

- 2-3-3-2. Methods for Finding P_n and K_n
- Chapter 3. The Calculation of Transmission Function by Rearrangement of Absorption Coefficients
 - 3-1. The Calculation of Absorption Coefficients K by Direct Line-by-Line Integration
 - 3-1-1. Introduction
 - 3-1-2. Calculation Scheme
 - 3-1-3. Determination of the Integration Step
 - 3-1-4. Determination of Number of Sampling points for a Single Line and Consideration of Contribution of Wings of Other Lines to Absorption
 - 3-2. The Rearrangement of Absorption Coefficients
 - 3-2-1. "Quicksort"
 - 3-2-2. Two-Dimensional Box Method
 - 3-3. The Representation of Transmission Function by Exponential Sum Fitting
- Chapter 4. Approach to Inhomogeneity of Atmosphere
 - 4-1. Introduction
 - 4-2. The Dependence of Fundamental Parameters of Line on Pressure and Temperature
 - 4-3. Separability of Temperature-Dependence and Pressure-Dependence of Absorption Coefficients
 - 4-4. The Calculation of $R(T, T)$
 - 4-5. The Pressure-Dependence of Absorption Coefficients and its Representation
- Chapter 5. Approach to Overlapping Bands
- Chapter 6. Numerical Results and Discussion
 - 6-1. Spectral Data and Division of Wavenumber Intervals
 - 6-2. Numerical Results
 - 6-3. Comparison with the Experimental Measurements
 - 6-4. The Way to Deal with Variation of Line Parameters

References

Tables

Figure Captions

Appendix

論文内容要旨

放射伝達の研究には大きくわけて二つの目的がある。一つは地球大気のエネルギー収支の研究の中で重要な成分である放射項の究明である。もう一つは理論計算と観測との比較によって大気構造に関する情報を得ることである。従来の放射計算方式はこれらの目的のためには必ずしも十分ではなく、特に気候研究においては精密かつ敏速な計算方法が必要とされる。例えば、放射・対流平衡モデルによる CO_2 濃度の増加の影響の研究において、1967年に Manabe と Wetherald は CO_2 濃度が現在の 2 倍になると地球の平均地表気温は 2.36°C 上昇するという数値結果を得たが、その後(1971年) Manabe は同じモデルで、放射収支の計算だけを彼ら自身の方法から Rodgers と Walshaw(1966)の方法に変えると、対応する地表気温の上昇は 1.95°C に減少することを見いだした。放射・対流平衡温度の決定には、放射収支の計算の僅かな違いが大きな影響を及ぼすのである。1977年に、Augustsson と Ramanathan が更に詳しい研究を行っている。彼らは、Manabe らと同じモデルを用い、独自の放射計算によって、 CO_2 濃度の倍増による昇温を評価しているが、その際 CO_2 の赤外吸収帯として、従来と同じように $12\sim 18$ ミクロンの波長域 ($15\mu\text{m}$ 帯) だけを考慮すると、 1.53°C の昇温となるが、更に $10\mu\text{m}$ 付近及び $7.6\mu\text{m}$ 付近の極めて微弱な吸収帯まで考慮すると、対応する昇温は 1.98°C まで増加するという結果を得ている。彼らはまた、 CO_2 の赤外吸収に見られる弱い温度依存性を考慮するか否かによっても、昇温結果の見積もりに上と同程度の違いが生ずることを示している。要するに CO_2 濃度の増加による昇温効果を正確に評価するためには、まず放射収支の精度を極力高める必要があるということである。しかし、実際の地球大気の中では、吸収帯の線構造に伴う吸収係数の激しい変化(non-grey 問題)、不均質成層(inhomogeneous path)、多重散乱等の問題があり、放射伝達の取扱いがかなり困難である。特に大気成分の線構造による波数積分は問題が多い。すなわち従来の透過関数の計算方法を考察すると、バンドモデル(band model)を用いる方法は不均質成層と多重散乱の取り扱いに対して不適當である一方、厳密波数積分法(line-by-line integration)は実際の応用にとって、余りに多くの時間がかかる等々の問題がある。

この研究の目的は上の困難を解決するため対流圏から成層圏までの全域を対象として、各種気体成分、エアロゾルおよび雲の効果を精密に導入出来る新しい放射計算スキームを開発することである。これを用いて、各大気成分の効果や大気組成の変化が温度場におよぼす影響などもより精密にできるようなスキームを得ることである。

第二章では、従来の透過関数の計算方法(band model, line-by-line integration 及び経験・半経験方法等)を調べた上で新しい計算方法を提出する。 H_2O 、 CO_2 、 O_3 等気体成分の赤外吸収帯は多くの回転線を含む複雑な線構造をしているため、ある波数の単色光に対する大気の光学的性質(あるいは放射伝達方程式の解)がその周辺の波数域を代表するという性質は著しく制約

されている。局所熱力学平衡の問題では、これに対応して波数区間 $\Delta\nu$ での平均透過関数を導入した。平均透過関数を求める方法としては厳密波数積分や band model 等がある。吸収帯の線構造が問題になるもう一つの場合は吸収・放出・散乱が共存する場合である(例えば、雲層またはエアロゾル層内での太陽近赤外線 の伝達、雲層内での赤外熱放射の伝達)。この場合には、波数区間 $\Delta\nu$ での平均強度に対する伝達方程式の解を直接得ることはできないので、単色光の解を如何にして平均化するかということが問題になる。この問題の解法としては線吸収に関して区間 $\Delta\nu$ での平均の透過関数を指数関数の和で近似する方式(いわゆる exponential sum fitting)が用いられる。Exponential sum fitting の中で重み P_n と等価な吸収係数 k_n を求める方法としてはいろいろな方法があるが、この研究ではまったく異なる立場からこの問題を検討した。我々の考えている放射伝達の問題では、ある波数の放射と異なる波数の放射の間の相関は存在しない。すなわち放射過程は波数に関しては互いに独立である。従って、Planck関数を一定と見做し得る程度の波数範囲を考えるなどの一定の条件のもとでは現実の波数空間 ν の配列には特に意味がない。Exponential sum fitting の式の中で、 $k_1 > k_2 > \dots > k_n$ とおけば、これは現実の波数空間を吸収係数の大きい順に並べ替えて新しい波数空間 ν^* に変換したものと解釈できる。この解釈から、exponential sum fitting の意味は明らかであり、また適当な N に対して合理的な近似を与えることも推定できる。この方法は次の利点がある。すなわち、(1)物理的なイメージがはっきりしていること；(2)問題の物理的な意味から必要である $P_n > 0$ 、 $k_n \geq 0$ 、 $\sum_{n=1}^N P_n = 1$ 等条件は自動的に満足されること；(3)近似の精度は問題の要求に応じて、 N の数値によって調整できること；(4)前もって透過関数を知る必要はないこと；(5)不均質成層に対して必要な吸収係数の圧力依存性と温度依存性が解析的に処理できる可能性があること；(6)多重散乱とバンドの重畳 (overlapping band) の効果が合理的に導入できることである。

第三章では、この研究の中で提出した吸収係数の再配列に基づく透過関数の計算を詳しく述べる。まず半幅値の圧力と温度依存性、線強度の温度依存性及び吸収線形 (line shape) の変化などを組み入れて、高効率の厳密計算によって吸収係数を計算する。波数空間を並べ替える方法としては“二次元ボックス法”なる方法を提出した。従来の方法(例えばクイックソート法)との比較によってこの方法の効率の高さを明らかにした。次に新しい波数空間に対して若干の変数変換を行った後、Gauss 求積公式を適用することによって、exponential sum fitting における P_n 、 k_n を求め得ることを示した。厳密 (line-by-line) 積分で計算した若干の吸収帯の透過関数との比較により、今回の方法で fitting した透過関数の最大誤差を 0.01 以下におさえるには $N = 9$ 程度で十分であることも示す。

第四章では不均質成層の取り扱い方について述べる。まず、吸収係数の温度依存性と圧力依存性が、実用上可分 (separable) と見做し得ることを示めた。これによって、不均質成層の

取り扱いに大きな簡化をもたらした。

次に吸収係数の圧力依存性を取り扱う時、次の基本仮定を採る。すなわち各圧力(高度)の吸収係数の間には波数空間の中で一対一の対応関係が存在する。つまり、各圧力(高度)での最強の吸収は同じ波数で発生する。2番目、3番目、n番目も同様である。この仮定は一本の吸収線(single line)や理想吸収帯(Elsasser band)に対して完全に正確だが、実際の気体の吸収スペクトルでは異なる半幅値や強度(line strength)を持つ吸収線の部分的な重畳(overlapping)等のため、この仮定は厳密には成り立たない。しかし、この問題は全体の精度に対して殆んど影響はないことが我々の数値計算によって示めされた。

第五章は吸収帯の重畳(overlapping band)の問題を取り扱う。大気成分同志の多くの吸収帯が重なっているほか、液体水の吸収や窓領域での水のダイマー(H_2O)₂の連続吸収もある。この問題についての従来のやり方は区間 $\Delta\nu$ が余り広くない時に透過率の積を取るものであった。これは本来は単色(あるいは指数)透過率に対してのみ正しいが、一つのバンド全体の透過率はこれでかなりよく表現できると考えられてきた。しかし、これは一般に合成透過率を過小評価するものであることが我々の計算によって示された。この研究では、overlapping bandsの取り扱い方について、幾つの情況に分けて考察し、精密な処理方法を提起した。

以上の考察に基づいて、 $0 \sim 14,500 \text{ cm}^{-1}$ の全波数範囲にわたって、 H_2O 、 CO_2 、 O_3 、 N_2O 、 CH_4 のすべての主要な吸収帯の計算を実施した。全波数範囲を実用的な36区間(太陽放射の波数範囲には21、熱放射の波数範囲には15)に分けて処理し、その数値結果をAppendixとして表示した。この数表を用いることによって、任意の現実的な大気内での放射伝達の計算を厳密かつ容易に行うことが可能である。数表の精度は計算の基礎資料として用いられた分子分光学的パラメータ(線構造要素)の精度如何にかかっている。この点についての知見を得るため、数表から得られる透過関数と実験結果の比較を試みた。また、今後構造要素や透過関数のデータが改善された場合に、それに対応して数表をどのように修正すればよいかも考察した。

論文審査の結果の要旨

大気中における太陽放射および地球放射(赤外熱放射)の伝達とその効果の精密な評価は、大気物理学の重要な課題である。この問題に関する一つの大きな困難は、エアロゾル・雲粒などによる多重散乱過程と気体成分による線吸収とが共存する任意の不均質成層中では放射伝達を厳密に扱い得る現実的な方法が未だ見出されていないところにあった。

石 廣玉提出の論文は、地球大気中であっては異なる波長に対する放射過程は相互に独立であることに着目して、吸収帯の線構造によって吸収係数が激しく変動する現実の波数空間を吸収係数が単調に変化する新たな波数空間に再配列することにより、この問題を精密かつ簡便に取り扱い得ることを示したものである。

論文においては、まず、多くの吸収線を含む任意の波数区間を対象として、吸収係数をその大きさの順に再配列する効率的な方法が見出されている。また、再配列された波数区間からガウス型求積法に基づいて少数の吸収係数をサンプリングすることによって透過関数の精度の高い表現が可能であることが示されている。さらに、サンプリングされた吸収係数の温度および圧力に対する依存性が、簡単な経験式によって表現できることが示されている。現実の波数区間では異なる気体成分の吸収が重畳している場合が多いが、その効果の精密な取扱い方も見出された。次に、上記の方法を実際の地球大気に適用し、 H_2O 、 CO_2 、 O_3 、 N_2O 、 CH_4 などの、都合10数万本の吸収線を含む全赤外域を対象とした膨大な計算を行ない、各波数区間毎の吸収係数等を数表化する作業を行なっている。地球大気中での複雑な放射伝達方程式の解は、この数表に示されたそれぞれのサンプリング点での単色解の荷重平均として精密に評価することが可能である。

以上の結果は、大気物理学の研究の発展に大いに貢献するものであり、申請者が自立して研究を行なうに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。

よって石 廣玉提出の論文は、理学博士の学位論文として合格と認める。