

機関番号：13102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560149

研究課題名（和文） 超音速流を用いたTEA CO₂レーザ装置の開発研究課題名（英文） Development of TEA CO₂ laser device with supersonic flow

研究代表者

増田 渉 (MASUDA WATARU)

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号：80143816

研究成果の概要（和文）：レーザ出力の増大を目指して超音速流を用いたTEA-CO₂ガスレーザ装置の開発を行い、超音速流に伴う境界層や衝撃波の発生を抑えてレーザ励起放電に適する超音速ノズルおよび流路の開発に成功した。また、超音速流れ発生に伴う断熱膨張によるレーザ媒質の温度降下を積極的に利用したレーザ出力の増大作用について計算および実験により検討した結果、マッハ数2の流れにおいてCO₂分子の凝結による励起放電の劣化を回避できるガス温度133 Kの場合、室温の場合の約1.4倍の2.25%/cmの小信号利得係数が得られた。

研究成果の概要（英文）：TEA-CO₂ gas laser device using supersonic flow have been studied to increase the laser output. The shock-free supersonic nozzle is successfully developed with precise modification of the flow channel, which results in the stable excitation discharge for lasing. We also investigate the effect of gas temperature fall accompanied by adiabatic expansion on the laser output in the supersonic flow condition at $M = 2$. The small-signal gain is measured at 2.25 %/cm for the supersonic flow of the gas at 133 K in temperature, which is around 1.4 times as high as that obtained for the still laser medium at the room temperature.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究代表者の専門分野：流体力学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：超音速流、炭酸ガスレーザ、放電励起、ゲイン、ガス冷却、グロー放電、衝撃波

1. 研究開始当初の背景

TEAレーザ（Transversely Excited Atmospheric Laser）は、大気圧程度の気体のレーザ媒質に大電力密度（数kW/mm³）で100 ns程度の短パルス放電を行い、パルス状のレーザ出力を得るものであり、その時間平均出力の向上が要求されている。時間平均出力を向上させるには、パルスあたりのエネルギーを増大させる方法と繰り返し発振による方法がある。パルスあたりのエネルギーには限界があるので、繰り返し発振による方法

が一般に採用されている。ここで、大電力密度の放電を繰り返して行うには、励起放電自身により発生する衝撃波や低密度の膨張領域を次の放電までの僅かな時間内に放電空間から除去する必要がある。除去が不十分であるとレーザ発振に適するグロー放電中にアーク放電が混在するようになり、レーザ発振が停止してしまう。従来、この除去にはレーザ媒質をラインフローファン等により流速数十m/sで流し、放電毎に新鮮なレーザ媒質に交換していた。流速や放電空間寸法の

関係から、繰り返し周波数は 1 kHz 程度、時間平均出力は数百 W 程度に留まっていた。この状況を打破し更なる繰り返し発振を行うため、より高速の超音速流を用いたレーザ媒質の交換によるレーザ励起放電の安定化などの基礎研究が行われてきた。特に本研究グループでは、流路形状の改善などにより、マッハ数 2 の超音速流を用いて、17 kHz の高繰り返しレーザ励起放電の発生に成功している。

2. 研究の目的

本研究グループが研究開発した超音速流中において安定した高繰り返しレーザ励起放電を発生する技術を実際のレーザ機器に適用することが本研究の最大の目的である。炭酸ガス (CO₂) をレーザ媒質とし、マッハ数 2 程度の超音速流において、小信号利得係数などを計測し、数十 kHz 級の安定な高繰り返しレーザ発振を達成するための指針を得る。また、超音速流の発生に伴う断熱膨張によるガス冷却効果に着目し、そのレーザ出力に及ぼす影響を明らかにすることも目的に含まれる。

3. 研究の方法

図 1 に示すルートビーク管により亜音速にまで加速した流れを図 2 に示す超音速ノズルにより超音速流に加速する。本研究で用いたノズルは、出口 (200 mm^W × 22.7 mm^H) においてマッハ数 2、流速 614 m/s の流れを発生させる仕様である。この超音速流中に放電電極を設け、図 3 に示す放電励起回路により単発のレーザ励起放電を発生する。ここで、

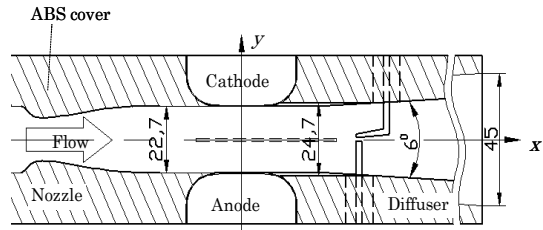


図 2 超音速ノズル

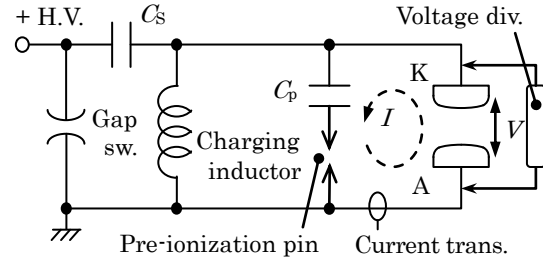


図 3 放電励起回路

$C_s = 5.3 \text{ nF}$ 、 $C_p = 4.2 \text{ nF}$ で、 C_s の充電電圧は 34 kV とした。

小信号利得係数の測定の概略を図 4 に示す。CW-CO₂ レーザからのプローブ光は、レーザ媒質を通過した後、赤外線検出器により受光される。小信号利得係数を g 、励起放電がない場合の光強度を I_0 、放電がある場合のそれを I_1 、電極の長さを L とすると、 g は次式から求めることができる。

$$g = \frac{1}{L} \ln\left(\frac{I_1}{I_0}\right) \quad (1)$$

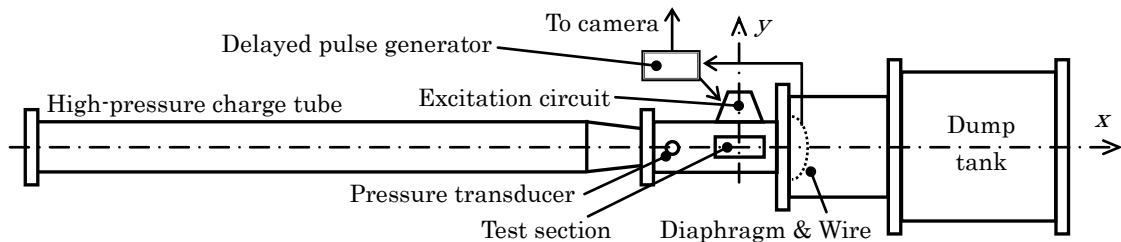


図 1 ルートビーク管

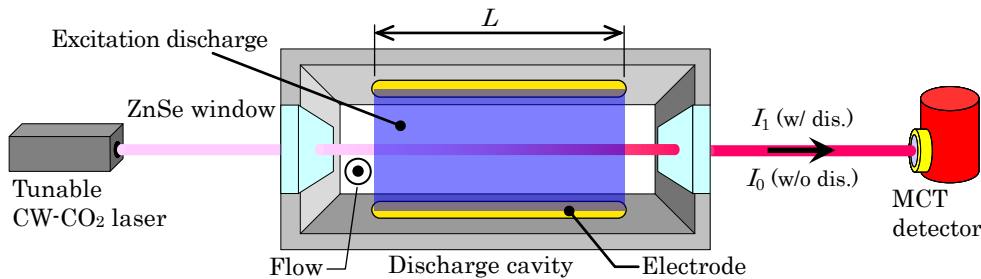


図 4 小信号利得計数の測定

4. 研究成果

(1) 超音速流中での安定したレーザ励起放電の生成

超音速流の発生に伴う断熱膨張によりガス（レーザ媒質）が冷却されるが、このとき、CO₂分子の凝結に起因する励起放電の崩壊が危惧される。これを回避するため、ルートビーク管の貯気ガスを加熱する手法を提案し、実証実験を行った。

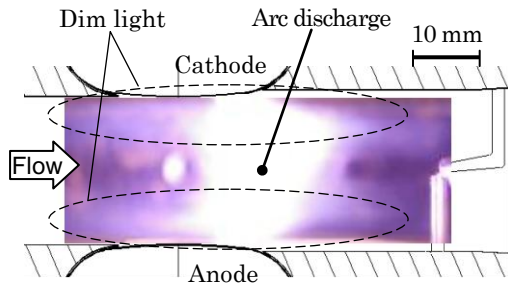


図5 ルートビーク管の貯気ガスを加熱しない場合の励起放電

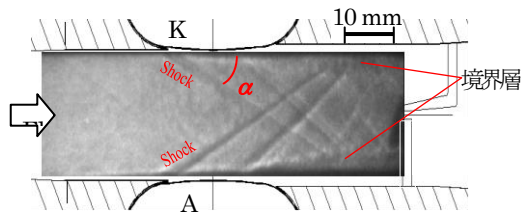


図7 超音速流のシャドウグラフ

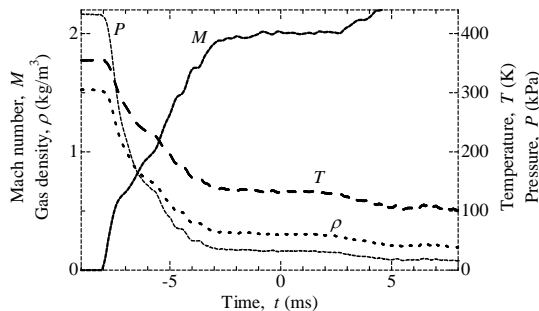


図8 超音速流の諸状態

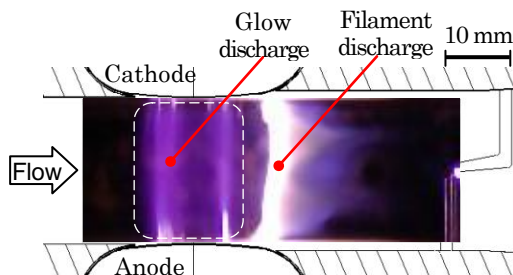


図9 ルートビーク管の貯気ガスを加熱した場合の励起放電

図5は加熱なしの場合（貯気ガス温度は室温）のレーザ励起放電の状態である。電極の下流側で強いアーク放電が発生している。また、流路壁近傍に霧状の光が認められ、これは凝結したCO₂分子にアーク放電の発光が反射、散乱されたものと考えられる。なお、レーザ励起を担うグロー放電の生成は、アーク放電からの発光に隠されて、十分に確認できない。このとき、超音速流のシャドウグラフ観測を行ったところ、電極の下流側に境界層の成長が見られ、これにより流路断面積の減少が引き起こされ、マッハ数は設計値を下回り1.8になっていた。

図7は350 Kに加熱した場合の超音速流のシャドウグラフである。電極端から発生している斜め衝撃波のマッハ角は30度であり、マッハ数2 (= {sin(30°)}⁻¹)の超音速流の発生が確認できる。図8は放電空間におけるマッハ数 M 、ガス密度 ρ 、ガス温度 T およびガス圧力 P の時間変化を示す。マッハ数2の準定常状態が6 msの間、生じている。放電空間のガス密度は設計値にほぼ等しい0.31 kg/m³となっている。また、断熱膨張の効果により、ガス温度が133 Kまで低下していることもわかる。図9は放電状態を示す。電極の下流の位置でフィラメント放電が発生しているが、図5のそれと比べると発光強度は弱い。また、電極開口部幅と同等の幅のグロー放電が確認でき、レーザ励起に適する放電の生成に成功した。

(2) ガス冷却が励起CO₂分子に及ぼす影響

超音速流中での安定したCO₂レーザ励起放電の生成に成功したことを踏まえて、ガス冷却時のレーザ動作の様子を理論的に検討した。レーザ発振に係る励起CO₂分子の数密度 n_J とガス温度 T の間には次式の関係が成り立つ。

$$n_J \cong n \frac{hcB}{kT} (2J+1) \times \exp \left\{ -J(J+1) \frac{hcB}{kT} \right\} \quad (2)$$

ここで、 J は回転量子数、 n は全CO₂分子の数密度、 h はプランク定数、 k はボルツマン定数、 c は光速、 B はCO₂分子の回転定数である。図10は n_J の温度依存性の計算結果を示す。低温になると J に対する n_J の分散が狭くなり、その分、数密度の高くなることわかる。ガス温度が133 Kに下がると、 n_J の最大値は、室温の場合のそれに比べ、1.5倍になる。また、 n_J が最も高くなる J すなわち発振波長がシフトすることもわかる。

以上より、超音速流のTEA-CO₂レーザ装置への適用は、励起放電の繰り返し周波数の上昇による時間平均出力の向上に加え

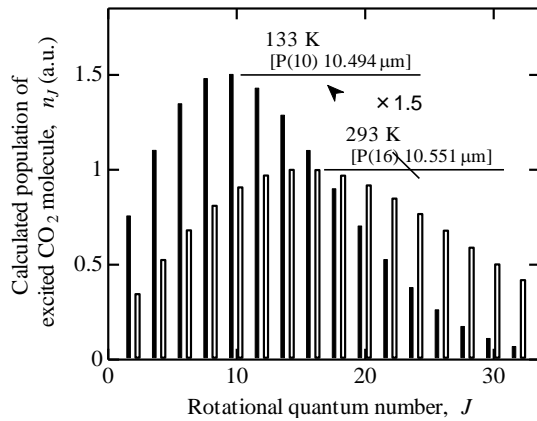


図 10 励起 CO₂ 分子の数密度の温度依存性

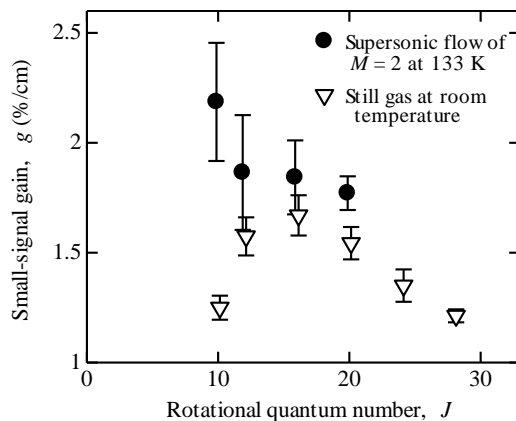


図 11 CO₂ レーザ媒質の小信号利得係数

て、ガス冷却作用によるパルスあたりのエネルギーの上昇の効果も期待できることが判明した。

(3) 超音速流 TEA-CO₂ レーザ装置の動作特性 — 小信号利得係数の測定 —

図 11 は開発した超音速流 TEA-CO₂ レーザ装置のレーザ媒質の小信号利得係数である。流れはマッハ数 2 でガス温度 133 K である。比較のため、室温で静止状態のレーザ媒質における利得係数も併せて示した。超音速流中では、回転量子数 J の減少に伴い利得係数 g は高くなっていき、本研究の実験範囲においては $J = 10$ にて最大の利得 $g = 2.25 \text{ %/cm}$ を達成した。これは、室温の静止レーザ媒質の場合の約 1.4 倍である。このときの波長は $10.494 \mu\text{m}$ である。なお、 J に対する g の振る舞い、および、超音速中の g と静止媒質中のそれの比は、図 10 に示した励起 CO₂ 分子の数密度と同様の傾向を示した。すなわち、特定の回転量子数への励起 CO₂ 分子の集中が、この小信号利得係数の向上の主因であることがわかった。

(4) まとめ

超音速流に伴う境界層や衝撃波の発生を抑えて TEA レーザ励起放電に適する超音速ノズルおよび流路形状の開発に成功した。供試装置のマッハ数 2 の超音速流において CO₂ 分子の凝結による励起放電の劣化を回避できるガス温度 133 K の場合、室温の場合の約 1.4 倍の 2.25 %/cm の小信号利得係数が得られた。

以上より、TEA-CO₂ レーザ装置への超音速流の適用が、時間平均出力の向上に対して極めて有効であることが実証された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Go Imada, Hiroyuki Saitou, Masataro Suzuki, and Wataru Masuda: “Gain Measurement of TEA-CO₂ Laser with Supersonic Gas Flow”, Proc. XVIII Int'l Symp. on Gas Flow and Chem. Lasers & High Power Laser Conf., Sofia, Bulgaria, 査読なし, **SPIE-7751, 77510M-1 - 77510M-8** (2010).
- ② 若林 徹、齊藤裕之、鈴木正太郎、増田 渉、今田 剛: “超音速流を利用した TEA-CO₂ レーザ装置のゲイン測定”、電気学会パルスパワー/放電合同研究会資料、査読なし、PPT-10-027/ED-10-025, 19-24 (2010).
- ③ Go Imada, Tran Thanh Son, Masataro Suzuki, and Wataru Masuda: “Evaluation of High-Repetition-Rate Excitation Discharge in TEA Gas Laser with Supersonic Gas Flow”, Proc. XVII Int'l Symp. on Gas Flow and Chem. Lasers & High Power Laser Conf., Lisbon, Portugal, 査読なし, **SPIE-7131, 71310T-1 - 71310T-8** (2009).

[学会発表] (計 3 件)

- ① 今田 剛、鈴木正太郎、増田 渉: “超音速ガス流を用いたショックフリー TEA-CO₂ レーザの流体特性”、第 57 回応用物理学関係連合講演会「衝撃現象とその応用物理」シンポジウム (招待講演)、第 57 回応用物理学関係連合講演会講演公式ガイドブック、229 (2010 年 3 月 19 日、東海大学).
- ② 今田 剛、鈴木正太郎、増田 渉: “超音速ガス流を用いたショックフリー TEA-CO₂ レーザの基礎検討”、第 56 回応用物理学関係連合講演会「科学技術としての衝撃応用とその拡がり」シンポジウム (招待講演)、第 56 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、No. 0, 107 (2009 年 3 月 31 日、筑波大学).

- ③ 齊藤裕之、今田 剛、鈴木正太郎、増田
渉：“超音速TEA-CO₂レーザー用ガス
流の観測”、第19回電気学会東京支部新
潟支所研究発表会予稿集、26（2009年11
月7日、朱鷺メッセ）。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

増田 渉 (MASUDA WATARU)
長岡技術科学大学・工学部・教授
研究者番号：80143816

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

今田 剛 (IMADA GO)
新潟工科大学・工学部・准教授
研究者番号：60262466
鈴木 正太郎 (SUZUKI MASATARO)
長岡技術科学大学・工学部・准教授
研究者番号：10282576