

| | | | |
|--|--------------------------------------|-------|----------------------------|
| 課題名 | B-2 温室効果ガス観測衛星データの解析手法高度化と利用に関する研究 | | |
| 課題代表者名 | 横田達也（独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター衛星観測研究室） | | |
| 研究期間 | 平成16-18年度 | 合計予算額 | 233,976千円（うち18年度 76,513千円） |
| 研究体制 | | | |
| <p>(1) 温室効果ガスの遠隔計測における巻雲・エアロゾルの影響研究</p> <p>1) 室内分光パラメータ取得及び地上・航空機観測による巻雲・エアロゾルの影響研究 (独立行政法人国立環境研究所)</p> <p>2) 温室効果ガスの分光データの高精度化 (国土交通省気象庁気象研究所)</p> <p>3) 新規in situ測定装置の開発とスペクトルの精密測定 (京都大学)</p> <p>4) 地上FTIR装置を用いた観測及び高精度高度分布導出 (名古屋大学太陽地球環境研究所)</p> <p>5) 雲・エアロゾル補正のための地上からのデータ取得と解析 (名古屋大学)</p> <p>(2) 衛星観測データからのカラム量導出のための解析手法の高度化研究</p> <p>1) 雲・エアロゾルの影響処理手法及び高度化データ処理アルゴリズムの開発 (独立行政法人国立環境研究所)</p> <p>2) カラム量導出のための数理統計情報解析に関する研究 (筑波大学)</p> <p>3) 熱赤外等の他の波長帯データによるカラム量解析手法の高度化研究 (東京大学気候システム研究センター)</p> <p>(3) 二酸化炭素収支分布推定のためのデータ同化手法の開発</p> <p>1) 濃度データの誤差がインバースモデル解析に与える影響に関する研究 (東北大学)</p> <p>2) 炭素収支量推定のためのスペクトルレベルでの評価関数の検討（平成16、17年度） (独立行政法人国立環境研究所)</p> <p>3) 衛星観測濃度データの四次元同化モデルに関する応用研究 (独立行政法人産業技術総合研究所)</p> <p>4) インバースモデルへの衛星データの適用方法と高分解能に関する研究 (独立行政法人海洋研究開発機構)</p> | | | |
| 研究概要 | | | |
| <p>1. 序（研究背景等）</p> <p>世界の地上観測局の配置には地域的な偏りがあり、また、各国の調査データの質もまちまちであるため、二酸化炭素をグローバルに測定する衛星の打ち上げが要望され、日米それぞれで計画されている。我が国では2008年の打ち上げを目標に、温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)プロジェクトが進行中である。GOSATの観測データを地球温暖化研究に真に役立てるため、平成15年度にはFS課題として「衛星観測データを活用した温室効果ガス吸収・排出量の推定精度に関する予備的研究」が実施された。その研究の成果として、データ解析時には薄い雲（巻雲）やエアロゾルが重要であることと、衛星観測データは高空間分解能の全球炭素収支（炭素のソース・シンク）の推定に役立つことが確認された。GOSATプロジェクトでは、基本的に大気中の雲やエアロゾルの極めて少ない（クリアスカイ条件の）地域と時期を対象に、二酸化炭素濃度を推定相対誤差1%で算出することを目標としている。しかし、観測データの多くには高層の薄い雲（巻雲）や、地表付近にダストや粉塵のようなエアロゾルが存在する場合は観測全体の90%を越え、それが観測データに影響を及ぼして濃度算出の誤差要因となるため、雲・エアロゾル存在下での高精度なデータ導出手法を開発する必要がある。そのため、当研究を平成16年度より開始した。</p> <p>当研究では、開発する雲・エアロゾル存在下での高精度なデータ導出手法の有用性や問題点を明らかにするために、温室効果ガスの遠隔計測における巻雲・エアロゾルの影響研究として、フィールド観測実験や室内の分光パラメータ精密測定を実施することとした。衛星打ち上げ前に地上での観測実験を行ってデータ解析手法に誤りが無いことを確かめることは実用的なアルゴリズム開発を行う上</p> | | | |

で極めて重要であり、本研究の特徴でもある。また、雲・エアロゾル存在下でのデータ処理手法の開発研究や、衛星観測センサ（短波長赤外データと熱赤外データ）の複合利用研究を行うとともに、解析された衛星観測データを全球の炭素収支推定研究に活用するための研究も実施する。以上のように、本研究課題では3節に示すように3つのサブテーマにより研究を進める計画を立てた。

2. 研究目的

本研究では、雲・エアロゾルがある場合の衛星観測データを有効に活用して、より正確に二酸化炭素の収支を推定しようとするものである。本研究の特徴は、GOSATの実利用性を重視して、衛星打ち上げに先立って航空機などによって雲・エアロゾル存在下での遠隔計測データを取得し、観測データの特徴を明らかにするとともに、実用的な温室効果ガス濃度の推定手法を開発する点にある。併せて衛星データをネット吸収・排出量推定モデルと組み合わせて利用する方法（モデルへの同化手法）も研究・開発する。具体的には、GOSATに搭載される温室効果ガス観測センサの仕様を基本的な条件とし、更に温室効果ガスを対象とした衛星観測データ全般を対象に、雲・エアロゾルの影響がある衛星観測データから、高精度に温室効果ガスのカラム量を導出することを目的として、解析手法の高度化を行う。更に、実際に衛星によって観測されるデータの特質を把握するため、類似仕様のセンサを地上の高所または航空機に搭載してデータを取得し、その解析手法の開発と実証を行う。また、GOSATプロジェクト及び将来の温室効果ガス衛星観測センサの方向付けに資することを目的として、大気輸送フォワードモデル計算への衛星観測データの同化手法の開発研究を行う。

なお、本研究は、京都議定書の第10条(d)「科学的及び技術的研究について協力し、気候変動とその悪影響及び種々の対応戦略による社会上及び経済上の結果に関連する不確実性を軽減するための、組織的観測の維持及び開発を促進し、…」に貢献する研究の一つと位置づけられる。また、総合科学技術会議温暖化イニシャティブ（平成17年度まで）の「二酸化炭素の収支推定誤差の半減」という目標達成に貢献する研究として位置づけられた。平成18年度からは、「科学技術基本計画」の重点推進4分野の一つである「環境分野」における、地球温暖化に立ち向かう戦略のための科学技術としての「人工衛星から二酸化炭素など地球温暖化と関係する情報を一気に観測する科学技術」に直接的に貢献する研究に位置づけられる。

3. 研究の方法及び結果

(1) 温室効果ガスの遠隔計測における巻雲・エアロゾルの影響研究

本サブテーマでは、雲・エアロゾル存在下における衛星搭載類似センサを用いた地上及び航空機観測を行う。同時に、雲・エアロゾルの密度・光学的性質、大気中の温室効果ガスの濃度分布を、地上に設置した高いスペクトル分解能のフーリエ変換分光器(FTSとぶ)や航空機によって直接測定する。このように、目標とする測定器による観測に合わせて、別の測定器でより直接的に対象(大気)を観測することを「in situ観測」という。また、温室効果ガスのカラム量導出の際の誤差要因の一つである気体分子の分光パラメータ情報の誤差を低減するため、温度・圧力を制御したガスセルを用いて高スペクトル分解能のFTSやレーザー分光法により温室効果ガスの高精度のスペクトル計測を行い、それらのデータから信頼性の高い分子分光パラメータを算出する。

平成16年度は、衛星に搭載される測定器に類似したセンサ(FTSの地上モデル)を初めて航空機や飛行船に搭載して衛星観測の模擬試験を実施した。その結果、太陽の地表面反射光の想定される輝度スペクトルが観測されたが、そのデータからカラム濃度の解析にまでは至らなかった。平成17年度は、地表面の変動による観測スペクトルの影響が無いほぼ快晴の筑波山頂に当地上モデルを設置し、地表面散乱光及び太陽直達光の分光観測を行った。そのデータから、観測時は快晴(クリアスカイ)で雲・エアロゾルは存在しないという仮定の下に二酸化炭素濃度を導出し、観測と同時に比較用に直接測定をしたデータ(in situ観測データ)と比較した。解析値とin situ観測データから求めた値とは2~4%の差で一致した。平成18年度は、同じく筑波山山頂での実験を実施したが、山腹からの迷光が小さくなるような観測方向を選択し、山頂と地表面には雲・エアロゾルの状況を測定するための装置も加えてデータを取得した。セスナ航空機によるin situ観測データも取得した(図1参照)。この種のフィールド観測実験(短波長赤外FTSによる地表面太陽散乱光観測スペクトルデータから二酸化炭素濃度を求める実験)は、当課題により日本はもとより世界初の試みがなされたと言える。

in-situ観測データに基づく理論スペクトルと地上モデルによる実観測スペクトルとを比較した結果、両者は良く一致した。二酸化炭素のカラム量(観測光路に沿った気柱量)のクリアスカイ条件での解析結果は、装置に依存する誤差の範囲内(2~3%以内)で一致した。更にエアロゾルを考慮した場合、両者の濃度は0.2~0.4%程度近づいた。これにより、サブテーマ(2)で研究開発を行っているデー

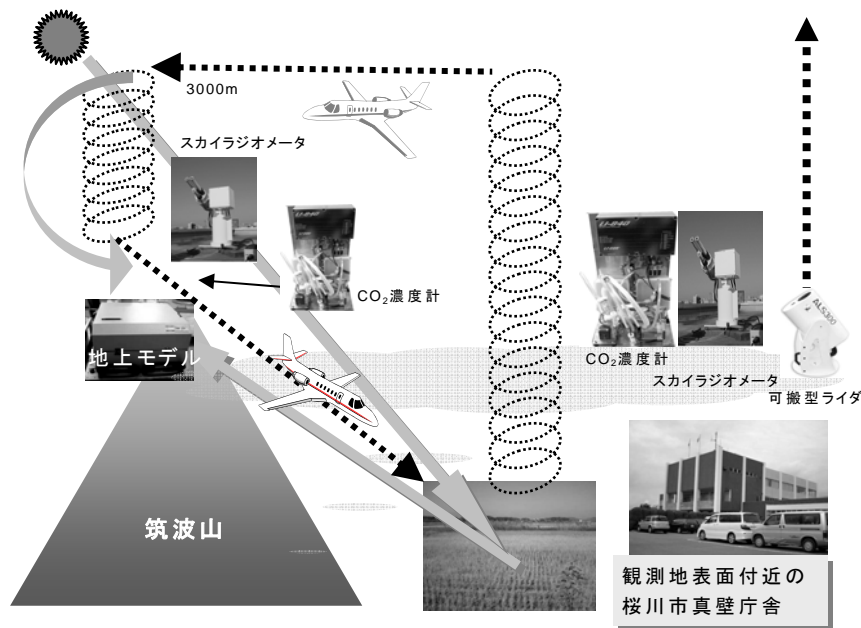


図1 FTSの地上モデルを用いた平成18年の筑波山高所観測の概要

タ解析手法に基本的に誤りのないことが実証された。

なお、上記の成果の他に、高分解能フーリエ変換分光計を用いたメタン $1.67\mu\text{m}$ 帯の分光パラメータについて調査及び精密測定を実施し、データを解析した結果、従来のHITRANデータベース2004年版1)ではメタン $1.67\mu\text{m}$ 帯の分光パラメータの整備が遅れていることが判明した。二酸化炭素については冬季の二酸化炭素濃度がほぼ一定時の観測データの解析結果から、当手法の相対精度は0.2%程度であることが示された。

また、分光パラメータに関する研究では、2004年に公開された最新版のHITRAN2004データベースの吸収線パラメータと比較して、二酸化炭素 $1.6\mu\text{m}$ 帯の低波数側に位置する吸収帯の線強度等に新たな知見を得た。また、レーザーキャビティリングダウン法により、二酸化炭素の $1.6\mu\text{m}$ 帯の吸収スペクトルを高分解能($10\sim 3\text{cm}^{-1}$ 以下)で計測した。温度範囲を $263\sim 326\text{K}$ として、圧力拡がりの係数を温度の関数及び回転順位の関数として求めた。既存のHITRANデータベースと本実験結果とは良く一致した。メタンの赤外吸収帯のスペクトルについては、同じくレーザーキャビティリングダウン分光法を用いて、衝突幅や温度係数について高精度に求められることがわかった。

(2) 衛星観測データからのカラム量導出のための解析手法の高度化研究

本サブテーマでは、雲やエアロゾルが存在する場合に太陽光の地表面反射スペクトルを衛星から観測し、そのデータから二酸化炭素やメタンなどの温室効果ガスのカラム量を高精度に導出する手法について検討する。

薄い雲(巻雲)が存在する場合のデータ解析手法としては、巻雲が高度 10km 付近に存在する場合に、巻雲からのパステラディアン情報が水蒸気の吸収飽和波長帯領域の観測データから得られるという特徴を利用して、巻雲の高度、光学的厚さ、地表面反射率、気体のカラム量を推定するための逐次推定手法として、2ステップの推定手法を開発した。

本研究で対象とする巻雲の影響は多くの場合、巻雲の高度とその光学的厚さが未知である。巻雲によって太陽光が減衰して地表面に到達し、そこで反射して大気中のガスの吸収を受けて衛星に到達する光と、巻雲の表面で反射された光(パステラディアン)が衛星センサに到達する光とが合成されて観測される(図2)。これを数値シミュレーションによって計算する。更に観測装置の特性(SN比を300)に合わせたノイズを付加して、擬似観測データを作成し、それを用いてデータ解析手法を検討した。

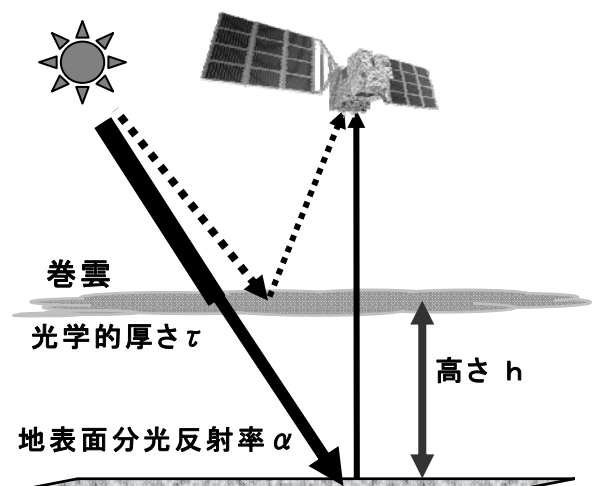


図2 巻雲が存在する場合の観測

1) [第1ステップ] : バンド1 (0.76 μm 帯) と、バンド3 (2.0 μm 帯) の水蒸気の飽和波長域 (図3) から、巻雲の高度 h と光学的厚さ τ を推定する。この際、バンド1の地表面分光反射率も同時に推定する。

2) [第2ステップ] : 第1ステップで求められた h と τ を利用して、バンド2 (1.6 μm 帯) の二酸化炭素 (CO_2) 吸収波長域から CO_2 のカラム量と、その波長域での地表面分光反射率を推定する。

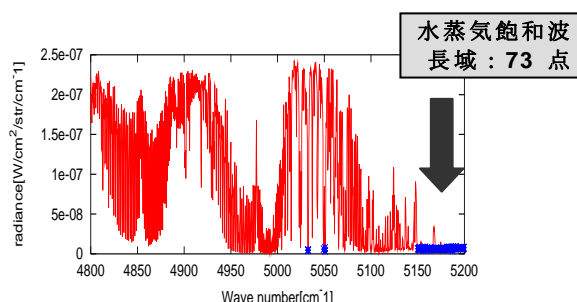


図3 巻雲からのパ斯拉ディアン情報として利用するバンド3の水蒸気飽和領域

この逐次推定法を12個の異なるノイズの擬似観測スペクトルデータに対して適用し、導出誤差の統計量を求めた。結果の一例として巻雲の光学的厚さ τ が、 $\tau=1.0$ のとき (case 1) と $\tau=0.2$ のとき (case 2) のそれぞれの結果を表1に示す。

表1 第2ステップ後の二酸化炭素カラム濃度の推定誤差の統計量 (単位: %)

| case | 巻雲 | 平均 | S.D. | 最小 | 最大 | 総合誤差 |
|------|------------|-------|-------|--------|-------|-------|
| 1 | $\tau=1.0$ | 0.011 | 0.137 | -0.245 | 0.281 | 0.137 |
| 2 | $\tau=0.2$ | 0.007 | 0.116 | -0.221 | 0.237 | 0.116 |

巻雲濃度が薄いcase 2の場合には巻雲に関するパラメータの推定精度は悪くなるが、二酸化炭素のカラム濃度の推定精度への誤差要因としての影響量は小さくなるため、結果としてカラム濃度は安定して求められ、その推定誤差は0.2%以下に抑えられることがわかった。

なお、この手法は、平成17年度には3ステップ法として研究開発したものを平成18年度に改良して2ステップ法としたものである。

また、本サブテーマでは、上記の研究結果の他に、以下のような研究成果を得た。

- (i) データ解析時の初期値として利用する巻雲パラメータの解析を、既存衛星 (ICESat 衛星搭載 GLAS センサ) の観測データ (2003年10月~11月のデータ) に基づいて行い、緯度帯別に巻雲の雲頂、中心、雲底の高度、幾何学的厚さ、光学的厚さの平均と分散を求め、巻雲の出現傾向を解析した。
- (ii) データ解析上の誤差要因となるエアロゾルに対処するため、エアロゾルパラメータの推定誤差が二酸化炭素カラム濃度推定誤差に及ぼす影響を調査し、黒鉛粒子の含まれるエアロゾルが誤差要因となること、低高度に分布するエアロゾルの影響は小さいが、黄砂などの高々度に存在するエアロゾルの影響が大きいことなどの知見を得た。
- (iii) 装置の特性に基づくノイズモデルを作成し、二酸化炭素カラム量導出に寄与する誤差要因を評価した。バンド2とバンド3の両者を用いて導出する場合、気温と水蒸気の影響が大きく、装置内のノイズではデータの量子化誤差の寄与が大きいことがわかった。
- (iv) 衛星観測の短波長赤外データと熱赤外データとの複合利用手法について検討し、二酸化炭素の下層大気の情報や上層大気のみを情報を得るための手法を開発した。更に、複数センサの利用による雲パラメータの抽出手法を開発した。

上記の(iv)の研究成果の一例として、以下に短波長赤外 (SWIR) センサからの情報 (カラム量) を拘束条件として熱赤外 (TIR) センサの観測データから上層の二酸化炭素濃度を求める手法について報告する。この手法の概念図を図4に示す。

SWIR解析により求められたカラム量情報を追加的な拘束条件として熱赤外 (TIR) データの解析を行う場合、初期推定値 (第一推定値) を更新するという手法によって、最終的に求められる CO_2 濃度に対する誤差 (解析誤差) が当初の場合より低減する。ここでは、カラム量の導入による誤差の低減は各高さの分子数密度に比例して起きる、つまり、相対的な誤差の低減率がどの高度でも一定であると仮定している。TIRセンサは大気下層に感度がなく、特にカラム量に大きく影響する大気境界層内

の激しい濃度変動は検出が難しい。しかしSWIRセンサのデータを組み合わせることで、より小さい誤差の推定結果を得ることができる。データの複合利用は、今後の発展的な研究の一つといえる。

SWIRによるカラム量のTIR解析への導入方法

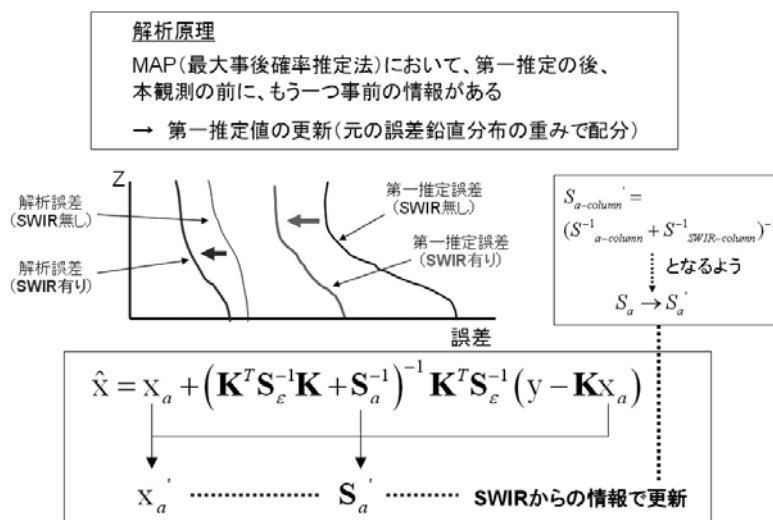


図4 カラム量を拘束条件として上層のCO₂濃度を求める手法の概念図

(3) 二酸化炭素収支分布推定のためのデータ同化手法の開発

本サブテーマでは、GOSATなどの衛星から得られるカラム濃度と地上観測および航空機観測による濃度データを結合し、全球3次元大気輸送モデルで解析することによって、地域別の二酸化炭素の収支を全球にわたって評価する手法を確立することを目的とする。

そのため、高解像度全球大気輸送モデルの開発・検証、データベース間の誤差や観測サイト選別、総観気象バイアスなどが収支推定に及ぼす影響の検討、逆解法解析手法の高速化、CO₂収支分布推定のためのデータ同化手法の開発、CO₂濃度の全球分布表示システムの開発、他機関からのCO₂濃度データの早期入手の調査を行った。

平成16年度は、特に解析に用いる大気輸送モデルの高解像度化および濃度データの四次元同化の手法の開発を開始するとともに、モデル解析およびそれに利用する濃度データに含まれる誤差要因の影響の検討を行った。輸送モデルの高解像度化に関しては、従来の2.5°×2.5°の空間分解能を0.25°×0.25°に向上させ、モデルを効率よく計算を行うために、マルチプロセッサ計算機上で稼動するように改良した。また、高解像度化したモデルに入力するために、既存の化石燃料起源二酸化炭素の放出分布と2.5°の全球人口データを基に、0.5°、0.25°、0.125°のデータベースを作成した。平成17年度は、平成16年度に開発した高解像度全球大気輸送モデルの検証、気象条件による衛星観測データの偏り(総観気象バイアス)や観測サイト選別が収支推定に及ぼす影響の検討、CO₂収支分布推定のためのデータ同化手法の開発、CO₂濃度の全球分布表示システムの開発を行った。その結果、大気輸送モデルの水平分解能を向上させることにより、巨大都市からのCO₂の流れ出しや内陸サイトでしばしば観測されるCO₂濃度スパイクなどを良く表現できるとともに、低気圧付近での大気の鉛直運動に伴って夏期のCO₂カラム濃度がシベリアや北米で顕著に低下することが見いだされ、CO₂収支解析の際にこのバイアスを考慮する必要があることがわかった。平成18年度には、データ誤差及び観測サイトが収支推定に及ぼす影響の検討を進め、衛星観測CO₂濃度データの四次元同化モデルの開発を進展させた。

以下に、データ誤差及び観測サイトが収支推定に及ぼす影響の検討結果について示す。

衛星観測による大気中のCO₂濃度データは、これまでに逆解法解析で伝統的に用いられてきた地上データのみと比べて、全球にわたる放出源・吸収源強度の地域分布を導出する上で、有効な役割を果たすと期待されている。しかしながら、衛星データを利用するにあたっては、測定精度や異なった測定手法によるデータ間のバイアス、測定とモデル計算の時間的不一致、雲やエアロゾルによる干渉などについて十分な配慮が必要である。そこでこれまでの研究報告を基に検討を行った。図5(A)は、衛星データおよびTransCom-3のプロトコルに従って海域と陸域をそれぞれ11に分割した逆解法を用いて、データにバイアスを与えない場合と全球一律な1%のバイアスを与えた場合の結果の差を表している。この図から、一律なバイアスはどの地域のフラックスにも大きな影響を与えないことがわかる。

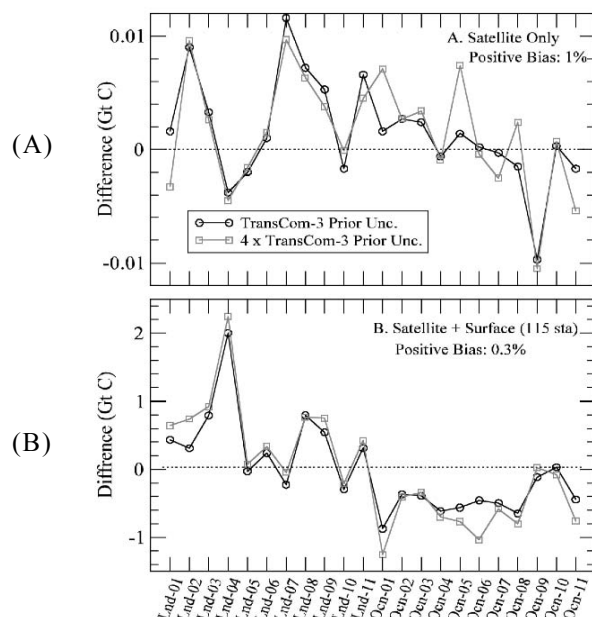


図5 衛星データと逆解法を用いて推定された海域 (Ocn) と陸域 (Lnd) のCO₂フラックスの違い。(A)は、衛星データのみを用いて、それに1%のバイアスを与えたときと与えないときの結果の違いを表し、(B)は、衛星データと115地点の地表データを用いて、衛星データに0.3%のバイアスを与えたときと与えないときの結果の違いを表す。ただし、衛星データには測定誤差はないと仮定している。

一方、二つの異なる観測方法からのデータ（ここでは衛星観測と地上観測を仮定）が用いられた場合、衛星データにわずか0.3%のバイアスを与えただけで、推定されたフラックスに大きな違いを生ずることが図5(B)からわかる。また、海域と陸域のフラックスの違いはほぼ同程度であるが、影響は領域によってかなり異なる。このことは、衛星データの検証と必要な補正が極めて重要であることを意味している。

衛星観測とモデル解析の時間の不一致から生ずるフラックスの誤差の評価は、上述の事項と比べてはるかに困難である。そこで、本研究では、今後の研究に供するために、大気輸送モデルを用いて基本的概念を検討した。この種の誤差としては、CO₂の日変化から生ずるバイアス (diurnal bias) と総観規模の気象条件の不適切な表現に関係したバイアス (clear sky bias) が考えられる。これらのバイアスを検討するためには、大気境界層の日変化のパラメタリゼーションおよびそれに関連したプロセスの扱いや、大気対流システムの時間変化と強度の取り扱いの正確化などについて、濃度のフォワード計算を行う際に用いる大気輸送モデルの改善が必要である。加えて、気象データを基にした陸上・海洋生物圏フラックスの日変化を計算する能力も必要である。

次に、衛星観測 CO₂ 濃度データの四次元同化モデルの開発結果について報告する。

本研究で入手したアジョイントコード（大気中の二酸化炭素を時間軸に沿って計算していく順方向モデルに対して、時間軸を逆方向に遡る計算モデルによるプログラム）の性能をテストするために、GOSAT衛星がデータを取得する可能性が高いサハラ砂漠上空 (5° E, 22.5° N, 3 km) の1999年1月31日18UTCをターゲットとして解析を行った。最初にターゲットを固定したまま、積分期間を10日、20日、30日と変えて、アジョイント感度の空間分布の変化を調べた。更に、本アジョイントコードを用いて、1995年の1年間について、アラスカのポイントバロー、南鳥島、ハワイのマウナロア、米国領サモア、タスマニアのグリム岬、南極点の6地点での連続観測データから地表面フラックスを推定することを試みた。その結果、観測誤差を小さく設定することによってアジョイント感度の合成では観測濃度に近づけることができたが、再度モデルを走らせた場合は、かえって濃度が観測値から遠くなった。考えられる原因として、濃度の増加率として得られる解をフラックスに変換する部分で生ずる不整合が挙げられる。本研究で実施したデータ同化法の開発では、データ同化しようとする衛星観測からの気柱積分濃度が与えられると、まず順方向積分をして得た（背景）濃度の気柱積算量と比較し、観測濃度との差が2 ppm（約5%）以上の場合、その食い違いの濃度を全球大気輸送モデルが作り出す分散に応じて高さ方向に配分する。背景濃度にこの食い違いを取り入れるために必要となる6時間前の濃度分布の修正量は、最小二乗法型の評価関数を定義し、それを最小にするような濃度として求めた。さらに修正した濃度分布を初期値として大気輸送モデルを順方向に6時間（1ステップ）走らせ、

観測との食い違いを修正するという手続きを誤差が2 ppm以下となるまで反復した。その結果、年間濃度が365 ppmから380 ppmへ変動する地点についてこの二つの濃度へのデータ同化を行ったところ、およそ20-30回の反復計算を行うことにより2 ppmの誤差に収束した。

4. 考察

本研究では、雲・エアロゾルがある場合の衛星観測データを有効に活用して、より正確に二酸化炭素の収支を推定するための解析手法の高度化に関する研究を、実測データと数値シミュレーションデータを用いて行う。そのため、本研究は3つのサブテーマを構成して実施した。本研究におけるサブテーマ間の関連性は、以下の通りである。

サブ(1)では、地上または航空機によって衛星観測の模擬データ(規模を縮小した実観測データ)を取得し、同時に取得される *in situ* 観測データとともに、現実の観測スペクトルデータの特徴を明らかにした。更にデータ解析の際の誤差要因の一つである気体の分子分光パラメータの精緻化を図った。ここでの成果はサブ(2)で開発される解析手法の検証として役立つ。

サブ(2)では、主に数値シミュレーションによって、雲・エアロゾルが存在する場合のデータ処理手法を研究開発するとともに、短波長赤外データの他に熱赤外データの情報も複合利用することにより、推定手法の高度化を図った。更に、過去の衛星データなどから雲・エアロゾルの出現状況や特徴について調査した。サブ(1)で得られる成果に基づいて、実際の観測データと理論スペクトルとの差異を明らかにし、それに基づいてデータ解析手法の開発・改良を図った。また、本研究により、雲・エアロゾルが存在する場合の衛星観測によるカラム量推定データの特徴を明らかにして、サブ(3)の炭素収支モデル推定への入力データの特徴として活用した。

サブ(3)では、衛星観測データのほかに地上観測データを利用して二酸化炭素などの炭素収支全球分布を求めるためのデータ同化手法について研究した。サブ(3)で得られるモデル推定値やここで整備された関連データベース、二酸化炭素濃度の全球表示システムからの出力データは、サブ(2)の研究におけるデータ解析時の初期値データ、拘束条件、または参照データとして活用される。

平成17年度と平成18年度には、サブ(1)でFTSの地上モデルを筑波山山頂に設置して、太陽の地表面散乱光の観測データを取得した。その平成17年度の観測データを、サブ(2)で開発されているクリアスカイを条件とした手法を適用して二酸化炭素カラム濃度の導出を試みたところ、5%程度の差で*in situ*観測データと一致した。差の原因は、装置のノイズやエアロゾルの影響が考えられるが、エアロゾルパラメータを取得した実験ではないため、それ以上の解析ができない。そこで平成18年度には、上記の問題点を解決出来るようにスカイラジオメータやエアロゾルライダ等を利用した観測実験を試みた。エアロゾルを考慮した解析の場合には結果の差が0.2~0.4%ほど小さくなることがわかった。

サブ(2)では、巻雲が存在する場合の衛星観測データの処理手法として、巻雲からの放射(パストラディアン)と減衰の補正を精密に行い、温室効果ガスのカラム量を安定かつ高精度に導出するための解析手法を開発し、計算機シミュレーションによってその推定精度を確認した。エアロゾルの影響についても検討し、低高度の大気境界層の内部に存在するエアロゾルの影響は小さく、高々度に分布するエアロゾルや黒煙粒子を含むエアロゾルの影響が大きいことが判明した。また、短波長赤外データと熱赤外データの複合利用の骨子を確立した。

以上のようにサブ(1)の実験側とサブ(2)の解析側が連携して総合的な研究を進めた。これにより、基本的なGOSATのデータ処理アルゴリズムの骨子が確立されたと言える。

サブ(3)では、衛星観測データを利用して二酸化炭素の放出源・吸収源強度の時間空間変動を推定する、いわゆるトップダウンアプローチによる手法開発を行った。高解像度大気輸送モデルの検証と総観気象バイアスの検討、観測サイトが収支推定に及ぼす影響の検討、二酸化炭素収支分布推定のためのデータ同化手法の開発、二酸化炭素濃度の全球分布表示システムの開発を行った。衛星観測データとモデル出力とを比較するためにも、高い時間空間分解能を持つ輸送モデルの開発が不可欠である。また、特に衛星観測データは、日中の晴天域のデータしか取得しないことから、二酸化炭素濃度に偏りを生じ(これをクリアスカイバイアスという)、測定点によっては影響が大きい。そのバイアスの影響をモデルに取り組みむために、連続観測データからのバイアス量の推定や、次世代の雲改造モデルの利用などの検討を進めた。また、四次元同化のアジョイント手法をより精緻化するための検討を行った。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

衛星センサの地上モデルを航空機に搭載し、あるいは山頂などの高所に設置して分光観測データを取得する実験を行った。このように、衛星の打ち上げ前に、地上または航空機により疑似的な衛星観測データの取得を試みたことは、事前に実観測データ上の特徴や問題点を明らかにして、それらに対

処できる実利用可能な解析手法を開発するために効率的かつ不可欠な研究手法であることを実証できたと言える。地上高分解能フーリエ変換分光計を用いた太陽直達光による温室効果ガスの観測からは、二酸化炭素濃度導出精度を実証し、今後の検証手段の一つとして利用可能であることを示した。また、分光パラメータの高精度解析研究からは、広く利用されているHITRANデータベースとの比較研究の結果、良く一致した部分やHITRANに不備がある部分を指摘することができた。今後は衛星観測データの解析誤差を低減するために活用される。更に、高精度分光パラメータの計測手法として、レーザーキャビティリングダウン法が利用できることが実証された。これにより、今後の精度の高いラインパラメータ整備の研究に貢献するものと期待される。

巻雲が存在する状況で取得されたデータに対する新たな処理方法を開発した。これは実際のGOSATのデータ処理に利用されるはずである。なお、この手法では巻雲濃度が薄い場合には巻雲に関するパラメータの推定精度は悪くなるが、二酸化炭素のカラム濃度の推定精度への誤差要因としての影響量は小さくなるため、結果としてカラム濃度は安定して求められる。したがって、クリアスカイと判定される観測条件でも、多くの場合巻雲が存在するという科学的な知見に基づくと、観測データの処理にはクリアスカイと判定されたシーンに対しても本手法を適用して、二酸化炭素のカラム濃度を高精度に求めるための安全策をとるべきであるという指針を示すことができた。更に、エアロゾルは人工衛星から太陽地表面散乱光を観測する際の最大の誤差要因の一つであり、今後その対処指針を本研究によって初めて具体的に言うことができた。状況は複雑であるが、実際のデータ処理上のヒントや、過誤を軽減するための重要点については示すことができたと考えている。また、短波長赤外と熱赤外の複合利用研究では、両者を組み合わせて利用することにより、CO₂の発生源、吸収源の推定に最も重要な大気境界層内の濃度解析が可能であることを提示し、その有効性を示すことができた。今後、この手法が実用化されれば、求められる大気境界層内のCO₂濃度データの蓄積と解析により、より確からしい炭素の発生源、吸収源強度の推定が可能になるものと期待される。

二酸化炭素収支分布推定のためのデータ同化手法の開発研究では、従来の2.5°×2.5°の水平分解能を0.125°×0.125°までに向上させ、時間ステップも最小で150秒の計算を可能とし、極めて高解像度化したモデルを開発し、実際にCO₂濃度の時間変動や水平分布のコントラストをより現実的に表現できることを示した。また、現在CO₂フラックスの逆解法において広く用いられている全球大気輸送モデルについて、陸域と海域における観測サイトからのデータセットを解析することによって、特に鉛直輸送の表現に不備があることを示し、衛星データの解析に用いるためにはモデルの改良が必要であることを明らかにした。衛星データと地上観測データを同時に用いた場合、データ間のバイアスに起因するCO₂フラックスの推定誤差について配慮が必要であり、本研究では詳細なシミュレーションを行うことによって観測に際して配慮すべき指針を与えた。アジョイント演算子を用いて地表面でのCO₂フラックスを直接推定する手法は、作成した演算子の適用時間が一ヶ月に制限されているために断定的な結果を得るに至らなかったが、CO₂の発生と吸収に関して極めて興味深い結果を示した。また、本研究で作成した4次元データ同化システムはCO₂濃度に特化した簡便かつ効率的なシステムであるが、衛星観測によるCO₂カラム濃度のみならず、定期航空機を用いたCO₂濃度の三次元観測などにも適用できる能力を有していることも大きな意義がある。

(2) 地球環境政策への貢献

本研究成果である衛星センサ地上モデルの室内評価結果、地上及び航空機を用いた観測結果は本研究によって独自に得られた成果であり、他国の関連研究者は彼らの解析アルゴリズムの検証のために、これらの観測データや解析結果に対して深い関心を示している。これは、当研究成果が国際協力を進める上において交渉材料ともなり得る貴重なものであることを示しているといえる。

また、環境省・宇宙航空研究開発機構・国立環境研究所の三者が共同で推進するGOSATプロジェクトにおけるデータ処理手法の一つに本研究の成果が実用されることにより、衛星によって取得されるより多くのデータが信頼性の高いデータとして科学研究に活用される。本研究の成果として得られる高頻度・高精度の衛星観測結果（二酸化炭素やメタンのカラム量）は、温室効果ガスのネット吸収・排出量推定のためのモデルへの入力値として役立つ。更にそのモデルの出力として得られる全球の炭素収支推定値の精度が高まる。このようにして炭素の収支モデル計算における不確実性が低減するなどの科学的成果が得られれば、それにより我が国の温暖化施策に貢献するものと期待される。

更に、本研究の副次的な効果として、本研究で得られた手法や知見は逆解法によるCO₂フラックスの時間空間変動の推定の高度化に直接役立つので、サブ(3)により研究開発された手法を応用することにより、京都議定書に基づくCO₂排出削減の検証などに貢献することが期待される。

6. 研究者略歴

課題代表者：横田達也

1956年生まれ、東京大学大学院工学系研究科修了、工学博士、
現在 独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター衛星観測研究室長

主要参画研究者

(1) 1) : 森野 勇

1968年生まれ、総合研究大学院大学博士後期課程修了、理学博士、
現在 国立環境研究所地球環境研究センター衛星観測研究室主任研究員

2) : 小熊 宏之

1965年生まれ、千葉大学園芸学部園芸経済学科卒業、工学博士、
現在 国立環境研究所地球環境研究センター陸域モニタリング推進室主任研究員

3) : 川崎 昌博

1947年生まれ、京都大学大学院燃料化学専攻博士課程中退、理学博士、
現在 京都大学大学院工学研究科分子工学専攻物性物理化学講座教授

(2) 1) : 横田 達也 (課題代表者に同じ)

2) : 日暮 明子

東京大学大学院理学系研究科博士課程修了、理学博士、
現在 国立環境研究所大気物理研究室主任研究員

3) : 椿 広計

1956年生まれ、東京大学大学院工学系研究科修了、工学博士、
現在 筑波大学大学院社会工学系ビジネス科学研究科教授

4) : 今須 良一

1962年生まれ、名古屋大学理学研究科博士課程後期中退、理学博士、
現在 東京大学気候システム研究センター助教授

(3) 1) : 中澤 高清

1947年生まれ、高知大学文理学部卒業、理学博士、東北大学理学部教授、
現在 東北大学大気海洋変動観測研究センター長

2) : Shamil Maksyutov

1957年生まれ、モスクワ工科大学卒業、化学物理博士、
現在 国立環境研究所地球環境研究センター主席研究員

3) : 田口 彰一

1956年生まれ、東京大学大学院理学系研究科博士課程後期中退、理学博士、
現在 産業技術総合研究所環境管理技術研究部門地球環境評価研究グループ長

7. 成果発表状況 (本研究課題に係る論文発表状況。)

(1) 査読付き論文

- 1) T. Hidaka, T.M.T. Yamada, M. Fukabori, T. Aoki, and T. Watanabe: *J. Mol. Spectrosc.*, 232, 202-212 (2005)
“Intensities and self-broadening coefficients of the CO₂ ro-vibrational transitions measured by a near-IR diode laser spectrometer”
- 2) D. F. Baker, R. M. Law, K. R. Gurney, P. Rayner, P. Peylin, A. S. Denning, P. Bousquet, L. Bruhwiler, Y.-H. Chen, P. Ciais, I. Y. Fung, M. Heimann, J. John, T. Maki, S. Maksyutov, K. Masarie, M. Prather, B. Pak, S. Taguchi, and Z. Zhu: *Global Biogeochem. Cycles*, 20, GB1002-10.1029/2004GB002439 (2005)
“TransCom 3 inversion intercomparison: Impact of transport model errors on the interannual variability of regional CO₂ fluxes, 1988–2003”
- 3) P. K. Patra, S. Maksyutov and T. Nakazawa: *Tellus*, 57B, 357-365 (2005)
“Analysis of atmospheric CO₂ growth rates at Mauna Loa using inverse model derived CO₂ fluxes”
- 4) P. K. Patra, S. Maksyutov, M. Ishizawa, T. Nakazawa, T. Takahashi and J. Ukita: *Global Biogeochemical Cycle*, 19, GB4013, doi:10.1029/2004GB002257 (2005)
“Interannual and decadal changes in the sea-air CO₂ flux from atmospheric CO₂ inverse modeling”

- 5) P. K. Patra, S. Maksyutov, M. Ishizawa, T. Nakazawa and G. Inoue: *Global Biogeochemical Cycle*, 19, GB3005, doi:10.1029/2004GB002258 (2005)
“Effects of biomass burning and meteorological conditions on land-atmosphere CO₂ flux from atmospheric CO₂ inverse modeling”
- 6) S. Nakamichi, Y. Kawaguchi, H. Fukuda, S. Enami, S. Hashimoto, M. Kawasaki, T. Umekawa, I. Morino, H. Suto, and G. Inoue: *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 8, 364-368 (2006)
“Buffer-gas pressure broadening for the (3 0⁰ 1)_{III} ← (0 0 0) band of CO₂ measured with continuous-wave cavity ring-down spectroscopy”
- 7) M. Fukabori, T. Aoki, T. Fujieda, and T. Watanabe: Proceedings of the 7th International Radiation Symposium, 95-98 (2006)
“Line strengths and half-widths of the N₂O bands in the 2.0- to 2.3 μm region at room temperature”
- 8) P. K. Patra, K. R. Gurney, A. S. Denning, S. Maksyutov, T. Nakazawa, et al.: *Geophys. Res. Lett.*, 33, L05814, doi:10.1029/2005GL025403 (2006)
“Sensitivity of inverse estimation of annual mean CO₂ sources and sinks to ocean-only sites versus all-sites observational networks”
- 9) T. Tanaka, M. Fukabori, H. Nakajima, T. Yokota, T. Watanabe, and Y. Sasano: *J. Mol. Spectrosc.*, 239, 1-10 (2006)
“Spectral line parameters for CO₂ bands in the 4.8- to 5.3-μm region”
- 10) T. Nakayama, H. Fukuda, S. Hashimoto, M. Kawasaki, I. Morino, G. Inoue, and S. Aloisio: *Chem. Phys.*, 334, 196–203 (2007)
“Buffer-gas pressure broadening for the (00⁰3) ← (00⁰0) band of N₂O measured with continuous-wave cavity ring-down spectroscopy”
- 11) A. Bril, S. Oshchepkov, T. Yokota, and G. Inoue: *Applied Optics*, Vol. 46, Issue 13, 2460-2470 (2007)
“Parameterization of aerosol and cirrus cloud effects on reflected sunlight spectra measured from space: application of the equivalence theorem”
- 12) N. Eguchi, T. Yokota, and G. Inoue: *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 34, L09810, doi:10.1029/2007GL029529 (2007)
“Characteristics of cirrus clouds from ICESat/GLAS observations”
- 13) T. Nakayama, H. Fukuda, T. Kamikawa, A. Sugita, M. Kawasaki, I. Morino, and G. Inoue: *Appl. Phys. B*, 88, 137-140 (2007)
“Measurements of the 3n₃ band of ¹⁴N¹⁵N¹⁶O and ¹⁵N¹⁴N¹⁶O with continuous-wave cavity ring-down spectroscopy”
- 14) T. Nakayama, H. Fukuda, T. Kamikawa, Y. Sakamoto, A. Sugita, M. Kawasaki, T. Amano, H. Sato, S. Sakaki, I. Morino, and G. Inoue: *J. Chem. Phys.*, 127, 134302 (2007)
“Effective interaction energy of water dimer at room temperature: An experimental and theoretical study”