

北半球の大気と海洋における 長周期変動のラグ相関解析

2016年1月

新井 一 永

北半球の大気と海洋における 長周期変動のラグ相関解析

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

新井一永

Lag correlation Analysis of Long-term Atmospheric and Oceanic Variations in the Northern Hemisphere

Kazunaga ARAI

Abstract

Global Warming is a phenomenon that average temperature rises in global scale. The cause is a large amount of greenhouse gas emissions since the industrial revolution. By Global Warming, sea level rise and the increase in extreme weather events have occurred. A greenhouse gas has increased, but Global Warming has stopped since 2000 years. This phenomenon is called a hiatus phenomenon of Global Warming. It is said that the La Nina like pattern in the Pacific is the cause, and the heat is collected in the Atlantic deep ocean. However, those are still being discussed.

There are the natural variability of the atmosphere, and the natural variability of the ocean. Arctic Oscillation(AO) is the natural variability of the atmosphere. AO is EOF1 of Sea Level Pressure(SLP)-anomaly on the poleward of 20° N. A fluctuation of SLP-anomaly becomes reverse around 60° N. When AO Index(AOI) is positive, SLP is minus-anomaly around north pole, and plus anomaly in mid-latitude. Surface Air Temperature(SAT) is minus anomaly around Greenland, and plus anomaly in Siberia to Europe and north west of Canada. Pacific Decadal Oscillation(PDO) is the natural variability of the ocean. PDO is EOF1 of Sea Surface Temperature(SST)-anomaly on the poleward of 20° N. A fluctuation of the North and South SST-anomaly becomes reverse in the Northern Hemisphere. PDO has the cycle of multi-decadal. It is said that hiatus of Global Warming is same as the pattern of PDO. The Japan Meteorological Agency uses NINO3 to examine the El Nino phenomenon. NINO3 is from 5° N to 5° S, from 150° W to 90° W. The difference between NINO3 and the standard value is NINO3 index.

In this study, correlation of natural variation in AO and North Pacific was examined. First, mutual correlation function was used for those indices. Next, lag maps were made using AOI and SST. In term of the time series which the high frequencies of the spectrum density, AOI- lead PDOI, and NINO3 lead AOI. Thus I have come to the conclusion that the long term wave(like PDO) leads the Atmosphere, and short term

wave (like NINO3) lead the Atmosphere.

Key Words: Arctic Oscillation, Pacific Decadal Oscillation, NINO3, Hiatus of global warming, Lag correlation, Mutual correlation 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 再解析データ	4
3.2 各指数データ	4
3.3 観測データ	5
4 解析手法	6
4.1 EOF 解析	6
4.2 相関係数	9
4.3 偏相関係数	9
4.4 相関関数	10
4.4.1 自己相関関数	10
4.4.2 相互相関関数	11
5 結果	13
5.1 時系列データのラグ相関解析の結果	13
5.1.1 時系列とパワースペクトル	13
5.1.2 相互相関とコヒーレンス・フェイズ	14
5.2 AOI と SST のラグマップの結果	16
5.2.1 MAM(春) のラグマップ	16
5.2.2 JJA(夏) のラグマップ	17
5.2.3 SON(秋) のラグマップ	18
5.2.4 DJF(冬) のラグマップ	18
5.2.5 ALL(全季節) のラグマップ	19
5.2.6 偏相関係数を用いた+5 年の強い正相関の要因の解明	19

6	まとめと考察	20
6.1	時系列データのラグ相関解析	20
6.1.1	時系列データから見られる各自然変動の特徴	20
6.1.2	各指数の先導関係について	20
6.2	AOI と SST を用いた北太平洋周辺のラグマップ	21
6.2.1	ラグマップから見られる周期性	22
6.2.2	ラグマップから見られる先導関係	22
6.2.3	+5 年の赤道付近の正相関	22
6.3	大気と北太平洋 SST との関係性	23
7	結論	25
	謝辞	26
	参考文献	27

図 目 次

1	AO プラスの概念図	29
2	AO マイナスの概念図	29
3	AO プラスにおける SLP 偏差の分布図	30
4	AO プラスにおける SAT 偏差の分布図	30
5	PDO プラスの概念図	31
6	PDO マイナスの概念図	31
7	各指数の時系列データ	32
8	AOI のパワースペクトル	33
9	PDOI のパワースペクトル	33
10	NINO3 のパワースペクトル	34
11	AOI と PDOI の長周期のパワースペクトル	35
12	AOI と NINO3 の長周期のパワースペクトル	36
13	AOI- と PDOI の相互相関	37
14	AOI- と NINO3 の相互相関	37
15	AOI- と PDOI のコヒーレンスとフェイズ	38
16	AOI- と NINO3 のコヒーレンスとフェイズ	39
17	AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (0 年)	40
18	AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (+1 年)	40
19	AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (+2 年)	41
20	AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (+3 年)	41
21	AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (+4 年)	42
22	AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (+5 年)	42
23	AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (+6 年)	43
24	AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (+7 年)	43
25	AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (+8 年)	44
26	AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (+9 年)	44
27	AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (+10 年)	45
28	AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (+11 年)	45
29	AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (+12 年)	46
30	AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (+13 年)	46
31	AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (-1 年)	47
32	AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (-2 年)	47

33	AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (-3 年)	48
34	AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (-4 年)	48
35	AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (-5 年)	49
36	AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (-6 年)	49
37	AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (-7 年)	50
38	AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (-8 年)	50
39	AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (-9 年)	51
40	AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (-10 年)	51
41	AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (-11 年)	52
42	AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (-12 年)	52
43	AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (-13 年)	53
44	AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (0 年)	54
45	AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (+1 年)	54
46	AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (+2 年)	55
47	AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (+3 年)	55
48	AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (+4 年)	56
49	AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (+5 年)	56
50	AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (+6 年)	57
51	AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (+7 年)	57
52	AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (+8 年)	58
53	AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (+9 年)	58
54	AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (+10 年)	59
55	AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (+11 年)	59
56	AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (+12 年)	60
57	AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (+13 年)	60
58	AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (-1 年)	61
59	AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (-2 年)	61
60	AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (-3 年)	62
61	AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (-4 年)	62
62	AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (-5 年)	63
63	AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (-6 年)	63
64	AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (-7 年)	64
65	AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (-8 年)	64
66	AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (-9 年)	65

67	AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (-10 年)	65
68	AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (-11 年)	66
69	AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (-12 年)	66
70	AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (-13 年)	67
71	AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (0 年)	68
72	AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (+1 年)	68
73	AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (+2 年)	69
74	AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (+3 年)	69
75	AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (+4 年)	70
76	AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (+5 年)	70
77	AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (+6 年)	71
78	AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (+7 年)	71
79	AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (+8 年)	72
80	AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (+9 年)	72
81	AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (+10 年)	73
82	AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (+11 年)	73
83	AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (+12 年)	74
84	AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (+13 年)	74
85	AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (-1 年)	75
86	AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (-2 年)	75
87	AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (-3 年)	76
88	AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (-4 年)	76
89	AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (-5 年)	77
90	AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (-6 年)	77
91	AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (-7 年)	78
92	AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (-8 年)	78
93	AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (-9 年)	79
94	AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (-10 年)	79
95	AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (-11 年)	80
96	AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (-12 年)	80
97	AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (-13 年)	81
98	AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (0 年)	82
99	AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (+1 年)	82
100	AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (+2 年)	83

101	AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (+3 年)	83
102	AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (+4 年)	84
103	AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (+5 年)	84
104	AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (+6 年)	85
105	AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (+7 年)	85
106	AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (+8 年)	86
107	AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (+9 年)	86
108	AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (+10 年)	87
109	AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (+11 年)	87
110	AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (+12 年)	88
111	AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (+13 年)	88
112	AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (-1 年)	89
113	AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (-2 年)	89
114	AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (-3 年)	90
115	AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (-4 年)	90
116	AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (-5 年)	91
117	AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (-6 年)	91
118	AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (-7 年)	92
119	AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (-8 年)	92
120	AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (-9 年)	93
121	AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (-10 年)	93
122	AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (-11 年)	94
123	AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (-12 年)	94
124	AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (-13 年)	95
125	AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (0 年)	96
126	AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (+1 年)	96
127	AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (+2 年)	97
128	AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (+3 年)	97
129	AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (+4 年)	98
130	AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (+5 年)	98
131	AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (+6 年)	99
132	AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (+7 年)	99
133	AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (+8 年)	100
134	AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (+9 年)	100

135	AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (+10 年)	101
136	AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (+11 年)	101
137	AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (+12 年)	102
138	AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (+13 年)	102
139	AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (-1 年)	103
140	AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (-2 年)	103
141	AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (-3 年)	104
142	AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (-4 年)	104
143	AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (-5 年)	105
144	AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (-6 年)	105
145	AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (-7 年)	106
146	AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (-8 年)	106
147	AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (-9 年)	107
148	AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (-10 年)	107
149	AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (-11 年)	108
150	AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (-12 年)	108
151	AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (-13 年)	109

1 はじめに

地球温暖化とは、産業革命以降徐々に進行してきた地球規模での温暖化現象の事である。その原因は人為起源による温室効果ガスの大量排出であり、温暖化の割合は北極域で特に顕著である (IPCC 2013; Trenberth and Fasullo 2013)。しかし 21 世紀に入り、温室効果ガスの濃度は上昇を続けているのにも関わらず、地球規模での温暖化の速度は停滞を始めた。この地球温暖化の停滞を温暖化の hiatus と呼ぶ (Easterling and Wehner 2009; Meehl et al. 2011 など)。この温暖化の hiatus は、IPCC-AR5 の元となった CMIP5 実験においても正確な再現はされなかった (Watanabe et al. 2013)。温暖化の hiatus の原因はラニーニャ的なパターンに伴う海洋の熱吸収であると言われており (Kosaka and Xie 2013)、冬季に最も顕著である (Trenberth et al. 2014)。また、Chen et al. (2014) は温暖化の hiatus におけるエネルギーのインバランスは、大西洋の深海に蓄積されていると指摘している。遡って 1940-1970 年にかけて気温の上昇が停滞しており、その際も貿易風が強い状態であった (Thompson et al. 2014)。

北半球における数十年スケールの主な自然変動は、大きく分けて 3 パターンに分類できる。1 つ目は大気の変動で最も卓越する北極振動 (Arctic Oscillation: AO) である (Thompson and Wallace 1998)。AO は、北緯 20 度以北の海面更正気圧 (Sea Level Pressure: SLP) 偏差を経験的直交関数 (Empirical Orthogonal Function: EOF) 展開した第一主成分 (EOF1) で定義され、SLP 偏差の変動が北緯 60 度を挟んで逆相関になる現象である (図 1, 図 2)。AO 指数 (AO Index: AOI) が正の時、気圧場は北極域で負偏差、中緯度で正偏差となり、気温場はグリーンランド周辺で低温偏差、シベリアからヨーロッパにかけてとカナダ北西部で高温偏差となる (図 3, 図 4)。残り 2 つの自然変動は、海面水温 (Surface Air Temperature: SST) の変動として卓越する太平洋十年規模振動 (Pacific Decadal Oscillation: PDO) と、大西洋数十年規模振動 (Atlantic Multidecadal Oscillation: AMO) である。PDO とは北太平洋において北緯 20 度以北の SST 偏差の EOF1 として定義され、SST 偏差の変動が北半球において南北に逆相関 (図 5, 図 6) になる現象である (Mantua et al. 1997)。PDO は十年規模の周期を持ち、近年の PDO 負偏差に伴う赤道太平洋でのラニーニャ的なパターンが温暖化の hiatus を引き起こしている (Watanabe et al. 2014) として注目されている。ここでラニーニャ現象とは、太平洋赤道域の日付変更線付近から、南米のペルー沿岸にかけての海域において、海面水温が平年に比べて低くなり、その状態が 1 年程度続く現象を指す。なお、偏差がこの逆パターンとなる現象をエルニーニョ現象という。気象庁ではこの現象の定義を東太平洋赤道域の海域である NINO3 を用いて行っている。次に AMO とは、トレンドを除去した北大西洋の SST 偏差の 10 年移動平均として定義され、海面水温が 70 年から

80 年周期で温暖期と寒冷期を繰り返す現象である (Enfield et al. 2001). AMO の主なメカニズムは大西洋熱塩循環である (Dima and Lohmann 2006).

北半球における自然変動の相互作用を調べる事は、北半球の気候変動や気候の応答を理解する上で重要である.

Kumar and Hoerling(2003) は太平洋東部熱帯域における SST と大気応答の相関に着目し, SST 偏差が1ヶ月から3ヶ月のタイムラグを持って大気の応答を先導していると述べた. また, Alexander et al.(2002) では, 赤道付近の SST 偏差はハドレー循環やウォーカー循環等を介した「大気の橋」を通じて, 北太平洋の大気海洋循環に影響を及ぼす事を示した. これに関連して, Jia et al.(2009) は, 太平洋熱帯域の強制力が AO にもたらす影響を求め, SST が AO を約3ヶ月のラグを持って先導している事を示した. このように長周期変動においては海洋が大気を先導するという多くの結果が得られており, Trenberth et al.(1998) においても, モデル内の冬季熱帯領域, および黒潮・親潮領域の SST が60日遅れてアリューシャン低気圧に影響を与えている事を示した.

一方で, Schneider and Cornuelle(2005) ではアリューシャン低気圧の強弱が PDO の形成に寄与している事を示した. また, Sun and Wang(2006) では AO と PDO の関係を解析し, AO が6年から10年 PDO を先導していると述べた.

以上の結果を踏まえ, 加藤 (2011) では, AO, PDO, AMO の3つの自然変動において時系列解析を行い, AO が, PDO を16ヶ月先導し, AMO を11ヶ月先導している事を示し, Sun and Wang (2006) の結果を支持した.

2 目的

本研究では、加藤(2011)で行われた手法を参考に、まずは気象庁の誇る最新の再解析データである JRA-55 を用いて作成した 1958 年 1 月-2014 年 12 月までの各月の AOI と、The Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean(JISAO) による PDOI、気象庁による NINO3 の各指数を用いて、自己相関・相互相関解析を行う。これにより、各時系列データにおいて、どの周波数の波が卓越しているのか、どの周波数帯で相関(コヒーレンス)が高く、またその周波数帯において両指数にどれ程の位相ズレ(フェイズ)が存在するのかを解明する。

次に、JRA-55 による AOI と、英国気象局 (United Kingdom Met Office: UKMO) 気象研究部ハドレーセンターの海面水温データである Hadley Centre Sea Ice and Sea Surface Temperature(HadISST) data set を用いて、北半球太平洋周辺におけるラグマップを作成する。ラグマップとは、AOI に対して海面水温データに-13 年~+13 年のタイムラグを与えて、各タイムラグごとの相関係数を表示した地図の事である。これにより、先に解析した自己相関・相互相関解析による周期振動などの特徴が整合的であるかを判断する事が出来るし、また AOI と SST が実際にどれ程のタイムラグでどういった相関分布を持つのかを可視化し判断する事が可能となる。加えて、ここに偏相関係数を用いる事で、擬似相関を棄却し、AOI に対して PDOI か NINO3 のどちらがそのラグの相関分布に主に寄与しているのかを求める。

上記の手順により、温暖化の hiatus の主な要因と考えられる北太平洋における海洋の自然変動と、北半球における大気の支配的なモードである AO の間に存在するタイムラグや相関分布を明らかにし、北太平洋周辺において大気と海洋がどういった関係性を持つのかを定量的に評価する事を、本研究の目的とする。

3 使用データ

3.1 再解析データ

過去の全球における気温場や風，放射フラックスや海水域といった様々な物理量を知る方法に「再解析」がある．これは，これまでに蓄積された多様な観測データを用いて，最新の数値予報モデルで再度解析を行う事で様々な物理量を再現する手法であり，これにより長期間にわたる高品質かつ均質なデータセットを作成する事が可能となる．気象庁と(財)電力中央研究所は，兼ねてより JRA project を実施し，アジア初となった長期の再解析プロダクトである JRA-25 を公開してきたが，対象期間の拡張や解像度の向上といったアップグレード版が JRA-55 であり，その期間はラジオゾンデによる定時観測ネットワークが確立された 1958 年以降を対象としている．

再解析データには他にも NOAA 環境予測センターと米国大気研究センターによる NCEP/NCAR や，ヨーロッパ中期気象予報センターによる ERA-interim などがある．

本研究では，日本の誇る最新の長期再解析データである JRA-55 を用いて実験を行った．利用データの詳細は以下の表に示す．

データ名	気象庁 55 年長期再解析 (JRA-55)
水平解像度	1.25 ° × 1.25 °
鉛直解像度	1000, 975, 950, 925, 900, 875, 850, 825, 800, 775, 750, 700, 650, 600, 550, 500, 450, 400, 350, 300, 250, 225, 200, 175, 150, 125, 100, 70, 50, 30, 20, 10, 7, 5, 3, 2, 1hPa の 37 層
気象要素	海面更正気圧 (SLP) 月平均値
使用期間	1958/1 - 2014/12

3.2 各指数データ

- AOI

AOI は JRA-55 で作成した．この際に，夏季においては北緯 20 度以北で EOF 解析を行っても，北極域で低圧偏差，それを取り囲むように周極域で高圧偏差となる AO の構造は現れない．夏季は元々分散が小さく，夏季の AO を再現するには季節変化を考慮した北極振動 (Seasonal Variations of the Northern Hemisphere Annular Mode: SV-NAM) を用いる必要がある (Ogi et al, 2004)．その手法は北緯 40 度以北で EOF 解析を行うというものであり，これにより全ての月，季節を通して AO の構造が現れる．よって全季節の AO を扱う場合は 40 度以北で定義した AOI を用いる事も考えられる

が、本研究では Thompson and Wallace(1998) により定義された AO を用いた。従って条件を統一するために、夏季の AO に関しても北緯 20 度以北の値を用いて解析を行っているため、本研究における夏季の AO は、厳密には AO の構造を持たない事に留意されたい。

- PDOI

JISAO のデータを用いた。JISAO における PDOI のデータソースは、1900-1981 年が UKMO SST データセット、1982-2001 年が Reynold's Optimally Interpolated SST, 2002 以降が NOAA Optimum Interpolation(OI) SST V2 である。本研究では 1958 年 1 月から 2014 年 12 月までの期間における PDOI を使用した。なお、JISAO とはワシントン大学と NOAA により 1977 年に設置された合同研究所であり、研究教育をその設立目的とする。JISAO では他にも降水量や SST、気候データといった様々なデータセットを提供している。

- NINO3

NINO3 のデータは気象庁のデータを用いた。ここで、NINO3 とは北緯 5 度-南緯 5 度、西経 150 度-西経 90 度までの海域を指し、本海域における基準値との差を NINO3 としている。この際の基準値とは、該当年の 30 年前から前年までの 30 年間の各月の平均値を指す。なお気象庁では、この NINO3 における SST の基準値との差の 5 か月移動平均値が、6 か月以上続いて +0.5 度以上となった場合をエルニーニョ現象、- 0.5 度以下となった場合をラニーニャ現象と定義している。

3.3 観測データ

SST データは UKMO 気象研究部ハドレーセンターの観測データセットより、HadISST を用いる。この HadISST は Global sea Ice and Sea Surface Temperature(GISST) の改訂版であり、全球の海面水温と海水密接度の値を 1870 年より水平格子間隔 1 度 × 1 度で提供している。SST データは、Global Telecommunications System(GTS) の 1982 年以降のデータも含む Met Office Marine Data Bank(MDB) から得られている。データのカバー率を向上させるために、Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set(COADS) による 1871-1995 年の SST の月の中央値も、MDB データが得られない海域では用いられている。HadISST は二段階の最適内挿法を用いて再現されており、海水周辺 SST に関しては、SST と海水密接度との統計的な関係から推測されている。

本研究では、1958 年 1 月～2014 年 12 月の期間における月平均 SST データを用いた。

4 解析手法

4.1 EOF 解析

EOF 解析は、いくつかの地点における時系列データの主要な変動パターンを抽出して変動の特徴を把握するための統計的手法である。本研究では、AOI を計算するために再解析データにこれを施す。

例として各年ごとの冬季の地上気温の偏差を x_t ，水平グリッド数を $N = m \times n$ とする。よって，ある年の地上気温の偏差は，

$$\mathbf{x}_t = (x_t(1) \ x_t(2) \ \cdots \ x_t(N))^T$$

となる。これを各年 $t(t = 1, 2, \dots, T)$ ごとに考えるとデータ行列 \mathbf{X}

$$\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2 \ \cdots \ \mathbf{x}_T) = \begin{pmatrix} x_1(1) & x_2(1) & \cdots & x_T(1) \\ x_1(2) & x_2(2) & \cdots & x_T(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1(N) & x_2(N) & \cdots & x_T(N) \end{pmatrix}$$

となる。このデータ行列 \mathbf{X} に対して分散共分散行列 \mathbf{A} を考えると，

$$\begin{aligned} \mathbf{A} \equiv \frac{1}{T} \mathbf{X} \mathbf{X}^T &= \frac{1}{T} \begin{pmatrix} x_1(1) & x_2(1) & \cdots & x_T(1) \\ x_1(2) & x_2(2) & \cdots & x_T(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1(N) & x_2(N) & \cdots & x_T(N) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(1) & x_1(2) & \cdots & x_1(N) \\ x_2(1) & x_2(2) & \cdots & x_2(N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_T(1) & x_T(2) & \cdots & x_T(N) \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T x_t(1)x_t(1) & \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T x_t(1)x_t(2) & \cdots & \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T x_t(1)x_t(N) \\ \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T x_t(2)x_t(1) & \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T x_t(2)x_t(2) & \cdots & \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T x_t(2)x_t(N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T x_t(N)x_t(1) & \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T x_t(N)x_t(2) & \cdots & \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T x_t(N)x_t(N) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

となる。このとき，緯度による格子の面積の違いを考慮し，各データに対して緯度 θ の重みづけをするため，それぞれの格子点データに $\sqrt{\cos \theta}$ をかけている。この分散共分散行列 \mathbf{A} の固有値問題を解くことにより，固有値 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ と，それに対応する固有ベクトル $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_N$ を得る。 \mathbf{A} は対称行列なので，全ての固有ベクトルを

$|\mathbf{v}_i| = 1$ とすると、固有ベクトルが正規直交系を成すようになる。よって、ある年 t における偏差 \mathbf{x}_t を

$$\mathbf{x}_t = \begin{pmatrix} x_t(1) \\ x_t(2) \\ \vdots \\ x_t(N) \end{pmatrix} = s_1(t)\mathbf{v}_1 + s_2(t)\mathbf{v}_2 + \cdots + s_N(t)\mathbf{v}_N$$

のように正規直交展開することができる。この固有ベクトル \mathbf{v}_i のことをモードと呼び、ある \mathbf{v}_i に対する全ての年の展開係数 $s_i(t) (t = 1, 2, \dots, T)$ をモード i のスコア時系列と呼ぶ。固有ベクトル \mathbf{v}_i は正規化されているため $\|\mathbf{v}_i\|$ は等しいので、スコアの分散が最も大きな項が偏差場に最も影響し、この項の固有ベクトルが最も影響している空間パターンとなる。

さらに、分散共分散行列 \mathbf{A} はその固有ベクトルを列ベクトルとする、行列 $\mathbf{V} = (\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2 \ \cdots \ \mathbf{v}_N)^T$ によって対角化することができる。

$$\mathbf{V}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{V} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & 0 \\ & \lambda_2 & \\ & & \ddots \\ 0 & & & \lambda_N \end{pmatrix}$$

行列 \mathbf{V} は直交行列であるので、 $\mathbf{V}^{-1} = \mathbf{V}^T$ が成り立ち、

$$\mathbf{V}^T\mathbf{A}\mathbf{V} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & 0 \\ & \lambda_2 & \\ & & \ddots \\ 0 & & & \lambda_N \end{pmatrix}$$

となる。ここで、 $\mathbf{A} \equiv \frac{1}{T}\mathbf{X}\mathbf{X}^T$ であるので、

$$\frac{1}{T}\mathbf{V}^T\mathbf{X}\mathbf{X}^T\mathbf{V} = \frac{1}{T}(\mathbf{V}^T\mathbf{X})(\mathbf{V}^T\mathbf{X})^T = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & 0 \\ & \lambda_2 & \\ & & \ddots \\ 0 & & & \lambda_N \end{pmatrix}$$

となる。左辺の $\mathbf{V}^T \mathbf{X}$ は,

$$\begin{aligned}\mathbf{V}^T \mathbf{X} &= (\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2 \ \cdots \ \mathbf{v}_N)^T (\mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2 \ \cdots \ \mathbf{x}_T) \\ &= \begin{pmatrix} \mathbf{v}_1^T \\ \mathbf{v}_2^T \\ \vdots \\ \mathbf{v}_N^T \end{pmatrix} (\mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2 \ \cdots \ \mathbf{x}_T) = \begin{pmatrix} \mathbf{v}_1^T \mathbf{x}_1 & \mathbf{v}_1^T \mathbf{x}_2 & \cdots & \mathbf{v}_1^T \mathbf{x}_T \\ \mathbf{v}_2^T \mathbf{x}_1 & \mathbf{v}_2^T \mathbf{x}_2 & \cdots & \mathbf{v}_2^T \mathbf{x}_T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{v}_N^T \mathbf{x}_1 & \mathbf{v}_N^T \mathbf{x}_2 & \cdots & \mathbf{v}_N^T \mathbf{x}_T \end{pmatrix}\end{aligned}$$

となり, $\mathbf{v}_i^T \mathbf{x}_t = \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{x}_t = s_i(t)$ より,

$$\mathbf{V}^T \mathbf{X} = \begin{pmatrix} s_1(1) & s_1(2) & \cdots & s_1(T) \\ s_2(1) & s_2(2) & \cdots & s_2(T) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_N(1) & s_N(2) & \cdots & s_N(T) \end{pmatrix}$$

となる。よって,

$$\begin{aligned}\frac{1}{T} (\mathbf{V}^T \mathbf{X}) (\mathbf{V}^T \mathbf{X})^T &= \frac{1}{T} \begin{pmatrix} s_1(1) & s_1(2) & \cdots & s_1(T) \\ s_2(1) & s_2(2) & \cdots & s_2(T) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_N(1) & s_N(2) & \cdots & s_N(T) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1(1) & s_2(1) & \cdots & s_N(1) \\ s_1(2) & s_2(2) & \cdots & s_N(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_1(T) & s_2(T) & \cdots & s_N(T) \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T s_1(t)s_1(t) & \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T s_1(t)s_2(t) & \cdots & \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T s_1(t)s_N(t) \\ \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T s_2(t)s_1(t) & \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T s_2(t)s_2(t) & \cdots & \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T s_2(t)s_N(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T s_N(t)s_1(t) & \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T s_N(t)s_2(t) & \cdots & \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T s_N(t)s_N(t) \end{pmatrix}\end{aligned}$$

となり, スコアの分散が固有値となることがわかる。つまり, 固有値 λ_i が最も大きいモードに対応する固有ベクトル \mathbf{v}_i が EOF-1 となる。また, 固有値の大きい方から順に $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_N$ とした時

$$\frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_i + \cdots + \lambda_N} \times 100(\%)$$

が EOF-i の寄与率となる。

4.2 相関係数

あるデータ間における相関の強さを求める統計学の手法であり、以下の式で表される。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

変数 x と y の共分散をそれぞれの標準偏差で割ったもので、単位は持たない。相関係数は-1~1の間の値を取り、一般的な強さの目安としては、0.4~0.7で「相関あり」、それを上回る場合は「強い相関あり」の関係を持つ。

ここで、相関係数の二乗の操作である r^2 を決定係数、または寄与率と呼び、独立変数 x が従属変数 y をどれだけ説明出来るのか、どれほどの原因となっているのかを表す。

4.3 偏相関係数

例えば変数 x, y, z がある場合に、 x と y の相関がどれ程高くても、実はその両者には因果関係はなく、その相関を z が発生させているという可能性が考えられる。

こうした見かけ上の擬似相関を考慮し、ある一つの変数の影響を取り除いた他の二つの変数の相関係数を求める手法が、偏相関係数である。偏相関係数は以下の式で表される。

$$r_{xy \cdot z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{1 - r_{xz}^2} \sqrt{1 - r_{yz}^2}}$$

上式は変数 z の影響を取り除いた、 x と y の偏相関係数を求める式である。偏相関係数の範囲は相関係数と同じく-1~1の値を取る。

偏相関係数の考え方として、平面上の散布図における回帰直線を考えると良い。まずは x と z の回帰直線を引き、回帰直線上に位置する相関が1の値を取り除いた残差を考える。同様に、 y と z の回帰直線を引き、回帰直線上の相関が1の値を取り除いた残差を考える。この残差同士の相関が偏相関係数である。要するに、取り除きたい変数 z とその他の変数 x, y との相関が1の要素を除いた、残り同士の相関が、理論上 z の影響を取り除いた x と y の相関係数という事である。

4.4 相関関数

日野幹雄「スペクトル解析」(朝倉書店出版)を参考に、本研究において用いた手法について解説する。

4.4.1 自己相関関数

時間に関する不規則変量を $x(t)$ とするとき、 τ 時間隔たった二つの変動の積の平均値で定義される統計的関数を指し、以下の式で表される。

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

ここで τ はラグタイムを表す。

ある時系列データを用意し、その時系列データを τ ずつずらしながら元の時系列との相関を取る解析手法である。これにより、 τ ずつずらした波が元の波とどれだけ似ているのかを判断できて、また変動中の周期成分を判別する事が出来る。例えば横軸に τ 、縦軸に相関を見た xy 座標において、 $\tau=0$ でのみ相関が高く、僅かでもタイムラグを持つと相関が消えてしまうような自己相関を持つならば、その波はホワイトノイズであると判断が出来るし、どのタイムラグの領域でも一定の自己相関を持つ場合は、その波は直流成分であると判断が出来る。

同じ波同士の相関を見る自己相関関数の一般的性質として、必ず y 軸対象の偶関数になる事、 $\tau=0$ で相関が最大となる事が言える。なお、 $C(\tau)$ を $C(0)$ で割って正規化したものを、自己相関係数と呼ぶ。

次に、自己相関関数をフーリエ変換したものをパワースペクトルといい、以下の式で表される。

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} C(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$$

パワースペクトルを導く事で、波の振動数ごとのスペクトル密度を求める事が可能となる。これにより、波の卓越周期や各周波数帯におけるスペクトル密度の大きさの傾向などを判断する事が可能となる。

例えば、どの周波数帯においてもスペクトル密度が変化せずに一定である、つまり顕著なスペクトルピークが見られない場合、その波はホワイトノイズであり卓越した周期性は持たない事がわかるし、長い周波数帯から短い周波数帯にかけてスペクトル密度が減少するレッドノイズの構造を持つ場合は、その波において長周期振動が卓越している事が理解出来る。

なお、自己相関関数 $C(\tau)$ とパワースペクトル $S(\omega)$ は互いにフーリエ変換の関係にあり、これを Wiener-Khintchine の公式 という。この法則は、次に述べる相互相関関数においても同様の性質を持つ。

4.4.2 相互相関関数

先ほどの自己相関関数では、ひとつの時系列に対してタイムラグを持たせて相関を求めた。これに対して、ある時系列 x に対して、別の時系列 y にタイムラグを持たせて相関を取る手法を相互相関関数といい、以下の式で表す。

$$C_{xy}(\tau) = \overline{x(t)y(t+\tau)}$$

例えば降水時の河川への水の流出を考えた場合に、降水量とその下流河川における嵩の時系列には、タイムラグを持った関係があると考えられる。降水量と嵩の変動に対して相互相関解析を行う事で、降水の何時間後に嵩が上昇した、といったような、この二つの時系列データに存在するタイムラグを求める事が出来る。

上記の事例のように、両指数の関係性が明らかな場合に相互相関解析は非常に有効であるが、いかに相互相関関数による結果に優位性が見られたとしても、それはメカニズム的な因果を説明するものではない点に注意が必要である。

二種類の波同士の相関を見る相互相関関数の一般的性質として、波は奇関数成分を持った、 y 軸対象ではない奇関数になる事があげられる。このため相互相関関数はガウス平面による理解が有効となる。自己相関関数と同様、相互相関関数を $C_{xy}(0)$ で正規化したものを相互相関係数と呼ぶ。

次に、相互相関関数をフーリエ変換したものをクロススペクトルといい、以下の式で表される。

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

前述のように、相互相関関数には偶関数成分に加え奇関数成分が含まれる。偶関数成分にあたる実部はコスペクトル $K_{xy}(\omega)$ と言い、奇関数成分にあたる虚部はクオドラチャスペクトル $iQ_{xy}(\omega)$ と言う。

クロススペクトルを求める事でコヒーレンスを、また、奇関数を含むためにガウス平面を用いたフェイズを導出する事が出来る。

$$coh^2(\omega) = \frac{|S_{xy}(\omega)|^2}{S_{xx}(\omega)S_{yy}(\omega)} = \frac{K_{xy}^2(\omega) + Q_{xy}^2(\omega)}{S_{xx}(\omega)S_{yy}(\omega)}$$

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

上式がコヒーレンス，下式がフェイズを示す．

コヒーレンスは相関の強さを表す．コヒーレンスの平方根である $coh(\omega)$ は二つの波における周波数成分の相互相関係数である．この相互相関係数に二乗の操作をしたコヒーレンスは決定係数 (寄与率) にあたり，ある波でもう一方の波をどれだけ説明出来るのかを表す．クロススペクトルを両パワースペクトルで規格化する事により二つの波の相関を導出し，両波のどの波数帯において相関が強いのかを見る事が出来る．なお，コヒーレンスは相関の高さは示すが，その周波数帯で実際にエネルギーが大きいかどうかをパワースペクトル密度の分布を用いて確認をする必要がある．

次に，フェイズは波の位相角の差を表す．クロススペクトルは複素数である事は前述の通りである．これによりガウス平面上に実軸にコスペクトル $K_{xy}(\omega)$ を，虚軸にクオドラチャスペクトル $iQ_{xy}(\omega)$ を示す事が出来て，両者を足し合わせたベクトル $S_{xy}(\omega)$ と実軸との角度がフェイズである．フェイズを見る事で奇関数成分を抽出し，元の波からどれほど位相がズレているのかを見る事が出来る．

5 結果

5.1 時系列データのラグ相関解析の結果

各自然変動の相互作用を見るために、AOI, PDOI, NINO3 の各指数の時系列データ (図 7) を用いてラグ相関解析を行った。ここで、AO と PDO の偏差パターンは逆相関であるため、AOI にマイナスをかけた「AOI-」を用いて解析を行った。「偏差パターンが逆相関」というのは、両者の偏差の分布を見れば理解が出来る。AO+は極域で負偏差、それを取り囲むように正偏差となる偏差パターンである。その逆の AO-は、極域で正偏差、それを取り囲むように負の偏差が卓越するパターンである。この AO-における北太平洋の SST を見ると、アリューシャン列島周辺で正偏差となり暖かく、北太平洋中央部で負偏差となり冷たくなる。この北太平洋中央部の偏差が PDO+の偏差パターンと一致しているため、AO-と PDO+が対応している事が理解出来る。

5.1.1 時系列とパワースペクトル

AOI の時系列を見ると (図 7), 期間を通して主な周期性が見られない事がわかる。1976/1977 年と 1988/1989 年は時系列の推移に大きな変化が見られる。これは「気候シフト」と呼ばれ、アリューシャン低気圧の強弱や北極海の海水密度など、様々な分野で共通して検出される不連続現象である。この際は巨大なブロッキング高気圧が発生し世界各地で異常気象が発生する事が知られている。また、2009/2010 年には指数が -3σ まで下がり、北米や中国、ヨーロッパ等で異常低温が発生、ワシントンでは降雪量が過去最大となり、ヨーロッパで多くの凍死者が出た。このように、AO は北半球の大気現象に大きく寄与する事が知られている。続いて AOI のパワースペクトル (図 8) を見ると、どの周波数領域においても、顕著な特徴を持たない振動である事がわかる。これはホワイトノイズと呼ばれるもので、全ての周波数帯においてほぼ一定のスペクトル密度を持つ。ホワイトノイズはその周期帯における現象がランダムで発生する事や、その周期で平均した時系列がその前後関係に全く影響を受けずに独立して発生するといった特徴を持つ。以上の事から、AO は卓越した周期を持たずにランダムに振動する自然変動である事が理解出来る。

次に、PDOI の時系列データを見ると (図 7), 概ね 10 年から数十年程度の長周期の振動を持つ事がわかる。前述の通り PDO-はラニーニャ的な偏差の分布を示し、この分布が温暖化の hiatus を引き起こしていると考えられている。先行研究より PDOI が概ねマイナス傾向であった 1940-1970 年にも気温上昇の鈍化があり、この際も貿易風が強かった (Thompson et al. 2014), つまりラニーニャ的であった事が理解出来る。な

お、2000年以降の温暖化のhiatusの期間もPDOIは負の傾向を示す。続いてPDOIのパワースペクトル(図9)を見てみると、AOとは異なり、より長周期においてスペクトル密度が高くなるレッドノイズの構造を持つ事がわかる。レッドノイズの時系列には連続性が存在し、ある周期で平均した時系列はその前後の周期帯において影響を与える。これは、時系列が過去の状態のメモリーを持つという事を意味する。以上の事から、PDOは長周期において卓越し、時系列にメモリーを持つ自然変動である事が理解される。

次に、NINO3の時系列データを見ると(図7)、PDOIに比べて比較的短い周期の振幅が見られる。また、他の指数とは異なり定期的に指数の+方向へ卓越した振幅を持つ事がわかる。続いてNINO3のパワースペクトル(図10)を見てみると、PDOと同じくレッドノイズの構造を持つ事がわかるが、PDOよりもやや短周期側にスペクトルピークが位置する事が確認出来る。これはPDOの10年規模の長周期振動とは異なり、エルニーニョ/ラニーニャ現象に伴う数年程度の規模の周期振動を再現している事が理由に上げられる。

PDOIとNINO3の長周期側のスペクトル密度をより詳細に見るために、パワースペクトルを長周期側に拡大した図が図11と図12である。ここから、PDO(図11)は主に40.0-41.7ヶ月(3.3-3.5年)、50.0-71.4ヶ月(4.2-6.0年)、100.0-166.7ヶ月(8.3-13.9年)に卓越周期を持つ振動であり、その中でも特に顕著な特徴として、10年前後の周期振動が卓越する自然変動である事が理解できる。なお、ここで500ヶ月(41.7年)にもスペクトルピークが見られるが、本実験で利用したデータの長さは約55年であるため、40年の周期の再現については除外した。

続いてNINO3(図12)を見てみると、主に29.4-30.3ヶ月(2.45-2.53年)、34.5-35.7ヶ月(2.9-3.0年)、40.0-45.5ヶ月(3.3-3.8年)、52.6-66.7ヶ月(4.4-5.6年)に卓越周期を持つ振動であり、その中でも特に顕著な特徴として、5年前後の、PDOIと比較して短い周期の振動が卓越する自然変動である事が理解できる。

以上の事から、AOは卓越した周期を持たない自然変動であり、PDOは10年程度の卓越周期を持つ長周期の自然変動、NINO3は5年前後の卓越周期を持つ、PDOと比較して短周期の自然変動である事が示された。

5.1.2 相互相関とコヒーレンス・フェイズ

図13はAOIとPDOIの相互相関の結果である。ここで、横軸は月単位でのラグタイムを、縦軸は相関の強さを表す。相互相関は、指数の相関関係に存在する振幅を大局的に見る際に大変有効である。

この図より、AOIとPDOIはラグ0において最も正の相関が高くなる事が理解出来る。だが、ここで視点を数ヶ月範囲の短い期間に拡大してみると、ラグ0よりもプラス側においてスペクトル密度が若干高くなっている事が確認できる。これはAOIの指数に、PDOIの指数を重ね、PDOIの波にプラスのタイムラグを持たせた場合に相関が高まり、マイナスのタイムラグを持たせた場合に相関が低くなるという事を意味する。波にプラス方向のタイムラグを与えると、その時系列データは左側(年代の古い方向)へ移動する。AOIにPDOIの時系列データを重ねて、AOIを固定してPDOIを左側へ移動すると正相関が高くなる、という事は、つまりAOIの時系列データがPDOIの時系列データを先導している事を意味している。次に、AOIとPDOIの間に存在する相関の強さの振幅から、周期性を探す。まずは-40ヶ月から始まり、+10ヶ月で一つの波となるような、おおよそ50ヶ月(4.2年)の振動が存在する事が理解出来る。続いて、より広い時間帯にかけてデータを俯瞰して見てみると、-90ヶ月から始まり、+20ヶ月で一つの波となるような周期も見られ、おおよそ110ヶ月(9.2年)の振動を持つ事も確認出来る。これらの卓越周期は、AOIとPDOIの両パワースペクトルの合算においても、同様の波数帯に強いスペクトル密度を確認する事が出来る。

図14はAOIとNINO3の相互相関の結果である。特筆すべきはラグ0周辺の正の相関のピークが負の方向である左側へずれている点である。これはNINO3の時系列データがAOIの時系列データを先導している事を意味している。相関の振幅から周期を探すと、-35ヶ月から始まり、+5ヶ月で一つの波となるような周期が見られ、おおよそ40ヶ月(3.3年)の振動がある事が理解出来る。PDOIの場合と同様、この卓越周期は両指数のパワースペクトルの合算においても同様の波数帯における強いスペクトル密度を確認する事が出来る。

図15はAOIとPDOIのコヒーレンスとフェイズである。ここで、上図がコヒーレンスを、下図がフェイズを示し、コヒーレンスは相関の強さを、フェイズは位相のズレを見る事が出来る。両図ともに横軸が振動数で、縦軸はコヒーレンスが相関の強さ、フェイズが位相ズレを示す。横軸の振動数は、周波数の逆数で与えられる。両図を同時に見る事が重要で、その方法は、コヒーレンスの図で相関の高い周波数を探し、その周波数におけるフェイズを見る事で、どの周波数帯で、どれほどの位相ズレがあるのかを確認する事が出来る。

コヒーレンスが0.5以上の周波数帯に着目すると、まずは21.7ヶ月(1.8年)周期や31.3ヶ月(2.6年)周期、71.4ヶ月(6.0年)周期などに大きな相関を持つ周波数帯が見られる。以下にフェイズから得られた位相ズレの結果を列挙する。AOIとPDOIは、21.7ヶ月(1.8年)周期の振動においてAOIが4.22ヶ月先導、23.3ヶ月(1.9年)周期においてAOIが1.94ヶ月先導、25ヶ月(2.1年)周期において両指数は同位相、31.3ヶ月(2.6年)

周期において PDOI が 2.61ヶ月先導, 45.5ヶ月 (3.8年) 周期において AOI が 1.26ヶ月先導, 52.6ヶ月 (4.4年) 周期において AOI が 7.31ヶ月先導, 71.4ヶ月 (6.0年) 周期において PDOI が 1.98ヶ月先導, 111.1ヶ月 (9.3年) 周期において PDOI が 9.26ヶ月先導, 200ヶ月 (16.7年) 周期において AOI が 11.1ヶ月先導している。

次に図 16 は AOI と NINO3 のコヒーレンスとフェイズである。全体を見ると, 43.5ヶ月 (3.6年) 周期, 76.9ヶ月 (6.4年) 周期, 200ヶ月 (16.7年) 周期の振動で特に相関が高くなっている。位相ズレを列挙すると, AOI が NINO3 を, 22.2ヶ月 (1.9年) 周期において AOI が 0.93ヶ月先導, 23.8ヶ月 (2.0年) 周期において AOI が 5.95ヶ月先導, 25ヶ月 (2.1年) 周期において NINO3 が 2.08ヶ月先導, 30.3ヶ月 (2.5年) 周期において NINO3 が 7.58ヶ月先導, 43.5ヶ月 (3.6年) 周期において NINO3 が 7.25ヶ月先導, 50.0ヶ月 (4.2年) 周期において両指数は同位相, 76.9ヶ月 (6.4年) 周期において NINO3 が 6.41ヶ月先導, 90.1ヶ月 (7.5年) 周期において AOI が 37.5ヶ月先導, 200ヶ月 (16.7年) 周期において NINO3 が 16.7ヶ月先導している。

5.2 AOI と SST のラグマップの結果

大気と SST とのタイムラグを持った相関分布を見るために, 各季節の AO と, SST に -13 年から +13 年のタイムラグを持たせた相関係数のラグマップを作成した。ここで各季節の AO とは, MAM(春), JJA(夏), SON(秋), DJF(冬) と ALL(全季節) の 5 パターンの AO を指す。例えば +1 年のラグマップで相関が高い海域というのは, AOI は固定, SST データは 1 年分遅らせて相関を取った際の相関係数の結果であり, つまり AO が SST を先導しているパターンを見ていると判断が出来る。同様の考え方で, 逆の -1 年のラグマップに関しては, SST が AO を先導しているパターンであると理解が出来る。なお, t 検定の結果, 0.2 以上の相関係数で 99% 以上の信頼区間である。

続いて, ラグマップにおいて見られた特徴的な相関の分布パターンに対して, その主要因を判断するために, AOI, PDOI, NINO3 の時系列データを用いて偏相関係数を求めた。

5.2.1 MAM(春) のラグマップ

図 17 から図 43 に AO(MAM) と SST のラグマップを示す。

ラグ 0 では東太平洋で赤道を挟んで北側に正, 南側に負の相関が見られる。また黒潮親潮域に正の相関が, 日本の南海上に負の相関が見られる。+1 年になると日本の南の負相関はカリフォルニア沖まで延び, 赤道周辺では正相関の範囲が広がる一方, 黒潮親

潮域の正相関は小さくなり、更にその北側に帯状の負相関が現れる。+2年ではウォームフェイズのPDOに似たパターンとなるが、+3年では一転してラニーニャ的な傾向となる。+5年で一時的にエルニーニョ的なパターンが強くなるが、その後赤道付近の正相関は弱まり、+7年から+10年まではペルー沖を除いて概ねPDOのクールフェイズに似たパターンを示す。

次にマイナスのラグを見ると、-10年でエルニーニョの構造を示し、-9年になると正の相関がベーリング海からアリューシャン列島、アラスカ湾まで広がる、PDO+のパターンが現れる。その後も-7年と-5年にウォームフェイズのPDO的な構造が現れるが、-2年、-1年は赤道付近に顕著な負の相関が広がる。

全体的に見て、+1年と+7年に、相関の正負が東西に帯状に伸びる特異なパターンが見られた。-1年で強いクールフェイズのPDO的なパターンになるため、PDO-がAOを1年先導している可能性が示唆される。

5.2.2 JJA(夏)のラグマップ

図44から図70にAO(JJA)とSSTのラグマップを示す。ここで、全ての季節において見られる+5年の赤道付近の強い正相関が夏のAOにおいては負相関となるため、AOにマイナスをかける事で他の季節における+5年の赤道付近の正の相関パターンに合わせている。

ラグ0では赤道を中心に正の相関を持つエルニーニョ的な分布パターンが見られる。+2年と+3年ではPDO-のパターンが現れるが、+5年では一変して顕著なエルニーニョ的なパターンとなる。+6年から+9年にかけては日本近海や中西太平洋沿岸で広く負の相関となるが、+9年、+10年は中東太平洋やマーシャル諸島周辺に正の相関が現れる。

次にマイナスのラグを見ると、-9年では赤道周辺は負の相関で、北西・中西太平洋沿岸からハワイ諸島の北には帯状に伸びる正の相関が見られる。北西・中西太平洋の正相関は-7年に北西太平洋と北東太平洋の広い範囲に広がる。-6年、-5年は一時的に赤道周辺に正の相関が現れエルニーニョ的な構造となるが、-4年で再びラニーニャ的な分布に戻り、概ねその状態が-1年まで持続する。

全体的に見て、ラグタイムがプラス方向の範囲で、ベーリング海や北西太平洋・中西太平洋の沿岸部において負の相関が続くパターンが多い。+6年～+9年では他の季節と異なり主に北西・中西太平洋で広く負の相関が見られた。春と同様に-1年においてラニーニャ的な分布を示す事から、ラニーニャ的なパターンがAOを1年先導している可能性が示唆される。

5.2.3 SON(秋)のラグマップ

図 71 から図 97 に AO(SON) と SST のラグマップを示す。

ラグ 0 では赤道を挟んで南北に負の相関が見られる PDO-的なパターンを示しているが、その構造は+1 年では既に見られなくなる。+5 年では赤道周辺の正相関が強くなり、エルニーニョ的なパターンとなる。+6 年には一時的に赤道付近の負の相関が強くなるが、+8 年、+9 年で再び赤道付近の正相関が顕著となる。

次にマイナスのラグを見ると、-9 年では北太平洋の比較的広い海域で正の相関が見られる。-6 年になると強いエルニーニョ的なパターンとなるが、-5 年、-4 年、-3 年にはラニーニャ的な分布に変化し、その後は構造に特に顕著な特徴は見られなくなる。

全体的に見て、秋は他の季節に比べて相関が低い傾向にあるが、全ての季節と同様に+5 年で赤道付近に強い正相関が見られ、また-5 年、-4 年、-3 年には比較的明瞭なラニーニャ的な構造が見られた。

5.2.4 DJF(冬)のラグマップ

図 98 から図 124 に AO(DJF) と SST のラグマップを示す。冬季は AO の分散が最も大きいため、海洋への AO の寄与を見る上でも特に重要となる季節である。

ラグ 0 では、赤道付近に負の海域が広がり、ハワイ諸島周辺に負相関の極大が位置している一方で、北西・中西太平洋には正の相関が広がっている。+2 年以降は PDO+ のパターンが続き、+5 年にはその構造が最も顕著となる。それ以降も太平洋の広い範囲で正の相関が強い状態が続く事が主な特徴として上げられる。+10 年ではハワイ諸島の南海上を東西に伸びる帯状の負の相関場が現れ、ラグ 0 のパターンに近い状態へ一巡する。

次にマイナスのラグを見ると、-13 年で PDO-的なパターンとなり、+10 年を鑑みて凡そ 10 年周期の振動が存在する事が理解できる。-9 年では PDO+ の構造となるが、その後赤道周辺の正の相関は小さくなり、-5 年になって再び PDO+ に似た分布が現れる。続いて-2 年、-1 年でもウォームフェイズの PDO 的なパターンとなる。

全体的に見ると、初め中東太平洋で概ね負の相関だが、+2 年以降は正の相関が広がり、+5 年以降は太平洋の広い範囲で正の相関となる。これは AO が+2 年以上のラグを持って太平洋の正相関に影響を与えている事を示している。他の季節に比べて+6 年以降に日本近海や中西太平洋にかけての強い正の相関が現れるため、全季節中、冬季の AO が特に顕著に海洋へ影響を与えている事が示唆される。

5.2.5 ALL(全季節)のラグマップ

図 125 から図 151 に AO(ALL) と SST のラグマップを示す。

ラグ 0 では中東太平洋からマーシャル諸島、南東太平洋にかけて赤道を挟んで広く負の相関となっている。一方、北西太平洋では黒潮親潮域を中心に正の相関となっており、同様に中西太平洋の沿岸部も正の相関を示している。この分布パターンから、ラグ 0 においては相関は低いがラニーニャ的な分布を持つ事がわかる。その後、海洋全体の相関は一時的に弱まるが、+2 年～+5 年にかけては逆に赤道を挟んで南北の海域と、北米大陸沿岸部に広く正の相関が、黒潮親潮域やハワイ諸島周辺で負の相関が見られる事から、この期間はウォームフェイズの PDO 的な特徴が現れており、特に+5 年においては正の相関が非常に強くなる事がわかる。+6 年以降は黒潮親潮域を除いて北西太平洋や中西太平洋でも正の相関が高い状態が継続するが、+10 年になると再びラグ 0 のラニーニャ的な相関分布を示す。

マイナス方向のラグマップを見ると、-10 年と-9 年に明瞭な PDO+ のパターンが現れる。-6 年から-4 年にかけては黒潮親潮域で負の相関が続く一方、中西太平洋沿岸部では-6 年以降正の相関が高い状態が持続する。

全体を通して分布パターンのライフサイクルに着目すると、基本的には±5 年でラグ 0 の逆相関、+10 年と-13 年でラグ 0 の負の相関パターンに戻る事から、太平洋における 10 年規模の振動が再現されていると考えられる。

5.2.6 偏相関係数を用いた+5 年の強い正相関の要因の解明

以上のラグマップにおいて、春・夏・秋・冬と全季節の全てのパターンにおいて現れた+5 年の赤道付近の強い正相関について、PDOI か NINO3 のどちらがこの構造に対して寄与しているのかを調べるために、AOI と PDOI、NINO3 のそれぞれの偏相関係数を求めた。春夏秋冬と全季節の結果はそれぞれ、まずは NINO3 の影響を取り除いた AOI と PDOI の偏相関係数が、-0.03(春)、0.00(夏)、0.03(秋)、0.15(冬)、0.03(全季節)となった。次に PDOI の影響を取り除いた AOI と NINO3 の偏相関係数はそれぞれ、0.11(春)、0.20(夏)、0.11(秋)、0.08(冬)、0.06(全季節)となった。

以上の事から、春、夏、秋に関しては、この赤道付近の正の相関分布は NINO3 が要因であると考えられ、冬に関しては PDOI がその要因であると考え事が出来る。なお、この際の信頼区間は春・秋の 0.11 が 90% 以上、夏の 0.20 と冬の 0.15 は 95% 以上である。

6 まとめと考察

6.1 時系列データのラグ相関解析

6.1.1 時系列データから見られる各自然変動の特徴

AOI と PDOI, NINO3 の時系列データを見ると (図 7), AOI には顕著な周期性は認められず, PDOI は 10 年程度の長周期の振動が, NINO3 はそれよりも短い数年程度の周期の振動が見られた.

次に指数データのパワースペクトル (図 8~図 10) を求める事で, どの周波数帯でスペクトル密度が高いのかを判断する事が出来て, AOI は卓越周期を持たないホワイトノイズであり, PDOI, NINO3 は長周期が卓越するレッドノイズである事が示された. PDOI と NINO3 は同様のレッドノイズでありながらスペクトルピークの周波数に違いが認められたため, 更に長周期側に拡大して (図 11~図 12), 両指数にこういった特徴の違いが存在するのかを見た. まず PDOI については, スペクトル密度の高い卓越した周期帯は, 40.0-41.7ヶ月 (3.3-3.5 年), 50.0-71.4ヶ月 (4.2-6.0 年), 100.0-166.7ヶ月 (8.3-13.9 年) に存在した. 特に 100.0-166.7ヶ月 (8.3-13.9 年) の周期帯においてはスペクトル密度が顕著に高いため, PDOI の主な特徴として, 10 年前後の周期振動が卓越する自然変動である事が理解できた. 次に NINO3 について, スペクトル密度の高い卓越した周期帯を見てみると, 29.4-30.3ヶ月 (2.45-2.53 年), 34.5-35.7ヶ月 (2.9-3.0 年), 40.0-45.5ヶ月 (3.3-3.8 年), 52.6-66.7ヶ月 (4.4-5.6 年) に存在した. 特に 40.0-45.5ヶ月 (3.3-3.8 年), 52.6-66.7ヶ月 (4.4-5.6 年) の周期帯においてスペクトル密度が顕著に高いため, NINO3 の主な特徴として, 3~6 年程度の周期振動が卓越する自然変動である事が理解できた.

6.1.2 各指数の先導関係について

相互相関の結果から (図 13, 図 14), AOI-と PDOI については, AOI-がやや PDOI を先導している事と, 相関の強弱の周期に着目する事で 4.2 年や 9.2 年の波が存在する事が示された. AOI-と NINO3 については, NINO3 が AOI-を先導している事と, 3.3 年の周期が存在する事が示された. これらの事から大気と海洋の先導関係を考察すると, AO と短い周期である NINO3 は海洋が大気を先導するが, 長周期を持つ PDO においては大気が海洋を先導する可能性が示された.

次にコヒーレンスを見る (図 15, 図 16). ここで, 先の解析の各時系列のパワースペクトルより, PDOI は 10 年前後の長周期振動が, NINO3 では 3~6 年程度の相対的に

短い周期振動が卓越する事が示されたが、この周期帯のコヒーレンスとフェイズのみを見るのでは、AOIのスペクトル密度を反映出来ていない。AOIは卓越した周期を持たないホワイトスペクトルであるが、その中にもスペクトル密度の大小が存在する。よって、先に理解されたPDOIとNINO3の特徴にAOIのパワーも鑑みた、両指数のスペクトル密度の合算が高い周波数帯に着目して、コヒーレンスとフェイズを見る事が重要である。

AOIとPDOIについて考察する。まずは先導関係について、コヒーレンスが0.5以上の振動数について列挙すると、21.7ヶ月(1.8年)、23.3ヶ月(1.9年)、45.5ヶ月(3.8年)、52.6ヶ月(4.4年)、200ヶ月(16.7年)の周期では、AOI-(大気)がPDOI(海洋)を先導している結果となった。それとは反対に、31.3ヶ月(2.6年)、71.4ヶ月(6.0年)、111.1ヶ月(9.3年)の周期においてはPDOI(海洋)がAOI-(大気)を先導している結果となった。以上、コヒーレンスが0.5以上の高い相関の波に着目すると、8つのスペクトル密度の高い波数に絞られ、そのうちの5つの周期振動において大気が海洋を先導している結果となった。

次にAOIとPDOI双方のパワースペクトル密度が高い周波数帯に着目すると、52.6ヶ月(4.4年)周期、111.1ヶ月(9.3年)周期、200ヶ月(16.7年)周期の振動が上げられる。前述のように4.4年周期と16.7年周期はAOIがPDOIを先導するパターンである事から、AOIとPDOIの両指数のパワースペクトル密度が高く、卓越した振動数において、この2つの周波数帯では大気が海洋を先導する事が示された。

続いて、AOIとNINO3について考察する。PDOIと同様に先導関係について、コヒーレンスが0.5以上の振動数帯について列挙すると、22.2ヶ月(1.9年)、23.8ヶ月(2.0年)、90.1ヶ月(7.5年)の周期では、AOIがNINO3を先導している事が示された。それとは反対に、25ヶ月(2.1年)、30.3ヶ月(2.5年)、43.5ヶ月(3.6年)、76.9ヶ月(6.4年)、200ヶ月(16.7年)の周期においてはNINO3がAOIを先導している事が示された。

次にAOIとNINO3双方のパワースペクトル密度が高い周波数帯に着目すると、25.0ヶ月(2.1年)周期、30.3ヶ月(2.5年)周期、43.5ヶ月(3.6年)周期の振動が上げられた。これらの振動数帯は全てNINO3がAOIを先導するパターンである事から、AOIとNINO3の両指数のパワースペクトル密度が高く、卓越した周期帯においては、海洋が大気を先導している事が示された。

6.2 AOIとSSTを用いた北太平洋周辺のラグマップ

1958年～2014年のAOIの時系列データとSSTデータを用いて相関係数のマップを作成し、SSTデータに-13年から+13年までのタイムラグを持たせたラグマップを作成

した。ここで注意したいのは、ラグマップにより見ている相関の構造が「周期性」であるのか「先導関係」であるのかという事である。例えば春のラグマップにおいて、ラグ0と+5年にエルニーニョ的なパターンが現れるが、同様の構造は-5年にも現れている。これはつまり「AOが、SSTのエルニーニョ的な構造を5年という期間で先導している」という事ではなく、「AOと、SSTのエルニーニョ的な構造には5年周期の振動が見られる」という事である。大気と海洋のラグマップを見る際にはこのように、海洋の周期を見ているのか、先導関係を見ているのかを判断する事が必要である。

6.2.1 ラグマップから見られる周期性

全季節(図125～図151)において、ラグ0で赤道周辺の広い海域で負の相関が見られる。同様に、+10年にも赤道周辺に負の相関が広がっており、-13年においても同じく負相関が広範囲に分布している。このため、この分布パターンはおおよそ10年程度の周期振動を現している事が理解できる。この約10年規模の周期振動は他の季節においても見る事が出来るが、全季節において最もこの特徴が現れている。

続いて春(図17～図43)と夏(図44～図70)のラグマップに着目すると、ラグ0において赤道周辺に正の相関が見られる。この特徴が+5年と-5年においても見られる事から、春と夏では5年周期の振動が見られる事が示された。

6.2.2 ラグマップから見られる先導関係

冬のラグマップ(図98～図124)に着目すると、+6、+7、+8年にかけて、ミッドウェー諸島周辺を除いてほぼ全ての海域で、正の相関が高い状態が持続している事がわかる。同様のパターンがマイナス方向のラグマップからは見られない事から、この正相関は海洋の周期性を表しているのではなく、AOによる海洋の先導を現している事が理解出来る。

次に全季節(図125～図151)の+6年を見ると、冬季と同様に+6年に、海洋の非常に広い海域で正の相関が高くなっている事がわかる。この正相関に関してもマイナス方向に同様の分布パターンが見られない事から、周期性ではなく、AOによる海洋の先導を現している事が理解出来る。

6.2.3 +5年の赤道付近の正相関

全ての季節を通して+5年には、赤道を挟んで南北に広がる正相関の海域が存在する。この正相関の要因について、AOIとPDOI、NINO3を用いて偏相関係数を求めた結果、

春・夏・秋については NINO3 との相関が高く、冬に関しては PDOI との相関が高かった。このことから、分散が最大の冬季 AO は長周期振動である PDO が主に寄与している事と、相対的に分散の小さい春・夏・秋の AO については短周期である NINO3 が主に寄与している事が示された。

なぜ+5 年に全ての季節において正の相関が現れたのか。まず AO の時系列を見ると、1989-1993 年周辺は分散の大きくなる時期が連続している。この期間と 5 年後の 1994-1998 年周辺の PDOI・NINO3 の時系列を比較すると、海洋の両指数においても分散が高い傾向にある事が理解出来る。よってラグマップにおいて現れた+5 年の正相関は、AOI の分散が大きな期間が、海洋の指数との分散の大きな期間と重なったために発生した相関であると考えられる。

6.3 大気と北太平洋 SST との関係性

NINO3 が AOI-を先導している事は既に述べた通りである。AO がマイナスの際は、寒帯前線ジェットが蛇行し、中緯度において低温偏差となる事が知られている。これを日本付近の傾向と当てはめてみると、エルニーニョ現象が発生したら、夏は冷夏、冬は寒冬となる、と理解出来る。だが、一般的にエルニーニョ現象の際は冷夏であるが、冬季は寒冬ではなく暖冬になる事が知られている。これは冬季の偏相関係数は NINO3 を取り除いた AOI-と PDOI の相関が高い事と、夏季の偏相関係数は PDOI を取り除いた AOI-と NINO3 の相関が高い事から理解出来る。つまり、本来エルニーニョ現象が発生すると中緯度で低温偏差になるため冬季は寒冬となるはずであるが、冬季においては NINO3 との相関が低いために、NINO3 の影響を顕著に受けるのは夏季における冷夏であると説明出来る。

次に、大気と海洋がどういったシステムで影響を及ぼし合っているのかを考察したい。

AO-が PDO を先導するパターンについては、まず AO-では、寒帯前線ジェットが弱まる事が知られている。このジェットの蛇行により、極域の寒気が南下し、中緯度では低温偏差となる。この際に北中部太平洋に寒気が入り、SST も冷やされるため、PDO のウォームフェイズのパターンへと遷移すると考えられる。

続いて、PDO が AO-を先導するパターンについて考察する。PDO のウォームフェイズになると、北中部太平洋の SST は低温偏差となる。これにより極域と中緯度の気圧傾度が減少するため、ジェットは弱まる事が考えられる。この結果、寒帯前線ジェットの蛇行する AO-へと移り変わる事が考えられる。

周期の異なる大気・海洋の様々な自然変動の相互作用について、Noel et al.(2015) は

北大西洋振動 (NAO) と大西洋数十年規模振動 (AMO) の相互作用において、NAO の持つホワイトノイズが AMO のレッドノイズに影響を与えている事を示した。AO は NAO と同様にホワイトノイズであり、PDO は AMO と同様に海洋のレッドノイズである。よって同様の相互作用が考えられ、AO のホワイトノイズが PDO のレッドノイズに影響を与えている事が考えられる。

7 結論

本研究では、大気・海洋間のタイムラグを見るために、北半球における大気の支配的なモードである AO のインデックスを JRA-55 で作成し、海洋の自然変動である PDOI, NINO3 の両指数を用いてラグ相関解析を行った。次に AOI と SST による大気と海洋のラグマップを作成し、大気と海洋の周期性及び先導関係について求め、ラグマップより得られた特徴の要因を判断するために偏相関係数を用いて解析を行った。

ラグ相関解析より、PDOI の卓越周期は 10 年前後であり、ラグマップにおいても 10 年規模の振動が見られたことから、ラグマップの結果はラグ相関解析の結果と整合的であった。NINO3 に関しても、卓越周期が 5 年前後で、ラグマップの春と夏において同様の周期が見られたことから、両者の結果は整合的であった。

次に、AO のスペクトル密度を鑑みて PDO・NINO3 のスペクトル密度も高い周期帯に着目して、コヒーレンスが 0.5 以上の波を抽出した。その結果、短い周期の NINO3 では、主に 2.1 年周期、2.5 年周期、3.6 年周期の振動において海洋 (NINO3) が大気 (AOI-) を先導している事が示された。それとは対照的に、長周期である PDOI を見てみると、4.4 年周期、16.7 年周期において大気 (AOI-) が海洋 (PDOI) を先導する周期帯が存在する事が示された。ラグマップにおいても、AO の卓越する冬季では +6 年から +8 年にかけて、全季節では +6 年において、北太平洋の非常に広い範囲で AO が海洋を先導している事が示された。以上をまとめると、海洋の短周期振動では海洋が大気を先導するが、海洋の長周期振動では大気が海洋を先導する周期帯があり、特に冬季においては 7 年前後のタイムラグを持って AO が SST を先導している事が示された。

また、全ての季節において +5 年に、赤道を挟んで南北に強く正の相関が広がっていた。この相関に、海洋の PDOI, NINO3 のどちらが主に寄与しているのかを見るために、偏相関係数を用いて相関を求めた。その結果、春・夏・秋は主に NINO3 が要因として存在し、冬に関しては PDO が要因である事が示された。

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、基礎的な学力も乏しかった私を寛大な心でゼミ室へ招き入れて下さり、初歩的な質問をも大変ご丁寧に忍耐強くご教授頂きました。私が本論文を書き終える事が出来たのは一重に田中教授の存在があったからこそだと確信致しております。今後私が社会に出る上でも、大変多くの貴重な知見をご指導頂きました。この場をお借り致しまして、心より厚く御礼申し上げます。

また、同大学生命環境科学研究科の植田宏昭教授、上野健一准教授、日下博幸准教授、若月泰孝助教、松枝未遠助教には様々な発表の場において貴重な御意見、御指摘を頂きました。また、気象庁気象研究所の石井正好准教授には、本研究の副査をお引き受け頂きました。

さらに、大気大循環研究室の相澤拓郎氏、小柴厚氏、山上晃央氏、須長智洋氏には、本研究を進める上で、多くの貴重なご助言を頂きました。特に山上氏には、ご多忙の身にも関わらず、基礎的な事から応用まで、大変真摯にご指導頂きました。

最後に、共に研究を行った大気大循環研究室の同期、後輩の皆様を始め、本論文の作成に関わって下さった全ての方々に、心より御礼申し上げます。

参考文献

- Alexander, M. A., I. Blade, M. Newman, J. R. Lanzante, N-C Lau, and J. D. Scott, 2002: The Atmospheric Bridge: The Influence of ENSO Teleconnections on Air-Sea Interaction over the Global Oceans. *Journal of Climate*, **15**, **16**, 2205-2231.
- Easterling, D. R. and Wehner, M. F., 2009: Is the climate warming or cooling? *Geophys. Res. Lett.*, , **36**, L08706.
- 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.
- 日野幹雄, 1977: 『スペクトル解析』 朝倉書店 300pp.
- IPCC, 2013 : Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC.
- Jia, X., H. Lin and J. Derome 2009: The influence of tropical Pacific forcing on the Arctic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L09401, doi:10.1029/2004GL19492.
- Kosaka, Y. and Xie S. -P., 2013: Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, **501**, 403-407.
- Kumar, A. and M. P. Hoerling 2003: The Nature and Causes for the Delayed Response to El nino. *J. Climate*, **16**, **9**, 1391-1403.
- 加藤健介, 2011: 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, 筑波大学生命環境科学研究科地球科学専攻修士論文
- 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.
- Masayo, O., Koji Y., Yoshihiro T., 2004: The summertime annular mode in the Northern Hemisphere and its linkage to the winter mode *Journal Geophysical Research*,, **109**, D20114.

- Noel, S Keenlyside, J. Ba, J. Mecking, N. Omrani, M. Latif, R. Zhang, and R. Msadek, 2015: North Atlantic Multi-Decadal Variability - Mechanisms and Predictability. *Climate Change: Multidecadal and Beyond*, **6**
- Schneider, N. and B. D. Cornuelle, 2005: The Forcing of the Pacific Decadal Oscillation *Journal of Climate*, **18**, 21, 4355-4373.
- 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.
- 田中博, 2007: 『偏西風の気象学』 成山堂書店 174pp.
- Thompson, D. W. and J. M. Wallace, 1998: Arctic Oscillation signature in the winter-time geopotential height and temperature field. *Geophys Res. Lett.*, **25**, 1297-1300.
- Trenberth, K. E., John T. F., Grant B., and Adam S. P., 2014: Seasonal aspects of the recent pause in surface warming *Mature Clim. Change*, ,doi:10.1038
- Trenberth, K. E., and J. T. Fasullo, 2013: An apparent hiatus in global warming? *Earth's Future*, **1**, 19-32, doi:10.1002/2013EF000165.
- Wallace, J. M., and D. W. J. Thompson, 2002: Annular modes and climate prediction. *Phys. Today*, **55**, 28-33.
- Watanabe, M., Youichi K., Masakazu Y., Akira O., Makiko S., Masayoshi I., Takashi M., Masahide K., 2013:Strengthening of ocean heat uptake efficiency associated with the recent climate hiatus *Geophys. Res. Lett.*, **40**,3175-3179,doi:10.1002/grl.50541,2013
- Watanabe, M., Hideo S., Hiroaki T., Michiya H., Masayoshi I and Masahide K., 2014: Contribution of natural decadal variability to global warming acceleration and hiatus. *Nature Climate Change*



図 1: AO プラスの概念図 (偏西風の気象学 より引用).



図 2: AO マイナスの概念図 (偏西風の気象学 より引用).

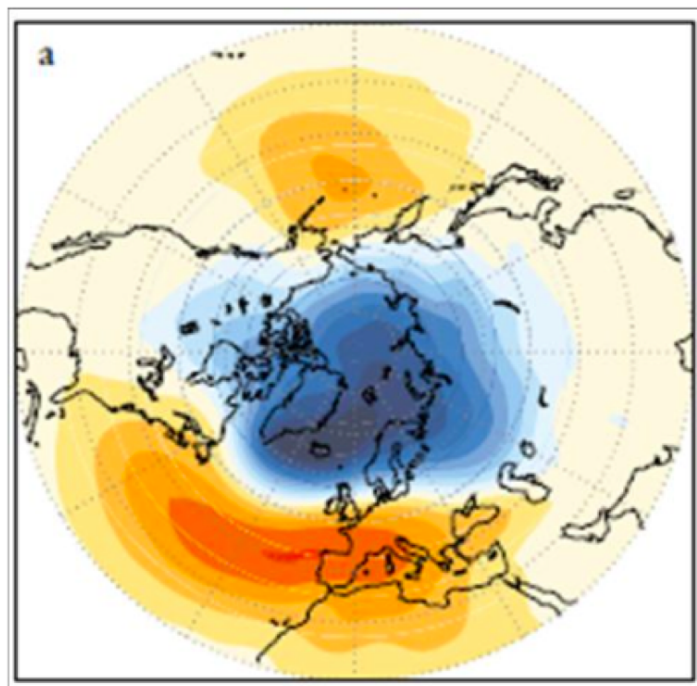


図 3: AO プラスにおける SLP 偏差の分布図 (Wallace and Thompson 2002 より引用).

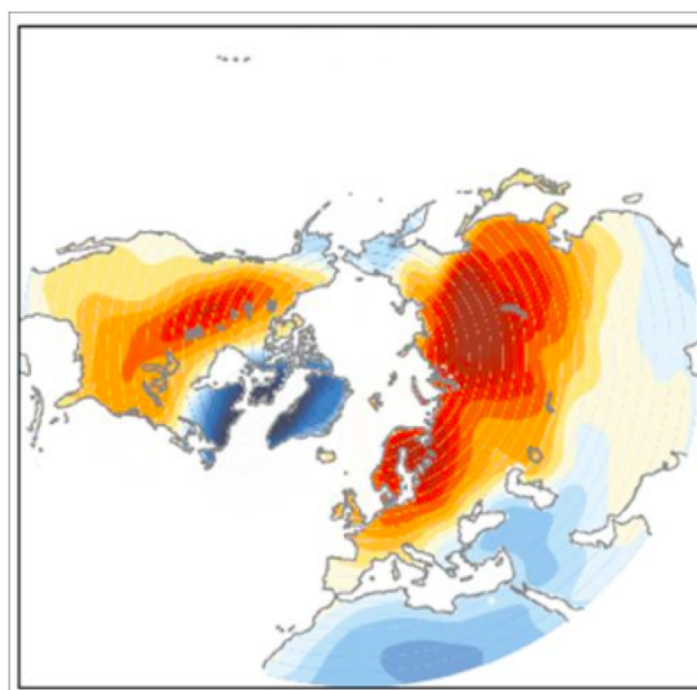


図 4: AO プラスにおける SAT 偏差の分布図 (Wallace and Thompson 2002 より引用).

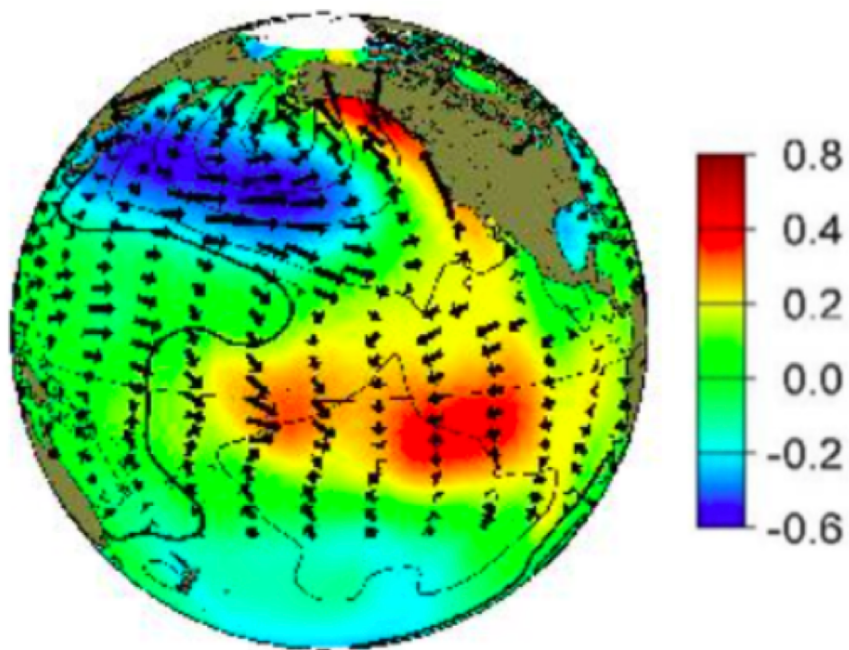


図 5: PDO プラスの概念図 (JISAO より引用).

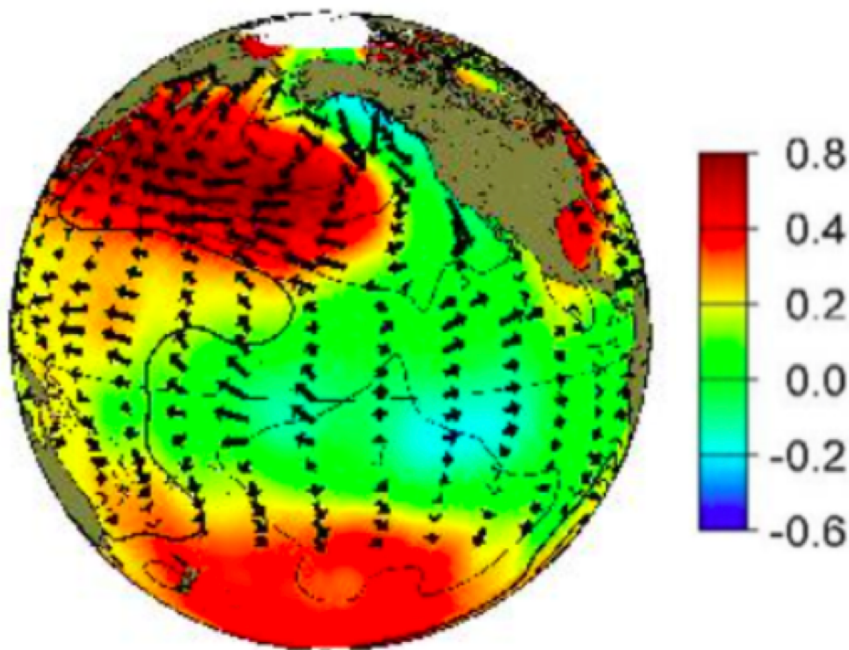


図 6: PDO マイナスの概念図 (JISAO より引用).

AOI, PDOI and NINO3 Time Series

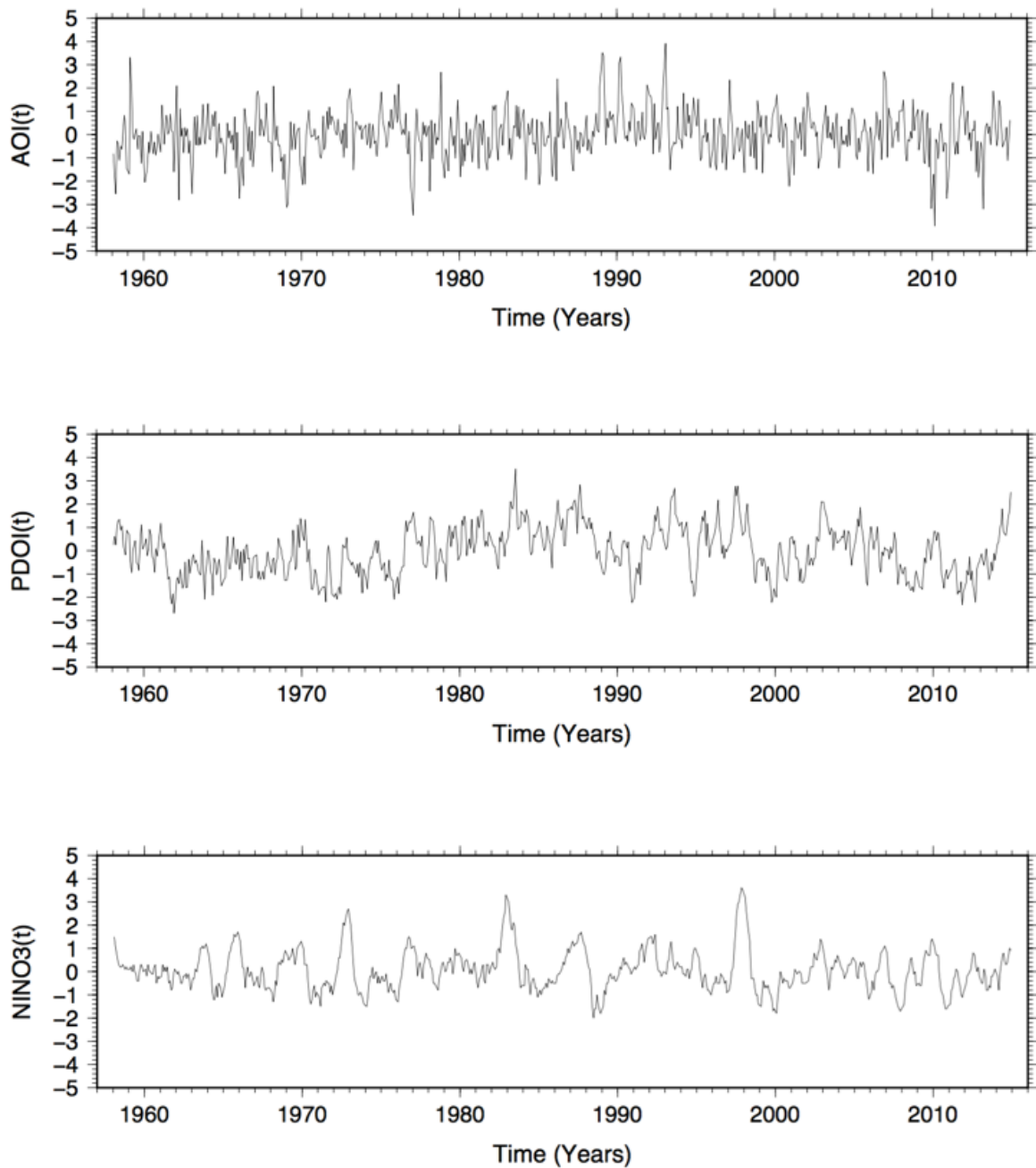


図 7: 1958～2014 年の AOI, PDOI と NINO3 の時系列データ.

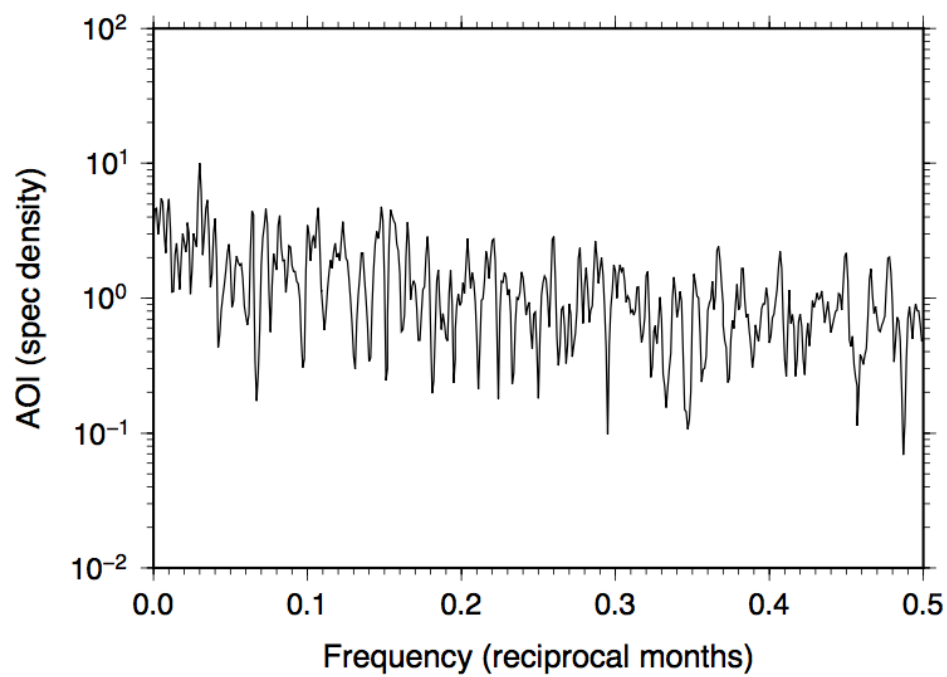


図 8: AOI のパワースペクトル．横軸は振動数を，縦軸はスペクトル密度を示す．

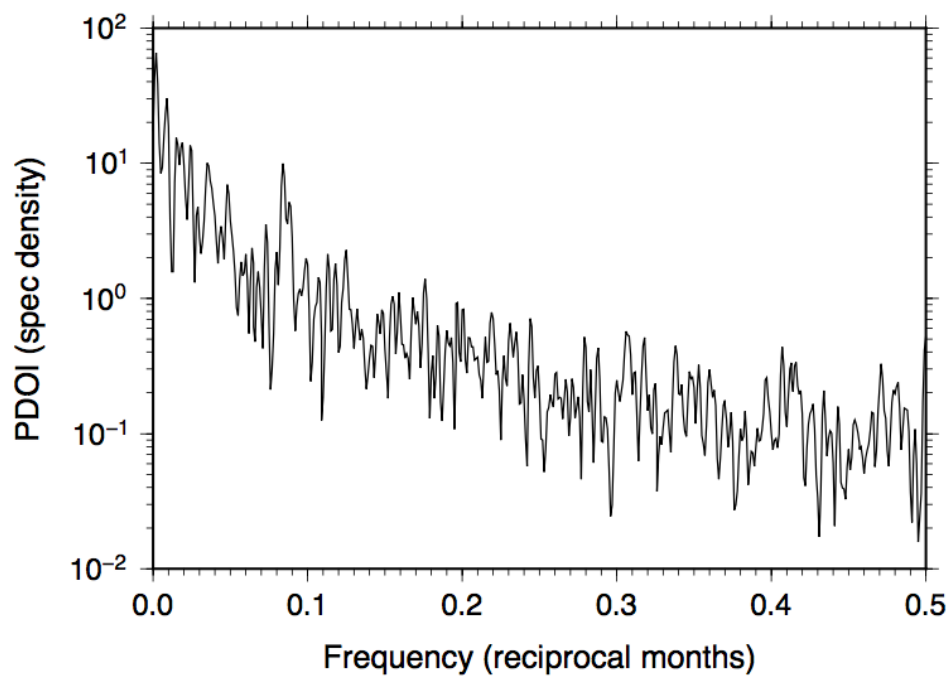


図 9: PDOI のパワースペクトル．横軸は振動数を，縦軸はスペクトル密度を示す．

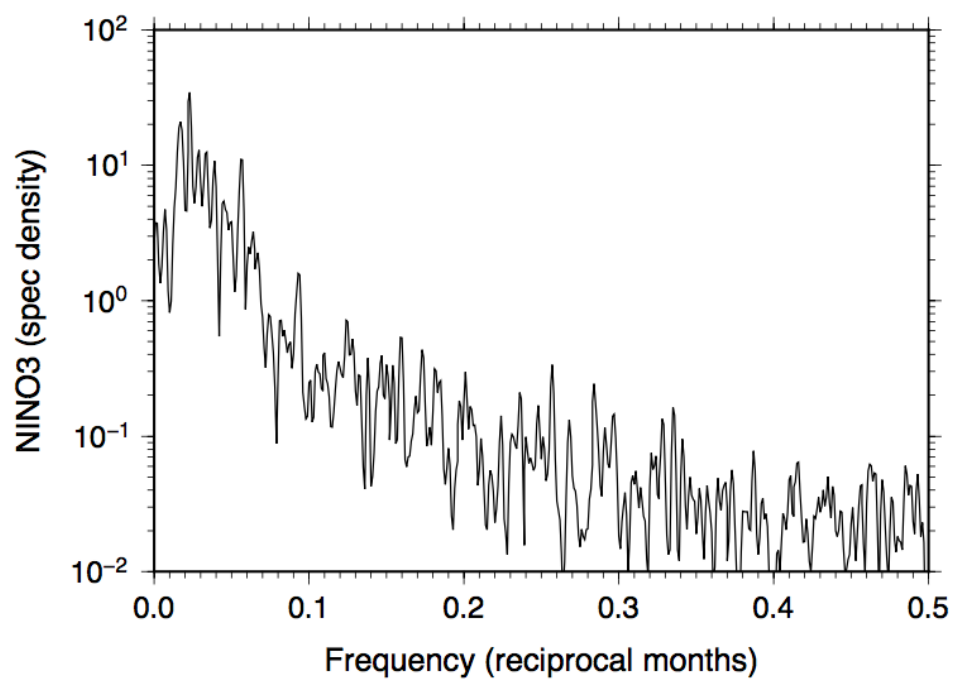


図 10: NINO3 のパワースペクトル. 横軸は振動数を, 縦軸はスペクトル密度を示す.

Power Spectrum

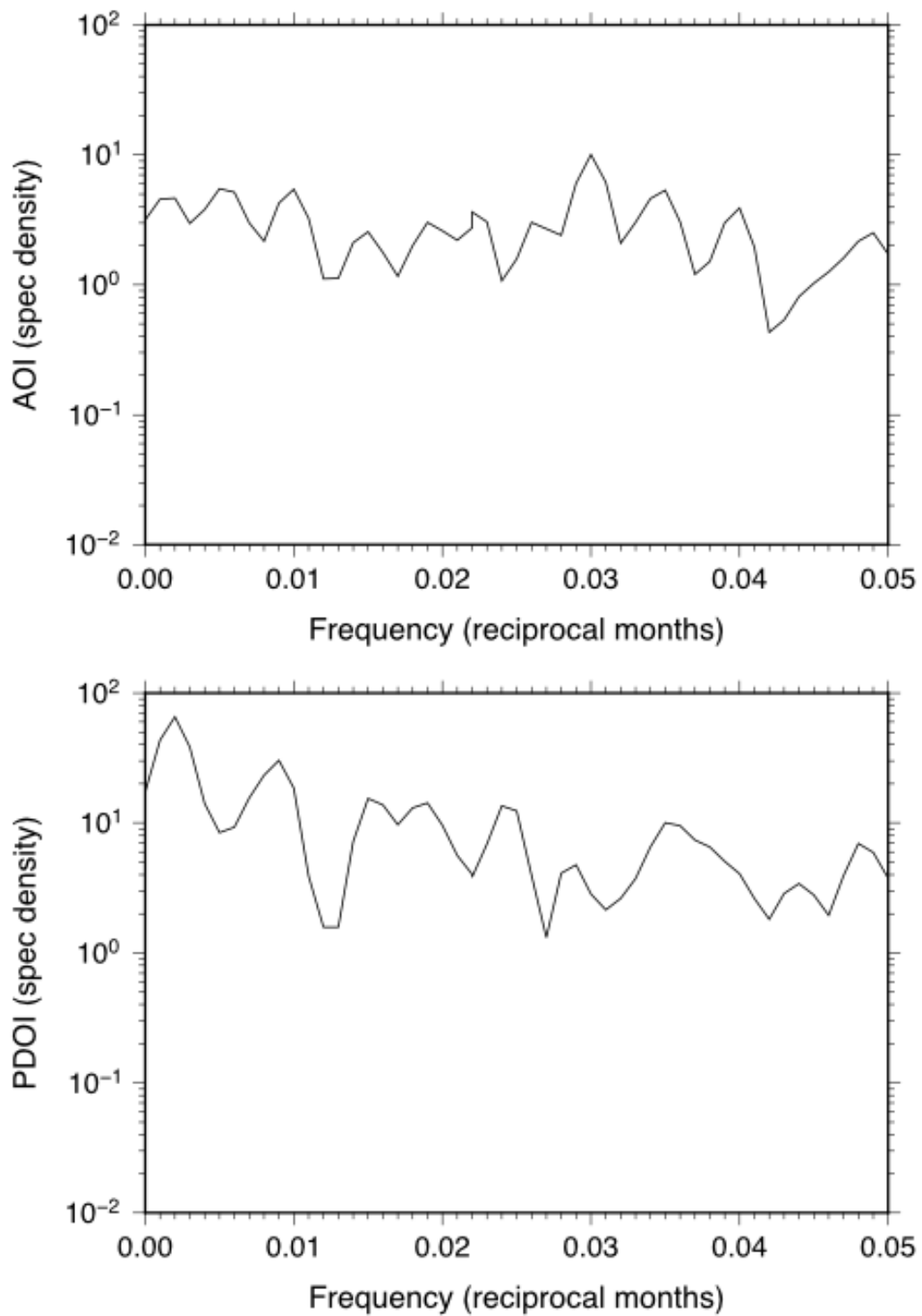


図 11: AOI と PDOI の長周期のパワースペクトル。横軸は振動数を、縦軸はスペクトル密度を示す。

Power Spectrum

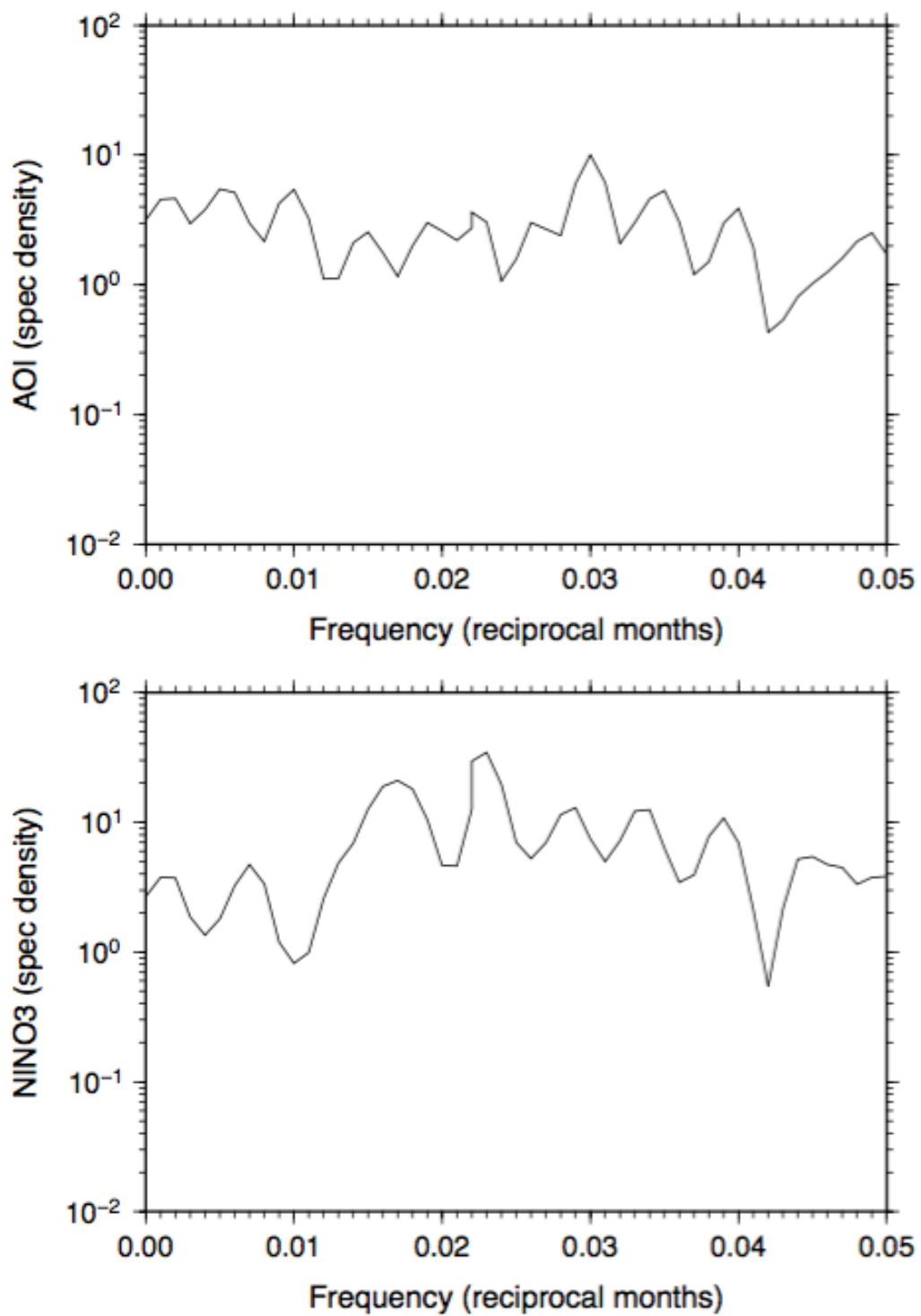


図 12: AOI と NINO3 の長周期のパワースペクトル. 横軸は振動数を, 縦軸はスペクトル密度を示す.

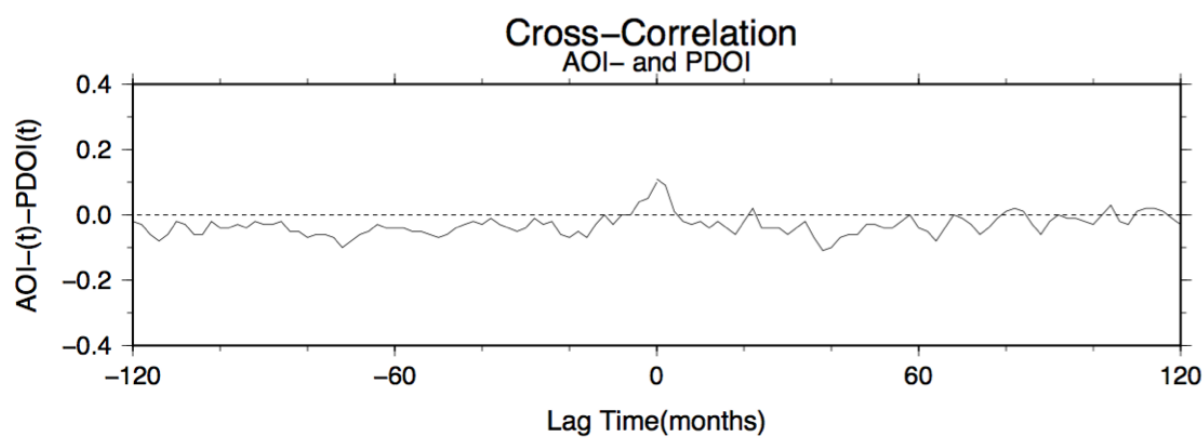


図 13: AOI- と PDOI の相互相関. 横軸はタイムラグ (月) を, 縦軸は相関を示す.

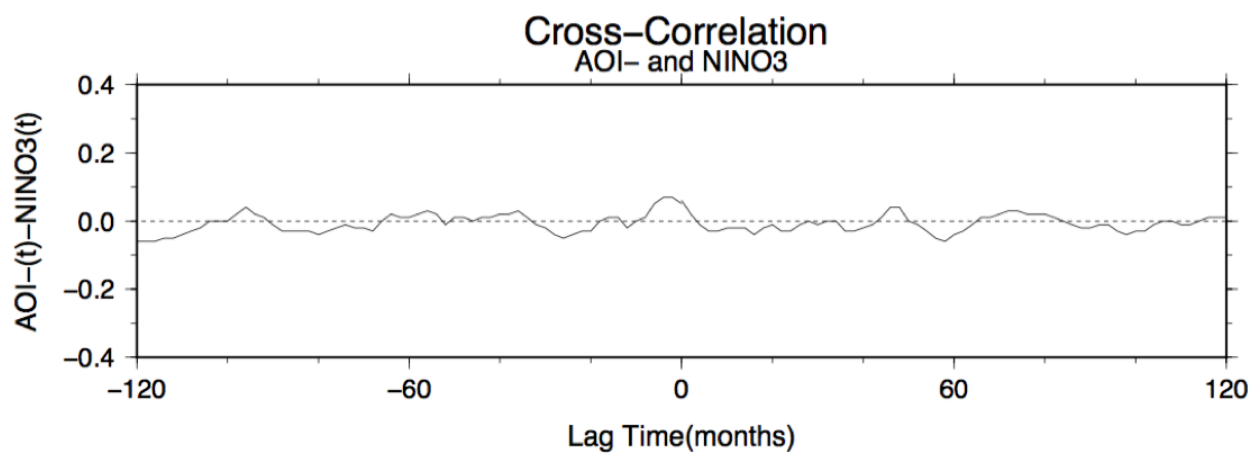


図 14: AOI- と NINO3 の相互相関. 横軸はタイムラグ (月) を, 縦軸は相関を示す.

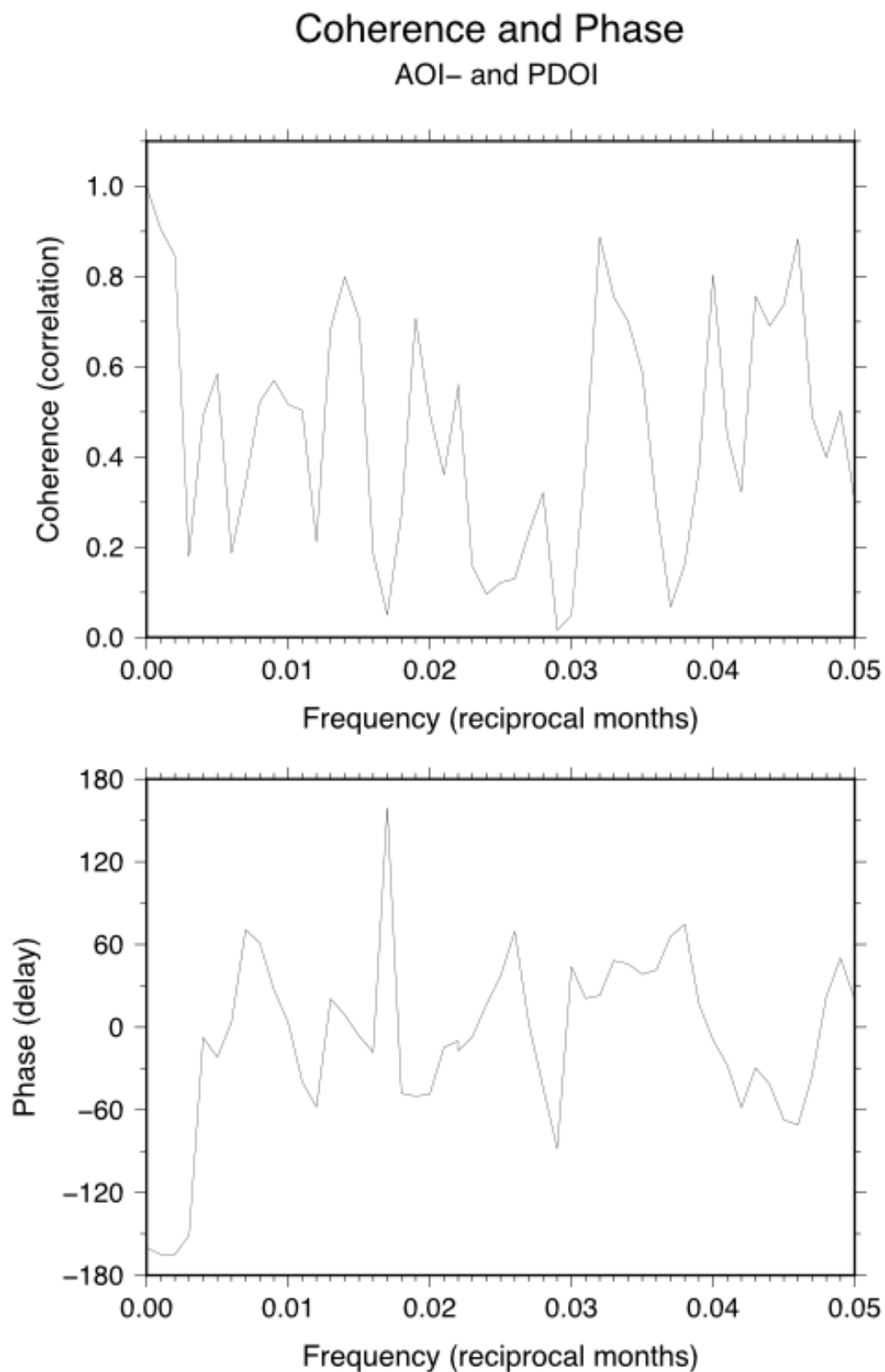


図 15: AOI- と PDOI のコヒーレンスとフェイズ. 上図がコヒーレンス, 下図がフェイズを示す. 横軸は振動数. 縦軸はコヒーレンスは相関の強さを, フェイズは位相ズレを示す.

Coherence and Phase

AOI- and NINO3

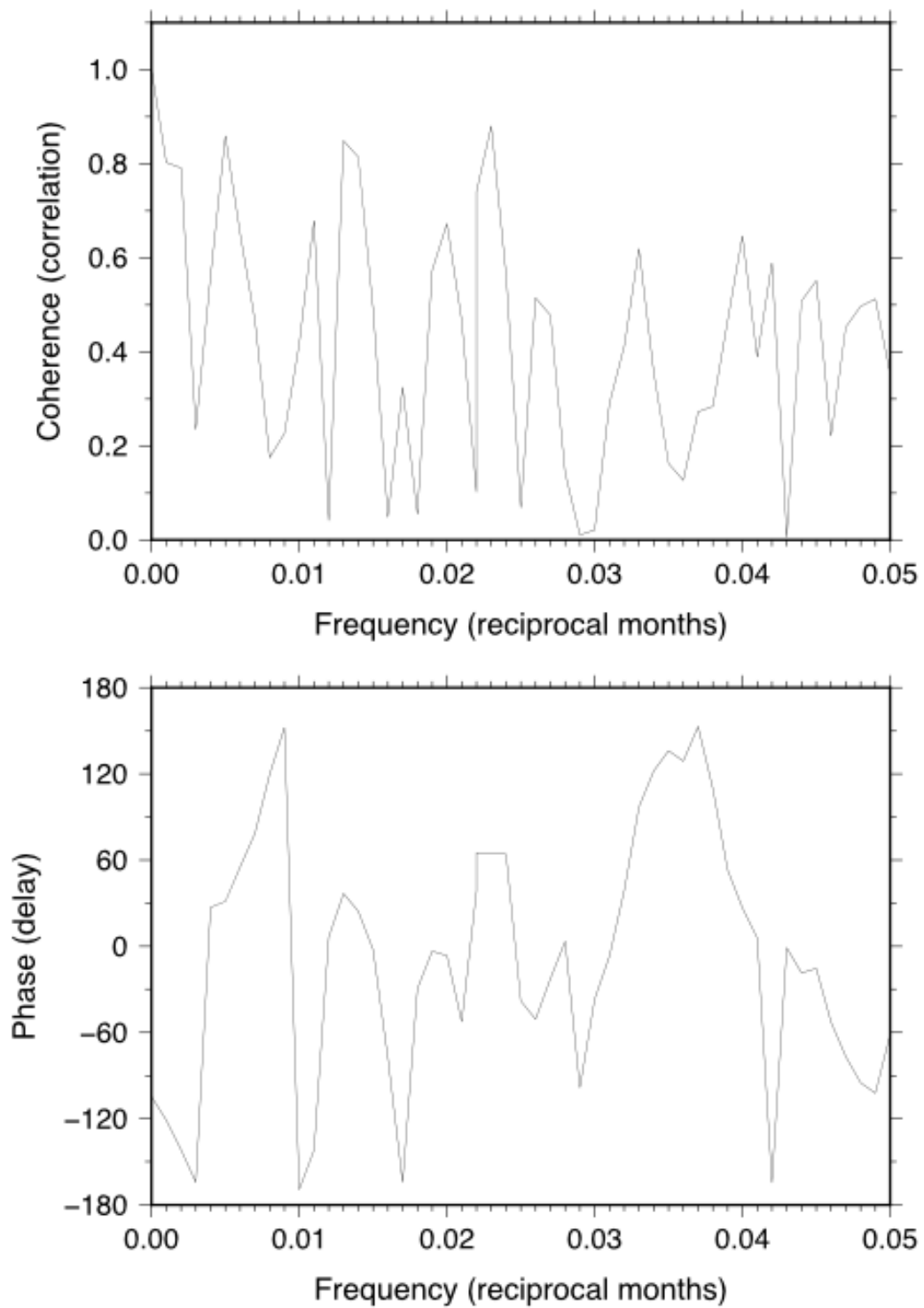


図 16: AOI- と NINO3 のコヒーレンスとフェイズ. 上図がコヒーレンス, 下図がフェイズを示す. 横軸は振動数. 縦軸はコヒーレンスは相関の強さを, フェイズは位相ズレを示す.

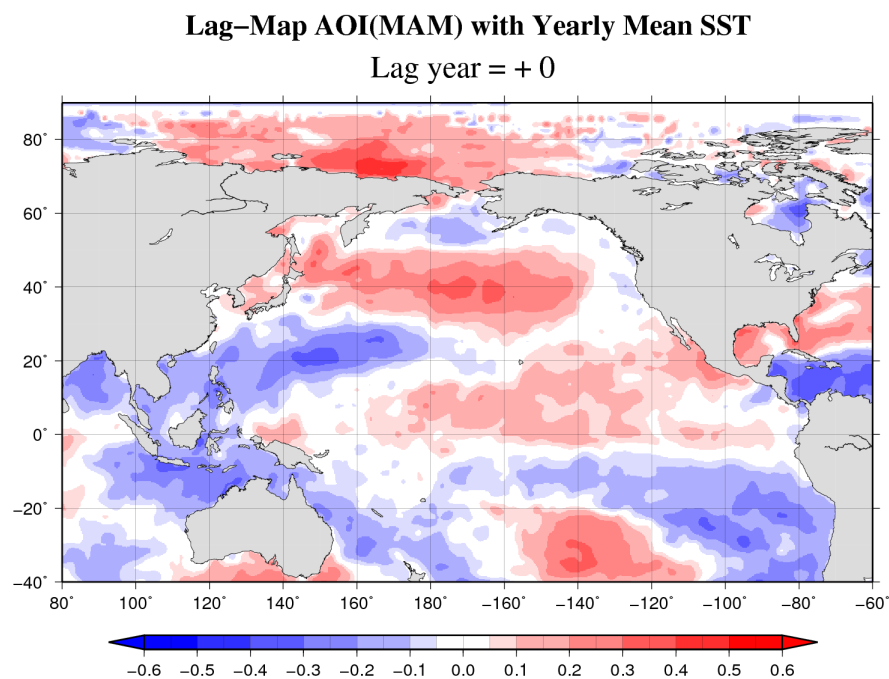


図 17: AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (0 年).

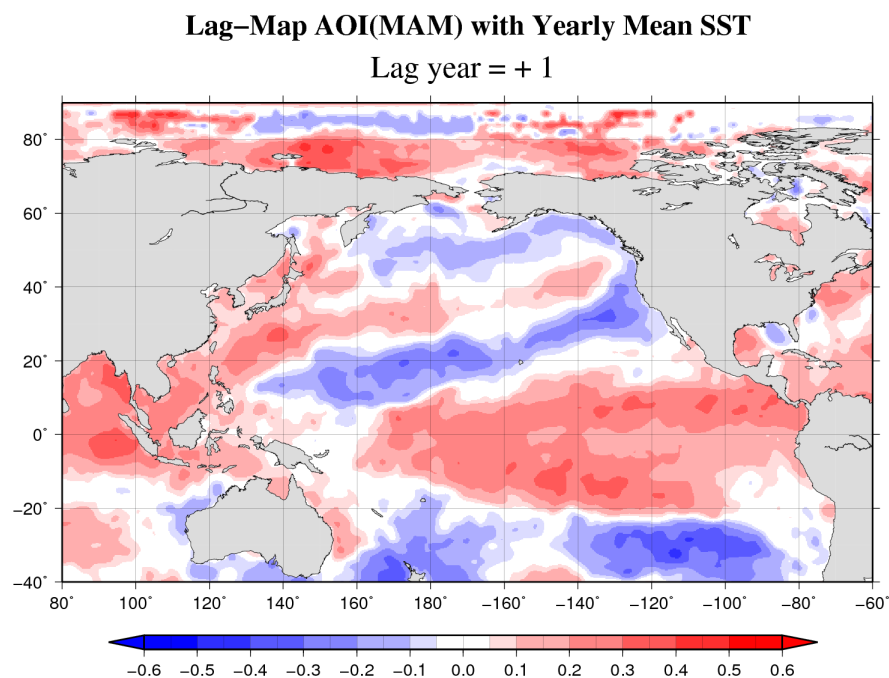


図 18: AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (+1 年).

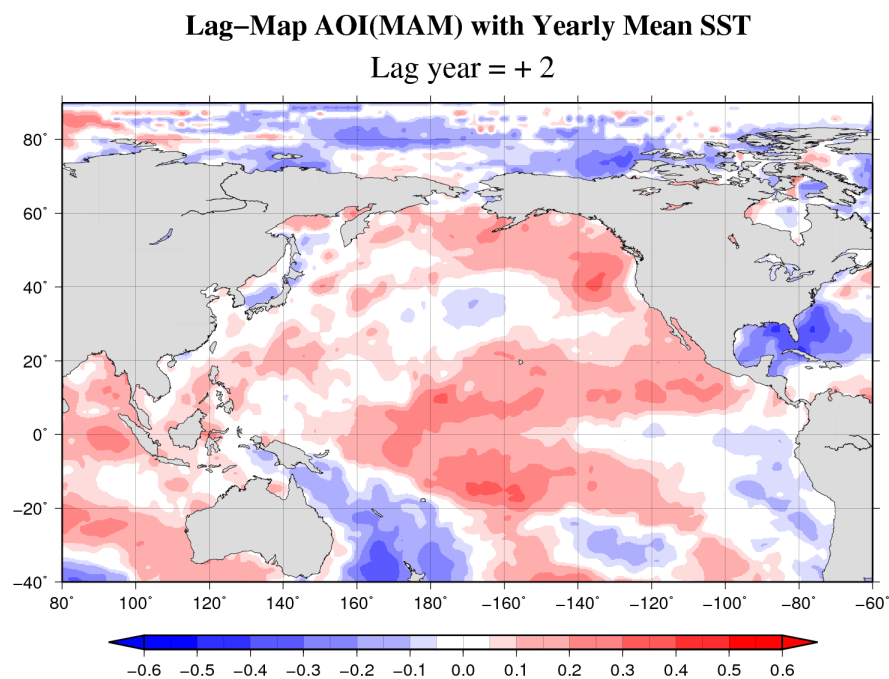


図 19: AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (+2 年).

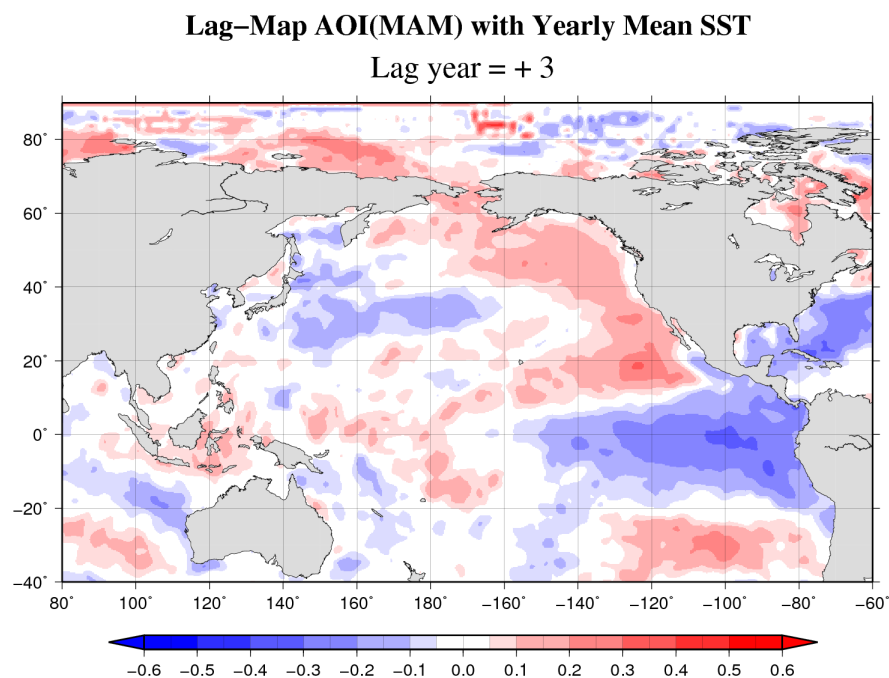


図 20: AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (+3 年).

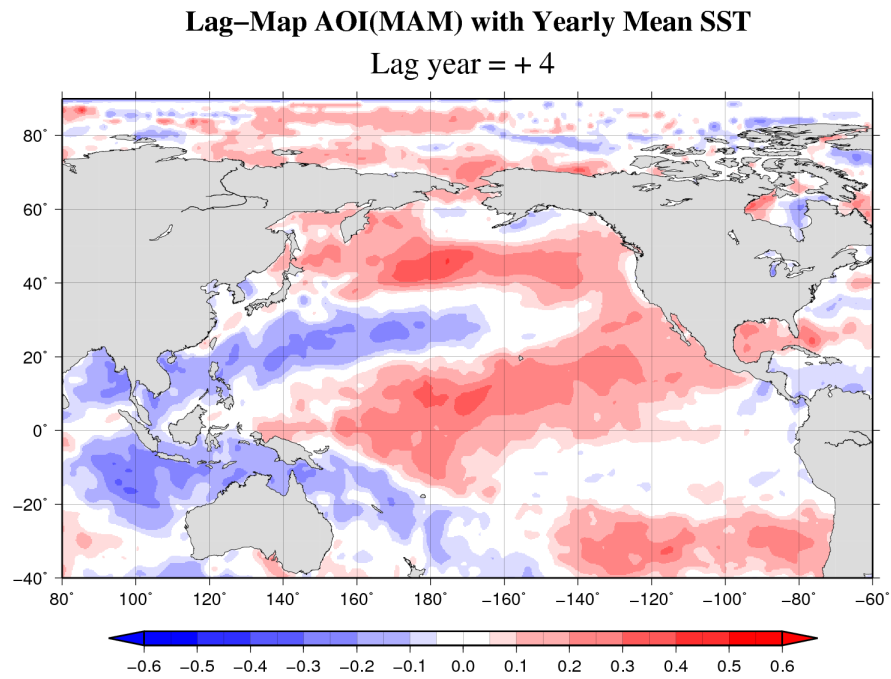


図 21: AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (+4 年).

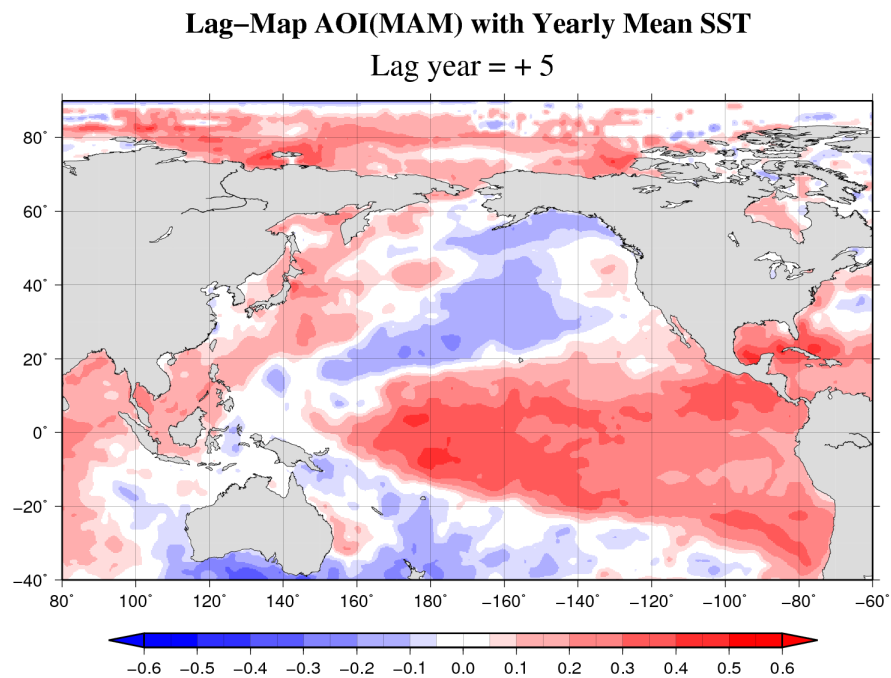


図 22: AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (+5 年).

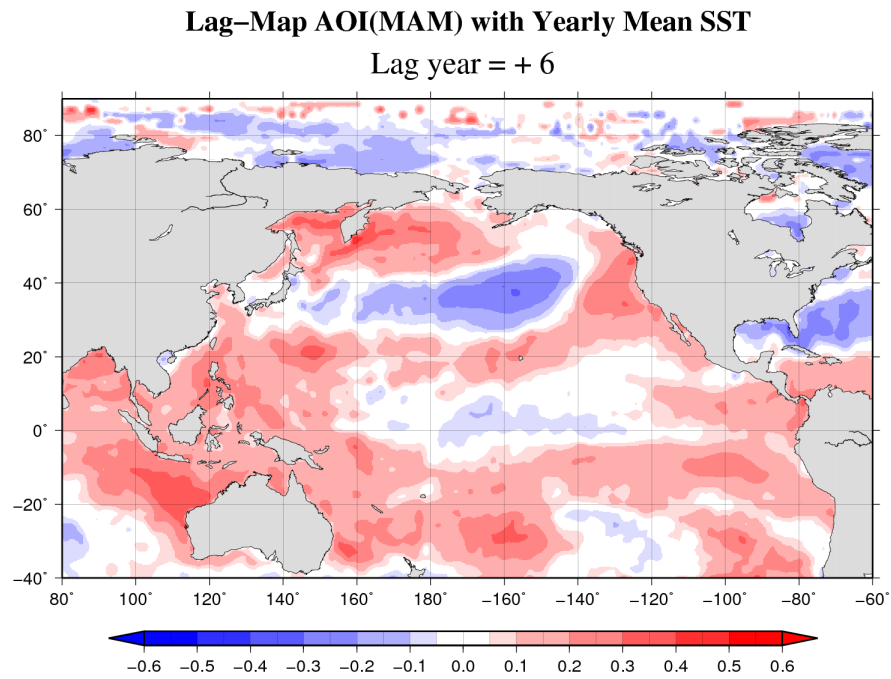


図 23: AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (+6 年).

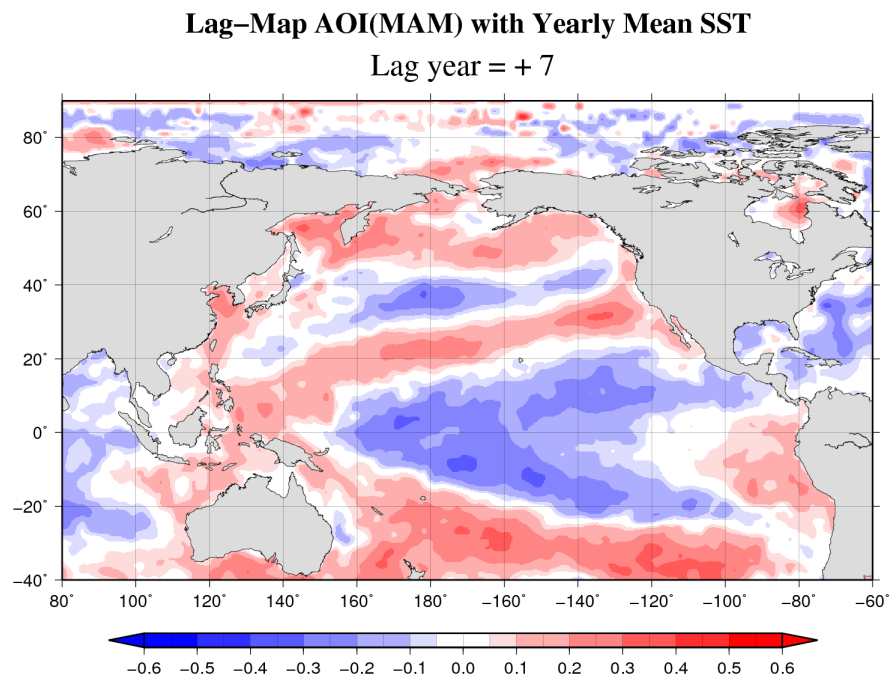


図 24: AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (+7 年).

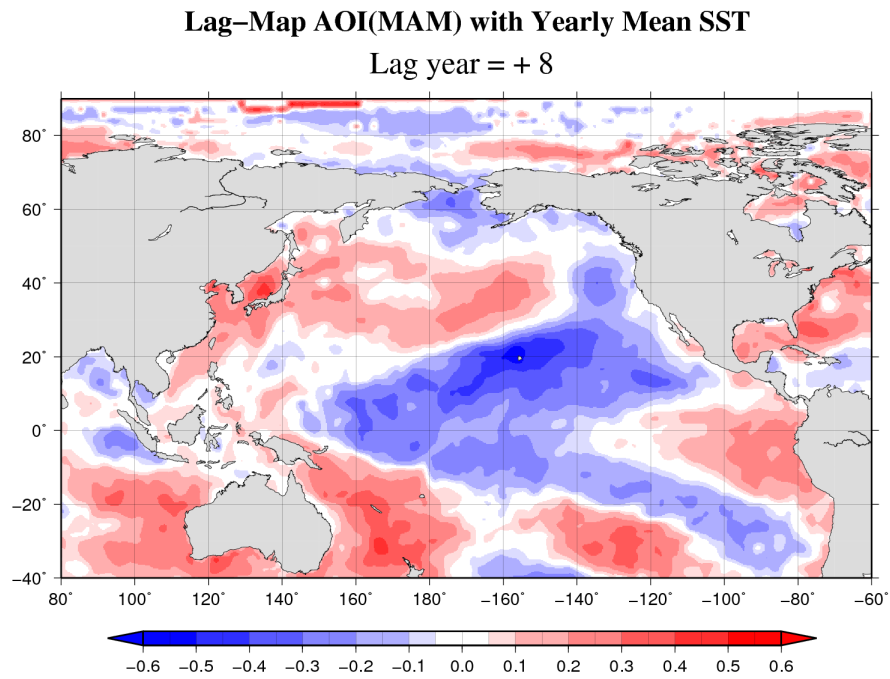


図 25: AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (+8 年).

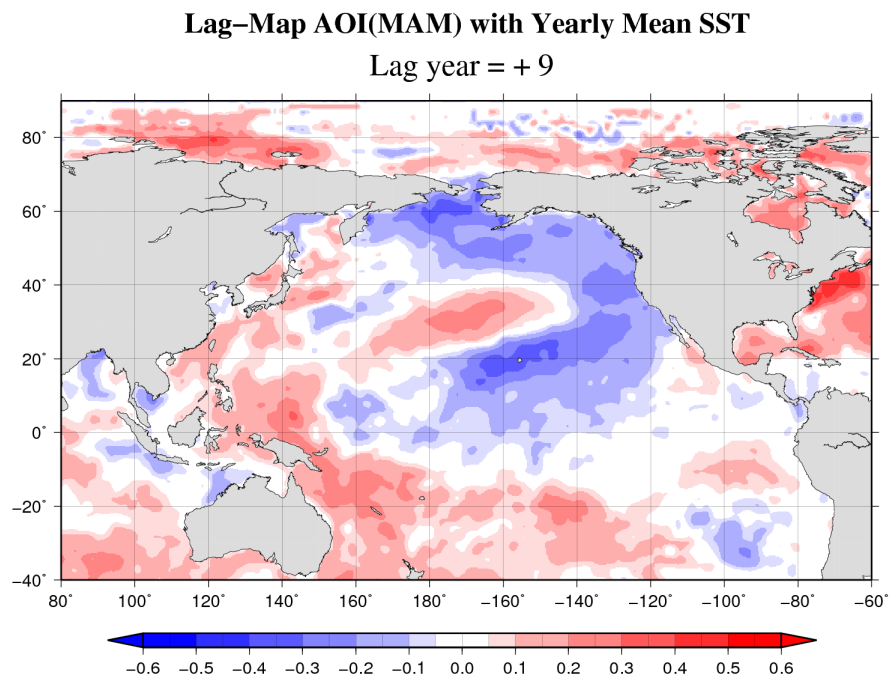


図 26: AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (+9 年).

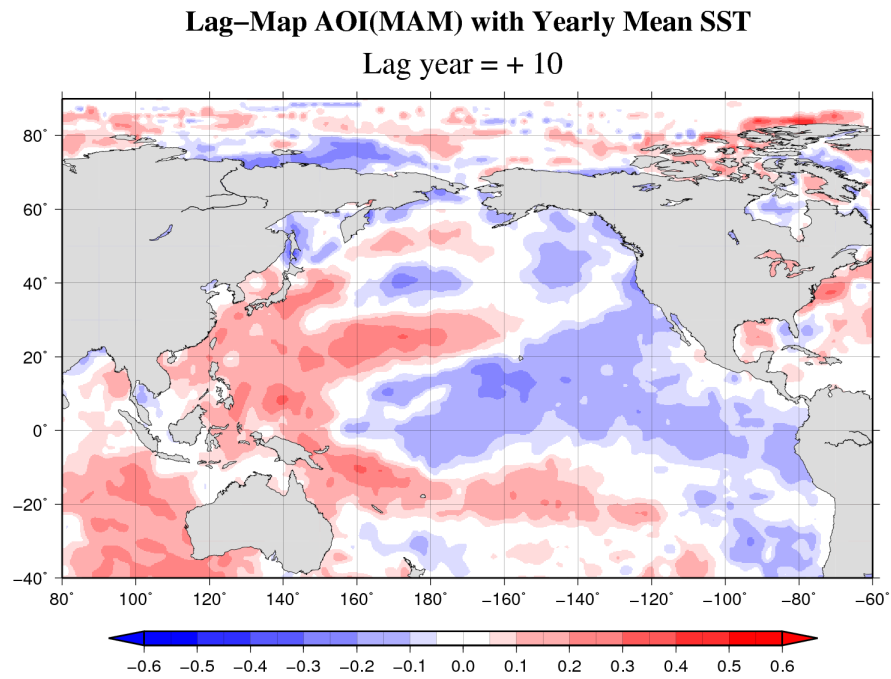


図 27: AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (+10 年).

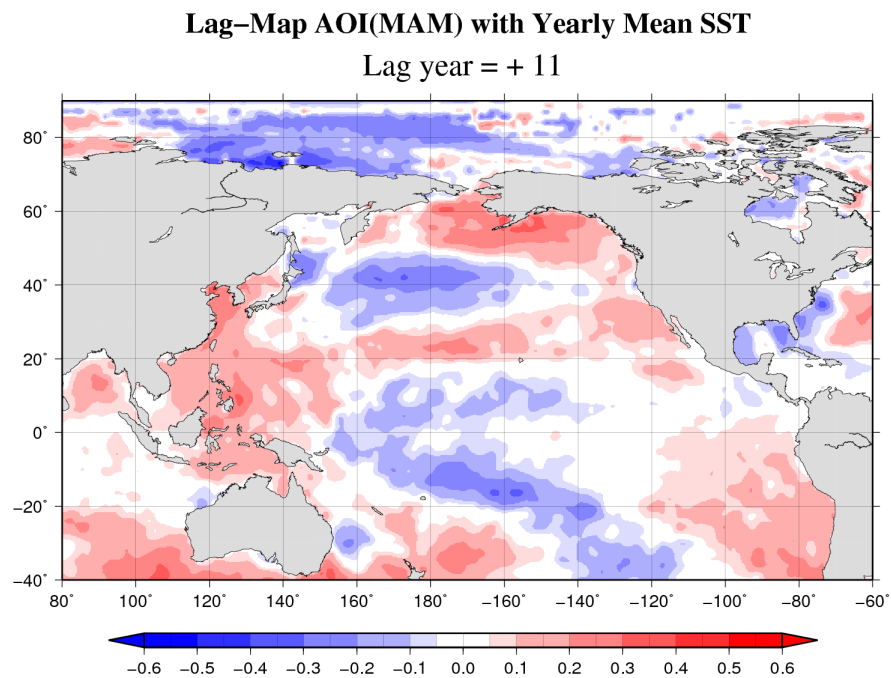


図 28: AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (+11 年).

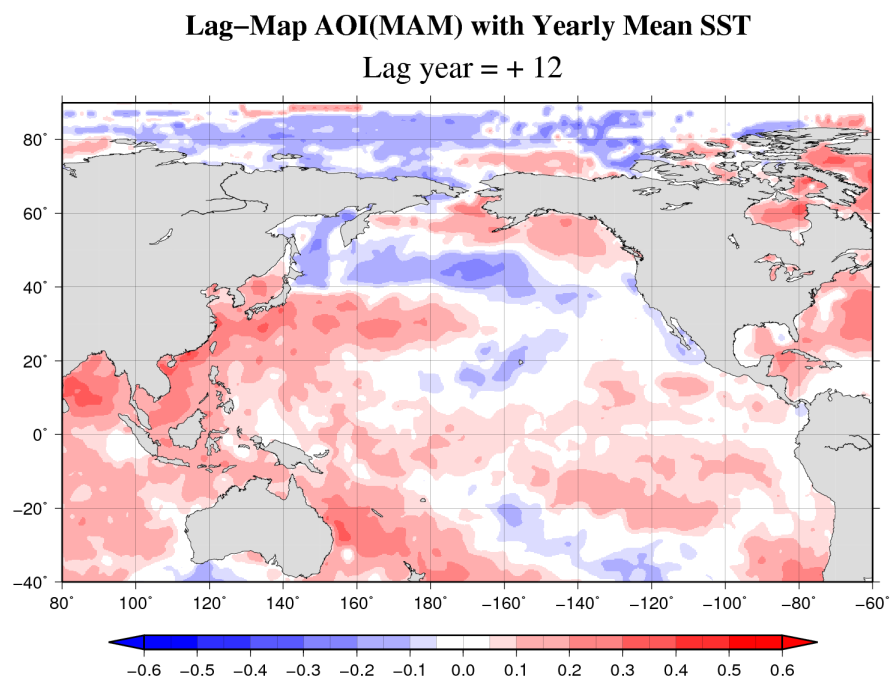


図 29: AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (+12 年).

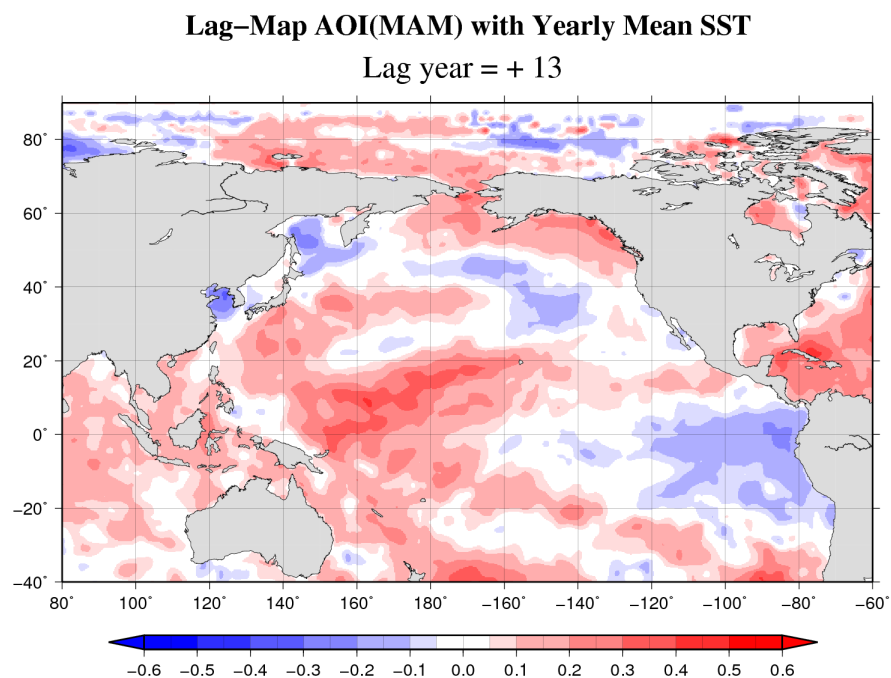


図 30: AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (+13 年).

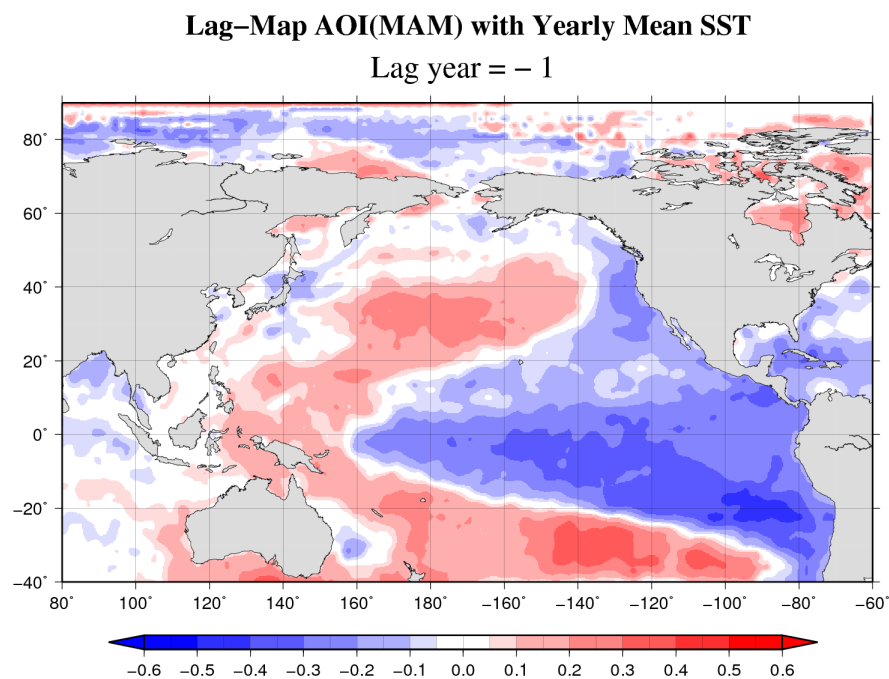


図 31: AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (-1 年).

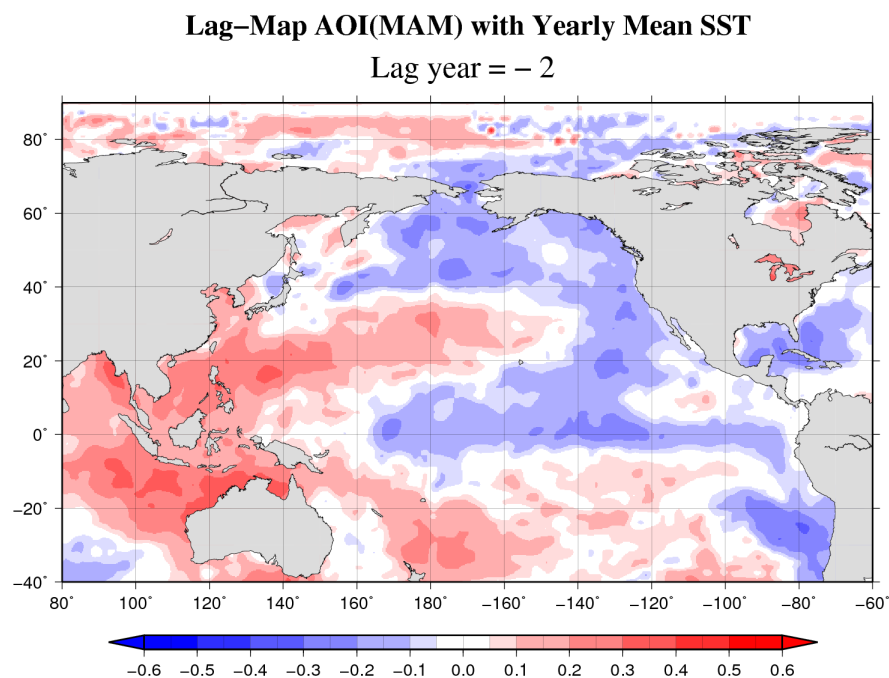


図 32: AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (-2 年).

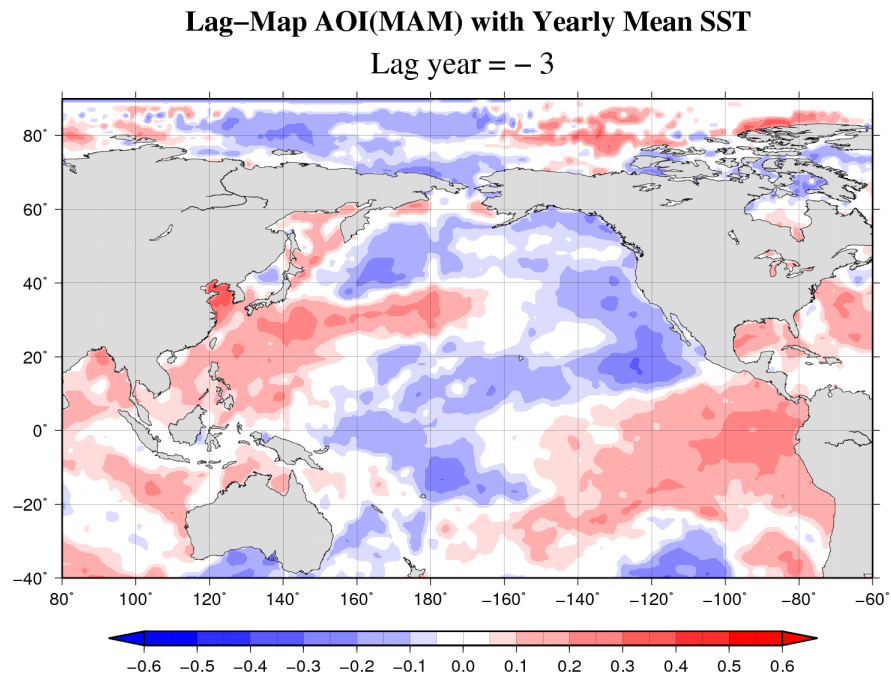


図 33: AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (-3 年).

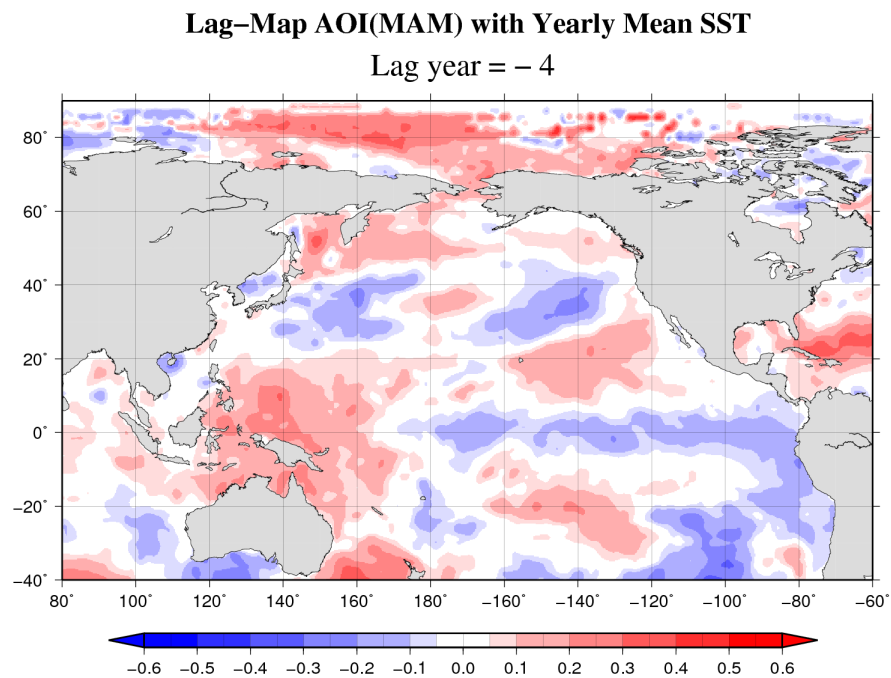


図 34: AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (-4 年).

Lag-Map AOI(MAM) with Yearly Mean SST

Lag year = - 5

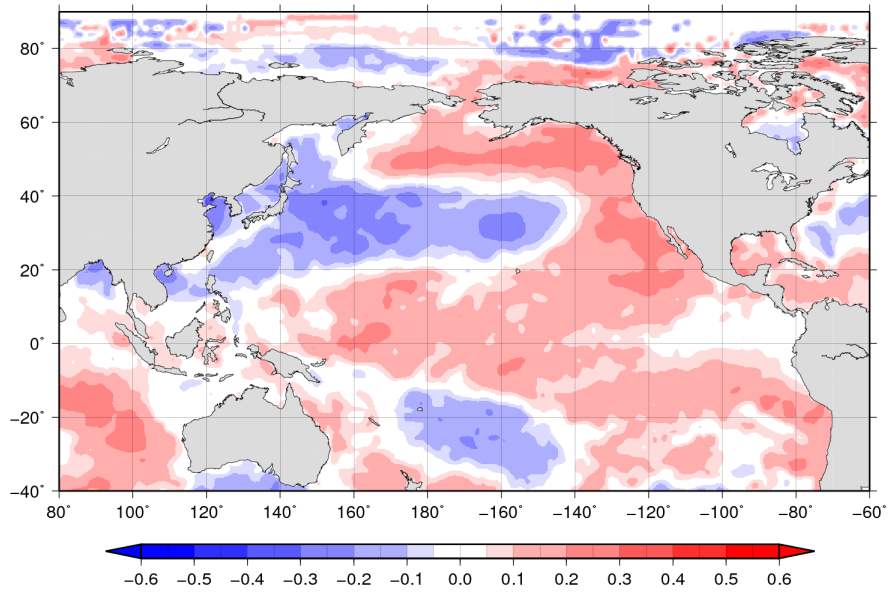


図 35: AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (-5 年).

Lag-Map AOI(MAM) with Yearly Mean SST

Lag year = - 6

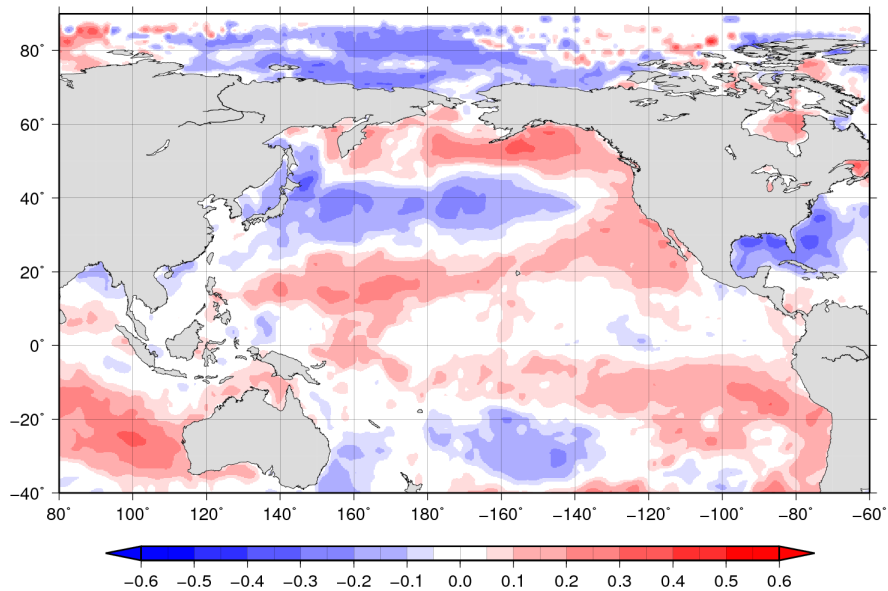


図 36: AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (-6 年).

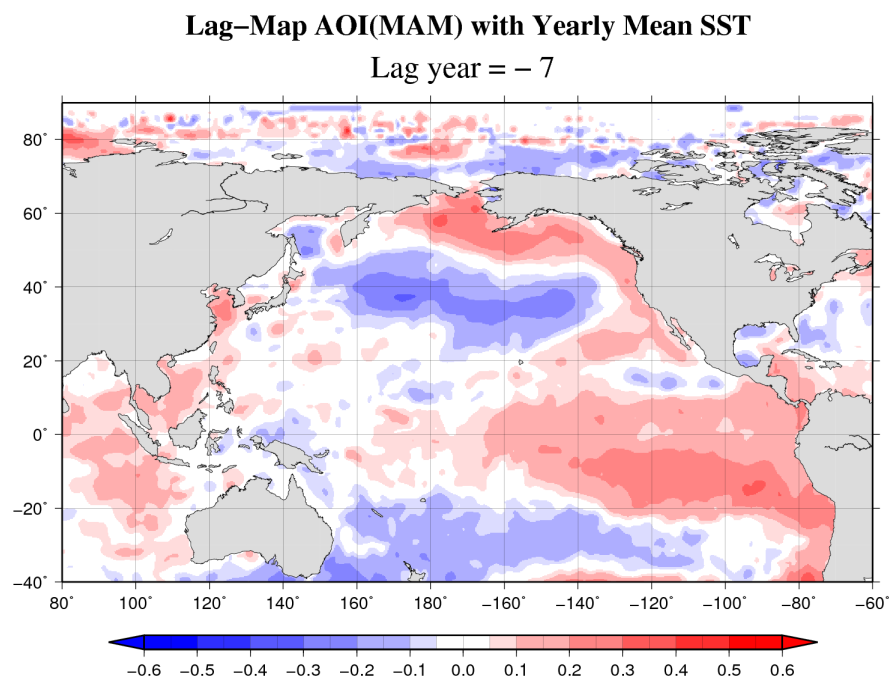


図 37: AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (-7 年).

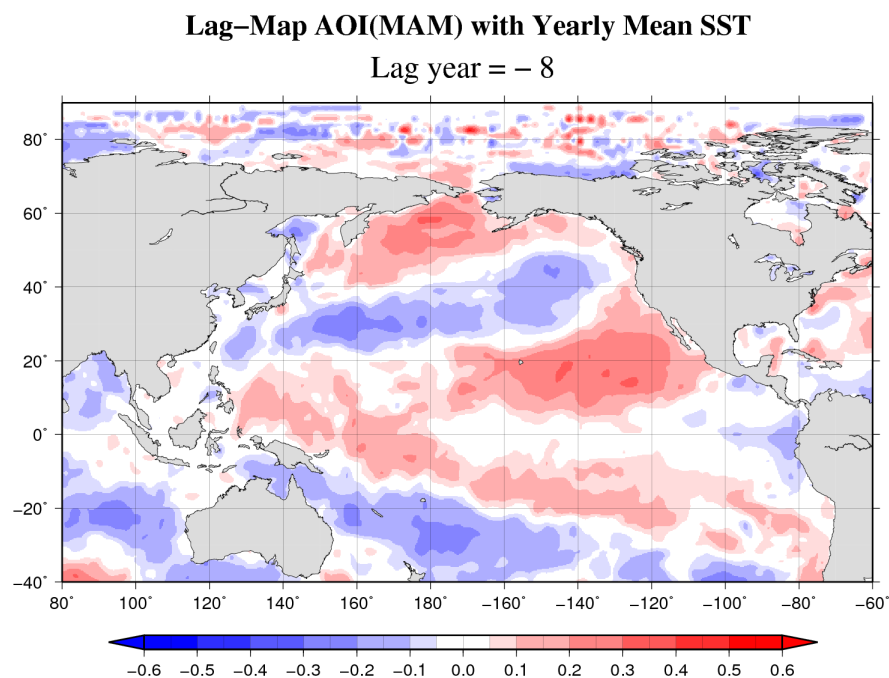


図 38: AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (-8 年).

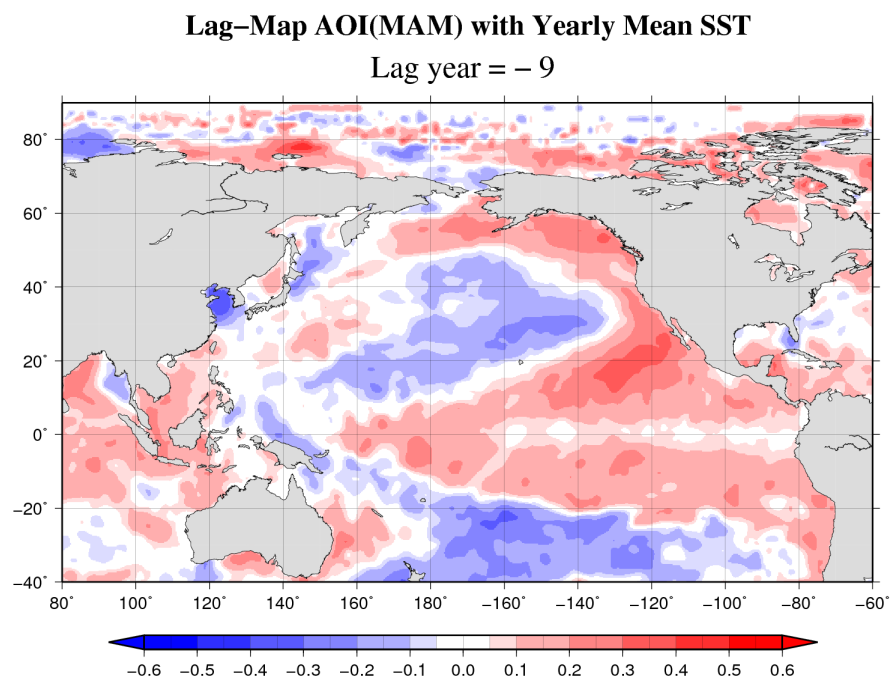


図 39: AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (-9 年).

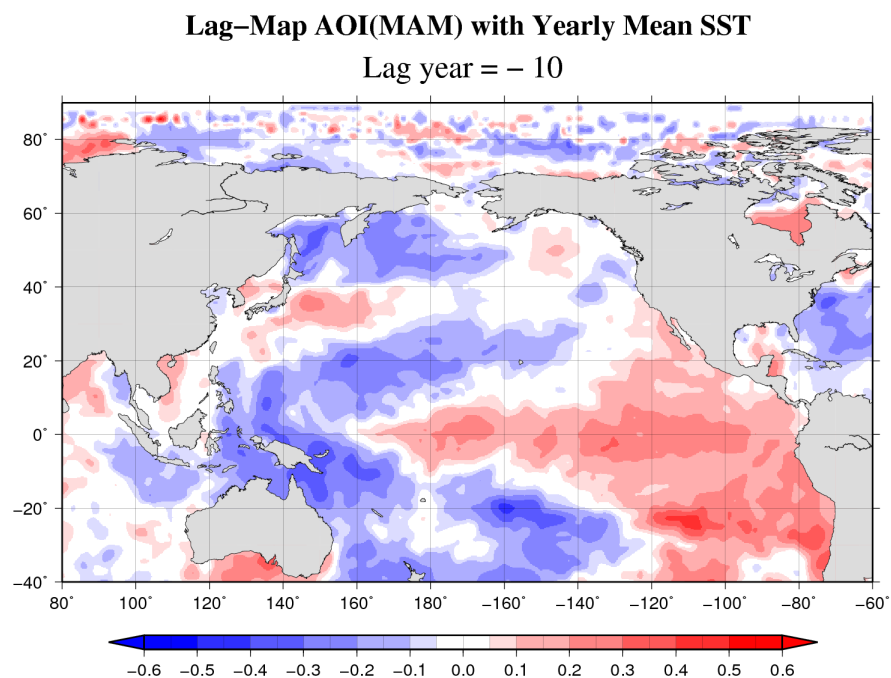


図 40: AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (-10 年).

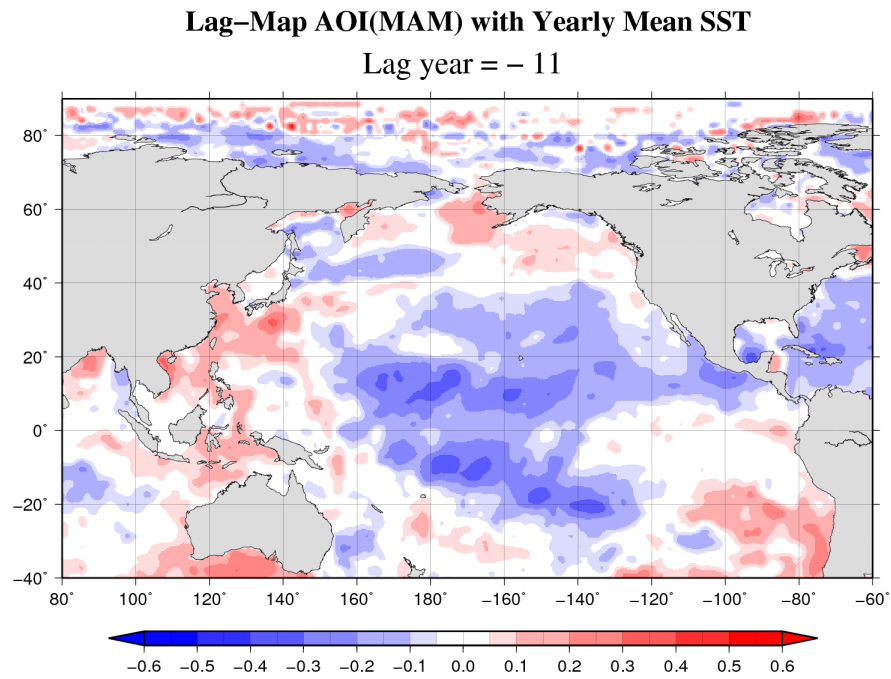


図 41: AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (-11 年).

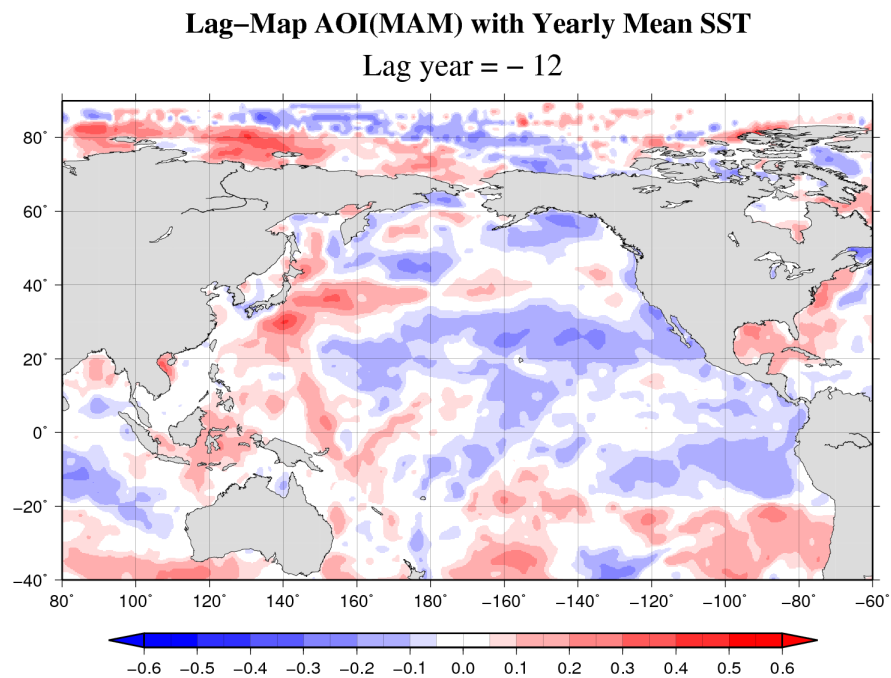


図 42: AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (-12 年).

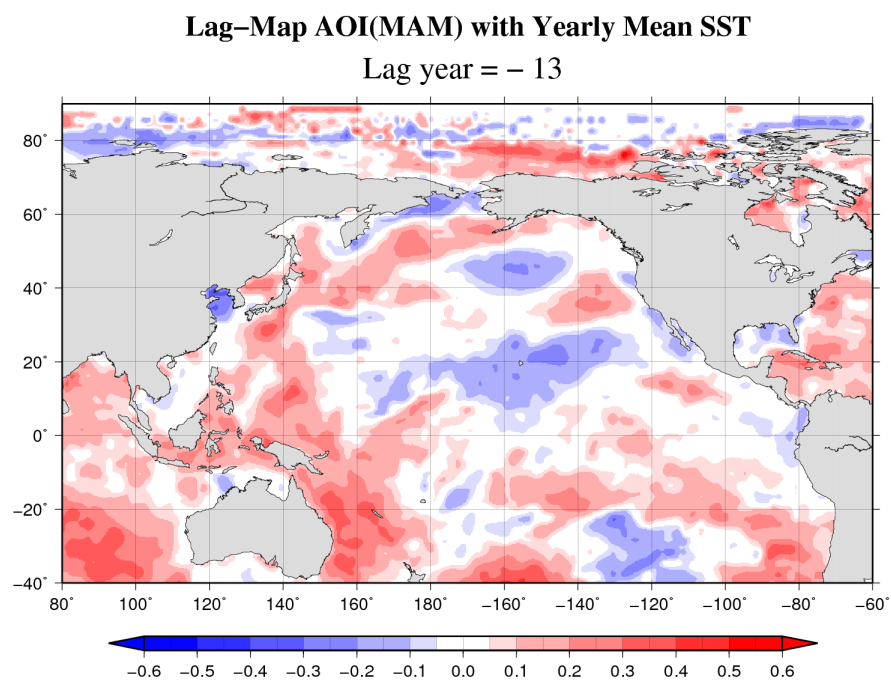


図 43: AOI(MAM) と SST(年平均) のラグマップ (-13 年).

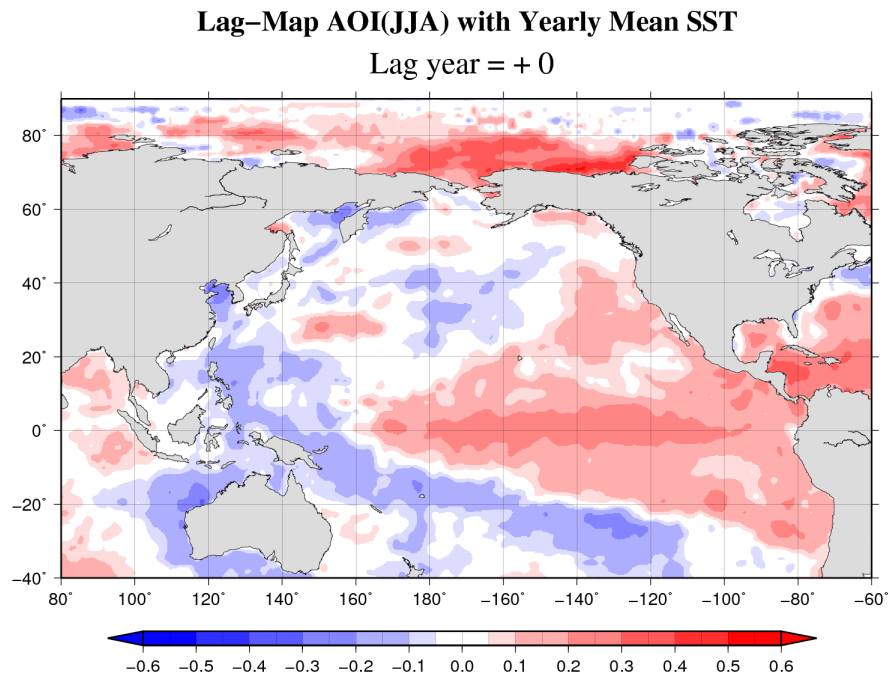


図 44: AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (0 年).

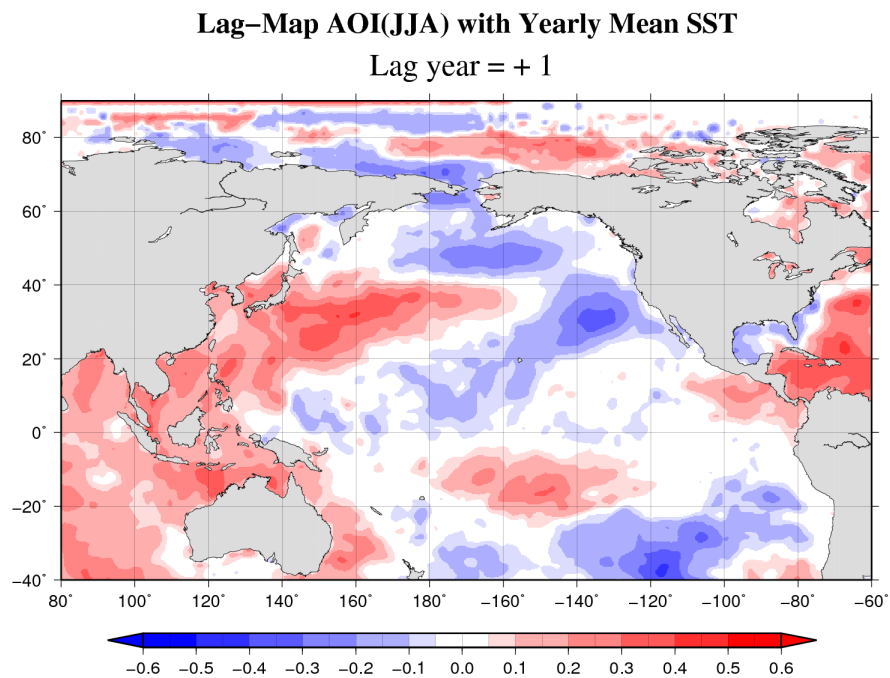


図 45: AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (+1 年).

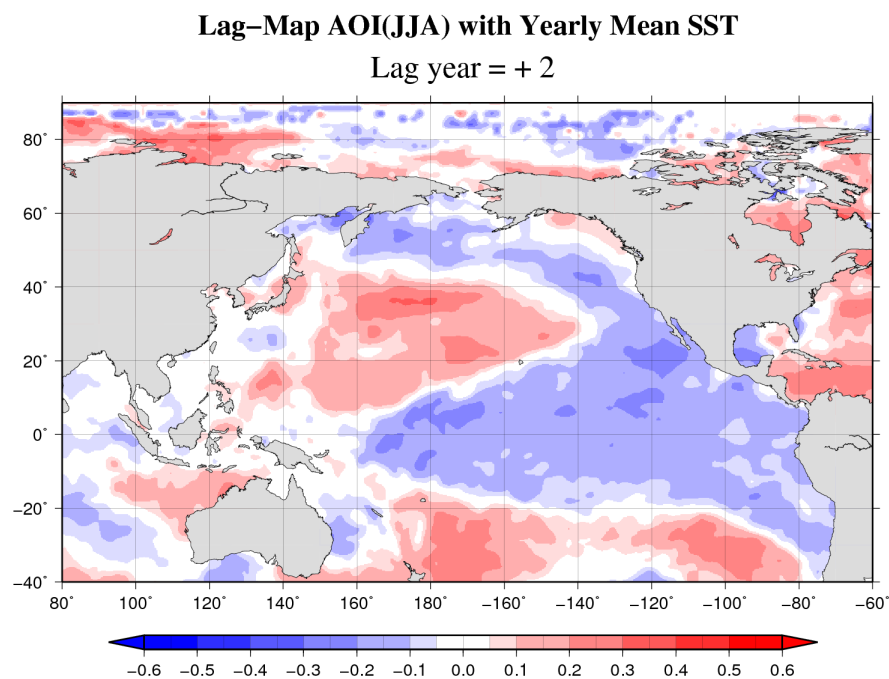


図 46: AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (+2 年).

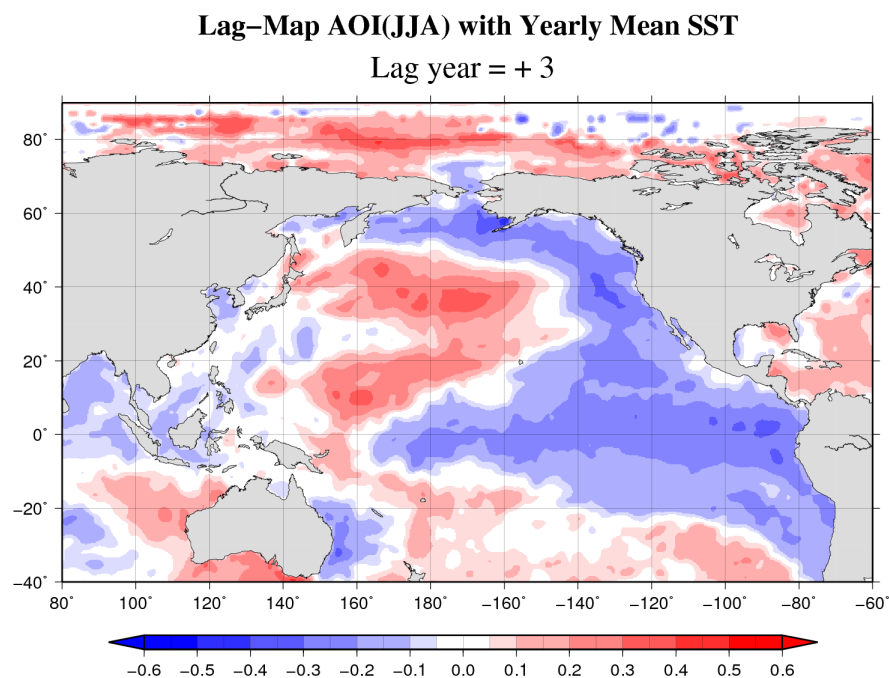


図 47: AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (+3 年).

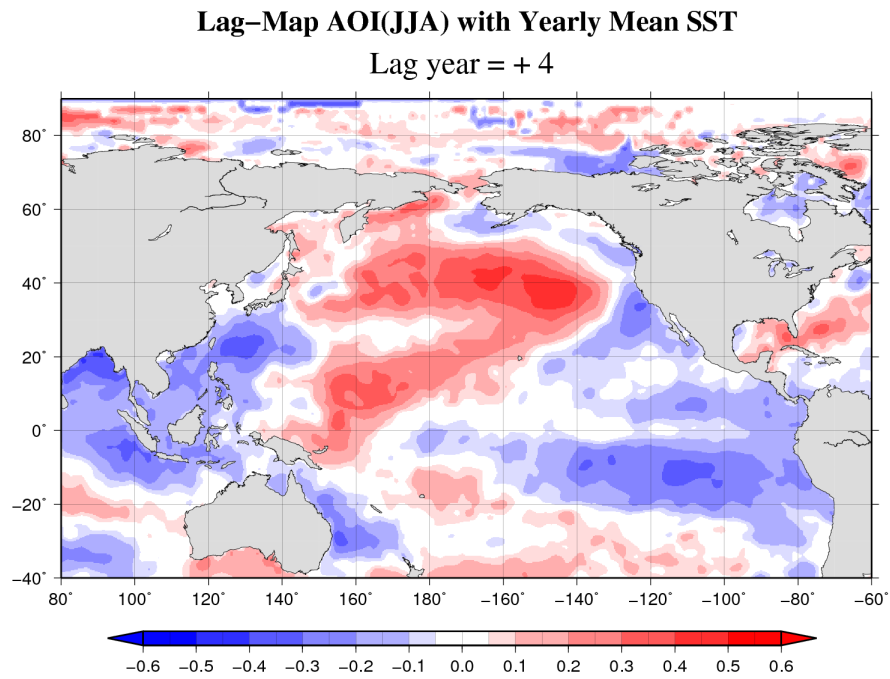


図 48: AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (+4 年).

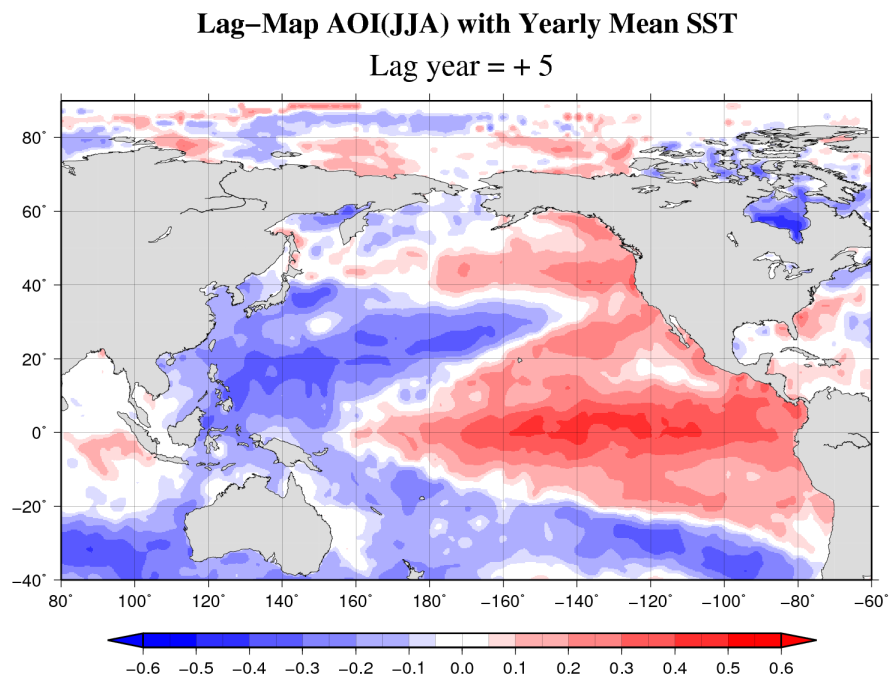


図 49: AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (+5 年).

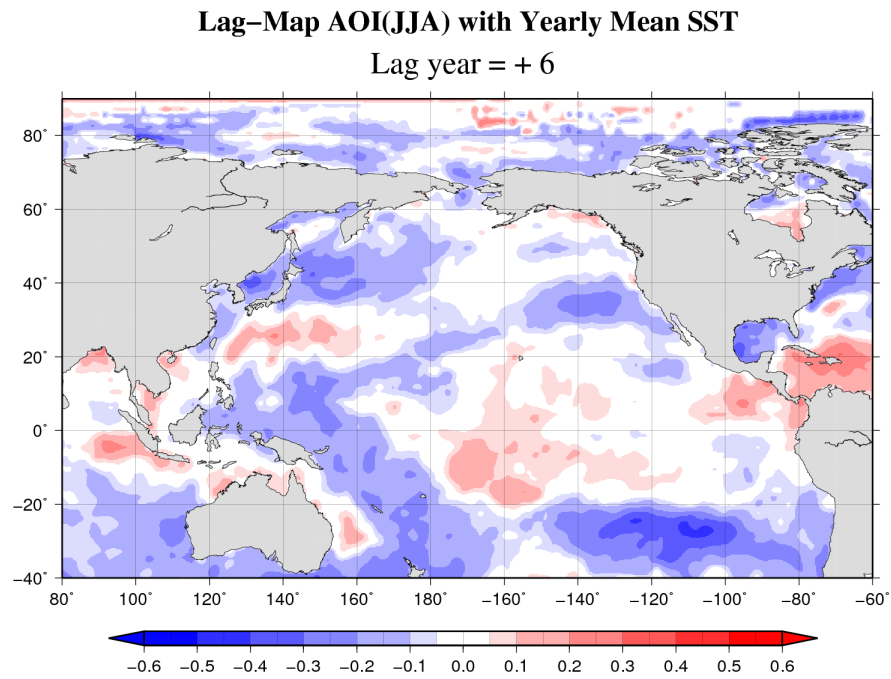


図 50: AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (+6 年).

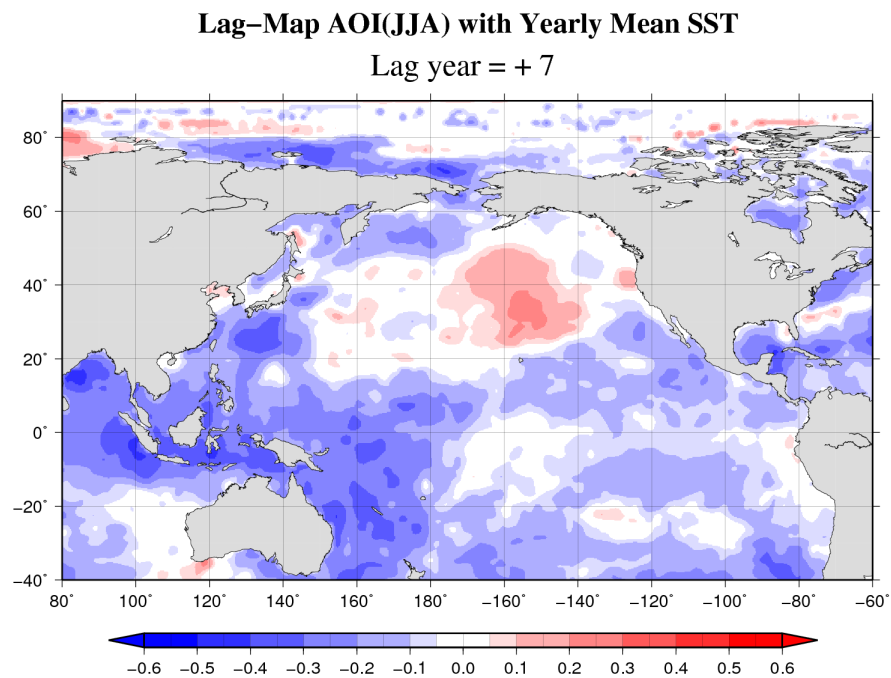


図 51: AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (+7 年).

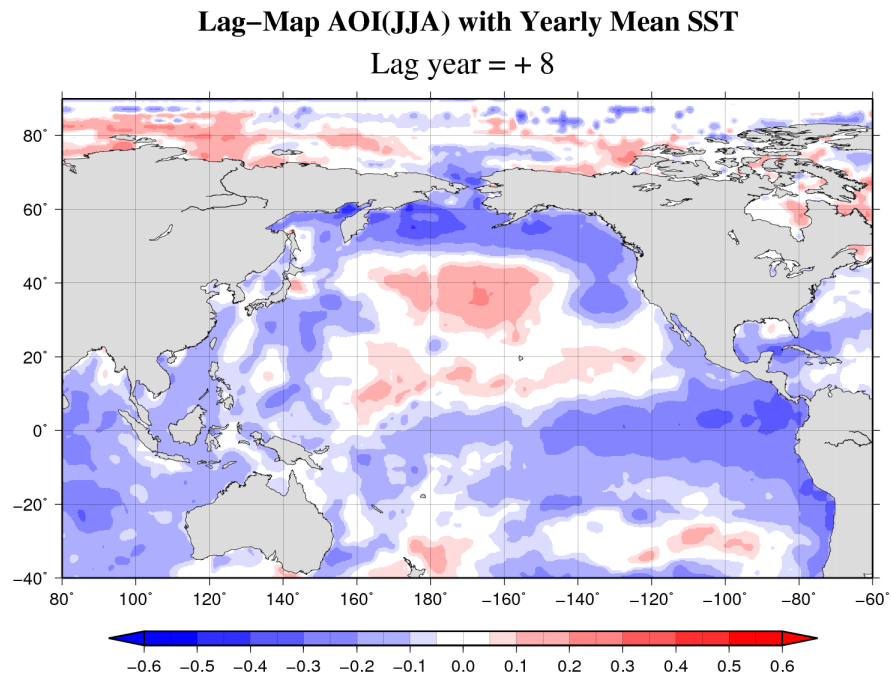


図 52: AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (+8 年).

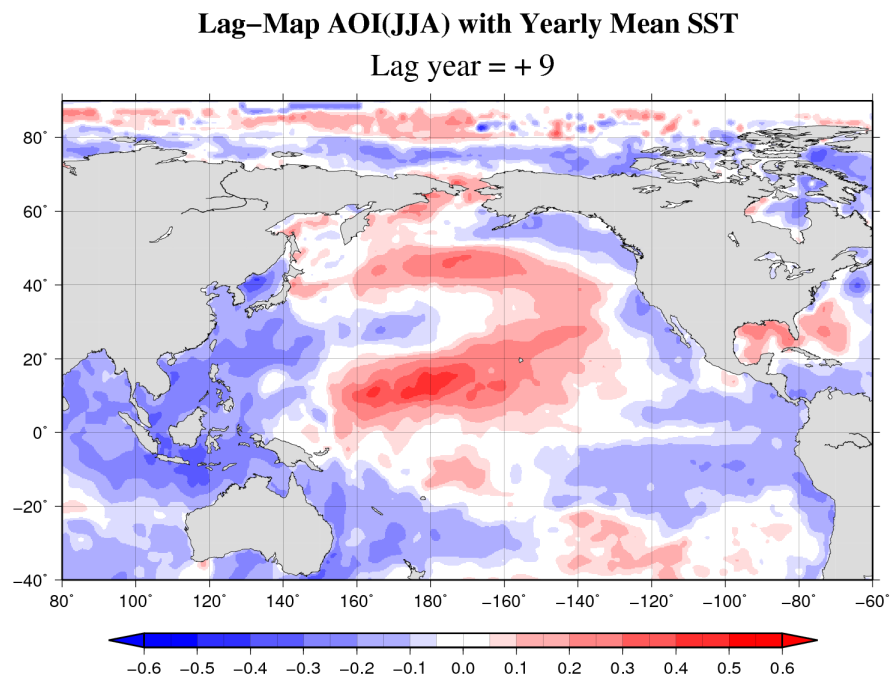


図 53: AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (+9 年).

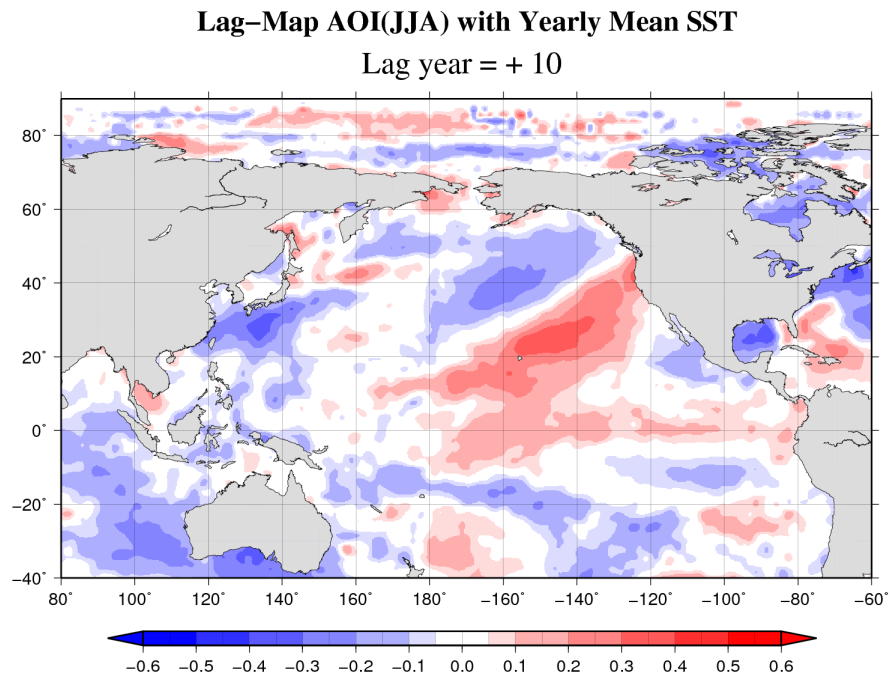


図 54: AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (+10 年).

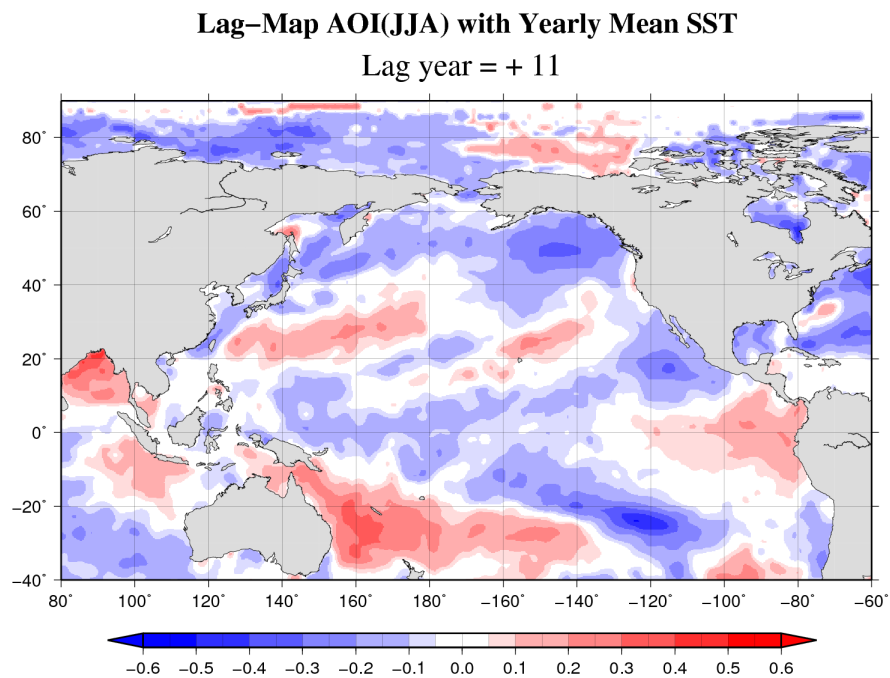


図 55: AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (+11 年).

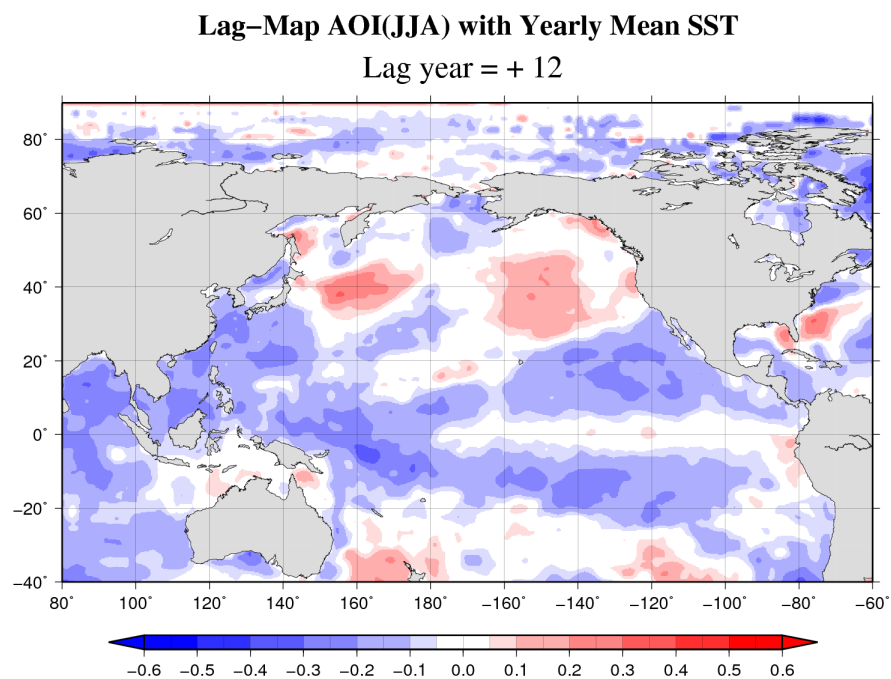


図 56: AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (+12 年).

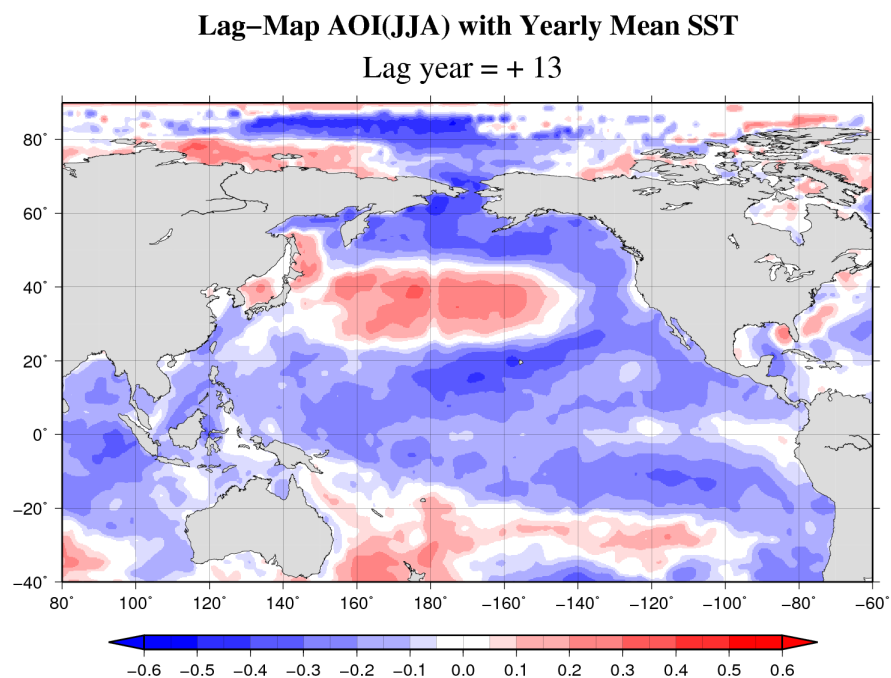


図 57: AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (+13 年).

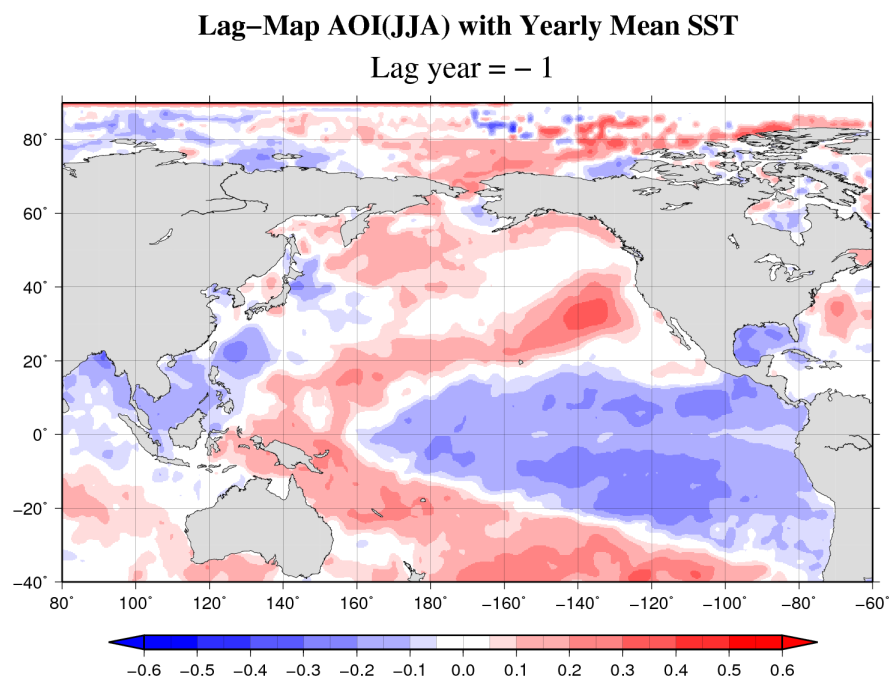


図 58: AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (-1 年).

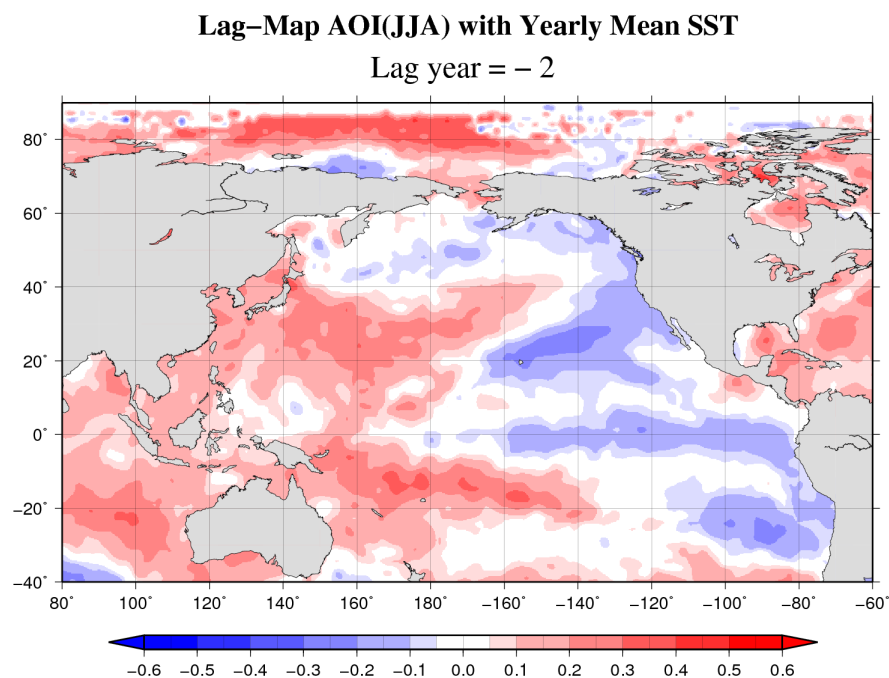


図 59: AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (-2 年).

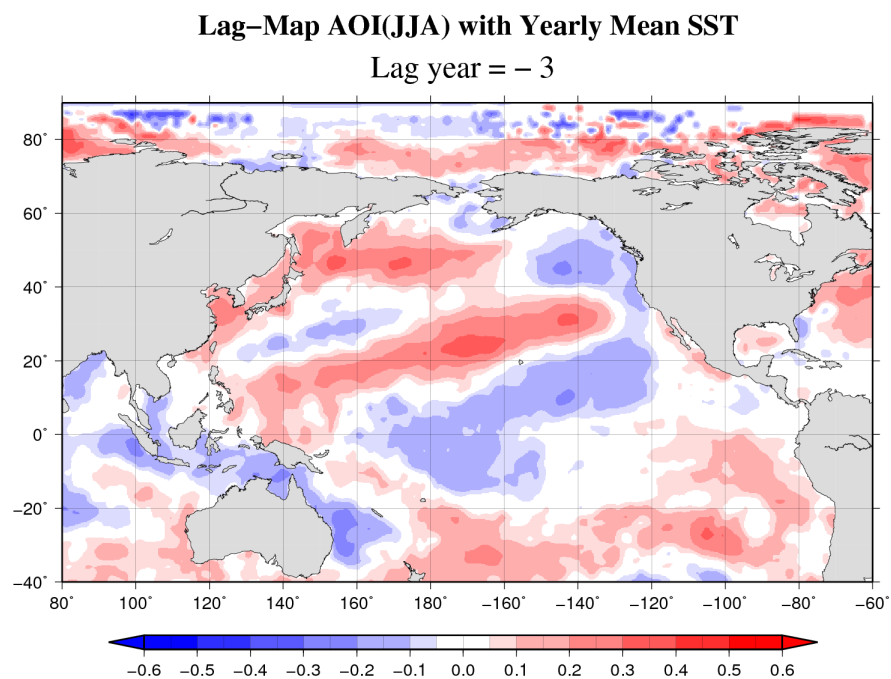


図 60: AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (-3 年).

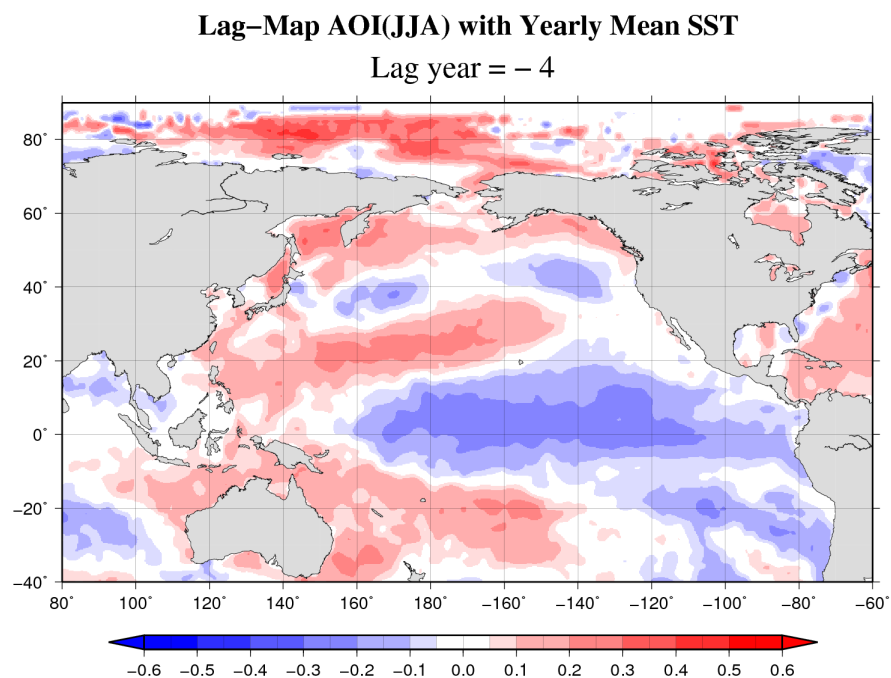


図 61: AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (-4 年).

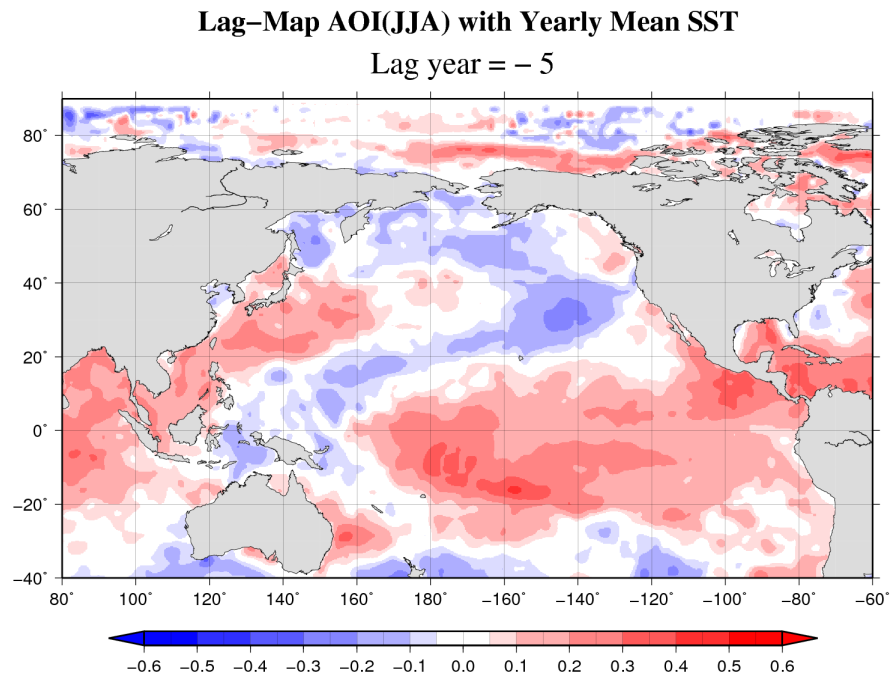


図 62: AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (-5 年).

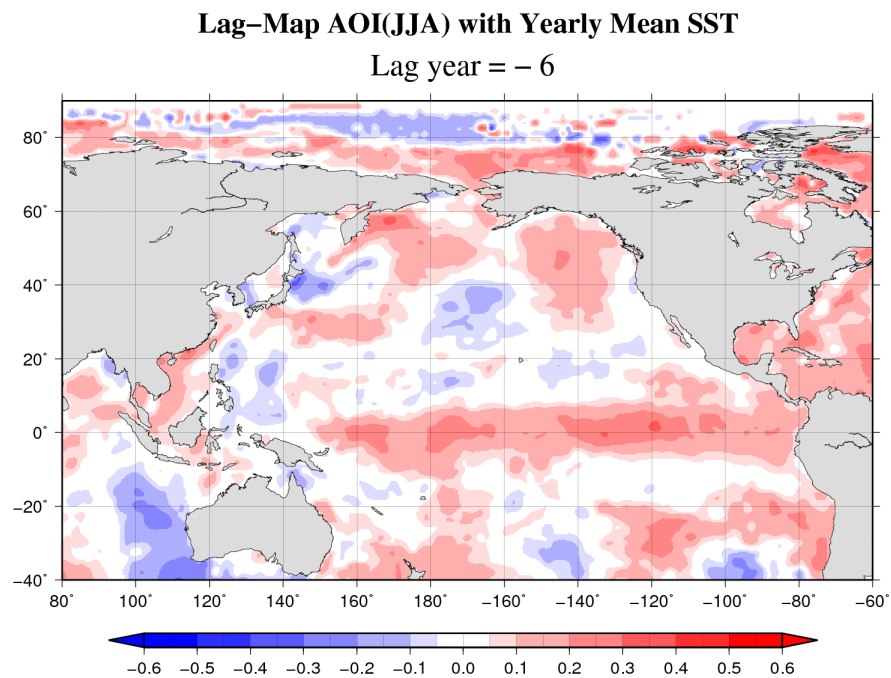


図 63: AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (-6 年).

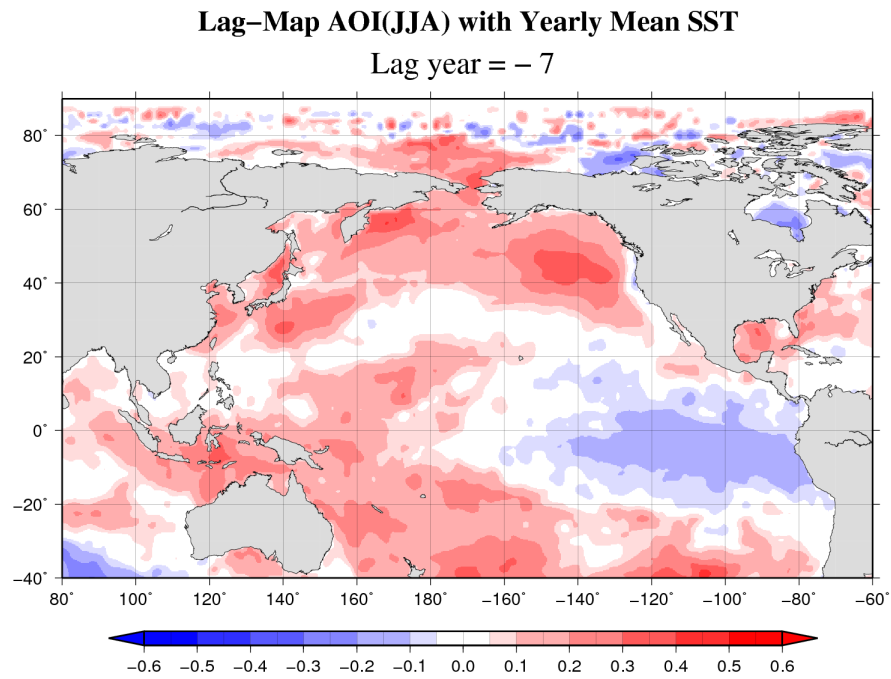


図 64: AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (-7 年).

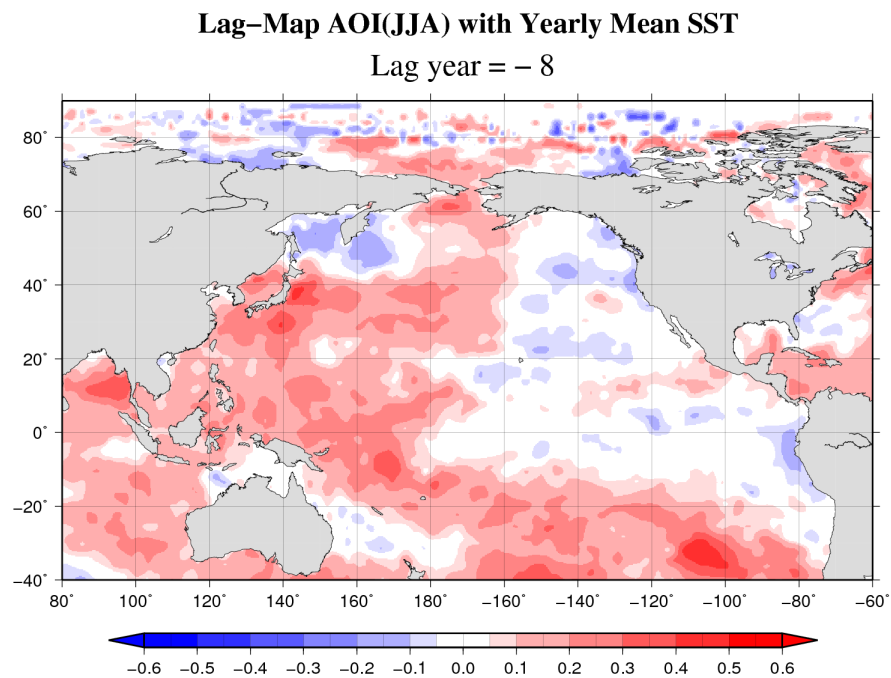


図 65: AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (-8 年).

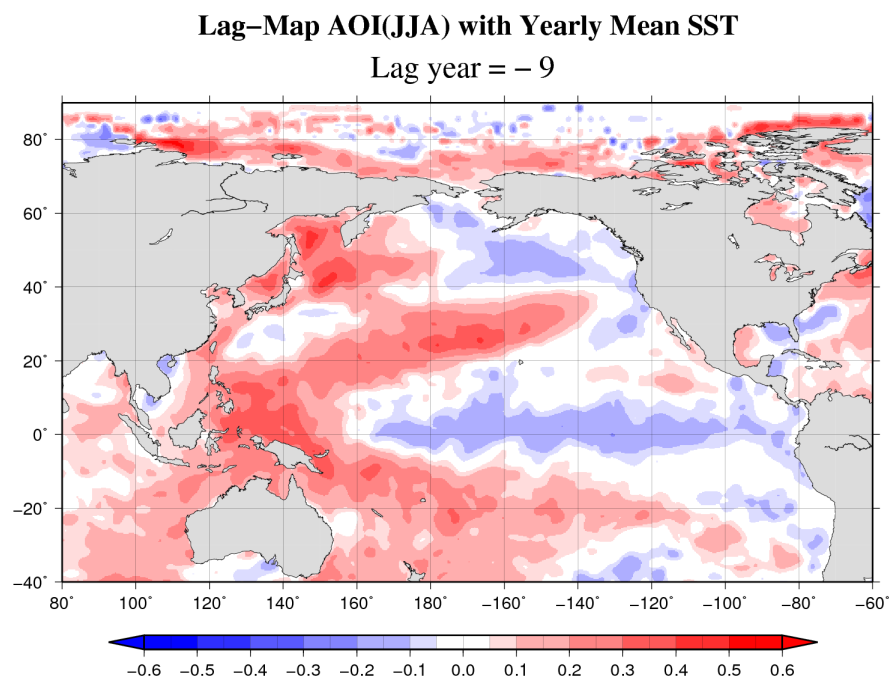


図 66: AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (-9 年).

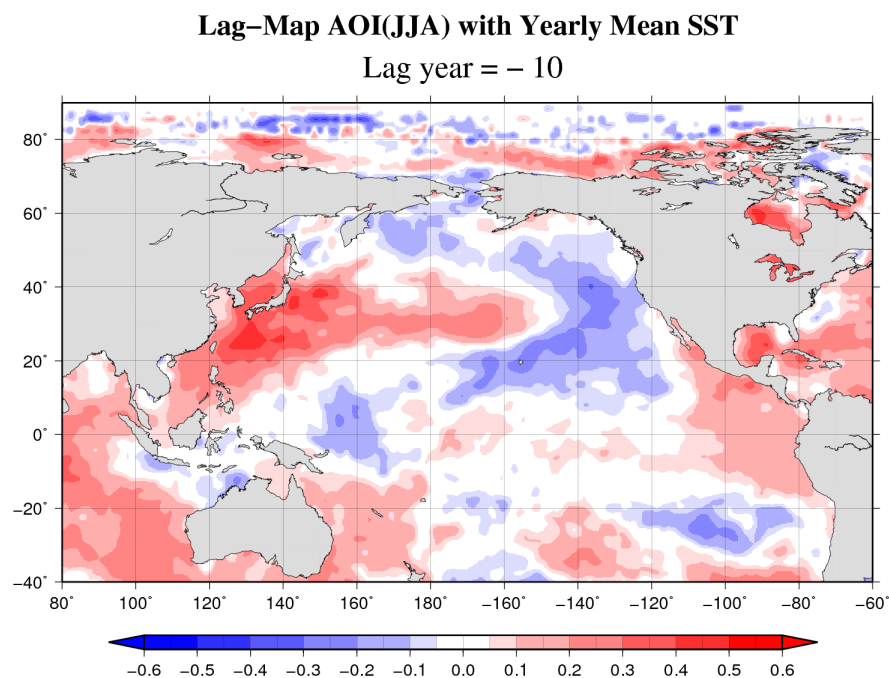


図 67: AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (-10 年).

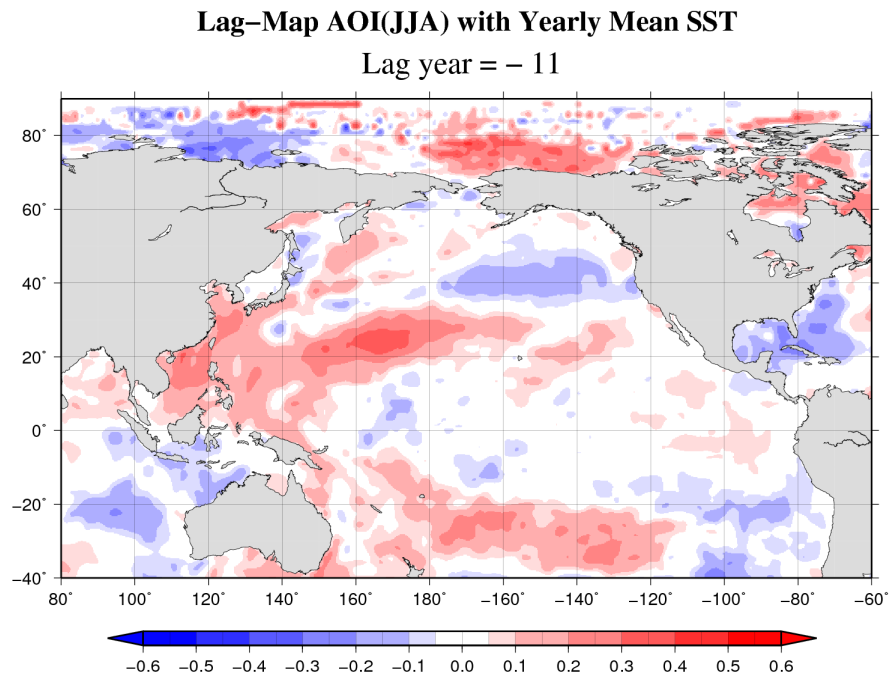


図 68: AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (-11 年).

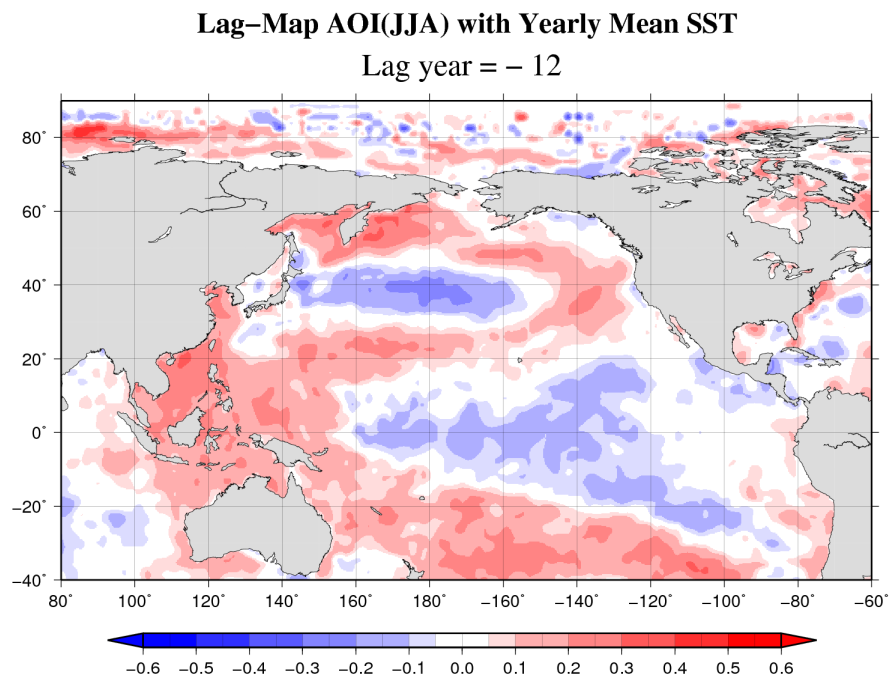


図 69: AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (-12 年).

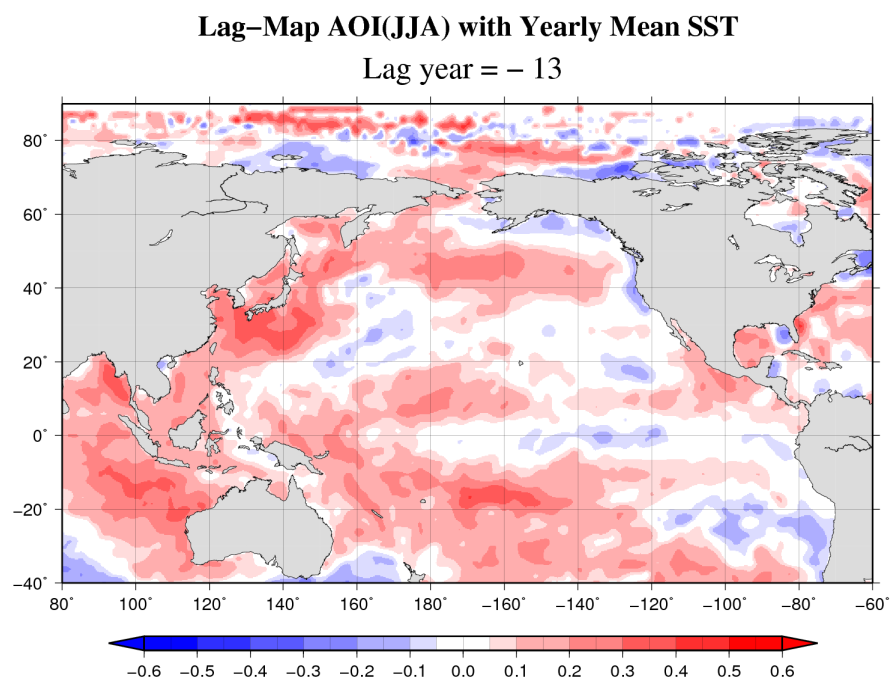


図 70: AOI(JJA) と SST(年平均) のラグマップ (-13 年).

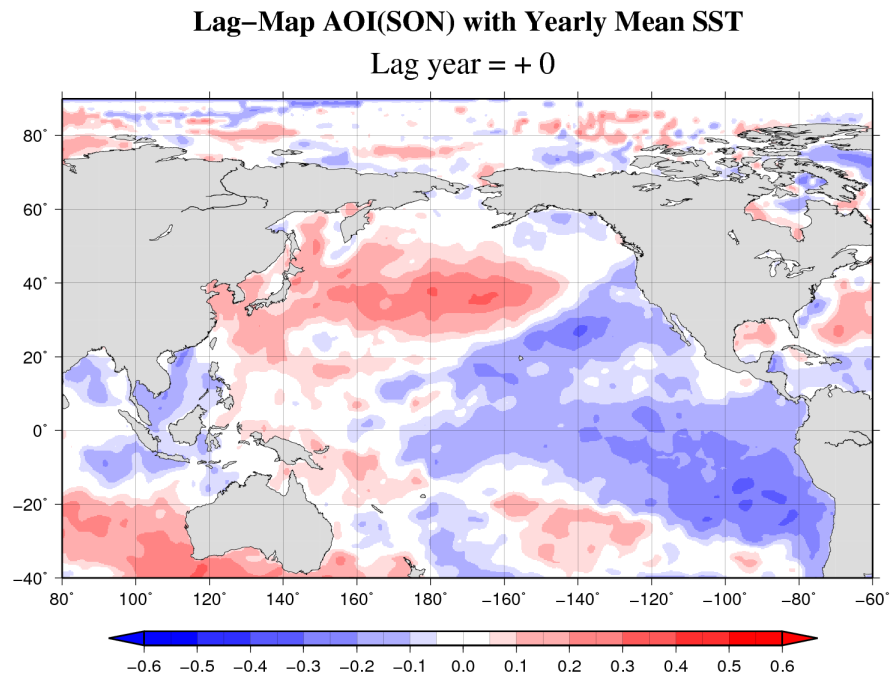


図 71: AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (0 年).

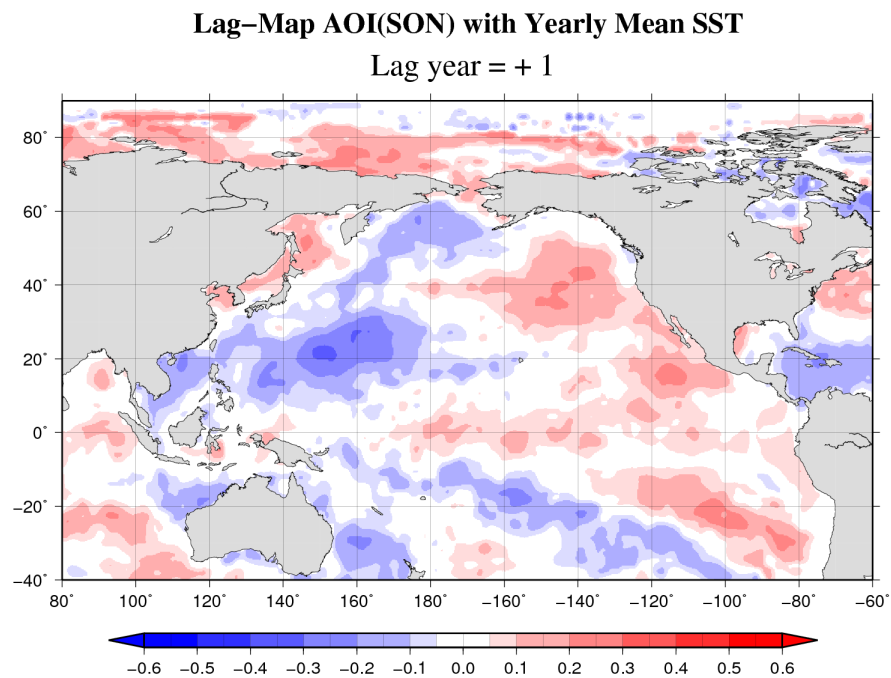


図 72: AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (+1 年).

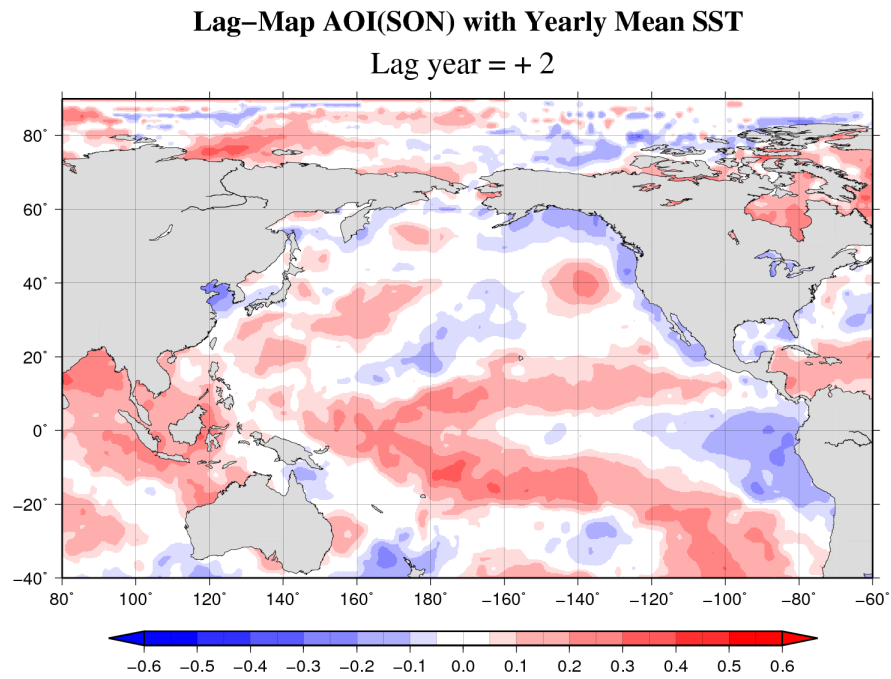


図 73: AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (+2 年).

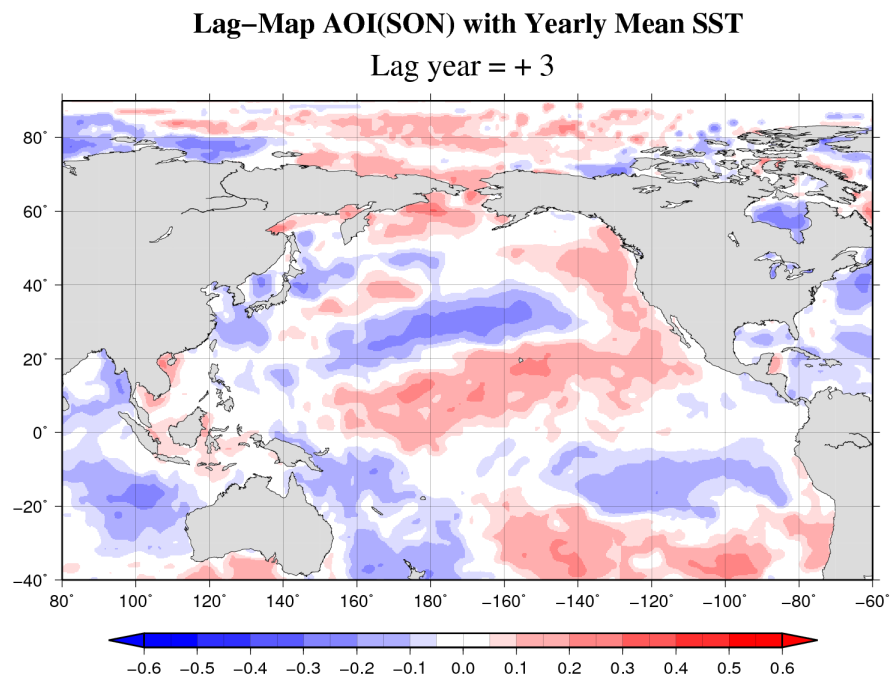


図 74: AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (+3 年).

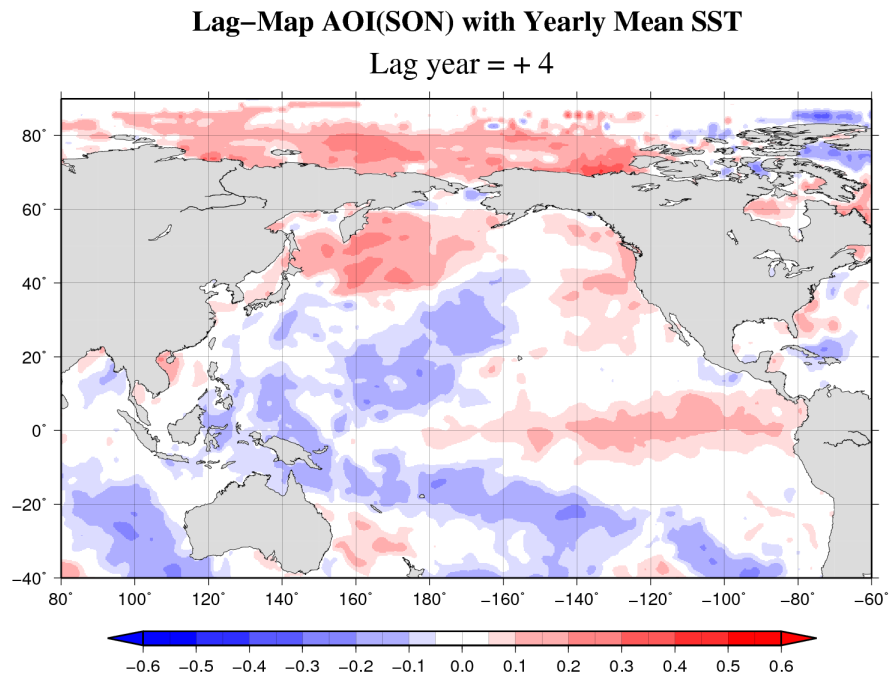


図 75: AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (+4 年).

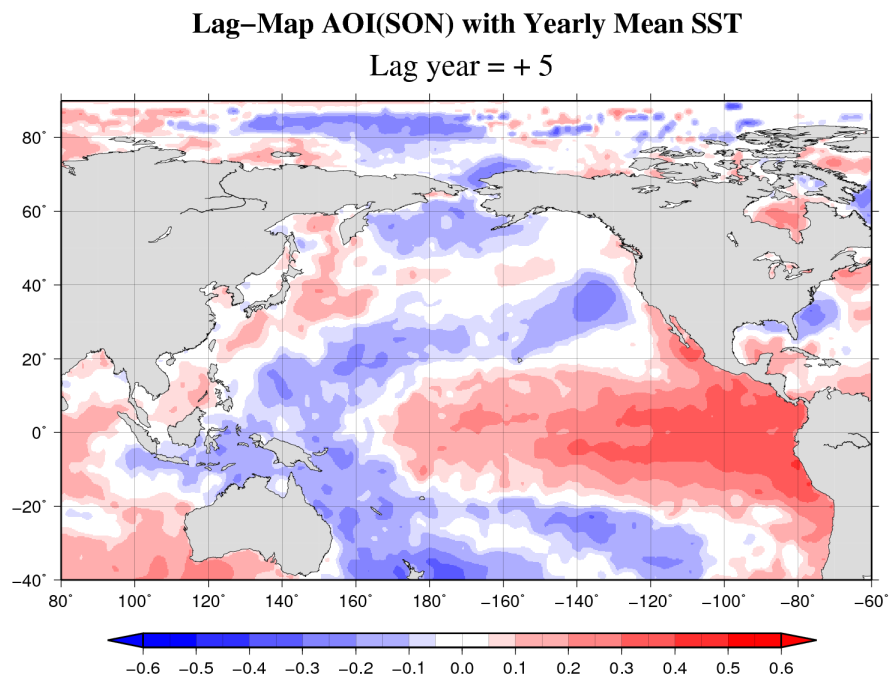


図 76: AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (+5 年).

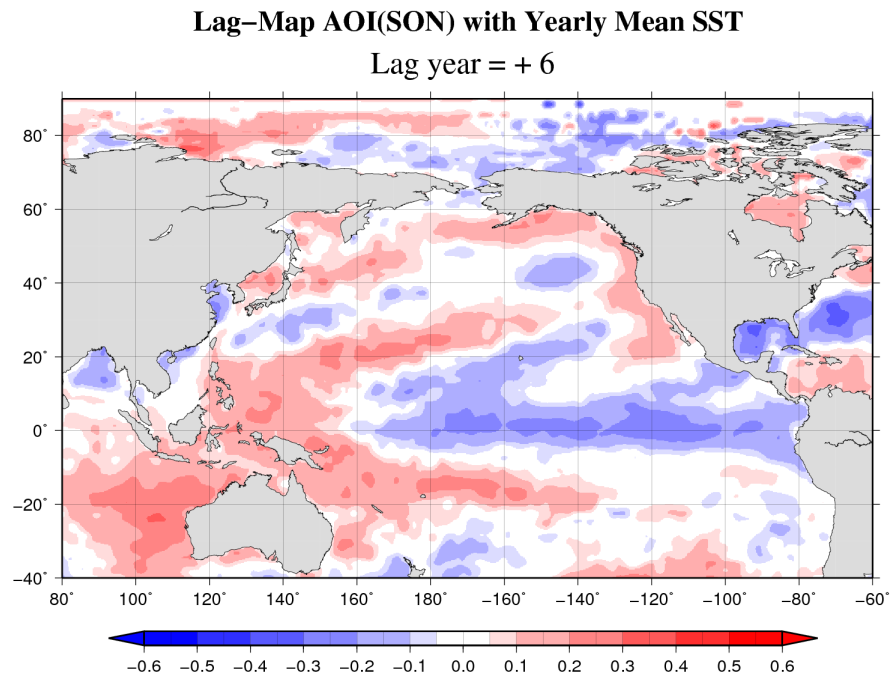


図 77: AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (+6 年).

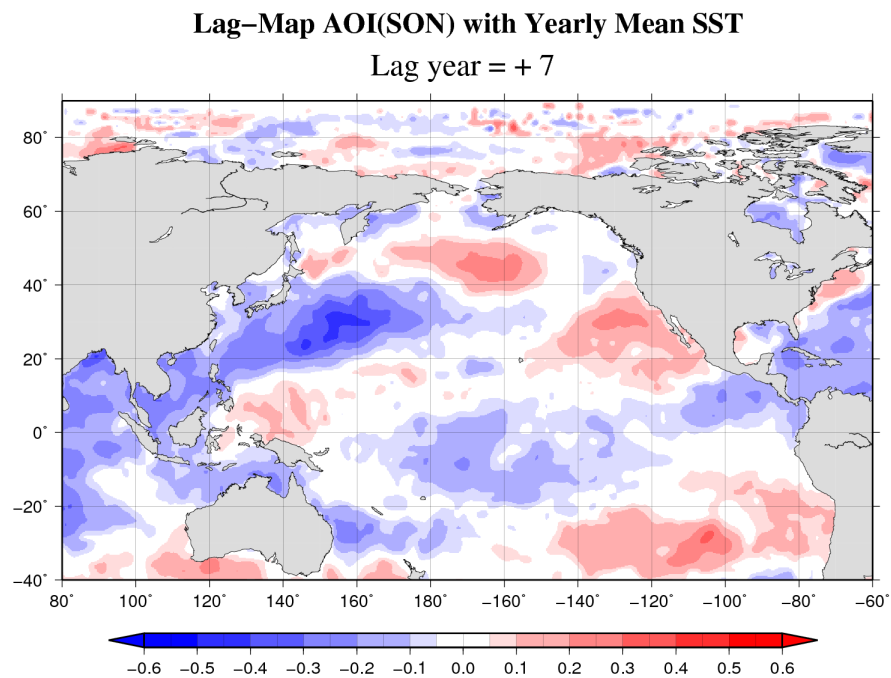


図 78: AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (+7 年).

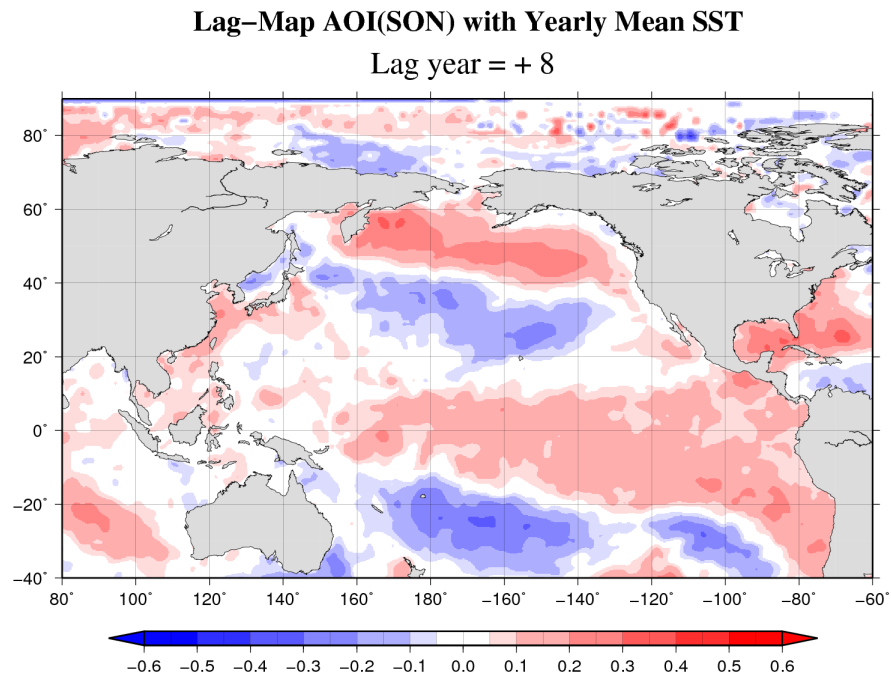


図 79: AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (+8 年).

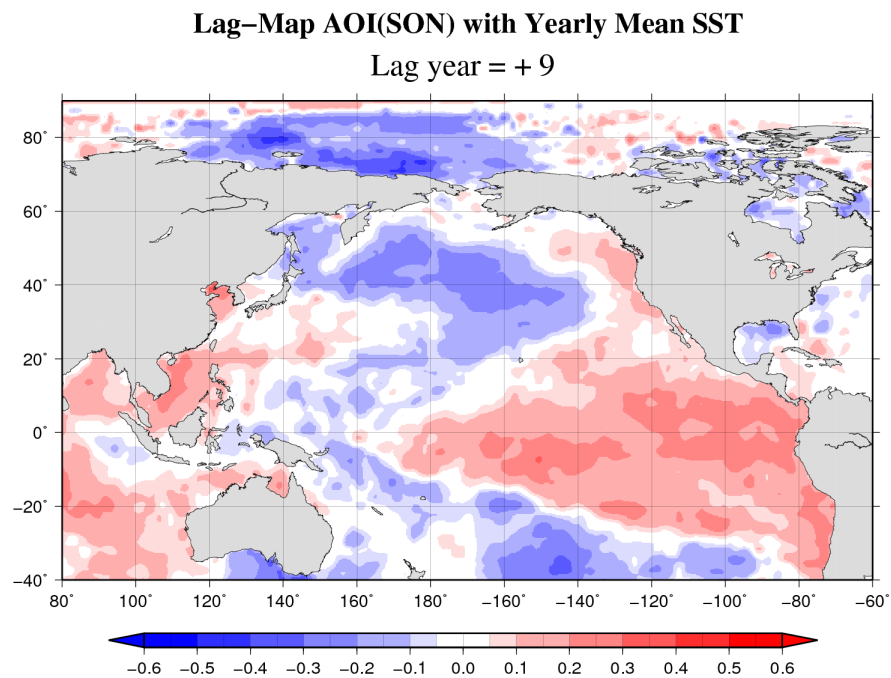


図 80: AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (+9 年).

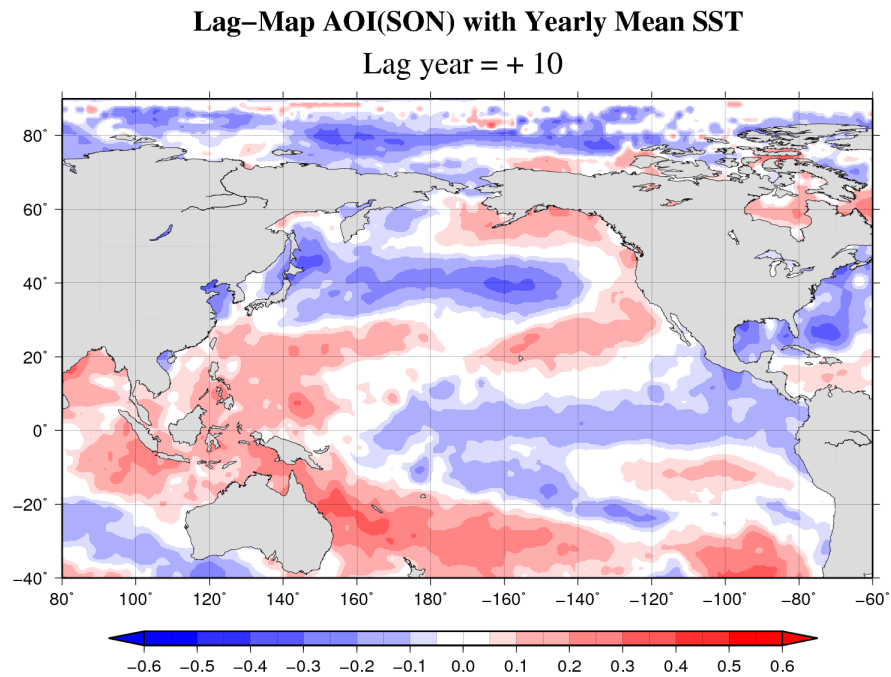


図 81: AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (+10 年).

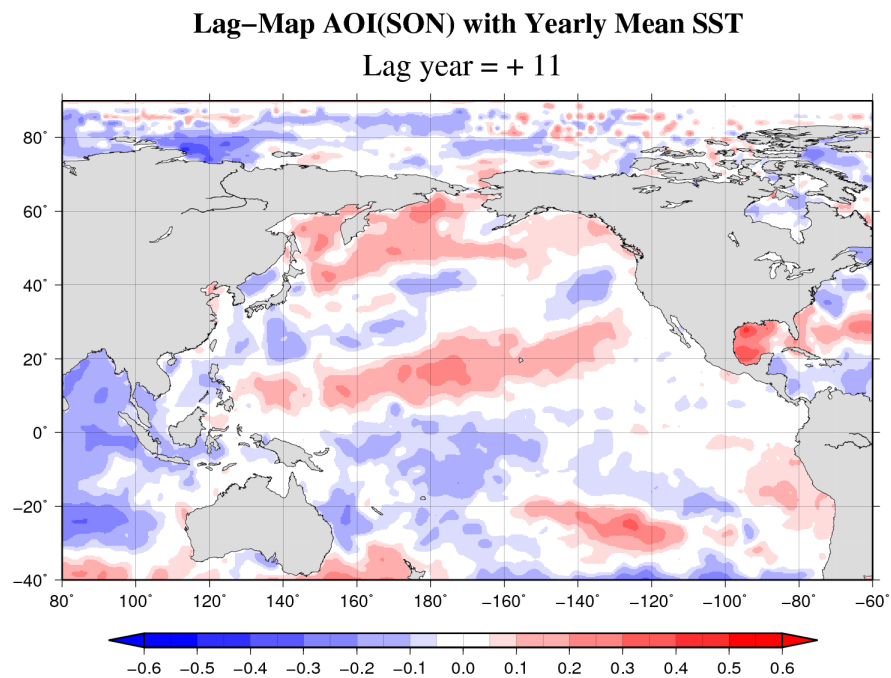


図 82: AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (+11 年).

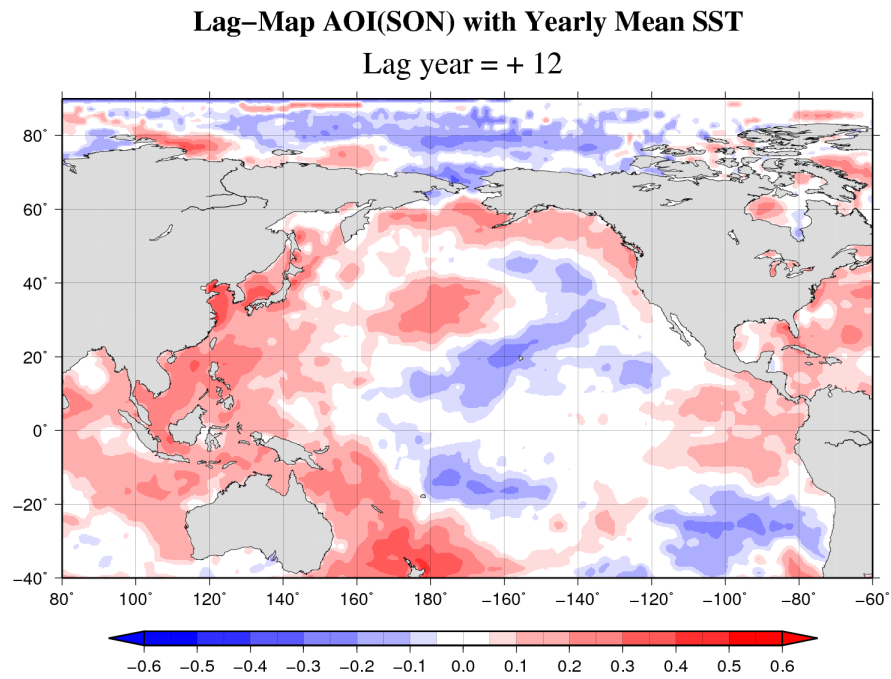


図 83: AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (+12 年).

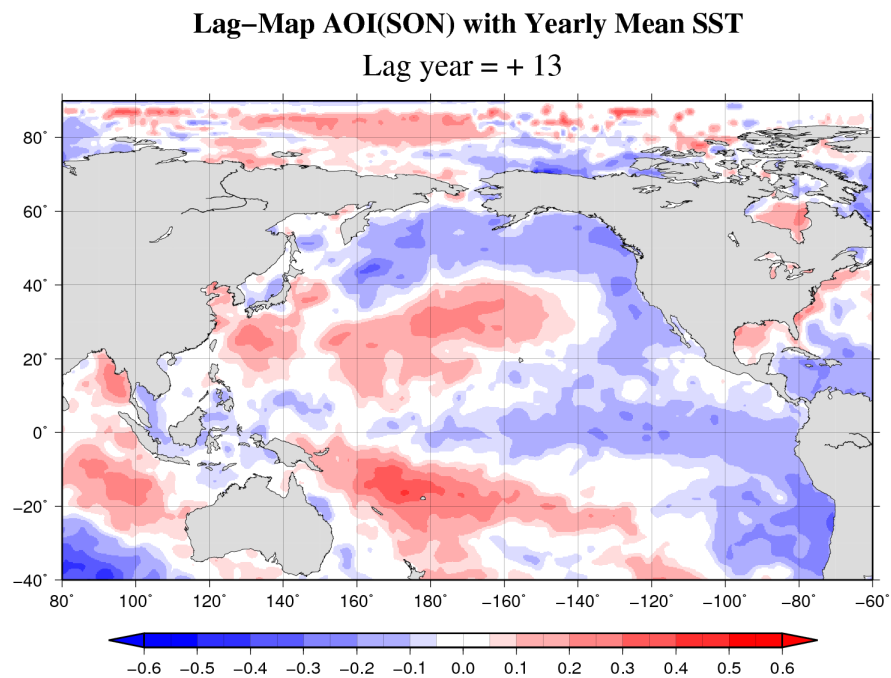


図 84: AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (+13 年).

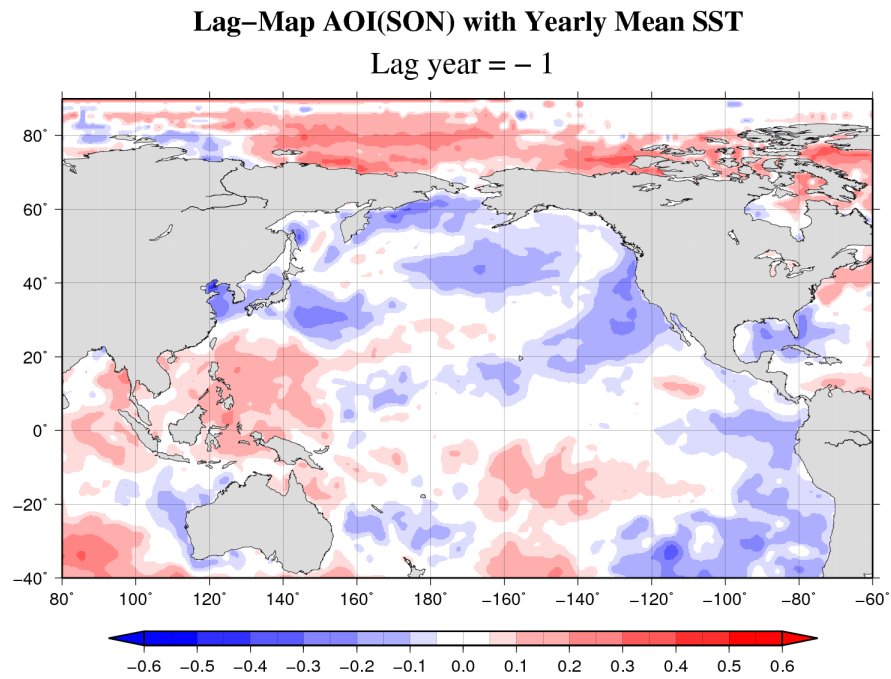


図 85: AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (-1 年).

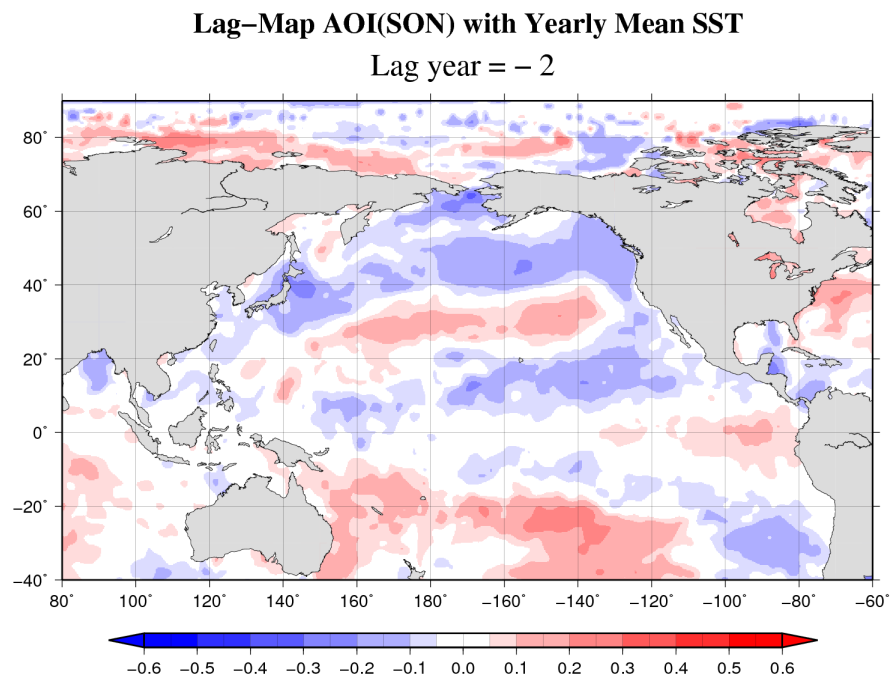


図 86: AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (-2 年).

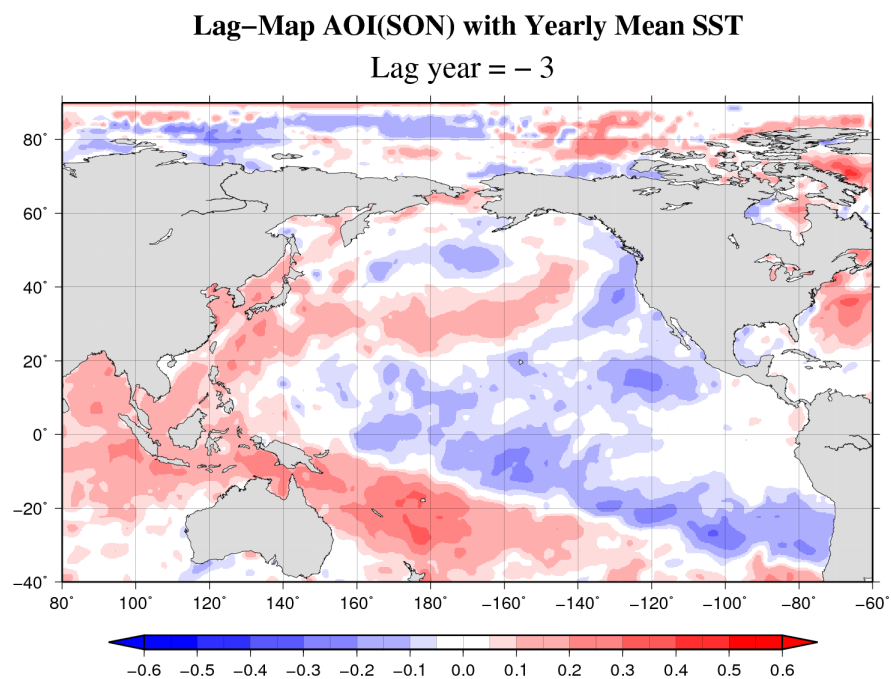


図 87: AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (-3 年).

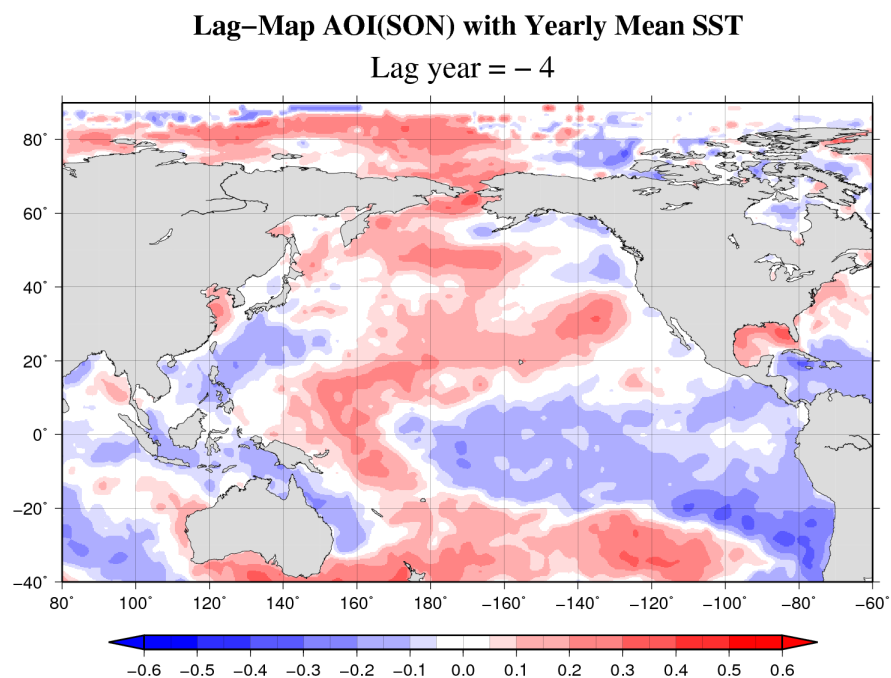


図 88: AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (-4 年).

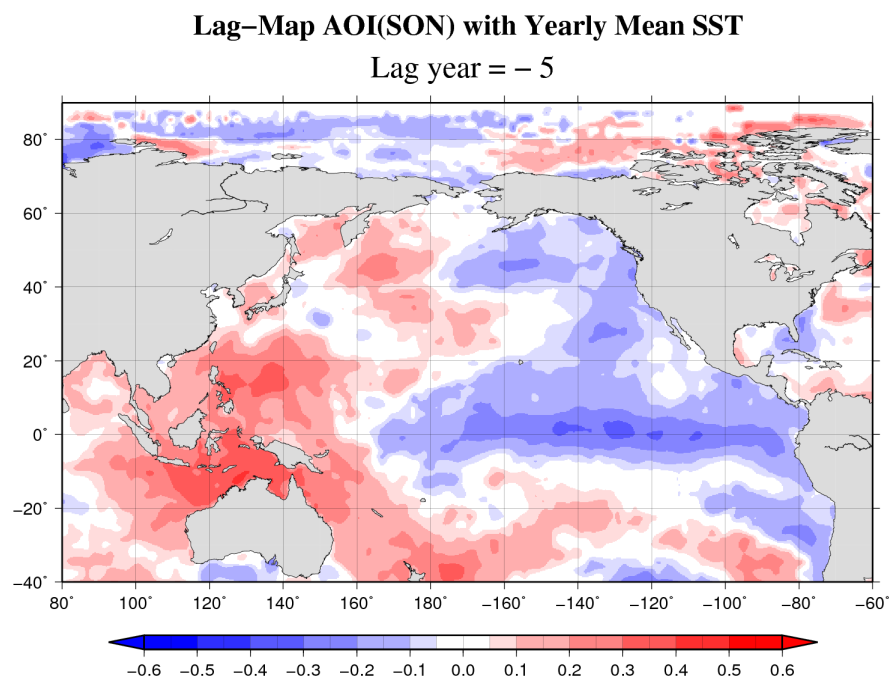


図 89: AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (-5 年).

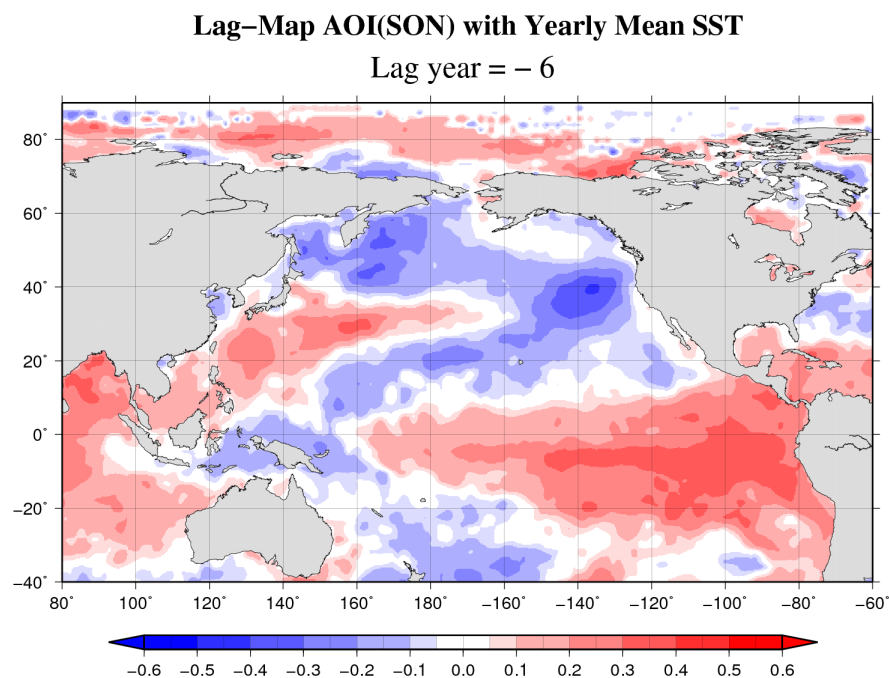


図 90: AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (-6 年).

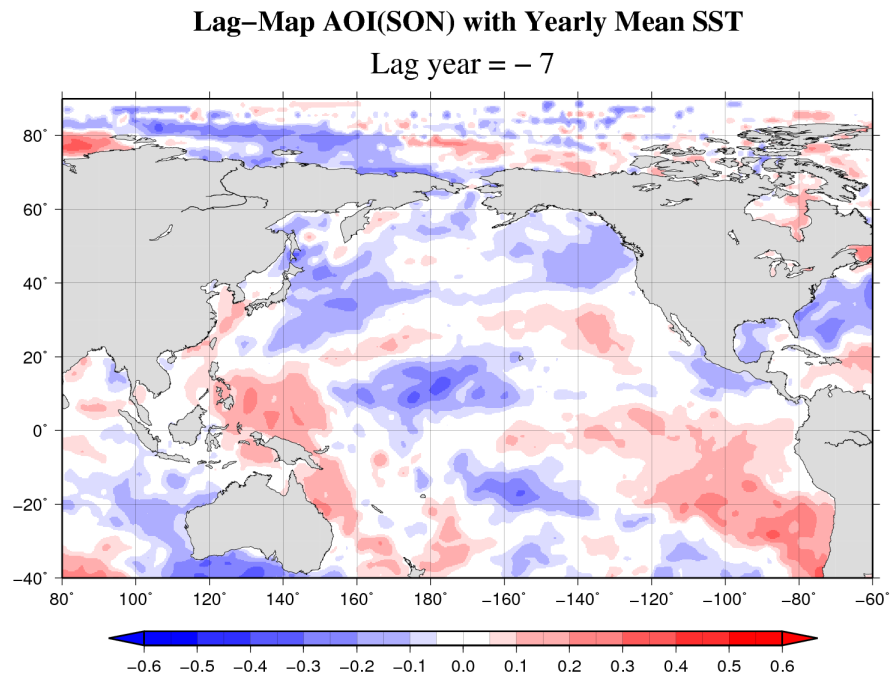


図 91: AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (-7 年).

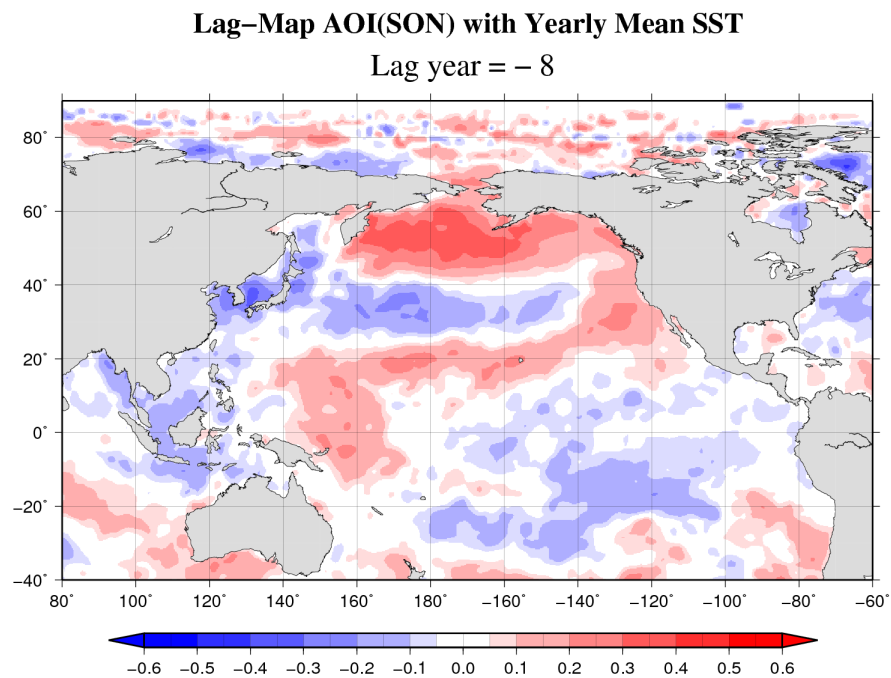


図 92: AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (-8 年).

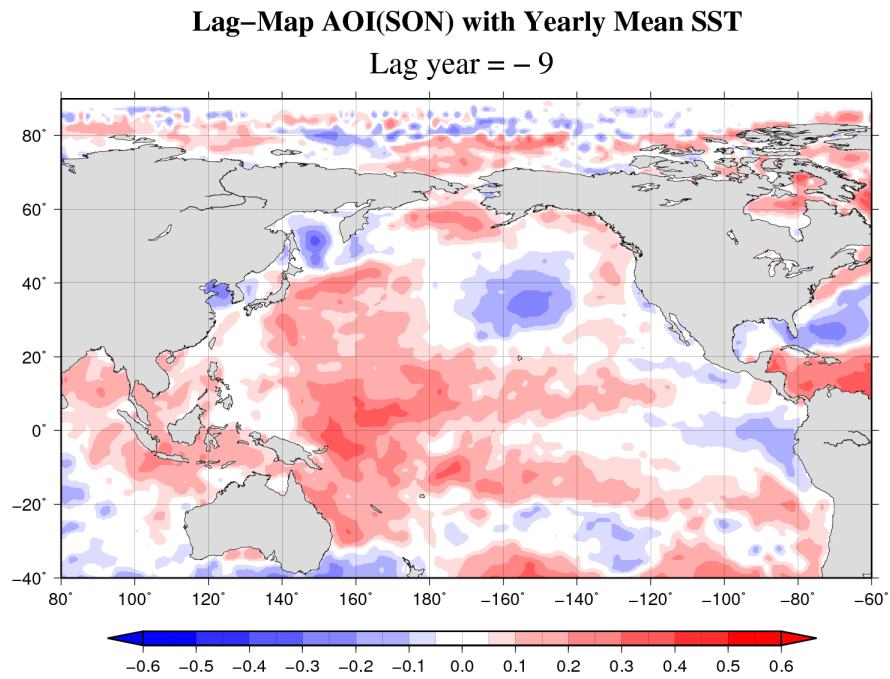


図 93: AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (-9 年).

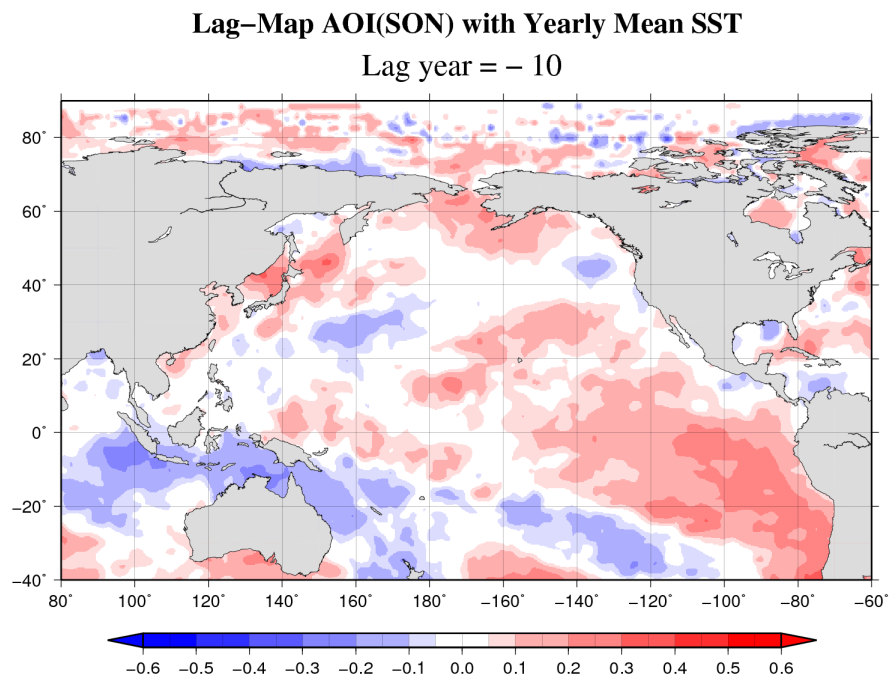


図 94: AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (-10 年).

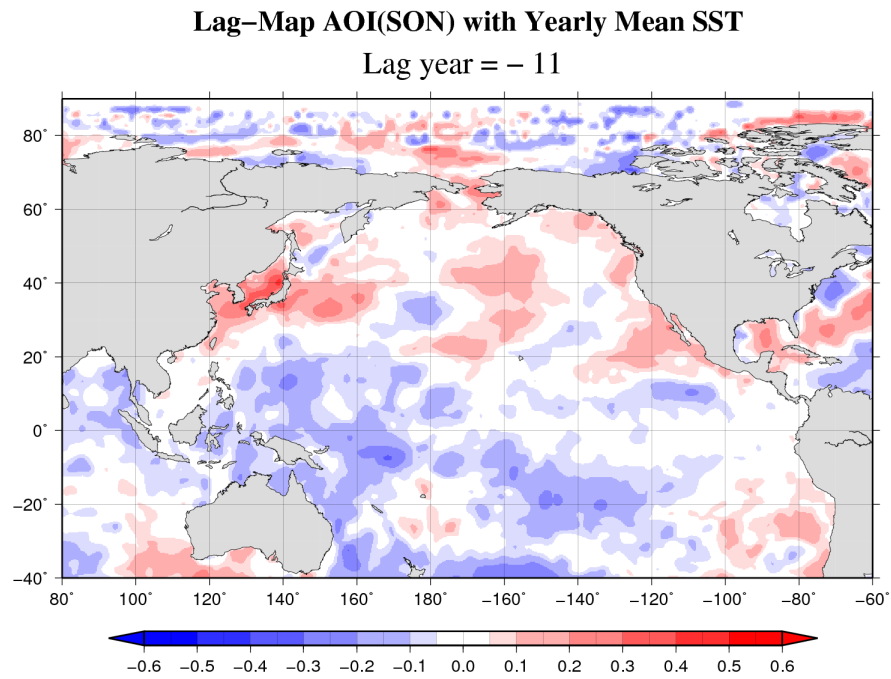


図 95: AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (-11 年).

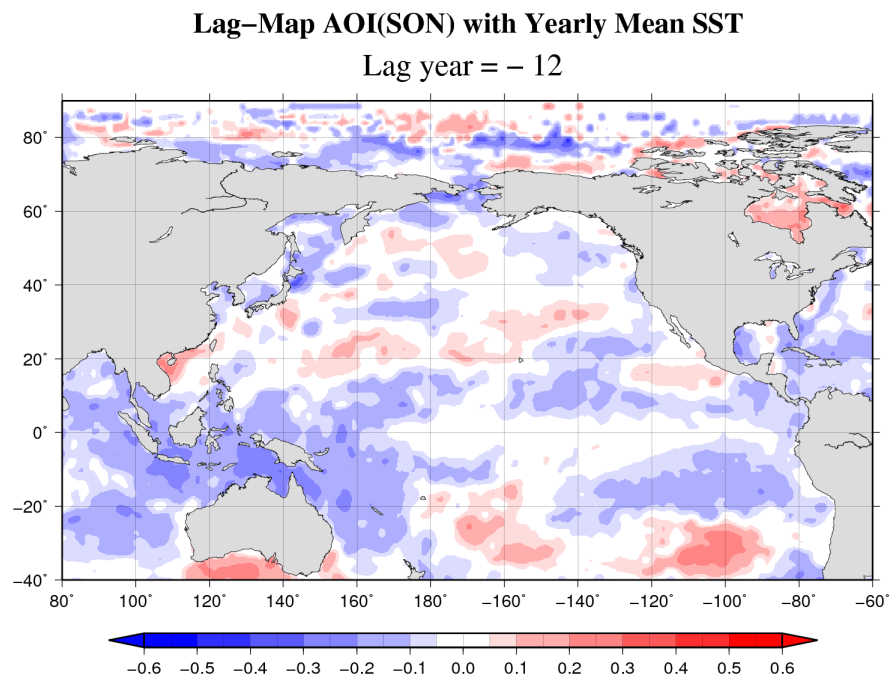


図 96: AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (-12 年).

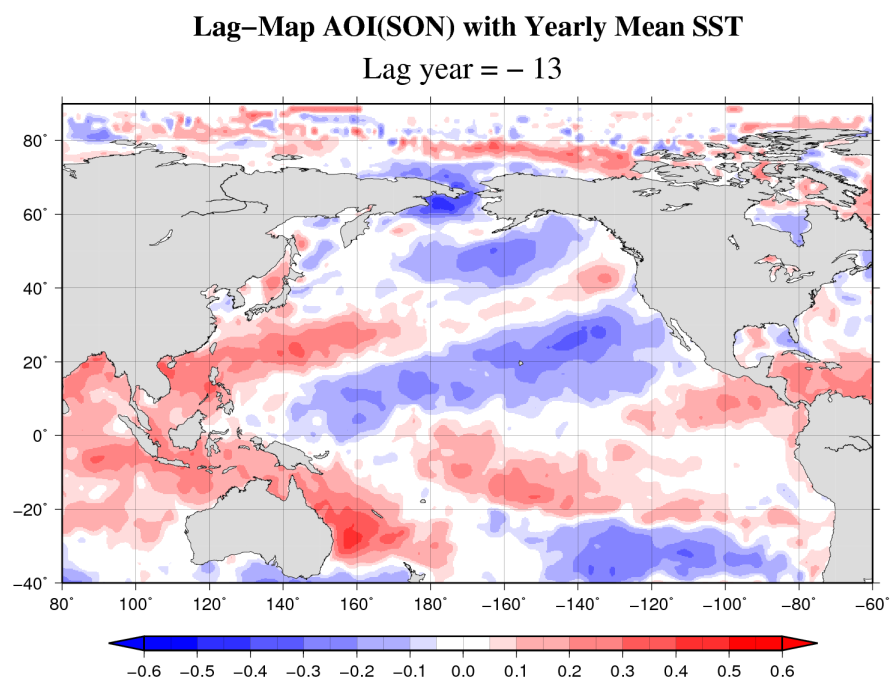


図 97: AOI(SON) と SST(年平均) のラグマップ (-13 年).

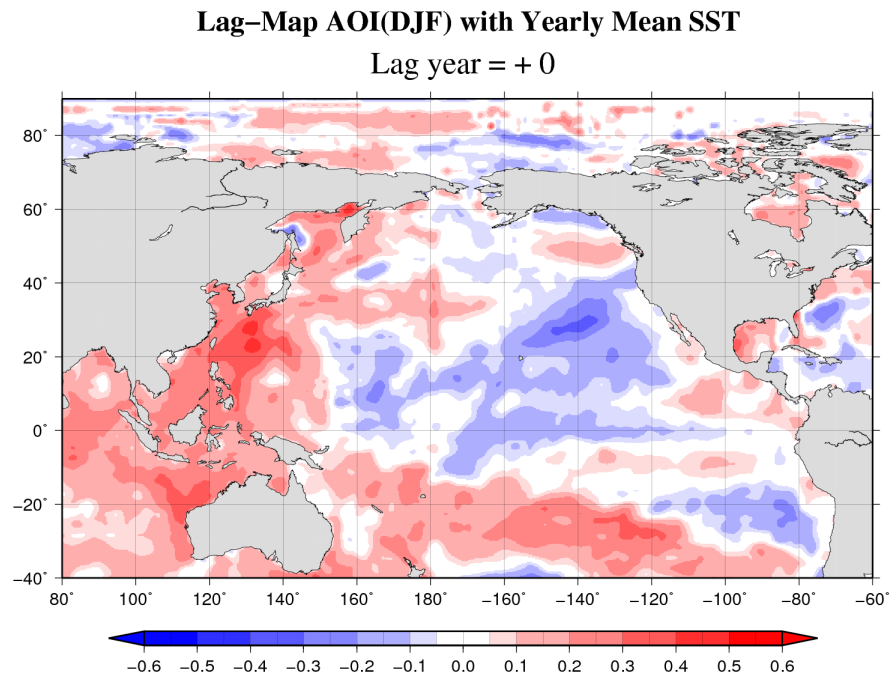


図 98: AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (0 年).

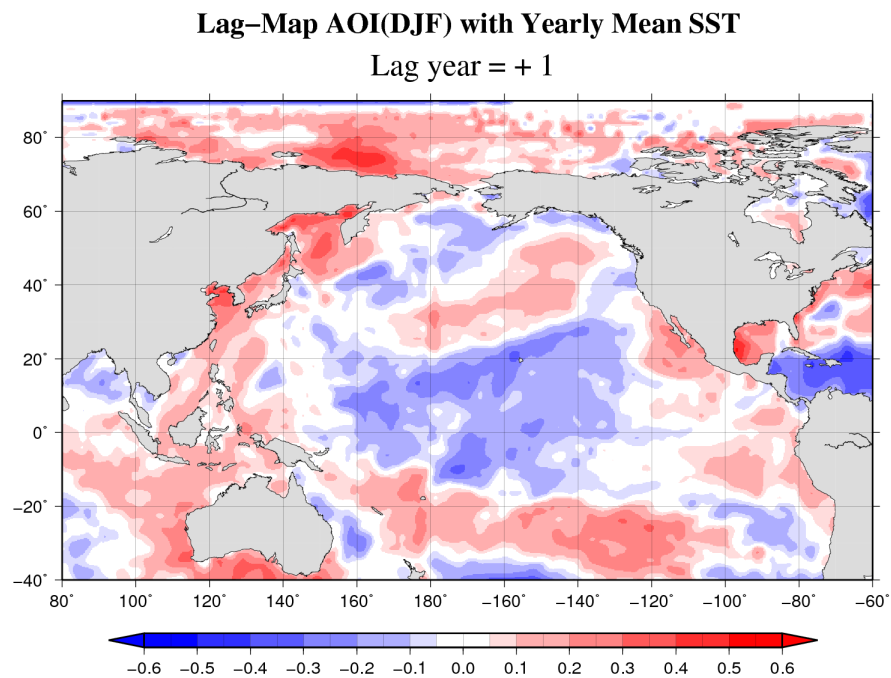


図 99: AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (+1 年).

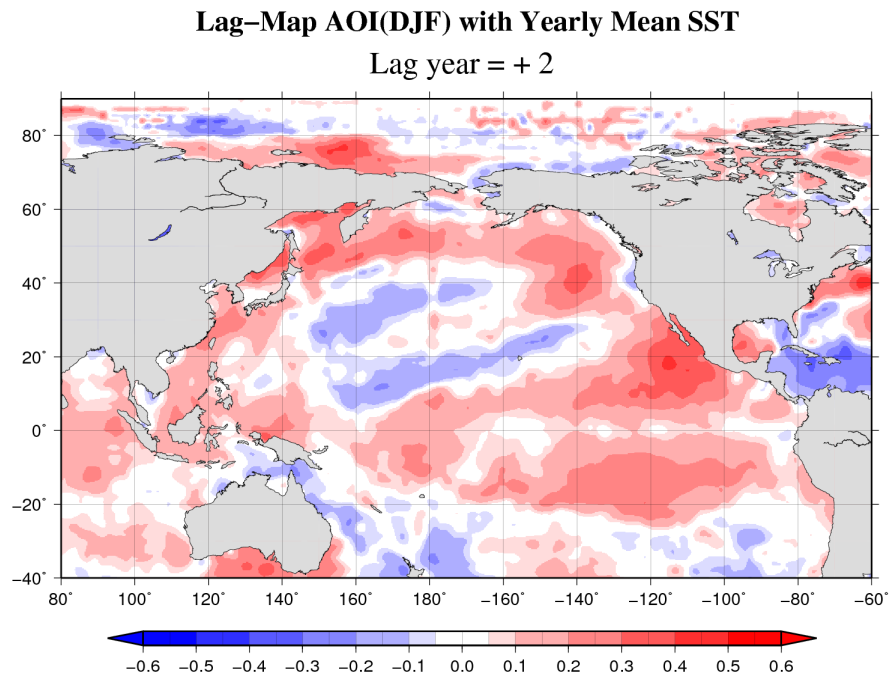


図 100: AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (+2 年).

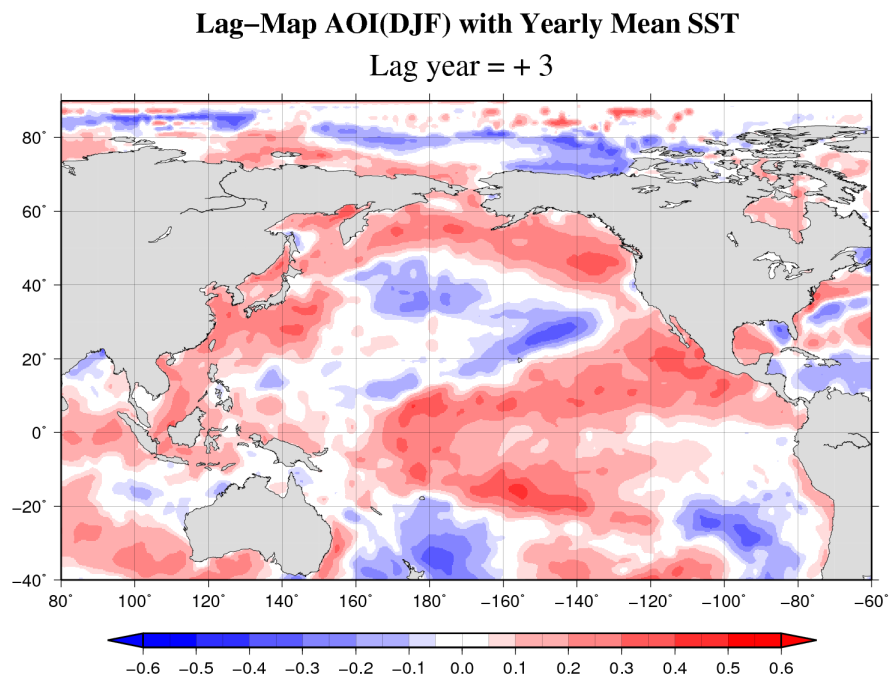


図 101: AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (+3 年).

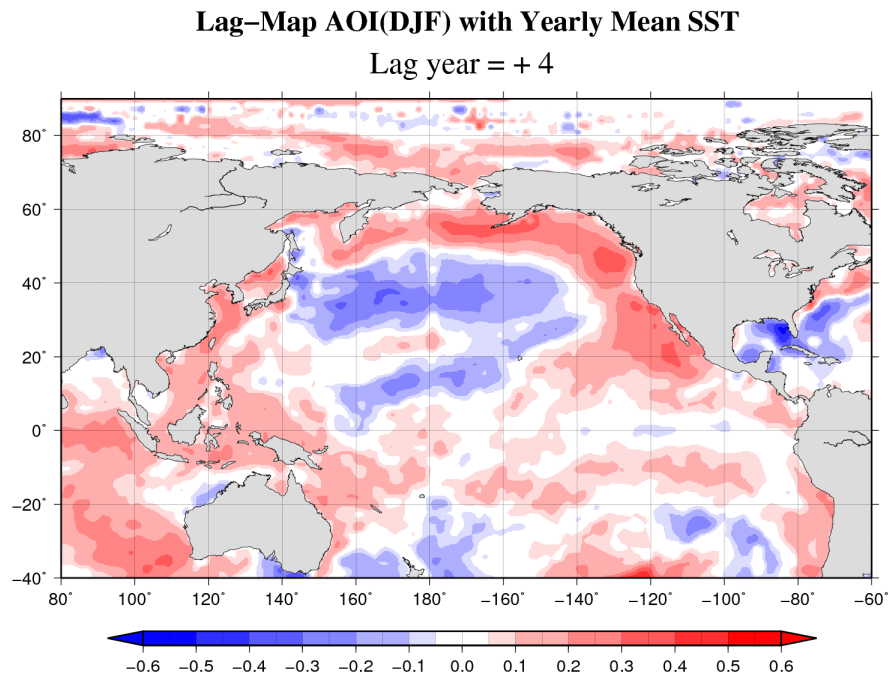


図 102: AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (+4 年).

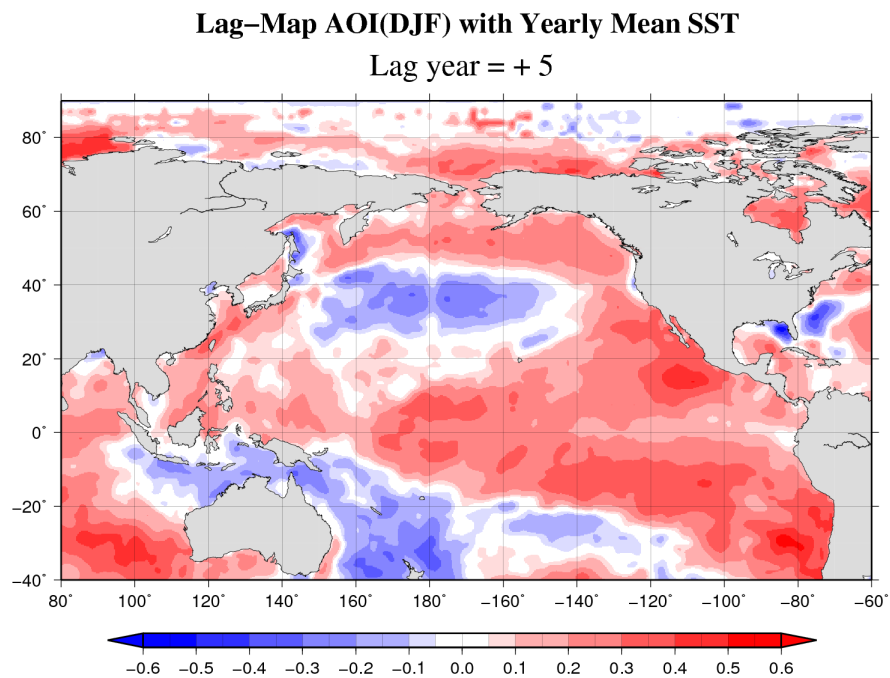


図 103: AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (+5 年).

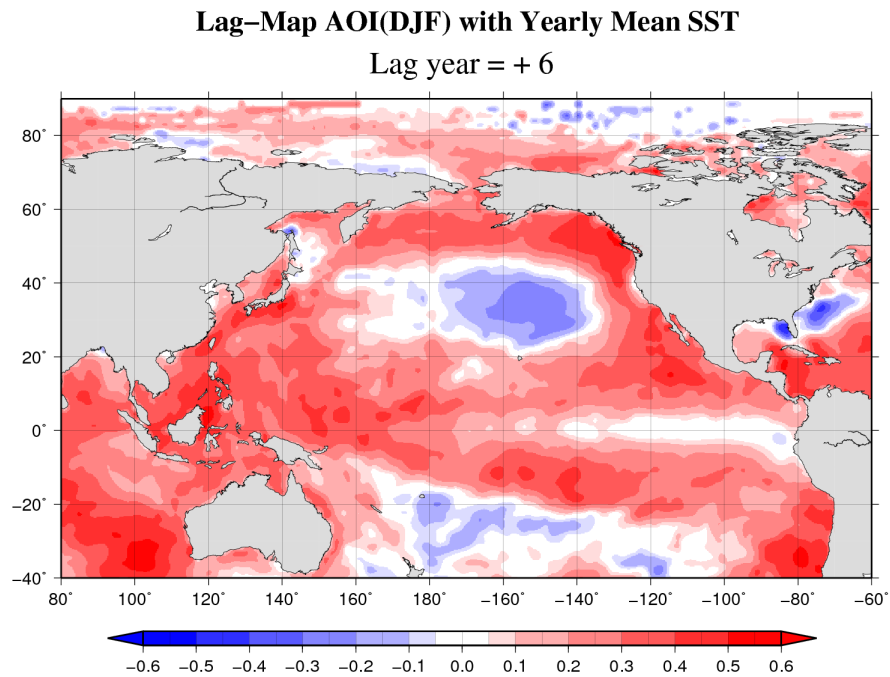


図 104: AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (+6 年).

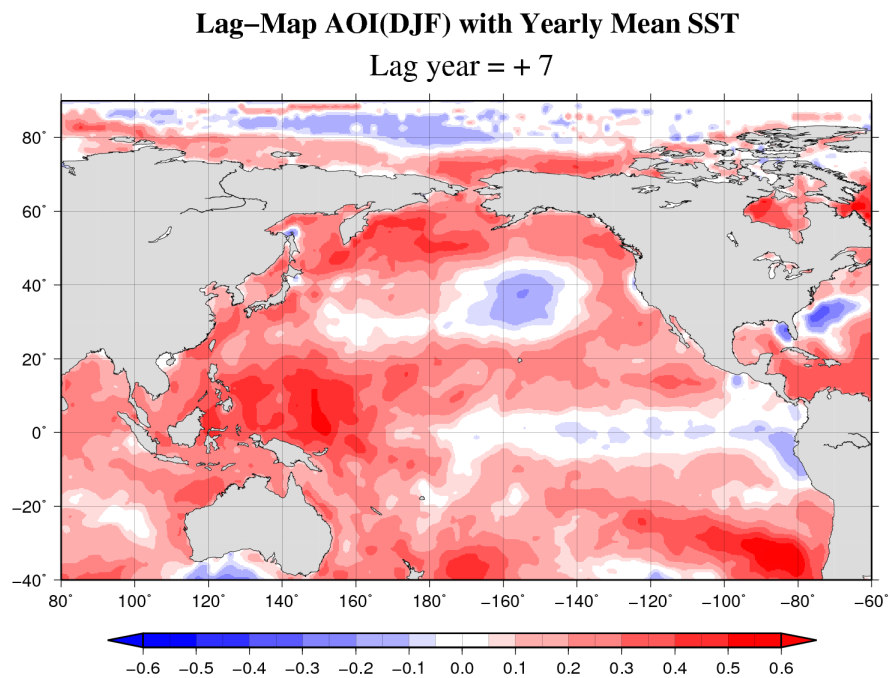


図 105: AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (+7 年).

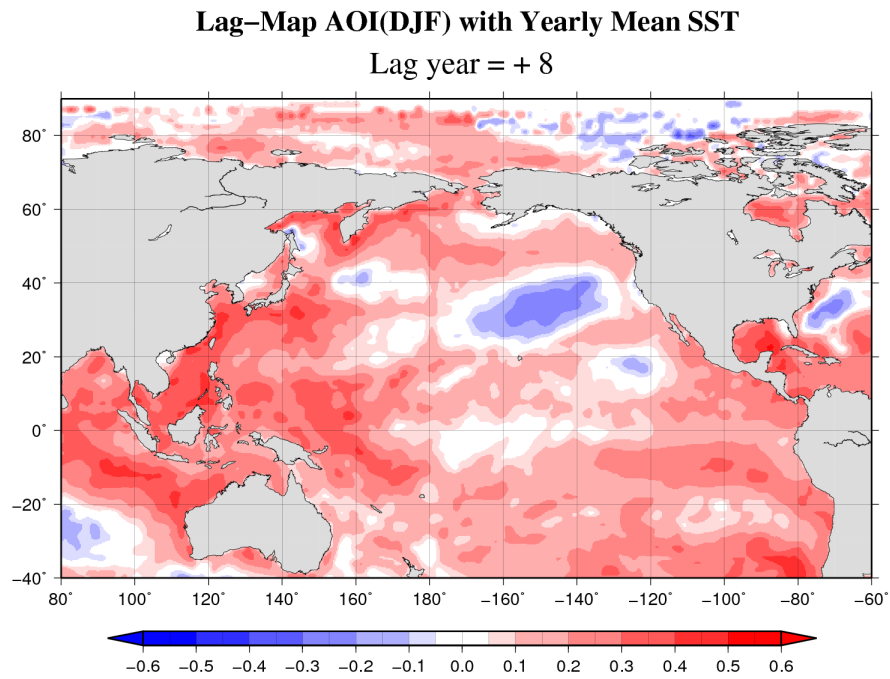


図 106: AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (+8 年).

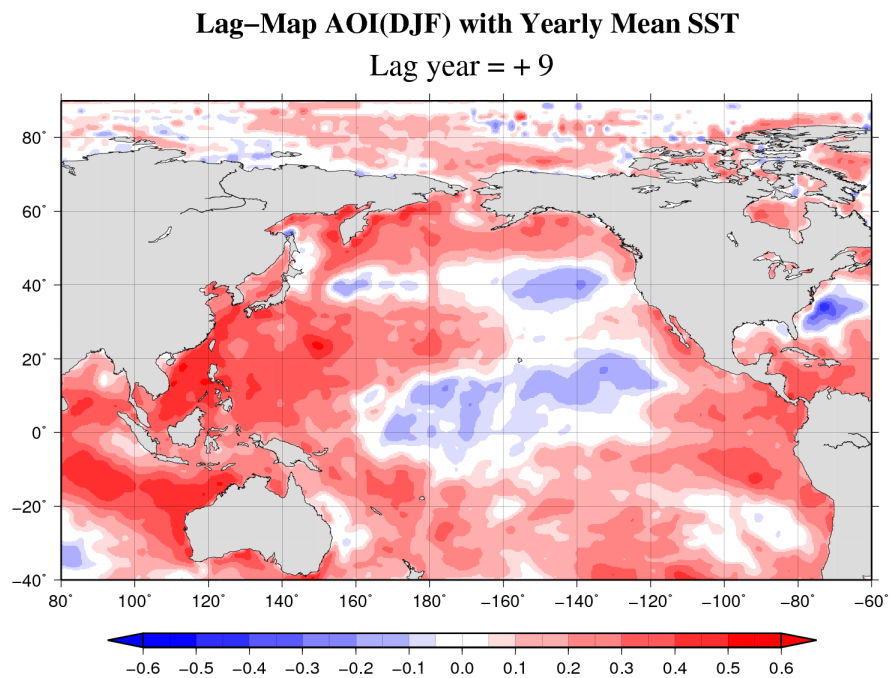


図 107: AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (+9 年).

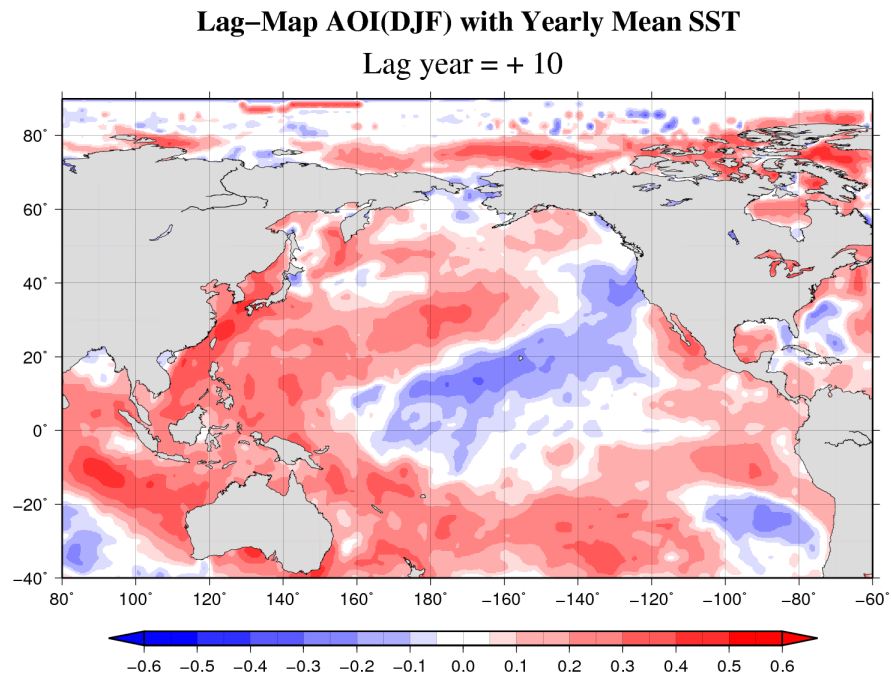


図 108: AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (+10 年).

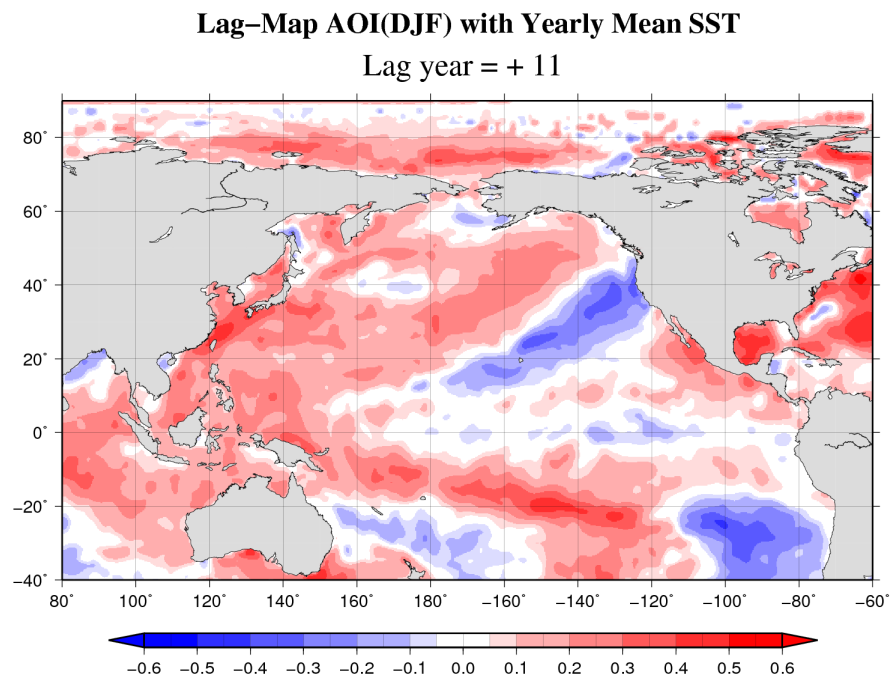


図 109: AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (+11 年).

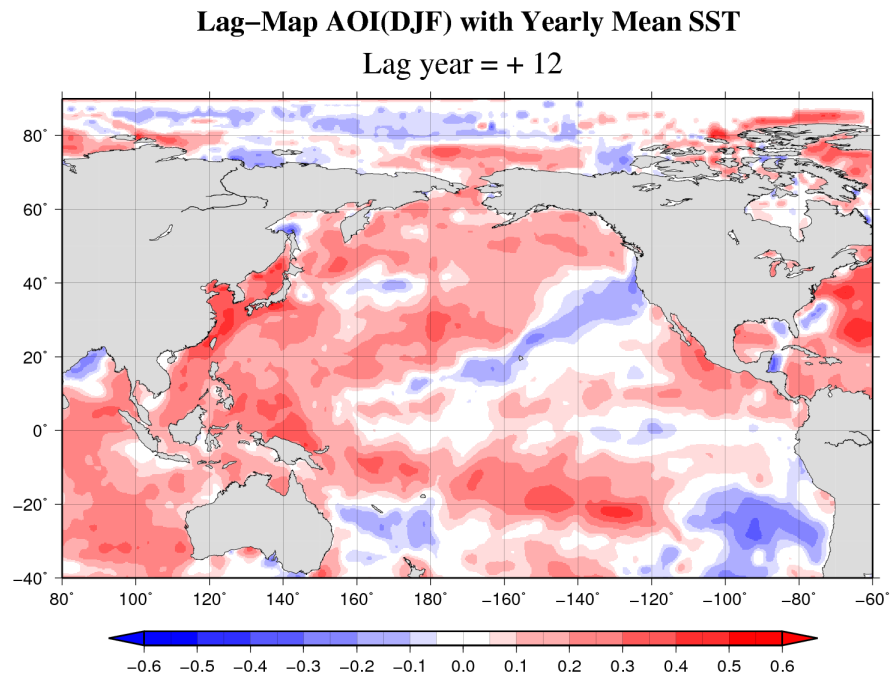


図 110: AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (+12 年).

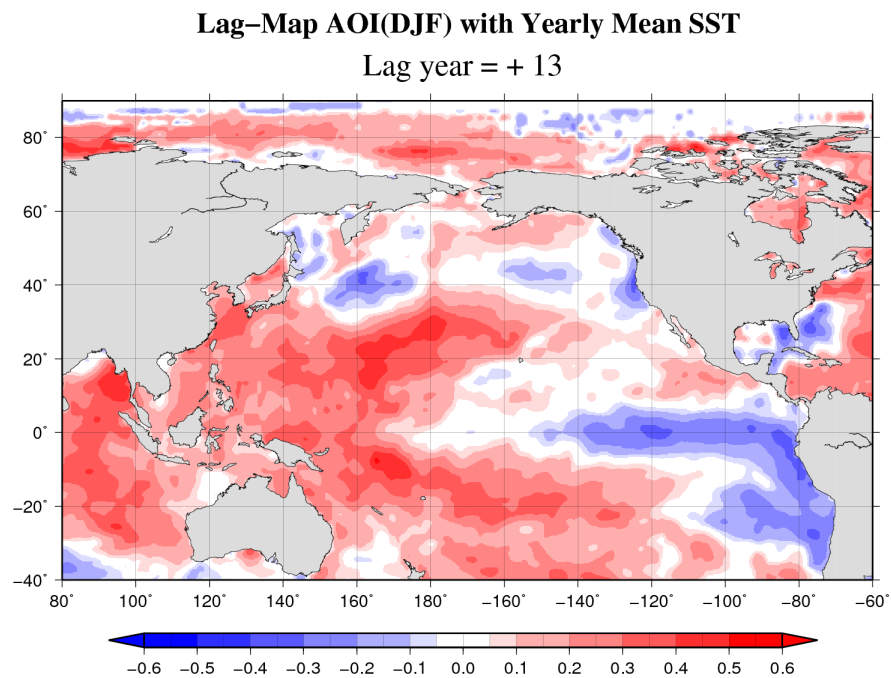


図 111: AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (+13 年).

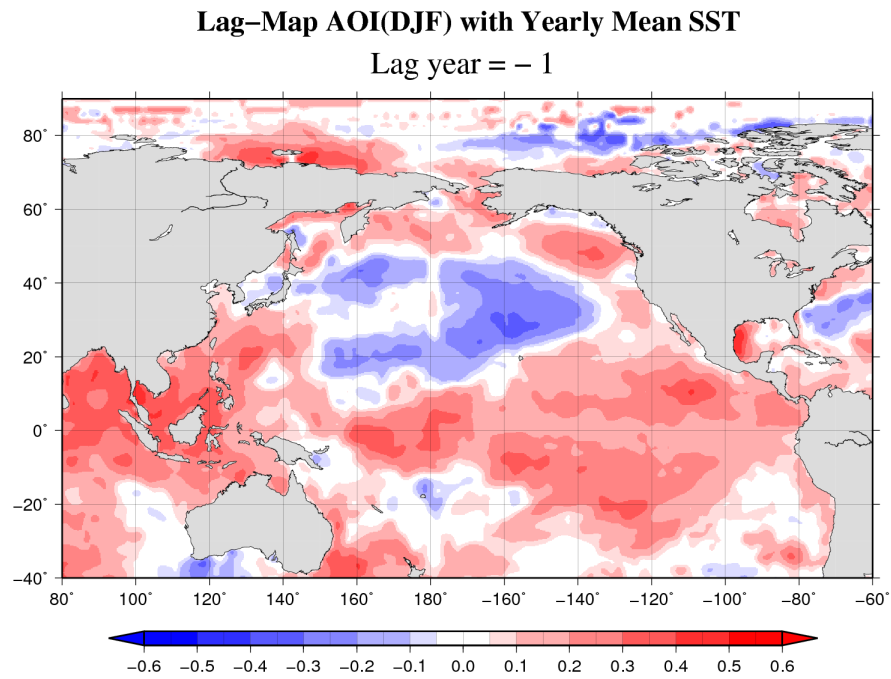


図 112: AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (-1 年).

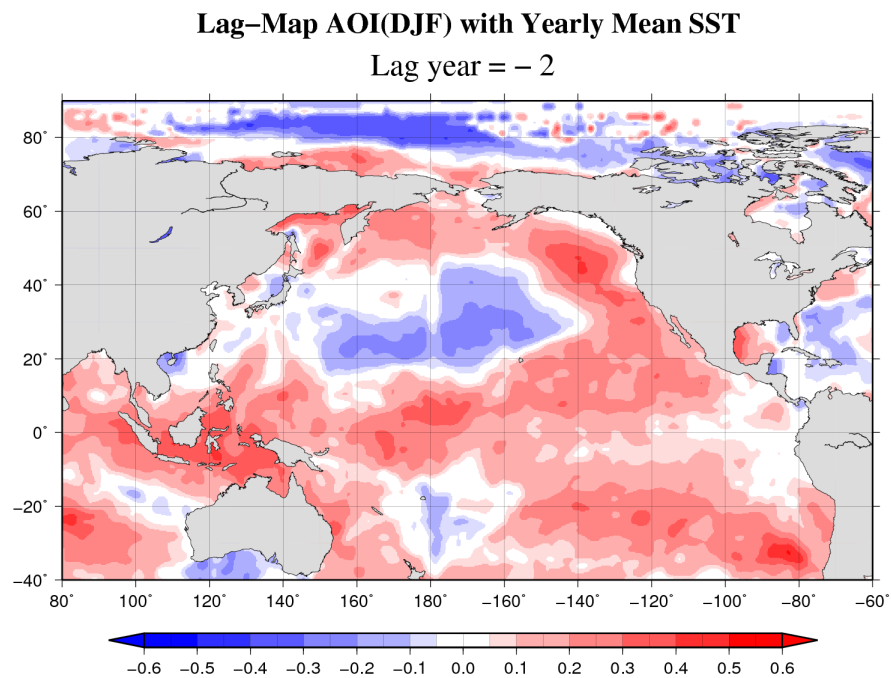


図 113: AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (-2 年).

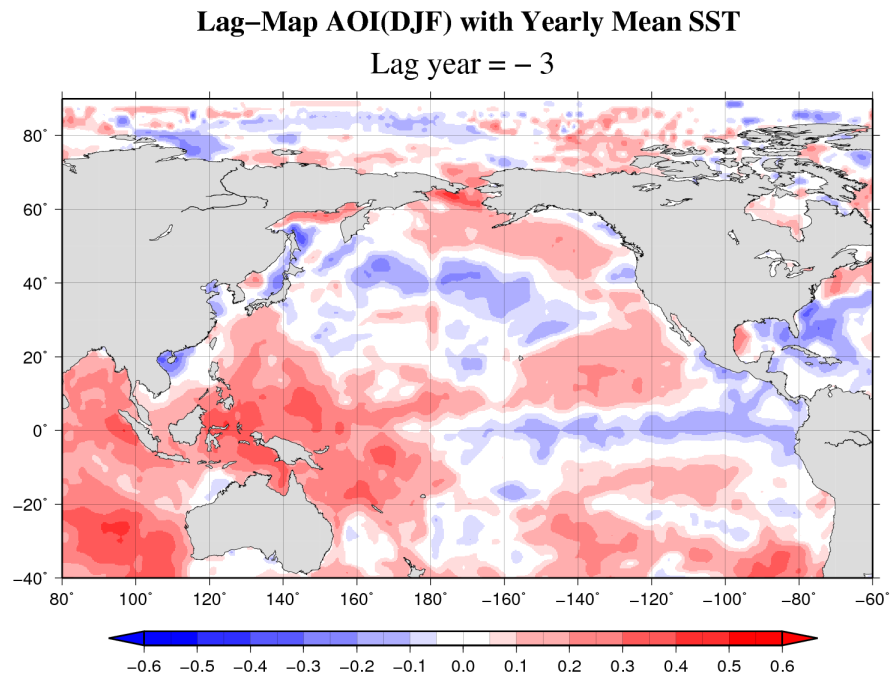


図 114: AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (-3 年).

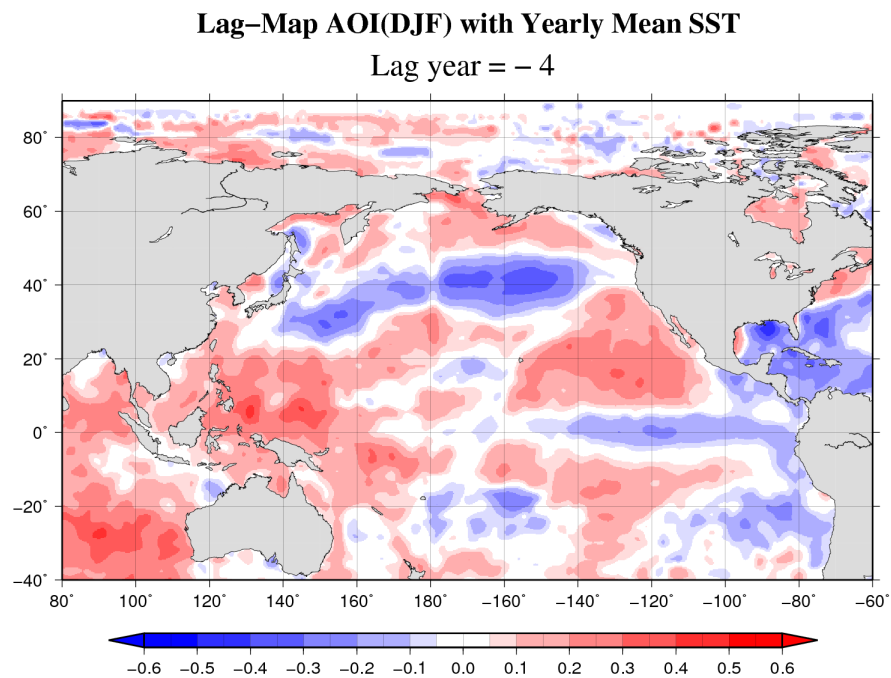


図 115: AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (-4 年).

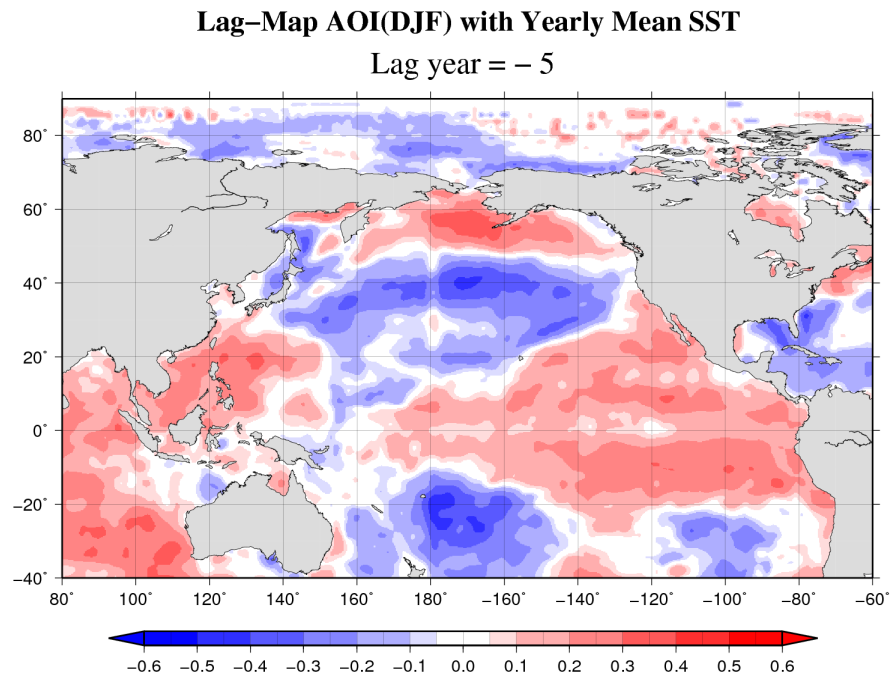


図 116: AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (-5 年).

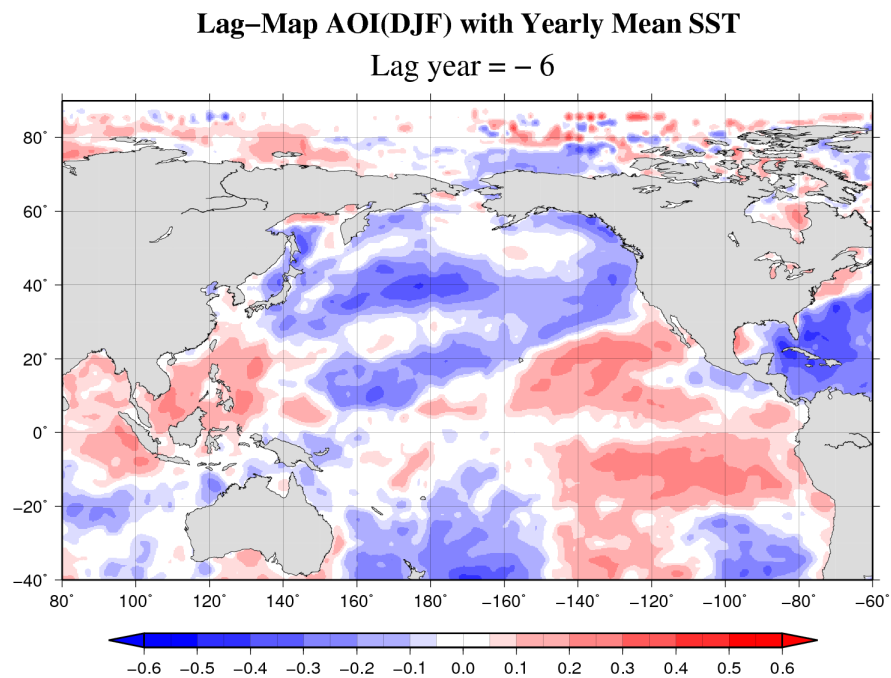


図 117: AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (-6 年).

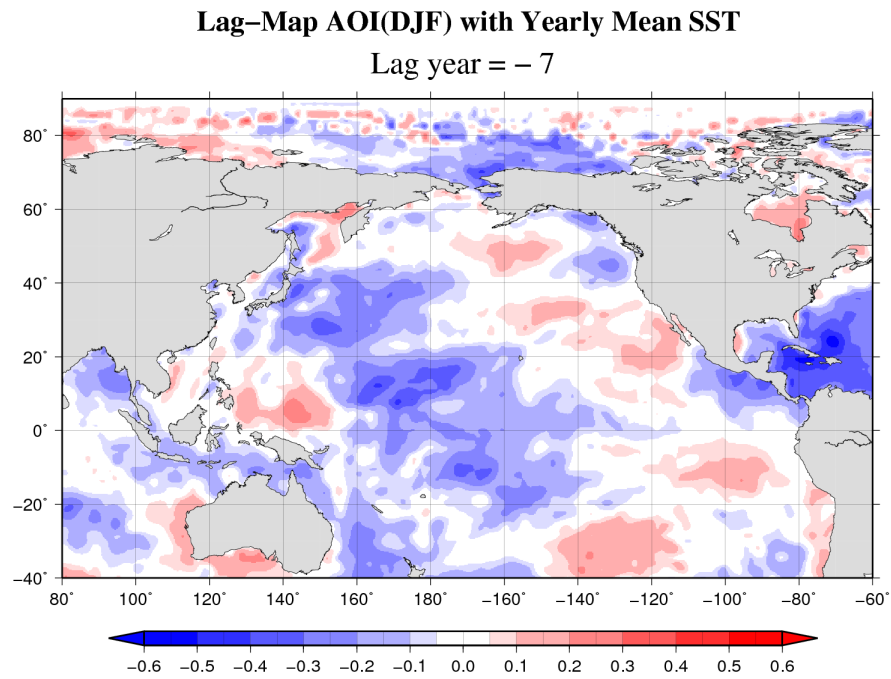


図 118: AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (-7 年).

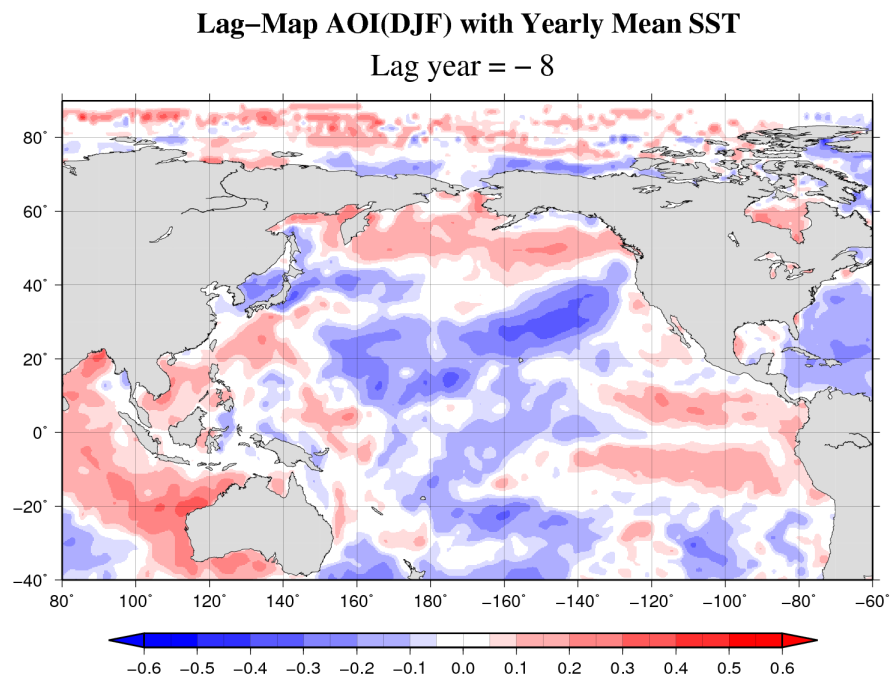


図 119: AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (-8 年).

Lag-Map AOI(DJF) with Yearly Mean SST

Lag year = - 9

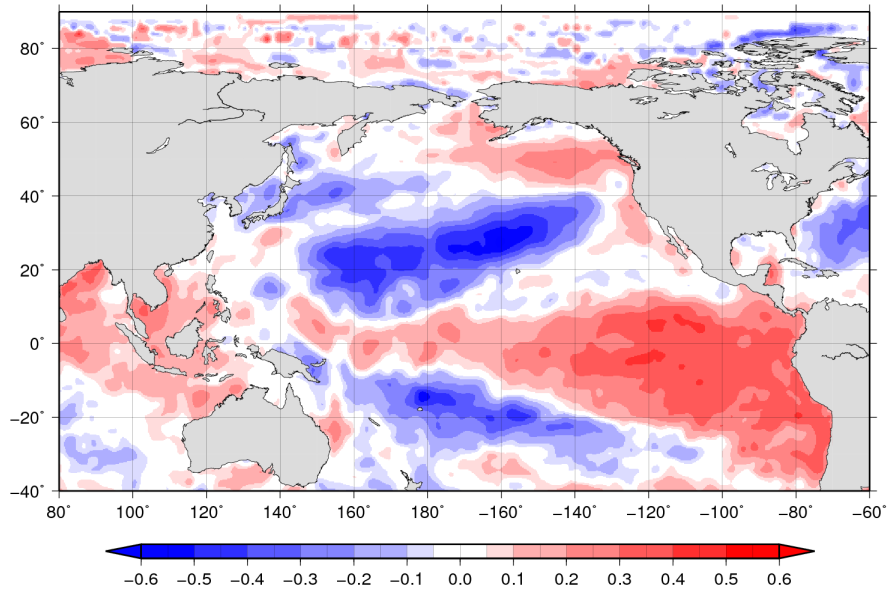


図 120: AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (-9 年).

Lag-Map AOI(DJF) with Yearly Mean SST

Lag year = - 10

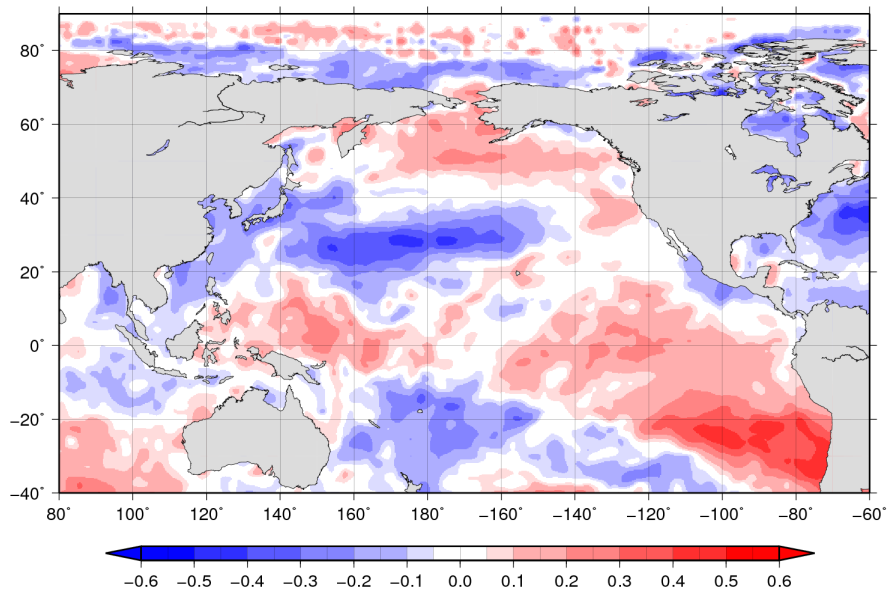


図 121: AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (-10 年).

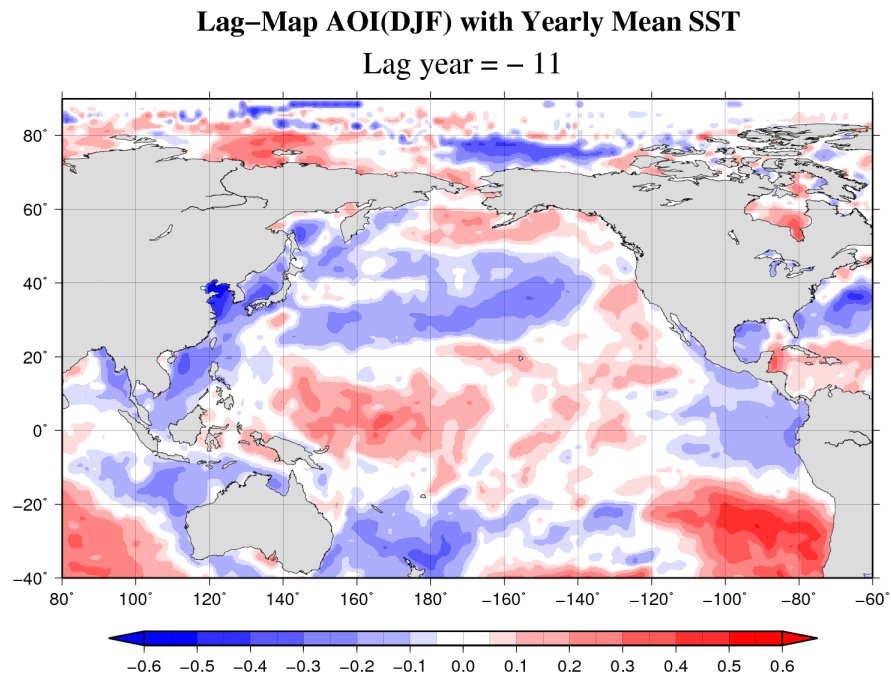


図 122: AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (-11 年).

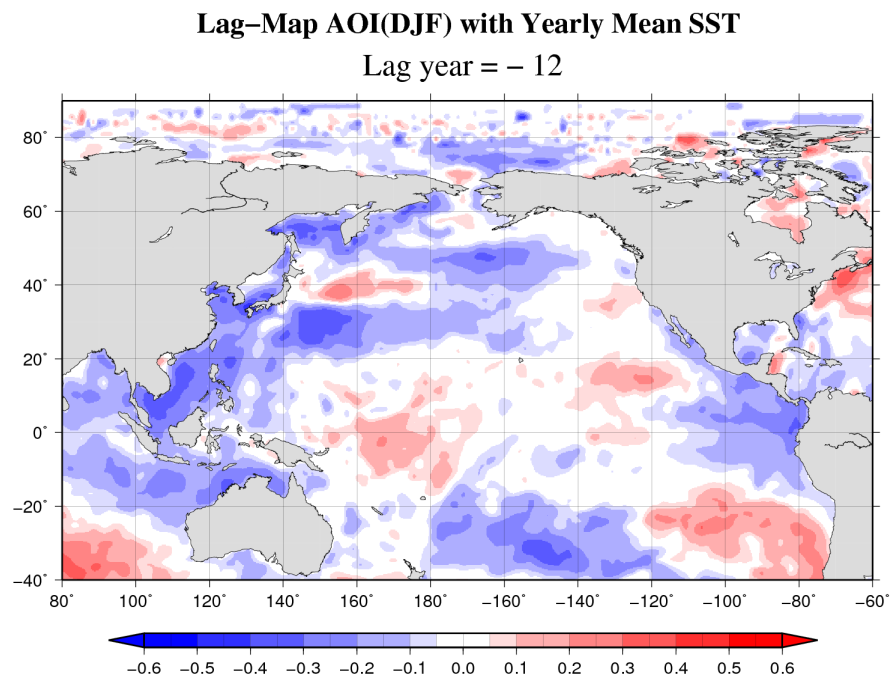


図 123: AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (-12 年).

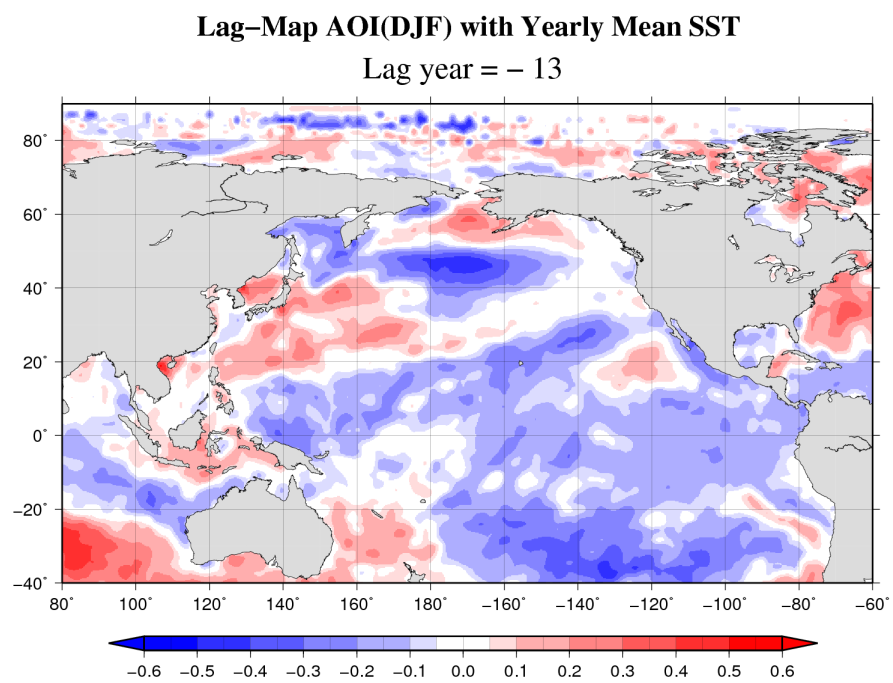


図 124: AOI(DJF) と SST(年平均) のラグマップ (-13 年).

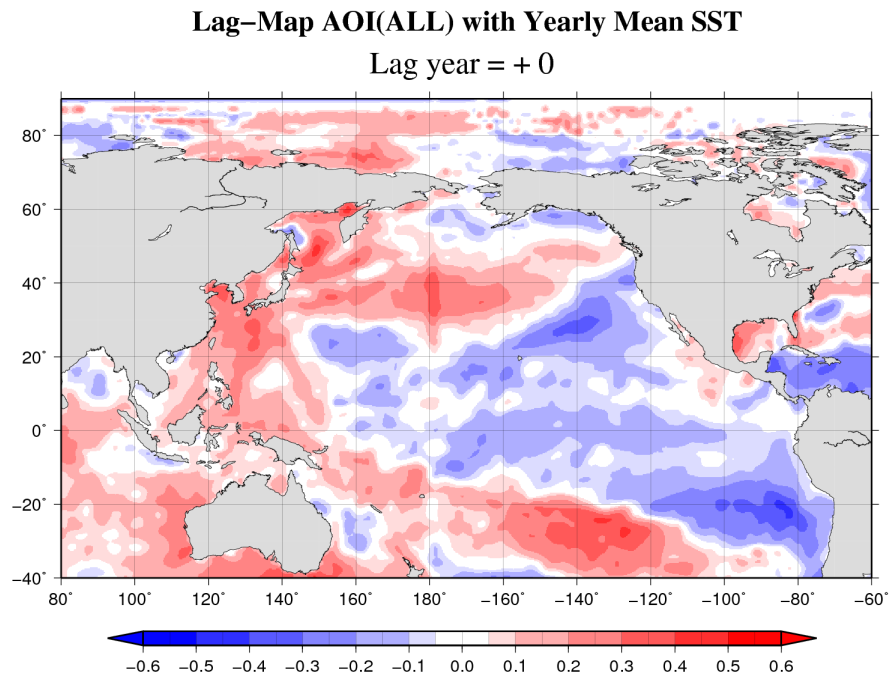


図 125: AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (0 年).

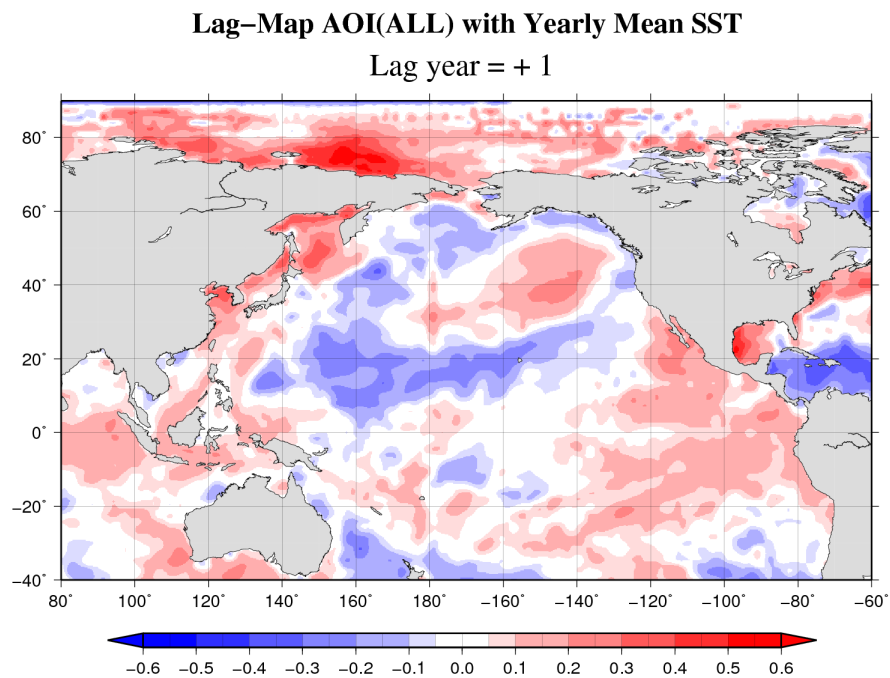


図 126: AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (+1 年).

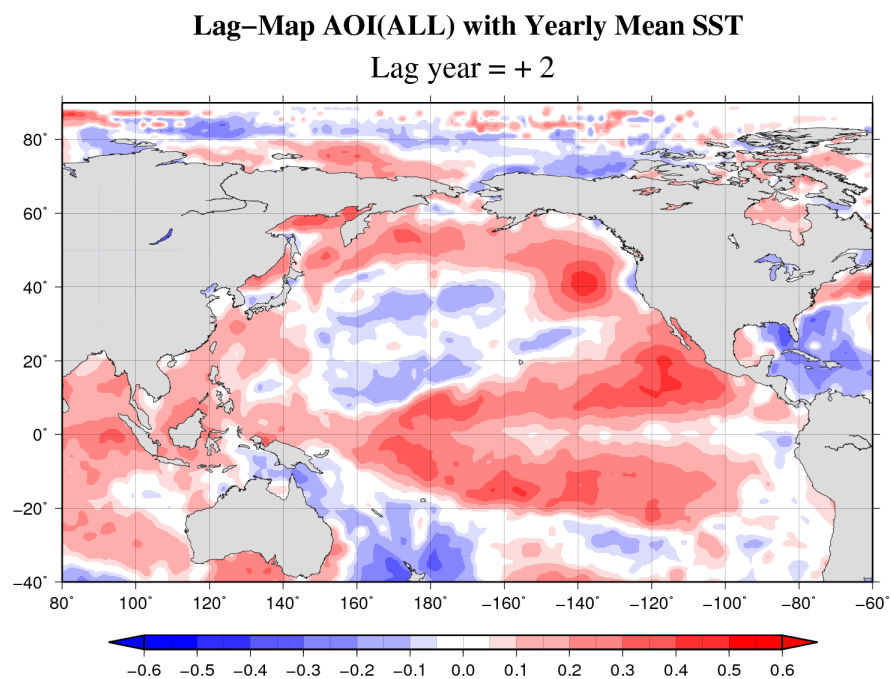


図 127: AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (+2 年).

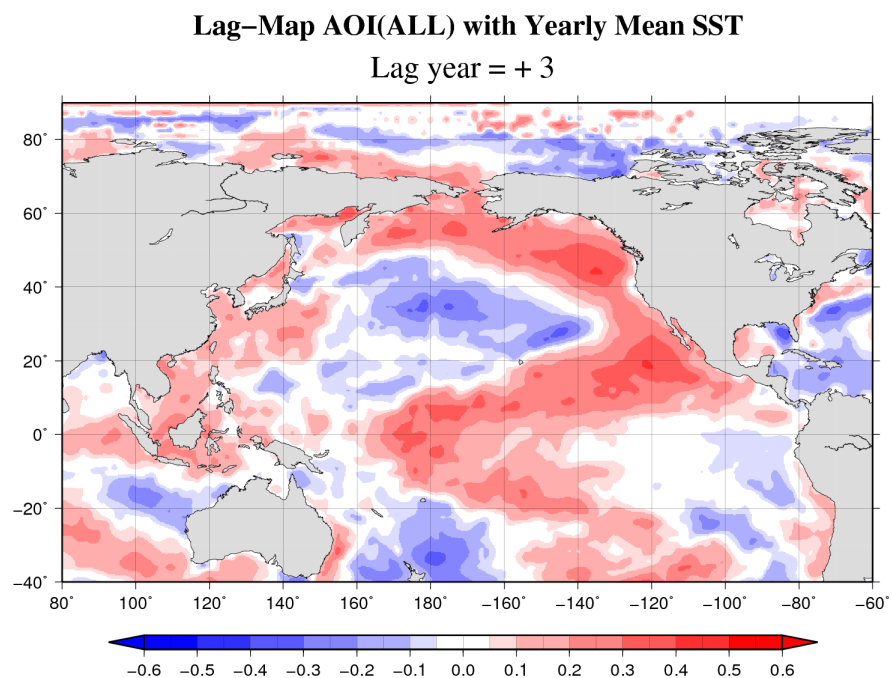


図 128: AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (+3 年).

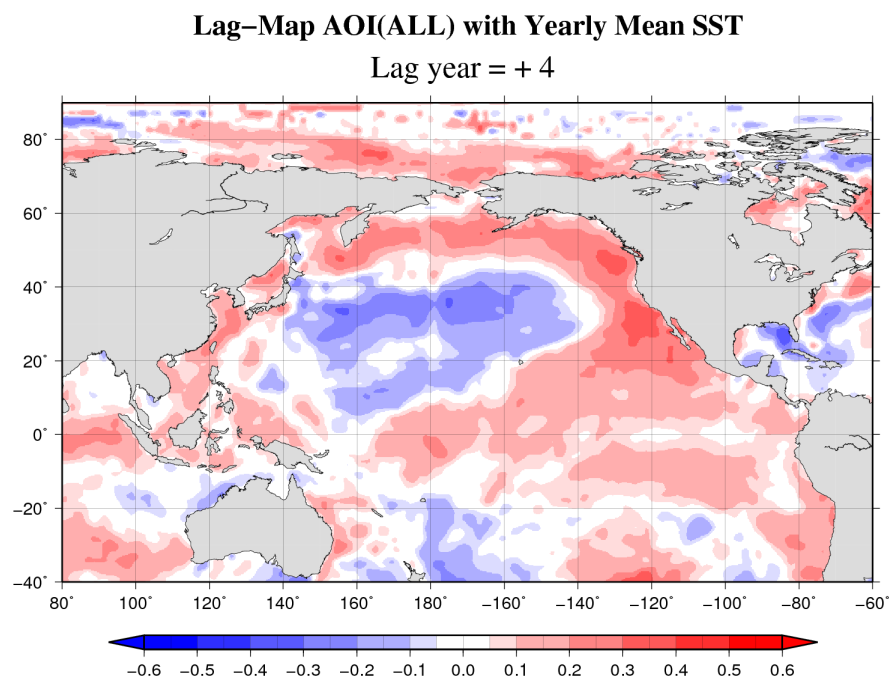


図 129: AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (+4 年).

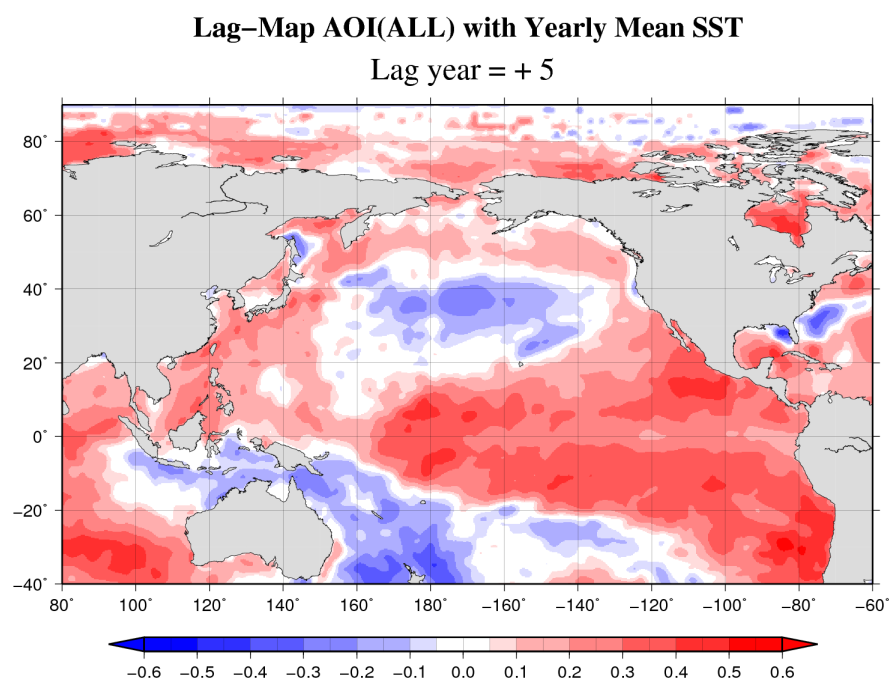


図 130: AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (+5 年).

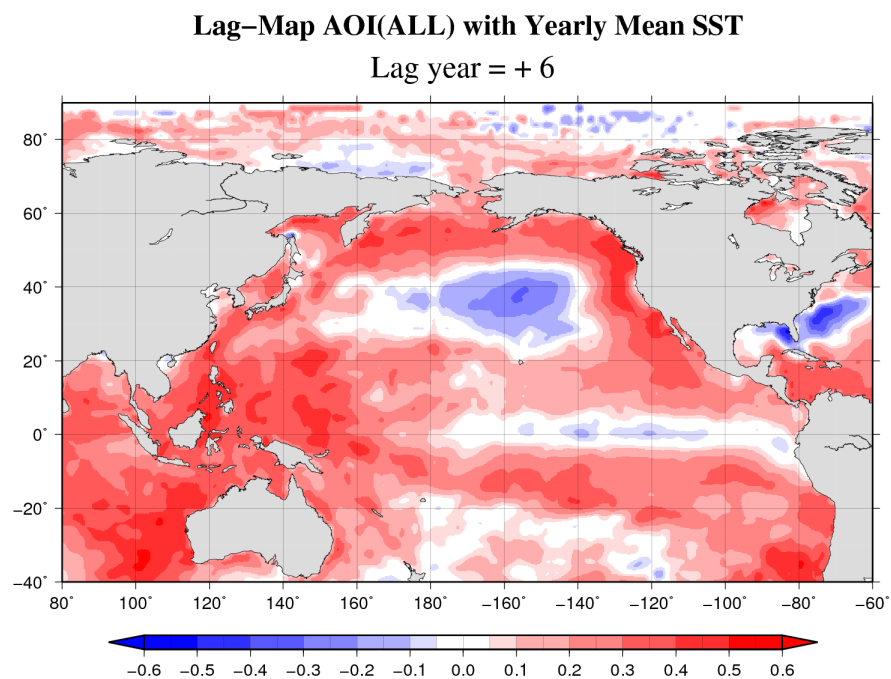


図 131: AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (+6 年).

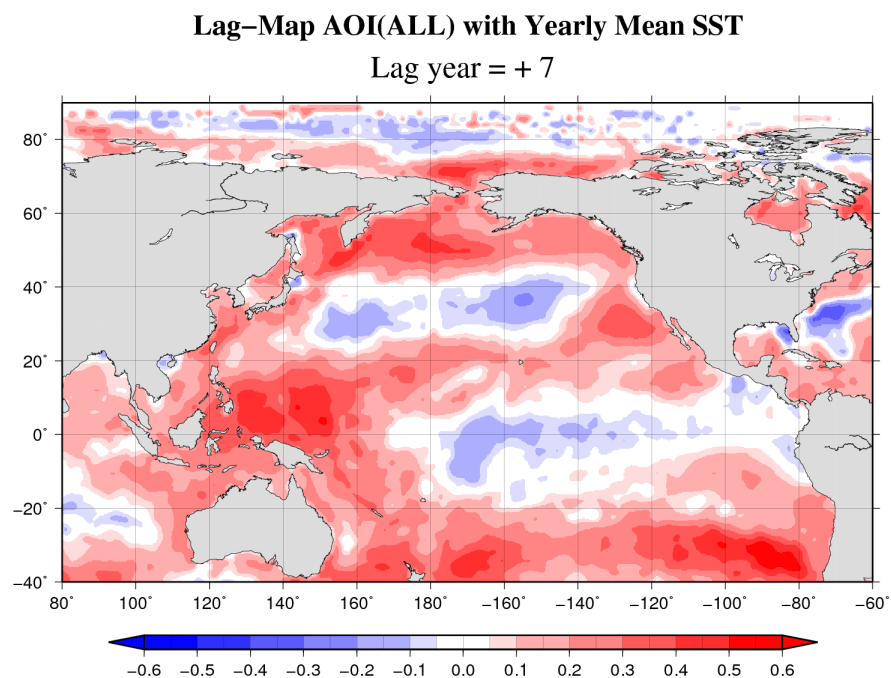


図 132: AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (+7 年).

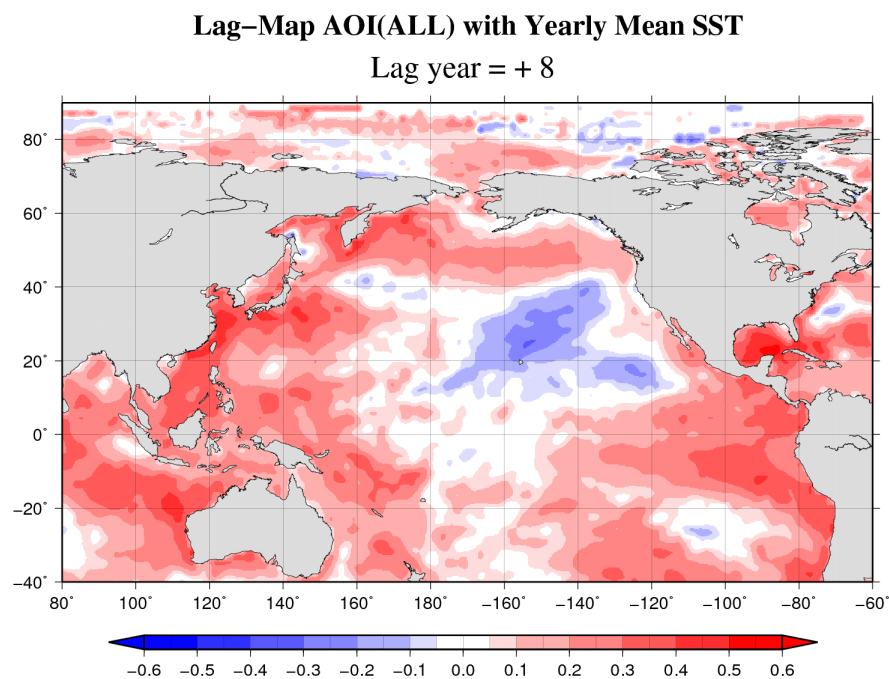


図 133: AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (+8 年).

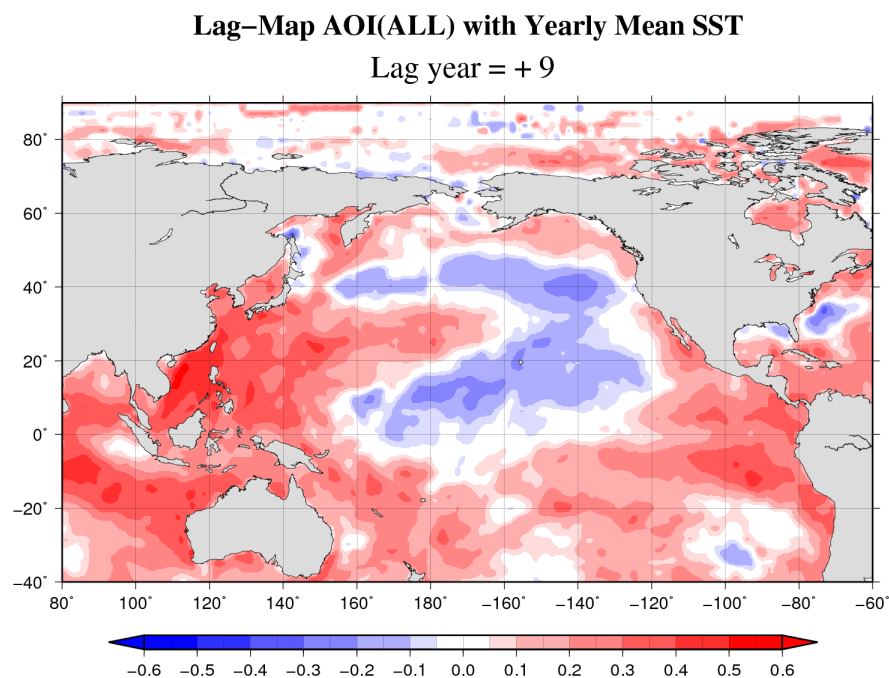


図 134: AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (+9 年).

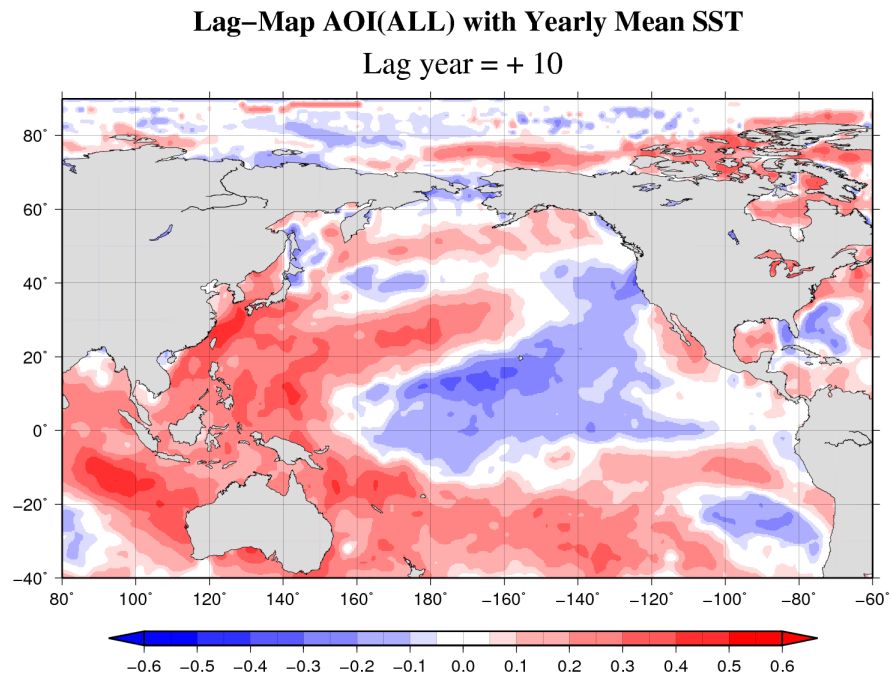


図 135: AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (+10 年).

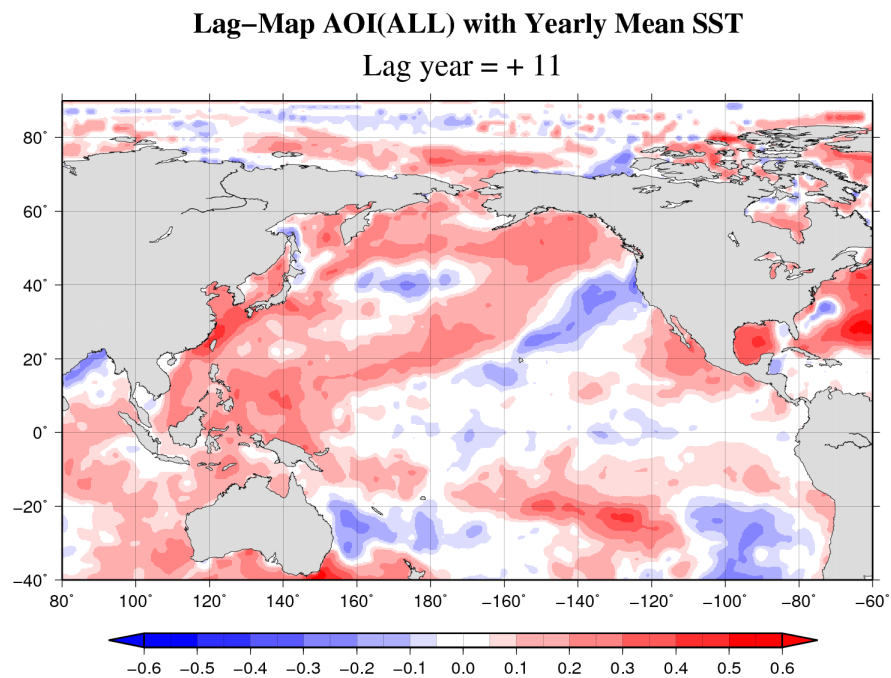


図 136: AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (+11 年).

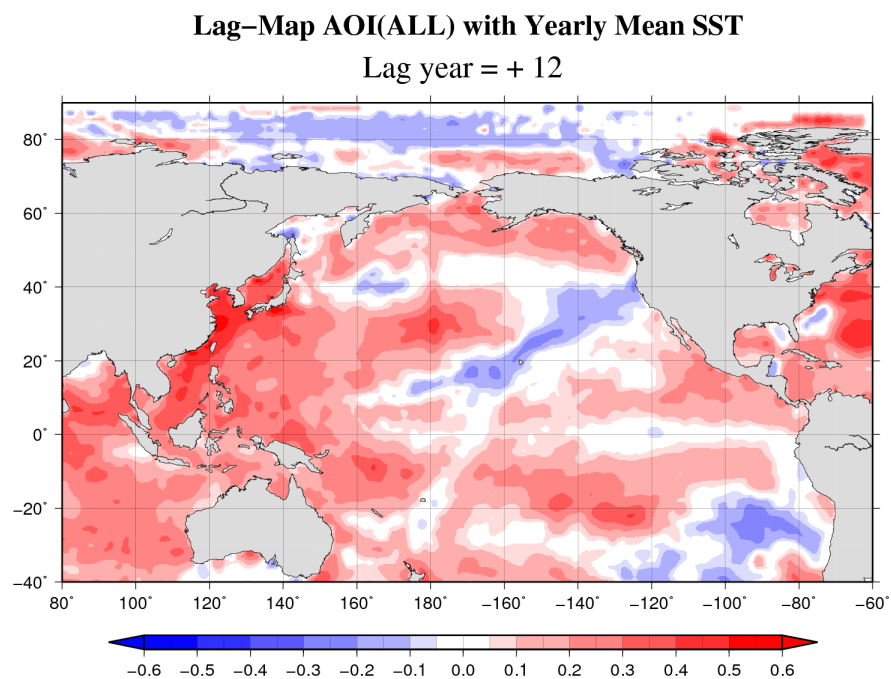


図 137: AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (+12 年).

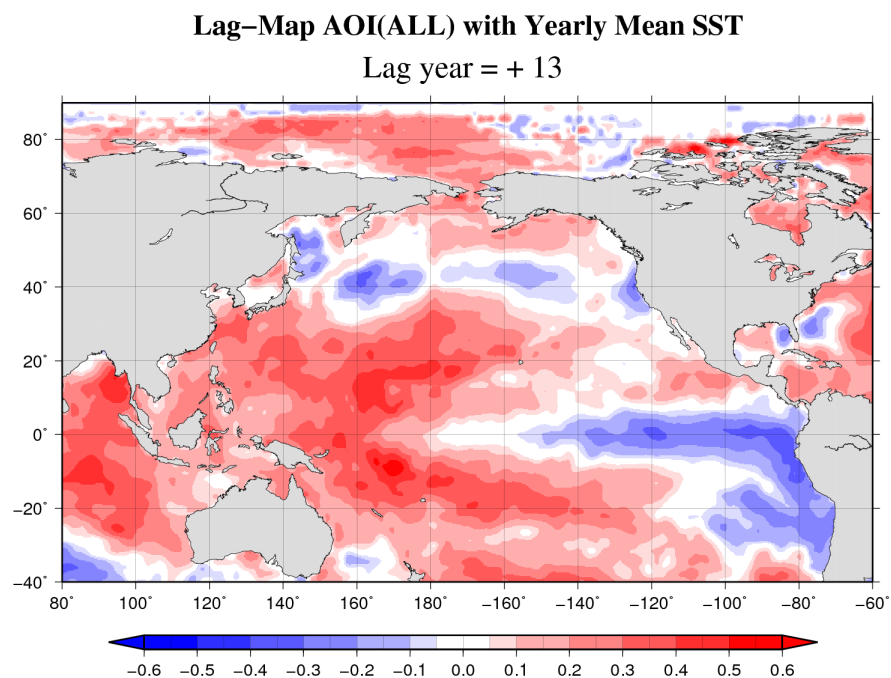


図 138: AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (+13 年).

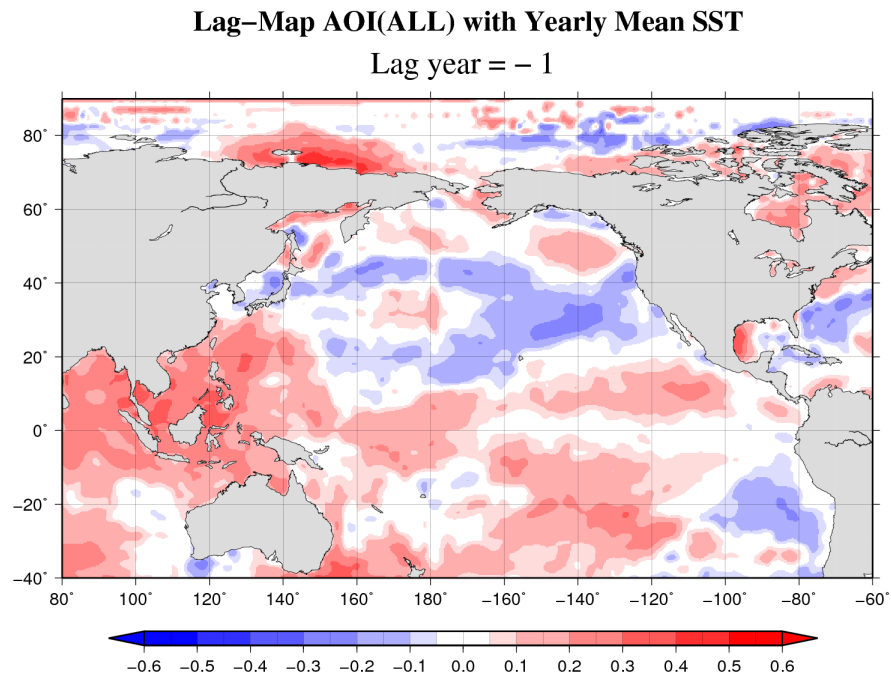


図 139: AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (-1 年).

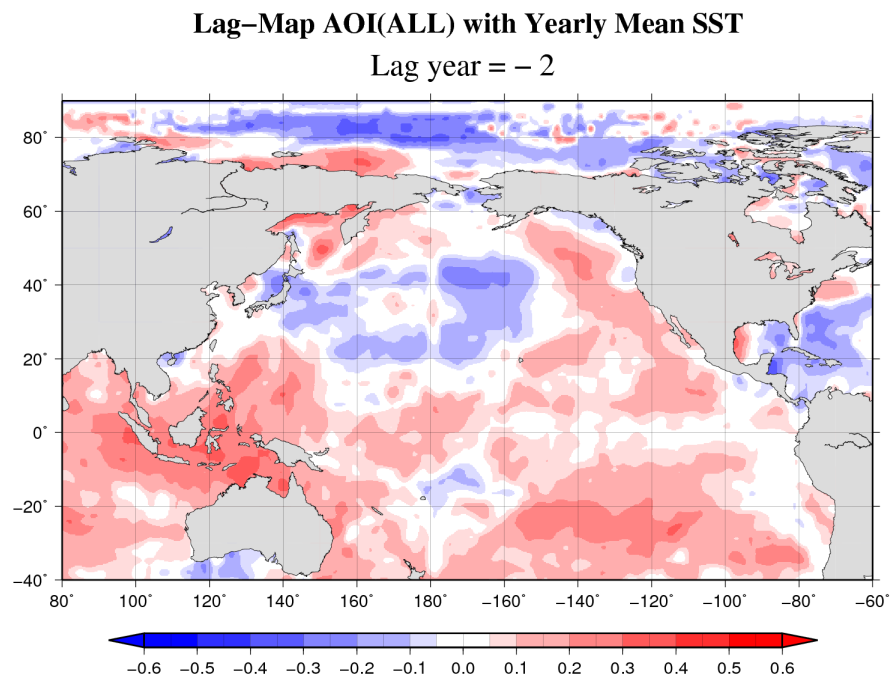


図 140: AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (-2 年).

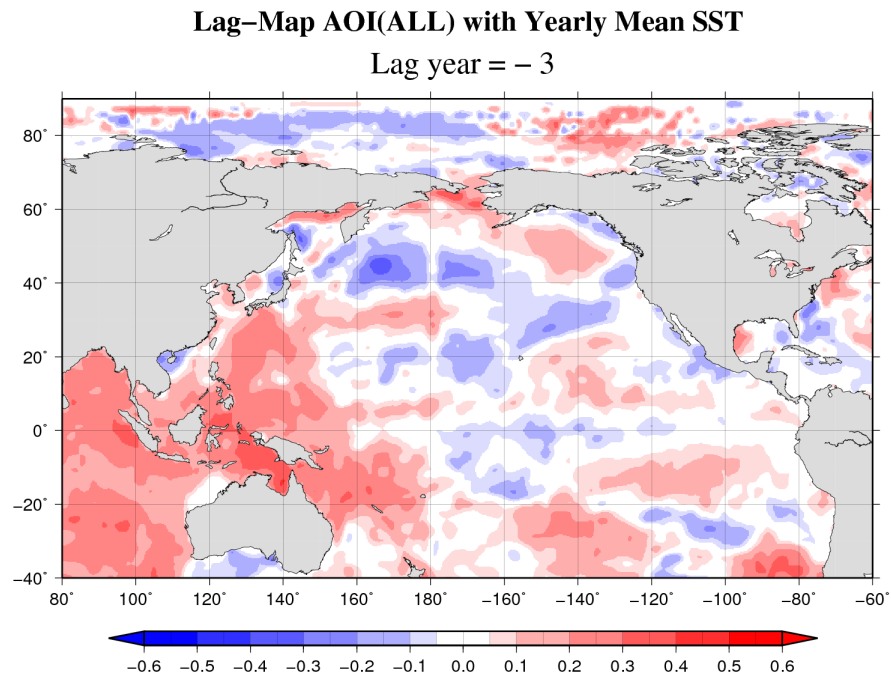


図 141: AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (-3 年).

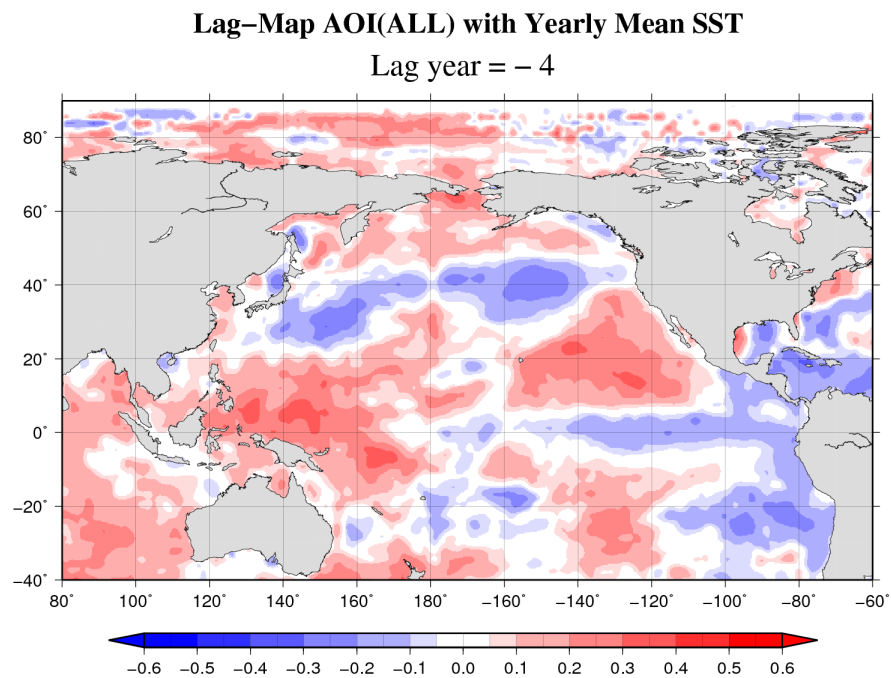


図 142: AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (-4 年).

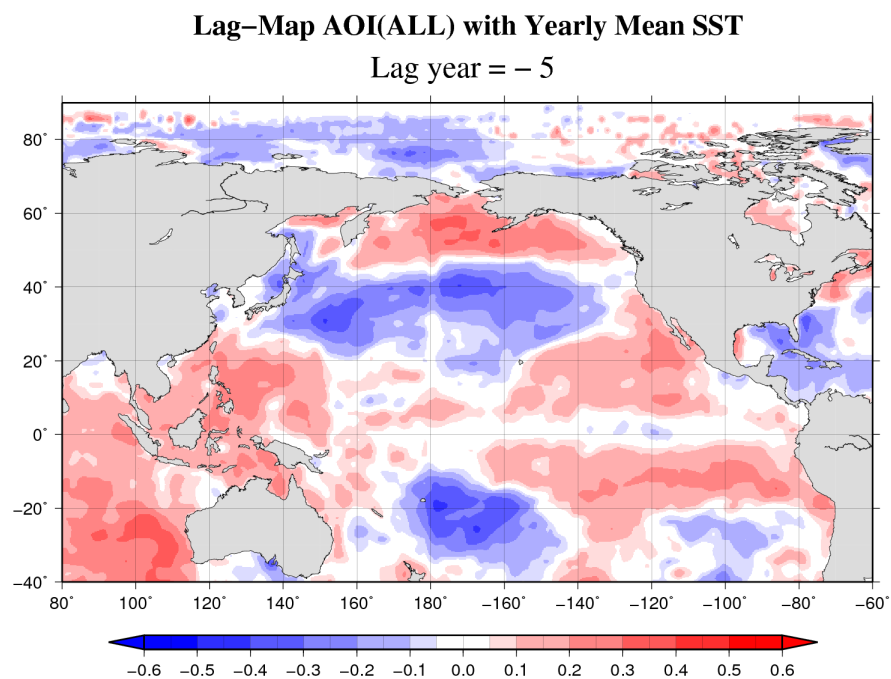


図 143: AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (-5 年).

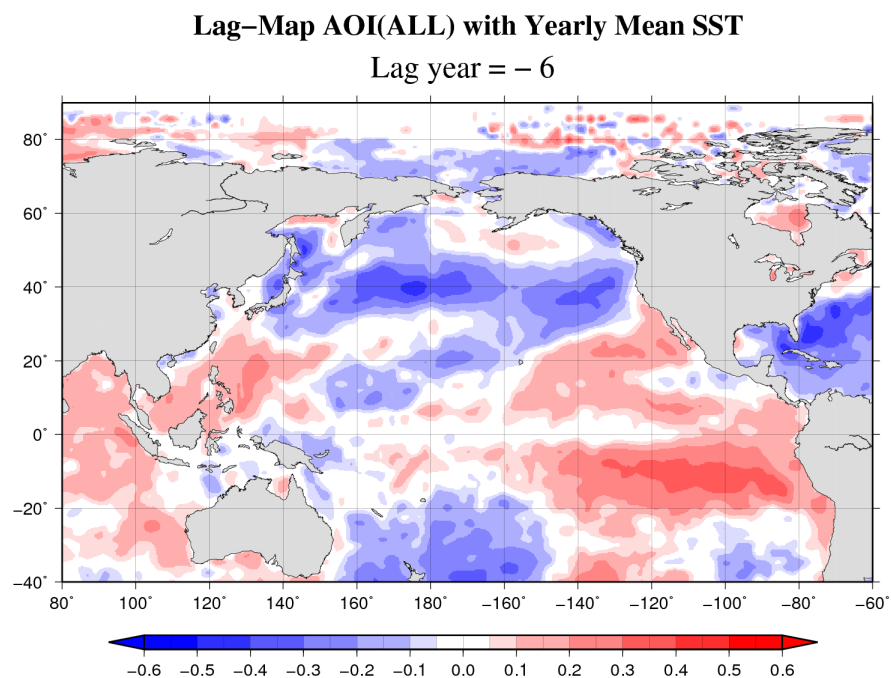


図 144: AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (-6 年).

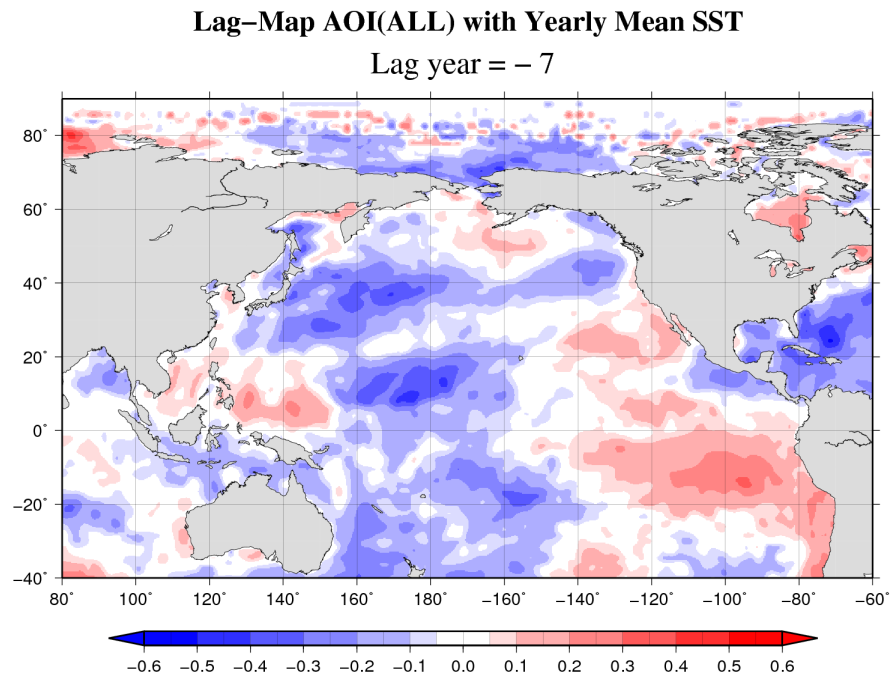


図 145: AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (-7 年).

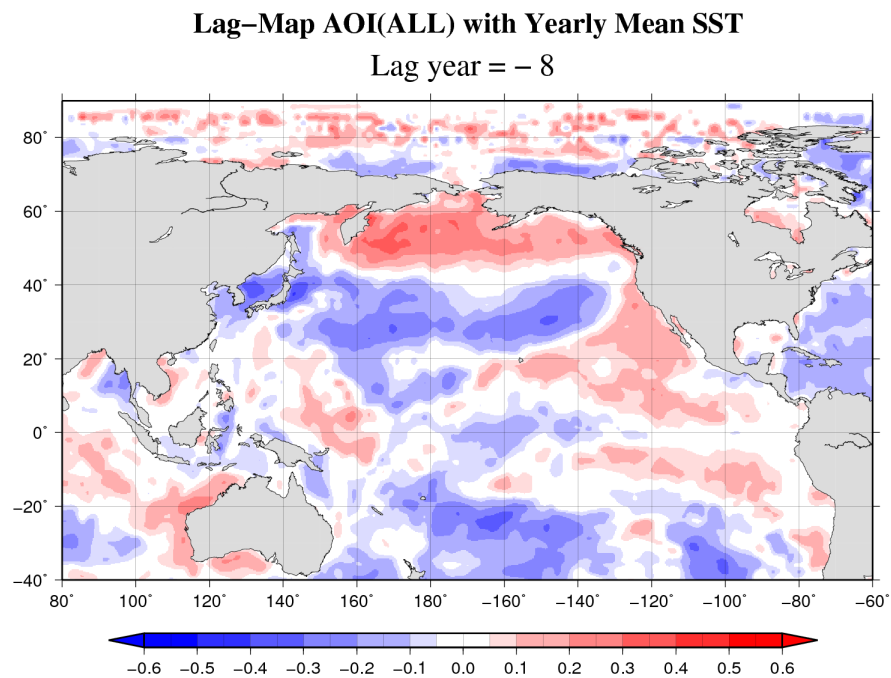


図 146: AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (-8 年).

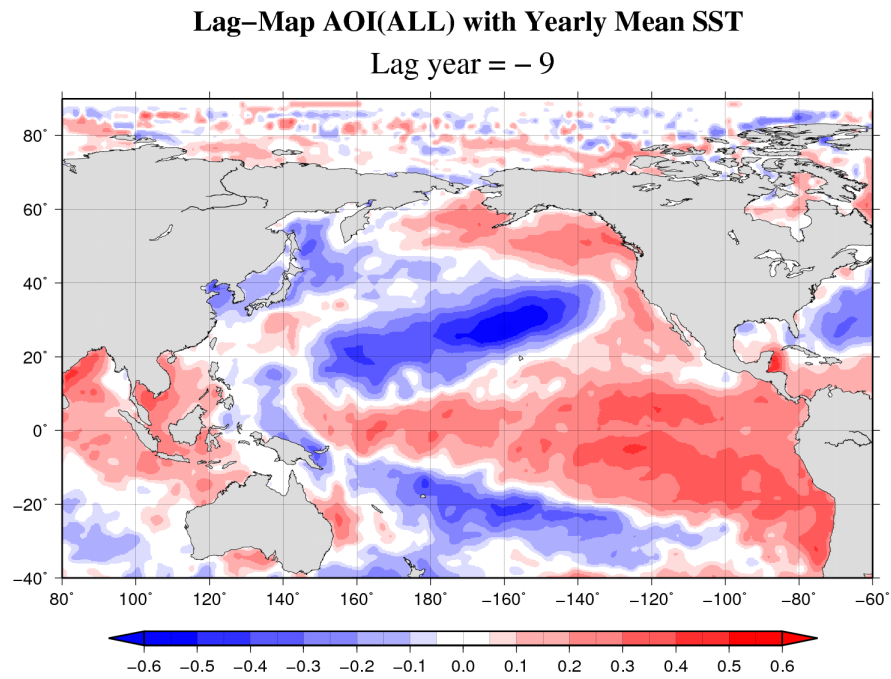


図 147: AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (-9 年).

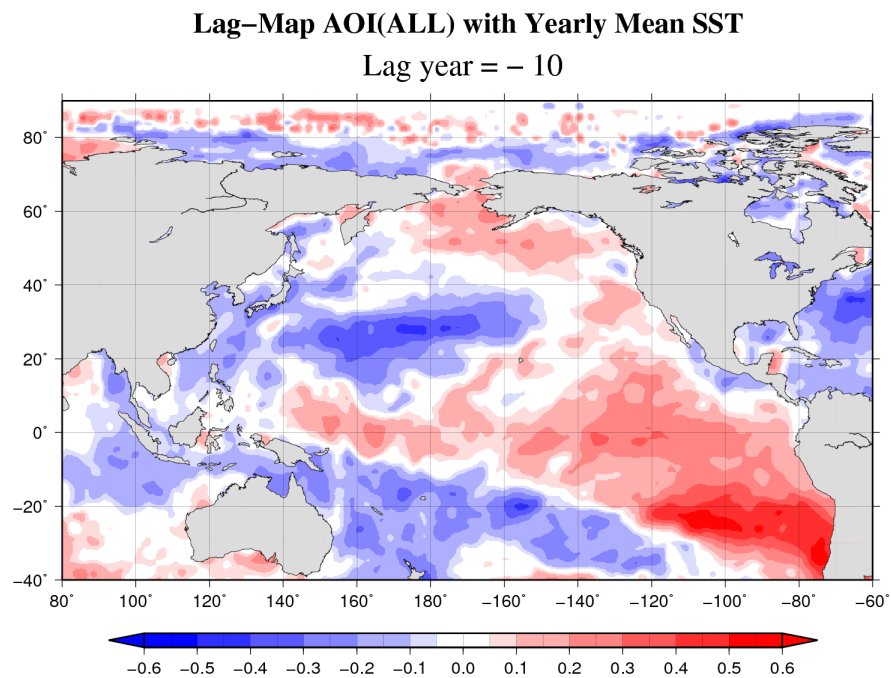


図 148: AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (-10 年).

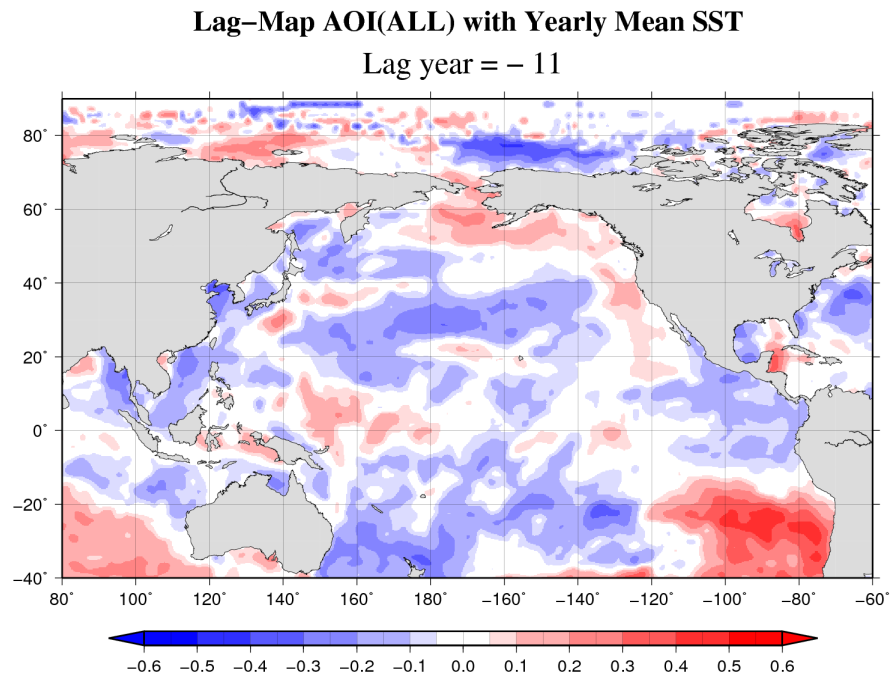


図 149: AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (-11 年).

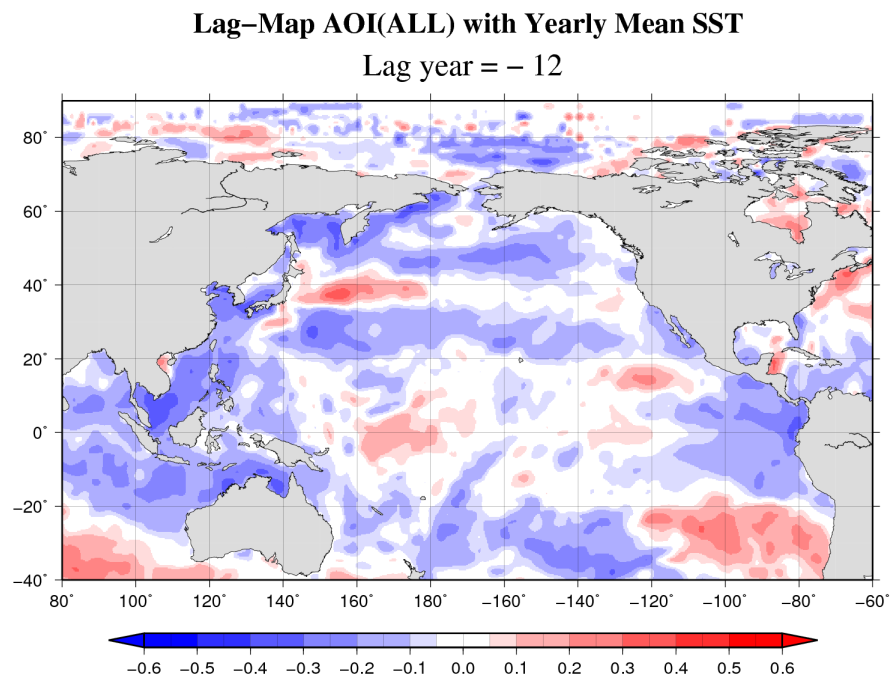


図 150: AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (-12 年).

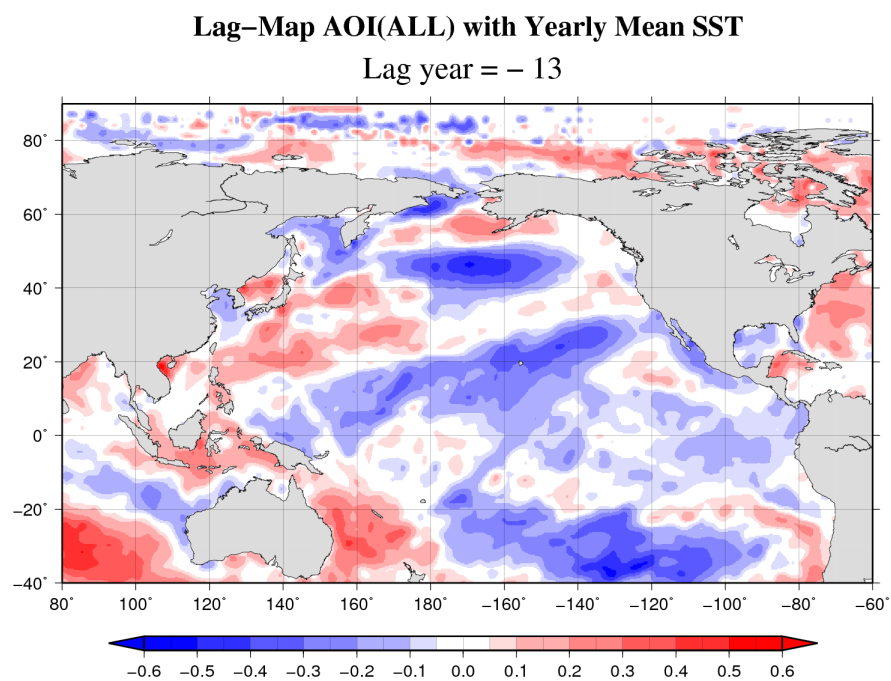


図 151: AOI(ALL) と SST(年平均) のラグマップ (-13 年).