

放電・混合型炭酸ガス超音速流レーザーに関する研究

板倉嘉哉[†], 川島佳奈子

千葉大学 教育学部

前野一夫

千葉大学大学院 工学研究科

Experimental Study on Electric Discharge Type CO₂ Downstream Mixing Supersonic Laser

by

Yoshiya ITAKURA and Kanako KAWASHIMA (Chiba University, Faculty of Education)

Kazuo MAENO (Chiba University, Graduate School of Engineering)

ABSTRACT

Development of high power laser is a technical subject on the realization of laser propulsion. Particularly, CO₂ laser is an 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 to 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.

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
 P_{N₂}^S : N₂ Reservoir pressure (absolute pressure), Pa
 P_{C₂}^S : CO₂ Reservoir pressure (absolute pressure), Pa
 R_B : Ballast resistance, Ω
 T : Temperature, K
 V_d : Discharge voltage, V
 W_d : Discharge power, W
 ρ : Voltage reflection coefficient

1. 結論

航空宇宙工学分野へのレーザー技術の応用として、超音速飛行体前方に照射した繰返しレーザーパルスにより誘起されるプラズマと衝撃波の干渉による抵抗低減¹⁾や、次世代低コスト打ち上げシステムとして期待されるレーザー推進²⁾が挙げられる。その実現へ向けては数々の技術的課題があるが、その一つとして、平均パワーが数百kWクラスの高出力かつ高効率レーザーの開発がある。

高出力・高効率レーザーに対応するものとして、大気中で気体分子による吸収が少ない赤外域(8~14μm)に発振波長を有するCO₂レーザーの使用が有望視されている。CO₂レーザーはエネルギー変換効率がよく(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、現在、百kWクラスであれば構築可能であるが、さらなる大出力化にはCO₂の励起方法から見直す必要がある。現在、CO₂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^{3), 4)}と放電励起型⁵⁾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。CO₂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)として利用するより、振動励起されたN₂ガスとCO₂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用いた報告^{6), 7)}は数例存在するが、超音速流中でのグロー放電をN₂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、筆者らはグロー放電により振動励起されたN₂とCO₂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⁸⁾では、N₂超音速流の始動を確認し、直流グロー放電を確立した。また、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N₂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。本報告では、予備放電部に更なる改良を加え、N₂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N₂とCO₂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. 実験の概要

2.1 放電混合型CO₂超音速流レーザーの概要

CO₂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。CO₂は線形 3 原子分子であり、その基本振動モードは対称伸縮モードν₁、屈曲モード(2重に縮退)ν₂、非対称伸縮モードν₃の 3 モードが存在する。また、CO₂へのエネルギー供給体(ポンピング剤)となるN₂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図 1 のように量子化された階段状のエネルギー準位を持つ。CO₂レーザーの主発振波長である 10.6μmはCO₂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、9.6μmのレーザー発振が可能であるが、主発振波長 10.6μmに比べるとその強度は非常に弱く 1/10 以下である。

[†] 千葉大学教育学部, 〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33

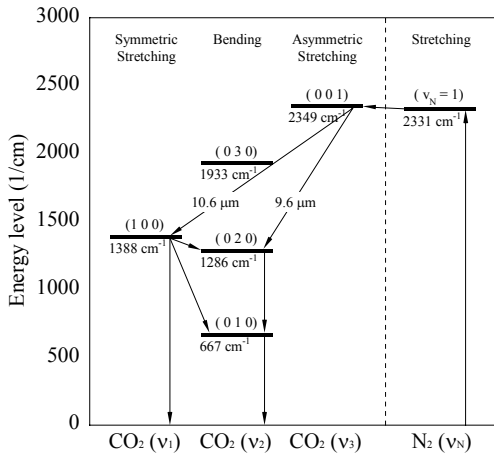


Fig. 1 Vibrational energy levels of CO_2 - N_2 system.

高出力かつ高効率発振に向けて研究を進めている放電・混合型 CO_2 超音速流レーザーの概略を図 2 に示す。本装置では、 N_2 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 N_2 分子を生成し、別ノズルにより生成した CO_2 超音速流と混合させることにより、 N_2 ($v_N=1$)と CO_2 (001)準位間で共鳴衝突遷移によるエネルギー移乗を行い、 CO_2 の上位準位である v_3 振動モードの数密度を選択的に増加させ、 CO_2 (100)準位間に数密度反転を形成させるものである。本形式のレーザーにおいては、以下に示すような特徴を有する。

- A) 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。
- B) 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、下位準位のエネルギーを失活させるのに有効である。

- C) 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、熱的不安定性が生じにくい。
- D) グロー放電中では電子衝突による N_2 分子の振動励起確率が高く、電子エネルギー（放電電力に比例）から N_2 の振動エネルギーへの変換効率が低い。
- E) 振動励起された N_2 分子と CO_2 分子を混合し衝突させ、共鳴衝突遷移により CO_2 分子を振動励起させるため、上位準位(001)を選択的に励起でき、下位準位(100)を同時に励起することがない。
- F) 前記 B 及び E の特徴により、失活体である He 等の添加が必要ない。

ノズル形状⁹⁾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。また、本装置は N_2 及び 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、 N_2 ノズル出口を中心にその周囲 10mm 角の四隅に CO_2 小径ノズル出口を配置した。実際の装置では、19.2mm間隔で水平に並べた 4 本の N_2 ノズル出口周囲に、10 本の CO_2 ノズル出口を配置した。表 1 に実験で使用した超音速ノズルの主要諸元を示す。実際の超音速流路及び放電部の位置関係を図 3 の写真に示す。ノズルを出た N_2 超音速流は青矢印方向へ進み、4 本のパイレックスガラス製予備放電部及び主放電部を経て、分子振動励起された状態でレーザーキャビティへと導かれ CO_2 と混合する。

Table 1 Configurations of supersonic 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

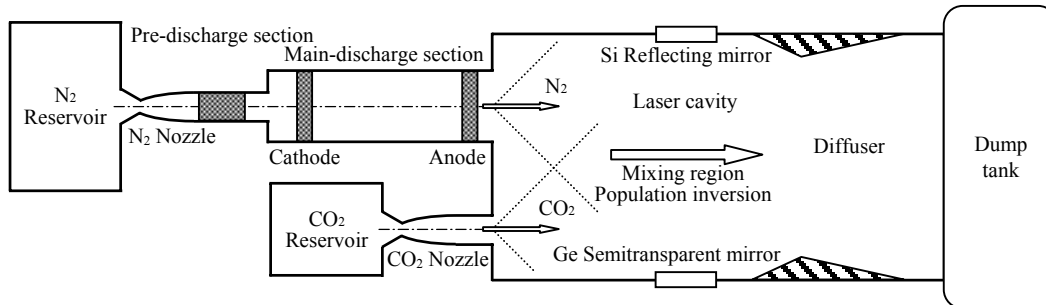


Fig. 2 Schematic diagram of the electric discharge type CO_2 downstream mixing supersonic flow laser.

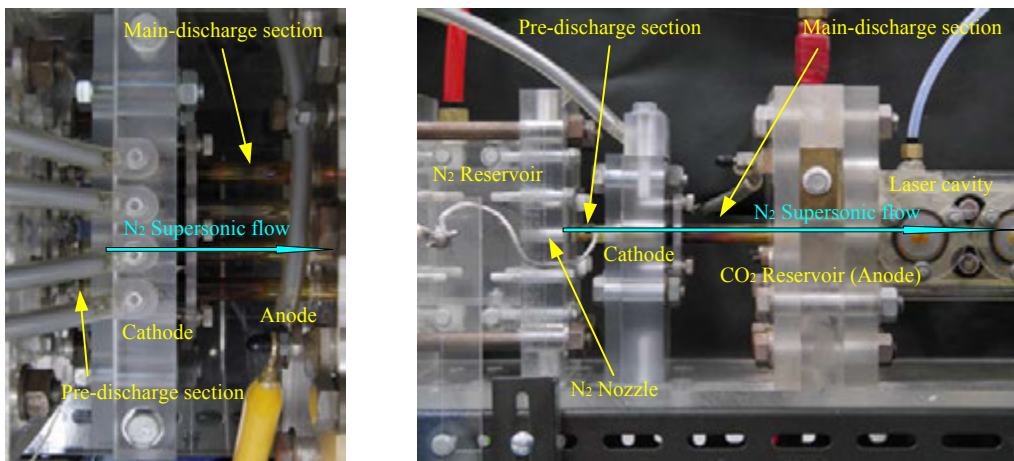


Fig. 3 Pre and main discharge section arrangement for electric discharge type CO_2 downstream mixing supersonic flow laser.

2.2 放電部の構造

放電部はN₂分子を直流グロー放電で振動励起する主放電部と、その上流側に位置する高周波グロー放電による予備放電部から構成される。その構造を図4に示す。

2.2.1 主放電部

N₂超音速流は予備放電部出口から半頂角 5 度、長さ 10mm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 8mm、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 8mmと長さ 15mmのBS製（真鍮）陰極とCO₂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。CO₂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最大容量 10kV、1.2Aの直流高電圧電源（日本測器）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

の安定抵抗（耐電力 500W）を直列に接続してある。その抵抗値は 10kΩ及び 20kΩのものを用意した。

また、主放電管への印加電圧及び放電電流の計測には、高電圧受動型プローブ（Pintek, HVP-15HF）及び接地側回路に電磁的に結合した電流プローブ（Fluke, i30s）を使用し、データロガー（Pico, ADC-20）により記録した。

2.2.2 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、N₂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陰極を結ぶ内径 6mm、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：125~375kHz、最大出力：150W）を使用した。

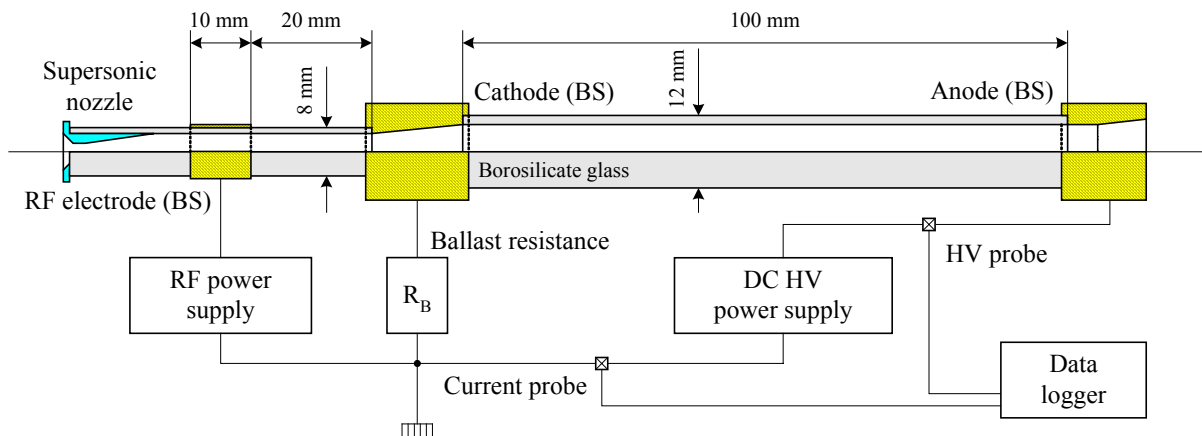


Fig. 4 Schematic diagram of the electric discharge type CO₂ mixing supersonic flow laser.

2.3 微小信号利得係数の測定

振動励起されたCO₂の(001)と(100)準位間に反転分が形成されていれば、光子の増幅作用が現れる。その増幅作用の指標である微小信号利得係数⁴⁾測定装置の概略を図5示す。測定には、小型CO₂レーザー（自作、最大出力 40W）のビーム光を赤外領域（12μm）まで良好な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パイル型検出器（OPHIR, 30A-SH-V1）及びパワーメータ（OPHIR, NOVA）で計測した。

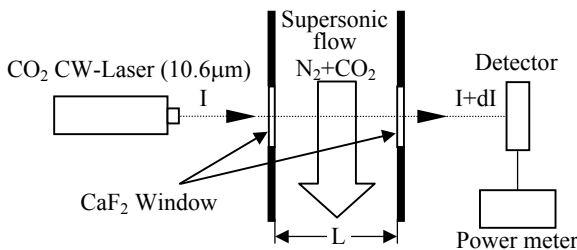


Fig. 5 Schematic of instrumentation for the measurement of small-signal gain coefficient.

上記計測系で得られたレーザー光強度の変化から微小信号利得係数を算出する際には、式(1)を使用した。なお、本装置での流路幅 L は 84mm である。

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

3. 結果及び考察

3.1 主放電特性

図6は、放電電圧 1kVにおける、主放電部の写真である。黄赤色¹⁰⁾をしたN₂陽光柱を確認することができる。

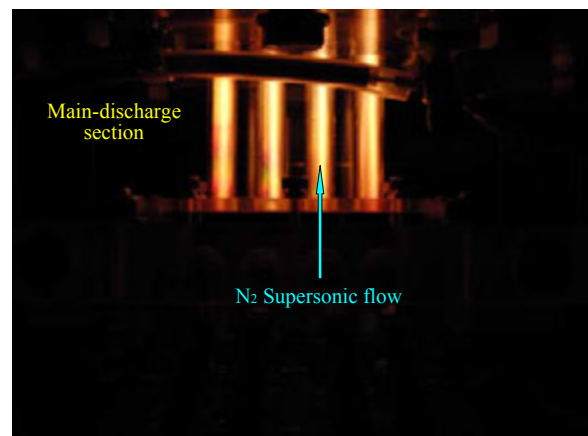


Fig. 6 Positive column of main-discharge.

図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する傾向を示しており、前期グロー的特性が現れている。

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及び加工精度によっても大きいと思われる。また、安定抵抗が 10kΩ の場合、実験可能な最小放電電流は約 0.3A、主放電が自続可能な N₂ の最大貯気槽圧は 0.0163MPa であり、必ずしも適切な安定抵抗値ではないと思われる。

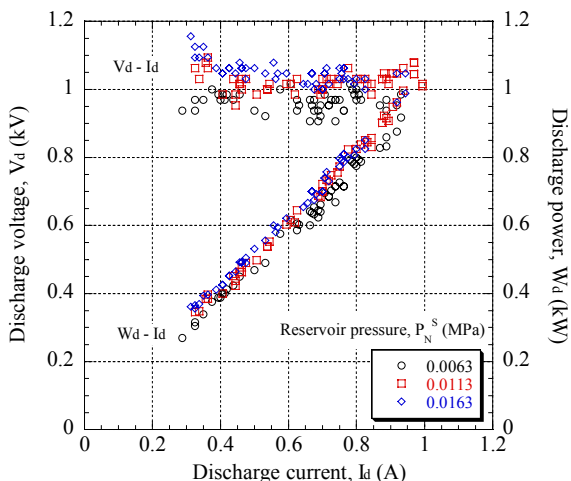


Fig. 7 Discharge voltage and power characteristics ($R_B=10k\Omega$).

そこで、安定抵抗を 20kΩ に交換して得られた結果が図 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可能になった。本実験装置で使用している高電圧電源は 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的特性が出現することになり、図 8 においても、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）をもたらす。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。

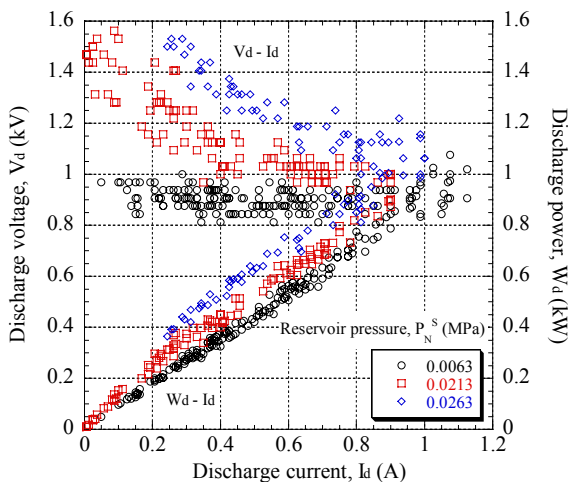


Fig. 8 Discharge voltage and power characteristics ($R_B=20k\Omega$).

安定抵抗値を変えると高い貯気槽圧での主放電が可能になり、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。

3.2 高周波予備放電特性

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電圧反射係数 ρ （電力反射係数の平方根）により式(2)で定義される、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。

$$SWR = \frac{1+|\rho|}{1-|\rho|} \quad (2)$$

図 9 に N₂ 各貯気槽圧における、SWR の周波数依存性を示す。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できる。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と考えられる。

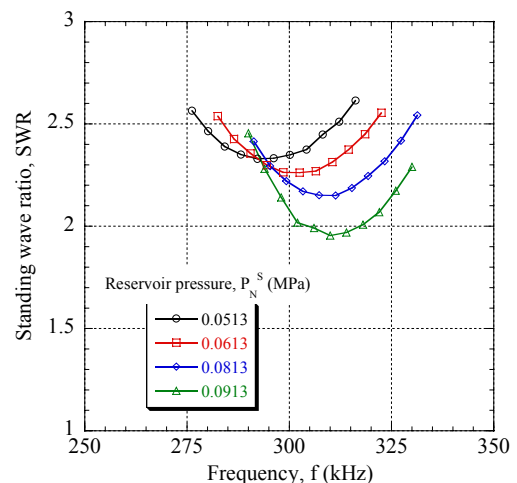


Fig. 9 Frequency dependence of standing wave ratio.

図 10 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得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おり、安定抵抗には電力型巻線抵抗器を使用しているため、抵抗値が変わると誘導性リアクタンスも変化するためである。

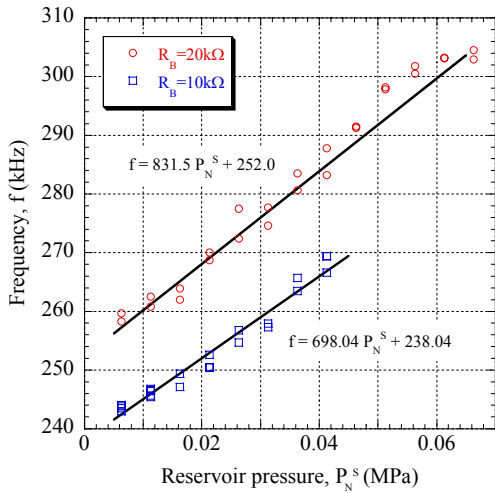


Fig. 10 Dependence of matching frequency on reservoir pressure.

3.3 主放電特性（予備放電付加）

図 11 は、予備放電電力 50W、主放電電圧 1kVにおける、予備及び主放電部の写真である。主放電部の陽光柱は、図 6 と同じく黄赤色の発光をしているが、予備放電部ではN₂の負グローである青色¹⁰⁾の発光を確認することができる。高周波によるグロー放電では極性が周期的に変化するため、陽光柱と負グローの発光が重なって見えることになる。また、これらの発光形態は放電部の圧力に影響を受け、放電部の圧力が 1~10⁻¹Paでは負グローの発光のみが発現するからである。

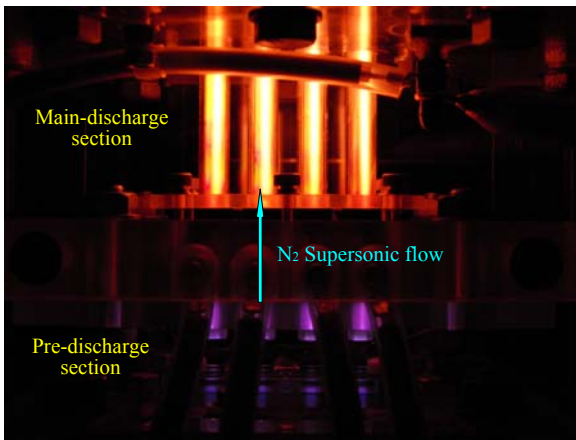


Fig. 11 Positive column of main-discharge and negative glow of pre-discharge.

図 12 は安定抵抗 20kΩ、高周波電力 50W 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をシーディングすることにより、電子生成及び消滅速度を支配するパラメータ E/N（電界と気体粒子の数密度の比）が変化し、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。

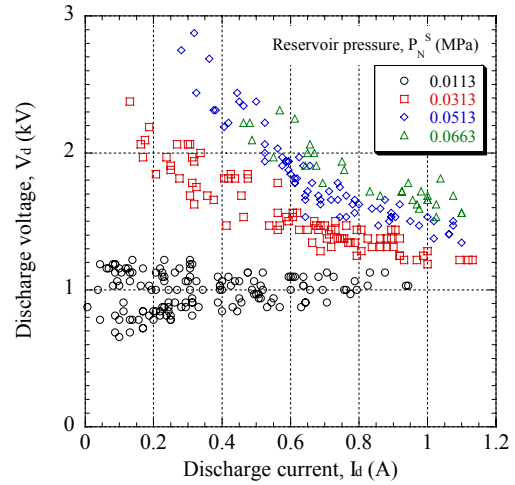


Fig. 12 Discharge voltage characteristics (R_B=20kΩ).

図 13 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。前述したように、N₂貯気槽圧の上昇とともに、放電電圧は一定とならず、放電電流の上昇に対し放電電圧は低下することになる。その結果、放電電流と電力の関係は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変わりはない。予備放電付加時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、約 90%の増大効果を得ることができた。

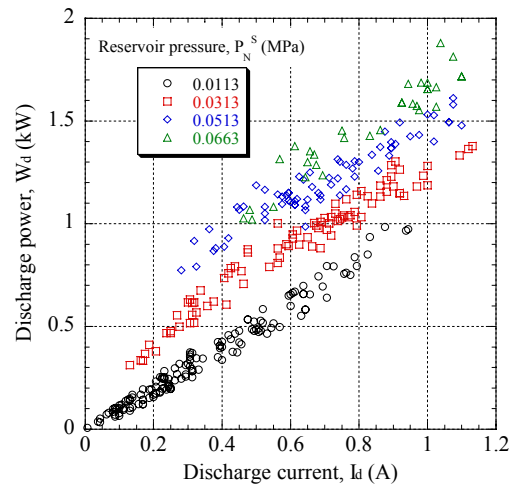


Fig. 13 Discharge power characteristics (R_B=20kΩ).

3.4 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、予備放電投入高周波電力 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図 14 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、光子の増幅作用を有する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超音速流が始動していないためレーザーキャビティ部で 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以前に、レーザー発振を生じる CO₂(001)準位が失活しているのが原因であると考えられる。しかし、CO₂側貯気槽圧を 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約 1.5m^{-1} となることを確認することができた。本実験装置により光子の増幅作用を有するレーザー媒質が生成可能であることを実証することができた。

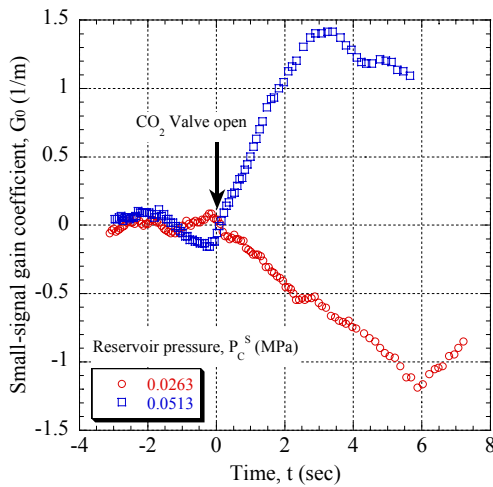


Fig. 14 Small-signal gain coefficient measurements as a function of time ($R_B=20\text{k}\Omega$, $P_N^s=0.0213\text{MPa}$).

4. 結言

放電・混合型 CO_2 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した。また、 N_2 と CO_2 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。本研究の遂行により、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が可能になった。
- 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 高周波による予備放電の付加により、 N_2 貯気槽圧を最大 0.0663MPa 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 N_2 貯気槽圧は、主放電電力の増大につながり、従来の1.9倍もの電力での主放電が可能になった。
- ⑤ CO_2 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 1.5m^{-1} 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 CO_2 超音速流レーザー装置の開発により、正の微小信号利得を得ることができ、高効率かつ高出力なレーザー発振の可能性が見出された。しかし、最終目標であるレーザー発振の実現に向けては、克服すべき課題が数多く有る。共振器系の構築、高マッハ数化、予備+主放電の最適化…等、更なる装置の改良が必要である。

参考文献

- 1) Tret'yakov et al., Control of Supersonic Flow around Bodies by Means of High-Power Recurrent Optical Breakdown, Physics-Doklady, Vol. 41, No.11 (1996), pp. 566-567.
- 2) 嶋村耕平, 福成雅史 他, 細い管内でのレーザー支持デトネーションの生成とレーザー推進への応用, 日本航空宇宙学会第43期年会講演会, 2012.
- 3) S. A. Losev, *Gasdynamic Laser*, Springer-Verlag, 1981.

- 4) J. D. Anderson, Jr., *Gasdynamic Lasers: An introduction*, Academic press, 1976.
- 5) 宅間宏, 量子エレクトロニクス入門, 培風館, 1972.
- 6) C.O. Brown, A High Power CO_2 Electric Discharge Mixing Laser, UAR-j206, United Aircraft Corp. Research Lab., 1970.
- 7) P. Hoffman, Discharge Behavior of a RF Excited High Power CO_2 Laser at Different Excitation Frequencies, Proc. 6th int. Sym. on GCL, SPIE Vol. 650, 1986.
- 8) 板倉嘉哉, 平井愛, 放電混合型 CO_2 超音速レーザーに関する基礎研究(第1報: N_2 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.
- 9) R. Harrop, P. I. F. Bright, et al., The Design and Testing of Supersonic Nozzles, Aeronautical Research Council Reports and Memoranda, 1953.
- 10) 大木正路, 放電工学とその応用の基礎, 岩波出版サービスセンター, 2007.