

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560228

研究課題名(和文) 浮力による流れの不安定現象の解明とCVD製膜問題への展開

研究課題名(英文) Experimental investigations on the flow instability due to buoyancy and its application to film-deposition by CVD

研究代表者

北村 健三 (Kitamura, Kenzo)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20126931

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：熱CVD法によってシリコン基板上に均一な薄膜を形成するには、浮力による流れの不安定現象についての理解が必要不可欠である。本研究は、とくにバレル型および台座型熱CVD炉でみられる体系、すなわち鉛直下方に一樣な流速で流れる強制対流気流中に、加熱された基板面を流れに対して水平または傾斜させて設置した体系を対象に、浮力によって基板面上の流れが不安定となるメカニズムおよび条件を流れの可視化により探った。また、この流れの不安定が、加熱面の局所伝熱(物質伝達)特性に及ぼす影響を伝熱実験により調べた。さらに、この実験データを無次元整理することにより、流れの不安定と伝熱特性を支配するパラメータを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：It is known that the unstable flow due to buoyancy causes a non-uniform film-deposition over heated silicon substrate in a barrel or pedestal CVD reactor. In the present study, the flow instability due to buoyancy was exploited experimentally through the flow visualizations. Heat transfer measurements were also carried out to investigate the influence of the flow instability on the local heat transfer from the plate. The experiments were conducted with the upward-facing, heated wedges placed in a uniform vertical downward flow of air, which simulates the aforementioned reactors. The wedge-angle was varied systematically from vertical to horizontal. The results showed that the flow is most stable when the wedge-angles from 135 to 110°, besides that the heat transfer coefficients from the wedge become uniform at the identical angles.

研究分野：熱工学

キーワード：対流 伝熱 共存対流

1. 研究開始当初の背景

液晶パネルや半導体の製造に当たっては、ガラス基板やシリコンウエハ上に各種金属、絶縁物等の機能性薄膜を形成する。これら薄膜を形成する上で、熱 CVD 法は重要な要素技術の一つとなっている。この熱 CVD 法は、CVD 炉内に加熱したガラスやシリコンなどの基板を設置し、基板のまわりに原料ガスとキャリアガスの混合ガスを流し、熱化学反応を利用して基板上に薄膜を蒸着するものである。この熱 CVD 炉の代表的な炉形式に縦型パレル型炉あるいは台座型炉がある。これらの炉では、鉛直下方に流れるガス中に、水平あるいは垂直または垂直に近い角度でサセプターが設置される。この、いずれの炉でも、基板上に均一な組成、厚さの蒸着膜を形成することが最も重要な課題であり、このためにはガスを基板表面に沿って、乱れのない層流状態で流す必要がある。さらにパレル型炉では、基板上に層流境界層が発達するが、そのままでは熱(物質)伝達率が下流に向かって低下するため、流れに対して基板を傾斜させ、流れの加速効果を利用して、熱(物質)伝達率の低下を防ぐ工夫が、また台座型炉では、流れを基板に垂直に衝突させることにより、一様な熱(物質)伝達率が得られる層流よどみ流れを利用するなどの工夫がなされている。

ところで、基板上に安定した層流を実現するには、原料ガスを十分速い速度で流せば良いが、原料ガスは高価であり、ガスの収率を上げるには、なるべくガスの流量(流速)を低く抑えたいとの要求がある。一方、ガスの流速が低くなると、高温に加熱されたサセプターまわりに生じる浮力が無視できなくなり、基板上の流れは局所的に不安定な流れへと移行する。このことから、従来 CVD の専門家を中心に、サセプターまわりの流れや温度場に及ぼす浮力の影響について、数値解析による検討が試みられている。しかし、これらの解析の多くは、市販の熱流体解析用ソフトに、炉形状、反応化学種、温度、圧力、流量などの諸条件を与えて計算を行ったもので、これらの解析から、基板まわりの流れや伝熱に浮力が如何なる影響を及ぼすか、一般的な理解を得るのは困難である。

このことから、申請者らは今まで CVD 炉でみられる基本的な体系について、常温・常圧の空気を試験流体に用いて、浮力の影響を流れの可視化および伝熱実験を通じて調べて来た。その結果、浮力によって平板に沿う強制対流境界層が不安定となる現象は、強制対流の向き(水平・垂直)、流れと平板とのなす角(直交・平行・斜交)によって大きく変化する結果を得ている。しかし、その詳細については、現在でもほとんど明らかになっていない。

2. 研究の目的

このことから、本研究では鉛直下方に一様

な流速で流れる強制対流中に、加熱面を流れに傾斜させて設置した体系を対象として、加熱面上に発達する層流境界層に浮力が如何なる影響を及ぼすか、実験を通じて調べることとした。実験では、まず傾斜加熱面上にどのような流れの不安定が生じるか、流れを可視化することにより調べる。ついで、この流れの不安定が加熱面の伝熱特性に如何なる影響を及ぼすか、伝熱実験を通じて明らかにする。また、これらの可視化および伝熱実験を、強制対流流速、傾斜角および加熱条件を系統的に変化させた場合について行い、それらの結果を無次元整理することにより、浮力による流れの不安定現象および伝熱特性を支配する無次元パラメータを明らかにする。

3. 研究の方法

本研究で作成・使用した実験装置を図1に示す。実験装置は、縦型風洞、および試験用くさびで構成されている。まず、縦型風洞であるが、実験室内の空気を整流胴の上部から吸込み、整流胴内に設置された金網・アルミハニカムおよび縮流ノズルにて、一様かつ低乱れ度の強制対流主流を得た。試験ダクトは断面 $300 \times 300 \text{mm}^2$ である。

つぎにくさびであるが、図1に示すように、辺長 $L=50 \text{mm}$ 、スパン方向長さ 290mm のくさびを使用した。平板の代わりにくさびを用いたのは、平板先端での流れのはく離、およびダクト内での流れの偏りを防ぐためである。くさびのアスペクト比を高くとり、くさび面上の流れが2次元となるようにした。実験では、くさび角 θ を $\theta=180^\circ, 160^\circ, 135^\circ, 110^\circ, 90^\circ, 60^\circ, 30^\circ$ および 0° の8通り変化させた。このうち、 $\theta=180^\circ$ から 135° までのくさびは厚さ 10mm のアクリル板で、また $\theta=110^\circ$ から 30° のくさびについては厚さ 3mm のバルサ板で作成した。このくさびの表面全体に亘って厚さ $30 \mu\text{m}$ のステンレス箔ヒータを貼り付け、交流を通電することにより、等熱流束条件で加熱した。くさびの局所熱伝達率を測定するために、くさびのスパン方向中心線上の箔ヒータ裏面に、線径 $100 \mu\text{m}$ の Cr-Al 熱電対を所定の流れ方向間隔でスポット溶接し、局所壁温 $T_{w,x}$ を計測した。そして、くさびの局所熱伝達率 h_x を次式で定義した。

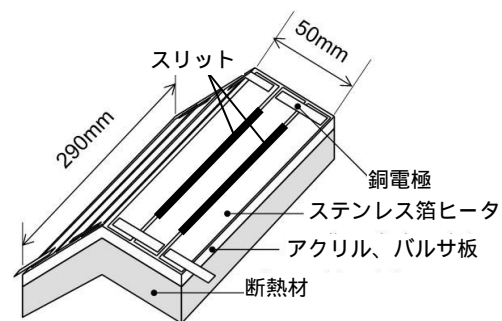


図1 試験平板(くさび)

$$h_x = q_w / (T_{wx} - T_\infty) \quad (1)$$

以上の風洞およびくさびを用いて実現されたレイノルズ数 $Re_L (= u_\infty \cdot L / \nu)$ は $Re_L = 250 - 700$, 修正グラスホフ数 $Gr_L^* (= g\beta q_w L^4 / \lambda \nu^2)$ は $Gr_L^* = 5.0 \times 10^5 - 8 \times 10^6$ であった。

4. 研究成果

(1) 流れの可視化

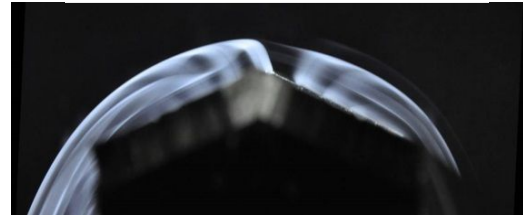
まず、浮力が強く作用した場合にくさび面上にどのような流れが生じるか、煙をトレーサとした流れの可視化により調べてみた。その代表的な例として、くさび角 $\theta = 135^\circ, 110^\circ, 60^\circ, 30^\circ$ のくさび面上の流れを可視化した結果を、図2に示す。これらの図は、いずれも強制対流主流速度および熱流束を $u_\infty = 0.12 \text{ m/s}$, $q_w = 100 - 150 \text{ W/m}^2$ に保ったときの結果を示したものである。まず図2(a)は、くさび角 $\theta = 135^\circ$ のくさび面上の流れをくさびの正面側から撮影したものである。強制対流主流は、図中上から下に向かって流れ、くさびの尖端で手前側と奥側に分岐した後、くさび先端より流出する。くさびを加熱しない場合および熱流束が $q_w = 80 \text{ W/m}^2$ 以下の場合には、スリットから流出した煙は、くさび表面に沿って膜状に乱れることなく流れ、そのままくさびの両端部から流出していく。この結果から、くさび面上にはいわゆる層流くさび流れ境界層が発達していることを確認している。一方、くさびの熱流束を $q_w = 100 \text{ W/m}^2$ に増加させると、煙がくさび面から筋状に複数本立ち上がる現象が観察された。この煙の筋は、流れ方向に軸を有する縦渦が発生することにより生じる。この縦渦の立ち上がり部分にスリット光を当て、くさびの側面側から可視化したのが、図2(a')に示す結果である。この図から、縦渦はくさびの幅全体に亘って出現しており、非常にスケールが大きな渦であることが判る。

つぎに、くさび角 $\theta = 110^\circ$ のくさび面上の流れを可視化した結果を図2(b)に示す。このくさびでは、熱流束が $q_w = 100 \text{ W/m}^2$ 以下では、煙はくさび面に沿って膜状に流れ、くさび面上には境界層が発達していることを確認している。一方、熱流束を $q_w = 120 \text{ W/m}^2$ に増加させると、境界層がくさび面からはく離し始め、さらに熱流束を $q_w = 150 \text{ W/m}^2$ に増加させると図2(b)右に示すように、境界層のはく離がさらに明瞭となる。このはく離泡内の壁面近傍にはくさびの下端から上端に向かう流れ（逆流）が発生している。このときくさびの正面側から流れを可視化すると、図2(b)左に示すように、煙が筋状に集中し始めている様子が観察される。なお、くさび面に沿う境界層がまずくさび面からはく離した後、縦渦が発生し始めることを確認している。

つぎに、くさび角がさらに小さな $\theta = 60^\circ$ のくさびの可視化結果を図2(c)に示す。くさび面に沿う境界層は $q_w = 80 \text{ W/m}^2$ 辺りでくさび下端部付近からはく離し始める。 $q_w = 125 \text{ W/m}^2$ では、図2(c)右に示すように、くさび面の



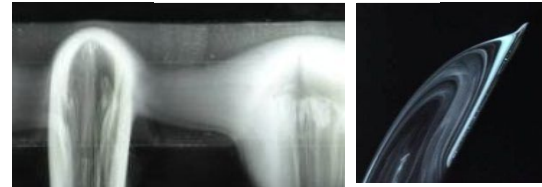
(a) $\theta = 135^\circ, q_w = 100 \text{ W/m}^2$ (正面図)



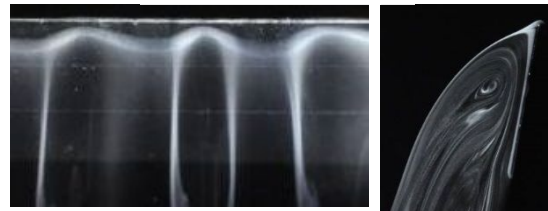
(a') $\theta = 135^\circ, q_w = 100 \text{ W/m}^2$ (側面図)



(b) $\theta = 110^\circ, q_w = 150 \text{ W/m}^2$



(c) $\theta = 60^\circ, q_w = 125 \text{ W/m}^2$



(d) $\theta = 30^\circ, q_w = 100 \text{ W/m}^2$

図2 くさび面上の流れの可視化 ($u_\infty = 0.12 \text{ m/s}$)

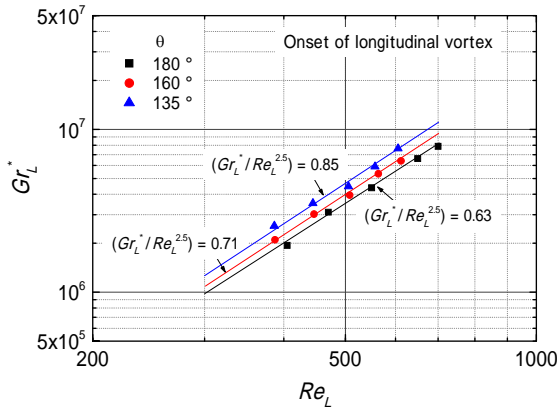
全体がはく離泡で覆われるようになる。このときくさび面上には、図2(c)左図に示すように、スケールが大きな馬蹄形状の渦が発生している様子が確認できる。

最後に $\theta = 30^\circ$ のくさび面上の流れを可視化した結果を図2(d)に示す。このくさびでは、 $q_w = 50 \text{ W/m}^2$ 付近で境界層がはく離し始め、 $q_w = 100 \text{ W/m}^2$ になると、図2(d)左に示すように馬蹄形状の渦が出現し始める。また、 $\theta = 30^\circ$ のくさび面上で境界層のはく離あるいは馬蹄形の渦が発生し始める熱流束は、 $\theta = 60^\circ$ の場合に比べて低いことが分かる。なお、図には掲げないが、本研究では垂直加熱平板についても流れの可視化を試みている。その結果によれば、垂直加熱平板では熱流束 $q_w = 30 \text{ W/m}^2$ 付近で境界層のはく離が生じ始め、 $q_w = 60 \text{ W/m}^2$ 前後ではく離点が板の上端に達することを確認している。

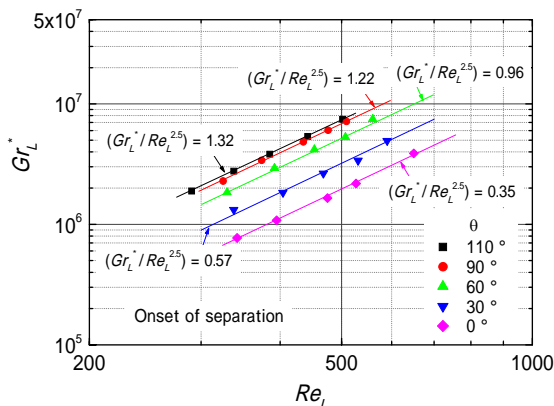
以上のくさび面まわりの流れの可視化により、くさび角 θ が 135° よりも大きなくさび

では、熱流束がある値以上になると流れ方向に軸をもつ縦渦が発生すること。一方、 θ が 110° 以下のくさびでは、熱流束を増加させていくと、まずくさび面に沿う境界層がはく離し、ついで縦渦あるいは馬蹄形の渦が出現すること。さらに、くさび面上で縦渦あるいははく離が発生し始める熱流束は、くさび角 θ によって大きく変化することが判った。

そこで本研究では、これらのデータを基に、くさびの辺長 L を代表長さ、強制対流速度 u を代表速度とするレイノルズ数 $Re_L (= u_{\infty} \cdot L/\nu)$ および $(q_{cr} \cdot L/\lambda)$ を代表温度差とする修正グラスホフ数 $Gr_L^* (= g\beta q_{cr} L^4/\lambda\nu^2)$ を算出し、横軸に Re_L 、縦軸に Gr_L^* をとってプロットし直してみた。図 3 はその結果を示したもので、図 3(a) は縦渦、図 3(b) は境界層のはく離が生じ始める条件を表している。この両図から、くさび面上に縦渦および境界層のはく離が生じ始める修正グラスホフ数 Gr_L^* は、いずれのくさび角 θ に対しても、レイノルズ数 Re_L に対する勾配がほぼ 2.5 となり、 $(Gr_L^*/Re_L^{2.5}) = C$ (一定) で表せることが判った。ここで、定数 C の値は図中に記す値となり、レイノルズ数が同じ条件下では、縦渦の発生開始グラスホフ数 Gr_L^* はくさび角 θ が小さくなるほど高くなり、逆に、はく離の発生開始グラスホフ数 Gr_L^* はくさび角 θ が小さくなるほど低くなること判る。また、これらの結果から、 $\theta=110^\circ$ のくさび面上の流れが浮力に対して最も安定であると言える。



(a) 縦渦の発生開始条件 ($180^\circ < \theta < 135^\circ$)



(b) はく離の発生開始条件 ($0^\circ < \theta < 110^\circ$)

図 3 くさび面上の流れの不安定条件

(2) くさびの局所熱伝達率

以上の流れの可視化によって、浮力が強く作用すると、 $\theta > 135^\circ$ のくさびでは縦渦が発生し、 $\theta < 110^\circ$ のくさびでは境界層のはく離が生じることが判った。これら縦渦や境界層のはく離は、くさびの伝熱に影響を及ぼすものと考えられる。そこで本研究では、くさびの局所熱伝達率を測定し、縦渦やはく離の発生が伝熱にどのような影響を及ぼすか調べてみた。その一例として、 u_{∞} を一定 0.12m/s に保ち、くさびの熱流束 q_w を順次増加させていった場合の結果を図 4 に示す。図の横軸にはくさび先端を始点とする流れ方向距離 x をとり、縦軸に局所熱伝達率 h_x をとっている。

まず、図 4(a) に示す $\theta=180^\circ$ の水平上向き加熱平板の結果であるが、この流速下では、熱流束 q_w がおよそ 50W/m^2 前後で平板上に縦渦が発生することを確認している。これより q_w が低いときの局所熱伝達率であるが、平板全体に亘ってほぼ同一の分布を示している。このように熱伝達率が熱流束に依らず同一の値を示す結果は、強制対流により伝熱が支配されていることを示している。つぎに熱流束を縦渦が生じる 80W/m^2 よりも高きした場合であるが、熱伝達率は、平板全体に亘って高い値を示すことが判る。また、その値は熱流束に依存して高くなっていく。これは縦渦の発生に伴って、温度境界層が薄くなること、および縦渦による乱れの促進効果によると考えられる。

つぎに $\theta=135^\circ$ のくさびであるが、図 4(b) に示すように、熱流束が 125W/m^2 以上になると、熱伝達率は熱流束の増加に伴ってとくにくさびの後半部分で高くなる。しかし、上向き平板に比べると、くさび全体に亘って熱伝達率の変化は小さくなっている。

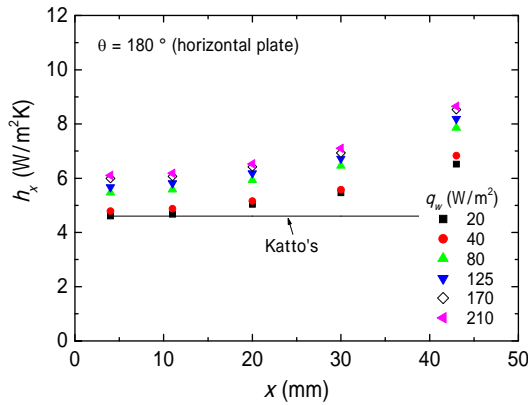
一方、 $\theta=110^\circ$ のくさびであるが、図 4(c) から、はく離が生じない 80W/m^2 以下の熱流束では、熱伝達率は熱流束に依らずほぼ同一の値を示すことが判る。一方、くさび面上ではく離が生じる $q_w=125\text{W/m}^2$ 以上では、上述のくさびとは逆に、熱流束の増加と共にくさび全体に亘って熱伝達率が低下する。この低下は、はく離点に近づくにつれて流れが減速されること、はく離点下流側にはく離泡が形成され流れがよどむためと考えられる。

これら一連の熱伝達率変化は、図 4(d) に示す $\theta=30^\circ$ のくさびについても同様であり、 $\theta=30^\circ$ の結果を $\theta=110^\circ$ のくさびと比較すると、 θ が小さくなるほど、より小さな熱流束で熱伝達率が低下し始め、とくにくさびの先端近くでの熱伝達率の低下が顕著となる。一方、くさび後端付近での熱伝達率の増加は、くさび角 θ が小さくなるほどより顕著となる。

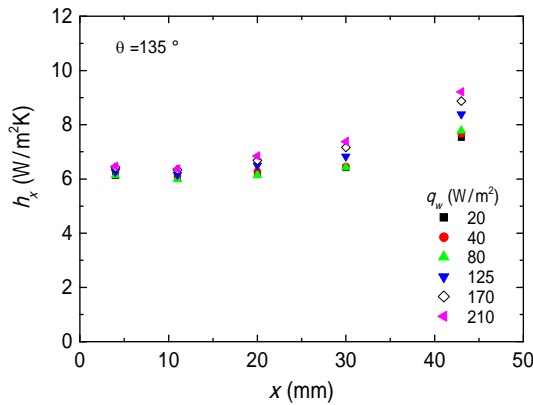
最後に垂直加熱平板 $\theta=0^\circ$ の局所熱伝達率を図 4(e) に示す。平板まわりの伝熱が強制対流により支配されている場合には、その局所ヌセルト数 $Nu_x (= h_x \cdot x/\lambda)$ は、以下の等熱流束加熱平板に沿う層流境界層流の伝熱相関式に従うと考えられる。

$$Nu_x = 0.458Pr^{1/3}Re_x^{1/2} \quad (2)$$

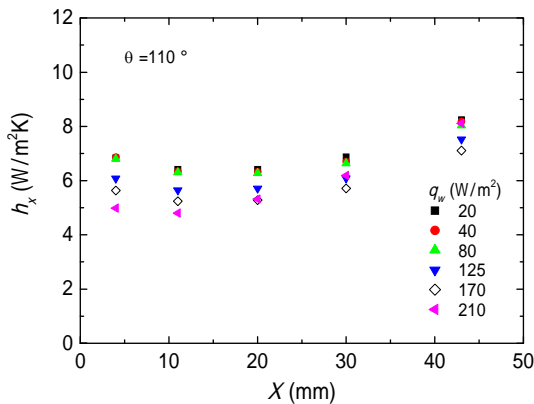
そこで、この伝熱相関式から計算される局所熱伝達率を図 4(e)中に実線で示した。流れの可視化によれば、垂直平板に沿う境界層がはく離し始めるのは $q_w=30\text{W/m}^2$ 付近であり、はく離が生じない場合は、実線で示す計算値とほぼ一致している。一方、平板上ではく離が生じる $q_w=40\text{W/m}^2$ の測定値は、上述の強制対流値に比べてとくに平板中央付近で低い値を示し、また $q_w=80\text{W/m}^2$ では、この伝熱劣下域が平板上端付近にまで拡大し、さらに熱流束を増加させると、熱伝達率は平板下端で最も高く、平板上端に向かうにつれて低くなる自然対流の伝熱特性へと近づくことが判る。



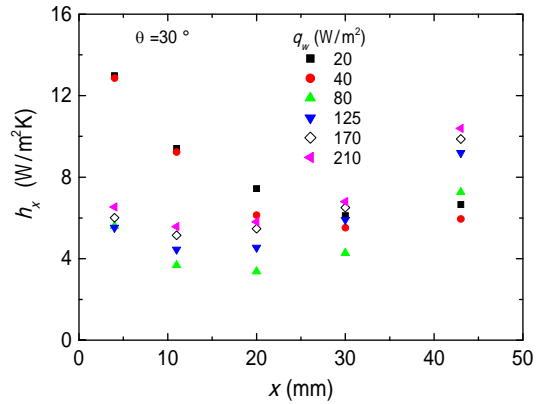
(a) $\theta=180^\circ$ (水平平板)



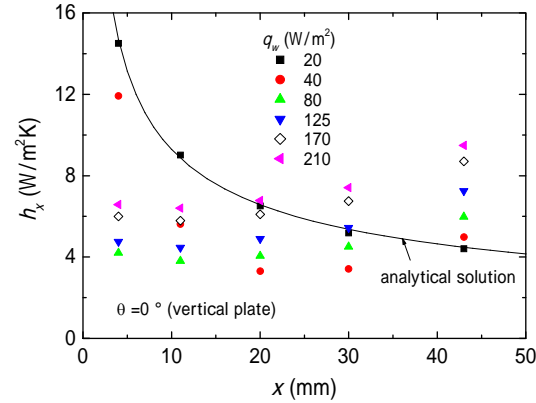
(b) $\theta=135^\circ$



(c) $\theta=110^\circ$



(d) $\theta=30^\circ$



(e) $\theta=0^\circ$ (垂直平板)

図4 くさび面の局所熱伝達率

(3) くさびの平均ヌセルト数

以上のくさびの局所熱伝達率の測定結果より、浮力が作用すると $180^\circ < \theta < 135^\circ$ のくさびでは、くさびまわりの伝熱が強制対流のそれよりも促進され、逆に $110^\circ < \theta < 0^\circ$ のくさびでは、伝熱が劣下することが判った。本研究では、これらくさびまわりの局所熱伝達率を種々の流速について測定している。そこで、これら流速 u_∞ 、熱流束 q_w およびくさび角 θ の異なる局所熱伝達率の測定値から、くさびの平均熱伝達率 h_m および平均ヌセルト数 $Nu_m (=h_m \cdot L/\lambda)$ を求めてみた。その結果、以下の事実が明らかとなった。

まず、グラスホフ数 Gr_L^* が十分低く、くさびまわりの伝熱が強制対流により支配されている場合、くさびの平均ヌセルト数を Nu_f とすると、 Nu_f とレイノルズ数 Re_L の間には、

$$Nu_f = C \cdot Re_L^{1/2} \quad (3)$$

なる関係が成立する。ここで、上式の係数 C はくさび角 θ によって定まる比例定数であり、 $\theta=180, 160, 135, 110, 90, 60, 30$ および 0° のくさびに対して、 C の値はそれぞれ 0.51, 0.55, 0.64, 0.68, 0.70, 0.755, 0.81 および 0.82 となった。一方、グラスホフ数 Gr_L^* がある値以上になると、くさびの平均ヌセルト数 Nu_m は、 $\theta > 135^\circ$ のくさびでは、強制対流くさび流れのヌセルト数 Nu_f よりも高くなるのに対して、 $\theta < 110^\circ$ のくさびでは、 Nu_f よりも低下する。しかし、これら Nu_m の Nu_f に対する増加あるいは低下の割合は、くさび角 θ およびレイノ

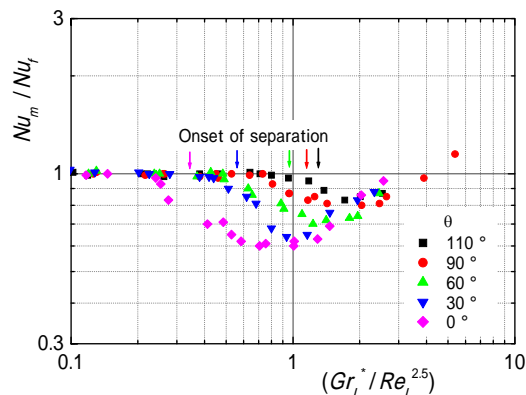
ルズ数 Re_L によって変化している．そこで本研究では，くさびの平均ヌセルト数 Nu_m を適当な無次元パラメータを用いて整理することにより，くさびまわりの伝熱を支配するパラメータを探ることとした．

このくさびまわりの伝熱に対しては，縦渦や境界層のはく離が支配的な影響を及ぼし，これらの発生条件がパラメータ $(Gr_L^*/Re_L^{2.5})$ で規定できることを明らかにしている．そこで本研究では，くさびの平均ヌセルト数についても，このパラメータを用いて整理してみた．図 5 は，その結果を示したもので，実験で得られたくさびの平均ヌセルト数 Nu_m を，層流くさび流れの Nu_f で割った値を，パラメータ $(Gr_L^*/Re_L^{2.5})$ を横軸にとってプロットしたものである．なお Nu_f には，式(3)から求めた値を用いた．くさび面上に縦渦が生じ，伝熱が強制対流くさび流れよりも促進される $\theta > 135^\circ$ のデータを図 5(a) に示す．この図から，くさびのヌセルト数比 (Nu_m/Nu_f) は， $(Gr_L^*/Re_L^{2.5})$ を用いると，くさび角 θ 毎にそれぞれ一本の曲線のまわりにまとまること， (Nu_m/Nu_f) の値が 1 から高くなり始める $(Gr_L^*/Re_L^{2.5})$ の値は，くさび角が小さいほど高いことが判る．なお，図 5(a) には，流れの可視化により得られた縦渦の発生開始条件を実験値と同色の矢印で示している．この発生開始条件と， (Nu_m/Nu_f) が 1 から増加し始める $(Gr_L^*/Re_L^{2.5})$ の値は，ほぼ一致している．

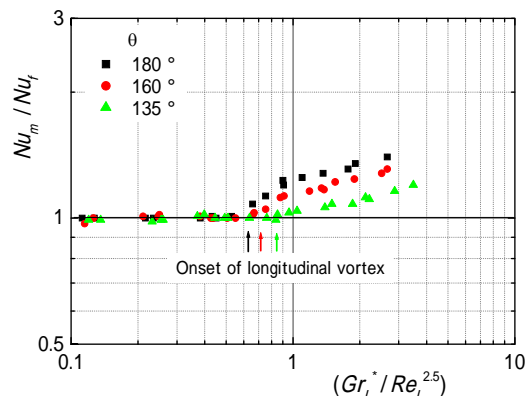
つぎに，くさび面上に境界層のはく離が生じる $\theta < 110^\circ$ のくさびのデータを図 5(b) にまとめて示す．この図から，くさびのヌセルト数比 (Nu_m/Nu_f) は，パラメータ $(Gr_L^*/Re_L^{2.5})$ を用いると，それぞれ一本の曲線のまわりにまとまることが判る．また， (Nu_m/Nu_f) が 1 から低下し始める $(Gr_L^*/Re_L^{2.5})$ の値は，くさび角 θ が小さくなるに従って，より低い値へ移行していく様子を読み取れる．また，図には流れの可視化により得られた境界層のはく離開始条件を同色の矢印で示しているが，この矢印と (Nu_m/Nu_f) が 1 から低下し始める位置を比較すると，矢印の方が常に $(Gr_L^*/Re_L^{2.5})$ の値が高いことが判る．本研究では，はく離開始をくさびの後端で境界層がはく離し始める条件で定義しているが，このはく離開始点より上流側において既に流れは減速されており，伝熱が抑制されている．このため， (Nu_m/Nu_f) が 1 から低下し始める $(Gr_L^*/Re_L^{2.5})$ の方が，境界層はく離が生じる値よりも低くなると考えられる．また，図 5(b) を見ると， (Nu_m/Nu_f) は $(Gr_L^*/Re_L^{2.5})$ のある値で極小値を示し，この極小値はくさび角が小さくなるほど低くなることが判る．

(4)まとめ

以上の結果より，縦型バレル型炉あるいは台座型炉では，サセプターを鉛直から 55° - 40° 傾斜させると，サセプター上の流れが浮力に対して最も安定となり，かつサセプター全体に亘って一様な熱（物質）伝達率が得られることが分かった．



(a) $180^\circ < \theta < 135^\circ$



(b) $0^\circ < \theta < 110^\circ$

図 5 くさび面の平均ヌセルト数

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

北村健三，光石暁彦，大畑亮祐，山崎慎司，一様な鉛直下降流中に設置された水平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，日本機械学会論文集，査読有，79 巻 798 号 B 編，2013，199-213.

〔学会発表〕(計 2 件)

F. Kimura, Y. Kuruma and K. Kitamura, Flow and Heat Transfer of Combined Forced and Natural Convection around Heated, Horizontal Square Cylinder Placed in Uniform Cross-Flow of Air, Proc. of 23rd International Symposium on Transport Phenomena, Vol.1, 2012, 1-8.

A. Mitsuishi and K. Kitamura, Numerical Simulation of Natural Convection over a Horizontal two-dimensional Heated Plate, Proc. of 23rd International Symposium on Transport Phenomena, Vol.1, 2012, 9-16.

6. 研究組織

(1)研究代表者

北村 健三 (KITAMURA, Kenzo)
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：20126931