超音速流CO化学レーザの流れ場の観察と利得の測定*

増田 渉^{*1}, 白石 和彦^{*2}, 佐藤 正史^{*3}Visual Observation and Gain Measurement
of a Supersonic Flow CO Chemical LaserWataru MASUDA, Kazuhiko SHIRAISHI
and Masashi SATOH

Experimental studies are conducted on a supersonic flow CO chemical laser to obtain data on the reaction zone structure and the small signal gain coefficient when Ar gas is injected onto the reactant interface. The visual observation of the chemical luminescence from various reactions in the laser cavity clearly demonstrates that the gas injection enhances the mixing via the reactant surface stretching. It is also shown that the small signal gain coefficient can be made higher by the gas injection. However, the gain decays in the downstream direction very rapidly due to the temperature rise. The region where the gain is positive can be extended significantly using a divergent channel, although the peak value of the gain is decreased.

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

1. 緒 論

前報⁽¹⁾⁽²⁾では、衝撃風洞を用いて超音速流CO化学レーザの小信号利得係数を測定するとともに、理論モデルを開発し、実験結果と計算結果の比較検討を行った。その結果、CS₂/Ar混合気体とO₂の瞬間的な混合を仮定した理論モデルによる計算は実験と定性的に正しく一致するが、小信号利得係数をかなり大きく予測することが示された。そこで、現象のより深い理解を得るため、化学発光を利用した流れ場の観察を行なって⁽³⁾、CS₂/Ar混合気体とO₂の混合が極めて緩慢であることを観察した。これが理論計算と実験結果の不一致をもたらす大きな原因のひとつであり、また大きな小信号利得係数を得るためには混合促進は不可欠であると考えられる。混合の促進はより小型の多くの

ノズル列を用いることにより可能である。しかし、この方法は加工精度やコストなどによる制限がある。そこで、本研究では超音速流HF化学レーザで用いられている混合促進用噴流⁽⁴⁾を利用して小信号利得係数の増加を試みた結果を報告する。

2. 実験装置

本研究で用いる実験装置は気体の加熱手段としての衝撃波管、超音速ノズル、O₂と噴流の供給系および光学測定部からなっている。実験に際しては、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。この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

* 平成元年9月21日 北陸信越支部信越地方講演会において講演、原稿受付 平成元年2月16日。

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

^{*2} 長岡技術科学大学大学院〔現在・三菱電機(株)〕。

^{*3} 学生員、長岡技術科学大学大学院。

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5 μ m前後の波長のレーザー・ビームを抽出することが可能となる。実験装置や小信号利得係数の測定方法などの詳細は前報⁽³⁾を参照されたい。

測定部と超音速ノズルを図1, 2に示す。図1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に垂直な座標であり、光軸はy座標と平行にとられている。本研究では前報⁽³⁾と同様に3対のくさび形ノズル列を用いている。CS₂解離気体用のノズル(以下ではpノズルとする)とO₂用ノズル(以下ではsノズルとする)の中心線は平行に配置されている。混合促進用の噴流を注入するノズルを設けるための加工上の制限から、p, sノズルの形状は前報⁽³⁾とはいくぶん異なっている。図2に示すように、pノズルは全角120°の絞り部と全角40°の膨張部を有し、そのスロート高さは0.6mm、面積比は35(前報⁽³⁾では41.3)である。スロートの超音速部は半径0.6mm、超音速部は半径0.3mmで丸めである。またsノズルは絞り部が半径2mmの円弧であり、スロート部は高さ0.5mm、長さ1.2mmの一定断面となっている。膨張部は全角90°(前報⁽³⁾では60°)で広げられており、面積比は8.4(前報⁽³⁾では10)である。また、前報⁽³⁾ではノズルの後縁は幅が0.1mmの平面で切り取られていたが、本実験では幅が2.4mmの大きな平面となっている。混合促進用噴流を注入するためのノズルは直径0.5mmの多数の円孔であり、ノズル出口近傍に壁に垂直に穿たれている。これらの円孔より噴流を注入することによりp, sノズルからの流れの接触面積を大きくし、これらの流れの混合が促進されるものと期待される。本研究では混合促進噴流としてArを用いた。図1に示すように、ノズル下流部の測定部の側面には4対の大きな円形光学窓が設けられており、小信号利得係数の測定や流れの観測が行なえるようになっている。また、3対の小さな円形の光学測定窓が設けられており、これらは小信号利得係数の測定のみ用いられる。図1(b)に示されるように、測定部の下部にも方形の光学窓を設けることが可能で、流れ場の観察を行なうことができる。しかし、この場合はノズル出口下流の流路は24mm×90mmの一定断面となる。図1(c)に示されるように、方形の窓を設けない場合は、半角 θ_c で流路の高さを44mmまで直線的に大きくすることができる。

本実験においては前報⁽³⁾と同様にCS₂/Ar混合気体

の初期組成(衝撃波で加熱解離される前の組成)はCS₂:Ar=1:9(モル比)とした。pノズルのプレナム温度T_{0p}とプレナム圧力P_{0p}はそれぞれ3500K, 1MPaであり、sノズルのプレナム温度T_{0s}は300Kである。p流れとs流れの流量比の調節はsノズルのプレナム圧力P_{0s}を変化させることにより行なった。sノズルを流れるO₂のモル流量 ϕ_{O_2} とpノズルを流れるCS₂とCSのモル流量の比を

$$\alpha_{1x} = \phi_{O_2} / \phi_{CS_2+CS} \quad \dots\dots\dots (3)$$

図1 測定部の概略

図2 超音速ノズル

と定義する。準一次元流れを仮定した計算⁽⁶⁾により、本ノズルは $P_{0a}=60$ kPa で $\alpha_{max}=2$ となり、pノズルとsノズルの出口圧力が一致するように設計されている。本実験では混合促進用噴流気体Arのプレナム温度は300 Kである。噴流の質量流量のp, s流れの質量流量の和に対する比を μ とする。 μ もプレナム圧力を変化させることにより調節した。

3. 流れ場の観察

超音速流CO化学レーザの流れ内では多くの化学反応が行なわれている。これらのうちで

の反応では青白い発光を伴うことが知られている。⁽⁷⁾ ただし、*は電子励起状態、hはプランク定数、 ν は振動数を表す。また

の反応では青い発光が伴う。⁽⁷⁾ さらに、 O_2 がCSより過剰な場合にはCS- O_2 火炎は赤色に発光することをRichardson⁽⁸⁾は示している。ただし、これは分子による発光であるのか、あるいは大きな粒子による黒体ふく射であるのかは明らかにされていない。これらの発光を利用して流れ場の写真撮影を行なうことができる。⁽⁹⁾ 流れ場の撮影はカメラのシャッターを開放状態にして衝撃波管を作動させる方法で行なった。撮影にはカラー・フィルムを用いたが、本論文では単色写真を掲載し、色あいについては文章で説明を加えることとする。また、本研究では混合の観察に主眼をおいているため、方形窓から撮影した写真のみを示す。

図3には $\alpha_{max}=2$ 、 $\mu=0$ の場合の流れ場を示す。本研究で用いたノズルは前報⁽¹⁾のものと面積比や形状が多少異なっているが、得られた流れ場の写真はほとんど見分けがつかない。pノズルの出口下流では、化学反応(4)、(5)に伴う青白い発光が観察される。 O_2 分子は発光しないため、sノズルの出口からは暗い帯状の流れが観察される。ノズル出口でp, s流れは角度を持って衝突し、斜め衝撃波が発生する。本実験条件では、上で述べたように、pノズルとsノズルの出口圧力はほぼ一致するように設計されている。しかし、ノズル出口近傍では、青白い発光部は暗色の領域を圧縮しながらさらに膨張することが観察される。この現象は、圧力はほぼ等しくとも、p流れの運動量が

図3 $\alpha_{max}=2$ 、 $\mu=0$ の場合の流れ場

s流れよりも遙かに大きいために生じると考えられる。青白い発光部と暗色部の境界には化学反応(6)、(7)による青い発光領域の発達を観察されるものと期待されたが、発光が弱いためか明瞭ではない。しかし、sノズルから流出する暗い帯状の領域は下流方向に赤く変色する。したがって、p, s流れは下流方向に混合して各種の化学反応が開始されることがわかるが、sノズルからの帯状の領域は $x=0.25$ mにおいてもかなり明瞭に観察され、混合が極めて緩慢であることが理解される。本実験条件では、ノズル出口状態と拡大部の長さを基準としたレイノルズ数はp, sノズルともに 10^4 程度の大きさであり、ノズル壁に沿って発達する境界層は層流であると考えられる。前報⁽¹⁾の計算ではpノズル出口における層流境界層の運動量厚さ δ は0.2 mm程度となる。非圧縮性の後流では乱流遷移は $x \approx 110\delta$ で生じる。しかし、圧縮性は後流を安定化させ、マッハ数が6の場合には $x \approx 2000\delta$ で生じることが報告されている。⁽¹⁰⁾ 本実験では、pノズル出口の振動凍結マッハ数は6.7、sノズル出口のマッハ数は3.74でありかなり大きい。これらのことから、本実験では測定部の混合も層流的であると思われる。超音速流CO化学レーザにおいては連鎖反応(1)、(2)により多量のCO分子が生成されることが不可欠であり、高い小信号利得係数を達成するためにはp, sノズルの流量の増加や混合の促進が必要と考えられる。このうちpノズルの流量の増加は高温高压気体発生器の大型化の必要性を意味し、設備費、効率などの実用的見地から問題がある。そこで、以下ではsノズルの流量を増加(α_{max} を増加)させた場合および混合促進噴流を用いた場合について実験を行なう。

図4には $\alpha_{max}=4$ 、 $\mu=0$ の場合の流れ場を示す。この場合においても、ノズル出口近傍で青白い発光部は膨張し、暗い領域は圧縮されている。しかし、sノズルの出口圧力が $\alpha_{max}=2$ の場合の2倍の大きさになっているため、sノズルから流出する暗い領域のくびれは小さくなっている。また、 $x \approx 0.2$ mの下

図4 $\alpha_{mix} = 4$, $\mu = 0$ の場合の流れ場

流には 乱れた火炎と思われるものが 存在する。ただし、この写真はカメラのシャッターを開放して撮影したもので、衝撃波管の動作時間内の全ての現象を積分したものである。したがって、この火炎がどの時期に存在したものであるかは明らかでない。混合促進の観点からは、本実験の範囲では、 α_{mix} の増加はあまり効果はなさそうである。

図5, 6, 7は混合促進噴流を用いた場合の流れ場である。これらはいずれも $\alpha_{mix} = 2$ であるが、それぞれ μ を10, 20, 40%と変化させている。混合促進噴流の注入量を増加させるとともに、sノズルから流出する暗い帯状の領域は 明るさを増し、その幅が 広くなってくる。また、注入量の増加とともにノズル後縁から発生する衝撃波の傾きも大きくなる。 $\mu = 40\%$ の場合には $x \approx 0.05$ mで pノズル出口下流の青白い発光部はほとんど消滅し、混合が大きく促進されていることがわかる。混合促進は噴流の注入によりp流れとs流れの接触面積が増加することによっていることは明らかであるが、流れが乱流遷移しているかどうかの判断は本実験では困難である。

4. 小信号利得係数

$\theta_0 = 0$, $\mu = 0$ で α_{mix} を変化させて得られた小信号利得係数Gの流れに沿う分布を図8に示す。ただし、本論文で示す小信号利得係数は 全て $P_0(12)$ 枝遷移に対するものである。図8には 前報⁽¹⁾で用いたノズルで得られた 結果も 示している。本実験の範囲では、いずれのノズルの場合でも α_{mix} を増加させるとともにGのピーク値は大きくなり、またピークが得られる位置は上流に移ることがわかる。流れ場の観察では α_{mix} を増加させても 混合促進効果は ほとんど認められなかったが、 O_2 の増加のため反応(1), (2)は促進され、COが急速に生成されることがわかる。しかし、 α_{mix} を増加させると 下流方向へのGの減少も急激になる。これは流れの温度上昇が大きくなり、振動緩和が促進されることによると考えられる。速度の小

図5 $\alpha_{mix} = 2$, $\mu = 10\%$ の場合の流れ場 図6 $\alpha_{mix} = 2$, $\mu = 20\%$ の場合の流れ場 図7 $\alpha_{mix} = 2$, $\mu = 40\%$ の場合の流れ場

さい O_2 を多量に供給すると 速度の大きい CS_2 との混合の際の散逸が大きくなり温度の上昇が大きくなる。⁽⁶⁾ また、反応熱の放出によっても温度は上昇する。反応(1), (2)の速度定数の温度依存性は小さいので、温度の上昇は COの生成を 促進しない。一方、振動緩和は温度上昇によって急激に促進されるため、流れの温度上昇はCO化学レーザには極めて好ましくない。⁽⁶⁾ 図8からはGのノズル形状への依存性の大きなことが理解され、これも今後の大きな研究課題と考えられる。

図9には $\theta_0 = 0$, $\alpha_{mix} = 2$ で μ を変化させた場合のGの分布を示す。噴流の注入により混合が促進された結果、Gはノズル下流で急速に増加する。しかし、Gの減少も 急激になる。また、 μ の増加とともにGのピーク値は減少し、その後増加してから再び減少するという興味深い現象を示している。この現象はつぎのような考え方で説明できると考えられる。図5, 6,

7から明らかなように 噴流の注入は 混合を促進するが、 α_{mix} を増加させる場合と同様に 散逸も増加させ流れの温度を上昇させる。 $\mu = 5\%$ の場合にGのピーク値がいったん低下するのは温度上昇の効果が混合促進効果を上回るためである。 $\mu = 10\%$ では混合促進効果が大きくなりGは大きくなるが、 μ をさらに増加させると再び温度上昇効果が優勢となってGが低下する

と思われる。

図10は噴流を注入するとともに α_{mix} を増加させた効果を示したものである。 $\mu = 10\%$ で α_{mix} を2から4に増加させると、これまでの議論から予想されるように、Gの増大と減少が急速になる。しかし、ピーク値については図に示されるように必ずしも大きくはならない。

以上の実験結果から、適当な α_{mix} と μ を えらべば Gのピーク値を大きくできることが明らかになった。しかし、流れの温度上昇により、Gが正となる領域は小さくなってしまふ。そこで、ノズル出口下流の流路を拡大して温度の上昇を抑制することを試みた。図11は $\theta_0 = 6.5^\circ$ とした場合の Gの分布を示している。温度上昇の抑制効果は 明らかであり、図10と比較すると、いずれの実験条件においてもGが正となる領域は大きく広がっている。しかし、流路を拡大することによって分子密度が低下するのでGのピーク値は低下する。ただし、 $\theta_0 = 6.5^\circ$ 、 $\mu = 10\%$ で $\alpha_{mix} = 2, 4$ の結果を $\theta_0 = \mu = 0$ 、 $\alpha_{mix} = 2$ の場合と比較すると、Gのピーク値はほぼ同じであるがGが正となる領域はかなり広がっている。また、流路を拡大することによ

図8 α_{mix} を変化させた時のGのx方向分布

図9 μ を変化させた時のGのx方向分布

図10 α_{mix} と μ を変化させた時のGのx方向分布

図11 $\theta_0 = 6.5^\circ$ の時のGのx方向分布

り設置しうる光共振器の体積も大きくなる。これらのことから混合促進用噴流の使用と流路の拡大は一応の効果があることがわかる。しかし、図5, 6, 7に示される著しい混合促進効果から期待されるような大きなGの改善は得られなかった。この原因の主たるものは温度上昇であると考えられ、より良い混合方式の開発が必要と思われる。また、Ar以外の気体の注入効果、ノズル形状や流路の拡大形状を含めた広範囲の検討も必要であると思われる。

5. 結 論

本研究においては超音速流CO化学レーザーの小信号利得係数の増大を目的に混合促進用噴流の効果などを実験的に検討した。本研究によって得られた結果は以下のようにまとめられる。

- (1) O_2 の流量を増加させても CS_2 と O_2 の混合促進にあまり効果はないが、噴流の注入により著しく混合を促進できる。
- (2) O_2 の流量の増加、噴流の注入によりGのピーク値を増大させることが可能である。しかし、Gの流れ方向への増加と減少は急激となり、Gが正となる領域は狭くなる。
- (3) ノズル出口下流の流路を広げて噴流の注入を行なうことにより、かなり高いGを幅広い領域にわたって維持することができる。しかし、今後、温

度上昇の小さなより良い混合方式の開発が必要である。

本研究で用いた装置の一部は長岡技術科学大学4年生 金田 洋 君 が製作した。また、本研究の実施にあたり、研究費の一部は文部省科学研究費補助金の助成を受けた。ここに謝意を表する。

文 献

- (1) 増田・他2名, 機論 No.88-0558B, 1989.
- (2) 増田・平出, 機論 No.88-0571A, 1989.
- (3) Masuda, W., Ikarashi, M., Shiraishi, K. and Hiraide, H., 7th Int. Symp. on Gas-Flow & Chemical Lasers
- (4) Driscoll, R. and Tregay, W., AIAA J., 21-2, (1983), 241.
- (5) 増田・藤原・五十嵐, 機論, 53-496B(1987), 3555.
- (6) Masuda, W., Ogawahara, N. and Tohyama, M., Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci., 30-87, (1987), 1.
- (7) Richardson, R. J., J. Phys. Chem. 79-12, (1975), 1153.
- (8) Behrens, W. and Ko, D. R. S., AIAA J., 9-5, (1971), 851.