# <u>修士論文</u>

# サブクール下加熱細線の気泡微細化沸騰

# <u>通し番号 1 72 完</u>

# <u>平成 16 年 2 月 13 日提出</u>

# 指導教官 庄司 正弘教授

# 26197 湯浅 真樹

目次

第-	−章	序論	4
1.1	研究	の背景	5
1.2	従来	の研究	9
1.3	本研	究の目的	14
第二	二章	実験	15
2.1	実験	概要	16
2.2	実験	仕様	17
2.3	実験	方法および解析	26
第三	三章	結果と考察	28
3.1	沸鷹	田線と伝熱効果	29
3.	1.1		29
3.	1.2		30
3.	1.3	沸騰曲線とMEB	33
3.2	沸騰	様相の画像観察	34
3.	2.1	熱流束による沸騰様相変化	34
3.	2.2	サブクール度による沸騰様相変化	38
3.	2.3	考察	41
3.3	気泡	径の測定	42
3.	3.1	気泡径の算出	42
3.	3.2	測定結果	44
3.	3.3	考察	48
3.4 沸騰音の解析			
3.4	4.1	FFTとスペクトルの検出	49
3.	3.2	周波数解析	52
3.	3.3	考察	63

第四章 結論	66
付録	68
参考文献	70
謝辞	71

# 第一章 序論

# 1.1 研究の背景

## <u>沸騰と伝熱</u>

物質が固体・液体・気体の間で状態変化する相変化の過程では,熱を吸収したり,放出したり というような熱伝達が行われる.このような相変化を伴う熱伝達の特徴は,通常の温度変化によ る熱量,すなわち顕熱 (sensible heat) に比べて非常に大きな潜熱 (latent heat) により熱輸送が 行われるため,小さな温度差で多量の熱を運ぶことが出来る.

相変化を伴う伝熱の中で,最も広く利用されているの伝熱形態は沸騰と凝縮である.火力発電 所のボイラや,蒸発器と凝縮器を持つエアコンなどが代表的なところである.

沸騰伝熱の特徴は,気液相変化に伴う潜熱により熱輸送が行われるため,他の伝熱形態に比べ て格段に優れた伝熱性能を有しているという点にある.大気圧下における水の沸騰伝熱の場合, 熱伝達率が10<sup>4</sup>~10<sup>5</sup> [W/(m<sup>2</sup>·K)] と非常に大きい.また,気泡の発生を伴うために,現象の理論 的取り扱いが困難であり,未知の部分も多い.熱伝達率や熱流束を予測するには実験式,経験式 に頼らざるを得ない.しかしながら,その良好な熱伝達のために他の伝熱形態との組み合わせで 沸騰が大きな伝熱抵抗となることは少ない.

## <u>飽和沸騰とサブクール沸騰</u>

沸騰現象は周囲の液体温度によって二つに分類される.液体温度が系の圧力に対する飽和温度 に達している場合を飽和沸騰(saturated boiling)と呼び,飽和温度より低い過冷却(subcooling) の状態にある場合をサブクール沸騰(subcooled boiling)という.一般的に飽和沸騰では発生し た気泡は伝熱面から離脱・上昇し,液面まで到達するが,サブクール沸騰の場合は伝熱面近傍で 凝縮し気泡は消滅する.(Fig. 1.1.1)



Fig. 1.1.1 Saturated boiling and Subcooled boiling

## 気泡微細化沸騰

ここでは加熱面を細線にした場合について論じる.通常飽和沸騰では,細線への電気入力を上げ,熱流束を増大させていくと,「核沸騰域 限界熱流束に到達 膜沸騰へ移行」という流れとなる.(Fig. 1.1.2)



Fig. 1.1.2 Change of boiling phase

細線飽和沸騰では上図のように沸騰様相は変化するが,実験液体の温度をやや下げると,サブ クール沸騰に特有な気泡の凝縮が見られる.(Fig. 1.1.3)



Fig. 1.1.3 Subcooled film boiling

しかし,一定以上のサブクール度をもった実験液体を用いて細線の熱流束を増大させていくと,

飽和沸騰時の限界熱流束を大きく超え,細線全体から霧状に微細な気泡が激しい立ち昇る現象が 生じる.(Fig. 1.1.4)この現象は気泡微細化沸騰(Microbubble emission boiling: MEB)と呼ば れる.大きな特徴として,

熱流束が急激に増大する.
大きな沸騰音を伴う.
加熱面全体で発生する.
などの特徴が挙げられる.



Fig. 1.1.4 Microbubble emission boiling

<u>熱輸送デバイス</u>

昨今,小規模な熱輸送デバイスの研究が進められている.その一つとしてとして注視されているのがヒートパイプである.

ヒートパイプは気液相変化現象を利用したもので,動作原理は Fig. 1.1.5 で示すように,パイプの中に封入された作動流体が蒸発部で外部から熱を吸収して蒸発し,蒸気が管中心部を通って

凝縮部で凝縮することにより熱を放出する.小さな温度差で多量の熱を輸送することが出来るため,宇宙用,電子機器用など様々なヒートパイプが開発されている.最近ではノートパソコンの CPUの冷却などにも利用されている.



Fig. 1.1.5 Principle of operation of a heat pipe

微小伝熱システムへの応用

ヒートパイプの電子機器冷却への応用を例として述べたが,昨今のLSIなどの目覚しい半導体技術の進歩により,より小型でより大規模な熱冷却システムの開発が求められている.しかしながら熱の除去システムは電子機器の小型化に追従仕切れていないのが現状である.

先述したように,気泡微細化沸騰は熱流束の多大な増大が得られる現象である.これをマイク ロミニチャネルなどの微小な熱入力装置で発生させることは熱冷却システムへの導入にアプロー チできる可能性を有することになる.

#### サブクール沸騰伝熱の研究

サブクール沸騰が熱流束の増大をもたらすことは比較的以前から知られていて,多くの研究が なされている.特に工業的汎用性が極めて高いCHF(Critical Heat Flux:限界熱流束)のサブ クール度による変化は様々な実験液体によって確認されている.ここでは主にプール沸騰系の研 究を中心に示すことにする.

#### Ivey, Morrisの研究<sup>[1]</sup>

細線入力(細線径:1.22~2.67mm)によるサブクール沸騰が飽和沸騰に比べCHFが増大することを見出し,次式を提示した.

$$\frac{q_{c,sub}}{q_{c,sat}} = 1 + 0.1(\rho_g / \rho_l)^{1/4} \frac{\rho_l c_p \Delta T_{sub}}{\rho_g h_{lg}}$$
(1)

q<sub>c,sub</sub>,q<sub>c,sat</sub>:サブクール沸騰,飽和沸騰の CHF [W/m²] l,g:水,蒸気の密度 [kg/m³] T<sub>sub</sub>:サブクール度 [K] h<sub>lg</sub>:水の蒸発熱 [kJ/kg]

また,実験結果により「 $q_{c,sub}$  /  $q_{c,sat}$ 」の値のサブクール度による変化をデータ範囲で示した. (Fig.)これはサブクール沸騰と熱流束の関係に着目した最初の事例となった.

#### Elkassabgi, Lienhard の研究<sup>[2]</sup>

Ivey, Morris によって示されたサブクール沸騰とCHFの関係について,イソプロパノール, メタノール,アセトンなど水以外の実験液体を用いて実験を行った.

実験により, T<sub>sub</sub> = 40 K 辺りまではサブクール度の上昇と,「q<sub>c,sub</sub> / q<sub>c,sat</sub>」の値は線形相 関を示すが, T<sub>sub</sub> = 40~60 K 辺りではサブクール度を上げても「q<sub>c,sub</sub> / q<sub>c,sat</sub>」は変化しな いことを報告している.(Fig. 1.2.1)

また, Lienhard はそれより以前に, 非サブクール沸騰系であるが電気入力の細線径の変化によるCHFの変化についても定式化し, 実験を行った.(Fig. 1.2.2) 図中の Equation が線径とCHFの関係式を表す.



Fig. 1.2.1 Effects of subcooling on CHF on a horizontal cylinder (Ivey,Morris 1966)<sup>[1]</sup>



Fig. 1.2.2 Effects of diameter of a cylindrical heater on CHF (Elkassabgi, Lienhard 1988)<sup>[2]</sup>

上図で無次元半径については 細線径 0.1mm ,1.0mm がそれぞれ無次元半径 0.02 0.2 にあたる.

### 気泡微細化沸騰についての研究

サブクール沸騰で加熱面から発生した気泡が微細化し,高熱流束が維持されることは比較的以前から指摘されていたが,現状の詳しい様相が実験によって報告されたのは稲田らによって最初 に報告された.それに伴い様々な研究がなされ,気泡微細化沸騰を表す「Microbubble emission boiling(以下 MEB)」という用語は10年ほど以前から使われるようになってきた.

#### 稲田らの研究[3]

プール沸騰系においてサブクール沸騰による熱流束増大要因を調べるため高熱流束域での気泡 挙動の実験を行った.気泡微細化にも着目し,微細化は凝縮によるところが大きい気泡崩壊現象 という見地から一定のモデル化を試みた.(Fig. 1.2.3)



#### 鈴木,鳥飼らの研究[4]

断面 17mm×17mm の矩形流路に水を流し,下面を加熱してMEBを発生させ,水の液温を流

速がMEBに及ぼす変化を観察した.これにより,水のサブクール度が大きいほど,また流速が 高いほどMEBが激しくなることを見出した.また,気泡まわりの流れの乱れが気泡の崩壊に関 与していると考察した.

熊谷,久保らの研究<sup>[5],[6]</sup>

MEBについて,円形電熱面を用いてマイクロジェットを用いた強制流動系の実験を行い,M EBbには大きな圧力変動と発生音を伴う激しいMEB領域と,比較的穏やかな静かなMEB領 域の二つのフェーズがあり,それぞれが交互に発生すると報告した.

また,マイクロフォンを用いたMEB発生時に発せられる音の測定を行い,MEBにおける熱 伝達の向上と音圧レベルの増大に何らかの相関性があると報告している.

<u>吉原,庄司らの研究[7],[8]</u>

細線を用いた強制流動系のサブクール沸騰の実験を行い, CHFとサブクール度の関係につい てデータを取り, Ivey, Morris らが示した限界熱流束のサブクール特性の図に照らし合わせてプ ロットした. Tsub=40[K] 近辺まではほぼ一時相関を示し,それ以降ではCHFは頭打ちに なることを細線沸騰でも実証した.(Fig. 1.2.4)

また,微細化気泡の写真撮影を初めて行っている.



(Shoji,Yoshihara 1991)<sup>[7]</sup>

<u>Celata らの研究<sup>[9]</sup></u>

高サブクール度における流動沸騰の実験を行い,微細化された気泡径の測定を試みた.その中で彼らは,微細化気泡径は40µm以上であり,それより微小な気泡は計測できなかったと論じている.ただしこの研究は非細線系であることを付記しておく.

# 1.3 本研究の目的

本研究では,過去の研究なども勘案して,白金細線を用いた気泡微細化沸騰(MEB)に関して 研究を行う.

まず, MEBを含むサブクール沸騰における沸騰曲線を各サブクール度において求め, MEB の伝熱効果を調べ, 高速度ビデオカメラでその挙動を詳細に観察する.

次に,細線沸騰では詳細に行われていない,微細化された気泡の大きさ(気泡径)について測 定を行う.

そして, MEB発生時に生じる音の測定を行い, 沸騰様相変化との関連性を調べる.

最終的にはMEB発生機構についてアプローチをすることを目標とする.

第二章 実験

# 2.1 実験概要

本実験では気泡微細化沸騰(以下 MEB)を発生させて観察した.実験液体は蒸留水を用い,沸 騰系はプール沸騰系とした.実験パラメタには実験液体の温度と加熱面の熱流束を用い,圧力は 基本的に大気開放として実験パラメタからは除外した.

測定はデジタル・マルチメーターと高速ビデオカメラで行った.デジタル・マルチメーターに よって熱電対で測定した実験液体の温度と加熱面の熱流束を同時に測定できる.

また, MEB 発生時に生じる音を調べるため, マイクロフォンを実験装置の近傍に設置して測定した. 音の測定のついては,発泡時の周波数と音圧レベルを測定することに主眼を置いた.

# 2.2 実験仕様

内径 210mm の円筒形容器(SUS304)内に蒸留水を満たし,中央部に真鍮製の径 10mm の柱 を槽内に浸す.柱の端部に細線を渡す形で半田付けによって取り付け,同時に半田部分に入力用 の導線も取り付ける.

細線には白金を用いる.細線の加熱は,細線に直接電流を流し,これにより発生するジュール 熱によるものとする.

実験液体の加熱は水槽底部に取り付けた補助ヒータによって行い,実験はあらかじめ液温を飽 和温度にして脱気をしてから行う.

MEB の観察は高速度ビデオカメラを用いた.撮影はシャッタースピード 1/3000,フレームレートは 3000fps で行った.

Fig. 2.2.1 に実験装置図を示す. Fig. 2.2.3 に細線沸騰槽の写真を付記する.



1: Water tank8: Scanner2: Vapor condenser9: Digital mltimeter3: Heater10: Computer4: Thermo couple11: DC power controller5: High speed video camera12: Resistor6: Video recorder13: Light7: DC power14: Pt wire



### 実験装置

1: 蒸留水タンク

コックの開け閉めにより実験容器に蒸留水を供給する.

2: 凝縮器

内部を通る冷却水によって実験容器から発生した蒸気を冷却し,それによって出来た凝縮水を 戻して循環させる.図中の矢印は,破線が蒸気の流れを,実線が水の流れを示す.

3: 補助ヒータ

実験液の加熱を行う.入力は直流スライダックによって行う.観察の邪魔にならないよう容器の壁に沿って配置されている.

4: 熱電対

容器の底部から9cmの位置に固定し,液温の測定を行う.液温データは冷接点補償器を通して スキャナに取り込まれ,デジタル・マルチメータで測定結果として得られる.

熱電対の位置については,細線の下部は局所的な液温増大が避けられるものとの判断による. 5: 高速度ビデオカメラ (Fig. 2.2.5)

現象の観察と記録を行う.シャッタースピードは 1/3000,フレームレートは 3000fps で測定した.接写撮影 (Fig. 2.2.7)には,長距離ズームレンズ(KEYENCE VH - Z35)を使用した.

6: ビデオレコーダー

高速度ビデオカメラで撮影した映像を一旦レコーダーに取り込んでからビデオテープに保存する.3000fps で測定したものに対してビデオテープは 30fps で記録するので,測定時間の約100 倍の時間をかけて記録することになる.

7: 直流電源

白金細線に電流を通電させる電源装置.最大出力電圧 15 V.

8: スキャナ

細線に通電された電圧値,電流値,熱電対から得られる液温データを読み込んでデジタル・マルチメータへデータを送る.デジタル・マルチメータへのデータ送信は GP - IB によって行われる.

9: デジタル・マルチメータ

スキャナからの細線入力・液温の情報を受信し,細線温度,細線抵抗値,熱流束などの計算を行う.諸計算は細線全体を積分し,全体の平均値として計算する.また,パソコンからのプログラム指令を受け,

10: パソコン

デジタル・マルチメータ,直流電源コントローラと接続し,実験系の制御,データの記録を行う.

11: 直流電源コントローラ

パソコンと直流電源をつなぎ、細線の電圧値変化のコントロールを行う、

12: 標準抵抗器

100A/1V,誤差±0.05%のものを用いる.

13: 光源 (Fig. 2.2.6)

主として後方から照射する.直接実験部を照らすのではなく,間にトレーシングペーパーとす りガラスを挟んで光量を調節している.

14: 白金細線

白金細線は直径 0.3mm,長さ 30mm とする.焼き鈍し済みのものを用いるが,半田付けで取り付けるため,念のため実験前に再度焼き鈍しする.気泡発生を促進するため取り付け前に微粒のエメリーペーパーで軽くヤスリがけしておく.細線に入力される熱流束( $q_w$ )と,細線面温度( $T_w$ )については,以下のようにして測定する.

熱流束  $q_{w}$  (W/m<sup>2</sup>)

細線を一つの電気抵抗体(ヒータ)と考えると,単位時間に発生する熱量 $Q_w(W)$ は,細線両 端間の電圧 $E_w(V)$ と細線を流れる電流 $I_w(A)$ から, $Q_w = E_w I_w$ で求められる.この熱量  $Q_w$ が細線表面全体から液体へ伝えられる.したがって,細線表面の熱流束 $q_w$ の値は, $Q_w$ と 細線の表面積

S = DL(D:細線の直径 L:細線の長さ)から次式で計算できる.

$$q_w = \frac{Q_w}{S} = \frac{E_w I_w}{\pi DL}$$

なお, *E<sub>w</sub>* と *I<sub>w</sub>* はともにデジタル・マルチメータで測定する.

加熱面温度  $T_{w}$  ( )

白金の電気抵抗は温度によって変化するが,温度が定まれば定まった値をとる.このことを 逆に利用して,白金の電気抵抗から白金の温度を求めることができる.すなわち,この実験で 用いる白金細線の電気抵抗は R<sub>w</sub>()は,前記の電圧 E<sub>w</sub>と電流 I<sub>w</sub>から次式で計算できる.

$$R_{w} = \frac{E_{w}}{I_{w}}$$

そして,この電気抵抗に対応する白金の温度を求めればよい.本実験では,白金の温度T<sub>w</sub>と 電気抵抗R<sub>w</sub>の関係は次の多項式で近似するものとする.

$$T_{w} = f(R_{w}) = f\left(\frac{R_{w}}{R_{100}}\right) = \sum_{i=0}^{n} \beta_{i} \left(\frac{R_{w}}{R_{100}}\right)^{i}$$

ここに, *β<sub>i</sub>*は定数, *R<sub>100</sub>*は 100 における白金細線の電気抵抗(基準となる電気抵抗)であ り,100 の液中において実測するものとする. Fig. 2.2.4 に実験装置の細線部分の拡大写真を示 す.

沸騰音の測定のため,実験槽から1cm ほど離れた場所にマイクロフォンを設置した.Fig. 2.2.2 に概要図を示す.

<u>実験装置(音測定用)</u>



15: Microphone 16: Amplifier 17: Data logger

# Fig. 2.2.2 Sound measurement apparatus

15:マイクロフォン[Sony 製] (Fig. 2.2.8)

単指向性マイクロフォン.周波数15kHzまで計測可能.測定時は外部遮音のため周りを厚紙で シールドする.

16:アンプ

微弱な音の出力値を増幅する.1~10000 倍まで増幅可能.

17: データロガー

音データを記録する.データサイズが大きいため記録媒体は MO ディスクを用いる.



Fig. 2.2.3 Experimental apparatus



Fig. 2.2.4 Close - up of the apparatus (-> :Pt wire)



Fig. 2.2.5 Hi speed video camera with zoom lens



Fig. 2.2.6 Light for video recording



Fig. 2.2.7 Close up video shooting



Fig. 2.2.8 Microphone

# 2.3 実験方法および解析

#### 実験手順

本実験は基本的にプログラム制御によって行う.細線両端に加える電圧を任意の間隔で増加あ るいは減少させながら,各測定点におけるデータの取り込み,演算,解析を行う.

本実験の主体となる沸騰実験については,以下の手順で行う.

実験槽内にタンクから蒸留水を満たし,スライダック入力でヒーターを加熱する.

水全体が飽和温度に達し、沸騰したらスライダック入力を下げて脱気する.

スライダック入力を落とし,実験上ターゲットとなる適温まで下げる.実験槽の冷却には スポットクーラーを用いる.

液温が 10 分ほど安定したら細線への入力を開始,自動的に細線からの熱流束値が増大して いくのでパソコン画面で確認し,ビデオ観察が必要な個所では細線入力をストップさせる.

#### 音の解析方法

本実験ではマイクロフォンを用いて微細化沸騰時に発生する音の周波数などを調べる.実験で 使用するマイクロフォンは比較的単純なものであり,実験室は防音のための作業を施していない. このようなノイズの予想される環境でオリジナル信号を調べて周波数成分を特定するのはきわめ て困難である.

そこで音の解析にはFFT(Fast Fourier Transform:高速フーリエ変換)を用いる.FFT はノイズを含む時間領域の記録から周波数成分を検出する手法で,時間系列と出力値のデータか ら,特定の周波数成分とその強さを表すパワースペクトルに変換することが出来る.(Fig. 2.3.1) マイクロフォン単体による微弱な出力を増幅するためアンプを用いる.増幅は 2000 倍とした.









Fast Fourier Transform<sup>[10]</sup>

# 第三章 結果と考察

# 3.1 沸騰曲線と伝熱効果

3.1.1 沸騰曲線

通常,沸騰現象によってもたらされた伝熱効果を調べるためには沸騰曲線を用いる.Fig. 3.1.1 に一般的な沸騰曲線を示す.



Fig. 3.1.1 Boiling curve

図中の T<sub>w</sub>は加熱面温度, T<sub>sat</sub> は飽和温度, q<sub>w</sub> は加熱面熱流束をさしている.熱流束を増大さ せていった際の変化は図中の青矢印で示す.加熱面入力を上げ熱流束を上昇させていくと, 核沸 騰の限界を超えて極めて短時間に加熱面が完全に乾き, T<sub>w</sub>が急上昇し, 図中の矢印で示したよう に遷移する.この遷移開始点は, バーンアウト点と呼ばれ, その際の熱流束が C H F である.今 実験で用いたプログラムでは, この細線温度の急上昇を察知し, その点を C H F として自動的に 検出できる.以降はある程度まで T<sub>w</sub>が上昇してから入力を下げていく.するとある点で先ほどと は逆に急激に Twが下がる.この点を MHF(極小熱流束)と呼ぶ.

これより先,実験で得られた細線沸騰の熱流束上昇の様相についてはこの沸騰曲線で示すことに する.

3.1.2 実験結果

今回の実験で得られた沸騰曲線のデータを示す.データ点はデジタル・マルチメータで記録した過熱度(Tsat)と熱流束値を用い,沸騰曲線は両対数表示する.

飽和沸騰

Fig. 3.1.2 に飽和沸騰( T<sub>sub</sub>=0 [K])の沸騰曲線を示す.MEBを含むサブクール沸騰との 比較のため,飽和沸騰においても細線径,細線長などの実験条件は同様にして行うこととする.



Fig. 3.1.2 Boiling curve : saturated boiling

数回同条件で実験を行った.白金の融点は約1760[]であるが,細線ということを考慮して T<sub>w</sub>については1000[]近辺まで上げて計測している.図中に示したCHF点については,それ ぞれの実験で多少のばらつきは見られたが,おおむね $q = 1.0 \times 10^6$  [W/m<sup>2</sup>]前後となったので, 飽和沸騰のCHF:q<sub>C,sat</sub> =1.0×10<sup>6</sup> [W/m<sup>2</sup>]とする.一般的な沸騰曲線に比べ,過熱度に比べて 熱流束の上昇率が大きいが,細線という入力電力に対して熱流束が上昇しやすい加熱面を使って いる影響と思われる.

#### <u>サブクール沸騰曲線</u>

Fig. 3.1.3 に T<sub>sub</sub> = 20 [K]の沸騰曲線を飽和沸騰のそれと重ねて示す.



Fig. 3.1.3 Boiling curve : **T**<sub>sub</sub> = 20 [K]

途中でプロットが途切れているのは,その点がCHFだというわけではなく,細線の溶断する ポイント近辺なので計測を終了したものである.細線溶断については後述する.

序論でも述べたが, MEBを含むサブクール沸騰で特徴的なのは熱流束の急激な上昇である.

その様子はこの図から見て取れる. 飽和沸騰でのCHFである q = 1.0 × 10<sup>6</sup> [W/m<sup>2</sup>]を大きく突破し, q = 4.2 × 10<sup>6</sup> [W/m<sup>2</sup>](計測終了点)まで上昇した. 過熱度の変化に比べ大きく熱流束が伸びており,以降の沸騰曲線は図中点線のような挙動が予想される.

本実験で得られた沸騰曲線の大きな特徴として,途中で(\*)のように過熱度が一度後退する 現象がある.それまでは緩やかな熱流束の上昇を示し,この(\*)の後で熱流束が急激に伸びて いることからこの過熱度の後退以降が沸騰現象でそれまでは対流現象域(非沸騰域)ではないか と推察される.

#### <u>各サブクール度における沸騰曲線</u>

Fig.3.1.4 に, T<sub>sub</sub> = 20, 30, 40 [K]の沸騰曲線の結果を重ねて示す.



Fig. 3.1.4 Boiling curve : T<sub>sub</sub>

サブクール沸騰実験では高熱流束に達した際に度々細線が溶断した.庄司,吉原らの研究結果 <sup>[7]</sup>から,  $T_{sub} = 30$ ,40 [K]では熱流束は  $q = 1.0 \times 10^7$  [W/m<sup>2</sup>]近辺までは得られると予見したが, 実際は  $q = 5.0 \times 10^6 \sim 6.8 \times 10^6$  [W/m<sup>2</sup>]の範囲で頻繁に溶断してしまい,そのつど実験は中止し た.そのため本実験で得た最大熱流束は, $q = 6.8 \times 10^6$  [W/m<sup>2</sup>]となる.

原因として, 細線沸騰ではMEBに対してある程度耐性の限界がある 本実験装置での細線への入力方法に問題があった の二通りが考えられる.ただ,細線への電流入力のステップを変化させても結果に反映されなかったことから,今回の実験の限りでは が原因ではないかと思われる.

Fig. 3.1.4 の結果から,サブクール度の増大とともに熱流束が上昇している様子がわかり,「サ ブクール度が高いほど熱流束が向上する」という Ivey, Morris の研究<sup>[1]</sup> から既知となっている 結果が得られていることが確認された.

3本の沸騰曲線を比較すると,q = 3.0 × 10<sup>6</sup> [W/m<sup>2</sup>]以上の高熱流束になると過熱度・熱流束値と もに極めて接近しているのが興味深い.

3.1.3 沸騰曲線とMEB

沸騰曲線という形で、MEBの熱流束増大の様子が確かめられた.一般的に沸騰ではCHFに 達するまでは核沸騰領域である.先ほど述べたように本実験ではプログラムがCHF点を計測す る前に全て溶断(バーンアウト)に到達している.そのことを勘案すると今回の細線系における 実験は飽和沸騰を除いて全て核沸騰域での現象と定義するのが妥当である.

MEBについては,過去の研究においても明確な開始点は定義されていない.今回の沸騰曲線 を見ても高熱流束部分で沸騰曲線に特異な変化は見られないが,「急激な熱流束の増大」というM EBの特徴から考えると,Fig. 3.1.4の沸騰曲線から,q=1.5~2.0×10<sup>6</sup> [W/m<sup>2</sup>]からがMEBへ 移行する十分な熱流束であると想定される.

当然ながらこれは厳密なMEB開始点とは言い切れない.よって,MEBの分岐については実際に観察した沸騰挙動を注視することも肝要となる.

# 3.2 沸騰様相の画像観察

ここでは高速度ビデオカメラとズームレンズを用いて観察した細線沸騰の様相について述べる. 実験方法の項でも述べたが撮影は逆光で行い,ビデオカメラのフレームスピードは 3000fps とする.よって1コマ毎の時間間隔は約0.33[ms]である.撮影において変化させるパラメタはサブクール度と熱流束であるが,ここでは固定パラメタ値はそれぞれ一つに絞ることにする.

### 3.2.1 熱流束による沸騰様相変化

ここではサブクール度を一定にして熱流束を変化させた際の沸騰様相の変化を述べる.サブク ール度は T<sub>sub</sub> = 20 [K]とする.サブクール度誤差は±0.5[K]は無視するものとする.

## <u>低熱流束の様相(q: 1.0×10<sup>6</sup> [W/m<sup>2</sup>]以下</u>)

細線入力を続けて細線表面に気泡が発生するのは,実験毎に多少のズレがあるが,おおむねq= 2.0~3.0×10<sup>5</sup> [W/m<sup>2</sup>]である.Fig. 3.2.1 にq=3.0×10<sup>5</sup> [W/m<sup>2</sup>]での画像を示す.これ以降の画像 で黒く矩形で見えるのは実験で用いた直径300µmの細線である.



Fig. 3.2.1  $q = 3.0 \times 10^5 [W/m^2]$ :  $T_{sub} = 20 [K]$ 

ちょうど細線に気泡が初めて発生した時の様子であるが,特徴的な点として, 細線に付着した大きい気泡(図中A)は一定時間たっても消えずにいる. Aの頂点部分が上に引っ張られるような挙動を示し,そこから上にちぎれて上方に流れてい くような挙動を示す.(図中B)

続いて Fig. 3.2.2 に q = 4.5 × 10<sup>5</sup> [W/m<sup>2</sup>]での画像を連続コマで示す 最初の一枚を 0[ms]とし, その後1コマごとに変化の様子を並べる.



Fig. 3.2.2  $q = 4.5 \times 10^5 [W/m^2]$ :  $T_{sub} = 20 [K]$ 

q = 3.0 × 10<sup>5</sup> [W/m<sup>2</sup>]の時と同様に付着気泡の上部が引っ張られて小さい気泡のようなものがち ぎれるような挙動を示すが,付着気泡は振動のような揺れを見せ,発生と消滅を一定の間隔で繰 り返した.

このような上方部分が上に引っ張られる気泡挙動について考察するため, Fig. 3.2.3 に光源を前から当てて撮影した画像を示す.



Fig. 3.2.3 Thermal Plume :  $q = 1.0 \times 10^{6} [W/m^{2}]$ 

Fig. 3.2.3 の赤矢印に見られる流体の流れは一般的にサーマルプルームと呼ばれる熱対流現象 である.この図を見ると, Fig. 3.2.1, 3.2.2 で見られた気泡流れはサーマルプルームによる流体 現象であると判断できる.これはマランゴニ対流と呼ばれる.勿論サーマルプルームは高熱流束 でも発生する現象だが,サーマルプルームによる流れの様子しか気泡に見られないことから Fig. 3.2.1, 3.2.2 で示した現象は沸騰現象ではないと見てよい.

3.1の沸騰曲線の項で, T<sub>sub</sub> = 20 [K]の場合沸騰開始熱流束は q = 5.0 × 10<sup>5</sup> [W/m<sup>2</sup>]以上であると示した.その結果との一致を見る結果だと考えられる.

Fig. 3.2.1, 3.2.2 で見られた様相は, q = 1.0×10<sup>6</sup> [W/m<sup>2</sup>]近辺までは,気泡の振動幅が増えるが大差はない.

## <u>高熱流束の様相(q: 1.0×10<sup>6</sup> [W/m<sup>2</sup>]以上</u>

劇的とは言わなくとも q =  $1.0 \times 10^6$  [W/m<sup>2</sup>]近辺から沸騰様相は激しさを帯び始める.Fig. 3.2.4, 3.2.5, 3.2.6 に q =  $1.0 \times 10^6$ ,  $2.0 \times 10^6$ ,  $3.0 \times 10^6$  [W/m<sup>2</sup>]での画像を示す.


1.0 [ms]1.3 [ms]1.7 [ms]Fig. 3.2.4 $q = 1.0 \times 10^6 \text{ [W/m^2]}$ : $T_{sub} = 20 \text{ [K]}$ 

この熱流束辺りから細線周りに微細化気泡が常に存在するようになってくる.細線付着気泡に着 目すると大気泡が比較的密に発生し,発生から崩壊に至る時間は更に短くなっている.画像では わかりにくいが,大気泡の頂点部分から小気泡が発生する様子は確認できる.



撮影は(×70)で行っているが, 微細化気泡数はさらに増大し, ここまで接写しても細線周り全 体に微細化気泡が立ち上っている様子が見て取れる、細線付着気泡の崩壊過程はさらに激しさを 増している.



0.7 [ms]



1.0 [ms]



1.3 [ms]

1.7 [ms]

 $q = 3.0 \times 10^6 [W/m^2]$  :  $T_{sub} = 20 [K]$ Fig. 3.2.6

q = 3.0 × 10<sup>6</sup> [W/m<sup>2</sup>]になると,様相もかなり変化してくる.

第一に細線付着の発生気泡がかなり大きくなっている.3枚目(0.7[ms])から,隣り合った気 泡同士が重なりつつあるような様相が見て取れることから,付着気泡同士が高速度で合体してい るものと思われる.

次に、細線付着気泡の画像が幾分ゆらいで(ぼやけて)見える.これは気泡の発生と消滅のス パンが極めて早くなったことによるもので, MEB現象が激しくなっていることが伺える.

<u>3.2.2</u> サブクール度による沸騰様相変化

熱流束を一定にして,サブクール度を変化させた際の沸騰様相の変化を示す.熱流束について

は、微細化現象が進行している q = 2.0 × 10<sup>6</sup> [W/m<sup>2</sup>]で固定とする .サブクール度は T<sub>sub</sub> = 20 , 30, 40, 50[K]と変化させる .

Fig. 3.2.7, 3.2.8, 3.2.9, 3.2.10 に T<sub>sub</sub> = 20, 30, 40, 50 [K]における沸騰様相を示す.







1.0 [ms]



1.3 [ms]



1.7 [ms]

Fig. 3.2.9

- $T_{sub} = 40 [K]$  :
  - $q = 2.0 \times 10^6 \; [W/m^2]$



結果から見ると細線付着気泡に変化が見られる. T<sub>sub</sub> = 20[K]では付着気泡が比較的明瞭に大 きく確認できるが,サブクール度が増大するに従って確認しづらくなる.この傾向は熱流束を変 化させても不変であった.これは付着気泡が発生後成長する前に崩壊することを示しているのは 勿論だが,もう一つ理由が考えられる.

T<sub>sub</sub> = 50 [K]ほどの高サブクール度になると微細化気泡が極めて高速に細線周りを飛び回るので細線周辺の流体がゆらぐ.これが付着気泡の姿を不明瞭にしているものと考えられる.

#### 3.2.3 考察

画像観察の結果として以下の点が確かめられた.

沸騰開始以前にも細線に気泡は発生するが挙動は熱対流流れの様相のみを示す.

3000fps の撮影で追えないほど高速の気泡崩壊の様相を示すのはおおむね q = 2.0 × 10<sup>6</sup> [W/m<sup>2</sup>]以上の熱流束値になってからである.

サブクール度の増大はより気泡崩壊のタイムスパンを加速させる.

以上のことから, MEB(気泡微細化沸騰)と解釈できるのは q = 1.0~2.0×10<sup>6</sup> [W/m<sup>2</sup>]の熱流 束値以降に限られると判断できる.

今回の実験を行う前は高速度ビデオカメラのフレームスピードは 3000fps で十分と考えていた が、高熱流束・高サブクール度においては1コマ後に気泡の発生と消滅を繰り返してしまうので 実際のMEBの発生メカニズムを画像分析することは不可能となった.MEBの発生機構として は気泡の「凝縮」ではなく「崩壊」であることは確実視される.メカニズムの画像からの考察と しては、細線付着気泡について、上部に多大な圧力が加わること 気泡自体が激 しく振動すること の二つの相互作用でするものと思われるが、よりフレームスピードを上 げての観測が今後必要となってくるのは論を待たない.

### 3.3 気泡径の測定

序論でも述べたが,これまでの研究でMEBによって発生する微細化気泡を測定した研究事例 及び実験データは少ない.Celataらが気泡径の測定を行ったが,彼らは最大気泡径=40µmと報 告しているのみである.<sup>[9]</sup>しかし実際に実験して観察すると,それよりも微小と思われる気泡 が発生している.今実験では高速度ビデオカメラで撮影した画像を元に発生した気泡径を実際に 測定し,その分布を調べた.

MEB現象の様相と微細気泡径の関連性について考察するのが第一の目的であるが,それ以外の側面も有する.MEBを微小熱伝達システムに応用するケースを想定すると様々な形態が考えられるが,例えばマイクロチャネルなどは幅1mm程度の流路を用いる.MEBにより発生する気泡の大きさを把握することで,気泡がスムーズに流れるマイクロチャネルの設計などに適用できる可能性を持つことになる.

一般に伝熱システムについては加熱面熱流束に比べて液温を保持することのほうが困難である. よって,サブクール度変化をターゲットにすることが熱システムへの応用を考えると汎用性が高 いと考え,熱流束を一定にしてサブクール度の変化による気泡径の変化を調べることを目的とす る.

<u>3.3.1 気泡径の算出</u>

先述したように沸騰によって生じる気泡は激しい動きを示すので,ダイレクトに気泡の大きさ を測定するのは困難を伴う.今実験では高速度ビデオカメラで撮影した画像を元に行うことにす る.Fig. 3.3.1 にあるMEBの画像を示す.



Fig. 3.3.1 Image of MEB (× 30)

下部に濃い黒色で写っているのが細線である.基本的に画像は細線にピントを合わせている. 細線上部に発生した微細気泡を測定するのだが,気泡を選別する領域を考える必要がある.

図中Bの領域は細線に付着した気泡が、「生成 崩壊」を起こす範囲であるので、当然微細 気泡もその付着気泡の影響を受ける.またあまりにも細線から離れた領域となると液温が上昇す るものと推定される上、気泡も激しい運動をした後なのでMEBによって発生した気泡としては 厳密性にかける.そこで、測定対象となる気泡はFig. 3.3.1 中のAの領域から選ぶこととする. Fig. 3.3.2 に抽出する領域を示す、領域は細線から上方に約 500~800 µ m離れた区間を選んだ.



Fig. 3.3.2 Extraction of the area

気泡径の導出にあたって,拡大した画像ほど詳細な測定ができるが,高サブクール度・高熱流 束になってくると細線近傍でサーマルプルームによるゆらぎが大きくなる.また,上図のような 画像から直接読み取ると測定誤差が著しく増大することが予見される.

そこで画像にコントラストをつけることにする.そして明瞭な気泡の形(球形上)を示したものを採取することとする.撮影は細線にピントを合わせて行い,細線幅(300µm)を基準に気泡 径を測定するので,コントラストをつけて明確な像を結ばなかった気泡についてはサンプルとし て不適当であると同時に測定が出来ないので除外される.また,気泡同士が合体しているものも 除外する.Fig. 3.3.3 にコントラストをつけた画像と採取する気泡の例を矢印で示す.



Fig. 3.3.3 Extraction of bubbles (×70)

画像の中でより明瞭なコントラストを示したものから採取するものとする.気泡の採取にあた り,サンプル数は30個とした.おおむね一つの画像から6~7個を目処に採取し,Fig.3.3.3の ような画像4~5枚から採取するものとした.当然のことながら,画像については画面上の気泡が 完全に入れ替わる必要があるため,画像はそれぞれ100[ms]以上時間間隔が開いたものを選別す るものとする.

径の測定は画像をビットマップファイルとして matlab で読み込んで,画像のピクセル数から 算出する方法をとる.

3.3.2 測定結果

測定は,熱流束値を保持してサブクール度を変化させて行った.熱流束値は q = 2.0 × 10<sup>6</sup>,3.0 × 10<sup>6</sup> [W/m<sup>2</sup>]の二種類で行った.サブクール度はそれぞれ6段階に変化させ,各サブクール度に ついてサンプル数は 30 とする.気泡径分布の表示については,2[µm]毎に領域を分割して各領 域に現れたサンプルをプロットするヒストグラム形式にした.分布の偏在を示すため,領域が重 なったサンプル(各々気泡径の差が2[µm] 以内)については偏在の程度を視覚化して示す.  $q = 2.0 \times 10^{6} [W/m^{2}]$ 

Fig. 3.3.4 に q = 2.0 × 10<sup>6</sup> [W/m<sup>2</sup>]における気泡径分布を示す.



Fig. 3.3.4 Bubble radius distribution (  $q = 2.0 \times 10^6 \text{ [W/m^2]}$ )

サブクール度に関しては, T<sub>sub</sub> = 20.5 53.4 [K]と変化させた.図中の円が気泡径の分布を, 円の大きさが分布の偏りを示す.円が大きいほどその径の値を持つ気泡が多いことを表している. 赤線で示した平均気泡径については,単純に「サンプル値の合計÷サンプル数」で行っている. 結果から,低サブクール度ほど気泡径のばらつきが大きく,高サブクール度になるほどばらつ き幅は小さくなることが見て取れる.気泡径については予想通り40µm以下のものが多数検出さ れた.

 $q = 3.0 \times 10^{6} [W/m^{2}]$ 

Fig. 3.3.5 に q = 3.0 × 10<sup>6</sup> [W/m<sup>2</sup>]における気泡径分布を示す.プロット法は同様である.



Fig. 3.3.5 Bubble radius distribution (  $q = 3.0 \times 10^6 [W/m^2]$ )

サブクール度は  $T_{sub} = 20.0$  56.6 [K]と変化させた.サブクール度による気泡のばらつき方 については  $q = 2.0 \times 10^6$  [W/m<sup>2</sup>]と同様のことが言える.また,  $T_{sub} = 56.6$  [K]において直径 7  $\mu$  m 以下の気泡が検出された.過去の研究例から見ても極めて微小な気泡である.

#### 熱流束による平均気泡径の比較

Fig. 3.3.6 に , q = 2.0×10<sup>6</sup> , 3.0×10<sup>6</sup> [W/m<sup>2</sup>] それぞれの平均気泡径のサブクール度による推移の比較を示す .



Fig. 3.3.6 Average bubble diameter T<sub>sub</sub>

図中の曲線は各値の最小二乗曲線をとったものである. $q = 3.0 \times 10^6 [W/m^2]$ は上下にばらついているが,おおむね同じ相関を示し,熱流束の変化は平均気泡径に大きな影響を及ぼしていないことが確認できる.しかし, $q = 3.0 \times 10^6 [W/m^2]$ は測定の最大サブクール度になってもまだ平均気泡径は下降傾向を示している.

3.3.3 考察

実験による測定の結果,過去の研究事例に比べて非常に小さな気泡がMEBでは発生することが確かめられた.加えて今回の測定で以下の点が明らかとなった.

低サブクール度でも径の小さな気泡は存在するが,高サブクールになるにつれて,より気 泡径のばらつきが抑えられること.

T<sub>sub</sub> 40 [K]では,気泡はおおむね直径 30 µ m以下(q = 3.0 × 10<sup>6</sup> [W/m<sup>2</sup>]では 25 µ m 以下)に抑えられること.

熱流束による気泡径の変化はドラスティックではないが,検出された最小気泡径,平均気 泡径のサブクール度による推移を見ると高熱流束の方がより微小な気泡を発生させること.

MEBにおいては, T<sub>sub</sub> 40 [K]では比較的安定した大きさの気泡が得られることが確認された.序論でも述べた庄司,吉原らの研究<sup>[7]</sup>でサブクール細線沸騰では T<sub>sub</sub> 40 [K]からは安定したCHFの値が得られることを考えると興味深い結果である.(Fig. 1.2.4)

### 3.4 沸騰音の解析

これまでは高速度ビデオカメラでのビジュアル的な沸騰様相の解明に主眼を置いてきた.ME Bを含むサブクール沸騰は特異な大きな発生音を伴うことは第一章で先述している.ここでは視 点を変えて音と本実験の沸騰現象との関連性を調べるため,沸騰音の解析から得た結果と考察を 示す。

#### <u>3.4.1 FFTとスペクトルの抽出</u>

第二章で述べたように,音の解析にはFFT(高速フーリエ変換)を用いた.実際の気泡挙動の観察に使用した高速ビデオカメラのフレームスピードは3000 fpsで行ったので,10000[Hz]以上の周波数を拾うのは理論的に意味をなさないと判断し,音の測定に使用するサンプリング周波数は20k[Hz]とした.これは,サンプリング周波数の半分の周波数まで測定が有効とされるサンプリング定理によるものである.

Fig. 3.4.1 に実際に測定した音の波形のFFT処理を施した結果の一例を示す.FFTの性質として,サンプリング周波数の半分から以降は対称波形を示すので,ナイキスト周波数10000 [Hz] で切ってある.



Fig. 3.4.1 Spectrum of sound (frequency – power spectrum)

50[Hz]付近に一本の大きなスペクトルが見えるが,これはアンプの電源電圧値をカットしなかったために検出されたものなので無視する.

このスペクトル図はあくまでFFTを施したものそのままなので,縦軸はパワースペクトル となり,このままでは縦軸の値は音としての意味をなさない.

パワースペクトルの音の物理変換手法には様々な方法があるが,ここでは最も広域的に使われているデシベル変換を用いる.デシベル変換は以下の通りに行う.

 $SPL[dB] = 20\log_{10}(Pyy)$ 

ここで *Pyy* は Fig. 3.4.1 の縦軸にあたるパワースペクトルの絶対値を, *SPL* は音圧レベル (Sound Pressure Level)を表す.音圧レベルは音の大きさの相対値を表し, *SPL* = 0 を基準と する.

Fig. 3.4.2 に, Fig. 3.4.1 に上記のデシベル変換を施したスペクトル図を示す.



Fig. 3.4.2 Spectrum of sound (frequency – SPL)

Fig. 3.4.2 を見ると明らかなように,波形の大部分を占めているのはSPL(音圧レベル)が0以

下のスペクトルである.一般的にはこれらはノイズとみなされている.当然のことながらこれら 低SPL値のスペクトルも全て含めて音の構成要素ではあるが,今回の実験では沸騰による音の 特徴的な変化をもたらす周波数を分析するため,SPLが低いものはカットし,ある程度突出し たスペクトルを抜き出すこととする.低SPL帯をカットするのは解析の厳密性から外れる懸念 があるが,今回は特異な音圧を示したものだけを抽出することとする.抽出するスペクトルは「S PL 0」のもののみとする.

Fig. 3.4.3 に抽出されたスペクトルを示す.



Fig. 3.4.3 Extraction of spectrums

これにより,沸騰発生音において突出した音圧レベルを示す周波数を選ぶことが出来る.以下 の音のスペクトル分析は全てこの方法で抽出したものを用いる.

#### 3.4.2 周波数解析

沸騰音の計測結果を示す.測定したサブクール度は  $T_{sub} = 1.5$ ,9,20,30,40 [K]の五通 りについて実験を行った.計測はサブクール度を一定にして徐々に細線熱流束を上げていく方法 で行った.測定開始熱流束は,マイクロフォンの波形がはっきり振れてくる  $q = 6.0 \sim 7.0 \times 10^5$ [W/m<sup>2</sup>] 付近からとし,測定終了熱流束は,各々細線の耐久を考慮し,  $T_{sub} = 20$ ,30,40 [K] については $q = 4.0 \times 10^6$  [W/m<sup>2</sup>]とし,  $T_{sub} = 9$  [K] は $q = 2.0 \times 10^6$  [W/m<sup>2</sup>],  $T_{sub} = 1.5$ [K] は  $q = 1.0 \times 10^6$  [W/m<sup>2</sup>]とした.得られたデータを一定時間 (120[s])で区切り,それぞれをスペク トル表示するものとする.

#### 飽和沸騰

当然のことながら通常の飽和沸騰でも沸騰発生音は生じる.よって,MEBの音測定の考察に おいて飽和沸騰での音周波数を解析する必要がある.

一般にプール沸騰系で飽和温度(水の場合 100)を常に保持しつづけるのは困難である.実験では,補助ヒータによる加熱を続けたまま沸騰実験を行い, T<sub>sub</sub> = 1.5 [K] で測定した.厳密には飽和沸騰ではないがCHFも飽和沸騰と同様の結果が得られたので問題ないとした.以降の図では飽和沸騰(saturated boiling)と表記する.なおq = 1.0×10<sup>6</sup> [W/m<sup>2</sup>]においてCHFに達したので,測定はその時点で終了とした.

Fig. 3.4.4 に q = 1.0 × 10<sup>6</sup> [W/m<sup>2</sup>]のときのスペクトル図を示す.なお,100[Hz]以下の低周波数 はあらかじめカットして表示する.



Fig. 3.4.4 Spectrum of saturated boiling  $(q = 1.0 \times 10^{6} [W/m^{2}])$ 

波形は「SPL 0」のものだけを抽出しているので,図中で縦方向に0からわずかに浮いて いるようなスペクトルもあるので注意されたい.500~1000 [Hz]までの域の狭い範囲にスペクト ルが認められる.

次に, Fig. 3.4.5 に熱流束の増大に伴うスペクトルの推移を示す.



Fig. 3.4.5 Saturated boiling - comparison of heat flux

途中でイレギュラーとも取れるスペクトルが出ているが,熱流束の増加に伴う周波数帯の大きな遷移は認められない.熱流束を増加することにより,音圧レベル(SPL)が少しずつ伸びていく様子が認められる.以上の結果より,飽和沸騰では支配的な沸騰音の周波数帯は 500~700[Hz] に存在することが確かめられた.

次に低サブクール度でのサブクール沸騰の測定のため,  $T_{sub} = 9[K]で測定を行った.Fig. 3.4.6 に q = <math>1.0 \times 10^6 [W/m^2]$ におけるスペクトルを示す.ここで初めて周波数帯が二つ検出された.



Fig. 3.4.6 Spectrum (  $T_{sub} = 9[K]$ ; q = 1.0 × 10<sup>6</sup> [W/m<sup>2</sup>])

実際測定した音をサウンドファイルに変換して聴いてみたところ, 飽和沸騰ではやや鈍い「ゴオー」というようなこもるような音がしていたが, T<sub>sub</sub> = 9[K]では「シュー」といった高い音に変化している.

Fig. 3.4.7 に熱流束増加に伴うスペクトルの推移を示す.



Fig. 3.4.7  $T_{sub} = 9[K]$  - comparison of heat flux

熱流束が変化しても周波数帯については, 700~1000[Hz] 2600~2800[Hz] の二つに明確に分かれている.SPLの観点から見ると, , 双方ともスペクトルは熱流束の 増加に伴って安定して伸びているが,終始 のスペクトルが のスペクトルよりも高いSPL を示しているのが見て取れる.

 $T_{sub} = 20[K]$ 

T<sub>sub</sub> = 20[K]以降においては,q = 4.0 × 10<sup>6</sup> [W/m<sup>2</sup>]まで測定を行った. T<sub>sub</sub> = 20[K]につ いては,熱流束増加とともにスペクトルに変化が見られるので熱流束増加に伴うスペクトルの推 移のみを示す.(Fig. 3.4.8)



Fig. 3.4.8  $T_{sub} = 20[K]$  - comparison of heat flux

T<sub>sub</sub> = 20[K]と同様に大別して二つの周波数帯が得られたが, T<sub>sub</sub> = 9[K]の時と比べると 低周波域において 800~900[Hz]と 900~1000[Hz]の狭い範囲に二つのスペクトルのピークが 認められる.ただ, T<sub>sub</sub> = 9[K]の時と比べて間の 800~900[Hz]の部分でスペクトル密度が疎 になっているだけの可能性もある.よって全体の周波数帯は二つと見てよいであろう.

Fig. 3.4.8の図の大きな特徴として,二つの周波数帯におけるSPLの大小が「低周波帯 高周 波帯」へと途中で逆転していることが見て取れる.途中のスペクトル変化の過程を見ると明瞭な 逆転とは言いがたいが,q=1.0×10<sup>6</sup> [W/m<sup>2</sup>]以上の沸騰領域で考えれば, T<sub>sub</sub> = 20[K]におい て沸騰音は高周波帯が支配的になったと判断できる.  $T_{sub} = 30[K]$ 

さらにサブクール度を上げて測定を行った.この辺りからは沸騰音はさらに「シャー」という 高い音になっていく.Fig. 3.4.9 に T<sub>sub</sub> = 30[K]における特徴的なスペクトルを, Fig. 3.4.10 に 熱流束増加に伴うスペクトルの推移を示す.



Fig. 3.4.9 Spectrum (  $T_{sub} = 30[K]$ ; q = 3.0 × 10<sup>6</sup> [W/m<sup>2</sup>])



Fig. 3.4.10  $T_{sub} = 30[K]$  - comparison of heat flux

T<sub>sub</sub> = 30[K]においては, T<sub>sub</sub> = 20[K]のスペクトルと比べて大きな変化が認められる. T<sub>sub</sub> = 20[K]までは明確に認められた 1000[Hz]以下の低周波数帯が,低熱流束においても散発的 にしか認められなくなり,大部分が 2600~2800[Hz]の周波数帯にシフトしている. T<sub>sub</sub> = 20[K]の場合に比べて高周波数帯のSPLの熱流束増加に伴う伸びも大きい.興味深い点として, 今まではスペクトルが認められなかった 1300[Hz]付近に単発的なスペクトルが検出されている.

 $T_{sub} = 40[K]$ 

沸騰挙動はさらに激しさを増してくる. Fig. 3.4.11 に熱流束増加に伴うスペクトルの推移を示す.



Fig. 3.4.11  $T_{sub} = 40[K]$  - comparison of heat flux

T<sub>sub</sub> = 40[K]になると低周波数帯は完全に消え,周波数帯は一つに絞られるといってよい. しかし,一つになった分周波数帯の幅はやや広範囲になり,周波数帯は2500~2800[Hz]となる. SPLについては熱流束の増加に比してさして伸びがないのも特徴的である.

#### 熱流束ごとの比較

これまで述べてきたように沸騰様相はサブクール度変化によって大きく異なる.これまで得られたスペクトルの図を踏まえ,「熱流束一定:サブクール度変化」のスペクトル図を示す.

 $q = 1.0 \times 10^6 [W/m^2]$ 

Fig. 3.4.12 に q = 1.0 × 10<sup>6</sup> [W/m<sup>2</sup>]の時の各サブクール度のスペクトルを示す.この図のみ飽和



Fig. 3.4.12 **q** =  $1.0 \times 10^{6} [W/m^{2}]$  - comparison of **T**<sub>sub</sub>

Fig. 3.4.12 から,サブクール度の上昇とともに 1000[Hz]以下の低周波数帯から 2600~2800[Hz]の高周波数帯にSPLがシフトしていくことがわかる.興味深い点として,高周波数部分は周波数の移動はほとんど認められないのに対し,低周波数帯ではサブクール度の増大とともに少しずつ周波数が増加の方向へシフトしていくことである.また, T<sub>sub</sub> = 20[K] T<sub>sub</sub> = 30[K]を見ると,低周波数帯が急激に消えている様子がわかる.

### $q = 2.0 \times 10^{6}$ , $3.0 \times 10^{6}$ , $4.0 \times 10^{6}$ [W/m<sup>2</sup>]

Fig. 3.4.13 , 3.4.14 , 3.4.15 に各熱流束値におけるサブクール度変化と各スペクトルの遷移を示す .



Fig. 3.4.13 **q** =  $2.0 \times 10^{6} [W/m^{2}]$  - comparison of **T**<sub>sub</sub>



Fig. 3.4.14  $q = 3.0 \times 10^{6} [W/m^2]$  - comparison of  $T_{sub}$ 



Fig. 3.4.15  $q = 4.0 \times 10^{6} [W/m^{2}]$  - comparison of  $T_{sub}$ 

T<sub>sub</sub> = 9[K]については q =  $2.0 \times 10^6$  [W/m<sup>2</sup>]までで測定を終了としたので, q =  $2.0 \times 10^6$ , 3.0 × 10<sup>6</sup> [W/m<sup>2</sup>]についての比較スペクトルは 3 つとなる.各々熱流束値の比較において,サブク ール度が増大するにつれて 2600 ~ 2800[Hz]付近の高周波帯の S P L が上がっており 熱流束が増 大するにつれて周波数帯の幅が広がっていると見て取れる.また,q =  $1.0 \times 10^6$  [W/m<sup>2</sup>]の時と同 様に, T<sub>sub</sub> = 20[K] から T<sub>sub</sub> = 30[K]への過程で 1000[Hz]以下の低周波帯のスペクトルはほ ぼ消えている.

#### 3.4.3 考察

サブクール度・熱流束増大により沸騰音が変化することに着目して本実験と解析を行ったが, 今回の沸騰音の周波数解析により,以下の点が明らかになった.

沸騰音の周波数には二箇所の大きな周波数帯が存在すること.

サブクール度・熱流束の増大に伴う音の変化は,周波数がそれらの変化に伴って移動してい くのではなく,低周波数帯(1000[Hz]以下)から高周波数帯(2600~2800[Hz])へと音圧レベル が移動していくことで起こること.

T<sub>sub</sub> = 20[K]に関してはどちらとも言えないが, T<sub>sub</sub> = 20[K]以下の沸騰音で支配的だったのは 700~900[Hz]の周波数帯である.それ以上のサブクール度ではそれらの周波数帯の影響は見て取れない.飽和沸騰における周波数ピークの域はおおむね 500~700[Hz]であったことから,低サブクール度において沸騰音の周波数は飽和沸騰のそれの影響を強く受けるのではないかと第一に推察される.

視覚的に見ると沸騰は加熱面に付着した気泡が離脱する現象である.序論で述べたように,飽 和沸騰は伝熱面に付着した気泡が離脱して気泡径を増大させながらやがて消滅し,サブクール沸 騰は離脱後気泡が収縮しながら消滅する.この「気泡の生成離脱 消滅」のサイクル により発生する音がスペクトルで検出されたものと仮定すると,飽和沸騰とサブクール沸騰では サイクルの挙動に違いがあることから,「500~700[Hz] 700~900[Hz]」のように周波数帯 の移動があることに理由付けがなされることになる.また,サブクール度が増大することにより 気泡の離脱サイクルはより激しくなってくるのは前項(3.2 気泡の発生挙動)で提示した. Fig. 3.4.12 に示した低周波数帯の移動については, この離脱サイクルの変化を表しているものと思われる.

次に周波数解析で顕著に表れたのが,  $T_{sub} = 20[K]$ までと  $T_{sub} = 30[K]$ 以降のスペクトルの違いである.Fig. 3.4.12~15で示したように,  $T_{sub} = 20[K]$ までは存在した 1000[Hz]以下の低周波帯が  $T_{sub} = 30[K]$ 以降ではほとんど見られなくなり,2600~2800[Hz]の高周波帯しかスペクトルが検出されなくなる.このことから,  $T_{sub} = 20[K]$ と  $T_{sub} = 30[K]$ の間で何らかの沸騰様相の変化があるのではないかと考えられる.

Fig. 3.4.16, 3.4.17 にそれぞれのサブクール度における気泡挙動の画像を示す. 各画像は 3000fps で撮影した1コマ毎に並べている.



Fig. 3.4.16 Fission of bubble (  $T_{sub} = 20.8[K]; q = 2.0 \times 10^{6} [W/m^{2}]$ )



0.7 [ms]







Fig. 3.4.17 Fission of bubble (  $T_{sub} = 29.4[K]; q = 2.0 \times 10^{6} [W/m^{2}]$ )

細線に付着した,「気泡の発生 崩壊 新しい気泡の生成」のサイクルを見ると,明ら T<sub>sub</sub> = 30[K]のほうが短いスパンで起きていることが見て取れる.上の図では T<sub>sub</sub> = かに 20[K]の場合は1サイクル約1.33[ms]で, T<sub>sub</sub> = 30[K]の場合は約0.67[ms]である.勿論この 画像データからは実際の周波数帯の数値(1000[Hz]以下と 2600~2800[Hz])の説明はつかない が,気泡崩壊のスパンが T<sub>sub</sub> = 20[K] と T<sub>sub</sub> = 30[K]で異なることは明らかなので,それが 沸騰音周波数の変化につながっているものと思われる.

この変化が通常のサブクール沸騰からMEBへの変化であるというのは幾分根拠に乏しいが, T<sub>sub</sub> = 20~30[K]に何らかの分岐点があることは確認できる.

# 第四章 結論

サブクール下での加熱細線の気泡微細化沸騰(MEB)の実験を行い,以下の結論を得た.

伝熱効果

MEBによって, 飽和沸騰のCHF(限界熱流束)の7倍程度の熱流束が容易に得られた. 細線の溶断がなければ更に大きな熱流束が得られたはずだが, MEBの大きな伝熱効果が確かめられた.

画像観察

沸騰様相の画像観察から, MEBは周辺流体の対流と細線に発生した気泡本体の振動によって気泡が崩壊して生じることが推察された.

様相変化から、「通常のサブクール沸騰 MEB」への推移はおおむね q = 1.0~2.0 × 10<sup>6</sup> [W/m<sup>2</sup>]の間に起きていると推察される.

気泡径の測定

MEBによって発生する気泡径の測定によって,従来研究よりも微細な気泡の存在が確認された.

気泡径分布については,低サブクール度ほど分布のばらつきが大きく,高サブクール度になるにつれて一定の大きさ以下(直径 30 µ m以下)に抑えられる.

サブクール度変化による平均気泡径の推移については,熱流束の変化には大きく依存しない. 沸騰音解析

沸騰音の周波数には低周波数帯(700~1000Hz)と高周波数帯(2600~2800Hz)の二箇所の 顕著なピークが存在する.

沸騰音の変化は,周波数帯そのものが移動することによってではなく,上記の二箇所のピー クでのそれぞれの音圧レベルが変化することで起こる.

低サブクール度ほど飽和沸騰に近い音の特性(低周波数分布)を示し,高サブクール度に移 行するにつれて高周波数のみを発するようになる.

上記の低周波数から高周波数へのシフトチェンジは T<sub>sub</sub>=20 [K]と T<sub>sub</sub>=30 [K]の間で 起こっており,この間で何らかの沸騰特性の変化があると推察される.

補足として,画像観察でMEBのメカニズムの詳細に触れることが出来なかったのは大きな反省 点である.MEBの詳細な観察にはより速いフレームスピードで撮影することが不可欠であるこ とが今後の課題であることを付記する.

$q = 2.0 \times 10^6 [W/m^2]$										
T <sub>sub</sub> [K]	20.5	28	36.5	43.5	49.5	53.7				
Bubble	19.33798	16.51568	14.42509	12.85714	11.49826	9.721254				
Diameter	21.42857	17.77003	15.15679	12.85714	11.81185	9.930314				
[µm]	23.51916	18.08362	16.51568	13.90244	12.54355	10.97561				
_	25.4007	18.60627	16.72474	14.1115	13.37979	12.85714				
	25.4007	18.60627	17.24739	14.42509	13.90244	13.58885				
	25.60976	19.12892	17.24739	15.15679	15.47038	13.58885				
▼ ソート済	26.65505	19.12892	17.77003	15.47038	15.47038	14.1115				
× 1.%1	27.70035	20.69686	18.29268	15.67944	15.67944	14.1115				
	29.58188	21.42857	19.12892	16.51568	15.67944	14.63415				
	29.79094	21.42857	19.12892	16.51568	16.20209	15.47038				
	29.79094	21.95122	19.65157	17.56098	16.51568	15.47038				
	31.14983	23.51916	19.86063	18.60627	17.03833	15.47038				
	31.67247	23.83275	20.69686	19.12892	17.24739	15.99303				
	32.92683	24.56446	20.69686	19.86063	17.24739	16.51568				
	34.80836	24.87805	20.69686	20.69686	17.24739	16.51568				
	35.54007	26.1324	21.21951	21.21951	18.29268	17.03833				
	36.06272	26.65505	21.42857	21.95122	19.12892	17.24739				
	37.10801	26.65505	22.78746	22.47387	19.33798	17.77003				
	37.94425	26.96864	23.3101	23.51916	19.86063	18.08362				
	38.67596	27.70035	24.87805	23.83275	19.86063	18.29268				
	39.72125	29.05923	24.87805	24.3554	19.86063	19.12892				
	41.2892	30.10453	27.70035	24.3554	20.69686	19.65157				
	41.81185	32.19512	28.223	24.87805	21.95122	20.38328				
	51.21951	33.97213	29.05923	25.4007	22.99652	20.90592				
	52.5784	37.4216	29.26829	25.4007	23.51916	22.99652				
	52.78746	43.90244	30.83624	26.1324	23.51916	23.83275				
	56.96864	49.65157	31.88153	27.70035	25.08711	24.56446				
	66.37631	50.17422	33.44948	29.58188	25.08711	26.1324				
	67.21254	53.3101	44.42509	33.97213	25.92334	26.96864				
	76.30662	54.66899	47.56098	34.80836	32.92683	30.10453				

$q = 3.0 \times 10^{6} [W/m^2]$										
T <sub>sub</sub> [K]	20	32	41.1	45.1	51.5	56.6				
Bubble	17.77003	15.9375	13.96552	10.9375	10.23891	6.206897				
Diameter	20.90592	17.70833	15.31034	10.9375	11.56997	9.62069				
[µm]	20.90592	18.22917	16.34483	11.25	12.28669	10.13793				
	25.08711	20.625	16.34483	12.5	12.79863	10.65517				
	25.08711	21.35417	17.06897	12.8125	12.79863	11.68966				
	26.1324	22.39583	17.06897	12.8125	13.61775	11.89655				
	27.1777	22.39583	17.06897	13.02083	13.61775	12.2069				
	28.223	23.75	17.37931	13.54167	14.12969	12.72414				
	30.31359	24.27083	17.74086	14.58333	14.84642	12.72414				
	33.44948	25.3125	18.73754	15.625	15.35836	12.93103				
	33.44948	25.3125	18.93688	16.45833	15.87031	13.24138				
	34.49477	25.52083	19.23588	16.45833	15.87031	13.96552				
	34.49477	26.5625	19.23588	16.45833	16.38225	13.96552				
	35.54007	29.47917	19.43522	17.70833	16.8942	14.48276				
	36.58537	29.6875	19.93355	18.02083	17.40614	14.48276				
	37.63066	31.5625	20.23256	18.54167	17.71331	14.7931				
	38.67596	32.29167	22.22591	19.58333	17.71331	15.31034				
	39.72125	33.85417	22.42525	20.10417	18.22526	16.03448				
	39.72125	34.89583	22.72425	20.625	19.45392	16.55172				
	39.72125	37.29167	22.92359	20.83333	19.96587	17.58621				
	40.76655	37.5	23.72093	21.875	21.80887	17.89655				
	41.81185	40.10417	25.21595	22.1875	22.01365	18.10345				
	43.90244	44.27083	25.71429	22.1875	24.06143	18.62069				
	51.21951	44.58333	25.91362	22.39583	24.57338	20.48276				
	52.26481	45.3125	25.91362	22.70833	24.88055	22.03448				
	52.26481	46.66667	26.41196	23.4375	25.08532	22.75862				
	53.3101	46.875	26.71096	23.95833	25.08532	23.27586				
	54.3554	47.70833	30.89701	25.3125	33.7884	23.58621				
	54.3554	51.5625	32.39203	26.5625	37.16724	30				
	60.62718	52.91667	34.18605	27.91667	38.70307	30.82759				

#### <u>参考文献</u>

[1] Ivey, H.J. and Morris ,D.J.1966. "Critical Heat Flux of Saturation and Subcooled Pool Boiling Burnout at Atmospheric Pressure" *Proceeding of 3<sup>rd</sup> International Heat Transfer Conference*,Volume ,pp.129-142

[2] Elkassabgi , Y. and Lienhard , J.H 1988, "Influences of Subcooling on Burnout of Horizontal Cylindrical Heaters" *Journal of Heat Transfer* 110:479-486

[3] 稲田茂昭,宮阪芳喜,佐久本伸,泉亮太郎 "サブクールプール沸騰特性曲線の研究",日 本機会学会論文集(B編)47巻422号 pp2021-2029,1981

[4] 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(気泡微細化沸騰の観察と発生条件",日本機会学会論文集(B編)65巻637号 pp3097-3104, 1999

[5] 久保良,熊谷哲,"気泡微細化沸騰の発生と安定性",日本機会学会論文集(B編)58巻546
号 pp497-502,1992

[6] 久保良,島田了八,熊谷哲,"気泡微細化沸騰の発生音と熱伝達の相関性",日本機会学会論
文集(B編)59巻557号 pp183-190,1993

[7] 庄司正弘, 吉原正博, "極細線のバーンアウト熱流束に関する研究", 第 28 回日本伝熱シン ポジウム講演論文集(1991-5)

[8] 庄司正弘,吉原正博,"沸騰熱伝達における微細気泡発生現象の観察",可視化情報 Vol11 Suppl. No.2(1991-10)

[9] Celata, G.P., Cumo, M., Mariani, A., Zummo, G., 2000. "Burnout in subcooled flow boiling of water.a visual experimental study" *Int.J. Therm. Sci.* 39:896-908

[10] The MathWorks ホームページ , http://www.mathworks.com/

#### <u>謝辞</u>

本研究を行うにあたり,ご指導を頂いた庄司正弘教授に謝意を表します.庄司先生には研究会 の時や実験の進め方に迷っている時などにおいて,経験に裏打ちされた的確かつ時には思いもよ らない角度からの指摘を頂き,知識と経験に乏しい私に指針を与えて頂きました.あらためて感 謝申し上げます.これからもそのバイタリティでご活躍されることをお祈りします.

丸山茂夫助教授には研究会などで鋭いご指摘を頂き,その都度身が締まる思いでした.深く感謝いたします.また,丸山研の井上満助手にあたっては,様々な事務作業などでお世話になりました.

実験を進める上で,特に渡辺誠技官には大変お世話になりました.私の未熟さから実験方針が 二転三転する中でも全く嫌な顔をせず相談に乗って頂き,実験中も様々なアドバイスと助力をい ただきました.この場で深くお礼申し上げます.

秘書の渡辺美和子さんにもお世話になりました.時折差し入れをして頂いくなど,一時の和み の時間となりました.これからのご健勝をお祈りします.

庄司研 修士2年の丹下君には, MATLAB のプログラムを提供してくれたり,研究会・勉強会 にとどまらず実験中や普段研究室にいる時も色々と有意義なアドバイスを頂きました.普段のそ の研究姿勢についても頭が下がりました.博士課程でもそのパワーでがんばって下さい.

同2年の石川君には,机が隣同士ということもあり色々とくだらない話や愚痴にもつき合わせてしまいました.これからもその個性を発揮しつづけて下さい.

丸山研の先輩の井上修平さん,渋田さん,村上さん,千足さんには色々と研究を進める上で先 輩としてのアドバイスをして頂きました.これからも研究活動をがんばって下さい.

同修士2年,もとい博士1年の宮内君とは実は大学入学以来からの付き合いになりますが,合 宿の際の車出しやその他もろもろとお世話になりました.半年飛ばしで博士課程に進学した時は ただただ驚きました.これからも研究がんばって下さい.

同修士2年の小川君,谷口君には,同じ就職組として互いに情報を頂いてお世話になりました. 追い込みの時期は色々とりとめのない話の相手もしてもらってリラックスできました.

同修士1年の五十嵐君,枝村君,吉永君にもお世話になりました.特に五十嵐君には雑務やネットワーク関係の相談にも乗って頂きとてもお世話になりました.今後も研究に邁進して下さい.

庄司研 学部4年の志村君,高尾君,芝浦工大の楠原君には,直接研究では接点がなくアドバイ スらしいアドバイスも全然出来ませんでしたが,三人ともとても優秀で刺激を受けました.実際 実験室で一番共に時間を過ごした三人だと思います.これからは別々の進路となりますが,それ ぞれ活躍を確信していますのでがんばって下さい.

丸山研 学部4年の方々とはあまり接する機会がありませんでしたが,これからもそれぞれの進路先で活躍してください.

最後に,足掛け6年間の大学生活を陰ながら支えてくれた家族に謝意を表します.

## 通し番号 1 72 完

### <u>修士論文</u>

## <u>平成 16 年 2 月 13 日提出</u>

# 26197 湯浅 真樹