

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540471

研究課題名(和文) 温室効果ガスの増加による成層圏の寒冷化に関する理論的研究

研究課題名(英文) A theoretical study on stratospheric cooling due to increase in greenhouse gases

研究代表者

神沢 博 (KANZAWA, Hiroshi)

名古屋大学・環境学研究科・教授

研究者番号：20150047

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：温室効果ガス濃度の増加による大気による長波放射の射出率の増加、したがって大気の長波放射に対する吸収率の増加が、大気層に加熱効果をもたらすが冷却効果をもたらすかのどちらかを定める閾値が射出率に存在することを、放射平衡で拘束した簡単な二層大気モデルを用いて示し、さらに、その閾値をもたらす二酸化炭素濃度の値の検討を行った。長波放射の射出率が、現在の状態から増加すれば、成層圏の温度は現在より低い状態(成層圏の冷却)となる。一方、長波放射の射出率が、ある閾値0.258より高い状態から増加すれば、成層圏の温度は元の値より高い状態(成層圏の昇温)となる。このような射出率の閾値が存在する。

研究成果の概要(英文)：We used a simple two-layer atmosphere model constrained by the radiative equilibrium to demonstrate the existence of a threshold value in longwave (LW) emissivity that determines whether increase in LW emissivity, i.e., increase in LW absorptivity, induced by increase in well-mixed greenhouse gasses (WM-GHGs), leads to warming or cooling of the atmosphere, and to investigate the carbon dioxide concentration value corresponding to the threshold value in LW emissivity. We found that the critical emissivity of the stratospheric layer which is required for entering the stratospheric warming stage is 0.258. The threshold value of the carbon dioxide concentration corresponding to the threshold value in LW is also investigated.

研究分野：気候科学

キーワード：温室効果ガス 長波放射 射出率 閾値 成層圏の冷却

1. 研究開始当初の背景

よく混合された (Well-mixed) 温室効果ガス (WM-GHG) の大気中の増加は、対流圏の大気を温暖化 (昇温) させる効果があるが、一方、成層圏より高度の高い大気を寒冷化 (降温) させる効果があることは、よく知られている (e.g., Manabe & Wetherald, 1967; WMO, 2006)。ここで、「成層圏より高度の高い大気を寒冷化 (降温)」と記したが、昇温と降温の境目の高度は、WM-GHG (二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素、フロンガス、など) のうちのどのガスが増加するかに依存する (e.g., Ramaswamy et al., 2001)。なお、現在の大気の状態において、ここ数百年のタイムスケールで WM-GHG が増加した時の昇温と降温の境目の高度は、ほぼ対流圏界面付近であると考えられている。一方、実際に 1980 年頃以来最近まで、成層圏の寒冷化が観測されている (下部成層圏の全球平均で、 -0.5 K/decade 程度)。この寒冷化は、主に、WM-GHG の増加による冷却効果と成層圏オゾンの減少による冷却効果とが合わさったものであると考えられている (e.g., Ramaswamy et al., 2001; Cordero & Forster, 2006; WMO, 2006, 2010)。

それでは、何故、WM-GHG の増加が、成層圏より高度の高い大気を寒冷化 (降温) させる効果を持つのであろうか？ 現在なされている説明は、次のようなものである。この本質を捉えるため、全球年平均の熱収支およびそれによって定まる平衡温度の鉛直分布を考える。全球平均を考えるので、力学熱輸送は主に水平面内の熱分配にかかわることから、熱収支は主に放射収支を考察すればよく、年平均を考えるので、放射平衡温度を議論する。成層圏の全球年平均の鉛直温度分布は、良い近似で放射平衡で定まっていると考えてよい。成層圏の放射吸収加熱源は、主にオゾンによる太陽紫外線の吸収である (対流圏の放射吸収加熱源は、主に地表面による太陽可視・近赤外光線の吸収である)。一方、成層圏の放射冷却源は、主に二酸化炭素などの WM-GHG の宇宙への赤外線放射の射出である。主に、このオゾン吸収加熱と WM-GHG 冷却とが釣り合うように、成層圏の温度が定まっている (放射平衡温度)。今、オゾンは不変で、WM-GHG が増加した時に、成層圏の放射平衡温度はどうなるであろうか？ オゾンは不変なので、加熱量は不変である。放射平衡の状態を議論しているので、冷却量も不変でなければならない。冷却量は、シュテファン・ボルツマンの法則を援用すると、成層圏の赤外線放射率と温度の 4 乗との掛け算に比例する。成層圏の WM-GHG が増加すると、赤外線放射率が高くなるので、成層圏の温度は、元よりも低い状態で、平衡となる。したがって、成層圏の WM-GHG が増加すると、成層圏の温度は低くなる。なお、WM-GHG が成層圏で増加している時には、

対流圏でも増加する (主な WM-GHG の発生源は地表面である)。対流圏で WM-GHG が増加すると、よく知られているように、温室効果の増大によって、地表面も対流圏大気も昇温する。地表面から成層圏まで達する赤外線は、対流圏の WM-GHG の増加による吸収によって、さほど増えず、対流圏から成層圏に達する赤外線も、対流圏の WM-GHG の増加により有効射出高度が高くなって、より低温の大気から射出されることから、さほど増えないと考えられる。だから、地表面および対流圏から成層圏へ達する赤外線の加熱効果は、上記の成層圏での加熱冷却効果に比べると無視できる程小さい。したがって、WM-GHG が対流圏と成層圏で増加した時に、成層圏の温度は低下する。

2. 研究の目的

WM-GHG の増加が、成層圏の寒冷化を何故引き起こすかについての本質的な理論的説明が上記のようであれば、鉛直 1 次元の多層の放射平衡モデルを用いて計算しなくとも、地表面、それに加えて、対流圏と成層圏の 2 層の灰色大気 (放射の吸収、透過、射出などが、長波波長と短波波長の 2 つの区別以外に、波長に依存しない大気) からなる系を設定し、放射平衡の拘束条件の下で、全太陽放射照度 (太陽定数) を与え、さらに、それぞれの大気層での長波放射 (主に赤外線; 地球放射起源) と短波放射 (主に可視・近赤外光線と紫外線; 太陽放射起源) に対する透過率を与えて、地表面と 2 層の大気が射出する放射フラックスとそれらの温度を求めるといった問題設定をして、その問題を解くことで、WM-GHG の増加によって、何故成層圏が寒冷化するかに関する初等的で簡明な理論的説明が可能ははずである。本研究では、主に、その問題を解くこと、すなわち、「地表面、対流圏、成層圏の 3 つから構成される系が放射平衡している時に、WM-GHG の増加によって成層圏が寒冷化する条件を、これまでに議論されてこなかった視点から理論的に明らかにすること」を目的とする。本研究課題を達成することにより、温室効果ガスの増加によって、何故成層圏が寒冷化するか、という基本的な問題に関する簡明な理論的説明を、大学理学部レベルの教科書に掲載できる内容として構築できる可能性が大きい。

3. 研究の方法

WM-GHG の増加によって、何故成層圏が寒冷化するかに関する初等的で簡明な理論的説明を可能とするため、まず、地表面、それに加えて、対流圏と成層圏の 2 層の灰色大気から構成される系の放射平衡モデルを構築して考察する。

全球年平均温度を議論することを想定し、地表面、それに加えて、対流圏と成層圏の 2

層の灰色大気（放射の吸収、透過、射出などが、長波と短波の2つの区別以外に、波長に依存しない大気）からなる系を設定し、その系の放射平衡モデルを、シュテファン・ボルツマンの法則とキルヒホッフの法則に基づいて、構築する。そのモデルで与えるパラメータは、太陽定数、2層の大気の長波放射（主に赤外線；地球放射起源）と短波放射（主に可視・近赤外光線と紫外線；太陽放射起源）に対する吸収率、短波放射に対する反射率（長波放射に対しては、反射は無視できるので、反射なしとする）である。また、地表面の長波放射の射出率は1とする（すなわち、地表面は、長波放射については良い近似で黒体とみなせるので、黒体とする）。地表面の短波放射に対する反射率も適切に設定する。このような条件下で、地表面と2層の大気が射出する放射フラックスとそれらの温度を求めるとい問題を解析的に解く。その解を解析して、WM-GHGの増加によって、何故成層圏が寒冷化するかに関する初等的で簡明な理論的説明を行う。

4. 研究成果

主要な結果を表す図1は、成層圏温度を成層圏の射出率（したがって吸収率）の関数として、モデルで解析的に得られた結果を図示したものである。短波吸収率として現在の値を採用した場合の図である。現在の成層圏の射出率は、約0.111である(Hartmann, 1994)。図1をみるとわかるように、WM-GHGが増加することにより、現在の成層圏の射出率である約0.111から射出率が増加すれば、成層圏温度が下がる。すなわち、成層圏寒冷化が起こる。図1をみると、成層圏温度が成層圏の射出率のある値、すなわち、閾値の箇所で極小となる。この閾値は、短波吸収率に依存するが、短波吸収率として現在の値を採用すると、閾値の値は、約0.258となる。すなわち、成層圏の射出率が、ある閾値0.258より低い（高い）状態から増加すれば、成層圏の温度は元の値より低い（高い）状態となる。このような成層圏の射出率（WM-GHGの濃度）の閾値が存在する。

現在の成層圏の長波放射の射出率0.111が、閾値0.258より小さいので、すなわち、現在の成層圏のWM-GHG濃度が十分低い状態にあるので、その状態から射出率(WM-GHG濃度)が増加すれば、成層圏の温度は現在より低い状態（成層圏の寒冷化）となる。これが、WM-GHG濃度の増加による成層圏の寒冷化のメカニズムを広いパースペクティブで捉えた場合の描像である。

これまで知られていなかった提示の仕方、成層圏において、長波放射に対する射出率（そして吸収率）が、短波放射に対する吸収率で定まる閾値より大きい小さいかが重要であることを見出した。

なお、この閾値に対応するWM-GHG濃度

の閾値を、WM-GHGが二酸化炭素の場合について、検討中である。

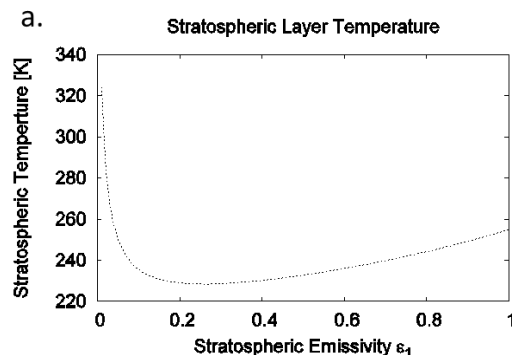


図1 成層圏温度の成層圏射出率依存性。縦軸は成層圏温度 (K)、横軸は成層圏射出率。

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 0 件)

〔学会発表〕(計 6 件)

- (1) 後藤慎司・神沢博: 温室効果ガスの増加によって寒冷化する高度領域と温暖化する高度領域との境界高度の温室効果ガスの持続的増加に伴う上昇について：放射平衡モデルで示唆される特徴。日本気象学会 2013 年度秋季大会, 仙台, 2013 年 11 月 19-21 日. (講演番号 D367, 講演予稿集 No. 104, p.587) 口頭
- (2) Goto, S. and H. Kanzawa: Reconsidering the mechanism of the stratospheric cooling induced by increase in well-mixed greenhouse gases. WCRP Regional Workshop on Stratosphere-Troposphere Processes and their Role in Climate, Kyoto, 1-3 April 2013. P-14 (Poster) (Abstracts Book, p.50-51)
- (3) Kanzawa, H.: A Panelist with T. Yasunari, M.H. Hitchman, K. Rosenlof, Special Session (Open to public) “Climate Research in Service to Society”. WCRP Regional Workshop on Stratosphere-Troposphere Processes and their Role in Climate, Kyoto, 1-3 April 2013. (Invited Talk)
- (4) 神沢博: 地球温暖化やオゾン層破壊に関する衛星観測と数値気候モデルに活用される赤外分光計測。日本分光学会近赤外分光部会第 8 回シンポジウム「環境計測に貢献する近赤外分光研究」, 名古屋大学野依記念学術交流館, 名古屋, 2012 年 12 月 21 日. (講演要旨集, p.8-13) 招待講演)

- (5) Goto, S. and H. Kanzawa: Radiative equilibrium temperature profiles in the middle atmosphere at high CO₂ concentrations. A23A-0184 (poster), AGU Fall Meeting, American Geophysical Union, San Francisco, U.S.A., 3-7 December 2012. (A23A. Atmospheric Sciences General Contributions: Atmospheric Dynamics, Radiation, and Cloud Properties Posters)
- (6) 後藤慎司・神沢博: 温室効果ガスの増加によって成層圏が温暖化する放射平衡解の領域の存在とその実現性. 日本気象学会 2012 年度春季大会, つくば, 2012 年 5 月 26-29 日. (講演番号 P320, 講演予稿集 No. 101, p.350) ポスター

〔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

<http://cloud.has.env.nagoya-u.ac.jp/index-jis.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神沢 博 (KANZAWA, Hiroshi)

名古屋大学・大学院環境学研究科・教授

研究者番号: 20150047

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし