

北極振動に伴う偏西風ジェット気流と
傾圧不安定波動の相互作用の研究

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

藤原冬樹

目次

Abstract	iii
図目次	iv
1 はじめに	1
2 目的	3
3 解析データ	4
4 支配方程式系	5
4.1 基礎方程式系	5
4.2 鉛直構造関数	6
4.3 水平構造関数	7
4.4 3次元ノーマルモード関数展開	8
4.5 スペクトル法の予報方程式	9
4.6 傾圧不安定問題	9
5 データ解析の結果および考察	11
5.1 各固有モードの不安定解	11
5.2 一月気候値の固有モードの構造	12
5.2.1 Mcモード(東西波数4~8)	12
5.2.2 M2モード(東西波数1~8)	13
5.2.3 M3モード(東西波数2~5)	14
5.3 AOに伴う帯状平均東西風の偏差を気候値に上乗せした仮想大気の固有モードの構造	15
5.3.1 Mcモード(東西波数4~8)	15
5.3.2 M2モード(東西波数1~8)	15
5.3.3 M3モード(東西波数2~5)	15
6 結論	17
謝辞	18

Interaction between Baroclinically Unstable Waves and Subtropical and Polar-frontal Jets

FUJIWARA Fuyuki

Abstract

In the upper troposphere, the subtropical jet and the polar-frontal jet exist in both of the Northern and Southern Hemispheres. The strength and location of the polar-frontal jet are variable, whereas that of the subtropical jet is relatively steady. The action of these westerly jets is related to the baroclinically unstable waves. By Tanaka and Tokinaga(2002), it is confirmed that two different kinds of baroclinic instability exist; the Polar mode excited by the baroclinicity of the polar-frontal jet and the Charney mode excited by the baroclinicity of the subtropical jet. These baroclinic instabilities have different feedback processes that make the polar-frontal jet weaker or stronger.

In this study, baroclinic instability of the Northern Hemisphere is investigated, using a method of expansion in 3D normal mode functions introduced by Tanaka and Kung(1989). Here, the 3D normal mode functions consist of vertical structure functions as the vertical normal modes and Hough harmonics as the horizontal normal modes. The basic states used for the linear stability analysis are observed zonal mean wind for strong and weak polar vortex and a virtual one which is added the anomaly by the strength of the AO index to the climatic average.

As a result of the eigenvalue problem for such basic states, we confirmed that the polar mode becomes the most unstable mode exceeding the Charney mode in each wavenumber when the polar vortex is strong enough. And we also confirmed that the structure of dipole Charney mode becomes the polar mode as the strength of polar-frontal jet is increased.

Key Words:

baroclinic instability, zonal mean wind, polar-frontal jet, subtropical jet,
polar mode, Charney mode, Arctic Oscillation

目次

図 1 AO インデックスに回帰した帯状平均東西風．等値線間隔は 1m/s で、実線が西風、破線が東風．	21
図 2 極渦のみを残した仮想大気における帯状平均風速度場．等値線間隔 は 5 m/s で、実線が西風、破線が東風 (Tanaka and Tokinaga 2002 より)	22
図 3 極渦のみを残した仮想大気における不安定モード (Tanaka and Tok- inaga 2002 より)	23
図 4 北極振動指数の 90 日平均	24
図 5 北半球 1 月における帯状平均風速度場 (気候値) ．等値線間隔は 5 m/s で、実線が西風、破線が東風．	25
図 6 1 月気候値における不安定モードの増幅率	26
図 7 1 月気候値における不安定モードの位相速度	26
図 8 AOI に回帰した東西風を 0.5 倍したものを気候値に上乘せした仮想 大気における帯状平均風速度場．等値線間隔は 5 m/s で、実線が西 風、破線が東風．	27
図 9 AOI に回帰した東西風を 1.0 倍したものを気候値に上乘せした仮想 大気における帯状平均風速度場．等値線間隔は 5 m/s で、実線が西 風、破線が東風．	28
図 10 AOI に回帰した東西風を 1.5 倍したものを気候値に上乘せした仮想 大気における帯状平均風速度場．等値線間隔は 5 m/s で、実線が西 風、破線が東風．	29
図 11 AOI に回帰した東西風を 0.5 倍したものを気候値に上乘せした仮想 大気における不安定モードの増幅率	30
図 12 上と同じ不安定モードの位相速度	30
図 13 AOI に回帰した東西風を 1.0 倍したものを気候値に上乘せした仮想 大気における不安定モードの増幅率	31
図 14 上と同じ不安定モードの位相速度	31
図 15 AOI に回帰した東西風を 1.5 倍したものを気候値に上乘せした仮想 大気における不安定モードの増幅率	32
図 16 上と同じ不安定モードの位相速度	32

図 17 極渦の強さを変えて解析した結果出てきた各モードの最大不安定の増幅率を、そのときの極渦の強さについてモード別にプロットしたもの	33
図 18 極渦の強さを変えて解析した結果出てきた各モードの最大不安定の増幅率を、そのときの極渦の強さについて構造別にプロットしたもの	33
図 19 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 4 における Mc モードの不安定構造 . ジオポテンシャル高度の振幅 [m]	34
図 20 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 5 における Mc モードの不安定構造 . ジオポテンシャル高度の振幅 [m]	35
図 21 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 6 における Mc モードの不安定構造 . ジオポテンシャル高度の振幅 [m]	36
図 22 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 7 における Mc モードの不安定構造 . ジオポテンシャル高度の振幅 [m]	37
図 23 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 8 における Mc モードの不安定構造 . ジオポテンシャル高度の振幅 [m]	38
図 24 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 4 における Mc モードの不安定構造 . ジオポテンシャル高度の位相 [°]	39

図 25 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 5 における Mc モードの不安定構造・ジオ ポテンシャル高度の位相 [°]	40
図 26 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 6 における Mc モードの不安定構造・ジオ ポテンシャル高度の位相 [°]	41
図 27 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 7 における Mc モードの不安定構造・ジオ ポテンシャル高度の位相 [°]	42
図 28 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 8 における Mc モードの不安定構造・ジオ ポテンシャル高度の位相 [°]	43
図 29 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 4 における Mc モードの不安定構造・ジオ ポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m]	44
図 30 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 5 における Mc モードの不安定構造・ジオ ポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m]	45
図 31 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 6 における Mc モードの不安定構造・ジオ ポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m]	46
図 32 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 7 における Mc モードの不安定構造・ジオ ポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m]	47

図 33 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 8 における Mc モードの不安定構造。ジオ ポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m]	48
図 34 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 1 における M2 モードの不安定構造。ジオ ポテンシャル高度の振幅 [m]	49
図 35 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 2 における M2 モードの不安定構造。ジオ ポテンシャル高度の振幅 [m]	50
図 36 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 3 における M2 モードの不安定構造。ジオ ポテンシャル高度の振幅 [m]	51
図 37 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 4 における M2 モードの不安定構造。ジオ ポテンシャル高度の振幅 [m]	52
図 38 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 5 における M2 モードの不安定構造。ジオ ポテンシャル高度の振幅 [m]	53
図 39 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 6 における M2 モードの不安定構造。ジオ ポテンシャル高度の振幅 [m]	54
図 40 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 7 における M2 モードの不安定構造。ジオ ポテンシャル高度の振幅 [m]	55

図 41 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 8 における M2 モードの不安定構造 . ジオ ポテンシャル高度の振幅 [m]	56
図 42 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 1 における M2 モードの不安定構造 . ジオ ポテンシャル高度の位相 [°]	57
図 43 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 2 における M2 モードの不安定構造 . ジオ ポテンシャル高度の位相 [°]	58
図 44 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 3 における M2 モードの不安定構造 . ジオ ポテンシャル高度の位相 [°]	59
図 45 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 4 における M2 モードの不安定構造 . ジオ ポテンシャル高度の位相 [°]	60
図 46 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 5 における M2 モードの不安定構造 . ジオ ポテンシャル高度の位相 [°]	61
図 47 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 6 における M2 モードの不安定構造 . ジオ ポテンシャル高度の位相 [°]	62
図 48 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 7 における M2 モードの不安定構造 . ジオ ポテンシャル高度の位相 [°]	63

図 49 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乗せした 仮想大気について、波数 8 における M2 モードの不安定構造・ジオ ポテンシャル高度の位相 [°]	64
図 50 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乗せした 仮想大気について、波数 1 における M2 モードの不安定構造・ジオ ポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m]	65
図 51 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乗せした 仮想大気について、波数 2 における M2 モードの不安定構造・ジオ ポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m]	66
図 52 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乗せした 仮想大気について、波数 3 における M2 モードの不安定構造・ジオ ポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m]	67
図 53 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乗せした 仮想大気について、波数 4 における M2 モードの不安定構造・ジオ ポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m]	68
図 54 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乗せした 仮想大気について、波数 5 における M2 モードの不安定構造・ジオ ポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m]	69
図 55 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乗せした 仮想大気について、波数 6 における M2 モードの不安定構造・ジオ ポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m]	70
図 56 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乗せした 仮想大気について、波数 7 における M2 モードの不安定構造・ジオ ポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m]	71

図 57 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 8 における M2 モードの不安定構造。ジオ ポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m]	72
図 58 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 2 における M3 モードの不安定構造。ジオ ポテンシャル高度の振幅 [m]	73
図 59 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 3 における M3 モードの不安定構造。ジオ ポテンシャル高度の振幅 [m]	74
図 60 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 4 における M3 モードの不安定構造。ジオ ポテンシャル高度の振幅 [m]	75
図 61 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 5 における M3 モードの不安定構造。ジオ ポテンシャル高度の振幅 [m]	76
図 62 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 2 における M3 モードの不安定構造。ジオ ポテンシャル高度の位相 [°]	77
図 63 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 3 における M3 モードの不安定構造。ジオ ポテンシャル高度の位相 [°]	78
図 64 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 4 における M3 モードの不安定構造。ジオ ポテンシャル高度の位相 [°]	79

図 65 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 5 における M3 モードの不安定構造・ジオ ポテンシャル高度の位相 [°]	80
図 66 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 2 における M3 モードの不安定構造・ジオ ポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m]	81
図 67 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 3 における M3 モードの不安定構造・ジオ ポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m]	82
図 68 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 4 における M3 モードの不安定構造・ジオ ポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m]	83
図 69 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした 仮想大気について、波数 5 における M3 モードの不安定構造・ジオ ポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m]	84

1 はじめに

Thompson and Wallace (1998) によって提唱された北極振動 (Arctic Oscillation : AO) が近年注目を浴びている。AO は、北半球冬季の海面更正気圧 (SLP) に経験直交関数 (EOF) 解析を用いたときの EOF-1 として定義される。その空間構造は地表から成層圏下層まで等価順圧的で、北極域を中心とした軸対称構造を持ち、北緯 60 度付近を境界として中緯度の環状域と北極域の変動が互いに逆相関を持つ。このほぼ環状の構造から、AO は北半球環状モード (NAM) と呼ばれることもある。AO を帯状平均風の偏差について見ると、同じように北緯 35 度と 55 度付近の間でシーソーパターンが見られる (図 1)。これは、地衡風の関係から、AO がプラスの時には高緯度の西風ジェットが強まって中緯度のジェットが弱まり、マイナスの時には高緯度ジェットが弱まり中緯度のジェットが強まることを示している。AO は極の周囲の偏西風ジェットつまり極渦の強さの変動であるといえる (山崎 2003)。

AO が正のとき、平均子午面循環は西風偏差が正の領域で赤道向きであり、コリオリ力によって西風が減速される方向に力が働く (Yamazaki and Shinya 1999)。そのため、この南北流による西風の弱化に対抗して西風運動量を高緯度へ運び、西風を強化するようなメカニズムが無ければならない。平均流と波の相互作用の視点からの研究の結果、波の強制力が AO の遷移に寄与していること、また波数ごとに分解して解析した結果、総観規模の波は低緯度側の風の変動に寄与し、波数が 2 や 3 のプラネタリースケールの波が AO の遷移に寄与していることが明らかにされた (Ohhashi and Yamazaki 1999; Yamazaki and Shinya 1999; Limpasuvan and Hartmann 1999)。また、南半球においては、北半球の NAM に対応して南半球環状モード (SAM) と呼ばれる、同じような環状パターンが見られるが (Shiogama et al. 2005 等)、南半球では総観規模擾乱が SAM の状態の遷移に大きく寄与しているのに対し、NAM においてはプラネタリー波と平均東西風の相互作用が大きな役割を果たしている (Limpasuvan and Hartmann 1999)。

先行研究では、傾圧不安定波はその構造によって、チャーニーモード、ポーラーモード、ダイポールモードなどに分けられるとされた (Charney 1947; Tanaka and Kung 1989)。チャーニーモードは、北緯 45 度付近の中緯度を中心に、北と南へ離れるほど位相が西にずれるような「逆くの字」型の構造を持つ傾圧不安定波で、低緯度及び高緯度から西風運動量を中緯度へ運ぶような性質を持つ。一方、ポーラーモードは、北緯 60 付近の高緯度をピークとして、南へ行くほど位相が西にずれる

「ノの字」型の構造を持ち、中緯度から高緯度へ運動量を運ぶように作用する。また、ダイポールモードは、南北に振幅の最大が二つある双極子構造を持つ傾圧不安定波である。Tanaka and Kung (1989) では、3D ノーマルモード展開を用いてこれを解析し、総観規模では主にチャーニーモードが、プラネタリースケールではポーラーもしくはダイポールモードが支配的であることを示した。

傾圧不安定波の挙動には偏西風ジェットが関連している。偏西風ジェットには、北緯 30 度、上空 200 hPa 付近を中心に定常的に吹く亜熱帯ジェットと、北緯 50 ~ 60 度付近を蛇行しながら吹く寒帯前線ジェットがある。AO がプラスになり極渦が強くなると、寒帯前線ジェットは強く現れ蛇行が小さくなり、亜熱帯ジェットは弱くなる。逆に極渦が弱いと、寒帯前線ジェットは大きく蛇行するようになり、帯状平均すると見えなくなる。Tanaka and Tokinaga (2002) では、図 2 のような亜熱帯ジェットを取り去った帯状平均基本場に対して線形不安定解析を行った結果、チャーニーモードは消失し、変わってポーラーモードが現実大気におけるチャーニーモードと同程度の増幅率を持って卓越したことで (図 3)、ポーラーモードが寒帯前線ジェットに対応したモードであるとした。すなわち、亜熱帯ジェットは、その傾圧性によって総観規模にチャーニーモードの波を増幅し、寒帯前線ジェットの傾圧性によってプラネタリー波領域にポーラーモードの波が励起される。

図 4 は、AO の指標である北極振動指数 (AOI) の時系列変化である。Tanaka and Tokinaga (2002) では、この極渦の強い年と弱い年のそれぞれについて偏西風ジェットと傾圧不安定波の相互作用を解析して、極渦が強いときは励起された傾圧不安定が更に極渦を強めようと西風運動量を極域に輸送し、逆に極渦が弱いときは西風運動量を極域から持ち去って更に極渦を弱めようとすることを示した。

2 目的

本研究では、Tanaka and Tokinaga (2002) の研究成果を踏まえて地球大気の傾圧不安定を調べ、東西風を指標として、寒帯前線ジェットの変化に対し、それによって励起される傾圧不安定波について理解することを目的とする。不安定解析には、Tanaka and Kung (1989) で用いられた 3 次元ノーマルモード関数 (以下、3D-NMFs) 展開を使用する。3D-NMFs は、鉛直ノーマルモードとしての鉛直構造関数および水平ノーマルモードとしてのハフ関数 (水平構造関数) から構成されており、これを用いて線形不安定解析を行うことにより、長周期のロスビーモードを残し、高振動数の重力波を除去することで、固有値問題の行列の大きさを効果的に小さくし、気象学的に意味のある不安定解を安定して求めることができる (Tanaka, 1993)。使用する基本場は帯状平均風速度場であり、基本場は赤道を挟んで南北対称であると仮定している。また東西風を北極振動指数 (AOI) に回帰したものを一月の気候値に段階的に上乗せした仮想大気においても同様の解析を行い、寒帯前線ジェットと主な不安定モードとの関係を調べる。

3 解析データ

本研究で用いたデータはNCEP (National Centers for Environmental Prediction; アメリカ環境予測センター) / NCAR (National Center for Atmospheric Research; アメリカ大気研究センター) の再解析データである . その詳細は以下のとおりである .

- 期間: 1949 年 1 月 ~ 1998 年 12 月、月平均値
- 気象要素: u (m/s), Z (gpm), p_s (hPa)
- 水平グリッド間隔: $2.5^\circ \times 2.5^\circ$
- 鉛直グリッド間隔: 1000,925,850,700,600,500,400,300,250,200,150,100,70,50,30,20,10 hPa の 17 層
- 解析範囲: 北半球
- 気候値: 1958 年 1 月 ~ 1997 年 12 月の 40 年間各月の平均値

NCEP/NCAR 再解析データを使用した理由は、同一の数値予報モデルとデータ同化手法を用いて過去 50 年という長期間にわたってできる限り均質に作成したデータセットであり、気候変動の解明、大気大循環の解析と全球のエネルギー循環の研究の際には有用だからである .

4 支配方程式系

4.1 基礎方程式系

球面座標系で大気の状態を表現するプリミティブ方程式は水平方向の運動方程式、熱力学の式、連続の式、状態方程式、静力学平衡の式により以下のように表現できる（小倉, 1978）。

$$\frac{\partial u}{\partial t} - 2\Omega v \sin \theta + \frac{1}{a \cos \theta} \frac{\partial \phi}{\partial \lambda} = -\mathbf{V} \cdot \nabla u - \omega \frac{\partial u}{\partial p} + \frac{\tan \theta}{a} uv + F_u \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + 2\Omega u \sin \theta + \frac{1}{a} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} = -\mathbf{V} \cdot \nabla v - \omega \frac{\partial v}{\partial p} - \frac{\tan \theta}{a} uv + F_v \quad (2)$$

$$\frac{\partial C_p T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla C_p T + \omega \frac{\partial C_p T}{\partial p} = \omega \alpha + Q \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0 \quad (4)$$

$$p\alpha = RT \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial p} = -\alpha \quad (6)$$

なお大気中では水平スケールがおよそ 10km 以上の現象では、良い精度で静力学平衡が成り立っている。

ここで式 (3) において両辺 C_p で除し整理して、

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla T = \frac{\omega}{p} \left(\frac{RT}{C_p} - p \frac{\partial T}{\partial p} \right) + \frac{Q}{C_p} \quad (7)$$

ここで静的安定度を

$$\gamma \equiv \frac{RT}{C_p} - p \frac{dT}{dp} = \frac{RT}{C_p} - \frac{dT}{d \ln p} \quad (8)$$

と定義した。全球平均の静的安定度を γ_0 とすると、これは水平時間一様で鉛直方向のみの関数となる。また温度 T と静力学平衡により結びつくジオポテンシャル

ϕ は全球平均からの偏差であらわすことにする．式 (8) を式 (7) に代入して両辺に p/γ_0 をかけて p で微分すると、

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial pT}{\partial p \gamma_0} \right) - \frac{\partial \omega}{\partial p} = -\frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{p}{\gamma_0} \mathbf{V} \cdot \nabla T \right) + \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{pQ}{C_p \gamma_0} \right) \quad (9)$$

これに式 (5)、(6) を用いて変形すると、

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(-\frac{\partial p^2}{\partial p \gamma_0 R} \frac{\partial \phi}{\partial p} \right) + \nabla \cdot \mathbf{V} = -\frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{p}{\gamma_0} \mathbf{V} \cdot \nabla T \right) + \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{pQ}{C_p \gamma_0} \right) \quad (10)$$

となる．ここで地表面気圧で規格化した σ 座標 $\sigma = p/p_s$ 、地球回転角速度で規格化した時間 $\tau = 2\Omega t$ を用いて、水平風速 $\mathbf{V} = (u, v)$ とジオポテンシャル ϕ に関するプリミティブ方程式は式 (1),(2),(10) から以下のように行列形式であらわされる．

$$M \frac{\partial U}{\partial \tau} + LU = N + F \quad (11)$$

この各要素は次のようになる．

$$U = (u, v, \phi)^T \quad (12)$$

$$M = 2\Omega \text{diag}(1, 1, -\frac{\partial \sigma^2}{\partial \sigma} \frac{\partial}{R\gamma} \frac{\partial}{\partial \sigma}) \quad (13)$$

$$L = \begin{pmatrix} 0 & -2\Omega \sin \theta & \frac{1}{a \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \\ 2\Omega \sin \theta & 0 & \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \theta} \\ \frac{1}{a \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} & \frac{1}{a \cos \lambda} \frac{\partial \cos \theta}{\partial \theta} & 0 \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$N = \begin{pmatrix} -V \cdot \nabla u - \omega \frac{\partial u}{\partial \sigma} + \frac{\tan \theta}{a} uv \\ -V \cdot \nabla v - \omega \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{\tan \theta}{a} uv \\ \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{\sigma^2}{R\gamma} \mathbf{V} \cdot \nabla \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} \right) \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$F = (F_u, F_v, \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{\sigma Q}{C_p \gamma} \right)) \quad (16)$$

なお、式 (10) では温度の偏差の鉛直移流は ω が小さいので無視した．

4.2 鉛直構造関数

鉛直構造関数の導出は Kasahara (1984) の Appendix に詳しいので、ここでは簡潔に記述する．式 (11) において、基本状態とこれからの摂動として表す．ここで

基本状態として静止大気を考えると摂動部分だけが残り、2次の項から成り立つ移流項や曲率項がスケールアナリシスにより無視できるほど小さいことがわかる。さらに、摩擦と非断熱加熱を無視すると以下のように簡略化できる。

$$\mathbf{M} \frac{\partial}{\partial \tau} \mathbf{U} + \mathbf{L} \mathbf{U} = 0 \quad (17)$$

ここで鉛直方向に任意の関数 $G(\sigma)$ を考えて (u, v, ϕ) を変数分離すると、次のようになる。

$$u(\lambda, \theta, \sigma) = G(\sigma)u(\lambda, \theta)$$

$$v(\lambda, \theta, \sigma) = G(\sigma)v(\lambda, \theta)$$

$$\phi(\lambda, \theta, \sigma) = G(\sigma)\phi(\lambda, \theta)$$

式 (17) の熱力学成分を取り出し、上の式をほどこして変形すると、

$$\frac{1}{G} \frac{\partial}{\partial \sigma} \frac{\sigma^2}{\gamma_0} \frac{\partial G}{\partial \sigma} = \frac{\nabla \cdot \mathbf{V}}{\frac{\partial \phi}{\partial t}} \quad (18)$$

とできる。この左辺は鉛直方向のみ、右辺は水平方向のみの関数で表されており変数分離しているので、(式 22 左辺) = $-1/gh = \text{const.}$ とおいて鉛直方向の項で考え、 σ についての微分方程式と見て変形したものを解けば、分離定数 $h = h_m$, ($m = 0, 1, 2, \dots$) ごとに鉛直構造関数が得られる。この h_m は等価深度と呼ばれ Laplace の潮汐方程式において浅水方程式の平均深度 h に対応するものである。本研究では Tanaka and Tokinaga (2002) と同じ全球平均鉛直温度場を当てはめ、鉛直構造関数を $m = 0, 1, 2, \dots, 11$ までを使用した。 m は数値解における鉛直方向の節の数を表す。 $m = 0$ が順圧モードである。

4.3 水平構造関数

水平構造関数の導出は Swarztrauber and Kasahara (1985) に詳しいので、こちらも行列を用いて簡潔に書く。

鉛直構造関数の計算で求めた等価深度 h_m を使用し、鉛直第 m モードの Laplace の潮汐方程式は次のように書くことができる。

$$\mathbf{M}_m \frac{\partial}{\partial \tau} \mathbf{U}_m + \mathbf{L} \mathbf{U}_m = 0 \quad (19)$$

ただし、

$$\mathbf{M}_m = 2\Omega \text{diag}(1, 1, \frac{1}{gh_m}) \quad (20)$$

さらにスケール行列 \mathbf{X}_m 、 \mathbf{Y}_m を

$$\mathbf{X}_m = \text{diag}(\sqrt{gh_m}, \sqrt{gh_m}, gh_m) \quad (21)$$

$$\mathbf{Y}_m = 2\Omega \text{diag}(\sqrt{gh_m}, \sqrt{gh_m}, 1) \quad (22)$$

を用いて変形すると、式は固有値問題に帰着でき、次のようにできる。

$$i\sigma_{slm} \mathbf{H}_{slm} + (\mathbf{Y}_m^{-1} L \mathbf{X}_m) \mathbf{H}_{slm} = 0 \quad (23)$$

ここで s は東西波数、 l は南北モード、 m は鉛直モードである。この \mathbf{H}_{slm} がハフ調和関数（水平構造関数）である。固有値問題で得られた固有ベクトルが水平波動の構造を、固有振動数がその波動の時間方向の振動数（周期）を表す。

ハフ調和関数は南北方向の構造を記述するハフベクトル関数 Θ_{slm} と東西方向の波動を表す複素三角関数 $e^{is\lambda}$ に分離でき、

$$\mathbf{H}_{slm}(\lambda, \theta) = \Theta_{slm}(\theta) e^{is\lambda} = (\mathbf{U}, -i\mathbf{V}, \mathbf{Z})_{slm}^T e^{is\lambda} \quad (24)$$

となる。高度の水平構造関数の南北モードは奇数番号が赤道を挟んで南北対称なモードである。

4.4 3次元ノーマルモード関数展開

3次元ノーマルモード関数 Π_{slm} （以下、3D-NMFs）は前述の鉛直構造関数 G_m と水平構造関数 H_{slm} を結合させて定義される。すなわち、

$$\Pi_{slm}(\lambda, \theta, \sigma) \equiv G_m(\sigma) \mathbf{H}_{slm}(\lambda, \theta) = G_m(\sigma) \Theta_{slm}(\theta) e^{is\lambda} \quad (25)$$

である。なお 3D-NMFs は以下の性質を満たすことがわかっている。

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \Pi_{slm} \cdot \Pi_{s'l'm'}^* \cos \theta d\sigma d\lambda d\theta = \delta_{ss'} \delta_{ll'} \delta_{mm'} \quad (26)$$

$$\mathbf{U}(\lambda, \theta, \sigma, \tau) = \sum_{s=-\infty}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} w_{slm}(\tau) \mathbf{X}_m \Pi_{slm}(\lambda, \theta, \sigma) \quad (27)$$

$$w_{slm}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \mathbf{U}(\lambda, \theta, \sigma, \tau) \cdot \mathbf{X}_m^{-1} \Pi_{slm}^*(\lambda, \theta, \sigma) \cos \theta d\sigma d\lambda d\theta \quad (28)$$

式 (27) は直交性を、式 (28)、(29) は 3D-NMFs による変換・逆変換を表している。

4.5 スペクトル法の予報方程式

大気の運動を表す式は前述の 3D-NMFs を用いることで物理空間から波数空間に変換することができる．式 (11) と 3D-NMFs の内積をとると、

$$\left\langle \mathbf{M} \frac{\partial}{\partial \tau} \mathbf{U} + \mathbf{L}\mathbf{U} - \mathbf{N} - \mathbf{F}, \mathbf{Y}_m^{-1} \Pi_{slm} \right\rangle = 0 \quad (29)$$

であるので、式 (29) の性質を利用して、

$$\frac{dw_i}{d\tau} + i\sigma_i w_i = -i \sum_{j=1}^K \sum_{k=1}^K r_{ijk} w_j w_k + f_i, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, K) \quad (30)$$

ここで ijk は三重添え字 $slm, s'l'm', s''l''m''$ を略したものである．非線形項の中の r_{ijk} は相互作用係数であり成分はすべて実数である．これは 3D-NMFs の三重積を計算することで得られる．厳密には全波数 K はそれぞれ S, L, M を無限までとってやらねばならないが、現実的にはある波数で打ち切ることになり、これを波数切断という．本研究では南北モードは $l = 1, 3, 5, \dots, 19$ の南北対称 10 モード、東西波数は $s = 0, 1, 2, \dots, 20$ まで、鉛直モードは $m = 0, 1, 2, \dots, 6$ までを用いた．

4.6 傾圧不安定問題

次に式 (30) を基本場 \bar{w}_k に対して線形化すると、

$$\frac{dw_i}{d\tau} + i\sigma_i w_i = -i \sum_{j=1}^K \left(\sum_{k=1}^K r_{ijk} + r_{ikj} \right) \bar{w}_k w_j + f_i, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, K) \quad (31)$$

とできる．ここで \bar{w}_k は大気の基本状態を表す．負の東西波数の展開係数と正の東西波数の展開係数の間には複素共役 $w_{(-s)lm} = w_{slm}^*$ の関係があるから、式 (31) を $s \geq 0$ の項について行列形式で書き直すと、

$$\frac{d\mathbf{w}}{d\tau} + i\mathbf{D}\mathbf{w} = -i\mathbf{B}\mathbf{w} - i\mathbf{C}\mathbf{w}^* + \mathbf{f} \quad (32)$$

となる．ここで、

$$\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_i, \dots, w_K)^T \quad (33)$$

$$\mathbf{f} = (f_1, f_2, \dots, f_i, \dots, f_K)^T \quad (34)$$

$$\mathbf{D} = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i, \dots, \sigma_K)^T \quad (35)$$

である．ただし K は $s \geq 0$ における全波数である．行列 B 、 C は基本状態の展開係数によりつくられる． (i, j) 成分について書くと、

$$b_{ij} = \sum_{k=1}^K (r_{ijk} + r_{ikj}) \bar{w}_k, (s') \geq 0 \quad (36)$$

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^K (r_{ijk} + r_{ikj}) \bar{w}_k, (s') < 0 \quad (37)$$

とできる．ここで基本状態が帯状風のみであるとすると、 $s \neq 0$ では $\bar{w}_k = 0$ である．東西波数の関係から行列 B は $s = s'$ のとき（つまり対角ブロック）のみ実数であり、ほかの成分はすべて 0 である．また行列 C は消える．さらに非粘性を仮定して f を無視すると式 (33) は東西波数ごとに次のように表すことができる．

$$\frac{d\mathbf{w}_s}{d\tau} = -i(\mathbf{B}_s + \mathbf{D}_s)\mathbf{w}_s, (s = 1, 2, 3, \dots, S) \quad (38)$$

これに $\mathbf{w}_s(\tau) = \xi_s e^{-i\nu_s \tau}$ という解を仮定して代入すると、

$$-i\nu_s \xi_s e^{-i\nu_s \tau} = -i(\mathbf{B}_s + \mathbf{D}_s)\xi_s e^{-i\nu_s \tau}, (s = 1, 2, 3, \dots, S) \quad (39)$$

$$\nu_s \xi_s = (\mathbf{B}_s + \mathbf{D}_s)\xi_s, (s = 1, 2, 3, \dots, S) \quad (40)$$

となる．これにより、固有値として ν_s が、固有ベクトルとして ξ_s がそれぞれ求まる．ここで、 ν_s の虚部は不安定解の増幅率、実部は位相速度、 ξ_s は解の構造を表すベクトルを表している．

5 データ解析の結果および考察

前章で説明した方法を用いて、まず、帯状平均風速度場の 1958~97 年の 1 月気候値 (図 5) を基本場として線形不安定問題を数値的に解いた。次に、図 1 は、AO インデックスに回帰した東西平均東西風の緯度-高度断面 (山崎 2003) であるが、これを基準として気候値に段階的に上乘せすることで、AO に伴って極渦が強い時の大気の状態を仮想的に作ることができる。これを利用して、この東西風偏差を 0.5 倍、1.0 倍、1.5 倍としたものをそれぞれ気候値に上乘せし、そのそれぞれを基本場として線形不安定解析を行った。

5.1 各固有モードの不安定解

図 6、7 は、東西風の 1 月気候値を線形不安定解析し、導出されたそれぞれの不安定解の増幅率、位相速度を東西波数について表したものである。このとき、増幅率と位相速度の東西波数間の連続性から、図 6 のように三つのモードに大きく分けることができる。主に波数 5 以上の総観スケールで最も支配的なモードを Mc、波数 2~4 のプラネタリースケールで卓越しているモードを M2、波数 1 以外では卓越しないモードを M3 とする。Mc は、最も不安定な解の増幅率は波数 8 におけるおよそ 0.42、また主要な不安定解の位相速度はおよそ 7~9 °/day となっている。この位相速度は北半球の大気平均風速とほぼ一致している。

次に、気候値に図 1 の値を 0.5 倍したものを上乘せした仮想大気 (図 8) を基本場として同じように線形不安定問題を数値的に解いたところ、図 11、12 のようになった。これによると、波数 2~4 のプラネタリースケールでは M2 モードが卓越し、波数 5 以上の総観規模においては Mc モードが卓越している。また、波数 1~5 にかけて M3 モードが見られる。最も不安定な解の増幅率は Mc が波数 8 でおおよそ 0.43、M2 が波数 6 で約 0.25、M3 モードが波数 4 でおおよそ 0.14。また、位相速度は平均して 7~8 °/day であり、波数が増えてくると約 10 °/day で一定となる。

さらに、気候値に図 1 の値を 1.0 倍したものを上乘せした仮想大気 (図 9)、1.5 倍したものの仮想大気 (図 10) をそれぞれ線形不安定解析を行った結果が図 13、14、15、16 である。気候値のみの場合とあわせてそれぞれの増幅率を比べてみると、各不安定解のうち Mc と M3 は極渦が強くなるに従って少しずつ不安定性が減少し、M2 は逆に少しずつ不安定さが増していくのがわかる。図 17 は、各モードに

おける最も増幅率が大きい不安定解の増幅率を、極渦の強さについてプロットしたものであるが、極渦の強弱における増幅率の変化はそれほど大きいものではないでことがわかる。これは、Tanaka and Tokinaga (2002) で言われたような、極渦が強くなるに従ってそれぞれのモードが強まったり弱まったり、あるいは消失することによって運動量輸送が変化するという理論は正確ではないのではないかと示唆するものである。

次に、線形不安定解析によって現れたそれぞれの不安定解について空間構造を調べ、どのような特徴を持ったモードなのかを見た。図 19 ~ 69 は、各不安定解の振幅と位相の緯度-高度分布および順圧高度場で見えた水平構造である。左上が気候値、右上、左下、右下がそれぞれ図 1 の値を 0.5 倍、1.0 倍、1.5 倍したものを上乗せした仮想大気についての図で、仮想大気 N は東西波数を表している。

5.2 一月気候値の固有モードの構造

5.2.1 Mc モード (東西波数 4 ~ 8)

まず、振幅の緯度-高度断面 (図 19 ~ 23 左上) を見ると、総観規模である東西波数 8 における不安定の振幅は主に対流圏内の北緯 30 ~ 60 度の、地上から上空約 100 hPa の範囲に分布しており、北緯 40 度付近においては小さな振幅が成層圏上層まで及んでいる。振幅の最大は北緯 45 度、地上から上空約 400 hPa に存在している。また、東西波数が小さくスケールが大きくなるにつれて、振幅の範囲は次第に南北および鉛直方向に広がり、振幅の中心は地表から離れて高度を上げながら北上する。そして東西波数 4 になると、振幅は北緯 20 ~ 75 度まで広がり、主な振幅は対流圏内だが、大きい振幅の一部は成層圏へと伝播しており、またその緯度も北緯 50 ~ 60 度付近へ北上している。また、振幅の最大は北緯 50 度、上空 200hPa 付近にあり、その絶対値も総観規模と比べて大きい。

次に位相の緯度-高度断面 (図 24 ~ 28 左上) を見ると、まず東西波数 8 について、振幅の大きい範囲においては、振幅の最大が存在する北緯 45 度付近から、南北に離れるほど、また高度が上がるほど位相が西へ傾くようなチャーニーモードの構造をしているのがわかる。そして、スケールが大きくなるにつれて高緯度低層における位相が進み、高緯度から南下するほど位相が西にずれるようなノの字型のポーラーモードに似た構造となる。これは、総観スケールでは西風運動量を

高緯度および低緯度から中緯度へ輸送し、プラネタリースケールでは高緯度へ輸送する作用を持つことを示す。

また、順圧高度場（図 29～33 左上）では、位相の図で見たように、総観規模では中緯度の振幅のピークを中心に南北に離れるほど位相が西へずれているが、スケールが大きくなるに従って振幅の最大が北上して位相が進み、南下するほど位相が西へずれるような構造になることが確認できる。

5.2.2 M2 モード（東西波数 1～8）

振幅の緯度-高度断面（図 34～41 左上）から、東西波数 8 では、高度 100hPa 以下の対流圏においては主に、北緯 30～40 度付近、45～70 度付近の二つの振幅が存在するダイポールモードの構造をしている。南側の振幅は中心が北緯約 35 度の地表付近、北側の中心が北緯約 55 度の上空約 400hPa に存在し、その値は北側の方が大きい。また、北緯 35 度付近の成層圏上層にも大きな振幅が見られる。東西波数が小さくなるとそれぞれの振幅は大きくなりながら北上し、北側の振幅からは成層圏へも強く伝播するようになる。そして、波数 2 ほどのプラネタリースケールになると、二つのピークの中心はそれぞれ北緯 50 度と 70 度、高度はどちらも約 200hPa の位置に見られる。

ここで波数 6 を見ると、南側の振幅がはっきりと見られない。また、波数 5 では南側の振幅が北側とくっついてしまっている。順圧高度場（図 50～57 左上）で見ても、波数 6 では南側の振幅が現れておらず、波数 5 でも南側の振幅は北西側の振幅と繋がり、チャーニーモードのような構造となっている。また、その他の波数においても、南側のピークは振幅が比較的小さくならかな構造をしており、その中心は北側のピークの中心と比べて少し位相が遅れている。

ここで位相（図 42～49 左上）を見ると、南側の振幅の存在する北緯 40～50 度付近においては上空に行くほど西へ傾く傾圧構造、南側の振幅に当たる北緯 50～70 度においては鉛直に直立する順圧構造を持っていることがわかる。このことから、南側のピークは高度によってその中心が西へずれているため、順圧高度場で見ると鉛直方向に打ち消しあってしまい小さくならかな構造になったと考えられる。また、南北鉛直断面の図（図 39 左上）において東西波数 6 における南側の振幅が見られなくなったことについても、南側の振幅の鉛直構造が傾いていたため南側のピークが打ち消されてしまっていたと考えられる。さらに、総観スケールにおいては中緯度の位相が最も進んでおり南北に離れるに従って西へずれるチャーニー

モードに似た構造、プラネタリースケールでは高緯度で最も進んでおり南下するに従って西へずれるポーラーモードに似た構造となっている。これにより、 M_c の場合と同じく、総観スケールでは中緯度に、プラネタリースケールでは高緯度に西風運動量を収束させる作用を持つことが分かる。

5.2.3 M3 モード（東西波数 2 ~ 5）

振幅の緯度-高度断面（図 58 ~ 61 左上）では、東西波数 5 において、対流圏内には北緯約 30 度、50 度、65 度の三カ所にピークが見られた。これはトリポールモードの構造である。真ん中の振幅は最大が地表にあり、他の二つと比べて規模が小さい。北側と南側の振幅は上空約 200hPa を中心としており、南側は振幅の範囲が広くゆるやかなのに対して、北側の振幅は値が大きくコンターが混んでいる。このモードも規模が大きくなるに従って振幅が大きくなり、波数 2 になるとその中心も北緯 45 度、60 度、75 度にまで北上した。また、成層圏においても広範囲にわたって伝播している。

位相の図（図 62 ~ 65 左上）からはわかりにくいですが、高緯度ではほぼ順圧構造で、南へ行くほど、振幅が上空に行くに従って西へ傾く傾圧構造になっている。順圧高度場（図 66 ~ 69 左上）についても、南北三つのうち南のピークほどなだらかで振幅が小さく、位相が西へずれていることから、高緯度は順圧構造で南下するに従って傾圧構造となるということがわかる。また、位相は全ての波数において北緯 40 度付近で最も進んでおり、チャーニーモードのように西風運動量を中緯度へ運ぶ作用を持つと考えられる。

全体で見ると、プラネタリースケールでは M_2 、総観スケールでは M_c が支配的であり、西風運動量をそれぞれ中緯度、高緯度に輸送する働きを持つ。しかし、プラネタリースケールにおける M_2 モードの構造は高緯度における位相の南北の傾きが小さいため高緯度への輸送が少なく、全体的には中緯度へ収束させる作用が卓越していると考えられる。

5.3 AOに伴う帯状平均東西風の偏差を気候値に上乘せした仮想大気の固有モードの構造

5.3.1 Mcモード（東西波数4～8）

振幅の緯度-高度断面（図19～23）を見ると、極渦が強くなるにつれて、振幅が少しずつ小さくなり、またその中心はすこしずつ南下している。総観規模においてはあまり大きな変化は見られないが、ピークの振幅と高度が少しずつ下がっているのがわかる。図24～28の位相の緯度-高度断面では、気候値と比べて、高緯度側大気の下層で位相が進んでいる。それによって順圧高度場（図29～33）では、くの字型の北半分の傾きが小さくなって、やがてノの字型のポーラーモードのような構造になっている。また、プラネタリースケールでは振幅の高緯度側に集中していたピークが中緯度へ降りてきているのがわかる。

5.3.2 M2モード（東西波数1～8）

振幅の緯度-高度断面（図34～41）から、全ての東西波数において、極渦が強くなるにつれて南側の振幅が小さく、北側の振幅が大きくなる傾向があることが分かる。成層圏への伝播も、プラネタリースケールでは対流圏内の北側のピークと同程度まで増幅している。また、総観規模においては南側のピークが北側の振幅と合体してはっきりしなくなっている。また位相の図（図50～57）では、傾圧的な構造を持っていた南側の振幅でも順圧的な構造に近づいてゆき、北から南へ行くに従って位相が西へずれるポーラーモード型の構造になる傾向が見られる。順圧高度場（図42～49）で見ても、南側の振幅が北東方向へ引き延ばされ、その方向にある北側の振幅と合体して、ポーラーモードの構造であるノの字型の水平構造を持つようになることがわかる。

5.3.3 M3モード（東西波数2～5）

振幅の緯度-高度断面（図58～61）では振幅の分布は極渦の強さによってあまり変わらないが、真ん中および北側の振幅が少しずつ大きくなっており、対照的に南側は振幅が小さく不明瞭になっている様子が分かる。また、成層圏の振幅に関しては、プラネタリースケールでは振幅がより大きく、総観規模ではより小さくなっている。位相の緯度-高度断面（図62～65）からは、M2モードと同じく、傾

圧的な構造を持っていた中緯度部分が順圧的な構造に近づき、位相が北から南へ行くに従って西へずれるポーラーモードのような構造を持つようになることがわかる。図 66～69 の順圧高度場からも、最も南側の振幅が北東方向に引き延ばされて合体し、ノの字型のポーラーモードの構造に近づく様子が見て取れる。このまま極渦を強くしていくと、トリポールモードがダイポールモードへ、それがさらにポーラーモードへと構造が変質してゆくと考えられる。

以上の結果を踏まえて、図 17 をそれぞれの構造ごとに分類してプロットしたものが図 18 である。Tanaka and Tokinaga (2002) では、極渦が強い時と弱い時で現れる不安定モードの構造が異なることから、それぞれ固有の構造を持ったモードが増幅あるいは減衰することにより最大不安定モードが入れ替わり、それによって極渦との相互作用が駆動されるとされていた。しかしこの図を見ると、極渦が強くなるに従って各モードの構造が連続的に変化していることがわかる。

これらの解析により、傾圧不安定モードが極渦へ相互作用するにあたって、極渦の強さによって励起される最大不安定モードが入れ替わることよりも、それまで存在した不安定モードが変質して極渦への作用に影響を及ぼすことによる寄与が大きいことが示唆された。

6 結論

本研究では、Tanaka and Tokinaga (2002) を参考に、北極振動に伴う寒帯前線ジェットとチャーニーモードやポーラーモードなどの傾圧不安定波動との関係を調べるのが目的であったが、結果として、ジェットの強弱に対応する傾圧不安定波動の挙動について新しい知見を得ることができた。以下に結論としてまとめる。

本研究の三次元ノーマルモード関数展開による傾圧不安定解析の結果から、気候値においては東西波数 2 ~ 4 のプラネタリースケールで卓越している不安定波 M2 モードは南北に振幅の最大を二つ持つようなダイポールモードの構造を持ち、西風運動量を低緯度から中緯度へ輸送している。一方で波数 5 以上の総観スケールで卓越する Mc は中緯度で位相が最も進んだチャーニーモードの構造を持っており、全体として高緯度および低緯度から中緯度へ西風運動量を収束させるように働く。また極渦を強めた仮想大気において、Mc モードは極渦が強くなるに従って、振幅は同じ緯度に留まりながら、全体的に北へ行くほど東へ傾くようなノの字型のポーラーモードに似た構造に変化していた。一方 M2 モードは、気候値においては北緯 45 度付近と 70 度付近に南北で二つのピークを持つダイポールモードの構造をしていたが、極渦が強まるに従って、南側の振幅の構造が南北に傾いて北東側の振幅と繋がり、高緯度をピークとして南へ行くほど西へ傾くようなポーラーモード構造に変化した。これにより、西風運動量を低緯度から高緯度へ一気に輸送する働きを持つようになった。

これまでの研究では、Mc、M2 等のそれぞれのモードがチャーニーモード、ダイポールモード、ポーラーモード等に 1 対 1 で対応し、それが極渦の強弱に応じて増幅してきたり、弱まったりあるいは消失したりして、卓越するモードが交替することによって極渦へ相互作用を及ぼすと考えられてきた。しかし、本研究において、運動量を極付近まで運び極渦を強化する作用には、特定のモードの盛衰だけではなく、モード自体の構造の変化による運動量輸送特性の変化が寄与していることが分かった。今後の課題としては、極渦の強弱に対応する傾圧不安定波の構造の変化において、本研究の結果のような挙動を示すのはなぜかを考察し、メカニズムを体系化する。また、AO に伴う極渦の変化に伴う傾圧不安定波動の変質と、それによる寒帯前線ジェットの強化・弱さを定量化することで AO の予測の向上に繋がると期待される。

謝辞

本研究を進めるにあたり、筑波大学計算科学研究センターの田中博教授には本研究の動機となる論文の紹介、研究手法の提案、数多くの図の作成、考察等の適切な御指導を賜り、心から感謝しております。

また、同研究センターの寺崎康児氏には大循環ゼミの場において多数のご助言、ご意見を頂き誠に有難うございました。

最後に、ともに一年間修士研究に取り組んできた同大学生命環境科学研究科の皆様には時折よき相談相手となって頂きましたことを感謝しております。

参考文献

- Charney, J. G., 1947: The dynamics of long wave in a baroclinic flows. *J. Meteor.*, **4**, 135-162.
- Limpasuvan, V. and D. L. Hartmann, 1999: Eddies and the annular modes of climate variability. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 3133-3136..
- Ohhashi, Y. and K. Yamazaki, 1999: Variability of the Eurasian pattern and its interpretation by wave activity flux. *J. Meteor. Soc. Japan*, **77**, 495-511.
- Shiogama, H., T. Terao, H. Kida, and T. Iwashima, 2005 : Roles of low- and high-frequency eddies in transitional process of the Southern Hemisphere annular mode. *J. Clim.*, **18**, 782-794.
- Tanaka, H.L., 1993: Blocking formation by the upscale energy cascade. Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. *WMO Weather Prediction Research Programmes*, **No.18**, 2. 12.
- Tanaka, H.L. and E.C Kung, 1989: A study of low-frequency unstable planetary waves in realistic zonal and zonally varying basic states, *Tellus*, **41A**, 179-199.
- Tanaka, H.L. and H. Tokinaga, 2002: Baroclinic instability in high latitudes induced by polay vortex: a connection to the Arctic Oscillation, *J. Atmos. Sci.*, **59**, 69-82.
- Tompson, D. W.J., and J. M.Wallace, 1998: The Arctic oscillation signiture in the wintertime geopotential height and height and temperature field, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 1297-1300.

Thompson, D. W.J., and J. M. Wallace, 1999a: Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to month variability. *J. Climate.*, **13**, 1000-1016.

Yamasaki, K and Y. Shinya, 1999: Analysis of the Arctic Oscillation simulated by ACCM. *J. Meteor. Soc. Japan*, **77**, No.6.

山崎孝治, 2003 : 北極振動の概要. 気象研究ノート, **206**, 71-107.

Zonal Mean U (AO-regressed)

U [m/s]

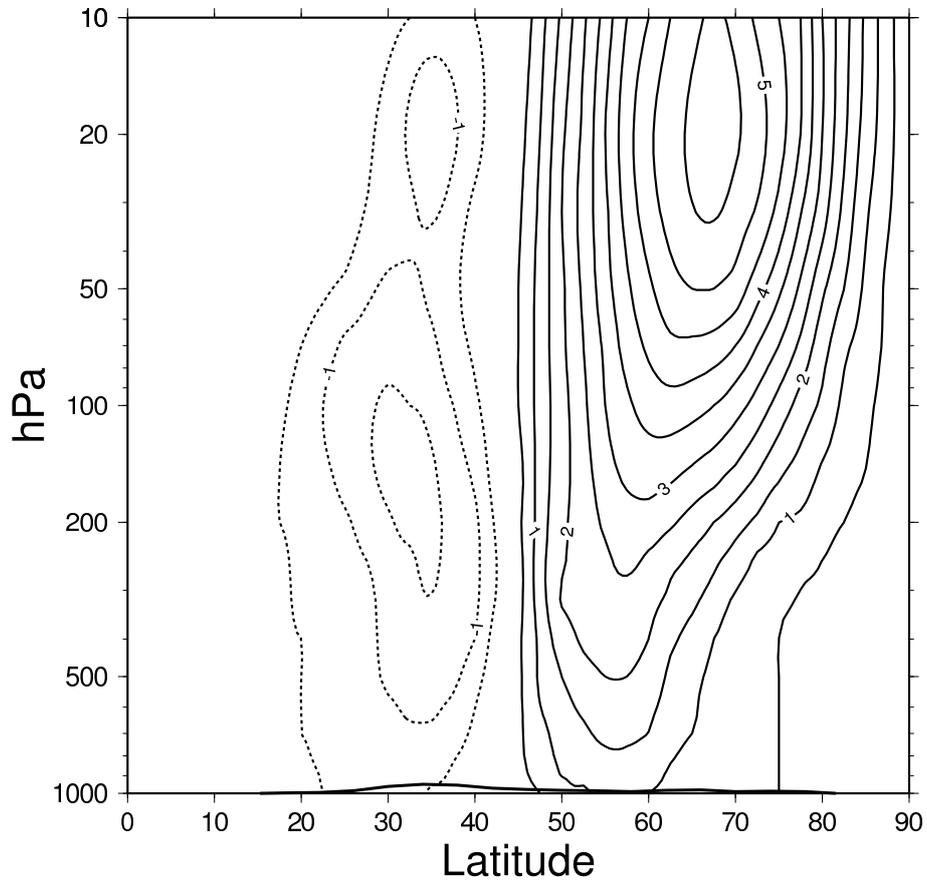


図 1: AO インデックスに回帰した帯状平均東西風 . 等値線間隔は 1m/s で、実線が西風、破線が東風 .

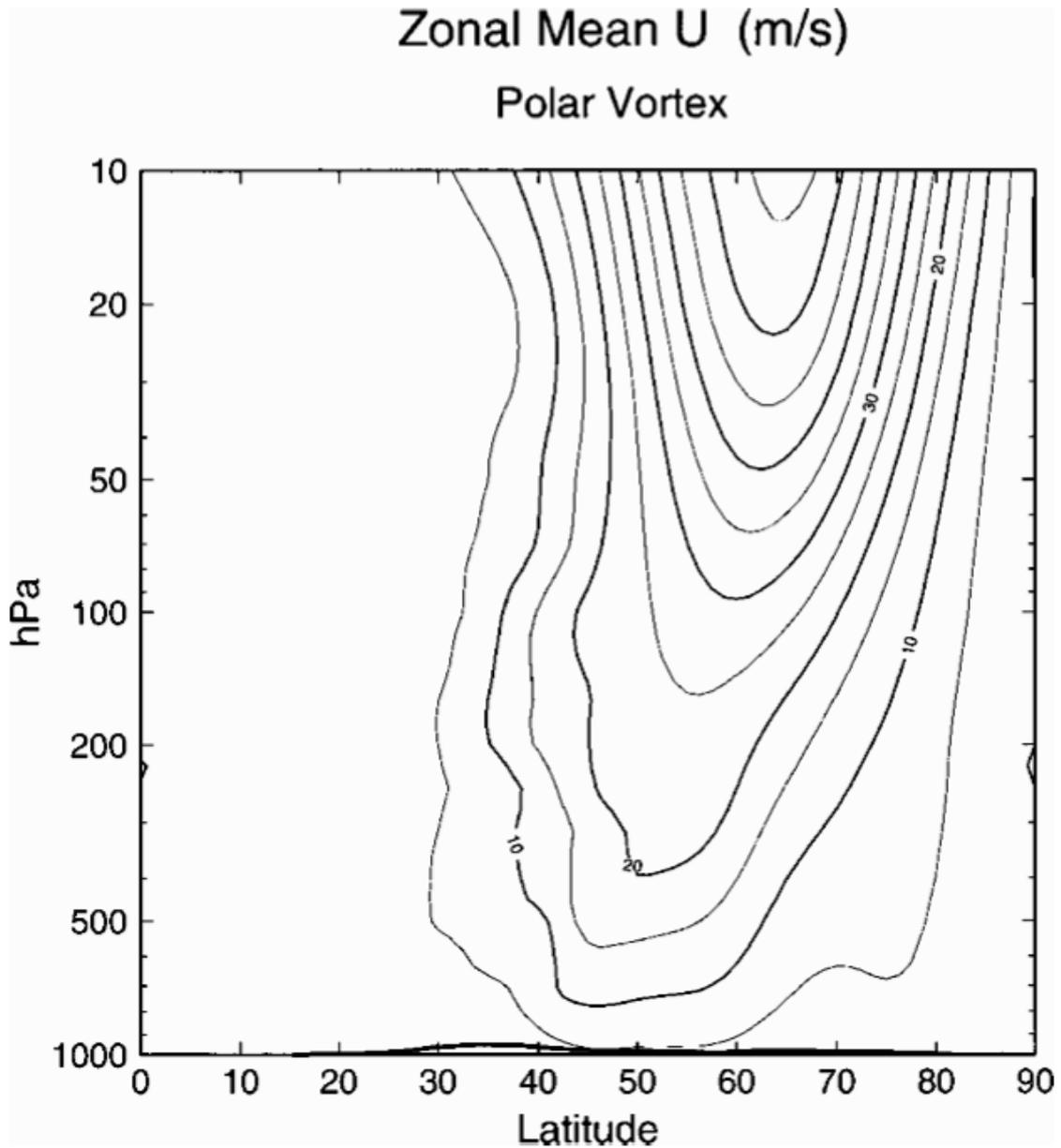


図 2: 極渦のみを残した仮想大気における帯状平均風速度場．等値線間隔は 5 m/s で、実線が西風、破線が東風（Tanaka and Tokinaga 2002 より）

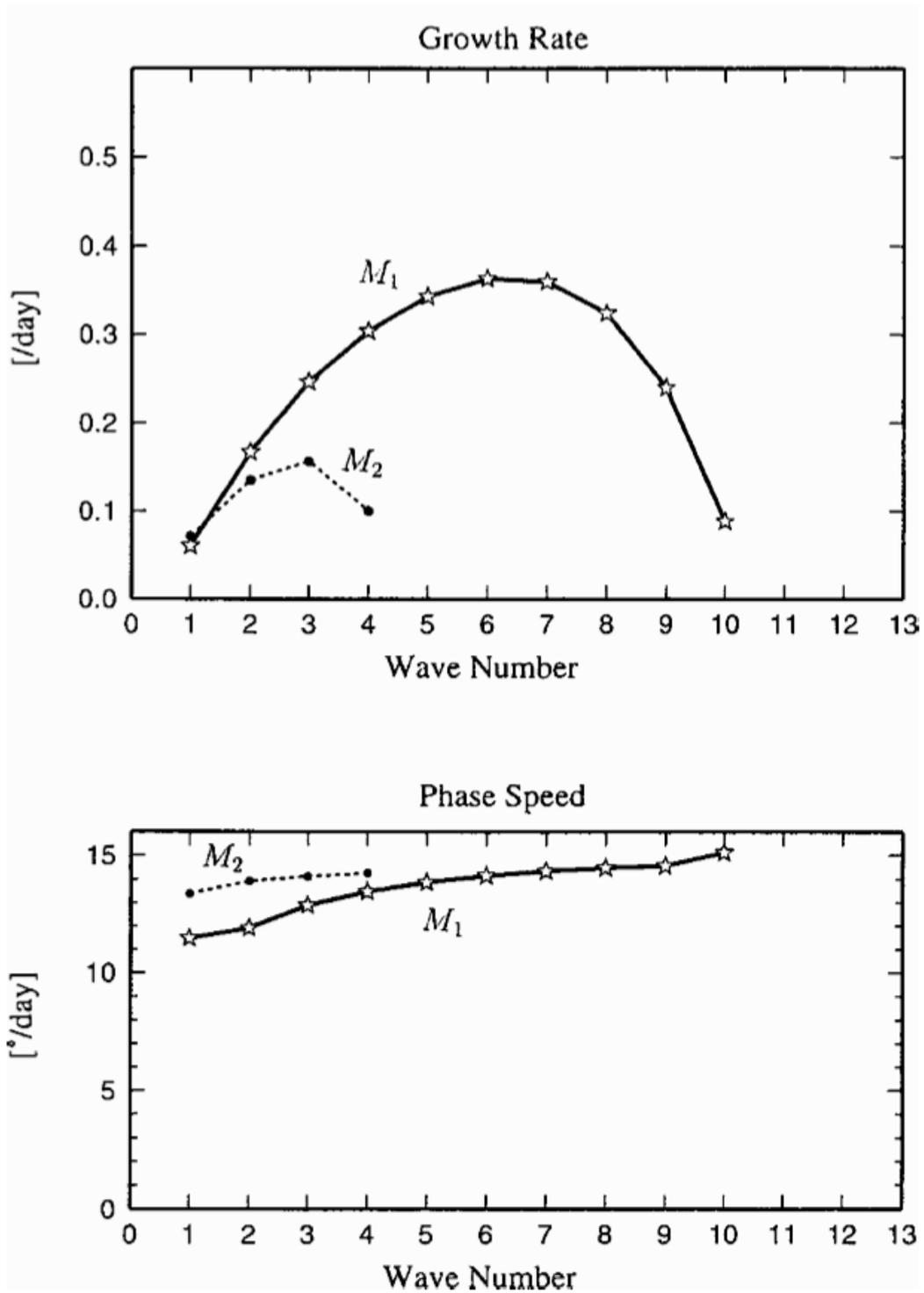


図 3: 極渦のみを残した仮想大気における不安定モード (Tanaka and Tokinaga 2002 より)

Arctic Oscillation Index (90-day mean)

Barotropic Component of the Atmosphere

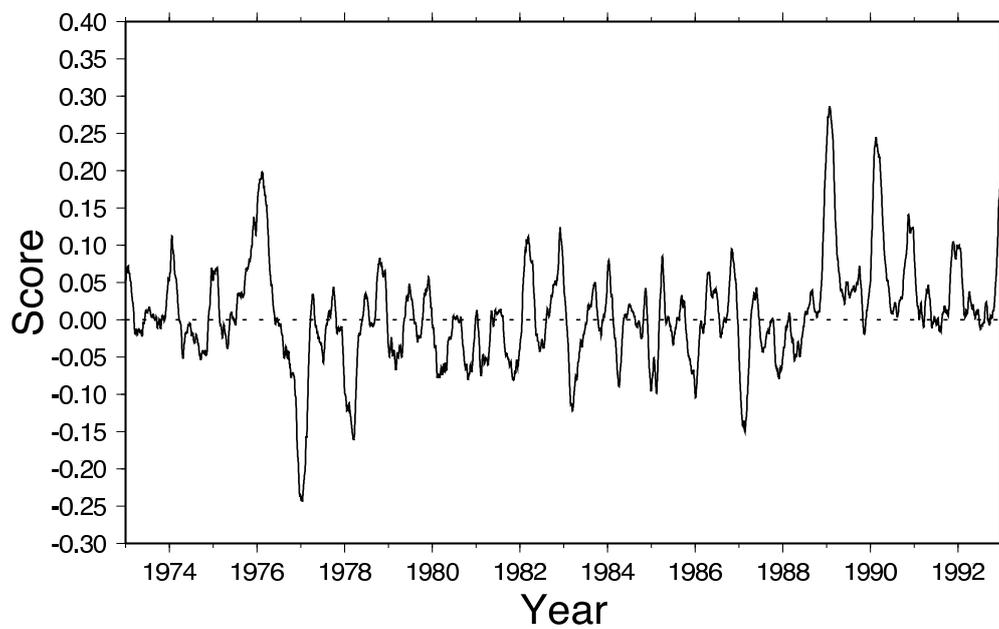


図 4: 北極振動指数の 90 日平均

Zonal Mean U (January clim)

U (m/s)

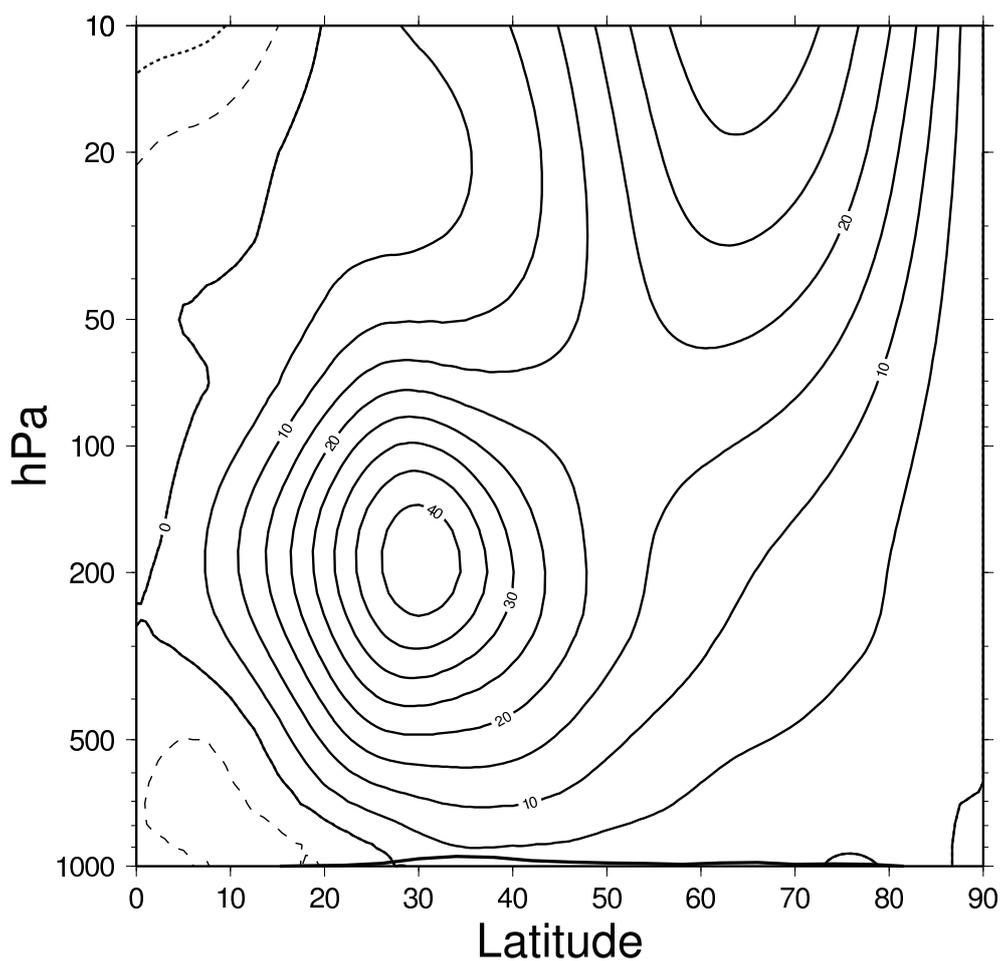


図 5: 北半球 1 月における帯状平均風速度場 (気候値) . 等値線間隔は 5 m/s で、
実線が西風、破線が東風 .

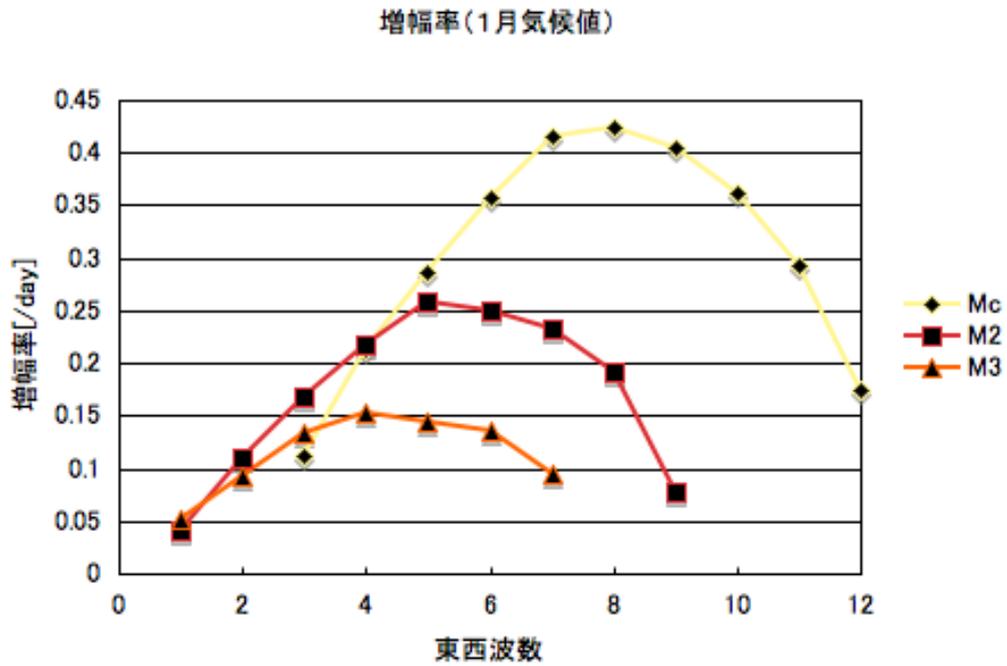


図 6: 1月気候値における不安定モードの増幅率

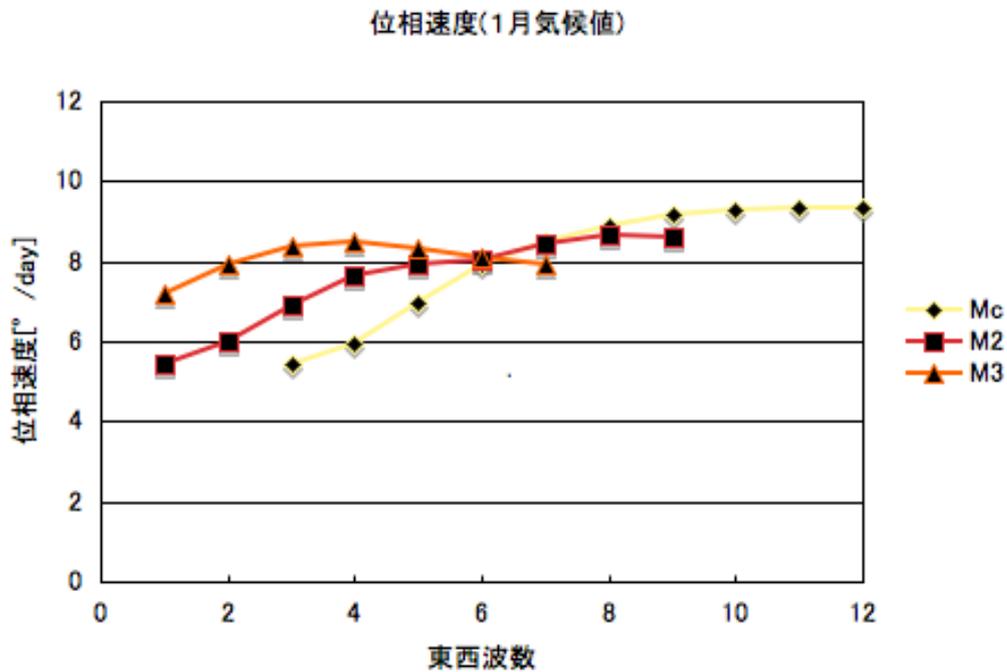


図 7: 1月気候値における不安定モードの位相速度

Zonal Mean U (Polar mode-0.5)

U (m/s)

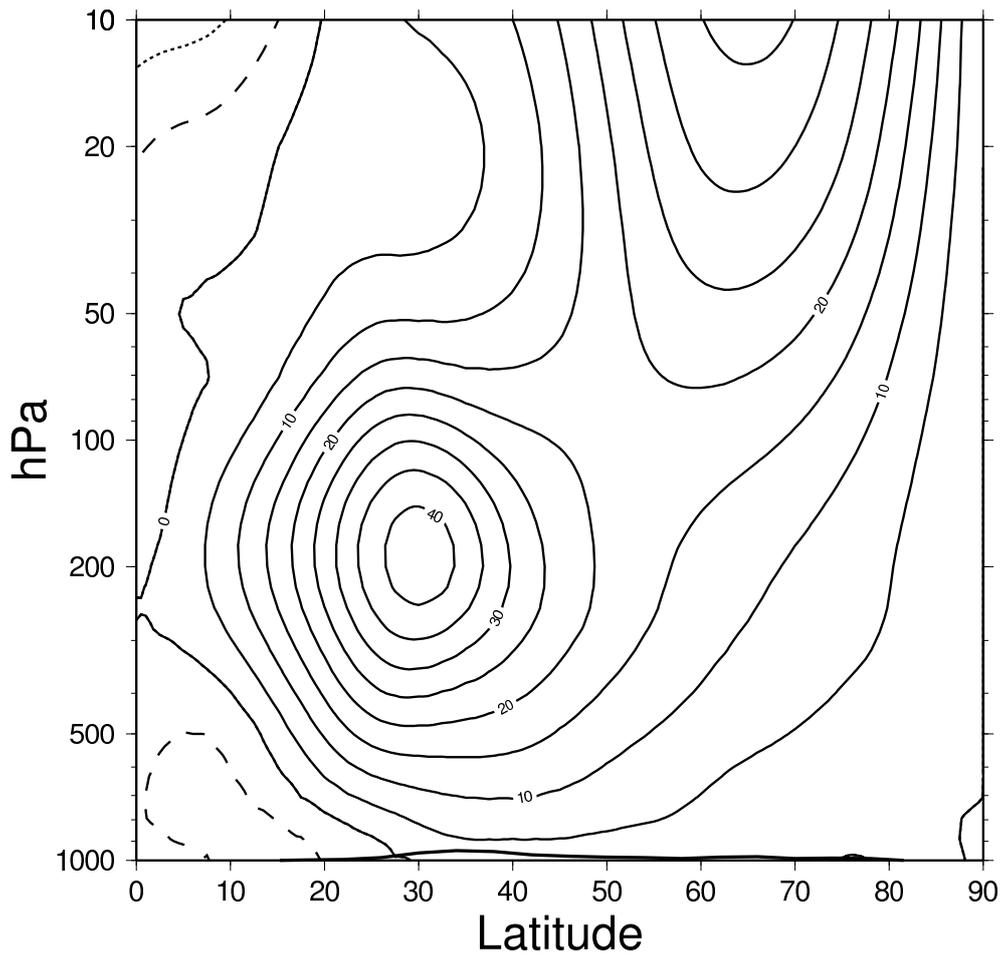


図 8: AOI に回帰した東西風を 0.5 倍したものを気候値に上乗せした仮想大気における帯状平均風速度場．等値線間隔は 5 m/s で、実線が西風、破線が東風．

Zonal Mean U (Polar mode-1)

U (m/s)

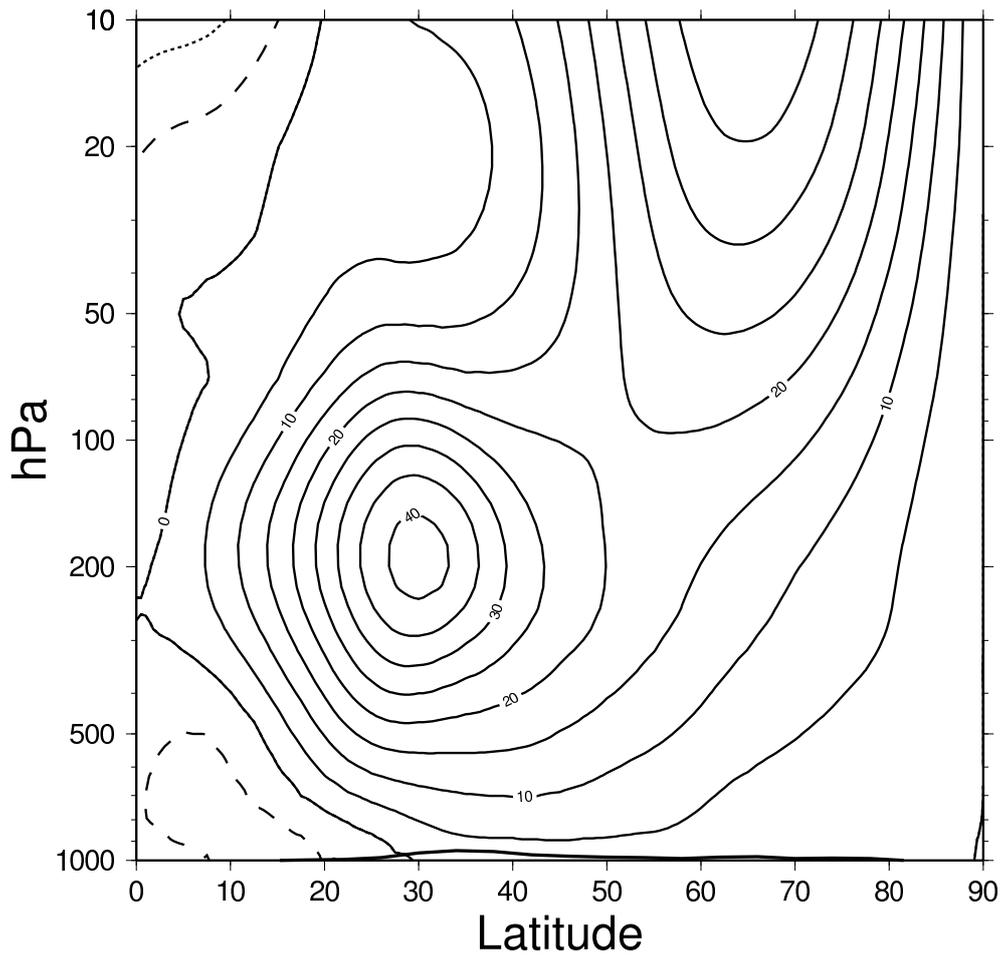


図 9: AOIに回帰した東西風を1.0倍したものを気候値に上乗せした仮想大気における帯状平均風速度場．等値線間隔は5 m/sで、実線が西風、破線が東風．

Zonal Mean U (Polar mode-1.5)

U (m/s)

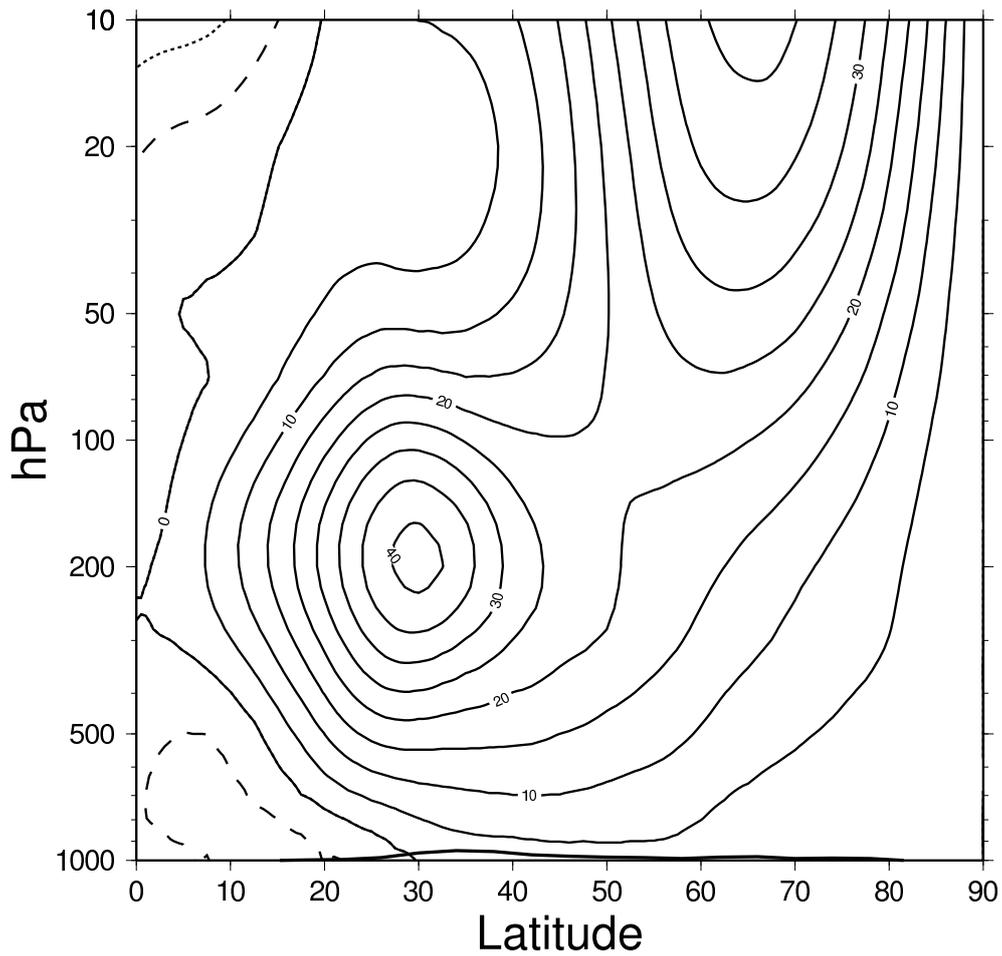


図 10: AOI に回帰した東西風を 1.5 倍したものを気候値に上乗せした仮想大気における帯状平均風速度場．等値線間隔は 5 m/s で、実線が西風、破線が東風．

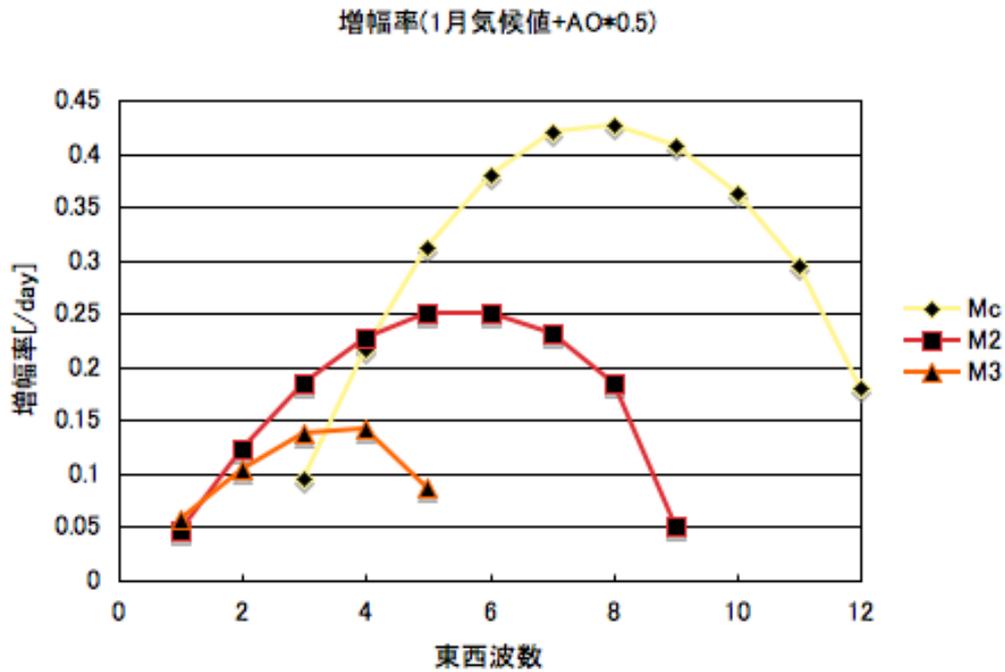


図 11: AOI に回帰した東西風を 0.5 倍したものを気候値に上乗せした仮想大気における不安定モードの増幅率

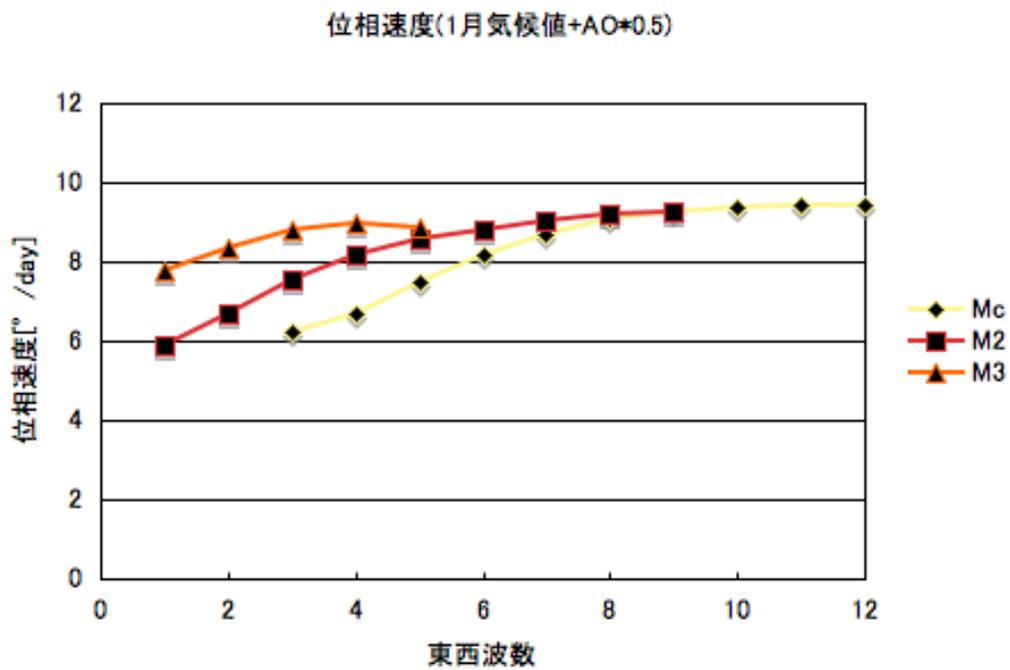


図 12: 上と同じ不安定モードの位相速度

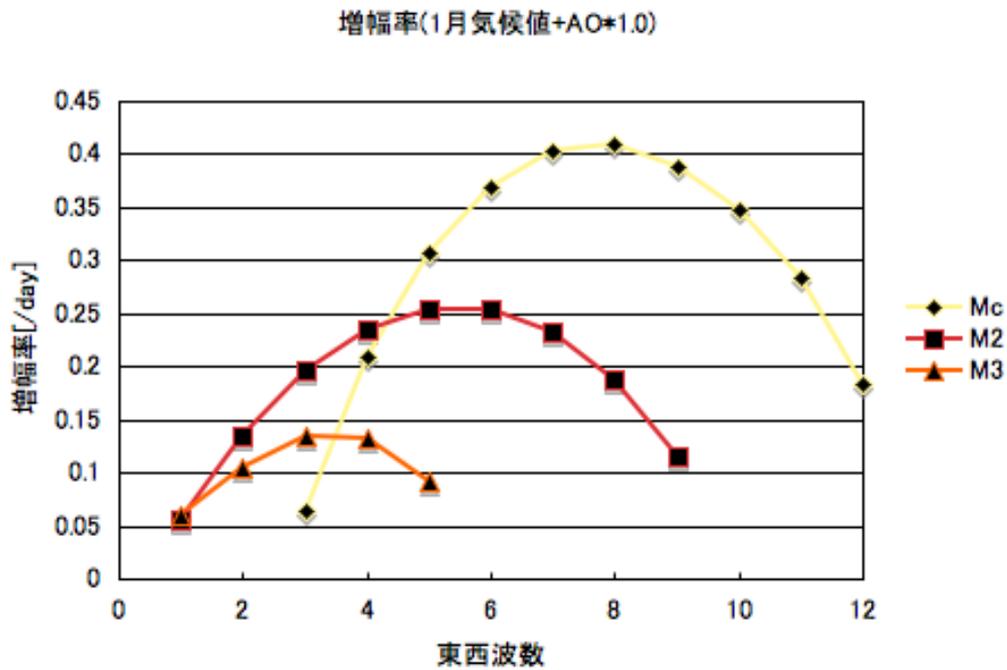


図 13: AOI に回帰した東西風を 1.0 倍したものを気候値に上乗せした仮想大気における不安定モードの増幅率

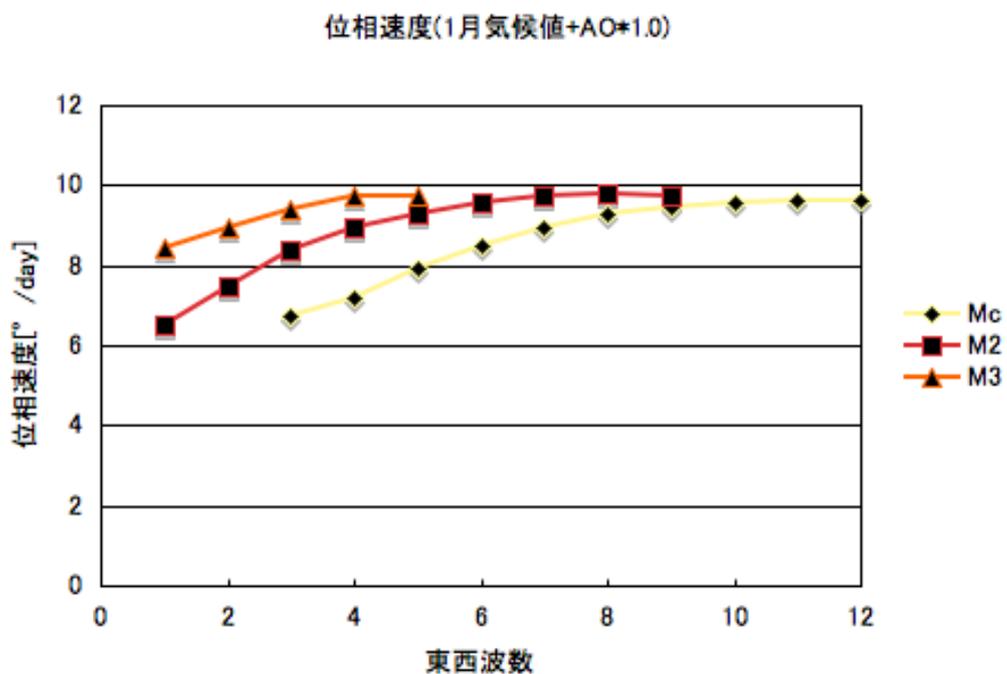


図 14: 上と同じ不安定モードの位相速度

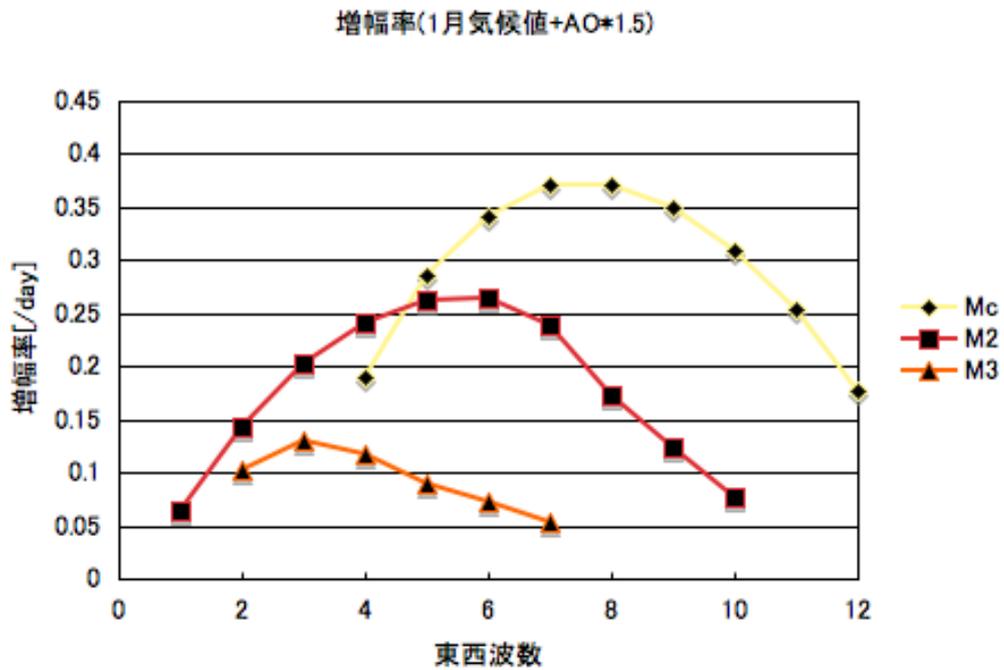


図 15: AOI に回帰した東西風を 1.5 倍したものを気候値に上乗せした仮想大気における不安定モードの増幅率

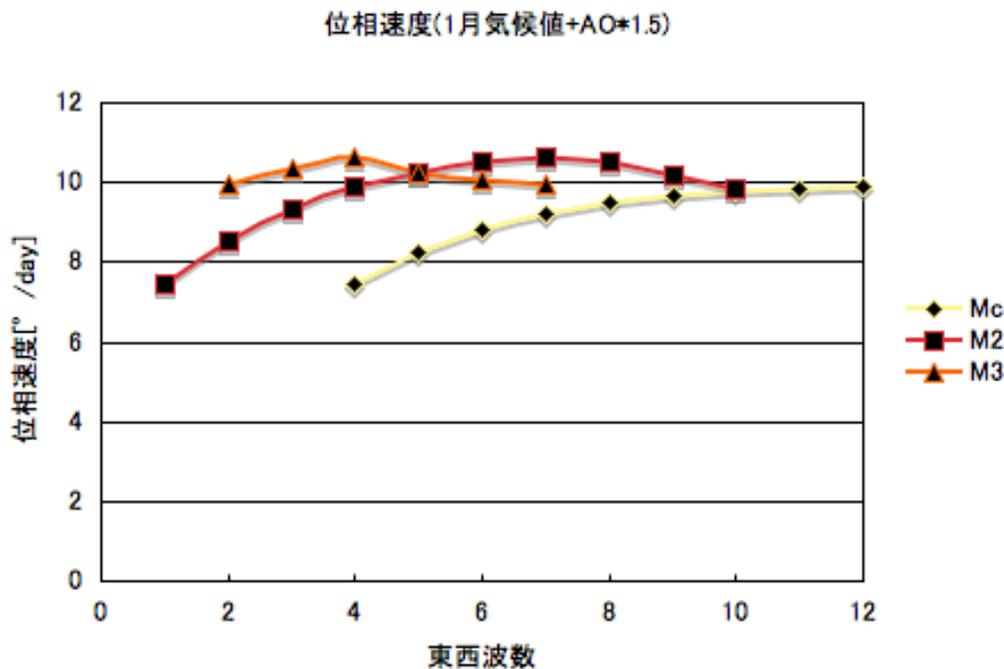


図 16: 上と同じ不安定モードの位相速度

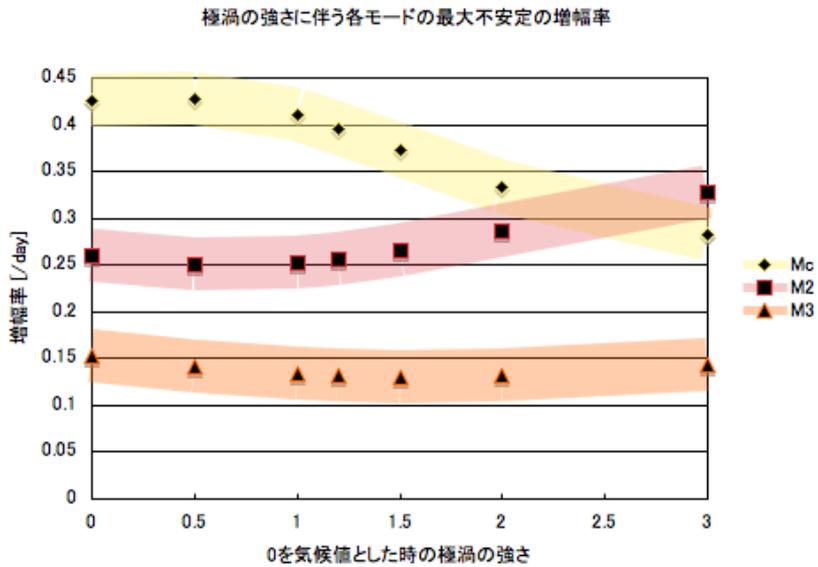


図 17: 極渦の強さを変えて解析した結果出てきた各モードの最大不安定の増幅率を、そのときの極渦の強さについてモード別にプロットしたもの。

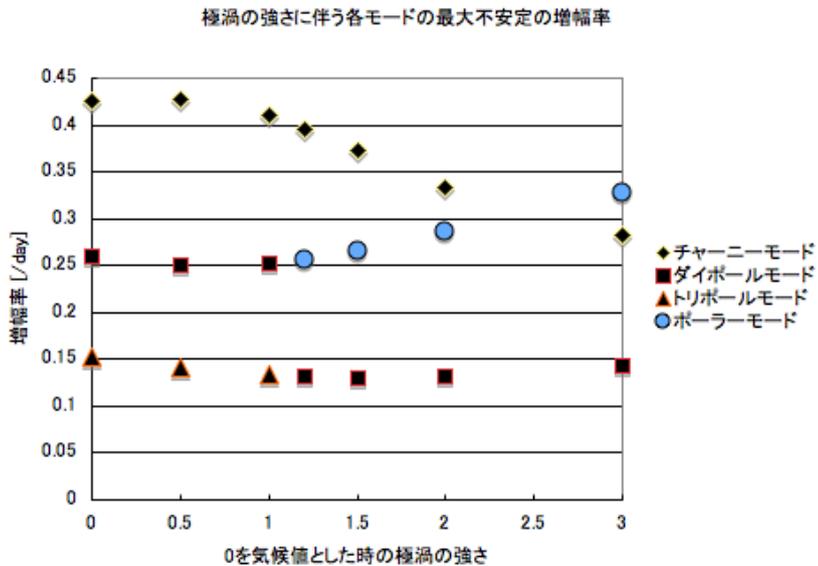


図 18: 極渦の強さを変えて解析した結果出てきた各モードの最大不安定の増幅率を、そのときの極渦の強さについて構造別にプロットしたもの。

Unstable Mode Structure

(N=4, Mc, Amplitude)

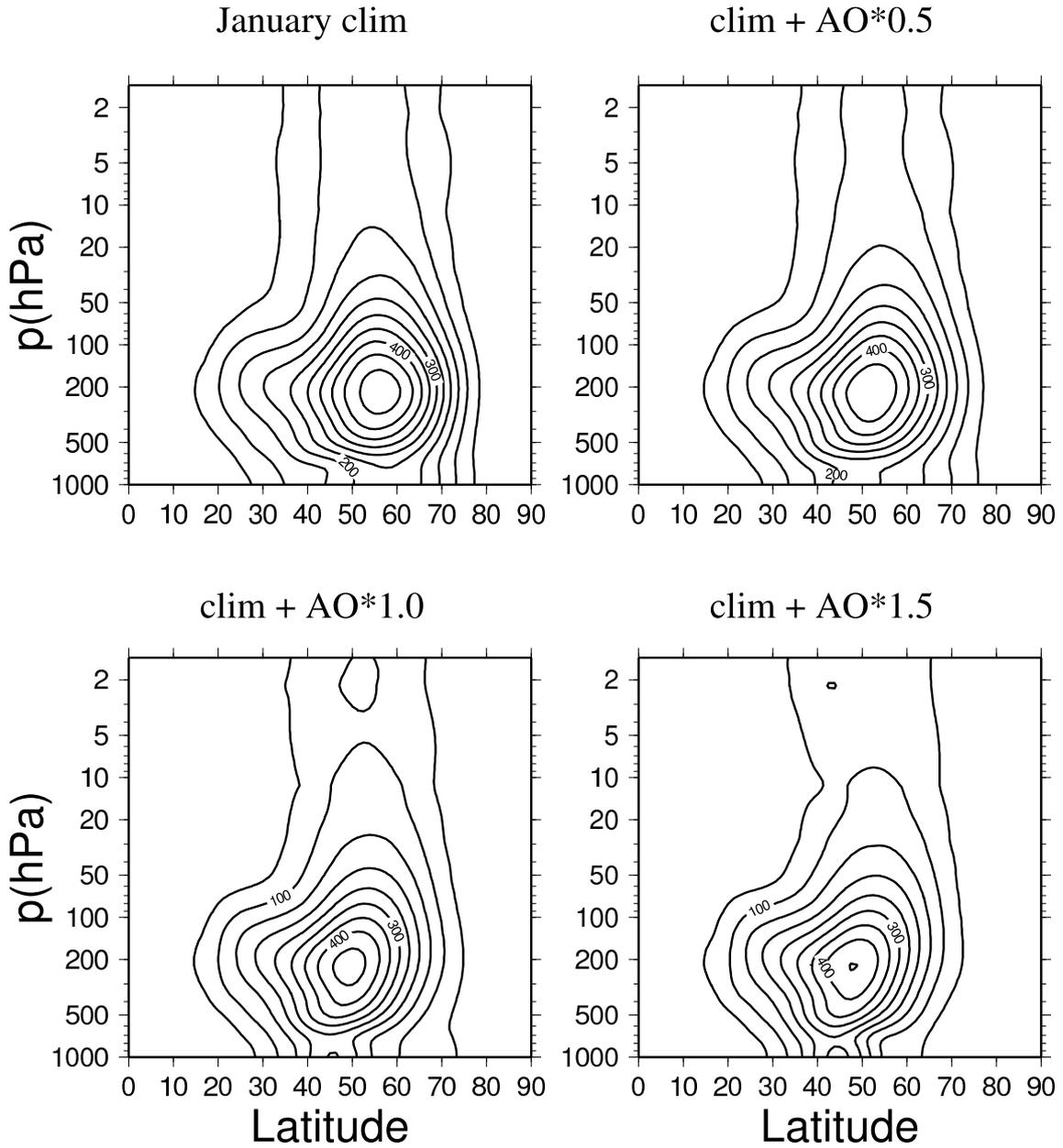


図 19: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 4 における Mc モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の振幅 [m]。

Unstable Mode Structure

(N=5, Mc, Amplitude)

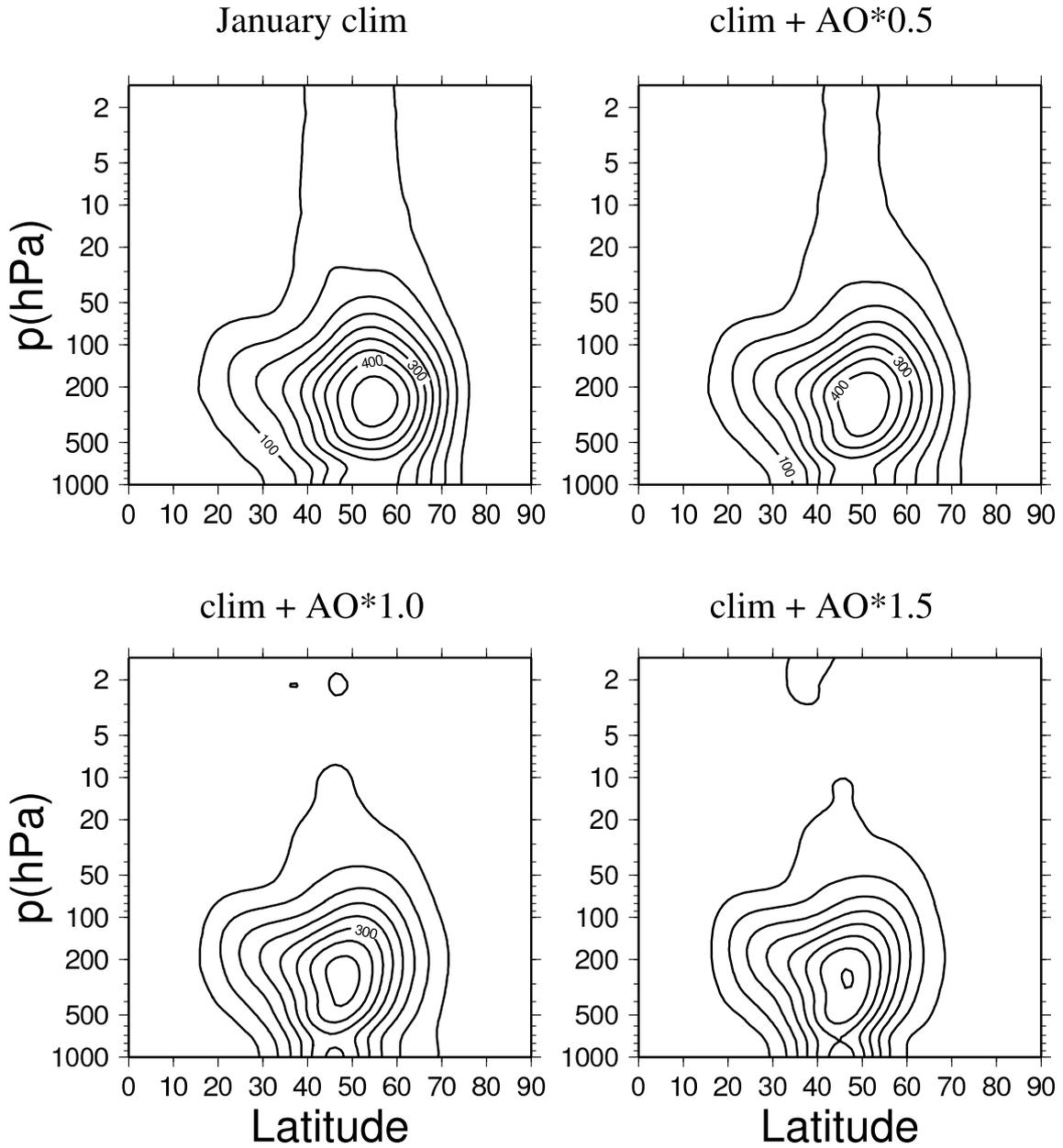


図 20: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 5 における Mc モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の振幅 [m]。

Unstable Mode Structure

(N=6, Mc, Amplitude)

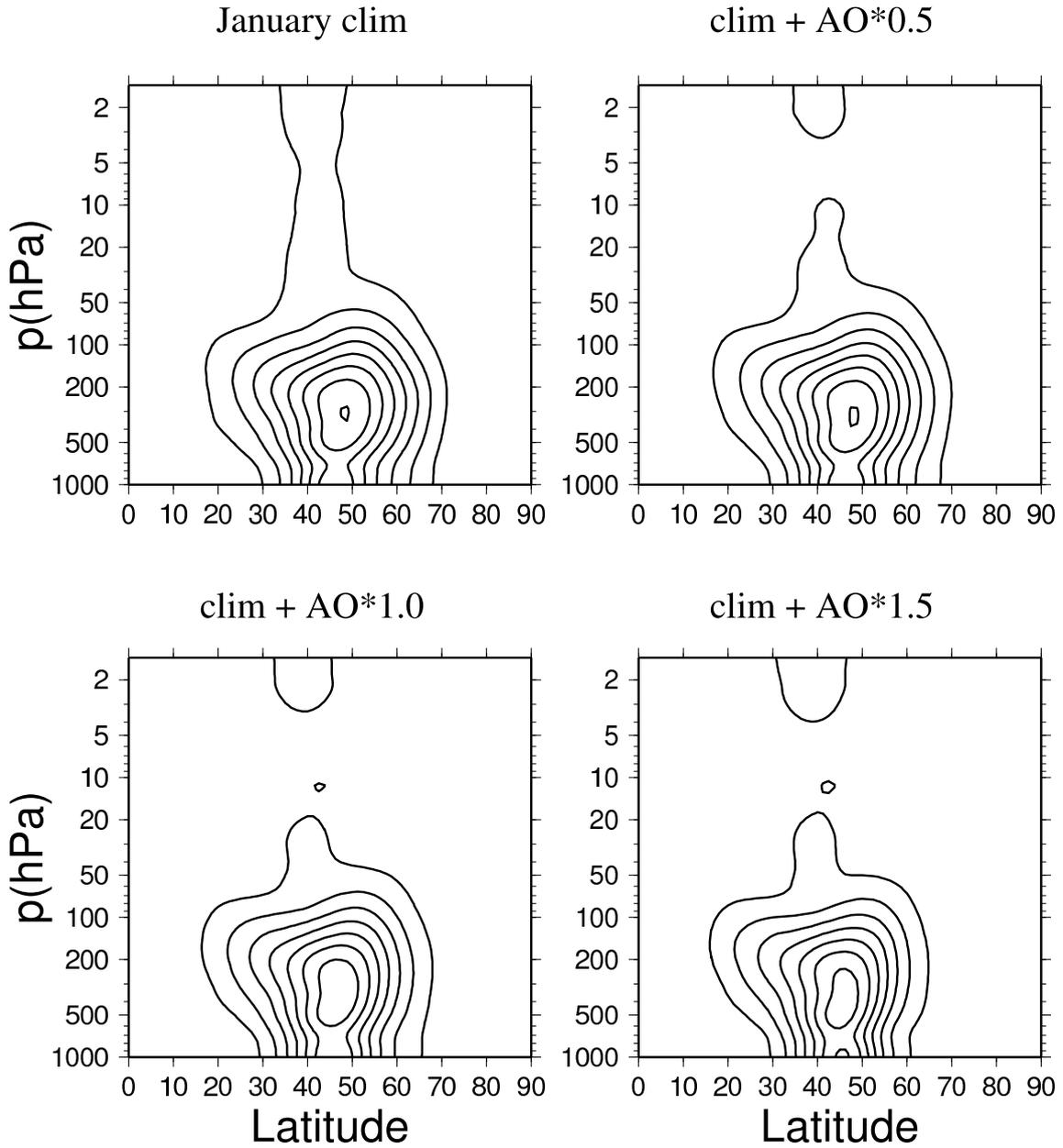


図 21: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 6 における Mc モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の振幅 [m]。

Unstable Mode Structure

(N=7, Mc, Amplitude)

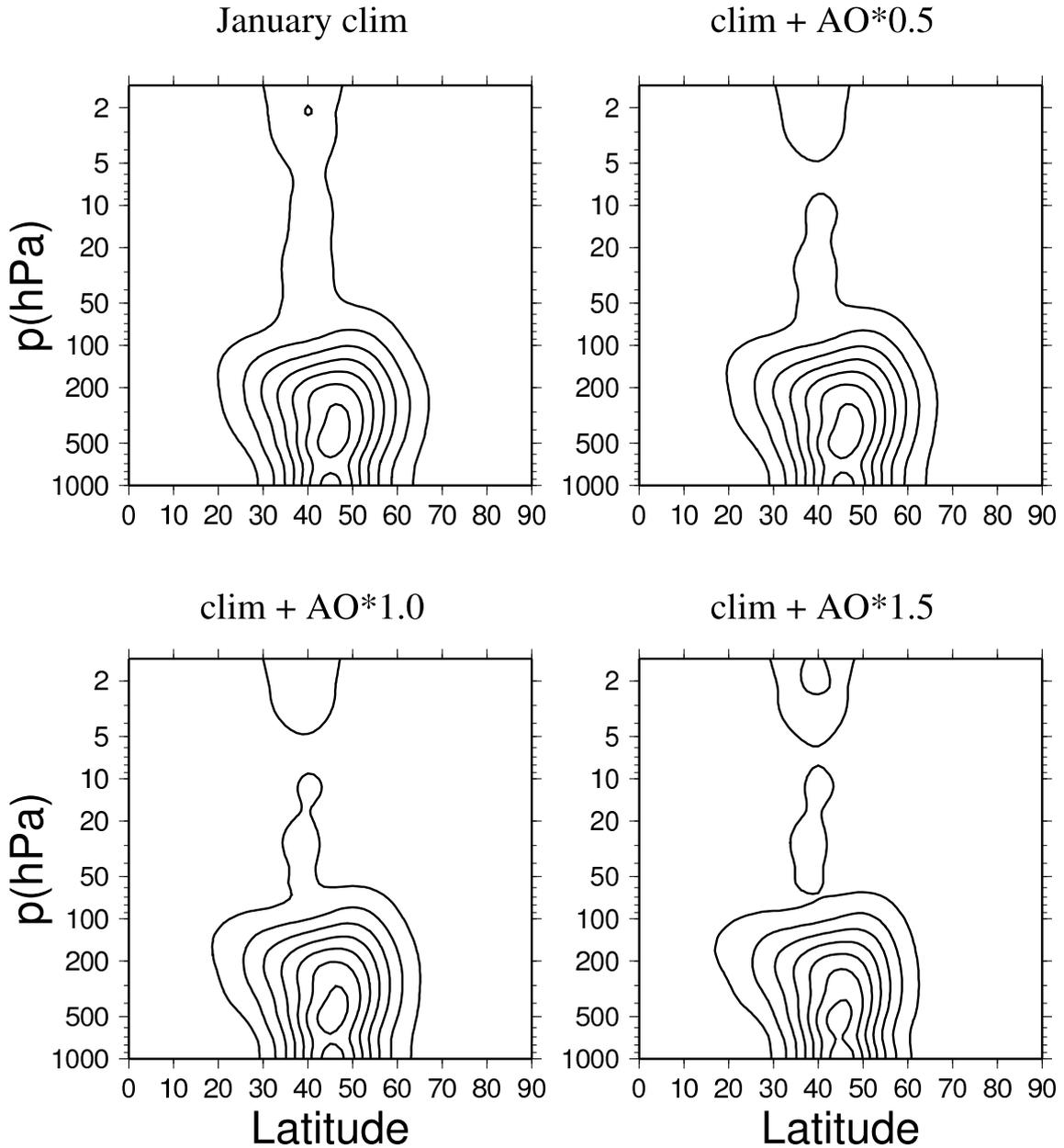


図 22: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乗せした仮想大気について、波数 7 における Mc モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の振幅 [m]。

Unstable Mode Structure

(N=8, Mc, Amplitude)

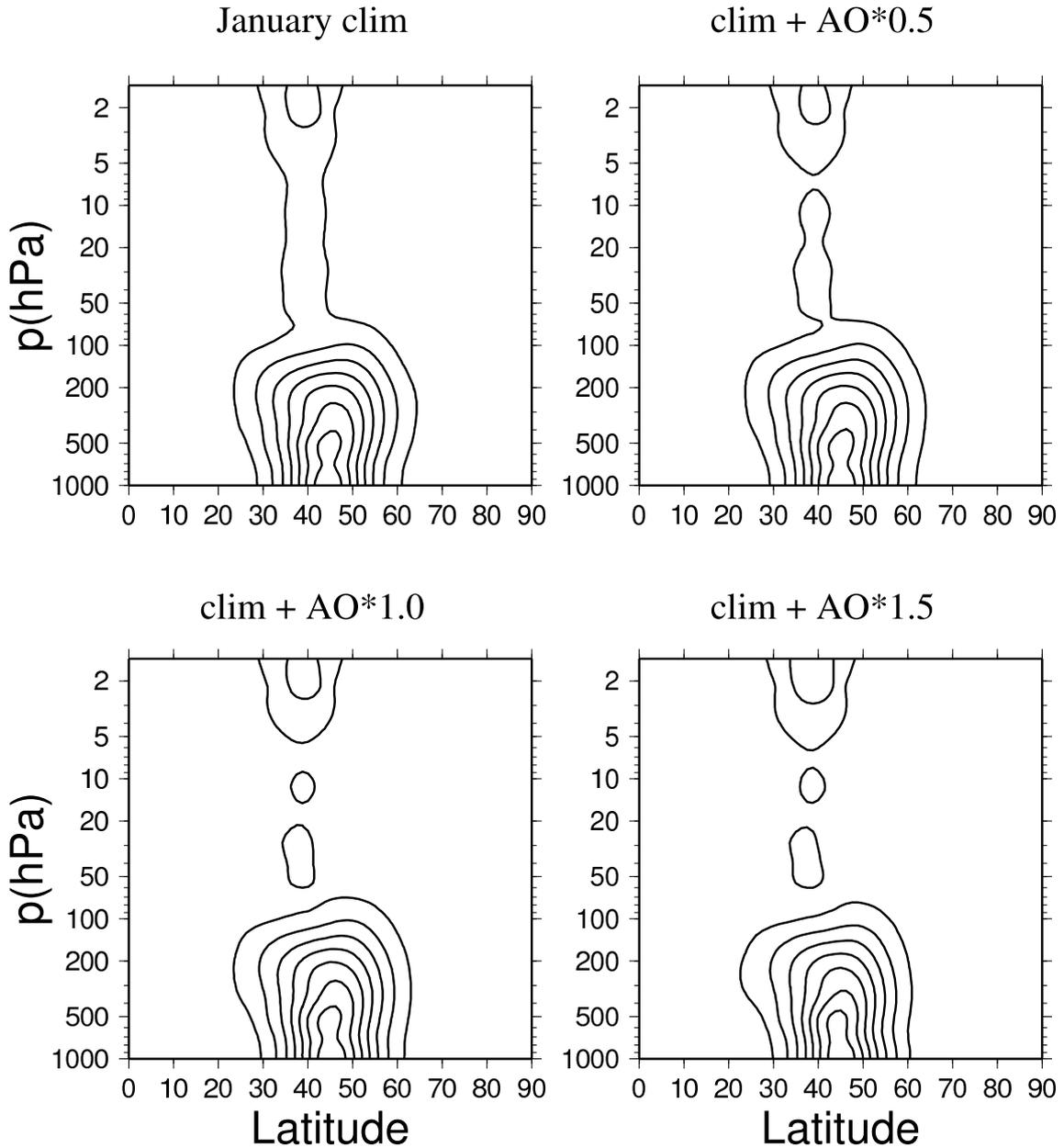


図 23: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 8 における Mc モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の振幅 [m]。

Unstable Mode Structure

(N=4, Mc, Phase)

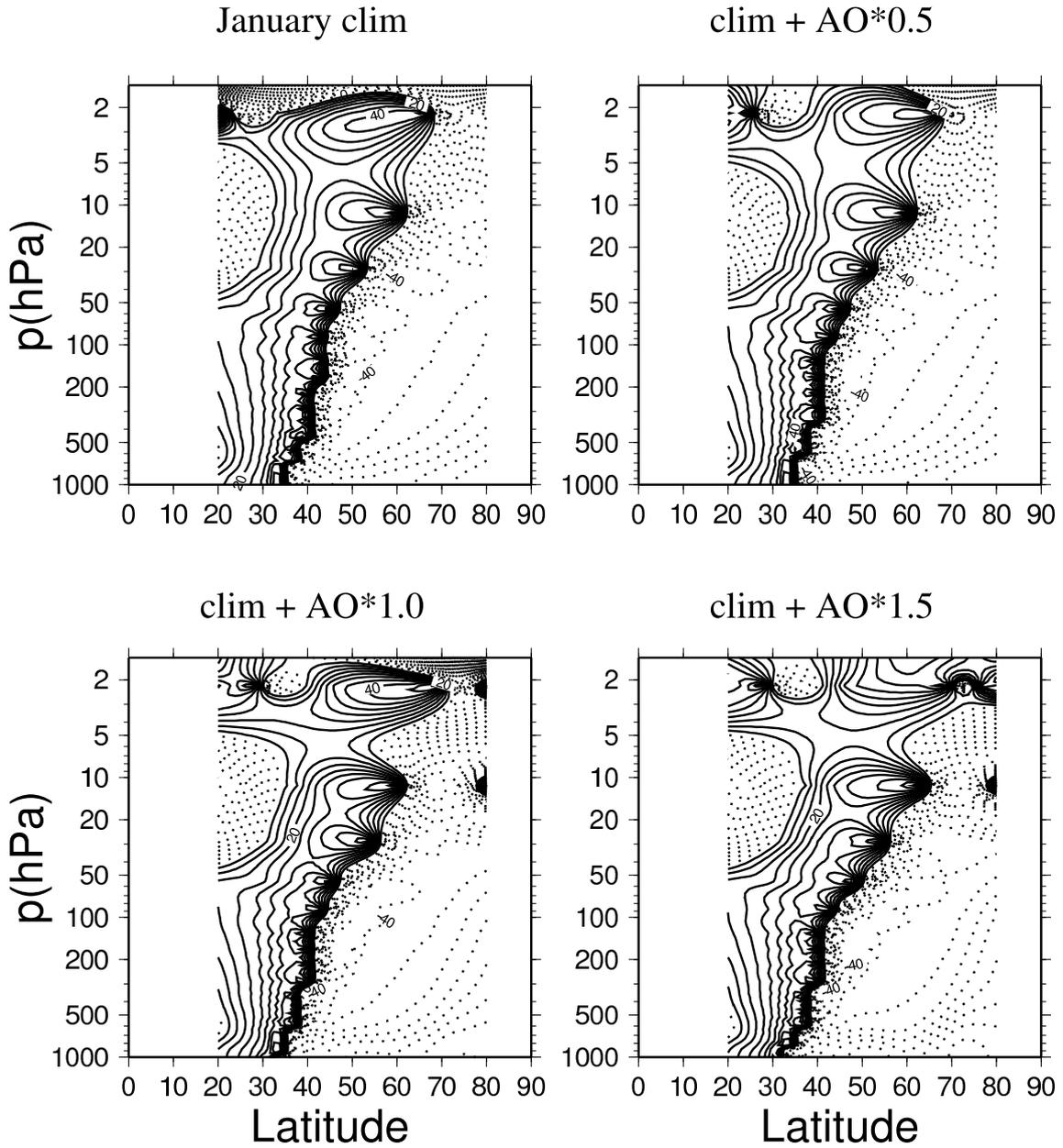


図 24: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 4 における Mc モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の位相 [$^{\circ}$]。

Unstable Mode Structure

(N=5, Mc, Phase)

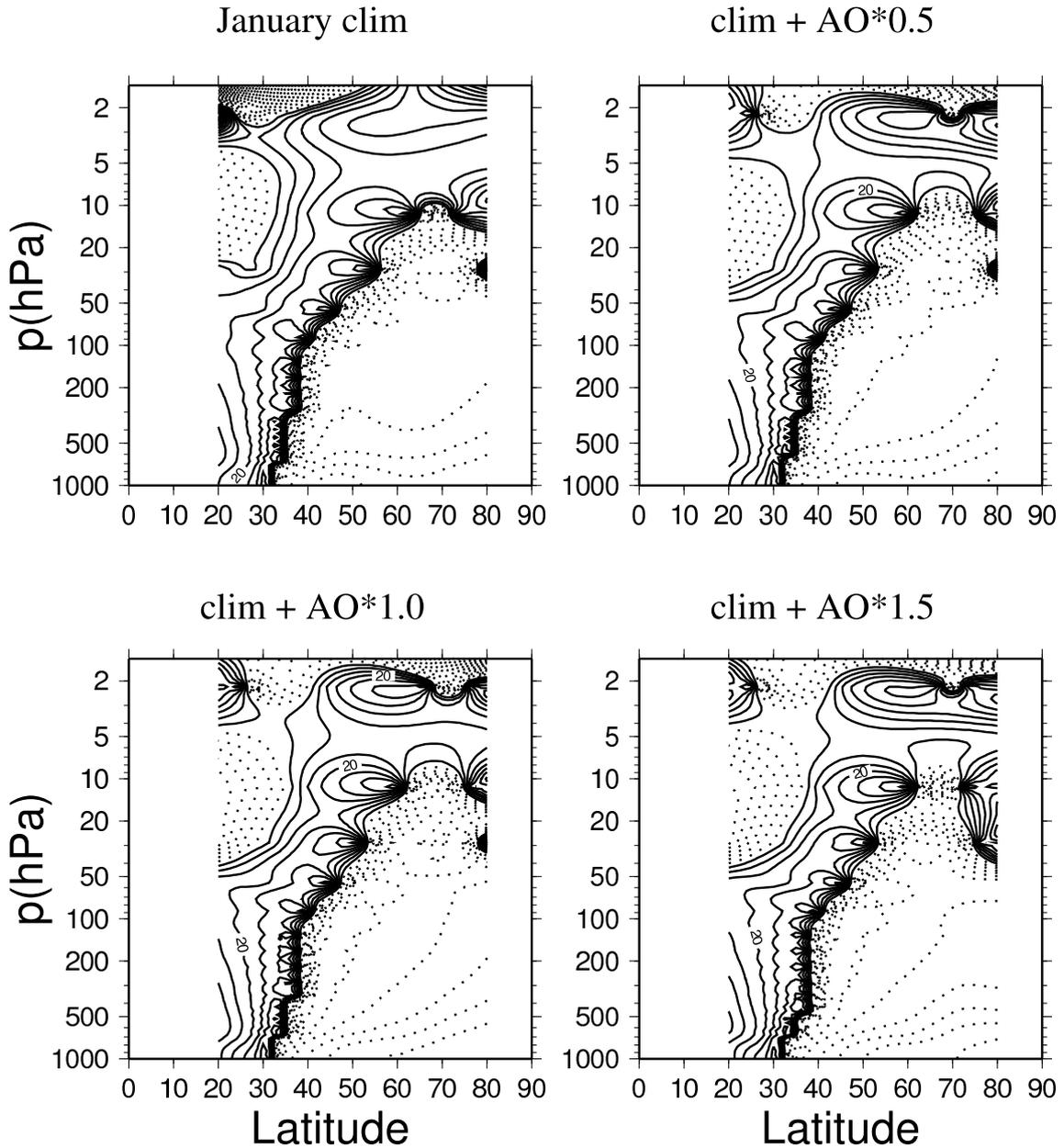


図 25: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 5 における Mc モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の位相 [°]。

Unstable Mode Structure

(N=6, Mc, Phase)

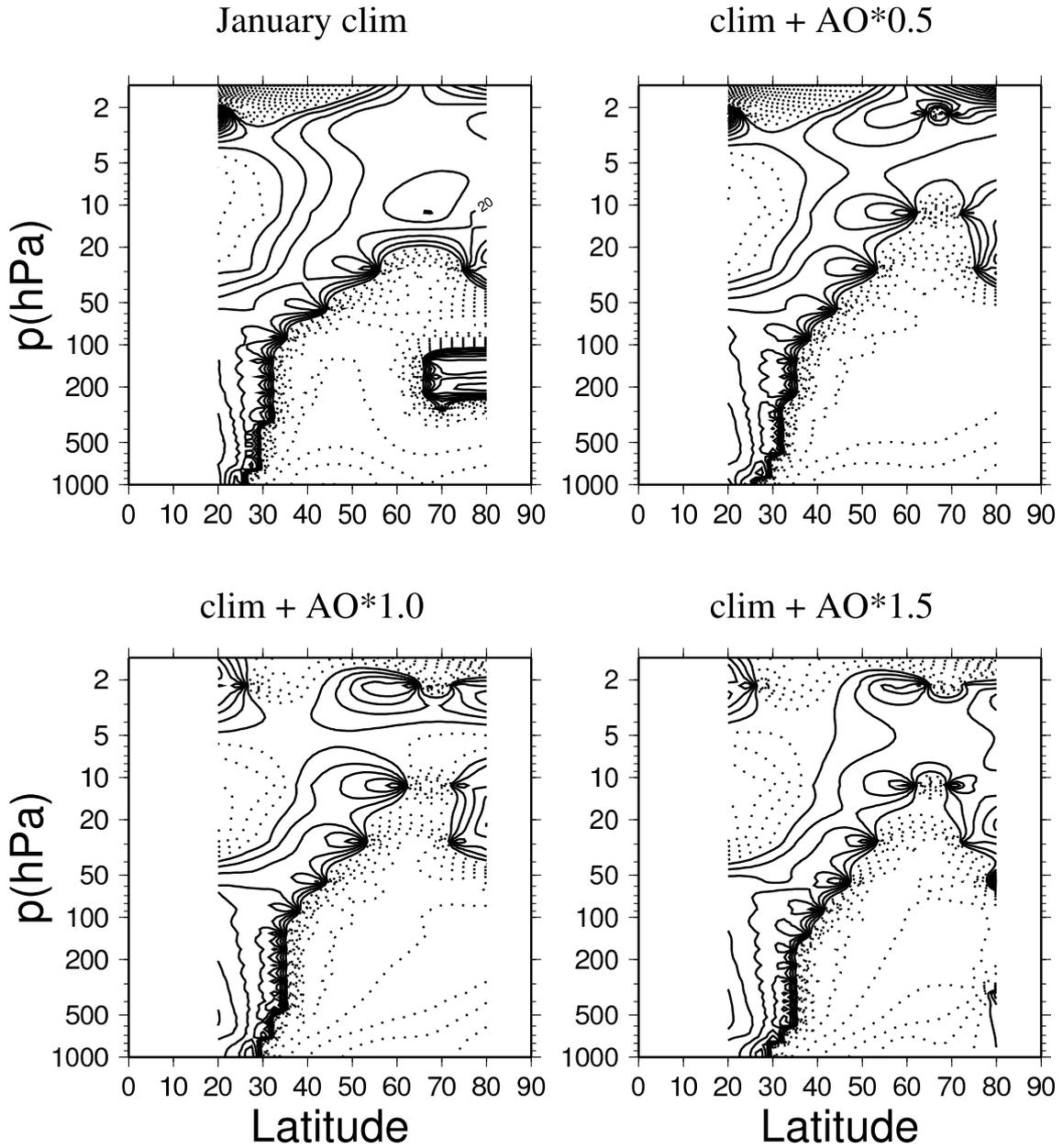


図 26: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 6 における Mc モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の位相 [°]。

Unstable Mode Structure

(N=7, Mc, Phase)

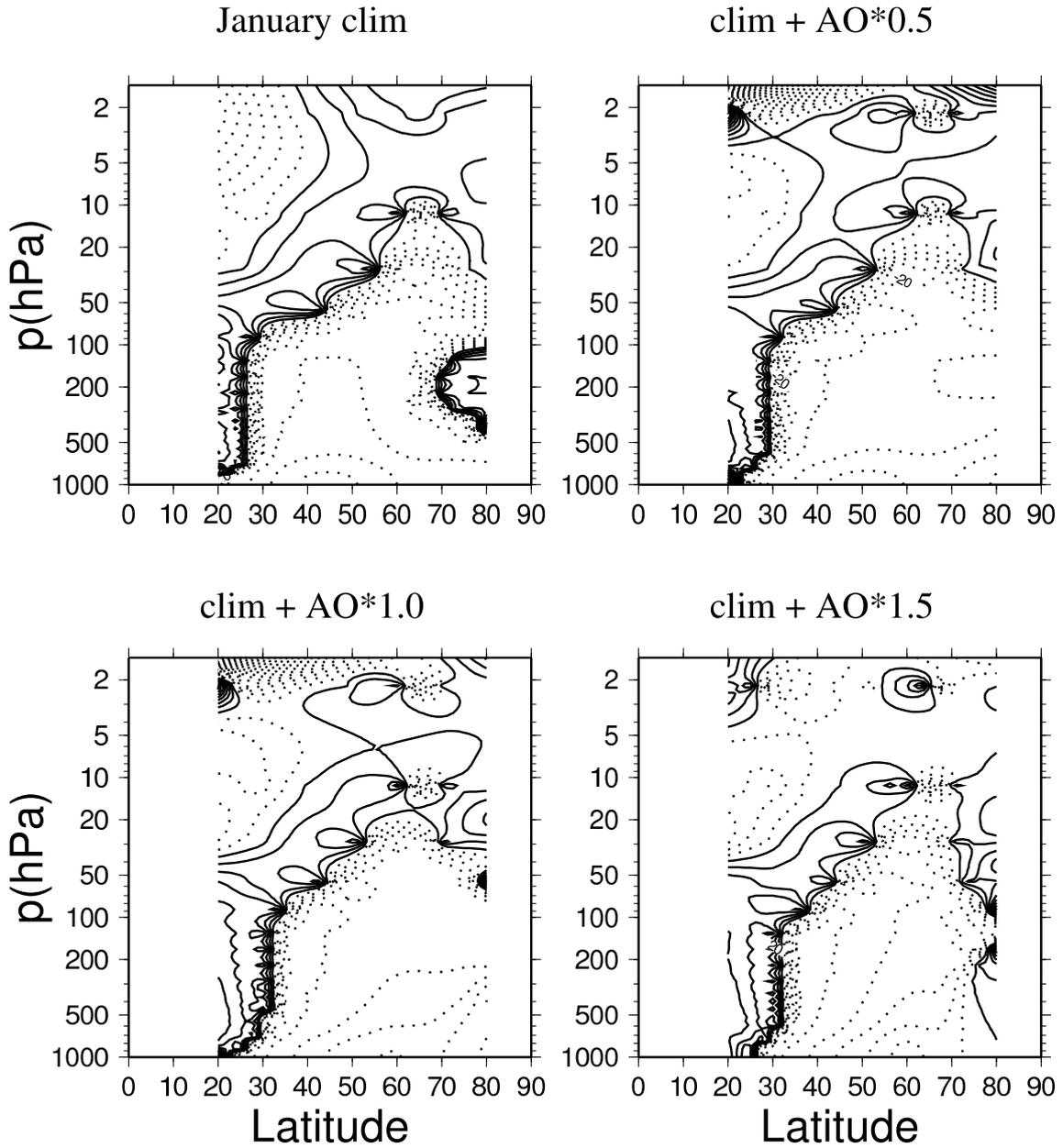


図 27: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 7 における Mc モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の位相 [°]。

Unstable Mode Structure

(N=8, Mc, Phase)

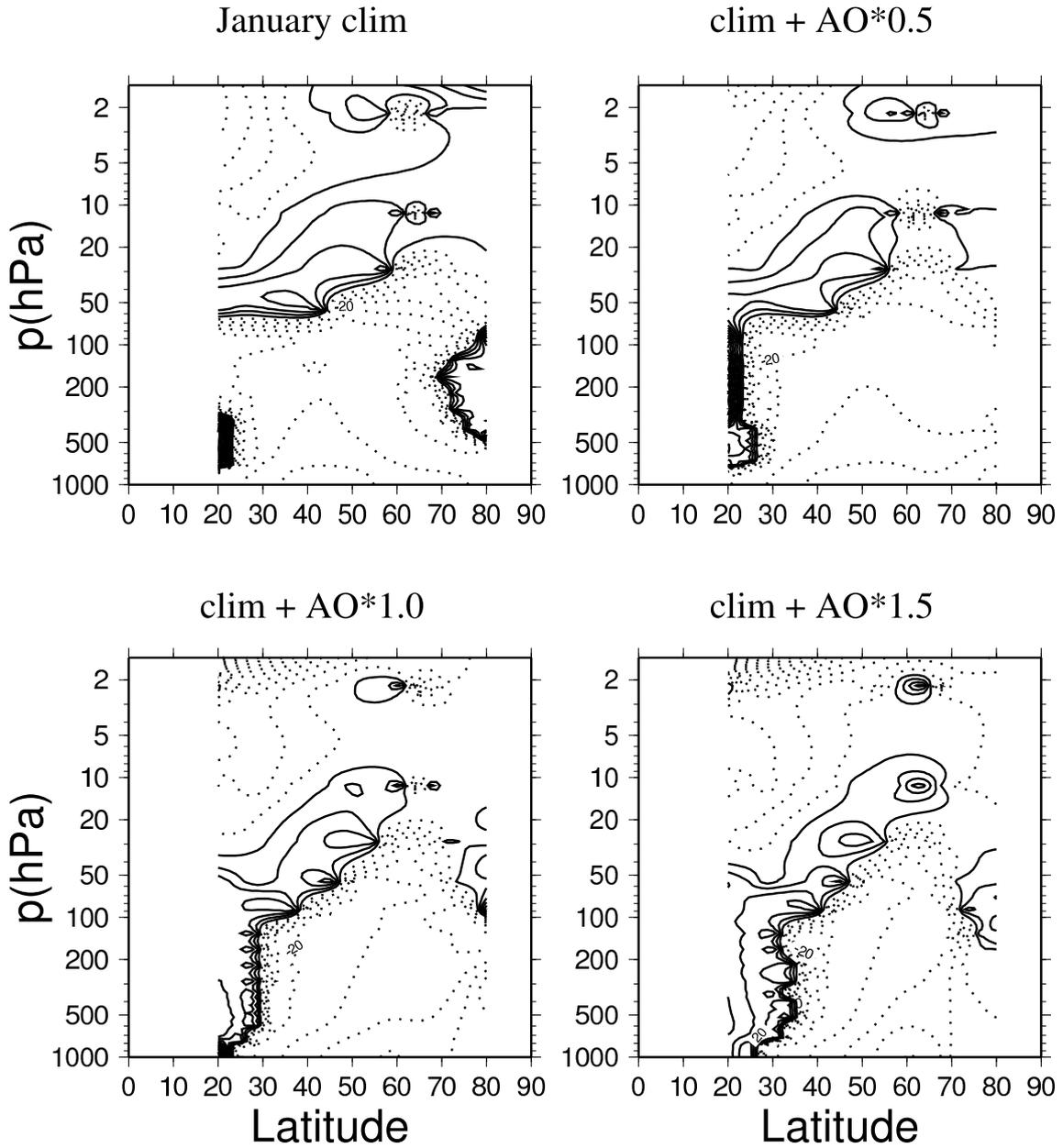
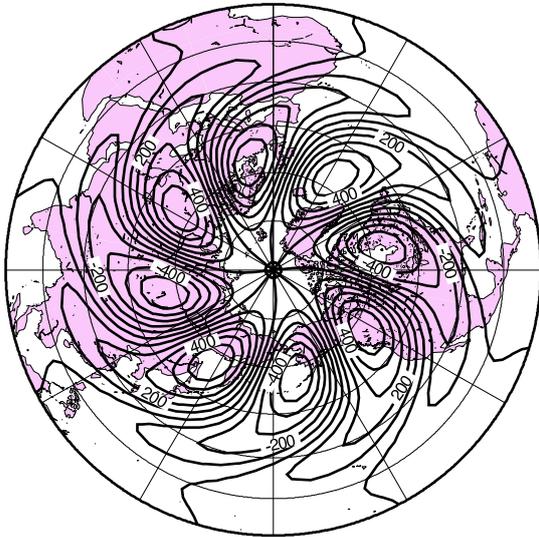


図 28: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 8 における Mc モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の位相 [°]。

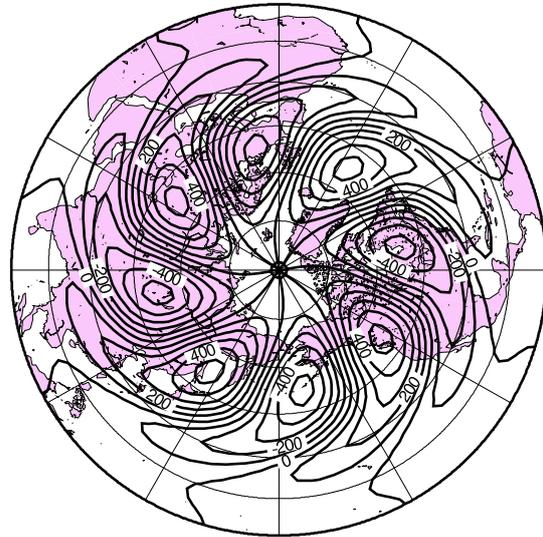
Unstable Mode Structure

($N=4$, Mc , Barotropic Height)

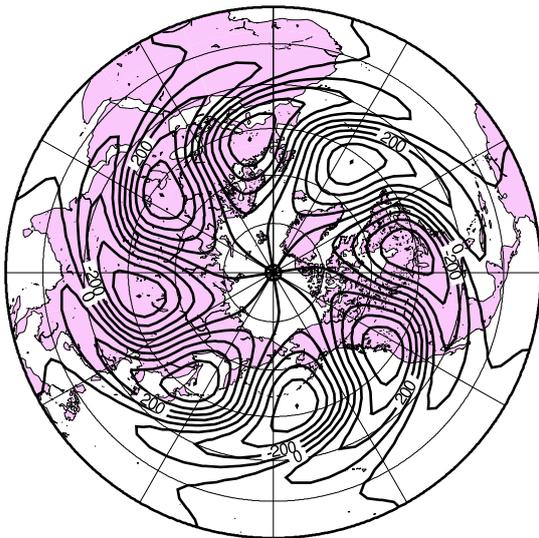
January clim



clim + AO*0.5



clim + AO*1.0



clim + AO*1.5

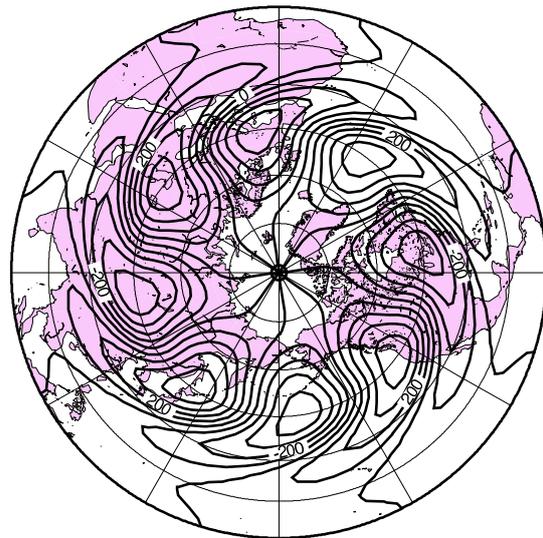


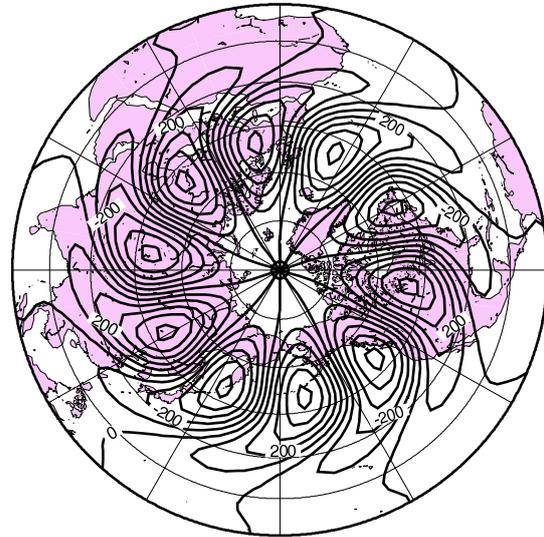
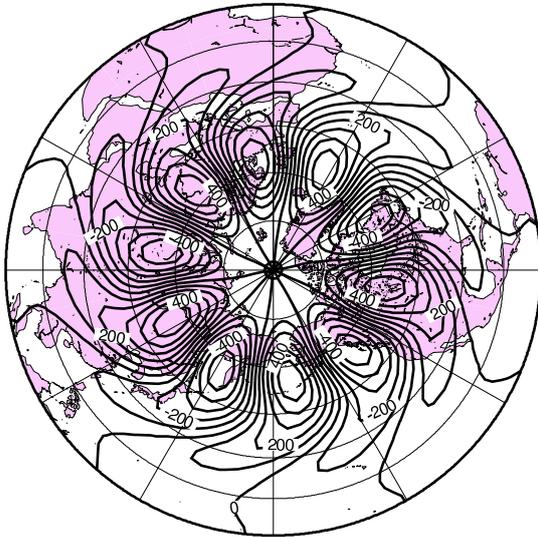
図 29: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乗せした仮想大気について、波数 4 における Mc モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m] .

Unstable Mode Structure

(N=5, Mc, Barotropic Height)

January clim

clim + AO*0.5



clim + AO*1.0

clim + AO*1.5

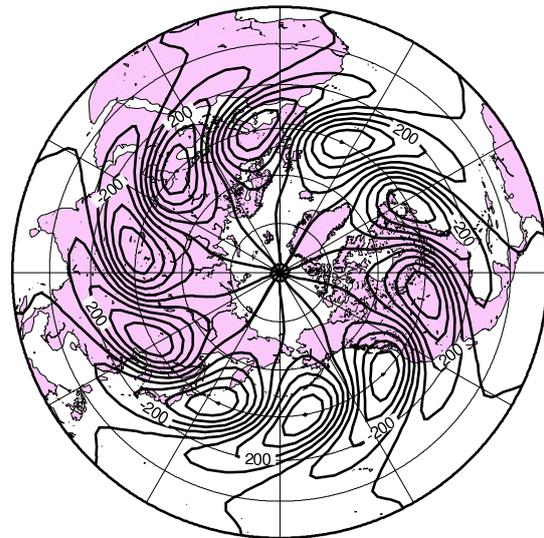
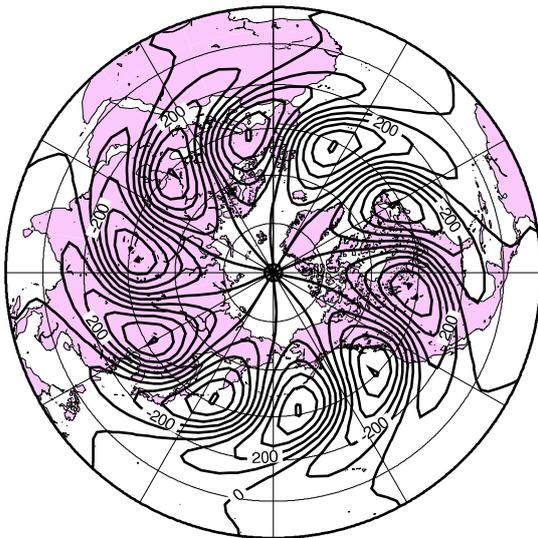


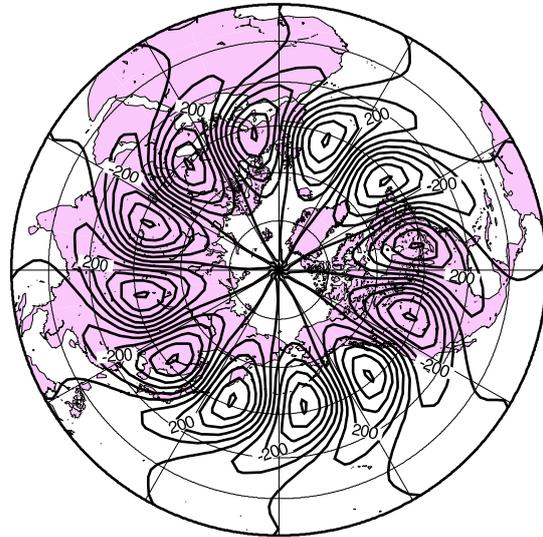
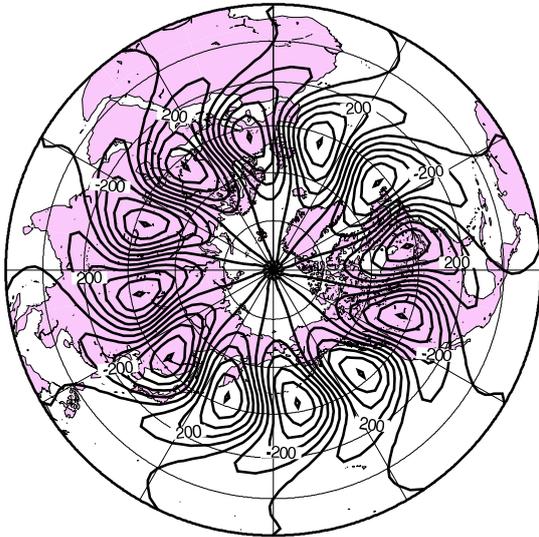
図 30: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上) 1.0 倍 (左下) 1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 5 における Mc モードの不安定構造 . ジオポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m] .

Unstable Mode Structure

(N=6, Mc, Barotropic Height)

January clim

clim + AO*0.5



clim + AO*1.0

clim + AO*1.5

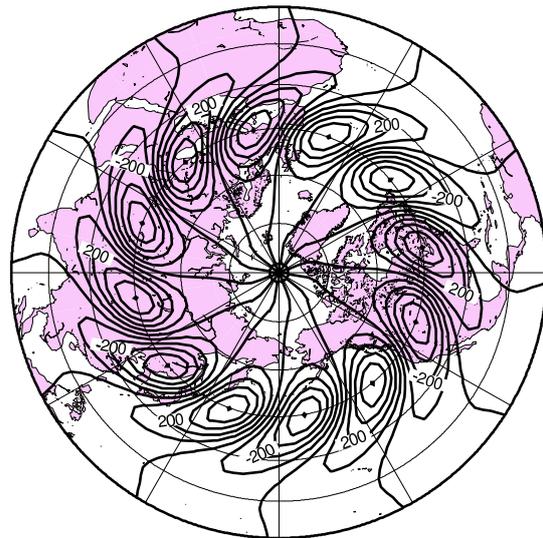
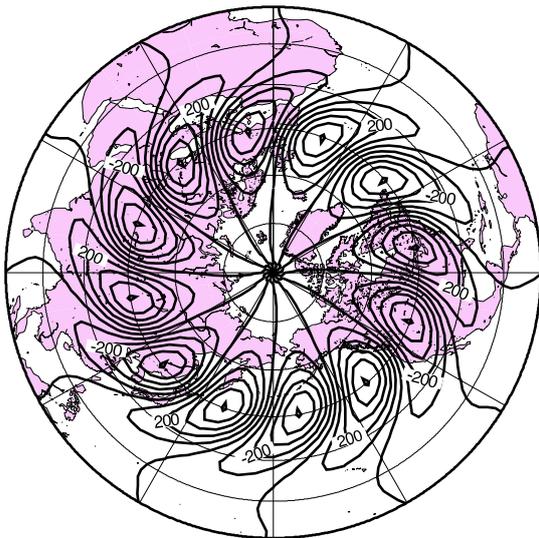


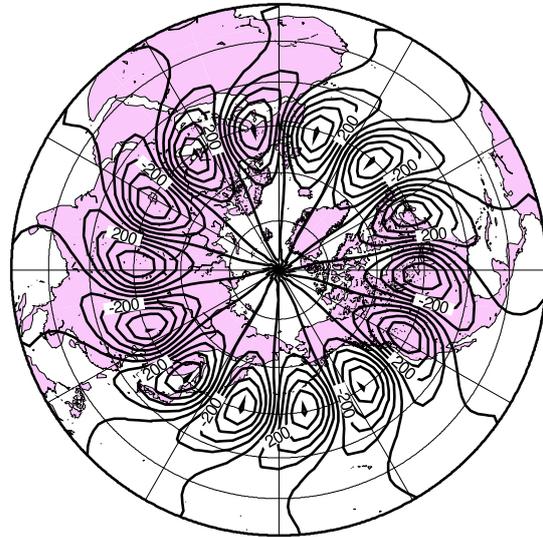
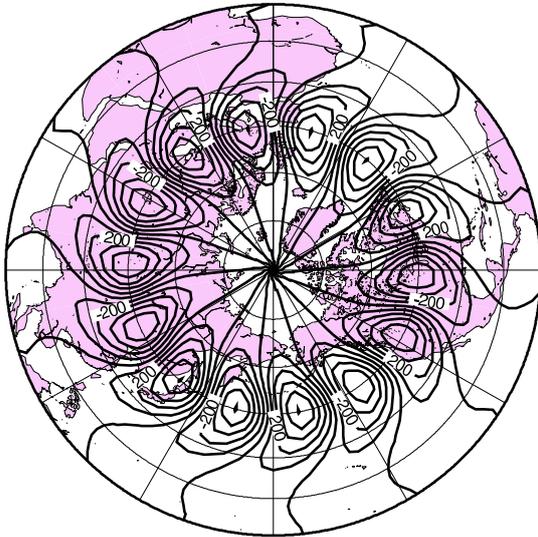
図 31: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上) 1.0 倍 (左下) 1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 6 における Mc モードの不安定構造 . ジオポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m] .

Unstable Mode Structure

($N=7$, Mc , Barotropic Height)

January clim

clim + AO*0.5



clim + AO*1.0

clim + AO*1.5

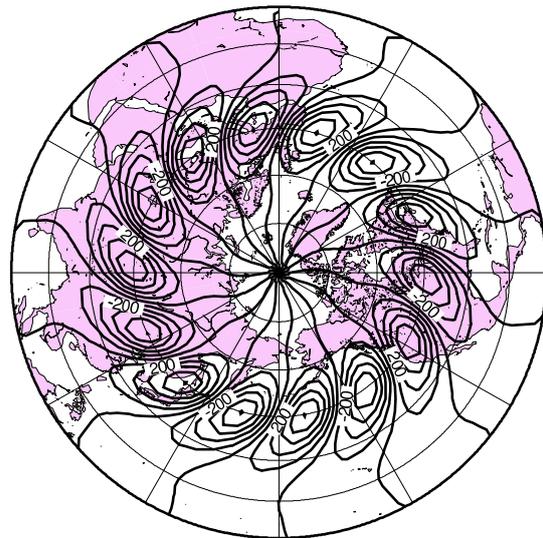
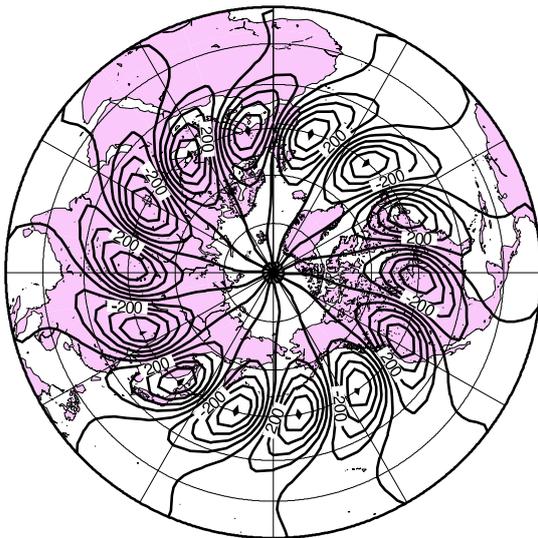


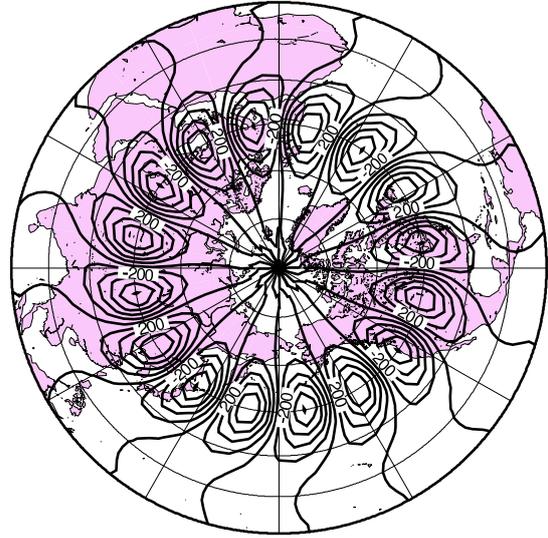
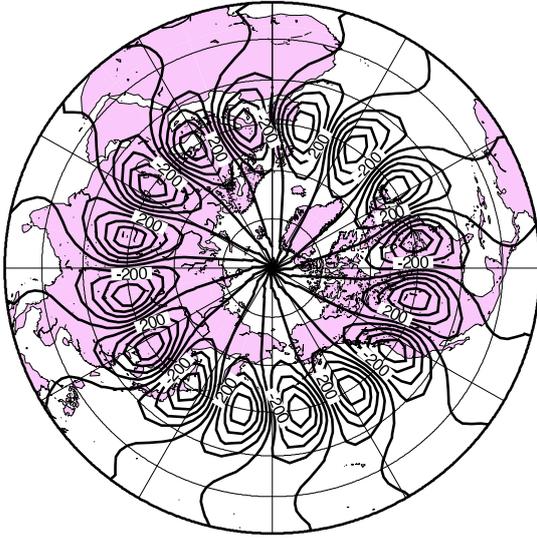
図 32: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上) 1.0 倍 (左下) 1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 7 における Mc モードの不安定構造 . ジオポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m] .

Unstable Mode Structure

($N=8$, Mc , Barotropic Height)

January clim

clim + AO*0.5



clim + AO*1.0

clim + AO*1.5

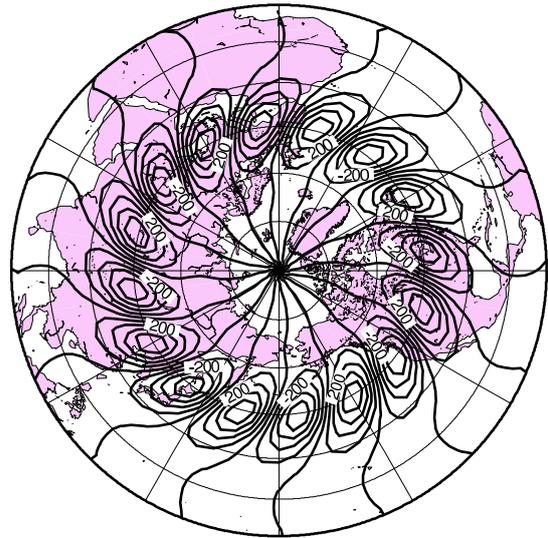
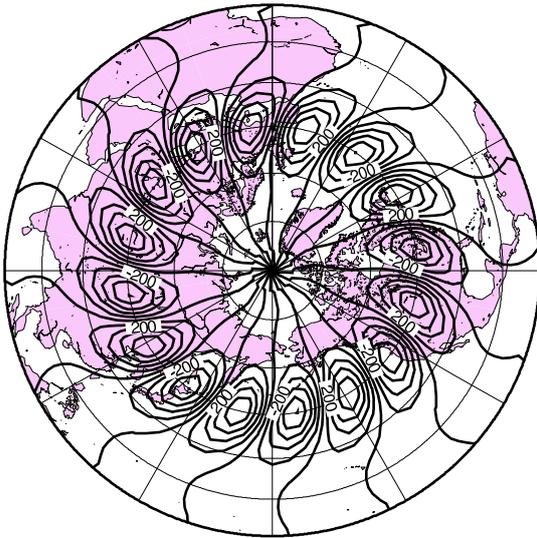


図 33: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上) 1.0 倍 (左下) 1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 8 における Mc モードの不安定構造 . ジオポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m] .

Unstable Mode Structure

(N=1, M2, Amplitude)

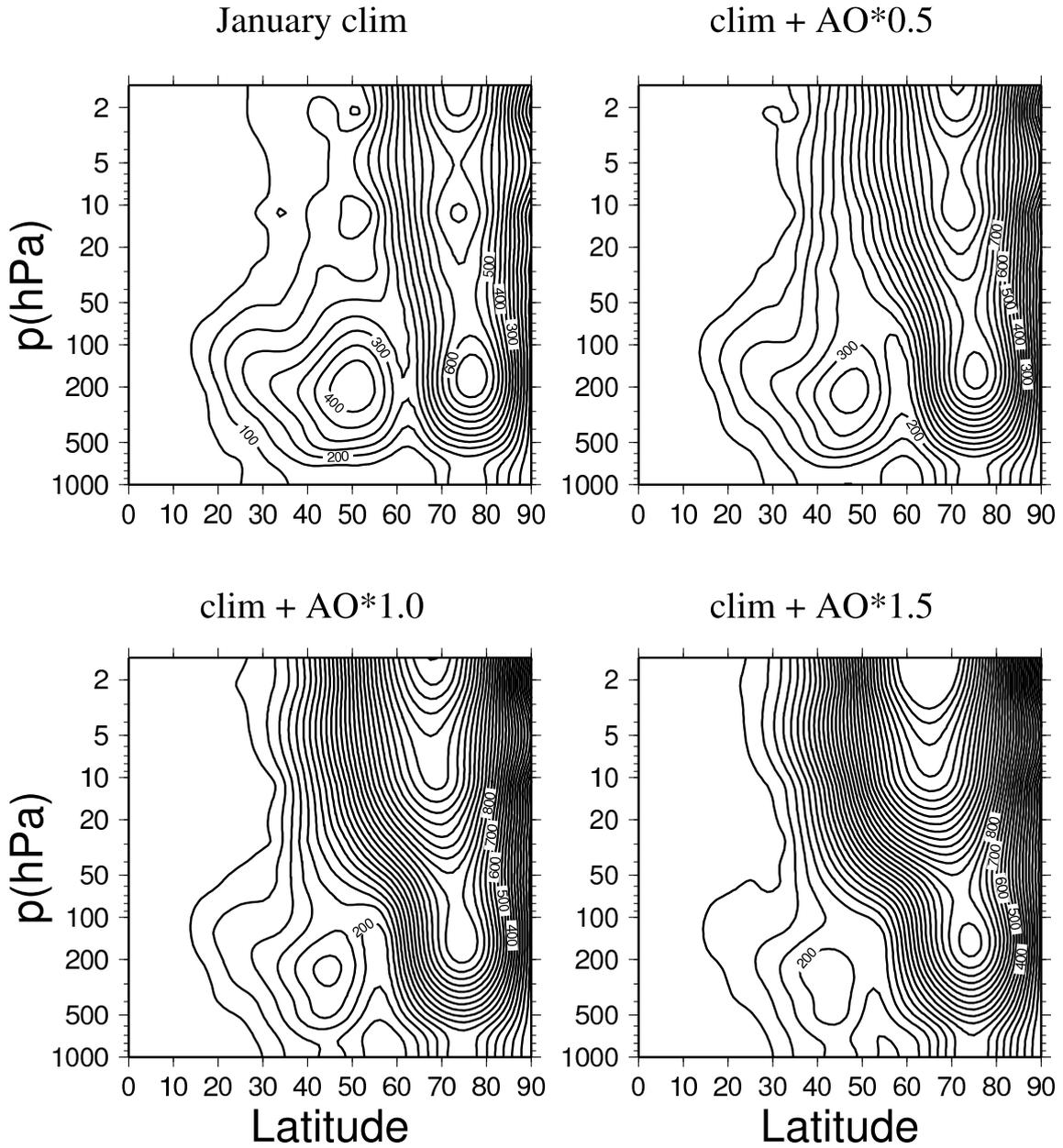


図 34: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 1 における M2 モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の振幅 [m]。

Unstable Mode Structure

(N=2, M2, Amplitude)

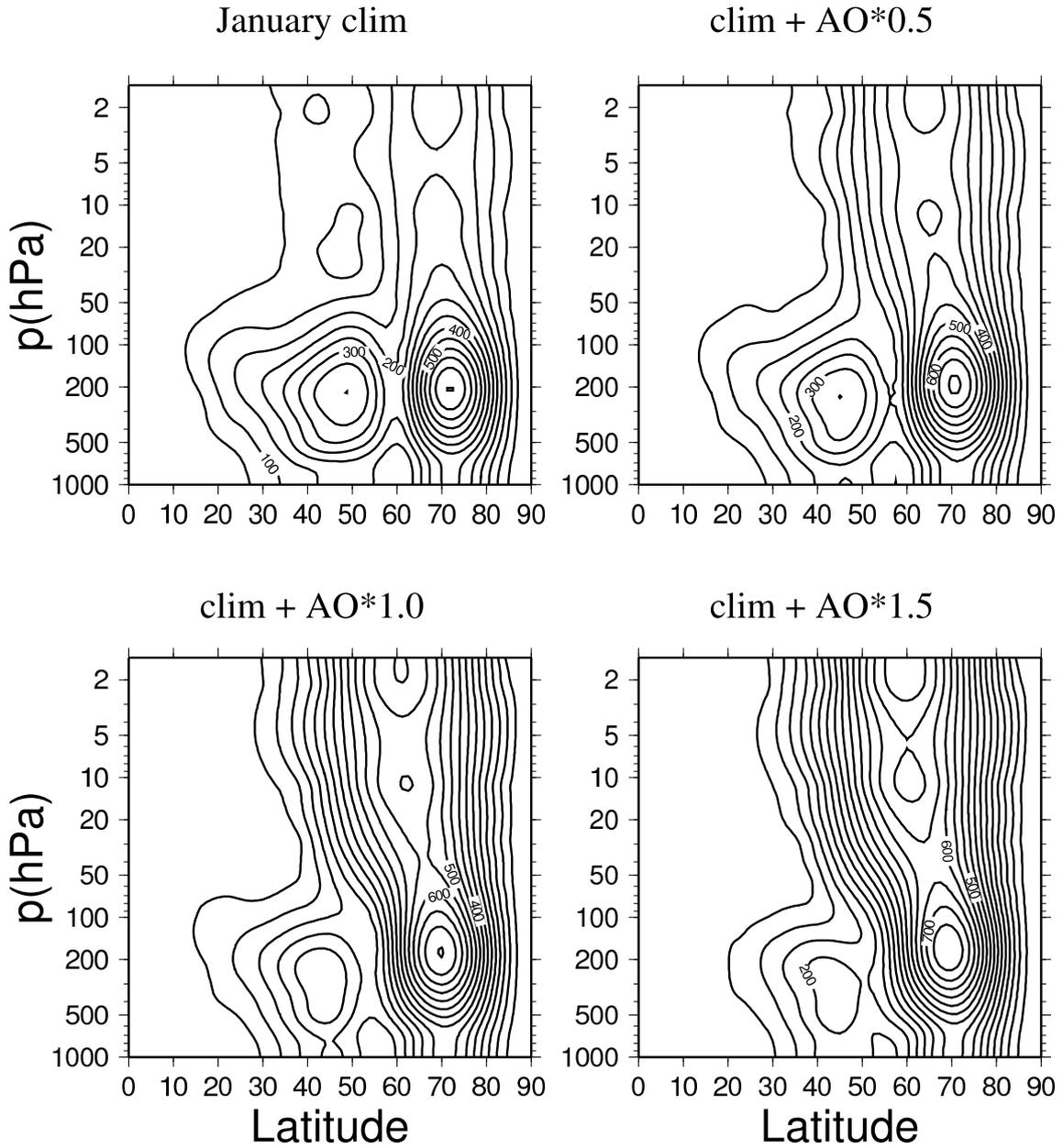


図 35: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 2 における M2 モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の振幅 [m]。

Unstable Mode Structure

(N=3, M2, Amplitude)

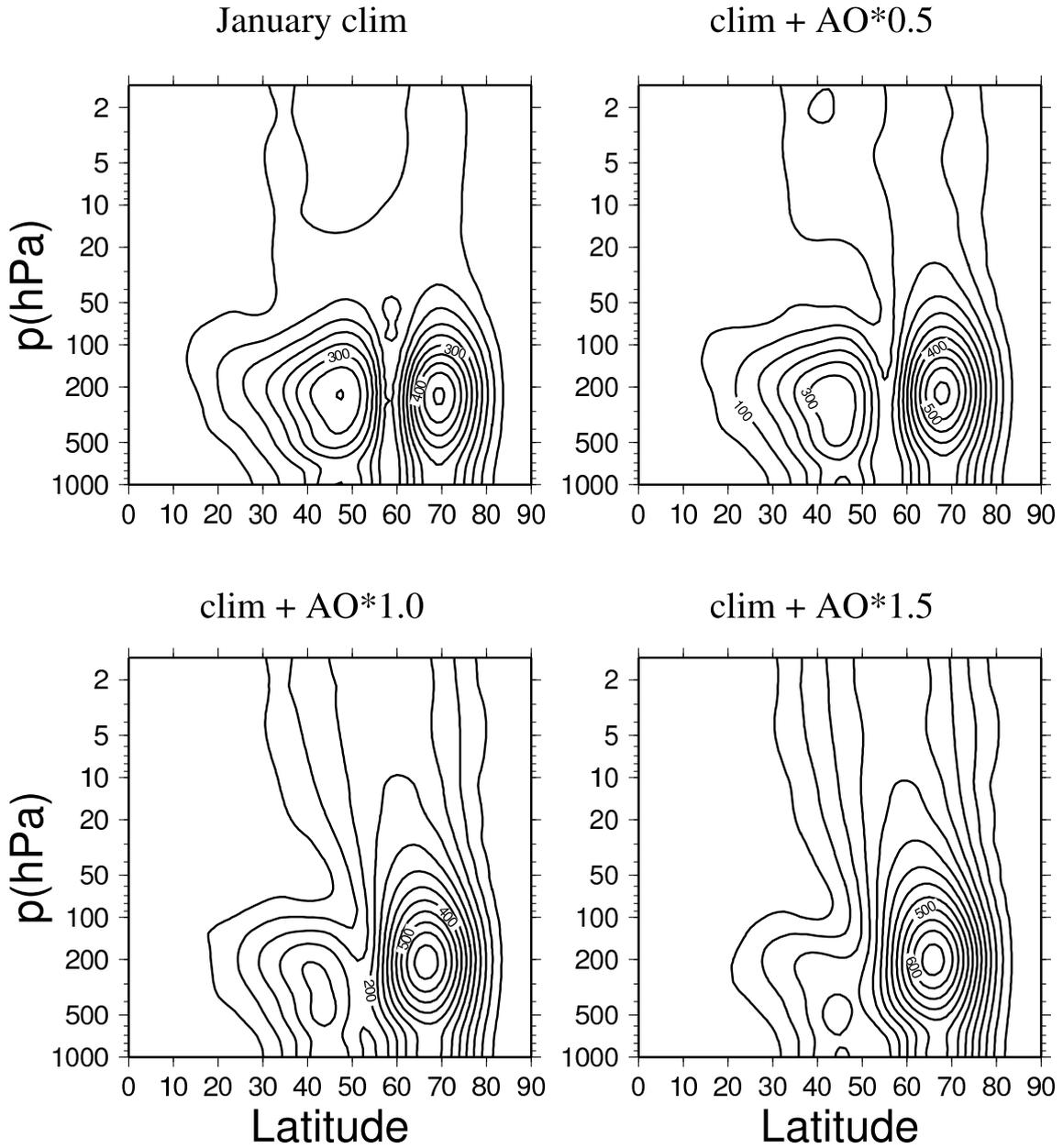


図 36: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 3 における M2 モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の振幅 [m]。

Unstable Mode Structure

(N=4, M2, Amplitude)

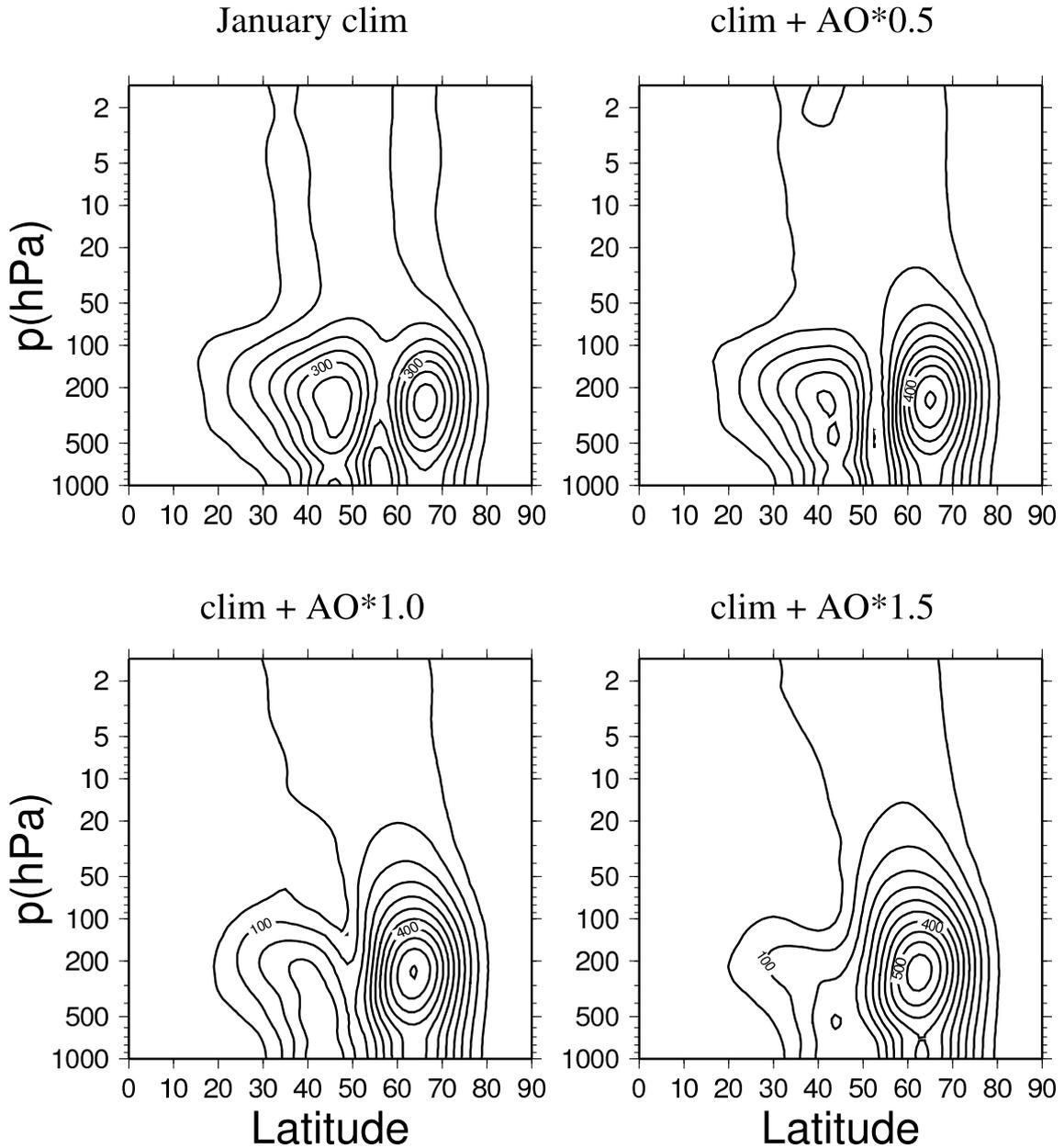


図 37: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 4 における M2 モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の振幅 [m]。

Unstable Mode Structure

(N=5, M2, Amplitude)

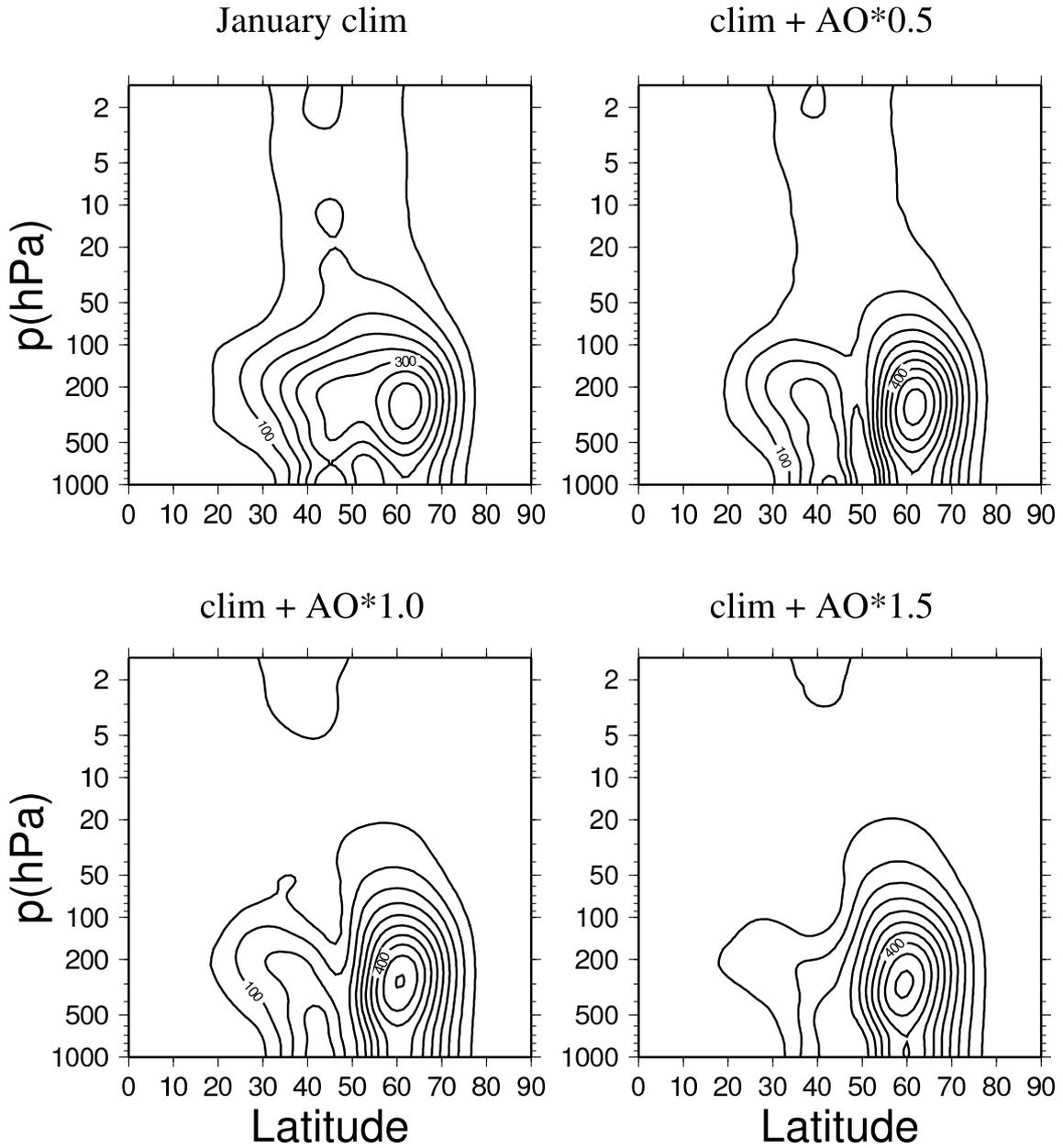


図 38: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乗せした仮想大気について、波数 5 における M2 モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の振幅 [m]。

Unstable Mode Structure

(N=6, M2, Amplitude)

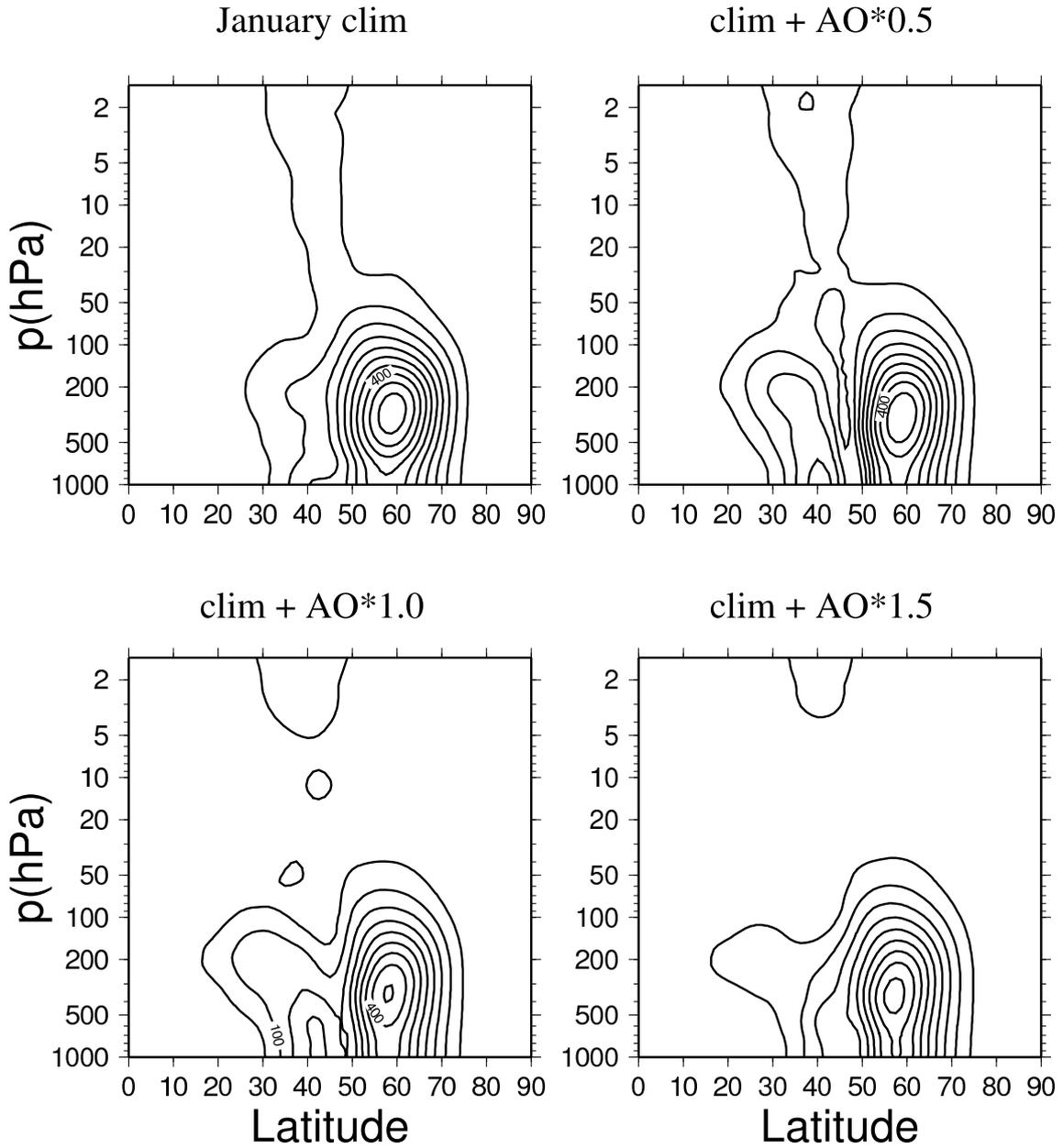


図 39: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 6 における M2 モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の振幅 [m]。

Unstable Mode Structure

(N=7, M2, Amplitude)

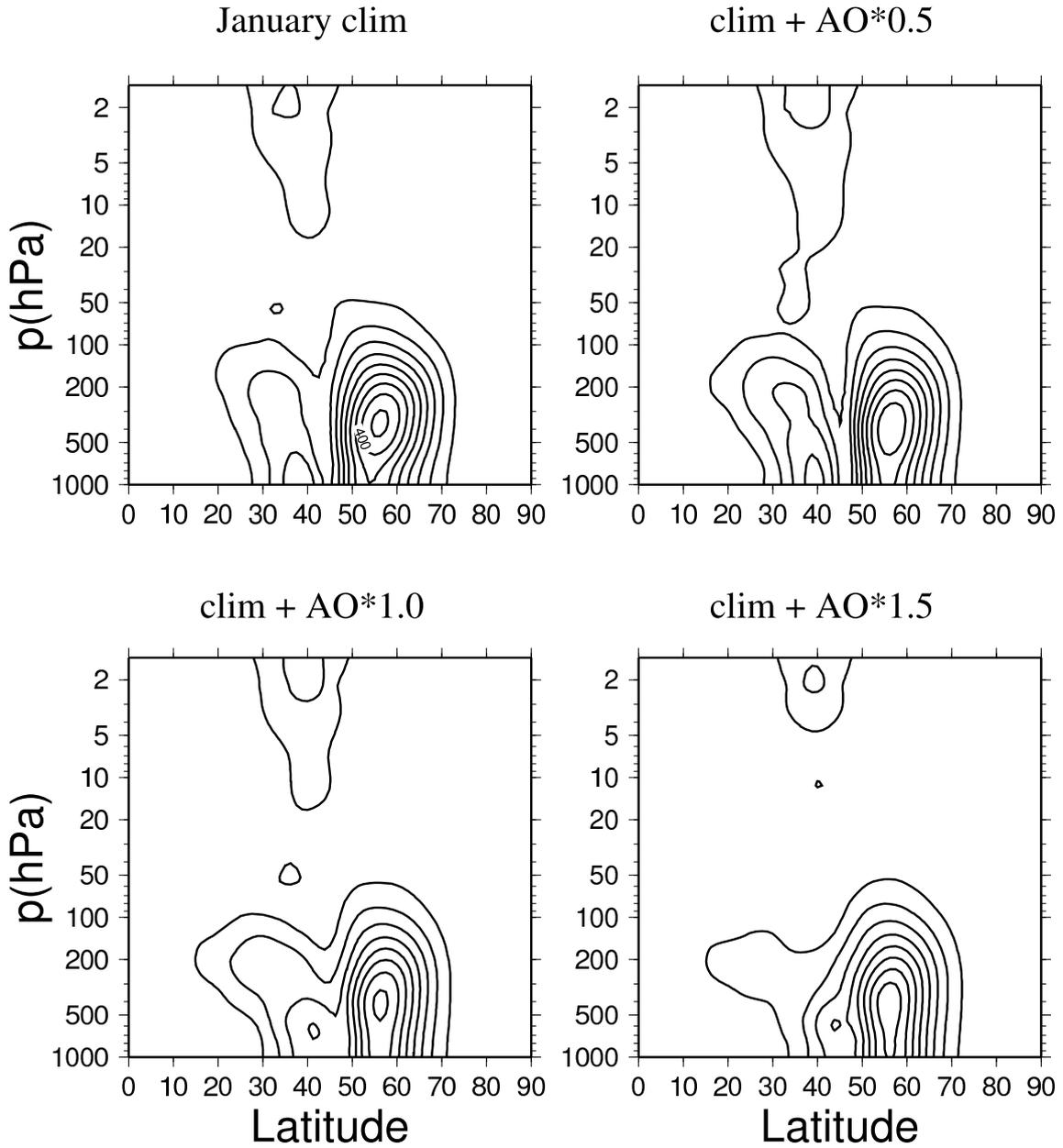


図 40: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 7 における M2 モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の振幅 [m]。

Unstable Mode Structure

(N=8, M2, Amplitude)

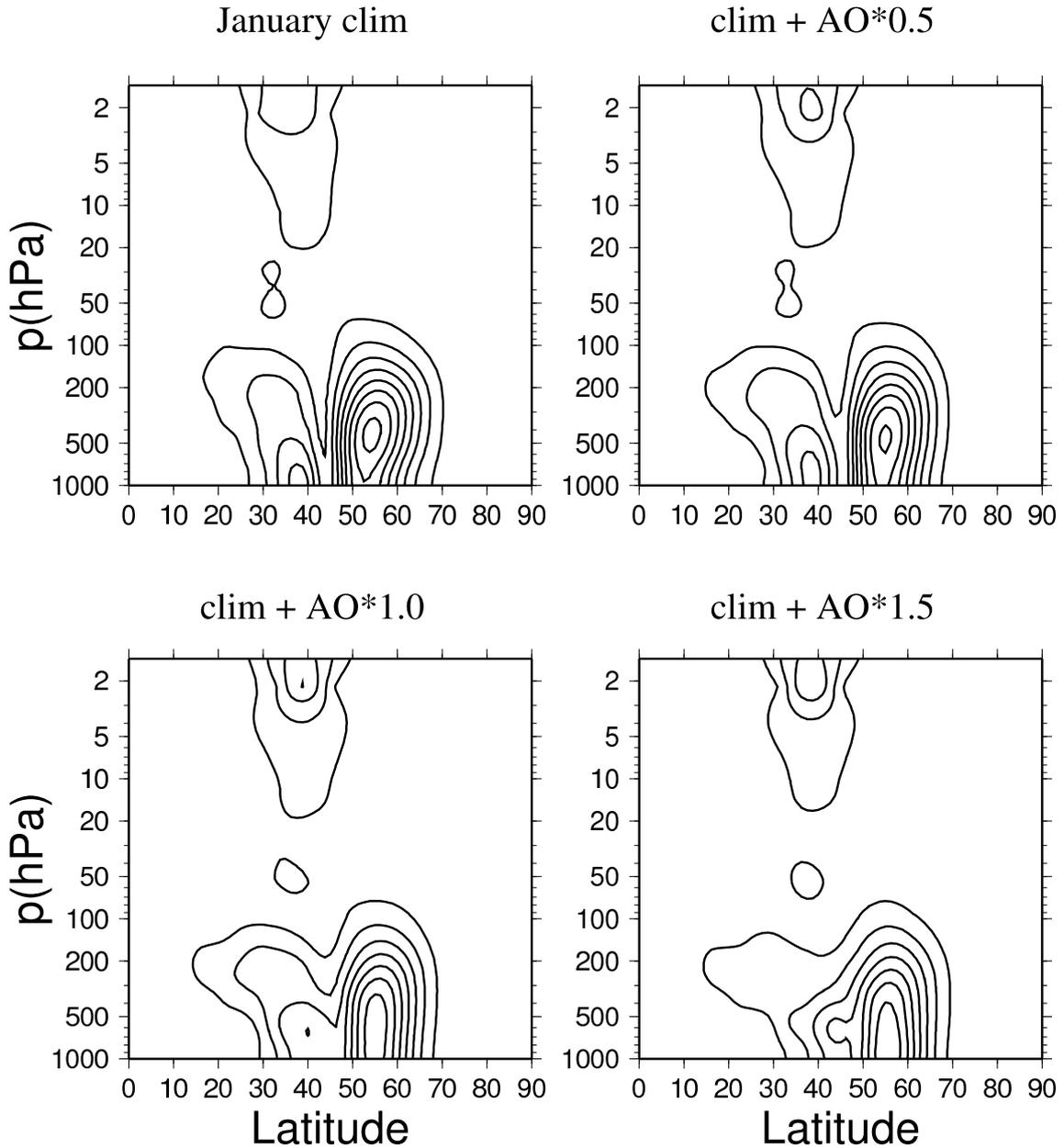


図 41: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 8 における M2 モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の振幅 [m]。

Unstable Mode Structure

(N=1, M2, Phase)

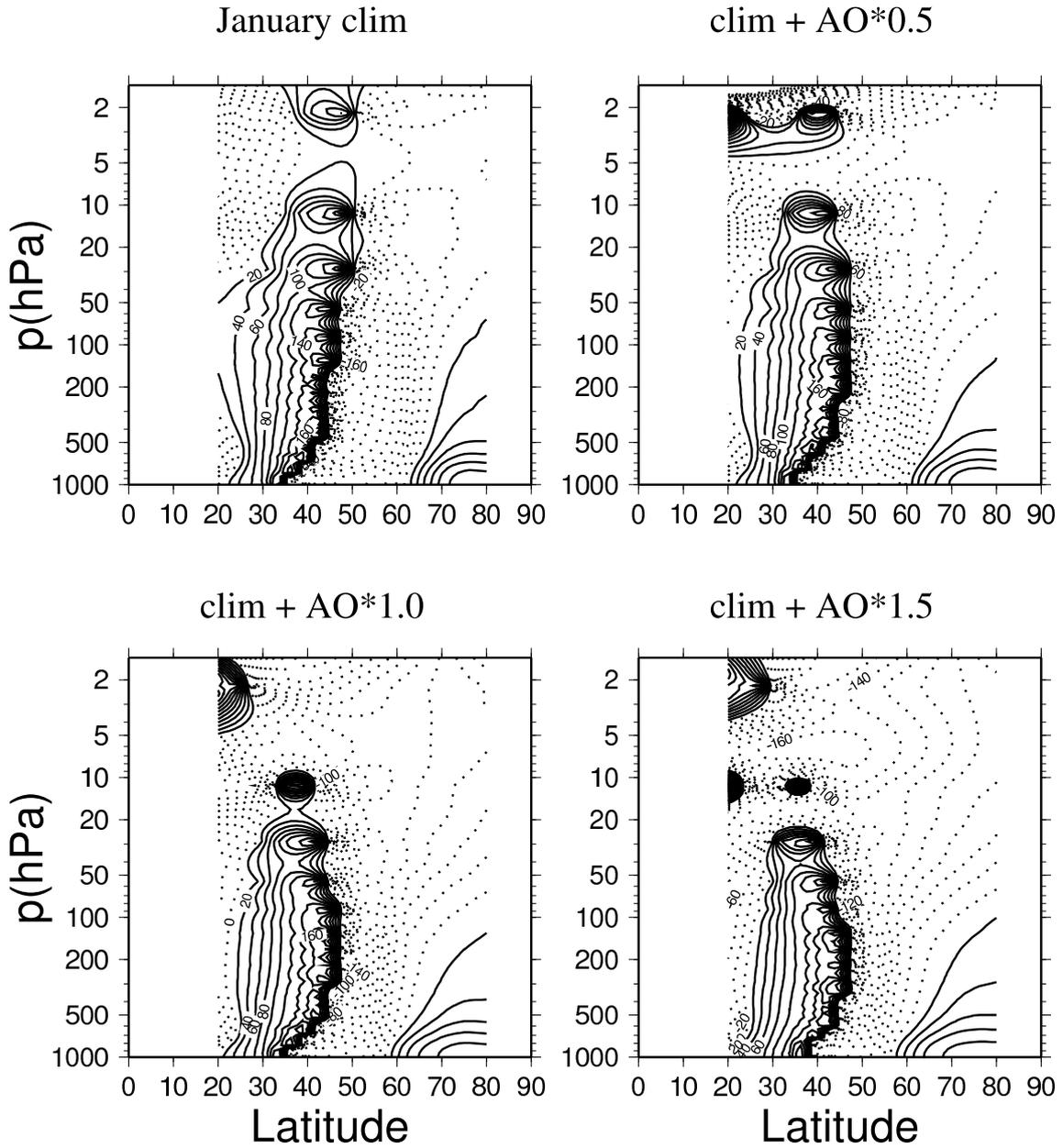


図 42: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 1 における M2 モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の位相 [°]。

Unstable Mode Structure

(N=2, M2, Phase)

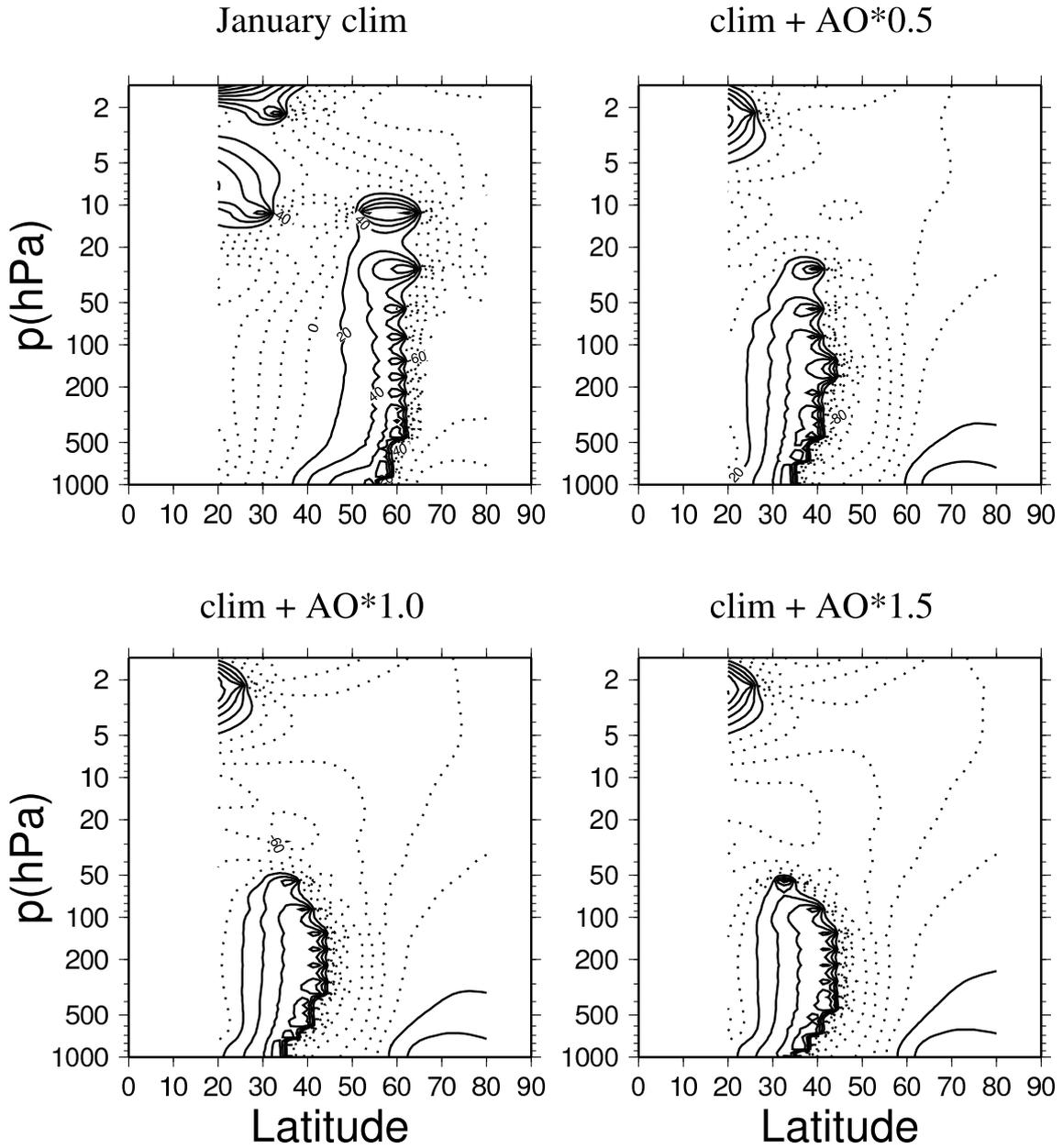


図 43: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 2 における M2 モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の位相 [°]。

Unstable Mode Structure

(N=3, M2, Phase)

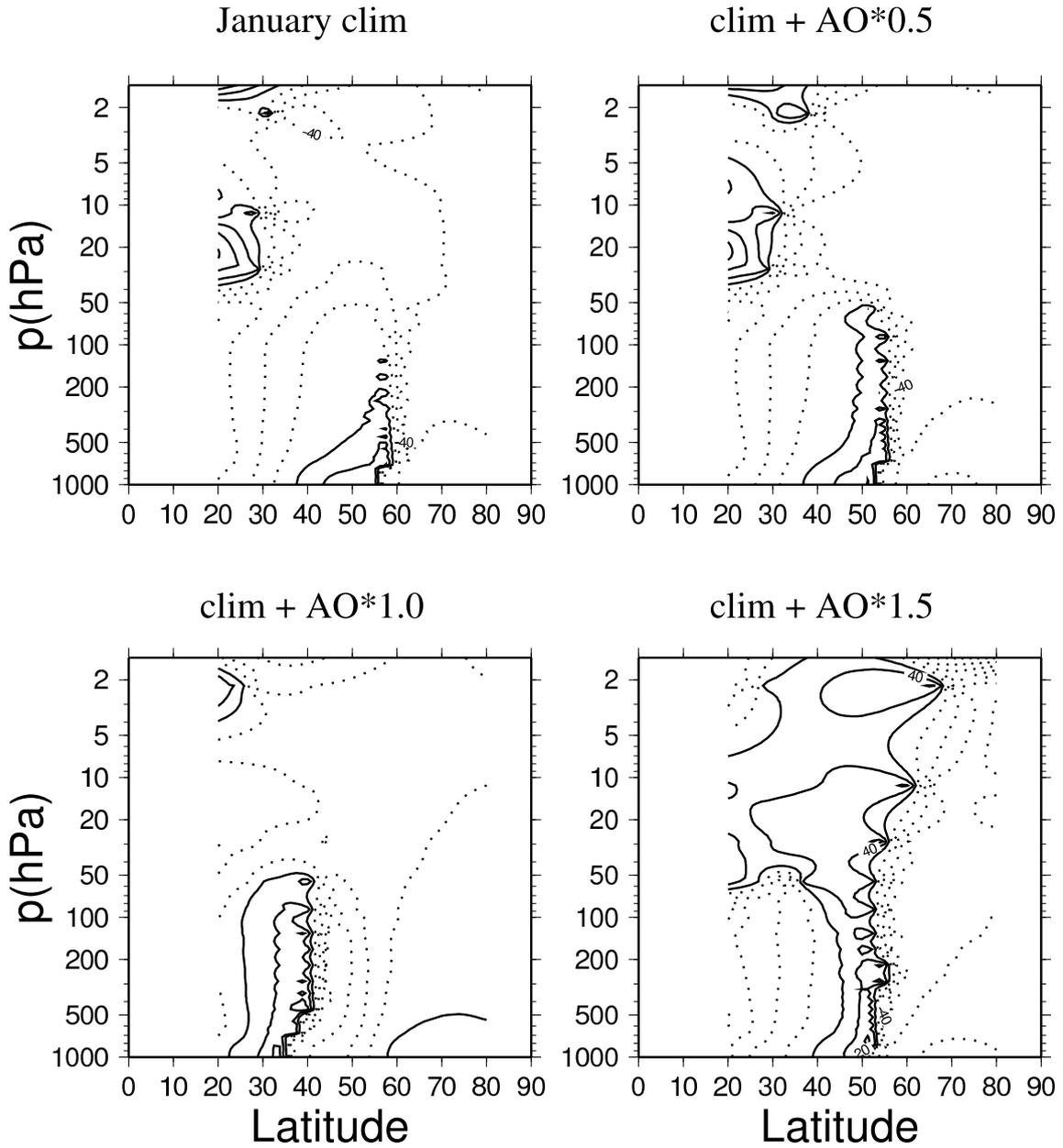


図 44: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 3 における M2 モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の位相 [°]。

Unstable Mode Structure

(N=4, M2, Phase)

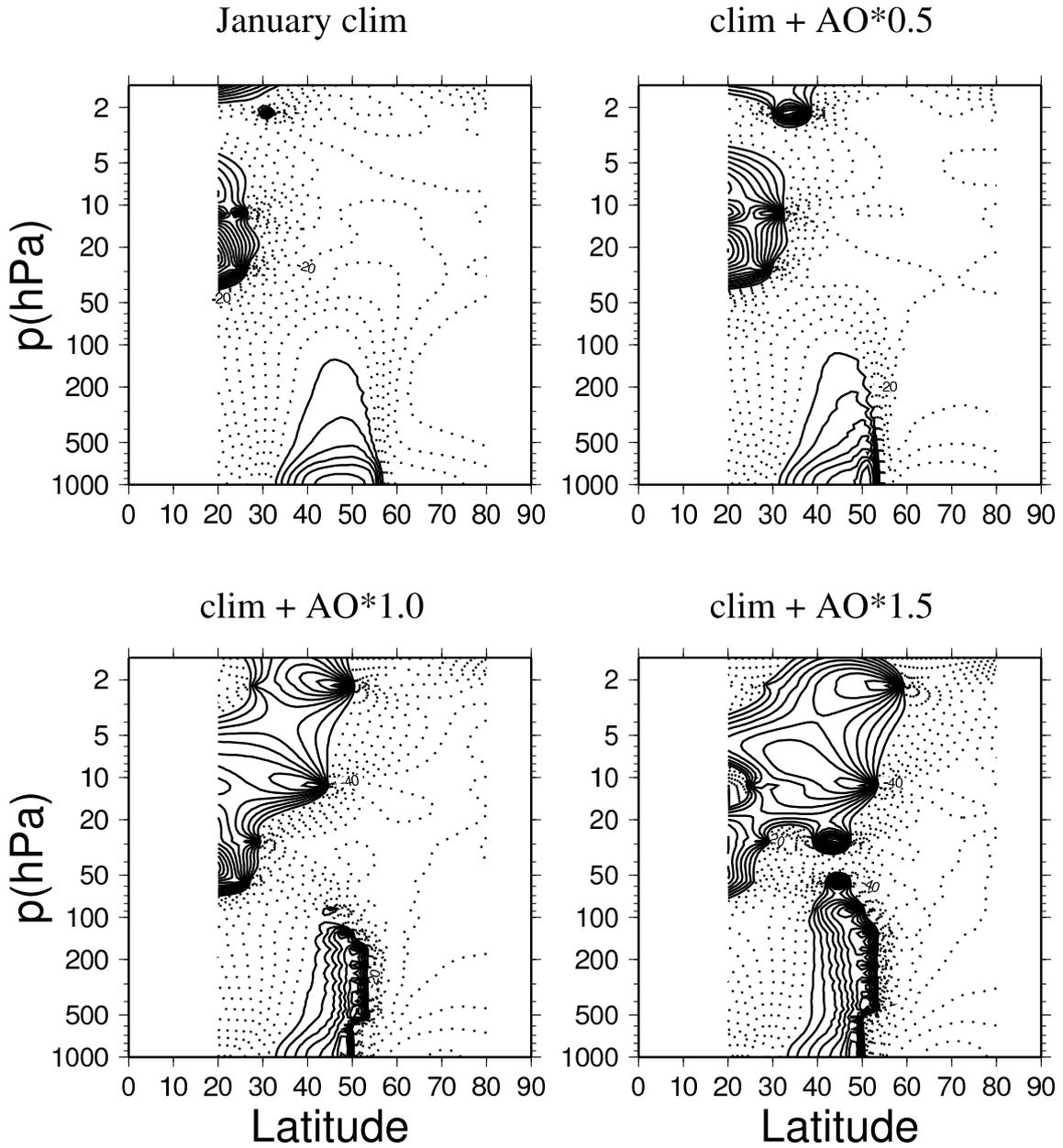


図 45: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 4 における M2 モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の位相 [°]。

Unstable Mode Structure

(N=5, M2, Phase)

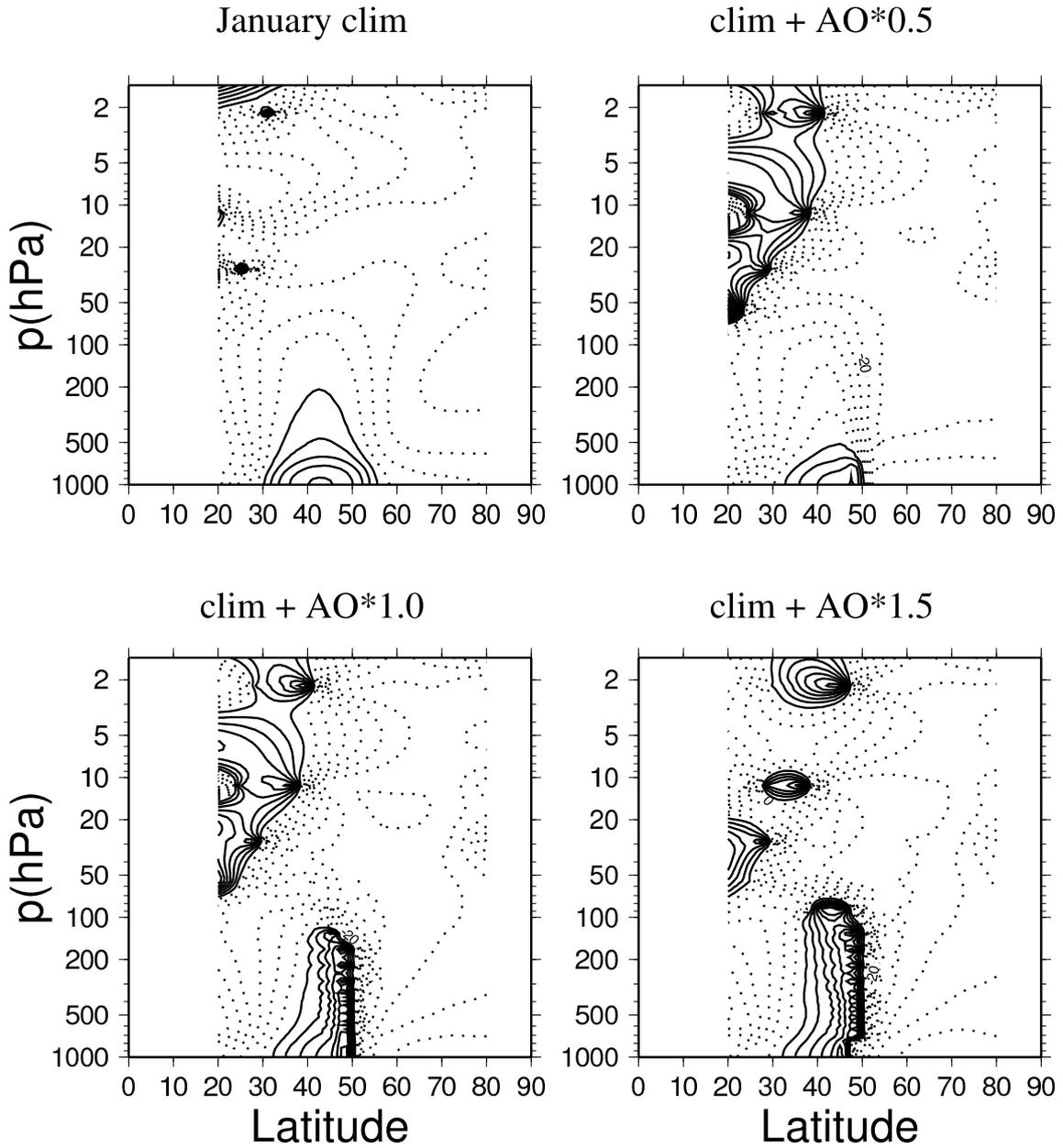


図 46: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 5 における M2 モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の位相 [$^{\circ}$]。

Unstable Mode Structure

(N=6, M2, Phase)

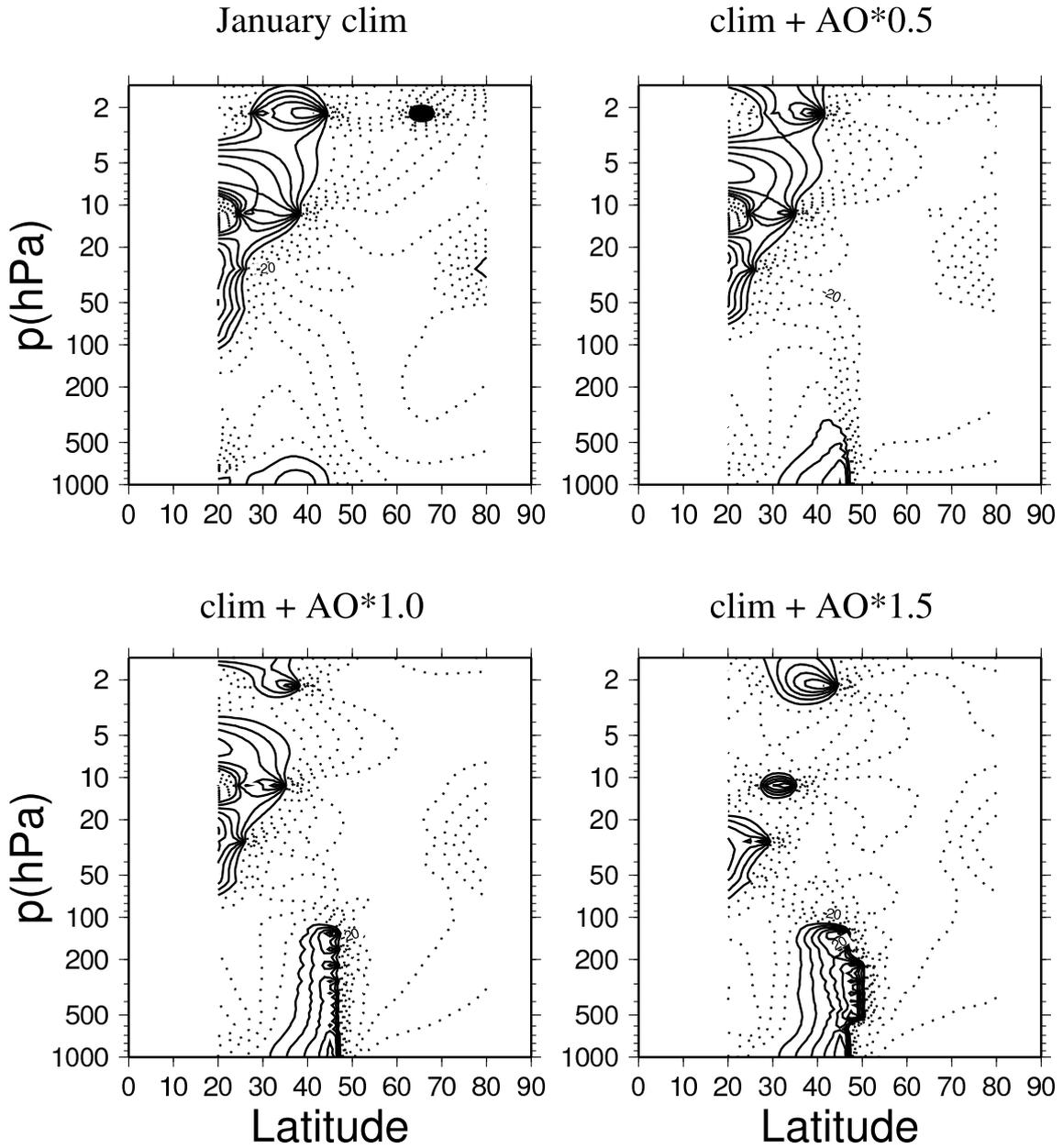


図 47: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 6 における M2 モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の位相 [°]。

Unstable Mode Structure

(N=7, M2, Phase)

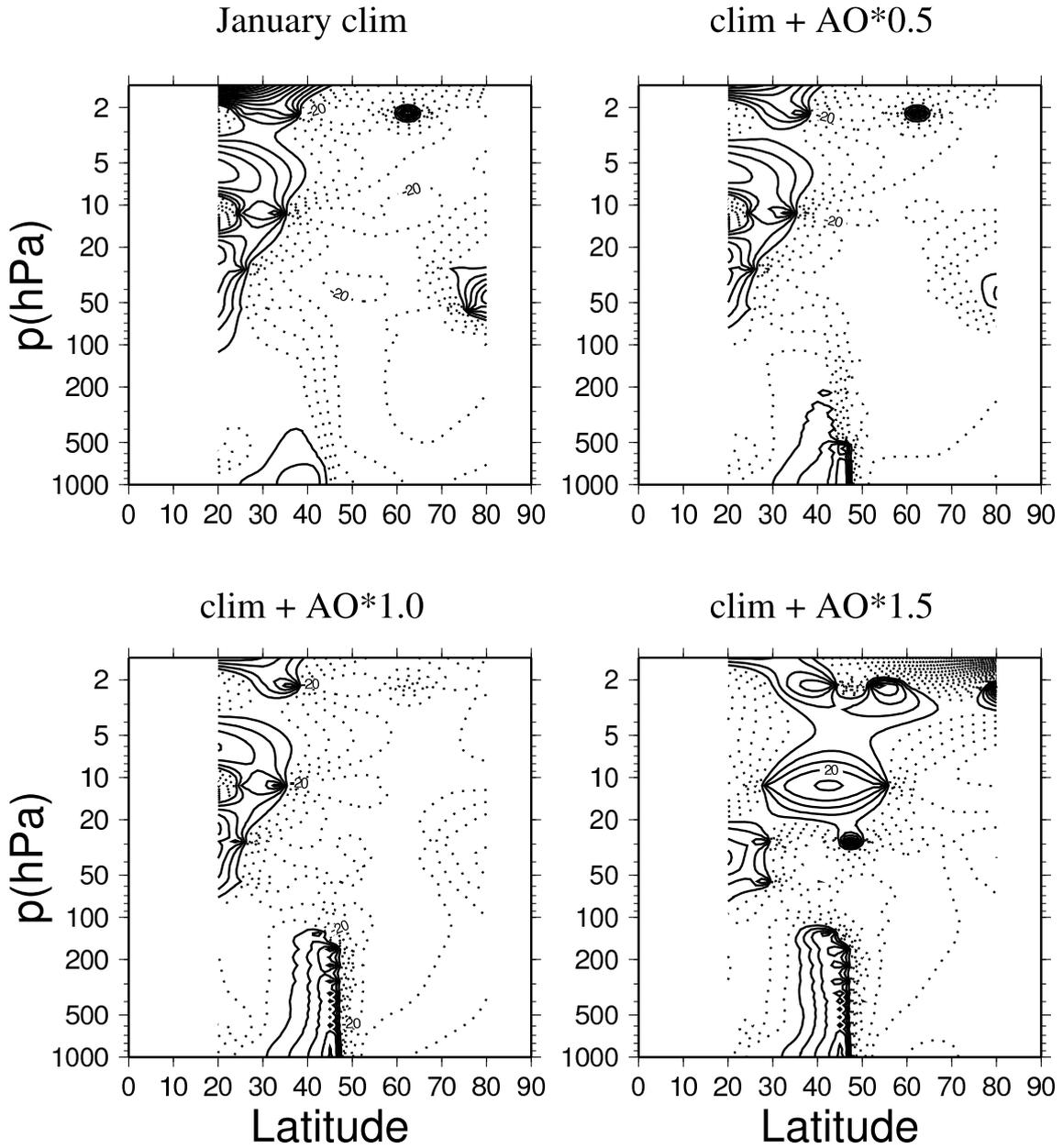


図 48: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 7 における M2 モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の位相 [°]。

Unstable Mode Structure

(N=8, M2, Phase)

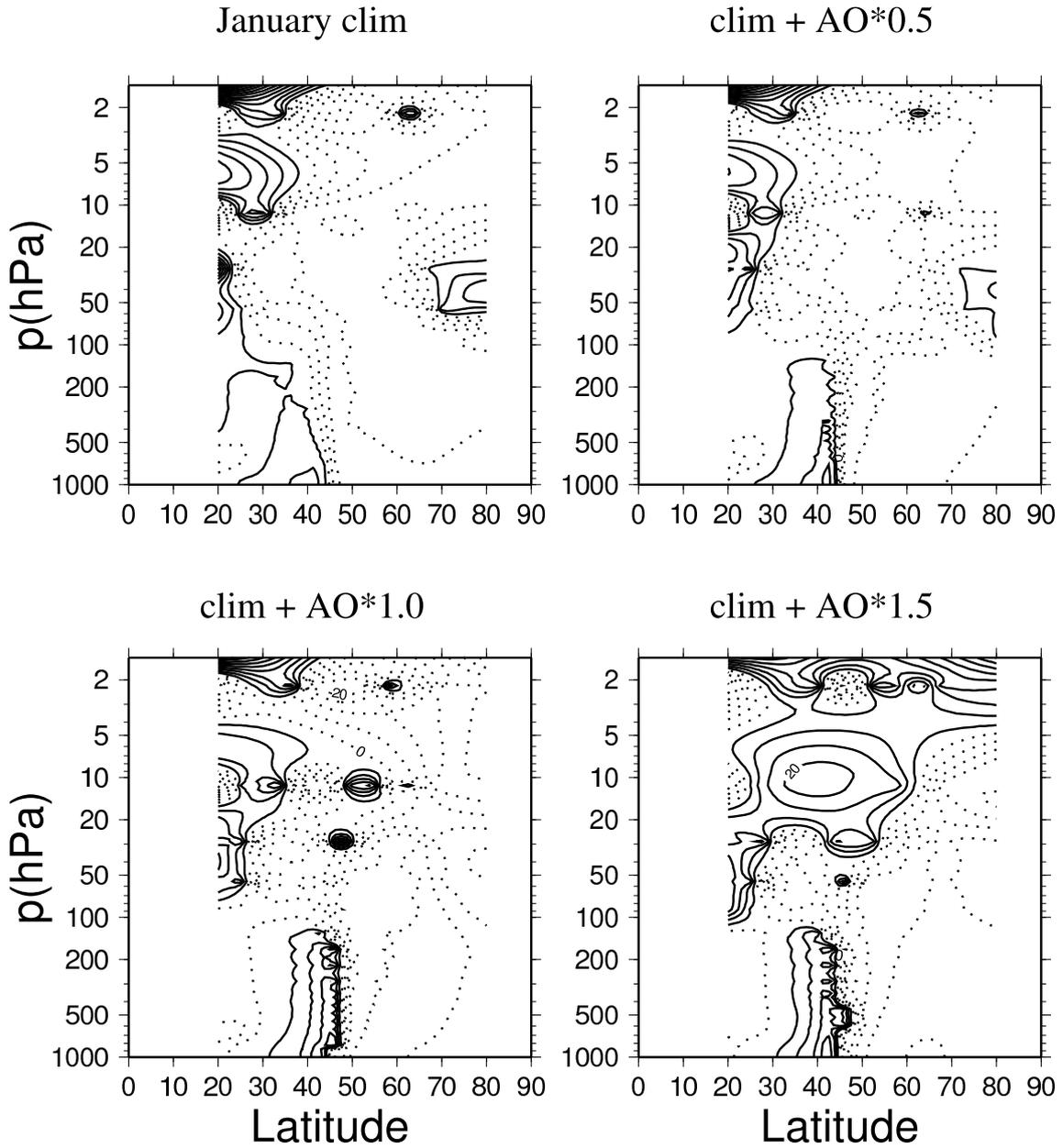
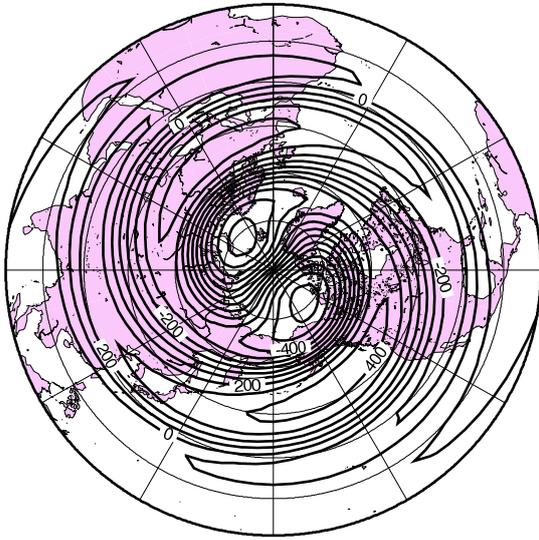


図 49: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 8 における M2 モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の位相 [°]。

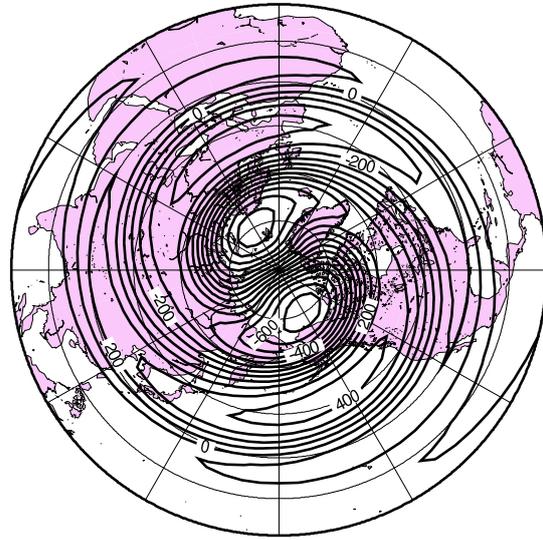
Unstable Mode Structure

(N=1, M2, Barotropic Height)

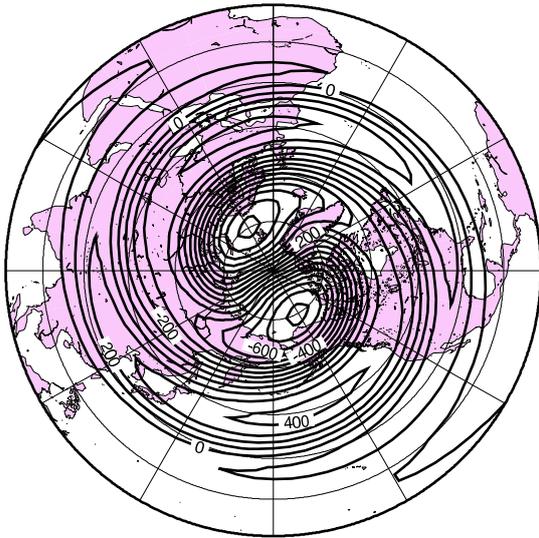
January clim



clim + AO*0.5



clim + AO*1.0



clim + AO*1.5

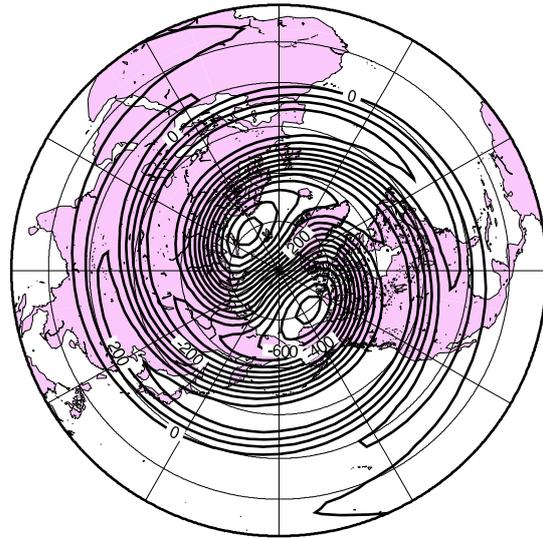


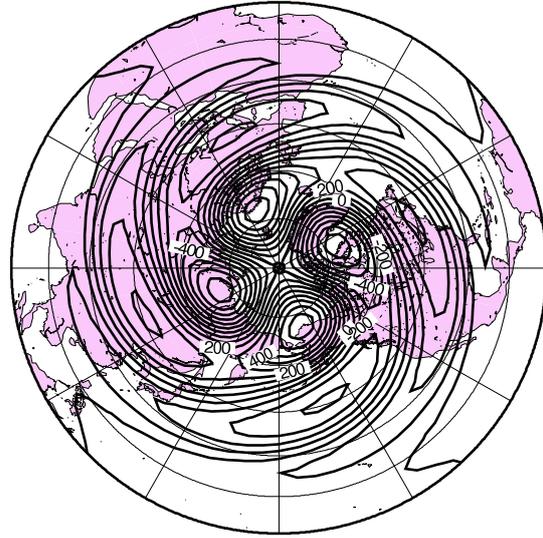
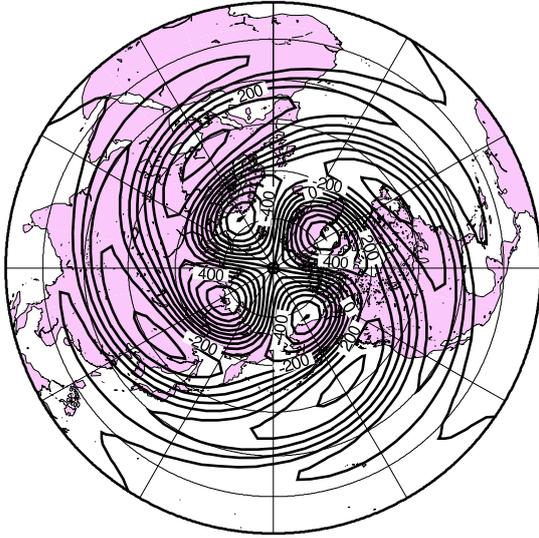
図 50: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上) 1.0 倍 (左下) 1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 1 における M2 モードの不安定構造 . ジオポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m] .

Unstable Mode Structure

(N=2, M2, Barotropic Height)

January clim

clim + AO*0.5



clim + AO*1.0

clim + AO*1.5

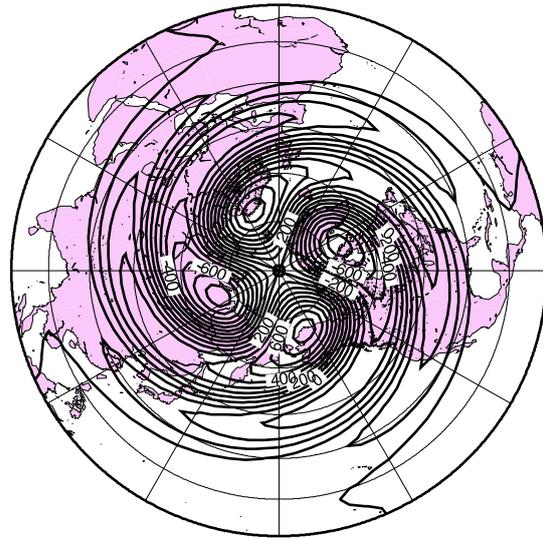
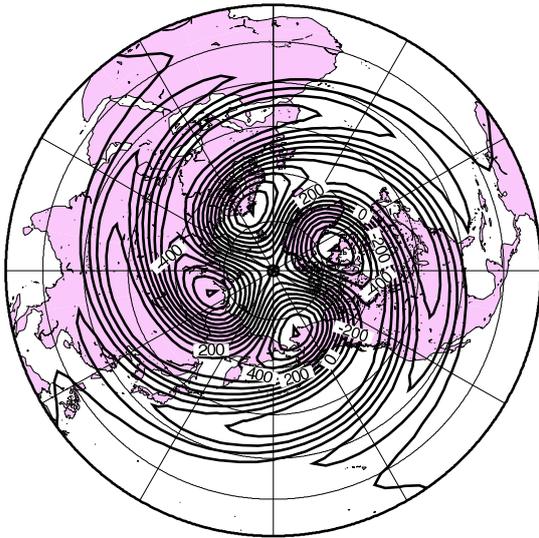
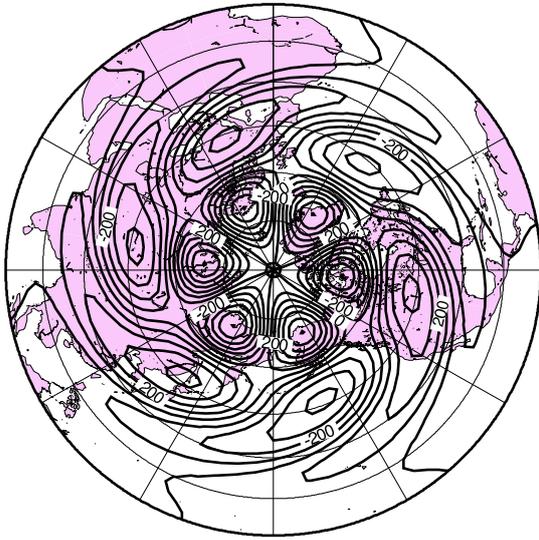


図 51: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上) 1.0 倍 (左下) 1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 2 における M2 モードの不安定構造 . ジオポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m] .

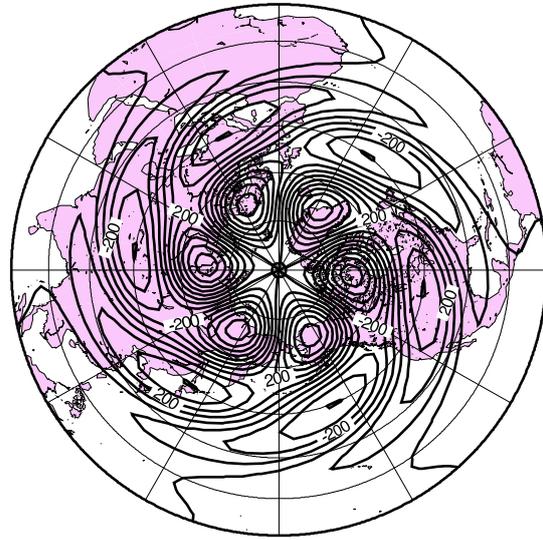
Unstable Mode Structure

(N=3, M2, Barotropic Height)

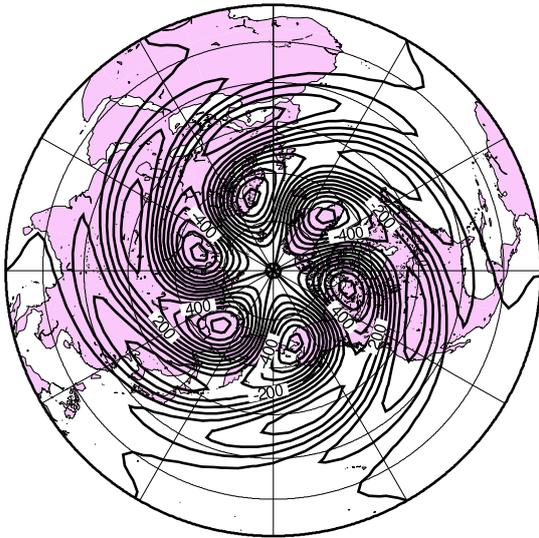
January clim



clim + AO*0.5



clim + AO*1.0



clim + AO*1.5

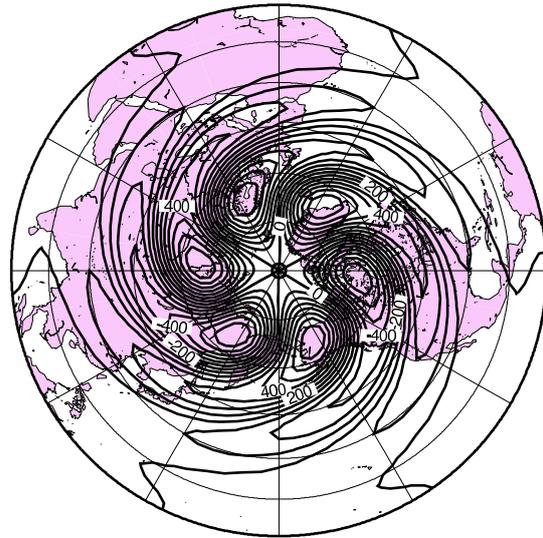


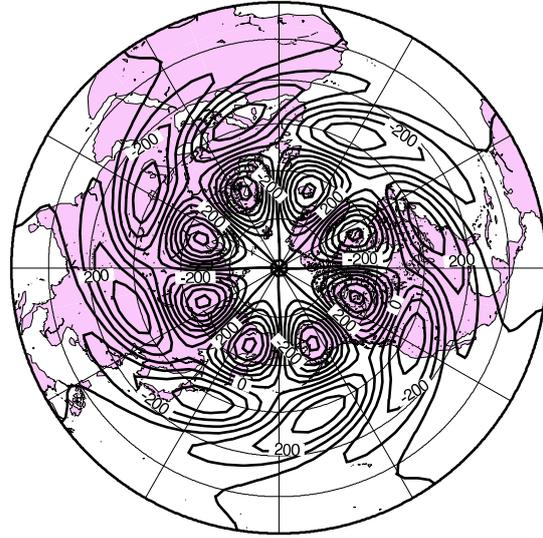
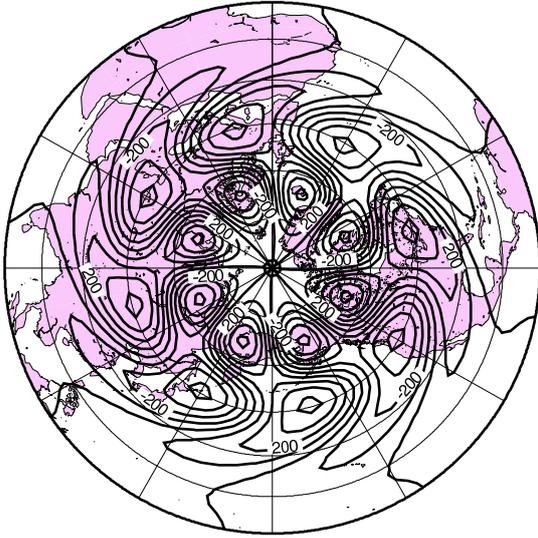
図 52: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上) 1.0 倍 (左下) 1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 3 における M2 モードの不安定構造 . ジオポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m] .

Unstable Mode Structure

(N=4, M2, Barotropic Height)

January clim

clim + AO*0.5



clim + AO*1.0

clim + AO*1.5

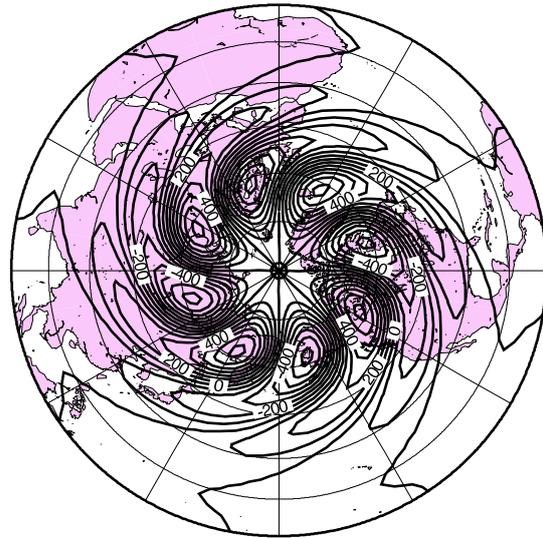
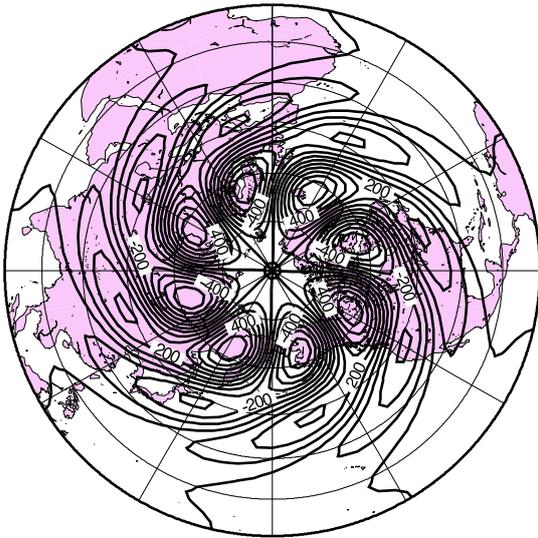
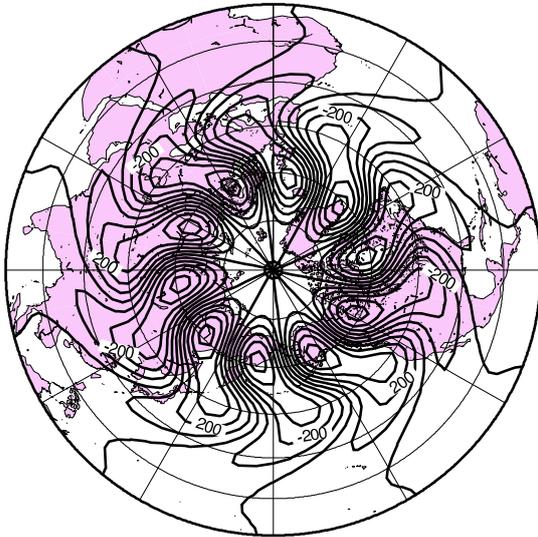


図 53: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上) 1.0 倍 (左下) 1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 4 における M2 モードの不安定構造 . ジオポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m] .

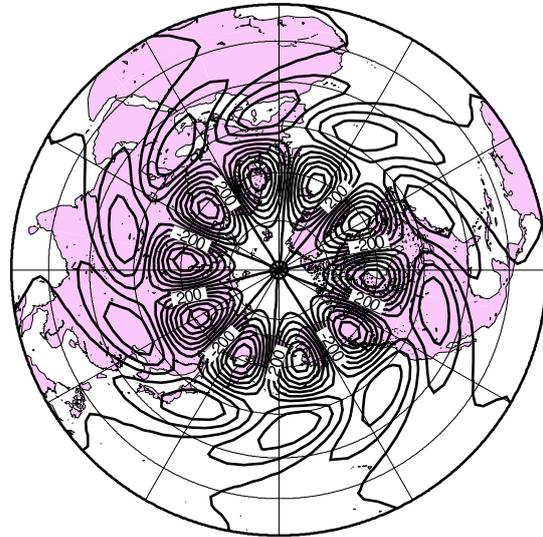
Unstable Mode Structure

(N=5, M2, Barotropic Height)

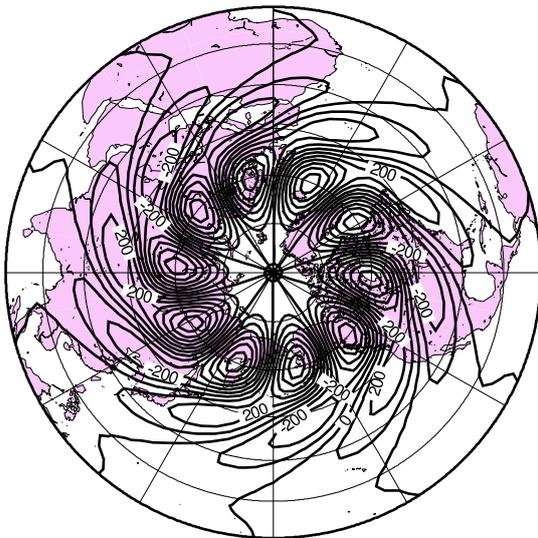
January clim



clim + AO*0.5



clim + AO*1.0



clim + AO*1.5

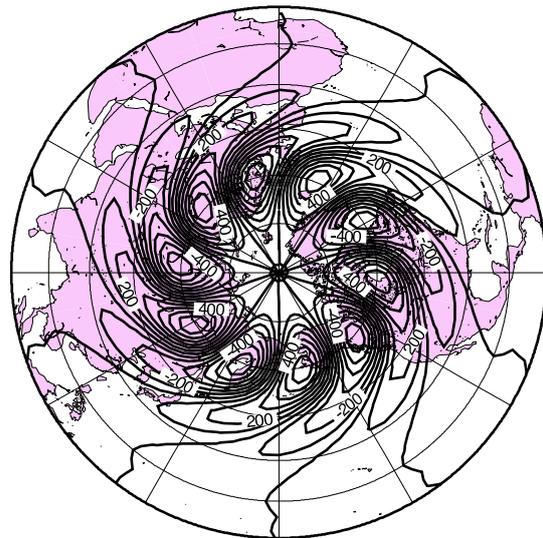


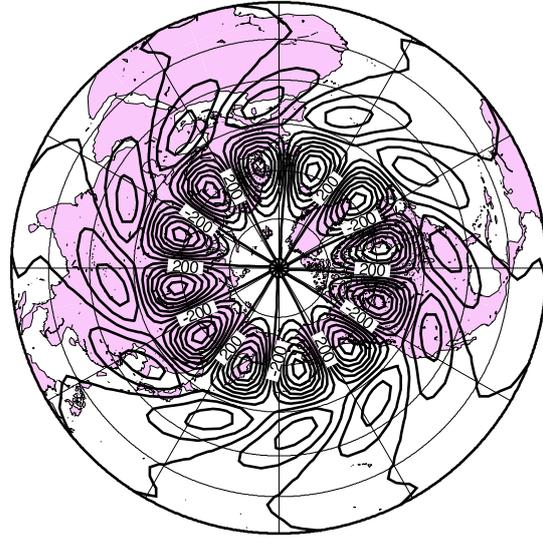
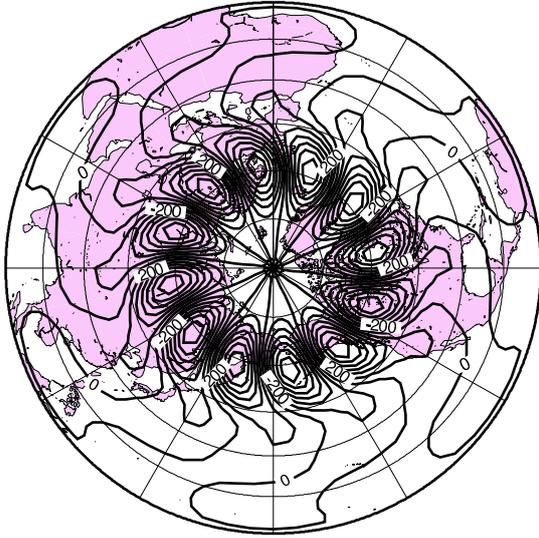
図 54: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上) 1.0 倍 (左下) 1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 5 における M2 モードの不安定構造 . ジオポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m] .

Unstable Mode Structure

(N=6, M2, Barotropic Height)

January clim

clim + AO*0.5



clim + AO*1.0

clim + AO*1.5

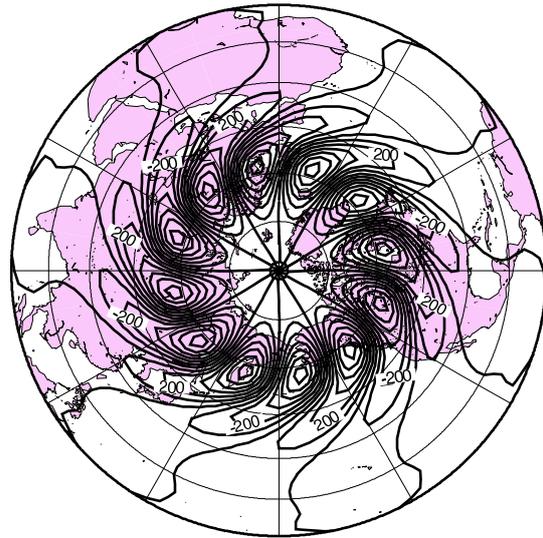
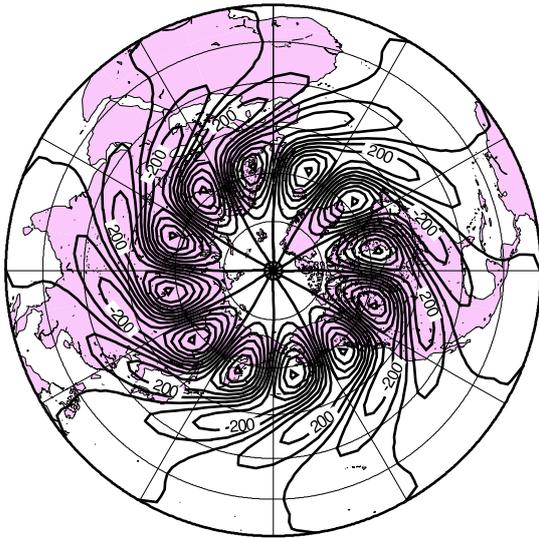


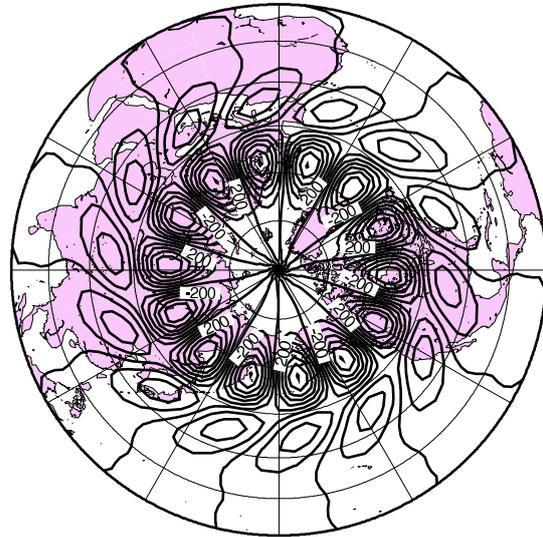
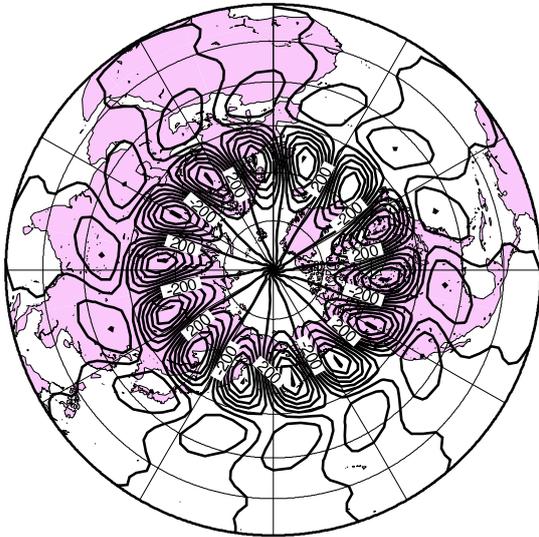
図 55: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上) 1.0 倍 (左下) 1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 6 における M2 モードの不安定構造 . ジオポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m] .

Unstable Mode Structure

(N=7, M2, Barotropic Height)

January clim

clim + AO*0.5



clim + AO*1.0

clim + AO*1.5

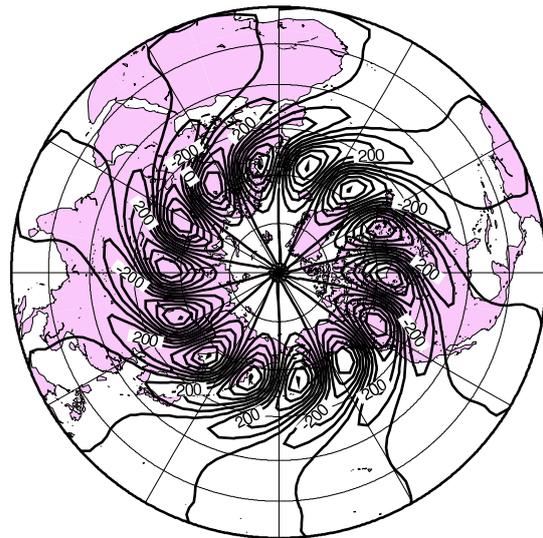
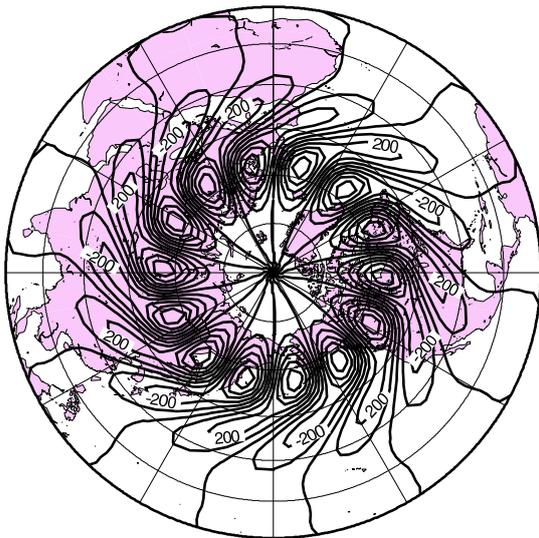


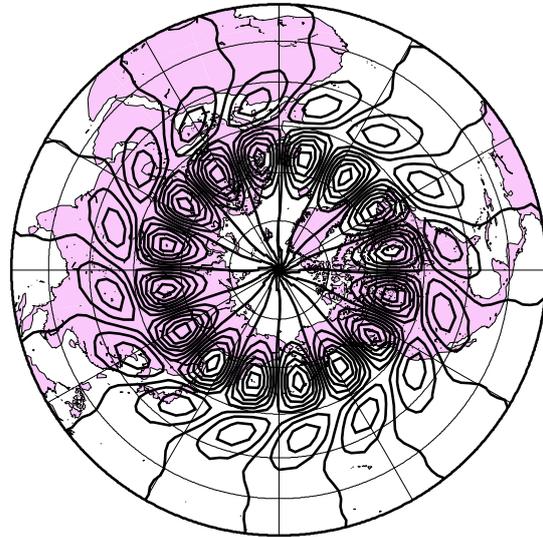
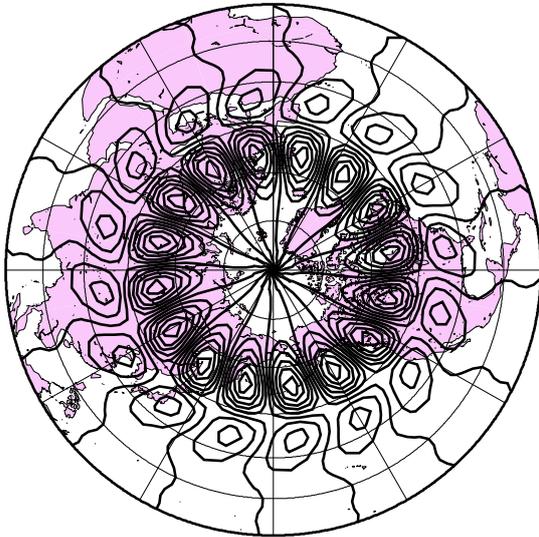
図 56: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上) 1.0 倍 (左下) 1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 7 における M2 モードの不安定構造 . ジオポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m] .

Unstable Mode Structure

(N=8, M2, Barotropic Height)

January clim

clim + AO*0.5



clim + AO*1.0

clim + AO*1.5

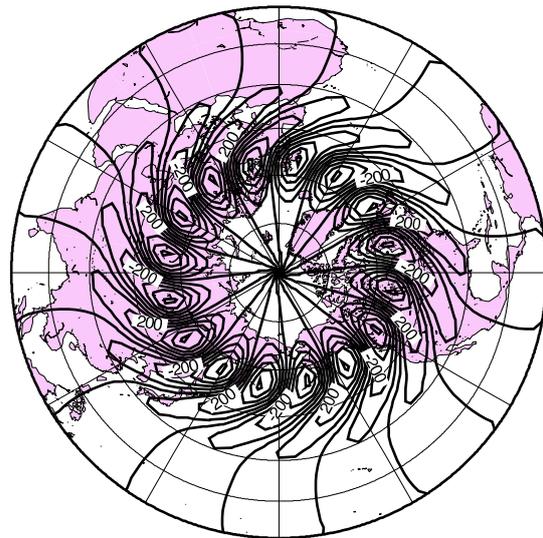
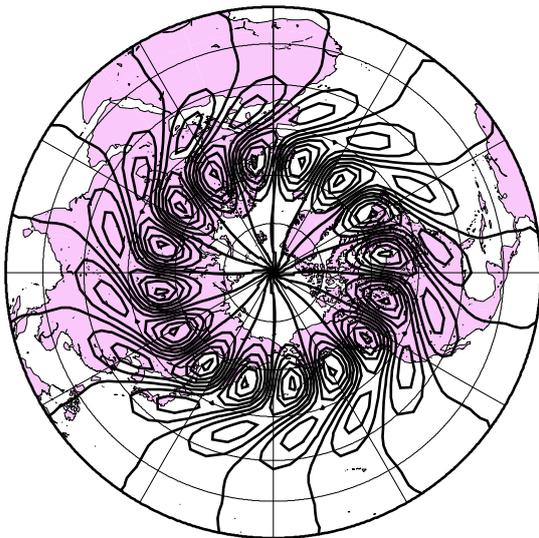


図 57: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上) 1.0 倍 (左下) 1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 8 における M2 モードの不安定構造 . ジオポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m] .

Unstable Mode Structure

(N=2, M3, Amplitude)

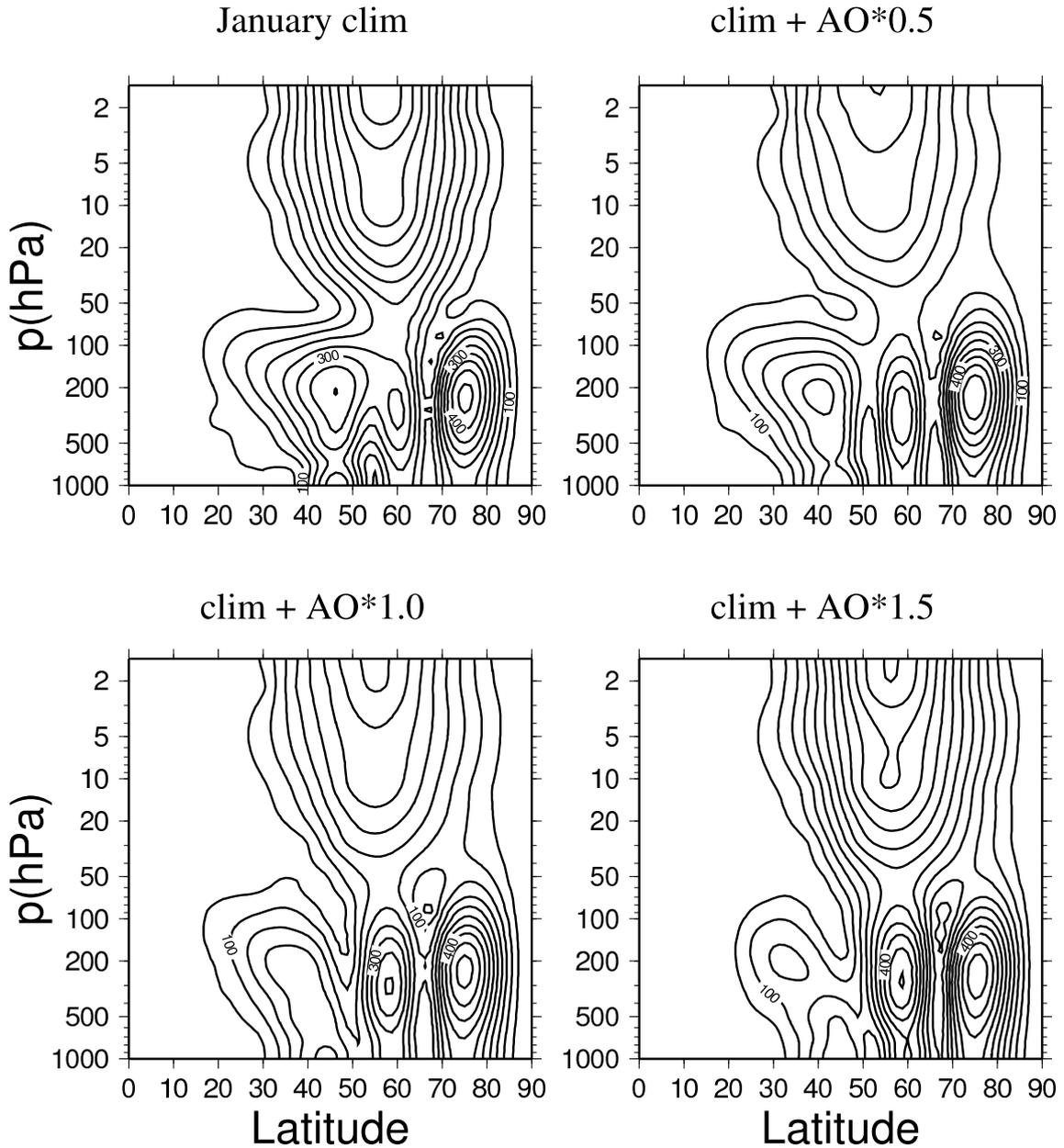


図 58: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上) 1.0 倍 (左下) 1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 2 における M3 モードの不安定構造．ジオポテンシャル高度の振幅 [m] ．

Unstable Mode Structure

(N=3, M3, Amplitude)

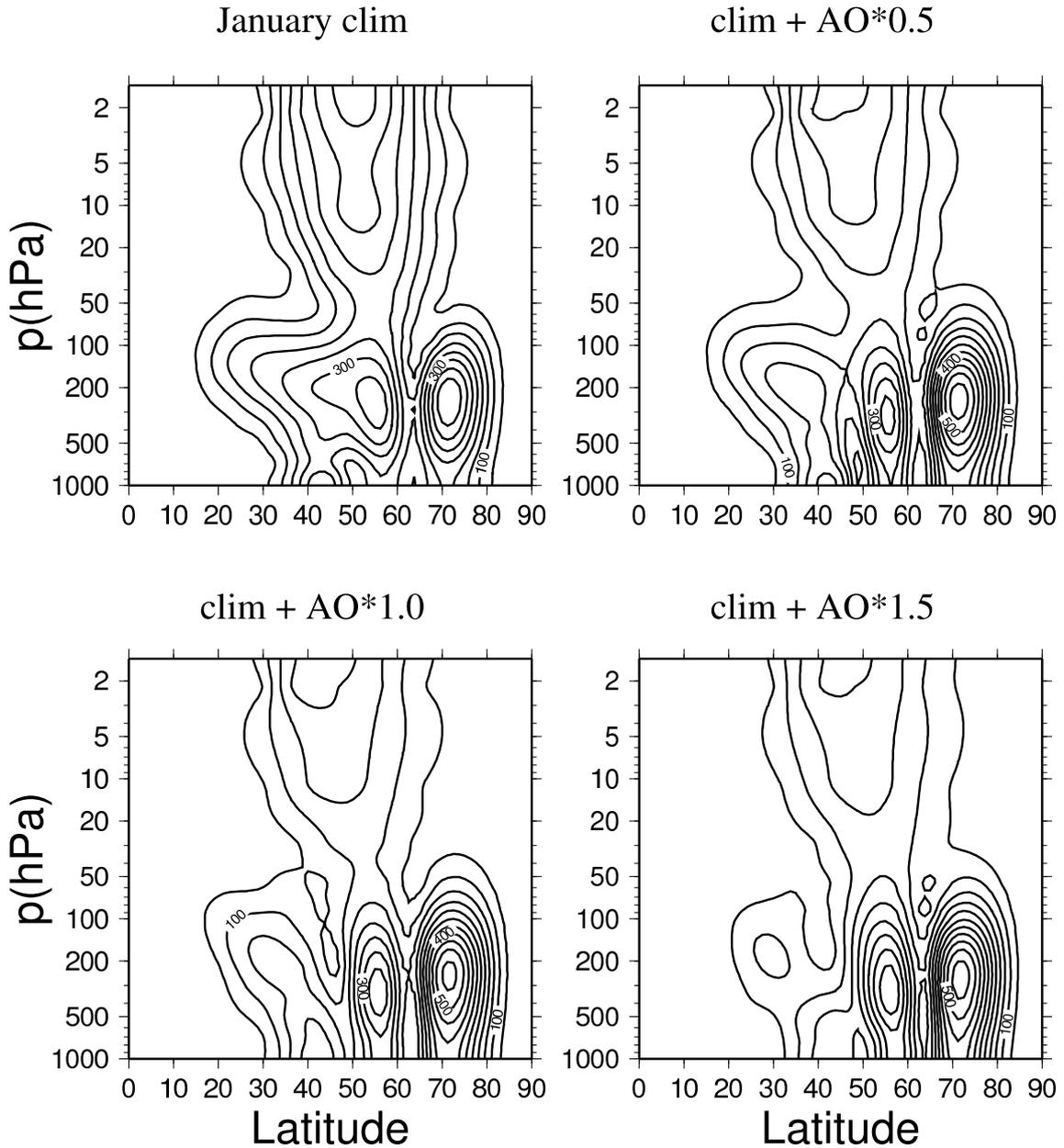


図 59: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 3 における M3 モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の振幅 [m]。

Unstable Mode Structure

(N=4, M3, Amplitude)

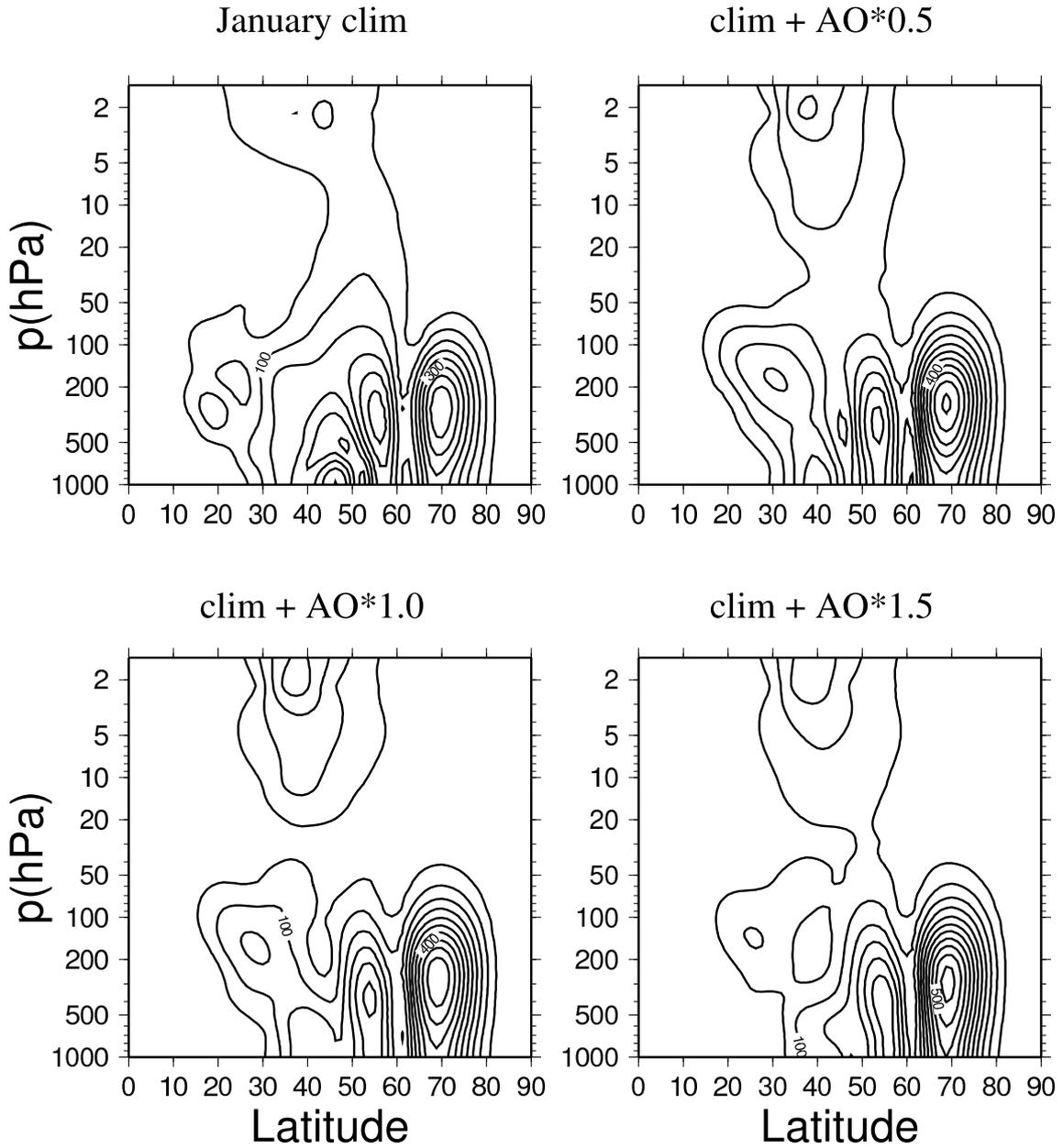


図 60: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 4 における M3 モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の振幅 [m]。

Unstable Mode Structure

(N=5, M3, Amplitude)

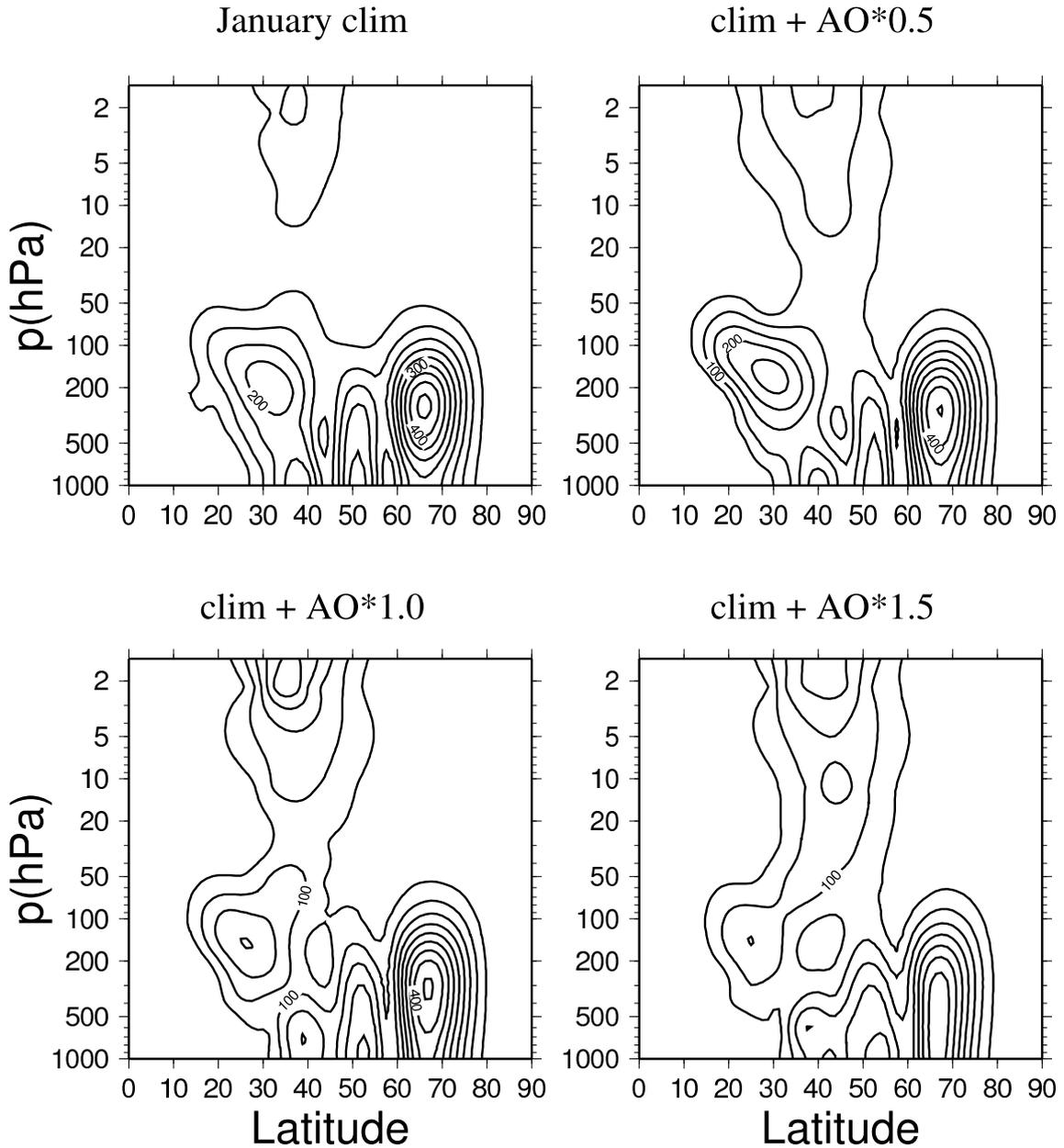


図 61: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 5 における M3 モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の振幅 [m]。

Unstable Mode Structure

(N=2, M3, Phase)

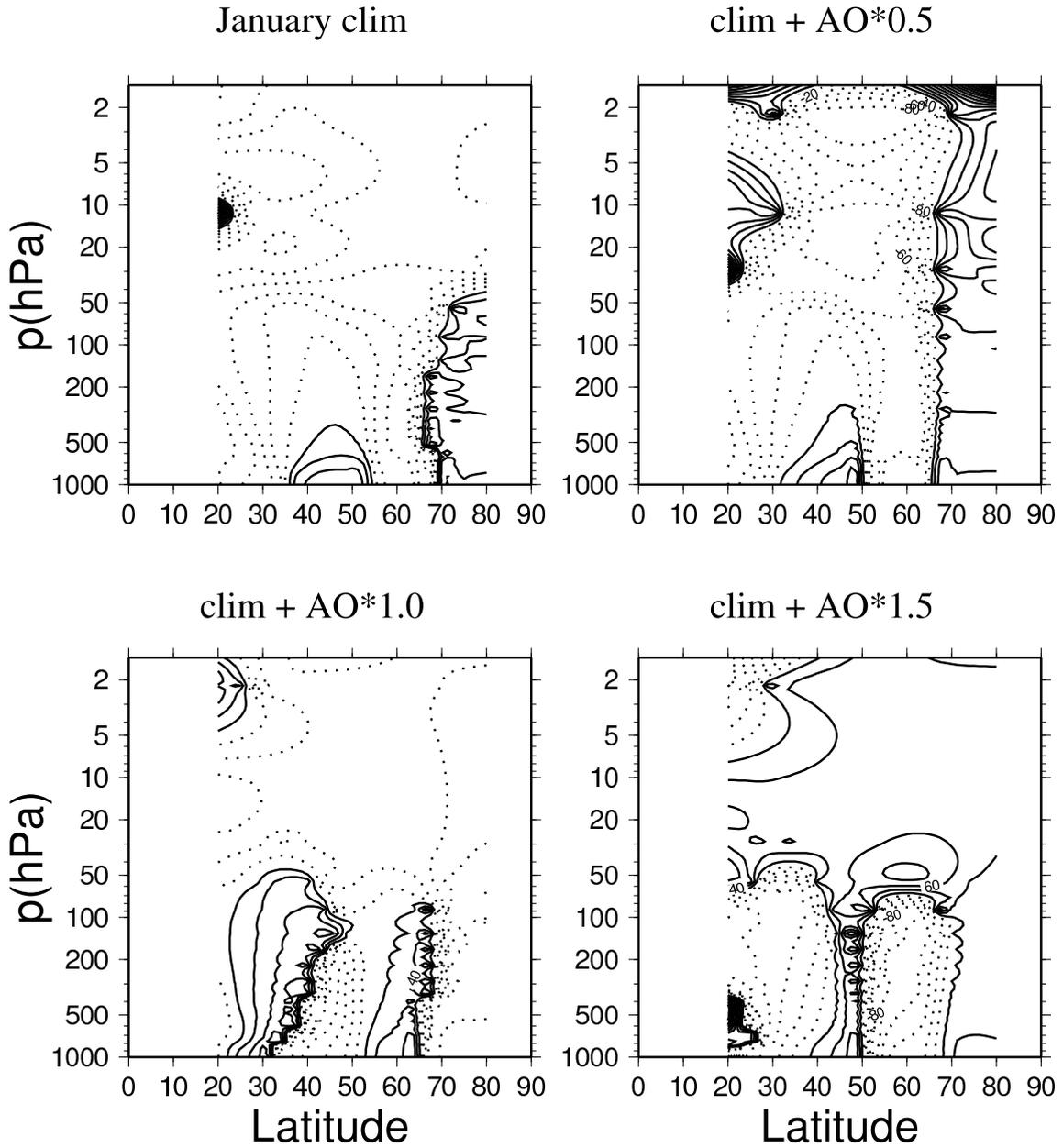


図 62: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 2 における M3 モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の位相 [°]。

Unstable Mode Structure

(N=3, M3, Phase)

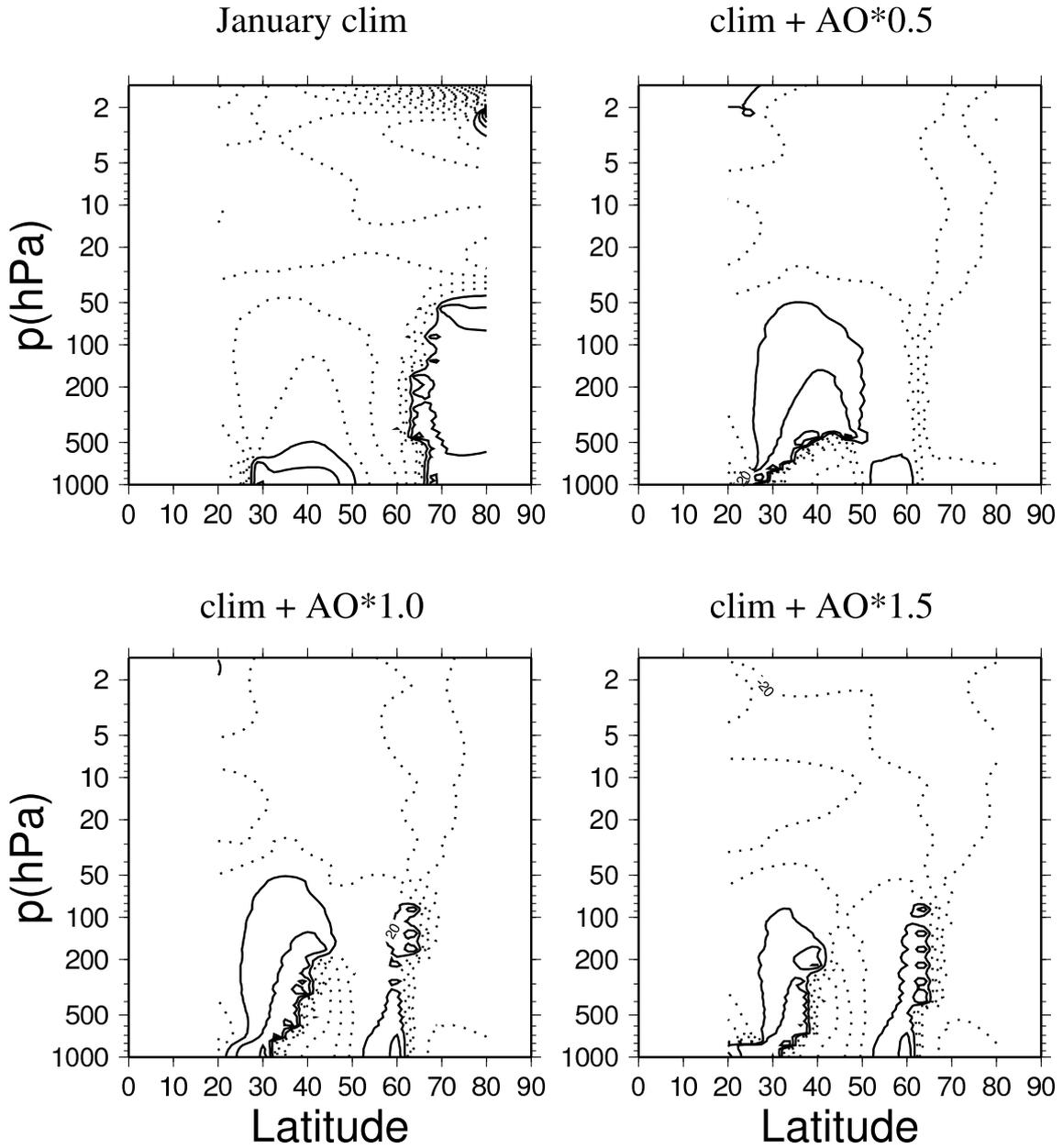


図 63: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 3 における M3 モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の位相 [°]。

Unstable Mode Structure

(N=4, M3, Phase)

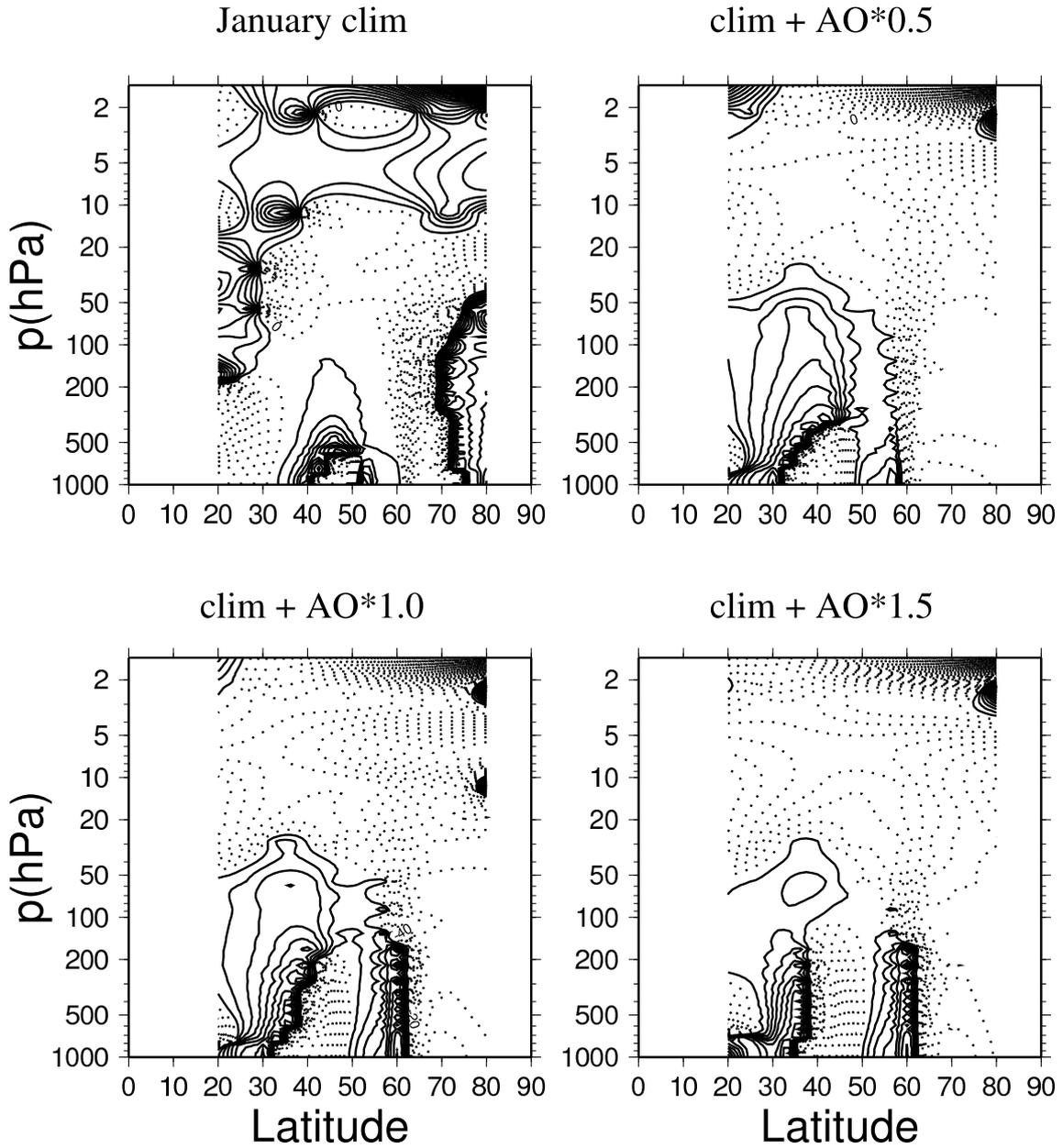


図 64: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 4 における M3 モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の位相 [$^{\circ}$]。

Unstable Mode Structure

(N=5, M3, Phase)

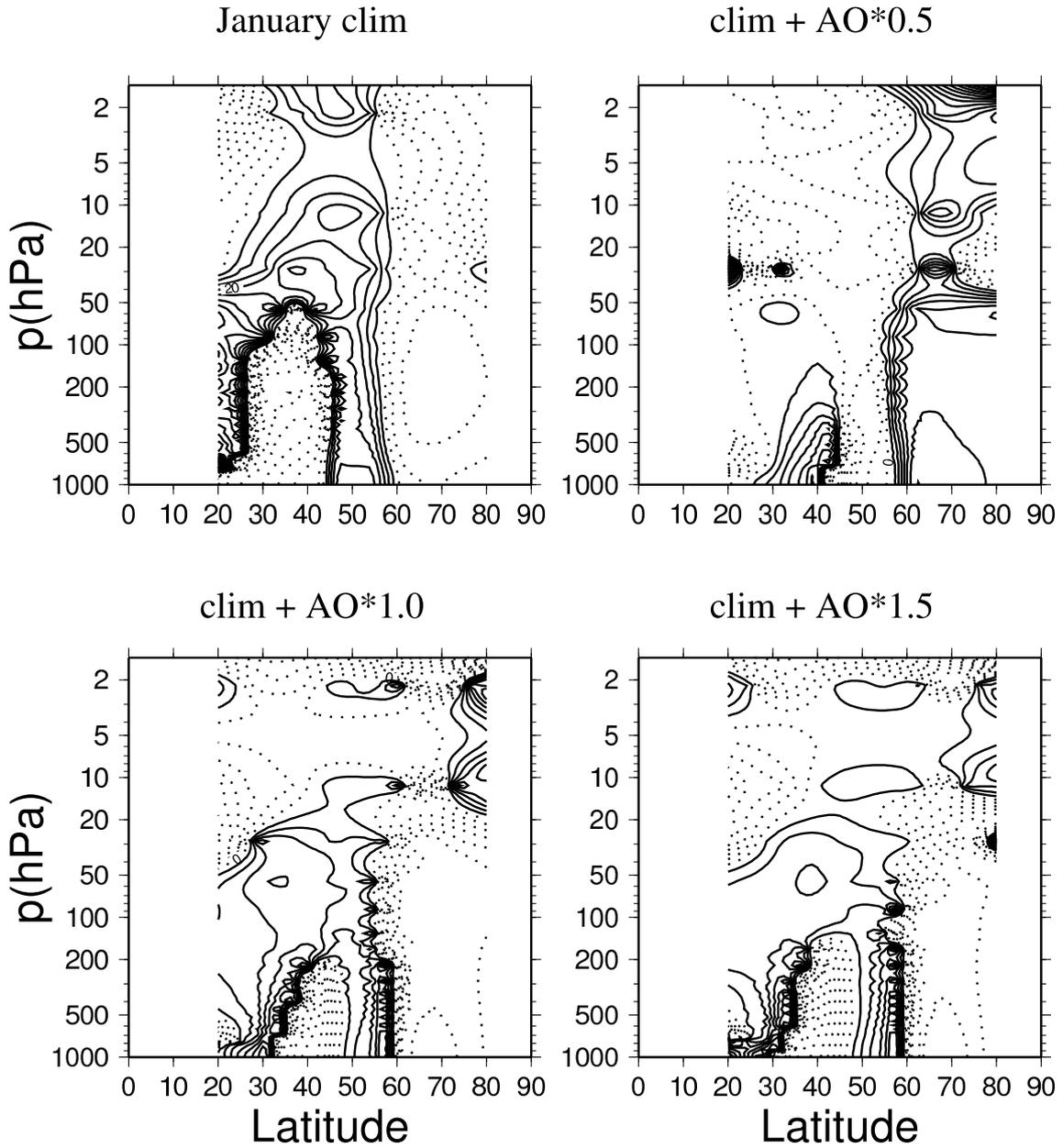


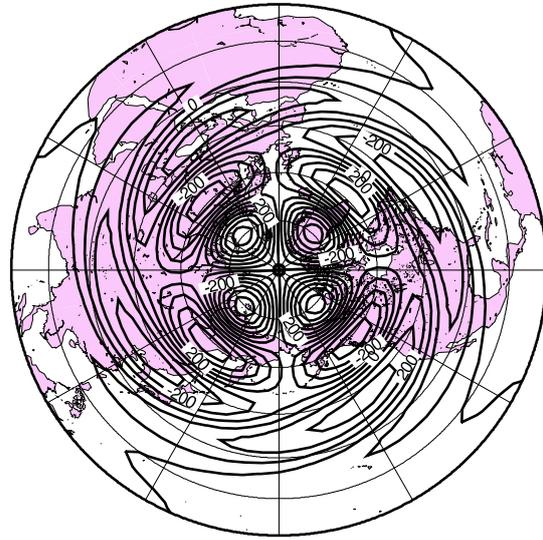
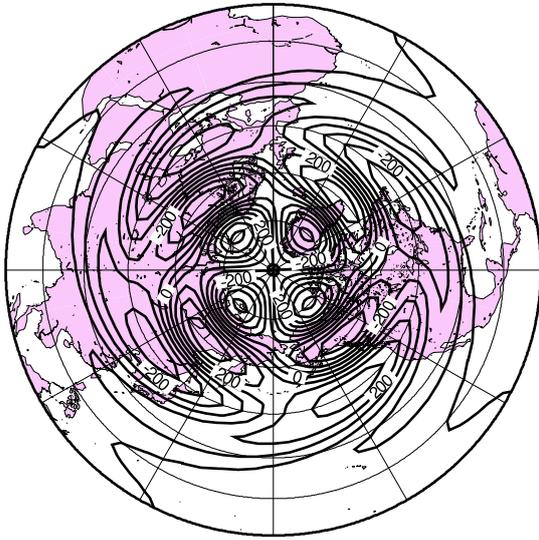
図 65: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上)、1.0 倍 (左下)、1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 5 における M3 モードの不安定構造。ジオポテンシャル高度の位相 [°]。

Unstable Mode Structure

(N=2, M3, Barotropic Height)

January clim

clim + AO*0.5



clim + AO*1.0

clim + AO*1.5

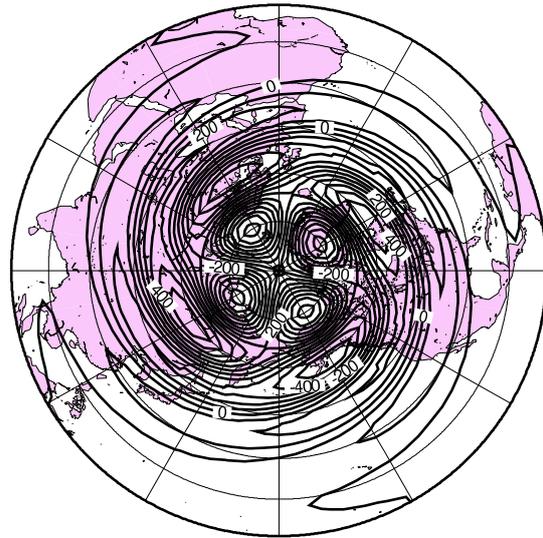
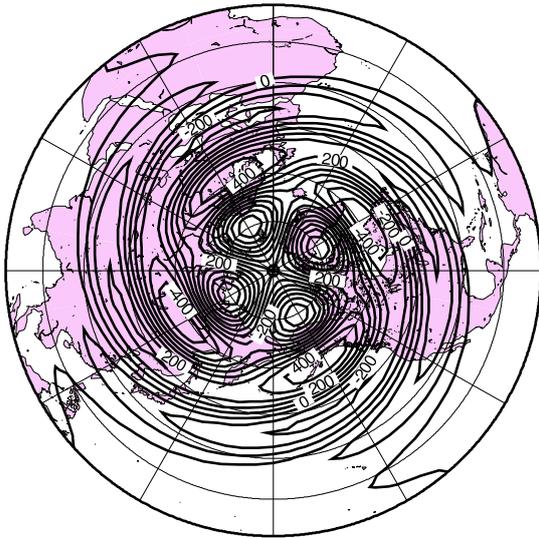


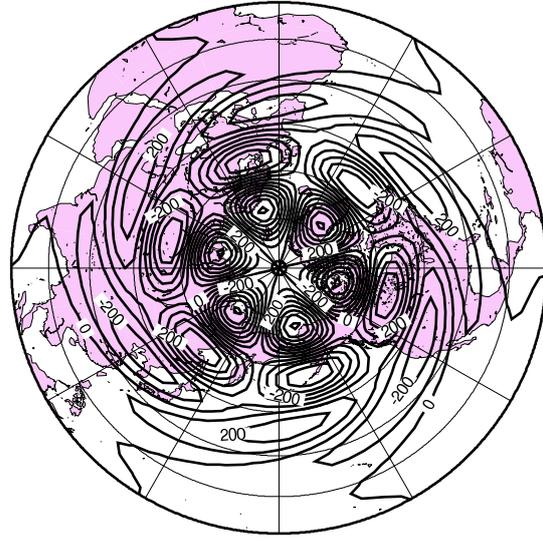
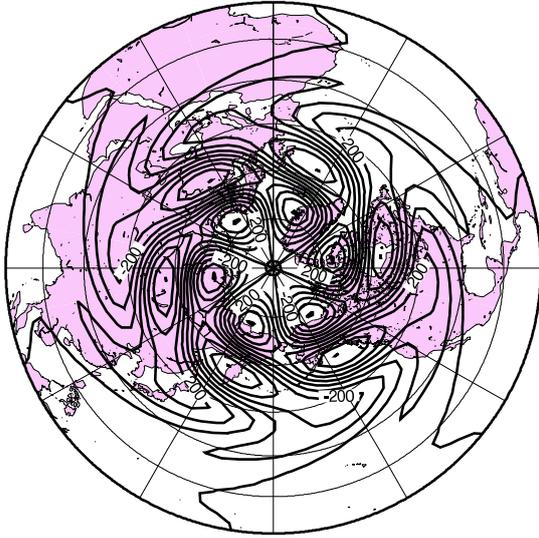
図 66: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上) 1.0 倍 (左下) 1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 2 における M3 モードの不安定構造 . ジオポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m] .

Unstable Mode Structure

(N=3, M3, Barotropic Height)

January clim

clim + AO*0.5



clim + AO*1.0

clim + AO*1.5

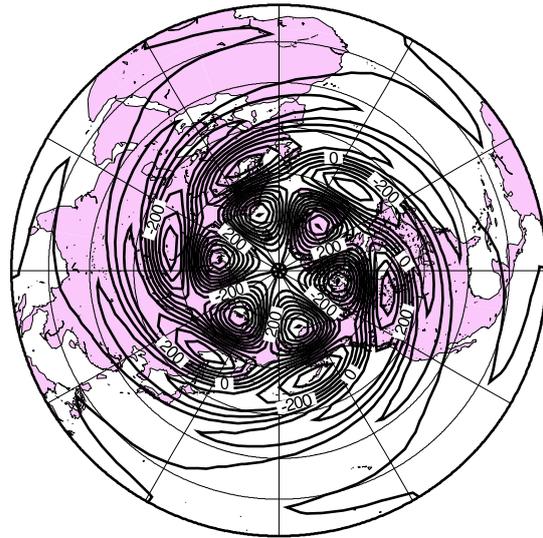
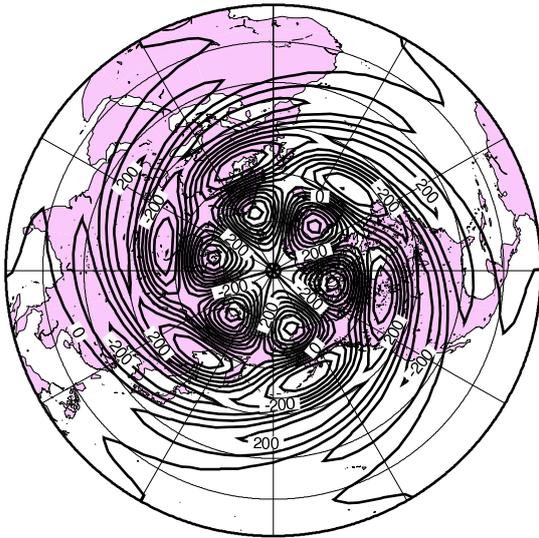


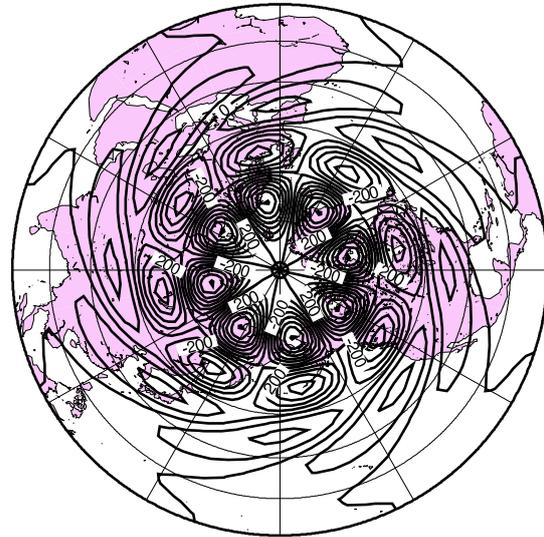
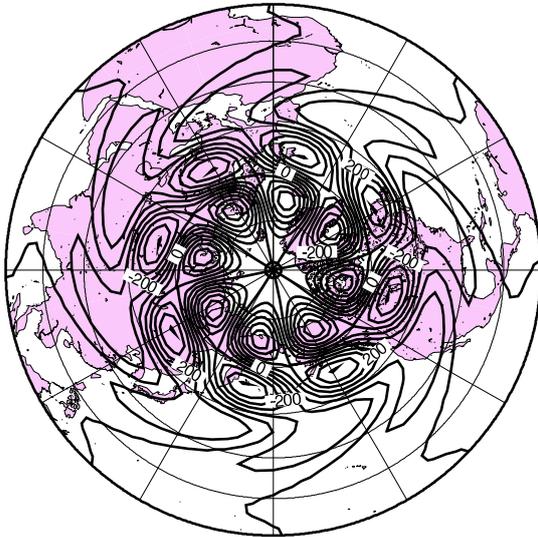
図 67: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上) 1.0 倍 (左下) 1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 3 における M3 モードの不安定構造 . ジオポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m] .

Unstable Mode Structure

(N=4, M3, Barotropic Height)

January clim

clim + AO*0.5



clim + AO*1.0

clim + AO*1.5

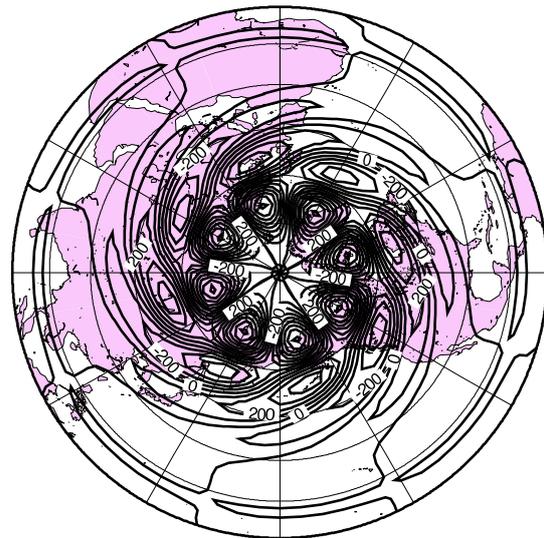
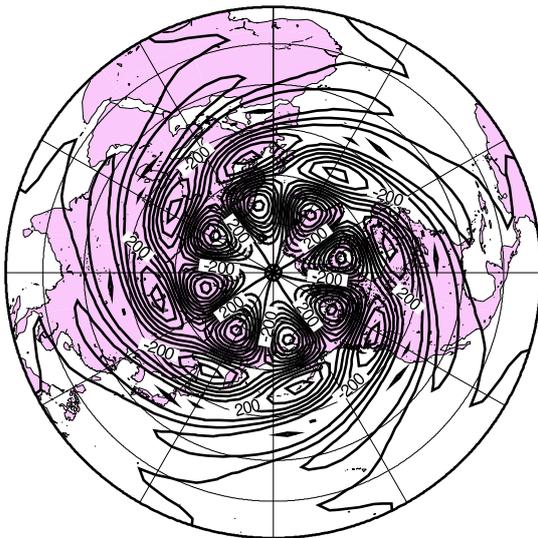


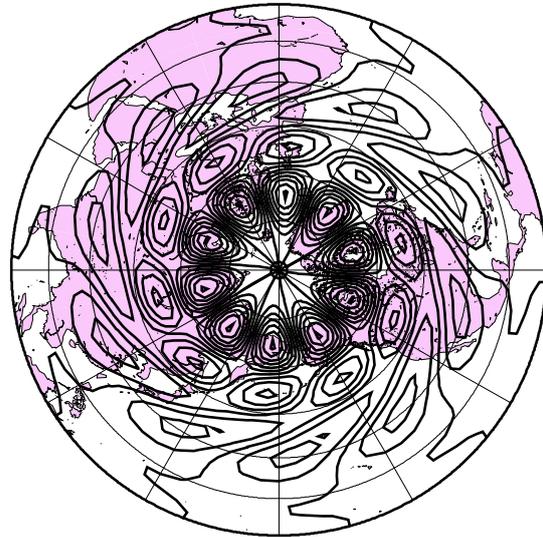
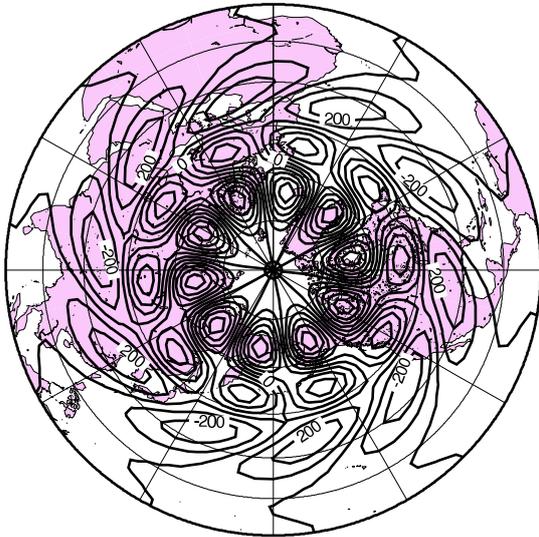
図 68: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上) 1.0 倍 (左下) 1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 4 における M3 モードの不安定構造 . ジオポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m] .

Unstable Mode Structure

(N=5, M3, Barotropic Height)

January clim

clim + AO*0.5



clim + AO*1.0

clim + AO*1.5

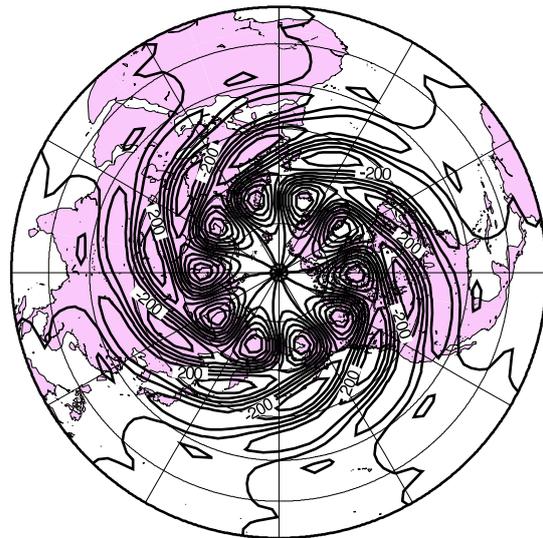
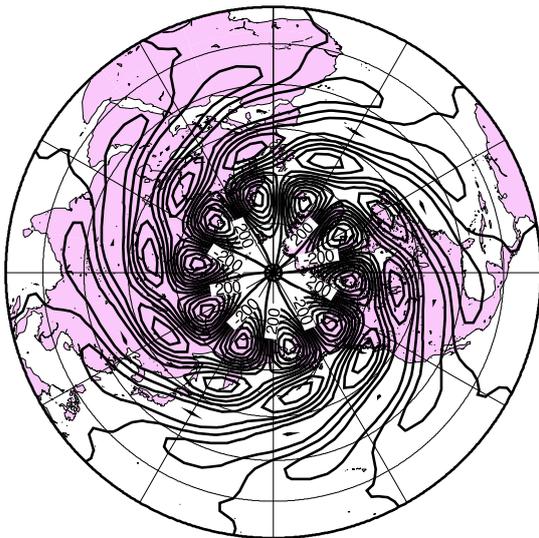


図 69: 気候値 (左上) および AOI に回帰した東西風を 0.5 倍 (右上) 1.0 倍 (左下) 1.5 倍 (右下) したものをそれぞれ気候値に上乘せした仮想大気について、波数 5 における M3 モードの不安定構造 . ジオポテンシャル高度の順圧高度場における振幅 [m] .