

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 25 日現在

機関番号：54502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01059

研究課題名(和文) 高等教育機関における環境教育を目的とした地球温暖化模擬実験装置の開発

研究課題名(英文) Development of Apparatus to Demonstrate the Global Warming for Environmental Education in Institutions of Higher Education

研究代表者

熊野 智之 (Kumano, Tomoyuki)

神戸市立工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：80435437

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：地球温暖化のメカニズムについての理解を理工学系の学生に十分浸透させるための教材として、ふく射に関するエネルギー収支の再現に主眼を置いた室内型模擬実験装置を開発した。模擬実験手法としては、温室効果ガス層としてプラスチック板を用いるのではなく、直接CO₂ガスを用いる方が有効であることが示された。後者の実験では、CO₂濃度が非現実的に高くかつ違いも大きい条件での比較であったものの、CO₂濃度によって温室効果に差が現れることが確認できた。今後、冷却をより低温で行うことやガス調整部を設けるなど装置の改良を行うことで、質の高いデモンストレーションと将来予測に繋がる実験が実現できる見込みが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本模擬実験装置では、CO₂濃度の変化がふく射のエネルギー収支に及ぼす影響を正しく模擬されており、温暖化の将来予測に資する実験を行うことが可能である。さらに、散乱性微粒子を浮遊させることで散乱アルベドを制御することや、CO₂が大気の主成分である金星や火星と地球との違いを実験的に示すことも可能である。このような温暖化を題材としたふく射伝熱における多角的な学習教材は世界でも例がなく、プロトタイプ機を開発したという点で学術的な意義がある。地球温暖化に関する科学的理解を理工学系学生に浸透させ、温暖化防止を意識した取り組みを拓けるという観点で社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：In this study, a novel simulation apparatus to demonstrate mechanism of global warming and change of the global mean temperature in future for students in institutions of higher education was developed. The apparatus must be designed so that the surface temperature of a mimic earth depends only on the radiative energy balance and the balance was simulated properly. In the apparatus, CO₂ and N₂ gas was used. The experiment was carried out under the two gas conditions that amount of supplying CO₂ was relatively small and large. As a result, it was cleared that degree of the effect was varied with CO₂ concentration despite the concentration was impractically high and was not homogeneous. Some improvements such like realization of more powerful cooling and addition of gas supplying unit allow the apparatus to demonstrate how the temperature changes corresponding to gas composition more accurately.

研究分野：伝熱工学

キーワード：温暖化模擬実験 温室効果

様式 F - 19 - 1

1. 研究開始当初の背景

IPCC の第 5 次報告によれば、「温暖化には疑う余地がなく、20 世紀半ば以降の温暖化の主な原因は人間活動の影響である可能性が極めて高い」とされている。また、近年は地球温暖化の停滞現象が見られるものの、将来には深刻なリスクがあり、適応および緩和に向けた様々な取り組みが必要と説かれている。このような取り組みを根付かせるためにも環境教育の果たす役割は大きい。一方で、人為的な CO₂ 濃度の上昇による温暖化には懐疑論も多く、太陽活動の停滞により寒冷化を予測する向きもある。このように温暖化問題には様々な見方がある中で、個々が温暖化の科学的なメカニズムを理解し、IPCC が指摘する将来リスクを可能性の 1 つとして正しく認識することが重要である。温暖化に関する環境教育は中等教育機関において広く実施されているが、社会問題として扱われる側面が強く、そのメカニズムについては簡略図で紹介される程度である。また、小中学生向けの温室効果模擬実験も幾つか報告されているが、それらは CO₂ の温室効果を示すことを目的としている。高等教育機関では、現状認識や将来予測に結びつくようなより高度な環境教育が求められる。

温暖化は地球規模でのふく射輸送問題であるため、メカニズムを理解するためには機械工学の範疇であるふく射伝熱の知識が必要となる。しかし、大学の学部や高専の本科課程ではふく射伝熱に関する学習時間は一般的に十分ではなく、機械系学生が物理現象としての温暖化に関する理解を深める機会が乏しいことが懸念される。世界的にも、大学において模擬実験を取り入れた温暖化メカニズムに関する教育の実施例は、僅かしか報告されていない。

2. 研究の目的

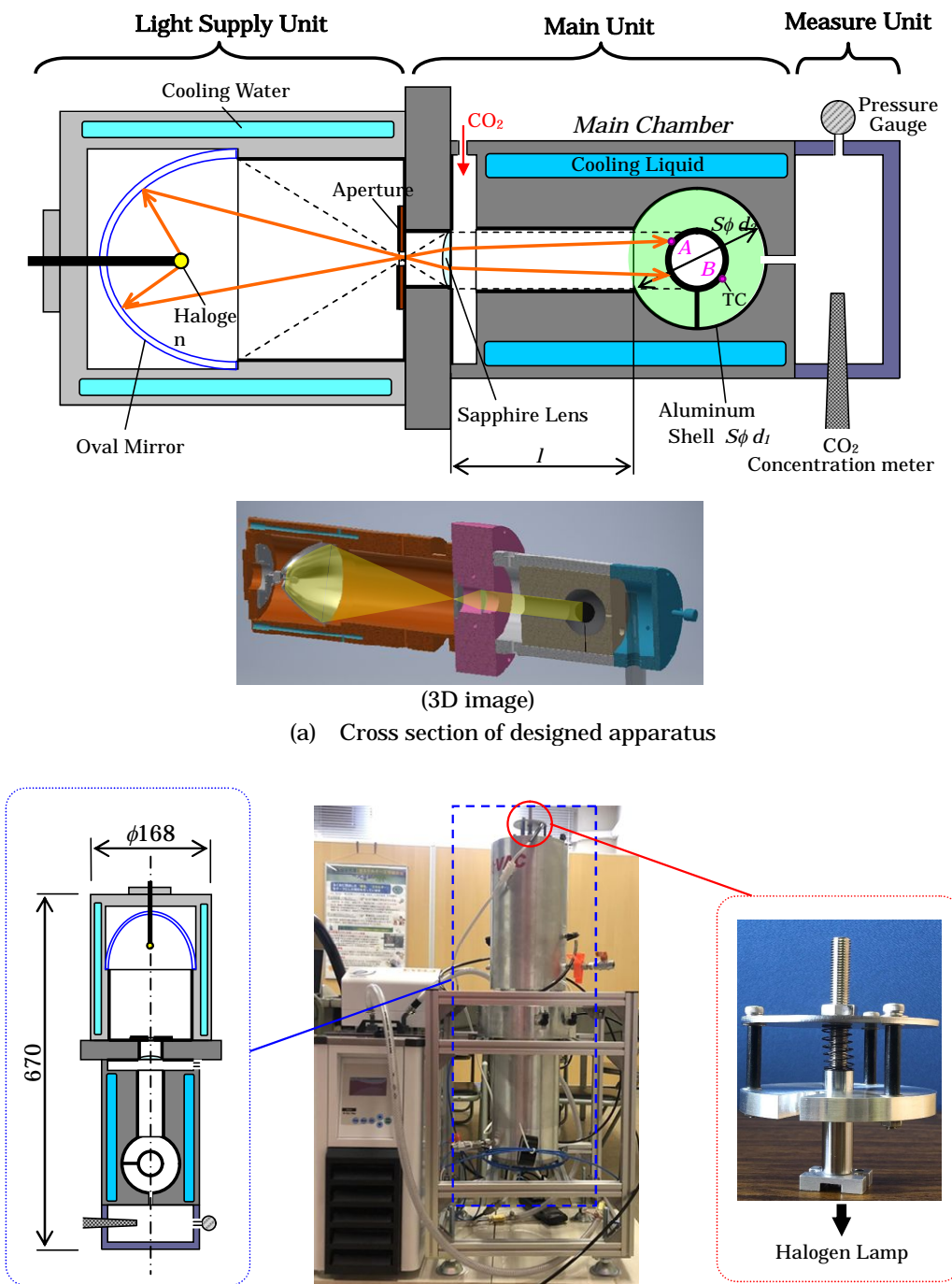
IPCC の将来予測では、最も深刻なシナリオの場合、2100 年時点で世界の平均気温は現在よりも 4 程度上昇し、引き続き上昇傾向にあるとされている。一方で、大気中の CO₂ 濃度のみをパラメータとした場合、熱平衡の観点から地表付近の温度が際限なく上昇することは考えにくい。よって、2100 年以降も CO₂ 濃度が上昇し続けると、平均気温の推移は(a)「右肩上がりに上昇し続ける」(b)「いずれ頭打ちになる」(c)「ある時点でピークに達しそれ以降は低下する」という 3 つのパターンが考えられる。中等教育機関で学習するメカニズムでは (a)しか予測できない。(b)は、温室効果の上で CO₂ 濃度が飽和状態に到達することを意味する。ガス層におけるふく射の吸収を考えれば妥当な推移と考えられる。ただし、圧力効果による吸収スペクトル線の広がり方が頭打ちになるかどうかを左右する要素となる。CO₂ ガス層による短波長側でのふく射の吸収は、地表が放射するふく射についてはエネルギー量が小さいため通常考慮されない。しかし、地表に入射する太陽光については、5 μ m 以下のエネルギー流束が全体の 99.5%を占めるため、短波長側でのふく射の吸収は無視できない。したがって、温室効果をもたらす 15 μ m 帯でのふく射の吸収が頭打ちになる以上に CO₂ ガス濃度が上昇した場合、入射エネルギーが減り(c)のケースとなる可能性がある。

地球温暖化は様々な要因が関連する複雑な現象であるため、全てを精密に模擬することは困難である。そこで本研究では、地表温度はふく射のエネルギー収支のみによって決まると仮定する。また、温室効果ガスとしては CO₂ のみを対象とする。そして、ふく射のエネルギー収支を再現し、CO₂ 濃度の増加が収支に及ぼす影響を正しく模擬することに重点を置く。以上のことから、本研究では、温暖化のメカニズムを理解するとともに将来的に(a)(b)(c)いずれの傾向になる可能性が高いかを議論できるよう、温室効果の調整とふく射のエネルギー収支の再現を可能にした室内型の模擬実験装置を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

実験装置の概要を図 1(a)(b)に示す。装置は光源部、本体部、測定部の 3 部から構成される。光源部では、(1)太陽光と類似したスペクトル分布、(2)平行光、(3)模擬地球の加熱に十分な光量、の実現が求め

られる．光源には，ハロゲン光源装置を用い，タングステンの光学物性によって太陽光の理論スペクトルに近いふく射が得られることが確認された．平行光を実現するためには，擬似的に点光源を形成する必要がある．光量を増やすことと両立させるため楕円面鏡を用い，第1焦点にハロゲンランプ，第2焦点にアパーチャーを置いて点光源とする．アパーチャーを通過したふく射をサファイア平凸レンズによってコリメートする．光量および平行度は，アパーチャーの孔径によって調整できる．レンズの利用は収差の発生に繋がるが，実験装置全体のコンパクト化が可能となる．ランプのフィラメントはコイル状であるため，第1焦点におけるフィラメントの位置によって擬似平行光全体の光量および光束断面における分布が大きく変化する．このため，図 1(b)中に示すようにランプの光軸方向位置をボルトとばねにより微調整できる機構を設け，予めレンズと同径で均一な光となるよう調整できるようにした．



(3D image)
 (a) Cross section of designed apparatus

(b) Photograph of the whole of developed

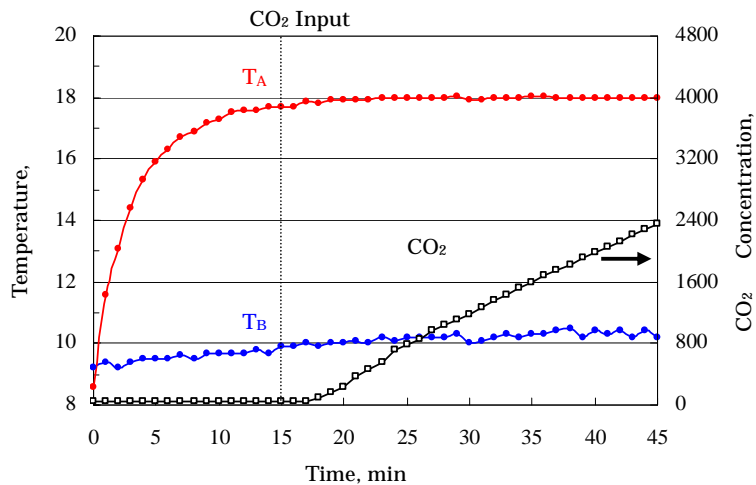
Fig. 1 Novel apparatus using CO₂ gas for global warming demonstration.

本体部には、模擬地球としてアルミニウム球殻をチャンバー内に設置する。球殻表面およびチャンバー内壁は黒体塗料面とする。チャンバーは、液体温度を $-30 \sim 95$ まで制御可能な低温恒温水槽を用いて循環冷却する。サファイアレンズで光源部と仕切られた本体部および測定部内は、 CO_2 N_2 混合ガスで満たす。模擬地球を取り囲む壁面は、(i)大気層と宇宙空間との境界、(ii)地球から放射されるふく射が到達する宇宙の果て、の2つの役割を担う。(i)の観点からは、ふく射が透過するガス層の体積比が入射時：放射時 = 1 : 2 となることが求められる (ii)の観点からは、球殻から放射されるふく射の殆どがチャンバー内壁に到達することが求められる。両条件を満たすように、チャンバー部における大気層は球と円筒を組み合わせた空間全体で模擬し、 $d_1=30$ mm、 $d_2=70$ mm、 $l=120$ mm と決定した。球殻表面には、光が照射される側(点 A)とされない側(点 B)の2箇所にも K 型熱電対素線を設置し、測定部に設けたコネクタを介して外部の補償導線に接続する。なお、実験装置は図 1(b)に示すように実際には縦置きで使用する。この際に本体部の CO_2 が重さにより下部に滞留せず、拡散によりチャンバー内濃度がほぼ均一となることも配慮して設計した。計測機器も含めた実験装置全体の大きさは、出前授業などでの移動を想定し、1つの台車に搭載可能なサイズに収まるように設計した。

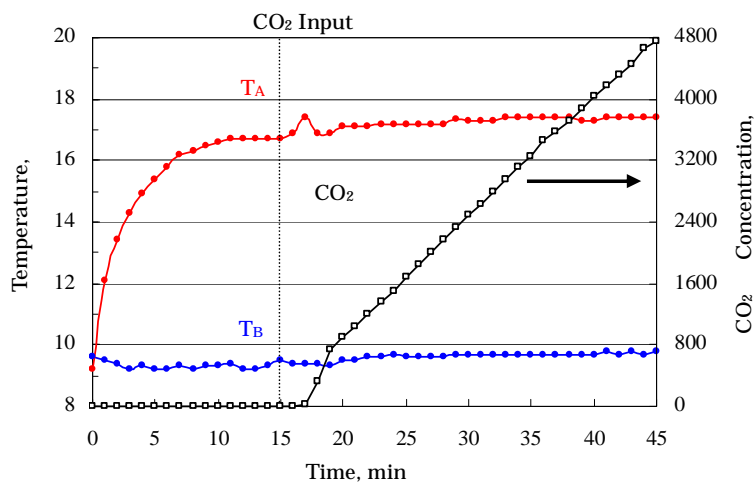
4. 研究成果

(1) 模擬実験結果および考察

本研究では、 CO_2 濃度に応じた温室効果の違いが現れるかどうか、現象が定常状態に達するまでにどの程度の時間を要するか、の2点を検証することを目的とした実験を行った。本体部の冷却には取り扱いの容易な水を用い、循環冷却装置内部および冷却管内での凍結を防ぐため水温は 8 に設定した。ハロゲンランプを点灯させた時点からの、点 A、B における温度 T_A 、 T_B の経時変化を図 2 に示す。温度は 1 分間隔で測定し、1 分間での温度変化が 0.1 以内であれば定常状態とみなすものとする。 CO_2 は開始 15 分後にガスカートリッジからの噴射によって一括供給し、チャンバー内で自然拡散させる。 CO_2 の供給量は噴射時間により変更した。図 2(a)は噴射時間が 1 秒、(b)は 3 秒の場合の結果である。(a)(b)ともに、光の照射によって T_A は顕著に増加し、15 分後には $17 \sim 18$ 程度で定常状態に達している。15 分間の照射による温度上昇は(a)で 9.1 、(b)で 7.5 である。両者の差異は光源の出力をアナログ方式で調整したことによる。 CO_2 を供給してから濃度の測定値が上昇するまでには、いずれの条件においても 2 分程度タイムラグが生じている。これは、図 1(a)に示されるように CO_2 を供給する位置と濃度を測定する位置が離れていることに加え、本体部から測定部に繋がる流路が狭いためである。その後濃度は、途中で傾きが変化しているものの直線的に一定の割合で増加していることから、装置内において CO_2 は均等に拡散していると言える。ただし、噴射時間が短い(a)においても、 CO_2 供給後 30 分経過した時点で濃度は 2400 ppm 付近にまで達し、定常になる兆しは見られない。これは、 CO_2 を高圧カートリッジから直接供給したため 1 秒の噴射でも供給量が多く、また自然拡散では時間がかかることが原因である。実験装置の構成上、本体部内では測定部内と反対に CO_2 濃度は供給直後をピークとしてその後低下し続けていると考えられる。一方で、模擬地球の温度は、(a)(b)ともに CO_2 を供給した 30 分後には定常状態に達していた。 CO_2 供給時点(実験開始 15 分後)と供給後 30 分経過時点(開始 45 分後)での点 A における温度差を T_A とすると、(a)では $T_A = +0.3$ 、(b)では $T_A = +0.7$ であった。よって、濃度が比較的低い(a)の場合にも僅かではあるが CO_2 による温室効果が現れていることと、濃度が高い(b)の場合にはより顕著に現れることが確認できた。一方で、今回の実験条件では CO_2 濃度に対する温室効果の感度が低く、供給直後の極端な濃度変化や(a)と(b)の違いなど CO_2 濃度の変化が非常に大きい場合にしか温室効果やその違いが現れないことが判明した。 T_B については、全体的に温度が上昇する傾向は認められるものの(a)(b)ともに僅かであり、誤差を考慮すれば確な温室効果は現れにくいと言える。これは、晴天時の夜に対応する点 B ではふく射冷却が支配的であり、かつ熱伝導および球殻の熱容量によって熱が伝わり温度が上昇するまでに時間がかかるためである。



(a) CO₂ supplying time is 1 sec



(b) CO₂ supplying time is 3 sec

Fig. 2 Results of experimental simulation of the global warming using the developed apparatus.

(2) 実験装置の改良点

CO₂濃度を変えた際の温室効果の違いを詳しく調べるためには、CO₂濃度の変化に対する T_Aの感度をより高める必要がある。そのためには、冷却媒体をエタノールに変更し、チャンバー温度を 20 に下げることが有効である。また、模擬実験では実際とは前提条件が異なるため、必ずしも CO₂濃度自体を現実的な範囲内に収める必要はない。しかし、将来予測においてどの程度先の未来に頭打ちやピークに達するのかを推定するため、また環境教育として学生に現象をより身近に感じてもらうためには現実的な範囲内に近いことが望ましい。そこで、CO₂濃度は 2000ppm 以下とし、かつ供給後 30 分間で CO₂濃度も定常状態に到達させることを目標に装置の改良に取り組む。具体的には、濃度および圧力を調整した N₂ - CO₂ 混合気で置換するためのガス調整部を装置外部に設ける。これらの改善を行っても 2000ppm 以下の範囲で温室効果の違いが明確に見られない場合は、光源装置をより出力の高いものに変更し、光量を増やすことを検討する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 熊野智之
2. 発表標題 高等教育機関における環境教育を目的とした地球温暖化模擬実験装置の開発
3. 学会等名 日本機械学会技術と社会部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 熊野智之
2. 発表標題 地球温暖化におけるふく射エネルギー収支を模擬する実験手法の検討
3. 学会等名 日本機械学会技術と社会部門講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松尾勇夢、熊野智之
2. 発表標題 カセグレン式集光器を用いる光学系シミュレータの開発
3. 学会等名 第23回高専シンポジウム
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----