

A-10 衛星データを利用したオゾン層破壊の機構解明に関する研究

(2) 大気微量気体のリモートセンシングのための分光データ精密化に関する研究

② 吸収線パラメータの実験的決定とその信頼性評価の研究

独立行政法人 産業技術総合研究所

環境管理研究部門 環境分子科学研究グループ

山田耕一

〈研究協力者〉 産業技術総合研究所 NEDO養成技術者 森野 勇

平成13～15年度合計予算額 9, 822千円

(うち、平成15年度予算額 2, 994千円)

[要旨] ILAS-IIなど人工衛星によるリモートセンシング観測によって得られるデータから、大気微量成分の分布について有用なデータを抽出するためには、精密な分光データを実験室であらかじめ決定する必要がある。われわれはこの課題に関して、サブサブテーマ2-1担当の気象研究所と共同で研究を行った。

本サブテーマの課題は、以下のとおりである。

- ・ 吸収強度の決定に関して、サブサブテーマ2-1で行われた実験と併せて、 N_2O や CO_2 のヘルマン・ワーリス効果及び赤外吸収強度の信頼性にかかわる問題点を明らかにする。
- ・ また分子の吸収線形などを精密に決定する技術を開発し、半値半幅の吸収帯間相違を確認する。
- ・ 未だ確立していない不安定分子種の吸収強度の測定法を開発する。

本年度まで3年間の成果は以下のとおり。

- ・ N_2O や CO_2 等直線形分子の吸収線強度決定に必要な分配関数の算出方法を比較・評価した。
- ・ ヘルマン・ワーリス因子が見かけ上の温度依存性を示す原因を明らかにした。
- ・ N_2O 、 CO 、 HCl 及び SO_2 の純回転遷移を用いて吸収線プロファイルの精密測定・解析手法を開発、精度の確認を行った。
- ・ N_2O 、 CO 、 HCl 及び SO_2 の振動基底状態の吸収線プロファイルから得られた半値半幅を赤外吸収帯より得られたものと比較検討し吸収帯間変動が少ないことを確認した。
- ・ 吸収線の圧力幅係数の回転量子数依存性を表す経験式を新たに提唱した。

[キーワード] 衛星観測、リモートセンシング、吸収線プロファイル、吸収強度、吸収線幅

1. はじめに

本研究は地球環境研究総合推進費による研究課題A-10「衛星データを利用したオゾン層破壊の機構解明に関する研究」のサブテーマ2「大気微量気体のリモートセンシングのための分光データ精密化に関する研究」のサブサブテーマ2-2として遂行された。ILAS-IIなど人工衛星によるリモートセンシング観測によって得られるデータから、大気微量成分の分布について有用なデータを抽出するためには、精密な分光データを実験室であらかじめ決定する必要がある。われわれはこの課題に関して、サブサブテーマ2-1担当の気象研究所と共同で研究を行った。

2. 研究目的

サブサブテーマ(2)②の目的は、人工衛星等によるリモートセンシング観測によって得られるさまざまな分光データから、大気微量成分の地域・高度分布を正確に決定するために必要な、線位置、強度、圧力幅などの吸収線パラメータを、実験室であらかじめ精密に決定し、その信頼性を評価することである。具体的には、N₂OやCO₂等地球温暖化関連物質の吸収強度の決定に関してサブサブテーマ2-1で行われた実験と併せて、ヘルマン・ワーリス効果及び赤外吸収強度の信頼性にかかわる問題点を明らかにする。また分子の吸収線形などを精密に決定するための測定及び解析技術を開発する。その結果を用いて半値半幅の吸収帯間相違を確認する。さらに、未だ確立していない不安定分子種の吸収強度の測定法を開発する。

3. 研究方法

地球温暖化関連物質の赤外線及び遠赤外線領域のスペクトルを実験室において、さまざまな圧力範囲において、高分解能・高精度で測定する。観測される個々の吸収線プロファイルを解析することによって、信頼性の高い吸収線パラメータを決定する。

4. 結果・考察

(1) 吸収強度の解析

本課題の研究の一環として、直線分子の振動回転吸収強度決定のプログラムを新規に作成した。これを、気象研のグループがすでに解析したCO₂の測定データに適用し、結果を比較した。状態 b から a への遷移の強度 S は

$$a \leftarrow b = (v', J', K') \leftarrow (v'', J'', K'')$$

$$S_a^b = \frac{8\pi^3}{3hc} \nu_{ab} f_b (1 - e^{-h\nu_{ab}/(kT)}) |\mu_{ab}|^2$$

[1]

と表される。ここで

- ν_{ab} : 遷移の波数 (cm^{-1})
 f_b : b 状態に分布するの分子割合
 μ_{ab} : 遷移モーメント

である。 f_b は分配関数 Q とボルツマン因子により次のように表される。

$$\begin{aligned}
 f_b &= g_b e^{-E_b/(kT)} / Q \\
 Q &= \sum_b [g_b e^{-E_b/(kT)}] \\
 &= \sum_{v'', J'', K''} [g_{(v'', J'', K'')} e^{-E_{(v'', J'', K'')}/(kT)}]
 \end{aligned}$$

[2]

従って吸収強度決定のため、正確に分配関数 Q を見積もる必要がある。CO₂についてはGamacheら¹⁾によって、分配関数の数値近似表現が与えられている。これを従来行われている解析的近似法²⁾と比較検討した。解析的に表現するために、式[1]の f_b を振動と回転の状態について以下のように分離する。

$$S_a^b = \frac{8\pi^3}{3hc} \nu_{ab} f_{\text{vib}}(v'') f_{\text{rot}}(J'', K'') (1 - e^{-h\nu_{ab}/(kT)}) |\mu_{ab}|^2$$

[3]

ここで f_{vib} と f_{rot} はそれぞれ振動状態 v'' と回転状態 (J'', K'') に分布する分子の割合である。なお本課題で取り上げたのは直線分子なので、 $K=0$ である。

f_{vib} は

$$\begin{aligned}
 f_{\text{vib}}(v'') &= g_{v''} e^{-G_{v''}/(kT)} / Q_v \\
 G_{v''} &\approx \sum_i \omega_i \nu_i
 \end{aligned}$$

と表され、振動の分配関数 Q_v は

$$\begin{aligned}
 Q_v &= \sum_v g_v e^{-G_v/(kT)} \\
 &\approx \prod_i (1 - e^{-\omega_i hc/(kt)})^{-g_i}
 \end{aligned}$$

[4]

となる。同様に f_{rot} は

$$\begin{aligned}
 f_{\text{rot}}(J'') &= (2J'' + 1) e^{-F_{J''}/(kT)} / Q_r \\
 F_J/(hc) &\approx BJ(J+1) - D[J(J+1)]^2 + H[J(J+1)]^3
 \end{aligned}$$

ここで

$$Q_r = \sum_J (2J+1) e^{-F_J/(kT)}$$

[5]

$$\approx \frac{kT}{hcB} + \frac{1}{3}$$

[6]

と表現される。式 [4] と [6] を用いるのが一般的で、高温近似と呼ばれる。

本課題で検討した結果、図 1 に示すとおり、回転準位については式 [6] を用いて数値積分、振動準位については式 [4] の調和振動近似を用いるのが最適であるという結論を得た。これを組み込んだプログラムにより、吸収強度の回転依存性に関するヘルマン・ワーリス因子³⁾を決定した。得られた結果は、気象研で独立に決定されたものと誤差の範囲で一致し、解析方法に問題のないことが確かめられ、吸収強度の測定データはほぼ 1% の精度で決定できた。

Partition Function for CO₂ - Comparison of Three Methods -

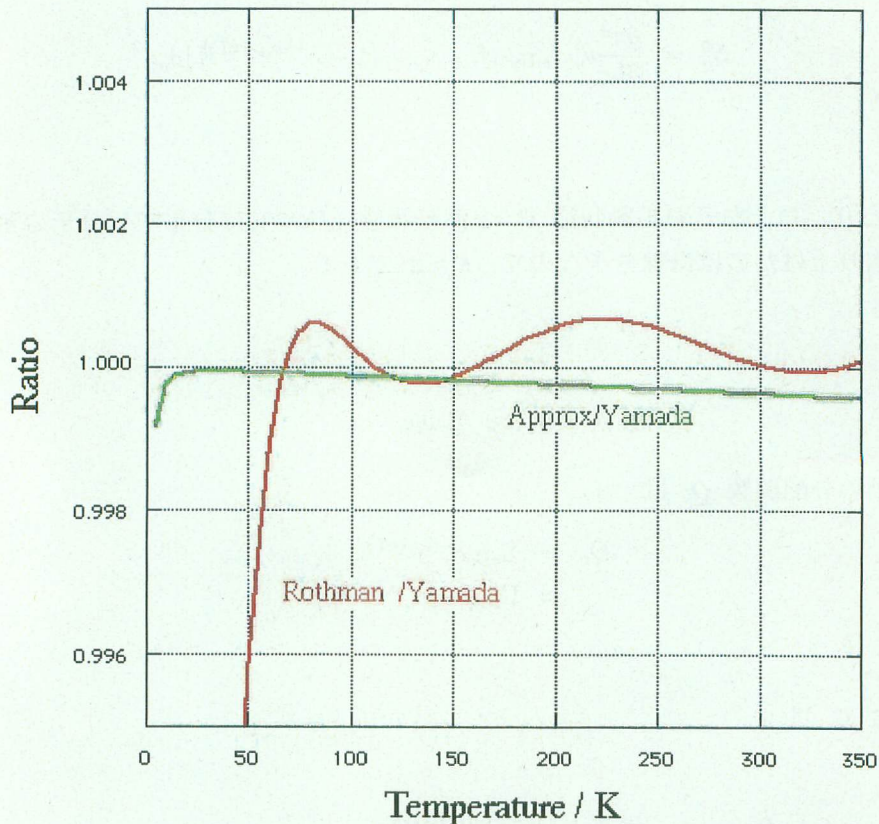


図 1 今回提案した分配関数 (Yamada) と、Gamache らの数値近似表現 (Rothman) 及び高温近似 (Approx) との比較を示す。Gamache らの数値近似表現は 60K 以下では適用できない。

振動回転遷移の吸収強度は遷移モーメント μ_{ab} の自乗に比例する。

$$|\mu_{ab}|^2 = (\mu)^2 A_{JK} \quad [7]$$

ここで μ は振動の遷移モーメントである。 A_{JK} は、直線分子の P 枝の場合、

$$A_{JK} = J/(2J + 1) \quad [8]$$

R 枝の場合

$$A_{JK} = (J + 1)/(2J + 1) \quad [9]$$

である。ところが、振動回転相互作用により、振動の遷移モーメントに対して、回転依存性の補正が必要となる。一般に振動回転遷移強度の回転依存性はヘルマン・ワーリス因子 A_1 、 A_2 を補正項として次のように表される。

$$(\mu)^2 = (\mu')^2 [1 + A_1 m + A_2 m^2] \quad [10]$$

ここで $m = (J' - J'')(J' + J'' + 1)/2$ で、 J' と J'' はそれぞれ遷移の上下の回転量子数である。

ワトソンによれば、 A_1 は 10^{-4} 、 A_2 は 10^{-8} のオーダーの量で温度に依存しない。しかしながら、サブサブテマ2-1の研究の予備的解析によれば、理論的予想に反して CO_2 や N_2O の赤外吸収スペクトルから決定されるヘルマン・ワーリス因子が温度に依存する結果が得られた。具体的には180K、240K、296Kの各温度について誤差を超える差が現れた。これまでにサブサブテマ2-1で検討した CO_2 のフェルミ3重項($10^0 2$)_{I,II,III} や、 N_2O の($00^0 1$) や($10^0 1$)バンドから決定される A_2 因子は、はるかに大きい 10^{-5} のオーダーで、かつ温度に依存する結果となっている。そこで、本研究ではWatson⁴⁾ の取り扱いを再検討した。その結果、解析されたバンドでは振動回転相互作用が大きく、式[10]のように2次項までの近似では正しく表現されず、高次項まで取り入れた解析が要求されている可能性が明らかになった。近似式を[10]のように2次項までで打ち切った場合、各因子の値には高次項の影響が含まれる。図2に CO_2 の振動回転遷移強度の実測値とヘルマン・ワーリス解析の結果を例として示す。

Observed and Calculated Line Intensities

CO₂ (20011)-(00001) at 5100 cm⁻¹

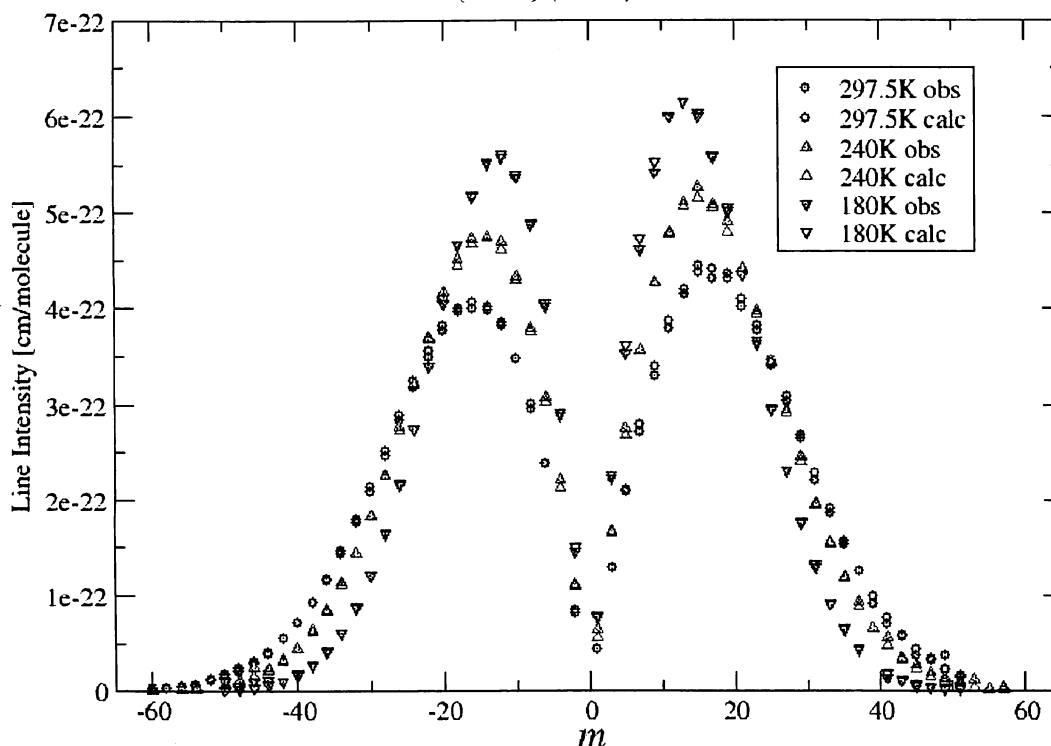


図2 CO₂のフェルミ3重項スペクトル：

(10⁰2)₁バンドの振動回転遷移の回転依存性とその温度変化

この図からわかるように、温度の高いスペクトルには高い J の情報がより多く含まれる。そのため、 A_2 に含まれる高次項の影響は温度が高いほど大きくなる。したがって、測定された遷移強度を式[10]を用いて解析すると、ヘルマン・ワーリス因子が見かけ上温度に依存する結果になる。高次項を含めた解析を試みたが、測定データの誤差のためこれまでのところ成功していない。より精度の良い測定が望まれる。

(2) 吸収線プロファイルの精密決定

吸収線プロファイルを、COの $J=5-4$ 遷移、塩化水素 (HCl) の $J=1-0$ 遷移、N₂O及びSO₂の複数の回転遷移についてサブミリ波領域で精密に測定し結果を検討した。大気による吸収形状変化を正確に予測できる吸収線パラメータを決定するため酸素と窒素を相互作用ガスとして実験した。酸素との衝突によって線幅の広がったN₂Oのスペクトルの例を図3に示す。

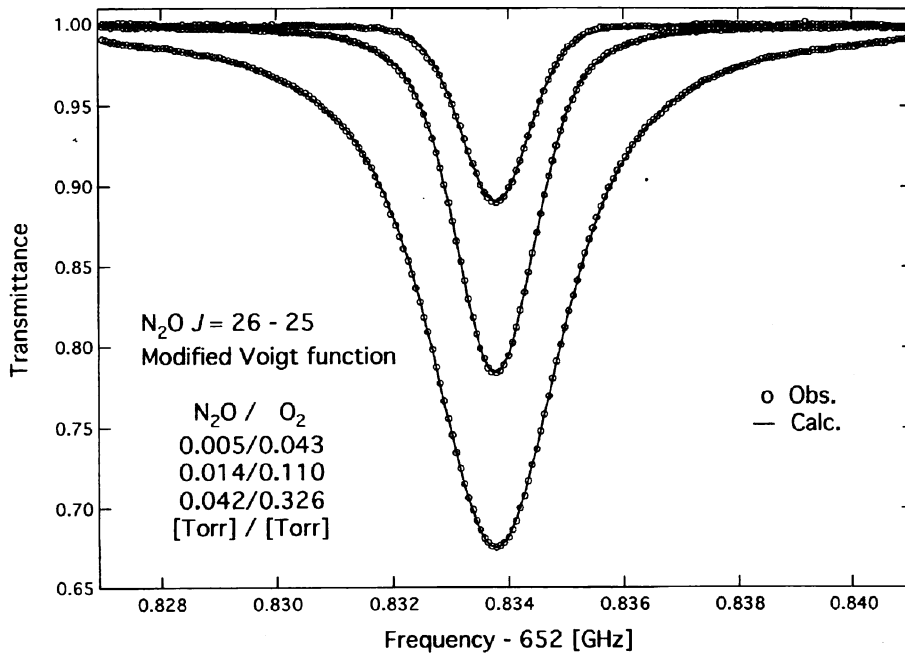


図 3 : 酸素ガスによって線幅が広げられたN₂Oのスペクトル例

セルを透過する光の強度は

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp[-\kappa(\nu) nL] \quad [11]$$

と表現される (Lambert-Beerの法則)。ここに I_0 は入射光の強度、 κ は吸収係数、 n は濃度、 L は光路長である。吸収係数 κ は光の周波数に依存し、式[1]の積分強度 S と吸収形状関数 f を用いて、

$$\kappa(\nu) = S f(\nu - \nu_c) \quad [12]$$

と表される。ここには ν_c 吸収線の中心周波数である。この形状関数として広く用いられているのはフォイクト (Voigt) 関数で、ガウス関数とローレンツ関数の畳み込みである。

$$V(x, \gamma) = \pi^{-\frac{3}{2}} \gamma \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-\tau^2)}{\gamma^2 + (x - \tau)^2} d\tau.$$

[13]

ここで無名数 x と y はガウス半幅(1/eHW)、 Γ_G 、を単位として計った周波数とローレンツ半値半幅 (HWHM)、 Γ_L 、である。即ち、

$$x = \frac{\nu - \nu_c}{\Gamma_G},$$

$$y = \frac{\Gamma_L}{\Gamma_G}.$$

測定結果は、ディッケの縮幅 (Dicke narrowing) 効果の影響を明確に示しており、従来広く採用されているフォイクト (Voigt) 関数では、吸収線の形状を正しく表現できないことがわかった。より精密な表現である、ギャラトリー (Galatry) 関数⁵⁾を用いる方式を導入し、解析した。本来ガウス幅は無秩序な分子の速度分布とドップラー効果に起因するもので、温度に依存する物理量であるが、圧力には依存しない。従って通常フォイクト関数を用いた解析ではガウス幅は、測定温度でのマックスウェル・ボルツマン分布から計算される理論的なドップラー幅に相当する値に固定する。ところが実測では、ディッケの縮幅効果によってガウス幅が圧力により減少するため、そのような解析では実測スペクトルを再現できない。本研究ではガウス幅も最小自乗法で決定することを試みた (修正フォイクト関数)。ガウス幅が圧力とともに減少する例を図4に示す。

ギャラトリー関数は上記の x 、 y に加えて、縮幅係数 z を導入して次のように表される。

$$G(x, y, z) = \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \int_0^{\infty} \exp[-ix\tau + g(y, z)] d\tau \quad [14]$$

ここで

$$g(y, z) = \left[-y\tau + \frac{1}{2z^2} (1 - z\tau - e^{-z\tau}) \right] \quad [15]$$

式 [14] は式 [13] に $z \rightarrow 0$ の極限で一致する事が数学的に証明されている⁵⁾。

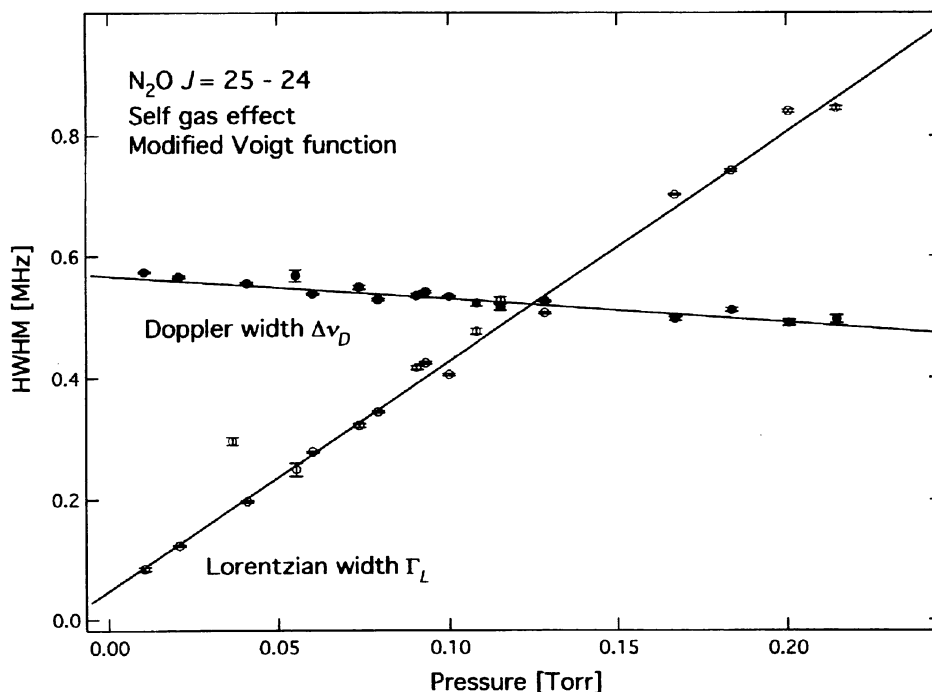


図4：圧力によってガウス幅が減少することが確認できた。

圧力幅係数が振動励起によって変化するかどうかを確認するため、得られたデータを、赤外線分光法で得られる振動回転遷移の圧力幅係数と比較検討した。その結果、測定誤差の範囲で圧力幅係数が振動励起によって変化しないことが確認された。COとN₂Oの研究結果は国際誌 (Journal of Molecular Spectroscopy) に受理され出版された [誌上発表②③]。

(3) 吸収線の圧力幅係数の回転量子数依存性

吸収線の圧力幅係数は、分子の衝突断面積に依存し、その回転量子数 (J または m) 依存性は解析的に簡単な式で記述できない。そのため従来は量子数に依存する圧力幅係数 y を多項式展開、

$$y(m) = a_0 + a_1|m| + a_2|m|^2 + \dots$$

をもちいて経験的に表現してきた。ここで m は回転状態を表示する擬似量子数で $J+1 \leftarrow J$ 遷移で $m = J+1$ 、 $J-1 \leftarrow J$ 遷移で $m = -J$ と定義される。この多項式は $m \rightarrow \infty$ の極限で正または負の無限大に発散する。このため、多項式展開によって圧力幅データを広い範囲の回転準位につい

て表現することが困難である。そこで本研究では、2つの n 次式の商で表現される有理関数近似⁶⁾ (n,n -Pade近似)

$$y(m) = (a_0 + a_1|m| + a_2|m|^2 + \dots + a_n|m|^n) / (1 + b_1|m| + b_2|m|^2 + \dots + b_n|m|^n)$$

を用いることを試みた。この式は、 $y(0) = a_0$ 、 $y(\infty) = a_n/b_n$ となり、 m の全領域で発散せず、広い J の範囲の圧力幅データを表現するのに適当である。これを窒素及び酸素と混合された N_2O の赤外吸収スペクトルの測定データ (サブサブテーマ2-1で得られたもの) に適用したところ図5に示すとおりのおりの良好な結果を得た。この新規の経験式の提案は、国際誌 (Journal of Molecular Spectroscopy) に受理され出版された [誌上発表①]。

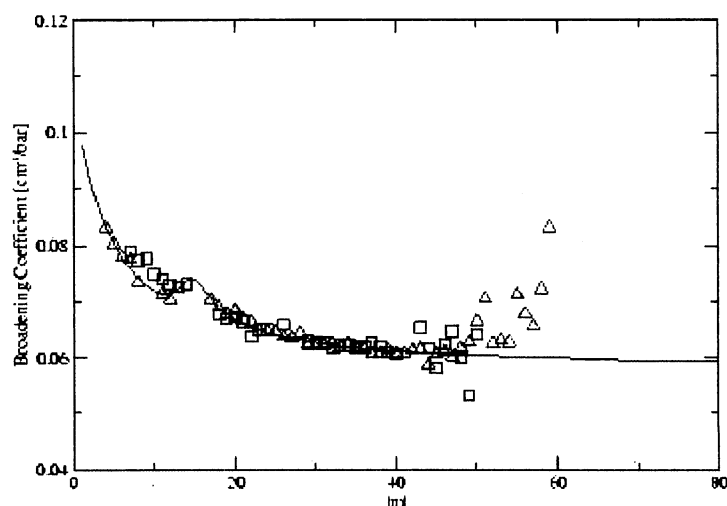


図5 : N_2O の圧力幅係数の量子数依存性。

5. 本研究により得られた成果

(1) 分配関数について

N_2O や CO_2 等直線形分子の吸収線強度決定に必要な分配関数の最適計算法に関して、Gamacheらの数値近似表現や従来的高温近似とは異なる近似計算法を提案し、結果の比較検討から、新規に我々が提案する、回転状態については数値的積算、振動状態については調和振動近似を用いるのが、現実的であつ精度が高いことを確認した。

(2) ヘルマン・ワーリス因子の見かけ上の温度依存性について

2次近似のヘルマン・ワーリス因子解析では、実験結果の解析から得られる因子が見かけ上温度に依存することを確認した。解析されたバンドでは振動回転相互作用が大きく、式 [10] のように2次項までの近似では正しく表現されず、高次項まで取り入れた解析が要求されている。近似式を [10] のように2次項までで打ち切った場合、因子の値には高次項の影響が含まれ

る。高次項を含めた解析を試みたが、測定データの誤差のためこれまでのところ成功していない。より精度の良い測定が望まれる。

(3) 吸収強度決定について

分配関数及びヘルマン・ワーリス因子解析から、赤外線領域の吸収強度を1%程度の精度で、実験的に決定しうることを確認した。この点についてはサブサブテーマ(2)①の報告を参照のこと。

(4) 吸収線プロファイルの精密解析について

N₂O、CO、HCl 及び SO₂ の純回転遷移を対象として吸収線プロファイルの精密測定・解析手法を開発、精度の確認を行った。吸収線プロファイルの精密解析の結果、実測スペクトルはディッケの縮幅 (Dicke narrowing) 効果の影響を明確に示しており、従来広く採用されているフォイクト (Voigt) 関数では、吸収線の形状を正しく表現できないことがわかった。本課題ではガウス幅も最小自乗法で決定する修正フォイクト関数、及びギャラトリー関数による解析を試みた。

(5) 半値半幅の吸収帯による変動について

N₂O、CO、HCl 及び SO₂ の振動基底状態での回転遷移の吸収線半値半幅をサブサブテーマ(2)①の高分解能 FTIR により得られたもの、あるいは文献値と比較することにより、半値半幅の吸収帯による変動は測定誤差程度の大きさであることを確認した。

(6) 圧力幅係数の回転量子数依存性の数式化について

吸収線の圧力幅係数の回転量子数依存性を、広い範囲の回転準位について、簡単な数式で与えることは、吸収線パラメータのデータベースを整理するうえで重要である。しかしこれは従来の単純な多項式展開では不可能であった。本課題では回転量子数依存性を表す新規の経験式を有理式展開によって試み、良好な結果を得た。

(7) 不安定分子種の吸収線パラメータについて

不安定分子種について同様に精密な計測を実行する手法を開発することを研究課題として掲げていたが、これまでのところ十分な成果をあげていない。観測される吸収強度は、式[11]で示されるように、分子の濃度とセル長と吸収係数の積である。不安定分子種の場合はセル中の観測対象分子種の濃度が不確定であるという重大な問題がある。濃度に関する情報を引き出すために、共存する分子種等を質量分析法でモニターしつつ、分光計測を行う装置の開発に着手した。

(8) 精密な分光情報を蓄積について

引き続き精密な分光情報を蓄積していくことは、分光法による環境計測手法を確立するための基盤を構築する上で極めて重要である。

6. 引用文献

- 1) R.G. Gamache, R.L. Hawkins, and L.S. Rothman, *J. Mol. Spectrosc.* **142**, 205 (1990).
- 2) G. Herzberg, "Molecular Spectra and Molecular Structure", Vol. II, D. Van Nostrand, 1945.
- 3) J.K.G. Watson, *J. Mol. Spectrosc.* **153**, 211 (1992).
- 4) J.K.G. Watson, *J. Mol. Spectrosc.* **132**, 483 (1988).
- 5) P.L. Varghese and R.K. Hanson, *Appl. Opt.* **23**, 2376 (1984).
- 6) G.A. Baker, Jr. "Essentials of Padé Approximants", Academic Press, 1975.

6. 国際共同研究等の状況

本課題遂行のために使用した産総研テラヘルツ分光器は、1994年から産総研がドイツ連邦共和国ケルン大学第一物理学教室 (Prof. G. Winnewisser) のグループの協力・指導を得て、5年の歳月をかけて完成したものである。本課題遂行にあたり、この分光器を用いて吸収線プロファイルの精密測定を行い、かつ得られたスペクトルを解析するため、引き続きこのグループの協力・支援を得た。特に、修正フォイクト関数およびギャラトリー関数を用いて吸収プロファイルを解析するプログラム開発に関して、この研究費によるドイツへの出張を実施した。今共同研究がなければ、ここに報告した成果は達成困難であった。以下に協力者の名前と協力分野を記して感謝に代える。

- (1) Dr. G. Winnewisser ケルン大学第一物理学教室 主任教授 総括協力
- (2) Dr. T.F. Giesen ケルン大学第一物理学教室 教授 吸収線プロファイル解析手法
- (3) Dr. F. Lewen ケルン大学第一物理学教室 助教授 テラヘルツ分光器の装置開発
- (4) Dr. F. Schmulling ケルン大学第一物理学教室 助手 分光器の計算機制御技術
修正フォイクト関数およびギャラトリー関数の計算機プログラム
- (5) Dr. M. Fabian ケルン大学第一物理学教室 助手 分光器の計算機制御技術 修正
フォイクト関数の計算機プログラム
- (6) Dr. T. Drascher ケルン大学第一物理学教室 助手 修正フォイクト関数およびギ
ャラトリー関数

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表 (学術誌・書籍)

<学術誌 (査読あり)>

- ① K.M.T. Yamada, T. Watanabe, and M. Fukabori: *J. Mol. Spectrosc.*, **216**, pp.170-171(2002).
"J-dependence of the N₂- and O₂-Pressure Broadening Coefficients Observed for NNO $\nu_1+\nu_3$ Band as Expressed by Rational Functions"
- ② K.M.T. Yamada and H. Abe: *J. Mol. Spectrosc.*, **217**, pp.87-92(2003).
"The line broadening and shift effects on the CO J=5-4 transition at 576 GHz induced by collisions"

with rare gases”

- ③ I. Morino and K.M.T. Yamada : J. Mol. Spectrosc., 219, pp. 282-289(2004).
“Absorption line profiles of N₂O Measured for J=25-24, 26-25 Rotational Transitions”

<学術誌（査読なし）>

該当なし

<書籍>

該当なし

<報告書類等>

- ① 境省地球環境局研究調査室編 地球環境研究総合推進費 平成13年度研究成果 – 中間
成果報告集- (I), 18-21 (2002)
「A(2)②吸収線パラメータの実験的決定とその信頼性評価の研究(山田耕一)」
- ② 境省地球環境局研究調査室編 地球環境研究総合推進費 平成13年度研究成果 – 中間
成果報告集- (I), 62-69 (2002)
「A(2)②吸収線パラメータの実験的決定とその信頼性評価の研究(山田耕一)」

(2) 口頭発表

- ① 山田耕一：第10回ILASデータ質評価・検証解析検討会およびILAS-IIデータ利用研究打ち
合わせ会議、東京、2001.8
「吸収線パラメータの実験的決定とその信頼性評価の研究」
- ② 山田耕一、阿部恒：分子構造総合討論会2001、札幌、2001.9
「希ガスとの衝突によって拡幅したCOのサブミリ波吸収線プロファイル」
- ③ K.M.T. Yamada: Molecular Physical Colloquium at University of Ulm (招待講演), Ulm,
Germany, 2001.1
“Determination of Spectral Line intensities”
- ④ 山田耕一：第3回ILAS-IIサイエンスチームミーティングおよび平成13年度推進費A-10課題
成果発表会、東京、2002.2
「吸収線パラメータの実験的決定とその信頼性評価の研究」
- ⑤ 森野 勇、山田耕一：日本化学会第81春季年会、東京、2002.3
「一酸化二窒素のサブミリ波吸収線プロファイルの精密決定：圧力効果の決定」、
- ⑥ 森野 勇、山田耕一：第2回分子分光研究会、京都、2002.5
「N₂Oのサブミリ波吸収線プロファイルの精密解析」、
- ⑦ 森野 勇、山田耕一：第2回分子分光研究会、京都、2002.5
「N₂Oのサブミリ波吸収線プロファイルの精密解析」
- ⑧ I. Morino, K.M.T. Yamada: The 17th International Conference on High Resolution Molecular
Spectroscopy, Praha, 2002.9

“Precise Analysis of Absorption Profiles in the Submillimeter-Wave Region for N₂O”

- ⑨ 森野 勇、山田耕一：分子構造総合討論会2002，神戸，2002.10
「塩化水素のサブミリ波吸収プロファイルの精密測定」
- ⑩ 山田耕一：平成14年度推進費 A10課題中間報告会、東京、2002.10
「吸収線パラメータの実験的決定とその信頼性評価の研究」
- ⑪ 森野 勇、山田 耕一：第13回大気化学シンポジウム，豊川市，2003.1
「塩化水素のサブミリ波吸収プロファイルの圧力効果測定」
- ⑫ 山田耕一：平成14年度推進費 A10課題研究成果報告会、つくば，2003.3
「吸収線パラメータの実験的決定とその信頼性評価の研究」
- ⑬ I. Morino, K.M.T. Yamada: ASAAQ2003, Tsukuba, 2003.3
“Precise measurements on Absorption Profiles of Hydrogen Chloride in the Submillimeter-wave Region”
- ⑭ 森野 勇、山田耕一：第3回分子分光研究会、東京、2003.5
「HClの吸収プロファイル」
- ⑮ I. Morino, K.M.T. Yamada: 18th Colloquium on High Resolution Molecular Spectroscopy, Dijon (France), 2004.9
“Absorption Profiles of HCl for the J=1-0 Transition: Foreign Gas Effects Measured for N₂, O₂, and Ar”
- ⑯ K.M.T. Yamada : The 28th International Conference on Infrared and Millimeter Waves, (招待講演) Otsu (Japan), 2003.9
“High Resolution Molecular Spectroscopy at THz Frequencies ”
- ⑰ 山田耕一：平成14年度推進費 A10課題中間報告会、東京、2003.12
「吸収線パラメータの実験的決定とその信頼性評価の研究」
- ⑱ 森野 勇、山田耕一：第14回大気化学シンポジウム，豊川，2004.1
「二酸化硫黄のサブミリ波吸収プロファイルの圧力効果測定」
- ⑲ I. Morino, K.M.T. Yamada : International Workshop on Critical Evaluation of mm/submm-wave Spectroscopic Data for Atmospheric Observations, Mito (Japan), 2004.1
“Submillimeter-wave line profile measurements at AIST ”
- ⑳ 山田耕一：平成15年度推進費 A10課題研究成果報告会、つくば，2003.3
「吸収線パラメータの実験的決定とその信頼性評価の研究」

(3) 出願特許

該当なし

(4) 受賞等

該当なし

(5) 一般への公表・報道等

個人ホームページ<http://staff.aist.go.jp/kmt.yamada/yamada.html>に一部記載。

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

本研究で開発した技術を発展させ、環境計測技術の標準化を目指す研究を産総研で実施中。