

航空機を利用した温室効果ガス観測

Aircraft observation for atmospheric greenhouse gases

町田 敏暢*

Toshinobu MACHIDA*

国立研究開発法人 国立環境研究所 地球システム領域
Earth System Division, National Institute for Environmental Studies

摘 要

大気中の温室効果ガスの観測における航空機の利用について、国立環境研究所の地球環境研究センターが航空機モニタリングとして実施しているシベリア上空の観測と、日本航空が運航する民間航空機を利用した CONTRAIL プロジェクトについて紹介する。シベリアでの観測は 1990 年代の観測黎明期に始まりロシアならではの苦労も多くあったが、それゆえに今に至っても周辺には他の観測が存在せず、世界の温室効果ガス観測網の中で極めて重要な位置付けになっている。チャーター機を使ったシベリアでの観測は頻度に限界があったが、民間航空機は観測回数と観測範囲を飛躍的に向上することができる、世界に先駆けた研究プロジェクトである。本稿は両プロジェクトの歴史や成果の一部を簡潔にまとめたものである。

キーワード：鉛直分布、温室効果ガス、シベリア、チャーター航空機、民間航空機

Key words：vertical distribution, GHG, Siberia, chartered aircraft, commercial aircraft

1. シベリア上空の航空機モニタリング

1.1 大型航空機を用いた空間分布観測

1990 年 10 月に発足した国立環境研究所(環境研)の地球環境研究センター(Center for Global Environmental Research: CGER)では、地球環境モニタリングの一環として、シベリア上空における航空機を使った大気中温室効果ガスのモニタリングを実施することとした。ロシア共和国のシベリア域にはタイガとよばれる広大な森林地帯があり、光合成や呼吸の活動を通じて大気中の二酸化炭素(CO₂)濃度の変動に大きな影響を及ぼしている。また、大気中メタン(CH₄)の最大の自然発生源は湿地であるが、西シベリア低地は世界最大規模の湿地帯を有しており、大気中 CH₄ の地球規模循環にとってもシベリアは重要な地域である。さらに、シベリアは北半球高緯度に位置するために地球温暖化の影響が顕著に表れるとされており、東シベリアに広がっている永久凍土の融解が進行すれば、凍土層に含まれている高濃度の CO₂ や CH₄ を含んだ気泡からの空気放出や土壌有機物の分解による CO₂ や CH₄ の放出が促進される可能性がある。永久凍土地帯でなくても上述の森林地帯や湿地帯においても気温上昇による CO₂ や CH₄ の自然放出が増加することが考えられる。このように、シベリアは地球上の温室効果ガス循環の解明や温暖化の影響を監視する上で極めて重要な地

域であるが、1990 年代初頭のロシア共和国はソビエト連邦が崩壊した直後で経済が停滞しており、地球環境研究に費やす予算や人的資源は限られていたため、この地での大気中温室効果ガスの系統的な観測は存在していなかった。

CGER では、CO₂ や CH₄ の非常に強い放出源や吸収源が不規則に分布するシベリア域において包括的な情報を得るために、ある程度混合された空間代表性のある上空の大気を航空機を用いて観測する計画を立案した。航空機観測においては、その鉛直分布から地表の放出源・吸収源の強度を推定し、水平分布から放出源・吸収源の地理的分布を推定することを最初のターゲットとした。

ロシアで航空機観測を実施するにあたっては、現地での共同研究機関(さらには借りられる航空機)を探し出すことに困難を極めたが、当時環境研の共同研究員であったシャミル マクシュートフ氏(後の環境研の物質循環モデリング解析研究室長)の紹介で、モスクワ郊外にあるロシア中央大気観測所(Central Aerological Observatory: CAO)の協力を得ることができた。CAO は観測専用の航空機としてイリュシン 18 型機(IL-18)を所有しており、気象専門の研究者ばかりでなく、航空機のパイロットやメカニックを有する観測チームが存在していた。IL-18 は 4 発のターボプロップエンジンを備えたプロペラ機であり(図 1)、開発は第二次世界大戦直後と古くはある

受付：2021 年 11 月 11 日、受理：2021 年 12 月 27 日

* 〒 305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2, E-mail: tmachida@nies.go.jp



図1 観測に使用したイリュージン 18 型機。
(写真提供：萩原富司氏)

が、60 席ほどの客席を配置できる広さがあり、多種の観測装置を搭載して飛行することが可能であった。

CGER 航空機モニタリングの記念すべき初観測は、1992 年 7 月に実施された。日本から輸送された大量の観測装置は、モスクワのシェレメチボ空港にて IL-18 へ搭載された。どの国であっても外国での作業の実施には困難が伴うが、当時のロシアは物資が極端に不足しており、ネジ 1 本でも不足を補うことが容易ではなかったと聞く。IL-18 は 7 月 10 日と 14 日にモスクワ上空にて試験飛行を行なった後、16 日にモスクワを発ち、チュメン、ハンティマンシクなどの西シベリア上空や、ヤクーツク、チクシなどの東シベリア上空での観測を終え、25 日にモスクワに帰還した。この飛行での観測項目は、ロシア側の気象観測に加え、CO₂ 濃度、CH₄ 濃度、金属フラスコやガラスフラスコへの大気サンプリングによる温室効果ガスが主な項目であった。CGER としては初めての経験であり多くのトラブルがあったが、世界でも例を見ないシベリア上空での観測飛行を無事に終え、東西シベリアでの CO₂ 濃度差や地上で発生した CH₄ の上空への輸送などの素描を掴むことができた。著者は当時大学院生であったが、この飛行に参加した同じ大学の教諭と同僚から苦労話を聞かされ、「大変な観測があるものだ」と人ごとのように思っていた記憶がある。

翌 1993 年に図らずも環境研のメンバーとなった著者は、人生初の海外経験をシベリアの地で迎えることになった。この年のシベリア航空機観測は物資調達の便宜を優先して、観測装置の航空機への搭載を日本の空港で行うことにした。空港の駐機場やサポートする整備会社の関係から、仙台空港が最適との結論になり、IL-18 が仙台にやってきた。仙台空港では航空機が発着する際のプッシュバック(航空機を駐機場から誘導路まで専用車を使って押し戻す作業)に使う器具のうち IL-18 に合うものを所持していなかった(おそらく日本のどの空港にもなかった)ので、空港側では IL-18 の駐機場所を特別に確保

し、プッシュバックなし(前進のみ)で出発できるよう航空機の誘導線(イエローライン)を新たにペイントするという前例のない措置によってこの計画が実現した。この年は CH₄ 濃度連続測定装置、CH₄ 同位体用サンプリング装置、地上からエアロゾルを測定するためのライダーなど新たな観測機器を持ち込んだ。装置を満載した IL-18 はエンジン全開で真っ黒な排気ガスを吐きながら仙台空港の滑走路端ぎりぎりでもようやく離陸し、シベリアに向けてゆっくり飛び立っていった(見送り者の談)。IL-18 はシベリア極東の玄関口であるハバロフスク空港にて税関チェックを済ませ、まずは西シベリアのニジェノバルチフスク空港を拠点に湿地周辺の観測を行い、次いで東シベリアのヤクーツク空港を拠点に森林地帯の観測を行った。ヤクーツクはモンゴル系のヤクート民族が人口のおよそ半数を占めている。西シベリアの各都市ではロシア系の人とばかり会ってきたので、ヤクーツク空港に降りたときには日本人として自然と親近感を持ったことを覚えている。また、ヤクーツクの街を歩いている際にロシア人から道を尋ねられたこともある。「私は日本人です」と答えてやり過ぎしたが、それほどヤクート民族と日本人は(ロシア系の方から見れば)似ている。

IL-18 は古い機体であるがパイロットの腕は確かで、森林地帯で光合成の影響を受けた空気を直接観測するために、わずか 100 m ほどの低高度での飛行も実現してくれた。この高度になると木々を「横から」眺めることになり、航空機の窓から見える景色の流れは日頃から新幹線で見ている風景に近く、不思議な感覚であった。夏季のシベリアは、暖められた地表面によって上昇気流が発生し、地上付近では乱流となるので、低高度の飛行を行うと機体の揺れが激しかった。1 日の飛行を終えるとメンバー一同はぐったり疲れてしまい、食欲が落ちる日も多かった。

1994 年にはこれまでの経験を踏まえ、一部の観測装置を刷新し、再びモスクワでの装置搭載を行って、西シベリアと東シベリアの観測を実施した。これら 3 年間の観測からはシベリア上空における CH₄ 濃度の空間分布(Tohjima *et al.*, 1997)ばかりでなく、西シベリアの油田地帯からの化石燃料起源 CH₄ の放出(Tohjima *et al.*, 1996)、同位体測定から明らかにした CH₄ の放出源推定(Sugawara *et al.*, 1996)、フラスコサンプリングで得られたシベリア上空の CO₂、CH₄、亜酸化窒素(N₂O)、一酸化炭素(CO)及び CO₂ の安定同位体の 3 次元分布(Nakazawa *et al.*, 1997)など、興味深い研究結果が出ている。

1.2 航空機を用いた高度別の定期観測

ここまでの航空機観測では夏季における温室効果ガスの空間分布の調査に主眼を置いていたが、温室効果ガスの本質的な動態を把握して全球循環における役割を理解するには、その地での経年変動や季節

変動を捉えることが不可欠であり、そのためには長期的かつ定期的な観測を行う必要がある。そこでロシア中央大気観測所(CAO)と協力してシベリア上空における定期的な航空機観測を立ち上げることとし、1993年のキャンペーン観測中のニジェノバルチフスク滞在中に西シベリアのスルグート空港を訪問して準備を行った。スルグート空港にはプロペラエンジン2発を備えた中型のアントノフ24型機(AN-24)があり、この航空機であれば比較的低予算でチャーターすることが可能であった(当時日本で小型のセスナ機をチャーターするための予算に近かった)。AN-24は最高到達高度が7,000mほどであり、対流圏の上部まで観測が可能な優秀な機体である。旅行用のスーツケースに収納した16本のガラス製の小型フラスコをAN-24機内に持ち込み、7,000mから500mまでの8種の高度帯においてそれぞれ2本ずつの空気試料をサンプリングすることに成功し、シベリアでの温室効果ガスの定期観測がスタートした。1993年7月のことであった。2回目の観測は1993年9月に行い、ここまでの飛行でオペレーションに問題がないことが確認できたので、10月の3回目の観測からは現地でのサンプリング作業は全てロシア人スタッフにお願いすることとし、西シベリアのスルグート上空における航空機観測を定常化できた。飛行空域は厳密には定めず、当日の風向を考慮してスルグート市(北緯61度、東経73度)の風上周辺域を基本とした。

空気採取による観測はサンプル容器の輸出入に大きな困難を伴うが、ロシアの税関手続きを含めたCAOの尽力がこの後の長期観測の成功につながる大きなきっかけになった。当時の環境研には温室効果ガスの分析を行う装置が完成していなかったため、ロシアから届いたサンプルは東北大学に送付して同大学がCO₂、CH₄、N₂O、COの各濃度及びCO₂同位体の分析を担当した。スルグート上空の大気分析は2005年3月より環境研が担当することになり、濃度分析項目も温室効果ガスである六弗化硫黄(SF₆)と関連ガスである水素(H₂)が加えられた。スルグートは湿地帯であり大規模な森林は存在していないが、夏季の地表植生の光合成活動によるCO₂吸収が非常に大きいことを反映して低高度におけるCO₂濃度の季節振幅が20ppm以上になり、同じ緯度帯の沿岸地域での振幅に比べて極めて大きいことがわかった。これまで地球上のCO₂濃度の変動は同じ緯度帯であればほぼ同じ挙動を示すと近似されてきたが、大陸内部では経度方向に大きな不均一があることが明らかになってきた。

スルグート上空の観測はロシア中央大気観測所(CAO)による協力が20年以上にわたる2016年まで続いたが、CAOの後継者の問題でいったん打ち切りになった。その後、モスクワにある微生物研究所(Institute of Microbiology: IMB)の協力で、スルグー

トにおいて中型のセスナ機をチャーターすることが可能になり、2018年より高度4,000mまでの観測を再開し、現在に至っている。

スルグートは湿地帯であったが、森林地帯上空での温室効果ガスの長期的な挙動を明らかにするために、同じ西シベリアのノボシビルスク(北緯55度、東経83度)周辺における航空機観測を1997年7月に開始した。ノボシビルスクの空港には、近くのトムスクにある大気光学研究所(Institute of Atmospheric Optics: IAO)が大気観測に利用しているアントノフ30型機(AN-30)があるので、IAOと共同でこれを定期運用することにした。AN-30にはIAOによって既に多くの観測装置が搭載されていると共に、外気を吸引するための空気取り入れ口や装置の電源も確保されており、我々の観測立ち上げには大きな助けとなった。何より毎月のフライトにエアロゾルの観測分野では経験豊富なIAOの研究者や技術者が搭乗してくれるので、質の高いサンプリングを安心して任せられることとなった。IAOと環境研とはその後も緊密な関係を維持できている、ノボシビルスク上空での観測自体は現在も継続している。しかしながら、利用する航空機は、AN-30の所有会社が倒産したことで、2011年3月よりジェットエンジンを備えたテュポレフ134型機(Tu-134)に切り換え、さらにこの機体の老朽化に伴い2017年10月からはヤク40型機(Yak-40)によって観測を維持している。

シベリアは広大である。西シベリアの様子がわかってきたところで、次は、東シベリアにおける温室効果ガスの変動を知るために、ヤクーツク(北緯62度、東経130度)上空での航空機観測を立ち上げるようになった。ヤクーツクでの協力機関は永久凍土研究所(Permafrost Institute: PI)であった。ヤクーツクは永久凍土地帯にあるので、PIは凍土について世界第一線の研究所である。PIの建物の地下は永久凍土層を利用した天然の冷凍保存庫があり、近傍で発掘された冷凍のマンモスを見学することができた。

しかしながらPIには大気光学研究所(IAO)のような観測専用の航空機はなく、航空機に搭乗して観測を行った経験の持ち主もいなかった。そこで民間の航空機を利用するために、PIの紹介でヤクーツク空港に行き、定期運航便を利用させてくれる航空会社を1996年に探し出した。本来なら装置の搭載には相当な手続きが必要であるが、PIの努力によって航空会社の許可を得ることができた。当時のロシアでなければ、このような観測は実現しなかったであろう。ここでの観測は定期運航便であるので観測者は搭乗できず、自動の大気サンプリング装置を開発して航空機がヤクーツク空港を離陸する際の高度500mから5,000mまでの間の6高度の空気採取することにした。使用した航空機はスルグートのチャーター機と同じAN-24型機であった。ヤクー

ツクにおいてはこの観測とは別に森林直上の低高度での観測を行うために小型の双翼機であるアントノフ2型機(AN-2)をチャーターして高度100mから3000mまでの観測を2000年に開始した。AN-2では手動の空気採取方法を採用してPIの研究者が航空機に搭乗した。AN-24での自動サンプリングは4年ほど実施することができたが、航空会社の倒産によって観測は打ち切りになり、その後はAN-2のみの低高度での観測を続けることになった。2008年になると中型のL-410型機によって高度5,000mまでの観測を再開することができたが、こちらも運航会社の倒産でわずか2年で観測が終わってしまった。その後別会社のAN-2機による観測が2010年から2014年まで続いたが、担当者の変更によって長く続いた永久凍土研究所(PI)との協力関係が打ち切りになってしまった。東シベリアでの観測中断は世界の温室効果ガス観測網にとっても痛手であるので、後継となる共同研究機関を探し、2017年よりヤクーツクにある凍土地域生物問題研究所(Institute for Biological Problems of Cryolithozone: IBPC)の協力によってAN-2を使った定期サンプリングを再開し、現在に至っている。IBPCは森林生態系の研究者がヤクーツク近郊の森林内に観測タワーを有しており、タワー上での空気サンプリングも参考観測として定期的実施している。スルグート、ノボシビルスク、ヤクーツク上空における観測用航空機の変遷を図2に示す。

シベリア航空機モニタリングの観測結果は、鉛直分布の長期変動から導き出した西シベリアとヨーロッパからのCH₄放出の寄与の推定(Sasakawa *et al.*, 2017)、CH₄の同位体比観測による湿地と天然ガスからのCH₄放出の季節変化(Umezawa *et al.*, 2012)、スルグート観測値のCO₂フラックス推定における誤差軽減(Maksyutov *et al.*, 2003)のほか、インバースモデルによるCO₂やCH₄のフラックス推定(Saeki *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2011 など)等の研究成果が生まれている。また、N₂Oの成層圏による寄与(Ishijima *et al.*, 2010)や、SF₆の全球循環の解明

(Gloor *et al.*, 2007)にも利用されている。さらにCO₂フラックス推定における航空機観測の重要性を述べた研究(Stephens *et al.*, 2007)でもスルグートの観測が貢献している。AN-2機での高頻度観測による大気境界層近傍のCO₂濃度の挙動を明らかにした関連研究(Sasakawa *et al.*, 2013)もこのモニタリングを基盤としている。シベリア航空機観測結果は、町田ら(2010)で要約的に紹介されている。

2. 民間航空機を利用した温室効果ガス観測

2.1 なぜ民間航空機なのか

地球規模での温室効果ガスの循環を理解するための観測網は未だに十分ではなく、特に上空の観測は地上に比べて極めて不足している。上述のシベリアの3カ所における定期的な航空機モニタリングは非常に貴重で有益であるが、航空機をチャーターするには高額な予算が必要であるので、観測頻度や観測範囲を向上させるには限度がある。これに対して、民間航空機は大気環境の調査を行うにあたって極めて魅力的な観測プラットフォームであるが、民間航空機に搭載する機器には厳しい安全基準が適用されるため、大気観測に応用するには克服すべき課題が少なくなかった。

そのような状況の中で日本は温室効果ガス観測における民間航空機の活用について、世界をリードしてきた。古くは東北大学が1979年に当時の東亜国内航空の協力を得て、仙台-福岡間のフライトにおいて、サンプリング法によるCO₂濃度の定期的な観測を始めた。東北大学の日本上空におけるフラスコ観測はその後日本エアシステム、続いて日本航空Japan Airlines(JAL)へと引き継がれ、現在でも継続している世界でも類のない上空における長期観測である。東北大学は1984年から1985年にはJALの協力で、成田-シドニー及び成田-アムステルダム間の国際線でもフラスコサンプリングによるCO₂観測を実施した。この中でも特に、シドニー-成田-アムステルダム間のデータは高度10km付近における

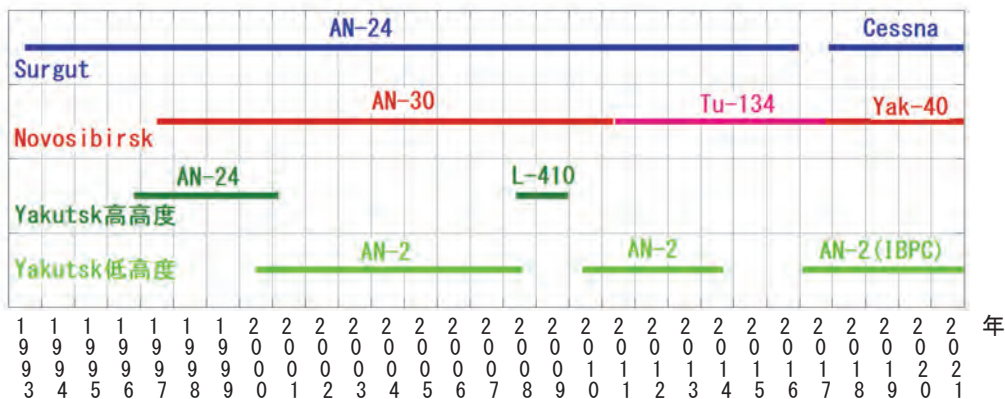


図2 シベリア3地点上空における定期観測で使用した航空機の変遷。

CO₂濃度の緯度分布を初めて示した観測であり、世界でも非常に高い評価を得ていた(Nakazawa *et al.*, 1991)。わずか2年の観測期間で終わってしまったこの観測は1993年に気象研究所(Meteorological Research Institute: MRI), JAL, 日航財団(現在のJAL財団)の共同事業として成田-豪州間で再び立ち上がった。このプロジェクトでは自動大気サンプリング装置(Automatic Air Sampling Equipment: ASE)を新たに開発し、厳しい環境試験を経て搭載承認を得ることによってボーイング747-200型機への搭載を成功させた。1980年代は手動でのサンプリングであったものが自動装置に代わったことで長期の観測につながった。2000年代に入ると、ここで使用していたボーイング747-200型機の退役が迫り、新たな観測が模索されていた。

2.2 CONTRAILプロジェクトの立ち上げ

2000年代のJALの長距離便の主役は新型のボーイング747-400型機に移りつつあり、新たにASEを747-400型機に搭載するための承認を取得する必要性に迫られていた。この時はこれまで使っていたASEで搭載承認を取得することも考えられたが、同じ苦勞をするなら新しい観測機器を開発しようという機運が盛り上がり、環境研と航空機部品メーカーである株式会社ジャムコがメンバーに加わって2003年より新プロジェクトが立ち上がった。新プロジェクトは、後にCONTRAIL(Comprehensive Network for Trace Gases by Airliner)プロジェクトと呼ばれることになり、旧型ASEを発展させた改良型ASEを開発するとともに、機上でCO₂濃度を連続測定する装置(Continuous CO₂ Measuring Equipment: CME)を新たに開発することになった。

自動サンプリングを行う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。旧型ASEはフラスコへの大気充填がタイマーで制御されていたが、改良型ASEでは航空機の位置情報を取り込んで動作する仕組みにした。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行えるようになるとともに、航空機の上昇または下降時に鉛直分布を観測するためのサンプリングを行うことも可能になった。空気サンプルの分析項目も、これまでのCO₂, CH₄, COに加えて、N₂O, SF₆, 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共に、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った。

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るので、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、航空機の上昇・下降時にCO₂濃

度の鉛直分布を測ることができる。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る。CMEは一端搭載されると約2ヶ月の間、自動で観測を行うので、ほぼ毎日観測ができることになる。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ある。また、観測領域もJALが運航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る。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あるので、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ある。

改良型ASEとCMEは民間航空機に搭載するため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, 耐水試験, その他多種の試験)を乗り越えて、ボーイング機の製造国である米国の連邦航空局(Federal Aviation Administration: FAA)及び日本の国土交通省航空局(Japan Civil Aviation Bureau: JCAB)から747-400型機に搭載するための追加型式承認(Supplemental Type Certificate: STC)を2005年末に取得した。CMEとASEは航空機の貨物室に搭載される。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。貨物室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。CONTRAILでは翌2006年に次世代の航空機であるボーイング777-200ER型機にCO₂濃度を連続観測するCMEを搭載するためのSTCを新たに取得した。この時点でJALは2機の747-400型機にCMEとASEを搭載するための改修を、3機の777-200ER型機にCMEを搭載するための改修を終え、合計5機でCONTRAILの本格運用が始まった(Machida *et al.*, 2008)。

747-400型機は燃費効率の関係から2010年に2機とも退役することになってしまったが、2011年に777-200ER型機にフラスコサンプリング装置ASEを搭載するためのSTCを取得し、2機の777-200ER型機を改修することによって再びCMEとASEの両装置での観測を継続できた。その後、2012年から2014年にかけて、5機の777-200ER型機を改修して8機体制での観測が始まった。777-200ER型機は中型機であるので、時代と共に長距離便での使用が減っていった。そこで2015年に、より大型のボーイング777-300ER型機でCO₂濃度を連続観測するためにCMEを搭載するためのSTCを取得し、2016年までに2機の機体を改修することによって米国東海

岸までの長距離観測も可能となり、10機でのプロジェクト実施体制となった。CONTRAILプロジェクトで使用した航空機の変遷を図3に示す。

2.3 ASEによるサンプリング観測の成果の例

図4は新旧のASE観測値を統合し、上部対流圏(高度10 km付近)における20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トレンドを解析した結果である。新旧の観測結果は、航空機の違い(747-200と747-400)、サンプリング装置の違い(旧型ASEと改良型ASE)、分析装置の違い(旧観測は気象研究所、新観測は環境研で分析)があるにもかかわらず、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について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スムーズに連結している

ことがわかる。北半球の上空におけるCO₂濃度の季節変動の振幅は地表付近に比べて小さくなっているが、高緯度に行くほど振幅が大きい傾向は地表での観測結果と同様である。長期的トレンドからCO₂の増加速度を算出すると、約1 ppm/年から3 ppm/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た。さらに長期トレンドの解析から、人為起源CO₂の放出がなかった産業革命前の緯度分布を推定することにも成功している(Matsueda *et al.*, 2015)。

我々の住む対流圏は高度約10 km付近までの空気層であり、そこから上はオゾン層などの存在で知られる成層圏が存在している。対流圏と成層圏の境界は圏界面と呼ばれ、圏界面を通した空気の入れ換えは限定されているので、この目に見えない境界の上

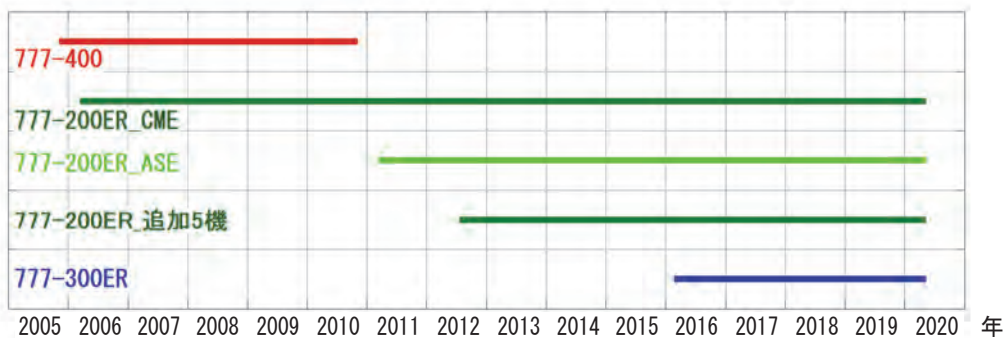


図3 CONTRAILプロジェクトで使用した航空機の変遷.

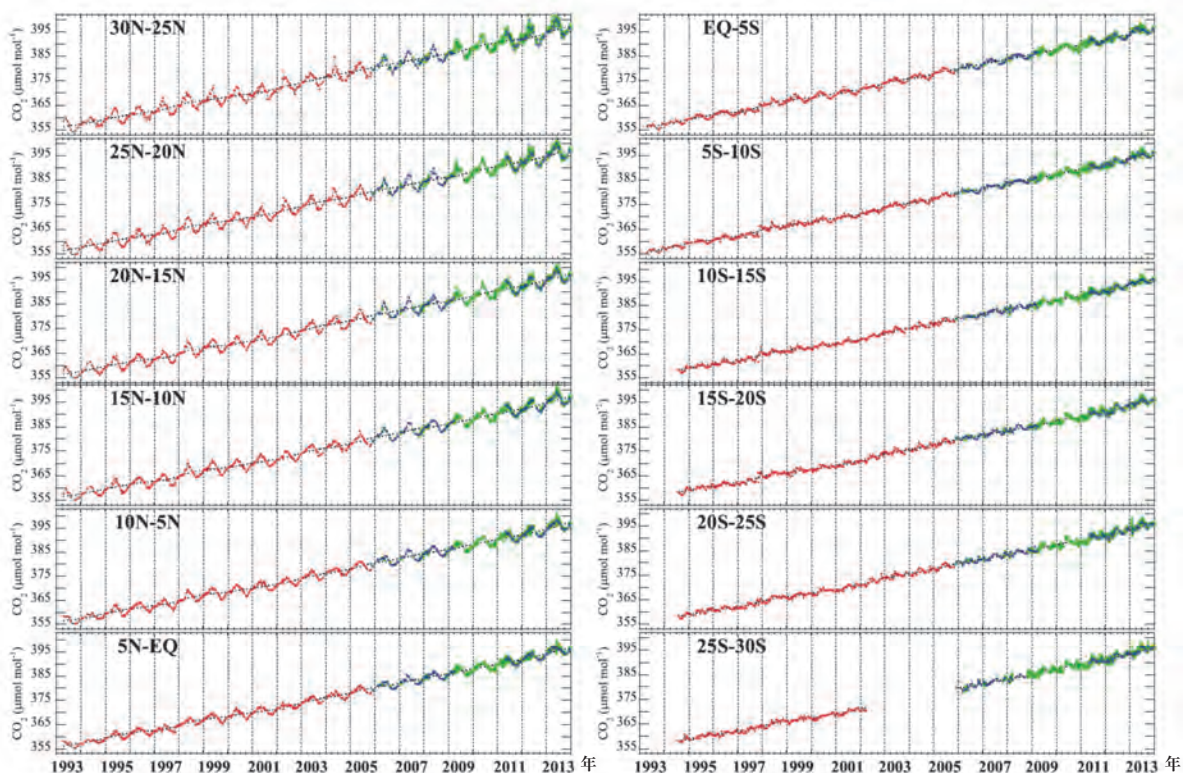


図4 北緯30度から南緯30度の間12の緯度帯別の上部対流圏におけるCO₂濃度の時間変動。赤丸、青丸、緑丸はそれぞれ旧型ASE、改良型ASE、CMEでの観測値を示す。

下で温室効果ガスの濃度や変動も大きく違うことが予想されていた。この圏界面の高度は一般に高緯度に行くほど低くなる。したがって高度 10 km 付近を飛行する民間航空機は、高緯度地域に行くとき成層圏に突入する機会が増えることになる。図 4 は日本と豪州を往復する中緯度から低緯度地帯における飛行での観測値であるので、ほぼ全てのデータが対流圏で得られている。これに対して日本と欧州の間の飛行で得られたサンプルの CO₂ 濃度は図 4 とは全く違う季節変動を示した。高緯度で得られたサンプルについて、気象データを利用して成層圏のサンプルだけを切り出すと、CO₂ 濃度の季節振幅は同じ緯度帯の上部対流圏に比べて明らかに小さく、最高濃度や最低濃度を示す季節も全く違うことが明らかになった。さらに CH₄ 濃度や N₂O 濃度は CO₂ とは逆に成層圏における季節振幅が極めて大きいことがわかった。これらは成層圏における大気の循環や、対流圏空気の流入の季節変化に密接に関係しており、気象分野で注目されている成層圏-対流圏交換過程に有益な知見をもたらすことになった(Sawa *et al.*, 2015)。

2.4 CME による CO₂ 連続観測の成果の例

2020 年 2 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及び CO₂ 濃度の鉛直分布取得回数を図 5 に示す。CME はこれまでに 24,000 以上のフライトで 36,000 以上の CO₂ 濃度の鉛直分布を観測している。

CME による CO₂ 観測の特徴は、高頻度、高密度、広範囲での大量のデータ取得である。CME の飛行は全て日本の空港を起点としていることから、図 5 の飛行ルートの中でもアジア域での観測数が特に多い。この特性を利用してアジア太平洋域における CO₂ 濃度の緻密な 3 次元構造を再現することに成功した(Umezawa *et al.*, 2018)。図 6 は 8 月における

3 次元濃度分布の例である。これらの解析から夏季に南アジアの植生による強い CO₂ 吸収を受けた空気塊がモンスーン循環で上部対流圏に輸送され、アジアモンスーン高気圧の内部に留まってしまう構造を鮮明に捉えることができた(図 6)。9 月になるとアジアモンスーン高気圧が崩壊して、低濃度の CO₂ は太平洋上に流出する現象も明らかにできた。さらに南アジアのデリー空港上空における CO₂ 観測の鉛直分布は、冬季の 1 月~3 月に地表付近で他の地域では見られない低濃度を示すことがわかった。解析の結果、この低濃度は、冬小麦等の農業活動に由来するものであり、最盛期の吸収量はこの時期の周辺の都市域からの CO₂ 放出量の 2 倍程度に相当することもわかった(Umezawa *et al.*, 2016)。

CME データは CO₂ フラックスの分布を推定するための多くのモデル研究に利用されているが、初めての本格的な利用は Niwa *et al.* (2012) による NICAM (Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model) モデルをベースにした逆解析によるフラックス推定であった。この研究では、鉛直混合が卓越する熱帯域では上空の観測値が地上のフラックスのシグナルを効率的に捉えていることを証明し、従来より観測データの少なかった東南アジアや南アジアのフラックス推定誤差を大きく減らすことに成功した。特に南アジアでは、夏季の CO₂ 吸収が先行研究では過小評価であったことを指摘することもできた。

2015 年のエルニーニョイベントではインドネシアで大規模森林火災が発生し、現地の住民の生活に大きな影響があった。CONTRAIL ではこの年にシンガポール便で多くのデータを取得することができた。シンガポール上空における鉛直分布を確認すると、前年に比べて地表付近で高濃度の CO₂ を観測するケースが明らかに増えており、森林火災による影響であると予想された。NICAM モデルベースの逆解

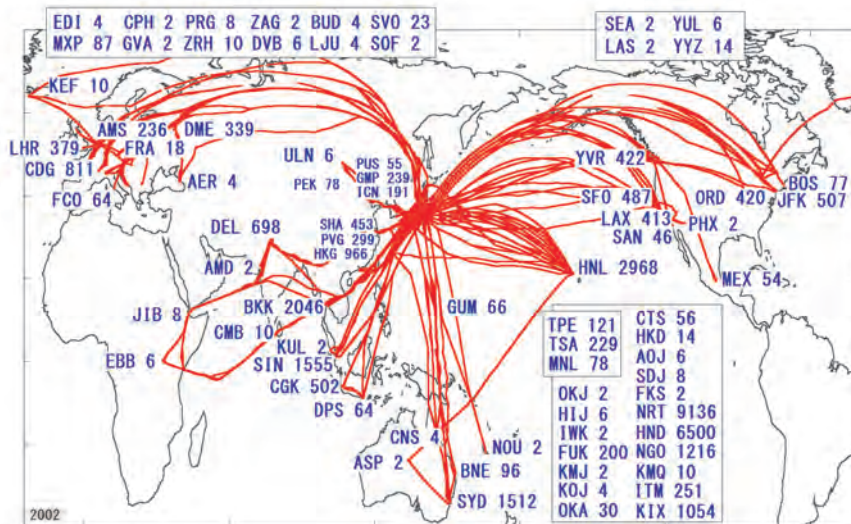


図 5 CME の飛行ルートと各空港上空における鉛直分布観測回数。

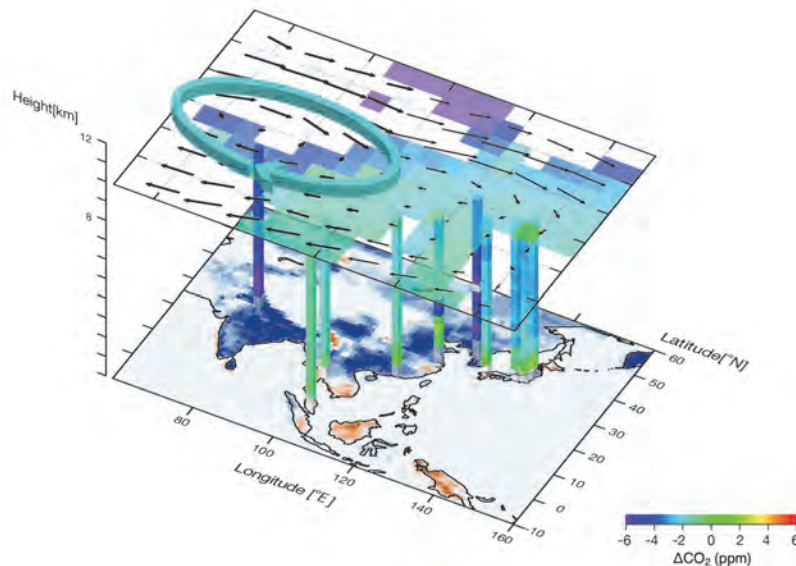


図6 アジア太平洋域における CO₂ 濃度の3次元分布(8月の例).

地表面に相当する地図の色分けは CO₂ フラックス分布を、上空 10 km に相当する面の黒矢印は 8 月の平均の風向風速を、水色の楕円矢印はアジアモンスーン高気圧のイメージを表している。(Umezawa *et al.*, 2018 を基に作図).

析によって放出量を推定したところ、2015年の乾期である9月～10月にインドネシア域で発生した大規模森林火災からの CO₂ 放出量は日本の年間放出量に匹敵することがわかった(Niwa *et al.*, 2021)。

CO₂ は大気中で化学反応による消滅を受けにくいので、化学的に安定であり、それゆえに大気輸送の指標(トレーサー)としても役に立つ。CO₂ データを3次元的に大量に得ることができる CME は大気輸送研究にも貢献している。Sawa *et al.* (2008) による研究では、圏界面近傍の大量の CO₂ データを解析することによって圏界面を通じた大気輸送を明らかにした。冬季から春季の圏界面は空気輸送の障壁として機能しているが、7月から8月にかけて上部対流圏のやや高濃度の CO₂ を含んだ空気が圏界面を通して成層圏に流入する現象を CO₂ 濃度場によって可視化することに成功した。また、東経 100 度から 160 度の範囲にある CME データで CO₂ 濃度分布の南北半球に渡る断面図を作成すると、赤道付近で南北両半球の空気の交換が抑制されているものの、4月から6月にかけて北半球の高濃度 CO₂ を示す空気塊が赤道上空の上部対流圏を通して南半球に流入している現象を明確に捉えることができた(Sawa *et al.*, 2012)。

最後に、これまでの炭素循環研究では陸上生態系や海洋といった自然起源 CO₂ のフラックス推定を目指していたが、パリ協定に基づく排出抑制政策の効果が期待される今後は、人為放出 CO₂ を観測する責務も大きくなっている。CME 観測では空港離陸時に CO₂ 濃度の高度分布を取得するが、世界の主要空港が一般に大都市圏近郊に位置していることに着目すると、空港上空での観測データには都市圏からの CO₂ 排出の影響が見られる可能性がある。そこ

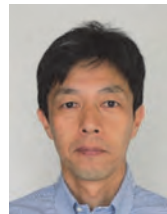
で、世界 36 空港の上空について高濃度 CO₂ データのばらつき(標準偏差)に着目したところ、人口規模の大きな都市を近傍に持つ空港の上空ほど大きく、インベントリから推定される人為起源 CO₂ 排出量と良い相関があることがわかった(Umezawa *et al.*, 2020)。これは CO₂ の自然放出源が面的な広がりを持っていることに対して、人為放出源は強度の強いものが局所的に偏在しがちであることから、人為放出源のシグナルが風向や風速によってばらつきが大きくなることを反映した結果であると考えられる。このことは今後の CO₂ 排出抑制政策の効果を検証する上でも、CME 観測が有用であることを示しており、さらなる観測の長期化、広域化が期待される。

引用文献

- Gloor, M., Dlugokencky, E., Brenninkmeijer, C., Horowitz, L., Hurst, D. F., Dutton, G., Crevoisier, C., Machida, T. and Tans P. (2007) Three-dimensional SF₆ data and tropospheric transport simulations: Signals, modeling accuracy, and implications for inverse modeling. *Journal of Geophysical Research*, 112, D15112. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2006JD007973>
- Ishijima, K., Patra, P. K., Takigawa, M., Machida, T., Matsueda, H., Sawa, Y., Steele, P., Krummel, P., Langenfelds, R., Aoki, S. and Nakazawa, T. (2010) Stratospheric influence on the seasonal cycle of nitrous oxide in the troposphere as deduced from aircraft observations and model simulations. *Journal of Geophysical Research*, 115, D20308.

- <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2009JD013322>
- Kim, H.-S., Maksyutov, S., Glagolev, M. V., Machida, T., Patra, P. K., Sudo, K. and Inoue, G. (2011) Evaluation of methane emissions from west Siberian wetlands based on inverse modeling. *Environmental Research Letters*, 6, 035201. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/6/3/035201> (2021年11月19日確認)
- Machida, T., Matsueda, H., Sawa, Y., Nakagawa, Y., Hirokuni, K., Kondo, N., Goto, K., Nakazawa, T., Ishikawa, K. and Ogawa, T. (2008) Worldwide measurements of atmospheric CO₂ and other trace gas species using commercial airlines. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25(10), 1744–1754. https://journals.ametsoc.org/view/journals/atot/25/10/2008jtecha1082_1.xml (2021年11月19日確認)
- 町田敏暢・笹川基樹・下山宏・Arshinov, M., Davydov, D., Fofonov, A., Krasnov, O., Fedoseev, N., Mitin, S., 須藤洋志・勝又啓一・津田憲次・中澤高清・Maksyutov, S. (2010) シベリアにおける温室効果ガスの時空間分布. 低温科学, 68, 9–19. <https://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/handle/2115/45157> (2021年11月19日確認)
- Maksyutov, S., Machida, T., Mukai, H., Patra, P., Nakazawa, T., Inoue, G. and TRANSCOM-3 Modelers (2003) Effect of recent observations on Asian CO₂ flux estimates by transport model inversions. *Tellus, B* 55(2), 522–529. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3402/tellusb.v55i2.16734>
- Matsueda, H., Machida, T., Sawa, Y. and Niwa, Y. (2015) Long-term change of CO₂ latitudinal distribution in the upper troposphere. *Geophysical Research Letters*, 42. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2014GL062768>
- Nakazawa, T., Miyashita, K., Aoki, S. and Tanaka, M. (1991) Temporal and spatial variations of upper tropospheric and lower stratospheric carbon dioxide. *Tellus, 43B*, 106–117. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3402/tellusb.v43i2.15254>
- Nakazawa, T., Sugawara, S., Inoue, G., Machida, T., Maksyutov, S. and Mukai, H. (1997) Aircraft measurements of the concentrations of CO₂, CH₄, N₂O and CO and the carbon and oxygen isotopic ratios of CO₂ in the troposphere over Russia. *Journal of Geophysical Research*, 102, 3843–3859. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/96JD03131>
- Niwa, Y., Sawa, Y., Nara, H., Machida, T., Matsueda, H., Umezawa, T., Ito, A., Nakaoka, S.-I., Tanimoto, H. and Tohjima, Y. (2021) Estimation of fire-induced carbon emissions from Equatorial Asia in 2015 using in situ aircraft and ship observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 9455–9473. <https://acp.copernicus.org/articles/21/9455/2021/> (2021年11月19日確認)
- Niwa, Y., Machida, T., Sawa, Y., Matsueda, H., Schuck, T. J., Brenninkmeijer, C. A. M., Imasu, R. and Satoh, M. (2012) Imposing strong constraints on tropical terrestrial CO₂ fluxes using passenger aircraft based measurements. *Journal of Geophysical Research*, 117, D11303. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2012JD017474>
- Saeki, T., Maksyutov, S., Sasakawa, M., Machida, T., Arshinov, M., Tans, P., Conway, T., Saito, M., Valsala, V., Oda, T., Andres, R. and Belikov, D. (2013) Carbon flux estimation for Siberia by inverse modeling constrained by aircraft and tower CO₂ measurements. *Journal of Geophysical Research*, 118. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jgrd.50127>
- Sasakawa, M., Machida, T., Tsuda, N., Arshinov, M., Davydov, D., Fofonov, A. and Krasnov, O. (2013) Aircraft and tower measurements of CO₂ concentration in the planetary boundary layer and the lower free troposphere over southern taiga in West Siberia: Long-term records from 2002 to 2011. *Journal of Geophysical Research*, 118. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jgrd.50755>
- Sasakawa, M., Machida, T., Ishijima, K., Arshinov, M., Patra, P. K., Ito, A., Aoki, S. and Petrov, V. (2017) Temporal characteristics of CH₄ vertical profiles observed in the West Siberian Lowland over Surgut from 1993 to 2015 and Novosibirsk from 1997 to 2015. *Journal of Geophysical Research*, 122, 11 261–11 273. <https://doi.org/10.1002/2017JD026836>
- Sawa, Y., Machida, T., Matsueda, H., Niwa, Y., Tsuboi, K., Murayama, S., Morimoto, S. and Aoki, S. (2015) Seasonal changes of CO₂, CH₄, N₂O, and SF₆ in the upper troposphere/lower stratosphere over the Eurasian continent observed by commercial airliner. *Geophysical Research Letters*, 42. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014GL062734>
- Sawa, Y., Machida, T. and Matsueda, H. (2008) Seasonal variations of CO₂ near the tropopause observed by commercial aircraft. *Journal of Geophysical Research*, 113, D23301. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2008JD010568>
- Sawa, Y., Machida, T. and Matsueda, H. (2012) Aircraft observation of the seasonal variation in the transport of CO₂ in the upper atmosphere. *Journal of*

- Geophysical Research*, 117, D05305. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011JD016933>
- Stephens, B. B., Gurney, K. R., Tans, P. P., Sweeney, C., Peters, W., Bruhwiler, L., Ciais, P., Ramonet, M., Bousquet, P., Nakazawa, T., Aoki, S., Machida, T., Inoue, G., Vinnichenko, N., Lloyd, J., Jordan, A., Heimann, M., Shibistova, O., Langenfelds, R., Steele, L. P., Francey, R. J. and Denning, A. S. (2007) Weak northern and strong tropical land carbon uptake from vertical profiles of atmospheric CO₂. *Science*, 316, 1732–1735. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1137004>
- Sugawara, S., Nakazawa, T., Inoue, G., Machida, T., Mukai, H., Vinnichenko, N. K. and Khattatov, V. U. (1996) Aircraft measurements of the stable carbon isotopic ratio of atmospheric methane over Siberia. *Global Biogeochemical Cycles*, 10, 223–231. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/96GB00038>
- Tohjima, Y., Maksyutov, S., Machida, T. and Inoue, G. (1996) Airborne measurements of atmospheric methane over oil fields in western Siberia. *Geophysical Research Letters*, 23, 1621–1624. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/96GL01027>
- Tohjima, Y., Wakita, H., Maksyutov, S., Machida, T., Inoue, G., Vinnichenko, N. and Khattatov, V. (1997) Distribution of tropospheric methane over Siberia in July 1993. *Journal of Geophysical Research*, 102, 25371–25382. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/97JD02244>
- Umezawa, T., Machida, T., Ishijima, K., Matsueda, H., Sawa, Y., Patra, P. K., Aoki, S. and Nakazawa, T. (2012) Carbon and hydrogen isotopic ratios of atmospheric methane in the upper troposphere over the Western Pacific. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12, 8095–8113. <https://doi.org/10.5194/acp-12-8095-2012>
- Umezawa, T., Matsueda, H., Oda, T., Higuchi, K., Sawa, Y., Machida, T., Niwa, Y. and Maksyutov, S. (2020) Statistical characterization of urban CO₂ emission signals observed by commercial airliner measurements. *Scientific Reports*, 10, 7963. <https://www.nature.com/articles/s41598-020-64769-9/> (2021年11月19日確認)
- Umezawa, T., Matsueda, H., Sawa, Y., Niwa, Y., Machida, T. and Zhou, L. (2018) Seasonal evaluation of tropospheric CO₂ over the Asia-Pacific region observed by the CONTRAIL commercial airliner measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 14851–14866. <https://acp.copernicus.org/articles/18/14851/2018/> (2021年11月19日確認)
- Umezawa, T., Niwa, Y., Sawa, Y., Machida, T. and Matsueda, H. (2016) Winter crop CO₂ uptake inferred from CONTRAIL measurements over Delhi, India. *Geophysical Research Letters*, 43, 11859–11866. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016GL070939>



町田 敏暢 / Toshinobu MACHIDA

国立環境研究所地球システム領域大気・海洋モニタリング推進室長。1988年東北大学理学部卒業。1993年東北大学大学院理学研究科博士課程(地球物理学専攻)修了。博士(理学)。1993年国立環境研究所入所。2006年より現職。東北大学大学院環境科学研究科客員教授併任。専門は大気中の温室効果ガスの観測を通じたグローバルな循環解明研究。特に航空機を利用した上空における観測を推進している。