

機関番号：35504

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560246

研究課題名(和文) 気泡微細化沸騰の発生機構の解明および高熱流束沸騰冷却への応用

研究課題名(英文) On mechanism of microbubble emission boiling and the application for high heat flux cooling technology

研究代表者

鈴木 康一 (Suzuki, Koichi)

山口東京理科大学・工学部・教授

研究者番号：10089378

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：不凍液混合媒体および純水の加圧サブクールプール沸騰実験において、気泡微細化沸騰が確認され、高熱流束冷却技術への実用化に向けて重要な知見が得られた。純水のマイクロチャンネルサブクール流動沸騰実験では、流路内に気泡が充満しやすく気泡微細化沸騰の発生は難しい。

音響振動場のサブクール沸騰実験では、500Hz付近で気泡崩壊が観察され、気液界面の不安定増幅が気泡崩壊を起こし固液接触を促進すると同時に伝熱面近傍で微細気泡の放出と同時に伝熱面に向かうサブクール液の流れが観察された。これらは気泡微細化沸騰と固液接触のメカニズムを示す。以上の実験結果から、本研究の目的をほぼ達成することができた。

研究成果の概要(英文)：A subcooled pool boiling has been performed for the purpose of developing high heat flux cooling technology. Microbubble emission boiling (MEB) has occurred for a mixture of anti-freezing liquid and water. The heat flux increases higher than the critical heat flux (CHF). In the boiling of water under the pressurized condition of 0.1MPa in gage for an example, MEB occurs and the heat flux increases higher than the CHF. In subcooled flow boiling in a microchannel, the vapor fills whole of the channel and the boiling turns to film boiling. These experimental results give effective information for the practical cooling technology.

In subcooled pool boiling of water in an acoustic field, MEB has been observed at frequency of 500Hz. According to the PIV analysis of microbubbles in MEB, the subcooled liquid has been observed to flow into the heating surface. The experimental results give the mechanism of MEB and solid-liquid contact.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 熱工学

キーワード：サブクール沸騰 気泡微細化沸騰 高熱流束 パワーエレクトロニクス 沸騰冷却 不凍液媒体 マイクロチャンネル 気液界面

1. 研究開始当初の背景

気泡微細化沸騰 (MEB=Microbubble Emission Boiling) に関する研究は、サブクールプール沸騰を中心に 1981 年稲田茂昭 (群馬大学) によって始めて紹介され[1]、その後サブクール流動沸騰下に発生する MEB を熊谷哲 (東北大学) が研究[2]、1990 年代になってから鳥飼欣一と鈴木康一 (東京理科大学・申請者) が流路内サブクール流動沸騰における気泡微細化沸騰の研究[3]を続けている。

MEB は、図 1 に示すように、およそ 20K 以上の高サブクール沸騰の遷移沸騰域において、伝熱面上の合体気泡から連続的に微細気泡を放出しながら、熱流束が通常の限界熱流束(CHF=Critical Heat Flux)より高い熱流束が液に伝達されることが特徴である。最近では、上海交通大学の Ping Cheng がマイクロチャンネルの MEB に成功している[4]。

わが国以外では、MEB に関する研究例は、ほとんどなく、申請者の国際会議やセミナーでの招待講義および基調講演で紹介するなど、MEB に関心が高まっている。

MEB は、近年発熱密度の増加が著しい電子機器の冷却に応用できる技術のほか浮力効果が期待できない宇宙環境における高熱流束輸送として期待されている。しかし、MEB の詳細は未だ明らかではなく、気泡崩壊と固液接触と CHF を超える高い熱流束が輸送されるメカニズムの解明が待たれる。

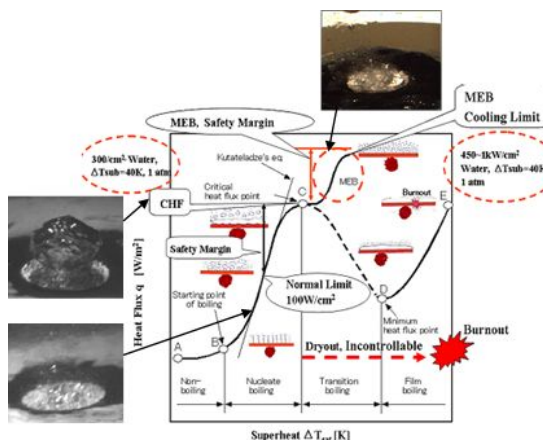


図 1 MEB を含む沸騰曲線

[1] 稲田茂昭, 宮阪芳喜, 泉亮太郎, 小長谷, 芳彦, “サブクールプール沸騰特性曲線の研究(第 1 報), 機械学会論文集 B 編 47, pp.852-861, 1981.

[2] 久保良・熊谷哲, “気泡微細化沸騰の発生と安定性”, 日本機械学会論文集 B 編 58, pp.497-502, 1992.

[3] 鈴木康一・鳥飼欣一・佐藤英明・石丸淳二・田中康夫, “矩形管流路内のサブクール沸騰熱伝達”, 日本機械学会論文集 B 編 65, pp.3097-3104, 1999.

[4] Wang, G. & Cheng, P., Subcooled flow boiling and microbubble emission boiling phenomena in a partially heated microchannel, Int. J. Heat Mass Trans. 52, pp.79-91, 2009.

2. 研究の目的

近年実用化が急がれる電気自動車の電力変換に用いられる IC パッケージインバータなど高性能化および小型化の一途を辿るパワーデバイスに避けられない発熱密度の上昇に対応するために、図 2 に示すような気泡微細化沸騰冷却デバイスのモデルを提案した[5]。

本研究は、MEB による高熱流束沸騰冷却技術の実用化のための知見を得ること、マイクロチャンネルの MEB 特性を調べ沸騰冷却の可能性を明らかにすること、および気泡崩壊の大きな要因と考えられる気液界面の不安定性の増幅と MEB のメカニズムを明らかにすることを目的とする。

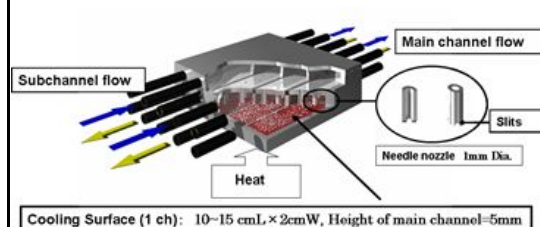


図 2 副流路・マルチニードル付高熱流束沸騰冷却デバイスのモデル

国内特許登録；4766427, 4766428, 2011, 6, 14.

米国特許登録；US8,061,414B, 2011, 11, 22.

[5] Suzuki, K., Kawamura, H., Tamura, S., and Maki, H., "Subcooled Flow Boiling with Microbubble Emission; Development for High Heat Flux Cooling Technology in Power Electronics", Pro.13th International Heat Transfer Conference, CD-ROM, 2006.

3. 研究の方法

3 - 1 実用化に向けた実験

サブクールプール実験装置を図3に示す。ステンレス沸騰容器の底面に直径10mmの銅加熱ブロックの上面を伝熱面として設置した。銅ブロックは、直径12mmの円柱部および電気カートリッジヒータを挿入する台形基部からなり断熱材で被覆されている。円柱中心軸上传熱面から3mm, 6mm, 9mmの位置に直径0.5mmのKシース熱電対を挿入し、定常温度分布を伝熱面まで外挿し伝熱面温度とし、温度勾配から熱流束を算出した。沸騰容器は、電気ヒーター、コイル水冷クーラー、攪拌機を備え、沸騰液を所定の温度の1K以内に保持した。この装置を用いて、不凍液混合媒体（エチレングリコール 30vol%, 50vo%）、純水の沸騰ヒステレシスおよび液温上昇のMEBへの影響について常圧下の実験を行った。伝熱面上の気泡挙動は高速ビデオカメラにより観察し、PIV解析をした。

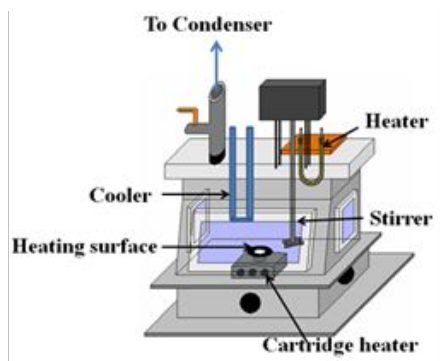


図3 プール沸騰実験装置

加圧実験装置を図4に示す。直径210mm × 高さ170mm ステンレス円筒容器で、3方向に観察窓を備え、底面に図3と同様の銅伝熱

面を設置した。沸騰媒体は純水とし、チツガスによりゲージ圧で0.05MPa, 0.1MPaに加圧した。

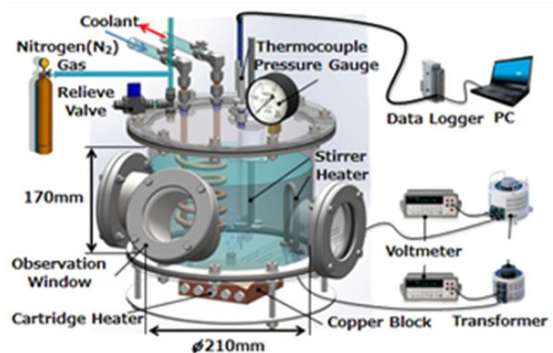


図4 加圧プール沸騰実験装置

3 - 2 マイクロチャンネルの沸騰

10mmH × 5mmW × 10mmL のステンレス板に矩形断面形状0.3mm × 0.3mmの溝を9本作成し、図5に示すように5mmW × 10mmLの銅ブロック伝熱面に被せて水平流路とし、サブクール度30~70K、質量流量100~1000kg/m²sで純水の流動沸騰を行った。

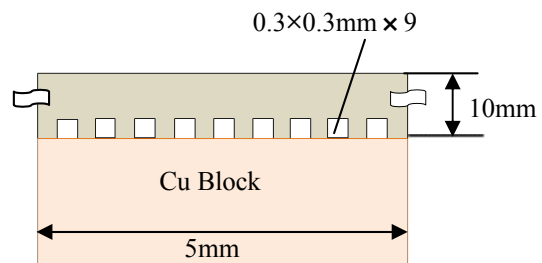


図5 マイクロチャンネルの断面

3 - 3 音響振動場のサブクールプール沸騰

図3に示す沸騰容器を透明アクリルで作製し、伝熱面上部90mmの位置に水中スピーカーを設置した。大気圧下でサブクール度20Kのプール沸騰に対して、低周波発信機の正弦波をアンプで増幅し、周波数100~15,000Hz、スピーカー出力30~50Wで音響振動を与えた。

4. 研究成果

4 - 1 実用化にむけて；不凍液混合媒体

不凍液混合媒体の実験結果を図6に示す。何れの混合液についても、純水の沸騰に比較して、熱流束は小さいものの、CHFを超えてからMEBが発生している。例えば50vol%

濃度のサブクール度 40K(68)においては、伝熱面過熱度 90~100K で 熱流束が 300 ~ 340W/cm² である。この結果は、電気自動車あるいは冷却水共用型ハイブリッド自動車の SiC インバータの冷却に対応可能である。

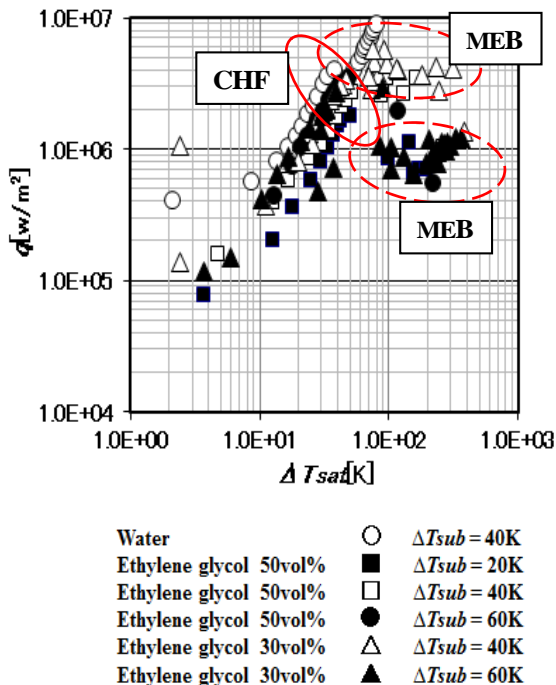


図 6 不凍液（エチレングリコール）添加沸騰媒体のサブクールプール沸騰特性

4 - 2 実用化にむけて；沸騰ヒステレシス
純水を沸騰媒体として、常圧下のサブクール度 40K で MEB 領域まで加熱した後、加熱電力を減少させた実験の結果の例を図 7 に示す。ヒステレシスが見られるもののその差は

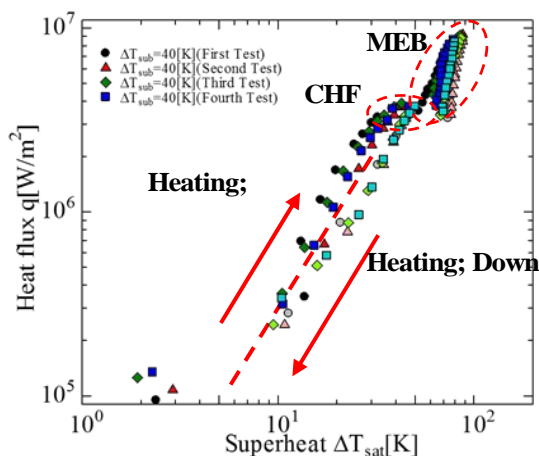


図 7 気泡微細化沸騰を伴うサブクール沸騰における発熱変動のヒステレシス

小さく、冷却性能には大きく影響はしないものとする。また、インバータが高負荷の高発熱状態で冷却水の温度が上昇した場合を想定した実験では、サブクール度が 30K 以下になると伝熱面温度の急上昇と共に膜沸騰に移行する。従って実際の冷却ではサブクール度は 30K 以上維持することが必要である。

4 - 3 実用化にむけて；加圧下の沸騰

加圧実験結果の例として、純水のサブクール度 60K、50kPa および 100kPa の加圧沸騰の沸騰曲線を図 8 に示す。熱流束は、CHF を超えて増加する。核沸騰領域では、加圧によって沸騰曲線は、周知の傾向と同様であるが、MEB では逆に高加熱度側に移行し、熱伝達率が低下する傾向を示すものの、伝熱面温度および最大熱流束は、50kPa で 195~200、700~800W/cm²、100kPa で 210~240、500~700W/cm² である。SiC パワー半導体を IC インバータに用いる場合、冷却面温度 150 ~ 250 で、最大除熱熱流束 500W/cm² 以上で要求レベル 300W/cm² を十分満足している。

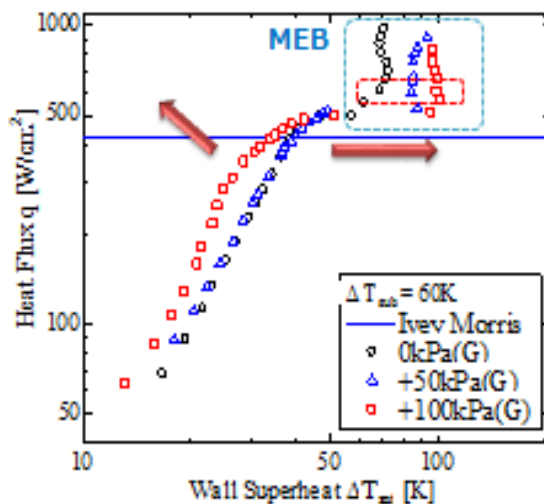


図 8 加圧サブクールプール沸騰特性
サブクール度=60K

4 - 4 マイクロチャンネルのサブクール沸騰
実験結果の例として、サブクール度 70K の純水の質量流量について図 9 に示す。質量流量の増加に伴って熱流束も増加しているが、

MEB の発生は確認できなかった。サブクール度 70K で最大熱流束は CHF 近傍の 3MW/m^2 (300W/cm^2) 程度である。これは、Ping Cheng[4]の結果と比較して発熱部の熱容量が大きいと考えられる。マイクロチャンネルで電子チップの除熱を行う場合は、マイクロフィルムヒーターより熱容量が大きいと考えられるので、MEB は期待できない。

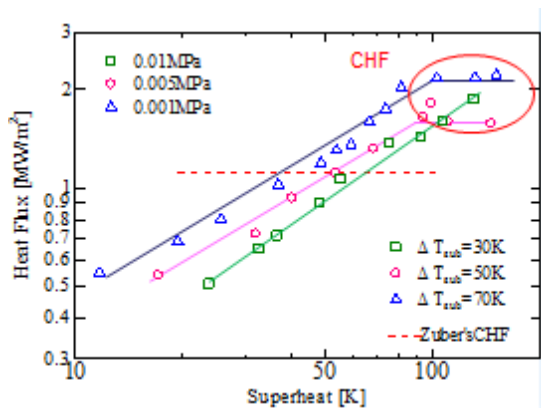


図9 マイクロチャンネルの沸騰;サブクール度の影響, 質量流量= $500\text{kg/m}^2\text{s}$

4 - 4 音響振動場におけるサブクール沸騰

MEB が発生する境界サブクールは 20K であることが分かっているので、実験はサブクール 20K で行った。その結果を図 10 に示す。核沸騰では音響振動の影響は見られないが、遷移沸騰の初期において、周波数 500Hz 付近 (30~50W) で気泡のゆらぎと共に熱流束の維持される部分が確認された。CHF を超えることはなかったが、高い熱流束を示す MEB と

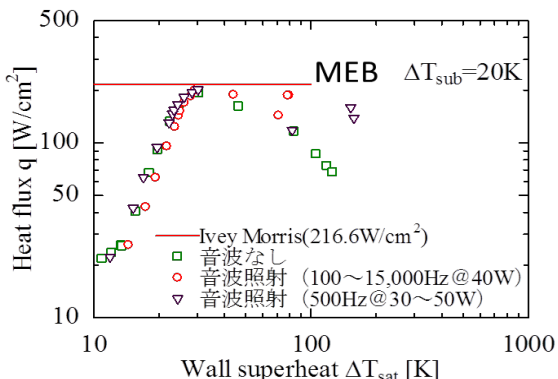


図 10 音響振動場における純水のサブクールプール沸騰。サブクール度 = 20K

考えられる。さらに加熱すると瞬時に膜沸騰に移行した。

エチレングリコール 50vol%水溶液の MEB を高速度ビデオカメラ(150Frames/s)で撮影し微細気泡挙動を PIV 解析した結果を図 11 に示す。微細気泡の挙動から合体気泡の中に向かう流れのあることが確認できた。すなわち MEB の固液接触のメカニズムと考えられる。

以上の実験結果は、合体気泡の気液界面の不安定性が増幅して微細気泡に崩壊すると同時にサブクール液が伝熱面に供給される MEB のメカニズムを表していると考えられる。

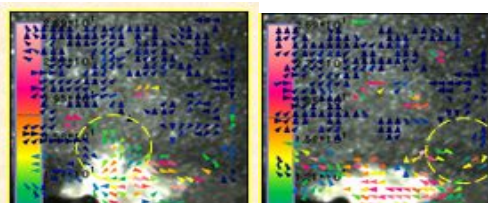


図 11 PIV 解析による MEB の伝熱面近傍のサブクール液の流れ, エチレングリコール 50vol%の水溶液, サブクール度 40K

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 3 件)

Koichi Suzuki, Kazuhisa Yuki, Gang Chen (Xi-an Jiao Tong Univ.), Cyungpyo Hong (Kagoshima Univ.), “Microbubble Emission Boiling of Binary Mixtures (Advanced cooling technology for future power electronics)”, ICMF-2013; Intel. Conf. on Multiphase Flow, ICMF2013-946, 2013.

K. Suzuki, K. Yuki, G. Chen and C. Hong, “High Heat Flux Cooling Technology for Power Electronics (Subcooled Boiling of Water Mixture of Antifreeze Coolants)”, Proc. ISTP23, paper No.222, 2012.

Koichi Suzuki, Kazuhisa Yuki, Masataka Mochizuki,” Application of Boiling Heat Transfer to High Heat Flux Cooling Technology in Power Electronics”,

Transaction of Institute of Electronics Packaging, Vol.4, No.1, pp.52-60, 2011.

〔学会発表〕(計10件)

鈴木康一, 結城和久, 陳燕, “気泡微細化沸騰の高熱流束冷却技術への応用”, 日本機械学会 熱工学コンファレンス, 2013.10.19, 弘前大学.

Koichi Suzuki, Kazuhisa Yuki, Yen Chen, “Subcooled Boiling with Microbubble Emission (Application for high heat flux cooling device in Power electronics), 9th UK-J Seminar on Multi-Phase Flow, 2013.9.16, Brunel University, London.

鈴木康一, 結城和久, “次世代高熱流束冷却技術(気泡微細化沸騰の実用化にむけて)”, 日本混相流学会混相流シンポジウム 2013.8.9, 信州大学.

Koichi Suzuki, Kazuhisa Yuki, Gang Chen, Cyungpyo Hong, “Microbubble Emission Boiling of Binary Mixtures (Advanced cooling technology for future power electronics), Intel. Conf. Multi-phase Flow 2013.5.26, Jeju 国際会議場, 韓国

Koichi Suzuki, “Advanced Cooling Technology for Next Generation Power Electronics”, 7th Intel.Symp.on Two-Phase Systems for Ground and Space applications (招待講演), 2012.9.17, 北京 香山飯店 会議場.

鈴木康一, 結城和久, 陳剛, “微細重力環境における高熱流束輸送技術にむけて; 気泡微細化を伴うサブクール沸騰”, 日本混相流学会年会講演会 2012 (招待講演), 2012.8.91, 東京大学柏キャンパス.

K. Suzuki, K. Yuki, G. Chen and C. Hong, “High Heat Flux Cooling Technology for Power Electronics (Subcooled Boiling of Water Mixture of Antifreeze Coolants), ISTEP23, 2012.11.19, Aucland University, New Zee Land.

Koichi Suzuki, Kazuhisa Yuki, Chunpyo Hong, Subcooled Boiling with Microbubble Emission(On mechanisu of MEB generation), 22nd Intel.Symp. on Transport Phenomena, 2011.11.9, Delft Technical University, Netherland.

鈴木康一, “Observation of Bubbles on Wetting Surface in Subcooled Boiling”, 11th Asian Symposiumu on Visualization, 2011,6,5, Toki Messe, 新潟.

鈴木康一, 結城和久, 望月正孝, “Application of Boiling Heat Transfer to High Flux Cooling Technology in Power Electronics”, Intel. Conf. on Electronics Packaging, 2011.4.13, 奈良国際会議場.

〔図書〕(計3件)

鈴木康一, 結城和久(分担執筆), 一般社団法人 日本機械学会, RC256 エレクトロニクス実装のプロセスと製品における信頼性評価と熱制御に関する研究分科会 研究報告書, 605, 2014.

鈴木康一, 株式会社テクノタイムズ, 月刊ディスプレイ 11月号(連載 伝熱工学. 沸騰), 104, 2013.

鈴木康一 他, 一般社団法人日本機械学会, RC248 電子実装における信頼性設計と熱制御に関する研究分科会, 691(分担執筆 675-691), 2012.

〔産業財産権〕

出願状況(計0件),

取得状況(計0件)

〔その他〕ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

鈴木 康一 (Suzuki, Koichi)

山口東京理科大学・工学部機械工学科・教授

研究者番号: 10089378

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし