

## 第3章 沸騰限界熱流束近傍の気泡下部液膜厚さ変動の測定

### 第1節 緒論

#### 3-1-1 まえがき

本実験では、新たに、面状静電容量プローブを制作して、液膜厚さ絶対値の時間変化を測定する。液膜厚さの絶対値のオーダが明らかになれば、気泡下部液膜への液体供給量が明らかとなり、液体供給のメカニズムを解明する鍵となる。

そこで、本研究では、面状静電容量プローブにより、気泡下部液膜厚さの絶対値の測定を行った。気泡下部液膜厚さの時間的変化の実験データをもとに、沸騰現象を決定的に支配している気泡下部の液膜の挙動に着目し、気泡形状の時間的変化を通じて、限界熱流束発生に関係する気泡下部への液膜供給のメカニズムを解明することを目的としている。また、プール沸騰における気泡下部液膜厚さの変動については、気泡下部に生じる液膜への液体の供給と消耗のバランスで決まり、かつ、供給量と消耗量は時間的に変化し、それらは熱流束、過熱度、蒸気泡の挙動などにより影響されると考え、測定した気泡下部液膜への液体供給メカニズムを、Dhir モデルをもとに検討した。著者らは、雑音及び温度ドリフトを受けない静電容量型プローブを考案し、蒸気柱下部液膜厚さの時間変動を測定し、Taylor 不安定波長毎に生じる蒸気柱下部の伝熱面近傍の形状変化により液体の供給と排出が生じるという仮定をたて、気泡下部への液体供給速度及び排出速度計算を行い、「液体の供給及び排出が主に蒸気柱下部曲率半径の変化により生じる」、という新たな沸騰限界熱流束発生モデルを提案する。

本研究では行った実験は、第2節～第4節までは、面状静電容量プローブを用いた気泡下部液膜厚さの絶対値の測定について述べる。第5節には、気泡形状の時間変化と、液膜厚さの時間変化の同時計測について述べる。針状静電容量プローブを用い、気泡下部液膜厚さの変化を測定すると同時に、高速度ビデオカメラを用いて気泡形状変化を撮影し、気泡形状変化と気泡下部液膜厚さの変化の関係を明らかにした。第6節では液膜内圧力の時間変化と、液膜厚さの時間変化の同時計測について述べる。液膜内圧力測定には第2章で用いた微小高速応答圧力センサーを用い、液膜厚さ測定には第3章、第2節～第4節で用いた面状静電容量プローブを使用した。

### 3-1-2 従来の研究

現在、限界熱流束の発生メカニズムについては、Zuberモデル<sup>(5)</sup>、原村・甲藤モデル<sup>(6)</sup>などの代表的モデルが提案されている。前者のモデルは、Taylor不安定とHelmholtz不安定による蒸気柱の蒸気速度が限界に達し、限界熱流束が発生するというモデルであり、後者は気泡下部の液膜に微少な蒸気茎を仮定し、蒸気茎の蒸気と液膜とのHelmholtz不安定により液膜厚さを決定し、伝熱面上で気泡離脱までの時間と、その液膜が乾くまでの時間が一致したときに限界熱流束が発生するというモデルである。前者は、静的なモデルで複雑な沸騰現象の時間的変化の挙動を説明できない。また、後者は、上向き面、下向き面など多様な伝熱面における沸騰現象を統一的に説明することのできるモデルであるが、我々の実験では微少な蒸気茎の存在を確認することができなかった。また近年では液膜を伝わる熱伝達だけでは限界熱流束が説明できないため、三相界線付近の蒸発を評価しよう、という動きが強くなってきている。

限界熱流束発生メカニズム解明の第一歩として、限界熱流束時、遷移沸騰時の気泡下部液膜の測定が実験的に行われている。実験的な気泡下部液膜の測定は、主に探針による方法<sup>(7)~(9)</sup>により測定されているが、気泡の滞留時間内に蒸発するには計測結果が厚過ぎるとして疑問視する研究者も多い。

三相界線付近の蒸発をきちんと評価しようと言う考え方に付いては、気泡下部に気泡柱が存在すると仮定しており、気泡下部液膜厚さの時間変動を説明できず、また核沸騰時に気泡柱下部中心での液膜が常に乾いているという可能性がある。

## 第2節 実験装置および方法

### 3-2-1 実験装置の概要および特徴

実験装置は、蒸気泡下部に形成される液膜厚さの絶対値を測定するために、新たに面状の静電容量測定プローブを制作し、測定を行った。Fig.12(a)に実験装置全体図を示す。この原理は、「伝熱面上に生成する単一気泡内に、上部よりステンレス製プローブの先端部分を差し込んだ形で設置、プローブには数ボルトの交流電圧(20kHz)を付与し、アースされている伝熱面との間に生じる静電容量の変化を、電圧値として測定、液体と蒸気の誘電率の違いにより、液膜厚さを求める」というものである。

Fig.12(b)に静電容量測定プローブの構造を示す。測定部は直径1mmのステンレス製電極を使用し、その外側には、測定部と同電位をもつ外径1.6mmのステンレス製薄肉パイプのガード電極を使用した。さらに、その外側に、外径2.4mmのステンレス製薄肉パイプのシールド電極を使用して、アース電極と結線されているために、プローブ測定部に雑音の影響の少ない構造となっている。Fig.13

に示すように、ガード電極に測定部と同電位の電圧を与える事により、静電容量の測定部と伝熱面との間に生じる電気力線の散乱を防止する機能を有し、局所での測定精度を向上させる。プローブの各電極の絶縁は、テフロンシートにより行われている。静電容量の出力は、IWATSU製の膜厚測定器 ST-3521 を使用し、その出力信号を計測器に取り込み、出力電圧は解析器(YOKOGAWA HOKUSHIN ELECTRIC MODEL-3655)でA-D変換され、GP-1Bを通してコンピューターに送られる。コンピューターに送られた電圧値にキャリブレーションを行い、気泡下部液膜の圧力に変換する。

従来の気泡下部液膜厚さ測定は、気泡上方からプローブを差込み、気泡下部液膜に接触したときの高さを計測する、通電プローブを用いたものが多かった。この測定法では時間変化に付いては計測できず、また計測できたとしても通常プローブ先端に液体が付着した場合、表面張力で付きつづける性質のため正確な時間変化が測定できないという欠点があった。その点、静電容量プローブは、入力周波数を高くすることにより、応答性を高める事ができる。またプローブ先端を液膜に接触しない点に設置すれば、表面張力による沸騰への影響を全く受けずに測定する事ができる。設置する高さについては予備実験を行い最適な高さを選んだ。静電容量プローブ先端の位置は、最終的に伝熱面から  $500\mu\text{m}$  の高さとした。これは「作動流体に HCFC-123 を用いた本実験において、沸騰限界熱流束近傍での気泡の高さが約  $3\sim 10\text{mm}$  であるため、プローブ先端が常に気泡内にあるには伝熱面からプローブまでの高さが  $3\text{mm}$  以下である必要がある。プローブ高さを高くすると静電容量変化割合が小さくなり測定誤差が増大する。プローブ高さが低すぎると液膜に接触し一定電圧(プローブ-伝熱面間がすべて液体)を示す。」という実験結果を経て、静電容量を計測するために選んだ最適値である。

Fig. 13 にはその新しいプローブの測定部分を拡大して示す。静電容量プローブの先端は、ほぼ全ての時間蒸気泡の内部に存在し、気泡全体の形状変化には影響を受けずに、気泡下部液膜厚さを測定できる。この状況は高速度ビデオカメラによる気泡形状の観察( $200\text{コマ/秒}$ )と、ステンレス製プローブの外側を、ステンレスと比べ表面張力の小さいテフロンで被膜し、プローブをぬれにくくしても、限界熱流束が変化しなかったことから推定される。

気泡下部液膜厚さが場所によって一定でない場合、本プローブ先端の測定電極直径  $1\text{mm}$  の円内における液膜厚さの平均値を測定する。

### 3-2-2 実験方法

実験は、核沸騰領域→限界熱流束→比較的高過熱度の遷移沸騰領域へ至る加熱過程、比較的高過熱度の遷移沸騰領域→限界熱流束→核沸騰領域に至る冷却

過程において行った。Fig. 14(a)に本実験における沸騰曲線を示す。熱流束および過熱度は、Fig. 13に示すように、伝熱面下部に垂直方向 2mm おきに埋め込まれた5本の熱電対により、1分間隔でデータをサンプリングし、これを元に最小二乗法を用いて計算した。

$$\text{平均温度 } T_a = (T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5) / 5$$

$$\text{温度勾配 } dT = ((T_a - T_1) \times 0.004 + (T_a - T_2) \times 0.002 + (T_1 - T_a) \times 0.002 + (T_5 - T_a) \times 0.004) / (0.004^2 \times 2 + 0.002^2 \times 2)$$

$$\text{伝熱面温度 } T_s = T_a - dT \times 0.006$$

$$\text{過熱度 } \Delta T = T_s - T_{sat}$$

$$\text{熱流束 (kW/m}^2\text{)} = (210 \times dT) / 1000$$

またプローブによる沸騰への影響を調べるために、プローブ径を変えて予備実験を行った。Fig. 14(b)にプローブ無しの場合、直径 2.3mm、および 1.6mm のプローブを設置した場合の沸騰曲線を示す。直径 1.6mm の場合、プローブ無しの場合に比べ、限界熱流束値は約 9%小さくなっているが、核沸騰領域を含めてほぼ全領域で、沸騰曲線はほぼ近い形をしており、また限界熱流束時の伝熱面過熱度に付いても、プローブ無しの場合とほぼ等しい。それに対して 2.3mm の限界熱流束時の伝熱面過熱度は、プローブ無しの場合や直径 1.6mm の場合と比べて約 10K 低い。このことから、プローブ直径を 2.3mm から 1.6mm まで細くすることにより、プローブの存在は、沸騰限界熱流束近傍の現象にほとんど影響を与えなくなると考えることができる。

### 第3節 校正方法

#### 3-3-1 液膜厚さ測定機器校正の基準値

液膜厚さの測定において、プローブ-伝熱面間が HCFC-123 の飽和液で満たされているときの出力電圧値がプローブ-伝熱面間距離に相当し、気泡下部液膜が完全に乾き HCFC-123 のガスで満たされているときの出力電圧値が液膜無しに相当する。このため液膜厚さの基準値は、沸騰熱伝達実験前と実験終了後に飽和蒸気温度に達した、未沸騰の時点での出力電圧をプローブ-伝熱面間距離基準液膜厚さ 500 $\mu$ m とする。高過熱度の遷移沸騰で伝熱面上に乾きの発生したときに、ある一定のレベルの出力をとるが、この出力の液膜厚さを 0 $\mu$ m とする。

#### 3-3-2 液膜厚さの校正の計算方法

計測器の出力は静電容量に比例した電圧値である。石英のカバーガラス ( $\epsilon = 3.8$ , thickness 約 190 $\mu$ m) とポリエチレンのラップ ( $\epsilon = 2.3$ , thickness 約

15 μm)を重ね、厚みを変えて電圧値を測定し、キャリブレーションを行った。実験に使用した HCFC-123 の比誘電率は 3.79 である。

プローブ-伝熱面間の静電容量を  $C$ 、プローブ測定部面積を  $S$ 、気泡下部液膜厚さを  $\delta$ 、プローブ-伝熱面間距離を  $D$ 、液体の比誘電率を  $\epsilon_L$ 、蒸気の比誘電率を  $\epsilon_V$ 、真空の誘電率を  $\epsilon_0$  とすると、出力電圧と液膜厚さの関係は以下のようになる。

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{\epsilon_0 S} \left( \frac{\delta}{\epsilon_L} + \frac{D - \delta}{\epsilon_V} \right) \quad (1)$$

ここで  $\epsilon_V = 1.0$  とすると、 $C$  は、

$$C = \epsilon_0 S \frac{\epsilon_L}{\delta + \epsilon_L D - \epsilon_L \delta} \quad (2)$$

ドライアウトに相当する液膜厚さ  $0$  のときのプローブ-伝熱面間における静電容量

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{D} \quad (3)$$

を用いると気泡下部液膜部分の静電容量  $C_L$  は、

$$C_L = C - C_0 \quad (4)$$

$$C_L = \frac{\epsilon_0 S}{D} \frac{-\delta}{\frac{\epsilon_L D}{1 - \epsilon_L} + \delta} \quad (5)$$

プローブにより、気泡下部液膜部分の静電容量  $C_L$  に比例する電圧  $V_L$  が測定されたとすると、

$$V_L = K \cdot C_L \quad (6)$$

より、

$$V_L = K_1 \frac{-\delta}{-K_2 + \delta} \text{ ただし } K_1 = K \cdot \frac{\epsilon_0 S}{D}, K_2 = -\frac{\epsilon_L D}{1 - \epsilon_L} \quad (7)$$

これにより出力電圧(V)の逆数と気泡下部液膜厚さの逆数との関係は以下のようになる。

$$\frac{1}{\delta} = \frac{K_1}{K_2} \frac{1}{V_L} + \frac{1}{K_2} \quad (8)$$

プローブによって得られた、カバーガラスとポリエチレンの場合の出力電圧値を、比誘電率の異なる HCFC-123 の出力電圧値に変換する必要がある。カバーガラスもしくはポリエチレンの出力電圧値を  $V_p$ 、厚さを  $\delta_p$ 、比誘電率  $\epsilon_p$  とすると、式(7)を用いて

$$V_p : V_L = \frac{\delta_p}{\frac{\epsilon_p}{1 - \epsilon_p} + \delta_p} : \frac{\delta}{\frac{\epsilon_L}{1 - \epsilon_L} + \delta_L} \quad (9)$$

と表せる。 $\delta_p$  が  $\delta_L$  と同じ場合の出力電圧  $V_L$  は、

$$V_p : V_L = \frac{1 - \epsilon_p}{(1 - \delta_L)\epsilon_p + \delta_L} : \frac{1 - \epsilon_L}{(1 - \delta_L)\epsilon_L + \delta_L} \quad (10)$$

よって

$$V_L = \frac{1 - \epsilon_L}{1 - \epsilon_p} \cdot \frac{(1 - \delta_L)\epsilon_p + \delta_L}{(1 - \delta_L)\epsilon_L + \delta_L} \cdot V_p \quad (11)$$

となり、測定によって得られた、カバーガラスとポリエチレンの場合の出力電圧値を、HCFC-123 の出力電圧値に変換できる。

測定によって得られた、カバーガラスとポリエチレン厚さの逆数と、変換した出力電圧の逆数の関係を Fig. 15 に示す。

### 3-3-3 気泡下部液膜厚さ測定精度

気泡下部液膜厚さ測定精度は、

1. キャリブレーション式の近似誤差は  $0.0001(\mu\text{m}^{-1})$  である。これは  $\delta_l=200\mu\text{m}$  のとき 2% の近似誤差となる、
  2. 増幅機器と測定機器による誤差は、すべての気泡下部液膜厚さにおいて  $0.01(\text{V})$  の出力電圧誤差を持つ、
  3. ノイズによる誤差は、未沸騰状態でのプローブからの出力電圧の変動から推定する。気泡が存在せず、プローブ-伝熱面間がすべて HCFC-123 で満たされている時、出力電圧はプローブ先端と伝熱面の距離  $500\mu\text{m}$  の液膜厚さに相当する。この時の出力電圧値は  $0.877\pm 0.016(\text{V})$  である。電圧値の誤差は、機械的要因によるものであるため、すべての気泡下部液膜厚さにおいて  $0.016(\text{V})$  の出力電圧誤差を持つ、
- などの影響を受ける。この 3 つの誤差を総括し、代表液膜厚さにおける絶対誤差を示すと、 $\delta_l=100\mu\text{m}$  のとき  $\delta_l=100\pm 69\mu\text{m}$ 、 $\delta_l=200\mu\text{m}$  のとき  $\delta_l=200\pm 43\mu\text{m}$ 、 $\delta_l=300\mu\text{m}$  のとき  $\delta_l=300\pm 23\mu\text{m}$  となる。

#### 第4節 沸騰気泡下部液膜厚さの絶対値とその変動について

##### 3-4-1 核沸騰領域、限界熱流束時及び遷移沸騰領域での沸騰気泡下部液膜厚さの時間変化

加熱過程における限界熱流束近傍の核沸騰領域及び限界熱流束における気泡下部液膜厚さ変化を Fig. 16(a) 及び (b) に、限界熱流束及び限界熱流束近傍の遷移沸騰領域における気泡下部液膜厚さ変化を Fig. 17(a) 及び (b) に示す。また気泡下部液膜厚さ変化の周波数解析結果を Fig. 18(a) ~ (c) に示す。

Fig. 16(a) より、核沸騰領域では、気泡下部液膜厚さは限界熱流束時と比べ、時間平均的に見ると約  $200\mu\text{m}$  と厚く、周期的な液膜厚さ変化が明確にはみられない。液膜厚さは急激な液膜厚さ減少の後  $0\mu\text{m}$  近傍となるが、その時間は限界熱流束時と比べると  $5\text{ms}$  未満と短い。

Fig. 16(b) より限界熱流束時の気泡下部液膜厚さは、核沸騰領域と比べ時間平均的に見ると薄くなり、時間変化の波形がはっきりとしてくる。周期は核沸騰領域に比べ約  $50\text{ms}$  と短くなり、液膜厚さはほぼ毎周期ごとに  $0\mu\text{m}$  近傍となる。これは気泡下部液膜のドライアウトを示すものである。気泡下部液膜厚さの時間変化の特徴としては、ドライアウト、約  $50\sim 100\mu\text{m}$  の比較的薄い領域、急激な液膜厚さ増加、急激な液膜厚さ減少を繰り返す。また最大液膜厚さは  $300\sim 350\mu\text{m}$  となる。

Fig. 17(b) より遷移沸騰領域では、周期が限界熱流束時に比べ約  $75\sim 100\text{ms}$  と長くなる。気泡下部液膜厚さの時間変化の特徴としては、気泡下部液膜のドライアウトを示す、液膜厚さ最低値を取る時間が限界熱流束時と比べ長くなる。

Fig. 18(a) ~ (c) に示す、気泡下部液膜厚さ変化の周波数解析結果は、 $256\text{ms}$  区

間 512 データを用い、4 計測の平均を取っている。Fig. 18 (a) の核沸騰領域では約 15Hz、25Hz 及び 40Hz に、Fig. 18 (b) の限界熱流束では約 20Hz に、Fig. 18 (c) の遷移沸騰領域では約 15Hz にピークが現れる。

### 3-4-2 限界熱流束時の急激な液膜減少

Fig. 17(a)において、気泡下部液膜厚さが最も厚くなり膜厚さ約 300~350  $\mu\text{m}$  となった直後、約 5~10ms で急激に液膜厚さが減少し、気泡下部液膜厚さが 0  $\mu\text{m}$  近傍になる。ここで限界熱流束時（壁面過熱度  $\Delta T=40\text{K}$ ）における、膜厚  $\delta=300\mu\text{m}$  の気泡下部液膜が、10ms で 1  $\mu\text{m}$  まで減少する場合、液膜を貫く熱流束によって蒸発する液膜の厚さは、

1. まず沸騰により伝わった熱量を過熱度から求め、

$$dq = Q \cdot S \cdot dt = \frac{\lambda \cdot \Delta T \cdot S \cdot dt}{\delta} \quad (12)$$

2. 沸騰により伝わった熱量を単位時間  $dt$  あたり膜厚  $d\delta_v$ 、消費されたとして求め、

$$dq = d\delta_v \cdot S \cdot \rho \cdot h \quad (13)$$

3. 膜厚  $\delta=300\mu\text{m}$  の気泡下部液膜が、10ms 間に排出量一定で 1  $\mu\text{m}$  まで減少すると考えると液膜厚さは、

$$\delta(t) = -2.99 \times 10^{-2} t + 3 \times 10^{-4} \quad (14)$$

よって式(12)、(13)、(14)より液膜を貫く熱流束によって蒸発する液膜の厚さは、

$$\delta_v = \frac{\lambda \Delta T}{\rho h} \int_0^{10^{-2}} \frac{1}{\delta_{(t)}} dt = 0.937 \times 10^{-6} (\text{m}) = 0.937 (\mu\text{m}) \quad (15)$$

となる。すなわち気泡下部液膜、膜厚  $\delta=300\mu\text{m}$  の内 99%以上が蒸発せずに気泡下部から排出されていると考えられる。このため周辺から中心部への液体供給、逆に中心部から周辺部への液体排出は、気泡下部液膜厚さの時間変動を説明する上で重要となる事が明らかになった。このことは、液膜が蒸発して消失する時が沸騰限界熱流束である、という考え方が、小さい伝熱面の場合、成り立つ



ていないことを示しており、新たな動力学モデルを提案する必要のあることも明らかになった。

### 3-4-3 限界熱流束時の気泡下部液膜への液体供給及び排出過程の検証

本研究では粗さの違う2タイプの伝熱面における、限界熱流束時の気泡下部液膜厚さの時間変化を測定し、液体供給及び排出が、気泡下部周辺から行われていることを確かめる実験を行った。

これをFig. 19に示す。伝熱面粗さの異なる二つの面は、紙やすり100番と2000番で表面を研磨して作成した。2000番で表面を研磨して作成した粗い面には、紙やすりによって約 $100\mu\text{m}$ の溝ができています。伝熱面を粗くすると、液膜厚さの急激な減少時間は鏡面仕上げのものとはほぼ等しいにもかかわらず、気泡下部液膜への急激な液体供給が現れなくなる。これは液体供給が気泡下部縁から行われており、伝熱面上の溝によって液体供給が妨げられている事を示す。また供給時には液膜厚さが薄いため、溝の影響を受けやすく（伝熱面上の溝の深さ $100\mu\text{m}$ 近傍）、排出時には液膜厚さが厚いため、伝熱面上の溝に影響を受けにくい事が推測される。このことから、気泡の端部より液体が気泡下部に出入りする事を実験的に確認することができた。

### 3-4-4 限界熱流束時の液体供給及び排出速度

3-4-3より、気泡の端部より液体が気泡下部に出入りする事を実験的に確認することができた。また3-4-2より液膜厚さ $300\mu\text{m}$ が $10\text{ms}$ でほぼ $0\mu\text{m}$ にまで減少する間に沸騰による熱伝達によって消費される液膜厚さは約 $1\mu\text{m}$ であることが明らかになった。すなわち気泡下部の液体は、最大液膜厚さをとった後、沸騰ではなく何らかの力によって気泡下部から排出されている事が分かる。

次に気泡下部からの液体排出速度を計算する。式(14)より気泡下部液膜厚さが求まるため、気泡下部液膜の側面積は

$$S(t) = 2\pi r\delta(t) \quad (16)$$

と表せる。気泡下部側面より液体排出速度 $u_i(t)$ で単位時間あたりに排出される液体容量は、

$$dV = S(t) \cdot u_i(t) \quad (17)$$

排出によって失われた液体容量(気泡下部に存在した直径 $5\text{mm}$ 高さ $300\mu\text{m}$ の円

柱分の液体の内高さ  $299 \mu\text{m}$  分に相当)と表せ、またこれが  $10\text{ms}$  で失われたことより、単位時間あたりの排出量を求めると、

$$dV = \frac{3 \times 10^{-4} \pi r^2 - 10^{-6} \pi r^2}{10^{-2}} = 2.99 \times 10^{-2} \pi r^2 \quad (18)$$

となる。式(17)、(18)より、排出速度を求めると、

$$u_1(t) = \frac{2.99 \times 10^{-2} \pi r^2}{2\pi r(-2.99 \times 10^{-2} t + 3 \times 10^{-4})} \quad [\text{m/s}] \quad (19)$$

となる。

同じく液体供給時、液膜厚さ  $1 \mu\text{m}$  が  $10\text{ms}$  で  $300 \mu\text{m}$  にまで増加する場合の供給速度を求める。

$$u_1(t) = \frac{2.99 \times 10^{-2} \pi r^2}{2\pi r(2.99 \times 10^{-2} t + 10^{-6})} \quad [\text{m/s}] \quad (20)$$

Table1 に  $t=0 \text{ s}$  及び  $t=10^{-2} \text{ s}$  の時、すなわち気泡下部液膜への液体供給及び排出開始時及び終了時の速度を示す。

**Table1: Calculated discharging and supplying velocity from the time variation of liquid thickness under the boiling bubble in CHF region.**

	Start	End
Discharging velocity	0.12 [m/s]	37 [m/s]
Supplying velocity	37 [m/s]	0.12 [m/s]

### 3-4-5 限界熱流束時の熱流束時間変化

気泡下部液膜を貫く熱流束  $q_c$  は、エネルギー方程式により求まる。ただし対流条件、放射伝導、粘性による散逸は無視できるものとする。また、液膜厚さ方向において、線形の温度分布が存在するものとする。

$$q_c = \frac{\lambda_l (T_w - T_g)}{\delta} \quad (21)$$

Fig. 20 に液膜厚さ変化測定結果より導き出した熱流束の時間変化を示す。これより沸騰による熱伝達は、ほとんどが液膜厚さの薄くなった時に生じ、それ以外の時間は沸騰がわずかしか起きていない事が分かる。またこの計算によっ

て得られた熱流束の平均を取ると約  $60\text{kW/m}^2$  であった。平均熱流束  $q$  ( $200\text{kW/m}^2=200\text{kJ/S}\cdot\text{m}^2$ ) であるから約 30%が沸騰により熱伝達する事になる。

## 第5節 気泡形状の時間変化と、液膜厚さの時間変化

### 3-5-1 実験装置の概要および特徴

Fig. 21 (a)に実験装置全体図を示す。実験容器側面には、可視化部用窓が設けられている。可視化部は、厚さ 25mm のパイレックス製の円形ガラス板でできており、固定フランジによって取り付けられている。可視化部のガラス窓から高速度ビデオカメラを用いて気泡の撮影を行った。撮影は毎秒 200 コマで行った。

Fig. 21 (a)に伝熱面拡大図を示す。静電容量プローブには、気泡形状を撮影しやすい針状プローブを用いた。ただし、このプローブでは液膜厚さの相対値を測定できるが、絶対値は求めることができない。プローブ先端は、気泡の中に位置しているため、プローブと伝熱面の間で電気力線がもっとも近い金属面である伝熱面に集中する。このため気泡形状変化の影響を、ほとんど受けないと考えられる。実験においても、出力波形とそれに同期した高速ビデオカメラの映像を比較したところ、気泡の形状による影響は受けていないことから、プローブはほぼ伝熱面との静電容量についての情報を測定していると考えられ、気泡下部液膜厚さの時間的変化を示していると考えられる。

### 3-5-2 気泡形状及び液膜厚さの時間変化の同時測定結果

Fig. 22 に、静電容量プローブを用いて測定した、限界熱流束における気泡下部液膜厚さ変動の測定結果と、同時に高速ビデオカメラを用いて撮影した気泡形状をプロットしたものを示す。グラフは縦軸方向に高いほど、液膜が厚みをもっていることを表わしている。高速ビデオカメラを用いた撮影は 5ms 毎に行っている。気泡下部液膜厚さ変動の周期は約 40~60ms である。高速ビデオカメラの観察によれば、気泡の離脱周期は約 45~55ms で液膜厚さの周期と合うときと、気泡がくびれるだけで離脱しない場合がある。すなわち気泡の離脱周期は気泡下部液膜厚さの周期と必ずしも一致しない。

Fig. 22 から、気泡下部の形状と気泡下部液膜厚さの変動に着目すると、気泡下部縁が丸くなっている時は気泡下部への液体供給が生じ、気泡下部液膜厚さは増加する。気泡下部縁が尖っている時は気泡下部からの液体排出が生じ、気泡下部液膜厚さが減少することを新たに見出すことができた。

Fig. 23 (a)液体排出中の気泡、Fig. 23 (b)液体供給中の気泡を示す。これらは限界熱流束における気泡を、カメラを用いて撮影したものである。気泡が伝熱面を全て覆っている。写真内において気泡下部より、伝熱面がはみ出しているように見えるのは、伝熱面を囲んだ塩ビの薄板である。

気泡形状の違いを気泡下部縦断面方向の曲率として言い直すと、Fig. 23(a)における気泡下部縁は、平坦な気泡下部から曲率を持ち始め、気泡下部縁で最大曲率となり、曲率を保ったまま変化し、気泡下部縁が尖っている。これに対しFig. 23(b)の気泡下部縁は、平坦な気泡下部から曲率を持ち始め、気泡下部縁で最大曲率となり、さらに平坦もしくは逆の曲率を持つまで変化するため、気泡下部縁が膨らんだ形状になる。

## 第6節 液膜内圧力の時間変化と、液膜厚さの時間変化

### 3-6-1 実験装置の概要および特徴

Fig. 24(a)に実験装置の全体図を示す。IWATSU製の膜厚測定器ST-3521を2台使用し、解析器(YOKOGAWA HOKUSHIN ELECTRIC MODEL-3655)によってトリガーを引き同時計測を行った。これにより圧力の時間変動と液膜厚さの時間変動の同期した測定結果を得た。

Fig. 24(b)に測定部の拡大図を示す。気泡下部液膜厚さ測定は気泡中心部を、気泡下部液膜内圧力測定は、伝熱面外周より1mm内側で行う。このため、圧力計の振動板の影響を受けない。圧力の時間変動と液膜厚さの測定は、測定周波数2kHz、測定周期0.5msで行った。圧力の変動周期は50msであったため、充分現象を捉えていると言える。なお変動周期に付いては、いくつかの測定周期(0.01ms~1s)について予備測定を行い、最も明確な波が出る位置を把握した。

### 3-6-2 液膜内圧力及び液膜厚さの時間変化の同時測定結果

液膜内圧力及び液膜厚さの時間変化の同時測定をおこなった。Fig. 25(a)に沸騰限界熱流束時の気泡下部液膜内圧力、Fig. 25(b)に液膜厚さを示す。これにより、次の様なことが分かった。

1. 沸騰限界熱流束時に、伝熱面上の圧力は最大圧力は約20kPa、最小圧力は約-20kPaの範囲で変動する事を明らかにした。
2. 気泡下部液膜は濡れやすく、気泡下部液膜内圧力が正になると時間が経くと液膜厚さが薄くなり、圧力が負になると液膜厚さはすぐに厚くなる傾向を示した。
3. 伝熱面の圧力変動は、液膜厚さ変動の測定結果の振動周波数は約20Hzと一致する。

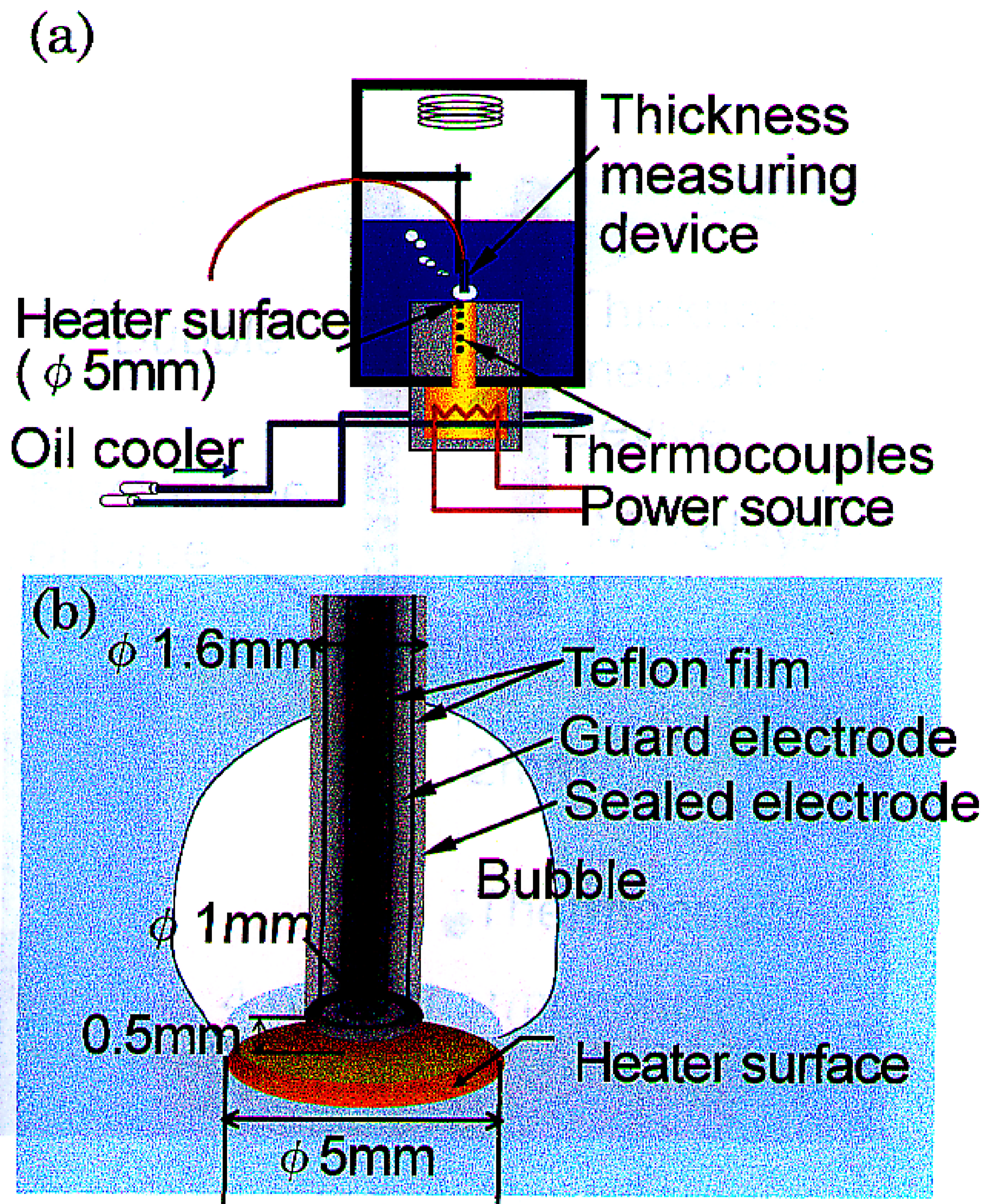
## 第7節 本章の結論

沸騰限界熱流束時の気泡下部液膜厚さの動的な挙動を解明する目的で、気泡下部液膜厚さの時間変化を、静電容量型液膜厚さプローブを試作して測定し以下の結論を得た。

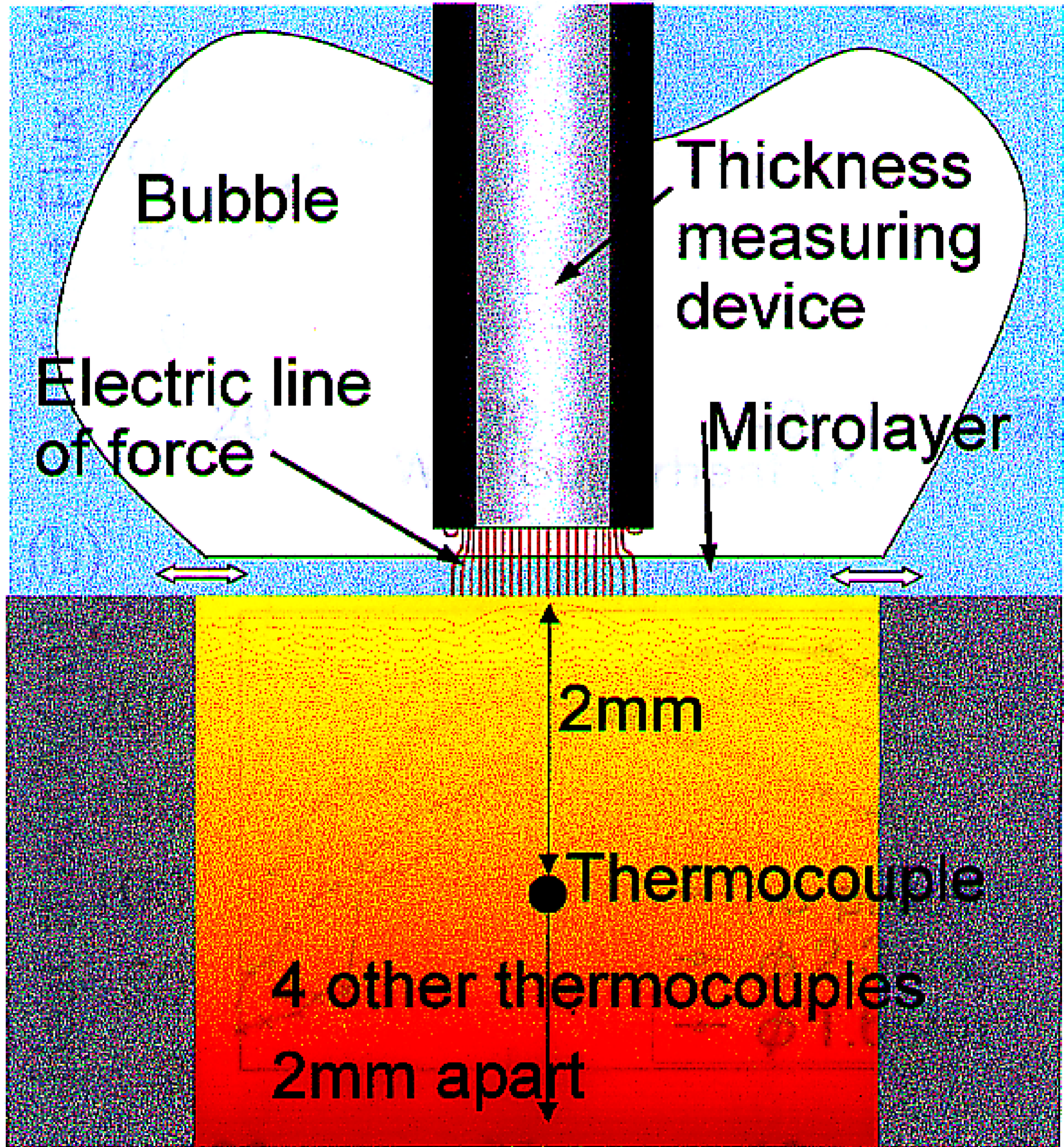
1. 外径 1.6mm の3層同軸プローブを用いて、気泡下部液膜厚さの絶対値を測

定することができた。限界熱流束時の蒸気柱下部液膜厚さは伝熱面の粗さには余り影響を受けず最大で約  $300\ \mu\text{m}$  であった。

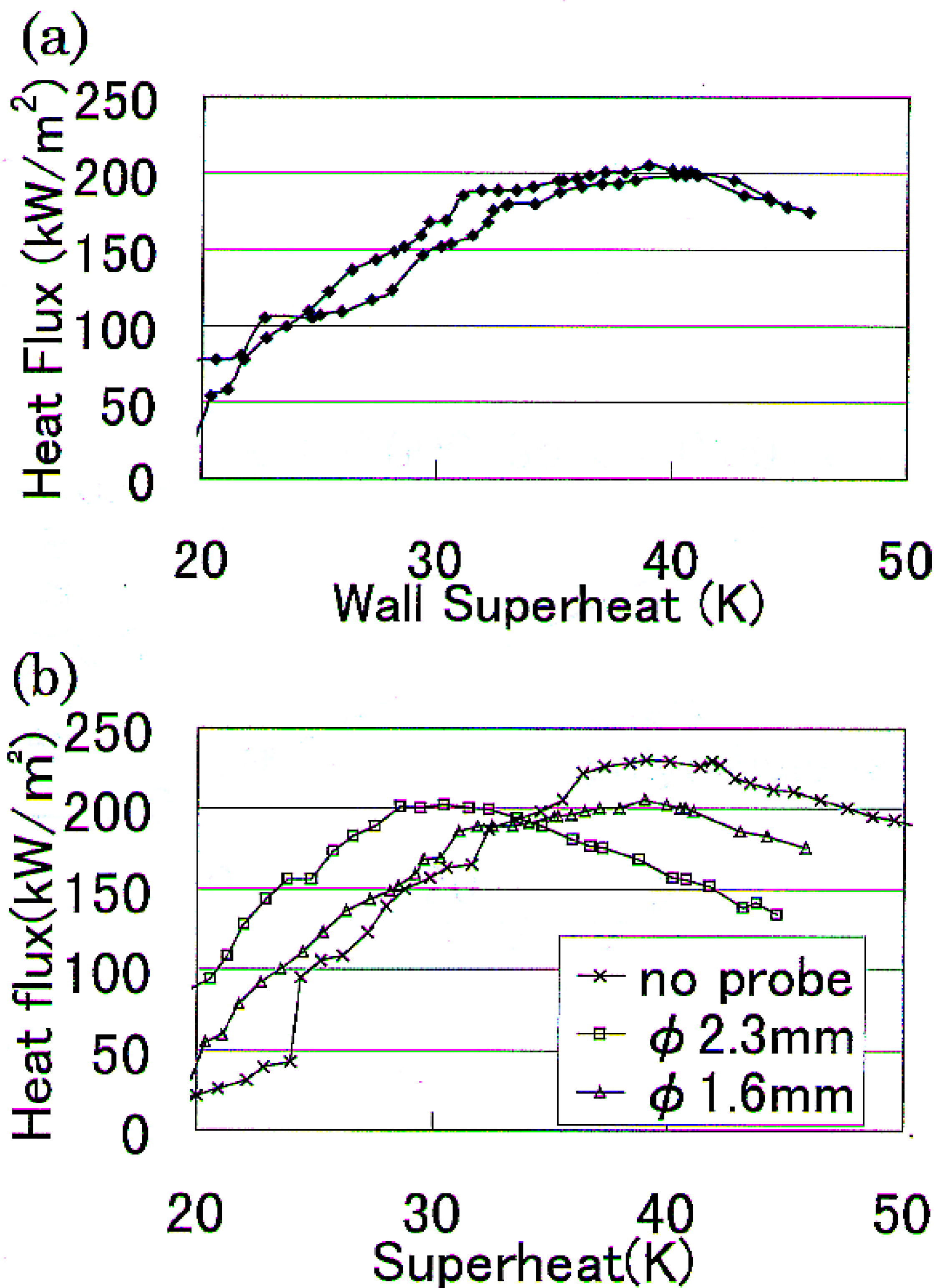
2. 核沸騰領域では周期的な液膜厚さ変化が明確にはみられないが、限界熱流束時には液膜厚さ変化の波形がはっきりとしてくる。これは気泡下部液膜のドライアウトを示すものである。気泡下部液膜厚さの時間変化の特徴としては、ドライアウト、約  $50\sim 100\ \mu\text{m}$  の比較的薄い領域、急激な液膜厚さ増加、急激な液膜厚さ減少を繰り返す。また最大液膜厚さは  $300\sim 350\ \mu\text{m}$  となる。遷移沸騰領域では、気泡下部液膜のドライアウトを示す液膜厚さ最低値を取る時間が限界熱流束時と比べ長くなる。
3. 気泡下部液膜厚さ変化の周波数解析結果は、 $256\text{ms}$  区間 512 データを用い、4 計測の平均を取り、核沸騰領域では約  $15\text{Hz}$ 、 $25\text{Hz}$  及び  $40\text{Hz}$  に、限界熱流束では約  $20\text{Hz}$  に、遷移沸騰領域では約  $15\text{Hz}$  にピークが現れる。
4. 気泡下部液膜の急激なドライアウトは、約  $300\ \mu\text{m}$  の厚みの流体が約  $5\sim 10\text{ms}$  で無くなる事により生じており、そのメカニズムは、熱伝達率から液膜全てが蒸発するのに必要な時間が長いことを考えると、そのほとんどが蒸発せずに気泡下部より流出していると考えられる。また気泡下部の形状と気泡下部液膜厚さの変動に着目すると、気泡下部縁が丸くなっている時は気泡下部への液体供給が生じ、気泡下部液膜厚さは増加する。気泡下部縁が尖っている時は気泡下部からの液体排出が生じ、気泡下部液膜厚さが減少することを見出した。
5. 沸騰限界熱流束時に、伝熱面上の圧力は最大圧力は約  $20\text{kPa}$ 、最小圧力は約  $-20\text{kPa}$  の範囲で変動する事を明らかにした。圧力変動は、圧力が周りの圧力と比べ正になると液膜が薄くなり、負になると厚くなる傾向を示した。伝熱面の圧力変動は、液膜厚さ変動の測定結果の振動周期  $40\text{ms}\sim 60\text{ms}$  と一致する。



**Fig.12 (a) Experimental apparatus**  
**(b) Enlargement of heater surface**

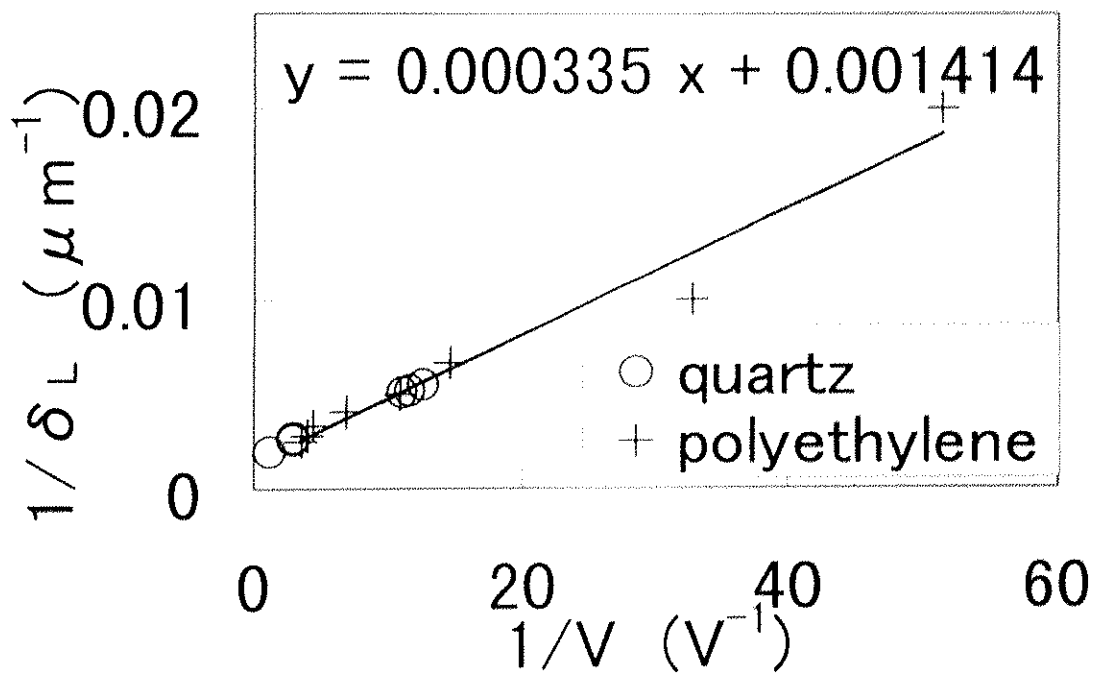


**Fig.13 Enlargement of thickness measuring device**

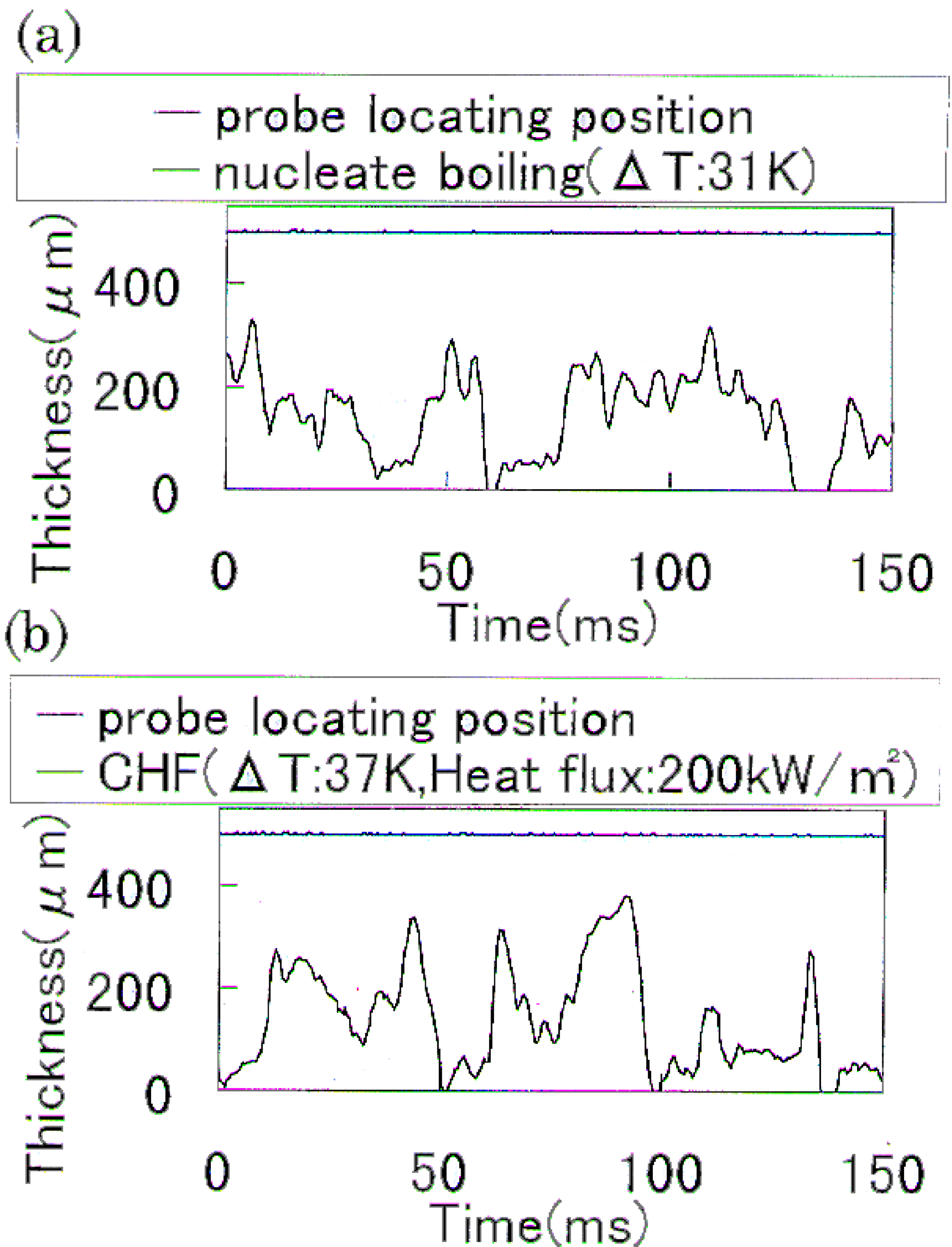


**Fig.14 (a)Boiling curve (b)The effect of probes on boiling curve**

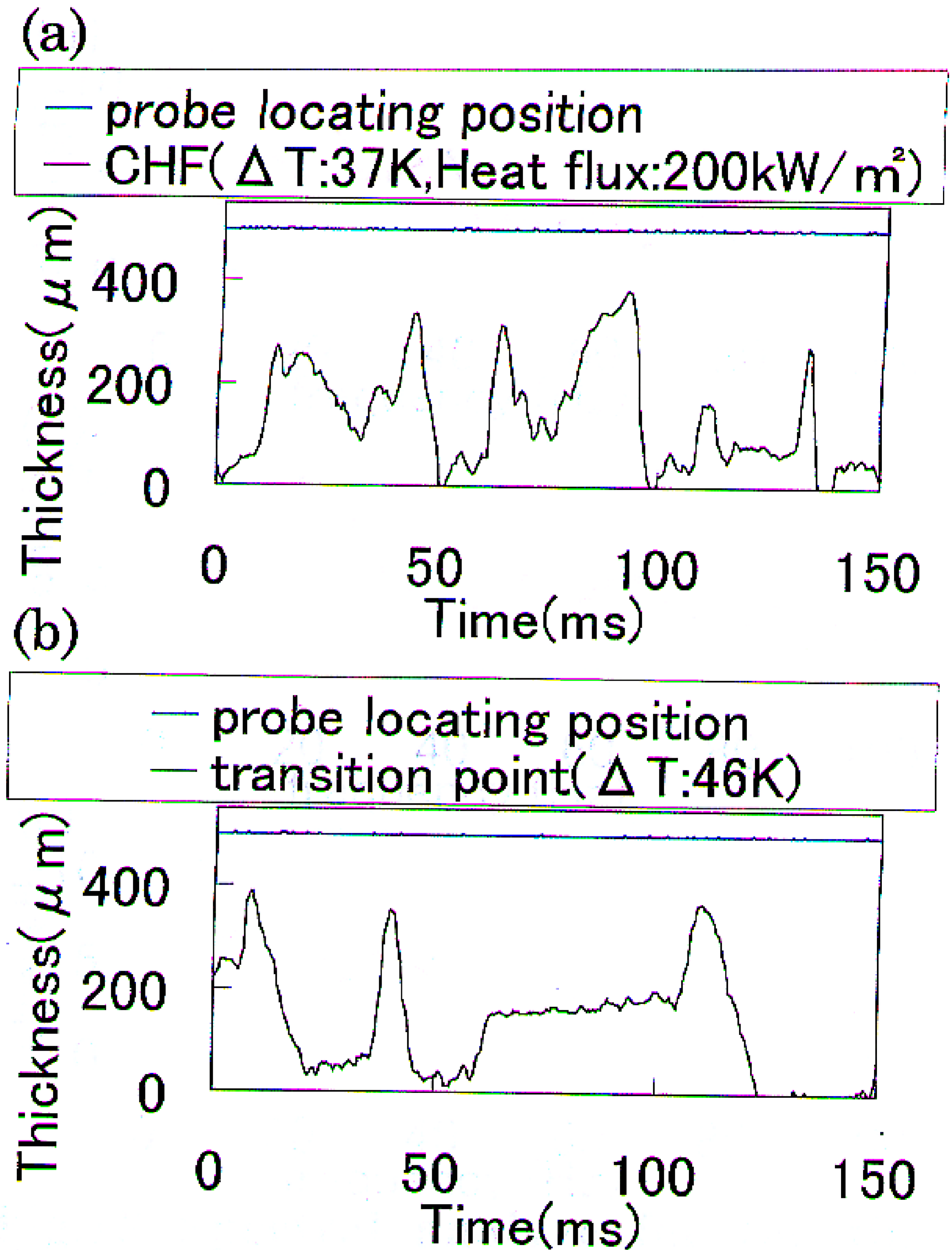




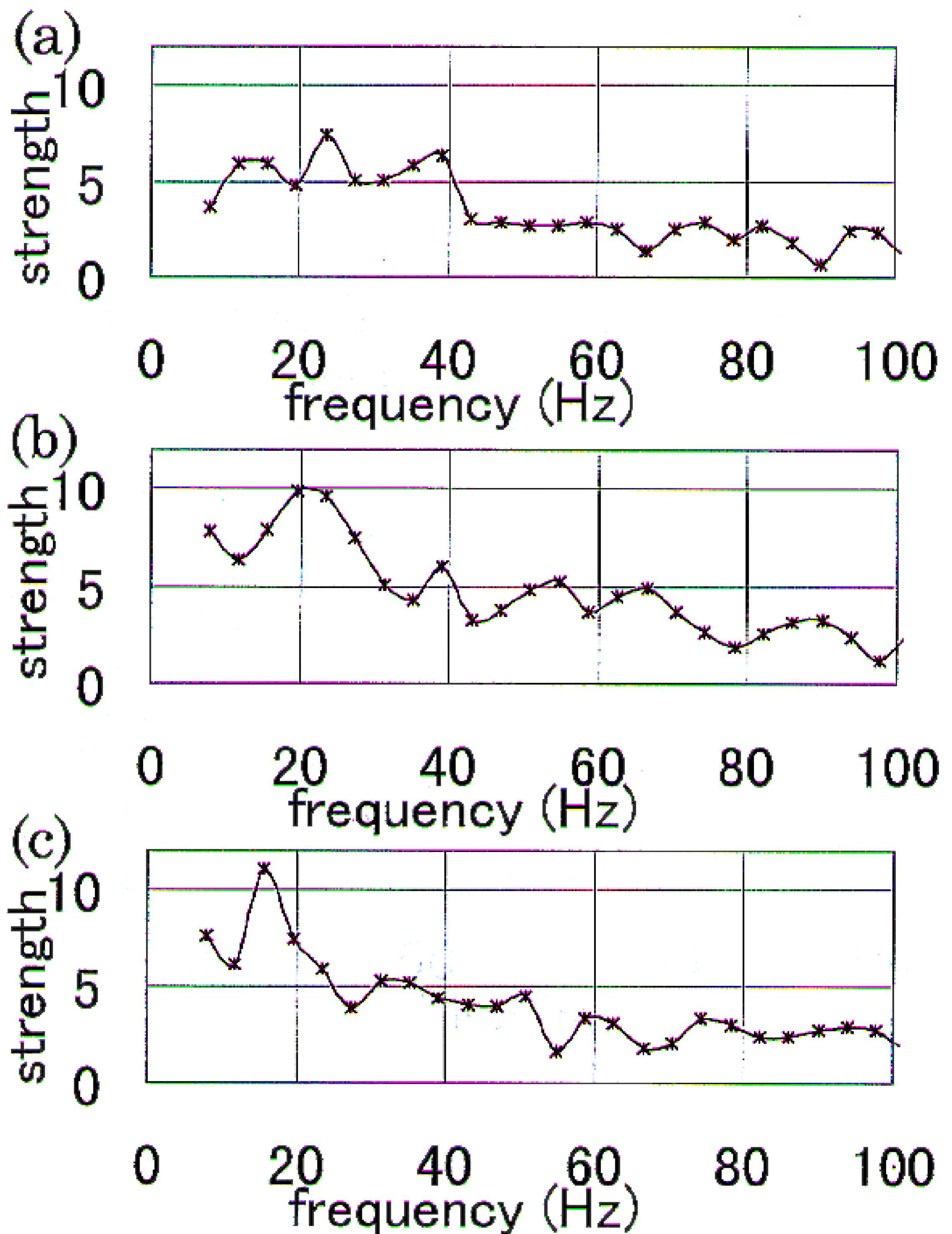
**Fig.15 The conversion of voltage to liquid film thickness**



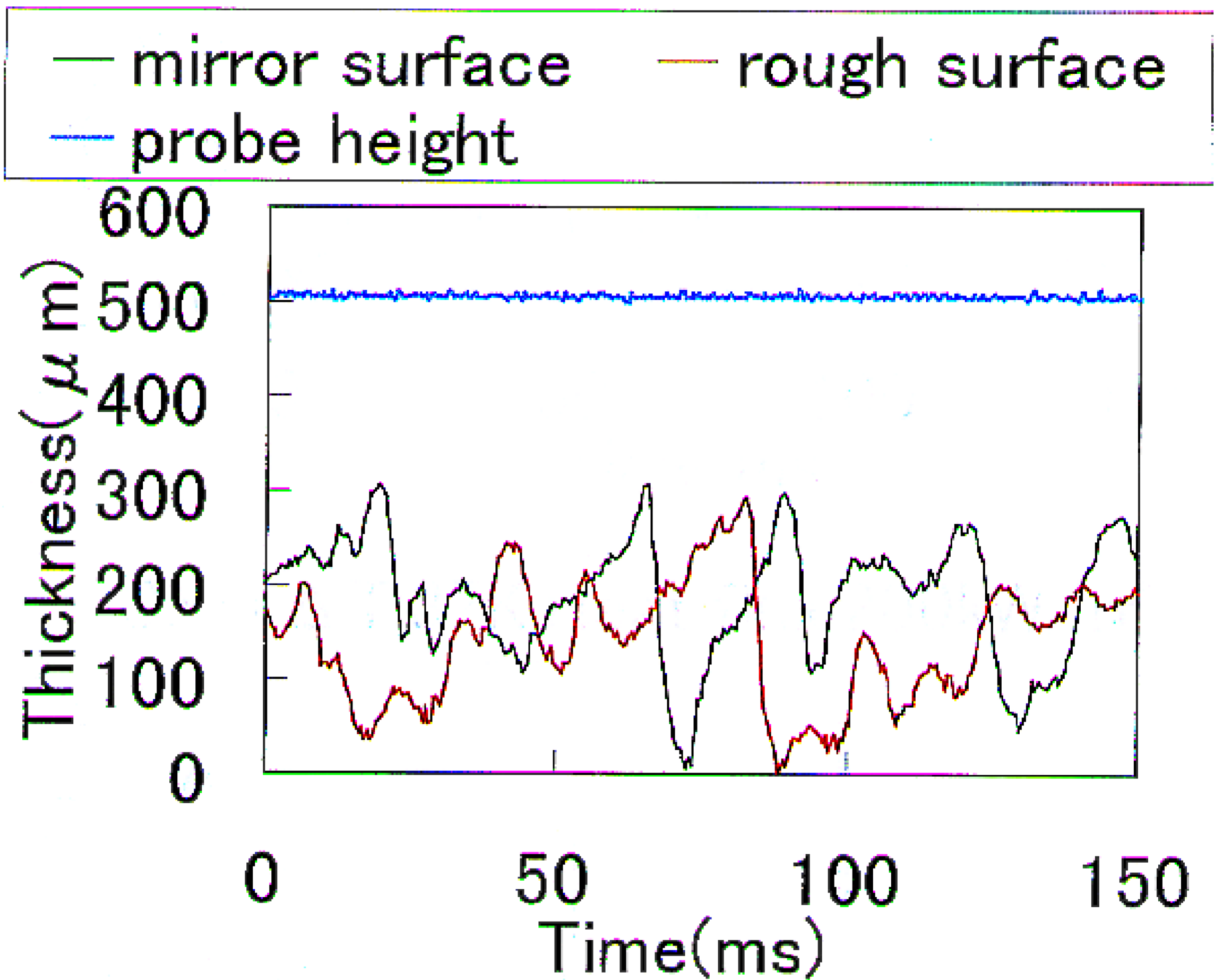
**Fig.16 Microlayer thickness as a function of time in (a) Nucleate boiling region (b) CHF**



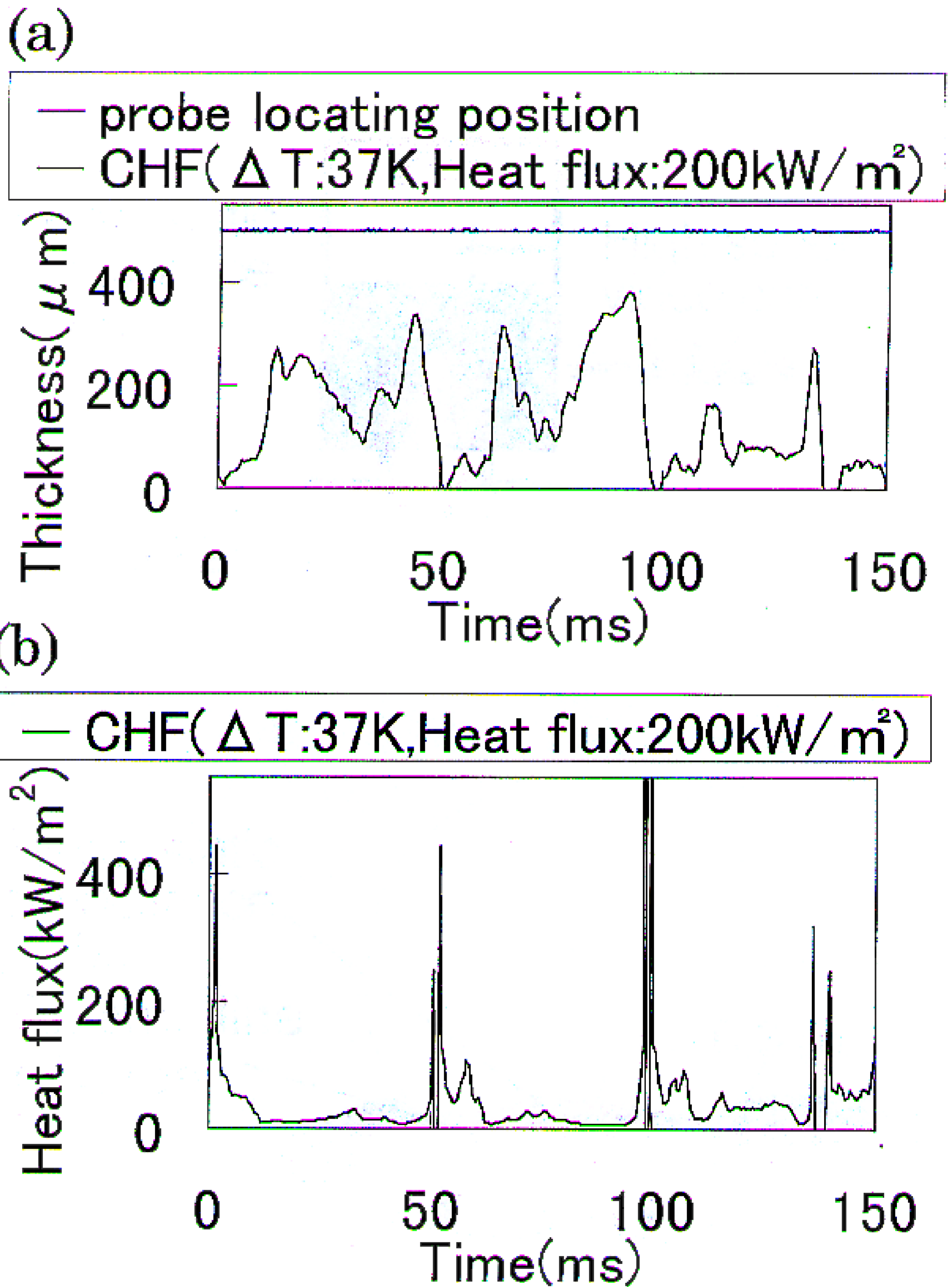
**Fig.17 Microlayer thickness as a function of time in (a)CHF (b)Transition boiling region**



**Fig.18 Spectral analyze for the time variation of microlayer thickness in (a)Nucleate boiling region (b)CHF region (c)Transition boiling region**

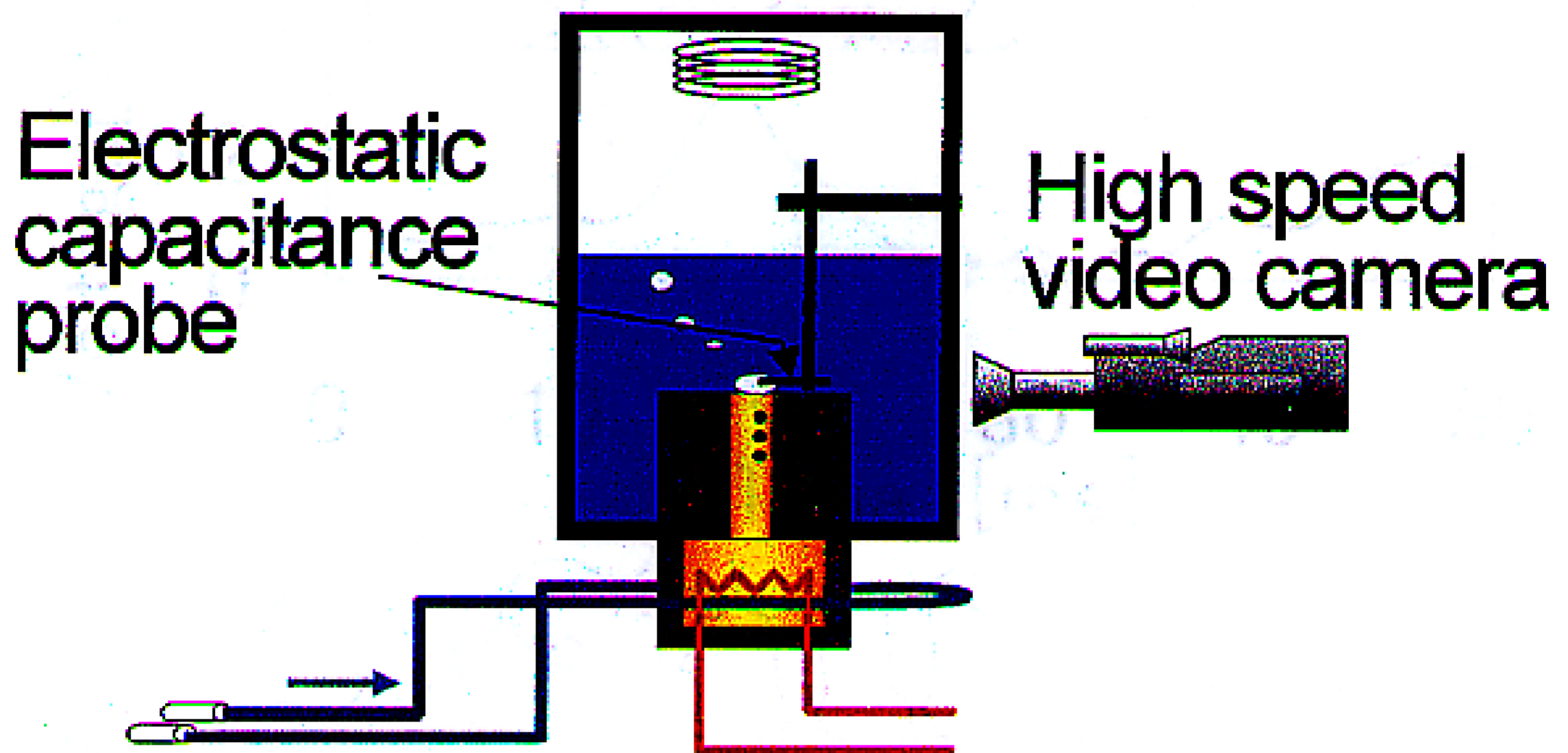


**Fig.19 Microlayer thickness as a function of time at burnout heat flux for two rough surfaces**

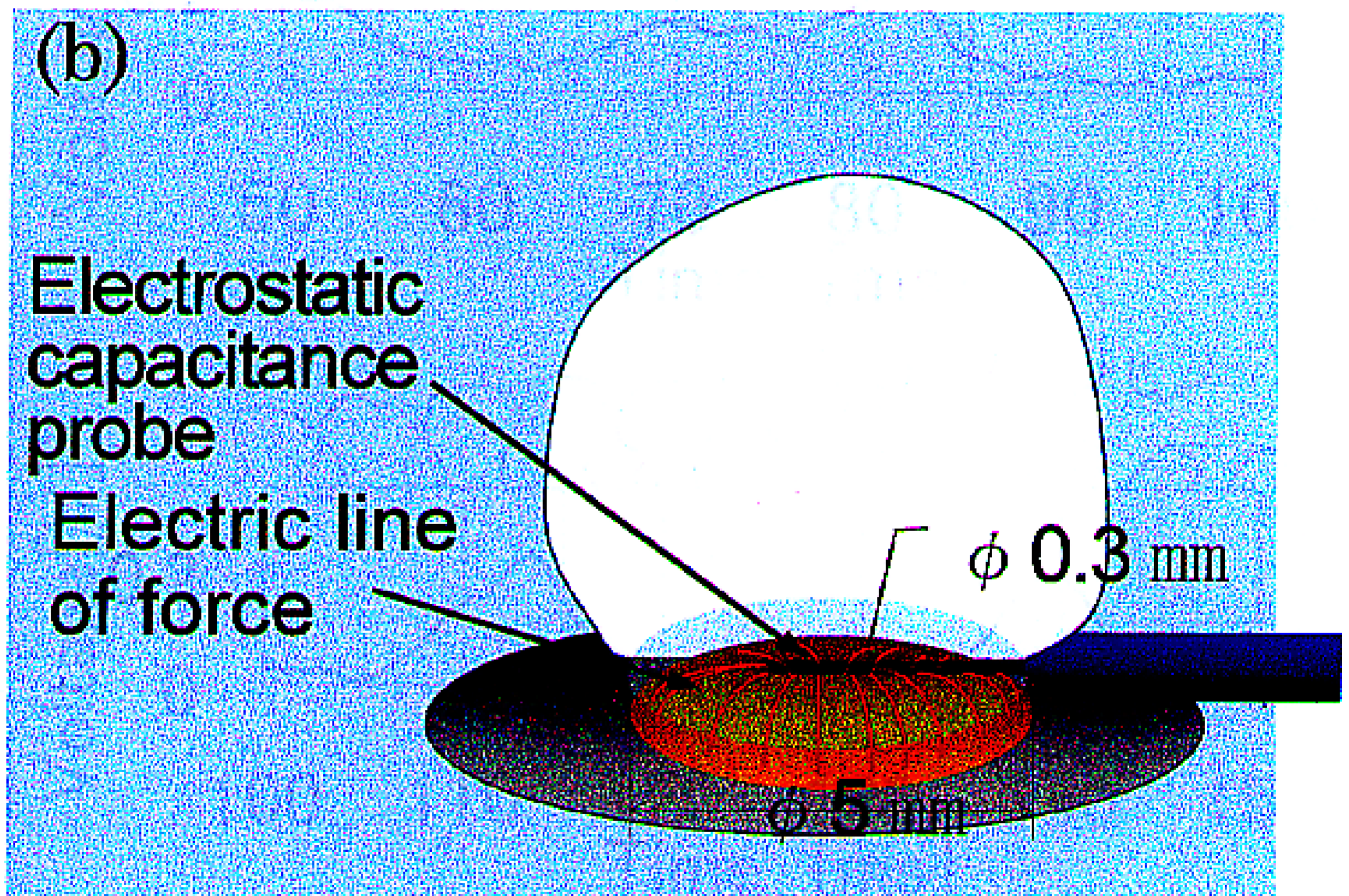


**Fig.20 Time variation of (a)Microlayer thickness and (b)Heatflux in CHF region**

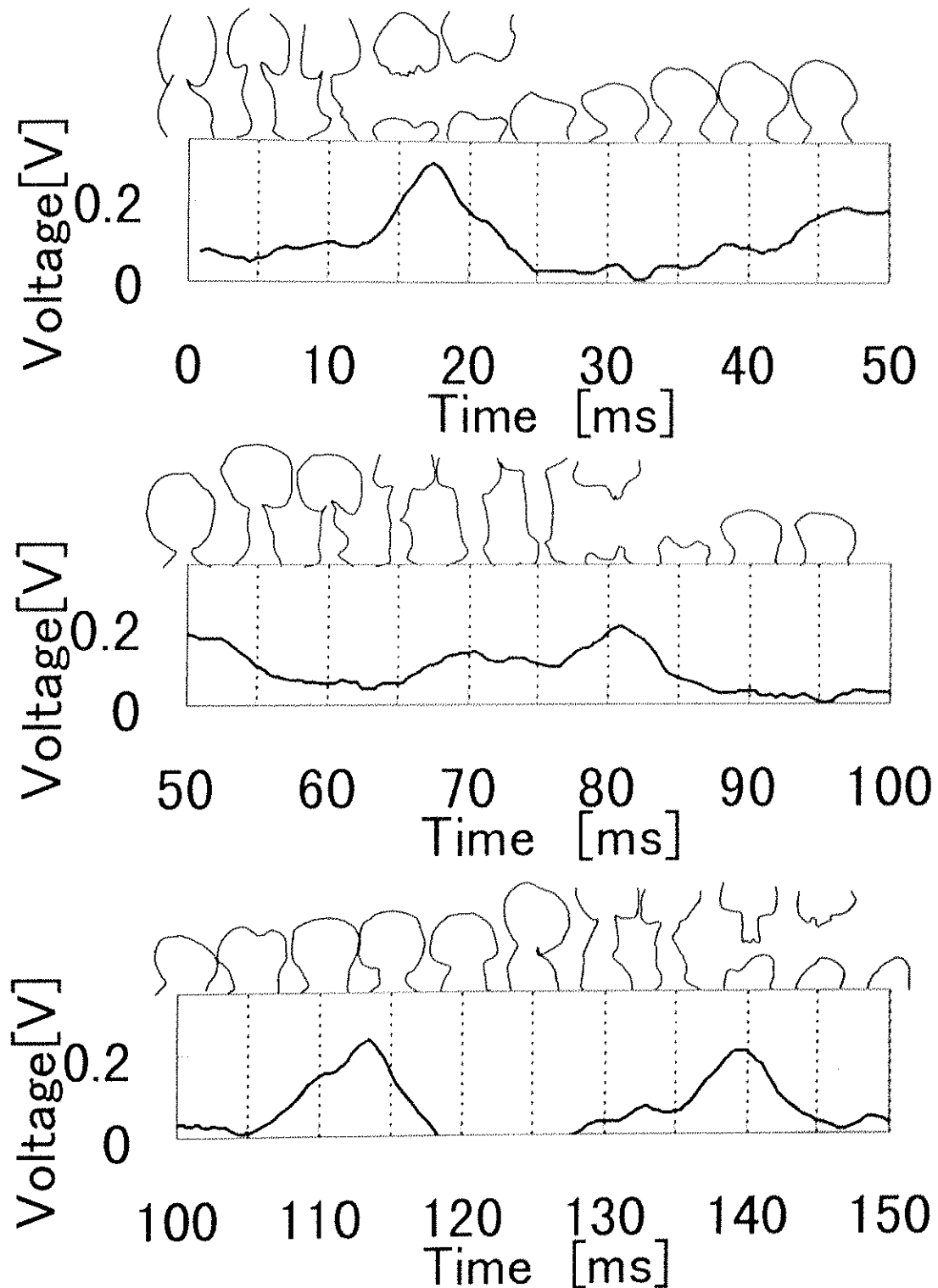
(a)



(b)

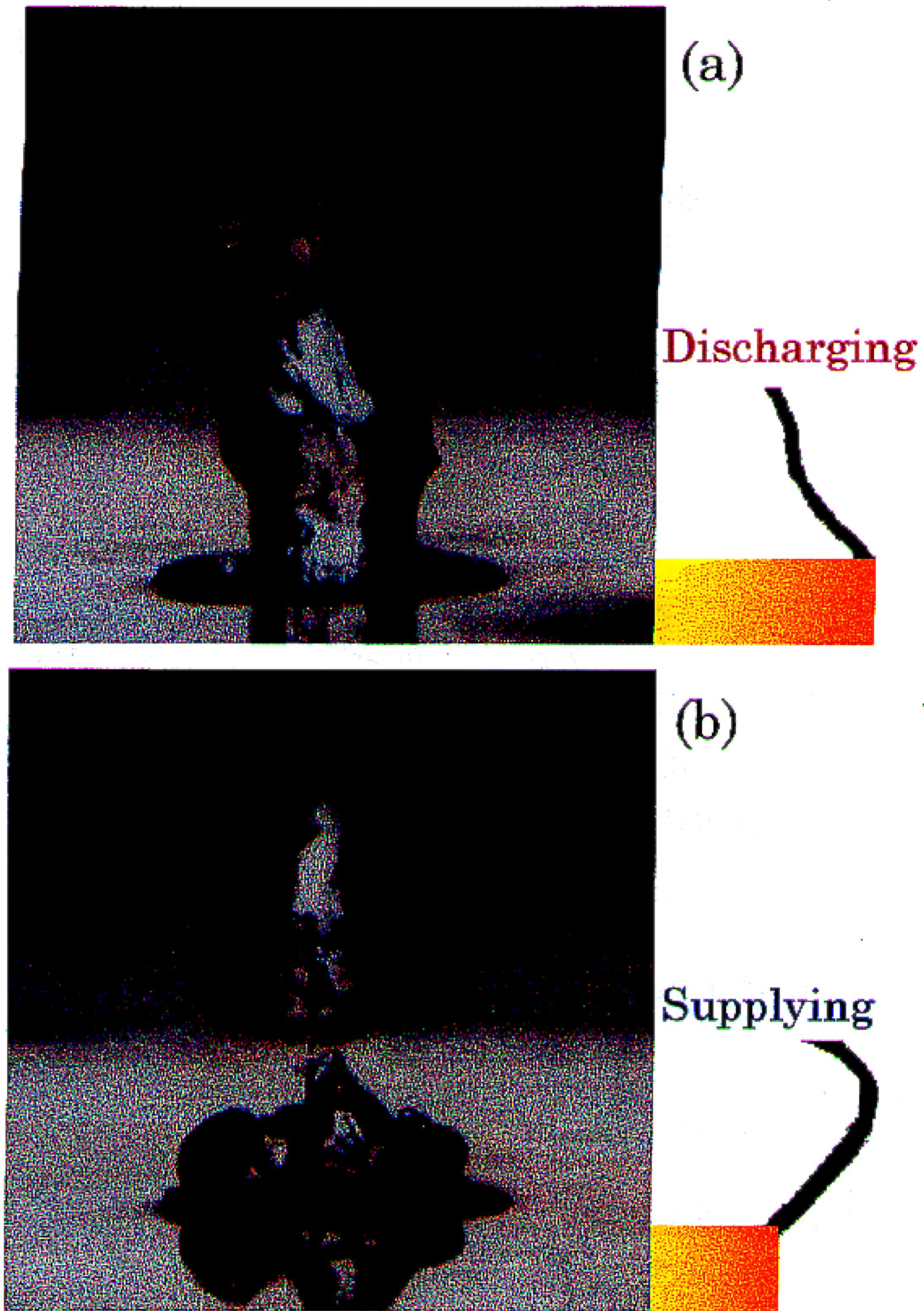


**Fig.21 (a) Experimental apparatus**  
**(b) Enlargement of heater surface**



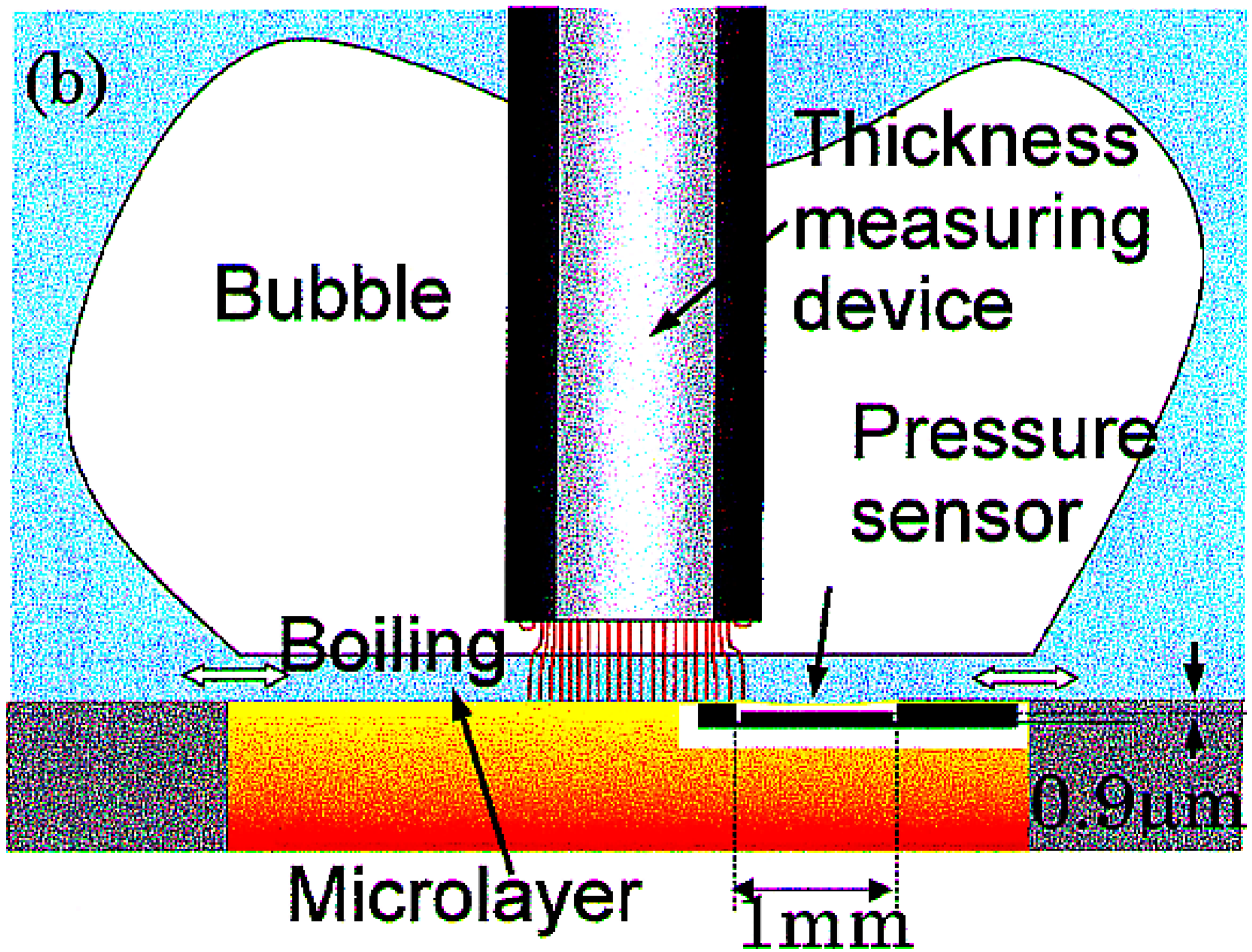
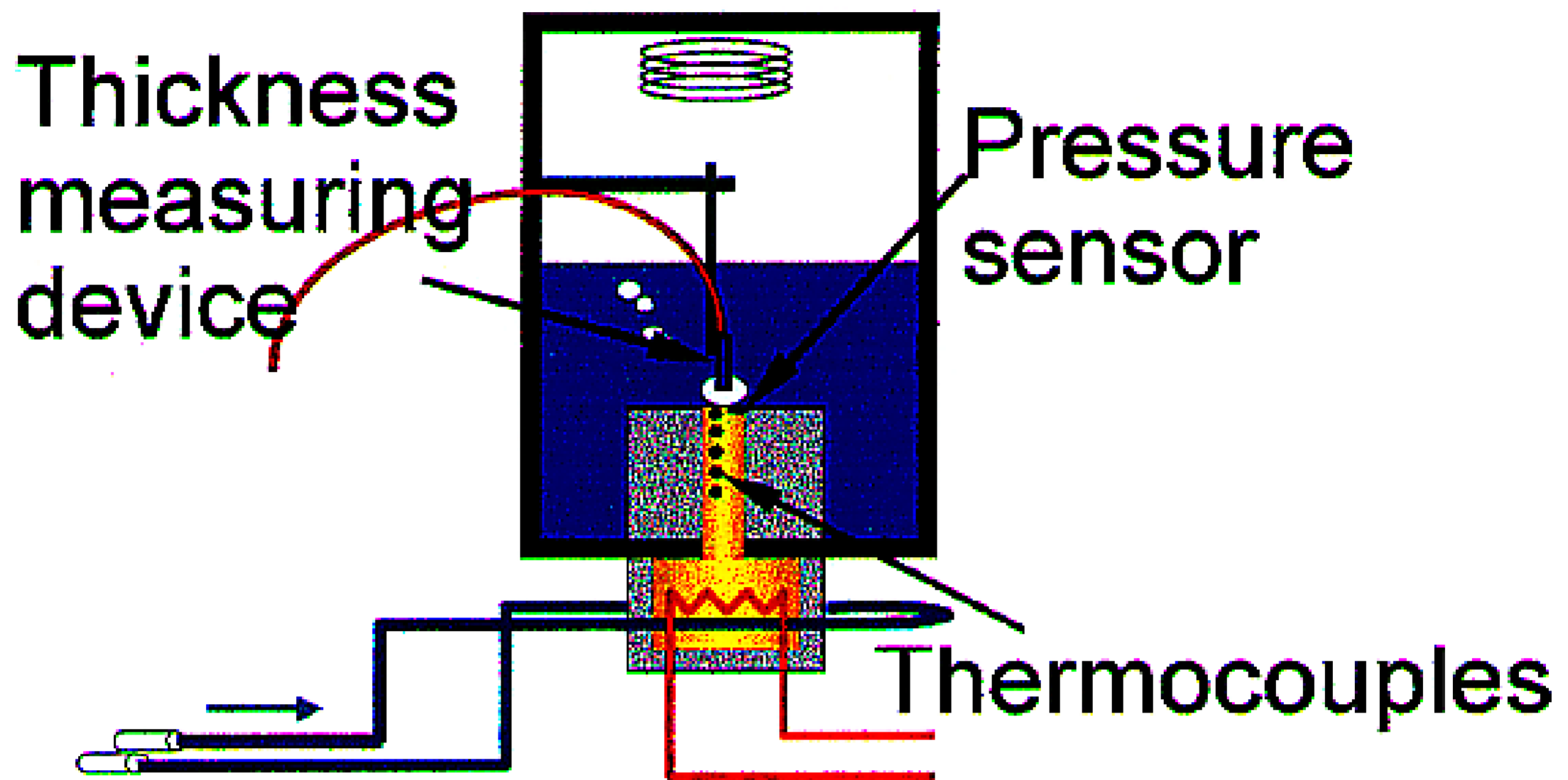
**Fig.22 Relationship between relative microlayer thickness and bubble shape as a function of time**





**Fig.23 The bubble shapes in the process of(a)discharging (b)supplying**

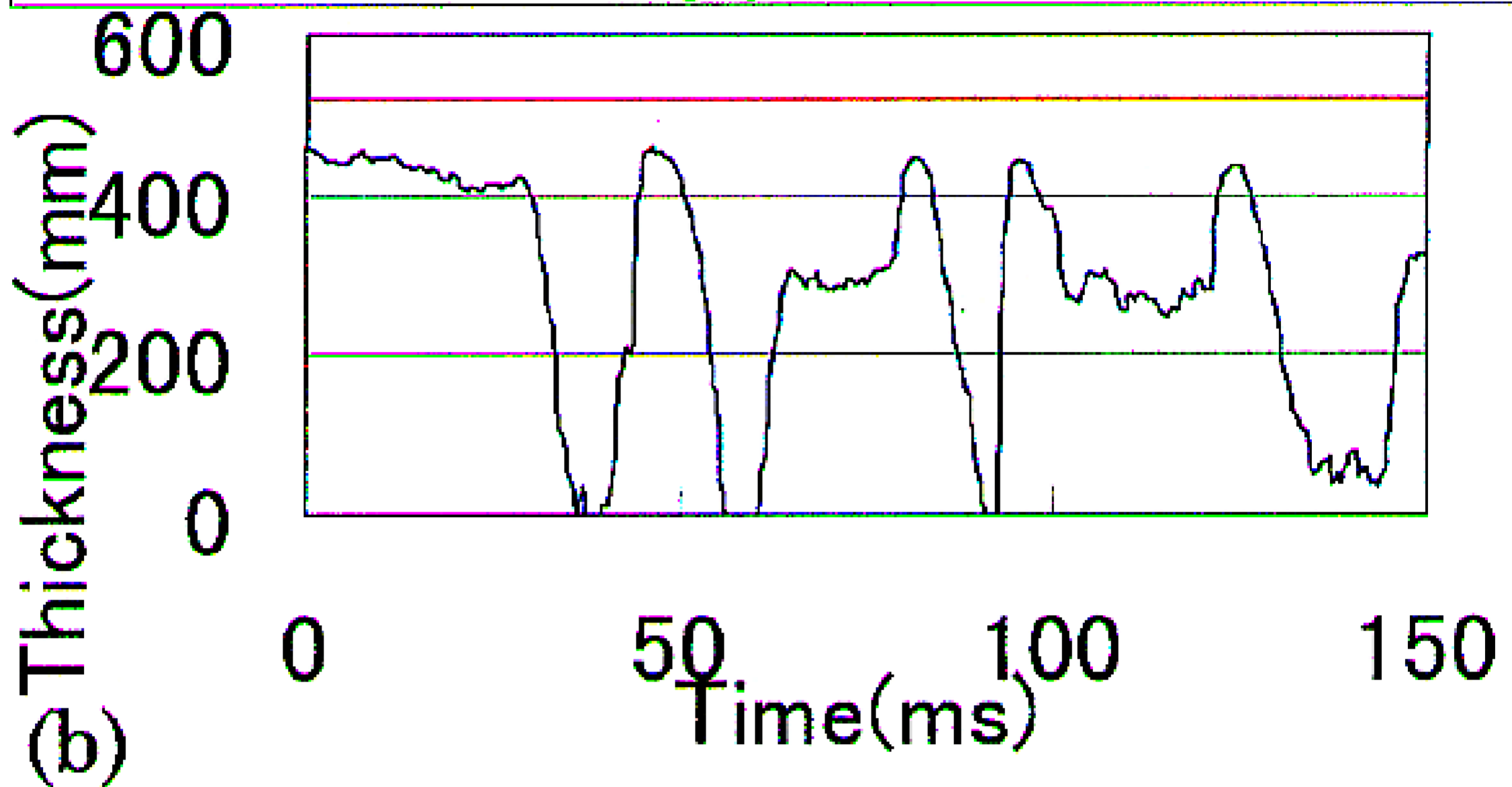
(a)



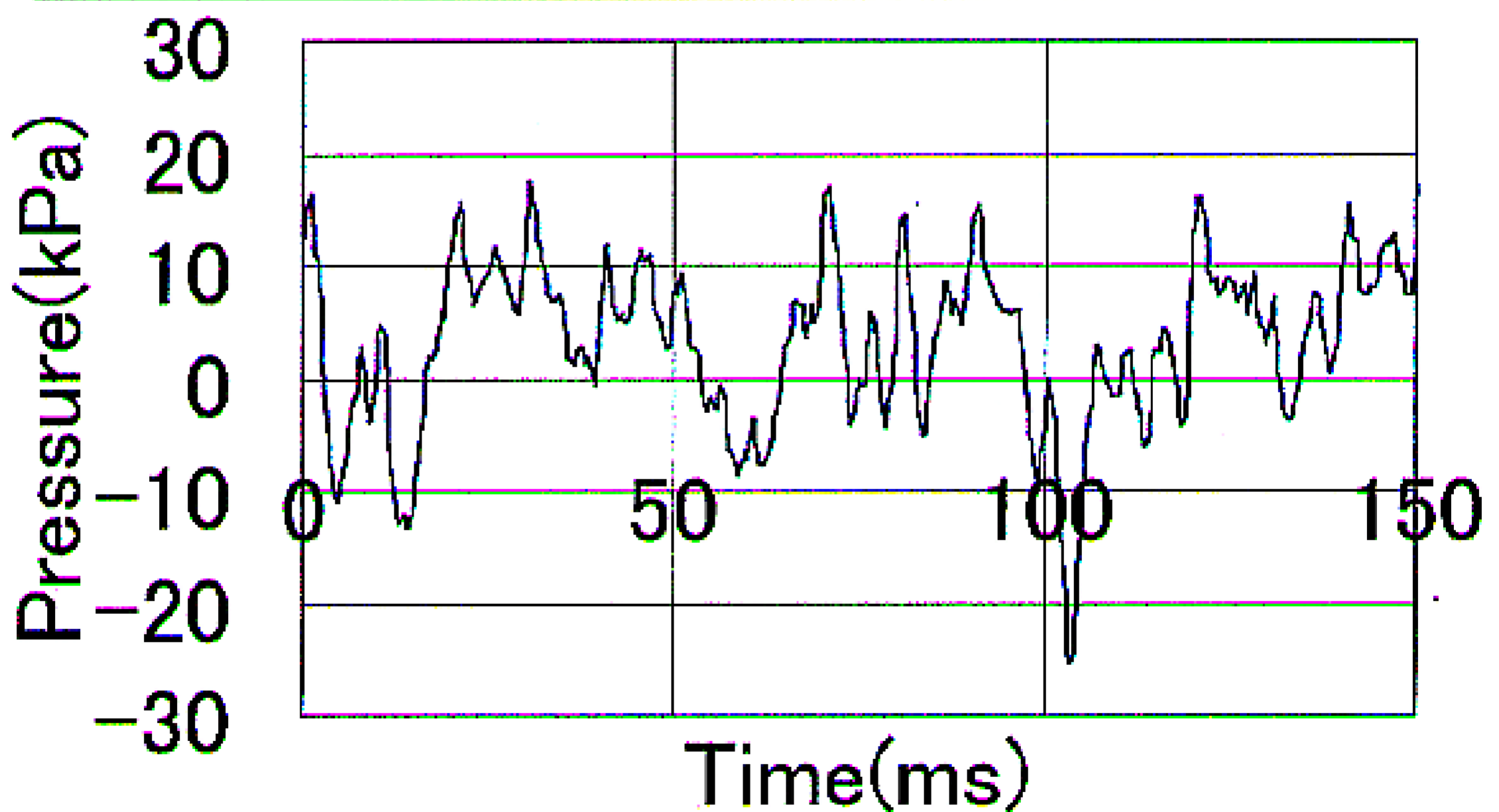
**Fig.24 (a) Experimental apparatus**  
**(b) Enlargement of heater surface**

(a)

— CHF( $\Delta T:36\text{K}$ , Heat flux: $219\text{kW/m}^2$ )  
 — Probe locating position



— CHF( $\Delta T:36\text{K}$ , Heat flux: $219\text{kW/m}^2$ )



**Fig.25 Time variation of**  
**(a) Microlayer thickness**  
**(b) Inner pressure of microlayer**