score をそれぞれの期間における標準偏差で割った値を示す．実線・四角囲いは JRA-55，破線・十字点は NCEP/NCAR の結果である．

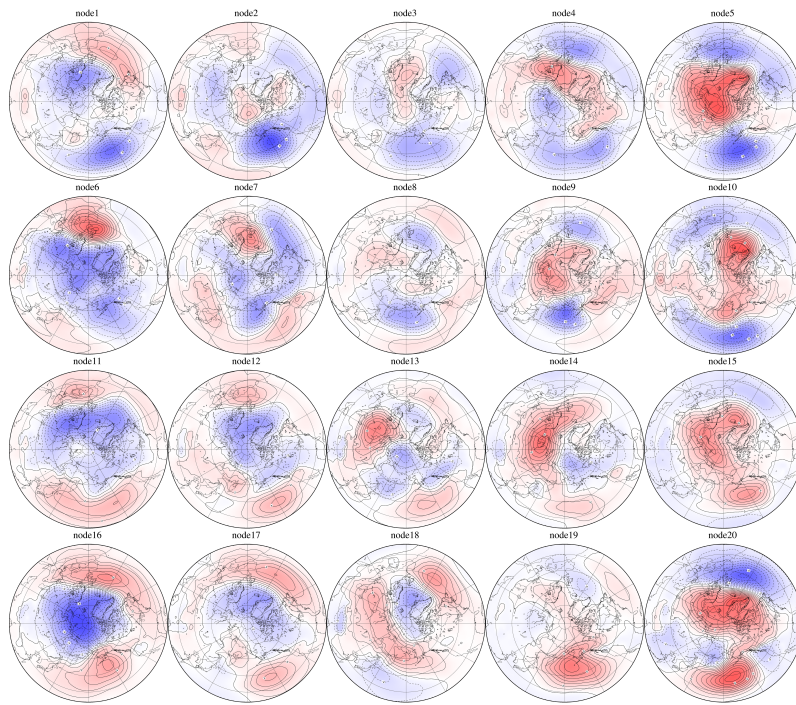


図 16: JRA-55 の 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 50 年の DJF 平均値を用いて SOM 解析を行った構造マップを示す．左上から右に向かって node1,node2 と並び，端に来たら下段に移り，右下が node20 となる 4 × 5 のマップである．1 つの node 中の大気場は偏差場と同等の意味を持つ．

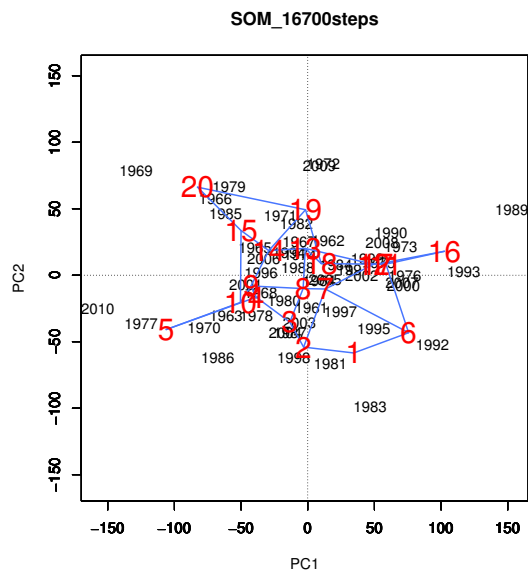


図 17: JRA-55 の 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 50 年の DJF 平均値を用いて SOM 解析を行った PC1-PC2 平面上に node を配置した図を示す．横軸は PC1，縦軸は PC2 である．赤色数字は node 番号で，青線は隣接 node を繋いだものである．黒の数字は PC1 と PC2 の値の位置を年代の数字の中央で示している．



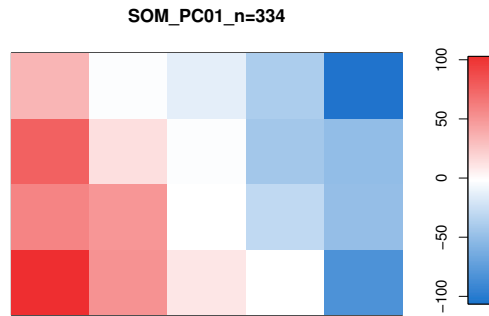


図 18: JRA-55 の 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 50 年の DJF 平均値を用いて SOM 解析を行った S-Map 平面上の PC1 の値を示す．左上から右に向かって node1,node2 と並び，端に来たら下段に移り，右下が node20 となる  $4 \times 5$  のマップである．赤色が正に，青色が負に対応する．

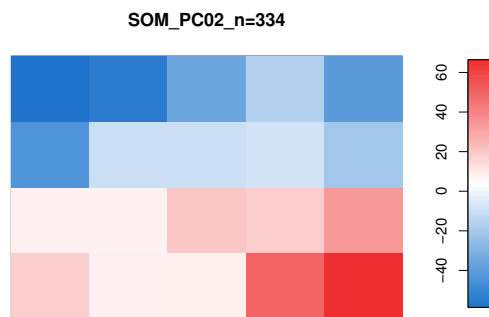


図 19: JRA-55 の 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 50 年の DJF 平均値を用いて SOM 解析を行った S-Map 平面上の PC2 の値を示す．左上から右に向かって node1,node2 と並び，端に来たら下段に移り，右下が node20 となる  $4 \times 5$  のマップである．赤色が正に，青色が負に対応する．

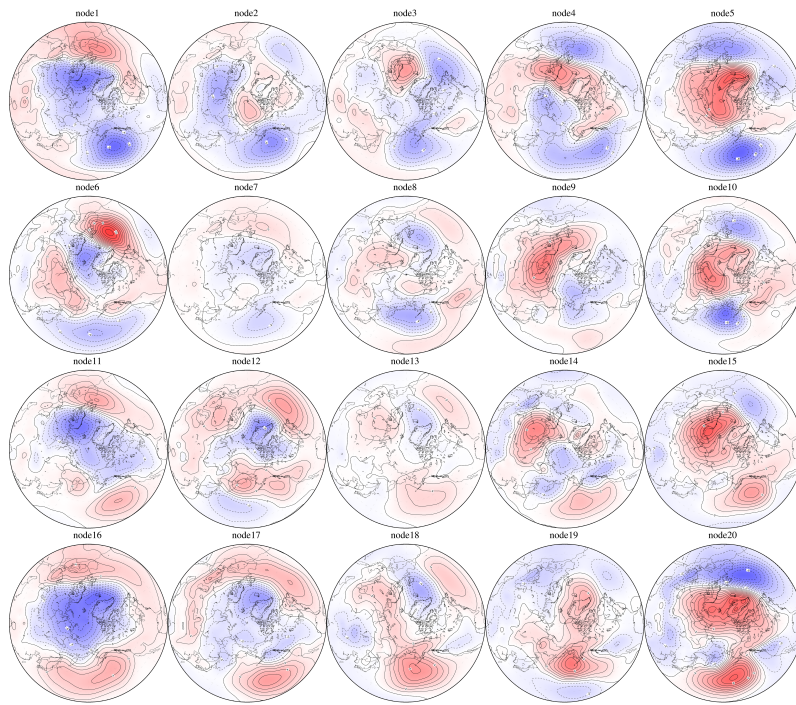


図 20: NCEP/NCAR の 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 50 年の DJF 平均値を用いて SOM 解析を行った構造マップを示す．左上から右に向かって node1,node2 と並び，端に来たら下段に移り，右下が node20 となる 4 × 5 のマップである．1 つの node の中の大気場は偏差場と同等の意味を持つ．

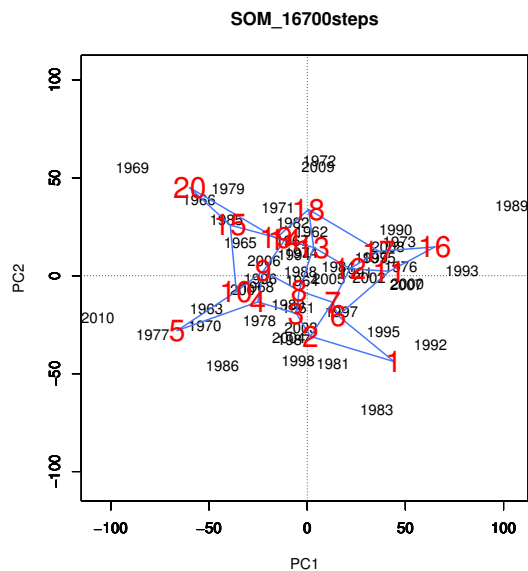


図 21: NCEP/NCAR の 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 50 年の DJF 平均値を用いて SOM 解析を行った PC1-PC2 平面上に node を配置した図を示す．横軸は PC1，縦軸は PC2 である．赤色数字は node 番号で，青線は隣接 node を繋いだものである．黒の数字は PC1 と PC2 の値の位置を年代の数字の中央で示している．

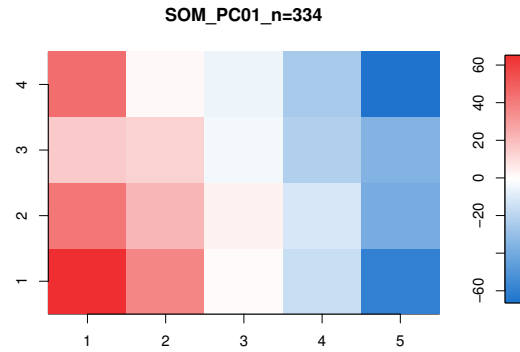


図 22: NCEP/NCAR の 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 50 年の DJF 平均値を用いて SOM 解析を行った S-Map 平面上の PC1 の値を示す . 左上から右に向かって node1,node2 と並び , 端に来たら下段に移り , 右下が node20 となる  $4 \times 5$  のマップである . 赤色が正に , 青色が負に対応する .

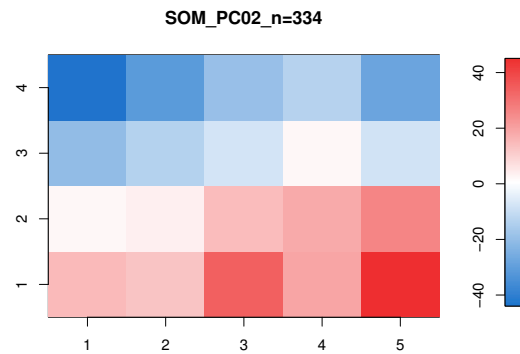


図 23: NCEP/NCAR の 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 50 年の DJF 平均値を用いて SOM 解析を行った S-Map 平面上の PC2 の値を示す . 左上から右に向かって node1,node2 と並び , 端に来たら下段に移り , 右下が node20 となる  $4 \times 5$  のマップである . 赤色が正に , 青色が負に対応する .

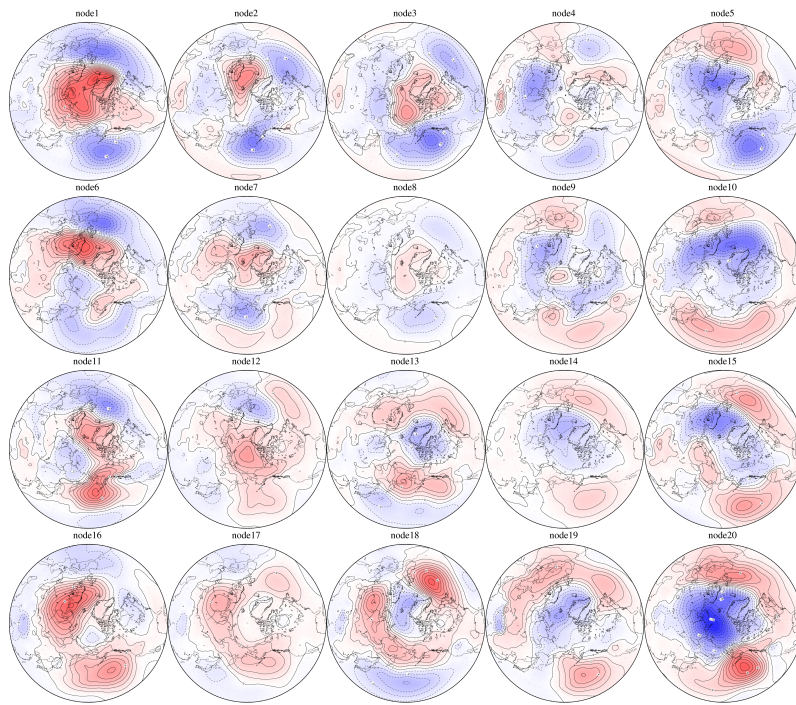


図 24: JRA-55 の 1980 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 30 年の DJF 平均値を用いて SOM 解析を行った構造マップを示す．左上から右に向かって node1,node2 と並び，端に来たら下段に移り，右下が node20 となる 4 × 5 のマップである．1 つの node 中の大気場は偏差場と同等の意味を持つ．

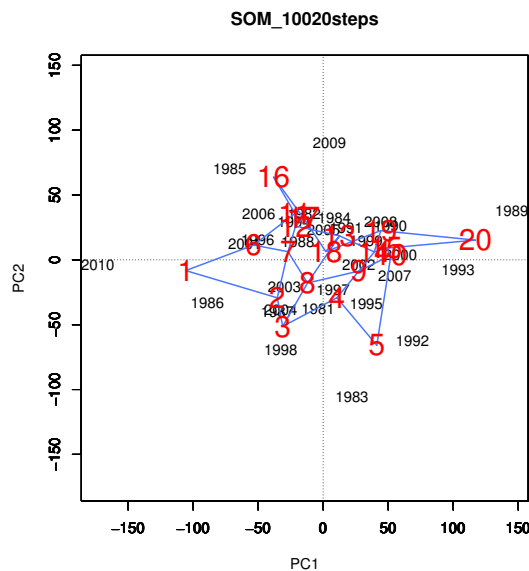


図 25: JRA-55 の 1980 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 30 年の DJF 平均値を用いて SOM 解析を行った PC1-PC2 平面上に node を配置した図を示す．横軸は PC1，縦軸は PC2 である．赤色数字は node 番号で，青線は隣接 node を繋いだものである．黒の数字は PC1 と PC2 の値の位置を年代の数字の中央で示している．

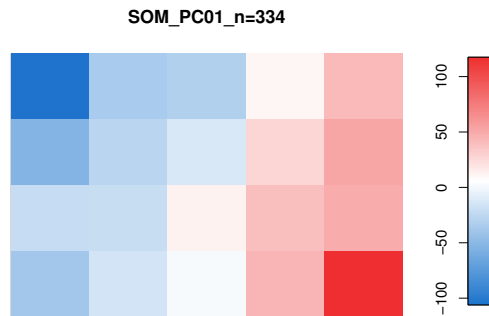


図 26: JRA-55 の 1980 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 30 年の DJF 平均値を用いて SOM 解析を行った S-Map 平面上の PC1 の値を示す．左上から右に向かって node1,node2 と並び，端に来たら下段に移り，右下が node20 となる  $4 \times 5$  のマップである．赤色が正に，青色が負に対応する．

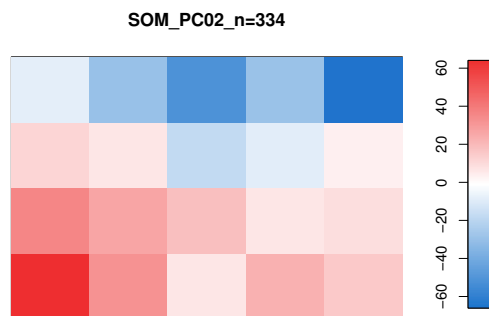


図 27: JRA-55 の 1980 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 30 年の DJF 平均値を用いて SOM 解析を行った S-Map 平面上の PC2 の値を示す．左上から右に向かって node1,node2 と並び，端に来たら下段に移り，右下が node20 となる  $4 \times 5$  のマップである．赤色が正に，青色が負に対応する．

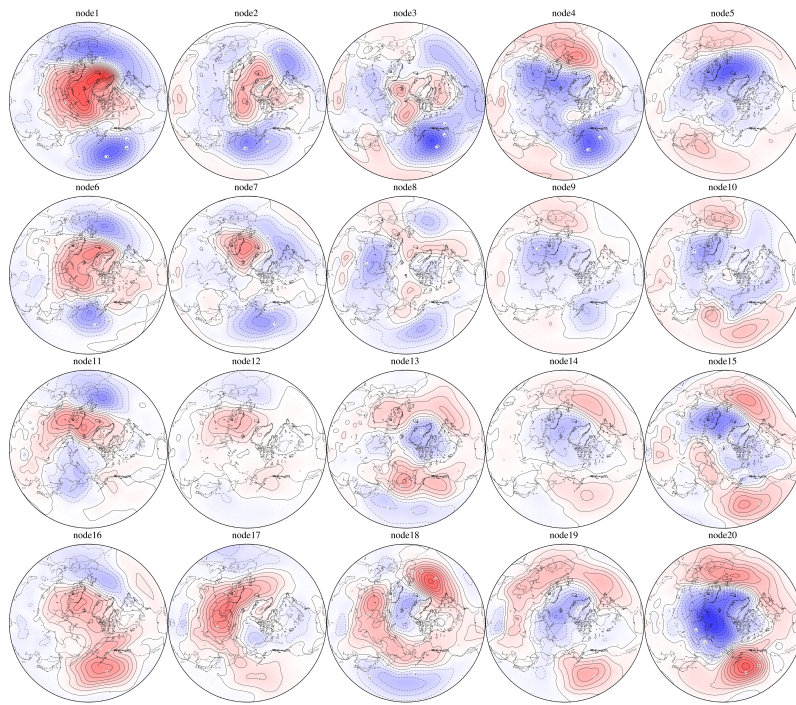


図 28: NCEP/NCAR の 1980 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 30 年の DJF 平均値を用いて SOM 解析を行った構造マップを示す．左上から右に向かって node1,node2 と並び，端に来たら下段に移り，右下が node20 となる 4 × 5 のマップである．1 つの node の中の大気場は偏差場と同等の意味を持つ．

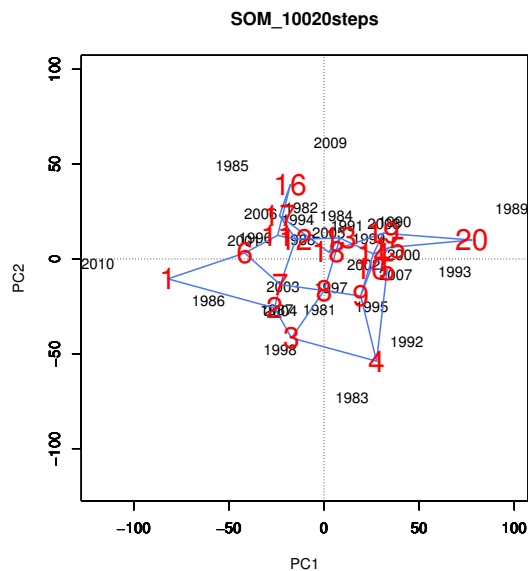


図 29: NCEP/NCAR の 1980 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 30 年の DJF 平均値を用いて SOM 解析を行った PC1-PC2 平面上に node を配置した図を示す．横軸は PC1，縦軸は PC2 である．赤色数字は node 番号で，青線は隣接 node を繋いだものである．黒の数字は PC1 と PC2 の値の位置を年代の数字の中央で示している．

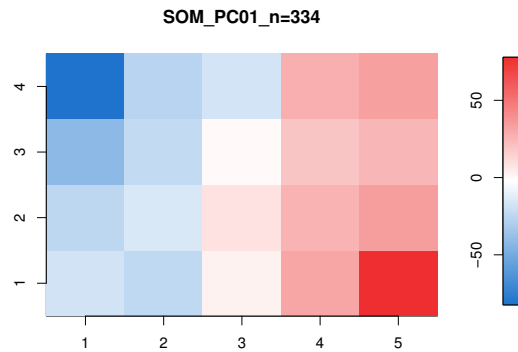


図 30: NCEP/NCAR の 1980 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 30 年の DJF 平均値を用いて SOM 解析を行った S-Map 平面上の PC1 の値を示す . 左上から右に向かって node1,node2 と並び , 端に来たら下段に移り , 右下が node20 となる  $4 \times 5$  のマップである . 赤色が正に , 青色が負に対応する .

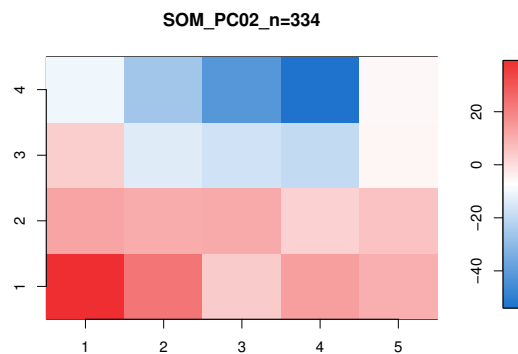


図 31: NCEP/NCAR の 1980 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 30 年の DJF 平均値を用いて SOM 解析を行った S-Map 平面上の PC2 の値を示す . 左上から右に向かって node1,node2 と並び , 端に来たら下段に移り , 右下が node20 となる  $4 \times 5$  のマップである . 赤色が正に , 青色が負に対応する .



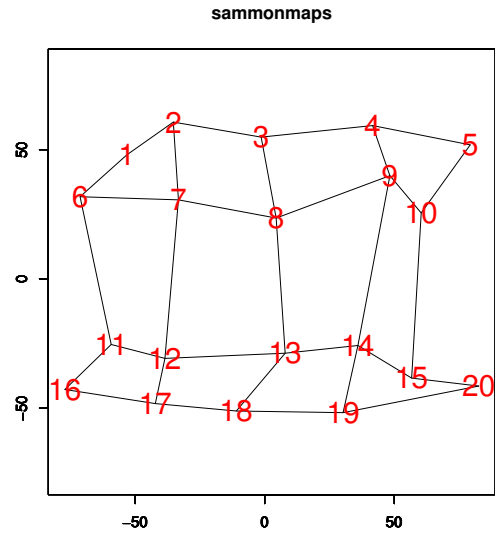


図 32: JRA-55 の 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 50 年の DJF 平均値を用いて SOM 解析した node の sammonmap を示す．赤色数字は node 番号で，青線は隣接 node を繋いだものである．横軸と縦軸は sammonmap によって近似された 2 次元距離空間の距離を示す．

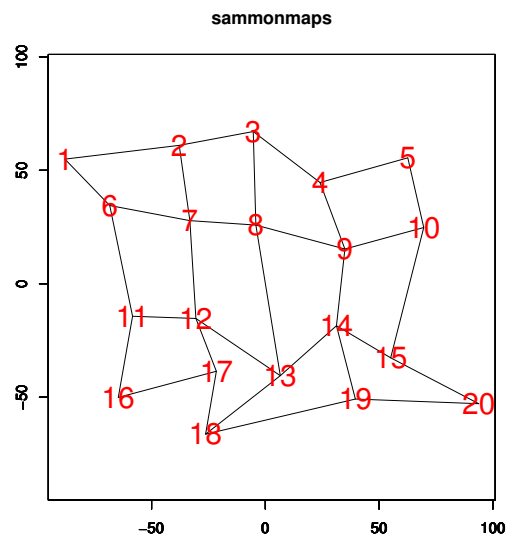


図 33: JRA-55 の 1980 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 30 年の DJF 平均値を用いて SOM 解析した node の sammonmap を示す．赤色数字は node 番号で，青線は隣接 node を繋いだものである．横軸と縦軸は sammonmap によって近似された 2 次元距離空間の距離を示す．



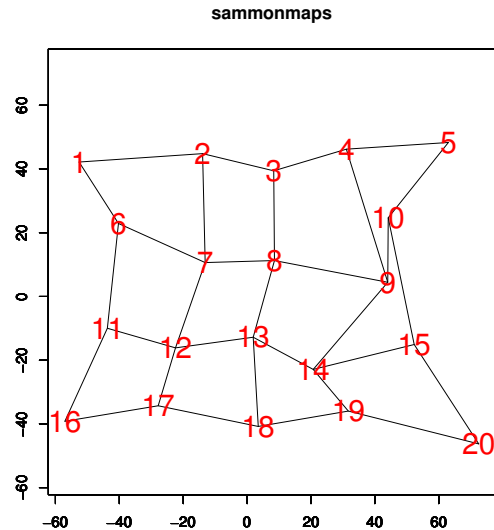


図 34: NCEP/NCAR の 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 50 年の DJF 平均値を用いて SOM 解析した node の sammonmap を示す．赤色数字は node 番号で，青線は隣接 node を繋いだものである．横軸と縦軸は sammonmap によって近似された 2 次元距離空間の距離を示す．

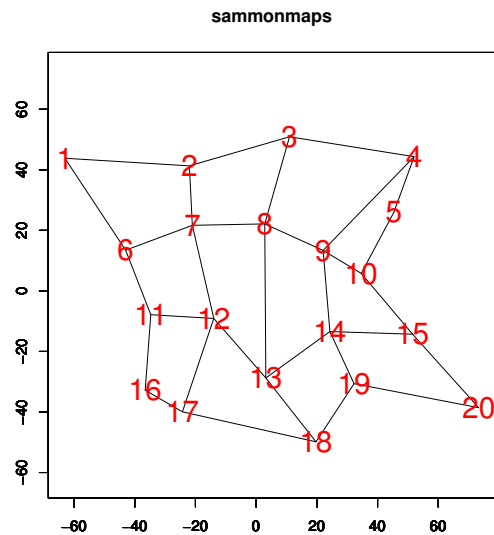


図 35: NCEP/NCAR の 1980 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 30 年の DJF 平均値を用いて SOM 解析した node の sammonmap を示す．赤色数字は node 番号で，青線は隣接 node を繋いだものである．横軸と縦軸は sammonmap によって近似された 2 次元距離空間の距離を示す．

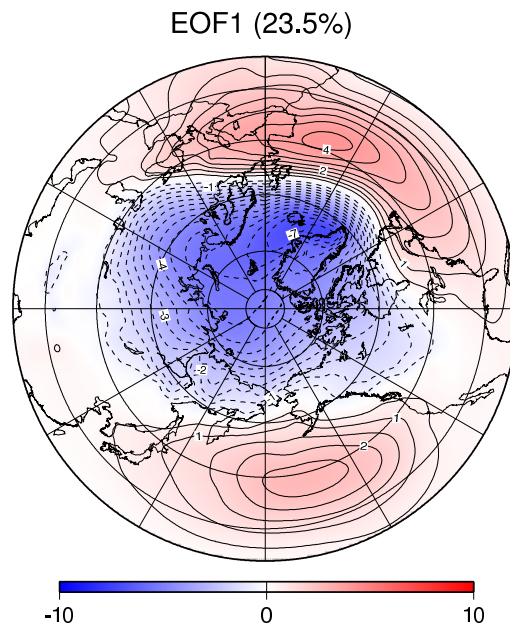


図 36: 1960 年 12 月～2010 年 2 月までの 50 年の 12, 1, 2 月各月平均値を用いて EOF 解析を行った固有ベクトルの構造 EOF1 を示す．コンターは 0.5 間隔で，実線が正（赤），破線が負（青）を示す．

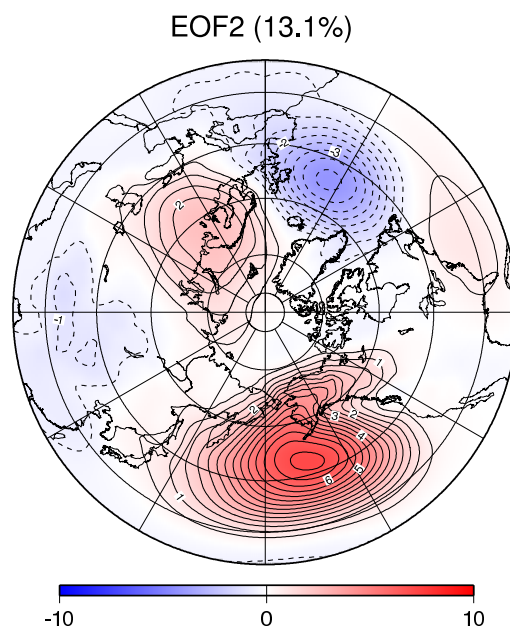


図 37: 1960 年 12 月～2010 年 2 月までの 50 年の 12, 1, 2 月各月平均値を用いて EOF 解析を行った固有ベクトルの構造 EOF2 を示す．コンターは 0.5 間隔で，実線が正（赤），破線が負（青）を示す．

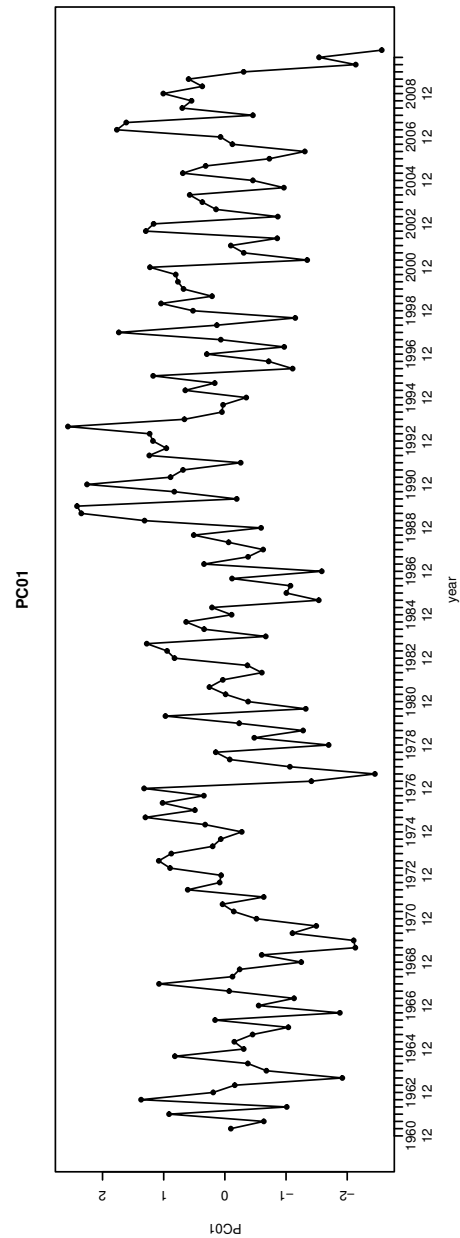


図 38: 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 50 年の 12 , 1 , 2 月各月平均値を用いて EOF 解析を行った score の時系列である PC1 を示す . 横軸は年代で , 縦軸は score をそれぞれの期間における標準偏差で割った値を示す .

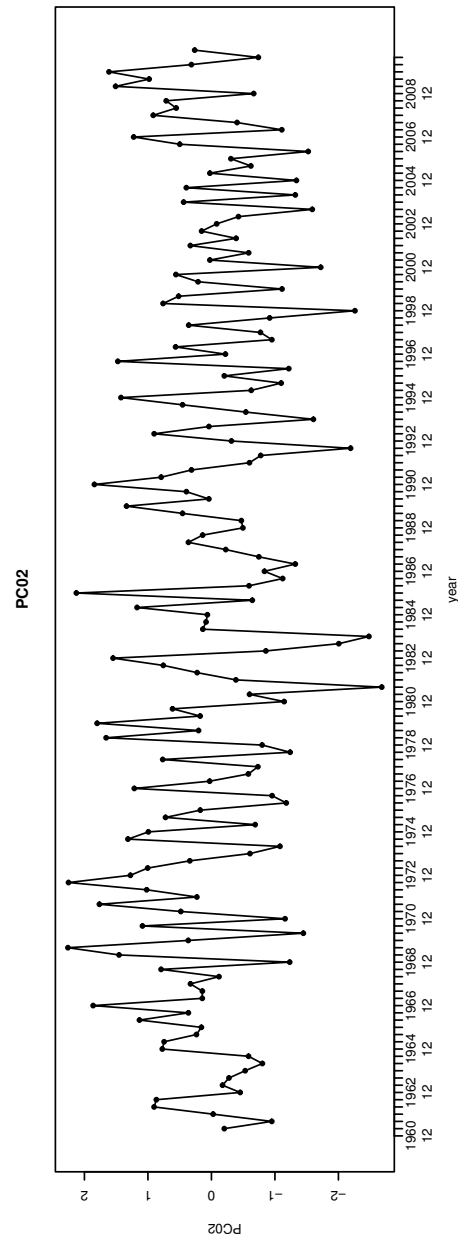


図 39: 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 50 年の 12 , 1 , 2 月各月平均値を用いて EOF 解析を行った score の時系列である PC2 を示す . 横軸は年代で , 縦軸は score をそれぞれの期間における標準偏差で割った値を示す .

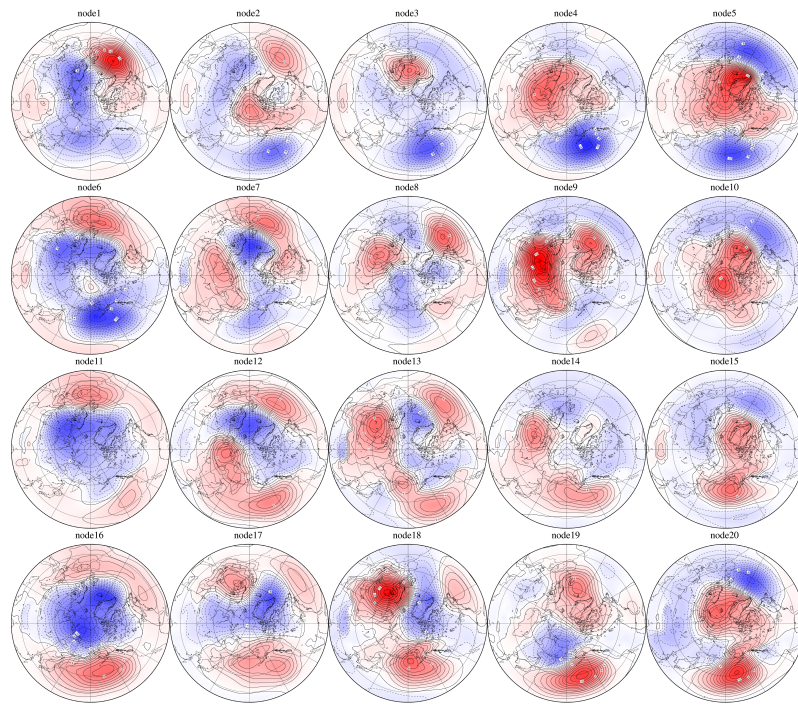


図 40: 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 50 年の 12 , 1 , 2 月各月平均値を用いて SOM 解析を行った構造マップを示す . 左上から右に向かって node1,node2 と並び , 端に来たら下段に移り , 右下が node20 となる 4 × 5 のマップである . 1 つの node 中の大気場は偏差場と同等の意味を持つ .

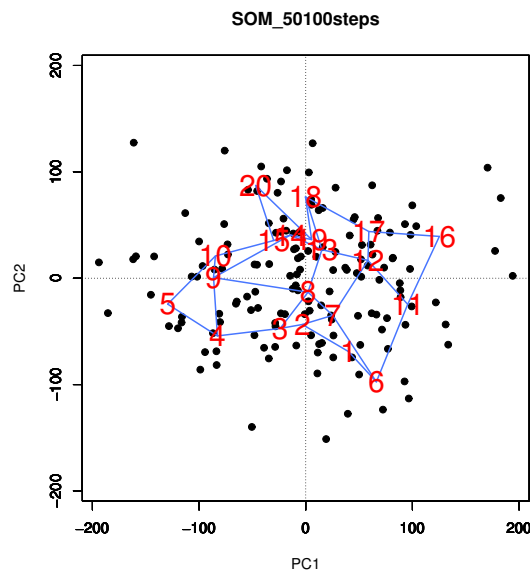


図 41: JRA-55 の 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 50 年の 12 , 1 , 2 月各月平均値を用いて SOM 解析を行った PC1-PC2 平面上に node を配置した図を示す . 横軸は PC1 , 縦軸は PC2 である . 赤色数字は node 番号で , 青線は隣接 node を繋いだものである . 黒の数字は PC1 と PC2 の値の位置を年代の数字の中央で示している .

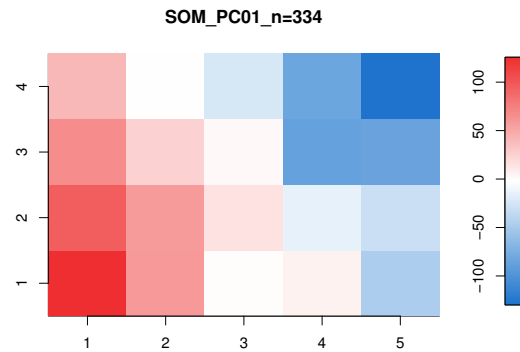


図 42: JRA-55 の 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 50 年の 12, 1, 2 月各月平均値を用いて SOM 解析を行った S-Map 平面上の PC1 の値を示す．左上から右に向かって node1,node2 と並び，端に来たら下段に移り，右下が node20 となる 4 × 5 のマップである．赤色が正に，青色が負に対応する．

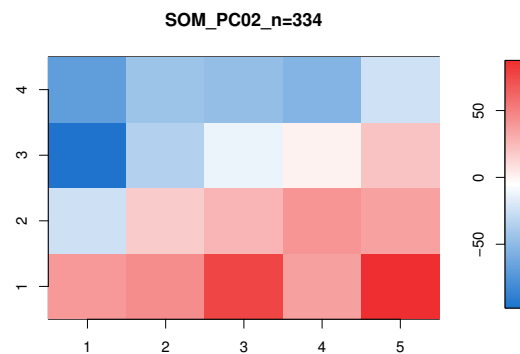


図 43: JRA-55 の 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 50 年の 12, 1, 2 月各月平均値を用いて SOM 解析を行った S-Map 平面上の PC2 の値を示す．左上から右に向かって node1,node2 と並び，端に来たら下段に移り，右下が node20 となる 4 × 5 のマップである．赤色が正に，青色が負に対応する．

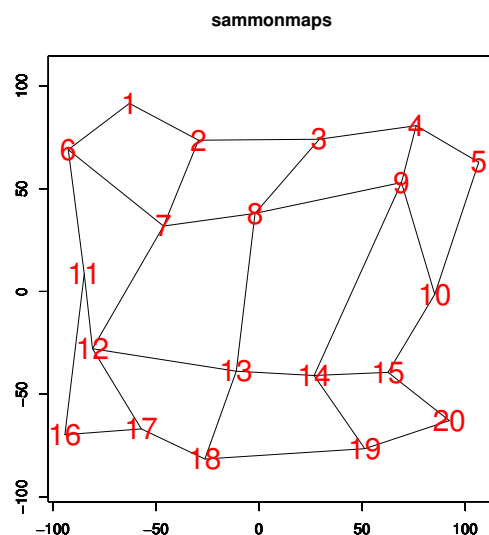
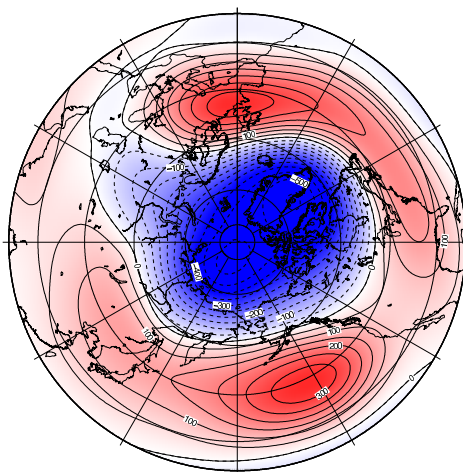


図 44: JRA-55 の 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 50 年の 12, 1, 2 月各月平均値を用いて SOM 解析した node の sammonmap を示す．赤色数字は node 番号で，青線は隣接 node を繋いだものである．横軸と縦軸は sammonmap によって近似された 2 次元距離空間の距離を示す．

# Barotropic Height

EOF-1 (29.7%)

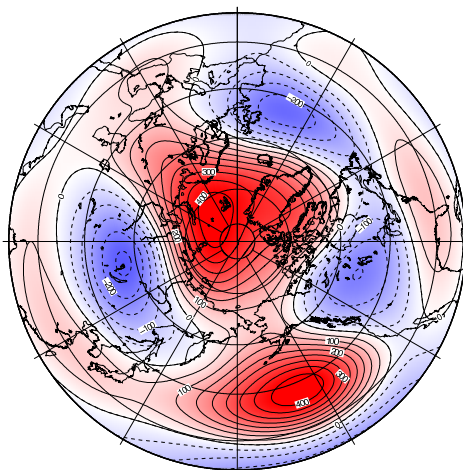


GM7 2017 Jan 23 20:24:18 NCEP/NCAR Reanalysis

図 45: 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの順圧成分を用いて EOF 解析を行った固有ベクトルの構造 EOF1 を示す。コンターは 0.5 間隔で、実線が正（赤）、破線が負（青）を示す。

# Barotropic Height

EOF-2 (14.6%)



GM7 2017 Jan 23 20:27:46 NCEP/NCAR Reanalysis

図 46: 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの順圧成分を用いて EOF 解析を行った固有ベクトルの構造 EOF2 を示す。コンターは 0.5 間隔で、実線が正（赤）、破線が負（青）を示す。



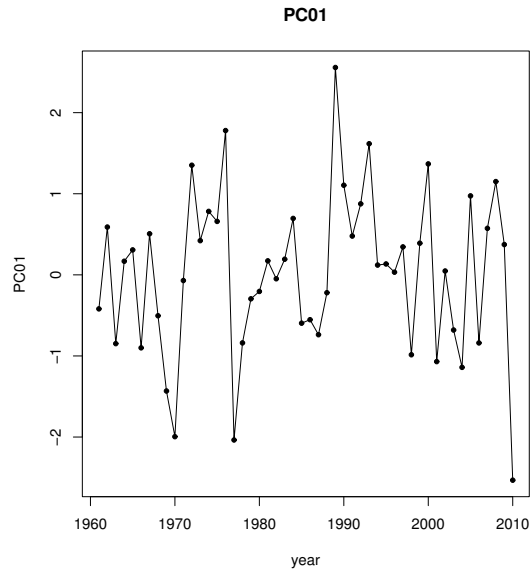


図 47: 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの順圧成分を用いて EOF 解析を行った score の時系列である PC1 を示す．横軸は年代で，縦軸は score をそれぞれの期間における標準偏差で割った値を示す．

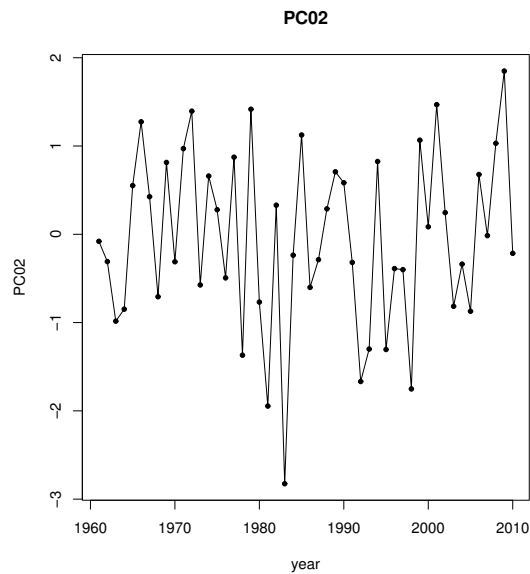


図 48: 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの順圧成分を用いて EOF 解析を行った score の時系列である PC2 を示す．横軸は年代で，縦軸は score をそれぞれの期間における標準偏差で割った値を示す．

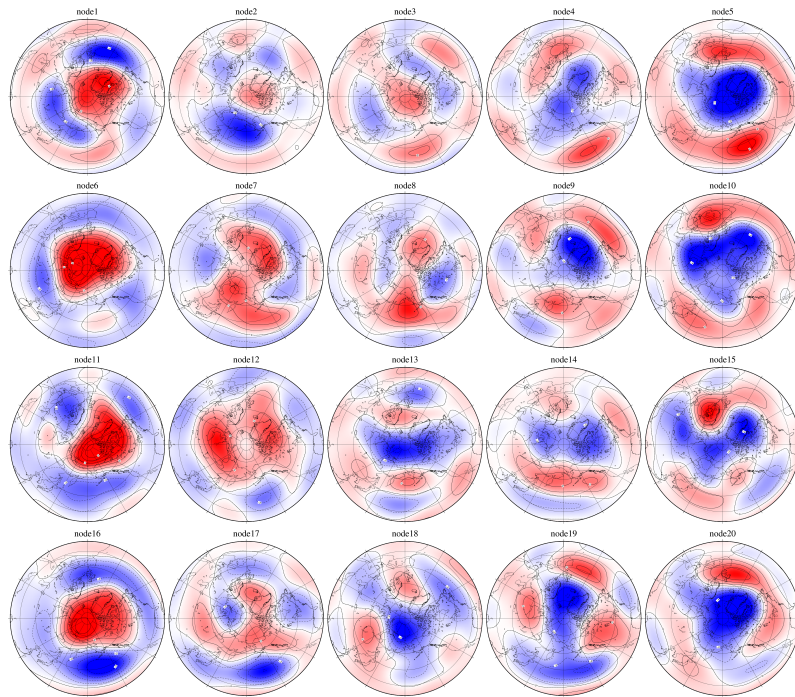


図 49: 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの順圧成分を用いて SOM 解析を行った構造マップを示す．左上から右に向かって node1,node2 と並び，端に来たら下段に移り，右下が node20 となる  $4 \times 5$  のマップである．1 つの node の中の大気場は偏差場と同等の意味を持つ．

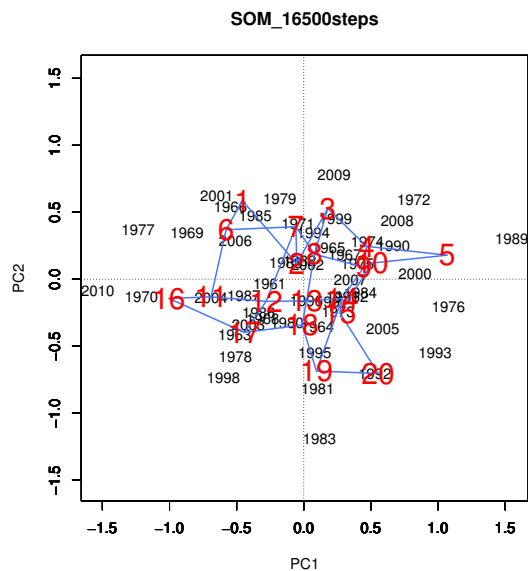


図 50: 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの順圧成分を用いて SOM 解析を行った PC1-PC2 平面上に node を配置した図を示す．横軸は PC1，縦軸は PC2 である．赤色数字は node 番号で，青線は隣接 node を繋いだものである．黒の数字は PC1 と PC2 の値の位置を年代の数字の中央で示している．

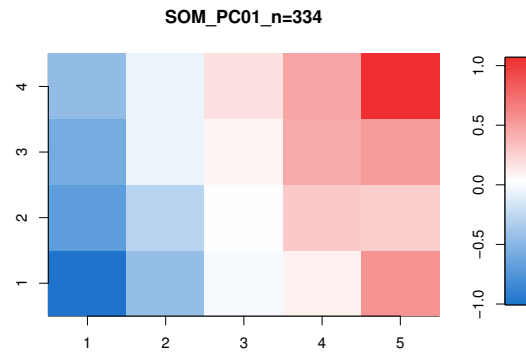


図 51: 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの順圧成分を用いて SOM 解析を行った S-Map 平面上の PC1 の値を示す．左上から右に向かって node1,node2 と並び，端に来たら下段に移り，右下が node20 となる  $4 \times 5$  のマップである．赤色がが正に，青色が負に対応する．

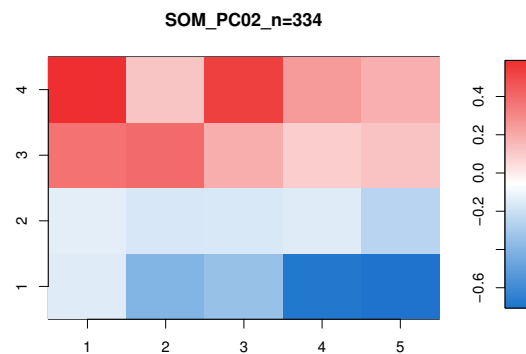


図 52: 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの順圧成分を用いて SOM 解析を行った S-Map 平面上の PC2 の値を示す．左上から右に向かって node1,node2 と並び，端に来たら下段に移り，右下が node20 となる  $4 \times 5$  のマップである．赤色がが正に，青色が負に対応する．

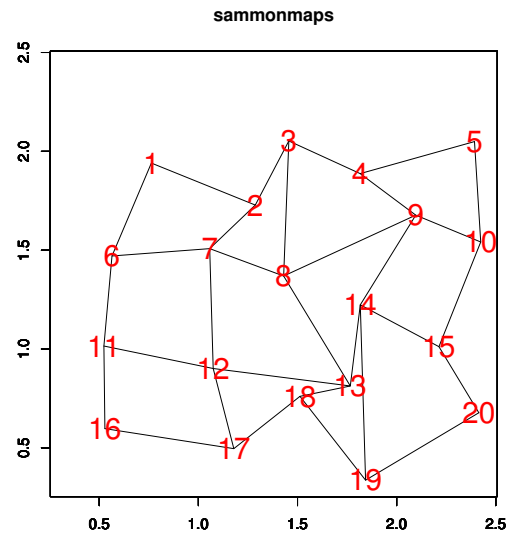


図 53: 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの順圧成分を用いて SOM 解析した node の sammonmap を示す．赤色数字は node 番号で，青線は隣接 node を繋いだものである．横軸と縦軸は sammonmap によって近似された 2 次元距離空間の距離を示す．

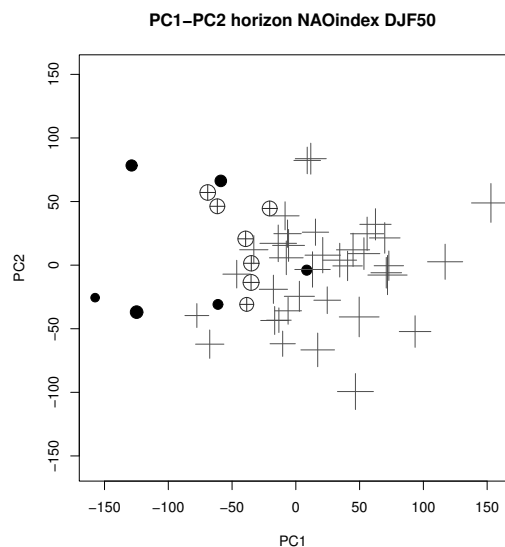


図 54: JRA-55 の 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 50 年の DJF 平均値を用いて EOF 解析した PC1-PC2 平面に NAOindex の大きさをシンボルで表現したものである。NAOindex を標準偏差で基準化し、 $-1$  以下を黒丸、 $-0.5$  以下を丸十字、それ以上を十字で表現している。また、それぞれのシンボルの大きさは NAOindex の大小に比例するように表現している。横軸は PC1、縦軸は PC2 を示す。

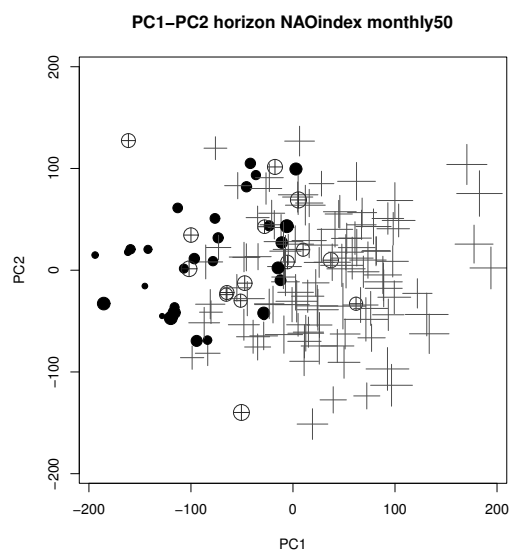


図 55: JRA-55 の 1960 年 12 月 ~ 2010 年 2 月までの 50 年の 12, 1, 2 月毎月平均値を用いて EOF 解析した PC1-PC2 平面に NAOindex の大きさをシンボルで表現したものである。NAOindex を標準偏差で基準化し、 $-1$  以下を黒丸、 $-0.5$  以下を丸十字、それ以上を十字で表現している。また、それぞれのシンボルの大きさは NAOindex の大小に比例するように表現している。横軸は PC1、縦軸は PC2 を示す。

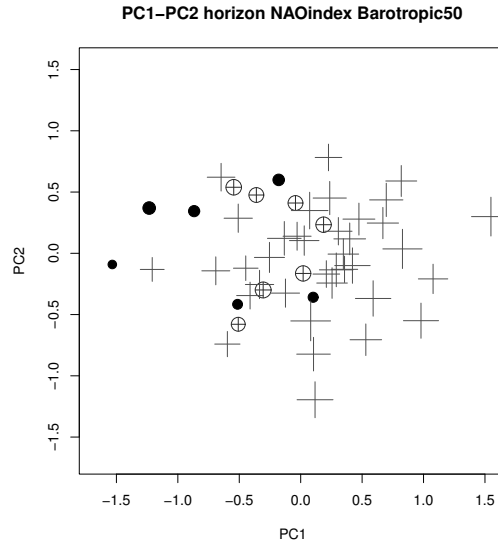


図 56: 1960 年 12 月～2010 年 2 月までの順圧成分を用いて EOF 解析した PC1-PC2 平面に NAOindex の大きさをシンボルで表現したものである．NAOindex を標準偏差で基準化し， $-1$  以下を黒丸， $-0.5$  以下を丸十字，それ以上を十字で表現している．また，それぞれのシンボルの大きさは NAOindex の大小に比例するように表現している．横軸は PC1，縦軸は PC2 を示す．

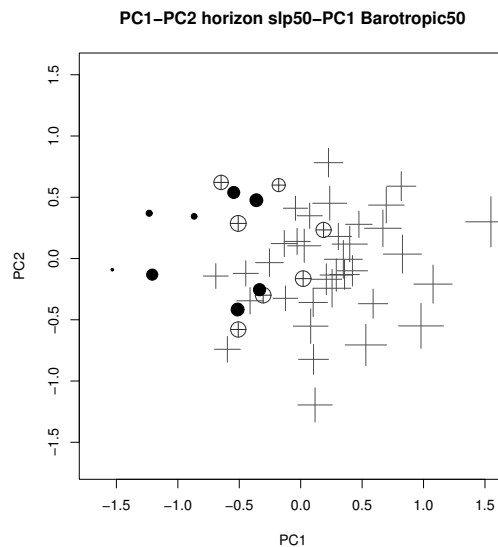


図 57: 1960 年 12 月～2010 年 2 月までの順圧成分を用いて EOF 解析した PC1-PC2 平面に，SLP の DJF 平均値の 50 年の PC1 (AOindex) の大きさをシンボルで表現したものである．AOindex を標準偏差で基準化し， $-1$  以下を黒丸， $-0.5$  以下を丸十字，それ以上を十字で表現している．また，それぞれのシンボルの大きさは AOindex の大小に比例するように表現している．横軸は PC1，縦軸は PC2 を示す．

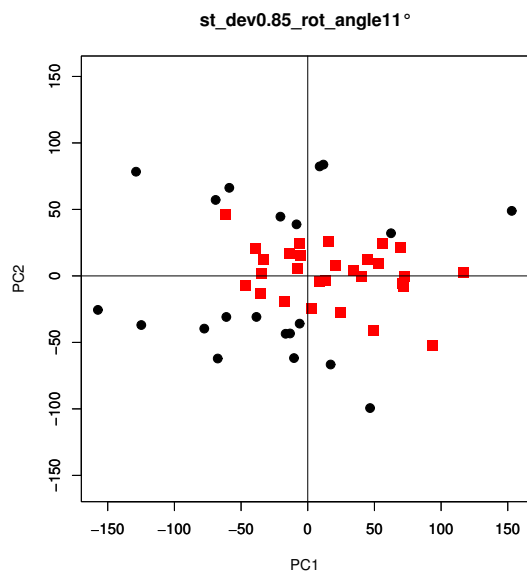


図 58: PC1 を横軸 , PC2 を縦軸とする PC1-PC2 平面において , 時計回りに 11 ° 回転させた変量 PC1' の標準偏差 0.85 で分割を行った結果 . 分割線から原点側を赤い四角の点で , 分割線から原点側でない方向を黒い丸で表記している . この時 P 値 0.0087 である .

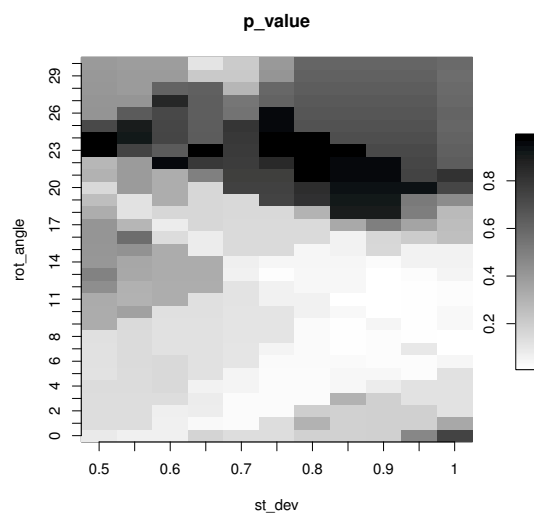


図 59: 図 58 において標準偏差を横軸に , 回転角度 ( 右回り ) を縦軸にとった時の T 検定を行った P 値である . 黒いほど P 値は 1 に近づき , 白いほど 0 に近い .