

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

(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

独立行政法人国立環境研究所

大気圏環境研究領域	遠隔計測研究室	森野 勇
地球環境研究センター	陸域モニタリング推進室	小熊宏之
	大気・海洋モニタリング推進室	町田敏暢

国土交通省気象庁気象研究所

物理気象研究部	第3研究室	青木輝夫（平成18年度）
		深堀正志（平成16、17年度）

京都大学大学院	工学研究科	分子工学専攻	川崎昌博
---------	-------	--------	------

名古屋大学

太陽地球環境研究所	大気圏環境部門	長濱智生
同大学院環境学研究科	地球環境科学専攻	井上 元

〈研究協力者〉 独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇宙利用推進本部

GOSATプロジェクトチーム 久世暁彦

平成16～18年度合計予算額	1 1 1, 0 4 9 千円
（うち、平成18年度予算額	2 8, 5 0 0 千円）

[要旨] 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、衛星センサの地上モデル（フーリエ変換分光計、BBM）を航空機（セスナや飛行船）に搭載し、あるいは山頂などの高所定点に設置して、分光観測データを取得した。同時に、地上からの装置による分光観測データや航空機による直接測定データ（in-situ観測データ）を取得し、二酸化炭素（CO₂）及びメタン（CH₄）に関する観測情報の解析を行った。飛行船に搭載したBBMによる地表面散乱光の観測では、実観測スペクトルとin-situ観測に基づいた放射伝達計算によるスペクトルとを比較し、装置のノイズに起因する誤差の範囲で良い一致を得た。筑波山山頂にBBMを設置して地表面散乱光及び太陽直達光の観測を2回行い、in-situ観測データに基づく理論スペクトルとBBMの実観測スペクトルとを比較した。両者は良く一致し、CO₂カラム量（観測光路に沿った気柱量）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。これにより、サブテーマ(2)で研究開発を行っているデー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、この種のフィールド観測（二酸化炭素計測を目標とした短波長赤外FTSによる地表面観測）は、本研究が世界初である。

また、地上高分解能フーリエ変換分光計を用いた太陽直達光観測を行い、解析されたCO₂カラム量は小型航空機搭載In-situ測定と比較して1%以内で一致した。なお、冬季のCO₂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。

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、CO₂ 1.6 μm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。CH₄の赤外吸収帯のスペクトルにおいては、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。

[キーワード] 温室効果ガス、GOSAT、航空機観測、地上観測、エアロゾル

1. はじめに

環境省と宇宙航空研究開発機構では、衛星観測によって地球温暖化の状況を把握するために、平成14年度に「温室効果ガス観測ミッション」計画を策定した。このミッションでは、京都議定書の第一拘束期間(2008～2012年)における観測開始を目標に、「温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)プロジェクト」を推進している。このプロジェクトの目的は、衛星観測データと地上モニタリングデータを組み合わせて、逆推定モデル計算によって温室効果ガスの収支を亜大陸単位で把握し、その推定誤差を半減させることである。その衛星センサの仕様について平成14年度より検討が行われ、具体的な衛星センサ仕様については、環境省・国立環境研究所・宇宙航空研究開発機構の三者のもとで設置されている「GOSATセンサ検討グループ(平成16年11月～平成16年3月)」により検討が行われた。平成16年度からは「GOSATサイエンスチーム」において、衛星センサのより詳細な仕様、観測データの解析手法、データ利用方法等について検討がなされている。

GOSATの観測データの解析手法については、確実にカラム量の導出が可能な、観測視野中に雲やエアロゾルがほとんど存在しない条件(クリアスカイ)を中心にプロジェクト研究が行われ、平成15年度の予備的研究(地球環境研究総合推進費FS-3、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)¹⁾によって、誤差要因の種類と各誤差の影響の程度が評価された。その結果、観測データの多くには高層の薄い雲(巻雲)や地表面にエアロゾルが存在し、それらは観測データ全体の90%を超えるため、雲・エアロゾル存在下における高精度なデータ解析手法の開発の必要性が明らかとなった。

本サブテーマでは、これまでの予備的研究の結果に基づいて、実際に衛星によって観測されるデータの特徴を把握するため、打ち上げ前の類似仕様のセンサを地上設置や航空機に搭載して観測データを取得し、それらのデータの特徴を明らかにするとともに、その解析手法の開発に繋げる実証的研究を実施した。また、導出精度に影響を与える分子分光パラメータを、地上フーリエ変換分光器とキャビティリングダウンレーザー分光法により精密測定し、文献値と比較を行い、大気観測データと比較を行った。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ることは、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。本サブテーマはその実証のための研究と位置づけられる。

2. 研究目的

衛星で観測されるデータには、薄い巻雲やエアロゾルが観測視野内に含まれることが多い。このような観測条件下で取得されたスペクトルデータから、温室効果ガスなどの大気組成濃度を求めるための実用的なデータ解析手法は、これまで研究開発されていない。

本サブテーマでは、雲・エアロゾルの存在下での衛星観測データを模擬することを目的として、衛星搭載センサの類似センサ(地上モデル:BBM)を用いて雲・エアロゾル存在下の気象条件のもとで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航空機により直接測定する。このように、目標とする観測装置による測定と

同時に、別の測定装置を用いてより直接的に対象(大気微量成分)を測定することを「In-situ観測」とよぶ。In-situ観測データは、衛星センサの地上モデルにより測定したデータの参照値として利用される。また雲やエアロゾルの影響を切り分けるために、地上に設置した高スペクトル分解能のフーリエ変換分光計により太陽直達光の大気観測を行い、これらの影響ほとんど受けないスペクトルを観測し、温室効果ガスのカラム濃度を導出する。これら結果はサブテーマ(2)の研究にも利用される。

更に、データ解析上の誤差要因の一つである、気体の分子分光パラメータ誤差の低減を目的として、実験室で高精度分光測定を実施し、取得したスペクトルより新たな分光パラメータの評価を試みる。これらのパラメータは、地上・航空機観測実験データの解析に利用されるとともに、サブテーマ(2)の解析手法の向上に貢献できる。

3. 研究方法

(1) 衛星搭載類似センサの室内評価、航空機等への搭載観測、及び高所観測

衛星搭載の類似センサである地上モデル(BBM)を用いて、その地上観測と航空機搭載観測を行う。地上観測では、雲やエアロゾルは太陽光を減衰させる効果があり、航空機観測ではこれに加えて雲・エアロゾルによる散乱光が加わる。両者の比較から、雲・エアロゾルの減衰と散乱の量を評価することができる。

このようにBBMを航空機に搭載して観測するのは史上初であるため、事前にBBM装置の航空機観測時の耐震性について、除振装置を組み合わせることで評価する。更に、雲・エアロゾル存在下での測定の前に、クリアスカイ条件でのスペクトルデータを取得し、航空機観測の有効性を評価する。

初期段階では、小型航空機(セスナ)等を用いた低高度観測により、主にエアロゾルの影響のあるスペクトルデータを取得する。当研究の対象外ではあるが、将来はジェット機等を用いた高高度からの観測により、巻雲の影響があるスペクトルデータを取得する必要もある。

航空機観測と同時に、上記のBBMによって測定されたデータの解析結果との比較検証を目的として、温室効果ガス濃度や水蒸気量、気象要素等の高度分布を航空機等に搭載したin-situ観測を行う。また、航空機を用いた観測において問題が生じた場合は、別の観測手法を検討し実施する。

(2) 地上及び航空機観測のデータ解析

地上及び航空機観測により取得されたスペクトルデータに対して、同時に測定した雲・エアロゾルの光学特性を用いて、データの雲・エアロゾルの影響による分類作業を行うことを最終目的とする。解析が比較的容易な雲・エアロゾルの影響が少ないスペクトルデータに対しては、既存の解析手法により定量的な解析を実施する。更に、取得データの解析から雲・エアロゾル存在を無視してクリアスカイとして近似が可能か、誤差が大きい場合は、雲・エアロゾルに関するどのパラメータを実験で取得する必要があるか、取得が可能であるかを検討する。

地上設置の高分解能フーリエ変換分光計で取得した大気吸収スペクトルデータより、クリアスカイ条件での温室効果ガスの高度分布及びカラム濃度を導出する。短波長赤外領域における導出研究例は、過去にはほとんど報告がない。このため解析手法・検証手法を開発する。

BBMが測定するスペクトルデータの解析結果とin-situ観測結果とを比較し、更に、地上設置のフーリエ変換分光計によるスペクトルデータの解析結果を踏まえて、BBMデータからの導出誤差を

評価する。この誤差評価によって得られる知見と（１）の「衛星搭載類似センサを用いた地上及び航空機観測」で整理分類されたスペクトルデータを、サブテーマ（２）の研究でも利用する。

（３）温室効果ガス吸収スペクトルの実験室分光測定と解析による分光パラメータの取得と評価
スペクトルデータから気体濃度を導出する際の誤差要因の一つとして、使用する気体の分子分光パラメータの精度が挙げられる。短波長赤外領域では、熱赤外領域と比較して、これまでに高精度な分子分光パラメータが十分には整備されていない。そこで、実験室において圧力・濃度・温度をコントロールした条件下で、温室効果ガスの短波長赤外領域のスペクトルを測定し、吸収線のプロファイル解析により高精度な分光パラメータを取得する。それらの分光パラメータの評価を行った後、取得された分光パラメータをサブテーマ（２）に利用する。なお、これらの実験室測定には、広範囲のスペクトル測定が可能なフーリエ変換分光計と、スペクトル強度が弱い遷移の場合や限られた吸収線の高精度測定に適する半導体レーザー分光計とを併せて利用する。

4. 結果・考察

（１）衛星搭載類似センサを用いた地上評価及び航空機観測

衛星搭載類似センサ (BBM) を航空機に搭載しての実際の観測は初めての試みであるため、まず、雲・エアロゾル存在下での地表面散乱光のスペクトル観測の前段階として、観測の技術的問題点を明らかにすることを主目的として観測と研究を行った。次に、BBMをセスナ及び飛行船に搭載し、機上での安定性評価のためのデータ取得及び地表面からの散乱光データを取得した。さらに、その結果を踏まえ、BBMの装置性能とエアロゾルの影響を解明するための観測を行った方の進め方が効率的と判断し、筑波山山頂における定点観測を計２回実施した。１回目は、クリアスカイにおける前方散乱観測、２回目はエアロゾル情報を含む後方散乱観測である。

1) BBM性能確認のための地上観測

野外の本格的な観測の前にBBMを用いた地上観測は、晴天時の太陽直達光及び、土壌や木の葉の散乱光の２通りについて実施した。太陽直達光の観測は、最も光源強度の強くSN比（信号対ノイズ比）の高いデータが得られる。土壌や木葉による散乱光の観測は、航空機観測で得られる良質なスペクトルの上限値を与えると考えられるため、装置の特性に応じた取得スペクトルの定性的な傾向を知ることを主眼とした。

太陽直達光の観測は、下記のように２回実施した。

１回目は平成16年9月3日の午後に、BBMをビル（国立環境研究所の地球温暖化棟）の屋上に設置して、散乱板を導入して観測を行った。散乱板の導入は、太陽光源の強度が強すぎたためである。この観測には、同じ建物に設置されている高分解能フーリエ変換分光計（茨城県つくば市、東経140.1度、北緯36.1度、Bruker社製 IFS 120HR）も同期観測を行った。

２回目は平成17年3月30日に行った。BBMを高分解能フーリエ変換分光計が設置されている室内に設置し、太陽追尾装置から導入される太陽光を、BBMと高分解能フーリエ変換分光計とに分配して観測を行った。この観測時には、高分解能フーリエ変換分光計との同時観測のほかに、小型航空機（セスナ）を用いたin situ観測も３回実施し、最高高度3000 mまでのデータを取得した。

取得したBBMのスペクトルは、同時に観測した高分解能フーリエ変換分光計の観測スペクトルを

BBMの分解能に落として再作成したものと類似しており、SN比が高く(500前後)、解析に耐えるデータが取得された。しかし、取得されたデータから、BBM装置における装置関数ずれや波数シフト等の問題点も明らかとなり、観測スペクトルの定量的な解析には、BBMの改良が必要であることが明らかとなった。この問題点は、後日改修され、波長可変レーザーによる装置関数測定やガスセル測定によって、改善されたことを確認した。

土壌や木の葉の散乱光データは短時間で取得できるため、観測を数回実施し、BBMに関する以下の特性が明らかとなった。土壌に対しては、二酸化炭素と水蒸気の吸収帯がある $2\ \mu\text{m}$ 帯のSN比は約50、二酸化炭素及とメタンの吸収帯がある $1.6\ \mu\text{m}$ 帯のSN比が約100、酸素Aバンドの吸収帯が存在する $0.76\ \mu\text{m}$ 帯のSN比が約30であった。木の葉については $2\ \mu\text{m}$ 帯のSN比が8、 $1.6\ \mu\text{m}$ 帯のSN比が80、 $0.76\ \mu\text{m}$ 帯のSN比が35程度という結果であった。 $2\ \mu\text{m}$ 帯はこのままでは実用に適さない。木の葉の散乱特性に起因する部分もあるが、特に $2\ \mu\text{m}$ 帯については、BBMの大幅な性能向上が必要である。装置の電氣的なノイズを低減することで改善と評価を行った。

2) 小型航空機(セスナ)搭載観測

観測実験の準備段階では、セスナ航空機の気体内の振動計測を行って、データをBBM用の除震台の設計・製作に反映した。BBMをセスナに搭載するにあたり、機上用の安定化電源、飛行姿勢と位置(GPS)のデータ収録装置、地表面観測状況のビデオ収録装置、及び観測光路折り曲げミラー装置を新たに製作した。また、機上でのデータ安定性を評価するため、衛星搭載用ハロゲンランプとスペクトラロン散乱板を組み合わせた標準光源を装着し、機上での観測中においても常時参照を可能とした。

セスナ観測は高度6000 mまでの運行が可能な「セスナ206」を使用し、平成16年5月27日には高度1000 mまで上昇して機上でのBBMの動作確認を行った。平成16年8月10日には飛行高度6000、3000、2000、1000、500mの各高度で、茨城県南部と、つくば市上空からの観測を行った。

5月27日の動作確認飛行において、BBMと制御PC間の通信が途絶するといった制御上の問題点を改善した後、8月に本実験を実施した。飛行前の機外からの電源を使用した場合と、地上におけるエンジン回転時の機体電源を使用した場合のSN比の比較、更に、機体の上昇中の500~6000 mまでの各高度と着陸後において、標準光源によるSN比評価用のデータを収録したほか、水平飛行中には、主に水田からの散乱光のスペクトルデータを取得した。BBMには、装置特性上の問題点が残っていたが、 $1.6\ \mu\text{m}$ 帯のSN比は、離陸前の外部電源利用時が80に対して、飛行中は70程度と僅かに低下するにとどまった。更に、水平飛行中に地表面散乱光を観測して、 $1.6\ \mu\text{m}$ 帯の二酸化炭素の吸収スペクトルを取得することに成功した。この観測時期には、水稻の生育がほぼ均一な状態であったことから、2秒に1回のBBMの観測走査速度でも、水田が一様な地表面においてはスペクトルが安定していたが、道路や建築物などが一部混入した場合には不安定なスペクトルとなることが判明した。

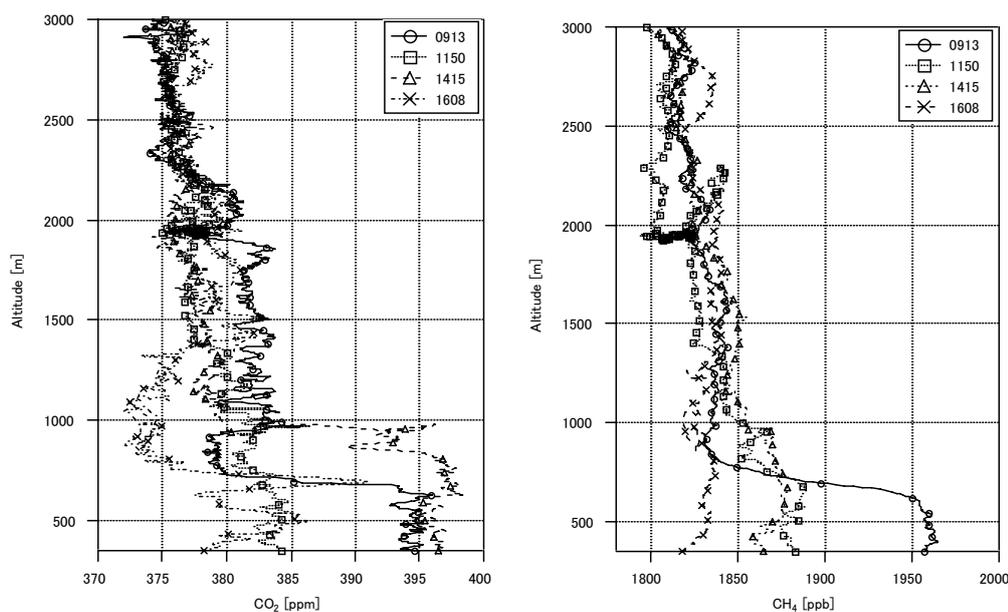


図1 航空機搭載によるin situ観測結果。左は二酸化炭素、右はメタンの濃度分布。図中の#1150はつくば上空の観測データで、他は水田上空の測定結果である。高度700～1000 mの範囲に大気境界層が見られ、これは朝から昼になるにつれて上昇し、夕方には消滅している。

8月10日には、小型航空機(セスナ)を用いたin situ観測により、高度3000 m程度までの二酸化炭素とメタンの濃度、気温・湿度のデータを取得した。二酸化炭素及びメタンのin situ観測結果を図1に示す。

観測当日は、国立環境研究所(茨城県つくば市、東経140.1度、北緯36.1度)に設置されている高分解能フーリエ変換分光計(Bruker社製 IFS 120HR)を用いて、日の出から日の入りまでの太陽直達光を光源として、BBMと同じスペクトル範囲で大気微量成分の吸収スペクトルの連続観測を行った。正午辺りには、航空機によるin situ観測が国立環境研究所の上空で実施された。

3) 飛行船搭載観測

セスナによる観測では、機体が高速で移動していることから、地表面の同一ターゲットを複数回観測して、その平均処理からSN比を改善することは困難であり、機体のキャビンスペースの制約からin situ観測用装置を同時に搭載することができない。そこで、同一地点の長時間・安定観測に適すると思われる飛行船によって、BBM観測の有効性を検証した。飛行船は「ツェッペリンNT号」で、当初の計画では平成17年3月の初旬の実施を予定していたが、天候上の問題から平成17年4月7日に埼玉県鴻巣市付近の乾いた水田上で、高度200 mと700 mから地表面散乱光の観測を行った。飛行船にはin situ観測装置を一緒に搭載し、二酸化炭素とメタンの濃度、気温・湿度を測定した。

飛行船は、同一箇所にも2分間以上ホバリング(空中に停留すること)が可能であることから、比較的安定なスペクトルが取得された。観測したスペクトルとSN比を図2に示す。

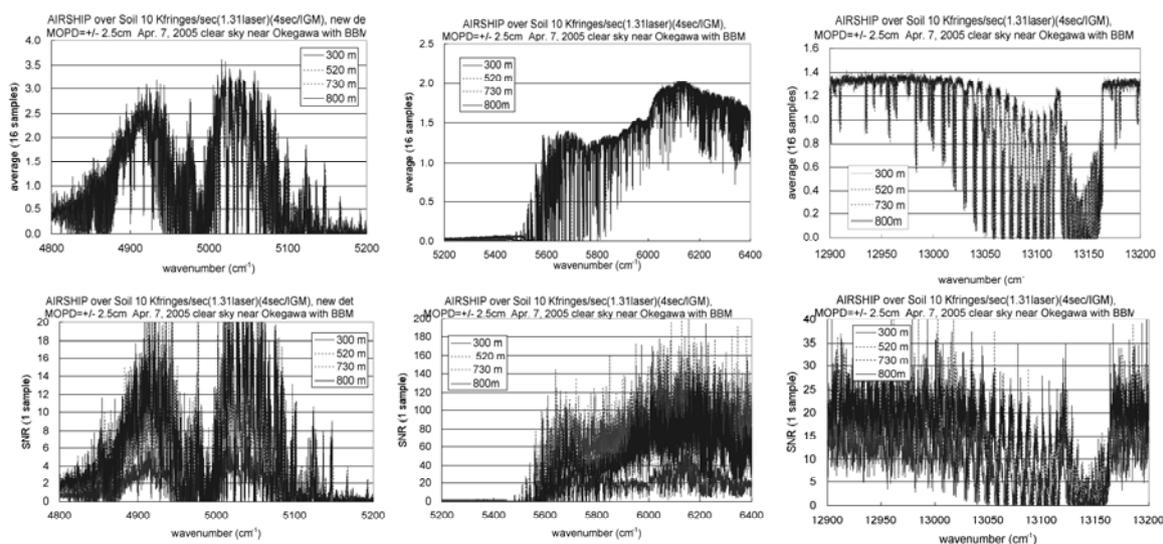
(a) 2.0 μm 帯(b) 1.6 μm 帯(c) 0.76 μm 帯

図 2 飛行船搭載BBMによる地表面散乱光の観測スペクトルとSN比。

上図は16サンプルを平均したスペクトルで、下図は1回の走査データのSN比である。図には飛行船の飛行高度ごとのスペクトルが重ね書きされている。

1.6 μm 帯の二酸化炭素及びメタンの吸収バンド、及び0.76 μm 帯の酸素Aバンドについては、振動回転構造が分かれたスペクトルデータを取得することができた。SN比は1.6 μm 帯が60程度、0.76 μm 帯が20程度であった。2.0 μm 帯の二酸化炭素のバンドは、地表面反射率が非常に低く、SN比も非常に低かった（約8）ため、振動回転構造が分かれるようなスペクトルは取得されなかった。この原因は、地表面反射率が極度に低かったとも考えられるが、使用したBBMは、ノイズ対策などの性能の改善が施される前であったことも要因の一つといえる。更に、BBM装置内レーザーの波数シフトなどの問題が生じていたため、取得したスペクトルデータの定量的解析は行わず、定性的な評価にとどめている。なお1.6 μm 帯と0.76 μm 帯の観測データは、理論スペクトルと比較可能な状態にまで近づいていると判定できる。

観測データについては、以上のような状況ではあるが、温室効果ガスを観測対象として、航空機搭載フーリエ変換分光計により、太陽の短波長赤外波長帯における地表面散乱光を実際に測定し、スペクトル形状として構成された実観測データは、本研究で取得されたものが日本初のデータであり、貴重なものといえる。また、国内外を通して、衛星打ち上げの前にこのような衛星搭載類似センサによる観測を実施することは、従来は多くはなされて来なかった。航空機のin situ観測手法では、本研究での実績により、二酸化炭素とメタンの測定の自動化が実証されたといえる。

4) 筑波山山頂における定点観測

平成17、18年度は、その結果を踏まえてBBMの性能向上を目指して室内評価実験を実施し、その装置を用いて筑波山山頂における定点観測を実施した。以下に、平成17年度における筑波

山山頂における定点観測の実験状況について記述する。

BBMでは、 $0.76\ \mu\text{m}$ の酸素のA波長帯、 $1.6\ \mu\text{m}$ の CO_2 、 CH_4 の吸収帯、 $2.0\ \mu\text{m}$ の CO_2 吸収帯を 0.2cm^{-1} の分解能で同時に観測する。その測定に同期して用いるIn-situ観測装置の観測項目は、二酸化炭素濃度、メタン濃度、大気圧力 (Model276:OMEGA)、温位・湿度 (HMP233:VAISALA) およびGPS (Etrex:GARMIN)を用いた観測位置である。二酸化炭素濃度およびメタン濃度はNIESで開発された観測システムを使用し測定した。二酸化炭素の検出器として非分散型赤外吸収測定を原理とするLi-820 (Li-cor社)を搭載し、サンプルセル内の圧力・流量を一定に保つ自動制御機構が付加された。また本観測システムは、汎用性を高めるために、エネルギー密度の高いリチウムイオン電池を内蔵し、設置する航空機に依存しないシステムである (図3)。

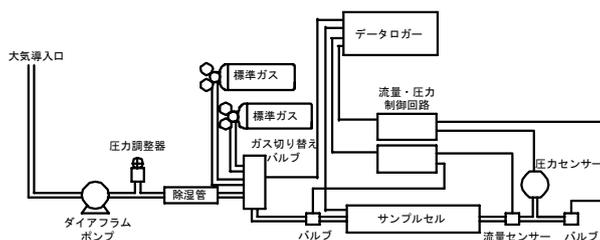


図3 In-situ二酸化炭素センサの装置概要図

筑波山高所観測は、2005年11月17日の10時～15時にかけて、ほぼ快晴時に行われた。その概要を図4に示す。BBMを筑波山ロープウェイ山頂駅 (茨城県つくば市、 36.2°N 、 140.1°E 、標高833m)に設置した。観測ジオメトリは前方散乱である。観測中、BBMでは地表面散乱光と太陽直達光とを交互にそれぞれ複数回ずつ観測し続けた。また同時に、小型航空機 (セスナ)を用いて高度3 kmまでの CO_2 、 CH_4 濃度の直接観測 (気温、気圧、湿度も測定)を3度行った。さらに、山頂では CO_2 直接観測を行い、地表ターゲットでは気象データ及び CO_2 直接観測を行った。また、地表面分光反射率 (地表面アルベド)も測定した。

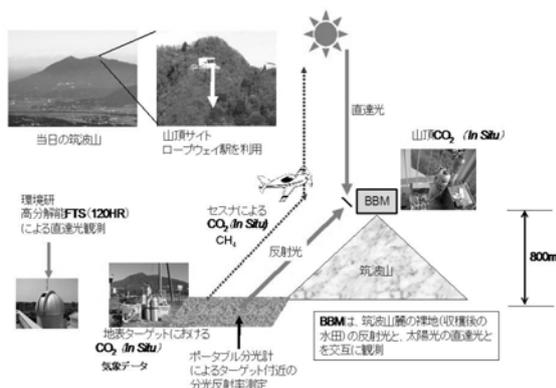


図4 平成17年度筑波山高所観測の概要

BBMの1ブロック測定観測データ (最大16 scan)中に波数シフトの無いことを確認し、スペクトルの平均化処理を行った後、HITRAN2004データベースの吸収線位置を基準にスペクトルの波数補正を行った。解析を行うためのデータセットとして、(1)午前の地表面付近に CO_2 が蓄積しているケース、(2)午後の発達した大気境界層内で CO_2 が比較的一様に分布していると思われるケースの、地表面散乱光及び太陽直達光観測データを選択した。

図5にケース(1)の地表面散乱光と太陽直達光を観測した時の $1.6\mu\text{m}$ 帯の吸収スペクトルを示す。地表面散乱光の観測スペクトルの方が温室効果ガス濃度の高い境界層を太陽光が地表面に到達する際と地表面からの反射光がセンサに至るまでとの2回通過している分だけ、太陽直達光の観測スペクトルに比べて吸収線が深くなっており、BBMが光路差の違いによる輝度スペクトルの差を明瞭に捉えていることがわかる。

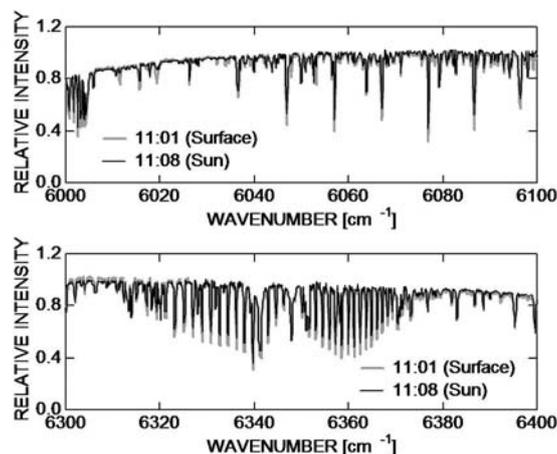


図5 BBMを用いて観測された $1.6\mu\text{m}$ 帯の CH_4 $2\nu_3$ バンド(上図)と CO_2 (30012)-(00001)バンド(下図)の吸収スペクトル。ケース(1)における地表面散乱光と太陽直達光観測の比較。縦軸は任意。

筑波山高所観測と同時に行った小型航空機(セスナ)搭載in-situ測定結果を図6に示す。二酸化炭素及び水蒸気は対流により、大気境界層が上昇し消滅していく様子が見られる。メタンの濃度は高度3 kmまではほぼ一定であることがわかる。

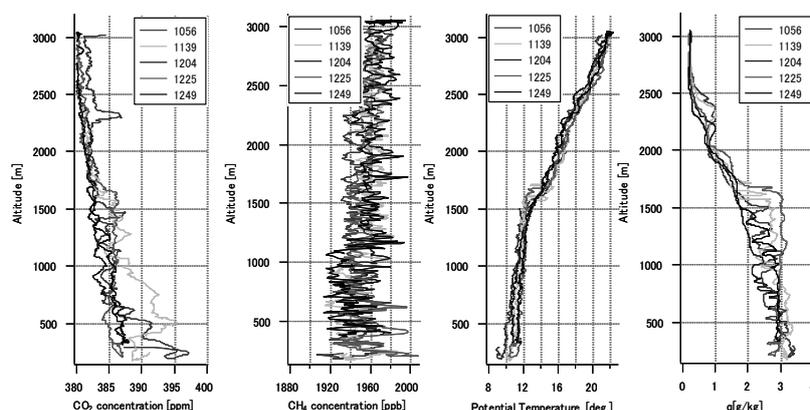


図6 筑波山高所観測と同時に行なった小型航空機(セスナ)搭載in-situ測定装置により取得された二酸化炭素歩、メタン、温位、湿度の高度プロファイル。

更に、筑波山頂と地表ターゲットで行った二酸化炭素の直接測定結果を図7に示す。地表ターゲットは、夜間の生態系の呼吸のため二酸化炭素の濃度が増加し、日の出後は対流により大気が混合するため濃度が減少する様子が観測された。筑波山頂はほぼ一定方向の風が吹いていたため、二酸化炭素の濃度はほぼ一定であることがわかる。

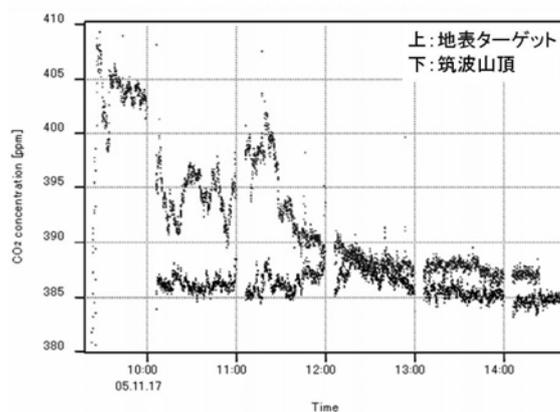


図7 定点(地表ターゲット及び筑波山頂)二酸化炭素in situ測定の結果。地表ターゲットの濃度は時間が経つにつれて減少し、筑波山頂はほぼ一定であった。

平成18年度は、平成17年度の筑波山山頂観測により取得されたデータ解析により、次のような問題点が明らかとなった。(1)エアロゾルに関するパラメータが計測されていない。(2)in-situ測定がBBM観測光路と完全には一致しない。(3)気象条件(エアロゾル)などが異なる条件(複数の気象条件)での観測がなされていない。

これらの問題点を解決するために、平成17年度の筑波山山頂観測を以下に追加変更した。(1)スカイラジオメータ、ライダー観測によるエアロゾル情報の取得。(2)航空機(セスナ)搭載高速CO₂濃度計による、観測光路に沿ったin-situ測定。このジオメトリで観測を行うために、後方散乱観測に変更した。(3)2週間の観測期間を設け、晴天時にはデータ取得を行った。このときの観測の概要を図8に示す。

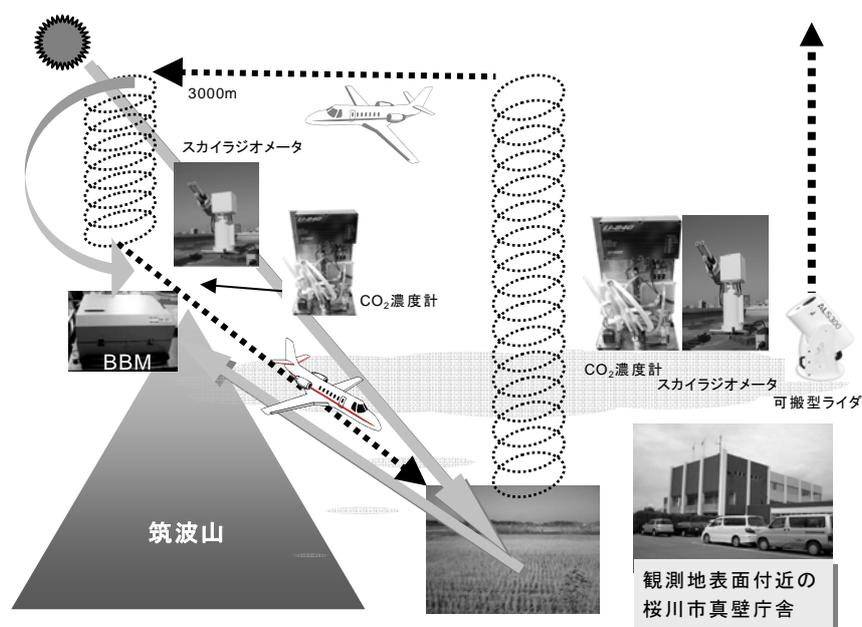


図8 平成18年度筑波山高所観測の概要

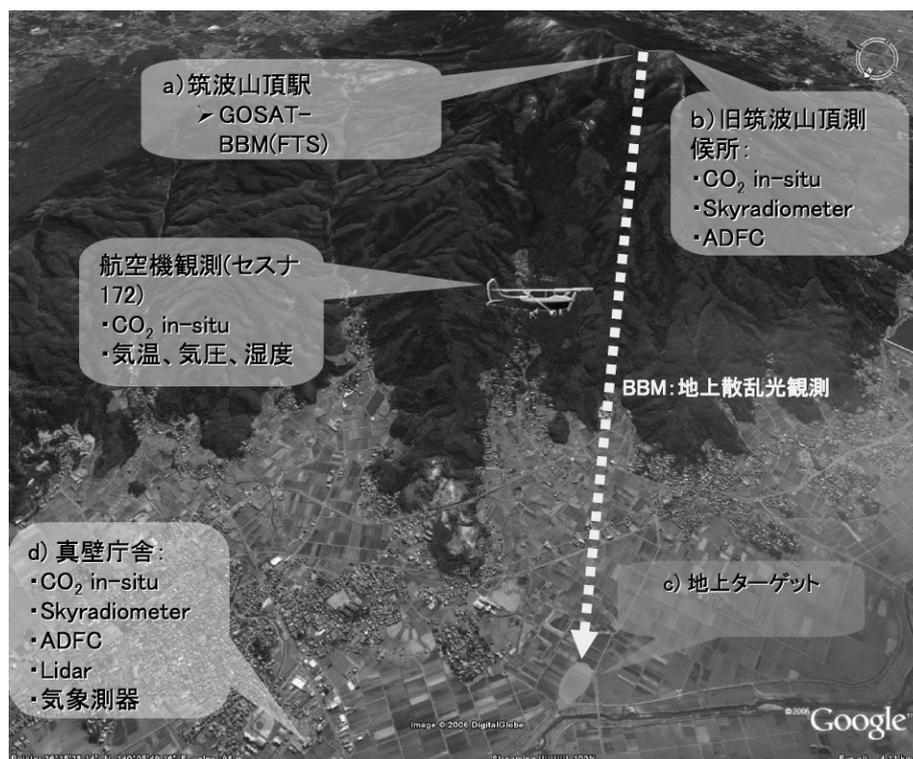


図9 平成18年度筑波山高所観測の観測項目

具体的な観測項目は図9に示す。a)BBMを筑波山ケーブルカー山頂駅の駅舎2階に設置した。b)筑波山旧気象測候所には、CO₂ in-situ測定装置、スカイラジオメータを設置し、全天カメラによる雲画像撮影を実施した。c)観測ターゲットでは、地表面反射率を測定した。d)桜川市役所真壁庁舎には、CO₂ in-situ測定装置、スカイラジオメータ、気象測器、ライダーを設置し、全天カメラによる雲画像撮影を実施した。BBMの地表面散乱光観測時の観測航路をできるだけ重ねるようにして、航空機（セスナ）搭載CO₂ in-situ測定を行った。同時に、気温、気圧、湿度を測定した。

平成18年度は約2週間の観測期間を設けたが、分散させて観測装置を設置する必要があったため、約1ヶ月かけて設置調整を行った。主な、実施日程は下記の通りである。

10月31日筑波山測候所へ測器設置：スカイラジオメータ、全天カメラ、CO₂計設置

11月16日真壁庁舎測器設置：気象計、ライダー、スカイラジオメータ、全天カメラの設置

11月20日BBM設置をケーブルカー筑波山頂駅2階に設置

11月28日筑波山頂にCO₂濃度計を設置

11月29日真壁庁舎にCO₂濃度計を設置

12月1～18日の期間を観測ウィンドウとした。例年であれば冬型の気候のため多く日数実施可能と期待されたが、天候が今ひとつで観測日数が限られた。ケーブルカー山頂駅に設置したBBMによる観測実施できた日は、12月1、4、6、7、11、18日であった。12月19日に、観測装置の撤収を行った。様々なトラブルもあったが、数カ所に多くの観測装置を展開し、複数日の観測データの取得に成功した。

今回、初めて導入したスカイラジオメータ、ライダー、全天カメラによる観測の例を、図10、図11、図12にそれぞれ示す。

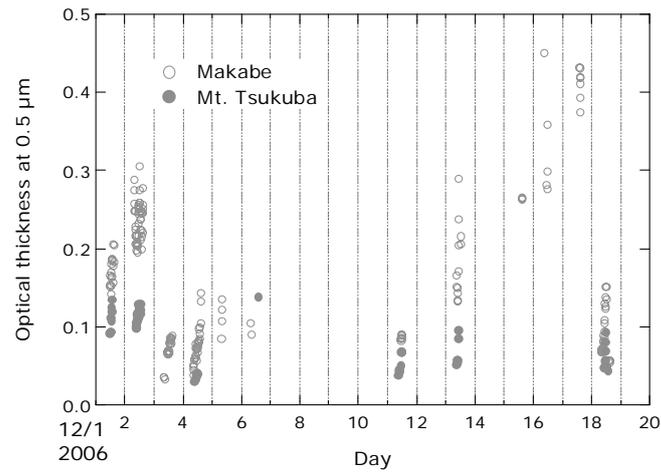


図 10 真壁庁舎 (○) 及び旧筑波山山頂測候所 (●) に設置したSkyradiometerから得られた $0.5 \mu\text{m}$ における光学的厚さ。真壁庁舎 (標高40 m) に設置したSkyradiometerの光学的厚さは筑波山頂の観測結果と比べて大きく、約800 mの高度差における光学的厚さの差を観測し

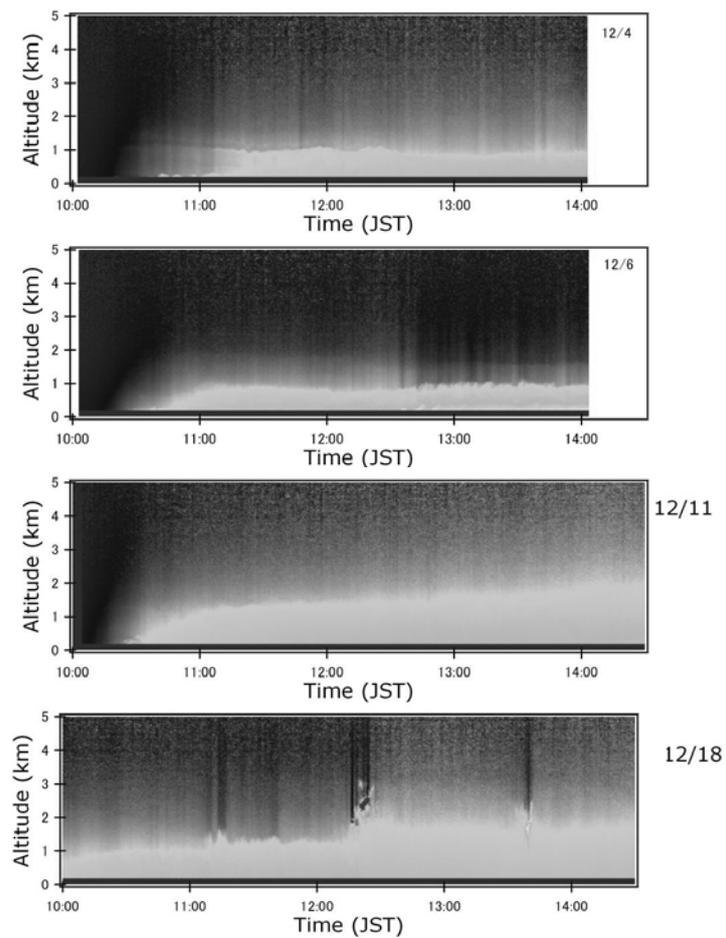


図 11 真壁庁舎に設置したライダー (Leosphere ALS300、レーザー波長355 nm) による後方散乱強度高度分布。

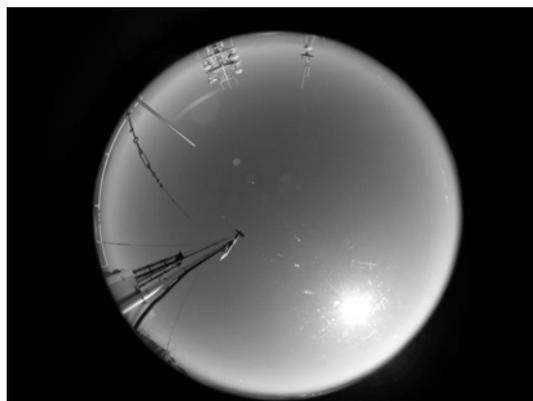


図12 旧筑波山測候所設置全天カメラによる画像(実際はカラー)

真壁庁舎、筑波山山頂に自動全天カメラ(魚眼レンズ撮影)を常設し、5分おきに雲画像を継続して撮影した。

(2) 地上及び航空機観測のデータ解析

BBM性能確認のための地上観測、小型航空機(セスナ)搭載観測

BBMを使用した昨年度の飛行船搭載観測データの解析や、今年度実施した筑波山山頂実験解析のほか、地上設置高分解能フーリエ変換分光器による太陽直達光観測データの解析として、 $1.6\mu\text{m}$ 帯のデータ解析による二酸化炭素の日変動解析、メタン $1.67\mu\text{m}$ 帯データの予備的解析と分光パラメータ評価、地上設置小型フーリエ変換分光器による太陽直達光観測データの予備解析を実施した。その中で、世界初の実験データの解析として最も重要かつ貴重な知見が得られたと思われる筑波山山頂実験のデータ解析結果について以下に報告する。

1) BBM性能確認のための地上観測

4. (1) 1) に述べたように、本格的な野外観測を実施する前に実験室や実験室の近傍の野外でBBMの性能を確認するために、様々な観測を実施することは非常に重要である。解析を行った結果、原因が明らかとなり、随時装置の改修が行われた。現在できうる最前の状況になったと言える。

2) 小型航空機(セスナ)搭載観測

4. (1) 2) に述べたように、BBMには、装置特性上の問題点が残っていたが、 $1.6\mu\text{m}$ 帯のSN比は、離陸前の外部電源利用時が80に対して、飛行中は70程度と僅かに低下するにとどまった。更に、水平飛行中に地表面散乱光を観測して、 $1.6\mu\text{m}$ 帯の二酸化炭素の吸収スペクトルを取得することに成功した。この観測時期には、水稻の生育がほぼ均一な状態であったことから、2秒に1回のBBMの観測走査速度でも、水田が一様な地表面においてはスペクトルが安定していたが、道路や建築物などが一部混入した場合には不安定なスペクトルとなることが判明した。本節に記載すべき詳細な解析に耐えうるデータでなかったため、上述の定性的な解析にとどめた。

3) 飛行船搭載観測

解析に先立ち、BBM観測データのうち、スキャン中のアルベドの変動などによる歪んだ観測スペクトルサンプルを除外した。次に1測定(最大16 scan, 64秒積分)中に波数シフトのないことを確認し、スペクトルの平均化処理を行った。HITRAN2004データベースの吸収線位置を基準にスペクトルの波数補正を、BBMの黒体放射光源測定データを元に波数感度特性の補正をそれぞれ行った。更にBBMの波数感度特性を放射伝達計算コードのHSATRによる理論スペクトルに掛け合わせることで、HSTARのシミュレーションスペクトル輝度が全体として観測スペクトルに合うこととなった。

本研究では放射伝達モデルHSTARを用いてシミュレーションを行った。HSTARではNakajima and Tanaka (1986)²⁾に基づき、平行平板大気 of の仮定のもと、Discrete Ordinate法で放射伝達を解いている。気体吸収にはHITRAN2004データベース¹⁾を、入射太陽光データにはKurucz (1992)³⁾による太陽光源データを用いており、高い波数分解能の放射伝達計算を行う事が可能である。放射伝達計算に用いた大気プロファイルは、地表から高度0.73kmまでは飛行船による観測データを、高度0.73km~33kmまでは観測当日(2005年04月07日)午前9時の館野のゾンデデータを、それよりも高い高度では中緯度冬のモデル大気 of のデータを使用した。但し、相対湿度に関しては有効なゾンデデータが高度9kmまでしかないため、9km以上の高度に対してモデル大気 of の値を用いた。二酸化炭素濃度は地表から高度0.3kmまでは425ppm、高度0.3~0.73kmまでは415ppmで、それ以上の高度では380ppmとした。雲・エアロゾルは考慮せず、気体分子による散乱・吸収のみを考慮している。

以上の条件のもと、波数分解能 0.01cm^{-1} で放射伝達計算を行った。得られた輝度スペクトルに対してBox-Car型のアポダイゼーションを行い、BBMの観測波数分解能 0.2cm^{-1} と同じ分解能に合わせた後、BBMの波数特性を乗じて輝度スペクトル of のシミュレーション結果を作成した。

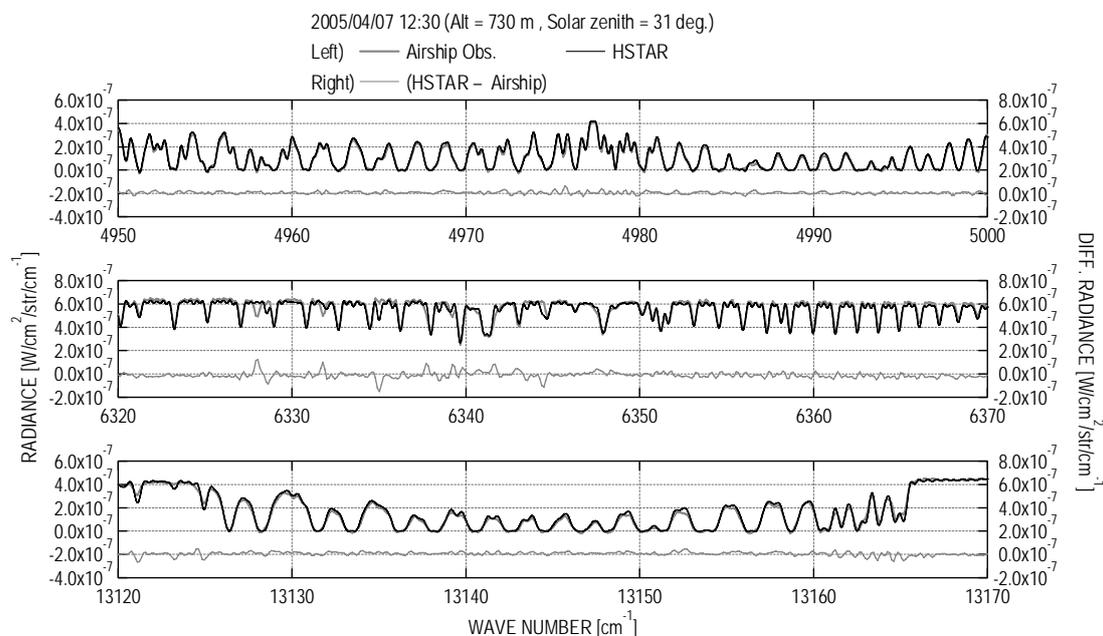


図 1 3 2005年4月7日12:30 (JST) (太陽天頂角 31°)、高度0.73 kmにおける飛行船搭載BBM観測スペクトル(灰色実線)とHSTARシミュレーションスペクトルと(灰色点線)の比較。観測地とシミュレーションスペクトルの差を黒色実線で示した。

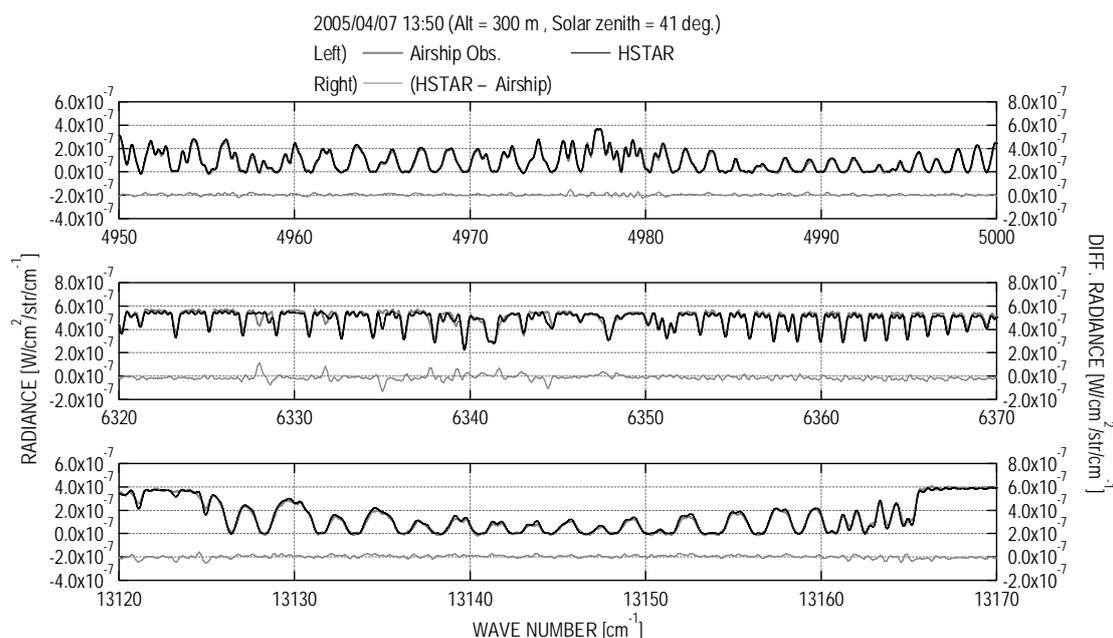


図 1 4 2005年4月7日13:50 (JST) (太陽天頂角 41°)、高度0.30 kmにおける飛行船搭載BBM観測スペクトル(灰色実線)とHSTARシミュレーションスペクトルと(灰色点線)の比較。観測地とシミュレーションスペクトルの差を黒色実線で示した。

図 1 3 に2005年04月07日 12:30 (太陽天頂角 31°) の高度0.73kmで観測された輝度スペクトルと放射伝達シミュレーションにより得られた輝度スペクトルとを、また、図 1 4 に同日 13:50 (太陽天頂角 41°) の高度0.3kmにおける輝度スペクトルと放射伝達シミュレーションとの比較を示す。実観測スペクトルと、in situ観測結果に基づいて放射伝達計算したスペクトルは、吸収線の幅や深さに若干の差が見られるものの概ね良く一致している。

図 1 5 には高度0.73kmで観測された輝度スペクトルと高度0.3kmで観測された輝度スペクトルとの差と、参考として同一太陽天頂角の条件における輝度スペクトルの高度差を示した。地表面からの反射光を観測しているため、高度差のみを考えた場合、高度0.73kmの方が高度0.3kmに比べて光路長が長くなり、より気体吸収が増えるため、高度0.73kmにおける輝度スペクトルの方の吸収が深くなるはずであるが、実際には両者の太陽天頂角の違いによる光路差の影響の方が強く、高度0.3kmにおける輝度スペクトルの方の吸収が深くなっている。

また、図 1 5 の中段の図 ($1.6\mu\text{m}$ 帯) より、 $6,200\sim 6,400\text{ cm}^{-1}$ の範囲に CO_2 の濃度差らしき差分スペクトルが見られるが、両者の差のスペクトルにおけるノイズが同程度のレベルであることから、両者の高度の二酸化炭素濃度の差を検出できるほどではないことがわかる。以上のように、BBMのSN比に関する問題点が、実観測スペクトルと理論スペクトルとの比較から明らかとなったが、短波長赤外域のフーリエ干渉分光計を飛行船に搭載して地表面散乱光を高所から測定した実験はこれが日本初の試みであり、世界でも初と言えよう。まがりなりにも比較解析に耐えるデータが取得されたことは画期的なことと言える。

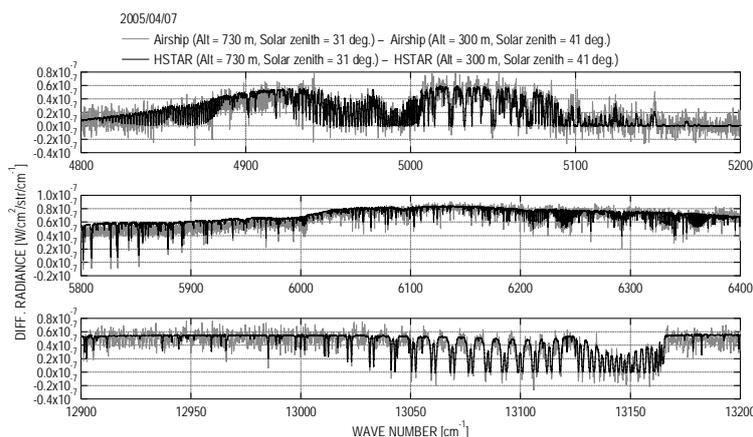


図 1 5 高度0.73 kmと0.30 kmにおける放射スペクトルの比較。灰色は観測スペクトル、黒色はHSTARシミュレーションスペクトルである。

4) 筑波山山頂観測－平成17年度の観測データの解析－

BBMで観測された $1.6\ \mu\text{m}$ 帯の輝度スペクトルから、 CO_2 カラム濃度を推定する。推定には最大事後確率 (Maximum A Posteriori) 推定法を用い、式(1)で表される評価関数 $J(x)$ を最小にする解を求める。最小化アルゴリズムには Gauss-Newton 法 (式(2)) を使用した。

$$J(x) = [y - F(x)]^T S_\varepsilon^{-1} [y - F(x)] + (x - x_a)^T S_a^{-1} (x - x_a) \rightarrow \min. \quad (1)$$

$$x_{i+1} = x_i + (K_i^T S_\varepsilon^{-1} K_i + S_a^{-1})^{-1} [K_i^T S_\varepsilon^{-1} (y - F(x_i)) - S_a^{-1} (x_i - x_a)] \quad (2)$$

ここで、 y は観測輝度スペクトル、 x 、 x_a は未知数とその先見情報(a priori)、 $F(x)$ は x に対応するシミュレーション輝度スペクトル、 S_ε 、 S_a は観測輝度スペクトル、未知数の先見情報に対する共分散行列、 K はヤコビアンである。BBMの設置高度($\sim 800\ \text{m}$)とセスナ観測が実施された高度範囲($150\ \text{m} \sim 3\ \text{km}$)を考慮し、地表から高度 $3.2\ \text{km}$ までを $0.4\ \text{km}$ 厚で8層に区切り、各層の平均 CO_2 濃度を未知数として求めた後に、 CO_2 カラム濃度を算出した。高度 $4\ \text{km} \sim 12\ \text{km}$ の CO_2 濃度は民間航空機を用いて成田空港で測定された2005年11月の平均濃度プロファイルを、高度 $12\ \text{km}$ 以上は高度 $12\ \text{km}$ と同じ混合比であるとして、リトリバル解析時には固定した。また、解析に使用した波数領域($6180 \sim 6380\ \text{cm}^{-1}$)の地表面アルベドを、波数間隔 $50\ \text{cm}^{-1}$ で区切られた折線型の波数依存性を示すとして CO_2 濃度と同時に推定した。エアロゾルに関しては、定量的な観測が行わなかったため、エアロゾル無し(光学的厚さ 0.0)とエアロゾル光学的厚さ 0.2 の2種類の仮定の下で解析を行った。

シミュレーション輝度スペクトル、ヤコビアンは、放射伝達モデルHSTAR²⁾を用いて計算した $0.01\ \text{cm}^{-1}$ 波数分解能の単色放射輝度に対して、室内実験から得られたBBMの装置関数、および波数感度特性を作用させることで得られる。HSTARの入射太陽光データにはKurucz (1992)³⁾による太陽光源データを用いているが、Kitt Peakにおける太陽光観測データとの比較から、いくつかのフ라운ホーファー線の位置・強度が一致しないことが判ったため、リトリバル解析時には、フ라운ホーファー線と重なっているデータをマスクして処理を行った。

表1に、セスナ観測から得られたCO₂カラム濃度と、その直近の観測データからリトリーバル解析を通して得られたCO₂カラム濃度との差を示す。エアロゾル無しとした場合には、セスナ観測と比べてCO₂カラム量を過小評価する傾向にあり、実際の観測の際に、エアロゾルによって地表面に到達する前に散乱された光がBBMに入射することで、見かけ上吸収が弱い輝度スペクトルが観測されたためと考えられる。他方、エアロゾル光学的厚さを0.2とした場合には、セスナ観測に比べて過大評価する傾向にあり、エアロゾル散乱光の影響を強く見積もりすぎたためにCO₂カラム濃度を大きく推定した可能性がある。しかし、先述した通りエアロゾルに関する定量的な観測は行われなかったため、この点に関しては実証的な議論はできない。

表1 BBMにより観測されたスペクトルからリトリーバル導出された及び小型航空機(セスナ)搭載 in-situ測定によるCO₂カラム濃度の差。

時刻 \ 差	カラム濃度の差[%] ($\tau=0.0$)	カラム濃度の差[%] ($\tau=0.2$)
11:01	-0.52	1.25
12:26	-2.04	0.73

観測される輝度スペクトルは、大気上端から入射し、地表面で反射した後、高度約800 mに設置されたBBMに到達する光である。高度800 mよりも下の大気層を二度通過しているため、その領域のCO₂濃度の変動に対して強い感度を持っていると考えられる。そこで、地表面およびBBM設置地点近傍で連続測定されたCO₂濃度から推定した高度0.0~0.8 km間のCO₂カラム量と、リトリーバル解析で得られたCO₂カラム量とを比較した(図16)。

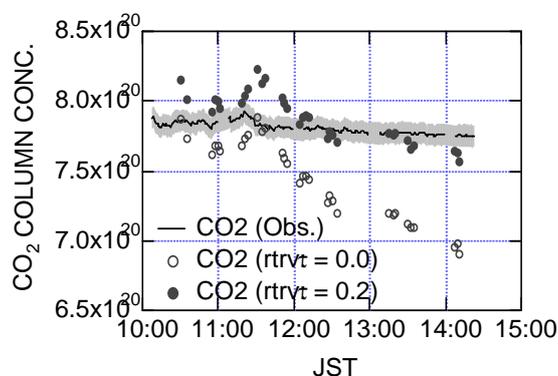


図16 BBMにより観測されたスペクトルからリトリーバル導出された及び小型航空機(セスナ)搭載 in-situ測定によるCO₂カラム濃度の時間変動(エアロゾル無:○、エアロゾル光学的厚さ0.2:●)。かげの部分は地表面およびBBM設置地点近傍で連続測定されたCO₂濃度から推定した高度0.0~0.8 km間のCO₂カラム量の1%の幅を示す。

推定されたCO₂カラム量の絶対値はエアロゾルの有無で異なるものの、変動のパターンには違いが見られない。また、この変動のパターンは地表面で測定されたCO₂濃度の変動パターンと多少の時間差はあるものの良い相関を持つ(図7、図16)。このことから、BBMでは少なくとも地表面付近のCO₂濃度の変動による輝度スペクトルの変動を捉えていると考えられる。装置のSN比の範囲内でCO₂の観測値とin-situ値が一致したものの、エアロゾルを考慮すればより解析結果の精度が向上する可能性を示した。

5) 筑波山山頂観測－平成18年度の観測データの解析－

現在詳細な解析は継続中である。このため、観測期間中、最もエアロゾルの影響が小さいと考えられる12月4日の解析を行った。観測当日は地表面ターゲット近傍において野焼きが行われていたものの、スカイラジオメータの解析によると、波長500 nmにおけるエアロゾル光学的厚さは終日0.1以下であった。BBM観測データ(使用波数範囲: $6280\sim 6380\text{ cm}^{-1}$)に対して、エアロゾル無しの場合の下で4)のリトリバル解析方法を適用し、求めた CO_2 気柱量を図17に示す。 CO_2 濃度の高度分布測定時に小型航空機(セスナ)が野焼きの煙を時折横切ったことが報告されているため、セスナ機観測による CO_2 気柱量はその影響を考慮して評価した。

4)のリトリバル解析導出した CO_2 気柱量とセスナ機観測結果とは2~3%程度の差で、良い一致を示した。また、 CO_2 気柱量推定値の日変動は、山頂・地表面ターゲットにおける CO_2 濃度変動とも対応していることが判った。エアロゾルを考慮した解析の結果、両者の差が0.2~0.4%程度小さくなった。

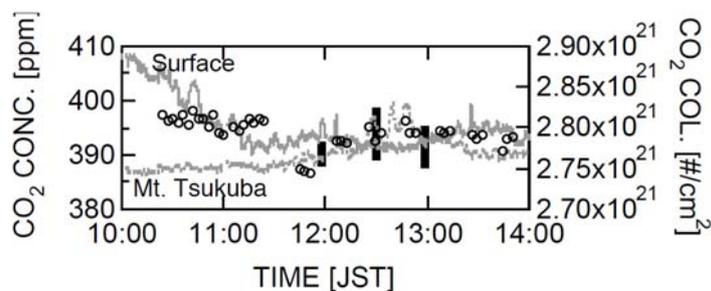


図17 12月4日に山頂・地表対象近傍で測定された CO_2 濃度(左軸: 灰色線)とリトリバル解析で得られた高度0.0~3.2 kmまでの CO_2 気柱量(右軸: 黒丸)、および、セスナ機観測による同高度区間の CO_2 気柱量(右軸: 黒棒)。左右軸のスケールは CO_2 濃度が高度方向に一定である場合の CO_2 気柱量(高度=0.0~3.2 km)にほぼ等しくなるように調整している。

6) 地上高分解能フーリエ分光計による太陽直達光観測スペクトル

近年、温室効果ガスの変動を把握することの重要性が増しているが、太陽直達光による観測では、オゾン層破壊関連物質に比べて CO_2 や CH_4 の報告はわずかであり、大気吸収スペクトルの解析方法も発展途上にある。温室効果ガスの観測には、他の大気微量成分の吸収線による妨害が少ない近赤外領域が注目されており、本研究では近赤外領域における太陽光大気吸収スペクトルを観測するために観測装置を改良し、観測スペクトルのリトリバル解析により CO_2 濃度の鉛直分布及びカラム量を求めた。

近赤外領域における温室効果ガスの効率的な観測を行うために、2004年より $4500\sim 7000\text{ cm}^{-1}$ の光学フィルターを新たに導入し、観測条件の最適化を行った。その結果、波数分解能 0.015 cm^{-1} (optical pass difference: 60 cm)、積算回数10回(約10分)で定常的に観測を行うことにした。

大気吸収スペクトルの解析には、NASA JPLで開発されたリトリバル解析プログラムSEASCRAPE PLUS (Remote Sensing Analysis Systems, Inc.)を使用した。朝から夕方まで観測を行った2004年8月10日と2005年3月30日の観測スペクトルについて解析を行った(この両日は、つくば上空において航空機による直接観測(in-situ観測)を実施)。スペクトルの前処理として、 CO_2 の(30012)-(00001)帯(band origin: 6348 cm^{-1})のうち $6300\sim 6347\text{ cm}^{-1}$ (P-branch)の波数領域を切り出

した。この領域には、CO₂の吸収以外に太陽のフラウンフォーファー線が多く存在するため、アメリカ国立太陽観測所の太陽光観測から取得された再解析データを用いてフラウンフォーファー線を取り除いた。ただし、視線方向における太陽との相対的な運動によってフラウンフォーファー線のドップラーシフトが起こるため、その影響を補正した。そして、装置分解能の最適化及び観測スペクトルの波数の較正を行った。フラウンフォーファー線を完全に補正できていない波数領域については、重みを小さくすることによってリトリバル解析から除外した。解析に必要な気圧・気温・H₂O濃度の鉛直分布は、高層気象台(館野)のレーウィンゾンデ観測値を用いた。また、CO₂濃度の鉛直分布の初期推定値については、つくばの気象研タワー(高度0.2 km)、相模湾上空の航空機観測(高度1, 2, 3, 4, 5.5, 7 km)、三陸上空の大気球による成層圏大気サンプリングの観測データに、経年変動 + 季節変動を仮定してフィッティングしたモデル計算値を用いた。

リトリバル解析は、初期推定値とその拘束条件に大きく依存する。初期推定値の不確定性を0~40 kmの全ての高度においてCO₂濃度の1%に設定した場合では、濃度変化の大きい対流圏大気境界層内(高度約2 kmまで)において初期推定値からの拘束が強くなってしまいうため、高度0 kmでCO₂濃度の3%、5 km以上で1%、その間は直線補間した値を用いた。2004年8月10日11:35(波数分解能: 0.015 cm⁻¹)の観測データについて、この条件で解析を行った結果を図18、図19に示す。スペクトルのCO₂吸収部分における残差は2%程度であり、残差の大きい(≥5%)波数領域は重みを小さくしている。アベレージングカーネル(ある高度について他の高度からどの程度の情報が得られるかを示す指標)は高度1 kmに最も高い感度を持ち、高度分解能は4 km程度であった。これは、スペクトルから鉛直分布について多くの情報が得られる高度が1 kmであることに対応しており、大気境界層内の変動を観測できることを示している。求めたCO₂濃度の鉛直分布からカラム量を導出した。また、各高度におけるCO₂濃度を乾燥大気の個数密度で加重平均してカラム平均濃度を求めた。本解析から得られたカラム量及びカラム平均濃度は、in-situ観測(高度3 kmまで)[3] + モデル計算から求めた値と1%の範囲内で一致した。次に、CO₂濃度の日変動解析を行った。導出したCO₂濃度の日変動は、気象研究所における気象観測タワーのCO₂連続観測値と同様の傾向を示した。つまり、典型的な夏の晴天である2004年8月10日は、日の出と共に地表面のCO₂が対流により混合し濃度が上昇、昼頃は光合成により減少、午後3時頃に都市大気が流入することによる上昇が観測された。典型的な冬の晴天である2005年3月30日は、平均風速5 m/秒程度の季節風が吹いていたため、CO₂は一定であった。この結果から、相対精度を0.2%であることが明らかになった。

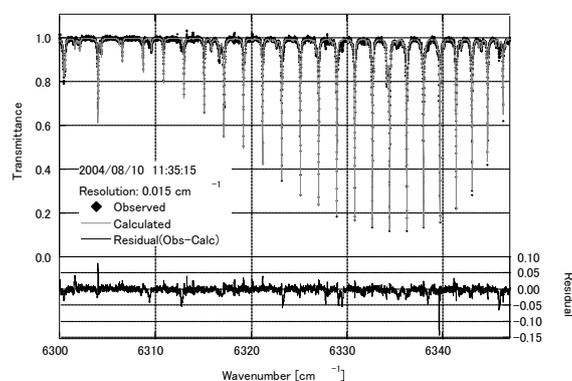


図18 波数分解能0.015 cm⁻¹、CO₂ (30012)-(00001)バンドの観測スペクトル及びフォワードモデルで計算したスペクトルとその残差。

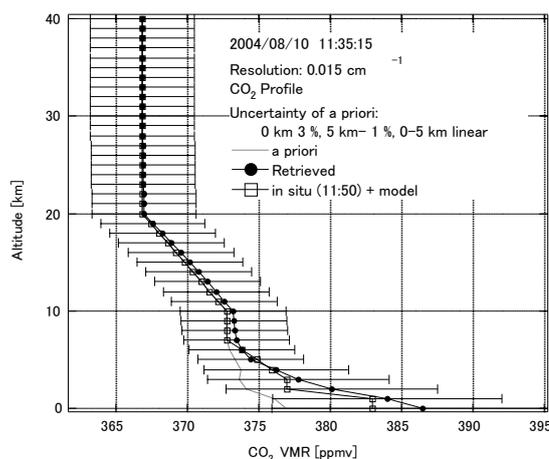


図 19 リトリバル解析から得られたCO₂濃度の鉛直分布及びin-situ + モデルの鉛直分布。

(3) 温室効果ガス吸収スペクトルの実験室分光測定と解析による分光パラメータの決定とその評価

1) フーリエ変換分光計を用いた広い波数領域の測定による研究

a. HITRAN2004データベースにおける吸収線パラメータの改訂

2004年9月に公開されたHITRAN2004データベース¹⁾のCO₂の1.6 μm帯の主要な4個の近赤外吸収帯 [(30011-00001)帯、(30012-00001)帯、(30013-00001)帯、(30014-00001)帯]の吸収線パラメータを調査した結果、吸収線の中心波数が4個の吸収帯全てに対し改訂されていることが分かった。新旧データベースの中心波数の差は、最大0.002cm⁻¹程度であった。線強度に対しては(30012-00001)帯のみが改訂されており、HITRAN2004データベースの線強度はHITRAN2000データベースのそれよりも小さな値であった。また両者のHerman-Wallis因子の係数は大きく異なっていた。

CO₂ 2.0 μm帯の主要な3個の吸収帯 [(20011-00001)帯、(20012-00001)帯、(20013-00001)帯]の吸収線パラメータを調査した。(20012-00001)帯と(20013-00001)帯の線強度は、HITRAN1996データベースにおいてHerman-Wallis因子が考慮され、HITRAN1996データベースの値から大幅に改訂された。HITRAN2004データベースにはHITRAN1996データベースと同一の値が格納されている。(20011-00001)帯の線強度は、HITRAN2004データベースにおいて極わずかに改訂されたが、それらの値にはHerman-Wallis因子が考慮されていない。

CH₄ 2ν₃帯の吸収線パラメータには変更が見られなかった。

b. CO₂ 1.6 μm帯

図 20、図 21、図 22、図 23 に、(30011-00001)帯、(30012-00001)帯、(30013-00001)帯、(30014-00001)帯の遷移双極子モーメントの2乗とm数との関係を示す。図中の縦軸の $|R(^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2)|^2$ は、¹²C¹⁶O₂の遷移双極子モーメントの2乗を表す。これらの図から、本研究による(30011-00001)帯の線強度は、HITRAN2004データベースの値とほぼ一致する結果であることが分かる。また本研究の(30012-00001)帯の線強度とHITRAN2000データベースの値との差異は、P枝とR枝に対して、吸収帯の中心から裾野の領域にかけて大きくなる傾向を示した。一方、本研究の値とHITRAN2004デ

データベースの値はR枝において良い一致を示したが、P枝の裾野の領域において、両者の差異が明瞭に確認できた。(30012-00001)帯の線強度はHITRAN2004データベースで大幅に改善されたことが分かったが、さらに検証を必要とする領域が残されていることも分かった。本研究の(30013-00001)帯の線強度とHITRAN2004データベースの値との差異は、R枝に対して吸収帯の中心から裾野の領域にかけて大きくなる傾向を示し、その差異は25%に及んだ。本研究の(30014-00001)帯に対する線強度は、HITRAN2004データベースの値よりも5-30%小さな値であった。(30013-00001)帯と(30014-00001)帯の線強度については、HITRAN2004データベースの値を早急に改善する必要がある。(30012-00001)帯に対するHITRAN2004データベースのHerman-Wallis因子は、回転量子数の三次の係数まで考慮されているが、本研究で得られたHerman-Wallis因子の係数は2次までで十分であった。

図2-4に、本研究のCO₂とN₂の衝突幅と他研究者の値との比較を示す。本研究のCO₂とN₂の衝突幅及びCO₂とO₂の衝突幅は、HITRAN2004データベースに編集されたCO₂と空気の衝突幅の基礎データとなった1980年代後半から1990年代前半に行われたJohns⁴⁾やDana et al.⁵⁾などによる高分解能実験結果と一致した。この結果、HITRAN2004データベースの室温におけるCO₂と空気の衝突幅の妥当性が検証できた。

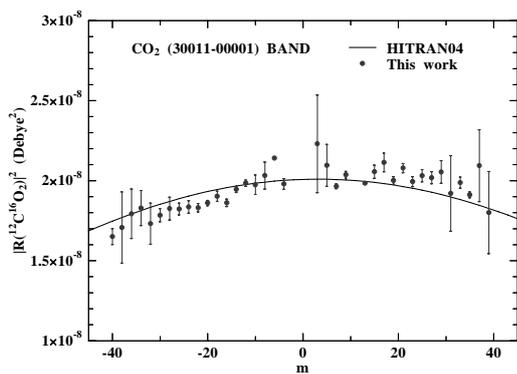


図2-0 (30011-00001)帯の遷移双極子モーメントの2乗とm数との関係。

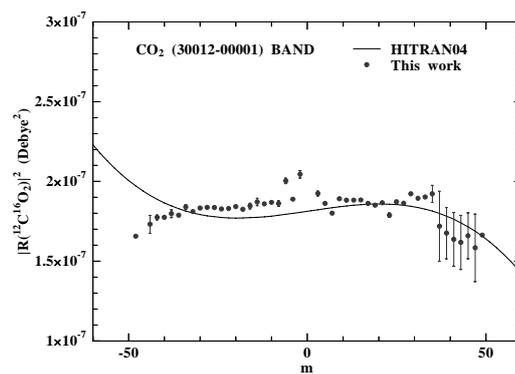


図2-1 (30012-00001)帯の遷移双極子モーメントの2乗とm数との関係。

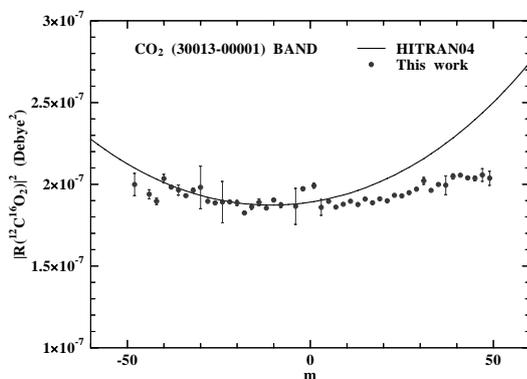


図2-2 (30013-00001)帯の遷移双極子モーメントの2乗とm数との関係。

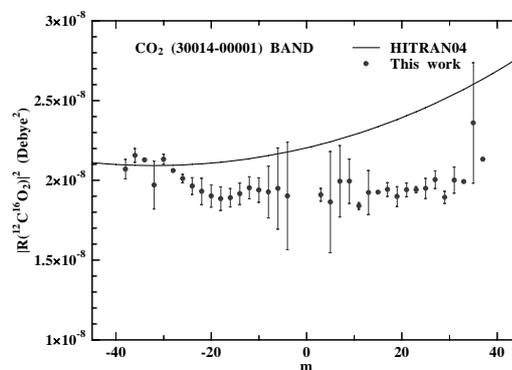


図2-3 (30014-00001)帯の遷移双極子モーメントの2乗とm数との関係。

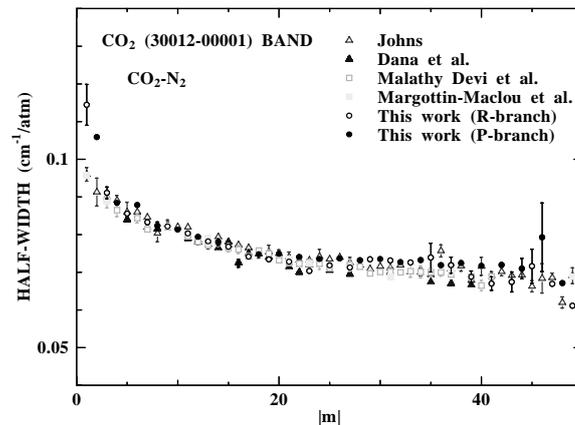


図 2 4 (30012-00001) 帯の CO_2 と N_2 の衝突幅の比較。

c. CO_2 2.0 μm 帯

図 2 5、図 2 6、図 2 7 に、(20011-00001) 帯、(20012-00001) 帯、(20013-00001) 帯の遷移双極子モーメントの 2 乗と m 数との関係を示す。本研究による (20011-00001) 帯の線強度は、実験誤差の範囲内で、HITRAN2004 データベースの値とほぼ一致する結果が得られたが、本研究の線強度には、Herman-Wallis 因子の効果が確認できた。本研究の (20012-00001) 帯の線強度は、P 枝全体と R 枝の吸収帯中心付近で、HITRAN2004 データベースの値とほぼ一致する結果が得られたが、本研究と HITRAN2004 データベースの Herman-Wallis 因子の二次係数は、符号が逆であった。このため、R 枝の裾野の領域において、両者の線強度に明瞭な差異が確認できた。本研究の (20013-00001) 帯の線強度は HITRAN2004 データベースの値よりも小さく、両者の差異は、吸収帯の中心から R 枝の裾野の領域にかけて大きくなる傾向を示し、その差異は 13% に及んだ。

本研究の CO_2 と N_2 の衝突幅は、HITRAN2004 データベースに編集された CO_2 と空気の衝突幅の基礎データとなった 1980 年代後半から 1990 年代前半に行われた Johns⁴⁾ や Dana et al.⁵⁾ などによる高分解能実験結果と良く一致した (図 2 8)。本研究の CO_2 と O_2 の衝突幅は、HITRAN2004 データベースに編集された CO_2 と空気の衝突幅の基礎データとなった 1980 年代後半から 1990 年代前半に行われた Dana et al.⁵⁾ や Margottin-Maclou et al.⁶⁾ による高分解能実験結果と 1980 年代中頃に行われた Arie et al.⁷⁾ による実験結果の中間的な値を示した (図 2 9)。

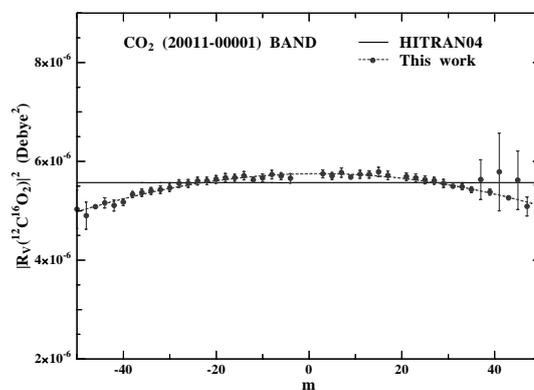


図 2 5 (20011-00001) 帯の遷移双極子モーメントの 2 乗と m 数との関係。

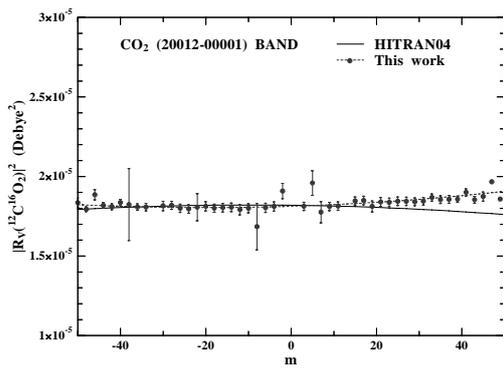


図 2 6 (20012-00001) 帯の遷移双極子モーメントの2乗とm数との関係。

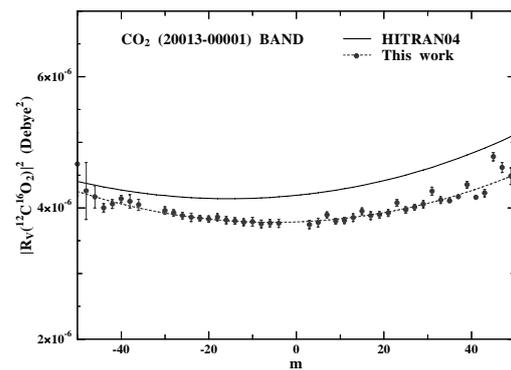


図 2 7 (20013-00001) 帯の遷移双極子モーメントの2乗とm数との関係。

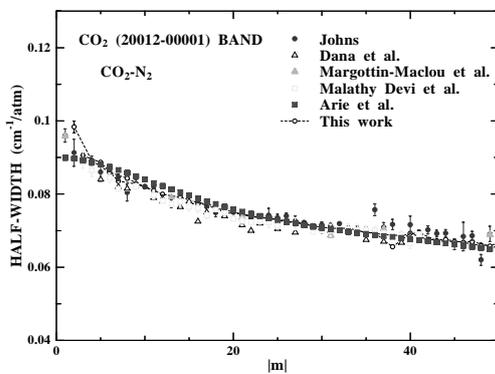


図 2 8 (20012-00001) 帯のCO₂とN₂の衝突幅。

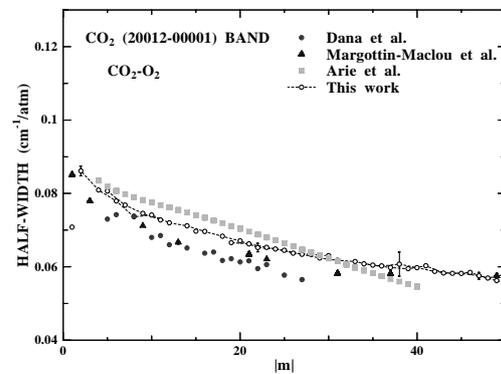


図 2 9 (20012-00001) 帯のCO₂とO₂の衝突幅。

d. CH₄ 2ν₃帯

図 3 0 に、P(CH₄)=38.0 Torr、P(N₂)=342.2 Torr、T=260.1 K の条件で測定された吸収線 R(1)、R(0) 及び Q 枝の各マニホールドの吸収スペクトルを示す。

図 3 1、図 3 2 に、それぞれ 2ν₃ 帯の吸収線 R(1) と R(0) の半値半幅 ($\gamma^0(\text{CH}_4\text{-N}_2)$ と $\gamma^0(\text{CH}_4\text{-O}_2)$) の各温度における値と温度依存性を示す。また表 2 に、半値半幅の温度依存性を表すべき指数 n の値を示す。

表 2 2ν₃ 帯の吸収線 R(1)、R(0)、P(1) の半値半幅の温度依存性

	n		
	R(1)	R(0)	P(1)
$\gamma^0(\text{CH}_4\text{-N}_2)$	0.978	0.893	0.796
$\gamma^0(\text{CH}_4\text{-O}_2)$	0.850	0.812	

これらの値は、ν₃ 帯の $\gamma^0(\text{CH}_4\text{-N}_2)$ に対して我々が得た約 0.85 と良く一致している。HITRAN2004 データベースに格納されている 0.75 は R(1)、R(0)、P(1) に対して、過小評価していると思われる。

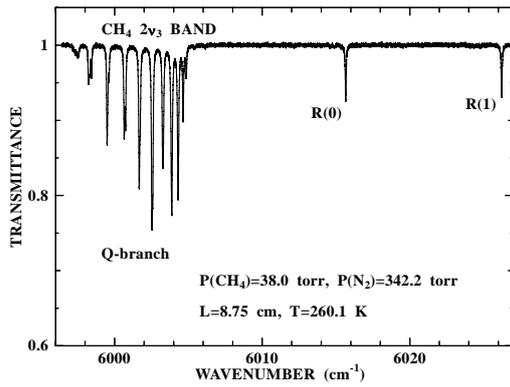


図 3 0 CH₄ 2ν₃帯の実験スペクトルの一例。

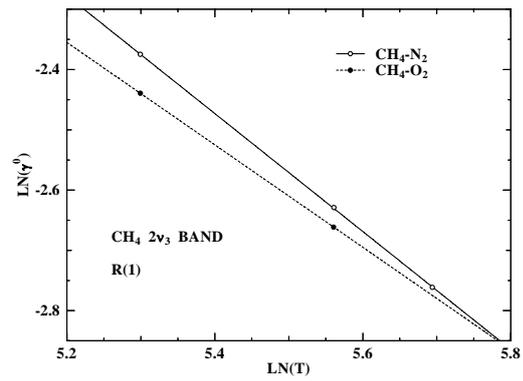


図 3 1 CH₄ 2ν₃帯吸収線R(1)の半値半幅の温度依存性。

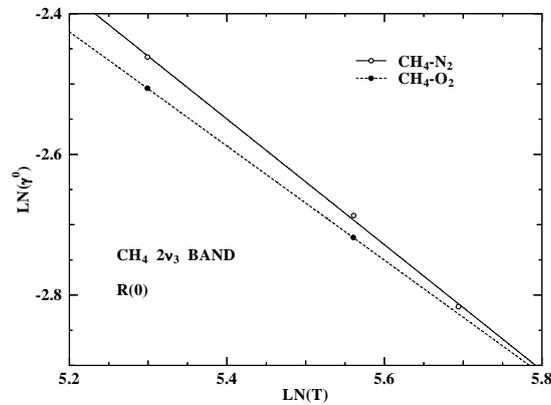


図 3 2 CH₄ 2ν₃帯吸収線R(0)の半値半幅の温度依存性。

200K から 260K の温度範囲で、 $\gamma^0(\text{CH}_4\text{-N}_2)$ と $\gamma^0(\text{CH}_4\text{-O}_2)$ の比は、R(1) と R(0) に対して、1.03 から 1.07 の値となり、 $\gamma^0(\text{CH}_4\text{-N}_2)$ が $\gamma^0(\text{CH}_4\text{-O}_2)$ より常に大きな傾向を示した。

図 3 3、図 3 4 に、CH₄ 2ν₃ 帯の R(1) と R(0) に対する線強度の温度依存性を示す。縦軸の値は、線強度の単位に $\text{cm}^{-2}\text{atm}^{-1}$ を用いて計算している。各温度における線強度は傾き -2.5 の直線の近傍に位置しており、線強度の温度依存性は理論的な依存性と良く一致する結果が得られた。

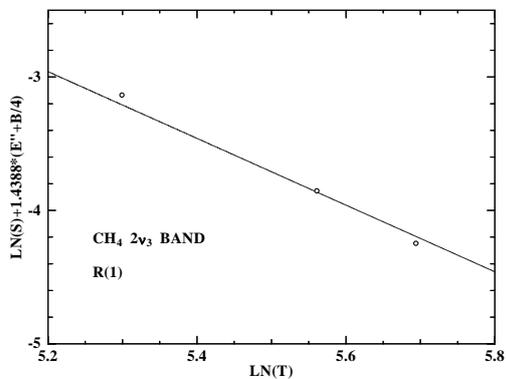


図 3 3 CH₄ 2ν₃帯吸収線R(1)の線強度の温度依存性。

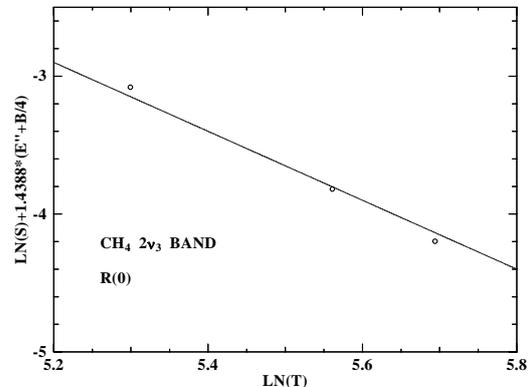


図 3 4 CH₄ 2ν₃帯吸収線R(0)の線強度の温度依存性。

CH₄ 2ν₃帯の1本の吸収線からなるR(1)、R(0)、P(1)を除いて、マニホールド（狭い波数範囲に複数の吸収線が出現する領域）の吸収スペクトルには、吸収線ミキシングの影響による吸収特性が確認できた。図35と図36に、P(CH₄)=38.0 Torr、P(N₂)=342.2 Torr、T=260.1 Kの条件下で測定されたマニホールドR(6)とP(8)の吸収スペクトルを示す。これらの図から両マニホールドの高波数側の吸収において、実験スペクトルはVoigt線形やLorentz線形を重ね合わせた計算スペクトルと一致が良くないのが分かる。マニホールドの高波数側では、吸収線ピークの低波数側へのシフトや線強度の増大などに関連する吸収線ミキシングの効果を考慮しなければ、実験スペクトルを再現できないことが分かった。吸収線ミキシング効果の精密な解析は今後の課題である。

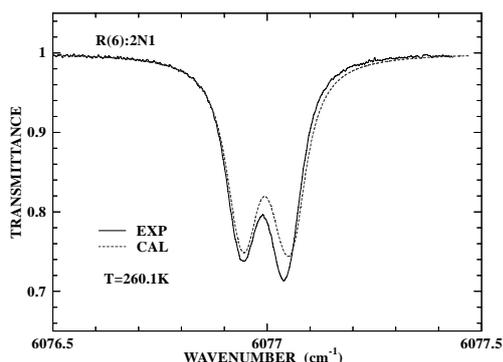


図35 CH₄ 2ν₃帯マニホールドR(6)のスペクトル比較。

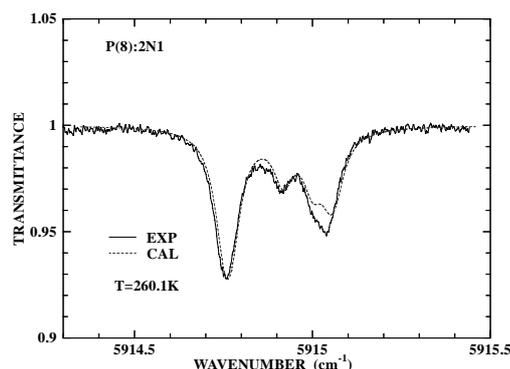


図36 CH₄ 2ν₃帯マニホールドP(8)のスペクトル比較。

2) 半導体レーザーを用いたスペクトル強度が弱い吸収線や限られた吸収線の高精度測定の研究

検出光光源として、外部共振器型半導体レーザーを用いた。レーザー光を音響光学素子によって屈折させた後、高反射率ミラーを50 cm隔てて構成した光学キャビティに導入した。検出側のミラーからの透過光信号強度がある一定のレベルまで到達すると、音響光学素子によって入射光を遮断した。その時点から、キャビティ内に定存していた光はリングダウンを開始し、信号強度は指数関数的に減衰する。減衰速度から試料分子による光吸収量を得た。バッファーガスとしてN₂、O₂、希ガスを用いた。吸収バンドの各振動回転線の前後で、0.001 cm⁻¹ごとにレーザー波長を変化させ、吸収スペクトルを得た。以下の式で回転量子数 m を定義する。

$$2m = J'(J' + 1) - J''(J'' + 1)$$

$$P\text{-branch } (J'' - 1 \leftarrow J'') \quad m = -J''$$

$$R\text{-branch } (J'' + 1 \leftarrow J'') \quad m = J'' + 1$$

得られたスペクトルをVoigt関数でフィットし、ローレンツ幅を求めた。その際、ドップラー幅は測定時の温度に対応する値に固定した。得られたローレンツ幅をバッファーガスの圧力に対してプロットした直線の傾きから、衝突幅(半値半幅) $\gamma / \text{cm}^{-1} \text{atm}^{-1}$ を決定した。

$$\gamma(T) / \gamma(T_0) = (T_0 / T)^n$$

N_2 と O_2 について得られた値を用いて、空気による衝突幅及び温度依存性を決定し、HITRAN2004データベースと比較検討した。

$$\begin{aligned}\gamma(\text{air}) &= 0.79 \gamma(N_2) + 0.21 \gamma(O_2) \\ n(\text{air}) &= n(N_2) + n(O_2)\end{aligned}$$

a. $CO_2(3\ 0^0\ 1) \leftarrow (0\ 0\ 0)$ バンド

衝突幅 γ を表 3 に示し、各温度における $\gamma(\text{air})$ から求めた温度依存係数 n を表 4 に示す。図 3 7 には各回転量子数 m に対して衝突幅 γ をプロットしておく。回転が速くなると、衝突の際の相互作用時間が小さいので γ 値は小さくなる。表 5 に示す今回の結果の $\gamma(\text{air})$ は、HITRAN2004データベースの値と比較して4~8%大きい値となった。空気の温度係数はよい一致を示した。

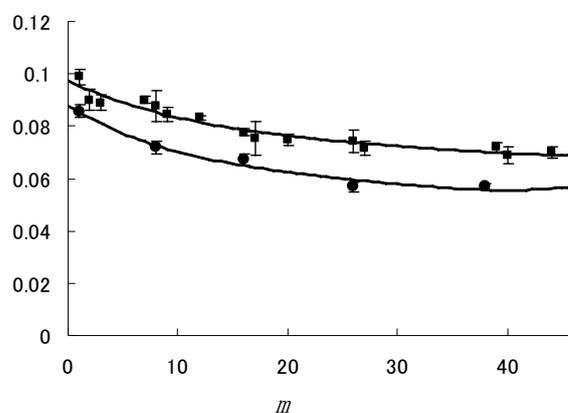


図 3 7 CO_2 の衝突幅 $\gamma / \text{cm}^{-1} \text{atm}^{-1}$ の回転量子数 m への依存性。上は N_2 データ、下は O_2 データ

表 3 298 Kにおける様々なバッファーガスによる CO_2 の衝突幅 ($\gamma / \text{cm}^{-1} \text{atm}^{-1}$)。

m	N_2	O_2	He	Ne	Ar
1	0.099(3)	0.086(2)	0.070(2)	0.059(1)	0.071(1)
2	0.090(4)	-	-	-	-
3	0.089(3)	-	-	-	-
7	0.090(1)	-	-	-	-
8	0.088(6)	0.072(2)	0.060(2)	0.052(3)	0.068(2)
9	0.085(3)	-	-	-	-
12	0.083(1)	-	-	-	-
16	0.078(1)	0.067(2)	0.058(2)	0.048(2)	0.062(2)
17	0.075(6)	-	-	-	-
20	0.075(2)	-	-	-	-
26	0.074(4)	0.057(2)	0.057(2)	0.047(3)	0.055(5)
27	0.071(3)	-	-	-	-
38	0.072(2)	0.057(1)	0.055(2)	0.042(1)	0.053(4)
39	0.069(3)	-	-	-	-
44	0.070(2)	-	-	-	-

表 4 様々なバッファーガスによるCO₂の衝突幅の温度依存性 (n)

$ m $	n			
	N ₂	O ₂	He	Xe
1	0.80(4)	0.66(8)	0.30(3)	0.82(7)
8	0.74(11)	0.72(11)	-	-

表 5 298 Kにおける空気によるCO₂の衝突幅と温度依存性。

Transition	γ (air) /cm ⁻¹ atm ⁻¹		n (air)	
	This Work	HITRAN ¹⁾	This Work	HITRAN ¹⁾
$R(0)$	0.096(2)	0.0939	0.77	0.74
$P(8)$	0.086(5)	0.0803	0.75	0.71
$P(16)$	0.075(2)	0.0732	-	-
$P(26)$	0.070(4)	0.0687	-	-
$P(38)$	0.069(2)	0.0667	-	-

b. N₂O (0 0⁰ 3) ← (0 0⁰ 0) バンド

表 6 に示す空気の γ (air) は HITRAN2004 データベースの値と比較してよい一致を示す。 γ 値の回転量子数依存性に関して、他のバンドや純回転スペクトルの結果と比較して図 3-8 に示す。赤外遷移においてその線幅を決めているのは下の準位の衝突相互作用であるので、遷移にかかわらず下の回転量子数 m が同じであれば、同じ γ 値を持つことがわかる。また、N₂ および O₂ との衝突における γ の温度依存性を測定した。その結果は $n=0.7-0.8$ であり、誤差範囲内では回転量子数依存性はなかった。さらに、N₂O のソースや大気循環の指標となる同位体検出を行い新しいスペクトル線を報告した。この結果は N₂O 検出の際に未帰属線を減らすことができる。

表 6 298 Kにおける空気によるN₂Oの衝突幅

$ m $	this work	HITRAN ¹⁾
3	0.089(02)	0.0916
4	0.086(01)	0.0901
5	-	0.0887
6	0.084(01)	0.0874
7	0.083(01)	0.0861
8	0.084(02)	0.0849
9	0.082(02)	0.0838
10	0.079(02)	0.0827
14	0.079(03)	0.0790
15	-	0.0782
18	0.075(03)	0.0761
21	-	0.0743
23	0.075(02)	0.0734
26	-	0.0722
32	0.065(01)	0.0707
34	-	0.0703
40	0.063(01)	0.0696

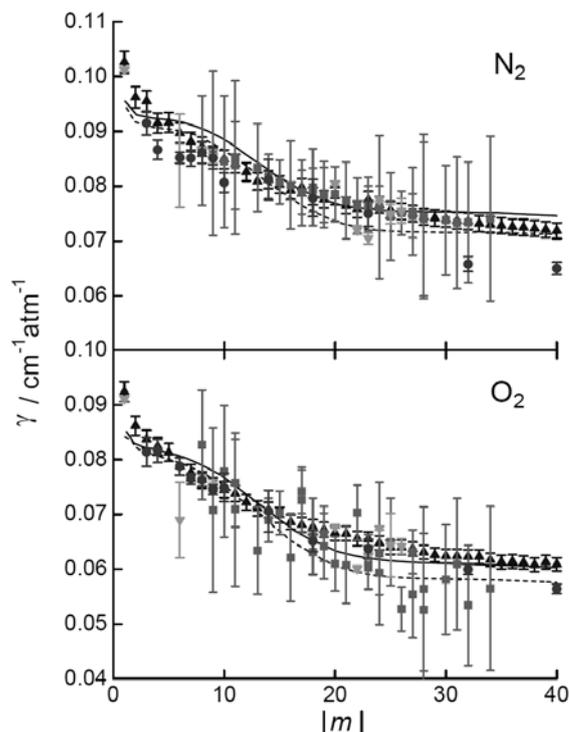


図 3 8 N_2 の衝突幅 ($\gamma / \text{cm}^{-1} \text{atm}^{-1}$) の回転量子数依存性。他の近赤外バンド、赤外バンドや純回転バンドデータとの比較をしてある。

c. H_2O (1 0 3) \leftarrow (0 0 0) バンド

水は温暖化ガスのスペクトル計測において常に妨害線として表れるので、そのデータ信頼性確認は重要項目である。表 7 に空気の γ (air) を示す。この値の回転量子数依存性は図 3 9 のように HITRAN2004 データベースの値 (実線) と比較してよい一致を示す。単調減少の形にはならない。

また、水二量体がかなりの割合で存在することが知られてきた。その大気中での存在量を推定することが必要であるので二量体生成平衡定数を求めるに必要な熱力学データを実測した。

表 7 298 K における N_2 、 O_2 、空気による H_2O の衝突幅 ($\gamma / \text{cm}^{-1} \text{atm}^{-1}$)。

Transition $J', K_a', K_c' - J'', K_a'', K_c''$	N_2	O_2	air
5, 2, 3 - 6, 2, 4	0.097 (5)	0.073 (6)	0.092 (4)
5, 3, 2 - 4, 1, 3	0.103 (4)	0.059 (2)	0.094 (3)
9, 2, 7 - 8, 2, 6	0.077 (3)	0.041 (2)	0.070 (3)
10, 1, 9 - 9, 1, 8	0.045 (3)	0.024 (3)	0.041 (2)
10, 2, 8 - 9, 2, 7	0.078 (4)	0.029 (2)	0.068 (3)
10, 3, 7 - 9, 3, 6	0.099 (3)	0.050 (3)	0.089 (2)
10, 4, 6 - 9, 4, 5	0.085 (3)	0.039 (3)	0.076 (2)
10, 5, 5 - 9, 5, 4	0.075 (2)	0.030 (3)	0.066 (2)
11, 2, 9 - 10, 2, 8	0.066 (3)	0.029 (2)	0.058 (2)
12, 2, 10 - 11, 2, 9	0.061 (4)	0.022 (3)	0.052 (3)

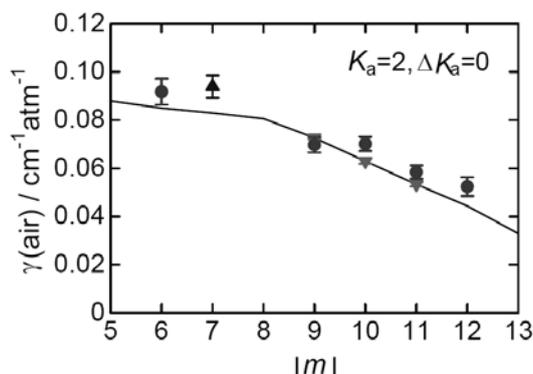


図39 H₂Oの γ (air)の回転量子数依存性。実線はHITRAN2004データベースの推奨値。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

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として、衛星センサの地上モデル（フーリエ変換分光計、BBM）を航空機（セスナや飛行船）に搭載、あるいは高所定点に設置して分光観測データを取得した。同時に、地上からの装置による分光観測データ、航空機による直接測定データを取得し、二酸化炭素及びメタンに関する観測情報を整備し、解析を実施した。温室効果ガスを観測対象として、航空機搭載のBBMにより短波長赤外波長帯の太陽の地表面反射光を観測したデータは、本研究において取得されたものが日本初の観測データと言える。結論として、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ることは、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。具体的には以下のような知見を得た。

飛行船に搭載したBBMによる地表面散乱光の観測とCO₂等のin-situ観測を同時に行い、実観測スペクトルとin-situ観測に基づいた放射伝達計算によるスペクトルとを比較し、装置のノイズに起因する誤差の範囲で良い一致を得ることができた。これにより、短波長赤外光の分光観測によりCO₂カラム濃度観測が可能であることを示すことができたと考えられる。

筑波山山頂にBBM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。同時に、航空機搭載直接測定により、二酸化炭素、メタン、気温、湿度データを取得し、筑波山頂では二酸化炭素の直接測定、地表ターゲットでは二酸化炭素の直接測定、気象データ、低分解能分光器による地表面分光散乱率を測定した。観測スペクトルをシミュレーション計算し、理論スペクトルと比較した。更にリトリバル解析を行いその結果を直接測定と比較した。

平成17年の観測実験（ほぼクリアスカイと考えられる天候）の解析結果は、両者は良く一致し、地表面散乱光と太陽直達光の光路差（約3 km）による吸収スペクトルの差が明瞭に示された。また、リトリバル解析による結果は、直接測定データ値と、装置に依存する誤差の範囲内（2～3%程度）で一致した。ただし、エアロゾルに関するパラメータが計測されていない、in-situ測定がBBM観測光路と完全には一致しない、気象条件（エアロゾル）などが異なる条件（複数の気象条件）での

観測がなされていない問題点が明らかとなった。

平成18年度は、これらの問題点を解決するために、次のように観測装置を追加し観測を実施した。つまり、スカイラジオメータ、ライダー観測によるエアロゾル情報の取得、航空機（セスナ）搭載高速CO₂濃度計による観測光路に沿ったin-situ測定を実施するために観測ジオメトリの後方散乱観測への変更である。また、2週間の観測期間を設け、晴天時にはデータ取得を行った。現在詳細な解析は継続中であるが、観測期間中、最もエアロゾルの影響が小さいと考えられる12月4日の解析を行った。観測当日は地表面ターゲット近傍において野焼きが行われていたものの、スカイラジオメータの解析によると、波長 500 nm におけるエアロゾル光学的厚さは終日0.1以下であった。BBM観測データ(使用波数範囲：6280～6380 cm⁻¹)に対して、エアロゾル無しの仮定の下で4)のリトリーバル解析を適用し、CO₂濃度の高度分布測定時に小型航空機(セスナ)が野焼きの煙を時折横切ったことが報告されているため、セスナ機観測によるCO₂気柱量はその影響を考慮して評価した。リトリーバル解析導出したCO₂気柱量とセスナ機観測結果とは2～3%程度の差で、良い一致を示した。また、CO₂気柱量推定値の日変動は、山頂・地表面ターゲットにおけるCO₂濃度変動とも対応していることがわかった。エアロゾルを考慮した解析の結果、両者の差が0.2～0.4%程度小さくなった。

2) 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を行い、巻雲やエアロゾルの影響がほとんど無く、地表面分光反射率の影響のないスペクトルを高精度で観測した。二酸化炭素1.6 μm帯のリトリーバル解析を行い、カラム量は小型航空機搭載In-situ測定と比較し1%以内で一致することが明らかとなった。更に朝から夕方までの観測データのリトリーバル解析結果を気象研鉄塔の直接測定と比較し、夏期の日変動を捉えている可能性が高いことを示した。冬季の二酸化炭素濃度がほぼ一定の時のリトリーバル解析から、当手法の相対精度は0.2%程度であることが示された。

これらは、GOSAT打ち上げ前はGOSATデータ解析アルゴリズムの妥当性の検証に役立ち、GOSAT打ち上げ後は、GOSATプロダクトの定常的な検証実験用機器の候補の一つとしての可能性がある。

3) 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に、改訂を検討する必要性のある点が見出された。特にCO₂ 1.6 μm帯の低波数側に位置する吸収帯の線強度は、実験から求めた線強度との差異が大きく、早急に改善すべきであることが判明した。この吸収帯は、衛星から大気中のCO₂全量を遠隔測定する場合に重要であるため、各々の線強度値の確度を高めることはCO₂全量の測定精度の向上に大いに資するものである。またCH₄ 2ν₃帯の吸収を正確に表現するためには、マニホールドに対しては吸収線ミキシングの効果が重要であることが把握できた。CH₄の赤外吸収帯のスペクトルにおいては、ν₃帯でも吸収線ミキシングの現象は確認されているが、まだ充分には解明されていないのが現状である。CH₄ 2ν₃帯のマニホールドで高波数側の吸収に吸収線ミキシングの効果が顕著に現れることを検出したことは、今後の吸収線ミキシングの研究の進展に大いに寄与すると思われる。

衝突幅について、HITRAN2004データベースのとの比較により本研究で用いたCRDS分光法は精度高いことがわかった。HITRAN2004データベースはいろいろな文献からその数値を得るとともに経

験的に数値を与えている部分がある。たとえば温度係数はフーリエ赤外分光法では実験が困難であるためそれほど信頼性が高いとはいえない。本研究で製作した新しい分光装置をもちいて温度係数を簡便に精度高く計測することができた。

これらによって取得された分光パラメータの改善情報は、サブテーマ2の研究やGOSATデータ解析アルゴリズムによる定常処理に活用されることが期待される。

(2) 地球環境政策への貢献

「GOSATサイエンスチーム」において、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を提示し、短波長赤外領域の衛星センサの検討において具体的な評価結果を数値で示すことにより、プロジェクトにおいて重要な貢献を果たした。併行して進められている熱赤外領域の検討は、該当するBBMのような装置がないため、シミュレーションおよび過去の衛星センサデータ（IMGセンサ）のみに基づく検討を余儀なくされ、当サブテーマのような実験結果に基づく検討はほとんど行うことが出来ない状況である。

また、競争相手であり協力相手でもある、二酸化炭素を観測するアメリカの人工衛星OCO(Orbiting Carbon Observatory)計画では、衛星打ち上げ前に、衛星観測に近い状況での航空機等による観測を実施していないため、OCO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、本研究で取得した観測データや解析結果に対して深い関心を示した。また、研究ベースでOCOプロジェクト側にこれらのデータを供与するよう求められている。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。

6. 引用文献

- 1) L. S. Rothman, D. Jacquemart, A. Barbe, D. C. Benner, M. Birk, L. R. Brown, M. R. Carleer, C. Chackerian, K. Chance, L. H. Coudert, V. Dana, V. M. Devi, J. M. Flaud, R. R. Gamache, A. Goldman, J. M. Hartmann, K. W. Jucks, A. G. Maki, J. Y. Mandin, S. T. Massie, J. Orphal, A. Perrin, C. P. Rinsland, M. A. H. Smith, J. Tennyson, R. N. Tolchenov, R. A. Toth, J. Vander Auwera, P. Varanasi, G. Wagner: J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 96, 139-204(2005)
“The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database”
- 2) T. Nakajima, and M. Tanaka: J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 35, 13-21(1986)
“Matrix formulations for the transfer of solar radiation in a planeparallel scattering atmosphere”
- 3) T. L. Kurucz: IAU Sympo. 154, edited by D.M. Rabin and J.T. Jefferies, Kluwer, Acad., Norwell Massachusetts(1992)
“Synthetic infrared spectra, Infrared Solar Physics”
- 4) J. W. C. Johns: J. Mol. Spectrosc. 125, 442-464(1987)
“Absolute intensity and pressure broadening measurements of co2 in the 4.3 μ m region”
- 5) V. Dana, A. Valentin, A. Hamdouni, and L. S. Rothman: Appl. Opt. 28, 2562-2565(1989)
“Line-intensities and broadening parameters of the (11101)-(10002) band of $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ ”

- 6) M. Margottin-Maclou, P. Dahoo, A. Henry, A. Valentin, and L. Henry : J. Mol. Spectrosc. 131, 21-35(1988)
 “Self-broadening, N₂-broadening, and O₂-broadening parameters in the ν_3 and $\nu_1 + \nu_3$ bands of ¹²C¹⁶O₂”
- 7) E. Arie, N. Lacome, P. Arcas, and A. Levy : Appl. Opt., 25, 2584-2591(1986)
 “Oxygen-broadened and air-broadened linewidths of CO₂”

7. 国際共同研究等の状況

- 協力案件名 : 「地球温暖化を防止する代替フロンの大気化学反応」代替フロンの対流圏大気寿命とGWPの推定
- 実施者 : 川崎昌博・京都大学
- カウンターパート : T. J. Wallington・フォード自動車研究所・米国
 O. J. Nielsen・コペンハーゲン大学・デンマーク
- 位置づけ : 相互訪問して共同論文の執筆を行い、共同論文を国際学術誌に2報掲載した。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり)>

- 1) 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”
- 2) 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- μ m region”
- 3) T. Nakayama, H. Fukuda, S. Hashimoto, M. Kawasaki, I. Morino, G. Inoue, 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”
- 4) T. Nakayama, H. Fukuda, T. Kamikawa, A. Sugita, M. Kawasaki, I. Morino, 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”
- 5) 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 dimmer at room temperature: An experimental and theoretical study”

〈その他誌上発表（査読なし）〉

- 1) 深堀正志、横田達也、田中智章：分光研究、第53巻第5号、311-313（2004）
「第8回HITRANデータベース会議報告」
- 2) 中野幸夫、川崎昌博：化学、59、78-79（2004）
「これまでにない超高感度な光吸収分光；キャビティ・リングダウン分光法」
- 3) 杉岡幸次、矢部明編：レーザーマイクロ・ナノプロセッシング、シーエムシー出版、351-358（2004）
「第6章1節 環境技術—大気環境化学反応研究におけるレーザー分光法の利用（執筆担当：川崎昌博）」
- 4) 久世暁彦、近藤賀代子、浜崎敬、小熊宏之、森野勇、横田達也、井上元：日本リモートセンシング学会誌、26、1、41-42（2005）
「GOSATによる衛星からの温室効果ガス観測」
- 5) A. Kuze, K. Kondo, and T. Hamazaki：MWE 2005 (Microwave Workshop and Exhibition) 2005 Workshop digest, 377-382（2005）
“Greenhouse Gases Monitoring from the GOSAT Satellite”
- 6) 深堀正志、鈴木睦：分光研究、第54巻第6号、353-355（2005）：
「『第7回大気分光学の応用に関するコロキウム（ASA2005）』報告」
- 7) M. Fukabori, T. Fujieda, T. Aoki, and T. Watanabe：Proceedings of the 7th Colloquium ASA (Atmospheric Spectroscopy Applications), 35-38（2005）
“Line strengths and half-widths of the CO₂ bands in the 2 μm region at room temperature”

(2) 口頭発表（学会）

- 1) 深堀正志、青木忠生、藤枝鋼、渡邊猛：日本分光学会春季講演会（2004）
「N₂O近赤外吸収帯の吸収線パラメータの測定及び最新HITRANデータベースとの比較」
- 2) 藤枝鋼、深堀正志、青木忠生、渡邊猛：日本気象学会春季大会（2004）
「室温下におけるCH₄ ν₁+ν₄ 帯・ν₃+ν₄ 帯の吸収線強度と半値半幅の測定」
- 3) 田中智章、横田達也、中島英彰、笹野泰弘、深堀正志、青木忠生、渡邊 猛：日本気象学会2004年度春季大会（2004）
「ILAS-II CH.1の測定領域におけるCH₄ ν₄ 帯の高分解能吸収スペクトル測定」
- 4) 井上元、横田達也、小熊宏之、日暮明子、森野勇、中根英昭：第10回大気化学討論会（2004）
「温室効果ガス観測衛星(GOSAT)開発の現状」
- 5) T. Tanaka, M. Fukabori, H. Nakajima, T. Yokota, and T. Watanabe：The 8th HITRAN database conference, Cambridge, USA（2004）
“Spectral line parameters for CO₂ bands near 4.8 μm”
- 6) T. Tanaka, M. Fukabori, H. Nakajima, T. Sugita, T. Yokota, T. Watanabe, and Y. Sasano：AGU Fall Meeting, San Francisco, USA（2004）
“Spectral line parameters for CO₂ bands near 4.8 μm”
- 7) 深堀正志、青木忠生、藤枝鋼、横田達也、中島英彰、笹野泰弘、渡邊猛：第23回レーザーセンシングシンポジウム（2004）
「CO₂ レーザーバンドの吸収線強度と半値半幅」

- 8) 川口紀光、福田久人、橋本訓、川崎昌博、森野勇、須藤洋志、井上元：第23回レーザーセンシングシンポジウム (2004)
「連続光キャビティ・リングダウン分光法による二酸化炭素スペクトル線の圧力広がり測定」
- 9) 森野勇、杉本伸夫、中根英昭：第23回レーザーセンシングシンポジウム (2004)
「遠隔計測のための分光パラメータの精密取得及び評価」
- 10) 田中智章、横田達也、中島英彰、笹野泰弘、深堀正志、渡邊猛：日本気象学会秋季大会 (2004)
「CO₂ 4.8 μ m帯の吸収線パラメータ測定」
- 11) 川崎昌博、日本分光学会北海道支部設立記念講演会 (2004)
「キャビティ・リングダウン分光法による海洋境界面の大気化学」
- 12) T. Yokota, H. Oguma, I. Morino, A. Higurashi, and G. Inoue: SPIE's 4th Int. Asia-Pacific Environ. Remote Sensing Sympo., Remote Sensing of the Atmosphere, Ocean, Environment, and Space, Hawaii USA, 2004
“Test measurements by a BBM of the nadir-looking SWIR FTS aboard GOSAT to monitor CO₂ column density from space”
- 13) T. Nagahama, J. Kadoguchi, A. Mizuno, H. Maezawa, and Y. Matsumi : NDSC Infrared Working Group meeting, Queenstown, New Zealand, 2004
“Site Report on Moshiri & Rikibetsu FTIRs; Long term measurements of HCl and HF column density”
- 14) I. Morino, H. Nakane, and T. Nagahama: NDSC Infrared Working Group meeting, Queenstown, New Zealand, 2004
“Present status of solar absorption measurements with Bruker IFS 120 HR at Tsukuba”
- 15) G. Inoue, T. Yokota, H. Oguma, A. Higurashi, I. Morino, and T. Aoki : 2004 AGU Fall Meeting, San Francisco, California, USA, 2004
“Overview of Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT) of Japan”
- 16) 須藤洋志、山本昌則、小熊宏之、井上元：第15回大気化学シンポジウム (2005)
「小型航空機による二酸化炭素・メタンの鉛直分布観測」
- 17) 藤枝鋼、深堀正志、渡邊猛：第15回大気化学シンポジウム (2005)
「室温におけるCH₄ $\nu_1 + \nu_4$ 帯・ $\nu_3 + \nu_4$ 帯の吸収線強度と圧力による広がり特性」
- 18) 森野勇、大山博史、杉本伸夫、中根英昭、長浜智生：第15回大気化学シンポジウム (2005)
「つくばフーリエ分光計を用いた温室効果ガスの近赤外吸収スペクトル観測」
- 19) 角口潤一郎、長浜智生：第15回大気化学シンポジウム (2005)
「母子里・陸別FTIRによるHCl・HFカラム全量の長期変動観測」
- 20) 川崎昌博、日本分析機器工業会先端計測研究会 (2005)
「レーザー分光の高感度分析への応用」
- 21) 久世暁彦：2nd International Workshop on Greenhouse Gas Measurement from Space, Pasadena, California, USA, 2005
“GOSAT Instrument Design and BBM Test Results”
- 22) 川崎昌博：日本分析機器工業会先端計測研究会 (2005)

- 「レーザー分光の高感度分析への応用」
- 23) A. Kuze : 12th ASSFTS (Atmospheric Science from Space using Fourier Transform Spectrometry) Workshop, Quebec City, Canada, (2005)
 “GOSAT FTS Design and BBM Test Results”
- 24) 久世暁彦、近藤賀代子、浜崎敬、小熊宏之、森野勇、横田達也、井上元 : 日本リモートセンシング学会、SICE-RSSJ共同セッション「新たな可能性に挑むセンサ」(2005)
 「GOSATセンサの概要とBBM実験結果」
- 25) H. Ohyama, I. Morino, T. Nagahama, T. Machida, N. Sugimoto, H. Nakane, and K. Nakagawa : NDSC Infrared Working Group Meeting, Toronto, Canada, (2005)
 “Retrieval analysis of the CO₂ 1.6 μm band absorption spectra measured with a ground-based Fourier transform spectrometer at Tsukuba”
- 26) 大山博史、森野勇、長浜智生、町田敏暢、杉本伸夫、中根英昭、中川和道 : 第11回大気化学討論会 (2005)
 「つくば地上FTSを用いたCO₂ 1.6 μm帯のリトリバーバル解析」
- 27) M. Fukabori, T. Fujieda, T. Aoki, T. Watanabe : the 7th Colloquium ASA (Atmospheric Spectroscopy Applications), Reims, France, (2005)
 “Line strengths and half-widths of the CO₂ bands in the 2 μm region at room temperature”
- 28) H. Ohyama, I. Morino, T. Nagahama, T. Machida, N. Sugimoto, H. Nakane, and K. Nakagawa : 19th Colloquium on High Resolution Molecular Spectroscopy, Salamanca, Spain, 2005
 “NEAR-INFRARED SOLAR ABSORPTION SPECTRA MEASURED BY A GROUND-BASED HIGH-RESOLUTION FOURIER-TRANSFORM SPECTROMETER AT TSUKUBA: RETRIEVAL ANALYSIS OF THE CO₂ 1.6 μm BAND”
- 29) 福田久人、橋本訓、川崎昌博、森野勇、須藤洋志、井上元 : 分子構造総合討論会 (2005)
 「連続光キャビティ・リングダウン分光法による二酸化炭素吸収線の圧力広がり測定」
- 30) 大山博史、森野勇、長浜智生、町田敏暢、杉本伸夫、中根英昭、中川和道 : 分子構造総合討論会 (2005)
 「つくば地上高分解能FTSを用いた太陽直達光大気吸収スペクトルの測定とCO₂ 1.6 μm帯のリトリバーバル解析」
- 31) 藤枝鋼、深堀正志、熊沢亮一、渡邊猛 : 日本気象学会2005年度秋季大会 (2005)
 「低温下におけるCH₄のν₃帯吸収線強度と半値半幅の測定」
- 32) M. Fukabori, T. Fujieda, R. Kumazawa, T. Watanabe : 2005 FY Spectroscopical Society of Japan Conference, Tokyo, Japan, (2005)
 “Measurements of the absorption line parameters of the 1.6 μm bands of CO₂ at room temperature”
- 33) 久世暁彦、占部智之、近藤賀代子、浜崎敬、小熊宏之、森野勇、横田達也、井上元 : 計測自動制御学会計測部門リモートセンシング部会、第31回リモートセンシングシンポジウム (2005)
 「GOSAT温室効果ガス観測センサのBBM実験結果」

- 34) 上川拓磨、福田久人、橋本訓、川崎昌博、森野勇、須藤洋志、井上元：日本分光学会秋季講演会・シンポジウム（2005）
「連続光キャビティ・リングダウン分光法によるCO₂線幅の測定」
- 35) 小熊宏之、横田達也、森野勇、須藤洋志、吉田幸生、江口菜穂、久世暁彦、井上元：日本リモートセンシング学会第39回(平成17年度秋季)学術講演会（2005）
「飛行船搭載短波長赤外フーリエ変換分光器(GOSAT-BBM)による二酸化炭素スペクトル観測実験」
- 36) A. Kuze, K. Kondo, Y. Kaneko, and T. Hamazaki : AGU 2005 Fall Meeting, San Francisco, USA, (2005)
“Greenhouse Gases Observation from the GOSAT Satellite”
- 37) I. Morino, H. Suto, G. Inoue, H. Fukuda, S. Hashimoto, and M. Kawasaki : AGU 2005 Fall Meeting, San Francisco, USA, (2005)
“Foreign-Gas Pressure Broadening Measurement of the Carbon Dioxide (3 0⁰ 1)_{III} ← (0 0 0) Band using Continuous-Wave Cavity Ring-Down Spectroscopy”
- 38) 大山博史、森野勇、長浜智生、杉本伸夫、中根英昭、中川和道：第16回大気化学シンポジウム（2006）
「つくば地上高分解能FTSを用いたメタン1.67 μm帯の吸収スペクトル観測」
- 39) 黒崎陽介、福田久人、橋本訓、川崎昌博、森野勇、須藤洋志、井上元：第16回大気化学シンポジウム（2006）
「連続光キャビティ・リングダウン分光法を用いたCO₂/CH₄/N₂O線幅測定」
- 40) 藤枝鋼、深堀正志、熊沢亮一、渡邊猛：第16回大気化学シンポジウム（2006）
「低温下におけるCH₄のν₃帯吸収線パラメータ」
- 41) 福田久人、橋本訓、川崎昌博、森野勇、須藤洋志、井上元：レーザー学会学術講演会第26回年次大会（2006）
「連続光キャビティ・リングダウン分光法による二酸化炭素吸収線の圧力広がり測定」
- 42) H. Ohyama, I. Morino, T. Nagahama, T. Machida, N. Sugimoto, H. Nakane, and K. Nakagawa : International Symposium on New Horizon of Astrochemistry and Laboratory Spectroscopy, Mito, Ibaraki, Japan, (2006)
“Near-Infrared Solar Absorption Spectra Measured by a Ground-Based High-Resolution Fourier-Transform Spectrometer at Tsukuba: Retrieval Analysis of the Carbon Dioxide 1.6 μm Band”
- 43) I. Morino, H. Suto, G. Inoue, H. Fukuda, T. Kamikawa, S. Hashimoto, and M. Kawasaki : International Symposium on New Horizon of Astrochemistry and Laboratory Spectroscopy, Mito, Ibaraki, Japan, (2006)
“Foreign-Gas Pressure Broadening Measurement of the CO₂ (3 0⁰ 1)_{III} ← (0 0 0) Band using Continuous-Wave Cavity Ring-Down Spectroscopy”
- 44) T. Fujieda, M. Fukabori, R. Kumazawa : International Symposium on New Horizon of Astrochemistry and Laboratory Spectroscopy, Mito, Ibaraki, Japan, (2006)
“Temperature dependence of line strengths and pressure-broadening coefficients for

- spectral lines in the ν_3 band of $^{12}\text{CH}_4$ ”
- 45) H. Fukuda, S. Hashimoto, M. Kawasaki, I. Morino, H. Suto, G. Inoue : XXIst IUPAC SYMPOSIUM ON PHOTOCHEMISTRY, Kyoto (2006)
 “Cavity ring-down spectroscopy for gas analysis with diode laser”
- 46) H. Ohyama, I. Morino, T. Nagahama, T. Machida, N. Sugimoto, H. Nakane, and K. Nakagawa : NDACC Infrared Working Group Meeting, Tsukuba, Japan(2006)
 “Near-Infrared Solar Absorption Spectra Measured by a Ground-Based High-Resolution FTS at Tsukuba: Retrieval Analysis of the Carbon Dioxide 1.6 μm Band”
- 47) I. Morino, H. Ohyama, T. Nagahama, and H. Nakane : NDACC Infrared Working Group Meeting, Tsukuba, Japan(2006)
 “Tsukuba NIR Site Report (Bruker IFS 120 HR)”
- 48) 吉田幸生、小熊宏之、森野勇、須藤洋志、横田達也、井上元、久世暁彦：気象学会2006年度春季大会(2006)
 「短波長赤外フーリエ変換分光器(GOSAT-BBM)による二酸化炭素スペクトルの高所観測実験」
- 49) 吉田幸生、小熊宏之、森野勇、須藤洋志、横田達也、井上元、久世暁彦：第6回分子分光研究会(2006)
 「筑波山における短波長赤外フーリエ変換分光計(GOSAT-BBM)を用いた温室効果ガスの吸収スペクトル観測」
- 50) H. Ohyama, I. Morino, T. Nagahama, T. Machida, N. Sugimoto, H. Nakane, and K. Nakagawa : 3rd International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space(IWGGMS), Tsukuba, Japan(2006)
 “Near-Infrared Solar Absorption Spectra Measured by a Ground-Based High-Resolution Fourier-Transform Spectrometer at Tsukuba: Retrieval Analysis of the Carbon Dioxide 1.6 μm Band”
- 51) 福田久人、上川拓磨、中山智喜、橋本訓、川崎昌博、森野勇、須藤洋志、井上元：第12回大気化学討論会(2006)
 「連続光キャビティ・リングダウン分光法によるN₂O吸収線の圧力広がり測定」
- 52) 小熊宏之、森野勇、井上元、横田達也、S. マクシュートフ、町田敏暢、青木忠生、吉田幸生：第12回大気化学討論会(2006)
 「温室効果ガス観測技術衛星「GOSAT」の検証実験計画」
- 53) 須藤洋志、久世暁彦、金子豊、浜崎敬、小熊宏之、吉田幸生、森野勇、横田達也、井上元：電子情報通信学会宇宙・航行エレクトロニクス研究会(SANE)(2006)
 「GOSAT搭載TANSOによる温室効果ガス観測」
- 54) Y. Yoshida, H. Oguma, I. Morino, H. Suto, T. Yokota, G. Inoue, and A. Kuze : APRS2006(The 2nd Asian-Pacific Radiation Symposium), Kanazawa, Japan(2006)
 “Measurement of CO₂ absorption spectra at an altitude of 800 meters by using the FTS (GOSAT-BBM) in SWIR spectral region”
- 55) I. Morino, H. Suto, G. Inoue, H. Fukuda, T. Kamikawa, S. Hashimoto, and M. Kawasaki : : 3rd International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space(IWGGMS), Tsukuba,

Japan(2006)

“Foreign-Gas Pressure Broadening Measurement of the CO_2 (3 0⁰ 1)_{III} ← (0 0 0) Band using Continuous-Wave Cavity Ring-Down Spectroscopy”

- 56) I. Morino, H. Suto, G. Inoue, H. Fukuda, T. Kamikawa, S. Hashimoto, M. Kawasaki : 19th International Conference on High Resolution Molecular Spectroscopy, Prague (2006)

“FOREIGN-GAS PRESSURE BROADENING FOR THE CO_2 (3 0⁰ 1)_{III} ← (0 0 0) BAND USING CONTINUOUS-WAVE CAVITY RING-DOWN SPECTROSCOPY”

- 57) 福田久人、上川拓磨、中山智喜、橋本 訓、川崎昌博、森野勇、井上元 : 分子構造総合討論会(2006)

「近赤外半導体レーザーを用いた N_2O 吸収線の圧力広がり測定」

- 58) 深堀正志、森野勇、横田達也、熊沢亮一、渡邊猛 : 日本気象学会2006年度秋季大会(2006)
「 CH_4 の $2\nu_3$ 帯の半値半幅の温度依存性」

- 59) 小熊宏之、吉田幸生、森野勇、須藤洋志、久世暁彦、横田達也 : 日本リモートセンシング学会第41回(平成18年度秋季)学術講演会(2006)

「短波長赤外フーリエ変換分光計(GOSAT-BBM)を用いた CO_2 吸収スペクトルの高所観測実験」

- 60) K. Nobuta, A. Kotani, H. Ishihara, N. Uemura, T. Yokota, A. Higurashi, I. Morino, H. Oguma, Y. Yoshida, Y. Ota, N. Eguchi, T. Aoki, and G. Inoue : American Geophysical Union Fall meeting, San Francisco, California, USA (2006)

“Error Analysis of CO_2 Column Amount Retrievals using SWIR Synthetic Data of the GOSAT FTS: Impact of Atmospheric Aerosols”

- 61) Y. Yoshida, H. Oguma, I. Morino, H. Suto, T. Yokota, G. Inoue, and A. Kuze : American Geophysical Union Fall meeting, San Francisco, California, USA (2006)

“Estimation of the CO_2 Concentration from the Measurements of Solar Absorption Spectra at an Altitude of 800 Meters by using the FTS (GOSAT-BBM) in SWIR Region”

- 62) H. Ohyama, I. Morino, T. Nagahama, H. Suto, H. Oguma, T. Machida, N. Sugimoto, H. Nakane, K. Nakagawa : American Geophysical Union Fall meeting, San Francisco, California, USA (2006)

“Retrieval Analysis of the CO_2 1.6 μm Band in Solar Absorption Spectra Measured by a Ground-Based High-Resolution Fourier Transform Spectrometer at Tsukuba”

- 63) I. Morino, H. Fukuda, T. Nakayama, S. Hashimoto, G. Inoue, M. Kawasaki : American Geophysical Union Fall meeting, San Francisco, California, USA (2006)

“Foreign-Gas Pressure Broadening Measurement of the Nitrous Oxide (0 0⁰ 3) ← (0 0 0) Band using Continuous-Wave Cavity Ring-Down Spectroscopy”

- 64) 大山博史、森野勇、青木忠生、横田達也、岩木敏幸、荒谷修 : 第17回大気化学シンポジウム(2007)

「太陽大気吸収スペクトルの導出方法の検討 : 高分解能FTIR測定データの適用例」

- 65) 田中智章、斉藤龍、吉田幸生、小熊宏之、森野勇、町田敏暢、下山宏、原熙、井上元、横田達也 : 第17回大気化学シンポジウム(2007)

- 「GOSAT-BBMを用いた2006年秋季筑波山観測」
- 66) 福田久人、中山智喜、橋本訓、川崎昌博、森野勇、井上元：第17回大気化学シンポジウム (2007)
- 「連続光キャビティ・リングダウン分光法を用いたH₂O吸収線の圧力広がり測定」
- 67) 齊藤龍、田中智章、吉田幸生、小熊宏之、森野勇、横田達也、井上元、原熙：日本気象学会2007年度春季大会 (2007)
- 「筑波山近辺の気象不連続変化時における複数測器の相関と考察」
- 68) 吉田幸生、齊藤龍、田中智章、小熊宏之、森野勇、原熙、青木一真、町田敏暢、横田達也：日本気象学会2007年度春季大会 (2007)
- 「短波長赤外フーリエ変換分光器 (GOSAT-BBM) による二酸化炭素スペクトルの高地観測実験 その2」
- 69) 森野勇、中山智喜、福田久人、上川琢磨、井上元、川崎昌博：第7回分子分光研究会 (2007)
- 「キャビティ・リングダウン分光法によるN₂O 3ν₃バンドの圧力幅と同位体種測定」
- 70) 中山智喜、福田久人、上川琢磨、天野達夫、佐藤啓文、榊茂好、S. Aloisio、森野勇、井上元、川崎昌博：第7回分子分光研究会 (2007)
- 「H₂O, CO₂, N₂Oの二量体の相互作用エネルギー」
- 71) 中山智喜、福田久人、上川琢磨、橋本訓、川崎昌博、森野勇、井上元：第23回化学反応討論会 (2007)
- 「H₂Oの圧力広がり測定による(H₂O)₂のポテンシャルエネルギー深さの推定」
- (3) 出願特許
- 1) 川崎昌博(京都大学)、堀場製作所株式会社：「粒子分析装置」、特願：2004-328270、2004年11月11日
- (4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)
- 1) 第1回CRDS実用化フォーラム (2006年10月17日、科学技術振興機構 研究成果活用プラザ 京都、参加者18名)
- (5) マスコミ等への公表・報道等
- 1) 東京MXテレビ、ガリレオチャンネル (2005年4月24日、5月1日再放送、飛行船だからできる空の仕事、2分程度紹介)

