

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05828

研究課題名(和文) 流動沸騰定常・過渡限界熱流束に関する研究

研究課題名(英文) Steady state and transient critical heat flux of flow boiling

研究代表者

福田 勝哉 (Fukuda, Katsuya)

神戸大学・海事科学研究科・教授

研究者番号：10127417

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：円管発熱体を用い種々の速度で変化する指数関数状発熱率を与え、円管内径、肉厚、有効長さ、流速、系圧力およびサブクール度を変え、管内流動沸騰定常・過渡CHFを系統的に求めた。流動沸騰定常・過渡 CHF 表示式を提案した。さらに、管内における高流速水流動沸騰において、流動沸騰開始条件を系統的に求め、新たにウェーブレット等の音響解析手法を導入することにより、沸騰開始条件を特定して、沸騰開始条件の実験相関式を提案した。

研究成果の概要(英文)：The heat generation rate was controlled with exponential functions. A correlation of the flow boiling CHF was obtained based on the experimental data. Various boiling incipencies for subcooled water flowing in a uniformly heated narrow tube were measured experimentally. The boiling signal was analyzed using such as the wavelet decomposition method. The surface superheat ascended with an increase of the heat flux until the incipient boiling point was reached. The initial temperature overshoot did not appear as the outlet pressure increased. Since the existing correlations underestimated the incipient heat flux, a semi-empirical correlation of the boiling incipience was obtained based on the experimental data.

研究分野：原子力工学

キーワード：定常限界熱流束 過渡限界熱流束 円管内流動沸騰 流動沸騰開始条件

1. 研究開始当初の背景

(1) 限界熱流束に関する新モデル開発

限界熱流束(CHF)機構に対する個々の物理モデルは、国内外において多く研究されているが、流動沸騰定常・過渡 CHF 現象において不均質自発核生成モデルを導入し、実験的に明らかにするのは国内外で初めての試みである。この研究により一般的な CHF メカニズム解明に一石を投じるものと期待できる。本研究は、プール沸騰 CHF から得られた研究成果を基に管内強制流動沸騰定常・過渡 CHF にまで拡張して、より一般的な定常・非常 CHF 表示式を構築することを目的とするものであるが、これまで内外の多くの研究者によって定常 CHF データが得られている。これらのデータを再構築するためには、従来モデルの他に新しいモデルに基づく必要があるが、未だに一般に認められたものではなく、思い切った独創的な発想のもとに研究する必要がある。現象を明確にするために、既設の流動沸騰実験装置を用いて実施する必要があった。

(2) 最大サブクール度の実験的検証

一般に流動沸騰定常 CHF 点は、サブクール度が増加するにつれ増加することが知られている。しかしあるサブクール度(最大 CHF 点)に達すると、CHF は最大値に達し、サブクール度の増加に伴い急減した後、再び増加するという傾向が見られることが研究代表者らの過去の研究で明らかになった。さらに、その最大サブクール度は、どうもほとんど流速に依存しないようである。この最大サブクール度が冷却限界(最大CHF)ということにもなる。この傾向は、研究代表者らによってはじめて明らかにされたものである。すなわち、ある流速が定まれば(管長/管径)比が小さくなるに伴い、最大サブクール度は、高くなる。したがって、それに対する CHF も増加する。この点を、ぜひ既設の高流速水流動沸騰実験装置によって実験的に検証する必要があった。

2. 研究の目的

(1) 流動沸騰定常 CHF のサブクール度に対する非線形現象の解明

サブクール度に対する沸騰限界熱流束の傾向に存在する非線形特性については、未解決のままである。これまでの他の研究結果を研究代表者らが詳細に分析することにより、サブクール度に対するプール沸騰及び流動沸騰定常 CHF には最大値が存在し、あるサブクール度以上になれば、定常限界熱流束が減少し、極小値へ遷移

することをはじめて明らかにした。特に流動沸騰定常 CHF は、この傾向が顕著に現れることを示した。したがって、高熱流束除熱の手段として沸騰冷却を応用する場合、工学的安全性の観点から緊急に解明すべき問題であると認識した。ここでは、沸騰開始条件の解明及び流動沸騰定常・過渡 CHF のサブクール度に対する非線形特性を明らかにすることにした。

(2) 流動沸騰過渡限界熱流束現象の解明と実験表示式の提案

発熱体に種々の速さの指数関数状発熱率を与えることにより流動沸騰定常・過渡 CHF を求めサブクール沸騰定常 CHF 表示式を拡張した流動沸騰定常・過渡 CHF 実験表示式を提案することである。

3. 研究の方法

図1は、本研究で使用した水用実験ループの概略図である。この装置に、新たに購入した電源装置を付加して実験を行った。なお、FC-72 は、同様の小型実験装置を別途製作し、上述の電源を共有して実験を行った。

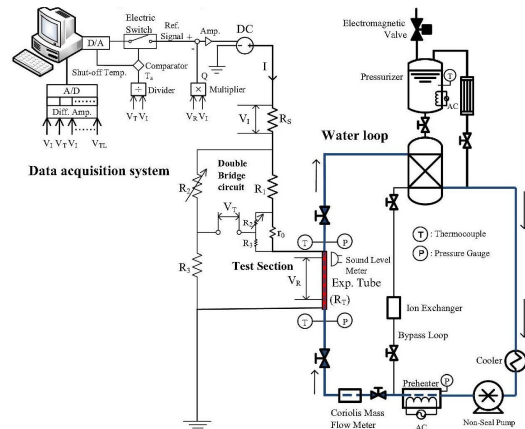


図1 実験装置

(1) 円管発熱体を用い、指数関数状発熱率を与え、時間経過に対する流動水沸騰定常・過渡沸騰現象における非沸騰領域の熱伝達及び沸騰開始点データを系統的に収集し、得られた実験データを分析し、定常・過渡 CHF 現象の解明とその実験表示式を提案することである。

(2) 管内における高流速水流動沸騰において、沸騰開始の条件を解明するために、画像処理のみならず、新たに音響解析手法を導入し現象の解明を行うことである。

(3) 円管発熱体を用い、指数関数状発熱率を与え、時間経過に対するフロリーナト FC-72 を用いた非沸騰領域の定常・過渡強制対流熱伝達データ

を系統的に収集し、得られた実験データを分析し、定常・過渡熱伝達現象の解明とその実験表示式を提案することである。

4. 研究成果

(1) 流動沸騰定常 CHF のサブクール度に対する非線形現象の解明

図 2 は、流動定常沸騰線に及ぼす流速の影響を比較した沸騰曲線の一例を示したものである。CHF 点に及ぼす流速の影響は明らかであるが、各流速の沸騰曲線は、定常沸騰曲線の延長上にある

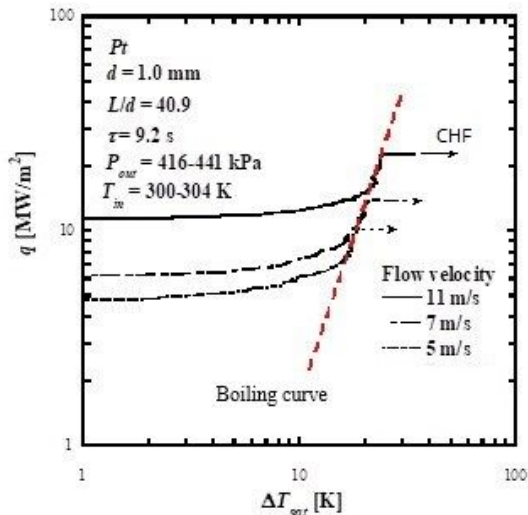


図 2 流動定常沸騰曲線

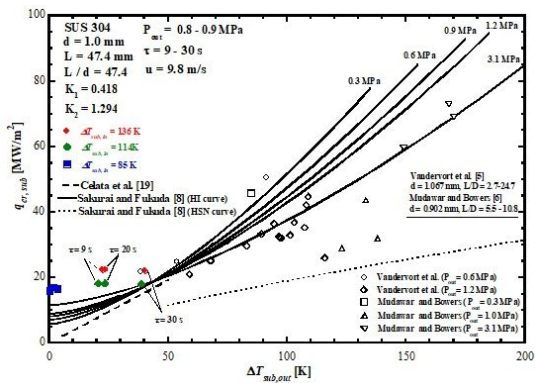


図 3 流動沸騰定常限界熱流束

ることが分かる。

図 3 は、流動沸騰 CHF に及ぼすサブクール度の影響を示したものである。サブクール度に対する沸騰限界熱流束の傾向に存在する非線形特性については、未解決のままであったが、これまでの他研究結果を研究代表者らが詳細に分析することにより、サブクール度に対するプール沸騰及び流動沸騰定常 CHF には最大値が存在し、あるサブクール度以上になれば、定常限界熱流束が減少し、極小値へ遷移することを明らかにしてきたが、改めて確認できた。特に流動沸騰定常 CHF は、この傾向が顕著に現

れることを示した。このサブクール度に対する定常限界熱流束の非線形現象の存在は、実験データが証明している。図 4 に示すように、流動

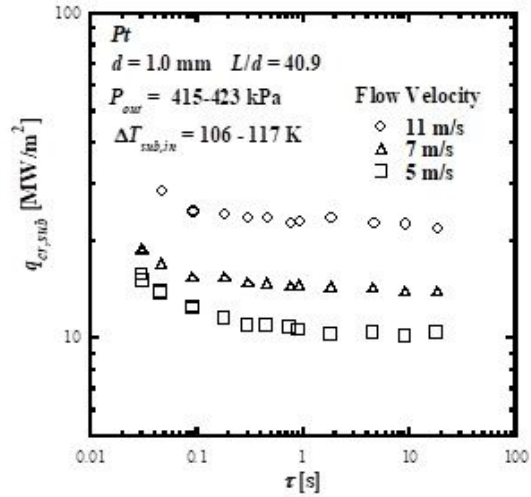


図 4 流動過渡沸騰限界熱流束

沸騰定常・過渡 CHF のサブクール度に対する非線形特性を実験的に示した。

(2) 流動沸騰過渡限界熱流束現象の解明と実験表示式の提案

広範囲なサブクール度の水中における流動沸騰過渡限界熱流束で瞬間的に起こる膜沸騰への遷移現象の機構の解明は、理工学システムに関わる高熱流束冷却系の設計データの基礎として重要である。CHF にかかわる独立変数、すなわち、系圧力、サブクール度、流速、発熱体代表直径等に関して系統的に広範囲な CHF の実験データの集積を行った。さらに、広範囲のサブクール水中において発熱体に種々の速さの指数関数状発熱率を与えることにより流動沸騰過渡 CHF を求めサブクールプール沸騰定常 CHF 表示式を拡張した流動沸騰過渡 CHF 実験表示式を提案した。

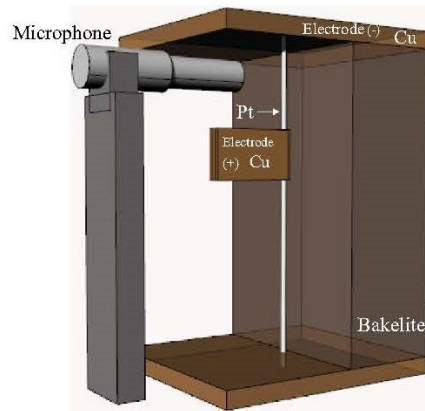


図 5 沸騰音響検出装置

(3) 沸騰開始条件の解明

管内における高流速水流动沸騰において、沸騰開始の条件を解明することは、非沸騰状態から沸騰状態に移る条件を明らかにした。

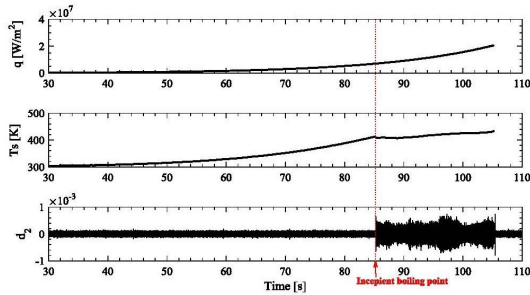


図6 ウェブレット解析による沸騰開始の検出

図5は、沸騰開始時に発生する音響を捉えるマイクロフォンの設置状況を示したものである。バックグラウンド音(ノイズ)も検出するので、ウェブレット解析を行い、ノイズと沸騰音を分離する手法を開発した。図6は、ノイズと沸騰音が、明確に区別されることを示したものである。

円管発熱体直径、有効長さ、系圧力およびサブクール度を変え、流動沸騰開始条件を系統的に求める。純水中において、種々の速度で変化する指数関数状発熱率を与えて、沸騰開始条件

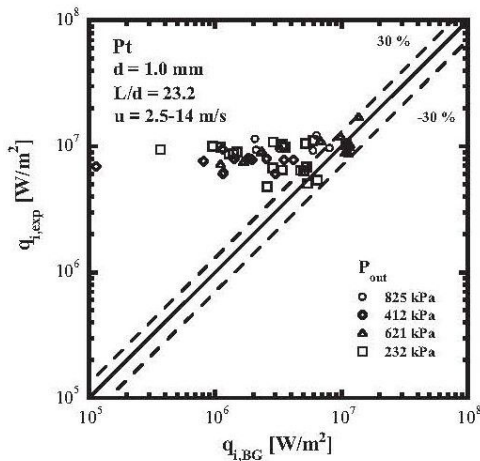


図7 流動沸騰開始熱流束

を決定するために、新たに音響解析手法を導入し、沸騰開始条件を明らかにした。

図7は、実験で得られた沸騰開始点熱流束を既存の実験式と比較したものである。従来の実験表示式は、本実験値を過小評価していることが分かった。

(4) フロリーナート FC-72 を用いた非沸騰領域の

定常・過渡強制対流熱伝達の解明

円管発熱体を用い、指数関数状発熱率を与え、時間経過に対するフロリーナート FC-72 を用い

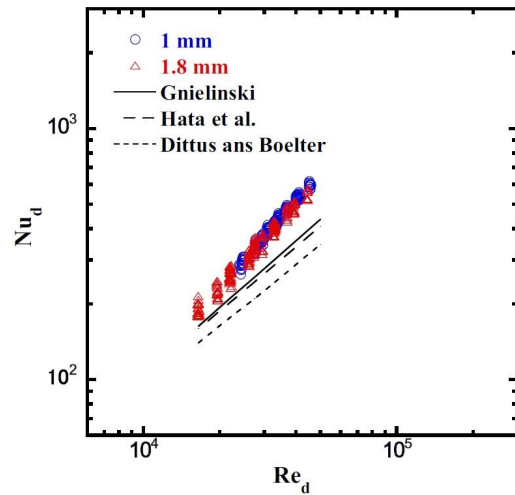


図8 FC-72 非沸騰乱流強制対流熱伝達

た非沸騰領域の定常・過渡強制対流熱伝達データを系統的に収集し、得られた実験データを分析した。

図8は、得られた非沸騰定常熱伝達率を無次元化表示したものである。従来から利用されている相関式は、本研究の実験結果を過小評価していることが分かる。さらに、その結果を踏まえ、実験表示式を提案した。

(5) フロリーナート FC-72 を用いた流動沸騰限界熱流束現象の解明と実験表示式の提案

円管発熱体を用い、指数関数状発熱率を与え、時間経過に対するフロリーナート FC-72 を用いた流動沸騰定常限界熱流束を流速及びサブク

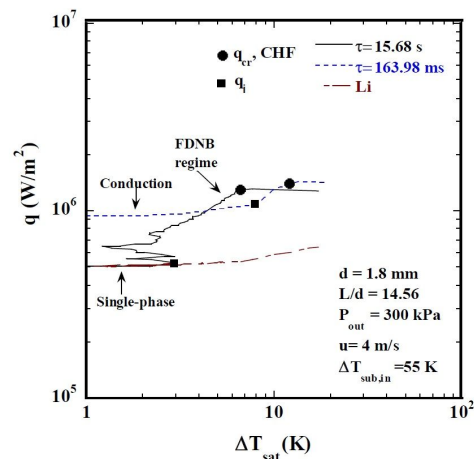


図9 FC-72 流動沸騰曲線

ル度を変え系統的に収集した。

図9は、貴重な FC-72 の流動定常及び過渡沸騰曲線の一例を示したものである。

図10は、流動沸騰定常 CHF に及ぼす出口サ

ブール度の影響を示したものである。

得られた実験データを分析し，その実験表示式を提案した。

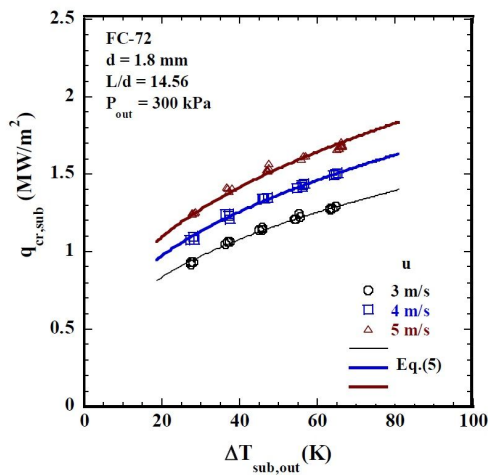


図 10 FC-72 流動沸騰限界熱流束

5 . 主な発表論文等

(研究代表者 , 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 16 件)

(1) Makoto Shibahara, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Koichi Hata, Suguru Masuzaki, Boiling incipience of subcooled water flowing in a narrow tube using wavelet analysis, Applied Thermal Engineering, 有, 132, 5, 2018, pp.595-604

10.1016/j.applthermaleng.2017.12.110,

(2) Makoto Shibahara, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Koichi Hata, Prediction of forced convective heat transfer and critical heat flux for subcooled water flowing in miniature tubes, Heat and Mass Transfer, 有, 54, 2, 2018, pp.501-508

10.1007/s00231-017-2155-8,

(3) Makoto Shibahara, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Koichi Hata, Single-phase convective heat transfer in a circular mini-channel with unsteady thermal loads, Heat Transfer Research, 有, 48, 13, 2017, pp.1179-1193

10.1615/HeatTransRes.2017018690,

(4) Makoto Shibahara, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Koichi Hata, Effects of outlet subcoolings and heat generation rates on transient critical heat flux for subcooled flow boiling of water in a vertical tube, Heat and Mass Transfer, 有, 53, 9, 2017, pp.2999-3012,

10.1007/s00231-017-2036-1,

(5) Yantao Li, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Transient heat transfer due to exponentially increasing heat inputs for turbulent flow of FC-72 in small diameter tubes, International Journal of Heat and Mass Transfer, 有, 110, 2017, pp.880-889

10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.03.022,

(6) Yantao Li, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Steady and transient CHF in subcooled pool boiling of water under sub-atmospheric pressures, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 有, 52, 2, 2017, pp.114-119,,

(7) Makoto Shibahara, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Koichi Hata, Steady and transient critical heat flux for subcooled water in a mini channel, International Journal of Heat and Mass Transfer, 有, 104, 2017, pp.267-275,,

(8) Makoto Shibahara, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Koichi Hata, Yuji Nakamura, Takeo Muroga, Masayuki Tokitani, Hiroyuki Noto, Transient critical heat flux for subcooled boiling of water flowing upward through a vertical small-diameter tube with exponentially increasing heat inputs, Journal of Thermal Science and Technology, 有, 11, 3, 2016, pp.16-0037,,

(9) Yantao Li, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Makoto Shibahara, Turbulent heat transfer with FC-72 in small diameter tubes, International Journal of Heat and Mass Transfer, 有, 103, 2016, pp.428-434

10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.018,

(10) MIN Han Htet, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Transient boiling critical heat flux on horizontal vertically oriented ribbon heater with treated surface condition in pool of water, Mechanical Engineering Journal, 有, 3, 3, 2016, pp.1-19

10.1299/mej.15-00438,

[学会発表] (計 7 件)

(1) Makoto Shibahara, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Koichi Hata, Critical heat flux for convective boiling in mini-tube due to power transient, Proc. of ASME 2017 Summer Heat Transfer Conference, 有, HT2017-5043, 2017.7.9, Bellevue, Washington, USA

(2) Makoto Shibahara, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Koichi Hata, Convective boiling heat transfer characteristics for pressurized

water in a small tube, Proc. of the 7th Pan Asian Association of Maritime Engineering Societies and Advanced Maritime Engineering Conference 2016, 無, AMEC2016-2B3-074, 2016.10.13, Hong Kong

(3) Makoto Shibahara, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Koichi Hata, Watanabe Sho, Yuji Nakamura, Takeo Muroga, Flow boiling and critical heat flux for subcooled water in vertical tube due to exponentially increasing heat inputs, Proc. of The 27th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP27), 有, 2016.9.20, Hawaii, USA

(4) Makoto Shibahara, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Koichi Hata, Yuji Nakamura, Takeo Muroga, Masayuki Tokitani, Hiroyuki Noto, Transient forced convection heat transfer for water flowing in a small tube with exponentially increasing heat inputs, Proc. of the 26th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP26), 無, 2015.9.27, Leoben, Austria

(5) MIN Han Htet, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Transient boiling critical heat flux on horizontal vertically oriented ribbon heater with treated surface condition in pool of water, Proc. of the 23rd International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-23), 有, 2015.5.17, Makuhari, Japan

6 . 研究組織

(1)研究代表者

福田 勝哉 (FUKUDA, Katsuya)
神戸大学・大学院海事科学研究科・教授
研究者番号：10127417

(2)研究分担者

劉 秋生 (LIU, Qiusheng)
神戸大学・大学院海事科学研究科・教授
研究者番号：80294263

(3)研究分担者

柴原 誠 (SHIBAHARA, Makoto)
神戸大学・大学院海事科学研究科・特命助教
研究者番号：80294263