

# 仙台市内における高空間分解能の二酸化炭素濃度観測

\*菅原 敏・\*\*高橋 健介

High spatial resolution measurements of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration in Sendai

SUGAWARA Satoshi, TAKAHASHI Kensuke

## 要 旨

小型の二酸化炭素測定器を用いて、仙台市中心部における移動連続観測を行った。その結果、郊外に比べて交通量が多い仙台市中心部において濃度が高いことに加え、主要な道路ごとに交通量に応じた微細な濃度分布が存在することが判明した。

Using small instruments for carbon dioxide measurements, continuous observations were carried out in the center of Sendai City. As a result, the higher concentration was found in the center of Sendai City compared to the suburbs due to a large amount of traffic. It was also found that the fine structures of concentration distribution exist for each main road in accordance with the traffic density.

**Key words** : Atmospheric CO<sub>2</sub> (大気中二酸化炭素)、CO<sub>2</sub> emission (二酸化炭素排出)、Sendai City (仙台市)

## 1. はじめに

我が国の地球温暖化防止の推進において、低炭素社会への転換、温室効果気体排出削減は最大の課題である。日本は世界に先駆けて、将来の大幅な温室効果気体排出削減を提案した。しかし、2011年3月11日に発生した東日本大震災と、それに続く原子力発電所の事故に伴い、エネルギーの需給バランスは激変し、2012年5月には国内の原子力発電所の全てが停止する事態となった。その結果、発電事業における火力への依存度は増大している。国難に直面する現在にあっては、エネルギーの安定供給維持のために短期的には温室効果気体排出削減を棚上げにせざるを得ない状況であるが、5年～数十年といった中長期的視点でみると、エネルギーの安全かつ安定な供給と温室効果気体排出削減の双方の両立という難問を解決しなければならな

い。この温室効果気体排出削減のための努力は、より国民に身近な自治体、企業活動、生活の場などに求められつつある。温室効果気体の研究は歴史的に見ると、グローバルスケールに主眼を置くものから発展してきた(例えばIPCC第4次評価報告書に詳しい)。一方、近年では、温室効果気体の衛星観測や数値シミュレーションの高度化、さらに温室効果気体の排出に関する国際的な取り決めに対応して、温室効果気体の研究もグローバルスケールから大陸スケールへ、さらに国家スケールへと、精密化・ダウンサイジングする傾向にある。本研究が目指すのは、さらにその先を見据えた、地域スケールでの温室効果気体の挙動の解明である。近い将来、このような地域レベルでの削減努力に呼応して、地域スケールでの温室効果気体の挙動の解明が必須となる。例えば、都市大気中の二酸化炭素濃度を知ることで、将来電気自動車が普及した場合、交

\* 宮城教育大学教育学部理科教育講座

\*\* 宮城教育大学教育学部理科教育専攻(現 大学生生活協同組合東北事業連合)

通が集中する地域における二酸化炭素排出量が減じたことを検出できる可能性が高い。このような、大気中の濃度を詳細に調べることによって放出源の分布や強度の情報を得る手法は、グローバルな温室効果気体の研究におけるトップダウンアプローチと呼ばれており、これと同様の手法を地域スケールに適用することが可能である。このような観測がカバーすべき空間的スケールは、数キロから数十キロ程度と考えられる。現状では、このような地域スケール、あるいは都市大気での温室効果気体の観測は、公害対策の一環として定点で実施されているものがほとんどであり、その都市を含む空間的な分布を明らかにしている例はほとんどない。これまで主にバックグラウンド大気の温室効果気体の研究に取り組んで来たが、その過程において、船舶や航空機を用いた高精度の移動観測の手法を用いてきた。この手法はより小さなスケールでも応用が可能であり、既に仙台市内において予備的な二酸化炭素濃度の移動観測を実施してきた。この観測手法をより発展させ、さらに二酸化炭素だけではなく、メタンや六フッ化硫黄などを同時に計測することで、これまでに知られていない都市大気中の温室効果気体の実態が明らかにされるものと期待される。また、本研究の着想には、温暖化防止に関する社会的教育や啓蒙の観点に基づいた側面も大きい。多くの国民が、地球環境の保全のために温室効果気体の排出削減が必要と考えていながら、自らの住む自治体において、その大気に大量の二酸化

炭素を自分たちが排出していることを実感できていない。教育現場における環境教育の場でも、清浄なバックグラウンド大気における二酸化炭素濃度の増加傾向のみが教材として取り上げられており、遠い国の出来事かのように錯覚させてしまう傾向にある。このような観点から、地域に立脚した温室効果気体の観測と、それによって明らかになる都市部での排出の実態解明が、地域の脱炭素社会に向けた教育・啓蒙活動に役立つばかりではなく、地方自治体の温暖化対策などの施策にも貢献できるものと期待される。

## 2. 観測方法

従来の研究では、高精度の非分散型赤外分析計(NDIR、LI-COR社製、LI-6262)を使用し、可搬型観測システムを開発して観測を行った(菅原、2008)。しかし、バッテリーなどを含む観測システム全体の重量は20kg程度となるため、自動車に搭載することで移動観測を行う必要があった。また、NDIR本体自体が高価であるため、複数の観測システムを構築することが困難である。このことは移動観測の頻度を高くすることの障害となっていた。都市大気中の二酸化炭素濃度を計測するために必要な精度を保ちつつ、より軽量でコンパクトな測定器を用いることで、より簡便に、かつ複数機器による多地点同時観測が可能になると考えられる。そこで、本研究では新たに小型二酸化炭素測定

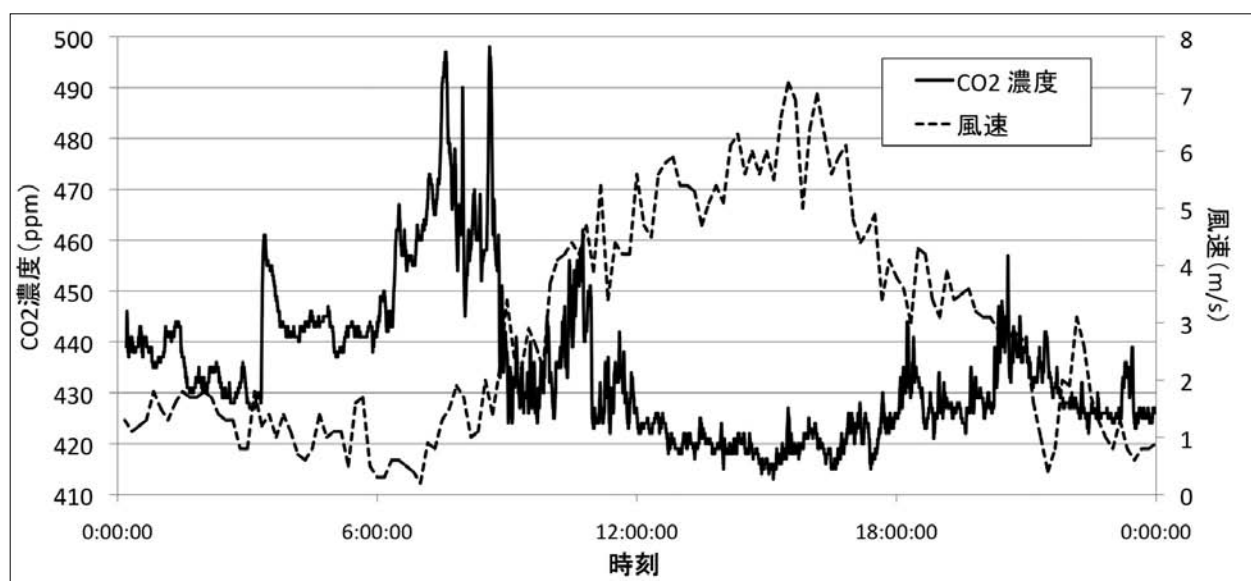


図1 愛宕上杉通に面した青葉区錦町1丁目に設置した小型二酸化炭素測定器を用いて観測された、2011年2月23日の二酸化炭素濃度の時間変化。気象庁発表の同日の風速も合わせて示す。

器（ユードム社製、C2D-W02TR）を導入した。この測定器の測定精度はおよそ $\pm 50$ ppmであり、LI-6262と比較すると2桁以上悪いが、重量が130gと極めて軽量であり、市販のUSBバッテリーで長時間の駆動が可能であるため、都市大気測定には適している。microSDカードに一定時間間隔でデータを保存することができるため、例えば自転車などに載せて市街地における移動観測を行うことが可能である。また、車両が通行できないような森林地帯などでの観測にも応用可能である。従来の観測システムでは、移動観測の位置を記録するために、携帯型受信機（GARMIN社製GPS38EX）を搭載し、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て使用した。本研究では、二酸化炭素測定器を小型化したことから、GPS情報の取得についても小型軽量化を行った。GPSでは緯度と経度の情報が取得できれば十分であるので、市販のGPS受信機（MobileAction社製、GT-600）を使用した。このGPS受信機は充電バッテリーが内蔵されており、二酸化炭素測定器と同様に一定時間間隔でデータを保存できる。ただし、二酸化炭素測定器とGPSはそれぞれ個別に動作し、同期したデータ取得は行わないため、観測終了後に両データの時間を同期させて解析を行うこととした。

### 3. 結果と考察

はじめに仙台市中心部における二酸化炭素濃度の時間的な変動特性を明らかにするために、定点観測を実施した。設置場所は、仙台市内でも交通量が比較的多い愛宕上杉通に面した青葉区錦町1丁目である。2011年の2月から8月まで設置し、その間に断続的に連続観測を実施した。図1は定点観測によって得られた、ある1日の二酸化炭素濃度の変化を示したものである。気象庁が公開している仙台管区気象台における風速データを合わせて示した。これまでの研究でも明らかのように、仙台市中心部では一般的にバックグラウンド大気に比べて常に高い濃度が現れることが多い。この観測のケースでも最低濃度が約420ppmであり、都市域における自動車排気ガスなどの影響を受けていることがわかる。しかし、その濃度は1日の中でも大きく変化しており、朝方にはおよそ500ppmの高濃度が単発的に現れている。この高濃度は朝方の通勤による交通量の増加によって出現していると考えられる。同時に、風速の変化にも影響を受けていることが判る。すなわち、二酸化炭素濃度と風速の間に逆相関の傾向が見られる。この日のケースでは、風速が大きい日中に移流の効果によって市街地の高濃度の空気塊が流され、郊外の低濃度の空気に置き換わるためと考えられる。

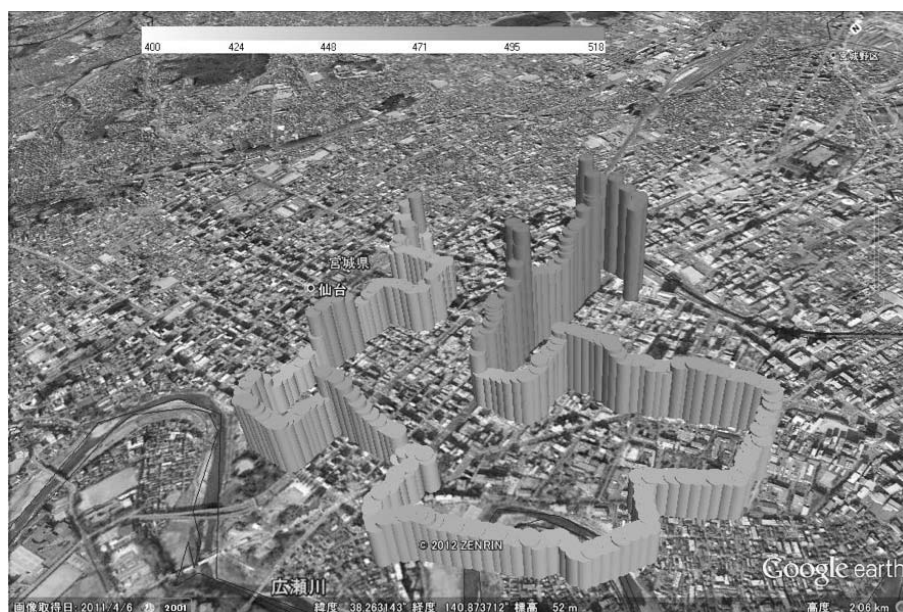


図2 小型二酸化炭素測定器を用いた移動連続観測の結果の一例。2011年12月29日の観測結果を、同時に取得しているGPS情報をもとに、Google Earthにオーバーレイして可視化したもの。円柱の高さと色の濃さが二酸化炭素濃度の高さを表している。最も濃度が高いところが仙台駅前付近に対応している。

前述のように、都市大気の二酸化炭素濃度は、自動車排気ガスなどの二酸化炭素の排出源の強度だけではなく、風速や境界層の状態などの気象学的な条件にも影響を受けるが、排出源である自動車交通の集中に伴って、基本的に都市大気中の濃度が高い状態で維持されている「CO<sub>2</sub>アイランド」の状況を把握することは排出の可視化の点において重要である。以前の自動車を用いた移動観測でも、「CO<sub>2</sub>アイランド」の存在は確認されているが、観測頻度が少ないために、平均像を捉えているとは言い難い。そこで、本研究では、小型二酸化炭素測定器を自転車に搭載して、より頻度の高い観測を実施した。さらに、GPS情報をもとに、地図上に濃度分布をオーバーレイすることによって、より視覚的に「CO<sub>2</sub>アイランド」を示すことにした。地図へのオーバーレイを行うために、フリーで利用できるコンピュータソフトウェアである Google Earth と、観測値から立体投影図を作成するための KML ファイルを作成する GE Graph を利用した。図2は、一例として2011年12月29日の夕方に実施した観測の結果を示したものである。仙台駅付近から青葉通にかけて

500ppm 程度の高濃度が観測されているが、広瀬川沿いなど、市街地から離れると420ppm 程度にまで濃度が低下している。他の日の観測でも概ね同様の傾向が見られており、交通量の多い幹線道路では明らかに濃度が高い状態となっている。すなわち、小型二酸化炭素測定器を用いた観測でも、都市大気にみられる二酸化炭素濃度の高い状態を観測できることがわかった。図3は本研究によって得られた全移動観測データを合成して作成した二酸化炭素濃度の分布図を示している。この図から明らかなように、仙台駅前付近の他にも、上杉1丁目交差点付近や五橋付近など、やはり交通量の多い場所において二酸化炭素濃度が周囲よりも高い傾向にあることが判る。さらに微細な空間的濃度変化を見るために、東二番町通を南北方向に移動した際の緯度に対する濃度分布を図4に示した。この図から、幹線道路の交差点付近ごとに、鋭い濃度のピークが見られることが判る。すなわち、自動車排気ガスに由来する二酸化炭素排出の実態が、個々の道路や交差点ごとの極めて微細なスケールにおいて、明瞭に可視化されたと言える。

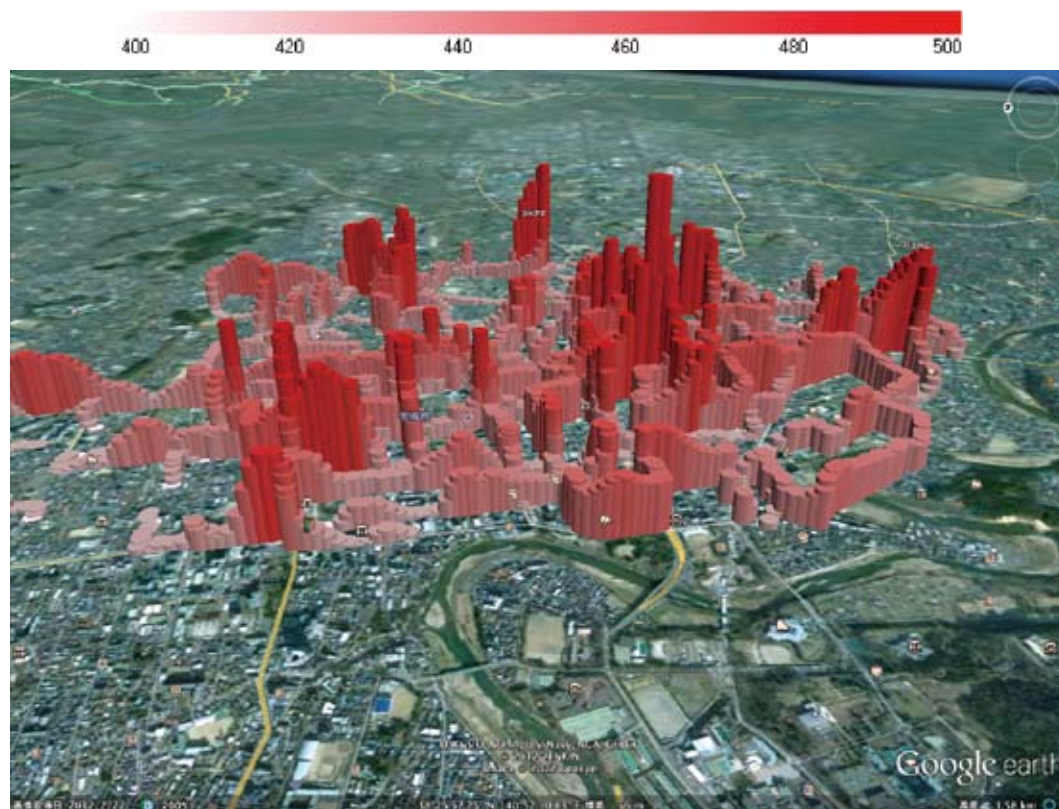


図3 2011年10月から2012年1月にかけて実施した移動観測によって得られた仙台市中心部における二酸化炭素濃度の空間分布。濃度の高さをバーの高さと色で表し、Google Earth にオーバーレイして、仙台市中心部を西側から俯瞰した様子。最も濃度が高いところが仙台駅前付近にあたる。

#### 4. 今後への応用と展望

本研究では、移動しながら大気観測を可能とする小型二酸化炭素測定器を用いて、仙台市の市街地を中心として、道路交通が集中する地域、住宅地、郊外などを含む圏内を観測した。観測システムを自転車等に搭載することで、空間分解能を最高で10メートル程度にまで高め、都市域の微細な濃度分布を検出可能にした。特に、交通が集中するような幹線道路とそれを含む周辺地域を中心に重点観測を実施し、交通量に応じた二酸化炭素濃度の空間構造の変化、時間帯に応じた変化が今後明らかになると期待される。この手法を発展させることで、仙台市内の市街地と郊外とを結ぶ東西方向および南北方向に、定期的な往復観測を実施し、より詳細な二酸化炭素濃度の分布を明らかにできる。仙台市では市街地から15~20km 圏内に海岸線や森林山岳地帯が存在するため、移動距離を広げることで、より広域的な濃度コントラストが明らかになるであろう。得られた濃度分布を、温室効果気体観測衛星 GOSAT のデータと比較し、二つの異なる地域観測の違いや双方の有用性を検証することも想定される。さらに、仙台市以外の都市や、逆に人間活動が少ない地域などにこの観測システムを応用し、都市ごとの差異や、より広域的にみた放出源強度の違いなどを明らかにすることが可能である。

本研究は、地域レベルにおいて低炭素社会への転換

を迫られている現代において、将来的な温室効果気体排出削減をにらみ、大気の観測をとおしてそれらを客観的に評価し得る手法を構築するものであり、地球温暖化防止を推進する上で極めて重要な研究である。この手法が確立された場合、将来的には他の大都市や都道府県単位にまで応用が可能であり、全国の自治体の温室効果気体排出削減や施策の策定に寄与できる可能性がある。また、従来の温室効果気体観測がバックグラウンド大気を対象とし、その空間的なスケールが大陸規模であるのに対して、本研究では地域の排出源の特性に対応して、数十 m から数十 km のスケールという微細な構造の解明を目指すことが大きな特徴である。従来は、都市域の大気は汚染源に近接しているため、平均的に濃度が高くなるとともに、極めて変動性が大きくなるために、都市大気を対象にすることはグローバルスケールの研究にとって科学的意義が薄いと考えられてきた。これに対し、本研究では逆に、地域スケールの排出源の影響をターゲットにしているため、むしろ都市大気を総合的に観測することに新たな科学的意義があるものとする。仙台市は東北地方の最大の都市であり、人口百万の政令指定都市である。しかし、東京都心などのメガ・シティなどと比較すると、社会経済活動は地理的にコンパクトに集中しており、本研究の地域スケールでの観測の試みに最も適しているといえる。すなわち、数十 km 内に人間活動が小さい地域が隣接しており、郊外と市街地とのコントラストが

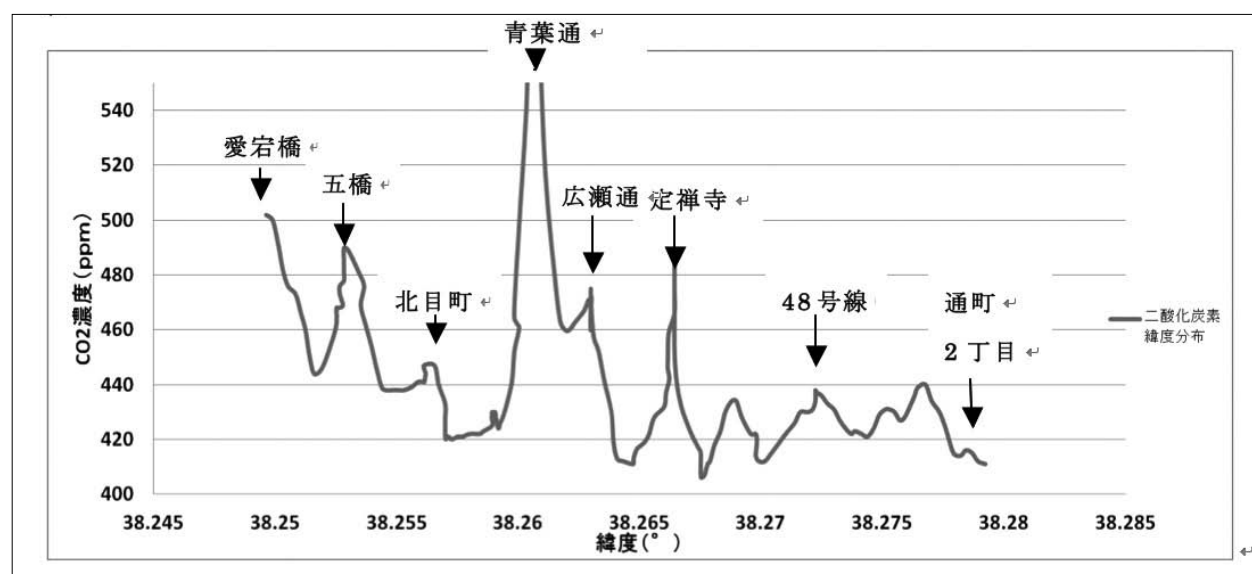


図4 2011年12月7日に東一番町通を南北方向に移動しながら観測したときの二酸化炭素濃度の緯度分布。幹線道路との交差点付近でスパイク状の濃度の極大が見られている。緯度は十進法で表している。

ら「CO<sub>2</sub>アイランド」現象が顕著に見られるという特徴がある。また、仙台市は独自に地球温暖化対策推進計画を策定し、積極的に温室効果気体排出の抑制に取り組んでいる。本研究の結果を、積極的に地域に還元することにより、一層地域における革新的低炭素化が効率的に進むものと考えられる。特に、仙台市のように、温室効果気体総排出量に占める自動車など運輸部門からの排出量の割合が極めて高い地域では、道路交通に伴う二酸化炭素排出によって都市域大気の「CO<sub>2</sub>アイランド」現象の現状を明らかにすることができるかと期待される。本研究の重要性は、将来的な波及効果にも大いに期待できる点である。将来的にみて、「CO<sub>2</sub>アイランド」のような現象がどのように変化していくのか、という点は重要である。より長期的な視点で見た場合、地球温暖化防止の推進によって、モーダルシフトや、電気自動車の普及、道路交通行政の変革などに伴って、「CO<sub>2</sub>アイランド」現象は弱まってゆく可能性もある。本研究の手法により、将来の都市大気を現在と比べることで、低炭素社会化の実質的な評価が可能になる。この将来的な活用のためにも、いま、地域スケールでのトップダウンアプローチを確立しておく必要がある。

温室効果気体の排出を削減し、低炭素社会へ移行することは、地球温暖化防止推進の中核である。この観点から、本研究は以下の意味において、地球温暖化防止の推進に寄与するものと期待される。本研究の特徴は、地域に立脚した温室効果気体の研究であるという点である。地球温暖化防止は全国一律に推進され得るものではなく、地域の特徴、特有の事情に応じて、地域が主体となって推進されることが望まれる。今後、地域レベルにおいて、低炭素社会へと移行する上で、やはり地域レベルでそれを評価する手法が必要となる。仙台市においては、運輸部門からの二酸化炭素排出の割合が最も高いという特徴があり、低炭素社会への取り組みにおいては道路交通を中心とする運輸部門からの排出削減が最大の課題となる。現時点における都市大気の温室効果気体濃度に運輸部門をはじめとする排出源がどれだけ影響を与えているのかを明らかにし、また、将来の排出削減の成果を客観的に大気観測から知るための手法を確立することで、地域の地球温暖化防止推進へ寄与する可能性がある。

これまで温室効果気体の循環の研究では、グローバ

ルな視点での循環（例えば二酸化炭素では、広域的な海洋、陸上植物圏と大気とのそれぞれの交換を考える大規模な炭素循環）が主流であった。しかし、温室効果気体の衛星観測が可能となりつつある現在は、空間分解能が飛躍的に高くなり、それに伴って、解明すべき放出源・吸収源の空間的なスケールもより小さくなってきた。本研究は、地域のスケールで、主要な排出源の周辺を最大級の空間分解能で計測するものであり、次世代型の温室効果気体研究として新たな方向性を示すものである。将来的にはこの手法を拡張し、地域の公共交通機関や、都市間を移動する鉄道などに搭載するなど、様々な応用が可能であり、学術的な波及効果が期待される。また、地域の大気の温室効果気体の実態を広く市民に公開することにより、温室効果気体の排出が市民一人ひとりの身近な生活や経済活動に伴うものであることを実感できるようになる。国民の多くは、自分自身の温室効果気体排出を日常生活において実感することができない。そのことが、民生部門の低炭素化を阻害する一つの要因となっている。すなわち、本研究は、目に見えない地域の温室効果気体排出の可視化の役割を担うことができると期待される。さらに、地元の学校などの教育機関に、本研究で開発された観測装置をより簡便にしたものを配置し、温室効果気体観測ネットワークを構築し、環境教育に活かすなどの応用が考えられる。

## 参考文献

- 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.
- 菅原敏、仙台市中心部における「CO<sub>2</sub>アイランド」現象、宮城教育大学紀要 43, 79-87, 2008.

(平成24年9月28日受理)