

氏名・(本籍)	うち 内	やま 山	あき 明	ひろ 博
学位の種類	理	学	博	士
学位記番号	理博第	759	号	
学位授与年月日	昭和57年3月25日			
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当			
研究科専攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程)地球物理学専攻			
学位論文題目	上層大気中における赤外放射の伝達に関する研究			
論文審査委員	(主査) 教授 田中正之			
			教授 上山 弘	
			教授 近藤 純正	
			教授 大家 寛	

論文目次

第I章 序

第II章 励起・脱励起過程について

§1.序, §2.力学過程について, §3.衝突過程(CO₂-system), §4.O₃(010), O₃(001), O₃(100)の衝突過程について, §5.同種分子の衝突, §6.main isotope と minor isotope の間のエネルギー交換, §7.CO₂(011), CO₂(021), CO₂(031)について

第III章 Infrared Radiative Transfer

§1.heating (cooling) rate, §2.定式化, Appendix 1, 2

第IV章 層の間の放射交換の方法の精度

§1.序, §2.Curtis matrix method についての簡単な説明, §3.比較するそれぞれの方法についての概略, §4.結果, §5.discussion, §6.まとめ

第V章 波数積分

§1.序, §2.吸収線形, §3.波数積分のやり方の概要, §4.被積分関数の形, §5.結果, §6.

波数積分の精度, §7. discussion, §8. まとめ

第VI章 2-level 問題

§1. 序, §2. 基礎方程式, §3. heating rate の形式解について, §4. 極端な条件の場合, §5. source function と heating rate の関係, §6. 衝突による励起・脱励起と放射による励起・脱励起の釣り合いについて, §7. 赤外放射の伝達を扱う場合に使われる近似について, §8. 計算の詳細, §9. 他の研究者との比較, §10. 反応定数と heating rate, §11. diffusivity factor を使ったときの誤差, §13. $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ と $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ の $15\mu\text{m}$ fundamental band の heating rate, §14. $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ と $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ の行列要素の比較, §15. 吸収線形の heating rate への影響について

第VII章 上層大気中の赤外放射の伝達

§1. 序, §2. いままでの研究の概要と問題点, §3. 衝突過程による励起・脱励起, §4. 放射伝達方程式, §5. 大気モデル, §6. 計算方法の詳細, §7. 他の研究者との比較, §8. heating (cooling) rate, §9. source function, §10. ν_2 振動量子の交換の反応定数の違いによる heating (cooling) rate の違い, §11. まとめ

謝 辞

REFERENCES

論文内容要旨

この研究では、成層圏から下部中間圏(30~110km)の中層大気の赤外放射の収支について考えた；地球大気の場合、赤外放射の収支に関係するものは、振動回転帯である。この領域の高度では、温度構造を決める上で、放射過程が、重要な役割をしている：第一次近似としては、放射平衡によって温度分布が決まっている。大気の上層に向うにつれ、大気は、稀薄になり、それとともに、衝突頻度が、少なくなる。このため、振動状態が、十分に、励起されなくなり、下層大気のように、局所熱力学的平衡(LTE)を仮定することが、できなくなる；並進運動、回転運動は、この領域では、まだ、LTEにある。したがって、放射の収支を評価するためには、衝突過程と放射過程の両方を考慮して、放射収支を評価しなければならない。このような問題を nonLTE(非局所熱力学的平衡)問題という。この研究では、nonLTE の効果を考慮して、赤外放射(おもに、CO₂の振動回転帯の放射)の収支について調べた。その際、従来の研究では、十分に考えられていない衝突過程についても十分に吟味し考慮した。

第II章では、各振動状態の population の決定にとって、どの衝突過程が重要か、各反応の特性時間を比較して調べた。その結果、励起状態の population は、少ないので、多くの吸収帯は、2-level 問題のように扱え、そして、下のほうの energy level の population から順次、決定できる可能性がわかった。また、CO₂分子同士の衝突による分子間V-V過程が、重要であること、CO₂と O₃の間の振動エネルギーの交換は、小さいことなどがわかった。そのほか、CO₂の同位体の間の振動エネルギーの交換についても考えた。

第III章では、放射伝達の取り扱い方について示した。扱いは、大気を層に分割し、それらの方射の交換という形で、放射伝達を扱うという方法である。この方法では、層の中で、source function を一定とすれば、放射交換を表わす行列が、本来持っている性質を保持した形で定式化できる。

第IV章では、層の間の放射交換の方法の精度について Curtis matrix method と比較して調べた。その結果、層間の放射交換の方法でも、一般的な傾向は、よく表わせるが、光学的に厚いときには、相対的に誤差が大きいことがわかった。

第V章では、行列要素を計算するとき、波数積分を行なうが、その被積分関数について、定性的に調べた。その結果、上部成層圏から下部中間圏で、弱い吸収線(吸収帯)が、相対的に重要になることがわかった。

第VI章では、nonLTEの問題で、もっとも簡単な、2-level問題を扱った；cooling rateは、CO₂ 15 μ m fundamental band について計算した。まず、振動回転帯の2-level問題の定式化を行ない、その解の一般的な性質を論じた。赤外放射の伝達で、しばしば使われる diffusivity factor (1.66を使用)の精度(3~4%)についてや、cooling to space 近似の解釈について示した。また、吸収線形として、Voigt, Lorentz, Doppler profile の三通りを仮定して、cooling rate を計算して、比べた。その結果、¹²C¹⁶O₂ の 15 μ m fundamental band の場合、約50kmまで、Lorentz profile を使っても誤差が小さいこと、Doppler profile を使えるのは、約75km以上であることがわかった。さらに、Voigt profile を使わないと、弱い吸収線が、相対的に重要である高度が存在しないことがわかった。

第VII章では、CO₂ の 15 μ m 帯、10 μ m 帯、4.3 μ m 帯、2.7 μ m 帯、H₂O の 6.3 μ m 帯について、heating(cooling)rate, source function の計算を行なった。CO₂ の振動状態について考えるときには、N₂, O₂, H₂O の振動状態についても考慮しなければならない(multi-stage問題)。またCO₂ の吸収帯は、fundamental band のほかに、hot band も考えなければならない(many level 問題)。multi-stage, many level 問題を解こうとすると、population を決める衝突過程、放射過程ともに、高度に、非線形な系となってしまう。ここでは、下のほうの energy level の population から順次 2-level問題のように扱い、iteration を行なう方法によって、これらの問題を解いた。従来は、考慮されなかった存在量の多い同位体(main isotope)と存在量の少ない同位体(minor isotope)の間の振動エネルギーの交換についても、不十分ではあるが、考慮した(CO₂ の minor isotope について計算するときには、CO₂ の main isotope, N₂, O₂, H₂O の振動状態の population を固定した。)

従来の研究では、CO₂ の 15 μ m 帯を扱うときには、太陽光の吸収(近赤外の combination band による吸収)とは、独立に扱われていた。しかし、太陽光を吸収して、励起された振動状態が、緩和して、15 μ m 帯に影響を与えるので、この研究では、日中と夜間は、区別して、扱った。

計算結果のいくつかについて、以下に示す。

- nonLTE の効果が効く高度では、個々の吸収帯の heating(cooling)rate の値は、分子間 V-V 過程に大きく依存する。これは、各吸収帯の振動温度が違うためである。
- CO₂ による太陽光の近赤外の吸収と、15 μ m 帯の赤外放射が独立でないことが正しく計算された。日中の場合、15 μ m 帯の cooling rate は、80km以上で、夜間に比べて、1.4~1.8K/day 増加する。
- CO₂ minor isotope の振動状態は、CO₂ の main isotope や、N₂ の振動状態からかなり影響を受けている。
- CO₂ の 15 μ m 帯の弱い吸収帯は、上部成層圏くらいから、LTE のずれが目立ち始める；ただし、70km以下では、ずれは、小さい。

- 非熱的な励起と、それによる cooling の可能性が示された。O₂や O₃の光解離の際に生じた O (¹D)が、N₂の振動状態を励起し、それが CO₂(001)へ移動して、4.3μm の放射を放出して、cooling へ結びつく。
- ν₂-mode の振動エネルギーの交換の heating(cooling)rate への影響は、個々の 15μm 帯へは、かなり大きい。しかし、全体の heating(cooling)rate への影響は、小さい。

ここで、得られた結果は、反応定数の不正確さのため、定量的には、多少、問題のあるものもある。しかし、考慮した、衝突過程、放射過程は、妥当なもので、どの結果も、定性的には、正しい。

論文審査の結果の要旨

地球上層大気中での赤外熱放射の伝達とそれによる大気の加熱・冷却率の評価は、上部成層圏～下部中間圏での微弱吸収帯の重要性、上部中間圏～下部熱圏での非局所熱力学平衡などの問題と関連する困難のために、従来十分満足できる理論的取り扱いのなかったものである。

内山明博提出の論文は、この問題に対してかつてない詳細な議論を展開したものである。まず微弱吸収帯の効果については、独自に開発した高精度の放射計算方式を用い、吸収線形として Lorentz 型、Doppler 型、Lorentz-Doppler 結合型を仮定した場合の放射エネルギーの収束・発散の計算を行い、上部成層圏～下部中間圏で微弱吸収帯の効果がその吸収帯強度に比して著しく強調されること、この効果は Lorentz-Doppler 結合型の線形によってはじめて正しく評価できること、Doppler 型の線形は75km以上の上層でのみ適用し得ることなどが明らかにされた。

次に非局所熱力学平衡の効果については、吸収気体の振動状態の population を決定する放射過程と衝突過程とを詳細に吟味し、いわゆる many level, multi-stage 問題の厳密な定式化を行っている。得られた非線形方程式系の解法についても議論している。

さらにこれらの成果を実際の地球大気に応用し、昼間および夜間の双方について、放射エネルギー収支とそれに関連するエネルギーの流れ、各気体成分の振動状態の局所熱力学平衡からのずれの実態など、極めて興味ある多くの知見を得ている。

これらの成果は、大気物理学特に大気放射学の発展に貢献するところ大と考えられ、申請者が自立して研究を行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。よって内山明博提出の論文は、理学博士の学位論文として合格と認める。