らせん細線などを挿入した管内における環状液膜流の研究*
(エントレインメント抑制効果の原因と実験相関式)汐崎 浩毅^{*1}, 波江 貞弘^{*1}Investigation of Annular Liquid Film Flow in Tubes
with Helical Ribs and Wires
(Experimental Correlation and Cause of the Entrainment-Suppression Effect)

Koki SHIOZAKI and Sadahiro NAMIE

The entrainment rate of liquid droplets in a two-phase annular mist flow is investigated in the helically ribbed and wired tubes with the aim of suppressing the droplet entrainment to improve evaporative heat transfer in various steam generators of the one-through type. The results show that the entrainment rate in the tubes is lower than that in smooth ones. An experimental correlation is introduced between the suppression rate of the entrainment and the parameters including liquid and gas flow rates and the shape of the ribs or wires. The decrease in number of disturbance waves is supposed to be the main cause of the entrainment suppression and is brought about by the direct interaction between the disturbance waves and the helical ribs or wires.

Key Words: Multiphase Flow, Annular Mist Flow, Liquid Film Structure, Helically Wired Tube, Droplet-Entrainment Suppression, Experimental Correlation

1. ま え が き

貫流ボイラや原子炉の蒸気発生器、ヒートポンプの蒸発器など貫流蒸気発生装置の小形化を図るうえで、高乾き度領域での蒸発管中心部への多量の液滴発生(エントレインメント)は、管壁に沿う液膜流のドライアウトを早め伝熱性能を劣化させると同時に、蒸気乾き度の向上を阻害する要因となる。本研究は、このエントレインメントの抑制を目的として、管壁面にリブや細線をらせん状に挿入した円管について、らせん溝構造や気液流量を変化させた場合の環状噴霧流の流動状況を実験的に検討したものである。

著者ら⁽¹⁾は、すでにらせん溝構造によるエントレインメント抑制効果について、いくつかの供試体について測定結果を報告している。本報告ではさらに測定範囲を広げるとともに、これらの測定値をもとにらせん溝構造の形状、気液流量とエントレインメント抑制効果の関係を整理し、実験式を導いた。また、その抑制効果の原因を調べるための実験を行ったので、これらの結果について報告する。

2. 実験装置および計測

管内のエントレインメント抑制効果の測定に用いた装置および実験方法(以下実験 A と称する)は前報⁽¹⁾と同一であり、ここでは説明を割愛する。実験 A で用いた供試管は、内径 D が 19.5 mm のアクリル製円管の内壁に、図 1 に示すようならせん溝構造を設けたものである。らせん溝構造は、数条の長方形断面のリブを接着したもの、または円形断面の細線をスペーサで固定して挿入したものからなっている。前報で扱ったものも含めて、供試管の種類、寸法等を液流量条件とともに表 1 にまとめて示す。

実験では前報と同様、供試管内で環状噴霧流を形成させた後、後流において内径 12 mm のサンプリング

図 1 供試管形状

* 原稿受付 平成 2 年 8 月 3 日。

*¹ 正員、船舶技術研究所 (〒181 三鷹市新川 6-38-1)。

表 1 供試管の種類および液流量(実験 A)

Symb.	No. Tubes	Rib Ht. x B. h x b mm	Wire D. d mm	H. Pitch p mm	H. Number n	Total L. Flow		N. Parameter $\pi D/p$
						W_i kg/s	U_i m/s	
○	No. 1 Smooth	-	-	-	-	0.083	0.279	-
⊖	"	-	-	-	-	0.050	0.167	-
⊙	"	-	-	-	-	0.033	0.112	-
⊗	"	-	-	-	-	0.017	0.056	-
△	" 2 S. Ribbed	1.0x5.0	-	∞	8	0.083	0.279	0.0
□	" 3 H. Ribbed	1.0x5.0	-	1000	8	"	"	0.061
◇	" 4 H. Ribbed	2.0x2.5	-	1000	8	"	"	0.061
▽	" 5 H. Ribbed	-	3.2	500	4	"	"	0.122
●	" 6 H. Wired	-	2.0	200	16	"	"	0.306
▲	" 7 H. Wired	-	2.0	200	8	"	"	0.306
★	"	-	"	"	"	0.050	0.167	"
▲	"	-	"	"	"	0.033	0.112	"
▲	"	-	"	"	"	0.017	0.056	"
⊙	" 8 H. Wired	-	2.0	200	4	0.083	0.279	0.306
■	" 9 H. Wired	-	2.0	200	3	"	"	0.306
◆	" 10 H. Wired	-	2.0	200	2	"	"	0.306
▼	" 11 H. Wired	-	2.0	200	1	"	"	0.306
▲	" 12 H. Wired	-	2.0	800	4	"	"	0.0765
⊠	" 13 H. Wired	-	2.0	400	4	"	"	0.153
◇	" 14 H. Wired	-	2.0	100	4	"	"	0.612
▽	" 15 H. Wired	-	1.0	200	4	"	"	0.306

表 2 供試管の種類と液流量(実験 B)

Symb.	No. Tubes	Wire D. d mm	H. Pitch p mm	H. Number n	Total L. Flow	
					W_i kg/s	U_i m/s
⊗	No. 1 H. Wired	2.0	200	4	0.050	0.265
⊗	"	"	"	"	0.033	0.176
⊗	No. 2 H. Wired	"	400	"	0.050	0.265
⊗	"	"	"	"	0.033	0.176

管によって環状液膜と気流中の液滴を分離した。さらにそれぞれサイクロン分離器で液だけを分離し、その流量 W_f , W_d を計測した。

つぎに、らせん溝構造によるエントレインメント抑制の原因を調べる実験(以下実験 B と称する)では、抑制効果に対する遠心力の寄与を調べるため、円柱外面上の液膜流を対象とした。装置の概要を図 2 に示す。供試管は、外径 20 mm の円柱の外側にらせん溝構造を設け、その周囲を内径 34 mm の外管で覆って、全体を二重管構造としたものである。水は円柱下部の円筒焼結金属部より図 2 のように環状流路内にしみだし、円柱外面上に液膜が形成される。この場合、らせん溝構造に起因する回転の遠心力は、実験 A の場合とは反対に液膜から液滴をひきはがす方向に作用する。供試管の種類、寸法、液流量条件などを表 2 に示す。

実験 B において、円柱外面上の液膜流量を W_f 、外管の内壁を流れる液膜流量を W_f' 、両者のすきまで気相中を液滴となって流れる液流量を W_d とする。各流量は以下のような方法で求める。まず、供試管部の後流で、図 2 中に示すような内径 24 mm のサンプリング管によって、 W_f と $W_f' + W_d$ を分離、計量する。つぎに、図 2 のような液膜吸出し部を設けた外管に取り替え、同じ流量条件で実験を行い、吸出し部から吸出される W_f' を計量する。これらより、 W_f , W_d , W_f' が

図 2 実験装置 (実験 B)

得られる。

また、液膜抵抗法により、円柱面上における液膜厚さの時間変化も調べた。計測装置および方法は、前報で用いたものと同様である。

3. 円管内におけるエントレインメントの実験整理式

らせん溝構造物によるエントレインメントの低減に対しては、リブや細線の高さ、らせんピッチや条数、空気流速ならびに液流量などが影響を及ぼす⁽¹⁾。そこで前報ならびに実験 A で得られた結果について、これらの諸因子を含む無次元数による整理を試みる。無次元数としては、各供試管におけるエントレインメント $E \equiv W_a / (W_a + W_l)$ と、それと同一の空気流速、液流量における平滑管での値 E_s との比 E/E_s 、リブ高さ h や細線径 d と最大液膜厚さ δ との比 h/δ 、 d/δ (以下 d/δ で代表させる)、らせん強さすなわちらせんの方向が管軸となす角度の正接 $\pi D/p$ 、およびらせん条数 n の四つを用いる。

E/E_s はエントレインメント抑制効果を示す無次元数であり、この値が 1 以下のとき抑制効果が存在することを意味する。

d/δ は、液膜界面波の最大液膜厚さ δ に対するリブや細線高さの相対的な大小関係を表す無次元数である。 δ については、同一の空気流速、液流量の平滑管に対する実験⁽⁴⁾ から求めた。すなわち管壁から y の位置における液膜の時間的存在割合 η を計測し、その値が 1% となる位置で定義を行った⁽¹⁾。平滑管での値を用いたのは、実用上の便宜性を考慮したためである。図 3 は前報で報告した、見掛けの空気流速 U_g 、液流速 U_l と δ の関係を、参考のため再記したものである。図 3 中には従来の研究結果⁽²⁾⁽³⁾ も参考のため示している。これらの測定値から、 δ を文献(2)で用いられたものと同じ形式の以下の実験式で整理した。

$$\delta = 185 \cdot W_l^{0.33} / U_g \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 δ 、 W_l 、 U_g の単位は、それぞれ mm、kg/s、

図 3 平滑管における最大液膜厚さ

m/s である。適用範囲は、 $W_l = 0.017 \sim 0.083$ kg/s, $U_g = 22 \sim 54$ m/s である。

空気流速および総液流量の直接的な影響は、この δ の中に含まれることになる。

図 4(a)～(c)は、 E/E_s を縦軸にとり、横軸の d/δ に対して示したものであり、図 4 中のパラメータはそれぞれ $\pi D/p$ 、 n 、 W_l である。前報⁽¹⁾でも報告したよ

(a) $\pi D/p$ の影響

(b) n の影響

(c) W_l の影響

図 4 無次元数による実験結果の整理(実験 A)

うに、全体的な傾向として E/E_s は、 δ の減少や溝構造物の高さ d の増加、したがって d/δ の増加とともに減少している。そして E/E_s は最小 0.4 程度まで低下して、エントレインメント抑制効果が現れている。つぎに各パラメータの影響をみると、 $\pi D/p$ に対しては、その増加 (p の減少) とともに抑制効果が大きくなっている。らせん条数 n については、初めその増加とともに抑制効果が大きくなるが、 $n=4, 8$ で飽和し、 $n=16$ では逆に効果が小さくなっている。条数が多い場合のこのような傾向は、細線数が過剰に多くなって流路を空間的にふさぎ、液膜の円滑な流れを阻害するようになるためと考えられる。一方、総液流量 W_l は $E/E_s-d/\delta$ の関係にあまり影響しないことがわかる。

以上の結果を総合して、エントレインメント抑制効果を次の式で整理した。

$$E/E_s = k \cdot n^j (\pi D/p)^{-0.353} / (d/\delta) \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで上に述べた条数 n に対する傾向を考慮するため、 k, j の値は、 $n=4$ と 8 の中間を境界として、 $n < 6$ に対してそれぞれ 0.55、 -0.263 、 $n > 6$ で 0.135、0.521 とする。なお、後者の領域はエントレインメント抑制効果が減少し、流動抵抗が増加するため、実用上は重要でない。

図 5 は、表 1 に示したすべてのらせん構造管における測定値を式 (2) を用いて表示しなおしたものである。 $d=1 \sim 3.2$ mm、 $p=100 \sim 1000$ mm、 $n=1 \sim 16$ および $W_l=0.017 \sim 0.083$ kg/s の実験範囲に対してはほぼ $\pm 20\%$ の範囲で整理できることがわかる。ただし、図 5 中で溝構造高さ d が小さい場合や、 d/δ が非常に大きな領域では、上記の範囲から外れている。前者の例として、 d が 1 mm の No.3 リブ付き管 (口印) と No.15 細線挿入管 (▼印) の一部の測定値では、溝構造物の断面形状や配置状況によって、測定値がばらつくものと思われる。一方、後者の例として、 d が 3.2 mm と大きい Mo.5 リブ付き管 (▽印) や No.7 細線挿入管 (▲印) で、液膜流量が少なく d/δ が非常に大きくなる領域では、エントレインメント抑制効果が飽和し、式 (2) の反比例関係が成立しなくなるものと考えられる。

4. エントレインメント抑制の原因

気液界面の様子を液膜抵抗法で調べると、らせん溝構造の付加により、気液界面のじょう乱波が減少して液膜が平たん化していることがわかる。これについては前報ですでに報告した⁽¹⁾。一般に気相中の液滴は、じょう乱波の波頭から発生すると考えられており、こうしたじょう乱波の減少がエントレインメント抑制の

主要原因となっていると推測される。一方、じょう乱波減少の原因については、2 とおりの考え方ができる。一つは波に対するらせん溝構造の直接的な干渉であり、もう一つは流体のらせん回転による遠心力の作用である。実験 A では遠心力が液膜を壁面に押し付ける方向に働いており、これが液膜の平たん化に寄与している可能性がある。そこで、気液界面において遠心力が逆方向に作用する実験 B を行い、どちらの要因が支配的であるかを検討した。

図 6 は、実験結果を実験 A の場合と同じ無次元数を用いて整理したものである。図 6 中には、参考のため実験 A の結果の代表例も破線で示している。図 6 において、横軸 d/δ の値が大きいくことは、 d および W_l が一定の条件下では、式 (1) から明らかなように空気流速が大きいくことに対応する。このとき液膜流速も大きくなり、そのらせん回転の角速度も大きくなって遠心力が増大する。遠心力が逆方向に作用する実験 B の場合も、実験 A 同様に d/δ の増加にしたがって E/E_s が減少し、しかもそのこう配は両者でほとんど等しくなっている。

図 7 は、液膜抵抗法で得られた円柱外面上の気液界

図 5 実験式 (2) による実験結果の整理

図 6 無次元数による実験結果の整理 (実験 B)

図 7 液膜厚さの変動

面波の様子を、平滑面の場合とらせん溝構造を付加した場合で比較したものである。計測は、円周上 180° 離れた 2 位置で同時に行っている。前報⁽¹⁾ に示した実験 A (円管内) の場合ほど顕著ではないが、やはりらせん溝構造によってじょう乱波が減少し、液膜が平坦化している様子が示されている。

すなわち、遠心力によるじょう乱波の増大効果はさほど強くなく、液膜に対するらせん溝構造の直接的な干渉が液膜平坦化の主な原因となっていることを示している。

なお、エントレインメントの抑制に対しては、液膜の平坦化という要因以外に、気相の回転成分による遠心力で気相中の液滴が外側に押し付けられ、減少するというような機構も考えられる。この場合実験 A では管内面方向、実験 B では外管内面方向にそれぞれ遠心力が作用する。いずれにしても気相中の液滴は減少

することになり、図 6 の傾向とも矛盾しない結果が予想される。しかし今回の実験の範囲内では、こうした作用が、上述のじょう乱波減少による効果に比べ、どの程度の影響をもつかを区別して見積もることはできなかった。

5. 結 果

リップ付き管や細線挿入管などのらせん溝構造管内における環状噴霧流について実験的検討を行い、つぎの結論を得た。

(1) らせん溝構造によるエントレインメント抑制効果は、 E/E_s , d/δ , n , $\pi D/p$ の四つの無次元数を用いて式(2)で整理できる。その精度は 20% 程度である。

(2) エントレインメント抑制の主要因と思われるじょう乱波の減少に関して、液体のらせん回転による遠心力の作用の影響は小さく、主に液膜に対するらせん溝構造物の直接的な干渉が原因になっていると推測される。

文 献

- (1) 波江・汐崎, らせん細線などを挿入した管内における環状液膜流の研究(蒸発伝熱の改善を目的とするエントレインメント抑制について), 機論, 56-524, B (1990), 1113.
- (2) 赤川・藤井・ほか 3 名, 施回環状噴霧流に関する研究(第 3 報, 液膜の流動特性), 機論, 49-444, B (1983), 1713.
- (3) 世古川・上野・田中, 気液環状ミスト流の流動特性(第 2 報, 主要パラメータの相関式について), 機論, 51-466, B (1985), 1798.
- (4) 汐崎・波江, らせん溝構造管内における環状噴霧流の研究(その 1, エントレインメント量および液膜界面波の計測), 第 53 回船舶技研講演集, (1989-5), 58.