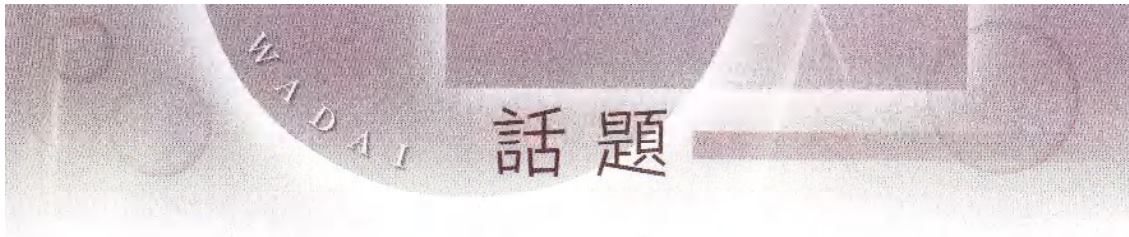


ファルマシア

別刷



国際線定期便の航空機を用いた地球規模のCO₂観測から分かってきたこと

町田敏暢

Toshinobu MACHIDA

国立環境研究所地球環境研究センター室長

1 はじめに

皆さんは普段乗っている航空機の床下で、小さな機械が世界中の大気を監視していることをご存じでしょうか。現在、日本航空(JAL)が運航する5機の国際線定期便(図1)を使って大気中の二酸化炭素(CO₂)濃度の全球的な観測が実施されています。このように民間の旅客機でCO₂濃度を常時測定する計画は世界で初めてであり、地球上のCO₂の循環を理解する上で貴重なデータが毎日のように得られています。

2 なぜCO₂濃度を観測しなければならないのか

1. 炭素循環はまだ分かっていない

昨今では「地球温暖化」という言葉をテレビや新聞で頻繁に聞いたり見たりするようになりました。地球温暖化の原因となる物質(温室効果ガス)のなかで、最もその影響が大きいのがCO₂です。大気中のCO₂濃度は人類が石炭や石油などの化石燃料を使い始める前(18世紀に起こった産業革命より前)は今よりずっと低く、約280 ppmでした(ppmは百万分の一)。人類は化石燃料を燃焼させてエネルギーを得ることによってCO₂を放出し、そのCO₂は大気中に着実に蓄積していきました。2006年にはCO₂の全球平均濃度が380 ppmを超えました。我々人類の活動が大気中のCO₂濃度を、実に100 ppmも上昇させてしまったのです。

しかしながら、人類が出したCO₂のすべてが大気中に蓄積しているわけではありません。全世界の化石燃料の消費統計から算出されたCO₂放出量に比べて、大気中の濃度増加に相当する量は約半分です。残りの半分は陸上植物と海洋が吸収してくれています。



図1 日本航空(JAL)の国際線航空機

さて、これら陸上植物と海洋はこれからもずっと人類が出したCO₂の半分を吸収し続けてくれるのでしょうか。そもそも地球上のどこの陸上植物とどこの海洋がどの季節にどれだけCO₂を吸収する能力があるのか、というメカニズムはほとんど分かっていません。このような地球上のCO₂並びにそこから生成される有機物を含めた物質の循環を「炭素循環」といいます。上記のような炭素循環の各メカニズムの理解が進むと、将来の気候変動の条件下でのCO₂吸収量をより精度よく見積もることが可能になり、将来の気温上昇を予測する際の不確実性も減少することになります。

2. 炭素循環を量的に理解するために

炭素循環を理解するには幾つかの方法がありますが、大気中CO₂濃度の空間的分布や、その時間変動を観測してCO₂の吸収源・放出源分布を推定する方法をトップダウン法と言います。トップダウン法ではCO₂濃度の観測値とCO₂の吸収源・放出源を結びつける「道具」として大気輸送モデルがよく使われます。コンピュータ資源の進歩でモデルの進化速度は速いのですが、肝心のCO₂観測値はまだ不足しているのが実情です。特に地上以外の上空の観測値は極めて少なく、大気の3次元的な輸送を理解する上で大きな障害になっています。

上空のCO₂濃度を観測するためには航空機が最も優れた観測道具です。しかし、観測用航空機をチャーターするには多額の資金が必要であり、観測頻度や観測領域は限られたものにならざるを得ませんでした。観測頻度や観測領域の観点から考えると、民間の旅客機は大気の観測を行う上で非常に魅力的なプラットフォームであるといえます。

3 国際線定期便を使った大気の観測

1. 初期の観測

JALの国際線定期便を使った大気観測は、古くは1980年代に遡ります。1984～1985年にかけて、東北大学がJALと連携して成田—シドニー間と成田—アンカレッジ間を飛ぶ国際線の機内において月に1回の頻度で、大気を採取(サンプリング)する方法で観測を行いました。サンプリングはJALの職員によって手動のポンプでガラス製のフラスコ容器に空気を加圧充填する方法で行われました。サンプル空気はエンジンで加圧された空気が流れ込むエアコンダクトから取り込むことによって、機内にいながらにして外気を汚染なく採取することができます。サンプリングした試料は実験室に持ち帰り、赤外分光計を使って正確にCO₂濃度が測定されます。わずか2年間の観測でしたが、上部対流圏(高度10～12 km)における緯度別のCO₂濃度の季節変動を世界で初めて明らかにした画期的な観測でした。この成果をまとめた論文は、¹⁾15年以上たった今でも多くの論文に引用されています。

その後、JAL航空機を使った観測には空白期間が生じましたが、1993年になると気象庁気象研究所、日航財団、JALが協力して成田—豪州間において大気のサンプリング観測が月に2回の頻度で再開されました。第2期大気観測では、空気試料のサンプリング装置(自動大気サンプリング装置, automatic air sampling equipment; ASE)、はタイマーを使った完全自動になりました。ASEには金属製の容器が12個備え付けられており、豪州から成田に向かう際の水平飛行中に12の異なる緯度帯で空気をサンプリングします。この観測は2005年までの13年間の長期にわたって継続され、第1期で得られたCO₂濃度の季節変動についての詳細な違いを明らかにするとともに、上空におけるCO₂濃度の緯度別の経年変動を示すことができました。²⁾第2期観測ではサンプル空気を使って、CO₂だけでなくメタン(CH₄)と一酸化炭素(CO)濃度も観測されています。

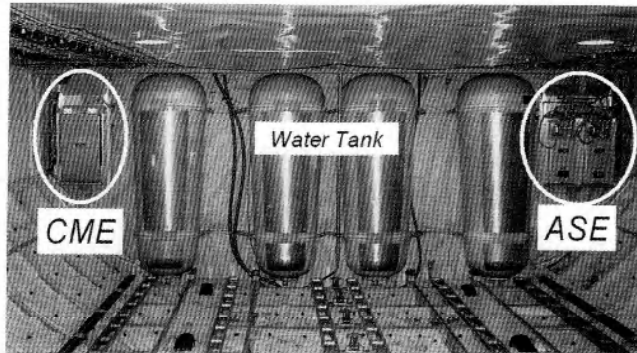


図2 ボーイング 747-400 型機の貨物室に搭載された CME と ASE

2. 新たな観測に向けた装置の開発

第2期観測で使用していた機体の退役が近づくと、これを契機に観測装置の大幅な更新を行うことになりました。組織も大きく変わり、国立環境研究所、気象研究所、JAL、ジャムコ社、東北大学、JAXA(宇宙航空研究開発機構)、日航財団の協力で新たな装置の開発が始まりました。³⁾ 開発した観測装置は2つあります(図2)。1つは改良型 ASE で、これまでのタイマー制御に代えて、航空機の位置情報を取り込んで動作する仕組みにしました。これによって、飛行前にあらかじめ設定した位置で確実にサンプリングができるようになりました。空気サンプルの分析項目も、これまでの CO₂、CH₄、CO に加えて、亜酸化窒素(N₂O)、六弗化硫黄(SF₆)、水素(H₂)の各濃度と CO₂ と CH₄ の同位体比まで増えて、多種の温室効果ガスやその関連気体の循環を知る手がかりになるとともに、CO₂ と CH₄ については同位体比の情報によってそれぞれのガスの吸収源・放出源の情報をより確かに知ることができるようになりました。

もう1つの装置は CO₂ 濃度連続測定装置(continuous CO₂ measuring equipment ; CME)です。CME は航空機に搭載されたままずっと CO₂ 濃度を測り続けることができますので、水平飛行時中に上空における CO₂ 濃度の緯度分布や経度分布を観測できるばかりでなく、航空機の離着陸時に CO₂ 濃度の鉛直分布を測れるところが特徴です。鉛直分布のデータは観測地点付近でその時期 CO₂ が吸収されているのか、放出されているのかを知る有力な手がかりとなります。CME はいったん搭載されると約1か月の間、自動で観測を行いますので、ほぼ毎日観測ができることとなります。チャーター機で行う観測頻度に比べると、これは飛躍的な進歩です。また、観測領域も JAL が運行を行っているヨーロッパ、北米、中米、ハワイ、東アジア、東南アジア、豪州と非常に幅広くなります。特にアジア域は世界の CO₂ 観測網の中でも「空白域」と呼ばれており、地上観測も少ない地域ですので、そこで CO₂ 濃度の鉛直分布まで得られることは大変意義深いものです。

これらの装置は米国連邦航空局の非常に厳しい環境試験(高温・低温試験、高圧・低圧試験、振動試験、加速度試験、電磁ノイズ試験、その他多種の試験)に合格し、ボーイングの 747-400 型機と 777-200 型機に搭載するための許可を取得しました。

3 新しい観測の始まり

JAL は第3期の大気観測のために5機の航空機を用意しました。そのうち2機が 747-400 で、ASE と CME の両方を搭載することができます。残りの3機は 777-200 で、CME のみを

搭載することができます。ASEは第2期と同様に豪州—日本間を月に2回の頻度で観測します。CMEは約1か月の搭載の後に航空機から取りおろして、データの回収、消耗品の交換、整備を約1か月かけて行います。したがって、およそ半数のCMEが常に稼働していることとなりますから、今日も世界のどこかの空で、2~3機の航空機が上空のCO₂濃度を測り続けていることとなります。

JALの第3期大気観測は2005年11月に始まり、CONTRAIL (comprehensive observation network for trace gases by airliner)プロジェクトと呼ばれています。図3は2005年12月に初めてCMEとASEが同じ機体に搭載された際に観測されたCO₂濃度と飛行高度を緯度方向にプロットしたものです。⁴⁾ ASEは実験室において大型の分析計で濃度測定していますから、その精度は高いといえます。一方CMEは、小型の分析計で温度も気圧も変動し振動もあるなかで動いており、極めて不利な条件下でCO₂濃度を分析しているのですが、両者の観測値が非常によい一致を示していることから、CMEが十分な精度をもってCO₂濃度を測定できていることが確認できます。さらに、CMEはASEだけでは分からなかった細かなCO₂濃度の空間分布を捉えていることも図3からよく分かります。

2005年12月から引き継がれたCONTRAILのASE観測は、1993~2005年にかけて行われた第2期の大気観測で得られたCO₂濃度と極めて整合的であることも確認されています。⁵⁾ 図4は2005年の11月に成田上空とインドネシアのジャカルタ上空で観測されたCO₂濃度の鉛直分布です。⁴⁾ 成田上空では低高度でしばしば人間活動の影響を受けた高いCO₂濃度が観測されています。このような局所的汚染を除くと、成田上空のCO₂濃度は低高度にいくほどやや濃度が高くなる勾配が存在していることが分かります。この季節は、陸上生態系の光合成活動よりも呼吸の活動が勝っていることに加えて化石燃料の燃焼によるCO₂放出が存在するので、日本付近とその風上の地表面がCO₂を放出していることから、このような鉛直勾配が存在すると考えられます。これに対して、ジャカルタ上空ではCO₂濃度が高度方向に一定です。これはジャカルタ付近の陸上生態系に季節性が少ないことやCO₂の人為発生量が少ないことが原因です。いずれのデータも、全く別の飛行で得られたCO₂濃度の分布がよく重なっており、CME観測の再現性の高さが分かります。

最後に、これまでCMEが観測した飛行経路と行き先、そして観測した鉛直分布の本数を図5

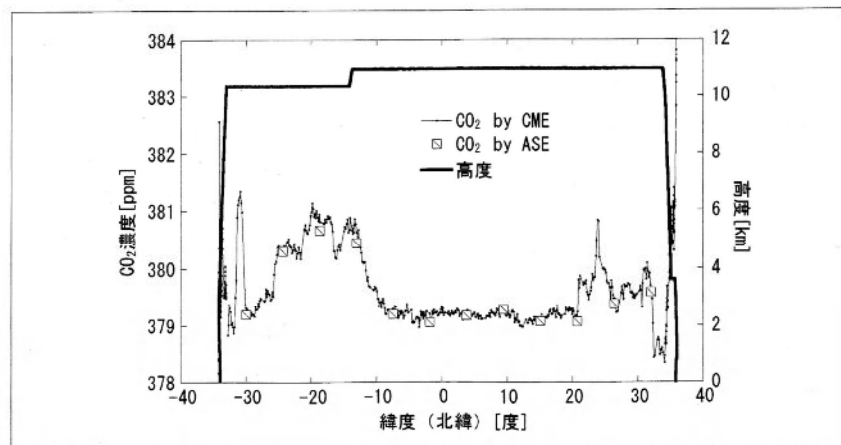


図3 2005年12月8日にシドニー—成田間で観測されたCO₂濃度と飛行高度の緯度分布

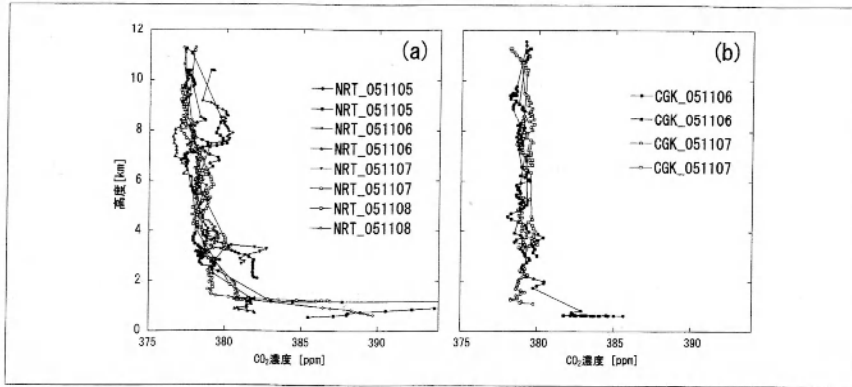


図4 2005年11月に成田上空とジャカルタ上空で観測されたCO₂濃度の鉛直分布

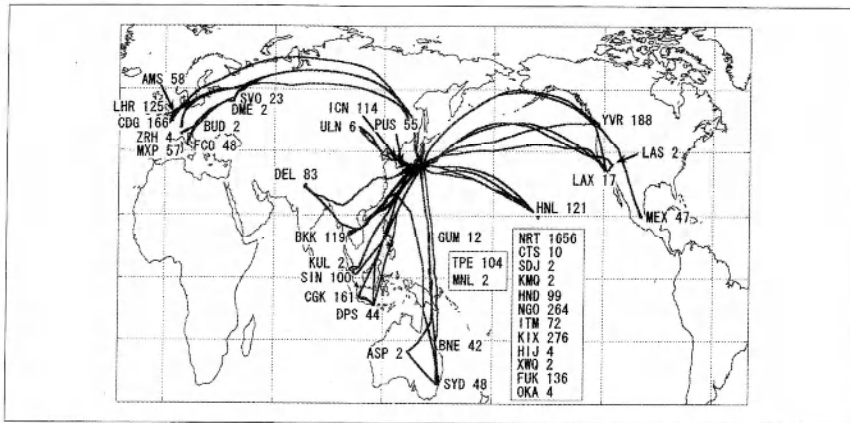


図5 2008年3月までにCME観測が行われた飛行経路と行き先、観測した鉛直分布の本数

に示します。既に世界の多くの場所で100本以上の鉛直分布を観測することができました。これらのデータを使ってCO₂濃度の季節変動の高さ、緯度、経度による違いが明らかになりつつあります。現在日本のモデル研究者の協力を得て、CMEのデータを使ってこれまでにない正確な炭素循環の解析を進めています。また、CO₂濃度の違いを利用して大気輸送の情報を引き出すこともできます。日本とヨーロッパ間の高高度飛行中のCMEデータから、対流圏と成層圏の空気の交換が季節によって違うことを明らかにしました。⁶⁾ さらに2009年になると、宇宙からCO₂を観測するGOSAT衛星「いぶき」が打ち上げられます。CONTRAILプロジェクトで得られたデータはGOSAT(温室ガス観測技術衛星)の有力な検証データとしても期待されています。

参考文献

- 1) Nakazawa T. et al., *Tellus*, 43 B, 106-117(1991).
- 2) Matsueda H. et al., *Tellus*, 54 B, 1-21(2002).
- 3) Machida T. et al., *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 25, 1744-1754(2008).
- 4) Machida T. et al., *JGAC Newsletter*, 37, 23-30(2007).
- 5) Matsueda H. et al., *Pap. Meteorol. Geophys.*, 59, 1(2008).
- 6) Sawa Y. et al., *J. Geophys. Res.*, 113, D23301(2008).