

大気微量成分が地表付近の気温に与える影響について 熱収支モデルを用いた研究

高村陽子・木田秀次

京都大学大学院理学研究科

要旨

放射過程の変化によって地表面気温にどのような違いが生じるかを明らかにするため、鉛直一次元放射モデルと放射対流モデルを作成し、数値計算した。対流モデルとして、温位一定に調整する乾燥対流調節を取り入れた。モデル大気として、北緯30度7月の標準大気の状態を与えた。温室効果気体として、水蒸気、オゾン、二酸化炭素を考慮し、以下の6つの場合についての計算を行った。大気微量成分が①オゾンのみの場合、②二酸化炭素のみの場合、③水蒸気の場合、④オゾンと二酸化炭素の場合、⑤オゾンと水蒸気の場合、⑥水蒸気と二酸化炭素の場合である。

数値実験の結果以下のことがわかった。大気中に水蒸気が含まれる場合には、二酸化炭素量変化に対する地表付近の気温の感度が高い。反対に大気中に水蒸気が含まれていない場合には、大気中二酸化炭素の増減にかかわらず、地表付近の気温の変化はほとんどみられない。

以上のことから、気候およびその変動に関するモデルを用いた研究において、大気中の水蒸気量のパラメタライズが非常に重要であるといえる。

キーワード：大気放射、温室効果気体

1. はじめに

地球の歴史において、大気中微量成分量は大きく変化してきた (Frakes et al., 1992; Crowley and North, 1991)。この変化は、地表面に到達するエネルギーに大きな影響を与える。地表面で吸収されるエネルギーには大気から射出される赤外放射と太陽から射出される短波放射がある。地質学的時間スケールの気候変動において、大気中に含まれる二酸化炭素や水蒸気量など赤外放射の変化が、重要な役割を果たしてきた (Crowley and North, 1991)。地表面に到達し吸収された放射フラックスは、地表面から射出される赤外放射、顕熱、潜熱という三つの過程および対流の効果によって大気中に輸送され、下層大気の熱源となる。このように地表面で吸収された放射エネルギーの変化は地表面や下層大気の運動状態を変え、気候変動をおこす引き金となる。大気の放射過程の変化と地表面熱収支は、過去の気候変動のみならず、未来の気候を考える上でも大切である。現在、二酸化炭素濃度増加による地球温暖化が

世界中で危惧されている。二酸化炭素をはじめとする温室効果気体と地表面熱収支の関係については、詳細な研究がされている (Ramanathan et al., 1987)。しかしながら、個々の微量気体に着目した研究は陽になされていない。放射過程に加えて、対流の効果による地表面から大気上方への熱輸送の過程もまた、地表面における熱収支にきわめて重要である。このように、地球の歴史および未来を考える上で、対流活動や大気微量成分量変化が地表付近の気温にどのような影響を与えるかについて知ることは非常に重要である。

大気中の微量気体の変化が地表熱収支に与える影響については、放射モデルを用いた研究がなされてきた。一次元放射モデルは、大気中の放射吸収物質の特性を取り入れたモデルであるため、放射過程の研究には最も適している。Manabe and Möller (1961) は複雑な放射伝達方程式を数値的に計算する一次元放射モデルによって、放射平衡にある大気の温度を数値的に求めた。これは当時としては画期的な研究であり、はじめて放射平衡にある大気

の温度分布が明らかになった。Manabe and Strickler(1964)は対流圏の生成に着目し、対流圏での気温減率を 6.5K/km に調節することによって、より現実的な大気の温度分布を求めた。また太陽定数や CO₂ の濃度を増加させると地球温暖化がおこることを計算によって示した。Manabe et al.(1965)は、大気の成層状態は不安定になると対流が起こり熱を上方に運んで成層状態は中立にもどる、という対流調節を定式化した。対流調節は積雲対流による水蒸気の潜熱の解放や熱の鉛直輸送などの効果を簡単に大規模運動に取り入れる方法で、GCM などに導入されている。Ramanathan(1989)は、大気中二酸化炭素以外の温室効果について研究している。しかしながら、水蒸気、オゾン、二酸化炭素それぞれが単体で、大気に含まれるときの効果についての研究はなされていない。

これらのことを踏まえ、筆者は個々の温室効果気体による放射効果および対流の影響を考察するため、(鉛直)一次元放射モデルおよび(鉛直)一次元放射対流モデルを作成し、数値実験を行った。

2. 熱収支モデル

2.1 熱収支モデルの概要

大気に以下の仮定を行った以下の 5 つの仮定をする。1. 大気は平行平面である。2. 等方性放射である。3. 空気分子による散乱は無視する。4. エアロゾルによる散乱は無視する。5. 大気各層は局所熱力学平衡にある。大気を鉛直方向に厚さ 1 km の平行平面をもつ 40 の大気層に分割して計算する。

以下の手順で計算を行う。

- ①等温大気を与える (300K)。
- ②地表面における、大気から射出される赤外放射量を求める。
- ③熱収支式を用いて地表面温度を求める。
- ④放射伝達方程式を解くことにより、局所熱力学平衡にある各大気層の温度変化率を求める。
- ⑤大気各層での気温を求める。
- ⑥上記②から⑤のステップを大気層の温度が平衡に達するまで行う。

光は大気を通過する際にオゾン、水蒸気および二酸化炭素によって吸収される。波数領域内の透過率はそれぞれ大気成分の透過率の積で与えられる。透過率の起算に必要な吸収線はクッディーのランダムモデルを用いる。そのため本研究では透過関数を計算するにあたり、次の五つの仮定をする。

- I. 吸収線構造はグッディーのランダムモデルで表される (Liou, 1980 ; Goody, 1989) 。

- II. 気圧依存する不均質な気層をカーティス・ゴドソン近似によって、等価な均質気層に置き換える (Curtis, 1952 ; Godson, 1953)。
- III. 散光因子を用いる。
- IV. 圧力の効果による吸収線の広がり、ローレンツ線型である。
- V. 一般に吸収係数 k_ν とプランク関数 $B_k(T)$ の波数に対する変化は、吸収係数のほうが大きいので、ある波数範囲 Δk 内で平均の $B_k(T)$ を利用する。

放射伝達方程式に関しては、以下の文献を参照されたい(会田, 1980 ; Liou, 1980 ; Liou, 1991)。短波放射計算に関しては、Lacis and Hansen (1974) によるパラメタリゼーションを用いた。

対流方法としては、乾燥対流モデルを取り入れた。この対流モデルは、大気が不安定になったときに温位を一定にする方式である。地表面温度の計算は、地表面での熱容量がゼロと仮定して熱収支式を用いた。

2.2 モデルのパラメータ

モデル大気の気圧、空気密度として AFCRL(1965) による北緯 30 度夏の標準大気モデルの値を用いた。大気中水蒸気は Manabe and Wetherald (1967) による相対湿度一定の定式化を用いた。オゾンは Dütsch (1980) による観測値を用いた。二酸化炭素は大気中一定の混合比 330ppmv を用いた。地球大気上端での太陽放射量は Campbell and Vonder (1980) の値を用いた。地表面におけるバルク係数は林ほか(1992) の値を用いた。

モデル大気の微量成分は以下の 6 つの場合を考えた。i 微量成分がオゾンだけの場合、ii 二酸化炭素だけの場合、III 水蒸気だけの場合、IV オゾンと二酸化炭素の場合、V オゾンと水蒸気の場合、VI 水蒸気と二酸化炭素の場合である。対流方法と微量成分を変化させて数値計算を行った。

3. 計算結果

Fig 1. は放射モデルを用いて二酸化炭素を増減させた場合の平衡温度である。図中の CO*は、現在の大気中二酸化炭素量の何倍かをあらわす。例えば、CO*2 は現在の二酸化炭素量の 2 倍の場合の平衡温度である。大気中二酸化炭素の増加(減少)により地表付近の温度は上昇(低下)した。反対に、大気中二酸化炭素の増加(減少)により、対流圏界面を

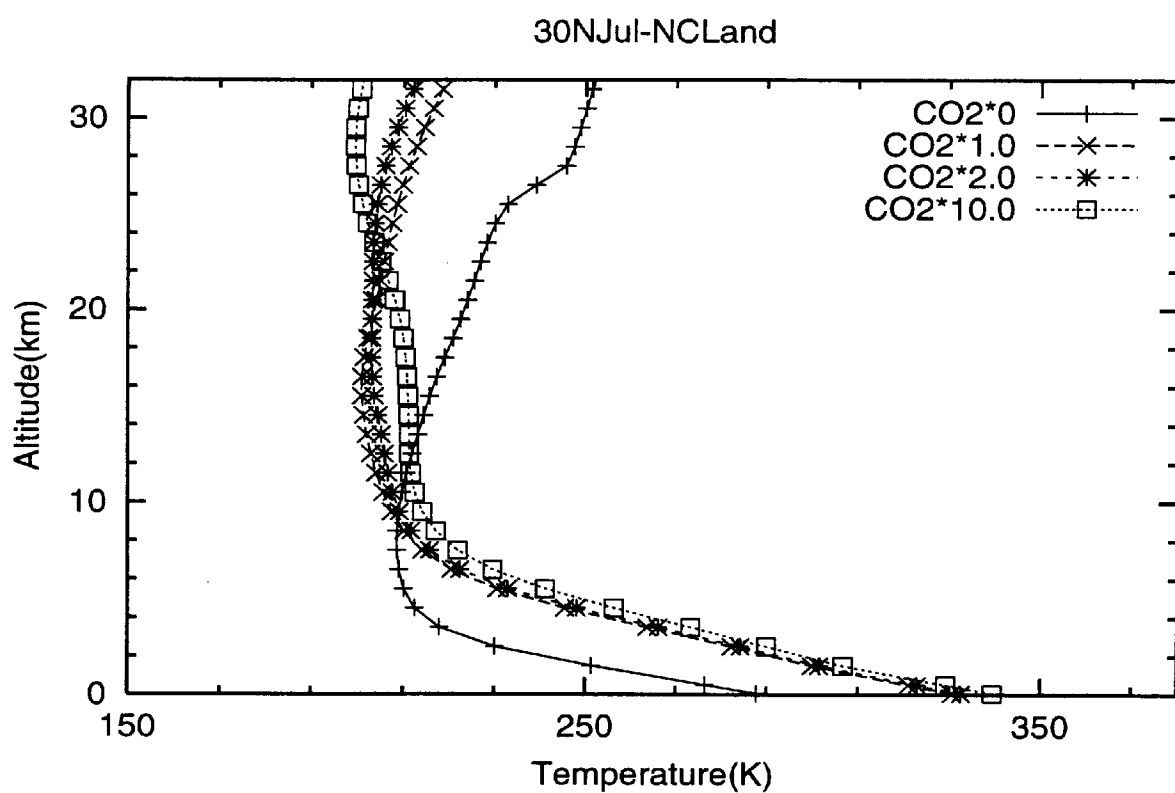


Fig 1. The equilibrium temperature profile.

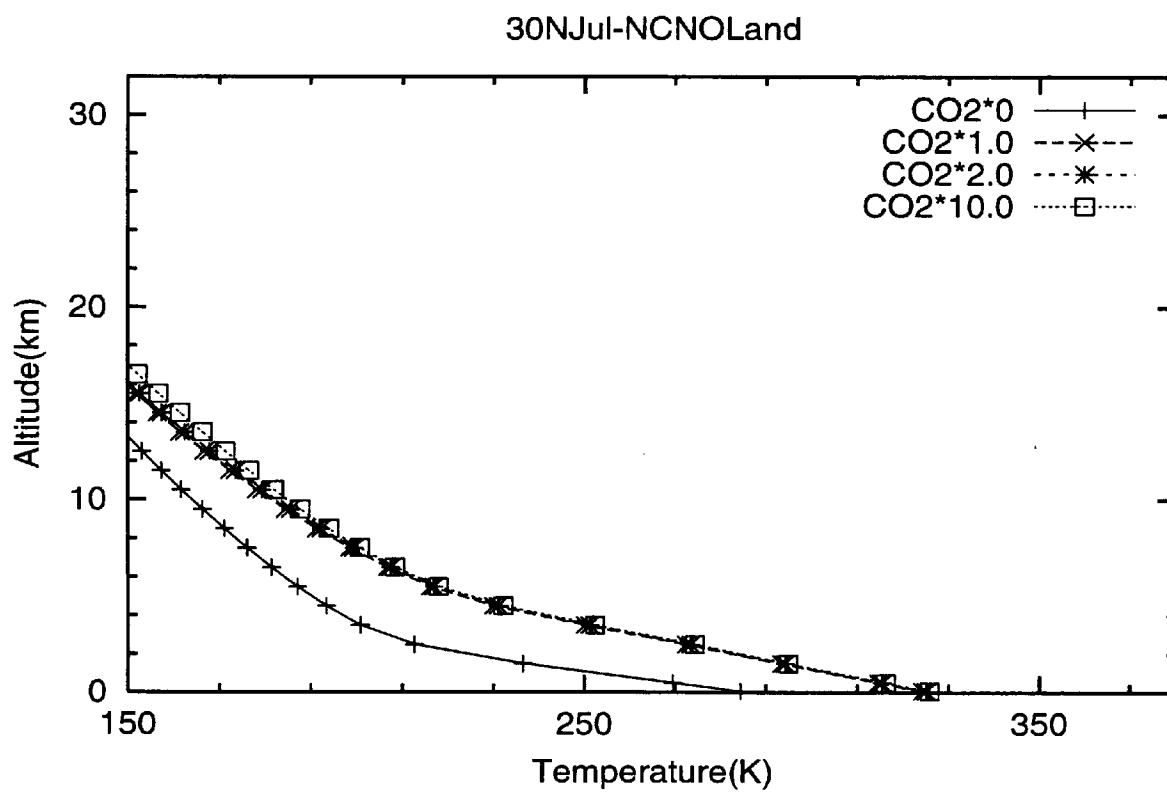


Fig 2. The equilibrium temperature without ozone.

30NJul-NCNWOLand

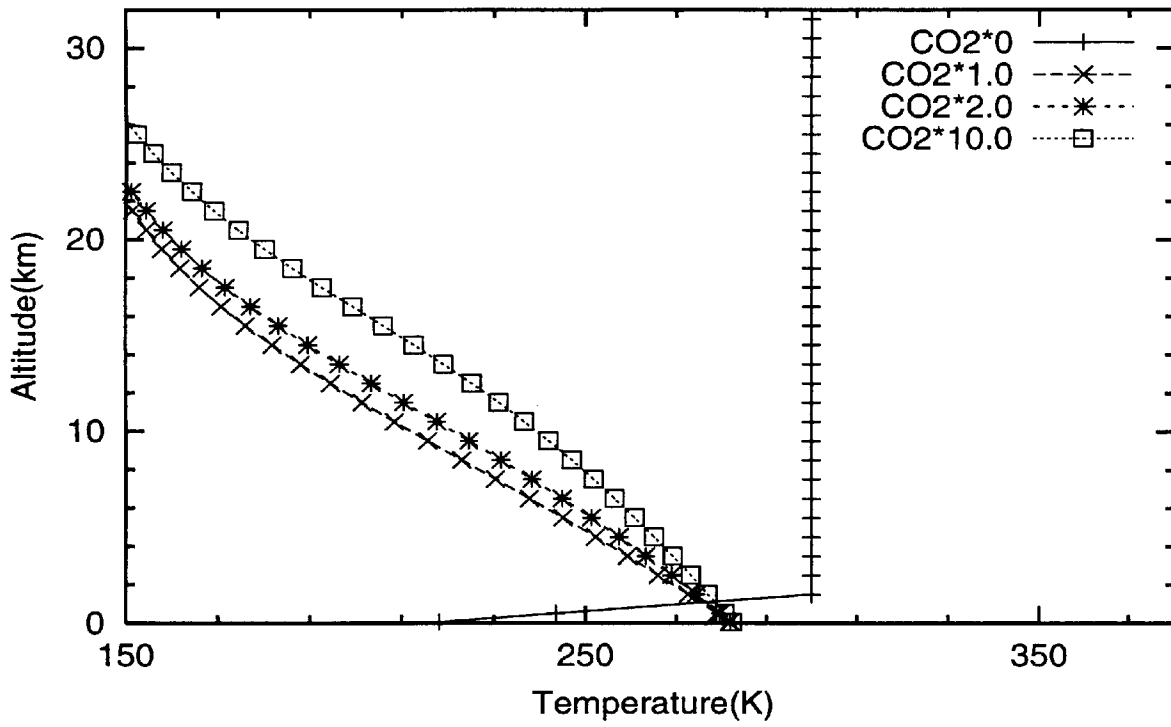


Fig 3. The equilibrium temperature without water vapor and ozone.

30NJul-NCNWOLand

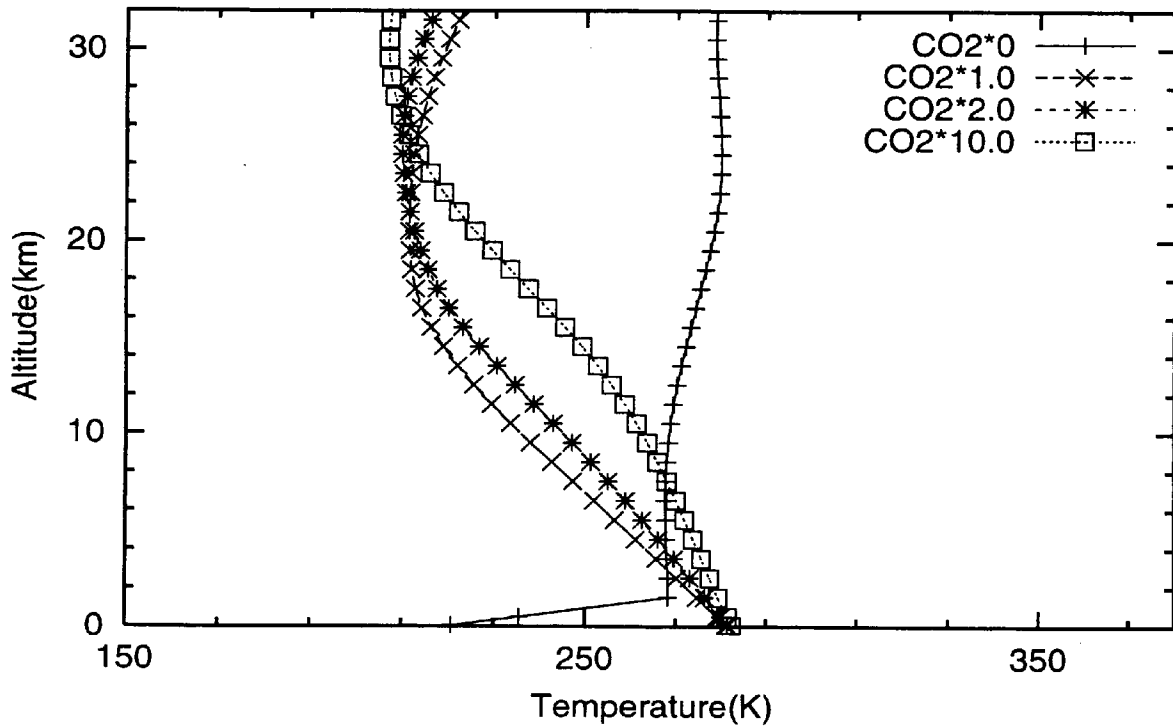


Fig 4. The equilibrium temperature without water vapor .

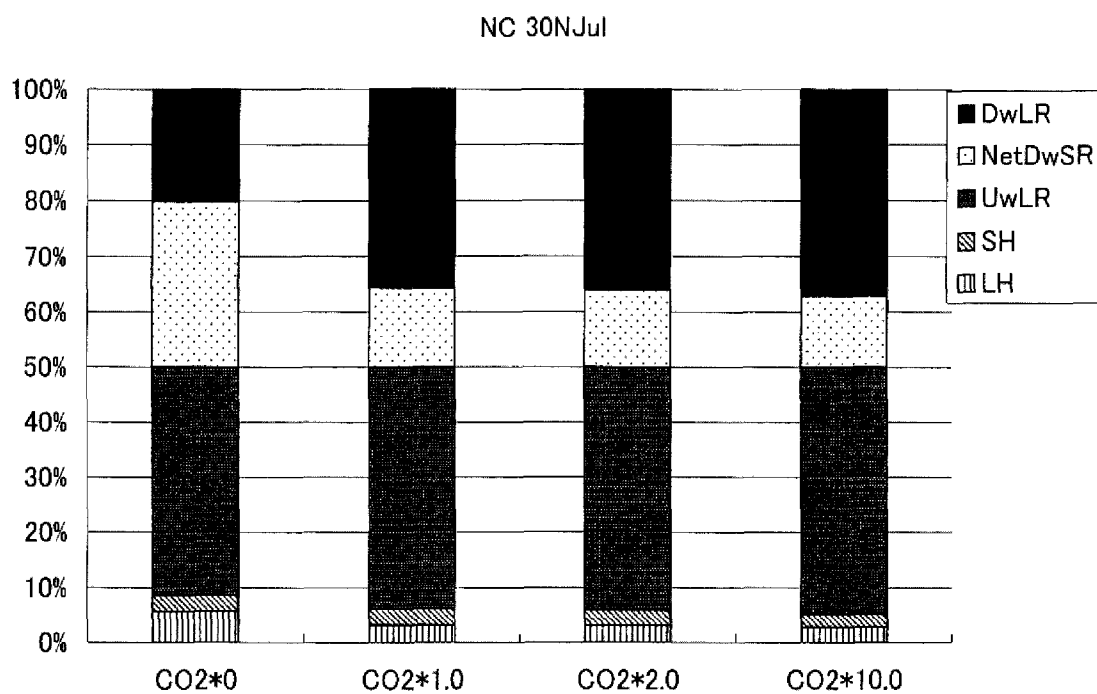


Fig 5. The relative amounts of each terms of thermal balance equation at surface.

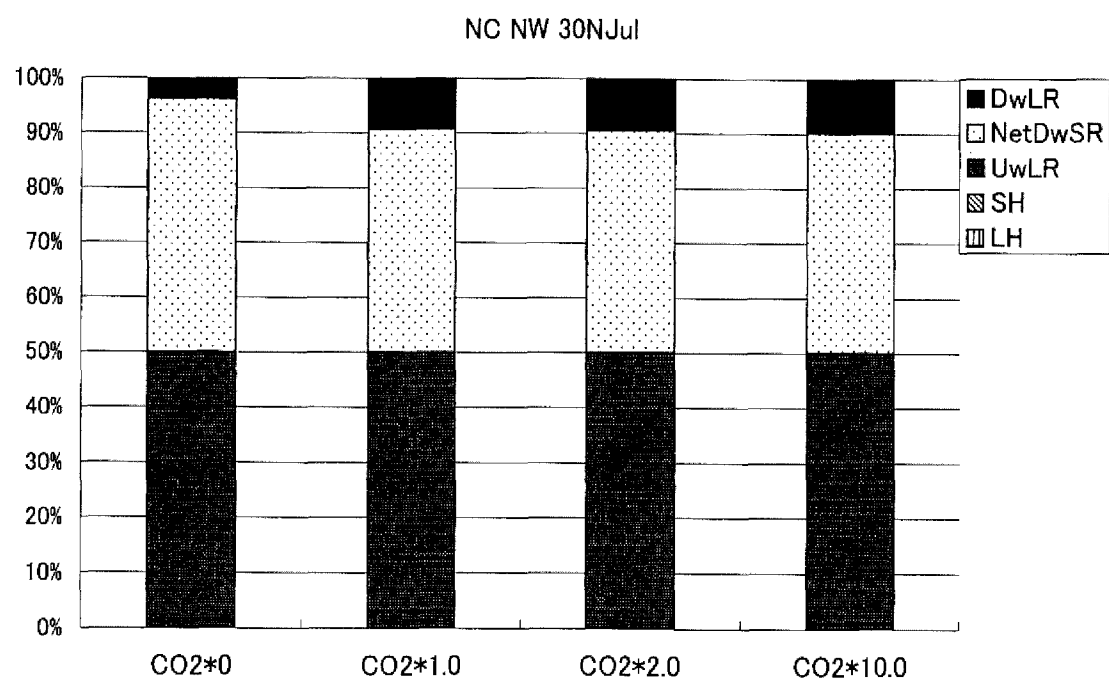


Fig 6. The relative amounts of each terms of thermal balance equation at surface without water vapor .

境に成層圏の温度は低下（上昇）した。現在の二酸化炭素の2倍になった場合、地表面温度は約1.8度上昇した。この感度は、これまでの放射モデルを用いた研究（例えば、林ほか、1992）と調和的である。Fig 2,3,4はFig 1.と同様の放射モデルとモデル大気を用いて、二酸化炭素を増減させた場合の平衡温度である。大気中微量成分の水蒸気・オゾンに関して、Fig 2.は①オゾンは含まず、水蒸気のみ含む場合の計算結果である。Fig 3.は②水蒸気とオゾンは含まれない場合の計算結果である。Fig 4.は③水蒸気は含まずオゾンのみ含む場合の計算結果である。Fig.2-4 を比べると明らかなように大気中に水蒸気が含まれるか否かによって、二酸化炭素増減に対する地表面気温の感度は高くなった。放射対流モデルを用い二酸化炭素を増減させた場合の平衡温度については図を載せていないが、Fig 1.と比べると二酸化炭素増減に対して、地表面気温と成層圏温度は同様に变化した。地表面気温に関しては、対流モデルのほうが、放射モデルによる結果より感度は高かった。放射対流モデルについても大気中微量成分の水蒸気・オゾンに関して、①オゾンは含まず、水蒸気のみ含む場合②水蒸気とオゾンは含まれない場合、③水蒸気は含まずオゾンのみ含む場合の計算を行った。図は載せていないが、得られた結果は定性的にFig 2,3,4.の放射モデルによる結果と同等であった。定量的には、放射対流モデルのほうが放射モデルより感度が高かった。

次に平衡状態における地表面での熱収支について述べる。Fig 5.は大気中に水蒸気が含まれる場合の地表面における熱収支式の各項の割合を示す。図のDwLR, NetDwSR, UwLR, SH, LHはそれぞれ、地表面における下向き赤外放射、正味の下向き太陽放射、上向き赤外放射、顕熱、潜熱を表している。横軸はモデル中の二酸化炭素量が現実大気中の二酸化炭素量に比べてどれだけ含まれるかをあらわしている。反対に、Fig 6.は大気中に水蒸気が含まれない場合の地表面における熱収支式の各項の全体に対する割合を示す。この図から以下のことがわかる。地表面で吸収される太陽放射量と大気から射出される赤外放射の関係は、大きな違いがみられた。大気中に水蒸気が含まれる場合には2倍ほど赤外放射の方が太陽放射量より大きい。一方、大気中に水蒸気が含まれない場合には4倍ほど太陽放射の方が赤外放射量より大きい。熱収支の観点から言えば、大気中に水蒸気が含まれる場合（地表面に到達する太陽エネルギーが小さいとき）には大気が地表面を温めている。このような状態では地表面に到達する赤外放射量の変化が、地表付近の気温に与える影響は大

きい。すなわち、二酸化炭素増減により赤外放射量が变化したとき、すなわち赤外放射の基本パラメータが変化すれば、地表面に大きな影響が出る可能性がある。これとは反対に、大気中に水蒸気が含まれない場合（地表面に到達する太陽エネルギーが大きいとき）には太陽放射が地表面を温めている。そのため二酸化炭素増減による赤外放射量変化が、地表面気温に反映されにくい。二酸化炭素増減による赤外放射量変化の相対値はどちらもほぼ同じであった。

4. おわりに

計算結果より次のことが言える。大気中二酸化炭素増減に対する地表面気温の感度は大気中に水蒸気が含まれるか否かで大きく異なる。大気中に水蒸気が含まれる場合には、感度は高い。しかし大気中に二酸化炭素が含まれない場合には、感度は低い。これらの効果は、地表面熱収支において、大気からの赤外放射量の絶対値に対して、大気中水蒸気量が大きな影響をもつためだと考えられる。

謝辞

本稿作成にあたり物理気候学研究室の皆様にごアドバイスをいただきました。心より感謝いたします。

参考文献

- 会田勝(1982): 大気と放射過程
- 林正康・山本晋・藤嶋康夫・安楽岡顕,(1992): 一次元放射対流平衡モデルを用いた大気微量成分増加の温室効果の評価. 大気汚染学会誌., Vol.27, 133-141.
- AFCRL, (1965): Handbook of Geophysics and Space Environments. U.S.Air Force, Bedford,Mass.
- Campbell, G. G. and T. H. Vonder., (1980): Climatology of Radiation budget measurements from satellites. Atmos. Sci. Paper No. 323, Dept. Atmos. Sci., Colorado State University, 74pp.
- Crowley, J. T. and G.R North,(1991): Paleoclimatology. Oxford University Press, 349pp.
- Curtis, A. R., (1952): Contribution to a discussion of "A statistical model for water vapor absorption", by R. M. Goody. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., Vol.78, 638-640.
- Dütsch, H. U., (1980): Vertical ozone distribution and

- tropospheric ozone, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Atmospheric Ozone; Its Variation and Human Influences, A.C.Aikin, ed., Rept.No.FAA-EE-80-20, U.S.Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Washington, D.C., 7-30.
- Frakes.,L. A., J. E. Francis and J. I. Syktus.,(1992): Climate modes of the Phanerozoic, Cambridge University Press,, 274pp.
- Godson, W. L., (1953): The evaluation of infrared radiative fluxes due to atmospheric water vapor. Quart. J. Roy. Meteor. Soc.,Vol.79,367-379.
- Goody, R.M. and Y.L.Yung.,(1989): Atmosoheric radiation. Oxford University Press, 519pp.
- Lacis,A.A.,andJ.E.Hansen,(1974):Aparametarization for absorption of solar radiation in the earth's atmosphere. J.Atmos. Sci., Vol.31,118-133.
- Liou, K. N., (1980): An Introduction to Atmospheric Radiation. Academic Press, New York, 392pp.
- Liou,K. N., (1992): Radiation and cloud processes in the atmosphere. Oxford University Press, 487pp.
- Manabe, S. and R. F. Strickler, (1964): Thermal equilibrium of the atmosphere of the atmosphere with a convective adjustment. J. Atmos. Sci., Vol.19,127-143.
- Manabe, S., J. Smagorinsky, and R. F. Strickler, (1965): Simulated climatology of a general circulation model with a hydrologic cycle. Mon. Weather Rev., Vol.93, 771-798.
- Manabe, S. and R. T. Wetherald, (1967): Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. J. Atmos. Sci., Vol.19,127-143.
- Ramanathan, V., and L. Callis R. Cess, J. Hansen, I. Isaksen, W. kuhn, A. Lacis, F. Lutter, J. Mahlman, and M. Schlesinger, (1987): Climate-Chemocal Interactions and Effects of Changing Atmospheric Trace Gases. Rev. Geophys.,Vol.25,1441-1487.

A Study on the effects of atmospheric trace to near surface temperature using radiative-convective model

Yoko Takamura and Hideji Kida

Graduate School of Science, Kyoto University

Synopsis

The exchanges of heat and moisture between the Earth surface and atmosphere are crucial in determining the near-surface air temperature which is one of the major factors of climate. Also crucial are the processes of the convection and atmospheric radiative transfer due to carbon dioxide, ozone and water vapor. In geological time scale, the radiative transfer and the convection have been largely changed.

We have examined the effect of the radiative transfer and the convection to near surface air temperature. Simulations were performed of the near-surface air temperature using the vertical one-dimensional non-convective or radiative-convective models. The type of atmospheric convective scheme is the dry adjustment. In our six models, there were supposed that the combinations between water vapor, ozone and carbon dioxide. The parameters necessary for the numerical experiments conducted were provided from the July standard atmospheres at 30N.

Our results suggested that how to parameterize the water vapor relative humidity in the atmosphere is greatly important to simulate the near-surface air temperature, when using a simple heat budget model.

Keywords: atmospheric radiation; greenhouse effects