

縦渦発生体による狭いダクト内に置かれた突起上の対流熱伝達促進

島田 了八¹・木村 光平²・高橋 智¹

Enhancement of Heat Transfer on a Projection with Longitudinal Vortex Generator in the Narrow Space Duct

Ryohachi SHIMADA¹, Kohei KIMURA² and Satoshi TAKAHASHI¹

^{1,2} *Department of Mechanical Engineering, Faculty of Science and Engineering, Ishinomaki Senshu University, Miyagi 986-8580, Japan*

Abstract

Experiment of heat transfer on a projection with delta wing-type longitudinal vortex generator was performed in the narrow space duct. The temperature on the projection was measured by the infrared imaging camera. The projection height varied 3 mm or 5 mm, the angle of vortex generator varied 30 deg. or 60 deg. and the duct Reynolds number varied from 1130 to 11200. The thermal performance factor η (the ratio between heat transfer enhancement and drag increase from it without vortex generator) is discussed. It is clear that the performance factor is best in the case of that the height of a projection is just higher than the height of velocity boundary layer which developed from the leading edge on the duct plate.

1. 緒言

流動抵抗をいかに少なくして空冷機器の冷却性能の向上を図るかは工業上重要な課題である。基板上に発熱素子を取り付けられ、さらにその基板が狭い間隔で並べられている場合、流路が狭いことによる流動抵抗の増加が考えられ、発熱素子が基板から突出することにより熱伝達は良くなるがさらに流動抵抗の増加が考えられる。しかし、発熱素子の上に縦渦発生体を設置したとき渦発生体を設置しない場合と比較して流動抵抗の上昇がわずかであるなら、縦渦発生体は良好な熱伝達促進体となり得る。また、ダクト入口から発達する速度境界層も素子の上の伝熱性能に影響を与えると推察される。さらに渦発生体は層流中でその効果が大きいと言われている^(1,2)。そこで本研究では、比較的低い圧力損失増加に対して良好な伝熱促進が可能となるといわれており^(3,4)加工も簡単な縦渦発生体を発熱素子上に取り付け、ダクトを形成する平板上が層流となるような低流速で冷却性能の向上を図った。

2. 実験装置および方法

図1に試験部の概要を示す。ナイフエッジを持つ平板を囲む形で高さ20 mm、幅120 mm、長さ300 mmのダクトが形成されている。平板は厚さ10 mm、側板は厚さ1 mmのポリカーボネイト板、上面は0.03 mm厚のポリエチレンシートでダクトが形成され、ダクト全体が吹き出し風洞の中に設置されている。ポリエチレンシートは熱画像装置の使用する温度に対応した波長帯では特異な吸収帯が存在しないためダクト上面に使用した。なお、熱画像装置を伝熱面表面温度測定に用いる場合、事前にポリエチレンシートのある場合と無い場合とで比較校正を行ってから使用している。

平板上には80 mm角のポリカーボネイト板上部表面に0.01 mm厚のニクロム箔を貼りその上に0.05 mm厚、熱伝導率5 w/mKのサーマルグリースを挟んで渦発生体を設置した0.1 mm厚の銅板を、平板からの突起高さが3 mmまたは5 mmになるように、平板前縁から60 mmの位置に設置した。

渦発生体は底辺5 mm、高さ5 mmの三角形状をしており、突起前縁から5 mmの位置に迎角

¹石巻専修大学理工学部機械工学科

²石巻専修大学大学院理工学研究科物質工学専攻

縦渦発生体による狭いダクト内に置かれた突起上の対流熱伝達促進

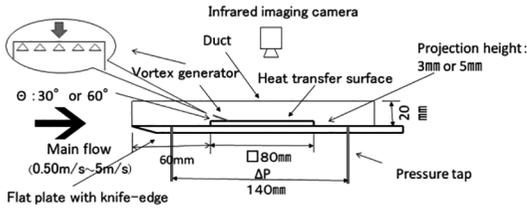


Fig.1 Schematic of experimental apparatus

30° または 60° の 2 通り変化させ、10 mm ピッチで突起上流路幅方向に 7 個配置した。ダクト入口の流速は 0.5 m/s から 5 m/s まで 5 通り変化させた。ダクト入口の流速は熱線風速計で、加熱面表面温度は熱画像装置を用い、ダクト入口空気温度は抵抗温度計で、突起裏面の温度は熱電対で求めた。平板上の静圧は、平板上に直径 0.8 mm の静圧タップを設けデジタルマノメータで測定した。

3. データ整理に用いた式

熱伝達率 h (W/m^2K) は以下の式より求めた。

$$h = \frac{Q}{A(T_w - T_\infty)}$$

$$Q = Q_j - Q_c$$

ここで、 A は伝熱面積 (m^2)、 T_w は伝熱面表面温度、 T_∞ はダクト入口での主流温度であり、上式の伝達熱量 Q は通電加熱によるジュール発熱量 Q_j からポリカーボネイト板を通して突起裏面に伝導で伝わる熱量 Q_c を差し引いて算出した。

管摩擦係数 λ は以下の式より求めた。

$$\lambda = \frac{\Delta P}{\frac{\rho u^2 \Delta x}{2D_h}}$$

ここで、 ρ は密度 (kg/m^3)、 u はダクト入口流速 (m/s)、 D_h はダクト入口での相当直径 (m) であり、平板上の静圧差 ΔP は突起を挟んで前後 30 mm の距離 Δx の値を用いた。

レイノルズ数は以下の式より求めた。

$$Re_{D_h} = \frac{uD_h}{\nu}$$

ここで、 ν は動粘性係数 (m^2/s)、 u はダクト入口流速 (m/s)、 D_h はダクト入口での相当直径 (m) である。

熱伝達の増加と流動抵抗の増加は同時に現れる

Table.1 Boundary layer thickness on a plate at 60mm from the reading edge

Velocity m/s	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0
Thickness mm	6.9	4.9	3.4	2.8	2.2

ので、ポンプ動力一定としたときの伝熱性能 η を求めた。

伝熱性能は以下の式で定義した。

$$\eta = \left(\frac{h}{h_0}\right) \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{-\frac{1}{3}}$$

添え字 0 は渦発生体の無い場合

4. 実験結果および考察

表 1 に平板前縁から (ダクト入口から) 60 mm の位置 (突起が置かれた位置) に層流境界層が発達していると仮定したときの境界層厚さを示す。

突起高さ 3 mm では主流速度 2 m/s 以下で、5 mm では 1 m/s 以下で突起は平板に発達する速度境界層に埋没している。入口から 60 mm はダクトとしては助走区間にあたる。

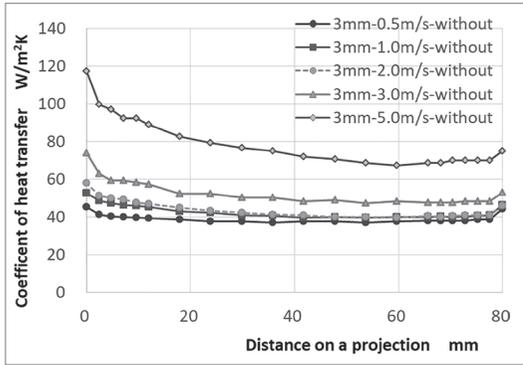
4.1 渦発生体の無い場合の局所熱伝達率分布

図 2 (a) に突起高さ 3 mm、(b) に突起高さ 5 mm の渦発生体の無い場合の突起上の局所熱伝達率分布を示す。

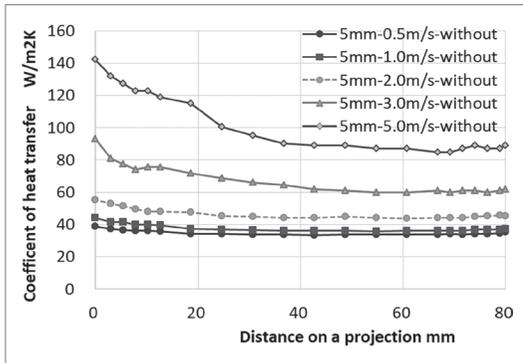
突起の高さにかかわらず、2 m/s 以下の流速では突起の前方 15 mm までの熱伝達が若干良くなっておりその後下流域までほぼ同じ値を示している。しかし、3 m/s 以上になると前方で急速に熱伝達率が向上し、下流に行くにしたがい低下している。これは突起上に新たに乱流境界層が発達したためと考えられる。80 mm 近傍で多少熱伝達率が良くなっているのは、突起のすぐ後方では流路拡大により剥離減速が起これるその影響が突起上の熱伝達率にも影響しているためと推察される。

4.2 縦渦の可視化

図 3 に実験条件として突起高さ 3 mm、渦発生体迎角 30°、流速 0.5 m/s ($Re_{D_h}=1130$) の場合にプロピレングリコールを発煙させてダクト後方より縦渦を確認した一例を示す。渦発生体の両脇に



(a) Projection height is 3 mm.



(b) Projection height is 5 mm.

Fig.2 Distribution of heat transfer coefficient on a projection without vortex generator.

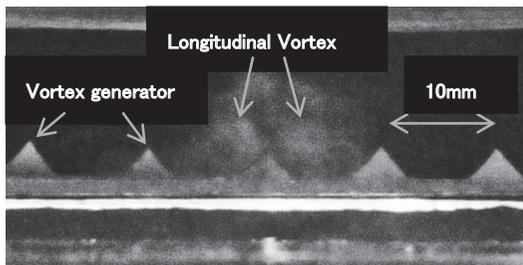
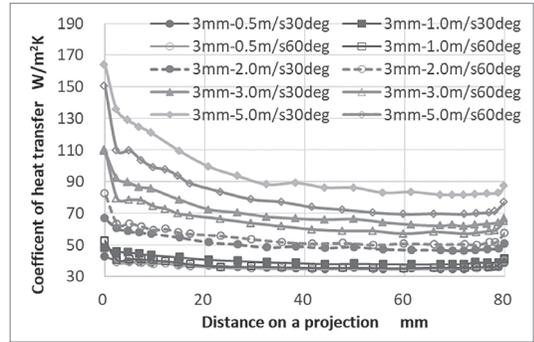


Fig.3 Longitudinal vortex (projection height is 3 mm, stream velocity is 0.5m/s, attack angle is 30deg.)

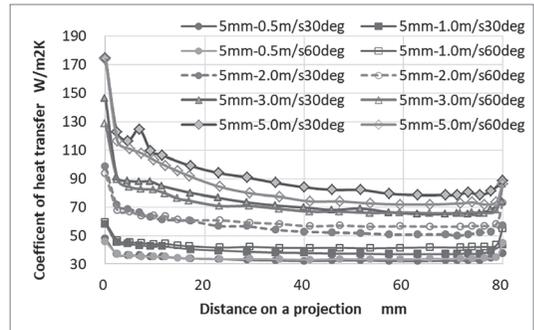
直径 4.8 mm の縦渦の発生が見られる。また、渦は突起通過後上側に持ち上がっていることも確認できた。

4.3 渦発生体がある場合の局所熱伝達率分布

図 4(a)には突起高さ 3 mm の場合、(b)には突起高さ 5 mm の場合に渦発生体の迎角を 30° と 60° に変化させたときの局所熱伝達率分布を示



(a) Projection height is 3 mm.



(b) Projection height is 5 mm.

Fig.4 Distribution of heat transfer coefficient on a projection with vortex generator.

す。渦発生体の頂角の下流方向と渦発生体との下流方向の局所熱伝達率分布は突起前縁から 2 mm を除き一致した。流路幅方向には熱伝達率の変化がないことを確認したので、1 次元性が保たれているものとして流れ方向のみの突起上の熱伝達率分布で比較した。

流速が 5 m/s の場合は迎角 30° の方が 60° と比較して全体で熱伝達が良くなっているが、3 m/s となると 30° がわずかに良く 60° との熱伝達率の差は小さくなっている。さらに速度が遅い 2 m/s 以下になると差は小さくなり 60° の方の熱伝達率がわずかに高くなる。この理由として低速の場合、60° の方が 30° よりもより主流に近くなるため 60° の方の熱伝達率がわずかに良く、流れが速い場合、突起は平板前縁からの速度境界層外に飛び出しており 60° の方が 30° よりも突起上の流れを妨げるような働きをするため 30° の方の熱伝達率が良いと考えられる。

また、縦渦は下流方向に行くにしたがい揺れな

縦渦発生体による狭いダクト内に置かれた突起上の対流熱伝達促進

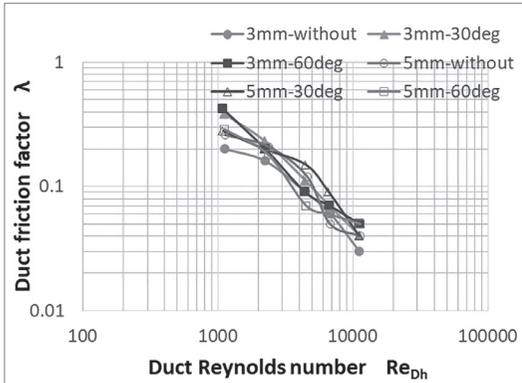


Fig.5 Duct friction factor with and without vortex generator

がら浮き上がる傾向が見られるが、浮き上がり方が大きいほど熱伝達率は後方で低下していき、低速の場合にはあまり大きな浮き上がりが無くその際には後方まで同じような熱伝達率が続くと考えられる。

4.4 管摩擦係数

流速はダクト入り口で測定した値を、直径は扁平なダクト断面のため相当直径を用いた管摩擦係数を図5に示す。

渦発生体のない場合には滑らかなダクトに比べて摩擦係数は大きくなっている。そこに小さな渦発生体を設けても突起だけの場合とあまり変わらない。20 mm のダクト高さに対して 3 mm、5 mm の高さの突起を設けたことで大きな流動抵抗になっている。渦発生体から発生する縦渦は流動抵抗の緩和をしているのではないかと推察する。図の傾きからはレイノルズ数が 2300 を超えても全体的に層流の場合と同じ様にみえる。突起高さ 5 mm の場合にはダクトレイノルズ数の高い方で乱流のような緩やかな傾きが一部見られる。

4.5 熱伝達促進率

図6に渦発生体のない場合の熱伝達率に対する促進率を示す。1以上が渦発生体を付けて熱伝達促進のあった場合である。

突起高さ 5 mm ではダクトレイノルズ数 6500 (流速 3 m/s) 以下で促進が行われており、突起高さ 3 mm ではダクトレイノルズ数 3000 (流速 1.5 m/s) 以上で促進が行われており、30° の迎角では

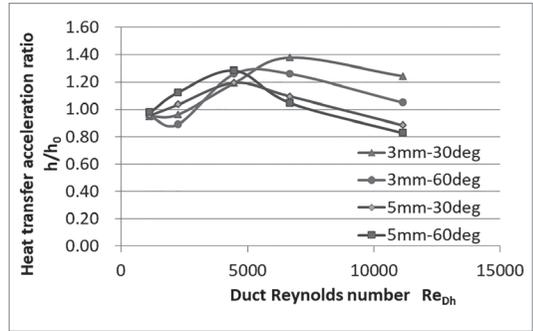


Fig.6 Heat transfer acceleration ratio.

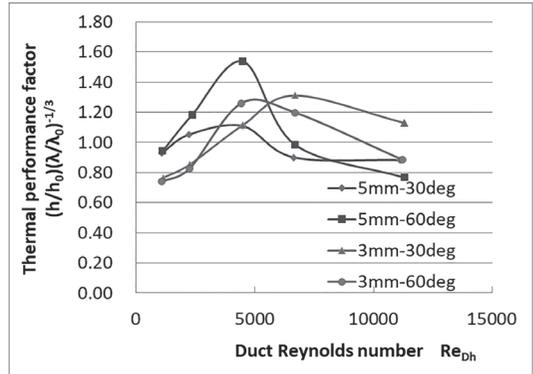


Fig.7 Thermal performance for the vortex generator

約 40% の促進が得られている。突起高さ 5 mm の場合ダクトレイノルズ数 4500 (流速 2 m/s) で熱伝達促進率が大きく、突起高さ 3 mm ではダクトレイノルズ数 6000 近傍で促進率が大きくなっており、このことより突起高さがダクト入口から発達する速度境界層よりも少しだけ高い状態のとき促進率が高まると考えられる。また、流速が速くなると縦渦が突起表面から離れる傾向にあることも影響しているものと考えられる。さらに乱流が強くなると促進率は低下する。

4.6 性能比較

図7にはポンプ動力一定とした場合の熱伝達の促進率を示す。突起の高さ 5 mm で渦発生体の迎角 60° の場合はダクトレイノルズ数 4500 (流速 2 m/s) 近傍で最も性能が良く、促進率は 50% を超す。突起高さ 3 mm で渦発生体の迎角 30° ではダクトレイノルズ数 6700 (流速 3 m/s) 近傍で促進率が高くなっており、突起高さ 3 mm、迎角 60°

ではダクトレイノルズ数 4500 (流速 2 m/s) 近傍で最も性能が良い。突起高さが前縁から発達する境界層から突出し始める流速で渦発生体を用いるのが効果的と考えられる。流速がさらに速くなると流動抵抗の増加が熱伝達率の増加を上回って、性能は低下する。以上より、発熱素子はその高さがダクト入口から発達する速度境界層より少し高くなる位置または流速で冷却性能が良くなると言える。渦発生体の迎角が大きい場合は主流速度の遅い方が有効である。

5. 結論

デルタ翼型縦渦発生体をダクト内に置かれた突起上に設置した場合の突起上の熱伝達率について実験を行い以下のことが明らかになった。

1. 3 m/s 以上と流速が速くなるとダクト内で発生した縦渦は流れ後方に行くにしたがい伝熱面から浮き上がり、それに伴い熱伝達率も後方に行くにしたがい低下する。
2. 1 m/s 以下の低速の場合、縦渦は伝熱面に沿って後方へ流れ、熱伝達率は後方までほぼ一定となる。
3. 突起高さがダクト入口から発達する速度境

界層より少し高くなるような流速や突起位置で渦発生体を用いるのが流動抵抗を考慮しても最も伝熱性能が良い。

4. 渦発生体の迎角は、主流速度が遅い場合には角度の大きい方を、主流速度が速い場合は角度の小さい方を用いるのが効果的である。

参考文献

- (1) 加藤健司, 脇本辰郎, 西村貴志, “渦発生体付き流路における圧力損失と伝熱促進”, 日本機械学会論文集 (B), Vol.78, No.794 (2012), pp.1769-1783.
- (2) 加藤健司, 東恒雄, “渦発生体付き流路における圧力損失と伝熱促進の関係について”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.69, No.685 (2003), pp.2091-2098.
- (3) Fiebig, M., “Embedded vortices in internal flow: heat transfer and pressure loss enhancement”, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 16, No.5 (1995), pp. 376-388.
- (4) Jacobi, A. M. and Shah, R. K., “Heat transfer surface enhancement through the use of longitudinal vortices: A review of recent progress”, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 11, (1995), pp.295-309.