

システム技術開発調査研究

16 R 7

気候モデルと結合した3次元化学輸送モデルによる
予測計算の高精度・高次元化に関する調査研究

報 告 書

要 旨

平成17年3月

財団法人 機械システム振興協会

委託先 財団法人 航空機国際共同開発促進基金

KEIRIN



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

目 次

序

はじめに

1	調査研究の目的	1
2	調査研究の実施体制	3
3	調査研究成果の要約	7
3.1	初期値作成手法の調査	7
3.1.1	温位と相当緯度による初期値作成	7
3.1.2	トラジェクトリー・マッピング（流跡線解析による分布図作成）	15
3.1.3	データ同化手法	21
3.2	気候モデルとの結合方法の検討	24
3.2.1	気候モデルとのデータ交換	24
3.2.2	座標変換・補間の手法	27
3.3	3次元化学輸送モデルによる予測の検証方法の調査	32
3.3.1	観測データとの比較	32
3.3.2	モデル間の比較	44
4	調査研究の今後の課題及び展開	50
4.1	調査研究結果の概要	50
4.2	今後の課題と展開	53
[資料編]		
参考資料 1	参考文献	54
参考資料 2	用語集	55

序

わが国経済の安定成長への推進にあたり、機械情報産業をめぐる経済的、社会的諸条件は急速な変化を見せており、社会生活における環境、防災、都市、住宅、福祉、教育等、直面する問題の解決を図るためには、技術開発力の強化に加えて、ますます多様化、高度化する社会的ニーズに適応する機械情報システムの研究開発が必要であります。

このような社会情勢に対応し、各方面の要請に応えるため、財団法人 機械システム振興協会では、日本自転車振興会から機械工業振興資金の交付を受けて、経済産業省のご指導のもとに、機械システムの開発等に関する補助事業、新機械システム普及促進補助事業等を実施しております。

特に、システム開発に関する事業を効果的に推進するためには、国内外における先端技術、あるいはシステム統合化技術に関する調査研究を先行して実施する必要がありますので、当協会に総合システム調査開発委員会（委員長 放送大学 副学長 中島尚正 氏）を設置し、同委員会のご指導のもとにシステム技術開発に関する調査研究事業を民間の調査機関等の協力を得て実施しております。

この「気候モデルと結合した 3 次元化学輸送モデルによる予測計算の高精度・高次元化に関する調査研究報告書」は、上記事業の一環として、当協会が財団法人航空機国際共同開発促進基金に委託して実施した調査研究の成果であります。

今後、機械情報産業に関する諸施策が展開されていくうえで、本調査研究の成果が一つの礎石として役立てば幸いです。

平成 17 年 3 月

財団法人機械システム振興協会

はじめに

財団法人航空機国際共同開発促進基金は、平成16年度調査研究の一つとして、日本自転車振興会の機械工業振興資金の交付を受けた、財団法人機械システム振興協会からの受託事業「気候モデルと結合した3次元化学輸送モデルによる予測計算の高精度・高次元化に関する調査研究」を実施した。本報告書は、その調査報告書である。

人間の社会経済活動に伴う大気組成の変動が気候に影響を与える、いわゆる地球温暖化の問題に対して、京都議定書が発効し、世界規模で地球温暖化防止に取り組む枠組みが作られ、その活動が本格化している。

地球温暖化の問題とは、大気中の微量化学成分のうち、二酸化炭素(CO₂)、水蒸気(H₂O)、メタン(CH₄)、亜酸化窒素(N₂O)、オゾン(O₃)等のいわゆる温室効果気体が地表および大気からの赤外線放射を吸収するため、その増加に伴って地表付近の気温が上昇することである。

大型精密機器システムにはこのような問題が内在し、特に、その代表である航空機のエンジン排気には、二酸化炭素、水蒸気が含まれているので、これらは地球温暖化に影響する。また、エンジン排気に含まれる窒素酸化物(NO_x)は、亜音速機が飛行する高度10 km程度の対流圏では、大気中の光化学反応によって温室効果気体であるオゾンを生成し、温暖化を促進させる。

一方、次世代の超高速輸送機と期待される超音速航空機は、高空を飛行する際、エンジン排気を直接成層圏(高度20 kmほどの高高度)に排出するため、その中の窒素酸化物がオゾン層に著しい影響を与えることが指摘されている。このときの最大の問題点は、成層圏における窒素酸化物はオゾンを減少させ、太陽からの有害な紫外光に対する防衛が弱まり、人体に悪影響を与えることである。

このため本調査研究では、これまでの次世代航空機等開発調査(超音速輸送機開発調査)に係わる環境影響調査、「大型精密機器システムが地球温暖化に及ぼす影響予測の化学輸送モデル開発に関する調査研究」において実施してきた技術をベースに、特に機械システムと深い関係を有する航空機産業が、地球温暖化問題に適確に対応することにより、航空機の国際共同開発の促進に寄与するとともに、機械システムの振興に寄与する事を目的とし、「気候モデルと結合した3次元化学輸送モデルによる予測計算の高精度・高次元化に関する調査研究」を実施した。

実施に際しては、当基金内に「化学輸送モデル開発調査委員会」を設け、その委員会において調査方針・内容等を確認しつつ、調査を実施した。

この調査にあたっては、事業の実現と推進にご尽力を賜った経済産業省および日本自転車振興会ならびに財団法人機械システム振興協会の関係者各位に厚く御礼申し上げます。

平成17年3月

財団法人 航空機国際共同開発促進基金
会 長 佐 藤 文 夫

1 調査研究の目的

人間の社会経済活動に伴う大気組成の変動が気候に影響を与える、いわゆる地球温暖化の問題に対して、京都議定書が発効し、世界規模で地球温暖化防止に取り組む枠組みが作られ、その活動が本格化している。

地球温暖化の問題とは、大気中の微量化学成分のうち、二酸化炭素(CO_2)、水蒸気(H_2O)、メタン(CH_4)、亜酸化窒素(N_2O)、オゾン(O_3)等のいわゆる温室効果気体が地表および大気からの赤外線放射を吸収するため、その増加に伴って地表付近の気温が上昇することである。

大型精密機器システムにはこのような問題が内在し、特に、その代表である航空機のエンジン排気には、二酸化炭素、水蒸気が含まれているので、これらは地球温暖化に影響する。また、エンジン排気に含まれる窒素酸化物(NO_x)は、亜音速機が飛行する高度10 km程度の対流圏では、大気中の光化学反応によって温室効果気体であるオゾンを生成し、温暖化を促進させる。

一方、次世代の超高速輸送機と期待される超音速航空機は、高空を飛行する際、エンジン排気を直接成層圏(高度20 kmほどの高高度)に排出するため、その中の窒素酸化物がオゾン層に著しい影響を与えることが指摘されている。このときの最大の問題点は、成層圏における窒素酸化物はオゾンを減少させ、太陽からの有害な紫外光に対する防禦が弱まり、人体に悪影響を与えることである。

このような状況下にあって、民間航空機の開発・生産は国際共同事業が趨勢であり、今後わが国が国際共同事業において主体的立場を確保し、戦略的産業である航空機産業の振興、ひいては機械システムの振興に資するには、航空機の技術開発とともに、航空機が地球温暖化に及ぼす影響を予測するための世界と対等以上の技術を保有することが必要である。その一つは、上記問題に対処し得る化学輸送モデルの調査研究である。

地球温暖化の程度を評価するためには、気候モデルが用いられる。気候モデルの基礎をなす大気大循環モデル(いわゆる気象予報の数値計算モデル)では、これら温室効果気体の濃度は既知なものとして外部から与えるのが普通である。しかし、現実の大気中では、オゾンやメタンなどは光化学反応によって生成・消滅し、その反応速度は気温によって変わるため、温暖化が進んだ状態ではその時の気温によって反応速度を計算し、生成気体成分の濃度を計算する必要がある。

また、これらの温室効果気体の多くは反応時定数が長いため、大気大循環が変わるとそれによって濃度分布が変わる可能性もある。これらの効果も含めて温暖化予測を行うためには、大気中の光化学反応と大気大循環による物質輸送を模擬し、各成分ごとの連続の式を解く化学輸送モデルを用いて、大気大循環モデルと結合させた計算を行うこと

が不可欠である。

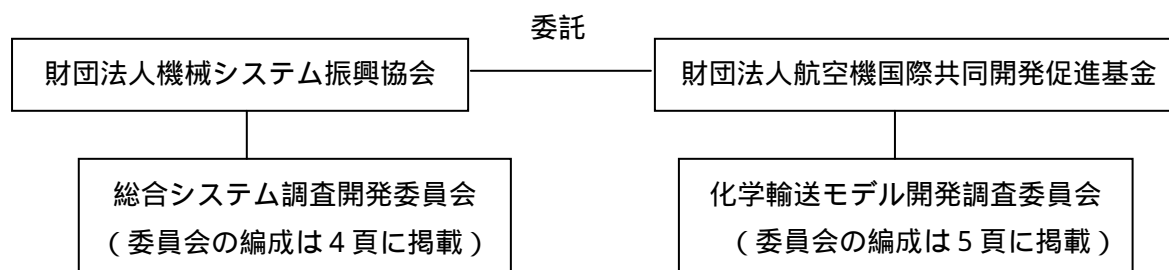
以上のような背景に基づき、本調査研究の目的と効果は次のとおりである。

- (1) 対流圏および成層圏における亜音速航空機と超音速航空機（超高速機）による温室効果気体の影響を調査し得る化学輸送モデルの調査研究を行なう。すなわち、航空機エンジン排気による対流圏オゾンの増加は、二酸化炭素の増加とは違って、地球上の場所と時間で著しく異なる（航空機が頻繁に飛ぶ高度と経路でオゾンの増加が大きい）ので、それらを正確に把握できる化学輸送モデルを開発し、オゾン増加量の全地球的分布を計算することが必要である。
- (2) 化学輸送モデルの調査研究は、亜音速機の開発に対して次の効果を有する。
 - ・当該モデルにより、航空機が排出する各種物質の環境への具体的影響度を明らかにすることにより、今後、航空機エンジン排気、及び航空機運用方法に対する環境基準の設定・改訂にあたって、主導的な役割を果たすことが出来ること。
 - ・現在行われている「環境適応型小型航空機用エンジン開発」を始め、今後開発されるエンジン並びに航空機の設計に際して、環境影響度の事前検証に当該モデルによる解析が有効に活用されること。
- (3) 将来、超音速航空機（超高速機）の国際共同開発にあたって、亜音速機とは異なった高度、運用形態で飛行するため、さらなる評価、環境基準制定が必要となり、本「化学輸送モデル調査研究」の成果を有効に活用した影響評価が必須である。
- (4) 本化学輸送モデル調査研究では、窒素酸化物等の温室効果気体を含む数 10 種類の物質の濃度を精度良く計算できる数値モデルを検討するので、航空機のみならず、機械全般が排出する物質の影響をも予測可能であり、その他の機械システムの性能向上にも寄与し得る。

以上のことから、本調査研究における成果は、日本が航空機産業において国際的に先導的な能力を持つことを可能とするものである。

2 調査研究の実施体制

財団法人航空機国際共同開発促進基金に「化学輸送モデル開発調査委員会」を設置し、その委員会において調査方針・内容等を確認しつつ、調査研究を実施する。



2.1 調査委員会の構成

委員会のメンバーは、大学2名、国立研究所等2名、航空機関連業界7名、その他の有識者1名の合計12名の専門家で構成した。

委員長には学会の第1人者である東海大学総合科学技術研究所久保田教授にご就任頂き、委員会の運営全般にわたり多大のご教示を賜った。

2.2 調査委員会の実施

計4回の委員会を実施した。

第1回委員会

平成16年7月27日

1. 本調査研究の主旨および計画概要の紹介と意見交換
2. 委員会の活動計画について

第2回委員会

平成16年10月29日

1. 本調査研究に関する情報交換

第3回委員会

平成17年1月14日

1. 本調査研究に関する中間報告

○第4回委員会

平成17年2月25日

1. 平成16年度調査研究報告書について

総合システム調査開発委員会委員名簿

(順不同・敬称略)

委員長	放送大学 副学長	中 島 尚 正
委 員	政策研究大学院大学 政策研究科 教授	藤 正 巖
委 員	東京工業大学 大学院総合理工学研究科 知能システム科学専攻 教授	廣 田 薫
委 員	東京大学 大学院工学系研究科 助教授	藤 岡 健 彦
委 員	独立行政法人産業技術総合研究所 産学官連携部門 コーディネータ	太 田 公 廣
委 員	独立行政法人産業技術総合研究所 産学官連携部門 シニアリサーチャー	志 村 洋 文

2.3 海外調査

(1) 調査目的

本調査研究の一環として、独国 Max-Planck 気象研究所の研究者を訪問し、聞き取り調査を実施することにより、航空機のエンジン排出物が温室効果気体の濃度を与える影響を予測するための 3 次元化学輸送モデルに関する情報を入手し、本調査研究に反映させる。

(2) 訪問先

独国ハンブルク市 Max-Planck 気象研究所

(3) 期間

平成 17 年 2 月 9 日～ 2 月 13 日

3 調査研究成果の要約

3.1 初期値作成手法の調査

3次元化学輸送モデルを用いて予測計算を行なう場合、大気微量成分濃度の初期値を与える必要がある。従来、3次元化学輸送モデルの初期値としてしばしば用いられてきたのは、子午面分布をそのまま経度方向に一樣な初期値として与える方法であるが、現実の大気はプラネタリー波などの影響で経度方向に不均一性があり、東西方向にまったく一樣という仮定は非現実的である。このような非現実的な初期値から計算を始めた場合、長期の時間積分の後には現実的な分布が再現されることが多いものの、3次元化学輸送モデルではかなりの計算機資源を必要とすることになり非効率的である。

また、特にオゾン太陽放射を吸収し、より下層の大気に入射する太陽放射の強度に影響を与えたり、多くの化学種と化学反応したりすることによって、オゾン自体や他の化学種の濃度分布に影響を及ぼしやすいことから、現実に即したオゾンの初期値から計算を始めることが重要である。

3次元の気象データ(温度や風の分布)については、各気象機関から毎日得ることができるが、3次元化学輸送モデルに必要な全球の化学微量成分のデータは、未だ十分とはいえない。3次元の観測値が稠密に得られている化学種はなく、鉛直積分値の全球分布や、いく地点かの高度分布が観測されることが多い。そのような数少ない観測データをもとにして、微量成分濃度の3次元分布を得る手法について調査した。具体的には、相当緯度等の指標を用いて3次元空間に展開する方法や、気塊の移動を追跡するトラジェクトリー解析を用いてより多くの観測データをマッピングする手法について調査・検討を行なった。

3.1.1 温位と相当緯度による初期値作成

(1) 概要

Laryら(1995)¹⁾は、相当緯度と温位を座標にとった空間に微量成分濃度をマッピングするELI法(Equivalent PV Latitude Initialization)を開発した。

断熱状態で空気塊は等温位面に沿って動くので、鉛直座標として温位を使えば、ある気象状態における空気塊が異なる気象状態のもとでも同じ等温位面上にあることが期待でき、微量成分の分布の初期化に使うことができる。

渦位(3節参照)は精度のよい物質トレーサーとみなせるので、緯度と経度の代わりに水平座標として使うことができる。特に、成層圏下部では等温位面上での渦位とオゾンの混合比の間にはよい相関がみられるので、渦位を水平座標として使えば有効である。

Laryらはさらに、渦位を正規化した相当緯度を用いることを提案した。相当緯度とは、等温位面上の渦位コンターに囲まれる領域の面積をもとに渦位の値を $-90^{\circ} \sim +90^{\circ}$ に正規

化したものである。相当緯度を緯度の代わりに用いると、高度や気象条件が異なる場合であっても、渦位とオゾン濃度の値を対応づけることができる。

(2) 温位

温位 potential temperature は、空気塊を断熱的に標準気圧にしたときに、その空気塊が取るであろう温度である。通常 θ で表わされ、その定義は次のとおり。

$$\theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R}{c_p}} \quad (1)$$

ここで T は気温、 p は気圧、 p_0 は基準となる気圧で、通常は 1000hPa、 R は乾燥空気の気体定数（一般気体定数を空気の平均分子量で割ったもの = $287 \text{JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$ ）、 c_p は空気の定圧比熱（ = $1004 \text{JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$ ）である。

温位の鉛直分布は、大気の静力学的安定度と関係がある。水蒸気が不飽和のまま断熱的に上昇する気塊を考えると、その温位は不変に保たれる。それに対して大気の温位が高度とともに増加しているならば、上昇した気塊の温位は周囲の空気の温位よりも低く、したがって温度も低い。すると、気塊には下向きの力が加わることになり、上昇が妨げられる。逆に大気の温位が高度とともに減少している場合には、成層不安定であることを表わしている（図 3.1.1-1 参照）。

実際の大気中における温位分布の例を図 3.1.1-2 に示す。平均してみると温位は高度とともに増加していることがわかる。特に成層圏では等温位線が密集しており、非常に安定であることがわかる。これに対し、対流圏では温位の鉛直勾配が小さく、場所によっては不安定になりうることを示している。

ある一定の温位をもつ面を考え、その等温位面の上で物質の分布やその移動を検討することがある。これを等温位面解析（isentropic analysis）という。先に述べたように、断熱条件の下では空気塊の温位は不変であるから、その気塊は等温位面に沿って動くことになる。したがって、大気による物質の移動や拡散を考える際には、等温位面解析はたいへん有効である¹。

¹但し、等温位解析は大気が断熱的であるという仮定が満たされているときのみ有効であるから、個々のケースでは断熱性が破れていないかどうか十分に注意する必要がある。断熱性が破れる場合としては、例えば地表付近では、地面との摩擦や境界層内の混合で熱のやり取りがあるし、雲がある場所では水蒸気が凝結したり蒸発したりするため、潜熱の放出や吸収がある。このほか、10 日間以上の移動を追跡する場合には、放射による加熱・冷却が無視できなくなる。

(3) 渦位

渦位もしくはポテンシャル渦度 potential vorticity (PV と略すことが多い) と呼ばれる量は以下のように定義される。

$$PV = (\zeta_{\theta} + f) \frac{\partial \theta}{\partial p} \quad (2)$$

ここで ζ_{θ} は等温位面上での渦度であり、以下の式で表わされる。

$$\zeta_{\theta} = \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)_{\theta} - \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{\theta}$$

また、 f はコリオリ・パラメータ ($=2\Omega \sin \varphi$) で、 Ω は地球の自転角速度、 φ は緯度、 θ は温位、 p は気圧である。

渦位は、地球の自転及び渦管の伸び縮みまで考慮に入れた渦度と考えることができる。断熱、静力学平衡という条件の下では渦位は保存される。したがって、この量は気塊の移動を追跡するトレーサーとして利用することができる。

図 3.1.1-3 に示したのは、成層圏下部 (約 19km) にあたる温位 475 K の等温位面上における渦位の分布である。この図は、国立環境研究所が ECMWF (欧州中期気象予報センター) の解析データを用いて作成したものである。図の中で渦位の等値線が混んでいるところ (赤い線になっているところ) が極域の空気と中緯度の空気の境界、すなわち極渦の縁で、極夜ジェットと呼ばれる強い西風が吹いている。

(4) Lary らの論文の要約

成層圏オゾンの短期数値モデルのシミュレーションにおいて、適切なオゾンの初期値から計算を始めることは、重要なことである。いろいろな気象センターから 3 次元の温度、風の分布は毎日得られるが、この数値モデルに必要な全球の化学微量成分のデータは、現在、得られない。よって、適切な初期微量成分を得るために、渦位に相当する緯度 (φ_e) と温位 (θ) の座標に微量成分をマッピングする ELI 法 (Equivalent PV Latitude Initialization) を開発した。

断熱状態で空気塊は等温位面に沿って動くので、鉛直座標として温位を使えば、ある気象状態における空気塊が異なる気象状態のもとでも同じ等温位面上にあることが期待でき、微量成分の分布の初期化に使うことができる。

一方、渦位 (PV) は近似的な物質トレーサーとして大きな役割を果たすので、緯度と経度の代わりに水平座標として使うことができる。特に、成層圏下部では等温位面上での渦位とオゾンの混合比の間にはよい相関があることが知られている。しかし、渦位の絶対値は高度と気象状態に大きく依存するので、渦位を正規化した相当緯度 equivalent latitude (φ_e) を、渦位それ自体のかわりに水平座標として使えば有効である。この手法では、等温

位面上の渦位コンターに囲まれる領域の面積をもとに渦位の値を $-90^{\circ} \sim +90^{\circ}$ に正規化した相当緯度を緯度の代わりに用いるため、高度や気象条件が異なる場合であっても、渦位とオゾン濃度の値を対応づけることができる。 q_e の値は、等温位面上に与えられた渦位コンターに囲まれた部分の面積を考慮して計算される。

渦位によって再構成されたオゾンの総量は、初期の観測データセットでのオゾンの総量とは異なってしまふ。渦位の代わりに q_e を使うと、等温位面上での座標値の範囲が、初期の状態と再構成された状態の両方で等しくなるため、微量成分の値の範囲も同じになることが保証される。

ELI 法による微量成分の初期化の方法は、(例えば、主に大気の動きによって濃度が左右されるような)長寿命の化学種に最も適している。もちろん、より速く反応する成分の場合には、化学が大変重要な役割を果たす。化学反応の速度は、その場所の温度、圧力、放射のようないくつかの要因によって決まる。もし、モデル計算の初期状態の温度と放射が、初期の微量成分データに適用されたものとかかなり異なっていたら、短寿命の種が ELI 法によって分配されるのは不適當だろう。これをカバーするためには、さらにその場での光化学平衡を仮定して濃度を計算するケミカルバランシングという操作を行なう。

短時間のシミュレーションでは、東西を一様に初期化する方法より、ELI 法を使って初期化するほうが、より現実的である。また、 $q_e=0$ 領域で、微量成分分布を蓄積することによって、どんな 2 つの間の相関も知ることができるし、長寿命の微量成分密度の非断熱的な過程の効果と渦位の非保存の効果を評価できる。もちろん、短寿命の化学種の場合、ローカルな温度と圧力と放射が密度に大きな効果をもつため、よい相関を見つけることはできないであろう。

この手法を用いて、人工衛星 UARS のマイクロ波リムサウンダー (MLS) によるオゾン観測値と、オゾンゾンデによる観測値の 2 つから、同一時刻 (1992 年 1 月 11 日) におけるオゾン分布の推定を行なった。前者は、地球周縁 (リム) 方向から放射されるマイクロ波を測定し大気微量成分の鉛直分布を計測するものであり (「サウンダー」は主に鉛直構造を探る探測機 (器) という意味) 後者は地上から放った気球に搭載されたオゾン観測器によってその場のオゾン濃度を測定するものである。両者は観測地点の水平分布も鉛直分解能も異なるが、ELI 法によってオゾン全量の分布を推定したところ、ほぼ同じ分布を得ることができた (図 3.1.1-4 参照)。

ELI 法で 3 次元的なオゾン分布を作成し、これを初期値として 3 次元化学輸送モデルで計算を行なった。従来、3 次元モデルの初期値としてよく用いられてきたのは、2 次元モデルの結果を、そのまま経度方向に一様な初期値として与える方法である。ELI 法で初期化した計算結果は、経度方向に一様に初期化して計算した結果に比べると、時間積分の最初の段階から TOMS の観測値に一致しており、良好な結果を得たとしている (図 3.1.1-5 参照)。

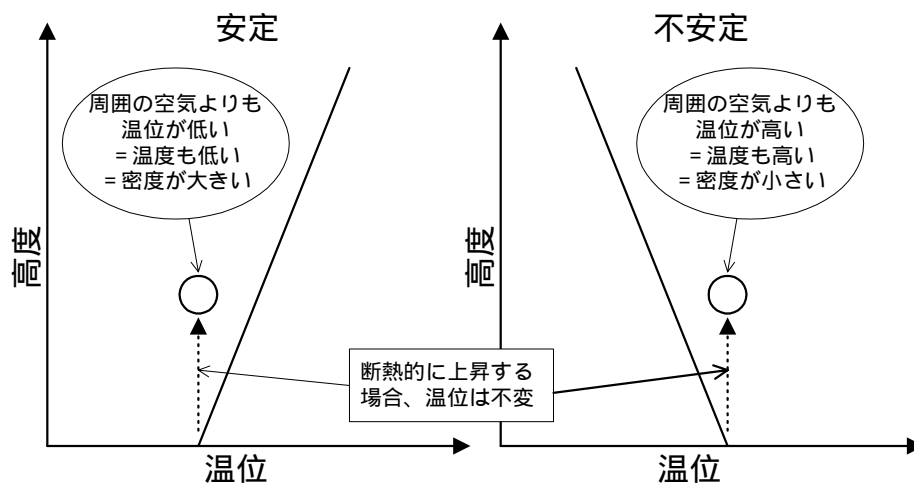


図 3.1.1-1 温位の鉛直分布と大気の安定性

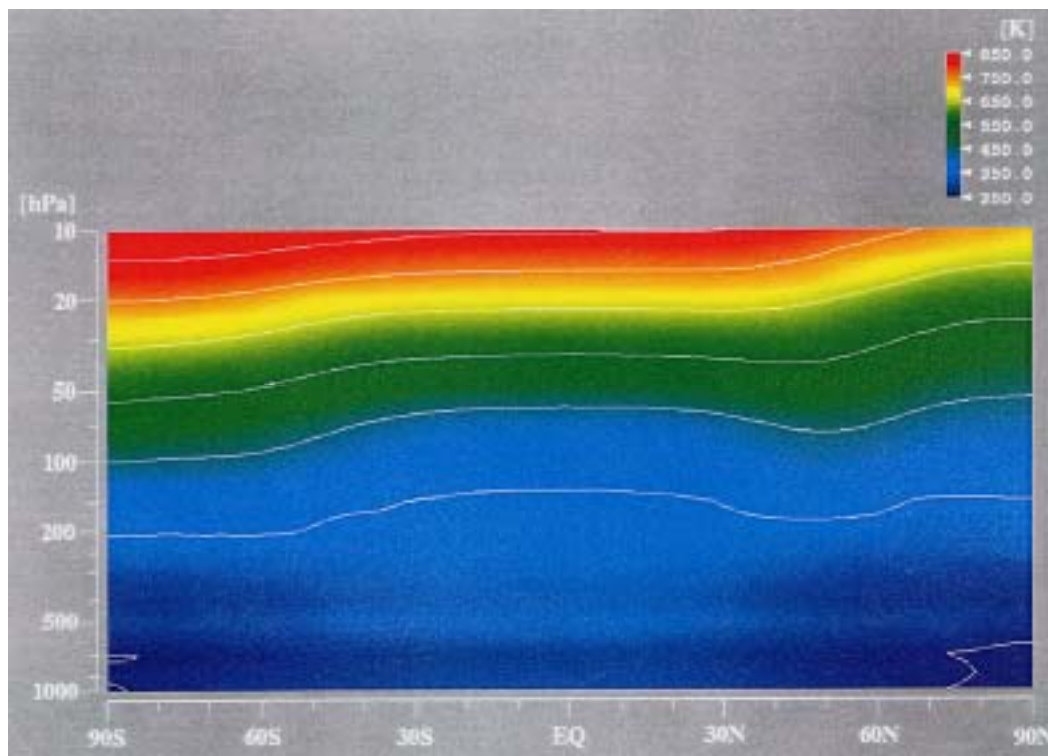


図 3.1.1-2 気象庁全球客観解析データから求めた温位 θ の子午面分布
(1996年1月1日0時(世界標準時)の値を東西平均)

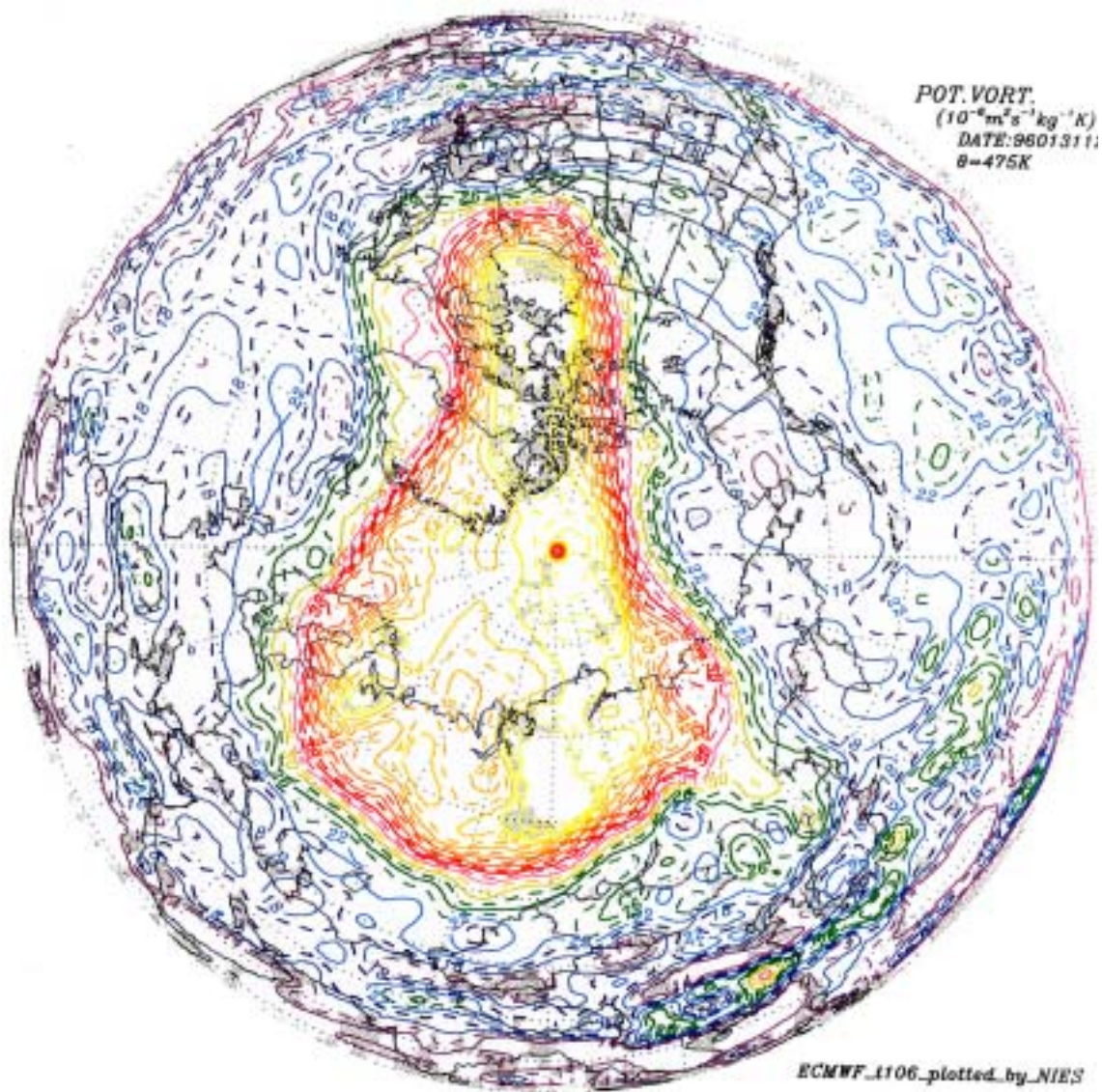


図 3.1.1-3 ECMWF の解析データから求めた 1996 年 1 月 31 日 12 時(世界標準時)における温位 475K 面の渦位の水平分布 (国立環境研究所による)

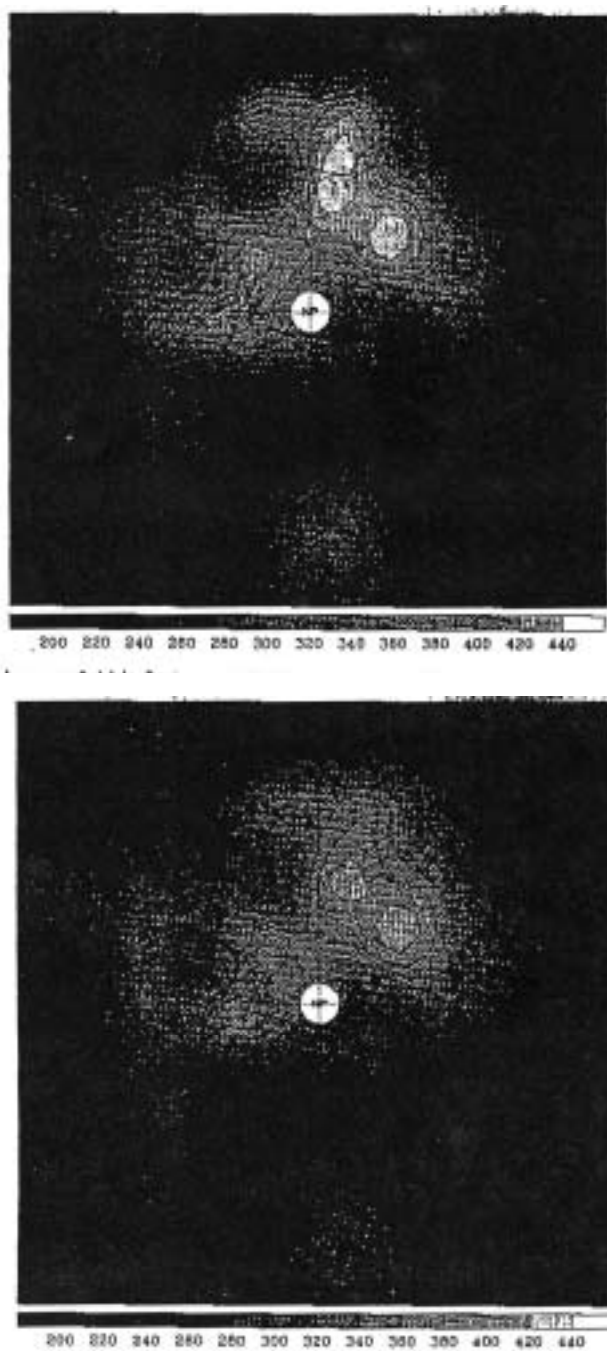


図 3.1.1-4 ELI 法によって作成した 1992 年 1 月 11 日のオゾン全量の分布 [単位: Dobson]
 上: 衛星データに基づくもの、下: オゾンゾンデデータに基づくもの
 (参考文献 1)

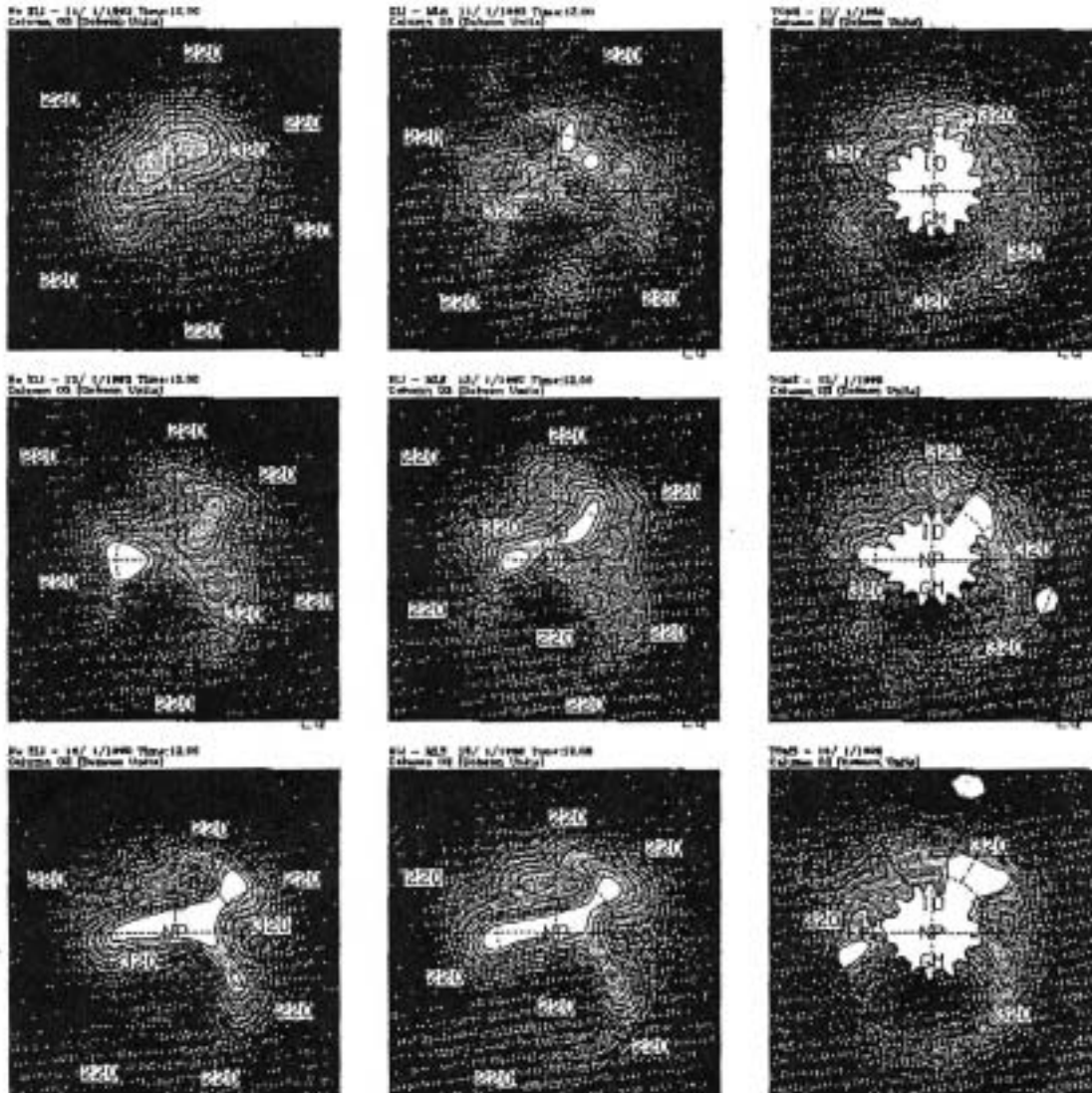


図 3.1.1-5 初期値の異なる 3 次元化学輸送モデルの計算結果の比較

左：東西方向に一樣な初期値を与えたもの、中：ELI 法による初期値を与えたもの、右：TOMS による観測値。

いずれも上段が 1 日後、中段が 2 日後、下段が 3 日後のオゾン分布（単位：Dobson）。

（参考文献 1）

3.1.2 トラジェクトリー・マッピング（流跡線解析による分布図作成）

オゾンゾンデ観測や、人工衛星からの掩蔽法による観測の場合、ある 1 日の内には限られた地点の鉛直分布データしか得ることができない。しかし、トラジェクトリー解析によって気塊の運動を追跡すれば、過去に観測された気塊が現在どこにあるかを知ることができるので、より多くの観測データを取り込んで初期値を作成することができる。

この考え方により、Pierce ら(1993)²⁾は過去 1 週間分の N₂O の観測データを集積し、ある日の分布を推定した。その方法は次のとおり。

ある温位面上のそれぞれの観測（例えば人工衛星、航空機、ライダー、気球など）について、空気塊をその観測値で初期化する。その気塊はその後、トラジェクトリーに沿って動き、それに伴って大気組成の値に関する情報は新しい位置に伝播する。さらに観測が行なわれれば、気塊を追加して初期化する。こうして気塊の初期化と追跡を繰り返す。

等温位面上のトラジェクトリーを用いる場合、5 ないし 10 日以上経過した気塊は削除する。一例として、図 3.1.2-1 は、人工衛星 UARS の軌道情報を用いて同衛星に搭載されたセンサー CLAES によって得られると想定される架空のデータでこの手順を行なったものである。最初は観測データの量は少ないが、急速に情報が蓄積される。この架空のデータでは、極渦の内と外で濃度勾配が仮定されている。1 ヶ月間の観測を蓄積した後は、極渦の構造が点描のように明らかにされた。その結果得られた N₂O の分布は、極渦に沿って大きな濃度勾配を示しており、推定された分布が正しいことが示唆された。

トラジェクトリー・マッピングでは、総観的な図を作成するために使うことのできる、より多くのデータセットを提供するために、過去に観測された濃度情報を合理的に保存する。この付加的なデータは、より高精度の地図を作成したり、他の測器からのデータと比較したりするために使うことができる。（あるいはその測器自身の別の観測と比較することもある。人工衛星は同一の気塊を 2 回以上サンプリングすることがありうる。）この技法は、Schoeberl と Lait(1992)³⁾の再構成の方法に似通っている（等温位面上の気塊は渦位も保存するため）。しかし、この方法は時定数の長い微量成分に限定されない（すなわち、等渦位線に沿った混合が微量成分の寿命よりも急速に起こるという仮定を必要としない）。そのうえ、化学モデルと組み合わせれば、反応時定数の短い微量成分をも考慮することができる。

大気の幅広い厚さにわたって観測が行なわれたような場合、測定された微量成分を含む気柱が鉛直シア shear（風速の水平成分が鉛直方向に異なる現象）によって崩されていくので、単純なトラジェクトリー・マッピングを使用することはできない。しかし、いくつかの気塊を鉛直方向に積み上げて観測値で初期化すれば、このような効果でさえも計算に含めることができる。

Morris ら(2000)⁴⁾はさらに、データ検証の手段としてのトラジェクトリー・マッピング手法の有効性を研究した。彼らは事例研究として、

- HALOE と MLS の O₃ データの比較
- HALOE と SAGE II の O₃ データの比較
- HALOE と欧州域オゾンゾンデによる分布の比較
- MLS の H₂O 精度の評価

を行なった (HALOE、MLS は米国の人工衛星 UARS に搭載されたセンサー、SAGE II は米国の人工衛星 ERBS に搭載されたセンサーで、それぞれ測定手法が異なる。)

図 3.1.2-2 は、HALOE と SAGE II の両方のデータを用いたトラジェクトリー・マッピングによって作成された、1995 年 3 月 19 日 12 時(世界標準時)における温位 800K 面(高度約 30km に相当)のオゾン体積混合比の分布である。HALOE データは、前後 2 週間分(1995 年 3 月 5 日~4 月 2 日)の間の観測データを集め、それぞれトラジェクトリー解析によって 3 月 19 日における位置を推定したものである(したがって、このトラジェクトリー解析には、過去にさかのぼるバックワード・トラジェクトリーが含まれる)。これに対し、SAGE II データは 3 月 19 日の観測値だけをプロットしてある。

こうして推定された 3 月 19 日の HALOE 観測データと SAGE II 観測データを比較したものが図 3.1.2-3 である。上は、トラジェクトリー・マッピングを行わず、従来方式(観測地点間の距離が 400km 以内、観測時刻が 12 時間以内のものを抽出)で比較したもの、下はトラジェクトリー・マッピング(トラジェクトリー解析の期間は前後 1.5 日)によって蓄積された HALOE データのうち、SAGE II 観測地点から 400km 以内に接近したものとを比較したものである。トラジェクトリー・マッピングによって、比較することのできる観測値のペアが大幅に増加したことがわかる。

精度比較の結果を表 3.1.2-1 に示す。表中、 r は相関係数、RMS は偏差の自乗平均の平方根の平均値に対する割合であり、トラジェクトリー・マッピングによって比較対象の時間差、距離が拡大しても、精度に影響が出ていないことがわかる。また、同表中の NH 及び SH は、それぞれ北半球及び南半球で比較対象とした観測値のペア数を表わしている。気塊の移動を考慮することによって、観測値どうしを比較するチャンスが増えたことがわかる。

トラジェクトリー・マッピングを用いると、従来技術による限られた緯度や時間内の測定精度の検討でなく、より広い地域や時間幅での検証を、精度を落とさずに行なうことができることが示された。

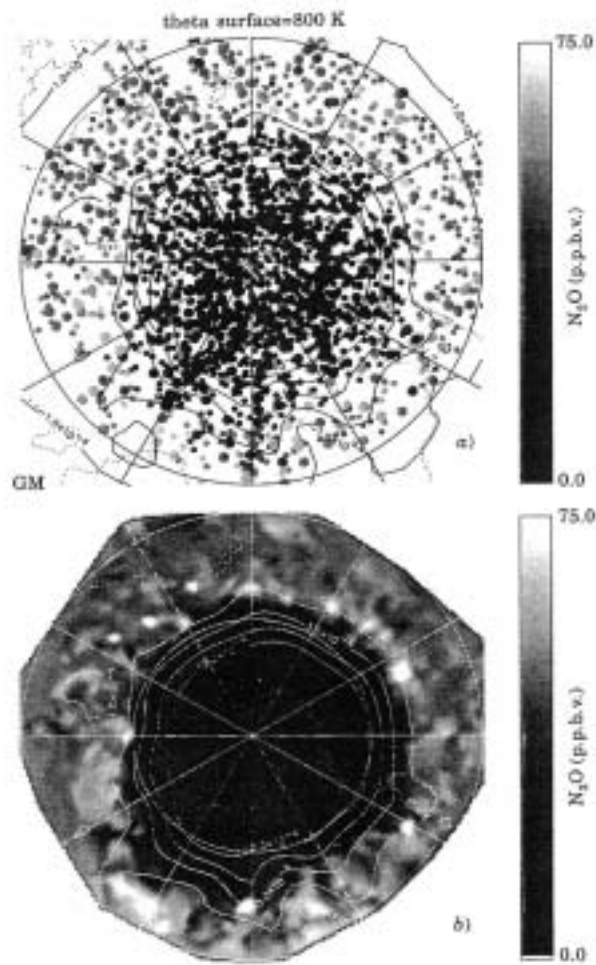


図 3.1.2-1 Pierce ら(1993)によるトラジェクトリー・マッピングの例

- a) 1992 年 8 月 20 日から 25 日にかけての CLAES データをトラジェクトリー解析して得られた、8 月 25 日における気塊の位置。 の濃さは N_2O の体積混合比を表わす (スケールは右側)。
- b) a)を補間してできた、8 月 25 日の温位 800K 面における N_2O の体積混合比の分布 (スケールは右側)。等値線は 800K 面における渦位を表わす。

(参考文献 5)

HALOE and SAGE Observations @ 800 K

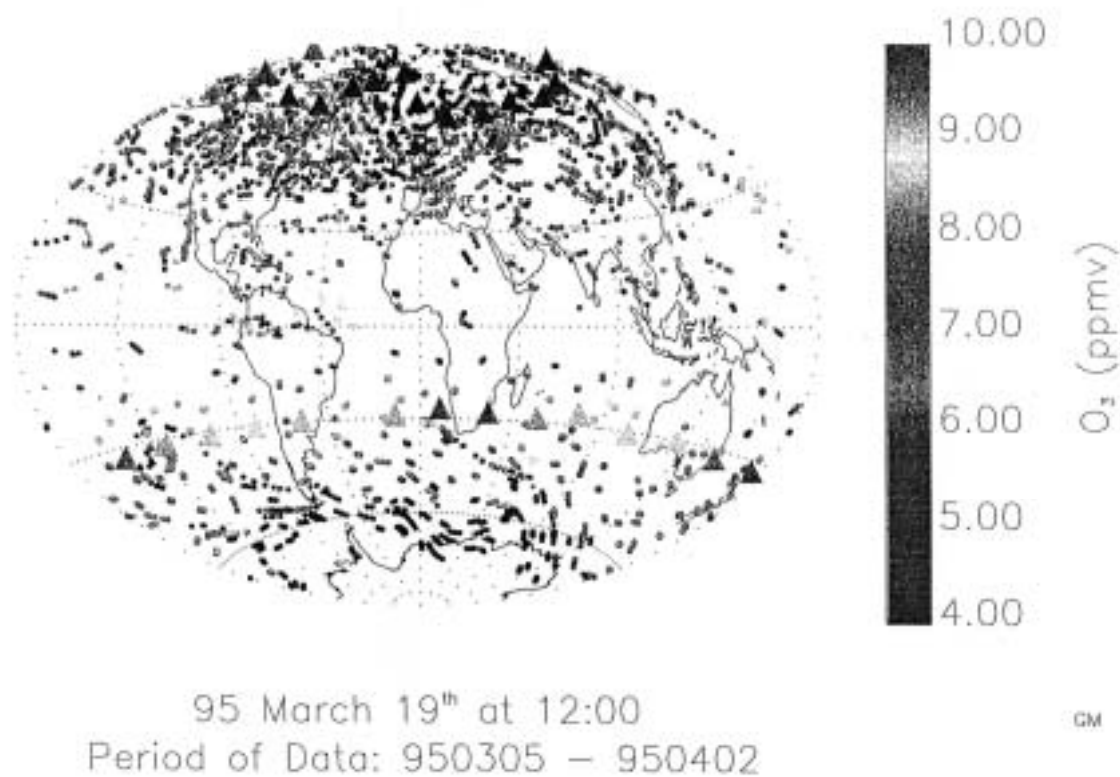


図 3.1.2-2 1995 年 3 月 5 日から 4 月 2 日にかけての HALOE データをもとにトラジェクトリー・マッピングにより作成した、1995 年 3 月 19 日の温位 800K 面におけるオゾン体積混合比の分布。 は 1995 年 3 月 19 日の SAGE II の実測値 (参考文献 4)

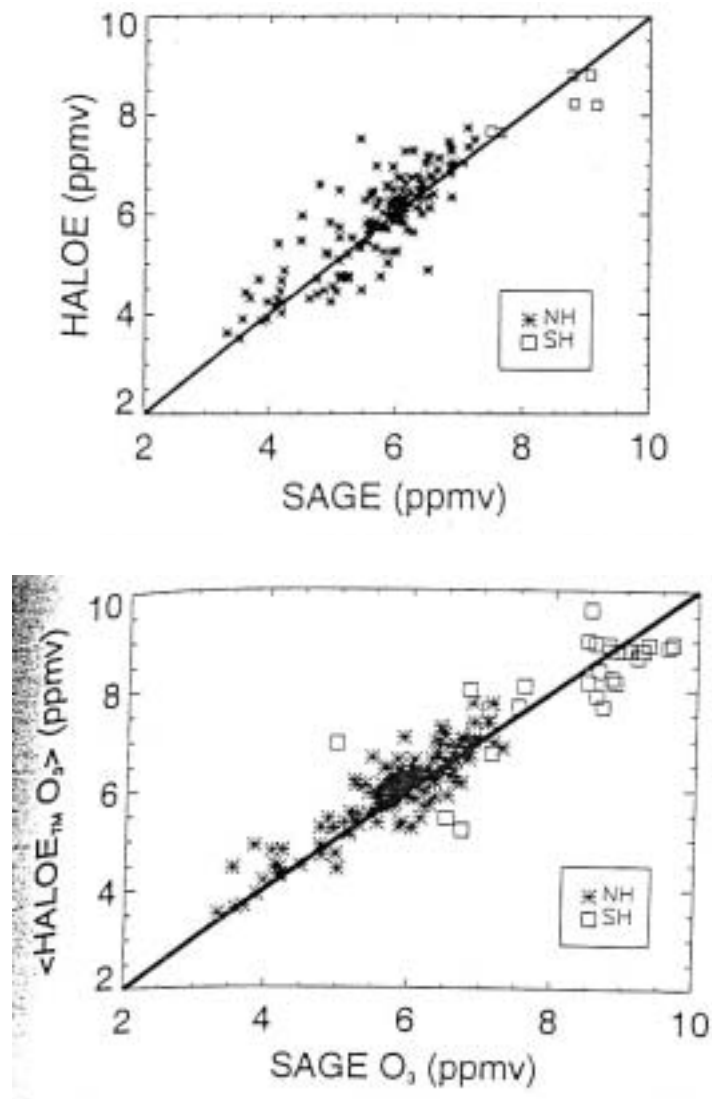


図 3.1.2-3 HALOE と SAGE II による温位 800K 面のオゾン観測値の比較

上：従来方式（観測地点間の距離が 400km 以内、観測時刻が 12 時間以内）

下：トラジェクトリー解析により 1.5 日以内に 400km 以内に近づいたものを比較。

いずれも NH：北半球の観測値、SH：南半球での観測値。（参考文献 4）

表 3.1.2-1 トラジェクトリー・マッピングによる HALOE と SAGE II データの精度検証

Method	r	RMS, %	SH	NH
Traditional	0.87	10.4	6	145
1.5-day TM	0.93	8.0	31	156
3-day TM	0.90	8.4	58	247
7-day TM	0.84	10.0	146	437
14-day TM	0.80	12.2	337	601

r は相関係数、RMS は偏差の自乗平均の平方根の平均値に対する割合、NH 及び SH は、それぞれ北半球及び南半球で比較対象とした観測値のペア数。

Traditional : 従来方式 (観測地点間の距離が 400km 以内、観測時刻が 12 時間以内)

1.5-day TM : トラジェクトリー解析により 1.5 日以内に 400km 以内に近づいたものを比較

3-day TM : トラジェクトリー解析により 3 日以内に 400km 以内に近づいたものを比較

7-day TM : トラジェクトリー解析により 7 日以内に 400km 以内に近づいたものを比較

14-day TM : トラジェクトリー解析により 14 日以内に 400km 以内に近づいたものを比較

3.1.3 データ同化手法

データ同化 Data Assimilation とは、モデル計算の過程で観測値を取り込むことによって予測結果の精度を高める手法である。通常、予測時間が長くなると計算結果の精度は悪化するが、現実の観測値を用いて修正することで時間的にも均質なデータセットを得ることができる。データ同化はしばしば「4次元データ同化」とも呼ばれるが、これは3次元空間のみならず、時間方向にも均質なデータという意味である。このデータ同化によって得られた現実的な濃度分布を初期値に用いることで、その後の予測計算の精度向上を図ることもできる。データ同化の種類には、以下のようなものがある。

(1) 間歇的同化

予報計算の結果を一次推定値とし、それに観測値をブレンドすることによって次の予報計算の初期値を作成する方法（図 3.1.3-1）。一定の時刻にしか観測値を取り込むことができない。

(2) 連続的同化

時間積分の最中に観測値を取り込み、予報値を修正していく方法（図 3.1.3-2）。予報方程式に観測値と予報値の誤差に係数をかけた外力項を付加して、観測値に近づける「ナッジング」法のほか、最近ではカルマン・フィルターを用いる方法や変分法などがある。

・ナッジング

ある物理量 ϕ の予測式

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = f$$

に対して、観測値 ϕ_{obs} との誤差に係数 α をかけた項を付加した式

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = f - \alpha(\phi - \phi_{obs})$$

によって予測を行なう方法。モデル計算値を現実に近づけるような外力項を付け加えたニュートン緩和法と考えられ、最も適用が容易なデータ同化法である。

係数 α はナッジング係数と呼ばれ、観測地点及び観測時刻から離れるほど小さくなるように取るのが普通である。しかし、ナッジング係数が大きすぎると、観測地付近での観測値とモデルの一致性は向上するが、現実的な現象を表現することができない。逆にナッジング係数が小さすぎると、観測値を取り入れた効果は少なくなり、計算値を観測値に近づけることができなくなる。また、空間領域を制御するための空間的重み係数の設定も困難である。

つまり、ナッジング法は適用は容易であるが、係数の設定に対する自由度が大

きいため、その設定値により計算結果に差異が生じる方法である。

・カルマン・フィルター

カルマン・フィルターはモデルの計算値と観測値の違いの原因を蓄積しておき、それを同化する直前に利用して、データのない場をも修正する方法である。カルマン・フィルターではモデルを前方に積分するに従って計算値と観測値の差の原因を示す情報が蓄積されるので、同化を行う度に修正幅が小さくなることが期待される。

ナッジング法に比べ、同化の度に最適な係数を求めるので予報精度は上がるが、計算機の負荷が大きい(つまりたくさんのメモリが必要になる)。また、カルマン・フィルターは線形モデルにしか適用できないので、これを非線形モデルに適用できるように拡張したものが Extended Kalman Filter(拡張カルマン・フィルター、EKF)である。しかし、モデルに対して完全に EKF を実行するためには、誤差の共分散行列を計算する必要があり、コンピュータコストの面から適用が困難である。

客観解析の手法として広く用いられている最適内挿法は、カルマン・フィルターに簡単化のための仮定を施し、大幅に簡略化したものと考えられる。しばしば用いられる仮定としては、誤差の場は等方的でありそれらの相関はガウス分布に従う、というものがある。この仮定によれば十分離れた 2 点間の相関は非常に小さくなるため、実際の計算ではある基準よりも遠い点との相関を 0 とおくことにより、計算時間やメモリを節約することが可能となる。

・変分法

変分法とは、汎関数に停留値を与えるような関数の形及びそのときの汎関数の値を決める問題である。データ同化法における変分法には、大きく分けて 3 次元変分法と 4 次元変分法の 2 種類がある。空間的及び時間的な観測データ分布を考慮するものを 4 次元変分法、空間的分布は考慮するが時間的分布は考慮しないものを 3 次元変分法という。データ同化法における変分法では、汎関数には観測値と計算値の差の平方和を与え、観測値と計算値の差の平方和を最小とする方法が一般的であるが、関数の形は目的に応じて異なる。

初期値作成手法としては、時間積分の最中に修正を施す連続的同化ではなく、前回の予報値と観測値を合成する間歇的同化が適用される。

このデータ同化手法による初期値作成手法は、断熱条件等の仮定が不要で現在の主流となっており、これを採用するのが最善と考えられる。

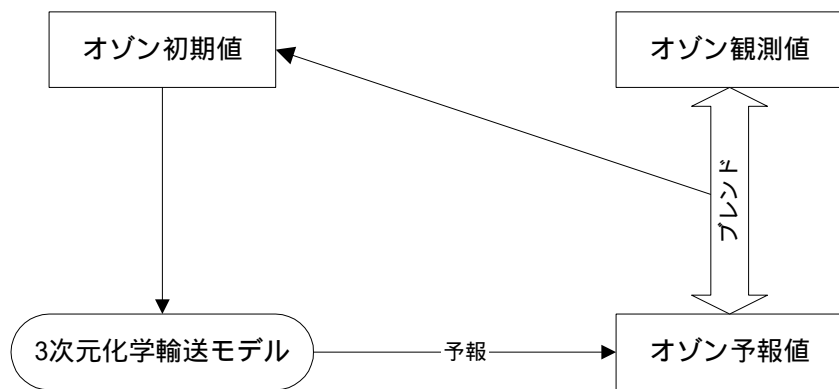
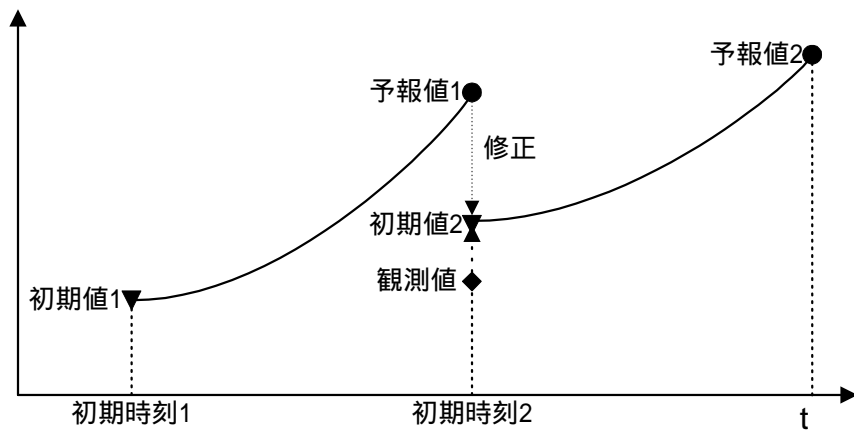


図 3.1.3-1 間歇的データ同化手法の概念図

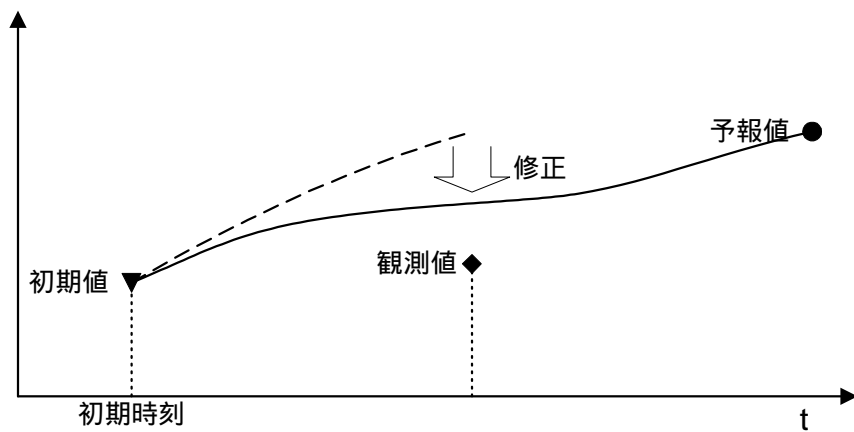


図 3.1.3-2 連続的同化手法の概念図

3.2 気候モデルとの結合方法の検討

航空機のエンジン排出物が地球温暖化に与える影響を予測する場合、現況からの変化だけでなく、地球温暖化が進行した時点での予測も行なえるようにしておく必要がある。そのためには、気候モデル（大気大循環モデル）によって計算された気温・風の分布を化学輸送モデルに取り込むことができないなければならない。また、化学輸送モデルによって予測されたオゾンなど温室効果気体の分布を気候モデルに反映させることも必要になる。これらの方法、特に、一方のモデル出力の座標系や解像度、時間間隔がもう一方のモデルで用いられているものと異なる場合の補間等の対処法について調査を行なった。

3.2.1 気候モデルとのデータ交換

化学輸送モデルとして MOZART を例に取り、付属のドキュメントならびにソースコードを精読することにより調査した。

化学輸送モデルによる予測計算を行なうためには、気象データとして

- 気温
- 風速（水平成分）
- 地表気圧

を入力する必要がある（図 3.2.1-1 参照）。これらはいずれも、3次元の格子点データとして用意しなければならない。

一方、化学輸送モデルによって予測された大気微量成分の濃度のうち、航空機のエンジン排気による地球温暖化への影響を評価するのに必要な化学種は

- オゾン
- メタン

である。これらの濃度を気候モデルにフィードバックすることによって、地球温暖化への影響を見積もることができる（図 3.2.1-1 参照）。

ところが現時点では、温室効果気体について 3次元の濃度分布を取り扱えるような気候モデルは少ない。CO₂ はもともと大気中での光化学反応がほとんどなく、全球平均した濃度を扱えばよかったからである。せいぜいオゾンについては、緯度・高度の子午面分布を扱えるようになっているが、他の温室効果気体については、メタンも含め CO₂ 換算した濃度を与えるようになっていることもある。

実際には、航空機航路が一樣でないこと、オゾンの反応時定数は CO₂ やメタンに比べて短いことから、予想される濃度変化にも地域性が見られるであろうことから、気候モデルでも、オゾン濃度の 3次元分布を入力として取り扱えるように改訂する必要がある。

気温、風などの気象データを化学輸送モデルで使っている格子系に補間することは可能

だが、実際には化学輸送モデルの格子系自体を気象データのそれに合うように設定することが多い。これは、特に風速のデータ補間に伴って誤差が入りやすく収束・発散のバランスが崩れるため、濃度分布の計算結果の精度が悪化しやすいためである。

一方、化学輸送モデルで計算した温室効果気体の分布については、補間を行っても大きな問題は起こりにくい。

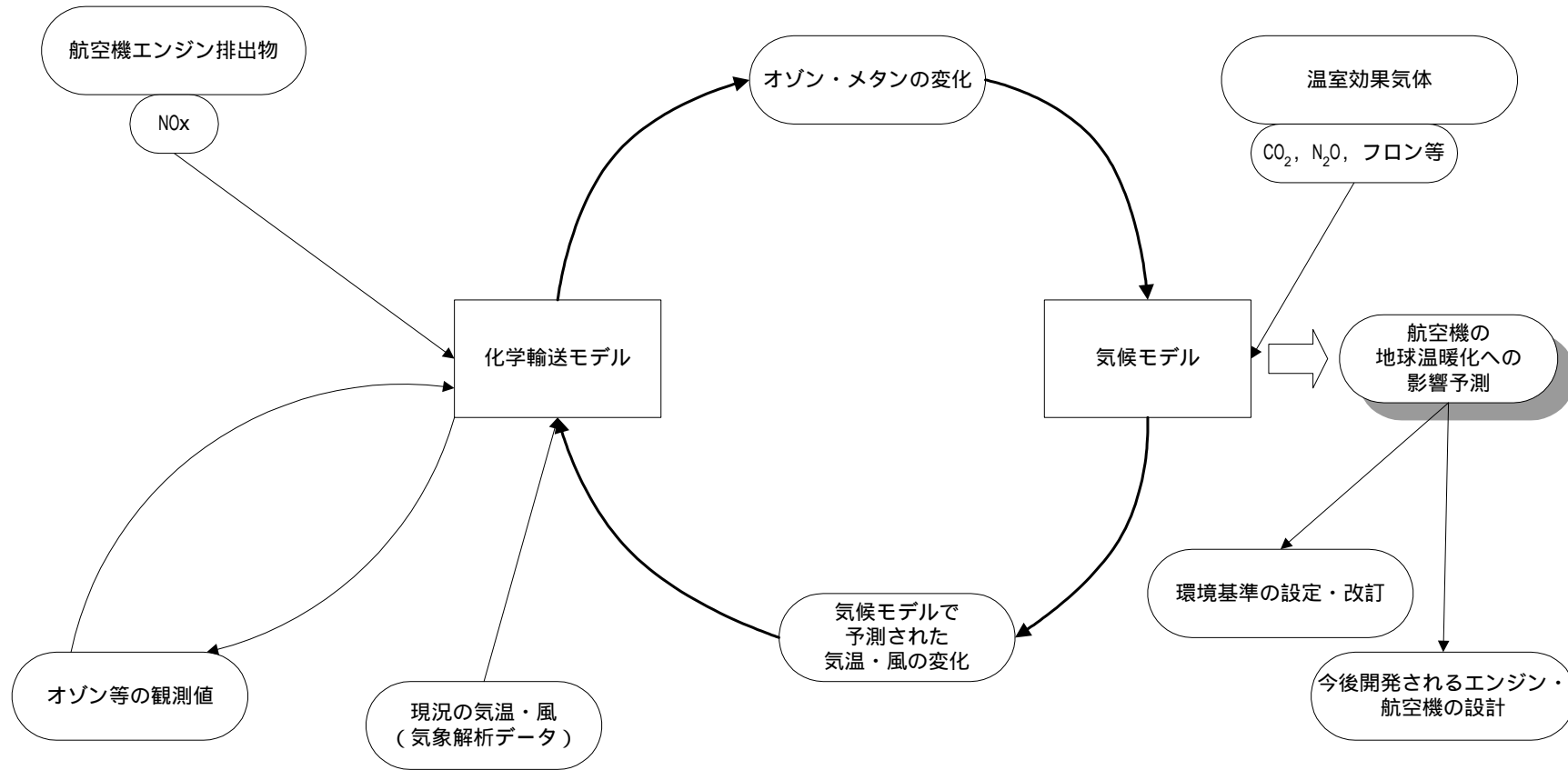


図 3.2.1-1 航空機エンジン排出物による地球温暖化影響予測の方法

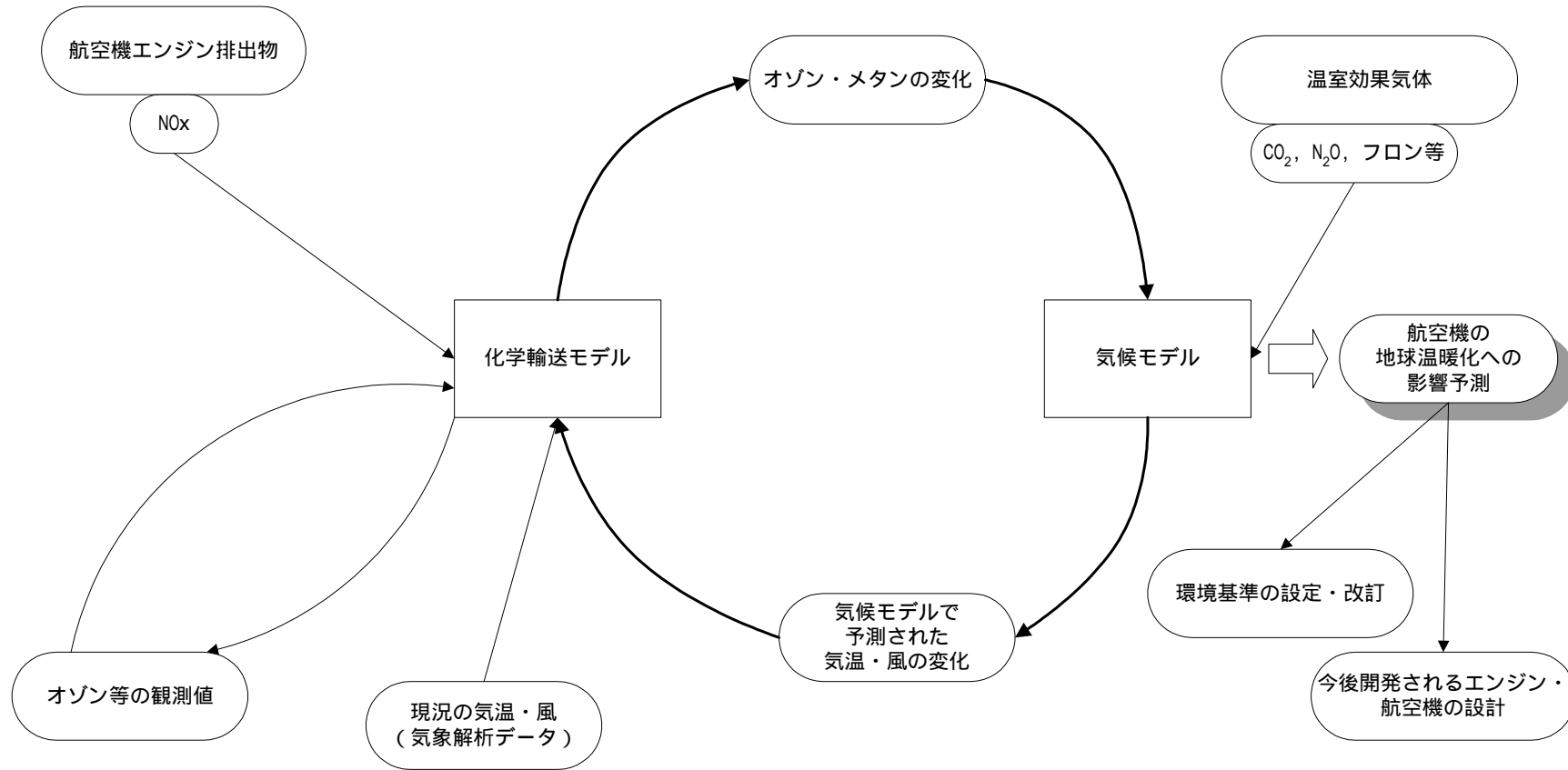


図 3.2.1-1 航空機エンジン排出物による地球温暖化影響予測の方法

3.2.2 座標変換・補間の手法

化学輸送モデルによって計算された大気微量成分の濃度は、緯度、経度、気圧の 3 次元の格子点上での値が与えられているので、任意の位置での濃度値は適当な補間（内挿）法によって求めなければならない。

微量成分濃度の補間法については、通常は線形補間が用いられる。但し、鉛直方向には変化が大きいため、スプライン補間が使われることも多い。

(1) 線形補間

気象データの定義されている格子点の番号について、経度方向を i 、緯度方向を j 、気圧（高度）方向を k で表わすことにする。いま流体粒子が位置 (λ, φ, p) にあるとき、まず $\lambda_i \leq \lambda < \lambda_{i+1}$, $\varphi_j \leq \varphi < \varphi_{j+1}$, $p_k \geq p > p_{k+1}$ を満たす i, j, k を求める（図 3.2.2-1、気圧は降順に並んでいることに注意）。ここで、

$$\alpha_1 = \frac{\lambda - \lambda_i}{\lambda_{i+1} - \lambda_i} \quad \alpha_2 = \frac{\lambda_{i+1} - \lambda}{\lambda_{i+1} - \lambda_i} = 1 - \alpha_1 \quad (1)$$

$$\beta_1 = \frac{\varphi - \varphi_j}{\varphi_{j+1} - \varphi_j} \quad \beta_2 = \frac{\varphi_{j+1} - \varphi}{\varphi_{j+1} - \varphi_j} = 1 - \beta_1 \quad (2)$$

気圧（高度）方向については、気圧が高度に対して指数関数的に減少していることから、気圧の対数について線型補間を行なうことにする。

$$\gamma_1 = \frac{\ln p - \ln p_k}{\ln p_{k+1} - \ln p_k} \quad \gamma_2 = \frac{\ln p_{k+1} - \ln p}{\ln p_{k+1} - \ln p_k} = 1 - \gamma_1 \quad (3)$$

これにより、結局任意の位置 P での濃度 $\phi(P)$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} \phi(P) = & \alpha_2 \beta_2 \gamma_2 \phi_{i,j,k} + \alpha_1 \beta_2 \gamma_2 \phi_{i+1,j,k} + \alpha_2 \beta_1 \gamma_2 \phi_{i,j+1,k} + \alpha_1 \beta_1 \gamma_2 \phi_{i+1,j+1,k} \\ & + \alpha_2 \beta_2 \gamma_1 \phi_{i,j,k+1} + \alpha_1 \beta_2 \gamma_1 \phi_{i+1,j,k+1} + \alpha_2 \beta_1 \gamma_1 \phi_{i,j+1,k+1} + \alpha_1 \beta_1 \gamma_1 \phi_{i+1,j+1,k+1} \end{aligned} \quad (4)$$

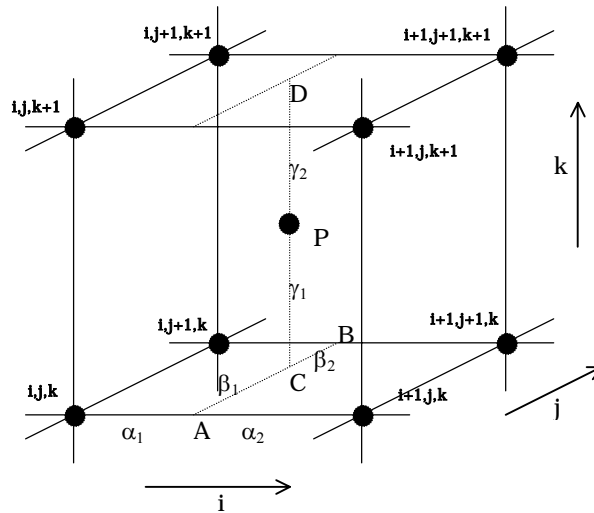


図 3.2.2-1 線形補間

(2) スプライン補間

線形補間の利点は、理論がシンプルのため、算出プログラムなどの作成が比較的容易であることが挙げられる。しかし、2点ずつ補間しその間を直線によって結ぶため、繋ぎ目点の傾きが同じにならず、折れ曲がってしまう欠点がある。

また、与えられた点の数だけの連立方程式を解き高次多項式を求める方法では、完全に滑らかにはなるが、計算誤差の問題と関数の振動が増すという問題がある。

区間の繋ぎ目の傾きを一致させ関数の振動を減らす方法として、補間する領域をデータ間隔 (x_i, x_{i+1}) に区切り3次の多項式で近似する3次スプライン補間がある。

補間するデータを、 $(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)$ とする。そして、区間 (x_j, x_{j+1}) で補間する関数を $s_j(x)$ とする。このようすを図 3.2.2-2 に示す。

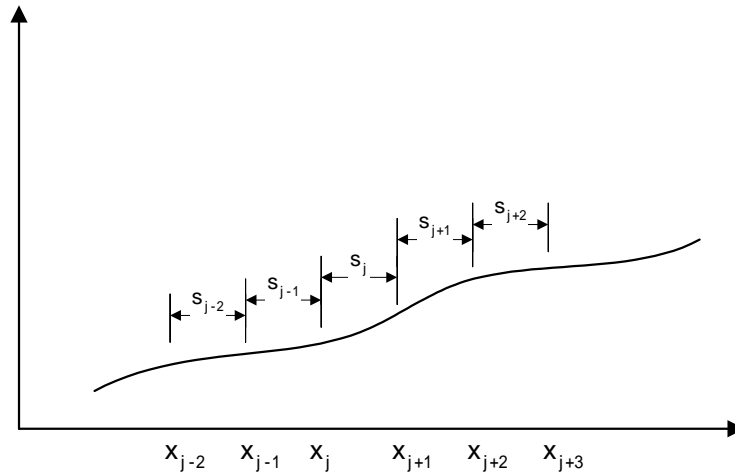


図 3.2.2-2 スプライン補間

3 次のスプライン補間を表わす式を、

$$s_j(x) = a_j(x - x_j)^3 + b_j(x - x_j)^2 + c_j(x - x_j) + d_j \quad (j = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1) \quad (1)$$

とおき、この a_j, b_j, c_j, d_j を求める。

未知数は $4N$ 個あるので、 $4N$ 個の方程式が必要である。そのために、3 次のスプライン補間に以下の条件を課すものとする。

- 全てのデータ点を通る。各々の $s_j(x)$ に対して両端での値が決まるため、 $2N$ 個の方程式ができる。
- 各々の区分補間式は、境界点の 1 次導関数は連続とする。これにより、 $N-1$ 個の方程式ができる。
- 各々の区分補間式は、境界点の 2 次導関数は連続とする。これにより、 $N-1$ 個の方程式ができる。

以上の条件を課すと方程式は $4N-2$ 個となり、未知数は $4N$ 個なので、方程式が 2 個不足することになる。この不足を補うためには、いろいろな方法が考えられるが、通常は両端 x_0 と x_N での 2 次導関数の値を 0 とするやり方を取る。すなわち、

$$s_0''(x_0) = s_{N-1}''(x_N) = 0$$

これを自然スプラインと呼ぶ。自然スプライン以外には、両端の 1 次導関数の値を指定する方法もある。

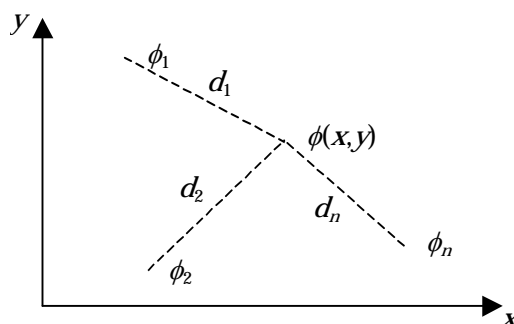
(3) 距離による重みで荷重平均する方法

格子点値を内挿して一次推定値を求める方法として、格子点と各観測点との距離の自乗の逆数で荷重平均する方法もある。この方法は非構造データから格子点値を作成するのによく用いられるが、格子点データをより細かいメッシュに展開すると格子状に波打ったような構造が現われ、問題が生ずる。

この方法は、相異なる n 個の観測点 (x_i, y_i) における濃度の観測値 ϕ_i が与えられたとき ($i=1, 2, \dots, n$)、任意の格子点 (x, y) での濃度 ϕ の値を

$$\phi(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\phi_i}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2}}$$

$$d_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2$$



によって求めるものである。この方法では、求める格子点と観測点の距離の自乗に反比例する重みを付けて平均されるため、観測点 (x_i, y_i) に近づくほど、そこでの観測値 ϕ_i に近づくような分布が得られる利点がある。

ところが、この方法でメッシュデータを観測値と見なし、1km メッシュに内挿しようとしたところ、格子状に波打ったような模様が見られた。格子縞の間隔は 10km で解析値の格子点に対応しているものと考えられる。

この原因について検討したところ、距離の自乗の逆数で荷重平均した場合、

1. 得られた曲面の傾きが、観測点で 0 (水平) になる。
2. 観測点から離れたところでは、全観測値の平均値に近づく。

という特性があることがわかった。

1. について、観測点 (x_i, y_i) における ϕ の偏微分係数を計算してみると、 $\frac{\partial \phi(x_i, y_i)}{\partial x} = 0$ 、

$\frac{\partial \phi(x_i, y_i)}{\partial y} = 0$ であることが示される。

このため、観測点における ϕ の分布は必ず水平になり、例えば図 3.2.2-3 のように、本来一定の傾きを持った平面になるようなデータを与えても、観測点ごとに水平になろうとするため波打ったような分布になってしまう。

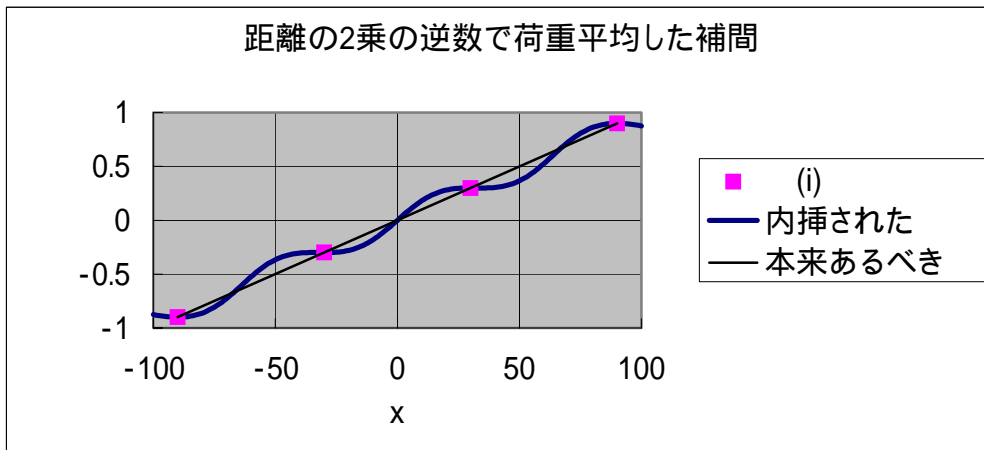


図 3.2.2-3 距離による重みで加重平均する手法の問題点(1)

2.については、観測点から離れたところでは、距離による重みがほぼ同じになり、 ϕ の内挿値が ϕ_i の算術平均に近づくことから理解される。このため、図 3.2.2-4 のようにピークを持つようなデータを与えても、中央の観測点の間（下図の $x=0$ 付近）ではむしろ値が小さくなって波状の分布となる。

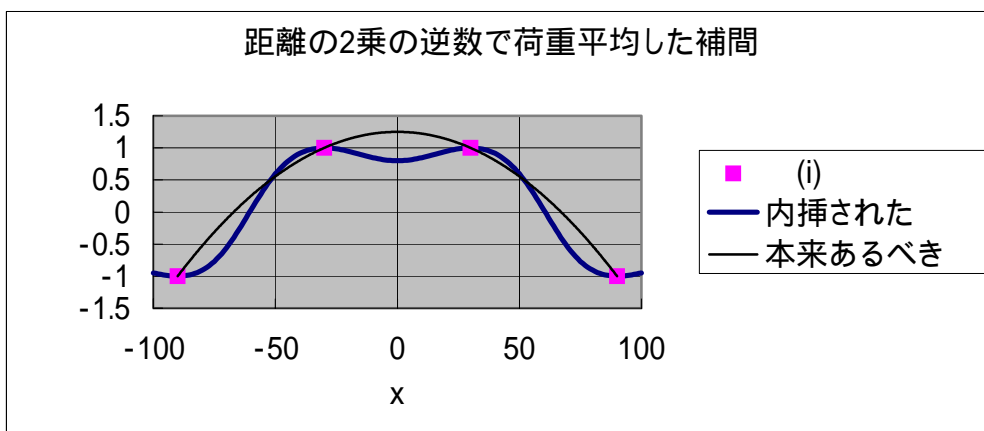


図 3.2.2-4 距離による重みで加重平均する手法の問題点(2)

以上から、距離の自乗の逆数で加重平均する内挿法は、観測点が少ない場合に有効であり、メッシュデータのようにそれ自体で領域内の分布を表現できているようなデータに対して適用した場合、実際には存在しない波状の構造を生成してしまう特性があり不適當であることがわかった。

3.3 3次元化学輸送モデルによる予測の検証方法の調査

3.3.1 観測データとの比較

主としてオゾンの観測データについて、現在どのようなものがあるか調査を行なった結果、以下のような観測データがあることがわかった。

オゾン層の観測は、大気を採取するなどしてその地点・高度のオゾン濃度を直接測る直接測定とオゾン分子による光の吸収・散乱などを用い間接的に濃度を算出する遠隔測定に大きく分けることができる。また、測定器を載せるプラットフォームにより、地上からの観測、人工衛星からの観測、気球やロケットを用いた観測などに分類できる（表 3.3.1-1 参照）。

表 3.3.1-1 オゾン観測手法の分類（参考文献 6）

手法	直接 / 遠隔	プラットフォーム	水平分布	全量 / 高度分布
ドブソン分光光度計等 全量観測 反転観測	遠隔	地上	陸上	全量 高度分布
オゾンゾンデ	直接	ゴム気球	陸上	高度分布
ロケットゾンデ	直接 / 遠隔	ロケット / パラシュート	数地点	高度分布
レーザーレーダー	遠隔	地上	数地点	高度分布
ミリ波センサー	遠隔	地上	数地点	高度分布
人工衛星センサー	遠隔	人工衛星	全球分布	（各種）

(1) 地上からの観測

● ドブソン分光光度計等

（全量観測）

現在、オゾン層の観測手法として標準とされているのは、ドブソン分光光度計による測定である。ドブソン分光光度計は、天空からくる紫外光をプリズムによって分光し、オゾンに強く吸収される波長の光と比較的吸収が少ない波長の光の強度比を測定することにより、地上から大気上端までの気柱に含まれるオゾンの総量（オゾン全量）を求めるものである。

同様の測定器として、プリューワ分光光度計、フィルター式分光光度計（M83 型あるいはM124 型）等がある。前者は回折格子を用いて分光を行なうもので、信号処理の自動化が図られている。後者は二つのバンドパス・フィルターによる分光光度計で、

旧ソ連圏で使用されている。フィルタ - の光学特性の変化のため測定精度はドブソン分光光度計より落ちるが、最近では改善されている。

非常に精度良くオゾン全量を観測することができ、以前からのデータの蓄積もあるが、鉛直積算量のみで観測地点も主に陸上に限られる（図 3.3.1-1 参照）。

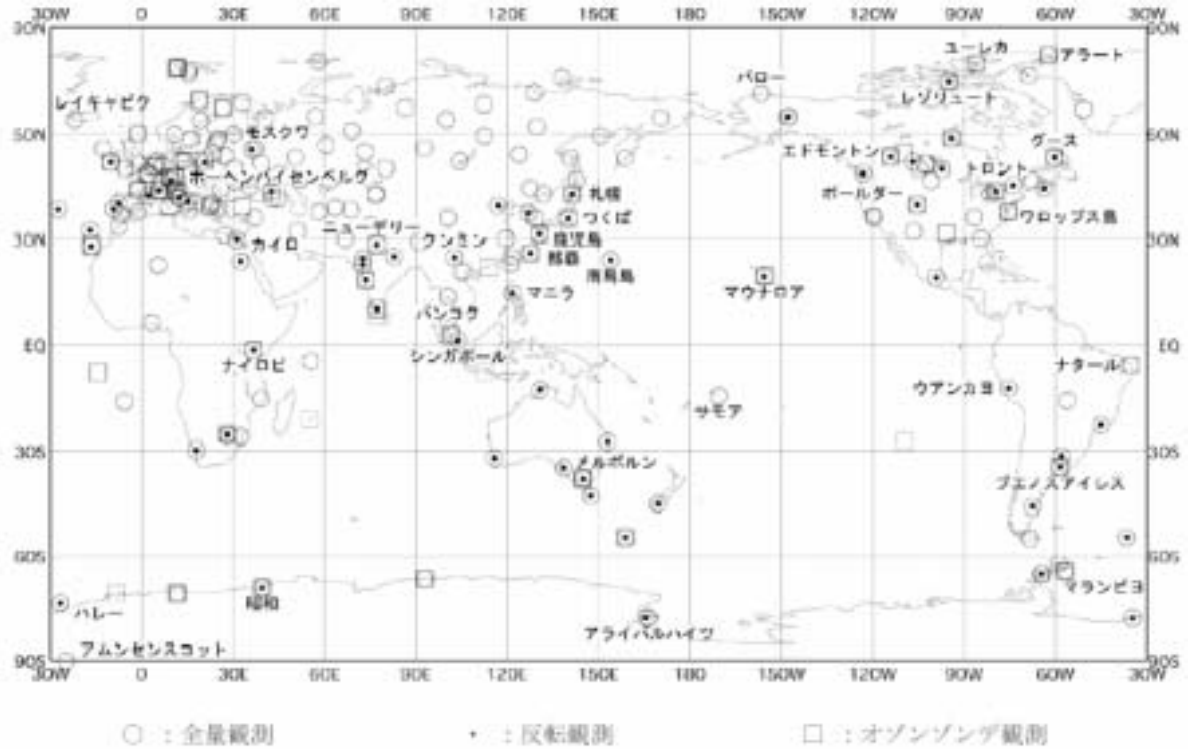


図 3.3.1-1 2003 年時点のオゾン観測地点の分布（参考文献 6）

全量観測は 229 地点（印）反転観測は 72 地点（・印）オゾンゾンデ観測は 63 地点（印）。

● 反転（ウムケール）観測

ドブソン分光光度計を用いてオゾンの高度分布を求める手法で、天頂方向から入射する光の強度比を 2 種類の波長で測定する。この場合、大気に入射した太陽光のうち、空気分子で散乱され真下に向かったものが測定される。どの高度で散乱された光が卓越するかは、太陽天頂角と波長に依存する。これらの関係は、太陽天頂角が大きいほど高度依存性が強くなるので、いくつかの異なる太陽天頂角での測定から、オゾンの高度層ごとの濃度が算出される。観測データの例を図 3.3.1-2 に示す。

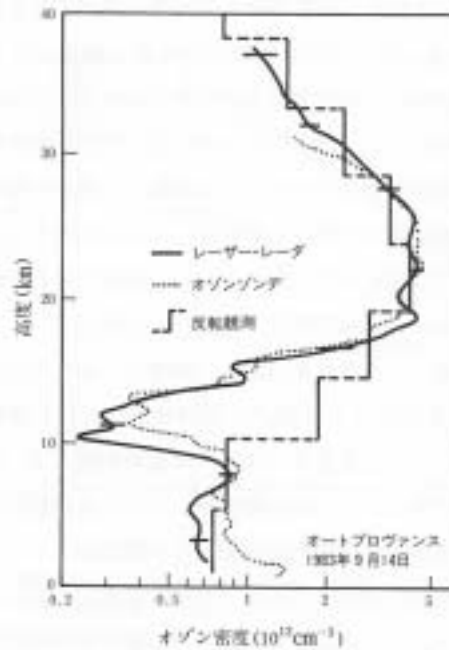


図 3.3.1-2 レーザーレーダー、オゾンゾンデ、反転観測の比較例（参考文献 7）

- オゾンゾンデ

オゾンゾンデはゴム気球に測定器を取り付けて飛揚させ、各高度で測定したデータを無線で地上に送信するもので、地上から高度 35km 位までの間のオゾン濃度を測定することができる。定常的に使われているオゾンゾンデの測定原理は、電気化学法と呼ばれるものである（図 3.3.1-3 参照）。ヨウ化カリウム（KI）溶液にオゾンを含む空気を通し、ヨウ化カリウムとオゾンの反応で生じるヨウ素分子が陰極電子と作用してできる陰イオンによる電流を測定する。この場合、反応したオゾンの数密度に比例した電流が得られるので、空気中のオゾン濃度がわかる。

オゾンゾンデでは、図 3.3.1-2 に示すようにオゾンの高度分布が得られる。しかし、観測地点は主に陸上に限られる（図 3.3.1-1 参照）。

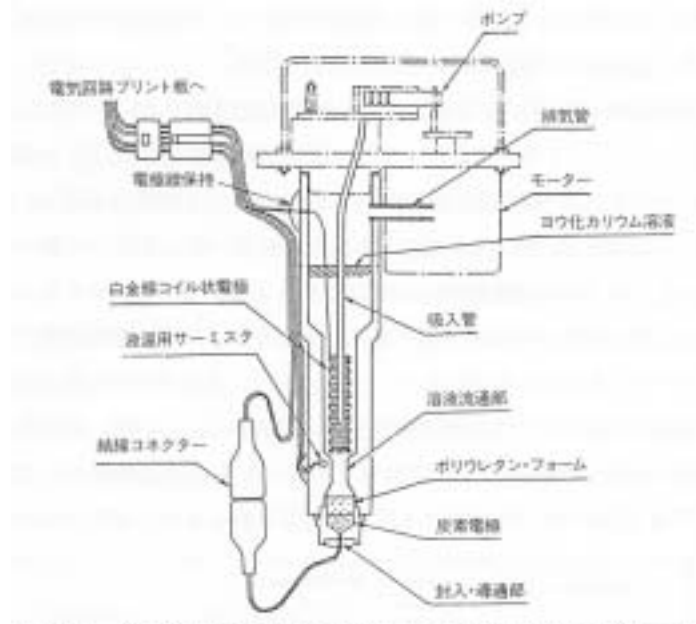


図 3.3.1-3 オゾンソンのセンサー部概略図（参考文献 7）

- レーザーレーダー（ライダー）

レーザーレーダー（ライダー）は、レーザー光を用いた一種のレーダーである。ドブソン分光光度計が太陽紫外光を光源としてオゾンによる吸光を測定するのに対し、レーザーレーダーは自らが紫外レーザー光を発して、大気による散乱光を発生させ、オゾンによるその吸収の大きさを測定することでオゾン密度を求める。また、パルス光を用いるので、高度分布を求めることができる。

具体的には、オゾンによる吸収の大きな波長と比較的吸収の小さな波長のレーザーパルス光を大気中に発射する。レーザー光は空気分子などで散乱されるので、後方に散乱される光を光学望遠鏡（受光望遠鏡）で受信し、パルスを出してから時間遅れの関数として記録する。時間の遅れからは距離（高度）の情報が得られ、2つの波長の信号強度の違いにより地上からその高度までのオゾンによる光の減衰（積分された吸収量）がわかる。したがって、一定の演算処理によってオゾン密度の高度分布が計算される。

これまで、米、仏、日本等で開発されてきたオゾンレーザーレーダーによれば、高度 40～50km の上部成層圏までの測定が、2～4 時間の測定時間をかけることにより高度分解能 1～4km で行なえる（図 3.3.1-2 参照）。

- ミリ波センサー

オゾンからの熱放射をミリ波帯で測定するもので、オゾン分子の回転状態遷移によって生じるスペクトル線の輪郭からオゾンの高度分布に関する情報が得られる。大気の高い高度から発せられるスペクトル線の輪郭は、幅の狭いスペクトルとなるが、高度が下がると空気分子との衝突のためスペクトル幅が広がる。測定されるスペクトルは、これらの重ね合わせである。気温の高度分布がわかっているならば、各高度に対するスペクトルの形状は計算されるので、オゾンの高度分布を算出することができる。

ミリ波センサーは、昼夜を問わず観測できるという利点がある。高度 70～80km までの高度分布が分解能 10 km 程度、5～20 分程度で測定できる。

(2) 人工衛星からの観測

すべての気体成分は、それぞれ固有の放射・吸収スペクトルを有していることから、適切な波長を選んで、大気の放射・吸収の測定を行なうことで、成分別の濃度を遠隔的に測定することが出来る。衛星に搭載されるオゾン観測センサーとしては、オゾンの発する赤外放射やミリ波放射を測定する方式（放射測定法）と、オゾンによる太陽光の吸収を測定する方式（吸光測定法）とに大別できる。後者にはさらに、太陽光を直接の光源として地球周縁大気を通過する際の吸収を測定する方法（太陽掩蔽法）と、地球大気による太陽光の散乱光を測定する方法（後方散乱法）とがある。

放射測定法に基づくセンサーにも、地球周縁方向を測定対象とする方法と、衛星直下を測定方向とする方法がある。前者の代表例としては、LIMS、CLAES、MLS、後者には、IMG がある。

太陽掩蔽法では、太陽とセンサーの位置関係によって主たる吸収を受ける高度が異なることを利用して、高度分布の測定を高精度に行なうことができる。太陽掩蔽法の代表例としては、SAGE、SAGE II、HALOE、ILAS、ILAS-II が挙げられる。後方散乱法の場合には、空気分子で後方散乱された太陽紫外光強度をいくつかの波長で測定する。波長によって大気層への紫外光の侵入高度が異なることを利用して、オゾン高度分布あるいは全量を求める。後方散乱法としては、TOMS、SBUV/2、GOME などが代表的である（表 3.3.1-2 参照）。

表 3.3.1-2 人工衛星センサーの分類（参考文献 6）

		センサー名	測定項目	観測国	搭載衛星名
放射測定法	地球周縁方向	LIMS	N ₂ O、CH ₄ 、HNO ₃ 、H ₂ O、NO ₂	米国	Nimbus-7
		CLAES	ClO、HCl、ClONO ₂	米国	UARS
		MLS	ClO、HNO ₃ 、H ₂ O、O ₃ 、ClONO ₂ 、HCl	米国	UARS
		MIPAS	O ₃ 、H ₂ O、CH ₄ 、HNO ₃ 、CFC's	欧州	Envisat
		SMR	O ₃ 、ClO、HNO ₃ 、NO ₂ 、N ₂ O、CH ₄ 、水蒸気、CO	欧州	ODIN
	衛星方向直下	IMG	気温、O ₃ 、H ₂ O、CH ₄ 、CO	日本	ADEOS(みどり)
		BUV	O ₃	日本	EXOS-C(おおぞら)
		TOVS/HIRS	気温、水蒸気、O ₃	米国	NOAA シリーズ

		センサー名	測定項目	観測国	搭載衛星名
吸光測定法	太陽掩蔽法	ILAS	気温、気圧、O ₃ 、H ₂ O、CH ₄ 、HNO ₃	日本	ADEOS(みどり)
		ILAS-II	気温、気圧、O ₃ 、HNO ₃ 、NO ₂ 、N ₂ O、CH ₄ 、H ₂ O	日本	ADEOS II(みどり)
		SAGE	O ₃ 、エアロゾル	米国	AEM2
		SAGE II	O ₃ 、H ₂ O、NO ₂ 、エアロゾル	米国	ERBS
		SAGE III	エアロゾル、水蒸気、NO ₂ 、NO ₃ 、O ₃ 、OCIO、気温、気圧、雲	米国	METEOR-3M
		HALOE	HCl、HF、ClONO ₂ 、NO ₂	米国	UARS
		POAM III	気温、水蒸気、O ₃ 、エアロゾル、NO ₂	米国	SPOT4
	恒星掩蔽法	GOMOS	O ₃ 、NO ₂ 、NO ₃ 、OCIO、気温、水蒸気	欧州	Envisat
	後方散乱法	TOMS	O ₃ 、SO ₂ 、エアロゾル、UV-B	米国	Nimbus- 7、Meteor- 3、Earth Probe
		SBUV	O ₃	米国	Nimbus- 7
		SBUV/2	O ₃	米国	NOAA シリーズ
		GOME	BrO、NO ₂ 、OCIO、O ₃	ドイツ	ERS-2
	太陽・月掩蔽法、後方散乱法	SCIAMACHY	O ₃ 、CO、CH ₄ 、N ₂ O、NO ₂ 、SO ₂ 、HCHO、H ₂ O、BrO、ClO、気温、エアロゾル	欧州	Envisat

- オゾン全量マッピング分光計 (TOMS: Total Ozone Mapping Spectrometer)

太陽紫外光が地球大気により後方散乱されたものを分光測定し、オゾン全量を測定するセンサー。1978年に打ち上げられた米国の人工衛星 Nimbus-7 に搭載され、南極オゾンホールが発見で有名になった。その後、ロシアのメテオール-3、我が国の ADEOS (みどり)、米国の Earth Probe 等に搭載され、継続的なモニタリングを行なっている。

1日に約1回、極夜以外の全地球をカバーできるが、オゾン全量(鉛直積算量)のみ。観測データの例を図 3.3.1-4 に示す。

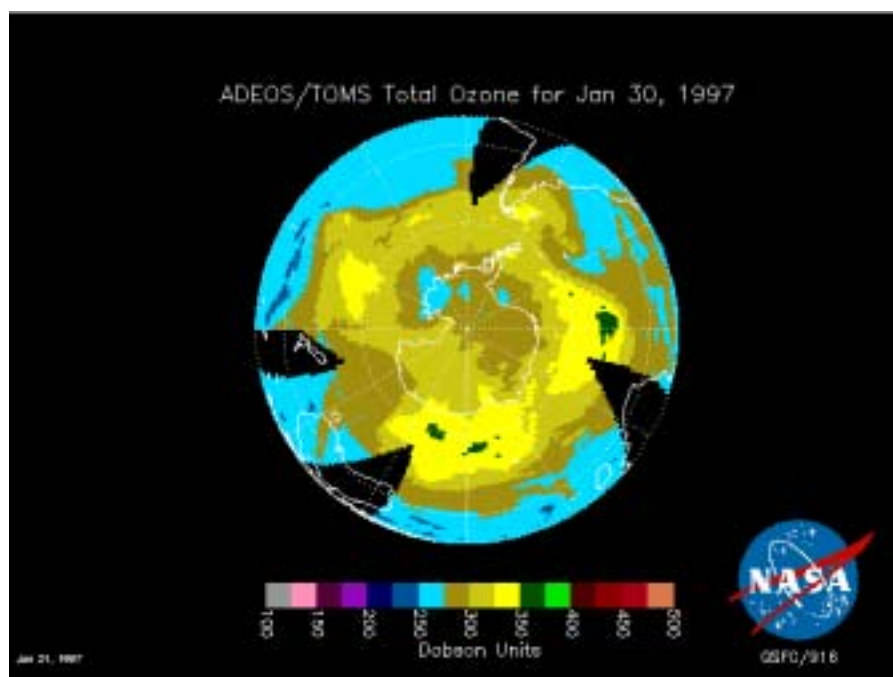


図 3.3.1-4 TOMS によるオゾン全量測定結果の例

- 後方散乱法

太陽紫外光が大気分子によって受けるレイリー散乱(一部エアロソルのミー散乱、雲あるいは地表面からの散乱も含まれる)のスペクトル強度を分光測定し、オゾンによる吸光量を定量することによって、オゾンの全量を、またはオゾンの吸光断面積が波長によって大きく変化することを利用してオゾンの高度分布を求める。
- 掩蔽法

太陽(あるいは月、星)が地球周縁大気に出没するところを人工衛星から分光観測し、オゾンによる吸光量を求める方法。人工衛星の運動とともに、光源から衛星までの光路が最も地球に近づく高度が変化するので、これによってオゾン濃度の高度分布が得られる(図 3.3.1-5 参照)。米国の SAGE、SAGE II、SAGE III のほか、我が国の

ILAS、ILAS-II による観測が行なわれた。

高度分布が得られるが、測定時刻（現地時間）が限られ、観測地点の数も 1 日に数ヶ所程度である。

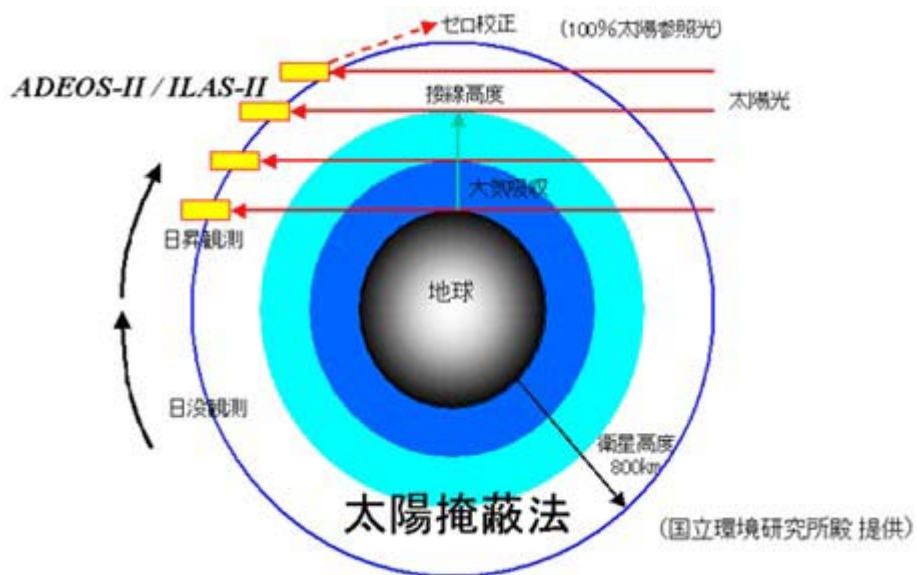


図 3.3.1-5 掩蔽法によるオゾン高度分布の観測

(3) 航空機からの観測

定期旅客機を利用した大気観測の事例

定期旅客機を利用した大気組成観測は、我が国と、ヨーロッパ諸国で実施されている。以下は、それらの各事例について簡潔にまとめたものである。

● 日航グループによる大気観測プロジェクト

日航財団と日本航空は、運輸省の支援の下に、気象研究所と共同で行なう「大気観測プロジェクト」を実施している。

この観測は、オーストラリアから成田に向かう JAL 定期便に、上空の大気を採取するための装置を搭載し、到着後、その装置を気象研究所に運び込んで、上空大気に含まれている温室効果気体（CO₂、CH₄、CO）の濃度を測定するものである。上空の大気を採取するためのボトルは 12 本取り付けられており、緯度でほぼ 5° 刻みに大気が採取される。この観測のために、JAL のボーイング 747 型機 2 機に改修が施されている。

この観測は 1993 年 4 月に開始され、現在も月に 2 回のペースで観測が続けられている。その観測の経緯を表 3.3.1-3 に示す。

表 3.3.1-3 日航グループによる大気観測プロジェクト

期間	観測路線	観測頻度	観測化学種
Apr/1993 ~ Jun/1994	ケアンズ 成田	1 回/月	CO ₂ 、CH ₄ 、CO
Jul/1994 ~ Aug/1994	シドニー 成田	1 回/月	↓
Sep/1994 ~ Mar/2002	シドニー 成田	2 回/月	
Apr/2002	ブリスベン 成田	2 回/月	

● フランスを中心とする観測プロジェクト「MOZAIC」

MOZAIC は、フランスの国立科学研究センター（CNRS）を中心として、欧州各国の研究機関が共同して実施している観測計画であり、1994 年 8 月から観測が開始された。当初の観測対象は、O₃ と H₂O に限られていたが、その後、計画が MOZAIC-、MOZAIC- と進展するにつれて、観測対象も増加し、現時点は、オゾン、水蒸気以外に、NO_y および CO も追加されている。

この観測には、ルフトハンザ、エアフランス、オーストリア、サベナの 4 社が所有する、エアバス A340 型機（計 5 機）が参加しており、その観測域は、世界中を網羅している（図 3.3.1-6 参照。なお、サベナが倒産したのち、その機体はルフトハンザによって運航されている。）

ちなみに、オゾンを例にとると、オゾンは化学的活性が高いため、専用の取り入れ口から取り入れた大気を機上で測定している。この測定は、離陸直後から着陸直前まで、4 秒に一

回づつ連続的に実施されるようになっている。

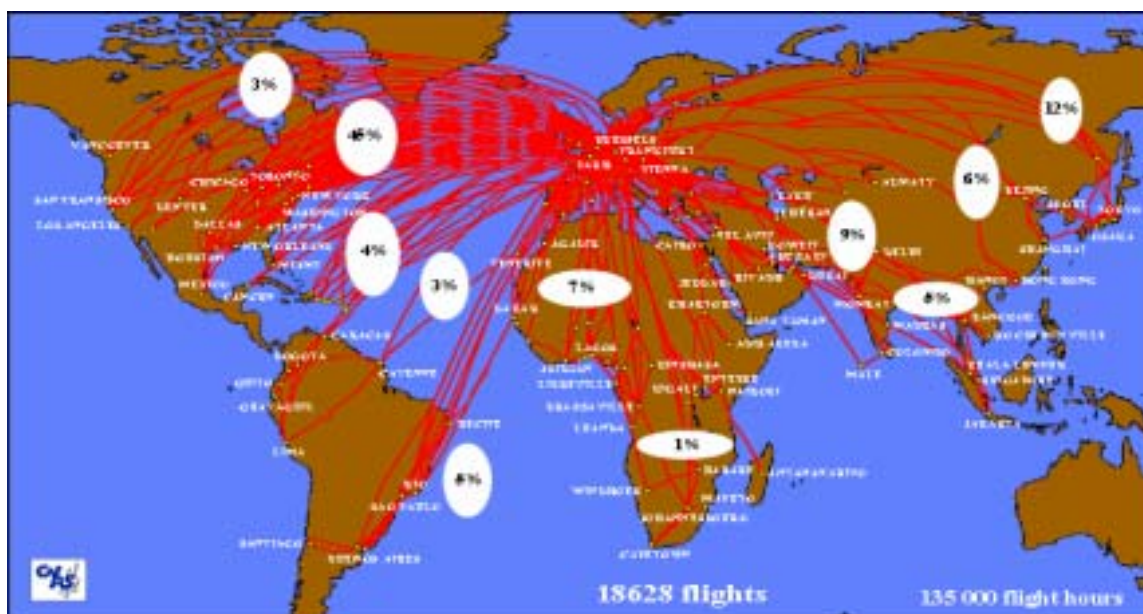


図 3.3.1-6 MOZAIC 観測プロジェクトの観測域

● ドイツを中心とする観測プロジェクト「CARIBIC」

CARIBIC は、ドイツのマックスプランク研究所 (MPI) を中心として、欧州各国の研究機関が共同して実施している観測計画であり、1997 年 11 月から観測が開始された (表 3.3.1-4 参照)。

CARIBIC では、CO₂、CH₄、CO、NO_x、O₃、エアロソル、CFC、HCFC、HFC、SF₆、¹³CO₂、¹⁴CO₂、CO¹⁷O、CO¹⁸O、といった、化学反応過程の解明にも輸送過程の解明にも役立つだけの十分な種類の成分が測定されている。

この観測には当初、LTU 航空のボーイング 767 型機 (Nov/1997 ~ Apr/2002) が用いられていたが、現在は、ルフトハンザのエアバス A340-600 型機 (Dec/2004 ~) が使用されている。ちなみに、観測時には CARIBIC 専用のコンテナ (1 個) が搭載されるが、その重量は 1.2 トン以上にも達するため、観測機会はそれほど多くはない。また、機材繰り上やむを得ないことではあるが、ある時期にある路線に集中して投入されているのも特徴である。

表 3.3.1-4 CARIBIC 観測プログラムの経緯

期間	観測の種類	観測回数	エアライン/機種
Jun/1997	試験観測	3 回	LTU/767
Nov/1997 ~ Apr/2002	本格観測	81 回	LTU/767
May/2002 ~ Nov/2004	中断	---	---
Dec/2004 ~	本格観測	不明	DLH/A340-600

民間旅客機によって取得されたデータの利用

上述した観測によって取得データはいずれも、手続きを踏んだ上で、化学輸送モデルあるいは大気大循環モデルの検証のためのデータとして使用することができる。

(4) その他

● ロケットゾンデ

ロケットにより測定器を高層まで運び、オゾン濃度を直接あるいは間接に測定する。測定器としては、太陽または月の紫外光がオゾンによって受ける吸収を高度の関数として測定するもの、取入口から取り込んだ空気中のオゾンによってある種の染料が発する蛍光を測定するもの、太陽紫外光によるオゾンの光解離で発する赤外放射を測定する方式のものなどがある。太陽紫外光の吸収による測定は、高度 40 ~ 60 km における最も信頼できるオゾン測定法で、我が国でも実用化されている（図 3.3.1-7 参照）。

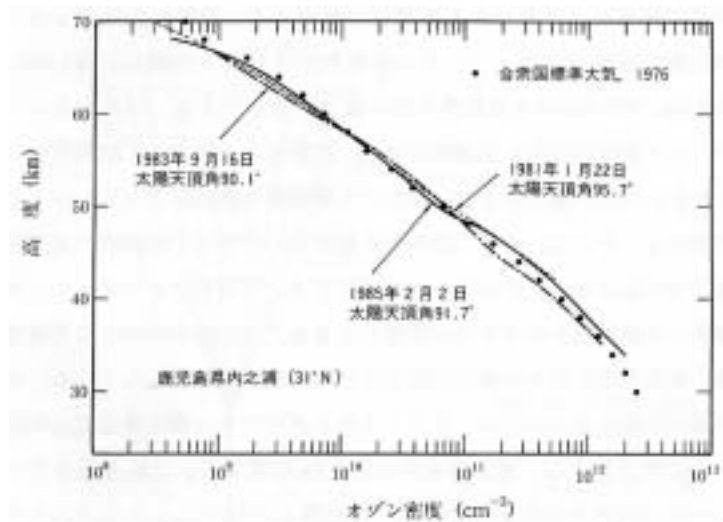


図 3.3.1-7 ロケットゾンデによるオゾン高度分布の観測例（参考文献 7）

3.3.2 モデル間の比較

(1) NASA M&M ワークショップ

海外では、モデルによる予測結果のばらつきが予測の信頼度を損ねているとして、しばしばモデル間の相互比較が行われている。オゾン変化の予測値については、モデルごとにアプローチが異なっているため、「このモデルによるものが絶対正しい」という値は本来得られないが、種々の観測値と比較したり、モデルどうしの違いの原因を調べることによって、予測値のばらつき（不確定性）を小さくし、より真実に近いと思われる信頼性の高いものとするのが現時点の目標である。

1997 年から 1998 年にかけて、NASA がモデルと観測ワークショップ（Models and Measurements Workshop II、以下 M&M ワークショップ⁹⁾）を開催している。これは 1992 年のモデルと観測ワークショップの続編として位置づけられ、2 次元モデル 11 個、3 次元モデル 9 個が参加した。

M&M ワークショップ⁹⁾ では、モデル内のいくつかの要素を固定して計算を実施し、結果を比較することを行なった。例えば、ソース気体を固定して活性化学種の濃度を比較したり、オゾン化学を同じにして他の化学種の振る舞いを比較したりする実験が行なわれた。

また、不活性な化学種の拡散の速さを表わす「空気の年代（Age of air）」を比較するなど輸送過程に重点を置いた相互比較や、超音速輸送機からの排出を模擬した計算結果の比較も行なった。

M&M における共通計算条件の概要は以下のとおり。これらの計算条件は、モデル間の比較のために設定されたものであり、必ずしも将来の予測シナリオと一致するものではないことに注意する必要がある。

輸送過程の検証

A-1 大気の年齢診断

赤道上空に発生源を持つ仮想的な化学種 X1 の濃度を 20 年分時間積分。

A-2 輸送の季節変動診断

赤道上空に季節変化する発生源を持つ仮想的な化学種 X2、X3（X2 と X3 は位相が異なる）の濃度を 5 年分時間積分。

A-3 成層圏起源の人工トレーサー（超音速輸送機を模擬、但し反応を含まない）

仮定された超音速輸送機（M=2.4、EI=10）からの排出物。シナリオは FTP にて配布。期間は 1 年。

A-4 成層圏起源の人工トレーサー（超音速輸送機を模擬、但し反応を含まない）

仮定された超音速輸送機（M=2.4、EI=10）からの排出物。北緯 30°以北からの排出だけを考慮。その他は A-3 と同様。

A-5 SF₆に重点を置いたシミュレーション

北緯 30~60° に年毎に増大する排出源（排出速度を与える）を置く。期間は 34 年。

A-6 CO₂ に重点を置いたシミュレーション

17 年間の地表 CO₂ 観測値を境界条件としてシミュレーション。観測値は FTP にて配布。

化学過程の検証

B-1 1992 年の化学状態の再現

PSC 及び硫酸エアロソル（ピナツボ火山の噴火によって増大している）表面での異相反応を含む。以下の変数を出し比較する。

CF₂Cl₂, CF₂Cl₃, CCl₄, CH₃Cl, CH₃CCl₃, CHClF₂, C₂Cl₃F₃, CClFO, CF₂O,
N₂O, CH₄, H₂O, HF, CH₃Br
O₃, HCl, ClONO₂, HNO₃, N₂O₅, HBr, BrONO₂, H₂O₂, CH₂O, CO
O(³P), O(¹D), NO, NO₂, OH, HO₂, HOCl, ClO, BrO, Cl₂O₂, HOBr
NO_y, Cly, Bry

オゾンの生成・消滅率

ソース気体・トレーサーの生成・消滅率（全球平均値）

B-2 気温、エアロソル、ソース気体を固定したシミュレーション

固定するデータは FTP にて配布。出力は B-1 に準じる。

B-3 オゾン濃度及びその生成・消滅率を固定したシミュレーション

固定するデータは FTP にて配布。オゾン全量及び混合比を出し比較。

B-4 超音速輸送機のシミュレーション

仮定された超音速輸送機（M=2.4、EI=10）からの NO_x 排出を注入。シナリオは FTP にて配布。期間は 1 年。以下の変数を出し比較する。

N₂O, CH₄, H₂O
O₃, HCl, ClONO₂, HNO₃, N₂O₅, HBr, BrONO₂, H₂O₂
O(³P), O(¹D), NO, NO₂, OH, HO₂, HOCl, ClO, BrO, Cl₂O₂, HOBr
NO_y, Cly, Bry

オゾンの生成・消滅率

E-1 塩素の異相反応を除くシミュレーション

異相反応のうち塩素の反応を除いた実験を行なう。その他は B-1 に準じる。

これら計算条件にしたがって複数の化学輸送モデルで計算を行なった結果を図 3.3.2-1~3 に示す。図 3.3.2-1 は、実験 A-1 の結果をもとに、大気の年齢（仮想的な化学種 X1 が成層圏に入ってからその場所に到達するまでにどのくらいの時間がかかるかを表わしたものを）を求め、緯度・高度断面上にプロットしたものである。図 3.3.2-2（実験 A-3）は、成

層圏を航行する航空機からの NO_x 排出を模擬した実験で、下部成層圏における物質拡散の速さをモデルどうしで比較したものである。図 3.3.2-3 は実験 B-1 の結果の一部で、モデルによって再現された 1992 年のオゾンの高度分布を、緯度別、季節別に気候値（観測値）と比較したものである。

これらは、今後開発される化学輸送モデルの検証のために用いることができる。

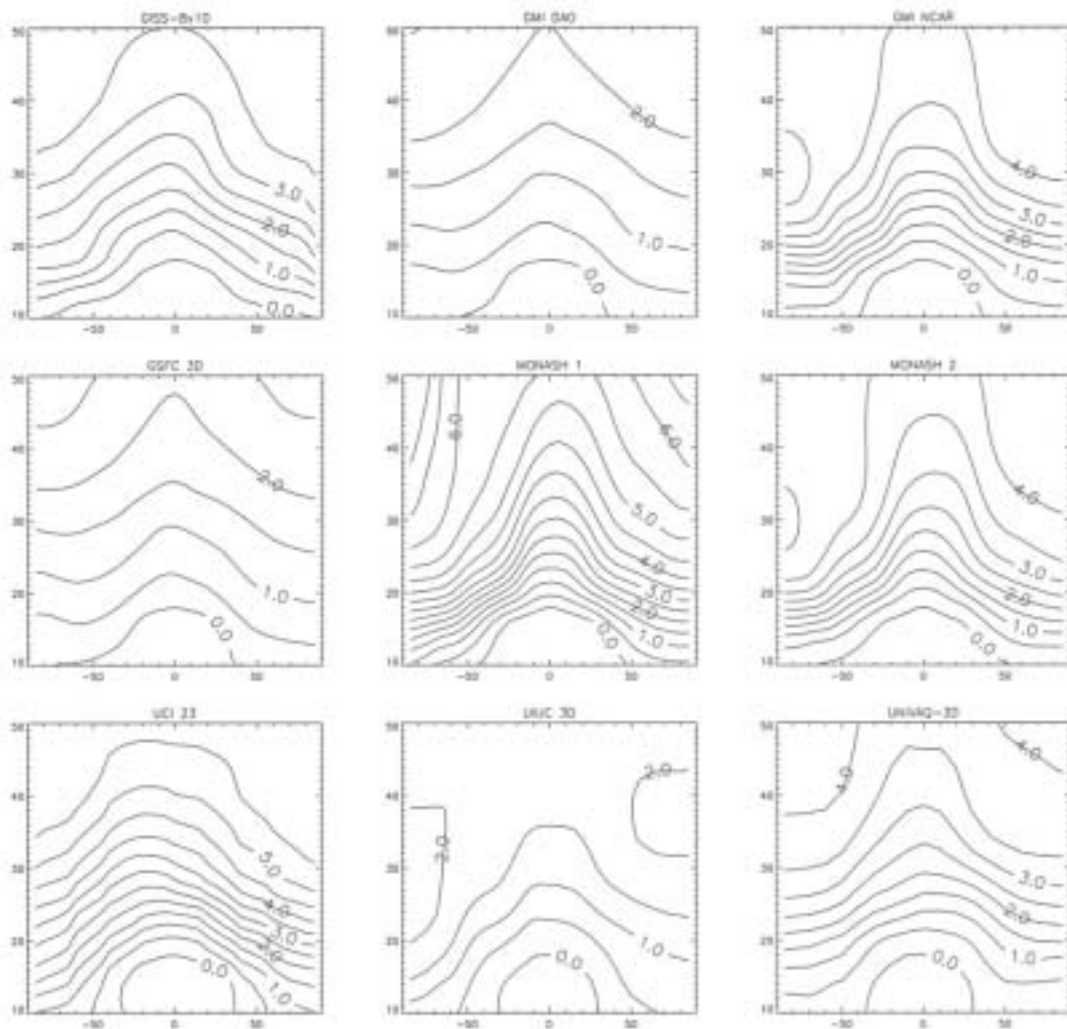


Figure 2.19. Modeled mean age distributions in the latitude-height plane as derived from the age spectrum. Each panel corresponds to an MM2 three-dimensional model, as labeled. Mean age is taken as zero at the equator and 18 km. Contour intervals are 0.5 years, and the heavy contours indicate 2 year intervals. Negative values are not shown.

図 3.3.2-1 大気の年齢スペクトルから導かれた大気の年齢の分布（単位：年）

大気の種類は、赤道上空から成層圏に入った架空の成分が、その場所に到達するまでにどのくらいの時間がかかるかを表わす。

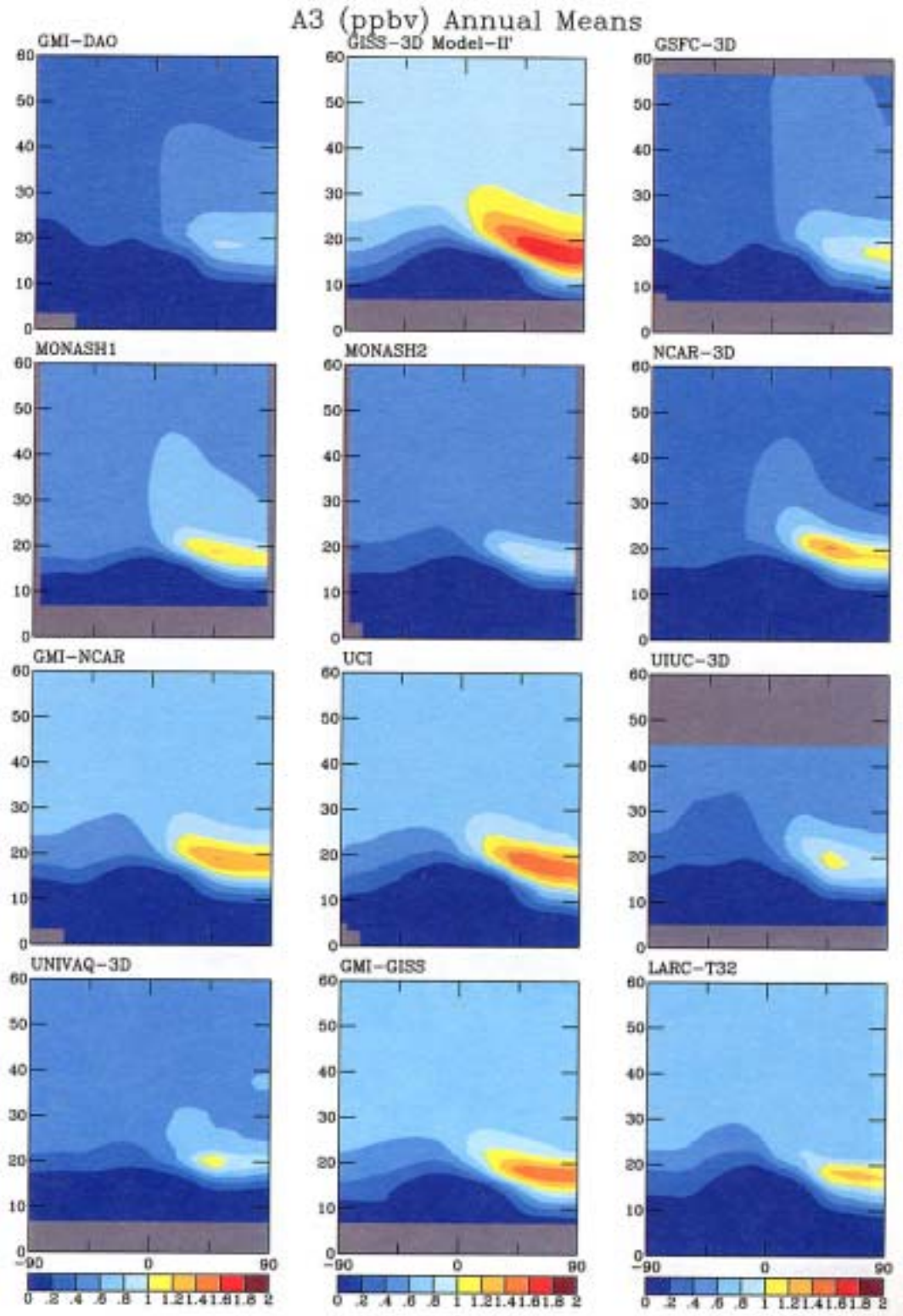


図 3.3.2-2 実験 A-3 の計算結果の例：

超音速機によって増加した NO_y の体積混合比 (単位：ppbv)

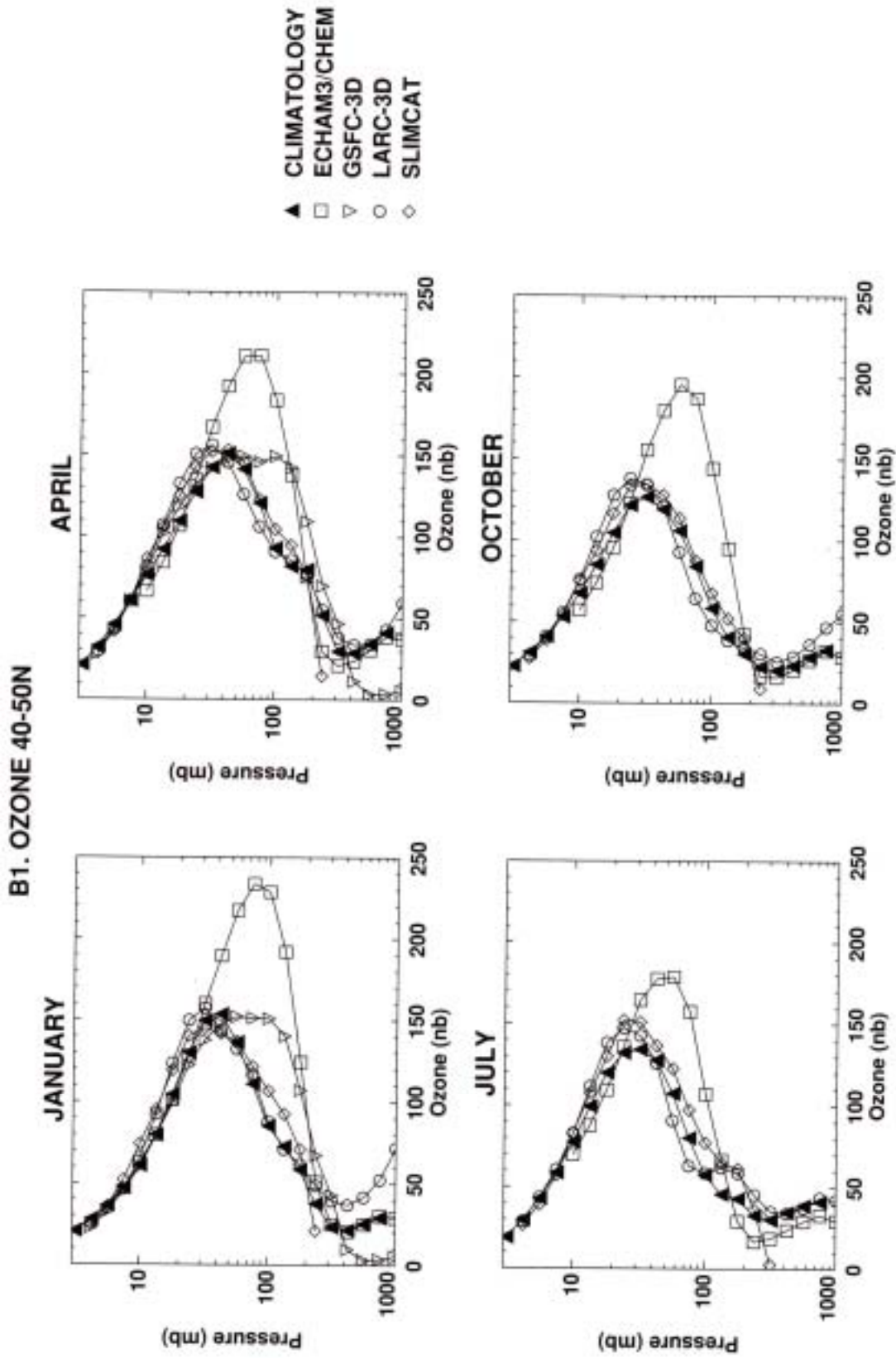


Figure 4.8. Continued.

図 3.3.2-3 実験 B-1 の計算結果と観測値の比較：北緯 40° ~ 50° における季節毎のオゾンの高度分布（単位：10⁶hPa）

4 調査研究の今後の課題及び展開

4.1 調査研究結果の概要

航空機は高度 8km 以上の上部対流圏から下部成層圏を飛行するため、そのエンジン排気は対流圏及び成層圏の両方に拡散する可能性がある。航空機のエンジン排気には、二酸化炭素、水蒸気が含まれており、これらは地球温暖化に影響している。また、エンジン排気に含まれる窒素酸化物 (NO_x) は、大気中の光化学反応によってオゾンを生成したり、メタンを分解したりすることによって、やはり温暖化に影響を与える可能性がある。

このような、航空機が地球温暖化に及ぼす影響については、ICAO (国際民間航空機関) の要請に基づいて気候変動に関する政府間パネル (IPCC) が特別報告書「航空機と地球大気」を 1999 年に取りまとめた。この報告書では、いくつかのシナリオの下で、2050 年までの航空機による潜在的な気候への影響について評価を行なった。その結果、二酸化炭素などの排出による影響はかなりよく定量化され理解が進んできている一方で、科学的な不確定性のためにわれわれの理解が不十分であり、さらなる作業が必要と結論づけられた部分もある。その一つとして、航空機の排出する NO_x がオゾンやメタンの濃度変化に果たす役割が挙げられている。大気中の物質の濃度は適切な化学輸送モデル (CTM: Chemical Transport Model) を用いることによって予測することができる。

そこで本調査研究では、航空機の排出物に含まれる NO_x が、大気中のオゾンやメタンの分布に及ぼす影響を定量的に予測するための化学輸送モデルに関する調査研究を実施した。

(1) 初期値作成手法の調査

3次元化学輸送モデルを用いて予測計算を行なう場合、大気微量成分濃度の初期値を適切に与える必要がある。初期値としては現実的な値を用いることが重要で、それには観測値を用いるのが妥当であるが、実際には 3次元の観測値が稠密に得られている化学種は少なく、鉛直積分値の全球分布や、いく地点かの高度分布が観測されることが多い。そのような観測データをもとにして、微量成分濃度の 3次元分布を得る手法について文献調査を行なった。その結果、以下のことがわかった。

観測値に基づいて初期値を作成する手法として、温位と相当緯度を指標とするもの、トラジェクトリー解析により、多くの観測データで濃度分布を構成するもの、化学輸送モデル自体の予測結果と観測データを結合させるデータ同化手法を用いるものなどがある。

- Lary らは、相当緯度と温位を座標にとった空間に微量成分濃度をマッピングする ELI 法を開発した。これは、断熱状態で空気塊は等温位面上に沿って動くこと、及び、断熱状態では渦位も保存量であるため物質トレーサーとして使えることに基づく。

- トラジェクトリー解析によって気塊の運動を追跡すれば、過去に観測された気塊が現在どこにあるかを知ることができるので、より多くの観測データを取り込んで初期値を作成することができる。
- モデル計算の過程で観測値を取り込むことによって予測結果の精度を高める手法をデータ同化という。その手法の一つとして、予報計算の結果を一次推定値とし、それに観測値をブレンドすることによって次の予報計算の初期値を作成する方法がある（間歇的同化）

断熱条件等の仮定が最も少ないデータ同化手法が現在の主流で、これを採用するのが最善であることがわかった。

(2) 気候モデルとの結合方法検討

気候モデルによって予測される地球温暖化進行時の気温・風の分布を化学輸送モデルに取り込む方法、及び化学輸送モデルによって予測されたオゾンなど温室効果気体の分布を気候モデルに反映させる方法について調査検討を行なった。特に、一方のモデル出力の座標系や解像度、時間間隔がもう一方のモデルで用いられているものと異なる場合の補間等の対処法について調査した。

化学輸送モデルとして既に関発・公開されている MOZART を例に取り、付属のドキュメントならびにソースコードを精読することにより調査した。その結果、以下のことがわかった。

- 化学輸送モデルによる予測計算を行なうためには、気象データとして気温と風速（水平成分）、地表気圧を入力する必要がある。これらはいずれも、3次元の格子点データとして用意しなければならない。化学輸送モデルによって予測された大気微量成分の濃度のうち、航空機のエンジン排気による地球温暖化への影響を評価するのに必要な化学種はオゾンとメタンである。これらの濃度を気候モデルにフィードバックすることによって、地球温暖化への影響を見積もることができる。
- 現時点では、温室効果気体について3次元の濃度分布を取り扱えるような気候モデルは少ない。航空機エンジン排気の温暖化影響を評価するためには、気候モデルでも、オゾン濃度の3次元分布を扱えるように改訂する必要がある。
- 気温、風などの気象データを化学輸送モデルで使っている格子系に補間することは可能だが、実際には化学輸送モデルの格子系自体を気象データのそれに合うように設定することが多い。これは、特に風速のデータ補間に伴って誤差が入りやすく収束・発散のバランスが崩れるため、濃度分布の計算結果の精度が悪化しやすいためである。一方、化学輸送モデルで計算した温室効果気体の分布については、補間を行なっても大きな問題は起こりにくい。
- 微量成分濃度の補間法については、通常は線形補間が用いられる。但し、鉛直方向

には変化が大きいため、スプライン補間が使われることもある。

- 非構造データから格子点値を作成するのによく用いられる距離の自乗の逆数で加重平均する方法については、格子点データをより細かいメッシュに展開すると格子状に波打ったような構造が現われ、問題が生ずることがわかった。

(3) 3次元化学輸送モデルによる予測の検証方法の調査

3次元化学輸送モデルによる大気微量成分の計算結果の精度検証のためには、どのような手法があるかを検討する。基本的には、過去または現在の大気微量成分の濃度について、計算結果と観測値を比較することになるが、どのような物質の観測データがあるか、またそのデータの特性についても調査した。さらに、モデルどうしの比較のための実験事例についても調査を行なった。

その結果、主としてオゾンの観測データについて、以下のような観測データがあることがわかった。

1. オゾンゾンデによるその場観測（高度分布が得られるが観測地点が限られる。）
2. 観測用航空機によるその場観測（精度は高く、航路に沿った分布データも得られるが、観測領域及び時期が少ない。）
3. 地上での全量観測（精度が高く、以前からのデータの蓄積もあるが、鉛直積算量のみで観測地点も主に陸上に限られる。）
4. 人工衛星からの全量観測（1日に約1回、極夜以外の全地球をカバーしたデータが得られるが、鉛直積算量のみ。）
5. 人工衛星からの掩蔽法（日出時及び日没時を利用した観測により高度分布が得られるが、観測地点が高緯度に限られ、その数も1日に数ヶ所程度。）

一方、モデル間の相互比較に関しては、NASAが1997年から1998年にかけて開催した、モデルと観測ワークショップ（Models and Measurements Workshop II、以下M&Mワークショップ）の情報を収集した。これは1992年のモデルと観測ワークショップの続編として位置づけられ、2次元モデル11個、3次元モデル9個が参加した。M&Mワークショップでは、モデル内のいくつかの要素を固定して計算を実施し、結果を比較することを行なった。例えば、ソース気体を固定して活性化学種の濃度を比較したり、オゾン化学を同じにして他の化学種の振る舞いを比較したりする実験が行なわれた。また、不活性な化学種の拡散の速さを表わす「空気の年代（Age of air）」を比較するなど輸送過程に重点を置いた相互比較や、超音速輸送機からの排出を模擬した計算結果の比較も行なった。

これらの実験結果は、NASAの報告書にまとめられており、3次元化学輸送モデルを新たに開発した際に、テストとして利用することができる。

4.2 今後の課題と展開

(1) 短期的課題

- 4次元同化手法の調査

3次元化学輸送モデルによる大気微量成分濃度の計算において、計算の過程で観測値を取り込むことによって予測結果の精度を高める4次元同化の手法について調査する。通常、予測時間が長くなると計算結果の精度は悪化するが、現実の観測値を用いて修正することで時間的にも均質なデータセットを得ることができる。短期的には、4次元同化の手法と及びそれらの特徴について調査する必要がある。

- 3次元化学輸送モデルの仕様検討

これまでの調査研究の成果を踏まえて、航空機排出物が地球温暖化に及ぼす影響を予測するための3次元化学輸送モデルの仕様について検討し、仕様書の形に取りまとめる必要がある。

(2) 中長期的課題と今後の展開

本調査研究の目的は、民間航空機の開発・生産において、今後我が国が国際共同事業において主体的立場を確保し、戦略的産業である航空機産業の振興、ひいては機械システムの振興に資することにある。そのためには海外及び国内の動向調査などの情報収集を行なうことがその活動の基本である。その一方で、航空機の技術開発とともに、航空機が地球温暖化に及ぼす影響を予測する世界と対等以上の技術を保有することが必要である。

これらを念頭に置いた上で、中長期的課題をまとめると以下のようなものである。

- 3次元化学輸送モデルによる予測計算を実施するためには、高速な計算機による大規模計算が不可欠である。そのためには、地球シミュレータ、地球フロンティア等との協力体制を築く必要がある。
- また、今後はさらに気候 - 化学フィードバック過程を直接的に考慮できるオンライン・モデルの開発へと進む見通しである。海外の動向を常に注視し、それと同等以上のモデルを持つことで、わが国の応分の貢献を果たすことができる。

参考資料-1 参考文献

- 1) D. J. Lary, M. P. Chipperfield, J. A. Pyle, W. A. Norton, L. P. Riishøjgaard: "Three-dimensional tracer initialization and general diagnostics using equivalent PV latitude - potential-temperature coordinates", *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **121**, 187-210 (1995)
- 2) R. B. Pierce, W. Grose, J. M. Russell and A. F. Tuck: "Evolution of southern hemisphere spring air masses observed by HALOE", *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 213-216 (1993)
- 3) M. R. Schoeberl and L. R. Lait: in *Proceedings of the International School of Physics, Course CXV: The Use of EOS for the Study of Atmospheric Physics*, edited by J. C. Gille and G. Visconti, North Holland, Amsterdam (1992)
- 4) G. A. Morris, J. F. Gleason, J. Ziemke and M. R. Schoeberl: "Trajectory Mapping: A tool for validation of trace gas observations", *J. Geophys. Res.*, **105**, 17875-17894 (2000)
- 5) M. R. Schoeberl and L. C. Sparling: "Trajectory Modeling", in *Proceedings of the International School of Physics, Course CXXIV: Diagnostic Tools in Atmospheric Physics*, edited by G.F.A.G. Visconti, Elsevier Science Publishing Company, Inc., New York (1994)
- 6) 環境省「平成 15 年度 オゾン層等の監視結果に関する年次報告書」(2004)
- 7) 小川利紘「大気の物理化学 新しい大気環境科学入門」第 期 気象学のプロムナード 12、東京堂出版(1991)
- 8) J. H. Park, M. K. W. Ko, C. H. Jackman, R. A. Plumb, J. A. Kaye and K. H. Sage: "Models and Measurements Intercomparison II", NASA/TM-1999-209554, National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, Hampton, VA, USA, 502 pp. (1999)

参考資料-2 用語集

異相反応 (heterogeneous reaction)

空気中に浮かぶ個体または液体との化学反応。

渦位 (potential vorticity)

渦位もしくはポテンシャル渦度 (PV と略することが多い) は以下のように定義される。

$$PV = (\zeta_{\theta} + f) \frac{\partial \theta}{\partial p}$$

ここで ζ_{θ} は等温位面上での渦度であり、以下の式で表わされる。

$$\zeta_{\theta} = \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)_{\theta} - \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{\theta}$$

また、 f はコリオリ・パラメータ ($=2\Omega \sin \phi$) で、 Ω は地球の自転角速度、 ϕ は緯度、 θ は温位、 p は気圧である。

エアロソル (aerosol)

大気中に浮遊する固体または液体の微粒子。

温位 (potential temperature)

空気塊を断熱的に標準気圧にしたときに、その空気塊が取るであろう温度。通常 θ で表わされ、その定義は次のとおり。

$$\theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R}{c_p}}$$

ここで T は気温、 p は気圧、 p_0 は基準となる気圧で、通常は1000hPaとする。 R は乾燥空気の気体定数 (一般気体定数を空気の平均分子量で割ったもの $= 287 \text{JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$)、 c_p は空気の定圧比熱 ($= 1004 \text{JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$) である。

気相反応 (gas phase reaction)

気体の化合物どうしの化学反応。

光解離 (photodissociation)

太陽光線 (主として紫外線) による化学反応。

相当緯度 (equivalent latitude)

等温位面上の渦位の値を $-90^{\circ} \sim +90^{\circ}$ に正規化したもの。

ADEOS (Advanced Earth Observing Satellite)

1996年8月17日に打ち上げられた日本の地球観測衛星。和名は「みどり」。AVNIR、

OCTS、NSCAT、TOMS、POLDER、IMG、ILAS、RIS の 8 つのセンサーを搭載。

ADEOS-II (Advanced Earth Observing Satellite-II)

2002 年 12 月 14 日に打ち上げられた日本の地球観測衛星。和名は「みどり 2 号」。
AMSR、GLI、ILAS-II、SeaWinds、POLDER の 5 つのセンサーを搭載。

AEAP (Atmospheric Effects of Aviation Program)

「航空機の大気影響」。1995 年～2001 年に実施された、NASA の航空機環境影響研究プロジェクト。

AEM-B (Application Explorer Mission -B)

米国の人工衛星。

AER (Atmospheric Environmental Research)

アトモスフェリック・エンパイロンメンタル・リサーチ社 (米国)

AERONOX (The Impact of NOx Emissions from Aircraft Upon the Atmosphere at Flight Altitudes 8-15 km)

1992 年～1994 年に実施された、欧州の航空機環境影響研究プロジェクト。

AESA (Atmospheric Effects of Stratospheric Aircraft)

「成層圏航空機の大気影響」。1990 年～2001 年に (1995 年以降は AEAP の一部として) 実施された NASA の超音速航空機の環境影響研究プロジェクト。

BUV (Back-scattered Ultra Violet)

後方紫外散乱光。日本の人工衛星 EXOS-C に搭載された、オゾンを計測するセンサー。

CAEP (Committee on Aviation Environmental Protection)

航空機環境保全委員会

CARIBIC (Civil Aircraft for the Regular Investigation of the atmosphere Based on an Instrument Container)

ドイツのマックスプランク研究所 (MPI) を中心として欧州各国の研究機関が共同して 1997 年から実施している観測計画。

CLAES (Cryogenic Limb Array Etalon Spectrometer)

UARS 搭載センサー。HNO₃、ClONO₂、CH₄、N₂O、O₃、CFCl₃、CF₂Cl₂、H₂O、温度、エアロゾル、NO、NO₂、NO₂、N₂O₅等を全球規模で計測。

CNES (Centre National d'Etudes Spatiales)

フランス国立科学研究センター

CTM (Chemistry Transport Model)
化学輸送モデル

DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)
ドイツ航空宇宙センター (ドイツ)

EC (European Committee)
欧州委員会

ECMWF (European Center for Medium-range Weather Forecast)
欧州中期気象予報センター

ENVISAT (Environment Satellite)
2002年3月に打ち上げられた ESA の地球観測衛星。ERS の観測の継続を目的としており、ASAR、MERIS、AATSR、RA-2、MWR、DORIS、GOMOS、MIPAS、SCIAMACHY、LRR の 10 のセンサー・装置を搭載している。

ERBS (Earth Radiation Budget Satellite)
米国の地球観測衛星。

ERS (European Remote Sensing Satellite)
ERS-1 は、1991年7月17日に、ERS-2 は、1995年4月21日に打ち上げられた欧州の地球観測衛星。AMI、RA、ATSR、GOME、LRR、PRARE の 6 つのセンサー・装置が搭載されている。

ESA (European Space Agency)
欧州宇宙機関

GCM (General Circulation Model)
大気大循環モデル

GOME (Global Ozone Monitoring Experiment)
欧州の人工衛星 ERS-1、ERS-2 に搭載されたセンサー。オゾン、CFCs 等を計測する。

GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars)
欧州の人工衛星 ENVISAT に搭載されたセンサー。オゾン、温度、水蒸気、NO₂、NO₃、OCIO 等を計測する。

HALOE (Halogen Occultation Experiment)

米国の人工衛星 UARS に搭載のセンサー。ClO_y、NO_y、HO_y、O₃、HCl、CH₄、H₂O、NO、NO₂、CO₂、CFC、HCl、HF、エアロゾルを全球規模で計測する。

HSCT (High Speed Civil Transport)

高速民間輸送機。1990 年代 NASA が研究していた超音速旅客機。

HIRS (High-resolution Infrared Radiation Sounder)

高分解能赤外放射サウンダー

ICAO (International Civil Aviation Organization)

国際民間航空機構

IMG (Interferometric Monitor for Greenhouse Gases)

日本の地球観測衛星 ADEOS に搭載されたセンサー。地球の熱放射収支、大気温度の垂直分布、地表温度、雲の物理的特性を監視、研究するためのセンサー。

ILAS (Improved Limb Atmospheric Spectrometer)

日本の地球観測衛星 ADEOS に搭載されたセンサー。赤外領域でオゾン (O₃)、硝酸 (HNO₃)、二酸化窒素 (NO₂)、エアロゾル、水蒸気、フロン-11 (CFC11)、メタン (CH₄)、一酸化二窒素 (N₂O) 等のオゾンホール現象に関連する大気微量成分を、また可視領域の酸素分子吸収線から気温、気圧、エアロゾルを測定する。

ILAS-II (Improved Limb Atmospheric Spectrometer-II)

日本の地球観測衛星 ADEOS-II に搭載されたセンサー。ADEOS に搭載されたセンサー-ILAS を踏襲し、観測波長範囲を広げ、鉛直分解能を高めている。O₃、HNO₃、N₂O、H₂O、CFC-11、CFC-12、CIONO₂、NO₂、エアロゾル、気温、気圧を測定する。南北両半球の高緯度地域の成層圏のオゾン層を監視・研究するため環境省が開発した大気センサで、フロンガス等の影響で生じたオゾンホールに代表される成層圏の各種現象を長期観測することにより、オゾン層破壊に関する物理化学現象の科学的解明と特定フロン規制等の対策効果の検証を目的としている。

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)

気候変動に関する政府間パネル

LIMS (Limb Infrared Monitor of the Stratosphere)

米国の人工衛星 Nimbus-7 に搭載されたセンサー。O₃、NO₂、H₂O、HNO₃ 等の高度分布を 1978 年 10 月 25 日から 1979 年 5 月 28 日まで測定した。

METEOR-3M

旧ソ連の周回型気象衛星。

MIPAS (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding)

欧州の人工衛星 ENVISAT に搭載されたセンサー。温度、オゾン、H₂O、CH₄、N₂O、HNO₃、CFC's 等を計測する。

MLS (Microwave Limb Sounder)

米国の人工衛星 UARS に搭載されたセンサー。気温、水蒸気、H₂O、OH、HO₂、O₃、CO、HCN、CH₃CN、N₂O、HNO₃、HCl、HOCl、ClO、BrO、SO₂ 等を計測する。

MOZAIC (Measurement of OZone and wAter vapour by airbus In-Service airCraft)

フランス国立科学研究センター (CNRS) を中心として欧州各国の研究機関が共同して 1984 年から実施している観測計画。

MOZART (Model of Ozone and Related Chemical Tracers)

米国大気研究センター・地球流体研究所・マックスプランク気象研究所の化学輸送モデル

MPI-Met (Max-Planck Institut für Meteorologie)

マックスプランク気象研究所 (ドイツ)

NASA (National Aeronautics and Space Administration)

米国航空宇宙局 (米国)

NCAR (National Center for Atmospheric Research)

国立大気研究センター (米国)

NCEP (National Centers for Environmental Prediction)

国立環境予報センター (米国)

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)

国立気象海洋庁 (米国)

NOXAR (Measurements of Nitrogen OXides and Ozone Along Air Routes)

1995 年 5 月 ~ 1996 年 5 月にかけて、スイス国立工科大学チューリッヒ校を中心とするグループによって実施された NO_x とオゾンを観測するプロジェクト。

ODIN

2001 年 2 月 20 日に打ち上げられたスウェーデンの地球観測衛星。光学分光計と、サブミリ波帯の放射計を搭載している。光学分光計 OSIRIS は、エアロゾル、ClO、O₃、O₂、O₄、NO、NO₂ 等の観測、サブミリ波帯の放射計 SMR は、ClO、CO、NO₂、N₂O、H₂O₂、HO₂、H₂O、H₂¹⁸O、NO、N₂O、HNO₃、O₃、O₂ を計測する。

POAM III (Polar Ozone and Aerosol Measurement III)

フランス CNES の人工衛星 SPOT-4 に搭載されたセンサー。水蒸気、O₃、エアロソル、NO₂などを計測する。

POES (Polar-orbiting Environmental Satellite)

2つの極軌道衛星を含んだ NASA、NOAA、英国、仏国の共同ミッション。

PSC (Polar Stratospheric Cloud)

極域成層圏雲。冬季の極域成層圏で発生する雲。硝酸と水を主成分とするタイプ と、氷の粒子であるタイプ がある。その表面で起きる異相反応によって極域春季オゾン減少が起きると考えられている。

SAGE (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment)

米国の人工衛星 AEM-B に搭載されたセンサー。O₃、エアロソルなどを計測する。

SAGE II (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment II)

米国の人工衛星 EBRS に搭載されたセンサー。O₃、NO₂、H₂O、エアロソルなどを計測する。

SAGE III (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment III)

ロシアの人工衛星 METEOR-3M に搭載されたセンサー。O₃、NO₂、NO₃、H₂O、OCIO、エアロソル、気温、気圧、雲などを計測する。

SBUV (Solar Back-scattered Ultra Violet)

米国の人工衛星 Nimbus-7 に搭載されたセンサー。後方散乱紫外光を分光測定してオゾンの高度分布を計測する。

SBUV/2 (Solar Back-scattered Ultra Violet/2)

米国の人工衛星 NOAA に搭載されたセンサー。後方散乱紫外光を分光測定してオゾンの高度分布を計測する。

SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption SpectroMeter Atmospheric ChartographY)

欧州の人工衛星 ENVISAT に搭載されたセンサー。O₃、O₂、(O₃)₂、H₂CO、SO₂、BrO、OCIO、ClO、NO、NO₂、NO₃、H₂O、CO、CO₂、CH₄、N₂O、雲、エアロゾルを計測する。

SMR (Sub-Millimeter Radiometer)

スウェーデンの人工衛星 ODIN に搭載されたセンサー。ClO、CO、NO₂、N₂O、H₂O₂、HO₂、H₂O、H₂¹⁸O、NO、N₂O、HNO₃、O₃、O₂を計測する。

SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre 4)

フランス国立科学研究センター（CNRS）が1998年3月に打ち上げた人工衛星。

TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer)

Earth Probe、ADEOS、METEOR3、Nimbus-7、TRIANA、QuikTOMS に搭載されたオゾン全量を計測するセンサー。

TOVS (TIROS Operational Vertical Sounder)

米国 NOAA の人工衛星 POES シリーズに搭載されたセンサー。

UARS (Upper Atmosphere Research Satellite)

1991 年にシャトルから軌道投入された米国の地球観測衛星。ACRIM、CLAES、HALOE、HRDI、ISAMS、MLS、PEM、SOLSTICE、SUSIM、WINDI の 10 センサを搭載している。

禁無断転載

システム技術開発調査研究

16 R 7

気候モデルと結合した3次元化学輸送モデルによる
予測計算の高精度・高次元化に関する調査研究

報告書

(要旨)

平成17年3月

作成 財団法人 機械システム振興協会
〒108-0073
東京都港区三田一丁目4番28号
電話 03-3454-1311

委託先 財団法人 航空機国際共同開発促進基金
〒105-0001
東京都港区虎ノ門三丁目6番2号
(第2秋山ビルディング)
電話 03-3432-8361