B 3 1 4 赤外線サーモグラフィーを用いた非定常熱伝達の可視化

中村 元[○] (防衛大学校), 五十嵐 保(防衛大学校)

Visualization of time-spatial characteristics in heat transfer using infrared thermograph

Hajime NAKAMURA and Tamotsu IGARASHI

ABSTRACT

Unsteady heat transfer to air is observable by measuring fluctuating temperatures on a heated surface having a low heat capacity. In this work, the time-spatial characteristics in the heat transfer on the wall of a turbulent boundary layer were investigated using an infrared thermograph having a frame rate of 120 per second. A titanium-foil of 2 μm thick was employed as the heated surface. The attenuation of the heat transfer coefficient in both space and time was reconstructed using a series of measured temperatures by solving the heat conduction equation.

Keywords: Convection heat transfer, Time-spatial characteristics, Infrared thermograph

1. 緒 論

対流熱伝達を測定する際、伝熱面の熱容量が十分小さければ壁面温度が変動するため、これを利用して熱伝達の非定常性を調べることができる。本報では、平板乱流境界層を例にとり、伝熱面の温度変動を赤外線サーモグラフィーで測定して熱伝達の時空間特性を調べた。また、測定した温度分布の時系列データを基に、熱伝導解析により熱伝達率の時間的・空間的減衰の復元を試みた。

2. 実験装置および方法

本実験で用いた平板模型を図1に示す。平板(幅150 mm, 厚さ8 mm)はアクリル製であり、風洞(高さ400 mm, 幅150 mm)内に平行に設置した。主流速度は $u_0 = 4 \text{ m/s}$ である。乱流境界層を生成するため、平板の先端から30 mmの位置に直径2 mmの円柱(トリッピングワイヤ)を設置した。トリッピングワイヤから測定位置($x = 10 - 50 \text{ mm}$)までの距離は840 - 880 mmである。伝熱面の熱容量を小さくするため、平板の中央部を図1のようにくり抜き、その上下面を厚さ2 μm のチタン箔で覆った。チタン箔は直流電源を用いて通電加熱し、主流との温度差を20 - 30 $^{\circ}\text{C}$ 程度にした。このとき箔表面に温度変動が現れるが、これを平板下方に設置した赤外線サーモグラフィー(TVS-8502, Avio, 120 frames/sec)で測定した。なお、本実験条件では上下の金属箔に囲まれた空気層内では自然対流が起こらないため、箔の裏面はほぼ断熱状態となる。

金属箔の半分の領域($z < 0$)には赤外線放射率の高い黒ペイントを塗布した。また、残りの領域($z > 0$)にはペイントを塗布せず、伝熱面の熱容量を最小限に抑えた。なお、金属部分の放射率は、ペイント面と金属部分

の対流熱伝達率(時間平均値)が等しいと仮定して求めた。また、風洞内壁に黒ペイントを塗布することで赤外線乱反射の影響を抑えた。

3. 実験結果

3.1 温度分布とその変動

伝熱面の温度変動の振幅は熱容量の影響で減衰し、温度の空間分布の振幅は面方向の熱伝導の影響で減衰する。伝熱面を、厚さ δ の無限に広い薄板と仮定すると、温度変動の時定数 τ および空間分解能(温度振幅が1/2になる距離) β は、熱伝導解析より、それぞれ $\tau = c\rho\delta/h$, $\beta = 2\pi\sqrt{\lambda\delta/h}$ と求められる¹⁾。本実験条件では、チタン箔の

Fig. 1 Experimental apparatus.

熱容量は $c_p = 2.35 \text{ MJ/m}^3\text{K}$, 熱伝導率は $\lambda = 16 \text{ W/mK}$, 厚さは $\delta = 2 \mu\text{m}$ であり, 測定領域 ($x = 30 \text{ mm}$) での平均熱伝達率は $\bar{h} = 31 \text{ W/m}^2\text{K}$ であるので, 時定数, 空間分解能は, それぞれ $\tau = 0.15 \text{ sec}$, $\beta = 6.4 \text{ mm}$ と見積もることができる.

図 2 に, 赤外線サーモグラフィで測定した瞬時温度分布および $x = 30 \text{ mm}$ におけるスパン (z) 方向の温度分布の時間変動を示す. 平板乱流境界層の壁近傍では, スパン方向におおよそ $100 l_\tau$ (本実験条件では $100 l_\tau = 100 \nu/u_\tau = 8.4 \text{ mm}$) の間隔で低速ストリークが形成されることが知られている²⁾ が, 本実験で測定した温度分布にも, ほぼこの程度の間隔でスパン方向の非一様性が確認できる. つまり, 本実験により, ストリーク構造の挙動を反映した熱伝達の時空間特性が観測された.

3.2 時間的・空間的減衰の復元

次に, 次式¹⁾ を用いて熱伝達率の時間的・空間的減衰を復元した.

$$h = \frac{\dot{q}_{in} - \dot{q}_{cd} - \dot{q}_{rd} - \lambda \delta \left(\frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} \right) - c_p \delta \frac{\partial T_w}{\partial t}}{T_w - T_0} \quad (1)$$

$\dot{q}_{in}$ はチタン箔に与えた熱流束, $\dot{q}_{cd}$ は箔内部の空気層への伝導熱流束, $\dot{q}_{rd}$ は箔外部および内部への放射熱流束である. また, $\lambda \delta (\partial^2 T_w / \partial x^2 + \partial^2 T_w / \partial z^2)$ は面方向の伝導熱流束であり, 測定した温度分布から 6 mm (11 ピクセル) 毎に二次関数を外挿して求めた. また $c_p \delta (\partial T_w / \partial t)$

は熱容量による時間遅れであり, 温度の時系列データから 0.04 秒 (5 フレーム) 毎に一次関数を外挿して求めた.

復元した熱伝達率の時空間特性を図 3 に示す. 低速ストリークを反映したスパン方向の非一様性がより鮮明になっており. また, パースト周期 (固定点で見た場合おおよそ $6\delta_{99}/u_0^{(3)} = 0.04 \text{ 秒}$) を反映した時間変動も現れている.

4. 結 論

極小熱容量の伝熱面 (厚さ $2 \mu\text{m}$ のチタン箔) と高速赤外線サーモグラフィ (120 フレーム/秒) を用いて, 平板乱流境界層の熱伝達特性を調べた. その結果, ストリーク構造を反映した熱伝達の時空間挙動が観測された.

参 考 文 献

- 1) Nakamura, H., Igarashi, T.: Frequency Response for the Measurement of Unsteady Heat Transfer Using Infrared Thermograph, 6th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, Matsushima, Japan (2005) 6-b-7.
- 2) Smith, C.R., Metzler, S.P.: The Characteristic of Low-Speed Streaks in the Near-Wall Region of a Turbulent Boundary Layer, J. Fluid Mech., vol. 129 (1983), pp. 27-54.
- 3) 木田重雄, 柳瀬眞一郎: 乱流力学, 朝倉書店, (1999) 313.

Fig. 2 Distribution of temperature difference ($T_w - T_0$) on the wall of a turbulent boundary layer: $u_0 = 4 \text{ m/s}$, $u_\tau = 0.185 \text{ m/s}$.

Fig. 3 Time and space-resolved heat transfer coefficient on the wall of a turbulent boundary layer: $u_0 = 4 \text{ m/s}$, $u_\tau = 0.185 \text{ m/s}$.