

平成23年度 修士論文

十年および数十年スケールの気候変動と北極振  
動の解析的研究

筑波大学大学院生命環境科学研究科

地球科学主専攻

修士(理学)学位論文

加藤健介

# Analyzing the Relationship between the Arctic Oscillation and Decadal to Multi-decadal Climate Systems

Kensuke KATO

## Abstract

Mid range climate prediction of decadal to multi-decadal scales have become increasingly important in recent years for policy making. Determining low frequency climate systems are significant as they influence the internal or natural variability of the climatic system, which is unaffected by anthropogenic influences.

The study focuses on three types of climatic oscillations which are significant in establishing mid range predictions. The relationship between the Arctic Oscillation (AO) and two low frequency modes; the Pacific Decadal Oscillation (PDO) and the Atlantic Multi-decadal Oscillation (AMO) is statistically analyzed by using spectral analysis and lag correlation analysis of each climatic mode with Sea Surface Temperature (SST).

The spectral analysis suggests that the AOI leads the other two climatic modes in the long term and in the short term, which emphasises on the AO being the dominant climatic mode. To verify the relationship of the AO and SST on an intra-annual basis, lag correlation of January Monthly Mean AOI with Monthly Mean SST was performed. The analysis suggested the persistence of the AOI in influencing SST until late Spring. To verify the relationship of the AO and SST on an inter-annual basis, lag correlation of DJF averaged AOI and DJF averaged SST was performed for AOI lead and SST lead. The analysis showed strong correlation from both leads suggesting that both the AO and the oceanic oscillations may affect one another. On a long term scale, the AO represents the spatial pattern of the PDO well but do not contribute in representing the spatial pattern of the AMO.

**Key Words:** Arctic Oscillation, Pacific Decadal Oscillation, Atlantic Multi-decadal Oscillation, Spectral Analysis, Lag Correlation

# 目次

Abstract	i
図目次	v
<b>1 はじめに</b>	<b>1</b>
1.1 気候変動の特徴	1
1.1.1 北極振動	1
1.1.2 北太平洋十年周期振動	2
1.1.3 北大西洋数十年周期振動	3
1.2 各気候変動の関連性	3
<b>2 目的</b>	<b>6</b>
<b>3 解析手法</b>	<b>7</b>
3.1 各気候変動指数の時系列解析	7
3.1.1 パワースペクトル	7
3.1.2 クロススペクトル	7
3.2 各気候変動と全球 SST の相関解析	8
<b>4 使用データ</b>	<b>10</b>
4.1 気候変動指数データ	10
4.2 SST データ	10
<b>5 結果</b>	<b>11</b>
5.1 時系列解析	11
5.2 ラグ相関解析	12
<b>6 まとめと考察</b>	<b>15</b>
6.1 時系列解析	15
6.2 相関解析	15
<b>7 結論</b>	<b>17</b>
<b>8 謝辞</b>	<b>18</b>



## 目次

1	北極振動 (正) の概念図 . . . . .	25
2	北極振動 (負) の概念図 . . . . .	25
3	北大平洋十年規模振動 (正) の概念図 . . . . .	26
4	北太平洋十年規模振動 (負) の概念図 . . . . .	26
5	北大西洋数十年規模振動 (正) の概念図 . . . . .	27
6	Mochizuki et al. (2010) による PDO の空間分布の再現 . . . . .	28
7	Mochizuki et al. (2010) による PDO の時系列の再現 . . . . .	28
8	Schneider and Cornuelle (2005) による各要素を用いた PDO の再現 実験 . . . . .	29
9	Dima and Lohmann (2007) が提唱する AMO のメカニズム . . . . .	29
10	SST が AO を数カ月先導 (Jia et al. 2009) . . . . .	30
11	大気の橋 (Atmospheric Bridge; Alexander et al. 2001) . . . . .	30
12	太平洋熱帯域の SST が 60 日遅れて北太平洋の気圧場にもたらす影 響 (Alexander et al. 2001) . . . . .	31
13	AO が SST を約 6 年 ~ 10 年先導 (Sun and Wang 2009) . . . . .	31
14	月平均 AOI と月平均 SST の相関 . . . . .	32
15	月平均 PDOI と月平均 SST の相関 . . . . .	32
16	月平均 AMOI と月平均 SST の相関 . . . . .	33
17	AOI の時系列 . . . . .	34
18	PDOI の時系列 . . . . .	34
19	AMOI の時系列 . . . . .	34
20	AOI のパワースペクトル . . . . .	35
21	PDOI のパワースペクトル . . . . .	35
22	AMOI のパワースペクトル . . . . .	36
23	AOI と PDOI の相互相関 . . . . .	37
24	AOI と AMOI の相互相関 . . . . .	38
25	AOI と PDOI のコヒーレンスとフェーズ . . . . .	39
26	AOI と AMOI のコヒーレンスとフェーズ . . . . .	40
27	1 月の月平均 AOI と 1 月の月平均 SST のラグ相関 . . . . .	41
28	1 月の月平均 AOI と 2 月の月平均 SST のラグ相関 . . . . .	41
29	1 月の月平均 AOI と 3 月の月平均 SST のラグ相関 . . . . .	42

30	1月の月平均 AOI と 4月の月平均 SST のラグ相関 . . . . .	42
31	1月の月平均 AOI と 5月の月平均 SST のラグ相関 . . . . .	43
32	1月の月平均 AOI と 6月の月平均 SST のラグ相関 . . . . .	43
33	1月の月平均 AOI と 7月の月平均 SST のラグ相関 . . . . .	44
34	1月の月平均 AOI と 8月の月平均 SST のラグ相関 . . . . .	44
35	1月の月平均 AOI と 9月の月平均 SST のラグ相関 . . . . .	45
36	1月の月平均 AOI と 10月の月平均 SST のラグ相関 . . . . .	45
37	1月の月平均 AOI と 11月の月平均 SST のラグ相関 . . . . .	46
38	1月の月平均 AOI と 12月の月平均 SST のラグ相関 . . . . .	46
39	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+0 年) . . . . .	47
40	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+1 年) . . . . .	47
41	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+2 年) . . . . .	48
42	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+3 年) . . . . .	48
43	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+4 年) . . . . .	49
44	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+5 年) . . . . .	49
45	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+6 年) . . . . .	50
46	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+7 年) . . . . .	50
47	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+8 年) . . . . .	51
48	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+9 年) . . . . .	51
49	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+10 年) . . . . .	52
50	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+11 年) . . . . .	52
51	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+12 年) . . . . .	53
52	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+13 年) . . . . .	53
53	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+14 年) . . . . .	54
54	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+15 年) . . . . .	54
55	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+16 年) . . . . .	55
56	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+17 年) . . . . .	55
57	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+18 年) . . . . .	56
58	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+19 年) . . . . .	56
59	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+20 年) . . . . .	57
60	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+21 年) . . . . .	57
61	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+22 年) . . . . .	58
62	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+23 年) . . . . .	58

63	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+24 年) . . . . .	59
64	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+25 年) . . . . .	59
65	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+26 年) . . . . .	60
66	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+27 年) . . . . .	60
67	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+28 年) . . . . .	61
68	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+29 年) . . . . .	61
69	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+30 年) . . . . .	62
70	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-1 年) . . . . .	63
71	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-2 年) . . . . .	63
72	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-3 年) . . . . .	64
73	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-4 年) . . . . .	64
74	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-5 年) . . . . .	65
75	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-6 年) . . . . .	65
76	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-7 年) . . . . .	66
77	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-8 年) . . . . .	66
78	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-9 年) . . . . .	67
79	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-10 年) . . . . .	67
80	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-11 年) . . . . .	68
81	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-12 年) . . . . .	68
82	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-13 年) . . . . .	69
83	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-14 年) . . . . .	69
84	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-15 年) . . . . .	70
85	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-16 年) . . . . .	70
86	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-17 年) . . . . .	71
87	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-18 年) . . . . .	71
88	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-19 年) . . . . .	72
89	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-20 年) . . . . .	72
90	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-21 年) . . . . .	73
91	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-22 年) . . . . .	73
92	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-23 年) . . . . .	74
93	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-24 年) . . . . .	74
94	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-25 年) . . . . .	75
95	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-26 年) . . . . .	75

96	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-27 年) . . . . .	76
97	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-28 年) . . . . .	76
98	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-29 年) . . . . .	77
99	DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-30 年) . . . . .	77

# 1 はじめに

近年では地球温暖化が環境システムに及ぼす影響が今まで以上に注目され、長期的な気候変動の予測が着目されている。長期的な気候変動の予測を解明するためには、温暖化の主要因の一つとしてみなされている人為的影響と独立している自然変動の解明が求められる (Delworth and Mann 2000)。これらの自然変動を明瞭にするにあたり、様々な時間スケールの気候変動の解明も求められる。とくに近年では政策決定のため、温暖化に伴う 100 年スケールの予測に加え、十年から数十年スケールの近未来予測の向上が必要とされている (Meehl et al. 2007; 2009)。故に、これらの中期的な自然変動の関係性を解析する事により、気候変動が環境に及ぼす影響、温暖化への寄与などを検証する事が可能になる。

## 1.1 気候変動の特徴

本研究では AO, PDO, AMO の三つの気候変動に着目する。

### 1.1.1 北極振動

北極振動 (Arctic Oscillation; AO) は Thompson and Wallace (1998) により提唱された気候変動であり、冬季 (NDJFMA:11 月 ~ 翌年の 4 月) の北緯 20 度以北における海面更生氣圧 (Sea Level Pressure; SLP) の経験的直交関数 (Empirical Orthogonal Function; EOF) 第一モードとして定義される。AO の変動は、AO の時系列スコアを規格化した北極振動指数 (Arctic Oscillation Index; AOI) により示される。AO の空間的特徴は図 1(正) 及び図 2(負) にて示す。AOI が正の場合、北極圏では低気圧偏差があり、それを取り囲むように中緯度での高気圧偏差が見られる。この期間ではアゾレス諸島やグリーンランド付近では気温の負偏差が見られ、北米、ユーラシア大陸では気温の負偏差が見られる。数年ごとに気圧偏差はシーソーの様に入れ代わり、正反対の気圧配置が見られる。この時、北極圏では高気圧偏差があり、中緯度では低気圧偏差が見られる。アゾレス諸島やグリーンランド付近では気温の高偏差が見られ、北米、ユーラシア大陸では気温の負偏差が見られる。北極振動は北半球中高緯度で最も卓越する気候変動であると言われ、局所的な気候システムに様々な影響を及ぼす (Thompson and Wallace 2001)。

また、AO の中心気圧がアゾレス諸島、グリーンランド付近で見られるため、同

じ地理的位置に中心をもつ北大西洋振動 (North Atlantic Oscillation ; NAO: Walker and Bliss 1932; Hurrell 1996) との共通点はこれまでいくつかの研究で挙げられてきた。また、AO は独立した気候変動であり、NAO はその一部として見る研究も多く存在し (Ambaum et al. 2008; 山崎 2004)、NAO との関連性について数多くの研究が行われているがその関係性は明確ではない。

### 1.1.2 北太平洋十年周期振動

北太平洋十年周期 (規模) 振動 (Pacific Decadal Oscillation; PDO) は Mantua et al. (1997) により提唱された太平洋で起こる 10 年周期での大気と海洋の連動により生じる変動であり、その概念図を図 3(正・ウォームフェーズ)、及び図 4(負・クールフェーズ) に示す。PDO は日本の東方海域と、それを取り囲むようなアラスカからカリフォルニア沿岸、赤道太平洋域の海面水温が 10 ~ 20 年規模でシーソーのように変動する現象である (Mantua and Hare 2000)。PDO は北太平洋の 20 度緯北における海面水温 (Sea Surface Temperature; SST) 偏差の EOF 第一モードにより定義され、気候値数の変動を北太平洋十年振動指数 (Pacific Decadal Oscillation; PDOI) と呼ぶ。PDOI が正の期間では海面水温は北太平洋中央部で平年より低く、北太平洋東部や赤道域では平年より高くなる傾向を見せる。この様に北太平洋中央部の海面水温が低いときは、上空のアリューシャン低気圧と偏西風が強くなり、北太平洋東部では南風が強くなる。三島 (2009) 及び Mochizuki et al. (2010) は PDO などの十年規模の気候変動は世界的な地球温暖化に中期的なゆらぎを与え、このゆらぎにより地域的な気候の影響が異なると述べる。Mochizuki et al. (2010)、及び Shiogama et al. (2007) は季節予報などで使われる手法を用いて十年規模の変動を予測するためのシステムを開発し、PDO の再現に成功した。しかし先行研究では内部変動の初期状態を反映させた初期値を使い空間分布は再現できたが (図 6)、指数変動はうまく再現できなく (図 7) そのメカニズムは確定されていない。また PDO の形成メカニズムを研究した Schneider and Cornuelle (2005) は、PDO の形成に重要だと考えられる Nino 3.4 領域の sst 偏差、北太平洋指数 (NPI; North Pacific Index)、黒潮・親潮領域の東西流 (KOE; Kuroshio-Oyashio Extent) を用いて PDO の空間分布を再現した (図 8)。

### 1.1.3 北大西洋数十年周期振動

北大西洋数十年規模振動 (Atlantic Multi-decadal Oscillation; AMO) は北大西洋海面水温の温暖期と寒冷期が交互に発生する数十年規模 (約 70 ~ 80 年) の自然変動であり、その概念図は図 5(正のフェーズ) に示す (Dima and Lohmann 2007)。北太平洋海面水温の数十年周期は幾つかの先行研究により提唱され、Mann and Delworth (2000) の延長した SST 及び SLP のプロキシデータにより 50 年 ~ 70 年のスペクトルピークを持つ変動として解明された。Enfield et al. (1999) は ENSO (El Nino Southern Oscillation; エルニーニョ南方振動) により寄与された SST 場を除外した回転 EOF の第一モードを解析し、南北に逆相関を持つ大西洋 SST のダイポールモードを発見した。Kerr (2000) は先行研究で紹介された大西洋の暖気と寒気を熱延循環 (Thermohaline Circulation; THC) の関係と繋げ、この変動を AMO と呼んだ。そして Enfield et al. (2001) は AMOI (AMO Index; 北大西洋数十年振動指数) をトレンドを除去された 0 度以北の太平洋 SST 偏差 (SSTA) の十年移動平均として定義した。

AMO のメカニズムは未だ解明されてなく、いくつかの要因が挙げられている。Dima and Lohmann(1999) は AMO を寄与する大気-海洋-海氷メカニズムの五つの主要因: 1. 大西洋熱延循環、2. 波数 1 型の SLP 構造、3. フラム海峡の海水輸送、4. 北大西洋領域大気海洋フィードバック、5. 北太平洋領域大気海洋フィードバックについて解析を行い、上記 5 つの要因を繋ぐ AMO メカニズムの概念図を示しそのメカニズムを提唱した (図 9)。

## 1.2 各気候変動の関連性

三つの気候変動はそれぞれ時間スケールも空間パターンも異なる。しかし各気候変動が影響する地理的領域 (北極圏、太平洋及び大西洋中高緯度) は重なり、その関連性について各気候変動を対象に幾つかの先行研究が行われた。

AO は北半球 SLP の第一モードであり、各気候システムに及ぼす影響が最も大きい。特に AOI と PDOI の時系列を見ると 1950 年以降からの変動は相似しており、関係性が示唆されている。AO と熱帯域及び亜熱帯域の気候との関連性を見た Lin et al. (2002) 及び Jia et al. (2009) は、AOI の最大値は太平洋熱帯領域の負の SST に関連していると述べた (図 10)。しかし Deser (2000) は北極圏と太平洋のテレコネクションは弱い、大西洋との関連性は強いと論じ、AO と NAO との関連性を述

べている。AOの熱帯領域、及び亜熱帯領域への寄与を見た Eden and Greatbatch (2003) は AOI は亜熱帯だけではなく熱帯域の影響にも依存すると述べた。そして AO と NAO の温暖化への寄与を示した Cohen and Barlow (2005) は 90 年代後半から 2000 年代の AOI 正のフェーズを北大西洋 sst と太平洋熱帯域 (Indo-Pacific sst; インド洋～太平洋中央領域の sst) sst 正偏差が寄与していると提唱した。AO と類似すると考えられる NAO と PDO の関係を見た Schwing et al. (2003) は両変動指数の時系列パターンに関連性があると述べた。両変動指数の月平均標準差を表す先行研究の図 3 から 1960 年以前は負相関、1960～1990 年代は正相関を持ち、1990 年代後半以降は正相関を持っていることが分かり、十年から数十年おきに関係が変わると示した。

PDO に関しては Schneider and Cornuelle (2005) の PDO の再現 (図 8) から、形成メカニズムの主要因において NPI が最も PDO の形成に寄与していると示唆された (PDO 共分散の 73%)。二番目に Nino 3.4 領域の SSTA (SST Anomaly; 海面水温偏差) が形成に寄与していることが分かった (PDO 共分散の 23%)。北半球高緯度の気圧場の指数として示される NPI は PDO に強い影響を及ぼすと考えられるため、中高緯度の気圧場の EOF 第一モードである AO との関係性は理論上高いと推測できる。PDO と NPI の相互相関を示した Newman et al. (2003) は、NPI は PDO を約 1 年先導していると述べた。

Enfield (1999) は AMOI と全球的な SSTA の相関を解析したところ、大西洋の SSTA 以外に北太平洋、主に 40 度以北で相関が見られた。Enfield は対流圏の極渦が北大西洋と北太平洋の循環を結んでいると述べた。AMO のメカニズムを寄与する主要因は北太平洋領域の熱延循環だが、Enfield は AMO の変動要因は北大西洋に限らず、北太平洋 SSTA も AMOI に影響を及ぼす可能性もある。Enfield et al. (1999) は AMO 以外の太平洋数十年規模振動を検出したが、AMO との相関は検証されなかった。Dima and Lohmann (2007) は五つの主要因による AMO ネガティブフィードバックの構造を提唱した (図 9)。AMO の構造により北極圏を中心とする AO、北大西洋を中心とする PDO と大西洋熱塩循環により寄与される AMO との繋がりが考えられる。

上記の先行研究により各気候変動との繋がりが示唆できる。各気候変動の関係性を見るためには、大気の変動である AO と海洋の変動である PDO と AMO がどの様にお互いを影響し、どの気候変動が先導するかを見なければならない。これに対し、太平洋東部の熱帯域 SST と大気応答の相関に着目した Kumar and Hoerling (2003) は、SST 偏差は 1～3 カ月大気への応答を先導していると推定した。同研究

は、SST 偏差のピークの約 1~3 カ月後、SST の変動がピークを迎え対流に伴う降水を起こし、降水時に起こる潜熱の放出を通して大気の応答に現れていると提議した。同様に太平洋熱帯域のフォーシングが AO にもたらす影響を見た Jia et al. (2009)(図 10) は、月平均の SST と AO のリード・ラグ回帰分析を行い SST が AO を約 3 カ月先導していると述べた。先行研究では、中緯度大気はロスビー波の伝播により 2~3 週間かけて Kumar and Hoerling (2003) で定義された熱帯域 SST のエネルギーを輸送すると述べた。

大気と海洋の遅れたフィードバックは Alexander et al. (2002) でも示され、同研究は太平洋中央と北太平洋の大気海洋システムを繋ぐ "Atmospheric Bridge" (大気の橋)(図 11) について提唱した。先行研究は、ENSO などの赤道付近の大気循環は数カ月から数年間遅れて (遅延) 北太平洋の大気海洋循環に影響を及ぼすと述べた。概念図の Atmospheric Bridge は ENSO による大気へのフィードバックがロスビー波やストームトラック、準定常流の相互作用を通して北太平洋海洋循環の正味熱フラックス ( $Q_{net}$ )、混合層へのエントレイメント ( $W_e$ )、及びエクマン輸送 ( $V_{ek}$ ) へ伝播し、大気循環に影響を及ぼすと提唱した (Trenberth et al. 1998)。同研究ではさらにモデル内の冬季熱帯領域、及び黒潮・親潮領域の SST が 60 日遅れてアリュシャン低気圧に影響を与えていると示した (図 12)。PDO の形成メカニズムの約半分は Atmospheric Bridge が寄与していると述べ、南北のエネルギー伝播が太平洋の大気海洋システムに与える影響の重要性を表した。

しかしラグ相関により AO と PDO との関係性に着目した Sun and Wang (2006)(図 13) は AO が 6~10 年の長期間で PDO を先導していると議論した。AO に回帰された北大西洋 SST の分布図を見ると AO は 1~12 年後の SST を先導している事が分かり、SST の先導を示唆している先行研究とは異なる結果を残している。

故に 10 年スケールで見られる北太平洋十年規模振動 (PDO)、70~80 年スケールで見られる北大西洋数十年規模振動 (AMO) と北半球の気圧場を最も影響する北極振動 (Arctic Oscillation: AO) の関係を知ることにより大気と海洋循環の関係性を明確にすることができると考えられ、気候変動の将来予測に役立つと思われる。

## 2 目的

本研究では AO と PDO、AMO との関係性をスペクトル解析を用いて分析し、AO と各気候変動の関係性の特徴を求めることを目的とする。そして、PDOI と AMOI は海洋を基に定義された指数であるため、その物理的メカニズムの解明を推測するため AOI と SST のラグ相関解析を行う。

## 3 解析手法

### 3.1 各気候変動指数の時系列解析

各気候変動の特徴とお互いの関係性を定量的に見るため各気候変動時系列解析を行った。スペクトル解析を行うにあたり自己相関関数、AOとの相関係数、相互相関関数を計算する。また、周波数帯で見られるエネルギーピークを見比べるため、自己相関関数のフーリエ展開であるパワースペクトル、相互相関関数のフーリエ展開であるクロススペクトルについて調査する。本研究ではハニングフィルタによる平滑化を4回施した。

#### 3.1.1 パワースペクトル

ある変動の時系列は様々な長周波、低周波成分で作られており、例えば365日の移動平均を施された時系列の相関をとる場合、周期1年以上の低周波成分での相関しか見えていないことになる。パワースペクトルを求めることにより自己相関の周波数ごとの寄与を見ることができ、時間に関する不規則変数  $x(t)$  を見るとき、 $\tau$  時間隔たった ( $\tau$  はラグ・遅延を表す) 二つの変動の積の平均値で定義される統計的関数を自己相関関数と呼ぶ。この平均は原則的に母集団平均だが定常確率過程では以下の様に時間平均で表す。

$$C(\tau) = \overline{x(\tau) + x(t + \tau)} \quad (1)$$

ここで  $C(\tau)$  を  $\tau = 0$  の値  $C(0)$  で割って正規化したものを自己相関係数と呼ぶ。自己相関関数を計算することにより各気候変動の持続性を確認することができる。またスペクトル  $S(\omega)$  と  $x(t)$  の複素フーリエ成分  $X(\omega)$  との関係を導くことにより、パワースペクトル (power spectral density) は以下の様に表す。

$$S(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2\pi X(\omega)X(\omega)}{T} \quad (2)$$

#### 3.1.2 クロススペクトル

相互相関から二つの時系列の関係性を見ることができ、どちらが原因でどちらが結果かを判別できない。そこで周波数ごとの相関や位相のずれを見るた

めに相互相関、及びクロススペクトル解析を導入した。二つの時系列データ  $x(t)$  と  $y(t)$  があるとき、その相互相関係数は以下の様に示す。

$$C_{xy}(\tau) = \overline{x(t)x(t+\tau)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)x(t+\tau)dt \quad (3)$$

ラグが 0 の相互相関関数で割ったものが相互相関係数になる。相互相関関数をフーリエ変換したものがクロススペクトルであり、以下の様に表す。

$$S_{xy}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} C_{xy}(\tau)e^{-i\omega\tau} d\tau = K_{xy}(\omega) - iQ_{xy}(\omega) \quad (4)$$

クロススペクトルは相互相関関数の周波数ごとの寄与を表す。ここで  $K_{xy}$  はクロススペクトル、 $Q_{xy}(\omega)$  はクオドラチャスペクトルと呼ばれている。クロススペクトルは複素数であり、現象の把握・記述に不便であるのでさらにコヒーレンスとフェーズを以下の様に導入する。

$$coh^2(\omega) = \frac{|S_{xy}(\omega)|^2}{S_x(\omega)S_y(\omega)} \quad (5)$$

$$\theta_{xy}(\omega) = \tan^{-1}\left(\frac{Q_{xy}(\omega)}{K_{xy}(\omega)}\right) \quad (6)$$

ここで  $S_{x(\omega)}$  はそれぞれの  $X(t)$  と  $Y(t)$  のパワースペクトルを表す。コヒーレンスは二つの時系列の同じ周波数成分どうして、どれだけ相関があるかを示す。またコヒーレンスの平方根は二信号のフーリエ周波数成分の相互相関係数である。フェイズは二つの時系列のフーリエ周波数成分の位相角の差を表す。各気候変動のコヒーレンス、フェイズを計算することによってどちらの変動が他方を先導し、先導後の遅延の長さを検証できる。尚、時系列解析の解析対象期間は 1901 年 1 月 ~ 1983 年 12 月とし、各変動指数に対して上記の解析は行われる。

### 3.2 各気候変動と全球 SST の相関解析

各振動指数と全球 SST を用いたラグ相関解析を行った。AOI と SST の関係を空間的に見ることにより、海洋循環を基に作成された PDOI(北太平洋) と AMOI(大西洋) にどのような影響を及ぼすか見られる。相関解析の解析対象期間は 1901 年 1 月 ~ 2001 年 12 月であり、ラグ相関解析で計算される相関係数は以下の様に求める。二つの確率変数  $x$  と  $y$  の相関係数は以下の様に定義される。

$$r_{xy} = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum \sqrt{(x_i - \bar{x})^2} \sum \sqrt{(y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

ここで  $S_x$ 、 $S_y$  は  $x$ 、 $y$  の標準偏差 (standard deviation)、 $S_{xy}$  は  $x$  と  $y$  の共分散 (covariance) になる。

HadISST データから全対象期間の各格子点での月平均を求め、各振動指数は年平均を求め相関係数を計算した。

まずは月単位で見られる短期的な AOI と SST の関係を見るため、全対象期間から、AOI が最も顕著に表れる時期である 1 月分の平均値を求め、HadISST データからは各格子点での各月の平均を求め、一か月ずつずらしラグ相関係数を求めた。

そして PDO 及び AMO は長周波であると両指数の自己相関が示したため、AO とのさらに長期的な関係を見る必要がある。DJF 平均された AOI と DJF 平均された SST の年ごとのラグ相関解析を行った。ここでは、AOI と SST のどちらが原因、結果かを推測するため、各格子点ごとの AOI が SST を先導する正のラグ相関、そして SST が AOI を先導する負のラグ相関係数を計算した。

## 4 使用データ

### 4.1 気候変動指数データ

#### AOI(北極振動指数)

AOI データはワシントン大学 JISAO (Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean) の 1900 年 1 月 ~ 2001 年 12 月の指数偏差データを規格化し使用する。

#### PDO(北太平洋十年規模振動)

PDO データは同様ワシントン大学 JISAO(Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean) の 1900 年 1 月 ~ 2001 年 12 月の指数偏差データを規格化し使用する。このデータは地球温暖化の影響を取り去るため、全球月平均の SST 偏差は除いてある。

#### AMO(北太平洋数十年規模振動)

AMO データはアメリカ海洋大気圏局 (The National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA) Extended SST version2 データ (Kaplan,1998) の 1900 年 1900 年 1 月 ~ 2001 年 12 月のデータを規格化し使用する。

### 4.2 SST データ

SST データは英国気象局気象研究部ハドレーセンターの観測データセット HadISST(Rayner et al 2003) を使用する。HadISST は Parker et al (1995) による GISST (Global Sea Ice and Sea Surface Temperature) データの改正版であり、英国気象局海洋データベース、MDB (Marine Data Bank; Parker et al 1995) データと NOAA の ICOADS(International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) データセットの統合である (Woodruff et al. 2003)。SST データは二次最適内挿法を用い各グリッドの観測値を際解析データに重層し、作成された。海氷付近の SST は海氷濃度を用いて統計的に得られた値である。水平グリッド間隔は 1 度 × 1 度である。

## 5 結果

### 5.1 時系列解析

まずは各変動指数の時系列とパワースペクトルを示す。時系列を見ることによって指数時系列の特徴を確認でき、パワースペクトルはどの周波数帯(長周期か短周期)でもっともスペクトル密度が高いかが確認できる。パワースペクトルは  $x$  軸は周波数は逆数として書かれており、 $y$  軸はスペクトル密度を表す。

AOIの時系列(図17)を見ると年々変動が大きく顕著に見られ、短周期の変動は見られるが長周期変動は確認できない。パワースペクトル(図20)を見ると長周期、短周期と共に一様なスペクトル密度を示し、AOIのホワイトノイズ構造が確認された。

PDOIのスコア時系列(図18)とパワースペクトル(図21)を示す。PDOIの時系列からは年々変動なども見られるが、指数変動も滑らかであり十年～数十年周期の変動が見られる。パワースペクトルを見ると右肩下がりのスペクトル密度が確認でき、100カ月周期など低周波側でレッドノイズの構造が見られる。

AMOIのスコア時系列(図19)とパワースペクトル(図22)を示す。AMOIの時系列は更に滑らかであり、十年規模、又は数十年規模の振動が明らかに見えており、年々変動など短周期変動は見られない。この特徴はパワースペクトルでも確認され、10カ月から100カ月以上の低周波を示す周波数でスペクトル密度が高くレッドノイズ構造が確認された。

次に各変動指数の自己相関、相互相関を示す。自己相関はある時間だけずらした指数変動と元の波の相関を表し、相互相関はある時間だけずらした指数変動の相関を表す。時間のずれ(ラグ、遅延)は月単位で示す。

AOI(図23)、PDOI(図23)、AMOI(図24)の自己相関を示す。AOIの自己相関は全体的に低く短周期から長周期まで一応であり、AOIの年々変動を表す。PDOIの自己相関は0～30カ月あたりまで持続するがこの期間以降の高い相関は見られない。AMOIの自己相関はさらに滑らかな右肩下がりの図線を示し、指数周期の持続性が確認できる。

図23にAOIとPDOIの相互相関を示す。ラグ0～10カ月までAOIとPDOIは負の関係を持っていることが分かり、AOIの先導を表す相関が持続するため、PDOIを先導する事が分かる。さらにはラグ20～30カ月では正の関係を持ちAOIがPDOIを先導している。PDOIがAOIを先導するケースでは30～40カ月、そしてわずか

だが 80 ~ 100 カ月あたりで正の相関を持つ。

図 24AOI と AMOI の相互相関を示す。両指数はラグ 40 カ月、60 ~ 80 カ月まで AOI が正の相関で先導しており、AMOI は約 30 ~ 35 カ月あたり負の相関を持ち AOI を先導しているが明瞭な関係性は見られなかった。

次に各振動指数の周波数帯で見る相互相関、位相を表すコヒーレンスとフェーズについて着目する。相互相関から AOI は量変動指数と主に負の相関を持つため、逆フーリエ変換 (reverse Fourier Transformation) により解析が行われた。

図 25 に AOI(負) と PDOI のコヒーレンスとフェーズを示す。両変動のコヒーレンスを見ると 25 か月、16 カ月で相関が見られ、共に AOI が 120 度の位相のずれがあり AOI が先導していることが分かる。

図 26 に AOI(負) と AMOI のコヒーレンスとフェーズを示す。両変動のコヒーレンスを見ると約 11 カ月、4.5 カ月、3 カ月で高い相関が確認された。主に AOI の先導が見られ 11 カ月では 90 度、4.5 カ月では約 20 度、3 カ月では 30 度の位相のずれが確認できる。

## 5.2 ラグ相関解析

クロススペクトルで得られた関係性が実際に物理的に反映されているかを検証するため、大気の変動である AOI と SST のラグ相関解析が行われた。以下の相関解析を表す図は、シェードが正相関を表し、コンターが負相関を表す。T 検定を行った結果、0.2 以上の相関は統計的に 99 % の有意性を示す。

図 14 は月平均 AOI と月平均 SST の相関を表す。AOI と SST の相関は主に北大西洋 (主にグリーンランド海、バレンツ海付近) で高く、0.3 以上の相関が見られる。大西洋領域では大西洋西部 (フロリダ沖) にもわずかな相関が見える。太平洋では中央部、そして日本海付近でわずかな相関が見られた。

図 15 及び図 16 は三島 (2009) と同様、PDOI と AMOI の月平均と SST の月平均値の相関を表し、両変動指数の空間分布を明瞭に表す。

図 15 は PDOI の空間分布を表し、先行研究と同様、日本海付近・黒潮、親潮領域では負の相関が見られ、それを囲むように太平洋中央部では正の相関が見れる。黒潮、親潮領域の負の相関は北太平洋指数 (NPI) が起こす SST との負の相関 (クールフーズ) を表し、北太平洋の気圧が SST に影響を及ぼしていることが示される。正の相関領域は逆に PDO のウォームフェーズ (PDOI 正) に相当する。また、インド洋付近でも正相関が確認できる。

図 16 は AMOI の空間分布を表し、先行研究と同様、大西洋中央部及び北大西洋領域で強い正の相関を表す。AMOI の周期は 50 年から 80 年と長期的であり、時系列を見ると解析対象期間中、主に正の指数偏差 (AMO のウォームフェーズ) が確認できる。故に AMO と他の変動指数の関係性を明確にするためにはさらに長期的な期間での解析が必要とされる。PDO と同じく、AMO は大西洋の海洋循環でありながら太平洋中央部、アラスカ湾付近、及び南東部で 0.3 以上の相関を表す。

図 27 から図 38 は 1 月の AOI の月平均と各月の平均 SST のラグ相関を表す。AOI は冬季に最も顕著な大気変動であるため、大西洋及び太平洋で冬季から春季 (1~4 月) に掛け SST との強い相関が見られる。図 14 で示されるように、北大西洋に着目すると 6 月まで統計的に有意な相関が確認された。特に大西洋中央部及びバレンツ海では 0.5 以上の相関が 5 月まで見られる。大西洋中央部に着目すると、1 月ではフロリダ沖で高い正相関が見られるが、相関パターンは徐々に北へ広がり、5 月には主に北太平洋中央部まで高い正相関が見られる。正相関に伴い、正相関を挟むようにグリーンランド南部及び北大西洋南部で負の相関が見られる。正の相関同様、負の相関も 6 月まで顕著に見られる。夏季では強い相関が見れないが、AO は冬季 (NDJFM: 11 月~3 月) で顕著な変動なため 11 月・12 月でまた強い相関が見られる。しかし、6 月まで AO が海洋に及ぼす影響が見られたため、AMO とのクロススペクトル解析で示された 3 カ月、4 カ月周期で見られる関係性を推測することができる。北太平洋に着目すると、1 月・2 月では北太平洋中央部で正相関が確認されるが、4 月~7 月に掛けてオホーツク海付近、そして東シベリア海でも高い正相関が確認される。オホーツク海の相関は夏季 (7 月~8 月) に掛けては弱い値を示すが、10 月では高い相関が見られる。そして正の相関を囲むようにしてカリフォルニア沖・アラスカ湾から太平洋中央部では負の相関が確認できる。太平洋では大西洋とは異なり、11 月及び 12 月では高い相関は確認されなかった。

図 39 から図 69 は DJF 平均された AOI と DJF 平均された SST の年ごとのラグ相関 (AOI が先導) を表す。DJF 平均のラグ+0 年では北大西洋の黒潮、親潮領域で正相関、そしてそれを囲むようにカリフォルニア沖から太平洋中央部で負相関が見られる。このパターンは PDO のウォームフェーズを表し、AOI が北大西洋に及ぼす影響を示す。また大西洋ではフロリダ沖、及びグリーンランド南部からバレンツ海まで正相関が確認でき、それを挟むように負相関が確認できる。このパターンは AMOI と SST の相関で確認でき (図 16)、AO が AMO に影響をもたらすと考えられる。ラグの+1 年から+3 年に掛けて大西洋では PDO 正のパターンは持続するが、太平洋では+3 年から+5 年まで逆のパターン (黒潮、親潮領域で負相関

とそれを囲む正相関)が見られる。黒潮、親潮領域で確認される負の相関パターンはラグ+9年、+11年と+13年、+16年と2、3年おきに持続的に見られ、+18年から+19年ではまた逆転し(黒潮、親潮領域で正相関のパターン)+26年では黒潮、親潮領域が負相関のパターンに戻る。以上の様に、太平洋では約十年周期のフェーズが確認でき、AOがPDOを先導している可能性を示す。一方大西洋では+4年まで上記の正相関と負相関のダイポールパターンが持続するが、+6年から約+11年に掛けて大西洋全体で高い正相関が確認できる。これは図19で示したAMOI正のフェーズである。+13年から+16年、及び+19年と+21年では再度ダイポールパターンが確認されるが、+20年以降はAMOI正のパターンが独占する。以上から大西洋でも約十年周期で交互に見られるパターンが確認された。確認されたダイポールパターンはAOが気圧場に与えるパターンに類似していることから、AOの影響も確認できる。

図70から図99はDJF平均されたAOIとDJF平均されたSSTの年ごとのラグ相関(SSTが先導)を表す。太平洋に着目すると、ラグ-1年から約-2年まで太平洋中央部で負の相関が確認でき、-6年から-9年及び-12年から-14年に再度見られる。-7年及び-8年では負の相関を囲むように正相関が太平洋東部で確認できる。-16年から-18年、-21年及び-24年から28年では太平洋熱帯域で高い負の相関、黒潮、親潮領域では正相関が確認される。AOが先導しているパターンと同様、約十年周期で交互に入れ替わるパターンが検証された。大西洋に着目すると、-2年から-9年まで領域全体で負の相関パターンが確認される。-11年から-13年ではAOI先導で確認されたダイポールパターンが見られるが、-14年から-18年、そして-24年では再度負の相関パターンが確認される。-29年以降は再度ダイポールパターンが出現し、SSTの長期先導を示唆する結果が得られた。

## 6 まとめと考察

### 6.1 時系列解析

各変動指数のパワースペクトル及び自己相関から各変動の周期的特徴が見出された。AOIは短周期的であり、主に年々変動を持つホワイトノイズ構造を持つ。反対にPDOIとAMOIは周期が長く持続するレッドノイズ構造を示した。相互相関では各指数ともAOIに先導され、AOIを先導するパターンが見られたが、クロススペクトル解析では主にAOIの先導が顕著に見られた。PDOIに関しては25カ月、16カ月で顕著な相関が見られ、120度の位相のずれを用いたAOIによる先導が見られた。AOIの先導はAOIが北太平洋のSLP、特にNPI(North Pacific Index)パターンに強い影響を与えていることが見れる。しかしAMOIに関しては明瞭な相関が確認できなかった。AOIによる11カ月のAMOIを位相90度のずれと共に先導するパターンが確認できた。AMOIは大西洋のSSTの南北構造をベースに作成された指数でありAOIが大西洋領域の大気海洋パターンに与える影響を表しており、大気の影響が海洋に反映する周期を示している。

### 6.2 相関解析

クロススペクトルで確認された結果を物理的に推測するため、AOIとSSTの相関解析を行った。

AOI、PDOI、及びAMOIとSSTの相関解析から、両変動指数の空間分布が示された。本研究は大気が海洋に及ぼす影響に着目しているが、大気の影響が他の海洋領域に影響する場合も考えられる。PDOI、及びAMOIとSSTの相関を見ると海洋循環による影響が明瞭に見られる。海洋循環の応答に着目したLanzante(1996; 表1を参照)は大洋を四つに分け、(IND = インド洋、CPAC = 太平洋中央、EPCA = 太平洋東部、NATL = 北大西洋)お互いのテレコネクション性(関連性)を研究した。1875年から1979年のSSTデータから得た結果では全大洋がお互いに関連性を持つことを示し(統計学的に99%の有意性)、海洋循環の繋がりを提唱した。図15からはPDOIと大西洋の相関も確認でき、Lanzanteの理論を証明する。また、主成分分析(Principal Component Analysis; PCA)を用いて年間Palmer Drought Severity Index (PDSI; 干ばつ重度指数)及び全球SSTの変動に伴う十年、数十年変動を見たMcCabe and Palecki(2006)はPDSIとSSTの第一主成分がPDOIの

変動を表し、第二主成分が AMOI の変動を表すと示した。この結果から PDOI と AMOI が全球的なスケールで気候システムに影響を及ぼし、テレコネクションを通して関連性があると考えられる。

1月の AOI と各月平均の SST のラグ相関を見ると、AOI は冬季で最も顕著な変動だが、春季から夏季まで持続している事が示され、クロススペクトルの結果を確認できた。しかし Jia et al. (2009) 及び Kumar and Hoerling (2003) は SST と大気の応答に着目し、SST が大気を短期的に先導していると述べた。長期的な SST の変動は DJF 平均された AOI と SST のラグ相関により推測できると考えられるが、1月の月平均の AO と各月の月平均 SST に着目すると先行研究で述べられた傾向は明瞭に見られない。大西洋では 11 月及び 12 月の SST と AOI の高い相関が確認されたが、翌冬の AO の影響だと考えられる。しかし太平洋では 10 月にオホーツク海で 1 月の AO との高い相関が見られ、先行研究で述べられた理論を示している可能性がある。

北太平洋では、夏季に掛けて東シベリア海で高い相関が確認された。しかし AOI は冬季に最も顕著な現象であるため、正確な結果とは限らない。SST データは海洋ブイと衛星データを同化しているため、全体的に高緯度 (北半球、南半球同様) のデータの信頼度は比較的低いと考えられる。特に 1950 年代以降のデータは海洋ブイなどによる観測が不十分であり、衛星によるデータとの同化は得られないため正確なデータは望めない。正確なデータは上記の考察は、北大西洋、(バレンツ海) で確認された高い相関に対しても述べる事ができる。DJF 平均された年ごとのラグ相関でも高緯度、特に海氷領域のデータが起こす不正確な相関係数が確認された。

DJF 平均された AOI と SST のラグ相関からは AO が主に太平洋、大西洋の循環を先導している事が示されたが、SST が AO を長期的に先導することも推測された。AOI が先導している結果と SST が先導している両結果で大西洋と太平洋で十年周期で変動する相関パターンが検出された。AOI が先導している結果では太平洋の PDO によるダイポールパターン、及び AO 又は NAO が及ぼすダイポールパターンが大西洋で見られた。しかし大西洋では AOI のパターンだけではなく、AMOI のパターンも検出された。SST が変動している結果では同様太平洋及び大西洋で約十年おきにダイポールパターンが検出されたが、大西洋では負の相関パターンが全領域で見られるケースが交互して検出された。故に AO と PDO の関係性は高いと推測されるが、AO と AMO は影響の対象である空間パターンが異なると推測できるため、両変動指数の SST パターンが交互に出現する。

## 7 結論

本研究では十年規模の気候変動 PDO(北太平洋十年規模振動)、数十年規模の AMO(北大西洋数十年規模振動) と AO(北極振動) の関係性について研究を行った。まずは各気候変動を用いて時系列解析・クロススペクトルを行った。その結果、主に AOI が両気候変動を先導しており、長期スケールから短期スケールにおいて影響を及ぼしていることが分かった。PDOI と AMOI は太平洋と大西洋の SST を反映する両指数であるため、AOI が海洋システムにもたらす影響が大きいと推測された。

クロススペクトルで検証された結果を確認するため、1月の AO と各月の月平均 SST とのラグ相関、及び冬季 DJF の AOI と SST の年ごとのラグ相関解析 (AOI が先導、及び SST が先導) が行われた。各月の月平均 SST のラグ相関から 1月の AOI は春季まで持続的に SST を影響することが確認された。年ごとのラグ相関から AOI は PDOI とは空間的に繋がりが有ると示唆できるが、AMOI とは空間的にずれが生じる事が示唆できる。以上の結果から北半球の気圧場を最も影響する AO と、海洋循環である PDO と AMO の結合が推測される。

海洋循環は長期的な周期を持つため、大気海洋循環の関係性を明確にするため更に長期的なデータを用いた研究が必要とされる。北米ローガン山における 300 年間の降雪データ (Moore et al. 2002) や 1661 年以降の年輪データ (Biondi et al. 2001) から PDO に伴う昇温パターン、そして 1567 年以降の年輪データ (Gray et al. 2004) から AMO に伴う気温パターンが検出され、PDO と AMO が長期気候変動に重要な影響をもたらす事が確認されている。AO の長期的な変動も年輪データから検出されているため (D'Arrigo et al. 2002)、各変動指数の長期的な関係性を解析することは今後の重要な課題である。

Robertson (2001) は SST は大気の生産物であるため、SST が予測できるから大気を予測できるとは限らないと述べている。大気と海洋の循環を理解するにあたり、統計的な解析のみならず、物理的なメカニズムをさらに長期的なデータを用いて検証する必要がある。

## 8 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本研究の動機となる論文の紹介、解析手法の提案、全体的な御指導を心より感謝しております。

同大学研究員の寺崎康児氏にはセミナーなど及び様々な御意見をいただきました。

同大学大学院生命環境科学研究科の林陽生教授、上野健一准教授、植田宏昭准教授、同大学計算科学センター日下博幸講師、同大学院同研究科持続環境学専攻の井上知栄研究員、釜江陽一氏、同大学院同研究科の相澤拓郎氏、元同大学同研究科の大橋正宏氏、渋谷亮二氏や大学院生の皆さまには専攻ゼミ、集中ゼミ、中間発表、最終発表の場で御助言を頂き誠に有難うございました。

さらに共に修士論文執筆作業を進めた同大学生命環境科学研究科気象分野の修士2年生の皆さま、修士1年生の皆さま及び同大学地球科学主専攻気候学・気象学分野4年生の皆さまにはよき相談相手になって頂きました。

最後に本大学への進学を援助してくれた家族には深く感謝いたします。

本論文は皆様のご協力により完成させることができました。心より感謝いたします。

尚、本研究で用いた主な図は、GMT (The Generic Mapping Tools; Wessel and Smith, 1991) にて作成しました。

## 参考文献

- Alexander M. A , I. Blade , M. Newman, J.R. Lanzante , and N-C Lau., 2002: The Atmospheric Bridge: The Influence of ENSO Teleconnections on Air-Sea Interaction over the Global Oceans. *Journal of Climate*, **15**, 16, 2205-2231.
- Biondi F., A. Gershunov and D.R. Cayan 2001: North Pacific Decadal Climate Variability since 1661. *Journal of Climate*, **14**, 5-10.
- Clark W.G. and S.G. Hare., 2002: Effects of Climate and Stock Size on Recruitment and Growth of Pacific Halibut. *North American Journal of Fisheries Management*, **22**, 852-862.
- Cohen, J. and M. Barlow, 2005: The NAO, the AO, and global warming: How closely related?. **J. Climate**, 18, 4498-4513.
- D'Arrigo R.D., E.R. Cook, M.E. Mann and G.C. Jacoby, 2003: Tree-ring reconstructions of temperature and sea-level pressure variability associated with the warm-season Arctic Oscillation since AD 1650. *Geophysical Research Letters*, **30**, pp. 1549, doi:10.1029/2003GL017250.
- Delworth, T. L. and M. E. Mann, 2000: Observed and simulated multidecadal variability in the Northern Hemisphere, *Climate Dynamics*, **16**, 661-676.
- Eden, C. and R.J. Greatbatch, 2003: A Damped Decadal Oscillation in the North Atlantic Climate System. *Journal of Climate*, **16**, 24, 4043-4060.
- Enfield, D. B. and A. M. Mestas-Nunez, 1999: Multiscale variabilities in global sea surface temperatures and their relationships with tropospheric climate patterns. *J. Climate*, **12**, 2719-2733.
- Gray, S.T., L.J. Graumlich, J.L. Betancourt and G.T. Pederson, 2004: A tree-ring based reconstruction of the Atlantic Multi-Decadal Oscillation since 1567 A.D. *Geophysical Research Letters*, **31**, L12205, pp. 4, doi:10.1029/2004GL019932.
- Hurrell J.W., 1996: Influence of variations in extratropical wintertime teleconnections on Northern Hemisphere temperature. *Geophysical Research Letters*, **23**, 6, 665-668.

- Jia X., H.Lin and J.Derome 2009: The influence of tropical Pacific forcing on the Arctic Oscillation. *Climate Dynamics*, **32**, 496-509, DOI 10.1007/s00382-008-0401-y
- Kaplan, A., M. Cane, Y. Kushnir, A. Clement, M. Blumenthal and B. Rajagopalan, 1998: Analyses of global sea surface temperature 1856-1991. *Journal of Geophysical Research*, **103**, 18,567-18,589.
- Kerr R.A, 2000: A North Atlantic Pacemaker for the Centuries. *Science*, **288**, 5473, pp. 1984-1985. doi: 10.1126/science.288.5473.198.
- Knight F.R. , C.K. Folland and A.A. Scaife, 2006: Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Geophysical Research Letters*, **33**,1, L17706.
- Kumar A. and M.P. Hoerling 2003: The Nature and Causes for the Delayed Response to El nino. *Journal of Climate*, **16**, 9, 1391-1403.
- Lanzante J.R., 1996: Lag Relationship Involving Tropical Sea Surface Temperature. *Journal of Climate*, **9**, 10, 2568-2578
- Lin H, Derome J, Greatbatch RJ, Peterson KA, Lu J, 2002: Tropical links of the Arctic Oscillation. *Geophysical Research Letters*, **29**, DOI 10.1029/2002GL015822
- Mantua N.J, S.R. Hare, Y. Zhang, J.M. Wallace, R.C. Francis, 1997: A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **8**, 6, 1069-1079.
- Mantua N.J. and S.R. Hare, 2002: The Pacific Decadal Oscillation. *Journal of Oceanography*, **58**,1, 10, pp. 35-44.
- McCabe G.J. and M.A. Palecki, 2006: Multidecadal Climate Variability of Global-Lands and Oceans. *International Journal of Climatology*, **26**,849-865.
- Meehl, G., C. Covey, T. Delworth, L. MoJib, B. McAvaney, J. Mitchell, J. Stouffer and K. Taylor., 2007: The WCRP CMIP3 multi-model dataset: a new era in climate change research. *Bulletin of The American Meteorological Society*, **88**, pp. 1383-1394.

- Meehl G.A., L. Goddard, J. Murphy, R.J. Stouffer, G. Boer, G. Danabasoglu, K. Dixon, M.A. Giorgetta, A.R. Greene, E. Hawkins, G. Hegerl, D. Karoly, N. Keenlyside, M. Kimoto, B. Kirtman, A. Navarra, R. Pulwarty, D. Smith, D. Stammer and T. Stockdale., 2009: Decadal Prediction- Can it be skillful?. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **90**, 10, 1467-1485.
- Mochizuki T., M. Ishii, M. Kimoto, Y. Chikamoto, M. Watanabe, T. Nozawa, T. Sakamoto, H. Shiogama, T. Awaji, N. Sugiura, T. Toyoda, S. Yasunaka, M. Tatebe and M. Mori, 2010: Pacific Decadal Oscillation hindcasts relevant to near-term climate prediction. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **107**,5, pp 1833-1837.
- Moore.G. W. K. , G. Holdsworth, and K. Alverson, 2002: Climate change in the North Pacific region over the past three centuries, *Nature*. **420**, 6914, 401-403.
- Newman M., G.P. Compo and M.A. Alexander, 2003: ENSO-forced variability of the Pacific Decadal Oscillation, *Journal of Climate*, **16**, 23, 3853-3857.
- Parker D.E., C.K.Folland and M.Jackson, 1995: The GISST sea surface temperature and sea ice climatology. *Hadley Centre Climate Research Technical Note*,**63**. (Available from the Hadley Centre, Meteorological Office, London Road, Bracknell, Berkshire RG12 2SY, UK).
- Rayner, N. A., D. E. Parker, E. B. Horton, C. K. Folland, L. V. Alexander, D. P. Rowell, E. C. Kent, and A. Kaplan, 2003: Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *Journal of Geophysical Research*,**108**, 4407, doi:10.1029/2002JD002670.
- Robertson, A. W. (2001), Influence of ocean-atmosphere interaction on the Arctic Oscillation in two general circulation models. *Journal of Climate*,**14**, 3240-3254.
- Schneider N. and B.D.Cornuelle, 2005: The Forcing of the Pacific Decadal Oscillation. *Journal of Climate*,**18**, 21, 4355-4373.

- Schwing F.B, J. Jiang and R. Mendelsohn, 2003: Coherency of multi-scale abrupt changes between the NAO, NPI and PDO. *Geophysical Research Letters*, **30**, 7, 1406-1409.
- Seager R., Y. Kushnir, N.H. Naik, M.A. Cane and J. Miller, 2001: Wind-Driven Shifts in the Latitude of the Kuroshio-Oyashio Extension and Generation of SST Anomalies on Decadal Timescales , *Journal of Climate*, **14**, 22, 4249-4265.
- Sun J. and H. Wang, 2006: Relationship between Arctic Oscillation and the Pacific Decadal Oscillation on decadal timescales, *Chinese Science Bulletin*, **51**, 1, 75-79.
- Thompson D.W.J. and J. M. Wallace, 2000: Regional Climate Impacts of the Northern Hemisphere Annular Mode. *Science*, **293**,85-89.
- Thompson D.W. and J.M.Wallace , 1998: Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature field. *Geophysical Research Letters*, **25**, 1297-1300.
- Thompson D.W.J. and J.M. Wallace, 2001: Regional Climate Impacts of the Northern Hemisphere Annular Mode *Science*, **293**, 85-88.
- Walker G. T., and E. W.Bliss , 1932: World Weather V. *Memoirs of the Royal Meteorological Society*, **4**,36, 53-84.
- Wallace, J. M, and D. W. J. Thompson, 2002: The Pacific center of action of the Northern Hemisphere annular mode: Real or artifact? *Journal of Climate*, **15**, 1987-1991.
- Willmot C.J. and S.M. Robertson, 1995: Climatologically aided interpolation (CAI) of terrestrial air temperature. *International Journal of Climatology*, **15**, 2, 221-229.
- Woodruff, S. D., S. J. Worley, J. A. Arnott, H. F. Diaz, J. D. Elms, M. Jackson, S. J. Lubker, and D. E. Parker, 2003: COADS updates and the blend with the U.K. Met Office Marine Data Bank, *Advances in the Applications of Marine Climatology, The Dynamic Part of the WMO Guide to the Applications*

*of Marine Meteorology*, WMO/TD1081, 246 pp., World Meteorol. Organ., Geneva, Switzerland.

三島豊秋, 山下隆男, 松岡潔照, 駒口友章, 2009: 気候変動のゆらぎと台風災害に関する研究. 土木学会論文集 *B2(海岸工学)*, **B2-65**, 1, 1276-1280.

山崎孝治, 2004: 北極振動の概要. 気象研究ノート, **206**, 1-9.

9 ㊦



図 1: 北極振動 (正) の概念図.



図 2: 北極振動 (負) の概念図.

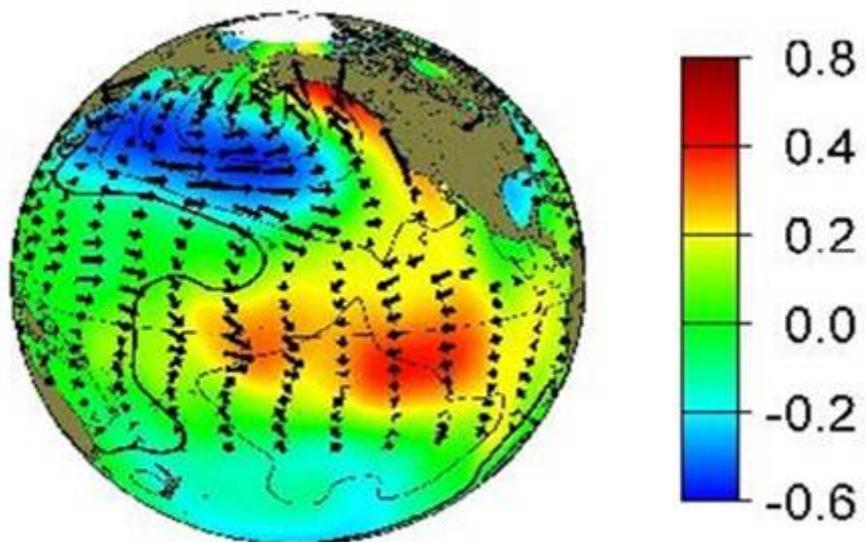


図 3: 北太平洋十年規模振動 (正) の概念図 (JISAO より引用).

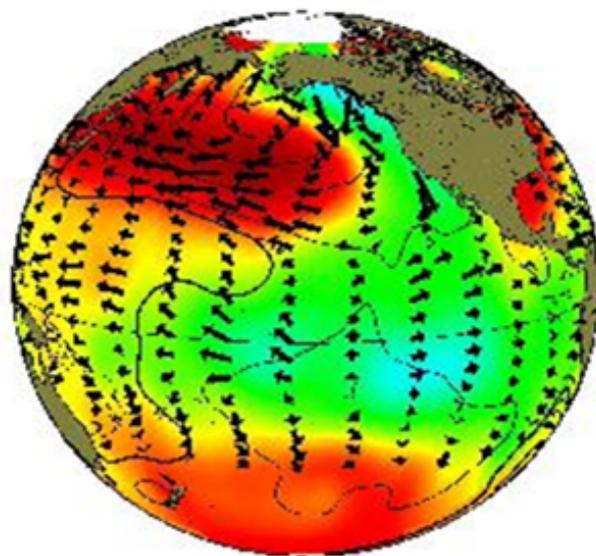


図 4: 北太平洋十年規模振動 (負) の概念図 (JISAO より引用).

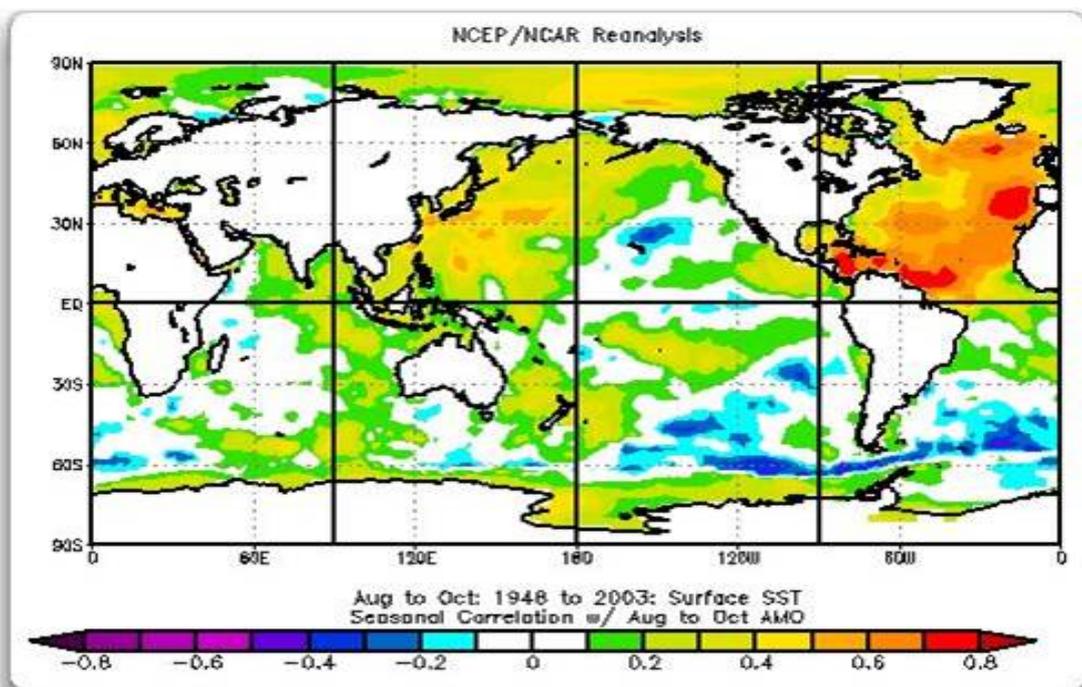


図 5: 北大西洋数十年規模振動 (正) の概念図 (Wikipedia より引用).

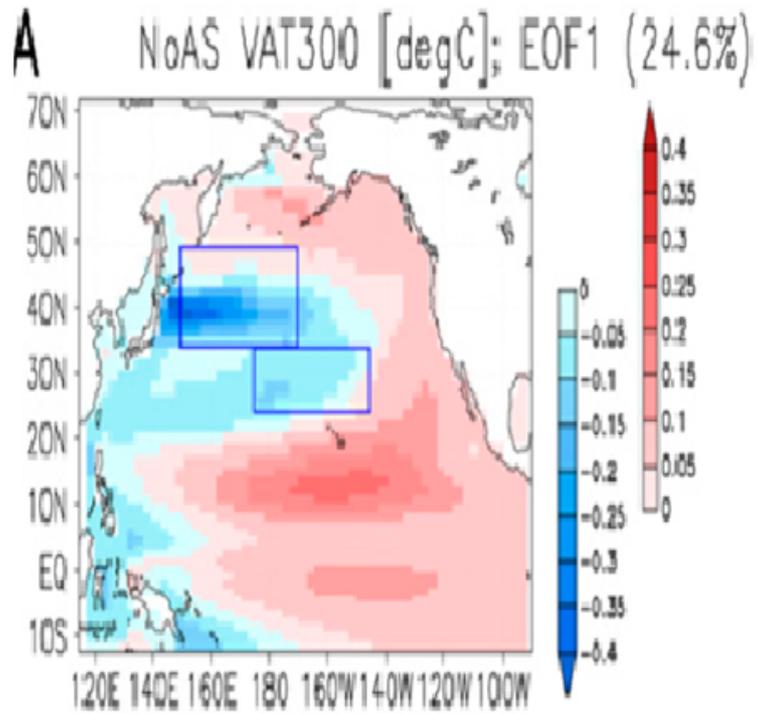


図 6: Mochizuki et al. (2010) による PDO の空間分布の再現.

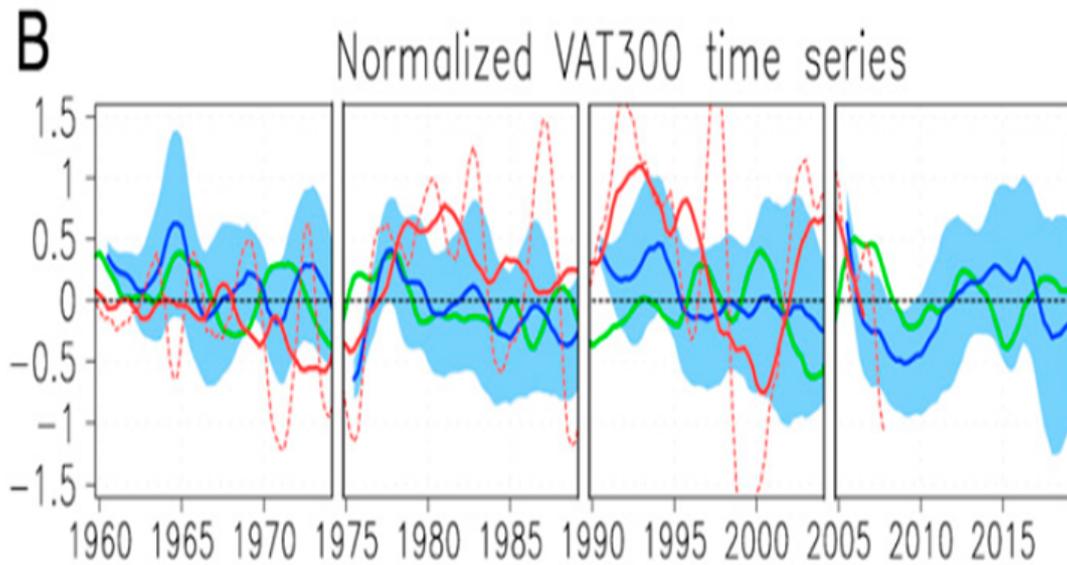


図 7: Mochizuki et al. (2010) による PDO の時系列の再現.

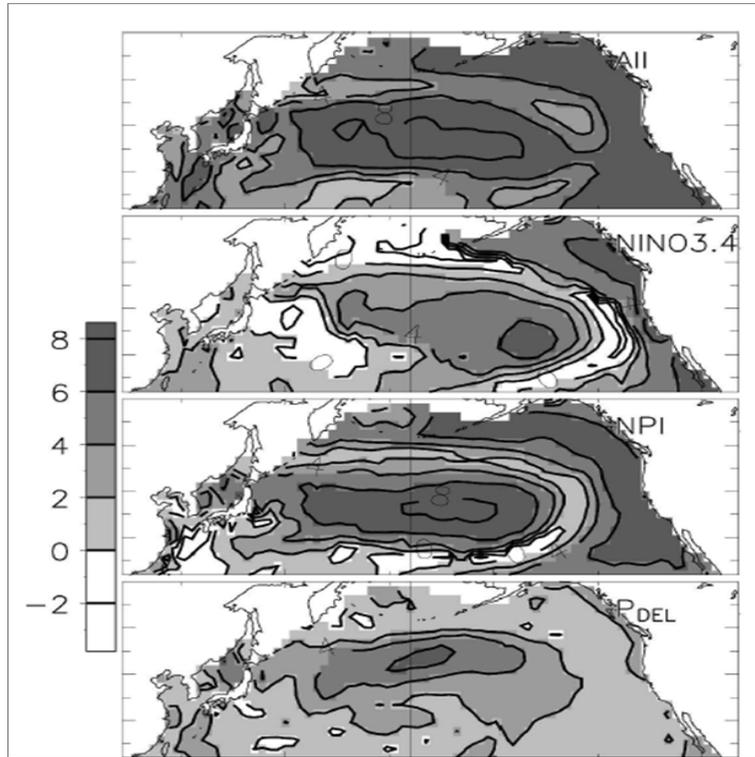


図 8: Schneider and Cornuelle (2005) による各要素を用いた PDO の再現実験.

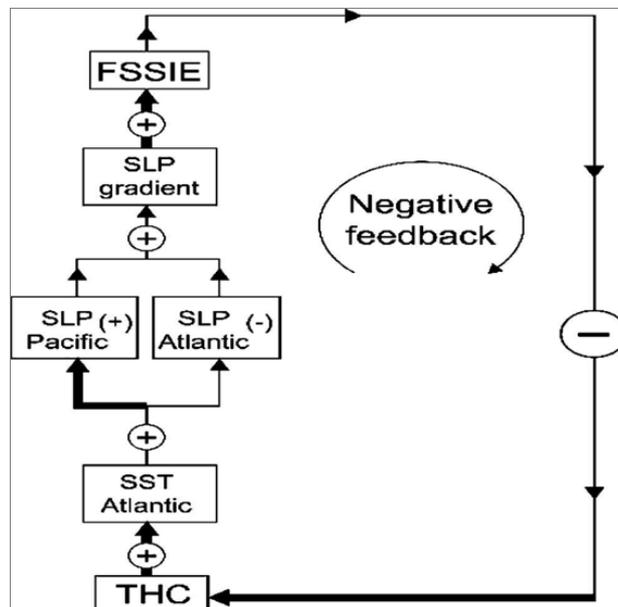


図 9: Dima and Lohmann (2007) が提唱する AMO のメカニズム.

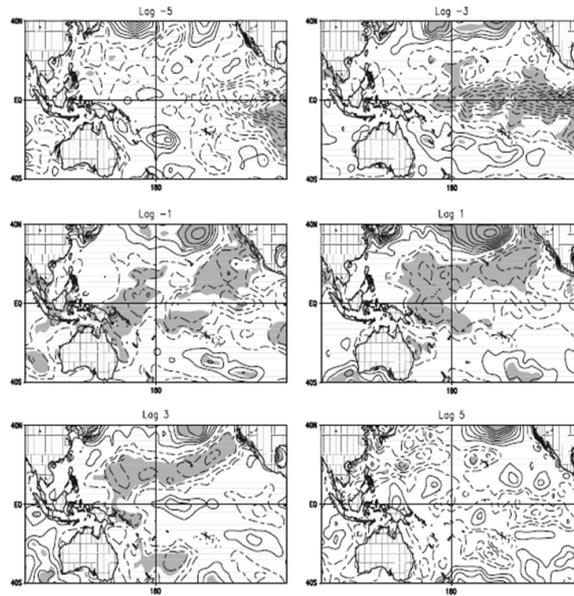


図 10: SST が AO を数カ月先導 (Jia et al. 2009).

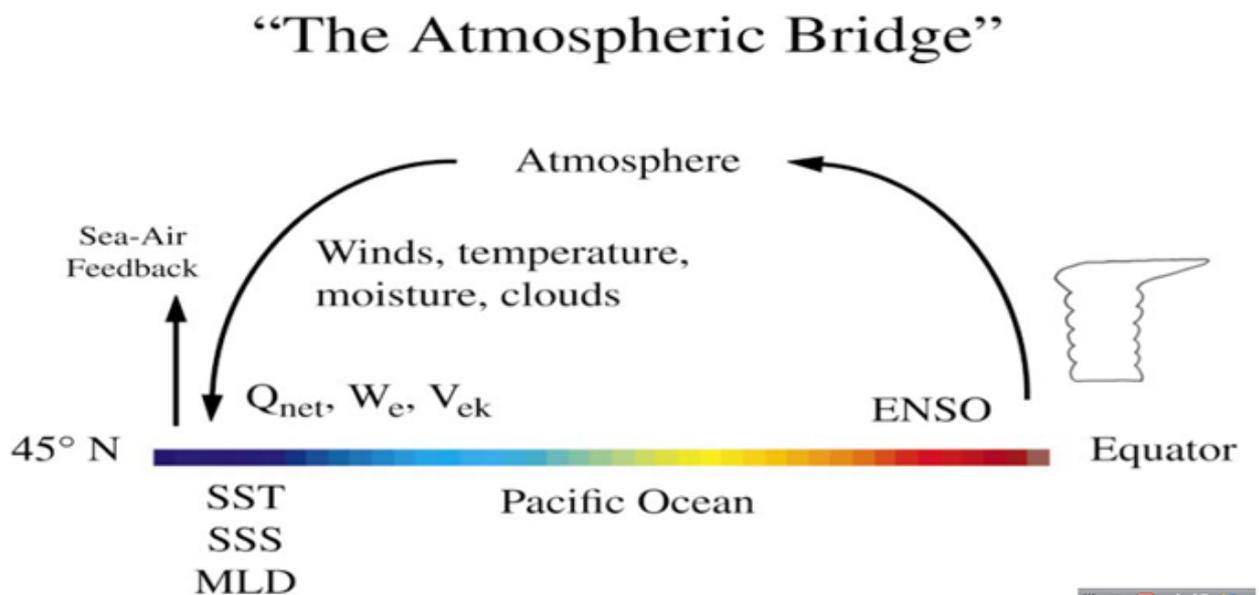


図 11: 大気の橋 (Atmospheric Bridge; Alexander et al. 2001).

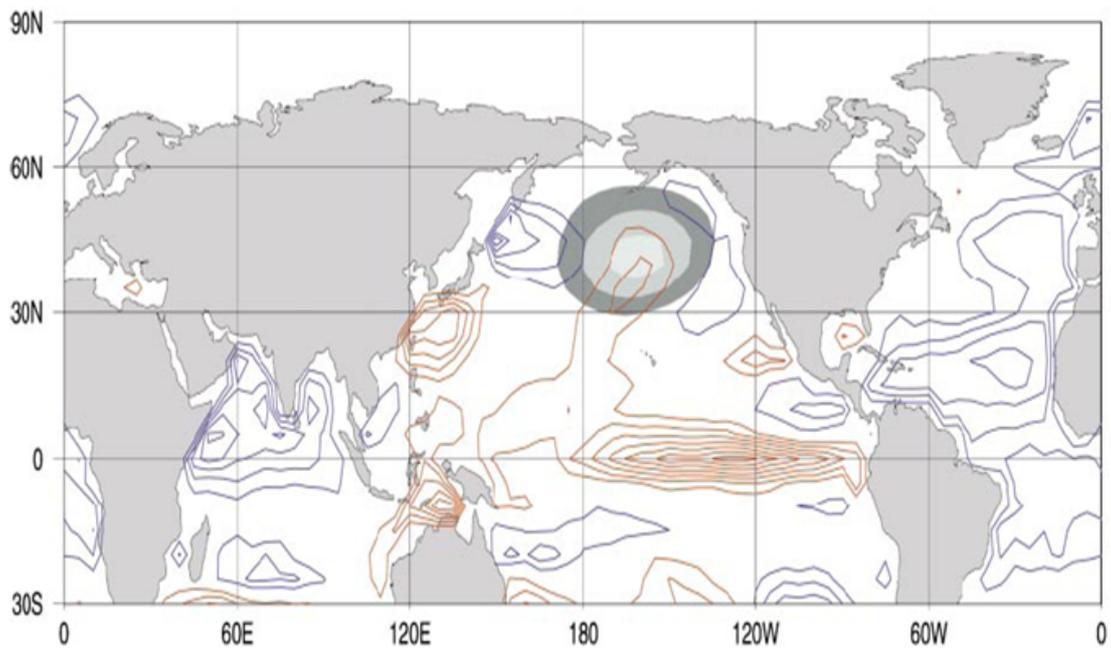


図 12: 太平洋熱帯域の SST が 60 日遅れて北太平洋の気圧場にもたらす影響 (Alexander et al. 2001).

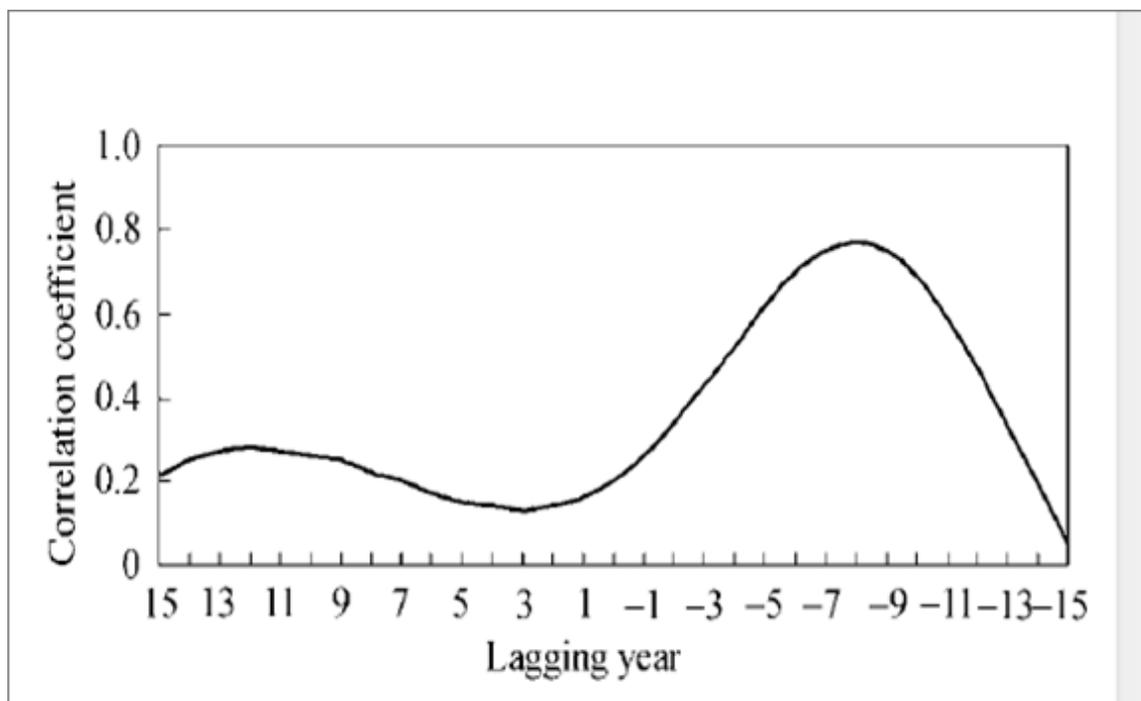


図 13: AO が SST を約 6 年 ~ 10 年先導 (Sun and Wang 2009).

**Correlation Monthly Mean AOI and Monthly Mean SST**  
Period = 1901 - 2001

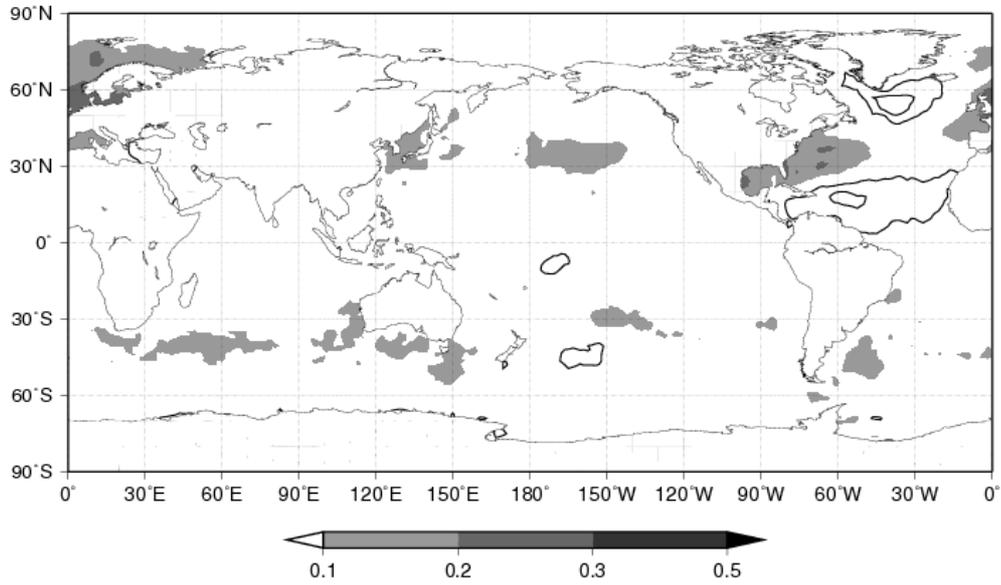


図 14: 月平均 AOI と月平均 SST の相関.

**Correlation Monthly Mean PDOI and Monthly Mean SST**  
Period = 1901 - 2001

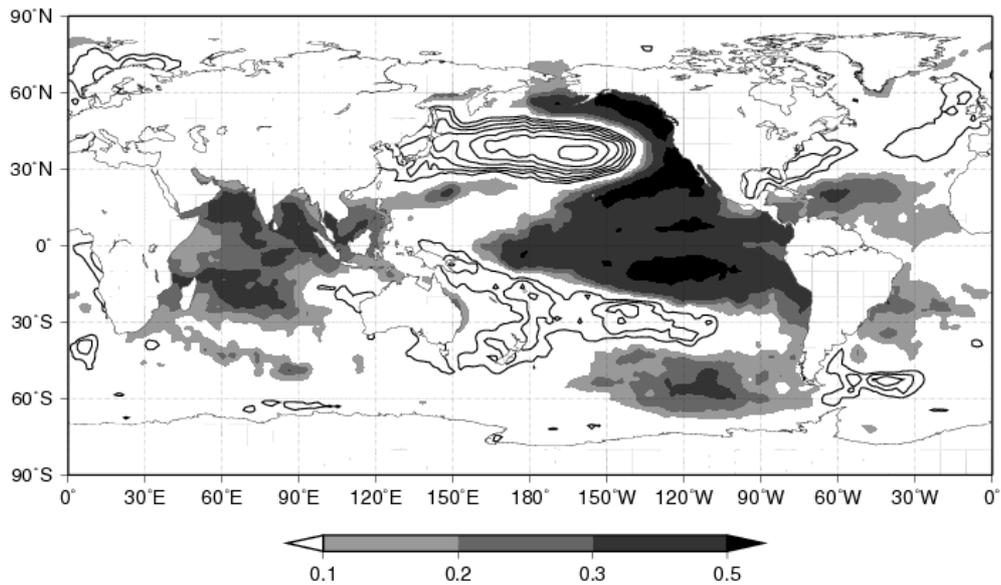


図 15: 月平均 PDOI と月平均 SST の相関.

*Correlation Monthly Mean AMOI and Monthly Mean SST*  
Period = 1901 - 2001

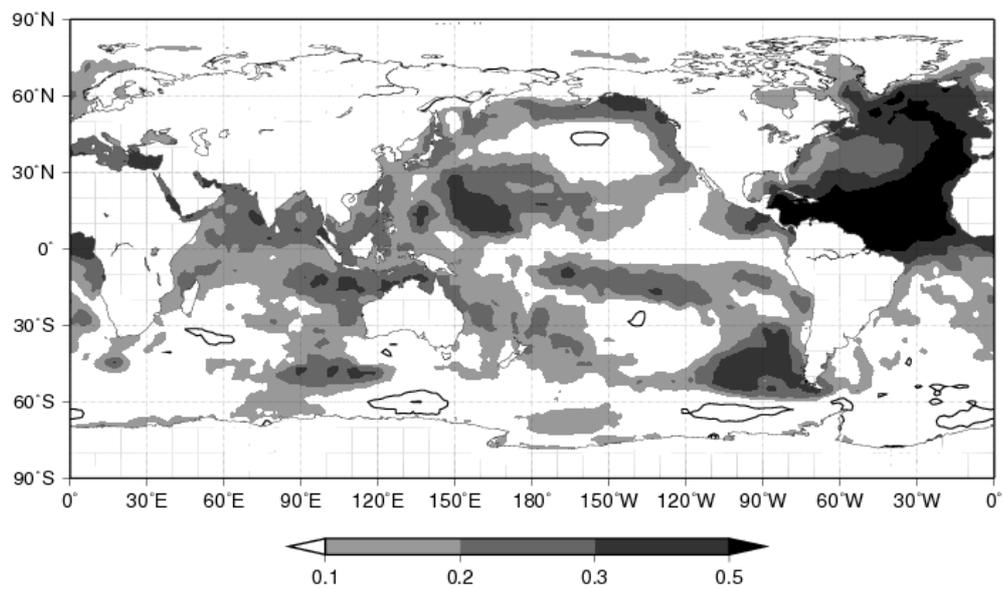


図 16: 月平均 AMOI と月平均 SST の相関.

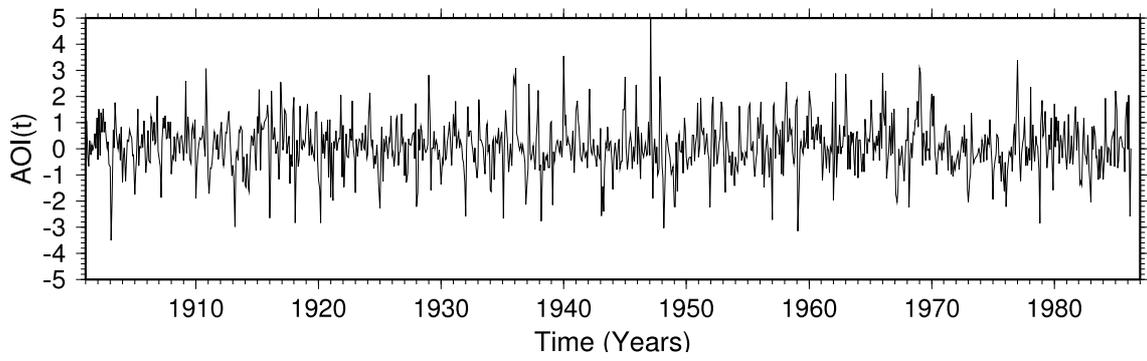


図 17: AOI の時系列.

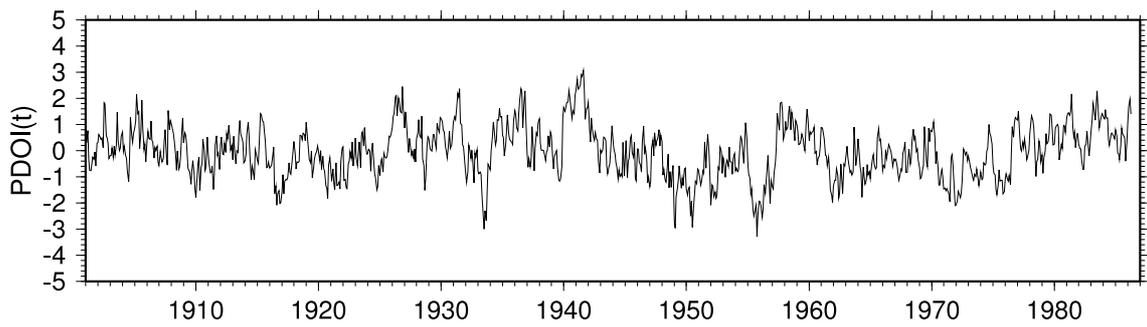


図 18: PDOI の時系列.

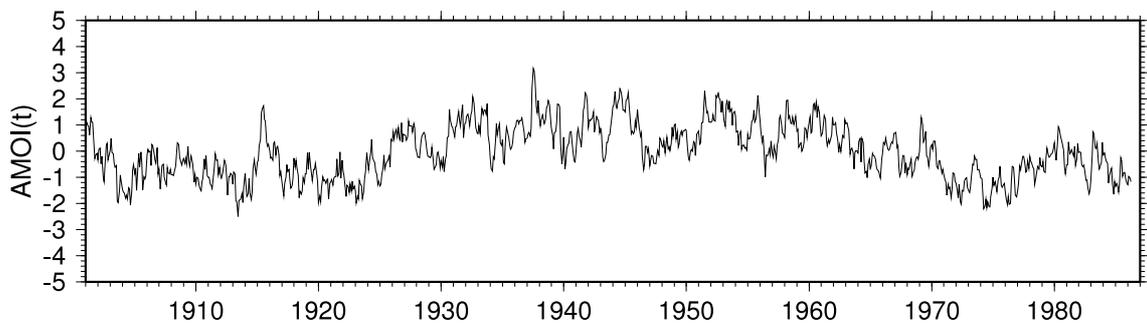


図 19: AMOI の時系列.

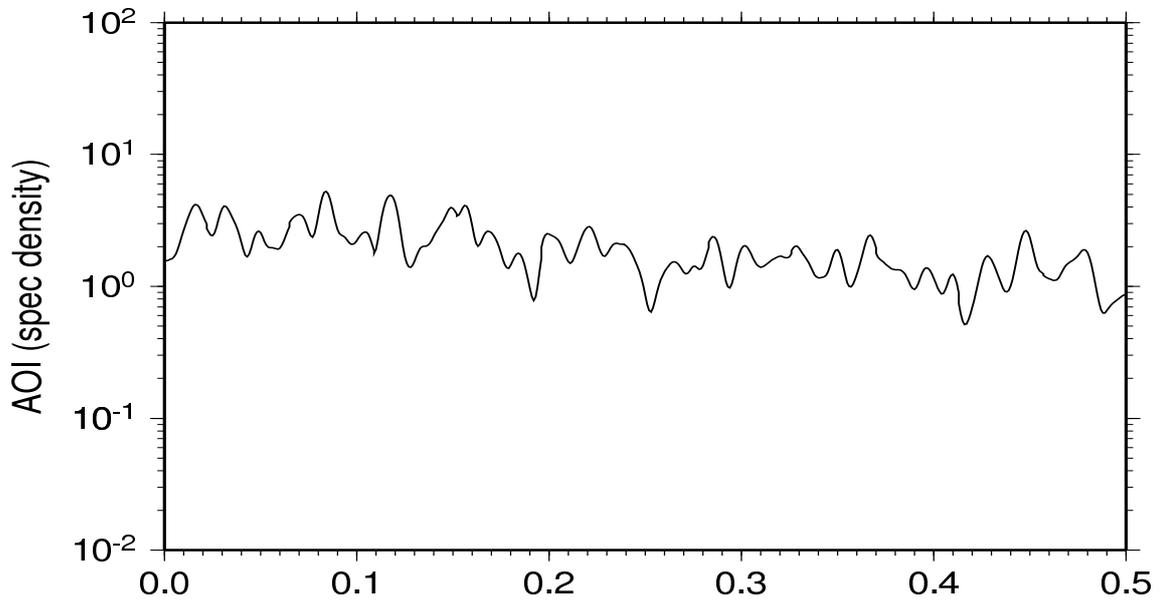


図 20: AOIのパワースペクトル.

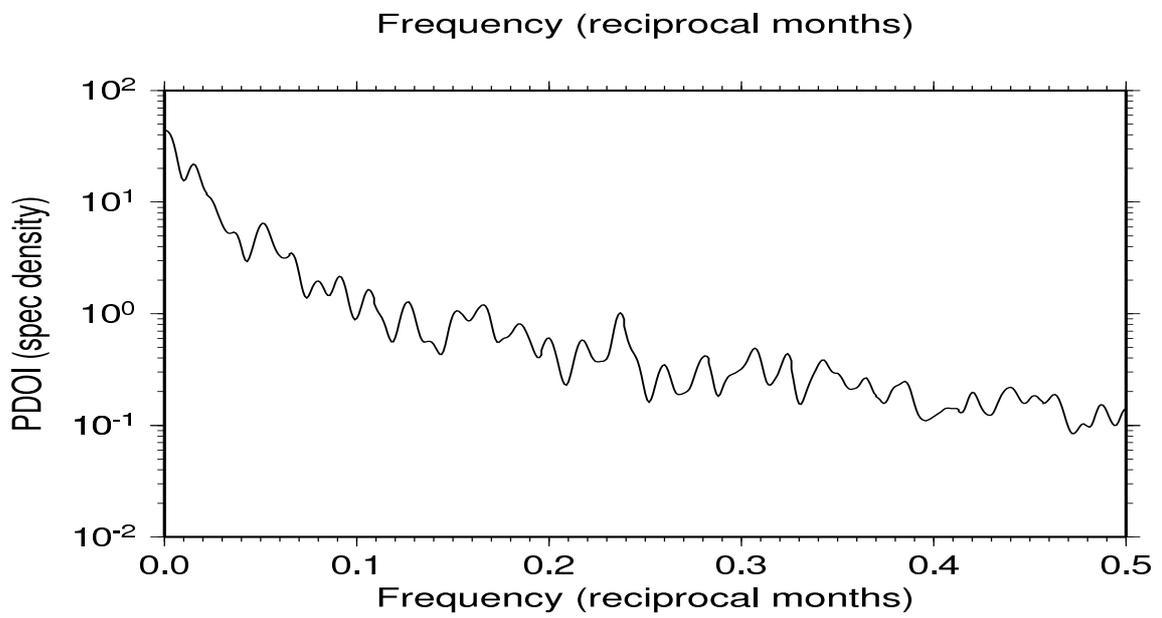


図 21: PDOIのパワースペクトル.

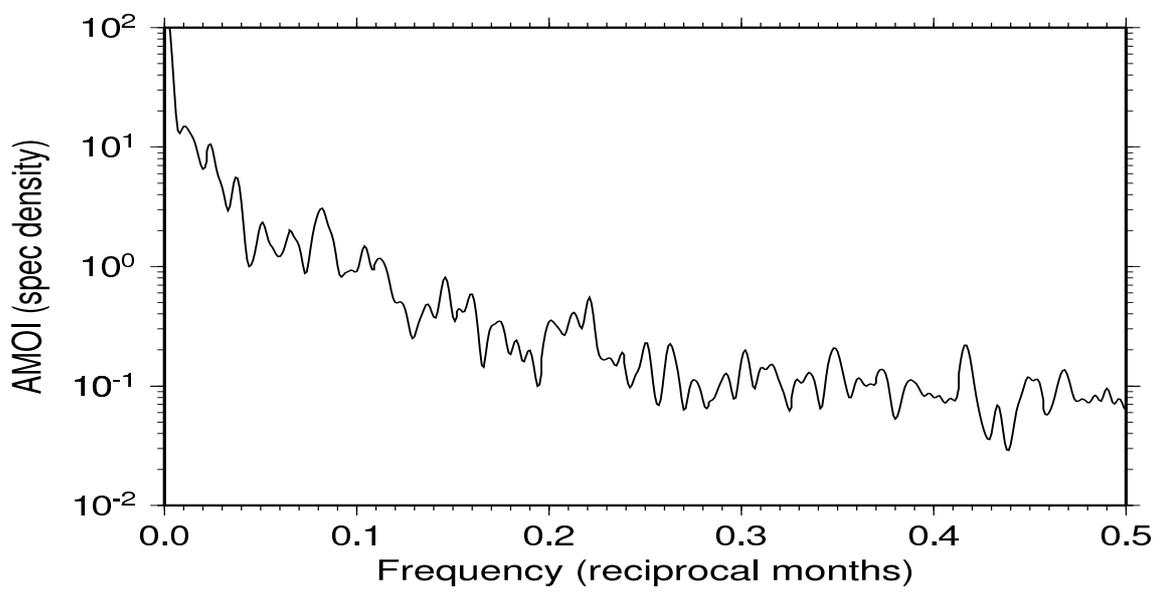
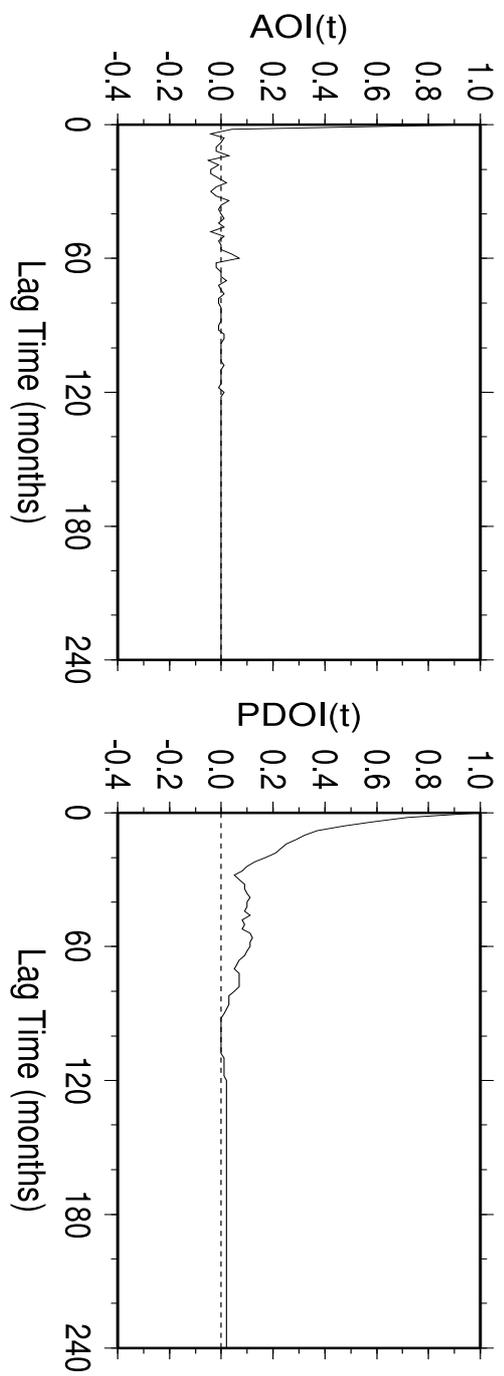


図 22: AMOIのパワースペクトル.

### Auto-Correlation



### Cross-Correlation AOI and PDOI

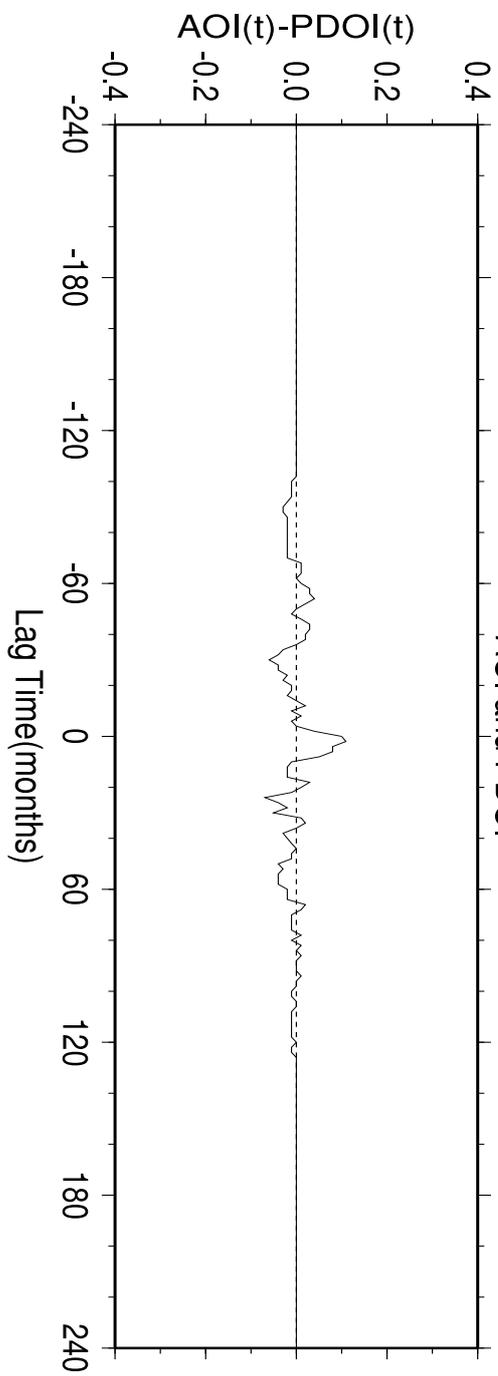
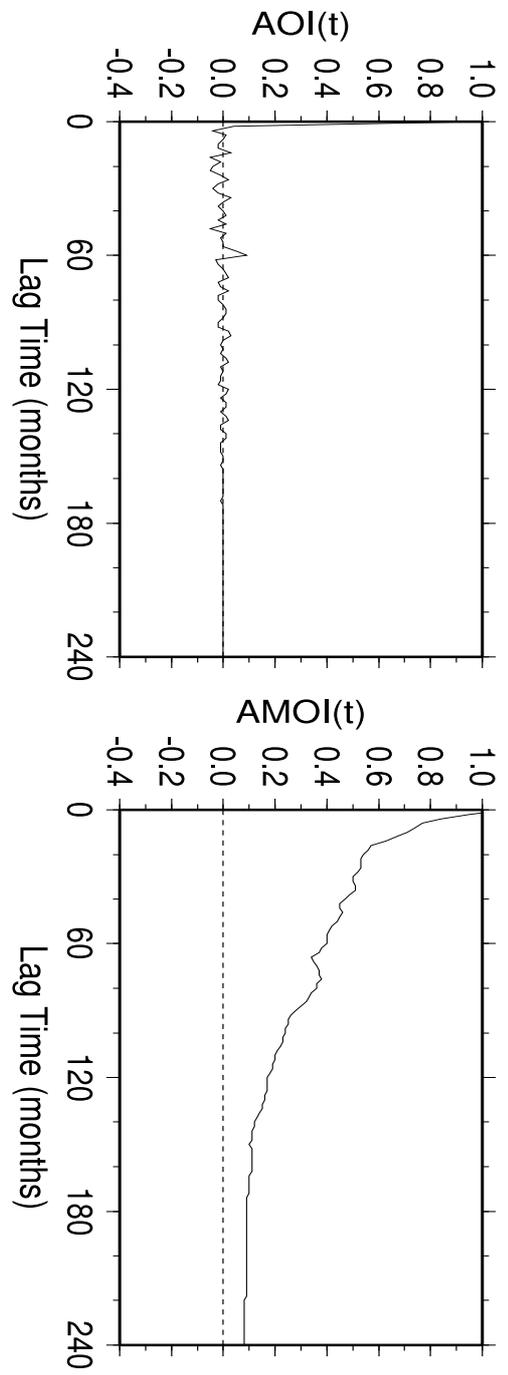


図 23: AOI と PDOI の相互相関.

### Auto-Correlation



### Cross-Correlation AOI and AMOI

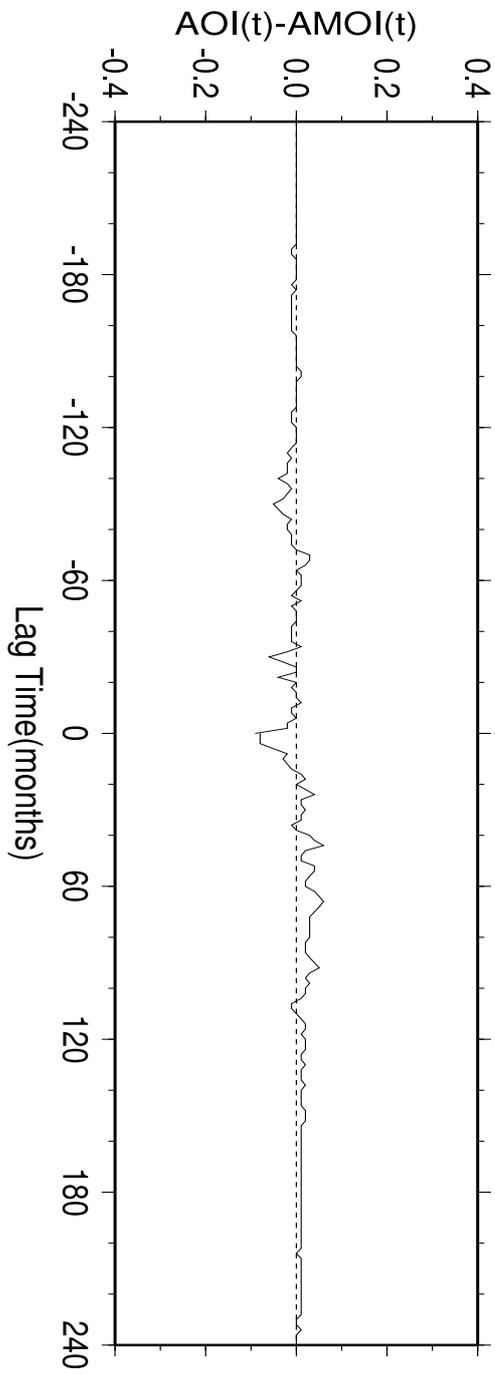
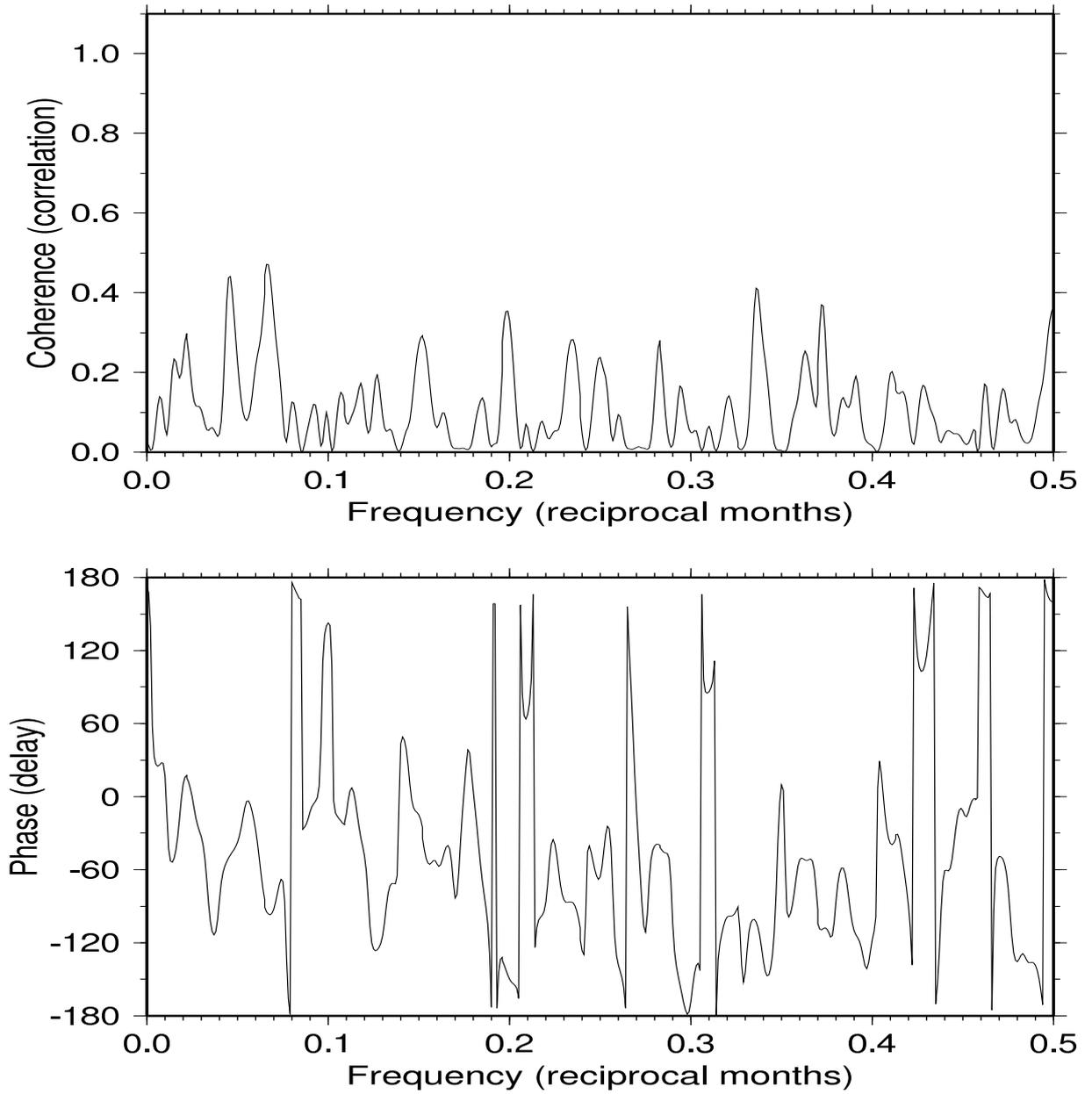


図 24: AOI と AMOI の相互相関.

## Coherence and Phase -AOI and PDO



☒ 25: AOI と PDOI のコヒーレンスとフェーズ.

## Coherence and Phase AOI and AMOI

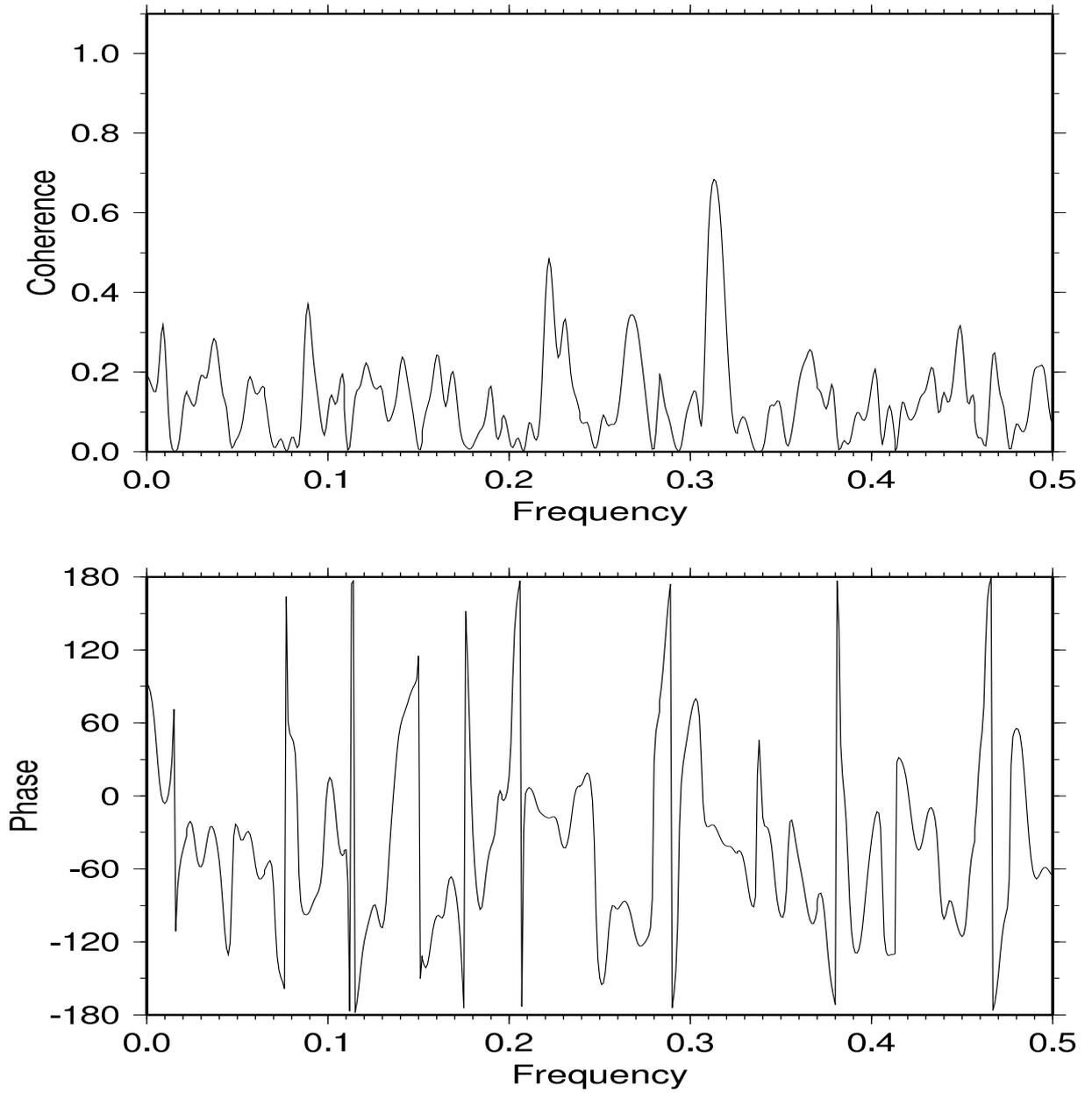


図 26: AOI と AMOI のコヒーレンスとフェーズ.

**Lag Correlation Monthly Mean Jan AOI with Monthly Mean Jan SST**  
Period = 1901 - 2001

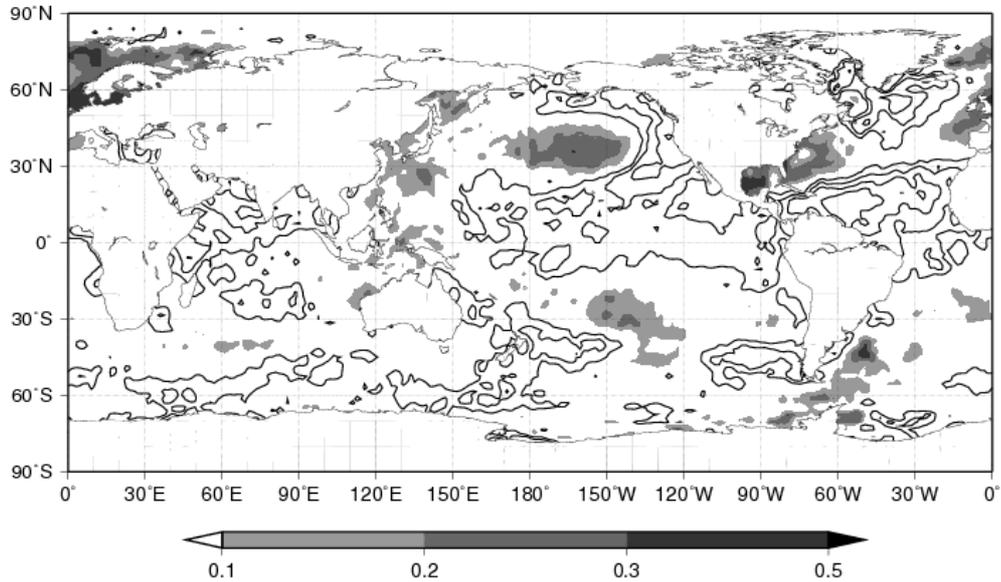


図 27: 1月の月平均 AOI と 1月の月平均 SST のラグ相関.

**Lag Correlation Monthly Mean Jan AOI with Monthly Mean Feb SST**  
Period = 1901 - 2001

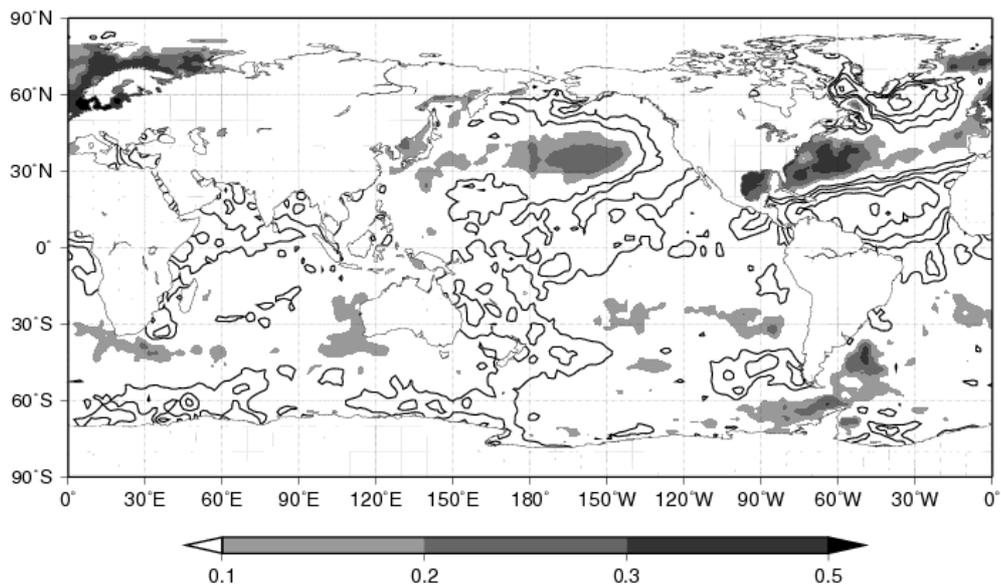


図 28: 1月の月平均 AOI と 2月の月平均 SST のラグ相関.

**Lag Correlation Monthly Mean Jan AOI with Monthly Mean Mar SST**  
Period = 1901 - 2001

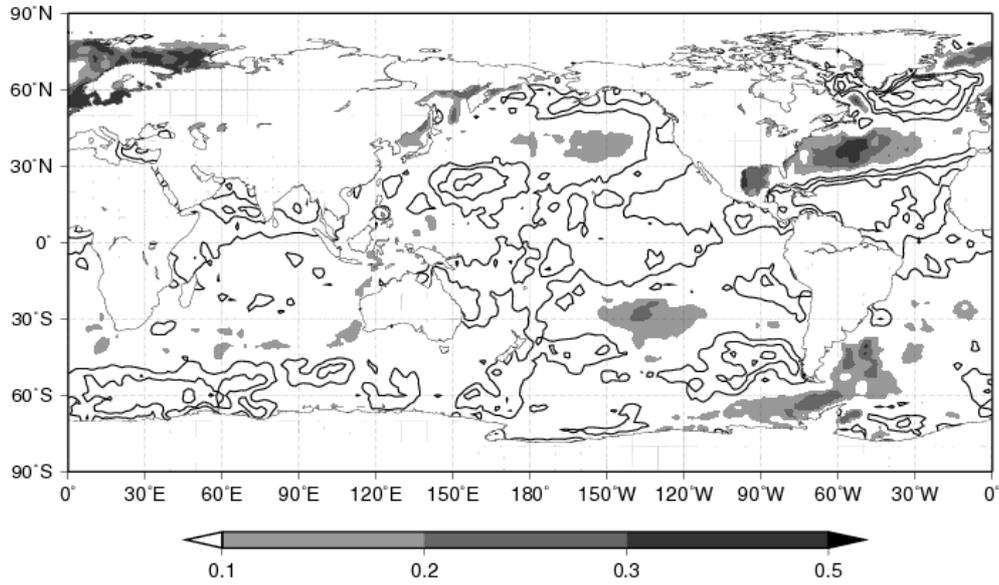


図 29: 1月の月平均 AOI と 3月の月平均 SST のラグ相関.

**Lag Correlation Monthly Mean Jan AOI with Monthly Mean Apr SST**  
Period = 1901 - 2001

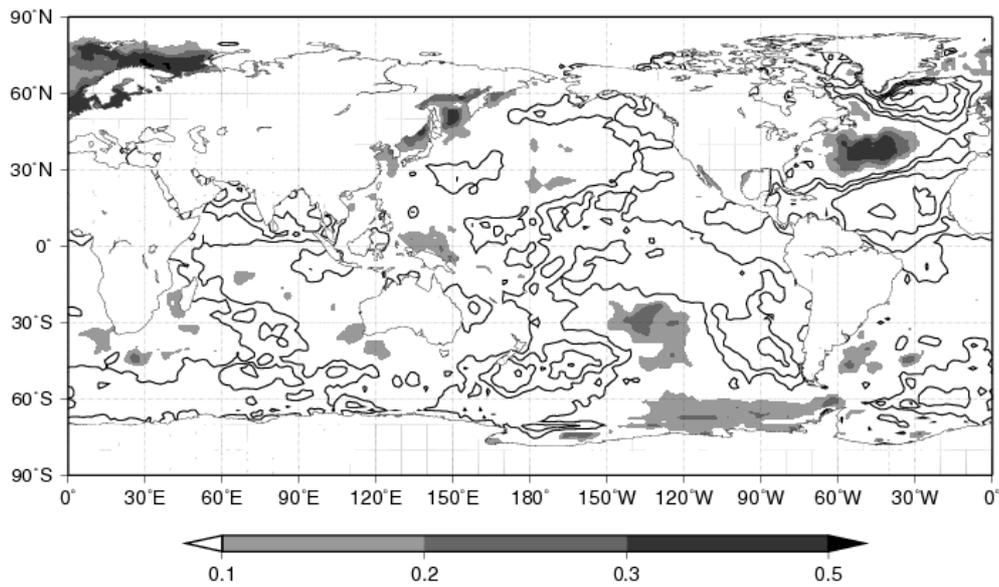


図 30: 1月の月平均 AOI と 4月の月平均 SST のラグ相関.

**Lag Correlation Monthly Mean Jan AOI with Monthly Mean May SST**  
Period = 1901 - 2001

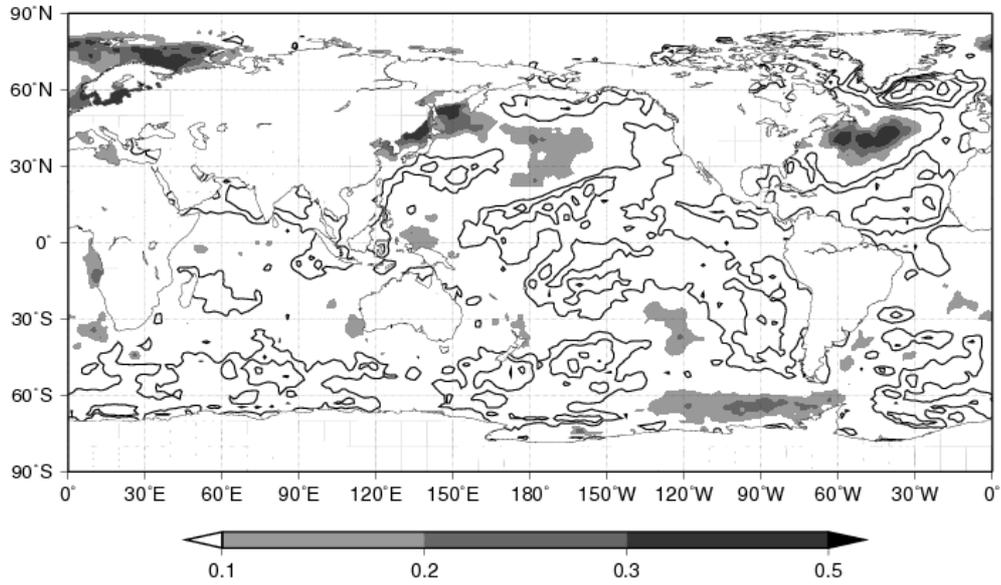


図 31: 1月の月平均 AOI と 5月の月平均 SST のラグ相関.

**Lag Correlation Monthly Mean Jan AOI with Monthly Mean Jun SST**  
Period = 1901 - 2001

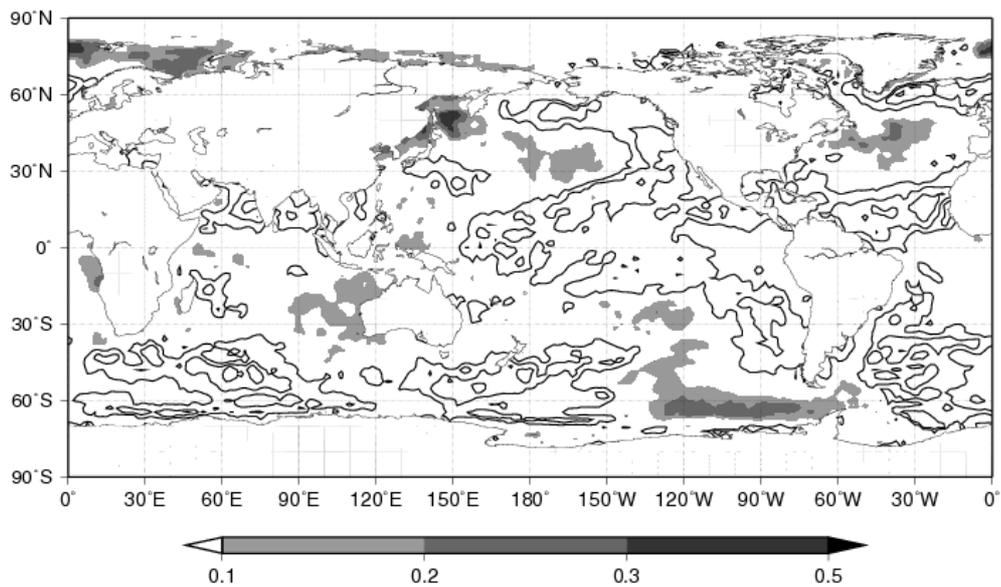


図 32: 1月の月平均 AOI と 6月の月平均 SST のラグ相関.

**Lag Correlation Monthly Mean Jan AOI with Monthly Mean Jul SST**  
Period = 1901 - 2001

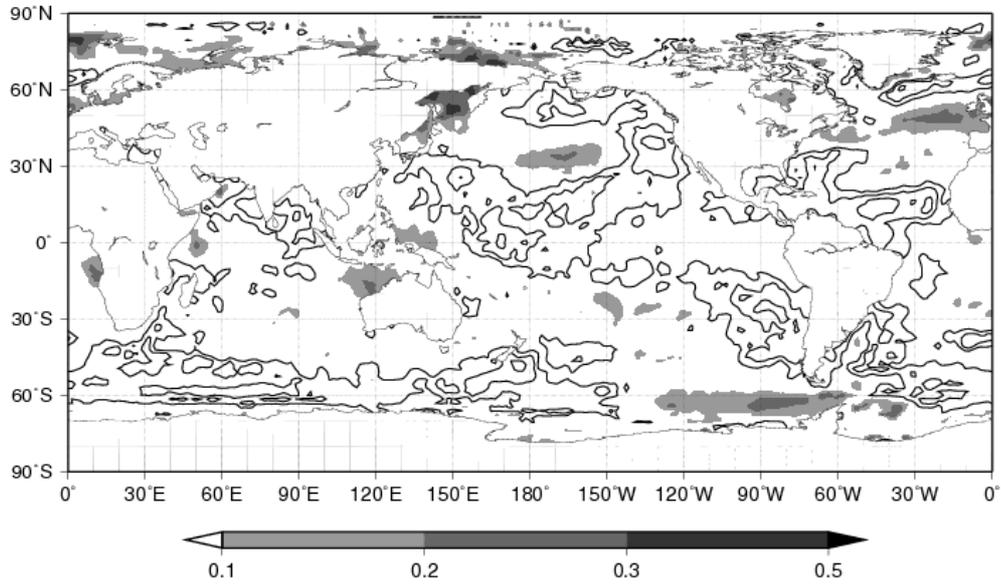


図 33: 1月の月平均 AOI と 7月の月平均 SST のラグ相関.

**Lag Correlation Monthly Mean Jan AOI with Monthly Mean Aug SST**  
Period = 1901 - 2001

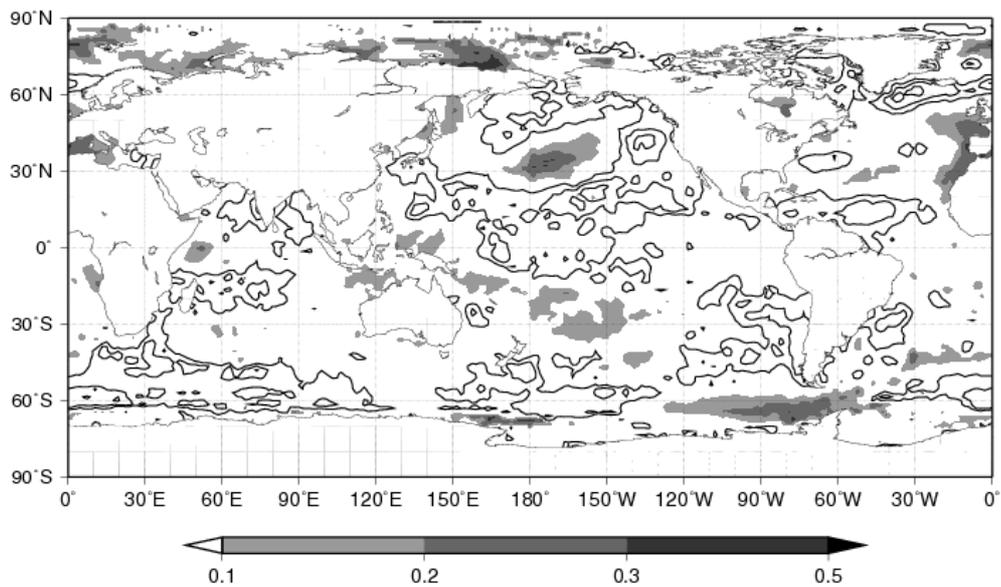


図 34: 1月の月平均 AOI と 8月の月平均 SST のラグ相関.

**Lag Correlation Monthly Mean Jan AOI with Monthly Mean Sep SST**  
Period = 1901 - 2001

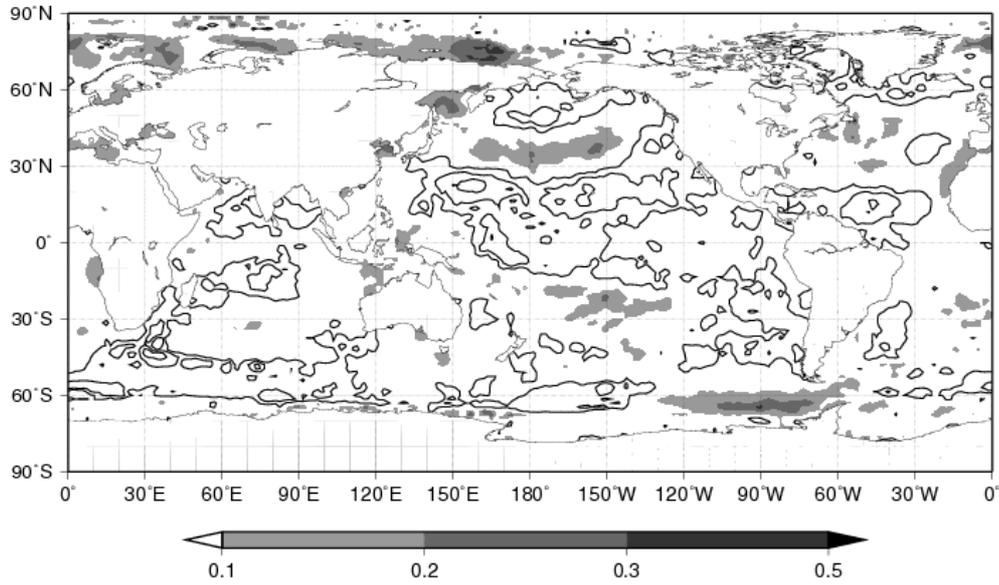


図 35: 1月の月平均 AOI と 9月の月平均 SST のラグ相関.

**Lag Correlation Monthly Mean Jan AOI with Monthly Mean Oct SST**  
Period = 1901 - 2001

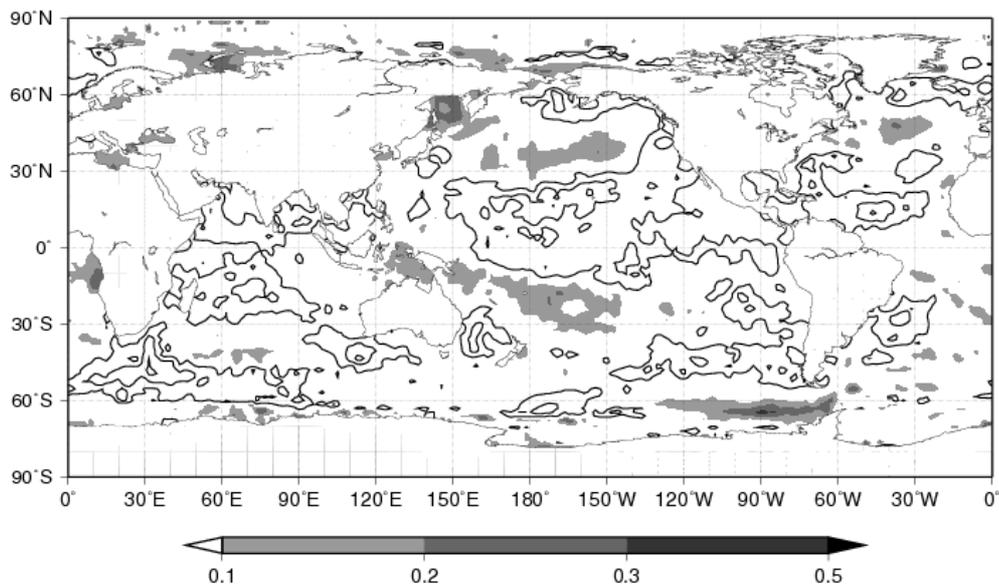


図 36: 1月の月平均 AOI と 10月の月平均 SST のラグ相関.

**Lag Correlation Monthly Mean Jan AOI with Monthly Mean Nov SST**  
Period = 1901 - 2001

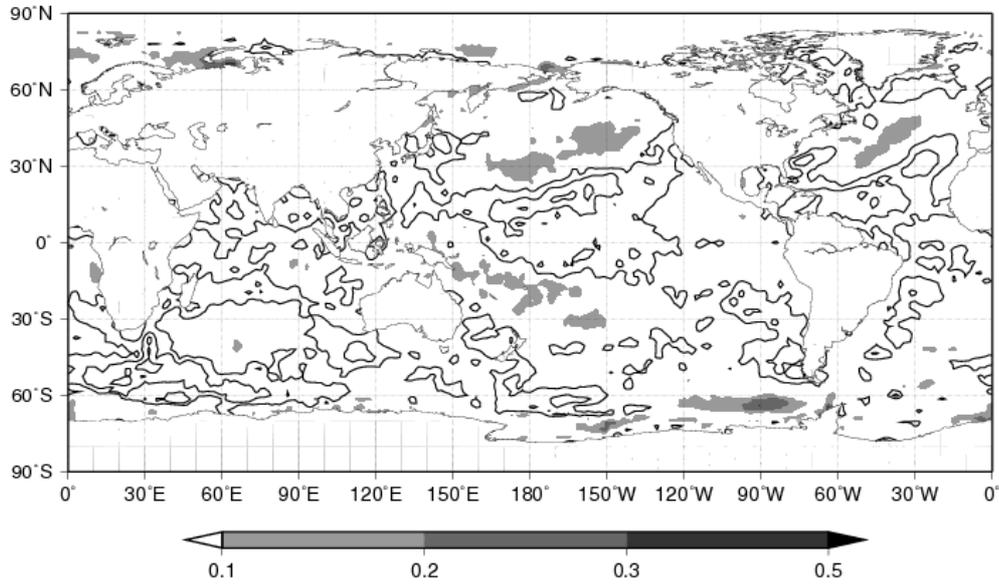


図 37: 1月の月平均 AOI と 11月の月平均 SST のラグ相関.

**Lag Correlation Monthly Mean Jan AOI with Monthly Mean Dec SST**  
Period = 1901 - 2001

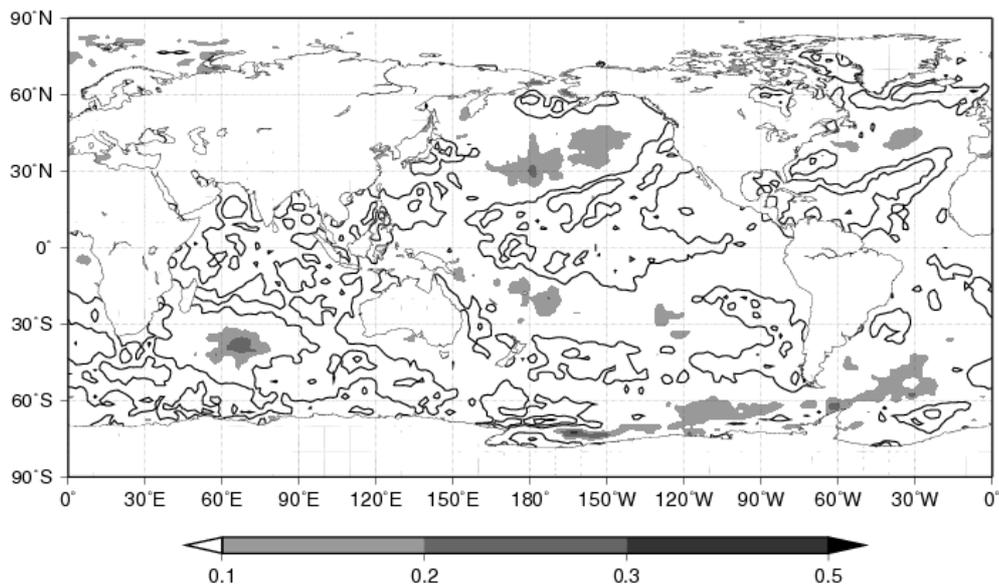


図 38: 1月の月平均 AOI と 12月の月平均 SST のラグ相関.

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +0 years**  
Period = 1901 - 2001

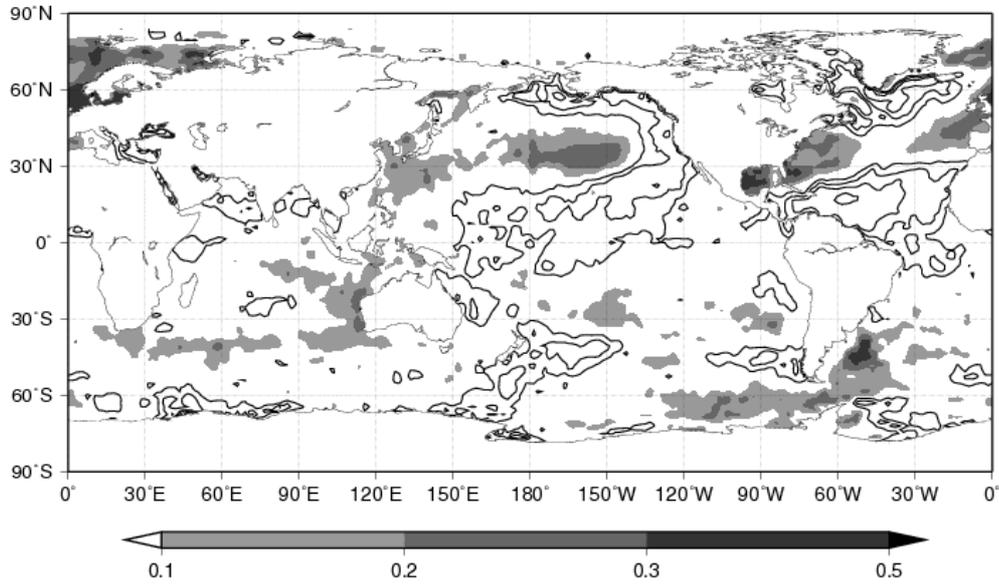


図 39: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+0 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +1 years**  
Period = 1901 - 2001

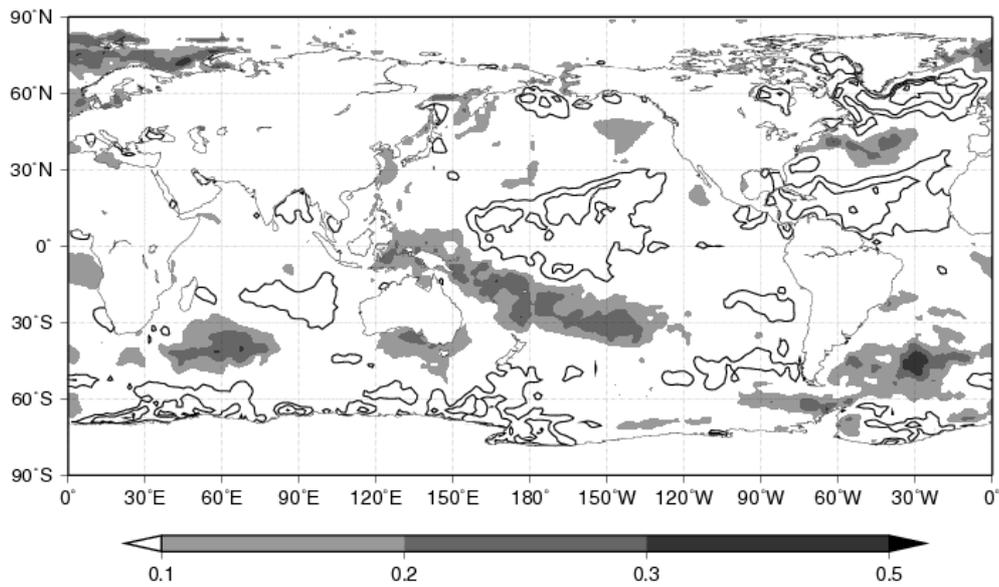


図 40: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+1 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +2 years**  
Period = 1901 - 2001

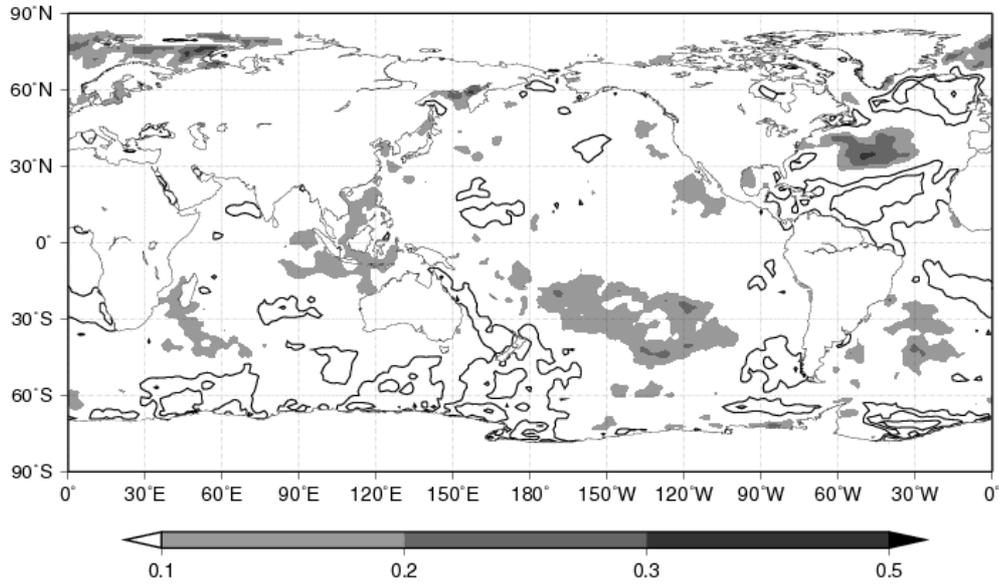


図 41: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+2 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +3 years**  
Period = 1901 - 2001

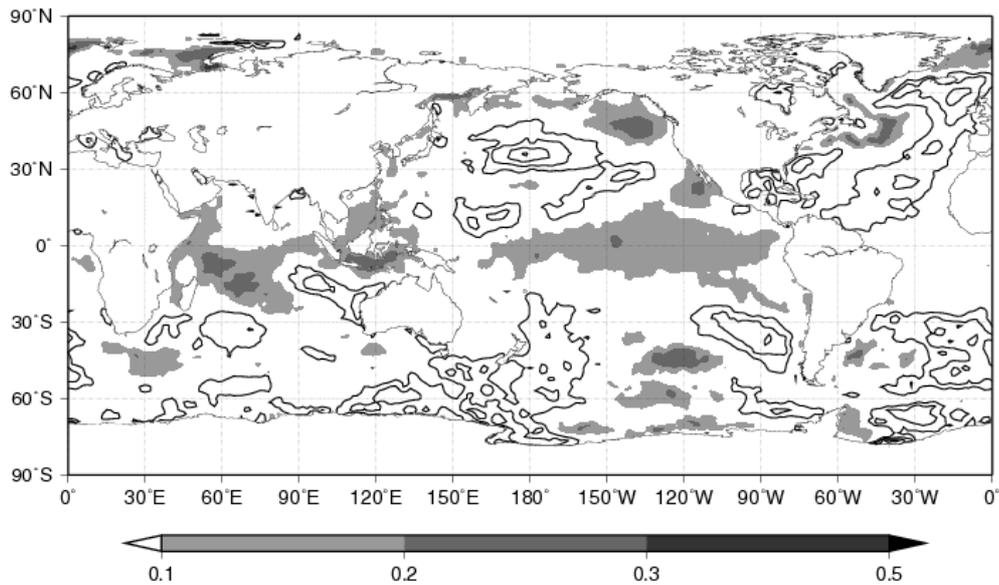


図 42: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+3 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +4 years**  
Period = 1901 - 2001

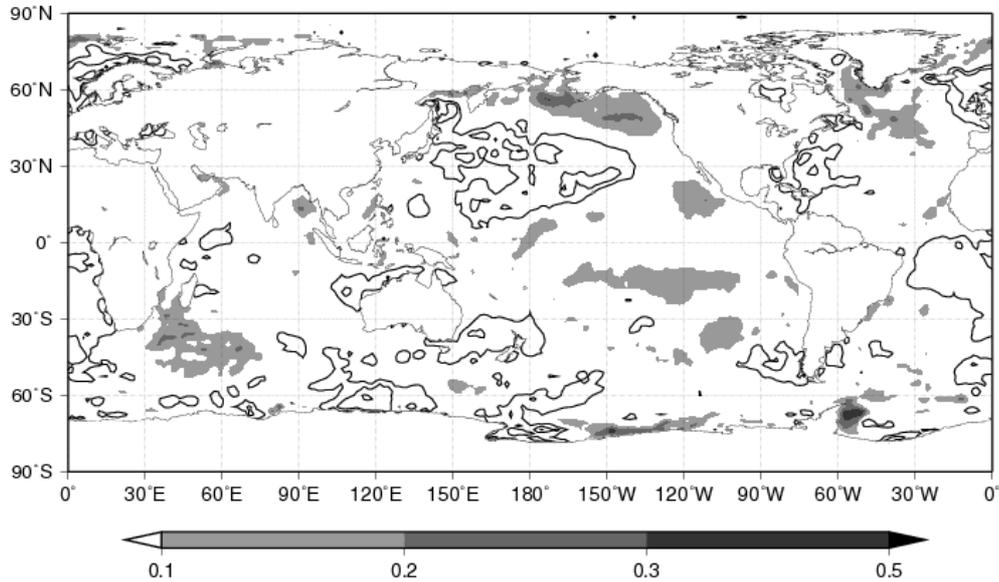


図 43: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+4 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +5 years**  
Period = 1901 - 2001

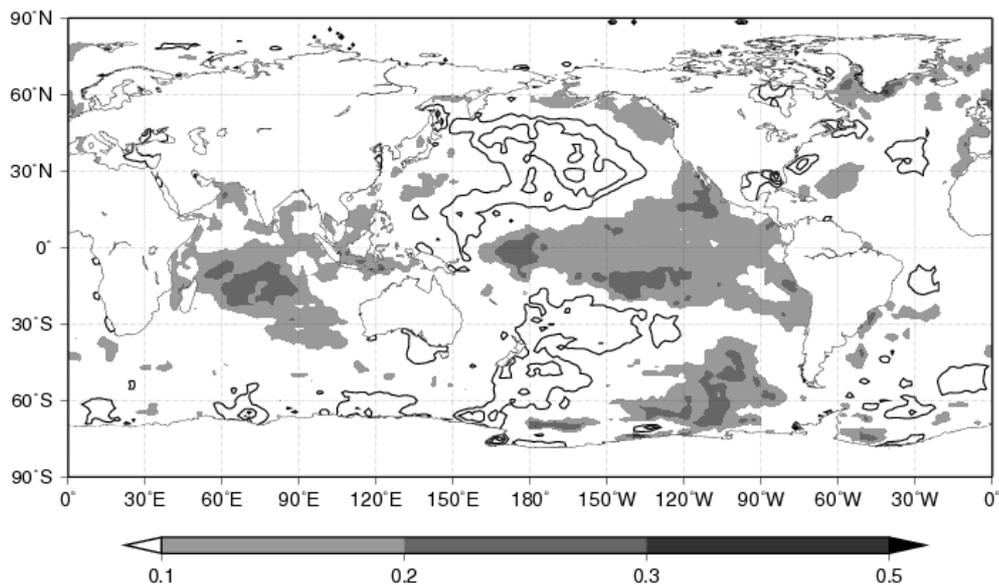


図 44: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+5 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +6 years**  
Period = 1901 - 2001

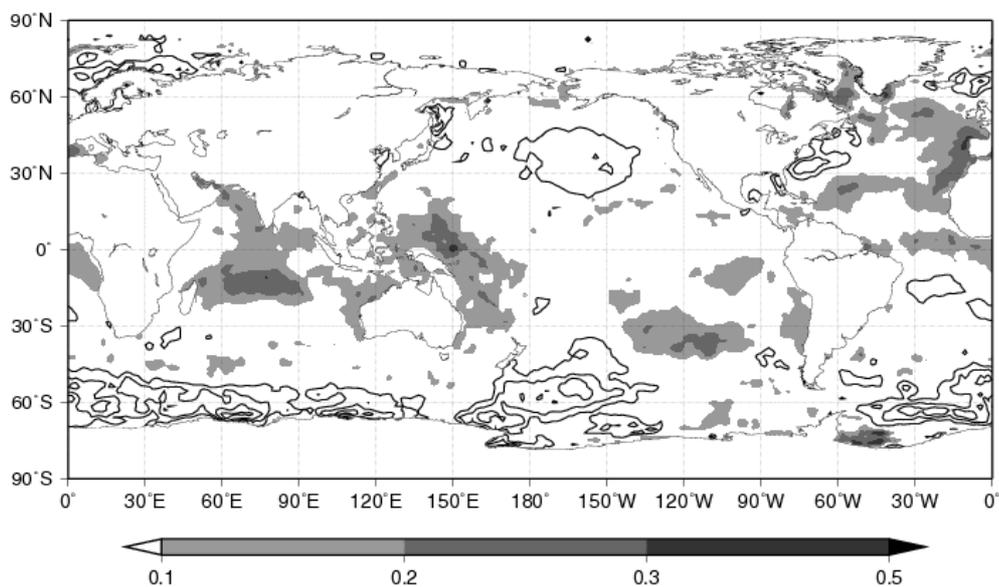


図 45: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+6 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +7 years**  
Period = 1901 - 2001

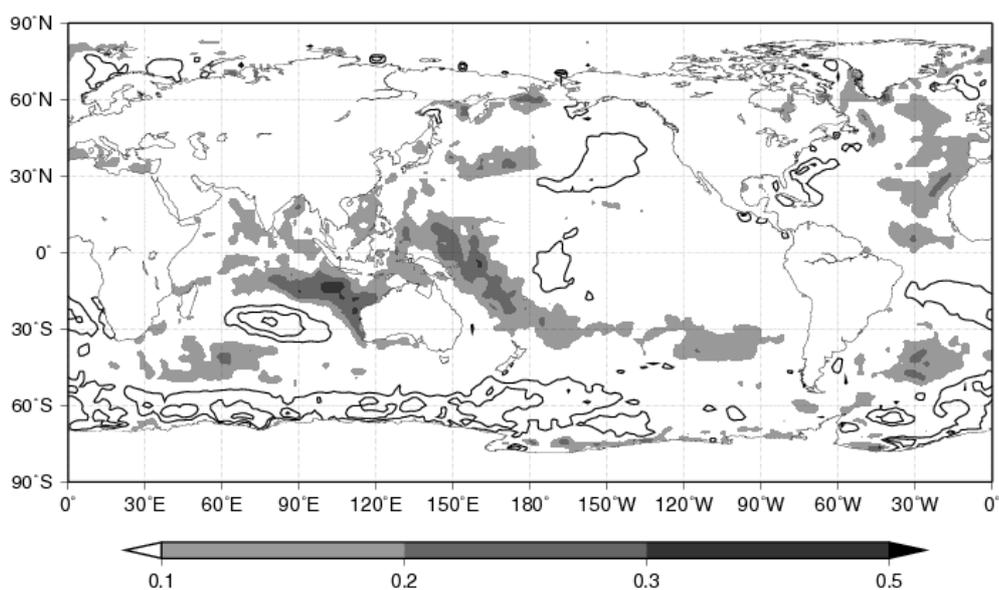


図 46: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+7 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +8 years**  
Period = 1901 - 2001

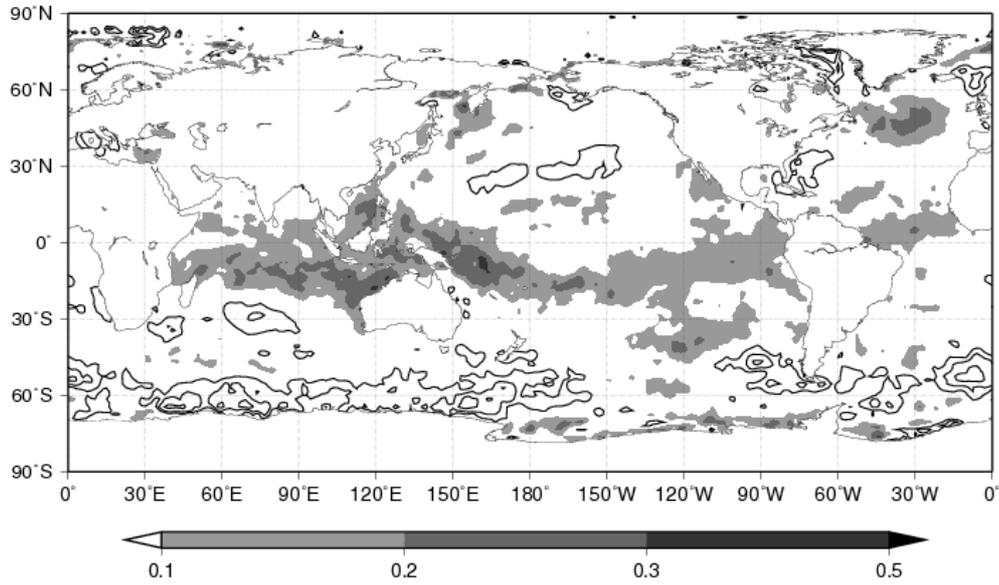


図 47: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+8 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +9 years**  
Period = 1901 - 2001

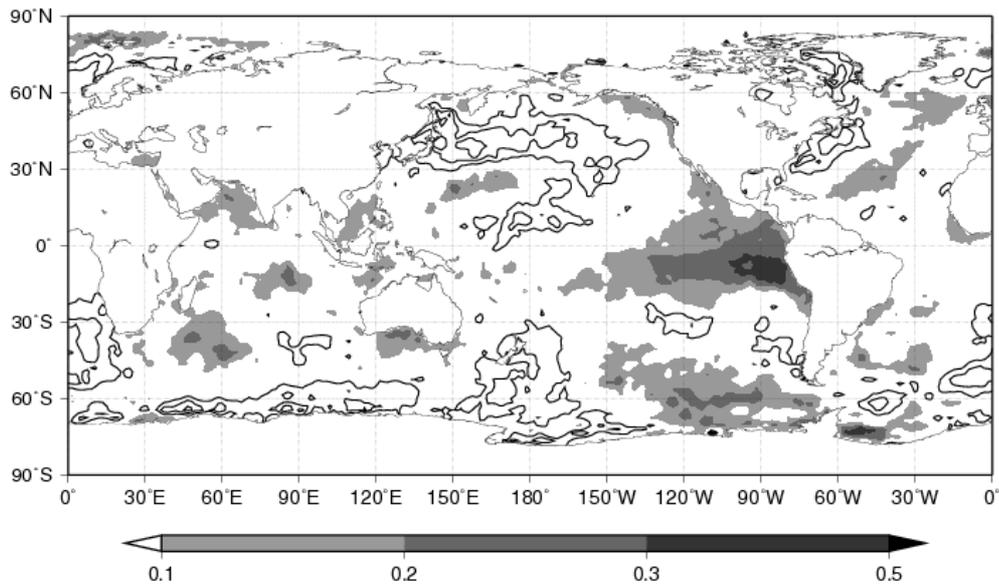


図 48: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+9 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +10 years**  
Period = 1901 - 2001

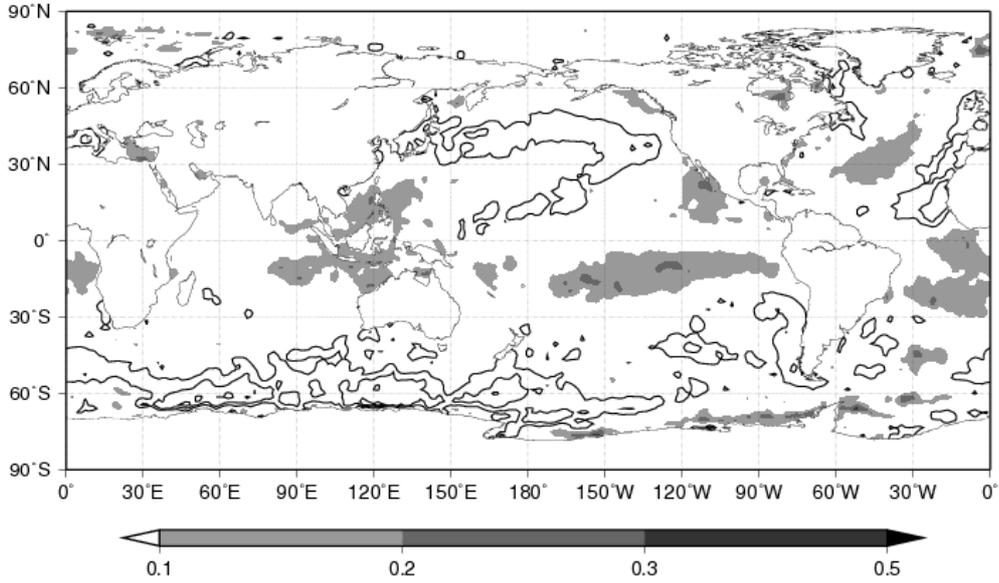


図 49: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+10 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +11 years**  
Period = 1901 - 2001

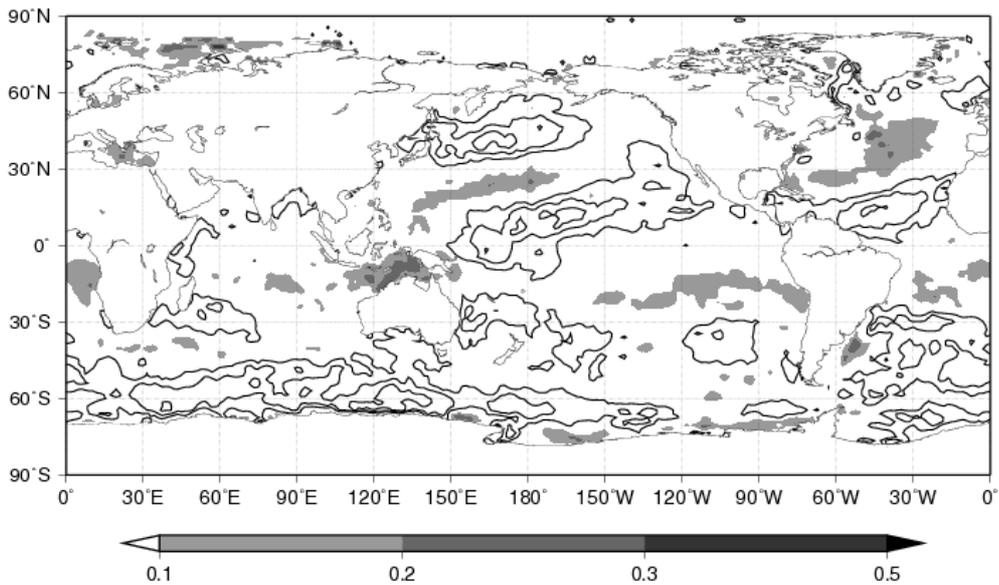


図 50: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+11 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +12 years**  
Period = 1901 - 2001

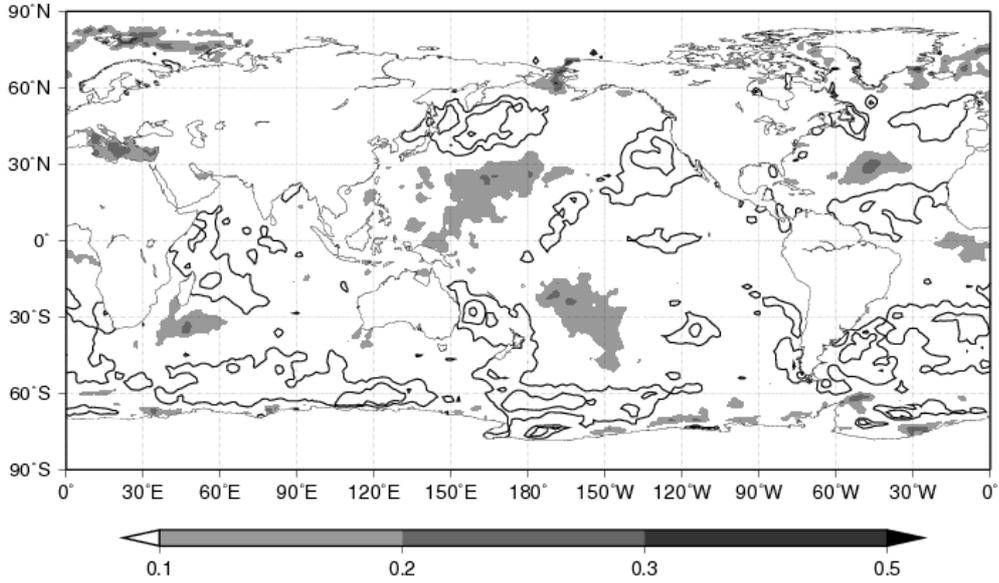


図 51: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+12 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +13 years**  
Period = 1901 - 2001

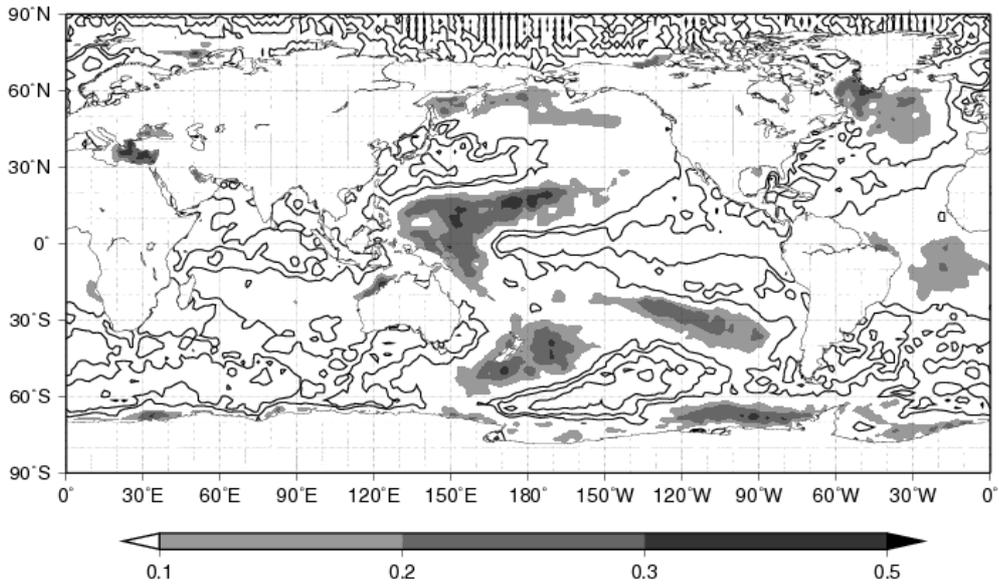


図 52: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+13 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +14 years**  
Period = 1901 - 2001

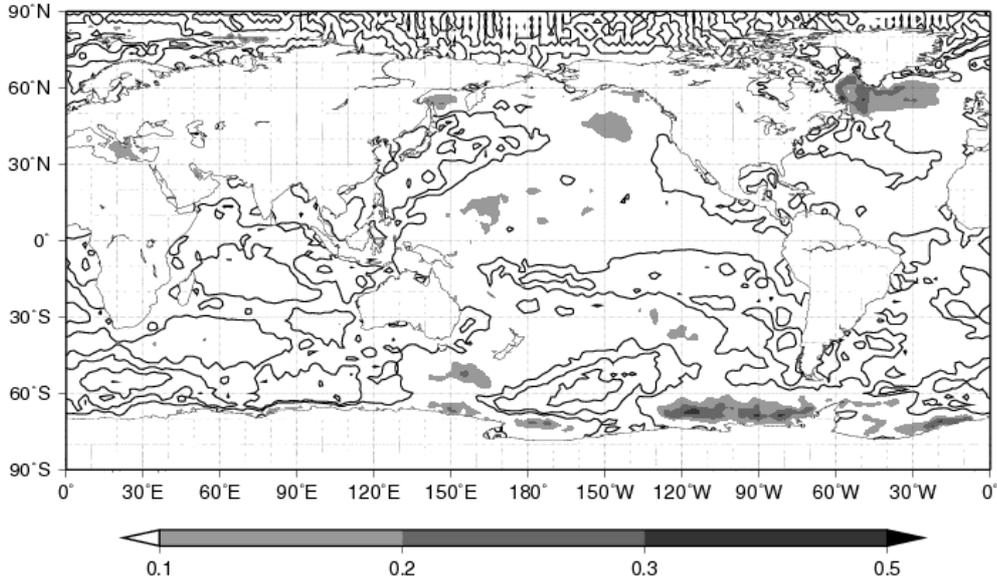


図 53: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+14 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +15 years**  
Period = 1901 - 2001

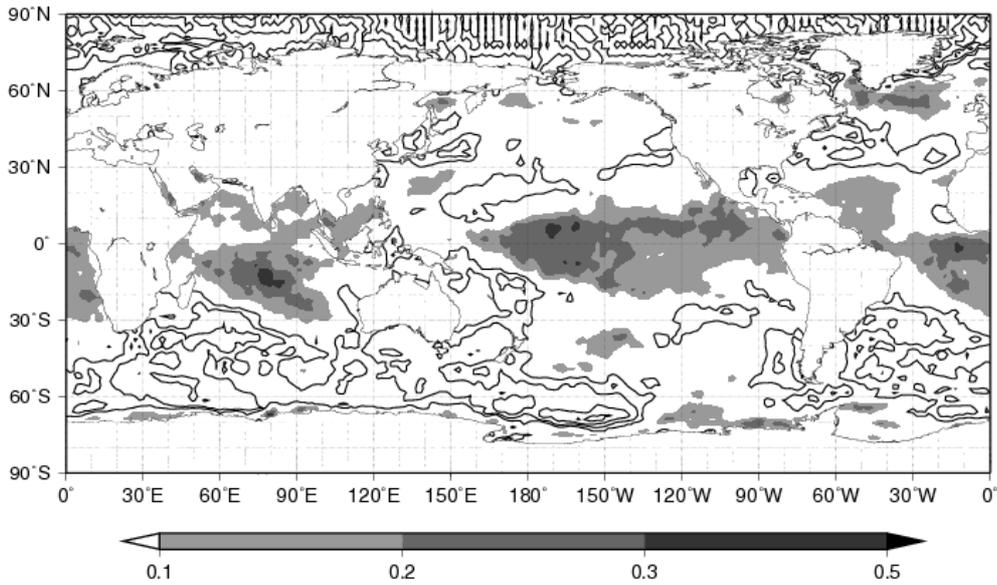


図 54: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+15 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +16 years**  
Period = 1901 - 2001

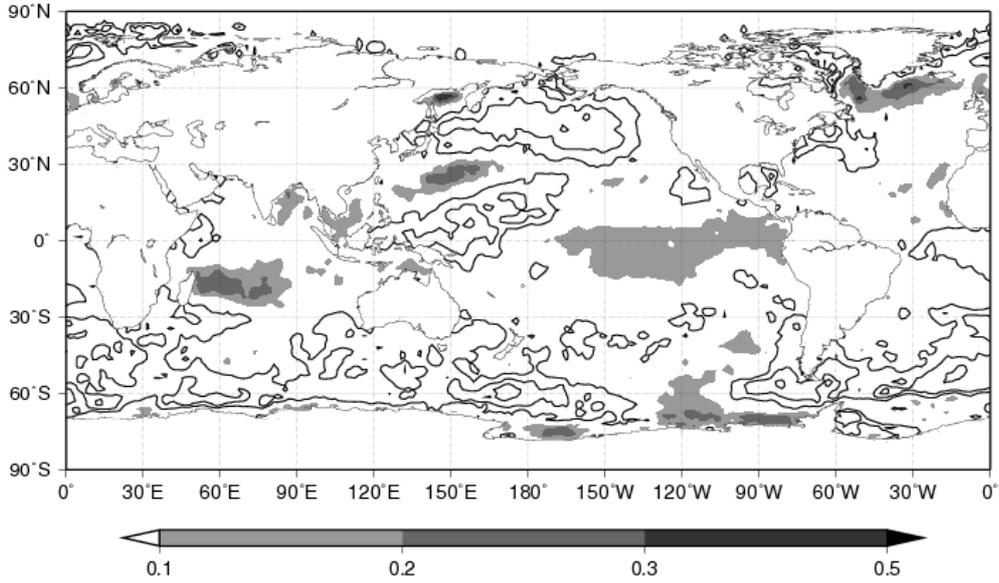


図 55: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+16 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +17 years**  
Period = 1901 - 2001

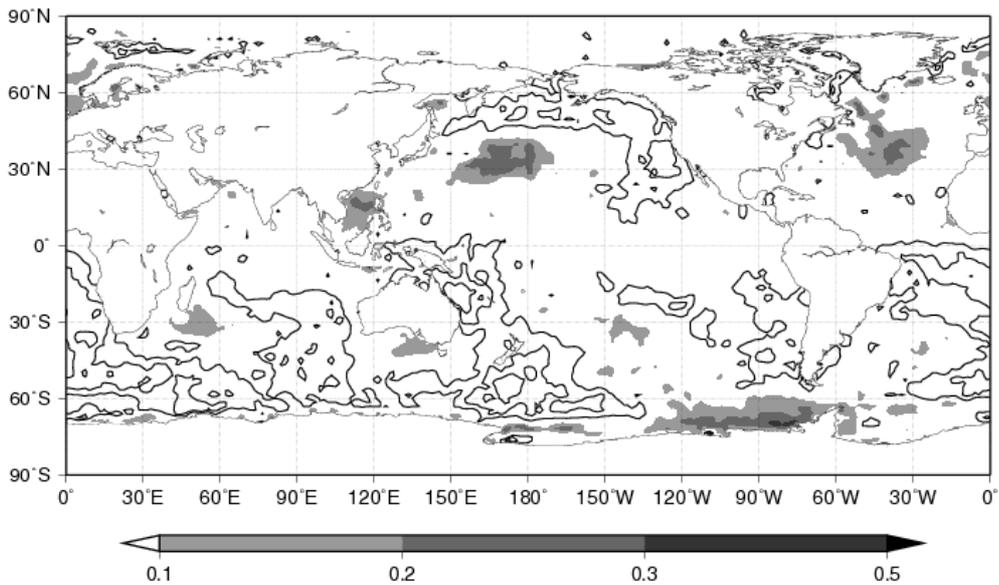


図 56: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+17 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +18 years**  
Period = 1901 - 2001

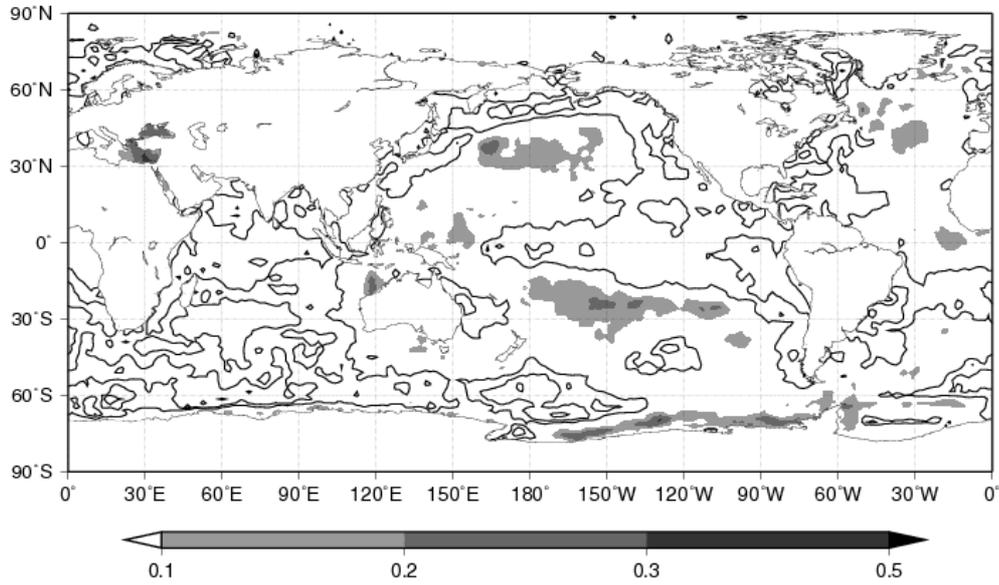


図 57: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+18 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +19 years**  
Period = 1901 - 2001

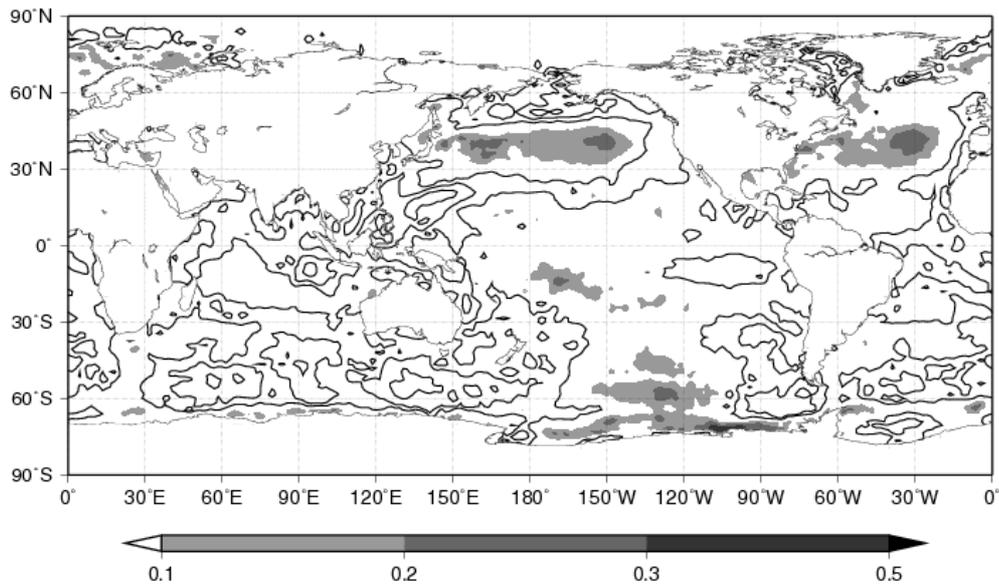


図 58: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+19 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +20 years**  
Period = 1901 - 2001

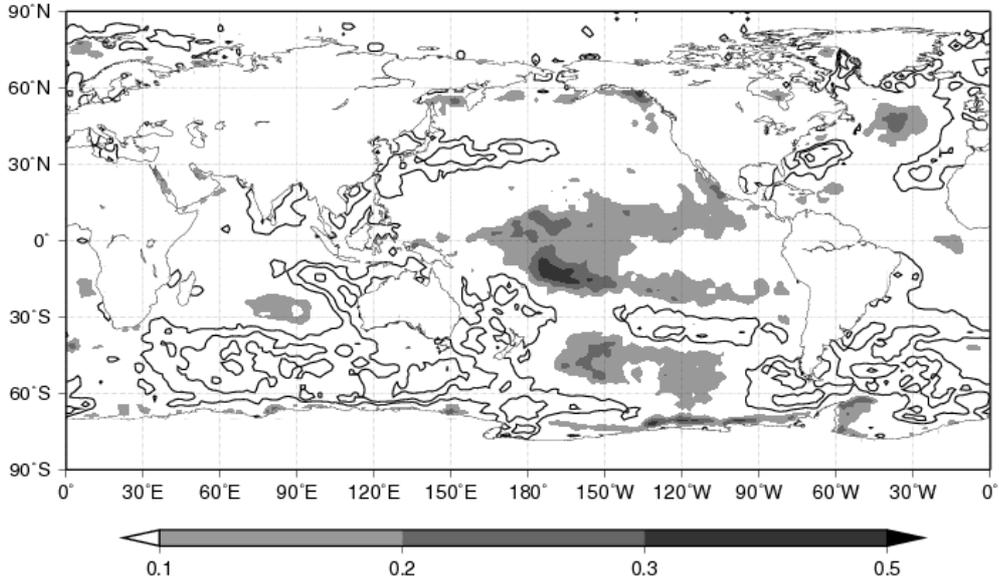


図 59: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+20 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +21 years**  
Period = 1901 - 2001

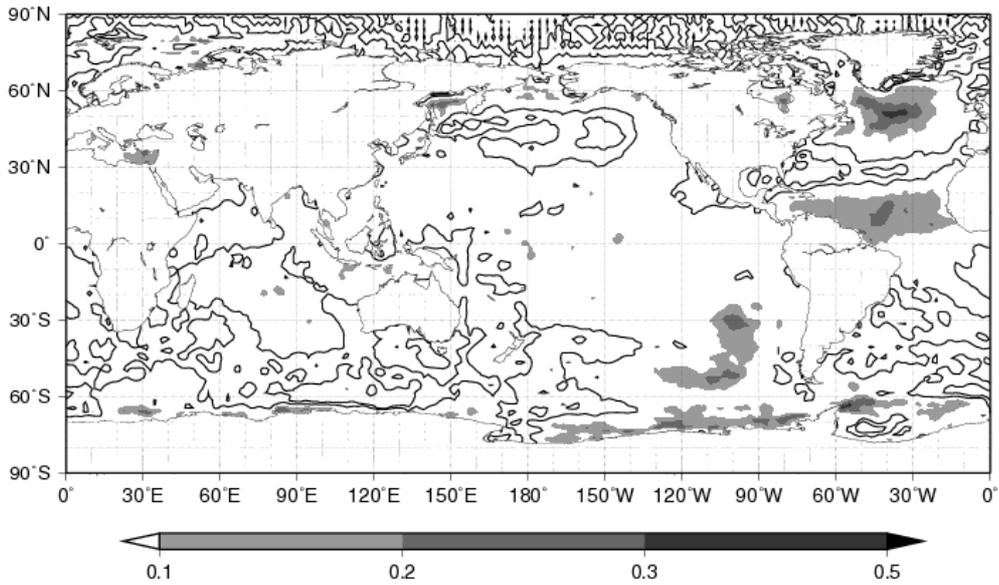


図 60: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+21 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +22 years**  
Period = 1901 - 2001

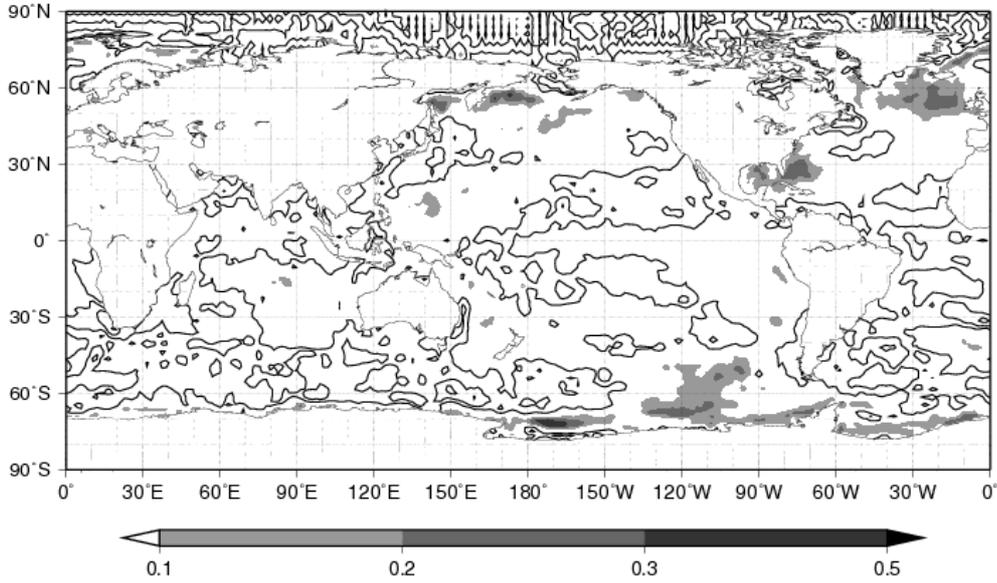


図 61: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+22 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +23 years**  
Period = 1901 - 2001

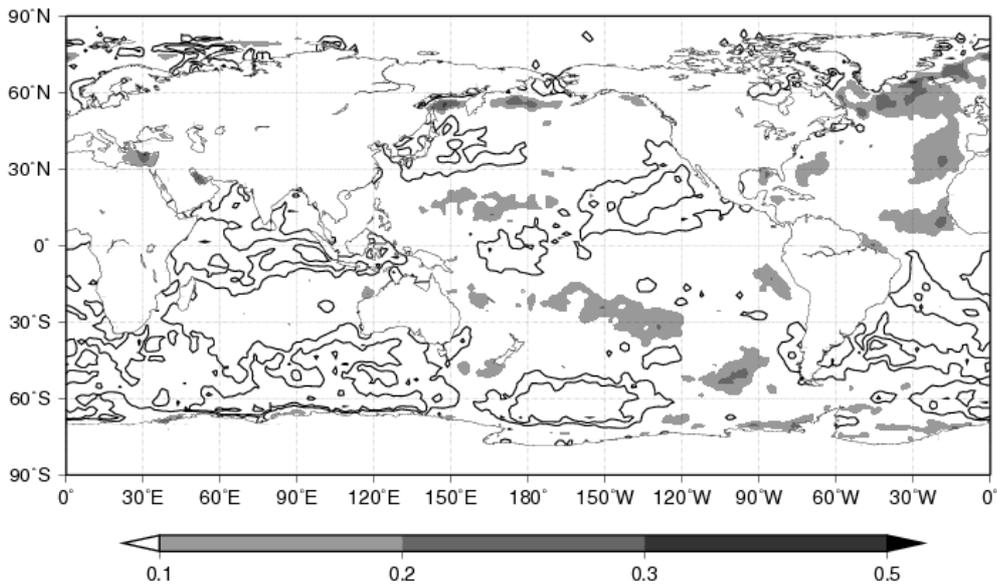


図 62: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+23 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +24 years**  
Period = 1901 - 2001

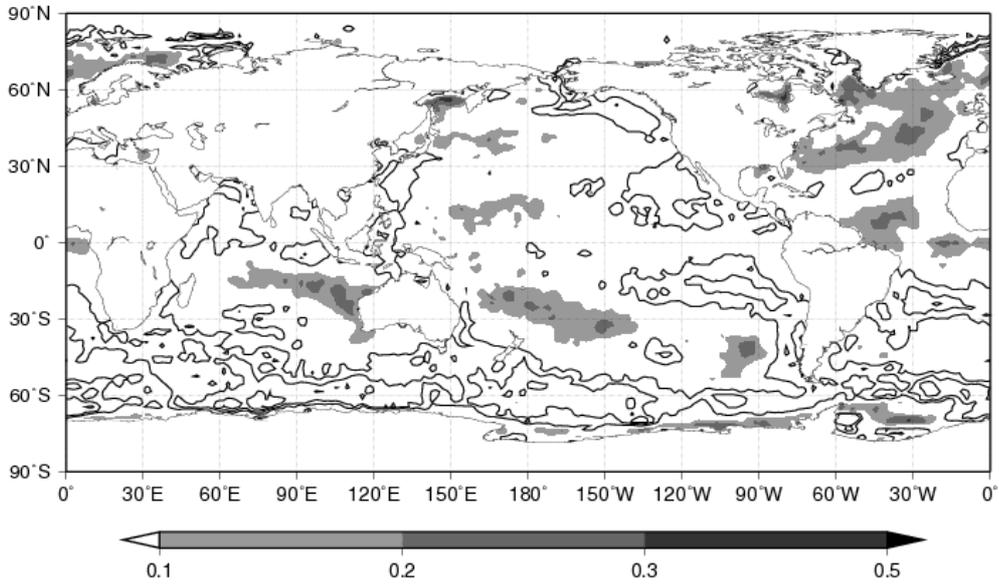


図 63: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+24 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +25 years**  
Period = 1901 - 2001

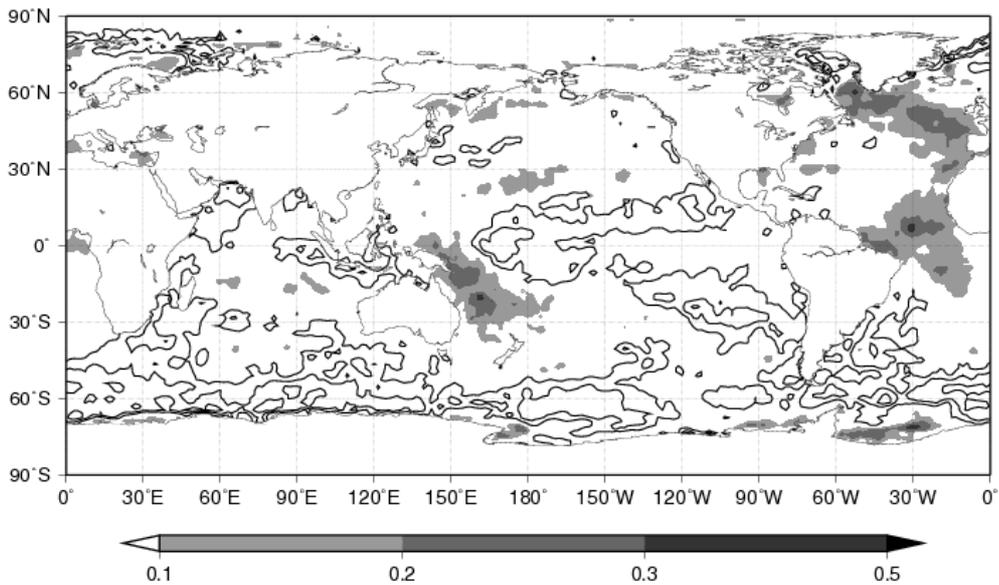


図 64: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+25 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +26 years**  
Period = 1901 - 2001

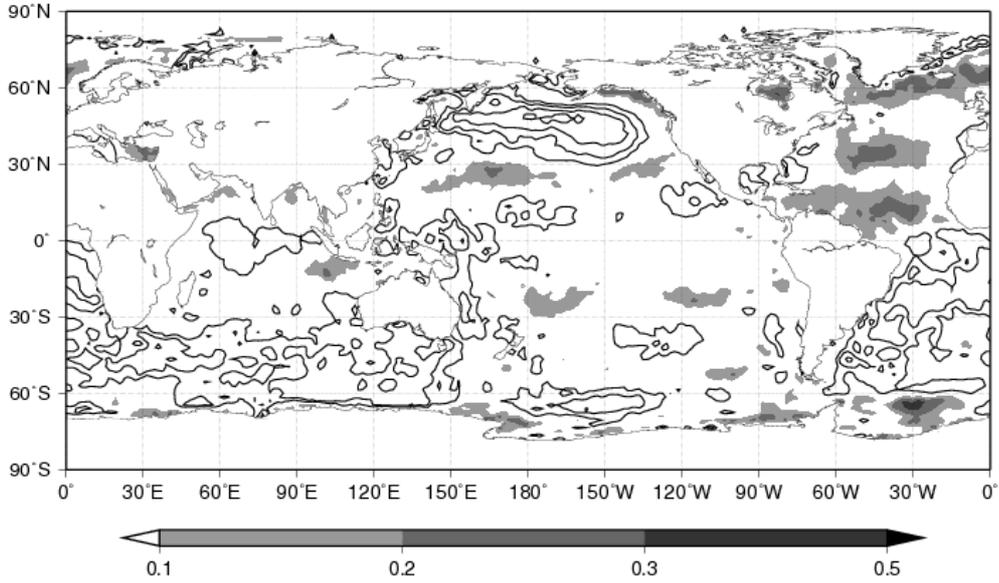


図 65: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+26 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +27 years**  
Period = 1901 - 2001

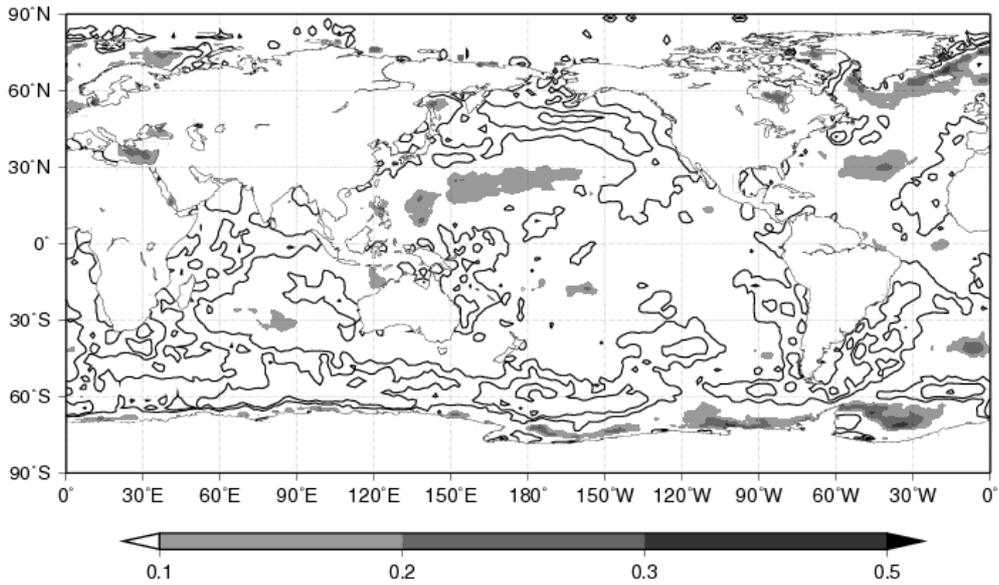


図 66: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+27 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +28 years**  
Period = 1901 - 2001

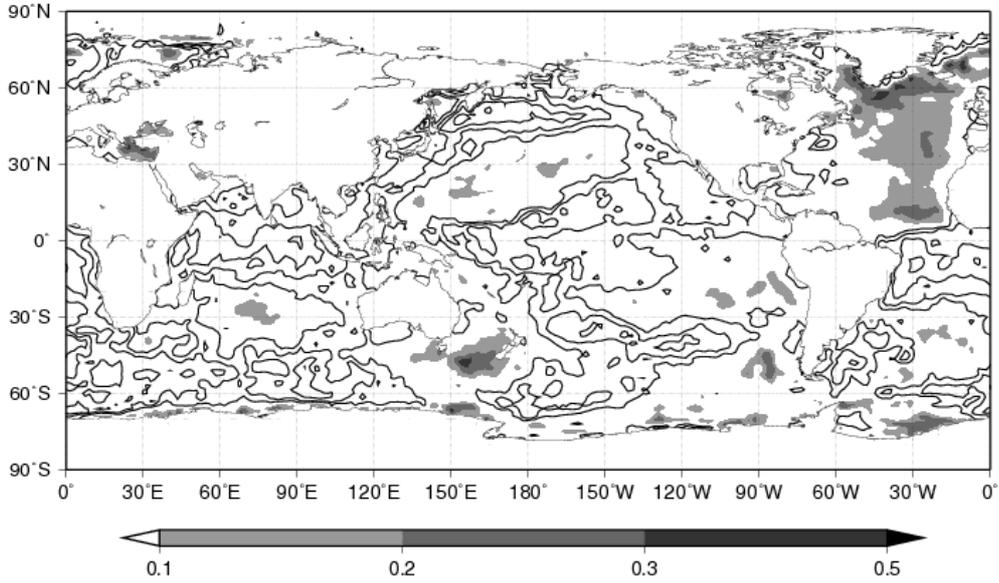


図 67: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+28 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +29 years**  
Period = 1901 - 2001

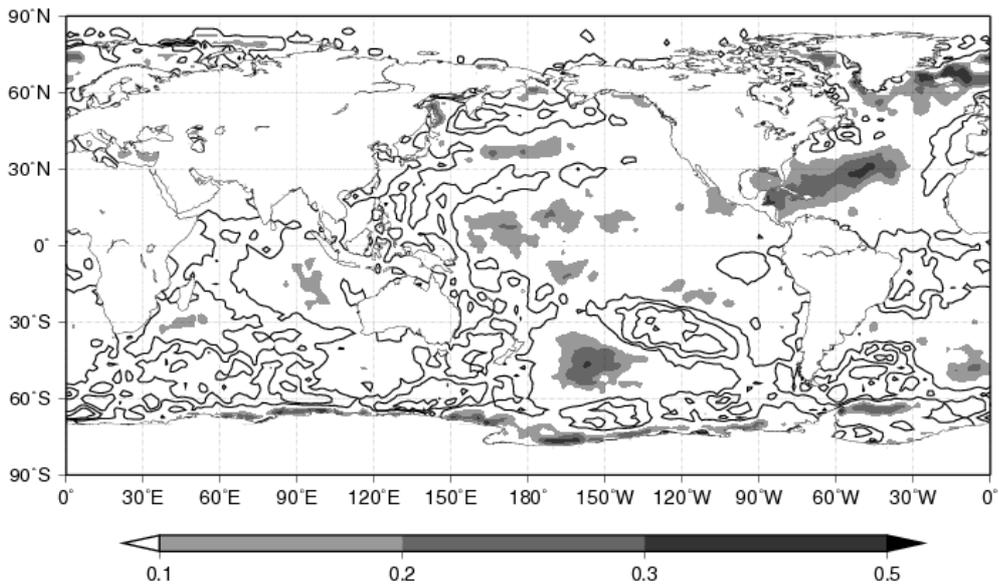


図 68: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+29 年).

***Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST +30 years***  
Period = 1901 - 2001

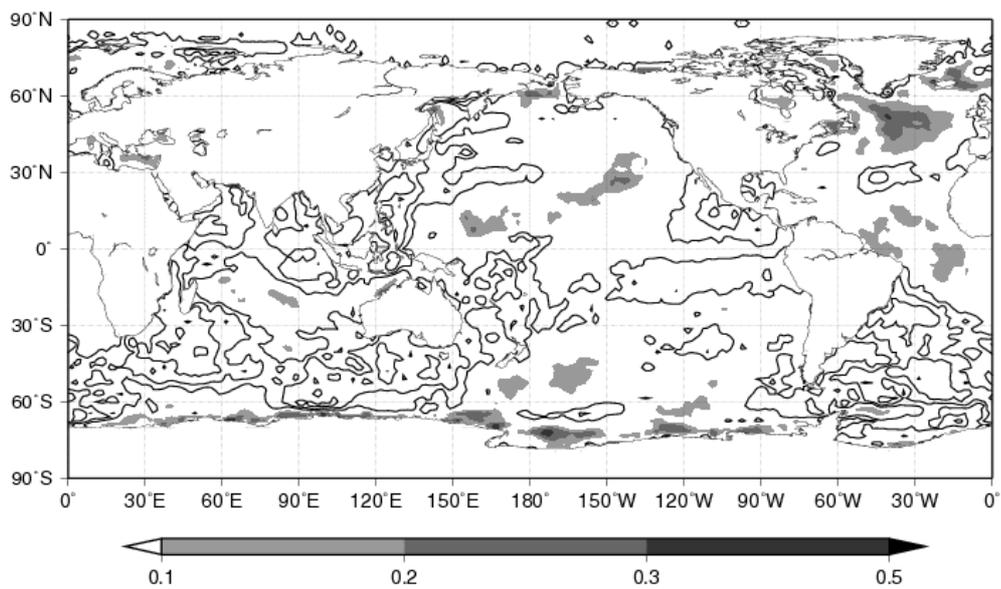


図 69: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (+30 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -1 years**  
Period = 1901 - 2001

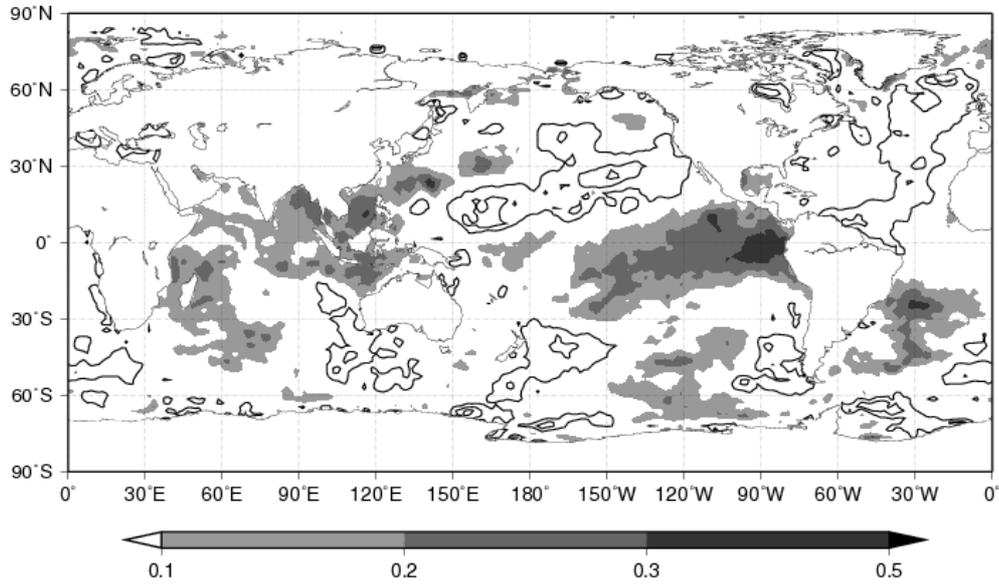


図 70: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-1 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -2 years**  
Period = 1901 - 2001

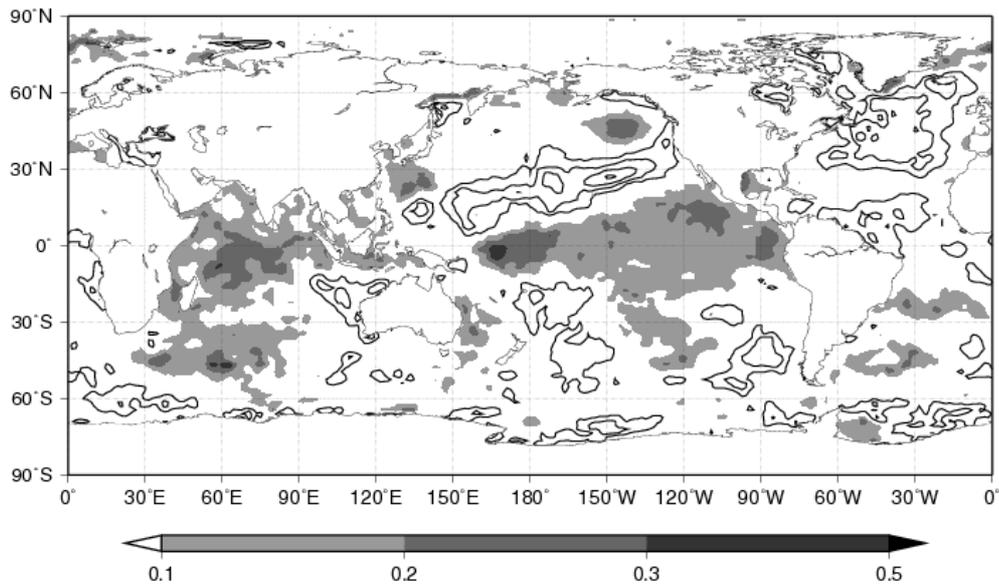


図 71: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-2 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -3 years**  
Period = 1901 - 2001

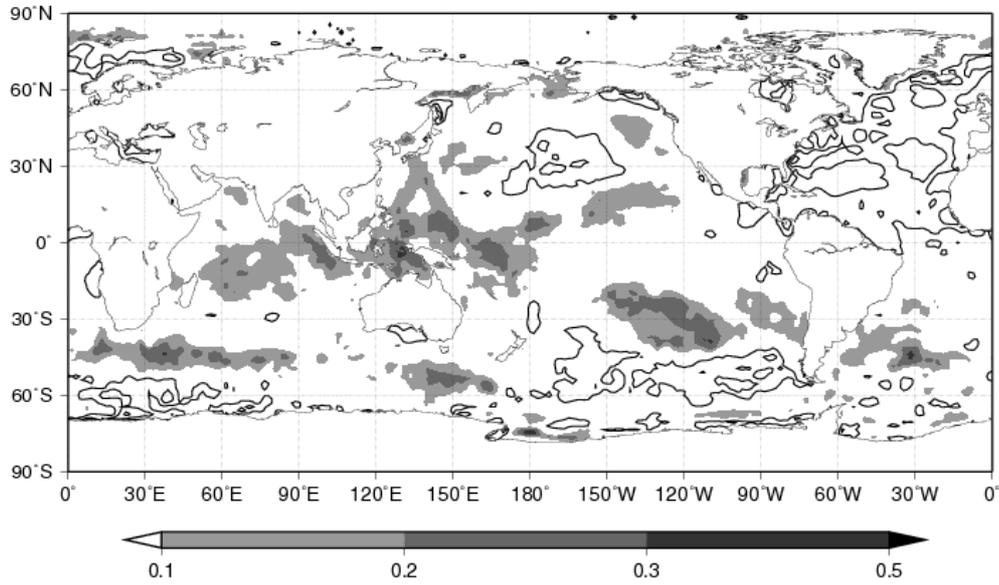


図 72: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-3 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -4 years**  
Period = 1901 - 2001

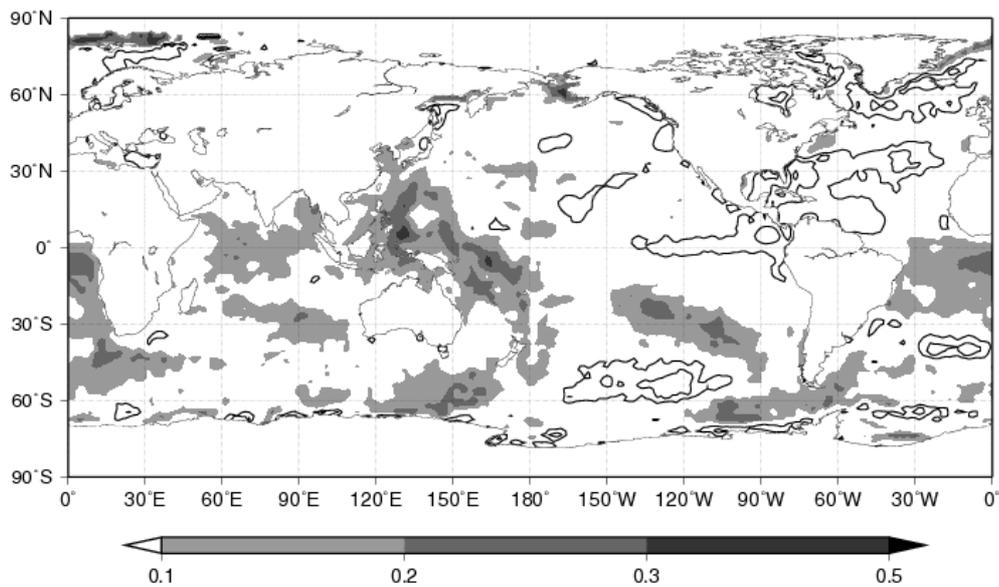


図 73: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-4 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -5 years**  
Period = 1901 - 2001

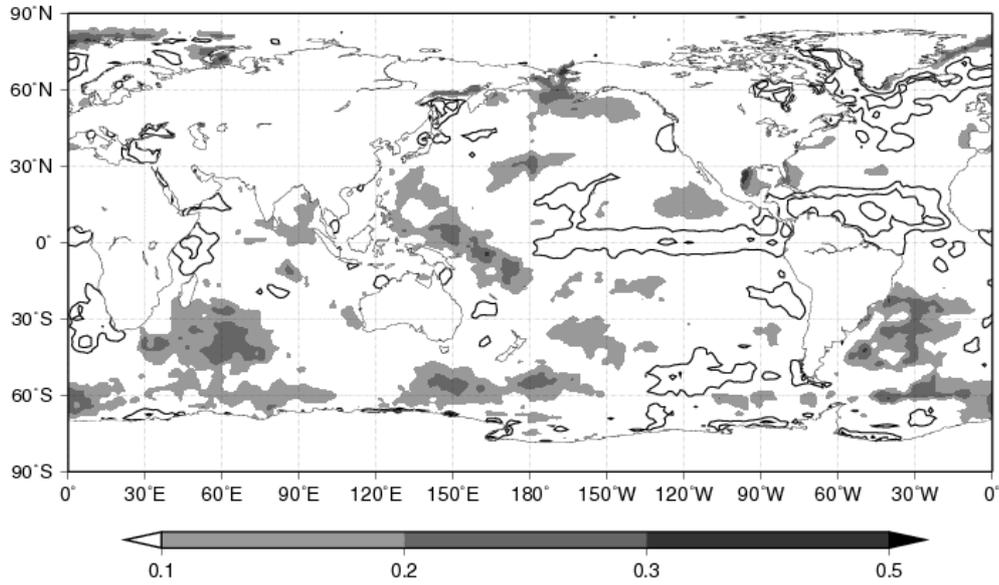


図 74: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-5 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -6 years**  
Period = 1901 - 2001

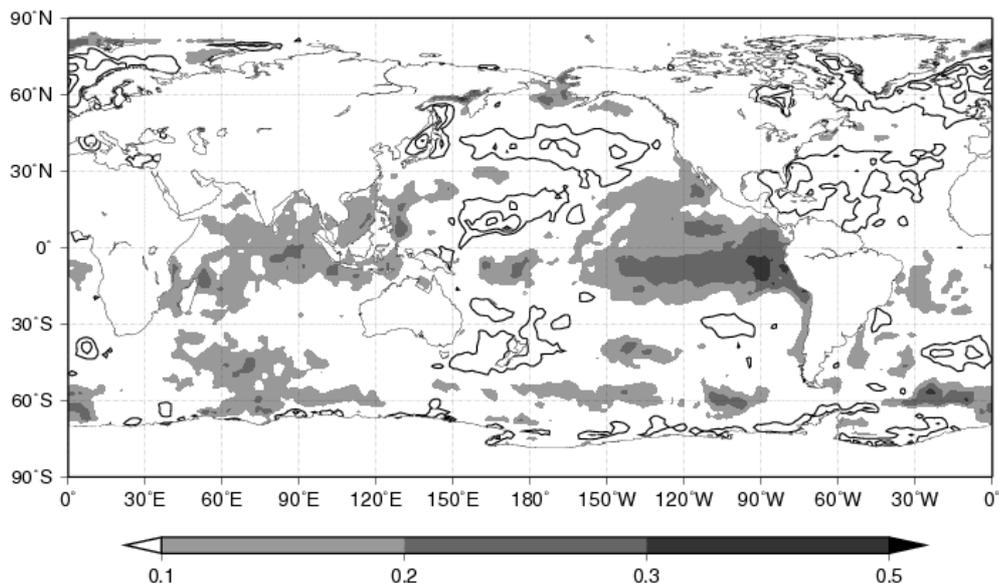


図 75: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-6 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -7 years**  
Period = 1901 - 2001

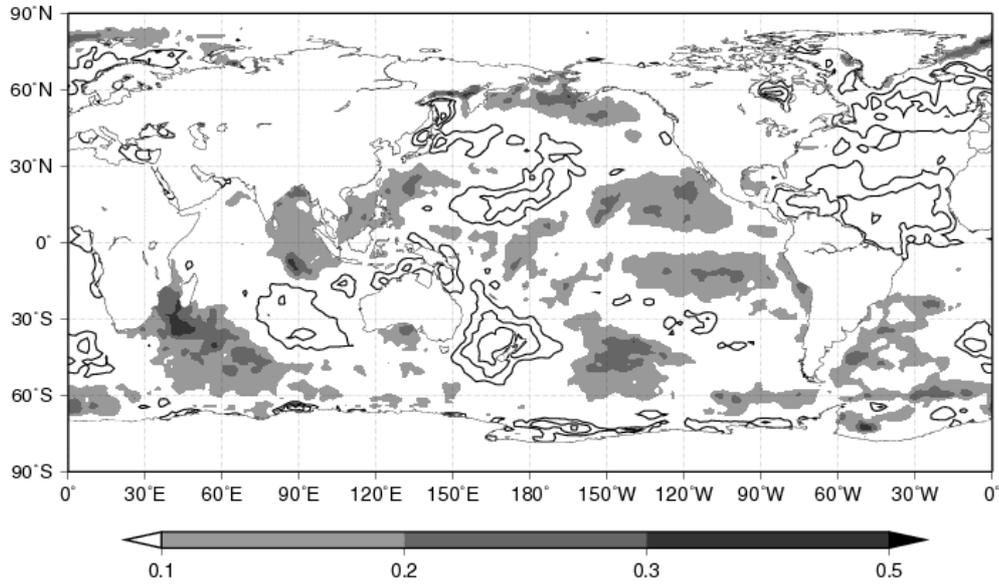


図 76: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-7 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -8 years**  
Period = 1901 - 2001

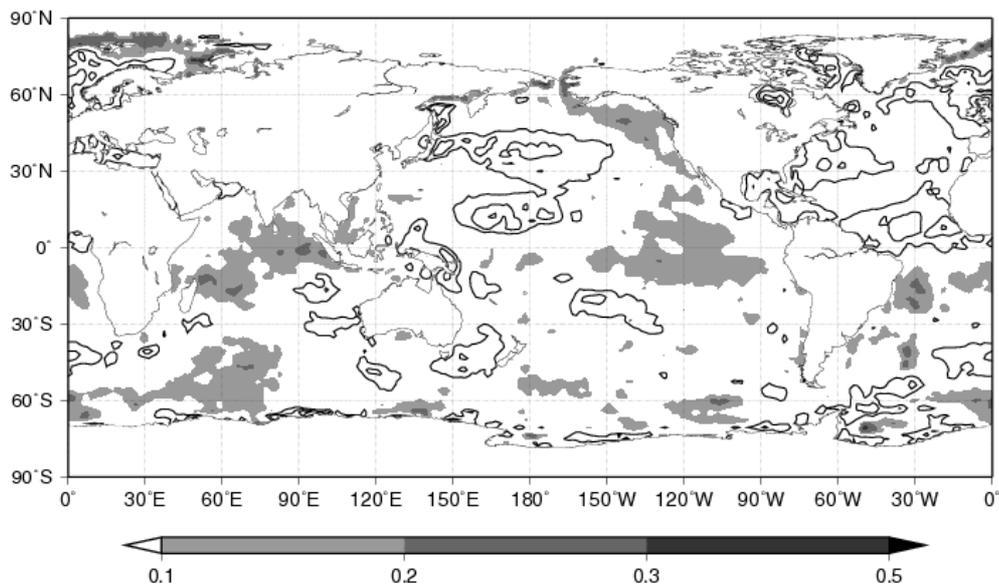


図 77: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-8 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -9 years**  
Period = 1901 - 2001

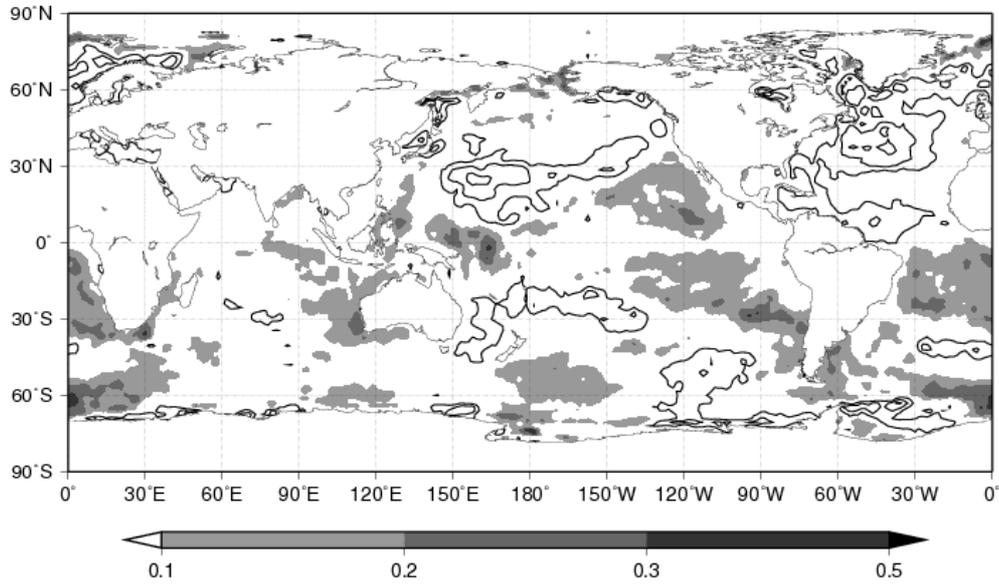


図 78: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-9 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -10 years**  
Period = 1901 - 2001

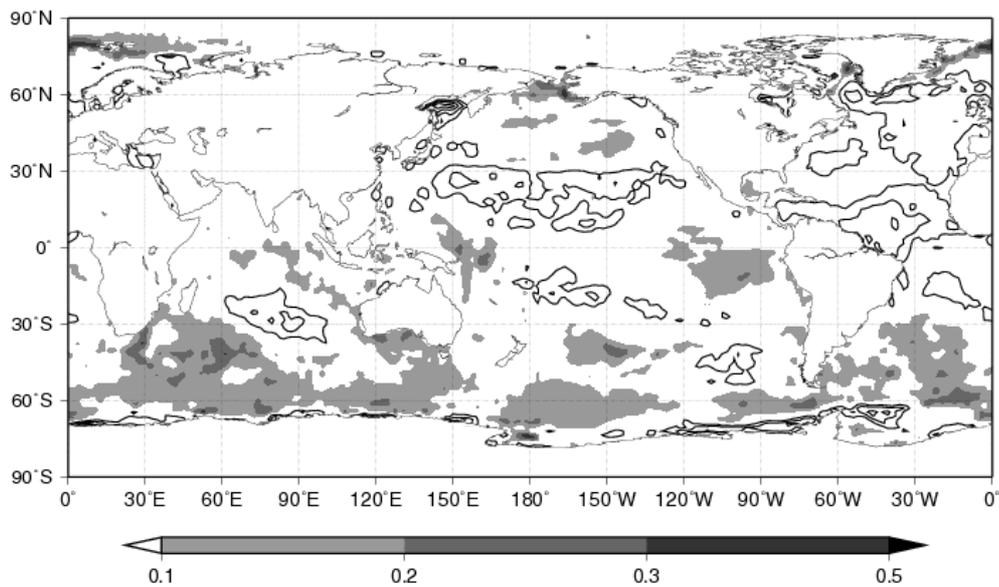


図 79: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-10 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -11 years**  
Period = 1901 - 2001

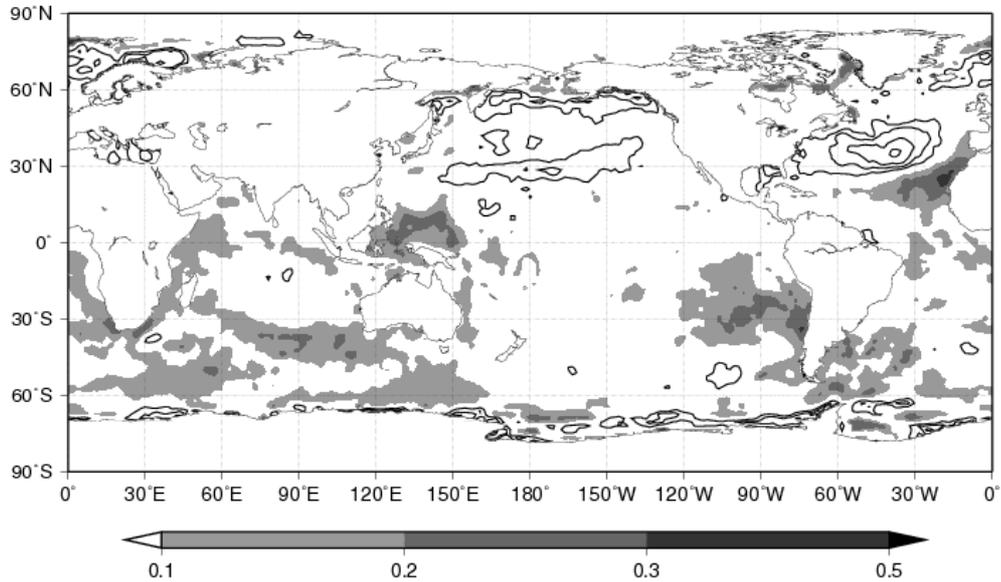


図 80: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-11 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -12 years**  
Period = 1901 - 2001

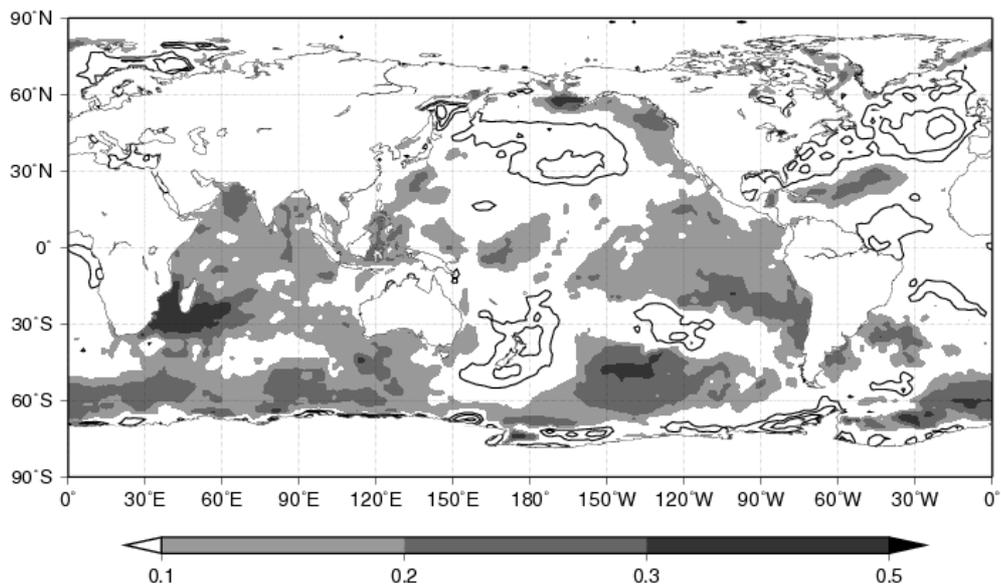


図 81: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-12 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -13 years**  
Period = 1901 - 2001

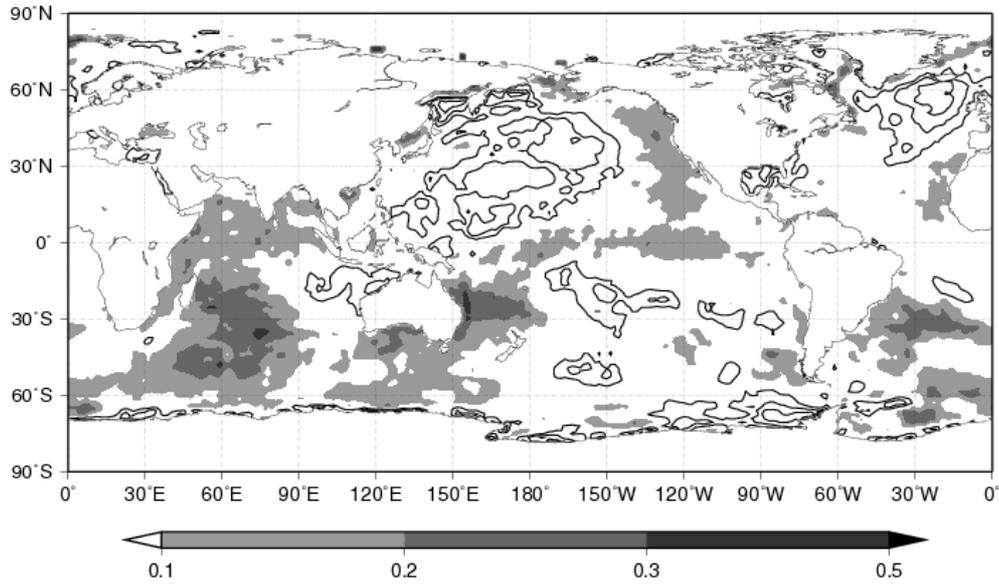


図 82: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-13 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -14 years**  
Period = 1901 - 2001

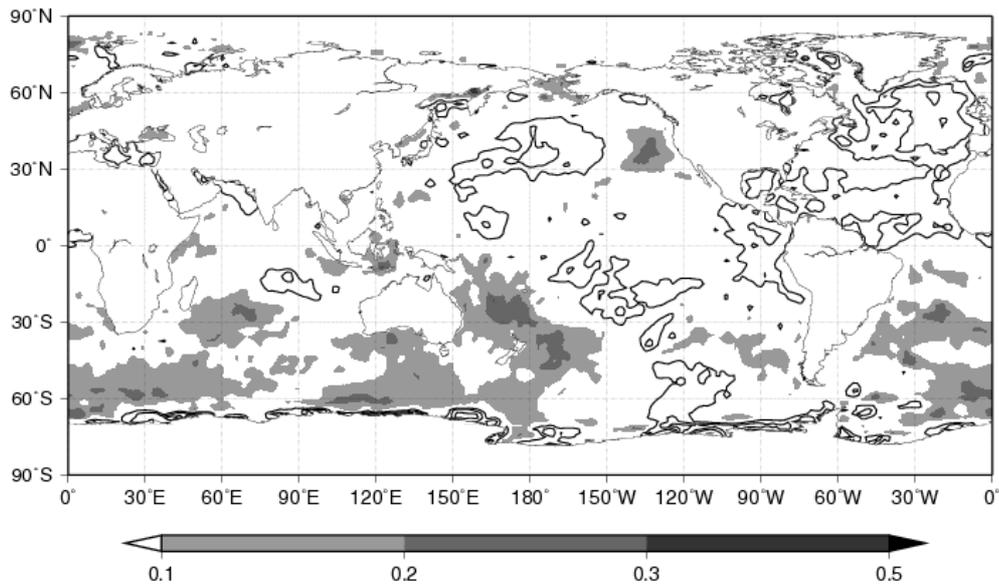


図 83: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-14 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -15 years**  
Period = 1901 - 2001

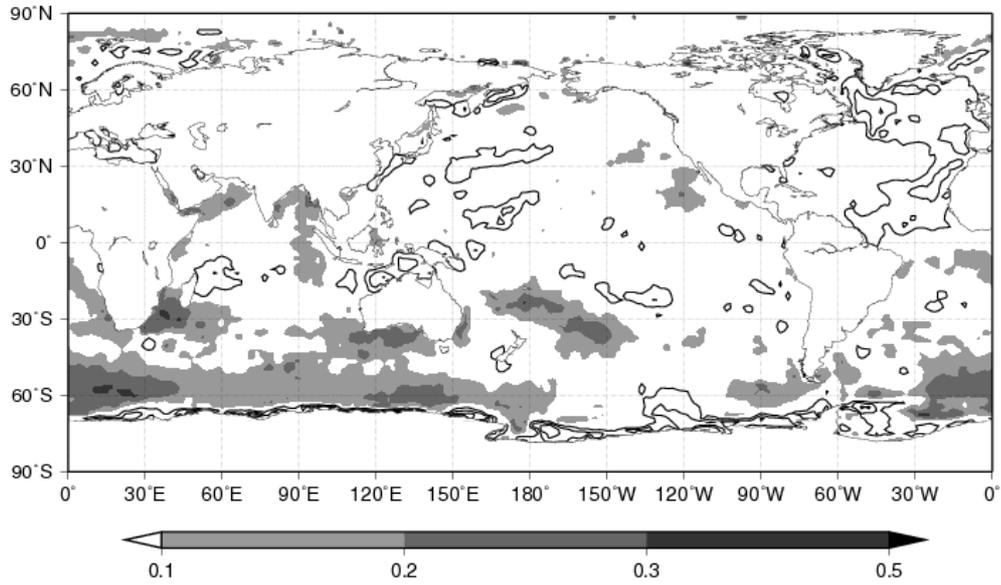


図 84: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-15 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -16 years**  
Period = 1901 - 2001

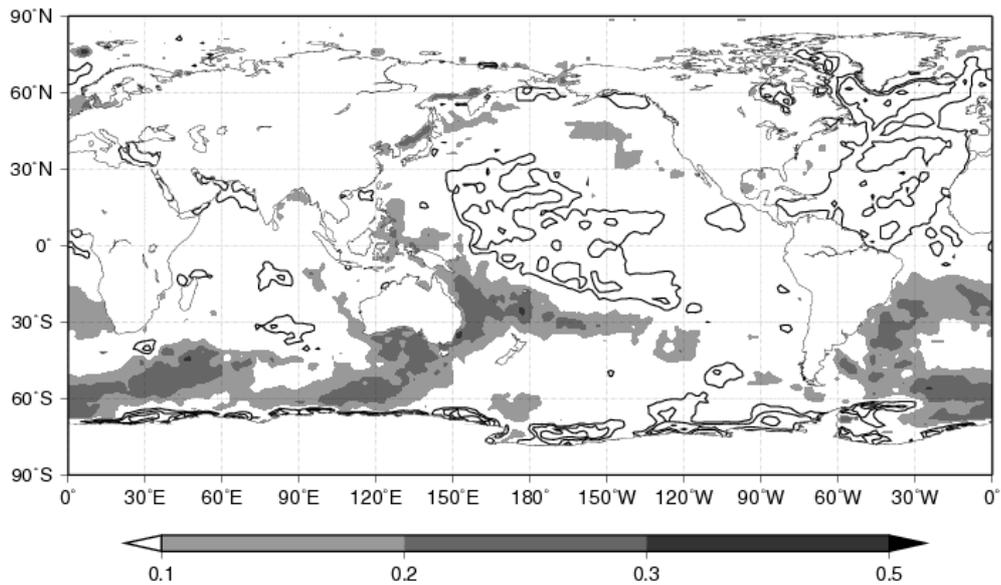


図 85: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-16 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -17 years**  
Period = 1901 - 2001

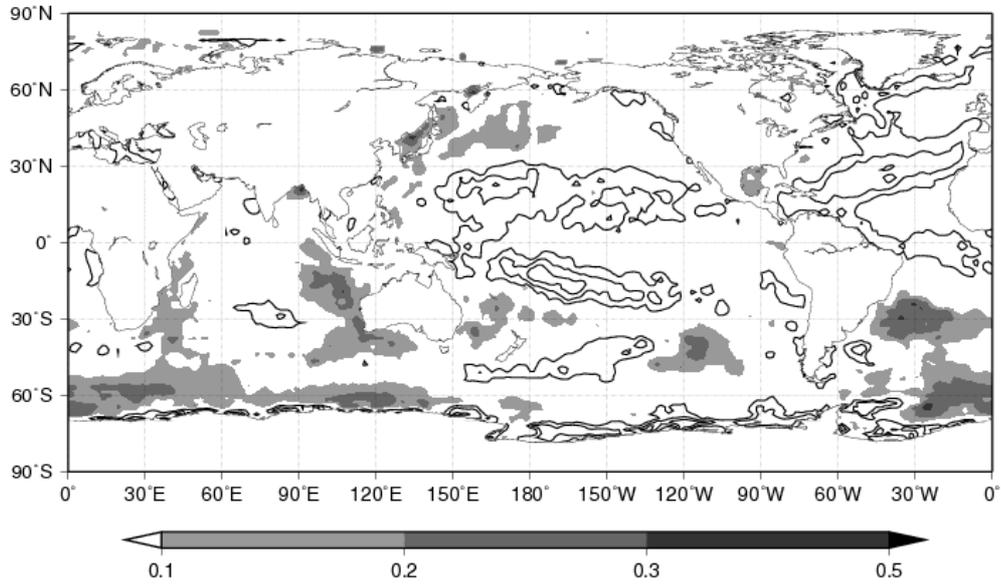


図 86: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-17 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -18 years**  
Period = 1901 - 2001

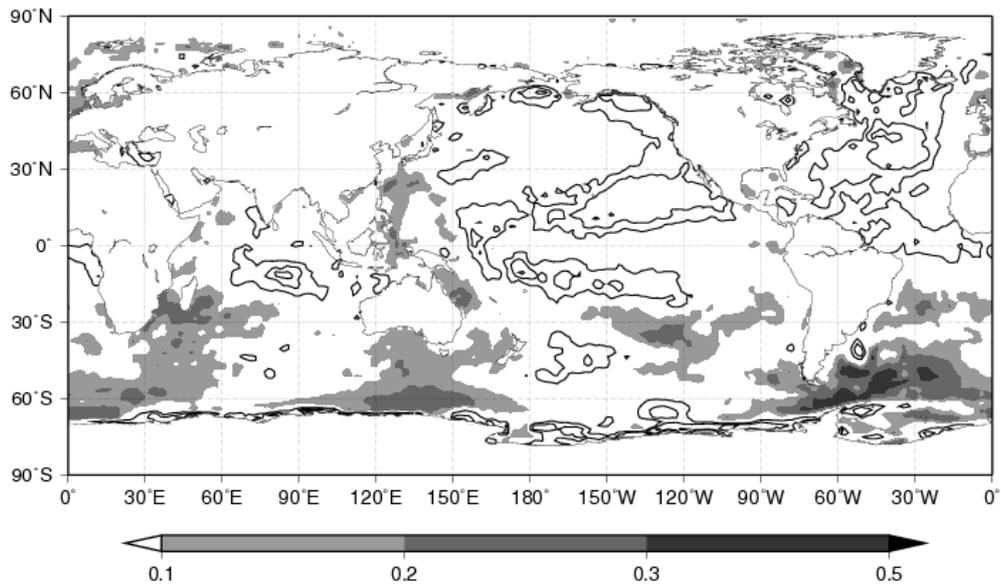


図 87: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-18 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -19 years**  
 Period = 1901 - 2001

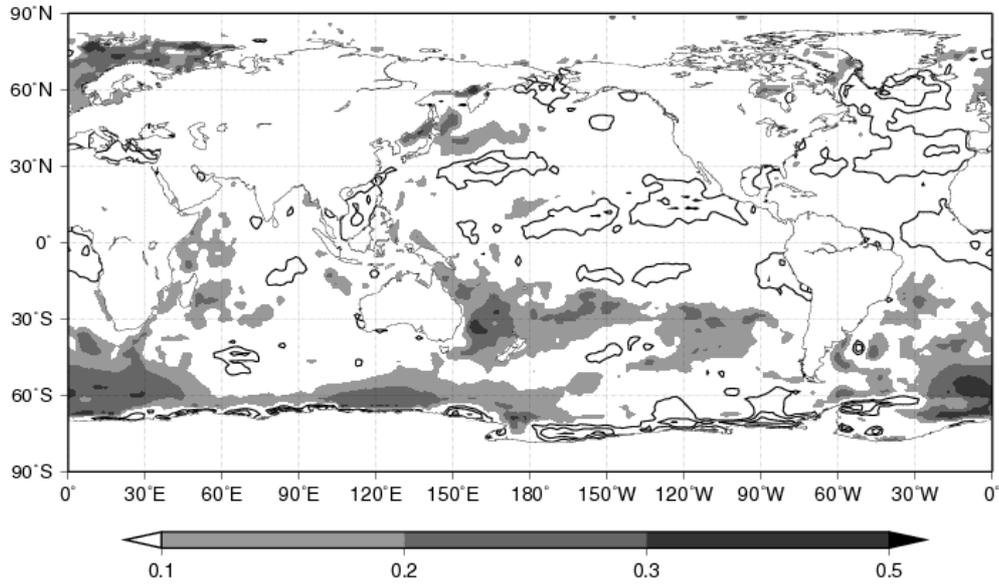


図 88: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-19 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -20 years**  
 Period = 1901 - 2001

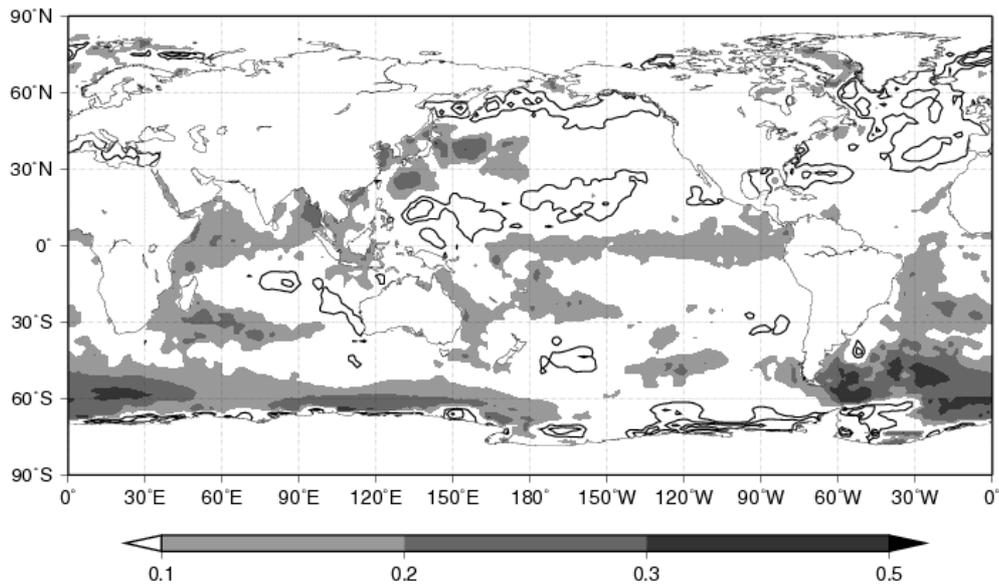


図 89: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-20 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -21 years**  
Period = 1901 - 2001

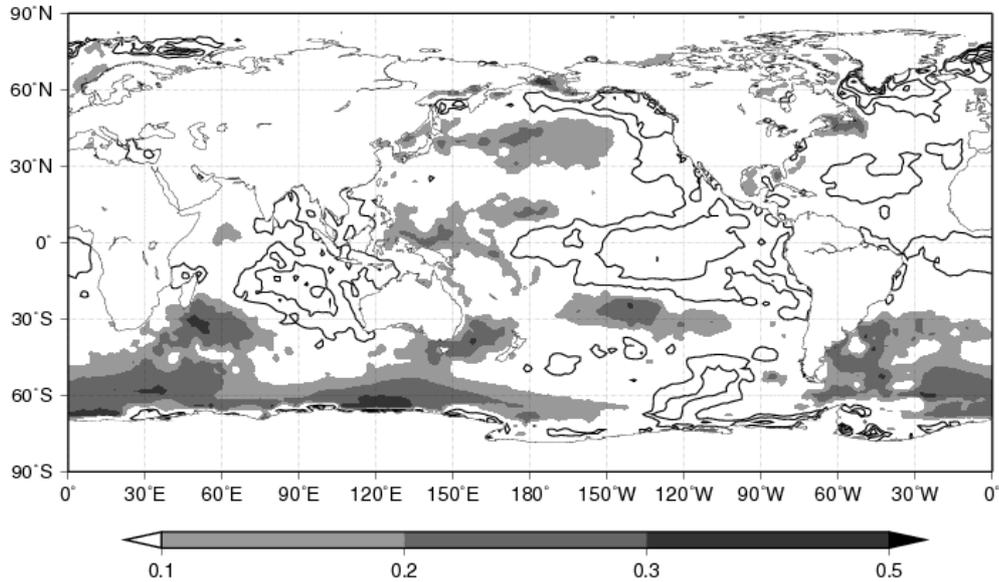


図 90: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-21 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -22 years**  
Period = 1901 - 2001

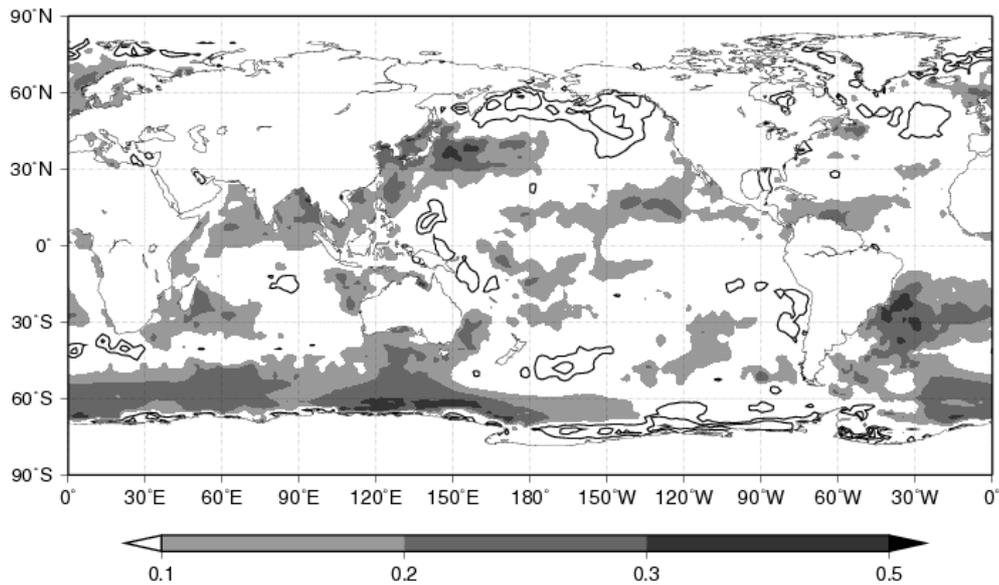


図 91: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-22 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -23 years**  
Period = 1901 - 2001

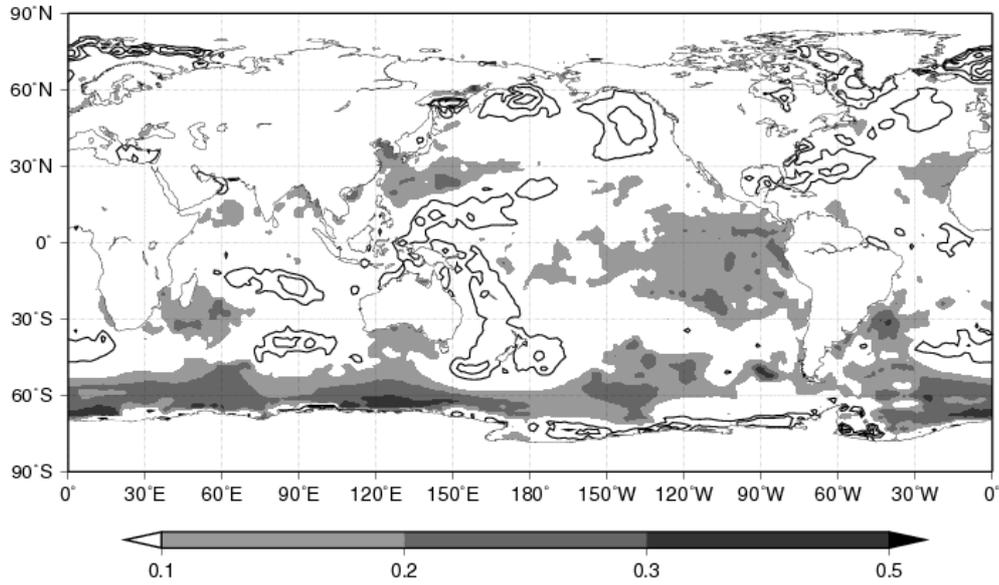


図 92: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-23 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -24 years**  
Period = 1901 - 2001

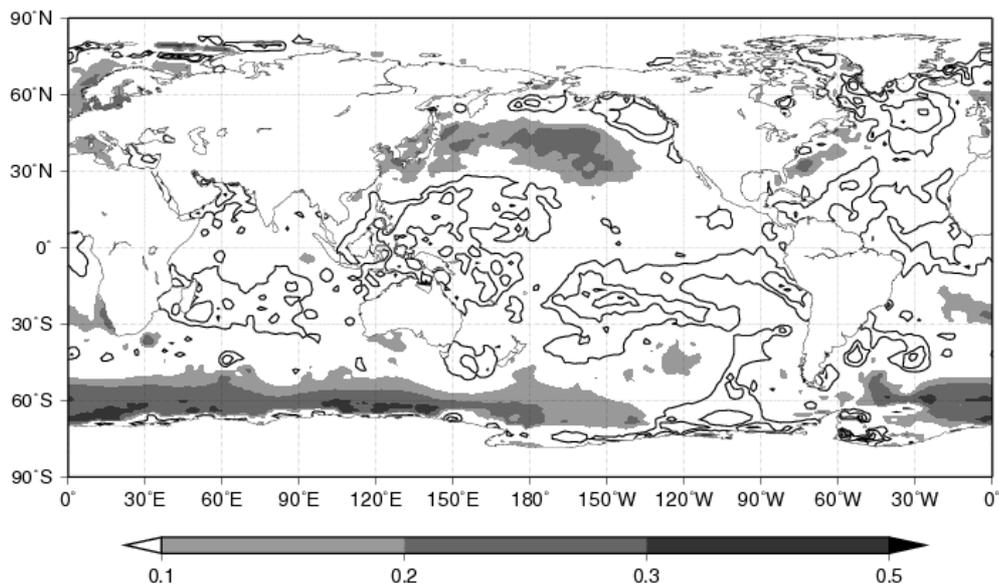


図 93: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-24 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -25 years**  
Period = 1901 - 2001

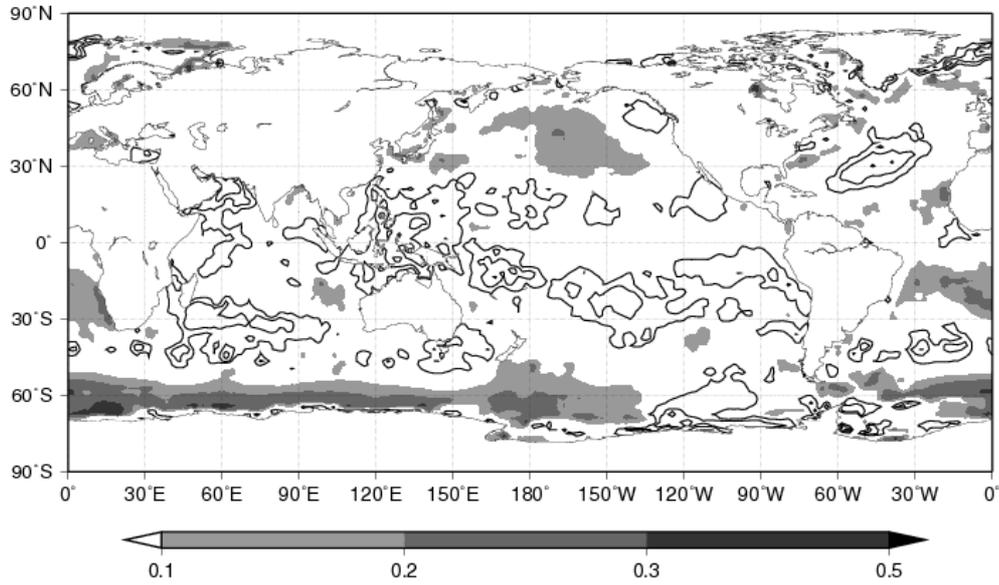


図 94: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-25 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -26 years**  
Period = 1901 - 2001

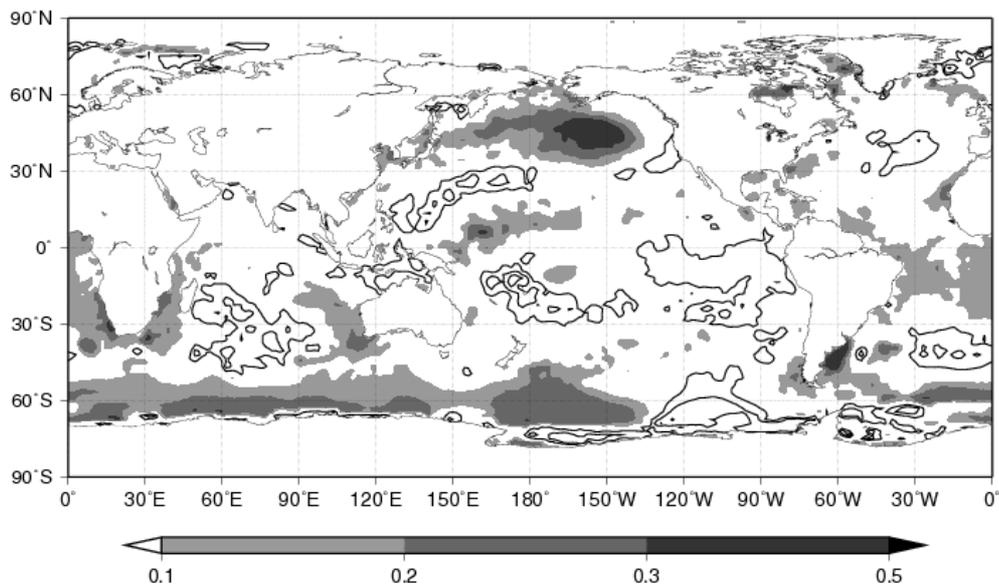


図 95: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-26 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -27 years**  
Period = 1901 - 2001

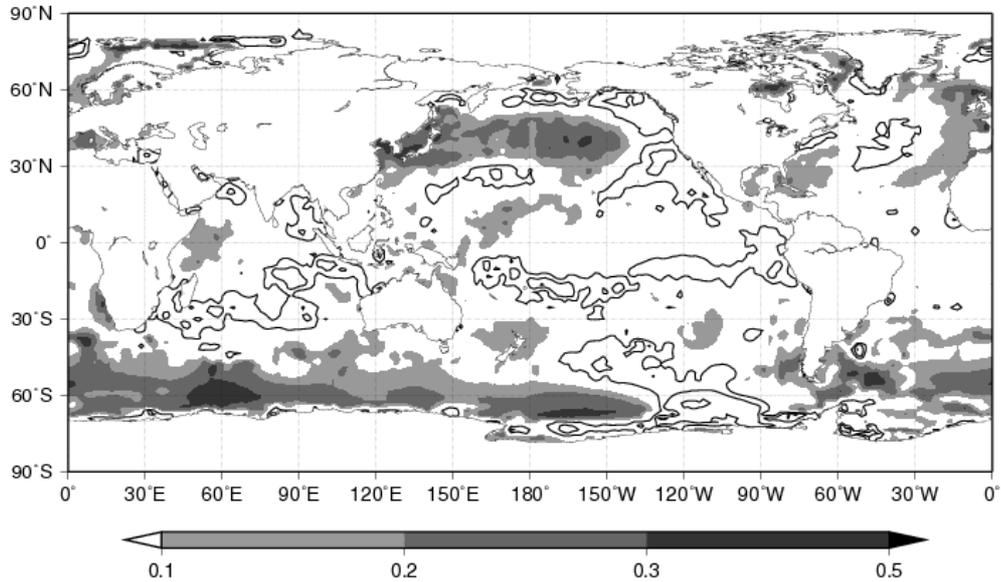


図 96: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-27 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -28 years**  
Period = 1901 - 2001

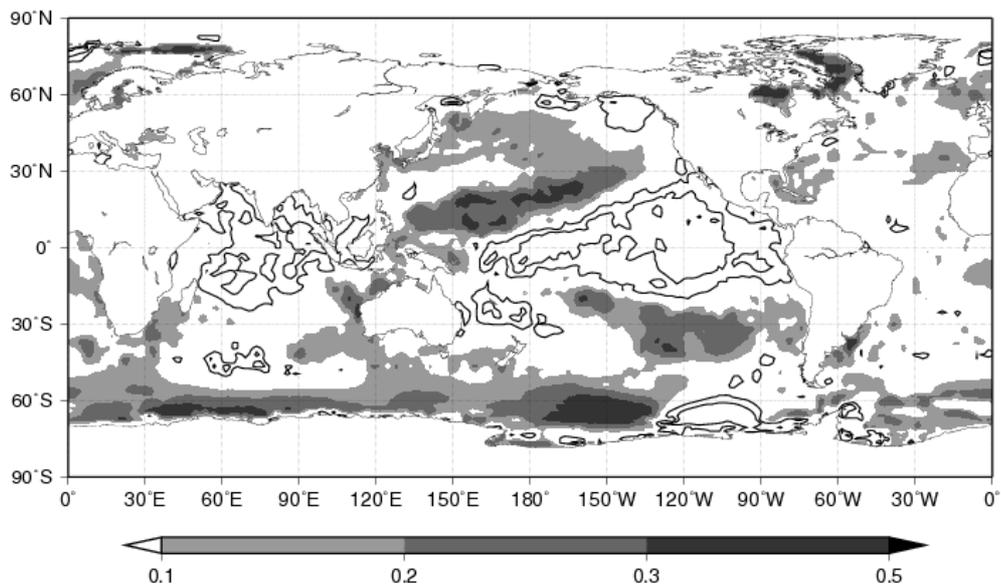


図 97: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-28 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -29 years**  
Period = 1901 - 2001

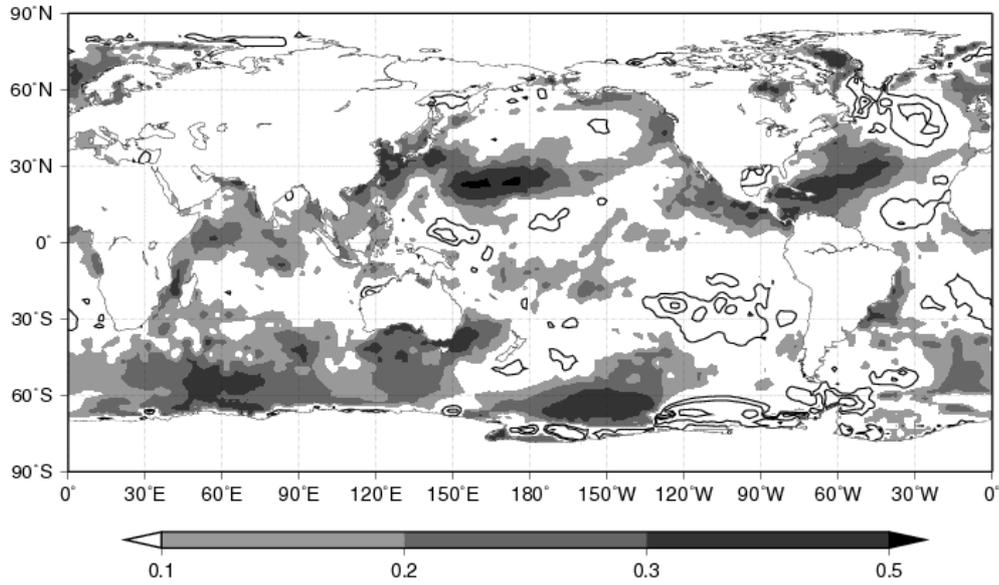


図 98: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-30 年).

**Lag Correlation AOI with Monthly Mean SST -30 years**  
Period = 1901 - 2001

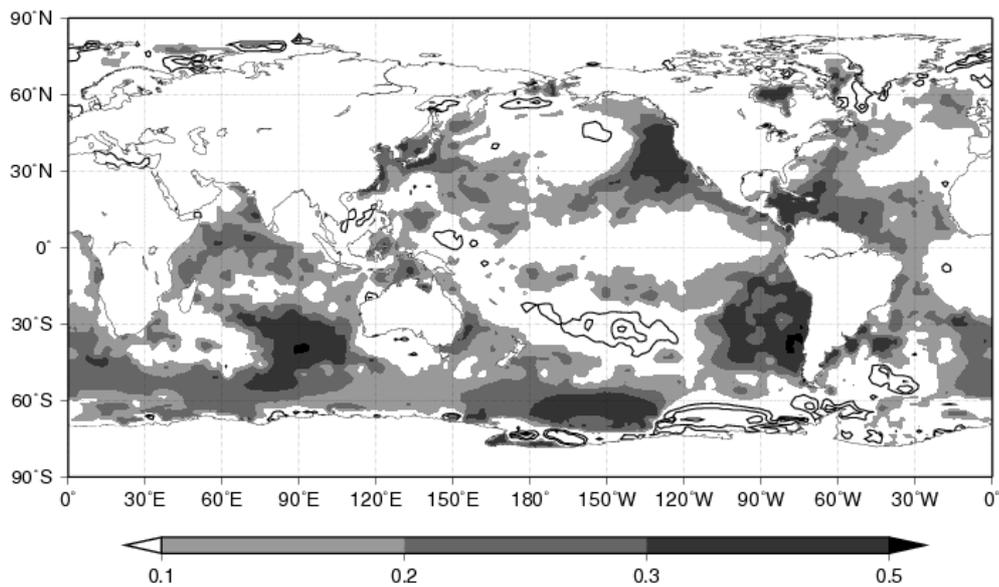


図 99: DJF 平均された AOI と SST の年ごとのラグ相関 (-30 年).