

民間航空機を活用したアジア太平洋域上空における温室効果気体の観測

独立行政法人国立環境研究所

地球環境研究センター 大気・海洋モニタリング推進室 町田敏暢

気象庁気象研究所

地球化学研究部 第一研究室 松枝秀和・澤 庸介

平成18～22年度合計予算額	180,201千円
(うち、平成22年度当初予算額)	36,503千円)

[要旨]本研究はCO₂濃度連続測定装置(CME)と自動大気サンプリング装置(ASE)を日本航空(JAL)所有の国際線航空機5機に搭載して、頻度と領域を飛躍的に向上させた温室効果気体の時空間分布観測を行うものである。CMEによるCO₂濃度鉛直分布の観測数は10000回を超えた。また、同時期にASEと手動サンプリング装置(MSE)によるサンプリング観測では合計1230個を超える空気試料が採取され、CO₂、CH₄、CO、N₂O、SF₆、H₂濃度の緯度分布とその経年変動を明らかにした。過去18年間の太平洋上空におけるCO₂の増加速度を算出すると、1-3ppm/年の大きな変化が認められ、その変動はエル・ニーニョ現象と密接に関連していることが捉えられた。また、北半球の化石燃料燃焼の増大に伴って、上空の南北濃度勾配が徐々に大きくなっていることも確認できた。成田上空のCME観測では2008年6月以降はほぼ毎日CO₂濃度の鉛直分布が観測されており、自由対流圏においても総観規模の変動を見いだすことができた。このような短周期変動の情報は、CO₂濃度の高高度観測やカラム量観測を行う際の時間代表性を考える上で極めて重要である。シドニー上空のCO₂濃度の季節振幅は上空ほど大きく、高高度ほど年平均値が高いことから、上部対流圏を通した北半球空気の進入が季節変動に寄与していると考えられる。下部成層圏の深部におけるCO₂濃度は対流圏とは異なる季節変化を示し、夏季に急激に濃度上昇が起こり、夏から次の春まで非常にゆっくりと減少することが明らかになった。夏季の濃度増加は低緯度から圏界面を横切って成層圏に高濃度CO₂が輸送されることが原因であることを解明した。北半球の高濃度CO₂は4月から5月になると高高度を通して南半球へ流入し始め、6月には高濃度のCO₂がさらに南半球高緯度側である南緯40度付近まで広がるといった南北輸送メカニズムが明らかになった。このことは炭素収支の見積もりにおいて、これまでの地上を中心とした観測網では付加できなかった新たな拘束条件を与え、より正確な南北両半球の地域的炭素収支の見積もりに寄与するものと考えられる。

[キーワード] 温室効果気体、民間航空機、アジア太平洋域、高度分布、高頻度観測

1. はじめに

地球表層の炭素循環を定量的に明らかにするための、3次元大気輸送モデルを基にしたデータ解析の性能は日進月歩であるが、最終的な信頼性の向上を制限しているのは入力すべき観測データの不完全さであり、炭素循環モデルグループの会合(Transcom Meeting)でも、観測データが不足しているという意見が相次いで出されている^{1) 2)}。

大気中二酸化炭素 (CO₂) 濃度の観測網は、バックグラウンド大気を捉えることを目的として海洋上や大陸の沿岸域を中心に拡大してきたが、それらのほとんどは地上における観測であり、鉛直方向のデータは決定的に不足している。航空機を用いた大気の観測は温室効果気体の空間分布を捉える上で最も有効な方法の一つである。チャーター機を利用した観測はCO₂濃度の詳細な空間分布や他の大気成分との関係を知る上で有用であるが^{3) 4) 5) 6)}、コストの問題から頻度や観測地点がおのずと限られていた。一方、民間定期航空機を大気観測に利用する際には、安全運航の観点から観測装置には非常に厳しい航空機搭載装備品としての規定が適用されるが、観測の頻度や領域を向上させることが可能となる^{7) 8)}。

2. 研究目的

本研究はCO₂濃度連続測定装置を日本航空 (JAL) 所有の国際線航空機 5 機に搭載して、頻度と領域を飛躍的に向上させたCO₂濃度空間分布観測を行うものである。また、このうち 2 機には大気試料サンプリング装置を搭載して、CO₂以外の温室効果気体の濃度やCO₂の安定同位体比のデータを定期的に取得することを目的としている。

JALの国際便は世界の多くの地域に就航しているが、本研究では特にアジア太平洋地域に重点をおいた観測を展開する。世界のCO₂観測には、アフリカ、南アメリカ、シベリアそして東南アジアといった空白域が存在する。このうちシベリアは1992年から国立環境研究所の観測⁹⁾ や、1990年代後半からのヨーロッパグループの観測^{10) 11)} でデータが蓄積しつつある。残り 3 カ所のうち、南アメリカは米国のグループが、アフリカはヨーロッパのグループが観測網を広げるべく計画を立てているが、東南アジア域においては日本がリーダーシップをとって観測を行うべきであり、本研究の観測結果による大きな貢献が期待できる。

温室効果気体の航空機観測は、1970年代から続いている東北大学の定期観測¹²⁾ を始め、常に日本が世界を先導してきた数少ない分野である。CO₂濃度連続測定装置を定期航空便に搭載する世界初の試みである本研究はこの観測分野をさらに発展させることにもなる。さらに観測で得られるデータは2009年1月に打ち上げられた温室効果気体観測衛星 (GOSAT) の有力な検証データとしても利用が進んでいる。

3. 研究方法

(1) 観測装置と観測手法

本研究では 2 つの装置を使った観測を行う。1 つはCO₂濃度連続測定装置 (Continuous CO₂ Measuring Equipment : 以下CMEと略す) によって航空機の飛行中に連続してCO₂濃度を測定するものであり、もう 1 つはフラスコサンプリング装置 (Automated Air Sampling Equipment : 以下ASEと略す) によって航空機の飛行中に大気試料を採取し、地上の実験室においてCO₂を始めとする温室効果気体の濃度やCO₂の安定同位体比の観測を行うものである¹³⁾。

観測に利用する航空機はJALが運航する 2 機のボーイング747-400型機と 3 機のボーイング777-200型機の計 5 機を利用する。5 機全てにCMEを搭載することが可能で、2 機の777-400にはASEも搭載することができる。

CMEとASEは航空機の貨物室に搭載される。両装置の搭載の様子を、サンプル大気取り入れ口と併せて747-400型機を例として図 1 に示す。観測に必要なサンプル大気はジェットエンジンから取

り込まれるエアコン空気を利用する。客室キャビンの床下にあるエアコンダクトにCME、ASEそれぞれの空気取り入れ口を設け、ステンレス製の配管を使って前方貨物室に位置する両装置まで空気を引き込む。エアコン空気は最終的に客室空気と混合され再循環する設計になっているが、本観測では客室空気の汚染を避けるために、再循環部より十分に上流に空気取り入れ口を設置している。

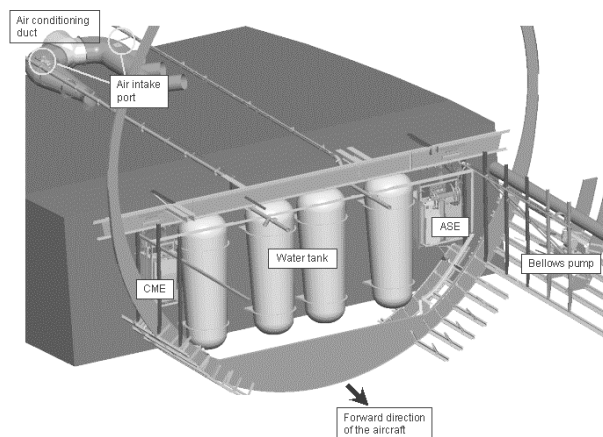


図 1. 観測装置の搭載位置と大気サンプル取り入れ口の概観図

CMEの配管の概略を図2に示す。サンプル大気は過塩素酸マグネシウムを充填した除湿管を通過し、小型のダイアフラムポンプで加圧された後に小型のシングルセルNDIR (LI-840, LI-COR) に導入される。セルの上流と下流には流量コントローラと圧力コントローラをそれぞれ備えているので航空機の上昇、下降に伴うキャビン圧の変動に対して、NDIR出力がほとんど影響を受けない仕組みになっている。さらに測定精度を保つために、サンプル大気のNDIRへの導入の前後に2本の標準ガスを導入し、NDIR出力のドリフトを補正している。CO₂の観測データは、CME内の流量、圧力、温度データや、航空機のARINCバスから取得した緯度、経度、圧力高度、電波高度、対地速度、風向、風速、外気温のデータと共にデータロガーに蓄えられる。空港周辺の汚染空気や高湿度の空気をできるだけ装置に入れないうために、CMEのポンプは電波高度が1200ft以上の際に作動するように設計されている。CMEはいったん航空機に搭載されると1ヶ月から1ヶ月半の間自動で観測を行い、取りおろし後にデータの回収と除湿剤、標準ガスの交換を行う。

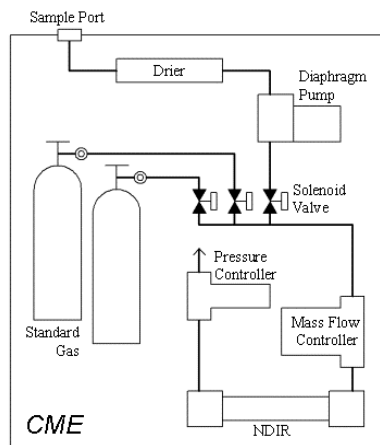


図 2. CMEの概略配管図

ASEは月に2回の頻度でオーストラリアと成田を結ぶ路線に投入され、上部対流圏において12本の大気サンプリングを行う。図3のようにASEは2つのユニット(ASE-1とASE-2)から構成され、それぞれのユニットに内容積1.7Lのチタン製フラスコが6本ずつ備えられている。サンプル大気は大型のベロウズポンプで吸引・加圧され、ASEユニットに送られる。サンプリングを行う前にフラスコは十分な量のサンプル大気で置換され、航空機が採取地点に到達した時点で出口側の電磁弁が閉じ、サンプル大気が約2.7bar(abs)まで加圧充填される。ASEもARINCデータを取得・記録する機能を備えており、飛行前に設定した緯度、経度または高度で正確にサンプリングを実行できる。シドニー、成田間を飛行した場合には南緯30°から北緯32°までを等間隔に12本の大気サンプリングを行うよう設定している。データの取得と電磁弁、ポンプの制御はASE内の小型ボードコンピュータが担っている。

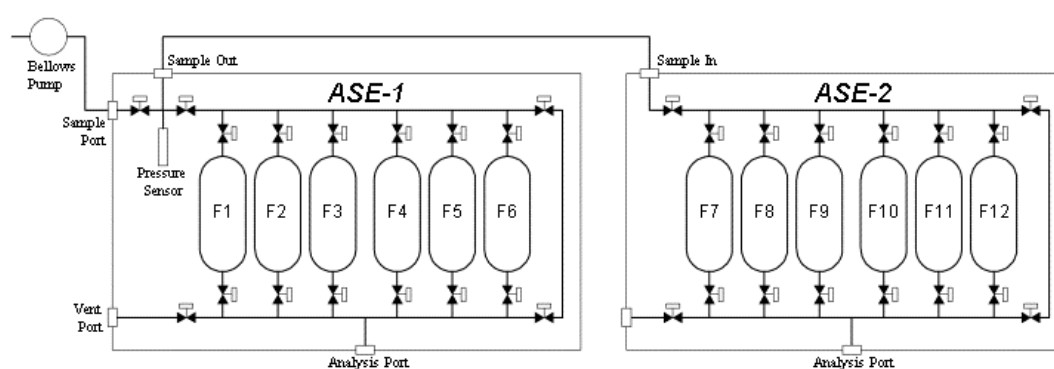


図3. ASEの概略配管図

サンプリングが終了したASEは直ちに航空機から取りおろされ、基本的に24時間以内、遅くとも48時間以内に、国立環境研究所(NIES)においてCO₂、メタン(CH₄)、亜酸化窒素(N₂O)、六弗化硫黄(SF₆)、一酸化炭素(CO)および水素(H₂)の濃度分析が行われる。濃度分析後のサンプル大気は一部が分割され、東北大学においてCH₄の同位体分析に利用される。残ったサンプルはCO₂の同位体分析のためにCO₂だけを濃縮抽出し、質量分析計によって安定炭素同位体比($\delta^{13}\text{C}$)と酸素同位体比($\delta^{18}\text{O}$)に利用される。

2009年にはJAL全体の運航計画が変更され、ASEを搭載できる2機のボーイング747-400型の旅客機(JA8917, JA8921)がオーストラリア線への運航を取り止めたために、ASEによるオーストラリア線でのフラスコサンプリング観測が困難となった。このため、手動サンプリング装置(Manual air Sampling Equipment:以下MSEと略す)を準備し、JAL職員がボーイング777-200ERに搭乗して、シドニー-成田間でフラスコサンプルの採取を実施することになった。MSEは手動のピストンポンプを使って、入口と出口に手動バルブを備えた内容積500mlのチタン製フラスコに空気を加圧充填する。大気試料はコックピットまたはクルーレストの再循環していないエアコン空気を使用する。

(2) CMEで観測されたCO₂濃度データの品質管理

CMEによる観測では、航空機の離陸から着陸までCO₂濃度が連続で得られる。取得されるデータ数は観測航路等によって異なるが1フライトあたりおおよそ500程度のCO₂濃度データとなる。観測

が開始された2005年11月以降2010年12月までに5000以上の観測フライトが実施されてきており、取得されたCO₂濃度データも200万を超える量となっている。CMEのデータの品質管理については、平成20年度に時間遅れの補正、流量・圧力変動に対するフラグ付け、NDIR出力の極端な変動に対するデータ選別、水蒸気量によるデータ選別、ばらつきの大きいデータの選別等について検討を行い、品質管理手法を確立した。最終年度はこれまでに観測されたすべてのデータについてこれら手法を用いた品質管理を実施するとともに、国立環境研究所におけるCO₂標準ガススケールの更新を考慮した観測スケールの統一化を図った。

最終的な品質管理手順は以下の通りである。

- ①各種フラグ付け（流量・圧力・水蒸気量・緯度・経度・気温…）
- ②有効データをもとにした時間遅れの補正
- ③不良データの削除・データのスクリーニング
- ④NIES95スケールで観測されたCO₂濃度のNIES09スケールへの変換
- ⑤データセットの確定

①各種フラグ付け

このフラグ付けはCME観測装置の制御状態とARINC429バスによって航空機本体からCMEに送信される位置情報と気象データの受信状態に関わるものである。(a-1：流量圧力調整) CMEでは、機内圧の変動が測定に影響を与えないよう、試料空気の流量と圧力が、それぞれ150cm³/min、110kPaに制御されている。CME内のデータロガーに記録されている流量・圧力を調査した結果、流量圧力は極めて安定して制御されていることが確認されたが、いくつかのフライトでは、一時的に流量・圧力がこれらの値から外れることがあった。そこで流量150±2cm³/min、圧力110±2kPaの範囲外のデータについては、フラグ付けを行いデータとして採用しないこととした。(a-2：測器ドリフト) 高精度のCO₂濃度測定を実現するために、CME内のNDIRには、較正のためにCO₂標準ガスが定期的に導入される。この間の試料空気の観測は前後の標準ガスによる較正結果をもとに濃度計算が行われる。通常10分から40分の標準ガス導入間隔におけるNDIRの測器ドリフトは非常に小さい。しかしながら、観測期間中の計3つのフライトでは標準ガス導入間隔間に大きな測器ドリフトが認められた。この場合、試料空気測定中の測器の応答を推測することは困難であるため、当該データについてはCO₂濃度観測値として採用しないこととした。(a-3：水蒸気影響) CMEでは水蒸気による赤外線吸収の干渉を避けるため、過塩素酸マグネシウムを用いた水分除去がなされている。水蒸気濃度が一定値以上になると観測を停止する仕組みが2007年の追加型式設計承認(STC)改訂で追加された。観測条件をそろえるためSTC改訂以前のデータについてもCME内のデータロガーに記録された水蒸気データをもとにデータの見直しとフラグ付けを行い、一定値以上の水蒸気を含む試料空気のデータは採用しないこととした。(a-4：標準偏差) CMEでは離着陸時には10秒平均値、水平飛行中は1分平均値のCO₂濃度が記録される。データは2秒または2.5秒の一回の頻度で取得されており、10秒及び1分の測定時間内のCO₂濃度の変動を示す標準偏差も記録される。この標準偏差を検討した結果、水平飛行中の標準偏差は通常0.5ppm以下であった。また空港近くの離着陸時においても通常の標準偏差は2ppm以下であった。一方で微小な粒子がNDIR内に混入した場合や経年的な測器の感度低下等により標準偏差が2ppm程度の大きな値も認められた。データを検討した結果、標準偏差3ppm以下のデータを採用すれば、CO₂濃度観測値として問題なく使用できることを

確認した。3ppmを越える標準偏差のデータは測器の不具合または極度の汚染気塊の影響を受けたものとして棄却した。(a-5:旅客機測定データ) CMEでは内部に搭載された測器による測定値の他に、旅客機で測定された緯度・経度・気圧高度などの位置情報と風向・風速・気温の気象情報を航空機のデータバス規格であるARINC429を介して取得している。これらデータもCME内部のデータロガーに10秒平均値または1分平均値として記録される。これらのデータについて見直しを行った結果、CME処理上の問題によりいくつか採用できないデータがあることが確認された。ARINC429データバス中の緯度・経度には有効・無効フラグが添付されているが、CMEの処理能力の問題からこのフラグに係わらずデータを採用し計算・記録に使用している。このため本来有効ではないデータもデータロガーに記録されていた。これらの誤った位置情報を削除するため、記録された全てのデータについて、緯度・経度の前後時間の位置との差を計算し、一定距離以上離れた地点でのデータは採用しないこととした。また、航空機で取得された気温については、ARINC429バスへの送信間隔が2秒であるため、CMEのデータ取得間隔が2秒である場合、データ取得のタイミングが合わず、データが更新されないという不具合が観測開始後明らかになった。2007年のSTC改訂後はCMEデータ取得間隔を2.5秒とARINC429の送信間隔とずらすことでデータが更新されるように改訂された。STC改訂以前のデータについては、特に747-400に搭載のCMEにおいて、一度受信された気温が残りデータが更新されないという不具合が多く発生した。このため、全てのフライトデータについてSTCの改訂前/改訂後のどちらのプログラムで取得されたものであるかを判断し、不具合データの除去を実施した。

②時間遅れの補正

航空機のエンジンから取り込まれた試料空気が機内配管を通りCME内のNDIRで測定されるまでには時間的な遅れがある。このうちエンジンからCMEのサンプル・インレットまでの時間遅れは、機内で使用されている配管の内径と長さ及び試料流量とから777-200では約15秒、747-400では約22秒と見積もられた。一方、CMEのサンプル・インレットから試料が導入された後、NDIRで測定されるまでの時間遅れは、CMEを用いて実際に空気導入試験を行うことで約25秒であることが確かめられた。これらの結果から試料空気の時間遅れは777-200では約40秒、747-400では約47秒であると見積もられた。これらの時間遅れは、航空機の離着陸時の上昇・下降速度を考慮すると約400mの高度差に相当し、時間補正を行わないと離陸時と着陸時とで濃度プロファイルにずれが認められる場合がある。図4 aは関西国際空港で2007年2月25日に観測された下降時と上昇時の時間遅れ補正前のCO₂濃度プロファイルを示したものである。着陸と離陸の時間差は約3時間と短時間であるにも係わらず高度2kmから5kmにかけてのCO₂濃度の極大・極小の鉛直構造は大きく異なっており、高濃度CO₂の領域は下降時の方が上方に観測されていることがわかる。図4 bは時間遅れの補正を実施したCO₂濃度プロファイルである。時間遅れを補正することによって、高度2kmと4kmのCO₂極小が上昇下降時に共通して認められるようになったほか、高度6-10kmにかけてのCO₂濃度と高度2km以下の境界層内のCO₂濃度についてもほぼ一致した鉛直分布が得られた。時間遅れの補正の効果が確認されたため、これまで取得された全フライトデータについて補正を行うプログラムを作成し補正を実施した。この際、機体で取得されている位置情報(緯度・経度・気圧高度等)を試料空気測定時刻に内挿することにより、CMEで取得されているCO₂濃度データの10秒平均値(上昇下降時)1分平均値(巡航高度飛行時)の時間分解能をそのまま活かした。時間遅れの補正の結果、

空港付近のCO₂濃度鉛直分布がより正確に捉えられるようになった。

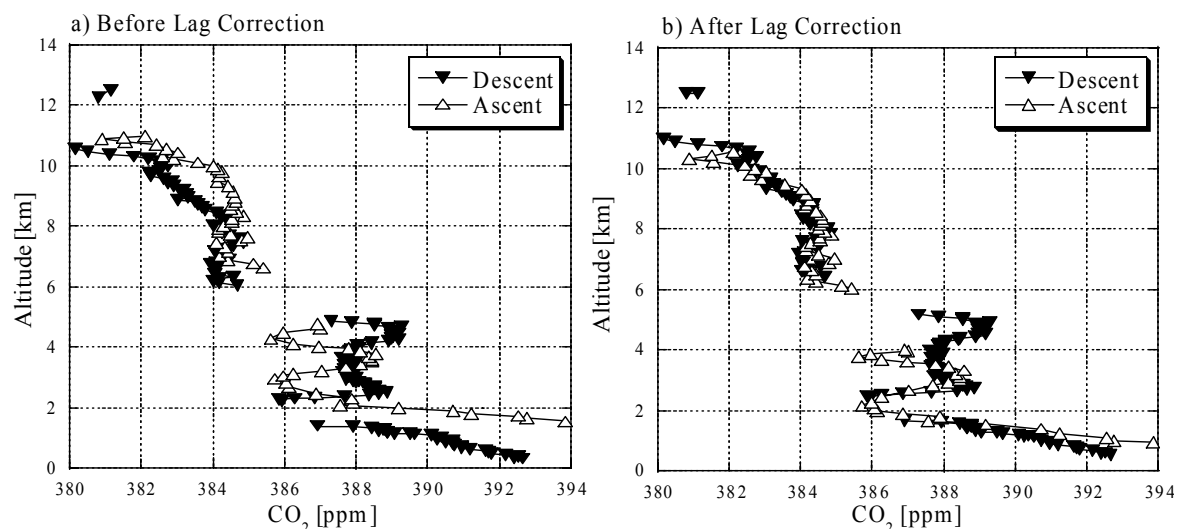


図4. 時間遅れ補正の例：2007年2月25日関西国際空港で観測されたCO₂濃度鉛直プロファイル。
△上昇時、▽下降時。a)時間遅れ補正前、b)時間遅れ補正後。

③不良データの削除

CO₂濃度測定に関わるデータと旅客機測定データについて不具合データの除去を実施した。観測されたデータは最終的にフライト毎に、出発地（空港）、到着地等のヘッダーが新たに付加され、さらに観測されたCO₂濃度データも出発地付近の上昇時データ、水平飛行中のデータ、到着地付近の下降時データの3つに分割されてデータファイルとされる。しかしながら、ポンプストップや水蒸気濃度上昇で観測がフライト途中で停止された場合には、プログラム中での自動処理がうまく行かない場合があった。これらの事項についても目視による確認を実施し、必要がある場合には修正を実施した。

④観測スケールの変換

CMEに搭載される標準ガスは国立環境研究所のCO₂標準ガススケールに基づいている。2009年に国立環境研究所の標準ガススケールが、従来のNIES95スケールからNIES09スケールに更新されたことに伴い、観測データセットも2種類の標準ガススケールで観測された値が混在することとなった。そこで最終年度にデータセットを確定させるに当たり、NIES95スケールで観測された過去の観測データをNIES09スケールに換算しスケールを統一した。NIES95スケールとNIES09スケール間には、

$$C(09) = 1.0510 \times 10^{-4} \times C(95)^2 + 0.922640 \times C(95) + 14.241$$

C(09) : NIES09スケール濃度[ppm]

C(95) : NIES95スケール濃度[ppm]

の関係がある。しかしながら、観測では標準ガス高低2本による1次式で測器較正を実施しているため、多数の標準ガスセットにおける上記2次式の関係式をそのまま適用することはできない。このため、以下のように標準ガススケールの変換を実施した。まず、取得されたすべてのCMEデータのうち、NIES95スケール基準の標準ガスで観測されたデータを抽出した。次に搭載された2本の

標準ガスについて上記の関係式を用いてNIES09スケールでの標準ガス濃度を求めた。その後、観測データをNIES09スケール基準のCO₂濃度として再計算を実施した。通常観測に使用される標準ガスの濃度は340ppm付近と390ppm付近である。このため標準ガス濃度はNIES09スケールでは低濃度側では+0.10ppm、高濃度側では+0.05ppm程度高くなる。実際に観測されるCO₂濃度は390ppm付近が中心であるため、変換後の観測データの多くは0.05ppm程度高濃度となった。NIES95スケールとNIES09スケールの通常の観測濃度範囲に対する影響は0.1ppm以下ではあるが、2009年中途よりCMEに使用される標準ガススケールが順次変更となったため、これらのスケールの違いを考慮しないと2009年以前の濃度が実際よりも0.05ppm程度過小評価されることとなり、CO₂濃度の年増加率の変化の見積もりにも影響を与える。今回の標準ガススケールの統一により整合性のより高いデータセットとなった。

⑤データセットの確定

上記品質管理を実施し、各フライトについて測器の状態・観測値等が確認できるクイックルック図を作成し、最終的には目視による確認を実施した。CMEで取得されたデータからCO₂濃度計算を実施し、最終的なデータセットが作成されるまでのフローチャートを図5に示す。これら作業により2005年11月から2010年12月まで5224フライトから2760043個のCO₂データを有効値として確定させた。品質管理されたデータファイルは、観測グループのデータ解析に使用されるとともに、国内外の炭素循環研究者に対して公開するために国立環境研究所内にあるデータサーバに登録された。

データ処理の流れ

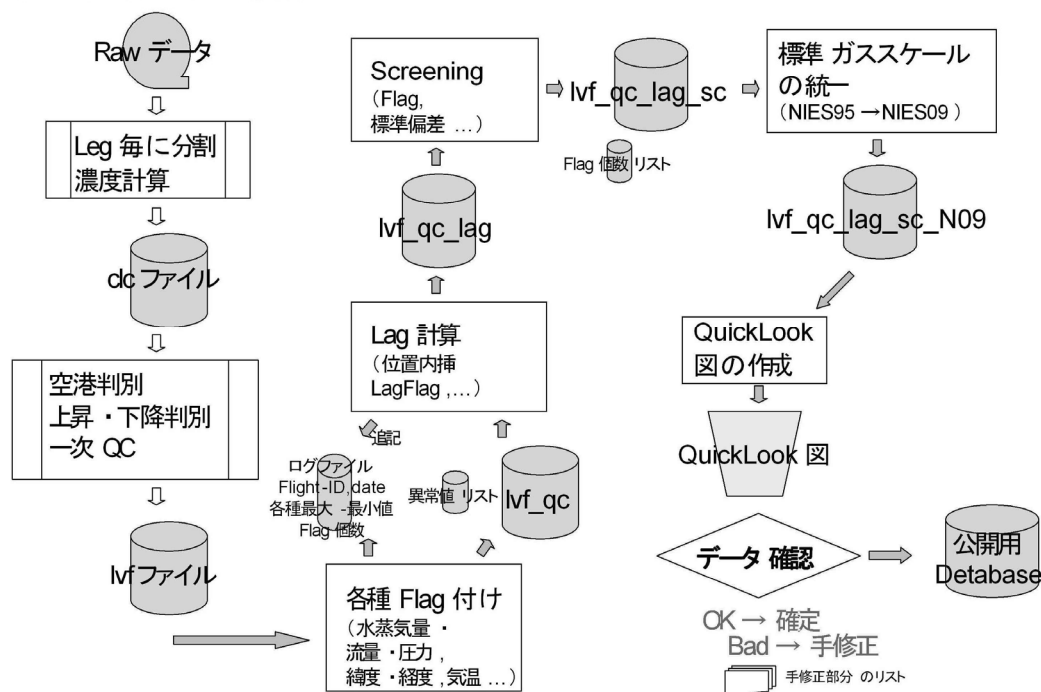


図5. データ処理の流れ。Rawデータからフライト毎の濃度データを作成した後、各種フラグ付け、時間遅れ補正、データスクリーニング、標準ガススケールの統一を実施し、クイックルック図にて最終確認してデータを確定させる。

(3) 気象データを用いた気塊の分類

CMEによる観測では、水平飛行中に1分ごとにデータが取得されるため、10-20kmの空間分解能でCO₂濃度分布が得られる。また、離着陸時には10秒ごとにデータが取得され、これは約80mの高度分解能でCO₂の鉛直プロファイルが観測される。観測されたCO₂データを解析した結果、観測データの濃度・変動強度は成層圏/上部対流圏/境界層といった気塊起源に大きく依存していることが確認された。ここでは、本研究で使用した気象データを利用した観測データの分類手法について説明する。

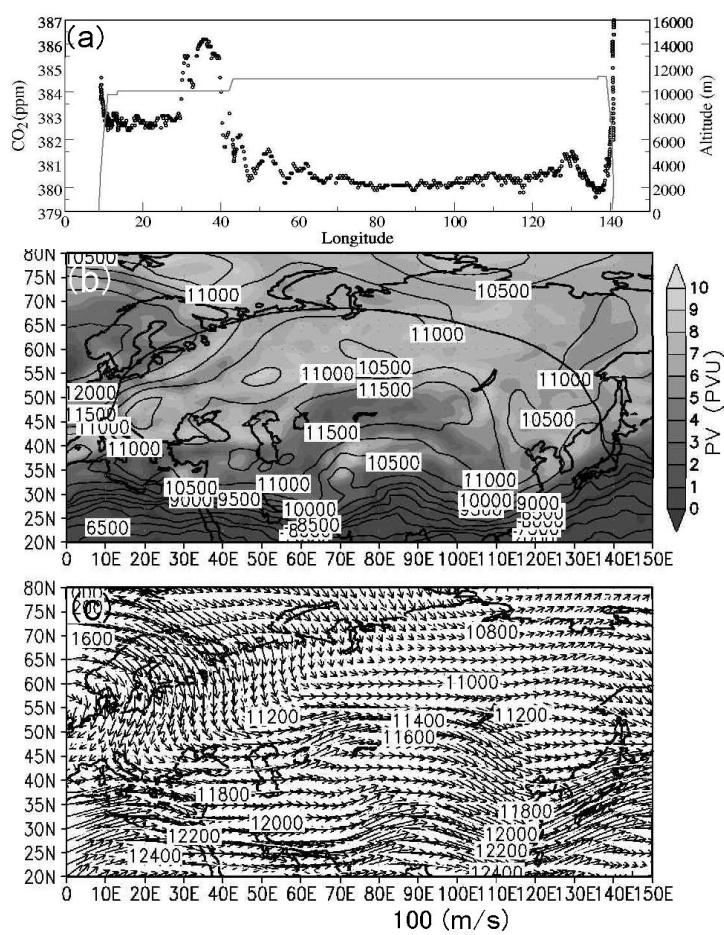
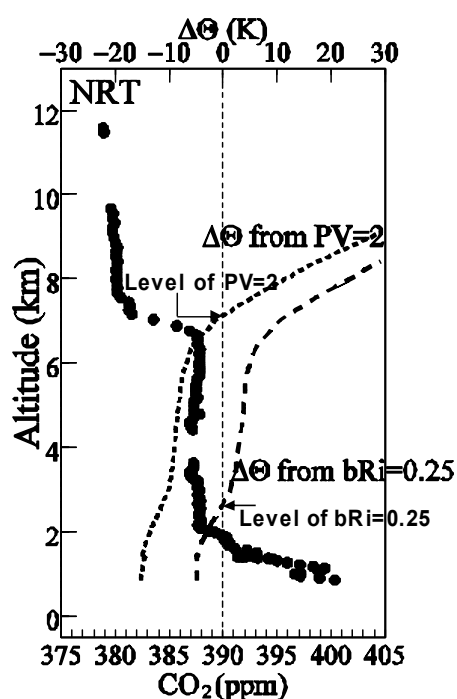


図6. CO₂濃度と気象場の比較例。2006年12月20日のミラノ-成田間のフライトで得られたCO₂濃度分布(単位:ppm, ○)と飛行高度(単位:m, 実線)(a)。330 K温位面での渦位(単位:PVU, shade)と高度(単位:m, contour)(b)。黒線は飛行経路図を示す。250hPaでの風ベクトル(凡例参照)と高度(単位:m)(c)。

高度10km付近の巡航高度では成層圏・対流圏の気塊を観測可能である。実際に2006年12月20日にミラノ-成田間で取得されたCO₂濃度の例を図6aに示す。観測されたCO₂は東経40度以西で382ppm以上の高濃度を示す一方、40度以東では空間的な変動も小さく381ppm以下の濃度を示した。これらの濃度変動は水平飛行中に圏界面を横切ることにより、下部成層圏の比較的安定で低濃度のCO₂と上部対流圏の高濃度で変動も大きいCO₂濃度の両方の影響を受けていることを示唆してい

る。このことを確かめるために、気象庁の客観解析値JCDASをもとにした解析を実施した。対流圏界面高度推定のため、客観解析値データから渦位を求め解析に使用した。図6 b-cに12月20日のミラノ-成田間のフライトに対応する渦位と風の様子を示す。大きく蛇行したジェット気流はヨーロッパ東部で北から南に流れ、これに対応してヨーロッパでは比較的低渦位の気塊が高緯度地域まで広がっていた。一方、ロシア上空は高渦位の気塊に覆われていた。これらのことから、観測されたCO₂濃度は上部対流圏と下部成層圏の濃度の違いを反映していることが明らかになった。このような渦位とCO₂濃度の対応は他のフライトにおいても認められた。



次に離着陸時に得られたCO₂濃度データの分類の例について示す。図7に2007年1月6日に成田空港上空で観測されたCO₂濃度の鉛直プロファイルを示す。高度2km付近及び高度7km付近を境にCO₂濃度が大きく変化している。気象データと比較解析を行うことにより、高度7kmは渦位2PVUで定義される対流圏界面、高度2kmはバルクリチャードソン数が0.25となる境界層高度とよく対応していることが明らかになった。ほかのフライトにおいても、これら気象要素から見積もった対流圏界面、境界層高度はCO₂濃度の高度変化とおおよそ対応していることが明らかになった。

図7. 2007年1月6日に成田空港上空で観測されたCO₂濃度の鉛直プロファイルの例。丸印は観測されたCO₂濃度を示す(単位ppm)。2本の曲線は観測高度における対流圏界面及び境界層高度からの温位差を示す(単位K)。中央の0Kと交差する高度がそれぞれ対流圏界面高度、境界層高度を示す。

以上のように、観測されたCO₂データについて気象データを用いて気塊を分類し、成層圏・対流圏・境界層に大きく分けて解析を行うことが可能であることが確認された。そこで本研究では、気象庁の客観解析値を用いて渦位・温位・境界層高度等の気象要素を計算した後、観測データの位置・時刻に時間空間的に内挿して付加し解析用データセットを作成し利用した。

(4) 上空における平均的なCO₂濃度の季節変化の導出

約5年間にわたり観測を継続することにより膨大な量の上空CO₂データが蓄積されるようになったが、観測領域・観測頻度はCMEを搭載した航空機の運航状況に左右されるため一定ではない。路線別の観測頻度を図8に示す。2006年末以降の取得される観測データの総数は大きくは変わらないが、路線別頻度は時期によって大きく異なる。

ほぼ毎月安定してデータが取得されている欧州路線のCO₂観測データを解析したところ、2005年以降年1.9ppmの増加率でCO₂濃度が増加しており、その増加率は上部対流圏及び下部成層圏ではほぼ同様であることが明らかになった¹⁴⁾。そこで観測時期が同様ではない北米路線、豪州路線のCO₂濃度の季節変化も合わせて解析するために、式(1)のように年増加率を仮定して2008年基準の

CO₂濃度CO_{2 ref_year=2008}を求めることとした。

$$CO_{2 \text{ ref_year}=2008} = CO_{2 \text{ observed}} + \text{Trend} \times (2008 - \text{year}_{\text{observed}}) \quad (1)$$

ここでCO_{2 observed}=観測されたCO₂濃度 (ppm)、Trend=1.9 (ppm/年)、year=観測年である。したがって、観測年が2007年なら+1.9ppm、2008年なら-1.9ppmそれぞれ加算して2008年基準のCO₂濃度に換算する。この方法では単純な年増加率を仮定しているため、年々の変動による効果は加味されないが、定期的に観測のある豪州路線のASE観測とCO_{2 ref_year=2008}の季節変化を比較した結果、北半球中緯度から南半球の中緯度までの季節変化の振幅・位相は、各月に観測されたデータの標準偏差内でよく一致することが確認された。そこで、求められたCO_{2 ref_year=2008}を用いてCO₂濃度の月平均値を作成し平均的な季節変化を調べるために使用した。

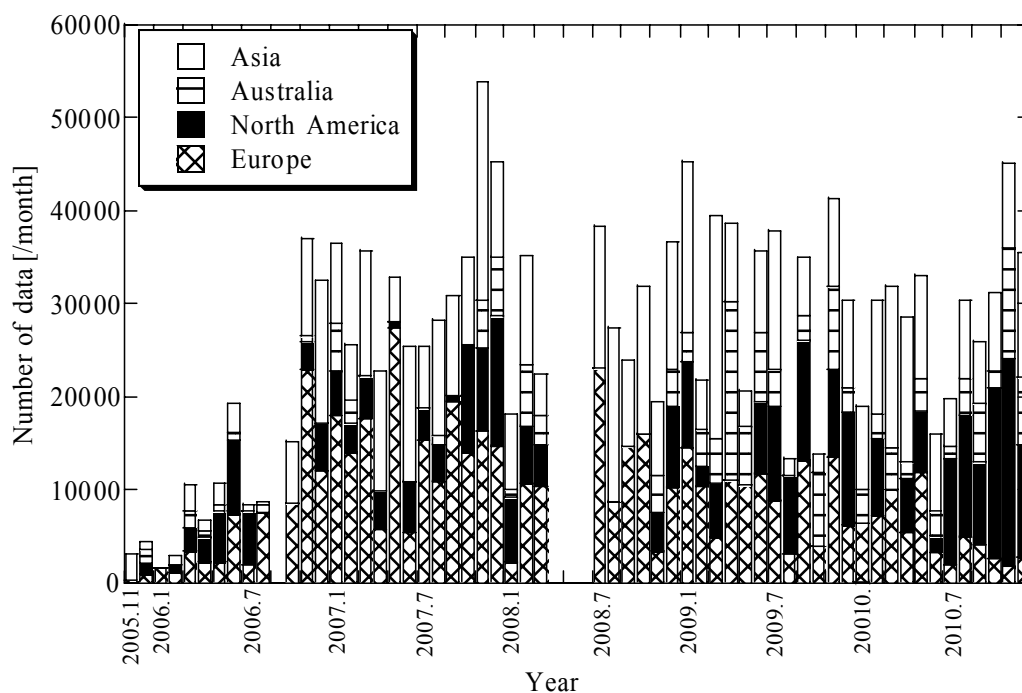


図8. CMEで観測された水平飛行中のCO₂データ数。アジア路線、オーストラリア路線、北米路線、欧州路線ごとにデータ数を示す。

4. 結果・考察

(1) フラスコサンプリング観測

①観測実績と分析精度

豪州と日本を結ぶ日本航空(JAL)の定期旅客便を利用した旧型ASEの観測は、1993年4月から2005年11月まで継続された。本研究では、これまでの長期の観測記録をさらに更新するために、新型ASEによる観測を2005年12月から同じ豪州路線において開始した。本CONTRAILプロジェクトでは、旧観測で測定されていた CO_2 、 CH_4 、 CO に加えて、新たに N_2O 、 SF_6 及び H_2 も分析し、上空の微量気体観測の拡大を図ってきた。しかしながら、2009年4月からJAL全体の運航計画が変更され、新型ASEを搭載できる2機のボーイング747-400型旅客機が豪州路線の運航を取り止めたために、手動サンプリング装置(MSE)を急遽準備し、フラスコサンプル採取を継続した。一方、新型ASEは、2009年4月から2010年3月までグアム路線に投入し、その後はハワイ路線に切り替えて、他の空域の空気採取に使用した。

図9は、2005年9月から2010年12月までの期間に実施された観測フライトにおけるフラスコサンプルの採取緯度、経度、及び高度を示してある。新型ASEによる豪州路線の観測は月に2回の頻度で実施する一方、MSEによる観測は毎月1回の頻度で実施してきた。これらの観測の多くはシドニー線で行われ、従来の旧観測と同様に北緯30度から南緯30度までの上空をカバーする観測が実施された。但し、一部の観測はブリスベン路線で実施された。採取経度は大部分が東経140～150度の範囲にあり、これまでの旧ASE観測と違いがないことが確認された。豪州路線での空気採取は基本的に巡航高度で行い、大部分は高度9～12kmの範囲で得られている。毎回、観測は豪州から日本の成田への復路で実施し、日本に向かう航空機は高度を上昇させていくため、南半球から北半球に向けて採取高度が徐々に高くなるのは旧ASE観測と同じであった(図9(d))。従って、北半球の方が南半球に比べて系統的に1～

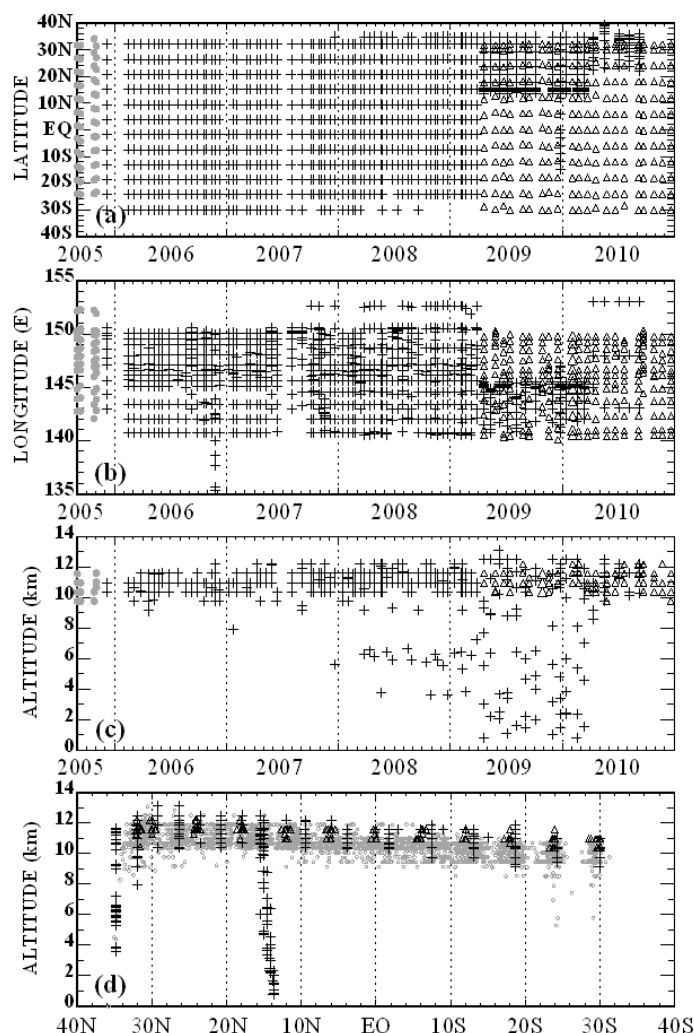


図9. フラスコサンプル観測による空気試料採取の緯度(a)、経度(b)と高度(c, d)。図中の印は、新型ASE(+)、MSE(△)及び旧ASE(●)による観測フライトを示す。

2 km高い高度でのサンプル採取となっている。

2009年4月から2010年3月までは、新型ASEを搭載できるボーイング747-400型旅客機による観測をグアム航路に展開し、毎月1回の頻度で合計12回のフライトが実施された。このグアム便の観測では、北緯30度から北緯15度付近までの巡航高度における観測と同時に、グアム上空から下降する際に高度別のサンプル採取を実施した。これによって、北緯15度付近の鉛直分布の情報を得ることができた（図9(d)）。一方、2010年4月から10月までは、ハワイ航路での巡航高度における観測に切り替えて、毎月1回の頻度で空気採取を実施した。

過去5年の期間における新ASEとMSEによるフラスコサンプリング観測では合計1230個を超える空気試料が採取され、それらに含まれる6種類の微量気体の濃度分析を実施した。図10は、2005年12月から2010年12月の期間に実施した濃度測定における分析精度（3回の繰り返し標準偏差値）の時間的推移を示してある。全サンプル測定の平均分析精度とその標準偏差値は、 0.02 ± 0.01 ppm(CO₂)、 1.0 ± 0.6 ppb(CH₄)、 0.20 ± 0.44 ppb(CO)、 0.14 ± 0.13 ppb(N₂O)、 0.17 ± 0.12 ppt(SF₆)及び 1.2 ± 0.88 ppb(H₂)であった。これらの値は、いずれも大気の長期モニタリング観測に要求される世界的な水準を十分満たしている精度であった。過去5年間の分析精度には大きな変化はなく、高精度の測定が長期間安定して維持されていたことが分かった。但し、いくつかのサンプルでは分析精度が通常よりも大きい場合が見られた。これらの測定値については、フライト毎の緯度分布パターンや濃度変動の時間系列プロットなどの点から総合的にデータの品質評価を行い、解析に使用しても問題ないことを確認した。

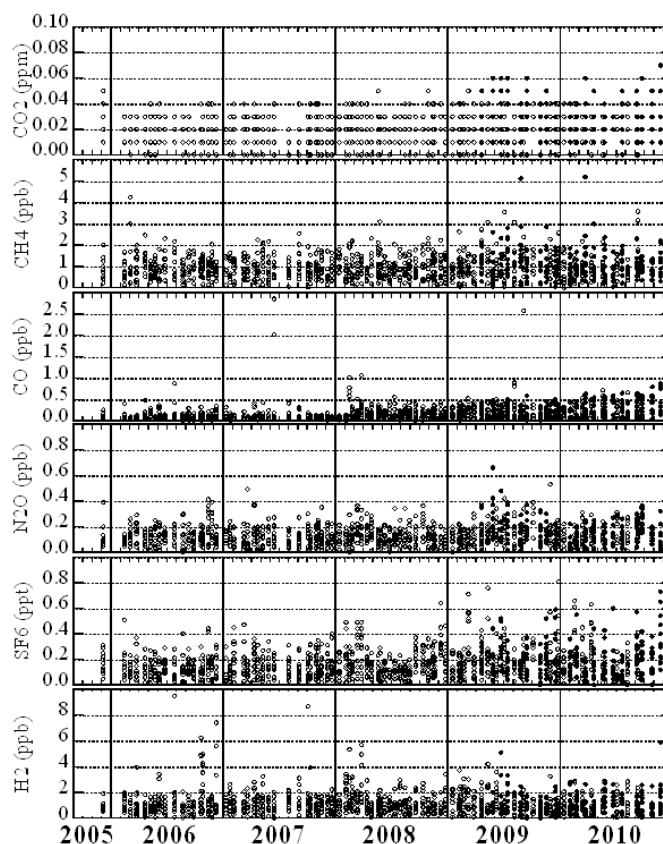


図10. CO₂, CH₄, CO, N₂O, SF₆及びH₂の濃度分析における3回の繰り返し測定誤差（標準偏差値）の時間変化。

②緯度分布

図11は、2005年12月～2010年12月までの新ASEとMSEによるフラスコサンプリング観測で得られたすべての測定データを6種類の微量気体に分けて緯度分布として示してある。図中の実線は、加重平均法によって求めた観測期間中の平均的な緯度分布を示す。緯度分布のパターンは微量気体によって異なると同時に、緯度帯毎の濃度変動幅も気体の種類によって違いがあることが明確に認められた。これら各微量気体の緯度分布の特徴は、過去の旧ASEの観測結果とほぼ類似した傾向を示したが、長期的な濃度増加傾向にある微量気体については濃度レベルの上昇が認められた。

CO₂濃度の平均的な緯度分布としては、北半球の20度～10度付近で若干濃度が高く、南半球に向けて濃度が減少するパターンを示し、平均濃度の南北差は北緯30度から南緯30度の間で約3ppm程度であった。しかしながら、各緯度帯の濃度変動の幅は10～15ppmと大きく、特に、北半球のCO₂の季節変動が南半球に比べて顕著であることを示している。一方、CH₄とCOの平均的な緯度分布としては、北半球で濃度が高く南半球に向けて減少するパターンを示した。両微量気体とも、北半球の20度以北で濃度変動幅が大きく赤道に向けて小さくなる傾向が見られた。

N₂OとSF₆の平均的な緯度分布は、北緯30度で最も濃度が高く南半球に向けて濃度が徐々に低下する南北勾配を示したが、分布のパターンは両者でやや異なっていることが見られた。N₂Oの場合の最も顕著な特徴として、南北の30度付近の緯度帯に限って、通常の変動範囲よりも著しく低い濃度が出現する現象が見られた。このような極端な低濃度のN₂Oの出現はこれまでも多く見られており、成層圏からの空気塊の流入による影響と特定された¹⁵⁾。一方、SF₆の濃度変動幅は南北両半球ともほぼ同じで、緯度帯による特徴的な違いは見られなかった。SF₆の南北勾配は測定精度の限界をわずかに超える程度の極めて小さい幅であった。

H₂の平均的な緯度分布は他の微量気体とは異なり、熱帯地域で濃度が上昇する分布パターンを示した。但し、470ppb以下の低いH₂濃度がどの緯度帯でも観測されており、試料空気中のH₂がエアコンシステムのオゾンコンバーターを通過する際に濃度変化を起こしている可能性も考えられる。今後、H₂の濃度の変動の解析については、データの取捨選択を含めた注意深い検討が必要である。

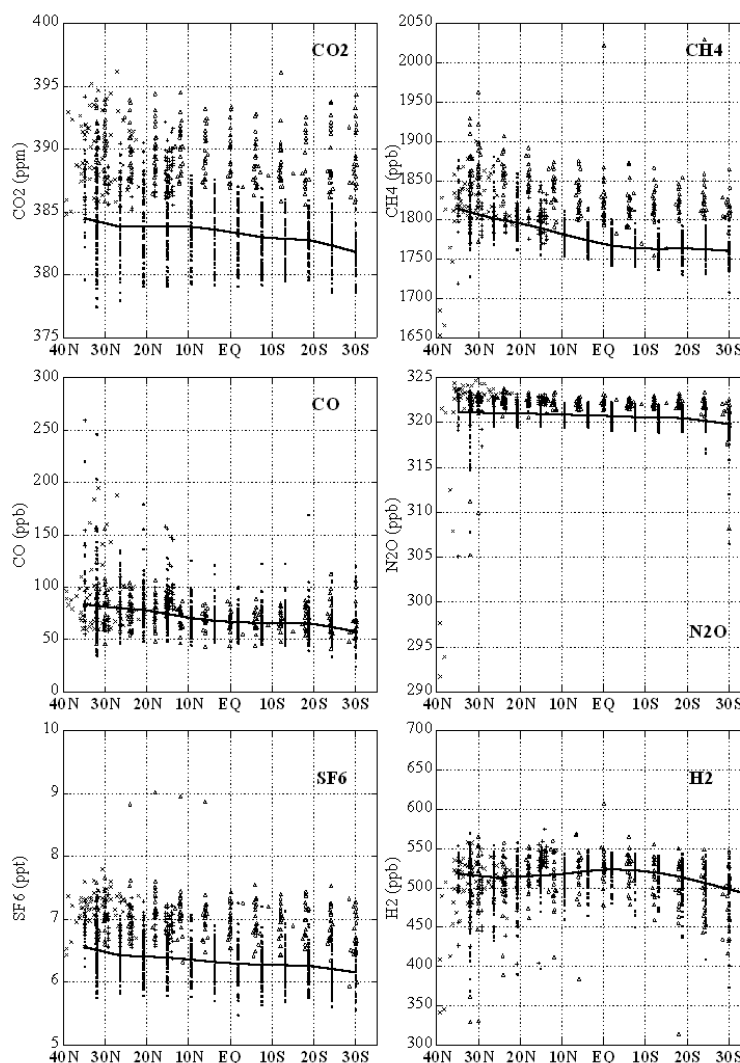


図 1 1. 2005 年 12 月から 2010 年 12 月の期間に観測された CO₂, CH₄, CO, N₂O, SF₆ 及び H₂ の全観測データの緯度プロット。

③過去5年間の緯度別の時間変動

過去5年間に観測されたデータを基に、緯度帯別の濃度変動の違いを明らかにするために、北緯30度から南緯30度までの間を5度間隔で12個の緯度帯に分けて解析を進めることとした。ここでは、以下に述べるMatsueda et al. (2002、2008)¹⁵⁾¹⁶⁾の方法に従って各緯度帯の時系列解析を行った。まず、個々の観測フライトで得られた濃度の緯度分布に対してスプライン関数を当てはめて、緯度幅1度間隔の内挿値を求めた。次に、それらの内挿値を5度幅ごとに単純平均して、12個の緯度帯の平均濃度値のデータセットを作成した。最後に、緯度帯平均濃度データの時間変化に対して、直線と3つの調和関数を組み合わせた関数を適応して、観測期間中の平均的な濃度変動曲線を最小自乗法で求めた。ここでは、長期的濃度の増減傾向（トレンド）は直線で表現し、年による違いは考慮しなかった。同様に、季節変動についても年々変動による調和関数からのズレについては処理を行っていない。従って、過去5年の平均的な長期トレンドと緯度帯別の季節変動に着目した解析結果を中心に述べる。

図12は、2006年1月から2010年12月までのフラスコサンプリング観測で得られたCO₂データを12個の緯度帯別にプロ

ットした結果を示す。図中の実線は、2009年4月以降のCMEのデータも含めて解析した長期的トレンドを含む平均的な濃度変動の結果を示してある。なお、測定されたすべてのCO₂濃度値はこれまで使用してきたNIES-95スケールに変えて、新たに一段希釈法により決定されたNIES-09スケールに変換して、すべての観測値を同一の濃度スケールで統一した。2009年4月以降のMSEで観測された結果は、CO₂の季節変動をほぼ再現していたが、CMEの測定結果に比べてやや高い傾向が見られた。これらのMSE観測値については、手動サンプリング法に切り替えた影響が考えるため、確定値として

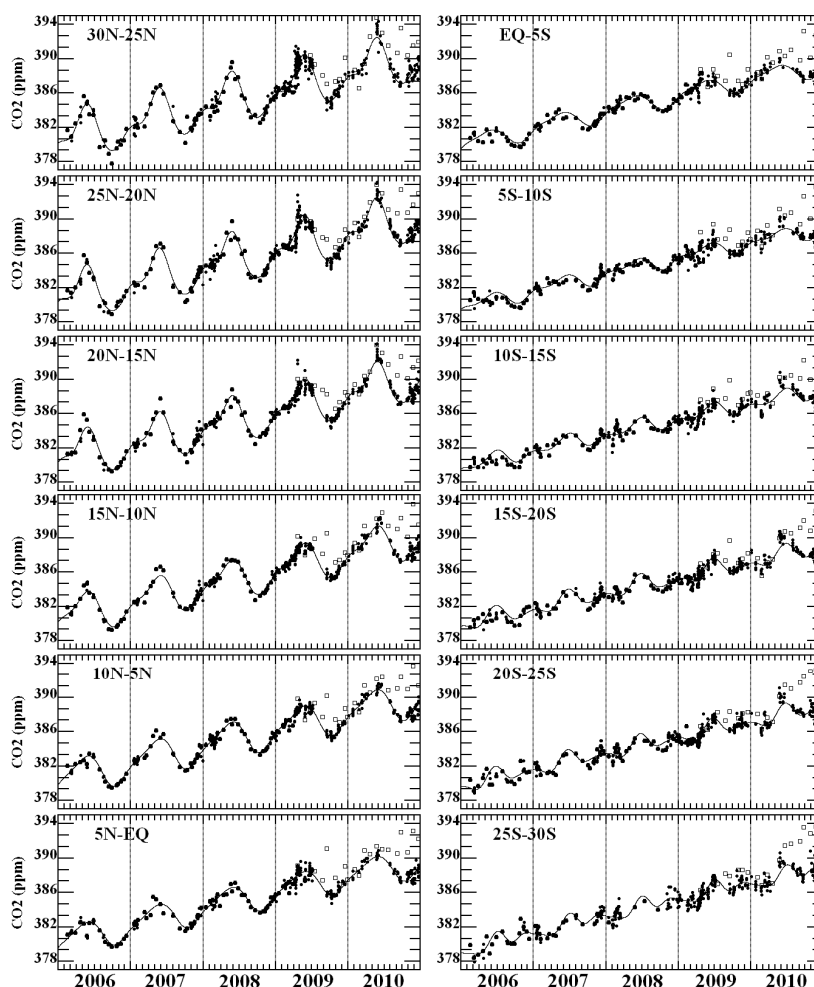


図12. 北緯30度から南緯30度の間の12の緯度帯別のCO₂濃度の時間変動。図中の印は、新型ASE(●)、MSE(□)及びCME(■)による観測フライトを示す。

採用するために今後さらに詳しく調査する必要が認められた。

本研究のASEとCMEで観測された各緯度帯のCO₂の季節変動は、これまでの旧ASE観測結果と非常に良い整合性があり、特に、季節変動パターンの緯度変化は、これまでとほぼ同様な結果を示した。北半球では、北緯30度から赤道に向けて季節変化の振幅が減衰しながら位相が徐々に遅れてくる緯度変化が明瞭に観測された。これに対して、南半球では季節変化の振幅が小さく、そのパターンも二峰性を持つ複雑な季節性をほぼ的確に捉えることができた。

図13は、CH₄データを12個の緯度帯別にプロットし、その平均的な濃度変動と長期的トレンドを解析した結果を示してある。図に示す通り、この観測期間中にCH₄濃度が上昇傾向を示していること、及び各緯度帯の季節変動パターンを明瞭に把握することができた。但し、2009年4月からのMSEによるCH₄濃度は、ASEを用いたグアム路線の値と比較してやや高い傾向が見られており、その差については今後調査する必要が認められた。

図14は、COデータを12個の緯度帯別にプロットした結果を示す。これまで、COの測定値については、標準ガスが時間的に増加する濃度ドリフトが見られたために、ドリフトを再評価してすべての値を補正して、CO濃度の確定値を得ることができた。これによって、これまでの旧ASEの観測によるCOデータとの連続性にも問題がないことが確認できた。

図14に示す通り、MSEによるCO濃度は、グアム航路の値と比較してほぼ一致した結果が見られた。また、過去3年間のASE観測を用いた増減傾向と緯度別の季節変動の外挿値と比較しても、データの連続性が保たれていることが認められた。従って、COの場合には手動サンプリング法に切

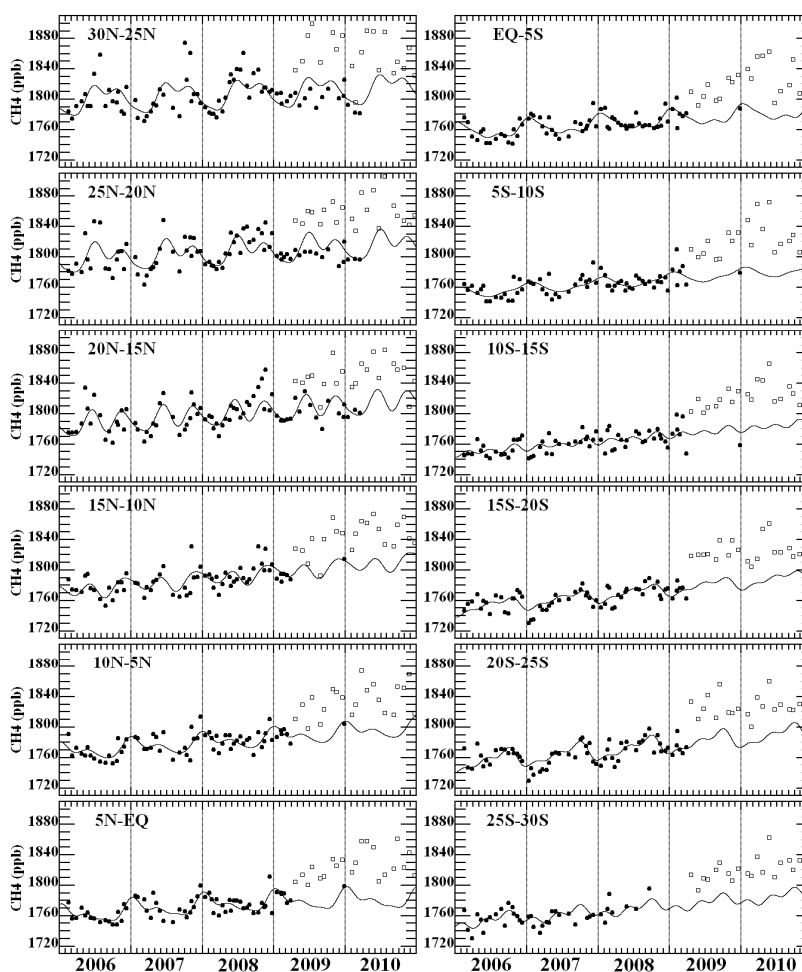


図13. 北緯30度から南緯30度の間の12の緯度帯別のCH₄濃度の時間変動。図中の印は、新型ASE(●)とMSE(□)による観測フライトを示す。

り替えた影響は非常に小さいものと考えられた。

過去5年にわたるCO観測の結果を見ると、北半球では、5月頃に濃度が最大となり、冬の時期に最低となる季節変動が明瞭に捉えられていることが分かった。この北半球の季節変動は、赤道に向けて急激に減衰する一方、南半球では、北半球と異なる季節変動に変わることが見出された。南半球では10月頃に濃度が上昇する特徴的な季節変動が見られた。この季節変動は年によって大きく異なり、特に、2006年には10月の濃度上昇が顕著であったが、他の年では10月の濃度上昇は小さい規模であった。このような南半球の年々変動はエル・ニーニョ現象と密接に関連していることが旧ASE観測でも認められており、インドネシア地域のバイ

オマス燃焼によるCOの発生量が気候変化によって大きく変動を受け、上空にもその影響が及んでいる結果と考えられた。一方、COの長期増減傾向は明瞭ではなく、過去5年の期間では特に顕著な濃度の長期変化傾向は認められなかった。

図15は、N₂Oの12個の緯度帯別の濃度変動とその解析結果を示してある。N₂Oの場合には、上述した通り、成層圏由来の低濃度空気塊と区別して解析する必要があるため、ここでは明らかに成層圏の空気塊として認識される低濃度の観測値は除き、対流圏上部の変動のみを取り扱うこととした。

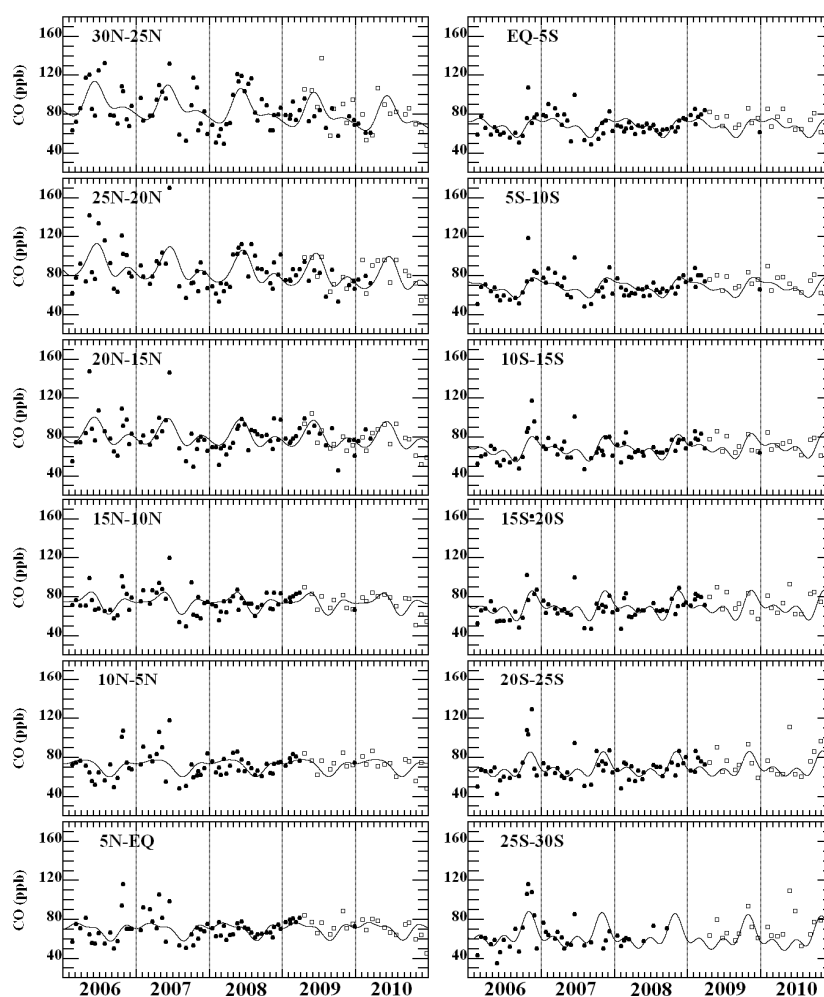


図14. 北緯30度から南緯30度の間での12の緯度帯別のCO濃度の時間変動。図中の印は、新型ASE(●)とMSE(□)による観測フライトを示す。

過去5年間の N_2O 濃度は増加の一途を辿っており、約0.8ppb/年の増加速度で上昇してきたことが分かった。この増加速度は、地上の観測網で得られている値とほぼ同程度であることが認められた。MSEによる観測でも N_2O の濃度上昇傾向が見出されたが、ASEよりもMSEの方がやや系統的に低い値を示した。長期的な N_2O の濃度上昇スピードは、北緯30度から南緯30度のすべての緯度帯においてほぼ一致しており全球規模の現象であることが分かった。

一方、季節変動の振幅は、北半球から南半球にかけてやや減少する傾向が見られた。北半球の北緯20度以北では6月頃に濃度上昇ピークを示す季節変動が示唆された。しかしながら、それより南の熱帯から南半

球にかけては濃度変動が極めて小さく、上空の微小な N_2O の季節変動を広範囲に把握するには、さらに観測を継続してデータを蓄積する必要がある。

図16は、 SF_6 の12個の緯度帯別の濃度変動とその解析結果を示してある。図に示す通り、過去4年間の SF_6 濃度は増加の一途を辿っていることが明瞭に観測された。2009年4月からのMSEによる観測でも、 SF_6 の濃度上昇傾向が継続していることが見られた。また、グアム航路の値と比較して顕著な差はなく、さらに過去3年間の長期的な増加トレンド直線の外挿値と比較しても、MSE観測による SF_6 の値の連続性に大きな変化は認められなかった。これらの結果から、 SF_6 の場合には手動サンプリング法に切り替えた影響はほとんどないと考えられた。

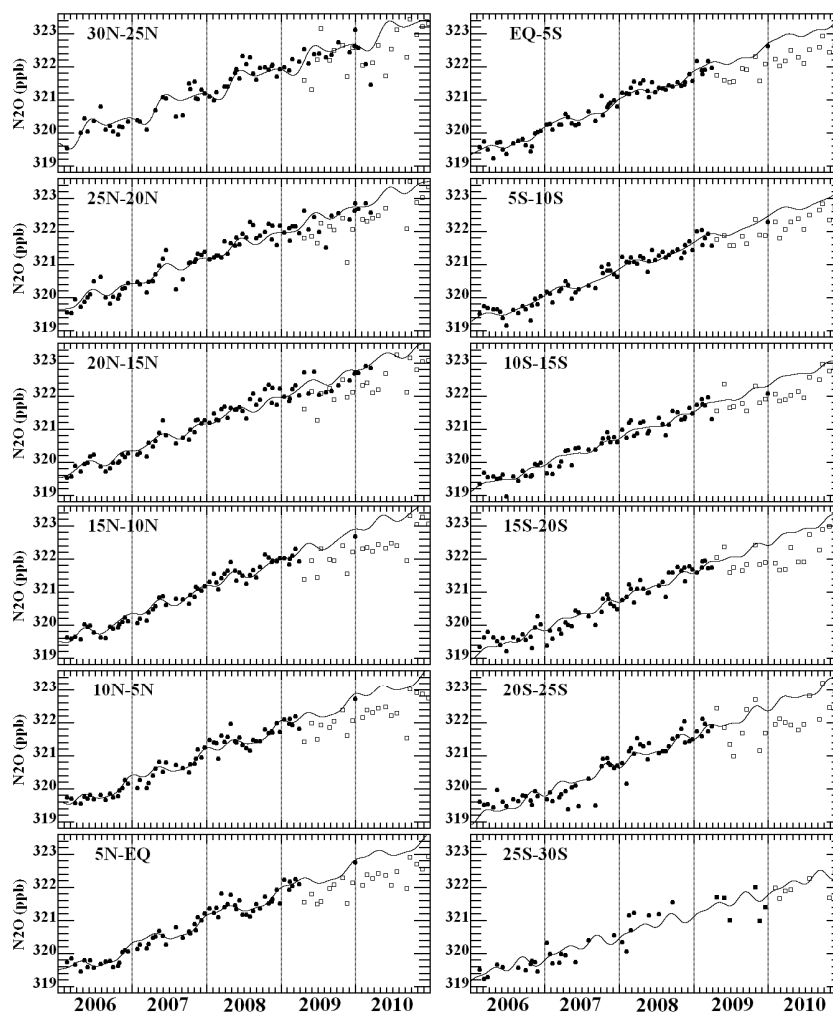


図15. 北緯30度から南緯30度間の12の緯度帯別の N_2O 濃度の時間変動。図中の印は、新型ASE(●)とMSE(□)による観測フライトを示す。

長期的なSF₆の濃度上昇は北緯30度から南緯30度のすべての緯度帯においてほぼ類似しており、観測期間中の12個の緯度帯の平均増加速度は約0.25ppt/年と算定された。この増加速度は地上で観測されている全球平均とほぼ同じ値であり、正確なSF₆の長期トレンドが航空機観測でも把握することができた。一方、解析された季節変動はその振幅が極めて小さく、分析精度の限界に近く、上空の季節変動を正確に把握するためには、さらに長期の観測を継続することが不可欠である。

④新旧観測の統合データ・ベースの構築

本研究で取得した豪州と日本を結ぶフラスコサンプリング観測データと、旧ASE観測で得られたデータを統合して、長期のデータ・ベースを作成した。新旧観測データの統合に当たっては、以下に述べる主に3つの観測手法に関する違いについて詳細に検証を行った。

第一は、ASEが新型モデルに一新され、観測装置が新旧観測で異なる点。第二は、微量気体濃度の分析が、気象研究所 (MRI) から国立環境研究所 (NIES) に移されたこと。第三は、観測機体が、ボーイング社のB747-200型機からB747-400型機に切り替わった点。これら3つの観測手法の違いによる影響に主眼を置いて、本研究で得られたCO₂、CH₄及びCOの3つの成分の測定データについて品質評価を行った。その結果、3つの成分とも新旧観測データの連続性に問題がないことが確認でき、高品質の統合データ・ベースを構築することができた。なお、その評価方法の詳細については、すでにMatsueda et al. (2008)¹⁷⁾に論文として発表した。CO₂の統合データ・ベースについては、気象庁にある世界気象機関 (WMO) のデータセンター (温室効果ガス資料センター)、及び米国の海洋大気庁 (NOAA) データ・ベース (Globalview-CO₂プロジェクト) に登録し、広く

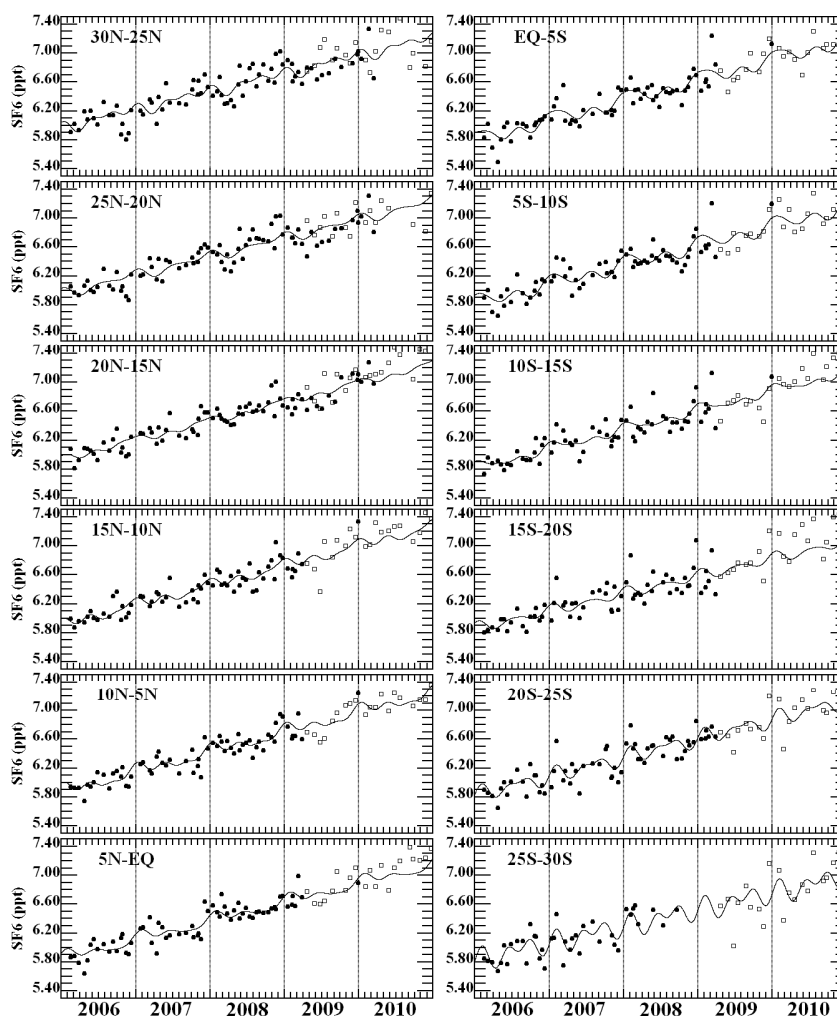


図 16. 北緯 30 度から南緯 30 度間の 12 の緯度帯別の SF₆ 濃度の時間変動。図中の印は、新型 ASE (●) と MSE (□) による観測フライトを示す。

一般に公開して利用の促進を図ってきた。その結果、モデルや衛星観測の検証に有効に活用され、多くの成果が共同研究論文として発表された (Crevoisier et al., 2009¹⁸) ; Miyazaki et al., 2009¹⁹) ; Kulawik et al., 2010²⁰) ; Ishijima et al., 2010¹⁵) ; Nassar et al., 2010²¹) ; Feng et al., 2011²²))。

図 1 7 は、統合データ・ベースを利用して、過去18年間のCO₂データを12個の緯度帯に区分して、季節変動を含む濃度変動と長期的トレンドを解析した結果を示してある。なお、1993年4月から2005年11月までは旧ASE観測、2005年12月から2009年3月までは新ASE観測、2009年3月から2010年12月まではCME観測のデータを示しており、いずれも最新のNIES-09スケールに統一した値を使用した。特に、新旧観測が入れ替わる2005年11月～12月前後の長期トレンドの連続性を調べた結果、どの緯度帯でも継続した濃度上昇傾向に目立ったギャップはなく、濃度増加のトレンド曲線がスムーズに連結していることが分かった。長期的トレンドから、CO₂の増加速度を算出すると、約1ppm/年から3ppm/年の大きな変化が認められ、その変動はエル・ニーニョ現象と密接に関連していることが明瞭に捉えられた。また、北半球の化石燃料燃焼の増大によるCO₂濃度の長期的増加に伴って、上空の南北濃度勾配が徐々に大きくなっていることも確認できた。

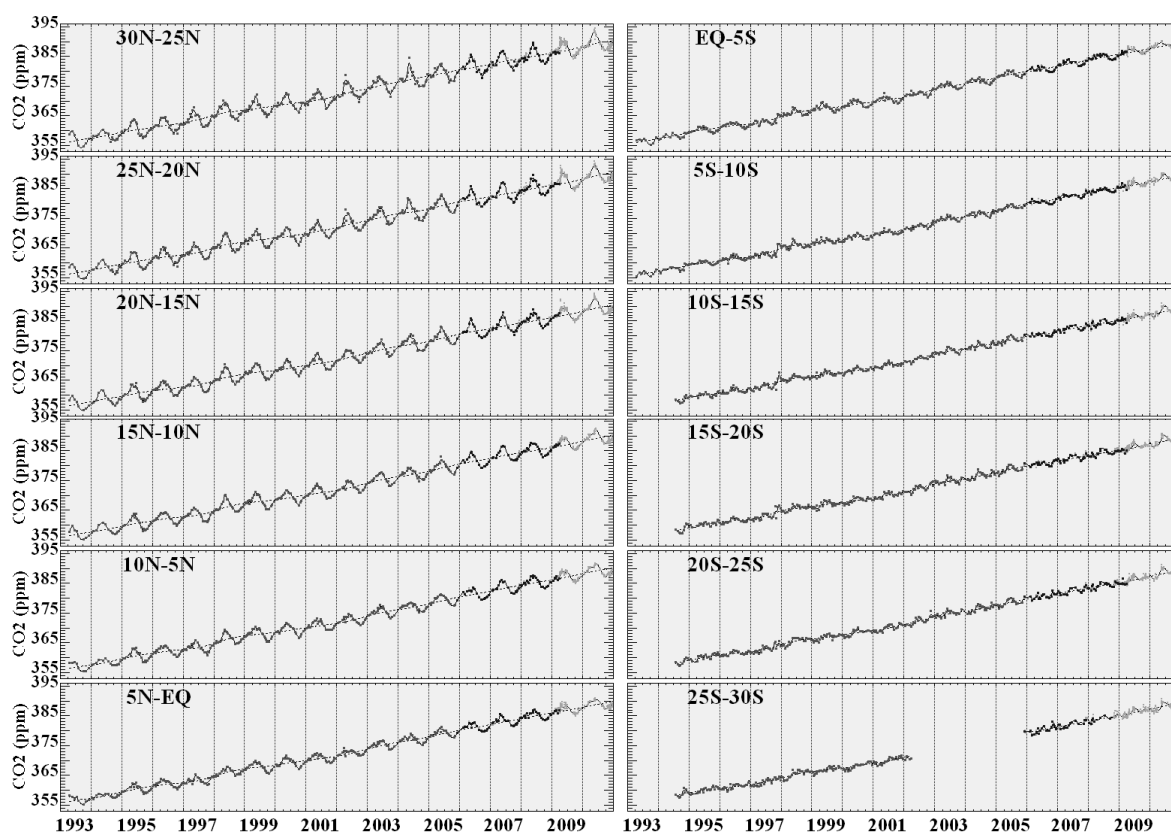


図 1 7 . 新旧観測の統合データ・ベースの解析による北緯 30 度から南緯 30 度の間の 12 の緯度帯別の CO₂ 濃度の時間変動。

CO₂の季節変動のパターンはいずれの緯度帯とも新旧観測で酷似していることが認められた。また、季節変動の振幅は北半球から南半球に向けて減衰するが、新旧観測ともほぼ一致した傾向

を示した。両観測で得られた季節振幅が統計的に優位な差があるかどうか解析した結果、95%の信頼度で変動幅に大差がないことが検証された。これらの結果から、新旧観測における観測や解析手法の違いによる影響はなく、本CONTRAILプロジェクトで取得されたデータによって、過去の測定記録を精度良く延長できていることが確認できた。

図18は、CH₄の統合データ・ベースを利用して、12個の緯度帯のCH₄濃度の季節変動を含む濃度変動と長期的トレンドを解析した結果を示してある。なお、1993年4月から2005年11月までは旧ASE観測、2005年12月から2009年3月までは新ASE観測のデータを示しており、いずれも気象研究所のMRI/GRDスケールに統一した値を使用した。CH₄の長期トレンドは、1990年代は増加傾向にあったが、2000年代に入って増加が停止した状態が続いていた。しかし、2006年頃から再び増加する傾向がどの緯度帯でも明瞭に捉えられた。新旧観測が入れ替わる2005年11月～12月前後の長期トレンドを調べた結果、どの緯度帯でも濃度レベルにギャップはなく、トレンド曲線がスムーズに増加に転じていることが分かった。航空機で得られたCH₄の長期的増減傾向の変化は、地上の観測網の結果とも良く一致しており、地球規模のCH₄の収支が長期の気候変化の影響で生じている可能性が強く示唆されたが、その直接の原因については現在の所、未解決である。今後、さらに長期の観測を継続して、その要因について解明することが次の重要な課題となっている。

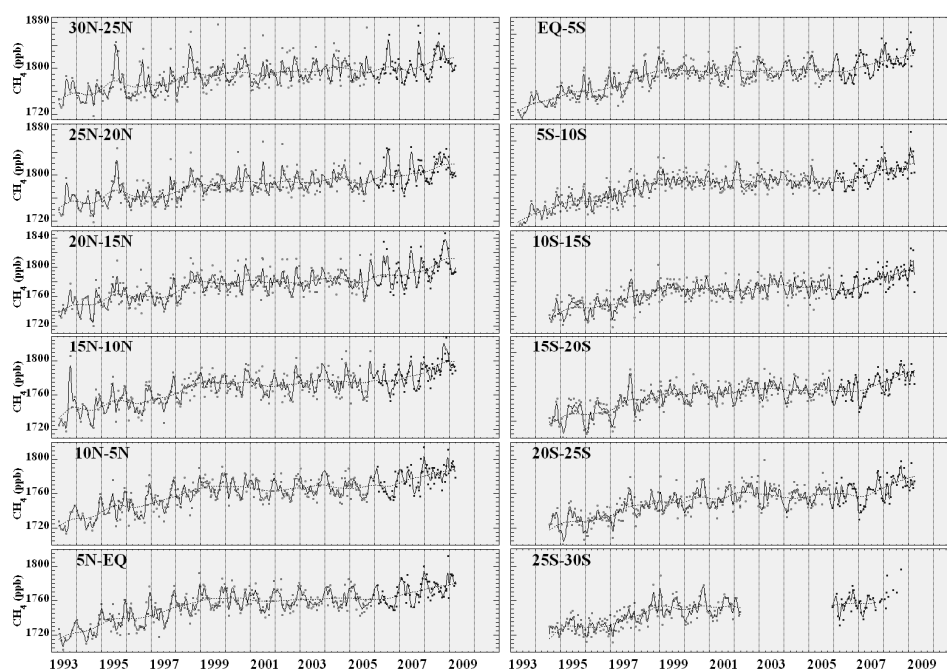


図18. 新旧観測の統合データ・ベースの解析による北緯30度から南緯30度の間の12の緯度帯別のCH₄濃度の時間変動。

CH₄の場合には、毎年の季節変動がCO₂ほど規則的ではないが、新旧観測で見られた季節変化のパターンは、いずれの緯度帯ともほぼ類似していることが認められた。季節変動の振幅は新旧観測ともほぼ同程度であり、統計的に優位な差はないことが認められた。これらの結果から、本CONTRAILプロジェクトで取得されたCH₄データによって、過去の測定記録を精度良く延長できていることが確認できた。

図19は、COの統合データ・ベースを利用して、12個の緯度帯のCO濃度の季節変動を含む濃度変動と長期的トレンドを解析した結果を示してある。なお、1993年4月から2005年11月までは旧ASE観測、2005年12月から2009年3月までは新ASE観測のデータを示しており、いずれも気象研究所のスケールに統一した値を使用した。COの長期トレンドは、特に一定の顕著な増減傾向は認められていない。新旧観測が入れ替わる2005年11月～12月前後の長期トレンドを調べた結果、どの緯度帯でも目立ったギャップはなく、トレンド曲線がスムーズに連結していることが分かった。特に、COの季節変動は南半球の10月頃に濃度が上昇するパターンが特徴的であり、前述した通り、エル・ニーニョ現象に関連した熱帯のバイオマス燃焼が重要なCOの発生源になっていることが明瞭に認められた。

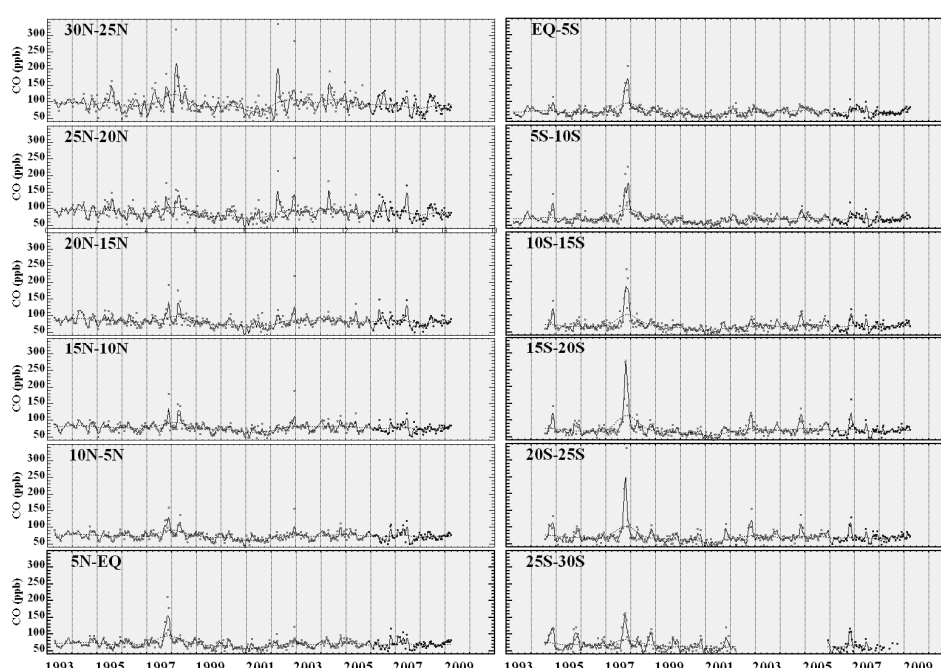


図19. 新旧観測の統合データ・ベースの解析による北緯30度から南緯30度までの12の緯度帯別のCO濃度の時間変動。

(2) CO₂濃度の連続観測

①観測実績

2011年3月までにCMEが観測を行った主な飛行ルートと鉛直分布観測を行った場所の空港コードおよびCO₂濃度の鉛直分布取得回数を図20に示す。東アジア各地で非常に多くの鉛直分布が得られている他、東南アジアのバンコック(BKK)、ジャカルタ(CGK)、シンガポール(SIN)といった亜熱帯や熱帯域でのデータも順調に取得できている。インドのデリー(DEL)にも定期的な飛行があり、地上観測でさえほとんど行われていない地域での鉛直分布が得られており、炭素循環の新たな制約条件となると期待される。ヨーロッパではパリ(CDG)が最も回数が多く、アムステルダム(AMS)が次いでいる。近年はモスクワのドモジェドボ(DME)上空の観測頻度が上がっている。北米ではバ

ンカーバー（YVR）のデータが最も充実している。メキシコ（MEX）にも定期的な飛行があり、デリーと同様に観測の空白地帯での貴重なデータが2009年まで得られていた。また、成田（NRT）上空ではほぼ毎日データが得られており、これまで得られていなかった上空におけるCO₂濃度の日変動が観測できている。2005年11月以来、6000回を越えるフライトでCME観測を実施し、得られたCO₂濃度の鉛直分布は10000本を超えた。

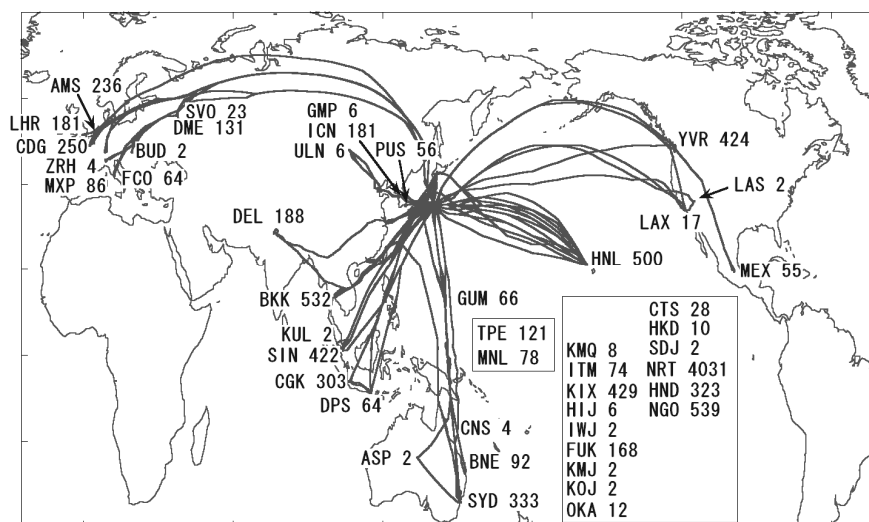


図 2 0 . CMEの飛行ルートと鉛直分布観測回数

②観測結果

ア、成田上空における時系列

成田上空で得られた鉛直分布を、Sawa et al. (2008)¹⁴⁾ に倣って気象庁の再解析データ (JCDAS)²³⁾ を基に対流圏と成層圏、さらに境界層の空気塊に分類して時系列プロットしたものが図 2 1 である。本解析ではPV=2の面を圏界面とみなし、そこより低高度を対流圏とした。圏界面直上はCO₂濃度が急激に変化する遷移領域が存在するので、ここでも圏界面からの温位差が25Kまでの空気塊

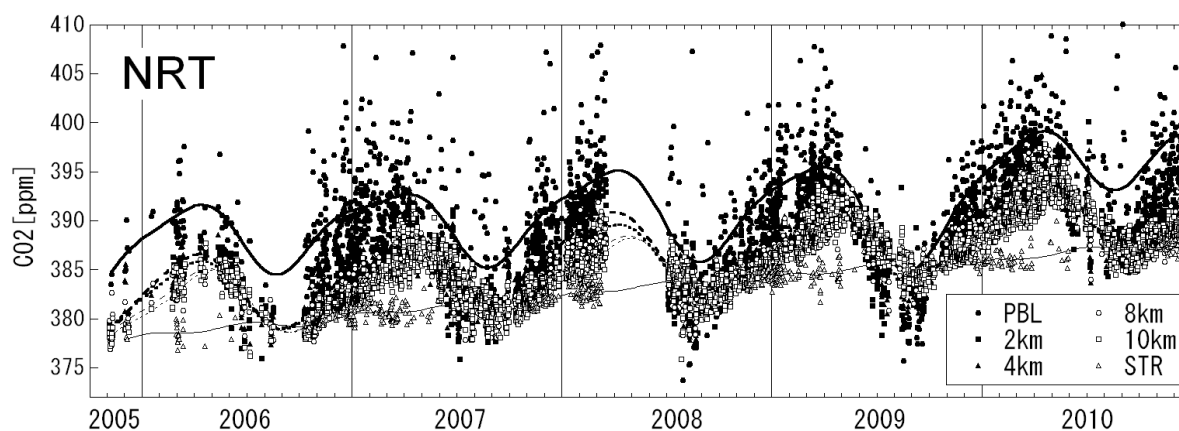


図 2 1 . 成田上空の成層圏（STR）、境界層内（PBL）および高度別の自由対流圏におけるCO₂濃度の時間変動

は解析に用いず、圏界面からの温位差25K以上で観測されたデータを成層圏として扱った。また、バルクリチャードソン数が0.25を示す面を境界層上端としてデータを選択した。境界層と自由対流圏の間にも遷移領域があると考えられるので、境界層上端からの温位差10Kまでのデータは解析に用いず、そこから上方を自由対流圏の空気塊とした。自由対流圏のデータは高度2kmごとに分類して解析した。

2010年は大きな欠測もなく、一年を通して非常に多くのデータが得られた。2008年6月以降はほぼ毎日PBLから自由対流圏にかけてのCO₂濃度が観測されており、自由対流圏においても総観規模のCO₂濃度の変動が見られる。成田上空のCO₂濃度はどの高度においても明瞭な季節性を示し、秋季から初春にかけては低高度ほど濃度が高い濃度勾配が存在する。成層圏に分類されたCO₂濃度は自由対流圏の高度10kmとは全く違った変動をしており、有意な経年変動は認められるものの、季節変動はほとんど見られない。境界層の濃度は2009年の夏季には光合成の影響を受けた低濃度のCO₂により、自由対流圏と同じレベルの低い濃度が観測されたが、2010年の夏季は2008年以前と同様に自由対流圏より明らかに高い濃度となった。

イ、世界各地の上空におけるCO₂濃度の季節変動

成田上空と同様の解析を鉛直分布観測回数の比較的多い北ヨーロッパ(N. EU)、モスクワ(MOW)、バンクーバ(YVR)、デリー(DEL)、成田(NRT)、ホノルル(HNL)、バンコック(BKK)、シンガポール(SIN)およびシドニー(SYD)について行い、平均的な季節変動成分を比較したものが図22である。ここで、北ヨーロッパのデータはパリ、ロンドン、アムステルダム各空港上空におけるデータをまとめて解析した結果であり、モスクワはシェレメチヴォとドモジエドヴォ各空港上空のデータを合わせて解析したものである。観測点によっては成層圏や境界層内のデータが十分にそろっていないために代表的な季節変動を示せない場合がある。

成層圏データが比較的そろっているのは北ヨーロッパとバンクーバの2地点のみである。季節変動の振幅はいずれも1-2ppmであり、Sawa et al. (2008)¹⁴⁾の結果と整合的である。下部成層圏における季節変動の位相はその直下の対流圏とは逆になっており、春季に極小で夏季に極大値を示している。北半球の下部成層圏では冬季から春季にかけて上方から低濃度CO₂の空気塊が沈降するために濃度が暫減し、夏季になると低緯度の上部対流圏から高濃度CO₂の空気塊が等温位面に沿って流入するために濃度が増加すると説明されている¹⁴⁾。

モスクワ上空の季節振幅は北ヨーロッパやバンクーバに比べて明らかに大きくなっている。これは北ヨーロッパやバンクーバが大陸の西岸に位置しているのに対しモスクワは内陸にあり、陸上生態系の影響を直接受けやすいためであると考えられる。

デリー上空のPBLは夏季に非常に低いCO₂濃度が観測されることがある。一方で春季のPBLは自由対流圏より明らかに高くなることが多く、デリー近傍における陸上生態系の活動の季節性が大きいことが示唆される。また、デリー上空のPBLでは10月から12月にかけて高い濃度が観測されることがあり、平均的な季節変動の曲線にも2つめの極大値が表れている。

ホノルルは太平洋の中に位置しており周囲にCO₂の強い放出源や吸収源はないと考えられる。CO₂濃度の季節変動は自由対流圏の2kmから10kmまでほぼ同じ位相、振幅であり、海洋上におけるCO₂濃度の鉛直分布の特徴を表していると言える。

バンコック上空のPBLは極大値が1月-2月頃に表れている。自由対流圏でも高度2kmでは上空よりやや早い3月に極大を示す。これはバンコック周辺においてこの季節に頻繁に発生する森林火災の影響だと考えられる。

シンガポールはほぼ赤道上の北緯1度21分に位置しているが、CO₂濃度は明瞭な北半球性の季節変動を示し、振幅は2.6-2.9ppmである。

南半球のシドニー上空では季節変動の位相は北半球と逆になっており、振幅は北半球に比べて非常に小さい。シドニー上空における季節変動については次節で詳細に考察する。

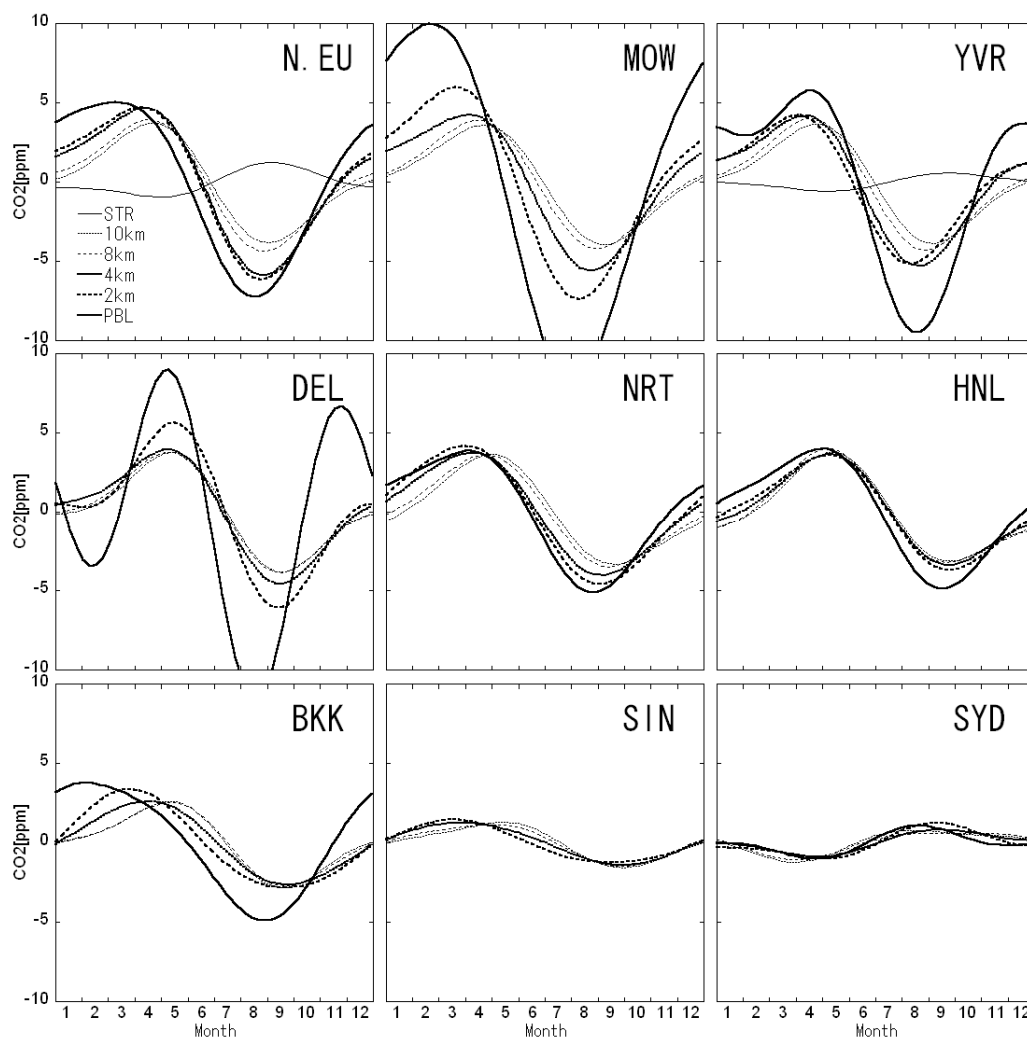


図 2.2. 北ヨーロッパ、MOW、DEL、NRT、HNL、BKK、SINおよびSYD上空におけるCO₂濃度の平均的な季節変動

図 2.2 の季節変動の振幅を他の観測点の結果を合わせて緯度別にプロットしたものが図 2.3 である。自由対流圏の高度2kmではデリーとモスクワの振幅が大きく、観測地点付近の陸上生態系の活動が盛んであることを示唆している。北緯28度のデリーより北の観測点では低高度ほど陸上生態系の影響を強く受けて振幅が大きくなる鉛直構造が見られる。北緯21度のホノルルから赤道域にかけては、自由対流圏においても低緯度ほど振幅が小さくなるとともに、上下方向の振幅の差が非常に小さいことがわかる。赤道付近のシンガポール上空では小さいながらも季節変動が確認

できたが、南緯6度のジャカルタ上空では有意な季節変動は見られなくなる。

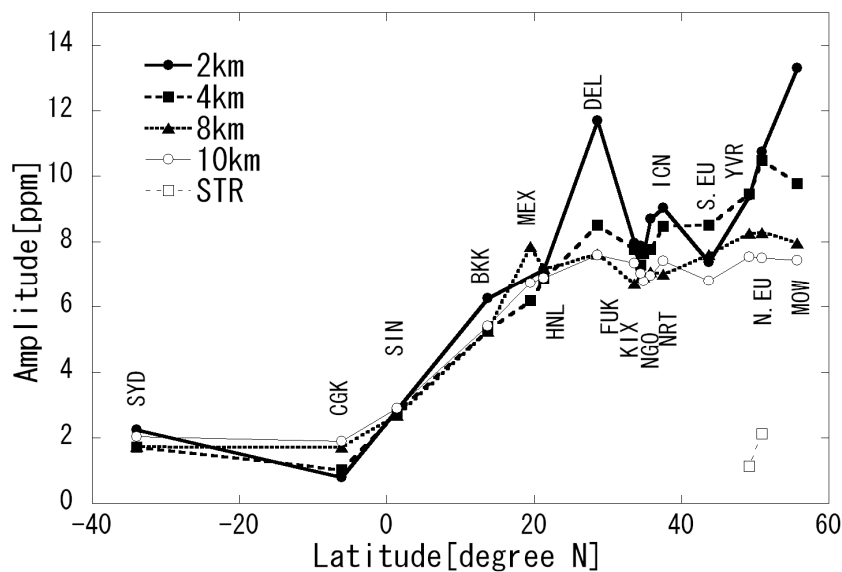


図 2.3. 高度別のCO₂濃度季節振幅の緯度分布

ウ、オーストラリア上空におけるCO₂濃度の季節変動

2009年4月以降はJALの運行計画の変更に伴い777-200型機が定常的にシドニー路線に投入されることになったために、シドニー上空の鉛直分布が高頻度取得できるようになった。この結果、図 2.4 で表されるように、シドニーのデータのみで全ての季節を埋めることができるようになった。シドニー上空4kmにおけるCO₂濃度の季節変動は、4月から5月にかけて極小値を、8月から9月にかけて極大値を示す。振幅は1.7ppmと小さいもののフィッティングカーブからの各データの

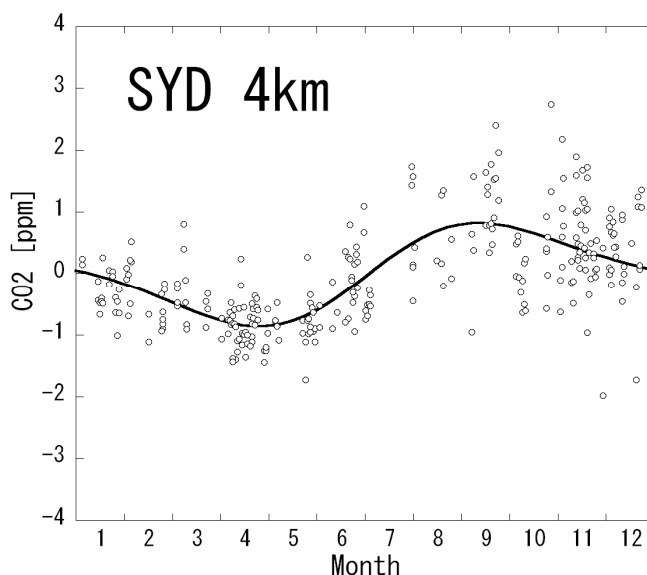


図 2.4. シドニー上空4kmで観測されたデータの平均的な季節変動（実線）と観測値とトレンド成分の残差（白丸）をその年の観測日に対してプロットしたもの

偏差は0.6ppmとさらに小さいために、有意な変動をとらえていると言える。なお、2008年以前の観測値は季節的な偏りがあったために1年周期の調和関数でフィッティングしていたが、2009年以降の観測値を含めたデータセットでは1年周期と半年周期の調和関数を使ってより詳細な変動を追うことができています。

上記の調和関数を使って表したシドニー上空における高度別の平均的な季節変動をまとめたものが図25である。シドニー上空におけるCO₂濃度の季節変動はどの高度でも3月から4月に極小値を示すことは共通している。これらの季節変動を作り出す要因として南半球の陸上生態系活動が挙げられる。自由対流圏の季節振幅は高度2kmが最も大きく、2.2 ppmである。地表面の影響が小さくなる高度4kmの振幅は1.7 ppmになるが、高度6km、8kmはより上空であるにもかかわらず振幅は4kmと変わらず1.7 ppmのままである。さらに高度10kmでは逆に2.0 ppmと振幅が大きくなっている。この結果は南半球の上部対流圏におけるCO₂濃度の季節変動を駆動しているのは地表の陸上生態系の活動だけではないことを示唆している。

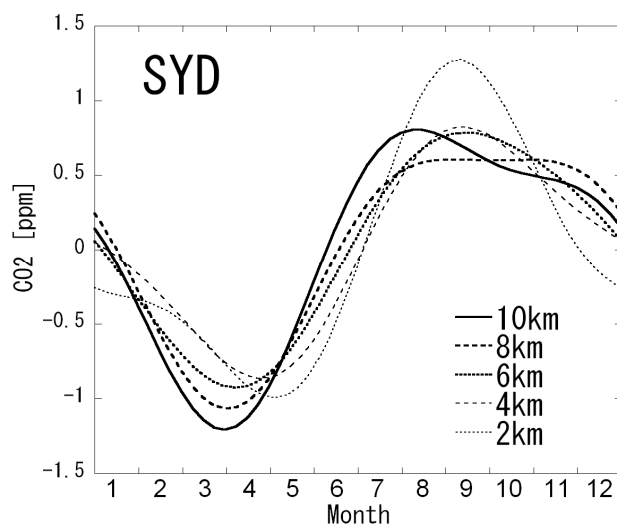


図25. シドニー上空におけるCO₂濃度の高度別季節変動

図26はシドニー上空の2009年におけるCO₂濃度観測値に対するフィッティングカーブを比較したものである。南半球の季節変動は4月から7月にかけての急激な濃度増加が最も特徴的であるが、その濃度増加には高度による系統的な差があり、上空ほど位相が早くなっていることが明瞭に見られる。また、2009年のCO₂濃度の年平均値は高度2kmから6kmでは等しく385.6 ppmであり、高度8kmではそれらよりわずかに高く385.7 ppmとなり、高度10kmは385.9 ppmである。すなわち、シドニー上空では高高度ほど年平均値が高くなる傾向にある。

これは「ケ、CMEで観測されたCO₂濃度の南北分布の季節変化」節で詳細に述べるように、北半球の高い濃度のCO₂が4月から7月にかけて南半球への進入することと、その経路が上部対流圏であることに強く影響されていると考えられる。

なお、本研究で観測された南半球上空の季節振幅は過去に報告された航空機観測の結果²⁴⁾より大きくなっているが、これは北半球におけるCO₂放出量の増大によって南北両半球のCO₂濃度差が1980年代に比べて拡大しているために、北半球空気流入の効果が大きくなっているためであると考えられる。

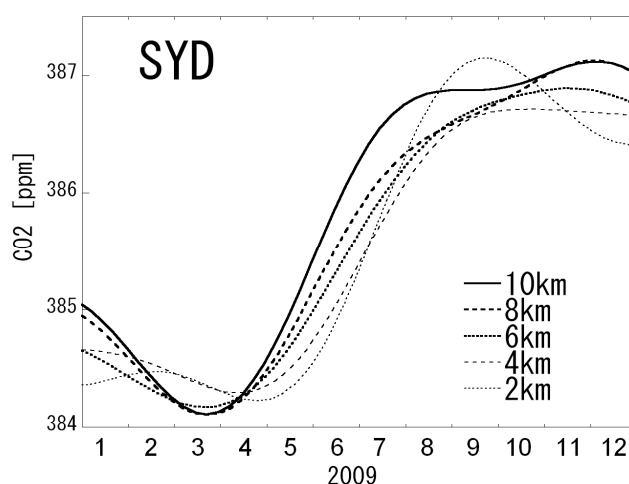


図 2 6. シドニー上空におけるCO₂濃度の高度別フィッティングカーブ

エ、上空におけるCO₂濃度の短周期変動

図 2 4 に示されるように実際に観測されるCO₂濃度は平均的な季節変動を示すと共に、自由対流圏であっても数日規模の短周期の変動によってばらついている。このようなばらつきの情報は、CO₂濃度の高高度観測やカラム量観測を行う際の時間的な代表性を考える上で極めて重要である。特にGOSATなどの衛星観測では、比較検証においてこのばらつきを考慮する必要があるばかりでなく、濃度計算のリトリーバルを行う上での初期誤差として、本観測で得られたばらつきの情報が非常に有用であると言える。図 2 7 は観測頻度の比較的高い場所の上空で観測されたCO₂濃度の短周期変動の緯度分布である。自由対流圏における短周期変動に伴うばらつきは一般的に低高度ほど大きい、各観測点の周辺におけるCO₂放出源・吸収源分布に依存していると言える。すなわち、南半球のオーストラリア上空や太平洋の中に位置するホノルル上空では全体にばらつきは小さく、特に高度2kmで小さいことが特徴である。一方日本の各空港の上空では上部対流圏においてもばら

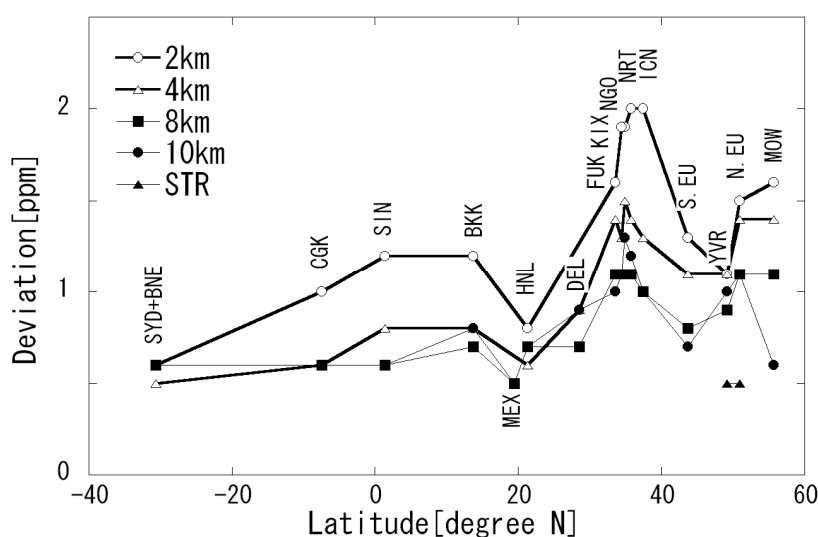


図 2 7. 自由対流圏と成層圏における短周期変動に伴うCO₂濃度観測値のばらつきの緯度分布

つきが大きくなっている。成層圏においてはやはり近傍に強い放出源・吸収源が存在しないので短周期変動は小さいことがわかる。

同じようなCO₂濃度の短周期変動を境界層内と自由対流圏とで比較したものが図28である。境界層内の短周期変動は自由対流圏の変動に比べて非常に大きい。観測点によるばらつきの違いは緯度による依存性よりも、空港の位置などごく近傍の環境に大きく依存していると言える。たとえば、海に近いホノルルやバンクーバーといった空港ではばらつきが小さいが、南半球にあってもシドニー+ブリスベンのばらつきはバンクーバーなみの大きさである。

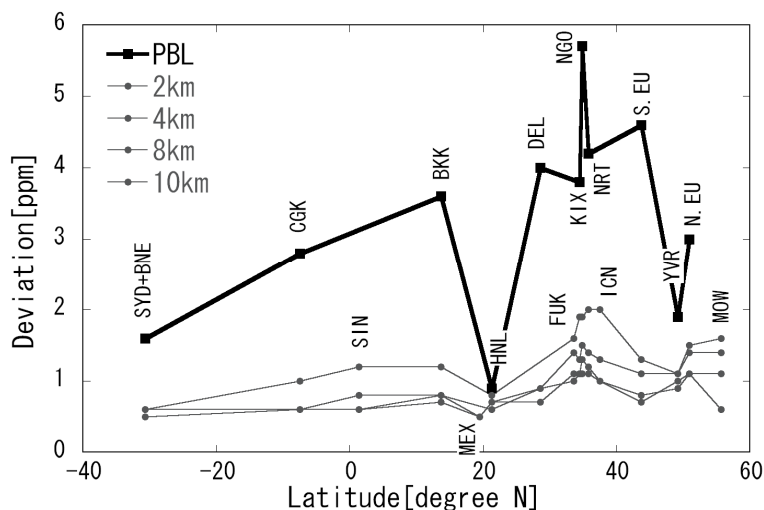


図28. 境界層内の短周期変動に伴うCO₂濃度観測値のばらつきの自由対流圏との比較

オ、CO₂濃度年平均値の緯度分布

上空におけるCO₂濃度の2009年の年平均値を緯度分布としてプロットしたものが図29である。南半球のシドニーは、いずれの高度においても全観測点を通して最も低い濃度を示している。「ウ、オーストラリア上空におけるCO₂濃度の季節変動」で述べた通り、上空ほど年平均値が高くなっていることが図29からもわかる。南緯6度のジャカルタにおいても年平均値は上空の方が高いこと

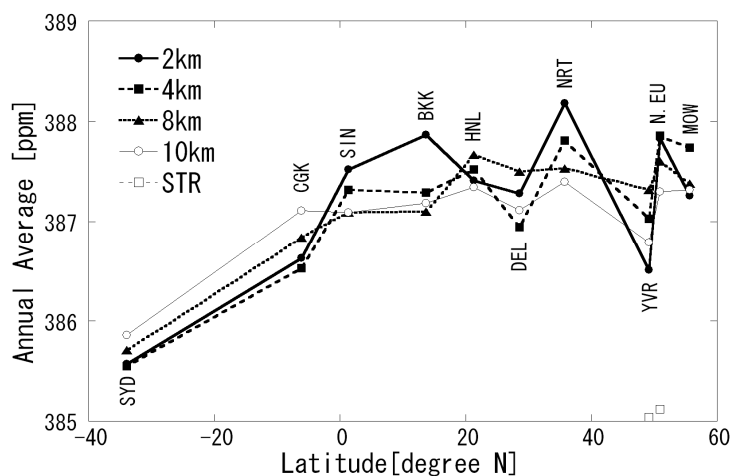


図29. 2009年におけるCO₂濃度年平均値の緯度分布

から、この緯度帯においても上空の方が北半球の影響をより強く受けていると考えられる。北緯1度のシンガポール上空では季節変動の位相も北半球的であったが、CO₂濃度の年平均値も低高度ほど高く、北半球の性質を示している。シンガポールより北の年平均値は、季節振幅に見られたような明らかな濃度勾配は存在せず、北半球内でほぼ似た濃度である。その中でもデリーとバンクーバーは年平均濃度が低くなっており、周辺にCO₂の吸収源が存在していることが示唆される。

カ、下部成層圏におけるCO₂濃度の季節変動とその成因

CMEによる観測では、水平飛行中の高度9-12kmにおいて時間的・空間的に密なCO₂濃度分布が取得される。これらの高度は中高緯度では上部対流圏と下部成層圏に相当するため、観測された高頻度のCO₂データは対流圏界面を通じた輸送過程の理解に大きく貢献する。圏界面付近のCO₂濃度観測はこれまでいくつかの航空機観測キャンペーン (e.g., Hoor et al., 2004²⁵⁾) や過去のJALプロジェクトや気球を利用した大気採取 (e.g., Nakazawa et al., 1991²⁶⁾; Aoki et al., 2003²⁷⁾) に限られており、詳細な時間変動や高度分布は得られていなかった。

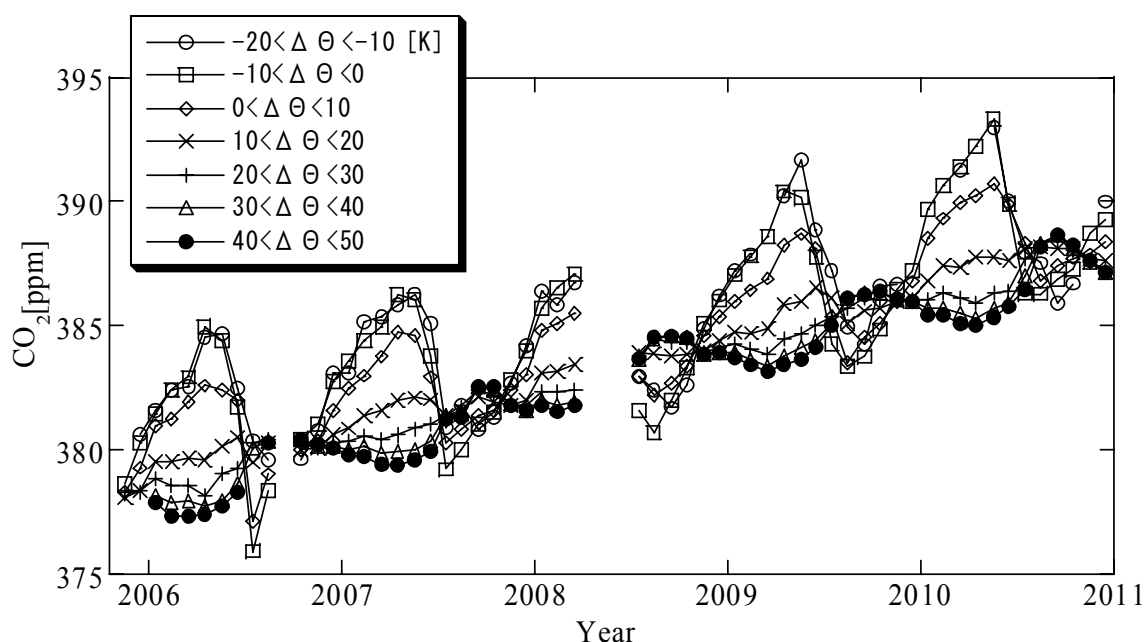


図30. 圏界面付近のCO₂濃度の季節変化。

圏界面からの温位差10Kごとの月平均濃度(単位:ppm, mark)。

図30は観測頻度の高い日本-欧州間で観測されたCO₂濃度の季節変化を対流圏界面(渦位=2PVUで定義)からの温位差ごとに示したものである。観測高度における温位(Θ)と圏界面温位との差を $\Delta\Theta$ として定義し、圏界面からの温位差10Kごとに区分してCO₂濃度の季節変化を求めている。 $\Delta\Theta$ が正の領域は観測高度の温位の方が高い成層圏気塊を示す。上記区分による各温位での季節変化は、観測年に関わらず共通して認められた。このことは得られたデータの代表性・信頼性を支持するものである。観測から得られた各高度での月平均CO₂濃度値をもとに季節変化について解析した結果、対流圏($\Delta\Theta < 0$)においては、春に極大で夏に極小となる大きな季節変化(振幅6-8 ppm)が認められた。一方、下部成層圏の深部($\Delta\Theta > 20\text{K}$)では、対流圏とは異なる季節変化を

示し、夏6月から7月にかけて急激に濃度上昇（最大1.4 ppm）が起こり、夏から次の春まで非常にゆっくりと減少することが明らかになった。さらに成層圏深部での季節変化振幅に着目すると、成層圏深部でより大きな季節変化（振幅2.2ppm, $40\text{K} < \Delta \Theta \leq 50\text{K}$ ）を示す傾向が認められた。このことは、下部成層圏のCO₂季節変化は単純に対流圏の季節変化が下方から伝播したものではないことを示唆している。

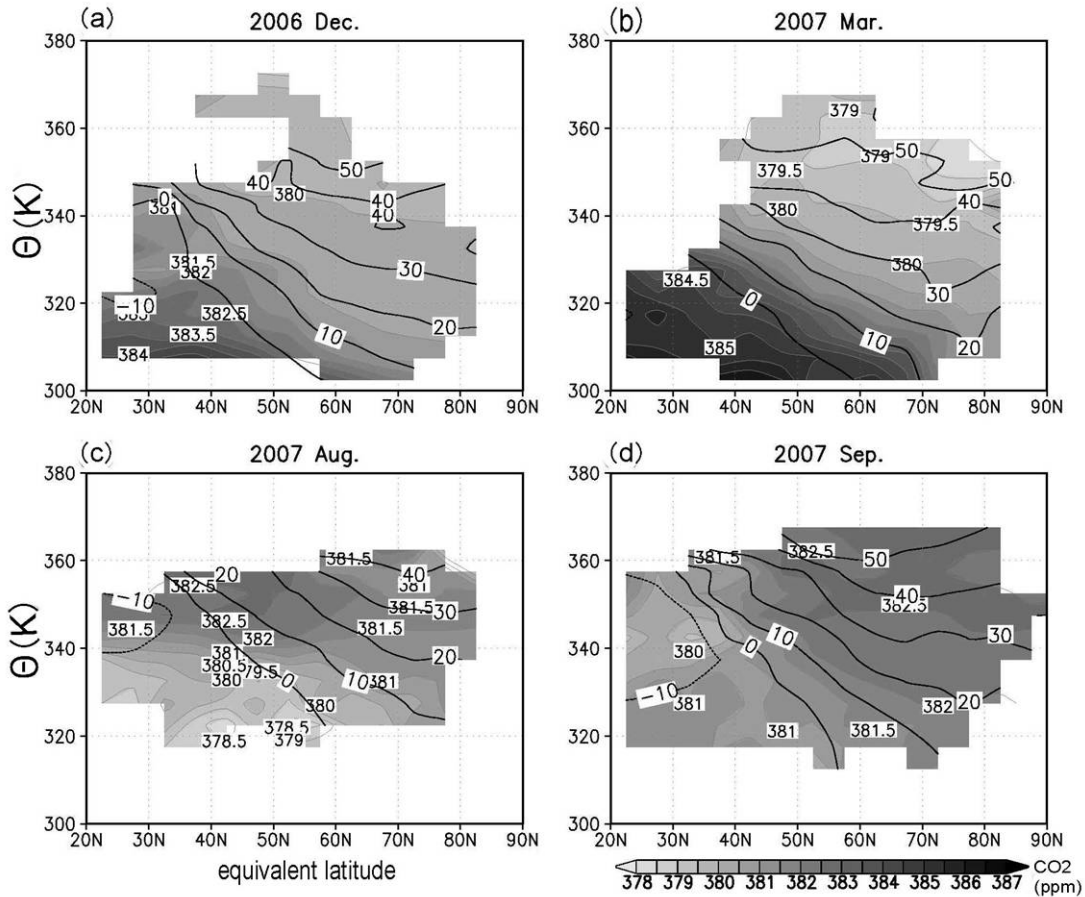


図3 1. 等価緯度-温位座標でのCO₂濃度分布（単位:ppm, shade）と $\Delta \Theta$ （単位:K, contour）。2006年12月(a), 2007年3月(b), 8月(c), 9月(d)。

観測されたCO₂濃度の季節変化を引き起こす輸送経路を調べるために、等価緯度-温位座標での解析を実施した。等価緯度は渦位を基準とした緯度座標で、物質がジェット気流とともに動く場合、蛇行等によって地理緯度座標に表れる見かけの変動を除去することが可能となる。またジェットが北進した場合より低緯度の性質を持った気塊が高緯度へ流入するがその効果も加味できる。図3 1に等価緯度-温位座標で表した代表的な月のCO₂濃度分布を示す。圏界面との相対位置を表すため $\Delta \Theta$ も合わせて示す。秋にはCO₂濃度は観測領域でほぼ一様となっていたが、12月になると対流圏でのCO₂濃度上昇に伴い、圏界面を境に対流圏と成層圏で濃度勾配が現れる（図3 1 a）。この時期、圏界面と平行なCO₂濃度分布が観測されている。これは等価緯度によらずCO₂濃度が圏界面との距離によって決まっていることを示す。3月にも圏界面と平行なCO₂濃度分布は変わらないが、対流圏CO₂濃度上昇に伴ってより大きな濃度差が圏界面を挟んで観測されている（図3 1 b）。

春には極域高温位の領域に低濃度のCO₂が現れることも特徴である。これは春に強まる成層圏上部からの下降流を反映したものと考えられる。夏になるとCO₂濃度分布は大きく変化する(図3 1 c)。8月にはCO₂濃度分布は圏界面に沿うのではなく、温位面に沿った分布が認められる。340K以上の高温位領域で低緯度から北緯60~70度付近まで圏界面を横切って、382ppm以上の高濃度CO₂が分布している。この高濃度CO₂は $\Delta\Theta \sim 30\text{K}$ の成層圏深部まで到達している。一方、340K以下においても380ppm以下の低濃度CO₂が高緯度まで分布している。解析の結果、このような圏界面を横切る温位面上の高濃度CO₂の輸送は7月に低緯度高高度で始まり、8月に高緯度まで到達することが明らかになった。9月には再び圏界面に沿うようなCO₂濃度分布に戻るが、夏に流入した高濃度CO₂が下部成層圏の広い領域に広がること示された(図3 1 d)。

水平飛行中の観測により、中高緯度圏界面付近におけるCO₂濃度の詳細な季節変化が明らかになった。気象データをもとに求めた圏界面からの温位差によって、対流圏・成層圏での季節変化と鉛直構造が明瞭に異なることが示された。さらに等価緯度-温位座標での解析により、下部成層圏でのCO₂濃度の季節変化が、夏の低緯度から高濃度CO₂が温位面に沿って速く輸送されること、春に顕著な成層圏上部からの低濃度CO₂の下降、及び成層圏最下層での対流圏気塊との混合の3つの要素によることが明らかになった。

キ、上部対流圏における広域CO₂濃度分布と季節変化

本観測では、日本を中心に南北(日本-豪州)、東西(欧州-北米)に伸びる非常に広域の領域で上空のCO₂濃度が観測される。ここでは本観測で得られた上部対流圏でのCO₂濃度の広域分布と季節変化について記述する。

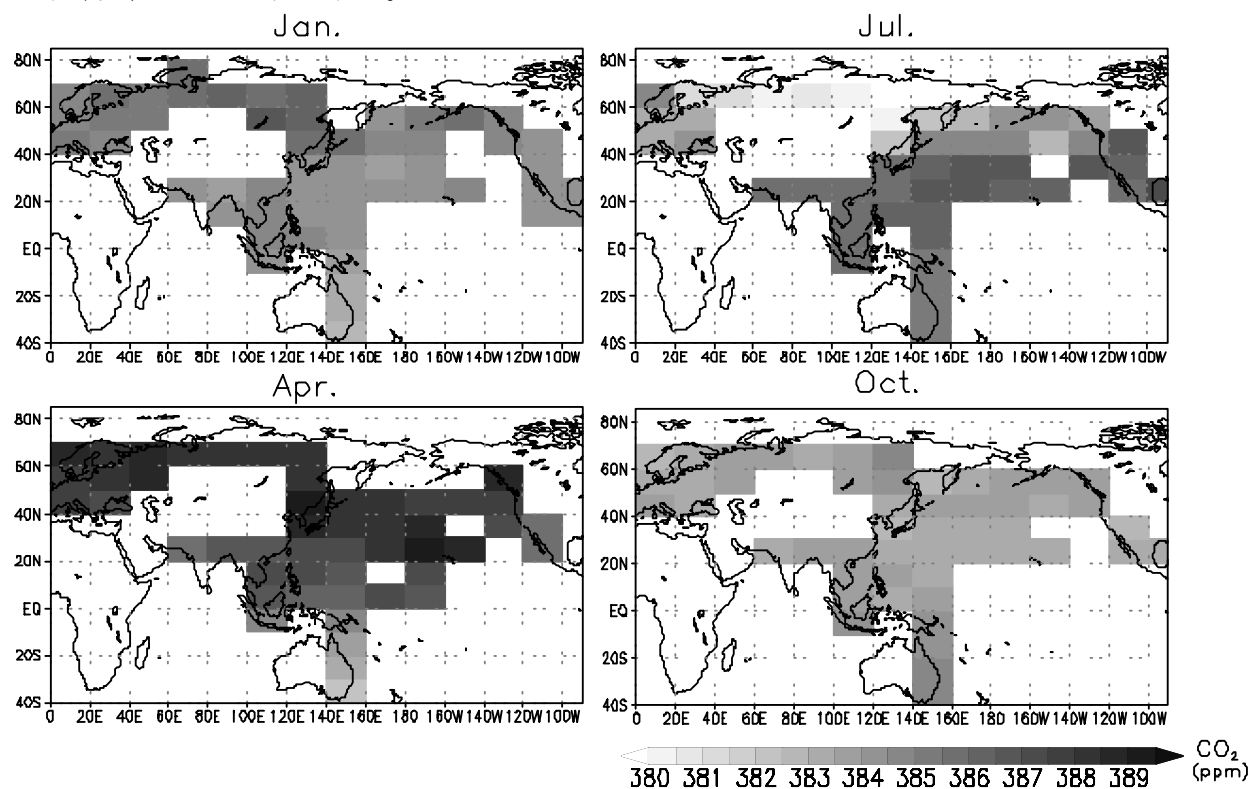


図3 2. 高度8kmから対流圏界面までの高度で観測されたCO₂濃度の月平均値の広域分布。観測された値を2008年基準の濃度に換算してから平均している。

図3 2に上空8kmから圏界面までの上部対流圏において観測されたCO₂濃度の季節変化を示す。ここでは5年間の観測データをもとに式(1)により2008年基準の濃度に変換したCO₂濃度の月平均値を示している。1月には北半球の高緯度において386ppm前後の高濃度が観測されるのに対し、低緯度では384ppm、南半球のオーストラリア南部では383ppm前後で南ほど低濃度になる傾向が上部対流圏CO₂に認められた。4月になると北半球のCO₂濃度は上部対流圏においても大幅に上昇し、中高緯度では389ppmを超えるCO₂濃度も観測されるようになる。北半球低緯度地域においてもCO₂濃度は上昇するのに対し、南半球での濃度変化は小さい。7月になるとユーラシア大陸上のCO₂濃度は381ppm以下に急激に減少している。北太平洋上のCO₂濃度も4月に比べ383ppm前後に大きく減少しているが、ユーラシア大陸に比較すると2~3ppm前後高い。10月になると北半球のCO₂濃度は再び上昇し384ppm付近を示すようになる。北半球の秋にあたる10月には観測領域での上部対流圏のCO₂濃度の空間的な差は比較的小さくなることが示されている。このような広域におけるCO₂濃度分布は、高頻度・広範囲・高精度の観測を積み重ねることによって明らかになったものである。これまで上空における精度の高い観測は非常に限られており、上部対流圏の広域のCO₂濃度の季節変化が得られたのは世界でも初めてのことである。本研究によって観測された広域のCO₂濃度分布は人工衛星などのリモートセンシングや炭素循環モデルの検証に極めて有効である。

ク、北半球中高緯度におけるCO₂濃度の東西分布

北半球中高緯度においては、日本から欧州、北米への路線により大陸・海洋上の広い緯度帯でのCO₂濃度が取得されてきた。ここでは、これらのデータを利用して経度的な分布、大陸・海洋上の上空CO₂濃度の違いを解析した。北米路線は欧州路線に比べて観測頻度が低いので本解析でも観測されたCO₂濃度を2008年基準の濃度に換算して季節変化の違いを解析した。

図3 3は北緯40度から北緯70度までの北半球中高緯度帯で高度8kmから対流圏界面までの上部対流圏におけるCO₂濃度の月別の東西分布の変化を示したものである。

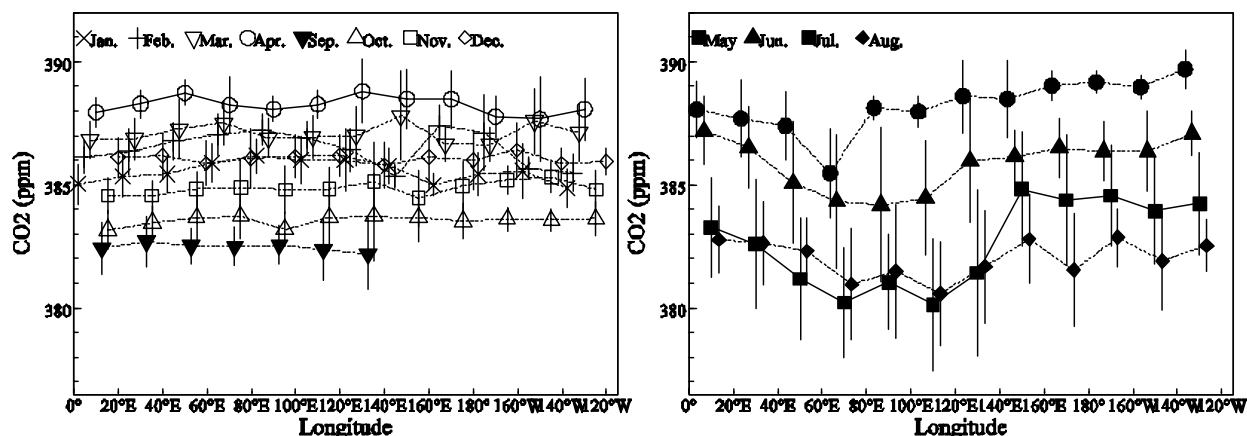


図3 3. 北半球中高緯度における上部対流圏CO₂濃度の東西分布。1月から4月及び9月から12月までの月平均東西分布(左図)、5月から8月までの東西分布(右図)。北緯40度から北緯70度、高度8kmから対流圏界面までで観測されたCO₂濃度を2008年基準に換算し平均した。縦棒は各経度帯で観測されたCO₂濃度の標準偏差を示す。

秋から春にかけての9月から4月にかけては、季節の進行に伴い上空のCO₂濃度も上昇していくが東西方向の変化は小さい。これに対して、5月から8月にかけては経度的に大きなCO₂濃度の違いが観測された。ユーラシア大陸上空(20E-140E)上のCO₂は5月に減少し始め、60E-80Eには386ppm以下のCO₂濃度が観測されている。6月にはCO₂濃度の減少は120Eまで広がり、7月には極小値約380ppmに達する。これは大陸上の植生の夏季の活発な光合成の影響を反映したものと考えられる。一方、北太平洋上空の160E-120Wの濃度は大陸上空よりも約1ヶ月遅れて減少し始め、8月に極小値382ppmに達する。観測領域における経度的な東西濃度差は7月に最大4ppmに達するが、8月には若干解消され2ppm程度となる。各領域の観測されるCO₂濃度の標準偏差は5月には1ppm程度であるのに対し、濃度が減少するに従って増加し、7月には2.0-3.5ppmと大きな標準偏差を伴っていた。夏季の大きな標準偏差は陸上植生の光合成活動による低濃度CO₂が一様に上空に輸送されるのではなく、対流活動等によって散発的に上空に輸送されてきていることを示唆している。これに対し、冬季は標準偏差が小さく上空への直接的な輸送の影響は小さいことが観測から示唆される。

これまで、地上観測点の多くは局所的な影響をできるだけ受けないように洋上の孤島や岬などで実施されてきた。これらのバックグラウンド観測点に加え、近年は大陸上にも観測所が設けられるようになってきた。しかしながら、依然として大陸上の観測地点は限られているのに加え、得られた観測値から局所的な影響を除いて空間代表性の高いCO₂濃度を求めることも困難な状況にある。これに対しCMEの高頻度・広範囲観測において明らかになったCO₂濃度の分布の空間代表性は極めて高く、これらの観測データを用いることによってCO₂フラックスの推定精度を大きく向上させることが期待される。

ケ、CMEで観測されたCO₂濃度の南北分布の季節変化

本観測では日本を離発着する航空機に観測機器を搭載しているため、日本付近の経度帯でオーストラリア路線、東南アジア路線により熱帯、南半球まで、北から南まで広い緯度帯でCO₂濃度が観測される。ここでは西太平洋域のCO₂濃度の南北分布と季節変化について、東経100度から160度までの範囲で観測されたデータをもとに解析を行った。解析に等価緯度座標系を採用することで、直接の観測が実施されていない緯度においても平均的なCO₂濃度分布を求めた。

3月の等価緯度-気圧座標系のCO₂濃度断面図では、北半球対流圏と成層圏との大きな濃度差が認められる。このことは、対流圏界面が強い輸送障壁となっていることが示している(図3 4a)。冬から春にかけては、赤道を挟んで比較的大きなCO₂濃度差が観測され、この時期北半球と南半球の空気塊の輸送が抑えられていることが推測される。このような分布は4月まで共通して認められる(図3 4b)。3月には高濃度のCO₂は北半球の低高度の領域に閉じ込められているのに対して、4月には北半球熱帯域の高高度にも高濃度CO₂分布が観測され、高濃度CO₂が高緯度低高度から低緯度高高度へ輸送されていることを示している。4月には南半球のCO₂はまだ低濃度のままで、赤道を挟んだ濃度差は約4ppmとなっている。5月になると南半球へも高濃度CO₂が流入し始める(図3 4c)。4月から5月の1ヶ月間に約1ppmのCO₂濃度上昇が南半球南緯20度付近まで認められる。また、高高度の領域ほどより南半球高緯度側まで高濃度のCO₂が進入しており、これは南半球への気塊輸送が高高度ほど活発であることを示している。6月には高濃度のCO₂がさらに南半球高緯度側である南緯40度付近まで広がっている(図3 4d)。南半球に低緯度高高度から侵入した高濃度CO₂気塊は7月から9月にかけてより高緯度側・低高度へ広がり南半球に広く分布するようになる(図3

4 e-g) この時期上空で観測されるCO₂濃度は地上観測値と比較して約2ppm近く高いが、これは北半球からの高濃度CO₂気塊の流入によるものであることが明らかになった。

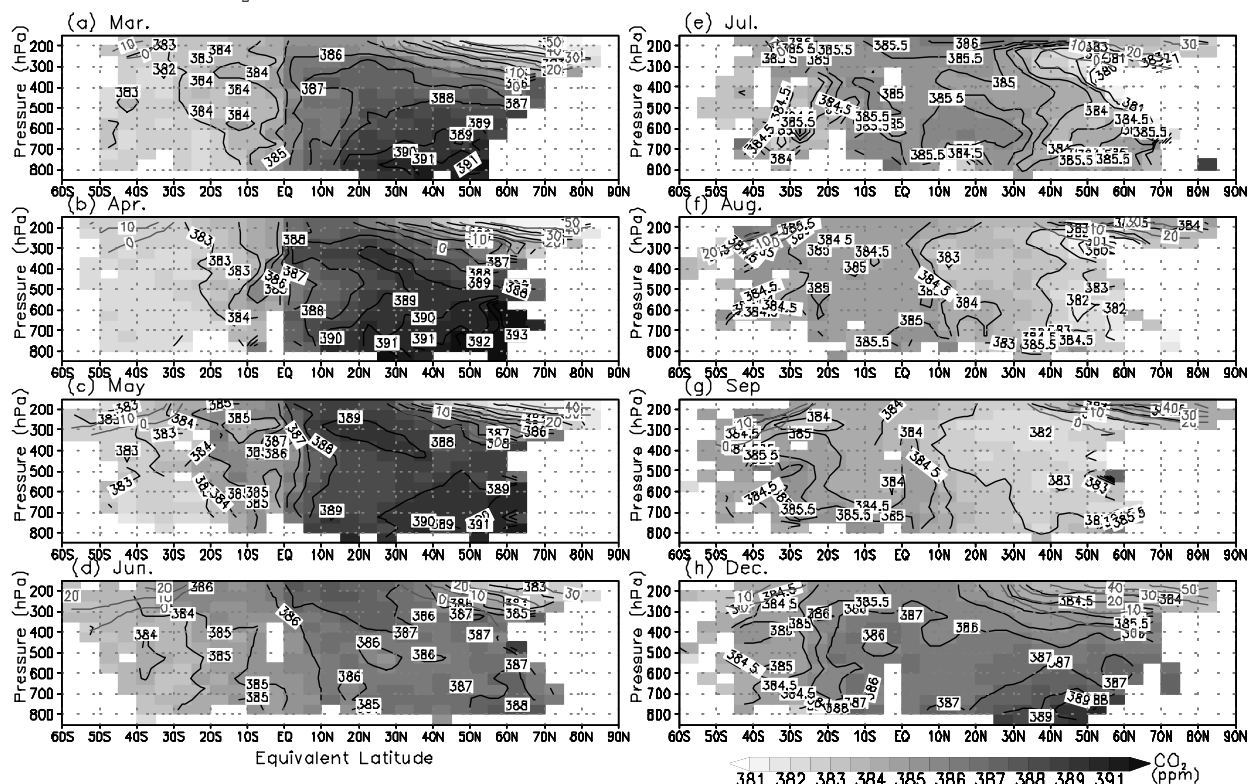


図3.4. 西太平洋域上空におけるCO₂濃度の断面図。東経100度から160度までで観測されたCO₂濃度を2008年基準濃度に換算し、等価緯度-気圧座標系の5度×50hPaのグリッド内のデータを各月平均して求めた。

得られた観測データをもとに、南緯30度から赤道まで高度600hPaから200hPaまでの領域に含まれる炭素量を見積もったところ、4月から9月までの増加量は約0.7PgCとなることがわかった。この量はこれまで領域別に見積もられてきた亜大陸スケール（アジア寒帯域、アジア温帯域等…）のCO₂フラックスの季節変化量に相当する大きな量である。したがって上空を通じた半球間輸送を適切に評価しないと全球の炭素収支の見積もりに大きな誤差が生じることになる。上空を通じた北半球起源気塊の南半球への輸送についてはこれまで数値実験等が実施されてきたが、今回の解析では高濃度CO₂が南半球へ効率的に輸送される時期があることが明らかになった。このことは炭素収支の見積もりにおいて、これまでの地上を中心とした観測網では付加できなかった新たな拘束条件を与え、より正確な南北両半球の地域的炭素収支の見積もりに寄与するものと考えられる。

5. 本研究により得られた成果

本年度の研究により以下の成果が得られた。

- ・ CMEは2005年11月から2011年3月までの間に6000回を越える観測フライトを実施し、CO₂濃度鉛直分布の観測数は10000回を超えた。また、同時期にASEとMSEによるサンプリング観測では合計1230個を超える空気試料が採取され、それらに含まれるCO₂、CH₄、CO、N₂O、SF₆、H₂の濃度分析を実施した。

- ・ ASE分析装置は、過去5年間の分析精度には大きな変化はなく、高精度の測定が長期間安定して維持されていたことが分かった。
- ・ ASEとCMEで観測された各緯度帯のCO₂の季節変動は、これまでの旧ASE観測結果と非常に良い整合性があった。北半球では、北緯30度から赤道に向けて季節変化の振幅が減衰しながら位相が徐々に遅れてくる緯度変化が明瞭に観測された。これに対して、南半球では季節変化の振幅が小さく、そのパターンも二峰性を持つ複雑な季節性を捉えることができた。
- ・ 過去5年にわたるCO観測の結果を見ると、北半球では、5月頃に濃度が最大となり、冬の時期に最低となる季節変動が明瞭に捉えられていることが分かった。また、過去5年間のN₂O濃度とSF₆濃度は増加の一途を辿っており、平均像加速度はそれぞれ約0.8ppb/年と約0.25ppt/年であることが分かった。
- ・ 過去18年間の太平洋上空におけるCO₂の増加速度を算出すると、約1ppm/年から3ppm/年の大きな変化が認められ、その変動はエル・ニーニョ現象と密接に関連していることが捉えられた。また、北半球の化石燃料燃焼の増大に伴って、上空の南北濃度勾配が徐々に大きくなっていることも確認できた。
- ・ CH₄の長期トレンドは、1990年代は増加傾向にあったが、2000年代に入って増加が停止した状態が続いていた。しかし、2006年頃から再び増加する傾向がどの緯度帯でも明瞭に捉えられた。
- ・ COの長期トレンドは、特に一定の顕著な増減傾向は認められていない。また、COの季節変動は南半球の10月頃に濃度が上昇するパターンが特徴的であり、エル・ニーニョ現象に関連した熱帯のバイオマス燃焼が重要なCOの発生源になっていることが明瞭に認められた。
- ・ 成田上空では2008年6月以降はほぼ毎日PBLから自由対流圏にかけてのCO₂濃度が観測されており、自由対流圏においても総観規模のCO₂濃度の変動が見られることが確認された。
- ・ モスクワ上空のCO₂濃度の季節振幅は北ヨーロッパやバンクーバに比べて明らかに大きくなっている。これは北ヨーロッパやバンクーバが大陸の西岸に位置しているのに対しモスクワは内陸にあり、陸上生態系の影響を直接受けやすいためであると考えられる。
- ・ バンコック上空では1月から3月にかけて低高度で高いCO₂濃度が観測される。これはバンコック周辺においてこの季節に頻繁に発生する森林火災の影響だと考えられる。
- ・ シンガポールはほぼ赤道上に位置しているが、CO₂濃度の季節変動もCO₂濃度年平均値の鉛直分布も北半球の特徴を示していることが分かった。
- ・ 2009年4月以降に777-200型機が定常的にシドニー路線に観測機材が投入されることになったために、南半球の観測値が増えた。シドニー上空のCO₂濃度の季節振幅は上空ほど大きく、4月から7月にかけての濃度上昇は上空ほど早く、高高度ほど年平均値がことから、上部対流圏を通した北半球空気の進入が南半球の季節変動に影響を及ぼしていると考えられる。
- ・ また、南半球上空の季節振幅が1980年代より大きくなっているのは南北両半球のCO₂濃度差が拡大していることが要因の一つであると言える。
- ・ 自由対流圏におけるCO₂濃度の短周期変動はオーストラリアやシドニーで小さく、日本の各空港上空では大きめであり、これらの変動が地上の放出源・吸収源分布に依存していることが明らかになった。このようなばらつきの情報は、CO₂濃度の高高度観測やカラム量

観測を行う際の時間的な代表性を考える上で極めて重要である。

- ・ 下部成層圏の深部におけるCO₂濃度は対流圏とは異なる季節変化を示し、夏6月から7月にかけて急激に濃度上昇が起こり、夏から次の春まで非常にゆっくりと減少することが明らかになった。季節振幅に着目すると、成層圏深部でより大きな季節変化を示す傾向が認められた。
- ・ 北半球の冬季から春季にかけてはCO₂濃度分布が圏界面と平行であるが、8月には340K以上の高温位領域で低緯度から圏界面を横切って成層圏に高濃度CO₂が輸送されるメカニズムが存在することが明らかになった。このように、気象データをもとに求めた圏界面からの温位差によって、対流圏・成層圏での季節変化と鉛直構造が明瞭に異なることが示された。
- ・ 下部成層圏でのCO₂濃度の季節変化が、夏の低緯度から高濃度CO₂が温位面に沿って速く輸送されること、春に顕著な成層圏上部からの低濃度CO₂の下降、及び成層圏最下層での対流圏気塊との混合の3つの要素によることが明らかになった。
- ・ 北半球上部対流圏CO₂濃度の東西分布は、9月から4月にかけては上空のCO₂濃度も上昇していくが東西方向の変化は小さい。ユーラシア大陸上空上のCO₂は5月に減少し始め、6月にはCO₂濃度の減少は120Eまで広がり、7月には極小値約380ppmに達する。一方、北太平洋上空の160E-120Wの濃度は大陸上空よりも約1ヶ月遅れて減少し始め、8月に極小値に達するという東西方向の不均衡があることが明らかになった。
- ・ 北半球上部対流圏CO₂濃度の夏季の大きな標準偏差は陸上植生の光合成活動による低濃度CO₂が対流活動等によって散発的に上空に輸送されていることを示唆している。これに対し、冬季は標準偏差が小さく上空への直接的な輸送の影響は小さいことが示唆される。
- ・ CO₂濃度は4月には南北両半球の濃度差が4ppmにまで広がるが、5月になると特に高高度を通して南半球へ高濃度CO₂が流入し始め、6月には高濃度のCO₂がさらに南半球高緯度側である南緯40度付近まで広がるといった南北輸送メカニズムが明らかになった。
- ・ 南緯30度から赤道まで高度600hPaから200hPaまでの領域に含まれる炭素量を見積もったところ、4月から9月までの増加量は約0.7PgCとなることがわかった。この量は亜大陸スケールのCO₂フラックスの季節変化量に相当する大きな量である。したがって上空を通じた半球間輸送を適切に評価しないと全球の炭素収支の見積もりに大きな誤差が生じることが明らかになった。
- ・ 以上のことは炭素収支の見積もりにおいて、これまでの地上を中心とした観測網では付加できなかった新たな拘束条件を与え、より正確な南北両半球の地域的炭素収支の見積もりに寄与するものと考えられる。

6. 引用文献

- 1) Gurney, K. R., and Coauthors (2004), Transcom 3 inversion intercomparison: Model mean results for the estimation of seasonal carbon sources and sinks. *Global Biogeochem. Cycles*, **18**, GB1010, doi:10.1029/2003GB002111.
- 2) Baker, D.F., and Coauthors (2006), Transcom 3 inversion intercomparison: Impact of transport model errors on the interannual variability of regional CO₂ fluxes,

- 1988–2003. *Global Biogeochem. Cycles*, **20**, GB1002, doi:10.1029/2004GB002439.
- 3) Gerbig, C., and Coauthors (2003), Toward constraining regional-scale fluxes of CO₂ with atmospheric observations over a continent: 1. Observed spatial variability from airborne platforms, *J. Geophys. Res.*, **108**, 4756, doi:10.1029/2002JD003018.
 - 4) Machida, T., and Coauthors (2003), Vertical and meridional distributions of the atmospheric CO₂ mixing ratio between northern midlatitudes and southern subtropics. *J. Geophys. Res.*, **108**, 8401, doi:10.1029/2001JD000910.
 - 5) Vay, S.A., and Coauthors (2003) Influence of regional-scale anthropogenic emissions on CO₂ distributions over the western North Pacific, *J. Geophys. Res.*, **108**, 8801, doi:10.1029/2002JD003094.
 - 6) Sawa Y., and Coauthors (2004), Aircraft observation of CO₂, CO, O₃ and H₂ over the North Pacific during the PACE-7 campaign. *Tellus*, **56B**, 2–20.
 - 7) Brenninkmeijer, C. A. M., and Coauthors (1999), CARIBIC-civil aircraft for global measurement of trace gases and aerosols in the tropopause region. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **16**, 1373–1383.
 - 8) Marenco, A., and Coauthors (1998), Measurement of ozone and water vapor by Airbus in-service aircraft: The MOZIC airborne program, an overview. *J. Geophys. Res.*, **103**, 25631–25642.
 - 9) Machida, T., and Coauthors (2001), Temporal and Spatial Variations of atmospheric CO₂ mixing ratio over Siberia, Sixth International CO₂ Conference, Sendai Japan; *CGER Report*, CGER-I047-2001-1, 15–18.
 - 10) Lloyd, J., and Coauthors (2002), A trace-gas climatology above Zotino, central Siberia, *Tellus* **54B**, 749–767.
 - 11) Ramonet, M., and Coauthors (2002), Three years of aircraft-based trace gas measurements over the Fyodorovskoye southern taiga forest, 300 km north-west of Moscow, *Tellus* **54B**, 713–734.
 - 12) Nakazawa, T., and Coauthors (1993), Time and space variations of the carbon isotopic ratio of tropospheric carbon dioxide over Japan. *Tellus*, **45B**, 258–274.
 - 13) Machida, T., H. Matsueda, Y. Sawa, and Coauthors (2008), Worldwide measurements of atmospheric CO₂ and other trace gas species using commercial airlines. *J. Atmos. Oceanic Technol.* **25** (10), 1744–1754, DOI: 10.1175/2008JTECHA1082.1.
 - 14) Sawa, Y., T. Machida, and H. Matsueda (2008), Seasonal variations of CO₂ near the tropopause observed by commercial aircraft, *J. Geophys. Res.*, **113**, D23301, doi:10.1029/2008JD010568.
 - 15) Ishijima, K., and Coauthors (2010), Stratospheric influence on the seasonal cycle of nitrous oxide in the troposphere as deduced from aircraft observations and model simulations, *J. Geophys. Res.*, **115**, D20308,
 - 16) Matsueda, H., and Coauthors (2002), Aircraft observation of carbon dioxide at 8–13 km altitude over the western Pacific from 1993 to 1999. *Tellus*, **54B**, 1–21.

- 17) Matsueda, H., and Coauthors (2008), Evaluation of atmospheric CO₂ measurements from new air sampling of JAL airliner observations. *Pap. Meteorol. Geophys.*, **59**, 1-17.
- 18) Crevoisier, C., Chédin, A., Matsueda, H., Machida, T., Armante, R., and Scott, N. A. (2009), First year of upper tropospheric integrated content of CO₂ from IASI hyperspectral infrared observations, *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 4797-4810.
- 19) Miyazaki, K., T. Machida, P. K. Patra, T. Iwasaki, Y. Sawa, H. Matsueda, and T. Nakazawa (2009), Formation mechanisms of latitudinal CO₂ gradients in the upper troposphere over the subtropics and tropics, *J. Geophys. Res.*, **114**, D03306, doi:10.1029/2008JD010545.
- 20) Kulawik, S. S., and Coauthors (2010), Characterization of Tropospheric Emission Spectrometer (TES) CO₂ for carbon cycle science, *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 5601-5623, doi:10.5194/acp-10-5601-2010.
- 21) Nassar, R., and Coauthors (2010), Modeling global atmospheric CO₂ with improved emission inventories and CO₂ production from the oxidation of other carbon species, *Geosci. Model Dev.*, **3**, 689-716, doi:10.5194/gmd-3-689-2010.
- 22) Feng, L., and Coauthors (2011), Evaluating a 3-D transport model of atmospheric CO₂ using ground-based, aircraft, and space-borne data, *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 2789-2803, doi:10.5194/acp-11-2789-2011.
- 23) Onogi, K., and Coauthors (2007), The JRA-25 Reanalysis, *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369-432.
- 24) Pearman, G. I., and D. J. Beardsmore (1984), Atmospheric carbon dioxide measurements in the Australian region: Ten years of aircraft data. *Tellus* **36B**, 1-24.
- 25) Hoor, P., and Coauthors (2004), Seasonality and extent of extratropical TST derived from in-situ CO measurements during SPURT, *Atmos. Chem. Phys.*, **4**, 1427-1442.
- 26) Nakazawa, T., K. Miyashita, S. Aoki, and M. Tanaka (1991), Temporal and spatial variations of upper troposphere and lower stratospheric carbon dioxide, *Tellus*, **43B**, 106-117.
- 27) Aoki, S., Nakazawa, T., Machida, T., Sugawara, S., Morimoto, S., Hashida, G., Yamanouchi, T., Kawamura, K. & Honda, H. (2003), Carbon dioxide variations in the stratosphere over Japan, Scandinavia and Antarctica., *Tellus* **55B** (2), 178-186. doi: 10.1034/j.1600-0560.2003.00059.

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表 (学術誌)

- ① Kulawik, S. S., Jones, D. B. A., Nassar, R., Irion, F. W., Worden, J. R., Bowman, K. W., Machida, T., Matsueda, H., Sawa, Y., Biraud, S. C., Fischer, M., and Jacobson, A. R. (2010), Characterization of Tropospheric Emission Spectrometer (TES) CO₂ for carbon cycle science, *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 5601-5623, doi:10.5194/acp-10-5601-2010.

- ② Araki, M., Morino, I., Machida, T., Sawa, Y., Matsueda, H., Yokota, T., and Uchino, O. (2010), CO₂ column-averaged volume mixing ratio derived over Tsukuba from measurements by commercial airlines, *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 7659–7667, doi:10.5194/acp-10-7659-2010.
- ③ Chevallier, F., P. Ciais, T. J. Conway, B. E. T. Aalto, Anderson, P. Bousquet, E. G. Brunke, Y. Esaki, M. Fröhlich, A. J. Gomez-Pelaez, L. Haszpra, P. Krümmel, R. Langenfelds, M. Leuenberger, T. Machida, F. Maignan, H. Matsueda, J. A. Morguá, H. Mukai, T. Nakazawa, P. Peylin, M. Ramonet, L. Rivier, Y. Sawa, M. Schmidt, P. Steele, S. A. Vay, A. T. Vermeulen, S. Wofsy, D. Worthy (2010), CO₂ surface fluxes at grid point scale estimated from a global 21-year reanalysis of atmospheric measurements, *J. Geophys. Res.*, **115**, D21307, doi:10.1029/2010JD013887.
- ④ Ishijima, K., P. K. Patra, M. Takigawa, T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa, P. Steele, P. Krümmel, R. Langenfelds, S. Aoki and T. Nakazawa (2010), Stratospheric influence on the seasonal cycle of nitrous oxide in the troposphere as deduced from aircraft observations and model simulations, *J. Geophys. Res.*, **115**, D20308, doi:10.1029/2009JD013322.
- ⑤ Wunch, D., Toon, G. C., Wennberg, P. O., Wofsy, S. C., Stephens, B. B., Fischer, M. L., Uchino, O., Abshire, J. B., Bernath, P., Biraud, S. C., Blavier, J.-F. L., Boone, C., Bowman, K. P., Browell, E. V., Campos, T., Connor, B. J., Daube, B. C., Deutscher, N. M., Diao, M., Elkins, J. W., Gerbig, C., Gottlieb, E., Griffith, D. W. T., Hurst, D. F., Jiménez, R., Keppel-Aleks, G., Kort, E. A., Macatangay, R., Machida, T., Matsueda, H., Moore, F., Morino, I., Park, S., Robinson, J., Roehl, C. M., Sawa, Y., Sherlock, V., Sweeney, C., Tanaka, T., and Zondlo, M. A. (2010), Calibration of the Total Carbon Column Observing Network using aircraft profile data, *Atmos. Meas. Tech.*, **3**, 1351–1362, doi:10.5194/amt-3-1351-2010.
- ⑥ Nassar, R., Jones, D. B. A., Suntharalingam, P., Chen, J. M., Andres, R. J., Wecht, K. J., Yantosca, R. M., Kulawik, S. S., Bowman, K. W., Worden, J. R., Machida, T., and Matsueda, H. (2010), Modeling global atmospheric CO₂ with improved emission inventories and CO₂ production from the oxidation of other carbon species, *Geosci. Model Dev.*, **3**, 689–716, doi:10.5194/gmd-3-689-2010.
- ⑦ Feng, L., Palmer, P. I., Yang, Y., Yantosca, R. M., Kawa, S. R., Paris, J.-D., Matsueda, H., and Machida, T. (2011), Evaluating a 3-D transport model of atmospheric CO₂ using ground-based, aircraft, and space-borne data, *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 2789–2803, doi:10.5194/acp-11-2789-2011.
- ⑧ Patra, P. K., Niwa, Y., Schuck, T. J., Brenninkmeijer, C. A. M., Machida, T., Matsueda, H., and Sawa, Y. (2011), Carbon balance of South Asia constrained by passenger aircraft CO₂ measurements, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, **11**, 5379–5405, doi:10.5194/acpd-11-5379-2011.
- ⑨ Niwa, Y., P. K. Patra, Y. Sawa, T. Machida, H. Matsueda, D. Belikov, T. Maki, M. Ikegami,

R. Imasu, S. Maksyutov, T. Oda, M. Satoh, M. Takigawa (2011), Three-dimensional variations of atmospheric CO₂: aircraft measurements and multi-transport model simulations, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, **11**, 12805–12848, doi:10.5194/acpd-11-12805-2011.

(2) 口頭発表

- ① Uchino O., Morino I., Tanaka T., Miyamoto Y., Yoshida Y., Yokota T., Machida, T., Wunch D., Wennberg P., Toon G. et al.: EGU General Assembly 2010, Vienna, Austria, 2010
“Progress of Validation of GOSAT Standard Products”
- ② 松枝秀和, 町田敏暢, 澤庸介: 日本地球惑星科学連合2010年大会 (2010)
「上部対流圏におけるCO₂の南北勾配の長期変化」
- ③ 澤庸介, 町田敏暢, 松枝秀和: 日本地球惑星科学連合2010年大会 (2010)
「民間航空機で観測された上部対流圏・下部成層圏のCO₂の広域分布」
- ④ 白井知子, 町田敏暢, Shamil Maksyutov, 松枝秀和, 澤庸介, Kaz Higuchi: 日本地球惑星科学連合2010年大会 (2010)
「成田上空におけるCO₂短周期変動の観測値と計算値の比較」
- ⑤ Wunch D., Toon G. C., Wennberg P., Wofsy S. C., Stephens B. B., Fischer, M. L., Uchino O., Machida T., Morino I., Tanaka T. et al.: The 2010 NDACC/TCCON Science Team Meeting, Wollongong, Australia, 2010
“TCCON precision and accuracy.”
- ⑥ Uchino O., Morino I., Tanaka T., Miyamoto Y., Yoshida Y., Yokota T., Machida, T., Wunch D., Wennberg P., Toon G. et al.: The 2010 NDACC/TCCON Science Team Meeting, Wollongong, Australia, 2010
“Progress of validation of GOSAT standard products”
- ⑦ Machida, T., Matsueda, H. Sawa, Y.: Asia Oceania Geosciences Society 2010, Hyderabad, India, 2010
“Vertical distributions of atmospheric CO₂ over Delhi observed by commercial aircraft”
- ⑧ Sawa, Y., Machida, T. and Matsueda, H.: 11th Scientific Conference of the International Global Atmospheric Chemistry Project, Halifax, Canada, 2010
“Global distribution and transport of CO₂ in upper troposphere and lower stratosphere obtained by commercial aircraft observations”
- ⑨ Machida, T., Matsueda, H. Sawa, Y.: Pacific Greenhouse Gases Measurement (PGGM) Conferences-3rd, Taipei, Taiwan, 2010
“Recent activities of Japanese airline observation project, CONTRAIL”
- ⑩ Sawa, Y., Machida, T. and Matsueda, H.: In-service Aircraft for Global Observation System 2010 annual meeting, Geneva, Switzerland, 2010
“CO₂ distributions in the upper troposphere observed in the CONTRAIL project, and Recent Activities in the project”
- ⑪ Matsueda, H., Machida, T., Murayama, S., Tsuboi, K., Niwa, Y., Sawa, Y.: The 2nd

International Workshop on Atmosphere Watch in Asia -Greenhouse Gases Monitoring Activities-, Jeju, Republic of Korea, 2010

“Introduction and recent topics for atmospheric carbon cycle researches in Meteorological Research Institute (MRI), Japan”

- ⑫ 松枝秀和, 町田敏暢, 澤庸介, 丹羽洋介: 日本気象学会2010年度秋季学会(2010)
「上部対流圏における二酸化炭素濃度の南北分布の年々変動」
- ⑬ 丹羽洋介, 町田敏暢, 澤庸介, 松枝秀和: 日本気象学会2010年度秋季学会(2010)
「定期旅客機観測データからみる東南アジアのCO₂変動」
- ⑭ 澤庸介, 町田敏暢, 松枝秀和, 丹羽洋介: 日本気象学会2010年度秋季学会(2010)
「定期旅客機で観測された上部対流圏の広域CO₂分布と季節変動」
- ⑮ 白井知子, 町田敏暢, S. Maksyutov, 松枝秀和, 澤庸介, 丹羽洋介, K. Higuchi: 日本気象学会2010年度秋季学会(2010)
「2007年成田空港上空におけるCO₂濃度の短周期変動の観測及び再現結果」
- ⑯ 内野修, 森野勇, 宮本祐樹, 田中智章, 井上誠, 吉田幸生, 横田達也, 町田敏暢, 澤庸介, 松枝秀和: 日本気象学会2010年度秋季学会(2010)
「GOSATから得られたCO₂とCH₄のカラム平均濃度の検証」
- ⑰ 町田敏暢, 松枝秀和, 澤庸介: 第16回大気化学討論会(2010)
「CONTRAIL プロジェクトで観測された南半球上空におけるCO₂の季節変動について」
- ⑱ 白井知子, 町田敏暢, S. Maksyutov, 松枝秀和, 澤庸介, 丹羽洋介, K. Higuchi: 第16回大気化学討論会(2010)
「成田上空における二酸化炭素の短周期変動について」
- ⑲ 森野勇, 内野修, 宮本祐樹, 田中智章, 井上誠, 吉田幸生, 町田敏暢, 横田達也, 澤庸介, 松枝秀和: 第16回大気化学討論会(2010)
「GOSAT 搭載フーリエ変換分光計による温室効果ガスの観測とGOSAT プロダクトの検証」

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

- ① 毎日新聞: 「北半球のCO₂南に大量流入: 気象研など初めて確認: 温暖化対策 地球規模で」、2011年2月12日夕刊1面に掲載
- ② TBSテレビ: ウィークエンドウェザー「旅客機でCO₂採取」、2011年3月5日放送

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

【成果の普及】

フラスコサンプリングによるCO₂濃度データはWMOのWDCGGおよびGlobalviewに提供し、世界の研究者に利用されている。

日本国内の研究者を集めて、「データ利用小委員会」を組織し、データを広く、有効に利

用する体制を構築している。

CONTRAILデータ利用プロトコルを2009年1月に作成し、世界の研究者に向けたデータ配布を続けている。

【政策的な貢献】

平成18年度より第3期科学技術基本計画が始動している。総合科学技術会議で決定した「分野別推進戦略」のIII環境分野では、国際協力・分担により二酸化炭素収支観測の全球カバーを目指して進め、人為起源二酸化炭素の地球各圏への分配を把握することを推進している。本研究は観測の空白域である上空のデータ、とくにアジア域において質が高く頻度も高い有用な観測を推進していることに加えて、モデルの改善を通じてCO₂収支量の推定誤差低減にも貢献している。