

RF-063 Post-GOSAT時代の衛星からの全球温室効果ガス観測に関する研究

(1) Post-GOSAT時代の衛星からの全球温室効果ガス観測に関する研究に関する研究

独立行政法人国立環境研究所

地球環境研究センター	地球環境データベース推進室	松永恒雄
	陸域モニタリング推進室	小熊宏之
	衛星観測研究室	森野 勇

平成18～19年度合計予算額 19,304千円
(うち、平成19年度予算額 9,307千円)

※上記の合計予算額には、間接経費4,454千円を含む

[要旨]

本研究では、GOSAT（温室効果ガス観測技術衛星、2008年度中に打上げ予定）の運用終了後にあたるPost-GOSAT時代の衛星からの全球温室効果ガス観測のシナリオを作成すると同時に、その実現に必要な技術的課題と解決への展望を示し、Post-GOSAT時代の衛星観測計画策定に資することを目的とした。

炭素収支に関わる研究者らにヒアリング等を実施した結果、a) GOSATと同様の成功基準をより確実にかつより小さいメッシュサイズ及び短い平均時間で達成できる仕様のセンサ／観測と、b) 地域レベルの炭素収支／ポイントソースの評価に利用出来るデータの取得に関する要望がある事が分かった。

また現在世界各国で開発が進められているCO₂用差分吸収ライダ（DIAL）の技術動向を調査し、さらにそのうち日本が国際競争力を持つ1つの方式について、衛星に搭載した場合のリソース検討を行った。その結果、現時点または近い将来に利用可能な技術によりGOSATを上回る性能を実現できる観測シナリオがある事が分かった。

一方 衛星による全球温室効果ガス観測データと二酸化炭素フラックス推定精度の関係をインバースモデル等を用いて評価した既往研究を、特にGOSAT仕様決定後に発表されたものを中心に精査し、その結論を取りまとめた。データ点数が多くなるためランダム誤差の影響は大幅に低減される一方、バイアス誤差の影響が支配的になる事が分かった。また22-分割モデルで0.8ppm、66-分割モデルで1.5ppm程度の二酸化炭素濃度推定精度になる場合、衛星データを単独でインバースモデル解析に利用しても、地上観測データを使った場合と大きくは変わらない事が示唆された。

さらに地域レベル（数十～数百km）の二酸化炭素フラックス推定を地点間の二酸化炭素濃度差観測から行う場合についても検討した。日本の都市域で見られる濃度差の場合には、GOSATでは検出出来ない可能性のある事が示された。一方DIALは十分な精度を持つ事が可能であるが、対象地域によってはDIALが最も高い精度を実現する夜間には濃度差が解消される事が分かった。

[キーワード] GOSAT、二酸化炭素、フーリエ変換分光計、差分吸収型ライダ、ポイントソース

1. はじめに

GOSAT（温室効果ガス観測技術衛星）（科学的背景は井上¹⁾を、衛星／センサに関しては浜崎他²⁾を参照の事。）は、主要な温室効果ガスである二酸化炭素とメタンの全球濃度分布の観測と、全球炭素収支推定精度の改善を目指して2008年度中に打ち上げられる予定の地球観測衛星である。GOSATは環境省、宇宙航空研究開発機構、国立環境研究所の共同プロジェクトとして推進されているが、一方米国航空宇宙局でも同様の衛星（Orbital Carbon Observatory, OCO）の打上げを同時期に予定している。

これらの衛星の運用期間は2008年からの京都議定書の第1約束期間にほぼ対応しているが、2013年以降の同様の衛星開発が正式に承認された国はまだない。一方第2回地球観測サミット（東京、2004年4月）をうけ、総合科学技術会議「地球観測の推進戦略について」（2004年12月）では、「今後10年間に目処に取り組むべき課題・事項」として「全球的な温室効果ガス観測」を取り上げた。このように我が国はGOSAT運用終了後（以下、Post-GOSAT時代）においても、衛星による全球温室効果ガス観測について世界をリードすべき立場にある。

しかしながら、実際の衛星開発に要する期間（日本の場合は通常5年程度）を考えると、GOSATが予定通り上げられた場合には、運用終了予定時期（2013年）／GOSAT後継機打上げまで時間的な余裕が十分にある訳ではない。

そこでこのようなGOSAT及びその後継機を巡る状況を鑑み、本研究ではPost-GOSAT時代の衛星からの全球温室効果ガス観測に求められる事、問題点等を実際のプロジェクト化に先立って実施することとした。なお既往研究の数等の関係で、詳細検討の対象とする温室効果ガスはCO₂に限定した。

2. 研究目的

本課題では、Post-GOSAT時代の衛星からの全球温室効果ガス観測のシナリオを科学的及び政策的要求に基づいて作成すると同時に、その実現に必要な技術的課題と解決への展望を示し、Post-GOSAT時代の衛星観測計画策定に資することを目的とする。具体的には以下の4項目に取り組んだ（ただし取り組む順番は適宜調整した。）。

- (1) Post-GOSAT時代の衛星からの全球温室効果ガス観測に対する要求を明らかにする。
- (2) 要求を実現するための具体的な観測シナリオを複数作成する。
- (3) 個々の観測シナリオを実現するための課題を抽出する。
- (4) 抽出された技術的課題について、その解決の可能性と道筋を検討する。

3. 研究方法

本研究では、

- (1) 関係する研究者等に対するヒアリング、検討会等により、Post-GOSAT時代の衛星による全球温室効果ガス観測に関する要求、要望を把握する。
- (2) 現行のGOSATの観測方式であるフーリエ変換分光計による温室効果ガス観測の精度や問題点についてはGOSATにおける各種検討結果を調査・参照する。
- (3) 将来の利用が期待されている二酸化炭素計測法の一つである差分吸収ライダー (DIAL) については、国内外の研究グループからの情報を適宜収集する事に加えて、実際に衛星搭載する場合のリソース等に関する机上検討を行う。
- (4) インバースモデルを用いた炭素吸収排出量分布推定と衛星観測の関係については、GOSATの他、米国OCO、ESA/SCIAMACHY等における各種検討結果を調査・参照する。また国立環境研究所GOSATプロジェクトのモデルグループの協力を適宜得る。
- (5) 上記1) で新たに提案された都市域等の地域レベル (数十～数百km) / ポイントソースの二酸化炭素吸収排出量推定については、国内の地方自治体による二酸化炭素観測結果を精査した上で、具体的な観測方法について検討を行う。

という方法で研究を進めた。

4. 結果・考察

- (1) Post-GOSAT時代における衛星からの全球温室効果ガス観測に関する要求・要望について

Post-GOSAT時代における衛星からの全球温室効果ガス観測に関する要求・要望については、国立環境研究所内外及び関連学会の研究者等のヒアリング・会議等に基づいて取りまとめた。

まず国立環境研究所GOSATプロジェクトからは、現状のGOSATの成功基準*またはそれをやや厳しくした基準を確実に達成できる観測が強く求められた。特に現在の基準は時間、空間的な平均範囲を広くしてあるため、相対精度要求自体は満たせても、その他の要因 (バイアス成分や実際の二酸化炭素濃度分布の変動等) により二酸化炭素フラックスの推定精度が十分に改善されない恐れがある。このため、より狭いメッシュ、より短い期間での二酸化炭素気柱量推定精度目標の実現が求められた。

さらにGOSATサイエンスチームのチーフサイエンティストを務める井上¹⁾は、GOSATの問題点 / GOSAT後継機に期待する点として以下を上げた。

- ・ 亜酸化窒素やハロゲン化炭化水素は空間的な不均一性が小さく、地上の測定でも南北半球の差しか測定出来ていない。従って将来的にも衛星観測のターゲットとならない。
- ・ 二酸化炭素やメタン (湿地やパイプラインからの漏洩等) の発生源の区別には他の大気微

量成分の測定が重要である。たとえば燃焼では一酸化炭素や一酸化窒素を同時に排出するケースが多く、同時に測定できれば大気化学だけではなく、行政的にも重要な情報になる。

- ・インバースモデルの計算結果をより強く拘束するためには、高度分布の情報が重要である。しかし技術的に難しい課題であるので、実現まで時間がかかるだろう。
- ・観測の空間分解能を上げ、雲のないところの観測を行う事により、データの質と頻度を大きく向上させる。
- ・炭素循環の年々変動を見るにはGOSATの5年の寿命では十分とは言えず、少なくとも10年の観測を継続する事が重要である。
- ・森林火災による炭素放出は地球規模の炭素循環にとっても重要であるが、その発生量は森林側の焼失量データに頼っている。これに対しGOSAT観測により森林火災や東京首都圏のような大きな点発生源の風上と風下での濃度差が得られればさらに排出量も算定できる可能性がある。

国立環境研究所内の議論では、インバースモデル関係者や排出インベントリ作成関係者から、国別収支の推定または国別収支に関する既存の統計データの検証に資するデータの取得の要望が出た。後者については、2005年に入江ほか³⁾が発表したGOMEデータの解析例*に相当するイメージであった。さらに空間分解能やその他の観測条件が許せば大都市圏や森林火災といった比較的大きなポイントソースからの排出量推定につながる観測への希望もあった。

また大気化学に関する研究者で構成されている「大気化学研究会」内に設置された「大気環境観測衛星検討会」では、アジア地域の大气汚染、特に時間的な変化の激しい現象・大気成分に着目し、静止気象衛星からの観測を強く主張している***。またGOSAT後継機についても、温室効果ガス観測を柱としながらも、他の関連する大気組成観測機能を加える事が望ましいという意見もあった。

*：GOSATの成功基準の概要を以下にまとめる。

- | | |
|----------|--|
| ミニマムサクセス | <ul style="list-style-type: none"> ○雲・エアロソルの影響のほとんどない条件において、SWIRで1000kmメッシュ、3ヶ月平均相対精度1%程度で、CO₂気柱量の陸域測定ができる。 ○二酸化炭素の吸収排出量の亜大陸規模での年当り推定誤差を低減できる。 |
| フルサクセス | <ul style="list-style-type: none"> ○雲・エアロソルの影響のほとんどない条件において、SWIRの1.6 μm、2.0 μm帯で、SNRが300以上で観測できる。 ○雲・エアロソルの影響のほとんどない条件において、SWIRのサングリント観測またはTIRの10または15 μm帯で、SNRが300以上で海域を観測できる。 ○そのデータからCO₂気柱量を、1000kmメッシュ、3ヶ月平均相対精度1%以下で算出できる。また、CH₄気柱量を、1000kmメッシュ、3ヶ月平均相対精度2%以下で算出できる。 ○CO₂の吸収排出量の亜大陸規模での年当りの推定誤差を半減できる。 |

**：中国が公表している燃料消費統計から算出したNO₂発生量に比べて、GOME(Global Ozone Monitoring Experiment：欧州宇宙機関が運用しているERS-2衛星に搭載された大気化学センサ。)による中国におけるNO₂濃度が高いため、公表された統計データは現状を過小評価している可能性が指摘された。

**大気化学研究会が発行しているパンフレット等

「大気環境観測衛星の実現へ向けて」（2007年3月発行）

<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/ste-www1/div1/taikiken/eisei/eisei1.pdf>

「静止大気環境衛星の実現を目指して」（2008年3月発行）

<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/ste-www1/div1/taikiken/eisei/eisei2.pdf>

(2) インバースモデルを用いた全球CO₂フラックス推定

まず1) でインバースモデルによる地表面CO₂フラックス推定について、概観する。さらに2) 以降で衛星データの精度等とフラックス推定精度改善の関係について、主要論文毎にその結論をまとめる。

1) インバースモデルと衛星データについて

二酸化炭素収支問題におけるインバースモデル計算とは、大気中の二酸化炭素の分布及びその時間変化を生み出すような地表面二酸化炭素フラックスを大気輸送モデル計算を用いて逆推定する一連の計算処理の事である。インバースモデル計算の出発点となる大気中の二酸化炭素の分布及びその時間変化自体は、地上観測点における二酸化炭素濃度データや各種地表面二酸化炭素フラックスモデルの計算結果と大気輸送モデルから得る事が多いが、地上観測点の不足及び不均一な分布が最終的な二酸化炭素収支推定精度を落としている事が指摘されている。

このため昨今では、大気中の二酸化炭素濃度の衛星観測値をインバースモデル計算に入力するとどの程度フラックス推定精度が改善されるか、またはフラックス推定精度を改善するにはどのような衛星観測が必要か等の検討が盛んに行われている。

ここではGOSATに焦点をあてた最新のMaksyutovらの成果⁴⁾を中心に、インバースモデル計算による二酸化炭素フラックス推定精度と衛星データの関係に関する知見をまとめ、その上でPost-GOSAT時代の衛星観測に対する要求を提案する。なおCO₂以外の気体については十分な数の既往研究がないため、検討は行わなかった。

2) Maksyutov et al.(2008)⁴⁾およびMaksyutov(2008)⁵⁾

国立環境研究所のMaksyutovらは、文献4)では全球を22の領域に分けたインバースモデル計算におけるGOSAT FTS SWIR(短波長赤外線)陸域データの効果(領域毎の炭素収支推定誤差の低減度)を、雲分布等の詳細な実データを利用して検討している。インバース計算は月平均と年平均の2種類を行っている。またインバースモデル計算への入力となる二酸化炭素カラム量の誤差をバイアス誤差とランダム誤差に分けて処理している点が特徴である。なお複数の測定結果の平均値のラ

ランダム誤差は測定回数の平方根に反比例するとしている。一方文献5)では雲の影響の処理等は不十分ながら全球を66に分割した場合について検討している。またいずれもGOSATデータは7.5°メッシュ1ヶ月平均のデータにまとめた上で、インバースモデルに入力されている。

文献4)では、年平均において、1回（シングルショット）の相対的な測定誤差が5ppm、バイアス誤差が0.5ppmより良いケースでは、地上データとGOSATデータを併用した場合の二酸化炭素フラックス推定誤差は、地上データのみの場合の50%以下(22領域の平均)になる事を示された。一方月平均の場合には条件はより厳しく、地上データのみの場合の60%以下にするには、ランダム分・バイアス分合わせた誤差が0.8ppm以下である必要がある。また誤差0.8ppm程度のGOSATデータのみ用いた場合の誤差は、地上データのみの場合より10%程度しか増加しておらず、衛星データを地上データと独立に利用出来る可能性がある事も示唆された。なおこのような誤差低減が、地上観測点の少ない領域で顕著である事も確認された。

全球を分割する領域数を22から66に増やす⁵⁾と、GOSATデータによる二酸化炭素フラックス推定精度がさらに改善される傾向がある。またこの場合、GOSATデータの精度が1.5ppm程度であれば、インバースモデルを用いた全球炭素収支におけるGOSATデータの有用性は地上観測ネットワークと同等といえる事も示唆された⁵⁾。

表1 GOSATデータを年平均フラックス推定に地上観測データと併用した場合の
二酸化炭素フラックス推定誤差の低減効果
(地上観測データのみの場合と比べて。22領域の平均) (Maksyutov et al., 2008⁴⁾より)

	Random error	Uncertainty reduction			
		2.5 ppm	5.0 ppm	7.5 ppm	10 ppm
Bias error	0.25 ppm	67 %	61 %	55 %	50 %
	0.50 ppm	54 %	49 %	44 %	41 %
	0.75 ppm	44 %	40 %	36 %	33 %
	1.00 ppm	36 %	33 %	30 %	28 %

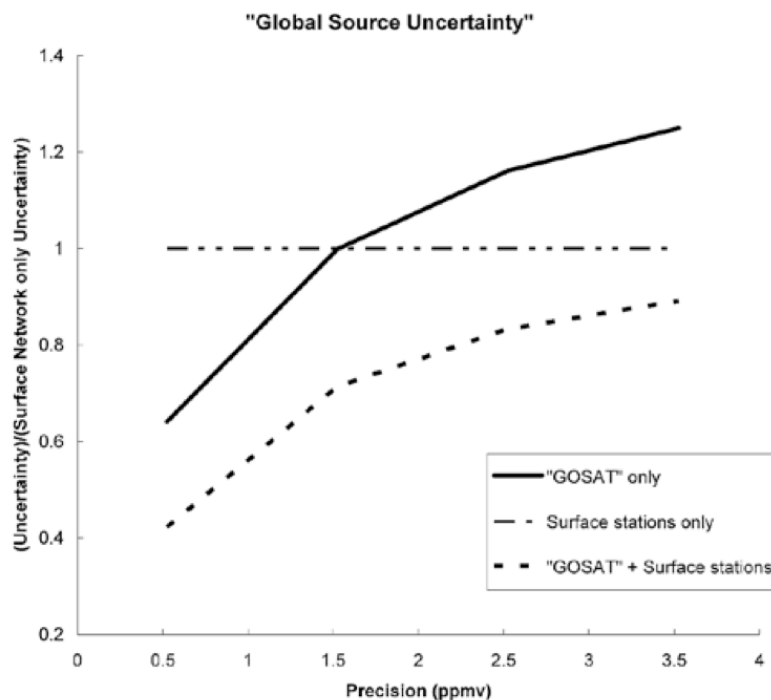


図1 7.5° メッシュ月平均二酸化炭素カラム量誤差と二酸化炭素フラックスの推定誤差の関係 (Maksyutov(2008)⁵⁾より)

3) Houwelling et al. (2004)⁶⁾

Houwellingらは $8 \times 10^\circ$ のメッシュサイズのインバースモデルを用いて、主としてENVISATに搭載されたSCIAMACHYを対象とした検討を行った。

その結果、SCIAMACHYの週平均 $8 \times 10^\circ$ カラム量のみを使ったインバースモデル計算による年平均二酸化炭素フラックス推定精度を地上観測データを使った場合と同程度にするためには、全球を対象とする場合で1ppm (シングルショットでは3.5ppm)、熱帯大陸を対象とする場合で5ppm程度 (シングルショットでは15-18ppm)の精度が必要となる事が示された。ただし誤差のうちバイアス分とランダム分の識別・区別は行われていない。

4) Rayner and O'Brien(2001)⁷⁾

Rayner and O'Brien(2001)では、全球を26分割 (海:12、陸:14)したインバースモデル計算で月平均フラックスを算出した。この計算において、衛星観測による二酸化炭素濃度データは月平均 $8 \times 10^\circ$ メッシュとされている。

このインバースモデル計算において、地上観測データ (56地点)を用いた推定と同等の精度の全球を対象とした推定を衛星データを用いて行うには、2.6ppmより高い精度が衛星データに求められる事が示された。ただし海だけを対象とする場合は1.5ppm程度の精度が必要である。

5) 考察

地上観測における二酸化炭素濃度測定精度は現状0.1~0.2ppm程度であり、衛星観測よりほぼ一桁高い。しかし上述のように、衛星による観測点数の増加はその測定精度の低さを十分補う事が

出来るものであり、衛星データをインバースモデル計算に入力する事により二酸化炭素フラックス推定精度が有意に向上する事が独立の検討結果によって示されてきた。

上述の検討結果はGOSATやOCOの実データによって実際に追試されるべきであるが、その上でPost-GOSAT時代の衛星観測では、インバースモデル計算において衛星データと地上データを独立に扱い、相互比較・十分な検証が出来るようになることが望ましい。これにより、衛星データの有用性及び衛星からの温室効果ガス観測の意義が確固たるものになると考えられる。

この観点からは、全球を22分割する場合には0.8ppm程度、66分割の場合には1.5ppm程度の7.5°メッシュ月平均二酸化炭素カラム濃度推定精度を実現する事が、Post-GOSAT時代の衛星観測に対する要求となる。

(3) 国内地方自治体による二酸化炭素濃度観測と 都市域周辺における二酸化炭素濃度分布の特徴について

(1) の「Post-GOSAT時代の衛星からの全球温室効果ガス観測に関する要求・要望について」で述べたように、GOSATのようにインバースモデルを使った全球二酸化炭素フラックスの算出をより高精度化する方向とは別に、より狭い地域レベルでの二酸化炭素排出量観測の要望もある。このような「小さな」対象の排出量を求める方法としては、インバースモデルを用いた逆推定法以外に、対象地域を挟む風上域、風下域での二酸化炭素濃度観測を使う方法がある⁸⁾。

一方、昨今では国内の地方自治体における二酸化炭素濃度観測も複数行われている。そのうち一部のものは標準ガスの扱い等絶対精度の面では問題がある場合もあるが、対象地域内のCO₂濃度差やその時間変化を把握するという意味では十分な精度があると思われる。

このような背景の元、国内の地方自治体で実施されている二酸化炭素濃度モニタリングの事例を調べ、都市域の排出量推定に寄与する可能性のある都心部と郊外部の測定を実施しているケースについて、以下にまとめた。引用元の図表については、本報告の末尾に補遺として必要最小限のものをまとめた。ただしCO₂以外の気体については地方自治体による測定例が少ないため、検討は行わなかった。

1) 神奈川県

神奈川県では、環境科学センターにおいて、県内の複数点（2005年度までに「鶴見」「県庁」「愛川町角田」「三浦市三浦」「西丹沢犬越路」の5地点）で二酸化炭素濃度のモニタリングを実施し、1993年から2003年の間で10～30ppmの増加（「県庁」「鶴見」「三崎」）を検出している。

2000年以降の年平均値では、「三浦市三浦」で380～400ppm、「西丹沢犬越路」で370～390ppmであるのに対し、「県庁」「鶴見」では400～410ppmとなっており、同県内において開発の進み人口が密集している東部と、比較的人口が少なく自然が残っている三浦半島先端部や丹沢の間の約30kmで20～30ppm程度の濃度差が発生している事が分かる。

さらに1998年以降にはヘリコプターを用いた上空における二酸化炭素濃度及びその鉛直変化の観測を実施している。1999～2000年に実施された県内2カ所（宮ヶ瀬と大磯。両地点の距離は約30km強）の調査では、高度2500m以上では地点間の差はあまり見られない一方、1000m以下では大きな差がしばしば見られた（例えば2000/1/14の観測では高度500mでは30ppm程度の差があった。）。この差の原因として、地上風の風向が上げられている（海側にある大磯の方が二酸化炭素濃度が低い日の地上風の風向は南西寄り（海側）であり、高い日は北東寄り（陸側）である等）。

また二酸化炭素濃度の日変化（1993年～2003年の平均値）としては、「県庁」「鶴見」「三崎」の三点では最大が午前7～9時、最低が午後3時～午後7時に対応する。ただし人為的な影響が強いと考えられる「県庁」「鶴見」の二酸化炭素濃度は、人為的影響が弱いと考えられる「三崎」より常に10-20ppmほど高い。

このように神奈川県においては、開発状況・人口分布等に応じた二酸化炭素の平均的な濃度分布がある一方、短いタイムスパンではローカルな風向等に応じて変動する分布があると言える。

また同県では自動車、工場・オフィス、家庭からの3区分について、その排出量分布図（1kmメッシュ）を作成済である。実際に高いCO₂濃度が観測された地点は、同分布図による二酸化炭素の最大排出地域に含まれている事が分かっている。

（参考）

<http://www.k-erc.pref.kanagawa.jp/center/theme/h14bull103.pdf>

<http://www.k-erc.pref.kanagawa.jp/center/gakkai/knnishi1508.pdf>

<http://www.k-erc.pref.kanagawa.jp/center/topic/CO2poster.pdf>

2) 名古屋市

名古屋市環境局では、市内2カ所（「中区 市科学館」（平成19年1月〜）と「天白区 市農業センター」（平成5年3月〜））で二酸化炭素濃度のモニタリングを実施している。「中区 市科学館」は都心部に位置し、「天白区 市農業センター」は郊外に位置する。前者は地上から3mの高さに、後者は地上から18mの高さに、採気口がある。また二点間の距離は10km強である。

「天白区 市農業センター」での観測結果より、平成5年から18年の13年間で二酸化炭素濃度の年平均値は30ppm弱の増加を示している事が分かる。一方、「中区 市科学館」については平成19年1月〜3月の3ヶ月の観測結果が公開されているが、「中区 市科学館」における月平均二酸化炭素濃度は「天白区 市農業センター」より5ppm高い事が示されている。

さらに二地点のデータ（平成19年1〜3月）を測定時刻別に見ると、以下の事が分かる。

- ・二地点とも午前9時頃と午後3〜4時が、それぞれ二酸化炭素濃度が最高及び最低となる時刻である。
- ・二地点の濃度差が最大となるのは午後3〜4時、最低となるのは午前5〜6時である。
- ・午前5〜6時以外では、二酸化炭素濃度は常に「中区 市科学館」の方が高い。

（参考）

「平成18年度二酸化炭素濃度年報（名古屋市環境局）」

http://www.city.nagoya.jp/_res/usr/29941/H18nenpo.pdf

3) 徳島県

徳島県では、保険環境センターが県内の2カ所（「徳島市新蔵町」と「海部郡美波町（由岐小学校）」）で1998年より二酸化炭素濃度の測定を実施している。前者は商業地、後者は山林に囲まれた小学校の屋上である。両地点とも地上から14mの高さに採気口がある。また二点間の距離は30km強である。

「徳島市新蔵町」のデータより、過去10年間の平均的な二酸化炭素濃度増加率は1.88ppm/年であり、既に15ppm程度の増加を観測している事が報告されている。

また「徳島市新蔵町」と「海部郡美波町」では、前者の方が二酸化炭素濃度が高い事が多い（平成10〜15年の5年間の平均値では前者の方が5ppm高い。）。両者の差を1日の中の時間帯別に見ると、最大となるのは午前9時頃、最小となるのは午後11時〜午前2時（この時間帯ではほぼ二酸化炭素濃度は等しい）である。

なお同地域では平成12年度に石炭火力発電所が運転を開始したが、その二酸化炭素濃度への影響は報告されていない。

(参考)

[http://www.pref.tokushima.jp/generaladmin.nsf/bf12dc1512b56d9b49256c5a00177cf3/301ea2e3344b78304925743c00103fbb/\\$FILE/8-2003.pdf](http://www.pref.tokushima.jp/generaladmin.nsf/bf12dc1512b56d9b49256c5a00177cf3/301ea2e3344b78304925743c00103fbb/$FILE/8-2003.pdf)

4) 埼玉県

埼玉県では環境科学国際センターが、1991年より「浦和市内」で二酸化炭素濃度の観測を始め、現在では「騎西」「堂平」の二点で観測を継続している。

人為的な影響が最も少ないと考えられる堂平の1993年から2001年までの8年間の観測結果より、年平均1.8ppmの二酸化炭素濃度の増加率が報告されている。

また個々のデータ、特に浦和のデータには地形やその他の局所的な要因の影響が見られるが、「堂平」に対し、「浦和」「騎西」（両地点とも堂平からの距離は約40km）で観測された二酸化炭素濃度はそれぞれ10-40ppm、0-20ppm程度高い事が示されている。

(参考)

http://www.pref.saitama.lg.jp/A09/BA30/labo/report/AnnualReport_CESS/no1/2000_47.pdf

<http://www.pref.saitama.lg.jp/A09/BA30/labo/report/BSIEP/PDF/N023/1996-1-5.pdf>

5) まとめ

神奈川県、名古屋市、徳島県、埼玉県の例より、国内の都市域の都心部と郊外部では10～40km程度の距離で10～40ppm程度の地表二酸化炭素濃度差が発生している事が分かる。また都心部と郊外部の濃度差が時間帯によって異なる場合とほぼ一定になっている場合の両方がある。前者の場合、日中は濃度差が大きく、夜間は濃度差が小さくなる事が多いようである。

※（補足）地表での二酸化炭素濃度測定値とカラム量の換算

上述の二酸化炭素濃度観測の例は（神奈川県のヘリコプタ観測を除き）地上数m～十数mで採気しており、短波長赤外域の衛星観測で計測される気柱量（カラム量）ではない。

ここで以降の衛星観測のシナリオ作成に利用するため、地表近傍で観測された二酸化炭素濃度の気柱濃度への換算を行う。

神奈川県でのヘリコプタ観測実験の結果に基づき、水平方向のスケールとして50km以下を考える。この時、

- ・地表～高度1000mまでは地表で測定された二酸化炭素濃度を適用する。
- ・高度1000m以上については、二酸化炭素濃度は水平方向（<50km）に変化しない

という仮定をおくと、2点間の地表測定濃度差の約1/5が、気柱平均濃度差に相当する事になる。

(4) 差分吸収ライダーに関する検討

1) はじめに

大気中のCO₂濃度の計測については、GOSAT、OCOで採用されたような受動型分光計方式の他に、レーザ光源を用いた能動型センサ（レーザレーダまたはライダー）方式も考えられる。この場合には、CO₂の吸収線の中心またはその近傍の波長（オン波長）と、吸収線の影響を受けない波長（オフ波長）の2種類の波長を用いて、2波長間の強度比より、光路中の吸収物質の量を推定する差分吸収ライダー（Differential Absorption Lidar、DIAL）方式の利用が考えられている。ライダーではGOSATで採用されているようなフーリエ変換分光計と比べてフットプリント面積を小さくする事が出来、雲の影響のないデータの取得率が高くなる他、SNが大陽高度や緯度帯にあまり依存しない等の利点がある。またレンジング機能も持つ場合には、二酸化炭素濃度の鉛直分布情報も得る事が出来る。一方、ライダー自身、宇宙での実績が不足しており、長期間の連続運用が保証出来る段階では未だ無い。また二酸化炭素用DIALについても、まだ室内・野外地上実験が中心であり、航空機に搭載したもので二酸化炭素の定量的な測定が実施できたケースは希である。

本報告では、国内外における二酸化炭素計測用DIALの開発状況を、学会講演聴講・出版物調査・個別インタビュー等によって調査した結果を述べる（2））。さらに比較の実用に近いと考えられるDIALの一方式に絞ってより詳細な机上検討を実施した結果をまとめる（3）以降）。

2) 国内外のCO₂計測用DIALの開発状況

差分吸収ライダーは、オゾン検出用をはじめとして1970年代から数多く報告されているが、CO₂検出用途として報告されはじめたのは比較的最近であり、特に実際の計測結果が報告されるようになったのは2003年以降である。以下に、現在までに報告されているCO₂検出用差分吸収ライダーの概要をまとめる。

表2 海外における二酸化炭素測定用DIALの開発状況

研究機関 項目	NASA JPL (米)	NASA Langley (米)	NASA Goddard (米)	Ecole Polytechni que (仏)	DLR (独)
波長	2.05 μm	2.05 μm	1.57 μm	2.05 μm	1.57 μm
レーザ	Ho: Tm: YLF	Ho: Tm: LuLiF	EDFA	Ho: Tm base OPO	Nd:YAG base OPO
パルス/CW	CW	パルス	パルス	パルス	パルス
受信方式	ヘテロダイ ン	ヘテロダイ ン⇒直接	直接	直接	直接
レーザ出力 目標	5W	1J 140ns 5Hz	10 μJ 100ns 40kHz	200mJ 100ns 10Hz	数mJ
現状	250mW	100mH 140ns 5Hz	不明	10mJ 230ns 5Hz	不明
反射ターゲット	地表	地表	エアロゾル	地表	地表

ト					
分解能 (水平方向)	120km	不明	—	100km	不明
衛星高度	450km	不明	—地上計測 想定 (~3km)	400km, 650km	不明
目標精度	1%, or 1ppm	1%, or 1ppm	1ppm	1%, or 1ppm	1ppm
検証状況 室内実験	○		△		△
地上試験		○		○	
航空機試験	△				
文献	[1], [2]	[3]	[4]	[5], [6]	[7]

表3 国内における二酸化炭素測定用DIALの開発状況

研究機関	首都大学	国立環境研究所	情報通信 研究機構	三菱電機、 JAXA、NIES
項目				
波長	1.57 μ m	1.57 μ m	2.05 μ m	1.57 μ m
レーザ	Nd:YAG base OPO		Tm, Ho:YLF	LD
パルス/CW	パルス	パルス	パルス	CW
受信方式	直接	直接	ヘテロダイン	直接
レーザ出力 目標	100mJ 100Hz	150mJ 20Hz	不明	
現状	16mJ 30Hz	—	100mJ 120ns 10Hz	
反射ターゲット	エアロゾル	地表	エアロゾル	地表
分解能 (水平方向)	—	不明	不明	—
衛星高度	— 地上計測想定 (~10km)	550km	不明	666 km
目標精度	1%	1%, or 1ppm	不明	1ppm
検証状況 室内実験	△(レーザベンチ 実験)	検討段階	△(レーザベン チ実験)	
地上試験				
航空機搭載試 験			計画中	
文献	[8]	[9]	[10]	[11]

- [1] R. T. Menzies et al., Appl. Opt., 42, 6569-6574, 2003.
[2] M. W. Philipps et al., Proc. of Coherent Laser Radar Conference, 118-121, 2005.
[3] J. Koch, et al., . Appl. Opt., 5092-5099, 2004.
[4] J. Burris et al., Proc. of International Laser Radar Conference, 531-533, 2006
[5] F. Gibert et al., Proc. of International Laser Radar Conference, 537-540, 2006.
[6] P. H. Flamant et al., Proc. of Coherent Laser Radar Conference, 110-113, 2005.
[7] A. Amediek et al., Proc. of International Laser Radar Conference, 143-146, 2006.
[8] T. Nagai et al., Proc. of International Laser Radar Conference, 541-545, 2006.

- [9] H. Nakajima et al., Proc. of Coherent Laser Radar Conference, 114-117, 2005.
 [10] K. Mizutani et al., Proc. of International Laser Radar Conference, 1037-1038, 2006.
 [11] S. Kameyama et al., Proc. of Coherent Laser Radar Conference, 2007.

3) 本研究に置くDIAL検討の前提条件等

本研究では、DIALの観測対象としてハードターゲットを想定し、GOSATと同じ高度*の衛星から地表に対して垂直にレーザ光を送受して、システムー地表間パス内における平均的なCO₂濃度を計測することを目的とした。また積分時間についてもGOSATのデフォルト値（4秒間）と同程度に設定した。衛星の対地速度が約7km/s程度であることより、Along truck方向の分解能は約28kmとなる。レーザ光波長については、光ファイバ増幅器の増幅帯である1.57 μm～1.6 μmを対象とした。

大気については、米国標準大気をベースとし、CO₂濃度はパス内で均一であるとした。また吸収線データベースには最新のHITRAN04を用いた。太陽分光輝度はエアロゾル無しかつ太陽位置を天頂とした場合、つまり最も厳しい背景光条件を想定した。この時、背景光に起因する光ショット雑音が最大となる。

*：衛星の回帰日数をGOSATと同じ3日間と定めた。これは3日程度ならば、日本周辺では通常気圧配置が大きく変化しない事による。また回帰日数を定める事により、衛星高度、衛星の対地速度も限定される。

表4 DIAL検討の前提条件

項目	値	備考
散乱ターゲット	地表	ターゲット反射率：0.1（共通）
衛星高度	666 km	GOSATと同じ高度。 直下観測を想定。
積分時間	1s, 2s, 4s, 8s, 16s, 32s	
目標計測精度	1ppmv	光路内平均濃度
光波長	1.57 μm～1.6 μm	光ファイバ増幅器増幅帯

表5 DIAL検討の大気条件

パラメータ	モデル or 値	備考
吸収線	HITRAN04	
気温	米国標準大気	296K at 地表
気圧	同上	1013mb at 地表
太陽光の分光輝度	同上	エアロゾルなし、太陽位置：天頂
水蒸気量	同上	
CO ₂ 濃度	370ppmv	鉛直方向に均一。
エアロゾル	Rural, VIS=23km	エアロゾル散乱・吸収に関する透過率：0.96/km

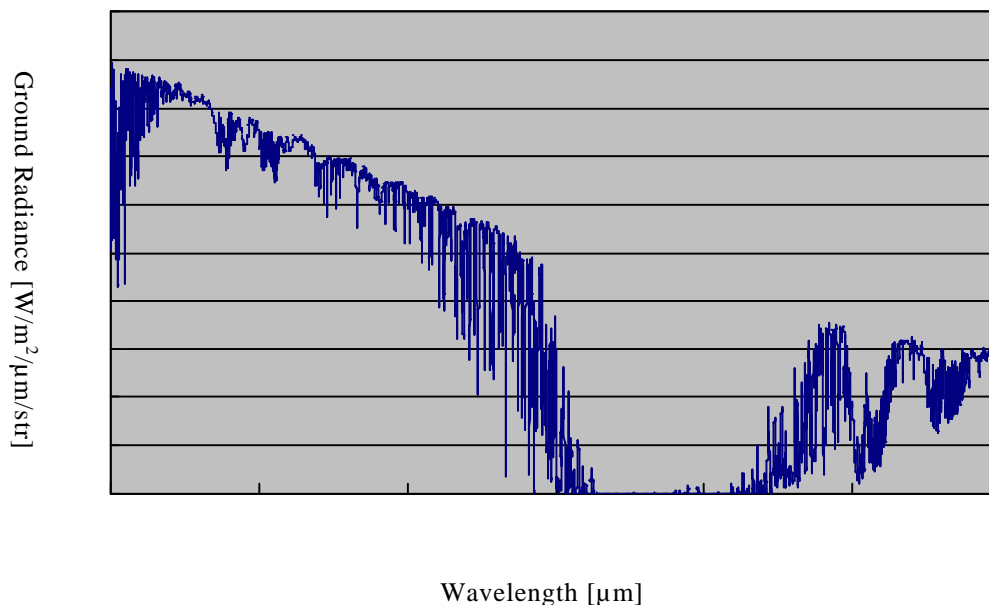


図2 1.5～2.1 μm 領域の太陽光の分光放射輝度（反射率0.1の地表面で反射された光）。
横軸：波長（単位： μm ）。縦軸：衛星高度で観測された、地表面で反射された太陽光の
分光放射輝度（単位： $\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}/\text{str}$ ）。

4) 検討したDIAL方式について

本研究で検討の対象としたDIAL方式は、CWレーザ光源を利用したマイクロ波変調ライダと呼ばれる方式である（例えば、亀山ほか、2007年⁹⁾）。本方式の主な利点は以下の通りである。なおパルス方式のライダではないため、基本的にレンジング（距離方向の測定）は出来ないが、別途変調コードを適用する事により、レンジング機能を付加する事も可能である。

- ・ オン波長とオフ波長の2波長を同じファイバ、同じ光学系で同時・同軸で送受可能。
- ・ 強度変調周波数による電気信号領域でのオン・オフ波長信号の識別
- ・ 長時間（秒オーダー）コヒーレント信号積算によるSN改善。

また本研究での検討で対象としたオン波長、オフ波長はそれぞれ1.58049517 μm 及び1.58028900 μm である。これらの波長（特にオン波長）は以下の条件に関するトレードオフ検討を行って定めたものである。

- ・ 水分子による吸収の影響が小さい。
- ・ 気温誤差感度が小さい。
- ・ CO_2 吸収に関してオフ波長との吸収量比が十分に大きい事。
- ・ CO_2 吸収により光量が減っても十分なSNを確保出来る事。

なおメタン等の二酸化炭素以外の気体についても、 $1.58\mu\text{m}$ 付近で適切なオン波長を選択することにより、本システムの設計を大きく変更する事無しに測定する事が可能である。ただし望遠鏡部以外のユニットの少なくない部分を測定対象とする気体の数に応じて用意する必要がある。

本方式のDIALの構成図（衛星搭載を想定）を図3に示す。

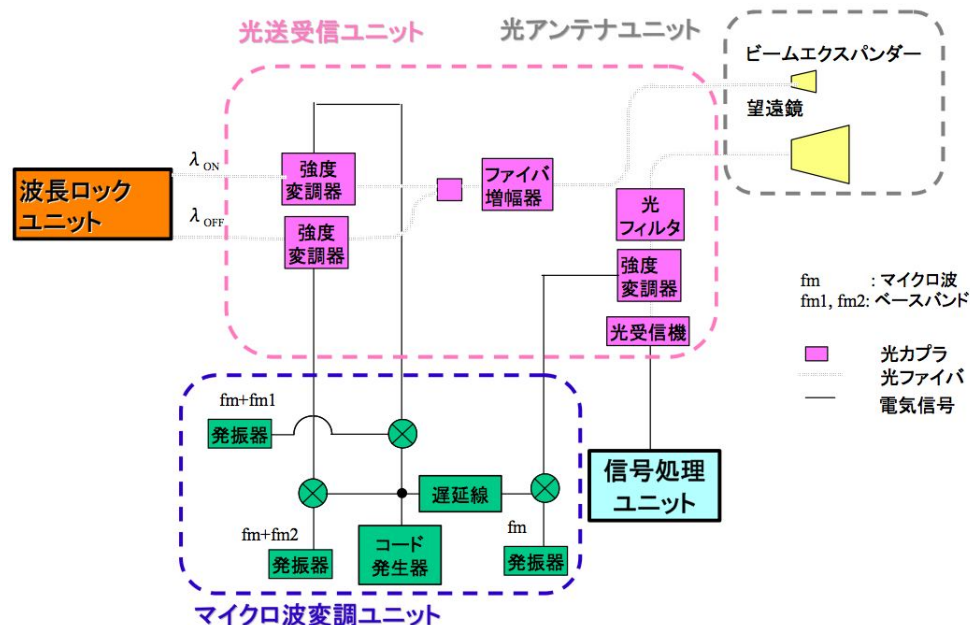


図3 マイクロ波変調方式差分吸収ライダ（衛星搭載を想定）の構成

5) 検討結果

図4に目標計測精度（1ppmv）を実現するために必要なレーザ送信パワー（2波長合計）を光受信機の帯域幅及び受光光学系の直径の関数として表した例（4秒積分）を示す。これより以下の事が分かる。

- ・ 受光光学系の直径が大きい程、レーザ送信パワーは小さく出来る。
- ・ 昼と夜では、背景光によるショット雑音の影響が異なるため、夜間の方が有利
- ・ 光受信機の帯域幅を広げると、より大きなレーザ送信パワーが必要となる。
一方、帯域幅をあまり狭くすると電氣的な雑音の影響が大きくなるため、送信パワーの低減にも限界がある。
- ・ 変調コードによるレンジング機能を付加するには、レーザ送信パワーを大幅に強くしなければならない。

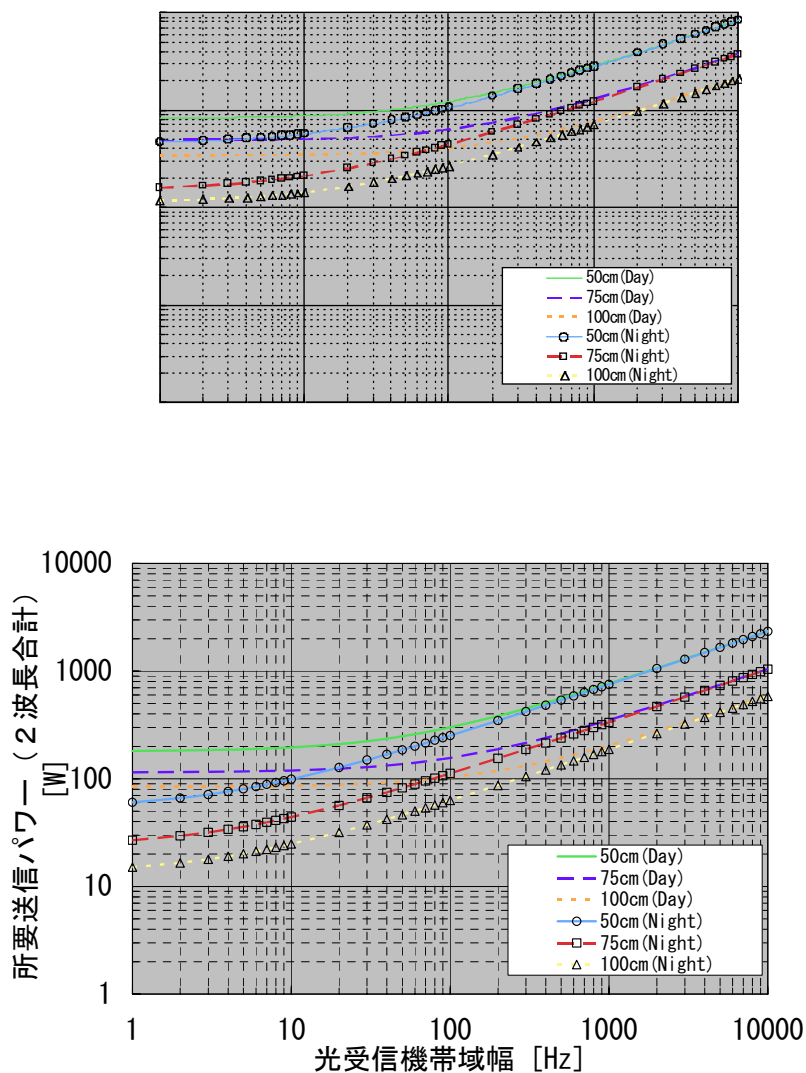


図4 目標計測精度を満たすために必要な光受信機帯域幅と送信パワーの関係

上：変調コードによるレンジング機能付き

下：変調コードによるレンジング機能無し

表6に、光受信機の帯域幅を10Hzとした場合の、目標計測精度を実現するために必要なレーザ送信パワーと積分時間の関係を示す。これより、積分時間を長くするとレーザ送信パワーは小さく出来る事が分かるが、逆に比較的開発の容易な数十W程度の送信パワーに限定する場合、レンジング有とすると100cm径/16秒積分/夜間以外に解は存在しない。一方レンジング無しと出来るならば、100cm径/2秒積分/夜間、100cm径/4秒積分/昼間、等複数の解が存在する事が分かる。

表6 目標計測精度を実現するために必要なレーザ送信パワーと積分時間の関係
(光受信機の帯域幅=10 Hz)

積分時間	1秒	2秒	4秒	16秒
レンジング有				
100cm(夜-昼)	500 - 800 W	200 - 500 W	100 - 400 W	50 - 200 W
50cm(夜-昼)	2000 - 3000 W	1000 - 2000 W	500 - 900 W	200 - 400 W
レンジング無				
100cm(夜-昼)	60 - 200 W	30 - 200 W	20 - 90 W	10 - 50 W
50cm(夜-昼)	200 - 400 W	100 - 300 W	90 - 200 W	40 - 100W

上記方式のDIALの衛星搭載用仕様の例（二酸化炭素導出精度の1ppmは背景光のない夜間観測時に達成される。）を下表に示す。

表7 本課題で検討したマイクロ波変調方式差分吸収ライダーを
衛星搭載用にした場合の仕様の例

項目		値
計測条件	計測高度 [km]	666
	精度 [ppmv]	1
	積分時間[sec]	4
装置条件	レーザ光波長 [μm]	1.5729920 (ON波長) 1.5731933 (OFF波長)
	変復調周波数差 or 変調周波数 [Hz]	10
	送信パワー (2波長 合計) [W]	143 (コード変調有) 25 (コード変調無)
	ON・OFFパワー比 [dB]	-1 (所要S/N比 : 58.5dB)
	受信波長幅 [nm]	0.1
	GB積 [ΩHz]	1×10^{12}
	なだれ増倍率	1
	暗電流 [A]	1×10^{-14}
	受信開口径 [m]	1
	受信視野角[mrad]	0.2
	システム効率 [dB]	-8 (コード変調有) -2.5dB (コード変調無)

なお、上記の結果を利用した観測シナリオの検討を次節で行う。

(5) Post-GOSAT時代の衛星からの全球温室効果ガス観測シナリオについて

本節では(1)節で述べた「Post-GOSAT時代の衛星からの全球温室効果ガス観測」への要望のうち、GOSATの成功基準をやや厳しくしたものを確実に実現するという要望と、都市域等の比較的狭い地域レベルでの二酸化炭素排出量の推定を行うという要望に対して、どのような衛星観測が可能か、または必要かを検討する。

1) 基本的な制約条件

宇宙航空研究開発機構GOSAT後継機検討チームとの意見交換より、GOSAT後継機のタイミングで静止衛星や(複数の)小型衛星の利用は現実的ではないという情報が得られたため、衛星の軌道の特性はGOSATと同等とした(表8)。また現時点でのGOSAT TANSOセンサの仕様及び二酸化炭素カラム量導出精度も表9に示した。

表8 GOSAT及びPost-GOSAT衛星の軌道特性(共通)

項目	値
衛星高度	666 km
回帰日数	3 日
対地速度	7 km/sec

表9 GOSAT TANSOセンサの基本仕様等

項目	値等	備考
積分時間	4秒	1.1秒、2秒モードは考慮しない。
フットプリント面積	64km ²	Image Motion Compensation機構により積分時間中の視野を固定する。
ワンショットのCO ₂ 推定精度	3-4 ppm (1%)	相対誤差(ランダム誤差)のみとする。
アロングトラック方向のポインティング可能範囲	±20° または ±240 km	
クリアスカイデータの取得される割合	14 %	フットプリント面積からMiller et al ¹⁰⁾ のFig. 13を用いて推定した。

2) 全球炭素収支推定のための観測の場合

ここでは(2)の議論に従い、衛星観測データをインバースモデル計算(全球分割数=66)に入力した際の二酸化炭素フラックス推定精度が、現在の地上観測データのみを使った場合の精度と同等になる事を条件とする。ただしインバースモデルへの二酸化炭素カラムデータの入力単位を文献4)に従い、7.5° x 7.5° とする。この時、全誤差は1.5ppm以下である必要がある。また誤差はバイアス分とランダム分(1回の観測の相対誤差)に分けて考える。後者については観測数Nの平方根の反比例して小さくなるが、バイアス分についてはNに応じて小さくなるとは限らない。ここではバイアス分はNに依存しないと仮定する。

表10は、インバースモデルへの入力となるデータの平均期間（3日間（1回帰）、1ヶ月、2ヶ月、3ヶ月）毎に、想定されるバイアス雑音、ランダム雑音の組み合わせから得られたインバースモデルに入力するデータの全誤差を算出したものである。ただし灰色のセルはGOSATの成功基準を満たさないもの、太枠のセルは誤差が1.5ppm以下となり、インバースモデル計算において地上観測データと同等のフラックス推定精度になるもの、を示す。

メッシュ内の観測点数（クリアスカイ条件）が数十以上となるGOSAT-1ヶ月型～3ヶ月型については、加算によるランダム誤差の低減効果が大きいため、全誤差が要求値（この場合は1.5ppm）を満たすかは基本的にバイアス誤差によって定められる。バイアス誤差は、機器側の問題がない限り、取得された検証データの質と量によってほぼ決定されるため、GOSATのようなFTS型でもDIAL型でも本質的には変わらない。このため、表10はDIAL型にもほぼそのまま適用出来ると考えられる（DIAL型の方が視野を狭く出来るため、クリアスカイ確率が高まり、総観測点数も多くなる。しかしこれはバイアス誤差には関係しない。）。

表10よりバイアス誤差を1ppm以下に出来れば、全誤差を1.5ppm以下にする事ができ、要望を実現出来る事になる。ただしこのためには、衛星データより求めた二酸化炭素カラム量のより高精度な検証を行う必要がある。

表10 全球二酸化炭素フラックス推定精度改善を目的とした場合の観測シナリオ例

灰色のセル：GOSATの成功基準を満たさないケース

太枠のセル：誤差が1.5ppm以下となり、現状の地上観測データの場合とフラックス推定誤差が同等になるケース

GOSAT-3日（1回帰）型

パラメータ	値	単位
メッシュサイズ (南北方向、固定)	7.5	deg
	833	km
データ間隔	4.5	秒
衛星対地速度	7	km/sec
メッシュ内の観測点数	26.4	点
観測日数	3.0	日
フットプリント面積	64.0	km ²
クリアスカイ確率	0.14	
総観測点数	3.7	点

GOSAT-1ヶ月型

パラメータ	値	単位
メッシュサイズ (南北方向、固定)	7.5	deg
	833	km
データ間隔	4.5	秒
衛星対地速度	7	km/sec
メッシュ内の観測点数	26.4	点
観測日数	30.0	日
フットプリント面積	64.0	km ²
クリアスカイ確率	0.14	
総観測点数	37.0	点

インバースモデルに入力するデータの誤差 (ppm)

バイアス誤差 (ppm)	1回の観測の相対誤差 (ppm)				
	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
0.0	0.5	1.0	1.6	2.1	2.6
1.0	1.5	2.0	2.6	3.1	3.6
2.0	2.5	3.0	3.6	4.1	4.6
3.0	3.5	4.0	4.6	5.1	5.6

インバースモデルに入力するデータの誤差 (ppm)

バイアス誤差 (ppm)	1回の観測の相対誤差 (ppm)				
	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
0.0	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8
1.0	1.2	1.3	1.5	1.7	1.8
2.0	2.2	2.3	2.5	2.7	2.8
3.0	3.2	3.3	3.5	3.7	3.8

GOSAT-2ヶ月型

パラメータ	値	単位
メッシュサイズ (南北方向、固定)	7.5	deg
	833	km
データ間隔	4.5	秒
衛星対地速度	7	km/sec
メッシュ内の観測点数	26.4	点
観測日数	60.0	日
フットプリント面積	64.0	km ²
クリアスカイ確率	0.14	
総観測点数	74.0	点

GOSAT-3ヶ月型

パラメータ	値	単位
メッシュサイズ (南北方向、固定)	7.5	deg
	833	km
データ間隔	4.5	秒
衛星対地速度	7	km/sec
メッシュ内の観測点数	26.4	点
観測日数	90.0	日
フットプリント面積	64.0	km ²
クリアスカイ確率	0.14	
総観測点数	111.0	点

インバースモデルに入力するデータの誤差 (ppm)

バイアス誤差 (ppm)	1回の観測の相対誤差 (ppm)				
	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6
1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6
2.0	2.1	2.2	2.3	2.5	2.6
3.0	3.1	3.2	3.3	3.5	3.6

インバースモデルに入力するデータの誤差 (ppm)

バイアス誤差 (ppm)	1回の観測の相対誤差 (ppm)				
	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5

3) 地域レベル/ポイントソースの排出量推定のための観測の場合

4(3)の調査結果に基づき、典型的なケースとして、30kmの距離で地表二酸化炭素濃度差が20ppmあるケースを想定する。高度1000mまでは20ppmの濃度差が維持され、それ以上では濃度差はない場合、衛星観測が可能な気柱量の30km離れた二点間の差は4ppm程度になる。

一方GOSATでは、ある地点をその上空通過前後35秒間（その地点から衛星を見た天頂角で±20°）

観測しつづける事が可能である（図5）。ある地点の上空通過前を風上側の観測、上空通過後を風下側の観測に配分し、測定間隔を4.5秒とすると、それぞれ約8回の観測が可能である。このため雲による処理不能データがないとすると8回の観測データを加算した結果におけるランダム雑音は、1回の観測の雑音（GOSATの仕様より3-4ppm）の約1/3強になるため、1-1.5 ppmとなる。この雑音は風上／風下間で期待される二酸化炭素濃度差の1/4～1/3に相当し、実際には斜め観測等に起因する未考慮の誤差の影響もあると考えられるため、この濃度差を有意に検出する事は困難である可能性がある。逆にGOSAT型の観測でこの濃度差を検出するためには、1回の観測の雑音を現状の半分以下（1～2ppm）にする必要がある。

一方DIAL観測の場合、4秒間の積分で1ppmが実現できれば、上記の条件を満たす事が出来る。ただし、表7にある通り受光用の望遠鏡の口径が1m程度と大きいため、35秒間1カ所を観測し続けるために、GOSATと同様の2軸のスキャンミラーを利用する事は困難であり、OCOと同様に衛星全体をポインティングする必要があると考えられる。さらに4（3）5）で述べたように、地域によっては都心部と郊外部の二酸化炭素濃度差が夜間には解消される場合がある一方、現在のDIALの検討（表7）では背景光の光ショット雑音のため、昼間の観測で1ppmの精度を実現するには、100-400Wクラスの出力のレーザー光源を使う必要がある。

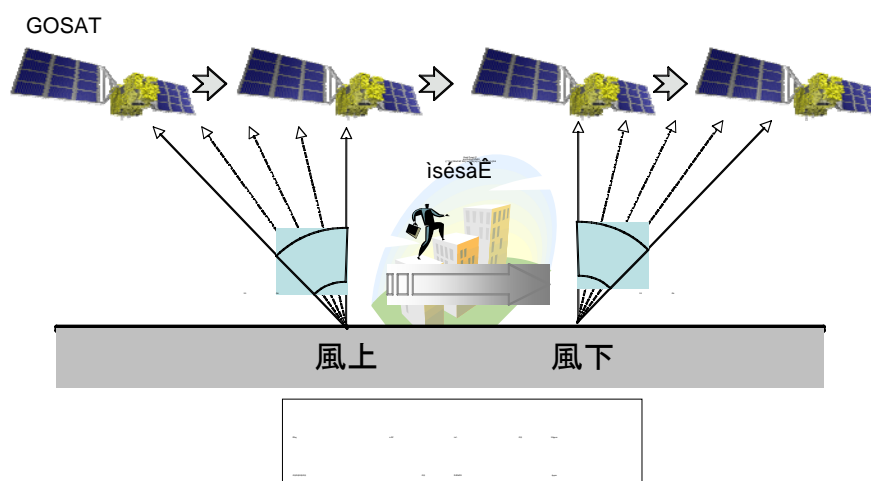


図5 GOSATによる都市域周辺の二酸化炭素濃度観測のイメージ図。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

GOSAT及びOCOの打上げが間近に迫っている現在、4(5)2)で示したようにバイアス誤差を1ppm以下に出来れば、全球二酸化炭素フラックス推定においてGOSATデータを地上データとは独立に使用出来るということは、GOSATの検証計画を実施する上で重要な知見である。また都市域等の地域レベル/ポイントソースの観測については、国内の都市の場合にはGOSATでは十分な精度を持たない可能性がある事が分かった一方、DIALを使う場合には都心部/郊外部の二酸化炭素濃度差の日変化に注意する必要がある事が分かった事も、今後の計画をたてる上で重要である。

(2) 地球環境政策への貢献

宇宙航空研究開発機構(JAXA)においてGOSAT後継機検討チームが進めているGOSAT後継機に関する検討に関して、本研究による検討の一部、特に都市域等のポイントソース測定に関する考え方を2008年2月に提示し、意見交換を行った。その後JAXA GOSAT後継機検討チームが作成した報告書(「平成19年度GOSAT後継機の研究 成果報告書」)に、都市域等のポイントソース測定に関する記載が含まれた。また2008年4月に開催されたJAXA「GOSAT後継機 ミッション定義審査」においては、国立環境研究所からの審査員が本研究の検討内容に基づいて意見を表明し、議論に参加した。

以上の通り、本研究において検討された「Post-GOSAT時代の衛星からの全球温室効果ガス観測」は実際のミッション検討に適宜反映されつつある*と言う事が出来る。

*: JAXA「GOSAT後継機 ミッション定義審査」は、平成20年度の後期に再度開催される予定である。

6. 引用文献

- (1) 井上 元, GOSATと炭素循環研究, 日本リモートセンシング学会誌, 28, 2, pp. 114-118, 2008.
- (2) 浜崎 敬・中島正勝・金子 豊・久世暁彦・竹島敏明・長尾法人, 温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)と地上システムの概要, 日本リモートセンシング学会誌, 28, 2, pp. 119-126, 2008.
- (3) H. Irii, K. Sudo, H. Akimoto, A. Richter, J. P. Burrows, T. Wagner, M. Wenig, S. Beirle, Y. Kondo, V. P. Sinyakov, and F. Goutail, Evaluation of long-term tropospheric NO₂ data obtained by GOME over East Asia in 1996-2002, *Geophysical Research Letters*, 32, L11810, doi:10.1029/2005GL022770, 2005
- (4) S. Maksyutov, N. Kadyrov, Y. Nakatsuka, P. K. Patra, T. Nakazawa, T. Yokota, G. Inoue, Projected impact of the GOSAT observations on regional CO₂ flux estimations as a function of total retrieval error, submitted to *Journal of Remote Sensing Society of Japan*, 28, 2, pp. 190-197, 2008.

- (5) S. Maksyutov, Application of the transport model for inverse modelling studies of the regional and global budgets of CO₂, 国立環境研究所スーパーコンピュータ利用研究年報 平成18年度, pp. 23- 32, 2008.
- (6) S. Houweling , F.-M. Breon , I. Aben, C. Rodenbeck, M. Gloor, M. Heimann, and P. Ciais, Inverse modeling of CO₂ sources and sinks using satellite data: a synthetic inter-comparison of measurement techniques and their performance as a function of space and time, Atmos. Chem. Phys., 4, 523- 538, 2004.
- (7) P. J. Rayner and D. M. O' Brien, The Utility of Remotely Sensed CO₂ Concentration Data in Surface Source Inversions, Geophysical Research Letters, Vol. 28, No. 1, pp. 175- 178, 2001.
- (8) Miller, C. E., et al. (2007), Precision requirements for space-based XCO₂ data, J. Geophys. Res., 112, D10314, doi:10.1029/2006JD007659.
- (9) 井上 元, 大気から見た二酸化炭素収支, 地球環境, 9, 2, pp. 221-230, 2004.
- (10) 亀山俊平, 平野嘉仁, 上野信一, 杉本伸夫, 木村俊義, 衛星搭載CO₂モニタ用1.6 μm帯CW変調DIALに関する検討, 第51回宇宙科学技術連合講演会, 2007年10月, 札幌.

7. 国際共同研究等の状況

国立環境研究所と米国ジェット推進研究所は2004年度より共同研究「衛星による温室効果ガス観測に関する共同推進」を実施中である。加えてGOSATとOCOについては、打上げ後の検証活動を想定した協定等の検討が国立環境研究所（代表：横田達也）及びジェット推進研究所（代表：David Crisp）の間で進められている。

なお衛星からの温室効果ガス観測に関する国際会議IWGGMS（International Working Group on Greenhouse gas Measurement from Space）では1年に1回定期的に行われている（2007年はフランス、2008年は米国で開催された。）。同会議において、Post-GOSATのセンサ候補である差分吸収型ライダの室内及び野外実験について報告されている他、将来衛星構想の議論も行われている。国立環境研究所は2006年に日本で開催された第3回会議を主催した。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

無し

<査読付論文に準ずる成果発表>（社会科学系の課題のみ記載可）

該当せず

<その他誌上発表（査読なし）>

無し

(2) 口頭発表（学会）

無し

(3) 出願特許

無し

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

無し

(5) マスコミ等への公表・報道等

無し

(6) その他

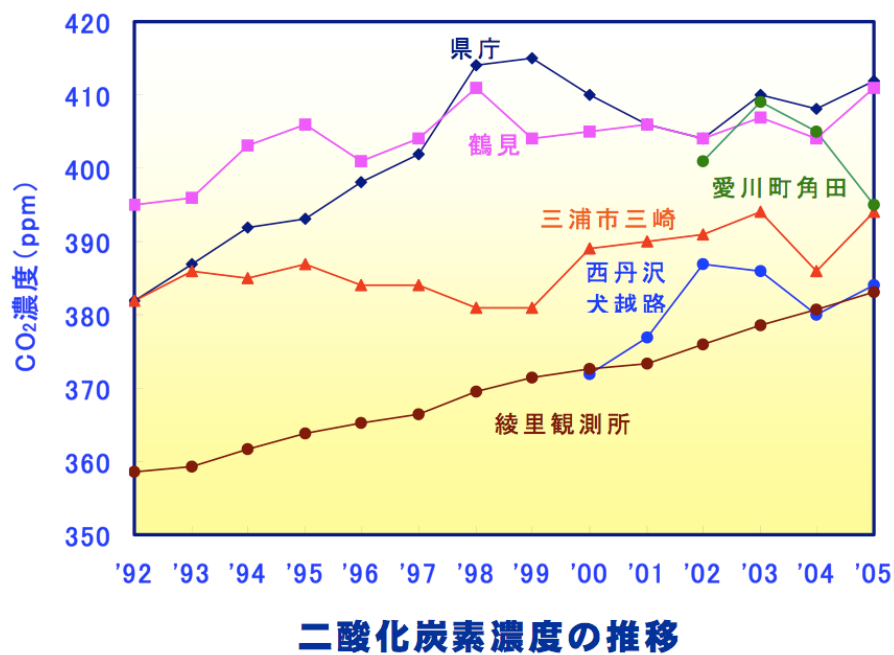
松永恒雄：（社）日本リモートセンシング学会誌「GOSAT小特集号」ゲストエディタ（小特集全体調整担当）。

補遺) 国内地方自治体における大気中二酸化炭素濃度観測に関する図等

1) 神奈川県



<http://www.k-erc.pref.kanagawa.jp/center/topic/CO2poster.pdf> より



<http://www.k-erc.pref.kanagawa.jp/center/topic/CO2poster.pdf> より

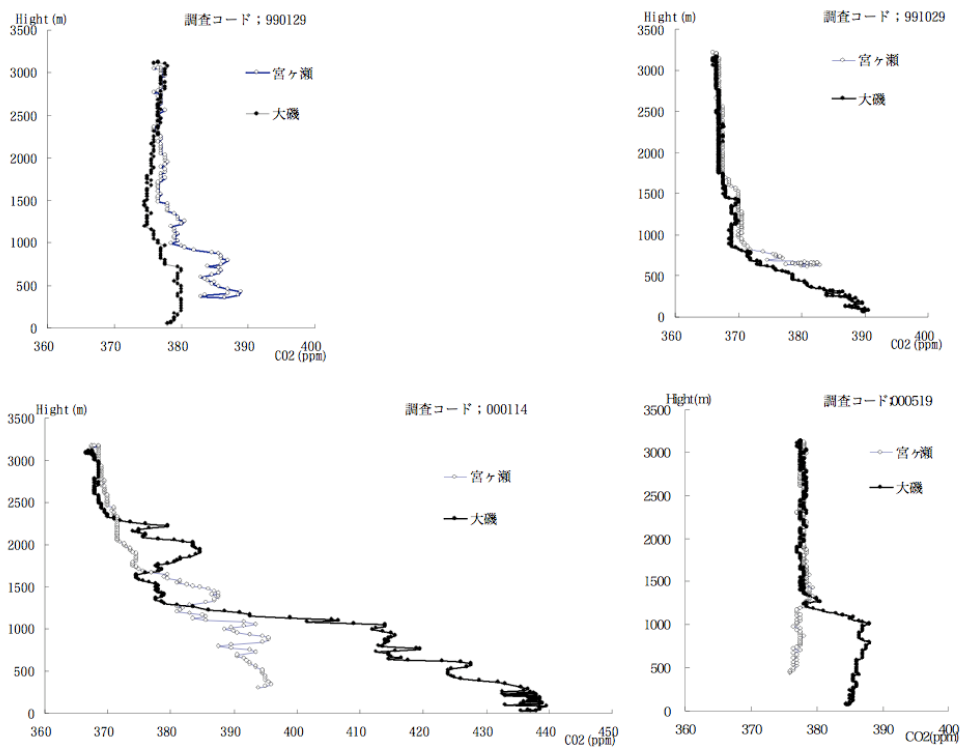


図2 宮ヶ瀬および大磯における二酸化炭素濃度の鉛直分布

<http://www.k-erc.pref.kanagawa.jp/center/theme/h14bull103.pdf> より

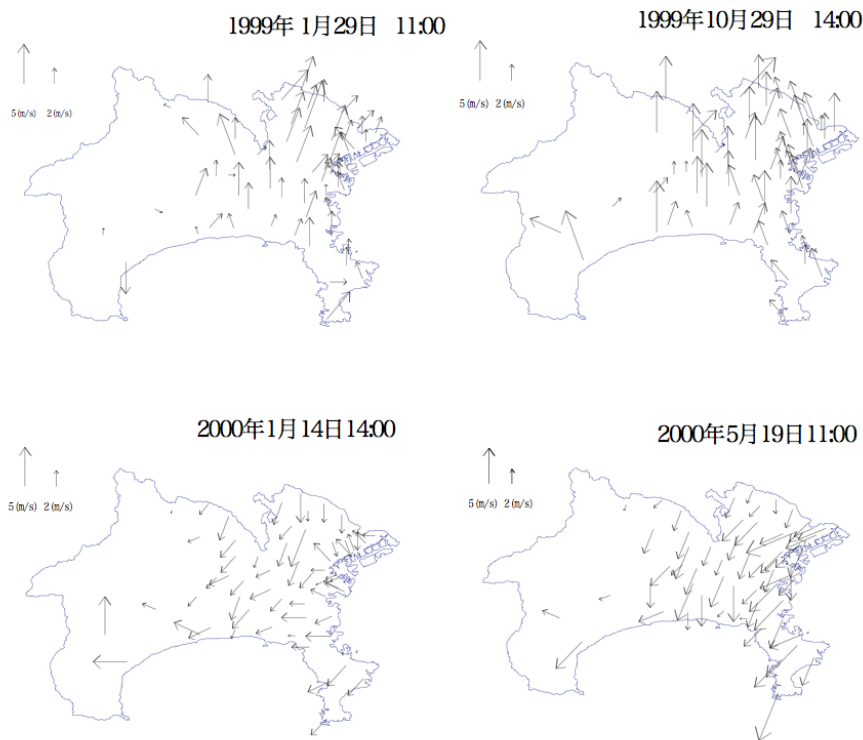
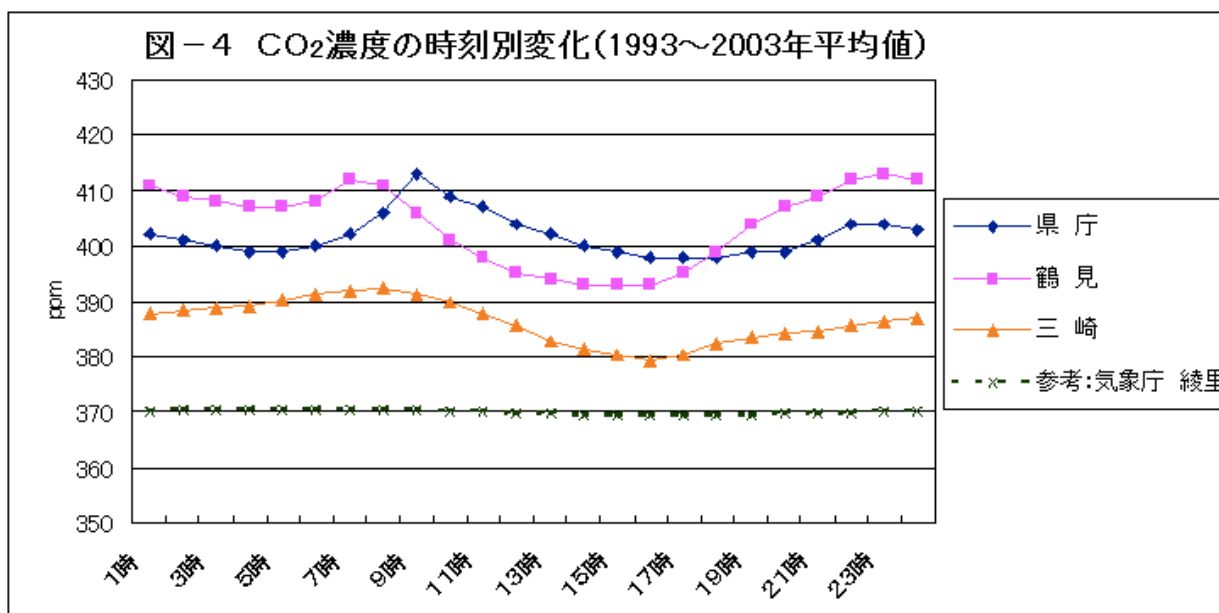


図3 県内の地上風の状況

<http://www.k-erc.pref.kanagawa.jp/center/theme/h14bull103.pdf> より



<http://www.k-erc.pref.kanagawa.jp/oldrelease/200502/07-01-01.htm>

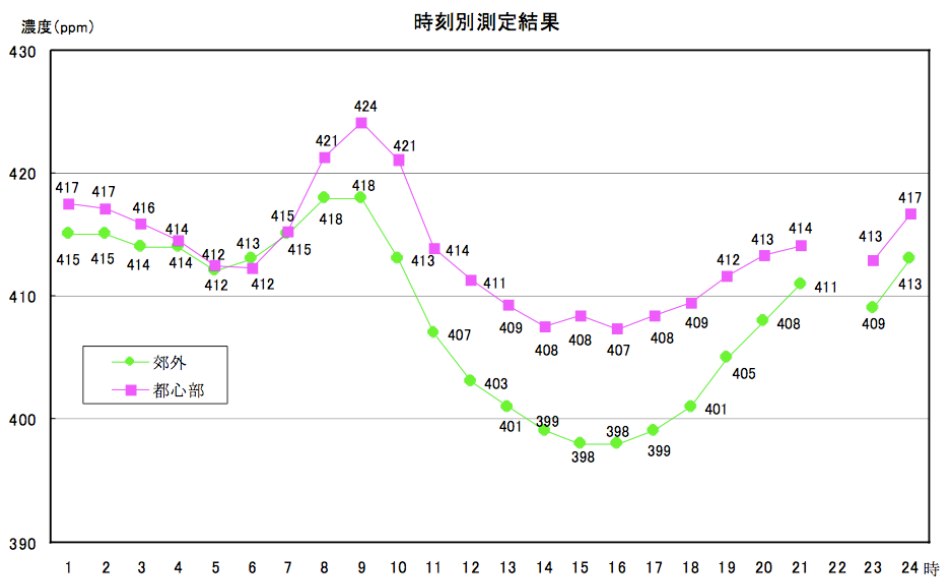
2) 名古屋市

「平成18年度二酸化炭素濃度年報 (名古屋市環境局)」

http://www.city.nagoya.jp/_res/usr/29941/H18nenpo.pdf



図1 二酸化炭素濃度測定地点



注：毎日22時は、測定機の機械調整（自動校正）のため測定しておりません。

図5 時刻別測定結果 (H19.1.23～)

3) 徳島県

[http://www.pref.tokushima.jp/generaladmin.nsf/bf12dc1512b56d9b49256c5a00177cf3/301ea2e3344b78304925743c00103fbb/\\$FILE/8-2003.pdf](http://www.pref.tokushima.jp/generaladmin.nsf/bf12dc1512b56d9b49256c5a00177cf3/301ea2e3344b78304925743c00103fbb/$FILE/8-2003.pdf)



図-1 測定地点位置図

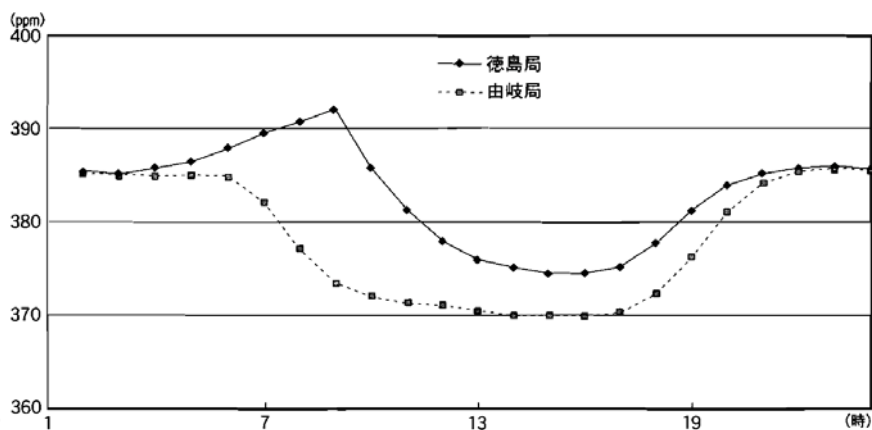


図-3 時間帯別平均値 (徳島, 由岐局)

4) 埼玉県

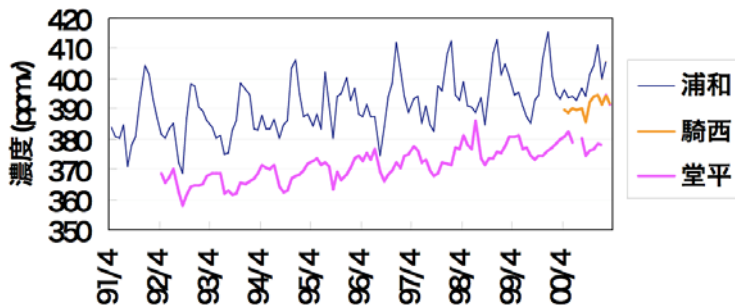


図1 二酸化炭素濃度の月平均値

http://www.pref.saitama.lg.jp/A09/BA30/labo/report/AnnualReport_CESS/no1/2000_47.pdf



埼玉県内のCO₂観測地点の場所