3 アルミ粉可視化法とレーザ散乱光同時計測による渦構造解析法

名古屋工業大学

中林功一・土田陽一

Method to analyse the vortex structure using simultaneous spectral and flow-visualization measurements

Koichi NAKABAYASHI* and Yoichi TSUCHIDA*

In the simultaneous spectral and flow-visualization measurements, the flow pattern is visible using a suspension of small aluminium flakes that align with the flow and the intensity of laser light scattered by the aluminium flakes is simultaneously measured. The vortex structure is analysed and the fundamental frequency of the velocity fluctuation is identified by comparing the results of the visual observation and the spectral analysis of the scattered-light intensity.

The present method using simultaneous spectral and flow-visualization measurements is applied to analyse the spiral Taylor-Görtler vortex, the travelling azimuthal waves, the shear waves and the modulated travelling azimuthal waves appearing in the laminar-turbulent transition of the Taylor-Görtler vortex flow in the clearance between two concentric spheres with only the inner sphere rotating.

1. はじめに

速度変動を熱線風速計などで測定し、その結果から渦構造を理解しようと試みているのが一般的である。速度変動の基本周波数をその周波数分析⁽¹⁾から決定するのは、単一周期運動のような単純な場合以外は不可能である。というのは、準周期運動のような複数の基本周波数を持つ場合には、それらの非線形相互干渉によって生じる、多数の整数線形結合した卓越周波数の中から、基本周波数を識別することが困難だからである⁽¹⁾⁽²⁾。したがって速度変動の基本周波数を決定するためには、速度変動の測定と同時に渦運動を可視化しそこに現れている渦構造を理解することが不可欠である。

しかし速度変動の測定を流れの可視化と同時に行うことは、一般に不可能である。そこでこれに代わるものとして、レーザ散乱光の出力変動の測定を流れの可視化と同時にを行い、速度変動の周波数分析結果とレーザ散乱光より得られる変動のそれとが一對一に対応することを確認し、速度変動の基本周波数を決定するとともに、渦構造を解析する方法を考案した。

このような渦構造解析法は、アルミ粉による流れの可視化法の応用例として、2, 3の文献⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾で採用されているが、詳細にわたるまとまった報告が見当たらない。本論文は、この解析法の原理および適用例を詳細に述べたものである。

2. 渦構造解析法の原理

アルミ粉可視化法とレーザ散乱光同時計測による渦構造解析法の原理は、可視化による渦の観察結果とレーザ散乱光の周波数分析結果を比較検討し、これより速度変動の基本周波

* Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466, Japan

数の決定を含めて渦構造を解析することである。

Fig. 1 は，内球回転同心2球間すきま内流れに生じる渦構造を解析するために用いた実験装置⁽²⁾を示す。供試流体は，水およびグリセリン水溶液である。以下には，本装置で採用したレーザ散乱光法および渦形状の測定法について述べる。

2. 1 レーザ散乱光法の特性

レーザ散乱光は，Fig. 1 に示すように装置前面中央の子午線断面（天頂角座標 θ ）に垂直に照射したレーザ（ビーム径 $d_L = 0.9 \text{ mm}$ ）の，流れの可視化のために混入したアルミ粉による散乱光を，その真横に置いたフォトダイオード（受光部）で受光することにより行った。

Fig. 2 は，受光部の構造および特性を示す。平行光線に対しては，感度は2個のピンホール通過光にほぼ比例する。また光軸の傾きに対してはかなりシャープに感じ， $\pm 0.5^\circ$ 以上では $1/2$ 以下の感度となり， $\pm 5^\circ$ 以上ではほとんど感度はない。

Fig. 3 は，後述（Fig. 7）の波動環状およびスパイラル・テイラー・ゲルトラ（T.G.）渦流の場合に，レーザと受光部の θ 位置（Fig. 1）を変えて計測した散乱光の変動出力 R^* の実効値を，渦構造（ θ_r はスパイラル T.G. 渦の到達天頂角⁽²⁾）とともに示す。散乱光の実効値と渦構造（特に渦境界）の間に，対応関係が認められる。

Fig. 4 は，レーザ散乱光の流体運動への追従性を，自己相関係数 R^* （ τ はタイムラグ；本論文では時間のスケールの単位は内球回転周期である）で表したものである。 $R^* = 56.3$ のような高レイノルズ数比（臨界レイノルズ数に対する比）における乱流環状 T.G. 渦流⁽²⁾ に対してさえ，熱線風速計による速度変動の場合と同程度の追従性を示している。

2. 2 渦形状の測定法

アルミ粉可視化法においては，渦形状を測定するため球表面観察法，子午線断面観察法および球表面全周観察法の3種の観察法を併用した。球表面観察法は，Fig. 1 の装置の側面や上方から，球表面に見られるアルミ粉の明暗模様を観察および撮影する方法で，これにより渦の表面形状が知られる^{(2), (6)~(9)}（後述の Fig. 7~9）。子午線断面観察法は，スリット光によって光切断された渦断面を観察および撮影する方法で，これにより渦境界の天頂角分布が求められる^{(3), (9)~(10)}（Fig. 6）。

一方球表面全周観察法は，Fig. 5 に示すように外球（外形が直方体）の周囲に4枚の鏡を対置させ，鏡に写した球表面全周を装置上方より観察および撮影する方法である⁽³⁾。これによりスパイラル T.G. 渦やせん断波動のスパイラルパターンあるいは進行波動や変調波動の波動パターンなどの球表面全周にわたる渦形状が知られる^{(2)~(3)}（Fig. 9）。

3. 渦構造の解析例

上述の渦構造解析法により，同心2球間すきま内流れの渦構造を解析した。以下にその解析例を示す。

3. 1 スパイラル T.G. 渦，進行波動とせん断波動

Fig. 6⁽²⁾ は，すきま比（内球半径に対するすきま幅の比） $\beta = 0.14$ の場合の渦構造の R^* 変化を，前述の子午線断面観察法より求めた渦境界の天頂角分布で示したものである。図中

のIB, IT, ... は渦構造によって分類された流れモードを, $R_{\text{c}}^*(=1)$ は臨界レイノルズ数比を, また $R_{\text{a}}^*, R_{\text{te}}^*, \dots$ は遷移レイノルズ数比を示す⁽²⁾。

最初に, Fig. 6 の流れモード IVWTS_N (波動環状およびスパイラルT.G.渦流) に対して行, た渦構造解析を述べよう。Fig. 7(a) は, 前述の球表面観察法により得た可視化写真である。赤道 ($\theta = 90^\circ$) 付近には, セル数 $N=2$ の環状T.G.渦および方位角方向に移動する, セル対の数 $Sp=1$ のスパイラルT.G.渦が, そしてその両極側には二次流れが見られる。また環状T.G.渦には方位角方向に移動する進行波動が生じている。ここで N, Sp, m の値は前述の3種の観察法を併用して求めた。また同様にして求めた, 上述のスパイラルT.G.渦および進行波動の, 実験室系の観察点 ($\theta = 80^\circ$, 2球間すきま中央 (無次元すきま座標 $\eta = 0.5$)) を通過する周波数の値が, Fig. 7(b) の散乱光パワースペクトル $P_L(f)$ (f はかく乱の周波数; 本論文では周波数の単位は内球回転周波数である) におけるそれぞれ f_{S3} および f_{W1} の卓越周波数の値と一致することから, $Sp=1$ のスパイラルT.G.渦および $m=6$ の進行波動の方位角方向への移動周波数を表す基本周波数は, それぞれ f_{S3} および f_{W1} であると決定できる。

Fig. 7(c) は, 熱線風速計による速度測定から求めた速度パワースペクトル $P(f)$ であるが, この卓越周波数の値は Fig. 7(b) の散乱光パワースペクトルのそれと一致しており, 速度パワースペクトルの卓越周波数の物理的意味付けは, 散乱光パワースペクトルのそれに基づいて行われる。

Fig. 8⁽²⁾ は, Fig. 6 の IVWTS_h (せん断波動を持つ乱流波動環状T.G.渦流) の可視化写真とレーザ散乱光のパワースペクトル結果を示す。熱線風速計による速度変動のパワースペクトルも Fig. 8(b) とほぼ同じものが得られる。この場合には $m=1$ の進行波動および二次流れ中に生じる波数 $SH=14$ のせん断波動 (Fig. 8(a)) が生じる。このタイプのかく乱による基本周波数は, それぞれ f_{W3} および f_{H1} (Fig. 8(b)) であると決定できる。

3. 2 変調波動の解析

Fig. 9^(a) および (b) は, $\beta = 0.138$ の場合の4セル ($N=4$) の環状T.G.渦に変調波動が生じたとき, 球表面全周観察法 (Fig. 5) から得た, 4枚一組の球表面全周の連続可視化写真およびレーザ散乱光法から得た散乱光パワースペクトルを示す。図9(a)の時間間隔は, 実験室系の観察点を1個の波が通過する時間 (波の通過周期) で, この値が Fig. 9(b) の卓越周波数 f_1 の逆数と一致することから, f_1 は波の方位角方向への移動周波数を表す基本周波数であると決定できる。また Fig. 9(a) において, $t=0$ では $\varphi=0$ にある波が平坦波 (ーを付す), $\varphi=\pi$ にある波がS字波 (へを付す) となるが, この波動パターンが再現する時間 (変調周期) が, Fig. 9(b) の卓越周波数 f_2 の逆数と一致することから, f_2 は変調周波数を表す基本周波数と決定できる。

Fig. 10⁽³⁾ は, 実験室系において変調周期 $1/f_2 (=7/f_1)$ の時間間隔で撮影した, Fig. 9(a) のような球表面全周の連続可視化写真を, 波とともに移動する回転系に変換することにより得た模写図である。これより $t=0$ の波動パターンが $t=42/f_1$ で再現することが知られるので, 回転系における変調周波数 f_2 は $f_1/42$ と得られる。また平坦波がT, S,

・ ・ ・ と移ることから，変調パターンを表すパラメータ⁽⁵⁾ α は -1 と得られる。

4. おわりに

本解析法は，アルミ粉可視化法，すなわち アルミ粉による可視光線の散乱光を目視観察する，と同時に レーザ光の散乱光を計測し，そこから得られるデータを基礎にして変動速度の基本周波数や渦構造を明らかにするものであるが，同じ性質の情報を目と計測機器の両方から総合的に判定しているので，確実な方法と考えられる。変動速度の基本周波数の決定を含む渦構造の解析方法は，本解析法以外にも考えられているが，本解析法は比較的容易に実行できる方法である。

文献

- (1) 中林：流れの計測，第9号（昭63），掲載予定
- (2) 中林・土田・鬼頭・一宮：機論，53-487，B(8862)，782.
- (3) 中林・土田：機論，52-480，B(8861)，2787.
- (4) 中林・土田：機論，53-485，B(8862)，60.
- (5) Gorman, N. M. & Swinney, H. L.: J. Fluid Mech. 117 (1982), 123.
- (6) Sawatzki, O. & Zierep, J.: Acta Mech. 9(1970), 13.
- (7) Yavorskaya, I. M., Belyaev, Yu. N., Monakhov, A. A., Astaf'eva, N. M., Scherbakhov, S. A. & Vvedenskaya, N. D.: Rep. No. 595. Space Research Institute of the Academy of Science, USSR, (1980).
- (8) Bühler, K. & Zierep, J.: Laminar-Turbulent Transition (ed. V. V. Kozlov), Springer, (1984), 677.
- (9) 中林・大森：機論，49-443，B(8858)，1329.
- (10) 中林：機論，50-499(8859)，11.

Fig.1 Experimental apparatus

Fig.2 Structure and characteristics of the photodetector (E is the output of the photodiode)

- (a) Laser injects into the pinhole of the photodetector in parallel with and distant X_L from its axis
- (b) Laser injects into the pinhole of the photodetector, inclining with the angle α_L to its axis

Fig.3 Relationship between the effective value of the scattered laser-light intensity and the vortex structure

Fig.4 Follow of the scattered-laser light to the fluid motion

Fig.5 Simultaneous observation of the whole flow pattern around the spherical annulus

Fig.6 Meridian distribution of the vortex boundaries

Fig.7 Wavy toroidal and spiral T.G. vortex flow

(b) Scattered-light intensity power spectrum ($\theta=80^\circ$, $\eta=0.5$)

(c) Velocity power spectrum ($\theta=80^\circ$, $\eta=0.5$) Wavy toroidal and spiral T.G. vortex flow IIIWTSN ($R^*=2.15$, $N=2$, $S_p=1$, $m=6$)

Rotation
(a) Photograph

(b) Scattered-light intensity power spectrum ($\Theta=80^\circ$, $\eta=0.5$)

Fig. 8 Turbulent wavy toroidal T.G. vortex flow with the shear waves ($R^*=12.7$, $N=2$, $S_H=1$, $m=1$)

(a) Photographs of the evolution in time of the modulation pattern in the laboratory frame (vortex boundaries are labelled $a_2, a_1, \dots$; successive waves are labelled 1, 2, $\dots$; φ is an azimuthal angle)

Fig. 9 Modulated wavy toroidal T.G. vortex flow ($R^*=2.2$, $N=4$, $m=1$, $k=-1$)

Fig. 10 Schematic representation of the evolution in time of the modulation pattern in the rotating frame with waves (Modulated wavy toroidal T.G. vortex flow; $R^*=2.2$, $N=4$, $m=6$, $k=-1$, φ' is an azimuthal angle)

(b) Scattered-light intensity power spectrum ($\Theta=90^\circ$, $\eta=0$)