

ISSN 0389-4010
UDC 629.78
537.525

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-989

宇宙環境試験用酸素原子生成装置

渡 辺 泰 夫 ・ 藤 森 義 典 ・ 西 田 迪 雄

1988年8月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

宇宙環境試験用酸素原子生成装置*

渡 辺 泰 夫** 藤 森 義 典*** 西 田 迪 雄****

An Atomic Oxygen Generation Facility for Space Environmental Testings

Yasuo WATANABE, Yoshinori FUJIMORI
and Michio NISHIDA

ABSTRACT

Preliminary experiments in producing atomic oxygen for space environmental testings were conducted. O-atoms were generated by injecting molecular oxygen into a preionized argon plasma. A mixture of argon plasma and oxygen was expanded through a sonic orifice into a low pressure chamber as a free jet. To confirm the generation of O-atoms and to examine the possibility of forming a molecular beam from the supersonic free jet, population densities of the electronic excitation levels $3p^3P$ and $3p^5P$ of atomic oxygen were measured along the free jet centerline. The results show that the population densities satisfied the flux condition of low earth orbit.

1. ま え が き

低地球軌道 (LEO : Low Earth Orbit)でのスペースシャトルの飛行実験の結果, その機体表面各所の熱防御材等の著しい劣化, 質量損失, 変色などが観測されている。これは, 主として, LEOの大気主成分である酸素原子 (高度260kmで 10^{15} 個/ m^3 , 高度500kmで 10^{13} 個/ m^3 , 図1参照)が, 8km/sの相対速度で飛翔体表面と衝突して表面部材と干渉する結果であると考えられている。これは, 計画中の宇宙ステーションなどの表面材料の劣化やソーラーアレイの光学的性質の低下につながり, 長時間にわたって LEO で運用される宇宙構造物の設計上大きな問題であり, その対策が急がれている。

宇宙飛翔体の飛行速度が8km/sのとき, 高度

260km では, $1m^2$ の表面に毎秒 8×10^{18} 個, 高度500km では 8×10^{16} 個の酸素原子が衝突してくる。酸素原子の衝撃が特定の材料に及ぼす影響の程度を示す指標としては, この単位面積, 単位時間あたりの衝突粒子数 (流入束) の時間積分値, フルーエンス (fluence) を用いる。例えば, 高度260km で5日間標準大気中を飛行するときのフルーエンスは, 3.5×10^{24} 個/ m^2 となる。この条件を地上で再現する高流束酸素原子発生装置の製作は容易でない。EOIM (Evaluation of Oxygen Interaction with Materials), LDEF (Long Duration Exposure Facility) など, シャトルを利用した各種材料の搭載曝露実験がSTS4-8の飛行実験に於て行われているが, 宇宙での実験には制約も多く, 地上の宇宙環境模擬設備を整備してデータの蓄積を行うことが必須である (LDEFはシャトルの打ち上げ失敗によりいまだ回収されていない)。本論文では, 酸素原子と材料の干渉についての研究の現況を述べ, アーク加熱型風洞での酸素原子生成の基礎実験結果とその環境試験設備としての適

* 昭和63年7月4日受付

** 空気力学部

*** 宇宙研究グループ (現宇宙開発事業団)

**** 京都大学工学部

用性の評価を述べる。実験はアーク加熱により生成された高温不活性気体プラズマに酸素分子を添加して解離させ、オリフィスを通して低圧槽に放出して形成された自由噴流中での酸素原子の空間分布、生成状況を調べた。このような自由噴流の特性、酸素原子の軸方向分布データは、酸素原子を供試体に照射するためのビーム化技術の確立の為に非常に有用である。

2. 研究の現状

図1に LEO の平均的な大気組成を示す。これは太陽活動、地球磁場の変動、緯度、季節等に依存し、特に太陽の活動には大きく影響されることが知られている¹⁾。高度200km 以上では組成中の(中性)酸素原子濃度が最大であることが解る。酸素原子の起源は、高層大気中の酸素分子やオゾンが太陽の紫外線を吸収して解離しているものと考えられる。1981年から始まったスペースシャトルの飛行により、LEOにおける表面現象の生々しいデータが回収されるようになり、その表面曝露部材料の劣化現象が顕著に認識されるようになった。宇宙船表面は高真空、紫外線、放射線等による厳しい複合環境に曝されるが²⁾、軌道速度8km/s に対応するエネルギー(約5eV)で表面に入射してくる化学反応性の高い酸素原子の衝撃による表面反応が表面部材劣化の主要原因と考えられている。これをシャトル高度での速度ベクトルに垂直な面での酸素原子の流束(flux)で考えると、 10^9 個/ $\text{m}^2 \cdot \text{s}$ に対応する。

地上でこの環境を模擬するための装置の開発が現在多くの機関において進められている。酸素原子環境模擬試験装置が満足すべき条件は、(1)発生された酸素原子が中性であること、(2)軌道速度8 km/s に対応するエネルギー(約5eV)を与えること、(3)流束(flux)で 10^{19} 個/ $\text{m}^2 \cdot \text{s}$ を達成出来ること、(4)所要のフルエンス(fluence)を満足できることである。以下に述べるように、これらの条件をすべて満足する装置は完成されていないが、試作された各種の試験装置による材料照射実験と劣化の観察およびそれらの供試体表面の走査電子顕微鏡(SEM: Scanning Electron Microscope)

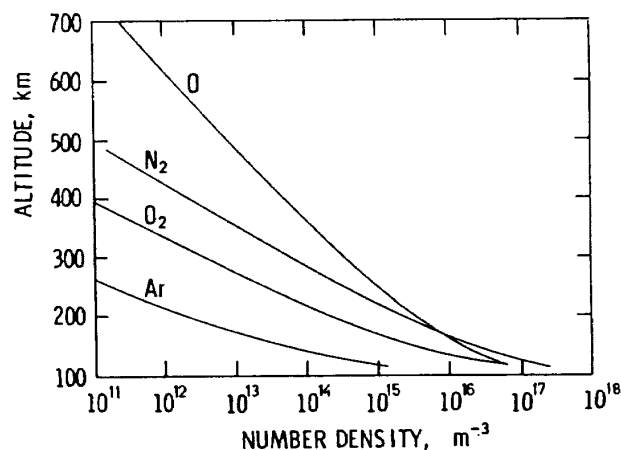


図1 LEO の大気組成

写真による宇宙実験結果との表面形態論(surface morphology) 的比較が試みられている。

2.1 宇宙実験

STS1-4 での表面部材劣化の観察結果に基づいて、STS-5 (1982 Nov.) において最初の LEO 環境での本格的な材料曝露実験 EOIM-1 が実施された。さらに STS-8 (1983 Aug.) においてより広範な反応速度データ(温度依存性、荷電粒子の影響、紫外線の影響等)を得るためのEOIM-2 実験が行われた³⁾。試料は貨物室トレイ上で各種条件により宇宙大気環境に曝露された。酸素原子のフルエンスは、高度225km における総計42時間の曝露で、 3.5×10^{24} 個/ m^2 に達した。その大部分(86%)は、姿勢の制御により、供試体表面が速度ベクトルに垂直になるように保たれた。この実験では、温度の影響に加えて厚さや製造工程の差異等も調べられた。Kapton と Mylar のデータ解析の結果より、LEO環境での材料表面と大気の干渉反応においては、上記の温度、太陽紫外線、荷電粒子等への依存性はないとの結論が得られている。他の各種材料についての解析結果は文献3の参考文献等に詳しい。また、カナダは STS41-G (1984 Oct.) で ACOMEX (Advanced Composite Materials Exposure to Space Experiment) 実験を実施した⁴⁾。この実験ではマニピュレータのアーム(Canadarm)に試料を直接貼付して曝露が行われた。試料は速度ベクトルの方向に垂直に取り付けられ、 2×10^{20} 個/ cm^2 のフルエンスがえら

れている。ポリマー材、特に carbon-epoxy や kevlar-epoxy などへの影響が調べられた。日本も参加する EOIM-3 搭載実験 (図 2) が計画されているが、宇宙での実験は曝露できる材料サン

プル数、実験項目にも制約があり、表面反応の機構を解明するための LEO 環境地上模擬試験設備の整備の必要性はきわめて高い。

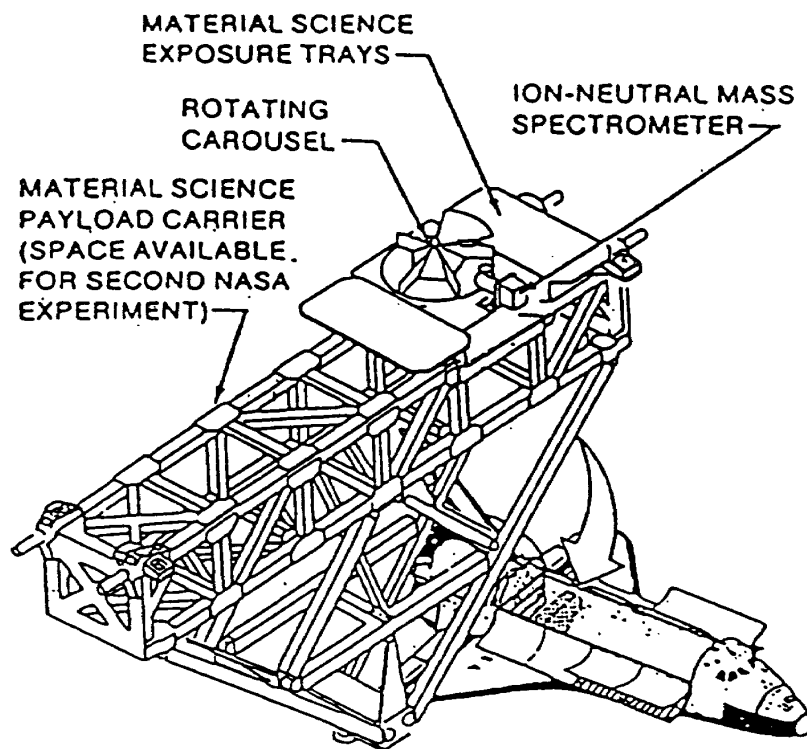
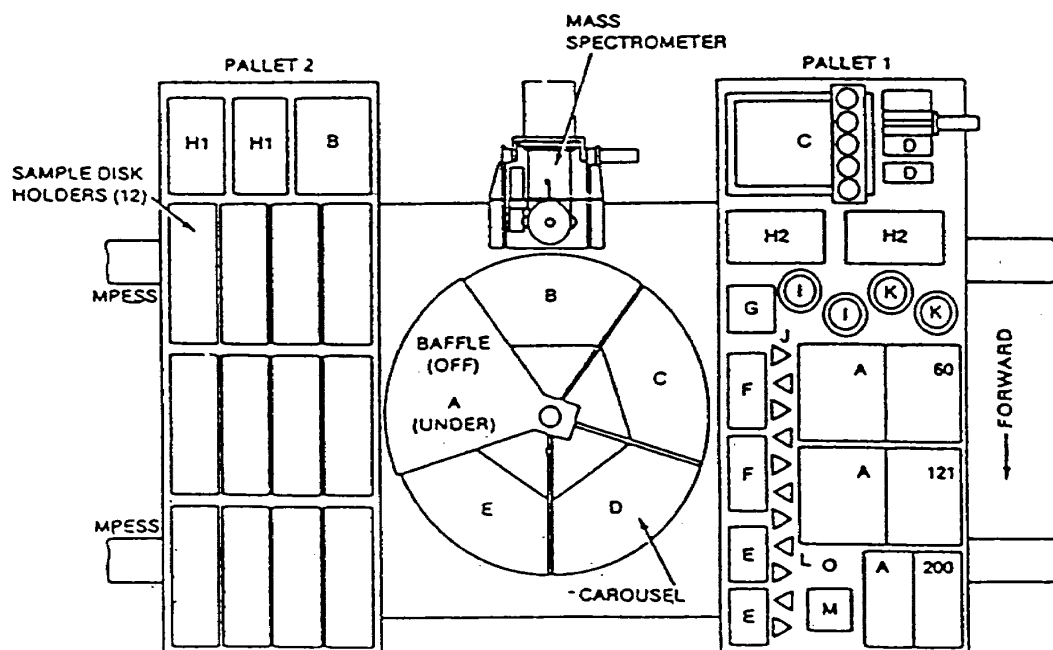


図 2(a) EOIM-3 の実験装置



EXPERIMENTS:

- A - HEATED PLATE (JSC), 3 EA
- B - ATOM SCATTERING EXPERIMENT (UAH), 1 EA
- C - ENVIRONMENT MONITOR PACKAGE (GSFC), 1 EA
- D - SOLAR UV EXPERIMENT (JSC), 1 EA
- E - STATIC STRESS FIXTURE (MSFC), 2 EA
- F - UNIFORM STRESS FIXTURE (MSFC), 2 EA
- G - ATOMIC OXYGEN MONITOR (MSFC), 1 EA

- H1 - COMPOSITE STRESS FIXTURE (LARC), 2 EA
- H2 - COMPOSITE STRESS FIXTURE (JSC), 2 EA
- I - SCATTEROMETER (JPL), 2 EA
- J - MECHANICAL STRESS FIXTURE (LARC), 11 EA
- K - REFLECTOMETER (LARC), 2 EA
- L - PINHOLE CAMERA (LARC), 1 EA
- M - SCATTEROMETER (AEROSPACE CORP.), 1 EA

図 2(b) EOIM-3 の実験装置の Sample Disk Holder

2. 2 模擬試験装置

前述の条件を満足するような宇宙船表面部材の地上模擬試験装置の開発が進められている。現在まで、不満足ながら部分的に要件を充す装置による試験が試みられてきている。宇宙実験と矛盾する結果が得られているものもあり、装置、試験方法の選択はきわめて慎重に行われねばならない。本質的な表面反応機構の解析が行われた試験例は殆ど見あたらない。以下で、現在まで試験された各種の酸素原子発生方式を代表的な例により整理しておく。

2. 2. 1 熱解離

酸素分子を熱的に解離して酸素原子を生成する。最も単純で、励起原子、イオン等を発生しないので理想的な方式であるが、酸素分子を十分に解離させるためには3000K以上の温度が必要であり、安定して使用できる耐熱材料の選択に難点がある。Lam⁵⁾は二酸化トリウム(トリア)(thorium dioxide or Thoria: ThO_2)の炉(oven)で350wattsのオーム加熱により55% (8% O_2 in He) の解離度を得ている。トリアの融点は3600Kであるが、その軟化点はこれより数百度低く、弱い放射性もあり、耐久性に難がある。また国産品がなく、入手は困難である。Lamはこの方式で速度3.8km, 1.61×10^{18} 個/ $\text{m}^2 \cdot \text{s}$ (1mの位置で)の酸素原子ビームを得ている。

2. 2. 2 電気放電

加熱源として各種の電氣的な放電を用い、加熱された不活性気体中で酸素分子を解離させ、ビーム化させる。Tennyson等⁶⁾はキャビティ方式のマイクロウェーブ放電(2450MHz)を用いて照射実験を行った。この方式の利点は、不純物で汚染されないきれいなビームが得られること、比較的低い温度(<1000K)で解離出来ることである。一方、解離度が低い(約3%)、ヘリウムに酸素をシードしたノズルビーム方式にしても十分な速度が得られない等の欠点がある。また、放電形式の共通の欠点として励起状態の原子の生成があげられる。最終的には、ビーム中心での流束 $\sim 10^{19}$ 個 /

$\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 、エネルギー0.14eV(流速1.3km/s)の酸素原子ビームが得られている。

文献7, 8ではDC アーク加熱方式が使われている(本論文でも、この方式の実験結果を後述する)。電極の酸化を避けるために、放電部では不活性気体(ヘリウム, アルゴン)のみを加熱プラズマ化し、アーク加熱器下流より酸素分子が添加される。プラズマは十分高温(>3000K)で、解離度は最大40%以上が達成可能である。流速はヘリウムを用いて3.5km/sと見積られている⁶⁾。流束は $10^{19} \sim 10^{20}$ 個/ $\text{m}^2 \cdot \text{s}$ が得られている。

2. 2. 3 イオンビーム

酸素原子源として電子衝撃型イオン源を用いる⁹⁾。生じたイオンは磁気セクター型質量分析器により質量分離後、減速して所要の速度とし、衝突セルで中性化気体との衝突により電荷交換して中性酸素をうる。この方式は最初にイオンを作るので電磁気力により速度の調整が可能で、必要なエネルギー(流速)が得やすいが、荷電粒子の相互作用による空間電荷制限特性により流量が制限される。ビームの搬送効率の向上、所要のフルエンスを得るためのイオン源の長寿命化等が問題であろう。現在のところ得られた酸素原子ビームの特性は明確でない。

2. 2. 4 レーザー加熱

Caledoniaら¹⁰⁾はレーザー推進の考え方を応用してパルス CO_2 レーザーを加熱源として酸素分子を解離した。図3に装置概略を示す。この方法で

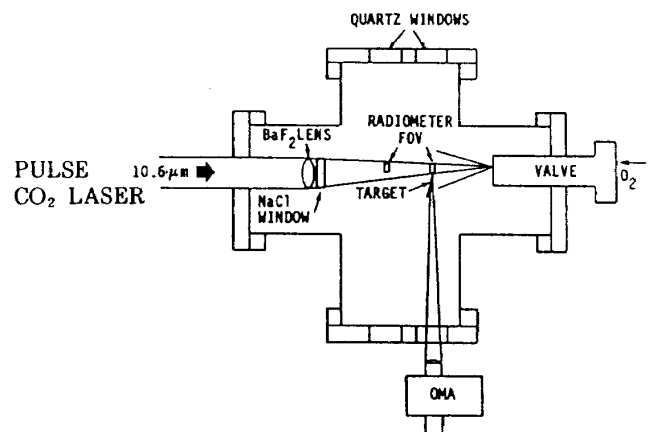


図3 レーザー加熱方式酸素原子ビーム装置配置

は、真空槽中で、パルス動作するバルブによりパルスの膨張ノズルを酸素分子で満たし、ノズルのスロート部に高エネルギーレーザーパルスが集束入射される。これによりブレイクダウン（絶縁破壊）が発生し、生じた爆発波の進行によりノズル内の分子が解離され、膨張加速してその熱エネルギーが速度に変換されてエネルギーの揃った高流束の酸素原子ビームが出来る。酸素原子スペクトル線によるラジオメータ流速測定で $\sim 5\text{--}13\text{km/s}$ の速度が得られ、レーザーの一パルス当り $\sim 10^{18}$ 個の酸素原子が生成されたとしている。供給ガス圧、レーザーパルスエネルギーの調節により流束速度の調整に柔軟性がある。流束の計測に不満足な点があるが、中性原子の生成効率に利点があるとしており、有望な方式と思われる。連続発振 CO_2 レーザーを使用した装置も試作されている¹¹⁾。

現在までに試作された各種の酸素原子生成方式を簡単に整理したが、いずれも欠点があり所要の条件を満足していない。その他の方式として、 O^+ イオンの中性化により酸素原子を生成する案が考えられている。酸素原子ビームの特性については、飛行時間型質量分析計により速度、原子濃度測定を行うのが一般的であるが、レーザー計測、分光計測等の適用により、より直接的で包括的な特性把握を行う必要がある。

3. 実験装置および方法

アーク加熱方式による宇宙での酸素原子環境シ

ミュレーション設備の可能性を調べるため、航技研および京都大学のアーク加熱型風洞を用いて得られた酸素原子発生基礎実験データを用いてシミュレーション能力の評価を行った。

航技研風洞では、ヘリウムプラズマに酸素を混合して、そのスペクトルを調べた。以下の議論は、主として図4に概略配置を示す京都大学風洞で得られた定量データにより行う（航技研の風洞については文献12に詳述されている）。最大入力 25kW のアークヒーターで加熱生成された弱电離アルゴンプラズマに、プレナム室（ $78\phi \times 216\ell$ ）より微量の酸素（ $[\text{O}_2]/[\text{Ar}] \sim 1/40$ ）を添加し、混合気体を直径 $D=13.7\text{mm}$ のオリフィスを通して低圧測定室（ $900\phi \times 1100\ell$ ）に放出し超音速自由噴流を得る。風洞の作動条件は、アルゴン流量 0.11g/s 、貯気槽圧（プレナム室圧） 1.8kPa 、測定室圧 19.2Pa 、放電条件は 200A で約 40V である。貯気槽温度（アルゴン原子の並進温度）は 3400K である。

酸素原子の計測は、2本の酸素原子のスペクトル線OI 844.6nm ($3p^3\text{P}-3s^3\text{S}$)とOI 777.3nm ($3p^5\text{P}-3s^5\text{S}$)の絶対強度測定を自由噴流の軸に沿って行い、これにより酸素原子の生成を確認するとともに、それぞれの上位励起準位の占有密度を決定した。さらに母気体（アルゴンプラズマ）の自由噴流の流れ場とその性質を調べるために、アルゴンスペクトル線の強度測定により、アルゴンの二つの励起準位 $5p[5/2]$ と $5p[3/2]$ の占有密度の計測を行うとともに、探針測定により電子温度、

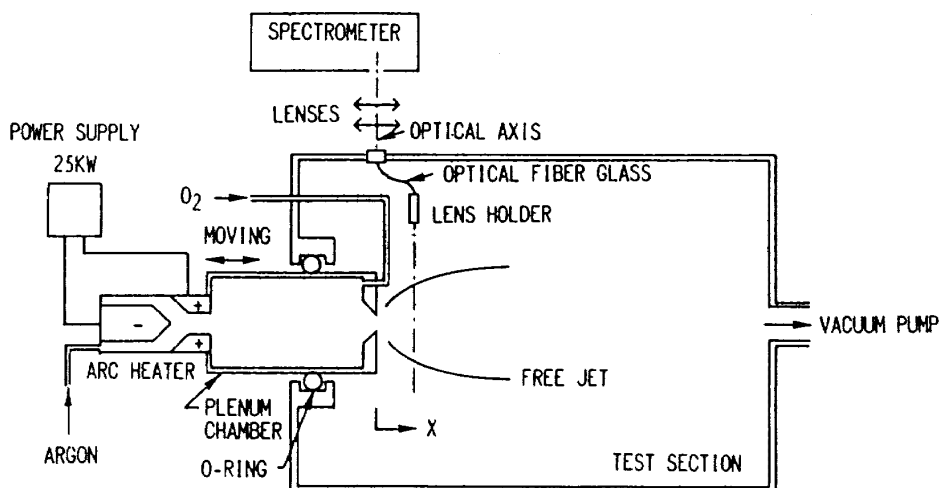


図4 実験装置

電子密度の分布を調べた。探針は直径0.5mmのタングステン線で作られた平面型静電探針で、捕集面が流れに平行になるように置かれた。実験データは、通常の探針理論により処理され、電子温度、電子密度が決定された。また、数値シミュレーションにより流れ場の構造を把握した。

3.1 分光測定

低密度プラズマ気流からの放射光は、図4に示す光学系により光電子増倍管付き分光器（島津GCT-100型平面回折格子分光器、波長範囲200-900 nm、主鏡焦点距離100cm、格子数1200本/mm、格子面積 $102 \times 102 \text{ mm}^2$ 、一次逆分散度 0.77 nm/mm ）に導かれる。集光系の詳細を図5に示す。自由噴流中心軸上の放射線強度値を求めるために、レンズホルダーを半径方向に走査させ、先端の $3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ のスリットを通る平行光線のみを光ファイバーを介して分光器に送る。こうして得られた光強度信号は、噴流を横切る光路に沿う放射光の積分値の半径方向分布であり、これよりアーベル逆変換によりスペクトル線強度の噴流断面内分布が求められる。軸方向の光強度分布の計測は、プレナム室を軸方向に移動することにより行う。

測定された信号値よりスペクトル線の絶対強度を求めるために、光学系は標準タングステンリボンランプを用いて較正された。励起準位の絶対占有密度は次のようにして求められる。プラズマの自己吸収が無視できるとき、準位 j から k への遷移に対応するスペクトル線強度 I_{jk} は、遷移 $j \rightarrow k$ の上方準位の全占有密度 $n(j)$ に比例する。すな

わち、

$$I_{jk} = CA_{jk}h\nu_{jk}n(j) \quad (1)$$

ここで、 C は光学系の較正係数、 A_{jk} は放射遷移 $j \rightarrow k$ に対する Einstein A 係数、 h は Planck の定数、 ν_{jk} は線スペクトルの振動数である。標準タングステンランプによる光学系の較正をしたときのランプによる出力信号を I_t 、同じ光学系で測定したプラズマのスペクトル線による出力信号を I_{jk} とすると、較正されたスペクトル線強度 I_{jk}' は次のように表される。

$$I_{jk}' = (I_b/I_t) I_{jk}^m \quad (2)$$

ここで、 I_b はタングステンランプの放射強度で、次式で与えられる。

$$I_b = \tau_0 E(\lambda, T_t) C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T_t) d\lambda \quad (3)$$

ただし、 τ_0 はランプの透過係数（ここでは0.9とおいた）、 $E(\lambda, T_t)$ はランプの放射係数（文献13に与えられている）、 C_1 は第一放射係数($0.3742 \times 10^{-16} \text{ J} \cdot \text{m}^2/\text{sec}$)、 C_2 は第二放射係数($1.439 \times 10^{-2} \text{ mK}$)、 $d\lambda$ は出口スリットを通る波長、 T_t はランプの真温度である。式(1)の定数 C は I_t/I_b になるので、準位 j の占有密度 $n(j)$ は次式で求められる。

$$n(j) = \frac{1}{A_{jk}h\nu_{jk}} \cdot \frac{I_b}{I_t} \cdot I_{jk}^m \quad (4)$$

4. 酸素原子の生成機構

航技研アーク加熱風洞でヘリウムを主作動気体としたときの低密度気流（ノズル膨張後）の自然放射のスペクトルを図6に示す。(a)は短波長領域のもので、A.はアルゴン（参照用）、B.はヘリウ

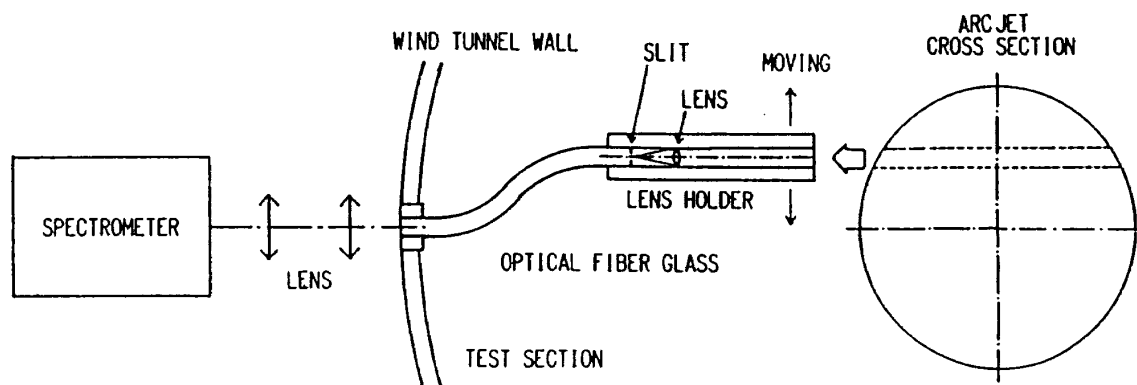


図5 集光系の詳細

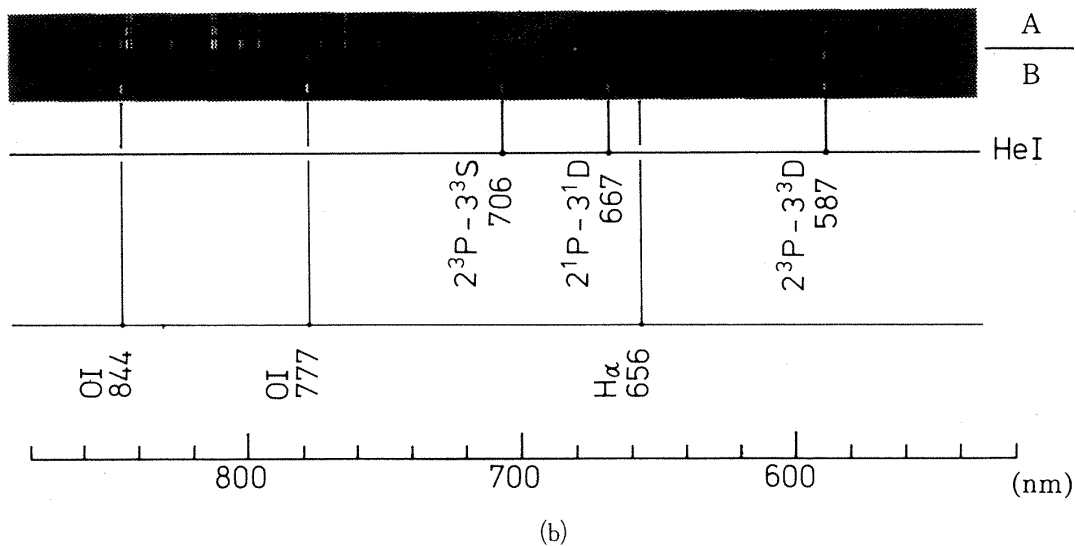
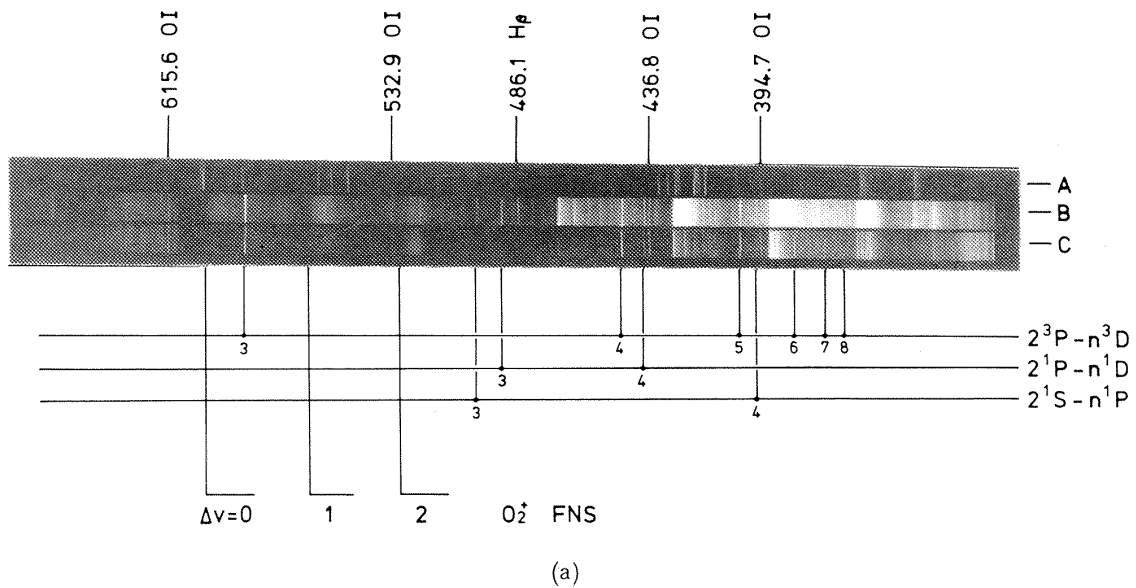


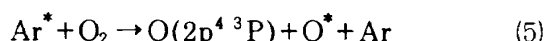
図6 酸素分子を微量添加したHe低密度気流のスペクトル

ムのみ、C.はプレナム室より酸素を添加した場合のスペクトルを示す。酸素を添加した時のスペクトルの特徴はOI, O_2^+ FNS (first negative system: $b^4\Sigma - a^4\Pi$)が励起されることである。(b)は赤、赤外領域のスペクトルを示す(A. アルゴン(参照用), B. ヘリウム)。確認された中性酸素原子(OI)線は、844.7 ($3s^3S-3p^3P$), 777.3 ($3s^5S-3p^5P$), 615.7 ($3p^5P-4d^5D$), 543.6 ($3p^5P-6s^5S$), 533.0 ($3p^5P-5d^5D$), 436.8 ($3s^3S-4p^3P$), 394.7 ($3s^5S-4p^5P$) 等である。OI 線の励起は準安定ヘリウム原子He (2^3S) と基底酸素分子 $O_2(X)$ との直接干渉により生成されると考えられる。ヘリウムを母気体とした酸素原子ビームは、その軽質量の故に、加

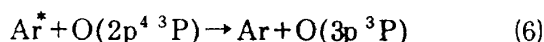
速特性で有利であり(前述の多くの装置はヘリウムを用いている), これらの線の振舞いを調べることはその特性検討に非常に有効であろう。一方、酸素分子の解離効率ではアルゴンを母気体とする方がはるかに優れている¹⁴⁾。酸素分子の混入比率が増加すると解離度は低下し、2%で最適の原子生成効率が得られている。この比率での酸素分子の解離割合は、ヘリウムに比べて約2倍となっている。この差はアルゴンとヘリウムの準安定準位のエネルギー差(ヘリウム: 19.81, 20.61eV, アルゴン: 11.54, 11.71eV), 即ち酸素原子励起準位とのエネルギー共鳴度の差に依るものと思われる。本論文では、アルゴンを母気体とした実験に

ついて解析する。

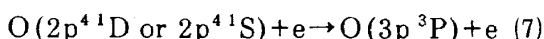
プレナム室で添加された酸素分子は、アーク放電で加熱生成されたアルゴンプラズマの熱浴（約 3400K）で、高い並進エネルギーを持つアルゴン原子と衝突し解離されるとともに、アルゴン準安定原子 Ar^* ($^3\text{P}_{0,2}$) との衝突によるエネルギー交換を行い、基底状態 ($2p^4\ ^3\text{P}$) または準安定状態 O^* ($2p^4\ ^1\text{D}$, $2p^4\ ^1\text{S}$) の酸素原子を生成する（図 7 に酸素原子のエネルギー準位とアルゴン準安定準位との関係を示す）。



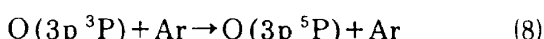
さらに、 Ar^* と基底状態酸素原子 ($2p^4\ ^3\text{P}$) との間のエネルギー交換により $\text{O}(3p\ ^3\text{P})$ が生成される。即ち、



この反応では、エネルギーの共鳴度が低いにもかかわらず（エネルギー差 0.56eV）、きわめて選択的に $\text{O}(3p\ ^3\text{P})$ 準位が励起されることが知られており、励起速度定数として $4.1 \times 10^{-11} \text{cm}^3 \text{molecules}^{-1} \text{s}^{-1}$ が得られている¹⁵⁾。また、 $\text{O}(3p\ ^3\text{P})$ はつぎのように $\text{O}^*(2p^4\ ^1\text{D}$ or $2p^4\ ^1\text{S})$ とエネルギーの高い電子との衝突によっても生み出されうる。



このようにして生成された $\text{O}(3p\ ^3\text{P})$ とアルゴン基底準位原子との衝突失活



により $\text{O}(3p\ ^5\text{P})$ が生成される。これらの準位よりの放射遷移により、844.6nm ($3p\ ^3\text{P} - 3s\ ^3\text{S}$) および 777.3nm ($3p\ ^5\text{P} - 3s\ ^5\text{S}$) のスペクトル線が生ずる。本実験ではこれら二本のスペクトル線を使用して励起酸素原子の数密度を測定した。

5. 数値解析

母気体の流れ場の構造を調べるために、時間依存法を用いて、音速オリフィスから低压室へ膨張する超音速軸対称自由噴流の数値シミュレーションを行った。この解析では、次の仮定をもちいた：(1)流れ場は中性アルゴン原子により支配される（電離度は 0.1% 程度である）。(2)流れは非粘性である。(3)気体はオリフィスで音速状態にある。(4)オリフィスで流れは一様で、軸に平行である。

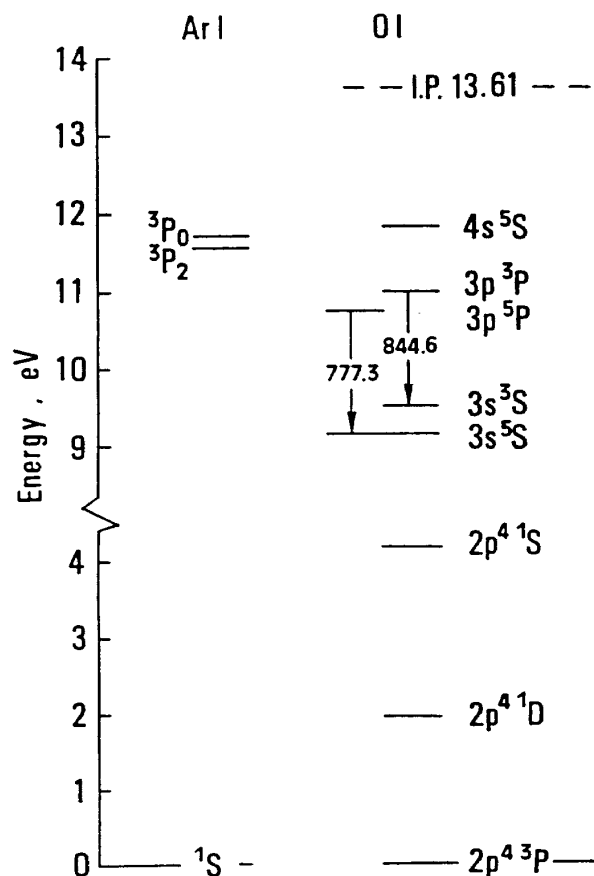


図 7 アルゴンと酸素原子のエネルギー準位

(5)励起、電離は無視する（これらの効果は現在の実験条件では非常に小さい）。

軸対称流に対するオイラー方程式は、

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial r} + \mathbf{H} = 0 \quad (9)$$

と書ける。ここで、

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho e \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ u(\rho e + p) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ v(\rho e + p) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \rho v/r \\ \rho uv/r \\ \rho v^2/r \\ v(\rho e + p)/r \end{bmatrix}$$

$$e = CvT + \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$$

ここでは一般的な記号が用いられている。ただし、 u, v は軸及び径方向の速度、 e は単位質量当りの全エネルギーである。この式が、実験条件 ($p_0/p_\infty = 93.8$, $T_0/T_\infty = 11.6$, $r = 5/3$; 但し、添字 0 は貯

気槽状態, ∞ は測定室状態, γ は比熱比)に対し, 各演算子に Piecewise-Linear-Method(PLM)¹⁶⁾を適用した演算子分割法により解かれた。計算面は全物理面の上半面で, 250×150 の格子に分割され, $d(x/D) = d(r/D) = 0.05$ と取られた。

図8に数値解析された母気体の自由噴流の等密度線を示す。この結果はCFL条件0.8, 時間ステップ5460で得られた解である。マッハディスク, 噴流境界, バレルショック, 反射衝撃波, 滑り線

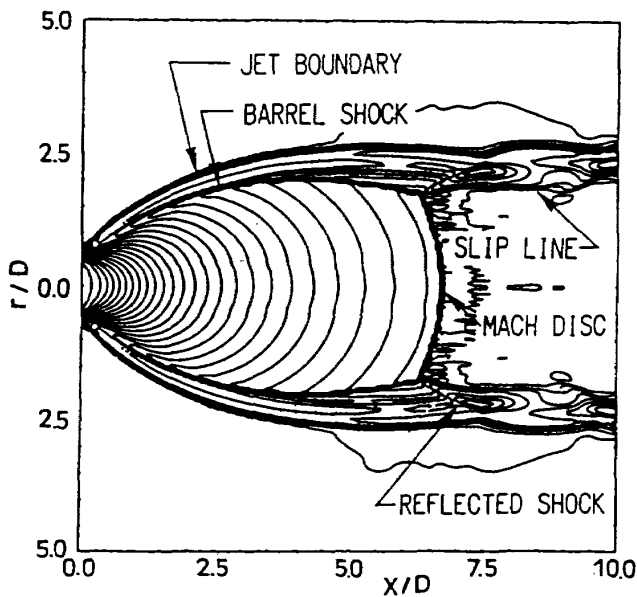


図8 自由噴流の等密度線図

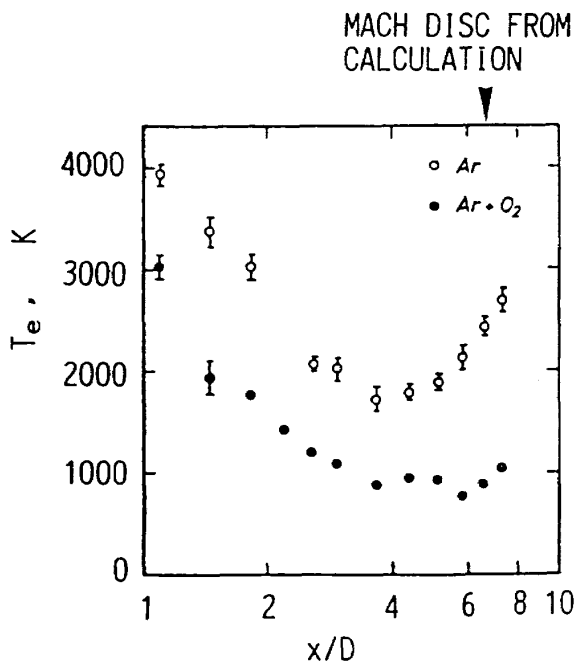


図9 電子温度の軸方向分布

が現れている。実験条件から求められた貯気槽密度を用いて得られた自由噴流上のアルゴン原子数密度の代表的な値は, $x/D=1$ で 5.6×10^{21} 個/ m^3 , $x/D=6$ で 1.8×10^{20} 個/ m^3 である。

6. 結 果

6.1 電子温度と電子密度

静電探針による電子温度と電子密度の測定結果を図9, 10に示す。測定はアルゴンプラズマ(以後Arプラズマ)と O_2 を添加されたアルゴンプラズマ(以後Ar- O_2 プラズマ)の両方に対して行われた。図9より, 酸素が添加されると電子温度が低下することが解る。その理由の一つとして次のことが考えられる。 O_2 がArプラズマに添加されると, アルゴン準安定原子との衝突により準安定状態の酸素原子 ($2p^4\ ^1D$ or $2p^4\ ^1S$) が生じる。これらの準安定原子は, 電子との衝突により高い励起準位に励起される(式(7))。即ち, 電子がその運動エネルギーを準安定酸素原子に与え, 電子からエネルギーが放出された結果として電子温度がさがら。下流に於ける電子温度の増加は, マッハディスクの前方に広がる電子の熱層に由来している。電子密度の分布は, Arプラズマでは, $x/D=$

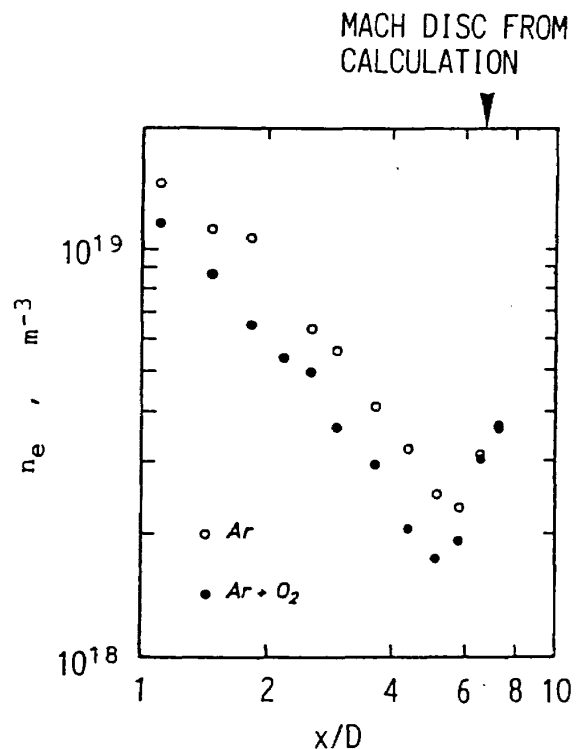


図10 電子密度の軸方向分布

1.1での 1.7×10^{19} 個/ m^3 から $x/D=5.8$ での 2.5×10^{18} 個/ m^3 まで、膨張により減少する。また、 $x/D=6$ 付近に見られる増加はマッハディスクによる圧縮の効果である。数値計算で求められたアルゴンの数密度に対して、電離度 $\alpha \sim 10^{-3}$ が得られるので、流れの場はアルゴン中性原子により支配されていると見なしてよい。 O_2 を添加することにより、プラズマが減衰するのが見られるが、電子密度の変化はArプラズマの場合に類似している。

6.2 アルゴン励起準位の占有密度

Ar I 430.0nm (4s [3/2]–5p [5/2]) と 415.9nm (4s [3/2]–5p [3/2]) の二本のスペクトル線強度測定から準位 5p [5/2] と 5p [3/2] の占有密度が決定された。図11に Ar (5p [5/2]) の占有密度 (統計力学的重率 g で除した値) の噴流軸上分布の実

験結果と比較のために前節の数値計算で得られた軸上の密度分布の結果を示す。 $x/D=0.73$ で実験と数値計算結果を一致させてある (数値計算結果は流れ場での中性アルゴン原子の数密度で巨視的な流れ場の密度変化の様子を示している。実験で得られた励起準位の占有密度との直接的な数値比較は出来ないが、上記準位に励起された原子が断熱膨張すれば達成されるであろう密度変化を表している)。 O_2 を添加したときの占有密度の減衰が明瞭に観察できる。Ar, Ar- O_2 プラズマの両方に於て、占有密度の変化は、上流部では、数値計算により予測される変化に近いが、 $x/D \sim 2$ より下流では、数値計算結果より急速な減少を示している。Arプラズマの場合は、この急速減少は、電離気体の衝撃波前方に一般に観測されるいわゆるダークスペースであると解釈される¹⁷⁾。占有密

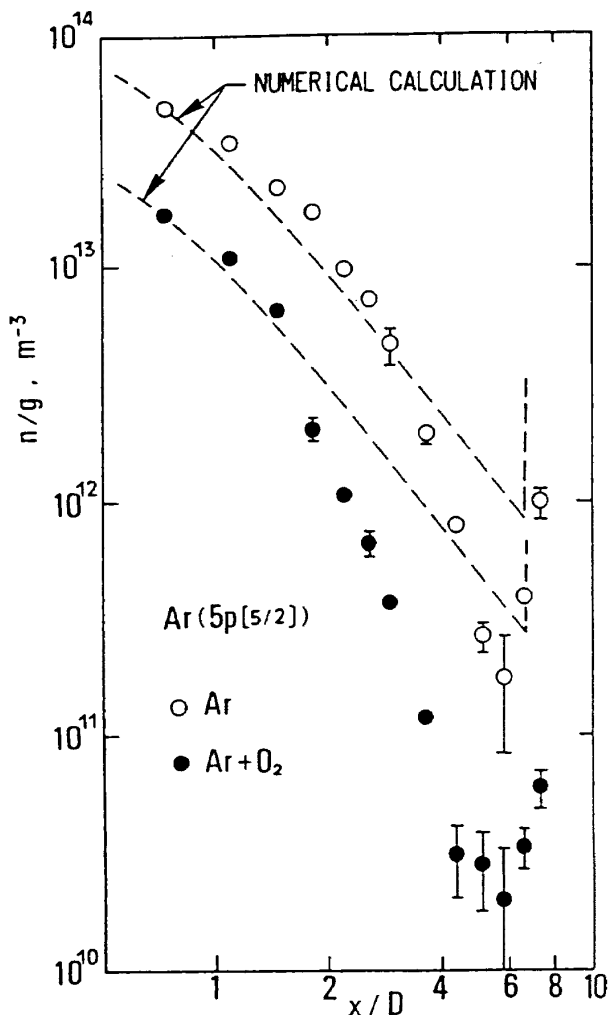


図11 Ar (5p [5/2]) 準位の占有密度の軸方向分布

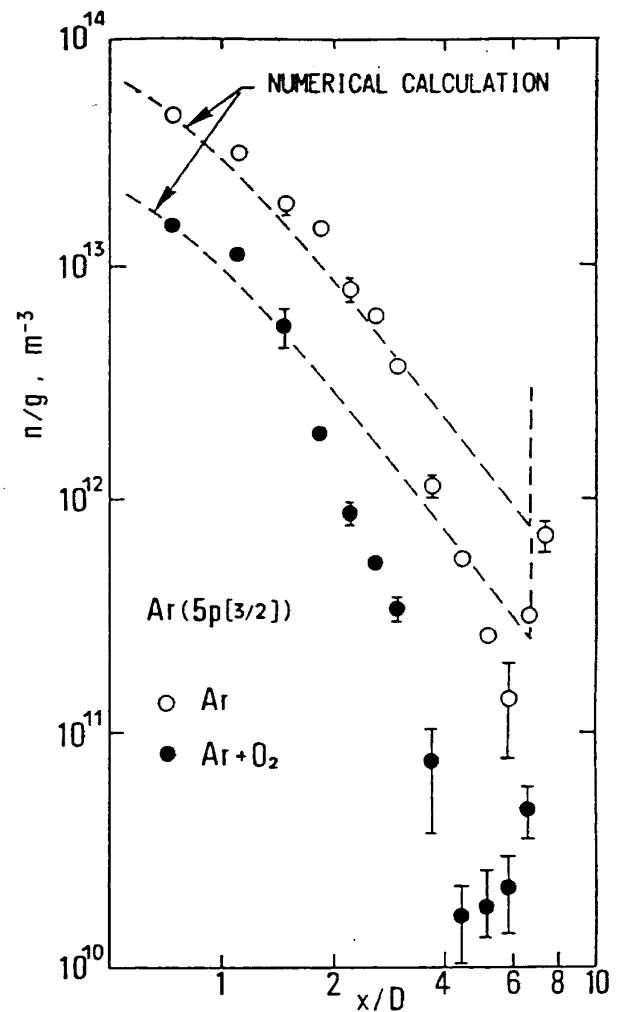


図12 Ar (5p [3/2]) 準位の占有密度の軸方向分布

度の急速減少は、Ar-O₂ プラズマでも見られる。 $x/D \sim 6$ の下流側の占有密度の増加はマッハディスクによる圧縮により生じている。図12に Ar(5p [3/2]) の占有密度分布を示す。この準位の占有密度の挙動は、図11の場合に類似している。

6.3 酸素原子励起準位の占有密度

測定された自由噴流軸上の O(3p³P) と O(3p⁵P) の占有密度分布を、数値計算結果(その意味はアルゴンの場合と同様である)と共に、図13、図14に示す。これらの結果より、酸素原子が生成されていることが確認できる。図より O(3p³P) の密度(統計力学的重率で割った値)は $x/D = 0.73$ で $n/g = 3.0 \times 10^{13}$ 個/m³ から $x/D = 4.4$ における $n/g = 5.7 \times 10^{10}$ 個/m³ まで減少し、それよりマッハディスクによる圧縮をうけて増加する。また、O(3p⁵P) の密度は、 $x/D = 0.73$ で $n/g = 1.03 \times 10^{13}$

個/m³ より $x/D = 4.4$ における $n/g = 2.2 \times 10^{10}$ 個/m³ まで減少する。両準位の占有密度は $x/D \sim 2$ までは数値計算に近い変化を示しているが、それより下流では急速な減少を示しており、マッハディスク直前での実験の最小占有密度は、数値計算結果の約1/10となっている。これは両準位ともその占有密度の正味の生成速度が負になっていること、即ち、その準位から流出する粒子数が、流入する粒子数より多くなっていることを意味している。実験結果より、O(3p³P) の密度(n) は自由噴流で $5.1 \times 10^{11} \sim 2.7 \times 10^{14}$ 個/m³ の範囲にあり、O(3p⁵P) の密度は $3.5 \times 10^{11} \sim 1.5 \times 10^{14}$ 個/m³ にある。この値は高度500kmに存在する酸素原子密度に相当している。本実験では、基底状態(2p⁴ ³P_{0,1,2})にある酸素原子密度の測定は出来なかったが、その密度は上記測定占有密度より大きいので、さらに低い高度の状態に対応できる。

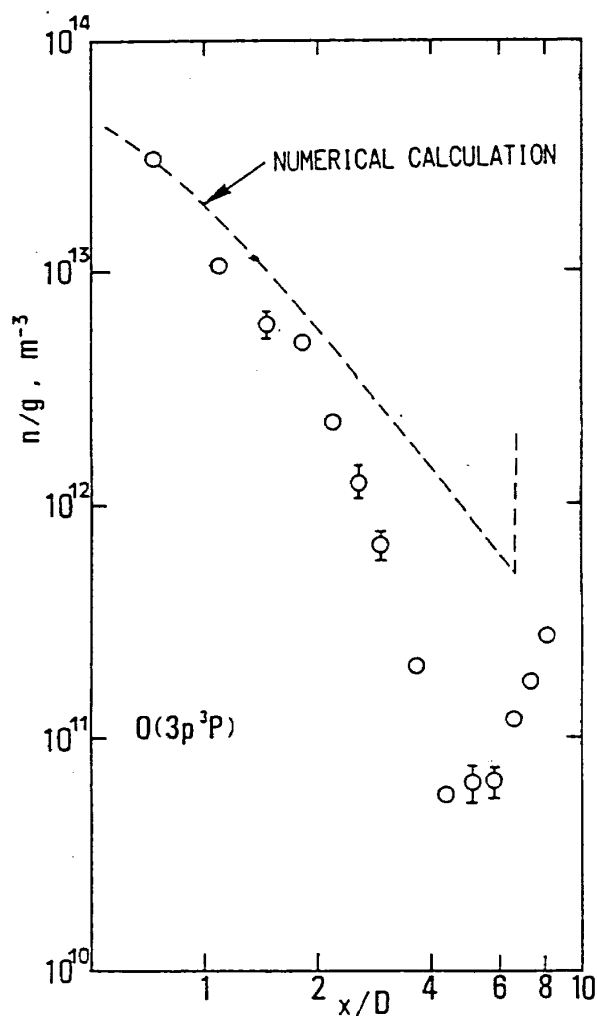


図13 O(3p³P) 準位の占有密度の軸方向分布

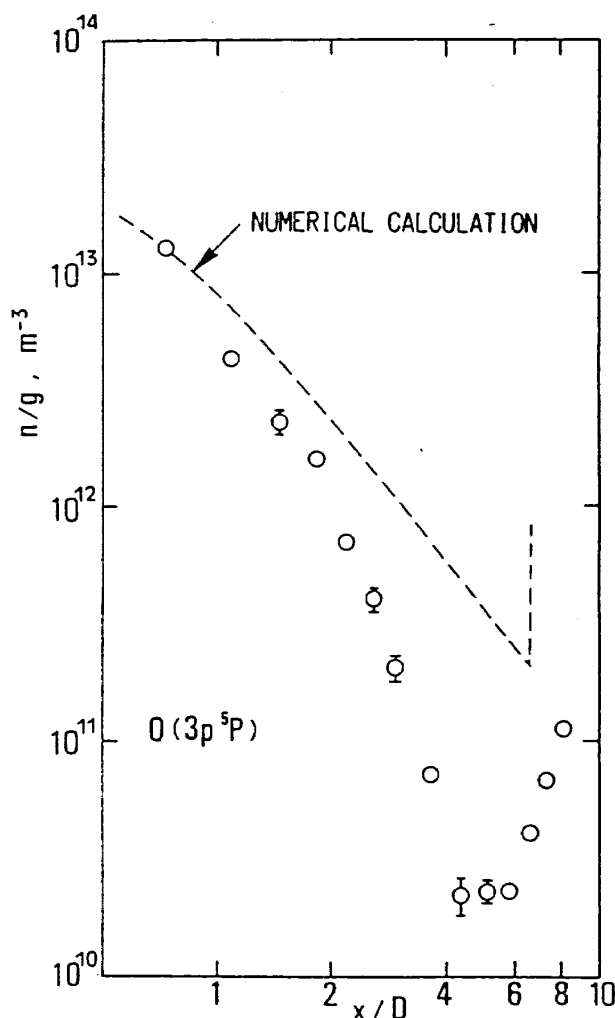


図14 O(3p⁵P) 準位の占有密度の軸方向分布

自由噴流中にスキマーとコリメータを置いて分子ビームを作ること考える。酸素原子は速度と温度に関してアルゴンと平衡になっていると考える。軸上噴流速度分布を図15に示す。この噴流速度が分子ビーム速度となるならば、 $x/D=1.1, 2.2, 4.4$ でビームを作るとき、 $O(3p^3P)$ の流束は、それぞれ 2.0×10^{17} , 4.9×10^{16} , 1.3×10^{15} 個/ m^2s となる。この結果より、 $x/D=1.1$ における流束は、高度500kmを速度8km/sで飛行する宇宙構造物への酸素分子の衝突流束条件 8×10^{16} 個/ m^2s を満たしていることが解る。基底状態にある酸素原子の密度は、 $3p^3P$ 励起準位の占有密度より高いので、本実験で得られた酸素原子をビーム化するとき、高度500km以下の条件を満たしていることは十分に期待できる。

図15に本実験の貯気槽温度と測定された自由噴流マッハ数より得られた噴流速度の軸上分布を示す。軸上流速は最大で約1.9km/sであり、軌道速度8km/sを模擬出来ない。母気体としてヘリウムを用いればかなり速度を増加出来るが、流束の減少が避けられない。このエネルギー差が表面反応にどの程度の影響があるのか現在の研究段階では明確でないが、反応のしきい値についての議論もあり¹⁸⁾、所要の速度を得るための工夫が必要であろう。

宇宙ステーションのような長期間(20~30年)運用される飛行体のための各種材料を十分に試験するためには、最終的にかなりのフルーエンス(積分流束)が必要であろう。今回使用したようなアーク加熱型の酸素原子源は、比較的低電力でよいので数時間の連続運転は可能である。電極の交換等によりこれを繰り返していけば流束の積分は出来るが、大きなフルーエンスの達成は現実的ではない。さきにふれた他の形式の酸素源についても同様に問題がある。

7. ま と め

宇宙環境試験用酸素原子ビーム装置を製作する予備研究として、現在までに試作された各種装置の性能を概観し、アーク加熱型風洞を用いた実験データによりその環境試験装置としての適用性を

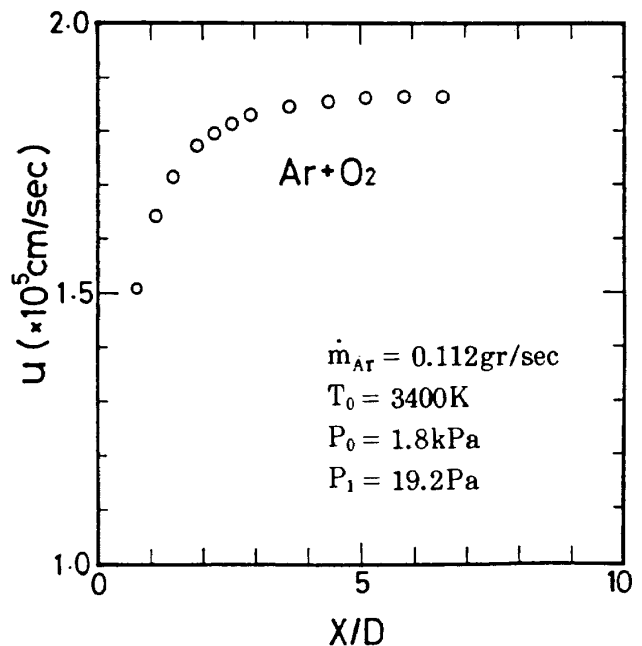


図15 噴流軸上の速度分布

評価した。アーク加熱方式により酸素原子のビームを作れば、流速の不足等に改善の余地があるが、一応の環境試験が可能であろう。よりよい装置の開発のために、レーザー加熱方式等を検討していく必要がある。主要な結論は以下のようにまとめられる。

(1) アーク加熱により生成された低密度弱电離アルゴンプラズマの自由噴流中で酸素分子を解離させ、OI 844.6, 777.3nmの2本のスペクトル線の絶対強度の測定から、 $O(3p^3)$ と $O(3p^5)$ 準位の占有密度を決定し酸素原子の生成を確認した。

(2) 達成できる流速は最大約1.9km/sであり、軌道速度8km/sの模擬には不十分である。表面反応にはエネルギーのしきい値も存在しうるので、一層の加速の工夫が必要である。

(3) 自由噴流中の両酸素原子準位の占有密度は $10^{11} \sim 10^{14}$ 個/ m^3 の範囲にあり、これはLEOの条件を満たしていると考えられる。自由噴流速度が分子ビーム速度になるとすると $O(3p^3)$ の流束は $x/D=1.1$ に於て 2.0×10^{17} 個/ m^2s となり、高度500kmでの流束条件 8×10^{16} 個/ m^2s を満たしていることが解る。基底状態にある酸素原子の密度はより高いので、より低い高度の流束条件に対応できる。

(4) 長時間飛行に対応出来るように各種材料を

十分に試験するためにはかなりのフルーエンスが必要であろうが、その為には風洞の長時間運転を必要とし、この装置で対応することは必ずしも現実的でない。

(5) 酸素原子の測定に加えて、母気体の弱電離アルゴンプラズマの電子温度、電子密度、励起準位占有密度を測定した。また、数値シミュレーションにより流れ場の構造を把握した。これらのデータは酸素原子ビームの特性解析に有用であろう。分光計測もビームの分析に有効であることがわかった。

参 考 文 献

- 1) D. R. Peplinski, G. S. Arnold, and E. N. Borson ; Introduction to Simulation of Upper Atmosphere Oxygen Satellite Exposure to Atomic Oxygen in Low Earth Orbit, Proceedings of the 13th Space Simulation Conference, NASA CP-2340, pp.133-145 (1984)
- 2) J. T. Durcanin, D. R. Chalmers and J. T. Visentine ; The Definition of the Low Earth Orbital Environment and its Effect on Thermal Control Materials, AIAA-87-1599 (1987)
- 3) J. T. Visentine, L. J. Leger, J. F. Kuminecz and I. K. Spiker ; STS-8 Atomic Oxygen Effects Experiment, AIAA-85-0415 (1985)
- 4) D. G. Zimcik ; Advanced Composite Materials Exposure to Space Experiment (ACOMEX) on STS 41-G, Canadian Aeronautics and Space Journal 31, 249-255 (1985)
- 5) C. K. Lam ; A Hypersonic Atomic Oxygen Molecular Beam Source, UTIAS Report No.212 (1976)
- 6) R. C. Tennyson, J. B. French, L. J. Kok, J. Kleiman and D. G. Zimcik ; An Atomic Oxygen Facility for Studying Polymer Materials for Spacecraft Applications, Proceedings of the 13th Space Simulation Conference, NASA CP-2340, pp.169-192 (1984)
- 7) A. Freedman, W. Unkel, J. Silver and C. Kolb ; Hypervelocity Supersonic Nozzle Beam Source of Atomic Oxygen, Proceedings of the 13th Space Simulation Conference, NASA CP-2340, pp.146-149 (1984)
- 8) G. S. Arnold and D. R. Peplinski ; A Facility for Investigating Interactions of Energetic Atomic Oxygen with Solids, Proceedings of the 13th Space Simulation Conference, NASA CP-2340, pp.150-167 (1984)
- 9) P. Mahadevan ; Atomic Beam System for Laboratory Simulation of Upper Atmospheric Oxygen Atom Impact on STS Surfaces, Proceedings of the 13th Space Simulation Conference, NASA CP-2340, pp.222-227 (1984)
- 10) G. E. Caledonia, R. H. Krech and B. D. Green ; A High Flux Source of Energetic Oxygen Atoms for Material Degradation Studies, AIAA J.25, 59-63 (1987)
- 11) J. B. Cross, D. A. Cremers, L. H. Spangler, M. A. Hoffbauer and F. A. Archuleta ; CO₂ Laser Sustained cw Discharge Atomic Beam Source, Proc. 15th Int. Symp. on Rarefied Gas Dynamics, Italy (1986)
- 12) 渡辺泰夫, 平林則明 ; 低密度プラズマ流のスペクトル特性 (I)アルゴンプラズマ, 航技研報告 TR-954 (1987)
- 13) R. D. Larrabee ; Spectral Emissivity of Tungsten, J. Opt. Soc. Am.49, 619-625(1959)
- 14) J. A. Silver, A. Freedman, C. E. Kolb, A. Rahbee and C. P. Dolan ; Supersonic Nozzle Beam Source of Atomic Oxygen Produced by Electric Discharge Heating, Rev. Sci. Instrum. 53, 1714-1718 (1982)
- 15) D. L. King, L. G. Piper and D. W. Setser ; Electronic Energy Transfer from Metastable Argon (4s³P_{2,0}) to Xenon, Oxygen and Chlorine Atoms, JCS, Faraday Trans-

- actions II, 73, 177-200 (1977)
- 16) P. Collela and H. M. Glaz ; Efficient Solution Algorithm for the Real Gases, Lawrence Lab., Univ. Calif. LBL-15776 (1983)
- 17) M. Nishida ; Dark Space ahead of a Shock in Ionized Gas Flows, Z. Naturforsch. 36a, 980-991 (1981)
- 18) G. S. Arnold, D. R. Peplinski and F. M. Cascarano ; Translational Energy Dependence of the Reaction of Atomic Oxygen with Polyimide Films, J. Spacecraft and Rockets 24, 454-458 (1987)

航空宇宙技術研究所報告 989号

昭和63年8月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1
電話三鷹(0422) 47-5911(大代表) ㊦182
印刷所 株式会社 東京プレス
東京都板橋区桜川 2 - 27 - 12

Printed in Japan