

太陽活動及び地磁気活動と北極振動
との関係に関する統計的解析

藤 田 玲 子

200520297

平成 19 年 1 月

筑波大学大学院環境科学研究科
平成 18 年度修士（環境科学）学位論文

要旨

太陽活動及び地磁気活動と北極振動との関係 に関する統計的解析

太陽活動の指標として紫外線の代用的指数となる太陽電波フラックス (F10.7) と、地磁気活動度指数 (aa index) を用いて極大期間と極小期間を定義し、高度場の極大 - 極小期間の差を確認したところどちらも北極振動の構造をとるが、有意検定をした結果地磁気活動指数を用いたほうに広い範囲で有意な領域を確認した。このことから、地磁気の変動要因が大気に与える影響のほうが、紫外線が大気に与える影響よりも大きい可能性があるといえる。

また、風速場 / 温度場を調査したところ、地磁気活動度指数を用いたほうが明瞭な北極振動の特徴が現れることがわかった。特に温度場において、地磁気活動度指数を用いた場合に 1hPa 付近に F10.7 とは異なる特徴的な温度変化がみられたことから、この温度変化が北極振動強化の発端となる可能性があると考えた。そこで、地磁気変動要因となり、かつ高層の大気温度を変化させる要因について調査したところ、現時点ではソーラプロトンイベントにより成層圏～中間圏の窒素酸化物が増加し、成層圏のオゾン濃度が低下することによる影響が最有力な要因であると考えられる。

キーワード：太陽活動，北極振動，地磁気活動，プロトン，オゾン

Abstract

Statistical analysis of the relationship between solar activity or geomagnetic activity and Arctic Oscillation

The purpose of this study is to analyze the possible impact of solar activity and geomagnetic activity upon the Arctic Oscillation (AO) as the external forcing. Maximum and minimum periods are defined for the solar flux density at 10.7cm wavelength (F10.7) and amplitude antipodal index (aa index). In each period, the monthly mean of barotropic height anomaly, zonal-mean wind anomaly and zonal-mean temperature anomaly are calculated and the difference between the maximum and minimum period are analyzed. It is investigated which has more considerable impact on AO in the short term, F10.7 or aa index.

As a result, the structure of AO is found in winter when the anomaly composite is analyzed for each month. Significance test shows that the aa index has wider significant area than that of F10.7. According to zonal-mean temperature anomaly, a heating area is found in the lower stratosphere for both indices. But in the case of aa index, the characteristic temperature variation area is found in the vicinity of 1 hPa. There is a possibility such that the upper atmospheric differences in temperature can be a trigger of the excitation of the AO in the lower atmosphere. It is considered that the aa index representing the variation of geomagnetic activity, which is attributed to the fact of charged particles from the sun, especially proton, can be another forcing of the excitation of the AO.

Keyword : Solar activity, Arctic Oscillation, Geomagnetic activity, Proton, Ozone

目次

要旨
目次
表目次
図目次

1 . 序論	1
1.1 背景.....	1
1.1.1 北極振動.....	1
1.1.2 太陽活動と北極振動	1
1.1.3 地磁気活動と北極振動.....	2
1.1.4 ソーラプロトンイベント (SPE) と成層圏オゾン	2
1.2 研究目的.....	3
2 . 使用データ及び解析方法	4
2.1 使用データ.....	4
2.1.1 等圧面高度場.....	4
2.1.2 温度 / 風速場.....	4
2.1.3 太陽電波フラックス (F10.7)	5
2.1.4 地磁気活動度指数 (aa index, AE index, Dst index).....	5
2.1.5 北極振動指数 (AO index).....	6
2.1.6 プロトンフラックス	6
2.2 解析方法.....	7
2.2.1 太陽活動極大 / 極小期間の定義.....	7
2.2.2 AO index - F10.7 , AO index - aa index の lag 相関	8
2.2.3 順圧高度場 / 温度場 / 風速場の極大 - 極小の算出	8
2.2.4 Student 検定	8

3 . 結果	9
3.1 順圧高度場 (F10.7 / aa index)	9
3.2 順圧高度場 (AE index / Dst index)	9
3.3 帯状平均風速場 (ERA-40)	10
3.4 帯状平均温度場 (ERA-40)	11
3.5 帯状平均温度場 (UKMO data)	11
3.6 F10.7 と aa index の変動のタイミング	12
3.7 プロトンフラックスと aa index の変動のタイミング	12
4 . 考察	13
4.1 気象場（順圧高度場 / 帯状平均風速場 / 帯状平均温度場）	13
4.1.1 順圧高度場	13
4.1.2 帯状平均風速場	13
4.1.3 帯状平均温度場	13
4.2 1hPa 付近の温度変化要因	14
4.2.1 紫外線説	14
4.2.2 プロトン説	14
4.3 プロトンが北極振動を強化するプロセス	16
5 . 結論	17
6 . 謝辞	18
引用文献	19
Appendix_A	66
Appendix_B	70

表目次

表 2-1	使用データ	21
表 2-2	観測期間 / 気観測局と各局の補正係数.....	22
表 2-3	F10.7 サンプル数.....	23
表 2-4	aa index サンプル数.....	24
表 2-5	t 検定のサンプル数.....	25
表 A-1	aa index 観測局の地理座標 / 地磁気座標.....	67
表 A-2	AE index 観測局の地理座標 / 地磁気座標.....	67
表 A-2	Dst index 観測局の地理座標 / 地磁気座標.....	67
表 B-1	プロトンフラックスが高く aa index が激しく変動しているケース.....	71

図目次

図 1-1	典型的な AO + の構造：順圧高度場(EOF-1)	26
図 1-2	北極振動の特徴	27
図 2-1	(a) F10.7 の時系列，(b) aa index の時系列	28
図 2-2	(a) F10.7 のパワースペクトル，(b) aa index のパワースペクトル	29
図 2-3	F10.7 - aa index 散布図	30
図 2-4	F10.7 / aa index の年平均データの推移	31
図 2-5	F10.7 - aa index の lag 相関	32
図 2-6	(a) AE index の時系列，(b) Dst index の時系列	33
図 2-7	(a) aa index - AE index の散布図，(b) aa index - Dst index の散布図	34
図 2-8	(a) F10.7 - AO index の時系列，(b) aa index - AO index の時系列	35
図 2-9	(a) F10.7 - AO index の lag 相関，(b) aa index - AO index の lag 相関	36
図 3-1	F10.7 極大期間の高度場アノマリ(季節毎)	37
図 3-2	F10.7 極小期間の高度場アノマリ(季節毎)	38
図 3-3	F10.7 極大 - 極小期間の高度場アノマリ(季節毎)	39
図 3-4	(a) F10.7 極大 - 極小期間の冬季高度場(有意検定)， (b) F10.7 極大 - 極小期間の冬季高度場(有意検定)	40
図 3-5	aa index 極大期間の高度場アノマリ(季節毎)	41
図 3-6	aa index 極小期間の高度場アノマリ(季節毎)	42
図 3-7	aa index 極大 - 極小期間の高度場アノマリ(季節毎)	43
図 3-8	(a) AE index 極大 - 極小期間の冬季高度場(有意検定)， (b) Dst index 極大 - 極小期間の冬季高度場(有意検定)	44
図 3-9	AE index 極大期間 / 極小期間に該当する月のサンプル数	45
図 3-10	AE index 極大 - 極小期間の冬季高度場(有意検定)_winter	46
図 3-11	F10.7 極大期間の風速場アノマリ(季節毎)	47
図 3-12	F10.7 極小期間の風速場アノマリ(季節毎)	48
図 3-13	F10.7 極大 - 極小期間の風速場アノマリ(季節毎)	49
図 3-14	aa index 極大期間の風速場アノマリ(季節毎)	50
図 3-15	aa index 極小期間の風速場アノマリ(季節毎)	51
図 3-16	aa index 極大 - 極小期間の風速場アノマリ(季節毎)	52
図 3-17	F10.7 極大期間の温度場(季節毎)	53
図 3-18	F10.7 極小期間の温度場(季節毎)	54
図 3-19	F10.7 極大 - 極小期間の温度場(季節毎)	55
図 3-20	aa index 極大期間の温度場(季節毎)	56
図 3-21	aa index 極小期間の温度場(季節毎)	57
図 3-22	aa index 極大 - 極小期間の温度場(季節毎)	58
図 3-23	(a) F10.7 の ERA-40/UKMO 極大 - 極小期間の温度場(冬季)， (b) aa index の ERA-40/UKMO 極大 - 極小期間の温度場(冬季)	59

図 3-24	F10.7 高周波成分 / 低周波成分	60
図 3-25	(a)F10.7 高周波成分 - aa index 散布図 , (b)F10.7 高周波成分 - プロトンフラックス散布図	61
図 3-26	(a) aa index とプロトンフラックスの時系列 , (b) aa index - プロトンフラックス散布図.....	62
図 3-27	(a) aa index 時系列 (プロトンフラックス上昇) , (b) aa index 時系列 (プロトンフラックス上昇なし) , (c) プロトンフラックスの増減と aa index の増減によるケース分け	63
図 4-1	(a) プロトンによる NO 生成 , (b) 触媒反応サイクルによるオゾン破壊.....	64
図 4-2	プロトンが北極振動を強化するプロセス.....	65
図 A-1	地磁気赤道面での環電流.	68
図 A-2	aa index, AE index, Dst index の各観測局の位置.....	69
図 B-1	オゾン全量の緯度時間断面置.....	71

1. 序論

1.1 背景

1.1.1 北極振動

[Kodera et al. \(1990, 1996\)](#) 等により、極夜ジェットの変動に伴い、極域と中緯度帯にシーソー的な気圧場の振動が存在することが既に示唆されていた。その後、[Thompson and Wallace \(1998\)](#) によりこの振動は「北極振動 (Arctic Oscillation : AO)」と命名された。AO は、北緯 20 度以北の領域で冬季 (11 ~ 4 月) の月平均海面気圧偏差場の主成分分析 (EOF 解析) を行い、最も卓越するモードを抽出したものであるとして定義されている。

等圧面高度場の空間変動パターンは鉛直断面は地表から下部成層圏まで順圧的な構造をもち、極域とそれを取り巻く中緯度地域で気圧が逆位相に振動しており、水平面は海面構成気圧が北極域で負の偏差の時に中緯度帯で正の偏差 (AO+)、北極域で正の偏差の時に中緯度帯で負の偏差 (AO-) となる変動である。図 1-1 に、順圧高度場の EOF-1 を示す。これは、典型的な AO+ のパターンである。また、図 1-2 に AO+ と AO- の時の風速 / 温度に関する特徴を示す。

北極振動は北半球の気候変動に密接な関わりを持つ現象であることから、様々な角度からの先行研究が存在する。力学的見地から解析を行っている論文である [Tanaka and Matsueda \(2005\)](#) では、任意の外部強制に共鳴して特異固有解となるモードが北極振動へと成長すると報告されている。その外力としては、総観規模擾乱の他に、太陽活動、火山活動、温室効果ガス等も考えられる。そして、外力としてわずかであっても、太陽活動のような定常的外力は北極振動の成長に重要であることが示されている。

1.1.2 太陽活動と北極振動

外力のひとつとして、太陽活動に着目した研究がいくつかある。その中で、[Kodera \(2002\)](#) では、太陽活動を極大期 / 極小期に分けて高度場の解析を行ったところ、NAO に伴う変動は極小期には北大西洋域にとどまるが、極大期には影響範囲がユーラシア方向に広がり半球的な AO の構造になることを報告している。また、これに対応して極大期には帯状平均東西風偏差が上部成層圏まで伸びていることを見出した。成層圏極渦変動の影響が下方伝播し対流圏循環場に影響を及ぼすことは、[Baldwin and Dunkerton \(2001\)](#) らによっても示されている。

この太陽活動と北極振動の関係を明確にした論文が、[Kodera and Kuroda \(2002\)](#) である。太陽活動極大期には紫外線量が増加し、そのため冬季において日射のある南半球 ~ 赤道域と日射の少ない北半球極域との温度勾配が増大し、温度風の関係によりジェットが強化されると解釈している。さらに亜熱帯域成層圏上部のジェットの強化は波の伝播にも影響を与え、ジェットのコアへの波の伝播を減少させ、ジェットのコアが亜熱帯域から北極域へと伝播していると説明している。また、同論文で

は上部成層圏の高温域はオゾンの直接加熱によるものとしており、紫外線が強くなる太陽活動の極大期ほどオゾンが多く生成されるとともに吸収も多くなる。下部成層圏の高温域は、熱帯上部成層圏から極域へのブリューワ・ドブソン (BD) 循環が弱まり、アノマリとしては極域から赤道へ風が循環するため、本領域で大気が断熱圧縮され温度が上昇した結果と考えられる。そして、BD 循環の弱まりは、極域へのオゾン輸送を減少させることになる。

長期的な太陽活動の変化と北極振動との間では、太陽から到達する「紫外線量」と成層圏の「オゾン量」が重要となる。

1.1.3 地磁気活動と北極振動

1960 年代に「磁気嵐の 3 日後に気圧の谷が深まる」という報告があることから、古くから地磁気活動と地上気圧との間には関係があるといわれている。また、柳原 (1991) では、太陽活動と地球温暖化について議論するにあたって、地磁気活動を指標とすることが有効であると述べられている。そして、伊藤 (2003) では、地磁気活動 (aa index) と北極振動指数の相関について記述されている。

Bucha and Bucha (1998) は、黒点数と地磁気活動との相関は 1969 年以降から低下し、温度 / 気圧との相関は 1969 年以降の地磁気活動とのほうが良いため、地磁気活動の影響のほうが黒点変動より気象に与える影響が大きいと考えた。そして、1969 年以降の地磁気活動に着目し北極振動との相関を調べたところ、高い相関係数が得られると報告している。彼らはこの要因を、地磁気擾乱が活発な時熱圏で下降流が生じ、それが成層圏 / 対流圏へ伝わり、この過程が対流圏の気圧と温度を変化させると考察している。

Palamala and Bryant (2004) では、1965 年以降の冬季に限定すると地磁気活動と NAM index の相関が高いと報告している。また彼らの論文には、地磁気活動と NAM index の相関を QBO 東風 / 西風位相に分けて評価すると、東風位相の時に相関係数が高くなるという興味深い報告もある。

Thejll (2003) 等多数の論文で、様々な解析手法を用いて北極振動と地磁気活動の相関に関する研究結果が報告されているが、現段階ではその詳細なプロセスは未知のようである。

1.1.4 ソーラプロトンイベント (SPE) と成層圏オゾン

Solar Proton Event (SPE) といわれる太陽フレアもしくはコロナガス噴射 (Coronal Mass Ejection : CME) 発生時に、高エネルギー粒子 (特にプロトン) を大量に放出する現象がある。

太陽から放出されたプロトンは、地球の磁力線に沿って極域 (地磁気高緯度) に降り注ぎ、大気に侵入する。その際、プロトンは大気中の分子と衝突しエネルギーを失う。大気は下へ行くほど急激に密度が増加しているので、低エネルギー粒子は途中でエネルギーを失い下層へは到達しない。10MeV 程度の粒子では成層圏上部で

静止してしまうが、100Mev 以上のエネルギーを持つ粒子は、成層圏下部まで到達することが可能である。

プロトンと大気中分子の相互作用の結果、極域中間圏では HO_x (H, OH, HO₂) や NO_y (N, NO, NO₂, NO₃, N₂ O₅, HNO₃, HNO₄, ClONO₂) が生成される。HO_x の効果は SPE 後数時間の短いスケールであるが、NO_y は長時間存在し、中間圏で数週間、成層圏で数ヶ月～数年間持続するといわれている。これらは触媒となり、成層圏のオゾン濃度低下に関与する (Reid et al., 1991, Jackman and McPeters, 2004)。

また、上記論文では、窒素酸化物の増加 / オゾン濃度の低下の観測結果と、それに対する温度低下を示している。成層圏温度は、SPE の結果 3 度程度低下すると報告されている。

成層圏オゾン量が北極振動と関わりが深いことは知られているので、SPE 有無によるオゾン濃度変化と北極振動には関連があるのかが重要となってくる。

1.2 研究目的

太陽活動が北極振動に与える影響について調査するために、「太陽電波フラックス (F10.7) 」と「地磁気活動度 (aa index) 」を用いて、下記 3 項目の疑問に答えるべく気象場に対して統計的解析を行う。

- ・地磁気活動は北極振動に影響を及ぼしているか
- ・紫外線と地磁気活動変動要因が気象場に与える影響の相違点は
- ・地磁気活動変動要因が北極振動を強化するプロセスとは

2. 使用データ及び解析方法

2.1 使用データ

本研究において使用したデータ概要及び使用理由を以下に示す。

また、本研究で使用した各データの入手先を表 2-1 に示す。

2.1.1 等圧面高度場

順圧高度場算出のために、National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) 再解析データの月平均データを使用した。対象期間は、1950～2004 年にわたる 55 年間である。空間分解能は、水平方向が $2.5 \times 2.5^\circ$ 、鉛直方向は 1000～10hPa までの 17 層 (1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 hPa) である。

データの条件として、研究対象が太陽活動という 1 サイクル 11 年の長期にわたる変動を観察することから、統計的に解析を行うためにはデータが長期間（最低限 2 サイクル）存在する必要がある。本機関のデータは 1950 年より存在するため、目的に適していると判断し使用した。

2.1.2 温度 / 風速場

温度 / 風速場算出のために、以下の 2 機関のデータを使用した。

(1) ERA-40

European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) の ERA-40 の月平均データを使用した。対象期間は、1957～2002 年にわたる 45 年間である。空間分解能は、水平方向が $2.5 \times 2.5^\circ$ 、鉛直方向は 1000～1hPa までの 23 層 (1000, 925, 850, 775, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10, 7, 5, 3, 2, 1 hPa) である。

データの条件として、2.1.1 項と同様に長期間データが存在することと、成層圏まで含めた変化を確認するため 1hPa 付近までデータが存在する必要がある。本機関のデータは成層圏界面（約 1hPa）付近までのデータが 45 年間存在するため目的に適していた。ただし、対流圏におけるデータについては他機関データとほぼ同等であり問題ないが、成層圏データについて精度に対する疑問があるため、同項(2)に示すデータで確認を行う。

(2) UKMO 成層圏同化データ

United Kingdom Meteorological Office (UKMO) の Stratospheric Assimilated Data の月平均データを使用した。対象期間は、1991～2005 年にわたる 14 年間である。

本データは、1991 年により打ち上げられた Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) で観測されたデータから作成されたものであり、空間分解能は、水平方向が

3.75×2.5 度、鉛直方向は 1000 ~ 0.32hPa までの 22 層 (1000, 681.29, 464.16, 316.23, 215.44, 146.78, 100.00, 68.13, 46.42, 31.62, 21.54, 14.68, 10.00, 6.81, 4.64, 3.16, 2.15, 1.47, 1.00, 0.68, 0.46, 0.32hPa) である。

本データを使用した理由は、ERA-40 は 10hPa 以上の高層データについて信頼性が低いため、データ存在期間は短いが ERA-40 より信頼度が高いといわれている本データを使用し、両データを照らし合わせて評価を行うためである。

2.1.3 太陽電波フラックス(F10.7)

紫外線の代用的指数として、National Research Council の太陽電波フラックス (F10.7) の月平均データを使用した。対象期間は、1950 ~ 2004 年にわたる 55 年間である。

F10.7 とは、波長 10.7cm の太陽電波強度を Solar Flux Unit (SFU) で表現したものであり、単位は $\text{SFU} = [10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}]$ である。1947 年に Canada の Ottawa において連続観測が開始され、1990 年に Penticton へ移設された。

紫外線は大気を通過して地上に到達するまでに減衰しやすいことから、衛星観測開始以前に地上で正確に値を測定することは困難であった。一方、太陽黒点数はデータが古くから存在し紫外線と強度変化が同一であったが、その評価方法が目視であるため曖昧であるとの見方があった。そこで、紫外線より長波長帯に位置するため地上へ到達する際の減衰が少なく、紫外線と強度変化が同一である波長 10.7cm (2.8GHz の周波数帯) の電波を用いることにした。

2.1.4 地磁気活動度指数(aa index, AE index, Dst index)

地磁気活動度指数として、aa index , AE index , Dst index を使用した。

地磁気に関する補足は、Appendix_A を参照。

(1) aa index

National Geophysical Data Center の amplitude antipodal index (aa index)の月平均データを使用した。対象期間は、1950 ~ 2004 年にわたる 55 年間である。

aa index (Mayaud, 1972) とは、磁気共役点に位置する 2 ヶ所の地磁気観測点で算出された K 指数から振幅に戻し、表 2-2 に示す係数をかけて 2 点の平均値を作成したものである。観測期間 / 観測局については、表 2-2 を参照。単位は、[nT]である。

本データは、先行研究 Palamara and Bryant (2004) で使用されていたこと、1986 年に観測が開始されているため、2.1.1 項と同様に長期間データが存在することから使用した。

(2) AE index

World Data Centers for Geomagnetism の Auroral Electrojet index (AE index) を、1957 ~ 1988 年は最終版、1990 ~ 1995 年は暫定版、1997 ~ 2001 年はクイックルック

版を用いて月平均値を算出して使用した。AE index とは、主にオーロラ頻出現域を流れる電流に起因する地磁気擾乱を表現する指数である (Davis and Sugiura 1966)。

aa index では、地磁気緯度が若干中緯度に存在することから、正確にオーロラ帯に流れる電流を評価しておらず、同項(3)に示す赤道環電流の影響を含むことになる。また、観測局が2箇所（北半球/南半球それぞれに1箇所）であることから、局所的なオーロラ帯の電流を表していることになり、オーロラ帯全体を流れる電流を評価していない可能性がある。そこで、オーロラ帯に流れる電流による影響と、赤道環電流による影響を切り分けて評価するために、オーロラ帯直下に位置する12箇所の観測所の平均で算出された本データを指標として使用する。

(3) Dst index

World Data Centers for Geomagnetism の Disturbance Storm Time index (Dst index) を、1957～2003 年は最終版、2004 年は暫定版を用いて月平均値を算出して使用した。

Dst index とは、地磁気の中低緯度域での地磁気の軸に平行な向きの擾乱場を表現する指数である。同項(2)に記述する理由により、赤道環電流による影響を評価するため、中低緯度域に位置する4箇所の観測所の平均で算出された本データを指標として使用する。

2.1.5 北極振動指数 (AO index)

北極振動の活動度の指標となる AO index は、EOF 第1モードの展開係数の時系列として定義されている。本研究においては、筑波大学田中博研究室で作成された大気の順圧成分で定義された北極振動指数を使用した。

2.1.6 プロトンフラックス

National Oceanic and Atmospheric Administration / Space Environment Center (NOAA/SEC) の 10MeV 以上の Proton Flux data を使用した。対象期間は、1976～2005 年にわたる 30 年間である。

通常の宇宙環境では静止軌道上で、10MeV 以上のプロトンフラックスは 1pfu 以下であるが、SPE 発生時には $10^3 \sim 10^4$ pfu (proton flux unit = 1 個/($\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}$)) 程度に増加する。発生頻度は、太陽活動1サイクル期間中にフラックスが 10pfu 程度のものが約 50 回、 10^4 pfu 程度のものが約 3 回である。(NOAA Space Weather Scale, http://www.sec.noaa.gov/NOAA_scales/)

SPE により飛来したプロトンと大気との化学的相互作用は、成層圏のオゾン濃度/温度変化と密接な関わりがあるとされていることから、本データを使用した。

2.2 解析方法

本研究の解析方法及び解析準備作業について以下に記述する。

2.2.1 太陽活動極大／極小期間の定義

指標として使用するデータは、太陽電波フラックス(F10.7)と地磁気活動度指数 (aa index, AE index, Dst index) である。太陽活動黒点周期については、すでに約 11 年で極大／極小を繰り返すことが知られている。ここでは、F10.7 と aa index のそれぞれについて、変動の動向を把握した上で、その極大／極小期間を定義する。

(1) 周期／変動の特徴

F10.7 と aa index の時系列を図 2-1 (a) (b) に示す。

F10.7 については正弦曲線状の周期的変動が見られるが、aa index については不規則な突出がみられ目視での周期性の判断は困難である。F10.7 と aa index の変動が太陽活動 11 年周期に依存しているかを確認するために、各 55 年間のデータに対してフーリエ解析を行った結果を図 2-2 に示す。

F10.7 については、波数 5 にパワースペクトルのピークがみられることから黒点周期と同様に約 11 年周期の変動成分が大きいことが分かる。aa index については、F10.7 ほど顕著ではないが、波数 5 にピークがあることが確認できる。どちらも同じ 11 年周期であるが、図 2-3 に示す散布図からもわかるように、その間に相関はみられない。

周期は同じであるが、巨大なフレアは太陽活動 (黒点数) 極大期よりも数年遅れて発生するといわれており、また図 2-4 より F10.7 と aa index の年平均データのピークも一致していないことがわかる。このことから、地磁気活動の変動も太陽活動 (黒点数) 極大期のピークより数年の遅延があると考えられるため、F10.7 と aa index について年平均データを 1 年ごとにシフトし lag 相関をとったところ、図 2-5 より 2 年シフトした場合に相関が高いことが示された。

以上より、F10.7 及び aa index とともに約 11 年周期で変動するが、そのピークは aa index のほうが F10.7 よりも約 2 年遅れて出現することが分かった。

AE index と Dst index の時系列を図 2-6 に示す。AE index については、データの欠損期間が 1989 年と 1996 年にあるためグラフのブランクとなった。Dst index については、磁気圏の活動が大きい場合には負にふれるため、グラフでは - 1 をかけて時系列を示した。

aa index - AE index , aa index - Dst index 間には、図 2-7 の散布図からもわかるように相関が高く、上昇する月も 7 割程度同じである。

(2) 極大／極小期間の定義

各指標の極大／極小期間における大気の差異を確認するため、F10.7 , aa index , AE index , Dst index を極大期間と極小期間に分ける必要がある。より明確な極大期間と極小期間の差異を見出すために、+ 1 以上を極大期間 , - 1 以下を極小期間と

定義した。図 2-1 及び図 2-6 において、黒い太線が平均値，ピンクのラインが +1 ，水色のラインが -1 を示す。

定義によって位置付けられた各指数のサンプル数をデータ毎 (NCEP/NCAR 及び ERA-40) に、F10.7 については表 2-3，aa index については表 2-4 にそれぞれ示す。

2.2.2 AO index - F10.7，AO index - aa index の lag 相関

AO index - F10.7，AO index - aa index のそれぞれの時系列を図 2-8 に示す。

太陽活動の影響が数ヶ月の lag をもって高度場へ影響を与えている可能性があることから、AO index - F10.7，AO index - aa index の間で一ヶ月ごとにシフトした lag 相関を求めた。結果を図 2-9 に示す。

両指数ともに 1～11 ヶ月シフトして lag をとったどの場合についても相関係数は低いため、全期間を通しては AO index との間に際立った相関はないといえる。このことから、太陽活動の影響が 1 年を通じて特定の期間を持って AO へと現われているとは考え難い。

2.2.3 順圧高度場 / 温度場 / 風速場の極大 - 極小の算出

順圧モデル (Tanaka, 2003) を使用して、NCEP/NCAR 再解析データ (月平均) を用いて、月毎に北半球の順圧高度場の算出を行い、各月の値から気候値を引いたアノマリを月毎に算出し、極大期間 / 極小期間毎に各月のアノマリのコンポジットを作成した。次に、極大期間と極小期間の差異を確認するために、極大期間から極小期間の差を算出した月毎のコンポジットを作成した。同様に季節毎 (DJF : 12-1-2，MAM : 3-4-5，JJA : 6-7-8，SON : 9-10-11) に極大期間から極小期間の差を算出したコンポジットを作成した。

温度 / 風速場についても同様の手順で、ERA-40 (月平均) を用いて、月毎に温度 / 風速データを帯状平均し、各月の値から気候値を引いたアノマリを月毎に算出し、極大期間 / 極小期間毎に各月のアノマリのコンポジットを作成した。次に、極大期間と極小期間の差異を確認するために、極大期間から極小期間の差を算出した月毎のコンポジットを作成した。同様に季節毎 (DJF，MAM，JJA，SON) にコンポジットを作成した。

2.2.4 Student 検定

極大期間 / 極小期間の差異が有意かどうか調査するために、信頼度 95% で両側検定を行った。(詳細は、[ブラント \(1976\)](#) 参照)

各ケースにおけるサンプル数を表 2-5 に示す。

3. 結果

3.1 順圧高度場 (F10.7 / aa index)

F10.7 と aa index を指標とし、NCEP / NCAR 再解析データを用いて、極大期間 / 極小期間から気候値を引いたアノマリ高度場をそれぞれ描いた。また、極大期間と極小期間の間にどのような違いがあるかを確認するために、極大期間から極小期間の差をとった高度場の季節毎の結果を以下に示す。

< F10.7 >

- ・ F10.7 極大期間の高度場アノマリ(季節毎) 図 3-1
- ・ F10.7 極小期間の高度場アノマリ(季節毎) 図 3-2
- ・ F10.7 極大 - 極小期間の高度場(季節毎) 図 3-3
- ・ F10.7 極大 - 極小期間の冬季高度場(有意検定) 図 3-4(a)

< aa_index >

- ・ aa_index 極大期間の高度場アノマリ(季節毎) 図 3-5
- ・ aa_index 極小期間の高度場アノマリ(季節毎) 図 3-6
- ・ aa_index 極大 - 極小期間の高度場(季節毎) 図 3-7
- ・ aa_index 極大 - 極小期間の冬季高度場(有意検定) . . . 図 3-4(b)

図 3-3 , 図 3-7 より、F10.7 及び aa index とともに、冬季に限定した場合、極域に負、中緯度地方に正のアノマリがみられ、北極振動の構造をとっていることが分かった。ここで、aa index は DJF3 ヶ月のデータを冬季のデータとして使用しても北極振動の形状が現れたが、F10.7 を指標とした場合、2 月のデータを含めてコンポジットをとると北極振動の形状がくずれてしまうため、12 月 , 1 月の 2 ヶ月分を冬季のコンポジットとした。この冬季の高度場について、極大期間と極小期間の間のデータが意味のある差を持っているかどうかを判断するために、95% の信頼度で有意検定を実施した結果を図 3-4(a)(b) に示す。F10.7 を指標とした場合、極域と赤道付近にわずかに有意な領域が出現しているのに対し、aa index を指標とした場合、極域や赤道付近に広い範囲で有意な領域を確認した。

3.2 順圧高度場 (AE index / Dst index)

3.1 節では地磁気活動指数として、先行研究でも使用していた aa index を使用して解析を行った。しかし、2.1.4 項に記述した理由により、地磁気活動指数を AE index / Dst index に分けて確認する必要がある。本節では AE index と Dst index を指標とし、NCEP / NCAR 再解析データを用いて、極大 - 極小期間の冬季高度場の有意検定を行った結果を図 3-8 に示す。

図 3-8 より、AE index と Dst index のどちらを指標としても北極域に負、中緯度地方に正のアノマリがみられる。AE index を指標とした場合、北極域に位置する負のアノマリ、中緯度地方に位置する正のアノマリの中心部と赤道域において有意な領域を確認したが、Dst index を指標とした場合有意な領域はほとんどみられなかった。

ここで AE index については、図 3-9 より極大期間 / 極小期間に該当する月のサンプル数には季節依存性があることがうかがえる。AE index は夏季に増加し冬季に減少する傾向があることが分かった。つまり、夏季の値につられてしまい +1 以上になる冬季データ数が少なくなってしまうこと。そこで AE index を冬季に限定して極大 / 極小期間を定義し、再度有意検定を行った結果を図 3-10 に示す。確認した結果、北極振動の構造も不明瞭であり、有意な領域はほとんどみられなかった。

3.3 帯状平均風速場 (ERA-40)

F10.7 と aa index を指標とし、ERA-40 で算出した帯状平均風速場の結果を示す。

< F10.7 >

- ・ F10.7 極大期間の風速場アノマリ(季節毎) 図 3-11
- ・ F10.7 極小期間の風速場アノマリ(季節毎) 図 3-12
- ・ F10.7 極大 - 極小期間の風速場(季節毎) 図 3-13

< aa index >

- ・ aa index 極大期間の風速場アノマリ(季節毎) 図 3-14
- ・ aa index 極小期間の風速場アノマリ(季節毎) 図 3-15
- ・ aa index 極大 - 極小期間の風速場(季節毎) 図 3-16

3.1 節の高度場で冬季に北極振動の形状が現れたことから、極大 - 極小期間の冬季風速場に焦点をあてて記述する(図 3-13 , 図 3-16 の冬季)。

F10.7 を指標とした場合、赤道域成層圏上部と北緯 60 度付近中部成層圏に正のアノマリ、赤道域成層圏中部で負のアノマリがみられる。しかし、明瞭なアノマリは確認できない。これに対し、aa index を指標とした場合、赤道域成層圏下部 ~ 中部と北緯 60 度付近の成層圏に強い正のアノマリ、赤道域成層圏上部と北緯 30 度付近の成層圏に強い負のアノマリが確認できることから、帯状風は、赤道域上空と極域成層圏においては、極大期間の方が極小期間よりも際立って強いことが分かった。

3.4 帯状平均温度場 (ERA-40)

F10.7 と aa index を指標とし、ERA-40 で算出した帯状平均温度場の結果を示す。

<F10.7>

- ・ F10.7 極大期間の温度場アノマリ(季節毎) 図 3-17
- ・ F10.7 極小期間の温度場アノマリ(季節毎) 図 3-18
- ・ F10.7 極大 - 極小期間の温度場(季節毎) 図 3-19

<aa index>

- ・ aa index 極大期間の温度場アノマリ(季節毎) 図 3-20
- ・ aa index 極小期間の温度場アノマリ(季節毎) 図 3-21
- ・ aa index 極大 - 極小期間の温度場(季節毎) 図 3-22

3.1 節の高度場で冬季に北極振動の形状が現れたことから、極大 - 極小期間の冬季温度場に焦点をあてて記述する(図 3-19, 図 3-22 の冬季)。

F10.7 を指標とした場合、赤道域成層圏下部において正のアノマリ, 赤道から北緯 60 度付近まで成層圏上部において負のアノマリがみられる。これに対し、aa index を指標とした場合、赤道域成層圏下部と赤道域から北緯 60 度付近までの成層圏上部において正のアノマリ, 成層圏中部のほぼ全域と北極域で負のアノマリが確認できる。

F10.7 及び aa index とともに、成層圏下部では極大期の方が極小期よりも温度が高いことが分かった。さらに、aa index を指標とした場合には、1 hPa 付近でより顕著な温度上昇がみられた。

3.5 帯状平均温度場 (UKMO data)

2.1.1 項に示す理由により、UKMO 成層圏同化データを使用して帯状平均温度場の確認を行った。図 3-23 に ERA-40 と UKMO のデータについて F10.7 と aa index を指標として極大 - 極小期間を算出した冬季温度場を示す。

F10.7 を指標とした場合、ERA-40 / UKMO のどちらにおいても、赤道域成層圏下部で極大期に温度が高く、赤道域成層圏上部で極大期の温度が低い。また、UKMO の 1hPa よりも上層で、極大期の温度が高いことが分かった。

aa index を指標とした場合、ERA-40 / UKMO のどちらにおいても、赤道域～中緯度成層圏下部及び全域の 1hPa 付近で極大期に温度が高く、北極域成層圏及び 10hPa 付近で極大期の方が温度が低い。また、UKMO の 1hPa よりも上層で、極大期の温度が低いことが分かった。

ただし、UKMO データを使用すると、サンプル数が減少するため統計的評価が行えないことに注意する。

3.6 F10.7 と aa index の変動のタイミング

2.2.1 項に示したように、F10.7 と aa index の周期はともに 11 年であった。しかし、図 2-1 より、F10.7 と aa index の上昇のタイミングは異なり（ともに +1 以上になる月は全体の 3 割程度）、図 2-3 で散布図を確認すると相関は低い（相関値：0.08）。また、図 2-4 及び図 2-5 から、aa index のピークは F10.7 よりも 2 年遅れている。

2.2.1 項のフーリエ解析の結果より、F10.7 を高周波成分 / 低周波成分に分けた結果を図 3-24 に示す。この高周波成分と aa index / プロトンフラックスの上昇タイミングが同じ可能性があるため、図 3-25 (a) (b) による散布図で確認したところ、どちらも相関はみられなかった。

3.7 プロトンフラックスと aa index の変動のタイミング

図 3-26 (a) に aa index とプロトンフラックスの時系列を、図 3-26 (b) に aa index - プロトンフラックス散布図を示す。図 3-27 に (a) aa index の時系列 (プロトンフラックス上昇)、(b) aa index の時系列 (プロトンフラックス上昇なし)、(c) プロトンフラックスの増減と aa index の増減によるケース分けを示す。

- ・ Case1：プロトンフラックスが上昇し aa index が激しく変動
- ・ Case2：プロトンフラックス上昇なしで aa index もあまり変動しない
- ・ Case3：プロトンフラックスが上昇し aa index があまり変動しない
- ・ Case4：プロトンフラックス上昇なしで aa index が激しく変動

図 3-26 より、aa index とプロトンフラックスの上昇のタイミングや度合いは異なり、相関は低い。

aa index の激しい変動を +1 以上と仮定すると、図 3-27 (a) のピンクのライン以上が Case1，ピンクのライン以下が Case3 に該当，図 3-27 (b) のピンクのライン以上が Case4，ピンクのライン以下が Case2 に該当する。図中 で示したのは、冬季のデータである。

図 3-27 より、プロトンフラックスが上昇したときに必ず +1 以上に変動するわけではなく、-1 以下の場合もある (Case3)。また逆に、プロトンフラックスが上昇していない時に aa index が上昇している場合もある (Case4)。そのうち冬季のデータでプロトンフラックスが上昇していない時に aa index が +1 以上に上昇しているのは、1982/02，1990/02，2004/01 の 3 ケースであった。

4. 考察

4.1 気象場（順圧高度場 / 帯状平均風速場 / 帯状平均温度場）

4.1.1 順圧高度場

3.1 節に示すように、F10.7 と aa index を指標として極大期間と極小期間の差異を確認したところ、冬季において aa index を用いた場合のほうが高度場の北極振動の形状が明瞭であり、広い範囲で有意な領域を確認した。特に興味深いのは、有意な領域が極域だけではなく赤道付近にもみられることである。

3.2 節に示すように、AE / Dst index を用いて行った結果、どちらの指数を用いた場合にも北極振動の形状が現れた。これについては、aa index と AE index , aa index と Dst index について、極大期間の 7 割程度が同じ月を選出してしまうことによるものと考えられる。また、AO の構造は現れるが有意差は Dst index ではほぼないこと , AE index でも aa index と同様 AO の構造が現れかつ赤道付近でも有意性がみられることから、赤道付近に有意な領域があるのは赤道環電流が何らかの形で赤道付近に影響を及ぼしているのではないかと想定したが、その影響ではないといえる。

また、極大 / 極小期間定義時にデータを冬季に限定するということは、冬季以外も含めて定義するよりも平均値に近い値を極大 / 極小期間と定義してしまうことになる。このことから、サンプル数を増やすことよりも、指標とする地磁気活動が +1 以上 / -1 以下と顕著な差異があることのほうが重要である。

動向としては AE index も aa index と同様の結果を得ることができるので、aa index を使用した評価で問題ない。

4.1.2 帯状平均風速場

3.3 節に示すように、F10.7 と aa index を指標として極大期間と極小期間の差異を確認したところ、冬季においてどちらの指数についても、その強さは異なるものの北緯 60 度付近成層圏に西風アノマリが確認できる。これは、極大期において北極振動の特徴である極夜ジェットが強化されていることを示唆している。さらに、aa index を指標とした場合のほうがより強くその特徴が現れている。また、aa index を指標とした場合、赤道域成層圏で西風アノマリがみられるが、これは QBO の特徴をみているといえる。

4.1.3 帯状平均温度場

3.4 / 3.5 節より、F10.7 を指標とした場合、ERA-40 / UKMO のどちらにおいても、赤道域成層圏下部で極大期に温度が高い。これは、[Kodera and Kuroda \(2002\)](#) に示すように、紫外線極大期においては熱帯上部成層圏から極域への BD 循環が弱まり、アノマリとしては極域から赤道へ風が循環するため、本領域で大気が断熱圧縮され温

度が上昇した結果と考えられる。UKMO の 1hPa よりも上層で、極大期の温度が高いのは、紫外線によるオゾン層の直接加熱と考えられる。また、10hPa 付近で極大期の温度が低いのは、1hPa より上空でオゾンが吸収されることにより、その下側では通常よりも紫外線の到達が少なくなったためと考える。

aa index を指標とした場合、ERA-40 / UKMO のどちらにおいても、赤道域～中緯度成層圏下部で極大期に温度が高いのは、F10.7 に示す理由と同じであると考えられる。北極域成層圏で温度が低いのは、極夜ジェットが強化されている時は冷たい空気が中緯度へ流れ出しにくいという北極振動の特性のためである。また、UKMO の 1hPa よりも上層で極大期の温度が低く、そのすぐ下層で高いことが分かった。これは、4.2 節で議論するが、0.5hPa 付近のオゾン濃度が低下し、紫外線を吸収しにくくなり温度低下が生じるのと同時に、0.5hPa 付近で吸収されなかった紫外線が透過して 1hPa 付近のオゾンに吸収されて温度を高くしている可能性もある。

F10.7 を指標とした場合、1 章に示したように [Kodera and Kuroda \(2002\)](#) により成層圏の温度勾配がトリガとなり、北極振動を強化することが既に分かっている。aa index を使用した場合には、極大期間と極小期間で高層領域に F10.7 ではみられない温度アノマリがみられたことから、地磁気活動が活発になるタイミングで起こるこの領域の温度変化が重要となる。

4.2 1hPa 付近の温度変化要因

4.1 節で、1hPa 付近の温度変化が重要であることが分かった。そこで、地磁気活動の変動要因となり、かつ、大気の温度変化をもたらす物質を考えたところ、紫外線（紫外線自体は地磁気を変化させないが）とプロトンによる影響が考えられるため、それぞれについて考察を行った。

4.2.1 紫外線説

太陽フレアと呼ばれる太陽での爆発現象に伴い荷電粒子だけではなく X 線や紫外線も地球へ飛来してくる。このことから、地磁気を変化させているのは荷電粒子であるが、太陽フレア時に同じタイミングで大量に地球に到達する紫外線が地磁気を指標とした場合についても北極振動へ影響している可能性がある。

しかし、3.6 節において F10.7 の高周波成分と aa index / プロトンフラックスの相関を確認したところその上昇のタイミングは一致せず、図 3-25 より相関も低いことが分かった。つまり、紫外線の影響である可能性は低いと考えられる。

4.2.2 プロトン説

(1) プロトンによるオゾン濃度低下のプロセス

1.1.4 項に示したように SPE 時に極域成層圏～中間圏で HO_x や NO_y が生成されると、それらが触媒となり極域成層圏のオゾン濃度を低下させる。そのプロセスにつ

いて、実際には入射するプロトンエネルギーや高層に存在する分子の種類によって様々な化学反応が平衡して行われるが、ここではHO_x (SPE 後数時間) よりも存続期間の長いNO_y (SPE 後数ヶ月) を例とし簡単に図 4-1 に示す。

大気に到達したプロトン (H⁺) は、窒素分子 N₂ を電離し N₂⁺ を作り、それが電子と結合するときに解離して N 原子となる。N 原子は O₂ と反応して NO を生成する。生成された NO、NO₂ が触媒となりオゾンが酸素分子になるためオゾンが破壊される。

(2) プロトンと地磁気の関係

3.7 節によると、図 3-26 からプロトン上昇時に必ずしも地磁気活動が上昇しているわけではないことが分かる。これは、地球磁気圏へ到来するプラズマ雲の磁場の向きに依存する。プラズマ雲の磁場が地球磁場と同じ北向き成分をもっている時は加算され磁気圏磁場はその分強まるだけであるが、地球磁場と反対の南向き成分をもっている時には減算され、地球磁力線とプラズマ雲の磁力線とのつながりかえ (リコネクション) が起り、プラズマ雲磁場の磁力線と連結し地球磁力線が開いた形になるためである。また、到来する磁場が北向きの時は、南向きの時よりもオーロラオーバルが縮小するため、プロトンはより高々緯度に降下する。

Case1 の場合、到来する磁場が南向きであったため地球磁場が活発に変動した。この時、極域成層圏のオゾン濃度は低下していると推測する。

Case2 については、プロトンフラックスが上昇していないため飛来する荷電粒子も少なく地球磁場は変動しなかった。この時、極域成層圏のオゾン濃度は通常通りであると推測する。

Case3 の場合、プロトンフラックスが上昇しても aa index があまり変動しないのは、到来する磁場が北向きであったため aa index は変動し難かったと考えられる。この時、高々緯度の極域成層圏のオゾン濃度を低下させると推測する。

Case4 については、プロトンフラックスが上昇していないのに aa index が変動するのは、これは太陽から直接降り込むプロトン等の降下粒子の影響ではなく、一度磁気圏尾部に蓄積された電子が再度極域に向かって降り注いだ電子等による影響と考えられる。この時、極域成層圏のオゾン濃度は通常通りであると推測する。

つまり、特に「地磁気活動度の上昇」と「プロトンフラックスの上昇」がともに確認できた場合に、極域成層圏のオゾン濃度が低下すると考えられる。

4.3 プロトンが北極振動を強化するプロセス

プロトンが北極振動を強化するプロセスとして、以下の2つが考えられる。

< 仮説 1 >

磁力線に沿ってプロトンが極域に流入し、成層圏～中間圏の窒素酸化物が増加し、それらが触媒となり成層圏のオゾンが減少する。

中間圏で増加した窒素酸化物が子午面循環により極域下降時に輸送され、成層圏下部までのオゾン濃度を低下させる。もしくは、100MeV 以上のプロトンは成層圏下部まで到達するという報告があることから、直接成層圏下部まで降下し、極域のオゾン濃度を低下させる。オゾン濃度の低下により、吸収する紫外線量も減少するため、極域成層圏の温度が低下する。

< 仮説 2 >

仮説 1 と同様

極域成層圏のオゾン濃度の低下により、吸収する紫外線量も減少するため、極域成層圏上部の温度が低下する。特に、赤道～冬半球極域にむかって成層圏上部の温度勾配が増加する。

温度風の関係より、成層圏の温度勾配が急な部分でジェットが強化される。下方から伝播してきたプラネタリー波を変化させ、ジェットのコアを北極域へと移動させ、北極振動を強化する。(Kodera and Kuroda (2002))

しかし、Reid et al. (1991) では、1989 年 10 月の SPE 時に南緯 75 ° 高度 40 ~ 50km でオゾンが減少し温度が約 3 度低下すると報告しているが、そのオゾン濃度低下領域と、図 3-23 (b) の UKMO データの温度場にみられる成層圏低温域 (1hPa 全域) の位置は異なる。これについて、UKMO データの上層の信頼度によるものなのか、UKMO データは短期間しか存在しなかったため平均場でみることができなかったことによるものなのか、まったく別のプロセスが存在するかを判断することは困難である。

5. 結論

太陽活動が北極振動に与える影響について、F10.7 と aa index を用いて極大期間 / 極小期間を定義し、気象場に対してその差異を確認し統計的解析を行った結果得られたことを示す。

なお、下記に記述するのは冬季限定の解析結果である。

・地磁気活動は北極振動に影響を及ぼしているか

等圧面高度場については、F10.7 と同様に北極振動の構造をとることが分かった。また、風速場 / 温度場についても、北極振動の特徴が現れていることが分かった。よって、aa index も北極振動に影響を及ぼしているといえる。

・紫外線と地磁気活動変動要因が気象場に与える影響の相違点は

高度場の極大 - 極小期間の差に対して有意検定を行った結果、F10.7 よりも aa index を用いた方が有意な領域が広がった。特に、正 / 負アノマリの大きい部分だけではなく、小さい赤道域でも有意な領域がみられた。また、風速場 / 温度場については、どちらの場においても aa index を用いたほうが北極振動の特徴が明瞭であった。このことから、短期的な時間スケールでは、地磁気の変動要因のほうが紫外線よりも大気に影響を及ぼしている可能性が高いといえる。

特に、温度場において aa index を指標とした場合、1hPa 付近に F10.7 を指標とした場合とは異なる特徴的な温度変化がみられた。

・地磁気活動変動要因が北極振動を強化するプロセスとは

本解析は月平均データを対象としているので、温度場についても北極振動の発端 / 結果が同じ図に混在して現れてしまうが、1hPa 付近の温度変化が北極振動強化のトリガとなる可能性があると考えた。そこで、地磁気変動要因となり、かつ高層の大気温度を変化させる要因を調査し考察したところ、現時点ではプロトン説が有力となった。「極域へのプロトン流入 成層圏上部～中間圏の窒素酸化物増加」から、「仮説 1：極域成層圏下部への窒素酸化物輸送 成層圏のオゾン減少」もしくは「仮説 2：成層圏上部のオゾン減少 成層圏上部の赤道 - 極域間の温度勾配増加 [Kodera and Kuroda \(2002\)](#)」というプロセスで北極振動強化へつなぐと考えたためである。

地磁気活動指数が北極振動と相関が高くなる大まかなプロセスを理解することができた。しかし、オゾン濃度低下による温度低下域と UKMO の温度場の低温域とは完全には一致しないため、今後オゾンデータを用いて、プロトンフラックス上昇時にどの程度オゾン濃度 / 温度が低下し、北極振動へとつながる可能性があるのかを確認する必要がある (オゾン全量による評価を Appendix_B に示す)。

また、これらは事象毎に得られた結果を繋ぎ合わせただけであるため、これらの流れを証明するためには、今後より詳細な解析が必要である。

6. 謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教員である筑波大学の田中博教授には終始丁寧な御指導を賜り、気象学会等の発表の場やアラスカサマースクール参加の機会をいただきました。同大学の木村富士男教授、林陽生教授、上野健一助教授、植田宏昭講師及び国立環境研究所の菅田誠治氏には、ゼミや論文に対して多くのご意見をいただきました。また、同大学の渡来靖準研究員、秘書の本田恭子さんには公私ともどもお世話になりました。

名古屋大学環境学研究科の小寺邦彦先生には、太陽活動が成層圏に与える影響の話や研究に対して貴重なご意見をいただきました。

横浜国立大学大学院環境情報研究院の伊藤公紀先生には、地磁気活動と北極振動の相関が高いという修士課程2年間の研究テーマのきっかけとなる情報をいただきました。

気象庁地磁気観測所の小出孝氏には、太陽活動と地磁気に関するセミナーや地磁気観測所柿岡（柿岡）の見学の機会をいただきました。

情報通信研究機構の村山泰啓氏、石井守氏には、電離圏の現象に関してや本論文の結論として大変参考になる情報を教えていただきました。

アラスカ大地球物理研究所の赤祖父俊一所長には、研究の参考となる論文をいただき、また、村山氏／石井氏を紹介していただきました。

GMT作図での網掛けを教えてくれた環境科学研究科の筒井謙一君をはじめ、環境科学研究科の友人にはお世話になりました。

そして、大学院進学に理解を示してくれた家族に感謝します。

他皆様のご好意に心から感謝いたします。

引用文献

Baldwin, M.P. and T. J. Dunkerton, 2001 : Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes, *Science*, 294, 581-584.

Bucha, V. and V. Bucha, 1998 : Geomagnetic forcing of changes in climate and in the atmospheric circulation, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 60, 145–169.

Davis, T. N. and M. Sugiura, 1966 : Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations, *J. Geophys. Res.*, 71, 785.

伊藤公紀, 2003 : 地球温暖化, 日本評論社, p.129.

Jackman, C. H., and R. D. McPeters, 2004 : Solar Variability and its Effects on Climate, *Geophys. Mon. The effect of Solar Proton Events on ozone and other constituents*, 305-319.

Kodera, K., 2002 : Solar cycle modulation of the North Atlantic Oscillation: Implication in the spatial structure of the NAO *Geophysical Research Letters*, 29 (8).

Kodera, K., and Y. Kuroda, 2002 : Dynamical response to the solar cycle, *J. Geophys. Res.*, 107.

Kodera, K., K. Yamazaki, M. Chiba and K. Shibata, 1990 : Downward propagation of upper stratospheric mean zonal wind perturbations to the troposphere, *Geophys. Res. Lett.*, 17, 1263-1266.

Kodera, K., M. Chiba, H. Koide, A. Kitoh and Y. Nikaidou, 1996 : Interannual variability of winter stratosphere and troposphere in the northern hemisphere, *J. Meteor. Soc. Japan*, 74, 365-382.

Mayaud, P. N., 1972 : The aa indices: A 100-year series characterizing the magnetic activity, *J. Geophys. Res.*, 77, 6870–6874.

Palamara, D. and T. Bryant, 2004 : Geomagnetic activity forcing of the Northern Annular Mode via the stratosphere, *Annales Geophysicae*, Volume.22, European Geoscience Union, Germany, pp.725-731.

Reid G. C., S. Solomon and R. R. Garcia , 1991 : Response of the middle atmosphere to the solar proton events of August-December 1989 *Geophys. Res. Lett.*, 18, 1019-1022.

S.ブラント[著], 吉城肇ほか[訳], 1976 : データ解析の方法, みすず書房, 8章.

Tanaka, H.L., and M. Matsueda, 2005 : Arctic Oscillation analyzed as a singular eigenmode of the global atmosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, 83, 611-619.

Thejll, P., B. Christiansen and H. Gleisner, 2003 : On correlations between the north atlantic oscillation, geopotential heights, and geomagnetic activity, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 81-84.

Thompson, D. W. J. and J. M. Wallace, 1998 : The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1297-1300.

柳原一夫, 1991 : 太陽活動と地球温暖化 - 地磁気活動を指標として -, 科学技術庁調査研究資料.

表 2-1 使用データ

データ名称	データ提供機関 / URL
高度場	
NCEP/NCAR	National Centers for Environmental Prediction
	National Center for Atmospheric Research
	http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.derived.pressure.html
温度/風速場	
ERA-40	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
	http://data.ecmwf.int/data/d/era40_mnth/
UKMO	United Kingdom Meteorological Office
	http://badc.nerc.ac.uk/cgi-bin/data_browser/data_browser/badc/ukmo-assim/data
太陽電波フラックス	
F10.7	National Research Council
	http://www.drao-ofr.hia-ihp.nrc-cnrc.gc.ca/icarus/www/maver.txt
地磁気活動度指数	
aa index	National Geophysical Data Center
	ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/RELATED_INDICES/
AE index	World Data Centers for Geomagnetism
	http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir/index.html
Dst index	World Data Centers for Geomagnetism
	http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html
プロトンフラックス	
SPE	National Oceanic and Atmospheric Administration
	ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/Satellite_ENVIRONMENT/PARTICLES/

表 2-2 観測期間 / 気観測局と各局の補正係数

北半球			南半球		
観測期間	観測局	補正係数	観測期間	観測局	補正係数
1868-1925	Greenwich	1.007	1868-1919	Melbourne	0.967
1926-1956	Abinger	0.934	1920-1979	Toolangui	1.033
1957-	Hartland	1.059	1980-	Canberra	1.084

表 2-3 F10.7 サンプル数

NCEP/NCAR

f10.7_MAX

season	month	month_sample	season_sample
DJF	12	13	36
	1	12	
	2	11	
MAM	3	11	31
	4	11	
	5	9	
JJA	6	8	26
	7	9	
	8	9	
SON	9	11	33
	10	10	
	11	12	

ERA - 40

f10.7_MAX

season	month	month_sample	season_sample
DJF	12	12	33
	1	11	
	2	10	
MAM	3	10	28
	4	10	
	5	8	
JJA	6	7	22
	7	8	
	8	7	
SON	9	10	30
	10	9	
	11	11	

f10.7_MIN

season	month	month_sample	season_sample
DJF	12	10	30
	1	10	
	2	10	
MAM	3	14	35
	4	12	
	5	9	
JJA	6	12	34
	7	11	
	8	11	
SON	9	9	28
	10	10	
	11	9	

f10.7_MIN

season	month	month_sample	season_sample
DJF	12	8	25
	1	9	
	2	8	
MAM	3	11	28
	4	10	
	5	7	
JJA	6	10	28
	7	9	
	8	9	
SON	9	7	21
	10	7	
	11	7	

表 2-4 aa index サンプル数

NCEP/NCAR

aa_index_MAX			
season	month	month sample	season sample
DJF	12	3	16
	1	3	
	2	10	
MAM	3	14	36
	4	16	
	5	6	
JJA	6	2	13
	7	7	
	8	4	
SON	9	9	28
	10	10	
	11	9	

ERA - 40

aa_index_MAX			
season	month	month sample	season sample
DJF	12	3	13
	1	1	
	2	9	
MAM	3	11	27
	4	12	
	5	4	
JJA	6	1	10
	7	6	
	8	3	
SON	9	7	20
	10	7	
	11	6	

aa_index_MIN			
season	month	month sample	season sample
DJF	12	13	24
	1	6	
	2	5	
MAM	3	6	21
	4	5	
	5	10	
JJA	6	13	30
	7	11	
	8	6	
SON	9	2	10
	10	3	
	11	5	

aa_index_MIN			
season	month	month sample	season sample
DJF	12	10	20
	1	5	
	2	5	
MAM	3	6	20
	4	5	
	5	9	
JJA	6	10	23
	7	9	
	8	4	
SON	9	1	6
	10	1	
	11	4	

表 2-5 t 検定のサンプル数

F10.7	December	January	February	N	N-1
max	13	12	11	36	35
min	10	10	10	30	29
sum				66	64
Product				1080	

aa index	December	January	February	N	N-1
max	3	3	10	16	15
min	13	6	5	24	23
sum				40	38
Product				384	

AE index	December	January	February	N	N-1
max	4	0	13	17	16
min	6	9	4	19	18
sum				36	34
Product				323	

Dst index	December	January	February	N	N-1
max	3	3	8	14	13
min	7	8	5	20	19
sum				34	32
Product				280	

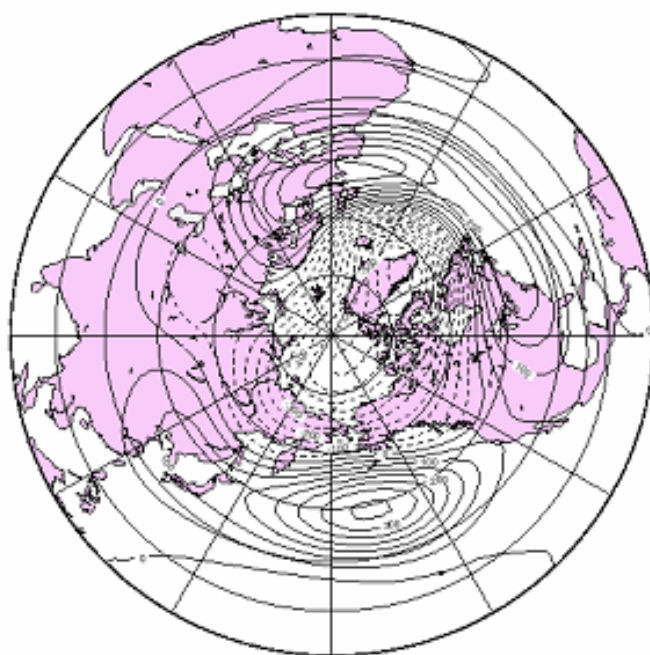
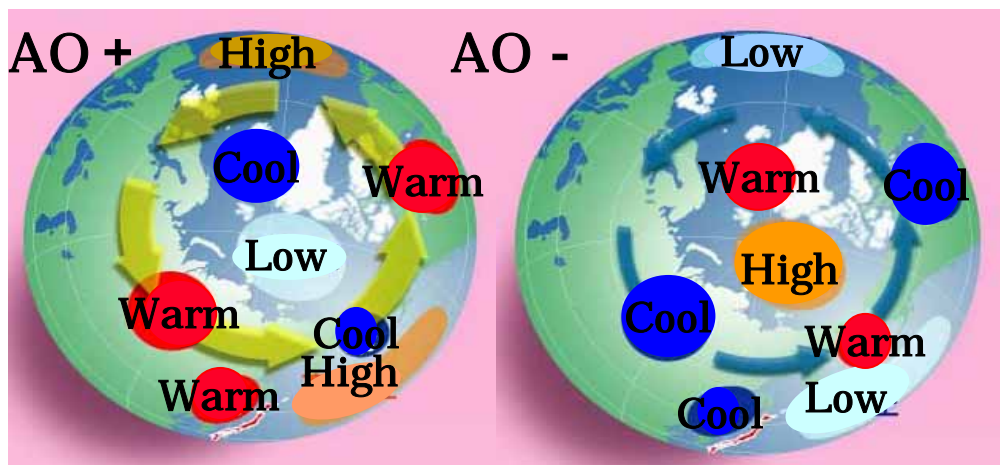


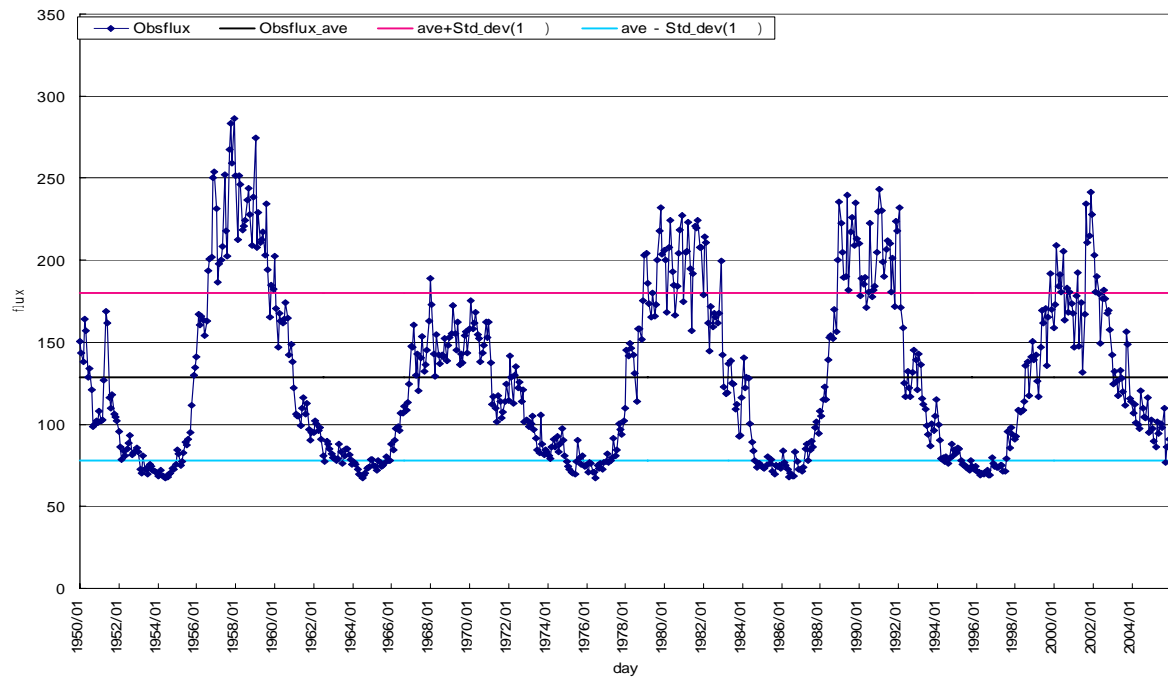
図 1-1 典型的な AO+ の構造：順圧高度場(EOF-1)
実線：正のアノマリ，破線：負のアノマリ



	Jet	Polar region		Mid-latitude region	
		Pressure	Temperature	Pressure	Temperature
AO +	Strong	Low	Cool	High	Warm
AO -	Weak	High	Warm	Low	Cool

図 1-2 北極振動の特徴

(a)



(b)

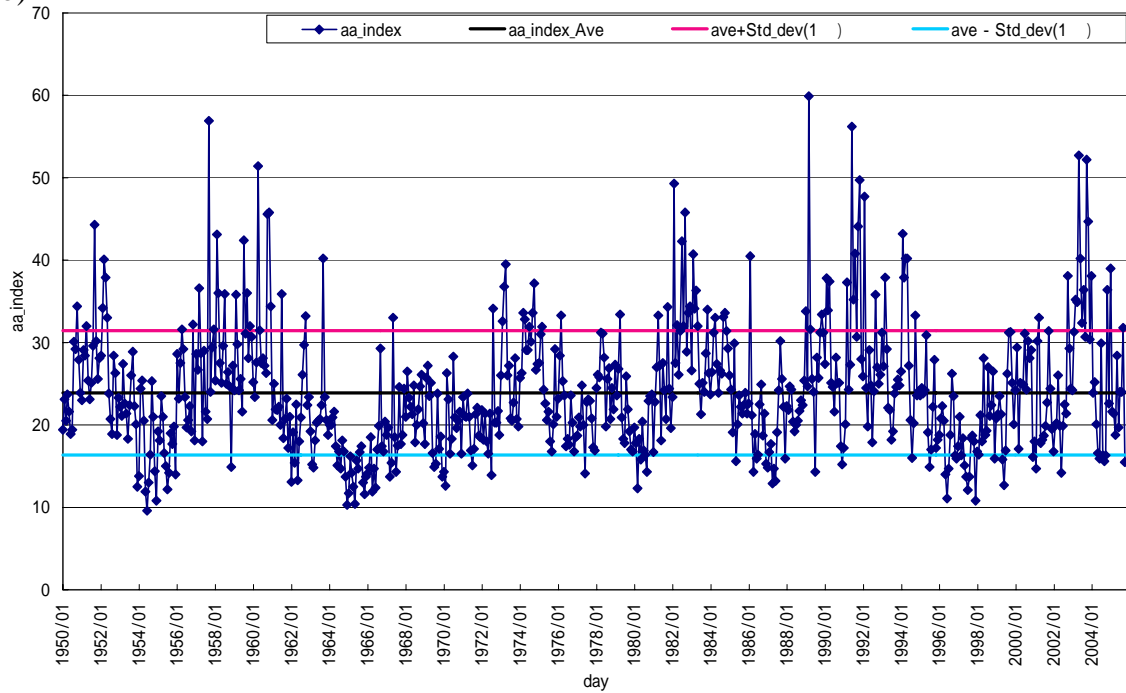
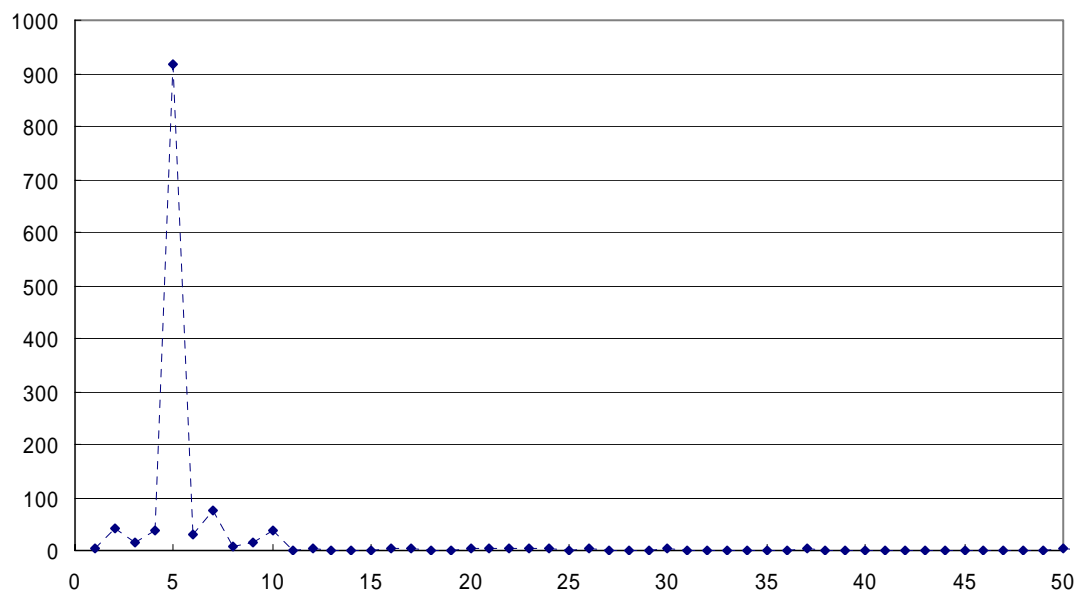


図 2-1 (a) F10.7 の時系列 , (b) aa index の時系列
黒太線 : 平均 , ピンク実線 : +1 , 水色実線 : -1

(a)



(b)

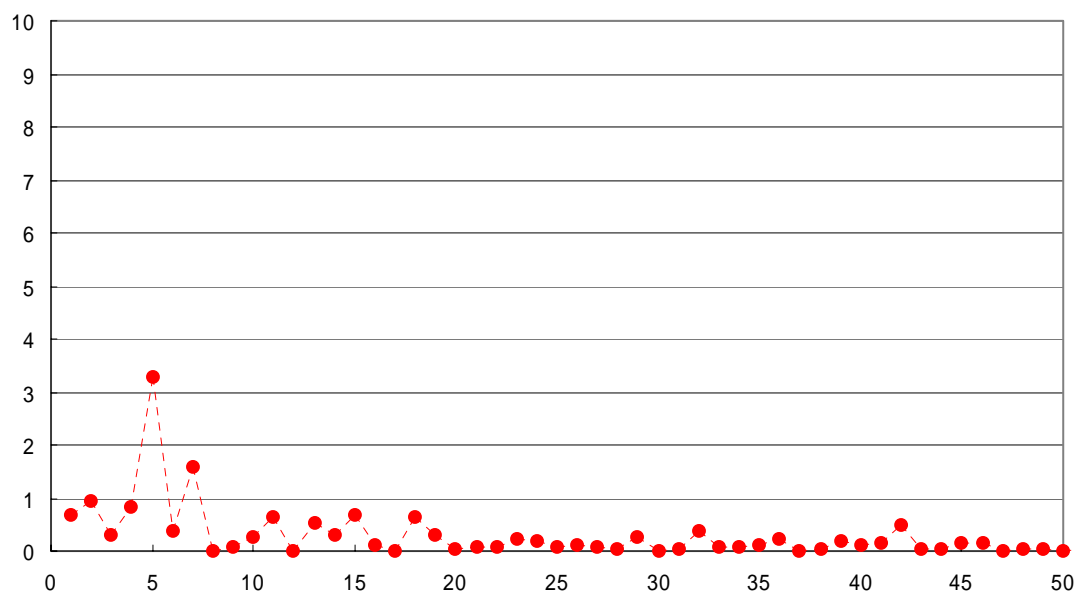


図 2-2 (a) F10.7 のパワースペクトル , (b) aa index のパワースペクトル

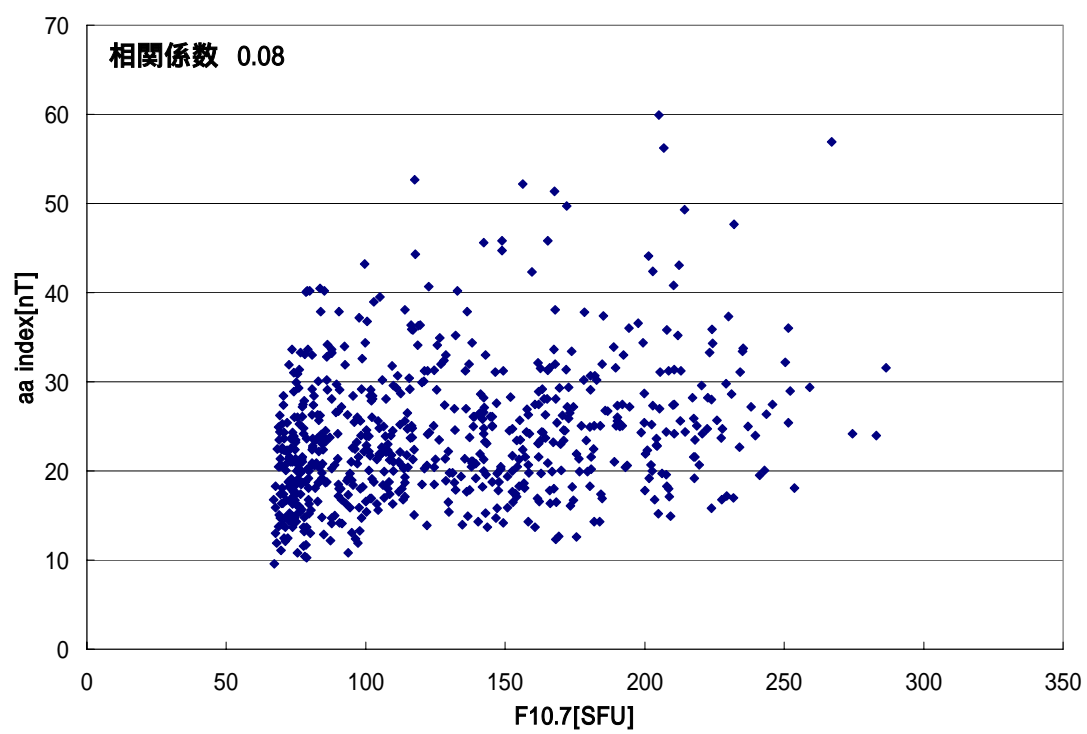


図2-3 F10.7 - aa index散布図

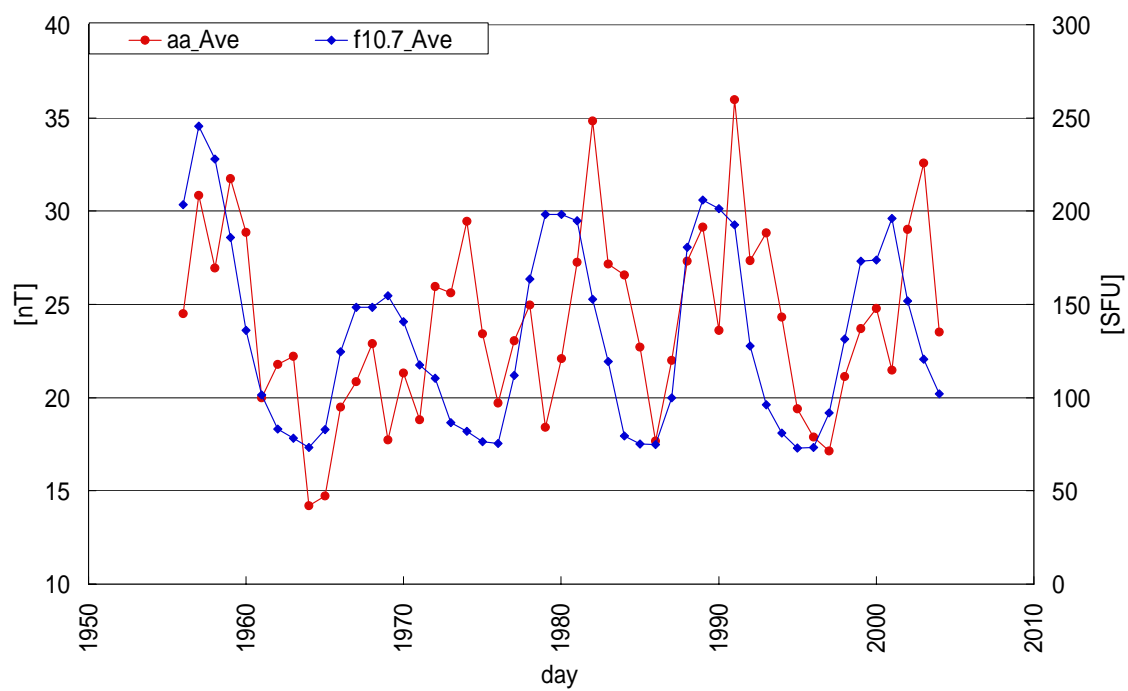


図 2-4 F10.7 / aa index の年平均データの推移

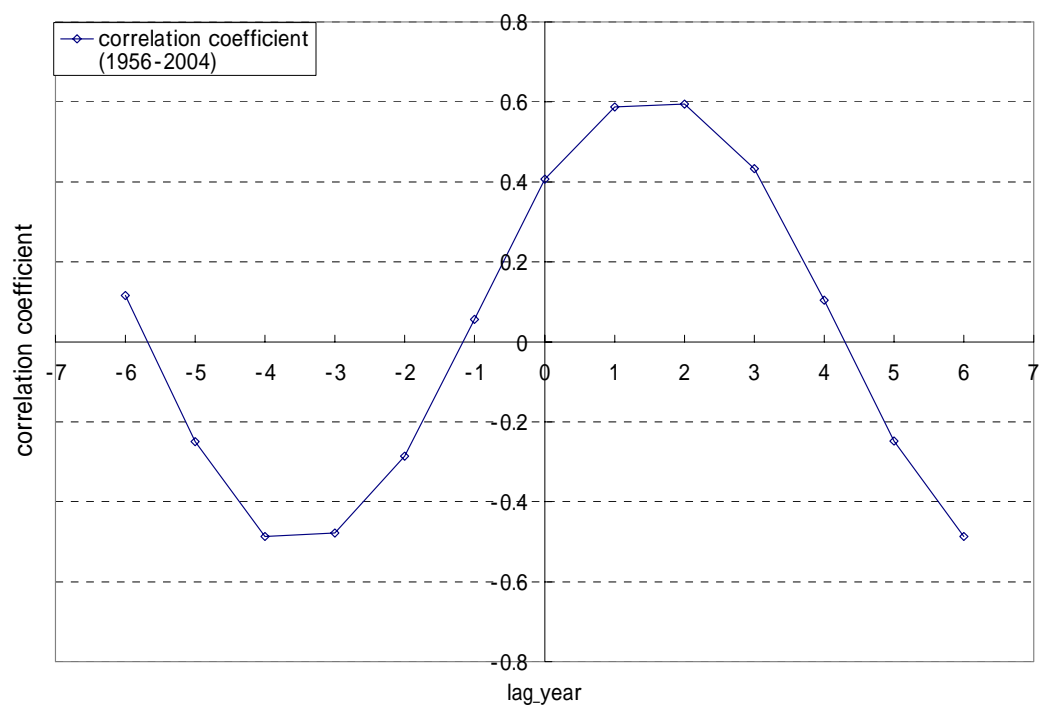
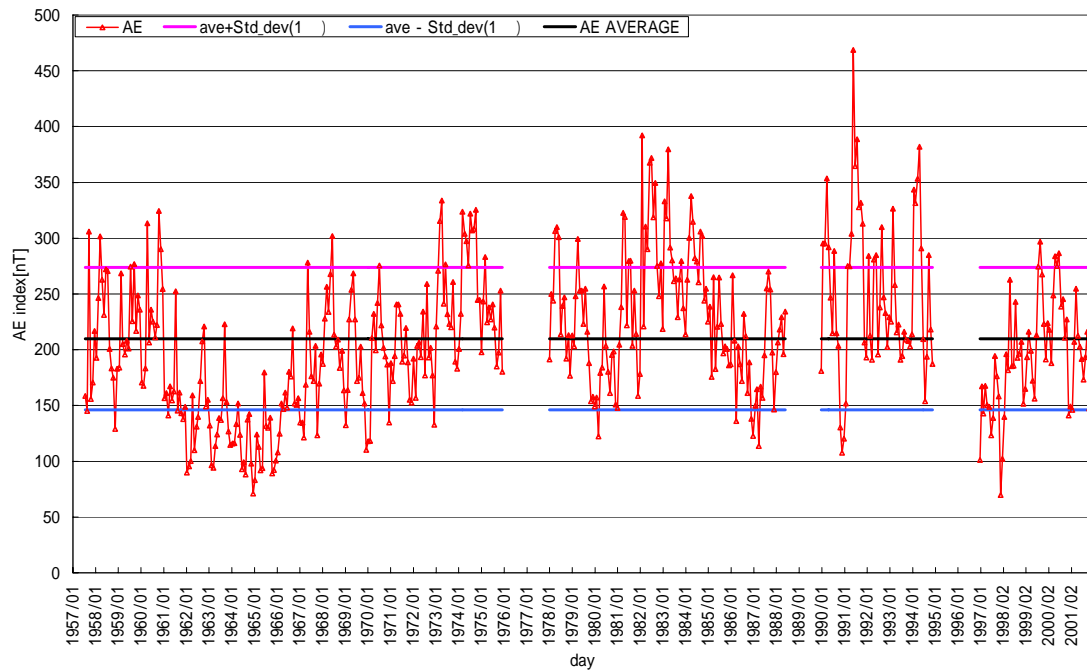


図 2-5 F10.7 - aa index の lag 相関

(a)



(b)

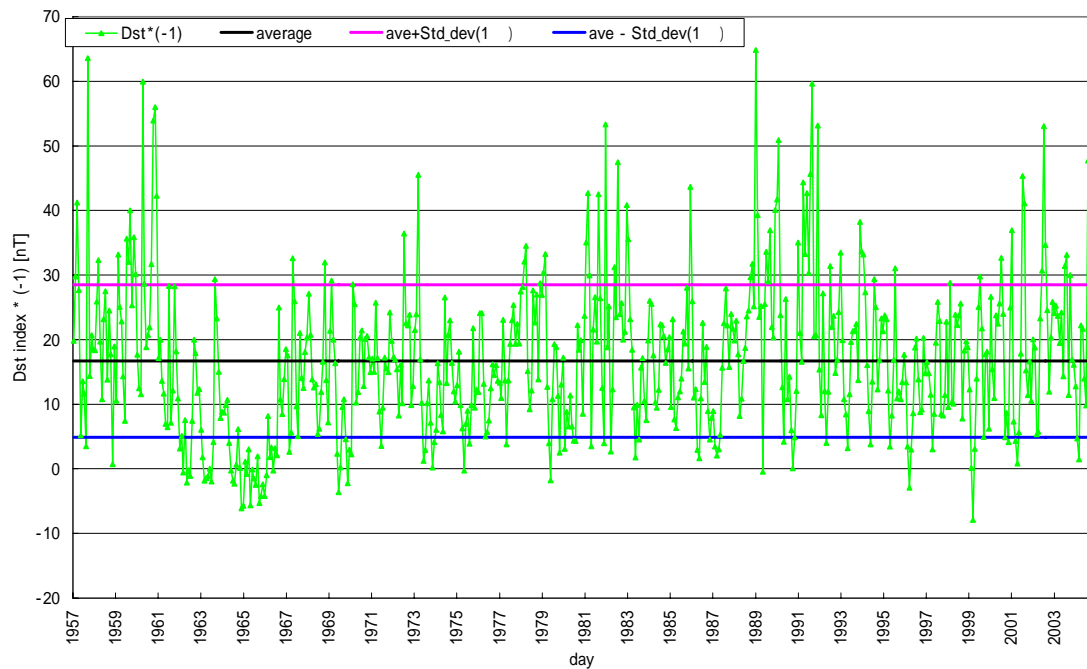
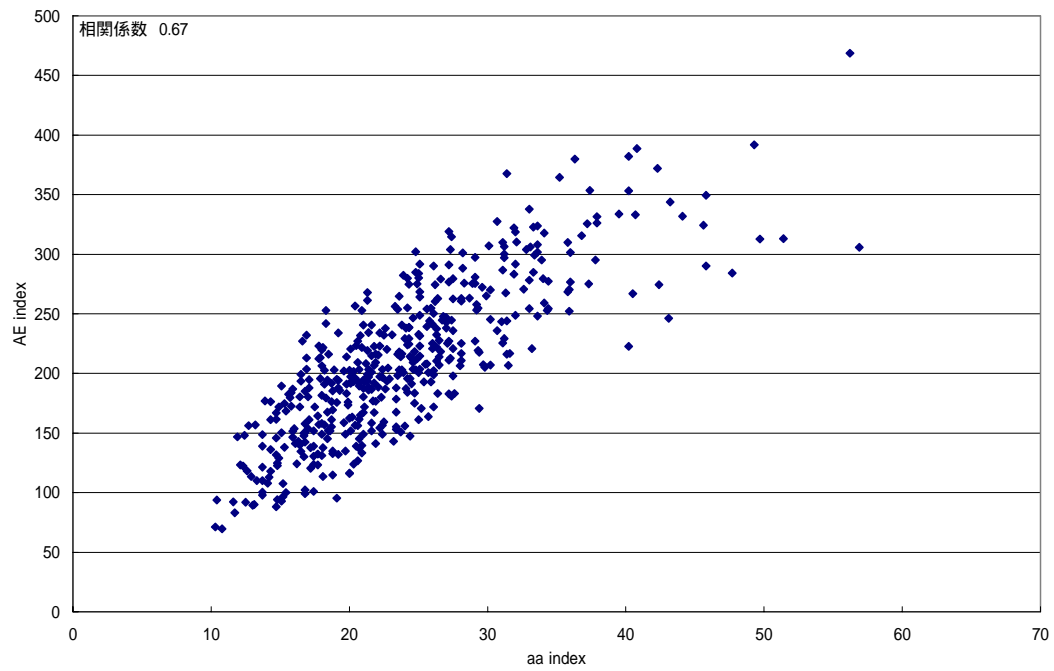


図 2-6 (a) AE index の時系列 , (b) Dst index の時系列
黒太線 : 平均 , ピンク実線 : +1 , 水色実線 : -1

(a)



(b)

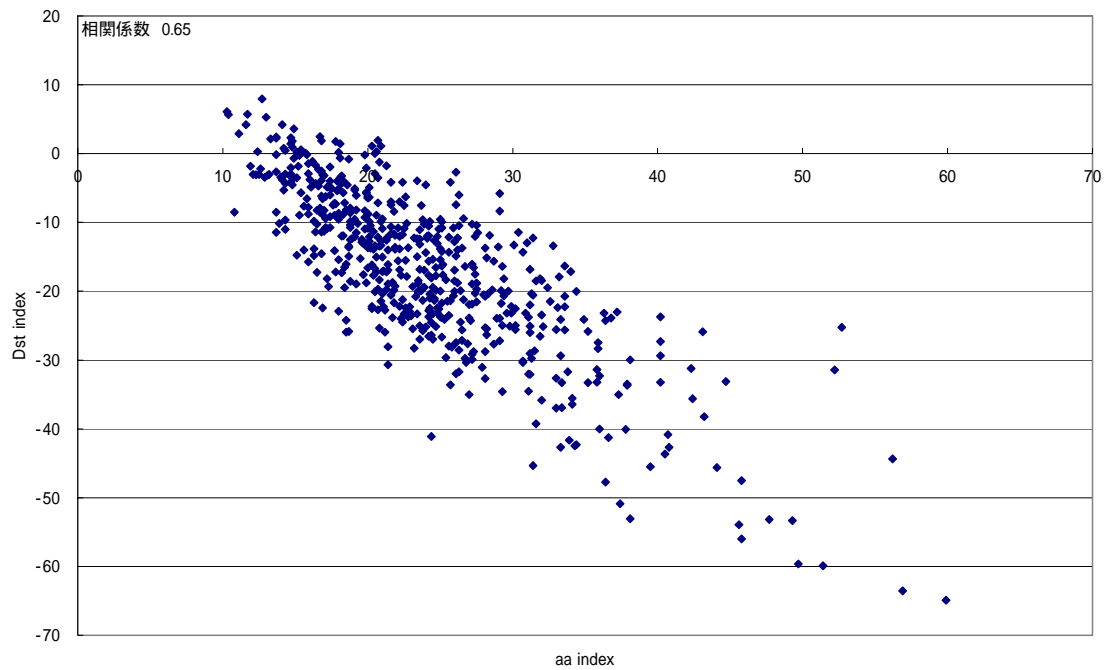


図 2-7 (a) aa index - AE index の散布図 , (b) aa index - Dst index の散布図

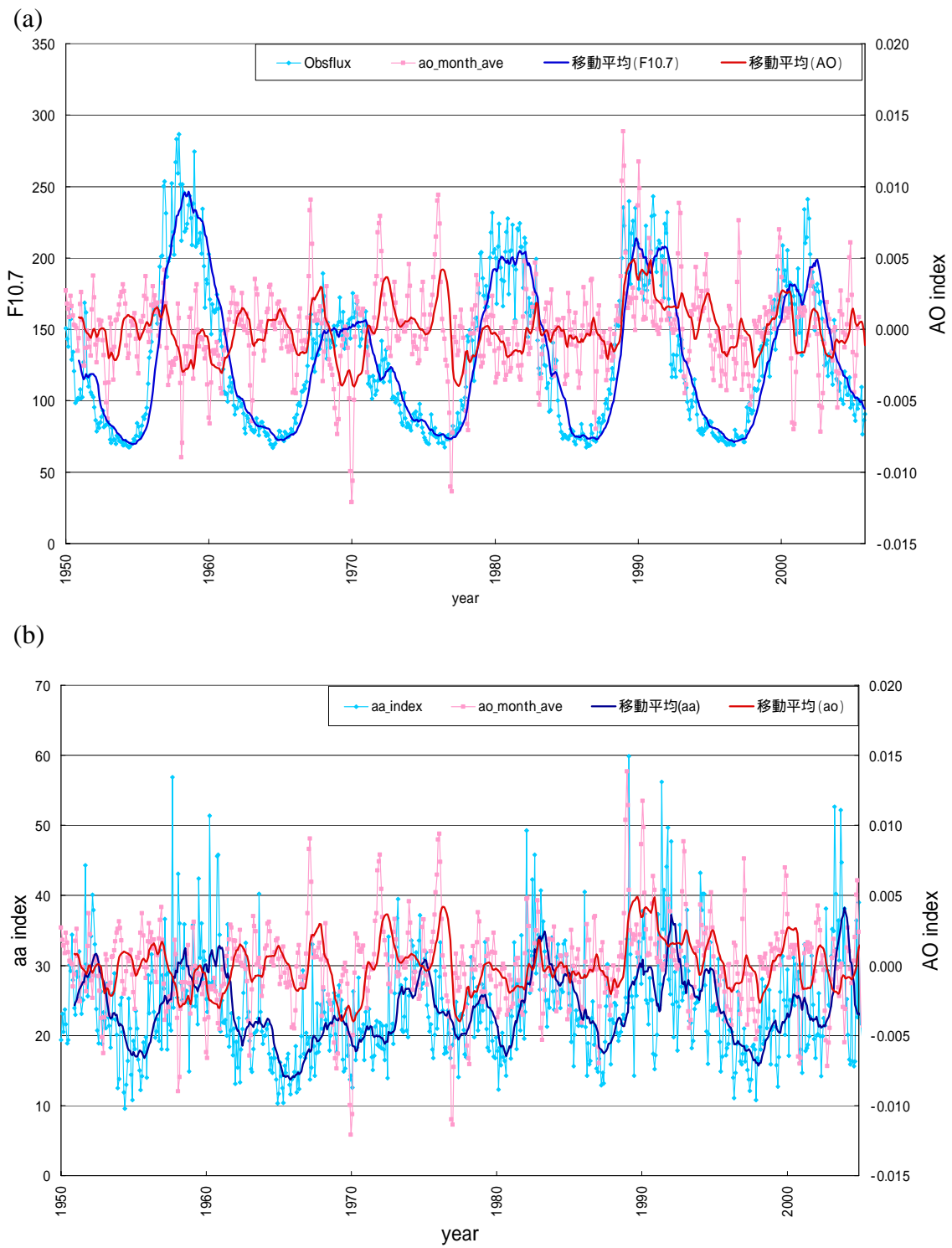


図 2-8 (a) F10.7 - AO index の時系列 , (b) aa index - AO index の時系列
各時系列の移動平均の区間は 12 ヶ月

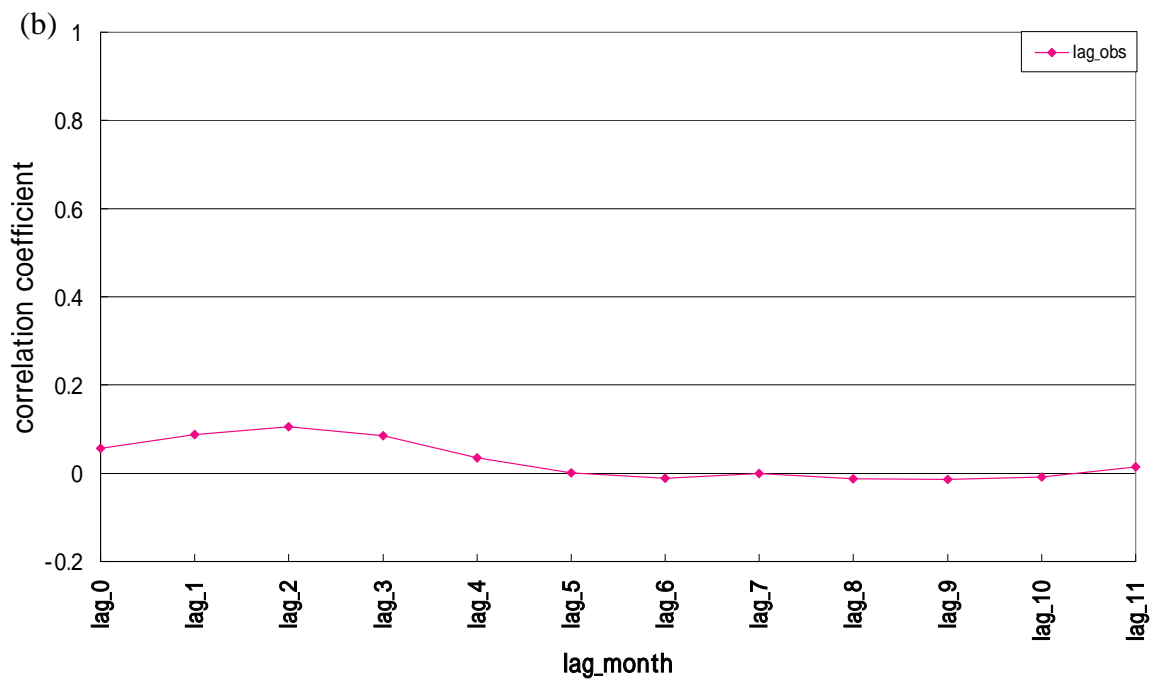
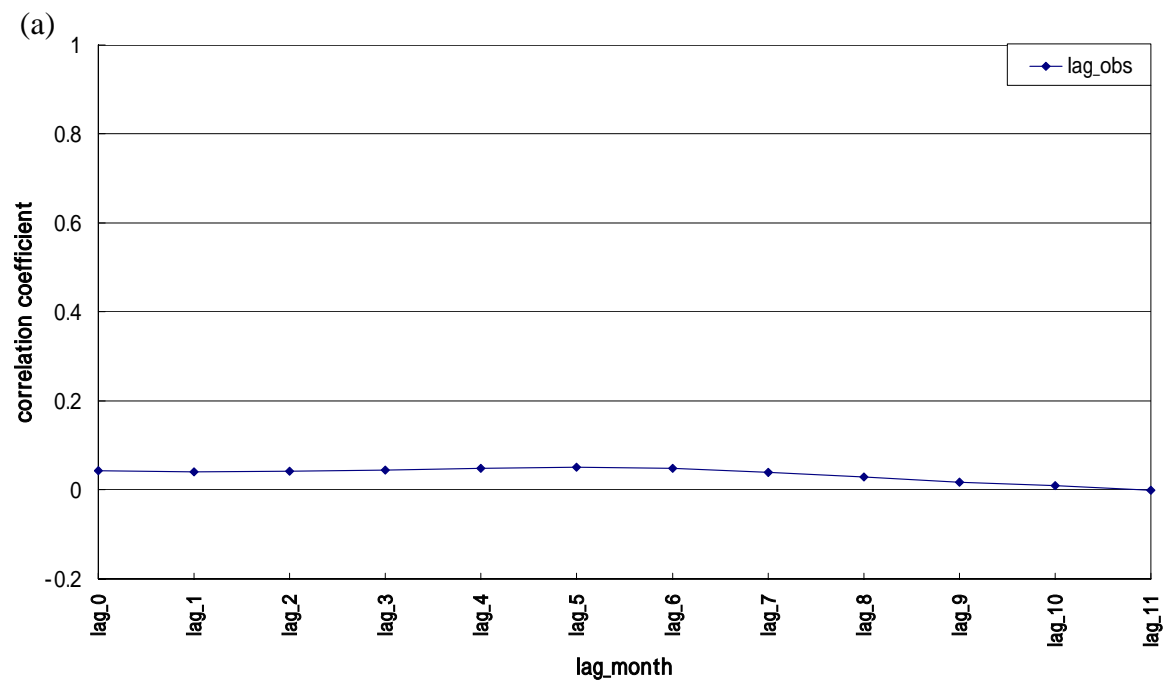


図 2-9 (a) F10.7 - AO index の lag 相関 , (b) aa index - AO index の lag 相関

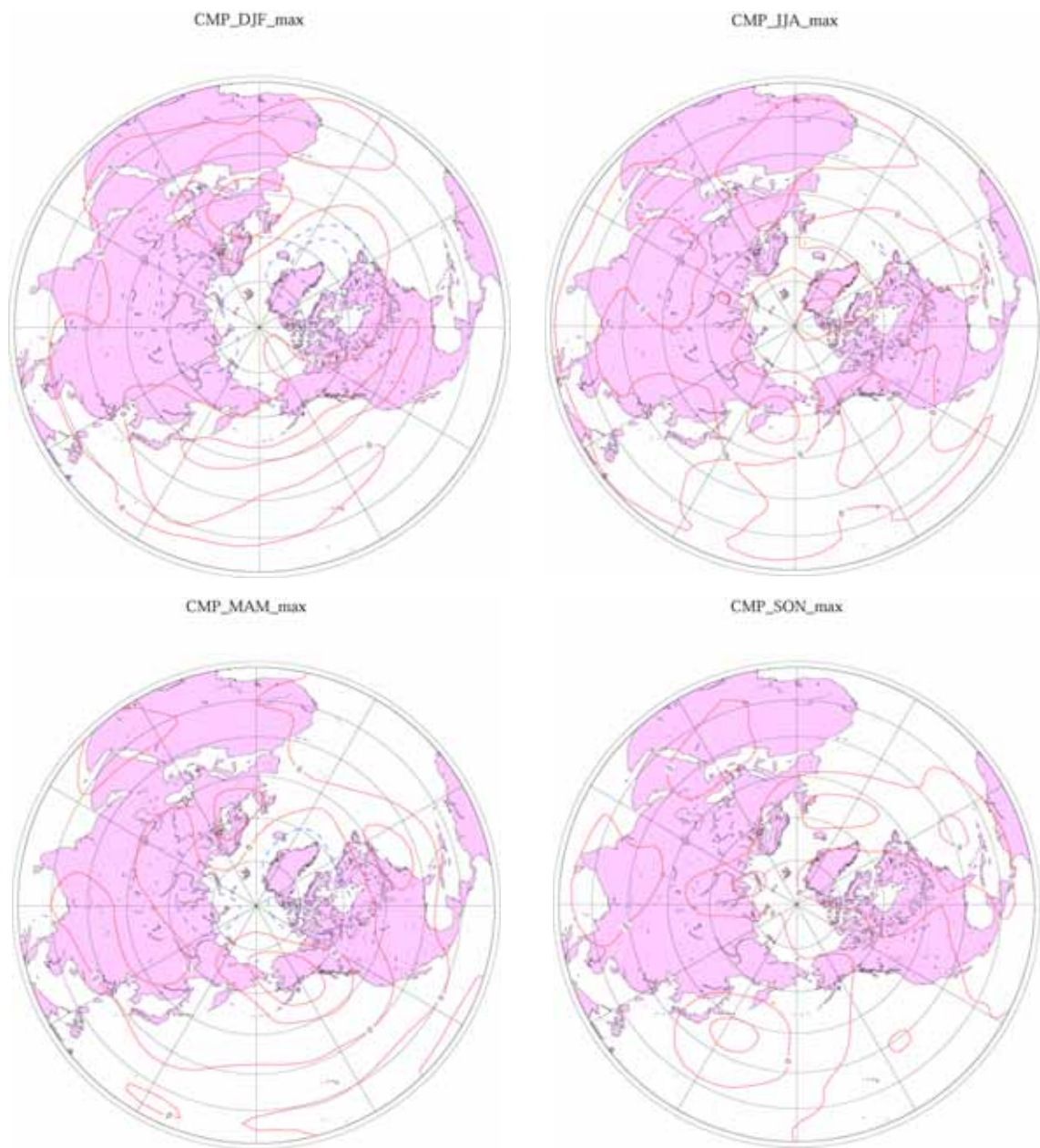


図 3-1 F10.7 極大期間の高度場アノマリ(季節毎)
 実線：正のアノマリ，破線：負のアノマリ，コンター間隔：10m

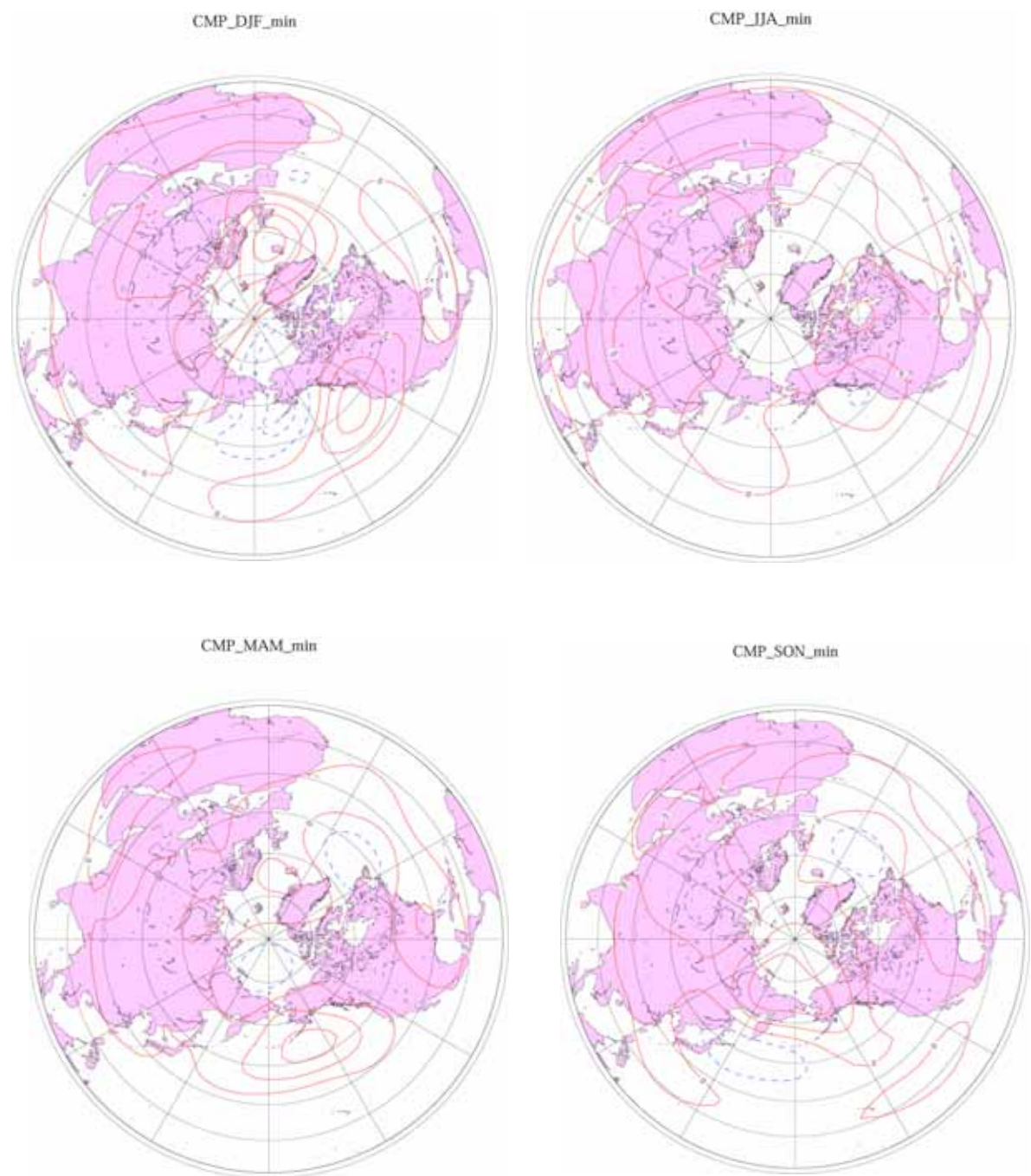


図 3-2 F10.7 極小期間の高度場アノマリ(季節毎)
実線：正のアノマリ，破線：負のアノマリ，コンター間隔：10m

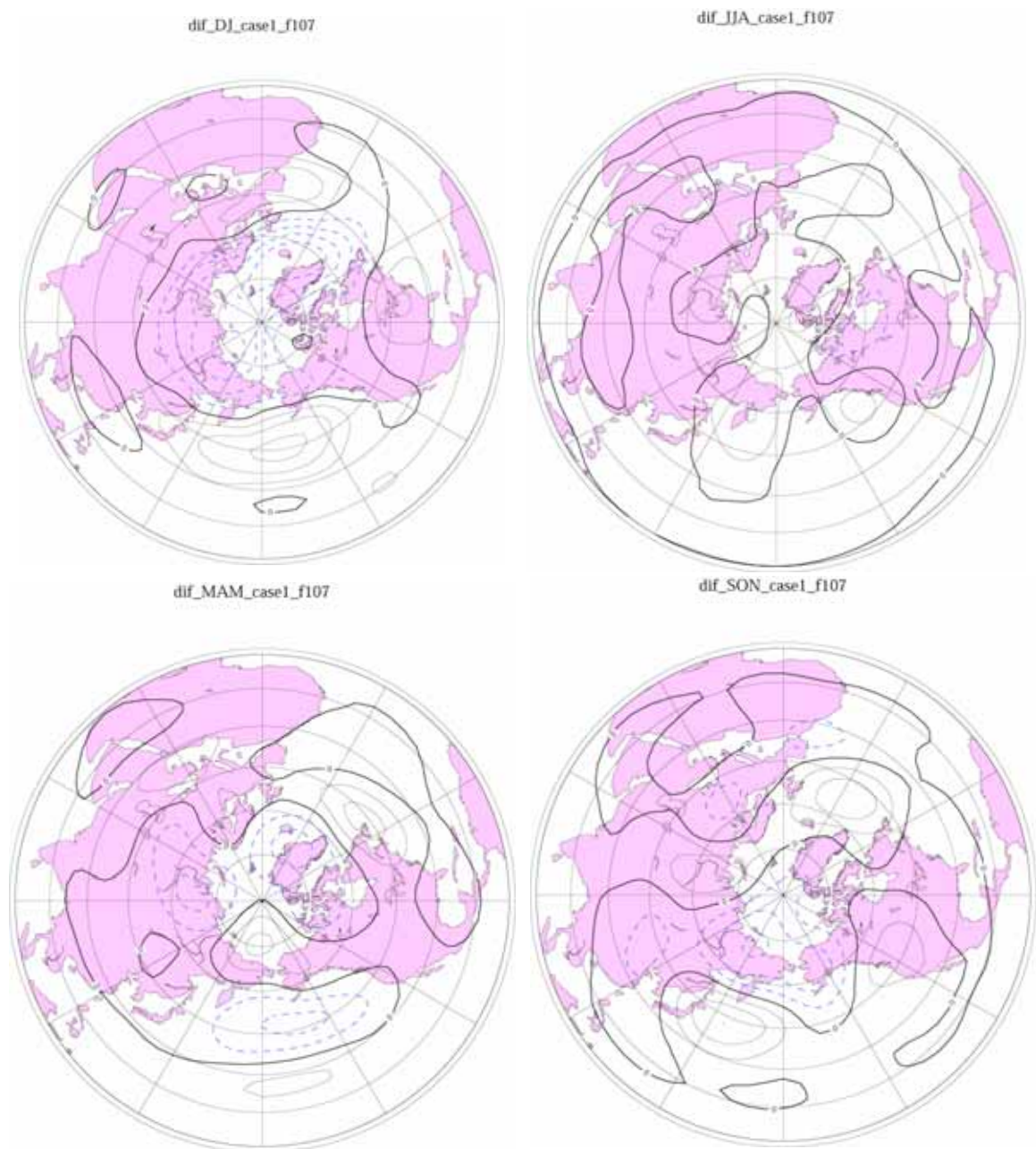
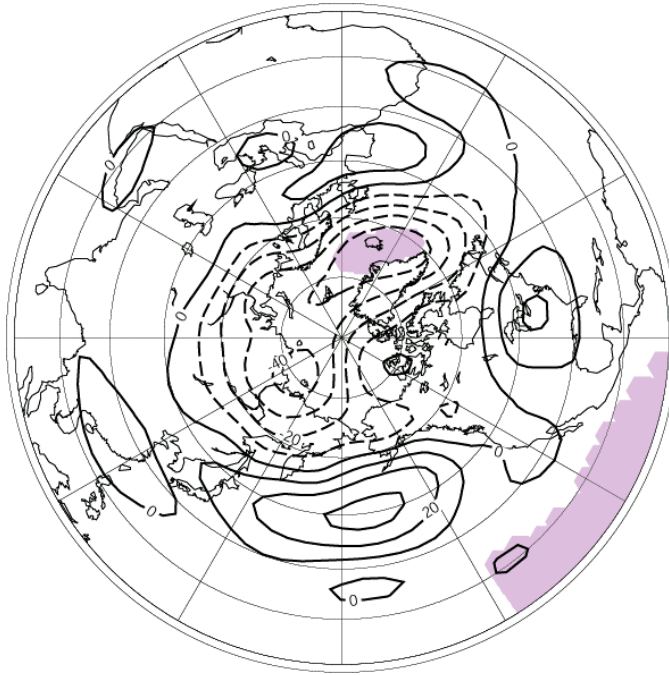


図 3-3 F10.7 極大 - 極小期間の高度場アノマリ(季節毎)
 実線：正のアノマリ，破線：負のアノマリ，コンター間隔：10m

(a)



(b)

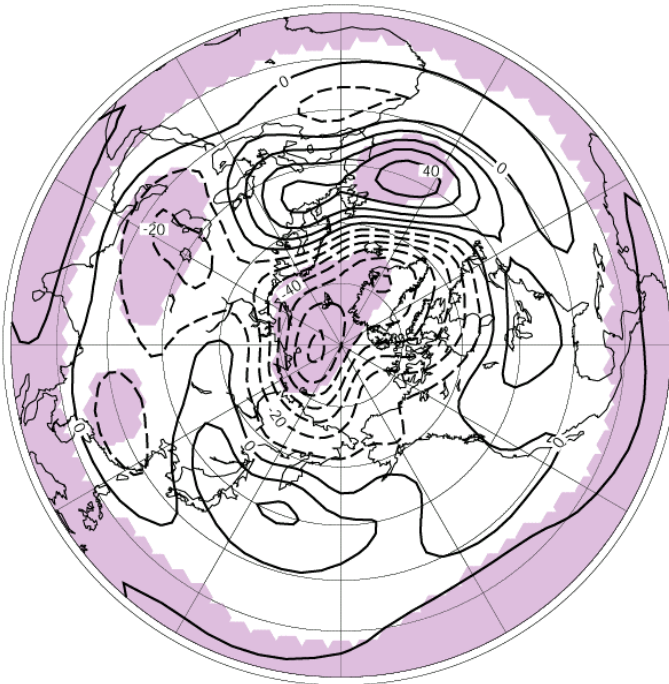


図 3-4 (a) F10.7 極大 - 極小期間の冬季高度場(有意検定) ,
(b) aa index 極大 - 極小期間の冬季高度場(有意検定)
実線 : 正のアノマリ , 破線 : 負のアノマリ , コンター間隔 : 10m
網掛けは有意な領域 (信頼度 95%)

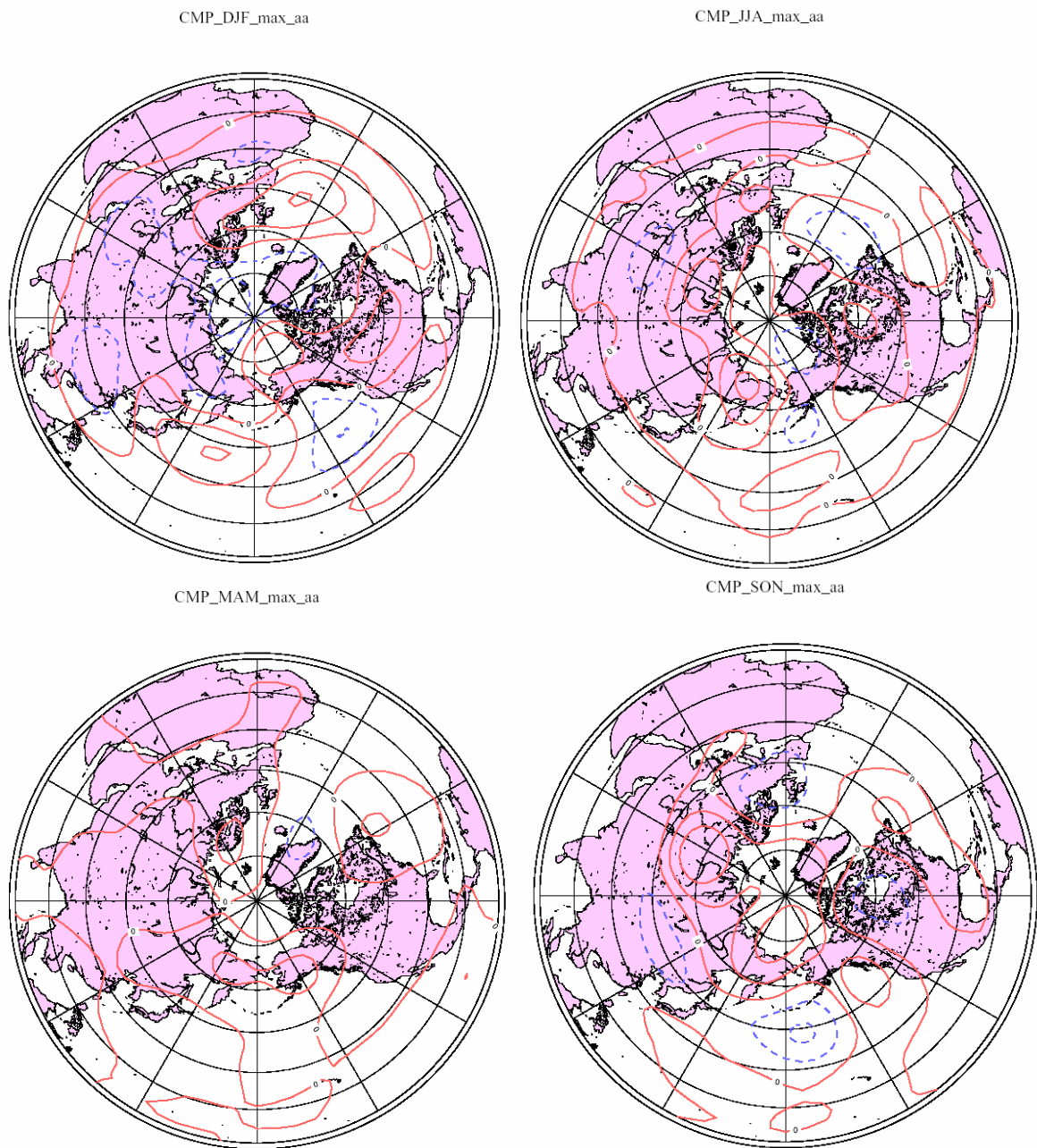


図 3-5 aa index 極大期間の高度場アノマリ(季節毎)
 実線：正のアノマリ，破線：負のアノマリ，コンター間隔：10m

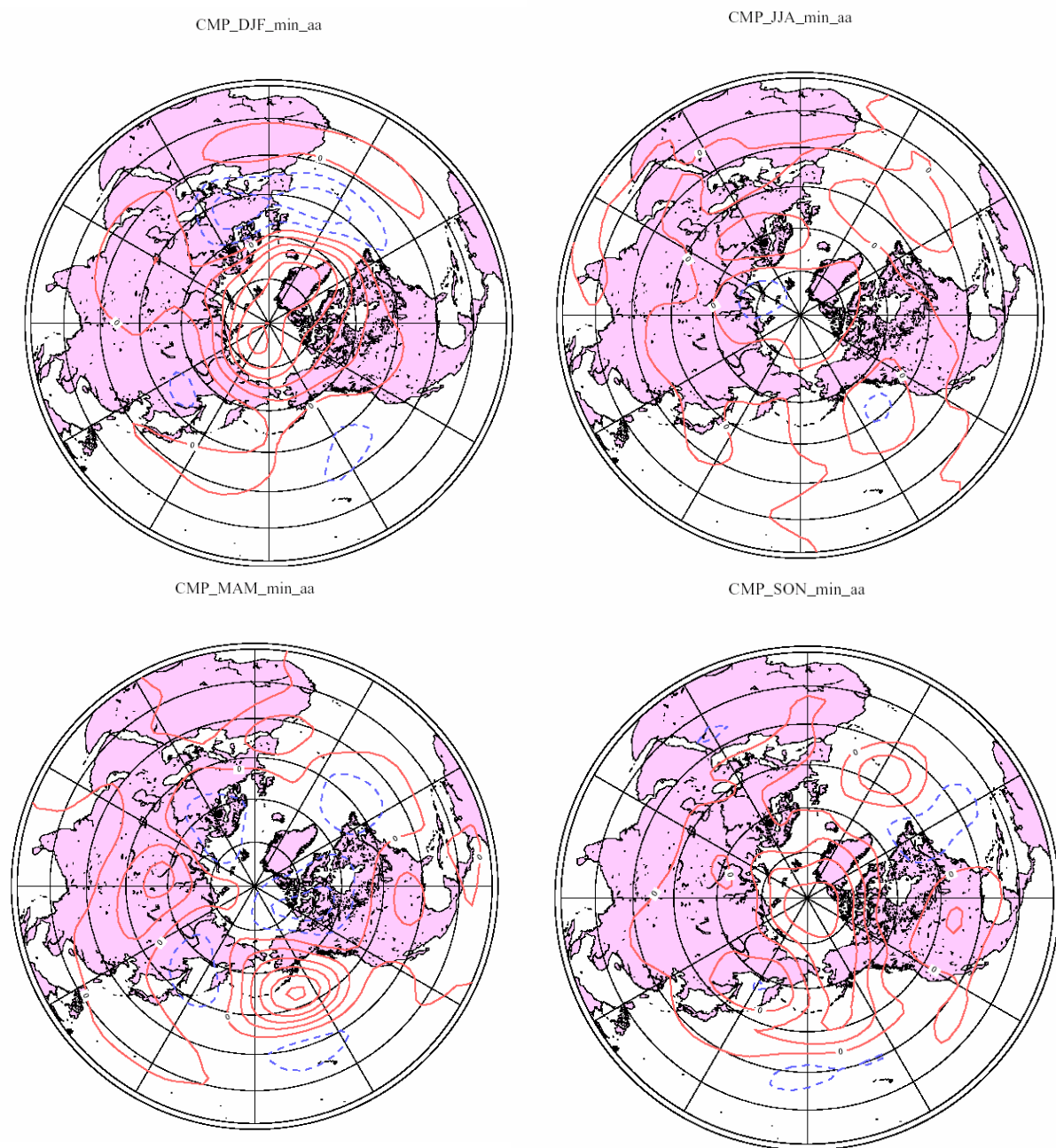
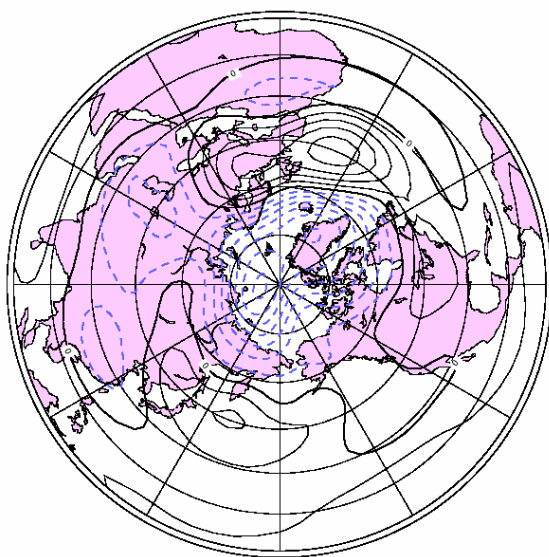
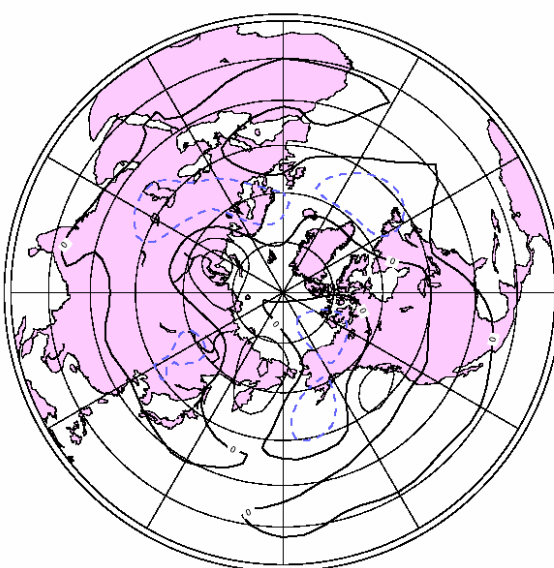


図 3-6 aa index 極小期間の高度場アノマリ(季節毎)
 実線：正のアノマリ，破線：負のアノマリ，コンター間隔：10m

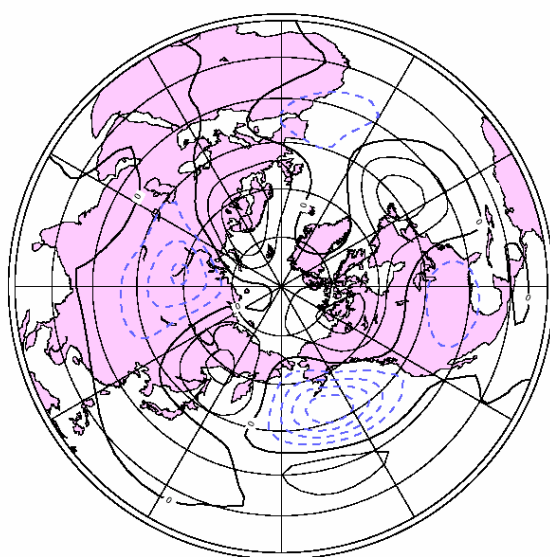
dif_DJF_case1_aa



dif_JJA_case1_aa



dif_MAM_case1_aa



dif_SON_case1_aa

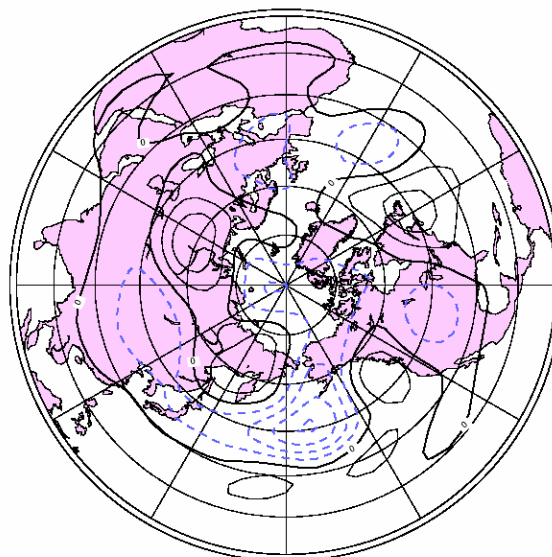
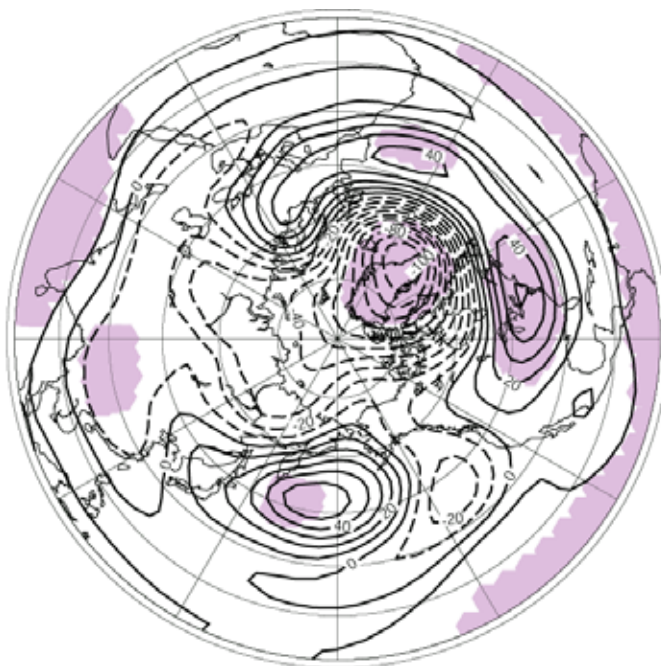


図 3-7 aa index 極大 - 極小期間の高度場アノマリ(季節毎)
実線：正のアノマリ，破線：負のアノマリ，コンター間隔：10m

(a)



(b)

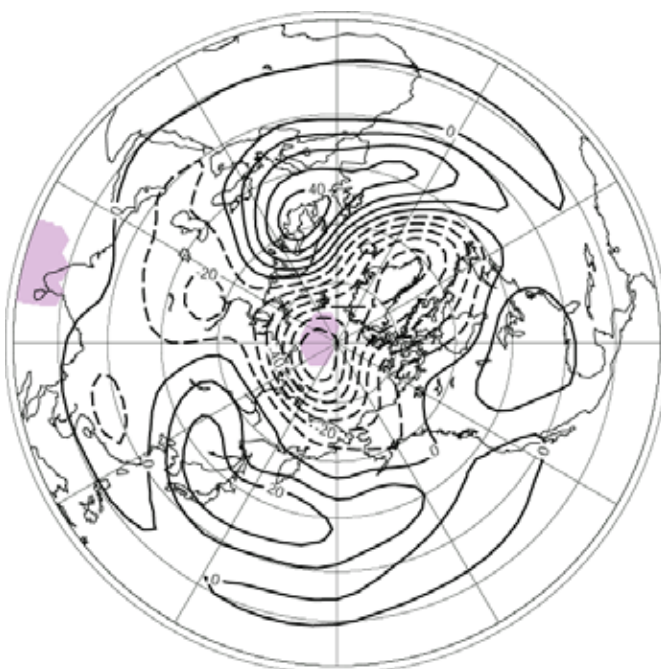


図 3-8 (a) AE index 極大 - 極小期間の冬季高度場(有意検定) ,
(b) Dst_index 極大 - 極小期間の冬季高度場(有意検定)
実線：正のアノマリ，破線：負のアノマリ，コンター間隔：10m
網掛けは有意な領域（信頼度95%）

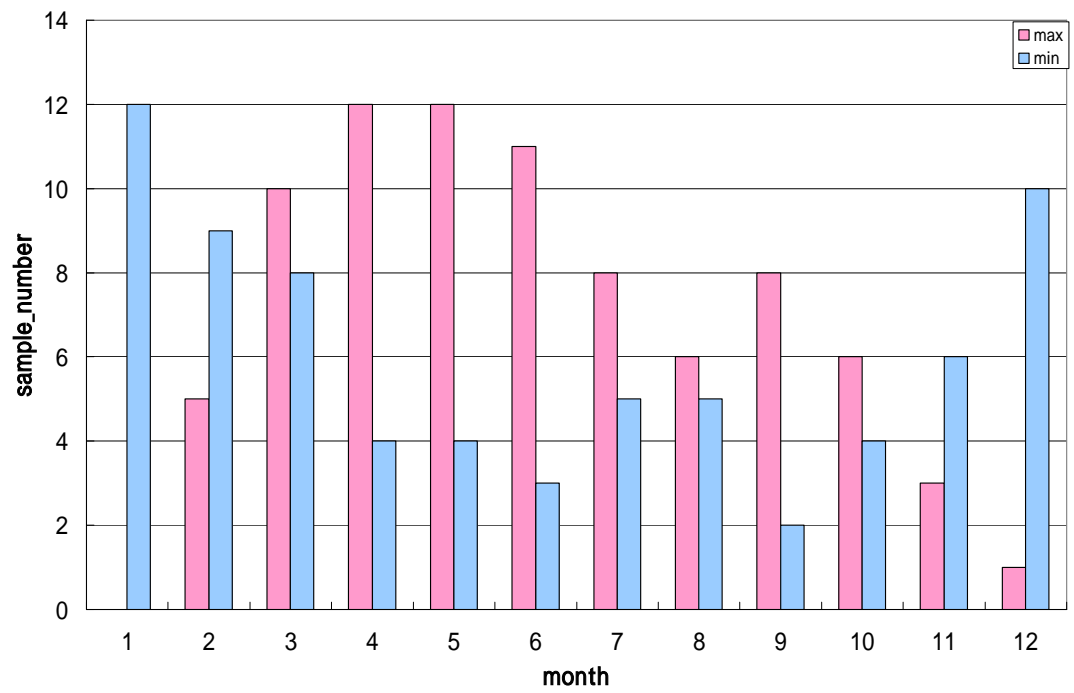


図3-9 AE index極大期間 / 極小期間に該当する月のサンプル数

dif_DJF_case1_ae

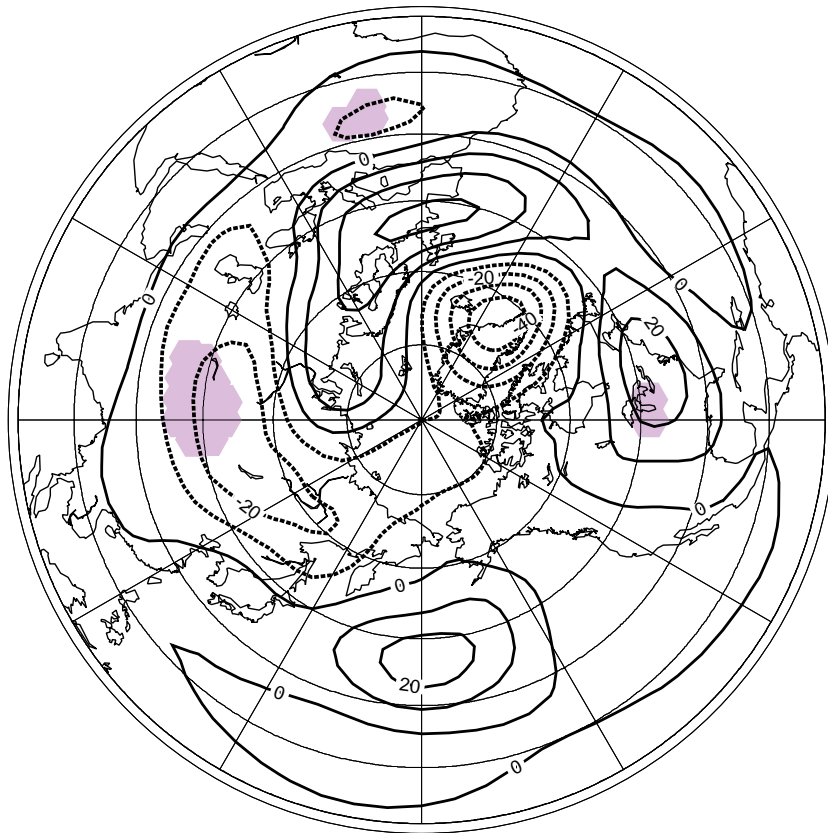


図3-10 AE index極大 - 極小期間の冬季高度場(有意検定)_winter
冬季データのみを対象として極大期間-極小期間を定義
実線：正のアノマリ，破線：負のアノマリ，コンター間隔：10m
網掛けは有意な領域（信頼度95%）

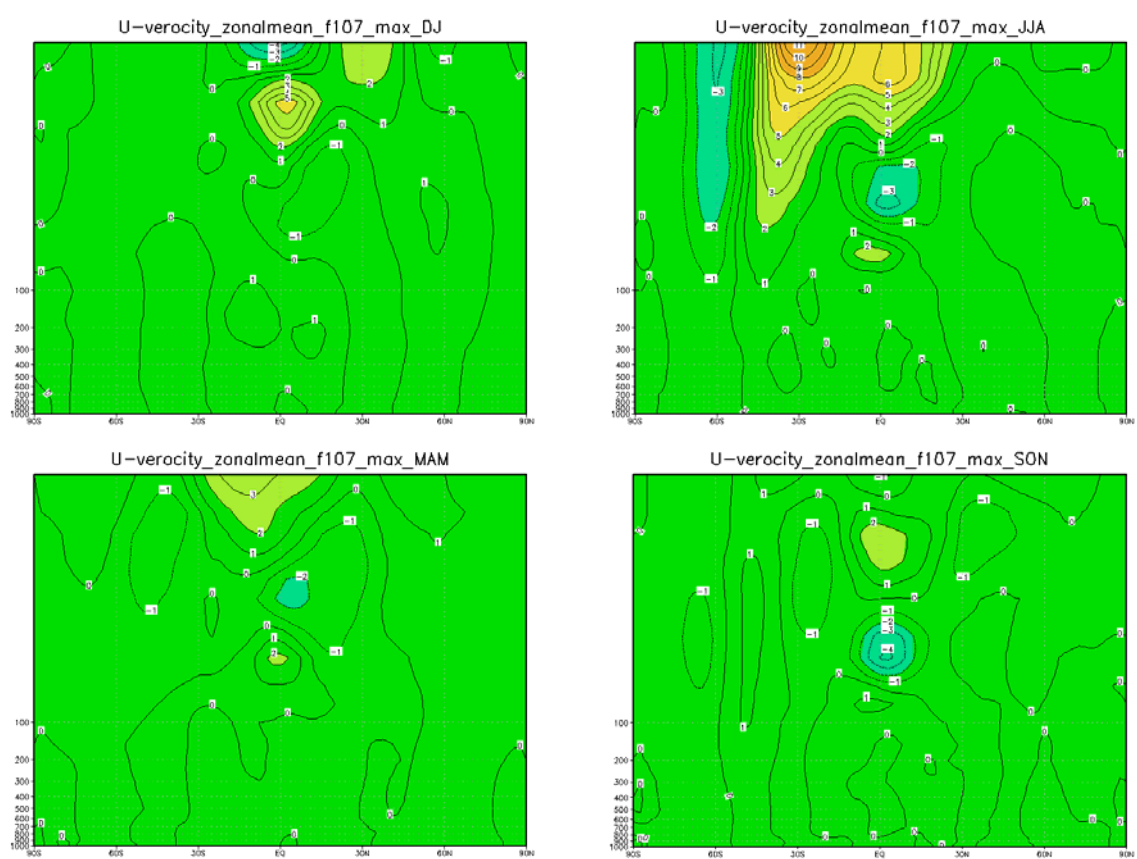


図 3-11 F10.7 極大期間の風速場アノマリ(季節毎)

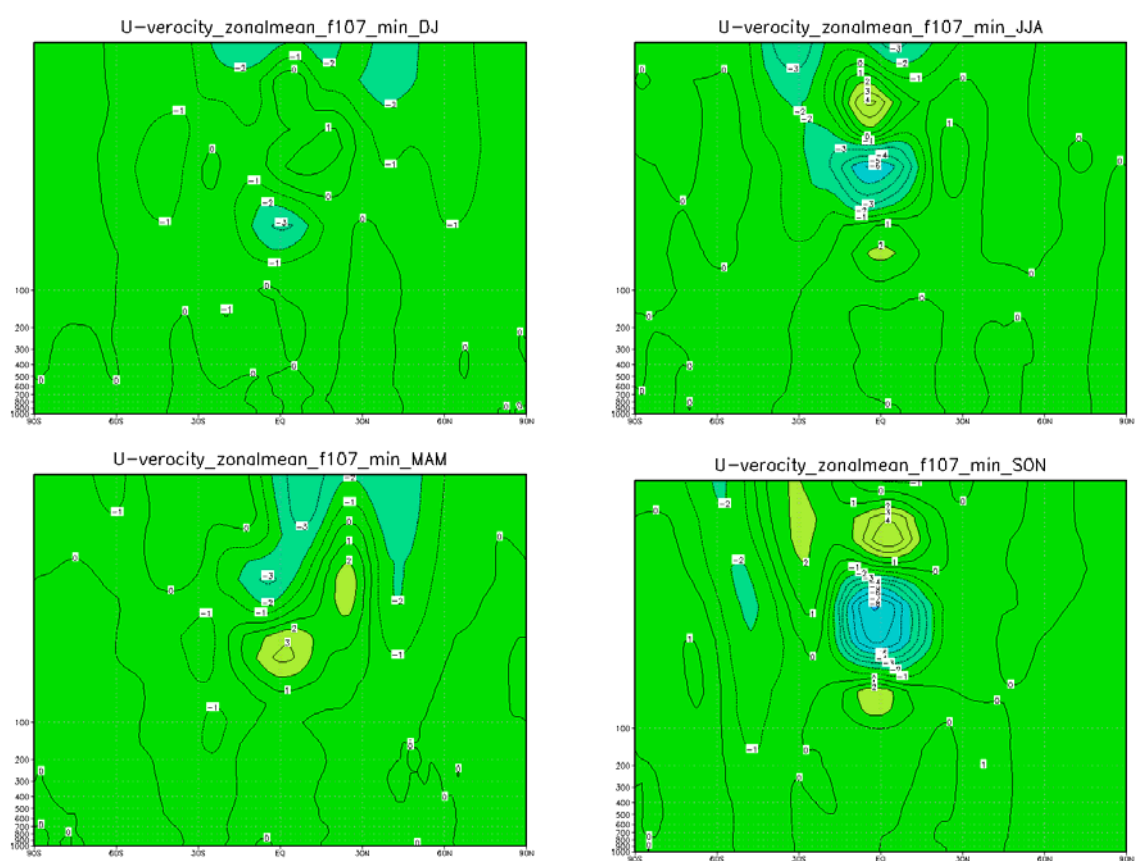


図 3-12 F10.7 極小期間の風速場アノマリ(季節毎)

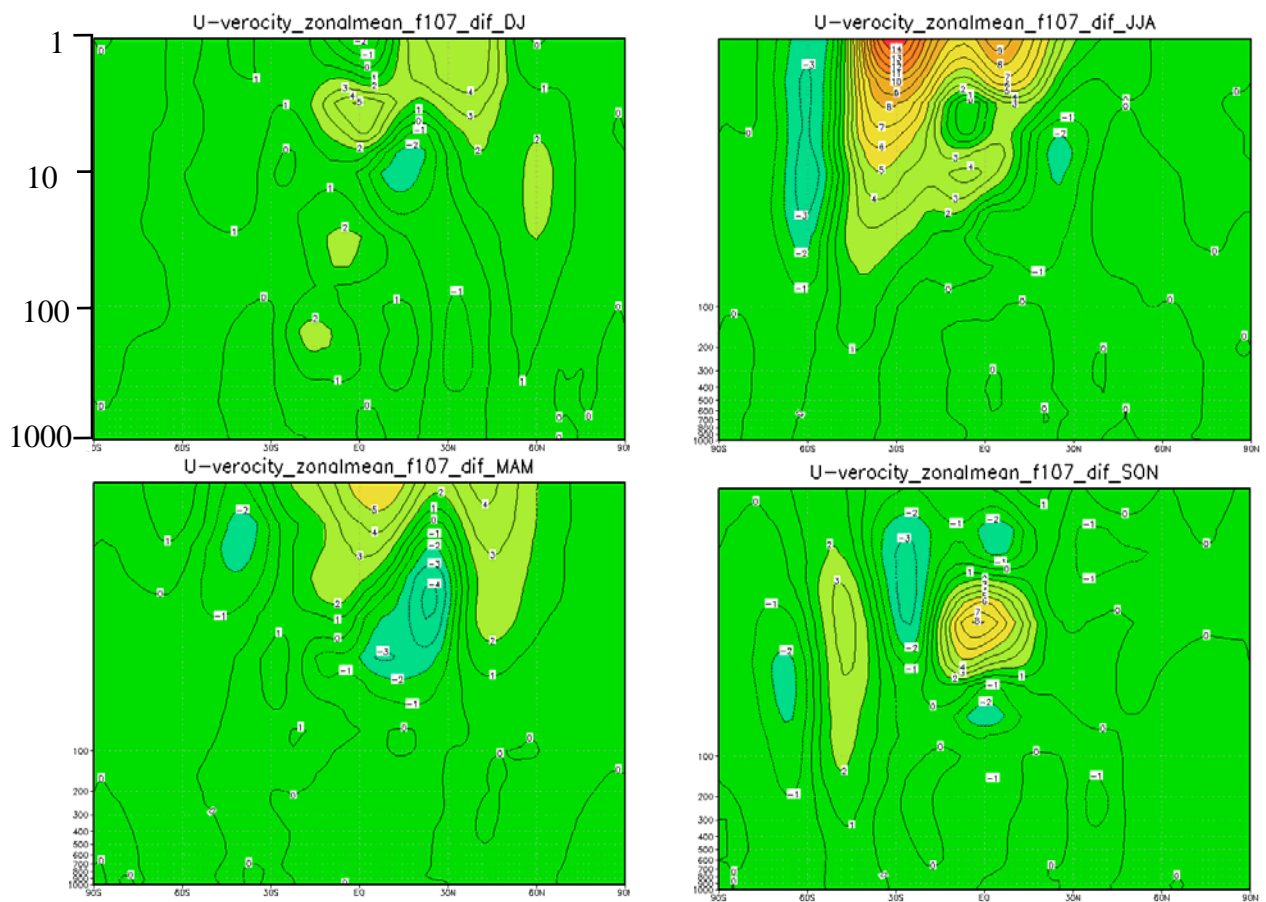


図 3-13 F10.7 極大 - 極小期間の風速場アノマリ(季節毎)

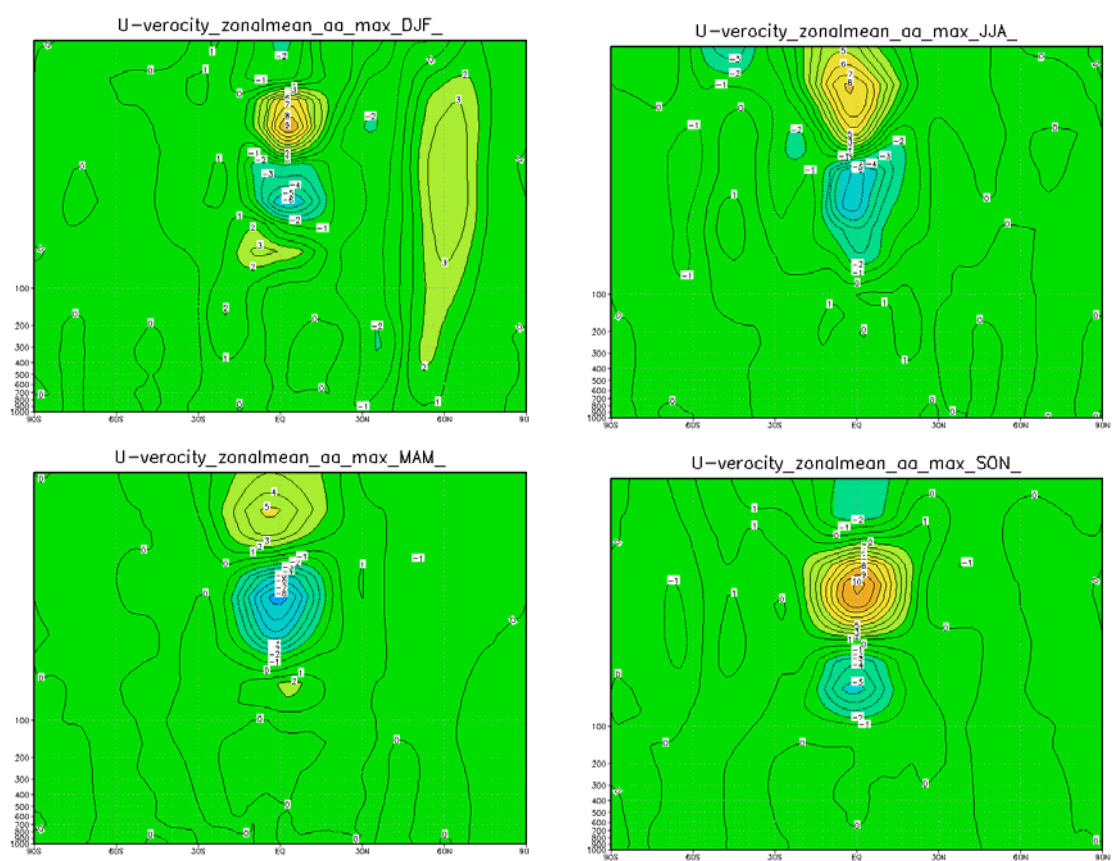


図 3-14 aa index 極大期間の風速場アノマリ(季節毎)

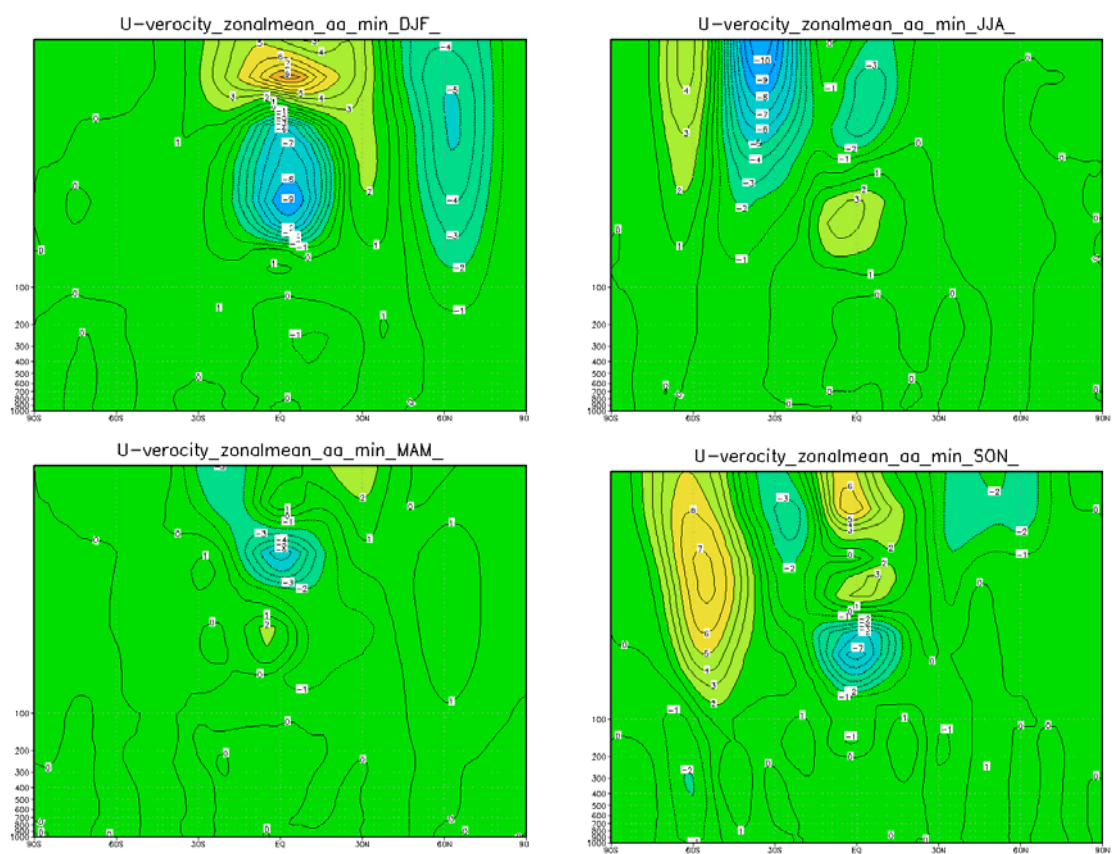


図 3-15 aa index 極小期間の風速場アノマリ(季節毎)

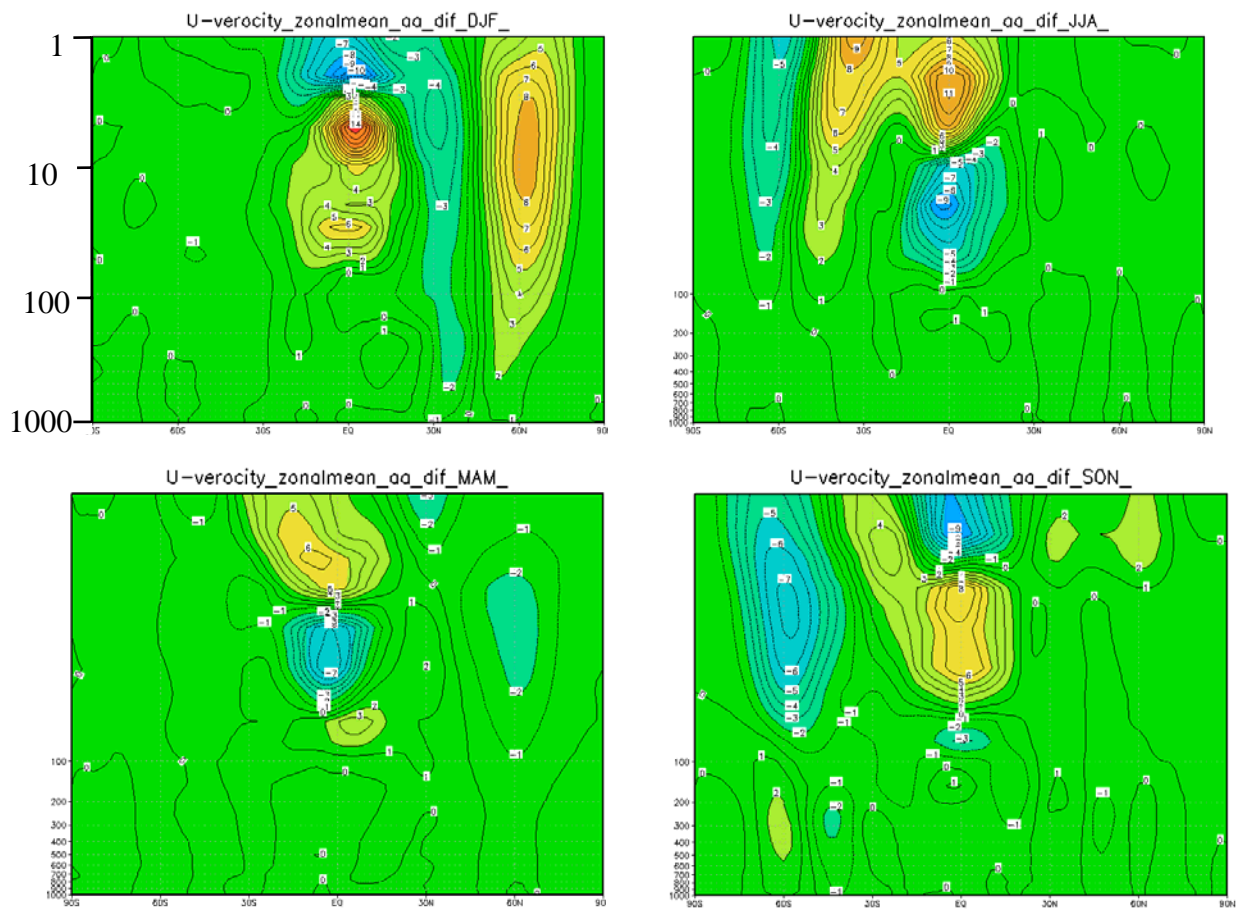


図 3-16 aa index 極大 - 極小期間の風速場アノマリ(季節毎)

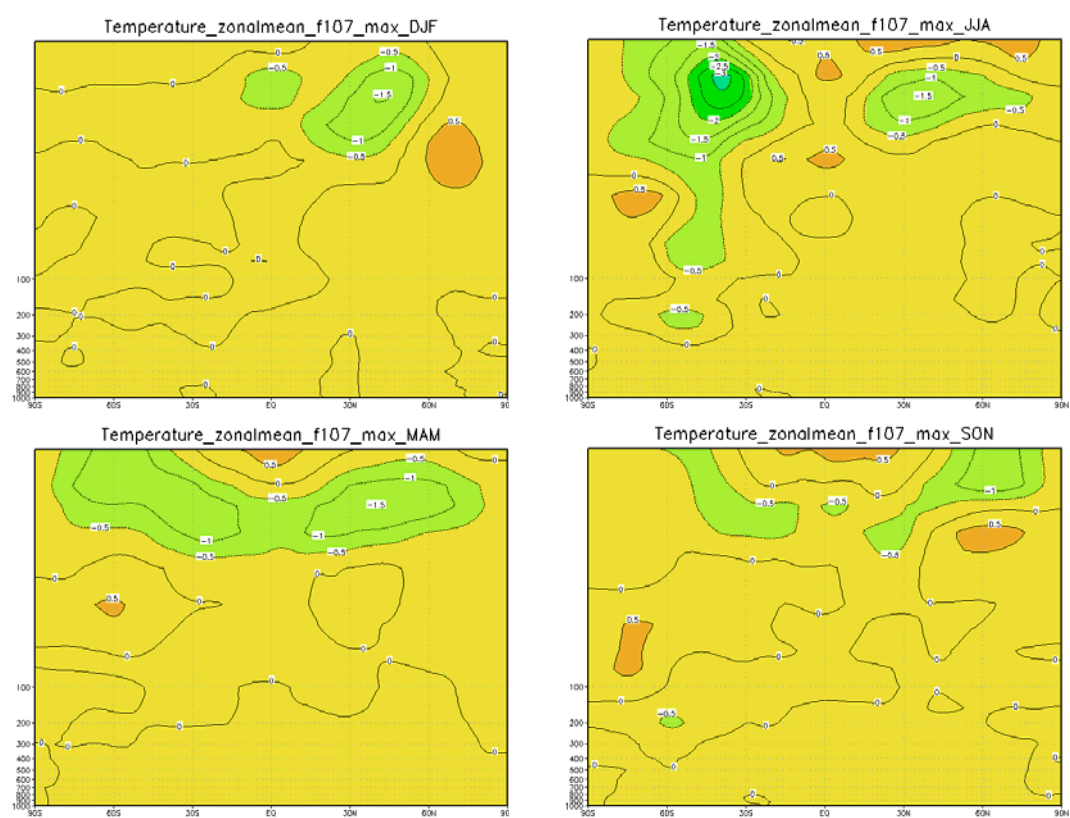


図 3-17 F10.7 極大期間の温度場(季節毎)

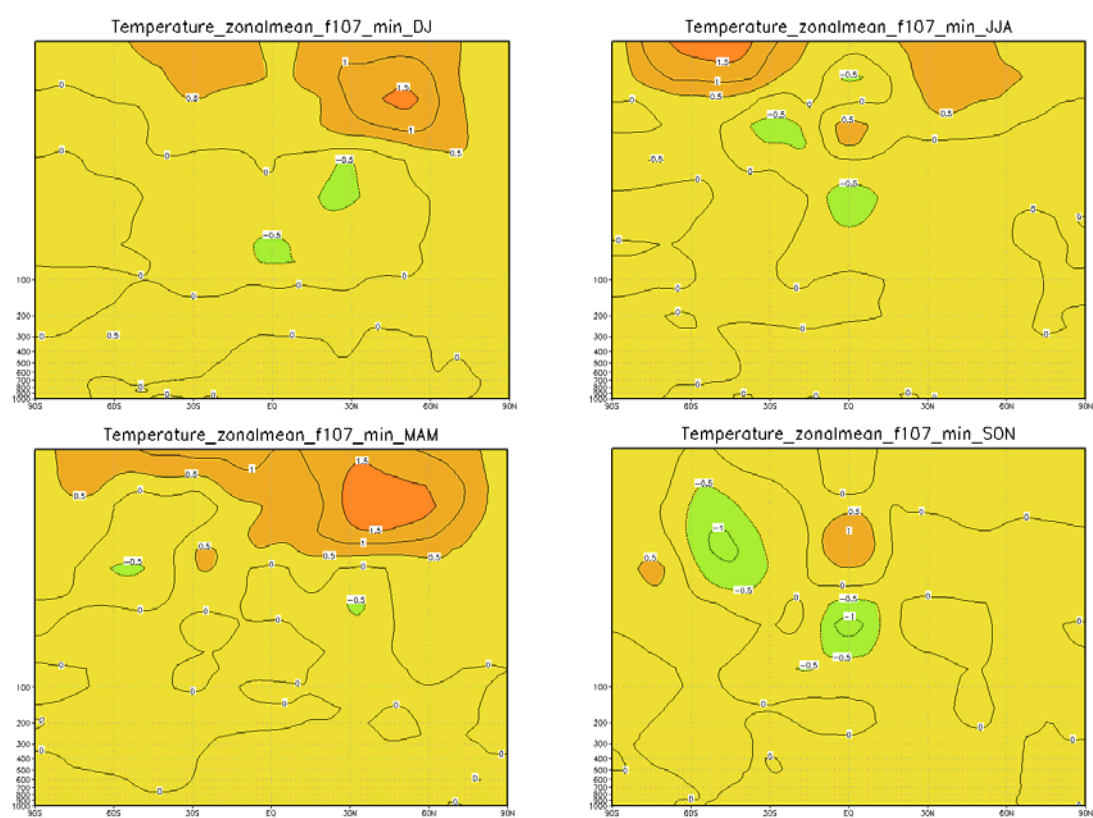


図 3-18 F10.7 極小期間の温度場(季節毎)

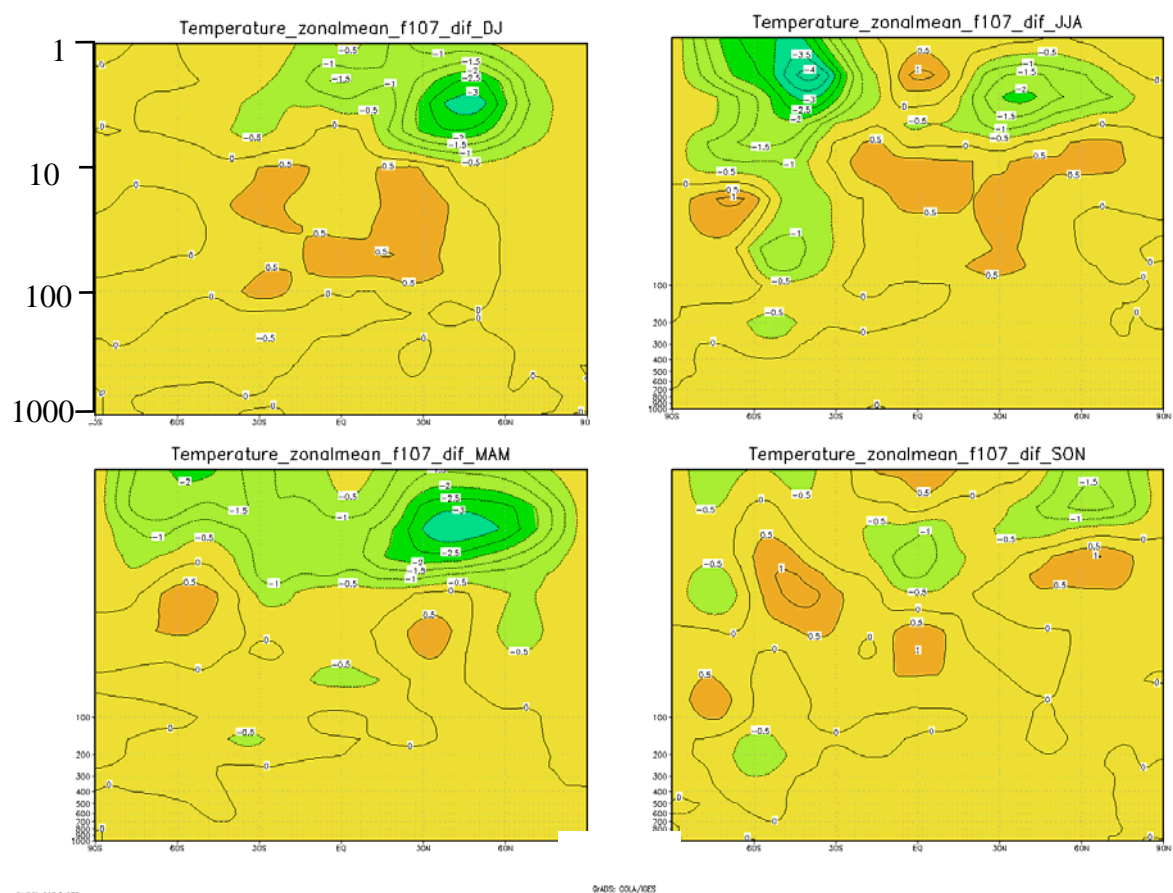


図 3-19 F10.7 極大 - 極小期間の温度場(季節毎)

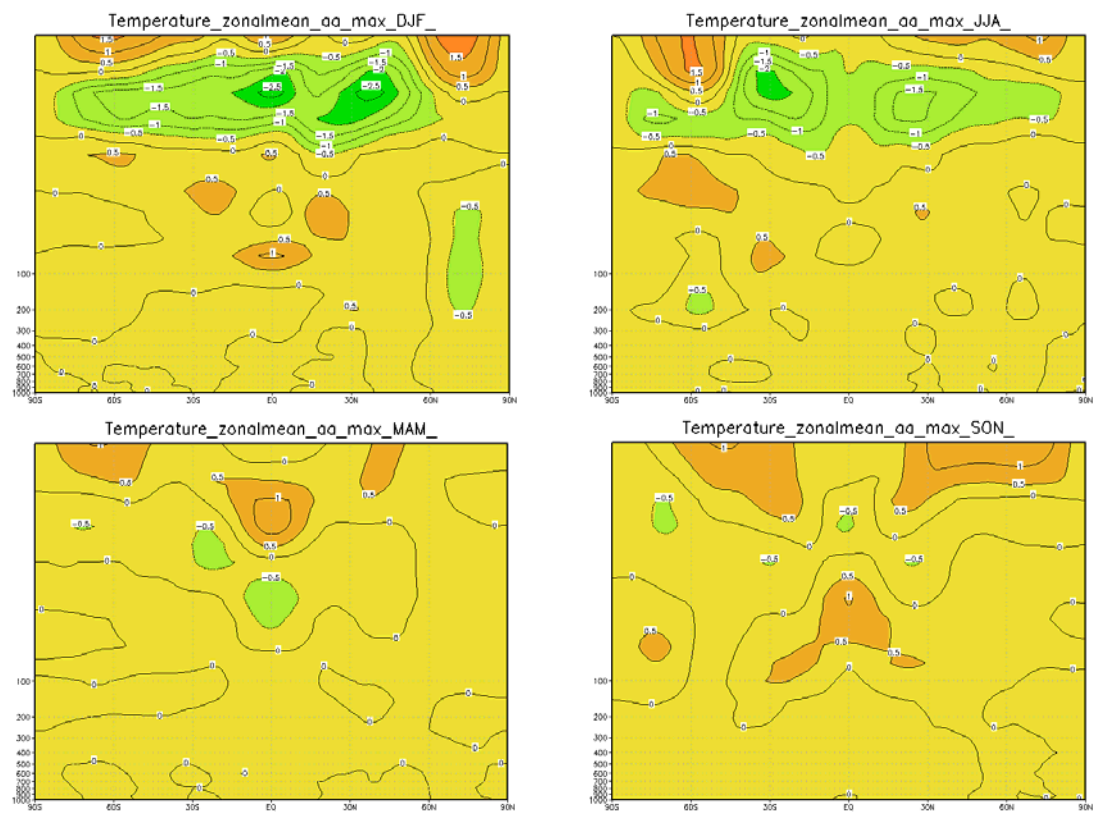


図 3-20 aa index 極大期間の温度場(季節毎)

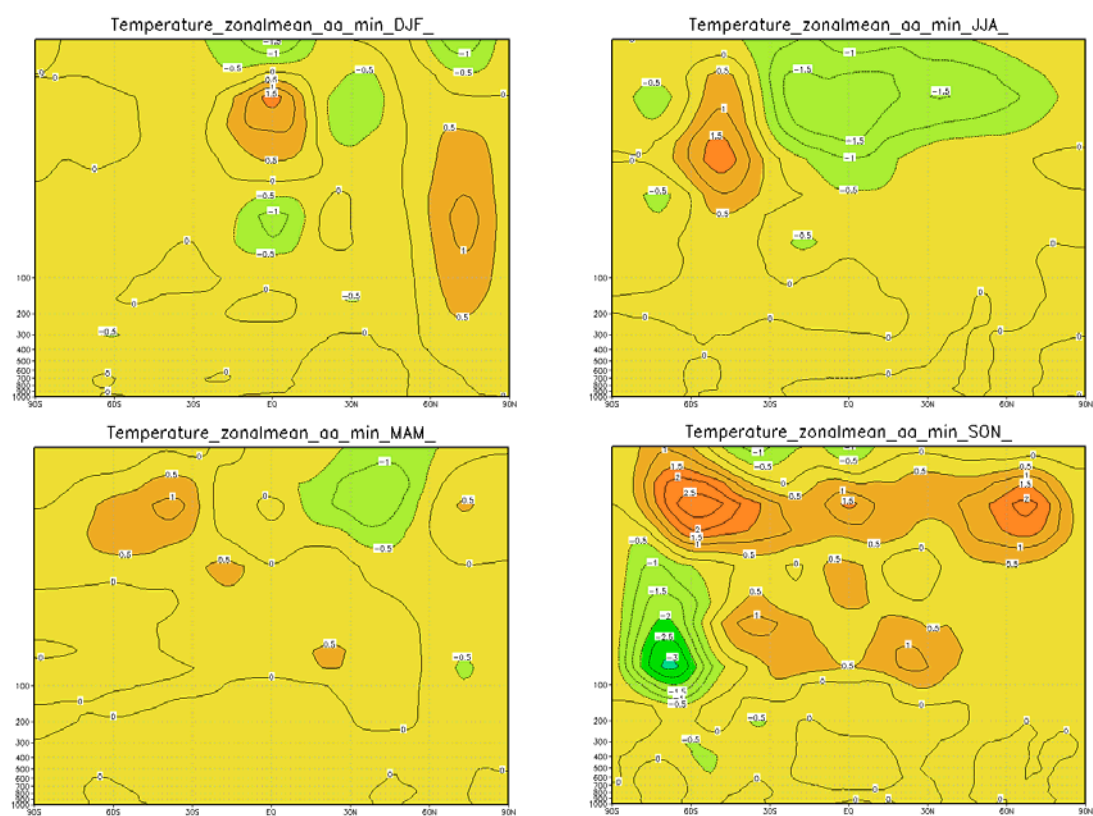


図 3-21 aa index 極小期間の温度場(季節毎)

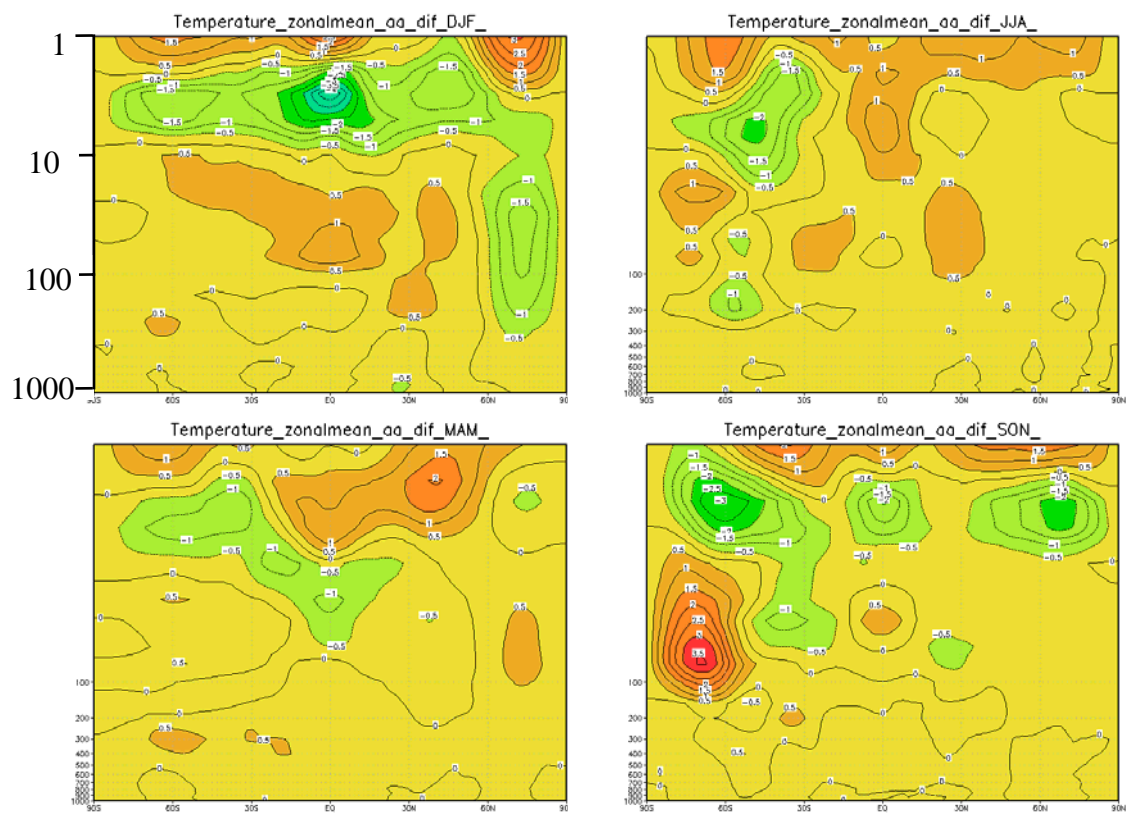


図 3-22 aa index 極大 - 極小期間の温度場(季節毎)

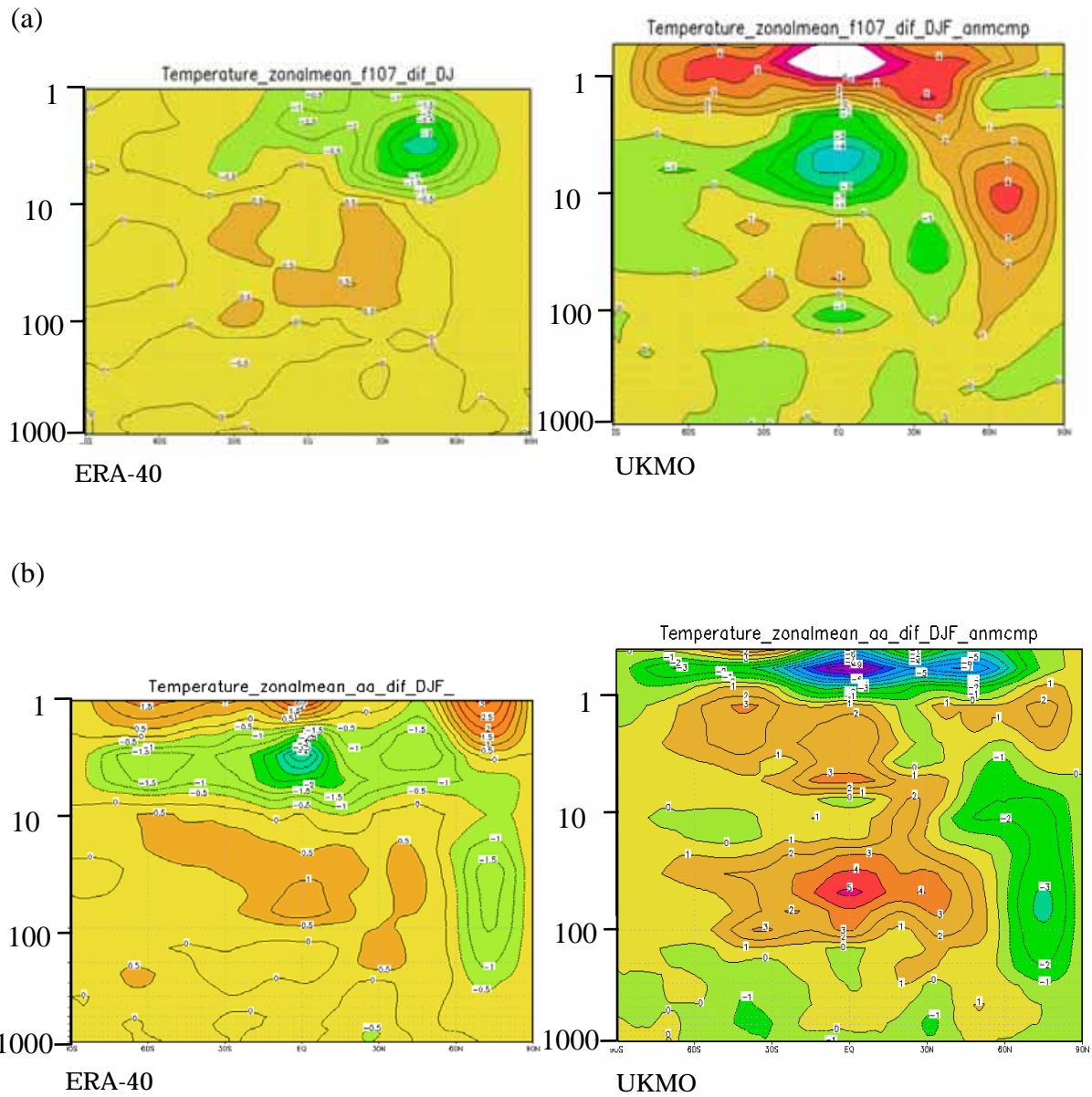


図 3-23 (a)F10.7 の ERA-40/UKMO 極大 - 極小期間の温度場(冬季)
(b)aa index の ERA-40/UKMO 極大 - 極小期間の温度場(冬季)

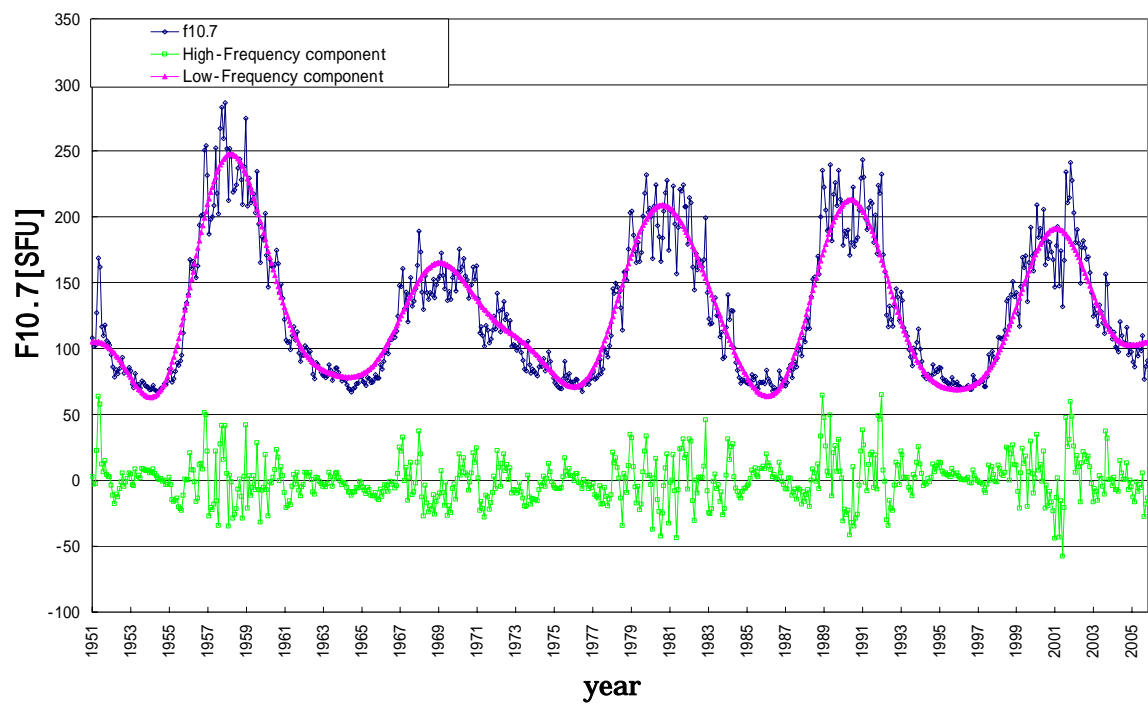


図3-24 F10.7高周波成分 / 低周波成分
ピンク：低周波成分，黄緑：高周波成分

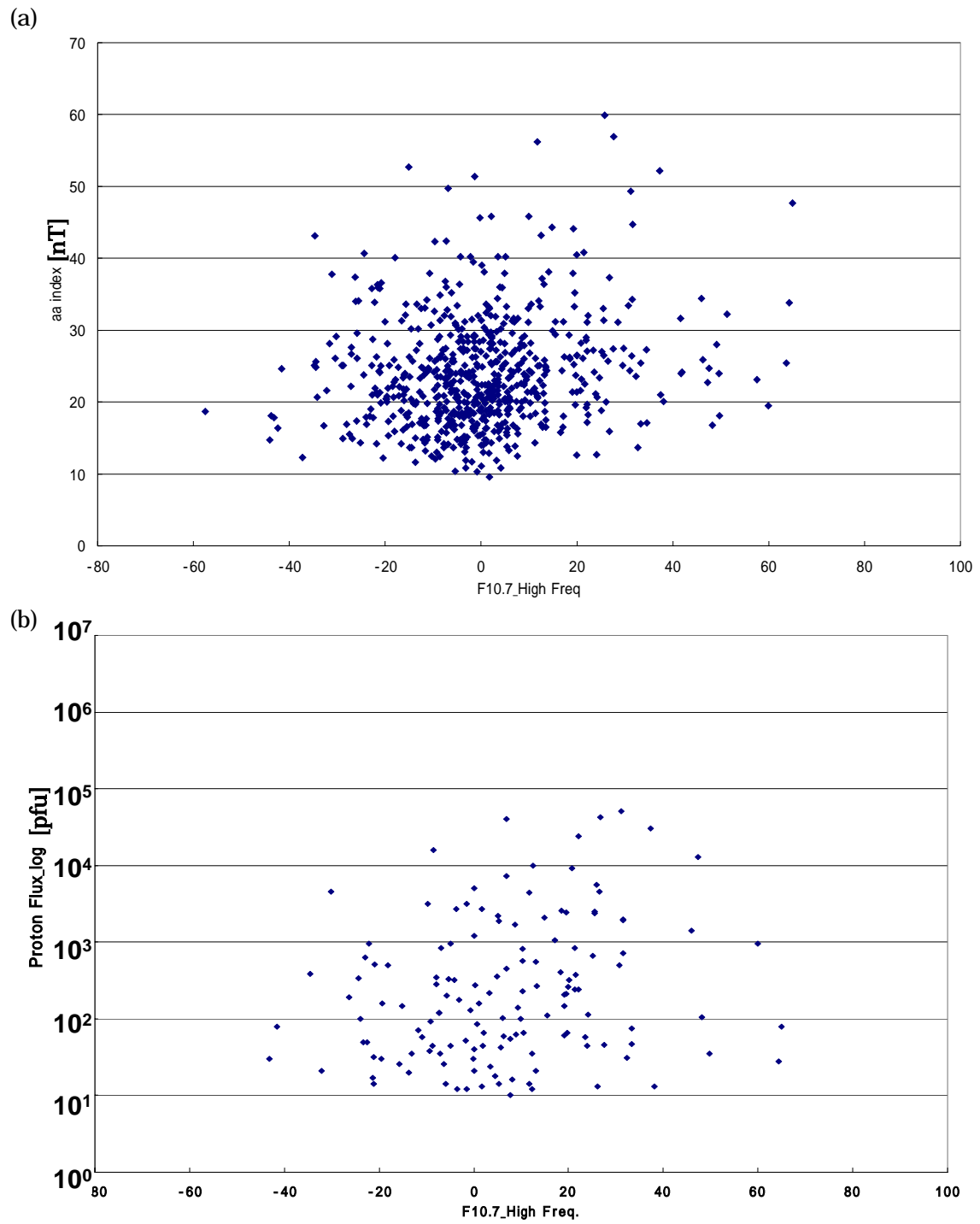
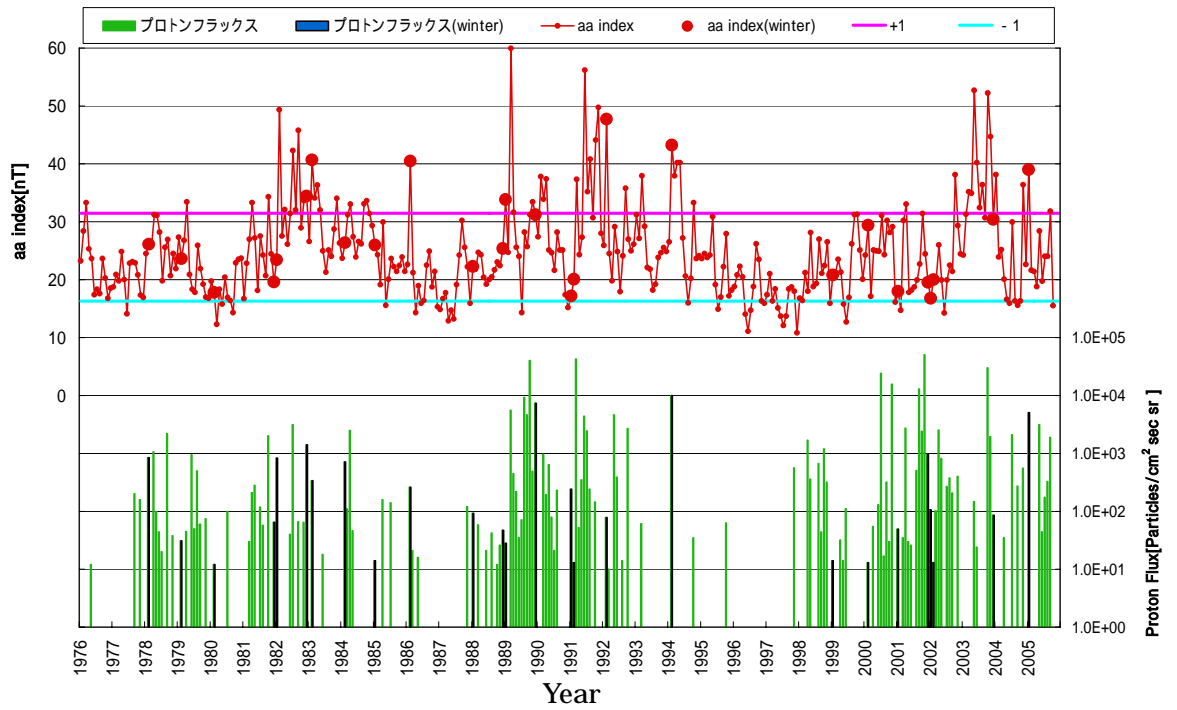


図3-25 (a)F10.7高周波成分 - aa index散布図，
(b)F10.7高周波成分 - プロトンフラックス散布図

(a)



(b)

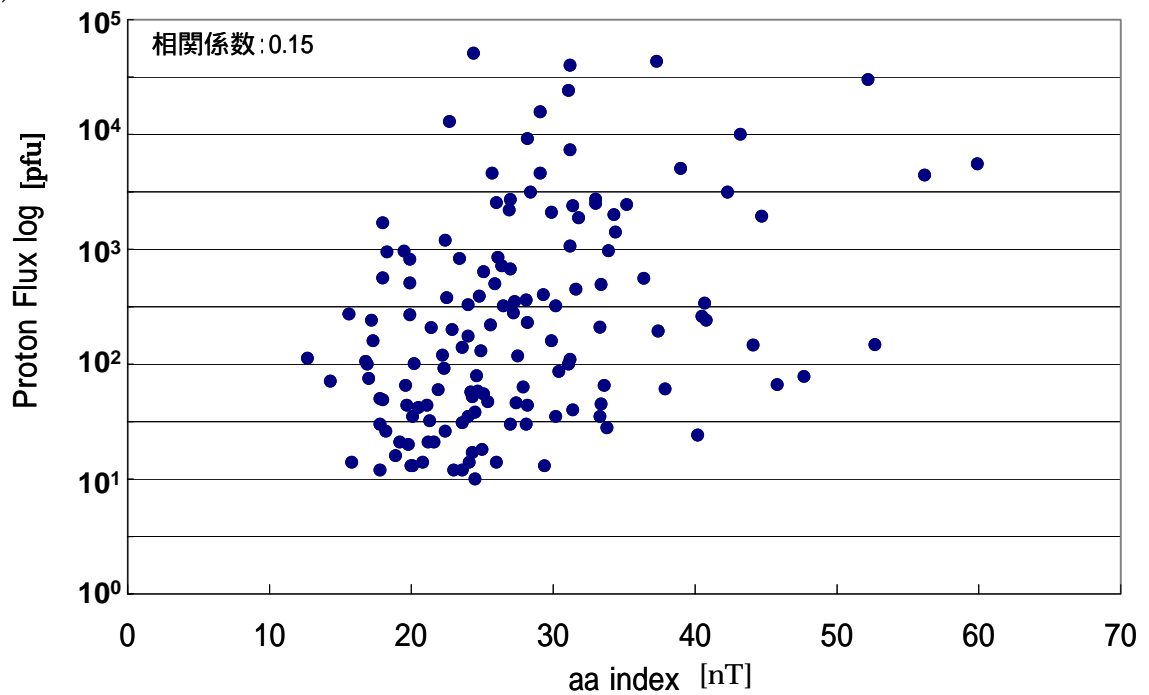
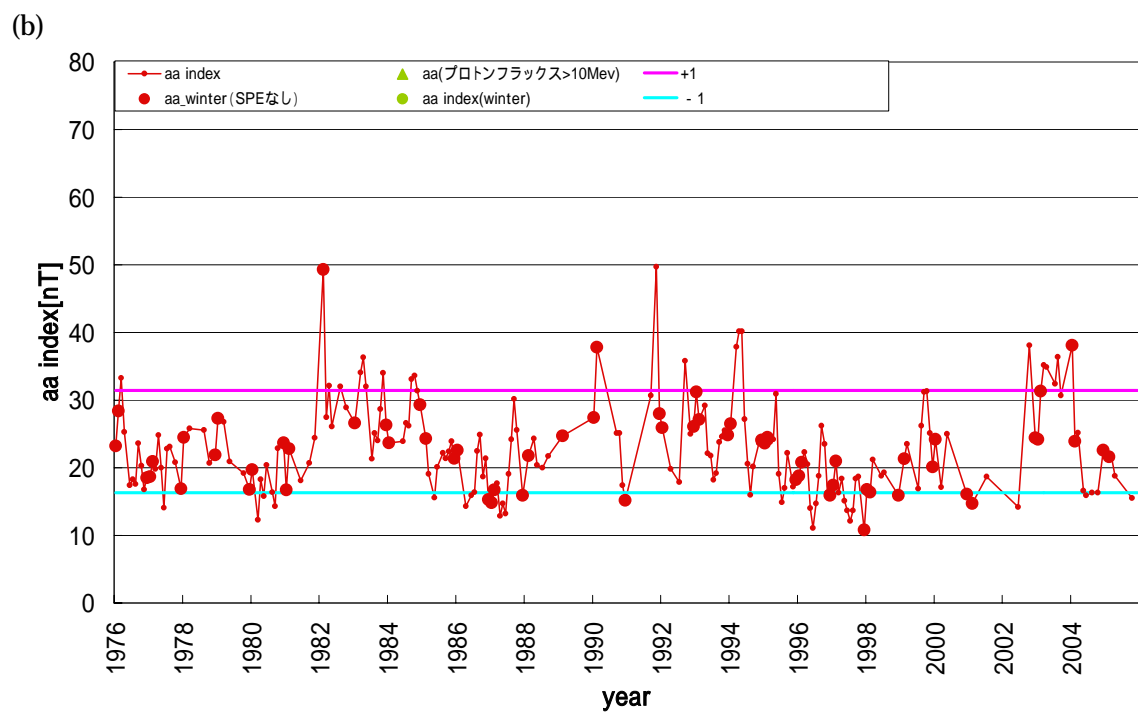
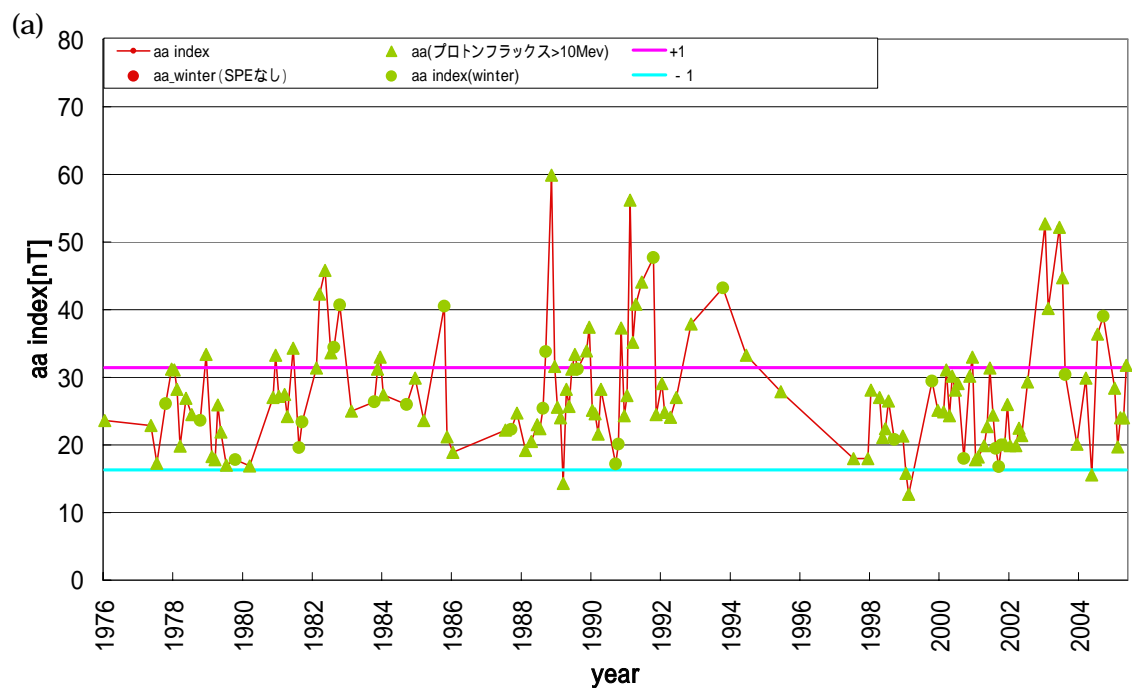


図3-26 (a) aa indexとプロトンフラックスの時系列 ,
(b) aa index - プロトンフラックス散布図

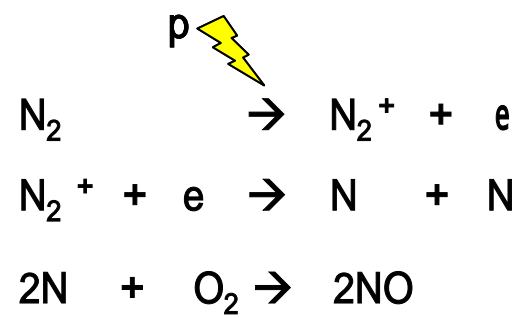


(c)

	case1	case2	case3	case4
SPE	↑	↓	↑	↓
aa index	↑	↓	↓	↑
ozone	↓	-	↓	-

図3-27 (a) aa index時系列 (プロトンフラックス上昇),
 (b) aa index時系列 (プロトンフラックス上昇なし),
 (c) プロトンフラックスの増減とaa indexの増減によるケース分け

(a)



(b)

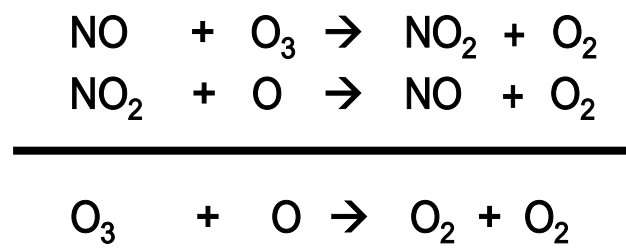


図 4-1 (a)プロトンによる NO 生成 , (b)触媒反応サイクルによるオゾン破壊

Appendix_A

本文中でも記述したが、地磁気活動と北極振動は相関が高いが、地磁気は直接大気に影響を与えるのではなく、地磁気活動を変化させる要因が大気に何らかの影響を及ぼしているため北極振動指数との相関が高くなる。地磁気の変動要因は、「火山噴火等の地球内部による影響」、「太陽や宇宙銀河からくる荷電粒子等の地球外部による影響」の二つがある。大気には、後者の荷電粒子の影響が重要となってくる。

ここでは、その荷電粒子の動きと地磁気観測局について、簡単に補足する。

(1) 地球に飛来した荷電粒子の動き

太陽からの荷電粒子は、地球磁場にそって極域へと降り注ぐ。この領域は、カスプ領域（地磁気緯度 77 度付近）とよばれる。この極域に降り込んだ荷電粒子によって生じた電流は、オーロラオーバル帯（地磁気緯度 65 ~ 70 度付近）に位置する観測局において測定され、AE index として指数化される。また、一度極域に入ってきた荷電粒子はミラー運動をしながら徐々に西向きにドリフトする（図 A-1）。このドリフト運動は西向き電流を作り出す（赤道環電流）。赤道環電流は地磁気赤道付近の観測局において測定され、Dst index として指数化されている。

(2) 地磁気観測所の位置による影響

本研究では地磁気活動度指数として、aa index, AE index, Dst index の 3 種類を用いている。各指数について、観測局の地理座標 / 地磁気座標を表 A-1 ~ 3 に、観測局の位置を図 A-2 に示す。

本文中でも記述したが、先行研究では aa index を使用していた。しかし、表 A-1 中に示した地磁気座標の緯度平均より、aa index の観測局の位置は平均 48.29 度であり、カスプ領域の地磁気緯度よりも中緯度に位置している。このため、極域に降り注いだ粒子による電流だけでなく、赤道域を流れる赤道環電流の影響も含んでいることになる。AE index については、緯度平均が 66.37 度と aa index 観測局よりも高緯度に位置しているため、より純粹に高緯度に降り注ぐ荷電粒子を評価できるといえる。

表 A-1 aa index 観測局の地理座標 / 地磁気座標

aa index Observatory	Geographic Coord.		Geomagnetic Coord.
	Lat.(°N)	Long.(°E)	Lat.(°N)
Hartland	50.98	355.52	53.88
Canberra	-35.31	149.36	-42.70
Average	-	-	48.29

表 A-2 AE index 観測局の地理座標 / 地磁気座標

AE index Observatory	Geographic Coord.		Geomagnetic Coord.
	Lat.(°N)	Long.(°E)	Lat.(°N)
Abisko	68.36	18.82	66.04
Dixon Island	73.55	80.57	63.02
Cape Chelyuskin	77.72	104.28	66.26
Tixie Bay	71.58	129.00	60.44
Cape Wellen	66.17	190.17	61.79
Barrow	71.30	203.25	68.54
College	64.87	212.17	64.63
Yellowknife	62.40	245.60	69.00
Fort Churchill	58.80	265.90	68.70
Poste-de-la-Baleine	55.27	282.22	66.58
Narsarsuaq	61.20	314.16	71.21
Leirvogur	64.18	338.30	70.22
Average	-	-	66.37

表 A-3 Dst index 観測局の地理座標 / 地磁気座標

Dst index Observatory	Geographic Coord.		Geomagnetic Coord.
	Lat.(°N)	Long.(°E)	Lat.(°N)
Hermanus	-34.40	19.22	-33.30
Kakioka	36.23	140.18	26.00
Honolulu	21.32	201.98	21.10
San Juan	18.38	293.88	29.90
Average	-	-	27.58

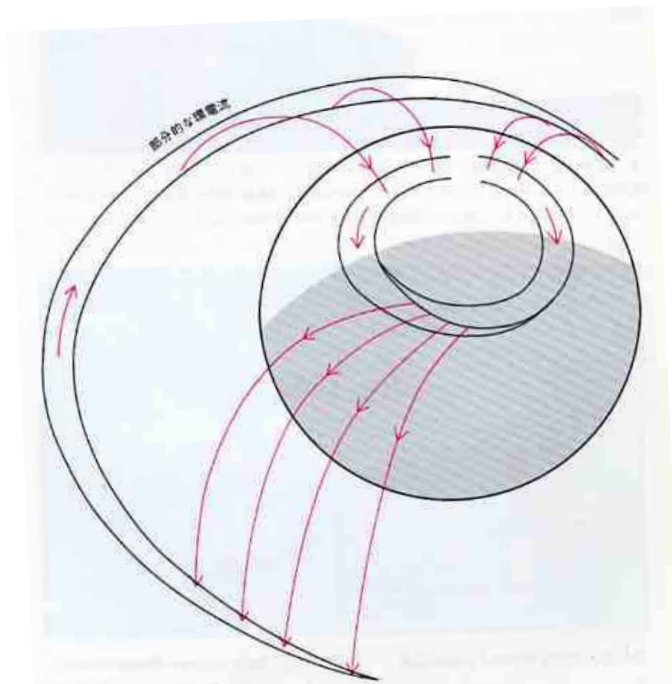


図 A-1 地磁気赤道面での環電流

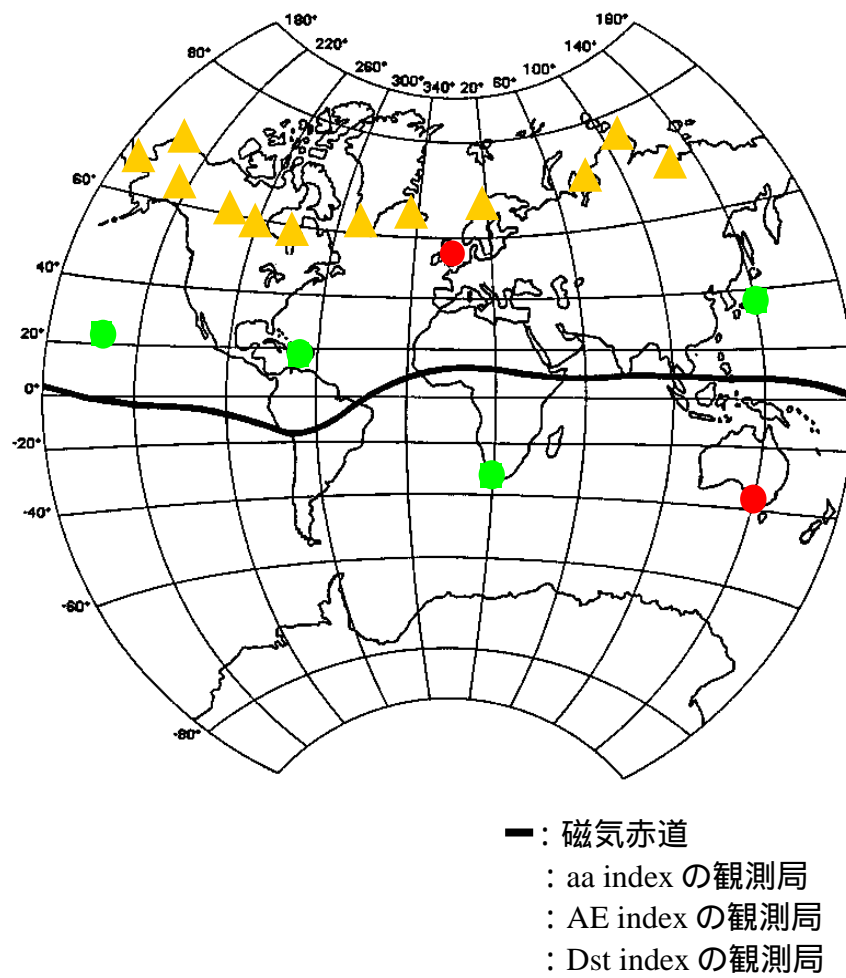


図 A-2 aa index , AE index , Dst index の各観測局の位置

Appendix_B

本文中では、地磁気活動と北極振動の相関を高める要因のひとつとして、極域へのプロトン流入によるオゾン量の減少というプロセスについて考察した。

ここでは、プロトンフラックス上昇後にオゾン量が低下しているかを確認した結果を記述する。

(1) 使用データ / 手法

オゾン量データとして、Goddard Space Flight Center から入手した TOMS によるオゾン全量日平均データを使用した。調査対象期間は 1981 ~ 1991 年にわたる 11 年間である。

4.2.2 項(2)で記述した、プロトンフラックスが高く aa index が激しく変動している時のオゾン量の変化を確認するために、Proton Flux > 100 [pfu] , aa index > +2 (約 39 [nT]) の条件を設定したところ、該当するプロトンイベント発生日(夏季を除く)は、1983/02/04 , 1986/02/07 , 1989/03/13 , 1991/10/28 の 4 ケースであった(表 B-1 参照)。

オゾン全量の変化を確認するめに、1 ヶ月移動平均したものから気候値を作成し、帯状平均オゾン全量アノマリを算出した。さらに、プロトンイベント 3 日前を基準としてイベント - 10 日 ~ + 30 日までの緯度時間断面を作成した。

(2) 結果

オゾン全量の緯度時間断面図を図 B-1 に示す。なお、オゾン観測には太陽光が必要なため冬半球高緯度のデータは存在しない。

プロトンフラックス上昇後に両半球高緯度でオゾン全量の変化がみられる。しかし、冬半球高緯度での明瞭なオゾン量減少を確認することはできなかった。

本解析にはオゾン全量を用いているため、成層圏下部のオゾン量変化をみている可能性もあることから、成層圏上部を重点的に確認する必要がある、今後更なる解析が必要となる。

表 B-1 プロトンフラックスが高く aa index が激しく変動しているケース

date	aa>+2 σ	SPE>100[pfu]
1983/02/04	40.7	340
1986/02/07	40.5	260
1989/03/13	59.9	5553
1991/10/28	44.1	146

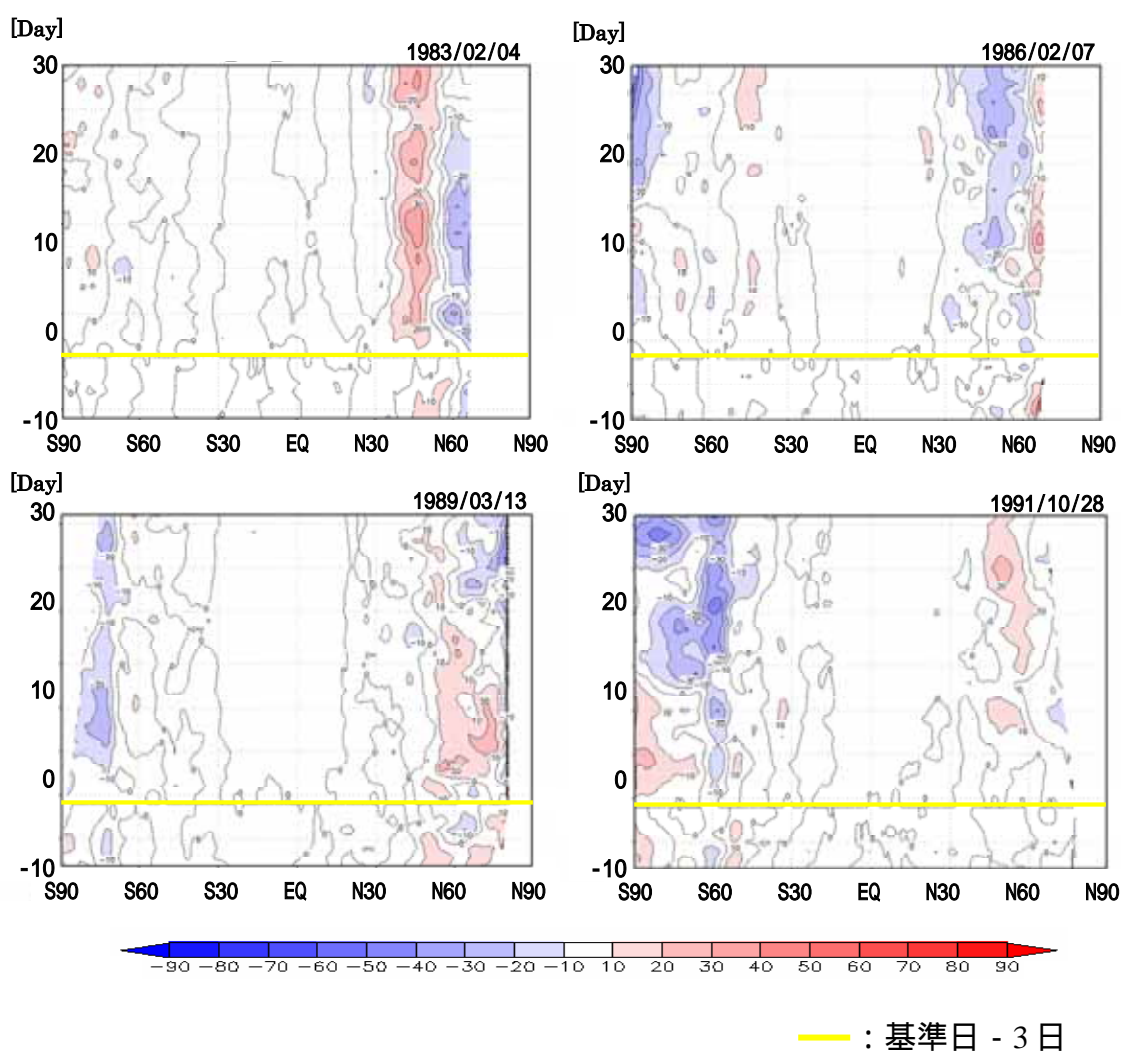


図 B-1 オゾン全量の緯度時間断面