

---

## 解 説

---

### WDCGG における主要温室効果ガスの全球濃度解析手法

堤 之智\*・森 一正\*\*・平原 隆寿\*\*\*・池上 雅明\*\*\*  
・栗原 幸雄\*\*\*・Thomas J. Conway\*\*\*\*

#### 要 旨

地球環境・海洋部環境気象管理官は、全球規模で大気環境を監視する世界気象機関 (WMO) 全球大気監視 (Global Atmosphere Watch : GAW) プログラムの中で、WMO 温室効果ガス世界資料センター (World Data Centre for Greenhouse Gases : WDCGG) を運営しており、世界中の GAW 観測点から温室効果ガスの観測データを収集・保管し、世界に提供している。さらに WDCGG は、温室効果ガスの全球平均濃度などの解析も行っており、その結果は、WMO から毎年発行される温室効果ガス年報に掲載されている。

WDCGG に提出された各観測点の観測データの品質は必ずしも一様ではないため、例えば全球平均濃度を出すのに、提出されたデータをそのまま算術平均しても妥当な結果にならない。そのため、WDCGG では全球規模の濃度解析を行う際に、以下の手法を取っている。まず、観測データとともに提供される補足情報 (メタデータ) を参照して、同じ観測スケール (尺度) を用いている地点を選び出す。次に、選び出した各地点と南極点との観測値の差を、各地点の緯度ごとに評価して、全球解析にふさわしい空間代表性を持つ地点を選別する。さらにデータを季節変化成分と長期変動成分に分け、それらを用いてデータを内外挿して、全使用観測点のデータが、空白期間がなく同一観測期間を持ったデータセットを作成する。そしてこのデータセットを用いて全球濃度解析を行っている。WDCGG は、解析結果の世界的な信頼を得るために、WMO の会議や GAW 科学諮問部会でその解析手法を議論した上で、2009 年にその内容を WMO の GAW Technical Report に発表している。この報告は、その内容にそれまでに至る背景や経緯を補足して和文で記載するものである。

---

\* 青森地方気象台

\*\* 神戸海洋気象台

\*\*\* 地球環境・海洋部環境気象管理官

\*\*\*\* Global Monitoring Division, Earth System Research Laboratory, Boulder, Colorado, USA

1. はじめに

1.1 GAW とは

WMO/GAW は、WMO が主導して各国や各研究機関が実施している大気環境に関するプログラムの一つであり、1989 年に開始され、世界的な規模を持ち、観測のあり方（節末参照）を調整した観測により、一貫した観測結果を出せるようにしている（WMO, 1992）。GAW には、米国海洋大気庁（NOAA）を含む多くの機関が参加しており、例えばオゾンや温室効果ガス、酸性雨などについて、国際的な世界的規模の観測ネットワークを確立している（例えば第 1 図）。

WMO は、GAW の実施方針を戦略計画として定めており、2007 年に新たに GAW 戦略計画（2008-2015）（WMO, 2007a）を定めた（詳しくは堤（2007）を参照）。この戦略計画では、以下に示されている使命に従って全球規模で大気環境の監視を実施するとしている。

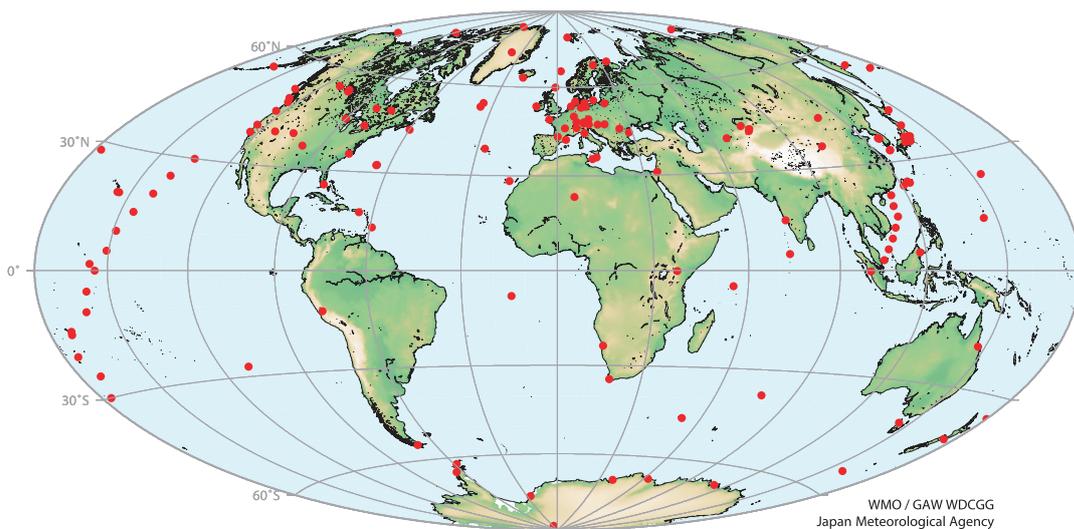
- ・大気中の化学成分及び特定の物理的特性について、地球規模の長期的な監視を継続的に実施する。
- ・品質保証及び品質管理に重点を置く。
- ・利用者に対し、関連する統合プロダクト・サービスを提供する。

上記を通じて、

- ・社会に与える環境上のリスクを低減するとともに環境に関する条約の要請にこたえる。
- ・気候、気象及び大気質の予報能力を高める。
- ・環境政策の支援に関する科学的評価に寄与する。

WMO/GAW は、この地球規模の観測を実施する上で、主分野ごとに設置された科学諮問部会が科学的・技術的な方針を示すとともに、濃度測定の尺度となる観測スケールの維持・管理を行う中央校正施設（Central Calibration Laboratory : CCL）、観測技術の確認や支援を行う品質保証科学センター（Quality Assurance and Science Activity Centre : QA/SAC）、観測データの品質向上やトレーサビリティ（観測スケールの一貫性）の確保を支援する世界校正センター（World Calibration Centre : WCC）、観測データの収集・配信や関連情報の提供を行う世界資料センター（World Data Centre : WDC）を設立し、各観測点による観測を支援している。また、WMO/GAW は、各観測点で相互比較実験（ラウンドロビン）を実施して、トレーサビリティや観測品質の確保にも努めている。これらにより、GAW により以下の点が調整・推進されて一貫性のある全球規模の観測が可能となっている。

- ・比較的統一された観測手法・手順



第 1 図 主な温室効果ガスに関する GAW 観測点の全球分布  
この観測網は GCOS の大気化学成分の観測網となっている。

- ・同一の観測基準
- ・データ品質・精度に関する情報提供
- ・あらゆる観測データや観測に関する情報への容易なアクセス

## 1.2 温室効果ガスの全球濃度解析に関する世界の状況と観測データに関する問題点

二酸化炭素をはじめとする長寿命の温室効果ガスは、地球温暖化に大きく寄与している。それらの状況の正確な把握は、気候変動に関する国際連合枠組条約（UNFCCC）を通してその緩和策や適応策を策定する上で、基盤となる情報となる。さらに、それらのガスの全球分布は、ある一定の地域内での炭素の主な放出と吸収の強さを特定することにも貢献する。その温室効果ガスの全球の状況や分布の算出には、世界中の観測点からのデータが必要である。

このように、地球温暖化問題にとって重要な温室効果ガスの全球規模での状況把握に関して、NOAAの気候監視診断研究所炭素循環グループ（現地球システム観測研究所の全球監視部、Earth System Research Laboratory/Global Monitoring Division : ESRL/GMD）は、1968年に世界規模の観測ネットワークを確立して、各観測点でプラスチックにサンプリングされた空気中のCO<sub>2</sub>測定を開始し（Komhyr *et al.*, 1985）、その後、1983年に観測をメタンに拡充した（Dlugokencky *et al.*, 1994）。NOAAの観測ネットワークは米国内の地点と外国機関との協力による世界的に分散した地点からなり、広域でよく混合された対流圏の空気を代表する海洋上や沿岸地域の場所が選択されている（Conway *et al.*, 1994）。この観測は現在もGAWの一部として継続されており、GAWにとっても貴重な観測地点となっている。

現在、CO<sub>2</sub>などの温室効果ガスに関する全球平均濃度などの情報は、地上の観測点の精密な観測から算出されているが、世界には幾種類かの全球平均濃度値が存在している。WMOでは、要旨に示したように、温室効果ガス年報で毎年CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oの全球平均濃度と年濃度増加量を発表している。それ以外に、IPCC（2007）は、スクリプス海洋研究所の観測網とNOAAのESRL/

GMDの観測網を用いて、2005年のCO<sub>2</sub>全球平均濃度を示している。NOAAでは、自らの観測網とConway *et al.*（1994）の解析手法を用いて毎年のCO<sub>2</sub>全球平均濃度や増加量を発表している（<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>）。全球規模の地上観測ネットワークによる解析結果はこれらに限られている。

世界的なネットワークからの温室効果ガス観測データを用いて全球濃度解析する際には、使用する観測データについて、いくつかの問題点を考慮する必要がある。まず、全球濃度解析のための観測地点は、温室効果ガスを測定する際に、注意深く維持されている一つの基準（参照標準と呼ばれる）に基づいた観測スケール（尺度）を採用していなければならない（でなければ測定データを比較できない）。また、観測点は全球規模の変動を把握するに十分な空間代表性を持っていないと、ある地域特有の状況に偏った結果となる。さらに、全球濃度解析のための観測は観測期間が同一でなければならない（これを同期と呼ぶ）。そうでなければ、全球平均濃度などの得られた結果は、利用可能な観測地点や観測データの量の変化による重みによって偏差を持つ。特に最後の問題は厄介で、実際の観測期間は観測所ごとに異なっており（特に観測の開始時期）、また観測データは測定器の不調や他の理由により欠測して空白期間があることがある。これらの問題を対処するため、観測データを選別・加工し、品質一様なデータセットを作成してから全球濃度解析を行う必要がある。

## 1.3 WDCGGの役割

WMOの世界資料センターの中で、温室効果ガスについては、1990年に気象庁に温室効果ガス世界資料センター（WDCGG）が設立され、現在は地球環境・海洋部環境気象管理官が運営を行っている。GAW戦略計画（2008-2015）（WMO, 2007a）によると、世界資料センターへの委託事項は以下のとおりとなっている。

- 適切な保管手段とネットワークにより、GAWが地球規模で調整する責任を負っている大気化学観測の利用者に対して、十分に把

- 握された品質を持つ観測結果に容易にアクセスできるようにするための支援を行う。
- b) データの提出及び提供のために、観測要素ごとに一貫したガイドラインとデータフォーマットを確立する。
  - c) 提出されたデータについて、必要なフォーマット項目及び包括的メタデータ（観測関連情報）の内容を確認し、これらの基準に合致していないデータについては受理しない。
  - d) 提出されたデータについて妥当性及び整合性を確認し、問題箇所にはフラグを立て、必要な場合は観測点に対しフィードバックを行う。
  - e) GAW の世界データセンターに関する専門家チームに参加し、当該専門家チームの目標を達成することに貢献する。
  - f) 特にデータフォーマットの整合性及び準リアルタイムでのデータ配信に対するニーズを配慮しつつ WMO 情報システム (WMO information system : WIS) の発展に伴い WDC の運用を高度化させる。

これに従って、WDCGG は、提出データの方針を定めるとともに、観測点ごとに異なる提出データのフォーマットを変換・統一している。また、誤観測やデータ処理の間違いによる異常などのデータ品質をチェックし、各観測点に確認してもらった後に、利用条件を付けて WDCGG のウェブサイトからインターネットを通じてデータを提供している ([http://gaw.kishou.go.jp/wdcgg/jp/wdcgg\\_j.html](http://gaw.kishou.go.jp/wdcgg/jp/wdcgg_j.html))。さらに、全球の温室効果ガスの状況に関する解析結果を WMO WDCGG データサマリーなどの報告書で毎年発表している。

全球気候観測システム (Global Climate Observing System : GCOS) は、世界の気候観測を調整する枠組みであり、その GCOS は気候変動に関する国際連合枠組条約第 11 回締約国会議 (COP11) で採択された「気候変動に関する国際連合枠組条約を支援するための GCOS 実施計画 (以下 GCOS 実施計画)」(WMO, 2004) により気候変動に関する国際連合枠組条約第 5 条の研究及び組織的観測を促進する役割を負っている。GAW は 2005 年に GCOS と合意文書を交わ

し、GCOS 実施計画の大気化学成分（現時点では CO<sub>2</sub> と CH<sub>4</sub>）を担当することとなり、気候変動に関する国際連合枠組条約の「研究及び組織的観測」に公式に寄与できることになった。これを受けて 2006 年から、WMO は全球の温室効果ガスの最新状況を掲載した WMO 温室効果ガス年報 (WMO Greenhouse Gas Bulletin) を発行している。そして、本年報において WDCGG は、全球平均濃度などの解析結果の作成を担当している。WMO 温室効果ガス年報は、毎年 WMO と気象庁から報道発表され、世界のマスコミによって報道されるとともに、気候変動に関する国際連合枠組条約 / 京都議定書の締約国会議 (COP/MOP) の会議場前で配布されている。

#### 1.4 WDCGG の世界に向けた情報発信のための問題点

これまで、WDCGG が解析結果を世界へ向けに発信する際に、2つの大きな問題があった。一つは、GAW 観測点での温室効果ガス観測手法やデータ品質に関する情報の透明性の確保であり、二つめは WDCGG の解析結果に関する利用者の信頼性の獲得である。前者に関して、温室効果ガスの観測は比較的歴史が浅く、考え方や手法が統一されていない部分があった。つまり、全球規模での解析を的確に行うためには、観測データだけでなく観測点での観測手法や観測スケール、空間代表性（すべての観測点が地球規模の現象を対象としているわけではない）などを正確に把握する必要がある。しかし、観測点から提出されるデータによっては、データ利用者に必要な情報が欠けたり、報告項目がばらばらであったりして、データ利用に関して多くの問題を抱えていたものがあつた。そのため、WDCGG では、的確なデータ利用のために必要な情報やそのあり方を洗い出すための調査・検討を行い、さらに GAW 温室効果ガス科学諮問部会や WMO 世界資料センター専門家チームと何度も綿密な協議を行った。そして、2007 年に、データ提出に当たっての考え方やデータ利用に必要な観測関連データ（メタデータ）等を WDCGG ガイド (Data Submission and Dissemination Guide) に定め、WMO から

GAW Technical Report として出版した (WMO, 2007b)。このガイドは、これまで各国機関や研究所ごとにばらばらであった温室効果ガスのデータ提供のあり方を、データ利用の観点から整理して、世界で初めて系統的に示したものである。世界各地の観測点からの観測データや観測関連データが、このガイドに沿って WDCGG に提出されることによって、観測やデータに関する内容や品質の一貫性・透明性が高まり、WMO 温室効果ガス年報などでのよりの確かな全球濃度解析が可能になっている。

さて、もう一つの問題である WDCGG の解析結果に関する利用者の信頼性の獲得であるが、そのためには、まず NOAA の動向に触れておく必要がある。NOAA/ESRL/GMD は、第 1.2 節で述べたように、温室効果ガスの吸・排出源から比較的離れた海洋性の大気境界層内に自前の観測地点を展開している。そして観測期間が同期した品質が一般的なデータセットを Masarie and Tans (1995) の方法によって解析的に作成している。これから計算された全球平均濃度などは世界的に広く使われている。一方、WDCGG は、同様なデータセットを作成する際に、海洋性の大気境界層内の地点だけでなく、品質や空間代表性が確保されれば、なるべく多くの GAW 観測点を使うことがより正確な全球濃度解析に貢献すると考えており、その利用地点は NOAA の観測地点に加えて内陸の濃度変動が大きい観測点を含んでいる。さらに GAW は多様な空間代表性を持つ観測点をネットワークに含んでいるため、NOAA と異なる解析手法をとっている部分がある。そのため、WDCGG の解析結果が世界の信頼を得るには、その手法について、まず世界の温室効果ガス関連研究者の信頼を得る必要がある。WDCGG は、解析手法の科学的合理性について WMO 等が主催する「二酸化炭素と関連気体の測定手法に関する専門家会議」において発表・議論するとともに、温室効果ガス科学諮問部会の査読を受けた上で、2009 年にその全球濃度解析手法をその信頼性を世界の研究者・関係者に公開するため、「Global analysis method on major greenhouse gases by the World Data Centre for Greenhouse Gases」という標題の報告

を GAW Technical Report として発行した (WMO, 2009)。本報告は、WDCGG で行っている温室効果ガスの全球濃度解析業務を実施する上で関係者の理解を高めるため、この GAW Technical Report での発行内容をわかりやすく一部補足して和文で掲載するものである。以下の第 2 章でこの WDCGG でのデータセットの作成方法と全球濃度解析手法を示す。第 3 章で NOAA の手法による全球平均濃度と WDCGG の全球平均濃度との比較結果を示す。

## 2. WDCGG での全球濃度解析手法

### 2.1 WDCGG での全球濃度解析手法の概要

WDCGG は、第 1.2 節で挙げた全球濃度解析のための問題点に対処するために、以下の手順 (Step) によって WMO の参照標準とトレーサビリティを持ち、空間代表性がある一定基準以上で、かつ空白期間のない同期した観測点データからなるデータセットを作成し、それを用いて全球平均濃度やその他の解析値を計算している。なお、このデータセットは、最低 1 年以上の継続期間を持つ観測点の月平均濃度を用いて作成される。

- Step 1 : WMO 参照標準とのトレーサビリティに基づく地点選別
- Step 2 : 同一地点複数データの統合
- Step 3 : 全球濃度解析のための地点選択
- Step 4 : フーリエ級数を用いた平均の季節変化の抽出
- Step 5 : データ空白期間の内挿
- Step 6 : データ期間同期のための外挿
- Step 7 : 緯度帯平均や全球平均濃度、トレンド、濃度増加量の計算

第 2.2 節以降で各ステップを詳しく説明する。

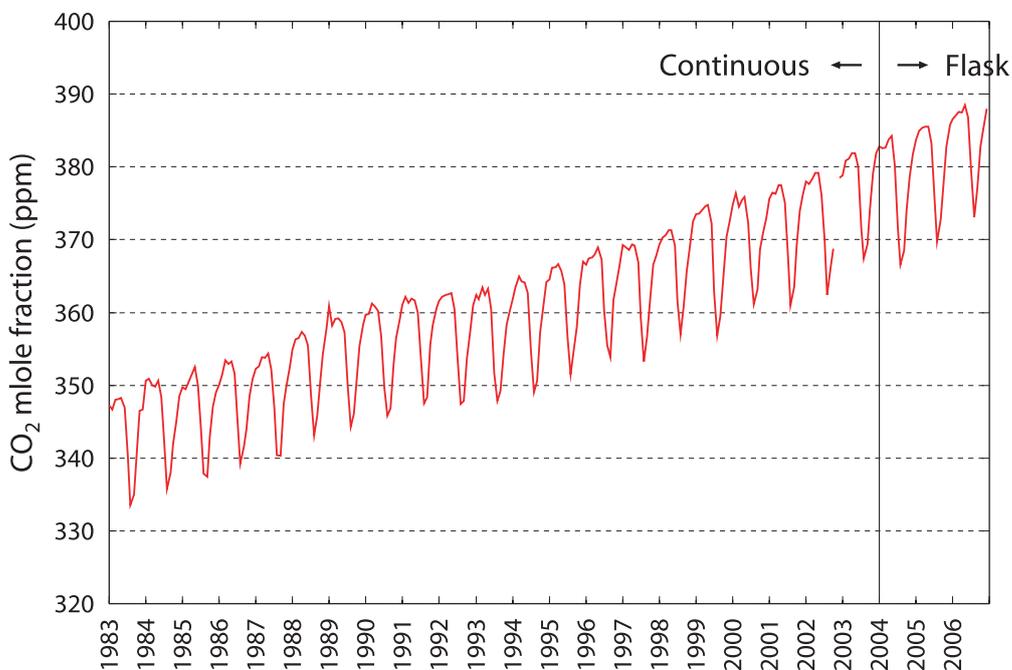
### 2.2 WMO 参照標準のトレーサビリティに基づく地点選択 (Step1)

WDCGG は、まず提出されているメタデータ (観測関連情報) に基づき、観測地点が採用している観測スケールの一貫性を、全観測期間にわたって確認している。そして WDCGG は、CO<sub>2</sub> の全球濃度解析については、WMO の CO<sub>2</sub> 参照標準又は SIO スケール (前の WMO 参照標準) に対してト

レーサビリティのある地点データのみを使用している。CH<sub>4</sub>については、2005年にWMO参照標準がNOAAによって確立されたので(Dlugokencky *et al.*, 2005), WDCGGはWMO参照標準とトレーサビリティがある地点のデータを使用している。しかし、この参照標準は、まだ世界的に十分流布していないので、用いている観測スケールとWMO参照標準スケールとの差を科学論文として公表している地点のデータについても、それをWMO参照標準スケールに換算して全球濃度解析に使用している(WMO(2007b)のAppendixを参照)。N<sub>2</sub>Oは、NOAAの維持するWMO参照標準スケール(Hall *et al.*, 2007)を用いた観測データと、別に観測ネットワークを持っているAGAGE(Advanced Global Atmospheric Gases Experiment)グループの観測地点のデータを使用している。AGAGEグループは、独自の観測スケールを使っているが、NOAAの観測地点と同一地点で比較観測が行われており、その結果を用いて、WMO参照標準に基づいた濃度に換算している。

### 2.3 単一地点複数データの統合(Step2)

温室効果ガスの観測の手法には、その場で常時分析を行う連続観測と、観測点での空気を定期的にボトル(フラスコ)に詰めて研究所へ送り、そこで分析するフラスコ採取観測がある。そして場所によってはそれら両方が行われている観測地点があるが、フラスコ採取観測は週1回程度の観測頻度なので、もしバックグラウンドとしてのデータ管理が適切であれば、通常は連続観測の方がより良い地点代表性を持っていると考えられる。1地点のデータは1種類にする必要があるため、WDCGGは観測地点に連続観測データとフラスコ採取観測データがともにある場合は、まず、連続観測データを採用する。そして連続観測データの無い期間については(通常は連続観測の方が観測期間が短いことが多い)、フラスコ採取観測データで埋めて統合したデータを作成している(第2図参照)。両データは同等の品質を持っているわけではないが、Tans *et al.*(1990)によると、NOAAの同一地点での連続観測のデータとフラスコ採取観測によるデータの差は、月平均値で±0.16~0.35ppm以内と見積もっている。



第2図 連続データとフラスコサンプリングデータが統合された例

2003年12月までの連続データと2004年1月以降のフラスコサンプリングデータが統合されている。

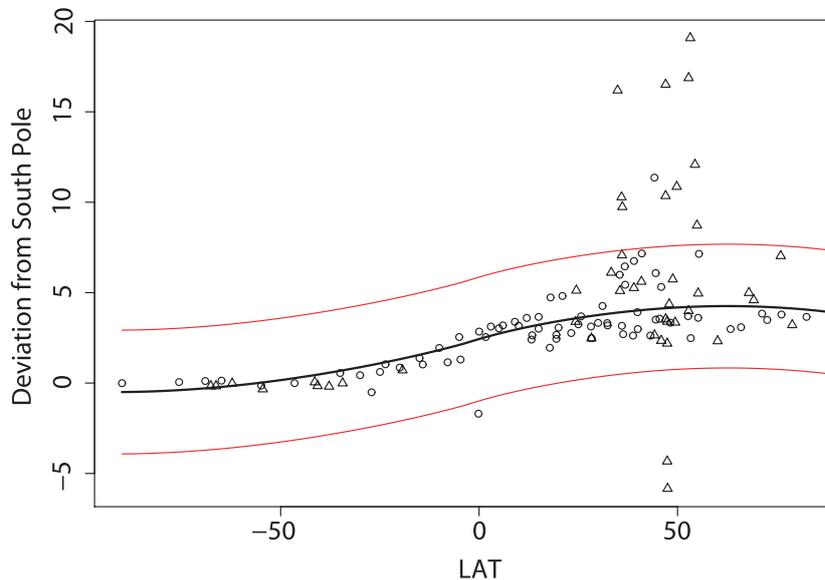
### 2.4 全球濃度解析のための地点選択 (Step3)

WDCGG には様々な空間代表性を持つ観測地点からデータが送られてくる。そのため WDCGG は、全球濃度解析に適当なバックグラウンド観測地点の選別を次のようにしている。

- a) 南極に対して規格化した全地点の平均濃度の緯度分布を loess モデル曲線 (Cleveland and Devlin, 1988 ; Masarie and Tans, 1995) に当てはめて緯度勾配曲線を決定する。
- b) Tans *et al.* (1990) と同様に、緯度勾配曲線から  $\pm 3 \sigma$  より離れた平均濃度を持つ地点 (第 3 図) を除外する。

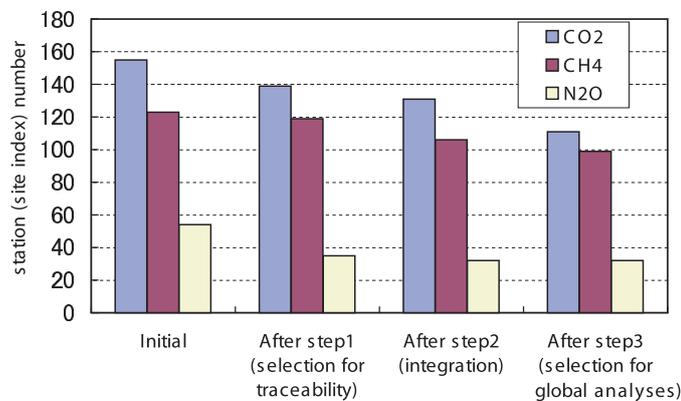
- c) 残った地点に対して再びこれらの手順を当てはめ、残ったすべての地点の平均濃度が、緯度勾配曲線から  $\pm 3 \sigma$  内にとどまるようになるまで、これを繰り返す。最終的に残った地点を採用する。

第 4 図に WMO 温室効果ガス年報第 3 号について、Step1 から Step3 までの手法によって選別された観測点の数を、それぞれの要素ごとに示す。年報に使用された観測地点とデータ提供者は、WDCGG のホームページで公開されている (<http://gaw.kishou.go.jp/wdcgg/products/bulletin.html>)。



第 3 図 南極に対して規格化されている平均 CO<sub>2</sub> 濃度の緯度分布

太線は Loess モデルを用いた緯度勾配曲線、細線は残っている地点の濃度による緯度勾配曲線からの  $\pm 3 \sigma$  の範囲。範囲外の地点を除去して再び  $\pm 3 \sigma$  の範囲の計算を繰り返す。



第 4 図 データ提供全地点数と WMO 温室効果ガス年報第 3 号でのステップ 1 (トレーサビリティによる選択)、ステップ 2 (データ結合)、ステップ 3 (全球解析用の地点選択) それぞれによって残った地点数 (地点インデックス数)

### 2.5 フーリエ級数を用いた観測点における平均の季節変化の抽出 (Step4)

それぞれの観測点データは、長期トレンドと平均の季節変化に分解できる。その地点の最も長く継続したデータ部分を用いてその観測点の平均の季節変化を次のようにしてフーリエ級数を用いて表す。

- (a) 観測値データ  $F(t)$  に対して最小自乗法により線形トレンド  $T1(t)$  を算出する。
- (b) 線形トレンド  $T1(t)$  を差し引いた時系列データ  $F(t)-T1(t)$  に対して、フーリエ級数を適用し、平均の季節変化  $S(t)$  を算出する (第5図)。

$$S(t) = \sum_{i=1}^3 [A_i \sin(2\pi it) + B_i \cos(2\pi it)]$$

ここで、 $A_i$  と  $B_i$  はそれぞれの振幅パラメータ、 $t$  は解析開始からの経過時間 (単位は月)、 $i$  は次数。ここでの解析では  $i$  はすべての観測点における季節変化を表現できるように3を用いている (Nakazawa *et al.*, 1991)。

- (c) もとの時系列データ  $F(t)$  から平均季節変化  $S1(t)$  を差し引いた時系列データに対して、Lanczos フィルター (カットオフ周波数は、0.48 サイクル/年) (Duchon, 1979) をかけて長期トレンドを求める。
- (d) もとの時系列データ  $F(t)$  から (c) で求めた長期トレンドを差し引く。この長期トレンドを差し引いた時系列に対して、(b) と同様の操作によって、平均的な季節変化を求める。
- (e) (c) 及び (d) の操作を、平均季節変化及び長期トレンドが変わらなくなるまで繰り返して、長期トレンドと平均の季節変化を決定する (第6図)。

### 2.6 データ空白期間の内挿 (Step5)

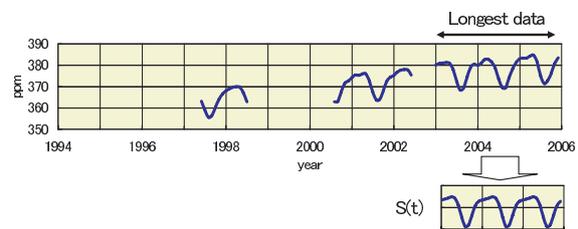
観測期間に空白がある場合には、それを埋めるために平均の季節変化  $S(t)$  を差し引いた長期トレンドに対して線形内挿を行う。その後内挿期間に平均の季節変化を加えることによって空白のない連続した濃度変動を再現する (第7図)。

### 2.7 データ期間同期のための外挿 (Step6)

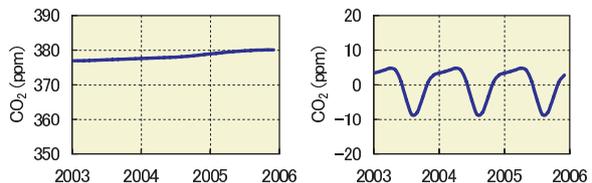
WDCGG では、全球濃度解析に用いる各観測点

のデータ期間の同期を取るために、不足の期間に対して外挿を行う。例えば  $CO_2$  では各緯度帯 (30度ごと) には、1983年からの観測期間を持つ長期観測点がいくつかあるので、同期される地点の長期トレンドは、同じ緯度帯にある長期観測点の緯度帯平均した長期トレンドに沿って、同期期間の最初 (1983年) まで外挿される。最後に平均の季節変化を加えることによって同期データが得られる (第8図)。

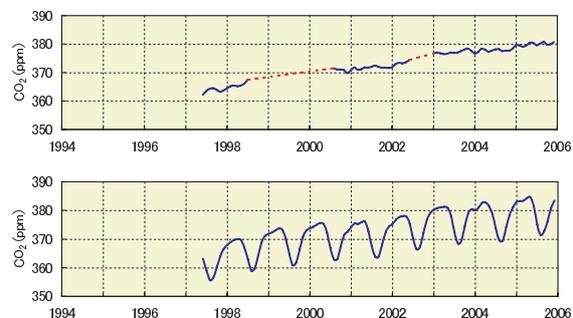
これらの手順により、WMO 参照標準スケールとトレーサビリティがとれてかつ空白期間のない観測期間が同期したデータセットが作成される (第9図)。



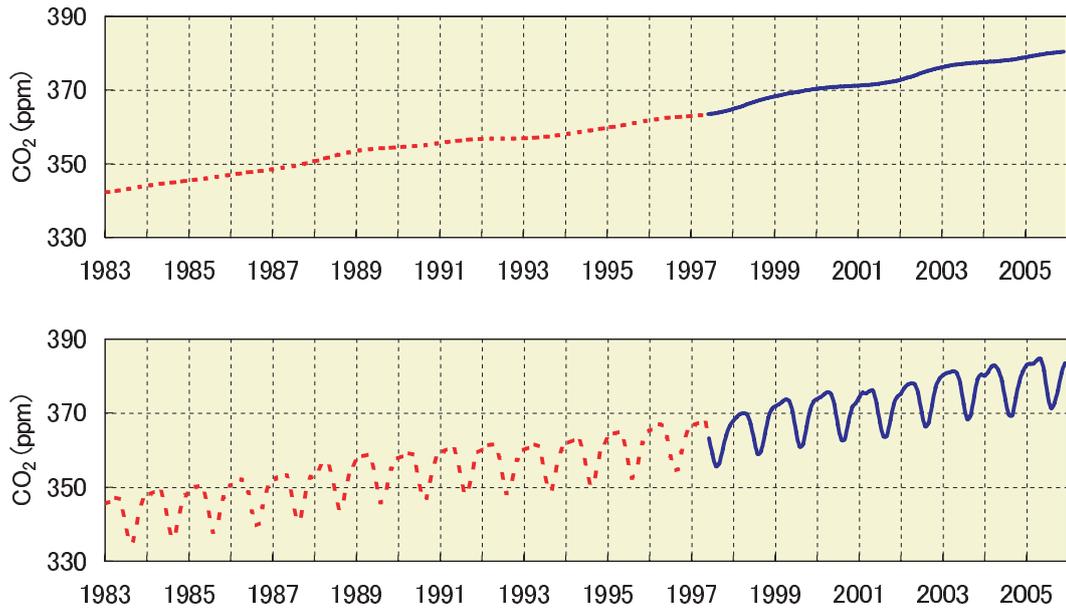
第5図 データに欠測がある  $CO_2$  観測データの例と最長の連続部分を用いた平均された季節変化  $S(t)$



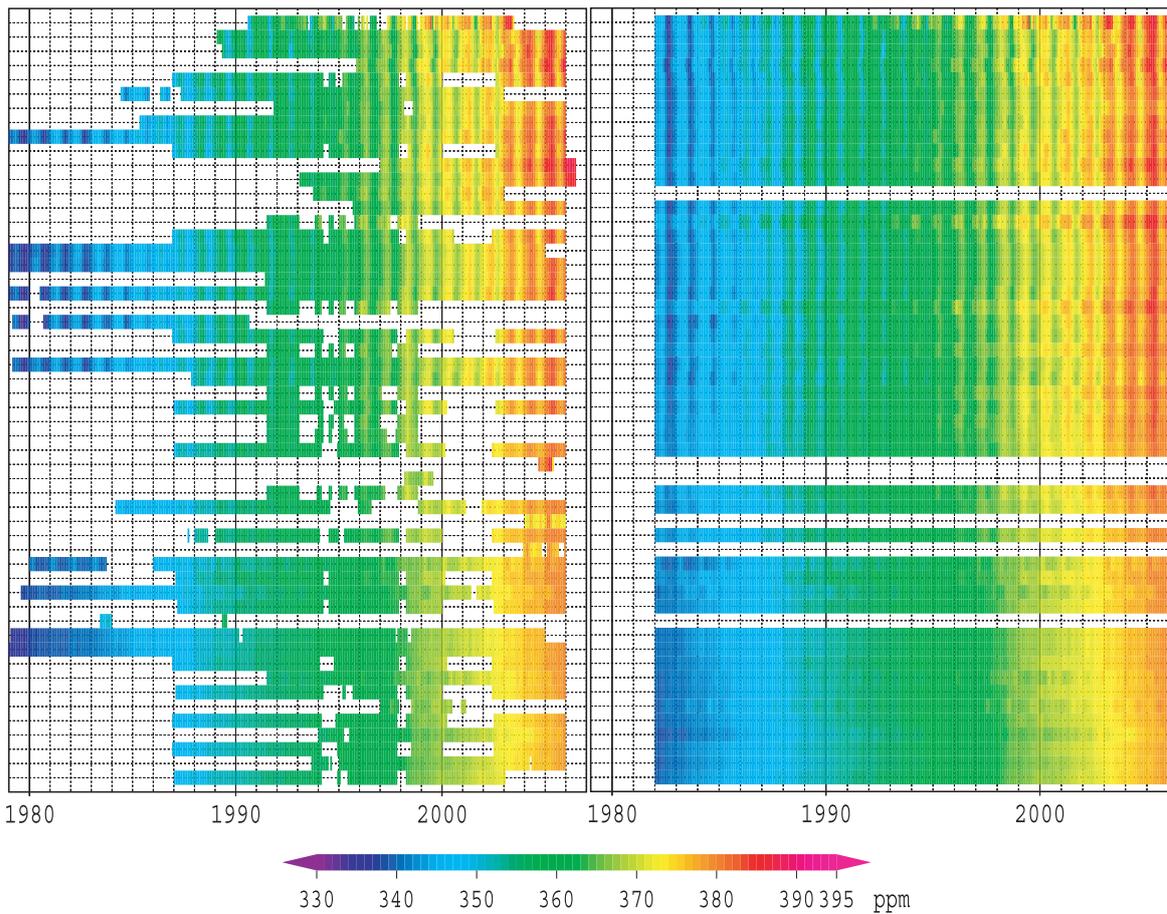
第6図  $CO_2$  の長期トレンド (左) と平均の季節変化 (右) の例



第7図 空白期間を内挿 (破線) した  $CO_2$  長期トレンド (上) と平均の季節変化を加えて再現した  $CO_2$  濃度変動 (下)



第 8 図 データ同期のために外挿された(破線) CO<sub>2</sub> 長期トレンド(上)と長期濃度変動(下)



第 9 図 WDCGG に保管されている CO<sub>2</sub> の月平均濃度データ(左)と全球解析のために同期処理された月平均濃度データセット(右)  
色は濃度に応じて変えてある. 観測点は北から南の順に上から並んでいる.

## 2.8 緯度帯平均濃度と全球平均濃度、長期トレンド、濃度増加量の計算方法 (Step7)

緯度帯別月平均濃度は、第2.7節で作成された同期データセットを用いて、30度ごとの緯度帯に含まれる地点の算術平均により算出される。全球及び北半球・南半球月平均濃度は、この緯度帯別月平均濃度に緯度別面積比の重みをかけて算出される。全球及び北半球・南半球平均濃度の長期トレンドは、第2.5節と同じ手法により季節変化を除去して算出される。全球及び北半球・南半球、緯度帯ごとの濃度増加量は、それぞれの濃度の長期トレンドの時間微分である。

なお、Lanczos フィルターをかけて長期トレンドを算出する際に、あらかじめ観測期間両端のトレンドを延長する必要があるが、そのトレンドには、直近1年分の観測値から季節変動成分を差し引いたものに最小二乗法を当てはめて出した傾きを使っている。ただし、そうやっても第2.5節のトレンド計算の際に、原理上トレンドの最終端(約半年の期間)では誤差が生じる。

## 3. 議論

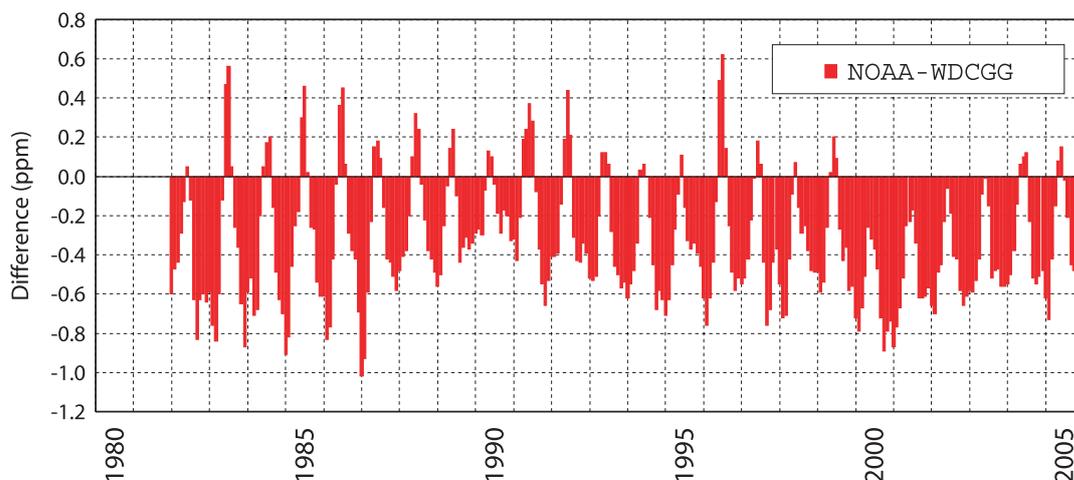
### 3.1 NOAA による結果との比較

第2章で記したように、NOAA/ESRL/GMD も全球平均濃度を発表している。WDCGG の手法との主な違いは、使っている観測点とデータ空白期間のトレンドの内挿・外挿方法にある。NOAA

では、全球平均濃度の計算に、主に海洋性大気境界層内に位置している観測点のデータのみを使っている。さらに、NOAA はデータ期間の外挿・内挿に緯度参照法 (Masarie and Tans, 1995) という方法を用いている。これは全球の観測地点から最適緯度勾配曲線を毎週算出し、各地点の緯度から濃度を決定するものである。

第10図に、CO<sub>2</sub> の全球平均濃度について、WDCGG の手法による結果と NOAA の手法による結果の月平均濃度差 (NOAA-WDCGG) を示す。この図で、NOAA の値は、NOAA/ESRL/GMD 炭素循環グループのウェブサイト公開されている値を用いた。WDCGG の全球平均濃度は、平均すると  $0.35 \pm 0.31 \text{ ppm}$  ほど NOAA の値より高い。この差を月別に見てみると、夏季は WDCGG の方が NOAA より濃度が低く、それ以外の季節 (特に冬季) は NOAA の方が濃度が低いことが多い。

この原因として、使っている観測点の違いと解析手法の違いの2つの可能性が挙げられる。WDCGG は、全球濃度解析の前に空間代表性の小さい地点を除外しているが、それでも NOAA に比べて放出源・吸収源がより近い内陸の観測点を含んでいる。その結果、陸上生物圏の光合成による夏季の濃度減少と呼吸による冬季の濃度増加の影響に関して、WDCGG の方が NOAA の地点より大きいことが想定される。NOAA と WDCGG の全球平均濃度値の差の原因を調べるために、



第10図 WDCGG の手法による全球平均された月平均濃度の、NOAA による全球平均された月平均濃度との差

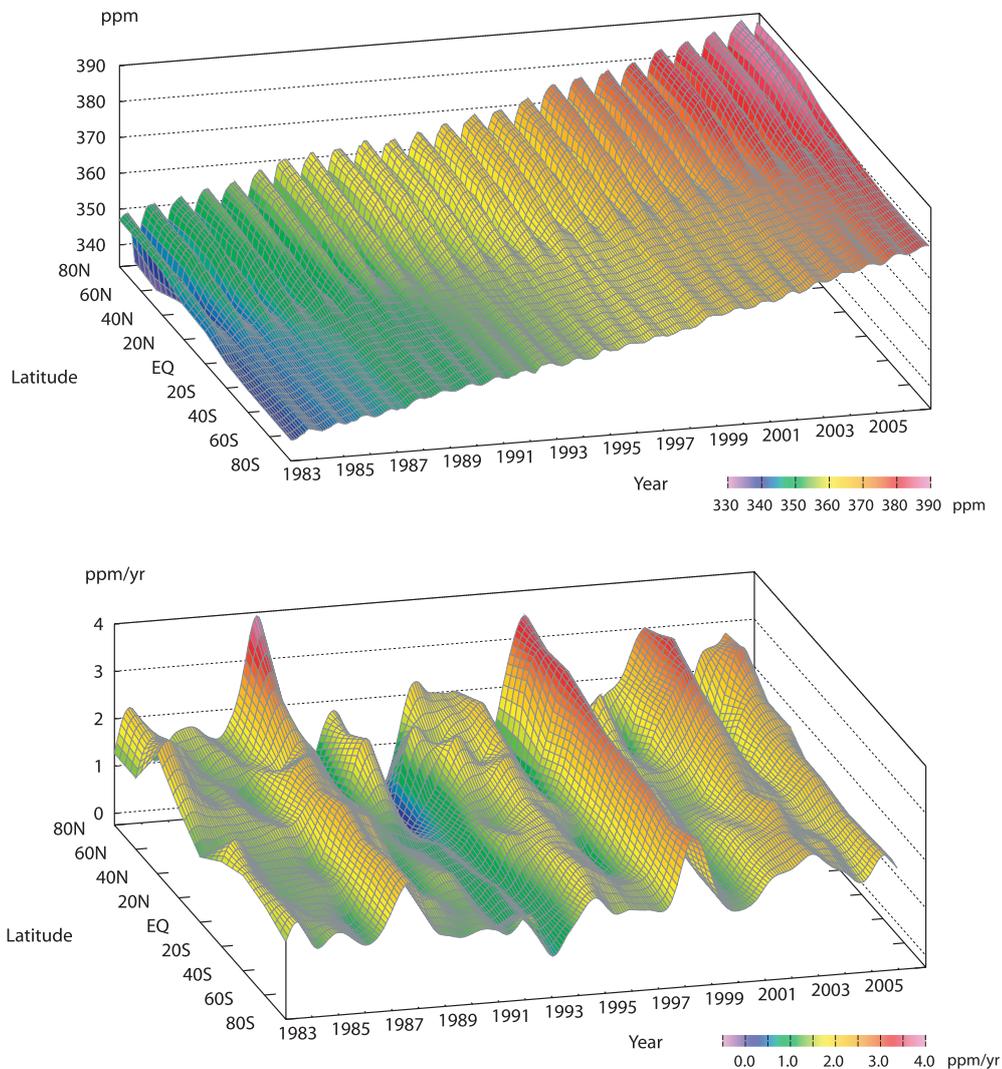
WDCGG に提出されている NOAA の海洋性大気境界層内の観測地点 (Masarie and Tans, 1995 の Table 1) の月平均濃度データを用いて, WDCGG の手法による全球平均濃度を計算し, NOAA との手法の違いによる全球平均濃度差を求めたところ, 平均で 0.13ppm であった. 採用観測点の違いによる濃度差は 0.22ppm と見積もられ, 手法の違いによる差より大きかった.

### 3.2 最近の解析例

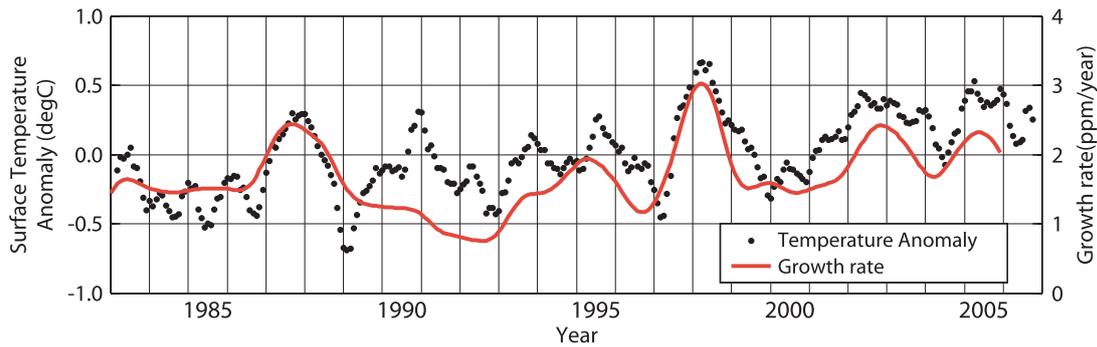
第 11 図は, 同期したデータセットを用いて大気中の CO<sub>2</sub> の, 緯度帯別に平均した月平均濃度, 濃度増加量の経年変化を 3 次元的に表現したもの

である. これらの図から, 季節変動の振幅は北半球中高緯度では大きい南半球では小さいか不明りょうであること, 濃度の増加は北半球中高緯度で先行して次第に南半球に広がっていくこと, 濃度増加量は全球的規模で変動しているが, 北半球中高緯度で変動幅が大きいことなどがわかる.

CO<sub>2</sub> の増加量は, 気温及びそれに関連する干ばつなど, 陸上生物圏からの CO<sub>2</sub> の放出と密に関連していることはよく知られている (例えば Keeling *et al.* (1995)). 第 12 図に 1983 年から 2006 年までの熱帯陸上 (30°N-30°S) の 5 か月移動平均した気温偏差と熱帯陸上の濃度増加量との関係を示す. 気温は気象庁の再解析データ (Onogi



第 11 図 緯度帯ごとに平均された CO<sub>2</sub> 月平均濃度 (上) と増加量 (下) の 3 次元図



第12図 JRA-25再解析データから計算した熱帯陸上の気温偏差(5か月移動平均)と熱帯のCO<sub>2</sub>濃度増加量の経年変化

気温偏差は全期間平均(1983-2006)からの差。

*et al.*, 2007) を用い、偏差は25年間の平均からの差である。ピナトゥボ火山噴火の影響がある1991～1992年を除いて両者はよく対応しており(全期間での相関係数は0.70)、特に2002年以降、熱帯陸上の気温偏差と全球濃度増加量は、ともに高い値が継続している。ただし、Canadell *et al.* (2007) が指摘しているように、2002年以降の高い濃度増加量には、人為起源のCO<sub>2</sub>放出量の増加も寄与しているかもしれない。

#### 4. 結論

WDCGGでは全球濃度解析を行う際に、品質や空間代表性が確保されれば、なるべく多くのGAW観測点を使うことがより正確な全球濃度解析に貢献すると考えており、GAWプログラム下で世界規模のネットワークで観測されたデータを用いて、

- ・WMO参照標準スケールとのトレーサビリティによる地点選別
- ・同一地点複数データの統合
- ・全球濃度解析のための地点選別
- ・データ空白期間の内挿
- ・データ期間同期のための外挿

を行って必要な条件を満たすデータセットを作成している。さらに、そのデータセットを用いて、緯度帯平均を計算し、緯度帯ごとの重みを考慮して、全球平均濃度や長期トレンド、年増加量、その他の解析結果を作成している。NOAAも世界に展開している自前の海洋性大気境界層内の観測地点(それらはGAWの一部でもある)を使って

全球平均濃度等を公表しており、その値は世界的に使われている。WDCGGとNOAAとの平均での濃度差は、 $0.35 \pm 0.31$  ppmであり、その差は主に解析に使った地点が異なることによる。これにより、WDCGGが用いている全球濃度解析手法の定量的な評価と妥当性を示すことができた。

WMOは全球規模で大気環境を監視するGAWプログラムを実施しており、そのGAWはGCOSの中で大気化学成分(CO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>)の公式の観測ネットワークとして認識されている。その枠組みの中で環境気象管理官が運営しているWDCGGは、GAWの世界中の観測点からの温室効果ガス観測データを収集・保管・提供するだけでなく、全球平均濃度などの解析を的確に行っていくことにより、地球温暖化防止を目的としている気候変動に関する国際連合枠組条約の活動に大きく貢献している。

#### 謝辞

この解析手法は、環境気象管理官が旧環境気象課であったころから温室効果ガス解析係が中心となって、繰り返し改良を行ってきた手法の集大成となっている。これは代々の担当者及び関係者の継続的な努力の所産である。また品質評価科学活動委員会の、故木田秀次 京都大学教授、及川武久 筑波大名誉教授、中澤高清 東北大学教授、秋元肇 酸性雨研究センター所長、山本晋 岡山大学教授、佐藤薫 東京大学教授の先生方には、専門家の立場からたびたび貴重な意見をいただきました。厚くお礼を申し上げます。

## 参 考 文 献

- Canadell, J. G., L. C. Quere, M. R. Raupach, C. B. Field, E.T. Buitenhuis, P. Ciais, T. J. Conway, N. P. Gillett, R. A. Houghton and G. Marland (2007) : Contributions to accelerating atmospheric CO<sub>2</sub> growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proceedings of the National Academy of Sciences Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(47), 18866-18870, doi:10.1073/pnas.0702737104.
- Cleveland, W. S., and S. J. Devlin (1988) : Locally weighted regression: an approach to regression analysis by local fitting. *J. Amer. Statist. Assn.*, 83, 596-610.
- Conway, T. J., P. P. Tans, L. S. Waterman, K.W. Thoning, D. R. Kitzis, K. A. Masarie, and N. Zhang (1994) : Evidence for interannual variability of the carbon cycle from the NOAA/CMDL global air sampling network. *J. Geophys. Res.*, 99(D11), 22831-22855.
- Dlugokencky, E. J., R. C. Myers, P. M. Lang, K. A. Masarie, A. M. Croswell, K. W. Thoning, B. D. Hall, J. W. Elkins, and L. P. Steele (2005) : Conversion of NOAA atmospheric dry air CH<sub>4</sub> mole fractions to a gravimetrically prepared standard scale. *J. Geophys. Res.*, 110, D18306, doi:10.1029/2005JD006035.
- Duchon, C. E. (1979) : Lanczos Filtering in One and Two Dimensions. *J. Appl. Meteor.*, 18, 1016-1022.
- Hall, B. D., G. S. Dutton, and J. W. Elkins (2007) : The NOAA nitrous oxide standard scale for atmospheric observations. *J. Geophys. Res.*, 112, D09305, doi:10.1029/2006JD007954.
- IPCC (2007) : *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Keeling, C. D., T. P. Whorf, M. Wahlen and J. van der Plicht (1995) : Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, 375, 666-670.
- Komhyr, W. D., R. H. Gammon, T. B. Harris, L. S. Waterman, T. J. Conway, W. R. Taylor and K. W. Thoning (1985) : Global atmospheric CO<sub>2</sub> distribution and variations from 1968-1982 NOAA/GMCC flask sample data. *J. Geophys. Res.*, 90(D3), 5567-5596.
- Nakazawa, T., K. Miyashita, S. Aoki and M. Tanaka (1991) : Temporal and spatial variations of upper tropospheric and lower stratospheric carbon dioxide. *Tellus*, 43B, 106-117.
- Masarie, K.A., and P. P. Tans (1995) : Extension and integration of atmospheric carbon dioxide data into a globally consistent measurement record. *J. Geophys. Res.*, 100(D6), 11593-11610.
- Onogi, K., j. Tsutsui, h. Koide, m. Sakamoto, s. Kobayashi, H. Hatsushika, t. Matsumoto, n. Yamazaki, h. Kamahori, k. Takahashi, S. Kadokura, k. Wada, k. Kato, r. Oyama, t. Ose, n. Mannoji and R. Taira (2007) : The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteorol. Soc. of Jpn*, 85, 3, 369-432.
- Steele, L. P., P. J. Fraser, R. A. Rasmussen, M. A. K. Khalil, T. J. Conway, A. J. Crawford, R. H. Gammon, K. A. Masarie and K. W. Thoning (1987) : The global distribution of methane in the troposphere. *J. Atmos. Chem.*, 5, 125-171.
- Tans, P., K. Thoning, W. Elliott and T. Conway (1990) : Error estimates of background atmospheric CO<sub>2</sub> patterns from weekly flask samples. *J. Geophys. Res.*, 95(D9), 14063-14070.
- 堤之智 (2007) : 全球大気監視 (GAW) プログラムにおける新戦略計画について, *天気*, 54(8), 733-738.
- WMO (1993) : Forty-fourth session of the Executive Council (1992) - Abridged report with resolutions. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- WMO (2004) : Implementation Plan for the Global Observing System for Climate in Support of the UNFCCC. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, (WMO/TD No. 1219).
- WMO (2006) : 13th WMO/IAEA Meeting of Experts on Carbon Dioxide Concentration and Related Tracers Measurement Techniques, Boulder, Colorado, USA, 19-22 September 2005. GAW Research and Monitoring Reports, No. 168. (WMO TD No. 1359).
- WMO (2007a) : WMO/GAW Strategic Plan: 2008-2015 - A Contribution to the Implementation of the WMO Strategic Plan: 2008-2011. GAW Research and Monitoring Reports No. 172, (WMO TD No. 1384).
- WMO (2007b) : World Data Centre for Greenhouse Gases Data Submission and Dissemination Guide. GAW Research and Monitoring Reports No. 174. (WMO TD No. 1416).

WMO (2009) : Technical Report of Global Analysis Method  
for Major Greenhouse Gases by the World Data Center  
for Greenhouse Gases. GAW Research and Monitoring  
Reports No. 184. (WMO TD No. 1473).