

成層圏突然昇温に伴う子午面循環について

永柄 恵 (九大院・理)

廣岡俊彦 (九大院・理)

1 はじめに

様々な観測的、及び論理的研究の積み重ねにより、各種大気波動により駆動される、定常的な残差平均子午面循環は図1のような形態となることが知られている。対流圏界面付近では総観規模の傾圧不安定波の活動により、赤道域に形成された上昇流が両極に分かれてそれぞれの中高緯度で下降するという循環が見られ、成層圏では冬半球におけるプラネタリー波の活動により、赤道域から空気を吸い上げ、冬半球高緯度域で下降するという循環が見られる。これらは「ダウンワードコントロール原理」(Haynes et al., 1991) という考え方で知られている。

このように対流圏と成層圏では、互いに独立したメカニズムに基づく循環を作っているが、両者は互いに影響を及ぼし合っている。実際、対流圏から成層圏への影響については、これまでに様々な研究が行われている。一方、成層圏から対流圏への影響はこれまであまり研究は行われていなかった。しかしながら近年、成層圏で生じた極渦の強まりや弱まりが対流圏へと下方伝播する「環状振動」シグナルの下降を通じて、成層圏循環が対流圏循環に及ぼす影響が注目されるようになってきた(例えば、Baldwin and Dunkerton, 2001)。

成層圏における最も顕著な現象のひとつである成層圏突然昇温においては、極域の昇温や東風の出現が上層ほど早く始まり、徐々に弱まりながら下降するという特徴が見られる。これら温度や風系の変化は、突然昇温に伴う子午面循環の強化により引き起こされることが知られている。一方、成層圏突然昇温後にその変動のシグナルが徐々に下方へと伝播し対流圏の天候に影響を与える可能性が議論されている(Baldwin and Dunkerton, 2001)。両者の下降は同じものを見ていると考えられるが、その下降速度の形成時期や下降範囲、それらに関わる子午面循環の強化などについての統計的な研究はほとんど行われていない。

そこで本研究では、成層圏突然昇温に伴う子午面循環がどのようにして形成され、どのように時間変化するのか、また、子午面循環の強化でどれぐらいの空気量が動くのかを調べ、下方伝播に関する理解を深める。

2 データと解析手法

本研究で主に用いたデータは英国気象局 (Met Office UK) による4次元同化データであり、概要は以下の通りである。

- ・ データ時間間隔 12UTC のみ
- ・ 格子点間隔 $2.5^{\circ} \times 3.75^{\circ}$
- ・ 水平格子点数 風の場合 (u, v, w) 成分: 96×72 (経度 $\times$ 緯度)
 高度場・温度場: 73×96 (経度 $\times$ 緯度)

風の場合と高度・温度場の格子が半分ずれている(これを荒川のB格子という)ので、高度・温度場の格子点を風の場合の格子点に合わせて使用した。

・鉛直層数 22 層 (1000hPa ~ 0.316hPa)

ただし、鉛直 p 速度 ω は見積りが難しいため、精度等にデータ依存性があると考えられる。そこで鉛直 p 速度 ω の空間分布の特徴を検証した結果、本研究では空間的に平滑化した鉛直 p 速度 ω を用いることにした。ここでは平滑化の水平スケールとして、ある格子点上にあるデータに対して、東西に 2.5° ずつ、上下に 2 層ずつの空間にあるデータを空間的に平均した。

解析期間は 2001 ~ 2006 年の北半球冬季 (12 ~ 2 月) である。解析期間内に生じた突然昇温時の、プラネタリー波に伴う E-P フラックスの収束・発散と質量流線関数の日変化から、突然昇温に伴う子午面循環がどのように形成・強化されるのかを調べた。また、100hPa 面を横切る質量フラックスの大きさから、子午面循環による空気量の動きの変化を見積った。

3 解析結果

図 2 に、一例として 2001/02 年冬季の 81.25°N 、10hPa 面 (30km 付近) における帯状平均温度の時間変化を示す。この図を見ると、2001/02 年冬季には 3 回の突然昇温が起こっていることがわかる。特に、最初に起こった突然昇温に注目すると、12 月 15 日に昇温が始まり、12 月 28 日に温度ピークを迎えている。また、 60°N 、10hPa 面における帯状平均東西風は西風から東風に変化しており (図 3)、2001/02 年最初の突然昇温は大規模突然昇温であったことがわかる。

2001 年 12 月の大規模突然昇温時におけるプラネタリー波の活動度の変化を見るために、E-P フラックスとその収束・発散 DF の時間変化を図 4 に示す。昇温前はプラネタリー波はほとんど鉛直伝播していない (a) が、昇温が始まると、中緯度 ($50 - 70^\circ\text{N}$) においてプラネタリー波が下層から上層に向かって鉛直伝播し、上部成層圏で収束し東風加速を引き起こしている (b)。昇温が進むと、上部成層圏まで鉛直伝播するプラネタリー波の活動は活発になり、収束も強くなっている (c)(d)。昇温後は昇温前のようにプラネタリー波はほとんど鉛直伝播していない (e)。

次に、プラネタリー波の活動によって形成される子午面循環が、どのように時間変化し、強化されるのかを調べた。質量流線関数 $\overline{\chi}^*$ の時間変化と月平均からの偏差が正の領域を図 5 に示す。図 5(a) ~ (e) すべてに共通して、低緯度域から高緯度域に向かう子午面循環が見られる。昇温前には中高緯度全般に下降運動域が見られるが、循環はまだ弱い (a)。昇温が始まると昇温前よりも上層まで空気が引き上げられ、最初は低・中緯度上層に正の偏差領域が見られ極向きの南北運動が強まっている (b)。昇温が進むと低緯度下層で上昇運動 (c)、その後高緯度で下降運動が強まり (d)、昇温後は高緯度の昇温中よりも下層で下降運動が強くなっていることがわかる (e)。

また、2001 年 12 月の大規模昇温だけでなく、2001 ~ 2006 年に起こった突然昇温全事例において、ここまで述べてきた解析結果と同様の結果が得られた。

さらに、子午面循環に伴い 100hPa 面を横切って北半球中高緯度で下降する質量フラックスの大きさの時間変化を図 6 に示す。図 6 と図 2 より、この年 3 回起こった突然昇温と

対応して、100hPa 面を横切って下降する質量フラックスが増加している期間が 3 回見られる。これは、突然昇温に伴う子午面循環の強化によるものと考えられる。

次に、突然昇温に伴う子午面循環の強化によりどれぐらいの空気量が、100hPa 面を横切って北半球で下降しているのかを見積もった。2001～2006 年冬季に起こった全ての成層圏突然昇温について求めた結果を表 1 に示す。表 1 には、質量フラックスが増加している期間中の質量フラックスの総量と、その期間、及び総量を期間で割った一日当たりの期間平均をまとめている。また比較のために、突然昇温がほとんど起こっていないと考えられる、11 月についての月平均値を 5 年平均した一日当たりの質量フラックスを非突然昇温時として示している。

まず期間平均についてみると、非突然昇温時に比べ、全ての事例で突然昇温時の方が質量フラックスが多くなっている。このことから、子午面循環の強化により、100hPa 面を横切って上層から下層に下降する空気量が増加することが定量的にも示されたものと考えられる。また増加期間の長さとその期間中の質量フラックスの総量を見ると、2001 年 12 月に生じた大規模昇温と 2003 年 12 月に生じた小規模昇温の事例が、他の事例に比べて増加期間が長く、それに伴う質量フラックスの総量も多くなっていることがわかる。

4 まとめと今後の課題

突然昇温時には、プラネタリー波が上部成層圏まで鉛直伝播し、プラネタリー波によって伝達される東風運動量の収束が上層で大きくなり、赤道域から極域に向かう子午面循環が強化されていた。月平均した子午面循環と比較すると、昇温前には循環はまだ強まっていなかったが、昇温が始まると低・中緯度上層で極向きの流れが強まっていた。昇温中は特に低緯度下層で上昇運動、そして高緯度で下降運動が強まり、昇温後は高緯度下層で下降運動が強くなっていた (図 5)。そして突然昇温時には、北半球において 100hPa 面を横切って下降する質量フラックスが増加していることがわかった。特に、2001 年 12 月の大規模昇温、2003 年 12 月の小規模昇温時には、他の事例よりも長い期間、質量フラックスが増加していた。関連する研究として、通常緯度 $10-20^{\circ}$ 付近で発生する台風が、2001 年 12 月の成層圏突然昇温時には赤道直近の 1.5°N 以内で発生した要因の一つとして、2001 年 12 月の突然昇温の影響で低緯度の上昇流が強化され、それが通常ではほとんど起こらない赤道域の対流活動の活発化をもたらしたことが指摘されている (Kodera, 2006)。また 2003/04 年冬季では、他の年に比べ、成層圏から対流圏への変動のシグナルの下降が顕著であることが報告されている (Kuroda, 2007)。これら対流圏への影響は、上述の 100hPa 面を横切る質量フラックスの増加と密接に関連していると考えられる。

今後は、上記対流圏への影響と 100hPa 面を横切る質量フラックスの増加との関連性を詳細に調べる必要がある。また、突然昇温時に質量フラックスが増加する期間が長い事例 (今回の解析では 2001 年 12 月、2003 年 12 月の事例) とそれほど長くない事例はどのような違いがあるのか、またその要因を調べる必要がある。さらに、周極渦が 2 つに分裂するような、より成層圏循環が大きく変化する突然昇温 (過去 40 年間に 4、5 例程度) 時の質量フラックスの変化を調べ、今回の結果と比較していくことが今後の課題の一つとなる。

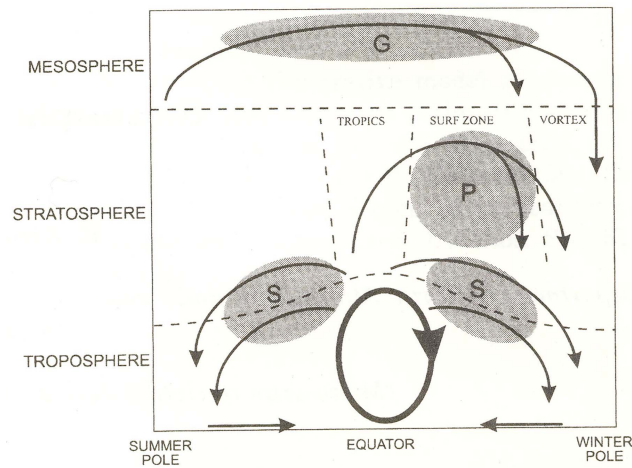


図 1: 大気における残差平均子午面循環の模式図。G: 重力波, P: プラネタリー波, S: 傾圧不安定波 (Plumb, 2002)

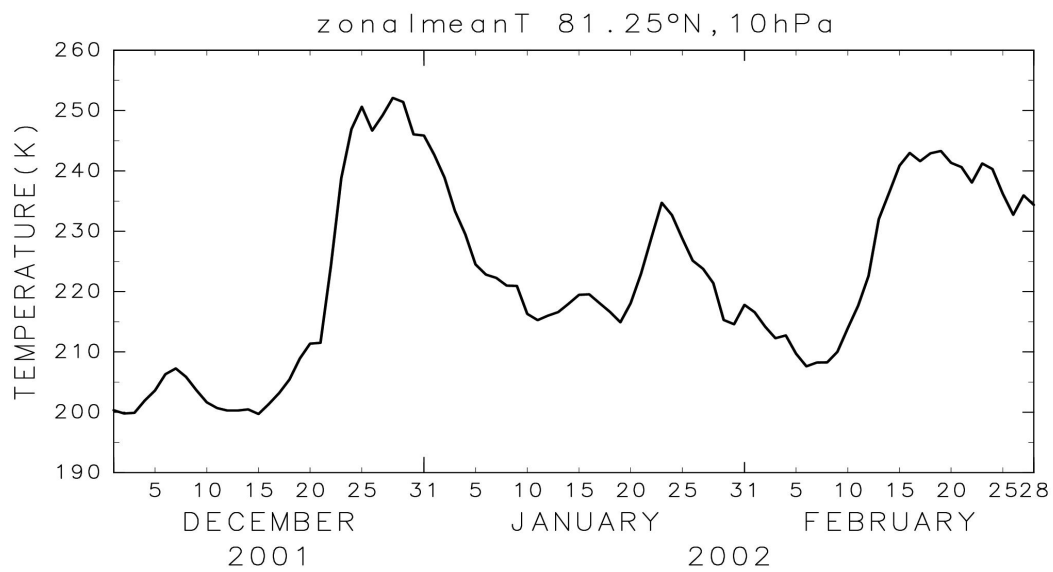


図 2: 2001/02 年冬季における 81.25°N、10hPa 面での帯状平均温度 (K)

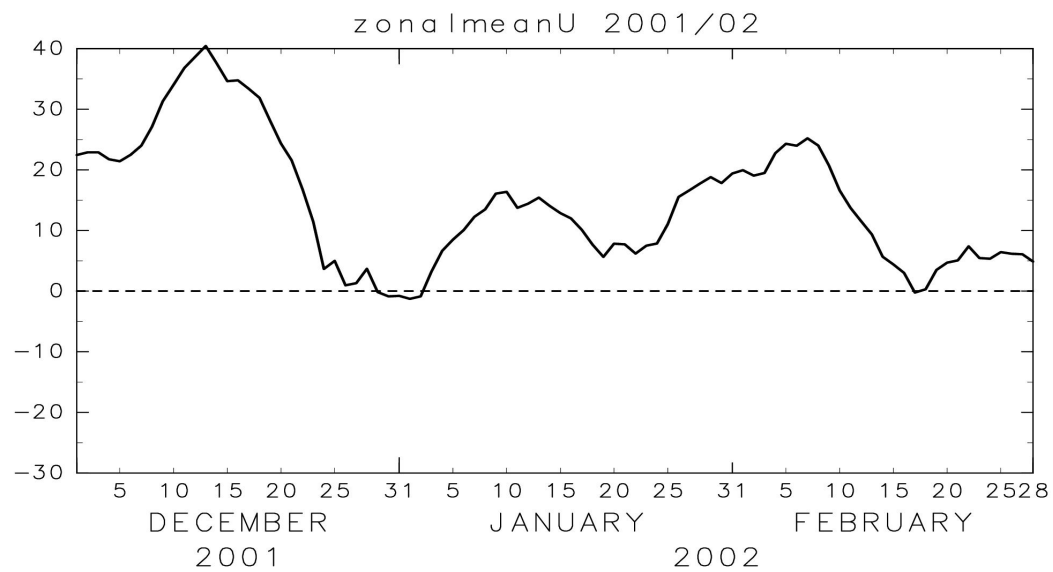


図 3: 2001/02 年冬季における 60°N、10hPa 面での帯状平均東西風 (m/s)

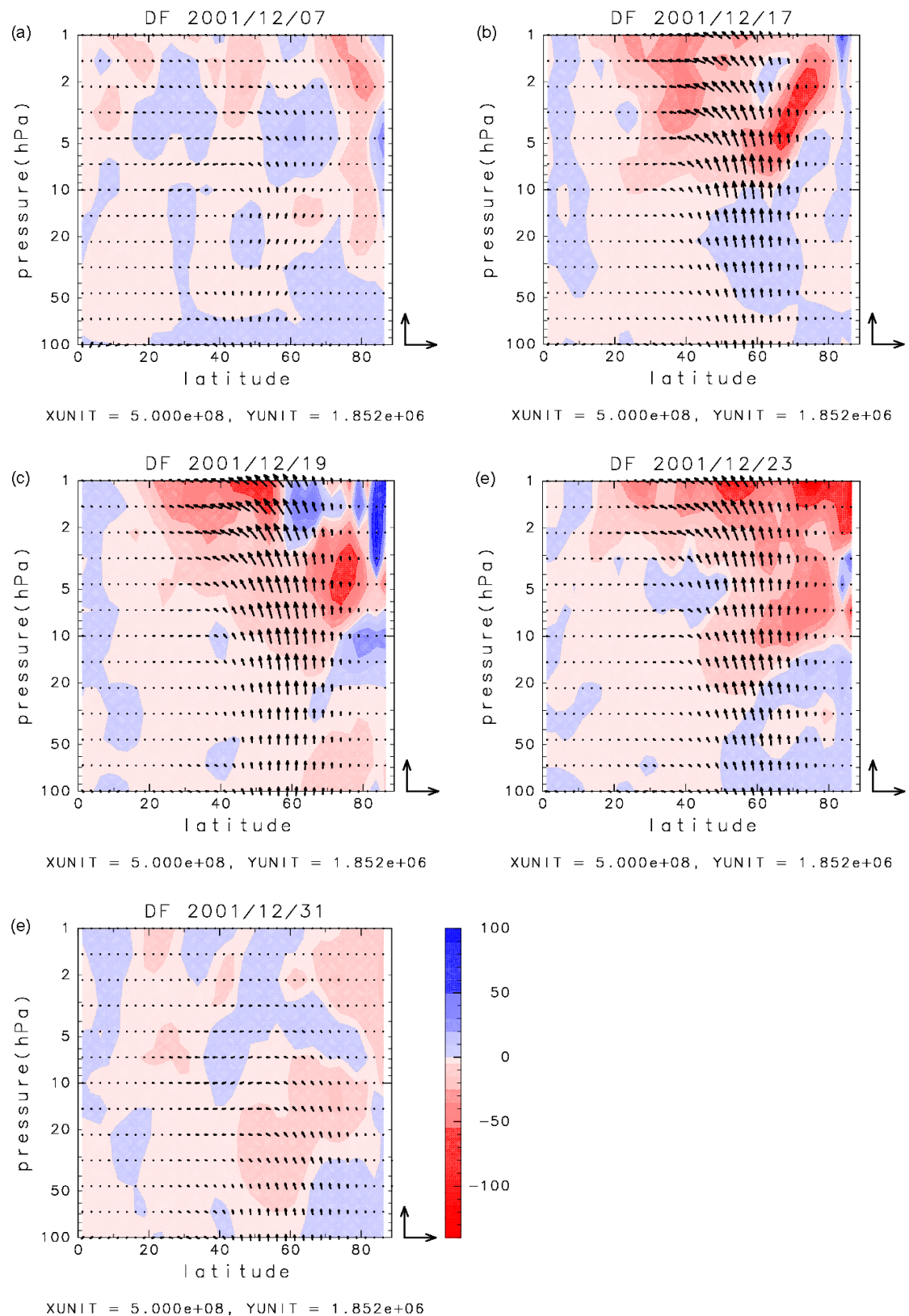


図 4: 2001 年 12 月大規模昇温時の E-P フラックスとその収束・発散 DF。(a) 昇温前 (12/7)、(b) 昇温初め (12/17)、(c) 昇温中 (12/19)、(d) 昇温中 2 (12/23)、(e) 昇温後 (12/31)。ベクトル: E-P フラックス (単位: kg/s^2)、カラー: DF (単位: m/s/day) (赤: 収束領域、青: 発散領域)。

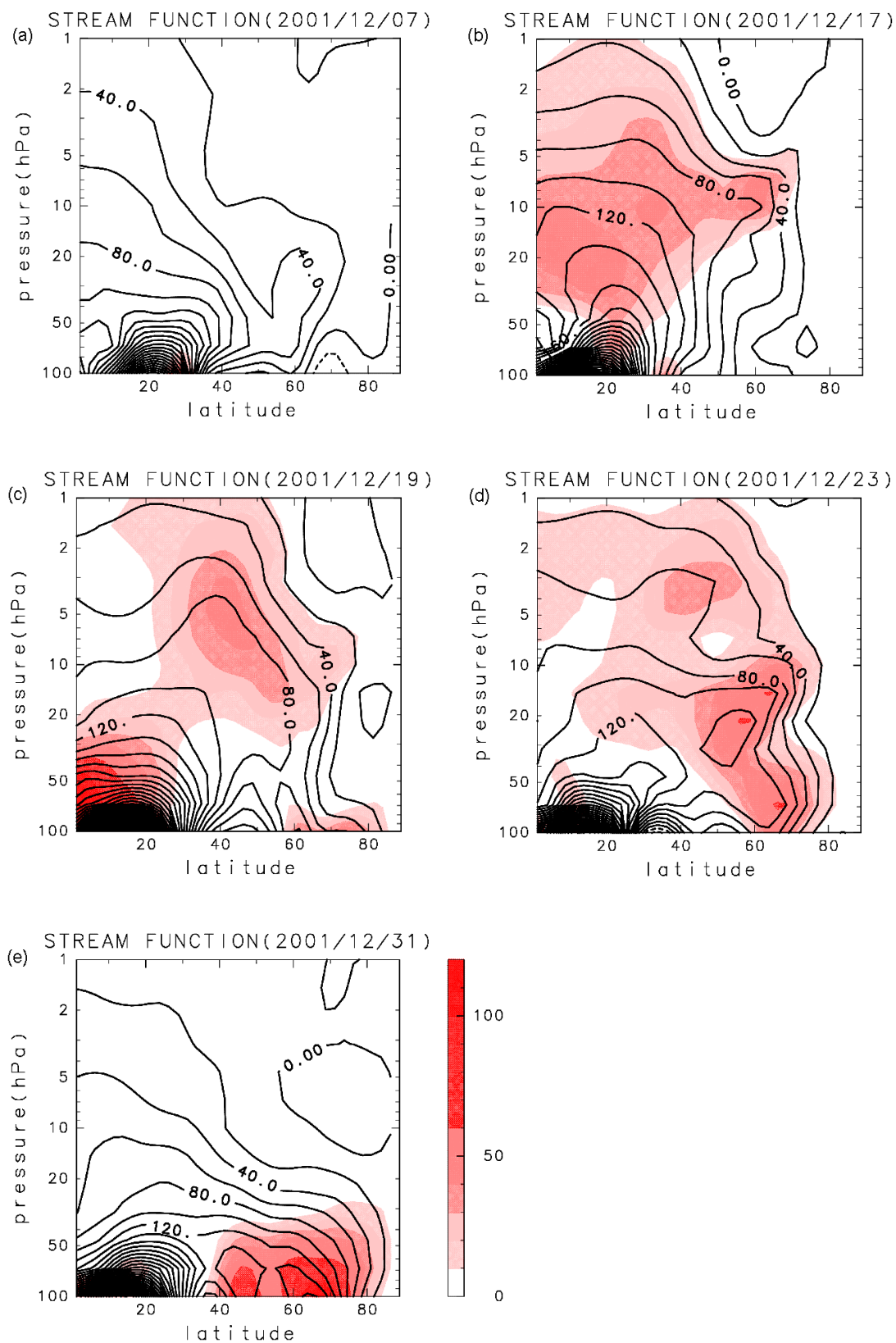


図 5: 2001 年 12 月大規模昇温時の質量流線関数 $\bar{X}^*$ と月平均からの偏差。(a) 昇温前 (12/7)、(b) 昇温初め (12/17)、(c) 昇温中 (12/19)、(d) 昇温中 2 (12/23)、(e) 昇温後 (12/31)。単位は $\text{kg}/\text{m}/\text{s}$ 、等値線間隔は 20.0。実線: 時計回りの循環、点線: 反時計回りの循環、赤: 月平均からの正の偏差領域。

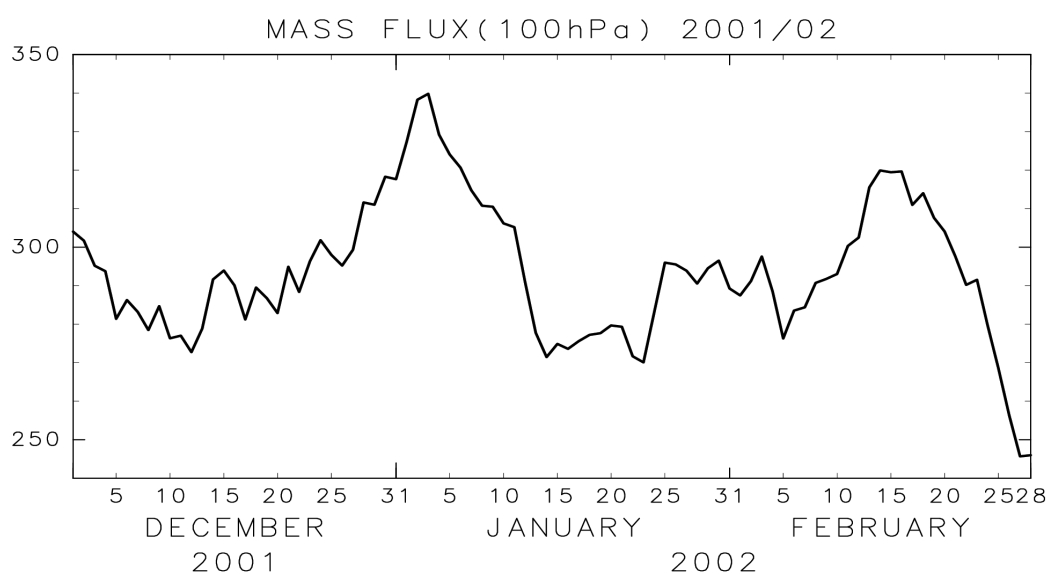


図 6: 2001/02 年冬季において 100hPa 面を横切って北半球で下降する質量フラックス (kg/s)。ただし、5 日の移動平均をとっている。

	突然昇温時の総量 ($\times 10^7 \text{kg}$)	増加期間 (日間)	突然昇温時の 期間平均 ($\times 10^7 \text{ kg/day}$)
2001 年 12 月大規模昇温	52	19	2.7
2002 年 1 月小規模昇温	25	10	2.5
2002 年 2 月小規模昇温	47	18	2.6
2002 年 12 月小規模昇温	41	15	2.7
2003 年 1 月大規模昇温	30	10	3.0
2003 年 1 月小規模昇温	35	13	2.7
2003 年 12 月小規模昇温	58	19	3.1
2004 年 1 月大規模昇温	37	13	2.9
2005 年 1 月小規模昇温	45	13	3.5
2006 年 1 月 (上旬) 小規模昇温	36	12	3.0
2006 年 1 月 (中旬) 小規模昇温	28	10	2.8
2006 年 1 月大規模昇温	45	15	3.0

非突然昇温時: $2.1 \times 10^7 \text{ kg/day}$

表 1: 突然昇温時の子午面循環の強化に伴い北半球において 100hPa 面を横切って下降する質量フラックスの総量。

参考文献

- Baldwin, M.P., and T.J. Dunkerton, 2001: Stratospheric Harbingers of Anomalous Weather Regimes. *Science*, **294**, 581-584.
- Haynes, P.H., M.E. McIntyre, T.G. Shepherd, C.J. Marks, and K.P. Shine, 1991: On the “Downward Control” of Extratropical Diabatic Circulations by Eddy-Induced Mean Zonal Forces. *J. Atmos. Sci.*, **48**, 651-678.
- Kuroda Y., 2007: The role of the stratosphere on the seasonal forecast using MRI/JMA-climate model. Paper presented in Chapman Conference on the role of the stratosphere in climate and climate change, *Santorini, Greece*, 24-28 September 2007.
- Plumb R.A., 2002: Stratospheric transport. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **80**, 793-809.
- 小寺邦彦, 2006: 赤道台風 Vamei と成層圏突然昇温, 平成 18 年度異常気象と長期変動研究集会報告, 193-196.