仙台市中心部における「CO_2アイランド」現象

*菅　原　　　敏

“Urban CO_2-island” observed in the central area of Sendai city

SUGAWARA Satoshi

要　旨

都市域の大気中CO_2濃度の空間構造を明らかにするために、可搬型CO_2濃度観測システムを開発し、仙台市中心部において自動車を用いた移動連続観測を実施した。その結果、都市の中心部に集中する自動車の燃料消費に伴うCO_2排出によって、仙台駅付近を中心としてCO_2濃度の高い領域が存在していることが明らかになった。

Abstract

To investigate spatial variations of atmospheric CO_2 concentration in an urban area, a portable CO_2 measurement system was developed. Mobile and continuous CO_2 measurements were carried out in Sendai city by using a car equipped with this system. High concentration area in the central part of Sendai was clearly observed, which is interpreted as being due to the CO_2 emissions from car fuel combustion.

Key words：Atmospheric CO_2（大気中二酸化炭素）、
CO_2-island（CO_2アイランド）、
CO_2 emission（二酸化炭素排出）、
Sendai city（仙台市）

1．はじめに

地球温暖化は人類が直面している最大の危機である。この温暖化を引き起こしている原因は、人類が自らの営みによって様々な赤外活性気体を大気中に放出することにより、大気の温室効果を増長させたことであると考えられている。「気候変動に関する政府間パネル」（Intergovernmental Panel on Climate Change、以下IPCCと略す）は、第４次評価報告書において、「20世紀後半のグローバルな気温上昇のトレンドが人間活動に起因するものである」という科学的推論が、90％以上の確率で確からしいと結論した（IPCC、2007）。人為的に大気に放出される温室効果気体の中で、その地球温暖化への寄与、すなわち放射強制力が最も大きいものが、二酸化炭素（CO_2）である。南極や北極の氷床コアを用いた研究や、過去50年間の大気の直接観測の結果によると、300年前より以前では約280 ppmv程度で安定していた大気中のCO_2濃度が、産業革命に伴って徐々に増加しはじめ、さらに第二次世界大戦後の経済発展に伴って爆発的に増加したことが知られている。この急激な濃度の増加は、人類が化石燃料を消費することによって大気に放出している炭素量の増加傾向によく対応している。全世界における化石燃料消費によるCO_2放出量は、2005年時点の統計値で年間お

＊ 宮城教育大学教育学部理科教育講座

よそ7.7ペタ・グラム（炭素換算量）であり（Energy Information Administration、2008）、その半分以上が大気に残留し、大気中のCO_2濃度を上昇させていると考えられる（グローバルなCO_2濃度に関しては、例えば、中澤ら（2007年）の解説に詳しい）。これらの科学的知見や、地球温暖化に伴う様々な脅威に関する警鐘が、国際社会において広く認知されるようになり、世界的な二酸化炭素放出量の削減への取り組みが進められている。特に、「気候変動に関する国際連合枠組条約」の締約国会議（Conference of Parties、以下COPと略す）では、1997年の第３回会議（COP3）において、各国の削減の数値目標を定めた京都議定書を採択しており、この削減義務を負う各国は2008年より５年間の削減実施期間に入った。我が国はこの京都議定書において、1990年（代替フロンについては1995年）の放出量を基準として、６％の削減が義務づけられている。しかし、2005年時点での放出量はその基準に対して逆に7.8％も増加しており（我が国の排出量の数値は独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター温室効果ガスインベントリオフィスより引用）、森林による炭素吸収源として見込まれている3.9％を差し引いたとしても、削減義務達成の可能性は極めて低いと言わざるを得ない。我が国の2005年におけるCO_2排出量を部門別間接放出（例えば、発電などのエネルギー転換に伴うCO_2排出を、間接放出としてエネルギー使用部門に配分することを意味する）に区分すると、産業（35％）、運輸（20％）、業務その他（18％）、家庭（13％）のそれぞれの部門の割合が特に大きい。これらの部門ごとの排出量を、京都議定書の基準年に対する比率で比較すると、工場等の産業部門が5.5％減少しているのに対して、運輸などのそれ以外の部門はいずれも高い増加率を示しており、我が国の排出量削減を困難にしている最大の要因となっている。特に運輸部門では、その約９割が自動車の燃料消費によって占められている。また、家庭部門における用途別の内訳に着目すると、約３割が自家用乗用車の利用に伴う排出であるとされている。これらの自動車の燃料消費による排出が、部門の別を問わず、都市域に集中しているであろうことは容易に想像される。京都議定書の採択以降、国としての削減目標の明確化を受けて、自治体や企業レベルでの温室効果ガス排出量統計の公表や、独自の排出量削減目標が策定されるようになった。発電などのエネルギー転換企業や、鉄鋼製造に代表される大規模産業などが、固定点におけるCO_2排出とみなせるのに対して、運輸部門や家庭の自家用車などの排出は、統計上の排出元と実際の排出地域は必ずしも一致しない。特に大都市域では、交通の集中化に伴って、周辺地域からの「排出源の流入」があるため、自治体や企業の公表する統計値以上に、より多くの実質的な排出が起こっていると考えられる。したがって、これらの自動車による膨大なCO_2排出の結果として、都市中心部では大気中のCO_2濃度が著しく高くなり、移動排出源の強度分布を反映した濃度の空間分布を形成しているものと予想される。しかし、都市の汚染大気モニタリングとして定点観測を実施している例はあるものの、都市域において、その中心部から郊外にかけての大気中のCO_2濃度の空間変動を明らかにした例はあまりない。その理由として、空間分布を観測するための技術的な制約に加え、ローカルなスケールにおいて実質的なCO_2排出強度の空間分布を明らかにすることの必要性が薄いと考えられていることが挙げられる。原理的には、大気中のCO_2濃度の地域的な空間分布を調べることにより、実質的な排出強度の地理的分布を得ることが可能である。大気中のCO_2濃度は、地表面のソース・シンクの空間分布と大気の輸送過程によって決まる。したがって、大気中のCO_2濃度の分布を詳細に知ることで、地域的な排出に関する情報を逆推法によって得ることができる。一般に、このような大気観測から地表のソース・シンクの情報を得る手法は、地球規模あるいは大陸スケールでの炭素循環の解明における「トップダウン・アプローチ」として知られている。この手法をローカルな空間スケールに適用して、地表面での排出量を定量化するためには、そのスケールでの大気輸送を、十分な時間・空間分解能をもってモデル化することが必要となる。現時点では、それぞれの部門や排出元ごとのインベントリ・データを把握することにとどまっており、大気濃度の空間分布や、実質的な排出分布は重要視されていない。しかし、本研究とその将来的な発展を念頭に置き、以下の理由により、ローカルな大気濃度の空間分布を明らかにすることには種々のメリットがあると考えている。まず、都市域の大気濃度の時間・空間的変動を明らかにすることで、今後の国や自治体の施策や企業の削減努力の成果を直接的、かつ総合的に評価しうる

可能性がある。例えば、自治体が進める自動車環境負荷低減政策や、近い将来の低燃費車やハイブリッド車、電気自動車などの普及に伴って、実質的に都市大気濃度が低下したかを確認できる可能性がある。また、大気濃度の空間コントラストと交通量データを組み合わせることで、どのような道路交通行政がCO_2排出削減に有効であるのかの基礎的なデータを得ることができると考えられる。さらに、都市域におけるCO_2濃度が周辺に比べてどれだけ高いのかという直接的な事実を示すことが、温暖化防止のための市民の啓蒙や教育活動にもつながると期待される。

仙台市は平成14年に地球温暖化対策推進計画の改訂版をまとめ、市の温室効果気体排出量の統計や独自の排出量削減目標を公表している（以下のURLを参照 http://www.city.sendai.jp/kankyou/toshisuishin/ondanka/index.html）。それによると、1998年時点での仙台市におけるCO_2排出の総量は、年間およそ2.0テラ・グラム（炭素換算量）であり、運輸部門（34％）が産業部門（28％）を上回って、最も大きな割合を占めていることが大きな特徴となっている。また、この運輸部門の排出量は1990年に対する比率で約40％という驚異的な増加を示しており、自動車をはじめとする運輸部門のCO_2排出が如何に深刻であるかを物語っている。この厳しい現状の中、仙台市は1998年度を基準として、2010年度には年間総排出量を10％、一人当たりでは20％を削減することを数値目標として掲げた。この両者の数値の違いは、人口の増加予想を考慮しているためであり、この12年間で単調に人口が増加すると予想される一方で、CO_2総排出量は削減する、という極めて厳しい目標である。特に、仙台市における運輸部門の排出量の急増は、乗用車登録台数の急増（90年度から98年度にかけて約46％の増加）が主要因となっている。仙台市における大気中CO_2濃度の時間空間変動を調べることは、仙台市の主要な排出源である自動車がどの程度大気濃度に対してインパクトを有するかを明らかにすることであり、その意義は大きい。また、仙台市における将来的な自動車からの排出量の動向を、大気濃度の変化から総合的に評価する可能性を示唆する研究といえる。

２．観測方法

本研究では都市域の大気中CO_2濃度の空間構造を明らかにするために、可搬型CO_2濃度観測システムを開発し、これを乗用車に搭載することで移動しながら観測を実施した。以下では、その観測システムと観測方法について解説する。

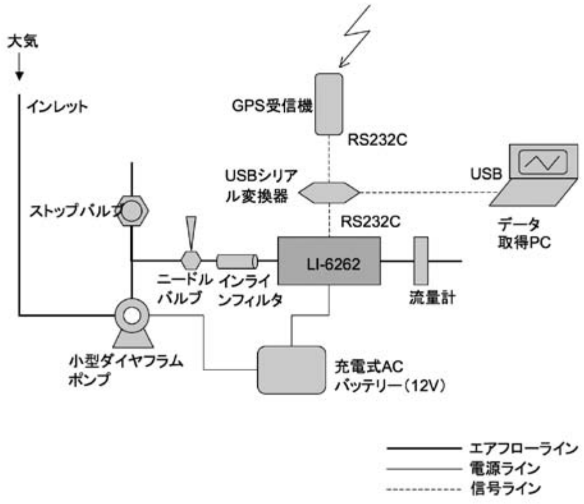

図１　可搬型CO_2濃度観測システムの構成概略図。

本研究で開発した可搬型CO_2濃度観測システムの概略図を図１に示す。本システムは、CO_2濃度分析計本体、サンプル導入系、信号処理系、電源から構成されている。通常、清浄なバックグラウンド大気のCO_2濃度を高精度で測定するためには、0.1ppmv程度の測定精度が要求される。そのため、世界の多くの研究機関において、大気中CO_2濃度を測定するために非分散型赤外分析計（NDIR）が用いられている。本研究では、都市大気観測を主眼に置くが、これに加えて、大気がより清浄な地域での移動観測への拡張を念頭に入れ、高精度測定に適したNDIR（LI-COR社製、LI-6262）を使用した。NDIRにはサンプルセルとリファレンスセルがあり、両セルの中に存在するCO_2分子の量の差を赤外吸収の差として検出することができる。したがって、サンプルセルには測定対象となるガスを一定流量で連続的に流し、リファレンスセルには濃度一定の低濃度ガスを一定流量で流すことが必要になる。分析計本体の性能を確認するために、室内に静置した状態で、濃度一定のリファレンスガスをシリンダーから供給し（ディファレンシャルモードと呼ぶ）、サンプルセルに濃度既知のガスを流して計測した結果、繰り

返し精度は約0.1ppmvであった。自動車に搭載して移動観測をする場合、安全性や機動性を考慮するとリファレンスのためにガスシリンダーを搭載することは困難である。そこで、本研究ではCO_2吸着剤であるソーダライムを充填した吸着筒を利用し、NDIRのチョッピングシャッターディスクの回転によってリファレンスセルにCO_2フリーの空気を流す方法（アブソリュートモードと呼ぶ）を用いることにした。高精度分析のためには、一般に複数の標準ガスを一定時間間隔で測定することで、その都度検量線を決め、サンプルの濃度を決定する方法が用いられる。そのためには、濃度既知のガスシリンダーを複数本用意し、装置とともに搭載しなければならないが、前述のリファレンスガスと同様に、本研究では難しい。そこで、標準ガスによる校正は観測の前後に実施し、観測データを補正することにした。CO_2濃度の計算では、移動中のNDIRのセル温度、気圧などの観測環境の変化に基づいて補正しているが、実際にはNDIRのシグナルに不規則なドリフトが生ずるため、この標準ガスによるキャリブレーションの簡略化によって、測定精度は著しく悪化し、約１ppmvと見積もられる。ただし、直接的に排出源地域を観測する本研究では、基本的な空間構造を把握するのに十分な精度である。なお、NDIRには圧力トランスデューサーが内蔵されており、現場気圧の変化による補正を加えるとともに、後述のように気圧データの出力・保存もしている。

大気サンプルは、内径１／４インチのタイゴンチューブをインレットとして、小型ダイヤフラムポンプで吸引される。このポンプは、DC12Ｖの電源で駆動し、最大消費電力が８Ｗと省電力ながら、５L/minという十分な空気送出能力を有する。重量が80ｇ程度と軽いことも、移動観測に適している。このポンプで吸引された大気サンプルは、そのほとんどがストップバルブを通して排気されるが、そのごく一部が分岐し、ニードルバルブで流量を50cc/minにコントロールされてNDIRへ導入される。これにより、大気サンプルが配管内に淀むことなく、常にフレッシュな空気を導入することができる。サンプルがインレットからNDIRに流れるまでに要する時間は、およそ５秒である。したがって、時速60kmで走行しながら観測した場合、観測位置とNDIRが検知した時点での位置は、およそ80mだけずれていることに注意が必要である。NDIRのサンプル出口側に流量計をつなぎ、観測時に流量が安定していることを常に確認できるようにした。また、NDIRのサンプル導入口には２ミクロンのインラインフィルタを装着し、NDIRのセル内が粒子状の汚染物質などで劣化しないようにした。

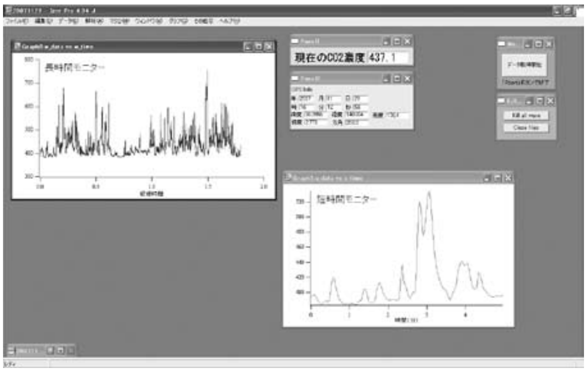

図２　観測中にリアルタイムで観測結果を表示するデータ処理PCの画面のスナップショット。

NDIRには標準でシリアル出力ポートが装備されており、測定値を外部に出力することができる。一般的には、移動観測中に取得されるデータをデータロガーなどに保存するが、本研究では観測中にも濃度の時間空間変動を観測者がリアルタイムで確認できるようにするため、市販のノート型PCと専用に開発したソフトウェアを用いて、ハードディスクにデータを保存するとともに、ディスプレイに観測値を表示できるようにした。NDIRから取得するデータは、検出器電圧値、CO_2濃度、セル温度、気圧、露点であり、１秒、または２秒ごとに取得した。また、観測開始後の途中から、GPSによる位置情報の取得をできるように改良した。GPS信号の受信のために、市販の携帯型受信機（GARMIN社製GPS38EX）を用いた。このGPS受信機にもRS232Cシリアル信号出力ポートが装備されており、容易に位置情報を外部に出力することができる。このGPS受信機のシリアル出力は、米国海洋電子機器協会が定めたNMEA-0183プロトコル、バージョン2.0に従っており、様々なGPS情報を独自のテキスト形式で送出する。本研究では、このGPS情報とNDIR出力とを同期させてデータを取得するために、独自にデータ処理プログラムを作成した。GPS情報として取得するデータは、日付、時刻、緯度、経度、高度、移動速度、進行方向である。NDIRとGPS受信機のRS232Cシリアル信号を同時にPCに取得するため、４チャンネル・シリアル－ＵＳＢ変換器（Keyspan

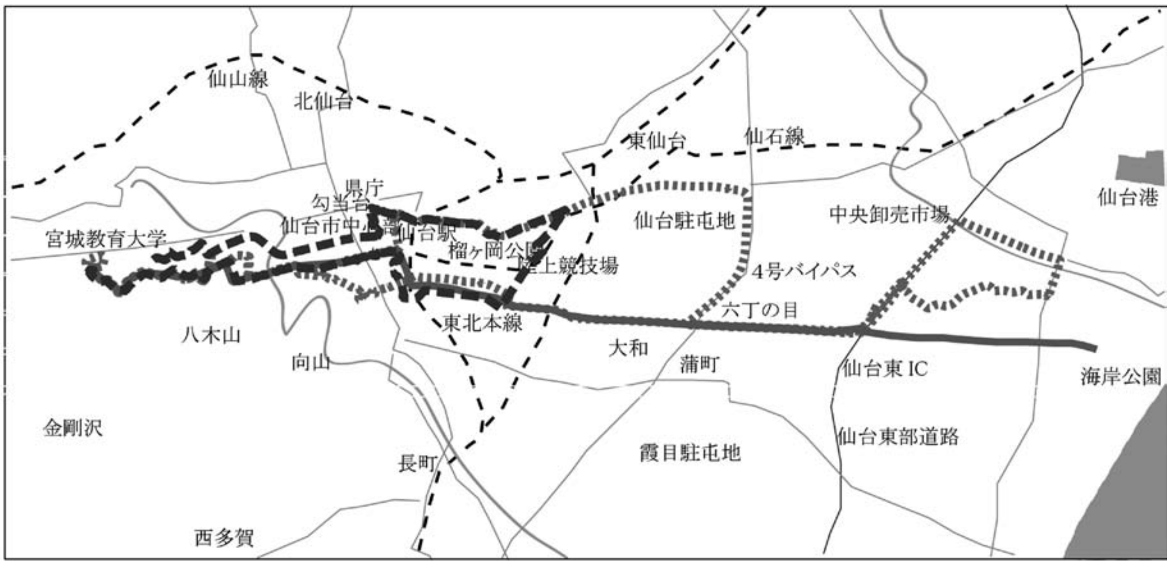

図３　観測の経路を表す仙台市内の概略地図。太い線が観測の移動経路を示す。（太実線：2007年５月14日、太破線：2007年７月27日、太点線：2007年11月29日）

社製USA-49WG）を用いた。PCでは、統合ソフトウェア環境であるIGOR Pro（WaveMetrics社製）を用いて、独自のコントロールプログラムを作成し、USBを経由して仮想シリアルポートから自動的にデータを取得した。図２は観測中にPCに表示される画面の例のスナップショットである。

野外での移動観測では、電源の確保が重要である。本研究では都市大気の観測のための移動手段として乗用車を用いており、乗用車のシガーソケット等からDC電源を使用することは可能である。しかし、外部からの電源供給を必要とするシステムでは、例えば他の移動手段への搭載や遠隔地への設置といった将来的な拡張性を確保できない。したがって、本研究ではバッテリーを搭載した自立型システムを開発した。バッテリーには、市販のDC12Vシール式鉛蓄電池（大自工業社製、SG-1100）を用いた。バッテリーからの電源供給が必要な機器はNDIRとポンプであり、合計した消費電力は約10Ｗである。満充電時では１０Ｗの消費電力で約５時間の供給が可能となる。実際の観測では、バックアップとして予備のバッテリーも搭載した。なお、ノート型PCの電源は必要に応じて搭載した乗用車から供給した。例えば他の移動形態での観測では、必ずしもPCを用いて常時モニターする必要はなく、むしろ小型で外部電源を必要としないデータロガーなどの利用が考えられる。

実際の観測では、これらの機材を一つのポリテナーに収納し、そのまま乗用車の座席に設置できるようにした。また、大気サンプルを導入するためのタイゴンチューブは、乗用車の助手席の窓から外に出し、車体前方部に固定した。その際、車内から観測者の呼気が漏れだして観測に影響しないように留意した。GPS受信機は車内のフロントガラス付近に設置した。悪天候時にはチューブ先端から雨や雪を吸い込む可能性があるため、観測は降雨や降雪のないときに実施した。

３．結果と考察

観測は2007年５月14日、７月27日、11月29日にそれぞれ実施した。観測時に取得されたGPSの緯度、経度情報をもとに、それぞれの移動観測の経路を概略地図と共に図３に示す。なお、GPS情報の取得は７月の観測から導入されたので、５月の観測における位置情報は、筆記メモによる時刻と位置の関係、およびNDIRの圧力トランスデューサの出力をもとに作成した。３回の観測における移動経路は共通部分も多いため、高度に伴う気圧の変化を用いることで、位置をある程度推定することが可能となる。すなわち、GPS導入後の位置と気圧の変化をもとに、５月の観測時の気圧データから位置（経度のみ）を逆推した。その結果を、図４に示す。これによって、５月の観測結果についても、濃度データの経度分布を調べることが可能となった。観測時の移動は、宮城教育大学を出発して東

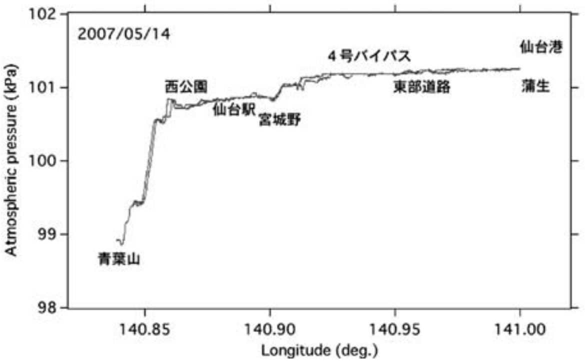

図４　2007年５月14日に実施された観測での、NDIR の圧力トランスデューサで計測された大気圧の経度分布。経度は観測時に記録された幾つかの時刻と目視位置情報をタイ・ポイントにして、往路・復路の気圧変化（すなわち高度変化）をシンクロナイズするように推定されたもの。

に向かい、市内中心部を通過して、仙台平野東部から折返し、大学に戻るように実施した。これは、主に仙台市内の東西方向のトランセクトに沿って観測することにより、都市中心部と郊外との濃度のコントラストを明らかにするためである。観測で得られた CO_2 濃度を時間軸に対してプロットしたものが図５である。CO_2 濃度は非常に大きな変動性を示し、また平均的な濃度も高い。仙台付近でのバックグラウンド大気の観測より、2007年における年平均濃度がおよそ386ppmv（東北大学大気海洋センター、私信）であることを考

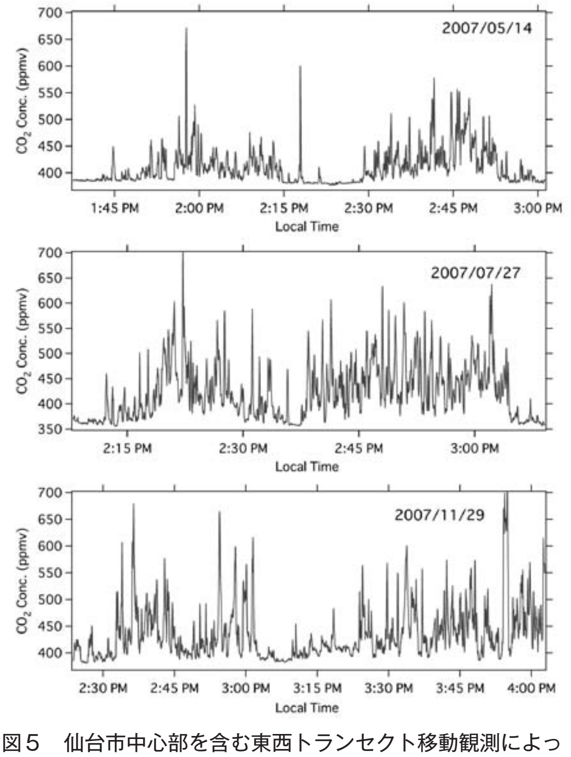

図５　仙台市中心部を含む東西トランセクト移動観測によって得られた大気中 CO_2 濃度の時間軸に対するプロット。

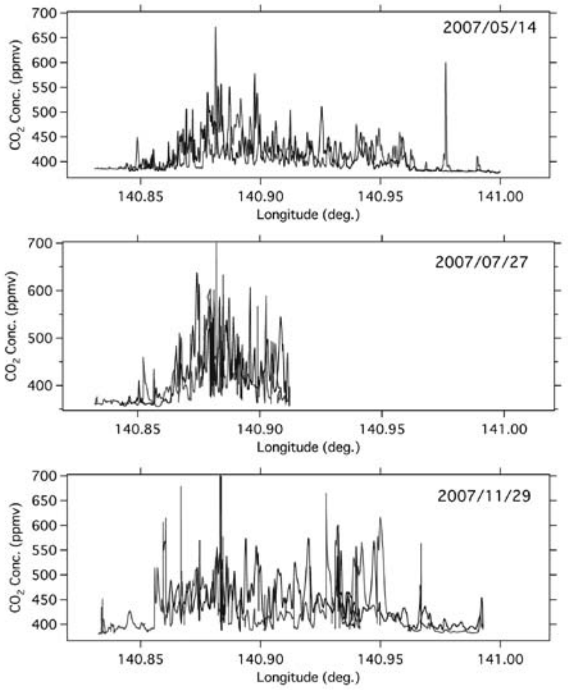

図６　仙台市中心部を含む東西トランセクト移動観測によって得られた大気中 CO_2 濃度の経度分布。

慮すると、本研究で観測されたような高濃度は、発生源の中を通過した場合に得られる濃度変化の典型例であると考えられる。すなわち移動排出源である自動車が高い密度で都市域に集中しているため、全体的に高濃度であり、かつ、その点状の移動排出源に対する観測者の距離に応じて、大きな濃度変動を生じているものと考えられる。しかし、その濃度変動はただ乱雑なだけではなく、都市大気全体で見た場合の大規模な構造を有している。観測に要した時間の長短はそれぞれ異なっているが、概ねどの観測の場合にも、濃度が450～600ppmv 程度の高濃度域が前半と後半に現れていることがわかる。この観測が東西トランセクトを往復して実施されていることから、このダブルピークの構造が、都市中心部の高濃度に対応している。そこで、CO_2 濃度の空間分布を明らかにするために、GPS から得られる経度に対してプロットしたものが図６である。この図から、前述の高濃度域がほぼ同じ経度帯に重なり、仙台中心部の高濃度域が明瞭に示されることがわかる。その高濃度域の中心の経度は140度52分30～50秒付近であり、国道４号線から仙台駅西口にかけての中心部に相当している。このような都市中心部での CO_2 濃度の高まりは、その場所での自動車の交通量の多さを鑑みれば、容易に想像できるものであるが、

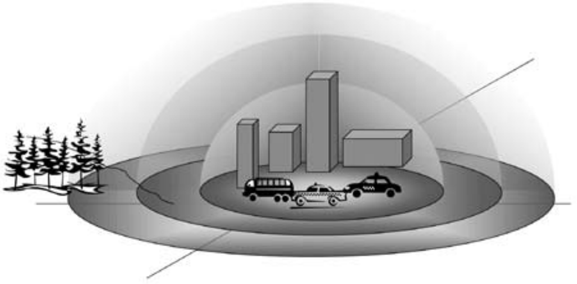

図７　都市大気の「CO_2アイランド」現象の模式図。交通量の多い都市中心部において、自動車の燃料消費に伴うCO_2排出が集中することによって、大気中CO_2濃度の高濃度領域が形成される。

具体的に空間的な構造を明らかにした例はあまりない。ここでは、図７に模式的に示したような、都市中心部でのCO_2濃度の高まりを、「CO_2アイランド」現象と呼ぶことにする。これは、都市部の気温がその周辺に比べて異常な高温を示す状況を「ヒートアイランド」現象と呼ぶことに模したものであるが、両者の直接的な関連を意図するものではない。ただし、その形成の要因については、部分的に共通の効果を生むものも存在すると考えられる。自動車のCO_2排出が、都市域の「CO_2アイランド」形成の主要因であることは疑いがないが、その構造の維持には、自動車以外の都市特有の要因が関わっているであろう。すなわち、高層建築物による地表面の幾何学的な構造変化が地表付近の大気輸送に与える影響や、海陸風の遮蔽効果などは、熱にも物質輸送にも似たような効果を与える可能性がある。また、ヒートアイランドの形成にとって自動車の人工排熱が無視できない熱源である場合、その自動車が同時にCO_2も排出しているという点で類似性がある。

５月と７月の観測では、CO_2アイランドの構造が明瞭であるが、11月の観測では、仙台駅の東側でも比較的高い濃度が見られている。11月の観測時には、東部において国道４号線バイパスと国道45号線を移動しており、交通量の多い地域を走行したことがその原因である。観測した濃度を地図上に立体的に表示した図８によって、その様子が明瞭に見られる。仙台駅東部では、東西方向に走る経路を比較すると、南側（新寺小路）よりも北側（国道45号線）で濃度が高い。このことは、幹線ごとの交通量に応じて、付近の大気濃度が空間的に大きく異なっていることを意味している。したがって、仙台のCO_2アイランドの構造をより詳細に調べるためには、東西トランセクトに沿った観測だけではなく、より密度の高い観測が必要である。

高濃度域における激しい濃度変化の中には、信号などで停車した際に直接前方の車両の排気ガスを吸引したことによる異常な高濃度が含まれる可能性がある。一般に、バックグラウンド大気の観測では、人為発生源の影響と思われる異常な高濃度はアウトライヤーとして解析から除外される。一方、排出源の中で観測する場合、全体的に高濃度であるため、異常値を除外するための基準は明確ではない。一般に自動車排気ガスそのもののCO_2濃度は、数％程度以上であるが、そのような異常な高濃度は本研究では観測されなかった。

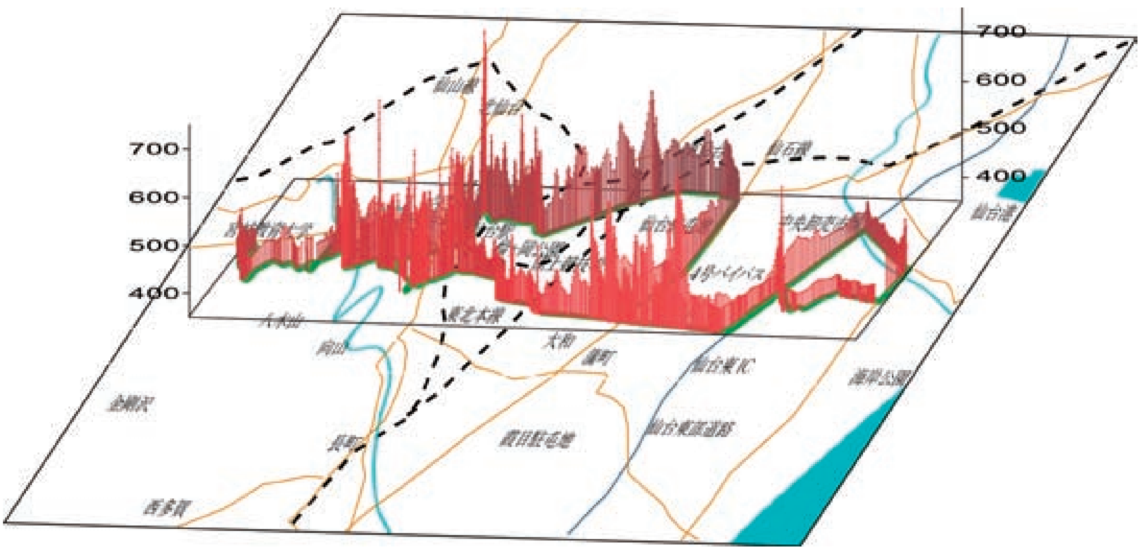

図８　2007年11月29日に観測された仙台市内の大気中CO_2濃度の平面分布図。観測の移動経路を示す地図上に、赤いバーの長さでCO_2濃度を三次元的に表示している。図中の縦軸は濃度（ppmv）を示す。

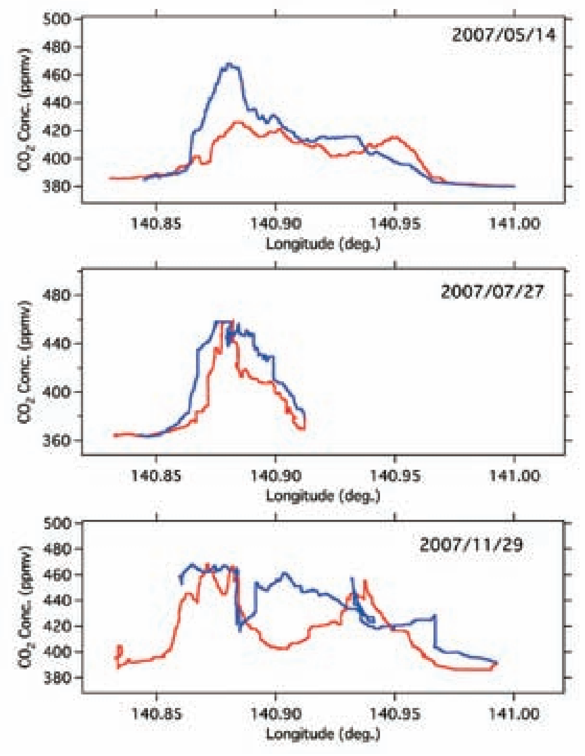

図９　仙台市中心部を含む東西トランセクト移動観測によって得られた大気中 CO_2 濃度の経度分布。ただし、観測時の移動速度データに基づいて停車時の異常値を除外し、メジアン・スムージング法によって平滑化した結果。それぞれ、赤線が往路、青線が復路。

しかし、停車中に観測される短時間のスパイク状の濃度変化は、やはり代表的な都市大気の濃度とは区別する必要がある。そのような急激な濃度変動を含めて平均化した場合には、平均値を過大評価することになる。本研究では、GPSによって移動速度データをリアルタイムで取得しているため、停車時の観測データを容易に識別、除外できる。さらに、短時間のスパイク状の濃度変化を除外して代表的な濃度変化を得るために、時間軸上のデータに対し５分幅のメジアン・スムージング法を適用した。このようにして得た平滑化されたデータを経度に対してプロットしたものが図９である。この結果を図６と比較すると、短時間の濃度変動が除外されて、概ね濃度の下側包絡線と一致していることがわかる。このように代表的な都市大気の濃度で見た場合、郊外に比べて都市中心部では、およそ50～100ppmv 程度濃度が高いことがわかる。また、11月に観測された仙台駅東部の観測経路による平均的な濃度の違いは、最大で50ppmv 程度であることも判明した。

仙台市の中心部から東西方向に最も離れている青葉山地域と仙台港に近い地域では、いずれも濃度が低く、比較的バックグラウンド大気の濃度に近い値を示している。それらの濃度は、５月には380～385ppmv、７月には364ppmv、11月には390ppmv 程度であった。これまでの北半球中緯度におけるバックグラウンド大気の観測から、日本付近の大気中の CO_2 濃度は、５月以降の森林生態系における植物の展葉時期に大気濃度が低下しはじめ、７～８月に極小を迎え、その後９～10月頃まで増加することが知られている（Tanaka et al., 1988）。仙台の郊外の地表付近では、このような植物の光合成・呼吸活動の影響が大きいと考えられる。実際、上述のように、本研究で観測された郊外の濃度は、このようなバックグラウンド大気における CO2 濃度の季節変化と同様の傾向を示している。特に、７月に観測された364ppmv の低濃度は、ローカルな植生の光合成の影響が大きいと考えられる。

４．まとめと今後の課題

本研究では、都市大気中の CO_2 濃度の空間構造を明らかにするために、可搬型の CO_2 濃度観測システムを開発し、これを仙台市の中心部と郊外の移動観測に適用した。その結果、交通量が多い仙台駅周辺を中心として CO_2 濃度の高濃度域、すなわち「CO_2 アイランド」現象が存在することを明らかにした。さらに、観測する経路の違いによっても、交通量の違いに起因すると思われる大きな濃度差があることがわかった。交通量が多い都市中心部において、自動車の燃料消費に伴う CO_2 排出が多いであろうことは自明であるが、実際に大気中の CO_2 濃度の空間的な構造として、その影響を直接的に示したことは意義深いと考えられる。

本研究では、仙台における CO_2 アイランドの基本構造を明らかにしたが、その詳細を明らかにし、さらに研究を発展させるためには、いくつかの課題が考えられる。まず、観測頻度をより高くする必要がある。都市域の CO_2 濃度は、主に排出源強度を決めている交通量に支配されていると考えられる。交通量は、月や曜日、時間帯に大きく依存するであろう。また、既に述べたように、経路の違いによる濃度の違いも大きい。したがって、空間的にも時間的にも、より密な観測をしなければ、CO_2 アイランドの詳細を解明することはできない。ただし、そのために多地点に観測装置を配

置するのは、コストの面から見て得策ではない。やはり、本研究で開発したような可搬性を活かした移動観測が有効である。しかし、観測者の自家用車を用いた運用などでは自ずと限界があるため、将来的な発展として、公共交通機関への観測システムの搭載などが有望である。例えば、仙台市交通局が運行する定期路線のバスに、本研究で開発した観測システムを搭載し、自動的にデータを収集するような仕組みが期待される。この目的のためには、観測装置のさらなる軽量化、標準ガス導入システムの装備などが必要となるであろう。また、これをさらに発展させると、鉄道会社との共同による、より広域の大気観測なども想定される。実際に、バックグラウンド大気の観測では、国立環境研究所、気象研究所、JALグループなどが中心となって、国際航空便の貨物室にCO_2濃度の自動連続観測装置を搭載し、世界中の大気の濃度観測を実施している（Machida et al., 2008）。例えば、新幹線などの移動距離の長い列車などをプラットフォームにすることができれば、複数の大都市の大気を短時間に連続して観測することができるであろう。観測の時間空間的な拡充と共に、自動車の交通量などのデータと組み合わせた解析が必要である。前述のように、自動車はCO_2の移動排出源であるので、インベントリデータに基づく地域の放出量と、実際の放出の地域分布は必ずしも一致しない。交通量データと、本研究のアプローチによるCO_2濃度のデータを組み合わせることで、実質的な排出源強度の分布を推定することができれば、自動車のCO_2排出の抑制を目指した道路交通の施策をより具体的に検討するための有益な情報となるであろう。

謝　辞

仙台市内における観測では、卒業研究の一環として山本直也氏に協力して頂きました。その貢献に深く感謝いたします。

参考文献

Energy Information Administration, The International Energy Annual 2005, available on EIA's web site at: http://www.eia.doe.gov/iea.

IPCC, Climate Change 2007–The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC, J. T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden and D. Xiaosu (Eds.), Cambridge University Press, UK. 2007.

Machida, T., Matsueda, H., Sawa, Y., Nakagawa, Y., Hirotani, K., Kondo, N., Goto, K., Ishikawa, K., Nakazawa, T. and Ogawa, T., Worldwide measurements of atmospheric CO2 and other trace gas species using commercial airlines, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **25**, 1744-1754, 2008.

Tanaka, M., T. Nakazawa, S. Aoki and H. Ohshima, Aircraft measurements of tropospheric carbon dioxide over the Japanese Islands, *Tellus, 40B*, 16-22, 1988.

中澤高清、菅原敏：気象研究ノート、「温室効果気体の広域観測と地球規模循環」215, 53-65, 2007

（平成20年９月29日受理）