感温液晶による乱流境界層壁近傍の伝熱機構の追跡

東大工 笠木伸英^{*}, (院) 入谷陽一郎, 平田賢

A Study of Heat Transfer Mechanism in the Near-Wall Region of Turbulent Boundary Layer With the Aid of Temperature-Sensitive Liquid Crystal

Nobuhide Kasagi^{*}, Yoichiro Iritani^{*} and Masaru Hirata^{*}

Temperature-sensitive liquid crystals are used to visualize an instantaneous temperature field close to the wall associated with the organized motions in a flat plate turbulent boundary layer without pressure gradient. A very thin liquid crystal membrane has been attached on the wall surface, which is heated with a constant heat flux in a low-speed water channel. By virtue of the color change of liquid crystals with the simultaneous hydrogen-bubble flow visualization, the existence of high- and low-temperature streaks near the wall is revealed. The high-temperature streaks are mostly associated with the so-called low-speed streaks, and the low-temperature streaks with the high-speed streaks. The measured spanwise spacing of high-temperature streaks is $81\nu/u^*$, while the streamwise length is confirmed to be more than $1000\nu/u^*$. These observations provide new evidence regarding the turbulent heat transfer mechanism in the wall region of turbulent boundary layers.

1. 緒言

著者らはこれまで、感温性のコレステリック液晶¹⁾を種々の伝熱実験^{2)~5)}に応用し、定性的定量的実験結果を得てきた。本報では、平板に沿う乱流境界層の主に壁近傍領域の構造と伝熱機構を明らかにするために行われた流れの可視化及び壁温の非定常変化の観察の概要について報告する。乱流境界層の壁面近傍領域の現象の適切な取扱いは、流動抵抗や熱伝達率の予測において最も重要な問題点のひとつである。近年種々の乱流モデルの開発によ、て乱流境界層の計算予測が著しく発達したが、一方で流動構造に関しては所謂準秩序構造について多くの実験的検討が加えられてきている⁶⁾。特に壁面近傍では、低速流体の外層へ向う局所的放出と壁面へ向う高速流体の侵入によって構成されるバースティング現象⁷⁾が乱水の生産や輸送過程に支配的要素となっていることが明らかにされつつある。著者らは、このような準秩序構造と熱の輸送機構の関係を実験的に検討し、最終的には構造的壁面乱流モデルを開発することを目的とした研究を行っているが、ここでは主として感温液晶による壁面温度分布変動パターン⁸⁾の追跡について述べる。

2. 実験装置と方法

実験はすべて低速の回流水槽で行った。実験装置と主要な実験条件を図1、表1に示す。矩形断面のテスト部は回流水槽のノズル(絞り比9:1)出口に取付けられていて、テスト部の一方の側壁上に発達する乱流境界層を実験対象とする。テスト部入口でのトリップングにより測定位置では発達した二次元乱流境界層が

* Faculty of Engineering, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

実現している。テスト部内に設置した圧力勾配調整板により流れ方向の圧力勾配を近似的に除いている。液晶の色彩変化を観察するための加熱部は、図2に示すように15mm厚の亚克力板に、30 μ m厚のステンレス鋼箔、100 μ m厚の市販コレステリック液晶膜(うちポリエステル表面膜厚さが約50 μ m)を接着した積層系である。ステンレス鋼箔に交流直接通電を行い、等熱流束条件を実現す

る。加熱面上の三ヶ所は、水素気泡法による観察を容易にするために液晶膜の代りに黒色のポリエステル膜を接着してある。液晶の色彩は、28.6 $^{\circ}$ Cで赤色、33.1 $^{\circ}$ Cで青色であり、この間赤、橙、黄、緑、青と連続的に変化する。このような積層系の非定常応答性は、一次元の熱伝導方程式を、周期的に変動する熱伝達率を境界条件として解くことにより解析できる⁸⁾が、図3はそのような数値計算を行った結果である。これらは熱伝達率の変動の片振幅が平均値(本実験での実測値)に

対して0.2の場合であり、曲線(A)は各変動周波数に対して誘起される伝熱面表面温度変動幅を、曲線(B)(C)は液晶による観察と表面温度変動との振幅比及び位相差を示している。曲線(A)によって本報で用いた固体壁側の熱伝導特性が示されるが、当然のことながら流れ場の変動によって誘起される表面温度変動は固体壁の厚さや熱的物性値に依存している。曲線(B)(C)により液晶による観察の特性は、約0.5Hz

以上でかなり強いフィルタがかかっている様子がわかるが、温度差($T_w - T_0$)が約10 $^{\circ}$ Cとした今回の実験条件等から考察すると、乱れエネルギーを主として担っている乱れ成分については十分認識可能であることが確認できる⁹⁾。流水の可視化には水素気泡法を用いたが、陰極には直径20 μ mのタングステン線を使用し、タイムラインの間隔はパルスカウンタでモニターして0.1秒に設定した。測定位置での壁面剪断応力は Clauserの方法¹⁰⁾により決定した。

U_m m/s	δ mm	δ^* mm	θ mm	$R_0 = \frac{U_m \delta^*}{\nu}$	$R_0 = \frac{U_m \theta}{\nu}$	$H = \frac{\delta^*}{\delta}$	U^+ m/s	δ^+ mm
0.204	50	6.8	4.9	1370	990	1.4	9.35×10^3	9.4

Table 1 Basic parameters

Fig. 1 Plane view of test section

Fig. 2 Heat transfer surface with liquid crystal membrane

Fig. 3 Frequency response of wall-temperature visualization by liquid crystal

Fig. 4 Flow visualization by hydrogen-bubble method at various distance from the wall and the measured velocity profile

3. 実験結果

図4に境界層内各位置で壁面と平行に電極線を張った場合の流れの可視化写真例を速度分布とともに示す。壁面のごく近傍では低速の流体が縞状に観察され、その流れ方向の長さは粘性底層厚さに比較して著しく長いこと

Fig. 5 Visualization of wall-temperature fluctuation by liquid crystal membrane.

とがわかる(図中A,B)。電極線と壁面との距離が増すにつれて乱れの強さとスケールが増加し、局所的に強い混合が起っている(図中C,D)。さらに壁面より離れた領域では、おおよそ $100 \sim 200 \nu/u^*$ 程度のスケールの乱れがランダムに観察される(図中E)。これらの観察結果は従来の観察結果¹⁾とよく一致している。

図5は、前述の実験条件に加えて四種の主流速度の下で行った液晶による瞬時的壁温分布の可視化例である。図中黒い部分が高温、白い部分が低温の領域である。どの流速の場合にも壁面近くの縞状の乱流構造により形成されたと考えられ

る縞状の壁温分布パターンが観察される。これらの温度分布は非定常かつランダムに発生消滅をくり返しているが、16mm映画の解析により定量的データを得ることが可能である。

図6は、 $y^+ = 4$ の位置に電極線を置いて水素気泡を発生し低速縞のスパン方向の平均発生間隔 $\bar{\lambda}$ を測定し、従来の結果と比較したものである。本実験では、203の λ^+ の測定値を16mm映画よりサンプルしたが、平均値 $\bar{\lambda}^+ = 89$ 、最頻値 $\lambda_m^+ = 75$ 、標準偏差 $\sigma_{\lambda}^+ = 34$ で、分布形は対数正規分布によってよく表される。従来の測定結果とともに、 Re_θ にはほとんどよらずに $\bar{\lambda}^+ \approx 100$ であることがわかる。一方液晶によって相対的に温度の高い高温縞のスパン方向の平均発生間隔 $\bar{\lambda}_T$ の測定を行った。 λ_T の測定においては、液晶層の平均温度を液晶の発色範囲のどのレベルに設定するかによって得られるデータが異なる可能性がある。本報では各場合に青色になる領域を高温縞と定義し、その中心間隔を読みとって図7のように整理した。(A)は液晶層温度を発色温度より相対的に低く、(F)は逆に高くした場合である。図中(C)(D)(E)間では $\bar{\lambda}_T^+$ がしきい値によらずほぼ一定値であること、又その値 $\bar{\lambda}_T^+ = 81$ 及び標準偏差は $\bar{\lambda}$ の場合とかなり近い値であることがわかる。物質移動を用いた実験報告⁽¹²⁾(シュミット数が大きい場合)では、局所物質伝達率のスパン方向の周期性は $\bar{\lambda}_m \approx 50$ であり、本報の結果とは異なっている。

水素気泡法の電極線下流において低速流体が外側へ向って放出される頻度 F (1/ms)を計測し、 $T_b = 1/F\bar{\lambda}$ により平均バースト周期 T_b が求められる。本報では $T_b U_\theta / \delta$ 、 $T_b U^* / \delta$ の二種の無次元整理を行い、図8,9に従来の測定値とともに示す。本実験結果は $T_b U_\theta / \delta = 5.3$ 、 $T_b U^* / \delta = 112$ で従来の可視化計測の結果に比較的良好に一致する。バースト周期のスケージングに関しては今なお定説が確立したとは言えず⁽⁶⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾測定結果にも相異が著しい。特にプロローグ測定によるものについては、測定方法、測定位置(壁面からの距離)等について今後十分注意がほられるべきと考える。

Fig. 6 Comparison of measured mean spacing of low-speed streaks

Fig. 7 Dependency of measured mean spacing of high-temperature streaks on the wall temperature

Fig. 8 Comparison of measured mean period between bursts

ナトリウム光源(波長5890Å)を用いると橙色の領域のみを輝かせることができる¹²⁾が、これを利用して低温縞の出現頻度を測定したものが図10である。この場合にもしきい値の設定に関して図7と同様のチェックを行った。出現する低温縞の数を複数の観測者が計測したが、図に示すように個人差はほとんど見られず、低速縞の放出頻度 $F=80(1/ms)$ とかなりよく一致している。

次に壁面温度分布変動パターンと壁近くの乱流構造との関係を調べるため、水素気泡法と液晶を同時併用して可視化を行った。まず気泡発生細線を壁面と平行に張り、壁面からの距離を変化させて観察を行った。図11は細線を $y^+=6$ の位置に置いた場合の写真例である。水素気泡が縞状となる低速流体部分には壁面の高温領域が、高速流体部分には低温領域がほぼ対応している。多くの写真について解析を行なったが、電極線が $y^+=10$ 程度までの距離にある場合、このような対応は70%以上について確認された。水素気泡法では縞状構造の流れ方向の観察に限度がある(図4参照)が、図11の液晶による観察では温度縞が $x^+=1000 \sim 2000$ 程度にわたって観察される。従来得られている粘性底層内の速度変動の相関¹⁵⁾からも示唆されるように、壁領域の乱流構造が予想外に流れ方向に長く伸びたものであることがわかる。

図12は壁面に垂直に張った細線による水素気泡法と液晶の同時可視化例である。ここには代表的な二例を示したが、(a)は低速流体の放出時(lift-up)、(b)は高速流体

Fig. 9 Comparison of measured mean period between bursts

Fig. 10 Passing frequency of low-temperature streaks measured by liquid crystal visualization

Fig. 11 Visualization of instantaneous wall-temperature distribution by liquid crystal with simultaneous hydrogen-bubble flow visualization (H_2 -bubble wire at $y^+=6$)

Fig. 12 Visualization of instantaneous wall-temperature distribution by liquid crystal with simultaneous hydrogen-bubble flow visualization (Vertical H_2 -bubble wire)

の侵入時(Sweep)に対応し、それぞれ壁面上の高温、低温の領域の形成を伴っている。実験で得られた82組の写真では、Lift-upのうち70%が高温縞に、Sweepのうち72%が低温縞に対応していることが示された。

4. 結び 水流の発達した乱流境界層で、水素気泡法と液晶を併用して壁面近傍の乱流構造と伝熱機構に関して定量的定性的知見を得た。非定常温度場は、流れ方向に長く伸びた縦縞状の乱流構造によって同様の縞状構造を有し、壁面近傍のバースティング現象による熱輸送と固体壁内の非定常熱伝導に連成して向久的な成長崩壊をくり返している。液晶法は、適切な使用条件のもとで、流れの可視化あるいは伝熱機構の検討に有力な手段のひとつであると言えよう。

参考文献

- 1) Kasagi, N., "Liquid Crystal Applications in Heat Transfer Experiments," Rep. IL-27, Thermosciences Division, Mech. Engrg. Dept., Stanford Univ., 1980, 2) 笠木, 平田, 熊田, "全面膜冷却技術(FMFC)に関する研究(第一報)," 日機論(B), Vol. 48, No. 430, 1982, 3) 横堀, 笠木, 平田, "二次元衝突噴流のよどみ領域における乱流輸送機構に関する研究," 日機論(B)投稿中, 4) Ali Khan, M. M., Kasagi, N., Hirata, M. and Nishiwaki, N., "Heat Transfer Augmentation in an Axis-Symmetric Impinging Jet," 7th Int'l Heat Transfer Conf., München, 1982, 5) 中丸, 津路, 笠木, 平田, "スラット後方剥離流の輸送機構に関する研究(第一報)," 第17回日本伝熱シンポジウム, p. 7, 1980, 6) Hirata, M., Tanaka, H., Kawamura, H. and Kasagi, N., "Heat Transfer in Turbulent Flows," A Keynote Paper, 7th Int'l Heat Transfer Conf., München, 1982, 7) Kim, H. T., Kline, S. T. and Reynolds, W. C., "The Production of Turbulence Near a Smooth Wall in a Turbulent Boundary Layer," J.F.M., Vol. 50, p. 133, 1971, 8) 笠木, 未発表, 9) 入谷, 笠木, 平田, "強制対流平板乱流境界層における輸送機構に関する研究," 日機論(B)投稿中, 10) Clauser, F. H., "Turbulent Boundary Layers in Adverse Pressure Gradients," J. Aero. Sci., Vol. 21, p. 91, 1954, 11) Cantwell, B. J., "Organized Motion in Turbulent Flow," Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 13, p. 457, 1981, 12) Campbell, J. A. and Hanratty, T. J., "Influence of Turbulent Structure on Mass Transfer at a Solid Surface," 2nd Symp. Turbulent Shear Flows, London, p. 18.1, 1979, 13) Blackwelder, R. F. and Haritonidis, J. H., "The Bursting Frequency in Turbulent Boundary Layers," submitted to J.F.M., 1981, 14) Badri Narayanan, M. A. and Marvin, J. G., "On the Period of the Coherent Structure in Boundary Layers at Large Reynolds Numbers," AFOSR/Lehigh Univ. Workshop, p. 380, 1978, 15) Kreplin, H. P. and Eckelmann, H., "Propagation of Perturbations in the Viscous Sublayer and Adjacent Wall Region," J.F.M., Vol. 95, p. 305, 1979.