

赤道圏界面付近でみられる東進擾乱について

西 憲敬

EASTWARD-MOVING DISTURBANCE NEAR THE TROPOPAUSE ALONG THE EQUATOR

By Noriyuki NISHI

Synopsis

The three eastward-moving disturbances localized near the tropopause was investigated with using JMA (Japan Meteorological Agency) global analysis data during November 1992-February 1993. These events are considered to be the equatorial trapped internal Kelvin waves with upward energy propagation. These waves have large amplitude only in the several ten longitudes around the western Pacific. The wave form is far from sinusoidal. Changing to the westerly and warming is much more rapid than changing to the easterly and cooling.

1. 序

熱帯の対流圏界面（以下、圏界面）付近でみられた、顕著な東進擾乱を、気象庁の全球解析データを用いて解析した。

熱帯域対流圏では、30-60日変動が顕著であり、その位相構造はよく調べられている¹⁾²⁾。対流圏の下層と上層では位相が逆であり、東進する波数1の構造をもっている。この現象は、対流圏上部では100-300 hPa付近で振幅が大きく、この中ではほぼ同位相で約5-10°/dayの東進速度をもっている。この周期をもつ、熱帯対流圏の30-60日変動に同期した成分は、100 hPaより上の成層圏では一般に見られていない³⁾。

一方、成層圏下部では、東進する自由内部ケルビン波がよく認められる⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾。70 hPa付近では、位相速度は地面に対して約25°/day、波数1であり、位相は下方伝播していることから、エネルギーは上向きに流れていると考えられる。一方、それより少し下方の圏界面付近にも、顕著な東西風の擾乱が認められる。Madden and Zipser⁹⁾は、Line Islandで圏界面付近の東西風を解析し、その鉛直シアが、50 m/s/kmにも達している時があることを見出した。Parker¹⁰⁾は、熱帯各地の高層観測データを解析し、100 hPa付近に局在した東進擾乱を見出した。その周期は、30日よりやや長かった。彼はケルビン波であると考えた。しかし、その周期が対流圏の背の高い（自由波とはいえない）30-60日変動に近く、またこの100 hPa付近では30-60日変動が観測される¹⁾こともあり、この二つの現象の関係は必ずしも明らかにはなっていない。Maruyama⁷⁾は、東西風のスペクトル解析を行い、70-100 hPa付近では、20日より長い周期帯にピークがあることを見出した。また、Tsuda et al.¹¹⁾、清水¹²⁾は、インドネシアの1点高層観測を用いて、圏界面付近に周期が20日以上になる低周波の波が局在していることを見出し、位相構造より、ケルビン波ではないかと考えたが、水平位相構造についてははっきりしていない。

そこで、圏界面付近（北半球の冬では、17-18 km）では、実際にどのような大規模擾乱が卓越しているのかをはっきりさせることは、重要であると考えられる。この解析では、TOGA COARE (Tropical Ocean-Global Atmosphere coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment) のIOP (Intensive Observing

Period) にあたる November 1992 – February 1993 の気象庁全球解析データを用いて、それらの擾乱について調べた。

2. データ

気象庁の全球解析データ (November 1992 – February 1993) を用いる。データは 1 日 2 回 (00Z, 12Z) で、データの格子点間隔は 1.875° である。高度レベルは、16 レベルである。圏界面付近には、150, 100, 70 hPa にしかデータがないことに注意が必要である。

西太平洋の赤道付近 (緯度 5° より赤道側) は、ふだんは高層観測点の少ないところであるが、この期間には特別観測のため多くの観測がなされており、データの信頼性も高いと考えられる。

3. 結果

3.1 風の場合

Fig. 1 は、西太平洋の赤道付近におけるある格子点 (1.9°S , 146.3°E) の、東西風 (以下 U) の時間高度断面を示す。1 月下旬に、100 hPa 付近で西風が強まっているのが認められる。これは、データのあるとなりの高さである 70, 150 hPa ではあまりはっきりしないことから、鉛直方向に薄いものであることがわかる。また、2 月 20 日ごろにも同様な西風の強まりがみられる。1 月上旬にも、西風の強まりがあるが、この時は 150 hPa でも解析されているようである。

上で示した西風は、風速値が 10–20 m/s あるいはそれ以上であり、また数日で、東風から 20–30 m/s も変化していることから、顕著な現象だと考えられる。そこで、西風が圏界面付近の薄い層で強化する時期に注目して、現象の空間的な広がりをしらべることにする。

Fig. 2 は、1 月 28 日における赤道上の東西風 (以下 U) の経度高度断面である。 90°E – 140°E にかけて 100 hPa 付近に限られた西風域が見られる。これは隣のデータレベルである 70, 150 hPa ではほとんど見られていないことから、鉛直にとっても薄いものであることがわかる。

Fig. 3 は、赤道における 1 月の 100 hPa での東西風 (以下 U) の経度時間断面である。1 月下旬にインド洋東部から西太平洋にかけて西風域が東進しているのがわかる。東進の速度は、 $12^\circ/\text{day}$ 程度である。特に注目すべき点は、経度帯 90°E – 150°E にかけてその西風の風速値が大きく、その他の経度帯では、風速値が小さいことである。また、ある経度でみれば、その前の時期の東風から西風への 1 日あたりの変化量はとても大きく、たとえば、 120°E 付近では、1 月 25 日から約 3 日のうちに 40 m/s にも達している。ところ

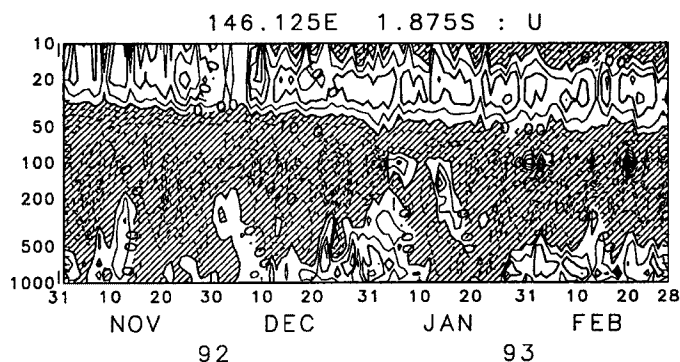


Fig. 1 Time-height (hPa) section of the zonal wind (unit m/s). The negative values (easterly) are shaded.

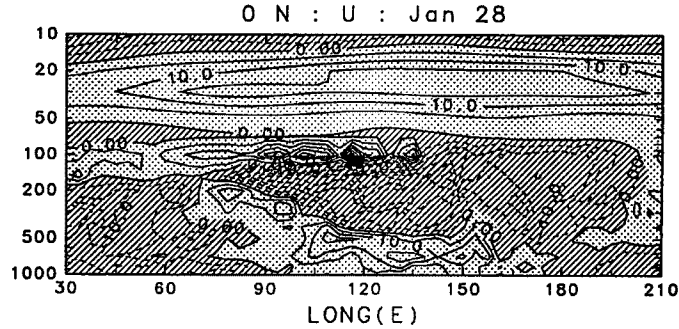


Fig. 2 Longitude ($^{\circ}$ E)-height (hPa) section of the zonal wind (unit m/s) on 28 Jan. The contour intervals are 5 m/s. Dotted area is westerly and hatched easterly.

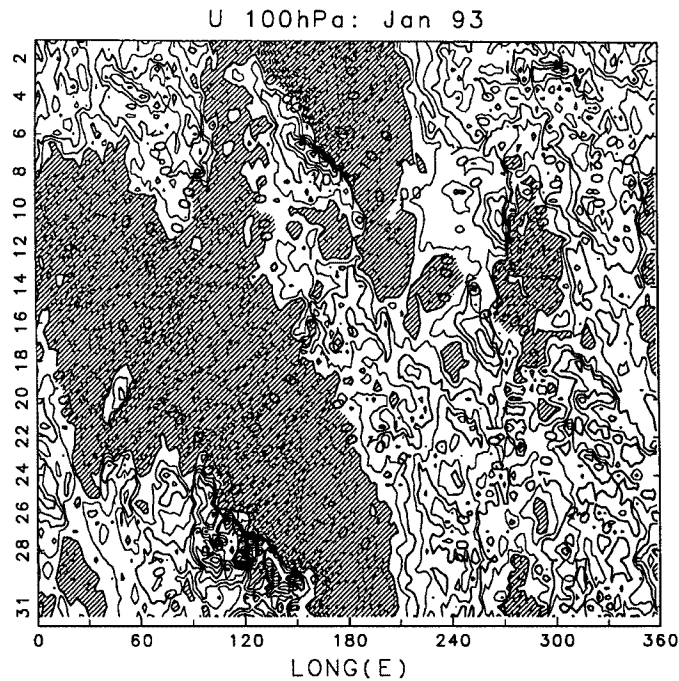


Fig. 3 Longitude ($^{\circ}$ E)-time section of the zonal wind at 100 hPa during Jan 1993. Contour intervals are 5 m/s and negative values (easterly) are shaded.

が、一方西風から次の東風への変化率はその直前の西風への変化に比べれば、それほど大きくない。

1月上旬の西風域の東進も1月下旬のそれとよく似ているが、経度帯が少し東よりであって、主として150-180 $^{\circ}$ Eで顕著である。2月20日頃の擾乱(図は示さず)も、東進しているという点では同じであるが、この時は、西風の強まり方がそれほど急ではなく、そのあとの東風への変化に比べて変化が大きいとはいえない。経度帯120-180 $^{\circ}$ E付近で目立っている。

以上の3つの事例に共通していえることは、(i) Fig. 1の時間高度断面図でみられた鉛直に薄い西風域は、東進しているものであること。(ii) 東進自体は赤道全周の半分にも達しているが、風速の大きいところは、経度帯にして、30-60 $^{\circ}$ に限定されており、その経度は東インド洋から東へ日付変更線付近の間で毎回違った場所であるということである。

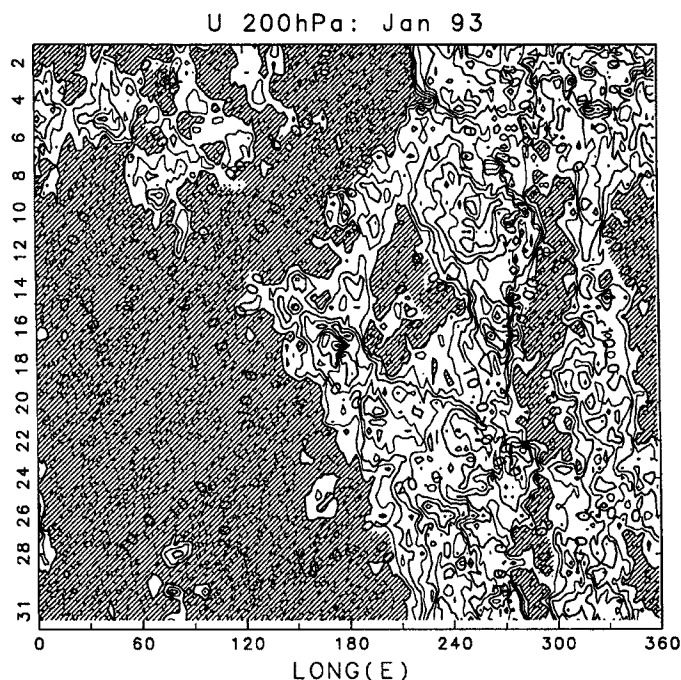


Fig. 4 Similar to Fig. 3 but for 200 hPa.

比較のために、約4 km下の200 hPaでの赤道のUの経度時間断面を示す（Fig. 4）。図の左上から右下へ流れる0の線ではっきりするように、この高さでも東進するシグナルがはっきりしているようにみえる。しかし、先に問題にした100 hPaでの西風の強化に対応する時期および場所（1月はじめと終りの西太平洋）には、この高度では西風域の東進はみられていないことがわかる。Fig. 1からわかるように、200 hPaにみられている東進シグナルは、対流圏のほぼすべての高さで見られる30-60日変動に対応するものと考えられる。これは100 hPaでもみられている（Fig. 3）。

長期間にわたるスペクトル解析の結果によれば¹⁾、100 hPaと200 hPaのUのシグナルは、30-60日変動の周波数帯ではほぼ同位相とみられるが、ここでもその構造がみられる。ところが一方、100 hPaにしかみられない1月上旬および下旬の東進シグナルは、これとは異なっているようである。

再び100 hPa面に注目して、現象の緯度方向の広がりをみる。Fig. 5は、1月25日および2月2日の100 hPaの東西風の水平分布をあらわしている。緯度方向の広がりは両半球にそれぞれ5°-10°程度だと見られる。

同様な解析を南北風についておこなってみたが、東進するはっきりしたシグナルをみとめることはできなかった。このこととUにおける東進性から、この現象がケルビン波あるいはその性質を色濃くもった現象であることが示唆される。

3.2 温度と高度の場合

東西風でみられた、100 hPa付近に局在した東進擾乱は、温度場でもはっきりとみとめられる。Fig. 6でみられるように、温度のシグナルも東進している。1月下旬の現象についていえば、シグナルの速度は、192 Kの等値線の方から判断して、10°/dayほどであり、Uよりもやや小さいめであるようにみえる。

温度のシグナルでも、変化の大きい経度はほぼUと同じ場所に限定されている。また、温度の上昇は急激におこっており、120°E付近では、1月24日から約2日間に12 Kも上昇しているが、それに引き続く温

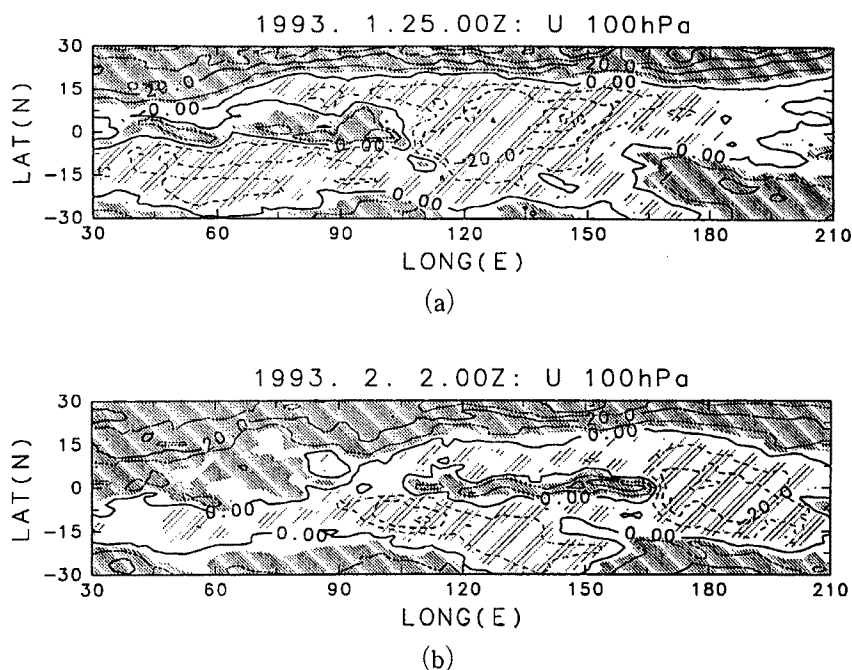


Fig. 5 The zonal wind at 100 hPa on (a) 25 Jan (b) 2 Feb. Contour interval is 10 m/s. Values greater than 5 m/s are heavily shaded and ones less than -5 m/s are lightly shaded.

度の下降は、それほど大きな変化率をもってはいない。昇温の時期であるが、120°E 付近では、1月24日ごろである。これは西風が急に強くなった時期より2-3日早い。正弦波から大きくずれた現象なので、位相を決めるのは難しいが、あえて波動に見立てて位相を決めるとすれば、TはU（西風を正）より少し位相が早いことになる。

次に、鉛直構造であるが、温度場では、現象が見られる高度はUほどは100hPa 付近に限定されていない。Fig. 7は、1月の下部成層圏から上部対流圏にかけての各高度での赤道上の温度の経度時間断面である（150 hPaの図はNov 1992からJan 1993の4ヵ月の偏差）。

高度の大きい方から順に見て行くと、50 hPaではあまりはっきりしない。しかし、70hPaでは、1月中旬にはっきりした昇温域の東進がみられ、どうやら100 hPaでみられた現象と対応しているようである。120°E 付近の昇温は15-16日であり、100 hPaより数日早い。また、150 hPaでは、昇温の規模はかなり小さいが、26日ごろもっとも昇温しているらしい。200 hPaでは現象はありそうにもみえるが、はっきりとはしない（図は示さず）。

このように、少なくとも70 hPaから150 hPa 付近にかけては、昇温時期が下の高度ほど遅いようにみえる。位相の下降速度は、およそ0.5 km/dayである。この値は、清水¹²⁾のインドネシアでの観測結果とほぼ一致している。1月上旬の現象はやや早く降下し、70 hPaから100 hPaの2 km強を約2日で降りているようである。しかし、この値を正確に見積もることは難しい。

一方、ジオポテンシャル高度の場合はずいぶん異なっている。圏界面付近に局在した現象は、あまりはっきりしない。Fig. 8に、100 hPaのHの偏差の波成分（Hから各点の4ヵ月の平均をひいて、それからさらに帯状平均をひいたもの）を示す。確かに、120°E 付近で、1月22日ごろHが小さくなり、2月上旬のはじめごろに（図を示さず）大きくなっているが、U、Tで見られたような激しい変化がみられない。また、鉛直構造も異なっていて、時間高度断面においても、顕著に圏界面付近に局在するシグナルをみつけることは難しい。

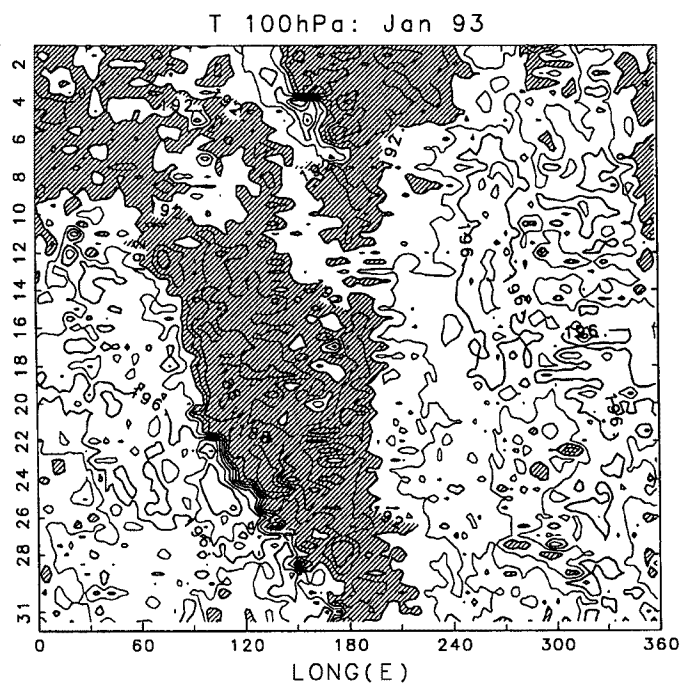
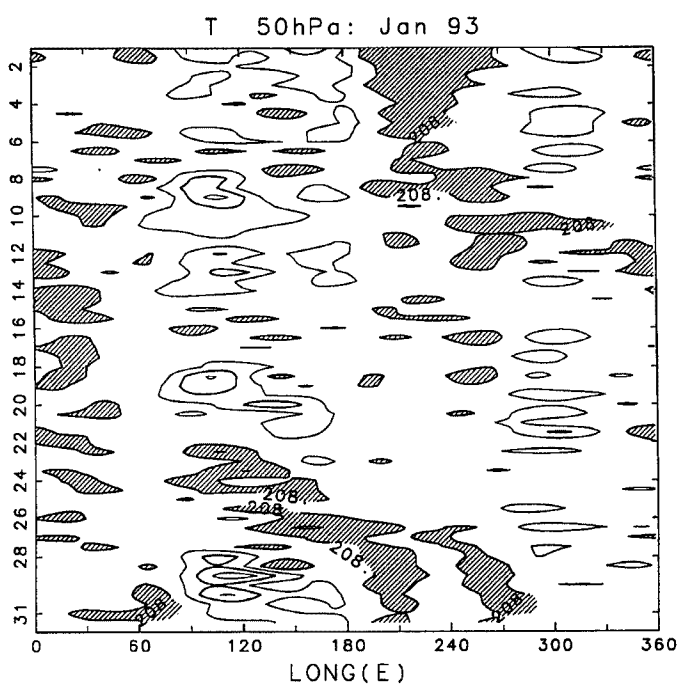
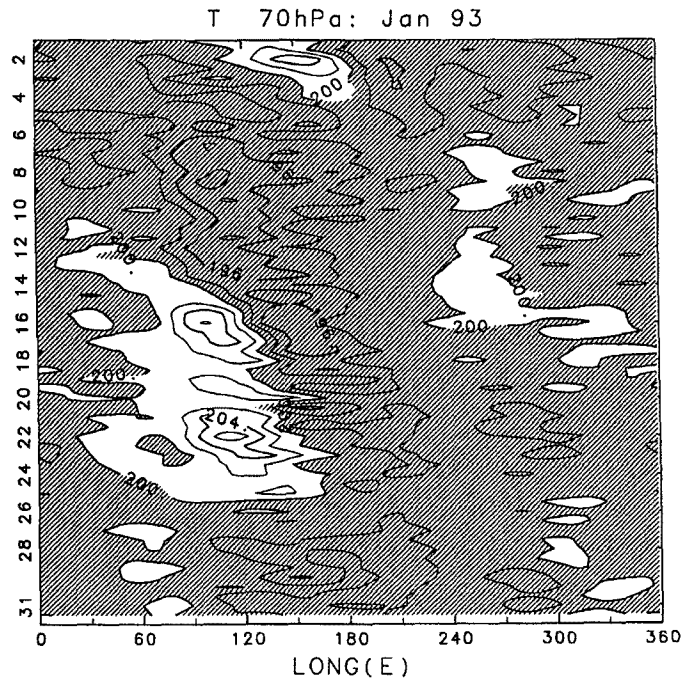


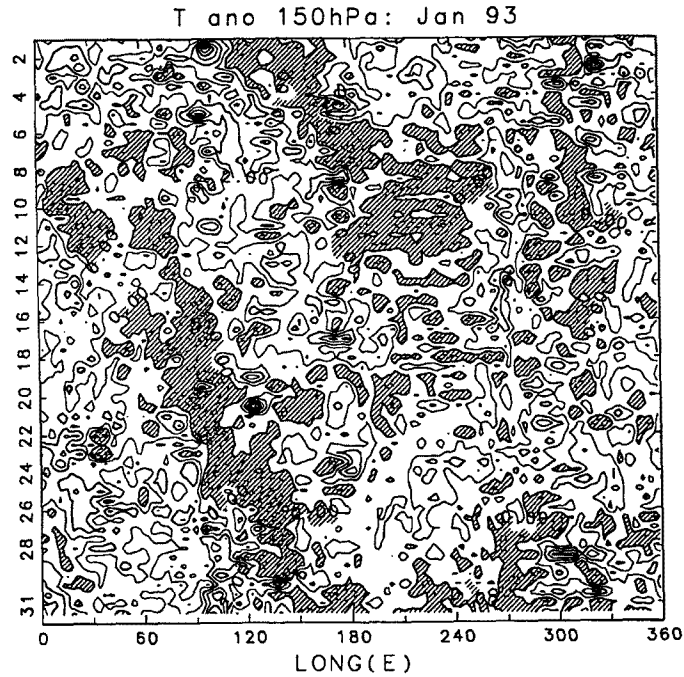
Fig. 6 Longitude ($^{\circ}$ E)-time section of the temperature at 100 hPa during Jan 1993. Contour intervals are 2K and values less than 192 K are shaded.



(i)



(ii)



(iii)

Fig. 7 Similar to Fig. 6 but for (i) 50 hPa (Contour interval 2 K and values less than 208 K are shaded) (ii) 70 hPa (2 K ; less than 200 K) (iii) Anomaly from 4-month mean at 150hPa (Nov 1992-Feb 1993) (1K ; negative values)

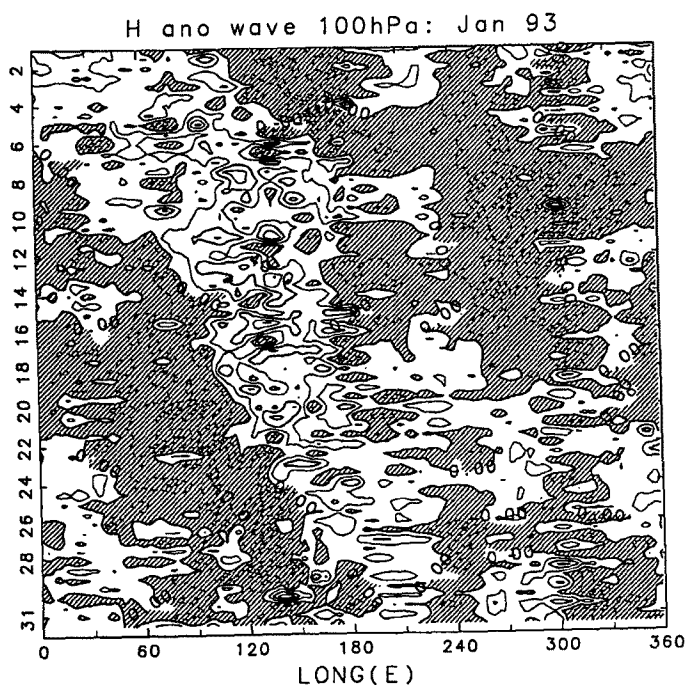


Fig. 8 Longitude ($^{\circ}$ E)-time section of the geopotential height anomaly at 100 hPa during Jan 1993. The anomaly is calculated in the following way: at first the 4month (Nov 92 - Feb 93) average at each point is subtracted and after that the zonal mean of the time-anomaly is subtracted. Contour intervals are 2 m and negative values are shaded.

4. 議論と結論

今回の解析で得られた100 hPa 付近に局在する現象は、対流圏に励起源をもつ赤道捕捉内部ケルビン波であると推測される。その理由は以下のとおりである。

- 東西風および温度のシグナルが東進している。
- 南北風にはシグナルがほとんど見られない。
- 位相の下方伝播が見られる。
- U に比べて、T の位相が (位相角までは同定できないものの) 少し進んでいる。

これらの現象は、大きく見ると Parker¹⁰⁾, Tsuda et al.¹¹⁾ に見られるものと同じであると考えられる。清水¹²⁾ は、今回の解析と同じ時期に、再びインドネシアのバンドン (7° S, 107° E) で約 120 日のゾンデ高層観測をおこなったが、1 月および 2 月に、圏界面付近で周期が 20 日前後の位相が下方に伝播する波動を検出した。これは、この解析でとらえられているものと同一の現象であると思われる。かれらの解析結果は、鉛直に約 150 m ごとにデータがあるため、位相の鉛直伝播や現象が見られる高度範囲がはっきりわかる。このインドネシアでの U や T のふるまいは、おおむねこの気象庁全球データのその地域でのふるまいと一致しており、今回の気象庁データの解析結果が現実のものであることを強く示唆している。また、TOGA COARE International Project Office¹³⁾ の速報における西太平洋の Kavieng (3° S, 151° E) の 100 hPa 以下の温度と風の鉛直プロファイルもこの全球データのものとよく似た振舞をしめしている。

以下、この現象が内部ケルビン波だと考えて、議論を行っていく。

この解析での新しい発見は以下の2点にある。

- 1：波の振幅が大きくなっている経度が数十度に限られている。
- 2：現象が正弦波の形から大きくずれていること。西風への変化、昇温が、東風への変化、降温に比べてはるかに劇的である。

以下の点についての議論が特に重要であろう。(a) なぜ、この波は圏界面付近に局在しているのか (b) なぜ、特定の経度帯に局在しているのか (c) なぜ、波の形は正弦的なものから程遠いのか

(a)に関しては、成層圏で一般に見られているものより振動数の小さい(周期の長い)この波が、鉛直にとっても小さい群速度(波数の同じ重力波同士なら、鉛直群速度は周期の2乗に反比例、また水平位相速度が同じ波同士なら、鉛直群速度は、周期に反比例する)をもつため、鉛直にエネルギーを伝えられないうちに減衰するのではないかと考えられる。(b)に関しては、3例とはいえ、すべての例が西太平洋を中心に起こっているため、積雲活動との関係が考えられる。(c)に関しては、移流項などの非線形項の寄与が考えられるが、どのように効いているかはまだはっきりしていない。

成層圏への波動エネルギーの流入口である圏界面付近で、波数1などの長波に伴う変動の振幅が経度によって大きく異なっているという事実は、波の活動度を評価するには1点や小領域のデータ解析ではおぼつかないことを示唆している。

圏界面直下の100 hPa付近では、周期が30-60日で積雲活動をともなった対流圏の“30-60日変動”と、この高さ付近に局在する、周期(または、現象の発現間隔)が20-35日前後の(自由な)ケルビン波がともに見られていることになる。この両者が、線形的に比較的独立に共存するのか、また何らかの強い相互作用を行うのかは、まだはっきりしない。

この東進擾乱とその典型的な性質が、再現性をもっているのかどうかをより長いデータを用いて調べることが必要である。現在、30年以上の長さを持つ高層観測データを用いて、その検証をおこなっている。

参考文献

- 1) Madden, R. A. and P. R. Julian, 1972: Description of global scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period. *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1109-1123
- 2) Nishi, N., 1989: Observational study on the 30-60 day variations in the geopotential and temperature fields in the equatorial region. *J. Meteor. Soc. Japan* **67**, 187-203
- 3) Madden, R. A. and P. R. Julian, 1971: Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 702-708
- 4) Wallace, J.M. and Kousky, V.E., 1968: Observational evidence of Kelvin waves in the tropical stratosphere. *J. Atmos. Sci.*, **25**, 900-907
- 5) Wallace, J.M. and Kousky, V.E., 1968: On the relation between Kelvin waves and the quasi-biennial oscillation. *J. Meteor. Soc. Japan* **46**, 496-502
- 6) Maruyama, T., 1969: Long-term behavior of Kelvin waves and mixed Rossby-gravity waves. *J. Meteor. Soc. Japan*, bf 47, 245-254
- 7) Maruyama, T., 1979: Equatorial wave intensity over the Indian Ocean during the years 1968-1972. *J. Meteor. Soc. Japan*, bf 57, 39-51
- 8) Maruyama, T., 1991: Annual and QBO-synchronized variations of lower-stratospheric equatorial

- wave activity over Singapore during 1961-1989. *J. Meteor. Soc. Japan*, bf 69, 219-232
- 9) Madden, R. A. and E. J. Zipser, 1970 : Multi-layered structure of the wind over the equatorial Pacific during the line island experiment. *J. Atmos. Sci.*, **27**, 336-342
 - 10) Parker, D. E., 1973 : Equatorial kelvin waves at 100 milibars. *Quart. J. R. Met. Soc.*, **99**, 116-129
 - 11) Tsuda, T., Y. Murayama, H. Wiryosumarto, S. W. B. Harijono, and S. Kato, 1994 : Radiosonde observations of equatorial atmosphere dynamics over Indonesia. Part I : Equatorial waves and diurnal tides. *J. Geophys. Res.*, **99** 10,491-10,505
 - 12) 清水厚, 1994 : インドネシアにおけるケルビン波のラジオゾンデ観測 (京都大学卒業研究論文 1994 年 2 月)
 - 13) TOGA COARE International Project Office, 1993 : TOGA COARE intensive operations summary.