

民間旅客機が世界 34 都市空港上空の CO2 濃度を観測、香港、東京羽田、上海虹橋は上位三位

日本航空の旅客機を利用した温室効果ガス観測プロジェクト（CONTRAIL プロジェクト）で 2005 年から 2016 年の約 10 年間にわたって取得された CO2 濃度の観測データを解析することによって、世界 34 都市の直上における CO2 濃度変動の特徴を明らかにしました。

各都市上空で都市の風上側と風下側を比べると、都市の風下で顕著な CO2 濃度の増加が観測され、都市域の CO2 排出の影響を見出すことができました。したがって、各都市上空における CO2 濃度の変動幅の大きさは都市からの CO2 排出の影響を捉えており、CO2 排出が大きいと考えられる都市ほど、その上空における CO2 濃度の変動幅も大きいことが明らかになりました。

CONTRAIL は民間旅客機により世界の都市上空での CO2 濃度データを提供する世界で唯一のプロジェクトであり、今後もこの観測データを都市域や世界各国の CO2 排出の監視に役立てて活用することで温室効果ガスインベントリ*3 の精度向上にも貢献できると期待されます。

1. 研究の背景

大気中の二酸化炭素濃度は、年間約 2~3 ppm の割合で増加を続けています。この増加の主な原因は化石燃料の燃焼による人為的な CO2 の排出ですが、化石燃料の使用にともなって大気中に排出される CO2 のうち、約半分は陸上植物と海洋によって吸収されていると考えられています。このような自然吸収と人為・自然排出を含めた CO2 の循環（炭素循環）を定量的に理解することは、パリ協定のもとでの実効的な排出削減目標の作成にとっても極めて重要です。

従来の研究においては、排出統計（インベントリ）に基づいた化石燃料消費による排出量は既知との考えに基づいて、大気観測データに収支を合わせるようにして自然吸収・排出量の推定が行われてきました。しかし、近年では排出量インベントリの整備が不十分な新興国で排出量が急増することで、化石燃料消費による排出量インベントリの不確実性が増大し、それに基づいて推定される自然吸収・排出量にもバイアスが生じることが懸念されています。

人為的な CO2 排出の約 70%は、世界の人口の約 50%を抱える都市域に起因す

ると言われています。都市域の CO₂ 排出量推定の不確実性を低減するためには様々な取り組みが不可欠であり、都市大気中 CO₂ 濃度の実態把握とその観測データを利用した都市排出量の推定はその一つです。実際に、特定の都市域をカバーする地上の大気観測ネットワークの構築や衛星を利用した都市大気観測の研究が近年盛んに行われています。

本研究においては、日本航空の旅客機を利用した CONTRAIL プロジェクトによって取得された世界の都市上空の CO₂ 濃度の鉛直分布データに着目しました。多くの主要な空港は大都市近郊に位置しているため、空港上空の CO₂ 濃度のデータは都市からの CO₂ 排出の評価に有用であると考えられるためです。本研究では、このような旅客機観測の利点を活かし、世界 34 都市の空港上空の CO₂ 濃度データの統計解析を実施しました。さらに、このような CO₂ 濃度の統計解析の結果と対象都市の CO₂ 排出量との関係についても調査しました。

2. 観測データ

国立環境研究所と気象庁気象研究所は、日本航空が運航する旅客機を利用した温室効果ガス観測プロジェクト CONTRAIL (Comprehensive Observation Network for Trace gases by Airliner) を 2005 年から展開しています (図 1)。本研究では、旅客機に搭載された CO₂ 濃度連続測定装置 (CME) によって、2005 年から 2016 年の約 10 年間にわたり観測された世界 34 都市の上空の CO₂ 濃度観測データを解析しました。



図 1. 羽田空港を離陸する日本航空の CONTRAIL ロゴ特別塗装機 (左、日本航空提供) と CO₂ 濃度連続測定装置 (CME) (右)。

CONTRAIL 観測が開始された 2005 年以降、2016 年末の時点で 13,000 を超える観測フライトから 700 万点を超える CO2 濃度データを取得しました。また、空港上空の上昇・下降時に取得した鉛直分布データは、成田空港上でおよそ 7,700 回、羽田空港上で 4,400 回、ホノルル空港で 2,100 回、バンコク空港上で 1,700 回、シドニー空港で 1,600 回、シンガポール空港で 900 回、香港空港で 800 回、デリー空港やパリ空港で 700 回など、世界各国の都市上空で非常に充実したデータが得られました（図 2）。

各空港での観測データ数は観測に使用される旅客機の運用によるため、観測機のベースである成田・羽田空港を除いて、必ずしも定期的な観測が実施できるとは限りません。一方で、大気中の CO2 濃度の変動には経年変動や季節変動が存在します。そこで、2005 年から 2016 年までの CONTRAIL の全観測データについて、観測地点別に独自に経年変動と季節変動を評価しそれらを観測データから除去することで、地域スケールの排出に起因する濃度増加を反映すると考えられる「CO2 増分」を計算しました。

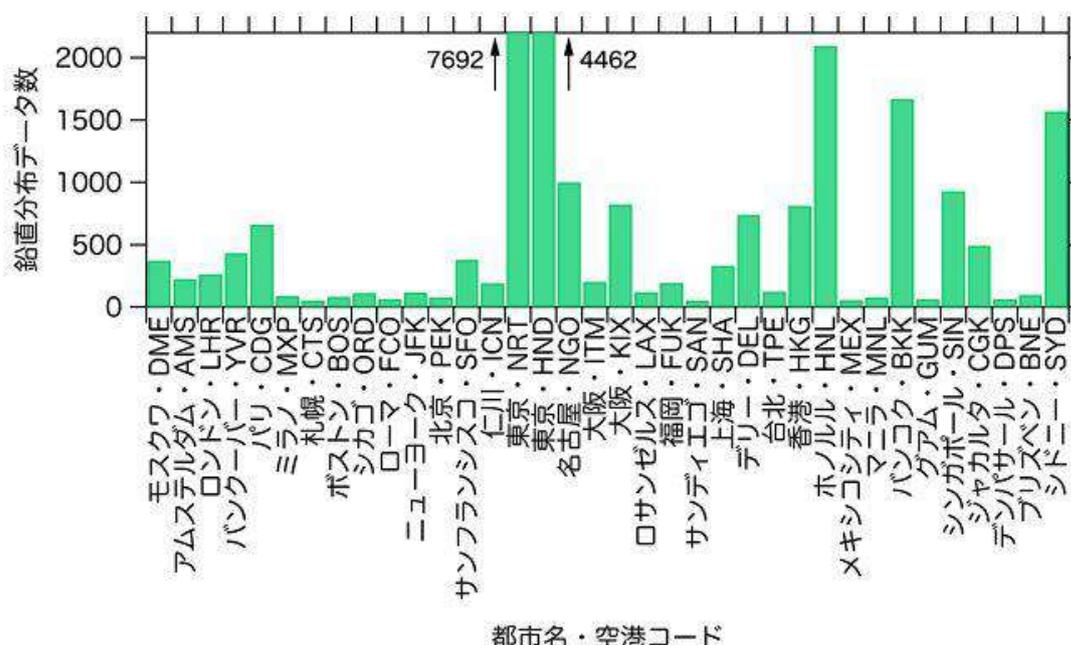


図 2. 都市・空港別の鉛直分布データ取得数（2005 年-2016 年）。

3. 研究結果と考察

本研究では、図 2 に示した世界各国の空港について、その上空の CO2 増分の変動を統計的に調べました。その一例として、東京（成田空港）の結果を図 3 に

示します。まず、図3dの通り、成田空港（白抜きダイヤ）は東京都心から約60 km 東方に位置しています。地図中の黒丸の群れで示されるように、CONTRAILの観測機は離着陸の際の高度2 km以下で、東京都心の東側を囲うように観測データを取得したことがわかります（観測機の位置は、高度を上げるにつれて各フライトの目的地方向へ様々に広がります）。東京東方の高度1.0-1.5 kmで、CO2増分と風向・風速との関係を調べたのが図3bです。

この図は、各風向・風速格子でのCO2増分の最大値を示しており、すなわち、どのような風向・風速時に高いCO2濃度が出現するかを示します。この図では、弱い西風の時に高いCO2増分が出現していることが明らかです。これは観測地点から見て強いCO2排出源（東京大都市圏）が西方に位置していること、また風の弱い時ほど東京大都市圏からの排出が近傍風下の大気下層（大気境界層）に蓄積しやすいことと整合します。このような都市域の排出影響は上空に行くほど弱まります（図3a）。また、図3cを見ると、CO2増分の変動幅（ばらつき）は大気下層ほど大きく、この様子にも地表の都市排出の影響を見出すことができます。

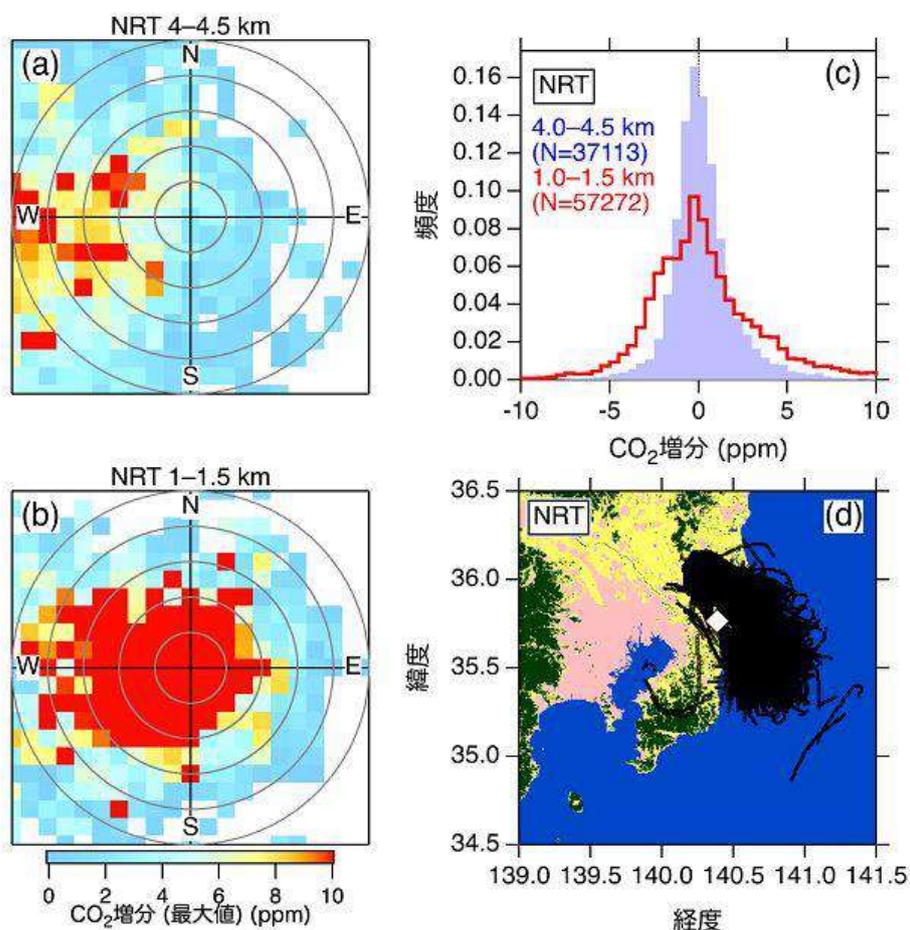


図3. 成田空港上空におけるCO₂増分の統計解析結果。

(a) 高度4.0-4.5 kmにおけるCO₂増分の最大値と観測時の風向・風速との関係を表す。上が北として、角度で風向を、円の中心からの距離で風速を表し、灰色の等心円の間隔が毎秒5 m。(b) aと同じ。ただし、高度1.0-1.5 kmの観測データの解析結果。(c) CO₂増分の出現頻度のヒストグラム。紫の塗りつぶしが高度4.0-4.5 km、赤の実線が高度1.0-1.5 kmの観測データの解析結果。各高度の観測データ数も左上に示されている。各CO₂データの季節変動からの偏差が小さい時にCO₂増分はゼロに近づく。(d) 成田空港周辺の土地利用を表しており、ピンクが都市域に対応する。白抜きのダイヤが成田空港の位置を表し、その周辺の黒い部分（小さな黒丸の集まり）が高度2 km以下の観測データの取得位置（観測機の位置）を表す。

このようなCO₂増分の統計解析を世界の36空港について調べたところ、多くの空港において、(1) 高度約1 kmにおいて高いCO₂濃度が出現する風向が特定でき、その方向は空港近隣都市の方向に一致していること、(2) 大きなCO₂濃度の増加は風速が弱い時に観測されやすいこと、(3) CO₂増分の変動幅は下層ほど大きい、高度4 km程度の上空に達すると地表の排出吸収の影響がほとんど到達しない清浄大気の特徴を示すこと、が明らかになりました。すなわち、CONTRAILによる空港近傍での観測結果が近隣都市域のCO₂排出の影響を明瞭に捉えていることがわかりました。

各空港上空の高度約1 kmのCO₂増分の変動幅（標準偏差）を計算すると、世界の都市の中でも大都市近郊の空港上空で大きな変動が見られることがわかりました（図4）。特に大都市圏人口で世界上位10位に入る東京、デリー、メキシコシティ、上海、大阪などの上空で非常に大きなCO₂濃度の変動が観測されたことがわかります。一方、沿岸部に位置する比較的規模の小さな都市上空のCO₂変動は小さい傾向も見えてきました。

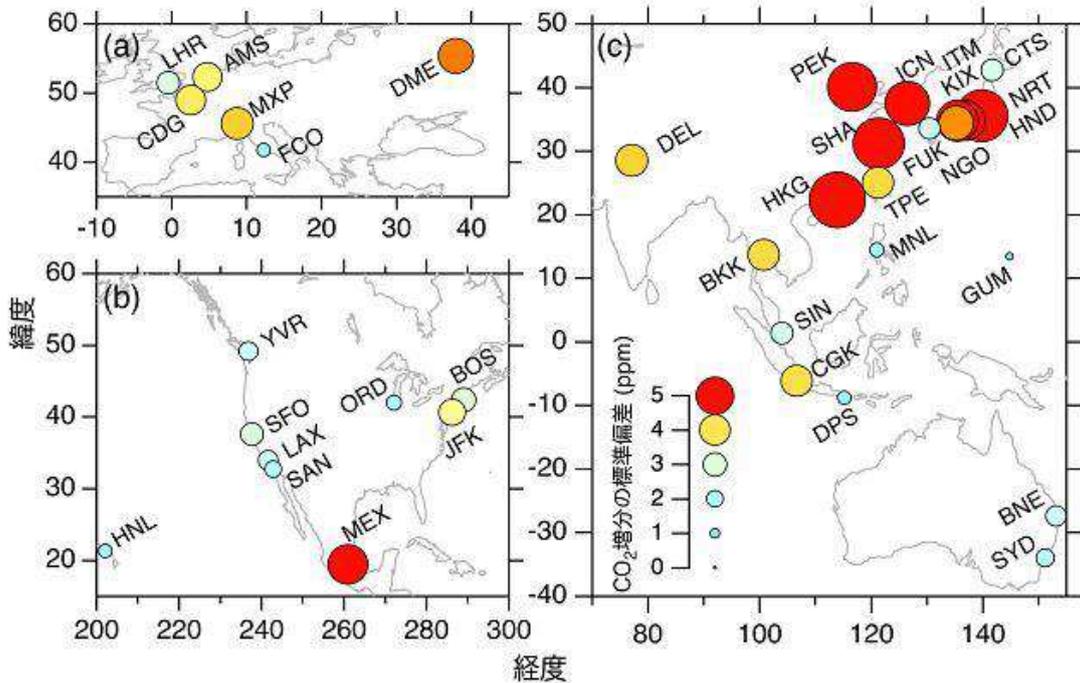


図 4. 世界各国の空港上空高度約 1 km における CO₂ 増分の変動幅（標準偏差）。丸が大きく赤くなるほど変動幅が大きいことを表す。空港コードと都市名の対応は図 2 を参照。

そこで本研究では、CO₂ 増分の変動幅を各都市の CO₂ 排出量の推定値に対して図示しました（図 5）。各都市の CO₂ 排出量は化石燃料の燃焼による人為起源 CO₂ 排出量データベース (ODIAC) から計算しました。この図に見られるように、高度約 4 km（図 5 の水色）では直下の都市域の CO₂ 排出量に関わらず CO₂ 増分の変動幅は小さいのですが、大気下層（高度約 1 km、図 5 の赤色）では CO₂ 排出量の大きな都市域近郊の空港上空ほど CO₂ 増分の変動幅が明らかに大きいことがわかります。すなわち、都市域上空の CO₂ 濃度の主要な変動要因は都市からの CO₂ 排出であり、観測フライト時の気象条件が様々に変動することによって、そのような排出影響が上空の高度 1 km 程度まで伝搬していることが明らかになりました。

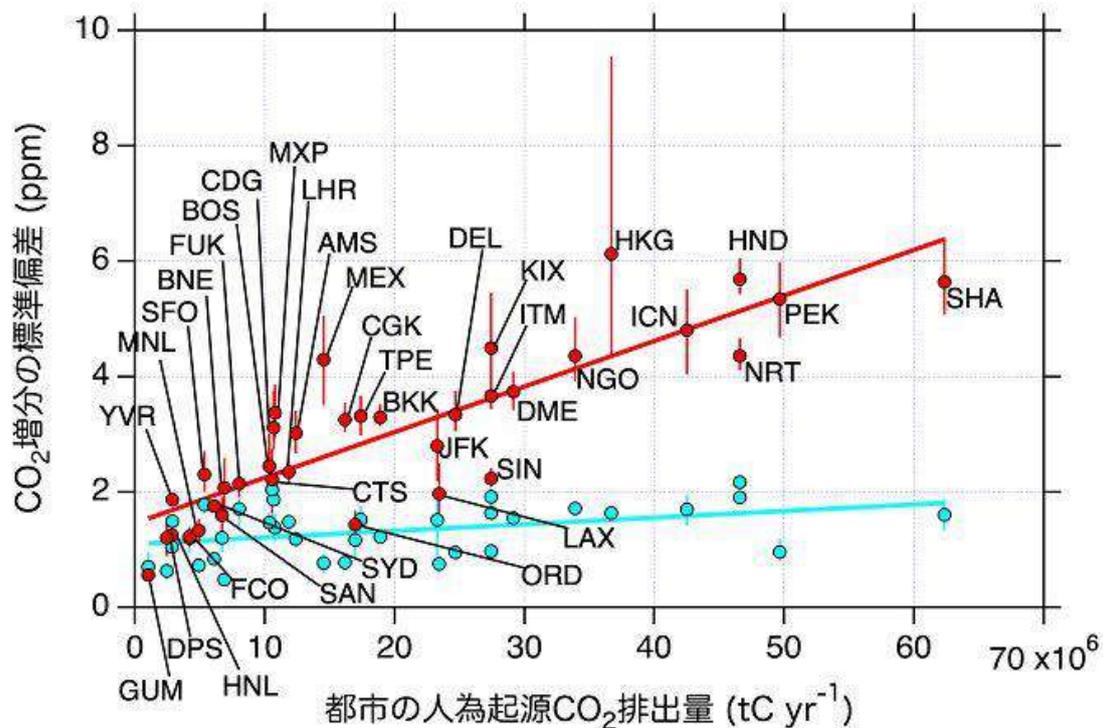


図5. 世界各国の空港上空におけるCO₂増分の変動幅（標準偏差）と各都市からの人為起源CO₂排出量との関係。
赤色が高度約1 km、水色が高度約4 kmの観測データによる解析結果。空港コードと都市名の対応は図2を参照。

一般に、地表のCO₂排出は大気下層（大気境界層）に蓄積され、これに伴うCO₂の濃度増加量は排出量に比例すると考えられます。都市域上空に生じるこのような高濃度CO₂領域の分布は、都市域の排出の地理的な分布ならびに排出されたCO₂の蓄積場となる大気境界層の状態によると考えられます。旅客機フライトから得られたCONTRAILの観測データでは、観測地点と都市のCO₂排出域との地理的關係は空港別に大きく異なりますし、日変動や季節変動をともなう大気境界層の状態も空港別のフライトスケジュールによって様々なケースがあると言えます。したがって、都市域からのCO₂排出量を1回や2回の限られた観測で定量的に捉えるのは困難です。

本研究では多数の観測で様々な都市域上空のCO₂濃度の変動幅を捉えることによって、そのCO₂の変動幅が都市からの排出に関係していることを統計的に明らかにしました。このようなCO₂濃度の鉛直分布データが蓄積されることによって近隣都市からのCO₂排出量推定の高精度化に貢献できることが期待できます。

論文情報

タイトル Statistical characterization of urban CO2 emission signals observed by commercial airliner measurements

雑誌 Scientific Reports

DOI 10.1038/s41598-020-64769-9

日本語発表原文

<http://www.nies.go.jp/whatsnew/20200515-2/20200515-2.html>

文 JST 客観日本編集部