

II-398

放射対流平衡モデルによる温室効果の感度分析

東京大学大学院 学生員 松井貞二郎

東京大学工学部 正会員 磯部 雅彦

東京大学工学部 正会員 渡辺 晃

1. はじめに

近年、地球環境問題は人類にとって最も優先的に考慮すべき問題の一つとして認識されている。温室効果と地球温暖化は環境問題のなかでも、そのシステムの解明が困難なものであり、それへの対応策の遅れも温室効果現象に未解明の部分が大きいことが起因していると考えられる。気候のモデル化は真鍋ら(1967)が作成した放射対流平衡モデル等の単純な1次元モデルから始まった。その後より精密な3次元モデルとして大気大循環モデル(GCM)、大気海洋混合層モデルへと発展してきた。現在最も先進的な気候モデルは、大気海洋大循環モデルと呼ばれるもので、大気と海洋を数万のボックス要素の集合として扱い、各ボックスの気温、水温、風、水流、水蒸気、塩分濃度の時間変化を流体力学や、熱力学の物理法則に従って運動して求めることが出来る。ただし、この計算は非常に膨大な量になるため世界でも限られた研究所でしか行われていない。本論文においては温室効果に関連する各ファクター(CO_2 の増加、雲の分布の変化等)の温室効果に対する貢献度を、真鍋ら(1967)が作成した1次元放射対流平衡モデルをベースとして評価することを目的としている。

2. 気候モデルの熱収支ファクターと雲の取扱い

大気を熱エネルギーに関するシステムとして捉えるとき、獲得熱量は太陽放射熱、地球表面からの顕熱、潜熱、対流熱であり、損失熱量は地球放射熱である。システムの安定のためには地球表面は蓄熱せず、大気上端では上向き地球放射と、下向き太陽放射のそれぞれの総和がつりあっていることが平衡状態に対する必要条件になる。ただし、地球放射に関しては次の境界条件が設定される。1. 大気上端における下向き地球放射は無視できる。2. 地表面における上向き地球放射は、地表温度での黒体放射に等しい。一方、太陽放射に関しては太陽放射熱は、太陽定数($1.96 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}$)に一日平均日射割合と天頂角を掛け合わせた量として計算した。潜熱は、水蒸気の相変化に伴い放出される熱量である。観測によれば大気中の相対湿度が一定に保たれるため、大気温度の上昇に伴い地表面からの蒸発量が増加し、潜熱の輸送量が増加するという性質がある。対流熱は大気の下層部から上層部に運ばれる熱量である。対流熱の輸送は、大気温度の鉛直方向減率がある一定値(6.5 K/km)を越えると、下層部の大気が上層部の大気より軽くなり大気に擾乱が生じる際に発生する。

温室効果分析における雲の扱いはかなり複雑である。放射収支の面からみると、大気上端では入射する太陽光を雲が反射することにより、地球-大気系の受け取る正味の太陽放射量は減少するが、他方、地球放射の射出面が高温の地表面から低温の雲頂へ移ることによって、地球から宇宙表面へ放出される地球放射量も減少する。同様のことを地表面でみると、地表に到達する太陽放射量は雲によって減少するが、他方で大気から地表に向かう地球放射は雲からの射出によって逆に増加するので、正味として地表面が放出する地球放射も減少することになり、地表面の放射冷却は弱められる。放射収支におよぼす雲の影響は、熱源である太陽放射を減少させる反射効果と、冷源である地球放射の発散を妨げる温室効果という相反する二つの効果の兼ね合いにかかっている。それぞれの効果の大きさは、雲の物理特性(雲粒の相、形、粒径分布、雲水量など)、厚さ、形状、地表面放射特性、大気温度・湿度分布、太陽高度等、ミクロスケールからマクロスケールにおよぶ多くの要素と関連しており、雲の時間的、空間的変動とあいまって、物理的関係の解明を困難なものにしている。

3. 温室効果の予測方法

温室効果は真鍋ら(1967)にならって以下の通りに算定した。まず大気を9層に分割し、各層に関して、太陽放射、地球放射の吸収率を温室効果ガス($\text{CO}_2, \text{O}_3, \text{H}_2\text{O}$)の濃度に対して計算する。これに地上からの顕熱、潜熱、対流熱を加味した熱収支から一定のタイムステップ毎の温度変化とその収束値としての平衡温度を計算する。雲に関して今回の計算で特に仮定したのは、一度反射あるいは散乱された太陽放射は、再度反射されることはない、ということである。

まず現在の鉛直大気温度分布がいかにして形成されているかを確認するため、以下の各ケースに対して計算した。また平衡状態での温度変化率を求めることにより、各吸収気体の温度分布形成への貢献度をも計算した。

- 放射平衡のみによる平衡温度の算出。
- 放射平衡に対流による影響を加味した平衡温度の算出。
 1. 雲を考慮する。
 2. 雲を考慮しない。

さらに、今後予想される環境条件の変化として以下のケースを想定して平衡温度を算出してみた。

- CO_2 を現在の2倍濃度にする。
 1. 相対湿度を一定に保つ。
 2. 絶対湿度を一定に保つ。
- 上記の前者の条件下で雲の分布状況を変化させる。

これらのそれぞれのケースについて、地表面での温度上昇値を求め、温室効果の強さを比較した。

4. 計算結果と考察

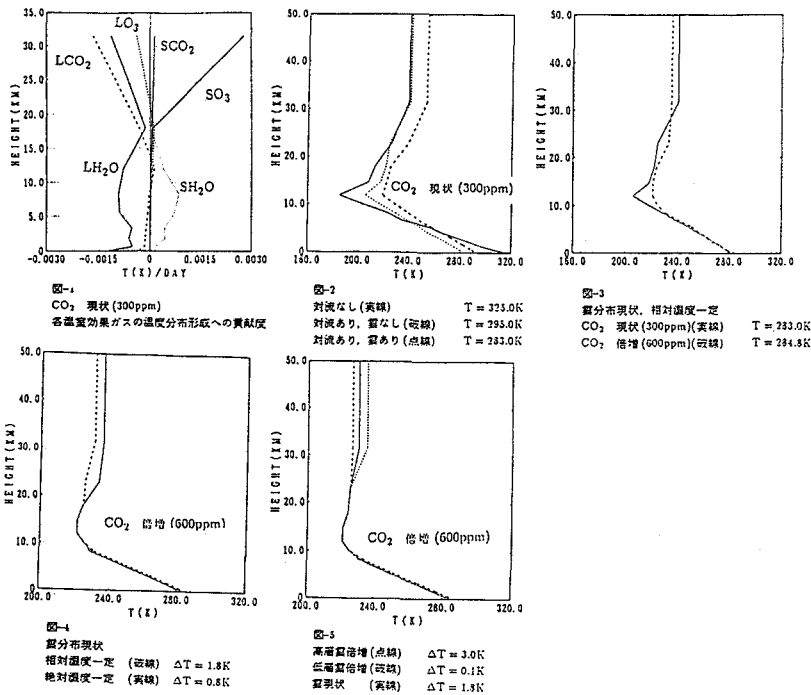


図-1 から、大気下層部では CO_2 と H_2O の地球放射の吸収および H_2O の太陽放射の吸収の影響度が大きく、大気上層部では O_3 の太陽放射の影響が大きいことが注目される。図-2 からは、高度約 12km 付近までは対流熱輸送が支配的であることがうかがえる。図-3、図-4 からは温室効果は CO_2 の倍増に加えて、 H_2O の絶対量の増加によるフィードバックが約 1.0K あることが分かる。図-5 からは、高層雲の増加は地表温度を上昇させる効果があり、低層雲の増加は下降させる効果があることが分かる。現在では大気温度の上昇は高層雲の増加を起こすと考えられている。今回の計算結果からは、2030 年頃までに起こると考えられている等価 CO_2 の倍増は、約 3.0K の地表温度の上昇につながると結論づけられる。

(参考文献)

- Manabe, S., and F. Möller, (1961): On the radiative equilibrium and heat balance of the atmosphere, Mon. Wea. Rev., 89, 503-532.
- Manabe, S., and R. F. Strickler (1964): Thermal equilibrium of the atmosphere with a convective adjustment, J. Atmos. Sci., 21, 361-384.
- Manabe, S., and R. T. Wetherald (1967): Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of Relative Humidity, J. Atmos. Sci., 24, 241-257