衝撃風洞を用いた超音速流CO化学レーザの実験*

増田 渉^{*1}, 藤原 良博^{*2}, 五十嵐 雅人^{*2}

Shock Tunnel Study on a Supersonic Flow CO Chemical Laser

Wataru MASUDA, Yoshihiro FUJIWARA and Masato IKARASHI

A shock tunnel facility is fabricated and used for the study of a supersonic flow CO chemical laser. A high temperature mixture of CS₂, CS, S₂, S and Ar is produced in a shock tube, where the thermal dissociation of CS₂ mixture is accomplished by a reflected shock wave. The shock heated mixture is exhausted through supersonic nozzles mounted at the end of the tube and mixed with the supersonic streams of O₂. Then, the vibrationally excited CO molecules are produced in the mixed streams by a chain reaction between CS and O₂ initiated by S atoms. The present paper shows that the shock tunnel facility is successfully used to study the dependence of the small signal gain coefficient on the plenum temperature, plenum pressure and the transition branch.

Key Words: Fluid Mechanics, Supersonic Flow, Laser, Carbon Monoxide, Chemical Laser, Shock Tunnel

1. 緒 論

超音速流化学レーザ⁽¹⁾⁽²⁾は化学エネルギーをレーザ・エネルギーに直接変換するため、ガスダイナミック・レーザ⁽³⁾に比べ、高効率・高出力が得られると期待され、HFレーザを中心に活発に研究が進められている。種々の化学レーザのなかで、CO化学レーザ⁽⁴⁾は気体の毒性が比較的低く排ガス処理が容易である。また、燃料のCS₂や酸化剤のO₂は安価で貯蔵性も良いため、超音速流CO化学レーザは工業用加工レーザとしての高い可能性を有していると思われる。しかしながら、現在までに報告されている超音速流CO化学レーザの実験的研究は、わずかに3件⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾のみであり、その特性はまだ十分に明らかにされていない。

本研究においては、衝撃風洞を用いた超音速流CO化学レーザ実験装置の設計・製作を行なった。この実験

装置においては、まずArで希釈したCS₂を衝撃波管によって加熱・解離させ、熱化学平衡状態のCS₂/CS/S₂/S/Ar混合気体を生成させる。高温の混合気体は衝撃波管端に設けられた超音速ノズルを通過して膨張し化学・振動非平衡流れとなる。希釈剤のArは超音速膨張による温度低下を促進し化学非平衡を大きくする。この超音速流れをO₂の超音速流れと混合させると

の連鎖反応によりCO分子が生成される。このとき、反応(2)によって放出される化学エネルギーの約70%はCO分子の振動準位に分配され、COの振動準位内では反転分布が形成されている。したがって、このCO分子から5μm前後の波長のレーザ・ビームを抽出することが可能となる。本論文においては、製作した衝撃風洞超音速流CO化学レーザ実験装置の概要と本装置を用いて得られた小信号利得係数の計測結果について報告する。

* 昭和62年10月2日 北陸信越支部信越地方新潟講演会において講演、原稿受付 昭和62年2月12日。

^{*1} 正員、長岡技術科学大学 (〒940-21 長岡市上富岡町1603-1)。

^{*2} 学生員、長岡技術科学大学大学院。

2. 実験装置

本研究において設計・製作した超音速流 CO 化学レーザ実験装置の概略を図 1 に示す。本装置は気体の加熱手段として用いる衝撃波管、超音速ノズル、 O_2 流れ供給系および光学測定部によって構成されている。各部の詳細は以下のようになっている。

2・1 衝撃波管 本衝撃波管は膜破断により衝撃波を発生させる標準型衝撃波管である。これは内径 52.5mm の円形断面を持ち、駆動部は 1800mm、被駆動部は 4200mm の長さを有している。管端には内径 52.5mm の円形断面を縦 24mm 横 90mm の矩形断面へ変換する断面変換器が取り付けられている。駆動気体は H_2 である。膜破断用の撃針は O_2 流れを同期させるためにモータにより駆動される。被駆動部には圧電型圧力センサを挿入したポートをいくつか設けてあり、圧力波形と衝撃波の速度をデジタル・メモリ および ユニバーサル・カウンタにより計測できる。プレナム状態は衝撃波の速度から計算した。^(a) 本研究においては、解離反応が凍結されている状態での反射衝撃波後方の圧力と温度を求め、それが等容的に化学平衡状態になるものと仮定してプレナム状態を求めた。解離反応に要する時間

は本実験の範囲では $10\mu s$ 以内であり衝撃波管の作動時間より十分小さい。

2・2 超音速ノズル 本研究では 多数の円錐ノズルを組み合わせた スクリーン・ノズル^(a) を用いている。図 2 に示すように、本ノズルは CS_2 の解離混合気体用のノズルが 16 個、また O_2 用のノズルが 7 個用いられている。図 2 において、 x はノズル出口からの流れに沿う距離である。また、 y と z は x に垂直

図 1 衝撃風洞超音速流 CO 化学レーザ実験装置概略

図 2 超音速ノズルと光学測定部

な座標であり、光軸はz座標と平行にとられている。CS₂用ノズルはスロート径2mm、出口径10mmで、O₂用ノズルはスロート径1mm、出口径3.5mmとなっている。ノズルの開き角はすべて15°である。ノズル出口の下流部の流路は化学反応による気体温度の上昇を抑制するため図2に示されるように6.8°の半角でy方向に拡げられている。衝撃波管の被駆動部とノズルは薄いセロファン膜で分離されている。このセロファン膜は入射衝撃波によって破られ、超音速流れが始動する。

2・3 O₂流れ供給系 O₂は内容積0.025m³の容器に貯蔵され、電磁弁により超音速ノズルに供給される。O₂は室温である。また電磁弁が全開するのに要する時間は20ms程度である。衝撃波管の動作と同期してO₂を供給するため、撃針の移動によりトリガ信号を発生させO₂供給用の電磁弁を開閉させる。トリガ信号発生から電磁弁を駆動させるまでの時間は遅延回路により調整可能である。本実験においては衝撃波管端に衝撃波が到達するより50ms程度前までに電磁弁が全開するように調整している。したがって衝撃波が到達するまでにダンプ・タンクの圧力はいくぶん上昇するが、超音速流れの始動を妨げるほど大きくない。

2・4 光学測定部 図1および2に示すようにノズル部およびその下流部には4対の光学測定用窓が設けられており、小信号利得の計測が行なえるようになっている。図3に示すように、小信号利得の計測系は診断用レーザ（自作の液体窒素冷却・放電式CO連続発振レーザ）、ZnSe窓、反射鏡、拡散板、Hg-Cd-Te赤外線検出器およびスペクトル・アナライザからなっている。診断用レーザは回折格子により波長の選択発振が可能である。強度I₀の診断用レーザ・ビームは光

学測定部を通過することによりΔIだけ増幅される。小信号利得係数Gは次式で与えられる。

$$(I_0 + \Delta I) / I_0 = \exp(Gl) \dots\dots\dots (4)$$

ここにlは光学長（90mm）である。

3. 実験結果

小信号利得の計測はノズル出口から130 mm下流の位置において行なわれた。図4には本研究において得られた典型的な圧力波形と赤外線検出器の出力波形を示す。図中のtは時間、Pは圧力である。圧力波形はノズル入口より195 mm上流で観測されたものである。圧力波形の最初の不連続的な立ち上がりは入射衝撃波の通過による圧力上昇であり、次の立ち上がりは反射衝撃波通過による圧力上昇である。赤外線検出器の出力波形における最初の平坦な部分は測定部にO₂の流れのみが存在している状態である。衝撃波によって測定部に化学・振動非平衡超音速流れが発生し、O₂と混合した時間から診断レーザ・ビームに対する増幅作用が明らかに観測される。

以下では小信号利得のプレナム状態とレーザ遷移枝への依存性を検討する。COレーザのR枝遷移の小信号利得はP枝遷移に比べ小さいことが知られているので、本研究においてはP枝遷移の小信号利得のみを計測した。反射衝撃波によって解離される前の試料気体の組成は体積比でCS₂:Ar=1:9とした。O₂の流量はO₂タンク圧力を変えることにより調整できる。本実験

図3 小信号利得計測系

図4 圧力波形[1]と赤外線検出器の出力波形[2]

図5 $P_5(14)$ 枝遷移の G の T_0 , P_0 への依存性 図7 $P_{10}(14)$ 枝遷移の G の T_0 , P_0 への依存性 図6 $P_7(14)$ 枝遷移の G の T_0 , P_0 への依存性 図8 G のレーザ遷移枝への依存性

では O_2 のモル流量と Ar のモル流量の比を 1 : 9 とした。図5 - 7 はそれぞれ $P_5(15)$, $P_7(15)$, $P_{10}(15)$ 枝遷移の小信号利得の プレナム温度 T_0 , プレナム圧力 P_0 への依存性を示す。図中の λ は波長である。いずれの P 枝遷移に対しても 本実験の範囲で G は T_0 , P_0 を上げると単調に増加している。得られた最大の信号利得は 0.5 m^{-1} である。プレナム温度 T_0 を上昇させると CS_2 の解離が進み、反応(1), (2)による CO の生成は速められるが流れの温度が上昇するため振動緩和も同時に促進される。また プレナム圧力 P_0 を上昇させると流れ内の各化学種の数密度が増加し CO の生成が促進されるが化学反応による流れの温度上昇も促進される。このため、 G は T_0 , P_0 とともに単調に増加せず、最適な T_0 , P_0 の存在することが理論上予測できる。しかしながら 本衝撃波管の能力上の制限のため 今回の実験では T_0 , P_0 の最適値を見出すことはできなかった。図8には G のレーザ遷移枝に対する依存性を示す。図中の v は CO の振動準位を表わ

している。 G は v とともに単調に減少しており、 G の最大値を与える v は5以下に存在することがわかる。Powell⁽¹⁰⁾ の実験によると反応(2)によって生成された瞬間における CO の振動準位に対する分布は $v=13$ において最大値を持ち、最大の反転分布は $v=12, 11$ 間に存在する。したがって、本実験における測定位置では振動緩和がかなり進んでいることがわかる。

4. 結 論

衝撃風洞で CS_2 を加熱・解離させて超音速流れを発生させ、これを O_2 の流れと混合させる方式の超音速流 CO 化学レーザー実験装置を製作し、光の増幅作用を観測することに成功した。本装置による小信号利得計測の結果、実験された範囲内では G は T_0 , P_0 の上昇とともに単調に増加した。また、 G の最大値を与えるレーザ遷移枝は $v=5$ 以下に存在することが示された。本実験において得られた G の最大値は 0.5 m^{-1}

であるが、より大きな値を与える遷移枝が $v = 5$ 以下に存在すると考えられる。超音速流 CO 化学レーザの性能はプレナム状態、気体組成、ノズル形状、混合方式などに大きく影響を受けるものと考えられ、その特性を把握し最適状態を見出すためには今後これらの効果を実験的・理論的に詳細に検討する必要がある。

文 献

- (1) Gross, R. W. F. and Bott, J. F., Handbook of Chemical Lasers, (1976), 1, John Wiley & Sons.
- (2) 増田, 日本航空宇宙学会誌, 33-380(昭60), 499.
- (3) Anderson, J. D. Jr., Gasdynamic Lasers: An Introduction, (1976), 1, Academic Press.
- (4) Pollack, M. A., Appl. Phys. Lett., 8-9 (1966), 237.
- (5) Boedeker, J. A., Shirley, J. A. and Bronfin, R. B., Appl. Phys. Lett., 21-6 (1972), 247.
- (6) Richardson, R. J., ほか5名, J. Appl. Phys., 50-12(1979), 7939.
- (7) Stricker, J. and Tilleman, M., J. Appl. Phys., 52-17(1981), 6494.
- (8) 倉谷・土屋, 衝撃波の化学物理, 1, (昭53), 裳華房.
- (9) Russell, D. A., Neice, S. E. and Rose, P. H., AIAA J., 13-5(1975), 593.
- (10) Powell, H. T. and Kelley, J. D., J. Chem. Phys., 60-5(1974), 2191.