

論文の内容の要旨

論文題目 ガス吸収大気中における放射フラックスの算定とその計算
最適化に関する研究

氏名 関口 美保

近年の研究の発展により、放射強制力は 0.1 W/m^2 のオーダーで求められるようになった。しかし、見落とされがちなのがそれを推定する放射コードの誤差である。約 12 年前に行われた ICRCM (Intercomparison of Radiation Codes used in Climate Models) では、reference となる LBL(line by line) モデルと比較して長波では $15 - 30 \text{ W/m}^2$ 、短波では 10 W/m^2 程度の誤差を持つと見積もられた。これらは晴天大気での比較であり、雲の影響を考慮すると急激に精度が悪くなる。また、CCSR/NIES AGCM に用いられている放射コード mstrn8 は約 8 年前に開発されたものであり、LBL モデルと比較すると 10% 程度の誤差を含む。本研究では mstrn8 の吸収過程の更新(mstrnX)において行った 1. 吸収線データの更新、2. 扱う気体吸収帯の増加、3. 積分点の最適化手法の改良について紹介し、その効果を解析した。また、中高層大気への拡張に向けて開発した手法についても紹介する。

現在、mstrn8 に用いられている気体吸収データベースは HITRAN92、連続吸収計算プログラムは LOWTRAN 7 から抜き出したものであり、これらについては改良・更新が重ねられている。そこで、それぞれ最新の気体吸収データベース HITRAN2000 と連続吸収計算プログラム MT CKD 1 を導入し、その影響を評価した。その結果、長波領域では対流圏で 0.3 K/day 程度の加熱率の誤差が存在し、波長別に見ると $10 - 50 \mu\text{m}$ において大気上端上向きフラックスに差が見られた。このことから、長波領域においては主に水蒸気について改良が加えられたと考えられる。また、短波領域では成層圏で最大 2.0 K/day の加熱率の誤差が存在し、加熱率が最大値を取る高度も低くなっている。波長別に見ると $0.5 - 0.8 \mu\text{m}$ において地表面下向きフラックスに差が見られた。これらのことから、短波領域では主にオゾンのシャピユイ帯について大幅な改良が加えられたと考えられる。このことは連続吸

取プログラムに含まれているデータからも確認でき、さらにシャピユイ帯の吸収係数の扱いが温度依存性を持つようになったことも重要であると考えられる。

mstrn8 で取り扱っている気体吸収帯のみを考慮した状態だと、長波領域ではフラックスで 1%、加熱率では 5.2%程度、短波領域ではフラックスで 1.2%、加熱率では 3.6%程度誤差を生んでしまうので、mstrnX で取り扱う気体吸収帯について新たに考慮し直した。それぞれの気体吸収帯が持つ影響を定量的に評価するためにフラックスと加熱率の誤差からなる評価関数を導入し、あるしきい値以上の値を持つ吸収帯を取り扱うことにした。更に、影響が大きい吸収帯の裾どうしが重なっている部分についてはバンド領域の境界を動かし最も誤差が小さいところに決定した。このようにして 2 種類の精度とバンド数 (17, 18) を持つブロードバンドモデルのバンド領域と取り扱う気体吸収帯を決定した。取り扱う気体吸収帯の誤差は、18 バンドモデルで大気上端と地表面フラックスの平均誤差が 0.48 (長波)、0.30 W/m² (短波) であり、17 バンドモデルで 1.16 (長波)、1.42 W/m² (短波) である。

各バンドを積分する際、吸収係数を並べ変え滑らかな関数にして積分する (Correlated k -distribution 法)。積分点が多いほど精度が良いが、計算時間がかかる。また、バンド領域に取り扱う吸収気体が 2 種類以上存在する際 (overlapping) には積分が困難であり、様々な計算手法が研究されているが最適な計算手法はバンドによって異なる。このような理由から、mstrn8,X とともに精度良く高速に計算できるように、積分点と重みの決定に最適化手法を用いている。最適化には逐次二次近似法を用いている。目的関数は LBL を基準としたフラックスと加熱率の誤差を使用している。大気プロファイルには AFGL の標準大気 6 種類を使用している。最適化に用いる加熱率の誤差は、mstrn8 では 30km までであったが、本研究では 50km まで拡張し成層圏での精度にも留意した。さらに、複数の気体吸収帯をバンド内で考慮している場合、mstrn8 では完全に相関がある状態を初期値としていたが、この状態から最適化を行うことにより最小ではない極小の値を取る可能性が考えられる。これより、mstrnX ではこの手法の他、完全に気体同士の相関がない状態から最適化を開始する方法も行った。また、加熱率プロファイルの重み付けの変更も加え、数種類の最適化条件を考案し、各バンドに適用した。しかし、どの条件で最も効率良く最適化されたかは各バンドや積分点数によっても異なった。これは、それぞれのバンドにおける加熱率プロファイルの違いによって最適な重み付けの方法が異なることや、反復が十分ではないこと、最小ではない極小値を選んでいる可能性が考えられる。これより、各最適化条件の結果を比較して目的関数が最小となった重みと積分点を選択してさらに最適化を行い、各バンド、積分点数での最適な重みと積分点が得られた。

さらに、mstrn8 では計算効率を向上させるため、吸収係数を温度・圧力の二次関数

で近似し、係数を読み込んで計算させていた。この手法を用いて 18 バンドモデルで計算を行うと大気上端と地表面フラックスの平均誤差は長波領域で 7.1W/m^2 にもなってしまふ。計算に用いる記憶領域は必要だが、計算時間の面ではほとんど差がないのでこれまでの計算で行ってきた吸収係数をテーブル化して温度・圧力で内挿する手法を実際の計算でも用いることにした。また、mstrn8 では連続吸収帯は太陽入射光・プランク関数で重みづけ平均した吸収係数を用いて各バンドで一度だけしか計算していない。これによってバンド内の吸収が平均化されてしまうので、吸収係数が大きく変化するところでは誤差が大きくなってしまふと考えられる。これより、mstrnX では連続吸収帯についても線吸収と同様に相関 k -分布法を適用することにした。

以上の更新を取り入れた mstrnX の大気上端と地表面フラックスの平均誤差は 18 バンドモデルで 1.17 (長波)、 1.00W/m^2 (短波)、17 バンドモデルで 1.88 (長波)、 2.43W/m^2 (短波) となった。加熱率についても mstrn8 で見られた誤差は大幅に減少した。更に、最適化を行う高度を 50km に拡張したことで 30km 以上での誤差が長波領域で 1.0K/day 以下、短波領域で 0.2K/day 以下となった (図 1)。ただし、ここで示している誤差は最適化に用いている AFGL 標準大気 6 種類の平均である。最適化を行っていない大気に対しては長波領域での再現性が悪く、最適化の限界がある。二酸化炭素の倍増実験に対しても、精度良く推定するためには二酸化炭素を倍増させたプロファイルを最適化に用いるなどの工夫が必要である。また、このようにして改良された mstrnX を大気大循環モデルに導入すると圏界面で見られた低温バイアスが大幅に改善された。

中高層では吸収線の形が鋭く変化するため、今までは精度よく計算するには積分点を増加せざるを得なかった。本研究では低層と中高層で積分点の位置を変化させ、短時間で精度良く計算する手法を開発した。低層の積分では地表から放射の寄与がほぼ無くなる高度 (透過率がほぼ 1) まで計算し、それより上層では吸収が無いとして計算する。積分範囲のうち最も光学的厚さが厚い部分では透過率が 0 とみなせる高度まではプランク関数として扱う。それより上層では分割して積分点を増加して計算することで吸収線の急激な変化に対応できるようにした。この手法は必要な精度に合わせて積分点数を変更させられる自由度を変わずに持つこと、積分点の位置を変化させても単色性を失わないことなどの特色を持つ。この手法について中高層で加熱率のプロファイルへ大きな影響を持つと考えられる二酸化炭素の $15\mu\text{m}$ 帯で精度の検証を行った。二酸化炭素のみの吸収を考慮した場合において、この手法を用いて計算した結果と、二次のガウス積分で計算された結果を比較すると、同じ点数で計算した場合で加熱率プロファイルはほぼ同じ精度を持ち、計算時間は 4 割削減された。さらに、この手法と最適化を組み合わせその他の気体吸収帯を考慮に入れても、同じ点数で計算した場合より精度が良いことが分かった (表 1)。下層ではまだ

誤差が大きいところもあるが、積分点数の配分や最適化法の条件を工夫することで解消されることが考えられる。また、この手法は本研究で改良を加えてきたブロードバンドモデルだけでなくナローバンドモデルにも応用できると考えられる。

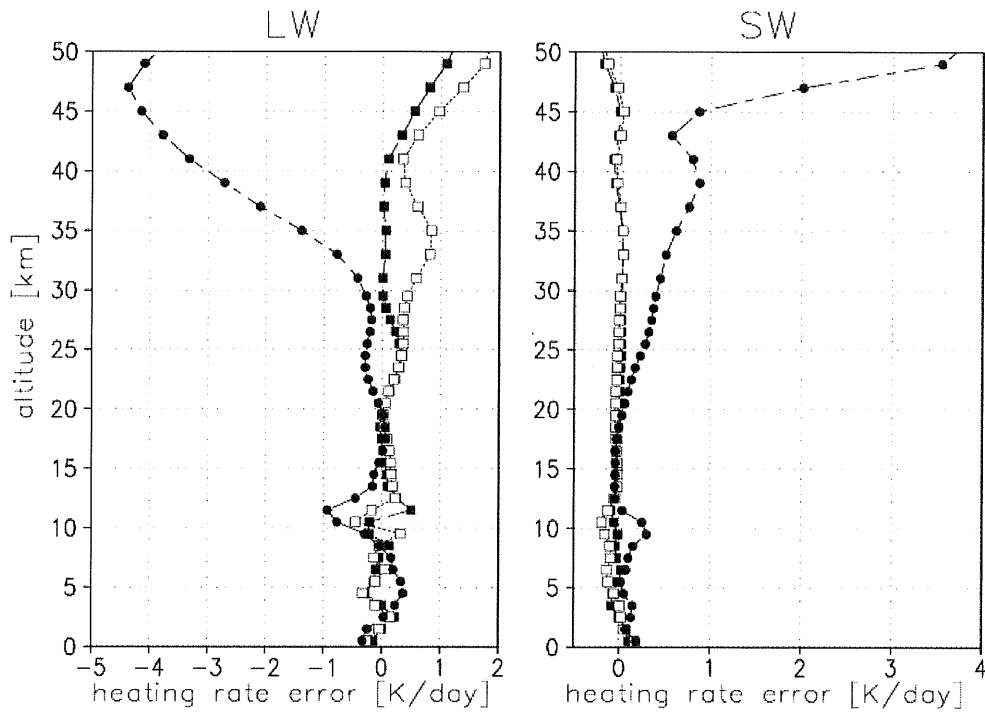


図 1. 長波領域（左図）と短波領域（右図）における加熱率の誤差プロファイルの比較（0 – 50 km）。白四角、黒四角は本研究で改良した mstrnX の 18 バンドモデル（40 点積分）と 17 バンドモデル（33 点積分）の誤差を示し、黒丸は mstrn8 を示す。大気状態は AFGL 標準大気の中緯度大気を用いた。

表 1. $610 - 820 \text{ cm}^{-1}$ の領域において水蒸気、二酸化炭素、オゾンの吸収を考慮したときの、中高層拡張手法と最適化を組み合わせた結果と最適化のみの結果の比較。評価関数は領域内のフラックスと加熱率の相対誤差の和を示し、flux error は大気上端上向きフラックスと地表面下向きフラックスの平均誤差、htr error は加熱率の層平均誤差。最適化はどちらも 70km まで行っている。

	上層 3 点	
	下層 4 点	全層 7 点
評価関数	0.040	0.074
flux error	0.636	1.416
htr error	0.150	0.177