A210 SCOIL 装置内流れ場の3次元数値計算による可視化

長岡技科大 阿佐見直樹[○]、廣岡成典、菱田学、増田渉

3-D Numerical Visualization of the Flow Field in SCOIL System

Naoki AZAMI*, Sigenori HIROOKA, Manabu HISHIDA* and Wataru MASUDA*

The flow field of a supersonic flow chemical oxygen-iodine laser is simulated solving three-dimensional Navier-Stokes equations, and the dependence of the mixing/reacting zone structure and the resulting gain region on the effective velocity ratio of I₂ jet to the primary flow is studied. The I₂/He ratio and plenum pressure of the secondary flow are varied in order that the amount of iodine injected into the primary flow is kept constant in each effective velocity ratio. The present results demonstrate that a pair of contrarotating vortices generated behind the I₂ jet greatly enhances the mixing and the simultaneous chemical reaction of I₂ and O₂(¹Δ). It is shown that the optimum condition for the secondary I₂ jet momentum exists. The I₂ jet which causes the high gain penetrates into the primary flow moderately deeply and does not collide with the counter one.

1、はじめに

超音速流よう素レーザ(SCOIL)は、化学反応により生成した励起酸素とよう素ガスを混合するだけで発振する純粋な化学レーザであり、超音速膨張による気体冷却を利用して性能を大幅に向上させている。SCOIL装置の概略をFig.1に示す。SCOIL装置では、励起酸素 O₂(¹Δ)の主流に対してよう素分子 I₂の噴流を垂直に噴射し、混合・反応させ、反転分布を形成させる。したがって、SCOILの性能は混合・反応領域の構造に大きく依存する。

一般に、主流に対し垂直に噴射される噴流の浸透深さとその特性は有効速度比に依存することが知られている¹⁾。この有効速度比 Γ は噴流の運動量流束と主流の運動量流束の比の二乗根として定義され、次式で表わされる。

$$\Gamma = \sqrt{\rho_s U_s^2 / \rho_p U_p^2} \quad (1)$$

ここに、 ρ は密度、 U は速度、添字 p, s はそれぞれ、主流、噴流を表わす。本研究では、SCOILの流れ場を三次元 Navier-Stokes 方程式と多段階レーザ気体化学反応モデルを用いて数値的に解析し、有効速度比 Γ が混合・反応領域の構造及び小信号利得係数に及ぼす効果を評価した。

*Nagaoka University of Technology, 1603-1 Kamitomioka, Nagaoka 940-21, Japan

2、数値解法及び計算条件

基礎方程式として、各化学種保存式を含む三次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式を構築した。化学反応モデルは、10 化学種によりレーザ気体が構成されるものとし、Perram による 21 化学反応モデルを採用した。なお、よう素原子の再結合反応、励起化学種の壁面失活反応、水蒸気の凝縮は考慮していない。

Fig.1 に、計算に用いた超音速ノズルとよう素インジェクタの配置を示す。SCOIL 装置全体を解析することは困難であることから、Fig.1 の破線部で示されるよう素インジェクタから共振器入口までの一部を計算領域とした。計算方法としては、一般座標系に変換した基礎方程式にセル中心有限体積法を適用し、空間の離散化については、対流

Fig. 1 Schematic diagram of nozzle blades and I_2 injectors.

項に対して van Albada の制限関数を用いた MUSCL 法により高次精度化された Roe の Flux Difference Splitting を、粘性項に対して中心差分を用いた。さらに、時間積分には LU-SGS 法を用いて、基礎方程式の定常解を求めた²⁾。

励起酸素発生器からの主流とインジェクタからの噴流のプレナム条件を Table 1 に示す。ここに、添字 0 はプレナム条件を表わす。本研究では、噴流の運動量を変化させることで異なる有効速度比の条件での計算を行ったが、その際、装置内に供給される励起酸素量とよう素量の比が一定になるように、圧力 $P_{0,s}$ と同時に噴流の I_2/He の比を変化させている。

3、結果及び考察

Fig.2 に、各有効速度比におけるオリフィスから噴射されたよう素噴流流管の、噴流中心線に対する垂直断面形状を示す。ここで、噴流中心線はオリフィス中心から噴射された噴流の流線と定義する。有効速度比 Γ が大きい程、よう素噴流は主流により深く浸透している。オリフィスから噴射された噴流は主流から受ける強い剪断力により伸長し、湾曲した噴流の背後に一對の伴走渦を形成する。この伴走渦は噴流断面

Table 1 Plenum condition of the primary and secondary flows.

primary flow					
	$P_{0,p}$ (torr)	$T_{0,p}$ (K)	molar fraction		
			$O_2(^1\Sigma)$	$O_2(^1\Delta)$	$O_2(^3\Sigma)$
			3.34×10^{-5}	0.179	0.060
			H_2O	Cl_2	He
	39.6	273	0.012	0.026	0.723
secondary flow					
cond.	$P_{0,s}$ (torr)	$T_{0,s}$ (K)	Γ	molar fraction	
				I_2	He
1	55.4	376	4.0	0.323	0.677
2	121	376	7.5	0.075	0.925
3	214	376	11.6	0.030	0.970

Fig.3 に、ノズル下流でのよう素分子 I_2 のモル分率分布及び小信号利得係数分布を示す。インジェクタ付近で伴走渦により形成された各物理量の空間分布形状はノズル下流の領域でも保存されている。このことは、よう素噴流背後にできる伴走渦がレーザ性能に重大な影響を及ぼすことを示す。小信号利得係数は case 2 の場合が、より広く均一に分布している。Fig.3(a) のような噴流浸透深さが浅い場合、流れ中心軸付近によう素の供給されない領域ができる。また、Fig.3(c) のように噴流が対向噴流と衝突してしまう場合、よう素分子を解離させるに十分な励起酸素が噴流に完全に侵入できないので、よう素分子が噴流中心に残存してしまう。このため、これらの領域では小信号利得係数が負になり、小信号利得係数分布の均一性が損なわれる。

Figure 1 consists of three sub-diagrams labeled (a), (b), and (c), each showing a 3D perspective view of a jet impinging on a curved surface. In each diagram, a mesh of lines represents the 'Stream Tube' originating from the jet. A thick, dark line within the mesh represents the 'Jet centerline'. The jet is shown entering from the top left and spreading out as it impinges on the curved surface. Diagram (a) shows the jet impinging on a flat surface. Diagram (b) shows the jet impinging on a curved surface. Diagram (c) shows the jet impinging on a curved surface with a different geometry, possibly a step or a change in curvature. The labels 'Stream Tube' and 'Jet centerline' are present in each diagram.

- 81 -

Fig. 3 The distributions of I_2 molar fraction (upper part) and small signal gain coefficient (lower part) on planes perpendicular to the flow axis with the effective velocity ratios (a) $\Gamma = 4.0$ (case 1), (b) $\Gamma = 7.5$ (case 2) and (c) $\Gamma = 11.6$ (case 3).

Fig. 4 The small signal gain coefficients 25 mm downstream of the nozzle exit $\bar{G}$ which are averaged over the plane perpendicular to the flow axis.

4、参考文献

- 1) Fearn R. and Weston R. P., Associated with a Jet in a Cross Flow, AIAA J., Vol.12, No.12 (1974), p.1666
- 2) Masuda W., Hishida M., Hirooka S., Azami N. and Yamada H., Three-Dimensional Mixing/Reacting Zone Structure in a Supersonic Flow Chemical Oxygen-Iodine Laser, JSME Int. J., (to be published)