

750kW アーク加熱空気流における NO 分子バンド発光の分析*

渡辺 泰夫*¹, 石田 清道*², 白井 紘行*³

Spectroscopic Analysis of NO Band Emissions from Arc-heated Air Flows in a 750kW Arc-Heated Wind Tunnel

Yasuo WATANABE *¹, Kiyomichi ISHIDA *², and Hiroyuki SHIRAI *³

ABSTRACT

Spectroscopic measurements of arc-heated high enthalpy air free streams were carried out in a 750 kW arc-heated wind tunnel. A 50cm Acton SpectraPro 500i spectrograph with Princeton Instrument 576G-1 ICCD detector was used to obtain emission spectra in the wavelength range from 190nm to 900nm. Major spectral features identified were the vibrational bands of NO γ, δ and ϵ band systems in the UV region. All the vibrational bands observed show only an upper vibrational level of $v'=0$. The NO bands were analyzed and synthetic spectra built based on the detailed energy level structure of NO and spectral line profile. The extent of agreement between synthetic and high resolution experimental spectra was examined to determine rotational temperatures, using a spectral profile matching method. Vibrational temperatures could not be determined by experiment due to the lack of vibrational bands with $v'>0$. Examining problems such as the lack of β band system and $v'>0$ bands of other band systems and, unexpectedly weak intensities of the ϵ band system would be of use in clarifying details of nonequilibrium energy transfer mechanisms in the flow.

Keywords : Arc-jet wind tunnel, emission spectroscopy, NO bands

概 要

750kWアーク加熱風洞の気流状態量計測のため、ノズル膨張後の低密度自由流の自然発光を分光器により観測した。190-900nmの波長範囲でスペクトルを調べ、200-300nmの紫外波長領域で強力なNO分子の γ, δ および ϵ バンド系のスペクトルを確認した。他の波長域には特徴的なスペクトルは存在しなかった。自由流は温度が低いため、NOの各バンドは相互に孤立しており、回転温度の決定には好都合であった。精密なエネルギー準位構造とスペクトルプロファイルに基づいて各バンドの理論合成シミュレーションスペクトルを計算し、高波長分解実験スペクトルとの一致性を比較検証し、回転温度を決定した。NO分子のスペクトルには、 $v'>0$ のバンドは観測されず、振動温度の直接決定は出来なかった。 β バンド系および他のバンド系の $v'>0$ バンドが観測されないこと、 ϵ バンド系の強度が非常に弱いこと等の非平衡放射現象の機構の解明が今後の検討課題である。

* 平成12年9月11日受付 (received 11 September 2000)

*¹ (元) 流体科学総合研究グループ

*² 流体科学総合研究グループ

*³ 群馬大学工学部機械システム工学科, (元) 客員研究官

記号

$A^2\Sigma$: NO γ バンド系の上位電子準位
B_v	: 振動準位 v における回転定数 (cm^{-1})
$C^2\Pi$: NO δ バンド系の上位電子準位
$D^2\Pi$: NO ϵ バンド系の上位電子準位
D_v	: 振動準位 v における回転定数 (cm^{-1})
$F(J)$: 回転エネルギー (cm^{-1})
G_v	: 振動エネルギー (cm^{-1})
J	: 回転量子数
K	: 電子スピンを除いた回転量子数
P	: 回転枝 (ブランチ) ($\Delta J = -1$)
Q	: 回転枝 (ブランチ) ($\Delta J = 0$)
$q_{v'v''}$: フランクコンドン因子
R	: 回転枝 (ブランチ) ($\Delta J = +1$)
R_e	: 電子遷移モーメント (esu cm)
S	: 回転強度因子 (Horn-London 因子)
T_r	: 回転温度 (K)
T_v	: 振動温度 (K)
T_e	: 電子励起温度 (K)
v	: 振動量子数
Λ	: 電子の合成軌道角運動量 (無次元)
ν	: スペクトル線の波数 (cm^{-1})
ω_e	: 振動定数 (cm^{-1})
$\omega_e x_e$: 振動定数 (cm^{-1})
$\omega_e y_e$: 振動定数 (cm^{-1})
$\omega_e z_e$: 振動定数 (cm^{-1})

1. まえがき

アーク加熱式風洞は、大電力アーク放電により高いエンタルピの超音速気流を長時間持続して得られることを特徴とし、再突入時の対流加熱環境模擬装置として NASA のスペースシャトルのような宇宙往還機の熱防衛系材料の開発、耐熱性評価に重要な役割を果たしてきたことはよく知られている。一方、大電力アーク放電で加熱され、高温により解離、電離したアーク加熱器内の気体は、超音速ノズルを通じた急速な膨張加速過程により連続排気された測定部に低密度超音速流を形成するが、気体の内部自由度や化学反応の緩和過程等による種々の熱化学的非平衡過程を伴うため、流れ場や模型前方衝撃層の熱力学的状態の解析には、高度の実験的検証と複雑な物理化学的考察が必要となる¹⁾。また、防熱材料表面の低触媒化による気体原子の再結合反応の抑制は、‘触媒効果 (catalytic effect)’ として往還機の空力加熱の軽減に有効と期待されているが、反応熱の定量評価に必要な気体成分原子濃度、表面反応現象の定量的知識も現状では極めて不足で、実機的设计に反映するには今後多

くの実験的、解析的作業を必要としている。現在開発が進められている HOPE-X や将来型の RLV (Reusable Launch Vehicle) 等では、機体重量の軽減はシステム成立のための至上の課題である。従って、防熱系材料にも極限性能の評価が要求され、アーク加熱式風洞における防熱系材料評価試験精度の向上、即ち試験気流の診断技術の向上による試験気流条件設定の精密化が従来に増して要求されている。NASA, ESA 等各国の主要アーク加熱設備においても、この目的のために分光計測、LIF (Laser Induced Fluorescence) 等各種の進歩した計測技術の適用による集中的な気流診断、材料評価技術の向上が進められつつある。さらに触媒効果・化学反応評価等を主目的とした、電極物質により汚染されない清浄プラズマ気流環境を実現するための大入力プラズマトロンの開発、実用化が促進されつつある状況である^{2, 3)}。

750kW アーク加熱風洞においても、同様の目標のもとに気流診断技術向上のための計測装置、計測器の整備を鋭意進めてきた。これらを用いてアーク加熱器の特性評価、ノズルおよび自由流、模型衝撃層計測等を行うことにより、アーク加熱気流を全体的に把握することを目標としている。アーク加熱器については、コンストリクタ部カスタムセグメントと加熱器上流端部よりの観測装置を製作し、内部壁面熱流束とアーク部スペクトル分布観測と解析によるノズル入口での上流激点状態計測を行う。ノズル及び自由流については、カロリーメータ、ピトー管等の各種プローブによる熱流束、圧力分布等の状態量計測と質量分析、気流発光解析による気体成分、温度の計測を行う。衝撃層計測は、主として発光分光計測により気体成分、温度の分布を計測し、衝撃層での熱空力学的状态や緩和過程の解析と材料表面での反応解析等を進める。実験装置の運用状況、実験手順の前後等により必ずしも最初に意図した上記項目すべてを完了出来てはいないが、現在までに非平衡高エンタルピ流についてかなりの知識、データおよび実験計測解析技術の蓄積が得られている。これらの結果は、CFD (Computational Fluid Dynamics) 計算の基礎データとして材料評価、触媒反応等への適用のみならず飛行環境の熱空力モデルの検証にも有用と考えている。

アーク加熱気流に付随する強い自然発光を利用した発光分光分析は、非接触で、測定対象気流に擾乱を与えることなく多くの情報が得られる極めて有効な気流計測手段と考えられ、気流診断の主要計測技術として自由流、衝撃層計測等への多くの適用例がある。NASA 等のアークジェット気流においても、回転、振動、励起温度の計測、非平衡性の評価、エンタルピ決定等の問題で有用な成果が得られている⁴⁾。

本報告では、NAL/NASDA 共同研究で運用されている

750kWアーク加熱風洞において、測定部自由気流の発光の分光観測を行った結果について述べる。分光器により発光スペクトルデータを収集、分析し、主要な発光は紫外波長域にあり、主たる発光種は紫外波長域に多くのバンド系列を持つNO分子であることがわかった。観測される各バンド系の波長同定、エネルギー準位構造の解析を行い、これら各バンドの詳細数値シミュレーションと高波長分解スペクトルとの詳細な比較を行った。各バンドのプロファイルフィッティングによる温度決定への適用性の検討、回転温度の決定等を行った。

2. 実験装置

2.1 アーク加熱風洞

本風洞では、Fig. 1 に概略構造を示すマルチセグメント型縮流アーク加熱器により作動気体を放電加熱し高エ

ンタルピ気流を得る。加熱器は、後部シェル、陽極、縮流部、陰極よりなり、相互に絶縁された縮流部各セグメント間より供給される作動気体に両電極間の放電によりエネルギーを供給する。セグメントは、厚さ約10mmで内径25mmのドーナツ状円盤で、13枚で1パックを構成し最大3パック（最大入力時）まで接続可能である。作動気体は空気を使用し（窒素等も可能）、試験条件設定は、コンストラクタ部長さ（パック数）、電流と空気流量の制御により行う。加熱器下流には熱損失軽減のためプレナム室をおかず、加熱された気体は、スロート径25mm、出口径115mm、半頂角15度のコニカルノズルで加速膨張して、連続排気された測定部に低密度超音速高エンタルピ気流を得る。測定部は、直径φ1600mm、奥行き1390mmの円筒形で、供試体回転投入装置、ピトー管等模型移動装置、観測窓等を備えている。測定室配置断面図を

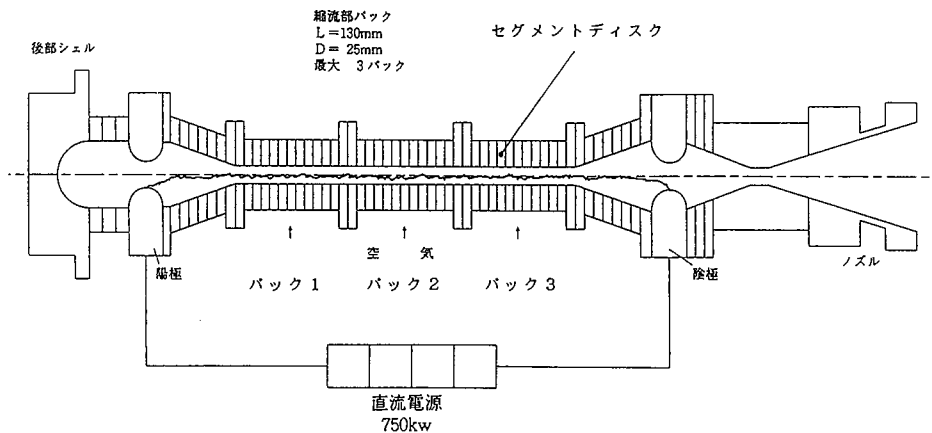


Fig.1 Configuration of the arc-heater

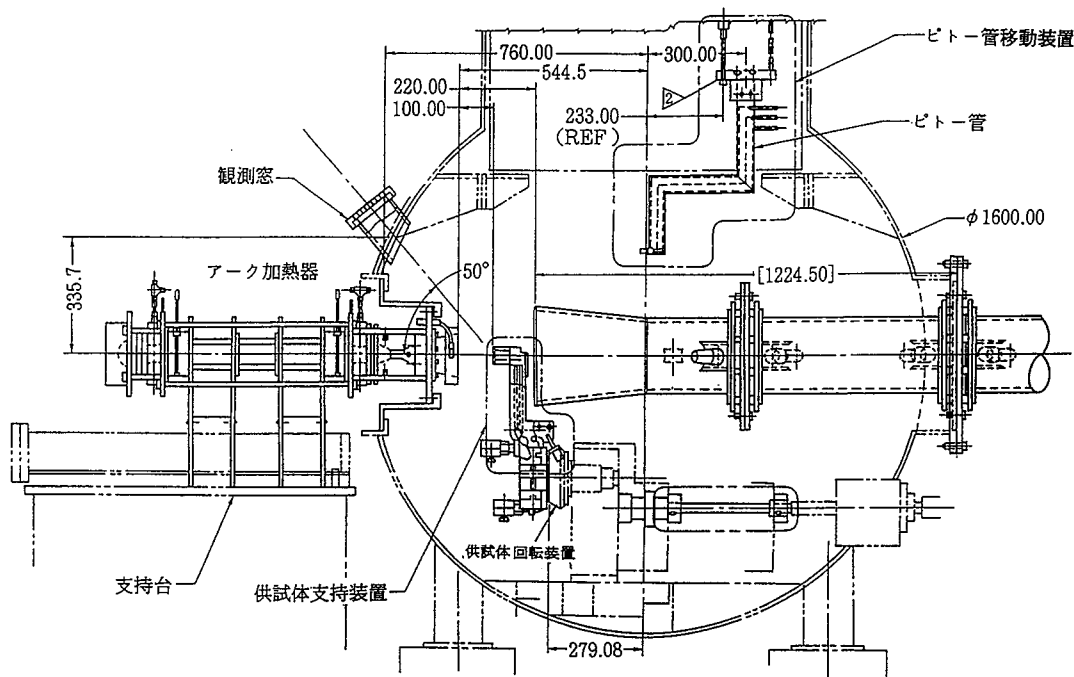


Fig.2 Structure of the 750kW arc-heated wind tunnel

Fig. 2 に示す。良好な気流の形成のために必要なディフューザ配置のため、測定気流はノズル出口とディフューザ入り口間の220mmに制限される。本風洞での標準試験位置はノズル出口より100mmの位置で、材料模型、カロリメータ等のプローブ類もこの位置に標準設定されている。試験模型、プローブ等は、気流条件確立後、回転腕装置により気流中心に急速に投入され加熱試験が実施される。試験中の測定室圧力は約1torr (133Pa) に保たれている。

2.2 分光計測装置

実験計測系の全体配置概念図を Fig. 3 に示す。本図の分光光学系配置は、材料模型の加熱試験時の衝撃層計測状況を示しており、赤外線温度計による材料表面温度と衝撃層分光の同時計測が可能である。標準供試体（平頭

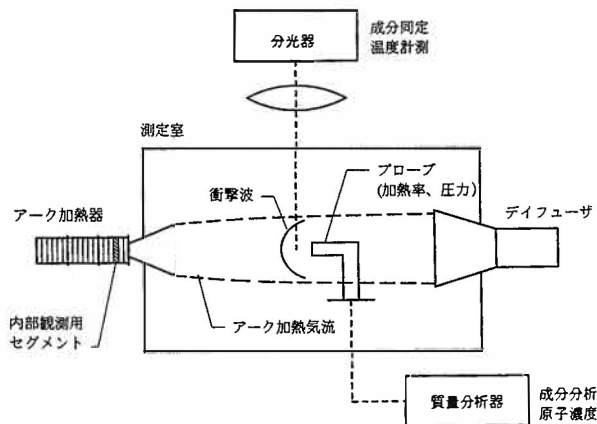


Fig.3 Schematics of the experimental setup

円柱, 直径 ϕ 40mm) を投入して運転中の気流状況写真を Fig. 4 に示す。気流に付随する強い発光と供試体周りの衝撃波の形成および衝撃波背後の発光強度の顕著な増加が特徴的に観測される。自由流の計測は、標準試験位置、またはノズル出口より下流60mmの位置に光学系を移動することで実施した。この上流位置での自由流スペクトル計測は、材料加熱評価実験と並行しての自由流計測が可能であり、風洞の運用とデータ取得の効率化に有効である。本報告のデータは大部分この位置で収録した。実験では、これらの位置での気流中心発光をレンズで分光器スリットに集光計測した。光学系の倍率は約0.3である。

分光器は、焦点距離50cmのActon SpectraPro-500iを使用した。本分光器では、最大3個までの回折格子をターゲットに同時装着して互換的に使用することが可能である。本実験では、主として300grooves/mm (ブレイズ波長300nm) と1200grooves/mm (ホログラフィック) の格子を使用した。スペクトルデータ収集は、プリンストン社製ICCD検出器 (PI ICCD-576G-1) を用いた。ピクセルは、576 (波長軸) \times 384 の二次元配置で、寸法は $22 \times 22 \mu\text{m}$ である。同時計測可能波長範囲は、300grooves/mmの格子使用時で80nm, 1200grooves/mm格子で20nmである。回折格子の切替え、波長領域設定、露出時間設定、データの収録等の操作は、コンピュータ (Epson VT513R) に搭載したPI社計測ソフトWinSpec (Ver.1.6) で行った。

3. スペクトルの特徴

自由流スペクトルの発光種の同定、確認および温度測

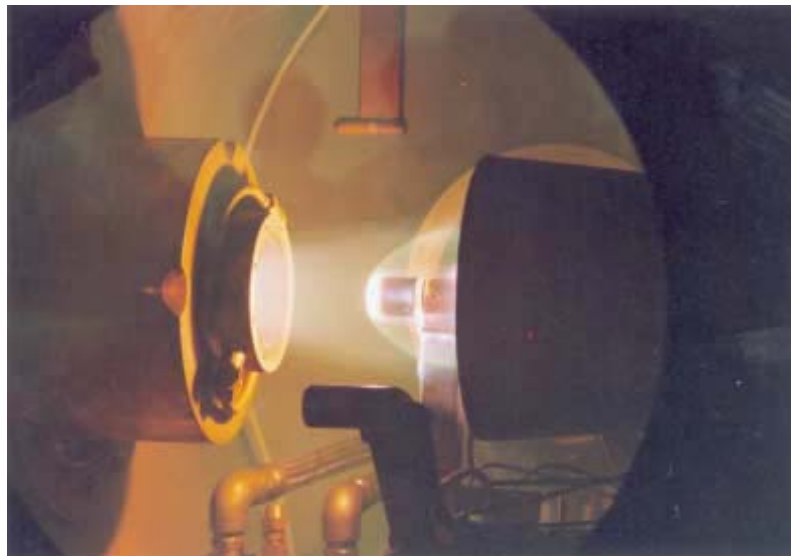


Fig.4 Appearance of a blunt model test

定等に適用可能な発光種の搜索のために、180-900nmの波長範囲で分光器を走査して多数のスペクトルの収集を行った。得られたスペクトルの最大の特徴は、紫外波長域 (300nm以下) で一連の非常に強い分子のバンドスペクトルが観測されたことである。一方、他の波長域では、電極物質の Cu の強い共鳴線 (324.7, 327.3nm) 以外には、有意な特徴と強度のある信号波形は得られなかった。Fig. 5 に、この紫外スペクトルを示す (300grooves/mm の格子使用)。波長同定分析の結果^{5, 6)}、図中に示すように、これらのバンドは、NO 分子のバンド系の振動遷移バンドで、 γ , δ および ϵ の各バンド系に属するものと確認された。 γ , δ 両バンド系は発光強度が強く、 ϵ バ

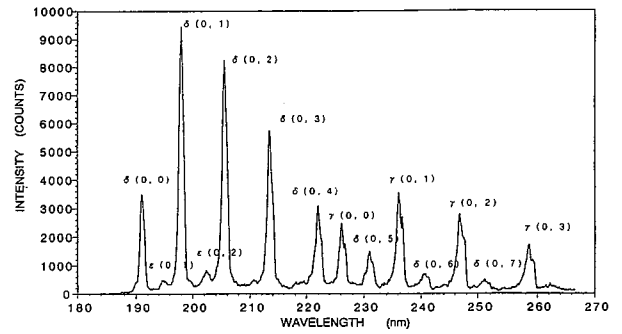


Fig.5 NO spectrum obtained in a free stream at 60mm from the nozzle exit

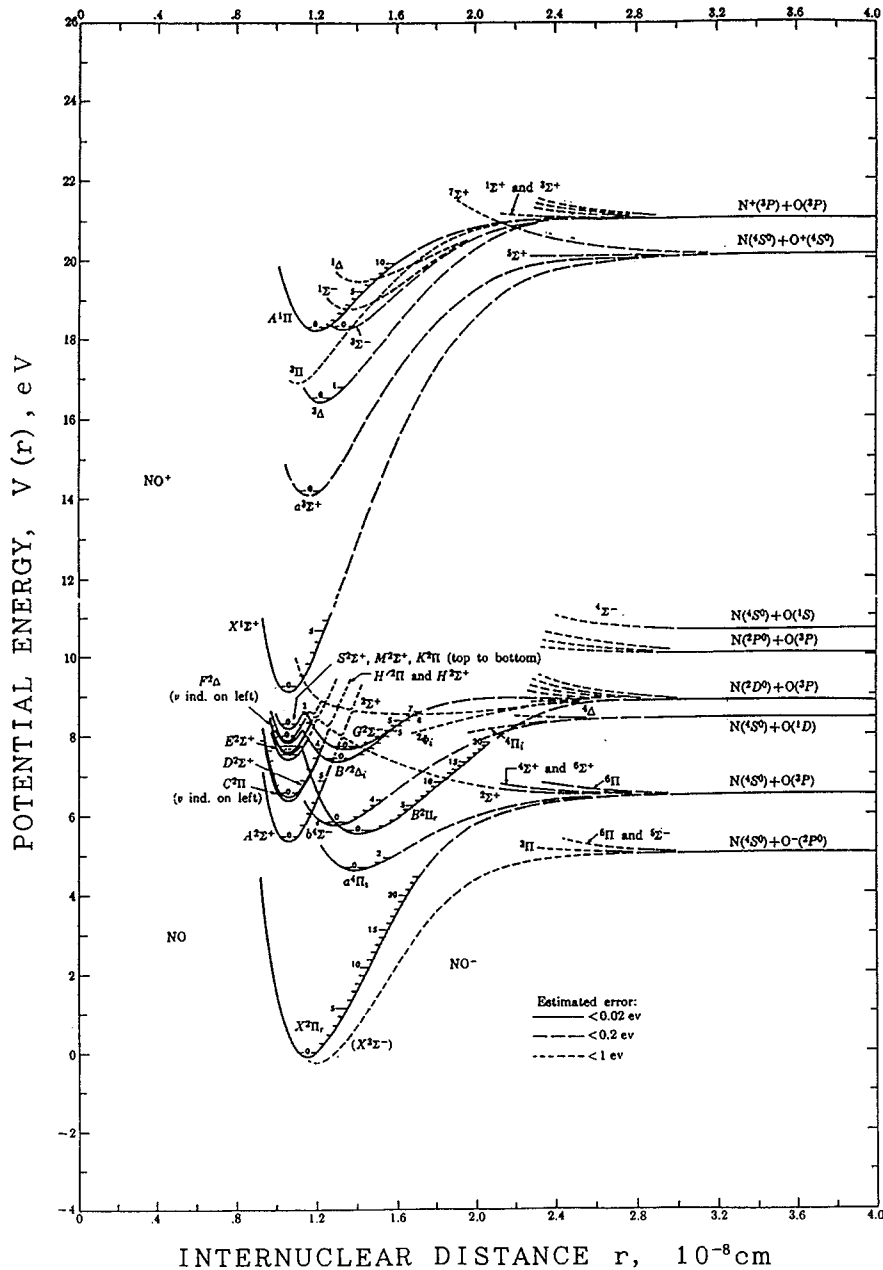


Fig.6 Potential energy curves of the NO molecule

Table 1. Spectral characteristics of NO emission

NO分子の主要なバンド系	遷移	備考
β	$B^2\Pi \rightarrow X^2\Pi$	観測されず
γ	$A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$	$v'=0$ よりのバンドのみ
δ	$C^2\Pi \rightarrow X^2\Pi$	"
ε	$D^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$	"

バンド系は非常に弱い。NO分子の形成は、空気成分の窒素、酸素分子がアーク放電での高温加熱により解離して大量の原子を生成し、ノズルを介して高速低密度に膨張する過程で窒素および酸素原子の再結合が進むことに由来する。縦軸の強度はICCDの直接出力カウント数を示し、今回の実験では検出器の波長応答の校正は行っていない。従って、このデータのみでは各バンドの強度比の直接比較は出来ない。上記各バンド系は、それぞれNOの電子励起準位A, C, D状態より基底電子状態Xへの遷移に対応している。確認された各バンドはすべて上位振動準位 $v'=0$ からの振動遷移に対応するもののみで、 v' が1以上のものは確認出来なかった。また、同一波長領域に存在する窒素のNO分子の β バンド系(B-X遷移)も確認が出来なかった。各バンド系の遷移関係をTable 1に、NO分子のポテンシャル曲線をFig. 6に示す。 δ , ε 各バンドのC, D両上位準位の励起エネルギーは殆ど同じにも拘わらず、これらのバンド強度が著しく異なる点も特徴的である。Fig. 7に、後述の手順により計算した実験と理論のスペクトルの200nm近傍での比較例を示す。観測された ε バンド強度が、理論予測に比して著しく弱くことがわかる。これらのNO分子スペクトルに関する諸特徴は、NASA Ames研究所20MWアーク設備で観測された自由流スペクトルの特徴と酷似している^{7, 8)}。これ

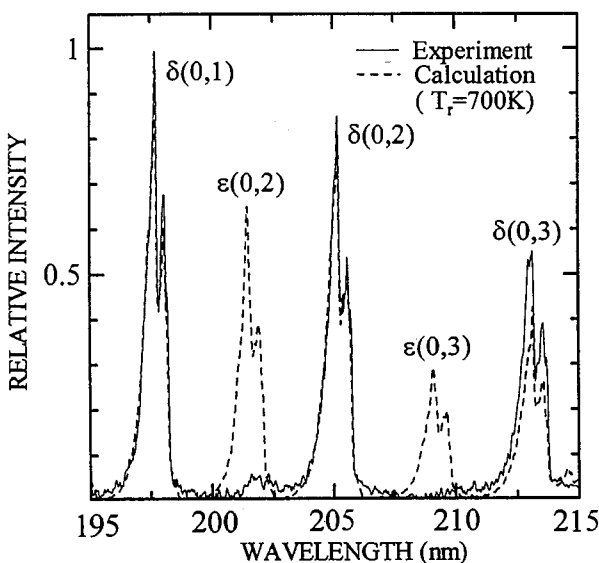


Fig.7 Comparison of experimental and simulated spectra

は、電力規模は大きく異なるがアーク加熱器の形式が類似なため、気体(空気)の放電励起のモードが類似なためと考えられる。NOの β バンド系が欠落している原因については、選択励起の可能性等が示唆されているが、各上位準位の構造、自由原子の状態、再結合経路、緩和過程等の詳細な検討がこの非平衡分布の説明に必要で、今後の検討課題として、上位準位のpopulationの緩和過程等の考察を進めている。

4. NO分子スペクトルの構造解析

自由流のスペクトルの分析より、200-900nmの波長範囲で顕著な発光源は紫外域にあるNO分子のバンドスペクトルであることがわかった。Fig. 5の観察より、NO分子の各バンドは低密度膨張気流中にあるため、温度が低く回転構造があまり発達していないことがわかる。従って、各バンドは相互に孤立した状態にあり個々のバンドを分離して計測出来るという非常に大きい利点がある。これらのNOバンドにより気流温度(正確には、NOバンドの回転温度 T_r 、振動温度 T_v 、励起温度 T_{ex} 等を指す)を決定するためにNO分子スペクトルの構造を解析し、理論スペクトルの数値シミュレーションを行った。以下にその詳細を述べる。

上記NOバンドの理論スペクトルの数値シミュレーションには、 β バンド、 δ バンド、 γ バンド、 ε バンドを考慮に入れ、できるだけ精密に計算した。 β' と γ' バンドは放射強度が弱いので無視した。Fig. 6に示すように、上部準位は $^2\Pi$ または $^2\Sigma$ 状態、下部準位は、すべての遷移に対して基底状態($X^2\Pi$)である。

分子の持つ内部エネルギー E_i は分子の回転量子数を J 、振動量子数を v 、電子の励起状態を I とすると、次式となる。

$$E_i = T_I + G_v + F_J \quad (1)$$

ここで、 T_I は分子の持つ電子的励起エネルギー、 G_v は振動エネルギー、 F_J は回転エネルギーである。 T_I は一般にデータとして与えられる(例えば、文献A13)。 G_v は次式で与えられる、

$$G_v = \omega_e(v+0.5) - \omega_e x_e(v+0.5)^2 + \omega_e y_e(v+0.5)^3 - \omega_e z_e(v+0.5)^4 \quad (2)$$

ω_e , $\omega_e x_e$, $\omega_e y_e$, $\omega_e z_e$ は振動定数、 v は振動量子数である。NO分子の各電子的状態は $^2\Pi$ または $^2\Sigma$ であり、いずれも電子スピンの影響で二重項(F_1 と F_2 項)を形成する。 $^2\Pi$ 準位に対する回転エネルギーは、 Λ 型二重分離を無視すると次式で与えられる、

$$F_1(J) = B_v \left[\left(J + \frac{1}{2} \right)^2 - A^2 - \frac{1}{2} \sqrt{4 \left(J + \frac{1}{2} \right)^2 + Y(Y-4)A^2} \right] - D_v J^4 \quad (3)$$

$$F_2(J) = B_v \left[\left(J + \frac{1}{2} \right)^2 - A^2 + \frac{1}{2} \sqrt{4 \left(J + \frac{1}{2} \right)^2 + Y(Y-4)A^2} \right] - D_v (J+1)^4 \quad (4)$$

ここで、 B_v 、 D_v は回転定数、 A は電子の軌道角運動量に関する量子数、 $Y=A_v/B_v$ はカップリング定数で、 A_v は結合の強さを表すパラメータである。NO分子の電子的励起状態に対しては次式で与えられる、

$$\text{X 状態 } A_v = 123.26 - 0.1906(v+0.5) - 0.0108(v+0.5)^2 \quad (\text{cm}^{-3})$$

$$\text{B 状態 } A_v = 28.5 + 1.57(v+0.5) \quad (\text{cm}^{-3})$$

$$\text{C 状態 } A_v = 7.6 \quad (\text{cm}^{-3})$$

X (基底) 状態に対する A_v 値は特に大きく分子のバンド形状に大きい影響を与える。 ${}^2\Sigma$ 状態の F_1 と F_2 項は、

$$F_1(K) = B_v K(K+1) - D_v K^2(K+1)^2 + 0.5\gamma K \quad (5)$$

$$F_2(K) = B_v K(K+1) - D_v K^2(K+1)^2 - 0.5\gamma(K+1) \quad (6)$$

で与えられる。ここで J は回転量子数、 K は電子スピンを除いた回転量子数、 γ はスピン結合定数で、 ${}^2\Sigma$ 状態に対しては一般に大変小さい。遷移に関与する電子的準

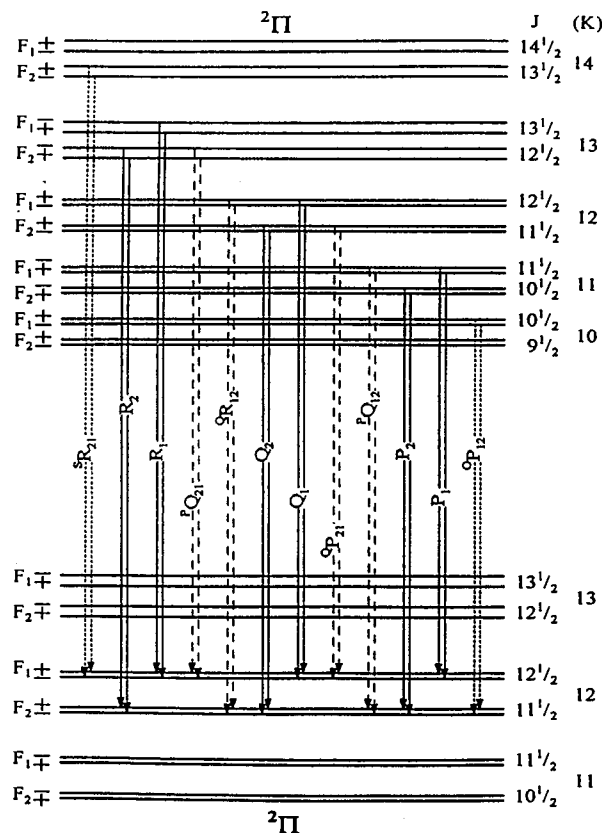


Fig.8 Detailed energy level configurations for the δ and β band systems

位の二重項のために、全てのバンドは6個の主ブランチ (R_1 , Q_1 , P_1 , R_2 , Q_2 , P_2) と6個のサテライトブランチ (${}^oR_{12}$, ${}^pQ_{12}$, ${}^oP_{12}$, ${}^sR_{21}$, ${}^rQ_{21}$, ${}^oP_{21}$)、合計12個のブランチから構成される^{A5)}。 β と δ バンドに対する遷移の概念図を Fig. 8 に示す。図中-と+は Λ 型二重分離を誇張して示したものである。このように、分子の状態に対するエネルギー値が与えられると、任意のバンドに属するすべての回転線の波数 ν ($=\Delta E_i$) を計算することができる。

これより、各回転線強度を計算して合成シミュレーションスペクトルを作成することになるが、この手順については Appendix に述べることにする。

5. スペクトルの分析と結果

前節の解析で示したように、NO分子の各バンド系の構造はかなり複雑であるが、Fig. 5では波長分解能が低いので比較的単純な形状として観察される。この波形より各バンドの半値幅を計測すれば、回転温度が測定出来る⁷⁾。即ち、あらかじめバンドの理論プロファイルを温度の関数として計算してその半値幅と温度の関係を求めておき、得られた半値幅との比較により回転温度を決定する。本実験計測条件での温度と半値幅の計算結果を Fig. 9 に示す。この方法は簡便に定量データが得られるが、図よりわかるように半値幅の温度依存性が鈍いので、定量的な温度決定には精度不足で不適切と判断した。

波長分解性の高いスペクトルが得られれば、理論スペクトルと実験スペクトルの詳細な比較が可能となり回転温度決定精度が向上する。このプロファイルマッチング

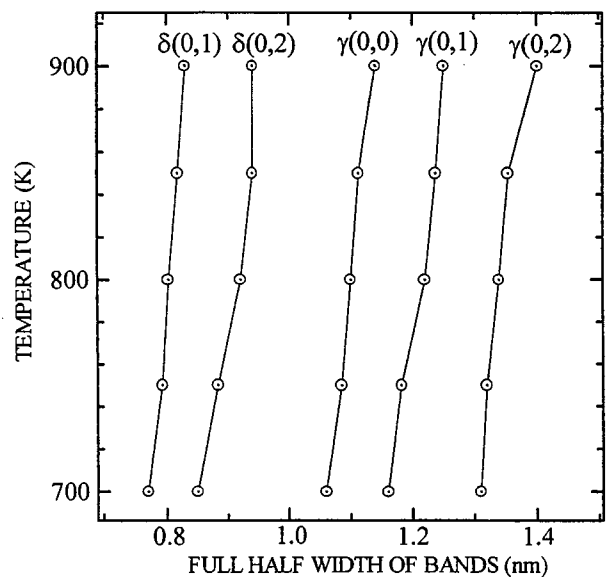


Fig.9 Calculated full half width for several experimentally observed bands

法を適用するために1200grooves/mmの格子を用いてより波長分解性のよいスペクトルを収集した。Fig. 10, 11にこれらのスペクトル測定例を示す。NOの γ および δ バンドは、いずれも短波長側に展張し、ヘッド部は二重の二重構造 (double double-headed) を示す⁶⁾。これらのスペクトルでは、この構造がかなり明確に観察可能である。前述のように、各バンドの理論プロファイルを経験温度の関数として計算し、実験プロファイルとの最良のマッチングプロファイルを与える温度を求めることにより

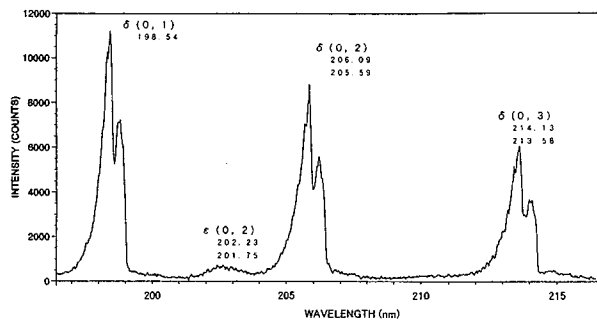


Fig.10 High resolution spectrum of NO δ bands

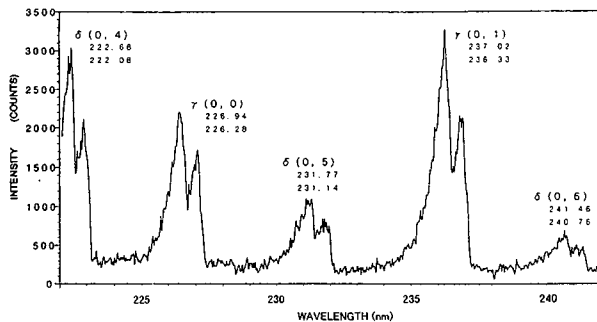


Fig.11 High resolution spectrum of NO δ and γ bands

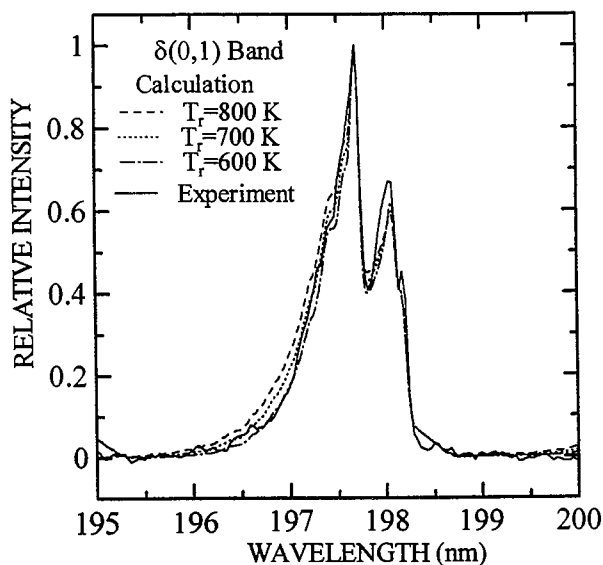


Fig.12 Comparison of experimental and simulated spectra of δ (0,1) band

回転温度が決定出来る。Fig.12よりFig.14に実験 (実験番号 592) で得られた δ (0,1), δ (0,2), γ (0,1) に対する実施例を示す。

Fig.12では、 δ (0,1) 実験プロファイルについて、600, 700, 800K 三種類の回転温度の計算プロファイルとのマッチング比較状況を示す。Fig. 13, 14には、 δ (0,2), γ (0,1)のそれぞれのバンドについて、マッチングにより求めた温度における比較プロファイルを示す。すべてのピークや谷の位置での完全な一致は下に述べるような理由により可能でないので、短波長側の減衰部での一致性を中心に観察し、温度のステップを次第に狭めながらプロファイルの一致性の最適点を判定することにより回転温

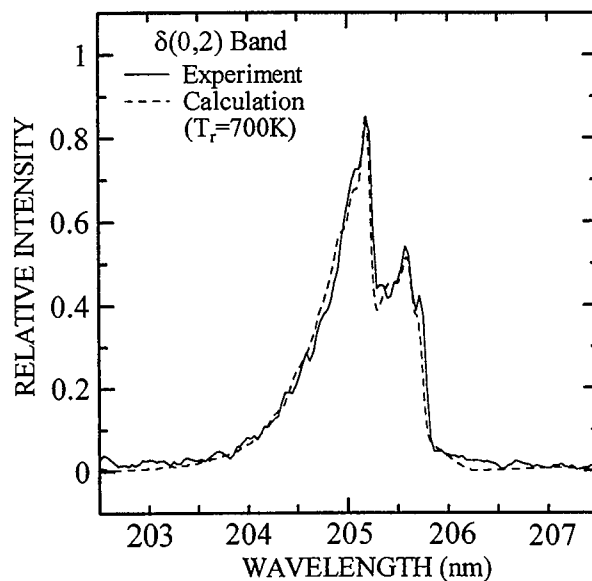


Fig.13 Comparison of experimental and simulated spectra of δ (0,2) band

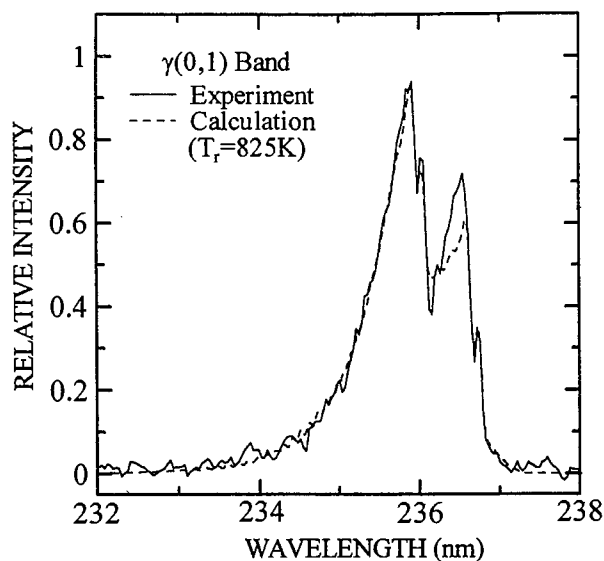


Fig.14 Comparison of experimental and simulated spectra of γ (0,1) band

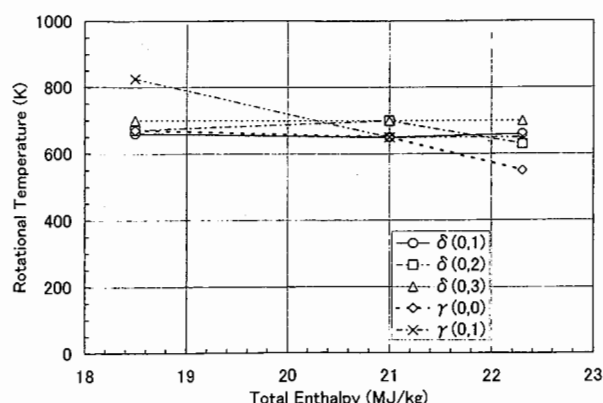


Fig.15 Dependence of the measured rotational temperatures on total enthalpy

Table 2. Dependence of the measured rotational temperatures on total enthalpy

実験番号	使用バンド					試験条件		
	$\delta(0,1)$	$\delta(0,2)$	$\delta(0,3)$	$\gamma(0,0)$	$\gamma(0,1)$	電流 amperes	空気流量 g/sec.	エンタルピ MJ/kg
TESS921	660 ± 40	670 ± 30	400 ± 50	—	—	500	10.0	18.5
TESS922	—	—	—	670 ± 40	825 ± 25	500	10.0	18.5
TESS923	650 ± 50	700 ± 30	700 ± 50	—	—	604	10.0	21.0
TESS924	—	—	—	650 ± 50	650 ± 50	604	10.0	21.0
TESS929	—	—	—	550 ± 150	650 ± 80	697	9.9	22.3
TESS92A	660 ± 50	630 ± 50	700 ± 100	—	—	697	9.9	22.3

度を決定した。Fig. 15 および Table. 2 に最終的な回転温度決定結果および試験条件を示す。光源はアーク放電により形成された、高温、高速膨張気流であり、気流の圧力、温度変動等の種々の誘因の寄与により光学強度レベル、スペクトル分布等の時間変動がかなりある。計測時には、積分時間の調整等によりこれらの変動の平均化を図っているが、個々のバンドの形状は偶発的要因 (ICCD検出器のインテンスファイアの応答のばらつきも含む) に依存して変動するため、マッチングの結果にもばらつきが生じる。また、分子定数にも誤差が含まれている可能性はあり、ばらつきに寄与する。温度決定の誤差は、これらの要因に依存したデータの質と信号レベルに強く依存する。従って、Fig.15にも見られるように偏差の大きい結果も含まれている。本研究の場合、経験より最良のデータでも ± 30 度程度の誤差を見込む必要があった。先述の Fig.12 の温度決定誤差は ± 50 度程度と判断される。一般に、高温になるにつれてバンドプロファイルの温度依存性が鈍くなり、かつバンド同士の重なりが生じて温度の決定を困難にする (現在実施中の衝撃層の解析がこれに該当する)。今回の結果 (Fig.15) からは回転温度の入力に対する依存性は確認できなかった。

た。

以上の解析において、一つの振動バンドの広がり範囲内では信号強度の波長依存性は一定として取り扱った。校正付き重水素ランプの導入により波長依存性の校正を進めつつある。また、集光光学系の焦点は気流中心にしているが、計測の性質上、視線 (line of sight: LOS) の気流発光が信号に寄与することは避けられない。計測断面でのピトー圧、加熱率分布等の計測より、気流特性諸量の測定断面での一様性は良好と推定しているが、得られた結果は気流断面の平均値を表していると考えられる。一般に、回転温度は並進温度とほぼ等しいと考えてよいので、得られた温度値は妥当な範囲にあると考えられる。より正確には、非平衡ノズル流 (あるいは自由流) 計算との比較等が必要である。その際に、衝撃層計算で行われているように⁹⁾、計測断面における気流特性諸量の分布を計算し、これに基づいた LOS 上の放射の平均量を求めて実験値と比較するのも一法である。実験的に、特定の体積を限定することは不可能なので、衝撃層の解析等のためにも、方法論の検討を進めている。

6. まとめ

750kWアーク加熱風洞の空気プラズマ自由流発光を発光分光計測し、発光種を同定した。観測可能な 190-900nm の波長範囲では紫外波長領域の NO 各バンド系のみが十分な発光強度で観測可能であった。これらの各バンドの詳細な分析を行い、これを用いて気流の温度の計測法を考察した。主要な結果は以下のようにまとめられる。

- (1) アーク加熱空気プラズマ自由流の発光を分析、同定し、紫外から近赤外の波長領域での主要発光源は 200-300nm 領域の NO γ , δ , ϵ の各バンド系のバンド系列であることを確認した。
- (2) NO バンドの特徴は、 $v' > 0$ 上位振動準位よりの遷移が観測されないこと、 β バンド系が観測されないこと、 ϵ バンド系の強度が理論予測に比して異常に弱いこと等である。これらの特徴は、同形式のアーク加熱器を使用している NASA Ames 20MW アーク風洞のスペクトルの特徴と類似している。
- (3) 温度の測定のために高分解能スペクトルを収集し、各バンドの精密なエネルギー準位構造に基づいたシミュレーションスペクトルとのマッチングを検討し、回転温度を決定した。得られた回転温度は並進温度とほぼ等しいと見なされる。今回得られた結果では回転温度の入力エンタルピ依存性は確認出来なかった。
- (4) 各バンドは上位準位が $v'=0$ しか観測されないため、振動温度の直接測定は出来なかった。また、今回は

検出器の波長応答が校正されていないので、バンド系同志の強度比較による電子励起温度の決定は行わなかった。

- (5) CFDによる非平衡流の計算、励起電子準位の緩和過程等の考察、実験的な検出器校正等により、NOバンドの発光機構、測定温度の精度向上等を進め、アーク加熱非平衡流の解明促進を図る。

7. 参考文献

- 1) S.P. Sharma, C.S.Park, M.E. Newfield, J. Balboni, C.D. Scott, S. Arepalli, and J.Taunk, "Arc jet Flow Characterization", AIAA Paper 96-0612, Jan. 1996.
- 2) B. Bottin, M. Carbonaro, S. Zemsch, and G. Degrez, "Aerothermodynamic Design of an Inductively Coupled Plasma Wind Tunnel", AIAA-97-2498, 1997.
- 3) G. Herdrich, M. Auweter-Kurtz, and H. Kurtz, "New Inductively Heated Plasma Source for Reentry Simulations", J. Thermophysics and Heat Transfer, Vol.14, No.2, April-June 2000, pp244-249.
- 4) C. Park, "Experimental Evaluation of Real-Gas Phenomena in High-Temperature Aerothermal Test Facilities: A Review", AIAA-96-2207, 1996.
- 5) R.W.B. Pearse and A.G. Gaydon, "The Identification of Molecular Spectra", Chapman & Hall LTD, London, 1963.
- 6) L. Wallace, "Band-Head Wavelengths of C, CH, CN, CO, NH, NO, O, OH, and Their Ions", ApJ. Suppl. 68, 165-290, Oct. 1962.
- 7) N.K.J.M. Gopaul, "Spectral Measurement of Nonequilibrium Arc-Jet Free-Stream Flow", ISA Paper 93-144, 1993.
- 8) D.S. Babikian, N.K.J.M. Gopaul and C. Park, "Measurement and Analysis of Nitric Oxide Radiation in an Arc-jet Flow", AIAA 93-2800, 1993.
- 9) T. Gokcen, C.S. Park, M.E. Newfield, and D.G. Fletcher, "Computational Simulation of Emission Spectra from Shock Layer Flows in an Arc-jet Facility", AIAA-97-0135, 1997.

Appendix :

本節では、宇宙機開発等に関連して実施される高温、高エンタルピ環境（アーク、衝撃波管等）での実験発光スペクトルの解析や大気圏や惑星大気への突入時の放射加熱の予測等に必要理論スペクトルの取扱、原理、計算法等について述べる。手法は一般的な理論スペクトル、放射予測に適用可能である。この種の計算には、多数の分子種とそれらに含まれる多数の電子準位間の遷

移、各種原子種を含み、膨大な数のスペクトル線を計算し、合成せねばならない。各分子の遷移を厳密に扱う場合（本文のNO解析のごとく）には、一般化したプログラムの作成は困難であり、合成スペクトル（synthetic spectra）の計算手順を作成し、各遷移の精密な扱いはサブルーチンとして作成するのが一般的である。このような計算のための汎用プログラムとして公開されているものとしては、文献A1-A3があげられる。A2はA1の具体的プログラムリストであり、またA2の内容はおおむねA3に含まれている。A3にはいくつかの利用者改訂版も存在する。A4はA3の改訂版であるが、米国人以外の米国外での利用は禁止されており、我々は利用出来ない。A3のNEQAIRには、データが古い、我々が今回必要とするNOバンドが含まれていない、計算波長範囲が200nmまで等の問題がある。また、国内では、宇宙研の藤田により作成されたSPRADIANというプログラムが公開されているが、十分に完成したものでなく、非平衡放射に対応していない等の問題があるため、今回の解析では自作のプログラムにより解析を行った。

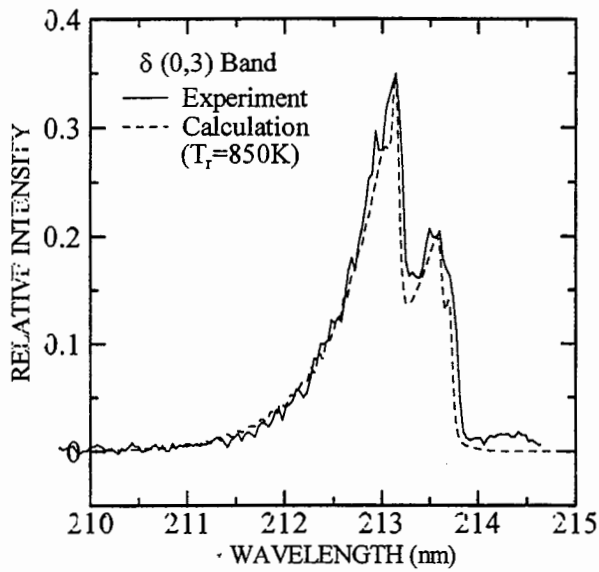
さて、アーク風洞のように発光源プラズマが光学的に薄い場合には、二原子分子のバンドスペクトルの最小構成要素である単一の回転線の積分強度は次式で与えられる。

$$E = \frac{16\pi^3 c N_u v_c^4}{3(2J'+1)} \frac{\sum |\text{Re}(v', v'')|^2}{d_u} q_{v'v''} S_{J' A'}^{J'' A''} \times 10^{-7} \quad (W/cm^3 - sr) \quad (A1)$$

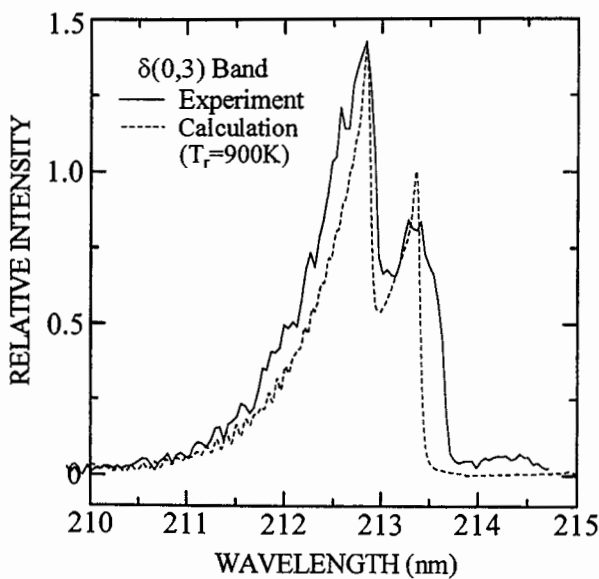
ここで、 N_u は上部の電子振動回転準位の粒子数、 d_u は上部電子状態の統計的重率、 v_c は回転線の中心波数、 $\sum |\text{Re}(v', v'')|^2$ は電子遷移モーメントの和、 $q_{v'v''}$ はFranck-

Condon因子、 $S_{J' A'}^{J'' A''}$ は回転線強度因子である。この回転線（バンドスペクトル）は、図6に示した分子の内部エネルギー準位において、上下二つの電子エネルギー準位間の遷移に起因する。その波数の具体的な計算法については、本文中でNO分子について詳細に述べた。他の二原子分子の各種遷移についても、関係する準位についての適切な分光定数等を適用することにより全く類似の手順での取り扱いが可能である。本実験のようなプロファイルの精密な比較が必要でなく大まかな見積もりを行う場合には、各準位を単一（singlet）として取扱えば計算が簡単化出来る。このような計算例をNO δ (0,3) についてFig. 16 (a), (b)に示す。単純化したプロファイル (b) の実験とのずれが大きいことが明白である。二原子分子の内部構造の詳細な解析はHerzbergの名著（文献A5）に詳しい。

式 (A1) により任意の回転線の積分強度を求めるた



(a) detailed energy level model



(b) simplified energy level model

Fig.16 Comparison of the calculated profiles of $\delta(0,3)$ band

めには、電子遷移モーメントの和 $\sum |\text{Re}(v', v'')|^2$ 、Franck-Condon 因子 $q_{v'v''}$ 、回転線強度因子 $S_{J'J''}^{A'A''}$ の値が必要である。これらについては、多数の二原子分子に関して長年にわたって実験的、解析的なデータの蓄積が行われてきており、特に空気成分分子については汎用的に要求があり、多くのデータの集積により信頼性のあるデータが得られている。但し、今回必要となった NO 分子のデータについては、 β バンド系以外のバンド系については従来殆どデータが存在しない（文献 A6 程度）。しかし、紫外波長域での最近のデータの必要性の高まりに応じて

LauXによりデータの計算と実験的検証、データの集積がなされており^{A7)}、今回の NO の解析にはこのデータを用いた。回転強度因子については、適切な文献より参照が可能である^{A8, A9)}。

以上の記述より、理論スペクトルの数値シミュレーションの実行手順をまとめると以下のようになる。

- (1) 計算すべき波長範囲の決定とその範囲内に含めるべきバンド系および原子線の選択
- (2) 各バンド系に含める振動バンド（振動量子数範囲）の決定
- (3) 各振動バンドに含める回転線（回転量子数）の上限の決定
- (4) 回転線および原子線のプロファイルの決定（一般には Voigt 型を用いる）
- (5) 計算条件の決定（粒子数分布は温度を指定して Boltzmann 分布を仮定する）
- (6) 式 (A1) により個々の回転線の積分強度を計算し、手順 (4) によりプロファイル分布を求め、手順 (1) - (3) に含まれる全回転線の強度を所要波長範囲において積算する。

以上の手順により計算した理論スペクトルには、実験時に使用した分光器等観測機器の影響は含まれていない。計測系全体のスペクトルプロファイルに及ぼす効果は一般にスリット関数として定義され、実験的に決定される。本実験で求めたスリット関数例を Fig. 17 に示す。上記手順で求めた理論スペクトルにこのスリット関数をコンボリューション積分することにより実験で得られるスペクトルがシミュレートされる。Fig. 12-14 の NO 各バンドについて示すように、計算条件を変化させて実験で得られたスペクトルとの最良マッチング条件を求め回

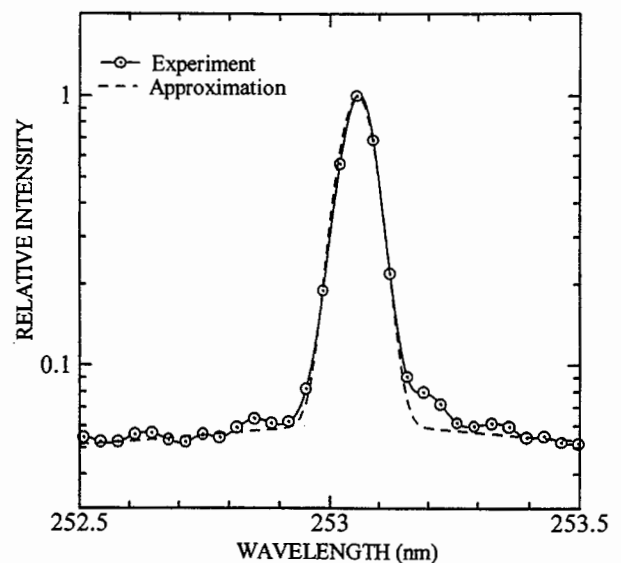


Fig.17 Example of an experimental slit function

転温度を決定する。原理的には、上位振動準位よりの遷移が観測される場合には振動温度の決定、相異なるバンド系のバンド強度比較による電子励起温度の決定も可能となる。

原子線の計算が必要な場合には、(A1) 式に対応する原子線積分強度の式の右辺に必要な量は波長と遷移確率のみである。これについては、所要の原子線のデータをそれぞれ収集して入力すればよく、例えば、Wiese 等による NBS のデータ集^{A10,A11)}のような資料の使用が適切と思われる。前記資料は発行年次が古い、C,N,O の各原子については全面改訂版が出版されている^{A12)}。二原子分子の分光定数の集積は Huber と Herzberg^{A13)} により Herzberg の著作シリーズの一環として出版されているが、発行年次が古いので使用時には注意が必要である。

参考文献：

- A1) J.O. Arnold, E.E. Whiting, and G.C. Lyle, "Line by Line Calculation of Spectra from Diatomic Molecules and Atoms Assuming a Voigt Line Profile", JQSRT Vol.9, 1969, pp.775-798.
- A2) E.E. Whiting, J.O. Arnold, and G.C. Lyle, "A Computer Program for a Line-by-Line Calculation of Spectra from Diatomic Molecules and Atoms Assuming a Voigt Line Profile", NASA TN D-5088, 1969.
- A3) Chul, Park, "Nonequilibrium Air Radiation (NEQ-AIR) Program:User's Manual", NASA TM 86707, 1985.
- A4) E.E. Whiting, Chul, Park, Yen Liu, J.O. Arnold, and J.A. Paterson, "NEQAIR96, Non-Equilibrium and Equilibrium Radiative Transport and Spectra Program:User's Manual", NASA RP 1389, 1996.
- A5) G. Herzberg, "Molecular Spectra and Molecular Structure, I. Spectra of Diatomic Molecules", Van Nostrand Reinhold Co., 1950, p.269.
- A6) D.M. Cooper, "Theoretical Study of IR Band Intensities and Electronic Transition Moments for the β and δ Systems of NO", JQSRT, Vol.27, 1982, pp. 459-465.
- A7) C.O. Laux, "Optical Diagnostics and Radiative Emission of Air Plasmas", HTGL Report T-288, High Temperature Gasdynamic Laboratory, Stanford University, 1993.
- A8) R.J.M. Bennett, "Honl-London Factors for Doublet Transitions in Diatomic Molecules", Monthly Notice of the Royal Astronomical Society, Vol.147, 1970, pp. 35-46.
- A9) I. Kovacs, "Rotational Structure in the Spectra of Diatomic Molecules", Adam Hilger Ltd. 1969.
- A10) W.L. Wiese, M.W. Smith, and B.M. Glennon, "Atomic Transition Probabilities: Vol.1 Hydrogen through Neon", NSRDS-NBS4, Volume I, May 20, 1966.
- A11) W.L. Wiese, M.W. Smith, and B.M. Miles, "Atomic Transition Probabilities: Vol.2 Sodium through Calcium", NSRDS-NBS 22, Volume II, Oct. 1969.
- A12) W.L. Wiese, J.R. Fuhr and T.M. Deters, "Atomic Transition Probabilities of Carbon, Nitrogen, and Oxygen :A Critical Data Compilation", Journal of Physical and Chemical Reference Data, Monograph No.7, 1996.
- A13) K.P. Huber and G. Herzberg, "Molecular Spectra and Molecular Structure IV. Constants of Diatomic Molecules", Van Nostrand Reinhold Company, 1979.