

研究課題代表者

気象研究所 柴田清孝

気象庁 気象研究所

気候研究部

第2研究室

柴田清孝

第3研究室

内山明博

物理気象研究部

第4研究室

青木忠生

深堀正志

平成2-4年度合計予算額 24,533千円

〔要旨〕 一分子当りの温室効果が二酸化炭素の数十倍である位大きな温室効果を示すメタン・亜酸化窒素の温室効果を精密に評価した。分子吸収線パラメータを厳密に使う射出力、吸収を評価する方法（ラインバイライン法）を用いて二酸化炭素・メタン・亜酸化窒素の放射強制力の計算を行った。併せて、吸収線間隔が非常に狭いため、現在、吸収断面積データしか利用できないフロンもラインバイライン法に組み込んでフロンの放射強制力の評価も行った。ラインバイライン法の効率化とその計算のための分子吸収線データベースの整備を行い、また分子吸収線パラメータを直接読んで計算を行うラインバイライン法の計算速度、精度の向上を計った。二酸化炭素・亜酸化窒素のラインパラメータ（吸収線強度、半値幅）の変動が放射強制力に与える影響を評価し、フロン12・フロン11の吸収断面積についても同様の評価も行った。2種類の異なる放射計算法（マルチパラメータランダムモデル、4ストリーム法（k-分布法））を使用できる放射対流平衡モデルを作成し、二酸化炭素・メタン・亜酸化窒素の濃度増加による地表面温度の変化を計算した。

〔キーワード〕 温室効果、メタン、亜酸化窒素、フロン

1. 序

現在、温室効果気体の増加による気候変動は世界的な関心を集めており、とりわけ二酸化炭素が大きくクローズアップされておりその規制が国際問題になっている。一方、メタン・亜酸化窒素・フロンも同様に増加しており、これらが二酸化炭素以上の温室効果をもたらすことが既に科学的に明かにされている。特に、メタン・亜酸化窒素は熱帯の対流圏上層から成層圏下層を暖め、大気の安定度を変化させるため二酸化炭素の場合の影響と異なると予測されている¹⁾。

「気候変動に関する政府間パネル」（IPCC）の最終報告にもこれらの気体の温室効果の評価がなされており、温暖化抑制策に活用されようとしている。しかし、それら気体の温室効果評価の精度は必ずしも高くない。今後の温暖化抑制策決定のためにメタン・亜酸化窒素・フロンの温室効果の精密評価が必要である。

2. モデル

気体の吸収線を厳密に計算する放射計算スキーム（ラインバイライン法）の整備と高速化を計る。計算の高度範囲が中間圏の60 kmから地表までと広いため波数分解能を狭くとる必要があり、また吸収の関数形としてローレンツからドップラーまで含まねばならず、これら2つのため計算時間が膨大になる。この計算時間の短縮を行うため吸収係数を予め温度、気圧の関数として表を作成しておいて、それを実際の気象を含むある温度、気圧の範囲になるようにならび替える。この措置によって計算効率は格段に上昇する。一方、吸収線パラメータのデータ集は数年間隔で更新されており、更新データをすぐに計算に使えるようにするめ吸収線パラメータのデータセットを直接読んで計算する方法も精度と計算速度の改良を行った。これら2つのラインバイライン法を適宜用いて放射計算を行った。これとは別に、繰り返し計算が多数必要な場合に使うマルチパラメータランダムモデルと4-ストリーム近似で計算を行う放射-対流平衡モデル用の開発、改良を行った。

3. 結果

3. 1 分子吸収線パラメータの変動に対する放射強制力の変化

温室効果を評価する方法として温室効果気体の濃度変化が引き起こす対流圏界面の正味フラックスの変化（放射強制力）が計算される²⁾。この計算には種々の誤差が含まれ、その分だけ温室効果の精度が低下する。この誤差の内、吸収線パラメータ（吸収強度、半値幅）の変動に起因する放射補強制力の変動を調べた。一般に、吸収線の位置の誤差は吸収強度、半値幅の誤差に比べ非常に小さいので、ここでは無視した。吸収線強度の精度は吸収物質や位置で異なっているが、水蒸気の回転帯で2-5%、振動帯で20%、二酸化炭素で10%、オゾンで10%、メタンで4-15%、亜酸化窒素で2-5%である³⁾。これらの誤差は吸収線に依って符号が正になったり負になったりして、全体としてその効果を打ち消す傾向にあると考えられるが、本研究では簡単に扱うため誤差は全て同符号とする。つまり、ここで得られる結果は誤差の最大値を与えるものである。

大気モデルにUS標準大気（上端は60 km）を用いて圏界面（高度11 km）での放射フラックスの変化を調べた。厳密放射計算法（ラインバイライン法）の計算は吸収線パラメータのデータセットを直接読んで計算する方法を用い、ラインパラメータはアメリカ空軍地球物理学研究所（AFGL）のデータベースを用いた。

（a） ラインパラメータの変動に対して

*ある吸収帯の強度、半値幅をすべて同一方向に10%変化させる；

・二酸化炭素 15 ミクロン帯 (560-760 cm^{-1})、濃度 340 ppmv.

*編集された年度の異なるラインパラメータを使う；

・亜酸化窒素 (1100-1350 cm^{-1})、濃度 0.310 ppmv, AFGLのデータセット1982 と 1986 版.

Changes in net flux and radiative forcing of CO₂

S/S_o (560 - 760 cm^{-1})	α/α_o	F_{trp}^{net} (Wcm^{-2})	$RF^* / \delta RF$ (Wcm^{-2})	δRF (%)
(No CO ₂)		68.8617		
1.0	1.0	29.4410	39.4206*	0
1.0	1.1	29.9955	0.4456	1.13
1.1	1.0	28.8215	0.6195	1.57
1.1	1.1	28.3763	1.0647	2.71
(2×CO ₂)		24.9888	4.4522*	

1 表 圏界面でのフラックス変化（二酸化炭素）

S, α はそれぞれ吸収強度、半値幅を表し、1 行目は S, α を変化させないときのフラックスで、2 行目以降はそれぞれ10%変化させたときのフラックス及びその変化を表す。放射強制力は0から340ppmvの変化に対応。

Changes in net flux and radiative forcing of N₂O

Absorbers (1100 - 1350 cm^{-1})	F_{trp}^{net} (Wcm^{-2})	$RF^* / \delta RF$ (Wcm^{-2})	δRF (%)
(H ₂ O, CO ₂ , O ₃) ₈₆	31.6864	0	—
(H ₂ O, CO ₂ , O ₃) ₈₆ , (N ₂ O; n=0.50) ₈₆	30.1028	-1.5837*	0
(H ₂ O, CO ₂ , O ₃) ₈₆ , (N ₂ O; n=0.50) ₈₂	29.9705	+0.1323	8.4
(H ₂ O, CO ₂ , O ₃) ₈₆ , (N ₂ O; n=0.75) ₈₂	29.9470	+0.1558	9.8

2 表 圏界面でのフラックス変化（亜酸化窒素）

下付き添え字はAFGLのデータセットの年を表し、nは半値幅の温度依存のべき数を表す。放射強制力は0から0.310ppmvの変化に対応。

Comparison of AFGL '82 and '86 datasets for N₂O

Band (1100 - 1350 cm^{-1})	'82	'86	('82 - '86) / '86
$\sum S_i$	0.105×10^{-16}	0.976×10^{-17}	7.58%
$\overline{\alpha_L} = \frac{1}{N} \sum \alpha_{L_i}$	0.0794	0.0741	7.15%
N	3163	4997	

3 表 A F G L のデータセットの1982年版と1986年版の亜酸化窒素の吸収強度、半値幅、吸収線数の比較。

二酸化炭素の場合は、強吸収域にある15ミクロン帯の放射強制力は吸収強度、半値幅の10%の変動に対して、表1に示すように、それぞれ1-2%の小さな変動をしており、吸収強度、半値幅の両方の効果はそれぞれ単独のときの和に近く、加算的である。弱吸収域の亜酸化窒素はAFGLの1982版と1986版のラインパラメータのデータベース（表2に示すように吸収強度、平均半値幅で見ても両方ともに7-8%の差がある）の違いで放射強制力に8-10%の違いを生ずる（表3）。但し、半値幅の温度依存性を0.5乗から0.75乗への変化は約1.5%と小さい。このことから、温室効果気体の放射強制力は弱吸収域にある場合はラインパラメータの変動の影響を受け易いと言えそうだが、現在の濃度に対して2倍時の放射強制力の変化を求めると、二酸化炭素（表4）、亜酸化窒素（表5）のいずれも放射強制力は10%程度変化している。放射強制力は後者の立場の方が実際に近いので、以上のことから、温室効果気体の放射強制力は強吸収・弱吸収域に関わらずラインパラメータの変動の影響を、その変動と同程度だけ受けると言える。

Changes in net flux and radiative forcing of $2 \times \text{CO}_2$

S/S_o (560 - 760 cm^{-1})	α/α_o	F_{trp}^{net} (Wcm^{-2})	$RF^* / \delta RF$ (Wcm^{-2})	δRF (%)
(1 $\times \text{CO}_2$)		29.4410		
1.0	1.0	24.9888	4.4522*	100
1.0	1.1	24.5515	0.4373	9.82
1.1	1.0	24.3890	0.5999	13.5
1.1	1.1	23.9540	1.0341	23.2

4表 1表と同じ、但し、濃度変化は340ppmvから680ppmvで、放射強制力もその変化に対応。

Changes in net flux and radiative forcing of $2 \times \text{N}_2\text{O}$

S/S_o (1100 - 1350 cm^{-1})	α/α_o	F_{trp}^{net} (Wcm^{-2})	$RF^* / \delta RF$ (Wcm^{-2})	δRF (%)
(1 $\times \text{N}_2\text{O}$)		30.1028		
1.0	1.0	29.2645	0.8381*	100
1.0	1.1	29.2015	0.0631	7.53
1.1	1.0	29.1272	0.1374	16.4
1.1	1.1	29.0609	0.2038	24.3

5表 3表と同じ、但し、濃度変化は亜酸化窒素の0.310ppmvから0.620ppmvで、放射強制力もその変化に対応。

(b) 吸収断面積の変動に対して

フロンは、温室効果が大変大きいけれど、吸収線の間隔が非常に狭いので、包括的なラインパラメータデータがなく、現在のところ吸収断面積データしか利用できない。そこで、フロンの吸収断面積の誤差に起因する放射強制力の不確かさを調べた。使ったデータの分解能は0.02カイザー、精度は10-25%である。実験はラインパラメータの時と同じようになるように濃度を変化させた。フロン11 (F11, 800-860 cm^{-1})、フロン12 (F12, 860-940 cm^{-1})の現在の濃度それぞれ300, 500 PPTとして0からの変化と2倍時の変化、1.1倍時を求めた。吸収断面積を用いたため1.1倍の変化は吸収断面積が10%変化したときに等しい結果を与える。結果は表6、7に示す通りで、F11, F12の放射強制力は吸収断面積の10%の変動に対してそれぞれ10%の変動を示している。これはラインパラメータの場合と同じである。

Changes in net flux and radiative forcing of F11 (800 - 860 cm^{-1})			
Concentration (PPT)	F_{trp}^{net} (W cm^{-2})	$RF^* / \delta RF$ (W cm^{-2})	δRF (%)
0	9.6825	0.0755	103.6
300	9.6070*	0	—
600	9.5341	0.0729*	100
330 (1.1 $\times\sigma$)	9.6000	0.0074	10.1

6 表 フロン11の吸収断面積の変化が放射強制力に与える影響。

Changes in net flux and radiative forcing of F12 (860 - 940 cm^{-1})			
Concentration (PPT)	F_{trp}^{net} (W cm^{-2})	$RF^* / \delta RF$ (W cm^{-2})	δRF (%)
0	23.9177	0.1233	103.2
500	23.7944*	0	—
1000	23.6750	0.1194*	100
550 (1.1 $\times\sigma$)	23.7823	0.0121	10.1

7 表 フロン12の吸収断面積の変化が放射強制力に与える影響。

3. 3 放射強制力の評価

ラインバイライン法を用いてメタン・亜酸化窒素の放射強制力の計算をモデル大気、冬季寒帯 (subarctic winter、SW)、米国標準 (US standard、US)、熱帯 (tropical、TR) に対して行った。表 8 がその結果である。

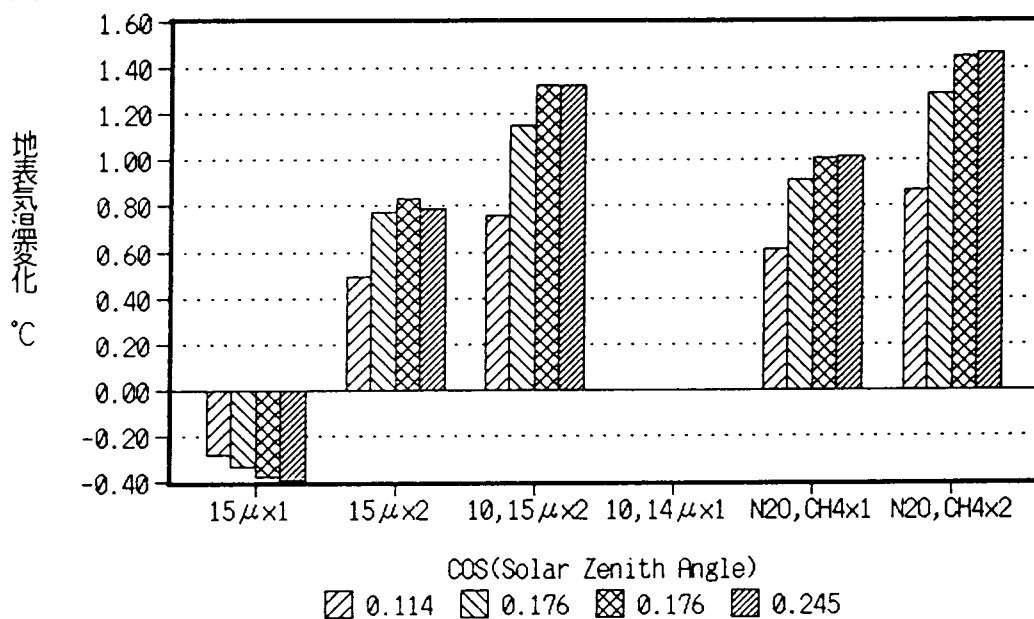
Comparison of Net Fluxes (W m^{-2}) at the Tropopause
due to CH_4 and N_2O Increases by LBL Calculations

550-3000 cm ⁻¹ (CH ₄ , N ₂ O)×0		(CH ₄ , N ₂ O)×1	(CH ₄ , N ₂ O)×2	
SW	Net Flux	174.34	172.01	170.94
	DIF	-2.31	-1.07	
US	Net Flux	242.48	238.39	236.63
	DIF	-4.09	-1.76	
TR	Net Flux	282.71	278.09	276.13
	DIF	-4.62	-1.96	

8 表 メタン・亜酸化窒素の濃度変化による放射強制力の変化。

3. 4 放射-対流平衡モデルの作成

マルチパラメータランダムモデルと4-ストリーム法 (k-分布法) を用いた放射-対流平衡モデルをそれぞれ作成した。メタン・亜酸化窒素と二酸化炭素も含めた地表温度の変化高を図 1 に示す。



1 図 二酸化炭素 (15, 10 ミクロン帯)、メタン、亜酸化窒素の濃度変化に対する地表の平衡温度の変化高。

4. むすび

ラインバイライン法の効率化とその計算法のための分子吸収線データベースの整備を行い、メタン・亜酸化窒素の温室効果の精密評価を行った。また、メタン・亜酸化窒素のラインパラメータの変動が温室効果に与える影響を評価し、フロン12・フロン11の吸収断面積についても同様の評価も行った。

2種類の異なった放射計算法（マルチパラメータランダムモデル、4-ストリーム法（k-分布法））を使用できる放射対流平衡モデルを作成し、メタン・亜酸化窒素の温室効果の評価を行った。

5. 研究発表の状況

柴田清孝、内山明博、1992：ラインパラメータの変動が放射強制力に与える影響について。
日本気象学会1992春季大会予稿集、204。

柴田清孝、内山明博、1992：フロンの吸収断面積の変動が放射強制力に与える影響について。
日本気象学会1992秋季大会予稿集、141。

Shibata and Uchiyama: Effect of uncertainty in line parameters and absorption cross section on radiative forcing. (in preparation)

引用文献

1) Wang, W. -C., M. P. Dudek, X. -Z. Liang, and J. T. Kiehl, 1991: Inadequacy of effective CO₂ as a proxy in simulating the greenhouse effect of other radiatively active gases. *Nature*, 350, 573-577.

2) Ramanathan, V., L. Callis, R. Cess, J. Hansen, I. Isaksen, W. Kuhn, A. Lacis, F. Luther, J. Mahlman, R. Reck, and M. Schlesinger, 1987: Climate-chemical interactions and effects of changing atmospheric trace gases, *Reviews of Geophysics*, 25, 1441-1482.

3) Rothman, L. S., R. R. Gamache, A. Goldman, L. R. Brown, R. A. Toth, H. M. Pickett, R. L. Poynter, J.-M. Flaud, C. Camy-Peyret, A. Barbe, N. Husson, C. P. Rinsland, and M. A. H. Smith, 1987: The HITRAN database: 1986 edition, *Applied Optics*, 26, 4058-4097.