

## 民間航空機による温室効果ガスの3次元長期観測とデータ提供システムの構築

環境省 国立研究開発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
	物質循環モデリング・解析研究室	丹羽洋介
	地球環境データ統合解析推進室	白井知子
環境計測研究センター	動態化学研究室	梅澤 拓

国土交通省 気象庁 気象研究所

気候・環境研究部	第三研究室	坪井一寛・石島健太郎
		藤田 遼・松枝秀和

平成28-令和2年度合計予算額	98,964千円
(うち、令和2年度当初予算額	20,058千円)

【要旨】本研究はCO<sub>2</sub>濃度連続測定装置（CME）、自動大気サンプリング装置（ASE）、手動サンプリング装置（MSE）を日本航空（JAL）が運航する国際線航空機に搭載して、頻度と領域を飛躍的に向上させた温室効果ガスの時空間分布の長期観測を実施するとともにデータ利用研究を推進するためにデータ提供システムの開発を行うものである。CMEによる二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）観測は5年間にわたる6000以上のフライトによって約400万のCO<sub>2</sub>濃度データを蓄積した。これら大量のCO<sub>2</sub>濃度データによってアジア地域におけるCO<sub>2</sub>濃度の3次元変動を明らかにし、特にアジアモンスーンに伴う大規模輸送やインドの農作物による大量のCO<sub>2</sub>吸収などを明確に示すことができた。また世界各都市のCO<sub>2</sub>排出の影響を旅客機による空港近傍の観測データによって検出できることを示した。ASEとMSEによるサンプリング観測は5年間で北米、欧州、東南アジア、東アジア、そして日本国内という多様な地域において、水平分布ばかりでなく鉛直分布の観測を実施した。オーストラリア路線におけるCO濃度の長期観測データを解析した結果、上空のCO濃度増分の年々変動のパターンと森林火災のCO排出量に良い対応関係が認められた。本課題の観測により得たデータにデジタルオブジェクト識別子（DOI）を付与して地球環境データベースから定期的に公開した。観測で得られたデータを速やかに公開するシステムを構築した結果、最新の2020年末までのデータを2021年5月に公開することが可能になり、本課題開始時に掲げた6ヶ月以内でのデータ公開の目標を達成することができた。大気輸送モデルとCMEのCO<sub>2</sub>濃度データを用いて、3次元グリッド化した高次データを作成し、提供を開始した。以上のように本課題では、観測によるデータ取得、データ解析による炭素循環や大気輸送の理解、データ公開システムの構築といった当初目的を達成することができた。

【キーワード】 温室効果ガス、民間航空機、3次元分布、炭素循環、データベース

### 1. はじめに

地球温暖化の進行は疑いのないものになっており、日本は率先して脱炭素社会の実現に向けて

行動をしなければならない。しかしながら温室効果ガスの削減目標に必要な炭素循環メカニズムの理解は十分に進んでいない。特に最近の観測ではCO<sub>2</sub>濃度の増加速度がエルニーニョ・南方振動(ENSO)イベントに無関係な変動を示す現象が出現し、これまで我々が把握し得なかったメカニズムが今後の炭素循環を決定していく可能性もある。一方で、中国やインドを中心としたアジアの人為起源CO<sub>2</sub>排出量の急増による地球規模の炭素収支への影響評価も必要となってきた。これら、新たな要因による変動を捉えるには地上の観測だけでは不十分であり、航空機を使った長期的な3次元観測の必要性が一層高まっている。特に熱帯域では、地上観測が少ない上に、雲が発達しやすいことが障害となって十分な衛星観測データの取得も困難である。熱帯域では活発な大気の鉛直輸送によって地上の放出・吸収のシグナルを上空で捉えやすいことが分かっており、熱帯のCO<sub>2</sub>放出・吸収量の推定には航空機観測が非常に有効な手段と考えられる。2013年に発表されたScience誌の論文<sup>1)</sup>で見い出されたCO<sub>2</sub>濃度の季節振幅の長期変動でも、より代表的なデータの得られる航空機観測が決定的な役割を果たしている。さらに同Science論文では世界の主たる地球システムモデルは航空機観測の結果を適切に表現できていないことが報告されており、将来の気候変動予測をより正確にするためにも、精度良い包括的な定期航空機観測による検証がますます重要な研究課題となってきた。

## 2. 研究目的

これまでは、世界で唯一の民間航空機による温室効果ガスの高頻度3次元観測プロジェクト(CONTRAIL: Comprehensive Observation Network for TRace gases by AirLiner)において広域かつ長期間安定的に実施するモニタリング手法と体制を確立し、地上観測だけでは明らかにすることのできないCO<sub>2</sub>など温室効果ガスの鉛直分布、季節変動の振幅、南北・東西分布の特徴を明らかにしてきた<sup>2)3)</sup>。本研究では今後さらに5年間の長期データを蓄積することによって、最近注目されている過去20-30年とは明らかに異なるアジアの人為源排出量の急増や、温暖化の進行に伴う陸上生態系や海洋フラックスの長期変化による影響の実態を解明することを目的とする。

さらに、CONTRAILデータの利用を促進して世界への情報発信や温暖化予測研究に対する日本の貢献を進展させるため、これまで培われたデータ処理手法の自動化と高速化を図り、定常的かつより迅速なデータ提供システムを構築する。これによって、タイムリーかつ効果的な情報発信を可能にするとともに、衛星観測の検証や炭素循環モデルの高度化に資することも目的とする。

## 3. 研究方法

### (1) 観測装置

本研究では3つの手法による観測を行う。1つはCME (Continuous CO<sub>2</sub> Measuring Equipment)によって航空機の飛行中に連続してCO<sub>2</sub>濃度を測定するものである(図1)。残りの2つは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CO<sub>2</sub>を始めとする温室効果ガスの濃度や安定同位体比の観測を行うものであり、あらかじめ決められた位置にて自動で空気採取を行うASE (Automatic Air Sampling Equipment、図2)を使う方法と、観測者が航空機に搭乗して手動のポンプによって空気採取を行うMSE (Manual Air Sampling Equipment)を使う方法とがある。

CMEは飛行中に継続的な観測が可能であり、上昇時及び降下時に離着陸地近傍におけるCO<sub>2</sub>濃度

の高度分布と、水平飛行中に上部対流圏におけるCO<sub>2</sub>濃度の緯度・経度分布を観測する。CME搭載機は東アジア、東南アジアばかりでなく、南アジア、オーストラリア、ハワイ、北米、及びシベリア上空経由ヨーロッパにも就航するため、太平洋域及びユーラシア大陸上空を中心としたグローバルなCO<sub>2</sub>濃度の長期変動を観測できる。特に、観測の空白域の1つであるアジア域で充実したデータを取得することが期待できる。

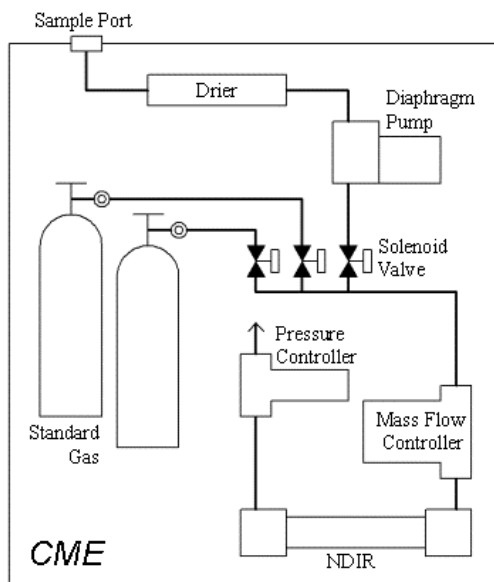


図 1. CMEの概略配管図

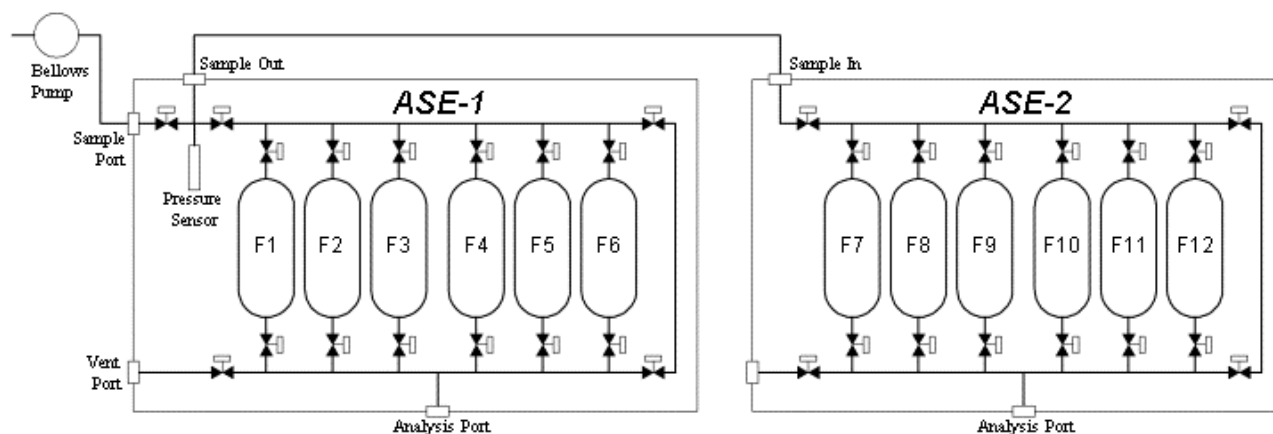


図 2. ASEの概略配管図

ASEまたはMSEでは上空の大気試料を採取し、CO<sub>2</sub>、メタン (CH<sub>4</sub>)、亜酸化窒素 (N<sub>2</sub>O)、六弗化硫黄 (SF<sub>6</sub>)、一酸化炭素 (CO) 及び水素 (H<sub>2</sub>) の各濃度とCO<sub>2</sub>の炭素同位体比 ( $\delta^{13C}$ ) 及び酸素同位体比 ( $\delta^{18O}$ ) の上部対流圏における緯度分布を観測する。

## (2) 大気輸送モデル

本研究では、CME観測で得られた大気CO<sub>2</sub>濃度データの3次元グリッド化を目的として、大気輸送モデルを用いる。大気輸送モデルをベースとした逆解析システムにCME観測で得られたCO<sub>2</sub>濃度

データを入力し、観測データと整合するように地表面CO<sub>2</sub>フラックスデータを修正・最適化する逆解析を行う。この逆解析で得られたCO<sub>2</sub>フラックスデータを再度、大気輸送モデルに入力し、大気輸送計算を行うことで、CME観測のない地域・期間においてもCO<sub>2</sub>濃度データ（CME観測と整合的な推定値）を得ることができる。本研究では、大気モデルNICAM（Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model）<sup>4)5)6)</sup>をベースとした大気輸送モデルNICAM-TM<sup>7)8)</sup>を用いる。NICAM-TMは質量保存性に優れたNICAMの特性を活かして、長寿命気体の大気輸送計算を可能としたモデルであり、SF<sub>6</sub>やラドンなどのトレーサ実験により輸送性能の確認も行われている<sup>7)9)10)</sup>。

#### 4. 結果・考察

##### （1）CMEによるCO<sub>2</sub>濃度観測

###### ①CMEデータ処理

CMEによる観測では、航空機の離陸から着陸までCO<sub>2</sub>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程度である。2016-2020年まで、JA702J, JA703J, JA705J, JA707J, JA708J, JA709J, JA710J, JA711Jの8機のボーイング777-200ER型機と、2機の777-300型機（JA733J, JA734J）にCMEを搭載し、CO<sub>2</sub>濃度データを取得した。取得されたCMEデータについて流量・圧力の制御状態、標準ガスの導入状況、水蒸気の除湿状態等に対する品質管理を実施し、安定性が劣るデータを削除した。また、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内の非分散型赤外分析計（NDIR）で測定されるまでの時間的な遅れを考慮し、40秒の時間補正を実施した。この際CMEで取得されているCO<sub>2</sub>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）の時間分解能を活かすため、機体で取得する位置情報（緯度・経度・気圧高度等）を試料空気測定時刻に内挿して求めた。CMEで取得されたデータから上空のCO<sub>2</sub>濃度を算出するまで品質管理やデータ処理の各作業が断片化され複雑で時間がかかるものであったため、迅速なデータ提供を困難にしていた。この5年間の中で、各作業を再整理しマニュアル化すると同時に、過去のデータ事例からデータの取捨選択の基準を設け明らかにおかしいデータを落としデータを選別するなど工夫をかさね、現在ではCMEが降ろされデータが届くと、約2日間でCO<sub>2</sub>濃度を算出できるようになった。迅速なデータ提供のためだけでなく、算出されたCO<sub>2</sub>濃度プロットを見て、装置の障害と思われるデータがあった際には、速やかに修理対応することも可能となった。

###### ②気象データを利用した空気塊分類

観測されるCO<sub>2</sub>データの濃度・変動強度は成層圏/上部対流圏/境界層といった大気力学的に区切られる気塊起源に大きく依存する。このため気象庁の客観解析値JRA-55を用いた気塊分類を実施している。客観解析値から飛行時刻、飛行位置での風向・風速・気温等を求めるとともに対流圏界面高度（渦位2で定義）、境界層高度（バルクリチャードソン数0.25で定義）を求め、観測された気塊が境界層内、自由対流圏、成層圏のいずれかにあたるかを観測データに付加情報として与えデータセットを作成した。2016-2020年にCMEで観測されたCO<sub>2</sub>データについて、境界層から自由対流圏への遷移領域（境界層最上層から温位10Kの範囲）、圏界面直上からの遷移領域（対流圏界面高度から温位25K）の5つに分け観測データを分類した結果を図3に示す。5年間の平均的傾向を見ると、おおよそ7割のデータが自由対流圏、2-3割が対流圏界面より上の下部成

層圏または下部成層圏への遷移領域で、地上付近の影響を強く受けるデータは5 %程度であった。2017年の観測航路は2016年とほぼ同様であったことから観測気塊の割合も2016年とほぼ同じで北米便による高緯度での観測が維持された結果、成層圏のデータもほぼ通年で取得されている。対流圏については自由対流圏のデータが多いことから観測により空間代表性の高いCO<sub>2</sub>濃度分布、自由対流圏を通じた長距離輸送等に関する情報が得るのに適したデータセットであると考えられる。図3 (b)を見ると、5年間の期間中、年々成層圏のデータ (ST, st)が増加し、対流圏のデータ (FT)が減少する傾向が見られる。この原因としては行先の変化が考えられる。最も大きな変化は、2018年まで年間300以上あったHNL便が2019年に20便程度に激減したことであろう。圏界面高度は低緯度に行くほど高いため、亜熱帯に位置するHNLへの便の減少は対流圏データの減少につながる。また、低緯度域を通過する豪州便が2017年以降なくなったことや、LHR、CDG、SFO、LAXといった中高緯度域への欧州・北米便が年々増加してきていることも、高緯度ほど圏界面が低く成層圏データが増えることから、影響していると考えられる。

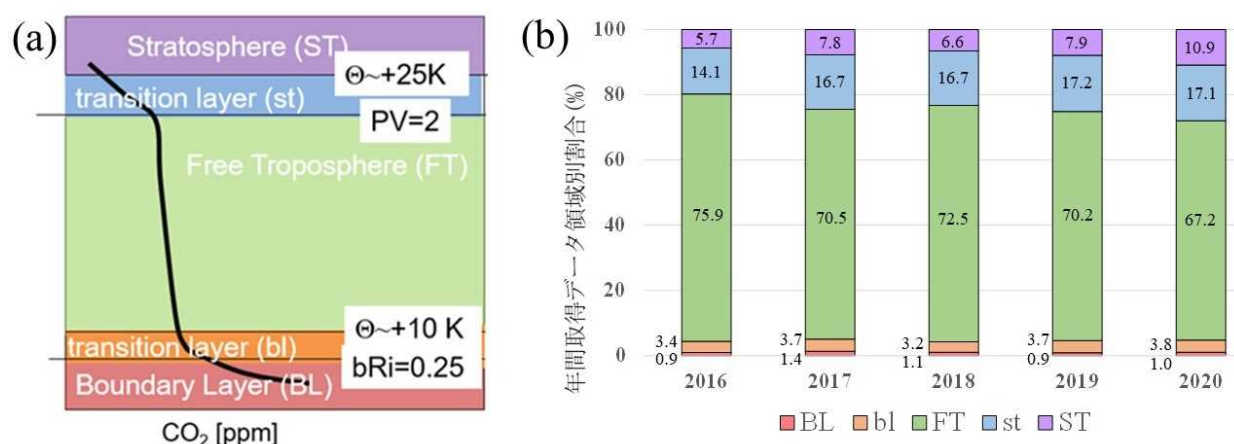


図3. 観測データの気象データを用いた分類の模式図 (a) と2016-2020年取得データの各領域別割合 (b)。高度領域はBL: 境界層内 (バルクリチャードソン数<0.25)、bl: 境界層から自由対流圏への遷移領域 (境界層上端から温位+10 Kの範囲)、FT: 自由対流圏、st: 下部成層圏への遷移領域 (対流圏界面 (渦位=2) から温位+25 K)、ST: 下部成層圏 (対流圏界面から温位+25 K以上) の5つに分類した。

### ③CMEによるデータ取得実績

2020年に得られたCME観測によるCO<sub>2</sub>濃度の有効データ数は541,731であり、2019年(712,595)と比べて24%ほど減少した(図4)。一方、有効フライト数(観測が成功したフライトの数)は、2020年は1,001であり、2019年の1,263に対して20%程度少なかった。2020年のCME搭載回数は、新型コロナウイルス感染拡大防止の影響を受けてJALの国際便運航が大幅に減少した中で、わずかに運航を続けた国際旅客便やチャーター便、貨物便などを選んでCME搭載を続け、CO<sub>2</sub>データを取得することができた。観測域はアジアが最も充実しているが、北米や欧州にも十分なフライトがあり、有意義な観測を行うことができた。このような状況下で想定以上のデータ取得に成功した要因は、航空会社と整備会社の環境観測への理解の深さに依るところが大きい。

2016-2020年までの5年間でのフライト数は6,583に達し、得られたCO<sub>2</sub>濃度の有効データ数

は 3,912,825 にまで上った。



図 4. 2005-2020年までのCMEによる有効CO<sub>2</sub>データ数と観測フライト数

図 5 に 2016-2020 年の CME 観測飛行経路の分布を示す。2020 年は 6 機のボーイング 777-200ER 型機 (JA702J、JA705J、JA707J、JA708J、JA709J、JA711J) と 2 機のボーイング 777-300ER 型機 (JA733J、JA734J) に CME を搭載して観測を実施した。2020 年は前年に続きオーストラリア路線、また新たにハワイ路線も観測がなくなったものの、北米を中心に、ヨーロッパ、アジアの各地域で観測を実施することができた。2020 年は、777-300ER を中心に搭載し特に北米域での観測が充実しており、空港上空の鉛直分布観測回数では、羽田 (685 回)、成田 (296 回) に次いで、バンコクが 172 回、ロサンゼルスが 158 回、シンガポールが 126 回と多かった。

2016 年から 2020 年までの 5 年間における鉛直分布観測数は羽田の 3,827 回が最も多く、次いで成田が 2,552 回となっている。3 番目はハワイのホノルルで 1,240 回である。アジア域ではシンガポール 805 回、バンコク 791 回、香港 304 回、ソウル (金浦空港) 264 回、上海 (虹橋空港) 199 回、台北 (松山空港) 177 回、上海 (浦東空港) 118 回、ジャカルタ 103 回が、全体のそれぞれ 4、5、10、12、13、14、19、21 番目に位置している。過去 5 年間では北米大陸での観測回数の増加が顕著であり、ロサンゼルス 538 回、ニューヨーク 517 回、シカゴ 465 回、サンフランシスコ 142 回が、全体のそれぞれ 6、7、8、18 番目である。欧州はパリ 165 回、ロンドン 147 回が、全体のそれぞれ 15、17 番目に多い空港であった。

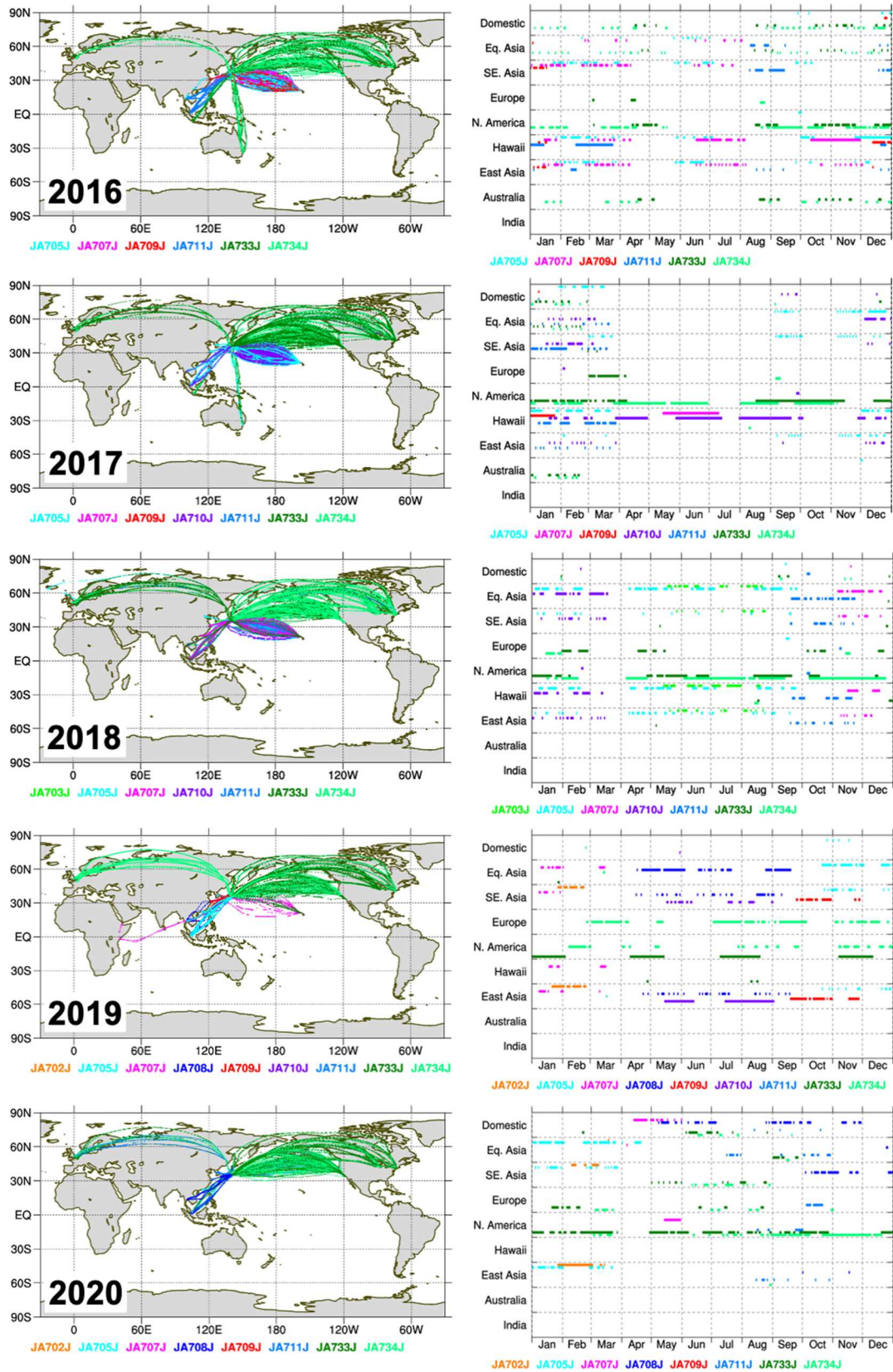


図5. 2016-2020年までのCME観測のフライトルート（左）および各年のCME観測の飛行地域の時間推移（右）。色はCMEを搭載した各機材を示す。

#### ④CO<sub>2</sub>濃度鉛直分布の時間変化

図6に2016-2020年までそれぞれの空港上空でCME観測によって得られたCO<sub>2</sub>濃度の時間-高度断面図を示す。図6(b)より、羽田上空では2020年も1年を通してほぼ定期的に観測を行うことができていたことが分かる。また成田やバンコク、シンガポールでも、新型コロナウイルス感染拡大防止の影響を受けて国際便運航が大幅に減少し観測空白期間があるものの、多くの月で観測が実施できていたことが分かる(図6(a)、(j)、(k))。図6から各地域の濃度変動の特徴も見て取れる。ヨーロッパ(図6(m)、(n))やソウル(図6(c))、ニューヨーク(図6(i))では、夏季の濃度低下が下層から上層まで顕著であり、大陸における陸域植生の吸収の影響を大きく受けていることがうかがえる。一方で、赤道付近に位置するシンガポールでは1年を通して季節変化が小さいことが見て取れる(図6(k))。また、成田・羽田や上海、香港、ニューヨーク(図6(a)、(b)、(e)、(f)、(i))などでは、地表付近に高濃度が観測されており、化石燃料消費による都市からの排出シグナルが捉えられていると考えられる。

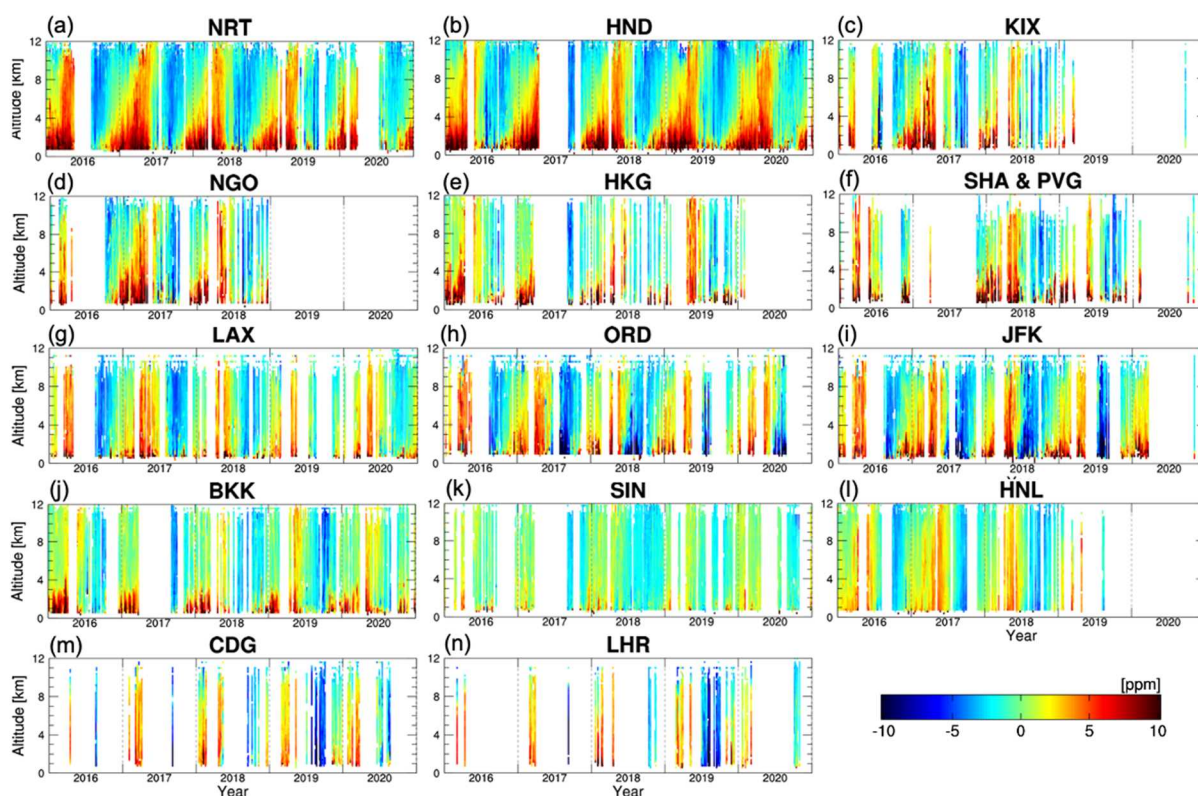


図6. 2016-2020年にかけてCME観測で取得された各空港上空におけるCO<sub>2</sub>濃度の時間(月)-高度断面図。東京(NRT+HND)上空6-7 kmにおけるCO<sub>2</sub>濃度のトレンド成分からの差で示し、見やすいように7日の移動平均を施した上で図示している。1-2段目は日本・東アジア域(NRT:成田、HND:羽田、KIX:関西、NGO:名古屋、HKG:香港、SHA&PVG:上海)、3段目は北米域(LAX:ロサンゼルス、ORD:シカゴ、JFK:ニューヨーク)、4段目は東南アジア・太平洋域(BKK:バンコク、SIN:シンガポール、HNL:ホノルル)、5段目はヨーロッパ域(CDG:パリ、LHR:ロンドン)を示す。

#### ⑥アジア地域におけるCO<sub>2</sub>濃度の広域変動

日本を拠点とするCONTRAILのCME観測では、アジア地域の上空で特に充実した観測データが取



得されてきた。図5に示したように成田空港、羽田空港、バンコク空港、シンガポール空港などアジア各地の空港上空で数百回を超えるCO<sub>2</sub>濃度の高度分布データを取得してきた。これに加えて、旅客機の巡航高度である高度10 km付近でも多数の観測データが得られた。これらの観測データをもとに、アジア地域の対流圏内におけるCO<sub>2</sub>濃度の季節変動や高度分布の平均的な分布を評価・考察した。

データ解析にあたり、まずは気象庁の最解析データJRA-55をもとに各観測地点における渦位 (potential vorticity, PV) を計算し、PVが2 PVU (1 PVU = 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> K kg<sup>-1</sup>) を超えるデータは成層圏データとして除外した。これにより、高度8 km以上で取得された観測データの33 %が除外された。このような成層圏気塊データの割合は観測地点の緯度や季節により異なる。さらに、CO<sub>2</sub>濃度の全球的な経年増加を考慮し、以下のようにΔCO<sub>2</sub>を計算した。

$$\Delta CO_2(lat, lon, alt, t) = CO_2(lat, lon, alt, t) - Trend CO_2 at MLO(t) \quad (1)$$

ここでlat、lon、alt、tは、それぞれ各観測データの取得された緯度、経度、高度、時刻を表す。Trend CO<sub>2</sub> at MLOは、地上観測基地マウナロア（米国ハワイ州）におけるCO<sub>2</sub>濃度の長期変動成分を表し、米国大気海洋庁の提供する観測データにデジタルフィルタリングの手法を適用して計算した。以下では、このように長期変動成分を除去したΔCO<sub>2</sub>の統計的解析結果を述べる。

アジア地域上空の高度8 km以上の上部対流圏におけるΔCO<sub>2</sub>の月平均の分布と緯度帯別の頻度分布を図7に示した。アジア地域の上部対流圏におけるΔCO<sub>2</sub>分布の季節変動を見ると、1月から2月にかけては、上部対流圏でのΔCO<sub>2</sub>はアジアから太平洋地域でほぼ均一であるが、3月頃から北日本付近（北緯30度以上）に高いΔCO<sub>2</sub>が出現し、このような高いΔCO<sub>2</sub>は5月まで持続する。この時期のΔCO<sub>2</sub>のヒストグラムを見ると、高濃度方向に広がりを持った頻度分布が確認できる。6月には前月までに見られた高いΔCO<sub>2</sub>の分布が消失する一方で、北緯35度以上で低いΔCO<sub>2</sub>が出現し始め、これ以降の夏期にはΔCO<sub>2</sub>の緯度方向の勾配が冬期とは逆転する。このような低いΔCO<sub>2</sub>は、7月には特にシベリア上空で顕著になり、それに加えて8月には、南アジアから東南アジアの上空でも低いΔCO<sub>2</sub>が出現する。8月の南アジアから東南アジア上空の低いΔCO<sub>2</sub>領域は、上空の風の分布で明らかのように、この時期に発達するアジアモンスーン高気圧の内部に形成されていることが分かる。9月になると低いΔCO<sub>2</sub>領域は依然としてシベリアや南アジア上空に見られるが、低濃度領域が太平洋上空を含めてより低緯度側までも広がっている。10月になると、前月まで見られた大陸上の顕著な低濃度領域が観測されず、それ以降のΔCO<sub>2</sub>はより広域で比較的均一となって春期まで継続的な濃度増加を示す。

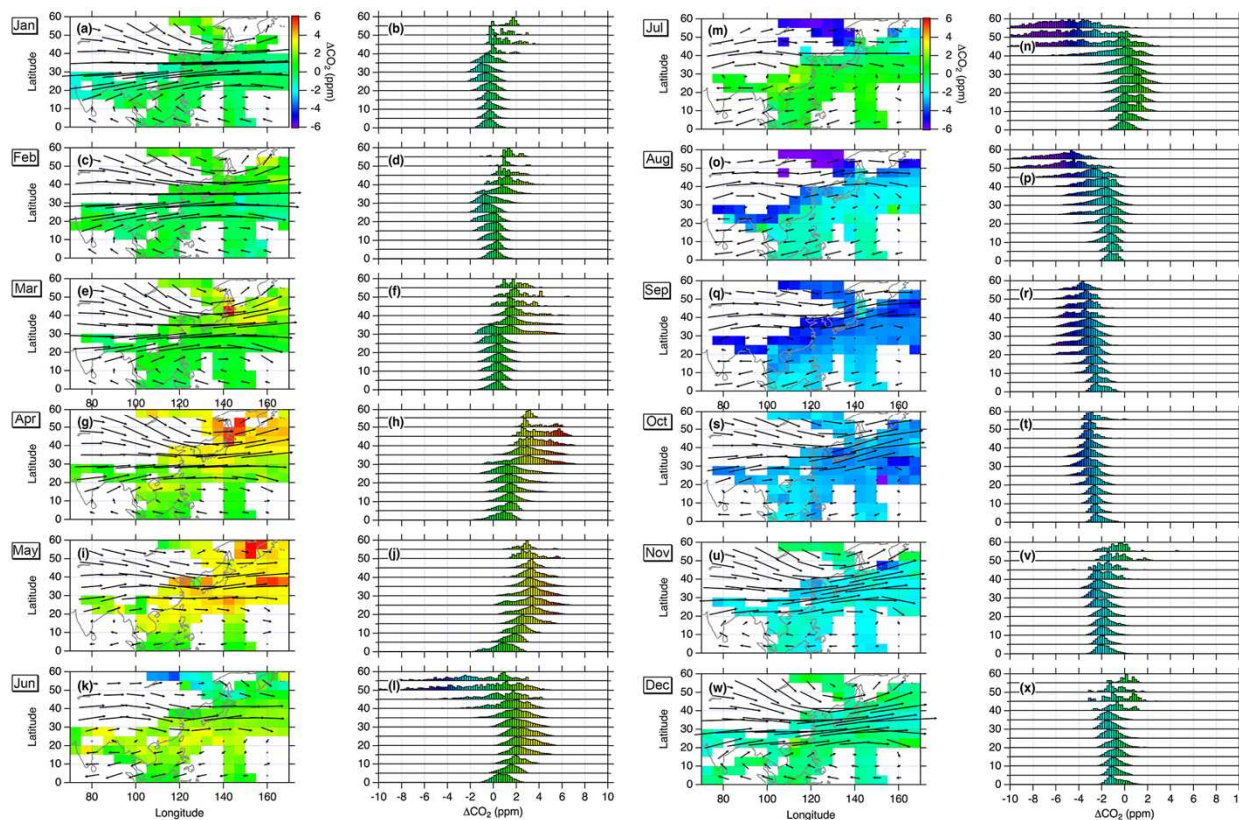


図7. アジア地域上空の高度8 km以上における  $\Delta CO_2$  の月平均の分布と緯度帯別の頻度分布。 $\Delta CO_2$  の値は緯度経度の5度毎に平均した。最解析データによる250 hPaの気圧面での風ベクトルも図示した。頻度分布のヒストグラムは5度毎に計算し、各緯度帯の最大頻度で規格化した。

次に、アジアの各都市上空で高度方向の  $\Delta CO_2$  分布の季節変動を図8に示す。この図では、アジア地域の様々な都市の上空で、 $CO_2$  濃度の季節変動が高度別に異なることや、 $CO_2$  濃度の高度方向の勾配が季節によって変動することが明瞭に示された。特に、シンガポールやジャカルタの熱帯地域を除いては、北半球の冬期から春期に高濃度、夏期に低濃度を示す明瞭な季節変動が観測された。デリーを除き、上空でCMEによる高度分布の観測が行われたアジアの都市は、主にアジア大陸東部の沿岸域に位置している。これらの都市では、冬期から春期にかけての  $CO_2$  濃度の増加が地表付近で出現しているのに対して、夏期の  $CO_2$  濃度の減少は地表付近よりも上空において顕著である。このことは、これらの都市の周辺地域が冬期においては  $CO_2$  の強い放出源である一方、夏期においては都市の周辺地域の  $CO_2$  吸収源が上空の季節変動を支配しているわけではないことを示唆している。一方、デリーの上空では、夏期に非常に低い  $\Delta CO_2$  が地表付近で顕著に出現し、その周辺地域が非常に強い  $CO_2$  の吸収源であることを示している。さらに、低い  $\Delta CO_2$  の特徴は地表付近から上部対流圏まで及んでおり、地表の強い  $CO_2$  吸収の影響を受けた気塊が活発に上空まで輸送されていることを示している。

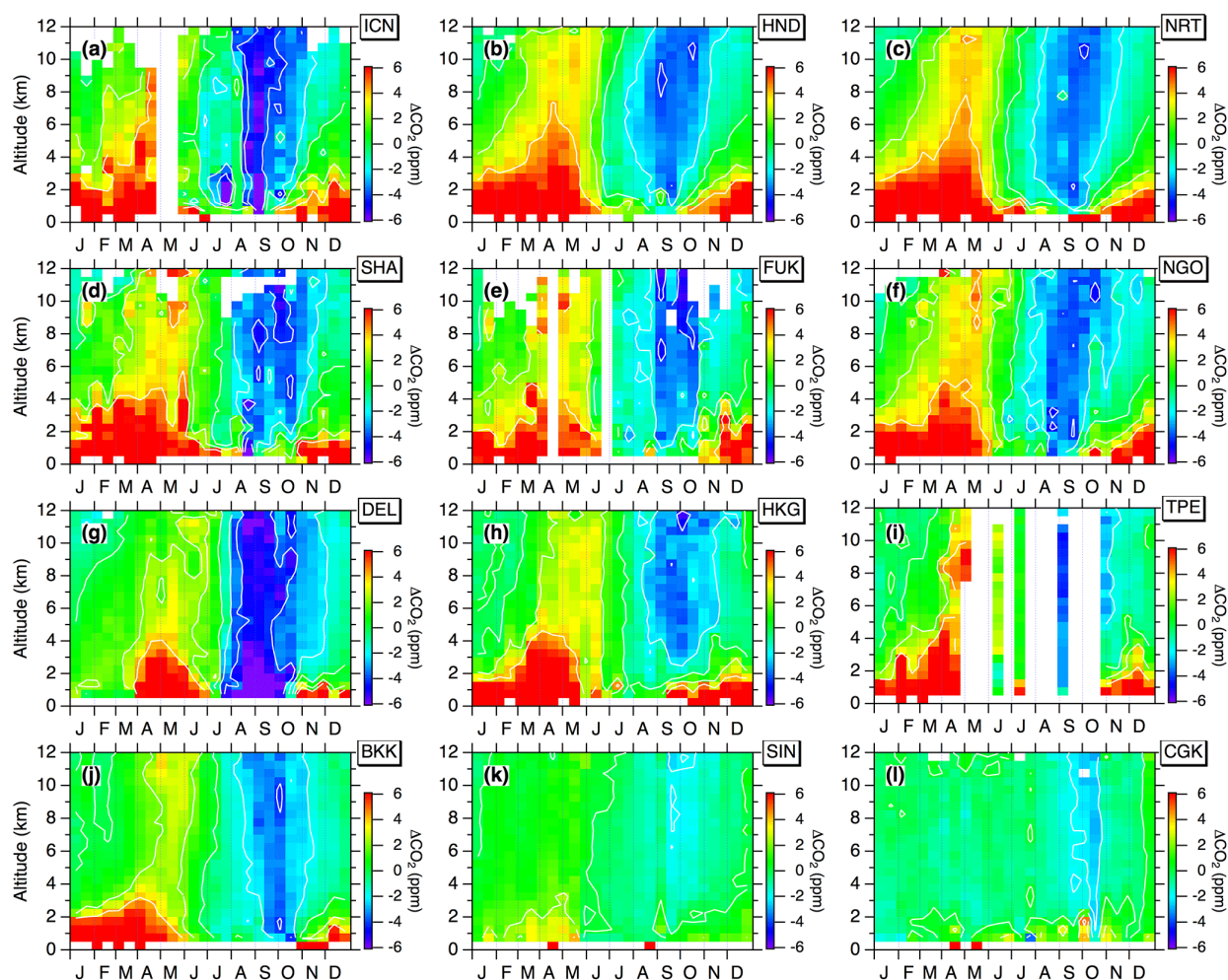


図8. アジア地域の様々な都市の上空での  $\Delta\text{CO}_2$  の高度分布と季節変動。ICN：仁川、HND：羽田、NRT：成田、SHA：上海、FUK：福岡、NGO：名古屋、DEL：デリー、HKG：香港、TPE：台北、BKK：バンコク、SIN：シンガポール、CGK：ジャカルタ。

このようなアジア地域上空の特徴的な  $\text{CO}_2$  濃度の高度分布や季節変動は、アジア地域特有の大気循環のもと、大気輸送モデルの解析も組み合わせることで、以下のように理解することができた。第一に、夏期のアジアモンスーンにともなって、南アジアから東南アジアの上部対流圏では持続性の高気圧が発達し、8月には、その内部に地表での強い  $\text{CO}_2$  吸収を反映した低い  $\text{CO}_2$  濃度の気塊が活発な鉛直輸送で供給されている。9月以降には、 $\text{CO}_2$  の低濃度気塊が高気圧の衰退とともに太平洋地域へと流出する。第二に、7月以降、シベリア地域の上空においても  $\text{CO}_2$  の低濃度気塊を頻繁に観測する。上部対流圏では、シベリア地域における  $\text{CO}_2$  吸収やその影響を上空まで輸送する大陸上の対流活動の不均一性により、観測される  $\text{CO}_2$  濃度の変動は非常に大きい。第三に、春期に日本付近に出現する高濃度  $\text{CO}_2$  気塊については、この時期に大陸から日本を通過する低気圧にともなって、大陸上の植生起源の高濃度  $\text{CO}_2$  が頻繁に輸送されていると考えられる。

#### ⑦インド・デリー周辺地域の農業による $\text{CO}_2$ 濃度変動への影響

CME観測では、2014年末までに、インドのデリー空港上空で合わせて787回の  $\text{CO}_2$  濃度の高度分布

を取得した。これらの高度分布は、着陸および離陸時において、それぞれ主に17時-19時と20時-22時の間に観測された。CO<sub>2</sub>濃度の高度分布の例を図9に示す。また、飛行中の気温データの鉛直分布を利用して、それぞれの観測時における大気境界層上端の高度を推定した（図中の水平の点線）。冬期のCO<sub>2</sub>濃度の鉛直分布について着目したところ、図9 (b)のように、12月中には大気境界層より上空で高度方向に均一なCO<sub>2</sub>濃度が観測される一方、大気境界層内では地表に向かってCO<sub>2</sub>濃度が増加する観測結果が多く得られた。しかし、1月-3月にかけては、図9 (a)のように、大気境界層より上空でのほぼ均一なCO<sub>2</sub>濃度は共通だが、大気境界層内では地表に向かってCO<sub>2</sub>濃度が減少する観測結果が頻出した。大気境界層内におけるこのようなCO<sub>2</sub>濃度の変動は、デリー空港周辺の都市域からのCO<sub>2</sub>の放出の他にも、デリー近傍にCO<sub>2</sub>の吸収源が存在することを示唆している。観測時の大気境界層内について後方足跡線解析を行ったところ、観測された低いCO<sub>2</sub>濃度の起源として、デリーを含む北インド一帯の主要な土地利用である農地が考えられた。

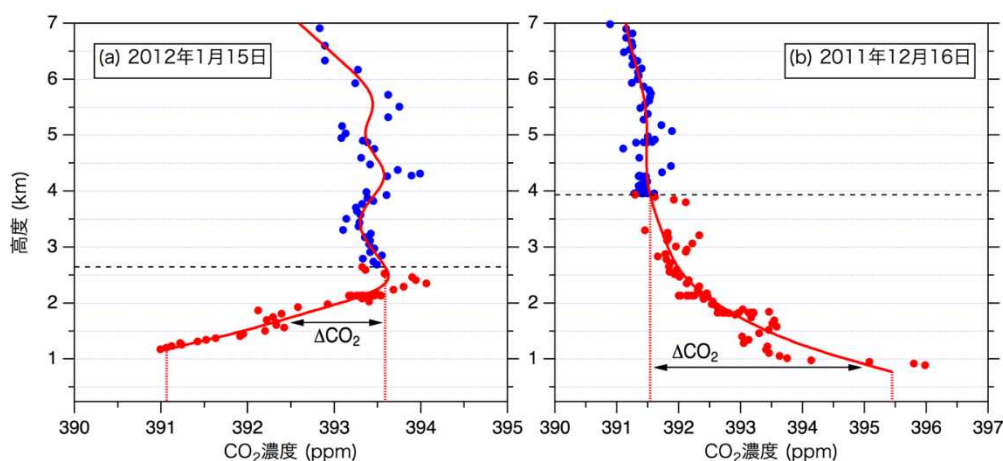


図9. インド・デリー空港上空で観測されたCO<sub>2</sub>濃度の高度分布の例。水平の点線は、飛行中の気温データから推定された大気境界層上端の高度を示しており、その高度以上と以下の観測値をそれぞれ青と赤で塗り分けた。赤の実線は観測値にフィットさせたスプライン曲線である。

デリー上空におけるCO<sub>2</sub>減少量の変動を調べるため、それぞれの高度分布データにスプライン曲線をフィットさせ、以下のように、大気境界層内におけるCO<sub>2</sub>のカラム量の増減 $\Delta V_{CO_2}$ を計算した。

$$\Delta V_{CO_2} = \int_{z_0}^{z_{top}} \frac{M_{CO_2} p(z) [\Delta CO_2](z)}{RT(z)} dz \quad (g \text{ CO}_2 \text{ m}^{-2}) \quad (1)$$

ただし、 $M_{CO_2} = 44.01$  (kg mol<sup>-1</sup>)、 $R = 8.31$  (kg m<sup>2</sup> s<sup>-2</sup> mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>)、 $p(z)$ と $T(z)$ はそれぞれ高度 $z$ における気圧 (hPa = 102 kg m<sup>-1</sup> s<sup>-2</sup>)と気温、 $[\Delta CO_2](z)$ は高度 $z$ と $z_{top}$ におけるCO<sub>2</sub>濃度の差、 $z_{top}$ と $z_0$ はそれぞれ大気境界層上端と地表の高度（デリー空港の標高237 m）を表す。

このように計算した $\Delta V_{CO_2}$ の12月-4月の変動を図10に示す。大気境界層内でCO<sub>2</sub>濃度が増加した場合、 $\Delta V_{CO_2}$ は正の値を示すが（赤い柱）、このような観測結果は冬期を通じて出現し、周辺都市域からのCO<sub>2</sub>放出の寄与が主と考えられる。4月に $\Delta V_{CO_2}$ の増加が観測されるのは、この時期の高温による植生呼吸の増加や農業残渣の燃焼が原因として考えられる。一方で、大気境界層内でCO<sub>2</sub>濃度が減少した場合、 $\Delta V_{CO_2}$ は負の値を示すが（青い柱）、その出現時期は1月-3月であり、

特に2月-3月にかけて顕著だった。デリー周辺地域の農地において、この時期は小麦等、冬期の主要作物の生育期に当たる。この時期の負の $\Delta V_{CO_2}$ の大きさが正の $\Delta V_{CO_2}$ の平均値に匹敵することは、冬期作物による最盛期の $CO_2$ の吸収量が、都市域からの $CO_2$ 放出量の2倍程度にも相当することを示唆している。このような北インドの農地による $CO_2$ 吸収は、本研究によって初めて報告された観測結果である。今後は、CME観測のデータをさらに活用し、北インドにおける農地を含めた周辺植生の $CO_2$ 吸収・排出や都市域からの $CO_2$ 放出の定量推定が求められる。

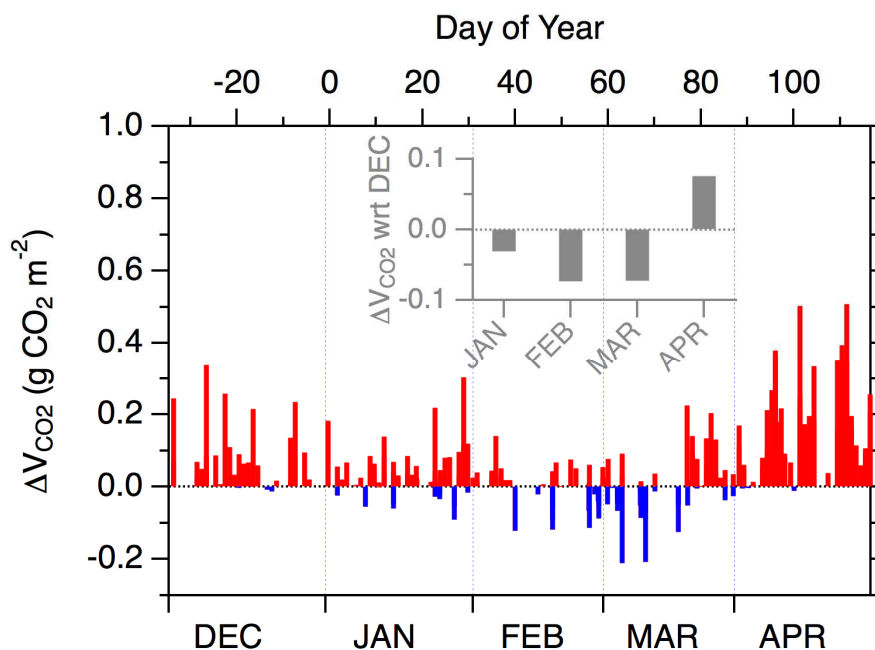


図10. デリー上空の大気境界層内における $CO_2$ のカラム量の変動 ( $\Delta V_{CO_2}$ )。正負の値をそれぞれ赤と青の柱で示した。上部の灰色のグラフでは、それぞれの月の平均値について12月との差を図示した。

#### ⑧世界各地の都市上空における $CO_2$ 濃度の変動

CME観測では空港離着陸時に $CO_2$ 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 $CO_2$ 排出の影響が見られる可能性がある。この観点から、CONTRAILで取得された全データを利用して整合性のある解析を行うためには、世界の空港別のデータ取得日時に違いがあることを考慮し、 $CO_2$ データに重畳している経年変動や季節変動を補正して、地域スケールでの $CO_2$ 変動を抽出する必要がある。そのため、上述の $\Delta CO_2$ に加え、以下で表される $excess CO_2$ を計算した。

$$excess CO_2(lat, lon, alt, t) = \Delta CO_2(lat, lon, alt, t) - median \Delta CO_2(airport, alt-bin, t-bin) \quad (2)$$

ここで、 $median \Delta CO_2$ は空港別に得られた $\Delta CO_2$ の中央値を表す。この手法により計算された $excess CO_2$ は、主に地域スケールの変動を表現すると考えられる。

そこで、世界36空港の上空について、近傍の都市圏の分布、高度別の観測位置、風向・風速と

のexcess CO<sub>2</sub>の関係を調べた。その解析例を図11に示す。モスクワ空港（ドモジエドヴォ空港）は、モスクワ大都市圏の南東に位置しており、離発着時の観測機はその周辺に位置している（左図パネル(d)）。高度1 km付近のexcess CO<sub>2</sub>の解析結果では、比較的弱い北西風（15 m/s以下）の時に高濃度CO<sub>2</sub>が出現することを示している（左図パネル(b)）。同様に、成田空港上空において観測機は東京大都市圏の東側に位置しており（右図パネル(d)）、高いexcess CO<sub>2</sub>が比較的弱い西風（20 m/s以下）の時に出現していることが分かる（右図パネル(b)）。両空港上空で見られた高いexcess CO<sub>2</sub>の出現風向は観測地点から見た都市圏の方向とよく一致しており、いずれも都市圏排出の影響と考えると整合的である。一方、より高高度ではこのような都市排出の影響は小さくなり、excess CO<sub>2</sub>の変動幅も小さくなった（パネル(a)と(c)）。ここで、median  $\Delta$ CO<sub>2</sub>は空港別に得られた $\Delta$ CO<sub>2</sub>の中央値を表す。この手法により計算されたexcess CO<sub>2</sub>は、主に地域スケールの変動を表現すると考えられる。

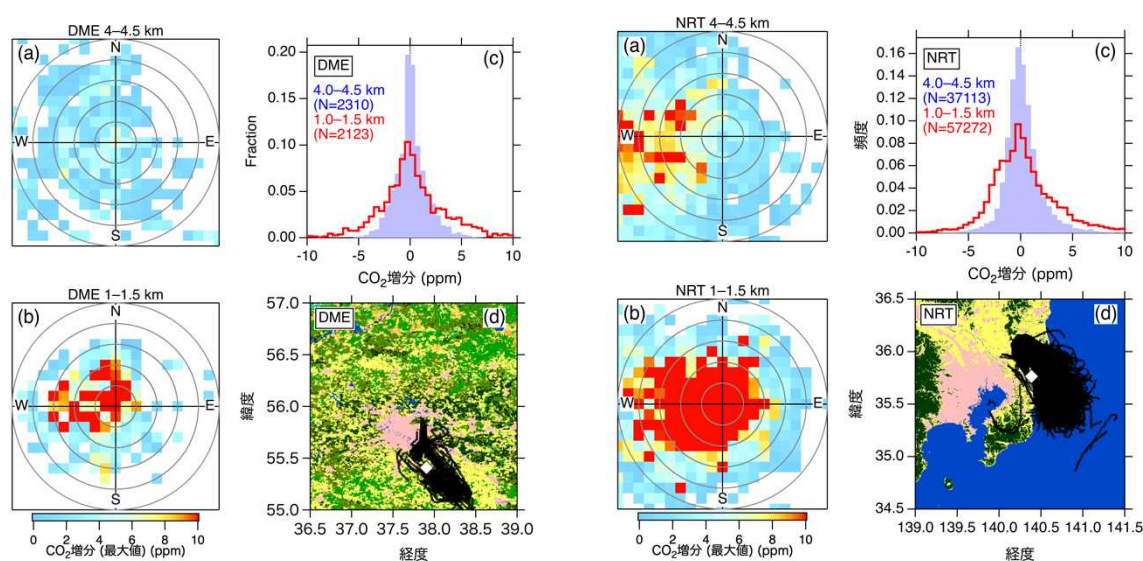


図11. モスクワ空港（DME、左4枚のパネル）と成田空港（NRT、右4枚のパネル）でのexcess CO<sub>2</sub>（CO<sub>2</sub>増分）の解析結果。(a)高度4.0-4.5 kmと(b)高度1.0-1.5 kmにおける風向・風速とexcess CO<sub>2</sub>の関係。各風向・風速グリッドでのexcess CO<sub>2</sub>の最大値が示されている。円の中心から遠いほど風速が大きく、同心円の間隔は5 m/s。(c)高度4.0-4.5 km（紫の塗り潰し）と高度1.0-1.5 km（赤実線）のexcess CO<sub>2</sub>のヒストグラム。(d)各空港（白ダイヤ）周辺の土地利用の状況と高度2 km以下でのCME観測機の位置。ピンク色が都市域を表す。

上記のモスクワと成田空港を含めて世界の36空港について同様の解析を行った。その結果、多くの空港において、(1)高度約1 kmでは高いCO<sub>2</sub>濃度が出現する風向が特定でき、その方向が空港近隣都市の方向に一致していること、(2)CO<sub>2</sub>濃度の大きな増加は風速が小さい時に観測されやすいこと、(3)excess CO<sub>2</sub>の変動幅は大気下層ほど大きい、高度4 km程度の上空では地表の排出・吸収の影響がほとんど見られない自由対流圏大気の特徴を示すこと、が明らかになった。

このように、空港上空の低高度におけるexcess CO<sub>2</sub>の変動は近隣都市のCO<sub>2</sub>排出の影響を強く受ける。そこで、CO<sub>2</sub>濃度の変動幅の指標としてexcess CO<sub>2</sub>の標準偏差（SD）を採用し、世界各都市上空でのSDを調べたところ、人口規模の大きな都市を近傍に持つ空港の上空でSDが大きいこ

とがわかった。SDを近隣都市のCO<sub>2</sub>排出量に対して図示したのが図12である。高度4 km付近の自由対流圏ではSDの大きさが近隣都市からのCO<sub>2</sub>の排出量に無関係に小さいのに対し、高度1 km付近においてはCO<sub>2</sub>排出量の大きい都市の上空ほどSDが大きい傾向がある。このことは、このような空港直上の観測地点において、観測されるCO<sub>2</sub>濃度の変動幅の支配的な要因が近隣都市からのCO<sub>2</sub>排出であることを示唆している。都市圏からのCO<sub>2</sub>放出の影響を空港上の観測によってどの程度捉えられるかはフライト時の気象条件によっても変動するが、観測地点が近隣都市の風上または風下に位置するかによって都市圏からのCO<sub>2</sub>排出の検出の程度は決まると考えられ、様々な観測条件下での濃度増加の大小すなわちCO<sub>2</sub>濃度の変動幅に都市圏からのCO<sub>2</sub>放出量の大きさが反映されていると考えられる。

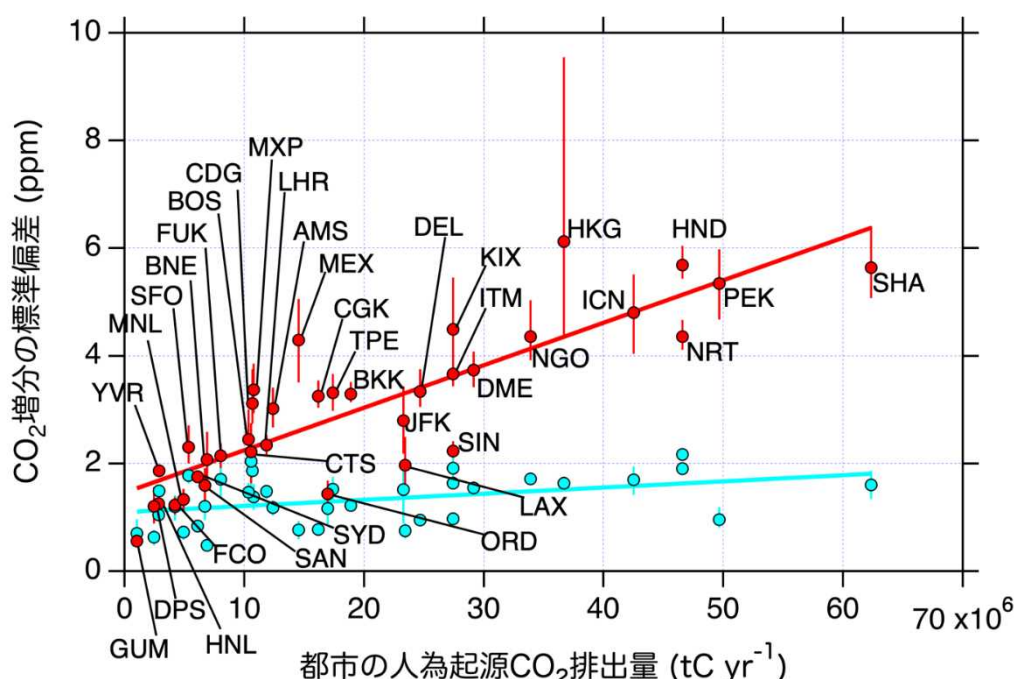


図12. 世界各国の空港上空におけるCO<sub>2</sub>濃度の変動幅（標準偏差）と各都市からの人為起源CO<sub>2</sub>放出量との関係。赤色が高度約1 km、水色が高度約4 kmでの観測データにもとづく結果。各空港名はアルファベット3文字の空港コードで示されている（例えば成田空港はNRT、羽田空港はHNDなど）。

本研究では、旅客機による空港近傍の観測データによって近隣都市圏のCO<sub>2</sub>排出の影響を検出できることが示された。今後は、各都市において、局所的な地表フラックスと大気での輸送過程の理解を進めることが必要である。特に、世界各地の都市上空で高度分布が取得できるCMEの観測データは、大気輸送モデルの地表フラックスおよび大気境界層を含めた鉛直輸送過程の評価に非常に有用である。このような航空機データを世界の都市圏からのCO<sub>2</sub>排出の逆解析にも利用することで、人為起源CO<sub>2</sub>排出量の高精度化を進めることも必要と考えられる。

#### ⑨インドネシア大規模森林火災からのCO<sub>2</sub>放出量推定

本研究では大気輸送モデルNICAM-TMをベースとした逆解析システムNISMOM-CO<sub>2</sub> (NICAM-based Inverse Simulation for Monitoring CO<sub>2</sub>)を用いて、2015年に発生したインドネシアにおける大

規模森林火災からの CO<sub>2</sub> 放出量を推定した。2015 年は最大級のエルニーニョが発生した年であり、インドネシアでは 9-10 月を中心として早ばつに起因する森林火災が起こり、大量の CO<sub>2</sub> が大気へ放出されたと考えられている。

NISMON-CO<sub>2</sub> による逆解析では CONTRAIL-CME 観測による CO<sub>2</sub> 濃度データを用いた。2015 年、CME を搭載した航空機は 209 回、シンガポールに飛行しており、東南アジア域では充実した観測ができてきている (図 13(a)、(b))。逆解析で得られたフラックスが妥当なものであるかを評価するため、逆解析には用いていない独立の観測データとして、東南アジアを航行する船舶による大気 CO<sub>2</sub> 観測データを用いた。この観測は、国立環境研究所が地球環境保全試験研究費課題「地球温暖化がアジア・太平洋地域における大気質および海洋沈着に及ぼす影響の長期観測」のもと、アジア・太平洋地域を航行している定期貨物船を用いて実施しているものである (NIES VOS)。本研究では、森林火災に着目した解析をするため、さらに、燃烧起源のトレーサーとして有用な一酸化炭素 (CO) の NIES VOS データも用いた。

CO のシミュレーションを行うため、CO に関する化学反応過程を簡易的に扱うモジュールを新たに NICAM-TM に導入した。NICAM-TM の水平解像度は、インドネシアを含む島嶼地域をできるだけ解像できるよう、glevel-6 (格子間隔約 112 km) とした。なお、全球で行う逆解析として、この解像度は世界でも最高レベルであるが、Niwa et al. (2017a)<sup>8)</sup> で開発した輸送計算のオフライン化により、利用可能な計算機資源で十分に実行可能な解像度となっている。NISMON-CO<sub>2</sub> では 4 次元変分法を用い<sup>11)</sup>、2015 年とその前後の期間 (2014 年 11-12 月および 2016 年 1 月) を合わせた 15 カ月間を解析対象として逆解析を行った。

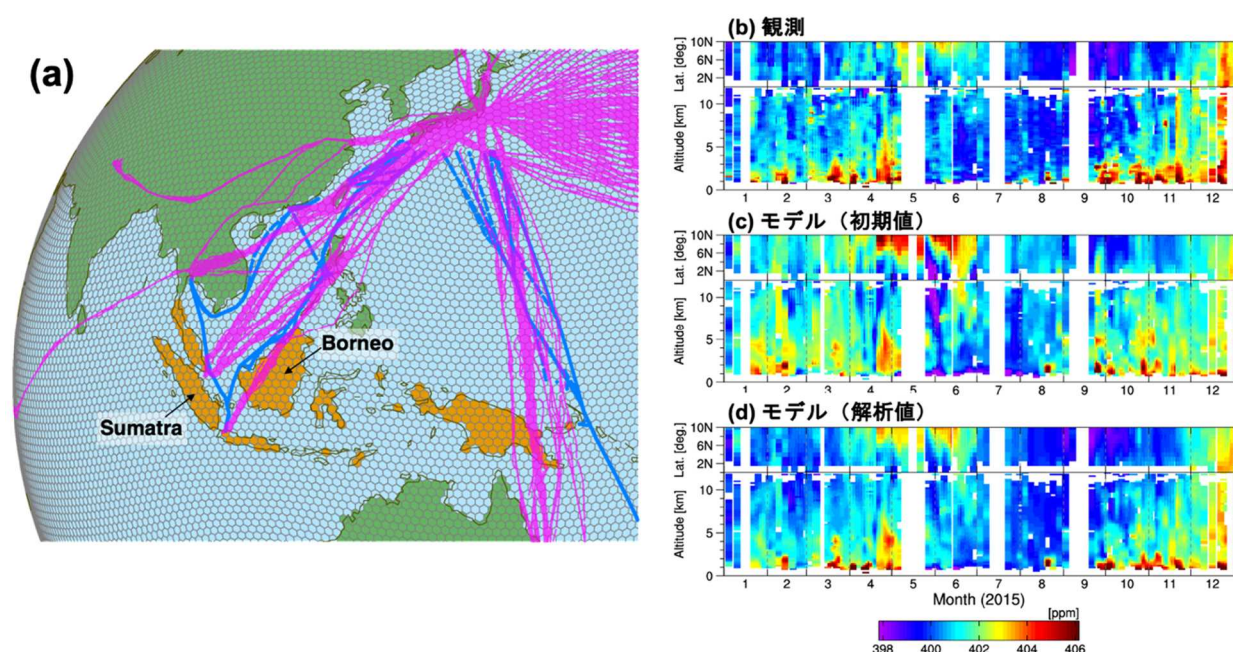


図13. 逆解析で用いたCONTRAIL-CMEによる観測網 (ピンク) と逆解析の評価で用いた船舶観測網 (青) (2015年)。地図上の格子は解析で実際に用いたNICAMの格子 (格子幅約112 km) (a)。右側はシンガポール上空でCONTRAIL-CME観測により得られた大気CO<sub>2</sub>濃度変動 (b) とそのモデルシミュレーションの結果 (c: フラックス初期値を用いた結果、d: 解析後のフラックスを用いた結果)。



2015年のインドネシア大規模森林火災について、NISMOM-CO<sub>2</sub>で最適化された炭素（ここではCO<sub>2</sub>とCOの合計値として示す）フラックスの分布を図2に示す。この図では、大規模な火災が発生したとされる9-10月において、スマトラ島の南東部およびボルネオ等の南部で大量のCO<sub>2</sub>放出があったと示されている。これらの地域は泥炭が多く存在する地域として知られており、泥炭火災からのCO<sub>2</sub>放出が甚大であったことが示唆される。このような大量のCO<sub>2</sub>排出は、初期推定値として用いた森林火災起源のCO<sub>2</sub>フラックスデータ（GFEDv4.1sおよびGFASv1.2）でも見られており、分布については整合的ではあるが、9-10月の2カ月間の時間変動については初期値と解析後で差異が見られた。

逆解析で最適化されたCO<sub>2</sub>フラックスを再度NICAM-TMに入力し、大気濃度観測との比較を行った。その結果、CONTRAIL-CMEとの比較では、初期推定フラックスを用いた場合より、観測との一致度（相関係数、平均平方二乗誤差）が改善し、大気CO<sub>2</sub>濃度の再現性が向上したことが確認された（図14(a)、(b)）。さらに、森林火災起源の要素に関しては、COのフラックスもCO<sub>2</sub>フラックスと同時に推定し、このCOフラックスも用いた大気輸送計算と独立な観測データであるNIES VOSの観測データとの比較を行った。その結果、CO<sub>2</sub>のみならずCOについてもNIES VOSとの一致度が改善することが確認され、火災起源排出の推定値が向上したことがわかった。

最後に、NIES-VOSも含めて逆解析を行ったところ、2015年9-10月の2カ月間の火災による排出総量は初期推定値よりもやや低い273 Tg Cであると推定された。この273 Tg Cという量は、初期推定値より低いとはいえ、日本の年間の人為的な排出量が338 Tg C（2018年）と見積もられていることを考えれば、非常に大きな量であるといえる。

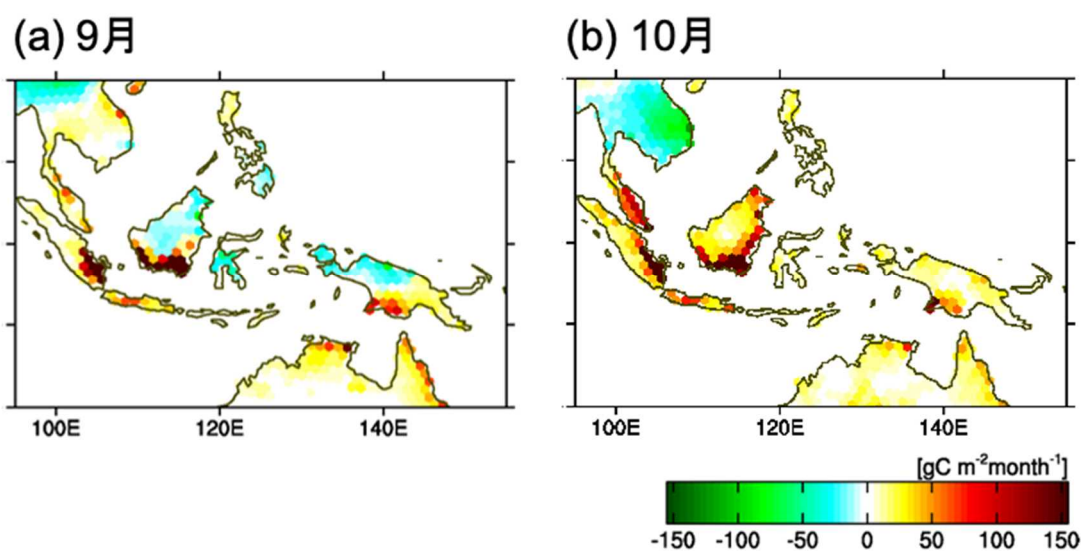


図14. CONTRAIL-CME観測から逆解析システムNISMOM-CO<sub>2</sub>によって推定された2015年の9月(a)と10月(b)の炭素(CO<sub>2</sub>+CO)フラックスの分布。赤系、緑系、それぞれの色は大気に対して放出、吸収を示す。

## (2) ASEとMSEによる多成分観測

### ①ASEとMSEの観測域

ASEとMSEによるサンプリング観測で最も重要な路線は南北両半球にまたがるオーストラリア路線であるが、本課題開始時の2016年度においては日本航空のオーストラリア路線であるシドニー便はボーイング777-300ER型機で運航されており、ASEを搭載した観測はできなかったために月に1回のMSEでの観測を継続した。その後、シドニー便は2017年に787型機に置き換わったためにMSE観測も実施できなくなり、本課題のサンプリング観測の対象はアジア域に移すことになった。2020年は新型コロナウイルスの感染拡大防止に伴う運航制限により国際便の運航本数が大きく減じられた。中でもASEを搭載できる777-200ERは特に欠航が多かったことから、数少ない運航機会を捉えて行き先を限定せずに積極的なASE搭載を行った。その結果、北米、欧州、東南アジア、東アジア、そして日本国内という多様な地域において、水平分布ばかりでなく鉛直分布の観測を実施することに成功し、CH<sub>4</sub>などのCO<sub>2</sub>以外の成分データを得ることができた。2016-2020年度にかけてサンプリング観測を実施した地点を図15に示す。この間に観測を実施した路線と回数は、シドニー線16回、バンコク線4回、シンガポール線28回、上海（虹橋）線21回、ソウル（仁川）線2回、香港線2回、千歳線4回、那覇線6回、サンフランシスコ線2回、ロサンゼルス線1回、ロンドン線1回であった。

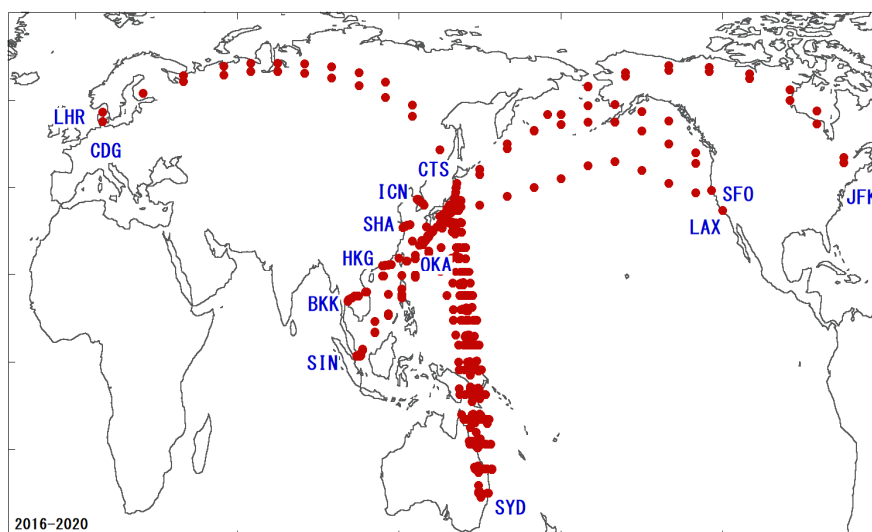


図15. 2016-2020年におけるASEおよびMSEによるサンプリング観測地点

### ②オーストラリア路線で観測された緯度別の温室効果ガスの時間変動

2017年までにオーストラリア路線で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（あるいは二次曲線）と3つの調和関数を組み合わせた数式を適応して、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。従って、ここでは年々変動の処理を行わず、規則的な季節変動と増減傾向（トレンド）を直線あるいは二次曲線に当てはめて解析を行った。なお、2017年はデータが少なかったため、2016年までの過去11年間のデータについて平均濃度変動曲線を求め、それを2017年に外挿した。

図16は、CO<sub>2</sub>観測データを12個の緯度帯別にプロットし、その時間変動の解析結果を実線で示してある。

2009年4月から2011年4月までの期間はフラスコ観測が中断したことから、CMEで得られたデータからCO<sub>2</sub>濃度の緯度帯平均値を求めて時系列解析に使用した。2011年5月以降はASE（□印）とともにCME（黒点）のデータも増えた。両方法で得られたデータを比較した結果、両者の濃度変動は良く一致していることが確認された。また、2015年11月以降に実施されたMSE（△印）のデータについて解析された濃度変動曲線に特段の異常はなく、MSEによる観測に大きな問題がないことが確認できた。

図16に示す通り、継続的なCO<sub>2</sub>濃度の上昇傾向と季節変動パターンの緯度に伴う変化を、過去12年の観測によって明瞭に捉えることができた。この間、ASE及びCMEとMSEの3つの異なる方法でデータが取得されたが、どの緯度帯でも濃度変動曲線にギャップはなく、長期的な濃度上昇傾向もスムーズに繋がっており、観測データの連続性が保たれているものと判断された。この観測期間におけるCO<sub>2</sub>の平均的な長期トレンドは直線よりも二次曲線によるフィッティングの方がより観測データを再現できることが認められた。従って、過去12年間のCO<sub>2</sub>濃度の上昇は平均すると徐々に加速していることを示した。この増加トレンドの加速には、最近発生した2015-2016年のエルニーニョ期間におけるCO<sub>2</sub>増加速度の増大が関与しているものと推定される。一方で、全球の人為源排出量の伸びは2010年代に入ってから鈍化する傾向にあることが報告されている。今後のCO<sub>2</sub>の増加動向についてはさらに観測を継続してデータを蓄積し、その原因を解析していく

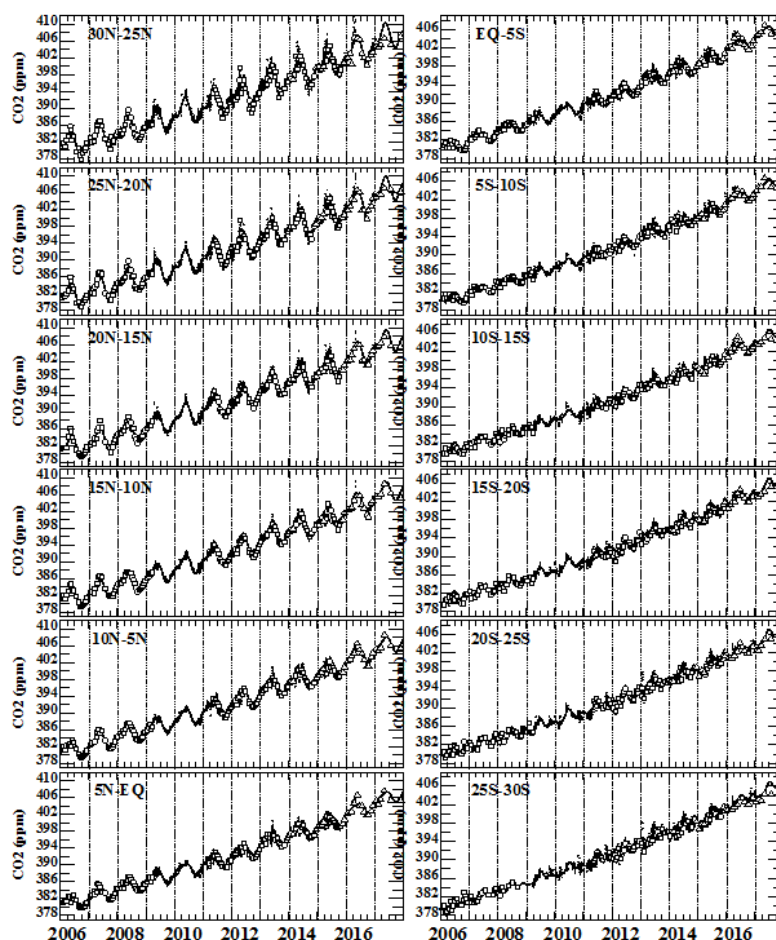


図16. 北緯30度から南緯30度間の12の緯度帯別のCO<sub>2</sub>濃度の時間変動

必要がある。

過去10年以上の観測で得られた平均的なCO<sub>2</sub>の季節変動パターンは緯度帯によって明瞭な違いがあることが認められた。北半球で季節振幅が大きく、南半球に向けて振幅が減衰することが示された。季節変動の位相も振幅の減衰に伴って北半球から赤道に向けて徐々に遅れ、南半球では2峰性を持つ北半球とは異なるパターンに変化することが分かった。また、季節変動の長期変化として、北半球の北緯30度から北緯20度の緯度帯で季節振幅が徐々に増大しつつある傾向も見られている。なお、2017年の観測データ数は少ないが、過去11年間の平均的な濃度変動を外挿した曲線と良い一致を示したことから、これまでと同様に高い精度で観測が行われていたことが確認できた。

図17は、CH<sub>4</sub>観測データを12個の緯度帯別にプロットし、その時間変動の解析結果を実線で示してある。2006-2009年にかけて、CH<sub>4</sub>の長期的な濃度上昇が観測によって捉えられたが、その後の2年間は観測データが欠損となった。2011年5月から再開された観測では、2年前のデータより明らかに高いCH<sub>4</sub>の濃度

レベルを示し、長期的な濃度増加が継続していたことが強く示唆された。2000年代前半には全球的なCH<sub>4</sub>の濃度増加が停止した時期があったが、2006年以降は増加傾向に転じて、この増加は昨年の2017年まで継続していることが認められた。過去12年間の平均的な濃度増加速度は約6-7 ppb/年で、どの緯度帯でも同様な上昇傾向が認められた。

CH<sub>4</sub>の季節変動は約30-40 ppb程度の小さい振幅で、より短い周期の変動が比較的大きく、数年の短い観測期間では季節パターンを正確に求めることは困難であった。現在では、過去12年間の観測で多数のデータが蓄積されたことより、平均的な季節変動とその緯度別の違いをほぼ把握することが可能となった。興味深い特徴として、北緯30度から

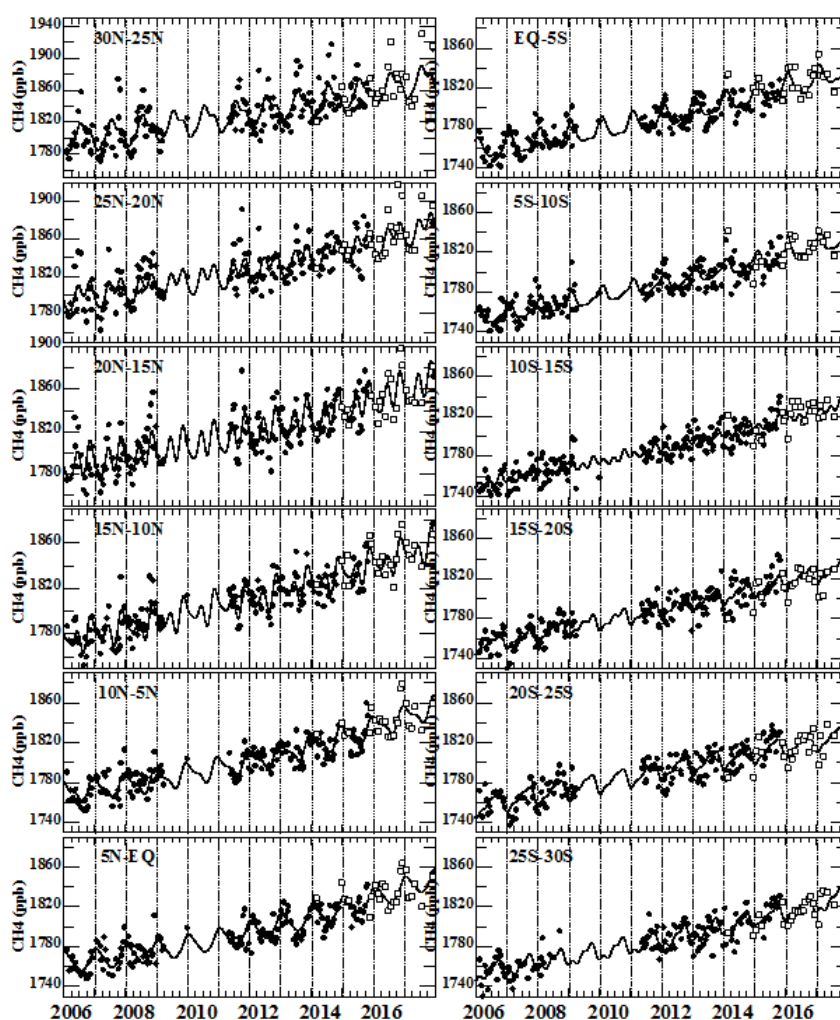


図17. 北緯30度から南緯30度の中の12の緯度帯別のCH<sub>4</sub>濃度の時間変動

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CH<sub>4</sub>が頻繁に上空で観測される現象が見出されてきた。この時期のCH<sub>4</sub>は地上のバックグランド大気の濃度を上回る高濃度となることも多い。採取された上空大気サンプルのCH<sub>4</sub>同位体を測定した結果から、高濃度CH<sub>4</sub>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<sup>5)</sup>。これまでと同様な夏季の濃度上昇現象は2017年の7月の観測でも捉えられている。2017年の観測データ数は少ないが、過去11年間の平均的な濃度変動を外挿した曲線とほぼ一致していたことから、CO<sub>2</sub>と同様に観測データに問題がないことが検証できた。南半球の南緯15度以南では毎年10月頃に濃度が上昇する季節変動パターンが典型的にみられ、熱帯地域の森林火災放出の年々の変動に強く影響を受けていると考えられる。特に、2015年の強いエルニーニョが発生した期間にはインドネシアの森林火災が活発となり、平年より高い濃度CH<sub>4</sub>が観測された。このように豪州路線の上空のCH<sub>4</sub>データはアジアの放出源の変動を強く反映しており、不確実性の大きいCH<sub>4</sub>の全球収支解析に、CONTRAIL観測データが有効に活用されることが大いに期待される。

図18は、N<sub>2</sub>O観測データを12個の緯度帯別にプロットし、その濃度変動の解析結果を実線で示してある。N<sub>2</sub>Oの場合には、対流圏と成層圏との濃度差が顕著であるため、ここでは明らかに成層圏の空気塊として識別される低濃度の観測値を除き、対流圏のデータのみを選別して時系列解析に使用した。成層圏空気塊として選別されたデータは全データの約4%弱で、大部分が30度以北か30度以南で得られたデータであった。

2006-2009年にかけて、N<sub>2</sub>Oの長期的な濃度上昇が観測されたが、その後の2年間はデータが欠損した。しかし、2011年5月以降に再開された観測で

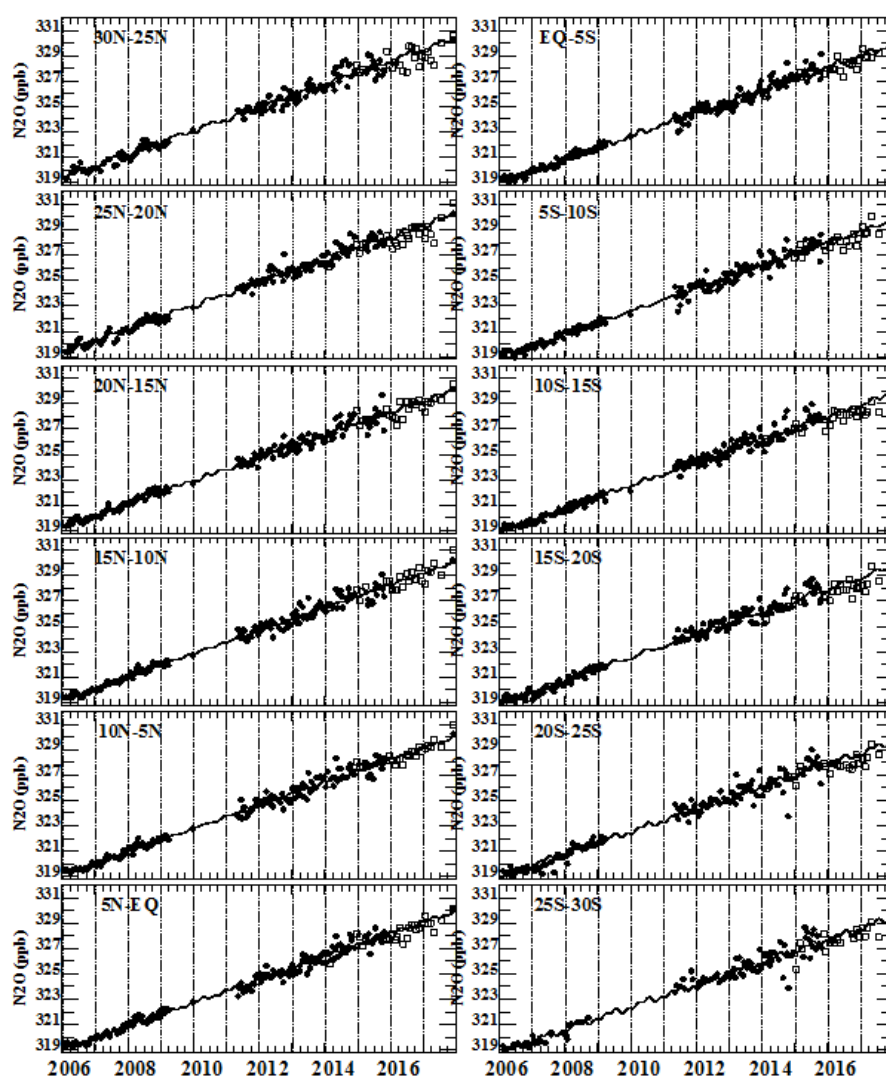


図 18. 北緯 30 度から南緯 30 度の間の 12 の緯度帯別の N<sub>2</sub>O 濃度の時間変動

は、明らかに長期的な濃度上昇が過去12年間に亘って継続していたこと示した。この期間の $N_2O$ 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0.9 ppb/年と算定された。この増加速度は地上の観測とほぼ一致していた。上空の $N_2O$ 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。

$N_2O$ のデータの分散を見ると、2011年5月以降のデータは2009年3月以前に比べると変動が明らかに大きく、最近の分析精度が低下したことが原因と考えられる。2017年も分析精度の低下により、観測データの変動が自然変動よりも大きかったと考えられる。今後、より精度の高いレーザー分光法による $N_2O$ 測定に切り替えることが検討されている。

図19は、 $SF_6$ 観測データを12個の緯度帯別にプロットし、その濃度変動の解析結果を実線で示してある。図に示す通り、2009-2011年の間の2年間は観測データが得られなかったが、データの推移を見ると、過去10年間に亘って長期的な濃度増加が継続していたことが示された。

この期間の $SF_6$ 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0.30 ppt/年と算定された。この値は、米国海洋大気庁が地上で展開している観測網で得た全球平均増加速度とほぼ一致していた。正確な $SF_6$ 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 $SF_6$ 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く、微小な南北勾配も捉えられていることが示唆された。

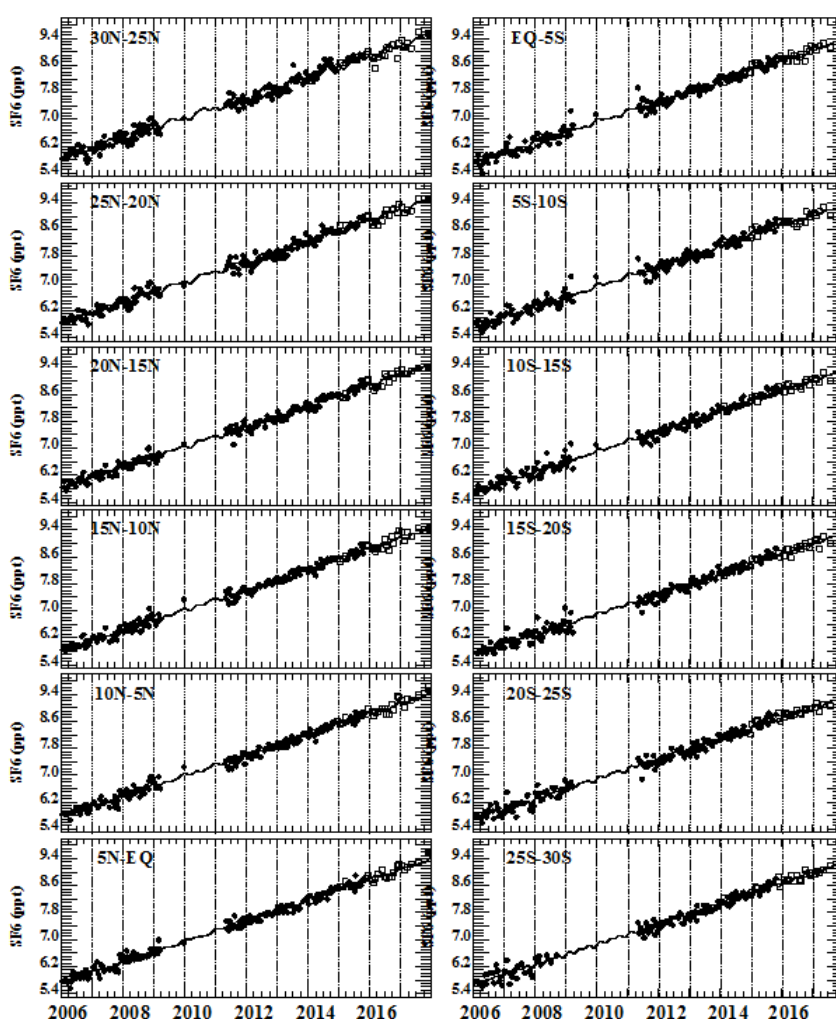


図 19. 北緯 30 度から南緯 30 度の間の 12 の緯度帯別の  $SF_6$  濃度の時間変動

### ③オーストラリア路線におけるCO濃度の長期観測結果

日本と豪州を結ぶ路線のフラスコサンプリング観測は1993年4月から実施されてきた。この路線の観測は2005年12月からCONTRAILプロジェクトに引き継がれ、2017年末まで定期的な観測が継続された。図20は、1993年4月から2016年12月までの期間にオセアニア線で観測された高度約10 kmのCO濃度の時間変動の結果を示す。2009年4月以降はJALのボーイング747型機が退役となり、ASEを利用した観測が中断したが、2011年5月以降はJALのボーイング777型機のASE観測と手動によるサンプリング方法（MSE）に切り替えて観測が継続された。COの観測データは北緯30度から南緯30度まで5度間隔で12個の緯度帯に分けて、濃度データにカーブフィッティングを行うことにより、平滑化した濃度変動や長期変化（トレンド）の解析を行った。

北半球の平均的なCO濃度は南半球に比べて高く、不規則な濃度上昇ピークが頻繁に観測された。これは北半球の人間活動に伴うCO放出の影響を強く受けている結果と考えられる。これに対して、南半球では北半球とは全く異なる濃度変動を示した。南半球の興味深い現象として、毎年10月頃に顕著なCO濃度の上昇が起こる明瞭な季節変動が捉えられた。特に、1997年の10月頃には異常なCO濃度の上昇ピークが観測された。1994年や2015年もCOの濃度上昇ピークが比較的大きかった年であったが、1998-2000年の期間は濃度上昇が小さかった。このようにCOの上昇ピークの特徴として、年々の変動が大きいことが長期の観測から分かった。

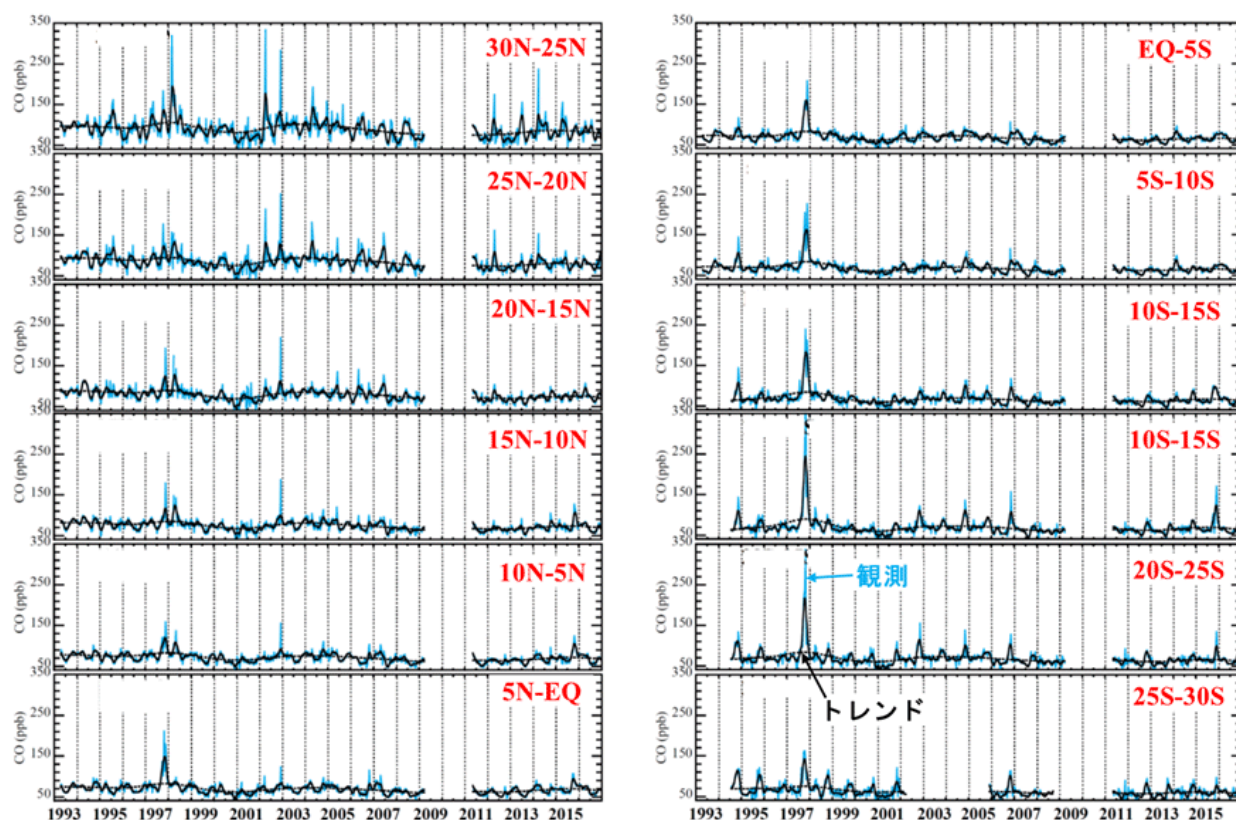


図20. オーストラリア路線における高度約10 kmのCO濃度の時間変動。水色が観測データ、黒の実線が平滑化した濃度変動曲線、黒の点線がトレンドを示す。

北半球の平均的なCO濃度は南半球に比べて高く、不規則な濃度上昇ピークが頻繁に観測された。これは北半球の人間活動に伴うCO放出の影響を強く受けている結果と考えられる。これに対して、南半球では北半球とは全く異なる濃度変動を示した。南半球の興味深い現象として、毎年10月頃に顕著なCO濃度の上昇が起こる明瞭な季節変動が捉えられた。特に、1997年の10月頃には異常なCO濃度の上昇ピークが観測された。1994年や2015年もCOの濃度上昇ピークが比較的大増大した年であったが、1998-2000年の期間は濃度上昇が小さかった。このようにCOの上昇ピークの特徴として、年々の変動が大きいことが長期の観測から分かった。

COの季節的な濃度上昇ピークは南緯10度から南緯25度の緯度帯で顕著に出現していたことから、この緯度帯の平均値を算出してトレンドを差し引いたCO濃度( $\Delta$ CO)を求めた(図21上段)。 $\Delta$ COは毎年10月前後にプラスの値を示し、それらの値はCO上昇ピークの年々変動を反映していた。この季節はインドネシアを中心とした熱帯アジア域で森林火災が発生する時期に相当していたことから、森林火災データベース(GFED)によるCO排出量と比較した(図21中段)。その結果、上空の $\Delta$ COの年々変動のパターンと森林火災のCO排出量に良い対応関係が認められ、主にインドネシアで発生する森林火災が上空のCO上昇をもたらす原因であることが分かった。3次元の大気輸送モデルによる実験でもインドネシアの森林火災から排出されたCOが上空の観測地点に輸送されていることが検証された。

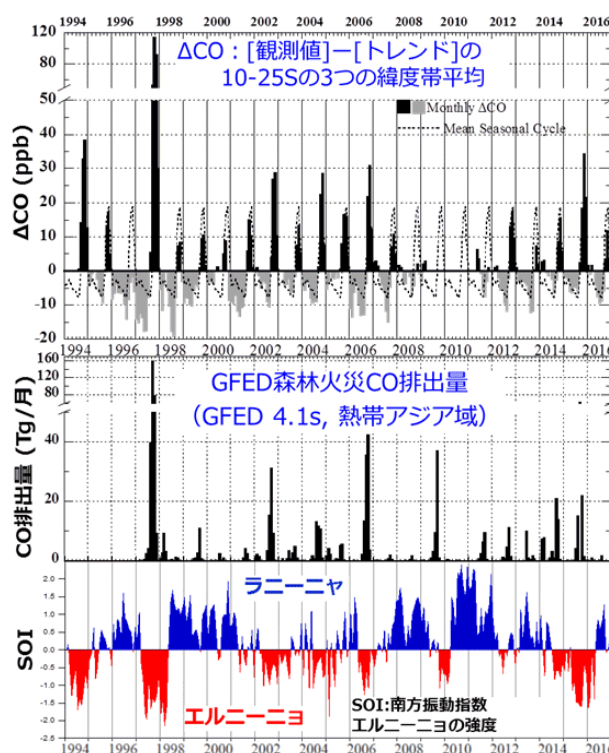


図21. 1994-2016年の期間の $\Delta$ CO（上段）、森林火災CO排出量（中段）、南方振動指数（下段）の時間変動。

$\Delta$ COの年々変動は南方振動指数(SOI)で記述されるエルニーニョ現象と良い対応を示した(図21下段)。これは熱帯の気候変動がインドネシアの森林火災の発生に強い影響を及ぼしているためである。大規模なエルニーニョが発生した1997年はインドネシアで激しい旱魃となり、焼畑など



から発生した森林火災が異常に拡大した。反対に、ラニーニャの年は雨量が多く、火災の延焼が抑えられた。

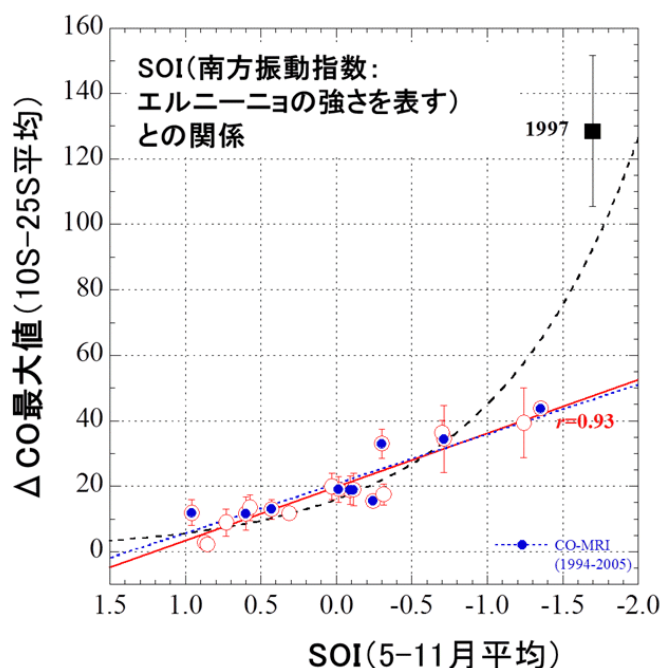


図22. 毎年の $\Delta\text{CO}$ の最大値と5月-11月のSOIの平均値との関係。

図22は上空の $\Delta\text{CO}$ の最大値とSOIの関係である。両者は強い相関関係を示し、エルニーニョ現象が強くなると上空の $\Delta\text{CO}$ 濃度も比例して増大する。ところが、1997年の異常な $\text{CO}$ 濃度の上昇は、他の年の関係性とは大きく外れていた。様々な気候変動指数(MEI, DMI, TSA, SAM)を考慮した気候要素重回帰モデルで解析した結果、1997年の異常は気候の要因だけでは説明できないことが強く示唆された。この結果から、自然の気候変動に加えて、焼き畑などの人為的要因による相乗効果によって1997年は例外的な現象が起こったものと推定された。

#### ④シンガポール上空における温室効果ガス

2018年以降はサンプリング観測をアジア域に移行した。図22はアジア域の中で最も飛行回数の多かったシンガポール路線で得られた $\text{CO}_2$ 濃度、 $\text{CH}_4$ 濃度、 $\text{CO}$ 濃度、 $\text{N}_2\text{O}$ 濃度、 $\text{SF}_6$ 濃度の時系列を示す。シンガポール路線では復路便においてシンガポール空港からの航空機の上昇中にサンプリングを実施している。離陸直後はサンプリングが困難なことから、高度2 km以下ではデータは得られていない。シンガポール上空の $\text{CO}_2$ 濃度には明瞭な季節変動と経年増加が認められるが、高度による濃度差は非常に小さく、大気が鉛直方向に混合されていることが分かる。2020年12月は低高度において高い濃度が観測されているが、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{SF}_6$ の各濃度も高いことから、人間活動の影響を受けている空気塊であることが分かる。シンガポール上空においてこのような明らかな人為汚染の観測は初めてである。 $\text{CH}_4$ 濃度については振幅は小さいが明瞭な季節変化が観測され、わずかであるが経年増加も見られる。SIN上空の $\text{CH}_4$ 濃度の季節変動パターンは $\text{CO}_2$ 濃度と違っているが、これは南北勾配が大きいことに伴ってITCZの位置に影響されやすいためであると考

えられる。CO濃度はわずかながら上空で低くなる濃度勾配が確認される。これはCOがCH<sub>4</sub>に比べて反応性に富んでいることが原因であると考えられる。また、2019年9月に広い高度範囲にわたってCO濃度のみの高いイベントが観測されていることから、バイオマス燃焼の影響があったことが示唆される。N<sub>2</sub>O濃度とSF<sub>6</sub>濃度は季節変動も鉛直勾配も小さく、有意な経年増加が観測されている。シンガポール周辺はエルニーニョに伴う森林火災の影響を受けやすい地域であり、2015年のような大規模な火災が発生した際にはASEのような他成分観測が燃焼係数などのプロセスデータの取得に大きく貢献すると期待できる。

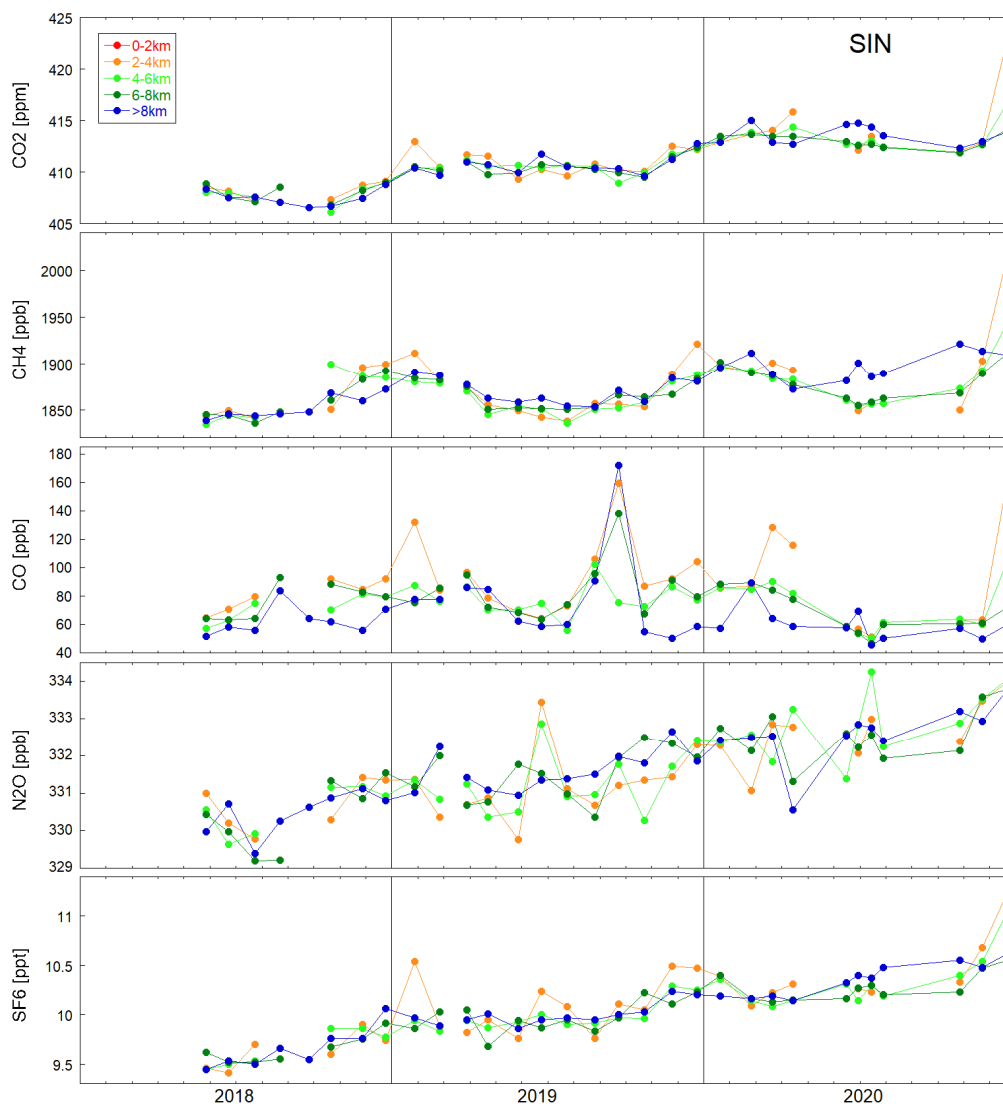


図23. シンガポール上空の高度2-4 km、4-6 km、6-8 km、8 km以上の各高度層におけるCO<sub>2</sub>濃度、CH<sub>4</sub>濃度、CO濃度、N<sub>2</sub>O濃度、SF<sub>6</sub>濃度の時系列

### (3) 観測結果ならびに解析結果の発信

#### ①CMEデータの提供

CMEデータからCO<sub>2</sub>濃度算出したデータ形式から公開データのフォーマットとしているテキスト形式への変換については、全てのデータに対して自動で変換を行えるようにpythonスクリプトを作成した。これにより、CMEデータの処理が終了後、速やかにデータ公開用のファイルを作成し、提供することが可能となった。最新の2020年末までのデータについては2021年5月の公開を予定しており、本課題開始時に掲げた6ヶ月以内でのデータ公開の目標を達成できる見込みである。公開データでは、CO<sub>2</sub>濃度算出時は機体毎に分かれて格納されているデータを全てマージさせ、また、時間順にソートすることで、解析の利便性を向上させた。公開されているCMEデータの例を図24に示す。図で分かる通り、一つ一つのデータに、時間、CO<sub>2</sub>濃度、緯度経度、気圧、気圧高度の他、どこの空港付近か（巡航中であれば発着の2空港を併記）、上昇・巡航・下降の別、さらにフライトレグIDを付記している。これにより、grepなどのlinuxコマンドを用いれば、特定の空港やフライトのデータを容易に抽出できるようになっている。

```

!          161          2.0
! (Number of header lines, Format version)
!-----
!--- File name
!   contrail_cme_co2_2020_v2020.1.0.txt
!--- Data Version
!   Ver. 2020.1.0
!--- History
!   2021-03-24: data first created
!   2021-03-24: file produced (this file)
!--- Project Name
!   CONTRAIL (Comprehensive Observation Network for Trace gases by Airliner)
!--- Principal investigators (PIs, the "Author" of this data set)
!   Machida, Toshinobu (1); Matsueda, Hidekazu(2); Niwa, Yosuke(1)
!   (1) National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki,
!       305-8506 Japan
!   (2) Meteorological Research Institute, 1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki, 305-0052 Japan
!-----
!
!          <中略>
!-----
!--- Data begins -----
! # ID      yr mo dy hr mn sc   CO2   wsp   wdir   sat   lat   lon   pres   alt   airport   fsect   flight
! 1 2020.0000269 2020 01 01 00 14 10 421.16 13.1 -103.0 270.90 35.474 139.910 829.3 1657 HND a JA705J-19_155_JND-TSA
! 2 2020.0000272 2020 01 01 00 14 21 422.15 12.7 -97.4 270.65 35.464 139.900 814.4 1804 HND a JA705J-19_155_JND-TSA
! 3 2020.0000275 2020 01 01 00 14 30 421.24 12.2 -91.9 270.40 35.455 139.900 800.2 1946 HND a JA705J-19_155_JND-TSA
! 4 2020.0000279 2020 01 01 00 14 41 420.57 11.8 -86.3 270.14 35.445 139.890 785.8 2092 HND a JA705J-19_155_JND-TSA
! 5 2020.0000281 2020 01 01 00 14 50 418.14 12.4 -88.1 269.02 35.439 139.880 770.8 2247 HND a JA705J-19_155_JND-TSA

```

図24. DOIを付与した公開CMEデータの例

このテキストデータは国立環境研究所の地球環境データベースにおいてDOIを付与して公開したのち、同様のものを、気象庁が運用している温室効果ガス世界資料センター（WDCGG）とアメリカ海洋大気庁地球システム研究所（NOAA/ESRL）に速やかに提供している。WDCGGは世界気象機関（WMO）の全球大気監視（Global Atmosphere Watch）計画における活動であり、WDCGGに格納されたデータは、毎年発行される温室効果ガス年報<sup>13)</sup>での解析などに利用されている。なお、WDCGG公開後、現在（2021年4月8日時点）に至るまでに219回ダウンロードされたことを確認した。一方、NOAA/ESRLへ提供したデータは、他の機関のデータと共にGLOBALVIEW+と呼ばれるデータセットに格納されている。GLOBALVIEW+は前身のGLOBALVIEWから温室効果ガス研究分野において広く利用されているデータセットであり、近年はObsPackと呼ばれる新たなパッケージの一部として配布され、大気輸送モデルを用いた逆解析研究などで利用が進んでいる。特に、フューチ

ャー・アースのリサーチ・プロジェクトの一つ、Global Carbon Projectが毎年発表している「Global Carbon Budget」<sup>13)</sup>では、逆解析結果の評価指標としてObsPackに格納されている航空機観測データが用いられているが、CONTRAIL-CMEのデータは格納されている航空機観測データのおよそ40 %を占めている<sup>14)</sup>。

## ②データベースの運用とデータ利用の把握

本課題の観測により得たデータを幅広いユーザーに提供し、利活用を促進するため、データ形式およびメタデータを整備し、DOI<sup>注1</sup>を付与して、地球環境データベース<sup>注2</sup>から公開している。CMEデータは、2018年2月、ASEデータは2019年8月より公開を開始した。このDOIは、研究データにDOI登録を行う国際的なコンソーシアムであるDataCiteに登録され、DataCiteの検索画面からも検索できる。公開データは一年に一度のペースで更新しており、新しいデータを追加するとともに、データの見直しを行い、必要に応じて修正し、バージョンを更新している。下記に示す通り、2020年7月にもCMEデータ、ASE/MSEデータのバージョン更新を行った。

以下に、これまでに公開・更新したデータセットおよび、そのDOIを示す<sup>注3</sup>。

- CONTRAIL-CMEによる大気CO<sub>2</sub>濃度データ

DOI: 10.17595/20180208.001 (2018-02-08公開、2019-03-05、2020-07-03更新)

- CONTRAILフラスコサンプリングによる太平洋上空の大気微量気体データ

DOI: 10.17595/20190828.001 (2019-08-28公開)

- CONTRAILフラスコサンプリングによるユーラシア大陸上空の大気微量気体データ

DOI: 10.17595/20190828.002 (2019-08-28公開、2020-07-03更新)

公開データへの外部ユーザーからのアクセス件数を把握するため、2019年6月よりアクセス集計を開始し、公開ファイルごとに月毎のダウンロード数を集計している<sup>注4</sup>。図25にCMEおよびASEとして提供しているデータセットのアクセス数推移を示す。CME、ASE両データセットとも、公開以来コンスタントに利用されてきたが、近年、アクセス数の伸びが著しく、特にデータ更新直後の2020年7月におけるCMEデータのアクセス数増加が目立つほか、2021年以降も高いアクセス数が続いている。図26には、アクセス元とそれぞれの地域からのアクセス数を地図上に示した。世界各国のユーザーから利用されていることが分かるが、2020年度は、特に北米からのアクセス数の増加が目立ち、累計では日本からのアクセスに迫る勢いとなってきた。海外からのアクセスが増えていることは、国際的にもCONTRAILデータの認知度が高まり、利活用がより活発になってきていると解釈できる。

注1：DOI (Digital Object Identifier)：デジタルオブジェクトに付与される国際的な識別子。ブラウザ等に入力するとコンテンツの所在情報 (URL) に変換される。

注2：GED (Global Environmental Database) <http://db.cger.nies.go.jp>

注3：バージョンアップによりDOIは変わらない。バージョン情報は、ランディングページ上の更新履歴の記述により管理される。

注4：CMEデータ公開を始めた2018年2月から遡りで計算した。同じアクセス元から同じファイルが24時間以

内に複数回ダウンロードされた場合は、重複カウントを排除するため、まとめて1つと数えている。

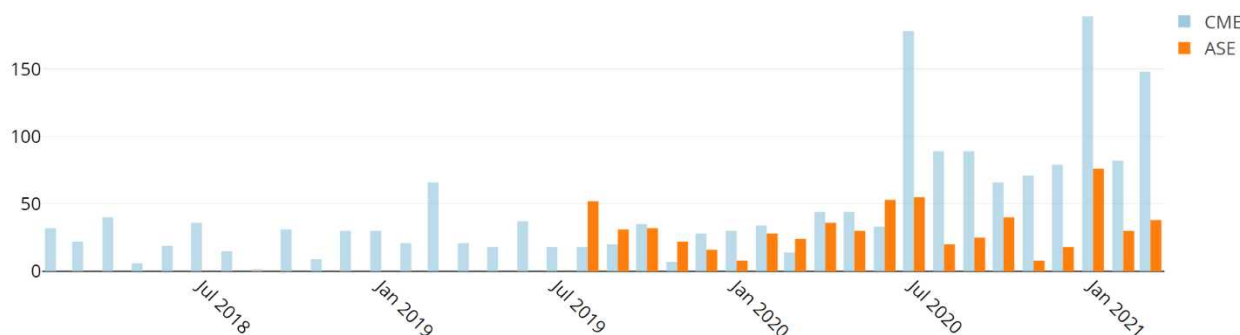


図25. CONTRAILデータセットの月別ダウンロード件数（CME:青、ASE:オレンジ）



図26. CONTRAILデータセットのアクセス元マップ（数字は累計ダウンロード数）

### ③輸送モデルを用いた3次元のグリッド化した高次データの提供

本研究では、大気輸送モデルNICAM-TM<sup>7)</sup>とCONTRAIL-CMEのCO<sub>2</sub>濃度データを用いて、3次元グリッド化した高次データを作成した。CONTRAIL-CMEで得られた観測データの情報は、まず、NICAM-TMを用いた逆解析によりフラックスデータに反映され、そのフラックスデータを再度、NICAM-TMに入力し大気輸送計算を行うことで大気中の3次元の濃度変動を計算する。逆解析により、この計算される大気CO<sub>2</sub>濃度は、少なくともCONTRAIL-CMEのデータが得られている地域においては、観測データと整合的な季節変動を持っていることが期待される。

大気輸送モデルNICAM-TMの計算では、CO<sub>2</sub>のフラックスデータとして、化石燃料起源はCDIAC、大気-海洋間フラックスは気象庁が公開しているpCO<sub>2</sub>観測に基づくマッピングデータ、森林火災起源はGFEDv4.1sを使用した。また、陸域植生起源については、陸域植生モデルCASAの月平均フラックスデータを気象庁再解析データJRA-55<sup>15)</sup>を用いて3時間値にダウンスケーリングしたものを用いた。逆解析の手法として直接行列法を採用し、2006-2008年の間のCONTRAIL-CMEと地上観

測データを用いた<sup>12)</sup>。一方、大気CO<sub>2</sub>濃度のシミュレーションでは、陸上生態系以外の要素（海洋起源、化石燃料起源、森林火災起源）はそれぞれの最新のデータベースから得られるものに差し替え、できるだけ現実の濃度増加速度を再現できるようにした。さらに、本研究では新たな逆解析システム<sup>8)11)</sup>も用いてグリッドデータを作成した。このシステムは4次元変分法を用いており、観測データ数およびフラックス推定のパラメータ数に制限がないため、観測データの情報をより多く抽出することが可能となっている。ここでは、2015年の1年間に対して逆解析を実施した。

上記の逆解析や大気輸送シミュレーションにおいて、NICAM-TMの計算では全てJRA-55の水平風速データを使ってナッジングを行い、現実の大気循環を再現した。また、NICAM-TMの水平解像度は格子間隔約112 kmまたは223 kmのものを用い、鉛直層数は40層とした。

逆解析によって得られた大気CO<sub>2</sub>濃度の3次元グリッドデータは、CONTRAILデータや地上観測データと整合的なものとなっている一方、それぞれの観測ではカバーされていない地域・高度の濃度もモデルで補間されているため、利便性の高い均一なデータとなっている。この3次元グリッドデータは国内の様々な関連グループに提供されており、領域シミュレーションの境界条件、GOSAT/GOSAT-2の熱赤外センサーのリトリバル値との比較、また、GOSAT-2の短波長赤外センサーのリトリバル初期値などに利用されている。図27はGOSAT-2の短波長赤外センサーのリトリバル初期値のために計算された大気CO<sub>2</sub>濃度の例を示す。このように、季節振幅・季節位相などが観測と整合的であり、最近の期間においても高い信頼度で大気CO<sub>2</sub>濃度の推定値が提供できていることが分かる。なお、GOSAT-2プロジェクトのためのNICAM-TMの計算は、国立環境研究所のデータ処理運用システムG2DPSと連動して定常的に行われている。一方、上部対流圏などに感度を持つ熱赤外センサーのリトリバルに関しては、CONTRAIL-CME自身、貴重な比較対象データとなっているが、そのCONTRAILデータを取り込んだ3次元グリッドデータを用いることで、衛星リトリバル特有のaveraging kernelを考慮することが容易となり、より定量的な評価が可能となった<sup>16)</sup>。

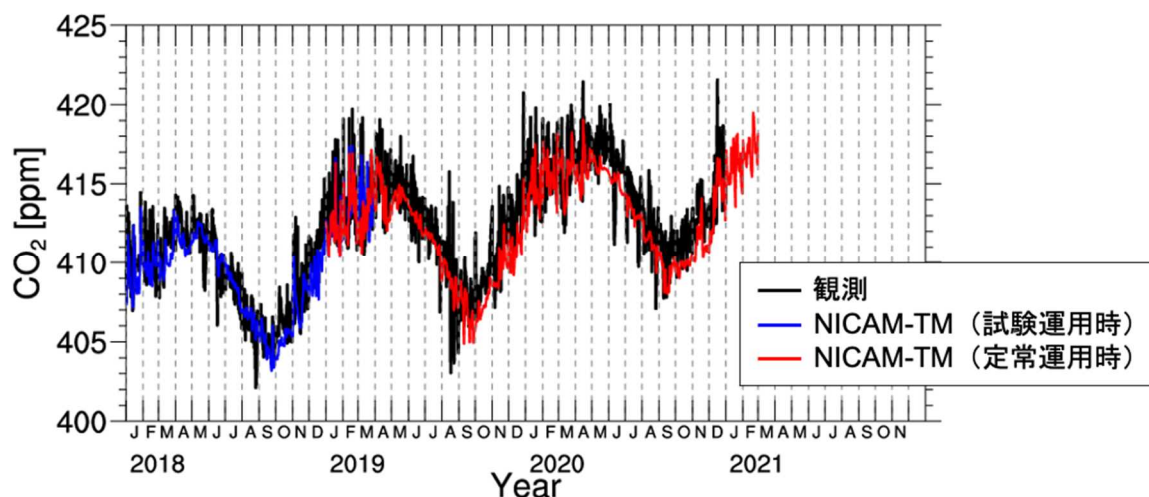


図27. 気象庁南鳥島気象観測所における大気CO<sub>2</sub>濃度の観測値（黒線）とG2DPS用に行われたNICAM-TMによるシミュレーションの結果（青・赤線）

図28に4次元変分法による逆解析で作成した3次元グリッドデータの一例として高度300 hPa

面におけるCO<sub>2</sub>濃度の季節変動を示す。この4次元変分法による逆解析では、観測データ数の制限がないため、CONTRAIL-CMEのデータは全てそのまま逆解析に取り込んでいる。実際に、CONTRAIL-CMEの観測に対する大気CO<sub>2</sub>濃度のモデル再現性を調べたところ、Niwa et al. (2012)<sup>10</sup>と同様の月平均データを取り込んだ場合よりも向上しており、観測データ数の増加によるインパクトが認められた。さらに、4次元変分法の計算、モデルシミュレーションの効率化により、定常的に長期の期間に対して逆解析を行う体制が整った。

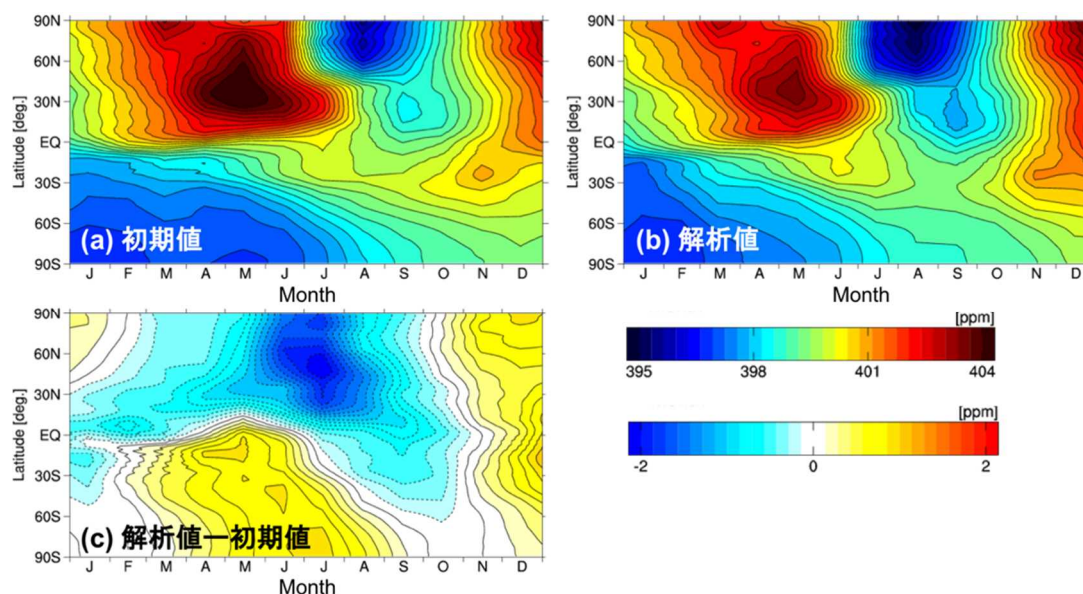


図28. 大気輸送モデルNICAM-TMで計算された300hPa面におけるCO<sub>2</sub>濃度の時間—緯度断面。2015年1月から12月まで。濃度の値は各緯度帯における帯状平均・月平均値を表す。フラックス初期推定値(a)と逆解析で得たフラックス解析値(b)から計算した結果、また、その差(c)を示す。

## 5. 成果

5年間にわたる本課題の実施によって以下の成果が得られた。

- ・2016-2020年までの5年間でのCME観測は6000以上のフライト数に達し、得られたCO<sub>2</sub>濃度の有効データ数は400万近くにまで上った。この観測により世界各地の空港上空におけるCO<sub>2</sub>濃度の鉛直分布データを高精度かつ高密度で長期にわたり蓄積することができた。2020年は新型コロナウイルスの影響を受けてJALの国際便運航が大幅に減少した中で、わずかに運航を続けた国際旅客便やチャーター便、貨物便などを選んでCME搭載を続けた結果、他の年と遜色ない数の観測を維持することができた。
- ・長期間に渡るCMEデータの蓄積によってアジア地域におけるCO<sub>2</sub>濃度の3次元変動を明らかにした。アジア域は7月のシベリアを起源とする低濃度の他、8月の南アジア・東南アジアの低濃度が特徴的であり、アジアモンスーン高気圧の内部の蓄積の後に9月には太平洋上に輸送されるメカニズムを明確に捉えることに成功した。
- ・インド・デリー上空におけるCO<sub>2</sub>濃度の変動を解析した結果、インド上空の低高度では1月-3月に小麦等の冬期の主要作物の生育に伴う低濃度が観測されており、農業活動が広域の炭素循環に有意な影響を及ぼすことを明らかにした。さらに冬期作物による最盛期のCO<sub>2</sub>の吸収量が、

都市域からの CO<sub>2</sub> 放出量の 2 倍程度にも相当することを示すことができた。

- ・ 世界 36 空港の上空における鉛直分布から CO<sub>2</sub> 濃度の増分を調べた結果、CO<sub>2</sub> 増分の標準偏差が各都市からの人為起源 CO<sub>2</sub> 放出量と非常に良い相関であることが明らかになった。この結果は、近隣都市圏の CO<sub>2</sub> 排出の影響を旅客機による空港近傍の観測データによって検出できることを示すものである。
- ・ NICAM-TMをベースとした逆解析システムNISMON-CO<sub>2</sub>を利用してCME観測によるCO<sub>2</sub>濃度データを用いた逆解析を行った結果、2015年のインドネシア大規模森林火災に伴って放出されたCO<sub>2</sub>量はGFEDv4.1sおよびGFASv1.2の推定値より低い値であることを明らかにした。
- ・ ASEとMSEによるサンプリング観測は5年間の中で運航機材の変更、新型コロナによる減便の影響を受けて観測域の変更があったが、北米、欧州、東南アジア、東アジア、そして日本国内という多様な地域において、水平分布ばかりでなく鉛直分布の観測を実施することに成功した。
- ・ オーストラリア路線におけるCO濃度の長期観測データを解析した結果、上空のCO濃度増分の年々変動のパターンと森林火災のCO排出量に良い対応関係が認められた。これは熱帯の気候変動がインドネシアの森林火災の発生に強い影響を及ぼすことを示している。ただし、1997年の異常は気候の要因だけでは説明できず、焼き畑などの人為的要因が加わっていたことが強く示唆された。
- ・ 本課題の観測により得たデータを幅広いユーザーに提供し、利活用を促進するため、データ形式およびメタデータを整備し、DOIを付与して、CMEデータは2018年2月、ASEデータは2019年8月より地球環境データベースから公開した。データアクセスの統計を確認できるシステムも整備した結果、海外からのアクセスが増えていることがわかり、国際的にもCONTRAILデータの認知度が高まり、利活用がより活発になってきていると解釈できた。
- ・ 観測で得られたデータの提供システムの構築を進めた結果、CMEデータの処理終了後に速やかにデータ公開用のファイルを作成し、提供することが可能となった。これらのシステムにより最新の2020年末までのデータについては2021年5月の公開を予定しており、本課題開始時に掲げた6ヶ月以内でのデータ公開の目標を達成することができた。
- ・ 大気輸送モデルNICAM-TM とCMEのCO<sub>2</sub>濃度データを用いて、3次元グリッド化した高次データを作成し、提供を開始した。3次元グリッドデータは観測ではカバーされていない地域・高度の濃度もモデルで補間されているため、利便性の高い均一なデータとなっている。

## 6. 引用文献

- 1) Graven, H.D. et al. (2013), Enhanced Seasonal Exchange of CO<sub>2</sub> by Northern Ecosystems Since 1960, *Science*, 341, 1085-1089, doi:10.1126/science.1239207.
- 2) Machida, T., et al. (2008), Worldwide measurements of atmospheric CO<sub>2</sub> and other trace gas species using commercial airlines. *J. Atmos. Oceanic. Technol.* 25 (10), 1744-1754, DOI: 10.1175/2008JTECHA1082.1.
- 3) Matsueda, H., et al. (2008), Evaluation of atmospheric CO<sub>2</sub> measurements from new air sampling of JAL airliner observations. *Pap. Meteorol. Geophys.*, 59, 1-17.
- 4) Tomita, H. and M. Satoh (2004), A new dynamical framework of nonhydrostatic global



- model using the icosahedral grid, *Fluid Dyn. Res.*, 34, 357–400, doi:10.1016/j.fluidyn.2004.03.003.
- 5) Satoh, M. et al. (2008), Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) for global cloud resolving simulations, *J. Comput. Phys.*, 227, 3486–3514, doi:10.1016/j.jcp.2007.02.006.
  - 6) Satoh, M. et al. (2014), The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Description and Development, *Progress in Earth and Planetary Science*, 1, 18. doi:10.1186/s40645-014-0018-1.
  - 7) Niwa, Y. et al. (2011a), A three-dimensional icosahedral grid advection scheme preserving monotonicity and consistency with continuity for atmospheric tracer transport, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 89, 255–268, doi:10.2151/jmsj.2011-306.
  - 8) Niwa, Y. et al. (2017a), A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0) – Part 1: Offline forward and adjoint transport models, *Geosci. Model Dev.*, 10, 1157–1174.
  - 9) Niwa, Y., et al. (2011b), Three-dimensional variations of atmospheric CO<sub>2</sub>: Aircraft measurements and multi-transport model simulations, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 13, 359–375, doi:10.5194/acp-11-13359-2011a.
  - 10) Niwa, Y. et al. (2012), Imposing strong constraints on tropical terrestrial CO<sub>2</sub> fluxes using passenger aircraft based measurements, *J. Geophys. Res.* 117, D11303, doi:10.1029/2012JD017474.
  - 11) Niwa, Y. et al. (2017b) A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0) - Part 2: Optimization scheme and identical twin experiment of atmospheric CO<sub>2</sub> inversion, *Geosci. Model Dev.*, 10, 2201–2219, doi:10.5194/gmd-10-2201-2017.
  - 12) World Meteorological Organization (WMO) (2018). WMO Greenhouse Gas Bulletin.
  - 13) Friedlingstein, P. et al. (2020) Global Carbon Budget 2020, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 3269–3340, <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>.
  - 14) Chevallier, F. et al. (2019) Objective evaluation of surface- and satellite-driven carbon dioxide atmospheric inversions, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 14233–14251, <https://doi.org/10.5194/acp-19-14233-2019>.
  - 15) Kobayashi, S. et al. (2015) The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics, *J. Meteor. Soc. Japan*, 93, 5–48, doi:10.2151/jmsj.2015-001.
  - 16) Saitoh, N. et al. (2017) Bias assessment of lower and middle tropospheric CO<sub>2</sub> concentrations of GOSAT/TANSO-FTS TIR version 1 product, *Atmos. Meas. Tech.*, 10, 3877–3892, doi:10.5194/amt-10-3877-2017.

**[研究成果の発表状況]** (課題開始年度—令和2年度)

(1) 誌上発表 (学術誌)

- Umezawa, T., Y. Niwa, Y. Sawa, T. Machida, and H. Matsueda (2016) Winter crop CO<sub>2</sub> uptake inferred from CONTRAIL measurements over Delhi, India, *Geophysical Research Letters*, 43, <https://doi.org/10.1002/2016GL070939>.
- Saitoh, N., S. Kimoto, R. Sugimura, R. Imasu, K. Shiomi, A. Kuze, Y. Niwa, T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda (2017) Bias assessment of lower and middle tropospheric CO<sub>2</sub> concentrations of GOSAT/TANSO-FTS TIR version 1 product, *Atmos. Meas. Tech.*, 10, 3877–3892, doi:10.5194/amt-10-3877-2017.
- Jiang, F., J. Chen, L. Zhou, W. Ju, H. Zhang, T. Machida, P. Giais, W. Peters, H. Wang, B. Chen, L. Liu, C. Zhang, H. Matsueda and Y. Sawa (2016), A comprehensive estimate of recent carbon sinks in China using both top-down and bottom-up approaches, *Scientific Reports* 6, Article number: 22130.
- Inoue, M., Morino, I., Uchino, O., Nakatsuru, T., Yoshida, Y., Yokota, T., Wunch, D., Wennberg, P. O., Roehl, C. M., Griffith, D. W. T., Velasco, V. A., Deutscher, N. M., Warneke, T., Notholt, J., Robinson, J., Sherlock, V., Hase, F., Blumenstock, T., Rettinger, M., Sussmann, R., Kyrö, E., Kivi, R., Shiomi, K., Kawakami, S., De Mazière, M., Arnold, S. G., Feist, D. G., Barrow, E. A., Barney, J., Dubey, M., Schneider, M., Iraci, L. T., Podolske, J. R., Hillyard, P. W., Machida, T., Sawa, Y., Tsuboi, K., Matsueda, H., Sweeney, C., Tans, P. P., Andrews, A. E., Biraud, S. C., Fukuyama, Y., Pittman, J. V., Kort, E. A., and Tanaka, T. (2016), Bias corrections of GOSAT SWIR X CO<sub>2</sub> and XCH<sub>4</sub> with TCCON data and their evaluation using aircraft measurement data, *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 3491–3512, doi:10.5194/amt-9-3491-2016.
- Pandey, S., Houweling, S., Krol, M., Aben, I., Chevallier, F., Dlugokencky, E. J., Gatti, L. V., Gloor, E., Miller, J. B., Detmers, R., Machida, T., and Röckmann, T. (2016), Inverse modeling of GOSAT-retrieved ratios of total column CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> for 2009 and 2010, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 5043–5062, doi:10.5194/acp-16-5043-2016.
- Niwa, Y., H. Tomita, M. Satoh, R. Imasu, Y. Sawa, K. Tsuboi, H. Matsueda, T. Machida, M. Sasakawa, B. Belan, N. Saigusa (2017) A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0) - Part 1: Offline forward and adjoint transport models, *Geosci. Model Dev.*, 10, 1157–1174, doi:10.5194/gmd-10-1157-2017.
- Diallo, M., Legras, B., Ray, E., Engel, A., and Añel, J. A. (2017), Global distribution of CO<sub>2</sub> in the upper troposphere and stratosphere, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 3861–3878, <https://doi.org/10.5194/acp-17-3861-2017>.
- Sugawara, S., Ishidoya, S., Aoki, S., Morimoto, S., Nakazawa, T., Toyoda, S., Inai, Y., Hasebe, F., Ikeda, C., Honda, H., Goto, D., and Putri, F. A., (2018), Age and gravitational separation of the stratospheric air over Indonesia, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 1819–1833, <https://doi.org/10.5194/acp-18-1819-2018>.
- Umezawa, T., H. Matsueda, Y. Sawa, Y. Niwa, T. Machida, and L. Zhou (2018) Seasonal

- evaluation of tropospheric CO<sub>2</sub> over the Asia-Pacific region observed by the CONTRAIL commercial airliner measurements, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 1-16, <https://doi.org/10.5194/acp-18-14851-2018>.
- Inai, Y., R. Fujita, T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa, K. Tsuboi, K. Katsumata, S. Morimoto, S. Aoki, and T. Nakazawa (2019), Seasonal characteristics of chemical and dynamical transport into the extratropical upper troposphere and lower stratosphere, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 7073-7103, doi:10.5194/acp-19-7073-2019.
- Matsueda, H., R. R. Buchholz, K. Ishijima, H. M. Worden, D. Hammerling, and T. Machida (2019) Interannual variation of upper tropospheric CO over the western Pacific linked with Indonesian fires, *SOLA*, 15, 205-210, doi:10.2151/sola.2019-037.
- Ouchi, M., Matsumi, Y., Nakayama, T., Shimizu, K., Sawada, T., Machida, T., Matsueda, H., Sawa, Y., Morino, I., Uchino, O., Tanaka, T., and Imasu, R. (2019), Development of a balloon-borne instrument for CO<sub>2</sub> vertical profile observations in the troposphere, *Atmos. Meas. Tech.*, 12, 5639-5653, <https://doi.org/10.5194/amt-12-5639-2019>
- Umezawa, T., H. Matsueda, T. Oda, K. Higuchi, Y. Sawa, T. Machida, Y. Niwa, and S. Maksyutov (2020) Statistical characterization of urban CO<sub>2</sub> emission signals observed by commercial airliner measurements, *Scientific Reports*, 10, 7963, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64769-9>.
- Lin, X., B. M. Rogers, C. Sweeney, F. Chevallier, M. Arshinov, E. Dlugokencky, T. Machida, M. Sasakawa, P. Tans, and G. Keppel-Aleksa (2020), Siberian and temperate ecosystems shape Northern Hemisphere atmospheric CO<sub>2</sub> seasonal amplification, *PNAS* September 1, 2020 117 (35) 21079-21087, doi.org/10.1073/pnas.1914135117.
- Friedlingstein P., et al., ..., Y. Niwa,... (2020) Global Carbon Budget 2020, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 3269-3340, <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
- Maksyutov, S., Oda, T., Saito, M., Janardanan, R., Belikov, D., Kaiser, J. W., Zhuravlev, R., Ganshin, A., Valsala, V. K., Andrews, A., Chmura, L., Dlugokencky, E., Haszpra, L., Langenfelds, R. L., Machida, T., Nakazawa, T., Ramonet, M., Sweeney, C., and Worthy, D. (2021), Technical note: A high-resolution inverse modelling technique for estimating surface CO<sub>2</sub> fluxes based on the NIES-TM-FLEXPART coupled transport model and its adjoint, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 1245-1266, doi.org/10.5194/acp-21-1245-2021.
- Bisht, J. S. H., T. Machida, N. Chandra, K. Tsuboi, P. K. Patra, T. Umezawa, Y. Niwa, Y. Sawa, S. Morimoto, T. Nakazawa, N. Saitoh, and M. Takigawa (2021) Seasonal variations of SF<sub>6</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O in the UT/LS region due to emissions, transport and chemistry, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, <https://doi.org/10.1029/2020JD033541>.
- Niwa, Y., Y. Sawa, H. Nara, T. Machida, H. Matsueda, T. Umezawa, A. Ito, S. Nakaoka, H. Tanimoto, and Y. Tohjima (2020) Estimation of fire-induced carbon emission from

Equatorial Asia in 2015 by using in situ aircraft and ship observations, Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, <https://doi.org/10.5194/acp-2020-1239>.

Müller, A., Tanimoto, H., Sugita, T., Machida, T., Nakaoka, S., Patra, P. K., Laughner, J., and Crisp, (2020) New approach to evaluate satellite derived XCO<sub>2</sub> over oceans by integrating ship and aircraft observations, Atmos. Chem. Phys. Discuss, <https://doi.org/10.5194/acp-2020-1094>,

## (2) 口頭発表

Machida, T., T. Umezawa, Y. Sawa, Y. Niwa, and H. Matsueda, The recent changes and topics in CONTRAIL project, EGU General Assembly 2016, EGU2016-13348, Vienna, Austria, 17-22 April 2016.

Sawa, Y., T. Machida, H. Matsueda, Y. Niwa, and T. Umezawa, Inter-annual variations of CO<sub>2</sub> observed by commercial airliner in the CONTRAIL project, EGU General Assembly 2016, EGU2016-10572, Vienna, Austria, 17-22 April 2016.

Umezawa, T., H. Matsueda, T. Machida, Y. Sawa, and Y. Niwa, Fine-scale CO<sub>2</sub> variations over the Tokyo megacity observed by CONTRAIL, 日本地球惑星科学連合2016年大会, AAS01-06, 千葉県千葉市, 2016年5月22-26日.

Niwa, Y., Y. Sawa, T. Machida, H. Matsueda, T. Umezawa and N. Saigusa, Toward assimilation of CONTRAIL data to estimate surface CO<sub>2</sub> fluxes, 日本地球惑星科学連合2016年大会, AAS01-05, 千葉県千葉市, 2016年5月22-26日.

梅澤拓, 丹羽洋介, 澤庸介, 町田敏暢, 松枝秀和, デリー上空でのCONTRAIL観測から明らかになった冬期農作物によるCO<sub>2</sub>吸収, 日本地球惑星科学連合2016年大会, AAS12-06, 千葉県千葉市, 2016年5月22-26日.

Umezawa, T., T. Machida, Y. Niwa, Y. Sawa, H. Matsueda, and L. Zhou, Structure of the Asian summer monsoon anticyclone observed by CONTRAIL commercial airliner trace gas measurements, 13th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society, AS13-A023, Beijing, China, 31 July-5 August 2016.

Umezawa, T., Y. Niwa, T. Machida, Y. Sawa, and H. Matsueda, CONTRAIL commercial airliner CO<sub>2</sub> measurements to detect regional/local fluxes, 13th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society, BG08-007, Beijing, China, 31 July-5 August 2016.

梅澤拓, 丹羽洋介, 町田敏暢, 澤庸介, 松枝秀和, CONTRAILで観測されたアジア上空のCO<sub>2</sub>変動とアジアンモンスーンとの関連, 日本気象学会2016年度秋季大会, 愛知県名古屋市, 2016年10月26-28日.

Patra, P. K., T. Saeki, S. Morimoto, H. Matsueda, T. Machida, Y. Sawa, T. Umezawa, S. Aoki and T. Nakazawa, On the use of aircraft CO<sub>2</sub> observations for carbon cycle studies, 日本気象学会2016年度秋季大会、愛知県名古屋市、2016年10月26-28日.

松枝秀和, 町田敏暢, 梅澤拓, 寺尾有希夫, 向井人史, 澤庸介, 丹羽洋介, CONTRAILで観測された上部対流圏のメタン濃度の分布と変動, 日本気象学会2016年度秋季大会, 愛知県名古屋

市, 2016年10月26-28日.

藤田遼, 森本真司, 青木周司, 町田敏暢, 澤庸介, 松枝秀和, 坪井一寛, 勝又啓一, 梅澤拓, 中澤高清, ユーラシア大陸上空の対流圏界面領域における大気中CH<sub>4</sub>濃度とその炭素・水素同位体比の季節変動の解析, 日本気象学会2016年度秋季大会, 愛知県名古屋市, 2016年10月26-28日.

松枝秀和, 町田敏暢, 澤庸介, 丹羽洋介, 梅澤拓, 旅客機観測CONTRAILによる上空のCO濃度の年々変動, 第22回大気化学討論会, 北海道札幌市, 2016年10月12-14日.

Umezawa, T., Y. Niwa, Y. Sawa, T. Machida and H. Matsueda, Winter crop CO<sub>2</sub> uptake inferred from CONTRAIL CO<sub>2</sub> measurements over Delhi, India, 2016 AGU Fall Meeting, B33C-0608, San Francisco, California, USA, 12-16 December 2016.

梅澤拓, 松枝秀和, 丹羽洋介, 澤庸介, 町田敏暢, Lingxhi Zhou, Climatological variations of tropospheric CO<sub>2</sub> over the Asia-Pacific region observed by the CONTRAIL commercial airliner measurements, JpGU-AGU Joint Meeting, AAS11-03, 千葉県千葉市, 2017年5月20-25日.

Sawa, Y., T. Machida, H. Matsueda, Y. Niwa, K. Tsuboi, K. Katsumata, T. Umezawa, H. Eto, R. Fujita, D. Goto, S. Morimoto and S. Aoki, Seasonal variations and trends of greenhouse gases in the upper troposphere/lowermost stratosphere by flask-based aircraft measurements between Europe and Japan, JpGU-AGU Joint Meeting, AAS09-P09, 千葉県千葉市, 2017年5月20-25日.

Niwa, Y., Y. Sawa, T. Machida, H. Matsueda, T. Umezawa and N. Saigusa, CO<sub>2</sub> flux variation in Southeast Asia for 2015 estimated by in-situ aircraft measurements, JpGU-AGU Joint Meeting, AAS04-14, 千葉県千葉市, 2017年5月20-25日.

Fujita, R., S. Morimoto, Y. Inai, S. Aoki, T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, Y. Niwa, K. Tsuboi, K. Katsumata, T. Umezawa, T. Nakazawa, Methane variations observed in the upper troposphere/lowermost stratosphere over the Eurasian Continent and their interpretation based on the carbon and hydrogen isotopic ratio, JpGU-AGU Joint Meeting, AAS09-03, 千葉県千葉市, 2017年5月20-25日.

Machida, T., H. Matsueda, Y. Sawa, Y. Niwa and T. Umezawa, Monitoring of atmospheric GHGs by commercial airliner, CONTRAIL, The 9th GEOSS Asia-Pacific Symposium, Tokyo, Japan, 11-13 January 2017.

Machida, T., S. Aoki, H. Matsueda, Y. Sawa, S. Ishidoya, T. Umezawa, Sugawara, D., Goto, Y. Niwa, K. Tsuboi, K. Katsumata, T. Nakazawa, S. Morimoto, Distributions and temporal changes of greenhouse gases in upper atmosphere observed by aircraft, JpGU-AGU Joint Meeting, ACG49-P04, 千葉県千葉市, 2017年5月20-25日.

Sawa, Y., T. Machida, H. Matsueda, Y. Niwa, T. Umezawa, K. Tsuboi, K. Katsumata, H. Eto, D. Goto, S. Morimoto, and S. Aoki, 10 years of observation for greenhouse gases by commercial airliner in the CONTRAIL project, 2017 Global Monitoring Annual Conference, Boulder, USA, 23-24 May 2017.

Saigusa, N., T. Machida, T. Umezawa, P. K. Patra, T. Saeki, Y. Niwa, K. Ichii, and M.

- Kondo, Detecting carbon cycle change using an integrated observation, modeling and analysis system, Joint conference of AsiaFlux Workshop 2017 and the 15th Anniversary Celebration of ChinaFLUX, Beijing, China, 17-19 August, 2017.
- Umezawa, T., H. Matsueda, Y. Sawa, Y. Niwa, T. Machida, and L. Zhou, Variations of tropospheric CO<sub>2</sub> over the Asia-Pacific region observed by the CONTRAIL commercial airliner measurements, 10th International Carbon Dioxide Conference, 193, Interlaken, Switzerland, 21-25 August 2017.
- Niwa, Y., Y. Sawa, T. Machida, H. Matsueda, T. Umezawa, and N. Saigusa, Spatiotemporal variation of CO<sub>2</sub> flux in Southeast Asia estimated from CONTRAIL, 10th International Carbon Dioxide Conference, 182, Interlaken, Switzerland, 21-25 August 2017.
- Sawa, Y., T. Machida, H. Matsueda, Y. Niwa and T. Umezawa, Sensitivity analysis of CO<sub>2</sub> growth rates estimation with sub-sampling method for occasional observation opportunities by commercial airliner, 10th International Carbon Dioxide Conference, 277, Interlaken, Switzerland, 21-25 August 2017.
- Machida, T., H. Matsueda, Y. Sawa, Y. Niwa, T. Umezawa, and K. Tsuboi, Present activities and future plan for CONTRAIL project, 10th International Carbon Dioxide Conference, 406, Interlaken, Switzerland, 21-25 August 2017.
- Fujita, R., S. Morimoto, Y. Inai, S. Aoki, T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, Y. Niwa, K. Tsuboi, K. Katsumata, T. Umezawa, T. Nakazawa, Variations of atmospheric methane and its carbon and hydrogen isotopic ratios in the upper troposphere/lowermost stratosphere over the Eurasian Continent observed by commercial aircraft, 10th International Carbon Dioxide Conference, 635, Interlaken, Switzerland, 21-25 August 2017.
- Nakamura, T., T. Maki, T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa, Improvement of the Upper-Tropospheric CO<sub>2</sub> Distribution from a New JMA Inversion Analysis, 10th International Carbon Dioxide Conference, Interlaken, Switzerland, 21-25 August 2017.
- Sawa, Y., T. Machida, H. Matsueda, Y. Niwa, K. Katsumata, and T. Umezawa, 11-year statistics for in-situ CO<sub>2</sub> data obtained in airliner project of CONTRAIL, 19th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases, and Related Measurement Techniques (GGMT-2017), P29, Dübendorf, Switzerland, 27-31 August 2017.
- 松枝秀和, 町田敏暢, 澤庸介, 丹羽洋介, 梅澤拓, 人為源二酸化炭素の増加による鉛直濃度勾配の長期変化, 第23回大気化学討論会, 香川県高松市, 2017年10月2-4日.
- Inai, Y., R. Fujita, T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa, K. Tsuboi, K. Katsumata, S. Morimoto, S. Aoki, and T. Nakazawa, Seasonal characteristics of trace gas transport in the Arctic upper troposphere/lower stratosphere, 5th International Symposium on Arctic Research (ISAR-5), Tokyo, Japan, Mar. 2018.
- Umezawa, T., H. Matsueda, Y. Sawa, Y. Niwa, T. Machida, and L. Zhou, Climatological variations of tropospheric CO<sub>2</sub> over the Asia-Pacific region observed by the CONTRAIL commercial airliner measurements, EGU2018-11094 (PICO session), EGU General Assembly

2018, Vienna, Austria, 8-13 April 2018.

- Niwa, Y., T. Machida, Y. Sawa, T. Umezawa, K. Tsuboi, K. Saito, H. Matsueda, and N. Saigusa, Forward and backward model analyses on high CH<sub>4</sub> events observed over the western North Pacific, JpGU meeting 2018, AAS06-P01, 千葉県千葉市, 2018年5月20-24日.
- Inai Y., R. Fujita, T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa, K. Tsuboi, K. Katsumata, S. Morimoto, S. Aoki, , and T. Nakazawa(2018), Seasonal characteristics of trace gas transport in the extratropical upper troposphere/lower stratosphere, JpGU Meeting 2018, 千葉県千葉市, 2018年5月20-24日.
- Niwa, Y., T. Machida, Y. Sawa, T. Umezawa, K. Tsuboi, K. Saito, H. Matsueda, and N. Saigusa, Adjoint Analysis on High CH<sub>4</sub> Mole Fractions Observed by Aircraft, AOGS 2018, BG03-IG-A004, Honolulu, Hawaii, USA, 3-8 June 2018.
- Nakamura, T., and T. Maki, Updates of CO<sub>2</sub> inversion analysis at Japan Meteorological Agency, IG3IS/TRANSCOM Workshop, Lund, Sweden, 19 September 2018.
- Machida, T., Y. Sawa, Y. Niwa, T. Umezawa, K. Tsuboi, and H. Matsueda, Contributions of commercial aircraft for researching atmospheric greenhouse gases, 2018 joint 14th iCAGGP Quadrennial Symposium/15th IGAC Science Conference, 3.104, Takamatsu, Japan, 25-29 September 2018.
- Matsueda, H., T. Machida, Y. Sawa, T. Umezawa, Y. Niwa, and K. Tsuboi, Indonesian fire history recorded in the upper tropospheric CO from the long-term CONTRAIL observation, 2018 joint 14th iCAGGP Quadrennial Symposium/15th IGAC Science Conference, 4.212, Takamatsu, Japan, 25-29 September 2018.
- Inai, Y., S. Chida, S. Morimoto, S. Murayama, S. Aoki, T. Nakazawa, T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa, K. Tsuboi, K. Katsumata, Variations of atmospheric CO<sub>2</sub> and its isotopes in the upper troposphere/lower stratosphere over Siberia, 2018 joint 14th iCAGGP Quadrennial Symposium/15th IGAC Science Conference, Takamatsu, Japan, 25-29 September 2018.
- Inai, Y., R. Fujita, T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa, K. Tsuboi, K. Katsumata, S. Morimoto, S. Aoki, and T. Nakazawa (2018), Seasonal characteristics of chemical and dynamical transports into the extratropical upper troposphere/lower stratosphere, SPARC General Assembly 1-5 October 2018, Kyoto, Japan.
- Niwa, Y., A. Ito, T. Machida, M. Sasakawa, Y. Tohjima, Y. Terao, T. Umezawa, S. Morimoto, S. Aoki, Y. Sawa, K. Tsuboi, H. Matsueda, E. Dlugokencky, C. Harth, P. B. Krummel, R. L. Langenfelds, Z. M. Loh, J. Mühle, S. O' Doherty, R. G. Prinn, M. Ramonet, P. Salameh, C. Sweeney, R. Weiss, D. Young, S. Castaldi, S. Noce, M. Saunio, and A. R. Stavert, Global inverse analysis of CH<sub>4</sub> fluxes using NICAM-TM 4D-Var, 日本地球惑星科学連合2019年大会, AAS04-28, 千葉県千葉市, 2019年5月26-30日.
- Niwa Y., T. Machida, Y. Sawa, T. Umezawa, K. Tsuboi, K. Saito, H. Matsueda, and N. Saigusa, Transport pathways of high CH<sub>4</sub> events observed over the western North

- Pacific, 8th International Symposium on Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gases (NCGG8), Amsterdam, The Netherlands, June 12–14, 2019.
- Umezawa, T., T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa, and Y. Niwa, Asian summer monsoon signatures observed by the CONTRAIL commercial airliner measurements, 4th Atmospheric Composition and Asian Monsoon Workshop (ACAM 2019), 2.39, Bangi, Selangor, Malaysia, 26–28 June 2019.
- Fujiwara, M., M. Hayashi, S. Ogino, K. Shiraishi, T. Sakai, T. Umezawa, Y. Inai, M. Shiotani, N. Nishi, P. Patra, N. Eguchi, and Collaborators, Investigation of transport processes associated with the Asian summer monsoon circulation using balloons, lidars, and aircrafts - Collaboration with the ACCLIP -, 4th Atmospheric Composition and Asian Monsoon Workshop (ACAM 2019), 2.12, Bangi, Selangor, Malaysia, 26–28 June 2019.
- Fujiwara, M., M. Hayashi, K. Shiraishi, N. Nishi, S. Ogino, P. Patra, T. Sakai, T. Umezawa, Y. Inai, M. Shiotani, Investigation of Transport Processes Associated with the Asian Summer Monsoon Circulation using Balloons, Lidars, and Aircrafts - Collaboration with the ACCLIP, AsiaPEX Kick-off Conference, Sapporo, Japan, 28–30 August 2019.
- Niwa, Y., Y. Sawa, H. Nara, T. Machida, H. Matsueda, T. Umezawa, A. Ito, S. Nakaoka, and H. Tanimoto, Fire-induced CO<sub>2</sub> emission in Equatorial Asia during the 2015 drought estimated by aircraft and ship observations, AGU Fall Meeting 2019, B13L–2465, San Francisco, USA, 9–13 December 2019.
- Fujiwara, M., M. Hayashi, S. Ogino, K. Shiraishi, T. Sakai, T. Umezawa, Y. Inai, M. Shiotani, N. Nishi, P. Patra, N. Eguchi, and L. Pan, Investigation of Transport Processes in Association with the Asian Summer Monsoon Circulation Using Balloons, Lidars, and Aircrafts - Japanese Collaboration with the ACCLIP, AGU Fall Meeting 2019, A51K–2785, San Francisco, USA, 9–13 December 2019.
- Umezawa, T., H. Matsueda, Y. Sawa, T. Machida, Y. Niwa, K. Higuchi, T. Oda and S. Maksyutov, Statistical characterization of atmospheric CO<sub>2</sub> in airport proximity from the CONTRAIL commercial aircraft measurements, GGMT–2019, T49, Jeju, South Korea, 1–6 September 2019.
- 白井知子 (2020) 環境研究データの公開と利活用に向けて. 第420回生存圏シンポジウム 生存圏データベース全国共同利用研究成果報告会 モノのデータベースから電子データベースまで -さまざまな学術データの新しい共同利用に向けて-
- Inai, Y., R. Fujita, T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa, K. Tsuboi, K. Katsumata, S. Morimoto, S. Aoki, and T. Nakazawa, Air mass transport and trace gas distribution in the Siberian upper troposphere and lower stratosphere, 6th International Symposium on Arctic Research (ISAR–6), Online, Japan, Mar. 2020.
- Saigusa N., Machida T., Nakaoka S., Matsunaga T., Tanimoto H., Niwa Y., Terao Y., Ito A. (2020) Greenhouse Gas Analyzing Platform using Ground Sites, Aircraft, Ships,



and Satellite-based Data: Japan's Contribution to the Paris Agreement, EGU General Assembly 2020

Fujiwara, M., T. Sakai, K. Shiraishi, M. Hayashi, N. Nishi, S. Ogino, P. Patra, T. Umezawa, Y. Inai, M. Shiotani, N. Eguchi, T. Shibata, S. Khaykin, L. L. Pan, UTLS aerosol measurements over Japan within eastward shedding vortices coming from the Asian summer monsoon anticyclone, JpGU-AGU Joint Meeting, AAS08-15, ONLINE, 12-16 July 2020.

Umezawa, T., T. Saito, Y. Tohjima, Y. Terao, A. Ito, Relative contributions of different methane emission categories in the continental East Asia inferred from stable carbon isotope measurements at Hateruma Station, JpGU-AGU Joint Meeting, ACG47-01, ONLINE, 12-16 July 2020.

Saigusa N., T. Machida, T. Matsunaga., H. Tanimoto, Y. Niwa, Y. Terao, A. Ito, Monitoring anthropogenic and natural sources and sinks of GHGs: Challenges in Asia and Oceania, JpGU-AGU Joint Meeting, AAS07-11, ONLINE, 12-16 July 2020.

Umezawa, T., H. Matsueda, T. Oda, K. Higuchi, Y. Sawa, T. Machida, Y. Niwa, S. Maksyutov, The CONTRAIL commercial aircraft monitoring CO<sub>2</sub> emissions from cities, NOAA Global Monitoring Laboratory Virtual Global Monitoring Annual Conference (eGMAC), ONLINE, 21 July 2020.

三枝信子, 松永恒雄, 町田敏暢, 谷本浩志, 丹羽洋介, 寺尾有希夫, 伊藤昭彦 (2020) 地上・船舶・航空機・衛星観測に基づく地球環境モニタリングとその将来展望, 第81回応用物理学会秋季講演会シンポジウム「宇宙から考える応用物理」, オンライン, 2020年9月10日.

町田敏暢, 遠嶋康徳, 梅澤拓, 寺尾有希夫, 野村渉平, 笹川基樹, 丹羽洋介, 坪井一寛, 石島健太郎, 松枝秀和, 澤庸介, 向井人史 (2020) 大気中の温室効果ガス観測から推定する放出源変動, 第432回生存圏シンポジウム 第14回生存圏フォーラム特別講演会 「ポストコロナ時代の生存圏科学」, 京都, 2020年11月7日.

Inai Y., S. Chida, S. Morimoto, S. Murayama, S. Aoki, T. Nakazawa, T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa, K. Tsuboi, K. Katsumata, R. Fujita, Seasonal variations of <sup>18</sup>O and <sup>13</sup>C of CO<sub>2</sub> in the upper troposphere and lower stratosphere over Siberia, The 11th Symposium on Polar Science, Online, 16-18 Nov., 2020.

藤田遼, 森本真司, 町田敏暢, 澤庸介, 松枝秀和, 坪井一寛, 青木周司, 中澤高清 (2020), シベリア上空の上部対流圏/下部成層圏におけるメタンの炭素・水素同位体比の観測, 「航空機観測による気候・地球システム科学研究の推進」研究集会, オンライン, 2020年12月9日

### (3) 出願特許

なし

### (4) 受賞等

2020年 梅澤 拓 日本気象学会正野賞

2019年 CONTRAILプロジェクト 第1回日本オープンイノベーション大賞環境大臣賞

2017年 2017年度環境省地球温暖化防止活動環境大臣表彰「国際貢献部門」

2016年 丹羽 洋介 日本大気化学会奨励賞

#### (5) 一般への公表・報道等

2020年5月21日：「上空CO2濃度は都市の排出量反映」電気新聞

2020年4月11日：「青春スクロール 母校群像記」にて紹介，朝日新聞

2020年3月31日：「航空の視座でものを見る 大気編 CONTRAILプロジェクト 大空を飛行しながら大気観測」JAXA機関紙JAXA's

2020年1月：「民間航空機が切り拓く大気中二酸化炭素の新たな観測ネットワーク」JETI、vol. 68 No. 1、2020年1月号

2020年1月1日：「JAL SDGs REPORT 航空機による大気観測プロジェクト」JALグループ機内誌SKYWARD

2019年11月8日：「二酸化炭素（CO2）はどこから来てどこに行くのだろうか」北海道陸別中学校出前授業、陸別

2019年9月16日：「増え続けているCO2 最新の観測事実を知る」令和元年度北海道地球温暖化防止活動推進員学習会、札幌

2019年4月20日：「【国立環境研究所】気候[変]会議&潜入ツアー」にて紹介，ニコニコ生放送

2019年2月16日：「増え続けているCO2—北海道では？世界では？—」十勝環境セミナー：変貌する十勝の気候と地球温暖化、帯広

2018年9月28日：IGAC2018 サイエンスカフェ、高松

2018年4月27日：“CONTRAIL Project”，Earth Day/ Boeing Externship Program, ボーイングジャパン、東京会場およびボーイング本社ネット中継

2017年12月3日：「そらエコinいけだ」池田市くれは音楽堂トークイベント

2017年10月25日：「精度高め温暖化対策促進、温室効果ガスの長期監視」毎日新聞

2017年7月22日：「そらエコinつくば—JAL国際線パイロットと温室効果ガス研究者によるクロストーク—」国立環境研究所トークイベント

2017年7月19日：「Monitoring of Atmospheric CO2, its temporal changes and global distribution」関西創価高校スーパーグローバルハイスクール

2017年3月16日：「増え続けるCO2—グローバルな視点でCO2の循環を探る—」埼玉県立熊谷高等学校SSH講演会

2016年12月28日：「二毛作の小麦栽培 冬場のCO2吸収」毎日新聞

2016年12月14日：「小麦がCO2を大量に吸収」環境新聞

2016年7月16日：「民間航空機でCO2を測る！ —CONTRAILの挑戦—」日本気象予報士会神奈川支部講演

#### (6) 研究分野における成果の発展・牽引

1) 世界初の民間航空機を使った温室効果ガス観測プロジェクトとして圧倒的多数の上空における高精度のCO2データを各国の研究コミュニティに提供し、世界の航空機観測を牽引し

ている。

2) 欧州連合の民間航空機による大気観測プロジェクトであるIAGOSにアドバイザーとして技術協力し、IAGOSとのデータ相互比較計画に発展する予定である。

3) 台湾が進めている民間航空機と民間船舶を利用した大気観測プロジェクトPGGMに協力し、共同でデータ解析を行う計画に発展している。

#### (7) 政策への寄与・貢献

1) 世界のCO<sub>2</sub>観測網で極めて不足している上空のデータを著しく増やし、モデルの制約条件を増やすばかりでなく衛星観測の検証、モデル輸送の検証を通して地域別のCO<sub>2</sub>収支の不確定性を低減し、炭素循環予測の確度を向上させることによって排出削減目標の策定に貢献する。

2) 大都市の空港近くで得られるCO<sub>2</sub>濃度の鉛直分布によって都市域から排出されるCO<sub>2</sub>の排出削減効果を監視し、パリ協定に沿った我が国の取り組みに客観的証拠を提供するほか、地域循環共生圏の活動評価にも貢献する。

3) 「環境研究・環境技術開発の推進戦略」（令和元年5月21日環境大臣決定）が「必要な研究」と定める「国際的な環境協力等にも資する地球温暖化現象の解明、予測、対策評価に焦点を当てた」研究である。