

3. 環境問題における大気化学

中 根 英 昭*

1. はじめに

最近、環境問題と政治、環境問題と研究の関係について考えさせるニュースが紙面ににぎわしている。米国の京都議定書を批准しようとせず、温暖化研究の推進を提案していること、逆に、欧州が日本に譲歩して、0.6%しか認めていなかった「森林吸収分」を3.9%認めると提案し、最終的にこの線で合意に至ったことなどである。森林を含む陸域生態系がどれだけ二酸化炭素を吸収するかは、炭素循環にとって、ひいては地球温暖化問題にとって重要である。ここまでは、研究と環境問題の関係についての話である。ところが、「森林吸収分」が0.6%分しか認められない場合と比較すると、3.9%認められる場合には、陸域生態系による炭素固定に関する研究の予算が増加することが予想される。これは関連する研究にとって大きなインパクトを与える話である。逆に、オゾン層破壊の問題については、化学、力学、放射が結合した研究が展開されるようになり、研究としては佳境に入ってきているにもかかわらず、また、オゾン層の回復は未だ確認されていないにも関わらず、世界的にみても、オゾン層破壊問題単独では研究予算の確保が困難な情勢となっている。「環境の時代」と呼ばれる21世紀にあっては、深刻な環境問題に関係のある学問は、基礎科学的色彩が強かろうが応用科学的であろうが、否応なく環境問題(及びその盛衰)と関係を持たざるを得なくなる。

ここでは、大気化学が、地球温暖化、酸性雨、オゾン層破壊等の環境問題とどう関わり、21世紀を生き抜いて行くかについて考えてみる。

2. 大気化学と環境問題

私が大学に入学した1970年頃には、「大気化学」とい

う言葉はなかったと思う。現在も大気化学の研究手法の基礎となっている科学—化学、物理、数学、もう少し詳しく言えば、物理化学(光化学)、分析化学、流体力学、情報科学—はもちろん存在した。また、成層圏大気化学のまさに生みの親(母体という意味で母親と言っておこう)とも言うべき地球物理学(特に、超高層大気物理学、気象学)も存在した(第1図参照)。

大気化学の研究の「種」を与え、その研究の経済的基盤のかかなりの部分を担ってきたという意味で、環境問題は大気化学の「父親」のような役割を果たしてきた(最近では父親像も崩れ、役割も変化してきているが)。この面から1970年頃を振り返ると、都市大気汚染・光化学スモッグの問題は深刻であり、そのメカニズムの研究が本格的に始まった。他方、1970年代始めに、成層圏超音速旅客機(SST)の問題がきっかけとなって「成層圏大気化学」が誕生し、成層圏オゾン層破壊問題を通して成長した。その後、南極オゾンホール発見以前に、「オゾン層破壊のメカニズムは分かった。」と考えられた時期があり、成層圏大気化学の基礎の上に立って、対流圏へとフィールドを拡大する動きが出てきた。また、光化学スモッグの研究の基礎の上に立って、地球環境問題に取り組もうとする動きも出てきた。この2つの研究の流れが、欧州における対流圏オゾンの増加という格好のターゲットを得て、「対流圏大気化学」として発展してきた。最近では、対流圏大気化学の主要な研究対象地域は欧州からアジアに移ってきたように見える。

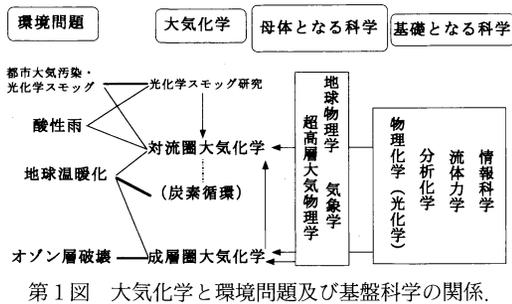
上のような経緯から、大気化学は、まさに地球物理学を中心とする科学を母親とし、環境問題を父親として生まれた科学であると言える。

3. 環境問題が研究に対してとるスタンス

環境問題はその解決を要求する。従って、研究に対して次のようなスタンスをとる。

* 国立環境研究所, nakane@nies.go.jp

© 2002 日本気象学会



第1図 大気化学と環境問題及び基盤科学の関係。

まず、問題の発見—現象の把握(機構解明)—影響把握—将来予測—対策(技術開発, 政策提示), という流れを要求する。この時、影響の大きさを定量的に問う。例えば、「オゾン全量が1%減少すると皮膚ガンは〇%増加する」というように、である。また、早期に対策研究に移ることを要求する。従って、研究予算の重点を、現象把握から対策の方向に移して行こうとする。また、問題が解決に向かえば、分かっていないことがあっても「終わった」とする傾向が強い。このことについては、お互い様ではある。研究の側は、問題が解決していなくても、「研究としては終わった」と言うことがあるから。

4. 環境問題とつき合う大気化学の悩みと生活設計

環境問題という「父親」は大気化学という「子供」から見るといかにもつき合いにくい相手である。環境問題の研究の流れの中で次々と違う兄弟に違う仕事と小遣いを与える訳で、とても落ち着いて仕事ができない。無理に苦手な仕事を引き受けると、血や肉を作ってくれる学問という「母親」から引き離されるようである。しかも、共働きとは言うものの、現時点では「父親」の給料なしでは経済的に苦しい。

このような家族の中で、大気化学という子供は幸福であろうか? 幸福であろうとなかろうと、家族なのだから完全に独立するまではつき合っていくしかない、と私は思う。しかし、環境問題という父親の言うことを素直にきく長男(長女)のような成層圏大気化学と、父親とは複雑な関係にあって、母体となる学問(母親)に少々甘えている次男(次女)のような対流圏大気化学では悩みも生活設計も異なるようである。

いつもオゾン層問題という環境問題(父親)から小遣いを貰っていた成層圏大気化学という長男(長女)の悩みは、「父親が死んでしまうと飢え死にする(研究予算がなくなる)のではないか」というものである。

生活設計に対するアドバイスとしては、「もう少し自立して、父親以外の大人からも小遣いを貰えるようにしなさい。」が適当であろう。

光化学スモッグ問題という老いた父親からは小遣いも貰えず、温暖化叔父さんや酸性雨伯父さんからは子供と認知してもらえないため、なかなか小遣いが集まらないのでいつも飢えている次男(次女)ともいべき対流圏大気化学には、「父親と同じ考えの若くて元気な叔父さんを説得して、まとまった小遣いを貰いなさい。だけど、他のおじさんとも仲良くするのだよ。」というアドバイスが適当だろう。

5. 環境問題における対流圏大気化学のいくつかの道

対流圏大気化学の環境問題としての意義付けとして、地球温暖化問題解明への寄与を挙げることがある。対流圏大気化学が対象とする対流圏オゾンや対流圏エアロゾルが放射強制力を変化させることや、その不確実性が大きいということが理由である。確かに、エアロゾルが雲に及ぼす間接的影響は当面の大きなテーマである。ただ、発展途上国における大気汚染物質の排出については対策が進むと期待されるので、二酸化炭素と比べると温暖化への寄与は相対的に低くなって行くであろう。とは言っても、対流圏オゾンやエアロゾルの前駆物質の間では、既存の対策技術の普及で排出が抑えられる大気汚染物質の比重が下がり、森林火災のような発生源からの大気汚染物質の比重が増加してくることが予想されるので、対流圏オゾンやエアロゾルが確実に減少すると楽観することはできない。森林火災が温暖化によって増加するのか減少するのとも見極める必要がある。

広い意味での大気汚染物質が放出され大気組成が変化しつつあるという問題については、地球温暖化への寄与とならんで、大気組成が変わりつつあるというこの環境問題としての「怖さ」について、もっと強調しても良いのではないだろうか。つまり、

- (1) 酸性雨だけではなく、対流圏オゾンや各種エアロゾルの増加等の(セミ)グローバルな対流圏大気質の劣化の影響を明確にして、自立した環境問題として提起して行く、植物生態系に対する慢性影響の研究とタイアップすることが重要、ではないだろうか。また、(1)の1つの具体例であるが、温暖化問題との関連では、
- (2) 対流圏大気質の悪化と温暖化の正のフィードバック

クの評価, すなわち, 「地表付近のオゾンの増加は陸上植物の光合成活性を低下させ, 光合成に対するCO₂の施肥効果を打ち消し, 地球温暖化を進める。また, 気温の上昇は土壌からのNOや揮発性有機化合物(VOC)の放出量を増加させ, 対流圏オゾンを増加させる(秋元, 2000).」という仮説の検証,

は興味深い研究対象である。さらに,

- (3) 人間活動の盛んな地域の気塊中のバックグラウンド対流圏オゾン濃度は, 産業革命以前の10ppbvから現在の40ppbv以上にまで増加している。しかも寿命が短い。それならば, 窒素酸化物や炭化水素類の抑制によって対流圏オゾンを減少させることによって, 温暖化対策にも貢献できる可能性がある。

これは, 「対流圏エアロゾルが増えると温暖化が緩和される」, というシナリオが今後の大気汚染対策によって有効でなくなる時に, 新たな希望をもたらす。この可能性については, 次のような解析が伴うことによって説得力が増す。

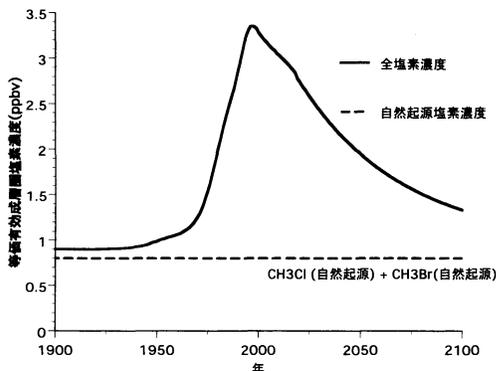
- (4) 対流圏オゾンを減少させる対策をとることによる温暖化緩和効果の総合評価や, (セミ)グローバルな総合的な環境改善効果を評価するような研究を立ち上げる。例えば森林火災の抑制の効果は, 対流圏オゾンの減少, エアロゾルの減少, 森林の保全, 森林の老齢化をもたらす。これらの効果及び森林火災の抑制に用いたエネルギー消費を総合すると, 温暖化をどれだけ緩和するであろうか, また, (セミ)グローバルな大気質の改善の環境的価値はCO₂換算では何トン程になるのであろうか, というような解析を行う。

6. 21世紀の成層圏大気化学研究

6.1 オゾン層破壊についてのシナリオと問題の捉え方

21世紀の成層圏大気化学研究の展開は, オゾン層が期待どおり回復に向かうのか, それ程回復しないかによって大きな影響を受けるであろう。成層圏の塩素濃度は1997年をピークとして減少に転じており, 2050年頃には1980年レベル(オゾンホールができ始めた年)まで戻ると予想されている(第2図)。このような状況の中で考えられるシナリオには次のようなものがある。

- (1) 北極域のオゾン層は年々変動が大きいため回復



第2図 成層圏における等価有効塩素濃度の推移及び将来シナリオ(WMO, 1999). 「等価」とは, 臭素濃度を等価のオゾン破壊をもたらす塩素濃度に換算したことを表す。「有効」とは, フロン等の有機化合物の形ではなく, HCl, ClONO₂やClOのようなオゾン層破壊に使われやすい無機化合物の形の塩素濃度を表す。

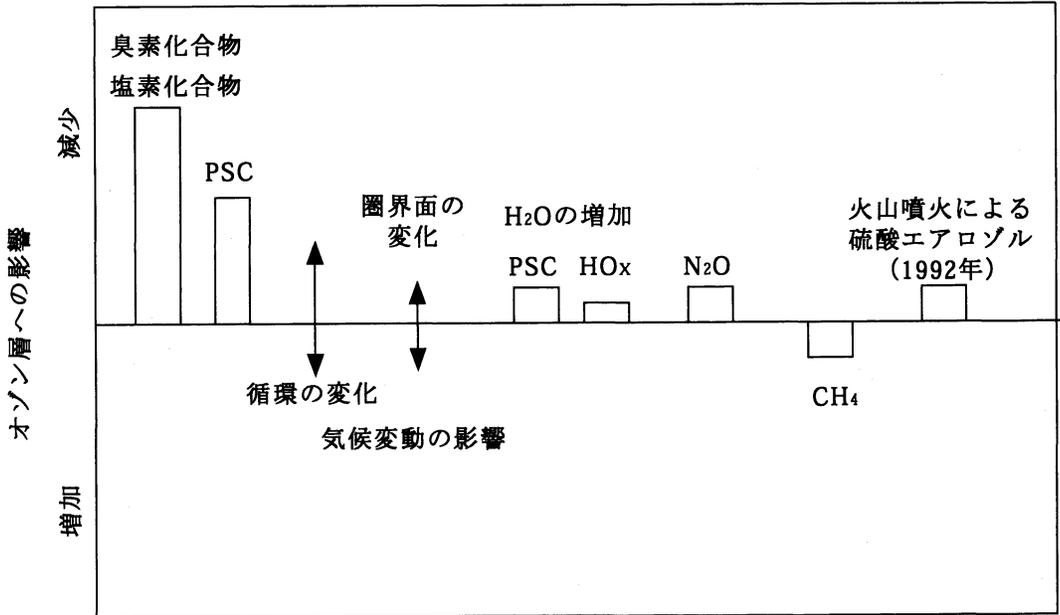
の確認は遅れるが, 21世紀当初から中低緯度のオゾン層, 南極オゾン層は順調に回復に向かう。(ハロカーボンの規制の効果についての説明責任が果たせたとして, オゾン層破壊問題は解決する)。

- (2) 21世紀はじめの10数年にわたって, 春季の極域オゾン層の回復の兆しがなかなか現れず, 極域の影響を受けた中緯度のオゾン層回復も芳しくない。しかし, 「純粋な」中緯度や低緯度ではオゾン層は順調に回復する(温暖化による極域成層圏の気温低下が原因でオゾンホールが強くなっているというので, 温暖化影響研究としてのオゾン層研究がしばらく盛んになる)。
- (3) 中緯度や低緯度におけるオゾン層も回復が思わしくない(フロン問題以外のオゾン層問題が出てくる。気候変動に伴う循環の変化や窒素酸化物, メタンなどの影響が議論される)。

このようなシナリオと組み合わせると, 次のようなオゾン層の変動要因がからんで問題を複雑化させる。

- 気候変動の敏感なセンサーとしての成層圏・中間圏, 成層圏と対流圏の気候変動のフィードバックなど, 気候変動の観点から成層圏が注目される。
- 成層圏の水蒸気濃度の増加トレンドが大きな問題になってくる。(観測されている水蒸気の増加は, どうやって大循環モデル(GCM)で再現できるだろうか。メタンの増加だけでは説明できないことは分かっているが。)

1980年を基準とした2000年におけるオゾン減少への寄与



第3図 成層圏オゾン減少への種々のプロセスの寄与についての模式図。左から、フロン、ハロン等の塩素・臭素化合物の増加(標準的な極域気温とバックグラウンド硫酸エアロゾルを前提とする)、極渦内気温低下による極域成層圏雲(PSC)の増加(塩素濃度3 ppbvを前提)、気候変動が引き起こす循環の変化、圏界面高度の変化、水蒸気の増加によるPSCの増加、水蒸気の増加によるHO_xの増加、N₂Oの増加によるNO_xの増加(中部成層圏オゾンは減少、下部成層圏・極域春季オゾンは増加)、メタンの増加、火山噴火による成層圏エアロゾルの増加、によるオゾン減少に対する寄与。それぞれの効果の間に相互作用、重なりのあることに注意。この図はあくまでも研究の方向性を提案するための模式図であって、実際のオゾン減少への寄与を表すものではない。

・上の様々なケースと組み合わせられて、太陽活動、火山噴火、流星塵(巨大極域成層圏雲(PSC)の核として重要である可能性が指摘されている)などの自然変動が注目される。火山噴火の影響は思ったよりも大きいようで、ピナツボ火山噴火後のオゾン減少の影響がなくなるのに数年間かかり、1990年代半ばには見かけの「オゾン層の回復」が見られた。現在は非常に成層圏エアロゾルの少ない状態になっており、もし、近い将来ピナツボ級の火山噴火が起ると、相当激しくオゾンが減少するであろう。

このような状況を、単純に「まだまだ分からないことはいっぱいあるからもっと研究しなければ。」というように表現するのは、環境問題の側からの支持は得られないであろう。そこで、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)に習って、「様々な要因のオゾン減少への寄与」の図を作ってみてはどうだろうか(第3図)。オゾンの減少要因としての寄与の大きさと不確実性を

明らかにすることによって、オゾン層を守るという観点からの、個々の研究の位置づけがはっきりしてくる。温暖化影響によるものをくりだしてCO₂の増加によるオゾンの減少(増加)という表現も可能かもしれない。

いずれにしても、どうしてこのような図が今まで作られていなかったのだろうか。「オゾン層破壊問題=フロン・ハロン問題」という図式が自明だという固定観念が我々を支配していたのであろう。この図において塩素・臭素化合物の寄与は今後相対的に小さくなっていく。気候変動を含む「その他」の部分が重要になっていく。このような図を定性的な図から定量的な図にして行くことが、「オゾン層破壊問題から見た21世紀の成層圏大気化学」の一つの流れではないだろうか。

6.2「化学か力学か」から「化学と力学の結合」へ
大気の化学的組成の変化が放射強制力の変化をもたらす、気候の変動とそれに伴う循環場や極渦等の成層

圏気象の変化をもたらす、成層圏化学の変化をもたらす、それがまたフィードバックして行く。なぜ我々はこれまで、化学か力学か、といつも大きな声で議論していたのだろうか。成層圏大気化学というのは始めから化学・力学・放射の結合の上に成り立っていたのではないか。

オゾンの観測データには、気候値としてのオゾンの分布と輸送の効果が相まってもたらされるオゾンの変動がまず見える。いや、ほとんどそれしか見えないのが普通である。オゾンの気候値としての分布は化学・放射・力学が結合して決まるが、オゾンの変動を観測し、その変動を理解することは専ら力学屋さんの仕事であった。逆に、化学屋さんには、フロン・ハロンの増加によるオゾン減少を捉えることが本質であるから、輸送によるオゾンの変動は除去すべきゴミであったが、このゴミを取り除くのは至難の業であった。この「化学か力学か」の対立が頂点に達したのが「南極オゾンホール」の「原因」解明においてであった。この「戦い」の結果は歴史的には「化学説の勝利」とされたが、オゾンホールの形成には極渦とそれがもたらす低温という極めて力学的な条件が不可欠である。

1990年代の北極オゾン層破壊研究の顕著な成果の一つが「MATCH法による化学的オゾン破壊速度（および量）の見積り」である（例えば、Rex *et al.*, 1997）。これは、オゾン濃度を観測した気塊と同じ気塊のオゾン濃度を数日後に再び観測し、オゾン濃度（混合比）の差から「輸送の効果を排除した化学的オゾン破壊速度」を求める方法である。この方法では、トラジェクトリーという極めて「力学的な」道具によって「同一気塊」を探していることが実に教訓的である。

さらに今、気候変動とオゾン層破壊の関係がホットな話題になり、成層圏で「水」という極めて気象学的であり化学的でもある物質の増加が問題になってきた。歴史的な「化学か力学か」という鋭い対立も、「化学と力学の結合」が本質的に重要であるという現在の認識も、オゾン層破壊という深刻な環境問題と、それに対する基礎科学にまで立ち戻った大気科学の取り組みがもたらした、人類の認識の進歩の一断面なのであろう。

7. 21世紀の大気化学プロジェクト—夢物語の実現と一点突破—

この20年の間にも研究プロジェクトの盛衰をいやと言うほど見てきた。21世紀全体を見通した予言など不

可能である。大気化学に近い分野の近い将来については、地球温暖化問題の解決に寄与する研究については、かつての夢物語が実現する可能性もゼロとは言えない。夢物語とは、整合性ある総合的な観測（衛星・地上・航空機観測のバランス、長期観測と集中観測のバランス）、モデル研究と観測の良好な相互作用、それらを支える予算と人的資源を伴い、研究目的に掲げたことを本当にやりきれるような研究である。そのような事態が起こった時には、研究リーダーの責任は重い。迷わず、焦点ボケにせず、責任を全うして欲しいものである。

温暖化ビッグプロジェクトが立ち上がるような事態が生じた場合、裾野が対流圏化学や成層圏化学まで広がるのかどうか。裾野が広がりすぎたプロジェクトはプロジェクトとは言えないので、予算や人的資源について過剰な期待はすべきではないだろう。しかし、温暖化研究で得られるデータは大気化学全般にとって極めて有用であるに違いない。これには大いに期待したい。

衛星プロジェクトによる一点突破は可能性の高い戦略である。改良型大気周縁赤外分光計（Improved Limb Atmospheric Spectrometer : ILAS）の成功は日本の成層圏大気化学研究を大きく前進させた（笹野, 2001）。今後はILAS-II, 超伝導サブミリ波リム放射計（Super conducting Sub millimeter-wave Limb-emission Sounder ; SMILES）、GCOM（Global Change Observation Mission）搭載センサーというように、次々と日本の衛星センサーの打ち上げが予定されている。自前の衛星データと、次に述べる自前のモデル研究が結合すれば、大きな発展が見込める。

東大気候システム研究センター/国立環境研究所大循環モデル（CCSR/NIES GCM）等の三次元モデルによる一点突破もあり得る。21世紀の最初の10年間には、欧米の衛星、日本の衛星が次々と大気化学データを取ってくれる。温暖化研究からもデータが出てくる。データ解析にモデルを使いたいという要求は強くなる一方である。モデルユーザーが自分でモデルを動かせる環境が整備されるならば、この分野は爆発的に発展する可能性がある。モデルの根幹を革新する研究者の必要性は言うまでもないが、モデルユーザーがモデルを使いやすい環境を整備するための人材が極めて重要になる。

地上からの長期観測や実験室研究、新しい測器による新しいデータの取得は、一定の確率でヒットが出る

ものだから長期的視野でサポートし、「好きな人」が研究できる環境を用意することが必要である。この場合も、研究の性質に対応したモデル研究との結合が成果を大きなものにする。

8. プロジェクトの進め方

これまでの考察と私自身の反省も含めて、これからのプロジェクトの進め方について堅実な提言をするならば次の二点になる。

- ・一点突破と長期的視野での布石をうまく組み合わせれば、環境問題における大気化学研究の将来は暗くない（と思いたい）。
- ・「我が国だけで」、あるいは「我がプロジェクトだけで」、環境問題をすべて解決しようとする背負い込みをしない。国際的な科学的知見の集積に、なるべく良質の役割を果たすこと、環境問題に的確な提言をできるようにしておくことで十分である（と思うようにする）。policy maker も市民も世界中から瞬時に情報を取ってくる時代だから、格好をつけても始まらない。

以上は持続的発展のシナリオ下での話であるが、大気化学研究者のポストの数に制約がある限り、これが現実的であろう。

ポスト数の制約をうち破る可能性は、先にあげたようなビッグプロジェクトの出現が一つ、もう一つはポストドク等のフェローが独立して会社を作り、環境研究を行うようになることである。そのような会社にとっても、大気化学が魅力的な研究対象であって欲しいものである。

9. おわりに

シンポジウム企画担当者から、「これからの研究を担う若手をお願いしているのでよろしく」という、年齢を考えるとポジティブかネガティブがよく分からないような出演要請を、極めてポジティブに受け取ってシンポジウムの講演を引き受けてしまった。そして、悩

ましいゴールデンウィークを過ごす羽目になった。それは、私自身、「21世紀の大気化学はこうなる」と確信を持って言う用意がなかったからである。この原稿は、多くの大気関係者のご意見を直接、間接にうかがいながらシンポジウムの前後に考えたことをまとめたものである。ご意見を頂いた方々にお礼を申し上げます。

悩ましさは今も変わらない。ただ、大気化学は、環境問題解決（解明）に大いに役に立つか、「知りたい」という欲求（研究者自身の、そして市民の）を大いに満たすものであるべきだと考えるに至った。これは突き詰めると、人類のエゴに忠実であれ、ということである。人類の「生き残りたい」というエゴ、人類が「自らと自らの生きる世界について、過去・現在・未来を知りたい」というエゴ、この二つの、おそらくは同一の根を持ったエゴに忠実であれ、ということである。この「同一の根を持った二つのエゴ」の関係と内容について、これからも考え続けて行きたい。

参考文献

- 秋元 肇, 2000: 対流圏オゾン・クロージングとオゾン・二酸化炭素フィードバック, 日本の地球大気化学研究 1989-1999—10年間の総括と今後の研究戦略—, 地球科学技術フォーラム/地球変動研究委員会 アジア太平洋大気組成変動予測グループ, 177-178.
- Rex, M., N. R. P. Harris, P. von der Garthen, R. Lehmann, G. O. Braathen, E. Reimer, A. Beck, M. P. Chipperfield, R. Alfer, M. Allaart, F. O'Connor, H. Dier, V. Dorokhov, H. Fast, M. Gil, E. Kyro, M. G. Molyneux, H. Nakane, J. Notholt, M. Rummukainen, P. Viatte and J. Wenger, 1997: Prolonged stratospheric ozone loss in the 1995-96 Arctic winter, *Nature*, **389**, 835-838.
- WMO, 1999: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998, WMO Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 44, Chapter 11, Figure 11-4.
- 笹野泰弘, 2001: ILAS による極域成層圏衛星観測プロジェクトの10年, *天気*, **48**, 452-460.