

論文の内容の要旨

論文題目 **Nucleation Site Interaction in Pool Boiling on Artificial Surfaces** (人工面のプール沸騰における気泡核干渉)

氏名 張 蕾

沸騰現象は、高い熱伝達効率が達成できるなどため各種工業用プラントや熱交換器に多く応用されているが、伝熱面上の熱拡散、流体運動、界面の気泡挙動などを含む複雑な現象である。沸騰熱伝達研究の工学的な最終目標は、各沸騰領域および特性点の熱伝達機構の解明とそれによる沸騰曲線の予測・制御手法の確立にある。これまでの多くのプール沸騰熱伝達の研究を概観すると、伝統的な沸騰応用に向け、様々な核沸騰熱伝達の整理式が提案されている。しかし、近年、電子デバイスの沸騰冷却を始めとした新たな応用が生れているが、この新しい応用のためには、伝統的な沸騰成果のみでは十分でないことが顕在化している。すなわち、核沸騰の熱伝達機構を徹底的に解明するのが急迫になってきているが、気泡核干渉がこの機構解明のキーポイントである。しかし、実際の沸騰面の表面性状の複雑性は気泡核干渉の研究をより難しいものとしている。一方、最近、MEMS 技術の発達により、人工的にキャビティを設けることで表面構造を単純化し、任意の位置で発泡させることが可能になった。本研究では、人工沸騰面を用いて、核沸騰の気泡核干渉の影響要素を把握し、それぞれの要素と気泡挙動の相互関係、気泡核干渉の基本機構と干渉領域を理解、解明することを目的として行ったものである。

結論から記すと、プール沸騰の気泡核干渉機構に関して、以下の事が明らかになった。

- (1) 影響要素として：1) 気泡間の流動干渉 (要素 'H')；2) 気泡核間の熱干渉 (要素 'T')；
3) 気泡合体 (要素 'C') が重要である。
- (2) 基本の干渉機構は要素 'H'、'T' と 'C' の強度、競合、支配関係で現れる。
- (3) 干渉領域は、1) 'T' 領域： $S/D_0 > 3$ ； 2) 'H' 領域： $2.4 < S/D_0 \leq 3$ ； 3) 'H+T' 領域： $1.5 < S/D_0 \leq 2.4$ ； 4) 'H+T+C' 領域： $S/D_0 \leq 1.5$ の4領域に分けられる。
- (4) 'H+T+C' 領域の限界は無次元間隔 S/D_0 のみから決定され、'H+T' 領域の限界が加熱面物性に依存している。'H' 領域の限界は液体流動と関係する。

上記の気泡核干渉を解明するため、次のような系統的な実験研究を行った。

- ・ 実験1：キャビティ寸法の影響 (単一キャビティ)
- ・ 実験2：キャビティ間隔の影響・気泡核干渉 (対キャビティ)
- ・ 実験3：伝熱面物性の影響 (単一・対キャビティ)

以下、上記結果を導くに至った本研究における実験及び考察に関し記述する。

Fig.1 に実験装置概略図を示す。シングルもしくはツインキャビティの設計された人工面を加熱面として採用し、下よりレーザーで加熱して蒸留水を沸騰させた。キャビティからの発泡による加熱面裏面の温度変動を放射温度計で測定し、同時に高速度ビデオカメラで発泡の様子を記録した。

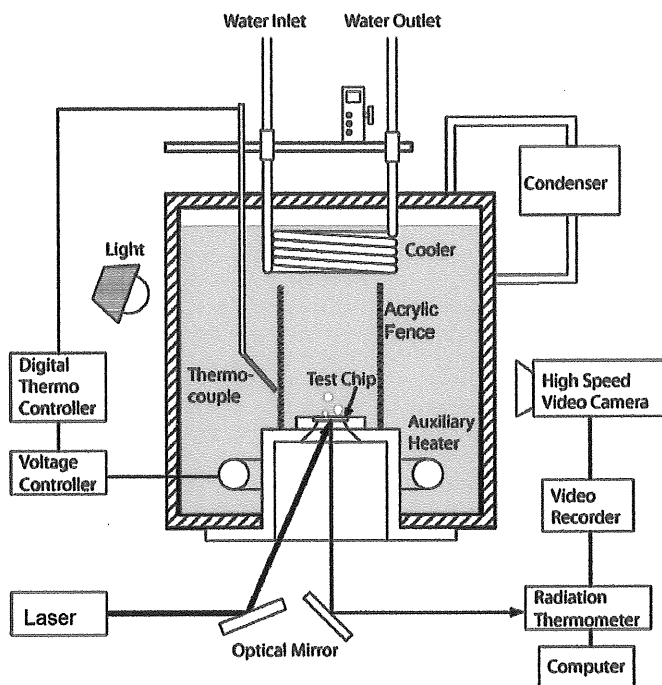


Fig.1 Schematic of experimental apparatus

気泡核干渉の実験を行う前に、まず、シングルキャビティを用いて気泡挙動と加熱面の温度変動の安定性について、予備実験（実験1）を行った。人工キャビティ形状の影響を研究した関連実験（高木，1999）で円筒形のキャビティの発泡安定性が良いの結論が得られている。この結論に基づいて、円筒形キャビティのサイズ（直径と深さ）の影響を調べた。人工面は厚さ0.2mmのシリコン面であるキャビティ直径5,10,20,50,100 μm （深さは一様に80 μm ）について気泡挙動と加熱面の温度変動の安定性を比較し、直径差による影響が顕著ではないことが分かった。キャビティ深さの影響を調べるため、深さ20,40,80 μm のキャビティ（直径は一様に10 μm ）からの気泡挙動と加熱面の温度変動の安定性を比べた。結論として、キャビティ深さが深いほど安定な気泡が生成できることが判明した。気泡核干渉の機構を解明するため、次の実験では安定性の良いキャビティ（深さ80 μm と直径10 μm ）を選ぶこととした。

気泡核干渉の実験（実験2）では、キャビティ間距離 S をパラメータとして $S=1,2,3,4,5,6,7,8\text{m}$ の8種類のシリコン面（厚さ0.2mm）を用いて行った。毛管定数によって得られた平均離脱気泡直径 D_0 は飽和沸騰水の場合約2.5mmであるので、干渉を示す際に用いられるパラメータである無次元間隔 S/D_0 の値はそれぞれ0.4,0.8,1.2,1.6,2.0,2.4,2.8,3.2になる。

実験結果として、気泡離脱周波数 f_d は無次元間隔によって複雑な傾向を示した（Fig.2）。 $S/D_0 > 3$ では気泡離脱周波数は単一キャビティの場合と類似している。間隔が短くなるにつれ、

気泡離脱周波数がまず高くなって、つぎに低くなり、また高くなるという傾向が見られた。この複雑な傾向は気泡核干渉と関係する。この傾向を説明するため、気泡核干渉の影響要素を求めた。

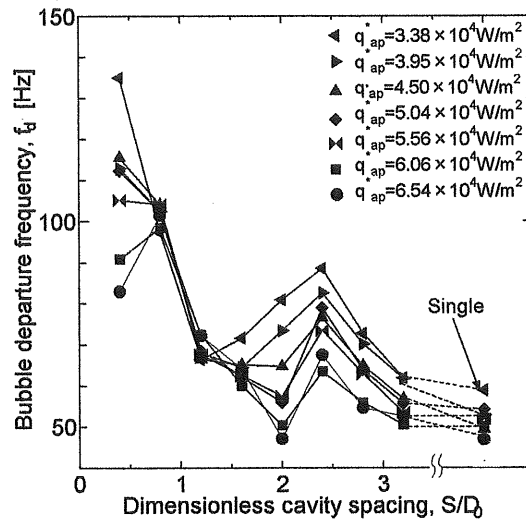


Fig.2 Variation of bubble departure frequency f_d with dimensionless cavity spacing S/D_0 for different apparent laser heat flux q_{ap}^*

一般的にプール沸騰系の干渉は Fig.3 で表せる。しかし、気泡と流体間の干渉（干渉1）、そして気泡核と加熱面間の干渉（干渉3）はその気泡の自己干渉と考えられるので、気泡と気泡核間の相互干渉研究に関しては、気泡間の流動干渉（干渉2）と気泡核間の熱干渉（干渉4）がより重視されるべきである。そして、気泡合体（干渉5）、は気泡間の特別な干渉であり、気泡挙動に顕著な影響を与え、個別的に研究の必要があると思われる。したがって、気泡と気泡核の干渉について、三つの影響要素を求めた：(1) 気泡間の流動干渉；(2) 気泡核間の熱干渉；(3) 気泡合体。本研究では、それぞれ要素‘H’、要素‘T’と要素‘C’と呼ぶ。

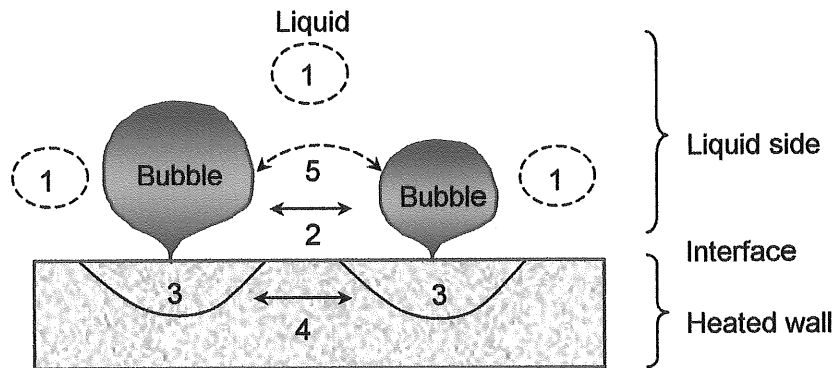


Fig. 3 Schematic diagram showing the effect factors of nucleation site interaction (1: Hydrodynamic interaction between bubble and liquid bulk. 2: Hydrodynamic interaction between bubbles. 3: Thermal interaction between nucleation site and heated surface. 4: Thermal interaction between nucleation sites. 5. Bubble coalescence.)

三つの影響要素と気泡離脱の関係、および評価方法について研究した。気泡間の流動干渉（要素‘H’）は基本的に気泡離脱を促進していると思われ、本実験では流体速度の測定を行っていないので、要素‘H’の強度は対流熱伝達率 h で表す (Eq.1).

$$h = \frac{Q_{laser} - Q_{bubble} - Q_{loss}}{(T_w - T_f) \cdot A} \quad (1)$$

気泡間の相互流動干渉は $\frac{h}{h_0}$ で評価した。ここで h_0 はシングルキャビティの場合での対流熱伝達率である。要素‘H’の強度と無次元間隔の関係を Fig4. (a) に示す。 $S/D_0 > 3$ の時に、要素‘H’は単一キャビティの場合と類似している。間隔が $S/D_0 \leq 3$ になると、気泡間の流動干渉が強くなるということが判った。

気泡核間の熱干渉（要素‘T’）は加熱面を冷却するので、気泡離脱を抑制することが分かった。要素‘T’の評価は放射温度計で得られたキャビティ周囲の加熱面温度変動の時系列に基づいて行った。まず、左右キャビティの温度変動と周囲点の温度変動との相互相関係数から、二つキャビティの相互熱干渉の範囲 ($X_l - X_r$) を決定し、この範囲の中での左右キャビティの温度変動と周囲点温度変動との相互相関関数の平均値を Eq.2 によって求めた。

$$\psi_t = \frac{\sum_{j=x_l}^{x_c} C_{cj}(R) + \sum_{j=x_c}^{x_r} C_{cj}(L)}{X_l - X_r} \quad (2)$$

この平均値を用いて、二つキャビティ間の熱干渉の強度を表した。相互熱干渉の強度と無次元間隔の関係を Fig4(b)に示す。 $S/D_0 < 2.4$ の時に、相互熱干渉は強くなっているということが判った。そして、気泡直径と合体の差異で、相互熱干渉は無次元間隔によって複雑的に変化している。

気泡合体（要素‘C’）は三種類（縦合体、横合体と斜合体）に分けた。三種類の合体は気泡離脱を促進している。横合体と斜合体は隣接の気泡間の特別な現象であるから、本研究ではこの二種類の気泡合体のみ評価した。無次元気泡合体周波数は気泡合体周波数 f_c を用いて、Eq.3 によって計算した。

$$\overline{f_c} = \frac{f_c}{2 \cdot f_d} \quad (3)$$

気泡合体周波数と無次元間隔の関係を Fig4 (c)に示す。 $S/D_0 \leq 1.5$ の時に、気泡合体周波数は高くなるということが分かる。

気泡核干渉の三つ影響要素の解析結果を Table 1 と Fig5 にまとめた。気泡核干渉の基本機構は要素‘H’、‘T’と‘C’の強度、競合、支配関係である。 $S/D_0 > 3$ の時に、三つの要素が全て弱いため、気泡離脱周波数が単一キャビティの場合と類似している。したがって、‘I’領域と呼ぶ。 $2.4 < S/D_0 \leq 3$ （‘H’領域）の時に、要素‘H’のみ強くなっているため、気泡離脱周波数は高くなっている。 $1.5 < S/D_0 \leq 2.4$ の時に、要素‘H’と要素‘T’は両方強いので、競合関係が存在している。気泡離脱周波数の傾向から見て、要素‘H’はより強いと思われる。抑制の影響に支配されて、この領域に気泡離脱周波数が低くなっており、‘H+T’領域と呼ぶ。 $S/D_0 \leq 1.5$ の時に、

要素 'C' も強くなって、気泡離脱周波数は要素 'H', 'T' と 'C' の競合関係で決定される。これらの結果から見て、促進の影響要素がこの領域を支配していることが分かる。この領域を 'H+T+C' 領域と呼ぶ。これにより、気泡核干涉は四つの領域に分けられる：(1) 'I' 領域: $S/D_0 > 3$; (2) 'H' 領域: $2.4 < S/D_0 \leq 3$; (3) 'H+T' 領域: $1.5 < S/D_0 \leq 2.4$; (4) 'H+T+C' 領域: $S/D_0 \leq 1.5$ 。

上述の干涉機構を確かめるため、伝熱面物性の影響を実験 3 で調べた。厚さ 0.2mm の銅面と厚さ 2.0mm のシリコン面の上に、シングルもしくはツインキャビティを加工した。キャビティ間隔によって、気泡挙動または気泡核干涉の三つ影響要素を解析した。結論として、気泡離脱周波数も基本的に要素 'H', 'T' と 'C' の強度、競合、支配関係で決定されることがわかった。しかし、銅面で高熱流の場合は、'H+T' 領域の限界は少し右に移動した。これは銅面の熱伝達率が高く、要素 'T' の影響範囲が広がったためである。厚いシリコンの実験で得られたデータは少なく、干涉領域の限界の変化は見つからなかった。

四つの干涉領域の限界の決定要素を調べた。'H+T+C' 領域の限界はいつも $S/D_0 \leq 1.5$ であることが判った。'H+T' 領域の限界について、簡単な数値計算で加熱面物性の影響を調べた。結果としては、'H+T' 領域の限界が加熱面の熱伝達率、または厚さと強く関係している。加熱面の熱伝達率が低くなる、あるいは加熱面が薄くなると、'H+T' 領域の限界が左に移動する傾向がある。また、加熱面の熱伝達率が高くなる、あるいは加熱面が厚くなると、'H+T' 領域の限界が右に移動する傾向がある。'H' 領域の限界は、流体運動または気泡挙動と関係がある。

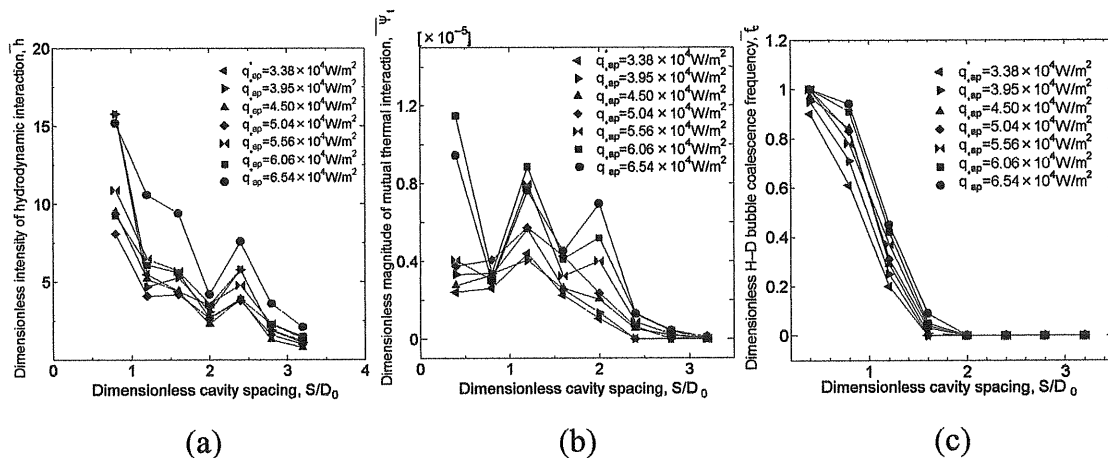


Fig.4 Variation of factor 'H', factor 'T', factor 'C' with dimensionless cavity spacing S/D_0 for different apparent laser heat flux q_{ap}

Table 1 Statement of essential mechanism of nucleation site interactions

Main effect factors	S/D_0	Effect on f_d	$S/D_0 > 3$	$2.4 < S/D_0 \leq 3$	$1.5 < S/D_0 \leq 2.4$	$S/D_0 \leq 1.5$
Hydrodynamic interaction between bubbles (factor 'H')		Promotive	X	O	O	O
Thermal interaction between nucleation sites (factor 'T')		Inhibitive	X	X	O	O
Horizontal and declining coalescences (factor 'C')		Promotive	X	X	X	O

(X: negligible; O: considerable)

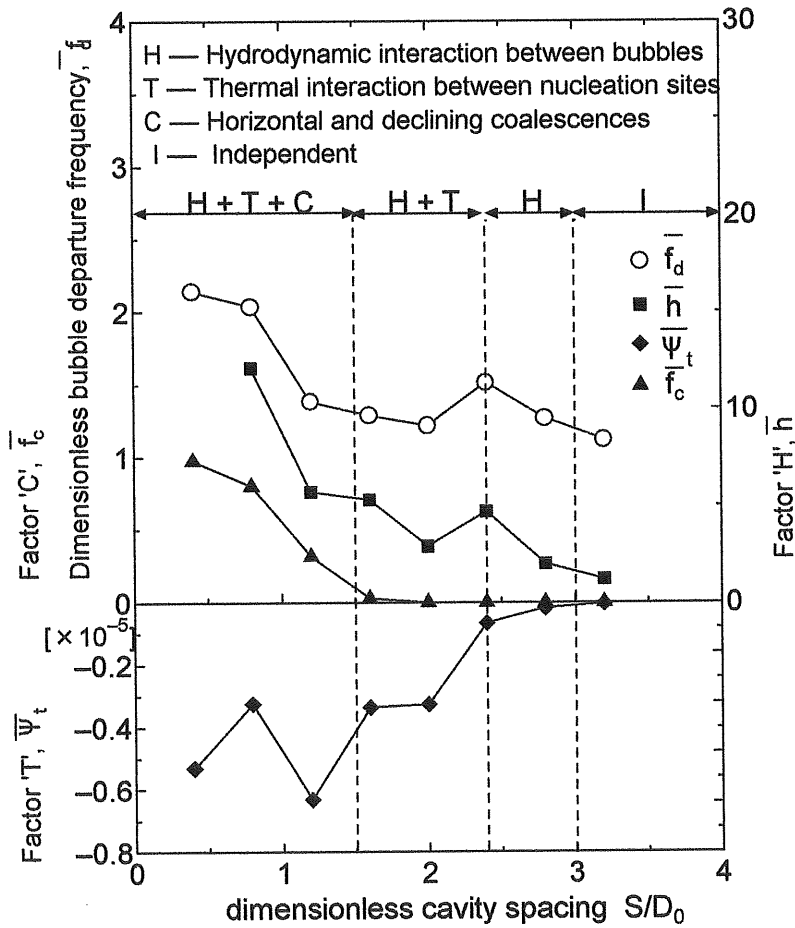


Fig.5 Four regions of nucleation site interaction