一様な鉛直下降流中に置かれた二次元上向き加熱くさび まわりの強制—自然共存対流の流動と伝熱

Fluid Flow and Heat Transfer of Combined Forced and Natural Convection Induced over Upward-Facing, Heated Wedge Placed in Uniform Downward Flow of Air

○学 大畑 亮祐 (豊橋技科大・院) 正 北村 健三 (豊橋技科大・工) 正 光石 暁彦 (豊橋技科大・工)

Ryosuke Ohata, Toyohashi Univ. of Tech. Kenzo Kitamura, Toyohashi Univ. of Tech. Akihiko Mitsuishi, Toyohashi Univ. of Tech.

Key Words: Heat Transfer, Mixed Convection, Wedge Flow, Flow Instability, Flow Visualization

1. 緒言

著者は、鉛直下方に流れる一様な強制対流主流中に、有限な大きさの加熱平板を水平上向きに設置した体系について、平板まわりに生じる強制-自然共存対流の流動と伝熱を実験により調べた⁽¹⁾。その結果、浮力が強く作用すると平板上に流れ方向に軸を持つ縦渦が発生し、この縦渦の発生に伴って、平板からの伝熱が顕著に促進されることを明らかにした。本研究はその続報であり、図1に示すように、一様な強制対流中に加熱された2次元のくさびを水平上向きに設置した体系について、くさび面上に生じる強制-自然共存対流の流動、とくに浮力による流れの不安定現象を流れの可視化により明らかにすると共に、流れの不安定がくさびまわりの伝熱に如何なる影響を及ぼすか、伝熱実験を通じて調べたものである。このような流れの不安定は、例えば化学気相蒸着(CVD)法により基板上に均一な薄膜を形成する上で問題となる現象であり、本研究で得られた結果は、CVD 炉の熱・流動設計の基礎資料として役立つものと考えている。

2. 実験装置および測定

実験装置の概略を図2に示す。試験流体として常温の空気を用いることにし、鉛直下方に一様な流速 u_∞ で流れる強制対流主流を得るために縦型吸込み式小型風洞を製作・使用した。実験室内の空気は、整流洞上部から流入し、整流洞および縮流ノズルを通り、一様かつ低乱れ度の流れに整流された後、断面 $300 \times 300 \text{ mm}^2$ 、長さ 500 mm の試験ダクト内に流入し、ブロアーにより室内中に排気される。縮流ノズル出口における強制対流流速は熱線流速計により測定した。実験に用いたくさび面は、図1に示すように半幅 $W/2=50 \text{ mm}$ 、奥行き 290 mm のアクリル板の上側表面に厚さ $30 \mu\text{m}$ のステンレス箔ヒータを貼り付け、箔に交流を通电することにより一様な熱流束で加熱した。局所熱伝達率を測定するために、くさび面中心線上の箔ヒータ裏側に線径 $100 \mu\text{m}$ のK型熱電対を流れ方向に所定の間隔でスポット溶接した。また、このくさびのくさび角 θ を $170, 160, 135$ および 90° の4種類変化させた。流れの可視化に際しては、箔ヒータ間の隙間にスリットを設け、線香の煙を流出させた。これらのくさびを試験ダクト中央に水平上向きに設置した。実験はくさび幅 W 基準のレイノルズ数 $Re_W (=u_\infty W/\nu) = 300\text{--}1000$ 、修正レーレー数 $Ra_W^* (=g\beta q_w W^4/\lambda\alpha\nu) = 10^7\text{--}5 \times 10^8$ の範囲で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 流れの可視化 まず始めにくさび面上に生じる流れを可視化してみた。その代表的な結果を $\theta=135^\circ$ のくさびについて図3に示す。図3は強制対流主流流速を一定 $u_\infty=0.12 \text{ m/s}$ に保ち、熱流束 q_w を増加させていった場合の結果を示したもので、くさび面の長手方向から写真撮影したものである。熱流束の低い図3(a)では、煙はくさび面に沿って膜状に流れているのに対して、熱流束が高い図3(b)では流れ方向に軸

Fig.1 Present flow configuration

Fig.2 Experimental apparatus

Fig.3 Visualized flow field around wedge ($u_\infty=0.12 \text{ m/s}$, $\theta=135^\circ$, $W=100 \text{ mm}$)

をもつ縦渦が生じている様子が読み取れる。またさらに熱流

束が大きな図 3(c)では、縦渦がくさび面から高く立ち上がっている。つぎに、この縦渦がくさび角 θ によってどのように変化するか調べた結果を図 4 に示す。図 4 は主流速と熱流束を一定に保ち、くさび角 θ を変化させた場合の可視化結果を示したもので、くさび角の増加に伴って個々の縦渦のスケールが大きくなり、とくに $\theta=90^\circ$ のくさび面上では、図 4(d) に示すように非常にスケールの大きな馬蹄形状の渦が発生している様子が注目される。

これら一連の可視化結果を基に、縦渦の発生開始条件を調べてみた。その結果を図 5 に示す。図 5 は、横軸に主流流速 u_∞ をとり、縦軸に縦渦が生じ始める熱流束 q_{crit} をとったものである。この図から流速 u_∞ の増加と共に q_{crit} は高くなること、また u_∞ が同じ条件下では、くさび角 θ が小さくなるにつれて q_{crit} が高くなり、 $\theta=135^\circ$ 付近で極大値を示した後、 $\theta=90^\circ$ になると逆に q_{crit} は低下することが分かる。図 6 は図 5 の結果を、くさび長さ W を代表長さとするレイノルズ数 $Re_W(=u_\infty W/\nu)$ —修正グラスホフ数 $Gr_W^*(=g\beta q_w W^4/\lambda\nu^2)$ 平面上にプロットし直したものである。比較のため前報⁽¹⁾で得た上向き加熱平板(くさび角 $\theta=180^\circ$)の結果を図中実線で示した。なお、この上向き平板における縦渦の発生開始条件は、次式で与えられる。

$$(Gr_W^*/Re_W^{2.5})=1.77 \quad (1)$$

図 6 から、本実験で得られた縦渦の発生開始条件はくさび角 θ に依存するものの、 Gr_W^* の Re_W に対する勾配はほぼ等しいことが分かる。

3.2 伝熱特性 以上の流れの可視化結果を参考に、本研究では、くさびの流れ方向の局所熱伝達率を測定してみた。その代表的な結果として、 $\theta=160^\circ$ のくさびを $u_\infty=0.12\text{m/s}$ の主流中に設置した場合について図 7 に示す。図は、くさび先端からの流れ方向距離 X の地点における局所熱伝達率 $h_x(=q_w/(T_{wx}-T_\infty))$ をプロットしたものである。この図より、熱伝達率はくさびの先端付近ではほぼ一様な値を示すのに

Fig.4 Visualized flow field around wedge ($u_\infty=0.12\text{m/s}$, $q_w=300\text{W/m}^2$, $W=100\text{mm}$)

Fig.5 Onsets of vortices

Fig.6 Non-dimensional condition for the onsets of vortices

Fig.7 Local heat transfer coefficients from wedge

対して、後端部付近では高くなることが分かる。また、 h_x の値は $q_w=50\text{W/m}^2$ 以下では熱流束に依存しないが、 100W/m^2 以上では、熱流束の増加に伴って単調に高くなることが分かる。これはくさび面上に縦渦が発生することにより、くさび面に沿う境界層が薄くなるためと考えられる。なお、角度の異なる他のくさびについても、これと同様な結果が得られた。

4. 結 言

等熱流束条件で加熱された2次元上向き加熱くさびまわりの共存対流の流動と伝熱を、流れの可視化および伝熱実験により探った。その結果、浮力が作用すると、くさび面上に縦渦が発生することを明らかにした。また、この縦渦によりくさびからの伝熱が促進されることを明らかにした。

参考文献

- (1) K. Kitamura, A. Mitsuishi and F. Kimura, *Trans. Japan. Soc. Mech. Eng.*, 75-759, ser.B (2009) pp.2249-2256.