

課題名	民間航空機によるグローバル観測ネットワークを活用した温室効果ガスの長期変動観測		
担当研究機関	国立研究開発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23-27年度	合計予算額 (当初予算額 ベース)	168,531千円 (うち27年度 34,154千円)
研究体制	<p>(1) 観測機器の運用と観測・分析 (国立研究開発法人国立環境研究所)</p> <p>(2) データの品質管理とデータベース化 (国土交通省気象庁気象研究所)</p>		
研究概要	<p>1. 序 (研究背景等)</p> <p>現在の地球温暖化予測には、気候変化による炭素循環のフィードバック機構に大きな不確実性が残されており、次期 IPCC 報告書の重要な課題の一つとなっている。このため、地球規模の大気中温室効果ガスの分布や変動を長期にわたって観測・監視することによって、気候変化に応答する全球の炭素循環変動メカニズムを十分に理解することが求められている。しかし、世界には依然として観測の空白域が残されており、特に上空の長期的な観測データが決定的に不足している。</p> <p>平成18年度から22年度まで地球環境保全試験研究費で実施された「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」課題では、日本航空(JAL)が運航する国際線大型旅客機に温室効果ガスの観測装置を搭載し、従来のチャーター航空機による観測では不可能であった膨大なデータの収集手法を確立した (CONTRAIL プロジェクト¹⁾²⁾。しかしながら、これまでの限られた観測では、温室効果ガスの空間分布を明らかにしてきたものの、データの収集間隔が時間的に不均一で不十分であり、年々の変動を統計的に有意に解析できるだけの十分な空間的・時間的に密なデータを得るには至っていないために、CONTRAIL プロジェクトの継続による長期的なデータの取得が必要となっている。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>本研究では、世界で唯一の民間航空機による温室効果ガスの定期観測プロジェクト (CONTRAIL プロジェクト) を発展的に継続して長期にデータを蓄積し、エルニーニョ・南方振動 (ENSO) 現象等の気候変化に応答する数年スケールの大規模なCO₂変動の実態を解明することを目的とする。実施期間中5年間のデータ蓄積を行うことによって従来観測と合わせた10年規模のCO₂データを構築し、2年～3年周期のENSOサイクルに伴うCO₂濃度の変動を把握する。また、より精度の高い温室効果ガス監視情報を社会に発信していくことも目的とする。</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。</p> <p>本年度の研究では改良型CMEのCO₂濃度観測精度について検討した。また、ASEで観測された西部太平洋域上空におけるCO₂濃度の長期変動について解析を行った。</p> <p>さらにCONTRAIL観測データを使ったインバージョン解析によって推定されたフラックスから、大気輸送計算によってCO₂濃度の3次元分布を求めた。また、独立した観測データを用いて大気輸送計算の妥当性を確認した。</p>		

3. 研究の内容・成果

(1) 観測機器の運用と観測・分析

2015年に大型のボーイング777-300ER型機（機番JA734J）にCMEを搭載するための機体改修を行い、CONTRAILプロジェクトとしては初めての777-300ER型機によるCME観測が始められた。さらに2016年には2機目の777-300ER型機（機番JA733J）にCMEを搭載する改修が実施された。この結果、ニューヨーク（JFK）、シカゴ（ORD）といった米国東海岸および中部地区での初めての年を通じたCO₂濃度の鉛直分布観測が可能になった。また、米国西海岸のロサンゼルス（LAX）、サンフランシスコ（SFO）、ヨーロッパのパリ（CDG）、ロンドン（LHR）、インドネシアのジャカルタ（CGK）における観測も再開し、広大な範囲での観測網を構築することができた。2005年11月以来、12,500回を超える飛行でCME観測を実施し、得られたCO₂濃度の鉛直分布は24,200本を超えた。

フラスコサンプリングは2005年12月～2015年12月までの10年間で合計164回の観測フライトが実施された。その内、ASEによる観測が157回で、残りの7回の観測は手動によるサンプリング方法（MSE）で行われ、上部対流圏における緯度別のCO₂、CH₄、CO、N₂O、SF₆、H₂の濃度を明らかにした。

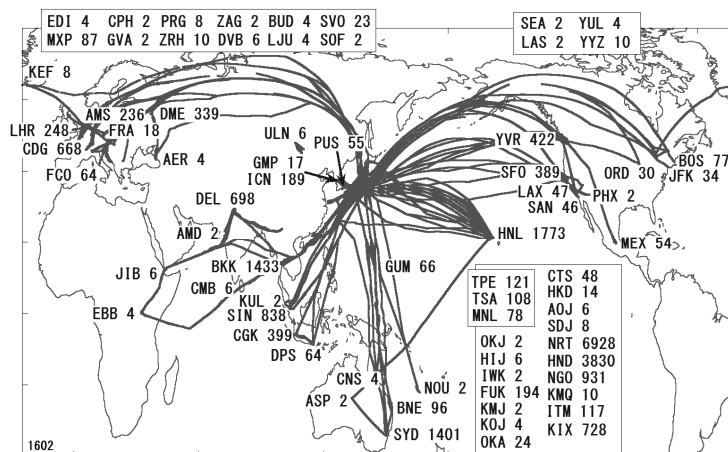


図1. CMEの飛行ルートと鉛直分布観測回数

(2) データの品質管理とデータベース化

図2aは2005年から2009年までシドニー線で実施されたボーイング747-400型機におけるCMEとASEのCO₂濃度差、図2bは、ボーイング777-200ER型機における同時観測時の2011年から2015年までのCO₂濃度差を示している。ほとんどのフライトにおいてCMEとASEの濃度差は0.4ppm以内に納まっており、CMEによるCO₂濃度が高い観測精度を持っていることが確認された。一方で、2009年までの747-400における観測では、ASEとCMEの濃度差は平均-0.02ppm、標準偏差0.20ppmであるのに対して、2011年以降の777-200ERにおける観測では平均濃度差が+0.18ppm、標準偏差が0.25ppmとなっており、CMEの方が若干高い傾向にある。また、インバージョンフラックスを用いた大気輸送計算により、観測データと整合的な3次元のCO₂濃度分布の長期間グリッドデータを作成できた。

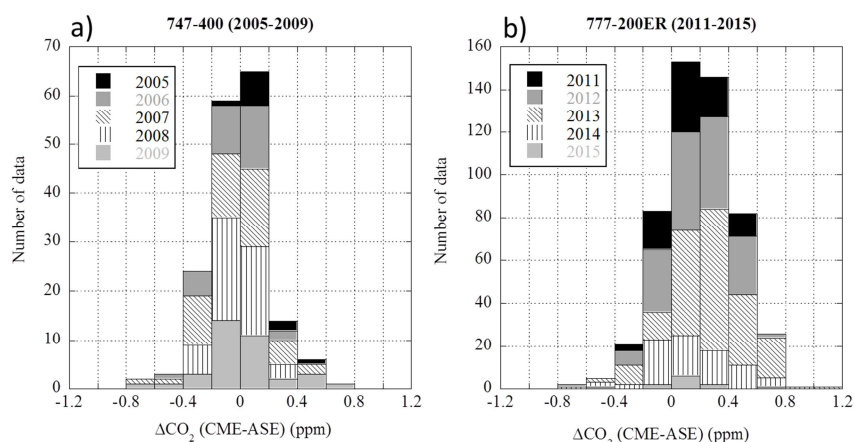


図2. CMEとASEで観測されたシドニー-成田間のCO₂濃度の差（CME-ASE）のヒストグラム

4. 考察

(1) フラスコサンプリング観測

図3は2006年から2015年にかけて観測された北緯30-25度と南緯20-25度の高度10km付近における

CO₂、CH₄、N₂O、SF₆の各濃度の時間変動をプロットしたものである。長期トレンドからCO₂の増加速度を計算した結果、約1.5~3ppm/年の範囲で大きな年々変動があることが示された。増加速度の年々変動はエル・ニーニョ現象と良い対応関係にあることが認められた。また、増加速度は長期的に上昇傾向にあり、人為源のCO₂排出量が年々増大することによって、大気に蓄積されるCO₂量が増加する傾向にあると考えられた。CH₄濃度は北緯30度から北緯15度までの緯度帯において、夏季(7月~9月)に高濃度のCH₄が頻繁に上空で観測される現象が見出された。この時期のCH₄は地上のバックグラウンド大気の濃度を上回る高濃度に達していることが分かった。採取された上空大気サンプルのCH₄同位体を測定した結果、高濃度CH₄は人類活動の燃焼起源によるものではなく、水田、家畜、湿地帯等の微生物生成に由来していることが分かった。北半球におけるCOの季節変動は、春季(5月頃)と秋季(11月頃)に濃度が上昇する2峰性のパターンが見られた。季節変動の振幅は北緯30度から赤道に向けて徐々に減衰する緯度変化が認められた。観測期間のSF₆の濃度上昇速度は、北緯30度から南緯30度までの12個の緯度帯の平均値として約0.30ppt/年と算定された。この値は、米国海洋大気庁(NOAA)が地上で展開している観測網で得た全球平均増加速度(約0.30ppt/年)にほぼ一致していた。正確なSF₆の長期トレンドが上空の航空機観測でも得られていると言える。上空のSF₆の増加速度を緯度別に比較すると、南半球に比べて北半球の方が若干大きい傾向が見られた。

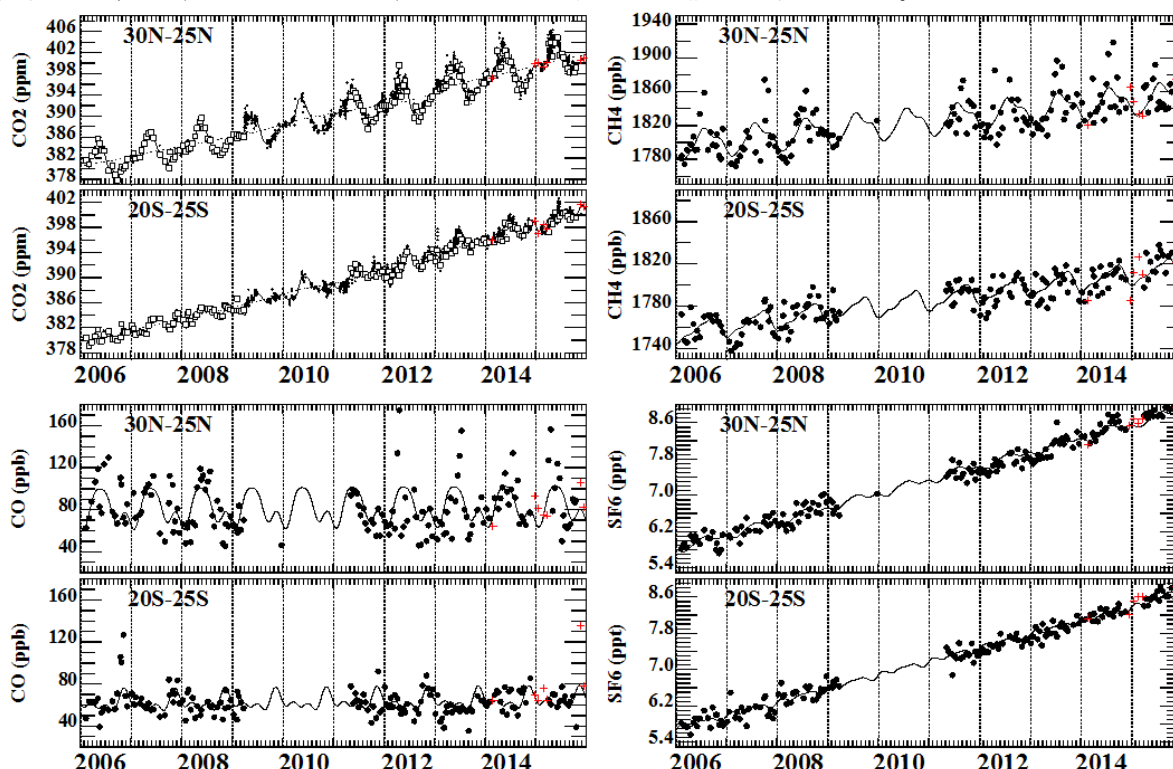


図3. 2006年から2015年にかけて観測された北緯30-25度と南緯20-25度の高度10km付近におけるCO₂、CH₄、CO、SF₆の各濃度の時間変動。黒丸は観測値を、実線はフィッティングカーブを表す。

(2) 上部対流圏におけるCO₂濃度の増加速度

CONTRAILでのCME観測も2005年の観測開始から10年が経過し、観測領域によっては経年変動を検出できる可能性が出てきた。比較的観測数が多い領域について気象データをもとに上部対流圏(高度8kmから対流圏界面まで)と考えられるデータを抽出し解析を行った。領域毎に平均して算出されたCO₂濃度の月平均値を求めたのち年増加速度を求めた。観測開始の2005年から2015年までの10年間の上部対流圏での平均的なCO₂濃度増加速度は約2ppm/年であり、この値は地上観測によるCO₂濃度時系列から求められる平均増加速度とほぼ同じであった。一方、観測開始からのCO₂濃度増加速度は緯度帯や年によって大きな違いが認められた(図4)。オーストラリア路線の南半球西太平洋域(図4 a-b)では2012年から2013年にかけてと2015年に比較的最大の3ppm/年の大きな増加速度が認められた一方、北半球西太平洋域の北緯30度まで(図4 c-d)ではこれに加え2006年から2007年にかけても増加速度の増大が見られる。一方、東南アジア域(図4 e-f)日本上空(図4 g)では、上記西太平洋域と同じく2012-2013年及び2015年に加え、2009年から2010年にかけてCO₂濃度の増加速度の増大が認められている。観測データからは、比較的広い範囲で共通したCO₂濃度増加の変動が観測されており、広域のCO₂フラックスの変化が観測に現れていると考えられる。一方、高緯度のシベリア大陸上空(北緯50-70度、東経0-130度)では、2009年から2010年にかけてと、2012年に顕著な増加速度の増大が見られ、日本上空の増加速度増大の時期との対応が認められる(図4 h)。

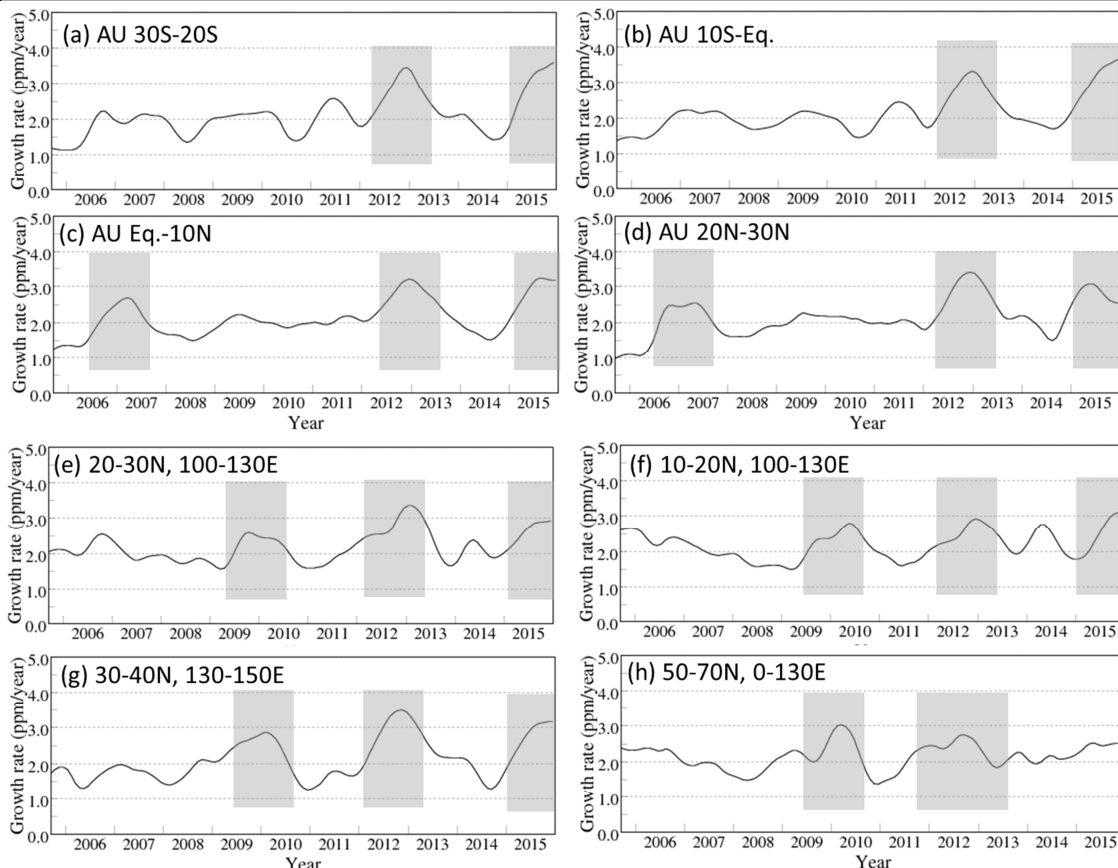


図 4. CME観測による上部対流圏CO₂濃度の年増加速度。顕著な増加速度の増大が見られた期間を灰色で示す。a-dは西太平洋域上空日本-オーストラリア間で得られた増加速度。e-gは日本から東南アジアにかけての上空で得られた増加速度。hは日本-欧州間で得られた増加速度。

(3) CO₂濃度 3次元グリッドデータの作成

図 5 は、インバージョン解析で得られる解析誤差について、地上観測のみによる解析から、CME観測を加えたことによって、どれだけ減少したかを減少率で示したものである。この図から、CME観測を追加することによって、アジア地域で誤差が減少していることがわかる。特に、熱帯アジア地域では 64%、南アジア地域でも 31%の誤差減少率が得られた。これら地域での誤差減少率が高い理由の一つに、地上観測のネットワークが不十分であることが挙げられる。もう一つの誤差減少の要因として、熱帯やアジア・モンスーン地域での活発な対流活動が挙げられる。赤道付近では、熱帯収束域の季節的移動はあるものの、常時、対流活動が活発である。また、インド大陸においては、8-9月の雨期において対流活動が活発になる。このような対流活動によって、地表 CO₂ フラックスのシグナルが効率よく上空へと伝播されるため、地上観測（しかも近傍には観測点がないため、遠方にある観測点）ではフラックスの情報に十分に補足されず、上空の CME 観測がより効率的に情報を補足出来ていると考えられる。

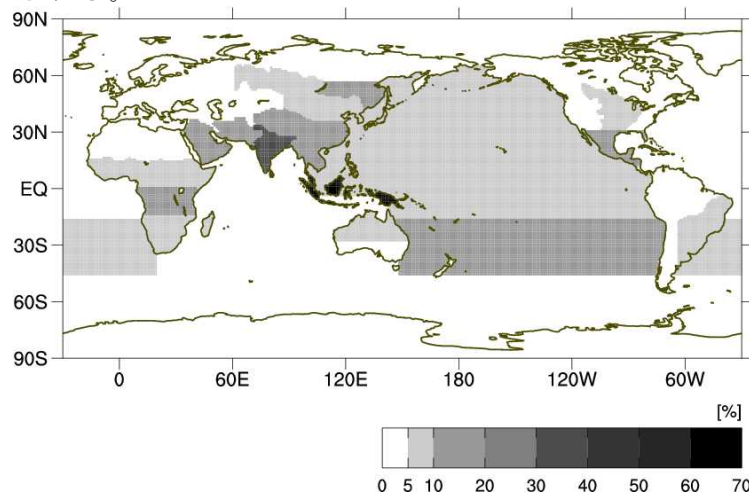


図 5. 地上観測に加えて CME 観測を用いたことによって得られた解析誤差の減少率。

図6にCONTRAILの東京-シドニー間の観測データとNICAM-TMの大気輸送計算で得られたCO₂濃度値との比較を示す。なおここでは、CMEより欠損の少ないASEのデータとの比較を示している。これらの図から、NICAM-TMとインバージョンフラックスによって計算されたCO₂濃度は、観測された季節変動・経年増加をよく再現していることを確認することができる。しかし、2012年頃からややモデルの計算値が観測値より上回っている傾向もみてとれる。これは、インバージョンフラックスが2006-2008年にかけて最適化されたもので、全ての期間において炭素収支が観測と整合的ではないためである。この結果より、2006-2015年の期間の全球炭素収支について、前半よりも後半にやや吸収量が強くなった（または放出量が弱まった）ことが示唆される。

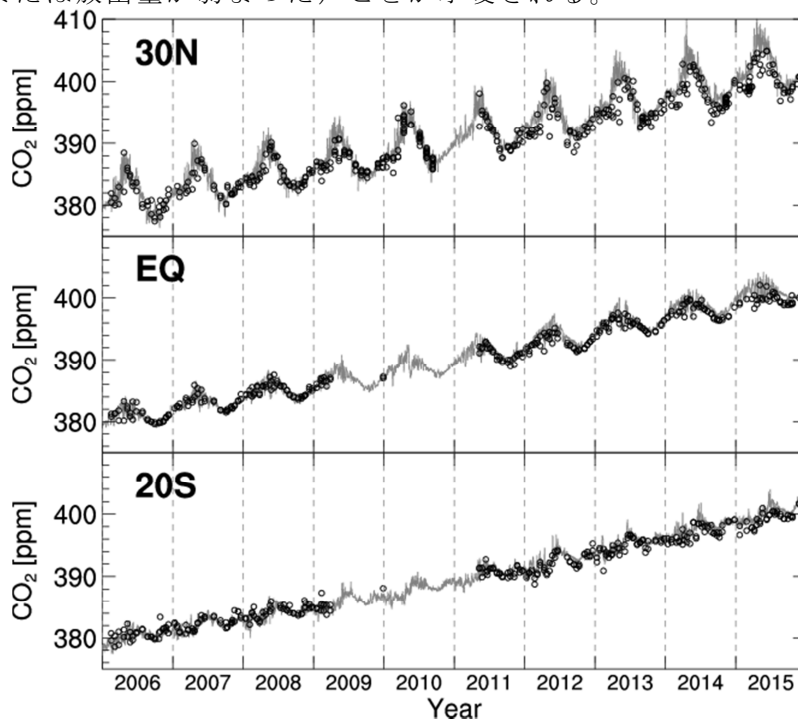


図6. 東京-シドニー間の上空約11kmにおける30°N、赤道、20°SでのNICAM-TM（灰線）とASE観測（黒点）のCO₂濃度時系列

5. 波及効果

- 1) 本研究の観測結果とEUが実施している航空機観測プロジェクトIAGOS-CARIBICの観測結果を相互に利用することによって、日本と欧州の共同研究が始まった。その結果、モデルを使ったCO₂フラックスの推定³⁾、太平洋上ならびに大西洋上における上空のメタン濃度分布⁴⁾などの結果が論文としてまとめられている。
- 2) さらに、EUのIAGOS-COREでは民間航空機によるCO₂濃度連続観測の許可取得の目処が立ち、間もなく観測を開始することになっている。これを受けて本研究の観測値との相互比較研究を実施することが決定し、データ解析ツールの開発が始まった。
- 3) 本研究の観測結果を検証に利用することにより⁵⁾、GOSAT等の衛星による温室効果ガス観測精度の低減が進んでいる。
- 4) 本研究の観測プラットフォームと観測手法を応用して、GRENE北極気候変動研究事業の北極上空における大気サンプリングが始まり、上部対流圏から下部成層圏における複数の温室効果ガス成分の変動が明らかになっている⁶⁾。

6. 引用文献

- 1) Machida, T. and Coauthors (2008), *J. Atmos. Oceanic. Technol.* 25 (10), 1744-1754, DOI: 10.1175/2008JTECHA1082.1.
- 2) Matsueda, H. and Coauthors (2008), *Pap. Meteorol. Geophys.*, 59, 1-17.
- 3) Niwa, Y. and Coauthors (2012), *J. Geophys. Res.* 117, D11303, doi:10.1029/2012JD017474.
- 4) Schuck, T. J. and Coauthors (2012), *J. Geophys. Res.*, 117, D19304, doi:10.1029/2012JD018199.
- 5) Inoue, M. and Coauthors (2013), *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 9771-9788, doi:10.5194/acp-13-9771-2013.
- 6) Sawa, Y. and Coauthors (2015), *Geophys. Res. Lett.*, 42, doi:10.1002/2014GL062734.