

ドップラークローバル流速計の開発研究

坂口大作^{*1}・Carlo Bagnera^{*2}

Development of Doppler Global Velocimetry

by

Daisaku SAKAGUCHI^{*1} and Carlo BAGNERA^{*2}

DGV (Doppler Global Velocimetry) is a system to measure velocity of particles crossing a laser sheet, by analyzing the scattered doppler shifted frequency of a light sheet. The light frequency shift is very weak because of the very low speed of the particles compared to the speed of light. In order to overcome this problem, an absorption line of the molecular iodine is used: the absorption of iodine depends strongly on the light frequency going through the iodine vapor. By this mean, it is possible to measure the scattered light intensity going through the iodine and normalize it to the scattered light: this ratio gives us the percentage of light absorbed by the iodine and therefore the doppler shifted frequency. The frequency shift can be traced back to particle velocity.

Key words: laser velocimetry, planner measurement, doppler signal, molecular iodine

1. まえがき

本研究で開発したドップラークローバル流速計 (DGV : Doppler Global Velocimetry) は、レーザシート面内に粒子が通過した際のドップラー信号を解析し速度を求めるシステムである。光の速度に対し粒子の速度が極端に小さいので、散乱粒子によって発生するドップラー信号は微弱であり、通常の光検知器ではドップラー信号を検知・解析することができない。そこで、ヨウ素の周波数に依存した吸収特性曲線を伝達関数として利用する。ヨウ素を充填させた容器前後の散乱光強度を計測し、その比を取ればドップラー周波数へ換算し、速度を求めることができるようになる。DGVは画像粒子流速計の一種であるが、レーザシート面内で速度3方向成分を取得でき、散乱粒子がレーザシート面を突き抜けても計測できる点において、従来のPIV (Particle Image Velocimetry) の欠点を補うことができる。Table. 1にDGVおよびPIVの長所および短所を比較した。DGVは、超音速風洞における計測手法として注目されており、NASA^(1,2,3)やDLR^(4,5)をはじめ欧米^(6,7,8)において盛んに研究されている。Table. 2に主要研究機関およびそれぞれのシステムにおける特徴をまとめた。

主要記号

ν_0	: Laser frequency
ν	: Scattered light frequency
$\Delta \nu$: Doppler shift or frequency variation
c	: Speed of light
\vec{V}	: Velocity vector of the particle
\vec{o}	: Unit vector of observation direction
\vec{l}	: Unit vector of laser beam direction
L	: Length of laser resonator
t	: Thickness of etalon
θ	: Tilting angle
ΔL	: Mirror displacement

Table 1 Comparison of DGV and PIV

	DGV	PIV
FLOW	+ independent of seeding concentration	- requires good seeding concentration
HARDWARE	+ camera resolution + endscopes, optical fiber bundles	- "interrogation window" limited resolution - better not
SOFTWARE	+ almost on-line	- lengthy precessing
FLOW	+ any flow direction	- in-plane fow motion
OUTPUT	+ 1C, easy 3C	- 2C, difficult 3C
READY TO USE	- under heavy development	+ consolidated
INSTANTANEOUS	- Nd:YAG (higher bandwidht)	+ intrinsically
OUTPUT	- average measuremend	+ average & statistics

平成16年 4月16日受理

^{*1} 大学院生産科学研究科 (Graduate School of Science and Technology)^{*2} von Karman Institute for Fluid Dynamics (Belgium)

Table 2 Main research center working on DGV

Group	Key Persons	System name & Laser spec.	Special feature	CCD Spec.	Iodine Cell	
Northrop Research and Technology Center, USA	H.Komine (Patent holder)	· Doppler Global Velocimetry (DGV) · Ar+(Coherent Innova90-5), 1w · Nd:YAG(Spectra Physics DCR-11) with seed laser (Lightwave Electronics 120-03), 15ns · Image size = 50*100(mm)	· 3C, 6CCD(simultaneously)	· Cohu 4810 CCD · 1/30 frame/s	Cell body	Cold finger
NASA, Langley Research Center	J.F.Meyers	· Doppler Global Velocimetry (DGV) · Ar+ · Nd:YAG 10Hz, 10ns, Laser band width = 120MHz · Image size = 100*200 (mm)	· 1C, 2CCD · Velocity calibration system with spinning wheel · 600-grit sandpaper for reference monitoring	· RS170 8bit low cost camera		40°C
	M.W.Smith G.B.Northam P.Drummond	· Absorption Filter Planar Doppler Velocimetry (AFPDV) · Nd:YAG (Quanta-Ray YG-590) 30Hz, 15ns, Laser band width = 100MHz, 100mJ	· 1C, 1CCD with image splitter	· Sony XC77R (30Hz) · Cooling, slow-scan (10sec for 1frame) mean data		
NASA, Ames Research Center	R.L.McKenzie M.S.Reinath	· Planar Doppler Velocimetry (PDV) · Ar+, 6W · Nd:YAG, Laser band width = 140MHz · Image size = 76*76 (mm)	· Development of uncertainly model	· RS170 8bit low cost camera · Pixel binning	100°C	40°C (dT = ±0.1°C)
DLR	I.Roehle R.Schodl C.Willert	· Ar+, 1-2W, PID controller, Frq.jitter = 1 ~ 4MHz	· Optical Fibre for 3C · Bragg cell for periodic flow	· cooling -15°C, 12bit, pixel binning, 500:1		55~60°C (dT = ±0.1°C)
	Fischer W.Forster H.Krain	· Long pulsed Nd:YAG, 1.6mJ · Ar+, 2W	· 3C-Doppler-L2F	· Gated CCD · Photomultiplier with delay fibre		60°C
ONERA, Fr.	P.Barrucan C.Lempereur	· Ar+(Spectra Physics 2060/65 with Jitter Lock) 2W	· 2C DGV with DEFI (Dispositif d'Etalonnage Frequence/Intensite)	· Hamamatsu-S7170 · Cooling -12°C, 8/12/16bit	70°C	43~39°C
Ohio Univ. USA	M.Samimy W.Lempert G.S.Elliott	· Planar Doppler Velocimetry (PDV) · Nd:YAG (Spectra Physics GCR-4) 9ns, 10Hz, 660mJ · Real Time PDV (RT-PDV)		· Princeton Instruments ICCD camera · Pixelvision Spectra Video series, 1024*1024, 16bit	95-140°C with N2 (5torr)	45°C (dT = ±0.1°C)
Princeton Univ. USA	R.B.Miles	· Filtered Rayleigh Scattering (FRS) · Nd:YAG, cw, 50mW	· Meas. Value (Velocity, Temp., Press.)	· ICCD	80°C	45.7°C (dT = ±0.5°C)
Cranfield Univ. UK	D.S.Nobes H.D.Ford R.P.Tatam	· 3C Planar Doppler Velocimetry (PDV) · Nd:YAG (Spectra Physics GCR 190-30), 300mJ	· Fibre Image Bundle (1-12cell, 2-CCD for 3C velocity mes.) · Frequency-switching technique by AOM (acousto-optic modulator) (1-12cell, 1-CCD)	· LaVision Imager3 · Cooling -15°C, 12bit	56.5°C	40°C
Univ of Oxford, UK	S.J.Thorp R.W.Ainsworth N.J.Quinlan	· Ar+ (0.5W) for rotating disc · Nd:YAG, Laser band width = 90MHz, 10Hz	· 1-CCD for 1C, capturing both reference and signal images (Sony XC77 CE)	· Ultralow-noise CCD, cooling (Peltier and liquid nitrogen cooling) · read out time 1sec		17-23°C

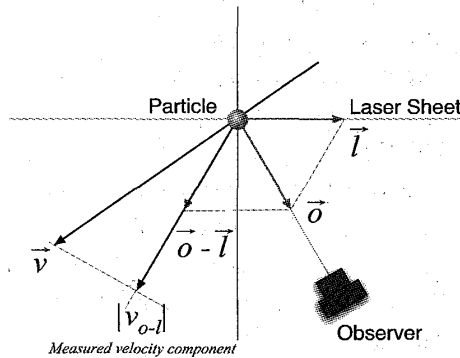


Fig.1 Determination of measured velocity component direction

2. 計測原理

DGVは流体中に混入した散乱粒子からの散乱光を検出する。レーザ光に対して散乱粒子はその速度の分だけドップラーシフトを生じる。

$$\Delta v = v - v_0 \quad (1)$$

このドップラーシフト量 Δv は散乱粒子の速度 \vec{v} , レーザ光源の入射方向 \vec{l} および受光センサ (観測者) の位置 \vec{o} によって変化し, 以下の式で示される。

$$\Delta v = v_0 \frac{(\vec{o} - \vec{l})}{c} \cdot \vec{v} \quad (2)$$

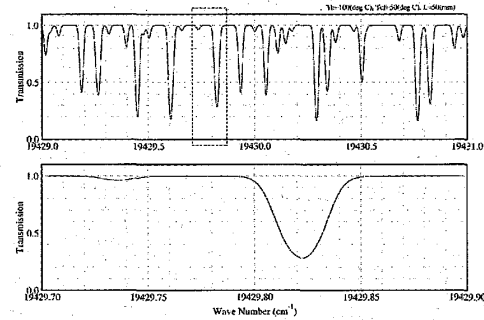


Fig.2 Computational simulation results of absorption line for molecular iodine

また, Fig. 1 にこれらのパラメータの位置関係を示す。

光の速度 c に対して, 散乱粒子の速度 \vec{v} は著しく低いので, このドップラーシフト量 Δv は微弱であり, ヨウ素の吸収特性曲線を利用する。ヨウ素を充填・蒸発させたガラス容器 (Iodine Cell) に散乱光を通過させれば, 僅かな周波数変化に対しても強い散乱光強度の変化となって得られる。Fig. 2 はシミュレーションプログラムを用いて解析した要素の吸収特性曲線であり, 良く知られた Ar+レーザの514.5(nm)や Nd:YAGレーザの532(nm)が利用可能である。また, Iodine Cell 前後の散乱光強度を計測するので, 2つの受光素

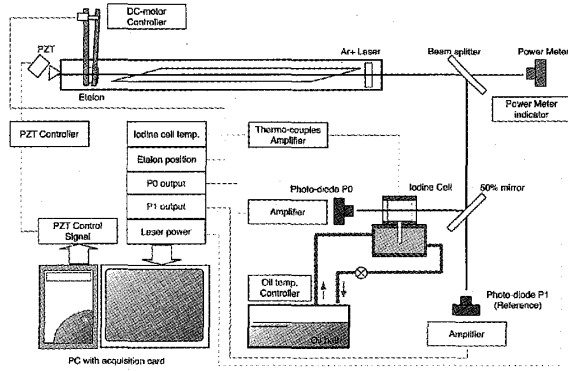


Fig. 3 DGV system setup for calibration of iodine cell

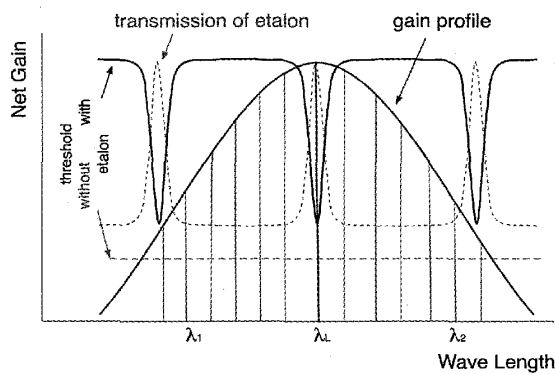


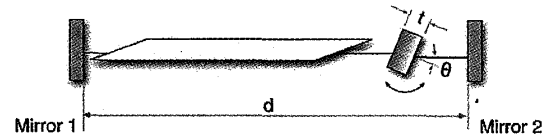
Fig. 4 Gain profile, resonator modes and transmission peaks of the intracavity etalon (dash curve). Also shown are the threshold curves with and without etalon

子が必要である。受光素子として CCD を用いた場合、Iodine Cell 前後の散乱光強度の比をピクセル毎に求め、シート面内における速度分布が得られる。なお、速度 3 成分を計測するには、レーザの入射方向を変えるか、観測者の位置を変える必要がある。なお、Ar+レーザなど連続発光のレーザを用いた場合、得られる速度は時間平均値であり、Nd:YAG レーザなどパルス発光のレーザを用いた場合には非定常 3 次元流れ場の計測が可能となる。

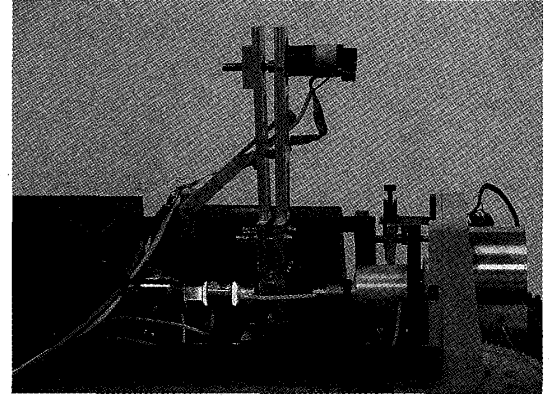
3. システム構成

3.1 レーザ光源

Fig. 3 に Iodine Cell 検定用 DGV システムを示す。光源として Ar+レーザ (Spectra Physics Model 2020, マルチライン最大光出力 5.0(W)) を用いた。後部ミラーとレーザキャビティとの間には三角プリズムを設けており、波長 514.5(nm) の単色光(グリーンライン)のみを得られるようにしてある。この場合、光出力は最大 2.5(W) であった。また、Fig. 4 に示すように、



(a) Single-mode operation by inserting a tilted etalon



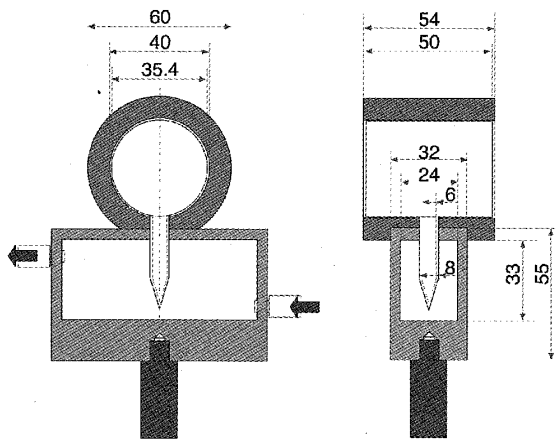
(b) Photo of the etalon tilting device designed at von Karman Institute

Fig. 5 Etalon system inside of the laser resonator

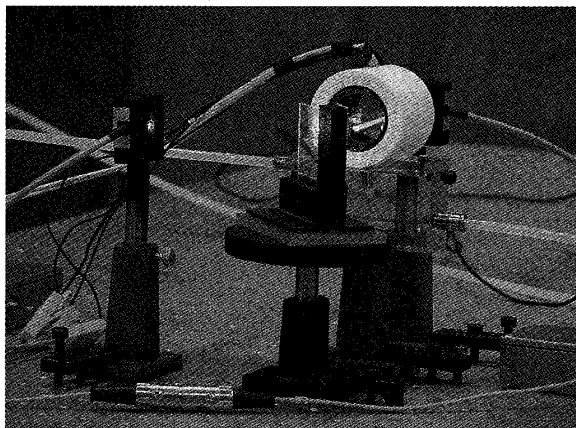
グリーンライン中には約 23 のモードがあり、これらのモードのピーク間隔 (FSR : *Free Spectral Range*) は以下の式で求められる。

$$FSR = \frac{c}{2L} \quad (3)$$

本研究で用いたレーザのキャビティ長は 1(m) であるので、 FSR は 150(MHz) となる。これら複数のモードの中から 1 つのモードだけを取り出すためにファブリペローエタロン (以下エタロン) を用いた。エタロンは、Fig. 5 に示すように、レーザ共振器中に収められた 2 面の半透過ミラーを持った小さな光共振器であり、多重反射されたレーザビームがエタロン出力部で位相整合された場合にエタロンの透過率が最大となり、狭線幅が達成される。また、レーザ光軸に対するエタロンの角度を変化させることでエタロン内部の光路長を変化させ、スペクトル下方へ中心波長を変化させることができる。エタロンは (1) エタロン自身の温度を加熱コントロールして光路長を変化させるタイプ、(2) スプリングにより圧力を加えて屈折率を変化させるタイプがあるが、本研究では後者 (*Spectra Physics Model 589 Air Spaced Etalon*) を使用し、エタロンにアームを取り付け、先端に DC モータおよびロー



(a) Geometry of iodine cell



(b) Iodine Cell under the condition of bottom absorption line

Fig.6 Iodine cell manufactured at von Karman Institute

タリーエンコーダを組み合わせて、エタロンの光軸を変えた場合の微小な角度変化量をコンピュータによるモニターできるように工夫した。本システムの場合、角度の最小分解能は $0.14 \times 10^{-3}(\text{deg})$ である。

エタロンの FSR は以下で表され、

$$FSR = \frac{c}{2t \cos \theta} \quad (4)$$

エタロンの長さ t は15(mm)であるので、 $\theta = 0(\text{deg})$ の場合、エタロンの FSR は10(GHz)となる。

3.2 Iodine Cell

Iodine Cell を Fig. 6 に示す。内径40(mm)、長さ50(mm)の円筒形のガラス容器は電熱線を巻き、定電圧電源により電流供給量をコントロールすることにより温度管理ができるようにした。(本研究では100(℃)) ガラス容器外周にはテフロンを加工した断熱部を設

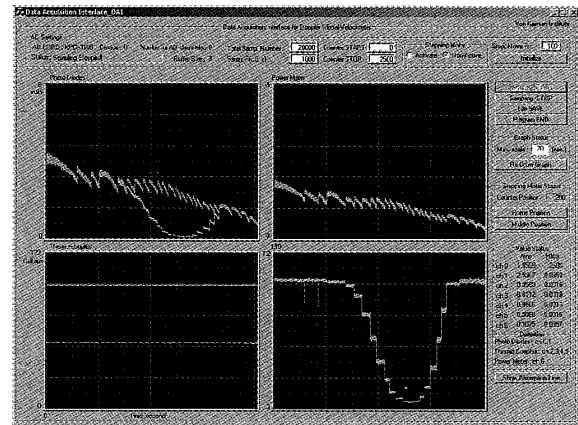


Fig.7 Data acquisition interface

け、周囲温度の影響を受けない構造になっている。また、ガラス容器下部にはコールドフィンガーと呼ぶ空間を設け、製作時に内部を吸引しヨウ素粒子を混入しておく。コールドフィンガーはアクリル樹脂で製作されたオイルバスに浸され、オイルの温度をコントロールすることにより、ヨウ素の昇華特性を変化させることができる。コールドフィンガーの温度は、ヨウ素の吸収特性曲線に強く影響し、厳密な温度管理が必要である。なお、温度の検出には熱伝対を用い、円筒部に2箇所、コールドフィンガー部に1箇所設けた。

3.3 散乱光受光部

速度1方向成分を点計測し、計測精度およびシステムの安定性の確認する為に、受光部にはフォトダイオード(浜松フォトニクスS2386, 有効受光面サイズ $3.6 \times 3.6(\text{mm})$)を用いた。受光レンズにより集光された散乱光は50%透過ミラーを通し、一方は参照用フォトダイオード(I_0)へ、もう一方はIodine Cellを通して計測用フォトダイオード(I)へ導かれる。オペアンプにより増幅されたこれらの出力の比(I/I_0)を計測し、検定時に取得したヨウ素の吸収特性曲線を伝達関数として速度へ換算する。なお、散乱粒子としてはプロピレン・グリコール溶液を霧化したものを使用し、平均粒径は1(μm)以下である。

3.4 データ取得部

データの取得は16-bit ADボード(Keithley KPCI-3107)を通して、コンピュータにより取得した。取得するアナログデータはフォトダイオード出力(2 ch.), Iodine Cell 温度および実験室温度計測用熱伝対(4 ch.), ロータリーエンコーダ出力(1 ch.)およ

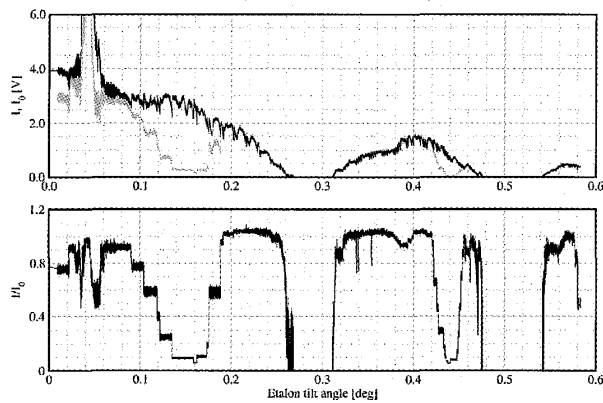


Fig.8 Photo-diode outputs and intensity ratio distribution versus etalon angle variation

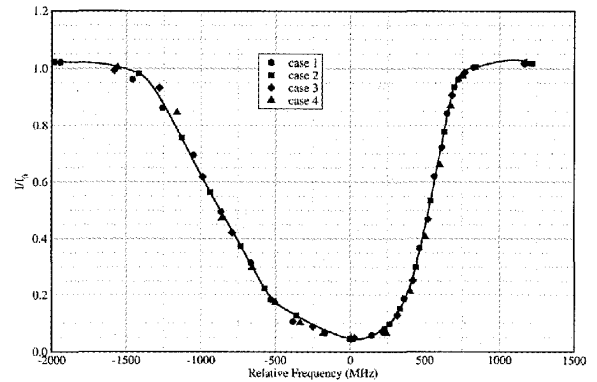


Fig.10 Measured intensity ratios for different cases and interpolating line ($T_{cf} = 50^\circ\text{C}$)

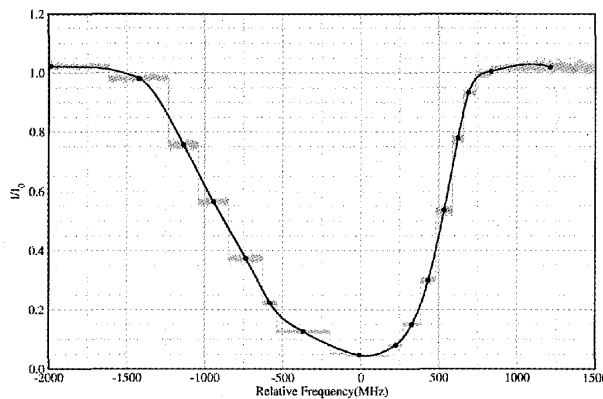


Fig.9 Measured intensity ratio showing mode-hops ($T_{cf} = 50^\circ\text{C}$)

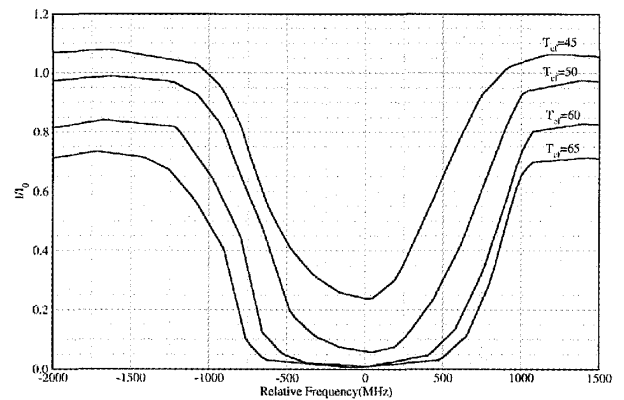


Fig.11 Measured intensity ratio for different cold finger temperature values

びレーザパワーメータ出力(1 ch.)の計 8 ch.分である。計測にはFig. 7に示すようインターフェースプログラムを作成し、逐次各パラメータをモニタできるようにした。

4. 伝達関数の検定

4.1 モードスキャンシステム

Fig. 8にエタロンの角度を変化させた場合のフォトダイオード出力(I, I_0)および出力比(I/I_0)を示す。レーザが最大出力を示すピークからエタロンを光軸方向から僅かに傾けていくと、スペクトルの下方へ透過周波数がシフトし、エタロンの透過線幅の範囲でレーザの各モードをスキャンすることができる。参照用フォトダイオード出力 (I_0) は、エタロンが抽出したレーザモノモード出力であり、グリーンラインの線幅が3.5(GHz)程度であるのに対して、エタロンのFSRは約10(GHz)であるので、角度によってはレーザの出力が得られない。各ピークから振動数の上方側では

Iodine Cellを通した散乱光のみが著しく減少し、レイリー散乱によるヨウ素の吸収効果を示している。

4.2 温度依存性

Fig. 9は吸収特性を示す部分を拡大したもので、横軸は相対周波数に換算している。レーザのモードが変化する度にフォトダイオードの出力比(I/I_0)は階段状に変化し、右下がり部分および右上がり部分でそれぞれ7～8のモードが確認できる。この各モードの中心位置を抽出し、各点を補間することによって伝達関数を得る。図中の線はスプラインフィットであり、計測の際に用いる右下がりおよび右上がり部分の中間位置近傍は直線的な変化を示している。Fig. 10は4回に亘ってモードスキャンを行った結果であり、Iodine Cell等の温度条件のわずかな違いからモードホップする位置が異なっているが、再現性の高い伝達関数が得られている。Fig. 11はコールドフィンガーの温度を変化させた場合の伝達関数の変化である。伝達関数はコールドフィンガーの温度に強く依存し、精度良く安定させる

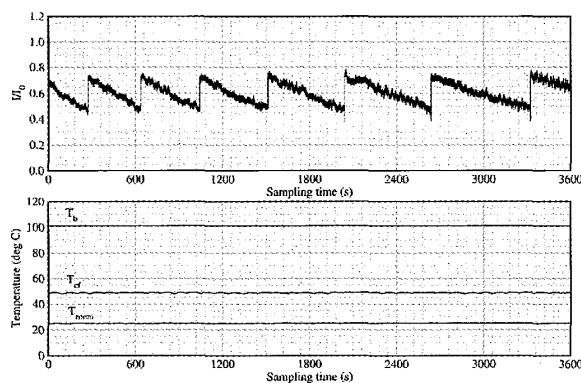


Fig.12 Time history of intensity ratio the middle point of transmission curve ($T_{cf}=50^{\circ}\text{C}$)

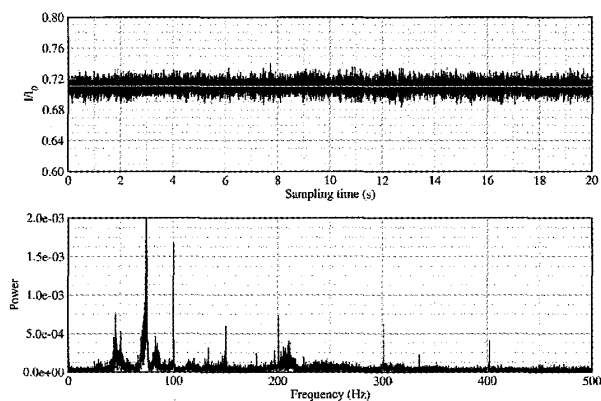


Fig.13 Time history of intensity ratio at the middle point of transmission curve and power spectrum distribution of fluctuation ($T_{cf}=50^{\circ}\text{C}$)

必要がある。本研究では $T_{cf}=50(^{\circ}\text{C})$ を選択し、1時間あたりの変化量は $\pm 0.2(^{\circ}\text{C})$ 以下である。

流れを計測する際には、エタロンの角度を伝達関数の中間位置に固定しておく必要がある。本研究では直線補間を用い、直線区間は約500(MHz)の相対周波数範囲に相当する。また、流れ場を計測する際には、伝達関数の右下がり部分と右上り部分では異なる傾きを示すので、計測する流速範囲および散乱光を検出するセンサ出力の解像度との組み合わせによって、どちらかを選択する必要がある。すなわち、計測する速度が広範囲に亘って変化する場合は、右下がり部分が適当であるし、速度範囲が小さければ右上り部分を用いる方が、縦軸の変化量が大きくなり計測誤差が少なくなる。

4.3 モノモードの安定性

Fig.12はエタロンの角度を伝達関数の中間位置に固

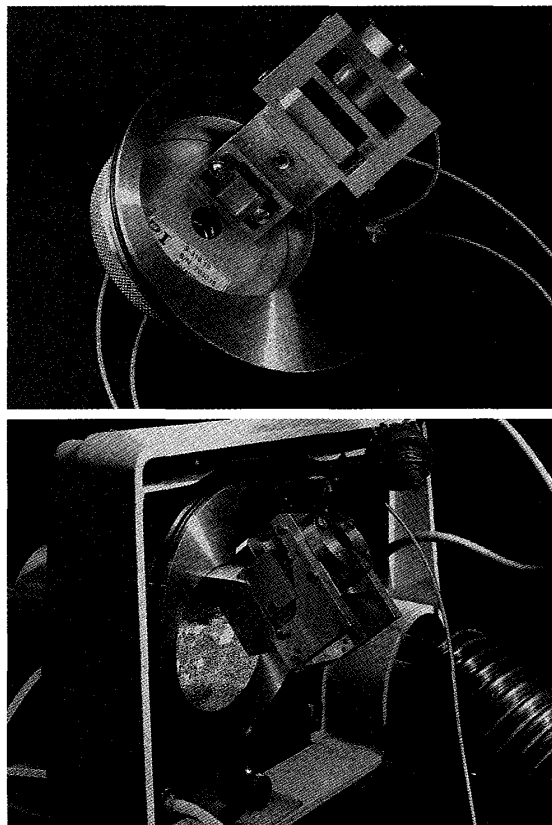


Fig.14 Support and installation of piezo translator for the rear mirror of the laser designed at von Karman Institute

定した場合の、1時間に亘る時間履歴である。サンプリングレートは5 (Hz)、合計20000点をサンプリングした。上図はフォトダイオードの出力比(I/I_0)、下図は同時に計測した Iodine Cell の本体部分温度 T_b 、コールドフィンガー部温度 T_{cf} および実験室内温度 T_{amb} である。温度に関しては標準偏差が $\pm 0.2(^{\circ}\text{C})$ 以内に収まっているのに対して、レーザのモードは急激な変動を繰り返す、また周期も一定であるとは限らない。最大値と最小値の差は、相対周波数に換算すると約150(MHz)であり、レーザの FSR と一致しモードホップを示していると考えられる。このモードホップは計測の際には無視できず、不安定な理由として、レーザ本体の冷却水の温度および流量の変化、機械的な振動によるレーザキャビティ長の変化、電源の不安定性等が考えられる。この多くのパラメータ全てをコントロールすることは難しく、一般的に DGV システムが複雑と言われる所以である。

対策としては、(1)計測時間を短時間に限定する、もしくは(2)レーザキャビティ長をアクティブにコントロールすることが考えられる。本報告では前者を選択し、Fig.13上図に示すように20秒間以内であれば、約0.1%のトレンドしか生じないことを確認してい

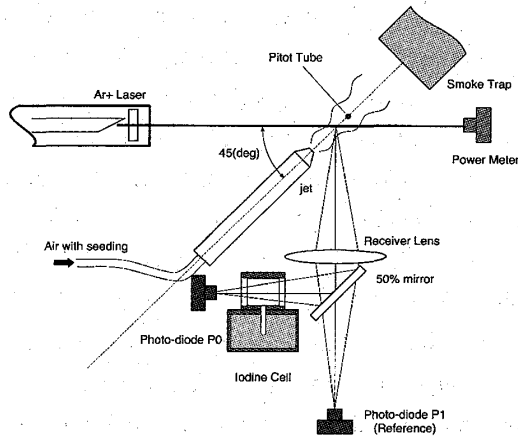


Fig.15 Experimental set-up for the measurement of the circular jet

る。また、標準偏差を相対周波数に換算すると約6.7 (MHz)となり、非定常計測は不可能ながら、定常計測ならば可能であることを示している。また、Fig.13 下図は、サンプリングレート1(kHz)にて20000点をサンプリングした上図の時間履歴データをFFT解析したものであり、約75(Hz)の卓越周波数が確認され、定常計測ではこの周波数の1周期分13(ms)以上の十分なサンプリング時間が必要である。

長時間計測時に生じるモードホップおよびトレンドは計測精度に大きく影響するので、将来的には後者(2)の対策が必要である。方法としては、Fig.14に示すような piezo素子をレーザキャビティ後方ミラーに取り付け、レーザ出力と逆位相の制御を行ってレーザキャビティ長のアクティブコントロールし、モードホップを含めた変動分の抑制が達成され则认为られる。

piezo素子の移動量 ΔL に対する振動数の変化 Δv は以下の式で求められる。

$$\Delta v = v_0 \frac{\Delta L}{L} \quad (5)$$

選択したpiezo素子(Phsik Instrumente Model.S-310.10)は最小分解能0.1(nm)、最大移動量6.0(μ m)であるので、 Δv は約0.6(MHz)~3.5(GHz)の範囲で制御できると期待される。

5. 円形噴流計測

Fig.15に円形噴流計測システムを示す。レーザ光軸から45度の位置に内径 $d=15$ (mm)の円形噴流を配置し、35(mm)下流の噴流中心位置を計測した。45(mm)下流には参照用の全圧プローブを配置し、同時計測を行った。レーザビーム直径($1/e^2$)は1.7(mm)、フォ

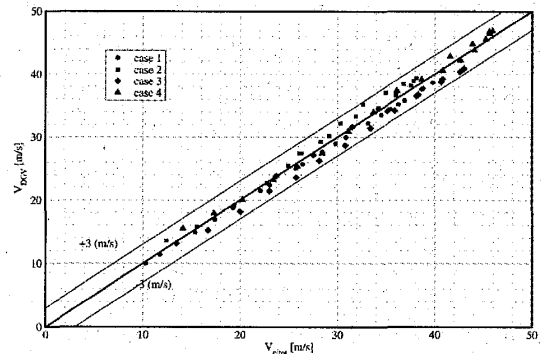


Fig.16 DGV measurements versus total pressure measurements, and accuracy range

トダイオードの有効領域サイズからおよびレシーバレンズ位置により換算した計測領域幅は6.1(mm)であり、計測領域は円形噴流のポテンシャル領域に含まれている。計測では20秒間の計測時間中、速度10(m/s)から50(m/s)まで連続して変化させ、1秒間(1000点)毎の時間平均値を求めた。使用した伝達関数は右下がり部分を使用し、計測前に伝達関数中間位置にレーザ周波数を合わせている。Fig.16は異なる4回の計測結果を示したものであり、 ± 3 (m/s)の計測精度が確認された。

6. まとめ

DGV システムの開発を行った。独自製作した Iodine Cell は有効に作用し、DC モータにより駆動するエタロンの角度変更装置は、短時間に伝達関数を取得できるとともに良好な再現性を示した。また、速度1成分の点計測システムを構築して円形噴流を計測したところ、 ± 3 (m/s)の範囲で流速を取得できた。今後は、piezo素子を用いたレーザキャビティ長のアクティブコントロールによるレーザ波長の長時間安定化を行うことで計測精度の向上を行うとともに、レーザシートおよび CCD カメラを用いた面計測、さらには速度3成分計測と改良していく必要がある。DGV システムは多くのパラメータをコントロールしなければならず、このパラメータを如何に簡素化できるかが、今後のDGVシステム開発の要点になると考えられる。

最後に、本研究を遂行するにあたり、研究の機会を与えて下さったベルギー王国 von Karman Institute の C.H.Sieverding 教授、R.A.Van den Braembussche 教授およびシステム開発に多大なるご助言を下された D.Fletcher 教授に感謝致します。

参 考 文 献

- (1) H.Komine, "System for measuring velocity field of fluid flow utilizing a laser-doppler spectral image converter", U.S. Patent No.4919536 (1990)
- (2) J.F.Meyers and H.Komine "Doppler global velocimetry: a new way to look at velocity", In 4th International Conference on Laser Anemometry, 5-9 (1991)
- (3) R.L.McKenzie "Measurement capabilities of planar doppler velocimetry using pulsed lasers" In 33rd Aerospace Science Meeting and Exhibit., AIAA-95-0297, 9-12 (1995)
- (4) I.Roehle and C.E.Willert "Extension of doppler global velocimetry to periodic flows" Measurement Science and Technology, 12(4);420-431 (2001)
- (5) I.Roele, C.E.Willert and R.Schodl "Recent applications of three-dimensional doppler global velocimetry in turbo-machinery" in 9th International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Dynamics, 13-16 (1998)
- (6) G.S.Elliott, M.Samimy and S.A.Arnette "Details of a molecular filter-based velocimetry technique" In 32nd Aerospace Science Meeting & Exhibit., AIAA-94-0490, 10-13 (1994)
- (7) D.S.Nobes, H.D.Ford and R.P.Tatam "Three component planar doppler velocimetry using image fibre bundles" In 11th International Symposium on Application of Laser Techniques to fluid Mechanics, 8-11 (2002)
- (8) D.Sakaguchi and C.Bagnera "Development of doppler global velocimetry" von Karman Institute Technical note 201 (2003)