

Transonic flow velocity field estimated from recovery temperature distribution

○石橋雅裕 (産総研)

Masahiro ISHIBASHI

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba 305-8563, Japan

Air flow velocity field in a critical nozzle was measured using a very thin thermocouple supported from a XY traverse. The measurement is based on the constant Prandtl number different from unity, that is, the thermocouple indicates the recovery temperature at the contact point, which is a function of the flow velocity. The thin thermocouple is shown not to change the discharge coefficient by monitoring the mass flow using another critical nozzle connected in series at the upstream location, so the measurement can be considered to be essentially non-intrusive. Measurements on a critical nozzle complying with ISO9300 were carried out at various pressure ratios. Flow structure such as the oblique shock originated at the contact point of the torus and the conical parts, and normal shock, location of which depends on the pressure ratio, were detected.

1. 緒論

一般的な気体のプラントル数 Pr は1ではないため回復温度がよどみ点温度と一致せず、また、 Pr が一般に定数であるため発生する温度差が流速のみに依存する。したがって、流れ場の回復温度分布を測定すれば流速分布を知ることができる。このとき、温度測定に細く長い熱電対線を用いれば、軸対称型など様々な形状の小口径管路内の流れ場を、ほぼ非侵襲に $10\ \mu\text{m}$ オーダーの空間分解能で求めることができる。本報告では、スロート直径 $13.4\ \text{mm}$ の臨界ノズル内に発生する遷音速流速分布を求めた結果について報告する。本方法は、非常に高い空間分解能を持つため、境界層の存在をも検出する。

2. 測定原理

マッハ数 M 、静温度 T の流れの中に管路に固定した温度センサを挿入すると、そのセンサ表面上の温度は次の回復温度 T_r となる。

$$T_r = \left(1 + \sqrt{Pr} \cdot \frac{\kappa - 1}{2} \cdot M^2\right) \cdot T \quad (1)$$

ここで、 κ と Pr は、比熱比とプラントル数である。静温度とよどみ点温度 T_0 を関係づける断熱の式を用いてよどみ点温度と回復温度の差 ΔT_{r0} を求めると、次式となる。

$$\Delta T_{r0} \equiv T_r - T_0 = -\left(1 - \sqrt{Pr}\right) \cdot \frac{\kappa - 1}{\kappa + 1} \cdot T_0 \cdot M^2 \quad (2)$$

温度計はセンサー表面の温度、すなわち回復温度をそのまま示すため、温度計を流れに差し込んで温度を読むだけで、臨界マッハ数 M^* の自乗、すなわち、流速の自乗に比例した値が得られる。

回復温度分布の測定にはFig. 1のようにトラバース上に設置したサポートに張った細線熱電対を用いた。熱電対を用いることには次の2つの大きな利点がある。まず、測定体積が接点の大きさに限定されるため、その大きさが線の直径程度の大きさ、すなわち $10\ \mu\text{m}$ オーダーとなり、非常に高い空間分解能が達成される。次に、測定値が熱電対線の長さに依存しないため、十分に離れた位置にサポートを置いて測定位置における乱れを極力小さくすることができる。この2点により、本方法は、一見良く似ている熱線流速計とは決定的に異なる結果をもたらす。

2. 測定装置

測定用トラバースをFig. 2に示す。X 軸はチャンパー内でノズル軸と平行に移動する。Y 方向のトラバースは、このX 軸に取り付けられたサポートのストロークを利用し、X 軸を回転して行う。

熱電対線には、直径 $13\sim 50\ \mu\text{m}$ のものを使った。被試験ノズルの上流側に基準の臨界ノズルを接続すると (Fig. 3)、流量変化を 0.01% オーダーの分解能で測定することができるが、熱電対線の有無による流量差は検出されないため、測定はほぼ非侵襲と考えられる。基準ノズルは実験室内の大気を吸入する。被試験ノズルのスロート直径は $13.4\ \text{mm}$ 、その上流圧は $25\ \text{kPa}$ 、測定レイノルズ数⁽¹⁾は約 44000 である。被試験ノズルの圧力比は、下流の調圧弁で調整する (Fig. 3)。

熱電対線はノズル軸と平行に張ったため、Fig. 4に示すように、スロート以外では壁面近くの測定が不可能である。以下、対称軸に沿う測定を"center"、スロートに接する線に沿う測定を"outer"と呼ぶ。実際にノズル内に $25\ \mu\text{m}\phi$ の熱電対線を張り、ノズルを臨界させたときの長時間露出 (10s 以上) 写真をFig. 5に示す。

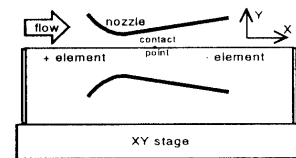


Fig. 1 Measurement of the recovery temperature distribution in a nozzle.

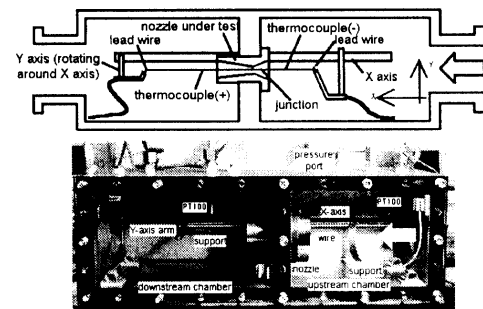


Fig. 2 The traverse.

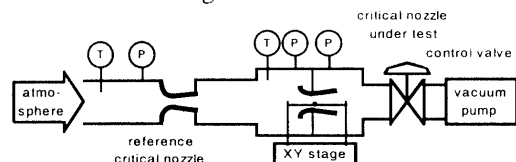


Fig. 3 Experimental setup.

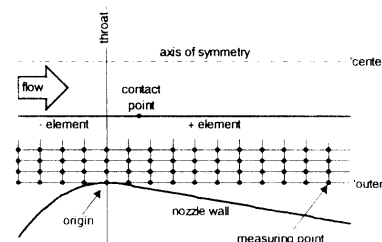


Fig. 4 Measuring points.



a) Downstream location b) Upstream location.

Fig. 5 Pictures of a $25\ \mu\text{m}\phi$ thermocouple wire settled in a nozzle in the choking condition taken with exposure times more than 10 s.

3. 測定結果

別稿²⁾に示すトロイダルスロート臨界ノズルの圧力比を 0.30 として測定した回復温度降下分布を Fig. 6 に示す。横軸 X は、スロート位置をゼロとし、下流側を正とした対称軸方向の位置を表す。図の両端がほぼノズルの両端に相当する。測定値は、図の太線が示す二次元等エントロピー流れを仮定した理論値と非常に良く一致する。しかし、円環部と円錐部の接合面から細かい構造が発生し、スロート後方の 20mm には強い衝撃波があることが分かる。単純な理論ではディフューザ内の垂直衝撃波の存在はこの圧力比では考えられないが、実際の低 Re の軸対象流れでは全く状況が異なることが分かる。約半分の Re における測定でもほぼ同じ分布が得られた。さらに詳細に見ると、円環-円錐接合面より前では、壁面に近い方の流速が中央部より速く、これは 2 次元理論の示すとおりである。この測定結果を三次元的に表示すると (Fig. 8)、円環-円錐接合面から発生した構造が斜め衝撃波であることが分かる。この図は、outer から center までの測定結果を反転してつなぎ合わせてある。

Y 軸方向の全ストロークについて測定すると (Fig. 9)、図の右側から挿入されているサポートの影響と見られる若干の非対称性はあるが、流れはほぼ軸対象と言える。この図では、スロート位置の流速分布が二次元理論の示すとおりであることがより明白に分かる。

Fig. 9 は、様々な圧力比 (図中の数字) における流速分布を並べて表示したものである。圧力比が 0.36 前後で、強い衝撃波が急速に移動して形状が大きく変化する。これは、斜め衝撃波との干渉によって起こったものと考えられる。この圧力比前後では雑音の音質が急激に変化するため、流れに大きな変化が起こっていることは確かである。また、この雑音の変化の様子は、熱電対線の有無にかかわらず同じであるため、測定は場を乱していないと考えられる。同様な干渉は 0.55 付近の圧力比でも起こっていると考えられる。

本方法は、たとえばステップを持つ臨界ノズルにおいて、エッジによる加速やその圧力比依存性も検出でき、流れ場の詳細な解析に非常に有効である³⁾。また、Fig. 10 に示すように、高空間分解能を生かして境界層内の速度変化までも検出できる。ただし、境界層内では式(2)が成り立たないため、流速に変換して議論するためにはさらなる検討が必要である。

4. 結論

細線熱電対線を用いて遷音速流れ場内の回復温度分布を測定することにより、ほぼ非侵襲に高空間分解能で流速分布を求めることができることを示した。

引用文献

- 1) 石橋、他：臨界ノズル内に発生する境界層遷移の精密測定、日本流体力学

会年會 2001 講演論文集 F125

- 2) Ishibashi, et al.: Discharge Coefficients of Critical Nozzles With Step Near the Throat and Their Flow Field Estimated From Recovery Temperature Distribution, FEDSM2001-18035 (May 2001, New Orleans)

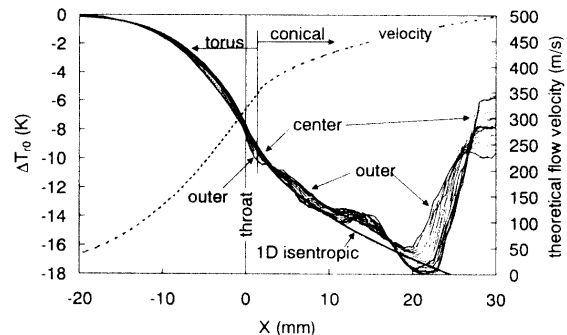


Fig. 6 Comparison with the 1D inviscid theory.

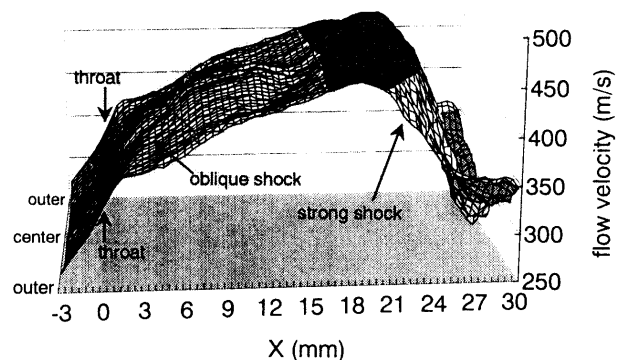


Fig. 7 3D plot of the result shown in Fig. 6.

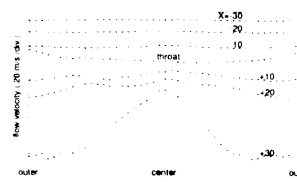


Fig. 8 Symmetry of the flow.

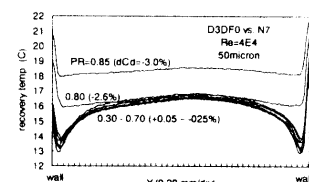


Fig. 10 Detection of boundary layer across the throat.

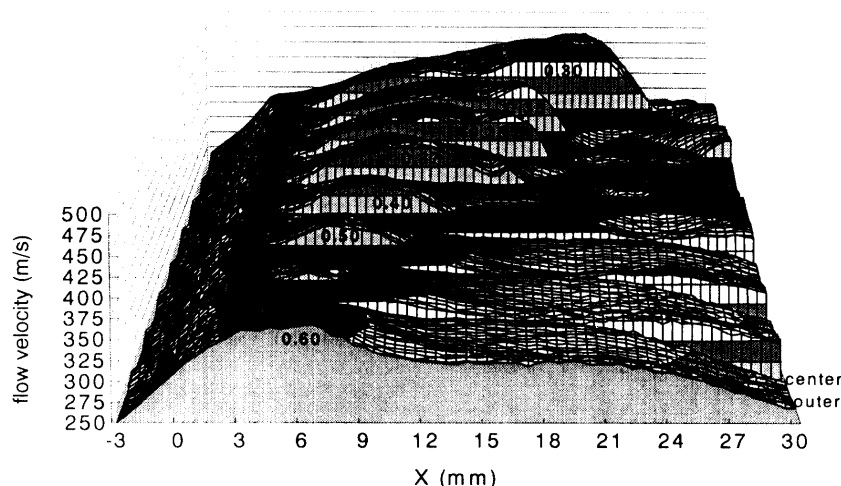


Fig. 9 Dependence of the flow fields on the back pressure ratio.