

令和元年6月3日現在

機関番号：12604

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K12749

研究課題名(和文)教材化を目指した温室効果検出への再挑戦

研究課題名(英文)Challenge to detect the 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) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、将来的な教材化を念頭に、地球大気中の二酸化炭素による温室効果を実験室で再現するモデル実験の開発に挑戦した。太陽のモデルである電球の光出力の精度を1%まで高め、地球大気中のモデル化に必要な可視光～中間赤外線が透過する素材(厚い岩塩や薄いユーピロンシート)の検討を行い、さらに、実験室の壁や天井などからの熱放射を抑えるために大型のフリーザーを導入する等の工夫を行いつつ実験装置を製作し、温室効果の実験室での検出を試みた。残念ながら、研究期間内に温室効果を検出したとの結論に至るほどの実験の再現性を確保することはできなかったが、将来的な再挑戦のための重要なヒントを得ることはできた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球温暖化の主要因として、今や温室効果は極めて重要なキーワードとなっている。しかし、その原理は正しく理解されておらず、むしろ誤った理解が社会に浸透している。温室効果を実験室で検出したとする報告例はいくつかあるが、その殆どは誤解に基づく温室効果ではない物理量(気体の比熱の違い)の計測に過ぎず、温室効果の信頼できる検出例は皆無といってよい。本研究が成功すれば、社会的・学術的に、大きなインパクトをもたらすものと思われる。

研究成果の概要(英文)：We have attempted to detect greenhouse effect of the Earth atmosphere in the laboratory for science education. We designed an experimental device to control precisely the output of a tungsten lamp representing the Sun and to set a window for the air storage tank (filled by nitrogen or carbon dioxide) which is transparent over the visible to mid-infrared wavelengths. In addition, we installed the device in a large freezer to cool it down to -40 Celsius to avoid the mid-infrared emission from the surroundings. As a result, we could not establish the reproducibility of the experiments, but we understand better what is necessary to realize such an experimental device to detect of the greenhouse effect.

研究分野：天文学、科学教育

キーワード：地球温暖化 温室効果 二酸化炭素 科学教育 地学教育

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

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。これまでに紹介されている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（ CO_2 ）と空気を封入した別々の容器（ペットボトルやフラスコ）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。インターネットでもしばしば紹介されているこれらの実験は、単に気体（ CO_2 と Air）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原理的に間違っている。温室効果とは、図1に示すように、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線を吸収・再放射し、地面はその中間赤線を受けてより温度が上昇する、という現象である。本研究では、この原理を忠実に再現する実験器の開発を試みることにした。

本研究に先立ち、目的とする温室効果実験器に求められる性能や特徴を明らかにすべく、我々は図2の模式図に示すような装置を製作し、予備的な実験を行った。図2の装置では、太陽のモデルである白熱電球の下に、地球大気モデルで透明な箱（空気箱）を設置し、さらにその下に地面を模した黒塗りの銅板を設置した。熱のやりとりが電磁波の放射だけで行われるよう、図の破線の部分をロータリーポンプで真空引きし、空気箱の中身を窒素や二酸化炭素に変えながら実験を繰り返した。その結果、二酸化炭素による温室効果を検出できる実験器を実現するためには、以下の(1)～(3)の問題を解決する必要があることがわかった。

(1) 安定な光源の確保

実際の太陽放射は非常に安定している（太陽定数 $1370\text{W}/\text{m}^2$ 程度）。図2の模式図に示した実験器では、空気箱の中身を窒素から二酸化炭素に入れ替えた場合、温室効果により約 1°C の温度差が銅板に生じることが期待される。この違いを有意に検出するためには、太陽のモデルである光源（図では白熱電球）の出力変動を 1% 程度以下に抑えなければならない。

(2) 透明な空気箱の製作

地球の重力で地球表面に捉えられている地球大気を再現するための空気箱の本体は、圧力差に耐えられるようスチール製のものを製作したが、問題はその窓材である。温室効果で重要になるのは、可視光の太陽放射と、中間赤外線の地球放射であるが、空気箱の窓材は可視光～中間赤外線の波長帯で透明でなければならない。そのような特性をもつ素材としては岩塩（ NaCl ）が挙げられるが、岩塩は脆く、 1 気圧の圧力差に耐えるためにはかなり厚くしなければならない（直径 5cm に対して厚さ 1cm 程度）。また、岩塩は湿気に弱く、すぐに透過率が低下するという問題がある。この問題は深刻で、実験器を実現するためには、岩塩に代わる透明な窓材の確保を検討しなければならない。

(3) 冷たい宇宙空間の再現

実際に地球に降り注ぐ電磁波の大部分は太陽放射であり、その他には黄道光、月・惑星や近傍の恒星の光、宇宙背景放射等の微弱な電磁波しか到達しない。しかし、実験室内に設置される実験器には、周囲の壁や天井から 300K 相当の放射が降り注ぎ、実験への影響が無視できない。この問題を解決するためには、実験器とその周囲を冷却する必要がある。

以上を踏まえ、我々は図3に示す装置を組み立て、温室効果の検出実験を試みることにした。この装置では、上記の(1)の問題を解決するために、 150 ワットの白熱電球（正確にはタングステンランプ）の電源として高出力高精度の直流安定化電源を導入した。

また、(2)の問題を解決するために、岩塩に加えて薄く頑丈なユーピロンシートも試用することにした。ユーピロン

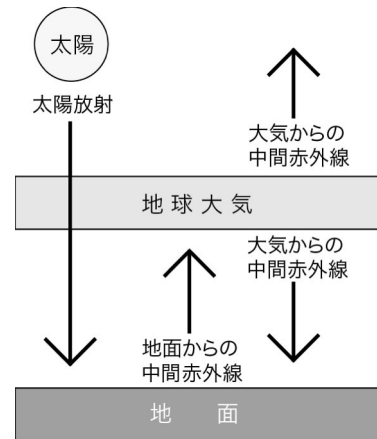


図1 温室効果の原理

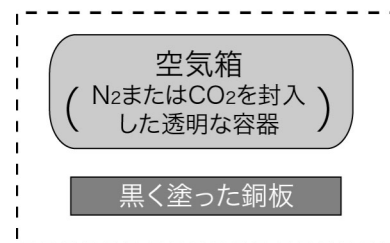


図2 温室効果のモデル実験の概略図。白熱電球は太陽のモデル、空気箱（気体入りの透明な容器）は地球大気モデル、黒塗りの銅板は地面のモデルである。熱のやり取りを放射だけで行わせるため、破線の部分を真空引きする。

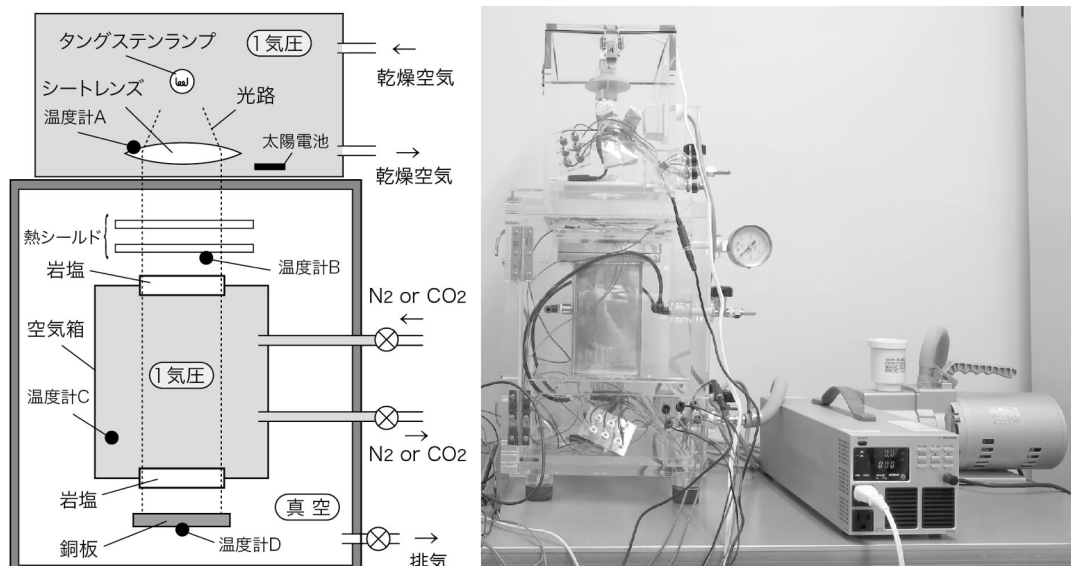


図3 <左図> 製作した実験器の模式図。上の箱には乾燥空気(1気圧)を充填させ、タングステンランプ(150W)と集光用のシートレンズを設置した。下の大きな箱は真空に引き、岩塩やユーピロンシートを窓材とした空気箱を設置した。空気箱の内部は、1気圧の二酸化炭素または窒素で満たす。黒く塗装した銅板をその下に設置する。空気箱の上には、熱シールド用のアクリル板を複数設置し、図中の4箇所の温度(A~D)を測定する。<右図> 実験器の本体(左)と真空ポンプ(右奥)および安定化電源(右手前)の写真。装置全体を大型のフリーザー内に入れ、 -40°C に冷却する。

シートには可視光・近赤外線～中間赤外線の波長帯に有機化合物に特有の吸収線がところどころに見られ、完全に透明という訳ではないが、薄くすることにより不透明さを克服できると考えられる。図4に示す通り、厚さ1mmのユーピロンシートを使えば、長さ15cmほどの空気箱の中身を1気圧の二酸化炭素で満たした場合には、地球放射(300Kの黒体放射)の約6%に相当する中赤外線が吸収される。

(3)の問題は、実験装置全体を大型のフリーザーに入れ、 -40°C に冷却することで解決を試みる。以上の方法により、地面に見立てた黒塗りの銅板の温度が、空気箱を1気圧の窒素で満たした場合と二酸化炭素で満たした場合で、約 1°C の違いが出ることが予想される。

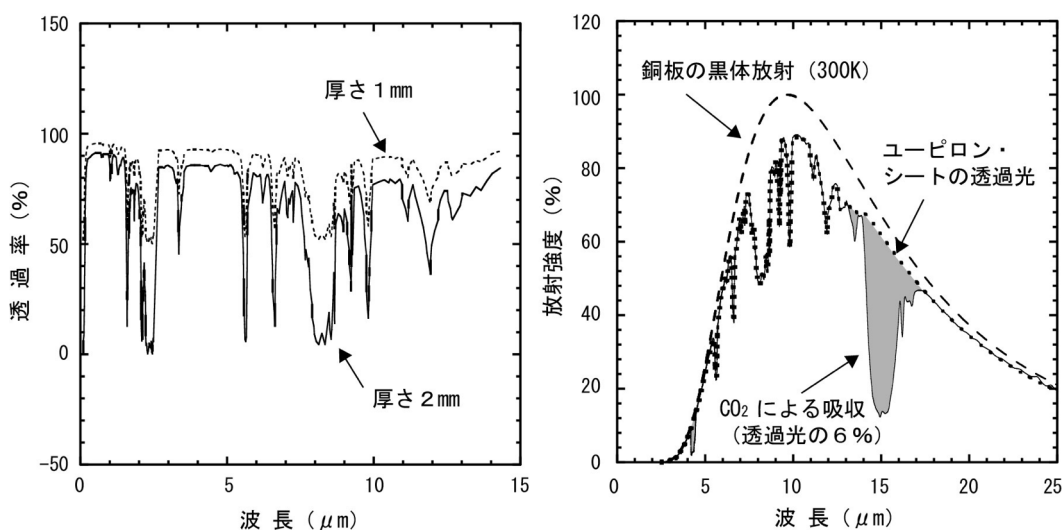


図4 <左図> ユーピロン・シートの透過率。三菱ガス化学(株)が公開している厚さ2mmのシートの実測値(実線)と、そこから推定した厚さ1mmの場合の推定値(破線)。<右図> 300Kの黒体放射(破線:相対値)が厚さ1mmのユーピロン・シートを窓材にした空気箱を透過した後の放射強度(点線)。 CO_2 (実線)は、そのうちの約6%(灰色の部分)を吸収する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、図3の実験装置を完成させて二酸化炭素による温室効果の検出を試みることである。また、それが実現した場合には、学校教育で使える地学教材・理科教材として利用できるよう小型化を検討することも、本研究の狙いである。温室効果を実験室で検出したとする報告は過去にいくつかあるが、いずれも温室効果の原理を誤解しているか、実際には他の効果を誤って計測しているものばかりであり、信頼できる報告例は皆無であると言ってよい。

3. 研究の方法

実験は以下の手順で行った。まず、図3の装置の空気箱に1気圧の窒素を封入し、空気箱周辺を排気して真空にし、装置全体をフリーザーに入れ -40°C に冷却する。温度が安定してから光源を点灯し、一定時間が過ぎたら消灯する。この間、装置各所の温度をモニターする(図3のA、B、C、Dの4箇所)。温度変化のデータの例を、図5に示す。得られたデータを加熱・冷却モデル(=指数関数的に変化する数値モデル)でフィットし、光源点灯時の平衡温度を初期温度との差として求める。フィットの例を、図6に示す。次に、空気箱の気体を1気圧の二酸化炭素に入れ替え、同様の実験を行い、平衡温度を求める。

以上を繰り返し、空気箱に封入した気体による平衡温度の違いを定量する。

4. 研究成果

計算してみると、空気箱の中身が窒素の場合よりも二酸化炭素の場合の方が温室効果により $0.5^{\circ}\text{C}\sim 1^{\circ}\text{C}$ 程度高くなることが予想される。実験を行った結果、予想される程度の温度差が出る場合もあったが、再現性に問題があることがわかった。再現性を高めるための工夫を行ったが、残念ながら、研究期間内に、温室効果を検出したとの結論に至るほど再現性を高めることはできなかった。

十分な再現性を確保できない原因は、主に次の2点であると思われる。まず、1つ目の原因としては、空気箱の窓材として採用した薄手のユーピロンシートが気圧差で変形する問題が挙げられる。窓材を岩塩にした場合には、僅かな湿気により曇り、透明度が失われてしまう。いずれにしても、実験を繰り返す毎に空気箱の窓材が劣化し、安定した実験を継続することができなくなる問題が挙げられる。温室効果の検出を確実なものにするためには、さらなる窓材の工夫が必要である。

2つ目の原因としては、実験装置の光源出力(150ワット)に対して、使用した大型フリーザーの冷却能力が不足気味であったことである。実験を連続して行うとフリーザー内の温度が上昇し、同じ条件下での温度測定ができなくなり、再現性が落ちる。現実的な予算で購入できるフリーザーの冷却能力は限られているので、もっと小さな出力の光源を導入し、かつ銅板の温度差を大きく取れるように設計を工夫する必要があるものと思われる。

なお、本研究では、温室効果そのものの検出を目指した実験を試みた他に、そのために必要な放射輸送を活用した天文学研究のほか、学校教育で活用できる天文教材や地学教材の開発も行った。

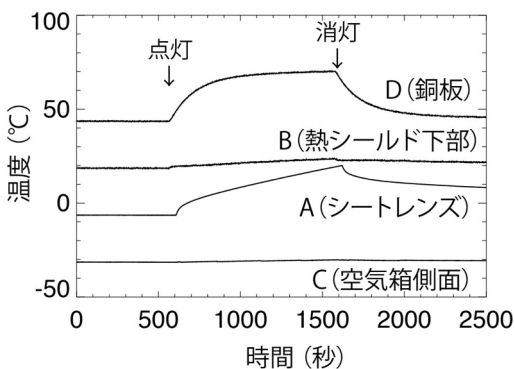


図5 空気箱の内部が二酸化炭素の場合の温度計A~D(図3)のデータの例。A、B、Dの温度は、それぞれ 25、50、 75°C のオフセットをつけた。

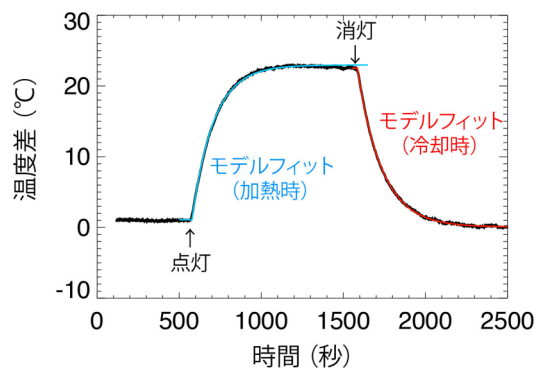


図6 黒線は、銅板の温度(D)と熱シールドの温度(B)の差の時間変化。青線と赤線は、加熱時と冷却時のモデルによるフィット。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① “Spectral Tomography for the Line-of-sight Structures of the Taurus Molecular Cloud 1”, Kazuhiro Dobashi, Tomomi Shimoikura, Fumitaka Nakamura, Seiji Kamenno, Izumi Mizuno, and Kotomi Taniguchi, 2018, The Astrophysical Journal, Vol. 864, id. 82 (12pp.) (査読有)
DOI: 10.3847/1538-4357/aad62f
- ② “Interferometric Observations of Cyanopolyynes toward the G28.28-0.36 High-mass Star-forming Region”, Kotomi Taniguchi, Yusuke Miyamoto, Masao Saito, Patricio Sanhueza, Tomomi Shimoikura, Kazuhiro Dobashi, Fumitaka Nakamura, and Hiroyuki Ozeki, 2018, The Astrophysical Journal, Vol. 866, id. 32 (8pp.) (査読有)
DOI: 10.3847/1538-4357/aadd0c
- ③ “Chemical Diversity in Three Massive Young Stellar Objects Associated with 6.7 GHz CH₃OH Masers”, Kotomi Taniguchi, Masao Saito, Liton Majumdar, Tomomi Shimoikura, Kazuhiro Dobashi, Hiroyuki Ozeki, Fumitaka Nakamura, Tomoya Hirota, Tetsuhiro Minamidani, Yusuke Miyamoto, and Kaneko Hiroyuki, 2018, The Astrophysical Journal, Vol. 866, id. 150 (19pp.) (査読有)
DOI: 10.3847/1538-4357/aade97
- ④ “Observations of Cyanopolyynes toward Four High-mass Star-forming Regions Containing Hot Cores”, Taniguchi Kotomi, Saito Masao, Hirota Tomoya, Ozeki Hiroyuki, Miyamoto Yusuke, Kaneko Hiroyuki, Minamidani Tetsuhiro, Shimoikura Tomomi, Nakamura Fumitaka, and Dobashi Kazuhiro, 2017, The Astrophysical Journal, Vol. 844, id. 68 (12pp.) (査読有)
DOI: 10.3847/1538-4357/aa7899
- ⑤ “Correlation of gas dynamics and dust in the evolved filament G82.65-02.00”, Saajasto M., Juvela M., Dobashi K., Shimoikura T., Ristorcelli I., Montillaud J., Malinen J., Pelkonen V. M., Feher O., Rivera-Ingraham A., Toth V., Montier L., Bernard J.-Ph., and Onishi, T., 2017, Astronomy & Astrophysics, Vol. 608, id. A21 (22pp.) (査読有)
DOI: 10.1051/0004-6361/201630005
- ⑥ 「理科を専攻としない教員志望学生への「月の満ち欠け」の教育の必要性」、下井倉ともみ、土橋一仁、2017、地学教育、Vol. 69, pp. 211-227 (査読有)
- ⑦ “A Statistical Study of Massive Cluster-forming Clumps”, Shimoikura Tomomi, Dobashi Kazuhiro, Nakamura Fumitaka, Matsumoto Tomoaki, and Hirota Tomoya, 2017, The Astrophysical Journal, Vol. 8555, id. 45 (28pp) (査読有)
DOI: 10.3847/1538-4357/aaaccd
- ⑧ 「N₂H⁺分子輝線の解析法を学ぶための学部生用天文教材の開発」、広瀬亜紗、土橋一仁、下井倉ともみ、西浦慎悟、2017、地学教育、Vol. 70, pp. 63-77 (査読有)
- ⑨ 「小学校理科の授業で天体望遠鏡を使おう！-初心者によくあるトラブルとその対策-」、土橋一仁、下井倉ともみ、西浦慎悟、中田正隆、2017、東京学芸大学紀要 自然科学系、Vol. 69, pp. 129-135 (査読無)
URL: <http://hdl.handle.net/2309/148229>
- ⑩ 「小中学校理科での活用を念頭においた地学教材『太陽系の旅-銀河系の回転と地質年代-』の開発」、清水今日子、土橋一仁、下井倉ともみ、佐藤たまき、生田巳裕、鉄矢悦朗、2017、東京学芸大学紀要 自然科学系、Vol. 69, pp. 137-142 (査読無)
URL: <http://hdl.handle.net/2309/148230>

[学会発表] (計 5 件)

- ① 「小学校の授業で天体望遠鏡を使おう！初心者によくあるトラブルと対策」、土橋一仁、下井倉ともみ、西浦慎悟、日本天文学会秋季年会、2017年
- ② 「N₂H⁺分子輝線の解析の学部生向け教材の開発」、広瀬亜紗、土橋一仁、下井倉ともみ、西浦慎悟、日本天文学会秋季年会、2017年
- ③ 「HC₃N・CCS 分子輝線を利用した TMC-1 の視線方向の構造解析」、土橋一仁、下井倉ともみ、平原純一、谷口琴美、水野いづみ、亀野誠二、中村文隆、日本天文学会秋季年会、2017年
- ④ 「教員志望学生を対象にした天体望遠鏡実習の授業実践とその効果」、下井倉ともみ、土橋一仁、日本天文学会秋季年会、2016年
- ⑤ 「『太陽系の旅 銀河系の回転と地質年代』の教材開発」、清水今日子、土橋一仁、下井倉ともみ、佐藤たまき、生田巳裕、鉄矢悦朗、日本天文学会秋季年会、2016年

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：松本伸示

ローマ字氏名：MATSUMOTO Shinji

所属研究機関名：兵庫教育大学

部局名：学校教育研究科

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：70165893