

## A-1 オゾン層の回復を妨げる要因の解明に関する研究

### (4) オゾンゾンデ観測に基づく中緯度におけるオゾン変動要因の解析的研究

#### 国土交通省気象庁観測部

環境気象課 オゾン層情報センター

下道正則、林 則雄、佐々木徹、藤本敏文、  
赤木万哲、長井勝栄、佐藤貴洋、斎藤篤思  
吉松和義、宮内誠司、青山 隆、坂本尚章

#### 国土交通省気象庁高層気象台

観測第二課 梶原良一、澁江 昇、鎌田浩嗣、野村保夫、川江 訓、  
佐藤昌志、脇野定則

平成 11～13 年度合計予算額 12,714 千円  
(平成 13 年度予算額 3,694 千円)

[要旨] 北半球中高緯度は冬季から春季にかけてオゾン減少傾向が顕著な地域であるものの、オゾン減少の機構は必ずしも明らかにはなっていない。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3年間にわたり、オゾンゾンデによる特別観測を実施し、オゾン層の変動機構の解析を行った。この特別観測データをバックトラジェクトリーなどの手法を用いて事例解析を行った。この結果、北半球中緯度（つくば）上空のオゾン層に対しては、高緯度の冬季の極渦の発達と低温によってもたらされる化学的なオゾン破壊、オゾン量の少ない低緯度からの移流、成層圏内でのオゾン輸送などが影響していることがわかった。また、これらの結果をもとにして、圏界面高度、準2年周期振動（QBO）、太陽活動等の要素を説明変数とした統計的な解析を行った所、空気塊の移流や鉛直上昇に関係する圏界面高度の変化や成層圏の輸送に係る QBO の変動などの影響の度合いが大きいことがわかった。

[キーワード] オゾン変動、オゾンゾンデ観測、極渦、中緯度、QBO

#### 1.はじめに

北半球高緯度の極渦内部においては、南極のオゾンホールと同一の発生機構によるオゾン層破壊が発生しているが、北半球中高緯度の極渦に覆われない地域でも大きなオゾン減少トレンドが見られる。これは、極渦内外の空気の交換等によると考えられているものの、その詳細についてはまだ十分に解明されていない。高層気象台におけるオゾン層観測によれば、つくば上空でのオゾン減少トレンドは、冬が $-1.4\%/10$ 年、春が $-1.1\%/10$ 年（1981～2000年の20年間のトレンド）となっており、北半球全体のオゾン減少トレンド(WMO,1999)と対応している。

#### 2.研究目的

中高緯度でオゾン減少トレンドの最も大きい冬季から春季にかけて集中的にオゾンゾンデ観測

を実施し、オゾンの高度別変動を詳細に解析し、またオゾンの全量及び高度分布の変動特性について解析を行う。この成果と他のグループで得られた成果により、中緯度域でのオゾン減少トレンドに対する大気組成等の影響の解明に資することを目的とする。

### 3. 研究方法

高層気象台では、1968年より、オゾンゾンデによるオゾンの高度分布の観測を行っており、中緯度におけるオゾン層の長期変化傾向の調査に必要な観測データを提供している。本研究では、通常（週一回）のオゾンゾンデ観測より時間分解能の高い（5日間の連続観測を含む）オゾンゾンデ観測を冬季から春季にかけて高層気象台において実施し、観測データの解析を行うとともに、気象庁の全球解析値やその他の気象資料を用いて、オゾン変動と極渦等について解析を行う。また、高度別に解析を行い、オゾンの変動特性について調べる。

### 4. 結果・考察

#### (1) 1999/2000～2001/2002（冬季/春季）の北半球中高緯度のオゾン層等の状況

##### ① 極渦及び気温の状況

1999/2000年（冬季/春季）の気象状況は、12月後半以降、北緯60度以北の50hPaにおける最低気温が平年より低い状態となり（図1）、極域成層圏雲（PSCs）が形成される目安となる $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の領域が平年より広がっていた（図2）。1月に入っても50hPaの気温が引き続き平年より低く、その期間の極渦は平年より強く、1997年以来の最大面積を示した（図3）。3月15日前後に極渦が一部崩壊し、北海道付近で渦位<sup>1</sup>の大きい領域が見られ（図4）、また、3月25日にも渦位の大きな領域が日本付近に近づいた（図5）。

2000/2001年の北半球高緯度の成層圏気温（50hPa）は、2000年12月末頃に $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の領域が現れ、1月に入ると、その面積は急速に広がり1月中旬には累年平均値の約2倍程度の大きさとなった（図1）。1月下旬から2月中旬にかけて大規模な成層圏突然昇温<sup>2</sup>が発生し、極域の気温が上昇して2月中旬以降、 $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の領域は見られなくなった（図2）。一方、極渦は気温分布と対応して、12月中旬にはシベリア北部とカナダ北部で2つに分裂していた。1月に一時的に強まったものの、成層圏突然昇温により、極渦が弱まった（図3）。その後、シベリア北部に存在した極渦は、次第に南下し、2月20日頃に日本上空に到達した（図6左下）。

2001/2002年（冬季/春季）の成層圏の高緯度（北緯60度以北）の気温（50hPa）の状態は、例年最低気温を記録する12月～1月にかけて平年に比べ暖かく（図1）、極域成層圏雲が発生する $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の領域もほとんど発生しなかった（図2）。また、極渦の規模はほぼ平年並であり、比較的安定していたため、3月後半まで持続した（図3）。

<sup>1</sup> 渦位：

空気塊が断熱変化をしている場合、その温位は変化しない。従ってその場合空気塊は等温位面上を移動する。渦（絶対渦度）を伴う空気塊がこの面上を移動した場合この渦に空気の安定度を考慮した物理量は保存され、空気塊の動きを追跡するのに適している。この物理量を渦位という。

<sup>2</sup> 気象庁の定義では、1週間の昇温量が $25^{\circ}\text{C}$ 以上で、かつ $60^{\circ}\text{N}$ 以北で帯状平均東西風が東風となり、帯状平均気温の南北傾度が逆転することとしている。

## ②北半球のオゾン全量の状況

1999/2000年(冬季/春季)の北半球のオゾン層は、11月の終わりに、北大西洋の上空にオゾン全量が著しく減少した領域が現れたこと、1~3月にかけて北半球中高緯度のオゾン全量は平年より少ない領域が広がったことが特徴であった。特に、3月の月平均オゾン全量は北半球高緯度で10%以上少ない領域が広がり、カナダ北部の北極海周辺では25%を超える負偏差が見られた。但し、つくばのオゾン全量は12~3月にかけて平年並だった。

2000/2001年(冬季/春季)の北半球では、北大西洋の上空で11月にオゾン全量が平年より10%以上少ない領域が現れ(図7)、12月には逆に10%以上多かった。1月と3月に平年より10%以上少ない領域がカナダ北部付近に見られた。2月には極渦がシベリア北部から日本付近に接近し、これに伴ってオゾンの少ない領域が日本上空に達した。北半球高緯度では平年よりオゾンの多い領域が見られ、特にカナダ北部で10%以上多かった。

2001/2002年(冬季/春季)の北半球では、1月~3月にかけて中緯度各地において、平年より10%以上少ない領域があらわれ、特に2月にその領域の面積が大きくなった。

## (2)つくばにおけるオゾン全量の変動の特徴的事例(オゾンゾンデ観測結果より)

本研究において実施した3年にわたるオゾンゾンデ観測をもとに、中緯度(つくば)上空のオゾン変動に係わると見られる特徴的事例を示す。

### ①極域における化学的オゾン破壊に起因すると見られるオゾン減少

#### ア)1999/2000年

2000年3月17日には、高度20~25km付近で平年値よりオゾン分圧がやや減少していた(図8)。この空気塊の動き(図9)を見ると、高度23km付近の空気塊は、北海道に近づいた極渦の一部に対応する渦位の大きい領域(図4)を通過していたが、高度22km以下の空気塊は、渦位の分布とは明確な関連が見られなかった。

一方、3月23日頃の極渦は、一部が分裂し、カナダ北部の北極海と中央アジア~東アジアにかけて渦位の大きい領域が存在していた。3月24日には、中央アジアに位置していた渦位の大きい領域はより東に移動し(図5)、3月25日には渦位の大きい領域がつくば上空にかかっていた。このときのつくば上空の空気塊の軌跡(バックトラジェクトリー、図10)を見ると、高度19km付近の空気塊はカスピ海付近から中国を通して、日本に達しており、極渦から分裂した渦位の高い領域の動きと対応していたが、つくば上空のオゾンゾンデによる観測では、オゾン濃度の減少は見られなかった(図8)。

#### イ)2000/2001年

2月中旬に、極渦の一部が日本付近に接近したため、5日間の連続観測(2月17~21日)を実施した。図11に2001年2月20日のオゾン高度分布を示す。20~30hPa及び80~200hPaの高度域でオゾン分圧が平年に比べて低くなっていた。同時期に札幌で行われた定常観測においても、つくばと同様、30~50hPa及び80~200hPa付近でオゾン分圧の低下が見られた。このうち、下層のオゾン減少について空気塊の軌跡(図12、約100hPa(高度16km、温位面391K)付近)を見ると、低緯度からの移流が見られた。一方、オゾン減少が顕著な26hPa(高度24km、温位

面 604K) 付近の空気塊の軌跡 (図 13) を見ると、ユーラシア大陸上を移動していることがわかり、この時期の極渦の動きとも対応している (図 6)。2 月の初めには極渦内部に  $-78^{\circ}\text{C}$  以下の低温の領域があり、この領域で化学過程によりオゾンが破壊され、オゾンが少なくなった空気塊が日本上空に移流してきてつくば上空 20~30hPa 付近のオゾン減少となって現れたと考えられる。また、2 月 20 日につくばの気象研究所の赤外分光計で観測された塩化水素が、通常より 30% 近く低い量であったことが報告されている。このことは、極渦内部で発生した極域成層圏雲表面での反応により、塩化水素が活性塩素に変化し、化学的にオゾン破壊が起こったものであることを裏付けている。

## ②低緯度からの移流に起因すると見られるオゾン変動

### ア)1999/2000 年

2000 年 1 月 5 日の高度 18km~22km 付近と 1 月 20 日の高度 15km~22km 付近に平年値と比べて少ない (標準偏差を超えて減少) オゾンの高度分布が得られた (図 14)。図 15 は 1 月 20 日の観測におけるつくば上空の気塊の軌跡 (バックトラジェクトリー) を示したものである。この図によれば、空気塊がオゾンの少ない低緯度からつくば上空に運ばれてきたことがわかり、この日のオゾンの減少は、低緯度からのオゾンの少ない大気の移流によるものといえる。1 月 5 日も同様の現象だった。

### イ)2000/2001 年

つくばにおけるオゾン全量は、2001 年 1 月以降、平年並か平年より多かったが、2000 年 11、12 月は平年より少なかった。特に、2000 年 11 月には観測開始以来、その月としては 2 番目に小さい値となった。11 月はつくばだけでなく、札幌、鹿児島でも少ない値となっており、それぞれ、その月として観測開始以来 1 番目、3 番目に少なかった。この現象については、中緯度のオゾン全量は高低気圧の通過に伴い変動する (Robbe et al., 1995) ことが知られており、高低気圧変動の指標として 500hPa 高度場の分布を図 16 に示す。この図から、ヨーロッパから日本にかけての高度場(500hPa)の偏差が、負、正、負、正となるパターン (ユーラシアパターンといわれる) が明瞭に見られ、日本付近では正偏差 (高圧場) が持続していた。この正偏差に沿って低緯度側からオゾンの少ない空気塊が日本付近に流入 (図 17) したことが、オゾン全量が少なかった要因の 1 つと考えられる。

### ウ)2001/2002 年

2002 年の 1 月から 3 月にかけて、つくば上空のオゾン全量が少ない状態が続いた。この時のオゾンゾンデの観測によると、オゾンピーク付近 (30~40hPa) のオゾン量が少ないという特徴を示していた (図 18)。この高度域のオゾン変動については、成層圏のオゾン輸送に関係する準 2 年周期振動(QBO)と関連があることが知られている (Hollandsworth et al., 1995)。このため、全年を通じてオゾンゾンデデータがある 1990 年 1 月から 2002 年 3 月までについて、QBO の指標であるシンガポール上空 50hPa 面の東西風 (QBO 指数) とオゾンゾンデの 30hPa 面の分圧の偏差の関係を調べた。これによれば、QBO 指数と 30hPa のオゾン偏差とがよく対応している (3~4 ヶ月のラグあり) ことがわかる (図 19)。つまり、2002 年の 1 月から 3 月には、この QBO

変動の東風フェイズに対して極小を示す対応をしており、このことがオゾン全量が少なかった要因の1つと考えられる。

### (3)統計的手法によるつくば上空のオゾン変動要因

本研究でこれまで行ってきた3年にわたるオゾンゾンデ特別観測をはじめとする観測結果とその解析から、中緯度におけるオゾン変動の主な要因として、極域の冬季から春季にかけての化学的なオゾン破壊、低濃度のオゾン領域である低緯度からの移流、QBOなどが挙げられる。これらの要因がどの程度オゾン変動に影響しているかを評価するため、それらの現象を説明変数化して統計的な解析を行い、見積もってみた。

具体的には、太陽活動、QBO、圏界面高度、成層圏エーロゾルを説明変数として、つくばの過去約30年(1970-2001年)のオゾン全量を目的変数として多重回帰解析を行い、標準回帰係数により影響の度合いを見積もった。説明変数のうち、太陽活動はオゾン光化学反応、QBOは成層圏循環、圏界面高度は低緯度空気塊の移流及び鉛直上昇、成層圏エーロゾルは成層圏の化学反応を通じてオゾン変動に影響していると考えられる。各説明変数は、太陽活動として国立天文台野辺山観測所の太陽電波フラックス、QBOとして前述のQBO指数、圏界面高度としてNCEP/NCAR再解析データの圏界面高度、成層圏エーロゾルとして米国航空宇宙局ゴダード研究所の成層圏エーロゾルの光学的厚さ (<http://www.giss.nasa.gov/data/strataer/>) のデータを使用した。この結果、圏界面高度が最も大きな影響を及ぼし、続いてQBO、太陽活動、成層圏エーロゾルの順で大きかった(表1)。

## 5. 本研究で得られた成果

これまでの3年間にわたって、冬季から春季を中心につくばにおけるオゾンゾンデの特別観測を行うことにより特徴的な事例のデータが得られ、これを基にトラジェクトリーなどを用いた事例解析を行った。つくばに代表される中緯度地域では、オゾンの少ない低緯度からの空気塊の移流や鉛直上昇などに関連する圏界面高度の変化、成層圏の輸送に影響を与えるQBOがオゾン変動要因の主なものであることがわかった。一方で高緯度冬季での極渦の発達と低温によって、南極オゾンホールと同じメカニズムによる化学的オゾン破壊が起こった空気塊が中緯度に到達することによるオゾン減少は、主に冬季の終わりから春季にかけての極渦の崩壊時に起こることがわかった。これらの変動要因を考慮したオゾンの長期トレンドの解析などを行い、人為起源物質によるオゾン破壊の回復をより精度よく解析することが必要である。今後は、地球の温暖化やエルニーニョ現象など対流圏の影響を含めた更に詳しいオゾン変動要因についての調査も進める必要がある。

## 6. 参考文献

- 1) Hollandsworth, S. M., K. P. Bowman and R. D. McPeters(1995), Observational study of the quasi-biennial oscillation in ozone, *J. Geophys. Res.*, 100, 7347-7361.
- 2) Robbe, A. and S. H. H. Larsen(1995), On the low ozone values over Scandinavia during the winter 1991-1992, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 57, 367-373.
- 3) 気象庁 (2000a)、オゾン層観測報告：1999

- 4) 気象庁 (2001a)、オゾン層観測報告：2000
- 5) 気象庁 (2002a)、オゾン層観測報告：2001
- 6) 気象庁 (2001b)、気候系監視報告、2001年3月

[国際共同研究等の状況]

本研究の一部はWMOのGAW(Global Atmosphere Watch)プログラムと関連している。

[研究成果の発表状況]

(1) 紙上発表

なし

(2) 口頭発表

- ①Uchino, O., T. Sasaki, K. Akagi, A. Saito and T. Fujimoto: Quadrennial Ozone Symposium-Sapporo 2000-, (2000)  
Variations and Long-term Trends of Ozone over Japan,
- ②Fujimoto, T., K. Nagai, T. Sato, N. Shibue, R. Kajihara, O. Sugita, M. Nakagawa, T. Sato, S. Arakaki, K. Takahashi and O. Uchino: Quadrennial Ozone Symposium-Sapporo 2000-, (2000),  
“Evaluation of Japanese Ozonesonde(RS2-KC96)”
- ③Makino, Y., H. Fast, R.L. Mittermeier, T. Sasaki, Y. Sawa, M. Hirota and K. K. Miyagawa  
Quadrennial Ozone Symposium-Sapporo 2000-, (2000)  
“IR-spectroscopic measurements of stratospheric minor constituents over Tsukuba, Japan and Eureka, Canadian Arctic”
- ④吉松和義、牧野行雄、藤本敏文、坂本尚章、下道正則、野村保夫、佐藤昌志、脇野定則、柴田清孝：2002年日本気象学会春季大会(2002)  
「オゾンゾンデ観測に基づく中緯度におけるオゾン変動要因の解析的研究」

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公募、報道等

なし

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

今後オゾン層観測報告(気象庁)などを通じて成果の広報・普及に努める。

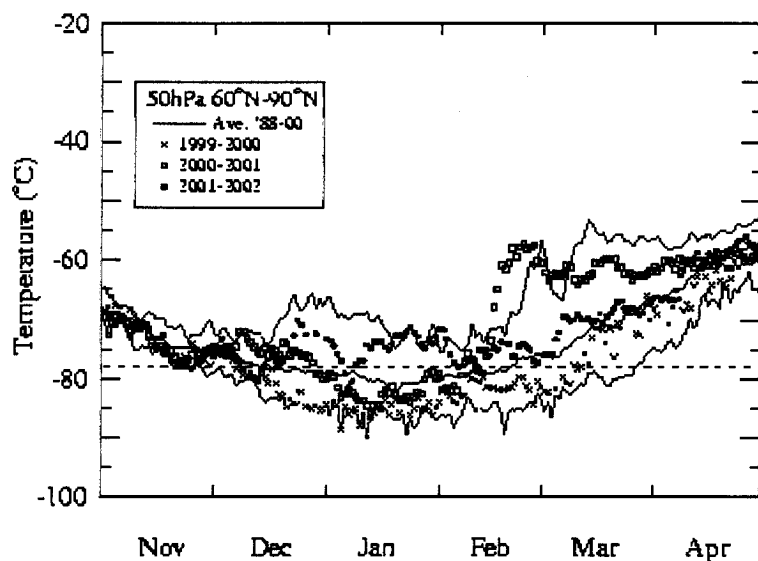


図1 北半球高緯度 (60度以北) の50hPaにおける最低気温の推移 (左図)。×□●が1999/2000年、2000/2001年、2001/2002年のそれぞれの観測値。実線は、1988~2000年までの累年平均値で、細実線は最低気温の最高値及び最低値を示す。横の破線は極域成層圏雲出現の目安となる $-78^{\circ}\text{C}$ を示す。

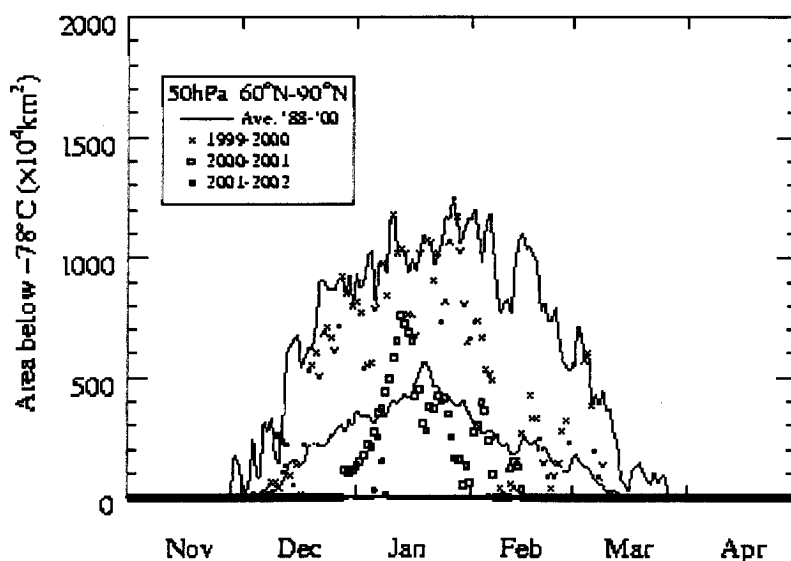


図2 北半球高緯度 (60度以北) の50hPaにおける気温が $-78^{\circ}\text{C}$ 未満の領域の推移 (右図)。×□●が1999/2000年、2000/2001年、2001/2002年のそれぞれの観測値。実線は、1988~2000年までの累年平均値で、細実線は過去最大の面積を示す。

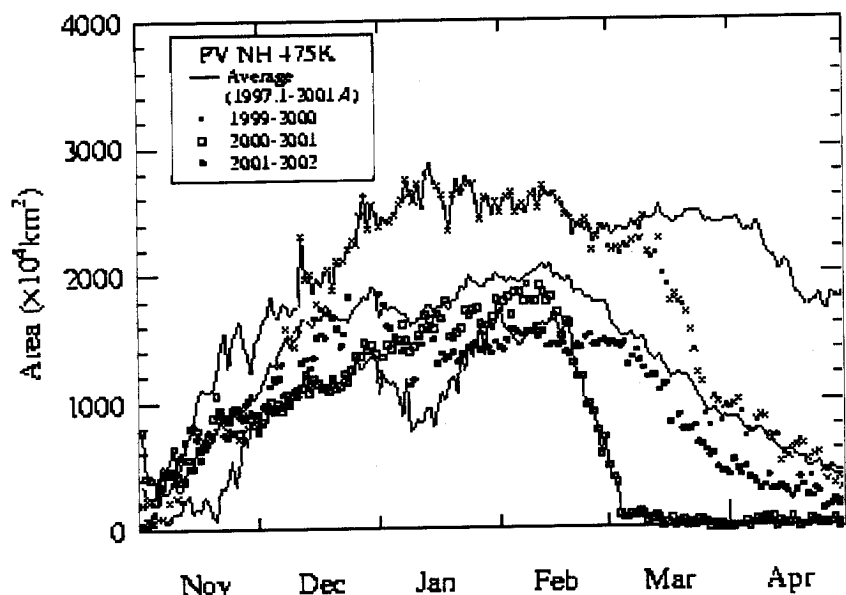


図3 北半球の温位面475Kの渦位35PVU以上の領域の推移。×□●が1999/2000年、2000/2001年、2001/2002年のそれぞれの観測値。実線は、1997年1月～2001年4月までの平均値で、細実線は過去最大及び最小の面積を示す。

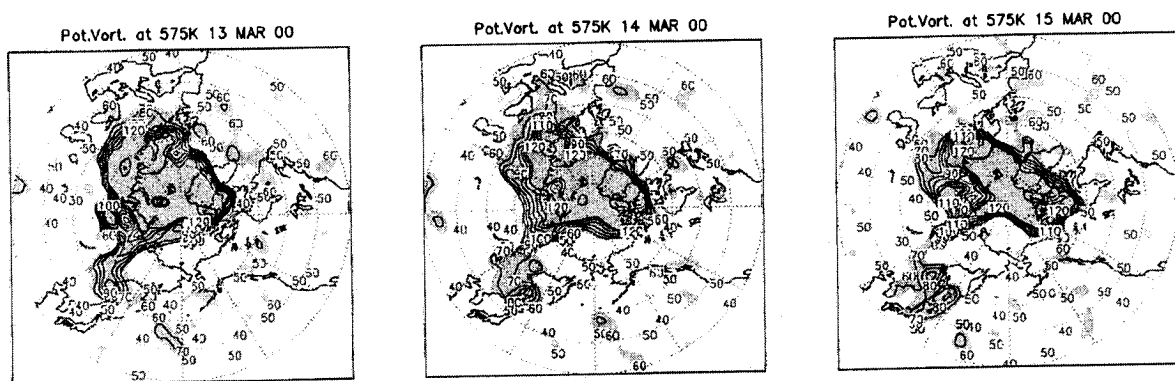


図4 2000年3月13日～15日の北半球の渦位の分布(575K面) 陰影部分は渦位の大きい領域で  $60\text{PVU} = 10^{-6} \text{ Km}^2\text{kg}^{-1}$  以上の領域を示す。

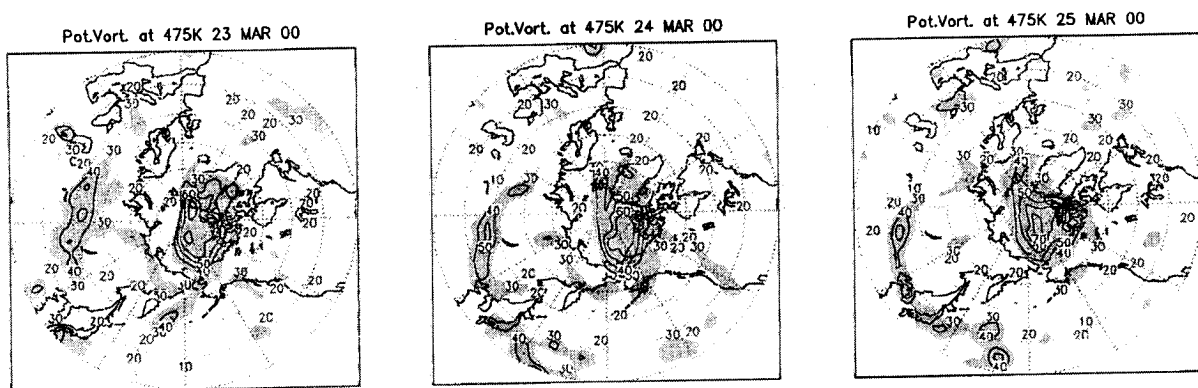


図5 2000年3月23日～25日の北半球の渦位の分布(475K面)。陰影部分は渦位の大きい領域。陰影部分は渦位の大きい領域で30PVU以上の領域を示す。



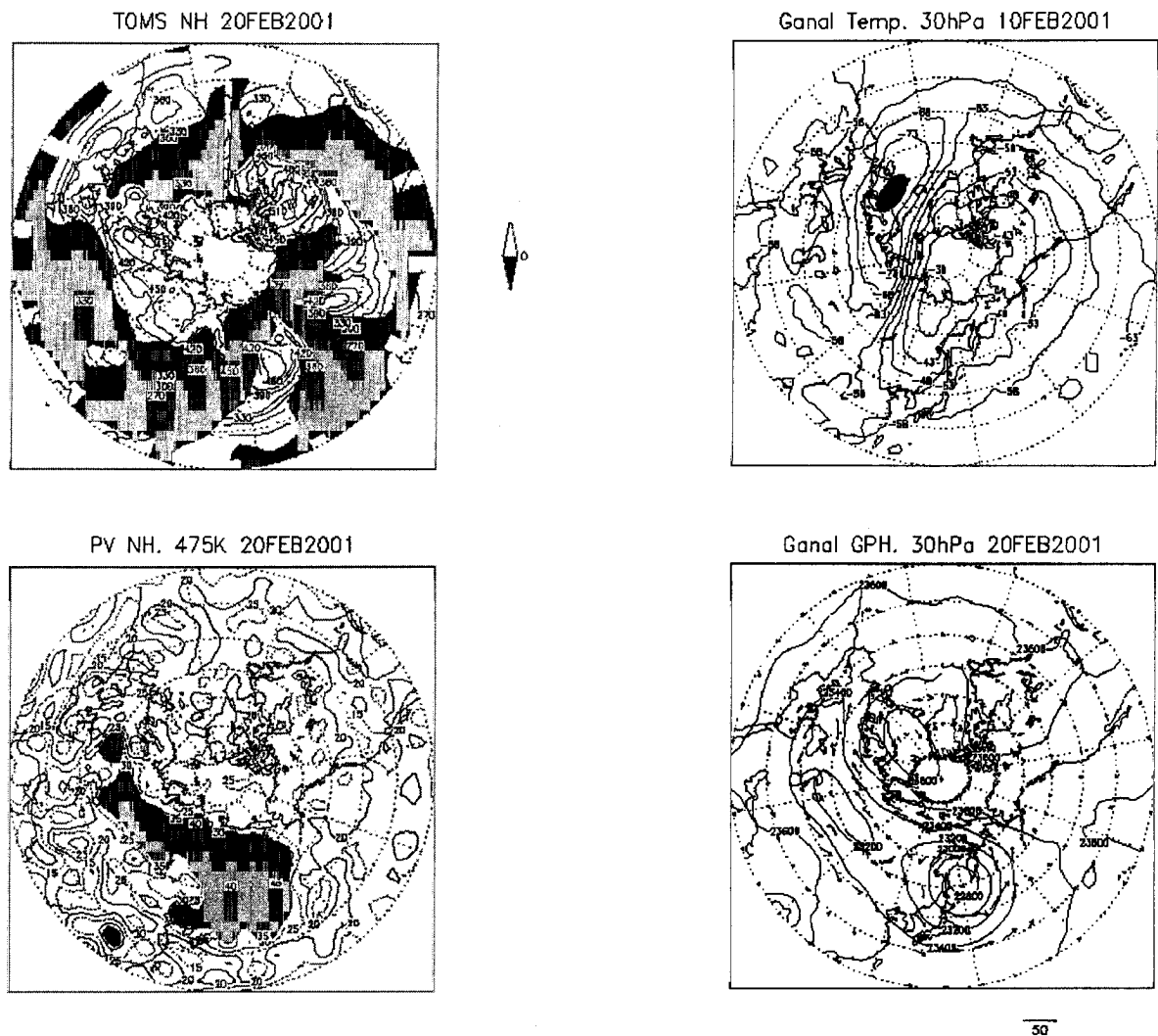


図6 2001年2月20日のTOMS (左上) : 陰影部は平年(1979~1992年の平均値)より少ない領域を示し、等値線間隔は30m atm·cm。同日の渦位(左下) : 温位面600K(高度約24km)の渦位で陰影部は $100 \times 10^{-6} \text{K} \cdot \text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ 以上の領域。2001年2月10日の気温(右上) : 30hPaの気温で、等値線間隔は5°C。2001年2月20日の高度場及び風ベクトル(右下) : 30hPa面のジオポテンシャル高度及び風ベクトル。等値線間隔は200m 毎。

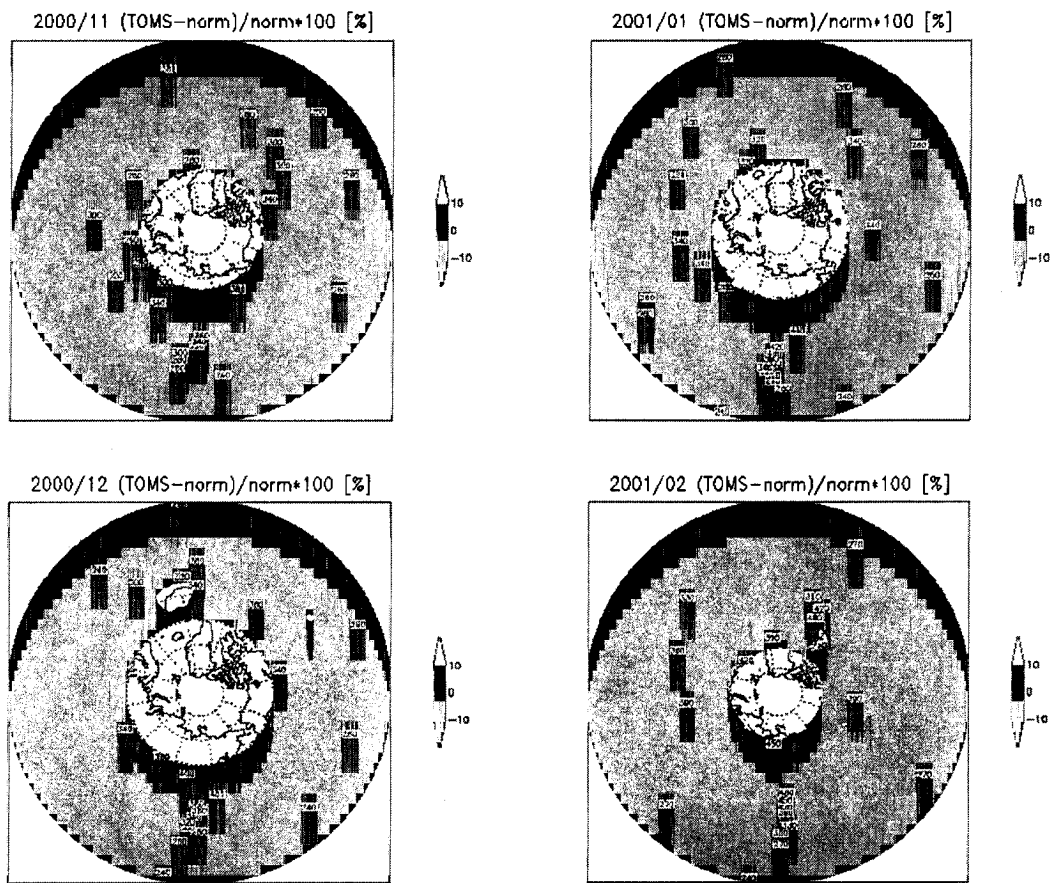


図7 2000/2001年のオゾン全量分布  
 左上：2000年11月、左下：2000年12月、右上：2001年1月、右下：  
 2001年2月。濃い陰影部分が平年より少ない領域。

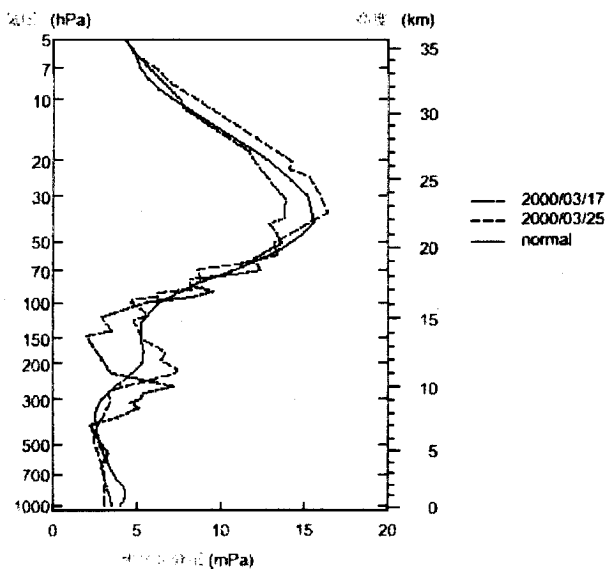


図8 2000年3月のつくばにおけるオゾンゾンデ観測によるオゾンの高度分布。  
 実線は月平年値。

2000 31712 23000m 32hPa 575 K

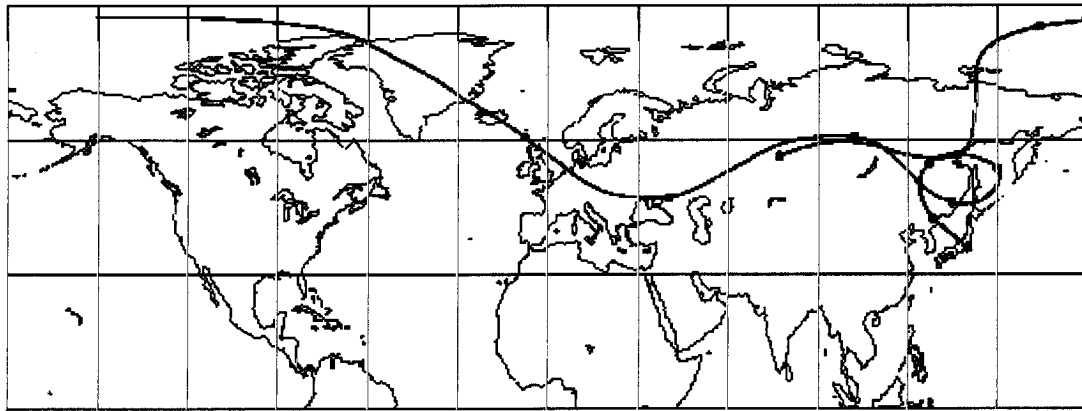


図9 2000年3月17日のつくば上空の空気塊（高度23km、温位575K面）の10日前までの軌跡（バックトラジェクトリー）。

2000 32512 19000m 61hPa 479 K

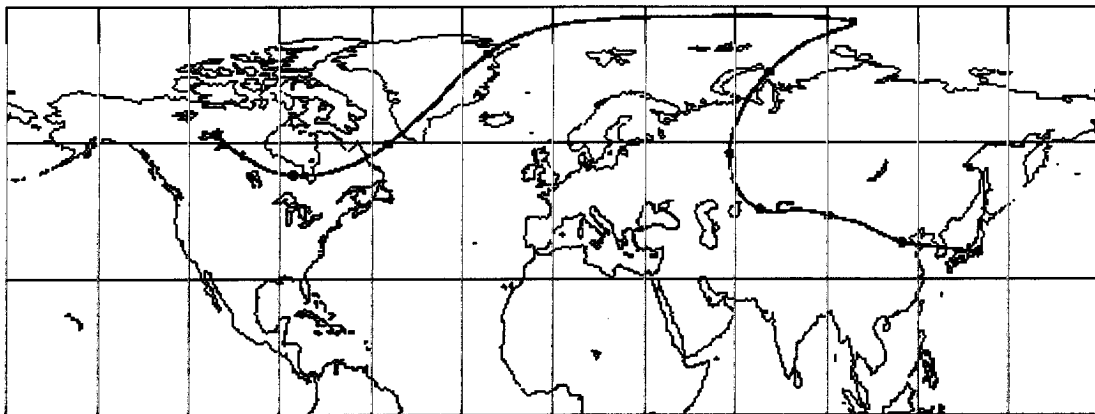


図10 2000年3月25日のつくば上空の空気塊（高度19km、温位479K面）の10日前までの軌跡。

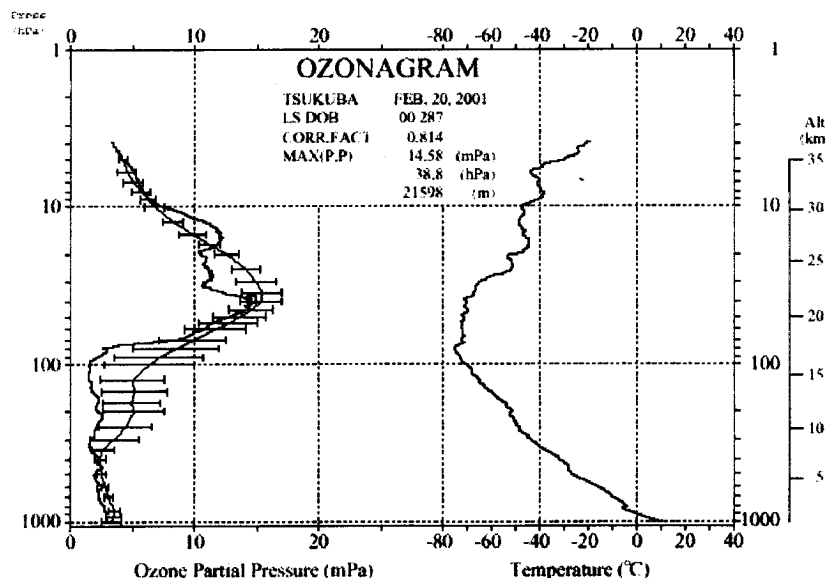


図11 2001年2月20日のつくばにおけるオゾン高度分布。左がオゾン分圧(太実線が2001年2月20日の観測、細線が1971~2000年の平均値、横線は標準偏差)、右が気温。

2001 22012 16000m 101hPa 391 K

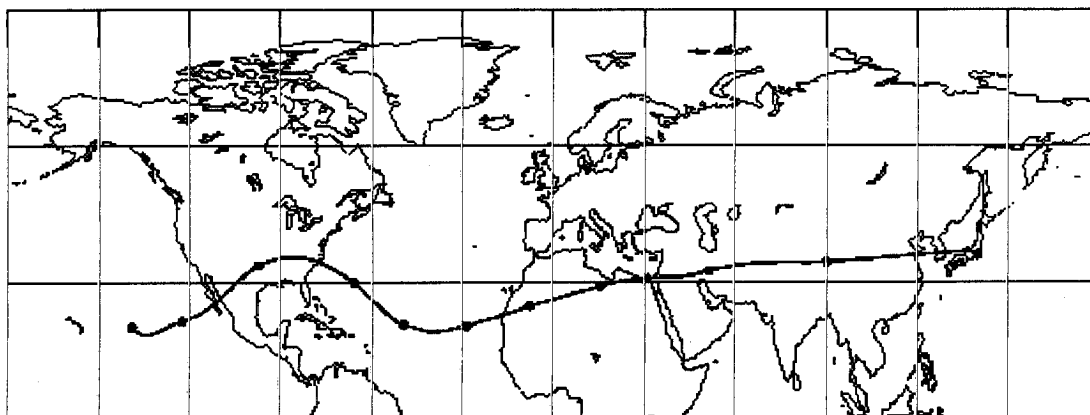


図 12 2001年2月20日のつくば上空の空気塊 (16km、温位 391K 面) の10日前までの軌跡。

2001 22012 24000m 26hPa 604 K

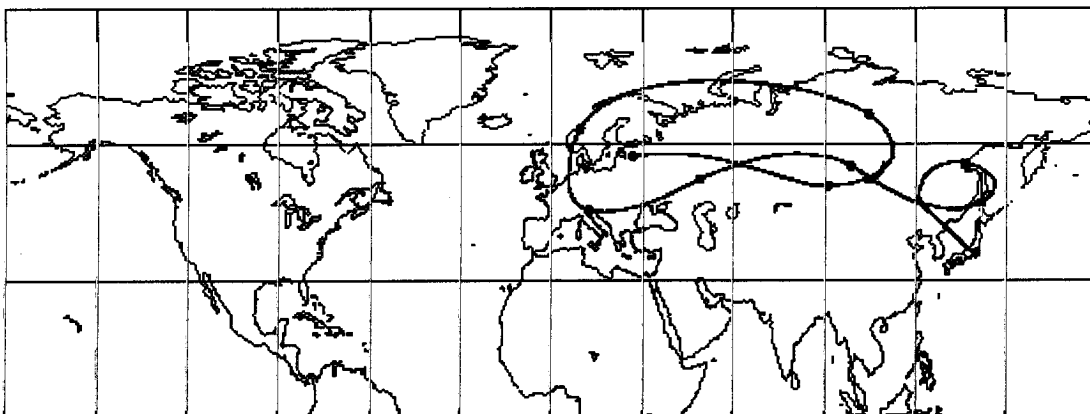


図 13 2001年2月20日のつくば上空の空気塊 (24km、温位 604K 面) の10日前までの軌跡。

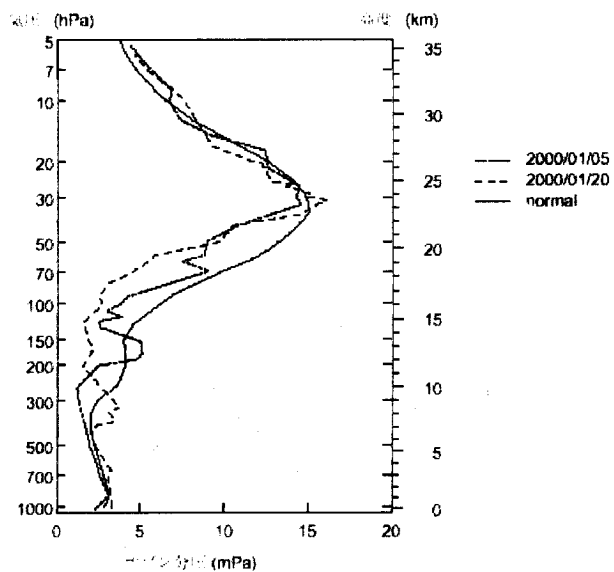


図 14

2000年1月のつくばにおけるオゾン  
ゾンデ観測によるオゾンの高度分布。  
実線は月平年値。

2000 12012 19000m 64hPa 470 K

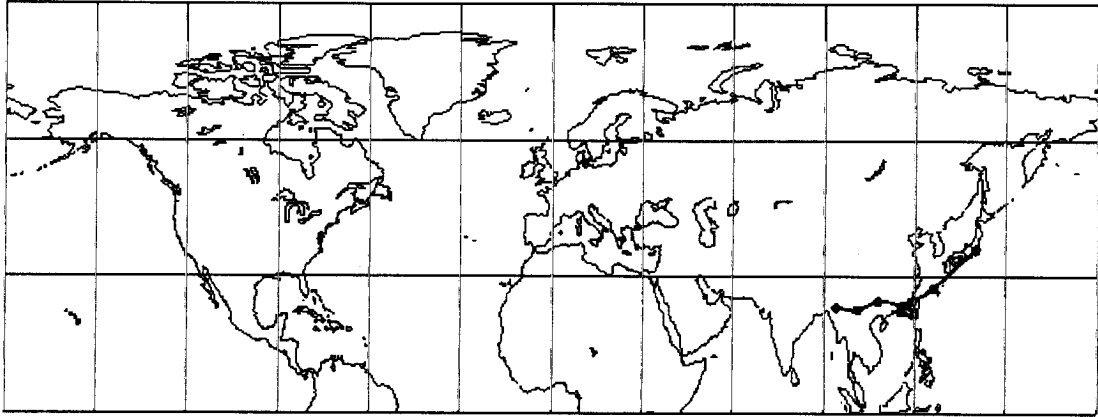


図 15 2000 年 1 月 20 日のつくば上空の空気塊（高度 19km、温位 470K 面）の 10 日前までの軌跡。

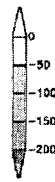
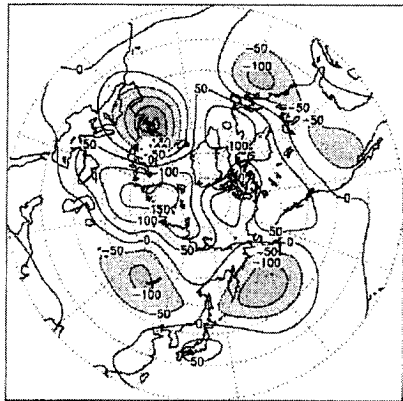


図 16 2000 年 11 月の 500hPa 高度場の  
平年偏差。陰影部は負偏差域。等値線  
間隔は 50m 毎。

2000112212 23000m 33hPa 561 K

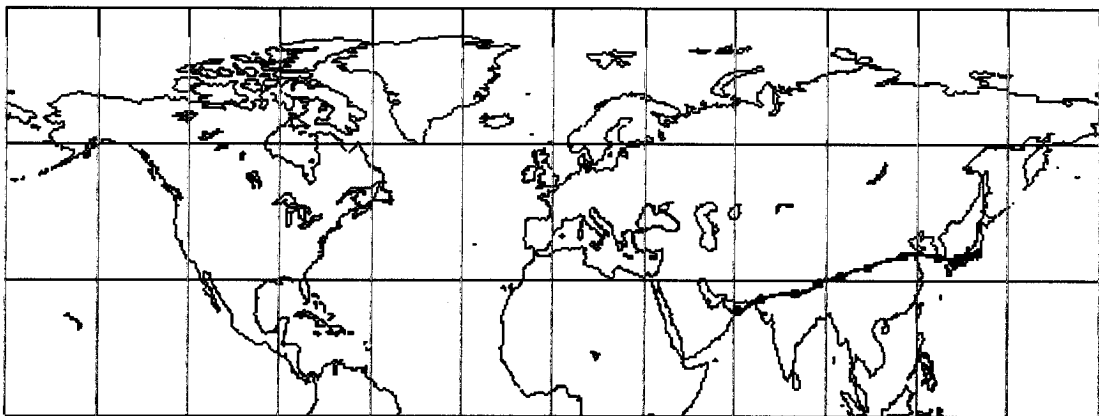


図 17 2000 年 11 月 22 日のつくば上空の空気塊（高度 23km、温位 561K 面）の 10 日前までの軌跡。

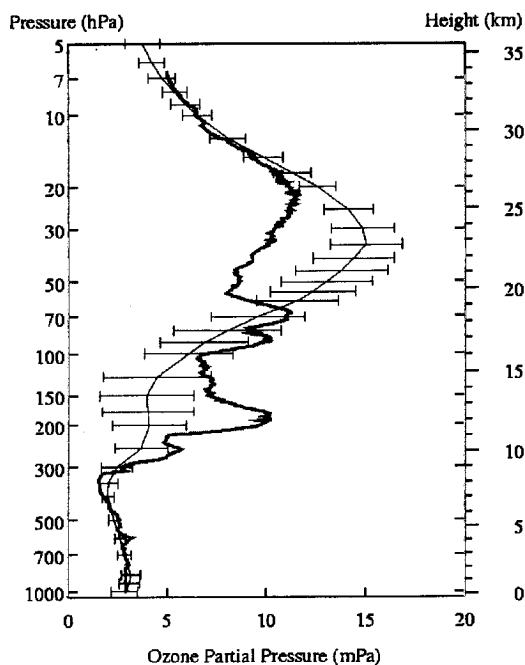


図18 2002年1月30日のつくばにおけるオゾン高度分布。太実線は2002年1月30日の観測値。細線は参照値（1971-2000年の平均値）、横線は標準偏差。

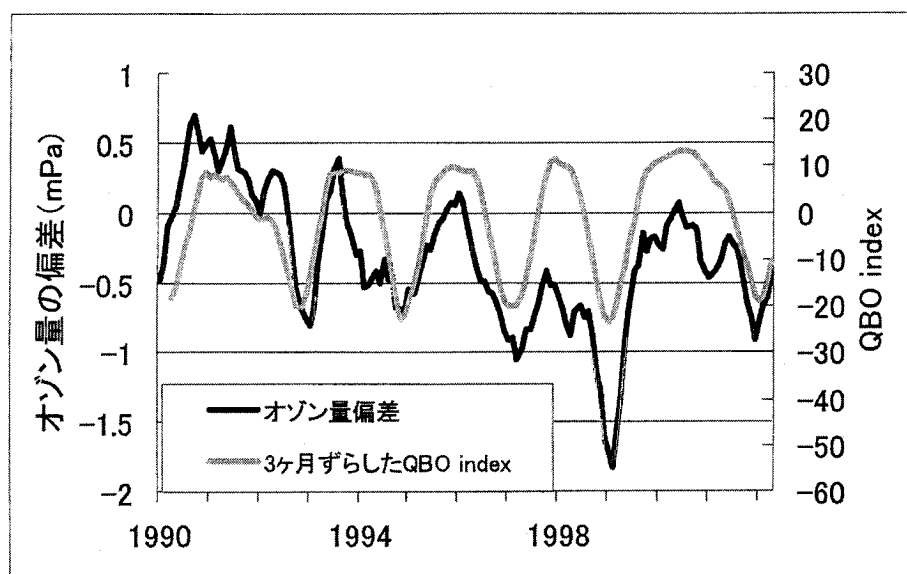


図19 QBO と 30hPa のオゾン分圧の偏差の関係

説明変数	QBO	太陽活動	圏界面高度	成層圏エーロゾル
標準回帰係数	0.2591	0.1376	-0.5472	-0.0787

表1 オゾン変動に与える影響の度合い（1970-2001年のデータを用いた標準回帰係数による）