

ヘリカルコイル内強制流動沸騰の熱伝達特性と流動様相

大河瀬 睦人* 永井 二郎* 吉川 信治**

Heat Transfer Characteristics and Flow Situations of Forced Convective Boiling inside Helically Coiled Tube

Mutsuhito DAIGASE*, Niro NAGAI* and Shinji YOSHIKAWA**

(Received January 31, 2007)

The helically coiled tube of heat exchanger is used for the evaporator of prototype fast breeder reactor "Monju". This report aims at the grasp of relation between two-phase flow phenomena and heat transfer characteristics of forced convective boiling of water inside helically coiled tube, especially focusing on oscillation of transition point. A transparent double tube made of glass is used as a heat exchanger. Water flows up inside helical tube and the high temperature oil flows down in the outside tube. The oscillation of the transition point was observed, that is mainly caused by intensive nucleate boiling near the dryout point and evaporation of thin liquid film flowing along the surface. Fluctuations of local heat flux, local temperature, pressure and flow velocity can be explained with relation to visualized flow situations.

Key Words : Forced Convective Boiling, Helically Coiled Tube, Oscillation, Heat Transfer, Visualization

1. 緒言

1.1 研究背景

エネルギー自給率の低い我が国においては、核分裂しないウラン 238 に高速中性子を吸収させることにより、核分裂性のプルトニウム 239 を燃焼量以上に生産できる高速増殖炉は大変有望な発電方法である。福井県敦賀市にはこの技術の実現のための高速増殖原型炉「もんじゅ」が建設されている。「もんじゅ」では核分裂で発生した中性子の減速効果が小さい金属ナトリウムを冷却材に用いており、ナトリウム加熱による蒸発器ではヘリカルコイル型伝熱管が用いられている。

この蒸発器で不安定流動が生じる条件の範囲はモックアップ試験で確認されている^[1]。この振動は局

所的な熱応力変動を伴うため、その発生条件、発生機構、熱伝達特性を定量的に把握することは、蒸発器の安全性をより合理的に把握することに貢献する。ヘリカル蒸発管についてマクロ的熱伝達・流動特性は解明されてきてはいるが、ヘリカル蒸発管内の沸騰二相流の可視化など、内部での沸騰二相流現象については十分な精度の機構論的モデルは把握されていない。

1.2 目的

著者らは、ヘリカル蒸発管内の沸騰二相流を可視化することを目的として、ガラス製ヘリカルコイル二重管を用いた水の強制流動沸騰の高速観察を行い、不安定流動現象（特にドライアウト点の振動現象）の特性を調べた^{[2], [3]}。その結果、ドライアウト点振動は、ドライアウト点の上流側に位置する遷移点（環状流に移行する点）付近の発泡と管壁に沿って上昇する液膜の蒸発が発生要因であると考えられ、また、加熱条件、液流量・温度、ヘリカルコイル管寸法等のパラメーターが振動の発生条件・振幅・周期に及ぼす影響を実験的に明らかにした。しかし、

* 機械工学専攻

* 日本原子力研究開発機構

* Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering

** Japan Atomic Energy Agency

ヘリカル蒸発管の局所熱伝達特性と流動様相の関係については把握できていない。

そこで本研究は、ヘリカル蒸発管の局所の熱流束・温度を計測し、同時に流動様相を観察することで、局所熱伝達の変動と流動様相（特に遷移点の振動現象）の関係を調べることを目的とする。

2. 実験装置及び方法

2.1 実験装置

本実験装置は熱交換を行うヘリカルコイル型の熱交換器、加熱装置、試験液体供給容器、高温油循環装置の4つの部分から構成されている。Fig. 1に概略図を示す。

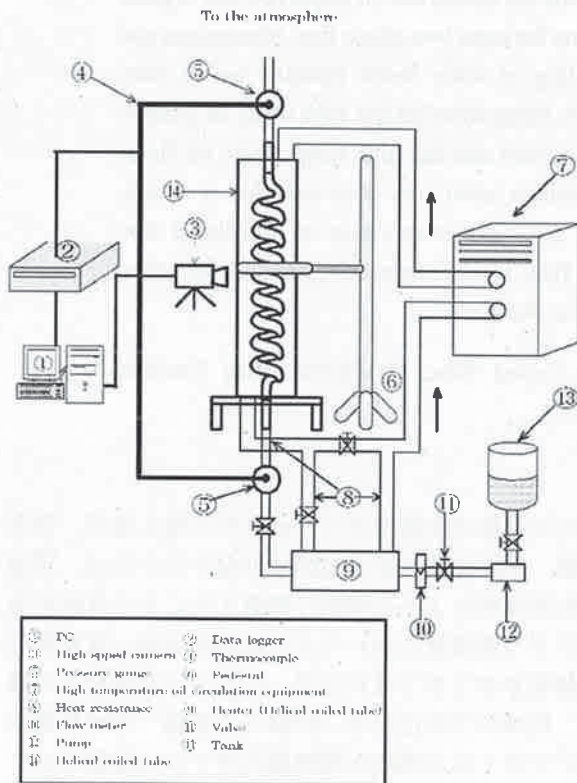


Fig. 1 Outline of experimental setup

熱交換器はガラス製のヘリカル蒸発管を真鍮板で開ったものを自作し使用した。真鍮板には穴を空け、そこにガラス板を貼り付ける事で内部を観察できるようにした。ヘリカル蒸発管表面には熱流束センサーを貼り付け、熱流束と温度を計測できるようにした。熱流束センサーは、水の入口部分のヘリカル管巻き始め部分から出口方向に5cm間隔で4枚貼り付けた。熱流束センサーについて、詳細をTable 1に示す。熱流束センサーは、管壁に沿って曲げた際に感度が変わるので、検定実験により感度を検定した。また、熱流束センサーを管壁に貼り付けた際の熱流束の誤差を計算により求めると、約5%となった。

Table 1 Characteristics of heat flux sensor

Maker		Captec	
Sensor size[mm]		10×10	
Sensitivity [$\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$]		Before	After
	Sensor1	0.885	0.531
	Sensor2	0.900	0.318
	Sensor3	0.935	0.623
Sensor4	0.994	0.680	
Type		Flexible	

Table 2 Dimensions of the helically coiled tube

Radius of curvature:R	14 mm
Outside diameter of helically coiled tube: $2r_o$	7.4 mm
Inside diameter of helically coiled tube: $2r_i$	5.0 mm
Thickness of helically coiled tube	1.2 mm
Length of outer tube:L	380 mm
Number of rolling	38
Pitch:p	10 mm

熱交換器外側に高温油を下向きに、内側のヘリカル管に水を上向きに流すことにより熱交換を行い、ヘリカル蒸発管内で沸騰現象を発生させる。本実験にて使用したヘリカル蒸発管の詳細図をFig. 2に、各種寸法をTable 2に示す。

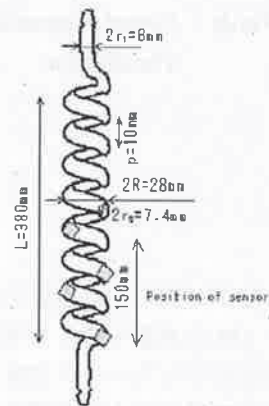


Fig. 2 Detail view of the helically coiled tube

循環させる油は高温用油（沸点 391℃・透明）を、試験液体は蒸留水を使用した。Fig. 1⑦の高温油循環装置は温度・流量を制御でき、連続使用最高温度は250℃である。水の入出口温度・圧力は、測定ボックス入口から流入した水を一度隔壁に当て、温度・圧力を均一にさせたものを測定した。④の熱電対はK型であり、⑧の耐熱ホースは連続使用最高温度が260℃のフッ素樹脂製である。⑨の加熱部はガラス製二重管のヘリカル蒸発管用い、管に流入する高温油の量を制御することで水の入口温度を調節した。水の流量は、バルブ⑩を調節することで変化させた。蒸発管で発生した蒸気は大気に開放される。

2.2 実験方法

実験条件は、油の流量は一定、油の温度は 195°C ~ 170°C の間で変化させ、水の流量は $0.05 \sim 0.2 \text{ L/min}$ 、水の入口温度は 60°C 、 70°C で実験を行った。実験方法は、水の流量を設定して流した後に油の温度を設定し一定の流量で循環させる。その後、高温油・水の入口温度・入口流量が設定条件に達したら測定・観察を行う。ヘリカル蒸発管内における水の沸騰の様子を観察・記録する時はデジタルビデオカメラで撮影した。測定する値は高温油の出入口温度、蒸留水の出入口温度・圧力、入口の流量、ヘリカル蒸発管表面の熱流束・温度、遷移点の振動発生時は振動の周期、振幅である。管壁での熱流束、温度は水の入口から出口に向かって①~④と区別する。遷移点の位置は熱交換器の隣に設置した定規の日盛りから測定した。熱交換器の下部に設置してある水の入口温度・圧力測定ボックスを 0m 地点として計測した。

3. 実験結果および考察

3.1 測定値の振動と流動様相について

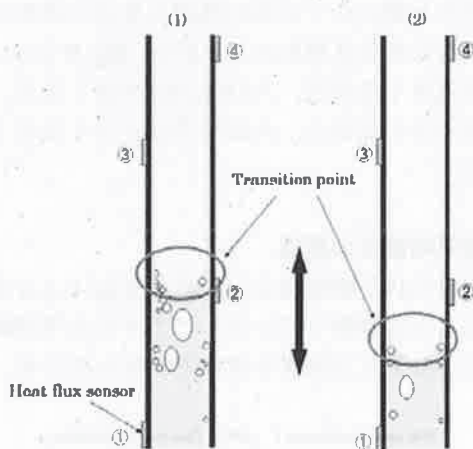


Fig. 3 Flow situation (inlet velocity 0.0425m/s)

Fig. 3 は、流速が 0.0425m/s の水の流動様相とセンサー位置の関係を表した模式図である。センサー①の部分は主に液単相流となっており、①~②の間で遷移点の振動が起こっている。遷移点は①付近が谷の位置となり、②付近が山の位置となる。③、④の位置では液膜が流れている状態となっている。

Fig. 4 は、熱流束②と管壁温度②を同期させたグラフである。Fig. 5 は、入口流速と入口圧力を同期させたグラフである。Fig. 6 は、遷移点振動の様子を表している。Fig. 4、Fig. 5、Fig. 6 はすべて同条件、同時

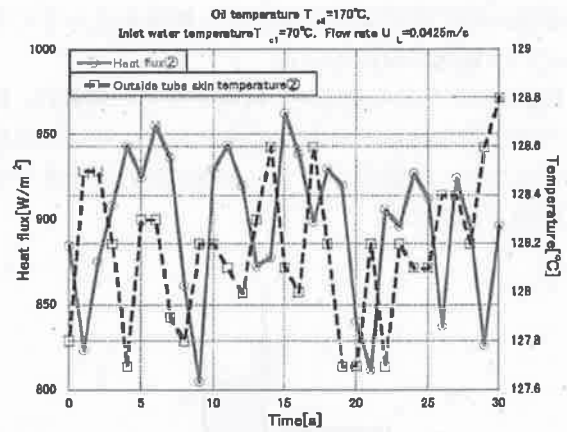


Fig. 4 Fluctuation of heat flux ② and outside surface temperature ② (inlet velocity 0.0425m/s)

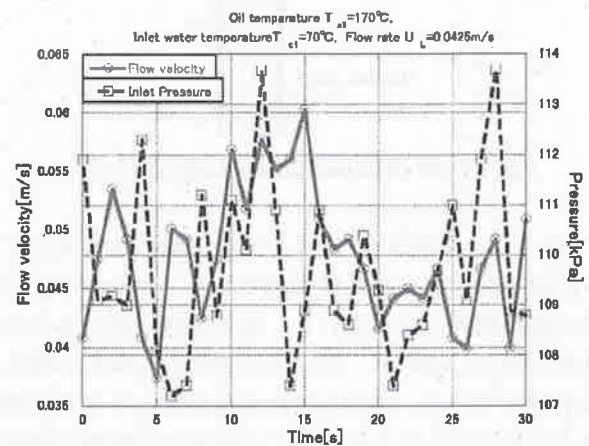


Fig. 5 Fluctuation of flow velocity and inlet pressure (inlet velocity 0.0425m/s)

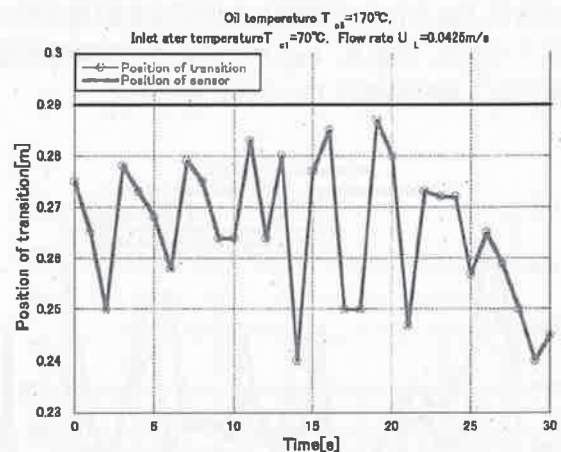


Fig. 6 Fluctuation of transition point (inlet velocity 0.0425m/s)

間の値を使用し、流動様相は Fig. 3 の状態である。

Fig. 4 と Fig. 6 のグラフを比較すると、遷移点の位置がセンサー②付近にある時は管壁温度が低くなり、熱流束は大きくなる。また、遷移点の位置が下がっ

た状態の時に管壁温度は高くなり熱流束は小さくなるという傾向が現れている。

Fig. 5のグラフを見ると、流速と圧力の関係は、ばらつきが見られるものの、流速が大きい時に圧力が小さくなり、流速が小さくなる時に圧力が大きくなる傾向が見られる。

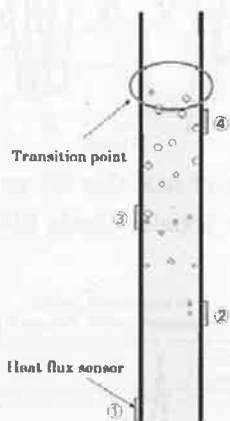


Fig. 7 Flow situation (inlet velocity 0.17m/s)

Fig. 7は、流速が0.17m/sの水の流動様相とセンサー位置の関係を表した模式図である。センサー①の所は液単相流となっている。②の位置付近で小さな気泡が発生し始める。③と④の間から気泡の発生量が増えていき、④の上では発泡が激しくなり、遷移点が存在するようだが、この流速では振動は確認できなかった。流速が速いほど振動が発生しにくくなる結果は、既報¹⁾と同様の結果である。

Fig. 8は、熱流束②と管壁温度②を同期させたグラフである。Fig. 9は入口流速と入口圧力を同期させたグラフである。Fig. 8, Fig. 9は同条件、同時間の値を使用し、流動様相はFig. 7の状態である。

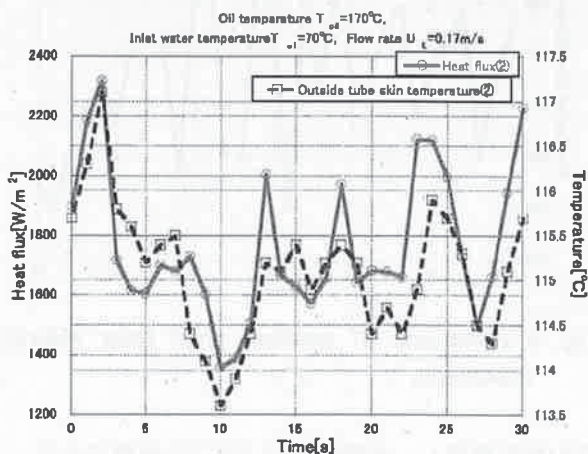


Fig. 8 Fluctuation of heat flux ② and outside tube skin temperature ② (inlet velocity 0.17m/s)

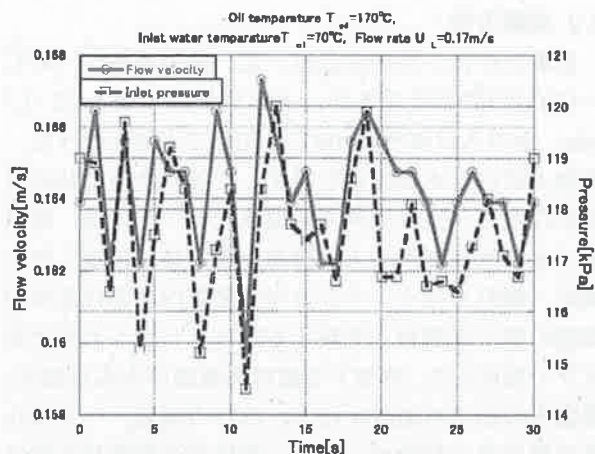


Fig. 9 Fluctuation of floe velocity and pressure (flow rate 0.17m/s)

Fig. 8より、管壁温度が高い時に熱流束は大きくなっていることがわかる。また、管壁温度が小さい時に熱流束は小さくなる。Fig. 3の低流速の場合と異なる理由として、Fig. 3では遷移点がセンサー②付近で振動するため、遷移点付近の高熱流束による壁温の低下と低熱流束の液膜蒸発による壁温上昇が交互に起こるのに対し、Fig. 7の高流速の場合は遷移点の振動現象が近くでは無いため、加熱用油の温度分布（上流から下流にいくに従い高温になる）がそのまま反映されたものと思われる。また、Fig. 9より、入口流速が大きくなると、入口圧力は大きくなり、入口流速が小さくなると、入口圧力は小さくなることわかる。

3.2 時間平均値との関係

実験で得られた熱流束などの値は、Fig. 4, 5, 6を見てわかるように振動している。ここでその平均値がそれぞれどのような関係を持っているかを示す。

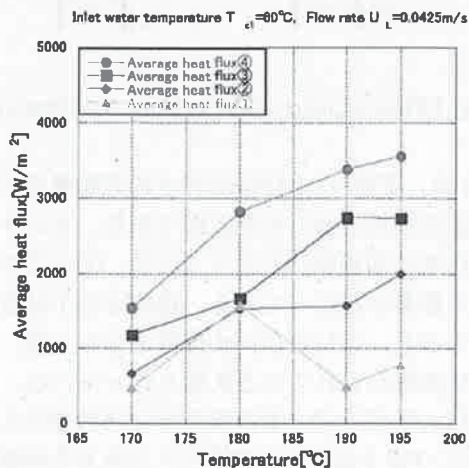


Fig. 10 Average heat flux and inlet oil temperature

Fig. 10 は、油の入口温度を横軸に、①～④の平均熱流束を縦軸にとったグラフである。流動様相は Fig. 3 の状態である。②～④の平均熱流束は入口油温が高くなると平均熱流束も大きくなる。しかし、①についてはそうではない。

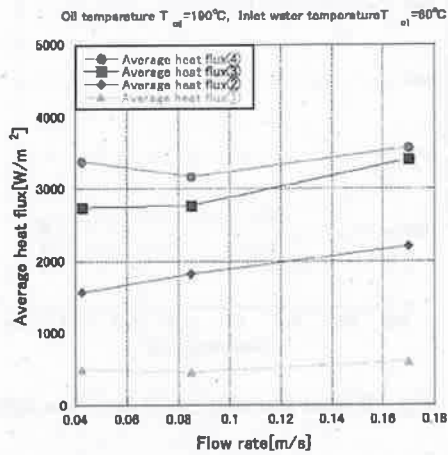


Fig. 10 Average heat flux and inlet oil temperature

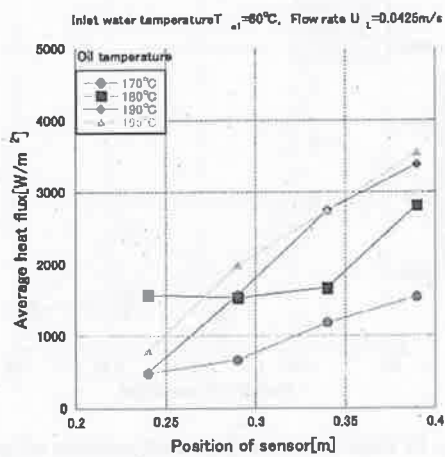


Fig. 12 Average heat flux and position of sensor (inlet velocity 0.0425m/s)

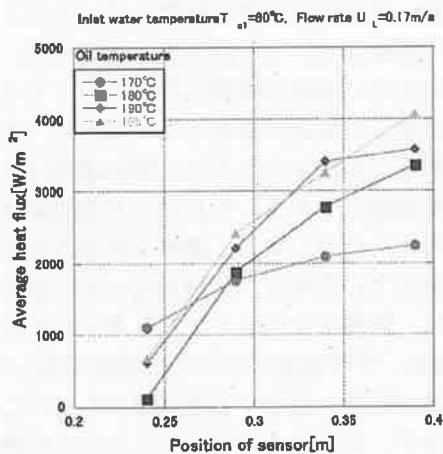


Fig. 13 Average heat flux and position of sensor (inlet velocity 0.17m/s)

Fig. 11 は、水の入口流速を横軸に、①～④の平均熱流束を縦軸にとったグラフである。流速が大きくなると、平均熱流束は少し大きくなる傾向がある。

Fig. 12, Fig. 13 は、センサーの位置を横軸に、平均熱流束を縦軸にとったグラフである。Fig. 12 は流速が小さい時、Fig. 13 は流速が大きい時の様子を表している。どちらの場合も、センサーの位置が高くなると熱流束の値が大きくなるということを表している。ただ、流速が小さい状態で油の温度が低い時は、位置による熱流束の値の差が小さくなる場合がある。

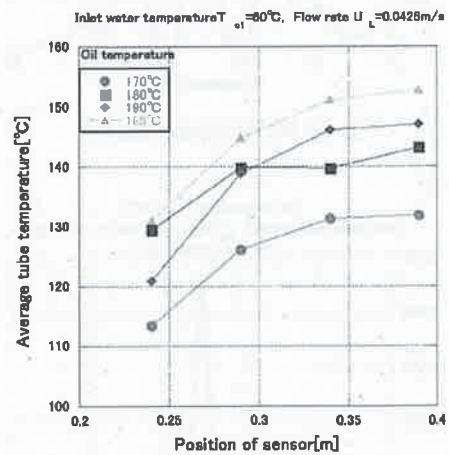


Fig. 14 Average surface temperature and position of sensor (inlet velocity 0.0425m/s)

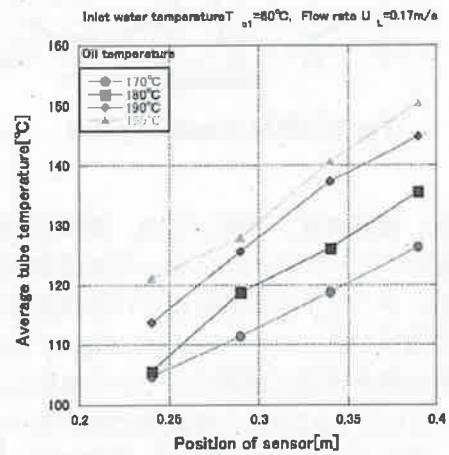


Fig. 15 Average surface temperature and position of sensor (inlet velocity 0.17m/s)

Fig. 14, Fig. 15 は横軸にセンサーの位置、縦軸に平均管壁温度をとったグラフである。センサーの位置が高くなると温度も高くなるということがわかる。Fig. 14 は流速が小さい時で、その時はセンサーの位置が高い所では温度変化が小さくなっている。Fig. 15 のグラフの方が傾きは大きくなっている。

3.3 測定値の周期, 振幅

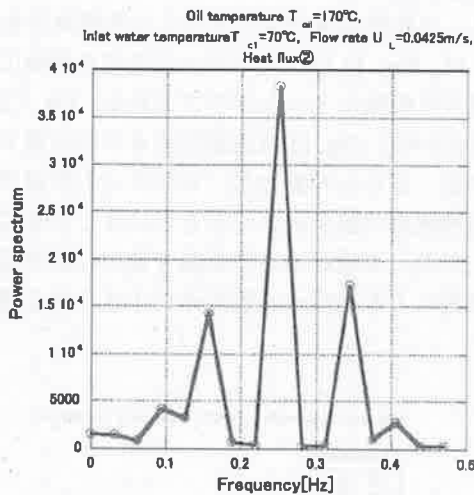


Fig. 16 MEM (Heat flux②)

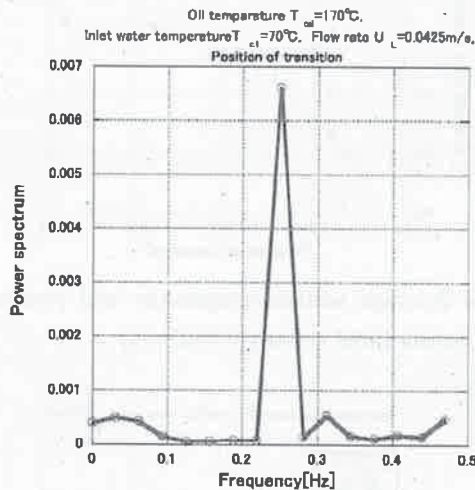


Fig. 17 MEM (transition point)

熱流束, 管壁温度, 流速, 圧力, 遷移点の振動をMEM(最大エントロピー法)によって周波数解析した。それぞれ, スペクトルが強く出ている周波数が多数存在する場合が見られた。Fig. 16, Fig. 17は同じ実験条件時の熱流束②と遷移点について解析した結果である。どちらも0.25Hzの周波数で強いスペクトルが出て一致している。他の熱流束, 管壁温度, 流速, 圧力, 遷移点についても, それぞれ同じ周波数で強いスペクトルが出ている場合が多く見られた。

Fig. 18は, 横軸に流速, 縦軸に熱流束の振幅をとったグラフである。振幅は振動している値の最大値と最小値の差から求めた。流速が大きくなると, 熱流束の振幅は小さくなる傾向がある。

Fig. 19は, 横軸にセンサーの位置, 縦軸に熱流束の振幅をとったグラフである。振幅が一番大きくな

るのは, センサー①の所である。その他の場所では, それぞれの振幅の大きさに変化があまり見られない。

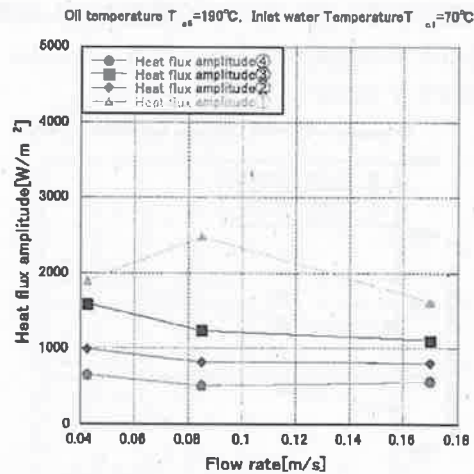


Fig. 18 Heat flux amplitude and flow rate

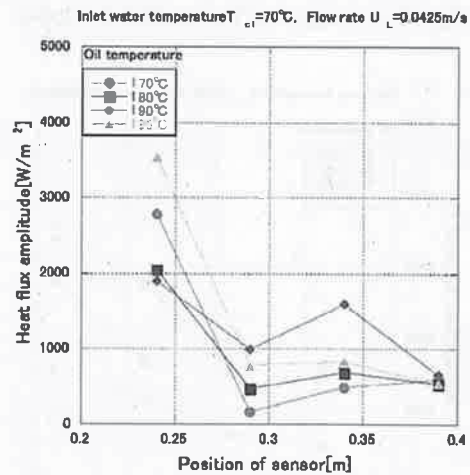


Fig. 19 Heat flux amplitude and position of sensor

4. 結 言

- (1) 実験結果から熱流束, 管壁温度, 遷移点の位置, 入口流速, 入口圧力は値が振動していることがわかる。水の流動様相により熱流束と管壁温度, 入口流速と入口圧力の振動の関係に違いが出てくる場合がある。遷移点の振動が発生している時に, 遷移点付近では激しい発泡を生じるので熱伝達率は大きくなり, 管壁温度は下がる。それにより熱流束は大きくなると考えられる。また, 遷移点が遠ざかり壁面を液膜が流れている時は, 発泡がないので管壁温度が高くなり, 熱流束は小さくなると考えられる。
- (2) 熱流束, 管壁温度については時間平均した値と, 入り口油の温度・流速・測定位置から次のことが言える。まず, 入り口油の温度が高くなると伝熱面温度が高くなり, 熱流束は大きくなると考えられる。流速が大きくなった場合に熱流束が大きくなる場合が

見られたが、層流から乱流に遷移する間で熱伝達率が高くなるので、その遷移域の流れになっているのではないかと思われる。

熱流束と測定位置の関係から、水の出口部分に向かって熱流束が大きくなることがわかった。流速が小さい時、①の場所は水の状態で熱伝達率が小さいので熱流束が小さくなる。②の位置からは液膜が流れる状態となるが、下流に行くほど液膜の厚さが薄くなるために熱流束が大きくなると考えられる。流速が大きい時、①の場所は先ほどと同じ理由で熱流束は小さい。観察から②の付近で沸騰が始まる。その時上の位置ほど伝熱面温度が高くなるから熱流束も大きくなっていくと考えられる。

(3) 熱流束などの値の振動について、周波数解析を行いそれぞれの周期を求め、関連性を調べた。熱流束、管壁面温度、遷移点、流速、入口圧力の周期は一致する場合が多く見られたので、それらの振動は互いに強く関連している。

また、振幅について、熱流束は流速の変化を受け若干小さくなる傾向が見られた。ヘリカル蒸発管の最下部で熱流束の振動が一番大きくなる。

参考文献

- [1] 竹内・久保田・土屋, “ナトリウム加熱蒸気発生器における不安定流動現象”, 機論(B編), **47-413**, 166 (1981).
- [2] N.Nagai et al., “Forced Convective Boiling of Water inside Helical Coiled Tube (Characteristics of Oscillation of Dryout Point)”, Japanese J. of Multiphase Flow, Progress in Multiphase Flow Research I, 111 (2006).
- [3] 永井ら, “ヘリカルコイル内強制流動沸騰のドライアウト点振動に関する研究”, 混相流学会年会講論集, 118 (2006).

