

航技研1.27m極超音速風洞におけるレーレ散乱/速度場計測 システムの構築

○津田尚一, 平林則明, 小山忠勇(NAL), 穂積弘一, 関根英夫(JAST)

Development of Hypersonic Velocity Flow Field Measurement System using
Filtered Rayleigh Scattering in NAL 1.27m Hypersonic Wind Tunnel

Shoichi TSUDA, Noriaki HIRABAYASHI, Tadao KOYAMA, (NAL),
Koichi HOZUMI and Hideo SEKINE (JAST)

概要

航技研1.27m極超音速風洞では、新しい試験技術の一つとして光学的可視化法による極超音速流場の速度分布測定を試みている。本実験ではマッハ数10の極超音速流における平板模型と楔模型からの衝撃波干渉領域の速度場を測定するため、炭酸ガスのドライアイス微粒子によるレーレ散乱光を1台のICCDカメラで観測した。得られたデータは衝撃波干渉領域内の微小な速度差を識別できることを示し、レーレ散乱を利用した計測方法が有効であることを確認した。

1. はじめに

最近ではPIV (Particle Image Velocimetry)法をはじめとする光学的手法による速度場計測が大型の実用風洞にも適用され、急速に発展している。光学的手法の利点は流れ場に影響を与えないこと及び面情報が可視的に得られることである。しかしながら、流速1,000 m/secを超える高速流の速度場の測定にPIV法を適用することは難しい。

レーレ散乱を利用する手法は、散乱光のドップラーシフト成分から流速を求める DGV (Doppler Global Velocimetry) と呼ばれ^{1),2)}、多くの技術確立の努力が行われている。この方法はトレーサー個々の移動量から画像を求めるPIV法と比べ、瞬時的な画像を用いる手法であるため、高速流の計測にも適用できる。Miles 等はこの方法へのヨース素 (I_2) フィルターの適用を検討し、散乱光の Background Scattering を除き、速度成分のみを分離し、流れの診断に適用した^{3),4)}。このヨース素フィルターを利用する方法はFRS (Filtered Rayleigh Scattering) 法と呼ばれている。本実験では、極超音速流の瞬時流場を得ることを目指して、炭酸ガスを注入しドライアイス微粒子により強められた散乱光を利用したFRS法により、衝撃波干渉領域の平面流場の速度分布測定を行った。

2. FRS法による計測の原理

2.1 Doppler Global Velocimetry の原理

微粒子散乱光のドップラーシフト量と流速の関係は、(1)式で示される¹⁾。

$$\Delta \nu = \nu (\vec{O} \cdot \vec{I}) \cdot \mathbf{V} / c \quad (1)$$

ここで、 $\Delta \nu$:ドップラーシフト周波数、 ν :レーザ周波数、 \mathbf{V} :粒子速度ベクトル、 c :光速である。

\vec{I} , \vec{O} は図1に示すように、それぞれ、レーザ光の方向、及びカメラへ向かう方向を表す単位ベクトルである。

2.2 ヨース素フィルターの吸収特性

FRS法ではヨース素フィルターのレーザ光吸収特性を用い、ドップラーシフト量に応じたシーダ印加電圧の選定を行い、吸収曲線の勾配を利用して流速を定める。主流マッハ数10の1,000m/sec以上の流速を測定するためには、レーザ光源に1V程度のシーダ印加電圧を加え、光源の波長を1GHz程度シフトさせ、吸収曲線の勾配部と計測周波数を合わせる必要がある。このため試験に先立ち、レーザ光源に0.4~1.6Vのシーダ印加電圧を加え、光源の波長532nm付近のヨース素フィルターの吸収特性の校正を行なった。校正したシーダ印加電圧に対するヨース素フィルターの吸収特性校正曲線を図2に示す。

3. 実験の概要

3.1 計測システム

図3に本実験の光学系のセットアップ概略を示す。光源にはNd-Yagレーザ(532nm, 420mJ/pulse, パルス周期10Hz, パルス幅10nsec)のインジェクションシーダ付きのものを用いた。レーザ光は投

入用風洞壁小窓から風洞測定部に投入し、風洞下流・後方に設置したシリンドリカルレンズからライトシートを発生させ、流場を観測した。ライトシートからの散乱光はシュリーレン窓を通して、ICCD カメラシステムにより画像を取得した。

今回用いたカメラシステムを図4に示す。このカメラシステムの特徴は、ビームスプリッタを用いてヨー素フィルターを通した画像とフィルターなしの参照画像を1台のICCDカメラ(16ビット、1024x1024画素)上に左右に並べて記録することである。この工夫によりコストの低減化とともに光学システムを単純化することができた。カメラと連動した画像収集システムによりパーソナルコンピュータに、25秒間(通風時間30秒)で12枚の画像を取得した。

散乱光の強度を強め、温度依存性を低減するため、液化炭酸ガスを用いた。液化炭酸ガス注入装置により、ノズル上流にある整流筒から主流流量の2.5%程度の液化炭酸ガスを注入した。注入された炭酸ガスは気流の静温低下によって数 nm オーダーの微粒子(ドライアイス)となり、レーレ散乱を起こす⁹⁾。

3.2 模型のセットアップ

今回の実験に用いた楔模型と平板模型を測定室内に設置した様子を図5に示す。速度場の定量計測の可能性を確かめるため、鋭い先端を持つ小迎角平板模型上の衝撃波と上流に設置した楔模型(ショックジェネレータ)による衝撃波との干渉流場の画像を取得した。2つの模型による衝撃波干渉流場のシュリーレン写真を図6に示す。図6中の○印部分がICCDカメラでの観測領域である。図7に示すように干渉流場は5つの速度場からなる。表1に平板模型迎角 5° 、楔模型迎角 7.5° 、 $M=9.59$ ($P_0=2.5\text{MPa}$, $T_0=700^\circ\text{C}$)に対応する各領域の流れの諸量を示す。表1に示すような微小な速度分布の違いが認識出来るかが本実験の目的である。

4. 実験結果

散乱光は炭酸ガス微粒子の密度に比例するため、密度による影響を取り除く必要がある。そのため、フィルターを通した画像をフィルターを通さない参照画像で基準化して速度場画像を得る。本実験で得られた画像(参照画像、フィルター画像)を図8に示す。図8から分かるように、図7の干渉流構造に対応する密度が低い主流域(1)は暗く、密度が高い干渉後の領域(4)、(5)は明るくなっている。

図9の基準化された画像は、密度の影響が取り除かれ、明るさが流速に比例した速度場画像にな

っている。5つの干渉領域の速度に応じた明るさの画像が得られており、干渉領域間の速度の違いは識別出来ることを示している。

図9の速度場画像において $X_{\text{pixel}}=480$ 位置垂直線上の強度分布を図10に示す。図10に示すように、各領域の速度に比例した強度分布が得られている。図10中に示す領域(3)ではほぼ強度一定の一樣流であるが、領域(2)では楔模型後方から生じる Expansion-Fan による膨張流となっており、下方に行くほど流速は早くなっていることが分かる。

5. 結論

1) 本レーレ散乱流場計測システムによって、主流速度1000 m/sec のオーダーのマッハ数1.0流れにおける小さい衝撃波角の衝撃波/衝撃波干渉の各領域間の微小な速度分布の違いを識別できた。得られた流速は予測値に近い流速分布を示し、本計測法が速度測定法として有効であることを確認した。今後、衝撃波干渉領域だけではなく模型後流の流場(反射光のない条件)にも本計測システムの適用を試みる。

2) 本システムをより精度の高い定量速度計測手段として確立するためには、散乱光周波数と粒子速度間や、光源周波数及びシーダ印加電圧とフィルター吸収曲線の間の正確な校正、それらに基づく速度導出手順の確立が必要である。空気分子運動による散乱光 Broadening 効果の検討、Background scattering 等のノイズ除去の工夫も必要である。

参考文献

- 1) Meyers, J.F., "Doppler Global Velocimetry: The Next Generation?," AIAA-92-3897.
- 2) Komine, H., Brosnan, S.J., Litton, A.B., and Stappaerts, E.A., "Real-Time Doppler Global Velocimetry," AIAA-91-0337.
- 3) Miles, R.B., Lempert, W.R., and Forkey, J. N., "Instantaneous Velocity Field and Background Suppression by Filtered Rayleigh Scattering," AIAA paper 91-0357, Jan. 1991.
- 4) Miles, R.B., Forkey, J. N., and Lempert, W.R., "Filtered Rayleigh Scattering Measurements in Supersonic/ Hypersonic Facilities," AIAA Paper 92-3894, July 1992.
- 5) Erbrand, P.J., Baumgartner, M. L., Yalin, A. P., Etz, M. R., Muzaus, B., Lempert, W.R., Smits, A.J., and Miles, R.B., "Development of Planar Diagnostics for Imaging Mach 8 Flowfields Using Carbon Dioxide and Sodium Seeding," AIAA paper 97-0154

表1 測定流場の流れ諸量の推定

Flow Region	M (-)	U (m/sec)	ρ (10^{-3}kg/m^3)	P (Pa)	T (K)	θ (deg)	δ (deg)
(1)	9.59	1361.2	5.408	77.83	50.18	0	0
(2)	7.23	1310.0	84.90	352.2	84.90	12.07	7.5
(3)	8.01	1331.3	11.19	226.1	70.44	9.74	-5
(4)	6.23	1271.6	25.98	820.99	109.9	11.76	2.375
(5)	6.33	1276.2	26.35	379.2	107.4	12.98	2.375

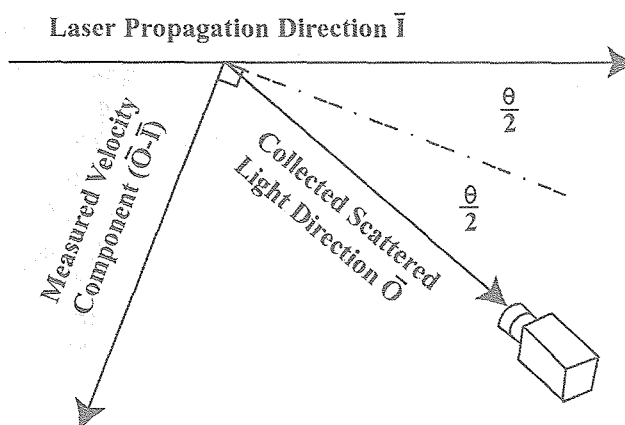


図1 レーザ光、観測方向及び測定速度成分の関係

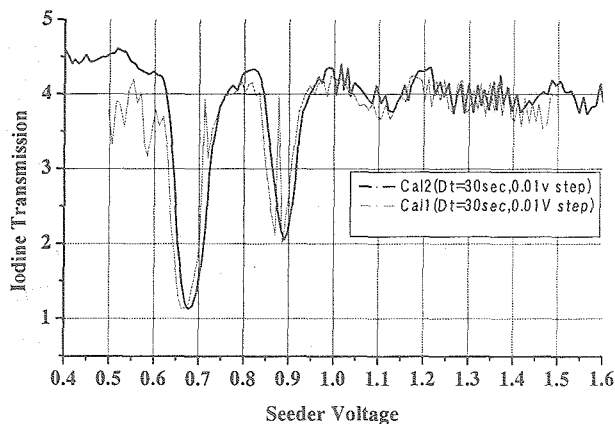


図2 測定したヨウ素 (I_2) フィルターの吸収特性

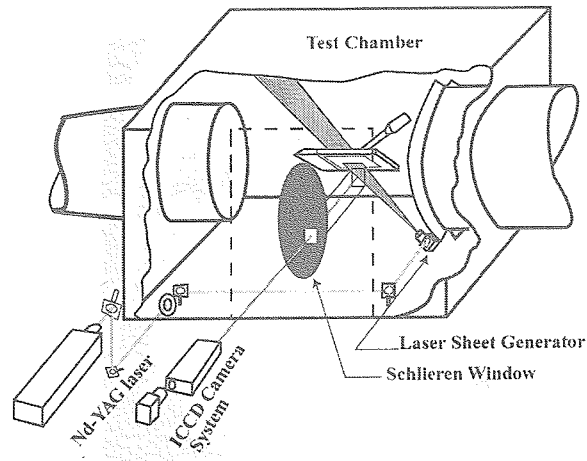


図3 光学系のセットアップ

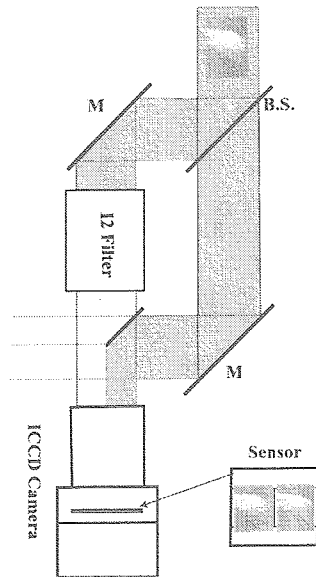


図4 受光部・カメラシステム

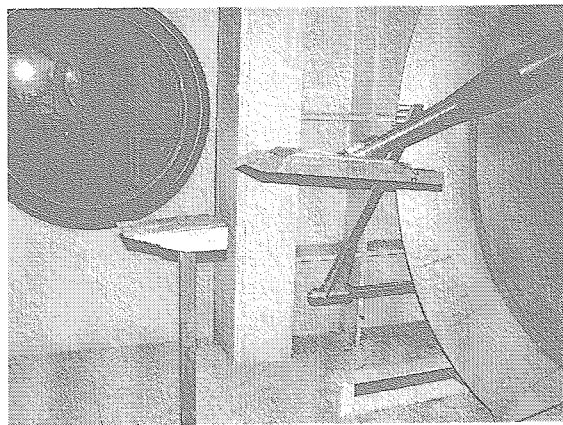


図5 模型のセットアップ
(楔模型 (左) と平板模型 (右))

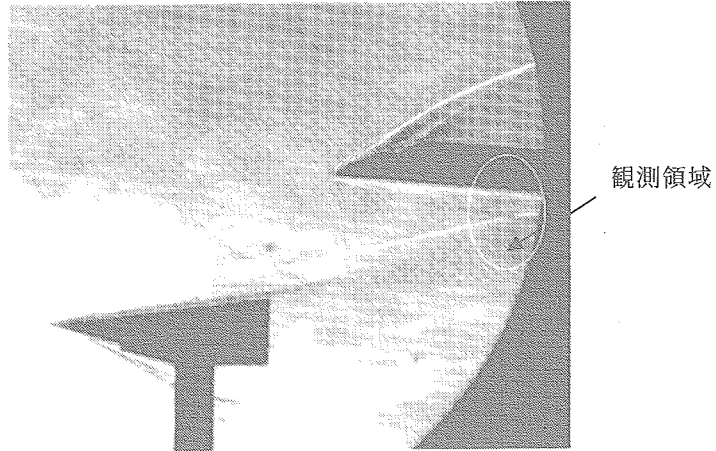


図6 衝撃波干渉流場のシュリーレン写真
 ($M=9.59$, $\alpha_{\text{model}}=5^\circ$, $\delta_{\text{wedge}}=7.5^\circ$)

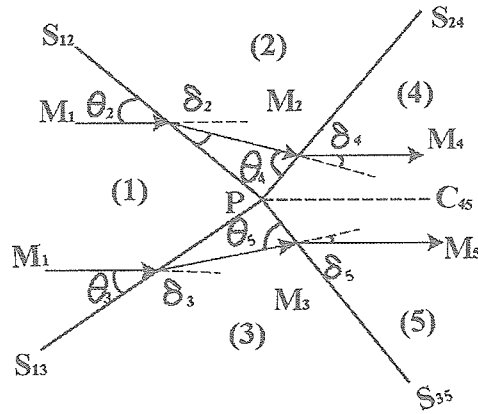
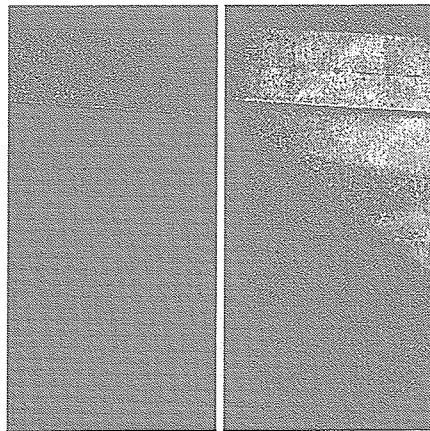


図7 Regular 干渉流の構造
 ($M=9.59$, $\alpha_{\text{model}}=5^\circ$, $\delta_{\text{wedge}}=7.5^\circ$)



フィルター画像 参照画像

図8 取得画像(Run1580)
 ($M=9.59$, $\alpha_{\text{model}}=5^\circ$, $\delta_{\text{wedge}}=7.5^\circ$)

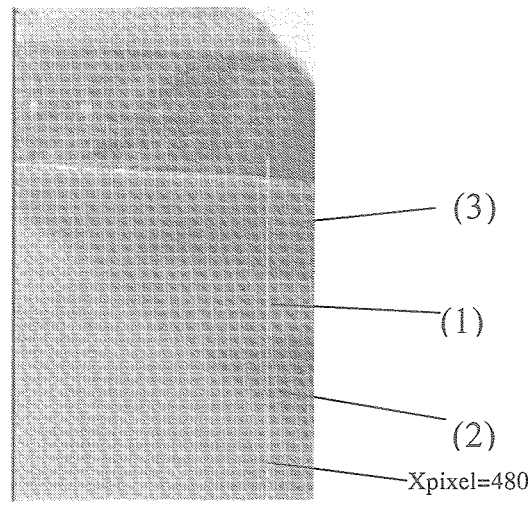


図9 速度計測結果 (Run1580,基準化画像)
 ($M=9.59$ 、 $\alpha_{\text{model}}=5^\circ$ 、 $\delta_{\text{wedge}}=7.5^\circ$)

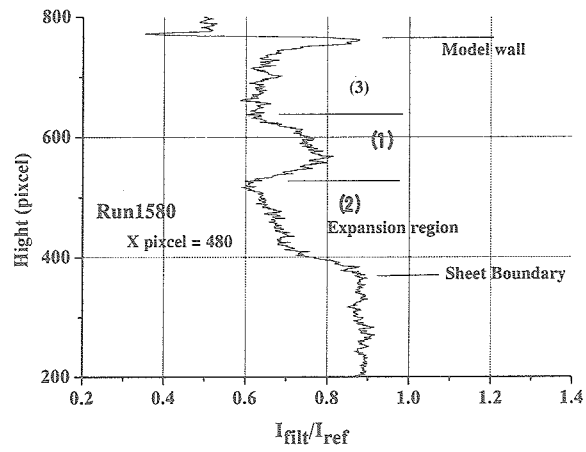


図10 干渉流中の速度分布(Run1580)
 ($M=9.59$ 、 $\alpha_{\text{model}}=5^\circ$ 、 $\delta_{\text{wedge}}=7.5^\circ$)