

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：12604

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24650518

研究課題名(和文) 科学教育のための温室効果実験器の開発

研究課題名(英文) Development of Experimental Device to Detect Greenhouse Effect for Science Education

研究代表者

土橋 一仁 (DOBASHI, Kazuhito)

東京学芸大学・教育学部・教授

研究者番号：20237176

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、温室効果を実験室で再現する実験器の開発に挑戦した。温室効果は地球温暖化の主要因として知られているが、その原理を正しく学習するためのモデル実験は存在しない。温室効果を実験室で再現するためには、温室効果ガスを封入する容器として、可視光から中間赤外線にかけて透明な素材が必要である。我々は、そのような素材として岩塩を用い、実験器を試作した。二酸化炭素を封入して実験を行ったところ、温室効果と思われるデータを得ることができたが、岩塩は脆弱で再現性に問題があり、研究期間内に温室効果検出の確証を得るには至らなかった。実験器の問題点は明らかなので、現在も引き続きその問題解決に取り組んでいる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop an experiment to detect greenhouse effect in laboratory. The greenhouse effect is now known to play an important role in the global warming, but there aren't appropriate experiments to reproduce it in laboratory. To realize the experiments, a material transparent over the visual to mid-infrared wavelengths is needed to confine the greenhouse effect gas. For this, we used rock salt to design a new experimental device, and we carried out an experiment to detect the greenhouse effect of carbon dioxide. We have obtained data indicative of detection of the greenhouse effect, but we cannot conclude so at the moment, because of the poor reproducibility mainly due to the vulnerability of the rock salt. The point of our device failure is apparent, and so we are now trying to improve it.

研究分野：天文学

キーワード：温室効果 地球温暖化 科学教育 大気現象

1. 研究開始当初の背景

(1) 温室効果とその間違った理解

温室効果は地球や金星といった惑星では普遍的に見られる現象であり、太古の昔から地球環境や生命に大きな影響を与えてきた。今や、地球温暖化の主な原因の一つとして、温室効果という言葉を知らない日本人はいないであろう。しかし、その原理は一般市民には理解されておらず、小学校～高校の大多数の児童・生徒はもちろんのこと、教員さえも理解していない場合が多い。その原因の一つは、温室効果の原理を分かり易く説明するための適切なモデル実験が存在しないことである。これまで温室効果を扱った数少ないモデル実験の例としては、二酸化炭素と窒素を封入した別々のペットボトルを赤外線ランプで温め、内部の気体の温度上昇を比較するというものがある^①。しかし、インターネットでも紹介されているこのような実験は、実は単に気体（二酸化炭素と窒素）の比熱の違いを測定しているに過ぎず、温室効果の原理を説明する実験としては、適切でないとわざるをえない。

(2) 温室効果の原理とモデル化への課題

図1に示すように、温室効果とは、太陽放射（可視光・近赤外線）によって温められた地面が中間赤外線（ $10\mu\text{m}$ 帯）を宇宙空間へ向けて放射し、大気中の温室効果ガスがその中間赤外線を吸収・再放射し、地面はその中間赤外線を受けてより温度が上昇する現象である^②。一見すると原理は単純であるが、地球スケールの現象である温室効果を小さな実験室で再現することは、極めて困難である。例えば、図

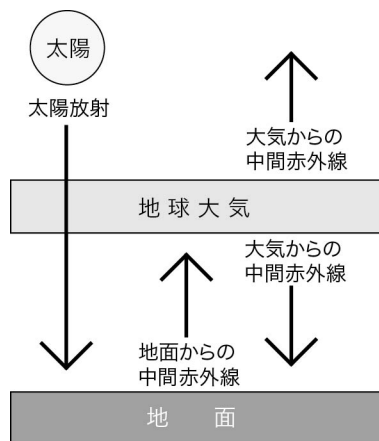


図1 温室効果の原理

1をモデル化した図2のような実験器を作製し、地球大気に見立てた透明な容器に二酸化炭素や空気を封入して白熱電球を点灯すれば、温室効果を再現できるだろうか。つまり、容器の中身が空気の場合よりも二酸化炭素の場合の方が、地面に見立てた黒塗りの銅板の温度は高くなるだろうか。答えはノーである。図2のような単純な実験器をそのまま作製して実験を行っても、いくつかの解決困難な理由で、温室効果を再現することは出来ない。前述のペットボトルの実験に限らず、温室効果を再現した信頼できる実験例は、これまで皆無である。

様々な検討の結果、我々は、温室効果を再現するためには、次の3点のモデル化を実現した実験器を作製する必要があると考えた。

①安定した太陽：実際の太陽放射は極めて安定である。温室効果による銅板の温度差を検出するためには、光源である白熱電球の光出力を、1%以下の高い精度で制御する必要がある。

②冷たい宇宙空間：地球は冷たい宇宙空間に孤立しており、地球の表面を約300Kに温めるのに寄与するのは、ほぼ太陽放射だけである。太陽放射のほとんどのエネルギーは、地球大気に対しては透明な可視光・近赤外線に分布する。しかし、実験室や実験器の壁や天井、白熱電球の傘などからは、強力な中間赤外線が放射されており、温室効果の発現を阻害している。温室効果を検出するためには、これらの余計な中間赤外線を除去する必要がある。

③透明な地球大気：地球大気は重力により地表にとどまっているが、実験室では容器に封入しなければ

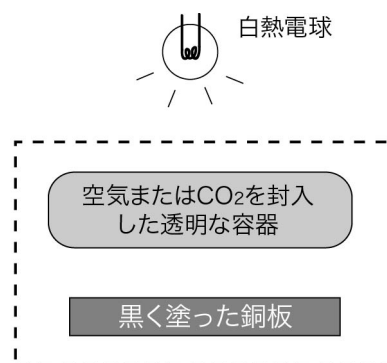


図2 温室効果のモデル実験の概略図。白熱電球は太陽のモデル、気体入りの透明な容器は地球大気のモデル、黒塗りの銅板は地面のモデルである。

ならない。その容器は、可視光から中間赤外線にかけて透明な素材で作られている必要がある。

2. 研究の目的

(1) 目的

本研究では、1の(2)の①～③のモデル化を行い、温室効果を実験室で再現することのできる実験器の開発にチャレンジする。各部分のモデル化に要求される精度や実現のためのアイデアを、図2に沿って説明する。

(2) 各部のモデル化のアイデア

①「安定した太陽」のモデル化

実験器を設計し(図3)、温室効果を試算してみると、透明な容器に封入する気体が二酸化炭素と窒素の場合に、温室効果により黒塗りの銅板には1℃の温度差が生じる。銅板の温度は光源の光出力によって変わるが、光出力が150W程度の場合、光出力の1%の変動は、銅板の温度では1℃の変動に相当することが予想される。よって、温室効果による温度差を検出するためには、光出力を1%以下の精度で制御する必要がある。しかし、通常の100V交流電源は5%程度の時間変動がある。本研究では、高出力の直流安定化電源を導入することにより、光源電球の光出力の安定化を図る。

②「冷たい宇宙空間」のモデル化

実験器や実験室の壁からの余計な中間赤外線を極力抑えるため、大型のフリーザーの中に実験全体を入れ、冷却して実験を行う。また、黒塗りの銅板を真空引きした実験器の内部に設置し、できるだけ放射のみ(対流・伝導はゼロ)で銅板と他の部分の熱のやり取りを行うように工夫する。さらに、各所に熱シールドを施し、アルミ等の放射率の低い素材を用いることで、余計な中間赤外線の影響を抑える。

③「透明な地球大気」のモデル化

可視光から中間赤外線で高い透過率をもつ素材は限られている。本研究では、赤外分光器(FIR)の窓材などに用いられる岩塩(NaCl)を窓材に用いた

容器を用意し、その中に1気圧の二酸化炭素と窒素を交互に封入して温室効果の検出を試みる。

3. 研究の方法

(1) 実験器の製作

作製した実験器の模式図と写真を、図3に示す。模式図にあるとおり、実験器の上部には、太陽のモデルである電球を収めたアクリル製の箱がある。当初、光源としては単純な白熱電球を用いていたが、100W程度の白熱電球では地面に見立てた銅板の温度が十分上昇せず、また集光にも苦労したため、指向性のある150Wのタングステンランプを採用した。光出力を高い精度で制御するため、タングステンランプの電源として0.5%程度の精度での制御が可能な大容量の安定化直流電源を導入した。この直流電源を用いて、1A・150V程度の電流・電圧でタングステンランプを駆動する。また、実験器全体を大型のフリーザーで冷却するので、結露防止のためにタングステンランプの入った箱の中を乾燥空気で満たした。

また、タングステンランプの下に集光用のシートレンズ(プラスチック製)を設置し、黒塗りの銅板に効率的に集光できるようにした。このシートレンズは、後述の熱シールドの役割も担っている。

実験器の下部には、他の部品を収納する大型のアクリル製の箱がある。この箱の中に、「空気箱」と名付けたステンレス製の小箱を設置し、その下に黒塗りの銅板を置く。実験時には、箱の中全体をロータリーポンプで真空に引く。

真空中に置かれた空気箱に外側から1気圧の気体(二酸化炭素または窒素)を入れ、銅板の平衡温度の違いを検出する。空気箱の上下の窓には、可視光から中間赤外線まで透明な岩塩の結晶(直径5cm)を取り付けてある。岩塩の厚さは、1気圧の圧力差に耐えられるよう、1cmになっている。タングステンランプの光は、この岩塩の窓を通過して、空気箱の下の銅板に照射される。

空気箱の上部には、熱シールドのためのアクリル板を複数取り付けてある。タングステンランプの発

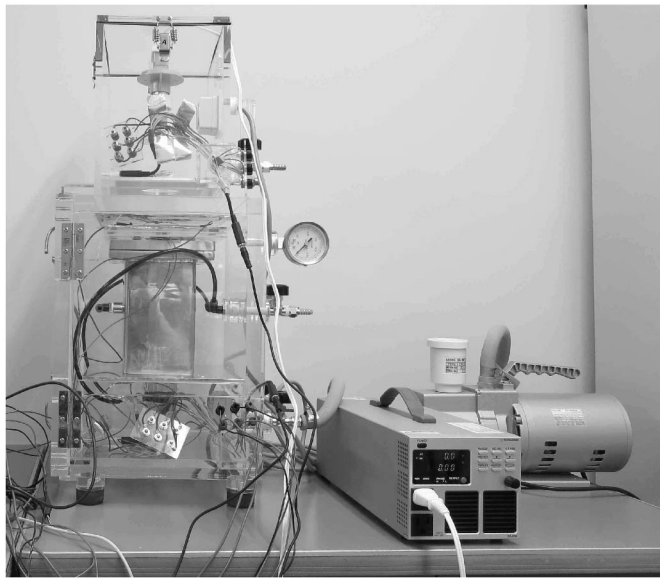
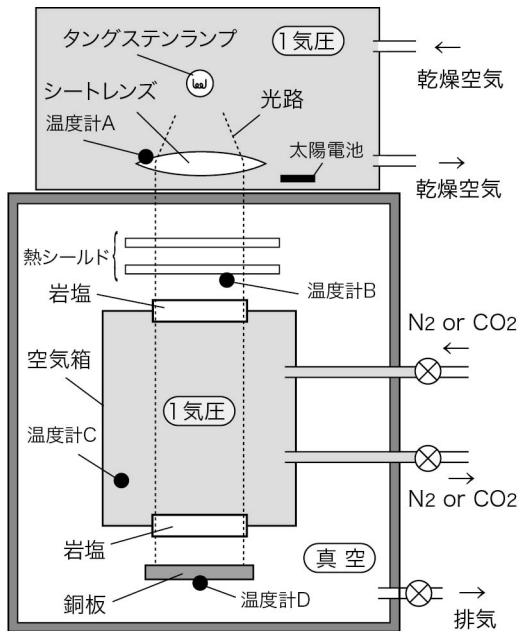


図3(左図)作製した実験器の模式図。上の箱には乾燥空気(1気圧)を充填させ、タングステンランプ(150W)と集光用のシートレンズを設置する。下の大きな箱は真空に引き、岩塩を窓材とした空気箱を設置する。空気箱の内部は、1気圧の二酸化炭素または窒素で満たす。黒く塗装した銅板をその下に設置する。空気箱の上には、熱シールド用のアクリル板を複数設置する。図中の4箇所(の温度(A~D)を測定する。(右図)実験器の本体(左)と真空ポンプ(右奥)および直流電源(右手前)の写真。

熱量は大きく、またアクリル製の箱は中間赤外線では完全に不透明(黒体)であるため、大型の箱の天井の内面は実験器周囲の温度に比べて25°C程度上昇する(タングステンランプを収めた箱は、もっと高温になる)。温められた天井は、より強い中間赤外線を放射し、二酸化炭素による温室効果の発現を阻害する。これを抑えるために、厚さ3mmのアクリル板2枚で熱シールドすることにした。これにより、空気箱上部の窓の直上のアクリル版の温度変化を、5°C程度に軽減することが可能になった。熱シールドの枚数をさらに増やせば、温度変化をもっと低減することができる。

また、熱の移動をできるだけ可視光~中間赤外線の放射のみで行うため、各部品同士は被接触で、できるだけ接触面積の小さな木片で大型のアクリル箱に取り付けた。

実験器各部の温度の計測ができるよう、黒塗りの銅板の裏面を含む4箇所(図3の模式図のA~D)に取り付けた。さらに、ハロゲンランプの光出力のモニター用に、太陽電池も設置した。これらのデータを、パソコンで自動的に記録できるようにした。

(2) 実験

実験は、平成26年度後半から年度末にかけて複数回行った。まず、図3の実験器の上部の箱に乾燥空気を封入し、下部の箱の中と空気箱の中をロータリーポンプで真空引きした後、実験器を丸ごと大型のフリーザーに入れ、約-30°Cに冷却した。図3の4つの温度計(A~D)をモニターしながら各部の温度が安定するまで10時間ほど待ち、タングステンランプ(150W)を点灯する。15分程度点灯した後、タングステンランプを消灯し、温度をモニターしながら15分程度放置する。

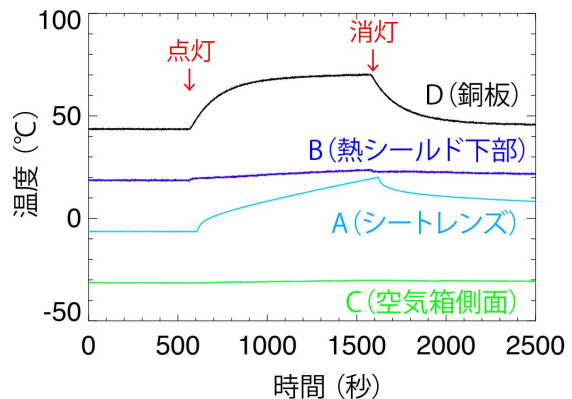


図4 空気箱の内部が二酸化炭素の場合の温度計A~D(図3)のデータの例。A、B、Dの温度は、それぞれ25、50、75°Cだけオフセットをつけた。

次に、フリーザーの扉を開き、空気箱に1気圧の窒素または二酸化炭素を封入して同様の実験を行う。

以上の手順を繰り返すことで、空気箱の中身が真空、窒素、二酸化炭素の3通りの場合の銅板等の温度変化のデータを取得する。得られたデータの例を、図4に示す。

(3) 結果

温度変化が小さく熱の移動を担うシュテファン・ボルツマンの法則が $(T + \Delta T)^4 \cong T^4(1 + 4\Delta T / T)$ と表せる場合（1次近似が可能な場合）、図4のDの銅板の温度とBの熱シールド下部の温度の差 ΔT は、時間 t の関数として、次の式で近似できる³⁾。

$$\Delta T = (\Delta T_0 - \Delta T_1) \exp(-t/t_0) + \Delta T_1 \quad \text{式1}$$

ここで、加熱する場合、式1の ΔT_0 と ΔT_1 は、それぞれ温度差の初期値と、平衡状態に達したときの温度差である。 ΔT_1 は、タングステンランプの照射量に比例し、空気箱の気体の中間赤外線吸収率が大きくなるほど、その温室効果により大きくなる。 t_0 は時定数で、銅板の熱容量に反比例する。また、式1は、加熱の時だけでなく、冷却する場合でも成り立つ。図5は、式1のモデルで図4のデータをフィットした例である。

我々は、空気箱の中が真空、窒素、二酸化炭素の3つの場合について、それぞれのデータを式1のモデルを用いてフィットし、 ΔT_0 と ΔT_1 と t_0 を求めた。

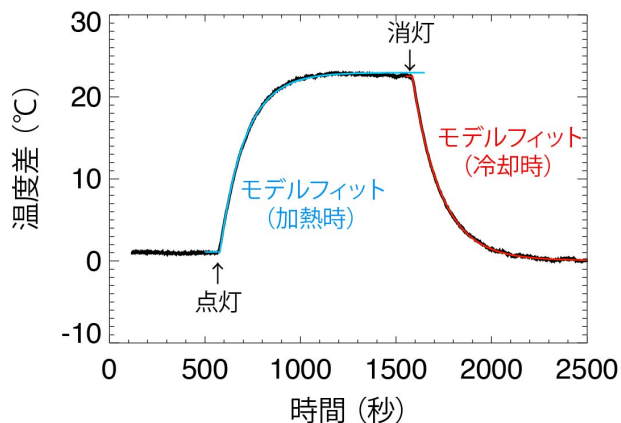


図5 黒線は、銅板の温度(D)と熱シールドの温度(B)の差の時間変化。青線と赤線は、加熱時と冷却時の式1のモデルによるフィット。

ある連続した実験時の加熱（図5の青線）の場合の結果を、表1に示す。空気箱の中身が二酸化炭素、窒素、真空の順で、 ΔT_1 が大きくなった。

気体	ΔT_0 (°C)	ΔT_1 (°C)	t_0 (秒)
真空	1.27±0.07	20.99±0.024	127.3±0.8
N ₂	4.15±0.11	21.55±0.105	124.3±2.1
CO ₂	1.18±0.08	22.91±0.017	130.1±0.7

4. 研究成果

(1) 実験結果の解釈

表1で、空気箱の中身が真空（または窒素）の場合と二酸化炭素の場合の ΔT_1 の差（約1.5～2°C）は、二酸化炭素による温室効果を取り入れて概算した予想値（この実験器の場合は約1°C）と同じオーダーである。よって、この実験で観測された温度差は、二酸化炭素による温室効果である可能性があるものと思われる。しかし、特に以下の（2）の①～③の問題により、現時点では、まだそう結論することはできない状況にある。

(2) 問題点と課題

①岩塩の劣化問題：実験を何度も繰り返すと、初期温度や光源の出力を一定にしても、観測される ΔT_1 の値は、徐々に低下する傾向があるという深刻な問題があることが判明した（2、3回の実験で1°C～2°C低下する）。おそらく、空気箱の窓材に使用している岩塩の表面が徐々に劣化し、銅板を加熱するのに必要な可視光・近赤外線での透過率が下がる（岩塩がくもる）ことが原因であると考えられる。実験の再現性を改善するためには、岩塩の劣化を完全に防止する方法を考案するか、岩塩に代わる新しい窓材が必要であると考えられる。

②温度環境の不安性の問題：銅板を十分に加熱するために光源のタングステンランプには150Wのものを使用したが、その発熱量は膨大で、連続して30分以上の実験を行うと装置全体の温度がかなり上昇して

しまう。すると、温度を下げるためにフリーザーの冷却機能が自動的かつ不定期にオン・オフする。フリーザーの消費電力（200W）はタングステンランプのそれ（150W）と同程度なので、実験器全体の温度が不安定になり、実験を継続できなくなる。より強力なフリーザーは高額であり、現実的な予算では入手困難である。安定した温度環境を得るためには、現行のタングステンランプよりもっと小さな消費電力の光源を用意し、銅板に効率よく集光する工夫が必要である。

③実験器の透過率の測定：得られた温度差（ ΔT_1 ）が温室効果によるものか否かを結論付けるためには、緻密なモデル計算による実験結果の検証が必須である。そのためには、光源であるタングステンランプの分光や、銅板に至るまでの光路の透過率を波長別（可視光から中間赤外線）に測定する必要があるが、実験器全体が大きくなりすぎたため、可視光分光器や赤外分光器の試料台にセットすることができなくなってしまった。特に空気箱の窓材に使用した岩塩はその脆弱性のために取り外しが効かず、可視光・近赤外線での透過率がどの程度劣化したのか、定量的な確認が難しい。

特に上記の①・②は実験の再現性・信頼性を左右する非常に重要な問題である。残念ながら、研究期間内にこれらの問題を解決することはできなかったが、実験を不安定にさせる要因は概ね判明したので、研究期間の終了した平成27年現在も、実験器を改良するための作業を継続している。

<引用文献>

①独立行政法人科学技術振興機構、理科ネットワーク「温室効果ガスを確かめよう」、URL:http://rikanet2.jst.go.jp/contents/cp0220a/contents/f_07_02.html

②時岡達志（1996）、地球環境論、pp.101-137、岩波

③土橋一仁、林良一、喜久川功、大村浩史（1998）、地学教育、第51巻、pp.237-249

5. 主な発表論文

[雑誌論文]（計2件）

①「非理科系の小学校教員志望学生に対する試行授業-月の観察、太陽エネルギー、光の性質、浮力を題材にして-」、下井倉ともみ、土橋一仁、2012、地学教育、第65巻、pp.1-15、査読有

②「理科を専攻としない学生を対象とした「小学校理科を教える自信」に関する調査」、下井倉ともみ、土橋一仁、松本伸示、2014、科学教育、第36巻、pp.238-247、査読有

DOI: 10.14935/jssej.38.238

[学会発表]（計1件）

①「小学校の教員志望学生を対象にした「月の満ち欠け」の理解度調査」、下井倉ともみ、土橋一仁、2014年9月11-13日、日本天文学会秋季年会（山形大学）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

土橋 一仁 (DOBASHI, Kazuhito)
東京学芸大学・教育学部・教授
研究者番号：20237176

(2) 研究分担者

松本 伸示 (MATSUMOTO, Shinji)
兵庫教育大学・学校教育研究科（研究院）・教授
研究者番号：70165893