

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20310008

研究課題名(和文)

大気中の二酸化炭素の気球観測器の開発

研究課題名(英文)

Development of a balloon-borne instrument for atmospheric carbon dioxide

研究代表者：

松見 豊 (MATSUMI YUTAKA)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授

研究者番号：30209605

研究成果の概要(和文)：

二酸化炭素(CO₂)は、温室効果気体として注目を集めているが、世界中の観測サイトの数が少ないため二酸化炭素(CO₂)収支の全球分布、季節変化の詳細は充分わかっていない。また、地表面や海面でのCO₂の収支の評価には、上空の高度分布の情報が重要である。そこで、さまざまな場所でCO₂の高度分布が計測可能である気球搭載型CO₂濃度計測装置の開発を行った。総計10球以上の気球に搭載してCO₂の計測試験を行った。当初の開発目標の性能を達成することができた。

研究成果の概要(英文)：

To ascertain the global and geophysical flux values of CO₂ and their seasonal and inter-annual variation, detailed CO₂ measurements including vertical distribution are required. Vertical CO₂ distribution in the troposphere, particularly in the planetary boundary layer, is key to estimate the local surface flux of CO₂. However, measurements of the vertical distribution are limited to some specific regions where specially equipped aircrafts are available. We are developing a low-cost, easy-to-operate, all-weather CO₂ sonde flown with a meteorological balloon. Balloon experiments with the CO₂ instruments were performed more than 10 times. The vertical profiles of CO₂ Mixing ratio were obtained with the vertical resolution of 300 m and precision of 1 ppm.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2009年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2010年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：大気環境科学

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：二酸化炭素、気球計測、地球温暖化、赤外吸収、温室効果気体、気球センサ、機器開発、高度分布

1. 研究開始当初の背景

二酸化炭素の排出量がこの100年間に急激に増え、大気中の濃度が急速に増大している。今日では世界各地で、熱波、旱魃、洪水などの異常現象が起こってきている。気候が変化して取り返しのつかない事態になることを避けるため、国際社会は温室効果ガスの排出を削減する方向に動き始め、その結果、1997年末の京都議定書で国際条約として先進国の削減目標が合意され、2004年秋のロシアの批准により2005年2月に発効となったが、一部には経済発展を妨げる、途上国も排出増加を抑制すべきである、科学的予測が正確でない、などの意見から批准しない国もある。

そこで、温室効果ガスがどのように分布し、それがどう変化しているかを科学的にきちんと把握することが必要である。既に、地球上の限られた地点、地域で、温室効果ガスの濃度の上昇やその要因の分析が進められているが、全地球規模で見ると、例えば、どれだけの二酸化炭素がどのように分布しているか、どのように変動しているかはまだ正確には判っていない。二酸化炭素の発生、吸収の過程を見てみると、都市域では人間活動によって放出され、森林域では火災によっても放出される。一方で、二酸化炭素は、海洋で吸収・蓄積され、また、陸域植生の光合成によっても吸収される。このため、地球上のどこに何があるかによって、二酸化炭素の分布は大きく変動する。空間的かつ時間的に変動する温室効果ガス濃度を全地球規模で観測し、その変動の原因を明らかにすること、世界的な二酸化炭素の放出・吸収のマップを正確に求めること、そして将来予測モデルに反映してゆくことが重要である。

現在、温室効果ガス濃度の観測ネットワークとしては、WMOの運営によるGAW（全球大気監視）や研究グループの様々な観測研究がある。GAWなどによって収集されたデータはWDCGG（WMO温室効果ガス世界資料センター）で収集・蓄積、配布されている。また、温室効果ガス濃度のみならず、その収支（フラックス）の観測も開始されており、フラックス観測タワーにおいて、温室効果ガス収支が観測されている。海域においても、船舶を利用した海上での二酸化炭素分圧の観測が行なわれている。近年では、航空機定期便を利用した二酸化炭素の高度分布モニタリングも開始されている。

しかしながら、これらの観測データは、地球規模で見れば、地表面もしくは海上など大気のごく一部をカバーしているに過ぎない。限られたデータを使ってどこでどのくらい二酸化炭素が放出されたり、吸収されたりしているかが推定されているが、観測点が少なく地表面情報が主なので、世界を数十に区切

った空間分解能でしか推定できない。しかもその推定誤差は各区域での吸収量や放出量と同じくらいである。大気中の二酸化炭素の変動の原因を明らかにし、さらには国別の排出量を正しく知り排出削減効果を評価するためには、測定を空間的・時間的に飛躍的に稠密にして、この放出・吸収量のマップを精密化することが求められている。

全地球規模での観測に、衛星を利用した広域かつ定期的な観測も有用であると考えられている。温室効果気体の観測のために2009年に日本の環境省、JAXA、国立環境研究所の協力により温室効果気体監視衛星GOSAT衛星が打ち上げられた。

GOSAT衛星は太陽光に含まれる短波長の赤外線（近赤外光）が、地表面で反射してふたたび宇宙に出ていく光の強さを分光して測定する。雲ひとつない快晴の場合であっても、さまざまな誤差要因があり、1%、4ppmの精度は出そうというのが目標で、しかも高度分布をだすのは困難でカラム濃度を求めようとしている。世界で雲がなく晴天がよくあるのは砂漠地帯であるが、そこを頻度よく測定してもほとんど意味がない。二酸化炭素の排出が盛んな工業地帯や、農業地帯、森林地帯などは、衛星が精度よく測定できる雲ひとつない天気の日というのはきわめて限られてしまう。雲やエアロゾルが少しでもある場合には、濃度の高い地表面付近を通らずに反射して戻ってくる光を計測してしまうので、衛星からの観測データを処理するのが非常に難しい。いくつかの方策が考案されているが、その信頼性は実際に何か実測と比べてみないとわからない。

この測定器の開発により、将来的には、オゾンゾンデのように世界数100箇所毎週のようにこの計測器で二酸化炭素が測定されることが予想される。また、温室効果気体の

表1 開発する気球搭載二酸化炭素測定器の目標性能

項目	目標性能
測定高度	0-10 km (200hPa)
気球上昇速度	300 m / 分程度
時間分解能	1 分
高度分解能	300 m
測定精度	1 ppm 以下
データ受取	無線による転送
操作	専門家でもなくても 取り扱い可能
気球	気象ゾンデに併載可能
費用	20 万円以下 / 個

衛星観測の検証の質を高めることができる。これらにより、吸収放出マップをより正確に綿密に作成することができるようになり、大気中の二酸化炭素の変動の原因を明らかにし、さらには国別の排出量を正しく知り排出削減効果を評価することが可能になる。温暖化対策を世界的に進める大きな力となる。

2. 研究の目的

本研究では、世界中のさまざまな地点で気候条件にとらわれずに二酸化炭素の濃度の高度分布を計測できるようにするために、簡単に精密に濃度を測定することができる装置を開発するものである。気球搭載型の二酸化炭素観測装置を開発する。気球に搭載する測定機器は、軽量・小電力で、使い捨てのためコストが低いことが要求される。さらに、上空では低圧力なのでそれに対応することが必要である、しかも必要な精度と時間分解能を有することはもちろんである。現在、市販されている大気中の二酸化炭素の観測装置は、非分散型の赤外光吸収に基づく原理のものであり、精度が高いが、サイズが大きく重量があり、価格も60万円以上である。さらに、大気1気圧付近でしか測定することができない。小型で簡便な二酸化炭素検出器としては、ビルや自動車に配置するものが開発されている。赤外光源と二酸化炭素が光吸収を持つ4.3 μmの干渉フィルターとサーモパイルによる赤外光検出器の組み合わせで成り立っている。しかしそのようなものは大気濃度の環境計測を対象とせずに、数千ppmの警戒濃度を10-100ppmの精度で検出するようになっている。そこで本研究では気球用の小型の二酸化炭素検出器を開発して、実際に気球に搭載して測定試験を行うことをめざした。

3. 研究の方法

表1に本研究で目指す気球用二酸化炭素センサの性能の目標を示す。この性能目標は、GOSATなどの温室効果気体監視衛星の検証に

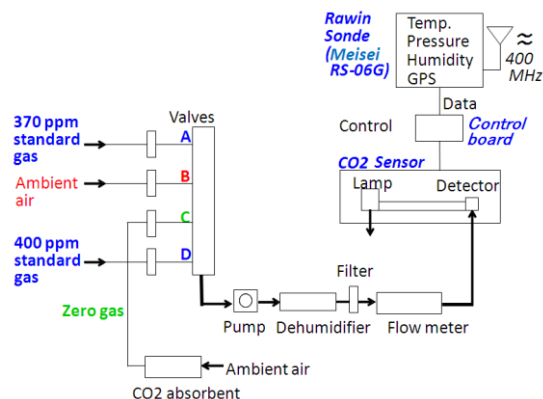


図1 開発した気球 CO₂ センサの模式図

使え、そして世界中で気象ゾンデのように頻繁にこの気球による二酸化炭素の計測がなされて世界各地の吸収・排出マップの作成に有用なデータを与えることができるレベルを考えて設定している。GOSAT衛星は、CO₂の衛星測定精度がカラム濃度で1% (4 ppm相当)の精度で測定できれば成功で、1 ppm相当の精度ができれば大成功であるとしている。GOSATでは濃度の高度分布の計測は困難であるとしている。

たとえば、日本の東京地域からの二酸化炭素の排出をこの気球測定から算出しようとすると、カラム濃度にして1 ppmの精度が必要になる。日本の年間の二酸化炭素排出量は1.2 GtCO₂であるが、その20%が東京地域から排出されて、100 kmの幅で流れていて、風速が5 m/sであるとする、約1 ppmの濃度上昇を観測する必要があるという計算になる。気球と測定装置の回収は難しく、また回収コストも装置コストを上回る可能性が大きいので、基本的には、オゾンゾンデと同じように使い捨てを考へる。水平移動して海や無人の山に着地・着水するように放球する。

4. 研究成果

気球システムはCO₂ゾンデパッケージ、標準ガスパッケージ、GPSゾンデの計測部とバルーン、パラシュート、リフレクタから構成される。開発したものは最終的に、重量はGPSゾンデ部が150g、CO₂ゾンデ部1000g、標準ガス部550gでセンサ全体の重量は、1700gとなる。CO₂センサ部のパッケージの大きさは、W280xH150xD280mmであり、標準ガスのパッケージの大きさはW400xH420xD490mmである。

開発した気球CO₂センサの部分の模式図を図1に示す。光源にはフィラメントタイプの赤外光源を用いている。光源のスペクトルは3-4 μmの赤外域に強度のピークを持ち、4.3 μmの赤外吸収を用いてCO₂濃度を計測した。光源の窓材は赤外の透過率の高いサファイアを用いた。光源はアルミブロックに包まれており、熱容量を持たせ、発生する熱を外に逃がす役割を持たせている。光源で発生した赤外線は金メッキしたガラス管の内部を管壁面で反射しながら進むようにしている。ガラス管の長さは100 mmであり、φ9.0 mmであった。受光部にはサーモパイルを用いてい

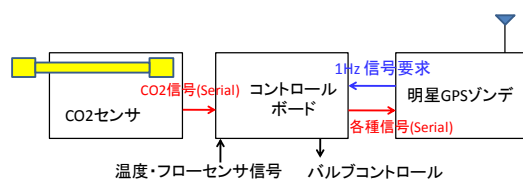


図2 CO₂センサ、コントロールボード、GPSゾンデとのデータのやりとり。

赤外吸収のない $4.0 \mu\text{m}$ と赤外吸収の存在する $4.3 \mu\text{m}$ の 2 波長を計測している。波長選択のために光学干渉フィルタを用いている。センサはサーモパイルであり、赤外による温度上昇を電圧に変えて測定するものである。センサから出力される電圧は $0\text{--}10 \mu\text{V}$ 程度であるので、電子基板はこれを $0\text{--}5\text{V}$ レンジに増幅し、16 bit の AD コンバータでデジタル値に変換し、基板に内蔵された水晶振動子を用いて時間を測定し、1 秒ごとにデータを取得して送る。受光側のアルミニウムブロックにガスのインレットを配し光源側のアルミニウムブロックにガスのアウトレットを配している。導入するガスは大気、370 ppm、400 ppm の 3 種類ガスであった。これをバルブで切り替えながら交互に導入した。光源は非常に大きな熱源となり、光源側のアルミニウムブロックは $95 \text{ }^\circ\text{C}$ まで上昇した。これを回避するため光源側にアルミニウムブロックに銅板を取り付け、熱吸収剤を取り付けた。熱吸収剤は商品名パッサモ P32 の 200g バックであり、 32°C で相転移するものである。これにより光源アルミブロックの温度上昇は、 50°C 程度に抑えられた。ポンプはオゾンポンプで使われているものを使用した。コントロールボードは、GPS ゾンデからの信号要求の 1 Hz 信号をトリガーにして CO_2 センサからの信号を取得し、 CO_2 ゾンデ内各部に取り付けられた測温抵抗体や流量計の測定値およびバルブの切り替え情報を結合し情報を排出する役目を持たせている。コントロールボードからは 23 Byte のバイナリーデータ列としてシリアル方式で送信する。これを明星電気製 GPS ゾンデが受けて、GPS 気象ゾンデの測定した温度、湿度、圧力等のデータとともに地上に 400 MHz 帯の電波送信をする (図 2 参照)。

370 ppm と 400 ppm の二つの標準ガスを搭載して放球するものとした。標準ガスは 20 リッターのテドラーバッグに入れ、さらに発泡スチロールの箱に入れて放球した。気球測定の精度を上げるためには、気球に載せる標準ガスバッグの濃度の精度を高める必要がある。標準ガスのソースとしては、 CO_2 の純空気希釈の標準ガスポンプを用いた。1 次標準として国立環境研究所で検定したガスポンプ、2 次標準として太陽日酸の CO_2 / 純空気の 10 リッターポンプを用いている。

CO_2 センサについて実験室でいろいろなテストを行い、改良を加えていった。気球計測の場合は、上空で高度があがるにつれて大気の圧力が低下してゆく。高度 15km でおよそ 0.1 気圧となる。そこで低圧での CO_2 センサの特性を真空チャンバーで測定した。さらに、 CO_2 センサに対する振動試験を行うために、天井からのブランコやリモータ駆動のニアトランスレータで気球 CO_2 センサの振動試験を

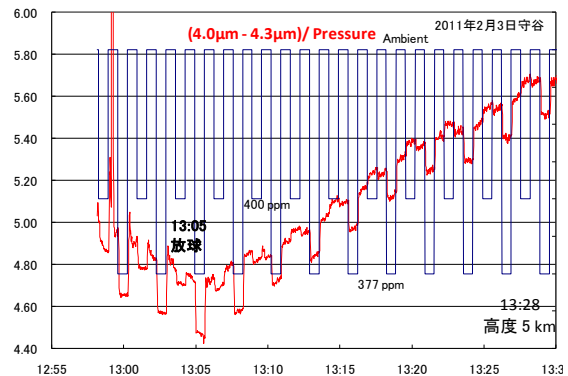


図 3 平成 23 年 2 月 1 日に守谷市で上げた気球で受信した CO_2 センサの信号
 $([4.3 \mu\text{m} \text{ 信号}] - [4.0 \mu\text{m} \text{ 信号}]) / \text{Pressure}$ 。

行った。

気球試験では、トーテックス社のゴム気球 TA-1200 を使用した。パラシュートは同じくトーテックス社の T-PF94-290-SS00-MLAW を使用した。この組み合わせで、気球は高度 20km 以上まで上昇し、そこで破裂して降下する。上空は偏西風が強いので、気球は 200km 以上西に流され、太平洋の海上に着水する。回収は困難なので使い捨てとなる。

平成 21 年度に 2 回の CO_2 濃度鉛直分布の計測を行った。測定の実施は北海道母子里で平成 21 年 8 月 26 日と 27 日に合計 3 球、茨城県守谷市にて平成 21 年 12 月 22 日に合計 3 球行った。放球および組み立て、テストを行うとき、母子里では名古屋大学母子里観測所の施設を利用し、守谷では明星電機株式会社のつくば事務所を利用した。また、平成 21 年 8 月の測定は GOSAT 衛星及び地上赤外分光計測、航空機観測との同時測定であった。12 月の 3 球目は、測定ノイズ要因を調べるため、バルブの切り替えを行わず、400ppm の標準ガスのみを流してデータを取得した

平成 22 年度は 4 回の CO_2 濃度鉛直分布の計測を行った。茨城県守谷市にて平成 22 年 10 月 22 日 11:40 に 1 個の気球を上げた。これは新しいタイプの CO_2 気球センサボードのテストのために行った。群馬県伊勢崎市の明星電気本社工場にて平成 22 年 12 月 14 日 13:00 に 1 個の気球を上げた。これは、次に行う、首都圏 3 か所同時計測の予行演習として行った。平成 23 年 1 月 7 日には群馬県伊勢崎市の明星電気本社工場、千葉県市原市玉前公園、千葉県九十九里浜白子海岸の 3 か所でほぼ同時に 1 個ずつ気球を上げた。平成 23 年 1 月 31 日および 2 月 1 日の 13:00 に、茨城県守谷市で気球を上げて、 CO_2 濃度鉛直分布の計測を行った。この気球観測は、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) および国立環境研究所が GOSAT 衛星の検証のために、つくば上空で航空機による CO_2 計測を行うのに合わせて行った。

気球からのデータ処理はエクセルのマク

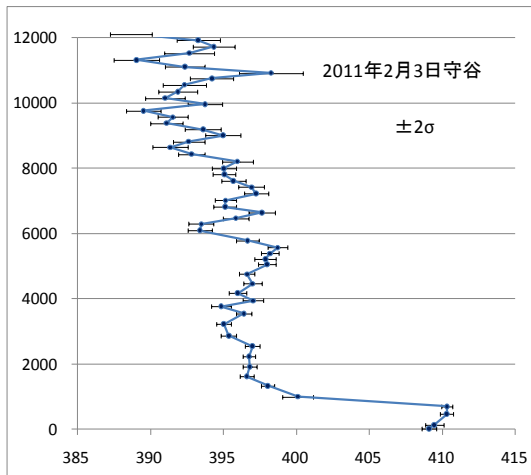


図4 平成23年2月1日に守谷市で上げた気球から得られたCO₂の高度分布

ロプログラムを作成し、ほぼ自動的に処理ができて、CO₂の高度分布およびその分散が得られるようにした。この場合も370 ppmと400 ppmのシグナルを参照しながらCO₂濃度の計算を行った。図3に平成23年2月1日に守谷市で上げた気球で受信したCO₂センサの信号（[4.3 μm信号] - [4.0 μm信号]）/ Pressureを示した。信号解析から得られたCO₂の高度分布を図4に示した。

平成23年1月～2月の気球試験に用いた気球CO₂ゾンデは、地上から10kmまでのCO₂の濃度の高度分布を300m程度の高度分解能で測定でき、また精度も1ppm程度になった。また、大きさもW280xH150xD280mmで、重量は1000gでゴム気球で充分上げることができるものとなっている。気象ゾンデと併載可能であり、上空でデータを無線により確実に受けることができた。以上のように表1に示した目標値を達成することができた。

この測定器の開発の成功により、将来的には、オゾンゾンデのように世界数100箇所毎週のようにこの計測器で二酸化炭素が測定されることが可能となる。また、温室効果気体の衛星観測の検証の質を高めることができる。世界中のCO₂の吸収放出マップをより正確に綿密に作成することができるようになり、大気中の二酸化炭素の変動の原因を明らかにし、さらには国別の排出量を正しく知り排出削減効果を評価することが可能になる。温暖化対策を世界的に進める大きな力となると期待される。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計15件）

- ① R. Wada, J. K. Pearce, T. Nakayama, Y. Matsumi, T. Hiyama, G. Inoue, T. Shibata, Observation of carbon and oxygen isotopic compositions of CO₂ at an urban site in Nagoya using Mid-IR laser absorption spectroscopy, *Atmospheric Environment* (査読有) 45, 1168 - 1174 (2011).
- ② Y. Matsumi, F. Taketani, K. Takahashi, T. Nakayama, Fluorescence detection of atmospheric nitrogen dioxide using a blue light-emitting diode as an excitation source, *Applied Optics* (査読有) 49 (19), 3762-376 (2010).
- ③ T. Nakayama, T. Ide, F. Taketani, M. Kawai, K. Takahashi, and Y. Matsumi, Nighttime measurements of ambient N₂O₅, NO₂, NO and O₃ in a sub-urban area, Toyokawa, Japan, *Atmospheric Environment* (査読有) 42, 1995-2006 (2008)

〔学会発表〕（計10件）

Y. Matsumi, T. Nakayama, M. Kawasaki, G. Inoue, S. Uematsu, and K. Shimizu, "DEVELOPMENT OF BALLOON-BORNE CO₂ INSTRUMENTS", ICDC8, T4-73, 2009年9月17日、ドイツ、イエナ。

〔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 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松見 豊 (MATSUMI YUTAKA)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授
研究者番号：30 209605

(2) 研究分担者

中山智喜 (NAKAYAMA TOMOKI)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・助教
研究者番号：40377784

(3) 連携研究者 なし