

## No. 3 触媒反応を利用した水素－空気超音速混合の評価

新井隆景（阪府大）

Evaluation of Hydrogen-Air Supersonic Mixing Condition  
using Catalytic Reaction

T. Arai

Department of Aerospace Engineering, Osaka Prefecture University, Sakai, Osaka, Japan

## ABSTRACT

An experiment was carried out to confirm the validity of time series evaluation of supersonic mixing condition by using catalytic reaction on a platinum wire. Gaseous hydrogen was injected into supersonic free-stream ( $M=1.81$ ) from injector. Time series condition of supersonic mixing was evaluated by using W-type probe which has a platinum wire and reference wire (nickel wire). The evaluation was done by simultaneously measuring each electric power supplied by each electric circuit which kept the temperature of wire constant. Specifically supplied electric power to Pt wire depended on catalytic heat release rate (giving hydrogen concentration) and flow convection. Meanwhile that to Ni wire depended on flow convection. The result showed that correlation coefficient between these electric powers increased when mixing developed. Investigations were also conducted for helium, air and no secondary injectant cases to compare with the hydrogen injectant case. The results indicated that it was possible to measure the time-series behavior of air-hydrogen supersonic mixing layer or coherent motion of turbulence by using this evaluation..

Key Words : Supersonic Mixing, Mixing Enhancement, Measurement, Mixing Condition, Scramjet

## 1. 緒言

次世代宇宙往還機としてスペースプレーンが提案されており、スペースプレーン用空気吸い込み式エンジンとして、スクラムジェットエンジンがある(1)。スクラムジェットエンジン内の流れは超音速となるため、1msオーダーで燃焼器を通過する超音速空気流れへの燃料混合の促進とその評価は重要な課題の一つである(2)。

本研究では、空気－水素超音速混合層の混合状態の瞬時的な評価を行う方法を提案し、種々の噴射形状から得られる混合層に対して適用し、その有効性を示す。

## 2. 触媒反応を用いた混合状態の測定原理

2.1 触媒反応による発熱量 W型プローブ（平行プローブ）に張られた白金線及びニッケル線に加えられるエネルギーは、触媒反応による発熱量及び供給される電力である。それらの和が放射、熱伝導および流れ場への熱伝達により失われるエネルギーとバランスしていると仮定すると、エネルギーバランス式は次のように表すことができる。

$$P + Q = \left\{ \beta (T^4 - T_w^4) + \alpha_g (T - T_g) \right\} \pi DL + Q_c \quad (1)$$

ここで、 $P$ は細線への供給電力、 $Q$ は触媒反応による発熱量、 $\beta$ はふく射率、 $T$ は細線の平均温度、 $T_w$ は流路壁

面の平均温度、 $\alpha_g$ は熱伝達率、 $T_g$ は流体の温度、 $D$ は細線の直径、 $Q_c$ はプローブ支柱からの熱伝導により失われる熱量である。また左辺第1項が細線への供給電力量、左辺第2項が触媒反応による発熱量、右辺第1項が放射熱伝導による放熱量、右辺第2項が細線表面から流れ場への熱伝達による放熱量、右辺第3項が細線支持部への放熱量である。ここで、式(1)のエネルギーバランス式を、白金線及びニッケル線の場合に分けて考えると、白金線では水素との触媒反応を生ずるため、白金線への供給電力は次式となる。

$$P_{Pt} + Q_{comb} = \left\{ \beta (T_{Pt}^4 - T_w^4) + \alpha_{g,Pt} (T_{Pt} - T_{g,Pt}) \right\} \pi DL + Q_{c,Pt} \quad (2)$$

また、ニッケル線の場合、水素と触媒反応を生じないため、供給電力は次式となる。

$$P_{Ni} = \left\{ \beta (T_{Ni}^4 - T_w^4) + \alpha_{g,Ni} (T_{Ni} - T_{g,Ni}) \right\} \pi DL + Q_{c,Ni} \quad (3)$$

このことから、白金線の触媒反応による発熱量は、ニッケル線への供給電力から白金線への供給電力を差し引いたものとなる(3)。

2.2 発熱量（電力量）の相関 白金線とニッケル線への供給電力量の時間的変動を同時測定し、その相関を調べた。白金線への供給電力量とニッケル線への供給電力の時間変動の相関係数は以下の式で与えられる。

$$r = \frac{1}{(N-1)s_{P_{Pt}}s_{P_{Ni}}} \sum_{j=1}^N (P_{Pr,j} - \bar{P}_{Pr})(P_{Ni,j} - \bar{P}_{Ni}) \quad (4)$$

$P_{Pt}$  : 白金線への供給電力量  
 $\bar{P}_{Pt}$  : 白金線への平均供給電力量  
 $P_{Ni}$  : ニッケル線への供給電力量  
 $\bar{P}_{Ni}$  : ニッケル線への平均供給電力量

白金線への供給電力量及びニッケル線への供給電力量の時間変動の相関係数が1に近づくほど、両者の供給電力量の時間変動が同じ挙動を示すことを意味する。このことは触媒反応による発熱量が変動しない、すなわち、水素濃度が時間的に変動しないことを示す。言い換えれば、一様に水素と空気が混合していることに対応する(4)。

### 3. 実験結果および考察

3.1 スリット噴射 Fig.1はスリット噴射による超音速混合層をシュリーレン法により可視化した結果である。スリットは後ろ向きステップに設けられ、流れに平行に水素を噴射している。Fig.2は白金線とニッケル線に供給される電力量の相関をしらべ、その係数が流れ方向にいかに変化するかを示したものである。測定位置は混合層その中心である。下流の位置ほど、相関係数が高く、空気と水素はより均一に混合していることがわかる。これは、混合層が発達するので、当然のことである。すなわち、ここで提案する手法で、混合状態の瞬間の状態が定性的に評価できる。Fig.3は気体種による違いを示したものである。気体種が水素の場合、気体種がヘリウム、空気の場合に比べて相関が弱いことが分かる。これより、白金線表面で触媒反応が生じないヘリウム、空気の場合の方が、触媒反応が生じている場合に比べて強いので、本手法により、混合状態の時系列測定が可能であるといえる(4)。噴射なしの場合、相関が低く測定されたが、これは、流れの乱れスケールがプローブのスケールに比べて小さいためであろう。

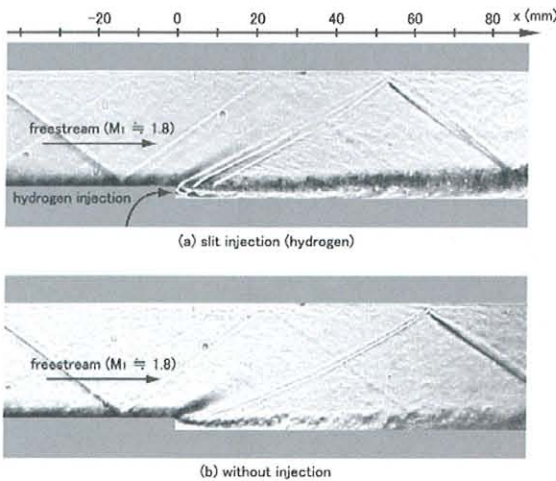


Fig.1 スリット噴射による超音速混合層 (シュリーレン写真)

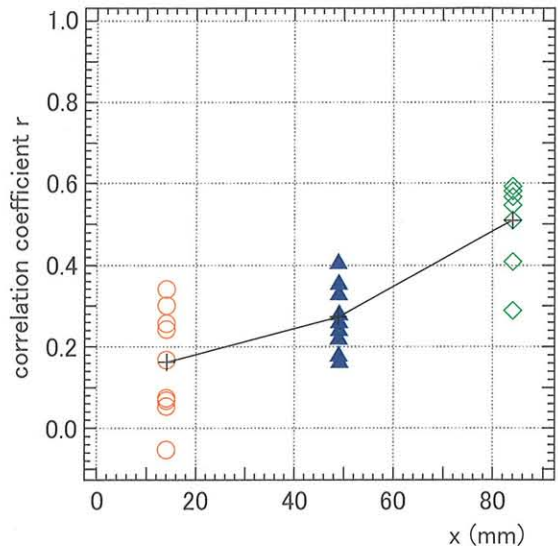


Fig.2 相関係数の流れ方向変化

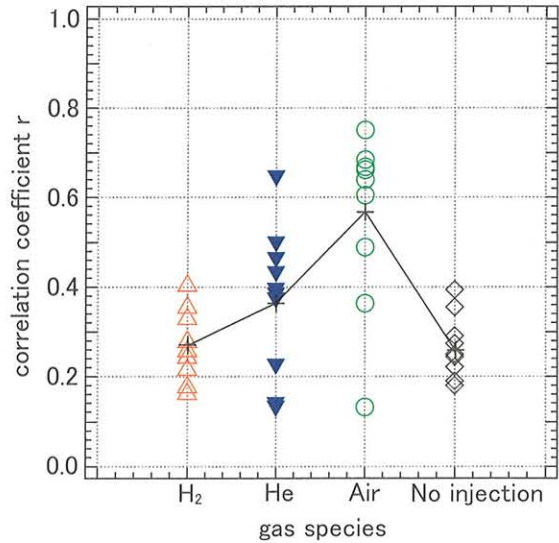


Fig.3 相関係数に及ぼす気体種の影響

3.2 AIP 噴射 Fig.4はAIP 噴射装置を示して示る。これは混合促進を目的として次の構想により考案したものである。まず、スリット噴射より、空気との接触面積を増加されるために、スリットを複数の噴射孔に分割する(0度噴射)。この場合の噴射方向は流れに平行である。この流れに、空気力学的に縦渦を導入するために、噴射孔を30度傾ける。すなわち、Fig.4に示されるように、0度噴射と30度噴射が交互にくるようにする。これを Alternating Inclined and Parallel injector (AIP injector) と呼ぶことにする。Fig.5はAIP 噴射器によって作られる混合層を可視化した結果を示している。図には参考のため、0度噴射とすべての噴射孔が30度傾いた場合(30度噴射)も示した。この3つの条件では、混合層の高さには大きな差は見られないことが分かる。すなわち、平均的な混合層の発達の様相には大きな違いは見られないように見受けられる。ただし、AIP 噴射の場合には混合層の

内部にかなりはっきりと組織構造がみられる。AIP 噴射では縦渦をながれに導入したが、その縦渦が速やかに不安定になり、流れに直角な構造が誘起されたものと思われる。Fig.6 は AIP 噴射、0 度噴射、30 度噴射の場合の白金線とニッケル線に供給される電力の相関係数を示している。測定は噴射位置から下流へ49mm の位置で、混合層のほぼ中心で行った。図から分かるように、AIP 噴射の場合がもっとも相関係数が高く、水素と空気が他に比べてより均一に混合していると考えられる。すなわち、縦渦の導入は混合促進に有利に作用するといえる。

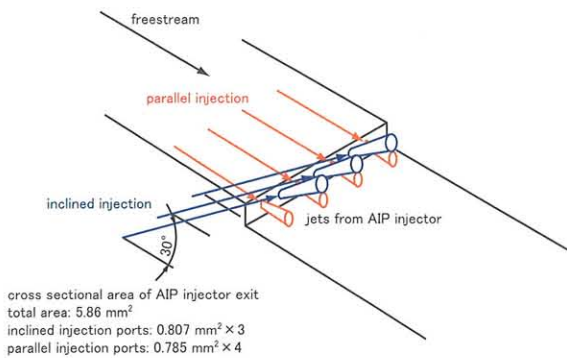


Fig. 4 AIP 噴射器

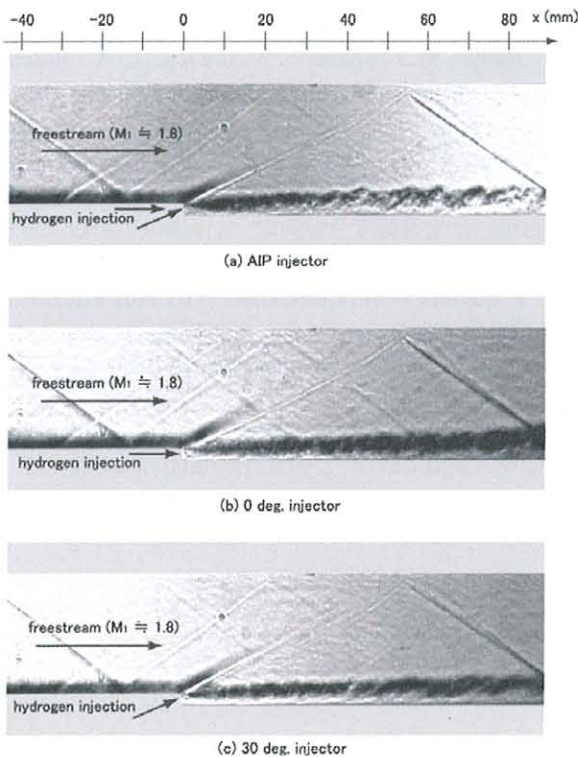


Fig. 5 AIP 噴射、0 度噴射、30 度噴射によって作られる流れ場の可視化

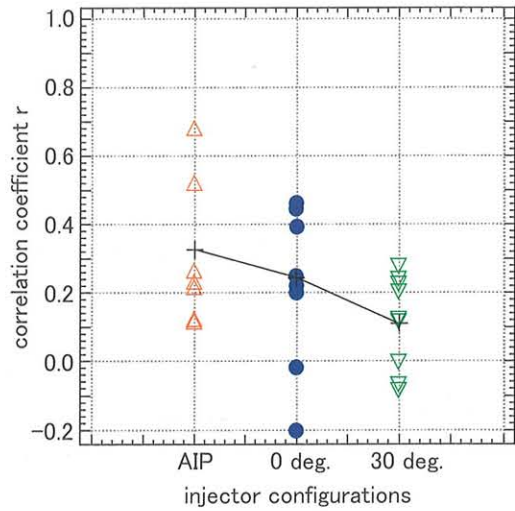


Fig. 6 噴射形状が相関係数に及ぼす影響

3.3 ポートホール噴射 Fig.7 に、ポートホール噴射孔の概略を示す。ポートホール噴射孔は直径が  $L$ 、深さが  $D$  のキャビティーに直径3mm の噴射孔を組み合わせたものである。また、ポートホール噴射孔と比較のため、のど部直径3mm の円孔噴射孔も用いられた。気体水素がこれらの噴射孔より、流れに垂直に主流との運動量流束比約1.0 で噴射された。Fig.8 に瞬間光源を用いたシュリーレン法による流れ場の可視化写真の一例を示す。図より、噴射孔前方の境界層の剥離による剥離衝撃波の発生位置は円孔噴射の場合が最も上流であることがわかる。流れの可視化写真より、キャビティーと噴流とが干渉して噴流に不安定変動が生じ、混合層内部に比較的是っきりとした組織構造が存在することが分かる。この組織構造の大きさは、 $L/D$  によって整理でき、キャビティーから励起される振動に支配される (5) (6)。

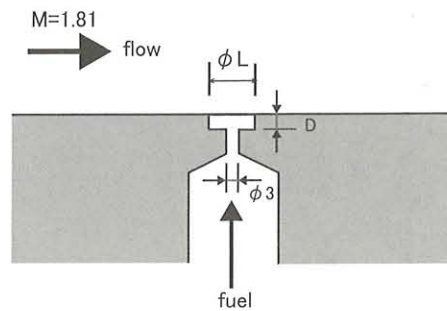


Fig. 7 ポートホール噴射器

Fig.9 は白金線およびニッケル線の供給電力量を測定し、それぞれの時間変動がどのくらい互いに依存関係があるかを相関係数を測定結果から算出して示している。以前の研究によれば、相関係数が高い場合は混合が進んでおり、より均一な混合場が得られていると考えられる (4)。図は  $x=64\text{mm}$  の位置で、ほぼ混合層の中心の  $z$  方向の位置における測定結果を示している。ここで縦軸は相関係数、横軸は  $L/D$  である。図より、円孔噴射に比べて

ポートホール噴射の場合の方がは相関係数が大きいことがわかる。すなわち、キャビティーが存在する場合はキャビティーが存在しない場合に比べて混合が進んでいると考えられる。また、 $L/D$  が2の場合が最も混合状態が良いと考えられる。このことは  $L/D=2$  のときに誘起される乱れの周期と噴流の不安定周期がほぼ一致していることによると考えられる。

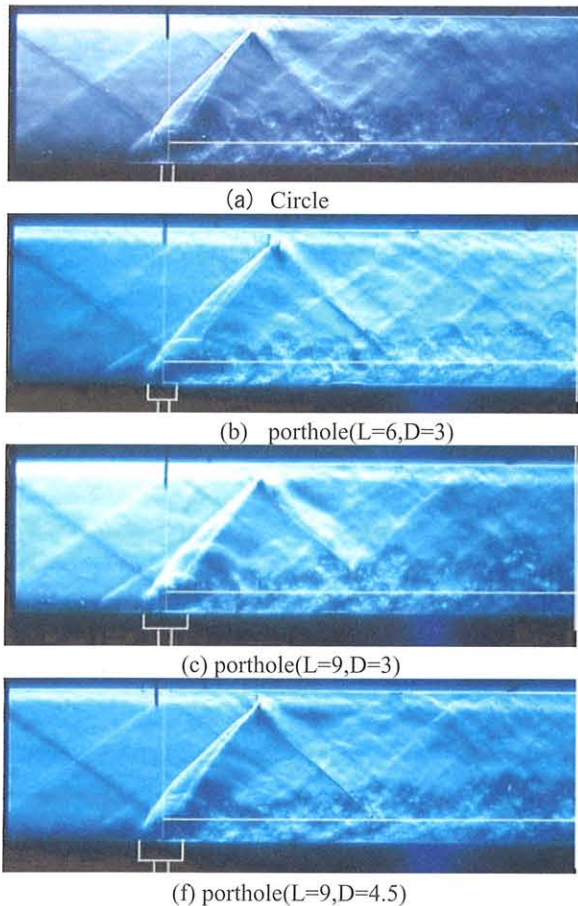


Fig.8 ポートホール噴射器によって作られる流れ場の可視化

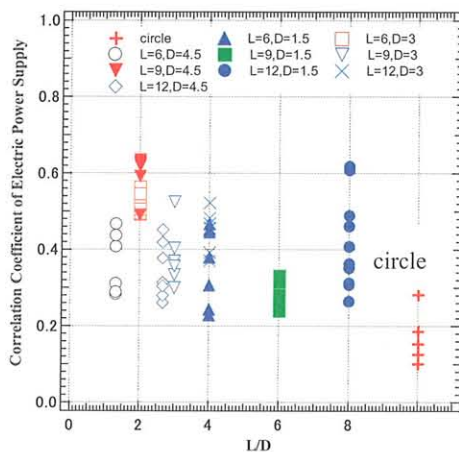


Fig.9 ポートホール噴射器の形状が相関係数に及ぼす影響

#### 4. 結論

空気-水素超音速混合層の混合状態の瞬間的な評価を行う方法を提案し、種々の噴射形状から得られる混合層に対して適用し、その有効性を示した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 触媒反応を用いた本混合評価方法は水素-空気超音速混合層の混合評価に有効であり、本手法により空間的均一度（一様に混合しているかどうか）を評価できる。
- (2) 混合促進法として、縦渦を導入するAIP噴射器は有効である。
- (3) 混合促進法として、キャビティー内から噴射するポートホール噴射器は有効である。ただし、キャビティーの形状（直径と深さの比）により、その効果が異なる。

#### 謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金（基盤研究（C）17560694）による。実験には元室蘭工業大学大学院生森優子君、室蘭工業大学大学院生工藤丈学君、シェリー・ローズ・エドワード君の強力をいただいた。付記して感謝する。

#### 参考文献

- (1) Scuderi, L. F., Orton, G. F. and Hunt, J. L.: Mach 10 Cruise/Space Access Vehicle Definition, AIAA Paper 98-1584, In AIAA Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference (1998).
- (2) Barber, M. J., Schetz, J. A. and Roe, L. A.: Normal, Sonic Helium Injection Through a Wedge-Shaped Orifice into Supersonic Flow, Journal of Propulsion and Power, Vol.13, No.2, (1997), pp.257-263.
- (3) 新井ら：空気-水素2次元超音速混合層の白金触媒反応を用いた水素濃度分布測定，日本機械学会論文集（B編）67巻656号（2001-4）934-939.
- (4) F. Sakima, et al., Correlation Mass Flux Fluctuation and of Hydrogen Concentration in 2-D Air-Hydrogen Supersonic Mixing Layer, Transaction of JSASS, Vol.47, No.158, pp.262-267, 2005.
- (5) 浅井智広, 西岡通男：超音速キャビティ流の振動機構に関する理論的研究，ながれ22(2003)147-156.
- (6) 浅井智広, 西岡通男：超音速キャビティ流の振動機構に関する実験的研究，ながれ22(2003)131-145.