ウェーブレットを利用したはく離の予測と制御

Prediction of Flow Separation by Wavelet Transform

○正 石川 仁 (東理大工) 正 山田俊輔 (東理大工)
谷合哲弥 (東理大院)Hitoshi ISHIKAWA, Department of Engineering, Tokyo University of Science
Shunsuke YAMADA, Department of Engineering, Tokyo University of Science
Tetsuya TANIAI, Graduate School of Engineering, Tokyo University of Science

Wavelet analysis was applied to the prediction of flow separation from airfoil. Velocity fluctuations on the surface of the NACA631-012 airfoil at the attack angle of 5 degree were measured by a glue-on type hot-film probe in various chord positions. Morlet wavelet has the advantage to educe unsteady fluctuation over other signal analyses. The coefficient of the Morlet wavelet showed the change of the wavelet scale related to the precursor signal of flow separation. The result suggested that the wavelet analysis was a possible approach to predict and control of flow separation.

Key Words: Prediction, Flow separation, Airfoil, Hot-film probe, Fluctuation signal

1. はじめに

翼や管路コーナー部からのはく離は、効率低下や騒音、振動などを引き起こす原因となっている。はく離の抑制法については、ボルテックスジェネレータやジェット吹き出し、吸い込みなど、受動・能動制御の如何に関わらず様々な提案がなされているが、より効率良く、より小さなエネルギーではく離を制御するには、はく離の開始前、あるいは、はく離が始まってすぐに制御を行うのが良い。その実現のためには速度や圧力の変動波形からはく離の前兆をなんらかの形で捉える必要がある。西沢らは、翼前縁に設置したセンサーから、壁面せん断応力の変化を捉えることで、翼のはく離の制御を行っている⁽¹⁾。また、望月らは可変ディフューザの可動壁面上の圧力変動波形から、はく離の前兆信号を抽出することを試みている⁽²⁾。

はく離開始の特徴を含んだ変動波形は非定常であると予想されるので、その解析には非定常解析に有効な信号処理法が適当である。ウェーブレット変換は、周波数情報に併せ、時間軸情報も抽出可能な、非定常信号を捉えるのに有効な信号処理法である。石川らは、このウェーブレット変換を、円柱後流の速度変動波形解析に用い、後流中の渦構造に内在する非定常な低周波数変動の解析を行っている⁽³⁾。

本研究の目的は、流れの中に置かれた翼の表面に、薄型の熱膜流速プローブを翼弦方向の各位置に貼付して速度変動波形を測定し、はく離の予測と制御に連続ウェーブレット解析が有効なことを示すことにある。

2. 実験装置および方法

図1に実験装置および座標系を示す。実験には出口寸法250mm×250mmの吹き出し型風洞を使用した。供試体となるNACA631-012層流翼は翼弦長 $C=111\text{mm}$ 、翼幅 $S=230\text{mm}$ である。内部は肉厚2mmの中空構造である。流れの二次元性確保のため、直径200mm、厚さ1mmの円形の端板を取り付けてある。翼の正負圧面には静圧孔を設けてあり、迎角 α を変えられるよう回転ステージに取り付けて、風洞出口から200mm下流に設置した。実験は主流流速 U_∞ 、翼弦長 C 、動粘性係数 ν とし、 $Re(=U_\infty C/\nu) \approx 98,000$ で行った。迎角 $\alpha = 0^\circ$ の位置は翼上下面の静圧が等しくなる角度で判定し、迎角 $\alpha = 0 \sim 20^\circ$ の範囲で実験を行った。ここでは $\alpha = 5^\circ$ の結果だけについて述べる。

貼付型熱膜流速プローブ(DANTEC製55R47)は、ポリイミド製フィルムにニッケルを蒸着した単線のセンサーで、翼表面からセンサーまでの高さは $0.5\mu\text{m}$ である。翼表面の $y/S = 0.50$ 上、 $x/C = 0.1, 0.4, 0.7, 0.8$ および 0.9 の5つの位置に糊で貼り付けた。

Fig. 1 Experimental setup. NACA-631-012 airfoil and glue-on type hot-film probe.

Fig. 2 Temperature difference distribution analyzed by thermal image on the surface of airfoil⁽⁴⁾.

Fig. 3 Velocity fluctuations on the surface of airfoil ($\alpha = 5$ deg) and the morlet wavelet coefficient.

これを定温度型流速計で動作させ、得られるブリッジ出力の変動から、翼表面の速度変動波形を測定した。サンプリングは10KHzで行った。

3. 連続ウェーブレット変換

速度変動波形の解析を行う連続ウェーブレットのマザーウェーブレットには、Morlet ウェーブレットの実数部を使用した。Morlet ウェーブレットは次式で定義される。

$$\psi(x) = \exp(-x^2/2) \cos 5x \quad (1)$$

石川らによる乱流カルマン渦列の解析にも、この Morlet ウェーブレットが用いられている。

4. 実験結果および考察

まず翼表面の流れの様子を調べるため、赤外線カメラによる差分熱画像撮影を事前に行った。その結果を図 3 に示す。この画像は翼表面をあらかじめ一様に加熱した後、通風を開始し、翼面が冷やされる様子を撮影したものである。実験の詳細については引用文献(4)を参考にされたい。一般に、はく離点での熱伝達率は極小に、再付着点での熱伝達率は極大になる性質があることから⁽⁶⁾、翼表面のはく離の様子をこのような画像から判定することができる。図中の黒点は $y/S = 0.50$ の位置での温度差 ΔT であり、これから $x/C=0.1$ が層流、 $x/C=0.4$ がはく離泡の直前、 $x/C=0.7$ が再付着点前、 $x/C=0.8$ が再付着点后、および $x/C=0.9$ が乱流の状態にあることが予想される。

上記をふまえ、図 3 に各 x/C の位置で測定された熱膜流速プローブによる速度変動波形に対し、Morlet ウェーブレット解析を行った結果を示す。図の上部には生の速度変動波形を、下部にはウェーブレット係数の時間スケール情報を時間軸に対応

させて示してある。各速度変動波形は時間平均のバイアス分を差し引いてあること、また同時測定されたものでないことに注意されたい。まず変動波形を見ると、翼後縁に近づくにつれ、変動の振幅が大きくなることがわかる。また、 $x/C=0.7$ 以降では、低周波数のうねり成分が重畳するようになる。Morlet ウェーブレット解析の結果では、速度波形に含まれる変動成分の大きさに一致するスケールに、ウェーブレット係数の高い値が非定常に現れる様子が観察できる。とくに再付着点前の $x/C=0.7$ の結果でその傾向が顕著になる。また、係数の高い値が時間経過と共に大きなスケールへ連続的にシフトする様子も見られる。大規模なはく離は、再付着点後に起こると予想されるので、このウェーブレット係数の変化をはく離の前兆信号として利用すれば、効果的なはく離制御を行えると期待される。

5. おわりに

本研究では、翼表面に貼付した熱膜流速プローブによって測定した速度変動波形に対し連続ウェーブレット解析を行った。ウェーブレット係数の変化をはく離の予測に適用可能である可能性を示した。

引用文献

- (1)西沢ら、翼周りの剥離流に関するスマート制御、日本流体力学会誌「ながれ」、25(4)(2006), pp.111-118
- (2)望月ら、はく離の前兆、機論、67-661, B (2001), pp.2226-2233
- (3)石川ら、乱流カルマン渦列の低周波数変調、機論、62-598, B(1996), pp.2180-2186
- (4)谷合ら、熱画像解析による翼表面流れのはく離検出、可視化情報、Vol.29, No.2, (2009), pp.137-140
- (5)森康夫、土方邦夫、流れと熱の工学Ⅱ、共立出版、(1977)。