

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：17701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26610152

研究課題名(和文)桜島から排出される二酸化炭素量の計測および解析

研究課題名(英文)Analysis and measurement of carbon dioxide exhaled from Sakurajima

研究代表者

大橋 勝文(Ohashi, Masafumi)

鹿児島大学・理工学域工学系・准教授

研究者番号：00381153

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：二酸化炭素の発生場所として注目すべき活火山近くの鹿児島市、大都会の東京、大規模な森林火災が起こるインドネシアカリマンタン島パラカラヤに観測装置を設置し、我々が開発した解析手法により二酸化炭素のカラム量及び大気層内の存在比を見積もった。我々のシステムの解析精度を国立環境研のFTSと比べた結果、 $\pm 2$ ppmの誤差であった。鹿児島市では405ppmの濃度を確認した。東京学芸大学付属高校の観測・解析により9.8ppmの上下変動と2.1ppm/yearの増加を明らかにできた。解析システムにGPUを利用することで、6セルでのマルチCPUに比べGPUを利用した手法に比べ約9倍も高速にすることができた。

研究成果の概要(英文)：The comparison involved operating the FES-C in parallel with a high resolution Fourier transform spectroscopy (FTS) situated at National Institute for Environment Studied, Japan. The difference of CO<sub>2</sub> mixing ratio from FTS and FES-C was estimated to be  $\pm 2$ ppm. We measured the atmospheric CO<sub>2</sub> by FES-C and OSA in Kagoshima and Tokyo Japan and ParankaRaya Indonesia. We set up the OSA system and observed a CO<sub>2</sub> mixing ratio in Kagoshima, where is near Sakurajima volcano. We observed the small variation of CO<sub>2</sub> mixing ratio in Kagoshima city. We estimated to be 2.1 ppm per year the annual trend of CO<sub>2</sub> mixing ratio in Tokyo in Japan, and cleared the increase in forest fire during the dry season raised the rise of CO<sub>2</sub> mixing ratio by the observation in Indonesia. We improved on various types of Voigt algorithm with GPU boards (c2075 and K20), and simulated rapidly CO<sub>2</sub> spectra at about 9 times compared to the parallel processing the multi-CPU (6-cell).

研究分野：大気分析および解析

キーワード：二酸化炭素 カラム量 二酸化炭素存在比 FTS FES-C OSA

## 1. 研究開始当初の背景

地球上の二酸化炭素量の変動を把握するために、世界的に計測及び解析が進められている。その手法には、ゾンデや航空機にガスの捕獲器を搭載して上空の大気を捕獲する方法や人工衛星による観測を行うなど、さまざまなものがある。日本では、(独)宇宙航空研究開発機構の温室効果ガス観測技術衛星「GOSAT」や(独)国立環境研究所が所有している地上設置高分解能 FTS (Fourier-transform spectrometer) により、二酸化炭素の計測が行われている[1]。GOSAT による観測は、地球全体の二酸化炭素濃度が空間的によどの程度分布しているかを把握することは可能だが、地球を周回しながら観測しているので、特定地域を6日間隔でしか計測できない。そのため、ある地域の二酸化炭素濃度が時系列的にどのように変化していくかを把握するためには、観測器を観測場所に設置する必要がある。しかも、GOSAT のデータとの比較を考慮すると地上から成層圏に至るカラム濃度と混合比を計測する必要がある。そのために、太陽光を集光して計測したスペクトルから大気二酸化炭素カラムを見積もる FTS を観測場所に設置して計測する手法が考えられる。ところが、FTS は高精度だが、室内設置環境を整える必要があり、全体では高価となる。しかも、任意の場所で計測を行うためには、持ち運びや設置が容易に行える機器が求められる。

そこで、研究代表者は設置が容易で移動可能な2種類のカラム濃度計測器:(1) Fiber-Etalon Solar Carbon (FES-C) 計測器、(2) Optical Spectrum Analyzer (OAS) を利用した計測システムの開発を進めている。

FES-C 計測器は、JST 経費「世界標準を目指した光学的二酸化炭素自動計測器の実用化開発」により開発した。FES-C 計測器はエタロン温度を変化させることにより、エタロンの透過領域を変化させることができる原理を使う。太陽光を温度制御された超小型のファイバーエタロンに光を通し、二酸化炭素の近赤外吸収スペクトルとエタロンの透過領域が一致しているときは信号光強度が最も小さくなる ( $I_{min}$ )。一方、不一致の時には、光の強度が最も大きくなる ( $I_{max}$ )。これらの比值  $I_{min}/I_{max}$  から二酸化炭素カラム濃度が得られる。その際には観測地から成層圏までの気象条件と二酸化炭素混合比を変えて  $I_{min}/I_{max}$  値を再現できる濃度を算出する。この FES-C 計測器は、太陽光が 20%まで低下し

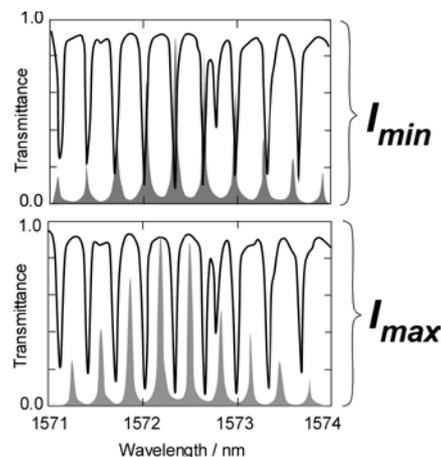


図1 Fiber-Etalon Solar Carbon 計測器の動作原理実線:二酸化炭素の吸収を含む太陽光のスペクトル、灰色の部分:エタロンの透過領域

ても二酸化炭素カラム量を計測することが可能なので、乾季のカリマンタン島に複数の観測地に機器を設置して、森林火災の風上/風下で変化する二酸化炭素混合比を計測することで大規模な発生量を精度高く計測できる[1]。火災による太陽光妨害があっても、この装置は二酸化炭素カラム計測ができることは実証済である。

また、二酸化炭素以外にも温室効果をもたらす気体として、二酸化炭素よりも約 20 倍もの温室効果を及ぼすメタンがあり、二酸化炭素とメタンの両分子を計測する場合には、計測対象の分子の特徴を示す吸収スペクトルの波長域を切り替えて OSA を用いて計測を行う。二酸化炭素とメタンの濃度変化に対しては、研究代表者の共同研究先である中国科学院と名古屋大学により中国の四川省にて観測を行い、その計測結果から二酸化炭素とメタンの濃度を研究代表者が開発したデータ解析手法により見積もった。

2014 年の時点では、二酸化炭素の発生源として注目する場所として、(1) 活火山、(2) 大規模な森林火災が起こる熱帯地域、(3) 社会生活を営む上で二酸化炭素を多く排出している大都会が挙げ、これらの地域での二酸化炭素混合比を計測した。

## 2. 研究の目的

研究代表者の目的としては、活火山である桜島から排出される二酸化炭素が、桜島上空の風向きによっては鹿児島上空に流れてくるため、鹿児島上空の二酸化炭素カラム量の変動を計測することを目的に、計測機器の設置、観測場所特有の環境に対する対策、設置

場所が鹿児島なので強力な台風が到達するため、その対策を行い、 $x\text{CO}_2$  と二酸化炭素カラム濃度を計測した。

同時期に、熱帯雨林の森林火災に対してインドネシアカリマンタン島のパランカラヤに FES-C 計測器も設置して、森林火災が発生する乾季と火災が沈静化する雨季との  $x\text{CO}_2$  と二酸化炭素カラム濃度の変動を把握することを目的に、観測データの解析を進めた。また、大都会である東京に対しては、東京都世田谷区にある東京学芸大学附属高等学校の屋上に OSA を設置して、年単位の長期にわたり  $x\text{CO}_2$  と二酸化炭素カラム濃度を計測した。これらの計測データすべてに対して、研究代表者が開発した解析システムにより解析を進めた。

研究代表者が温室効果ガスの解析において、解析精度を上げるために高度・気象データを正確に算出することが必要となるため、従来、ワイオミング大学のデータベースに記載しているゾンデデータから高度・気象データを算出している。しかし、場所によってはゾンデデータが提供されていない場所がある。例えば、インドネシアのカリマンタン島の観測場所(図2の赤丸)の付近には、ゾンデデータの観測場所が無い。そこで、地球をメッシュ状に緯度・経度で分割した交点の高度・気象データのデータベースを Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) から入手し、得られたデータから計測器の観測場所・観測時間の正確な高度・気象データをできるだけ自動化して見積もることを目的に、算出するシステムを開発した。



図2. ワイオミング大学のデータベースに記載しているゾンデの観測場所

これらの計測結果が膨大なため、その解析には多くの時間を必要とする。1つの吸収スペクトルを算出するだけでも 1571 ~ 1574nm の範囲の二酸化炭素と他の分子種を

含めた吸収スペクトルのピークは約 800 本あり、大気層を 28 層に分割した計算モデルで高い分解能でシミュレートする必要がある、Voigt 関数を約 5 千万回の計算を繰り返さなければならない。そのため、数百もの演算処理を並列に処理できる GPU を活用することで Voigt 関数の演算を CPU に比べて約 50 倍もの高速化を実現した技術を用いて、解析速度の向上を目的とした高速解析システムの開発を試みた。

### 3. 研究の方法

研究手法としては、研究の初期段階において、データ解析精度の向上手法に必須である観測場所の精度の高い高度・気象データを見積もるシステムを作成した。このシステムは、GES DISC のデータベースから高度・気象データを気象庁などのデータベースから気象データを人の手により Down Load する作業は単純作業の繰り返しであり、しかも、その量は膨大なため、作業者に対して高負担になるため、自動でダウンロードするようにした。さらに、データベースに収められた時間間隔の高度・気象データを観測時刻ごとに一次補間し、観測地周囲 4 点の高度・気象データを双一次補間法により観測場所の高度・気象データを見積もった。さらに、高度・気象データの気圧分布は地上の気圧データにより補正し、地上の気温は変動が激しいため、地上付近の高度・気象データは地上の気象データで補正した。

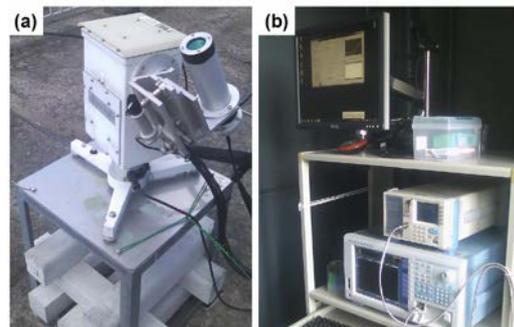


図 3. 鹿児島大学工学部情報生体システム工学科棟屋上に設置した OSA 観測装置 (a) 太陽光吸収用望遠鏡と太陽光追尾装置(室外) (b) Optical Spectrum Analyzer (OSA)他一式(屋上機械室内)

インドネシアカリマンタン島パランカラヤおよび東京学芸大学附属高校に関しては、研究に協力してくれている明星電気株式会社と名古屋大学の川崎先生らのグループが観測機器を設置して、解析データを当方に提供してくれるが、桜島観測に関しては研究代表者が、鹿児島大学工学部情報生体システム工学科棟

屋上の屋外に太陽光吸収用望遠鏡と太陽光追尾装置(図 3(a))と屋上の機械室内に OSA と計測器制御とデータ保管用の PC 等(図 3(b))に設置した。さらに屋外の望遠鏡で収集した太陽光を光ファイバーにて屋内の OSA に導いた。

データ解析の処理速度の高速化のために GPU ボード(C2075, K20)で並列計算を行うプログラムを作成し、多くの Voight 関数のアルゴリズムにてスペクトルのシミュレーションを行った時の計算時間を比較した。

#### 4. 研究成果

GES DISC のデータベースから得られた高度・気象データに気象庁のデータベースから入手した観測地の気象データで補正したもので、つくば市の国立環境研にて我々が共同研究で開発している FES-C と国立環境研所有の FTS を同時に観測して、FES-C のデータは我々が解析し、FTS は国立環境研のグループが解析した結果をもらい、両結果を図 4 に示す。

図 4 より、FES-C と FTS の間には±2ppm の差しかなく、最大の差でも 5ppm であることがわかった。FTS の観測精度が高いことが知られているため、我々の観測・解析精度が高いことを示すことができた。

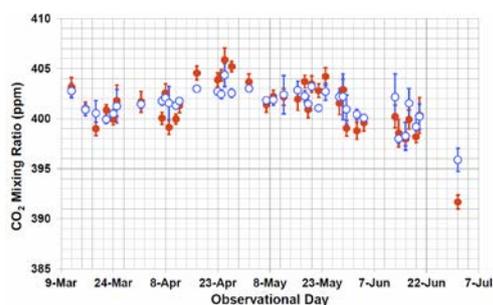


図4. FES-C と FTS の解析結果の比較  
赤丸:FES-C 白丸:FTS

この観測機器をインドネシアカリマンタン島パラカラヤに設置して観測・解析した結果を図 5 に示す。インドネシアカリマンタン島では、7月～9月が乾季のため、大規模な森林火災が7月後半から始まり9月に大規模な森林火災が起こる。7月から9月にかけて二酸化炭素混合比が増加していることが図 5 に示され、11月以降に雨季により森林火災が雨の影響で低減する。そのため、森林火災により 405ppm も大幅に上昇した二酸化炭素混合比が 397ppm と低下した(図 5)。9月から11月初頭にかけてデータの欠損が見られるが、森林火災により発生した煙に太陽光が遮られるために、太陽光の吸収スペクトルを利用する計測システムでは観測ができなかったためである。

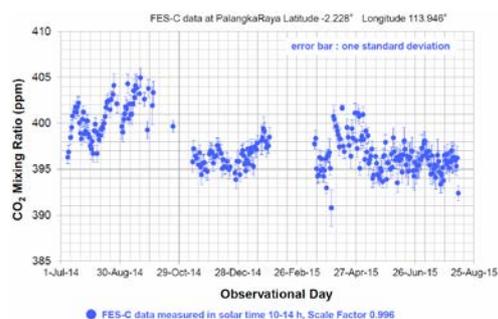


図 5. インドネシア カリマンタン島パラカラヤでの観測・解析結果 実丸が衛星時間 10 時から 14 時までの1日の平均値、エラーバーは標準偏差

次に、大都会である東京都世田谷区の東京学芸大学付属高校の屋上にて OSA を使用して観測し、データを解析した結果を図 6 に示す。図 6 を1年間で1周期の cos 関数と日ごとの増加による式により図 6 の解析結果を Fitting したところ 9.8ppm の上下変動と 2.1ppm/year の増加の加算による変化を示すことが明らかになった。日ごとの増加は、M. Inoue らが羽田と成田を発着する飛行機により大気を採取して分析したデータも我々と同じ 2.1ppm/year の増加を報告している[2]。

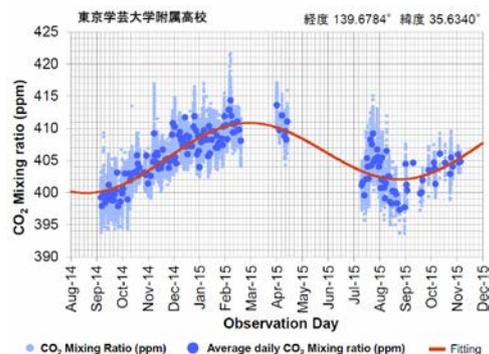


図 6. 東京学芸大学付属高校での観測結果

鹿児島市は、台風シーズンに大きなものになると木を倒すほど大きな影響を及ぼすが、太陽追尾装置を設置した台にコンクリートブロックを置くことで、大きな台風にも倒されることはなかった。また、熊本地震より鹿児島も大きく揺れたが、その影響もなかった。

屋上に設置した OSA により観測したスペクトルを例として図 7 に示す。同時に図 7 のスペクトルを 405.75ppm で Fitting したスペクトルも示した。朝 9 時 30 分に噴火した日の観測・解析結果を図 8 に示す。通常、植物の光合成により夕方に向けて少しずつ二酸化炭素混合比が低減していくが、図 8 の結果は、少しずつ二酸化炭素混合比上昇していることが観測できた。

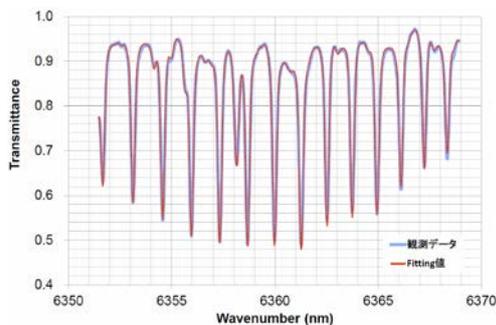


図 7. 鹿児島市上空を観測した二酸化炭素吸収スペクトル

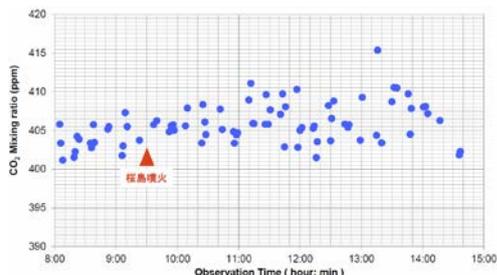


図 8. 鹿児島市上空の二酸化炭素混合比観測・解析結果

実行環境として CPU に Core i7 3930k を用いて、複数の Voigt 関数を用いて、並列化していない Intel Fortran Compiler、OpenMP を実装した Intel Fortran Compiler、CUDA C で実装し、二酸化炭素計算スペクトル計算時間を算出した (表)。OpenMP を実装したものは、12 スレッドで並列計算した。逐次処理である Dryson のアルゴリズムは並列化が困難なため、並列処理の評価をしなかった。Armstrong の Voigt 関数を Fortran プログラムで計算した場合、およそ 200 秒かかっていた。これに対して、OpenMP を施した場合、およそ 33 秒と、6 倍高速に計算できるようになった。また、OpenMP で実装した Fortran プログラムで最も速い Imai の Voigt 関数での計算時間と比べると、およそ 26 倍高速化できた。計算スペクトル算出時間と評価計算における標準偏差が Imai らと Humlíček のアルゴリズムの差が小さいこと、最大値は、Imai らのアルゴリズムが最も小さかった。

表 二酸化炭素計算スペクトル算出時間(sec)

Voigt Function Algorithm	CPU のみ		CUDA C	
	1 CPU	6 cells 12threads	C2075	K20
Armstrong[3]	198.07	33.37	3.37	2.00
Dryson[4]	50.42	×	×	×
Pierluissi[5]	48.92	8.67	2.81	2.40
Humlíček[6]	54.96	8.83	0.68	0.50
Kuntz[7]	50.00	8.00	1.04	0.94
Imai[8]	40.42	7.54	0.93	0.81

## 【参考文献】

- [1] T. Yokota, et.al. "Global Concentrations of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> Retrieved from GOSAT: First Preliminary Results", SOLA, **5**, 160-163, (2009).
- [2] M. Inoue et al., Atm. Chem. Phys., **13**, 9771-9788 (2013).
- [3] B.H.Armstrong, "SPECTRUM LINE PROFILES: THE VOIGT FUNCTION", JQSRT, **7**, 61-88 (1967).
- [4] S.R. Drayson, "Rapid computation of the Voigt profile", JQSRT, **16**, 611-614 (1976).
- [5] Joseph H. Pierluissi, et.al. "Fast calculational algorithm for the Voigt profile", JQSRT, **18**, 555-558 (1977).
- [6] J. Humlíček, "Optimized computation of the voigt and complex probability functions", JQSRT, **27**, 437, (1982).
- [7] M.Kuntz, "A new implementation of the Humlicek algorithm for the calculation of the Voigt profile function", JQSRT, **57**, 819-824 (1997).
- [8] Wim Ruyten, "Comment on "A new implementation of the Humlicek algorithm for the calculation of the Voigt profile function" by M. Kuntz [JQSRT **57**(6) (1997) 819-824]", JQSRT, **86**, 231-233 (2004).
- [9] Imai Kohji, et.al. "Evaluation of Voigt algorithms for the ISS/JEM/SMILES L2 data processing system", Advances in Space Research Issue **45**, 669-675 (2009).

## 5. 主な発表論文等

- [雑誌論文] (計 0 件)
- [学会発表] (計 2 件)

[1] W. Iriana, M. Kawasaki, M. Ohashi, G. Inoue, Y. Matsumi, K. Tonokura, "Evaluation of Disturbed Peatlands CO<sub>2</sub> Emissions by Atmospheric Concentration Measurements " International Workshop on Air Quality in Asia (Aug. 4-7th, 2015, Bogor, Indonesia)

[2] W. Iriana, M. Kawasaki, G. Inoue, M. Ohashi, Y. Matsumi, K. Tonokura "Monitoring of Carbon Dioxide Emission from Disturbed Tropical Peatlands in Indonesia" 日本大気化学討論会 (2015 年、10 月 19 日、東工大、東京都、目黒区)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]  
○出願状況 (計 0 件)  
○取得状況 (計 0 件)

[その他]  
ホームページ等

## 6. 研究組織 (1) 研究代表者

大橋勝文 (OHASHI, Masafumi)  
鹿児島大学理工学域工学系・准教授  
研究者番号 (00381153)