らせん管内気液環状二相流における液膜厚さの諸特性*
(鉛直らせんの場合)渡 辺 修^{*1}, 中 島 謙 司^{*2}, 藤 田 秀 臣^{*3}Characteristics of Liquid Film Thickness of Air-Water Annular
Two-Phase Flow in Helically Coiled Tubes
(Vertical Coil)

Osamu WATANABE, Kenji NAKAJIMA and Hideomi FUJITA

Experimental study has been carried out to clarify the characteristics of the liquid film thickness of air-water two-phase flow in helically coiled tubes of 500 and 1 000 mm coil diameters and 25 mm tube diameter. The wave of liquid film on the outer side of a coil differs from that on the inner side in not only the wave height but also the wave shape. The liquid flow rate does not affect the film thickness at the inner side, whereas at the bottom and the outer side, it makes the film thicker. The center of gravity of liquid film is in the region about 45 degrees inward from the top or the bottom of the tube. The coil diameter has little effect on the characteristics of the liquid film.

Key Words: Multiphase Flow, Helically Coiled Tube, Annular Two-Phase Flow, Film Thickness, Circumferential Distribution, Film Inversion

1. 緒 言

らせん管内の気液二相流は種々の熱交換器, 化学反応装置でみられるが, これらの機器における主たる伝熱領域である対流蒸発域での伝熱特性を明らかにすることは, 装置の伝熱性能を把握するうえで重要であり, これまでにも種々の観点から研究がなされている^{(1)~(5)}. 著者らも前報⁽⁶⁾において, らせん伝熱管の対流蒸発域における伝熱実験を行い, 管周方向の壁温分布が流体の質量速度, クオリティによって大きく変化することなどの特徴を明らかにした. このような壁温分布の変化は, らせん管内においても水平直管内の対流蒸発域におけると同様, 基本的には管周上の液膜厚さの分布に支配されるものと考えられる. したがって, らせん管内の環状流域の熱伝達特性を解明するためには液膜厚さの特徴を明らかにすることが重要である.

直管内の環状流域の液膜については系統的な研究がなされ, その特徴が明らかになってきている⁽⁷⁾. これらのうち, らせん管内の二相流と同様, 重力が流れと

直角方向に作用する水平直管では, 気相流速がかなり大きい場合でも液膜厚さが管の周方向に変化することなど, 鉛直直管とは液膜の諸性質が大きく異なることが指摘されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾. これに対し, らせん管内の環状二相流における液膜の特性に関する研究は非常に少なく⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾, また, それらは触針法によって液膜厚さを求めたものであるため, 液膜表面に形成される波形の特徴については, 久米ら⁽¹²⁾がわずかに述べている程度で, ほとんどわかっていないのが現状と思われる.

らせん管内の環状流では水平管内の重力に加えて, さらに遠心力の作用が重要であるが, 気液両相には速度差があるため, 両相に作用する遠心加速度は気相, 液相の流量によって複雑に変化するものと考えられる. このため, らせん管内の液膜の諸特性を明らかにするには, 種々の気液流速について, 管周方向の液膜の分布状況と, 波形の特徴に関する詳細なデータの蓄積が必要である.

このような背景のもとに, 本研究では管内径が25 mmで, らせん径が500 mmと1 000 mmの2種類のらせん管を用いて種々の気液流速のもとで実験を行い, 液膜厚さの諸特性について検討する.

* 原稿受付 平成4年4月17日.

^{*1} 正員, 愛知工業大学(〒470-03 豊田市八千草1247).^{*2} 正員, 日本電装(株) (〒448 刈谷市昭和町1-1).^{*3} 正員, 名古屋大学工学部 (〒464-01 名古屋市千種区不老町).

2. 実験装置と実験方法

図1に実験装置の概要を示す。二相流は空気-水系であり、気液の混合は、内径25 mmの焼結金属製円筒壁から水を流入させるシンタ給水方式である。気液混合部の下流に、らせん角(1.8°)と同一角度に傾斜させた長さ4.5 m、管内径25 mmの直管助走部を設け、これにらせん管テスト部を接続した。らせん管テスト部は管内径 $d=25$ mm、肉厚2.5 mmの銅管をらせん径 $D=500$ mmと $D=1000$ mmに巻いたものであり、巻き数はいずれも3巻きである。また比較のため、傾斜角がらせん角と同じ1.8°上向きの傾斜直管でも実験を行った。

液膜厚さは電気抵抗法によって測定した。このために、流れが発達したと考えられる⁽¹³⁾ 2.5巻きめでらせん管を切断し、切断面から20 mm上流側の断面に、図2のように管周方向8点の管壁に、直径1.0 mmのステンレス鋼製電極を外径5 mmの亚克力樹脂製円筒を介して取付けた。この際、電極先端が管内壁面と平滑になるように加工するとともに、電極取付け後再び管の切断部をつなぐ際にも段差が生じないように十分配慮した。この電極と銅製の管壁間の電気抵抗が液膜厚さによって変化することを利用して液膜厚さを測定するが、その際の電気信号の安定性を高めるとともにノイズを小さくするため、液膜部の抵抗を図2のようにホイートストンブリッジの一边に並列に接続し、

図1 実験装置

図2 液膜厚さの測定法

これを動ひずみ計に接続した。なお、測定部が曲管であることから、出力電圧と液膜厚さの校正に同心円筒を利用した方法を用いることができないため、実験電極と同一寸法の電極を平板上に設け、これによって校正曲線を得た。この校正曲線を用いて液膜の存在確率分布を求め、触針電極を用いて得た分布との間により一致が得られることを確認し、この方法は適切なものであると判断した。

実験は、測定部における液相見掛け流速 $j_L=0.015\sim0.11$ m/s、気相見掛け流速 $j_G=20\sim53$ m/s、圧力1.1~1.3 bar、温度21~25°Cで行った。このとき、流動様式は j_L, j_G ともに小さい範囲を除いて環状流であった。

3. 実験結果と考察

3.1 液膜波形の特徴 らせん管内の液膜波形の代表例を傾斜直管内の波形とともに図3および図4に示す。図3, 4とも(a), (b)はらせん径 $D=500$ mm, (c)は $D=1000$ mmのらせん管, (d)は傾斜直管の結果である。

図3は本実験における中程度の液相見掛け流速であ

図3 液膜波形 ($j_L=0.047$ m/s)

る $j_L = 0.047 \text{ m/s}$ の結果である。図 3(a) の気相見掛け流速 $j_G = 20 \text{ m/s}$ の流動様式は環状流であるが、液相は管底部に集中しており、液膜の管周方向の分布は傾斜直管の状況と類似である。しかし、 j_G の増大とともに、液膜厚さが最も厚くなる位置は管底部 $\psi = 270^\circ$ かららせんの内側方向へ移動し、本実験における最大気相流速である図 3(b) の $j_G = 53 \text{ m/s}$ では、らせん内側 $\psi = 0^\circ$ で液膜が最も厚くなる。また、液膜上に現れる波高の高いじょう乱波の波形も管周方向に大きく変化し、らせん外側付近では波高が非常に小さくなるとともに、波頭部が長くなる特徴〔図 3(b) 中①〕がみられる。一方、図 3(b) と同じ条件下の傾斜直管内の液膜波形を示した図 3(d) では、管周方向に比較的一様な液膜がみられ、じょう乱波もらせん管の場合と比べて鋭いピークを示す点が特徴的である。図 3(c) は $D = 1000 \text{ mm}$ らせんにおける液膜波形であるが、図 3(b) の $D = 500 \text{ mm}$ らせんの場合とほぼ同様である。

図 4 は本実験における最大の液相流速 $j_L = 0.11 \text{ m/s}$ の場合である。図 4(a) の $j_G = 20 \text{ m/s}$ の場合には、図 3(a) と同様に管底部の液膜が厚く、直管内の流動と類似の状況を示している。また、図 4(b) の $j_G = 53 \text{ m/s}$ の

でも図 3(b) と同様、管周方向に液膜厚さ、波形とも大きく変化し、特に管頂部 $\psi = 90^\circ$ から $\psi = 135^\circ$ にかけて液膜が非常に薄くなっている。しかし、らせん外側 $\psi = 180^\circ$ の液膜厚さが、両側の $\psi = 135^\circ$ および $\psi = 225^\circ$ よりも厚くなる点では、図 3(b) の $j_G = 0.047 \text{ m/s}$ の結果と異なっている。また、このらせん外側 $\psi = 180^\circ$ における波〔図 3(b) ②〕は波高が高い点では $j_L = 0.047 \text{ m/s}$ の場合と異なっているが、波頭部が長い点は類似であり、図 3(d) の傾斜直管の場合のように鋭いピークを示す図 3(d) 中③の波や、らせんの内側における波形とも異なっており、らせん外側の波に特有な性質であると思われる。図 4(c) は $D = 1000 \text{ mm}$ らせんの結果であるが、 $D = 500 \text{ mm}$ らせんの場合とは大きな差はない。

3.2 液相の存在確率分布による液膜波形の考察

$D = 500 \text{ mm}$ のらせん管における $j_G = 53 \text{ m/s}$ のときの液膜の存在確率 F を正規確率紙上にプロットした結果を図 5 に示す。図 5(a) のらせん内側 $\psi = 0^\circ$ では j_L が液膜の存在確率分布に及ぼす影響は非常に小さいのに対し、図 5(b) の管頂部 $\psi = 90^\circ$ 、図 5(c) のらせん外側 $\psi = 180^\circ$ 、および図 5(d) の管底部 $\psi = 270^\circ$ での分布は j_L の増大につれ大きく変化し、特にらせん外側と管底部での液膜厚さの増加が著しい。一方、

図 4 液膜波形 ($j_L = 0.11 \text{ m/s}$)

(a) らせん内側 ($\psi = 0^\circ$) (b) 管頂部 ($\psi = 90^\circ$)

(c) らせん外側 ($\psi = 180^\circ$) (d) 管底部 ($\psi = 270^\circ$)

図 5 液相の存在確率分布、 $D = 500 \text{ mm}$ らせん ($j_G = 53 \text{ m/s}$)

Whalley⁽¹⁰⁾によれば、ある位置における液膜厚さとそこを流れる液相の質量流量はほぼ比例関係にあることから、 j_G が大きい環状流では j_L の増大はらせん内側以外、特に管底部とらせん外側部分の液膜厚さと流量を増大するように作用すると考えられる。また、直管内の環状流の特徴である基底液膜〔例えば図5(a)の①の部分〕とじょう乱波(同②の部分)⁽¹⁴⁾の差は、らせんの内側では j_L が小さい場合にも明りように認められるが、らせんの外側や管頂部ではそれらの差は小さく、特に j_L が小さい場合には確率分布はほとんど直線となり、波形が正規分布の特徴をもつようになることを示している。したがって j_L の小さい場合には、管周方向の位置によって平均液膜厚さはもちろん、液膜上の波形も大きく異なったものになるといえる。

3.3 平均液膜厚さ 液膜波形から求めた局所の

平均液膜厚さ y_m を図6, 7に示す。図6, 7とも(a)は傾斜直管、(b)は $D=1000$ mmらせん、(c)は $D=500$ mmらせんにおける結果を示す。また、図6, 7には比較のため、類似な条件下で点電極法で求めた逢坂ら⁽⁹⁾およびWhalley⁽¹⁰⁾の結果も示した。

図6は液相流速 $j_L=0.047$ m/sの場合であり、図6(a)の傾斜直管では、気相流速 j_G が小さいときには液膜は管底部 $\psi=270^\circ$ に集中しているが、 j_G の増大にともない管底部の液膜は薄くなり、 $j_G=53$ m/sのときにはほとんど均一な液膜が管周にわたって存在することがわかる。このような特徴は図6(a)中の逢坂らの水平管内の液膜分布の測定結果ともほぼ一致している。これに対し、らせん管では傾斜直管と異なり、 y_m は管周方向に大きく変化し、図6(b)の $D=1000$ mm、図6(c)の $D=500$ mmのいずれの場合にも、

図6 平均液膜厚さ ($j_L=0.047$ m/s) A: 逢坂ら⁽⁹⁾, $d=26$ mm 水平直管, $j_L=0.04$ m/s, $j_G=30$ m/s, B: 逢坂ら⁽⁹⁾, 同, $j_L=0.04$ m/s, $j_G=40$ m/s, C: Whalley⁽¹⁰⁾, $d=20.2$ mm, $D=1000$ mm らせん, $j_L=0.045$ m/s, $j_G=40$ m/s

図7 平均液膜厚さ ($j_L=0.11$ m/s) A: Whalley⁽¹⁰⁾, $j_L=0.12$ m/s, $j_G=40$ m/s

y_m が最大となる位置は, j_G の増大につれて管底部 $\psi = 270^\circ$ から徐々にらせんの内側 $\psi = 0^\circ$ の方向へ移り, らせん内側での y_m はらせん外側の 3 倍程度になる。また, この程度の j_L のときには, j_G の増大によって y_m の分布が $\psi = 180^\circ$ に対してほぼ対称となり, 重力の効果に比べて遠心力の効果が増大すること示している。さらに, 本実験における平均液膜厚さの分布形状は, 管内径が本実験と異なる 20.2 mm の Whalley の結果とも, 管頂部側でやや液膜が厚くなるものの, ほぼ一致している。

一方, j_L が大きい図 7 では, j_G が大きいときの $\psi = 180^\circ$ に対する対称性はくずれ, 本実験で遠心力の効果が増大となる $j_G = 53 \text{ m/s}$ の場合でも, 管頂部側の y_m は管底部側の 1/2~2/3 程度の厚さにとどまる。また, らせん内側から頂部にかけては, j_G による y_m の変化は小さいのに対し, 管底部側の変化が著しいことが特徴的である。さらに y_m が最小となる位置は $\psi = 135^\circ$ 付近であり, その値は最も厚いらせん内側での 1/3 程度となっている。

らせん径の影響については, 図 6 の (b), (c), および図 7 の (b), (c) の比較より, この程度のらせん径の違いによる y_m の分布の差は比較的小さいことがわかる。しかし, 図 7 の $j_L = 0.11 \text{ m/s}$ では, j_G が大きいときにはらせん外側 $\psi = 180^\circ$ に Whalley⁽¹⁰⁾ が指摘しているような液膜厚さの第 2 のピークが認められるが, そのピークの大きさにはらせん径の影響が現れ, $D = 500 \text{ mm}$ らせんのほうが $D = 1000 \text{ mm}$ らせんよりも明らかに大きくなっている。

図 8 に気相流速の大きい場合の y_m に対する j_L の影響を $D = 1000 \text{ mm}$ らせんについて示す。 j_L の小さい場合には分布は $\psi = 180^\circ$ に対してほとんど対称になっている。この場合には重力の効果が増大し, 気相の二次流れによる ψ 方向の気液界面せん断力に

図 8 平均液膜厚さの分布に対する j_L の影響
 $D = 1000 \text{ mm}$ らせん ($j_G = 53 \text{ m/s}$)

よって液膜の分布が支配されていることを示している。これに対し, j_L が増大すると液膜厚さが増し, 気液界面のせん断力に比べて液膜に作用する重力の効果が顕著になり, 管底部側の液膜が厚くなると考えられる。

3.4 最大および最小液膜厚さ 本研究における最大液膜厚さ $y_{\max}$ は液相の存在確率 F の値が 0.01 になる y に, また最小液膜厚さ $y_{\min}$ は 0.99 となる y とした。図 9 に $D = 1000 \text{ mm}$ らせんの各管周部における最大液膜厚さを示す。また, 図 9 中には比較のため $D = 500 \text{ mm}$ らせんと傾斜直管における代表的な値も示した。

図 9(a) のらせん内側での $y_{\max}$ は, 気相流速 j_G が小さいときには液相流速 j_L の増大にともない大きくなるが, j_G が大きい場合には $0.8 \sim 1.0 \text{ mm}$ 程度に集中しており, j_L による変化は小さい。図 9(b) の管頂部では最大液膜厚さは j_G が小さいときには非常に小さいが, j_G の増大につれていったん増大したのち減少に転ずる。また図 9(a) のらせん内側とは異なり, j_G の大きな範囲でも j_L の影響が認められる。図 9(c) のらせん外側では, $y_{\max}$ はいずれの j_L においても j_G の増大とともに単調に減少する。また j_G の値にかかわらず, j_L の影響が顕著であり, 例えば $j_L = 0.11 \text{ m/s}$ の $y_{\max}$ は $j_L = 0.029 \text{ m/s}$ の値の 5 倍程度にも達している。さらに, j_L が大きいときには j_G の全域で図 9(b)

(a) らせん内側 ($\psi = 0^\circ$)

(b) 管頂部 ($\psi = 90^\circ$)

(c) らせん外側 ($\psi = 180^\circ$)

(d) 管底部 ($\psi = 270^\circ$)

図 9 最大液膜厚さ ($D = 1000 \text{ mm}$ らせん)

(a) らせん内側 ($\psi=0^\circ$) (b) らせん外側 ($\psi=180^\circ$)図 10 最小液膜厚さ ($D=1000$ mm らせん)

の管頂部の値より大きい、 $j_L=0.029$ m/s のように液相流速が小さいときには、 j_G の増大によって最大液膜厚さは管頂部の値より小さくなる。図 9(d) の管底部でも $y_{\max}$ は j_G の増大によって単調に減少するが、その値は図 9(c) のらせん外側の値より常に大きい。また、図 9(c) 中の $j_L=0.075$ m/s における $D=500$ mm らせん (◆印) と傾斜直管 (破線) の結果の比較より、最大液膜厚さに対するらせん径の影響が非常に小さいこと、および傾斜直管の場合との差はらせん内側と外側では顕著であるのに対し、管頂部と管底部では小さいことがわかる。

図 10 に $D=1000$ mm らせんのらせん内側と外側における最小液膜厚さ $y_{\min}$ を示す。最小液膜厚さはいずれの管周部においても最大液膜厚さの $1/5 \sim 1/10$ の値である。また、 j_G 、 j_L に対する依存性は、最大液膜厚さと類似の傾向を示すが、その程度は最大液膜厚さの場合より小さい。

3.5 管周上の液膜の重心位置 前述したように、らせん管内の二相流では、 j_G の増大にともない液膜の厚い部分がらせんの内側に移動する膜反転 (film inversion) を生じる。この現象については Banerjee ら⁽¹⁵⁾ が考察しているが、気流の二次流れを考慮しない層状流について解析しているため、本実験のような二次流れの強い環状流域に適用することはできない。ここでは、膜反転に対する j_G 、 j_L およびらせん径の影響を明らかにするため、液膜の重心位置の変化を管頂部側と管底部側にわけて、 $D=500$ mm と $D=1000$ mm らせんについて、図 11(a)、(b) に示す。ここで ψ_c は次式のように求めた液膜の重心位置であり、和は管頂部側では $\psi=0 \sim 180^\circ$ 、管底部側では $\psi=180 \sim 360^\circ$ の各 5 点についてとった。

$$\psi_c = \frac{\sum (y_m \cdot \psi)}{\sum y_m}$$

これらの図から、本実験範囲における液膜の重心位

(a) $D=500$ mm らせん (b) $D=1000$ mm らせん

図 11 液膜の重心位置

置は管頂部側では $\psi_c=45 \sim 90^\circ$ 、底部側では $\psi_c=270 \sim 315^\circ$ と常にらせんの内側にあることがわかる。その位置は j_G の増大によってらせんの内側方向に移るが、移動量は j_G の 2.5 倍の変化に対して (遠心力では 6 倍以上)、管頂部側、底部側ともに $20 \sim 35^\circ$ 程度である。一方、 j_L が増大すると重心位置は逆にらせんの外側方向に移るが、この場合の移動量は j_L の 5 倍程度の変化に対して $20 \sim 30^\circ$ 程度である。 j_G の増大は気相に働く遠心力を増し、二次流れを促進することから、液膜をらせんの内側に移動させる効果をもつものであるのに対し、 j_L の増大は液膜の速度を増し、液相に働く遠心力を大きくする結果、重心位置をらせん外側へ移すものと考えられる。

重心位置に対するらせん径の影響については、図 11(a)、(b) の結果が管頂部側および底部側ともにほぼ一致していることから、この程度のらせん径の差では液膜の分布に大きな影響を与えないものと思われる。これは、らせん径の増大は気相の二次流れを抑制し、重心位置をらせんの内側へ移す駆動力を減らすと同時に、らせんの外側へ移動させる駆動力である液相に作用する遠心力も小さくすることによって考えられる。さらに、らせん径による遠心加速度の変化量は $D=500$ mm らせん と $D=1000$ mm らせん では 2 倍であり、本実験範囲の j_L 、 j_G の変化による効果に比べれば小さいこともらせん径の差が現れなかった一因と考えられる。

4. 結 言

らせん管内の空気・水環状二相流の液膜厚さを測定し以下の結果を得た。

(1) j_G が大きい場合には、らせんの内側と外側の液膜波形は大きく異なり、外側では波頭部の長い波形となる。

(2) らせん管内の平均液膜厚さは j_G が大きいと

きにはらせんの内側で厚くなる。また j_L も大きい場合には管底部側が管頂部側より厚くなるとともに、液膜厚さの第2のピークがらせんの外側に現れる。

(3) j_G の大きなきの最大液膜厚さはらせんの内側では j_L に依存しないが、他の部分では j_L の増加にともない大きくなる。

(4) 液膜の重心位置は、管頂部側、底部側ともほぼ同一であり、管の頂部または底部から、らせんの内側方向 45° 程度までの範囲に位置する。

(5) 本実験範囲では、らせん径の違いは液膜の諸性質にほとんど影響を及ぼさない。

おわりに、本研究を行うにあたり終始適切なお指導をいただいた愛知工業大学 部谷尚道教授が、平成3年10月に逝去されたことに心から哀悼の意を表する。

また、本研究の一部は財団法人日東学術助成振興財団の助成によることを記して感謝の意を表する。

文 献

- (1) Owahdi, B., Bell, K. J. and Crain, B. Jr., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 11-12(1968), 1779.
- (2) Crain, B. Jr. and Bell, K. J., *AIChE Symp. Ser.*, 69-131 (1973), 30.
- (3) 小関・成合・古川・黒須, 機誌, 73-615(1970), 538.
- (4) Nariai, H., *J. Nucl. Sci. Tech.*, 19-11(1982), 936.
- (5) 加治・中西・森・久米・守谷・石谷, 機論, 50-451, B(1984), 650.
- (6) 渡辺・部谷・大見・藤田, 機論, 57-537, B(1991), 2104.
- (7) 日本機械学会編, 気液二相流技術ハンドブック, (1989), 293.
- (8) 世古口・逢坂・深野・森本, 機論, 48-426, B(1982), 346.
- (9) 逢坂・深野・森本, 機論, 51-468, B(1985), 2728.
- (10) Whalley, P. B., *Int. J. Multiphase Flow*, 6-4(1980), 345.
- (11) 小関, 東京大学学位論文, (1973), 82.
- (12) 久米・守谷・加治・中西・石谷, 第18回日本伝熱シンポジウム講論, (1981), 538.
- (13) 加治・森・岸本・中西, 機論, 50-457, B(1984), 2134.
- (14) 深野・逢坂・森本・世古口, 機論, 48-436, B(1982), 2589.
- (15) Banerjee, S., Rhodes, E. and Scott, D. S., *AIChE J.*, 13-1(1967), 189.