

博士論文 平成 30 年度 (2018)

生活環境圏における CO₂ 濃度の
動態把握に基づく環境教育方法に関する研究

名古屋産業大学大学院環境マネジメント研究科

高木 祥太

論文要旨

生活環境圏における CO₂ 濃度の動態把握に基づく環境教育方法に関する研究

高木 祥太

地球温暖化防止は、国際社会が対応すべき喫緊の課題となっており、パリ協定の目標達成に向けた CO₂ の大幅な削減が求められている。現在、地球規模での CO₂ 濃度の長期的変化を把握するため、世界各国で全球観測が行われており、日本では綾里、南鳥島、与那国島等に観測地点が置かれている。

その一方で、近年、人為の影響が反映される生活環境圏の CO₂ 濃度に着目した研究として、その実測データを利用した動態研究や環境教育研究が進められている。特に環境教育研究では、可搬型 CO₂ 濃度測定器を用いて、児童・生徒が実際に CO₂ 濃度を調査し、その調査データを環境教育の教材として活用している点が共通している。しかし、人間活動や植物活動による直接的な影響が反映された生活環境圏の CO₂ 濃度は、複雑かつ多様な日変化を示すことから、CO₂ 濃度の動態理解が不可欠となる。このため、岡村・伊藤ら（2006）は、生活環境圏における CO₂ 濃度の動態把握を目的に、環境教育の基盤として CO₂ 濃度測定局を順次開設し、これらをインターネット経由でネットワーク化する CO₂ 濃度常時測定ネットワークシステムの開発を行っている。しかし、CO₂ 濃度測定局の収集データ、すなわち CO₂ 濃度常時測定データの環境教育への応用については、研究の蓄積が乏しく、CO₂ 濃度の動態把握のための教育方法も確立されていないのが現状である。また、学校段階では、ESD の視点から問題解決に必要な能力・態度の養成をするために、探究的な学習やアクティブ・ラーニングの充実が求められている。

このため、生活環境圏における CO₂ 濃度の動態を科学的に理解し、CO₂ 濃度と地域環境との関係性を探究する教育方法を具体化することができれば、探究的な環境学習活動の深化と低炭素地域づくりに向けた環境行動への発展に繋げていくことができると考えられる。

本論の目的は、生活環境圏における CO₂ 濃度の動態把握に基づく環境教育方法を明らかにすることにある。

この目的を達成するため、第 1 章では、本論の背景として人為の直接的な影響を受ける生活環境圏の CO₂ 濃度に着目した環境教育研究の動向を中心に把握、整理し、本論の目的として、CO₂ 濃度の動態把握に基づく環境教育方法を具体化する必要性と意義を明らかにした。

第 2 章では、生活環境圏における CO₂ 濃度測定局の収集データに着目し、その環境教育への応用に向けて、「CO₂ 濃度データ検索システム」の設計と開発を行った。このシステム開発により、CO₂ 濃度測定局の過去データから、特定の気象条件下の CO₂ 濃度の日変化を参照することで、CO₂ 濃度の動態に対する科学的理解を促すための学習支援システムを整備した。

第 3 章では、CO₂ 濃度データ検索システムを利用し、東海 3 県に開設された CO₂ 濃度測定局の 2011 年から 2013 年までの収集データを基に、CO₂ 濃度の時別平均値を算出し、各測定地点の各月における CO₂ 濃度の変化パターンを分析した。分析に当たっては、CO₂ 濃度の時別

平均値を「CO₂平均濃度」、一定の風速以上時におけるCO₂濃度の時別平均値を「CO₂安定濃度」と定義し、これを検証することで、複雑かつ多様に变化するCO₂濃度のより客観的かつ多面的なデータ解釈が可能になることを明らかにした。

第4章では、東海3県に開設されたCO₂濃度測定局の5年間の収集データを活用し、生活環境圏におけるCO₂濃度の分布パターンを検証した。その際、生活環境圏のCO₂濃度を評価する尺度として「CO₂基準濃度」を定義し、その動態を検証した。そして、1年間にわたるCO₂濃度の定時調査を実施し、その分布パターンを検証することにより、「CO₂基準濃度」の空間分布は、地域環境の安定的な影響が反映された濃度となることを明らかにした。

第5章では、第3章及び第4章から得られた生活環境圏におけるCO₂濃度の動態把握に関する知見に基づいて、生活環境圏におけるCO₂濃度の基本的動態や学校周辺におけるCO₂濃度の測定方法などを記した学習指導計画を作成した。そして、この計画に基づいて日本と台湾の高等学校5校を対象に環境教育を実施し、その教育効果の検証を行うことで、探究的な環境学習活動としての有効性を明らかにした。

第6章では、本論の結論を総括し、その学術的な貢献と今後の展望を明らかにした。具体的には、CO₂濃度データ検索システムを開発し、生活環境圏におけるCO₂濃度の動態を把握するための方法を確立したうえで、同システムを利用した環境教育プログラムを開発し、環境教育の実施を通じて探究的な学習活動としての教材として有効であることを明らかにした。また、今後の課題としては、地域環境がCO₂濃度に与える具体的影響の検証方法、スパイラル学習の教育効果の検証方法、以上の2点を明確化する必要性を指摘するとともに、その課題解決に向けた取組方向を展望した。

本論の学術的貢献としては、

「CO₂濃度データ検索システム」を開発し、このシステムを活用して生活環境圏におけるCO₂濃度の基本的動態を明らかにしたこと

そのうえで、生活環境圏におけるCO₂濃度の動態把握に基づく環境教育の教育方法を具体化したこと

以上によって、生活環境圏におけるCO₂濃度の動態を科学的に理解し、CO₂濃度と地域環境との関係性を探究する環境教育の新たな方法を明らかにしたことにある。文部科学省の学習指導要領では、探究的な学習能力の更なる充実が目指されている。また、パリ協定の目標達成に向けては、地方自治体では低炭素地域づくりに向けた取組の強化が求められている。本論の成果は、探究的な環境学習活動の高度化に貢献するとともに、低炭素地域づくりに向けて、CO₂濃度の実測データを用いた地域環境評価指標の具体化など、環境政策の新たな展開にも繋げていくことができると考えられる。

目次

第1章 はじめに.....	1
1-1 研究の背景.....	1
1-1-1 CO ₂ 濃度の動態研究に関する動向.....	1
1-1-2 学校段階における環境教育の動向.....	6
1-2 研究の目的.....	8
1-3 論文の構成.....	9
第2章 CO ₂ 濃度データ検索システムの設計と開発.....	13
2-1 はじめに.....	13
2-2 CO ₂ 濃度常時測定データのデータベース化.....	15
2-3 CO ₂ 濃度データ検索システムの設計と開発.....	18
2-4 CO ₂ 濃度データ検索システムの環境教育への活用.....	19
2-5 まとめ.....	20
第3章 生活環境圏におけるCO ₂ 濃度の変化パターン.....	21
3-1 はじめに.....	21
3-2 研究の方法.....	21
3-3 生活環境圏におけるCO ₂ 濃度.....	23
3-4 生活環境圏におけるCO ₂ 濃度変化.....	24
3-5 CO ₂ 濃度データ検索システムによる分析.....	26
3-6 CO ₂ 濃度常時測定データの環境情報としてのデータ解釈.....	30
3-7 まとめ.....	32
第4章 生活環境圏におけるCO ₂ 濃度の分布パターン.....	34
4-1 はじめに.....	34
4-2 CO ₂ 濃度と風向・風速との関係性の整理.....	35
4-2-1 CO ₂ 濃度空間分布の検証.....	38
4-2-2 CO ₂ 安定濃度の空間分布とその動態.....	46
4-3 CO ₂ 基準濃度の空間分布に基づく地域環境評価の可能性.....	48
4-4 まとめ.....	48
第5章 生活環境圏のCO ₂ 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.....	50
5-1 はじめに.....	50
5-2 研究の方法.....	51
5-3 生活環境圏のCO ₂ 濃度データを利用した環境教育プログラムの開発.....	52
5-4 生活環境圏のCO ₂ 濃度データを利用した環境教育の実践.....	55
5-5 環境教育プログラムの教育効果.....	58

5-6 まとめ	62
第6章 結論と今後の展望	64
6-1 結論	64
6-2 今後の展望	66
6-2-1 地域環境がCO ₂ 濃度を与える具体的影響の検証に向けて	66
6-2-2 スパイラル学習の教育効果の検証に向けて	70
謝辞	74
付録	75
学習教材：学校周辺におけるCO ₂ 濃度の調査とデータ活用	76
学習教材：学校周辺におけるCO ₂ 濃度の調査とデータ活用（中国語版）	82
データ解釈シート	88
データ解釈シート（中国語版）	89
ワークシート	90
ワークシート（中国語版）	92
アンケート調査表：CO ₂ 濃度データを活用した環境教育に関するアンケート調査	94
アンケート調査表：CO ₂ 濃度データを活用した環境教育に関するアンケート調査（中国語版）	96
図一覧	98
表一覧	100
写真一覧	101

第1章 はじめに

1-1 研究の背景

1-1-1 CO₂濃度の動態研究に関する動向

地球温暖化防止は、国際社会が対応すべき喫緊の課題となっており、CO₂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。

地球規模でのCO₂濃度の長期的変化を把握するため、現在、世界各国で全球観測が行われており、日本では綾里、南鳥島、与那国島等に観測地点が置かれている。地球規模におけるCO₂濃度については、工業化以前の平均的な値とされる275 ppmと比べて45%増加しており、温室効果ガス世界資料センター(WDCGG)の解析による2016年の地球環境での平均CO₂濃度は403.3 ppmとなっており、陸域の植物が光合成することによる季節変動を伴いながら年々増加傾向にある(図1-1-1)¹⁾。

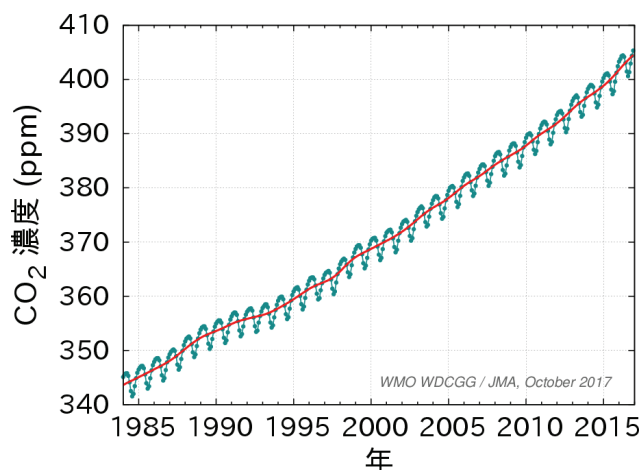


図 1 - 1 - 1 地球全体の二酸化炭素の経年変化
(気象庁 HP より引用)

これらの観測では、グローバルスケールでCO₂濃度変化のバックグラウンドデータの変動が測定されており、世界気象機関(WMO)が定めた標準ガスによって厳密に濃度較正が行われ、観測値のトレーサビリティが確保されている。また、地表面の人間活動や植物活動の直接的な影響を受けない、周辺の水平空間を代表する濃度観測をするため、地上約20mの高さで観測されている。

また、人為の影響を比較的受けやすい大都市近郊においては、埼玉県の内2地点において観測が行われている例がある²⁾。気象庁と同様にWMOが定める標準ガスによって観測値のトレーサビリティが確保されていることや、地上約20mの高さで観測されているなど、気象庁と同等の観測精度が保たれており、この点において、人為の影響が反映されやすい大都市近郊のCO₂濃度観測としては稀な例となっている。

さらに、CO₂濃度観測という点では、森林のCO₂吸収・排出量収支評価を目的にフラックスタワーを用いた観測が行われている（たとえば、安田ら（1998））。

特に、森林以外の都市域を対象としたフラックス観測には森脇・神田（2005）や森脇・菅原（2012）があり、都市キャノピー内におけるフラックス観測を用いて、植生・土壌や自動車交通量等がどの程度CO₂フラックスに寄与するかという研究がなされている。これらフラックス観測による研究では、森林などの植生や都市からどの程度のCO₂が吸収・排出されているかの収支評価に主眼が置かれている。なお、気象庁や埼玉県、また、一連のフラックス観測には、設置場所周辺の水平空間が様であることや、大規模なタワーの建設が必要であることから、設置可能な場所については制限がある。

その一方で、近年、人為の影響が反映される生活環境圏のCO₂濃度に着目した研究が進められている。

伊藤・岡村（2009）は、2003年度より、小・中学校、高等学校の児童・生徒を対象に、学校周辺のCO₂濃度調査を通じて、CO₂濃度データ等を可視化した「CO₂濃度マップ」を作成し、CO₂濃度の地域分布と地域環境との関係性を探究するための環境教育を実践している。具体的には、可搬型CO₂濃度測定器を使用して、学校周辺のCO₂濃度を児童・生徒が実際に測定し、その調査データを基に、調査区域の中で相対的に濃度が高い地点、低い地点を色分けして地図に記入し可視化する。これを「CO₂濃度マップ」と呼び、このマップを基に学校周辺のCO₂濃度の分布と自然的、社会経済的要因との関係を考察し、身近な環境への関心を高める環境教育プログラムの開発と実践に取り組んでいる。

また、高等学校と連携したプロジェクト研究（課題研究）として、CO₂濃度データを活用した探究的な環境学習への支援が行われている。

愛知県立稲沢高等学校（愛知県稲沢市）では、樹齢150年を超える桜の樹勢回復に取り組んでいる。樹木の成長がされているかどうかを判断するには長期間にわたる観察が必要となることから、プロジェクト研究の中でそれを実感するのは難しい。そこでCO₂濃度と葉緑素の測定を行うことで、短期間で樹勢回復を観察、確認する取組が行われている（岡村ら、2013）。その学習成果に対しては、愛知県学校農業クラブ連合会主催のプロジェクト研究発表会で優秀賞が授与されている。

また、三重県立久居農林高等学校（三重県津市）では、同校が所有する演習林の特徴が異なる複数地点で、CO₂濃度を数日間定点観測している。演習林のCO₂吸収量を調査し、CO₂吸収量を高める森林管理方法を探る観点から、それぞれの地点でどのようなCO₂濃度の動きをしているかを調査するためのデータ収集・分析が行われている（岡村ら、2011）。その学習成果に対しては、三重県学校農業クラブ連合会主催のプロジェクト研究発表会で最優秀賞が授与されている。

以上のように、高等学校段階における特定の調査課題に基づくプロジェクト研究は、環境教育のグッドプラクティスとして一定の評価を得てきている。

このほか、齋藤ら（2013）は、茨城県下の小学生を対象に学校周辺のCO₂濃度調査を行

い、アンケート調査から、地球温暖化や環境の大切さについての理解が促されたことを確認している。また、土井ら（2011）は、理科教育の一環として、可搬型 CO₂ センサーと屋外設置型 CO₂ センサーを利用し、CO₂ の振る舞いに関する教材や教授方法の有効性を検討している。

上述の環境教育では、可搬型 CO₂ 濃度測定器を用いて、児童・生徒が実際に CO₂ 濃度を調査し、その調査データを環境教育の教材として活用している点が共通している。しかし、人間活動や植物活動による直接的な影響が反映された生活環境圏の CO₂ 濃度は、複雑かつ多様な日変化を示すことから、児童・生徒が調査した CO₂ 濃度データの解釈を支援するうえで、CO₂ 濃度の動態理解が不可欠となる。また、可搬型 CO₂ 濃度測定器は、学校周辺の CO₂ 濃度調査に当たって複数台利用するが、その測定精度は $\pm 30 \text{ ppm} \pm$ 読み値の 5% であり、同一地点、同一時刻であっても測定器によって測定データの初期値が異なることから、測定精度をいかに確保していくかが課題となる。

このため、岡村・伊藤ら（2006）は、生活環境圏における CO₂ 濃度の動態把握を目的に、環境教育の基盤として CO₂ 濃度測定局を順次開設し、これらをインターネット経由でネットワーク化する CO₂ 濃度常時測定ネットワークシステム(図 1-1-2)³⁾の開発を行っている。CO₂ 濃度測定局については、2018 年 11 月現在、名古屋産業大学環境教育研究プロジェクトによって、日本国内で 9 局、台湾で 5 局の運用が行われている。また、学校周辺の CO₂ 濃度調査に際しては、可搬型 CO₂ 濃度測定器の測定誤差を考慮し、CO₂ 濃度測定局の常時測定データが基準値として活用されている。

気象庁が行っている CO₂ 濃度観測では、厳密な濃度補正やバックグラウンドデータの選別が行われており、フラックス観測においても毎秒 5 回から 10 回の精密観測が行われている。一方、CO₂ 濃度測定局に設置されている CO₂ 濃度測定器の仕様上の測定誤差は $\pm 30 \text{ ppm} \pm$ 読み値の 3% で、測定間隔も 3 秒に 1 回であり、全球観測やフラックス観測で使用される観測機器と比べ測定誤差や測定間隔は大きくなる。

しかし、全球観測やフラックス観測で使用される観測機器には大型のタワーを設置する必要があることや、設備そのものが大がかりになるなど、設置場所や費用面において環境教育用途で用いることには限界がある。

また、設置型 CO₂ 濃度測定器 3 台を 24 時間連続測定した検証結果としては、初期値の最大誤差は $\pm 8 \text{ ppm}$ 程度、その後の測定データの誤差は $\pm 2.2\%$ 、初期値の誤差を考慮しない濃度差データの誤差は $\pm 1.5\%$ と、いずれも読み値の誤差内で推移することが確認されている(図 1-1-3)。可搬型 CO₂ 濃度測定器も検証を行っているが、ほぼ同様の傾向を示している。この検証から、仕様上の測定誤差の多くは測定器の起動時に生じていることがわかる。このため、CO₂ 濃度測定局の常時測定データを基準値とすることで、言い換えれば測定器の起動時の測定誤差を解消することで、可搬型 CO₂ 濃度測定器で収集した調査データの測定精度を確保するとともに、その時系列変化の比較を可能にしている。



図 1 - 1 - 2 CO₂濃度常時測定ネットワークシステム

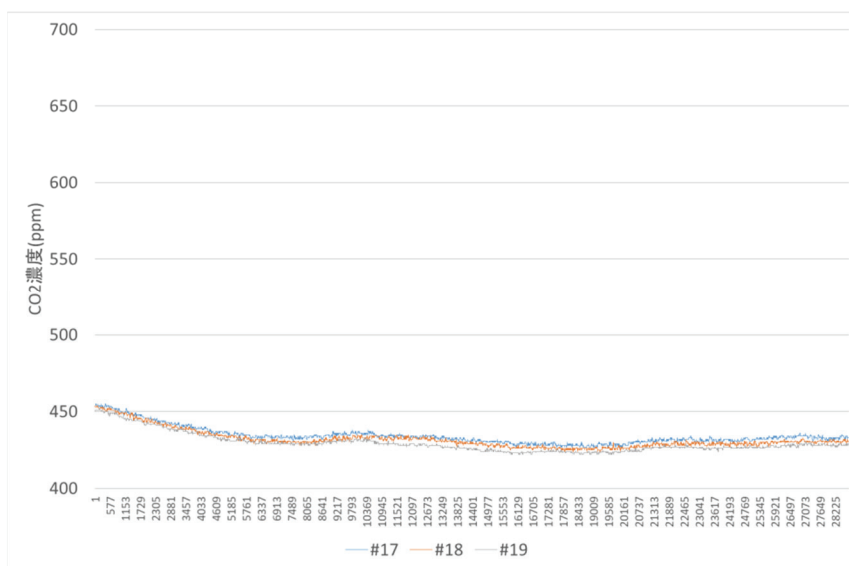


図 1 - 1 - 3 24 時間連続測定結果（設置型 CO₂ 濃度測定器）

なお、生活環境圏を対象とした CO₂ 濃度データの常時測定は、現在、上述した名古屋産業大学環境教育研究プロジェクトの事例以外に、後述する茨城大学国土空間情報研究室や広島県立広島工業高等学校、特定非営利活動法人 co2sos、名古屋市やつくば市などの地方自治体でも行われており、その多くは測定データが公開されている。

次に、生活環境圏における CO₂ 濃度の動態検証については、茨城大学国土空間情報研究室の研究グループによる一連の研究がある。

宮部ら（2009）は、茨城県内に設置した CO₂ 濃度観測システムによる計測データのフォーマットを整えるプロセスや季節別による CO₂ 濃度の日変化の分析等を行っている。齋藤

ら(2013)は、CO₂濃度や温度・湿度・気圧などの計測を多点で行う「茨城県 CO₂グリッド」の整備を提案したうえで、地域ごとの CO₂濃度の日変化などの検証を行っている。また、桑原ら(2014)は、茨城県内に CO₂濃度測定局を 10 局設置⁴⁾し、CO₂濃度測定局のデータから月別の CO₂濃度の日変化の季節変動や、各地点に設置した風向・風速計のデータを用いた方位別 CO₂濃度分布図を作成し、CO₂濃度と土地利用との地域性について検討している。さらに、今井ら(2014)は、都市内緑地や土地利用と CO₂濃度データとの関連性を検討している。

これらの研究では、名古屋産業大学環境教育研究プロジェクトが運営する測定局と同様に、設置型 CO₂濃度測定器を格納した百葉箱を学校等の屋上やベランダに設置し、人為等の地域的影響を受けた CO₂濃度の動態把握にとって合理的な性能、価格の CO₂濃度センサーが用いられているが、その用途は、都市計画の基礎データとしての活用可能性の検証に主眼が置かれている。このため、CO₂濃度の動態把握の方法も、環境教育の視点からアプローチが行われたものではない。

以上から、人為の影響が反映される生活環境圏の CO₂濃度に着目した既往研究としては、CO₂濃度を教材とした環境教育研究が進められてきており、CO₂濃度の動態把握を目的とした CO₂濃度測定局の開設も行われてきている。また、都市計画の基礎データとしての活用を図る観点から、CO₂濃度の動態研究にも取り組まれてきている。しかし、CO₂濃度測定局の収集データの環境教育への応用については、研究の蓄積が乏しく、CO₂濃度の動態把握のための教育方法も確立されていないのが現状である。

1 - 1 - 2 学校段階における環境教育の動向

2005年2月16日に発効された京都議定書では、1990年度のCO₂を含む6種類の温室効果ガス総排出量を基準として、第一約束期間として2008年から2012年までの5年間に先進国全体で、1990年度比で少なくとも5%の削減目標が定められた。日本においても1990年比で6%の削減目標が定められ、第一約束期間では森林等吸収源や京都メカニズムクレジットの活用によって日本は-8.2%を達成している。しかし、森林等吸収源や京都メカニズムクレジットを差し引かない実際の総排出量は5か年平均で1990年度比+1.4%となっている⁵⁾。

2015年12月に採択されたパリ協定は、1997年に採択された京都議定書以来18年ぶりの気候変動に関する国際的な枠組みであり、全196カ国全てが参加し、各国が削減目標を作成・提出・維持する義務を負うことが最大の特徴とされている。日本では2030年までに2013年比で温室効果ガス排出量を26%削減することを目標として定めている。

日本の部門別CO₂排出量の推移は、2016年度時点で、1990年度比で産業部門は-10.4%と減少したが、家庭部門では+8.2%の増加となっており⁶⁾、今後は暮らしのさまざまな場面で具体的な配慮行動を促す環境学習、環境教育の充実が大きな課題となっているといえる。

温室効果ガスの削減に関連する教育の国際的な取組としては、持続可能な開発のための教育(ESD: Education for Sustainable Development)がある。日本では、2008年に改訂された学習指導要領において、持続可能な社会を構築する観点から、ESDの関連記述が小・中学校、高等学校の総則や各教科の指導内容に記載されている⁷⁾。ESDの視点に立った教育には、問題解決に必要な能力・態度を身に付けることが必要とされており、ESDの考え方は探究的な学習によってより確かな力となることにつながることになる。

また、米国では、2000年代に入ってSTEM(Science, Technology, Engineering and Mathematics)教育が進められている。これは、学校教育において自ら学びとる人材を育てることを目的として、科学、技術、工学、数学領域に重点を置いて横断的に行う教育である。これに環境教育(environmental)を加えたeSTEM教育も存在しており、国際的にも探究的な学習活動の重視と充実が目指されている。STEM教育は、米国のみならず、中国、EU、英国などにも広がりをみせている⁸⁾。

さらに、2003年に10月に施行された環境教育推進法(環境の保全のための意欲の増進及び環境教育の推進に関する法律)では、持続可能な社会の構築に向けて、環境保全の意欲の増進、学校教育等における環境教育の支援等を通じて理解の深化、意欲の増進を図ることが目指されている⁹⁾。2012年10月には環境教育等推進法(環境教育等による環境保全の取組の促進に関する法律)として改正され、ESDの動きや学校における環境教育の関心の高まりなどを踏まえ、教育活動における環境配慮の努力義務や、学校教育における環境教育の一層の推進、環境教育の基盤強化などが図られている¹⁰⁾。

学校段階での環境教育は、主として「総合的な学習の時間」において実施されており、自ら学び、生活に活かす環境教育として、地域の川や海の汚染、ごみ問題などの身近な環境問題をはじめ、地球温暖化などの地球規模の環境問題をテーマにした学習が幅広く行われてきている。そして、次期学習指導要領の「総合的な学習の時間」では、横断的・総合的な問題解決の能力や実社会における横断的・総合的な問題解決に取り組む態度の育成、問題発見・解決を念頭に置いた深い学びの過程が実現できているかどうかなどのアクティブ・ラーニングの視点に立った授業改善が重視されている。

そして、伊藤・岡村（2009）では、小学校から高等学校に至る学校教育を対象に、身近な地域の CO₂ 濃度を可視化し、地域環境との関係性を探究するための教科横断的な環境教育プログラムの具体化が図られている。このプログラムは、各学校段階の「総合的な学習の時間」を中心に実践されているが、身近な地域の CO₂ 濃度調査を通じて、CO₂ 排出源や吸収源の影響を実感し、探究することに主眼が置かれている。暮らしの中の CO₂ 排出やその影響等について実感が持てなければ、CO₂ の削減に対する心理的な動機付けも働かない。すなわち、「地球温暖化は身近な環境問題である」ことの実感を醸成することが、CO₂ の削減を自らの問題として能動的に考える動機付けとなり、環境学習に取り組むべき重要なテーマのひとつとなる、としている。

以上から、国際社会では CO₂ をはじめとする温室効果ガスの削減が重要視されており、今後は暮らしのさまざまな場面で具体的な配慮行動を促す環境学習、環境教育の充実が大きな課題となっている。また、ESD や STEM 教育を通じて探究的な環境学習の重視と充実が目指されている状況にある。さらに、国内に目を転じれば、環境教育推進法の施行や改正によって、学校教育における環境教育の一層の推進が図られるとともに、学校段階では、ESD の視点から問題解決に必要な能力・態度の養成をするために、探究的な学習やアクティブ・ラーニングの充実が求められている。

1-2 研究の目的

既往研究では、上述したように生活環境圏における CO₂ 濃度の動態を把握するための教育方法の確立には至っていない。生活環境圏における CO₂ 濃度の動態を科学的に理解し、CO₂ 濃度と地域環境との関係性を探究する教育方法を具体化することができれば、探究的な環境学習活動の深化と低炭素地域づくりに向けた環境行動への発展に繋げていくことができる、これが本研究の学術的問いである。

本論の目的は、生活環境圏における CO₂ 濃度の動態把握に基づく環境教育方法を明らかにすることにある。この目的を達成するため、本論では、

生活環境圏における CO₂ 濃度の動態把握方法

生活環境圏における CO₂ 濃度の動態把握に基づく環境教育方法

以上の2つの方法の具体化に向けた実証的な研究を進める。

まず、生活環境圏における CO₂ 濃度の動態把握方法であるが、伊藤・岡村(2009)では、可搬型 CO₂ 濃度測定器を用いた CO₂ 濃度調査の方法が示されているものの、CO₂ 濃度測定局の収集データを用いた動態検証方法は明らかにされていない。このため、CO₂ 濃度測定局の収集データに着目し、その環境教育への応用に向けて、気象条件に応じた CO₂ 濃度変化を把握するための学習支援システムとして「CO₂ 濃度データ検索システム」の設計、開発を行い、生活環境圏における CO₂ 濃度の基本的動態とその検証プロセスを明らかにする。

次に、生活環境圏における CO₂ 濃度の動態把握に基づく環境教育方法であるが、これまでの研究を通じて、可搬型 CO₂ 濃度測定器を用いた環境教育方法の具体化が図られてきた。これらを踏まえ、上述の CO₂ 濃度データ検索システムを用いた環境教育プログラムや学習教材を開発し、高等学校での環境教育の実施とその教育効果の検証を通じて、教育方法の有効性を明らかにする。

1-3 論文の構成

本論の構成は、図 1-3-1 に示すとおりである。

まず第 1 章では、既述のとおり、本論の背景として人為の直接的な影響を受ける生活環境圏の CO₂ 濃度に着目した環境教育研究の動向を中心に把握、整理し、本論の目的として、CO₂ 濃度の動態把握に基づく環境教育方法を明らかにしていくことの必要性を述べた。

第 2 章では、生活環境圏における CO₂ 濃度測定局の収集データに着目し、その環境教育への応用に向けて、「CO₂ 濃度データ検索システム」の設計と開発を行う。このシステム開発により、CO₂ 濃度測定局の過去データから、特定の気象条件下の CO₂ 濃度の日変化を参照することで、CO₂ 濃度の動態に対する科学的理解を促すための学習支援システムを整備する。

第 3 章では、CO₂ 濃度データ検索システムを利用し、東海 3 県に開設された CO₂ 濃度測定局の 2011 年から 2013 年までの収集データを基に、CO₂ 濃度の時別平均値を算出し、各測定地点の各月における CO₂ 濃度の変化パターンを分析する。分析に当たっては、CO₂ 濃度の時別平均値を「CO₂ 平均濃度」、一定の風速以上時における CO₂ 濃度の時別平均値を「CO₂ 安定濃度」と定義し、これを検証することで、複雑かつ多様に变化する CO₂ 濃度により客観的かつ多面的なデータ解釈が可能になることを明らかにする。

第 4 章では、東海 3 県に開設された CO₂ 濃度測定局の 5 年間の収集データを活用し、生活環境圏における CO₂ 濃度の分布パターンを検証する。その際、生活環境圏の CO₂ 濃度を評価する尺度として「CO₂ 基準濃度」を定義し、その動態を検証する。そして、1 年間にわたる CO₂ 濃度の定時調査を実施し、その分布パターンを検証することにより、「CO₂ 基準濃度」の空間分布は、地域環境の安定的な影響が反映された濃度となることを明らかにする。

第 5 章では、第 3 章及び第 4 章から得られた生活環境圏における CO₂ 濃度の動態把握に関する知見に基づいて、生活環境圏における CO₂ 濃度の基本的動態や学校周辺における CO₂ 濃度の測定方法などを記した学習指導計画を作成する。そして、この計画に基づいて日本と台湾の高等学校 5 校を対象に環境教育を実施し、その教育効果の検証を行うことで、探究的な環境学習活動としての有効性を明らかにする。

第 6 章では、本論の結論を総括し、その学術的な貢献と今後の展望について述べる。

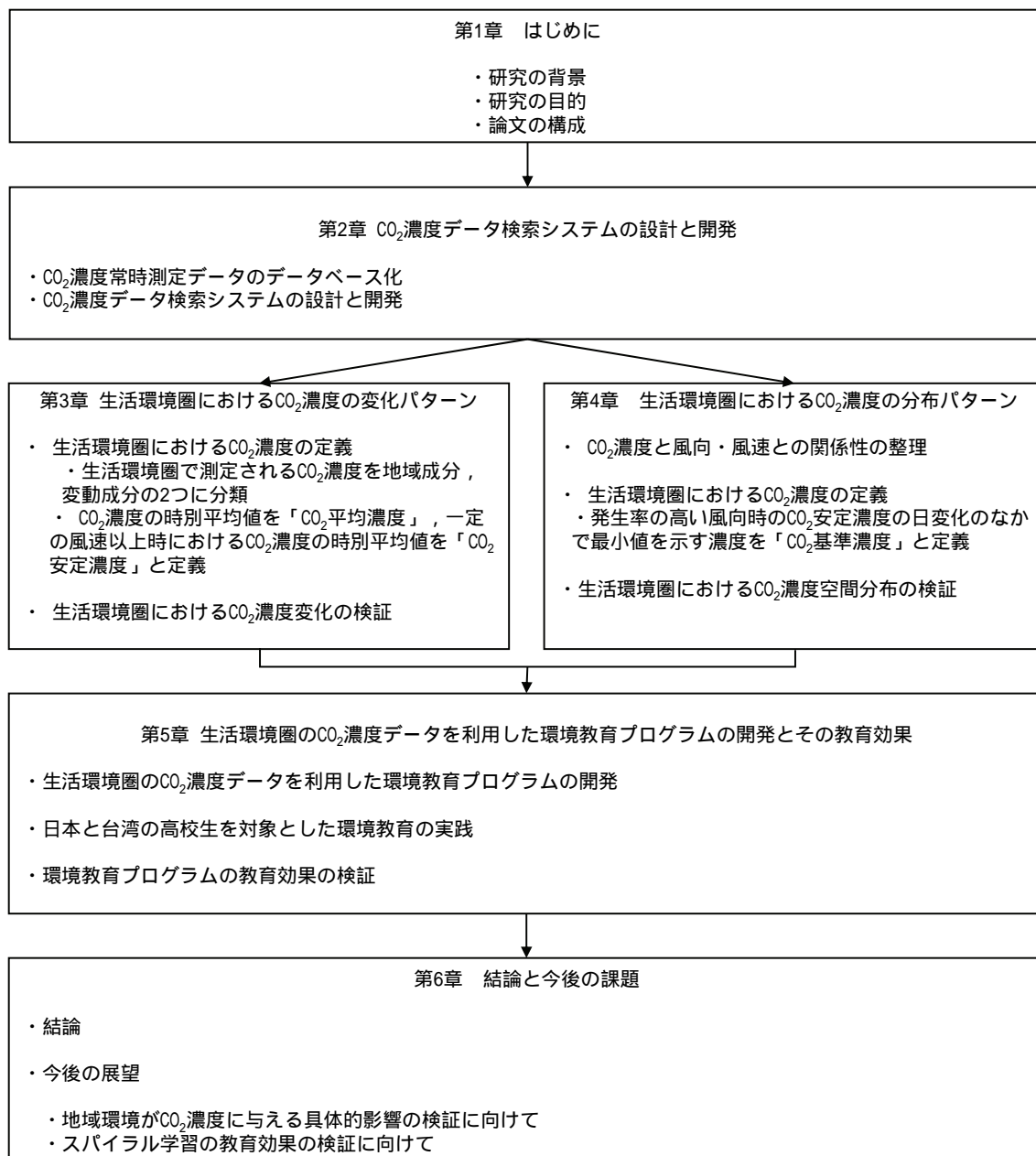


図 1 - 3 - 1 論文の構成

補注

- 1) 気象庁 (2018.5.31 更新) 二酸化炭素濃度の経年変化 . < http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2_trend.html > , 2018.10.10 参照
- 2) 埼玉県環境科学国際センター (2010.10.26 更新) 埼玉県 / 二酸化炭素濃度の観測結果 . < <http://www.kankyoku.pref.saitama.lg.jp/CO2/co2data.html> > , 2018.11.7 参照
- 3) 名古屋産業大学(2015.8.31 更新)二酸化炭素常時測定ネットワークシステム . < <http://co2.nagoya-su.ac.jp/> > , 2018.11.10 参照
- 4) 茨城大学 国土空間情報研究室 (2015.8.18 更新) CO₂ 観測ステーションの設置 . < <http://landinfo.civil.ibaraki.ac.jp/html/co2machine.html> > , 2018.11.10 参照
- 5) 環境省 (2014.7.1 更新) 京都議定書目標達成計画の進捗状況 . < <http://www.env.go.jp/press/upload/24788.pdf> > , 2018.12.29 参照
- 6) 全国地球温暖化防止活動推進センター (2018.4.25 更新) 日本の部門別二酸化炭素排出量の推移 (1990-2016 年度) . < http://www.jccca.org/chart/chart04_05.html > , 2018.12.29 参照
- 7) 文部科学省 (2013.10.11 更新) 学習指導要領における ESD 関連記述 . < <http://www.mext.go.jp/unesco/004/1339973.htm> > , 2018.12.22 参照
- 8) 文部科学省 (2018.9.18 更新) 諸外国における STEM 教育の取組例 . < https://edu.env.go.jp/old_law.html > , 2019.1.7 参照
- 9) 環境省 (2018.3.7 更新) 環境保全活動・環境教育推進法 (旧法) について . < http://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/_icsFiles/afieldfile/2018/09/18/1409229_06.pdf > , 2018.12.30 参照
- 10) 環境省 (2018.6.27 更新) 環境教育等促進法 関連情報 . < <https://edu.env.go.jp/law.html> > , 2019.1.7 参照

参考文献

- 安田幸生・渡辺力・大谷義一・岡野通明・中山敬一 (1998) 落葉広葉樹林上における CO₂ フラックスの季節変化 . 水文・水資源学会誌 , Vol 11 No 6 , pp.575 ~ 585.
- 森脇亮・神田学 (2005) 住宅街における熱収支と CO₂ フラックスの年間積算値 . 水工学論文集 , 第 49 巻 , pp.361 ~ 366.
- 森脇亮・菅原広史 (2012) 都市におけるフラックス及び乱流観測 (都市の気象と気候) . 日本気象学会 気象研究ノート , 第 224 号 , pp.103 ~ 154.
- 伊藤雅一・岡村聖編著 (2009) みんなで作る CO₂ 濃度マップ 地球温暖化と私たちの暮らし . リバネス出版 , 164p.
- 岡村聖・村上健太郎・伊藤雅一・岩瀬真寿美・坂本剛 (2013) 桜の樹勢回復に対する CO₂ 濃度と葉緑素の関係 : 木曽川堤の桜を事例として . 環境経営研究所年報 , 第 12 号 , pp.1

~ 4.

- 岡村聖・伊藤雅一・岩瀬真寿美・坂本剛(2011)間伐の有無による森林のCO₂濃度の違い：夏の白山演習林を事例として．環境経営研究所年報，第10号，pp.42~45.
- 齋藤修・桑原祐史・神澤雅典・石川富子・坏拓男(2013)CO₂濃度計測による小学校における環境教育実践．地球環境研究論文集，Vol.21, pp.79~84.
- 土井徹・匹田篤・野添生・古瀬健太郎・吉富健一・林武広(2011)環境センサーデータを活用した，環境学習教材の研究(4) - 二酸化炭素データを用いた理科学習の可能性 - ．広島大学 学部・附属学校共同研究紀要，Vol.40, pp.95~98.
- 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)~CO₂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.
- 宮部紀之・桑原祐史・齋藤修・安原一哉・小柳武和(2009)生活環境圏を対象としたCO₂濃度システムデータ利用による変動分析．(社)土木学会 情報利用技術論文集，18，pp.85~94.
- 桑原祐史・山田貴弘・今井友桂子・神澤雅典(2014)茨城県を対象とした生活環境圏におけるCO₂濃度観測データの補正方法と地域性の検討．応用測量論文集，Vol.25，pp.15~23.
- 今井友桂子・石内鉄平・桑原祐史(2014)都市域を対象としたCO₂濃度の計測とその変動要因の分析．応用測量論文集，Vol.25，pp.3~14.

第 2 章 CO₂ 濃度データ検索システムの設計と開発

2-1 はじめに

伊藤・岡村(2009)は、学校周辺の CO₂ 濃度調査を通じて、CO₂ 濃度データ等を可視化した「CO₂ 濃度マップ」を作成し、CO₂ 濃度の地域分布と地域環境との関係性を探究するための環境教育を実践している。

具体的には、学校周辺の CO₂ 濃度や風向・風速を児童・生徒が実際に測定し、その調査データを基に、メッシュ状に切った地図に、相対的に濃度が高い地点、低い地点を色分けして記入し可視化する。これを「CO₂ 濃度マップ」と呼び、このマップを基に学校周辺の CO₂ 濃度の分布と地域環境との関係性を考察している。

図 2-1-1 及び図 2-1-2 は、津市立橋北中学校の生徒が、CO₂ 濃度と風向・風速を調べ、その関係を整理した CO₂ 濃度マップの作成例である。校庭中央部の測定データを基準値とし、CO₂ 濃度が相対的に高い箇所は赤色系、低い箇所は青色系で色分けがされている。CO₂ 濃度と同時に測定した風向・風速は、矢印で表現されている。また、CO₂ 濃度の変化に影響を与えると考えられる当日の天候については、津気象台のデータを参照している。

この 2 つの CO₂ 濃度マップをみると、日によって CO₂ 濃度分布の様相は大きく異なっていることがわかる。図 2-1-1 は、図 2-1-2 と比べて CO₂ 濃度は相対的に低い。風速は図 2-1-1 が約 7 m/s であるのに対して、図 2-1-2 は約 1~2 m/s である。これは風速が強い日は大気中の CO₂ 濃度は風によって拡散し、風速が弱い日は拡散が弱まり大気中の CO₂ 濃度は滞留する傾向にあることを示している。

児童・生徒は、学校周辺の CO₂ 濃度を実際に調べることで、CO₂ そのものの性質や特性を理解することができる。また、CO₂ の吸収源となる、緑が豊富な公園などの地点では CO₂ 濃度は低く、車が多く往来する幹線道路など、排出源に近い地点では CO₂ 濃度が高くなるという一般的傾向を知ることができる。ただし、CO₂ を含んだ空気は常に移動しているため、CO₂ を多く含んだ空気が、緑が豊富な公園に滞留すると、その地点の CO₂ 濃度は高くなることもある。CO₂ を含んだ空気は地球上を絶え間なく移動し、吸収源や排出源の近くとは関係なく、CO₂ 濃度の値は高く、または低くなることもある。CO₂ 濃度マップを考察することで、CO₂ の排出影響が地点だけの問題ではなく、地域全体、さらには地球全体の問題であることを理解することにもつながる。

学校周辺の CO₂ 濃度調査に基づく環境教育は、学校教育の一環として、「総合的な学習の時間」や「選択理科」等で実施され、授業が行われる特定時間、特定日の中で CO₂ 濃度の測定が行われている。生活環境圏における CO₂ 濃度は、一定した一日の変化を示すのではなく、日によって大きく異なる。図 2-1-3 は名古屋産業大学に開設された CO₂ 濃度測定局の収集データを活用し、2010 年 7 月の日別(24 時間)の CO₂ 濃度変化を示したものである。どの日も他の日と同じ動きになることはなく、日によって大きく異なっていることが

わかる。複雑かつ多様に变化する CO₂ 濃度变化を多面的に理解しようとする、連続した CO₂ 濃度データの収集、蓄積とその検証が必要とされる。

このため、名古屋産業大学環境教育研究プロジェクトでは、環境教育の基盤として、東海3県の高等学校等に CO₂ 濃度測定局を開設し、24時間365日、3秒間隔で CO₂ 濃度、温度、湿度、気圧のデータ収集が行われている。また、学校周辺の CO₂ 濃度調査に際しては、可搬型 CO₂ 濃度測定器の測定誤差を考慮し、CO₂ 濃度測定局の常時測定データが基準値として活用されているが、CO₂ 濃度の動態把握のための教育方法の具体化には至っていない。

本章では、CO₂ 濃度測定局の収集データから、CO₂ 濃度の動態把握を目的とした学習支援システムの設計と開発を行う。

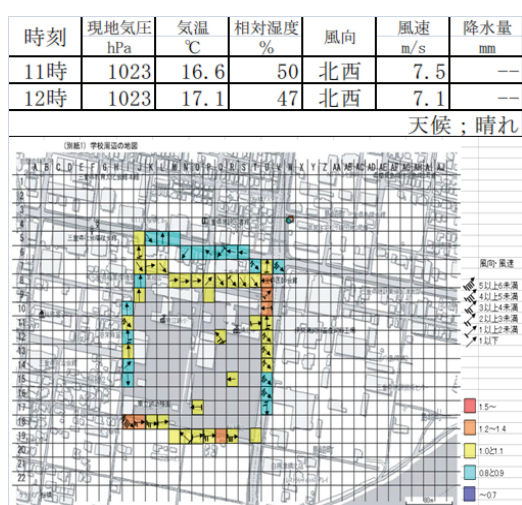


図 2 - 1 - 1 CO₂ 濃度マップと測定時気象条件 (2004 年 11 月 22 日)

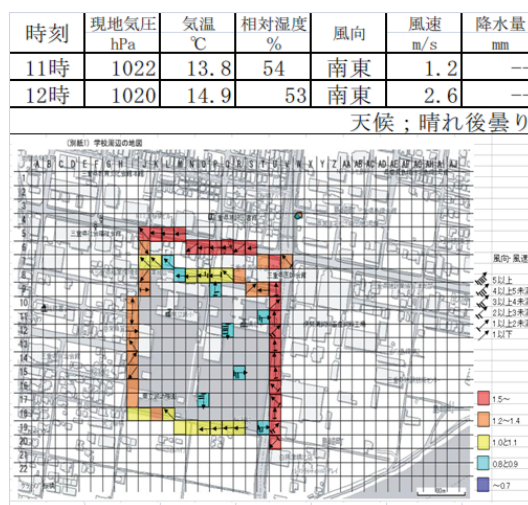


図 2 - 1 - 2 CO₂ 濃度マップと測定時気象条件 (2004 年 11 月 26 日)

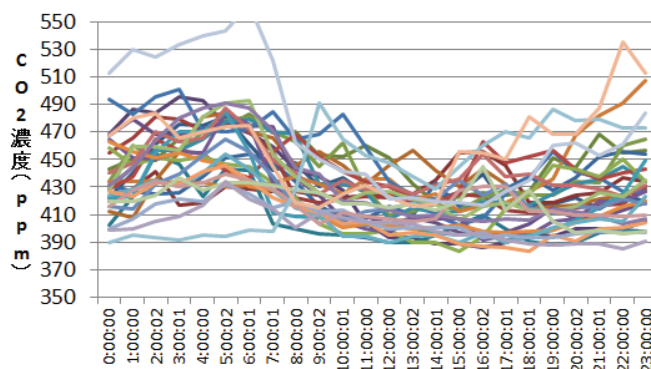


図 2 - 1 - 3 日別の CO₂ 濃度データ (名古屋産業大学 2010 年 7 月)

2-2 CO₂濃度常時測定データのデータベース化

CO₂濃度測定局では3秒に1回データ保存がされ、そのデータ量は年間1,000万件/局となる。この膨大なデータを生徒が自力で検証することは時間的な制約や技術的側面から実際には困難である。そこで、それらを簡単なステップで実現できる学習支援システムを整備することができれば、CO₂濃度の動態把握やそのデータ解釈をより効率的かつ効果的に行うことができると考えられる。このため、CO₂濃度の動態把握を目的とした学習支援システムの開発に向けて、CO₂濃度測定局の収集データのデータベース化を行った。

CO₂濃度常時測定データのデータベース化に当たっては、マイクロソフト社のExcel 2010およびAccess 2010を使用した。

データベース化のフローチャートは図2-2-1のとおりである。常時測定データは一日ごとに集計され、データはcsvファイルで保存される。CO₂濃度測定局では3秒に1回測定データが保存される。保存されたcsvファイルはそのままではデータ量が多く、データ検索時に大幅な時間がかかるなどの支障をきたす恐れがある。そのため、Excel VBAを用いて10分ごとのデータを代表値と平均値として取り出し、Accessにインポートすることとした。CO₂濃度測定局のデータからAccessにインポートされる情報は、場所、観測日、時刻、CO₂濃度、温度、湿度、気圧、種別である。種別が0の場合はその時点の代表値、1の場合は10分間の平均値を示す。これらはAccess上の測定データテーブルに保存がされる(図2-2-2)。次に、気温、湿度、風速、風向、気圧データについては気象庁が設置し、測定標準に沿って測定がされている最寄りの気象台からのデータを気象庁のWEBサイトから10分ごとのデータをExcelのマクロ機能を用いてダウンロードし、Accessにインポートを行った。Access上に入力されるデータは、場所、観測日、時刻、気象庁温度、気象庁湿度、気象庁気圧、風速、風向、天候である(図2-2-3)。

最後に、測定データと気象庁データを統合するためのテーブルとして、集計データテーブルを作成し、それぞれの場所、観測日、時刻が合致する時のデータを統合させ、検索システムを使用する際のデータベースとして使用した(図2-2-4)。

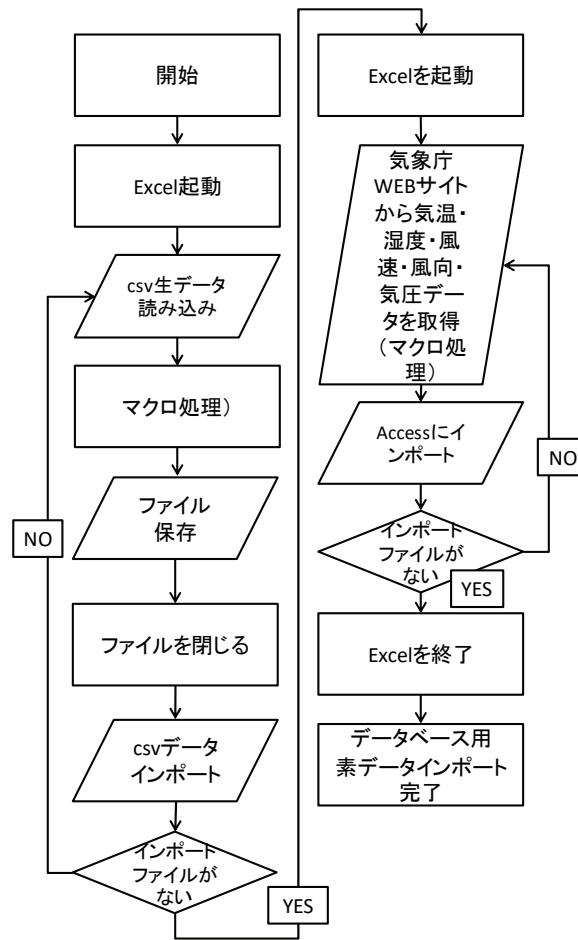


図 2 - 2 - 1 データベース化フローチャート

場所	観測日	時刻	CO2濃度	温度	湿度	気圧	種別
名古屋産業大	20130101	0:20	402	6.5	40.3	1004	0
名古屋産業大	20130101	0:20	403.4773869	6.409045226	40.81608040	1003.962312	1
名古屋産業大	20130101	0:30	403	6.3	41.3	1004	0
名古屋産業大	20130101	0:30	403.57	6.3775	41.135	1003.987	1
名古屋産業大	20130101	0:40	403	6.4	41.3	1004	0
名古屋産業大	20130101	0:40	404.16	6.2715	41.63	1003.999	1
名古屋産業大	20130101	0:50	406	6.3	41.6	1004	0
名古屋産業大	20130101	0:50	404.2562814	6.104522613	42.2638191	1004.011558	1
名古屋産業大	20130101	1:00	406	6	42.7	1004.1	0
名古屋産業大	20130101	1:00	405.09	6.114500000	42.6985	1004.167	1
名古屋産業大	20130101	1:10	403	6	43.1	1004.1	0
名古屋産業大	20130101	1:10	403.85	6.143000000	43.251	1004.2745	1
名古屋産業大	20130101	1:20	402	6.1	43.6	1004.3	0
名古屋産業大	20130101	1:20	402.6	6.1195	43.667	1004.32	1

図 2 - 2 - 2 測定データテーブル

気象庁データ								
場所	観測日	時刻	気象庁温度	気象庁湿度	気象庁気圧	風速	風向	天候
名古屋産業大	20120522	22:10	16.3	91	1003.4	1.9	北	晴れ
名古屋産業大	20120522	22:20	16.1	93	1003.3	1.6	北	晴れ
名古屋産業大	20120522	22:30	16	93	1003.3	1.5	北	晴れ
名古屋産業大	20120522	22:40	16.3	92	1003.3	1.8	北	晴れ
名古屋産業大	20120522	22:50	16.8	91	1003.2	1.8	北	晴れ
名古屋産業大	20120522	23:00	16.4	91	1003.3	1.7	北北東	晴れ
名古屋産業大	20120522	23:10	16	93	1003.4	1.6	北	晴れ
名古屋産業大	20120522	23:20	16.1	93	1003.4	1.5	北北西	晴れ
名古屋産業大	20120522	23:30	16.3	93	1003.3	1.4	北	晴れ
名古屋産業大	20120522	23:40	15.9	93	1003.2	1.6	北北東	晴れ
名古屋産業大	20120522	23:50	16.1	93	1003.2	1.6	北東	晴れ
名古屋産業大	20120522	0:00	16.2	93	1003.2	1.2	北東	晴れ

図 2 - 2 - 3 気象庁データテーブル

集計データ													
場所	観測日	時刻	CO2濃度	温度	気象庁温度	湿度	気象庁湿度	気圧	気象庁気圧	風速	風向	天候	種別
名古屋産業大	20110101	0:10	409	3.1	1.5	83.8	88	987.6	994.3	4	北西	曇	0
名古屋産業大	20110101	0:10	410.19	3.085000000	1.5	84.04300000	88	987.5985000	994.3	4	北西	曇	1
名古屋産業大	20110101	0:20	411	3.1	1.4	84.4	88	987.6	994.3	3.5	北西	曇	0
名古屋産業大	20110101	0:20	410.05	3.0255	1.4	84.65250000	88	987.5980000	994.3	3.5	北西	曇	1
名古屋産業大	20110101	0:30	410	3.1	1.5	84.7	88	987.6	994.3	2.9	北西	曇	0
名古屋産業大	20110101	0:30	412.4824623	3.023115578	1.5	84.9798986	88	987.6000000	994.3	2.9	北西	曇	1
名古屋産業大	20110101	0:40	413	3	1.5	85	89	987.6	994.3	3.7	北西	曇	0
名古屋産業大	20110101	0:40	412.23	3.012	1.5	85.14400000	89	987.6000000	994.3	3.7	北西	曇	1
名古屋産業大	20110101	0:50	412	3	1.4	85.3	89	987.6	994.4	4.3	北西	曇	0
名古屋産業大	20110101	0:50	413.41	2.9755	1.4	85.256	89	987.6040000	994.4	4.3	北西	曇	1
名古屋産業大	20110101	1:00	413	2.9	1.3	85.3	89	987.6	994.4	4.2	北西	曇	0
名古屋産業大	20110101	1:00	413.5527638	2.931658291	1.3	85.35829648	89	987.6366834	994.4	4.2	北西	曇	1
名古屋産業大	20110101	1:10	413	2.9	1.3	85.2	90	987.6	994.4	3.8	北西	曇	0
名古屋産業大	20110101	1:10	412.985	2.89	1.3	85.5	90	987.6015000	994.4	3.8	北西	曇	1
名古屋産業大	20110101	1:20	415	2.9	1.1	85.5	92	987.6	994.4	3.7	北西	曇	0
名古屋産業大	20110101	1:20	412.885	2.89	1.1	85.57050000	92	987.5825000	994.4	3.7	北西	曇	1

図 2 - 2 - 4 集計データテーブル

2-3 CO₂濃度データ検索システムの設計と開発

本節では、CO₂濃度のデータベースを活用した学習支援システムとして、「CO₂濃度データ検索システム」の設計と開発を行う。検索システムのアウトプットフローチャートを図2-3-1、検索システムの検索画面を図2-3-2、アウトプット画面を図2-3-3に示す。

検索システムのユーザーインターフェイスは検索条件に天候及び風向・風速を入力する。表示する対象期間には、特定日、特定月、任意の期間とする。表示項目はCO₂濃度、風向・風速とする。検索結果には、CO₂濃度の特別平均値、時間ごとの主たる風向・風速が表示され、さらに詳細条件で天候、風向・風速を入力した場合には、その条件に応じたCO₂濃度の特別平均値、時間ごとの主たる風向・風速が表示される。

この開発に当たっては、設置型CO₂濃度測定器、可搬型CO₂濃度測定器を開発している株式会社ユードムの支援を受け、Excel VBA、および2-2で整備したデータベースを用いて、上述の設計どおり検索画面を図2-3-2、アウトプット画面を図2-3-3のとおり作成を行い、CO₂濃度の特別平均値と、気象条件に応じたCO₂濃度の特別平均値、時間ごとの主たる風向・風速が表示されるように設計を行った。

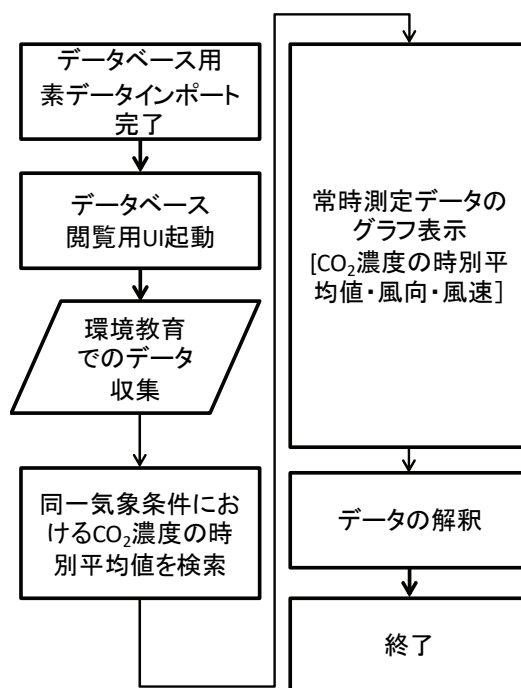


図 2 - 3 - 1 検索システムフローチャート



図 2 - 3 - 2 CO₂濃度データ検索システム

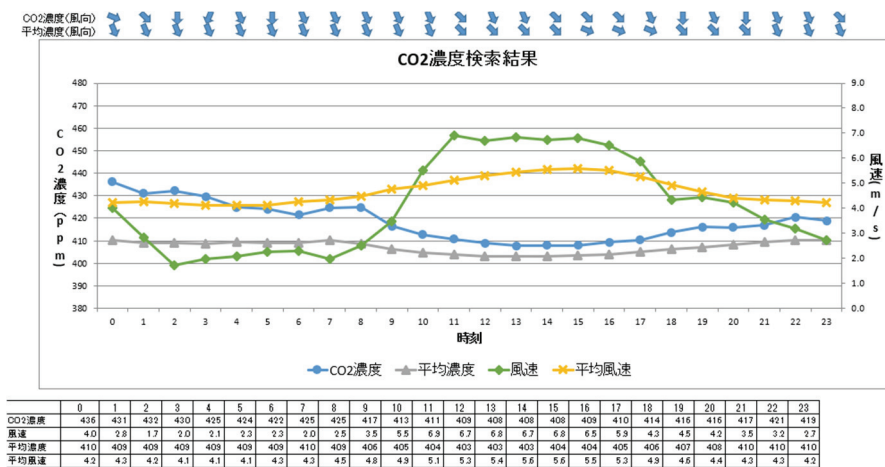


図 2 - 3 - 3 CO₂濃度データ検索システムでのアウトプット画面

2-4 CO₂濃度データ検索システムの環境教育への活用

図 2-4-1 は生徒が測定を行った月における CO₂ 濃度の特別平均値と、その測定日の気象条件に応じた CO₂ 濃度の特別平均値の比較例である。測定した日の天候、風向・風速を CO₂ 濃度データ検索システムに入力し検索を行えば、検索結果には CO₂ 濃度の特別平均値と、近似の気象条件（天候、風向・風速）における CO₂ 濃度の特別平均値がグラフとして表示される。

例えば、生徒が実測した CO₂ 濃度の値と検索システムによる CO₂ 濃度の特別平均値に 30 ppm の差があったならば、その濃度差は測定地点特有の気象現象や、CO₂ の排出源、吸収源の影響によるものと解釈することができる。

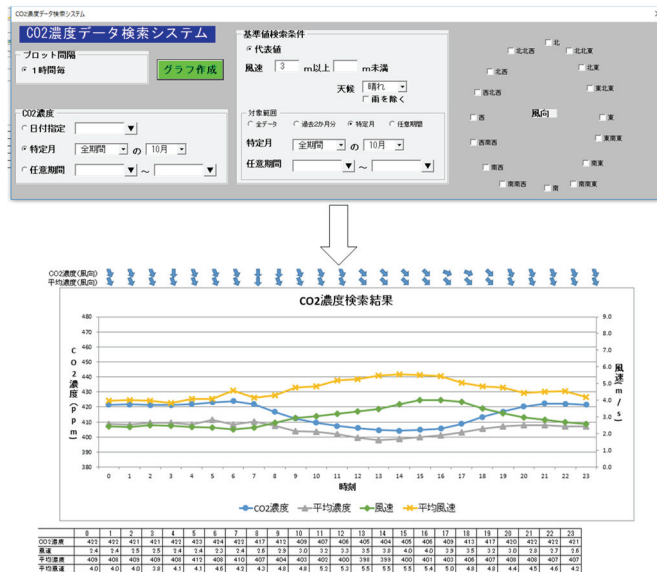


図 2 - 4 - 1 CO₂濃度常時測定データ検索例

2-5 まとめ

本章では、気象条件を考慮した CO₂ 濃度変化を把握可能な学習支援システムとして、CO₂ 濃度データ検索システムの設計と開発を行った。

このシステムを環境教育に活用すれば、生徒が測定した CO₂ 濃度データと CO₂ 濃度の特別平均値を気象現象別に簡便に比較し、仮説の立証に対してより多面的な考察を与えることができると考えられる。

参考文献

伊藤雅一・岡村聖編著（2009）みんなで作る CO₂ 濃度マップ 地球温暖化と私たちの暮らし，リバネス出版，164p.

第3章 生活環境圏におけるCO₂濃度の変化パターン

3-1 はじめに

第2章では、CO₂濃度常時測定データのデータベース化と、CO₂濃度データ検索システムの設計と開発を行った。

伊藤・岡村(2009)は、2003年度より、東海3県の小・中学校、高等学校を中心に、学校周辺のCO₂濃度調査に基づく環境教育プログラムの開発と実践に取り組んでいる。今井ら(2014)は、都市内緑地や土地利用とCO₂濃度データとの関連性について検討がされている。

生活環境圏における人間活動や植物活動による直接的な影響(以下「人為等の地域的影響」という)が反映されたCO₂濃度データ(非バックグラウンドデータ)の分析・解釈に当たっては、CO₂の挙動を継続的に把握することが必要になるが、岡村・伊藤ら(2006)は、学校等を拠点にCO₂濃度測定局を開設し、これらをインターネット経由でネットワーク化を図るCO₂濃度常時測定ネットワークシステム¹⁾の開発を行っている。

生活環境圏のCO₂濃度は、様々な地域環境の影響を受け、複雑かつ多様に变化するが、CO₂濃度変化の共通的傾向を明らかにすることで、地域環境の違いによる地域的差異を検証することが可能になると考えられる。

本論で着目するのは、CO₂濃度の全球観測では除外される人為等の地域的影響を受けた非バックグラウンドデータである。このデータに注目し、その規則性を明らかにしようとする点に学術的な価値、新規性があると考ええる。

本章の目的は、既設のCO₂濃度測定局で収集された3年間の常時測定データを用いて、環境情報としてのCO₂濃度データの解釈可能性に着目し、生活環境圏におけるCO₂濃度変化パターンを明らかにすることである。人々が生活を営む都市地域におけるCO₂濃度の変化パターン、すなわち規則性を明らかにすることで、CO₂濃度の実測データを低炭素の都市地域づくりに向けた取組に応用することが可能になると考える。

3-2 研究の方法

名古屋産業大学(愛知県尾張旭市)、岐阜農林高等学校(岐阜県本巣町)、久居農林高等学校(三重県津市)に開設されたCO₂濃度測定局3局(図3-2-1)で収集されたCO₂濃度常時測定データを用いて、生活環境圏におけるCO₂の挙動を検証する。この3局を分析対象としたのは、2011年以降のCO₂濃度常時測定データが蓄積されていること、学校に開設された測定局であり、本章の成果を踏まえた環境教育への応用が容易となること、東海3県の地理的に異なるCO₂濃度変化の比較が可能なことによる。この3地点は、都市部からやや離れた郊外に位置し、住宅地と隣接している。それぞれの周辺環境は、名古屋産業大

学は愛知県北西部にある尾張旭市のほぼ中心に位置し、北東方向に面積約 466 ha に及ぶ愛知県森林公園が広がり、南方向には田畑、南東方向には住宅地がある。岐阜農林高等学校は山の麓近くに位置し、周辺は田畑と住宅地があり、南西方向には長良川が流れている。久居農林高等学校は三重県中勢地域に位置し、北東方向には住宅地が、南西方向には田畑が、東方向に伊勢湾があり、西方向には三重県伊賀市東部から三重県津市西部にかけて広がる青山高原がある。

CO₂濃度測定局では、3秒に1回データを取得し、24時間365日間断なくデータ収集が行われている。1年間で約1,000万件/局の膨大なデータ収集量となる。

このため、データ分析を目的としたツールである「CO₂濃度データ検索システム」を使用し、測定データの分析、検証を行う。

次いで、各測定局で収集されたCO₂濃度変化の共通の傾向、言い換えれば、生活環境圏におけるCO₂濃度変化パターンを明らかにし、環境情報としてのデータ解釈の可能性について考察する。

なお、全球観測で収集されるCO₂濃度データは、人為等の地域的影響を排除するため、バックグラウンドデータの選別等が行われている。その一方で、本論では、人為等の地域的影響が反映されたCO₂濃度に着目していることから、バックグラウンドデータの選別等は行わず、明らかにノイズと考えられるデータや機器の点検、故障時の欠損データを除いた測定データを用いている。

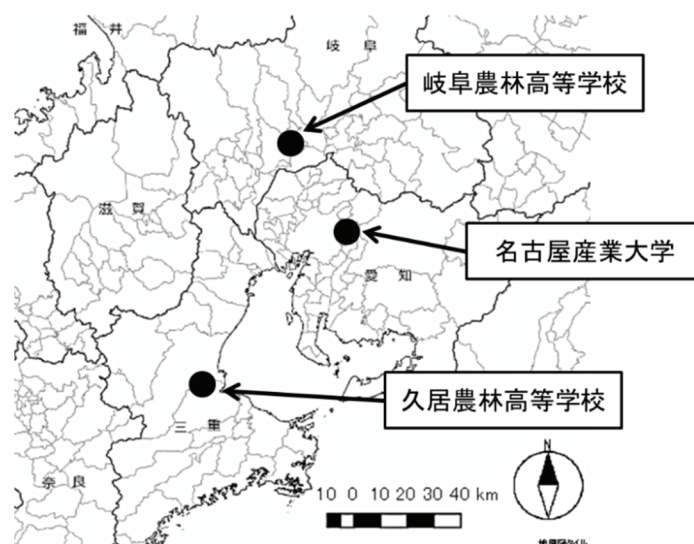


図 3 - 2 - 1 CO₂濃度測定局の測定地点
(国土地理院の電子地形図(タイル)に縮尺と方位記号及び測定地点を追記して掲載)

3-3 生活環境圏における CO₂ 濃度

本論では、生活環境圏で測定される CO₂ 濃度を、地域成分（地球成分を含む）と変動成分の 2 つの成分に分類する（図 3-3-1）。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ある。変動成分は、測定地点近傍のみを代表するもので、局所的な吸収源・排出源・気象現象の影響が反映されたものである。地域成分と変動成分を厳密に分離することは容易ではないが、気象庁の地域気象観測網（アメダス）では約 21 km の平均間隔で風向・風速が観測されており、誰もが利用できる近傍のアメダスデータから地域成分と変動成分を簡便に分離できれば、実用性は高い。本論では、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する。具体的には、Pasquill の安定度分類（Pasquill and Smith, 1983）（表 3-3-1）を用いて変動成分と地域成分を分類する。Pasquill の安定度分類は、接地層内²⁾で大気の乱れの状態を A（強不安定）から F（並安定）の 6 段階で表している。A（強不安定）は、CO₂ を含む大気が鉛直方向に移動しやすく、同じ場所に留まっていない状態を示し、F（並安定）は、大気が元の位置から動きにくく、外力に影響されず安定している状態を示す³⁾。A（強不安定）時には大気が鉛直方向に移動しやすいため、局所的な吸収源・排出源・気象現象の影響により急激に大気中の CO₂ 濃度が変動する可能性がある。また、F（並安定）時には大気が元の位置から動きにくいために、大気中の CO₂ は、局所的な吸収源・排出源・気象現象の影響を受け濃度が変化し、その場に留まる可能性がある。このため、これらの局所的な吸収源・排出源・気象現象の影響が反映される可能性のある 3 m/s 未満の風速帯は変動成分として分類する。さらに、安定度分類において A および F が出現しない風速 3 m/s 以上の CO₂ 濃度を地域成分として分類する。

本論では CO₂ 濃度の日変化に着目しており、日変化の中で特異となるようなスケールの小さな現象（突風や風の息など）を除けば、気象状況を地域的に細かく監視するために 40 年以上運用されている地域気象観測システム（アメダス）において、局地風を捉える上でその配置に問題があったとは考えておらず、平均間隔程度の空間代表性があると想定している。

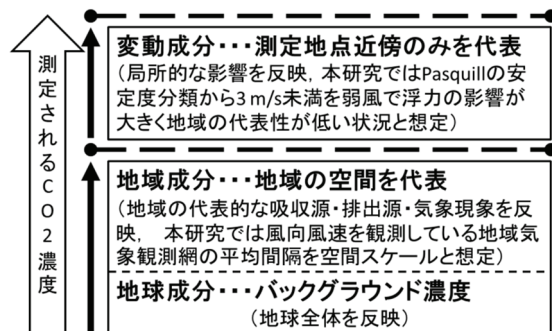


図 3-3-1 生活環境圏で測定される CO₂ 濃度の模式図

表 3 - 3 - 1 風速，日射および空の状態に対応する安定度分類

地上風速 (m/sec)	日射			夜	
	強	中	弱	薄曇または	3/8
				4/8 下層雲	雲量
<2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

(A-B は A および B の値の平均をとる。その他も同様)
A: 強不安定, B: 並不安定, C: 弱不安定, D: 中立,
E: 弱安定, F: 並安定

(Pasquill and Smith, 1983 の日本語訳版 (横山長之訳 (1995) 大気拡散 原著第 3 版, 近代科学社, 371p.) の表 6.5 を基に筆者作成)

3 - 4 生活環境圏における CO₂ 濃度変化

図 3-4-1 は,名古屋産業大学に開設された CO₂ 濃度測定局の 2011 年の常時測定データを用いて,日平均の CO₂ 濃度を算出し,1 年間の濃度変化を示したものである。日平均の CO₂ 濃度は,非常に激しく変化していることがわかる。また,30 日移動平均線を見ると,冬季の濃度が相対的に高く,春から秋にかけて濃度が低下し,秋から冬にかけて濃度が上昇する傾向がみられる。日本を含む北半球では,秋から冬にかけて CO₂ 濃度が高くなり,陸域の植物活動が活発になる夏季には濃度が低くなるが,その現象を確認することができる。

また,気象要素が CO₂ 濃度に与える影響を把握するため,相関係数を用いて,CO₂ 濃度データと気象要素との関連性を年別,季節別に,日中と夜間に分けて分析した。CO₂ 濃度と気温,湿度,気圧,風速の相関係数を求めた結果を表 3-4-1 に示す。

その結果,風速については,やや強いマイナスの相関が共通して現れている。このため,本論では,CO₂ 濃度と風速との関係性に着目し,常時測定データの検証を進める。

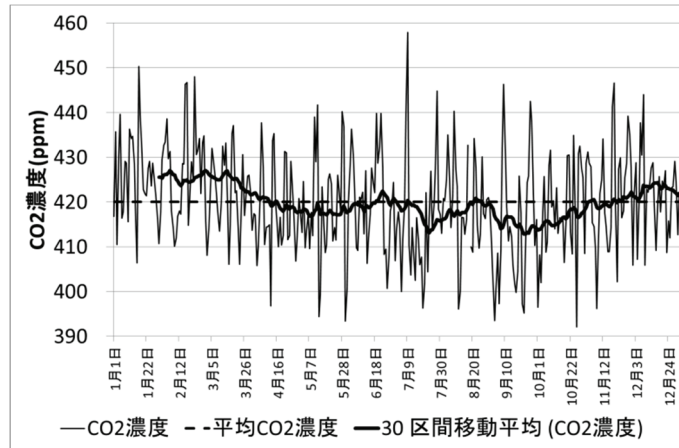


図 3 - 4 - 1 2011 年における CO₂ 濃度の日平均値の推移

表 3 - 4 - 1 CO₂ 濃度と気象要素との相関係数

		気象庁気温	気象庁湿度	気象庁気圧	気象庁風速		
2011年	春	日中	-0.1034**	0.3012**	0.0366	-0.4765**	
		夜間	-0.0941**	0.1649**	0.2931**	-0.5479**	
	夏	日中	-0.2651**	0.3375**	0.2065**	-0.4518**	
		夜間	-0.2583**	0.3740**	0.1841**	-0.5503**	
	秋	日中	-0.2320**	0.3499**	0.3206**	-0.6074**	
		夜間	-0.2410**	0.2056**	0.3604**	-0.6290**	
	冬	日中	-0.1364**	0.4273**	0.1800**	-0.5490**	
		夜間	0.1014**	0.2059**	0.1936**	-0.4697**	
	年間	日中	-0.2142**	0.3057**	0.0490**	-0.4927**	
		夜間	-0.1724**	0.2024**	0.2789**	-0.5394**	
	2012年	春	日中	-0.0824**	0.3052**	0.2063**	-0.5439**
			夜間	0.0837**	0.2669**	0.0773*	-0.5724**
夏		日中	-0.1376**	0.2082**	0.0685*	-0.4295**	
		夜間	-0.1379**	0.2182**	0.0404	-0.5641**	
秋		日中	-0.3051**	0.3929**	0.0298	-0.5002**	
		夜間	-0.1549**	0.1089**	0.2741**	-0.5089**	
冬		日中	-0.2178**	0.4849**	0.0507+	-0.5698**	
		夜間	0.1203**	0.3971**	0.2623**	-0.5332**	
年間		日中	-0.2894**	0.3121**	0.0696**	-0.4672**	
		夜間	-0.2093**	0.1939**	0.2373**	-0.5080**	
2013年		春	日中	-0.0148	0.2420**	0.1444**	-0.5838**
			夜間	0.0598*	0.0998**	0.1033**	-0.5413**
	夏	日中	-0.2626**	0.3128**	0.1012**	-0.3937**	
		夜間	-0.2091**	0.2969**	-0.0754*	-0.5597**	
	秋	日中	-0.4531**	0.3159**	0.1133**	-0.5213**	
		夜間	-0.4156**	0.1975**	0.5455**	-0.5431**	
	冬	日中	-0.0756*	0.4481**	0.1469**	-0.5612**	
		夜間	0.1688**	0.1833**	0.2118**	-0.4753**	
	年間	日中	-0.2455*	0.3077**	0.1340**	-0.4876**	
		夜間	-0.2447**	0.1640**	0.3568**	-0.5021**	

春(3-5月)、夏(6-8月)、秋(9-11月)、冬(12-2月)

日中(6~17時)、夜間(18~5時)

+: 10%有意 * : 5%有意 **: 1%有意

3-5 CO₂濃度データ検索システムによる分析

CO₂濃度データの分析に当たっては、分析対象とした3測定局⁴⁾における過去3年間(2011年から2013年)の常時測定データを対象に、CO₂濃度データ検索システムを利用して、CO₂濃度及び風速の特別平均値を算出し、午前9時を基準値とした差分ベースの日変化を検証した。各測定局、各年におけるCO₂濃度変化パターンの比較を容易にするため、午前9時の平均値よりも大きい小さいかという差分ベースのデータを用いることで基準化を行った。また、検索システムは1地点毎のデータ表示となるため、地点毎に検索システムを作成し、表示されたデータをExcel 2010上に集計し、分析を行った。

そして、CO₂濃度の特別平均値を「CO₂平均濃度」、一定の風速以上時⁵⁾におけるCO₂濃度の特別平均値を「CO₂安定濃度」と定義し、それぞれの変化パターンを検証した。

なお、本論では、CO₂安定濃度の算出に当たって、検索システムを利用して風速が3 m/s以上に該当する時のCO₂濃度及び風速データを抽出し、その特別平均値の日変化をグラフ化している。従って、基準値となる午前9時のCO₂濃度についても、風速が3 m/s以上に該当するCO₂濃度の特別平均値を示している。

生活環境圏におけるCO₂濃度の日変化は複雑かつ多様に変化し、測定局の地点によっても異なる動きを示すが、検証の結果、3測定局におけるCO₂平均濃度、CO₂安定濃度は、ほぼ相似した変化パターンに収斂し、次のような共通の傾向を示すことがわかった。

まずCO₂平均濃度の日変化(図3-5-1)は、午前9時を基準値とした日変化の中で午前6時前後に相対的に高い傾向を示し、午後4時前後に相対的に低い傾向を示す。また、CO₂安定濃度の日変化(図3-5-2)の変動幅は、大気拡散によりCO₂平均濃度に比べ縮小する。

次に、月別にみたCO₂平均濃度を図3-5-3に示す。図3-5-3の横線はCO₂濃度の変動幅(3局の平均値)を、左縦線はCO₂濃度が日変化の中で相対的に高い時間(3局の平均値)を、右縦線はCO₂濃度が日変化の中で相対的に低い時間(3局の平均値)を示す。この2つの破線によって形作られる四角形の大きさは、主として日射による対流発生に伴う風速の増加と、植物活動によるCO₂吸収量の増加によって変化する。生活環境圏におけるCO₂濃度の季節変化を表す一つの指標となる。月別にみたCO₂平均濃度の日変化(図3-5-3)には、季節変化が見られる。CO₂濃度の変動幅は、春から夏にかけて拡大し、夏から翌春にかけて縮小する。次に、月別にみたCO₂安定濃度を図3-5-4に示す。図3-5-4の横線は、3局平均でのCO₂濃度の時間変動幅が10 ppm以下で推移している時間帯を示す。月別にみたCO₂安定濃度の日変化(図3-5-4)は、日の出から日没までの時間帯は概ね10 ppm以下の変動幅の内で推移し、季節変化がみられる。CO₂安定濃度の時間変動幅は、大気が安定する冬は一定の範囲で推移するが、春から夏にかけて濃度差が拡大し、夏から翌春にかけて縮小する。

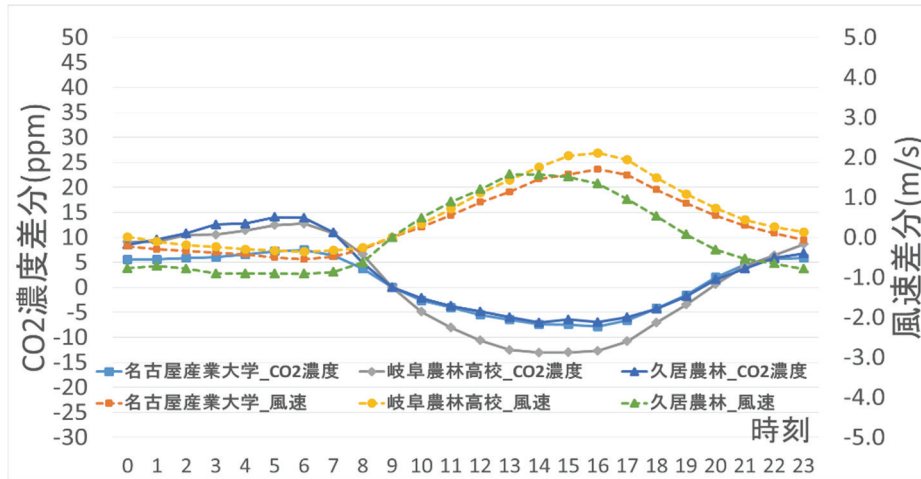


図 3 - 5 - 1 CO₂平均濃度の日変化

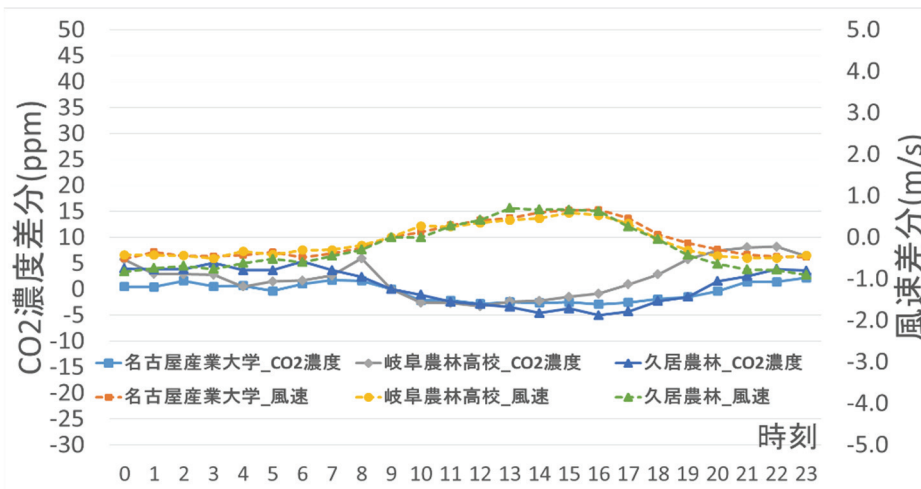


図 3 - 5 - 2 CO₂安定濃度の日変化

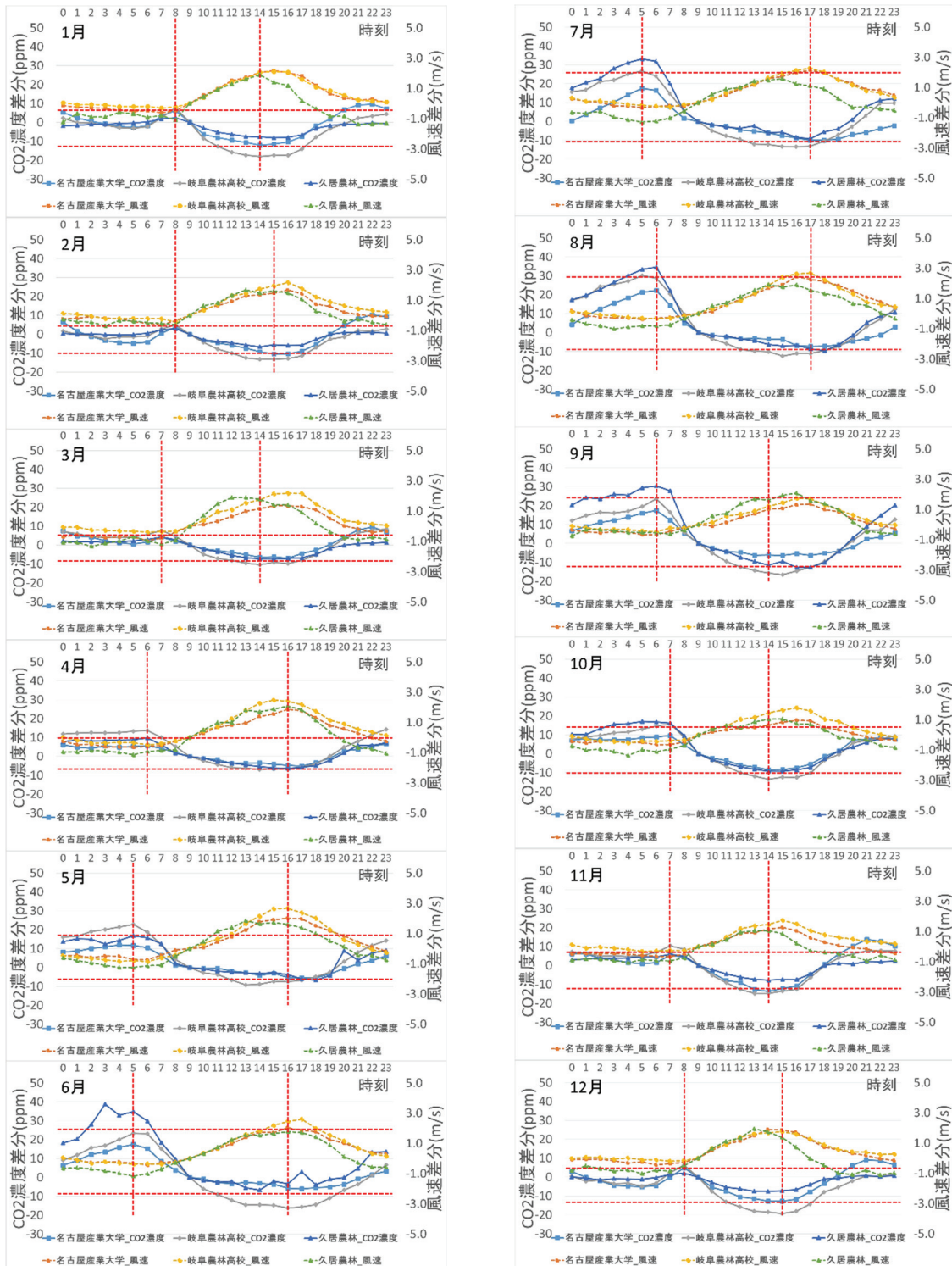


図 3 - 5 - 3 月別にみた CO₂ 平均濃度の日変化

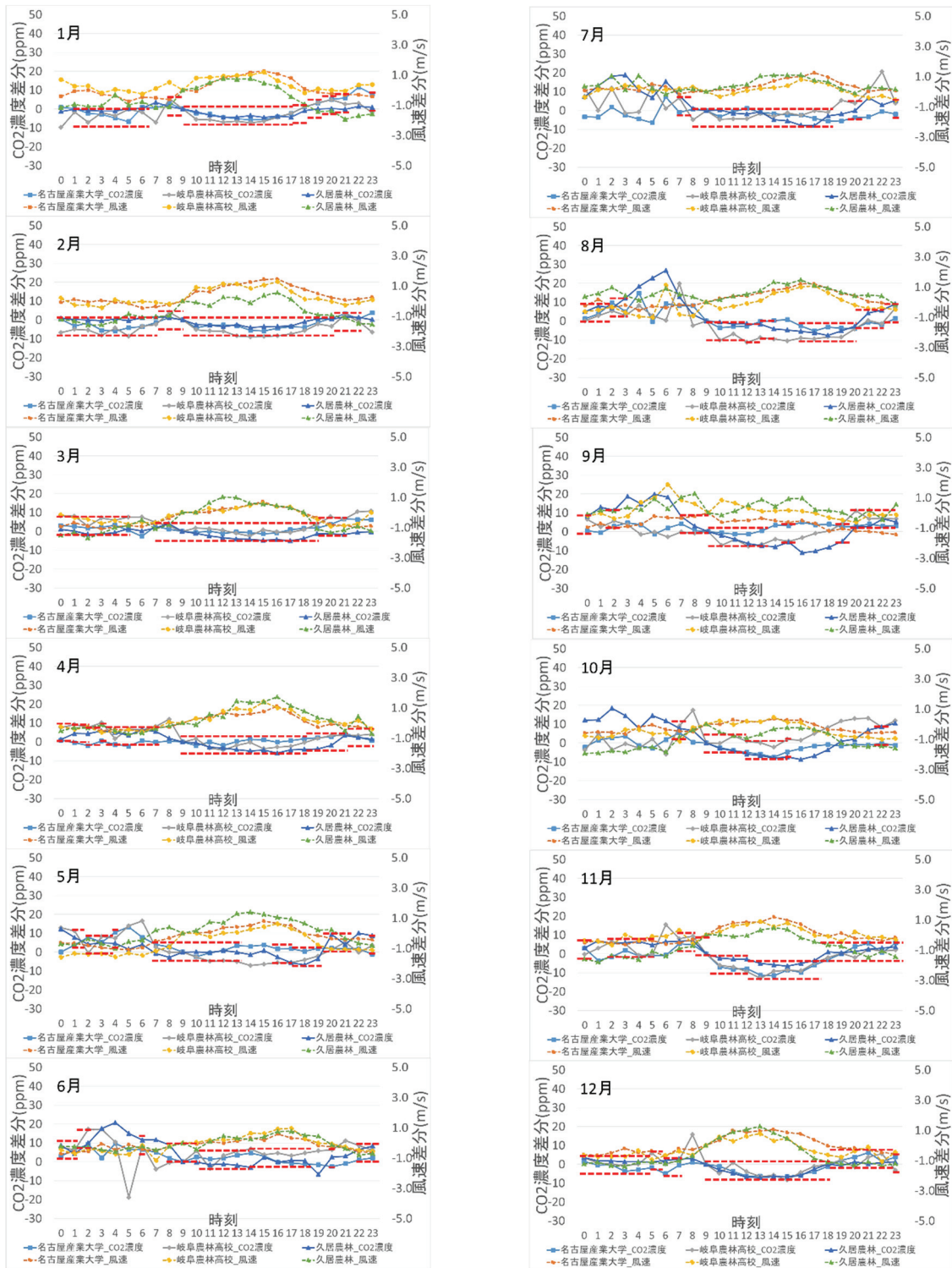


図 3 - 5 - 4 月別にみた CO₂ 安定濃度の日変化

3-6 CO₂濃度常時測定データの環境情報としてのデータ解釈

生活環境圏のCO₂濃度は複雑かつ多様に变化するが、実測されたCO₂濃度データと、上記3-5で得られた「CO₂平均濃度」、「CO₂安定濃度」の2つの变化パターンを対比することで、より客観的かつ多面的なデータ解釈が可能になる。

図3-6-1から図3-6-4は、名古屋産業大学地点におけるCO₂濃度のデータ解釈に当たっての変化パターンの作図例である。1月(冬)、4月(春)、7月(夏)及び10月(秋)のCO₂平均濃度、CO₂安定濃度とそれぞれの平均風速が特別に表示されている。

これらの図から、CO₂平均濃度は昼間の時間帯において日変化の中で相対的に低い傾向を示す、CO₂安定濃度は一定の範囲でほぼ安定した日変化を示す、以上の2つの共通傾向と実測されたCO₂濃度データを比較することがデータ解釈の基礎となる。特に、CO₂安定濃度は、その地点にとって安定的に示される濃度であるのか、あるいは局所的な変動成分の影響を受け、限定的に示される濃度であるのかを区別する判断材料となる。従って、実測されたCO₂濃度データとCO₂安定濃度との濃度差(図3-6-1～図3-6-4 破線の枠で表示)を変動成分の影響と捉え、その地域的要因を探ることになる。例えば、名古屋産業大学地点で2014年7月9日の午前10時に実測されたCO₂濃度は430ppm、風速は1.9m/sであった。また、7月の午前10時のCO₂安定濃度は406ppmで、風速は4.0m/sであった。このときの実測されたCO₂濃度データとCO₂安定濃度との濃度差は24ppmである。この濃度差に及ぼす影響として、まずは風速の強弱による大気拡散の影響を検討する。また、CO₂安定濃度との濃度差が大きい場合は、近傍の吸収源や排出源の影響を検討していくことになる。以上のように、まずはCO₂濃度と風速との関係性を把握したうえで、地域的要因を考慮したデータ解釈を進めていくことになる。

また、生活環境圏のCO₂濃度には季節変化がみられることから、各月におけるCO₂平均濃度やCO₂安定濃度の日変化パターンを参照することで、より多面的なデータ解釈が可能になる。

一方、CO₂濃度変化に影響を与える地域的要因としては、CO₂安定濃度の変化には主に風速が影響する、CO₂平均濃度の変化、特に風速が弱い時間帯では、局所的な影響を受けやすくなるため、地域の特徴として変動成分の影響が反映される。こうした地域性を考慮してデータ解釈の幅を広げていくことになる。

また、CO₂濃度と地域環境との関連性を探究しようとする、CO₂濃度の分布とその変化を地域全体の空間情報として把握することが必要になる。CO₂濃度測定局における常時測定データ(定点データ)の収集と並行して、測定局周辺のCO₂濃度調査を実施し、一時測定データを収集することで、上述したCO₂濃度の日変化、季節変化の共通傾向を考慮した特別、日別、月別の面データの収集及び比較を通じて、データ解釈の幅をさらに広げていくことが可能となる。

国土交通省では、二酸化炭素削減効果シミュレーション・ツール⁶⁾を開発し、低炭素都市

づくりのための空間情報の整備が行われている。このツールでは、市町村単位で CO₂ 排出量等の面データを生成しているが、都市域に CO₂ 濃度測定局を多地点に配置し、CO₂ 濃度分布とその変化を可視化することで、CO₂ の排出源や吸収源との関係性を探究していくことができると考えられる。

また、CO₂ 安定濃度はその地域における安定的な CO₂ 濃度レベルを示しているが、常時測定データの収集を継続することで、CO₂ 濃度の実測データに基づき都市地域における環境状態の時系列変化を評価することができる環境指標の開発にも結び付くものと考えられる。その際、CO₂ 濃度の年々変動のより詳細な把握・分析に取り組んでいくことが課題となる。

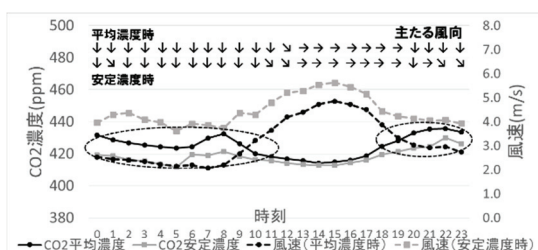


図 3 - 6 - 1

1月のCO₂濃度変化パターン

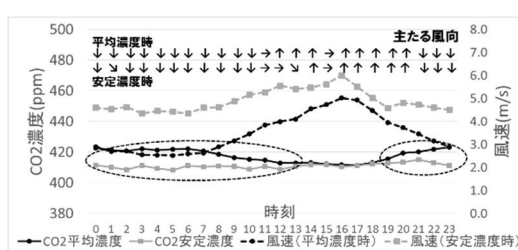


図 3 - 6 - 2

4月のCO₂濃度変化パターン

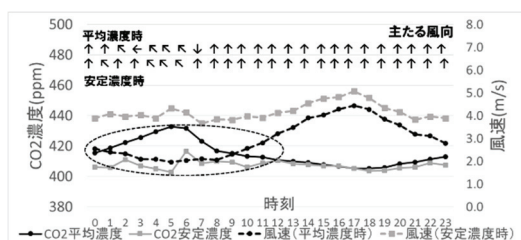


図 3 - 6 - 3

7月のCO₂濃度変化パターン

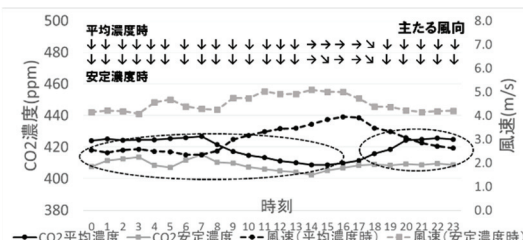


図 3 - 6 - 4

10月のCO₂濃度変化パターン

3-7 まとめ

本章では、東海 3 県に開設された CO₂ 濃度測定局の常時測定データを対象に、CO₂ 濃度データ検索システムを使用し、生活環境圏における CO₂ 濃度変化の共通傾向を分析した。その結果、CO₂ 平均濃度の日変化は、午前 6 時前後に日変化の中で相対的に高い傾向を示し、午後 4 時前後に相対的に低い傾向を示す、CO₂ 安定濃度の日変化の変動幅は、大気拡散により CO₂ 平均濃度に比べ縮小する、月別にみた CO₂ 平均濃度の日変化は、季節変化が見られる、月別にみた CO₂ 安定濃度の日変化は、日の出から日没までの時間帯は概ね 10 ppm 以下の変動幅で推移するとともに、季節変化がみられる、以上の点を明らかにした。

また、上記の共通傾向を踏まえ、環境情報としてのデータ解釈の可能性を明らかにした。特に、実測された CO₂ 濃度データと、CO₂ 平均濃度、CO₂ 安定濃度の変化パターンを対比し、CO₂ 濃度の季節変化を考慮することで、より多面的なデータ解釈が可能になる。また、CO₂ 濃度変化に影響を与える地域的要因としては、特に風速が弱い時間帯では風向が影響し、近傍の排出源の影響を考慮することが必要とされる。

補注

- 1) 名古屋産業大学 (2015.8.31 更新) 二酸化炭素常時測定ネットワークシステム . < <http://co2.nagoya-su.ac.jp/> > , 2018.11.10 参照
- 2) 接地層内は、気象科学事典によると、「一様に近い平面上での観測結果から、大気境界層の地上付近の 50 ~ 100 m 程度の高度までは、大気の運動量、顕熱ほどのフラックスに関する量が高度によらないほぼ一定の値をとることが分かった。この層を接地境界層または接地層という。」としている。
- 3) 横浜市 (2013.1.25 更新) 用語解説：大気安定度 . < <http://www.city.yokohama.lg.jp/kankyo/mamoru/kanshi/worda/stable.html> > , 2019.1.8 参照
- 4) 株式会社ユードム製の設置型 CO₂ 濃度測定器 (型式：C2D-E01) を使用している。この測定器の CO₂ 濃度の測定誤差は±30 ppm±読み値の 3% であるが、同型の測定器 3 台を、2 日間 24 時間連続測定し測定誤差の検証を行った結果、初期値の最大誤差は±8 ppm、測定データの誤差は±2.2%、初期値の誤差を考慮しない濃度差データの誤差は±1.5%と、いずれも読み値の誤差内であった。なお、気象庁が行っている CO₂ 濃度測定には、厳密な濃度補正が行われているほか、バックグラウンドデータの選別が行われており、フラックス観測においても毎秒 5 回から 10 回の精密観測が行われている。筆者や、桑原ら (2014) が行っている生活環境圏における CO₂ 濃度測定は、CO₂ 濃度の測定精度が ±30 ppm±読み値の 3% で、測定間隔も 3 秒に 1 回であるが、この点において桑原ら (2014) は、「気象庁等が示す厳密な CO₂ 濃度値との比較を主目的とするのではなく、他地域の

CO₂ 濃度の概況を説明する値であり，設置地点毎の相対的な濃度値の上下を比べる点に主眼を置いたものである」(p.17)としており，本論における CO₂ 濃度測定誤差についても同様の考え方を採っている。

- 5) 本論では，CO₂ 安定濃度の基準となる風速を 3 m/s 以上と設定した。Pasquill の安定度分類 (Pasquill and Smith, 1983) において B (並不安定) 及び E (弱安定) に分類される可能性がある風速 4 m/s 以上の CO₂ 濃度変化の検証も行ったが，月別，特別にみたときにデータサンプル数が十分蓄積されておらず，一部の時間帯で不規則な変化を示したこと，風速が 3 m/s 以上の時と濃度レベルの差があまりみられなかったことによる。したがって，CO₂ 安定濃度の基準となる風速は，今後のデータ蓄積を通じて変動する可能性がある。
- 6) 国土交通省 (2015.7.16 更新) 二酸化炭素削減効果シミュレーション・ツール (試行版) (平成 26 年 6 月公表) . < http://www.mlit.go.jp/toshi/city_plan/eco-machi-manual.html#tool > , 2016.2.26 参照

参考文献

- 伊藤雅一・岡村聖編著 (2009) みんなで作る CO₂ 濃度マップ 地球温暖化と私たちの暮らし。リバネス出版，164p.
- 今井友桂子・石内鉄平・桑原祐史 (2014) 都市域を対象とした CO₂ 濃度の計測とその変動要因の分析。応用測量論文集，Vol.25，pp.3～14.
- 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)～CO₂ 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.
- Pasquill F. and F.B. Smith(1983) Atmospheric Diffusion (third Edition). Ellis Howwood Ltd Publishers, Chichester. 437p.
- 横山長之訳 (1995) 大気拡散 原著第 3 版，近代科学社，371p.
- 気象科学学会編著 (1998) 気象科学事典。東京書籍株式会社，637p.
- 桑原祐史・山田貴弘・今井友桂子・神澤雅典 (2014) 茨城県を対象とした生活環境圏における CO₂ 濃度観測データの補正方法と地域性の検討。応用測量論文集，Vol.25，pp.15～23

第4章 生活環境圏におけるCO₂濃度の分布パターン

4-1 はじめに

2016年11月に発効した「パリ協定」では、国際社会が協調して大幅なCO₂削減を図ることが目指されている。このため、今後は、産業部門の排出削減に加え、家庭部門を中心とする民生部門の大幅なCO₂削減が避けて通れない課題となる。その課題解決には、人々の環境意識を高め、CO₂削減に向けた自立的かつ多様な環境行動を促していくことが必要とされる。

大気中のCO₂濃度については、世界各地でグローバルスケールの観測が行われている。これらの観測は、地球温暖化現象を解明、評価する観点から、人為の直接的な影響が排除された地球レベルの長期的変化が分析対象とされており、身近な地域環境を評価する指標とは捉えられていない。また、地域レベルの低炭素化に向けては、地方自治体において地球温暖化対策地方公共団体実行計画が策定され、その中で、「CO₂排出量」等の環境指標の導入が図られている¹⁾。さらに、低炭素まちづくり計画では、都市計画や交通計画など都市地域づくりの視点から、「CO₂排出量」や「エネルギー消費量」等の指標が導入されている²⁾。これらの指標は、都市地域全体のCO₂の排出量や削減量を評価する尺度となるが、CO₂削減の具体的な取組が都市地域のCO₂濃度にどのような影響を与えるのかを評価するための確立された手法は筆者の知る限り見当たらず、これらを実地することは難しい。このため、多くの人々にとって、CO₂削減に向けた取組効果が目に見える形で実感、評価することができず、環境配慮行動の拡大や促進に結びつきにくい。

その一方で、第1章で記述したとおり、近年、生活環境圏にCO₂濃度測定局を開設し、その収集データを活用して、人為の影響が反映されたCO₂濃度の動態把握に関する研究が進められてきている。

また、前章では、東海3県に開設されたCO₂濃度測定局の収集データを基に、CO₂濃度の時別平均値を算出し、その変化パターンを検証するとともに、これらの変化パターンを「CO₂平均濃度」、「CO₂安定濃度」と定義し参照することで、環境情報としてのデータ解釈の可能性を明らかにした。

本章の目的は、東海3県に開設されたCO₂濃度測定局の常時測定データ及び測定局周辺の空間分布データを用いて、生活環境圏におけるCO₂濃度の分布パターンを検証し、地域環境評価の基礎となるCO₂濃度の動態を明らかにすることにある。

4-2 CO₂濃度と風向・風速との関係性の整理

本章では、東海3県に設置されたCO₂濃度測定局3局を対象に、5年間(2011年~2015年)の収集データを用いて、CO₂濃度と風向・風速との関係性を検証するため、まず風速を3 m/s未満と3 m/s以上に区分し、相関係数を用いて、年別、季節別に、日中と夜間に分けて分析した(表4-2-1)。なお、本研究における風向・風速データは、気象庁が公開している近傍の気象台の特別値を用いた。分析の結果、相関係数は風速が3 m/s以上時において概ねやや弱い相関~やや強い相関にあることがわかった。

次に、風向・風速別にみたCO₂濃度の平均値を整理したものが表4-2-2である。

この表から、風向・風速別にみたCO₂濃度の動態として、まず名古屋産業大学では、風向の発生率は北北西が最も高く19%、次いで北西の15%、北の12%となり、北西方向からの風向の発生率が高い。風速の発生率をみると、風速3 m/s以上では45.2%となっている。また、CO₂濃度の推移をみると、風速が強くなるにしたがってCO₂濃度が低下していく傾向が概ね示されている。

久居農林高等学校では、風向の発生率は西北西が19%、西が17%、北西が16%の順で高く、北西方向からの風向の発生率が高い。風速の発生率をみると、風速3 m/s以上では51.7%となっている。CO₂濃度の推移をみると、風速4 m/s未満まではどの風向も風速が強くなるにしたがってCO₂濃度が低下する傾向が概ね示されている。風速4 m/s以上になると各風向によってばらつきがみられるが、風向の発生率が高い西北西、西、北西からのCO₂濃度は、風速4 m/s以上であっても安定的にCO₂濃度が低下していく傾向があることがわかった。

次に岐阜農林高等学校では、風向の発生率は北西が14%、西北西が14%、西が11%の順で高く、北西方向からの風向の発生率が高い。風速の発生率をみると、風速3 m/s以上では35.3%となっている。CO₂濃度の推移をみると、一部の風向で風速との対応関係がみられないものの、風向の発生率が高い北西、西北西、西からの風向を中心に、風速が強くなるにしたがってCO₂濃度が低下する傾向が示されている。

また、3地点とも風向の発生率が高い上位3風向では、風速6 m/s以上まで安定的に濃度が低下していく傾向がある。

以上から、まず表4-2-1からCO₂濃度と風速との相関係数は風速が3 m/s以上時の方が高くなる、また、表4-2-2から風向の発生率は3局とも北西方向からの風向が高い、風速の発生率は風速3 m/s以上で全体の35.3%~51.7%を占める、発生率の高い上位3風向時は、CO₂濃度が安定的に低下していく、以上の共通傾向があることがわかった。

上記の結果を踏まえ、発生率の高い風向時のCO₂安定濃度の日変化を検証した結果、13時から14時の間に濃度が最小値を示し、しかも一定の濃度を示すようになる(表4-2-3)。このため、発生率の高い風向時のCO₂安定濃度の日変化のなかで最小値を示す濃度を、地域の成分が反映されたCO₂濃度を評価する尺度、すなわち「CO₂基準濃度」と定義する。

具体的には、名古屋産業大学地点は、北方向～北西方向からの風向時に 402 ppm，久居農林高等学校地点と岐阜農林高等学校地点は、北西方向～西方向からの風向時に，それぞれ 393 ppm，407 ppm の値を示しており，この濃度が「CO₂基準濃度」となる。

表 4 - 2 - 1 CO₂濃度と風速との相関係数

	風速	相関係数				年間
		春	夏	秋	冬	
2011年	3 m/s 日中	-0.2279**	-0.3139**	-0.1257**	-0.2677**	-0.2355**
	未満 夜間	-0.2917**	-0.4187**	-0.2864**	-0.2347**	-0.3043**
2012年	3 m/s 日中	-0.4006**	-0.3312**	-0.4768**	-0.4296**	-0.3629**
	未満 夜間	-0.3756**	-0.2534**	-0.4869**	-0.3313**	-0.3404**
2013年	3 m/s 日中	-0.2383**	-0.2775**	-0.1644**	-0.3492**	-0.2284**
	未満 夜間	-0.2387**	-0.4214**	-0.3163**	-0.2615**	-0.2878**
2014年	3 m/s 日中	-0.4765**	-0.2557**	-0.3230**	-0.4195**	-0.3220**
	未満 夜間	-0.3482**	-0.3371**	-0.2843**	-0.3991**	-0.2984**
2015年	3 m/s 日中	-0.2691**	-0.2485**	-0.2587**	-0.2883**	-0.2415**
	未満 夜間	-0.2430**	-0.3526**	-0.2795**	-0.2429**	-0.2711**
2014年	3 m/s 日中	-0.4701**	-0.2497**	-0.5046**	-0.4646**	-0.3822**
	未満 夜間	-0.4229**	-0.2834**	-0.3881**	-0.3666**	-0.3259**
2015年	3 m/s 日中	-0.3110**	-0.2691**	-0.2356**	-0.2149**	-0.2274**
	未満 夜間	-0.2615**	-0.3713**	-0.3702**	-0.2267**	-0.2875**
2014年	3 m/s 日中	-0.4119**	-0.4365**	-0.5247**	-0.2676**	-0.3071**
	未満 夜間	-0.4824**	-0.3290**	-0.5082**	-0.2438**	-0.2831**
2015年	3 m/s 日中	-0.1306**	-0.2541**	-0.3040**	-0.1996**	-0.2127**
	未満 夜間	-0.3540**	-0.3645**	-0.3559**	-0.2997**	-0.3430**
2015年	3 m/s 日中	-0.4361**	-0.5150**	-0.4751**	-0.4211**	-0.4659**
	未満 夜間	-0.4088**	-0.3902**	-0.5025**	-0.4475**	-0.4296**

春(3-5月)、夏(6-8月)、秋(9-11月)、冬(12-2月)
日中(6~17時)、夜間(18~5時)
**:1%有意

表 4 - 2 - 2 風向・風速の発生率とCO₂濃度との関係性

名古屋産業大学								
風速	0 m/s~1.0 m/s未満		1.0 m/s~2.0 m/s未満		2.0 m/s~3.0 m/s未満		3.0 m/s~4.0 m/s未満	
	CO ₂ 濃度	風向	CO ₂ 濃度	風向	CO ₂ 濃度	風向	CO ₂ 濃度	風向
北	430	0.480%	427	3.916%	422	4.551%	416	1.988%
北北東	429	0.472%	425	2.376%	421	1.363%	410	0.294%
北東	430	0.408%	427	1.894%	423	0.676%	416	0.074%
東北東	430	0.355%	429	1.549%	428	0.725%	413	0.102%
東	434	0.357%	428	0.950%	420	0.212%	401	0.046%
東南東	434	0.311%	426	1.172%	416	0.533%	407	0.199%
南東	433	0.286%	425	1.534%	415	1.902%	408	1.276%
南南東	435	0.242%	425	1.248%	413	2.014%	407	2.065%
南	430	0.123%	420	0.740%	414	1.123%	409	1.297%
南南西	429	0.161%	424	0.641%	416	0.784%	415	0.735%
南西	430	0.166%	422	0.526%	416	0.528%	414	0.383%
西南西	430	0.151%	421	0.511%	413	0.508%	410	0.322%
西	431	0.179%	420	0.551%	414	0.556%	408	0.378%
西北西	428	0.212%	423	1.052%	417	1.544%	411	1.611%
北西	430	0.291%	425	2.080%	418	2.644%	411	2.813%
北北西	430	0.396%	426	4.107%	422	5.756%	414	3.926%
合計		4.6%		24.8%		25.4%		17.5%

風速	4.0 m/s~5.0 m/s未満		5.0 m/s~6.0 m/s未満		6.0 m/s以上		風向別発生頻度
	CO ₂ 濃度	風向	CO ₂ 濃度	風向	CO ₂ 濃度	風向	
北	407	0.587%	403	0.204%	397	0.138%	12%
北北東	409	0.054%		0.000%	390	0.010%	5%
北東	401	0.013%	387	0.008%		0.000%	3%
東北東	401	0.018%	385	0.005%	478	0.003%	3%
東	400	0.013%	396	0.008%	391	0.008%	2%
東南東	401	0.051%	400	0.020%	397	0.026%	2%
南東	405	0.705%	402	0.391%	398	0.500%	7%
南南東	404	1.608%	402	0.865%	400	0.740%	9%
南	406	1.184%	403	0.582%	402	0.202%	5%
南南西	415	0.490%	412	0.145%	399	0.048%	3%
南西	412	0.235%	413	0.043%	407	0.018%	2%
西南西	405	0.115%	406	0.051%	396	0.028%	2%
西	405	0.281%	401	0.184%	399	0.204%	2%
西北西	407	1.805%	405	1.532%	401	2.417%	10%
北西	408	2.356%	403	1.805%	399	3.055%	15%
北北西	407	2.165%	402	1.154%	399	1.562%	19%
合計		11.7%		7.0%		9.0%	100%

久居農林高等学校

風速	0 m/s~1.0 m/s未満		1.0 m/s~2.0 m/s未満		2.0 m/s~3.0 m/s未満		3.0 m/s~4.0 m/s未満	
風向	CO2濃度	風向	CO2濃度	風向	CO2濃度	風向	CO2濃度	風向
北	439	0.242%	430	0.932%	424	0.638%	419	0.274%
北北東	428	0.181%	428	0.539%	424	0.436%	416	0.205%
北東	434	0.186%	424	0.786%	419	0.624%	415	0.220%
東北東	423	0.149%	423	0.988%	418	1.036%	417	0.513%
東	430	0.175%	422	0.967%	419	1.461%	417	0.914%
東南東	431	0.175%	423	0.882%	418	1.405%	418	1.411%
南東	436	0.133%	426	0.808%	423	1.381%	420	1.384%
南南東	429	0.135%	432	0.640%	425	0.616%	423	0.584%
南	434	0.162%	438	0.457%	426	0.377%	418	0.311%
南南西	433	0.210%	429	0.582%	421	0.271%	413	0.125%
南西	437	0.244%	430	1.134%	417	0.545%	414	0.215%
西南西	437	0.353%	424	2.301%	416	1.902%	409	0.898%
西	436	0.417%	428	4.296%	414	5.263%	407	2.468%
西北西	437	0.420%	427	3.454%	411	2.970%	403	3.408%
北西	437	0.369%	437	2.213%	418	1.953%	400	2.008%
北北西	432	0.266%	434	1.424%	426	1.243%	407	0.728%
合計		3.8%		22.4%		22.1%		15.7%

風速	4.0 m/s~5.0 m/s未満		5.0 m/s~6.0 m/s未満		6.0 m/s以上		風向別発生頻度
風向	CO2濃度	風向	CO2濃度	風向	CO2濃度	風向	
北	402	0.088%	399	0.021%	392	0.005%	2%
北北東	422	0.048%	429	0.029%	412	0.053%	1%
北東	419	0.080%	407	0.045%	420	0.043%	2%
東北東	416	0.159%	421	0.058%	414	0.090%	3%
東	416	0.348%	426	0.181%	418	0.677%	5%
東南東	419	1.201%	414	0.924%	411	2.542%	9%
南東	418	1.068%	415	0.654%	411	0.922%	6%
南南東	415	0.502%	412	0.284%	408	0.319%	3%
南	413	0.167%	410	0.096%	405	0.077%	2%
南南西	399	0.021%	415	0.008%	395	0.005%	1%
南西	403	0.048%	406	0.016%	425	0.003%	2%
西南西	405	0.391%	396	0.167%	394	0.191%	6%
西	402	1.623%	396	1.079%	391	2.043%	17%
西北西	399	3.148%	396	2.356%	392	3.265%	19%
北西	396	2.564%	394	2.391%	392	4.431%	16%
北北西	398	0.561%	394	0.468%	393	0.534%	5%
合計		12.0%		8.8%		15.2%	100%

岐阜農林高等学校

風速	0 m/s~1.0 m/s未満		1.0 m/s~2.0 m/s未満		2.0 m/s~3.0 m/s未満		3.0 m/s~4.0 m/s未満	
風向	CO2濃度	風向	CO2濃度	風向	CO2濃度	風向	CO2濃度	風向
北	436	1.021%	436	3.035%	427	1.210%	420	0.328%
北北東	441	0.887%	437	2.306%	434	0.546%	428	0.091%
北東	442	0.812%	444	2.266%	436	0.771%	433	0.108%
東北東	442	0.683%	446	2.567%	440	1.110%	434	0.223%
東	440	0.570%	443	1.734%	445	0.968%	435	0.271%
東南東	438	0.444%	435	0.868%	446	0.640%	434	0.344%
南東	440	0.366%	439	0.879%	433	0.626%	431	0.384%
南南東	438	0.323%	438	0.833%	430	0.755%	429	0.387%
南	439	0.360%	435	1.113%	434	1.064%	428	0.879%
南南西	437	0.414%	430	1.403%	431	1.519%	426	1.282%
南西	433	0.398%	433	1.371%	422	1.218%	421	0.653%
西南西	438	0.495%	431	1.605%	423	1.449%	416	1.046%
西	436	0.659%	434	2.688%	429	2.618%	422	1.962%
西北西	439	0.680%	434	3.215%	430	3.473%	420	2.298%
北西	436	0.742%	432	3.387%	425	2.449%	415	2.051%
北北西	435	0.925%	434	3.419%	423	1.962%	413	1.156%
合計		9.8%		32.7%		22.4%		13.5%

風速	4.0 m/s~5.0 m/s未満		5.0 m/s~6.0 m/s未満		6.0 m/s以上		風向別発生頻度
風向	CO2濃度	風向	CO2濃度	風向	CO2濃度	風向	
北	407	0.132%	409	0.091%	410	0.113%	6%
北北東	408	0.013%	404	0.003%	438	0.003%	4%
北東	430	0.019%	428	0.008%	430	0.024%	4%
東北東	426	0.065%	399	0.030%	408	0.040%	5%
東	423	0.132%	427	0.048%	409	0.024%	4%
東南東	431	0.142%	425	0.078%	411	0.177%	3%
南東	429	0.185%	423	0.132%	419	0.202%	3%
南南東	426	0.180%	419	0.116%	412	0.121%	3%
南	427	0.637%	424	0.457%	422	0.290%	5%
南南西	427	0.917%	426	0.500%	420	0.183%	6%
南西	412	0.280%	411	0.126%	413	0.024%	4%
西南西	411	0.823%	411	0.495%	405	0.331%	6%
西	416	1.325%	407	0.704%	406	0.594%	11%
西北西	413	1.460%	411	1.089%	408	1.758%	14%
北西	410	1.685%	408	1.559%	404	2.360%	14%
北北西	408	0.788%	407	0.616%	403	0.616%	9%
合計		8.8%		6.1%		6.9%	100%

CO₂濃度の単位：ppm

風向は発生頻度を表す

表 4 - 2 - 3 発生率の高い風向時の CO₂ 安定濃度の日変化

		時刻	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
名古屋産業大学	CO ₂ 濃度	412	411	411	411	411	411	412	412	410	408	406	404	
	風速	4.1	4.1	4.1	4.0	4.0	4.1	4.1	4.1	4.3	4.5	4.7	4.9	
久居農林高等学校	CO ₂ 濃度	401	399	399	398	398	399	399	400	399	397	396	395	
	風速	4.8	4.8	4.8	4.9	4.9	4.9	4.9	5.0	5.2	5.5	5.7	5.8	
岐阜農林高等学校	CO ₂ 濃度	419	416	415	415	415	416	415	415	414	411	409	409	
	風速	4.2	4.1	4.2	4.1	4.2	4.1	4.2	4.3	4.5	4.8	5.1	5.3	
		時刻	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
名古屋産業大学	CO ₂ 濃度	403	402	402	402	402	404	406	408	409	411	411	411	
	風速	5.2	5.5	5.7	5.9	5.8	5.5	5.0	4.7	4.5	4.3	4.2	4.1	
久居農林高等学校	CO ₂ 濃度	393	393	393	393	393	395	397	398	399	400	400	399	
	風速	5.9	6.0	5.9	5.8	5.5	5.2	5.0	4.9	4.8	4.7	4.7	4.8	
岐阜農林高等学校	CO ₂ 濃度	408	407	407	408	408	410	412	415	417	418	418	420	
	風速	5.5	5.6	5.8	5.7	5.6	5.2	4.8	4.6	4.3	4.2	4.2	4.2	

CO₂濃度の単位: ppm
風速の単位: m/s

4 - 2 - 1 CO₂ 濃度空間分布の検証

実際の CO₂ 濃度の空間分布を検証するため、名古屋産業大学周辺地域を対象に、可搬型 CO₂ 濃度測定器³⁾、風向・風速計、GPS ロガーを用いて CO₂ 濃度調査を実施した。調査対象期間は、2015 年 5 月から 2016 年 4 月までの 1 年間であり、雨天等で測定不能な日を除き、計 44 日分のデータを収集した。また、CO₂ 濃度の日変化を考慮し、毎週金曜日の 14 時から 15 時までの 1 時間を対象に定時調査を実施した。

測定地点は 50 m 間隔のメッシュで区切り、縦 5 マス (250 m)、横 7 マス (350 m) の計 35 か所を測定地点 (図 4-2-1) とした。可搬型 CO₂ 濃度測定器の測定間隔は 10 秒であるため、調査にあたり、各マス最低 30 秒～1 分の測定を行った。

また、調査期間 (計 44 日) の調査開始時間 (14 時) 及び調査終了時間 (15 時) での平均濃度変動は 1.02 ppm であり、調査時間中に明らかに大きな濃度変動はみられなかった。

CO₂ 濃度調査の結果は、Excel 2010 の条件付き書式機能を用いて、CO₂ 濃度が高い地点は赤色が濃くなり、低い地点は緑色が濃くなるようにセルの自動着色を行い、1 調査日毎にデータ整理を行った。その後、GIS を用いて、各測定地点の年平均値、季節平均値を把握し、空間分布図の作成を行った。

名古屋産業大学周辺の土地利用状況 (図 4-2-2) としては、北西方向には樹木が多い城山公園が隣接し、その背後地には低層の住宅地が広がっている。北東方向には洞光院、多度神社の社寺林があり、その背後地には大規模な森林公園が広がっている。また、南東方向には都市的土地利用が進んだ市街地が、南西方向には田畑が隣接し、その背後地には住宅地が広がっている。

調査期間 (44 日分) の CO₂ 濃度空間分布図を図 4-2-3 に、風向・風速が異なる CO₂ 濃度調査の結果を図 4-2-4 及び図 4-2-5 に示す。図中、各メッシュの矢印は風向を、各メッシュ右の数値は CO₂ 濃度を、下の数値は風速を示す。また、枠外に記載した天気、風向・風速は調査時点の名古屋地方気象台の計測値を示す。まず、風速の強弱による動態として、図 4-2-4 から、風速が強いときの調査地点全体の CO₂ 濃度は相対的に低く、全体的な濃度の色も緑に近いが、風速が弱いときは全体的な濃度は橙色から赤色に近く、調査地点全体の CO₂

濃度は相対的に高い。次に風向が異なる時の動態として、北北西と南南東の風向時の CO₂ 濃度調査結果を図 4-2-5 に示す。風速はいずれも 1.9 m/s ~ 2.4 m/s の弱い風速時である。風向が北北西時では、全体的な濃度の色も緑に近く、CO₂ 濃度は相対的に低い状況にあるが、風向が南南東時では全体的な濃度は橙色から赤色に近く、CO₂ 濃度も相対的に高い。このことから、CO₂ 濃度空間分布の基本的動態としては、風速が強いときの CO₂ 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ことが示唆された。

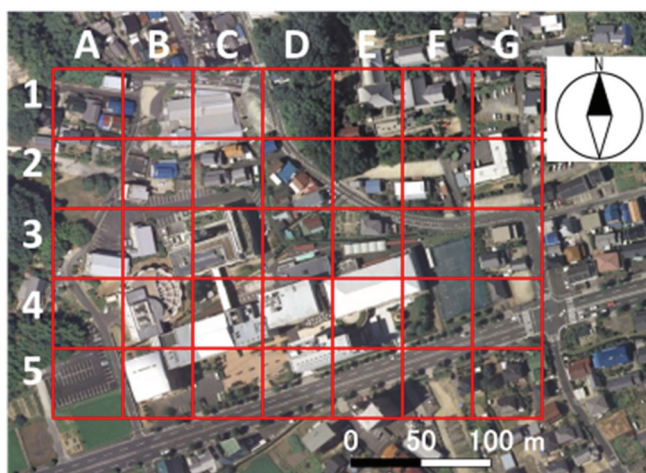


図 4 - 2 - 1 CO₂濃度の測定地点

(国土地理院の電子地形図(タイル)に縮尺と方位記号及びメッシュを追記して掲載)

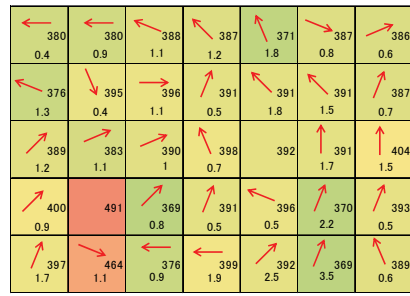


図 4 - 2 - 2 CO₂濃度調査地点周辺の土地利用状況

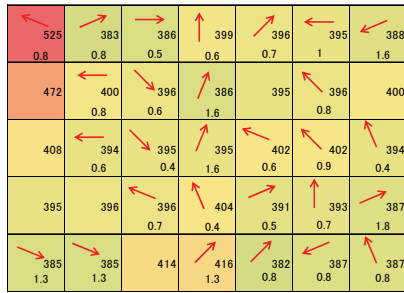
(国土地理院の電子地形図(タイル)に縮尺と方位記号及びメッシュを追記して掲載)



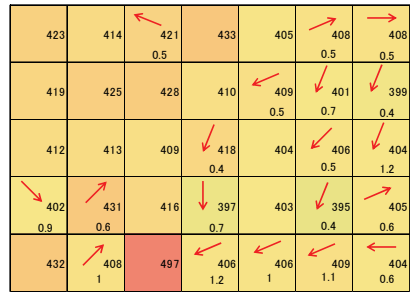
5月8日 基準値：390 ppm
 天気：晴れ 風速：1.9 m/s 風向：北北西



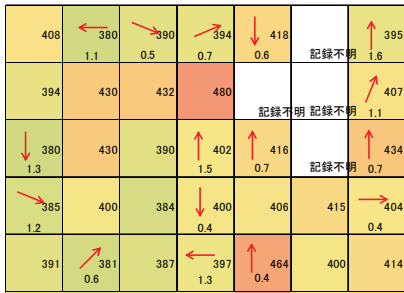
5月15日 基準値：390 ppm
 天気：曇り 風速：3.9 m/s 風向：南



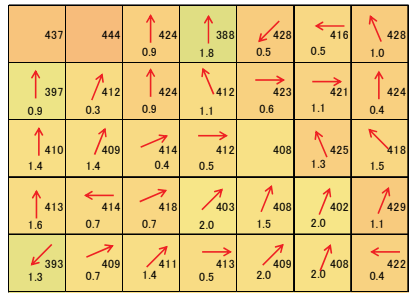
5月22日 基準値：394 ppm
 天気：晴れ 風速：1.5 m/s 風向：南西



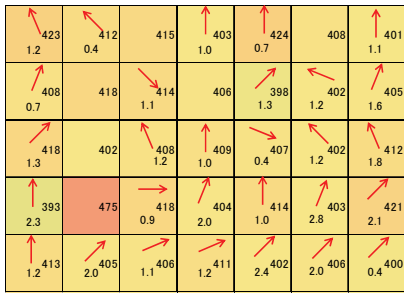
6月12日 基準値：409 ppm
 天気：曇り 風速：1.2 m/s 風向：北東



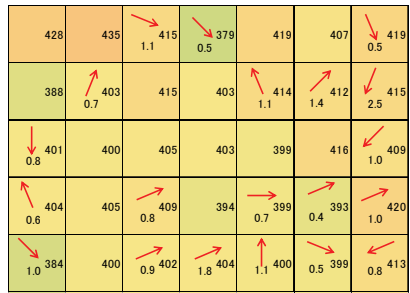
6月19日 基準値：401 ppm
 天気：曇り 風速：3.3 m/s 風向：北西



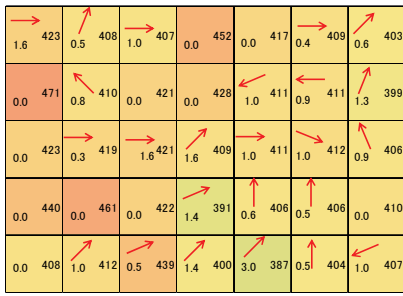
7月3日 基準値：413 ppm
 天気：曇り 風速：2.0 m/s 風向：東南東



7月10日 基準値：408 ppm
 天気：曇り 風速：3.4 m/s 風向：南南東

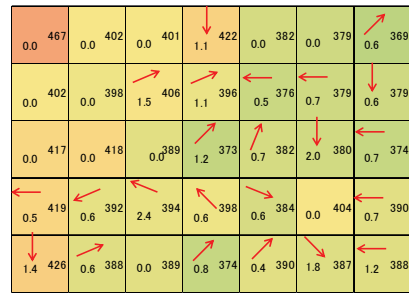


7月31日 基準値：405 ppm
 天気：晴れ 風速：2.8 m/s 風向：北北西



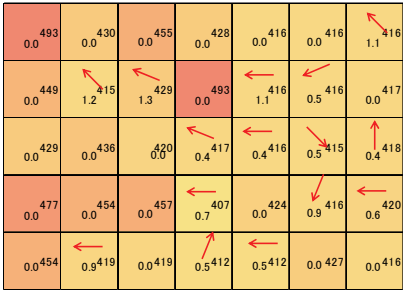
8月7日 基準値：416 ppm

天気：曇り 風速：1.4 m/s 風向：南南西



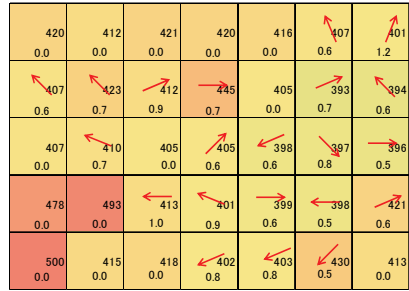
8月14日 基準値：389 ppm

天気：晴れ 風速：4.6 m/s 風向：西北西



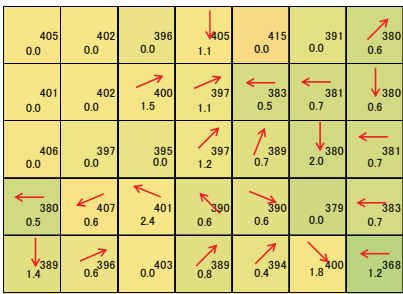
8月21日 基準値：420 ppm

天気：曇り 風速：1.5 m/s 風向：北北西



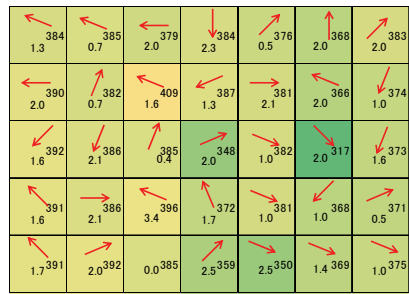
8月28日 基準値：405 ppm

天気：曇り 風速：1.7 m/s 風向：北西



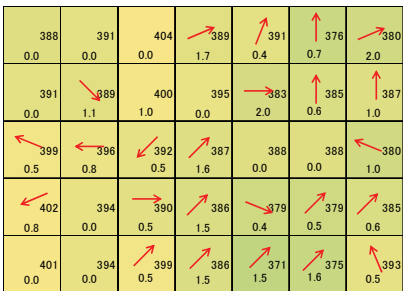
9月4日 基準値：395 ppm

天気：晴れ 風速：4.8 m/s 風向：西北西



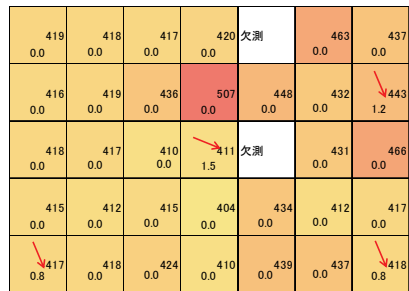
9月11日 基準値：385 ppm

天気：晴れ 風速：7.2 m/s 風向：西北西



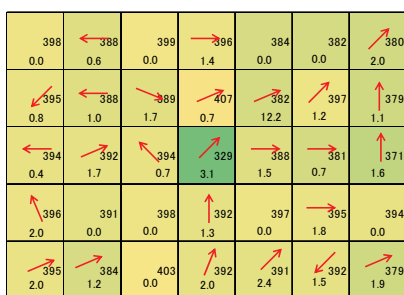
9月18日 基準値：392 ppm

天気：晴れ 風速：3.9 m/s 風向：西



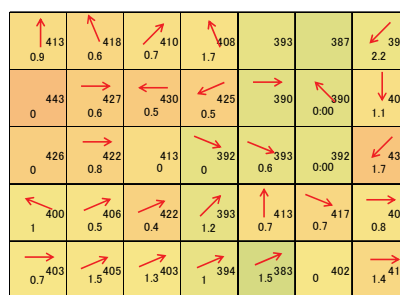
9月25日 基準値：410 ppm

天気：雨 風速：3.1 m/s 風向：北



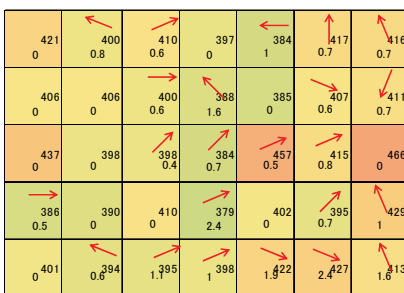
10月2日 基準値：394 ppm

天気：晴れ 風速：6.9 m/s 風向：北西



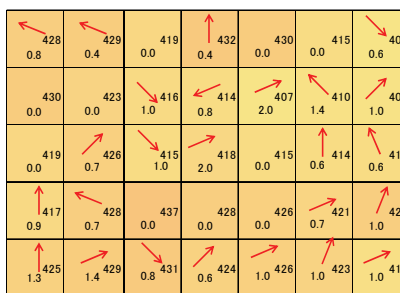
10月9日 基準値：392 ppm

天気：晴れ 風速：3.8 m/s 風向：南西



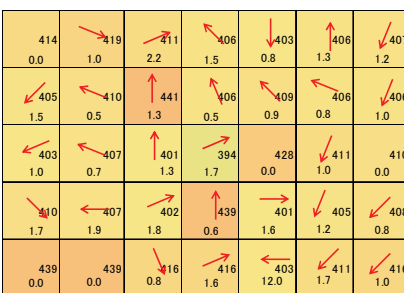
10月16日 基準値：398 ppm

天気：晴れ 風速：1.3 m/s 風向：北



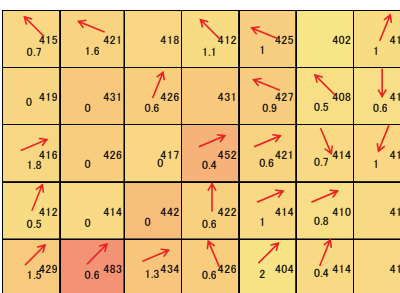
10月23日 基準値：412 ppm

天気：晴れ 風速：2.4 m/s 風向：南南東



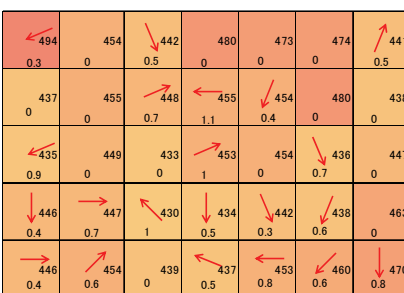
10月30日 基準値：401 ppm

天気：曇り 風速：6.8 m/s 風向：西北西



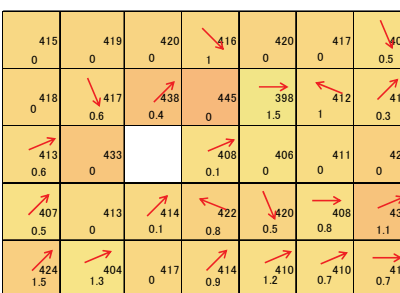
11月6日 基準値：417 ppm

天気：曇り 風速：1.8 m/s 風向：西



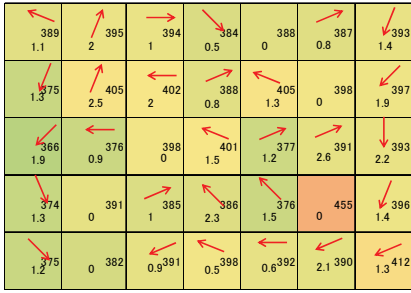
11月13日 基準値：433 ppm

天気：曇り 風速：1.2 m/s 風向：北北東



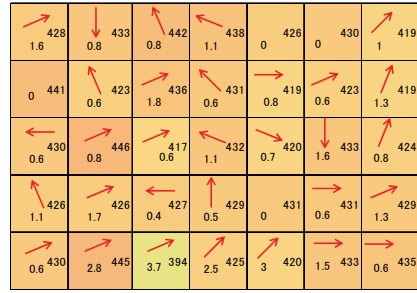
11月20日 基準値：409 ppm

天気：晴れ 風速：2.4 m/s 風向：北西



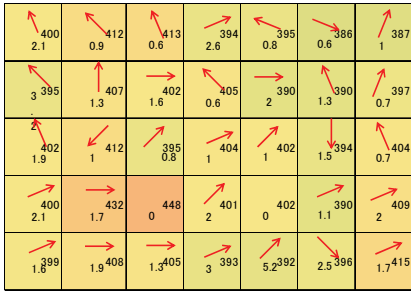
11月27日 基準値：398 ppm

天気：晴れ 風速：4.5 m/s 風向：北北西



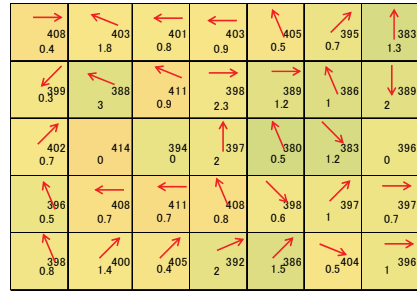
12月4日 基準値：417 ppm

天気：曇り 風速：4.2 m/s 風向：西南西



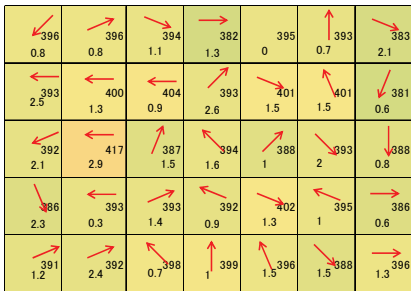
12月11日 基準値：395 ppm

天気：曇り 風速：8.4 m/s 風向：西北西



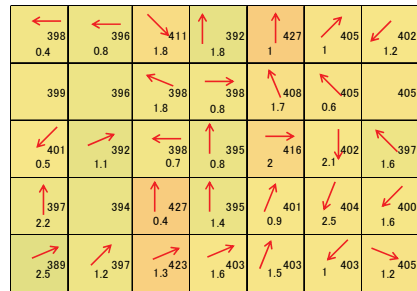
12月18日 基準値：394 ppm

天気：晴れ 風速：5.5 m/s 風向：北西



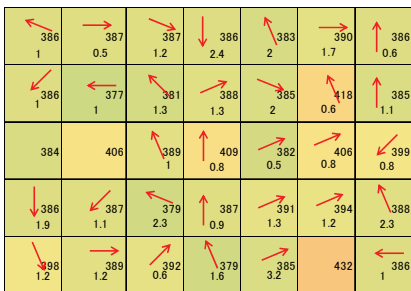
12月25日 基準値：387 ppm

天気：晴れ 風速：7.6 m/s 風向：北北西



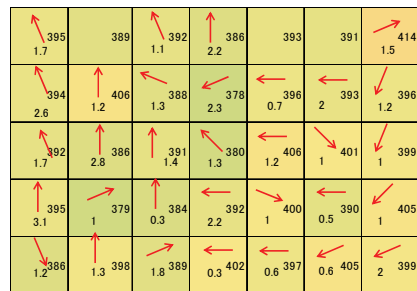
1月8日 基準値：398 ppm

天気：晴れ 風速：3.6 m/s 風向：北西



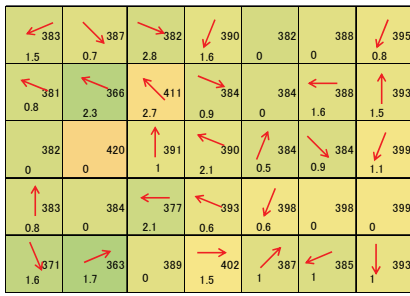
1月15日 基準値：389 ppm

天気：晴れ 風速：5.7 m/s 風向：西北西



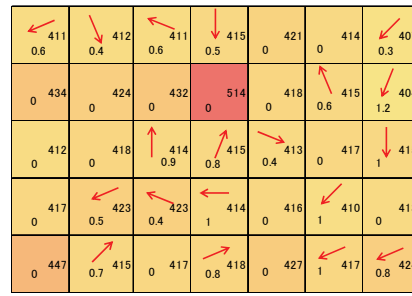
1月22日 基準値：391 ppm

天気：晴れ 風速：4.5 m/s 風向：北北西



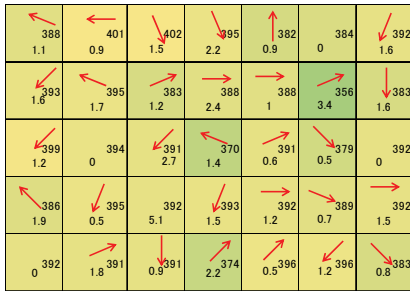
2月5日 基準値：391 ppm

天気：晴れ 風速：5.2 m/s 風向：北西



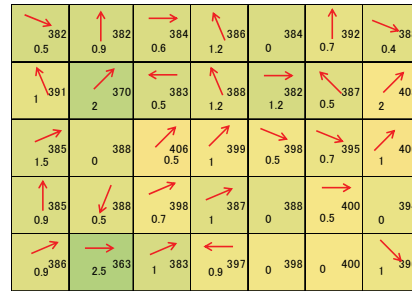
2月12日 基準値：414 ppm

天気：晴れ 風速：1.5 m/s 風向：北北西



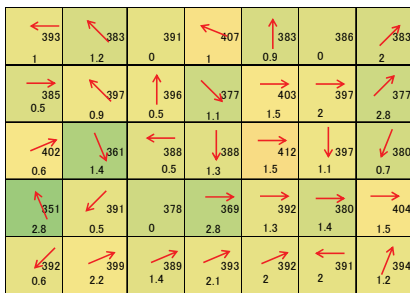
2月26日 基準値：397 ppm

天気：晴れ 風速：8.9 m/s 風向：西北西



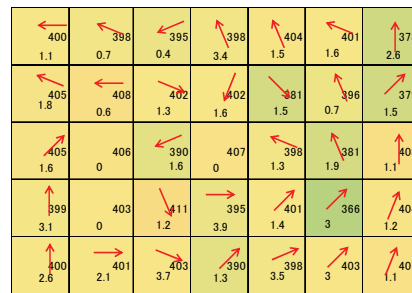
3月4日 基準値：406 ppm

天気：晴れ 風速：1.5 m/s 風向：北



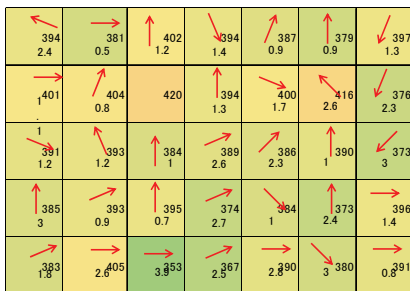
3月11日 基準値：388 ppm

天気：晴れ 風速：4.7 m/s 風向：北西



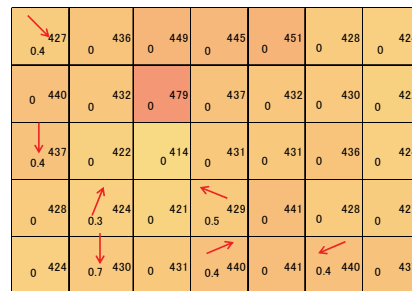
3月18日 基準値：390 ppm

天気：晴れ 風速：4.2 m/s 風向：南南東



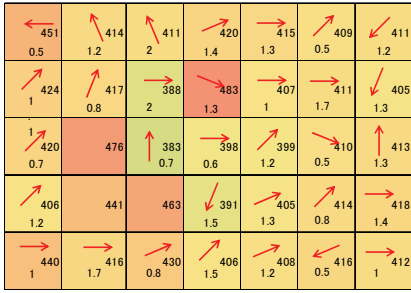
3月25日 基準値：384 ppm

天気：晴れ 風速：6.7 m/s 風向：西北西



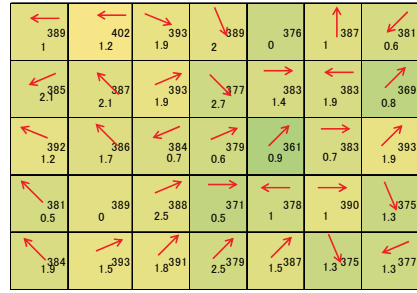
4月1日 基準値：426 ppm

天気：小雨 風速：2.1 m/s 風向：北



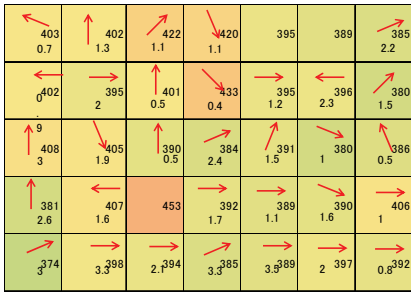
4月8日 基準値：391 ppm

天気：曇り 風速：6.0 m/s 風向：西北西



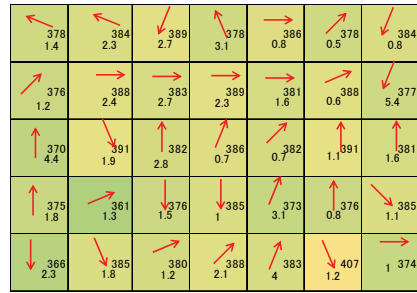
4月15日 基準値：382 ppm

天気：晴れ 風速：7.9 m/s 風向：北西



4月22日 基準値：394 ppm

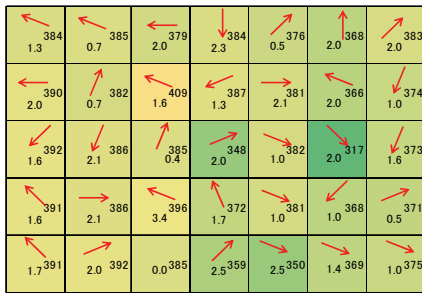
天気：晴れ 風速：5.8 m/s 風向：西北西



4月29日 基準値：382 ppm

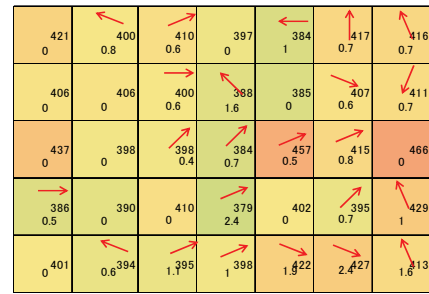
天気：晴れ 風速：10.7 m/s 風向：北西

図 4 - 2 - 3 CO₂濃度空間分布図(44日分)



2015年9月11日

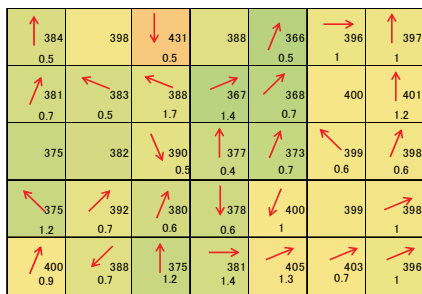
風速：7.2 m/s 風向：西北西



2015年10月16日

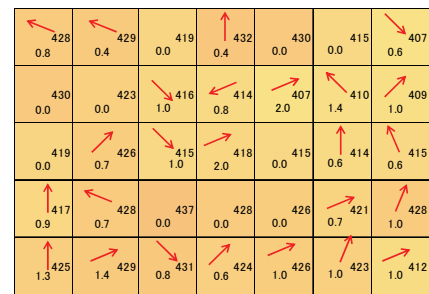
風速：1.3 m/s 風向：北

図 4 - 2 - 4 CO₂濃度調査結果（風速の比較）



2015年5月8日

風速：1.9 m/s 風向：北北西



2015年10月23日

風速：2.4 m/s 風向：南南東

図 4 - 2 - 5 CO₂濃度調査結果（風向の比較）

4 - 2 - 2 CO₂安定濃度の空間分布とその動態

図 4-2-6 は、GIS を用いて、CO₂ 濃度測定局の 14 時時点のデータを基準値とし、CO₂ 安定濃度時（28 調査日）の 35 測定地点における CO₂ 濃度の分布パターンを表したものである。図 4-2-7 は、CO₂ 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。なお、図 4-2-6、4-2-7 における値は GPS で測定した図 4-2-1 での各マス内の測定地点を示している。

GIS ソフトウェアは、GRASS を用いた。また、作図に当たっては、各測定地点の実測値（図 4-2-6 及び図 4-2-7、1 辺が 50 m のメッシュ）からスプライン補間を用いて 1 辺が約 15 m（緯度経度の間隔：0.5 秒）のメッシュに空間内挿を行った。CO₂ は風に乗って移動している間に他の化合物に変化してしまうことが無く、大気に排出された後の寿命が長いため、測定値が無いメッシュのみに極端な濃度変動が起こるとは考えにくい。測定値があるメッシュ同士をなめらかに結ぶ補間方法であるスプライン補間がふさわしいと判断した。

各調査日や各測定地点での CO₂ 濃度、風向・風速は異なる様相を呈するが、図 4-2-6 から、年平均の CO₂ 安定濃度は、地域の代表的な吸収源等の安定的な影響が反映された分布パターンを示すようになる。

具体的には、調査対象区域の北、北西部に CO₂ 濃度が相対的に高いエリア（A1, B3, C2, D2 の各地点）が、中央、北東部には CO₂ 濃度が相対的に低いエリア（D3, E1～E3, F1～F3, G1～G2 の各地点）が存在する。調査対象区域の北、北西部の CO₂ 濃度が相対的に高いエリアは、名古屋産業大学の校舎や住宅街があり、これらの建物に風が遮られて CO₂ が滞留し、濃度が相対的に高い状況にある。その一方で、調査対象区域中央、北東部の CO₂ 濃度が相対的に低いエリアは、中央部は南北方向への風通しがよく、また北東部は洞光院の社寺林に囲まれたエリアであり、社寺林が吸収源として影響を与え CO₂ 濃度が相対的に低い状況にある。

また、CO₂ 基準濃度が反映された空間分布を示す図 4-2-7 では、安定濃度に比べて全体的な濃度が低い分布パターンを示すようになる。

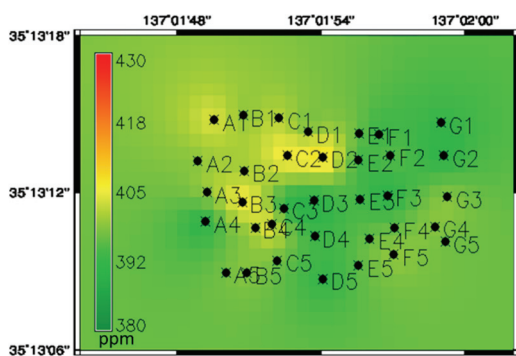


図 4 - 2 - 6

CO₂ 安定濃度の分布パターン（年平均）

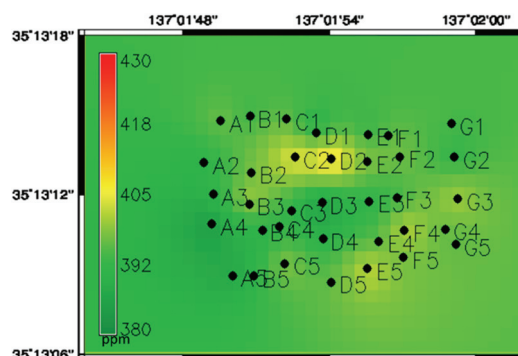


図 4 - 2 - 7

CO₂ 基準濃度の分布パターン（年平均）

4-3 CO₂基準濃度の空間分布に基づく地域環境評価の可能性

本章では、東海3県に設置されたCO₂濃度測定局の5年間(2011年~2015年)の収集データを用いて、発生率の高い風向時のCO₂安定濃度の日変化を検証した結果、13時から14時の間に濃度が最小値を示し、しかも一定の濃度を示すようになる。このため、発生率の高い風向時のCO₂安定濃度の日変化のなかで最小値を示す濃度を、地域の成分が反映されたCO₂濃度を評価する尺度、すなわち「CO₂基準濃度」と定義した。次に、CO₂基準濃度が反映された空間分布を検証するために、名古屋産業大学周辺地域を対象に、1年間(2015年5月~2016年4月)のCO₂濃度調査を実施した。その結果、CO₂濃度空間分布の基本的動態としては、風速が強いときのCO₂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ことがわかった。また、各調査日や各測定地点でのCO₂濃度、風向・風速は異なる様相を呈するが、年平均のCO₂安定濃度は、地域の代表的な吸収源等の安定的な影響が反映された分布パターンを示すようになり、CO₂基準濃度の空間分布は、安定濃度に比べて全体的な濃度が低い分布パターンを示すようになる。この分布パターンの時系列変化を検証することや、特定の調査日の空間分布との比較をすることによって、CO₂濃度に与える地域環境の影響を評価することが可能となると考えられる。

4-4 まとめ

本章では、地域環境評価の基礎となるCO₂濃度の動態を明らかにするため、CO₂濃度と風向・風速との関係性を検証し、CO₂基準濃度を導出するとともに、地域環境評価の基礎となるCO₂濃度の分布パターンを検証した。特に、CO₂基準濃度の分布パターンの時系列変化を検証、把握することなどによって、CO₂濃度の視点から地域環境の移り変わりや低炭素地域づくりの効果を評価する可能性を明らかにすることができたと考えられる。

今後の課題として、本研究ではCO₂濃度測定局周辺地域における空間分布データの収集を行ったが、そのデータ制約から月平均、季節平均の空間分布の詳細な検証には至っていない。今後は、風速3m/sを超える風速の発生率、及び発生率が高い風向を考慮し、調査を継続的に実施することで、空間分布の更なる検証を進めていくことが課題となる。また、CO₂安定濃度の空間代表性を検証するためには、調査頻度を高めることに加え、地表面の局所的な変動の影響を受けにくい高さでのCO₂濃度を調査し、その空間分布と地域環境との関係性を具体的に検証していくことが課題となる。

補注

- 1) 環境省 (2017.4.25 更新) 地方公共団体実行計画(区域施策編)策定・実施マニュアル(本編)Ver.1.0 . < https://www.env.go.jp/policy/local_keikaku/data/manual_main.pdf > , 2017.5.18 参照
- 2) 北九州市 (2017.5.18 更新) 北九州市低炭素まちづくり計画 . < <http://www.city.kitakyushu.lg.jp/files/000739650.pdf> > , 2017.5.18 参照
- 3) 株式会社ユードム社製の C2D-W02TR を使用した。可搬型 CO₂ 濃度測定器の仕様上の分解能は 1 ppm , 測定精度は $\pm 30 \text{ ppm} \pm \text{読み値の } 5\%$ である。CO₂ 濃度調査に当たって実際の測定精度を検証するため、無人の室内において 3 台の可搬型 CO₂ 濃度測定器(校正済)を、2 日間 24 時間連続測定を行い、個体間の誤差の検証を行った結果、初期値(測定器の電源を入れて安定時間(1分)が経過した後の測定値)の最大誤差は $\pm 10 \text{ ppm}$ 程度、その後の測定データの誤差は $\pm 2.5\%$ 、初期値の誤差を考慮しない濃度差データの誤差は $\pm 1.5\%$ と、いずれも読み値の誤差内であった。このため、CO₂ 濃度調査の実施に当たっては、名古屋産業大学に開設された CO₂ 濃度測定局の 14 時時点の測定データを基準値として用いることで、初期値段階における測定誤差の解消を図っており、実際の測定誤差は $\pm 1.5\%$ と想定している。

第5章 生活環境圏のCO₂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

5-1 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、CO₂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が、学校教育においても、環境負荷の少ない生活や持続可能な社会を目指すために主体的な行動を促す教育が行われている¹⁾。

2018年度より幼稚園、2020年度より小学校、2021年度より中学校、2022年度より高等学校で順次全面実施される次期学習指導要領では、主体的・対話的で深い学びの実現として、アクティブ・ラーニングによる授業改善が今後さらに重視されている²⁾。アクティブ・ラーニングによる授業改善には、探究的な学習をより一層充実させていくことにつながる。また、総合的な学習の見直しは、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。

このため、本章では、第3章、第4章にて導かれたCO₂濃度の動態を踏まえ、生活環境圏のCO₂濃度データを利用した環境教育プログラムを開発する。さらに、日本と台湾の高等学校5校で環境教育を実施し、生徒を対象とした学習到達度調査により探究的な学習活動としての有効性を検証する。

5-2 研究の方法

探究的な学習活動は、「課題設定」、「情報収集」、「整理分析」、「まとめ・表現」の4つのプロセスを繰り返し実施するものであるが³⁾、高等学校では、環境教育が実施可能な授業時間にも自ずと制約がある。このため、本研究では、授業の1単位時間(50分)を4回にわたって実施する基本的な環境教育プログラムの開発とその実施、さらには生徒を対象としたアンケート調査を通じて、探究的な学習活動としての有効性を検証する。

なお、台湾の高等学校を研究対象として加えたのは、1)台湾においても、日本と同様に教科教育を通じて環境教育が行われていること⁴⁾、2)また、学習指導要領(十二年國民基本教育普通高中課程規劃及行政準備手冊)に問題解決的な学習が位置づけられ、その中で「学際的な課題をまとめ、探究、実践する学習過程を経験させることによって、生徒が問題に対する発見、認識及び解決能力の向上を図る(用以提供學生跨科議題整合的探究與實作學習過程，以落實並提升學生發現、認識、解決問題能力)」という横断的、問題解決的な活動が実施されており⁵⁾、日本での探究的な学習プロセスを経た環境教育プログラムの教育効果についての検証が行えること、3)伊藤・岡村(2009)が台湾で翻訳出版され、学校周辺のCO₂濃度調査に基づく環境教育が行われていたこと、このため、4)本研究が対象とする環境教育プログラムの汎用性の検証が可能なることによる。さらに、本研究では、身近な地域をフィールドに、国際社会が削減に取り組んでいるCO₂を教材化している。このため、日本と台湾の生徒を対象に環境教育を実施し、その学習成果を基に交流する機会⁶⁾を設けることで、「地域性」と「グローバル性」を同時に認識させる環境教育プログラムへの発展を目指すことができると考えられるためである。

5-3 生活環境圏の CO₂濃度データを利用した環境教育プログラムの開発

表 5-3-1 は、学校周辺の CO₂濃度の調査とデータ活用をテーマにした学習指導計画である。環境教育プログラムとしては、学習内容に示されているように「オリエンテーション」、「学校周辺の CO₂濃度調査」、「CO₂濃度マップの作成」、「CO₂濃度測定局のデータ検索」、「CO₂濃度マップの解釈」、「学習成果の発表」によって構成される。このうち、「学校周辺の CO₂濃度調査」から「学習成果の発表」までのプロセスを繰り返し実施することで、CO₂濃度と地域環境との関係性を探究するためのスパイラル学習が可能となっている。また、「CO₂濃度測定局のデータ検索」では、CO₂濃度データ検索システムを活用し、CO₂濃度と風向・風速、天候との関係性を参照することで、気象が CO₂濃度に与える影響を把握したうえで、地域環境の影響を探究することを支援する。なお、学習指導計画の補助教材としては、「データ解釈シート(表 5-3-2)」を作成している。このシートは、生徒がデータ解釈を行う基本的視点が示されており、項目ごとにデータ解釈シートに沿って解釈を進めて行くことができるよう配慮している。

表 5 - 3 - 1 学習指導計画

テーマ	学校周辺における CO ₂ 濃度の調査とデータ活用				
対象学年	高校生	実施時間	200分	実施場所	PC教室及び学校周辺
支援者	教員1名, 名古屋産業大学より講師1名, 大学院生1名				
活動のねらい	<ul style="list-style-type: none"> ・学校周辺のCO₂濃度を調査し, CO₂濃度の時系列変化や空間分布を理解する。 ・気象や土地利用, 人間生活の影響を受けたCO₂濃度データを活用して, CO₂濃度と地域環境との関係性を探究し, 低炭素地域づくりに役立つ環境行動を考える。 				
評価の観点	<ul style="list-style-type: none"> ・生活環境圏のCO₂濃度は風向・風速, 天候, 土地利用や人間生活の影響を受けることがわかる ・CO₂濃度の時系列変化や空間分布がわかる 				
準備物	学校周辺地図, 記入用紙, CO ₂ 濃度測定器 ⁷⁾ , 風向・風速計 ⁸⁾ , パソコン, GPS				
活動の流れ					
時間	学習内容	学習目標・学習活動		支援事項・留意点など	
50分	オリエンテーション	【学習活動】 ・低炭素地域づくりやCO ₂ 濃度の基本的動態に関する知識を習得する		<ul style="list-style-type: none"> ・環境問題に関する基礎的な知識や関心を確認する ・学習教材に沿って説明する 	
50分	学校周辺のCO ₂ 濃度調査 【課題設定】 【情報収集】	【学習目標】 ・測定に必要な技能を身につけることができる ・調査を生徒同士で協力して行うことができる 【学習活動】 ・基礎知識の学習と測定機器の使い方を練習する ・CO ₂ 濃度が高い・低いと思う場所を1地点ずつ予想する ・調査班の仕事分担, 調査活動方法を確認する ・学校周辺のCO ₂ 濃度調査を行う スパイラル学習の場合, 前回の調査を踏まえて新たな課題を設定する		<ul style="list-style-type: none"> ・CO₂濃度が高い・低いと思う場所を1地点ずつ予想させる ・班に1つ時計を持ってくるように事前に指示しておく ・1班あたり5名～ (CO₂濃度測定係, 風向・風速測定係, 記録係等) ・測定するもの 時刻, 風向, 風速, CO₂濃度 ・喋りながら測定をするとCO₂濃度が上がることに注意する ・風向・風速計の測定方法に注意する。風が向かってくる方向に風向・風速計を向ける 	
25分	CO ₂ 濃度マップの作成 【整理分析】	【学習目標】 ・CO ₂ 濃度マップを作成することができる 【学習活動】 ・エクセルを使用し, 収集したデータからCO ₂ 濃度マップを作成する		<ul style="list-style-type: none"> ・CO₂濃度マップの作成方法を説明する ・CO₂濃度マップ作成用エクセルファイルを生徒に配布する 	
25分	CO ₂ 濃度測定局のデータ検索 【整理分析】	【学習目標】 ・CO ₂ 濃度測定局のデータ検索を行うことができる ・気象(風向・風速, 天候)とCO ₂ 濃度との関係性を考えることができる 【学習活動】 ・CO ₂ 濃度測定局のデータ検索システムの使い方を学ぶ ・CO ₂ 濃度測定局のデータ検索システムから必要なデータを抽出する		<ul style="list-style-type: none"> ・CO₂濃度データ検索システムの説明をする ・CO₂濃度データ検索システムの使い方を説明する ・風向・風速, 天候と, CO₂濃度との関係性を理解する 	
35分	CO ₂ 濃度マップの解釈 【整理分析】	【学習目標】 ・CO ₂ 濃度マップを解釈することができる 【学習活動】 ・作成したCO ₂ 濃度マップと, 検索システムのデータから各教科で学んだ知識を活用してCO ₂ 濃度のデータ解釈を行う ・学校周辺の代表的な排出源, 吸収源に着目して, CO ₂ 濃度と地域環境との関係性を探究する		<ul style="list-style-type: none"> ・生活環境圏のCO₂濃度の基本的動態について理解する ・学校周辺で測定されるCO₂濃度は, 気象や土地利用, 人間生活の影響を受け, 複雑かつ多様に变化する事を理解する CO₂平均濃度, 風速の影響, 風向の影響, 天候の影響 ・CO₂濃度が高い・低いと思う場所が予想どおりだったかを確認し, 予想と同じだった場合はなぜ同じになったのか, 異なった場合はなぜ違ったのかを考察する 	
15分	学習成果の発表 【まとめ・表現】	【学習目標】 ・学習した内容をまとめることができる 【学習活動】 ・学習成果を発表する ・CO ₂ 濃度の実測データから低炭素地域づくりに役立つ環境行動について意見交換を行う		<ul style="list-style-type: none"> ・わかった点, わからなかった点を明確にできているかどうかを確認する ・次の課題設定ができていくかどうかを確認する 	

表 5 - 3 - 2 データ解釈シート作成例 (抜粋)

日時：平成 28 年 10 月 7 日(金)11 時 00 分～11 時 50 分 天候：曇 調査地点：久居農林高等学校周辺		
評価項目	参照データ	調査データ
1 . CO ₂ 平均濃度	(1) 近傍の CO ₂ 濃度測定局の常時測定データ (2) 近傍の気象台の気象データ (気温, 風向, 風速) (3) CO ₂ 濃度検索データ (調査月の特別平均値)	CO ₂ 濃度 427 ppm 気温 22.2 , 風向 東 , 風速 2 m/s CO ₂ 408 ppm , 風速 3.8 m/s
2 . 風速の影響	(1) 近傍の気象台の風速データ (2) CO ₂ 濃度マップデータ (測定地点の風速データ) (3) CO ₂ 濃度検索データ (類似した風速時の特別平均値)	風速 2.0 m/s 風速 0.6 m/s CO ₂ 濃度 420 ppm , 風速 1.4 m/s
3 . 風向の影響	(1) 近傍の気象台の風向データ (2) CO ₂ 濃度マップデータ (測定地点の風向データ) (3) 地図データ (主な土地利用) (4) CO ₂ 濃度検索データ (類似した風向時の特別平均値)	風向 東 風向 南 CO ₂ 濃度 419 ppm , 風速 2.4 m/s

5-4 生活環境圏のCO₂濃度データを利用した環境教育の実践

表 5-3-1 の学習指導計画に基づく環境教育は、2016 年 9 月から 11 月にかけて日本 2 校、台湾 3 校の高等学校の生徒を対象に実施した。対象とした学校、参加生徒数は、日本では三重県立久居農林高校の 3 年生 6 名、愛知県立緑丘商業高校の 3 年生 16 名、台湾では国立竹南高級中学の 2 年生 36 名、国立苗栗高級農工職業学校の 1, 2 年生 31 名、苗栗県立大同高級中学の 2 年生 40 名である⁹⁾。なお、学校種によって生徒の環境に対する知識や関心も異なると考えられるが、本研究が対象とする学習指導計画では、気象(理科)、地域調査(地理)、CO₂濃度のデータ処理(情報)など、複数の学習要素が含まれている。このため、本研究では学習到達度を評価するうえで校種の区別をせず、同一の授業実施条件での教育効果を比較するため、連続して 4 時間(50 分×4 回)の環境教育が受入可能な高等学校を対象とした。

ここでは日本の高等学校 1 校を環境教育の実践例として取り上げ、学習活動とその支援の概要を整理する。当該校では、「総合的な学習の時間」及び「課題研究」の授業時間を利用して環境教育を実施した。この調査は、図 5-4-1 の赤枠で囲ったエリアを調査対象とし、西チーム(A~D の 1~3 エリア)と東チーム(J~M の 1~3 エリア)の 2 グループに分かれて実施した。

西チームと東チームは東西に約 250 m 離れており、調査エリアの土地利用状況としては、西チームは A 列の南北方向に国道が、北側には田畑や林、南側にはグラウンドがある。東チームは J1~2 にグラウンドが、K~M 列の東西方向に道路があり、周辺は住宅地である。最初の調査課題としては、調査対象エリアの中で CO₂濃度が高い地点、低い地点をそれぞれ予想させたが、西チームは A の 1~3 は CO₂濃度が高く、B、C の 1~3 は濃度が低いと予想した。東チームは、J、K の 1~3 は濃度が低く、M1 は濃度が高いと予想した。

生徒が作成した CO₂濃度マップを図 5-4-2 の赤枠内に示す。図中、各枠内の中央右の数値は CO₂濃度を、下の値は風速を、矢印は風向を示している。CO₂濃度マップの解釈は、補助教材となるデータ解釈シート(表 5-3-2)の項目に沿って行い、生徒が自ら収集したデータや CO₂濃度データ検索システムから参照したデータ(図 5-4-3)を記入していくことで、客観的かつ多面的にデータ解釈ができるよう配慮した。その作成に当たっては、表 5-3-1 の支援者らがデータの記入方法を生徒に説明したうえで、「CO₂濃度マップの解釈」の時間において、チームごとにデータの記入とこれに基づくディスカッションを行い、解釈した。

東チームのデータ解釈は以下のとおりである。まず調査日に実測された CO₂濃度は 427 ppm、風速は 2 m/s であったのに対し、CO₂濃度データ検索システムから導かれた過去の 10 月における CO₂濃度の特別平均値(以下「CO₂平均濃度」という)は 408 ppm、風速の特別平均値(以下「平均風速」という)は 3.8 m/s であった。過去の CO₂平均濃度、平均風速と比べると、調査当日の CO₂濃度は高く、風速も弱かったことから、生徒は、測定地点の局所的な排出源、吸収源の影響を受けやすい状況にあることを理解した。

また、M1 地点は、道路交通の影響を受け CO₂ 濃度が高いと予想したが、実際の CO₂ 濃度は 432 ppm、風速は 0.6 m/s であり、J、K の 1~3 地点の濃度 (425~432 ppm)、風速 (0~1.1 m/s) と近似していた。このため、CO₂ 濃度データ検索システムで 2 m/s 未満の条件下の CO₂ 濃度と風速を参照したところ、CO₂ 平均濃度は 420 ppm、平均風速は 1.4 m/s であったため、調査地点の風速が平均風速よりも弱く、局所的な影響が加わったことにより、CO₂ 濃度が 430 ppm 前後になっていると解釈した。また、M1 地点は周辺が道路となっているが、予想に反して CO₂ 濃度が高くなかったのは、調査時間帯の目視による自動車通行量が少なかったことから、自動車排ガスの影響よりも風通しの影響が大きいと解釈した。反対に L、M の 2~3 地点は CO₂ 濃度が 439~450 ppm、風速が 0~1.1 m/s であり、風速は他の地点とほぼ同様であったが、CO₂ 濃度は他地点に比べ高くなっていた。この点については、L、M の 2~3 地点は住宅などの建物に囲まれており、CO₂ が滞留して濃度が高くなったと解釈した。また、西チームは東チームに比べ全体的な CO₂ 濃度が高い結果となったが、生徒は、西チームと東チームで環境条件が異なる点として、地面がアスファルトか土かという点に着目し、土壌中の微生物が呼吸することによって CO₂ が発生し、東チームに比べ全体的な濃度が高くなったと解釈した。

以上から、生徒は、風速が CO₂ 濃度に与える影響に加え、道路など周辺の土地利用の影響、周辺が建物に囲まれていることへの風通しの影響など、風向・風速や地域環境、特に排出源・吸収源と関連付けて、CO₂ 濃度データを多面的に解釈していた。さらに今後の調査課題についても、西チームは、風速が弱い時の土壌環境が CO₂ 濃度に与える影響を、東チームは排出源となる道路周辺において濃度が低かった点に注目し、自動車の通行量が多い時間帯での CO₂ 濃度変化などを指摘した。すなわち、生徒は CO₂ 濃度と気象の実測データを用いて、CO₂ 濃度と地域環境との関係性を解釈し、今後のスパイラル学習に繋がる調査課題を明確にするなど、学習指導計画で意図した探究的な学習活動のプロセスをたどることができた。



図 5 - 4 - 1 CO₂ 濃度調査地点

(国土地理院の電子地形図 (タイル) に縮尺と方位記号及びメッシュを追記して掲載)



図 5 - 4 - 2 CO₂濃度マップ作成例

(国土地理院の電子地形図(タイル)に縮尺と方位記号及びメッシュを追記して掲載)

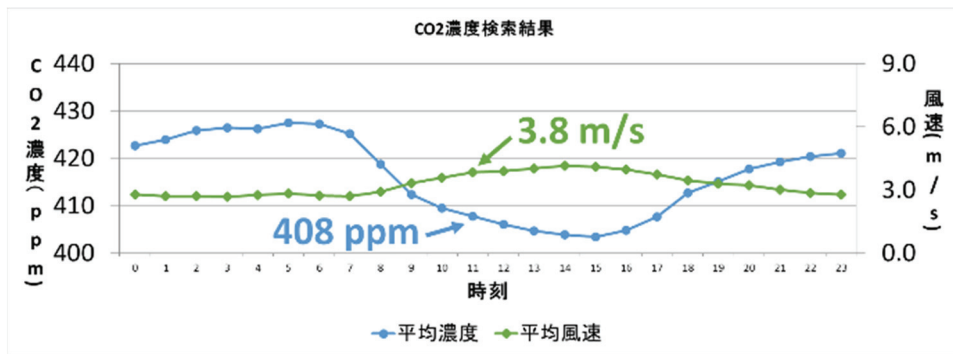


図 5 - 4 - 3 CO₂濃度データ検索システムの検索結果

5-5 環境教育プログラムの教育効果

日本2校と台湾3校で実施した環境学習では、授業の最後に生徒を対象とした学習到達度調査(表5-5-1)を実施した。この調査では、授業内容への関心、理解と、学習指導計画(表5-3-1)の学習内容に定めた4つのプロセスに対応する各学習目標に対する学習到達度の自己評価を求めた¹⁰⁾。表5-3-1では、探究的な学習における4つのプロセスに基づいて学習内容と学習目標・学習活動を設定し、加えて支援事項・留意点なども設定しているが、各学習目標は4つのプロセスに基づいているため、各学習目標をアンケート項目として設け、評価することで、探究的な学習としての有効性を検証することが可能となる。

回答の選択肢は、1. 思う、2. 少し思う、3. あまり思わない、4. 思わないの4区分とした。アンケートの調査結果を表5-5-2に示す。なお、参加人数等から学校の特定を避けるため、国・地域別で集計した。

日本と台湾のアンケート回答結果の差の検定には²⁾検定を用いた。また、「思わない」と回答した生徒は全ての学校で0人だったため、表5-5-2からは除外した。

日本2校のアンケート集計結果をみると、問8を除く各設問に対する「思う」、「少し思う」と回答した肯定的回答の割合は、86.3%~100%であった。また、台湾3校では、すべての設問で85.7%~99.1%という高い肯定的回答率を示した。

アンケート調査の回答を設問別に見ていくと、問1の「授業に関心を持つことができたか」については、日本の場合、22人の生徒のうち、9人(40.9%)が「思う」、11人(50%)が「少し思う」と回答した。また、台湾の場合、107人の生徒のうち、77人(72%)が「思う」、27人(25.2%)が「少し思う」と回答した。授業に対する関心は、その後の継続的な学習活動に繋がるものであるが、「あまり思わない」を選択したのは、日本の生徒が2人(9.1%)、台湾の生徒が3人(2.8%)であった。

また、問2の「授業内容を理解できたか」に対する日本の生徒の自己評価は、5人(22.7%)が「思う」、14人(63.6%)が「少し思う」と回答した。また、台湾の生徒は、47人(43.9%)が「思う」、56人(52.3%)が「少し思う」と回答しており、台湾の生徒がより積極的な理解を示す傾向にあった。学習内容が理解できたかどうかは、学習指導計画上、問3から問8までの学習到達度の総合的な自己評価と捉えることができる。ただし、その自己評価には、環境教育プログラムの教育効果に加え、日本と台湾の文化や国民性の違い、生徒の環境意識や学校環境教育の違いなどによって差異が生じると考えられる。このため、生徒の自己評価には、学習指導計画以外の要素が反映されていることに留意が必要となる。

問3から問8は、CO₂濃度と地域環境との関係性を継続的に探究するためのスパイラル学習を構成する学習目標となる。これらの学習目標に対する学習到達度は、授業の進行に従って、応用する知識や情報が増加することから低減傾向を示すと考えられる。その回答傾向を見ると、日本の生徒は、CO₂濃度調査の学習目標に対する肯定的回答の割合が最も高く、授業の進行に伴い肯定的回答の割合が低くなっていた。生徒は探究的な学習活動の最

初のステップを体験したが、CO₂濃度調査の継続的な実施に必要な技能の基礎は身に付けることができたと考えられる。また、CO₂濃度測定局のデータ検索、CO₂濃度マップの解釈や学習成果の発表については、最初の学習でCO₂濃度の動態を理解することには自ずと限界があることから、学習活動を継続することで段階的に到達度を高めていくことになる。台湾の生徒も、日本の生徒と同様の回答傾向を示したものの、問8の学習成果の発表に対する自己評価が高い点、問4のCO₂濃度調査を生徒同士で協力して行うことができたに対する自己評価が高い点が特徴的であった。特に問8の学習成果の発表については、日本では口頭で、台湾では母国語の違いによるコミュニケーションの齟齬を避けるため、模造紙に整理し発表を行ったことから、生徒の達成感が高まり、肯定的回答の割合が高くなったと考えられる。

次に、問9の自由記述欄での回答を求めたところ、日本2校では4件、台湾3校では53件の回答があった。これらの回答で示された意見を内容別に整理したところ、6項目に分類（表5-5-3）された。各項目の意見数を集計した結果は表5-5-4に示すとおりである。なお、集計に当たって、1つの回答に複数の意見が含まれる場合は意見ごとに分類したため、表5-5-4の合計数は問9の回答数と一致しない。回答が最も多かったのは、日本、台湾ともに「CO₂の知識理解の深化」で、日本は4件、台湾は23件であった。次いで「操作時間の延長」が14件、「測定地点の増加」が11件などであった。このうち、「CO₂の知識理解の深化」や「測定地点の増加」に関する意見としては、「工場周辺でCO₂濃度を測ってみたい」、「測定する地域をもっと広く、時間も長くすれば、更に深く勉強できると思う」、「植物や土壌の影響を測定してみたい」、「CO₂や風速を測るのはとても楽しく、もう一度やってみたいと思った」、「データをまとめたことにより、更に興味や関心がわいてきた」など、探究的な学習を継続して行いたいという学習ニーズが反映された意見が多くみられた。

なお、日本と台湾の生徒のアンケート調査結果を比較すると、台湾の生徒は、各設問で「思う」と積極的に回答した割合が相対的に高い状況にあり、自由記述についても、積極的に意見が述べられていた。特に問8の「学習した内容をまとめることができたか」の肯定的回答率は、台湾が92.4%であったのに対して、日本では61.9%と低い値を示した。日本で探究的な学習活動を進めるうえで、「まとめ・表現」に対する学習支援の強化が必要とされることを示唆していると考えられる。

表 5 - 5 - 1 学習到達度調査のアンケート項目

問1	授業内容に関心を持つことができたと思いますか。
問2	授業内容を理解することができたと思いますか。
問3	学校周辺のCO ₂ 濃度調査で測定に必要な技能を身につけることができたと思いますか。
問4	学校周辺のCO ₂ 濃度調査を、生徒同士で協力して行うことができたと思いますか。
問5	CO ₂ 濃度測定局のデータ検索で、CO ₂ 濃度測定局のデータ検索を行うことができたと思いますか。
問6	CO ₂ 濃度測定局のデータ検索で、気象(風向・風速、天候)とCO ₂ 濃度との関係性を考えることができたと思いますか。
問7	CO ₂ 濃度マップを解釈することができたと思いますか。
問8	学習した内容をまとめることができたと思いますか。
問9	ご意見、ご感想、改善点などご自由にご記入ください。

表 5 - 5 - 2 学習到達度調査の国・地域別集計結果

問1	思う	少し思う	あまり思わない	合計	p値
日本	9人(40.9%)	11人(50%)	2人(9.1%)	22人(100%)	
台湾	77人(72%)	27人(25.2%)	3人(2.8%)	107人(100%)	
合計	86人	38人	5人	129人	P < 0.05
問2	思う	少し思う	あまり思わない	合計	p値
日本	5人(22.7%)	14人(63.6%)	3人(13.6%)	22人(100%)	
台湾	47人(43.9%)	56人(52.3%)	4人(3.7%)	107人(100%)	
合計	52人	70人	7人	129人	0.056
問3	思う	少し思う	あまり思わない	合計	p値
日本	5人(22.7%)	16人(72.7%)	1人(4.5%)	22人(100%)	
台湾	82人(76.6%)	24人(22.4%)	1人(0.9%)	107人(100%)	
合計	87人	40人	2人	129人	P < 0.001
問4	思う	少し思う	あまり思わない	合計	p値
日本	10人(45.5%)	12人(54.5%)	0人(0%)	22人(100%)	
台湾	74人(69.8%)	30人(28.3%)	2人(1.9%)	106人(100%)	
合計	84人	42人	2人	128人	0.053
問5	思う	少し思う	あまり思わない	合計	p値
日本	7人(33.3%)	13人(61.9%)	1人(4.8%)	21人(100%)	
台湾	44人(41.9%)	46人(43.8%)	15人(14.3%)	105人(100%)	
合計	51人	59人	16人	126人	0.248
問6	思う	少し思う	あまり思わない	合計	p値
日本	5人(22.7%)	16人(72.7%)	1人(4.5%)	22人(100%)	
台湾	51人(48.1%)	51人(48.1%)	4人(3.8%)	106人(100%)	
合計	56人	67人	5人	128人	0.090
問7	思う	少し思う	あまり思わない	合計	p値
日本	9人(40.9%)	11人(50%)	2人(9.1%)	22人(100%)	
台湾	35人(33%)	62人(58.5%)	9人(8.5%)	106人(100%)	
合計	44人	73人	11人	128人	0.753
問8	思う	少し思う	あまり思わない	合計	p値
日本	3人(14.3%)	10人(47.6%)	8人(38.1%)	21人(100%)	
台湾	42人(39.6%)	56人(52.8%)	8人(7.5%)	106人(100%)	
合計	45人	66人	16人	127人	P < 0.001

表 5 - 5 - 3 問9自由記述内容分類例

回答内容	分類
CO ₂ の影響をより深く知ることができた	CO ₂ の知識理解の深化
測定の時間を延ばしたら影響要素がもっと見つかるかもしれない	操作時間の延長
測定器の操作に慣れることができなかった	測定器の操作方法
生徒に資料を探させるのは、直接図表を見せるよりいいと思う	データ検索への評価
測定する地域をもっと広く、時間も長くすれば、更に深く勉強できると思う	測定地点の増加
お互いの意見交換をもっと増やしてほしい	ディスカッションの増加

表 5 - 5 - 4 問9自由記述回答結果

	日本2校	台湾3校
CO ₂ の知識理解の深化	4	23
操作時間の延長	0	14
測定器の操作方法	0	1
データ検索への評価	0	1
測定地点の増加	0	11
ディスカッションの増加	0	3
合計	4	53

5-6 まとめ

本章では、生活環境圏の CO₂ 濃度データを利用した探究的な学習プロセスを体験する環境教育プログラムを開発し、日本と台湾の高等学校 5 校で実施したうえで、授業内容への関心、理解と学習目標に対する生徒の学習到達度の自己評価を求めた。

その結果、日本の生徒は、問 8 を除く学習目標に対する肯定的回答率は 86.3 % ~ 100 %、また、台湾の生徒は、すべての項目に対して 85.7 % ~ 99.1 % の高い肯定的回答率を示した。特に継続的な学習活動にとって重要となる授業への関心については、日本の生徒の 90.9 %、台湾の生徒の 97.2 % が肯定的に回答しており、自由記述でも、探究的な学習を継続して行いたいという学習ニーズを明らかにすることができた。また、生徒が学習活動に対して主体的、継続的に取り組むうえで、まずは CO₂ 濃度調査に必要な技能の基礎を身に付けることが不可欠となるが、生徒の自己評価から、今後の継続的な学習活動の条件を整えることができたといえる。

探究的な学習では、「課題設定」、「情報収集」、「整理分析」、「まとめ・表現」の 4 つのプロセスを繰り返す。本研究では、授業の 1 単位時間（50 分）を 4 回にわたって実施する環境教育プログラムを開発し、実施に移すとともに、生徒を対象としたアンケート調査を通じて、探究的な学習活動としての有効性を検証した。

この環境教育では、CO₂ 濃度マップの作成や CO₂ 濃度測定局のデータ検索で PC を利用するため、今後はすべての生徒が PC を自由に利用できる学習環境を整えていくことが必要となる。また、今後の課題としては、探究的な学習活動の継続を支援していくための教材開発と学習目標に基づく生徒の学習到達度の評価方法を明確にしていくことが必要とされる。その際、学習到達度の国際比較に当たっては、その前段階として環境意識調査の実施を通じ、生徒の環境意識やこれを下支えする学校環境教育の違いなどを検証することが必要とされる。また、学校種を考慮した探究的な学習活動の有効性を検証するため、実施対象校の拡大が必要とされる。

補注

- 1) 文部科学省 (2012.12.1 更新) 環境教育・学習指導要領における「環境教育」に関わる
主な内容の比較<http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/kankyou/__icsFiles/afieldfile/2013/01/22/1329192_1.pdf> , 2018.5.6 参照
- 2) 文部科学省 (2016.5.31 更新)「アクティブ・ラーニング」の視点からの授業改善・<http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyo3/073/siryu/__icsFiles/afieldfile/2016/05/31/1370946_12.pdf> , 2018.12.22 参照
- 3) 文部科学省 (2009.12.1 更新) 学習指導要領「生きる力」. 高等学校学習指導要領解説
総合的な学習の時間編<http://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/micro_detail/__icsFiles/afieldfile/2010/01/29/1282000_19.pdf> , 2018.4.23 参照
- 4) 教育部 (2009.8.1 更新). 普通高級中學課程綱要<<https://www.k12ea.gov.tw/>> , 2018.9.22 参照
- 5) 中小學師資課程教學與評量協作中心 (2017.1.25 更新). 十二年國民基本教育普通高中課程
規劃及行政準備手冊<<https://ws.moe.edu.tw/>> , 2018.9.22 参照
- 6) 2015 年 10 月 3 日に赤塚植物園 (三重県津市) において, 三重県立久居農林高校と苗栗
県立大同高級中学の生徒らが, テレビ会議を用いて試行的に交流学习を実施した。
- 7) 株式会社ユードム社製の C2D-W02TR を使用した。
- 8) ニールセン・ケラーマン社製のケストレル 5500 を使用した。
- 9) 高級中学は日本の高等学校の普通科に, 農工職業学校は日本の高等学校の農業科, 工業
科に該当する。
- 10) CO₂ 濃度マップの作成に関する学習目標については, 利用可能な PC の配置に制約が
あり, すべての生徒が実際のデータ処理を行うことができなかつたため, アンケート調
査対象から除外した。

参考文献

伊藤雅一・岡村聖編著 (2009) みんなで作る CO₂ 濃度マップ 地球温暖化と私たちの暮らし. リバネス出版, 164p.

第6章 結論と今後の展望

6-1 結論

本論では、生活環境圏における CO₂ 濃度の動態把握に基づく環境教育方法を具体化するために、以下の研究を進めた。

CO₂ 濃度データ検索システムの設計および開発

生活環境圏における CO₂ 濃度の変化パターンの検証

生活環境圏における CO₂ 濃度の分布パターンの検証

生活環境圏の CO₂ 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の検証

これを章ごとに整理すると、まず、第1章では、本論の背景として人為の直接的な影響を受ける生活環境圏の CO₂ 濃度に着目した環境教育研究の動向を中心に把握、整理し、本論の目的として、CO₂ 濃度の動態把握に基づく環境教育方法を具体化する必要性と意義を明らかにした。

第2章では、生活環境圏における CO₂ 濃度測定局の収集データに着目し、その環境教育への応用に向けて、「CO₂ 濃度データ検索システム」の設計と開発を行った。このシステム開発により、CO₂ 濃度測定局の過去データから、特定の気象条件下の CO₂ 濃度の日変化を参照することで、CO₂ 濃度の動態に対する科学的理解を促すための学習支援システムを整備した。

第3章では、CO₂ 濃度データ検索システムを利用し、東海3県に開設された CO₂ 濃度測定局の2011年から2013年までの収集データを基に、CO₂ 濃度の時別平均値を算出し、各測定地点の各月における CO₂ 濃度の変化パターンを分析した。分析に当たっては、CO₂ 濃度の時別平均値を「CO₂ 平均濃度」、一定の風速以上時における CO₂ 濃度の時別平均値を「CO₂ 安定濃度」と定義し、これを検証することで、複雑かつ多様に变化する CO₂ 濃度により客観的かつ多面的なデータ解釈が可能になることを明らかにした。具体的には、CO₂ 平均濃度の日変化は、午前6時前後に日変化の中で相対的に高い傾向を示し、午後4時前後に相対的に低い傾向を示す、CO₂ 安定濃度の日変化の変動幅は、大気拡散により CO₂ 平均濃度に比べ縮小する、月別にみた CO₂ 平均濃度の日変化は、季節変化がみられる、月別にみた CO₂ 安定濃度の日変化は、日の出から日没までの時間帯は概ね 10 ppm 以下の変動幅で推移するとともに、季節変化がみられる、以上の共通の傾向を踏まえた CO₂ 濃度データの解釈可能性を明らかにした。

第4章では、東海3県に開設された CO₂ 濃度測定局の5年間の収集データを活用し、生活環境圏における CO₂ 濃度の分布パターンを検証した。その際、生活環境圏の CO₂ 濃度を評価する尺度として「CO₂ 基準濃度」を定義し、その動態を検証した。そして、1年間にわたる CO₂ 濃度の定時調査を実施し、その分布パターンを検証することにより、「CO₂ 基準濃度」の空間分布は、地域環境の安定的な影響が反映された濃度となることを明らかにした。

具体的には、年平均の CO₂ 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り、また、CO₂ 基準濃度の分布パターンは、CO₂ 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ことを明らかにした。

第 5 章では、第 3 章及び第 4 章から得られた生活環境圏における CO₂ 濃度の動態把握に関する知見に基づいて、生活環境圏における CO₂ 濃度の基本的動態や学校周辺における CO₂ 濃度の測定方法などを記した学習指導計画を作成した。そして、この計画に基づいて日本と台湾の高等学校 5 校を対象に環境教育を実施し、その教育効果の検証を行うことで、探究的な環境学習活動としての有効性を明らかにした。具体的には、授業内容への関心、理解と学習目標に対する生徒の学習到達度の自己評価を求めた結果、日本、台湾の生徒ともに高い肯定的回答率を示し、特に継続的な学習活動にとって重要となる授業への関心については、日本の生徒の 90.9 %、台湾の生徒の 97.2 % が肯定的に回答しており、自由記述でも、探究的な学習を継続して行いたいという学習ニーズがあることがわかった。

第 6 章では、本論の結論を総括し、その学術的な貢献と今後の展望を明らかにした。具体的には、CO₂ 濃度データ検索システムを開発し、生活環境圏における CO₂ 濃度の動態を把握するための方法を確立したうえで、同システムを利用した環境教育プログラムを開発し、環境教育の実施を通じて探究的な学習活動としての教材として有効であることを明らかにした。

本論の学術的貢献としては、

「CO₂ 濃度データ検索システム」を開発し、このシステムを活用して生活環境圏における CO₂ 濃度の基本的動態を明らかにしたこと

そのうえで、生活環境圏における CO₂ 濃度の動態把握に基づく環境教育の教育方法を具体化したこと

以上によって、生活環境圏における CO₂ 濃度の動態を科学的に理解し、CO₂ 濃度と地域環境との関係性を探究する環境教育の新たな方法を明らかにしたことにある。

文部科学省の学習指導要領では、探究的な学習能力の更なる充実が目指されている。また、パリ協定の目標達成に向けては、地方自治体では低炭素地域づくりに向けた取組の強化が求められている。本論の成果は、探究的な環境学習活動の高度化に貢献するとともに、低炭素地域づくりに向けて、CO₂ 濃度の実測データを用いた地域環境評価指標の具体化など、環境政策の新たな展開にも繋げていくことができると考えられる。

6-2 今後の展望

本論では、生活環境圏におけるCO₂濃度の動態把握に基づく環境教育方法を明らかにすることを目的として、生活環境圏におけるCO₂濃度の動態把握方法、生活環境圏におけるCO₂濃度の動態把握に基づく環境教育の環境教育方法を具体化し、その有効性について検証を行った。

これらの検証結果から、風向・風速等の気象条件を考慮したCO₂濃度の動態については明らかにすることができたものの、地域環境の具体的影響、すなわちCO₂の排出源、吸収源の具体的影響の検証には至っていない。

また、CO₂濃度と地域環境との探究を行おうとすると、探究的な学習活動を継続的に実施することが必要となるが、本論では探究的な学習プロセスを一通り体験した教育効果の検証に留まっており、探究的な学習活動を繰り返し実施するスパイラル学習の教育効果の検証には至っていない。

このため、今後の課題としては、地域環境がCO₂濃度に与える具体的影響の検証方法、スパイラル学習の教育効果の検証方法の明確化が必要とされる。

これらの課題解決に向けた取組方向は、以下に示すとおりである。

6-2-1 地域環境がCO₂濃度に与える具体的影響の検証に向けて

本論では、生活環境圏におけるCO₂濃度の動態を把握するための学習支援システムとして、「CO₂濃度データ検索システム」を開発した。

図6-2-1は、CO₂濃度データ検索システムによってCO₂平均濃度、CO₂安定濃度、CO₂基準濃度の時別平均値を算出したものである。CO₂安定濃度は、CO₂平均濃度に比べて安定的な日変化を示し、CO₂基準濃度は、CO₂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。つまり、CO₂濃度データ検索システムを用いることによって、CO₂平均濃度、CO₂安定濃度、CO₂基準濃度の時別平均値を算出することが可能となる。

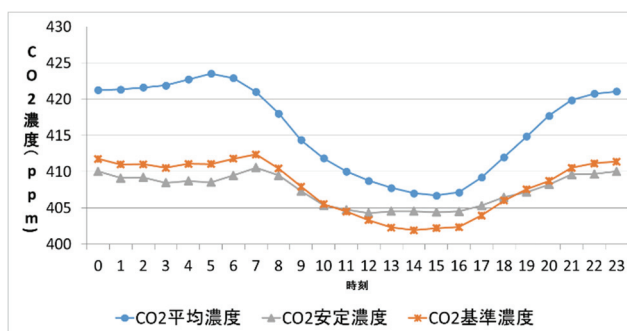


図 6-2-1 CO₂濃度の日変化パターン
(CO₂平均濃度・CO₂安定濃度・CO₂基準濃度)

また、CO₂濃度データ検索システムを用いた分析では、CO₂濃度測定局の定点データから、CO₂濃度と風向・風速との関係性を参照できるが、CO₂濃度と地域環境との関係性を探究しようとする、CO₂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、CO₂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、CO₂濃度調査を実施し、CO₂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CO₂濃度マップの作成を行った。

CO₂濃度マップを作成することによって、風速が強いときのCO₂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、CO₂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。しかし、このマップでは、調査日毎、測定地点毎の地表面におけるCO₂濃度、風向・風速を視覚化することができるが、CO₂平均濃度、CO₂安定濃度、CO₂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、GIS¹⁾を活用して、CO₂濃度マップを集約しCO₂濃度分布図を作成した。各調査日や各測定地点におけるCO₂濃度、風向・風速は異なる様相を示すが、年平均のCO₂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、CO₂基準濃度の分布パターンは、CO₂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。

以上から、本論では、CO₂濃度測定局の定点データ、学校周辺のCO₂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CO₂濃度の動態検証プロセスを明らかにしている。その際、データ解釈の基礎とするのが、その地点の空間代表性が高い濃度が反映されているCO₂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、CO₂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、気象台で収集される気象データと同様に、建物の影響を受けない地上高20 m付近のCO₂濃度調査が必要になる。

その具体的な調査法として、可搬型CO₂濃度測定器を搭載したドローン(DJI社 Matrice 100 (写真6-2-1))を使用したCO₂濃度調査の実施例を以下に示す。

ドローンを使用したCO₂濃度調査に当たっては、地表面でのCO₂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30 m付近(周辺の建物の高さを考慮してドローン調査の高度を30 mと設定)のCO₂濃度測定を同時に行っている。予備調査は、2018年6月26日15時～16時の間で実施し、その様子は写真6-2-2のとおりである。



写真 6 - 2 - 1

ドローン (DJI 社 Matrice 100)



写真 6 - 2 - 2

調査の様子

調査当日の 15 時時点での平均風速は 4.9 m/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 ²⁾。名古屋産業大学に設置している CO₂ 濃度測定局の同時刻の CO₂ 濃度は 408 ppm であった。ドローンでの CO₂ 濃度調査地点は図 6-2-2 の白点のとおりである。地上高 30 m 付近の調査に当たっては , 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 CO₂ 濃度データは , 可搬型 CO₂ 濃度測定器内の SD カードに , 10 秒間隔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 CO₂ 濃度データを抽出した。



図 6 - 2 - 2 ドローンによる CO₂ 濃度調査地点

これらの収集データを利用し , GIS を用いて作成した CO₂ 濃度空間分布図が図 6-2-3 , 図 6-2-4 である。図 6-2-3 は地表面での CO₂ 濃度分布であり , 図 6-2-4 は地上高 30 m 付近での CO₂ 濃度分布である。図 6-2-3 , 図 6-2-4 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 50 m 間隔で測定を行ったためである。

図 6-2-3 の CO₂ 濃度調査結果は , 最大濃度が 419 ppm , 最低濃度が 363 ppm , 平均値は 402 ppm , 測定地点間の CO₂ 濃度の変動幅は 56 ppm であった。図 6-2-4 では , 最大濃度が 407 ppm , 最低濃度が 398 ppm , 平均値は 402 ppm , 測定地点間の CO₂ 濃度の変動幅は

9 ppmであった。地上高 30 m 付近で測定した CO₂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 CO₂濃度分布を示している。

図 6-2-5 は、CO₂濃度データ検索システムから算出した 6 月の CO₂安定濃度と、CO₂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 CO₂基準濃度の日変化を示したものである。15 時時点の CO₂安定濃度は 403 ppm、風速は 4.8 m/s、同様に CO₂基準濃度は 401 ppm、風速は 5.0 m/s であった。地上高 30 m 付近の CO₂濃度分布は、CO₂濃度データ検索システムによる CO₂基準濃度が反映されていることがわかる。つまり、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 CO₂濃度分布を示している。

以上のドローンを用いた調査データからは、地域環境評価の基礎となる CO₂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。このため、ドローンを使用した CO₂濃度調査を継続的に実施することで、地域環境評価の基礎となる CO₂濃度の空間分布を明らかにすることができると考えられる。つまり、CO₂基準濃度の空間的広がりを明らかにすることができれば、これを基礎に、地域環境が CO₂濃度に与える具体的な影響を検証することが可能になると考えられる。

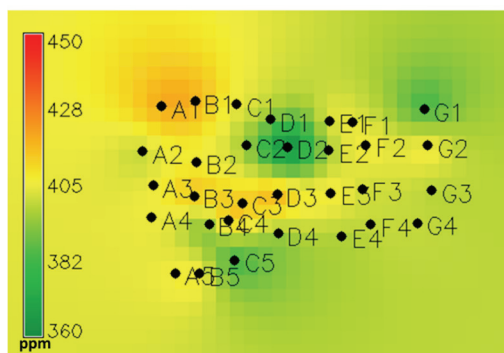


図 6 - 2 - 3
地表面での CO₂濃度空間分布図

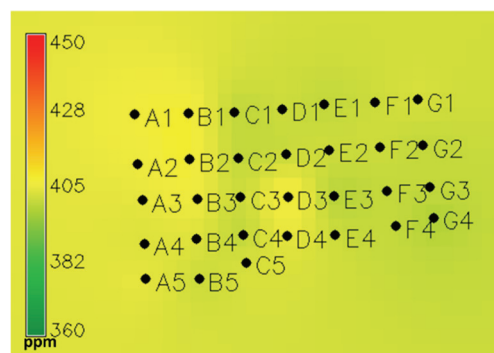


図 6 - 2 - 4
地上高 30 m 付近での
CO₂濃度空間分布図

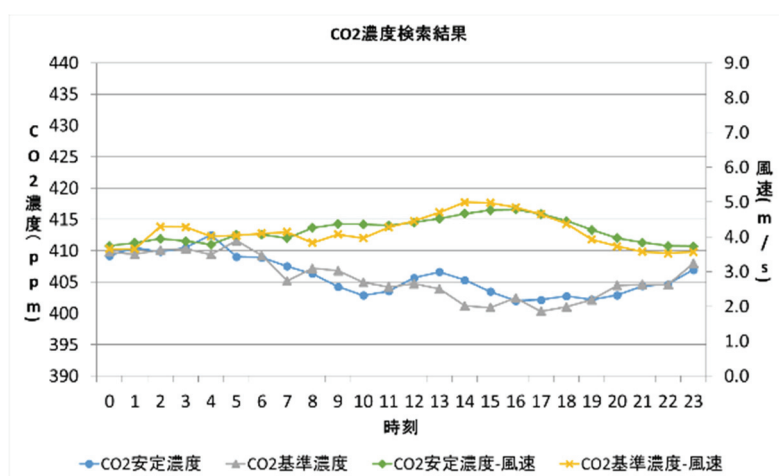


図 6 - 2 - 5 CO₂安定濃度・CO₂基準濃度の特別平均値(6月)

6 - 2 - 2 スパイラル学習の教育効果の検証に向けて

次に、スパイラル学習の教育効果の検証方法の明確化であるが、探究的な学習では、「課題設定」、「情報収集」、「整理分析」、「まとめ・表現」の4つのプロセスを繰り返す(図6-2-6)。本論では、探究的な学習プロセスを繰り返すことを考慮した学習指導計画を作成しているものの、教育効果については、4時間の環境教育プログラムを一通り体験した後の効果进行评估しており、スパイラル学習の評価には至っていない。

このため、今後は、スパイラル学習の教育効果の評価方法を具体化していく必要がある。

表6-2-1は、スパイラル学習の教育効果を検証するための学習到達度自己評価シートの作成例である。生徒は、まず、これまでのグループ活動の概要や、その中での自分自身の取組、またこれまでの調査や学習でわかったこと、今後の学習課題を記入する。次いで、各学習目標に対して、生徒自身がどこまで到達できたかを3段階で評価するルーブリックによる学習到達度の評価表(表6-2-2)を用いて、各学習目標に対して自己評価する。これを継続的に実施することで、生徒は学習活動に対する理解と、次回の学習活動に向けた改善点や課題を振り返ることが可能となり、探究的な学習プロセスに基づいた学習到達度の評価が可能となると考えられる。

この自己評価シートは、現在、1年間を通じて、CO₂濃度と地域環境との関係性を探究する学習活動を継続的に実施している高等学校に適用しており、今後、その検証を通じて、スパイラル学習の教育評価の有効性を明らかにしていくことが必要とされる。

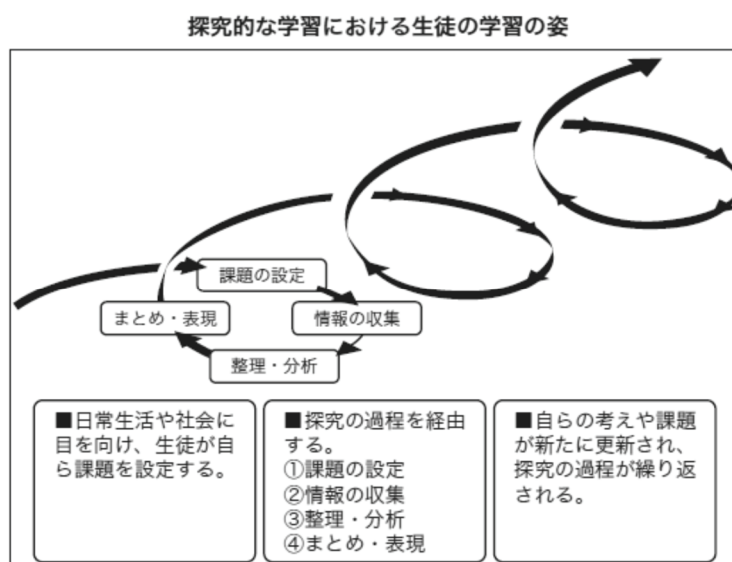


図 6 - 2 - 6 探究的学習におけるプロセス
(「学習指導要領解説 総合的な学習の時間編」³⁾から)

表 6 - 2 - 1 学習到達度自己評価シート

名古屋産業大学環境教育研究プロジェクト

名古屋産業大学環境教育研究プロジェクト

記入日 年 月 日

学習到達度自己評価シート

学校名	学年	名前
-----	----	----

1. 学校周辺のCO₂濃度調査に基づく環境学習の概要を記入してください。
 1-1 これまでのグループ活動の概要と、その中で自分の自身の取り組みを整理して記入してください。

1-2 これまでの調査や学習で分かったことを記入してください。

1-3 今後の学習課題を記入してください。

2. 学習到達度評価基準(別紙)に沿って、これまでの学習を自己評価し、学習目標に対して当てはまると思う項目に一つ〇印を付けてください。

学習目標	自己評価		
	1	2	—
①	1	2	—
②	1	2	3
③	1	2	3
④	1	2	3
⑤	1	2	3
⑥	1	2	3
⑦	1	2	3
⑧	1	2	3
⑨	1	2	3

3. これまでの学習に対する感想や、学習を通して分かったことなどを自由に記入してください。

表 6 - 2 - 2 学習到達度評価基準表

名古屋産業大学環境教育研究プロジェクト

学習到達度評価基準表

探究的な学習におけるプロセスとの対応関係	評価基準		
	1	2	3
【課題設定】	<p>① 調査課題（テーマ）を設定することができた。</p> <p>② 学校周辺のCO₂濃度調査で測定に必要な技能を身に付けることができた。</p> <p>③ 学校周辺のCO₂濃度調査を、生徒同士で協力して行うことができた。</p>	<p>調査課題を設定することができ、その課題に対する仮説や調査項目を1つ設定することができた。</p> <p>測定に必要な技能を身に付けることができた。</p> <p>測定器の濃度校正など測定準備についても自分で行うことができた。</p> <p>学校周辺のCO₂濃度調査を、生徒同士で協力して行うことができた。</p> <p>グループの一員として積極的に活動することができた。</p>	<p>調査課題を設定することができ、その課題に対する仮説や調査項目を複数設定し、結果を比較することができた。</p> <p>—</p> <p>学校周辺のCO₂濃度調査を、生徒同士で協力して行うことができ、「自分には何ができるか」を考えて主体的に活動することができた。</p>
【情報収集】	<p>④ CO₂濃度測定局のデータを検索で、CO₂濃度測定局のデータを検索することができた。</p> <p>⑤ CO₂濃度マップを作成し、解釈することができた。</p>	<p>CO₂濃度測定局のデータを検索することができ、自分なりに検索条件を変えて検索することができた。</p> <p>CO₂濃度マップを作成し、解釈することができた。</p>	<p>CO₂濃度測定局のデータを検索し、自分なりに検索条件を変えて検索することができ、さらに検索した情報を整理することができた。</p> <p>CO₂濃度マップを作成し、解釈することができ、自分なりの意見や考えを整理し、みんなに伝えたいことを見つけた。</p>

名古屋産業大学環境教育研究プロジェクト

評価基準

探究的な学習におけるプロセスとの対応関係	学習目標		
	1	2	3
【整理分析】	<p>⑥ CO₂濃度測定局のデータを検索で、気象風速、風向、天候とCO₂濃度との関連性を2つ考えることができた。</p> <p>⑦ CO₂濃度マップのデータとCO₂濃度測定局のデータをCO₂濃度測定局の検索データを用いて、気象風速、風向、天候との関連性を考えることができた。</p> <p>⑧ 複数のCO₂濃度マップを整理分析し、まとめることができた。</p>	<p>気象風速、風向、天候とCO₂濃度との関連性を2つ考えることができた。</p> <p>CO₂濃度マップのデータとCO₂濃度測定局の検索データを用いて、気象風速、風向、天候との関連性を考えることができた。</p> <p>複数のCO₂濃度マップを整理・分析し、その結果をまとめることができた。</p>	<p>気象風速、風向、天候とCO₂濃度との関連性を3つ以上考えることができた。</p> <p>CO₂濃度マップのデータとCO₂濃度測定局の検索データを用いて、気象風速、風向、天候との関連性を比較することができ、土地利用との関係性についても考えることができた。</p> <p>複数のCO₂濃度マップを整理・分析し、まとめることができた。</p> <p>類似点・相違点・パターンなどを検討することができた。</p>
	【まとめ・整理】	<p>⑨ 学習した内容をまとめることができた。</p>	<p>グループで学習した内容をまとめることができた。</p> <p>何がどこまでできたか」を整理することができた。</p>

補注

- 1) GIS ソフトウェアとして GRASS を用いた。作図に当たっては、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。
- 2) 気象庁 (2018.8.19 更新) 過去の気象データ検索 . < <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> > , 2018.8.19 参照
- 3) 文部科学省 (2009.12.1 更新) 学習指導要領「生きる力」. 高等学校学習指導要領解説 総合的な学習の時間編 <http://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/micro_detail/_icsFiles/afieldfile/2010/01/29/1282000_19.pdf> , 2018.11.15 参照

謝辞

本研究を進めるにあたり，多くの方に大変お世話になりました。ここに感謝の意を表します。

学部3年生から主査をしていただきました名古屋産業大学大学院環境マネジメント研究科教授 伊藤雅一先生に，甚大なる謝意を表します。卒業論文，修士論文，博士論文まで，私のゆっくりとした成長に長きにわたり忍耐強くご指導をいただきました。私がここまでたどり着くことができたのも，先生のご指導，ご鞭撻のおかげに他なりません。心より感謝いたします。

博士前期課程，博士後期課程の副査を務めてくださいました名古屋産業大学大学院環境マネジメント研究科教授 岡村聖先生には，多くの有益なご指摘とご指導，そして心温まる励ましをいただきました。ここに深く感謝いたします。

予備審査におきまして，名古屋産業大学大学院環境マネジメント研究科教授 石橋健一先生，名古屋産業大学大学院環境マネジメント研究科教授 巢宇燕先生には多様な視点から数々の有益なご指摘とご助言，励ましをいただきました。ここに深く感謝いたします。

これまでの研究過程において数々の有益なご助言をいただきました。名古屋産業大学大学院環境マネジメント研究科の先生方，名古屋産業大学現代ビジネス学部の先生方に深く感謝いたします。

江蘇大学 環境与安全工程学院副教授 鄭敏学先生には GIS ソフトウェアにつきまして数々の有益なご助言，ご指導をいただきました。ここに深く感謝いたします。

株式会社ユードムの皆さまには，CO₂濃度データ検索システムの設計と開発にあたり，多くの有益なご指摘，ご支援をいただきました。ここに深く御礼申し上げます。

研究室の皆さまには，これまでの研究過程においてさまざまな面からご協力をいただきました。ここに深く感謝いたします。

さらに，環境教育を実施するにあたり，ご協力いただきました三重県立久居農林高校，愛知県立緑丘商業高校，国立竹南高級中学，国立苗栗高級農工職業学校，苗栗県立大同高級中学の教員，職員，生徒のみなさま，また関係者の皆さまに感謝とお礼を述べさせていただきます。

最後に，これまで温かく見守っていただき，経済的，精神的にも支えてくれた両親に心から感謝いたします。

付録

学校周辺における CO₂濃度の調査とデータ活用

1 活動のねらい

- ・学校周辺の CO₂濃度を調査し、CO₂濃度の時系列変化や空間分布を理解する。
- ・気象や土地利用、人間生活の影響を受けた CO₂濃度データを活用して、CO₂濃度と都市環境との関係性を探究し、低炭素都市づくりに役立つ環境行動を考える。

2 CO₂の性質と濃度

(1) CO₂の温室効果

- ・CO₂は無色・無臭、不燃性で、空気に比べ約 1.5 倍の重さを持つ。
- ・CO₂は、地上からの放出熱が宇宙へと拡散することを防ぐ「温室効果ガス」として働く。
- ・現在の大気中には、およそ 400 ppm(0.04 %)前後の濃度で CO₂が含まれる。
- ・産業革命以前は 280 ppm の濃度であったと推定されている。
- ・CO₂濃度が増加したのは、主に化石燃料の大量消費が要因と言われている。

(2) グローバルスケールの CO₂濃度

- ・グローバルスケールの CO₂濃度は、地球スケールの長期的な変動を把握するためのデータ。現在、世界各国で観測が行われている。
- ・これらの観測は、厳格な濃度較正やデータ処理等がされている。また、周辺の水平空間を代表する濃度観測をするため、地上約 20 m の高さで観測されている。
- ・グローバルスケールの CO₂濃度は、年々増加傾向にある。2013 年 5 月には、アメリカの観測で 400 ppm を超えた。

(3) 都市域を対象としたローカルスケールの CO₂濃度

- ・その一方で、都市域(学校周辺)の CO₂濃度には、気象や土地利用、人間生活の影響が反映されている。
- ・本講義が対象とするローカルスケールの CO₂濃度は、CO₂の排出源、吸収源を具体的に理解するなど、低炭素都市づくりを目的に、都市域における短期的な変動を把握するためのデータとなる。
- ・日本では、2012 年 8 月に「都市の低炭素化の促進に関する法律」が施行されており、現在、地方自治体においては、都市レベルの CO₂削減に向けて「低炭素まちづくり計画」の策定、実践に取り組まれている。

3 CO₂濃度の調査とデータ処理

(1) CO₂濃度の調査方法

- 各調査ポイントでCO₂濃度、風向、風速を30秒間測定し、最頻値を記録する。

- 調査項目

時刻、 風向、 風速、 CO₂濃度

- 注意事項

- 喋りながら測定をすると、呼吸の影響を受けてCO₂濃度が上がることに注意する。
- 風向風速計の測定方法に注意する。風が向かってくる方向に風向風速計を向ける。

- 調査エリアの設定

- 学校周辺を50mほどの間隔のメッシュで区切り、角マス目の中で調査を行う。
- 調査エリアは1時限(50分)3~4班で回れる範囲。
- 1班あたり最低3名~(CO₂濃度測定係、風向・風速測定係、記録係)



図 調査対象エリア例

(名古屋産業大学周辺・50mメッシュ)

- 測定に必要なもの

- CO₂濃度測定器
- 風向・風速計
- データ記入シート
- 時刻がわかるもの(腕時計など)

(2) CO₂濃度のデータ処理

- CO₂濃度マップの作成方法

- 校庭の中心で測定した基準値を常時測定データの値で補正する。

- 校庭の基準値が380ppmで、常時測定データの値が400ppmであれば、各ポイントで測定したCO₂濃度にそれぞれ20ppm足し算する。

- 測定地点(例:A1であれば上記図の一番左上)のCO₂濃度を各セルに入力する。

- 測定地点の風向、風速を各セルに記入する。

	A	B	C	D	E	F	G
1	384 0.5m/s ↑	398 0m/s	431 0.5m/s ↓	388 0m/s	366 0.5m/s ↘	396 1.0m/s ↗	397 1.0m/s ↑
2	381 0.3m/s ↘	383 0.5m/s ↙	388 1.7m/s ↗	367 1.4m/s ↘	368 0.7m/s ↗	400 0m/s	401 1.2m/s ↑
3	375 0m/s	382 0m/s	390 0.5m/s ↘	377 0.4m/s ↘	373 0.3m/s ↘	399 0.9m/s ↗	398 0.6m/s ↗
4	400 1.2m/s ↘	392 0.7m/s ↘	380 0.6m/s ↘	378 0.6m/s ↓	400 1.0m/s ↘	399 0m/s	398 1.0m/s ↗
5	382 0.9m/s ↘	388 0.7m/s ↘	375 1.2m/s ↑	381 1.4m/s ↘	405 1.3m/s ↘	403 0.7m/s ↘	396 1.0m/s ↗

図 風向、風速を入力したCO₂濃度マップ

	A	B	C	D	E	F	G
1	384 0.5m/s ↑	398 0m/s	431 0.5m/s ↓	388 0m/s	366 0.5m/s ↘	396 1.0m/s ↗	397 1.0m/s ↑
2	381 0.3m/s ↘	383 0.5m/s ↙	388 1.7m/s ↗	367 1.4m/s ↘	368 0.7m/s ↗	400 0m/s	401 1.2m/s ↑
3	375 0m/s	382 0m/s	390 0.5m/s ↘	377 0.4m/s ↘	373 0.3m/s ↘	399 0.9m/s ↗	398 0.6m/s ↗
4	400 1.2m/s ↘	392 0.7m/s ↘	380 0.6m/s ↘	378 0.6m/s ↓	400 1.0m/s ↘	399 0m/s	398 1.0m/s ↗
5	382 0.9m/s ↘	388 0.7m/s ↘	375 1.2m/s ↑	381 1.4m/s ↘	405 1.3m/s ↘	403 0.7m/s ↘	396 1.0m/s ↗

図 CO₂濃度マップ作成例

- ・ CO₂ 濃度が入力されたセルを範囲選択し、エクセルの機能を使用して濃度の色づけを行う。
- ・ この状態で、エクセルのホームタブ→条件付き書式をクリックし、赤、黄、緑のカラースケールをクリックする。
- ・ CO₂ 濃度マップに色づけがされる。濃度が高い箇所は赤色、中間は黄色、低い箇所は緑色となる。



図 条件付き書式の選択画面

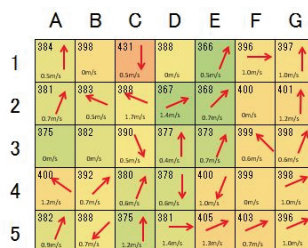


図 色づけがされた CO₂ 濃度マップ

4 CO₂ 濃度測定局のデータ処理

(1) CO₂ 濃度測定局の収集データ

- ・ CO₂ 濃度測定局で収集されるデータには、CO₂ 濃度、温度、湿度、気圧がある。
- ・ データは 3 秒に 1 回測定され、1 日ごとにエクセルで閲覧できるファイルにまとめられる。

(2) CO₂ 濃度のデータ処理

- ・ データベースの作成方法
 - ・ CO₂ 濃度データ検索システムのデータベース作成機能を使用する。
 - ・ 必要なもの：CO₂ 濃度測定局からのデータ（1 日ごとの csv ファイル）、最寄りの気象台からの 10 分ごとの気象データ
- ・ フローチャートに沿ってデータ処理を行う。

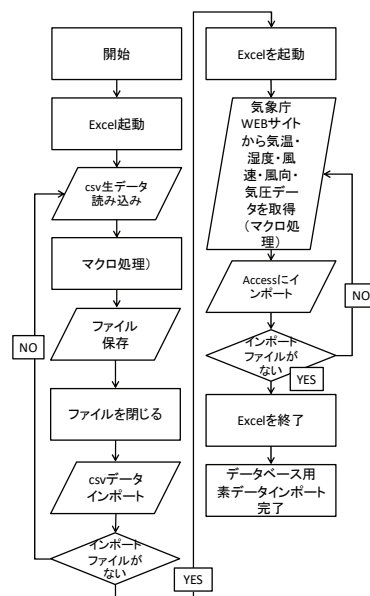


図 データベース作成フローチャート

(3) CO₂ 濃度データ検索システムの活用方法

- ・ CO₂ 濃度データ検索システムでは、期間を区切って CO₂ 濃度の日変化をみることができる。
- ・ また、上記に加え、気象別に条件をつけ、CO₂ 濃度の日変化をみることができる。
- ・ 上記を組み合わせて、年別のあるいは月別の CO₂ 濃度変化をみること、CO₂ 濃度の季節変動をみることができる
- ・ 気象別にみること、風速や風向、天候が CO₂ 濃度変化に与える影響を考察する。

- ・例：過去の7月の、CO₂濃度、風速の日変化が知りたいときは、CO₂濃度→特定月を選択→全期間を選択→7月を選択し、グラフ作成をクリックする。

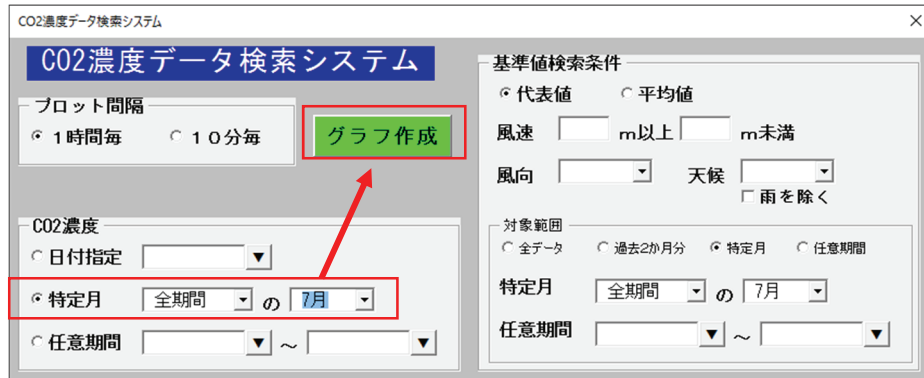


図 CO₂濃度検索システム 検索条件設定例

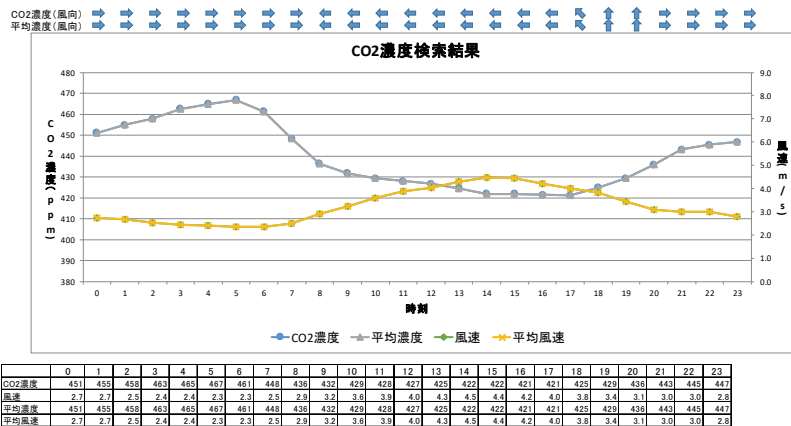


図 CO₂濃度検索システム 検索結果

5 データ解釈の基礎

(1) 学校周辺で測定される CO₂濃度

CO₂濃度の実測データ

- ・学校周辺で測定される CO₂濃度は、気象や土地利用、人間生活の影響を受け、複雑かつ多様に化する。

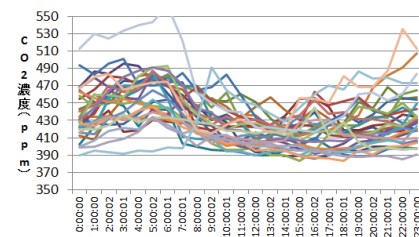


図 学校周辺における CO₂濃度の日変化

CO₂濃度の成分

- ・学校周辺で測定される CO₂濃度は、地球成分、地域成分、変動成分によって構成される。地球成分及び地域成分は CO₂濃度に安定的な影響を与え、変動成分は CO₂濃度に一時的、局所的な影響を与える。

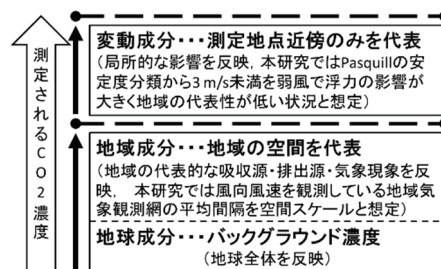


図 学校周辺で測定される CO₂濃度の成分

CO₂ 濃度の日変化

- CO₂ 濃度の特別平均値は、一定の日変化パターンを示し、季節変化が見られる。CO₂ 濃度の変動幅(日間の最大値と最小値の差)は、植物活動の影響等を受け、春から夏にかけて拡大し、夏から翌春にかけて縮小する。

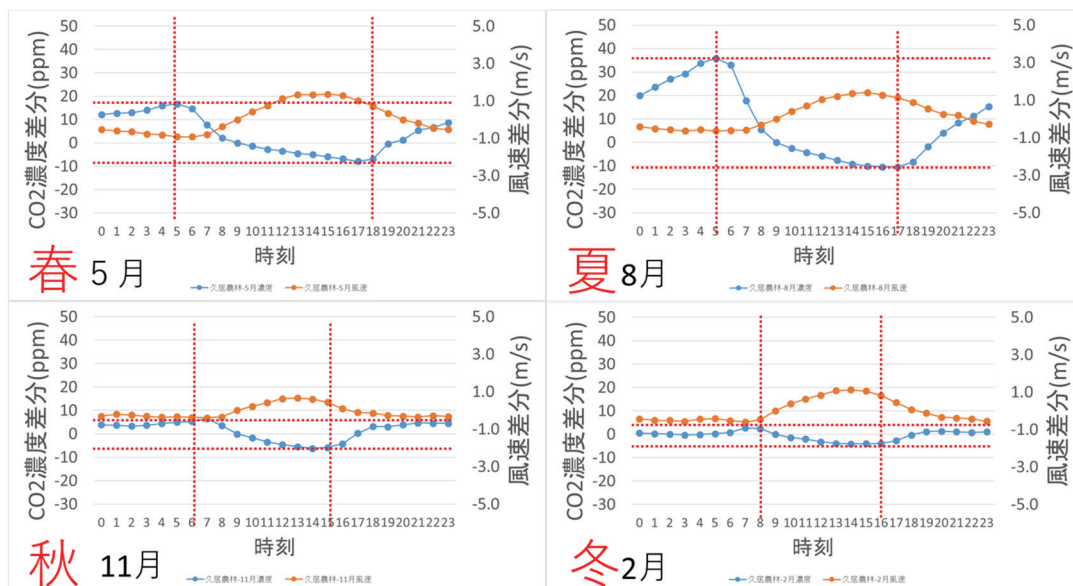
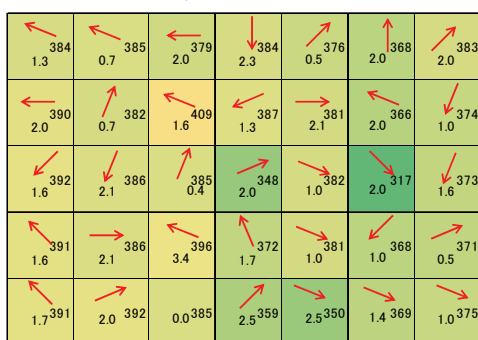


図 CO₂ 濃度特別平均値 (四季)

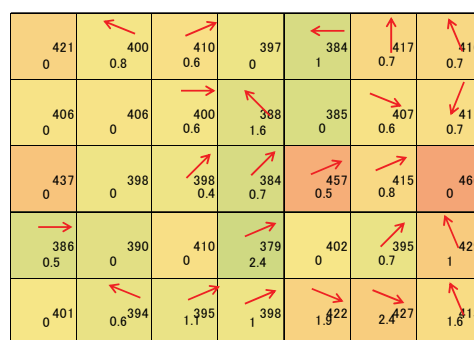
(2) CO₂ 濃度に影響を与える地域的要因

風速の影響

- 近傍の気象台の観測標準に基づく風速が CO₂ 濃度に基本的な影響を与える。地表面で測定される風速は、建物等によって不規則な変化を示し、CO₂ 濃度に付随的な影響を与える。
- 風速が強くなるほど、大気拡散の影響を受けて CO₂ 濃度は低減し、より安定的な日変化を示す。



9月11日 基準値：385 ppm



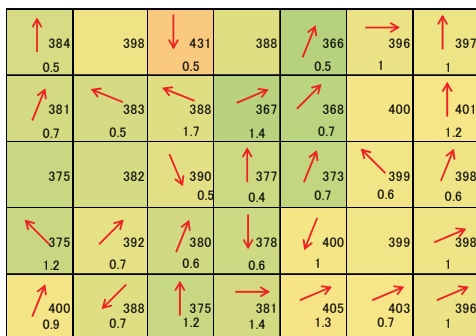
10月16日 基準値：398 ppm

天気：晴れ 風速：7.2 m/s 風向：西北西 天気：晴れ 風速：1.3 m/s 風向：北

図 風速の影響 (風速 7.2 m/s と 1.3 m/s)

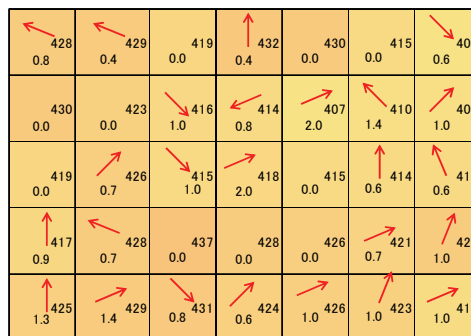
風向の影響

- ・風速が強い時の CO₂ 濃度は主に風速の影響を受けるが、風速が弱い時は、風速の影響に加え、風向の影響を受けやすくなる。
- ・CO₂ は風の影響を受けて空間を移動し、風上の土地利用や人間生活の影響によって CO₂ 濃度は異なる様相を示す。



5月8日 基準値：390 ppm

天気：晴れ 風速：1.9 m/s 風向：北北西



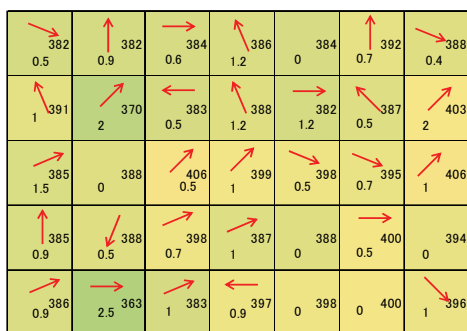
10月23日 基準値：412 ppm

天気：晴れ 風速：2.4 m/s 風向：南南東

図 風向の影響（北北西と南南東）

天候の影響

- ・晴天時は、日射による気流発生(風速の増加)と、植物活動による CO₂ 吸収量の増加等により、曇天時、雨天時と比べて CO₂ 濃度が低くなる傾向を示す。



3月4日 基準値：406 ppm

天気：晴れ 風速：1.5 m/s 風向：北



8月21日 基準値：420 ppm

天気：曇り 風速：1.5 m/s 風向：北北西

図 天候の影響（晴れと曇り）

(3) CO₂ 濃度のデータ解釈と探究的な学習活動

- ・上記(1)～(2)を踏まえ、各教科で学んだ知識を活用して CO₂ 濃度のデータ解釈を行う。
- ・学校周辺の代表的な排出源、吸収源に着目して、CO₂ 濃度と都市環境との関係性を探究する。
- ・CO₂ 濃度の実測データから低炭素都市づくりに役立つ環境行動を考える。

學校周邊的 CO₂ 濃度調查與其數據的活用

1 課程目標

- 調查學校周邊的 CO₂ 濃度，並了解 CO₂ 濃度的時間序列變化和空間分布。
- 活用受到氣象和土地利用、人類活動所影響的 CO₂ 濃度數據，探討、尋求 CO₂ 濃度與都市環境間的關係，並思考對創造低碳社會有利的環境行動。

2 CO₂ 的性質與濃度

(1) CO₂ 溫室效應

- CO₂ 是無色、無味、不助燃，比空氣約重 1.5 倍的氣體。
- CO₂ 作為「溫室效應氣體」之一，防止從地表所放出的熱能擴散到宇宙。
- 現在的大氣中 CO₂ 濃度約為 400 ppm(0.04 %)左右。
- 學者們推測工業革命以前，CO₂ 濃度約為 280 ppm。
- 一般認為造成 CO₂ 濃度增加的最主要的原因是礦石燃料的大量使用。

(2) 全球性的 CO₂ 濃度

- 全球性的 CO₂ 濃度是，為了掌握地球規模的 CO₂ 濃度長期變動之數據。現在，在世界各國都在進行 CO₂ 濃度的觀測。
- 在各地的觀測站，都有對 CO₂ 濃度進行嚴格的濃度校正或數據處理。此外，為了觀測周邊水平空間的 CO₂ 濃度，在離地面約 20 m 的高度，進行 CO₂ 濃度的觀測。
- 全球規模的 CO₂ 濃度有逐年增加的趨勢。在 2013 年 5 月，在美國觀測的 CO₂ 濃度已超過 400 ppm

(3) 以都市地區為對象的地區性 CO₂ 濃度

- 另一方面，都市地區（學校周邊）的 CO₂ 濃度則反映出，受到氣象或土地利用、人類活動的影響。
- 作為本課程主要對象的地區規模 CO₂ 濃度是為了，創造低碳社會的目的，對 CO₂ 的排放源與吸收源進行具體的理解，並掌握其都市地區短期變動的數據。
- 日本在 2012 年 8 月實施了「推動都市低碳化的相關法律」，現在地方的自治團體針對都市規模的 CO₂ 削減，策劃並努力推動「創造低碳社會計畫」的實踐。

3 CO₂ 濃度調查與其數據處理

(2) CO₂ 濃度的調查方法

- 在各調查地點，以每 30 秒一次測量 CO₂ 濃度、風向、風速，並記錄最頻繁顯示的數值。

- 調查項目

時間、風向、風速、CO₂ 濃度

- 注意事項

- 一邊說話一邊測量的話，可能會造成二氧化碳濃度的上升。
- 注意風向風速計的測量方法，風向風速計要朝著風吹來的方向。

- 調查範圍的設定

- 學校周邊的地圖，以 50 m 左右為間隔距離畫一格做切割，在每一個格子中進行調查。
- 調查範圍以 1 節課(50 分)，3~4 組能輪流調查的範圍為準。
- 每 1 組最少 3 名以上的學生(負責測量 CO₂ 濃度的人、測量風向風速的人跟記錄的人)。

- 測量所需的設備

- CO₂ 濃度測量器
- 風向・風速計
- 填寫數據的用紙
- 能知道時間的物品(例如手錶等)



(名古屋産業大學周邊・50 m 為 1 格)

(2) CO₂ 濃度的數據處理

- CO₂ 濃度地圖的製作方法

- 使用恆時測量數據，補正在校園的中心測量所得基準值的誤差。
- 例如，校園內的基準值為 380 ppm，恆時測量數據的數值為 400 ppm 的話，則在各個地點所測量出的 CO₂ 濃度將須對個數值加上 20 ppm。
- 在各框格裡輸入測量地點(例如：A1 為上圖的最左上角)的 CO₂ 濃度。
- 在各框格裡輸入測量地點的風向、風速。

	A	B	C	D	E	F	G
1	384 0.5m/s ↑	398 0m/s	431 0.5m/s ↘	388 0m/s	366 0.5m/s ↘	396 1.0m/s →	397 1.0m/s ↑
2	381 0.5m/s ↘	383 0.5m/s ↘	388 1.2m/s ↘	367 0.5m/s ↘	368 0.2m/s	400 0m/s	401 1.2m/s ↑
3	375 0m/s	382 0m/s	380 0.5m/s ↘	377 0.4m/s ↑	373 0.2m/s	399 0.6m/s ↘	398 0.6m/s ↘
4	400 1.2m/s ↘	392 0.7m/s ↘	380 0.6m/s ↘	378 0.6m/s ↘	400 1.0m/s ↘	399 0m/s	398 1.0m/s ↘
5	382 0.5m/s ↘	388 0.7m/s ↘	375 1.2m/s ↘	381 1.4m/s ↘	405 1.3m/s ↘	403 0.7m/s ↘	396 1.0m/s ↘

圖 輸入了風向、風速的 CO₂ 濃度地圖

- 選擇有輸入 CO₂ 濃度的全部範圍，使用 EXCEL 的功能，依據濃度高低進行上色動作。

- 在全選的狀態下，EXCEL 的「常用」標籤→點選條件書式，再點選設定格式化的條件裡的紅色、黃色、綠色樣式。

- 為 CO₂ 濃度地圖著上顏色。濃度高的框格塗上紅色、中間塗上黃色、濃度低的地方塗上綠色。

	A	B	C	D	E	F	G
1	384 0.5m/s ↑	398 0m/s	431 0.5m/s ↘	388 0m/s	366 0.5m/s ↘	396 1.0m/s →	397 1.0m/s ↑
2	381 0.5m/s ↘	383 0.5m/s ↘	388 1.2m/s ↘	367 0.5m/s ↘	368 0.2m/s	400 0m/s	401 1.2m/s ↑
3	375 0m/s	382 0m/s	380 0.5m/s ↘	377 0.4m/s ↑	373 0.2m/s	399 0.6m/s ↘	398 0.6m/s ↘
4	400 1.2m/s ↘	392 0.7m/s ↘	380 0.6m/s ↘	378 0.6m/s ↘	400 1.0m/s ↘	399 0m/s	398 1.0m/s ↘
5	382 0.5m/s ↘	388 0.7m/s ↘	375 1.2m/s ↘	381 1.4m/s ↘	405 1.3m/s ↘	403 0.7m/s ↘	396 1.0m/s ↘

圖 CO₂ 濃度地圖的製作例子

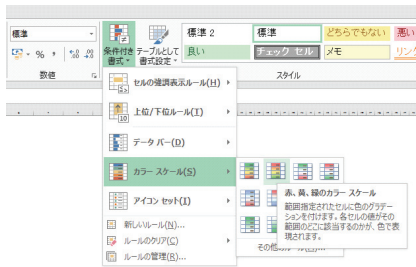


圖 格式化的條件的選擇畫面

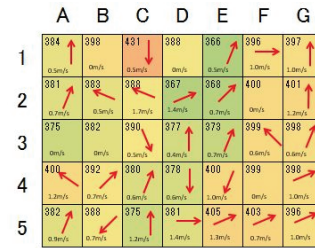


圖 著上色的 CO₂ 濃度地圖

4 CO₂ 濃度測量站的數據處理

(1) CO₂ 濃度測量站的收集數據

- 在 CO₂ 濃度測量站所收集到數據裡，有 CO₂ 濃度、濕度、氣壓之數據。
- 數據是以 3 秒為 1 次測量記錄，並以 1 天為單位收錄在資料夾，可以在 EXCEL 裡閱覽。

(2) CO₂ 濃度的數據處理

- 數據庫的作成方法
 - 使用 CO₂ 濃度數據搜尋系統的數據庫製作功能。
 - 需要的數據：CO₂ 濃度測量局的數據(每天的 csv 資料夾)、最靠近當區的氣象局所測的氣象數據(每 10 分鐘一次)
 - 按照流程進行數據處理步驟。

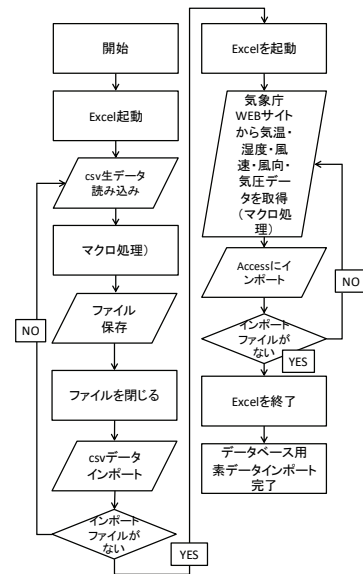


圖 製作數據庫的流程

(3) CO₂ 濃度數據搜尋系統的運用方法

- CO₂ 濃度數據搜尋系統能區分時間，可以查看 CO₂ 濃度的晝夜變化。
- 另外，上記的功能外，加入氣象條件的話，可以查看其條件下 CO₂ 濃度的晝夜變化。
- 上記の組合，以年為單位或者以月為單位查看 CO₂ 濃度的話，可以了解 CO₂ 濃度的季節變化。
- 加入氣象條件的話，能觀察風速與風向、氣候對 CO₂ 濃度所造成的影響。
- 例如：想知道過去 7 月份的 CO₂ 濃度、風速之晝夜變化的話，CO₂ 濃度→選擇特定月份→選擇全期間→點選「作成圖表」。

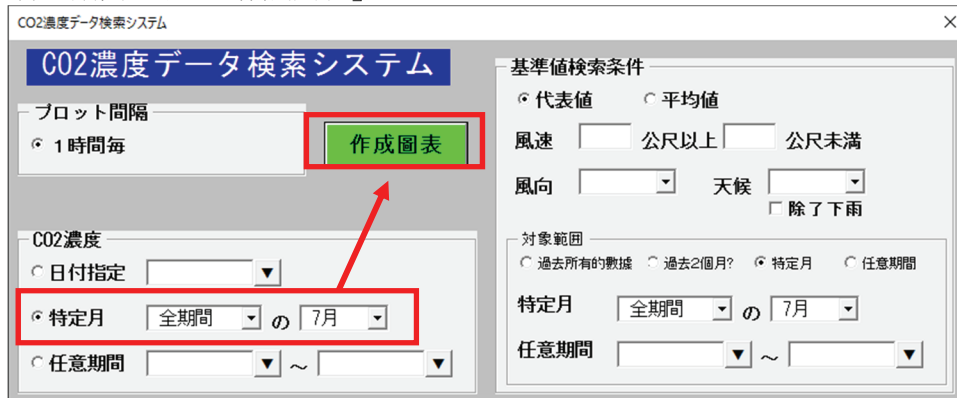


圖 CO₂ 濃度搜尋系統 設定搜尋條件之範例

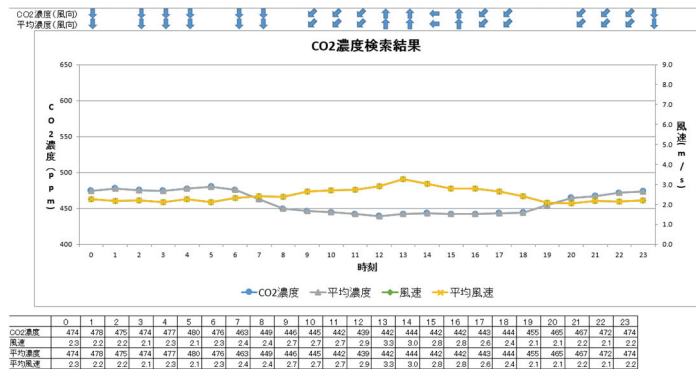


圖 CO₂濃度搜尋系統 搜尋結果

5 數據解釋的基礎

(1) 在學校周邊所測量的 CO₂ 濃度

CO₂ 濃度的實際測量數據

- 在學校周邊所測量的 CO₂ 濃度，因有受到氣候或土地利用、人類活動的影響，所以複雜而多變化。

CO₂ 濃度的成分

- 在學校周邊所測量的 CO₂ 濃度，是由地球成分、地區性成分、變動成分所組成。地球成分以及地區性成分對 CO₂ 濃度的影響是比較安定的，變動成分會帶給 CO₂ 濃度短暫、局部區域的影響。

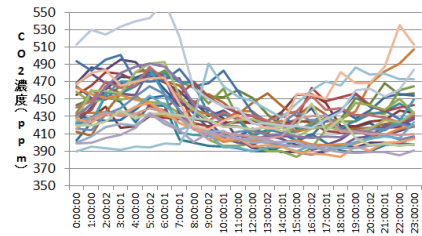


圖 學校周邊的 CO₂ 濃度晝夜變化

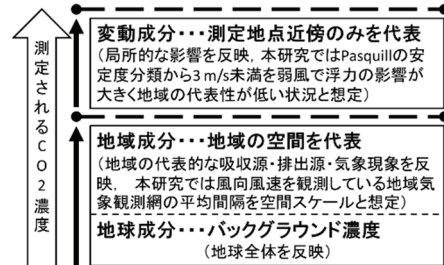


圖 在學校周邊所會測量出的 CO₂ 濃度成分

CO₂ 濃度的晝夜變化

- CO₂ 濃度的時段平均值，可藉由某一時期的晝夜變化，來觀察其季節變化。CO₂ 濃度變動幅度(日間最大值與最小值的差)，因受到植物活動的影響，春天到夏天的會擴大；夏天到隔年春天會縮小。

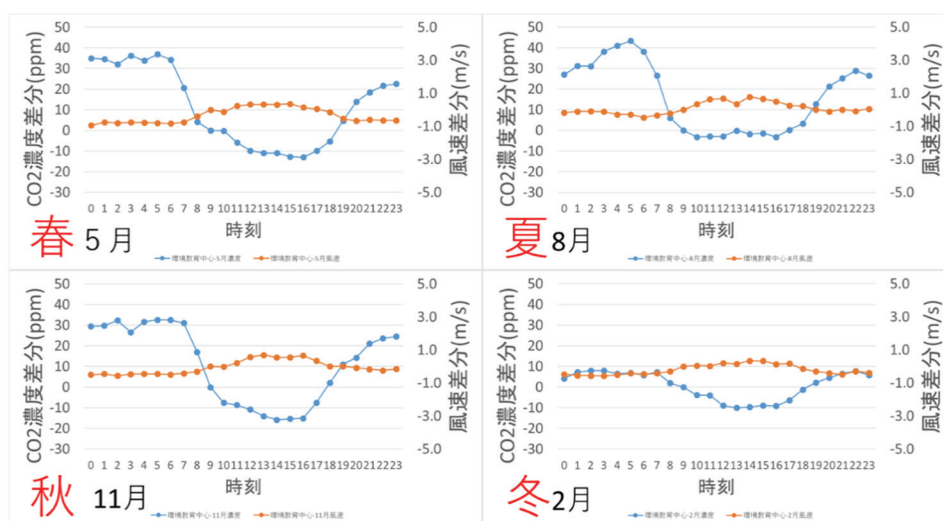
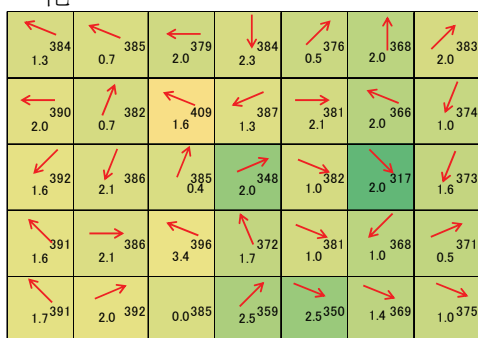


圖 CO₂ 濃度每小時的平均(四季)

(2) 對 CO₂ 濃度造成影響的地區性要因

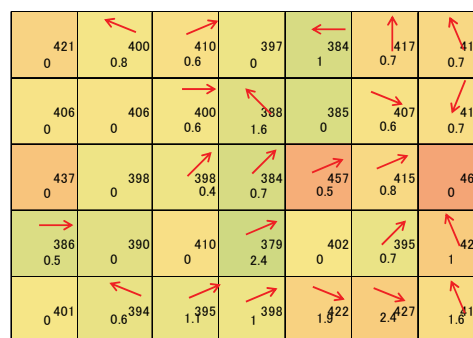
風速的影響

- 根據附近氣象台的觀測標準，風速會對 CO₂ 濃度造成基本的影響。在地面所測出的風速，因建築物等原因，會有不規則的變化，CO₂ 濃度也連帶的受到其影響。
- 風速如果變強的話，因大氣擴散的影響，CO₂ 濃度會降低，顯示出比較安定的晝夜變化。



9月11日 基準值：385 ppm

天氣：晴 風速：7.2 m/s 風向：西北西



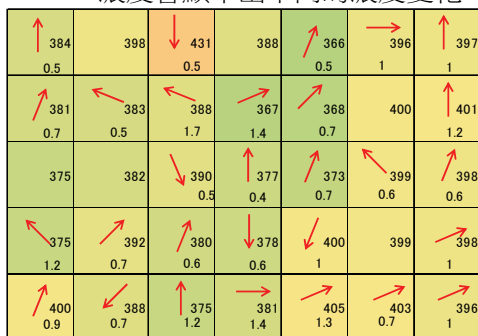
10月16日 基準值：398 ppm

天氣：晴 風速：1.3 m/s 風向：北

圖 風速的影響 (風速 7.2 m/s 和 1.3 m/s)

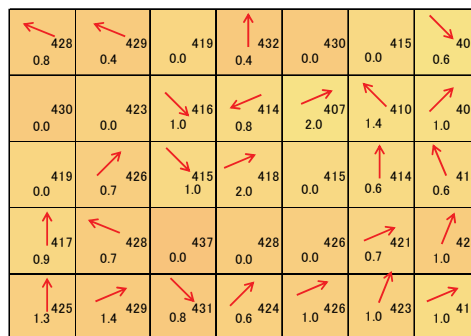
風向的影響

- 風速較強時候的 CO₂ 濃度，主要是受到風速的影響；風速較弱時，除了風速的影響，也容易受到風向的影響。
- CO₂ 是受到風的影響而在空間之中移動，基於上風處的土地利用和人類活動的影響，CO₂ 濃度會顯示出不同的濃度變化。



5月8日 基準值：390 ppm

天氣：晴 風速：1.9 m/s 風向：北北西



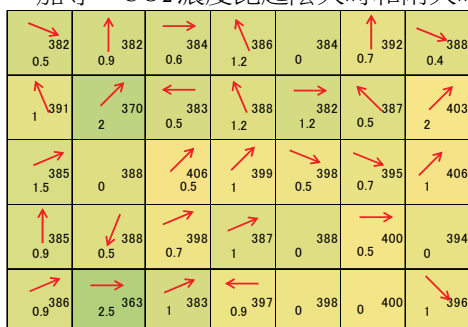
10月23日 基準值：412 ppm

天氣：晴 風速：2.4 m/s 風向：南南東

圖 風向的影響（北北西和南南東）

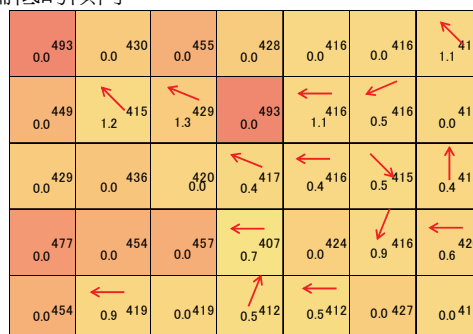
氣候的影響

- 晴天時，因為日照會產生氣流(風速的增加)，以及植物活動的影響造成 CO₂ 吸收量的增加等，CO₂ 濃度比起陰天時和雨天時，會有偏低的傾向。



3月4日 基準值：406 ppm

天氣：晴 風速：1.5 m/s 風向：北



8月21日 基準值：420 ppm

天氣：陰天 風速：1.5 m/s 風向：北北西

圖 天候的影響（晴天和陰天）

(3) 解釋 CO₂ 濃度數據與探求型的學習活動

- 根據上記的(1)~(2)，活用各學科所學到的知識，進行 CO₂ 濃度數據的解釋
- 將焦點放在學校周邊的排放源、吸收源，探求 CO₂ 濃度和都市環境之間的關係性。
- 從 CO₂ 濃度實際測量數據來思考，對創造低碳社會有利的環境行動。

データ解釈シート				
CO ₂ 濃度調査	日時	年月日()、時 00分～時 00分、天候	調査地点	
評価項目	参照データ		調査データ	
			データ解釈の基本的視点	
			備考(作成資料)	
1. CO ₂ 基準濃度	(1)近傍のCO ₂ 濃度測定局の常時測定データ (2)近傍の気象台の気象データ(気温、風向、風速) (3)CO ₂ 濃度検索データ(調査月の特別平均値)	CO ₂ ppm 気温 風向 風速 CO ₂ ppm	<ul style="list-style-type: none"> CO₂濃度の日変化は、午前6時前後から減少し、午後4時前後から増加に転じる。 CO₂濃度には季節変化が見られる。CO₂の変動幅は、春から夏にかけて拡大し、夏から翌春にかけて縮小する。 	CO ₂ 濃度変化パターン図(1)
2. 風速の影響	(1)近傍の気象台の風速データ (2)CO ₂ 濃度マップデータ(測定地点の風速データ) (3)CO ₂ 濃度検索データ(類似した風速時の特別平均値)	風速 m/s CO ₂ ppm	<ul style="list-style-type: none"> 観測標準に基づく風速(気象台で測定される風速)がCO₂濃度に基本的な影響を与える。 地表面で測定される風速は、建物等によって不規則な変化を示し、CO₂濃度に付随的な影響を与える。 風速が強くなると、CO₂濃度の日変化は、CO₂濃度が減少を示す時間帯が短くなり、CO₂濃度の変動幅も大気拡散により縮小する。 	CO ₂ 濃度マップ(1) CO ₂ 濃度変化パターン図(2)
3. 風向の影響	(1)近傍の気象台の風向データ (2)CO ₂ 濃度マップデータ(測定地点の風向データ) (3)地図データ(主な土地利用) (4)CO ₂ 濃度検索データ(類似した風向時の特別平均値)	風向 CO ₂ ppm	<ul style="list-style-type: none"> 観測標準に基づく風向(気象台で測定される風向)がCO₂濃度に基本的な影響を与える。 地表面で測定される風向は、建物等によって不規則な変化を示し、CO₂濃度に付随的な影響を与える。 風上の主な土地利用によってCO₂濃度への影響が異なる。 	CO ₂ 濃度マップ(1) 土地利用図(航空写真) CO ₂ 濃度変化パターン図(3)
4. 排出源の影響	(1)CO ₂ 濃度マップデータ(排出源付近のCO ₂ 濃度、風向・風速) (2)地図データ(主な土地利用)	CO ₂ ppm 風向 風速 m/s	<ul style="list-style-type: none"> 風速が強い場合のCO₂濃度変化は、主に風速が影響する。 一方、風速が弱い場合、風速の影響に加え、風向の影響、特に近傍の排出源の影響を受けやすくなる。 	CO ₂ 濃度マップ(1) 土地利用図(航空写真)
5. 吸収源の影響	(1)CO ₂ 濃度マップデータ(吸収源付近のCO ₂ 濃度、風向・風速) (2)地図データ(主な土地利用)	CO ₂ ppm 風向 風速 m/s	<ul style="list-style-type: none"> 風速が強い場合のCO₂濃度変化は、主に風速が影響する。 一方、風速が弱い場合、風速の影響に加え、風向の影響、特に近傍の吸収源の影響を受けやすくなる。 CO₂濃度の季節変化は、主に陸域の植物活動の影響によるものと推定されており、夏季には吸収源の影響が大きくなり、冬季には影響があまり見られなくなる。 	CO ₂ 濃度マップ(1) 土地利用図(航空写真)
6. 地域環境の影響	(1)CO ₂ 濃度検索データ(類似した気象条件下の特別平均値) (2)CO ₂ 濃度マップデータ(他の調査事例)	CO ₂ ppm 風向 風速 m/s	<ul style="list-style-type: none"> 上記の視点を踏まえて総合的な解釈を行う。 CO₂濃度の過去データの検証や、CO₂濃度マップの比較等を通じて、CO₂濃度と地域環境との関係を探査する。 	CO ₂ 濃度変化パターン図(4)～ CO ₂ 濃度マップ(2)～

數據說明表				
CO ₂ 濃度調查 日期	年 月 日 () 點 分 ~	點 分、天氣	解釋數據的基本要點	
評價項目	參考用數據		調查數據	備註 (資料的作成)
1. CO ₂ 基準濃度	(1)附近的 CO ₂ 濃度測量局的恆時測量數據 (2)附近氣象台的氣候數據(氣溫、風向、風速) (3)CO ₂ 濃度搜尋數據(調查一個月的時段平均值)	CO ₂ ppm 氣溫 風向 風速 CO ₂ ppm	CO ₂ 濃度一日變化為 從上午 6 點前後開始減少,下午 4 點前後開始轉變為增加。 • 看得出來 CO ₂ 濃度會應季節而有所變化。CO ₂ 的變動幅度為,春天開始擴大到夏天,夏天開始到隔年春天會縮小。	CO ₂ 濃度變化模式圖 (1)
2. 風速的影響	(1)附近氣象台的風速數據 (2)CO ₂ 濃度地圖的數據(測量地點的風速數據) (3)CO ₂ 濃度搜尋數據(相似風速的時段平均值)	風速 m/s 風速 m/s CO ₂ ppm	• 以觀測標準為基準的風速(氣象台所測量的風速),會給 CO ₂ 濃度一定程度的影響。 • 在地表測量到的風速,會因建築物等顯示出不規則的變化,CO ₂ 濃度也會跟著有所變化。 • 風速變強的話,CO ₂ 濃度一天的變化也會有所變動。CO ₂ 濃度減少的时间段會變短,CO ₂ 濃度的變動幅度也會隨著大氣的擴散縮小。	CO ₂ 濃度地圖 (1) CO ₂ 濃度變化模式圖 (2)
3. 風向的影響	(1)附近氣象台的風向數據 (2)CO ₂ 濃度地圖的數據(測量地點的風向數據) (3)地圖數據(主要的土地利用) (4)CO ₂ 濃度搜尋地圖(相似風向的時段平均值)	風向 風向 CO ₂ ppm	• 以觀測標準為基準的風向(氣象台所測量的風向),會給 CO ₂ 濃度一定程度的影響。 • 在地表測量到的風向,會因建築物等顯示出不規則的變化,CO ₂ 濃度也會跟著有所變化。 • 依上風處主要的土地利用,會給 CO ₂ 濃度不同的影響。	CO ₂ 濃度地圖 (1) 土地利用圖(衛星空拍圖) CO ₂ 濃度變化模式圖 (3)
4. 排放源的影響	(1)CO ₂ 濃度地圖的數據(排放源附近的 CO ₂ 濃度、風向、風速) (2)地圖數據(主要的土地利用)	CO ₂ ppm 風向 風速 m/s	• 風速較強時的 CO ₂ 濃度變化,大多受風速的影響。 • 此外,風速較弱時,會受到風速的影響加上風向的影響外,尤其容易受到周圍排放源的影響。	CO ₂ 濃度地圖 (1) 土地利用圖(衛星空拍圖)
5. 吸收源的影響	(1)CO ₂ 濃度地圖的數據(吸收源附近的 CO ₂ 濃度、風向、風速) (2)地圖數據(主要的土地利用)	CO ₂ ppm 風向 風速 m/s	• 風速較強時的 CO ₂ 濃度變化,大多受風速的影響。 • 此外,風速較弱時,會受到風速的影響加上風向的影響外,尤其容易受到周圍吸收源的影響。 • CO ₂ 濃度的季節變化,推測出主要是受到陸地植物活動的影響。夏天時,吸收源的影響會變大;冬天時,看不大出有什麼影響。	CO ₂ 濃度地圖 (1) 土地利用圖(衛星空拍圖)
6. 區域環境的影響	(1)CO ₂ 濃度搜尋數據(相似氣象條件的時段平均值) (2)CO ₂ 濃度地圖的數據(其他的調查事例)	CO ₂ ppm 風向 風速 m/s	• 引用上記的要點,進行總合解釋。 • 透過 CO ₂ 濃度過去數據的檢證或 CO ₂ 濃度地圖的比較等,探討 CO ₂ 濃度與區域環境的關連。	CO ₂ 濃度變化模式圖 (4) ~ CO ₂ 濃度地圖 (2) ~

日付： _____

名前： _____

1.CO₂基準濃度

2.風速の影響

3.風向の影響

4.排出源の影響

5.吸収源の影響

6.地域環境の影響

日付：_____

名前：_____

1.CO₂基準濃度

2.風速の影響

3.風向の影響

4.排放源的影響

5.吸收源的影響

6.區域環境的影響

CO₂濃度データを活用した環境教育に関するアンケート調査

平成 28 年 7 月

名古屋産業大学環境教育研究プロジェクト

(担当：大学院環境マネジメント研究科 高木祥太)

学校名 () 年 組 (男 ・ 女)

【記入上の注意】

* 回答は、選択肢の番号 (1 . 2 . 3 . . .) を で囲むか、 の中に記入してください。

問1 一連の授業を受けて、あなたは、授業内容に関心を持つことができましたと思いますか。
当てはまる番号一つに をつけてください。

1 . 思う 2 . 少し思う 3 . あまり思わない 4 . 思わない

問2 一連の授業を受けて、あなたは、授業内容を理解することができましたと思いますか。
当てはまる番号一つに をつけてください。

1 . 思う 2 . 少し思う 3 . あまり思わない 4 . 思わない

問3 一連の授業を受けて、あなたは、学校周辺の CO₂濃度調査で測定に必要な技能を身につけることができましたと思いますか。当てはまる番号一つに をつけてください。

1 . 思う 2 . 少し思う 3 . あまり思わない 4 . 思わない

問4 一連の授業を受けて、あなたは、学校周辺の CO₂濃度調査を、生徒同士で協力して行うことができましたと思いますか。当てはまる番号一つに をつけてください。

1 . 思う 2 . 少し思う 3 . あまり思わない 4 . 思わない

問5 一連の授業を受けて、あなたは、CO₂濃度測定局のデータ検索で、CO₂濃度測定局のデータ検索を行うことができましたと思いますか。当てはまる番号一つに をつけてください。

1 . 思う 2 . 少し思う 3 . あまり思わない 4 . 思わない

問 6 一連の授業を受けて、あなたは、CO₂濃度測定局のデータ検索で、気象(風速、風向、天候)と CO₂濃度との関連性を考えることができましたか。当てはまる番号一つに をつけてください。

1. 思う 2. 少し思う 3. あまり思わない 4. 思わない

問 7 一連の授業を受けて、あなたは、CO₂濃度マップを解釈することができたと思いますか。当てはまる番号一つに をつけてください。

1. 思う 2. 少し思う 3. あまり思わない 4. 思わない

問 8 一連の授業を受けて、あなたは、学習した内容をまとめることができましたか。当てはまる番号一つに をつけてください。

1. 思う 2. 少し思う 3. あまり思わない 4. 思わない

問 9 その他、一連の授業についてご意見、ご感想、改善点などありましたらご自由にご記入ください

アンケートは以上です。ご協力誠にありがとうございました。

活用 CO₂ 濃度數據的環境教育之問卷調查表

2016.9

名古屋產業大學環境教育研究計畫

(負責人：研究所環境教育管理研究科 高木祥太)

學校名稱 () 年 班 (男 · 女)

【填寫時的注意事項】

* 回答時，請在所選擇的號碼上畫 ，或者在 中填寫意見。

問3 一整個課程下來，你認為你對課程內容抱持著關心嗎？請選一個相應的號碼畫圈。

1. 認為 2. 有點認為 3. 不怎麼認為 4. 不認為

問4 一整個課程下來，你認為你理解了本次課程內容嗎？請選一個相應的號碼畫圈。

1. 認為 2. 有點認為 3. 不怎麼認為 4. 不認為

問3 一整個課程下來，你認為對於學校周邊的 CO₂ 濃度調查的部分，你學習到測量時所需要的能力了嗎？請選一個相應的號碼畫圈。

1. 認為 2. 有點認為 3. 不怎麼認為 4. 不認為

問4 一整個課程下來，你認為對於學校周邊的 CO₂ 濃度調查的部分，自己有做到小組間的互相合作、進行調查嗎？請選一個相應的號碼畫圈。

1. 認為 2. 有點認為 3. 不怎麼認為 4. 不認為

問5 一整個課程下來，你認為在 CO₂ 濃度測量站的數據搜尋部分，自己對於搜尋 CO₂ 濃度測量站的數據方面是沒問題的嗎？請選一個相應的號碼畫圈。

1. 認為 2. 有點認為 3. 不怎麼認為 4. 不認為

問 6 一整個課程下來，你認為在 CO₂ 濃度測量站的數據搜尋部分，自己對於氣象(風速、風向、天候)和 CO₂ 濃度關連性的思考方面是沒問題的嗎? 請選一個相應的號碼畫圈。

1. 認為 2. 有點認為 3. 不怎麼認為 4. 不認為

問 7 一整個課程下來，你認為自己有做到進行 CO₂ 濃度地圖的解釋嗎? 請選一個相應的號碼畫圈。

1. 認為 2. 有點認為 3. 不怎麼認為 4. 不認為

問 8 一整個課程下來，你認為自己對於本次課程中所學習到內容，能進行統整、總結嗎?請選一個相應的號碼畫圈。

1. 認為 2. 有點認為 3. 不怎麼認為 4. 不認為

問 9 其他，一整個課程下來，如果對於本次課程有任何意見、想法，或有任何需改進的地方等，請自由的填寫。

問卷到此結束，謝謝你的配合。

図一覧

図 1 - 1 - 1	地球全体の二酸化炭素の経年変化	1
図 1 - 1 - 2	CO ₂ 濃度常時測定ネットワークシステム	4
図 1 - 1 - 3	24 時間連続測定結果（設置型 CO ₂ 濃度測定器）	4
図 1 - 3 - 1	論文の構成	10
図 2 - 1 - 1	CO ₂ 濃度マップと 測定時気象条件（2004 年 11 月 22 日）	14
図 2 - 1 - 2	CO ₂ 濃度マップと 測定時気象条件（2004 年 11 月 26 日）	14
図 2 - 1 - 3	日別の CO ₂ 濃度データ	14
図 2 - 2 - 1	データベース化フローチャート	16
図 2 - 2 - 2	測定データテーブル	16
図 2 - 2 - 3	気象庁データテーブル	17
図 2 - 2 - 4	集計データテーブル	17
図 2 - 3 - 1	検索システムフローチャート	18
図 2 - 3 - 2	CO ₂ 濃度データ検索システム	19
図 2 - 3 - 3	CO ₂ 濃度データ検索システムでのアウトプット画面	19
図 2 - 4 - 1	CO ₂ 濃度常時測定データ検索例	20
図 3 - 2 - 1	CO ₂ 濃度測定局の測定地点	22
図 3 - 3 - 1	生活環境圏で測定される CO ₂ 濃度の模式図	23
図 3 - 4 - 1	2011 年における CO ₂ 濃度の日平均値の推移	25
図 3 - 5 - 1	CO ₂ 平均濃度の日変化	27
図 3 - 5 - 2	CO ₂ 安定濃度の日変化	27
図 3 - 5 - 3	月別にみた CO ₂ 平均濃度の日変化	28
図 3 - 5 - 4	月別にみた CO ₂ 安定濃度の日変化	29
図 3 - 6 - 1	1 月の CO ₂ 濃度変化パターン	31
図 3 - 6 - 2	4 月の CO ₂ 濃度変化パターン	31
図 3 - 6 - 3	7 月の CO ₂ 濃度変化パターン	31
図 3 - 6 - 4	10 月の CO ₂ 濃度変化パターン	31
図 4 - 2 - 1	CO ₂ 濃度の測定地点	39
図 4 - 2 - 2	CO ₂ 濃度調査地点周辺の土地利用状況	39
図 4 - 2 - 3	CO ₂ 濃度空間分布図（44 日分）	45
図 4 - 2 - 4	CO ₂ 濃度調査結果（風速の比較）	46
図 4 - 2 - 5	CO ₂ 濃度調査結果（風向の比較）	46
図 4 - 2 - 6	CO ₂ 安定濃度の分布パターン（年平均）	47
図 4 - 2 - 7	CO ₂ 基準濃度の分布パターン（年平均）	47
図 5 - 4 - 1	CO ₂ 濃度調査地点	56
図 5 - 4 - 2	CO ₂ 濃度マップ作成例	57
図 5 - 4 - 3	CO ₂ 濃度データ検索システムの検索結果	57

図 6 - 2 - 1	CO ₂ 濃度の日変化パターン	66
図 6 - 2 - 2	ドローンによる CO ₂ 濃度調査地点	68
図 6 - 2 - 3	地表面での CO ₂ 濃度空間分布図	69
図 6 - 2 - 4	地上高 30 m 付近での CO ₂ 濃度空間分布図	69
図 6 - 2 - 5	CO ₂ 安定濃度・CO ₂ 基準濃度の特別平均値 (6 月)	69
図 6 - 2 - 6	探究的学習におけるプロセス	70

表一覧

表 3 - 3 - 1	風速，日射および空の状態に対応する安定度分類	24
表 3 - 4 - 1	CO ₂ 濃度と気象要素との相関係数	25
表 4 - 2 - 1	CO ₂ 濃度と風速との相関係数	36
表 4 - 2 - 2	風向・風速の発生率と CO ₂ 濃度との関係性	36
表 4 - 2 - 3	発生率の高い風向時の CO ₂ 安定濃度の日変化	38
表 5 - 3 - 1	学習指導計画	53
表 5 - 3 - 2	データ解釈シート作成例（抜粋）	54
表 5 - 5 - 1	学習到達度調査のアンケート項目	60
表 5 - 5 - 2	学習到達度調査の国・地域別集計結果	60
表 5 - 5 - 3	問9 自由記述内容分類例	61
表 5 - 5 - 4	問9 自由記述回答結果	61
表 6 - 2 - 1	学習到達度自己評価シート	71
表 6 - 2 - 2	学習到達度評価基準表	72

写真一覧

写真 6 - 2 - 1	ドローン (DJI 社 Matrice 100)	68
写真 6 - 2 - 2	調査の様子	68