S053061

実験と数値解析による翼間のはく離・再付着流れに関する研究古田 浩貴^{*1}, 寺島 修^{*2}, 酒井 康彦^{*3}, 長田 孝二^{*2}, 石黒 俊輔^{*4}, 酒井 雅晴^{*5}**Experimental and Numerical Study on the Separated-Reattaching Flow between the Blades**Hiroki FURUTA^{*1}, Osamu TERASHIMA, Yasuhiko SAKAI, Koji NAGATA,
Shunsuke ISHIGURO^{*2} and Masaharu SAKAI^{*1} Department of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan
^{*2} DENSO CORPORATION, Japan

The separated-reattaching flow between the two-dimensional blades is investigated experimentally and numerically. In the experiment, a tandem-type probe which consists of two I-type hot-wire probes and a small elliptical cylinder is used to measure the velocity field because a separated flow involves a reverse flow which can not be measured by means of a general hot-wire probes. The experimental results show that the RMS value of the velocity fluctuation in the region of the separated shear layer approaching to the reattachment point is high and this is considered to be caused by the spatio-temporal fluctuation of the reattachment point. Further, numerical results show that the dissipation rate of the turbulent energy becomes high in the region where the Q-value and the RMS value of the velocity fluctuation are also high. These results indicate that the dissipation of the turbulent energy is caused by the separated vortex at the leading edge and the fluctuation of the reattachment point.

Key Words : Separated-Reattaching Flow, Tandem-Type Probe, LES, Dissipation Rate

1. 結 言

非規定流量におけるターボ機械の羽根車, 動的失速時の翼, ディフューザー, 流路の急拡大部・縮小部などで観察されるはく離流れは圧力損失や振動, 騒音の発生をもたらす. このため, はく離の発生を極力抑えることが望ましく⁽¹⁾, はく離の低減や制御に関する研究が現在も盛んに行われている.

本研究では, 二次元翼周りで発生するはく離・再付着流れを実験と数値解析の両面から調べ, これらの流れにより生じるエネルギー損失に着目して考察した. 実験では, Shouji ら⁽²⁾と同様にタンデム型熱線プローブを用いて流速の計測を行い, 二次元翼周りにおけるはく離・再付着流れの発生領域やはく離泡の大きさ, 変動流速の大きさについて考察した. 数値解析では, LESにより実験と同一の流れ場の解析を行い, 乱流エネルギー散逸率(以下, 散逸率と表記)などの物理量を評価した. また, 散逸率の大きい場所と相関の高い物理量を調べ, はく離・再付着流れで生じるエネルギー損失と流れ場の関係を考察した.

2. 実験および数値解析の方法**2・1 二次元翼モデル**

図1に実験ならびに数値解析の対象とした二次元翼ならびに座標系を示す. 実験は二次元翼と等しい曲率を有

^{*1} 学生員, 名古屋大学 大学院工学研究科 機械理工学専攻 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

^{*2} 正員, 名古屋大学 大学院工学研究科 機械理工学専攻

^{*3} 正員, フェロー, 名古屋大学 大学院工学研究科 機械理工学専攻

^{*4} 株式会社デンソー

^{*5} 正員, 株式会社デンソー

E-mail: furuta.hiroki@g.mbox.nagoya-u.ac.jp

Fig.1 Schematic view of experimental apparatus.

する流路内に二次元翼を設置し、この流路を風洞のノズル出口に接続して行った。ノズル出口幅 d_1 は 100 mm である。座標系はノズル出口の流れの方向を x 、それと垂直な方向を y とし、それぞれの方向の平均流速(変動流速)を $U(u)$ 、 $V(v)$ でそれぞれ表記した。また、ノズル出口の平均流速 U_0 は 17.1 m/s とした。本研究では翼の前縁で流れがはく離し、再び翼面に付着するまでの過程を調べるため、計測位置は二次元翼の負圧面側とし、下流方向に 15 箇所 (28 mm 間隔、以降、下流方向位置と表記)、垂直方向へ 10 箇所 (以降、垂直方向位置と表記) とした。二次元翼の負圧面と最も近い計測点と負圧面との距離は 5 mm 程度である。

2・2 実験方法

二次元翼周りの流速の計測はタンデム型熱線プローブにより行った。タンデム型熱線プローブの詳細な寸法や校正試験の結果は文献⁽²⁾を参照されたい。タンデム型熱線プローブの 2 本の熱線は定温度型の熱線流速計に接続し、熱線流速計の出力電圧は A/D 変換ボードを介してコンピュータに取り込み解析した。計測のサンプリング周波数は 10 kHz、サンプリング点数は 131,072 点 (約 13 秒) とした。

2・3 数値解析法

本研究では二次元翼間のはく離流れについてより詳細に考察するため、実験対象と同一の流れ場を対象に数値解析を行った。数値解析は汎用流体解析ソルバーの STAR-CCM+ を用いて LES (Large Eddy Simulation) スマゴリンスキーモデルにより行った。数値解析の条件は表 1 に示す通りである。

数値解析の領域とメッシュを図 2 に示す。流入条件は、図 1 の青線で示した位置における流速、静圧、乱流強度、乱流長さスケールが実測値と一致するように定めた。なお、メッシュサイズおよびタイムステップは、解析結果への依存性を事前に検討し、影響が無いことを確認した上で決定した。

本研究では、はく離・再付着流れにおけるエネルギー損失について考察するため、数値解析により得られる結果のうち、以下の式 (1) で定義した散逸率を求めて考察した。また、速度勾配テンソルの第二不変量である Q 値を式 (2) を用いて算出し、はく離・再付着流れ中の渦構造についても調べた。

Table 1 Conditions for simulation

LES Model	Smagorinsky model
Element number	about 260,000
Nodal Number	about 1,540,000
Inlet Mean Velocity	17.1 m/s
Inlet turbulent intensity	1.0 %
Inlet turbulent length scale	4.0 mm
Outlet static pressure	0 Pa
Wal at blades space	no slip
Simulation time	1.0 sec
Time step	5.0 * 10 sec

Fig.2 Schematic view of the analysis domain and mesh.

$$\varepsilon = 2\nu S_{ij} S_{ji} \quad (1)$$

$$Q = \frac{1}{2} (\Omega_{ij} \Omega_{ij} - S_{ij} S_{ij}) \quad (2)$$

ここで、 S_{ij} は歪み速度テンソル、 ν は動粘度、 Ω_{ij} は渦度テンソルである。

3. 結果と考察

3・1 実験・数値結果比較

図 3、図 4 にタンデム型熱線プローブで計測した各計測点における平均流速、ならびに数値解析により得られた平均流速のコンター図を示す。図中の濃淡は平均流速の大きさ、矢印は流れの方向（矢印の長さが流速の大きさを表していないことに留意されたい）、数字は下流方向位置を表している。また、図 5、図 6 にタンデム型熱線プローブで計測した各計測点における変動流速の二乗平均値（RMS 値）、ならびに数値解析により得られた変動流速の RMS 値のコンター図を示す。図中の濃淡は変動流速の RMS 値の大きさを表している。ここで、変動流速の RMS 値とは変動流速 u の RMS 値 u_{RMS} と v の RMS 値 v_{RMS} を用いて算出した $(u_{\text{RMS}}^2 + v_{\text{RMS}}^2)^{1/2}$ を指す。

図 3 と図 4 の比較から、実験と数値計算から得られた平均流速の分布、はく離泡の大きさ、再付着点の位置が一致していることが分かる。また、ノズル出口からの流れが二次元翼の前縁ではく離し、下流方向位置 4-10 で逆流が生じ、再付着点が下流方向位置 11 付近となっていることが分かる。一方、図 5 と図 6 の比較から、はく離せん断層に沿って下流位置ほど変動流速の RMS 値が大きくなる点や、下流方向位置 7-10 付近で変動流速の RMS 値が最大となる点に一致が見られる。なお、下流方向位置 7-10 付近で変動流速の RMS 値が最大となっているのは、再付着点の時間的・空間的な変動によるものと考えられる。すなわち、流速の時間変化から、時間平均的には再付着点は下流方向位置 11 付近と定義できるが、再付着点の変動が大きいため、再付着点に向かう流れが存在する下流方向位置 7-10 の壁面から離れた位置で変動流速が大きくなっているものと考えられる。

図 7 と図 8 に再付着点付近と考えられる下流方向位置 11 における平均流速と変動流速の RMS 値の垂直方向分布を示す。図 7 の縦軸は平均流速、図 8 の縦軸は変動流速の RMS 値、それぞれの横軸は垂直方向位置を表している。また、それぞれの図中の黒線はタンデム型熱線プローブで計測した結果、赤線は数値解析結果を表している。図 7、図 8 より、解析における誤差は、ノズル出口における平均流速 17.1 m/s に対して平均流速は最大 8.8 %、変動流速の RMS 値は最大 3.5 %であり、実験結果と解析結果は概ねよく一致していると言える。

Fig.3 Contour map of mean velocity with vectors (Experiment).

Fig.4 Contour map of mean velocity with vectors (Simulation).

Fig.5 Contour map of RMS value of velocity fluctuation with vectors (Experiment).

Fig.6 Contour map of RMS value of velocity fluctuation with vectors (Simulation).

Fig.7 Experimental and numerical results of mean velocity.

Fig.8 Experimental and numerical results of RMS value of velocity fluctuation.

3・2 乱流エネルギー散逸率

図 9 に数値解析により得られた散逸率のコンター図を示す。図中の濃淡は散逸率の大きさを表している。図 9 より、翼の前縁近くのはく離せん断層付近で散逸率が非常に大きく、はく離せん断層に沿って後縁近くまで散逸率の大きい領域が存在していることが分かる。

図 10 に Q 値のコンター図を示す。図中の濃淡は Q 値の大きさを表している。図より、翼前縁近傍のはく離せん断層付近で Q 値が大きくなっており、これは前縁はく離渦によるものと考えられる。また、図 9 と図 10 の比較から、前縁のはく離せん断層付近は散逸率も Q 値も大きくなっているため、前縁近傍で生じるエネルギー散逸は前縁はく離渦によるものと考えられる。一方、図 6 と図 9 を比較すると、下流側において散逸率が大きい領域は変動流速の RMS 値が大きい領域と一致していることが分かる。これより、下流側の大きな散逸は再付着点の変動により生じる大きな変動流速と関わっているものと考えられる。

Fig.9 Contour map of mean dissipation rate.

Fig.10 Contour map of Q-value (second invariant of velocity gradient tensor).

4. 結 語

本研究では、二次元翼周りで発生するはく離・再付着流れを実験と数値解析の両面から調べ、これにより生じるエネルギー損失に着目して考察した。以下に得られた知見を示す。

1. 再付着点に向かうはく離せん断層内で変動流速の RMS 値が大きくなることが確認された。これは、再付着点の時間的、空間的な変動によりもたらされているものと考えられる。
2. 散逸率は二次元翼の前縁近傍からはく離せん断層に沿って下流まで大きな値を示し、特に前縁近傍で大きな値となった。
3. 前縁近傍の散逸率が大きい領域は、Q 値の大きい場所と一致し、下流側の散逸率が大きい領域は変動流速の RMS 値が大きい領域と一致した。
4. 前縁近傍の Q 値の大きい領域は前縁はく離渦の発生、下流側の変動流速の RMS 値が大きい領域は再付着点の変動により生じていると考えられる。これより、二次元翼のはく離・再付着流れで生じるエネルギー損失は、前縁はく離渦と再付着点の変動が関わっているものと考えられる。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、元名古屋大学工学研究科の大学院生・庄司裕一氏（現：三菱電機株式会社）に協力を仰いだ。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) 木谷勝, “はく離・再付着流れの乱流構造”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 55, No. 511, pp. 559-564 (1989).
- (2) Shouji, Y., Furuta, H., Ishiguro, S., Sakai, M., Terashima, O., Sakai, Y., Nagata, K., “Experimental study on the internal separated flow between the blades”, *Proceedings of Thermal and Fluid Engineering Conference 8*, GSF28-003 (2012).