

- A-1 衛星データ等を活用したオゾン層破壊機構の解明及びモデル化に関する研究
(2) 極域・中緯度域相互作用とオゾン層変動に関する研究
③ つくばにおけるオゾンゾンデ観測等によるオゾン層変動の解明

研究代表者 運輸省気象庁観測部環境気象課オゾン層情報センター 内野 修(H8)
宮内 正厚(H9,10)

運輸省気象庁観測部環境気象課オゾン層情報センター 内野 修・宮内 正厚・梶原 良一・
篠原 吉雄・佐藤 尚志・赤木 万哲・林 基生・杉田 興正・
中川 雅之・高橋 賢一・新垣 貞則・斎藤 篤思
運輸省気象庁高層気象台 下道 正則・梶原 良一

平成8-10年度合計予算額 11,117千円
(平成10年度予算額 3,729千円)

[要旨] 北半球の中高緯度はオゾン減少傾向が顕著な地域であるが、オゾン減少の機構は必ずしも明確ではない。そのため気象庁高層気象台(つくば市)において冬季から春季にかけてオゾンゾンデによるオゾン層の特別観測を行い、オゾン層の変動機構について調査を行った。1997年の春季には、北半球高緯度において極渦が安定し大規模なオゾン層破壊が発生した。5月には極渦が分裂し、その一部が日本付近にも移動して、つくば上空においてオゾンの少ない状況が一部の高度で観測された。1997/98年、1998/99年の北半球高緯度では、成層圏の気象状況により大規模なオゾン層破壊は発生しなかった。しかし、1999年3月にはつくばで大きなオゾン減少を観測した。バックトラジェクトリー解析等の結果からこのオゾン減少の主な原因は、北極域での化学的な破壊に起因するものではなく、オゾンの少ない低緯度の気塊が移流したことによるもので、準二年周期振動(QBO)の影響も示唆される。

[キーワード] オゾン変動、オゾンゾンデ観測、極渦

1. 序

北半球高緯度域の極渦内部においては、南極オゾンホールと同一機構によるオゾン層破壊が出現している。また、極渦に覆われない北半球の中緯度域においても大きなオゾン減少の現れることがある。この減少は極渦内のオゾンの少ない空気が極渦外へ移流する影響等によると考えられるが、その詳細については解明が進んでいない。

高層気象台は、オゾンゾンデによるオゾンの高度分布の観測を1968年に開始し、オゾン層の長期変化傾向(トレンド)の解明に重要な観測データを提供している。それによればつくば上空300~30hPa(約9~23km)のオゾンには、減少傾向が見られる¹⁾(図1参照)。季節的には春季の減少傾向が大きく、200hPa(約12km)面では20%/10年を超える減少となっている。本研究では、データの蓄積の豊富な同気象台において、オゾンゾンデ観測を行うことにより、オゾン層の変動機構についての調査を行った。

2. 研究目的

中緯度のオゾン変動と関係が深い極渦内の気塊の輸送と極渦内外の相互作用について、オゾンゾンデ観測により実証的なデータを得る。観測されたオゾンゾンデデータに加え他の気象データ等も用いて解析し、中緯度のオゾン変動機構についての解析を行う。

3. 研究方法

高層気象台における通常のオゾンゾンデ観測に加えて冬季から春季にかけてオゾンゾンデの強化観測を行い、数多くの観測データを解析し、極渦外のオゾンの変動についての知見を得る。また、ヤクーツク、北海道で行われるオゾン等の各種強化観測のデータと比較することにより、極渦によるオゾン層破壊についての知見を得る。これらの観測は冬季から春季にかけて行う。

4. 北半球高緯度におけるオゾン層破壊のつくばへの影響

本研究期間における北半球高緯度の下部成層圏(50hPa)の日々の最低気温(北緯60度以北)の推移を図2に示す。1996/97年の冬季から春季にかけては、北半球高緯度の成層圏では極渦が安定していたことに伴い低温の状態が続いた。1997年は1月から3月下旬まで継続的に、極成層圏雲出現の目安である -78°C 以下となっており、極成層圏雲の表面における不均一系化学反応によるオゾン層破壊が進み、北半球高緯度で大規模なオゾン減少が観測された。1997/98年には12月に一時低温化したが、その後小規模な突然昇温が発生し、北半球高緯度の下部成層圏の最低気温は -78°C 前後の値を推移した。1998/99年には12月と2月に大規模な突然昇温が発生し、 -78°C 以下の領域は12月と2月に一時出現したのみであった。このように1997/98年、1998/99年には極成層圏雲を出現させる低温域が継続しなかったことから北半球高緯度においては大規模なオゾン層破壊は起こらなかった。ここでは1996/97年の大規模なオゾン減少が日本付近に及ぼした直接的な影響について示す。

1997年の2月以降、北半球高緯度の極渦は安定しその内部では継続して低温な状況が現れ、5月前半まで1988年以降で最も低い気温で推移した。そのため極渦内で極成層圏雲に伴うオゾン層破壊が進み、北半球高緯度の3、4月の月平均オゾン全量は、TOMSデータによれば1979～1992年の平均と比較し30%以上も減少していた²⁾。極渦の中の空気は渦位の高い領域として識別できるが、5月に入ると極渦は大きく変形して崩壊し、日本付近にもその崩壊した渦の一部が移動している(図3)。崩壊し分離した高渦位域の中心は12日に北海道付近、13日に中部日本付近まで南下している。5月12日につくばでオゾンゾンデ観測を実施した(13日以降は天候等の都合で観測を行うことができなかった)。同日には札幌においてもオゾンゾンデ観測を実施している(気象庁の定常観測)。12日の観測によれば両地点共に高度22km付近のオゾン分圧が減少している(図4)。この減少は高渦位域の中心が通過している札幌の方が明瞭に現れている。しかし、オゾン全量ではこれによる大きな減少は見られなかった。なお同日の国立環境研究所と名古屋大学太陽地球環境研究所が実施している北海道母子里でのオゾンゾンデ観測でもオゾンの減少が報告されている³⁾。図5はバックトラジェクトリー解析によりつくば上空の気塊の起源を推定したものである。これによれば、12日のつくば上空の21～23kmの気塊は極渦の存在していたシベリア付近から流入している。この12日の気塊の移動は、つくばに渦が移動してくる前

の 11 日までの気塊の経路と大きく異なっており、12 日の気塊は極渦の影響を大きく受けている。また、この高度域は、図 4 でオゾンが減少していた高度に対応している。このことから、つくばにおいても極渦から分離した空気の影響を受けていたと考えられる。なお、図 4 で 22km 付近より低い 15km 付近の高度でオゾンが減少しているのは、崩壊した渦の影響ではなく、オゾンの少ない低緯度からの気塊の移流によるものである。

図 6 は 1997、1998、1999 年の 1 月から 5 月までのつくば上空 550K 面（約 22km）の渦位とオゾン混合比の推移を示す（1999 年は 1 月から 3 月まで）。一般的に北半球高緯度域ではオゾン層破壊がなければ極渦内部ではオゾンの濃度は高いので、極渦の内外に位置することのある地点では、渦位とオゾンの間には、正の相関がある。しかし、極渦内でのオゾン層破壊が進むと、渦位とオゾンの関係は逆に負の相関となる。つくばにおける観測結果では、1998 年、1999 年の観測結果には、渦位とオゾンの間には一部対応が見られる期間もあるが、全体的にはその関係は明瞭ではない。これは、つくばに極渦が直接移動してくる回数は極めて少なく、またその影響も小さいことを意味していると考えられる。

5. 1999 年 3 月のオゾン減少について

前節に述べたように 1998/99 年の北半球高緯度の気温は高い状態であったことから、顕著なオゾン層破壊は発生しなかった。しかし、つくばで観測された 3 月の月平均オゾン全量は観測開始以降過去 2 番目に小さい値を記録した。この減少は北半球の 20 ~ 40 度付近に帯状に広がっており、全球的な規模の現象であった（図 7 参照）。またこのような減少傾向は 1 月から現れていた。この節ではオゾンゾンデ観測結果及びバックトラジェクトリー解析を用いた調査結果を示す。

図 8 は国内 4 地点の 1999 年 3 月の月平均オゾン高度分布である。これによると 4 地点共に高度 23km 付近を中心に大きな減少を示している。つくばで 3 月に観測されたオゾンゾンデ観測結果によれば、80 ~ 20hPa の高度域では個々の観測で変動はあるものの全ての観測で平年より少なかった。またつくばでは 300 ~ 80hPa にかけても平年より少ないオゾンを観測した例が多かった（図 9）。300 ~ 20hPa のすべての高度領域でオゾンが少なかった 3 月 29 日（図 9 の太線）について、バックトラジェクトリー解析の結果を図 10 に示す。これによればつくば上空 17km の気塊のみがつくばと同程度の緯度から移流されたものであり、それ以外の高度の気塊は低緯度からの移流によることを示している。図 9 の 29 日のオゾンの高度分布では低濃度の中に 17km 付近をピークとした比較的高濃度な構造が見られるが、これは 17km の気塊の起源が他の高度よりも高緯度であることに対応している可能性も考えられる。

次に図 8 で、オゾンの減少が大きい高度域である 23km について 3 月の毎日についてバックトラジェクトリー解析を行った結果を図 11 に示す。比較のために本年のような大きな減少が生じなかった 1998 年 3 月の解析結果も同時に示す。1998 年 3 月では一部を除いて北緯 30 ~ 60 度の範囲内から移流しているが、1999 年 3 月には北緯 30 度以南のアフリカからアラビア半島付近から移流している日が多く、両者の移流の軌跡には明瞭な違いが見られる。なお、1999 年 3 月の東シベリア付近から移流している軌跡は、極渦が崩壊してつくば付近に接近した影響であると推定され、図 6 の 3 月後半の渦位の上昇に対応している。10 日前の気塊の存在した平均的な緯度を計算すると、1998 年 3 月は北緯 37 度付近、1999 年 3 月は北緯 31 度付近であり、1999 年の方が約 6 度低緯度から移流していた。同様に 5 ~ 27km の各高度について計算した結果を示したも

のが図 12 である。図からわかるように、すべての高度域で 1999 年の方が 1998 年より低緯度から移流している。しかし、1999 年は 1998 年と比較して極渦の影響を受けた日が多いので（図 11 参照）、その極渦の影響を受けた日を除いて同様に計算すると、1999 年の気塊の起源は、より低緯度からとなっている。図 8 の国内 4 地点のオゾン高度分布の平年値では 20hPa より高高度では 4 地点ともほぼ同じオゾン分圧であるが、それより低高度のオゾン分圧は低緯度ほど小さくなる明瞭な緯度変化を示している。これらのことから 1999 年 3 月のオゾン減少は低緯度起源の気塊の移流による影響が示唆される。

1999 年 3 月にはオゾンのみでなく高層気象観測結果にも、平年と比較して興味深い現象が発生している。つくばのレーウィンゾンデ観測による高層風は 200hPa より上層では平年と比較して全体的に風速が強い傾向があり、さらにバックトラジェクトリー解析結果で示したつくば上空の気塊が低緯度から移流されたことに対応して 30hPa の高層風の南風成分は観測開始以降の最大値を記録している。また高層気温では対流圏で高温傾向、成層圏では低温傾向が明瞭に現れており、特に 125 ~ 40hPa にかけては観測開始以降最も低い気温であった。一般的に成層圏気温はオゾン量と相関が高いので、この低温な状態は 3 月の大きなオゾンの減少に対応している。オゾンや高層気温の経年変化は準二年周期振動(QBO)の変動に対応している。図 13 はつくば上空の 500hPa、50hPa 気温、オゾン全量及びシンガポール 50hPa の東西風の経年変化を 1960 年から示したものである。オゾン全量、50hPa 気温は QBO の指標であるシンガポール 50hPa 面の東西風と対応して変動している。例えば 1990 年以降では、1990,1993,1995,1997,1999 年のオゾン全量の減少時期とシンガポール 50hPa の東西風が東風から西風に変化する時期はほぼ対応し、同時期につくば 50hPa 気温の低下も見られる。また 500hPa 気温は 50hPa 気温と負の相関をもって変動している。このことから 1999 年 3 月のオゾン減少は QBO に対応した減少とも考えられる。ただし、バックトラジェクトリー解析により示された低緯度からの気塊の移流と QBO の関係については、今後さらに検討する必要がある。

6. まとめ

調査期間中の 1997 年に大規模な北半球高緯度のオゾン層破壊が発生した。その年の春季にはオゾンの減少した空気塊をつくばにおけるオゾンゾンデ観測により確認することができた。また 1999 年 3 月につくばで大きなオゾン減少が観測されたが、その主な原因は、北極域での化学的な破壊に起因するものではなく、低緯度のオゾンの少ない気塊が移流したことによるものと推定され、QBO の影響が示唆される。

7. 参考資料

- 1) 気象庁(1999), オゾン層観測報告:1998
- 2) 気象庁(1998), オゾン層観測報告:1997
- 3) 中根 英昭, 近藤 豊, 中島 英彰, 1997 年春季の北極域オゾン破壊と日本北部への影響, 日本気象学会 1997 年度秋季学会講演予稿集

[研究発表の状況]

(口頭発表)

- ① Uchino,O., K.Akagi, R.Kajihara, M.Hayashi, T.Sato, M. Miyauchi, 1997 AGU Fall Meeting,
Anomalous Ozone Depletion over the Arctic in the Spring of 1997
- ②内野 修, 赤木 万哲, 林 基生, 梶原 良一, 佐藤 尚志, 宮内 正厚, 第 23 回リモートセンシングシンポジウム, TOMS データによって解析された 1997 年春の北半球高緯度のオゾン層破壊
- ③赤木 万哲, 林 基生, 内野 修, 梶原 良一, 佐藤 尚志, 宮内 正厚, 1997 年春季の北半球高緯度域のオゾン減少について, 日本気象学会 1997 年度秋季学会
- ④ Uchino,O., R.Kajihara, M.Fukuda, M. Hayashi, O.Sugita, M.Nakagawa, Trends in ozone observed over Japan and Antarctica,First SPARC General Assembly
- ⑤内野 修, 梶原 良一, 佐藤 尚志, 赤木 万哲, 林 基生, 杉田 興正, 中川 雅之, 長期オゾントレンドと気温との関係, 日本気象学会 1997 年度春季学会

(論文発表)

- ① Oltmans, S.J., A.S.Lefohn, H.E.Scheel, J.M.Harris, H.Levy, I.E.Galbally, E.G.Brunke, C.P.Meyer, J.A.Lathrop, B.J.Johnson, D.S.Shadwick, E.Cuevas, F.J.Schmidlin, D.W.Tarasick, H.Claude, J.B.Kerr, O.Uchino, and V.Mohnen, Trends of ozone in the troposphere, Geophys. Res. Lett., 25,139-142,1998

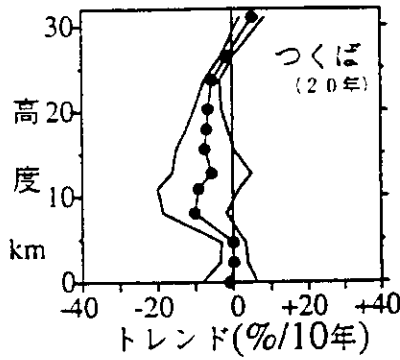


図1：つくばにおけるオゾントレンドの高度分布
 オゾンゾンデ観測による月平均オゾン分圧を基に評価した高度別オゾントレンド(%/10年)。過去20年間(1979～1998年)のオゾン分圧のトレンドの高度分布(●印)と自己回帰を考慮した95%信頼限界(細い折線)。季節変動、QBO及び太陽活動の影響を除去している。

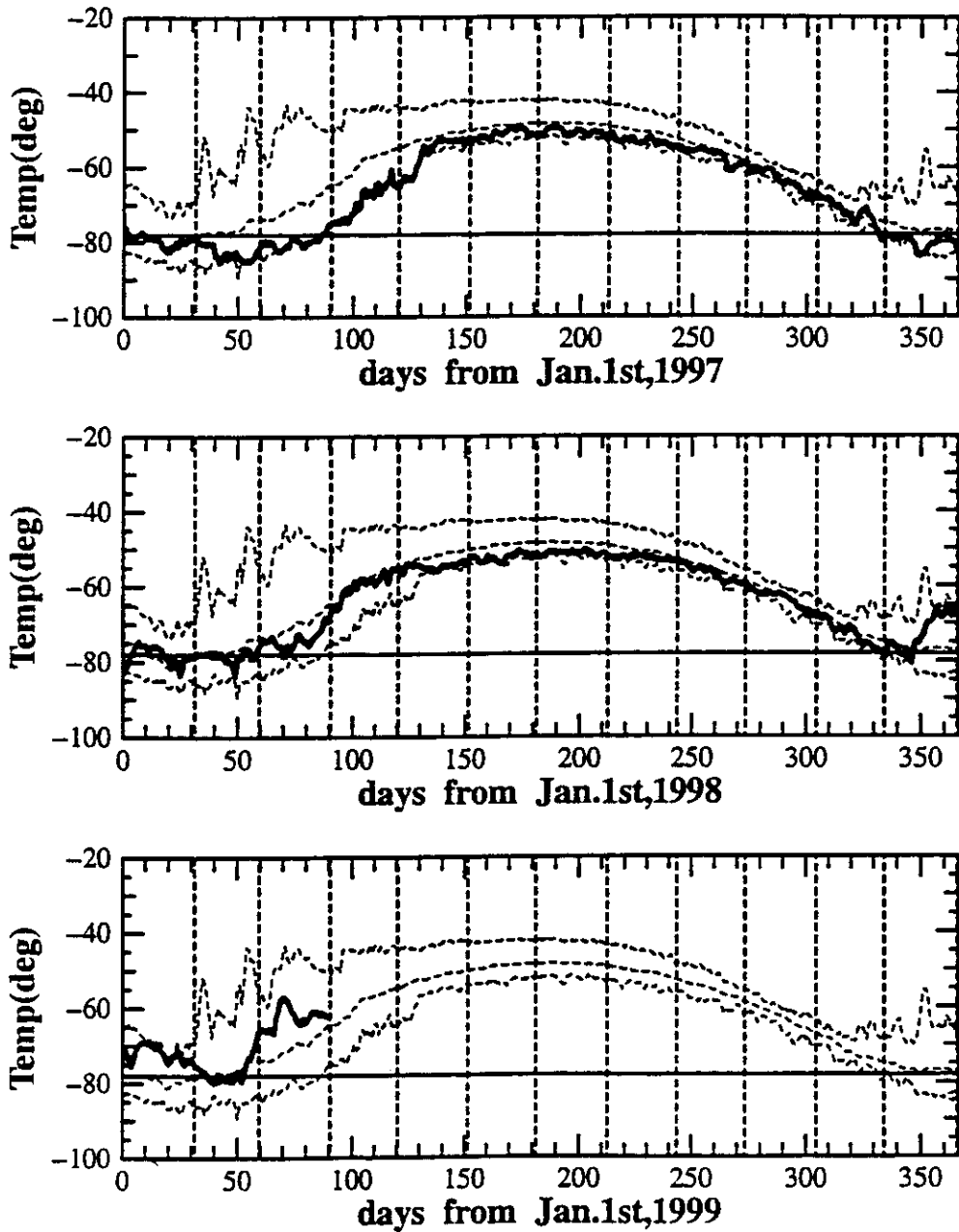
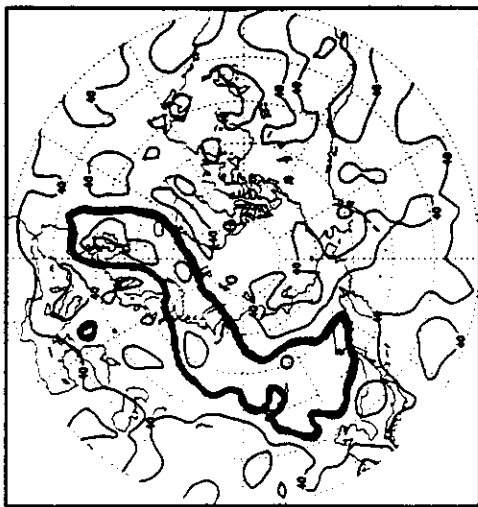
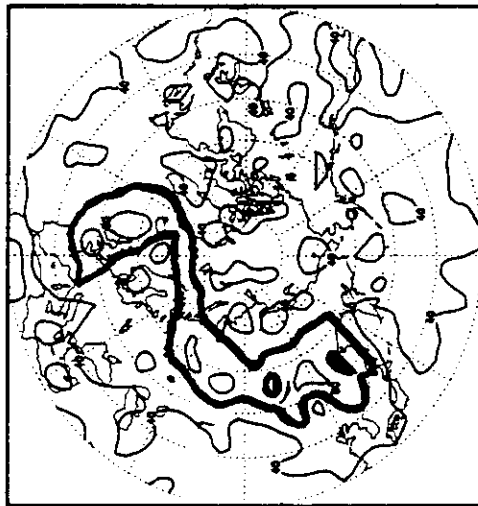


図2：50hPaの最低気温の日別の推移(北緯60度以北) 気象庁客観解析データを基に作成。太線は1997,1998,1999年の最低気温の値、破線は1988～1998年の最低気温の累年平均及び同期間の最低気温の最高値及び最低値を示す。図中の横の直線は極成層圏雲出現の目安となる-78℃を示す。

Pot Vor 550K ANAL 8 MAY 97



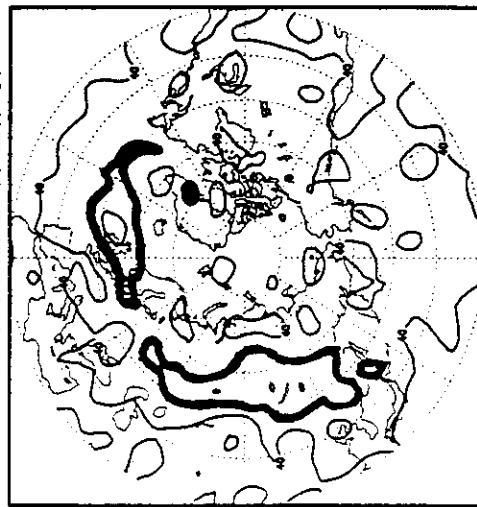
Pot Vor 550K ANAL 9 MAY 97



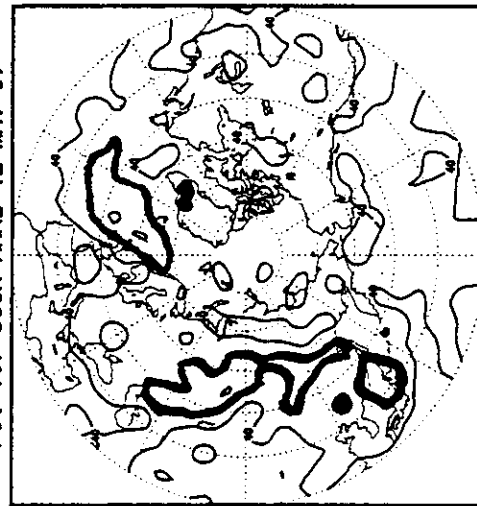
Pot Vor 550K ANAL 10 MAY 97



Pot Vor 550K ANAL 11 MAY 97



Pot Vor 550K ANAL 12 MAY 97



Pot Vor 550K ANAL 13 MAY 97

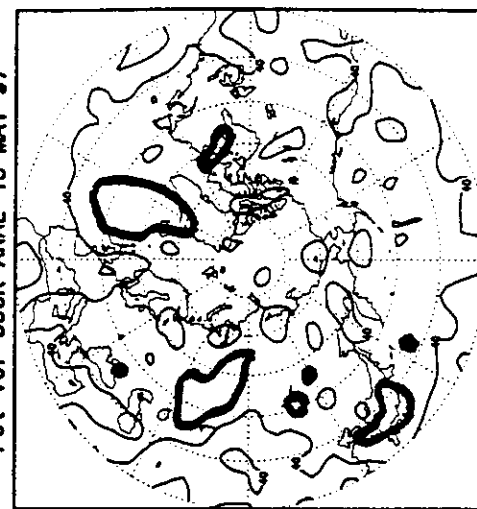


図3：北半球における1997年5月の渦位の分布 温度550K面上における渦位の分布の推移を5月8日から13日まで示す。太線は極渦の目安として $60 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ K/kg}$ sを示す。

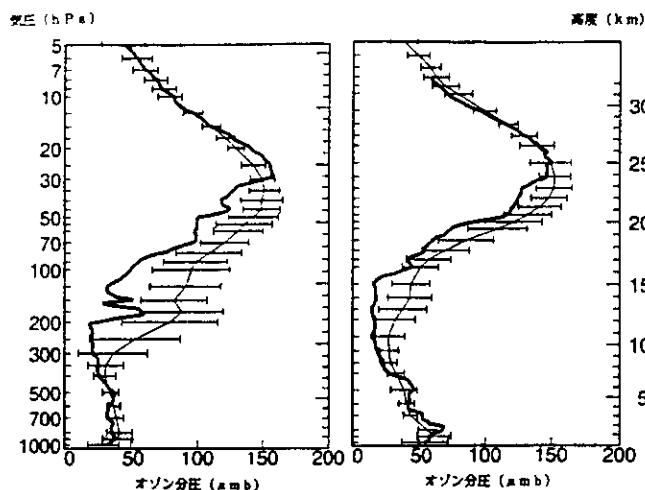


図4：札幌、つくばのオゾンゾンデ観測結果(1997年5月12日)

左図は札幌の1997年5月12日のオゾンゾンデ観測結果(太線)と5月の累年平均及び標準偏差(細線)。また右図は同日のつくばのオゾンゾンデ観測結果(太線)と5月の累年平均(1968-1996年)及び標準偏差(細線)。極渦の分裂に伴うオゾン減少の層は22km付近。下層に見られる減少域は他の要因による。

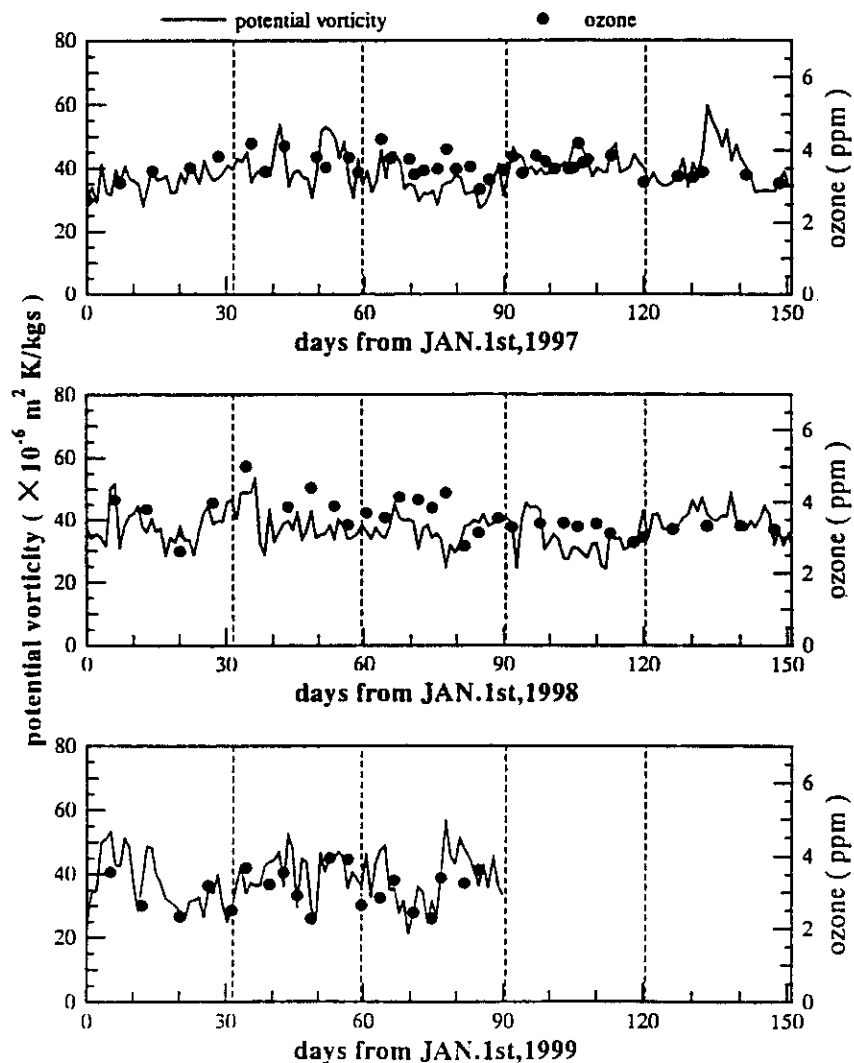


図6：つくば上空における渦位とオゾン混合比の推移 550K面上の渦位とオゾンゾンデ観測結果に基づくオゾン混合比の推移を示す。

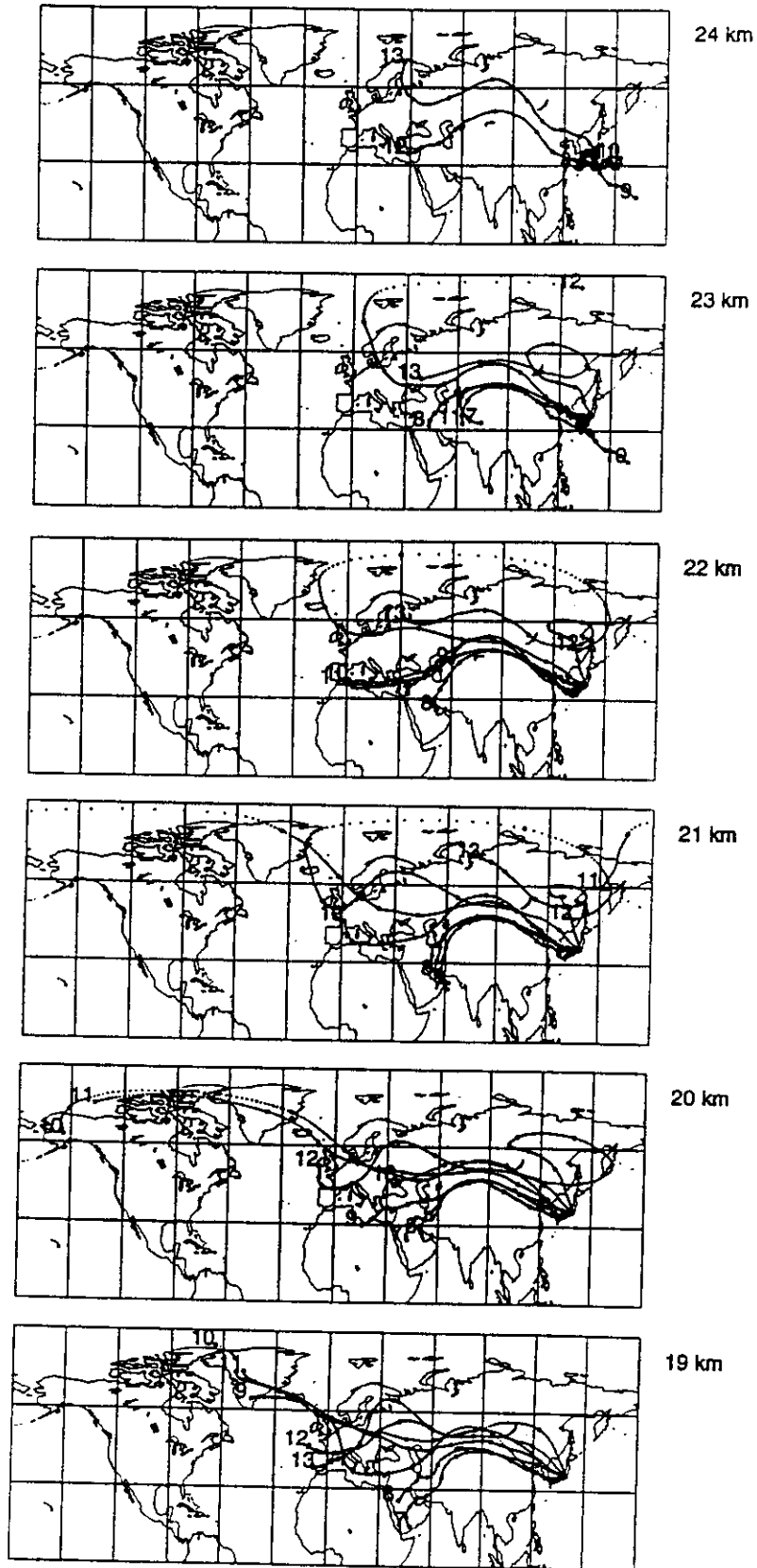


図5：つくば起点のバックトラジェクトリー解析結果（1997年5月1日～13日） 高度19～24kmを起点とした10日前までさかのぼったバックトラジェクトリー解析。小さい点は1時間毎の位置を、大きい点は1日毎の位置を示す。数字は計算を開始した日を示す。

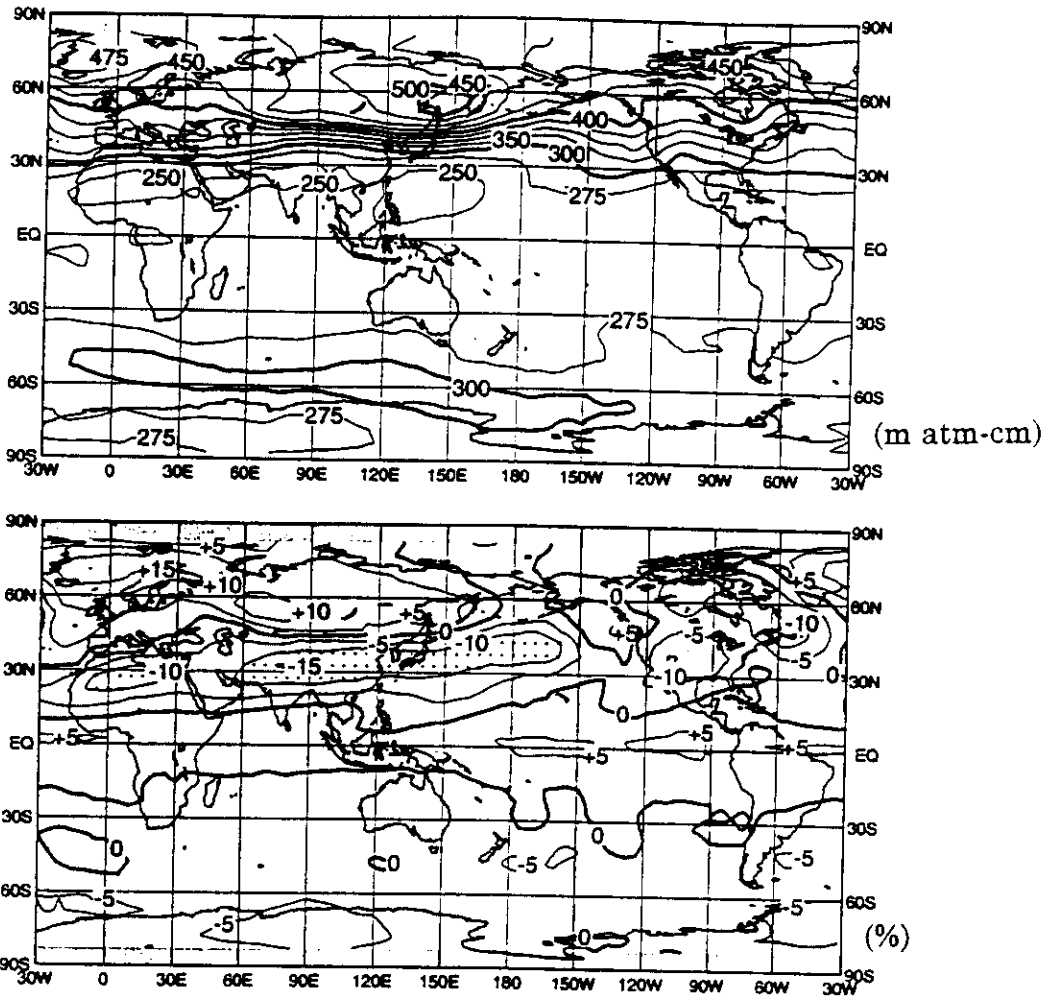


図7：1999年3月の全球のオゾン全量状況 上段は月平均オゾン全量分布、下段は1979-1992年の累年平均からの偏差。NASA提供のTOMSデータから作成した。

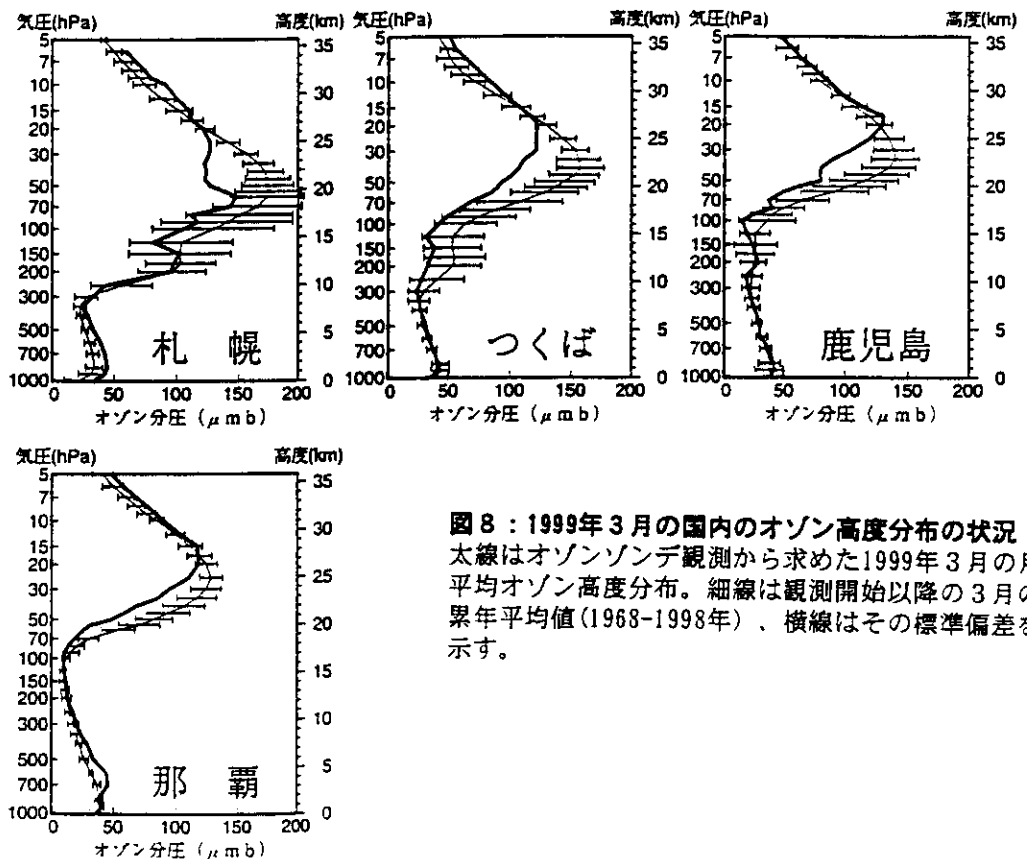


図8：1999年3月の国内のオゾン高度分布の状況 太線はオゾンゾンデ観測から求めた1999年3月の月平均オゾン高度分布。細線は観測開始以降の3月の累年平均値(1968-1998年)、横線はその標準偏差を示す。

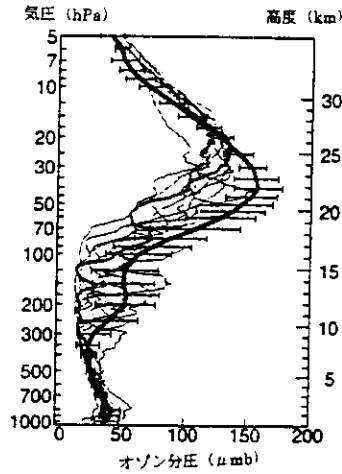


図9：1999年3月のつくばのオゾンゾンデ観測結果
 細線は全観測結果を、太線は3月29日の観測結果を示す。また極太線は観測開始以降の3月の累年平均値(1968-1996年)である。横線はその標準偏差を示す。

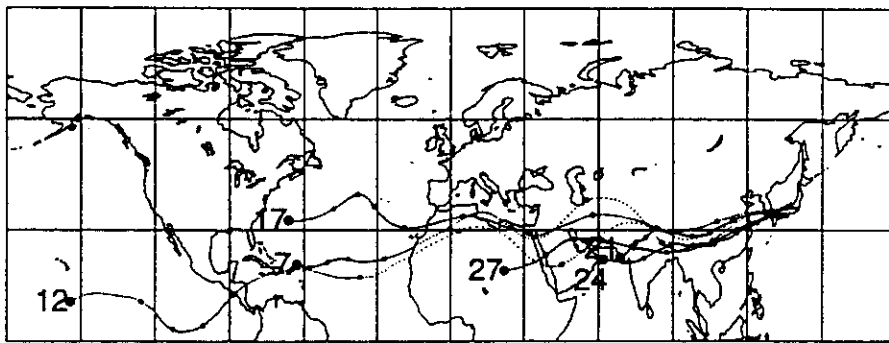
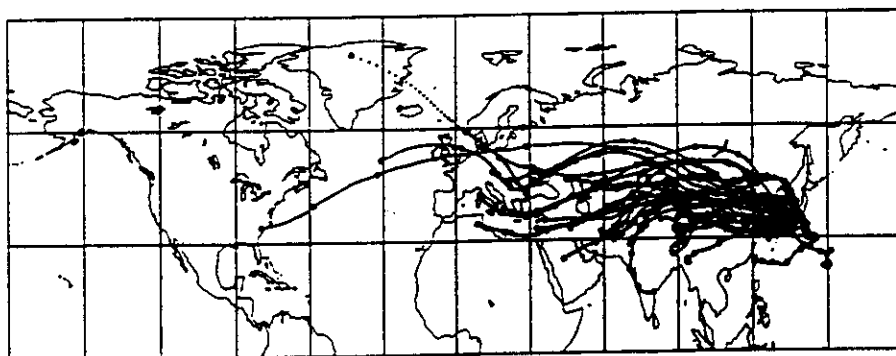
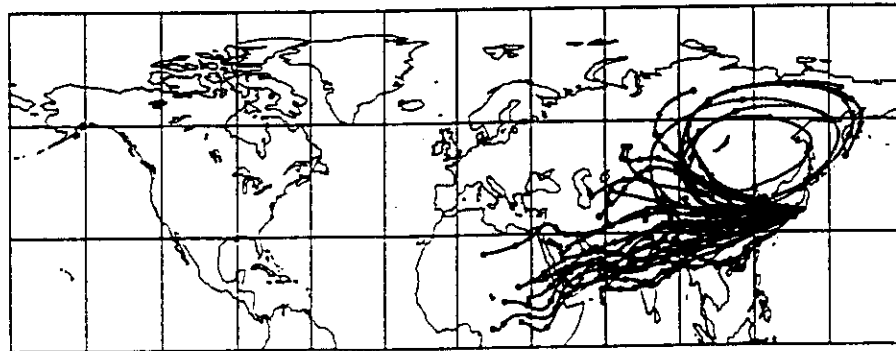


図10：1999年3月29日のつくば起点のバックトラジェクトリー解析結果 高度7, 12, 17, 21, 24及び27kmを起点として10日前までさかのぼったバックトラジェクトリー解析。小さい点は1時間毎の位置を、大きい点は1日毎の位置を示す。



1998.03



1999.03

図11：1998年、1999年3月のつくば上空23km起点のバックトラジェクトリー解析結果 つくば上空23kmを起点として10日前までさかのぼったバックトラジェクトリー解析。小さい点は1時間毎の位置を、大きい点は1日毎の位置を示す。

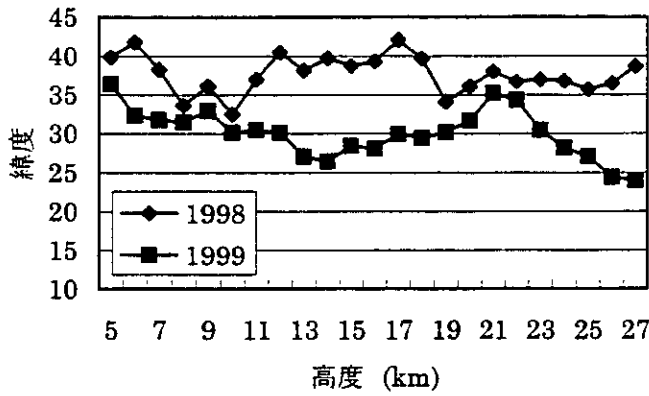


図12：1998年、1999年3月のつくば上空の気塊の起源 つくば上空を起点としたバックトラジェクトリ一解析結果を基にして、10日前の起源の平均位置を示す。

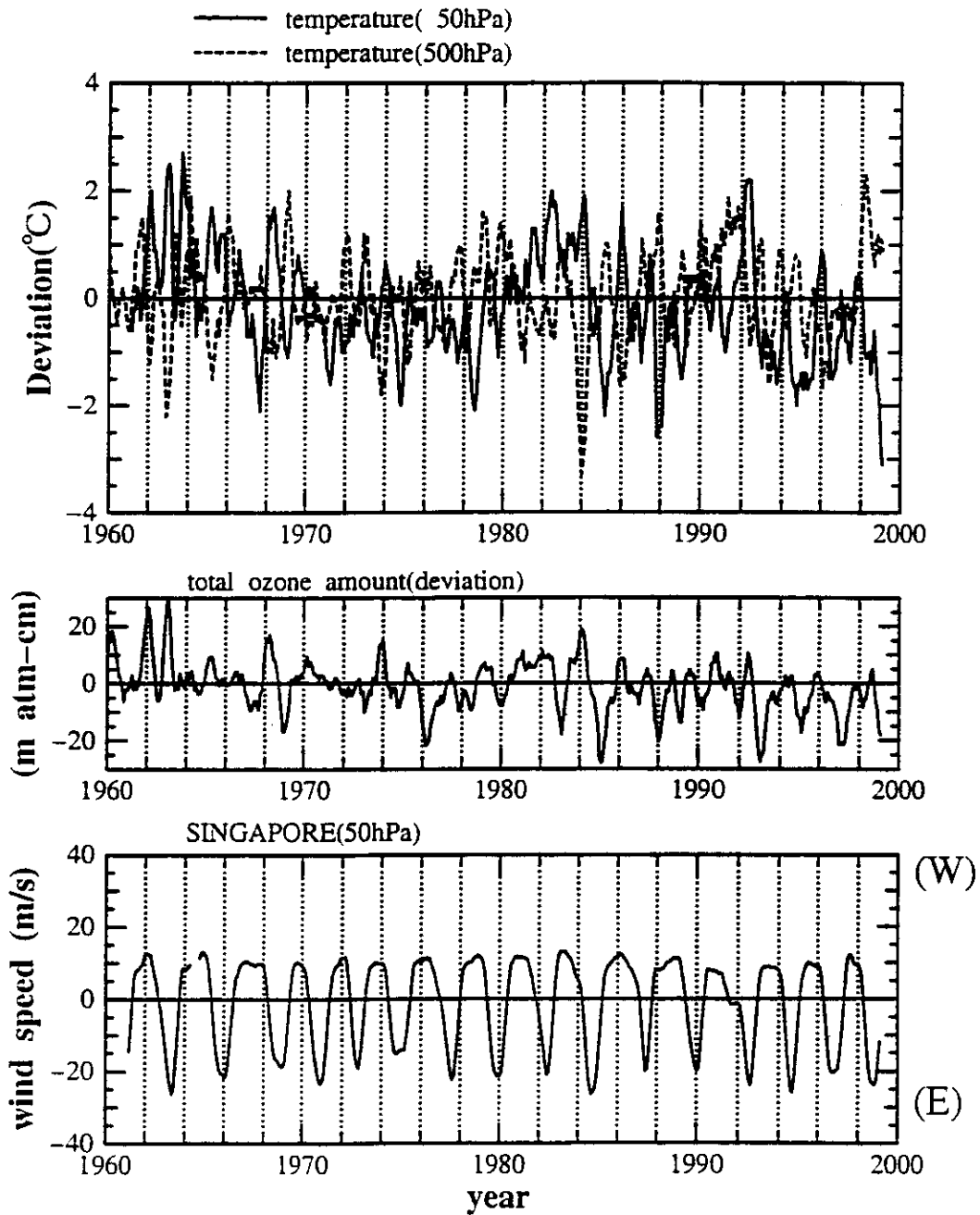


図13：1960年以降のつくば上空の500、50hPa気温、オゾン全量及びシンガポール上空50hPa東西風の推移 気温及びオゾン全量は各月の累年平均値からの偏差を示す。また全て5ヶ月移動平均を行った値。