

# 非共溶性混合媒体の強制流動沸騰を用いた宇宙用排熱処理システムの極限性能の追及

大田 治彦 (九州大), 新本 康久 (九州大), 松本 聡 (JAXA), 浅野 等 (神戸大),  
今井 良二 (室蘭工大), 河南 治 (兵庫大), 鈴木 康一 (山口東京理科大),  
藤井 清澄 (奈良先端大)

## Study on the maximum performance of space thermal management systems by the application of flow boiling using immiscible mixtures

Haruhiko Ohta\*, Yasuhisa Shinmoto (Kyushu Univ.), Satoshi Matsumoto (JAXA),  
Hltoshi Asano (Kobe Univ.), Ryoji Imai (Muroran Institute of Technology),  
Osamu Kawanami (Univ. Hyogo), Koichi Suzuki (Tokyo Univ. Science, Yamaguchi),  
Kiyosumi Fujii (NAIST)

\*Kyushu Univ., 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395

E-Mail: ohta@aero.kyushu-u.ac.jp

Abstract: Nucleate boiling of immiscible mixtures applied to the cooling system is a new topic proposed by the present authors. Both liquids with different volatilities and densities are subcooled by the additional compression of vapor pressure beyond the saturation pressure corresponding to the equilibrium temperature. By adequate combination and the volume ratio of mixtures, superior heat transfer characteristics were found in pool boiling. A new purpose to realize the highest cooling performance in space, the flow boiling of immiscible mixtures is performed on the ground. From the preliminary tests, flow patterns, heat transfer characteristics peculiar to the boiling of immiscible mixtures are clarified. In addition, the application to the ground cooling systems and international activities concerning the relevant researches on boiling and two-phase flow including those for immiscible mixtures are introduced reporting the activities of a working group in JAXA.

**Key words;** Immiscible mixture, Pool boiling, Flow boiling

### 1. 研究の背景

エネルギー消費を行うかぎり最終的エネルギー形態としての排熱の処理は宇宙用プラットフォームの不可避である。沸騰冷却を排熱処理システムに適用する理由は以下のように要約される。

- (1) 宇宙用プラットフォームの大型化による排熱処理量とラジエータまでの熱輸送距離の増大により、従来の単相液体による排熱処理システムでは限界である。排熱システムを模式的に図1に示す。
- (2) 半導体の発熱密度の増大により、宇宙での高発熱密度(およびパワーエレクトロニクスの冷却では大面積対応の)除熱は必須であり、必然的に沸騰現象を生じる。
- (3) 蒸発潜熱を伴う沸騰現象の応用により高効率熱伝達および高効率熱輸送が可能、コールドプレートサイズの小型化、単相流方式に比して流量低減が可能であることからポンプ動力の低減、液体保有量や打ち上げ質量の低減が実現する。

### 2. TPF 実験の3つの目標

微小入力下の沸騰現象に関する知識は多分に断片的であり、例えば重力低下により熱伝達が促進あるいは劣化するかという単純な質問にさえ明確に答えることはできない。これは従来の短時間微小重力環境での実験条件設定の曖昧さ、定常データ取得の困難によるところが大きい。実際に沸騰二相流を排熱システムに適用する場合には、そのほとんどがプール沸騰ではなく強制流動沸騰の形態をとることが予測されるが、信頼性のあるデータはきわめて限られている<sup>1)</sup>。そこでISSの長時間微小重力環境を利用して強制流動沸騰の実験を行うための準備を行っている。その目標は以下のとおりである。

- (1) 微小重力下での系統的データの取得  
長時間微小重力環境を生かし、各実験パラメータを系統的に変化させて、強制流動沸騰における熱伝達および限界熱流束に及ぼす重力の影響を明確にする。
- (2) 重力の影響が現れない作動条件の明確化  
信頼性の高い冷却システムの構築には地上試験をベースとすることが必須である。そこで力の支配領域線図を確立して、重力の影響が現れない条件での作動

を前提とした排熱システムを確立するのが理想である。(3) 特定の媒体かつ限られた条件範囲での宇宙実験の結果から普遍性を追求

重力レベルが熱伝達および限界熱流束に及ぼす影響に関するメカニズムを解明する。これはISSで実施される実験では液体の種類や実験条件範囲が限定されるので、他の液体や実験条件での微小重力下での挙動の予測精度を上げるために必須である。

以上の目的に沿って、これまでに地上ベース実験で検証された気液挙動と熱伝達の例、重力の影響が現れる条件範囲の予測、力の支配領域図をそれぞれ図2～図5に示す。また実験装置のEMを図6に示す。

### 3. ポスト TPF としての新たな目標

TPFに続く実験テーマとして、微小重力環境での除熱能力の限界を見極めるという新たな目的の下に平成23年度より研究を行っている。代表著者は非共沸混合媒体のマランゴニ効果により熱伝達の促進や限界熱流束の増大の可能性を調べてきた。しかし低沸点媒体の優先的蒸発に伴う物質拡散抵抗の存在による熱伝達劣化は明確に現れるものの、マランゴニ効果による自己浸潤性が強く現れるアルコール水溶液の共溶性の範囲では、顕著な効果は観察されなかった<sup>2)</sup>。

一方、非共溶性混合媒体が優れた沸騰熱伝達特性を持つことが代表著者により確認された。2種類の媒体を密閉容器に封入した場合、全圧は両方の媒体の平衡温度に対する飽和圧力の和になる。すなわちそれぞれの液体からすれば他方の液体により飽和圧力以上に圧

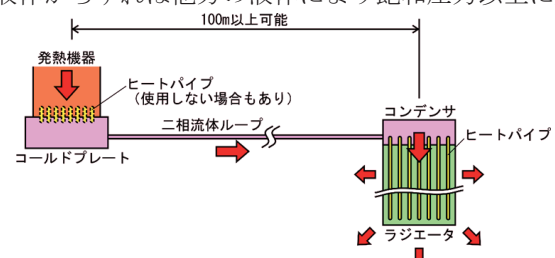


図1 大型宇宙用プラットフォームの排熱システムにおける二相流体ループの適用

縮されていることになる。したがって各成分液体はサブクール液（圧縮液）状態が自律的に維持されることになる。このときの状況を図7に示す。プール沸騰による地上実験結果により得られた結果を要約すると、以下ようになる。

(1) 限界熱流束の飛躍的増大

両方の液体がサブクール状態にあり、とくに高沸点媒体の限界熱流束が飛躍的に増大する。

(2) 沸騰冷却システムを阻害する空気混入の防止

一定全圧に対して平衡状態にある液体温度が低減する。これは液体温度を冷却要求により規定した場合に全圧を高く設定できることを意味する。すなわち純水を高沸点媒体に用いた場合においても、負圧による不凝縮気体（空気）混入に起因する凝縮阻害により、冷却システムが作動できなくなる状況を極力回避できることになる。

(3) 低沸点媒体の優先的蒸発による高沸点媒体の熱伝達の促進

一般に、2つの媒体は液体密度も異なるので、飽和温度（蒸気圧）の違いにより、水平上向き伝熱面を対象として、上記の利点のすべてが期待できるのは例えは図8に示す組み合わせである。ここに $H_1$ は高密度低沸点液体の加熱開始前の液位を表す。FC72/Waterに対する実験結果を図9に熱流束と伝熱面温度との関係で示す。 $H_1$ が小さい場合には、中熱流束において伝熱面に接しているFC72にバーンアウトを生じるが、その液位が低いため、入れ替わりに高サブクール度の水が伝熱面に接するようになり、伝熱面温度の上昇は小さい値に留まる。さらなる熱流束の増大により熱伝達

は水の対流から沸騰へ移行するが、FC72の凝縮液が伝熱面上に沈降して蒸発を繰り返すことにより、FC72のバーンアウト以降、水への熱伝達はすべての熱流束範囲で促進される。これにより水単成分に比して、伝熱面温度は低い値に留まる。伝熱面温度の著しい増大を伴う真の限界熱流束は飛躍的に増大し、水に対して少量のFC72を混合するのみであるが、現在では少なくとも $3 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ まで達することを確認している。

このような優れた熱伝達特性を宇宙での冷却システムに適用するために、非共溶性混合媒体の強制流動沸騰を対象とする。強制流動沸騰では除熱部と最終排熱部が分離できるので、冷却システムとして広い適用範囲を持つ。さらに非共溶性混合媒体はいずれの液体もサブクール状態にあり、気泡の凝縮により微小重力環境で一般に困難である気液分離プロセスが省略可能、あるいはきわめて簡便となる可能性がある。

		Low x	Moderate x	High x
High G		NB	TFC	TFC
Low G	High q	NB	NBA	NBA
	Low q	NB	TFC	TFC
Extremely low G		NB	NBA	NBA

- G : Mass velocity
- x : Vapor quality
- q : Heat flux
- NB : Nucleate Boiling
- TFC : Two-phase Forced Convection
- NBA : Nucleate Boiling in Annular film
- Gravity effect on liquid-vapor behavior
- Possible gravity effect on liquid-vapor behavior
- Gravity effect on heat transfer
- Possible gravity effect on heat transfer
- No gravity effect on liquid-vapor behavior and heat transfer

図4 質量速度、乾き度、熱流束の組み合わせで整理した重力の影響が現れる気液挙動と熱伝達の領域（予測を含む）核沸騰における気液挙動および熱伝達の一例

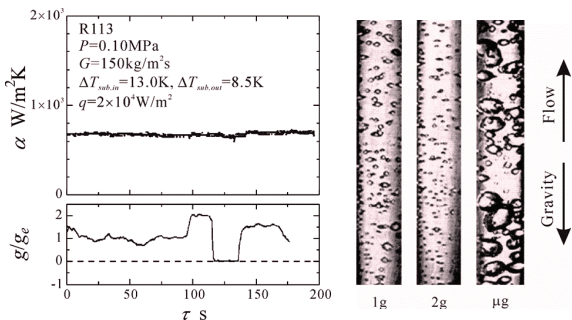
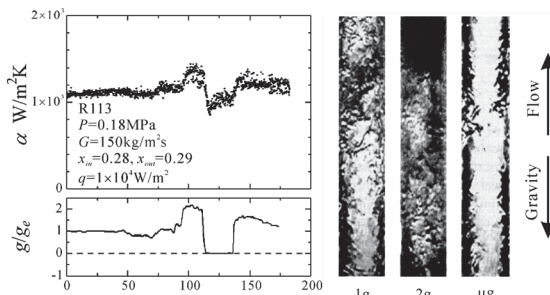
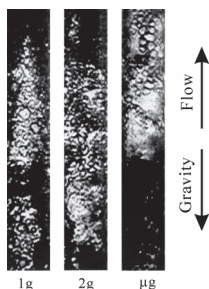


図2 核沸騰における気液挙動および熱伝達の一例



(a) 重力レベルによる環状液膜挙動の著しい変化と二相強制対流熱伝達に見られる重力の影響の例



(b) 高熱流束下の環状液膜における環状液膜内での核沸騰と重力の影響がほとんど現れない気液挙動の例

図3 二相強制対流域における気液挙動および熱伝達の一例

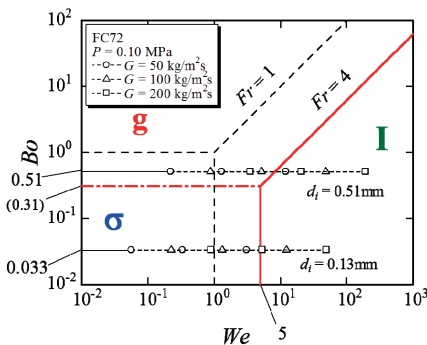
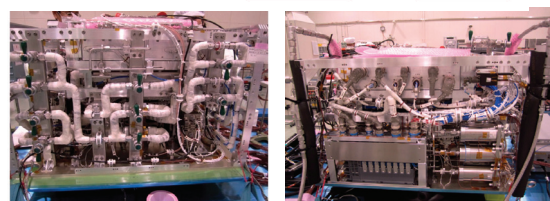
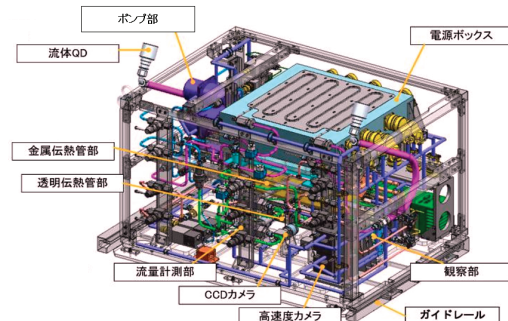


図5 地上実験での微細管による力の支配領域線図の予備検証



EM 正面

EM 背面

図6 TPF 実験の EM



4. 非共溶性混合媒体の強制流動沸騰

以下に通常重力場で実験を行った結果について述べる。図10にテストループを示す。1個のポンプにより、それぞれの液体を任意の流量比でテストセクションに送ることができる構造となっている。図11は非加熱状態で観察される液-液の流動様式を示したものである。非加熱としたのは加熱により気泡が発生する場合においても、その流動様式は非加熱状態の流動様式に大きく影響をうけるためである。非加熱時の流動様式は(a)分離流、(b) FC72 スラグ流、(c) 乳濁流の3つの基本形に加えて、FC72の微細液滴の発生を伴う3つの流動様式、(d) 波状分離流+FC72液滴、(e) FC72チャーン流+FC72液滴、(f) FC72スラグ流+FC72液滴が確認された。図12はこれらの流動様式が現れる条件を各媒体の体

積流量の組合せに対して示したものである。また各流動様式の境界はおおむね体積流量比  $V_{FC72}/V_{Water}$  により規定できることを図中に示している。

管軸方向の熱伝達係数の分布を求めるには、液体温

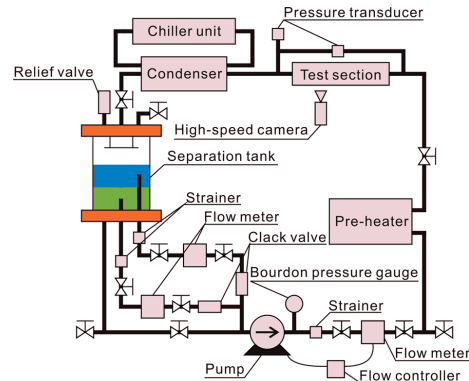


図10 非共溶性混合媒体の強制流動沸騰用テストループ

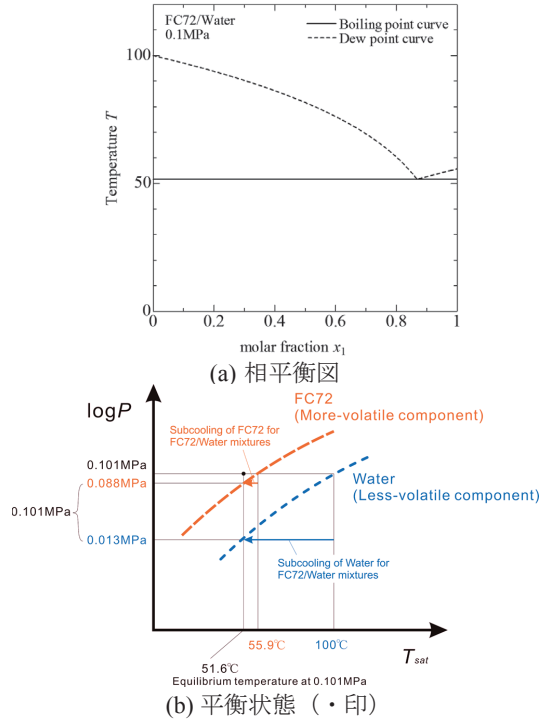


図7 非共溶性混合媒体の状態

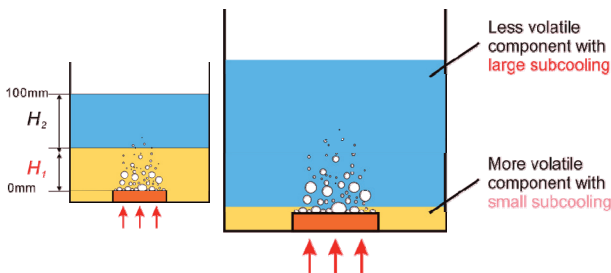


図8 プール沸騰において最も熱伝達性能が高いと考えられる液体の組み合わせ

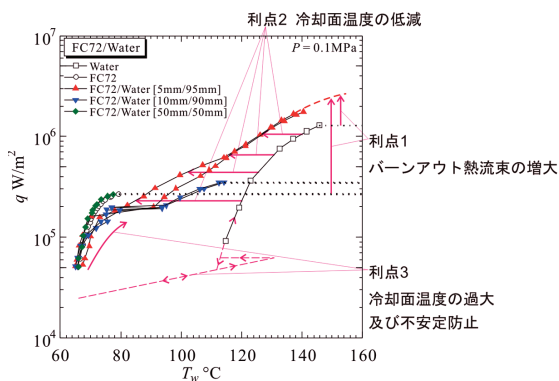


図9 非共溶性混合媒体の優れた沸騰熱伝達特性まとめ

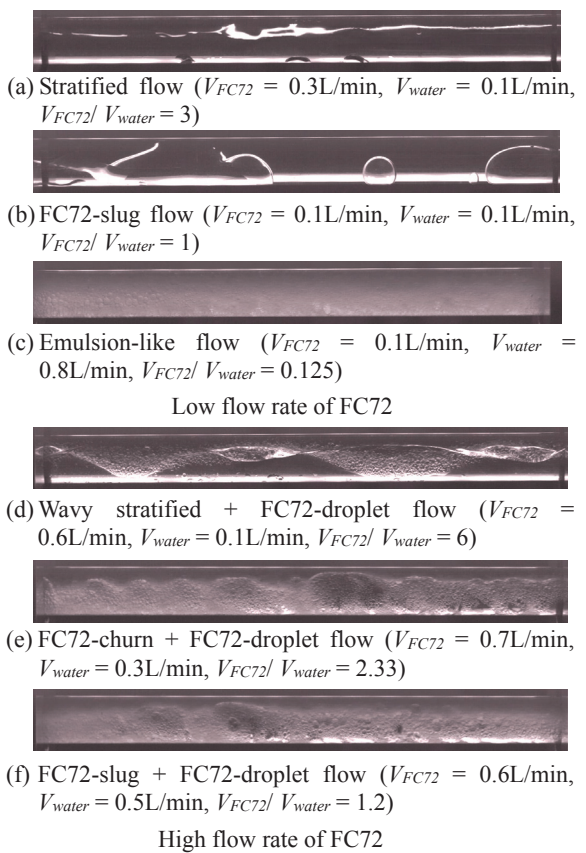


図11 非加熱状態における水平管内の流動様式

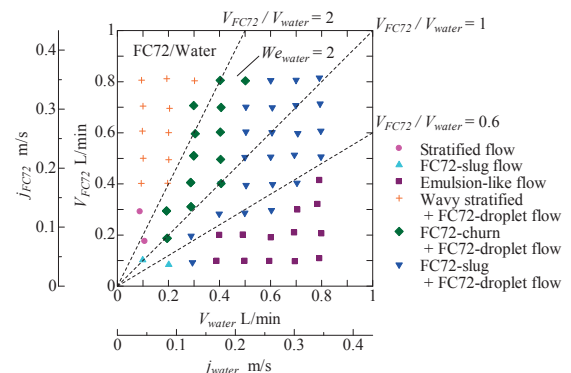


図12 流動様式マップ

度の分布が既知でなければならない。非溶解性混合媒体の強制流動沸騰においては、両媒体への熱伝達により顕熱による温度上昇と潜熱による蒸発を同時に考慮する必要がある。本実験ではテストセクション入口および出口の媒体温度のみが既知であり、入口条件をもとにエネルギーバランスを適用して出口温度が実測値に一致するかどうかを確認する必要がある。図13は実際にこれを行った結果であり、各体積流量の組合せ、熱流束のレベルによらず出口温度がよく再現されている。ここでエネルギーバランスを適用する際に、加熱熱流束のうちFC72に伝達された熱流束の割合を体積流量比の関数として図14のように与えている。図15はこの方法で求められた管軸方向の液体温度分布を示したものである。管の中央部でFC72は飽和状態に達するのに対して、水は単相のまま液温上昇を続けているのがわかる。一方、混合媒体ではこれらの中間的性質を持つことがわかる。図16は下流部における管頂部と管底部における局所熱伝達係数の差異をその平均値とともに示したものである。図中にはFC72蒸気の質量流量のFC72全質量流量に対する比で定義される乾き度  $x_{FC72}$ 、およびFC72蒸気の質量流量のFC72と水を含めた全質量流量に対する比で定義される乾き度  $x$  をそれぞれ示している。

水の蒸気は存在していない。図より管底部での熱伝達が管頂部のそれに比して良好であるが、FC72の密度が高ために、FC72の沸騰が主として管底部で生じることによるものである。図17および図18は下流部における管頂部と管底部のそれぞれ平均熱伝達係数および管内面平均温度を各体積流量に対して示したものである。図12の流動様式マップを参照すれば、乳濁流が最も良好な熱伝達を与えていることがわかる。これはFC72の微細液滴が管頂部においてもほぼ均一に分散し、管の全周でFC72の沸騰が生じることによるものと考えられる。

5. 予測される波及効果など

非溶解性混合媒体の強制流動沸騰の適用は、宇宙における将来の需要に必須の排熱システム以外に、高発熱密度・小型軽量・高信頼性で宇宙用との共通の要求がある自動車用インバータ冷却システム、3D画像の普

及によるデータ処理量の飛躍的増大が見込まれるデータセンターの冷却システム、などが考えられる。これらの地上用冷却システムに関しては、すでに企業との共同研究を実施中、実施手続き中である。

一方、一連の微小重力下沸騰二相流の研究における国際協力に関しては、(1) 毎年開催される ITTW (国際トピカルチーム) 活動を介しての経過報告、(2) TPFの実験結果に関する共同解析の合意済み (日本1機関、欧州6機関 (フランス2・イタリア2・ドイツ1・スイス1)、ロシア1機関、中国1機関、米国1機関)、(3) 非溶解性混合媒体に関して、ESAの"Thermal Platform"の仕様決定への実験提案、(4) ITTW2015の京都開催 (ISPS-6と合同)、を行っている。

6. 結論

- 1) 本研究の前段階であるISS利用TPF実験について、進捗を示した。
- 2) 極限的排熱性能を追求する新しい目的を定め、非溶解性混合媒体の沸騰によりそれが実現可能である見通しを得た。
- 3) 非溶解性混合媒体の沸騰熱伝達を適用することの利点と基本的特性を複数の沸騰系に対して示した。
- 4) 非溶解性混合媒体の沸騰熱伝達が宇宙用にもならず、地上でも重要な応用があり、現在取組み中である。
- 5) 非溶解性混合媒体の強制流動沸騰熱伝達において高沸点媒体も沸騰を生じる高熱流束域のデータ取得が今後の目標である。

謝辞

本研究はJAXA宇宙環境利用委員会WG活動の一環として、研究費の支援を受けて遂行されたものである。深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Haruhiko OHTA et al.; Proc. Int. Conf. on Multiphase Flow (ICMF2013), UFD 13 pages, 2013.
- 2) Takashi SAKAI et al.; Proc. Int. Heat Transfer Conference (IHTC-22737), DVD-ROM 8 pages, 2010.

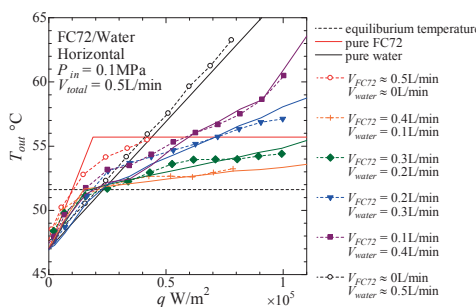


図13 シミュレーションによる管出口における液体温度変化の再現

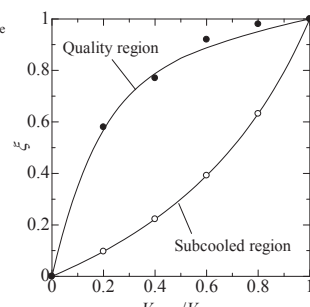


図14 全加熱熱量のうち低沸点媒体に伝達された熱量の割合

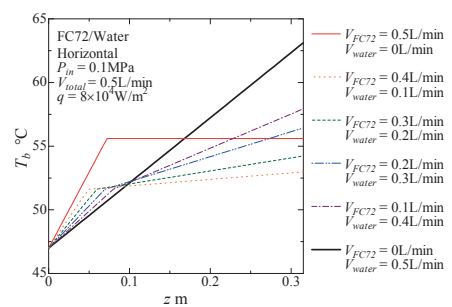


図15 体積流量比による管軸方向液体温度変化のバリエーション

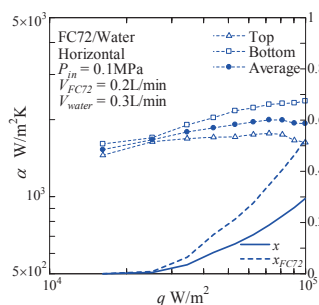


図16 下流部における管頂部・管底部での局所熱伝達係数の差異

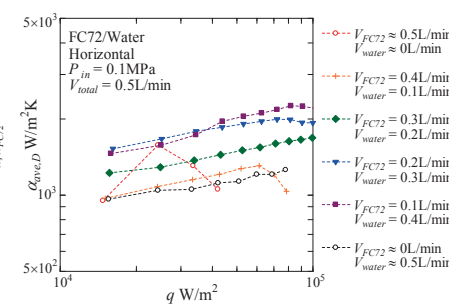


図17 下流部における流量比による熱伝達係数の差異

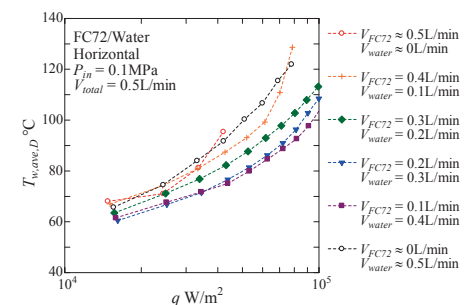


図18 下流部における流量比による管内面温度の差異