

鉄鋼製造過程における廃熱回収装置の高性能化に関する研究

研究代表者 大分大学工学部機械・エネルギーシステム工学科 濱川洋充

1. 緒 言

地球環境保全のためには機械の低環境負荷化と省エネルギー化が必須である。鉄鋼の製造過程における温暖化対策は、石炭をはじめとするエネルギーの消費を節減することにある。コークス炉、高炉、転炉などの鉄鋼の製・精錬工程では高温の熱エネルギーが生じており、これらの排熱を回収し有効利用する技術の開発は極めて重要である。

一般的に排熱の回収には排熱回収ボイラが使用されている。ボイラ内部に設置された伝熱管群の外側を高温の熱供給排熱ガスが流れ、このガスから伝熱管が授熱し管内部を流れる液体に伝熱し、排熱を回収する。この管内部に発生した蒸気を発電用蒸気タービン等に供給し発電が行われる。

ところで、近年、乱流制御技術が、現代文明を支えるほとんど全ての熱流体を利用した機械を高効率化および省エネルギー化できる新しい技術として注目されている。乱流とは、流体中の微細な渦運動であり、自動車や船舶が進むとき周りの空気や水から受ける摩擦抵抗を増加させるマイナスの効果と、混合・熱伝達・燃焼の促進などのプラスの効果をも有する。このプラス面を促進しマイナス面を抑制する技術が乱流制御である。流動抵抗低減、燃焼効率促進と低環境負荷燃焼、伝熱促進・抑制・分布制御、混合・拡散・化学反応制御などに効果があり、これを用いてシステムを高効率化すれば、二酸化炭素の排出量を大幅に低減できる。大気汚染問題の解決にも大きく寄与することから、世界的規模で今後の開発が期待されている。

最近開発された熱伝達を促進する乱流制御技術の一つに、廃熱回収ボイラなどの熱交換器の伝熱管の表面に針状のフィンを多数設置し、伝熱管周りの流れを乱し低温の流体と高温の流体の混合を促進させ、伝熱管の熱伝達特性を向上させる方法(セレイティッドフィン)がある。従来のスパイラルフィン(伝熱管に平板状のフィンを螺旋状に巻きつけたもの)に比べ熱伝達率が向上するため、主に排熱回収ボイラの伝熱管として利用されている。しかし、伝熱管にセレイティッドフィンを設置すると、流動抵抗が増し伝熱管群部の圧損が増加するため、流動抵抗の増加を抑え伝熱を促進した高性能伝熱管の開発が排熱回収装置の高性能化には必須の課題である。

以上の背景から本研究では、流動抵抗が少なく伝熱性能に優れた新しい排熱回収用伝熱管を開発するために、フィンの幾何形状とピッチが伝熱管周りの速度変動および流体抵抗に及ぼす影響を実験的に調査するとともに、流体抵抗の発生原因を明らかにした。

2. 実験装置および方法

測定部概要を図 1 に示す。断面が $500\text{mm} \times 500\text{mm}$ の単回路吹出式風洞のノズル出口から 250mm 下流の断面の噴流中央部に供試体である伝熱管を風洞下壁面に垂直に設置した。供試体の端板の長さは円管中心から測って下流へ $11D$ ($D=31.8\text{mm}$) である。

実験に使用した供試モデルの概要を図 2 に示す。直径 $D=31.8\text{mm}$ の円柱表面にフィンとして高さ 12.7mm 、厚さ (表 1 中の t) 1.2mm の帯状の薄板が螺旋状に巻かれている。帯状の薄板として平板状のものと、それに幅 2mm 、深さ 7mm の切れ込みが入り、それに若干ひねりが加えられた針状のもの 2 種類を使用した。以下、前者をソリッドフィン^{(1)~(3)}、後者をセレイティッドフィン^{(1)~(3)}と称す。このセレイティッドフィンはソリッドフィンより周囲の流れに乱れを生じさせ、伝熱特性を増加させる特徴を有する。フィン外径 D_f はいずれも 57.2mm である。フィンのピッチ Y_p は図 3 に示すように 3.63 , 5.08 , 8.47 , 25.4mm と変化させた。実験に使用した供試体の仕様一覧を表 1 に示す。

流れ場の測定には直径 $5\mu\text{m}$ のタングステン線をセンサとする I 型熱線プローブと定温度形熱線流速計を使用した。流れ場への影響を最小限に抑えるために主流に平行に直径 4.7mm のプローブを下流から挿入した。熱線は渦放出に因る速度変動を測定するために円柱のスパン方向 (Z 方向) に平行に張られており、トラバース装置により流れ方向 (X 方向) および流れに垂直方向 (Y 方向) に 0.1mm の刻みで位置決めが可能である。測定はコヒーレンス測定の場合を除き円柱スパン中央 $Z=0\text{mm}$ の $X-Y$ 断面上にて行った。

速度変動特性として、速度変動強さ u' 、速度変動のスペクトル分布を測定した。 u' は、速度変動の標準偏差を主流速度 U_∞ で除した値として定義する。0.1 秒間の速度変動の実効値を 80 回平均化処理しており、これは直径

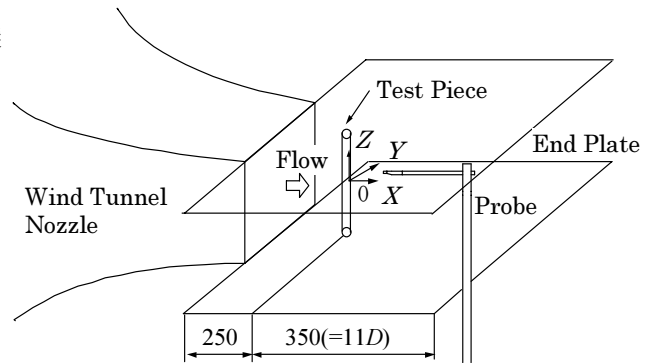


Fig.1 Experimental apparatus and co-ordinate axes

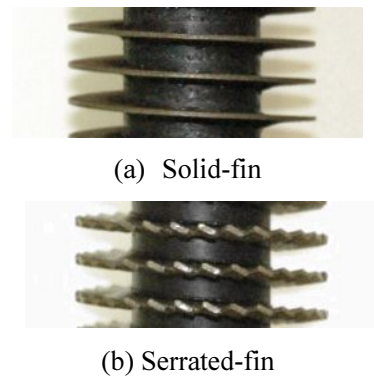


Fig.2 Shape of a fin-tube ($Y_p=8.47\text{mm}$)

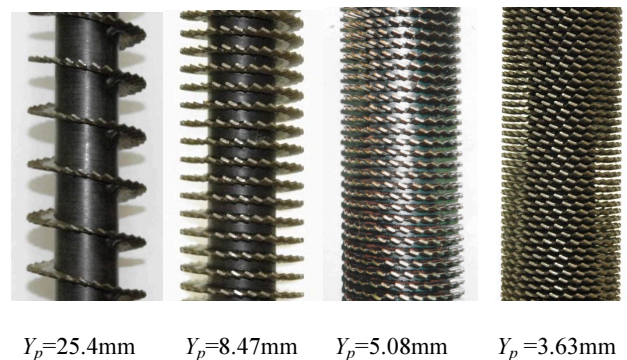


Fig.3 Change in geometry of serrated-fin for Y_p

$D=57.2\text{mm}$ の裸管から放出された渦約 290 個分に相当する。速度変動スペクトルは 500Hz レンジにて 48 回の平均化処理を、コヒーレンスは 80 回の平均化処理を行った。

主流速度 U_∞ は 5~30m/s の範囲で変化させた。このときレイノルズ数は $1.1 \times 10^4 \sim 6.3 \times 10^4$ となる。これは臨界レイノルズ数未満であり、ストローハル数 S_t は約 0.2⁽⁴⁾ となる。主流中の乱れは流速が 30m/s の時主流の 1%程度である。

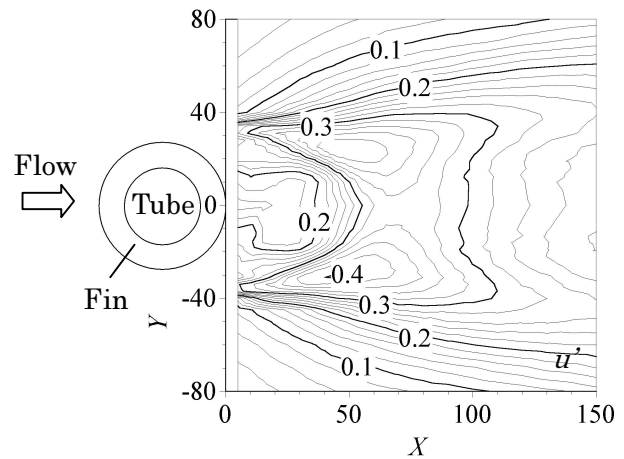
3. 実験結果および考察

直径 $D=31.8\text{mm}$ の円柱に例として $Y_p=5.08\text{mm}$ のセレイティッドフィンを設置した場合の後流の速度変動強さ分布を図 4(a)に示す。円柱後流には X 軸にほぼ対称に二つの速度変動強さ最大点が存在する。しかしフィンが無い場合に比べ最大点が下流側へ若干移動し、最大値が低下する。また、後流がフィン無しの $D=31.8\text{mm}$ の場合より Y 方向により広がった分布を示すが、フィン外径 D_f サイズの円柱 $D=57.2\text{mm}$ のそれより狭く、ちょうど二つの中間に相当する。

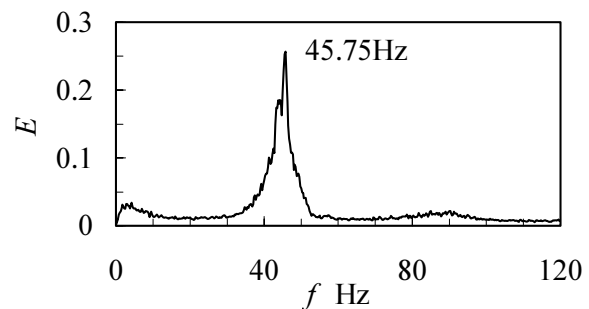
速度変動強さ最大点における速度変動スペクトルを図 4(b)に示す。この図には 45.75Hz に単一の卓越したピークがみられ、周期性の強い速度変動が生じていることがわかる。この変動の原因を調べるために、対称的に存在する二つの速度変動最大点にそれぞれ熱線を挿入し、速度変動の位相差を測定した。その結果、位相が 180 度となり、対称な二つの速度変動が逆位相であることが判った。この結果は、フィン無しの場合と同様の結果であり、フィン付き円柱後方ではカルマン渦列が形成されて

Table 1 Specifications of the circular cylinder with fin

| Tube Type | Y_p mm | D_f mm | D mm | t mm |
|----------------|----------|----------|--------|--------|
| Solid-fin tube | 25.4 | 59.2 | 31.8 | 1.2 |
| Solid-fin tube | 8.47 | 57.2 | 31.8 | 1.2 |
| Solid-fin tube | 5.08 | 57.2 | 31.8 | 1.2 |
| Solid-fin tube | 3.63 | 57.2 | 31.8 | 1.2 |
| Serrated-fin | 25.4 | 59.2 | 31.8 | 1.2 |
| Serrated-fin | 8.47 | 57.2 | 31.8 | 1.2 |
| Serrated-fin | 5.08 | 57.2 | 31.8 | 1.2 |
| Serrated-fin | 3.63 | 57.2 | 31.8 | 1.2 |
| Bare tube | | | 31.8 | |
| Bare tube | | | 57.2 | |



(a) Contour map of u'



(b) Spectral distribution of u'_{max}

Fig.4 Characteristics of velocity fluctuation in the wake of the circular cylinder with serrated fin ($U_\infty=10.0\text{m/s}$, $Y_p=5.08\text{mm}$)

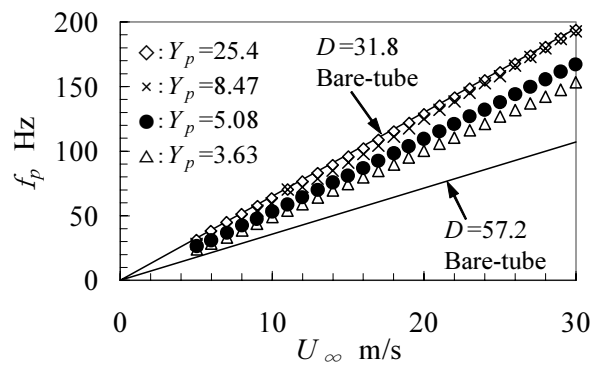
いることがわかる。

図 5(a)と(b)は、それぞれソリッドフィンとセレイティッドフィンのピッチ Y_p を 25.40, 8.47, 5.08, 3.63mm と変化させた場合の主流速度 U_∞ に対するピーク周波数の変化を表したものである。比較のため、直径 $D=31.8\text{mm}$ の円柱と、フィン外径に等しい直径 $D=57.2\text{mm}$ の円柱の結果も示している。フィンのピッチが変化しても卓越したピークの数は一つであり、その周波数の流速に対する勾配がピッチの増加と共に増加している。すなわちフィン付き円柱からの渦放出周波数は、 $D=31.8\text{mm}$ の円柱とフィン外径に等しい $D=57.2\text{mm}$ の円柱の渦放出周波数の間にはいつていることから、渦放出に関しフィン付き円管をある単円管としてみなすことができ、フィンはその目安の直径を変化させ、フィンのピッチが小さく密になるにつれて、それが増加すると理解することができる。なお、図 5 (b) のセレイティッドフィンのピッチ Y_p が 5.08 と 3.63mm の場合、主流速度が約 20m/s 以上では渦放出周波数が

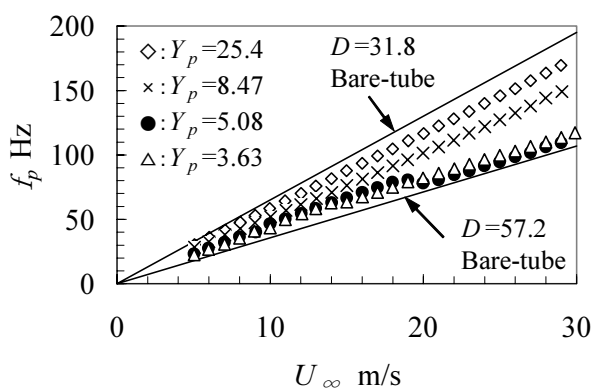
$D=57.2\text{mm}$ の円柱とほぼ同じとなった。この理由は、ピッチが小さい平板状のフィンにスリット状の切れ込みを入れ、さらにひねりを加えたことで、フィン間の流れの乱れが増加し流れ難くなり、流れがフィンの外側からはく離れたため、と考えられる。

図 5(a)のソリッドフィンと図 5(b)のセレイティッドフィンを同じフィンのピッチ Y_p に対して比較すると、セレイティッドフィンの方が渦放出周波数が低い。ここで渦放出に関連する代表寸法として図 6 に示す円柱後流の速度分布で図中の A と B の面積が等しいとして定義した排除厚さ δ を考える。図 7 はこの δ をフィンのピッチ Y_p に対して表したものであり、ソリッドフィンを▲印、セレイティッドフィンを●印で示している。この図から、両フィンとも Y_p の低下にともなう δ が増加していること、ソリッドフィンよりセレイティッドフィンの方が大きいことがわかる。これらは、フィンが密になるにつれて渦放出に関連する代表寸法が増加するという上述の考察を裏付けるものである。

鈍等物体の抗力は主に流れのはく離に起因する形状抗力が支配的であり、これは物体の直径にほぼ比例し増加すると考えられるため、フィン付円柱の目安の直径を以下の方法で求めた。すなわちフィン付き円柱からの渦放出周波数が単一であり、フィン無し円柱 $D=31.8\text{mm}$ とフィン外



(a) Solid-fin tube



(b) Serrated-fin tube

Fig.5 Change of vortex shedding frequency f_s with the pitch of fin Y_p

径 D_f サイズの円柱 $D=57.2\text{mm}$ からの渦放出周波数の間にあること、フィン無し円柱の場合のストローハル数がほぼ 0.204 であることから、フィン付きの場合にもストローハル数は 0.204 となると考え、ストローハル数 S_t を変形した次式からフィン付き円柱の目安の寸法 D_1^* を導出した。

$$D_1^* = S_t \frac{U_\infty}{f_s} = 0.204 \frac{U_\infty}{f_s} \quad (1)$$

図 8 に式(1)に U_∞ と f_s の実験値を代入して求めた直径 D_1^* を、ソリッドフィンの場合とセレイティッドフィンの場合で示している。フィンピッチ Y_p が小さくなるにつれて直径 D_1^* は増加し、ソリッドフィンに比べセレイティッドフィンの方が直径が大きくなる。すなわちフィン付き管の抗力は、フィンのピッチが小さいほど増加し、ソリッドフィンに比べセレイティッドフィンの方が大きくなると考えられる。また、セレイティッドフィンのピッチ Y_p が 5.08mm の場合、主流速度 U_∞ が 5~12m/s と 20~30m/s 時では目安の直径 D_1^* が変化し、後者が大きくなる。したがって、流速が増加するにつれて抗力が大きくなると考えられる。

スモークワイヤ法を用いてフィンの周りの流れを可視化した写真の一例を図 9 に示す。図 9(a) はフィンピッチが $Y_p=25.4\text{mm}$ のソリッドフィンの結果であり、図 9(b) はフィンピッチが $Y_p=5.08\text{mm}$ のセレイティッドフィンの結果である。ソリッドフィンの場合、螺旋状に巻かれ

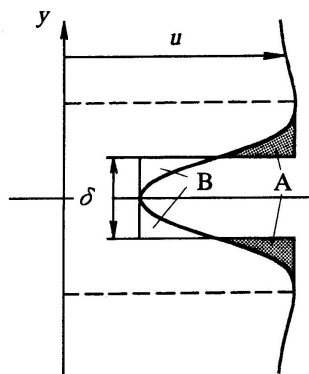
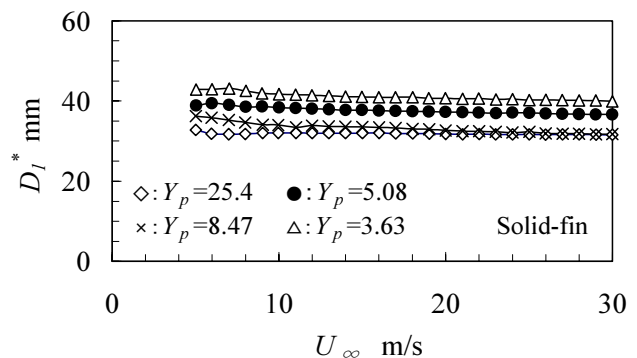


Fig.6 Definition of wake width δ



(a) Solid-fin tube

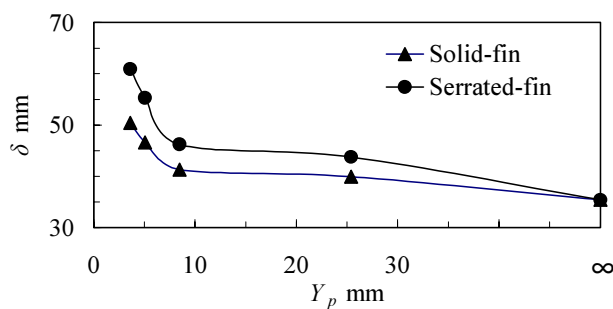
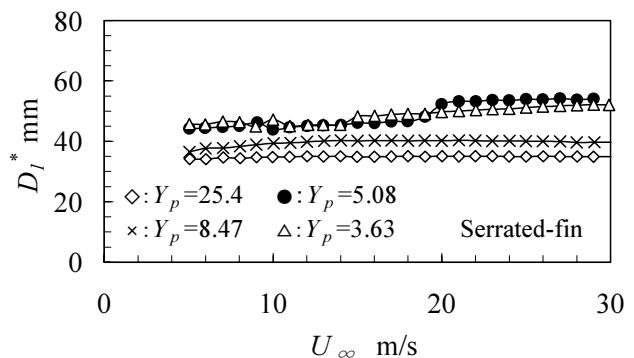


Fig.7 Wake width δ against the pitch of fin Y_p
($U_\infty=10.0\text{m/s}$)



(b) Serrated-fin tube

Fig. 8 Variation of the characteristic length against the freestream velocity

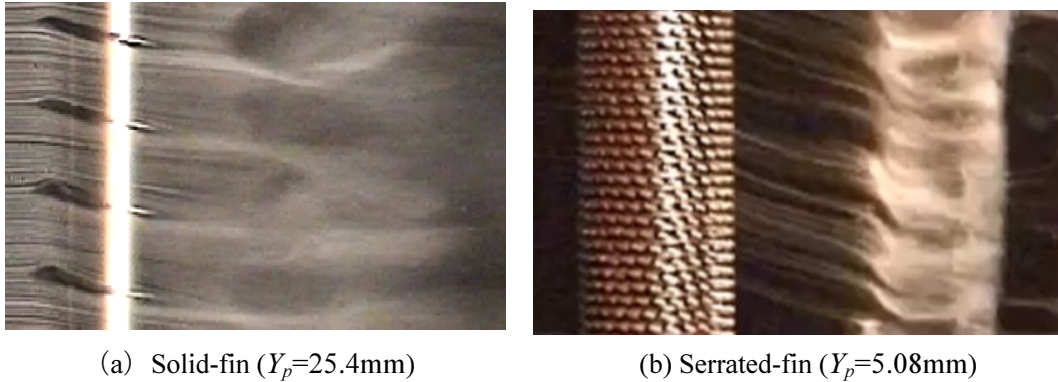


Fig. 9 Flow visualization by smoke wire method

たフィンにより流れが下方へ偏向していることがわかる．すなわちソリッドフィンではフィンの傾きが抗力の発生原因の一つであると考えられる．一方，図 9(b)のセレイティッドフィンではフィン先端の微小突起の傾きにより流れが下方へ大きく偏向しており，この微小突起の傾きが抗力の発生に寄与していると考えられる．

4. 結 論

フィンの幾何形状とピッチが伝熱管周りの速度諸特性および抗力に及ぼす影響を実験的に調査した結果，以下の結論を得た．

- (1) 渦放出に関してフィンは円柱の直径を増大させる効果を有する．すなわち，フィンのピッチが小さくなるにつれて円柱の直径が大きくなり，抗力も増加する．
- (2) ソリッドフィンよりセレイティッドフィンの方が渦放出に関する代表寸法が大きくなり，抗力が大きくなる．
- (3) 伝熱管表面に螺旋状に巻かれたソリッドフィンおよびセレイティッドフィンには管表面付近の流れを偏向させる性質がある．抗力の発生原因の一つはフィンの傾きである．
- (4) セレイティッドフィンの先端の微小突起の傾きは管表面付近の流れを偏向させる．抗力の発生原因の一つは微小突起の傾きである．

5. 文 献

- (1) A. Nemoto, A. Takakuwa, M. Tsutsui, Flow-induced Acoustic Resonance with Various Finned Tube Banks, Flow-induced Vibration and Noise, ASME, Vol.2, AD-Vol.53-2, (1997), 311-320.
- (2) 根本晃, 原文雄, 高桑章浩, 筒井政司, 千鳥配列の熱交換器管群における気流騒音特性, 日本機械学会論文集, 65 巻 635 号, C (1999), 129-135.
- (3) 川口清司, 奥井健一, 川部泰臣, スタッガード配列セレーテッドフィン付管群の渦発生特性, ターボ機械 31 巻 3 号, (2003), 53-61.
- (4) Roshko, A., *NACA Report*, 1191, (1954).
- (5) 濱川洋充, 深野徹, 新垣将, 西田英一, フィン付き円柱からの渦放出に関する研究, 日本機械学会論文集, 65 巻 635 号 B 編, (1999-7), p2204-2211.