

3 オゾン層の長期変化傾向

オゾン全量には、赤道付近を除いて減少傾向が現れている。この減少の主な要因は、オゾン破壊をもたらすクロロフルオロカーボン類などから解離した塩素量の増加であると考えられる。図3-1に示す北半球中緯度でのオゾントレンドの高度分布によれば、オゾン減少の極大は高度40km付近と高度15km付近に現れている (WMO, 1998)。この二つの高度のオゾン減少は、ともにクロロフルオロカーボン類などから解離した塩素によるものであるが、その破壊メカニズムは異なっている。高度40km付近の減少は、塩素原子との気相反応のみによるのに対し、高度15km付近の減少は主にエアロゾル粒子表面での光化学反応によって活性化される別の触媒反応サイクルによると考えられている (2章の解説参照)。

本章では、全球、日本域、南北両半球高緯度のオゾン層の長期変化傾向に関する解析結果を述べる。ここでは、季節変動、太陽活動、準2年周期振動 (QBO: Quasi-Biennial Oscillation) といった既知で周期的な自然要因と相関の高い変動成分を除去したオゾンデータを用いる。

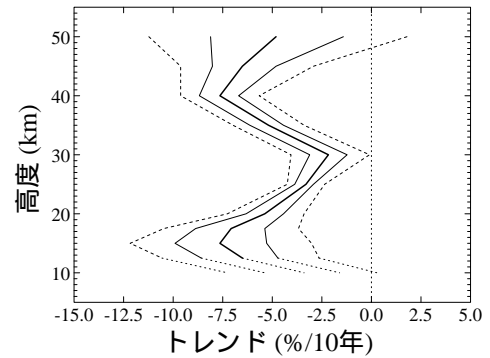


図3-1：オゾンのトレンドの高度分布
1980～1996年のSAGE I/II、SBUV、オゾンゾンデ、反転観測データをもとに作成した北半球中緯度の高度別オゾンのトレンド (%/10年)。実線がトレンドと68%の信頼限界、破線は95%の信頼限界(WMO, 1998)。

3-1 全球のオゾン層の長期変化

3-1-1 オゾン全量の長期変化

オゾン全量は低緯度域を除いて減少傾向が現れているが、個々の年のオゾン全量は変動が大きく、また地域的な違いもみられる。図3-1-1に、地上及び衛星からの観測によるオゾン全量から季節変動、太陽活動、QBOの影響を除去した値について、1970年から1980年の平均値に対する比偏差を示す。これによると、オゾン全量は1980年代から1990年代前半にかけて大きく減少しており、現在もオゾン全量は減少した状態が続いている。地上からの観測結果によれば、1990年から2005年の平均オゾン全量は、1980年以前と比較すると、南半球で4.8%、北半球で3.3%、全球平均で4.0%減少している。このように、オゾン全量の減少量は南北半球で異なっている。さらに、1990年代以降の変化傾向をみると、南半球では、年々の変動は大きいものの減少した状態が概ね同じ程度で続いている。一方北半球では、ピナトゥボ火山噴火 (1991年6月) に起因した成層圏エアロゾル粒子表面での不均一反応 (2章の解説参照) のためオゾン破壊が促進され、一時的な極小を示した1993年以後は、わずかに上昇に転じているようにみえる。現在、この変化傾向がモントリオール議定書などによる規制の効果によるものか否かが議論されているところである。

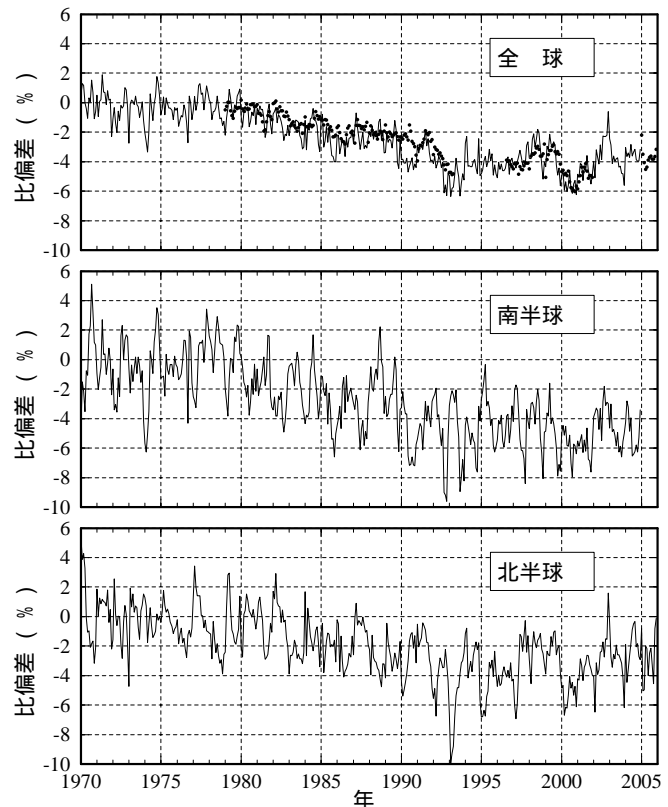


図3-1-1：世界のオゾン全量比偏差の推移
実線は、世界の地上観測点におけるオゾン全量の1970～1980年の平均値に対する比偏差。季節変動、太陽活動、QBOの影響を除去している。上段から全球 (北緯70度～南緯70度)、南半球及び北半球のオゾン全量の変化を示す。全球については、衛星観測データによる比偏差を●で示した。

オゾン層は、化学的要因（塩素等によるオゾン破壊）のほかにも力学的な要因（大気の流れによりオゾンの輸送が変化すること）で変動する。ここでは、その力学的要因の一つである北極振動(AO)と北半球中緯度のオゾン全量の関係について示す。北極振動は、北半球において最も顕著に現れる大気の偏差構造であり、北極付近とその周りの中緯度の海面気圧が正負逆の偏差を示す変動である。北極域が正偏差、中緯度が負偏差の場合に、AOインデックスを正とし、その逆の場合を負とする。図3-1-2に、AOインデックスと衛星データ(MODデータ)による北緯45度から50度帯の平均オゾン全量の冬期間の平均値の経年変化を示す。これによれば、AOインデックスとオゾン全量の間には、明瞭な逆相関が表れている。

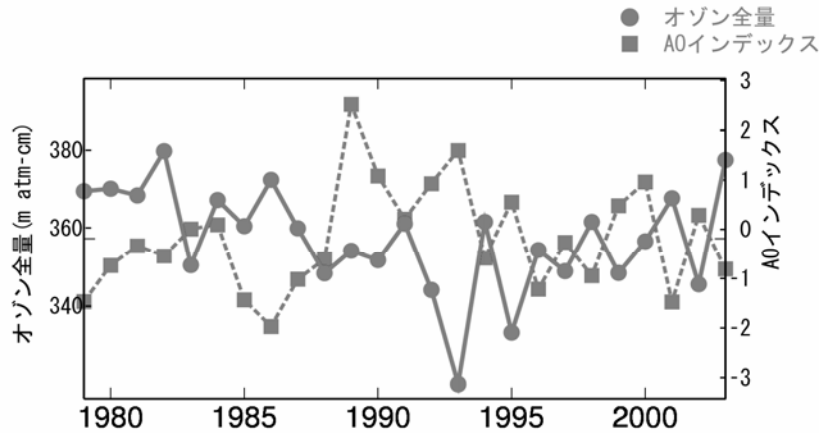


図3-1-2：AOインデックスと中緯度のオゾン全量の推移

NOAA/NCEPによるAOインデックス及びMODデータ(1979~2003年)による北緯45度から50度帯の平均オゾン全量それぞれの12~2月の平均値の推移。

AOインデックスが正であるとき、一般的に成層圏の極渦は強くなり、低緯度の成層圏で生成されたオゾンの中・高緯度へ運ぶブリュワー・ドブソン循環が弱くなる。また、下部成層圏から対流圏にかけては、低緯度対流圏のオゾンの少ない空気の中・高緯度に運ぶじょう乱が発生しやすくなる。これら二つの効果によって、AOインデックスが正のとき、中緯度のオゾン全量が少なくなると考えられる。AOインデックスは1980年代から1990年代前半にかけて正に向かう傾向が卓越しつつあったが、その後、負に向かう傾向が強まっており、これがオゾンの変化傾向に寄与していると考えられる。また、AOインデックスとは別の物理量である、対流圏のじょう乱や成層圏の循環の指標となる上空の渦位とEPフラックスを用いた解析でも、北半球中緯度のオゾン減少には、大気の流れの影響が大きく寄与していることが示されている(Hood and Soukharev, 2005)。

オゾン全量の変化に影響を与える力学的な要因については、数値モデルを用いた解析によっても確かめられつつある。成層圏の塩素濃度を1980年以前の値に固定した条件で、長期再解析により得られた大気循環場データ(ERA40)で化学輸送モデルを駆動したところ、1994年以降の北半球中緯度のオゾン全量の増加をよく再現できていることが図3-1-3に示されている(Hadjinicolaou, 2005)。

以上のことから、北半球のオゾン全量には1990年代半ば以降、ほとんど一定もしくは緩やかな増加傾向がみられるが、それには力学的な要因が大きく寄与しているものと考えられる。成層圏の塩素量は、現在、ピークを過ぎたとしてもその減少量はわずかであり、塩素量の減少に伴って、オゾン全量が増加に転じたとみることはできない。

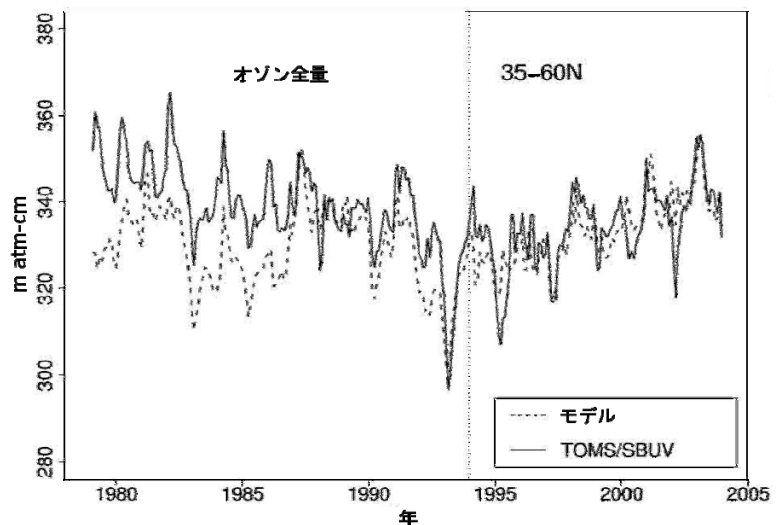


図3-1-3：衛星観測及び数値モデルによる北半球中緯度のオゾン全量の推移

実線は衛星によるオゾン全量データ(TOMSとSBUV)、破線は塩素量を1980年以前の値に固定し、長期再解析により得られた循環場により化学輸送モデルで計算されたオゾン全量。ともに季節変化は除去してある。1994年を縦の点線で示す(Hadjinicolaou, 2005)。

3-1-2 地上観測データによるトレンド

世界の地上観測地点について、オゾン減少が明瞭になり始めた時期と、3-1-3項で示す衛星データの解析結果との整合性を考慮して、1979年以降のオゾン全量データを用いてトレンド計算を行った。また、観測地点の選択にあたっては、最近の観測資料がほぼ継続して得られていること、及び毎月の月平均値と衛星による観測データとの全期間を通じた比較において、データの精度に大きな問題がないと判断されることを基準とした。なお、観測機器の変更等により観測データに不自然な段差がみられる場合には、その観測データに補正を施した後、解析を行った。3章の解説2で示したトレンド解析の手法を用いて、地点ごとに季節変動、太陽活動、QB0に依存する変動成分を除去した時系列に直線回帰を適用してトレンドを求めた。

図3-1-4は、地上の観測点についての通年及び季節ごとのオゾン全量トレンドの緯度分布を示している。これをみると、通年及び各季節とも低緯度を除いて多くの地点で減少傾向を示していることがわかる。特に北半球の北緯30度以北では、通年及び3~5月、12~2月に有意な減少傾向を示している地点が多い。南半球高緯度（南緯60度以南）の9~11月は南極オゾンホール出現に伴い、10%/10年を超える減少を示している。この結果から、オゾン全量のトレンドは低緯度を除いて明らかな減少を示しているといえる。

図3-1-5に、北半球で継続してオゾンゾンデ観測を行っている地点の中から選んだ2地点について、解説で述べた手法にしたがって求めたオゾン分圧トレンドの高度分布を示す。なお、このトレンドは通年について計算している。これによれば、カナダ北部のレズリュート及びドイツのホーヘンパイセンベルクとも、下部成層圏でオゾンの減少傾向がみられており、特にレズリュートでは高度10~14km付近と高度16~25km付近で有意な減少傾向がみられる。

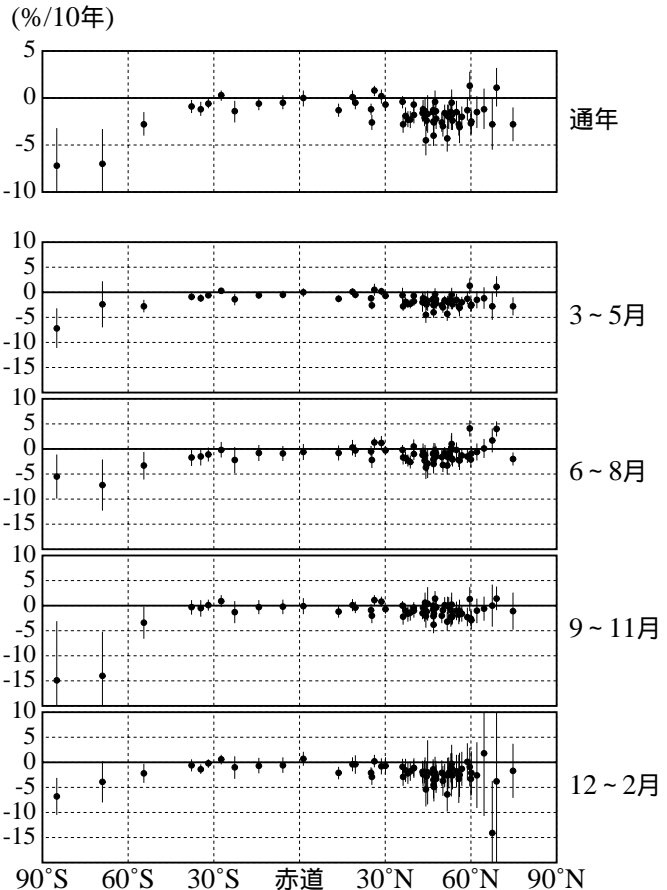
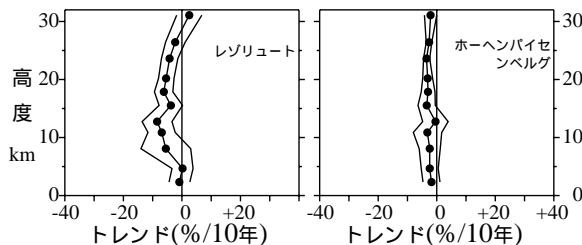


図3-1-4：地上観測データによるオゾン全量トレンドの緯度分布

●印は世界の観測地点（65地点）における1979~2005年のオゾン全量のトレンド（%/10年）。地点ごとに季節変動、太陽活動、QB0に依存する変動成分を除去した時系列に、直線回帰を適用してトレンドを求めた。横軸が緯度、縦軸がトレンドである。縦線は95%信頼限界の範囲を示す。上から順に、通年、3~5月、6~8月、9~11月、12~2月におけるトレンドである。

図3-1-5：北半球の2地点におけるオゾン分圧のトレンドの高度分布

●印はオゾンゾンデ観測による1979~2003年の月平均オゾン分圧をもとに評価した高度別トレンド（%/10年）。季節変動、太陽活動、QB0に依存する変動成分を除去している。外側の折線は自己相関を考慮した95%信頼限界。左がレズリュート（カナダ、北緯74.72度、西経94.98度）、右がホーヘンパイセンベルク（ドイツ、北緯47.80度、東経11.02度）。

3-1-3 衛星観測データによるトレンド

1章にも述べているように、TOMSは2002年頃から観測装置に起因する誤差（主に光学系の特性変化）が大きくなったため、NASA（米国航空宇宙局）では、最近のデータはトレンド解析には使用できないとしている。このため、2002年以降のTOMSデータは本項のトレンド計算には使用しない。2005年1月以降については、最近運用が開始されたNASAのオーラ衛星搭載のOMIによるデータを使用する。2005年のOMIデータについて、地上観測値との比較を行い、トレンド解析に用いるのに十分な精度であることを確認した。なお、1995年の通年と1993、1994、1996年の一部についてはTOMSによる観測が行われていないので、この期間のデータは使わずにトレンド解析を行った。

図3-1-6は、緯度10度ごとのオゾン全量についてのトレンド解析の結果である。低緯度では統計的に有意な変化傾向は現れていないが、北緯20度以北及び南緯20度以南で統計的に有意な減少傾向を示している。減少率は地上観測によるトレンドと同様に、高緯度ほど大きくなっている。北緯60度から南緯60度の平均でも、 $-1.5 \pm 0.8\%/10年$ の有意な減少傾向になっている。図3-1-7に、オゾン全量トレンドの全球分布を示す。ここでは緯度帯ごとに、経度方向及び季節によるトレンドの差異を論じることにする。通年の場合、北緯60度付近ではヨーロッパ上空でオゾン減少が大きく、北アメリカ西部は減少率が小さい。南緯60度付近ではオーストラリア南方から南太平洋上空でオゾン減少率が比較的小さく、南アメリカ南方からアフリカ南方上空にかけて減少率が大きい。季節別にみると、北半球では春季（3～5月）にシベリア北部、カナダ北東部、ヨーロッパ上空を中心に大きなオゾン減少を示しており、冬季（12～2月）にはヨーロッパから東アジア、北太平洋、北アメリカ東部上空でも減少が大きくなっている。南半球高緯度では秋季（3～5月）を除いてオゾン減少が顕著にみられ、南半球中緯度では春季（9～11月）、夏季（12～2月）に大西洋を中心に減少が大きいことがわかる。

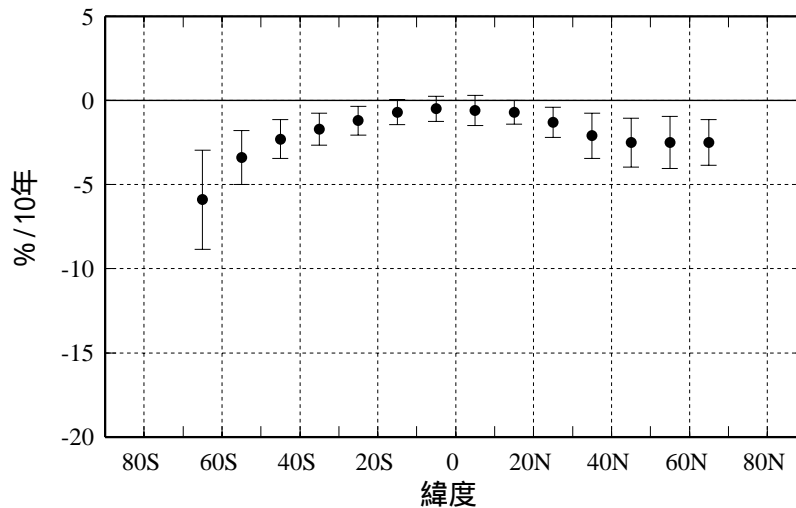


図3-1-6：衛星データによる緯度帯別オゾン全量トレンド

緯度10度ごとの平均オゾン全量の時系列（1979～2005年）から、季節変動、太陽活動、QBOの影響を除去して評価したトレンド（%/10年）。縦線は自己相関を考慮した95%信頼限界の範囲を示す。NASA提供のTOMS及びOMIデータから評価。

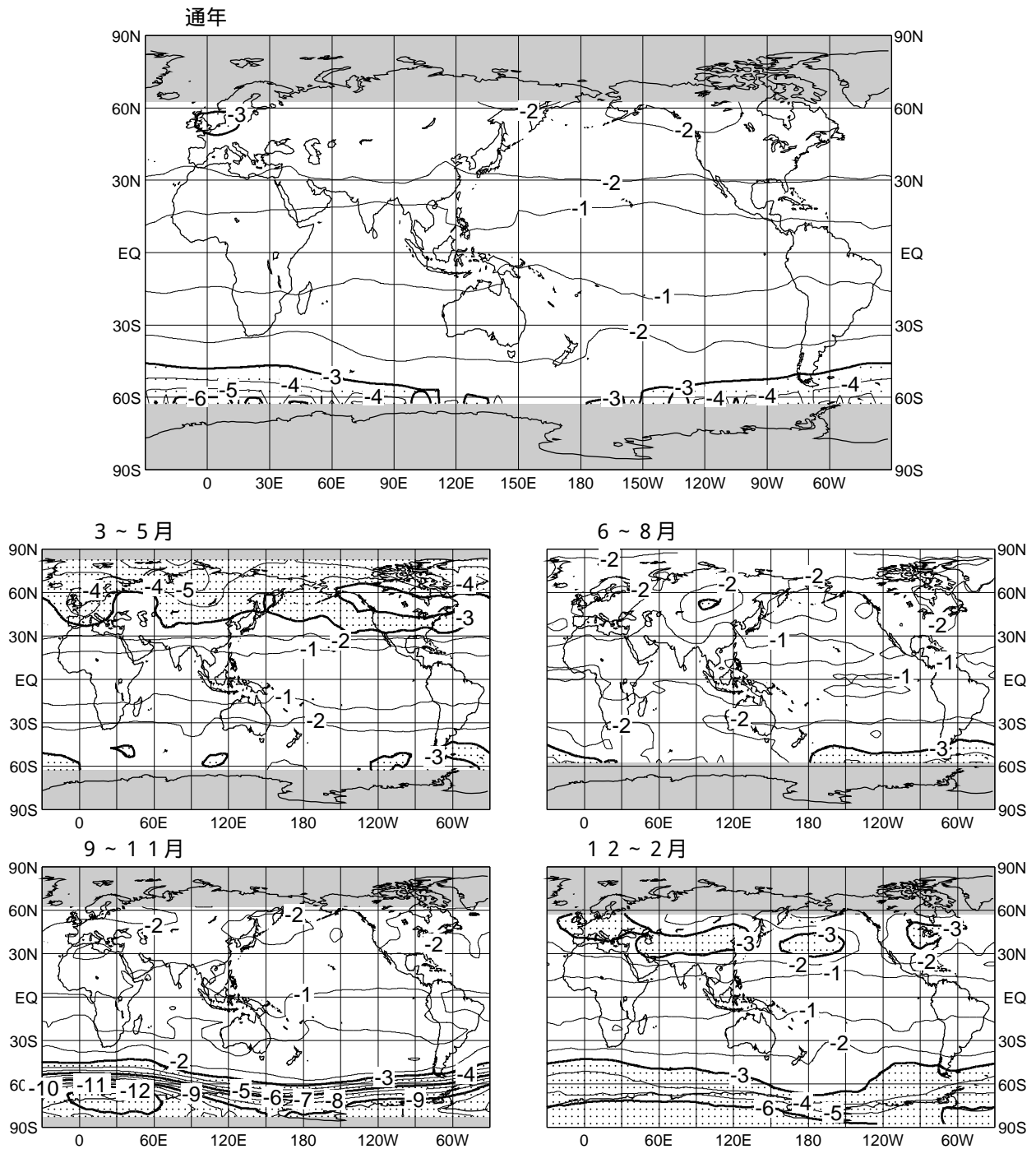


図3-1-7: 衛星データによるオゾン全量トレンドの全球分布

緯経度格子点 (5度メッシュ) ごとの月平均オゾン全量時系列 (1979~2005年) に、季節変動、太陽活動、QB0の影響を除去して評価したトレンド (%/10年) の全球分布図。上段は通年、下段はそれぞれ左上が3~5月、右上が6~8月、左下が9~11月、右下が12~2月についてのトレンド。等値線間隔は1%/10年。陰影部は極域でデータが取得できない領域。点域は、減少率が-3%/10年を超える領域。NASA提供のTOMS及びOMIデータから評価。

図3-1-8にはオゾン全量トレンドの緯度別季節変動を示す。これによれば、北半球高緯度の3~4月及び南半球中・高緯度の8~12月にオゾンの減少傾向が大きい。すなわち、塩素によるオゾン破壊は、低温の状況で促進されるため、より低温である高緯度ほど減少が大きくなり、冬季から春季にかけてオゾン層の破壊が進むため、春季に最も減少傾向が顕著となる。

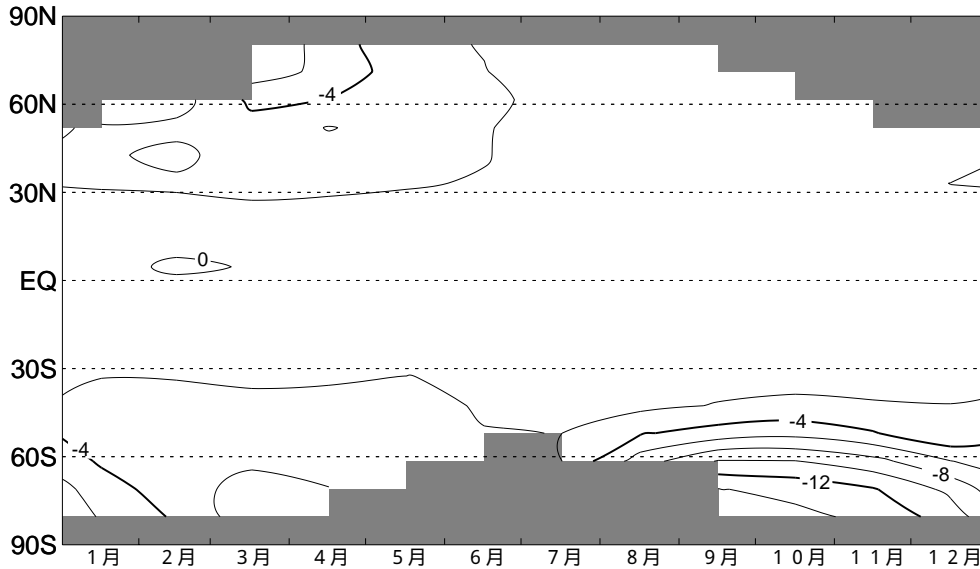


図3-1-8：衛星データによるオゾン全量トレンドの緯度別季節変動

月平均オゾン全量（1979~2005年）について、緯度10度ごとの平均値を求め、季節変動、太陽活動、QB0 に依存する変動成分を除去した後、直線回帰を適用して評価した、オゾントレンド（%/10年）の季節変動。等値線間隔は2%/10年。NASA 提供のTOMS及びOMIデータから評価。なお、衛星による観測では太陽光を用いており、極夜の時期は観測ができない領域が生じる。これを陰影部により示す。

3-2 日本上空のオゾン層の長期変化

図3-2-1に札幌、つくば、鹿児島、那覇のオゾン全量の年平均値の推移を示す。この図から日本上空でも高緯度ほどオゾンの減少が大きくなる傾向がみられる。図中の直線は、観測開始から2005年までの年平均値に関する長期的な変化傾向を示したもので、季節変動、太陽活動、QB0といった既知で周期的な変動要因と相関の高い変動成分を除去していないことに注意する必要がある。これによると、日本付近のオゾン全量は主に1980年代を中心に減少が進み、1990年代以降はほとんど変化がないか、緩やかな増加傾向がみられる。

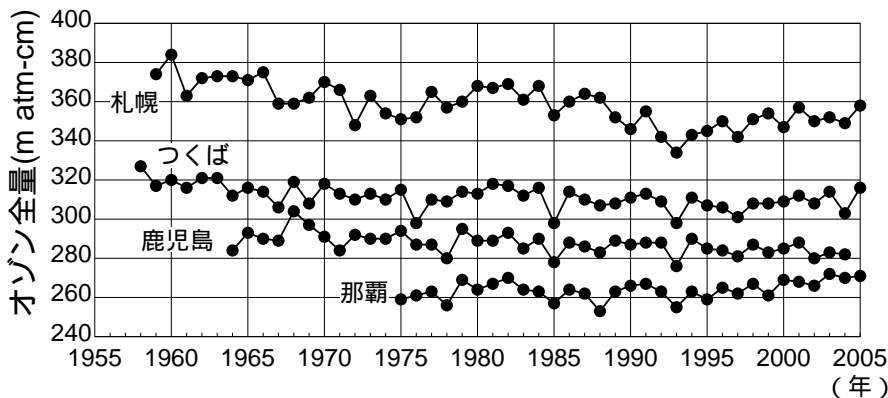


図3-2-1：日本上空のオゾン全量の年平均値の推移

札幌、つくば、鹿児島、那覇におけるオゾン全量の観測開始から2005年までの年平均値（鹿児島は2004年まで）。

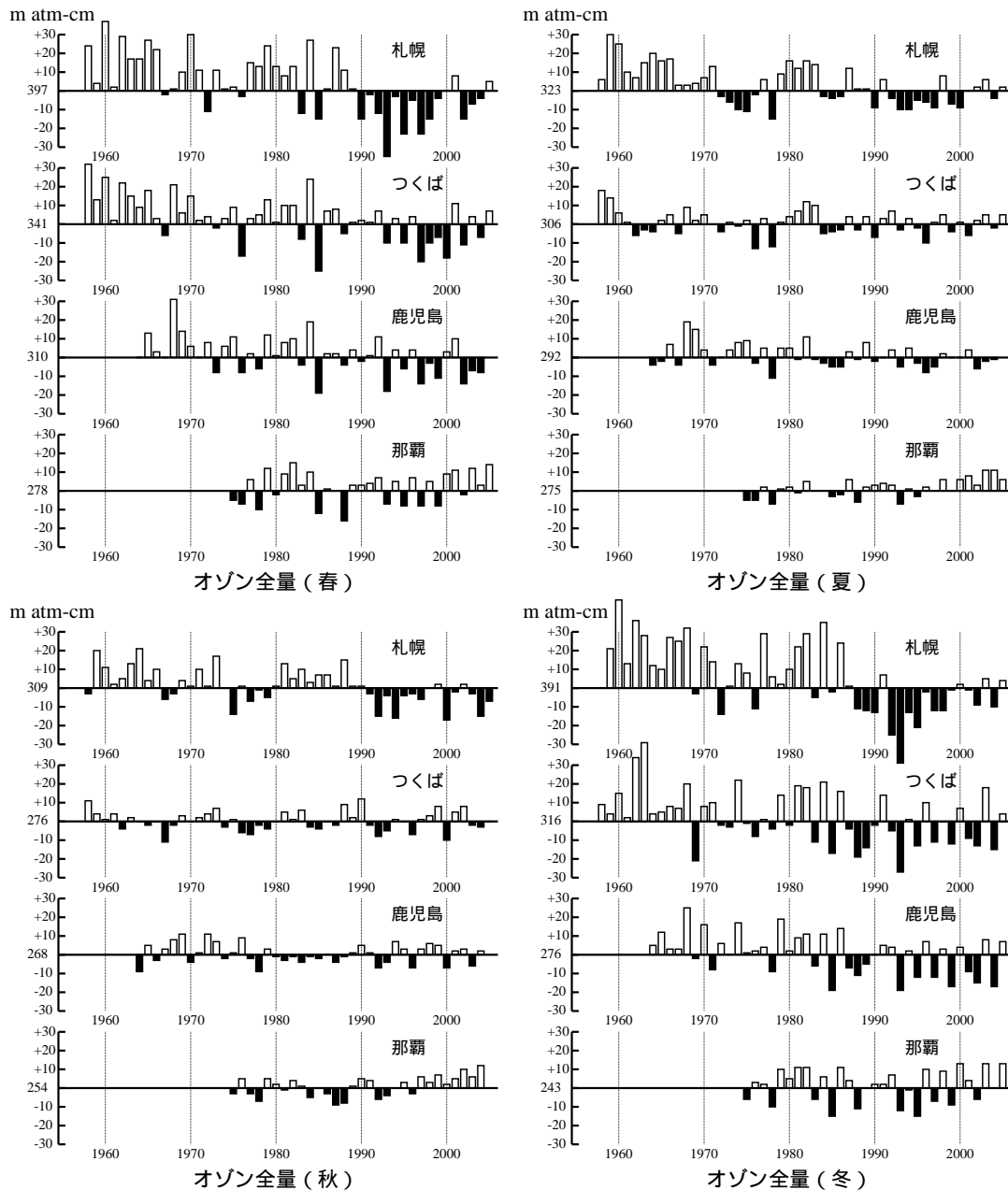


図3-2-2：オゾン全量の季節平均値の経年変化

札幌、つくば、鹿児島、那覇におけるオゾン全量の季節平均値に対する差の推移。上段は春(3月～5月)、夏(6月～8月)、下段は秋(9月～11月)、冬(前年12月～2月)についての値。鹿児島は2005年2月までの値を示す。

次に、日本上空のオゾン全量の経年変化が季節によってどう違うかについて述べる。図3-2-2に、オゾン全量の季節平均値の経年変化を示す。これによれば、春季、冬季に札幌、つくばの減少傾向が顕著にみられ、札幌では、夏季、秋季でもオゾン全量の減少傾向がみられることが注目される。

表3-2-1は、日本国内4地点のオゾン全量の通年及び各季節の1979年から2005年までのトレンドをまとめたもので、月平均オゾン全量の時系列から季節変動、太陽活動、QB0の影響を除去して算出している。図3-2-3は、表3-2-1を図示したものである。図の○印は、トレンドが統計的に有意であることを示す。1979年以降で有意な減少トレンドを示しているのは、札幌の通年(-1.6±0.8%/10年)、春季(-2.0±1.9%

/10年) 及び秋季 (-1.5±1.2%/10年)、鹿児島県の通年(-0.7±0.7%/10年)、冬季 (-1.5±1.4%/10年) である。一方、那覇は通年、夏季及び秋季に増加トレンドを示している。

図3-2-4に日本国内のオゾン全量トレンドの緯度別季節変動を示した。オゾンの変動成分を除去して評価した値を用いている。これによると、札幌の2、4月に顕著な減少トレンドがみられる。また、8、10月を除きつくばでも減少トレンドがみられる。一方、那覇では6~10月を中心に増加トレンドがみられる。

また、国内4地点におけるドブソン計の反転観測による層別(第1~9層)のオゾン量及びオゾンゾンデ観測による指定気圧面(1000~10hPa)のオゾン分圧についてもトレンド解析を行った。つくばの反転観測については、これまでの比較観測の結果に基づいて、過去の観測値に関して再計算を行ったデータを用いた。札幌、那覇のデータについては、測器の変更に伴う不連続が検出されており、今回の報告でその不連続点以前のデータに統計的な補正を行った。解析例として図3-2-5につくばの反転観測第8層(高度約38~43km)の結果を示す。上図は1970~2005年の月平均層別オゾン量(m atm-cm)、下図は上図から既知の自然変動を除去した結果と、1979~2005年に関する回帰直線であり、そのトレンドは-5.2±1.9%/10年である。また、図3-2-6はオゾンゾンデ観測による70hPa(約17km)と700hPa(約3km)について図3-2-5と同様の解析を行った結果を示したものであり、そのトレンドは70hPaで-5.5±3.3%/10年、700hPaで-1.6±2.2%/10年である。

表3-2-1: 日本上空のオゾン全量トレンド

月平均オゾン全量の時系列から季節変動、太陽活動、QB0の影響を除去して算出した、1979~2005年についてのオゾン全量トレンド(%/10年)。通年(1~12月)、春(3~5月)、夏(6~8月)、秋(9~11月)、冬(12~2月)に分けて評価した。○内は95%信頼限界の範囲を示し、下線を付したものは統計的に有意なものである。鹿児島は2005年3月までの値を用いている。

		札幌	つくば	鹿児島	那覇
通年	1979~2005	<u>-1.6(-2.5~-0.8)</u>	-0.4(-1.1~0.2)	<u>-0.7(-1.4~-0.1)</u>	<u>0.8(0.2~1.3)</u>
春	1979~2005	<u>-2.0(-3.9~-0.1)</u>	-0.6(-2.1~0.9)	-1.2(-2.7~0.3)	0.5(-0.7~1.7)
夏	1979~2005	-1.2(-2.4~0.1)	-0.2(-1.2~0.8)	-0.3(-1.5~0.8)	<u>1.3(0.2~2.3)</u>
秋	1979~2005	<u>-1.5(-2.7~-0.3)</u>	0.0(-1.0~0.9)	0.2(-0.9~1.4)	<u>1.0(0.0~2.1)</u>
冬	1979~2005	-1.9(-4.2~0.3)	-0.9(-2.5~0.7)	<u>-1.5(-2.9~-0.1)</u>	0.2(-1.0~1.5)

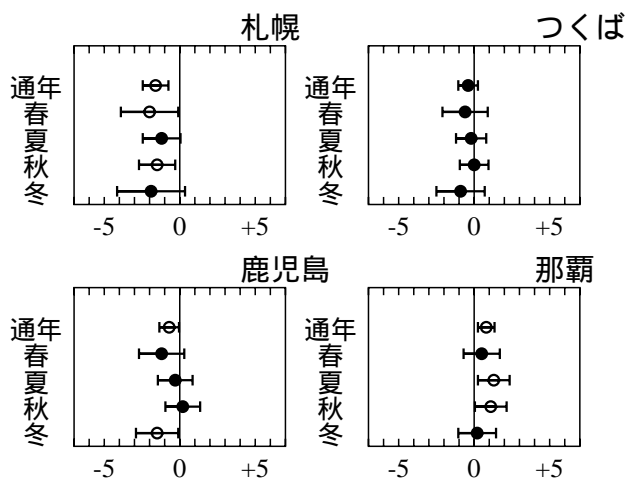


図3-2-3: 日本上空のオゾン全量トレンド

○印及び●印は、月平均オゾン全量の時系列から季節変動、太陽活動、QB0の影響を除去して算出した1979~2005年についてのオゾン全量トレンド(%/10年)。通年(1~12月)、春(3~5月)、夏(6~8月)、秋(9~11月)、冬(12~2月)に分けて評価した。実線の幅は95%信頼限界の範囲を示し、○印は統計的に有意なものである。鹿児島は2005年3月までの値を用いている。

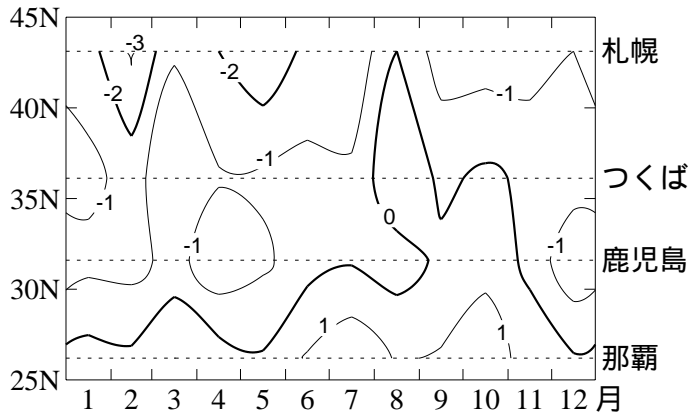


図3-2-4：日本上空のオゾン全量トレンドの緯度別季節変動

1979～2005年のオゾン全量の月別トレンド (%/10年)。季節変動、太陽活動、QB0に依存する変動成分を除去した後、直線回帰を適用して評価した。鹿児島は2005年3月まで。

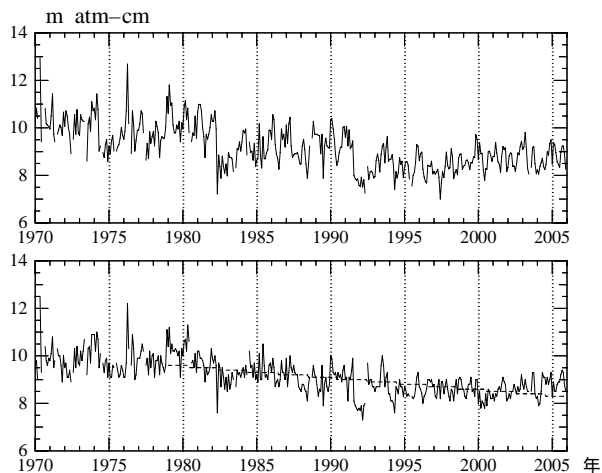


図3-2-5：反転観測データによるトレンド解析例

上図はつくばの反転観測第8層（約38～43km）の1970年からの月平均層別オゾン量（m atm-cm）。下図は上図データから、原因が既知の自然変動（季節変動、太陽活動、QB0、大気混濁度の影響）を除去した結果と、1979～2005年に関する回帰直線（破線）。

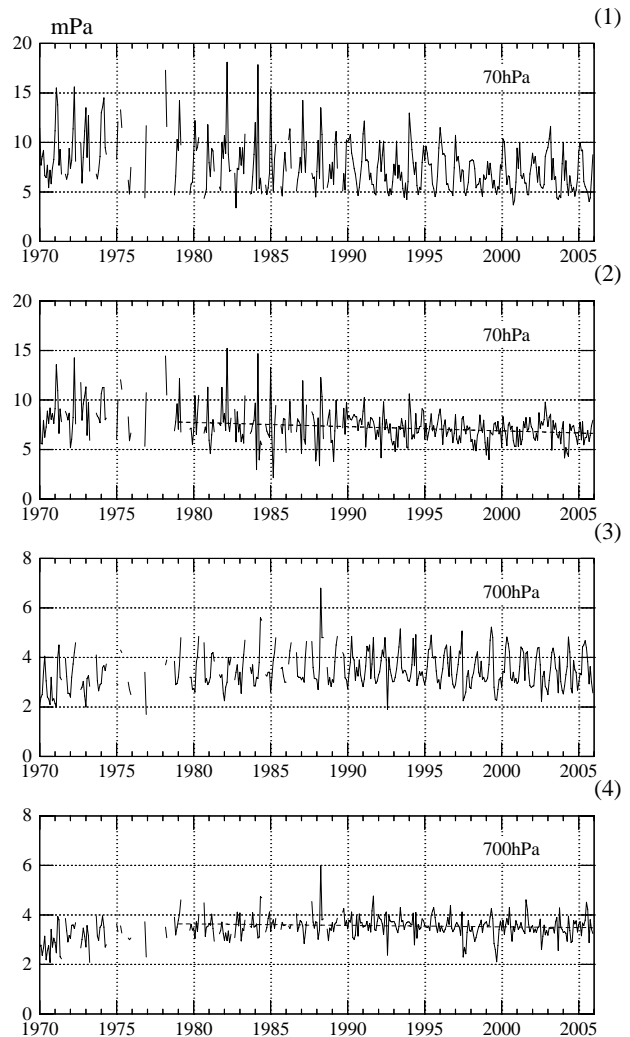


図3-2-6：オゾンゾンデデータによるトレンド解析例

つくばのオゾンゾンデ観測による1970年以降のオゾン分圧（mPa）の経年変化。(1)は70hPa（高度約17km）の月平均値、(2)は(1)から季節変動、太陽活動、QB0の影響を除去した値。(3)は700hPa（高度約3km）の月平均値、(4)は(3)から前述と同様の影響を除去した値。破線はそれぞれの高度における1979～2005年に関する回帰直線。

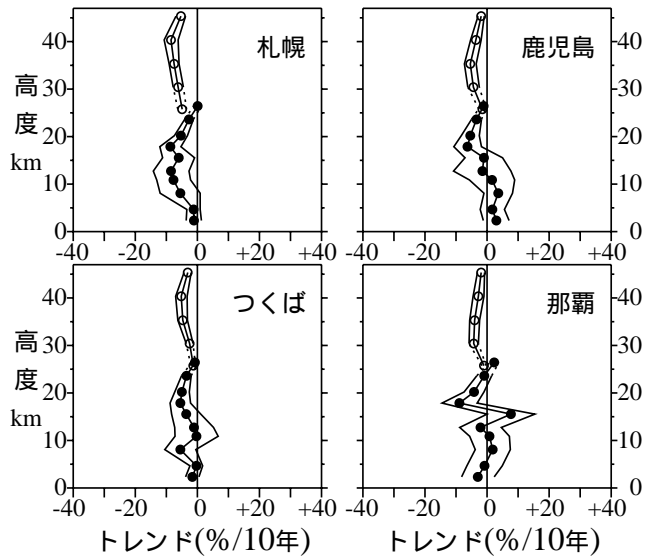


図3-2-7：オゾンの高度別トレンド

オゾンゾンデ観測と反転観測による、1979～2005年の月平均オゾン分圧と月平均層別オゾン量をもとに評価した高度別トレンド（%/10年）。●印はオゾンゾンデ観測データ、○印は反転観測データによる。季節変動、太陽活動、QBOに依存する変動成分を除去した。外側の折線は自己相関を考慮した95%信頼限界。なお、那覇のオゾンゾンデ観測によるトレンドは、観測を開始した1989年以降の17年間についての値、鹿児島は2005年3月までの値を用いている。

図3-2-7は、反転観測とオゾンゾンデ観測の結果から求められた1979年以降のオゾン分圧トレンドの高度分布を示したものである。下部成層圏でオゾンの減少トレンドが現れており、特に札幌で顕著である。また、上部成層圏を中心に全地点で有意な減少トレンドが現れている。このように、オゾン層の破壊は、日本上空でも上部成層圏と下部成層圏の二つの高度領域で起こっている。一方、那覇と鹿児島では、対流圏のオゾンにわずかな増加トレンドが現れている。なお、札幌、つくば、鹿児島では、1960年代末からオゾンゾンデ観測を行っており、この観測開始以降のデータを用いてトレンド解析を行うと、図には示していないが、各地点とも対流圏のオゾンは有意に増加している。つくばの年々の変化をみると、対流圏オゾンは1970年代を中心に増加し、1980年代末まで増加傾向が明瞭であるが、それ以降は、ほとんど変化がないか、もしくは緩やかな減少傾向がみられる。他の2地点でもほぼ同様な傾向となっている。Oltmans et al. (2006)の解析では、ドイツのホーヘンパイセンベルグ観測所におけるオゾンゾンデ観測による対流圏オゾンの変化傾向は、つくばと同様に1980年代末まで増加傾向、それ以降は減少傾向であることが示されている。なお、那覇におけるオゾンゾンデの観測開始は1989年であり、それ以降のデータでトレンド解析を行うと、わずかに増加傾向がみられる。

前節同様に1990年から2005年の日本国内の平均オゾン全量を1980年以前と比較すると、4地点平均で1.8%、特に札幌では3.5%減少している。オゾン全量の減少が大きい冬季について、年々の変化を図3-2-8に示す。これによると、日本付近のオゾン全量は、1980年代後半の減少が顕著であり、それ以降はほとんど変化していないか、緩やかな増加傾向がみられる。この変化傾向は、概ね全球の変化傾向と同様である。なお、冬期間について、1990年から2005年の日本国内の平均オゾン全量を1980年以前と比較すると、4地点平均で2.6%、札幌で4.2%の減少である。

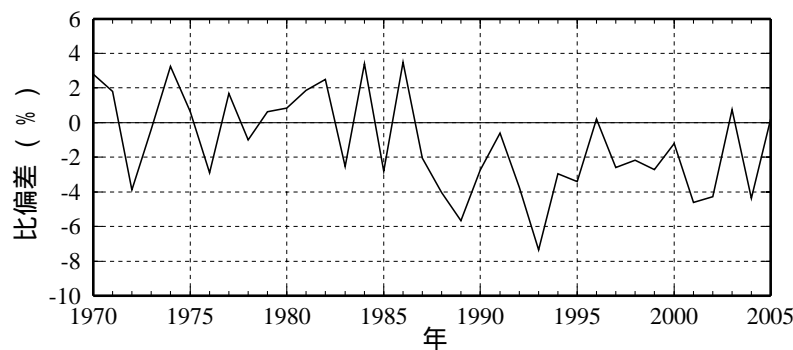


図3-2-8：日本上空の冬期間のオゾン全量の推移

札幌、つくば、鹿児島、那覇の月平均オゾン全量から季節変動、QBO、太陽活動の影響を除去した後、オゾン全量の平均値（1970～1980年）からの比偏差についての12～2月平均を4地点で平均した値を示す。なお、鹿児島は2004年までの値を用いている。

3-3 南北両半球高緯度のオゾン層の長期変化

3-3-1 南極域オゾンホール長期変化

図3-3-1に、昭和基地の観測による月平均オゾン全量について、1966~2005年の春季から秋季にかけての経年変化を示す。昭和基地上空はオゾンホールの縁辺となることが多く、昭和基地でのオゾン量の変化が、必ずしもオゾンホールの規模の変化をそのまま反映しているわけではないが、オゾンホールの時期にあたる9月から12月は、年ごとにばらつきはあるものの、1980年頃からオゾンが減少しているのがわかる。この中で、2002年の9月から11月のオゾン全量が急増しているが、これは2002年の南極域では、9月の成層圏の気温が過去50年で最高となり、極渦が不安定となる特異な気象条件により、大規模なオゾン破壊が生じなかったためである。また、オゾンホールが解消した後の時期にあたる1月から3月についても、長期的なオゾン全量の減少傾向がみられる。昭和基地のオゾン全量データに、3章の解説2で示したトレンド解析の手法を適用すると、1979年以降のトレンドは通年で $-7.0 \pm 3.7\%/10$ 年、9~11月で $-14.0 \pm 8.9\%/10$ 年になる。

図3-3-2に、10月の昭和基地上空の高度12kmから20kmまでの月平均オゾン量の経年変化を示す。この高度のオゾン量は、2-3-2項で示したようにオゾンホールの発達に伴って大きく減少するため、オゾンホールの長期的な変化傾向の良い指標になる。オゾン量は、1990年代初めから、ほぼ毎年大きく減少した状態が続いており、1970年代と比較して80%以上少ない。10月の極小値が1992年に現れているのは、ピナトゥボ火山噴火（1991年6月）に起因した成層圏エアロゾル粒子表面での不均一反応（2章の解説参照）のため、オゾン破壊が促進された影響とみられる。一方、2002年は南極域の成層圏が高温であったことからオゾン層破壊が顕著でなかった。もう少し詳しくみるために、150、100、70、50、30hPa（それぞれ高度約12、15、17、19、22km）のオゾン分圧の経年変化を、図3-3-3に示す。各高度ともオゾン全量と同様に、

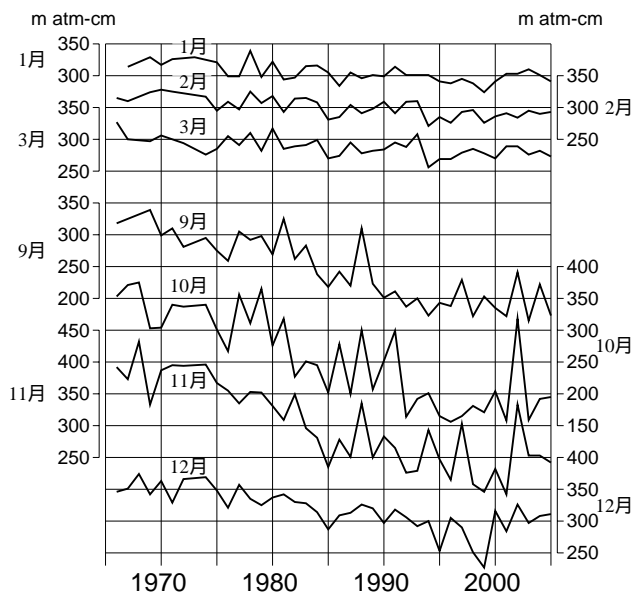


図3-3-1：南極昭和基地における月平均オゾン全量の経年変化

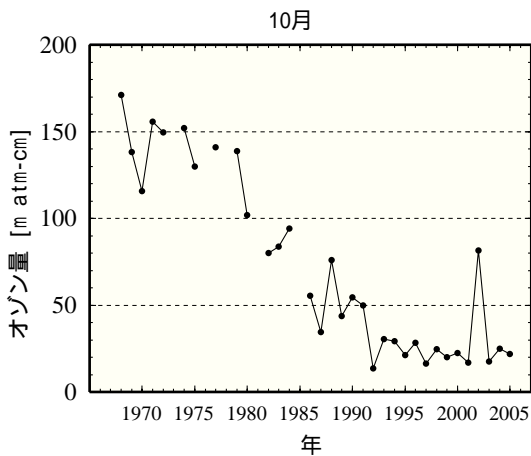


図3-3-2：南極昭和基地上空の高度12~20kmの10月の月平均オゾン量の経年変化

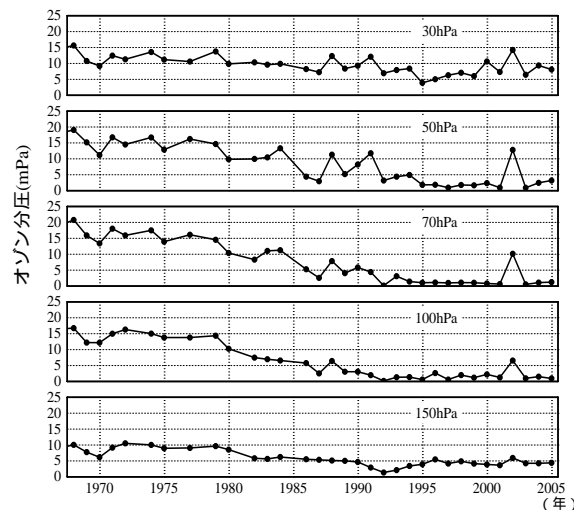


図3-3-3：南極昭和基地上空の150、100、70、50及び30hPaの10月の月平均オゾン分圧の経年変化

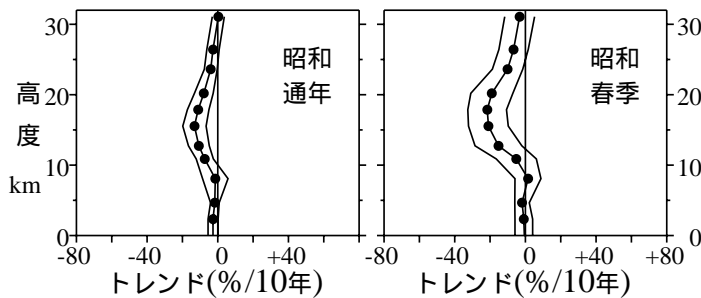


図3-3-4：南極昭和基地におけるオゾン分圧のトレンドの高度分布

●印はオゾンホールが観測された以降(1980～2005年)のオゾンゾンデ観測による月平均オゾン分圧をもとに評価した高度別トレンド(%/10年)。外側の折線は自己回帰を考慮した95%信頼限界。左が通年、右が春季(9～11月)。

1980年頃から減少が顕著に現れている。1992年頃に150hPaで極小値を示しているのは、ピナトゥボ火山噴火の影響と考えられる。特に100、70、50hPaでは、1992年頃から、2002年を除いてオゾン分圧が0に近く、オゾンがほとんど破壊されている状況が続いている。2002年の30hPaから150hPaの各高度でオゾン分圧が高くなっているのは、先に示したように特異な気象条件によるものである。

図3-3-4に、1980年以降のオゾンゾンデ観測による高度別オゾン分圧のトレンドを示す。高度15km(約100hPa)付近でのオゾン減少が大きく、春季(9～11月)に顕著である。

図3-3-5に、昭和基地における1979年以降のオゾン分圧と気温の高度分布の月別トレンドを示す。オゾン分圧の減少のピークは10、11月の70hPa付近に現れており、4mPa/10年を超える減少を示している。11月以降、オゾン分圧の減少の大きな領域は次第に下層へと移っている。一方、気温は11月に100～70hPa付近で5℃/10年以上の低下を示している。また、オゾンと同様に、気温が低下した領域は11月以降下層へ移っている。このように気温の低下はそれに先立つオゾン減少と対応していることから、オゾンの減少に伴って紫外線の吸収による成層圏大気の加熱が減ったことが主な原因と考えられる。なお、Solomon et al. (2005)によればアムセン・スコット基地(南極点)におけるオゾンゾンデ観測でも同様な変化がみられ、南極域で広範囲に現れている現象である。低温化している高度域は夏季には圏界面付近にまで達しており、南半球の対流圏の気候に影響を与えている可能性も示唆される。

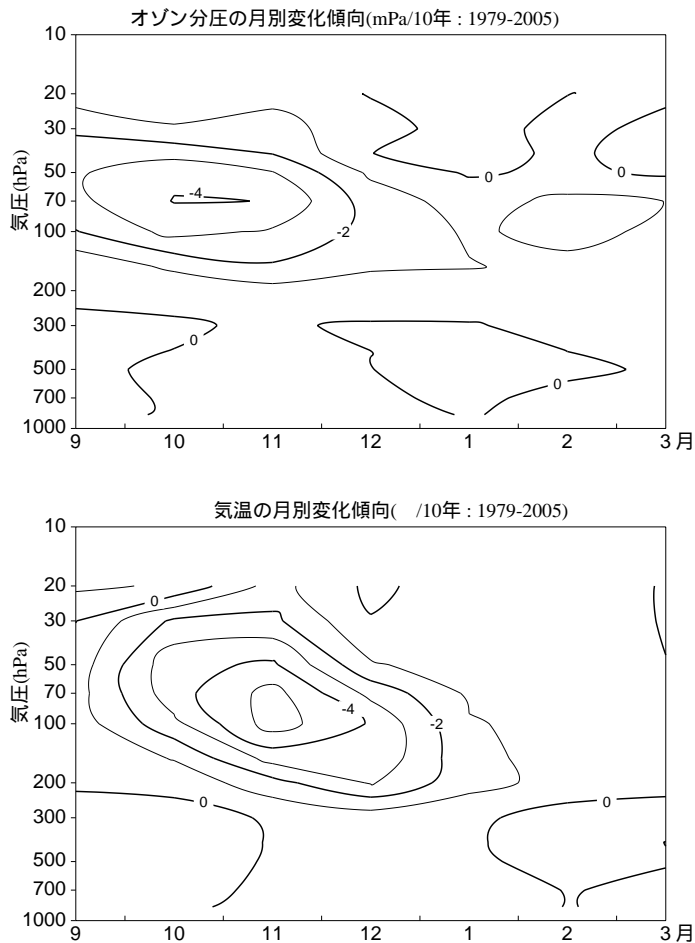


図3-3-5：オゾン及び気温の高度分布の月別トレンド

上図は1979～2005年のオゾン分圧の月別トレンド(単位はmPa/10年)。下図は同期間の気温の月別トレンド(単位は℃/10年)(Uchino et al., 1999; data updated to 2005)。

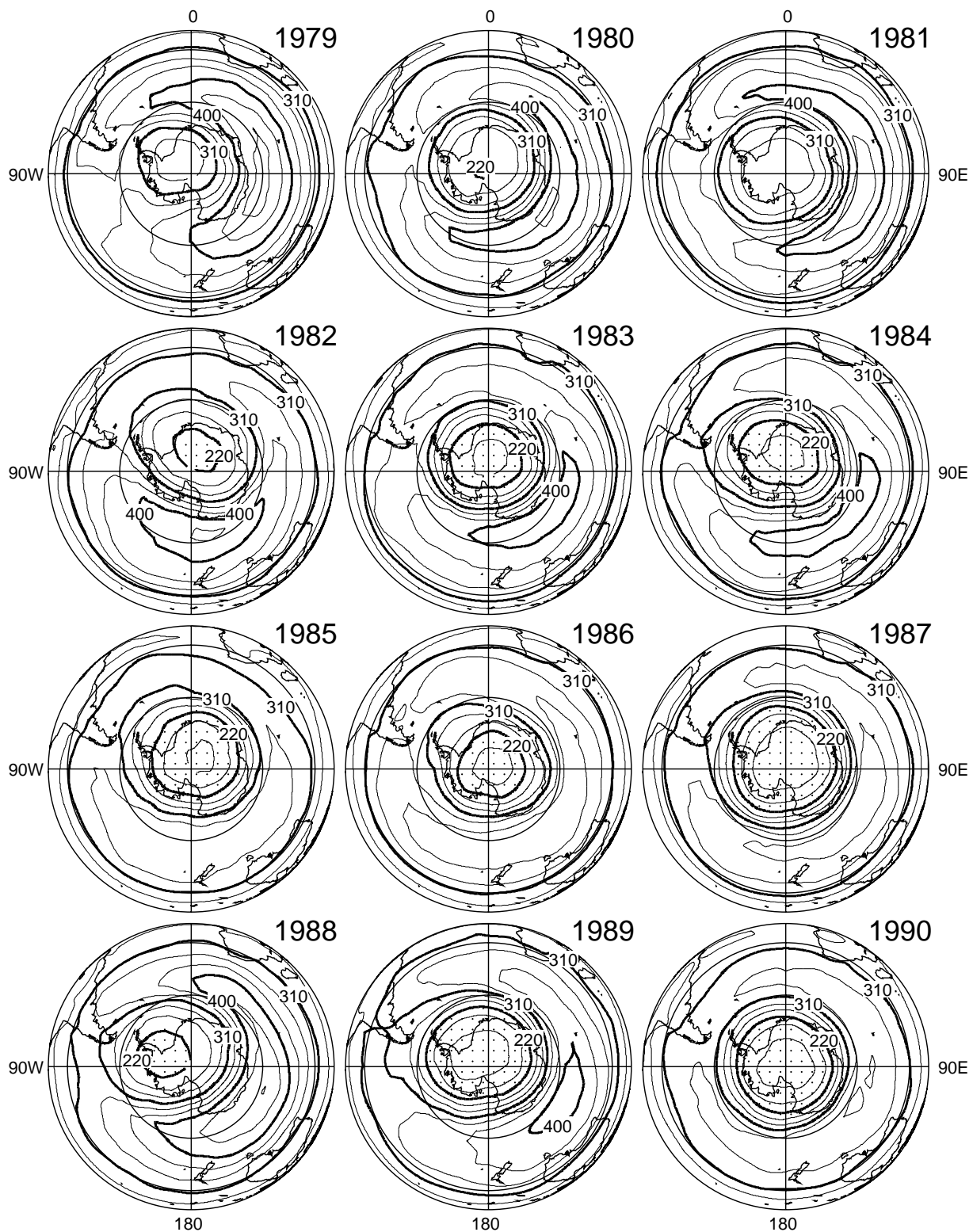


図3-3-6(1) : 10月の月平均オゾン全量の南半球分布図

等値線間隔は30m atm-cm。 NASA提供のTOMSデータをもとに気象庁で作成。点域は220m atm-cm以下の領域。

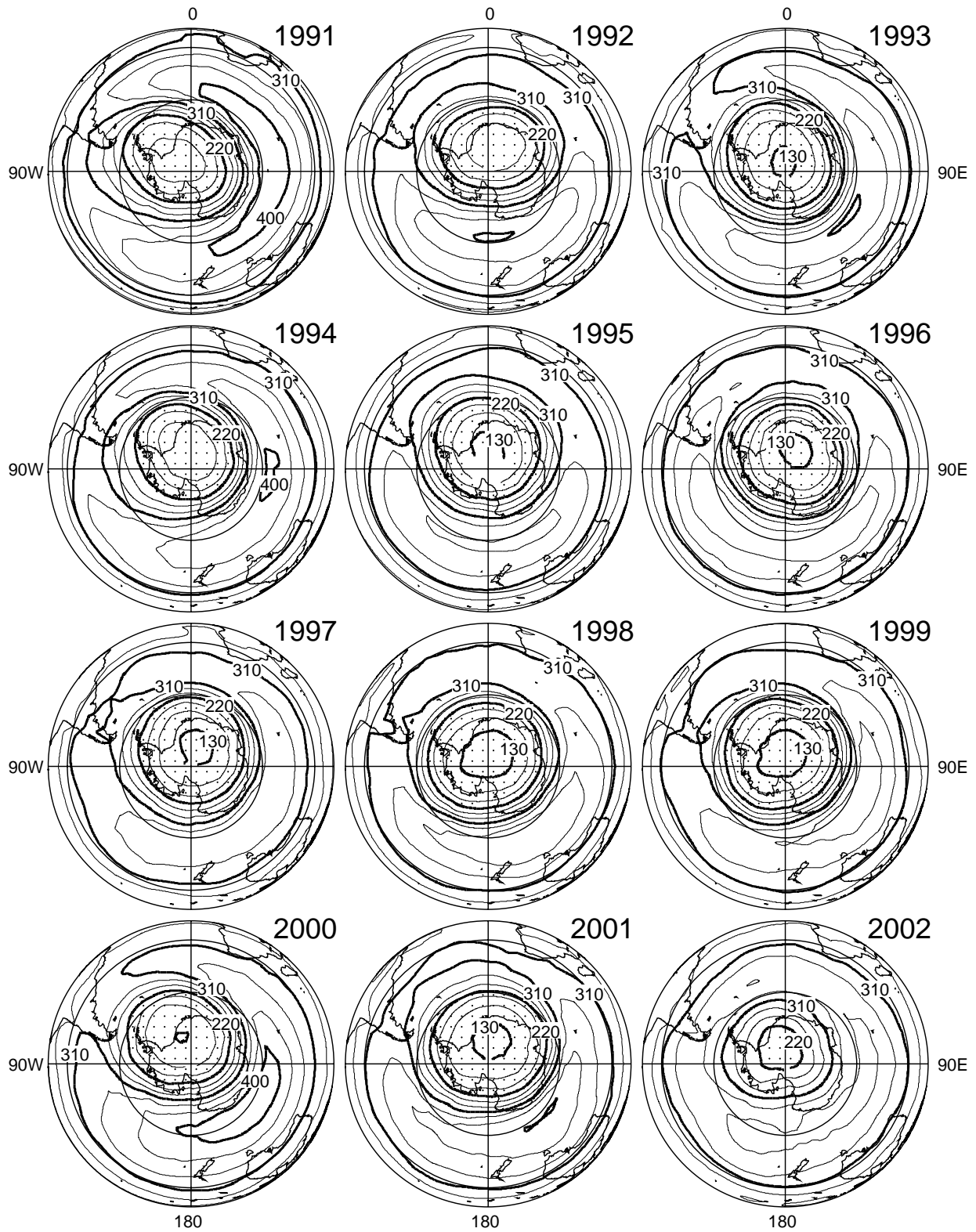


図3-3-6(2) : 10月の月平均オゾン全量の南半球分布図

前ページから続く。1993年は旧アルゴリズム (Ver. 6)、1994年はVer. 7のデータをもとに作成。1995年については、SBUV/2のデータを用いて作成した。

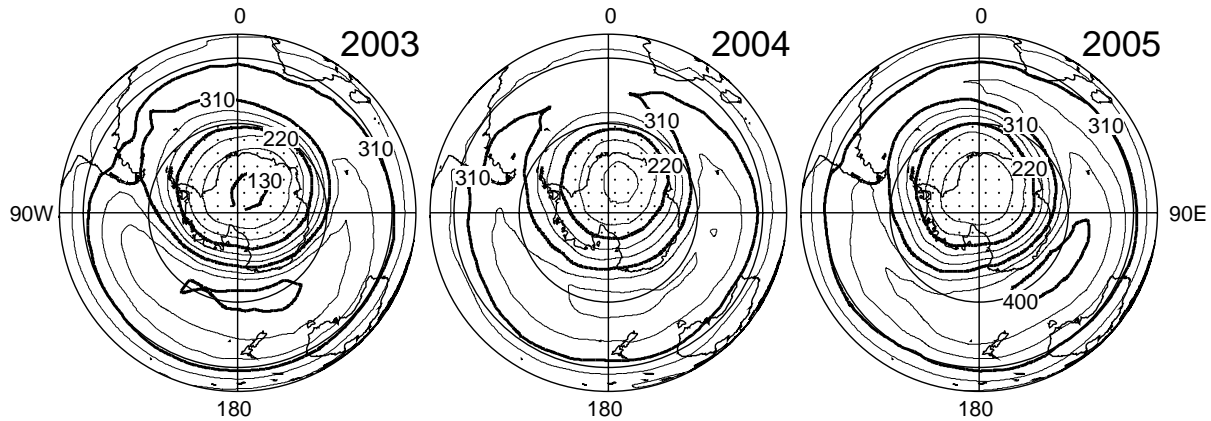


図3-3-6(3) : 10月の月平均オゾン全量の南半球分布図
前ページから続く。2005年については、OMIデータを用いて作成した。

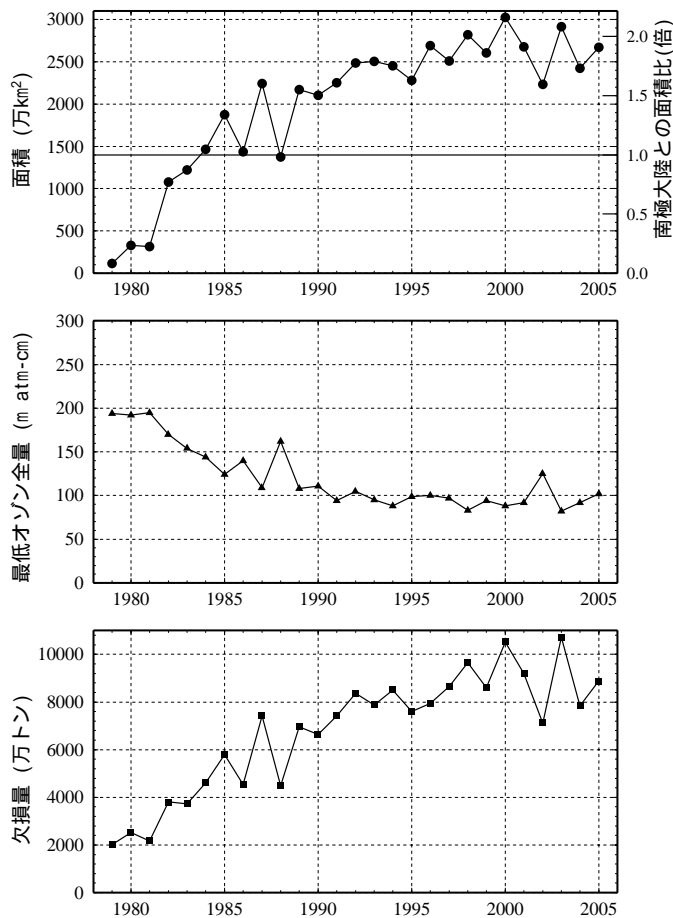


図3-3-7 : オゾンホール規模の経年変化
1979~2005年のオゾンホールの面積、最低オゾン全量、オゾン欠損量の年極値の変化。NASA提供のTOMSデータをもとに作成。1995年はTOVSの高分解能赤外放射計のデータ、2005年はOMIデータを用いてそれぞれ作成した。

図3-3-6に、TOMSデータにより作成した南半球の10月の月平均オゾン全量分布図を示す。1995年はTOMSのデータが得られなかったため、SBUV/2のデータにより作成した。なお、1993年10月及び1994年10月については最新の処理方法 (Ver. 8) によるデータが公表されていないので、古い処理方法 (1993年はVer. 6、1994年はVer. 7) によるデータから作成した図を参考のため掲載した。南極域上空の10月の月平均オゾン全量は、1979年には全球の平均値である約300m atm-cm前後であったが、1980年に220m atm-cm以下の領域が現れ、その後、1983年に190m atm-cm以下の領域も出現し、1985年以降は1986年、1988年及び2002年を除き毎年160m atm-cm以下の領域が現れている。特に1993年、1995~2001年、2003年には130m atm-cm以下の領域も現れている。

図3-3-7に、オゾンホールの面積、最低オゾン全量及びオゾン欠損量 (破壊量) の極値の経年変化を示す。これらによれば、2002年と2004年のオゾンホールの規模は最近の他の年と比較すると小さかったものの、これは気象状況によるものであり、現時点でオゾンホールに縮小する兆しがあるとは判断できない。

図3-3-8に、オゾンホールの目安である220m atm-cm以下の領域が消滅した日の経年変化を示す。消滅日は1990年頃まで年々遅くなる傾向があったが、その後は11月と12月の間で変動している。2005年は、大規模なオゾンホールの発生年の中では平均的な消滅日であった。

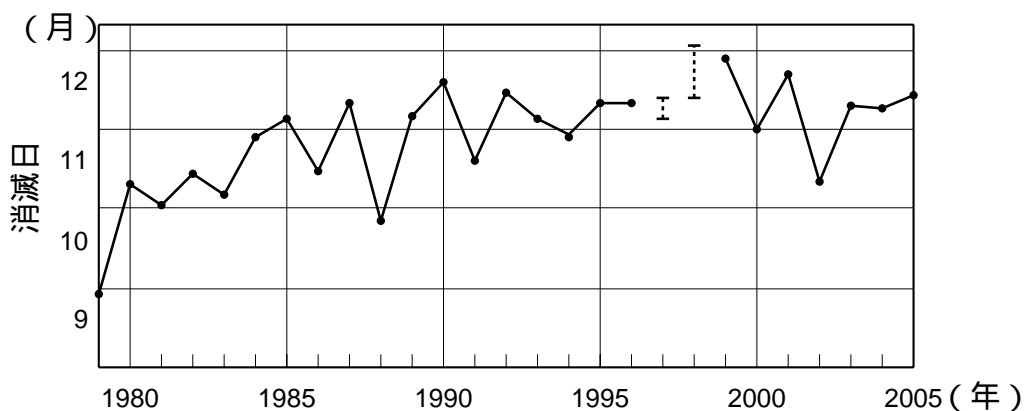


図3-3-8：南極域で220m atm-cm以下の領域がみられなくなった日の経年変化

1979～2005年の220m atm-cm以下の領域が消滅した時期の推移。NASA提供のTOMSデータをもとに作成。ただし、1995年はSBUV/2、2005年はOMIのデータをもとに作成した。なお、1997年及び1998年は、衛星データの一部（1997年12月5日～13日、1998年12月13日～1999年1月2日）が得られていないため、消滅日を特定できていないが、破線で示した期間中に消滅したと推定される。

（解 説 1） オゾンホール規模の統計的な推定法について

オゾンホール規模を表すパラメータとして、オゾン欠損量を取り上げ、その年の最大値を支配する因子を調査した結果、オゾン欠損量は、オゾン層破壊物質濃度と、6月及び8月の成層圏の温度場（実際には30hPa面における-78℃以下の面積）の三つの要因でかなりの部分を説明できることが示された（気象庁、1993、伊藤他、1993）。オゾン欠損量（ M ）を目的変数として下記の重回帰式

$$M_i = a \cdot X_i + b \cdot Y_i + c \cdot Z_i$$

を設定する。添え字 i は年の番号を表す。 X と Y は温度場の説明変数で、それぞれ6月と8月における30hPa面の月平均温度が-78℃以下の低温域の面積である。 Z はオゾン層破壊物質の濃度を表現する説明変数で、大気中のクロロフルオロカーボン等による塩素濃度をモデル化した数列を与えた。それぞれの年の M , X , Y , Z の値は、データ期間の平均値からの偏差の百分率で与えている。 a , b , c はそれぞれの説明変数の目的変数に対する寄与の度合いを表現する係数である。影響の大きさは、オゾン層破壊物質の濃度、8月の低温域の面積、6月の低温域の面積の順である。この重回帰式による重相関係数は約0.98であり、自由度調整済みの決定係数*は約0.94であることから、この重回帰式はオゾン欠損量の予測に有用である。

気象庁では、オゾンホールに関する報道発表等で、この手法を用いてオゾンホール規模の予測を公表している。

*選択した説明変数により、目的変数の変動がどの程度説明されたかを示す決定係数（重相関係数の2乗）は、予測に役立たない説明変数を増やしても見かけ上、係数が大きくなる性質がある。説明変数を増やしただけでは決定係数が大きくならないように調整したものが、自由度調整済み決定係数である。

3-3-2 北半球高緯度のオゾン層の長期変化

北半球高緯度の状況をみるために、TOMS及びOMIデータから評価した北緯60度以北の3月平均オゾン全量の偏差及び英国のラーウィック（北緯60.13度、西経1.18度）の3月平均オゾン全量の偏差を、図3-3-9に示す。衛星データによると、1990年以降、データの無い1995、1996年を除き、20m atm-cm以上の負偏差が14年のうち10回現れており、北半球高緯度でのオゾン減少が1990年以前に比べ明瞭になっている。なお、1995、1996年にはTOMSデータがないが、SBUV/2のデータを用いた解析によると、両年ともに春季にオゾン全量の大きな減少が観測されている（NOAA, 2005）。ラーウィックでも、1990年以降、春季に顕著なオゾン減少が現れており、特に1996、1997、2005年は大規模であった。このうち2005年は、ラーウィックで約80m atm-cmの負偏差がみられた。

このような北半球高緯度での春季のオゾン減少は、南極オゾンホールと同様の過程により生じていると考えられる（WMO, 1998）。図3-3-10に、気象庁全球解析データによる高緯度域（北緯60度以北、南緯60度以南）の50hPa（高度約20km）面での最低気温の経年変化を示す。南半球の冬季は長期間、最低気温が極域成層圏雲の発生の目安となる -78°C を下回るが、北半球では下回るのは短期間である。このような気象条件のため、北半球高緯度では、通常南極域のような大規模なオゾン減少は起こらないものの、気温がわずかに低下することで極域成層圏雲の発生する期間・領域が大幅に拡大し、オゾン破壊が一気に加速することがある。気温の変動に敏感なことから、北半球高緯度のオゾン破壊の規模は年ごとの変動が大きい。

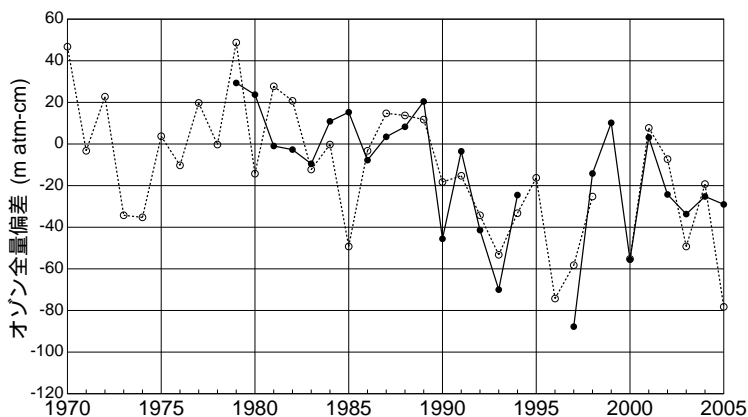


図3-3-9：北半球高緯度の3月のオゾン全量偏差の経年変化

●印はNASA提供のTOMS及びOMIデータをもとに気象庁で作成した北半球高緯度（北緯60度以北）の3月の平均オゾン全量の参照値（1979～1992年の平均値）からの偏差。なお、1995、1996年はTOMSデータがない。○印は、ラーウィック（英国、北緯60.13度、西経1.18度）の3月の平均オゾン全量の1979～1992年の平均値からの偏差を示す。

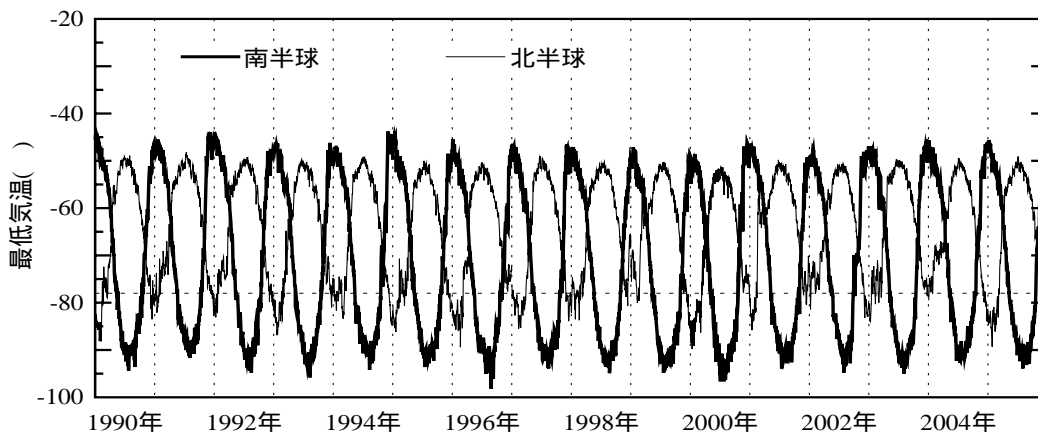


図3-3-10：高緯度域の最低気温の経年変化

北緯60度以北、南緯60度以南の50hPa面の日別最低気温の変化。図中の破線は極域成層圏雲（PSCs）発生の目安となる -78°C の気温を示す。気象庁全球解析データをもとに作成。

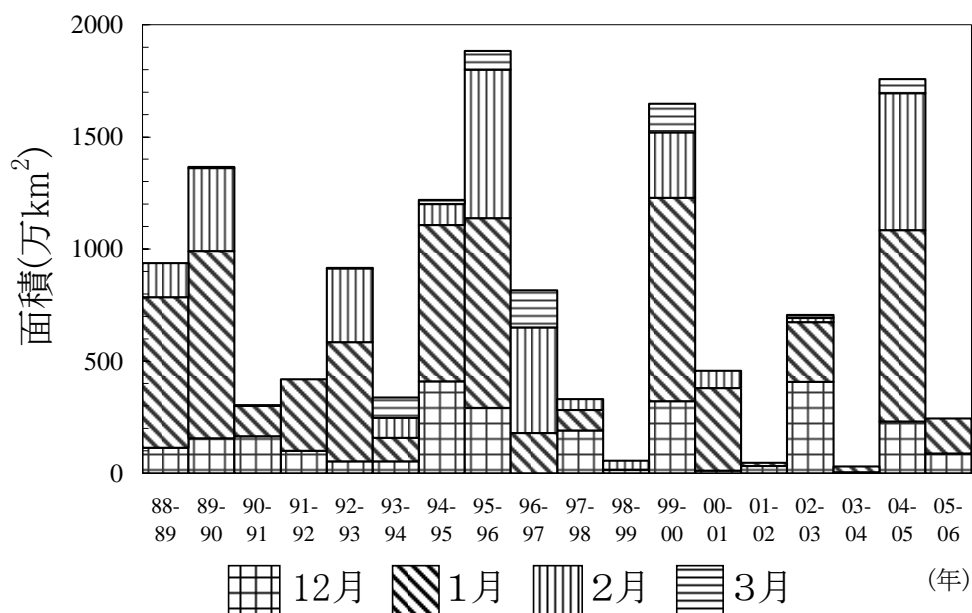


図3-3-11：冬季の北半球高緯度における低温域の面積の月平均値の推移

北緯60度以北の50hPa面における、極域成層圏雲出現の目安となる -78°C 以下の領域の面積の12～3月の月平均値の推移。2006年は -78°C 以下の領域が消滅した1月下旬までの値を掲載している。気象庁全球解析データをもとに作成。

図3-3-11は、北緯60度以北の50hPa面における、極域成層圏雲出現の目安となる -78°C 以下の領域の月平均面積の推移を示している。春季にオゾン減少が顕著だった年（1990, 1993, 1995, 1996, 1997, 2000, 2005年）にはほぼ共通する特徴は、2、3月の低温域の面積がその月としては広がったことで、オゾン全量偏差と逆相関の関係にある。太陽光が戻ってくる春季にかけて極域成層圏雲の生成に十分な低温域が維持されていることで、南極オゾンホールと同様の化学的な過程によりオゾン破壊が促進される。

極域のオゾン変動には、輸送の変動も影響している。冬季、極渦が平年よりも安定して存在すると、低緯度域から極域へのオゾン輸送が少なくなり、極域のオゾンは減少する。このため、極渦が安定している年は、オゾン輸送量の減少と化学的なオゾン破壊現象が重なり合い、極域のオゾンが減少するものと考えられる。これも南極オゾンホールと同様である。

2004年12月から2005年2月の期間の低温域の面積の合計は、オゾン減少が顕著だった1999年12月から2000年3月の期間を上回っていたが、3月中旬の成層圏突然昇温によって極渦が変形し消滅したため、それ以降、大規模なオゾン破壊が発生するには至らなかった。

3-4 オゾン層の今後の見通し

WMO/UNEPの「オゾン層破壊の科学アセスメント:2002」が指摘するように、モントリオール議定書が完全に遵守されたとしても、オゾン層は今後10年程度は現在のように脆弱であり、オゾン層は破壊されやすい状態である。今後、成層圏の塩素・臭素濃度が徐々に低くなることに伴い、今世紀中頃までにはオゾンホールは発生しなくなるとされている（WMO, 2003）。しかしながら、オゾン層の回復は、これまで製造された製品中に貯蔵されているフロン類の放出等によって、これまでの予測よりも遅れるとの最新の研究（Hurst, 2005, Austin, 2005）もあり、今後ともオゾン層の状況を注意深く監視する必要がある。

(解説 2) トレンド値算出方法

ここでは、本報告で採用しているトレンド値の算出手法について説明する。図3aに、札幌、つくば、鹿児島、那覇における観測開始から2005年12月まで（鹿児島は2005年3月）のオゾン全量の月平均値の推移を示す。月平均値には年平均値の20～30%の幅の季節変動がみられ、その大きさは年によって異なっている。現在問題とされているトレンドは、10年間で数%程度の大きさであり、トレンドの有無については以下のような手順で判定を行う。

図3bに、上記の月平均値から季節変動成分を除いたオゾン全量の経年変化を示す。オゾン量の経年変化には季節変動以外に、2～3年や10年程度のほぼ周期的な変動成分が含まれている。代表的なものとして、QBOや太陽活動が知られている。信頼度の高いオゾントレンドを求めるため、通常、これらの変動と関連の高い成分をオゾンの時系列データから除去する（WMO, 1992、吉松他, 2005）。

図3cに長期変化傾向の解析（トレンド解析）において除去すべき要因の時系列を示す。除去する要因は既知で周期的な変動である約11年周期の太陽活動（上図）、約2年周期のQBO（中図）があり、また、反転観測では、大きな火山噴火等で生じる大気混濁の影響が測定誤差として表れるため、直達日射量から算出した大気混濁係数（下図）も考慮する必要がある。

図3dに、例としてつくばにおけるオゾン全量の1970～2005年についてトレンド解析を示す。（1）は解析対象のオゾン全量の月平均値、（2）はオゾン全量の月平均値の49ヶ月移動平均値と太陽活動の目安となる太陽電波フラックス（3,750MHz）値の13ヶ月移動平均値、（3）はオゾン全量から季節変動と太陽活動に依存する変動成分を取り除いた値とQBOの指標となるシンガポール上空50hPa面の風の東西方向の風速の7ヶ月移動平均値、（4）はこれらの変動成分を除いたオゾン全量とそれに対するトレンドである。

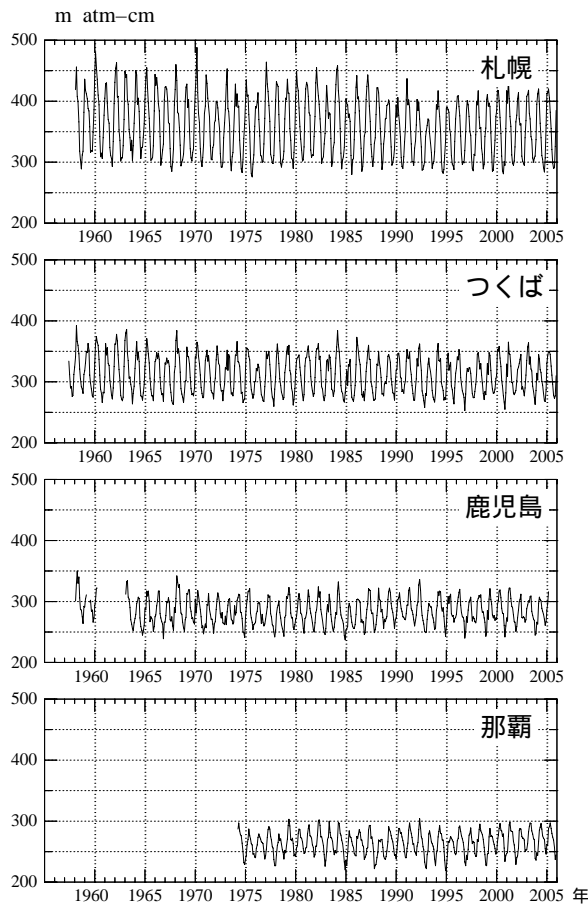


図3a：日本上空のオゾン全量の月平均値

札幌、つくば、鹿児島、那覇についての観測開始から2005年12月まで（鹿児島は2005年3月）のオゾン全量の月平均値。

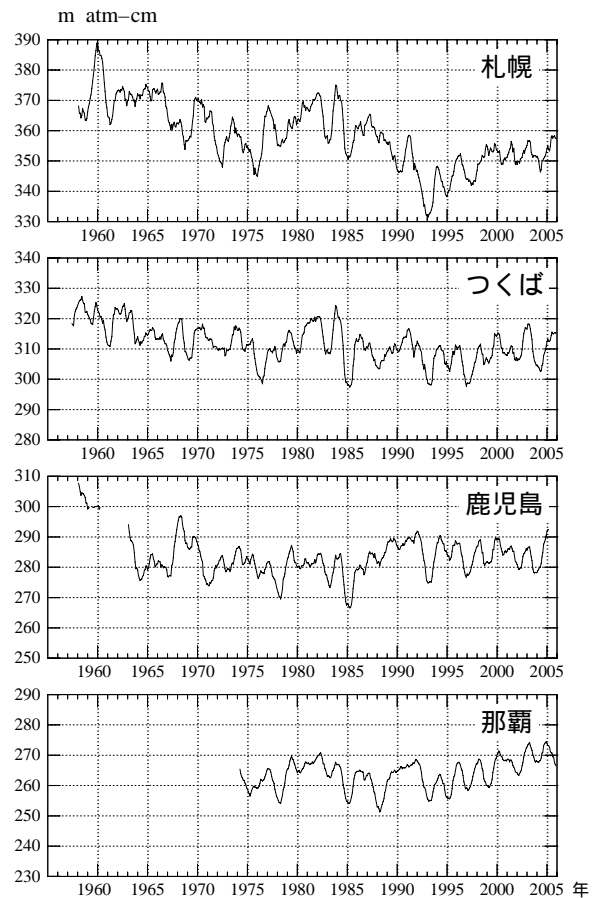


図3b：季節変動除去後のオゾン全量の推移

図3aのデータから季節変動を除去した後、13ヶ月移動平均した。

実際の解析の手順は以下のとおりである。

- 1) オゾン全量の季節変動除去値の時系列を目的変数とし、太陽電波フラックスの13ヶ月移動平均値とQB0の7ヶ月移動平均値(いずれも地点ごとにオゾン全量との相関が最も高くなるように時間ラグを設定)、及び直線トレンド成分を説明変数とした重回帰式を求める。
- 2) この回帰式を用いて、太陽の活動を示す太陽電波フラックス及びQB0の変動と対応するオゾン全量の成分を算定し、目的変数からこれらの成分を除去した時系列を作る。
- 3) この時系列に直線回帰を適用してトレンド(通年及び季節・月別)を決定する。
- 4) オゾン全量変化のトレンド直線からの偏差(残差)に自己相関を考慮して95%信頼限界を決め、これを超えた場合を有意とする。

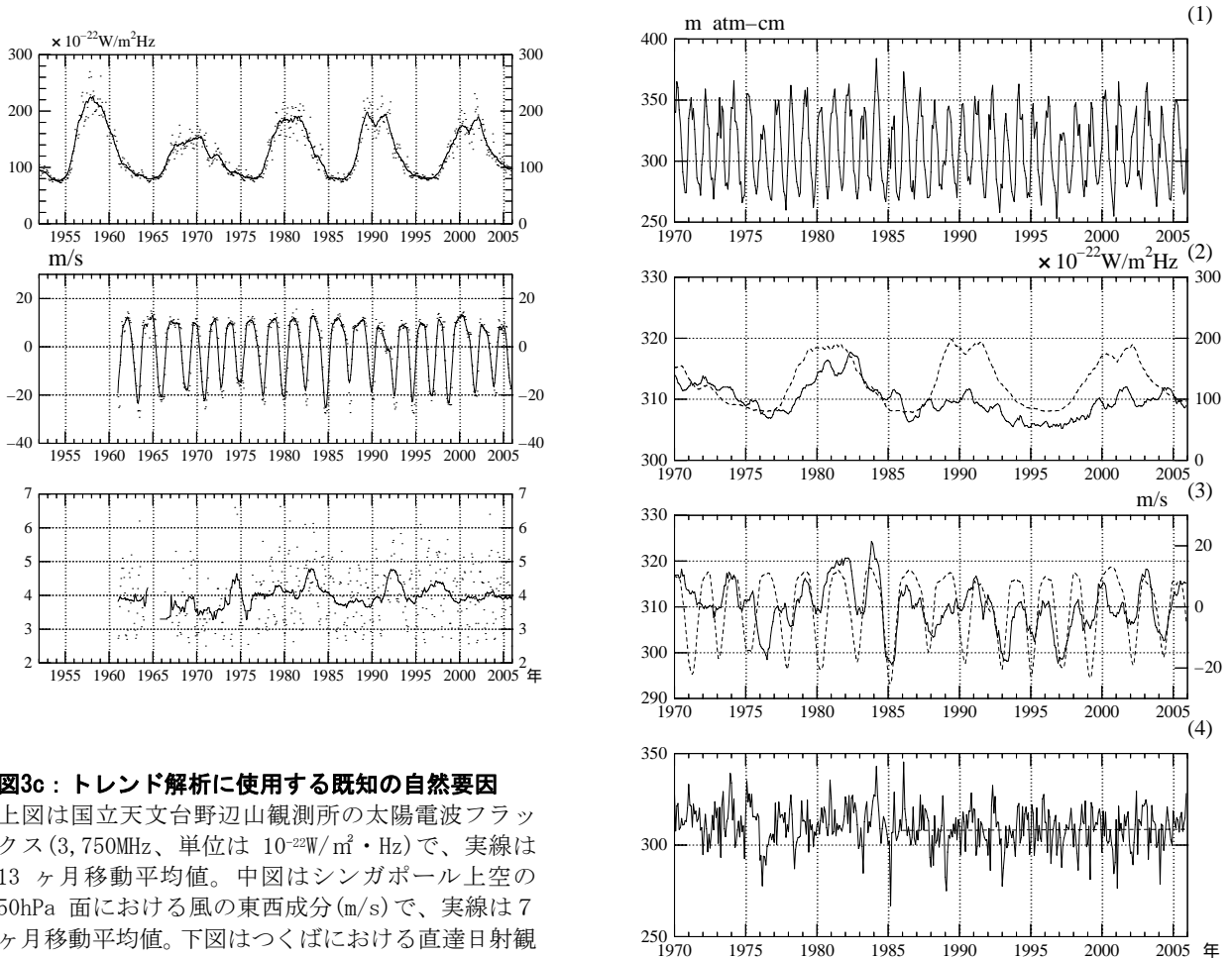


図3c：トレンド解析に使用する既知の自然要因

上図は国立天文台野辺山観測所の太陽電波フラックス(3,750MHz、単位は $10^{-22}W/m^2 \cdot Hz$)で、実線は13ヶ月移動平均値。中図はシンガポール上空の50hPa面における風の東西成分(m/s)で、実線は7ヶ月移動平均値。下図はつくばにおける直達日射観測から評価した大気の混濁係数で、実線は13ヶ月移動平均値。

図3d：つくばにおけるオゾン全量のトレンド解析例

(1)月平均値、(2)月平均偏差の49ヶ月移動平均値(太線)と太陽電波フラックスの13ヶ月移動平均値(破線)、(3)月平均値から季節と太陽活動の影響を取り除いた時系列の13ヶ月移動平均値(太線)とQB0の7ヶ月移動平均値(破線：時間ラグを設定)、(4)季節変動、太陽活動及びQB0の影響を除去したオゾン全量時系列(太線)と最近20年間の直線トレンド(破線)。