

			地球一括計上
課題名	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		
担当研究機関	独立行政法人国立環境研究所 国土交通省気象庁気象研究所		
研究期間	平成18-22年度	合計予算額 (当初予算額 ベース)	180,201 (うち22年度 36,503千円)
研究体制	独立行政法人国立環境研究所 国土交通省気象庁気象研究所		
研究概要	<p>1. 序 (研究背景等)</p> <p>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る。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、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。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>本研究はCO₂濃度連続測定装置を日本航空 (JAL) が運航する国際線航空機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。</p> <p>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期待される。</p> <p>本研究では2つの装置を用いた観測を行う。1つはCO₂濃度連続測定装置 (CME) 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 (ASE) 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。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。観測開始当初は試験観測を行いながら観測装置の改善を行ったために観測頻度が低かったが、2006年11月より5機での運用が始まり、高い頻度での観測が可能になっている。2009年4月以降はASEを搭載できる2機のボーイング747-400型の旅客機がオーストラリア線への運航を取り止めたためにボーイング777-200ER機を使って手動サンプリング装置 (MSE) によってフラスコ観測を継続している。</p> <p>本稿ではフラスコサンプリングの結果と共に、本格観測に入って以降5年以上蓄積した大量のデータを利用して世界各地上空のCO₂濃度の季節変動や下部成層圏でのCO₂濃度の変動、および半球間輸送、それに伴う南半球の季節変動について報告する。</p>		

3. 研究の内容・成果

(1) 観測の実施

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1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)にも定期的に飛行があり、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エドボ(DME)上空の観測頻度が上がっている。北米ではバンクーバー(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。

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個を越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。

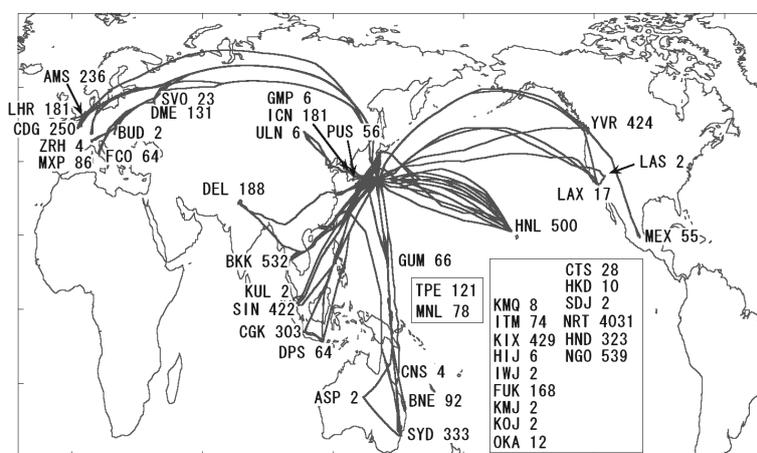


図1. CMEの飛行ルートと鉛直分布観測回数

(2) データ解析

CMEのデータ初期解析手法は昨年度、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、機体測定データに対する品質管理、出発地・到着地情報の再確認、について見直しを行った。新たな品質管理手順は以下の通りである。

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

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る。

4. 考察

(1) フラスコサンプリング観測

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CO₂、CH₄、COに加えて、新たにN₂O、SF₆及びH₂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。

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。図2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。

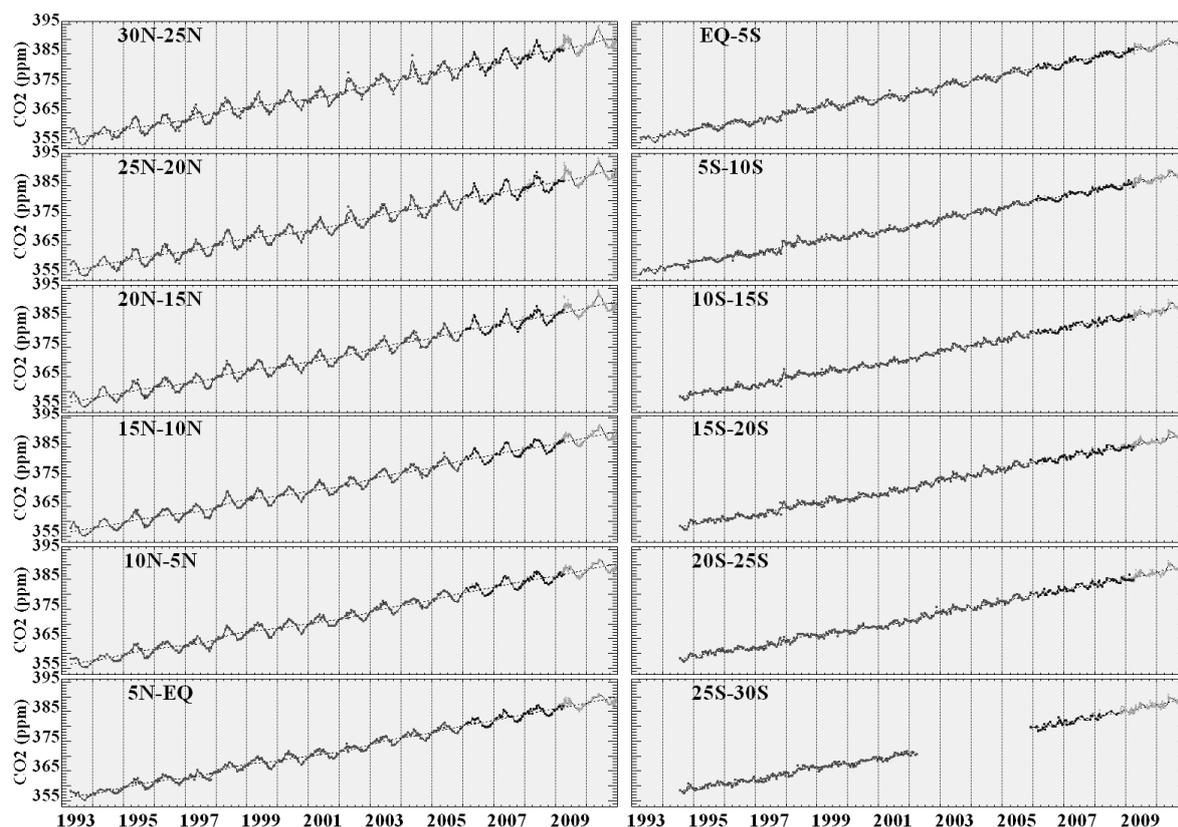


図2. 新旧観測の統合データ・ベースの解析による北緯30度から南緯30度の間の12の緯度帯別のCO₂濃度の時間変動。

(2) CO₂濃度の連続観測

① 成田上空におけるCO₂濃度の高度別時系列

CME観測は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。成田上空においては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、

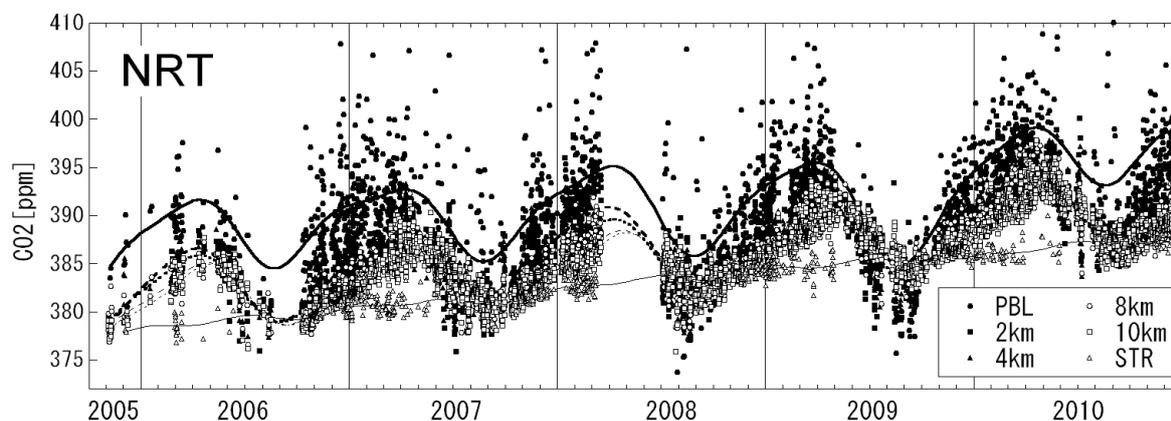


図3. 成田上空の成層圏 (STR)、境界層内 (PBL) および高度別の自由対流圏におけるCO₂濃度の時間変動

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。

②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9点について行い、平均的なCO₂濃度の季節変動成分を比較したものが図4である。

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も多く、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。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。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。

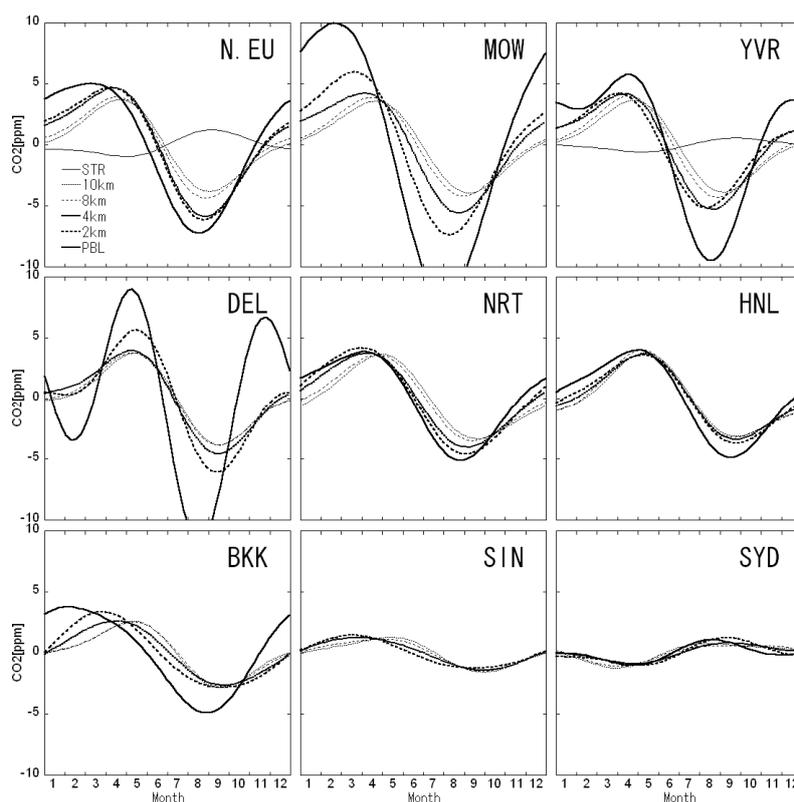


図4. 北ヨーロッパ、MOW、DEL、NRT、HNL、BKK、SINおよびSYD上空におけるCO₂濃度の平均的な季節変動

③下部成層圏におけるCO₂濃度の季節変動とその成因

図5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6-8ppm）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 2.2 ppm, $40\text{K} < \Delta \Theta \leq 50\text{K}$) を示す傾向が認められた。このことは、下部成層圏の CO_2 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。

等価緯度-温位座標での解析により、下部成層圏での CO_2 濃度の季節変化が、夏の低緯度から高濃度 CO_2 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 CO_2 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¹⁾。

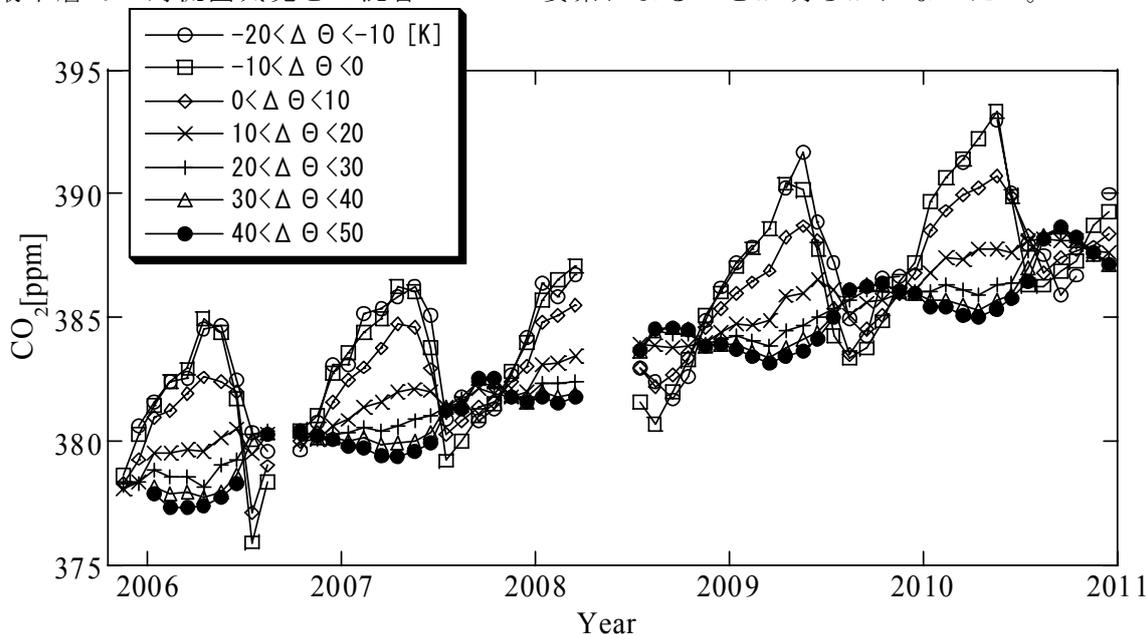


図5. 圏界面付近の CO_2 濃度の季節変化。

圏界面からの温位差 10K ごとの月平均濃度 (単位: ppm, mark)。

④CMEで観測された CO_2 濃度の南北分布の季節変化

西太平洋域の CO_2 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。

冬から春にかけては、赤道を挟んで比較的大きな CO_2 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6 b)。3月には高濃度の CO_2 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 CO_2 分布が観測され、高濃度 CO_2 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 CO_2 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 CO_2 が流入し始める (図6 c)。4月から5月の1ヶ月間に約1ppmの CO_2 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 CO_2 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 CO_2 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6 d)。南半球に低緯度高高度から侵入した高濃度 CO_2 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6 e-g) この時期上空で観測される CO_2 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 CO_2 気塊の流入によるものであることが明らかになった。

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 CO_2 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 CO_2 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。

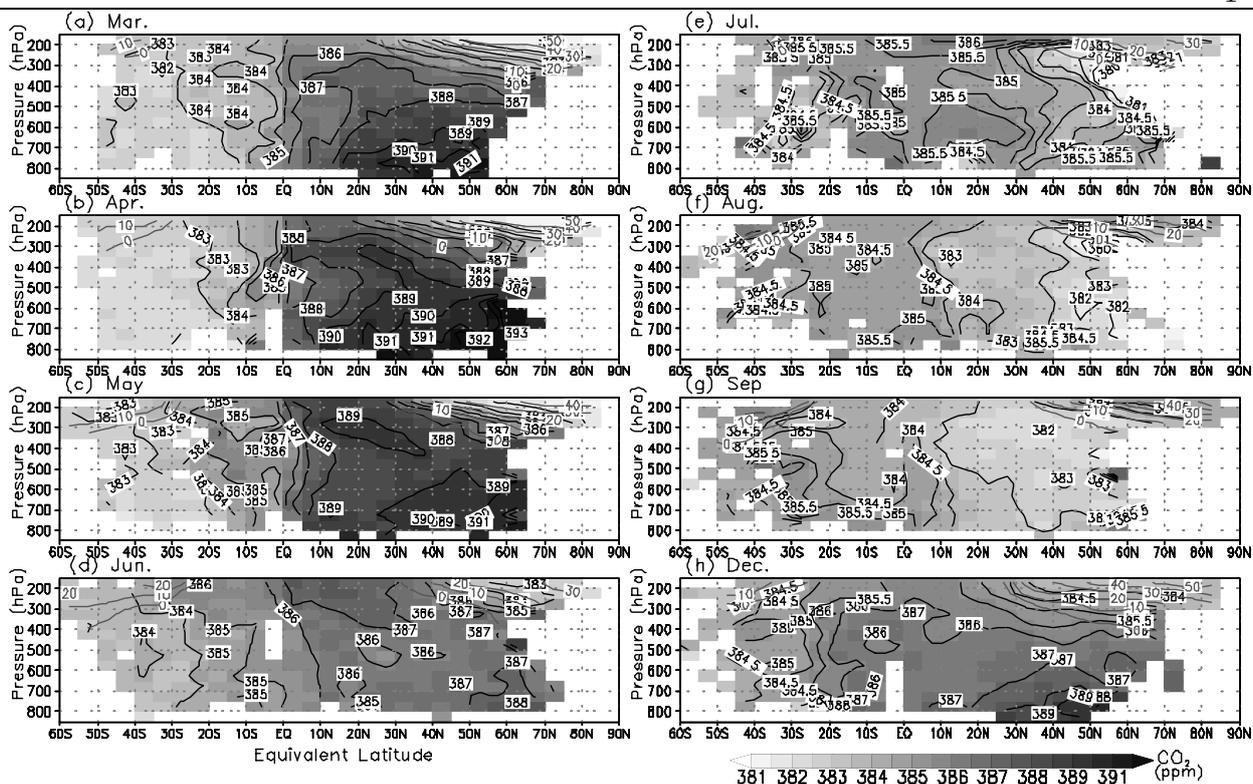


図6. 西太平洋上空におけるCO₂濃度の断面図。東経100度から160度までで観測されたCO₂濃度を2008年基準濃度に換算し、等価緯度-気圧座標系の5度×50hPaのグリッド内のデータを各月平均して求めた。

5. 引用文献

- 1) 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.