

放電混合型CO₂超音速流レーザーに関する基礎研究 (第2報：微小信号利得係数の測定)

板倉嘉哉^{1)*}

川島佳奈子²⁾

¹⁾千葉大学教育学部

²⁾千葉大学教育学部・学部生

Fundamental Study on Electric Discharge Type CO₂ Mixing Supersonic Flow Laser (2nd Report: Measurement of small-signal gain coefficient)

ITAKURA Yoshiya^{1)*}

KAWASHIMA Kanako²⁾

¹⁾Faculty of Education, Chiba University, Japan

²⁾Faculty of Education, Chiba University, Japan; Undergraduate Student

将来の効率的な宇宙輸送システムの基盤技術としてレーザー推進が注目されており、その要素技術として大出力CO₂レーザーの開発が求められている。機械工学研究室では大出力発振が可能な放電混合型CO₂超音速流レーザーの開発を進めており、これまでに主放電の安定化と放電電力の増大を目的に、高周波による予備放電を付加したときのN₂超音速流中での放電特性を明らかにしてきた。本報告では、従来の放電部に改良を加え、その放電特性を明らかにするとともに、放電電力の増大効果を検証した。また、改良された実験装置で微小信号利得係数を測定することにより、数密度反転分布を形成したレーザー媒質が生成可能であることを実証した。

Development of high power laser is a technical subject on the realization of laser propulsion. Particularly, CO₂ laser is a important candidate for power source. In the present paper, using the RF pre-discharge technique for electric discharge type CO₂ mixing supersonic flow laser, the glow discharge power in N₂ supersonic flow has been measured in the N₂ reservoir pressure range from 0.0063~0.0663 MPa (absolute pressure). The effect of preliminary electron seeding on the discharge power has been demonstrated. Due to this effect, the maximum main-discharge power is increased to 1.9kW. Furthermore the dependence of small-signal gain coefficient on CO₂ reservoir pressure is measured, and, positive small-signal gain coefficient is obtained. The possibility of this CO₂ mixing supersonic flow laser is assured.

キーワード：超音速流 (Supersonic flow) 炭酸ガスレーザー (CO₂ Laser) グロー放電 (Glow discharge)
高周波放電 (RF discharge) 微小信号利得係数 (Small-signal gain coefficient)

主な記号

- f : Frequency, Hz
- G₀ : Small-signal gain coefficient, 1/m
- I : Laser intensity, W
- I_d : Discharge current, A
- L : Width of laser cavity, m
- N : Number density, 1/m³
- P^s : Reservoir pressure (absolute pressure), Pa
- R_B : Ballast resistance, Ω
- T : Temperature, K
- V_d : Discharge voltage, V
- W_d : Discharge power, W
- Z : Collision frequency, 1/s
- λ : Wave length, m
- ν : Frequency of molecular vibration, 1/s
- ρ : Voltage reflection coefficient
- τ : Spontaneous radiative lifetime, s

1. 緒 言

将来宇宙開発の進展に伴って予想される大量物資の宇宙への輸送を低価格で実現できる、次世代低コスト打ち上げシステムの一つとしてレーザー推進¹⁾が挙げられる。レーザー推進とは、宇宙機より離れた場所からレーザービームにより遠隔的にエネルギーを供給し、そのエネルギーを直接、推進剤の熱・運動エネルギーに変換し、推力を得る推進システムであり、レーザー伝送形態の相違から、“CWレーザー推進”と“RPレーザー推進”の2つに分類することができる。CWレーザー推進の原理をFig. 1に示す。その大きな特徴として、地上もしくは宇宙空間に設置されたレーザー基地からレーザーを推進機に照射するだけで推力を得ることができ、宇宙機がエネルギー源を携帯せずすむため、電気推進システムに必要とされていた太陽電池パドルや電源、電力制御システム等のペイロード重量が軽減できること、従来のような化学ロケットの複雑なシステムを搭載する必要がないこと等が挙げられる。また、空気を燃料とする大気吸い込み型レーザー推進では、酸化剤や燃料を推進機自身が搭載す

*連絡先著者：板倉嘉哉

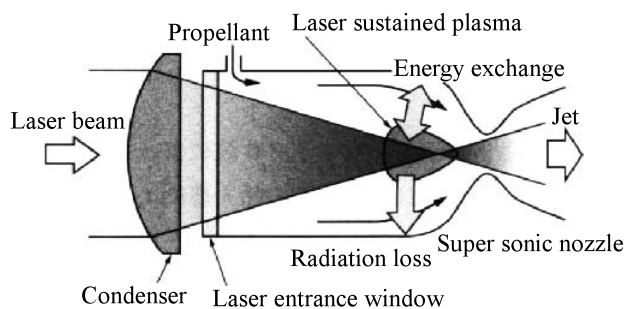


Fig. 1 Laser propulsion concept.

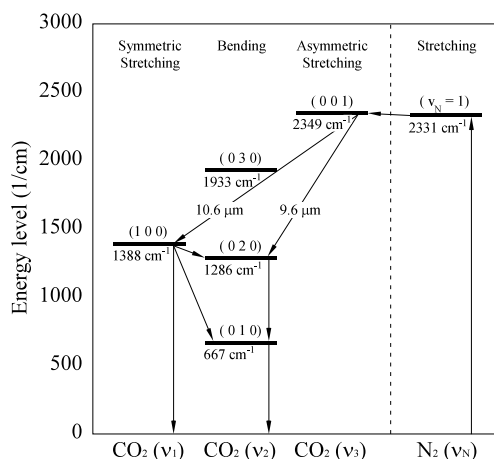
る必要がないため、効率的に大量の物資を運ぶことが可能となる。

レーザー推進の実現に向けては、高効率・高出力のレーザーの開発や高い精度の照射制御技術の確立が必要となるが、高出力レーザーに対応するものとしては、大気中で気体分子による吸収が少ない赤外域（ $8 \sim 14 \mu\text{m}$ ）に発振波長を有する CO_2 レーザーの使用が有望視されている。 CO_2 レーザーはエネルギー変換効率が高く（量子効率40%）、気体レーザーの一種であることにより流量増加である程度までは比較的容易に出力を増大させることができるが、さらなる大出力化には CO_2 の励起方法から見直す必要がある。現在、 CO_2 レーザーを含めた大出力気体レーザーの励起方法としてはガスダイナミック型²⁾と放電励起型³⁾に大別することができる。ガスダイナミック型は高温・高圧状態の気体を超音速ノズルで急激に断熱膨張させることにより、分子振動緩和時間の差により媒質に数密度反転分布を形成させ、レーザー出力を得ようとするものである。放電励起型は主としてグロー放電により、媒質中の上位エネルギー準位を励起するものであり、グロー放電中での電子-分子衝突による振動励起確率が高く、発振効率も高い。 CO_2 レーザーの場合、どちらの励起形式においてもレーザー媒質となる気体を予め混合（予混合型）して利用するより、振動励起された N_2 ガスと CO_2 を混合させる方がレーザー発振のための振動エネルギーを有効に利用することができる。放電混合型のレーザーに関する研究としては、超音速流中でのグロー放電を N_2 の振動励起に利用した研究は非常に少ない。

これらの背景を踏まえ、機械工学研究室ではグロー放電により振動励起された N_2 と CO_2 を超音速流状態で混合させ、高出力レーザー発振を実現する装置を設計し開発を進めてきた。これまでの研究経過では、 N_2 超音速流中での直流グロー放電を確立した後、放電電力の増大及び不安定性（アーク放電への移行）の改善を目的に高周波グロー放電による予備放電を付加し装置の改良を行ってきた。その成果として、予備放電の付加により N_2 超音速流中で安定に直流グローによる主放電が確立できることを確認し、その放電特性を解明した⁶⁾。本報告では、予備放電部に更なる改良を加え、 N_2 の振動励起を高効率で実現する放電部に改修するとともに、生成された励起状態の N_2 と CO_2 を超音速状態で混合させ、光子の増幅作用を有するレーザー媒質となり得るかを微小信号利得係数の測定により検証した。

2. CO_2 レーザーの理論²⁾

一般的な分子の持つエネルギー準位のうち上下2準位に着目すると、熱力学的な平衡状態においてはMaxwell-Boltzmann分布が成り立ち、上位準位にある分子の数密度は下位準位にある分子の数密度より小さくなる。しかし、平衡状態にある系へ放電や急激な温度変化等の擾乱が与えられると、上位エネルギー準位にある分子の数密度が下位エネルギー準位にあるものよりも大きくなる状態が形成されることがある。この状態を数密度反転もしくは負の温度状態と呼び、レーザー発振を可能とする必要条件である。 CO_2 レーザーでは分子内の振動エネルギーに数密度反転分布を形成させ、振動エネルギー準位間の遷移によりレーザー光を発振させるものである。 CO_2 は線形3原子分子であり、その基本振動の数は $3N-5$ （ N は原子数）すなわち4個である。その基本振動モードは対称伸縮モード ν_1 、屈曲モード（2重に縮退） ν_2 、非対称伸縮モード ν_3 の3モードが存在する。また、 CO_2 へのエネルギー供給体（ポンピング体）となる N_2 は2原子分子であり、軸対称伸縮モード ν_N のみを有しており、これらの振動エネルギー準位はFig. 2のように量子化された階段状のエネルギー準位を持つ。 CO_2 レーザーの主発振波長である $10.6 \mu\text{m}$ は CO_2 の（001）と（100）間の遷移により放射される光子である。他の準位間の放射遷移としては（001）と（020）および（010）と（020）間が知られており、 $9.6 \mu\text{m}$ のレーザー発振が可能であるが、主発振波長 $10.6 \mu\text{m}$ に比べるとその強度は非常に弱く1/10以下程度である。

Fig. 2 Vibrational energy levels of CO_2 - N_2 system.

放電励起型の CO_2 レーザーにおいては、数密度反転分布は次のようにして形成される。 CO_2 分子は放電による放出電子との衝突により3種の基本振動モードの持つ様々な振動エネルギー準位へ励起される。純 CO_2 中のグロー放電中では ν_1 、 ν_2 モードへの励起よりも ν_3 モードへの励起が起りやすく、（001）準位の数密度が増加し数密度反転分布が形成されレーザー作用が生じるが、（100）、（010）や（020）などの下位準位も同時に励起されるため、強い発振強度は得られない。そこで、通常の CO_2 レーザーの媒質には CO_2 と N_2 と He （もしくは H_2O ）の混合気体を使用している。 N_2 の振動励起状態 $\nu_N = 1$

は準安定状態であって、そのエネルギーはCO₂の ν_3 振動モード (001) とエネルギー差が極めて小さく、共鳴的にエネルギー移乗が起こり (近共鳴状態)、(001) 単位の効果的な励起 (振動エネルギーのポンピング作用) がおこなわれる。また、CO₂ よりも N₂ の方が放電中の電子衝突による振動励起効率が高いので、N₂ の混合はCO₂ の数密度反転分布の形成を補助することになる。さらに、分子の振動エネルギー単位はほぼ等間隔であるから、N₂ と CO₂ の高次振動エネルギーも反転分布の形成に有効に作用する。媒質中の He の作用は、放電を安定化するとともに、CO₂ との衝突により下位単位のエネルギーを吸収し失活させ、その数密度を減少させる作用がある。

振動励起されたCO₂ の (001) と (100) 単位間に数密度反転分が形成されていれば、自然放出、誘導放出が生じ光の増幅作用が現れる。すなわち、Fig. 3 に示すように数密度反転分布を形成した厚さ dL の気体層に $10.6\ \mu\text{m}$ の微小強度 I のレーザー光を入射し、出力側で観測される強度を $I + dI$ とすると、 dI は正となるはずである。

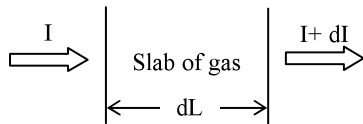


Fig. 3 Definition of small-signal gain coefficient.

ここで、負の吸収係数として微小信号利得係数を式(1)で定義する。この微小信号利得係数の物理的解釈としては、レーザー媒質中における単位長さあたりの光の増幅率と考えられる。

$$G_0 = \frac{dI}{IdL} \quad (1)$$

一方、CO₂ + N₂ 混合気体中での (001) から (100) への遷移における自然放出、誘導放出及び吸収過程を考え、 $10.6\ \mu\text{m}$ バンドにおける P (20) 遷移が支配的であるとすると、微小信号利得係数は近似的⁷⁾に式(2)で与えられる。式(1)及び(2)により dI と $(N_{(001)} - N_{(100)})$ が関連付けられ、実験的に dI が計測できれば、その混合気体が数密度反転分布を形成したレーザー媒質になり得るかを検証することができる。

$$G_0 = \frac{\lambda^2}{4\pi\tau Z} (N_{(001)} - N_{(100)}) \left(\frac{45.6}{T} \right) e^{-234/T} \quad (2)$$

3. 実験装置

3.1 放電混合型CO₂超音速流レーザーの概要

機械工学研究室で研究が進められている放電混合型CO₂超音速流レーザーの概略をFig. 4に示す。本装置では、N₂超音速流中で直流グロー放電を形成することにより振動励起されたN₂分子を生成し、別ノズルにより生成したCO₂超音速流を混合させることにより、N₂ ($\nu_N = 1$) とCO₂ (001) 間で共鳴衝突遷移によるエネルギー移乗を行い、CO₂ の上位単位である ν_3 振動モードの数密度を選択的に増加させて数密度反転を形成させている。本形式のレーザーにおいては、以下のような特徴がある。

1. 装置全体を常温に設定でき、特殊な材料等を使用する必要がない。
2. 気体を超音速ノズルで急激に断熱膨張させるので並進温度を低く保持でき、下位単位のエネルギーを失活させやすい。
3. 超音速流中でのグロー放電は、気体が放電部を通過する時間が非常に短く、放電に対する熱的不安定性が生じにくい。
4. グロー放電中では電子衝突によるN₂分子の振動励起確率が高く、電子エネルギー (放電電力) からN₂の振動エネルギーへの変換効率が高い。
5. 振動励起されたN₂分子とCO₂分子を混合し衝突させ、共鳴衝突遷移によりCO₂分子を振動励起させるため、上位単位を選択的に励起でき、下位単位を同時に励起することがない。
6. 前記2および5の特徴により、失活第3体であるHe等の添加は必要ない。

ノズル形状⁷⁾の決定に際しては、放電が形成されるノズル出口で、正規グロー放電を維持できる圧力 (数十 torr) 程度となるように設計した。Table 1に実験で使

Table 1 Configurations of super sonic nozzle.

	N ₂	CO ₂
Exit area, mm ²	7.48	19.61
Throat area, mm ²	1.76	3.14
Expansion ratio	4.25	6.25
Nozzle shape	Conical nozzle	
Mach number	3.0	3.4

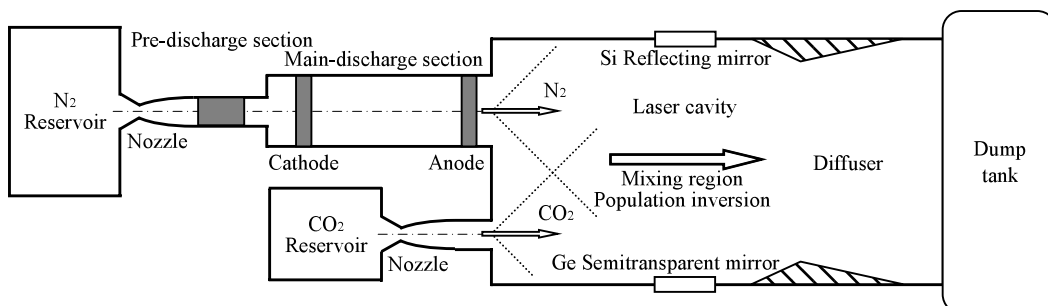


Fig. 4 Schematic diagram of the electric discharge type CO₂ mixing supersonic flow laser.

用した超音速ノズルの主要諸元を示す。また、前述したように、本実験装置は N_2 および CO_2 の超音速流を生成し混合させる方式を採用しており、混合距離を短縮するために小径ノズルを複数個 (N_2 ノズル4本および CO_2 ノズル10本) 配置するものとした。

設計ノズル形状において、完全気体の等エントロピー流⁸⁾であると仮定し、ノズル出口 (レーザーキャビティ部) での諸量を算出するとTable 2のようになる。理論上では、自続放電が可能な条件を満足している。

Table 2 List of typical flow properties.

Reservoir pressure, MPa	0.0063~0.1
Reservoir temperature, K	293.0
Exit pressure, kPa	0.2~2.7 (0.15~20 torr)
Exit temperature, K	104.6

3.2 放電部の構造

放電部は N_2 分子を振動励起する主放電部と、その上流側に位置する予備放電部から構成され、その概略をFig. 5に示す。

(1) 主放電部

N_2 超音速流は予備放電部出口から半頂角5度、長さ10 mmの膨張部を経て、主放電部陰極に導かれる。4本の主放電管は内径8 mm、長さ100mmのパイレックスガラス管で製作されており、その両端には内径8 mmと長さ15mmのBS製 (真鍮) 陰極と CO_2 貯気槽およびスクリーンノズルとが一体構造になったBS製ブロック型陽極が配置される。 CO_2 貯気槽と陽極を一体構造にしたのは、直流放電により高温となる陽極を冷却させる効果をもたせるためである。また、主放電部への電力供給には日本測器製の直流高電圧電源 (容量: 10kV, 1.2 A) を使用

した。なお、直流グロー放電は負抵抗特性を持つため、放電電極と電源の間に4本の安定化抵抗 (耐電力500W) を直列に接続してあり、抵抗値は10k Ω 及び20k Ω のものを用意した。

(2) 予備放電部

予備放電部は主放電部に初期電子を供給することを目的に、 N_2 超音速ノズル出口と主放電部との間に設置される。予備放電部では、ノズル出口と主放電部陰極を結ぶ内径6 mm、長さ60mmのパイレックスガラス管流路外側にBS製リング電極を取り付け、高周波電圧を印加することにより高周波グロー放電を行った。容量性結合を採用することにより、流路内に流れを乱す電極を設置する必要がなくなり、超音速流中で安定したプラズマを生成することが可能となる。高周波電源としてはENI Power Systems Inc. 製HPG-2型 (発振周波数: 125~375 kHz, 最大出力: 150W) を使用した。

3.3 微小信号利得係数の測定

Fig. 6に微小信号利得係数測定装置の概略を示す。測定には、小型 CO_2 レーザー (自作, 最大出力40W) の発振光を赤外領域 (12 μ m) まで優れた透過性を有するフッ化カルシウム窓を通して測定部に入射させ、レーザー媒質流れ無し時と流入時のレーザー光強度変動をサーモバ

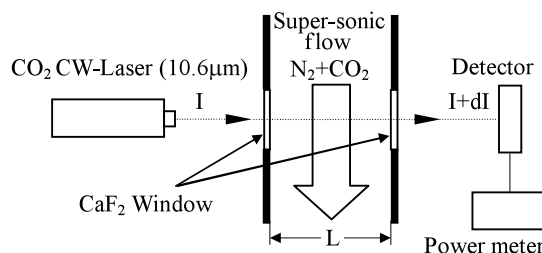


Fig. 6 Schematic of instrumentation for the measurement of small-signal gain coefficient.

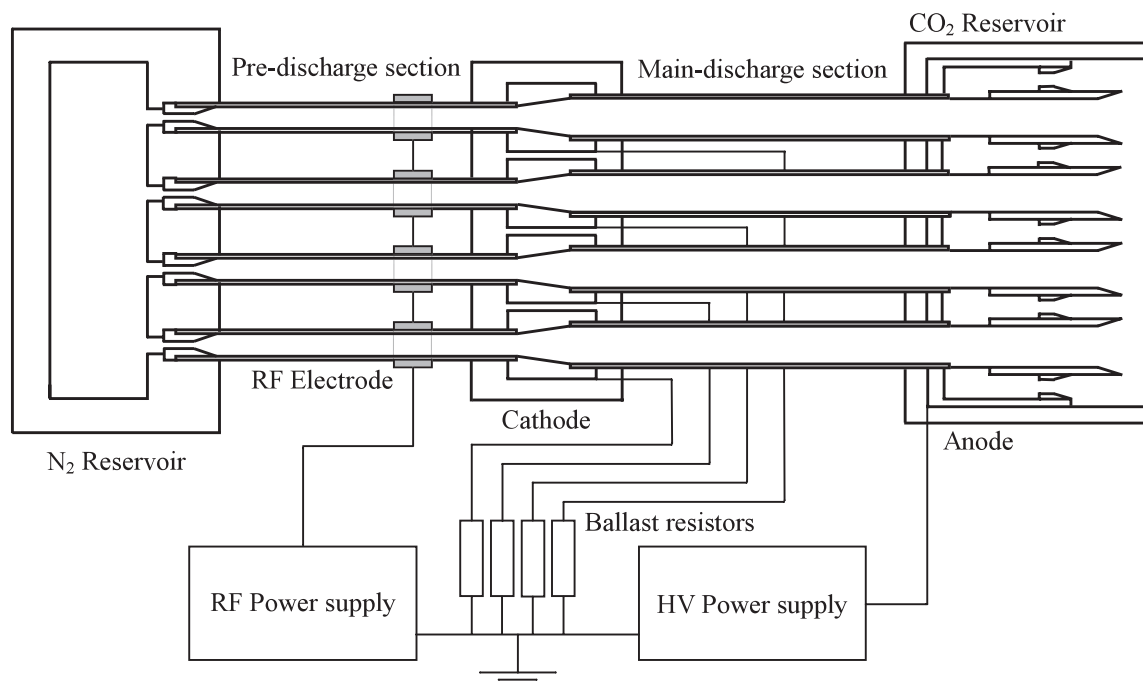


Fig. 5 Schematic diagram of pre and main discharge section.

イル型検出器（OPHIR製30A-SH-V1型）で計測した。

得られたレーザー光強度の変動から微小信号利得係数を算出する際には、式(1)を流路幅方向へ積分して得られる式(3)を使用した。なお、本装置での流路幅Lは84mmである。

$$G_0 = \frac{1}{L} \ln \frac{I + dI}{I} \quad (3)$$

4. 結果及び考察

4.1 主放電特性

Fig. 7に主放電管長100mm、安定抵抗10kΩにおける、N₂貯気槽圧（絶対圧）を変化させたときの、主放電の放電電流I_dに対する放電電圧V_d（放電管印加電圧）及び放電電力W_d（主放電部消費電力）の関係を示す。放電電流0.4A以上で、放電電圧は1kV前後で電流によらずほぼ一定値を示しており、正規グロー放電¹⁰⁾が形成されていることが確認できる、しかし、0.4A以下の低電流領域では、貯気槽圧が高くなると電流の減少に対し電圧はわずかに上昇しており、前期グロー的特性を示している。

貯気槽圧の変化に対して、放電電圧に大きな変化は無く、約1kVで推移していることから、放電電力は電流に対して直線的に変化することになる。放電電力は高圧電源の安全装置が作動するまで投入可能であるが、部分的にアーク放電に移行することもあり、安定抵抗10kΩでの最大電流は約1Aが限界であった。そのため、主放電部に投入できる最大電力は約1kWとなるが、この最大電力は電極の状態および加工精度によるところも大きいと思われる。

また、安定抵抗が10kΩの場合、計測可能な最小電流は約0.3A、主放電が自続可能な最大貯気槽圧は0.0163Mpaであり、必ずしも適切な抵抗値ではないと思われる。

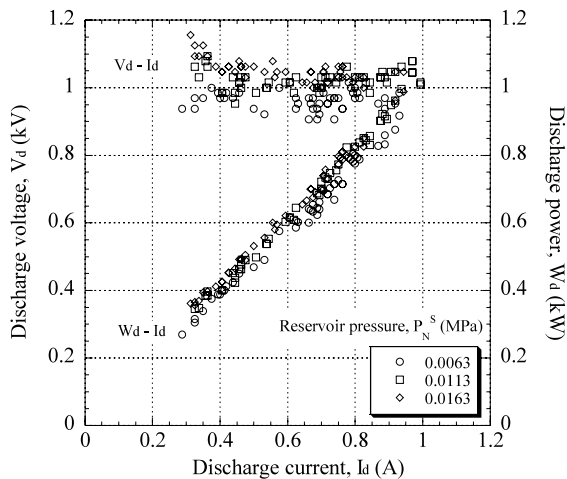


Fig. 7 Discharge voltage and power characteristics ($R_b=10k\Omega$).

そこで、安定抵抗を20kΩに交換して得られた結果がFig. 8である。抵抗値を変えることにより、実験可能な範囲は最小電流約0.01A、最大電流約1.1A、最大貯気槽圧は0.0263Mpaまで拡大することができた。本実験装置で使用している高圧電源は10kV、1.2Aと大容量であり、安定抵抗は20kΩの方が適切な抵抗値であると言

える。

前述したように、貯気槽圧が上昇すると放電電流の減少に対し放電電圧が上昇する前期グローの特性が出現することになり、Fig. 8でも、その特性が顕著に現れている。貯気槽圧の上昇は放電部の圧力上昇（数密度上昇）をもたらし、低電流領域では電極での放電面積が放電管内全体に広がっていないため、放電管半径方向の電子拡散損失が無視できないからだと考えられる。

安定抵抗値を変えると高い貯気槽圧での実験が可能になり、放電電圧—電流特性は変化するが、電流の増加とともに放電電圧は約1kVに漸近しており、放電部に投入できる最大電力は安定抵抗10kΩのときと同じ約1kWであった。

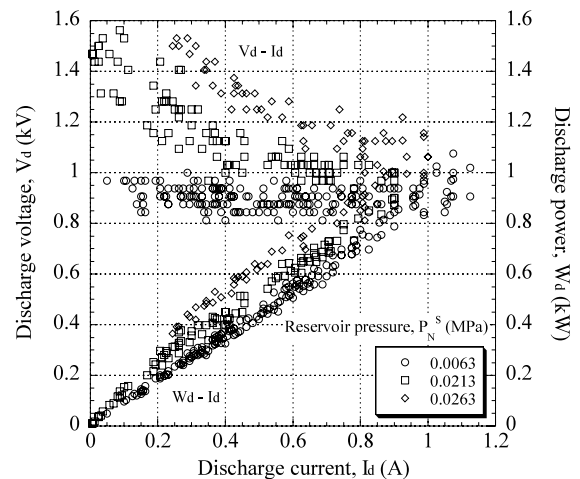


Fig. 8 Discharge voltage and power characteristics ($R_b=20k\Omega$).

4.2 予備放電特性

本実験装置では、主放電部における投入電力の増大及び不安定性（アーク放電への移行）改善を目的に高周波グロー放電による予備放電を付加し、装置の改良を行っている。しかし、高周波グロー放電を装置の特性改善に有効に作用させるためには、高周波電源と放電部間のインピーダンス整合をとらなくてはならない。インピーダンスに不整合があると、給電線を伝送されてきた高周波電圧（進行波）が不連続部分で反射し、逆向きに進行する電圧（反射波）が発生することになり、無効な電力が増加するばかりでなく、電源装置自体を破壊してしまう恐れがある。そこで、予備放電部の周波数特性を式(4)で与えられる定在波比（SWR: Standing Wave Ratio）により評価し、最適な高周波放電の運転条件を明らかにした。

$$SWR = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|} \quad (4)$$

SWRは周波数の変化に対し極小点を取り、その整合周波数は貯気槽圧の上昇とともに高い周波数側にシフトしていくことが確認⁶⁾されている。これは、容量結合による高周波放電で生成されるプラズマをモデル化した等価回路¹¹⁾はコイル、キャパシタ及び抵抗による一種の共振回路を形成しており、貯気槽圧が変化することにより予備放電部の静圧も変化し誘電率も変化するため、この

ような周波数特性が現れると考えられる。

Fig. 9は予備放電部に高周波電力50Wを投入し、N₂貯気槽圧を変化させたときの整合周波数（SWRが極小となる周波数）であり、パラメータは安定抵抗値である。貯気槽圧に対し周波数はほぼ直線的に変化しており、図中に示す近似式を得ることができた。任意の貯気槽状態で装置を運転するときは、この近似式により高周波放電の最適周波数を求めることが可能となる。なお、安定抵抗値により整合周波数-貯気槽圧関係が一致しないのは、高周波放電の管内電極は安定抵抗を通して接地されているが、安定抵抗には巻線抵抗器を使用しており、抵抗値が変わると誘導性リアクタンスも変化するからである。

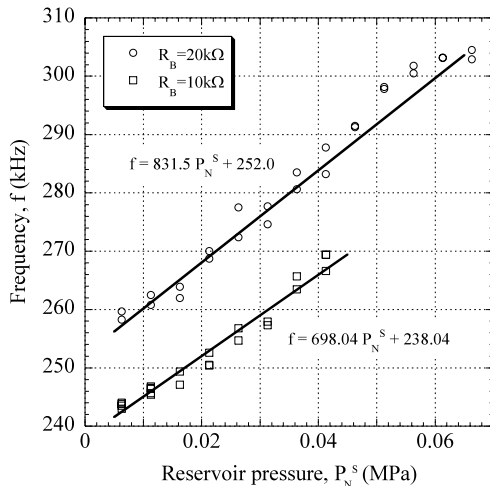


Fig. 9 Dependence of matching frequency on reservoir pressure.

4. 3 主放電特性（予備放電付加）

Fig. 10は安定抵抗20kΩ、50Wの高周波電力を予備放電に投入した際の主放電の放電電流に対する放電電圧の関係を示したものである。予備放電を付加することにより、主放電のみでは不可能だった貯気槽圧0.0663MPaでも放電を自続させることが可能となった。これは、主放電部への超音速流中に初期電子が生成されることにより、電子生成・消滅速度を支配するパラメータE/N（電

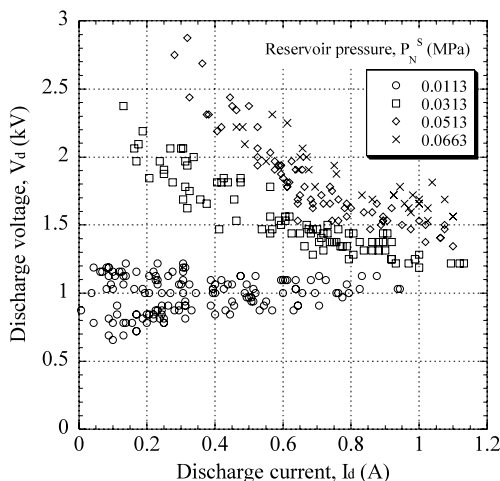


Fig. 10 Discharge voltage characteristics with RF pre-discharge ($R_B=20k\Omega$).

界と気体粒子の数密度の比)が低下し、放電開始条件が緩くなったためである。貯気槽圧の増大は高マッハ数での実験を可能にし、装置全体の性能を向上することができると考えられる。貯気槽圧0.0113MPaでは、放電電圧は電流によらず約1kVで一定値を示しており、正規グローが形成されているのがわかる。しかし、貯気槽圧が上昇すると、放電電流の増加とともに放電電圧が減少するようになり前期グロー的特性を示すようになるが、その理由は前述したとおりである。また、貯気槽圧が高くなるほど、その傾向は強くなり、放電電圧も最大で約2.9kVまで上昇している。

Fig. 11は主放電の放電電流に対する放電電力の関係を示したものである。貯気槽圧の上昇とともに、放電電圧は一定とならず、電流に依存して変化するようになり、放電電力と電流の関係も直線とはならないが、放電電流の増加は放電電力の増加をもたらすことになる。予備放電を付加したときの最大放電電力は約1.9kWであり、主放電のみの1kWと比較すると、90%の増大効果（1.9倍）を得ることができた。

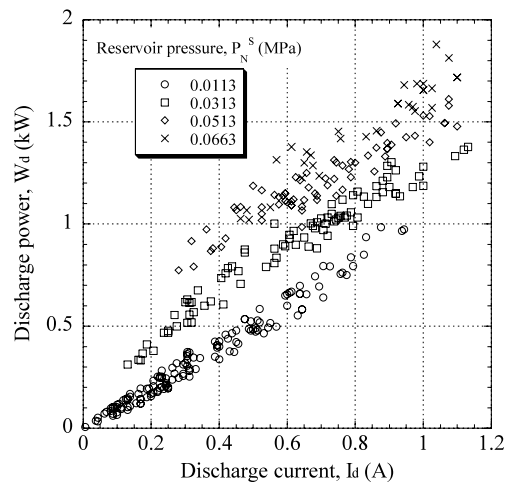


Fig. 11 Discharge power characteristics with RF pre-discharge ($R_B=20k\Omega$).

4. 4 微小信号利得特性

これまでの主及び予備放電特性を踏まえ、主放電管長100mm、安定抵抗20kΩ、N₂貯気槽圧0.0213MPa、予備放電投入電力50W、主放電投入電力約0.5kWなる運転条件で、CO₂ノズル出口から下流260mmの位置で微小信号利得係数を測定した結果がFig. 12である。CO₂貯気槽圧0.0263MPaでは、CO₂側電磁弁を開くと入射したレーザー光は吸収され、微小信号利得係数は負となり、数密度反転分布は形成されていないことがわかる。これは、貯気槽圧が低くCO₂超音速流が形成されないため、N₂との混合が阻害されるとともにレーザー強度の計測地点に到達する前にCO₂ (001) 準位が失活しているのが原因であると思われる。CO₂貯気槽圧を0.0513MPaまで上昇させると超音速が始動し、微小信号利得係数は正になり、数密度反転分布を形成したレーザー媒質が生成されていることを実証することができた。

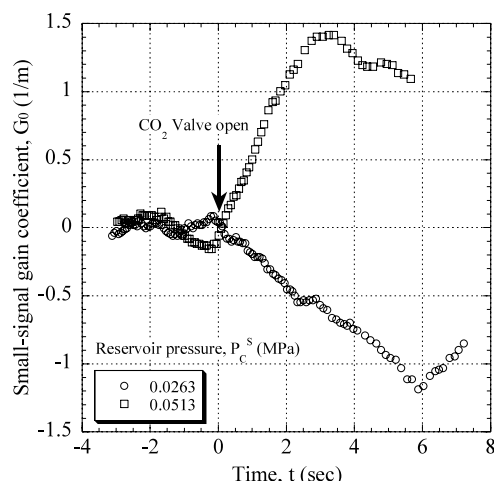


Fig. 12 Small-signal gain coefficient measurements as a function of time ($R_B=20k\Omega$, $P_N^s=0.0213$ MPa).

5. 結 言

放電混合型CO₂超音速流レーザー実現に向けた基礎研究として、これまでの予備放電部を改良しその放電特性を明らかにするとともに、N₂とCO₂超音速混合流中での微小信号利得係数の測定を実施した。本研究により、以下なる知見が得られた。

- 1) 改良した予備放電部リング電極により、これまでより低い投入電力においても、高い貯気槽圧で高周波グロー放電を自続させることに成功した。
- 2) 高周波による予備放電の貯気槽圧に依存した整合周波数特性を解明し、最適な運転が可能になった。
- 3) 予備放電の付加により、N₂貯気槽圧を最大0.0613 MPaまで増大させても、主放電を自続させることが可能になった。
- 4) 高いN₂貯気槽圧は、主放電電力の増大につながり、従来の1.9倍もの電力での実験が可能になった。
- 5) CO₂超音速流との混合による微小信号利得係数の測定では約1.5 (1/m) なる利得を得ることができ、改良された本装置により数密度反転分布が形成可能であることを実証した。

放電混合型CO₂超音速流レーザー装置により、正の微小信号利得を得ることができ、高効率で高出力なレーザー光発振の可能性が見出された。しかし、最終目標である高出力レーザー発振の実現に向けては、乗り越えるべき課題が数多くあり、共振器系の構築、高マッハ数化、予備+主放電の最適化……等、更なる改良が必要である。

謝 辞

本研究の一部は卒業研究として細々と進めてきたものであり、機械工学研究室の卒業生である関口明快君、加藤恒樹君、大橋宏嗣君、平井愛さんに深く謝意を捧げるものであります。

参考文献

- 1) 栗木恭一, 荒川義博 [編], 電気推進ロケット, 東京大学出版会, 2008年
- 2) S.A. Losev, Gasdynamic Laser, Springer-Verlag, 1981
- 3) 宅間宏, 量子エレクトロニクス入門, 培風館, 1972
- 4) C.O. Brown, A High Power CO₂ Electric Discharge Mixing Laser, UAR-j206, United Aircraft Corp. Research Lab., 1970.
- 5) P. Hoffman, Discharge Behavior of a RF Excited High Power CO₂ Laser at Different Excitation Frequencies, Proc. 6th int. Sym. on GCL, SPIE Vol. 650, 1986.
- 6) 板倉嘉哉, 平井愛, 放電混合型CO₂超音速レーザーに関する基礎研究 (第1報: N₂超音速流中でのグロー放電特性), 千葉大学教育学部研究紀要, Vol. 57, 2009年
- 7) J.D. Anderson, Jr., Gasdynamic Lasers: An introduction, Academic press, 1976.
- 8) R. Harrop, P.I.F. Bright, et al, The Design and Testing of Supersonic Nozzles., Aeronautical Research Council Reports and Memoranda, 1953.
- 9) H.W. Liepman, A. Roshko, Elements of Gasdynamics, John Wiley & Sons, 1960.
- 10) 武田進, 気体放電の基礎, 東明社, 1985年
- 11) 八坂保能, 放電プラズマ工学, 森北出版, 2007年