

# CO<sub>2</sub>濃度の空間代表性に関する考察～ドローンを利用した環境教育プログラムの開発に向けて

A study on spatial representativeness of CO<sub>2</sub> concentration – Toward to environmental education program using a drone

岡村 聖\*・高木祥太\*\*・伊藤雅一\*・林 敬三\*

OKAMURA Kiyoshi, TAKAGI Shota, ITO Masakazu and LIN Jin San

\*名古屋産業大学現代ビジネス学部 \*\*㈱ウェイトボックス

**Abstract:** The CO<sub>2</sub> concentration was measured around 30m above Nagoya Sangyo University using a drone in June and November 2018, respectively. The CO<sub>2</sub> concentration was distributed with uniformity over the measurement area (60,000 square meters). It was the same level of CO<sub>2</sub> concentration as the fixed point measurement station installed on the roof of a school building with a height of 12 m. It was suggested that the CO<sub>2</sub> concentration measured by drone has spatial representative. And then the fixed point data of the measuring station can be used as the standard value of the survey area when simply measuring the CO<sub>2</sub> concentration around the school in environmental education. Following these, Takada High School is planning an environmental education program that introduces a drone survey.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> concentration, spatial representativeness, drone, environmental education program

## 1. はじめに

地球温暖化現象に対しては、多くの人々が高い関心を示しており、2016年11月のパリ協定発効後は、CO<sub>2</sub>の大幅な削減に向けて多面的な環境行動の強化が求められている。

学校段階における環境教育は、総合的な学習の時間を中心に、その展開、充実が図られてきた。また、2011年に改定された高等学校指導要領理科では、新しい科目として「科学と人間生活」や「理科課題研究」が設定されるとともに、探究的な学習活動のより一層の充実などが図られてきた。さらに、次期の学習指導要領では、「主体的・対話的で深い学び（アクティブ・ラーニング）」の導入や、総合的な学習の見直しなど、児童・生徒に対しては、自ら考え主体的に判断する力、科学的な方法によるデータを用いて、客観的に分析・考察する力などが求められており、探究的な学習活動の更なる充実が目指されている（高木ら、2018）。

伊藤ら（2009）は、2003年度より、学校周辺のCO<sub>2</sub>濃度調査に基づく環境教育プログラムを開発し、日本および台湾の小・中学校、高等学校を対象に教育実践に取り組んでいる。また、生活環境圏で測定されるCO<sub>2</sub>濃度は、気象や人為の影響を受けて複雑かつ多様に変化する（図1）。このため、高木ら（2017a）は、東海3県に開設されたCO<sub>2</sub>濃度測定局の定点データを活用し、CO<sub>2</sub>濃度の日変化パターンを検証することで、環境情報としてのデータ解釈の可能性を明らかにしている。また、高木ら（2017b）では、名古屋産業大学周辺地域を対象に、1年間にわたってCO<sub>2</sub>濃度調査を実施し、その収集データを活用してCO<sub>2</sub>濃度の分布パターンを検証している。

これらの成果を踏まえて、筆者らが実施している環境教育では、CO<sub>2</sub>濃度測定局の定点データ、学校周辺のCO<sub>2</sub>濃度調査で収集される面データ、以上の2つの実測データを利用し、生活環境圏におけるCO<sub>2</sub>濃度の動態把握を行っている。その際、データ解釈の基礎としているのが、その地点の空間代表性が高い濃度が反映されているCO<sub>2</sub>基準濃度の日変化パターンと分布パターンである。ただし、CO<sub>2</sub>濃度調査は地表面のデータを収集しているため、この調査から導かれる分布パターンは、周辺の建物等による風通しの影響を受けやすくなる。このため、本研究では、可搬型CO<sub>2</sub>濃度測定器を搭載したドローンを使用して、建物の影響を受けない地上高30m付近のCO<sub>2</sub>濃度調査を実施し、ドローンを利用した環境教育プログラムの開発に向けた知見を得ることを目的とする。

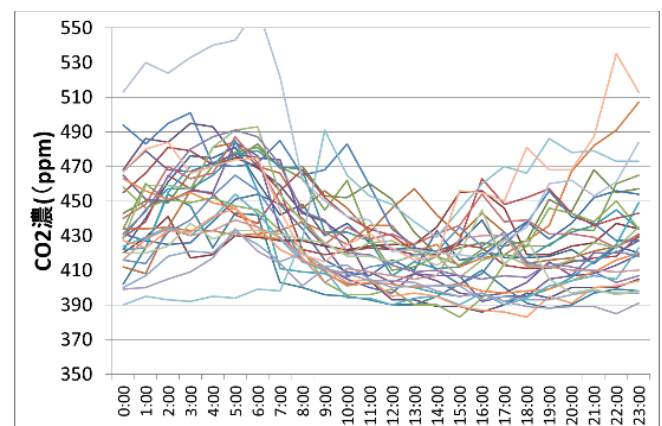


図1 生活環境圏におけるCO<sub>2</sub>濃度の日変化（高木ら（2017a）より引用）

## 2. 生活環境圏で測定される CO<sub>2</sub> 濃度の動態理解

### 2.1. 生活環境圏で測定される CO<sub>2</sub> 濃度

図2は、生活環境圏で測定される CO<sub>2</sub> 濃度の模式図である。高木ら (2017a) は、生活環境圏で測定される CO<sub>2</sub> 濃度を地域成分 (地球成分を含む) と変動成分の2つの成分に分類している。地域成分は地域の空間を代表するもので、バックグラウンド濃度 (地球成分) に地域の代表的な吸収源・排出源・気象現象が反映されたもので、風速 3 m/s 以上の CO<sub>2</sub> 濃度を地域成分として分類している。変動成分は、測定地点近傍のみを代表するもので、局所的な影響が反映されたものである。

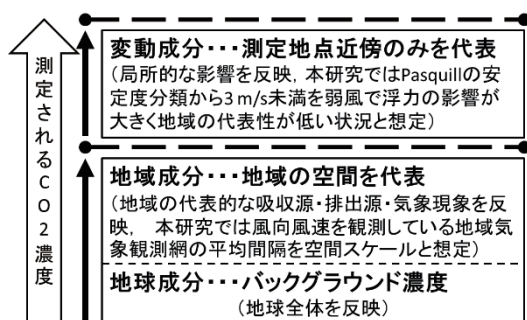


図2 生活環境圏で測定される CO<sub>2</sub> 濃度の模式図高木ら(2017a) より引用)

### 2.2. 生活環境圏で測定される CO<sub>2</sub> 濃度の定義

また、高木ら (2017a) は、CO<sub>2</sub> 濃度の時別平均値の変化パターンを「CO<sub>2</sub> 平均濃度」、さらに風速が 3m/s 以上時の CO<sub>2</sub> 濃度変化パターンを「CO<sub>2</sub> 安定濃度」と定義している。さらに、高木ら (2017b) では、発生率の高い風向時の CO<sub>2</sub> 濃度の日変化が最小値を示す 14 時前後の濃度を「CO<sub>2</sub> 基準濃度」と定義している。つまり、「CO<sub>2</sub> 平均濃度」は、風向・風速の影響を考慮していないが、「CO<sub>2</sub> 安定濃度」は風速の影響を、さらに「CO<sub>2</sub> 基準濃度」は風向・風速の影響を考慮した CO<sub>2</sub> 濃度の時別平均値となる。この中で、「CO<sub>2</sub> 基準濃度」は、地域環境の安定的な影響が反映された濃度、すなわち、図2に示す地域成分の安定的な影響が反映された空間代表性の高い濃度となる。

なお、高木ら (2017a) では、急激な地形の変化がない場合、アメダスで観測される一定以上の風速には観測所の平均間隔程度の空間代表性があると想定している。具体的には、Pasquill の安定度分類 (Pasquill and Smith (1983)) において A (強不安定) および F (並安定) に分類される可能性がある風速 3 m/s 未満の CO<sub>2</sub> 濃度を弱風で浮力の影響が大きく地域の代表性が低い状況と想定して変動成分に分類するとともに、風速 3 m/s 以上の CO<sub>2</sub> 濃度を地域成分として分類している。

## 3. CO<sub>2</sub> 濃度測定局で収集される定点データの検証プロセス

### 3.1. CO<sub>2</sub> 濃度測定局のデータ収集

筆者らは、2003 年度より人為の直接的な影響が反映された生活環境圏の CO<sub>2</sub> 濃度に着目し、CO<sub>2</sub> 濃度と地域環境との関係性を探究することができる環境教育プログラムの開発と実践に取り組んできた。その過程で、高等学校を主な対象として CO<sub>2</sub> 濃度測定局 (写真1) を開設し CO<sub>2</sub> 濃度の定点データの収集を行っている。CO<sub>2</sub> 濃度測定局は、風通しの良い学校等の建物の屋上に設置され、CO<sub>2</sub> 濃度、温度、湿度、気圧の各センサを百葉箱に格納したものである。また、測定局で収集されたデータはモニタリングソフトウェアを用いて PC に 3 秒間隔で csv 形式としてデータを収集、蓄積しており、各測定局における CO<sub>2</sub> 濃度データの年間収集量は約 1,000 万件となる。2018 年 8 月現在、日本 9 局、台湾 5 局でデータ収集を行っている。また、岡村ら (2006) は「CO<sub>2</sub> 濃度常時測定ネットワークシステム<sup>1)</sup>」を開発し、インターネットを経由してこれらのデータを公開している。

### 3.2. CO<sub>2</sub> 濃度データ検索システムによる分析

上述した CO<sub>2</sub> 濃度測定局から収集されるデータは年間約 1,000 万件であり、これらの CO<sub>2</sub> 濃度データを日変化として閲覧できるようにするためには膨大な処理量となる。このため、児童・生徒が気象条件<sup>2)</sup> に応じた CO<sub>2</sub> 濃度の日変化を容易に参照することができるよう、Microsoft Excel 2007 と Access 2007 を使用して「CO<sub>2</sub> 濃度データ検索システム (以下、検索システムという)」を開発した (高木ら (2014))。検索システムの入力画面を図3に、出力画面を図4に示す。検索システムの入力画面は、検索条件を特定日、特定月、あるいは任意期間とし、詳細条件に天候および風向・風速を入力する。検索結果には、入力条件に応じた CO<sub>2</sub> 濃度の時別平均値 (平均濃度) と平均風速 (平均風速) の日変化および風向などが表示される。検索システムを使用することにより、CO<sub>2</sub> 濃度測定局の過去データから CO<sub>2</sub> 濃度と風向・風速、天候との関係性を参照することが可能となる。

図5は、検索システムによって CO<sub>2</sub> 平均濃度、CO<sub>2</sub> 安定濃度、CO<sub>2</sub> 基準濃度の時別平均値を算出したものである。CO<sub>2</sub> 安定濃度は、CO<sub>2</sub> 平均濃度に比べて安定的な日変化を示し、CO<sub>2</sub> 基準濃度は、CO<sub>2</sub> 安定濃度に風上の地域環境の影響が反映された日変化を示すようになる。



写真1 CO<sub>2</sub> 濃度測定局



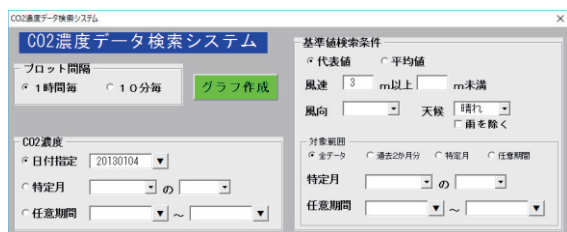


図3 検索システム入力画面

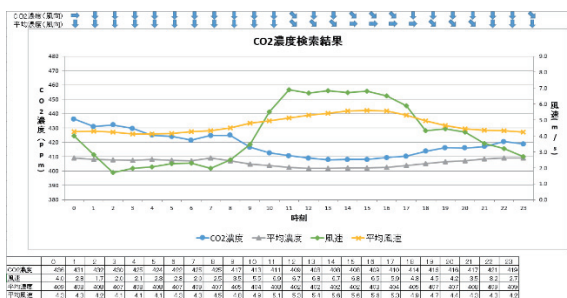


図4 検索システム出力画面

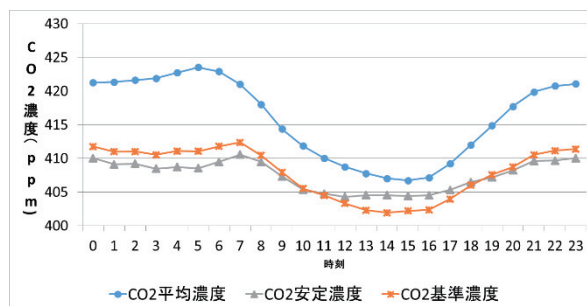


図5 CO<sub>2</sub>濃度の日変化パターン (CO<sub>2</sub>平均濃度・CO<sub>2</sub>安定濃度・CO<sub>2</sub>基準濃度)



写真2 可搬型CO<sub>2</sub>濃度測定器



写真3 デジタル風向・風速計

#### 4. 地表面のCO<sub>2</sub>濃度調査で収集される面データの検証プロセス

##### 4.1. CO<sub>2</sub>濃度分布データの収集

検索システムを用いた分析では、CO<sub>2</sub>濃度測定局の定点データから、CO<sub>2</sub>濃度と風向・風速との関係性を参照できるが、CO<sub>2</sub>濃度と地域環境との関係性を探究しようとする、CO<sub>2</sub>濃度の分布とその変化を地域全体の空間情報(面データ)として把握することが必要になる。このため、高木ら(2017b)では、CO<sub>2</sub>濃度測定局を開設している名古屋産業大学周辺地域を事例に、CO<sub>2</sub>濃度調査を実施し、CO<sub>2</sub>濃度分布データを実測するとともに、その収集データについては、Excelを使用してCO<sub>2</sub>濃度マップの作成を行っている。CO<sub>2</sub>濃度データの収集にあたっては、ユーコム社の可搬型CO<sub>2</sub>濃度測定器(型式:C2D-W02TR)(写真2)を使用している。また、風向・風速データの収集にはニールセン・ケラーマン社のケストレル4500を使用している(写真3)。CO<sub>2</sub>濃度の測定地点は図6のとおりである。測定地点は50m間隔のメッシュで区切り、縦5マス(250m)、横7マス(350m)の計35か所を測定地点としている。CO<sub>2</sub>濃度調査では、CO<sub>2</sub>濃度、風向・風速を測定、記録し、集計したデータは、CO<sub>2</sub>濃度が高い地点、低い地点が視覚的にわかるよう、Excelの自動着色機能を用いて濃度が高い地点は赤色系、低い地点は緑色系のグラデーションで濃度の高低を表している。図7、図8は、風速の影響を受けたCO<sub>2</sub>濃度マップの作成例である。各マス右の数値はCO<sub>2</sub>濃度を、矢印は風向を、マス下の数値は風速を示している。このマップを調査日毎に作成し、比較することにより、例えば、風速が強いときのCO<sub>2</sub>濃度は主に風速の影響を受けるが、風速が弱いときは、風速の影響に加えて、風向(周辺の土地利用)の影響を受けやすくなるなど、CO<sub>2</sub>濃度の空間分布の基本的な動態を検討することができる。

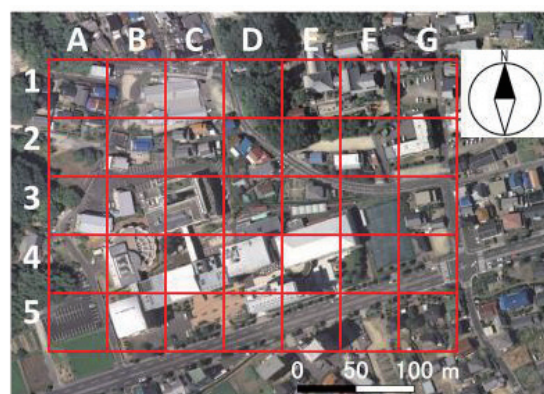


図6 CO<sub>2</sub>濃度の測定地点<sup>1)</sup>

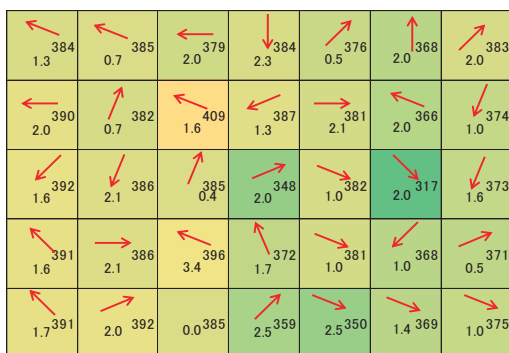


図7 CO<sub>2</sub>濃度マップの作成例 (強風時)

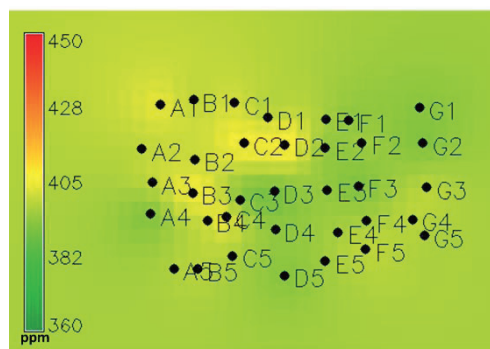


図9 CO<sub>2</sub>安定濃度の分布パターン (年平均)

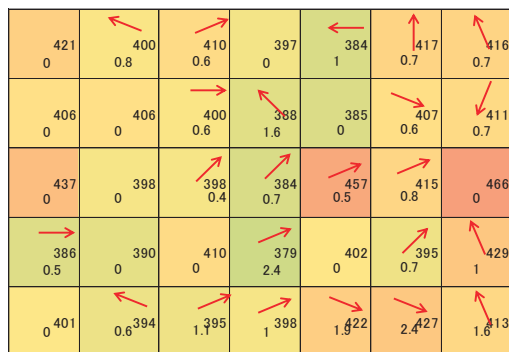


図8 CO<sub>2</sub>濃度マップの作成例 (弱風時)

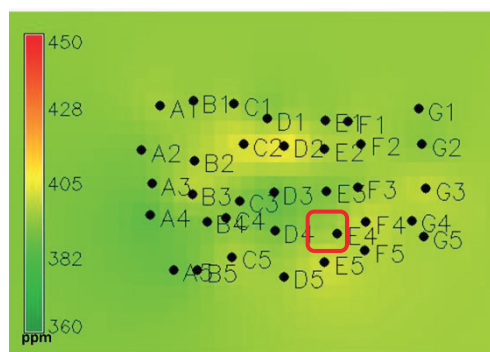


図10 CO<sub>2</sub>基準濃度の分布パターン (年平均)

## 4.2. GISを用いた空間分布図の作成

4-1におけるCO<sub>2</sub>濃度マップでは、調査日毎、測定地点毎の地表面におけるCO<sub>2</sub>濃度、風向・風速を視覚化することができるが、CO<sub>2</sub>平均濃度、CO<sub>2</sub>安定濃度、CO<sub>2</sub>基準濃度の分布パターンを把握することができない。このため、GIS<sup>4)</sup>を活用して、CO<sub>2</sub>濃度マップを集約しCO<sub>2</sub>濃度分布図を作成した。作図にあたっては、CO<sub>2</sub>濃度、風向・風速に加えて、緯経度(GPS)データを収集し、Excelによるデータベース化を行ったうえでGISによる分析を進めた。

図9、図10は、GISを用いたCO<sub>2</sub>濃度分布図の作成例である。図9はCO<sub>2</sub>安定濃度時(28調査)の分布パターンを、図10はCO<sub>2</sub>基準濃度時(12調査日)の分布パターンを表したものである。

また、図中の記号は測定地点を示している。各調査日や各測定地点におけるCO<sub>2</sub>濃度、風向・風速は異なる様相を示すが、年平均のCO<sub>2</sub>安定濃度の分布パターンは、地域の代表的な吸収源等の安定的な影響が反映されるようになる。また、CO<sub>2</sub>基準濃度の分布パターンは、CO<sub>2</sub>安定濃度に比べて全体的な濃度が低くなる傾向を示すようになる。

## 5. ドローンを用いたCO<sub>2</sub>濃度調査で収集されるデータの検証プロセス

筆者らが実施している環境教育では、CO<sub>2</sub>濃度測定局の定点データ、学校周辺のCO<sub>2</sub>濃度調査で収集される面データ、以上の2つの実測データを利用し、生活環境圏におけるCO<sub>2</sub>濃度の動態把握を行っている。その際、データ解釈の基礎としているのが、その地点の空間代表性が高い濃度が反映されている

CO<sub>2</sub>基準濃度の日変化パターンと分布パターンである。ただし、CO<sub>2</sub>濃度調査は地表面のデータを収集しているため、この調査から導かれる分布パターンは、周辺の建物等による風通しの影響を受けやすくなる。このため、筆者らは、可搬型CO<sub>2</sub>濃度測定器を搭載したドローン(DJI社Matrice 100(写真4))を使用して、建物の影響を受けない地上高30m付近のCO<sub>2</sub>濃度調査に着手している。

地上高30m付近のCO<sub>2</sub>濃度調査にあたっては、地表面でのCO<sub>2</sub>濃度分布図と比較するため、同日同時刻に名古屋産業大学周辺地域を対象として地表面と地上高30m付近のCO<sub>2</sub>濃度測定を同時に行っている。第1回調査は、2018年6月26日15時～16時、第2回調査は、2018年11月24日14時30分から15時30分の間でそれぞれ実施した。その様子は写真5の通りである。2回の調査結果の傾向はおおむね一致していたため、ここでは第1回調査結果を用いて考察を行う。

調査当日の15時時点での平均風速は4.9m/s、風向は南南東、天候は薄曇であり、当日の風向は夏季(6月～8月)の最多風向と一致している。名古屋産業大学に設置しているCO<sub>2</sub>濃度測定局の同時刻のCO<sub>2</sub>濃度は408ppmであった。ドローンでのCO<sub>2</sub>濃度調査地点は図11の白点のとおりである。地上高30m付近の調査にあたっては、DJI社が提供しているドローン自動操縦システムアプリのDJI GS Proを使用し、各測定地点において30秒間ホバリング状態で静止し、その後次の測定地点まで移動するようプログラミングを行った。収集するCO<sub>2</sub>濃度データは可搬型CO<sub>2</sub>濃度測定器内のSDカードに、10秒間隔





写真4 ドローン (DJI 社 Matrice 100)

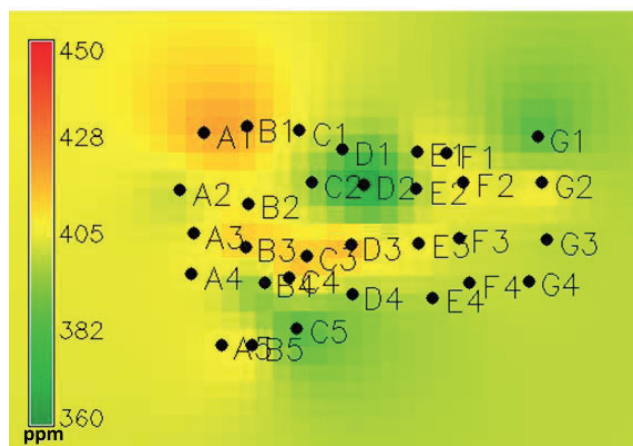


図12 地表面でのCO<sub>2</sub>濃度空間分布図



写真5 調査の様子



図11 ドローンによるCO<sub>2</sub>濃度調査地点

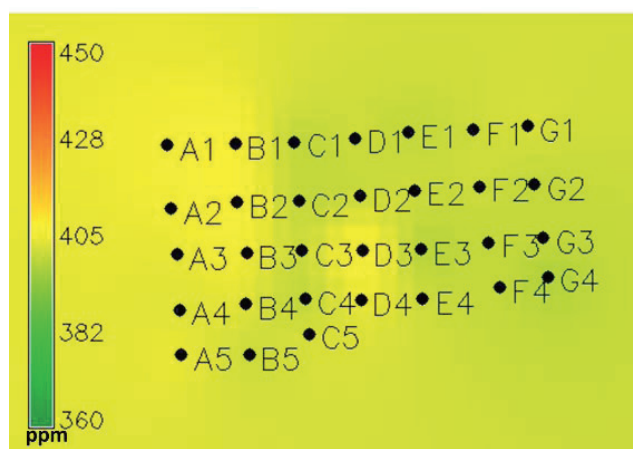


図13 地上高30m付近でのCO<sub>2</sub>濃度空間分布図

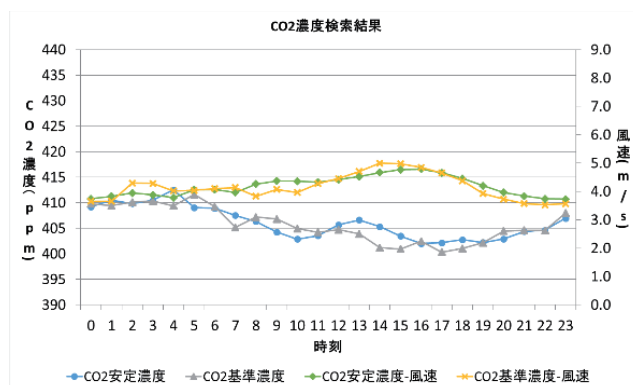


図14 CO<sub>2</sub>安定濃度・CO<sub>2</sub>基準濃度の時別平均値(6月)

で時刻と同時にデータ収集がされる。このため、ドローンがホバリングをし始めた時刻を記録し、その後SDカードに記録された時刻と突合させCO<sub>2</sub>濃度データを抽出した。

これらの収集データを利用し、GISを用いて作成したCO<sub>2</sub>濃度空間分布図が図12、図13である。図12は地表面でのCO<sub>2</sub>濃度分布であり、図13は地上高30m付近でのCO<sub>2</sub>濃度分布である。図12、図13で各測定地点の位置が異なるのは、上空では建物等の障害物の影響がないため、均等に50m間隔で測定を行ったためである。

図12のCO<sub>2</sub>濃度調査結果は、最大濃度が419ppm、最低濃度が363ppm、平均値は402ppm、測定地点間のCO<sub>2</sub>濃度の変動幅は56ppmであった。図13で

は、最大濃度が407ppm、最低濃度が398ppm、平均値は402ppm、測定地点間のCO<sub>2</sub>濃度の変動幅は9ppmであった。地上高30m付近で測定したCO<sub>2</sub>濃度の方が測定地点間の変動幅は少なくなり、より安定したCO<sub>2</sub>濃度分布を示している。

図14は、検索システムから算出した6月のCO<sub>2</sub>安定濃度と、CO<sub>2</sub>安定濃度から夏季の最多風向である南南東の風向を抽出したCO<sub>2</sub>基準濃度の日変化を示したものである。15時時点のCO<sub>2</sub>安定濃度は403ppm、風速は4.8m/s、同様にCO<sub>2</sub>基準濃度は401ppm、

風速は 5.0 m/s であった。

以上から、地上高 30 m 付近の CO<sub>2</sub> 濃度分布は、検索システムによる CO<sub>2</sub> 基準濃度が反映されている。つまり、図 2 に示す変動成分の影響が排除され、地域成分の安定的な影響が反映された CO<sub>2</sub> 濃度分布を示している。ドローンを使用した CO<sub>2</sub> 濃度調査については、今後も継続的に実施し、その動態検証を重ねていく必要があるが、今回の調査データからは、地域環境評価の基礎となる CO<sub>2</sub> 濃度分布が測定されている可能性が高いことが示唆された。

## 6. おわりに

本研究では、可搬型 CO<sub>2</sub> 濃度測定器を搭載したドローンを使用して、建物の影響を受けない地上高 30 m 付近の CO<sub>2</sub> 濃度調査を実施し、ドローンを利用した環境教育プログラムの開発に向けた知見を得ることを目的とした。その結果、本学周辺を対象とした 2 回のドローン調査では、測定局の定点データが測定区域に一樣に拡がっており、空間代表性のあるデータが収集できている可能性が示唆された。

高田高校（三重県津市）では、2017 年度より名古屋産業大学と連携して、CO<sub>2</sub> 濃度調査を取り入れた探究的な学習活動に継続的に取り組んでいるが、本研究の結果を踏まえて、ドローン調査を導入した環境教育プログラムを企画している。

また、今後、環境教育で学校周辺の CO<sub>2</sub> 濃度調査を行う際、測定局の定点データが調査対象区域の基準値として活用できることが期待される。

### 補注

- 1) 国土地理院の電子地形図（タイル）に縮尺と方位記号およびメッシュを追記して掲載。
- 2) 名古屋産業大学：二酸化炭素濃度常時測定ネットワークシステム，<http://co2.nagoya-su.ac.jp/>，（2019.3.18 アクセス）

- 3) 気象庁：過去の気象データ検索，<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>，（2019.3.19 アクセス）
- 4) GIS ソフトウェアとして GRASS を用いた。作図にあたっては、各測定地点の実測値からスプライン補間を用いて空間内挿を行った。

### 参考文献

- 伊藤雅一・岡村聖編著（2009）：みんなで作る CO<sub>2</sub> 濃度マップ～地球温暖化と私たちの暮らし，pp.164，リバネス出版
- 岡村聖・伊藤雅一・龍崎忠・坂本剛（2006）：地球温暖化防止のための環境教育に関する研究(2)～CO<sub>2</sub> 濃度常時測定ネットワークシステムの開発，名古屋産業大学環境経営研究所年報，第 5 号，pp.38-47
- 高木祥太・岡村聖・伊藤雅一（2014）：環境教育を目的とした CO<sub>2</sub> 濃度データ検索システムの設計，日本環境共生学会第 17 回学術大会発表論文集，pp.299-305
- 高木祥太・伊藤雅一・岡村聖（2017a）：生活環境圏における CO<sub>2</sub> 濃度の変化パターン～環境情報としてのデータ解釈の可能性に着目して，環境情報科学，46(2)，pp62-70
- 高木祥太・伊藤雅一・岡村聖・鄭敏学（2017b）：生活環境圏における CO<sub>2</sub> 濃度の分布パターン～地域環境評価の基礎となる CO<sub>2</sub> 濃度の動態に着目して，環境情報科学論文集，31，pp.311-316
- 高木祥太・伊藤雅一・岡村聖（2018）：生活環境圏の CO<sub>2</sub> 濃度データを利用した環境教育プログラムの開発とその教育効果—探究的な学修活動としての有効性に着目して，環境情報科学論文集，32，pp.130-134
- Pasquill F. and F.B. Smith(1983)：Atmospheric Diffusion (third Edition)，pp.437，Ellis Howwood Ltd Publishers