

卒業論文

プールサブクール沸騰の
CHF に関する研究

通し番号 1－64 完

平成 11 年 2 月 5 日 提出

指導教官 庄司 正弘 教授

丸山 茂夫 助教授

学生証番号 70220 氏名 吉井 啓人

目次	2
記号表	3
第一章 序論	4
1. 研究の背景	5
2. 限界熱流束	6
3. マクロ液膜消耗モデル	7
4. 研究の目的	8
第二章 実験装置	9
1. 実験装置の概要	10
2. サブクール度の決定方法	13
3. 伝熱面温度と熱流束の計算方法	14
4. 実験の手順・方法	16
第三章 実験結果と考察	17
1. 実験結果の概要（映像解析方法）	18
2. 液温分布	19
3. 合体気泡の挙動	23
4. 実験結果	34
5. サブクール度と限界熱流束と離脱周期の関係	52
6. 考察	58
第四章 結論	59
1. 結論	60
2. 今後の課題	62
参考文献	63
付録	
映像解析データ	

記号表

q	:	熱流束
q_{CHF}	:	限界熱流束
T_b	:	バルク液温度
ΔT_{sub}	:	サブクール度
ΔT_{sat}	:	過熱度
r_l	:	水の密度
δ_c	:	マクロ液膜の厚さ
H_{fg}	:	水の蒸発潜熱
A_v	:	合体気泡内の蒸気ジェット断面積
A_w	:	伝熱面面積
τ	:	合体気泡離脱周期
T	:	気泡の離脱周期
T_1	:	合体気泡準備期間
T_2	:	マクロ液膜消耗時間（気泡生長時間）

第一章 序論

1. 研究の背景

沸騰熱伝達は、液体から蒸気への相変化を伴う伝熱形態である。そこでは相変化をともなった潜熱のため、単相の場合とくらべると小さな温度差で非常に大きな熱伝達がえられるため、ボイラーや原子炉などをはじめとして、工業的に広く応用されている。しかし沸騰熱伝達は、相変化を伴うので現象は非常に複雑なものとなる。

特に限界熱流束（Critical Heat Flux）の問題は、伝熱面の熱破壊に関わり、その重要性から数多くの実験と研究が行われてきた。その結果、限界熱流束のモデルとして、流体力学不安定モデルとマクロ液膜消耗モデルの2つが現在広く用いられている。前者は、実験データを整理した経験式とよく合致するが、伝熱面上の実際挙動を完全に説明し得ない。後者のモデルは、実際の現象をよく説明するのだが適用限界の検討が十分にされておらず問題がある。その一つに、サブクール条件下の限界熱流束を十分に説明できないことがある。この問題は、モデル自体の存立にかかわる重要なものであり、最近の先端技術に関連した急速高効率冷却技術との関わりで解決が待ち望まれている。

2. 限界熱流束

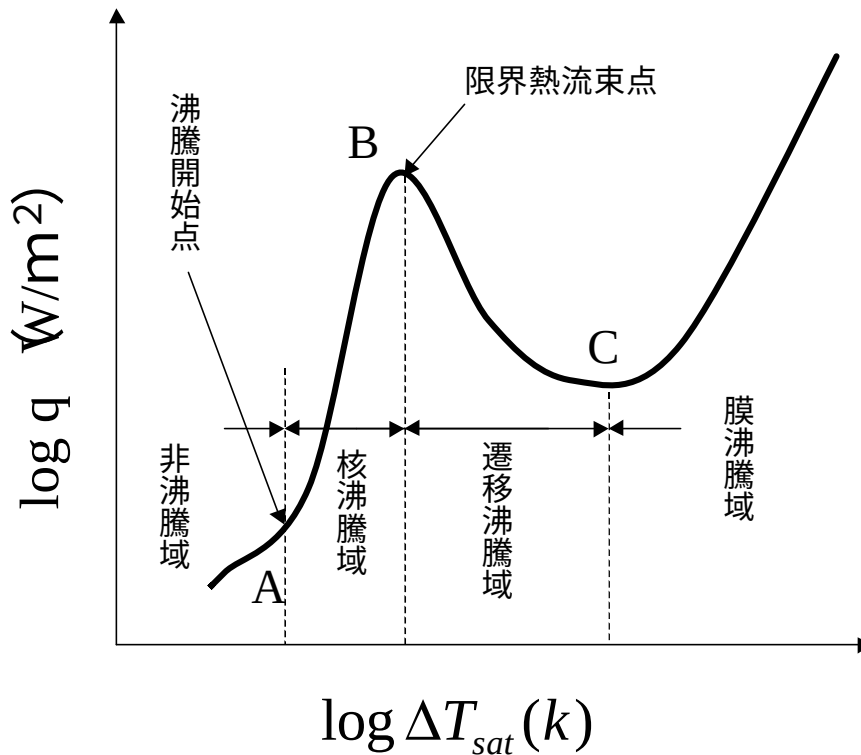


Fig1.1 沸騰曲線

横軸に過熱度（伝熱面温度と飽和温度の差）の常用対数を取り、たて軸に熱流束の常用対数をとると Fig1.1 のように沸騰曲線が描かれる。（Fig1.1 は液体が飽和温度にある場合の沸騰曲線である。）

熱流束が極大になっている B 点を限界熱流束点といい、この点の熱流束よりもわずかに大きな熱流束を加えると膜沸騰へ移行し、過熱度は急激に上昇して伝熱体の熱破壊につながるおそれがある。

サブクール沸騰とは、バルク液が飽和温度以下のままで沸騰がすすむ現象のことである。サブクール度（飽和温度とバルク液温度の差）が高くなれば高くなるほど、限界熱流束は高くなる。

3. マクロ液膜消耗モデル

限界熱流束発生メカニズムの一つとして、マクロ液膜消耗モデルが考えられている。
マクロ液膜消耗モデルとは、

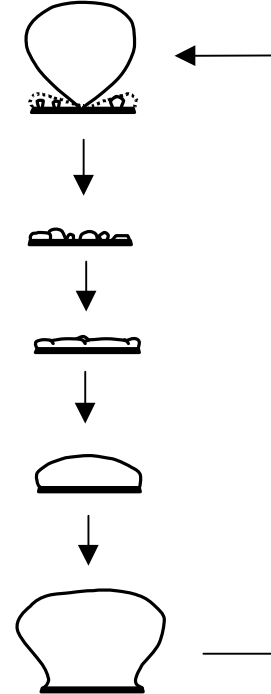
- ① 合体気泡が離脱し、伝熱面全面に水が供給される。
- ② 伝熱面上に一次気泡が多数発生する。
- ③ 一次気泡が合体し伝熱面が合体気泡で覆われる。その際、合体気泡の下に一次気泡をふくむマクロ液膜とよばれる薄い液膜が形成される。合体気泡が離脱するまでの間は、伝熱面上には外部から液体が供給されないため、マクロ液膜は蒸発のため消耗していく。
- ④ 合体気泡が離脱すると、①と同様に伝熱面上に液体が供給され、マクロ液膜が形成されて、同じ動作が繰り返される。

この①～④の繰り返しの途中で、熱流束が大きいと、③でマクロ液膜がすべて消費してしまう。このときに限界熱流束が発生する。

マクロ液膜消耗モデルの式は、伝熱面からマクロ液膜に伝えられる熱量とマクロ液膜がすべて蒸発するのに必要な熱量が等しくなるときの限界熱流束が発生するとして、

$$tq_{CHF} = r_l d_c H_{fg} \left(1 - \frac{A_v}{A_w}\right)$$

とあらわせる。



4. 研究の目的

マクロ液膜消耗モデルは、合体気泡底部のマクロ液膜の消耗時間が合体気泡の離脱周期と等しくなるときに限界熱流束が発生するとしているが、サブクール沸騰の場合、高サブクール条件下では合体気泡が凝縮され気泡が上方に離脱しないにも関わらず、限界熱流束が発生し、その値は合体気泡の離脱する飽和沸騰や低サブクール条件の沸騰よりも大きくなり、モデルの適用に限界がある。

したがってこの研究では、サブクール沸騰の限界熱流束がどのようなメカニズムで発生しているかを探求することを目的としている。

具体的には、

- ①一次気泡および合体気泡の挙動を観察する。
- ②マクロ液膜消耗モデルの式

$$tq_{CHF} = r_l d_c H_{fg} \left(1 - \frac{A_v}{A_w}\right)$$

の、合体気泡の離脱周期である τ を測定する。

- ③サブクール度と限界熱流束、離脱周期の関係を調べる。

以上について検証する。

第二章 実験装置

1. 実験装置の概要

実験では蒸留水を使用した。Fig.2.1 は実験装置の全体の構造をあらわした図である。また、全体の写真を、Fig2.2 にしめた。加熱面の上方にコイル状の冷却部を設け、冷水を循環させてサブクール状態を実現させた。また、沸騰容器内部にはサブヒーターと液温用熱電対を取り付け、温度調節器を用いて PID 制御することにより、バルク液温度を一定に保った。

伝熱面は銅ブロックでできており、カートリッジヒータにより加熱する。伝熱面の表面状態は、気泡の発泡に多大な影響を及ぼすので、表面の研磨と銅ブロックの接着には特に注意をはらった。さらに伝熱面温度と熱流束を求めるために、銅ブロックに 3 本の熱電対を伝熱面から 4mm おきに取り付けた。

沸騰容器には窓が二つあり、一方からはライトを照らし、もう一方から高速ビデオカメラを用いて、サブクール沸騰における気泡の挙動を観察した。

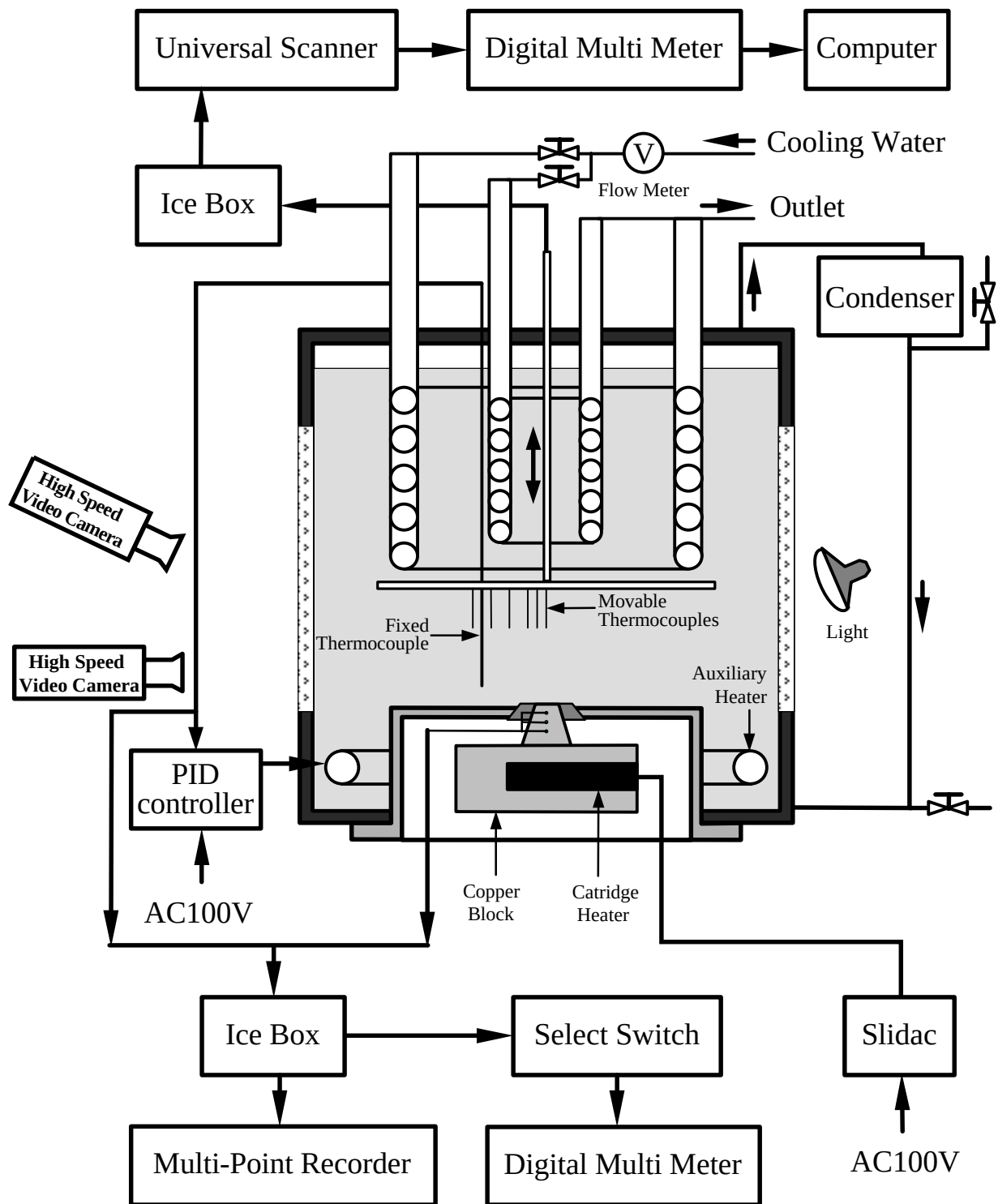


Fig.2.1 Experimental Apparatus for Subcooled Pool Boiling

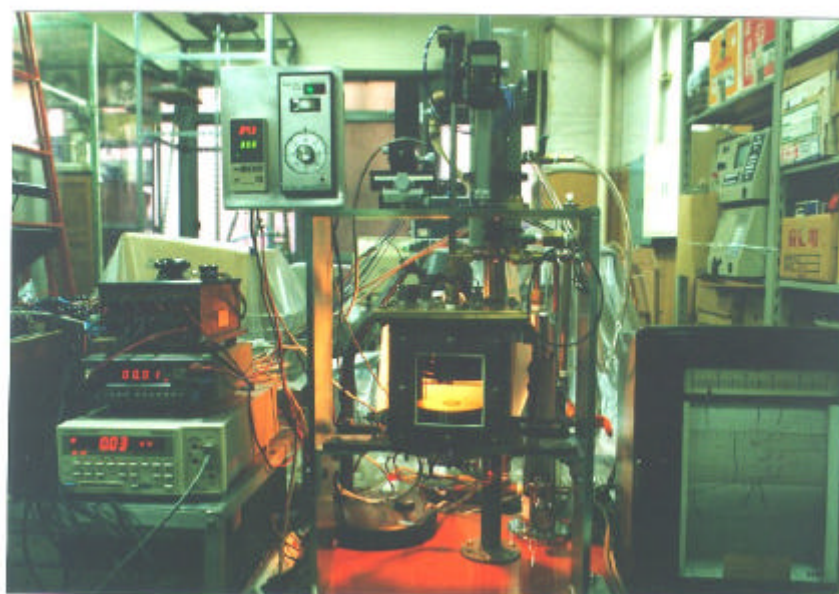
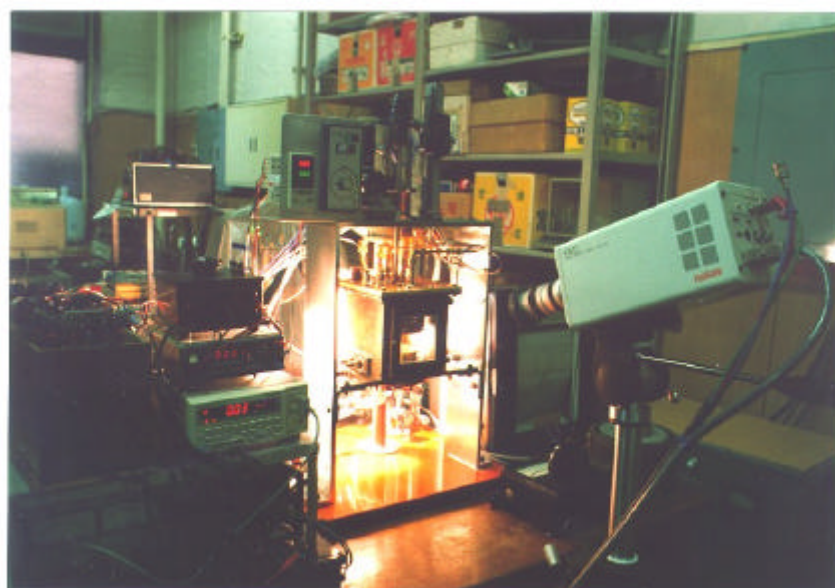


Fig.2.2 実験装置の全体写真

2. サブクール度の決定方法

沸騰現象が進行中の沸騰容器内は、サブクール状態を人工的に作り出しているため、一定ではない液温分布が存在すると考えられる。そこで、沸騰容器のどの部分をバルク液温度として採用するかが問題となり、冷却コイルやサブヒーター、伝熱面からある程度の距離をとる必要がある。そこで、予備実験により、サブクール状態にある沸騰容器内の液温分布を測定し、伝熱面から左方に35 mm、上方に5 mm離れた点の温度をバルク液温度として適当と考えて、熱電対を設置した。

沸騰容器の液温分布の計測は、Fig.2.1 のように、6本の熱電対を取り付けた支柱棒を上下させることによりおこなった。熱電対は伝熱面の中心からそれぞれ、水平方向に0 mm、5 mm、10 mm、20 mm、30 mm、40 mm離れているところを測れるように取り付けた。

3 伝熱面温度と熱流束の計算方法

①伝熱面温度の求め方

銅ブロックにおける温度分布は、熱源であるカートリッジヒータが無限遠にあると仮定すると、円錐台の側面が断熱されていて側面と温度分布曲線が常に垂直になることから、等温面は円錐の頂点を中心とする球面で形成される。

等温面を通過する熱流量は一定であるから、銅ブロックの温度 T と、円錐台の頂点からの距離 r との関係は、フーリエの法則より

$$\begin{cases} 4\pi r^2 q = \text{const} & \text{————— (1)} \\ q = -l \frac{\partial T}{\partial r} & \text{————— (2)} \end{cases}$$

式 (1)、(2)より

$$T = \frac{C_0}{r} + C_1 \quad (C_0, C_1 \text{ は積分定数}) \text{————— (3)}$$

2つの温度分布係数は、円錐の頂点からの距離が、

$$r_1 = 16.17\text{mm}, r_2 = 20.15\text{mm}, r_3 = 24.14\text{mm},$$

のところにある熱電対の測定値を利用して、最小二乗法により求めることができる。

$$X_i = \frac{1}{r_i} \quad \text{とおいて}$$

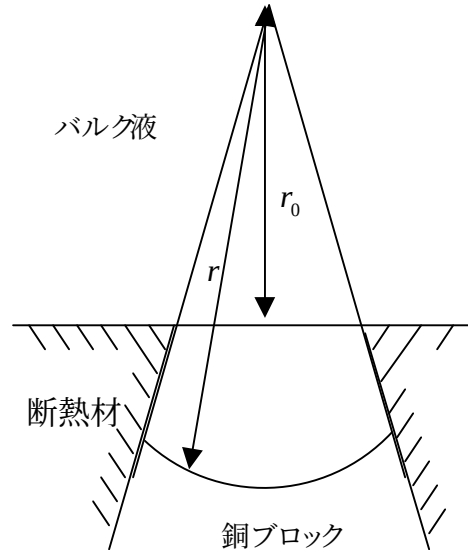
$$Y(C_0, C_1) = \sum_{i=1}^3 (C_0 X_i + C_1 - T_i)^2 \text{ を最小にするための条件は、}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial Y}{\partial C_0} = \sum_{i=1}^3 2(C_0 X_i + C_1 - T_i) X_i = 0 \\ \frac{\partial Y}{\partial C_1} = \sum_{i=1}^3 2(C_0 X_i + C_1 - T_i) = 0 \end{cases} \quad \text{である。}$$

これを解いて、

$$C_0 = \frac{3 \sum_{i=1}^3 X_i T_i - \sum_{i=1}^3 T_i \cdot \sum_{i=1}^3 X_i}{3 \sum_{i=1}^3 X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^3 X_i \right)^2}, \quad C_1 = \frac{\sum_{i=1}^3 T_i \cdot \sum_{i=1}^3 X_i^2 - \sum_{i=1}^3 T_i X_i \cdot \sum_{i=1}^3 X_i}{3 \sum_{i=1}^3 X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^3 X_i \right)^2}$$

伝熱面はたびたび研磨されるので、 r_0 は実験が始まる前に測定する。伝熱面の直径を計測することにより r_0 を求め、式 ③)に r_0 、 C_0 、 C_1 を代入して伝熱面の温度が求まる。



2) 熱流束の求め方

伝熱面から水に伝わる平均熱流束と、等しい熱流束を与える等温面を考える。(伝熱面と等価である等温面を考える。)

$$Q_W = Q_E \quad (1)$$

$$Q_W = A_E \overline{q_E} \quad (2)$$

$$Q_E = A_E q_E \quad (3)$$

$$\text{等価面の定義より } q_E = \overline{q_W} \quad (4)$$

式①～④より

$$A_W = A_E \quad (5) \quad \text{となる}$$

$$A_W = p \left(r_0 \tan \frac{q}{2} \right)^2 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} A_E &= \int_0^q 2pr_E \sin a \, da (r_E a) \\ &= 2pr_E^2 \left(1 - \cos \frac{q}{2} \right) \quad (7) \end{aligned}$$

式⑤～⑦より

$$r_E \sqrt{2(1 - \cos q)} = r_0 \tan \frac{q}{2}$$

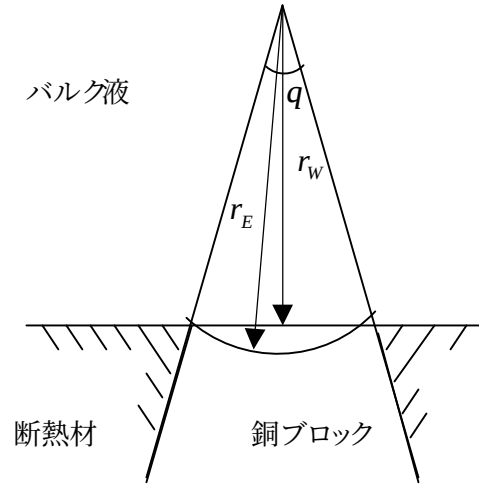
$$\frac{r_E}{r_0} = \frac{\tan \frac{q}{2}}{\sqrt{2(1 - \cos q)}} = \frac{\tan \frac{q}{2}}{2 \sin \frac{q}{4}}$$

$$q = 45^\circ \text{ なので } \frac{r_E}{r_0} = 1.062 \quad \text{となる。}$$

フーリエの法則より

$$q_W = k \frac{\partial T}{\partial r} = k \frac{C_0}{r_E^2} = k \frac{C_0}{1.062 r_0^2}$$

C_0 、 r_0 、 k に値を代入して、熱流束 q_W を求めることができる。



4. 実験の手順

(1) 実験の準備

伝熱面付近をアセトンで洗浄したのち、実験装置を組み立てる。沸騰容器に蒸留水を浸し洗浄した後、再び蒸留水を沸騰容器に満たして、補助ヒーターを作動させ、30 分間沸騰させて脱気する。その際に、凝縮器の弁を開いておき、発生する蒸気を液化し沸騰容器に戻るようにしておく。

また、大気圧と室温を記録しておく。

(2) 実験の方法

温度調節器に、目標のバルク液温度を入力し、冷却コイルに冷却水を循環させる。循環させる水量は、予備実験にて各バルク液温度の大体の目安を知っておく。次に、スライダックの電圧をCHFを起こす電圧より少し低くセットして、打点記録計に表示される伝熱面温度が安定するのを待つ。(もし最初にセットした電圧でCHFを起こしてしまったら、さらに電圧を低くして、再び伝熱面温度が安定するのを待つ。)

伝熱面温度が安定したら、高速ビデオカメラで沸騰の挙動を撮影する。高速ビデオカメラは約 1.5 秒間撮影することができる。その際に、高速ビデオカメラと反対の方向から、伝熱面をライトで照らし、鮮明な画像を得るために、補助ヒーターの電源を一時的に切っておく。(高速ビデオカメラの撮影スピードは、1 コマが $1/648$ 秒、シャッタースピードは $1/10,000$ 秒で、一度に 1024 コマ撮影することが出来る。)

撮影が終了したら、再び補助ヒーターのスイッチをいれて、高速ビデオカメラの画像をビデオテープに録画する。そして、そのときの、カートリッジヒータの電圧、電流、銅ブロックの中にある 3 本の熱電対、バルク液温度を測る 2 本の熱電対、冷却コイルへの冷却水の流量、温度のデータをとる。

次に、カートリッジヒータの電圧、電流と、銅ブロックの 3 本の熱電対のデータをコンピュータに入力し、伝熱面温度と熱流束を計算し、記録する。ここで使用しなかったデータは、実験に異常がないか調べるためのものである。

これら一連の作業が終了したら、カートリッジヒータの電圧を 1V 上げて、再び伝熱面温度が安定するのを待ち、同じ動作を行う。伝熱面温度が安定せず、限界熱流束が発生したら、カートリッジヒータの電圧、電流と、もっとも伝熱面に近い熱電対のデータを読み取って、同様に高速ビデオカメラで沸騰の挙動を撮影する。撮影が終了したら、カートリッジヒータの電圧をおとし、他のバルク液温度の実験にとりかかる。

予定していたすべての実験が終了したら、実験を終了する。沸騰が完全に終了した後、沸騰容器からバルク液を捨てる。

第三章 実験結果と考察

(1) 実験結果の概要

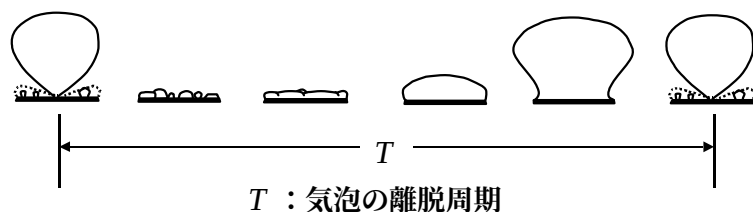
バルク液温度が 100 度、90 度、85 度、80 度、75 度、65 度、55 度、45 度、35 度、27 度で実験を行い、実験中の気泡挙動を高速ビデオカメラで撮影した。解析に使用するのは、限界熱流束が発生する直前の映像である。

映像の解析は 2 回行った。

1 回目は、各サブクール度においてどのような気泡がでているのか、その種類と出現してから完全に離脱するまでの周期（周期の取り方は、Fig. 3.1 参照）を映像から読みとった。その結果、サブクール度が低い状態の気泡挙動は、飽和沸騰と似ていて、高くなるにつれバルク液によって気泡が凝縮されやすくなるため、その挙動は複雑なものになる。具体的には、バルク液温度が 100 度(飽和沸騰)、90 度、85 度は飽和沸騰の挙動に近く、80 度、75 度、65 度は単一の気泡が規則正しく出現し、55 度以下は複雑な挙動をしめした。

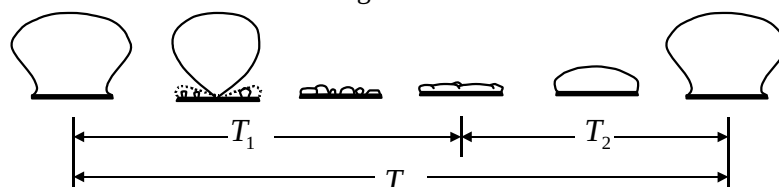
2 回目の解析は、気泡が伝熱面を覆いきっている時間を測るために、気泡が伝熱面を覆いきった時と、気泡が離脱し始める時に注目して周期を測った。(Fig. 3.2) このような解析をするのは、マクロ液膜の消耗時間を測るためであり、(合体気泡が伝熱面を覆いきっているときは周囲から液体が供給されない。)、 $\tau = T_2$ と考えるためである。ただし、バルク液温度が 35 度と、27 度の 2 回目の解析は、これらの気泡が伝熱面を完全に覆いきらないことと、気泡の挙動が非常に複雑なことから行わなかった。2 回目の解析の結果を表とグラフにし、さらにサブクール度と限界熱流束、合体気泡が伝熱面を覆っている平均時間との関係をそれぞれグラフにした。

また、各サブクール度における一般的な気泡の挙動の様子を写真にまとめてみた。



T : 気泡の離脱周期

Fig. 3.1



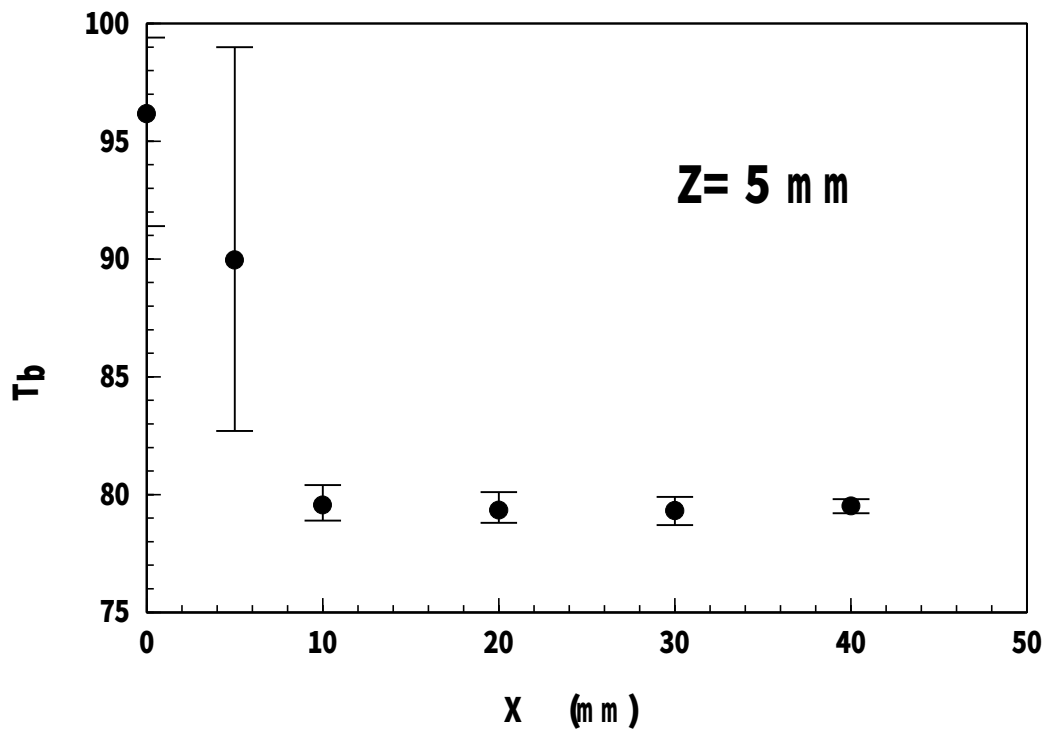
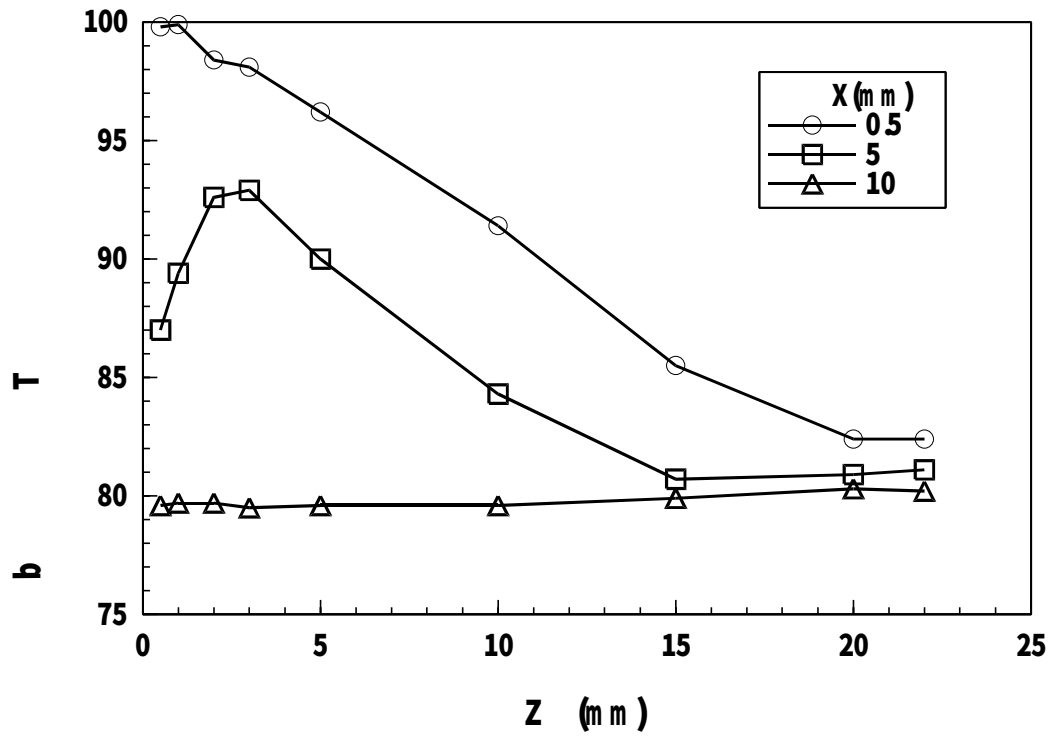
T_1 : 気泡準備期間

T_2 : マクロ液膜消耗時間

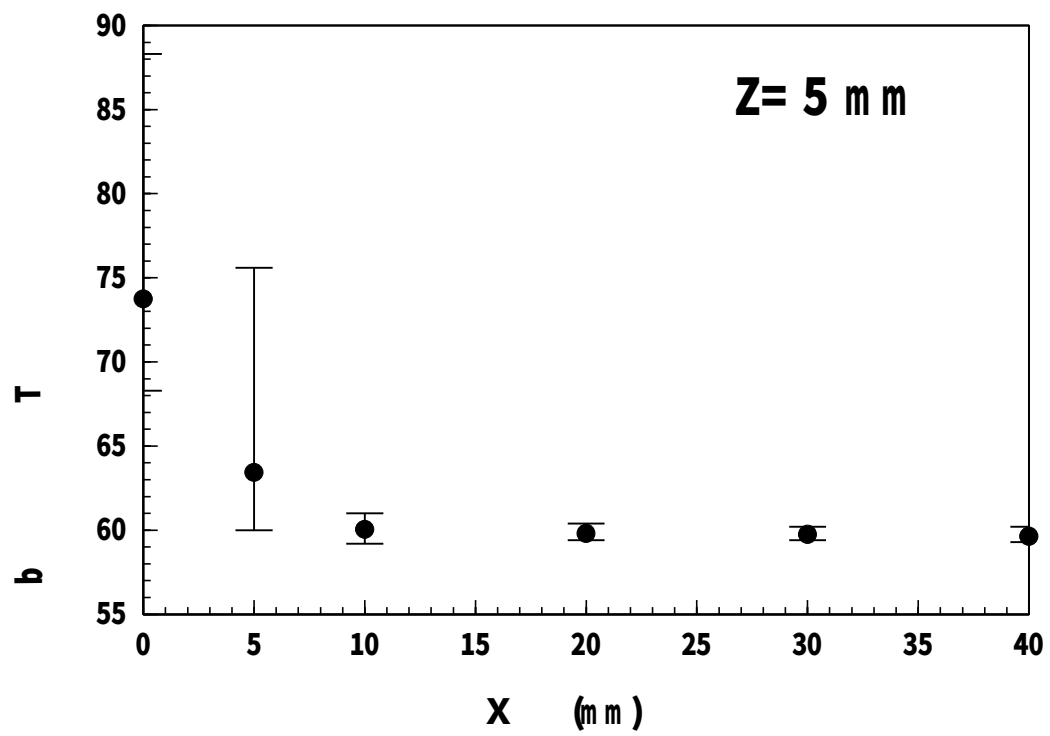
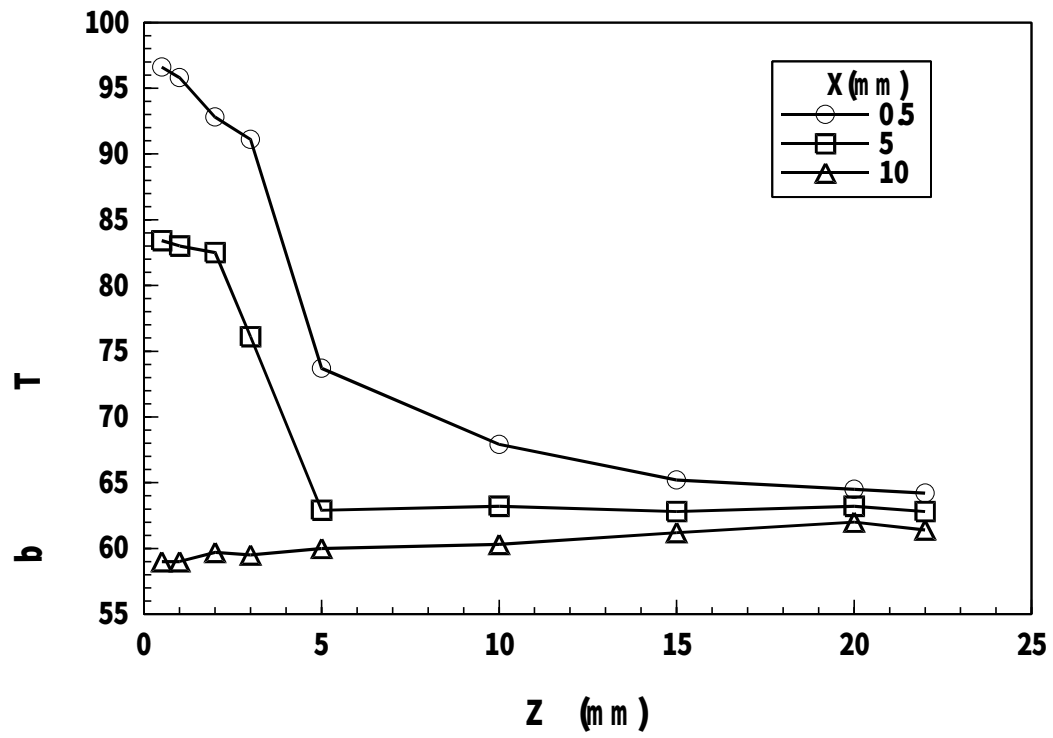
T : 気泡の離脱周期

Fig. 3.2

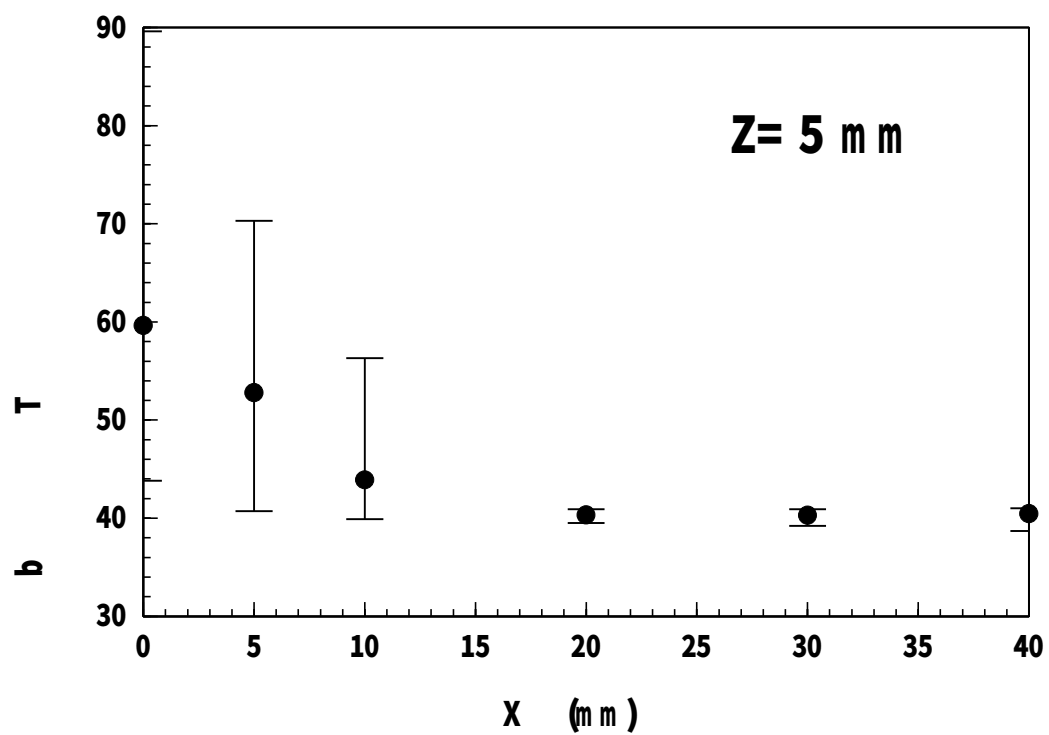
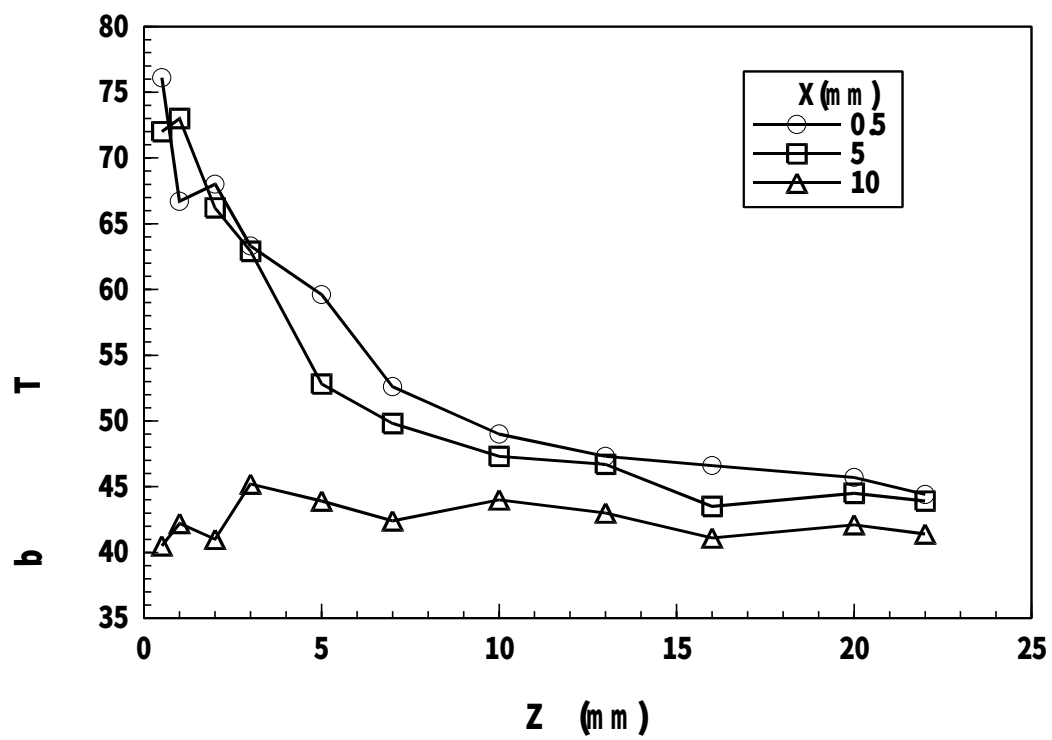
$$T_b = 80^\circ\text{C} \quad q_c = 3.161 \times 10^6 \text{ W/m}^2 \quad \Delta T_{\text{sat}} = 51.3^\circ\text{C}$$



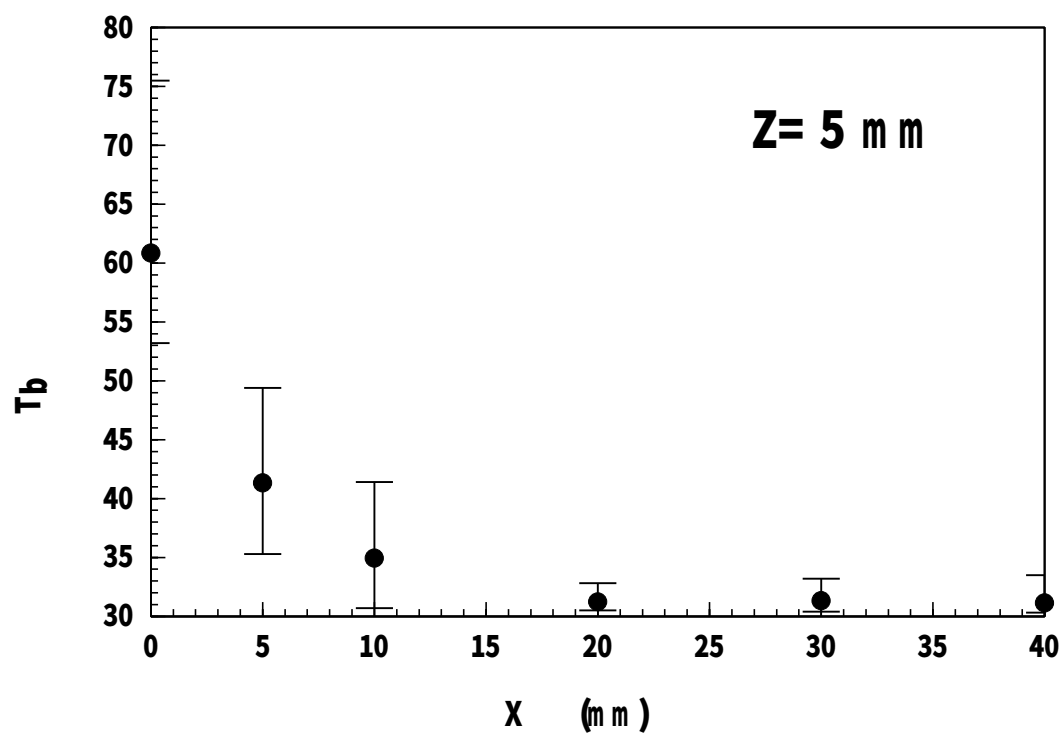
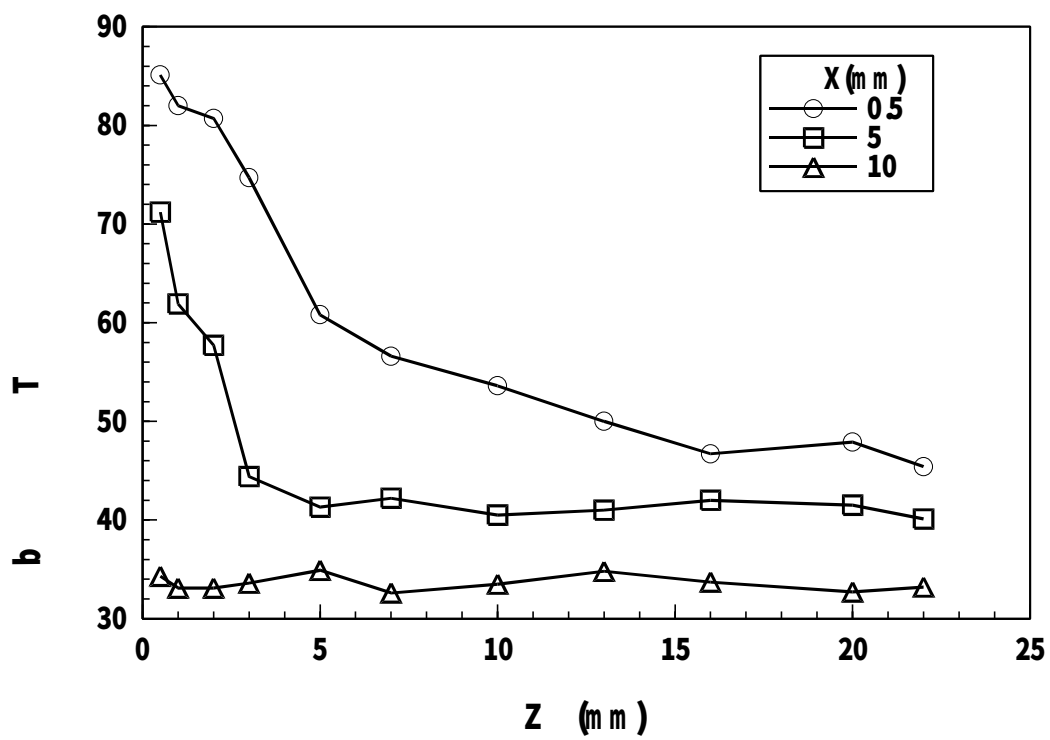
$$T_b = 60^\circ\text{C} \quad q_c = 4.628 \times 10^6 \text{ W/m}^2 \quad \Delta T_{\text{sat}} = 60.3^\circ\text{C}$$



$$T_b = 40^\circ\text{C} \quad q_c = 6.762 \times 10^6 \text{ W/m}^2 \quad \Delta T_{\text{sat}} = 51.7^\circ\text{C}$$



$$T_b=30^{\circ}\text{C} \quad q_c=8.457 \times 10^6 \text{ W/m}^2 \quad \Delta T_{\text{sat}}=67.9^{\circ}\text{C}$$

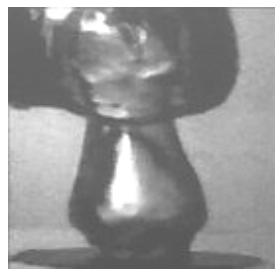


(3) 合体気泡の挙動

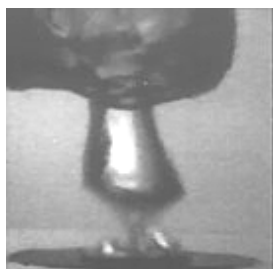
各バルク液温度の気泡の連続写真を Fig3.3～3.12 に示す。

- ①Fig3.3 の飽和沸騰では、合体気泡の形状が A と呼ばれる大きく生長する気泡が発生する。その直後に、a という小さな気泡が発生し、伝熱面から離脱するとすぐ A と合体する。そして、その次に B と呼ばれる柱状の気泡が発生し、A と合体する。a と B は、A の誘起する流れによってそういった形状となる。B の発生後は、たいてい A が発生し、再びこのサイクルで気泡の発生がくりかえされる。
- ②Fig.3.4、3.5 のバルク液温度が、90℃、85℃となると a の発生がなくなるが、大きく生長する A の次の気泡は、その誘起流れのために細長く生長する。グラフをみると、生長—離脱周期の違う 2 種類の気泡が発生しているのがわかる。これらの低サブクール度での沸騰における気泡の様子は、飽和沸騰の場合にちかいものとなっている。
- ③Fig.3.6、3.7、3.8 のバルク液温度が 80 度、75 度、65 度の気泡の様子は、同じ気泡の発生のくりかえしとなっている。サブクール度が高くなったために、気泡が大きく生長できず、流れが誘起されなくなったために、このような結果となったと思われる。
- ④Fig.3.9、3.10 のバルク液温度が 55 度、45 度でも同じ気泡の発生がくりかえされるが、気泡が離脱するまえに凝縮がはじまっており、生長—離脱周期に大きな変化がみられた。
- ⑤さらに、Fig.3.11、3.12 のバルク液温度が 35 度、27 度では伝熱面全体を覆う合体気泡は形成されず、局部的に合体気泡が形成され、複雑な挙動をしめした。

なお、気泡の連続写真は、2 回目の解析の方法をもとにしてならべてある。



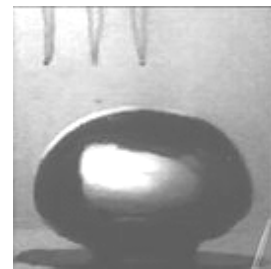
0. 0 ms



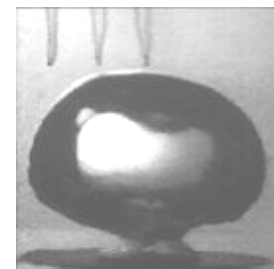
9. 3 ms



23. 1 ms



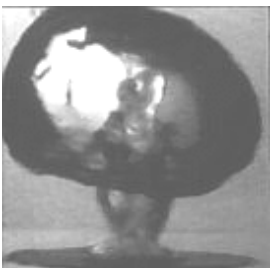
49. 4 ms



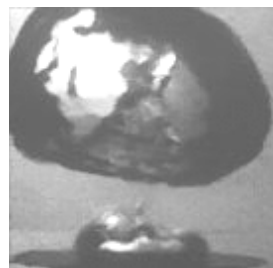
61. 7 ms



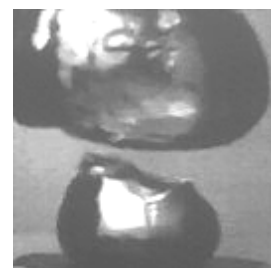
75. 6 ms



83. 3 ms



88. 0 ms



100. 3 ms



114. 2 ms

$$q_{CHF}=1.483 \text{ (Mw/m}^2\text{)} \quad \Delta T_{sat}=18.5 \text{ (}^{\circ}\text{C)}$$

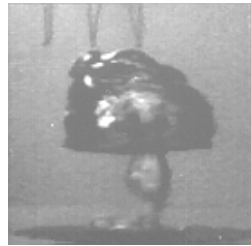
Fig. 3.3 $T_b = 100^{\circ}\text{C}$ における合体気泡の挙動



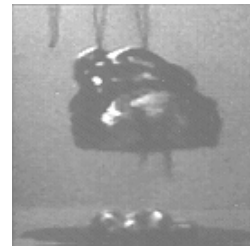
0. 0 ms



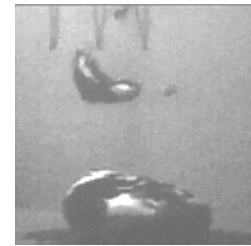
4. 6 ms



6. 2 ms



7. 7 ms



21. 6 ms



44. 8 ms



49. 4 ms



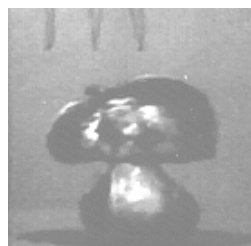
55. 6 ms



57. 1 ms



63. 3 ms



71. 0 ms

$$q_{CHF}=1.819 \text{ (Mw/m}^2\text{)} \quad \Delta T_{sat}=20.7 \text{ (}^{\circ}\text{C)}$$

Fig. 3.4 $T_b = 90^{\circ}\text{C}$ における合体気泡の挙動



0. 0 ms



6. 2 ms



10. 8 ms



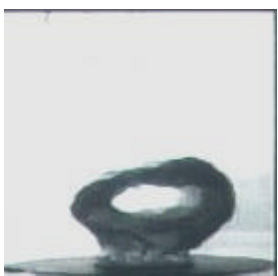
13. 9 ms



21. 6 ms



43. 2 ms



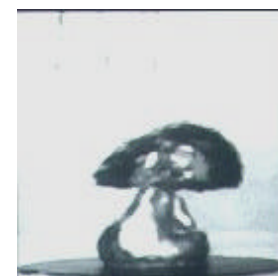
50. 9 ms



57. 1 ms



60. 2 ms



69. 4 ms



80. 2 ms

$$q_{CHF} = 2.236 \text{ (Mw/m}^2\text{)} \quad \Delta T_{sat} = 27.3 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

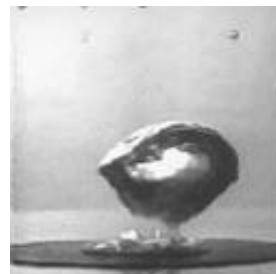
Fig. 3.5 $T_b = 85^\circ\text{C}$ における合体気泡の挙動



0. 0ms



7. 7ms



9. 3ms



12. 3ms



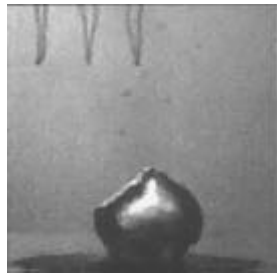
26. 2ms



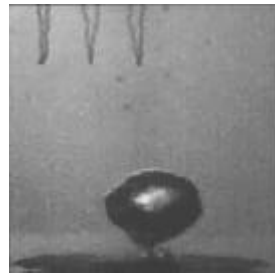
35. 5ms

$$q_{CHF} = 2.333 \text{ (Mw/m}^2\text{)} \quad \Delta T_{sat} = 24.7 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

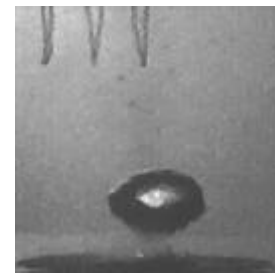
Fig. 3.6 $T_b = 80^\circ\text{C}$ における合体気泡の挙動



0. 0 ms



7. 7 ms



9. 3 ms



13. 8 ms



21. 6 ms



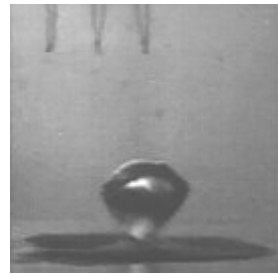
41. 7 ms

$$q_{CHF} = 2.772 \text{ (Mw/m}^2\text{)} \quad \Delta T_{sat} = 19.8 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

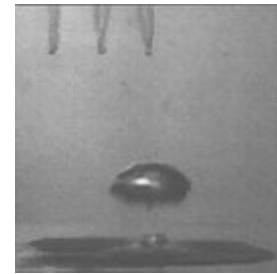
Fig. 3.7 $T_b = 75^\circ\text{C}$ における合体気泡の挙動



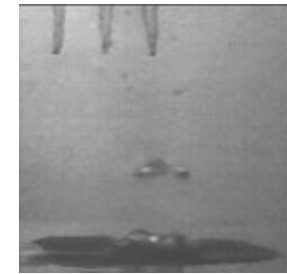
0. 0 ms



7. 7 ms



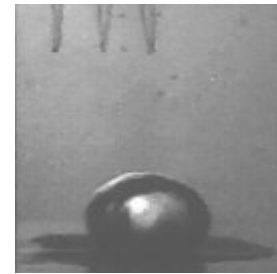
10. 8 ms



15. 4 ms



24. 7 ms



37. 0 ms

$$q_{CHF}=3.263 \text{ (Mw/m}^2\text{)} \quad \Delta T_{sat}=16.5 \text{ (}^{\circ}\text{C)}$$

Fig. 3.8 $T_b = 65^{\circ}\text{C}$ における合体気泡の挙動



0. 0 ms



7. 7 ms



9. 3 ms



10. 8 ms



13. 9 ms



21. 6 ms

$$q_{CHF}=4.638 \text{ (Mw/m}^2\text{)} \quad \Delta T_{sat}=22.1 \text{ (}^{\circ}\text{C)}$$

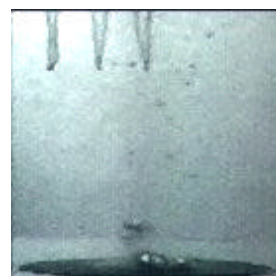
Fig. 3.9 $T_b = 55^{\circ}\text{C}$ における合体気泡の挙動



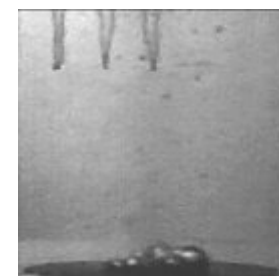
0. 0 ms



6. 2 ms



7. 7 ms



12. 3 ms



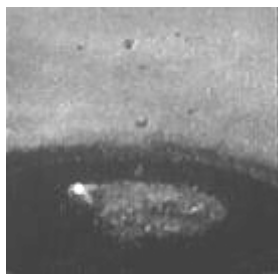
17. 0 ms



23. 1 ms

$$q_{\text{CHF}} = 5.61 \text{ (Mw/m}^2\text{)} \quad \Delta T_{\text{sat}} = 19.9 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

Fig. 3.10 $T_b = 45^\circ\text{C}$ における合体気泡の挙動



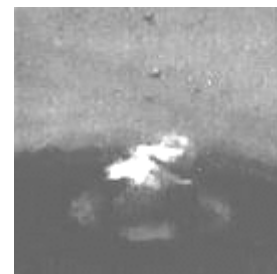
0. 0ms



4. 6 ms



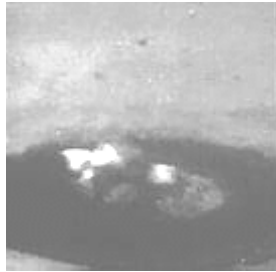
12. 3 ms



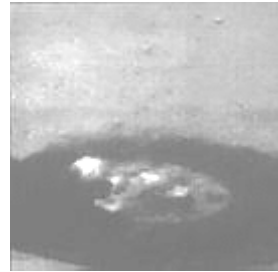
17. 0 ms

$$q_{\text{CHF}} = 6.445 \text{ (Mw/m}^2\text{)} \quad \Delta T_{\text{sat}} = 19.2 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

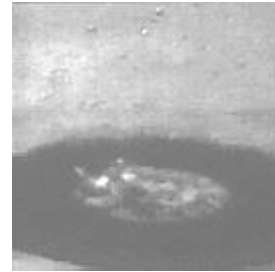
Fig. 3.11 $T_b = 35^\circ\text{C}$ における合体気泡の挙動



0. 0 m s



2 6. 2 m s



3 8. 6 m s



6 8. 0 m s

$$q_{\text{CHF}} = 7.025 \text{ (Mw/m}^2\text{)} \quad \Delta T_{\text{sat}} = 20.0 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

Fig. 3.12 $T_b = 27^\circ\text{C}$ における合体気泡の挙動

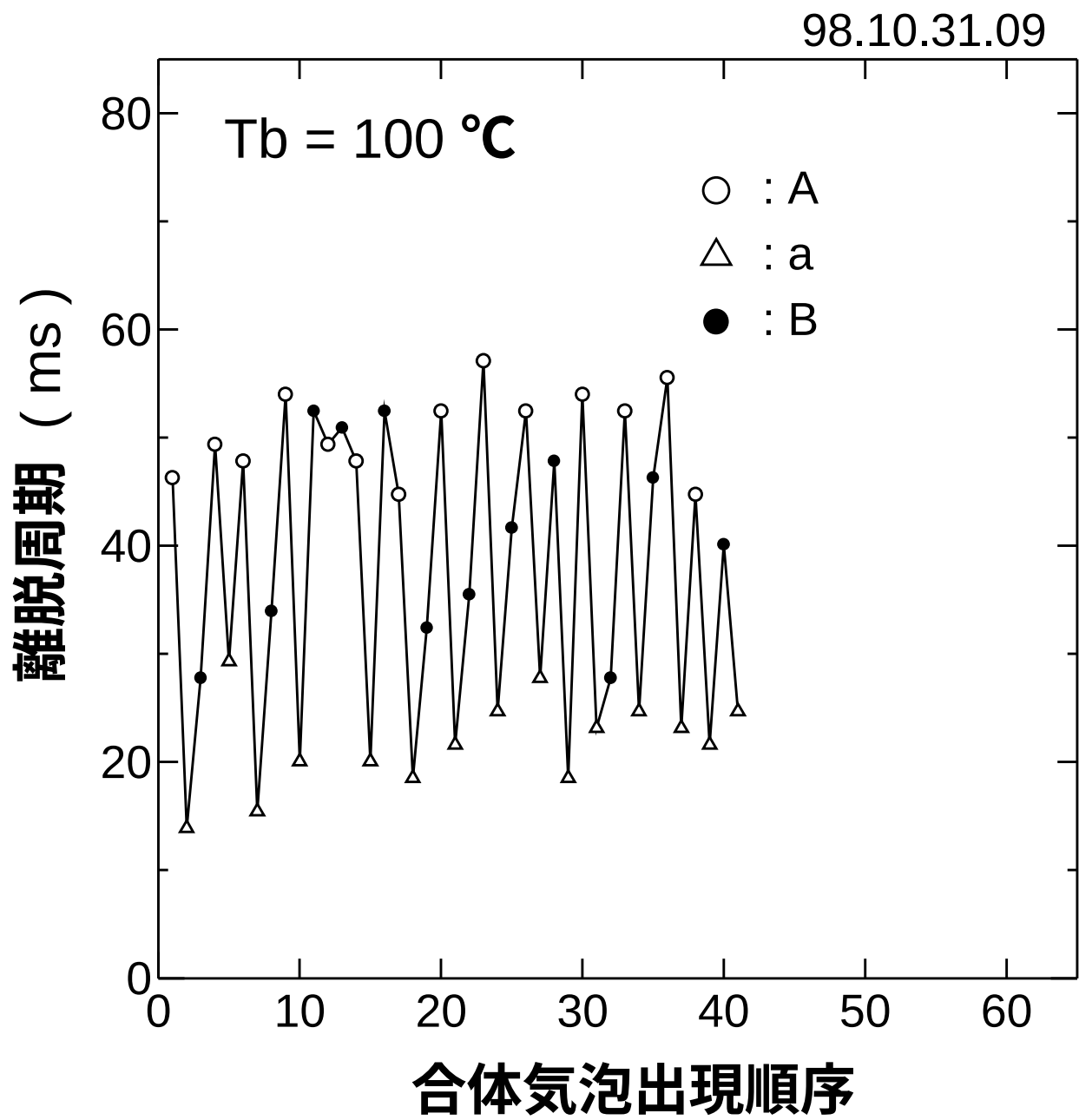


Fig.3.13

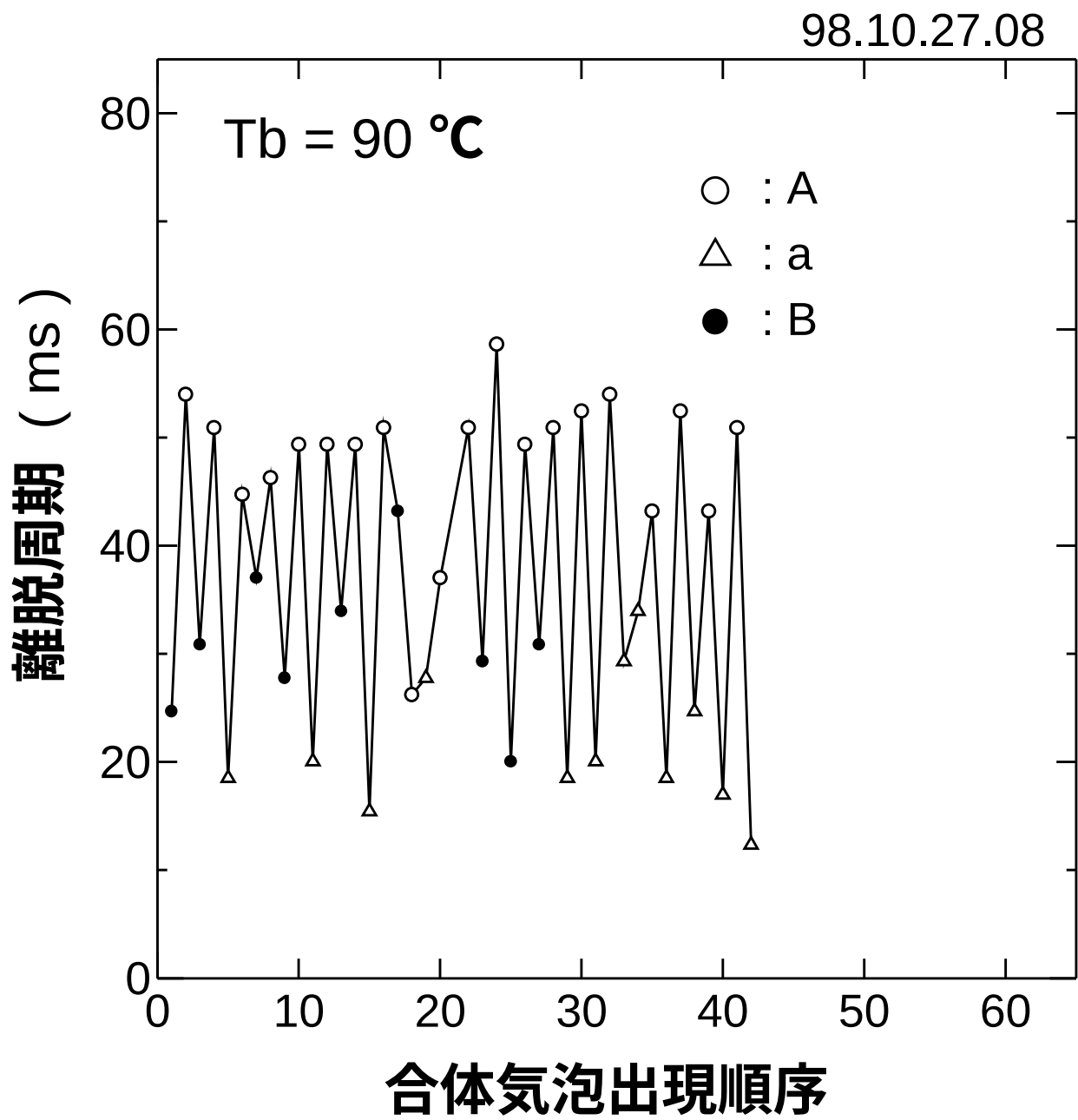


Fig.3.14

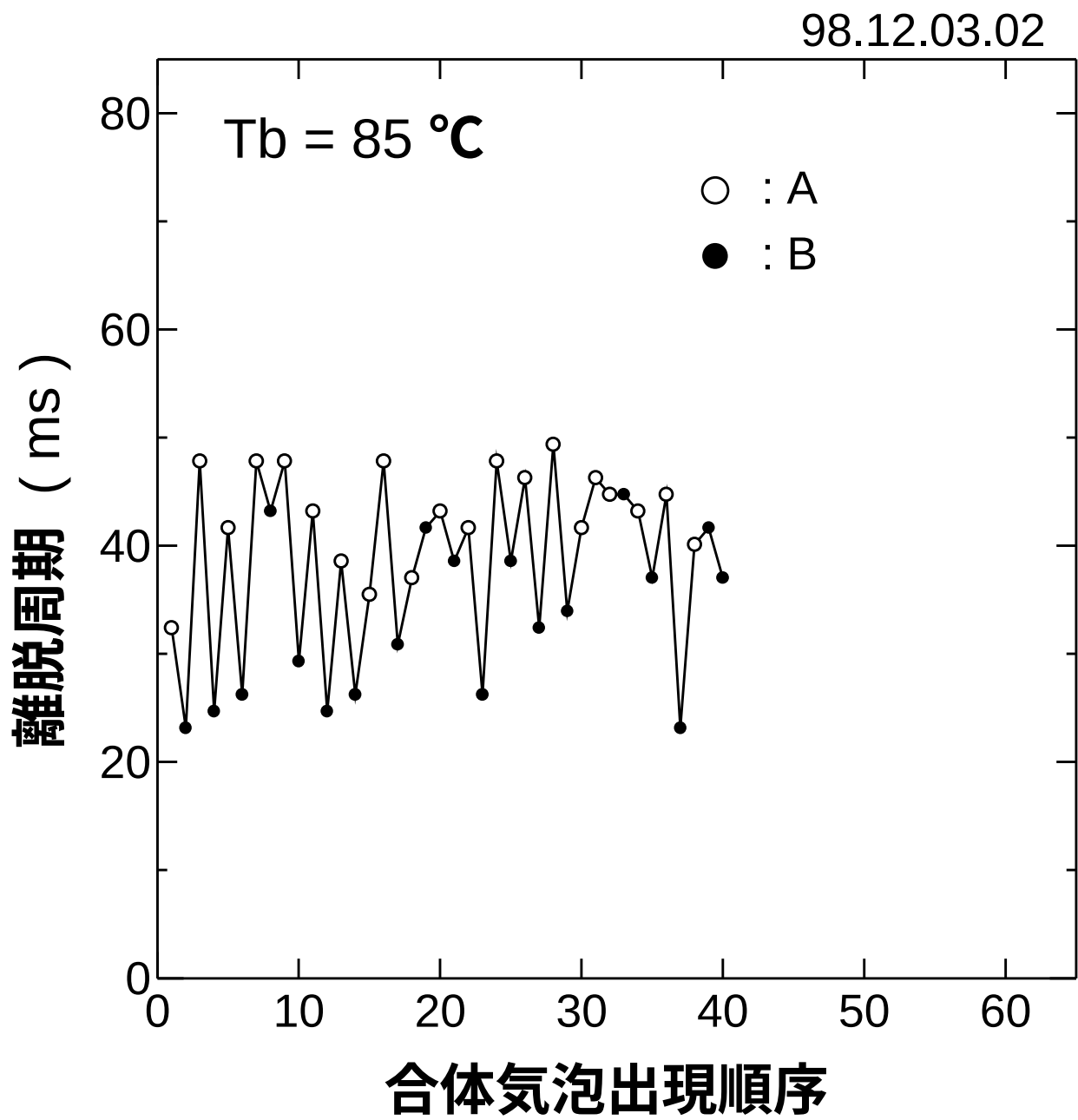


Fig.3.15

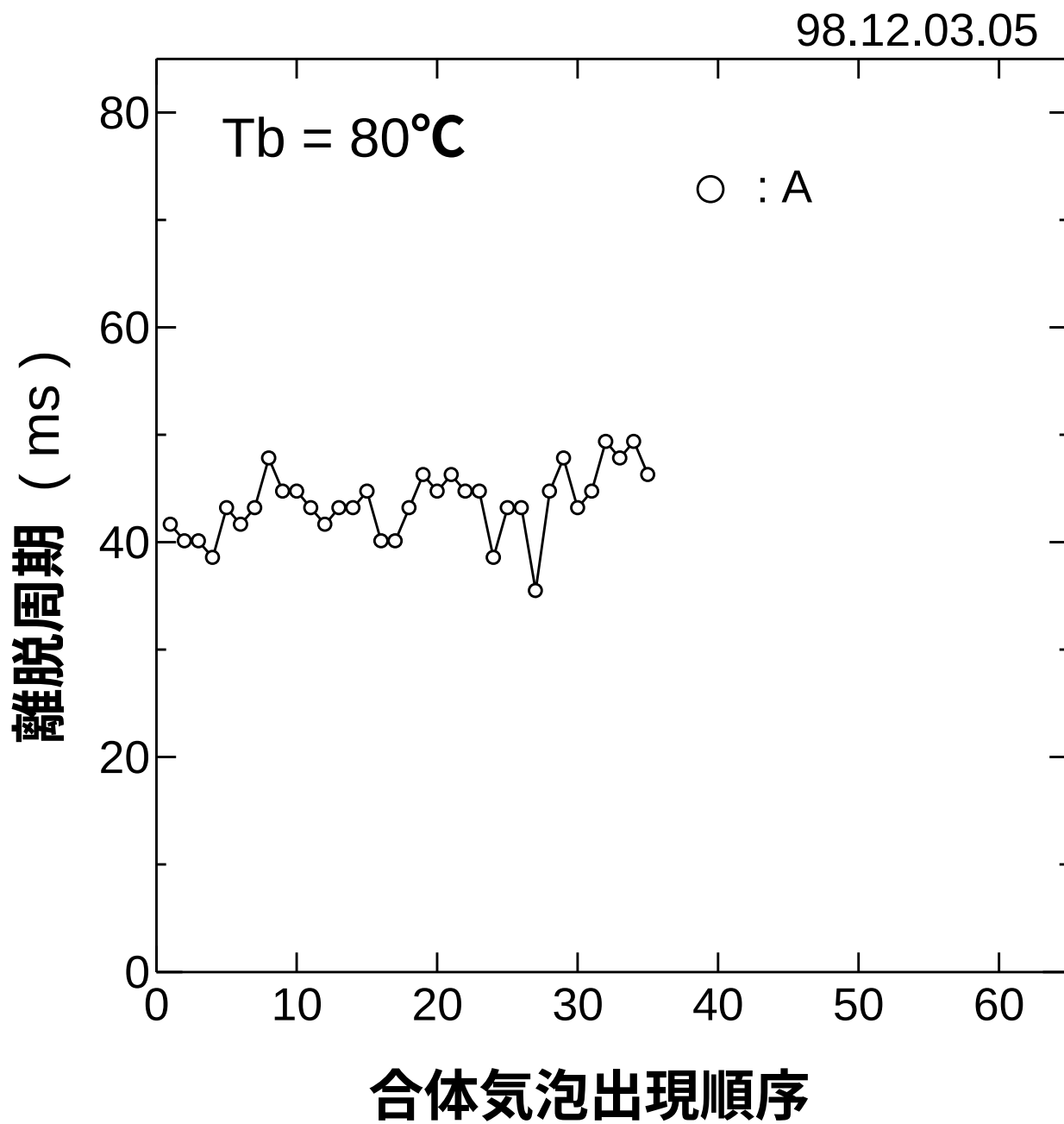


Fig.3.16

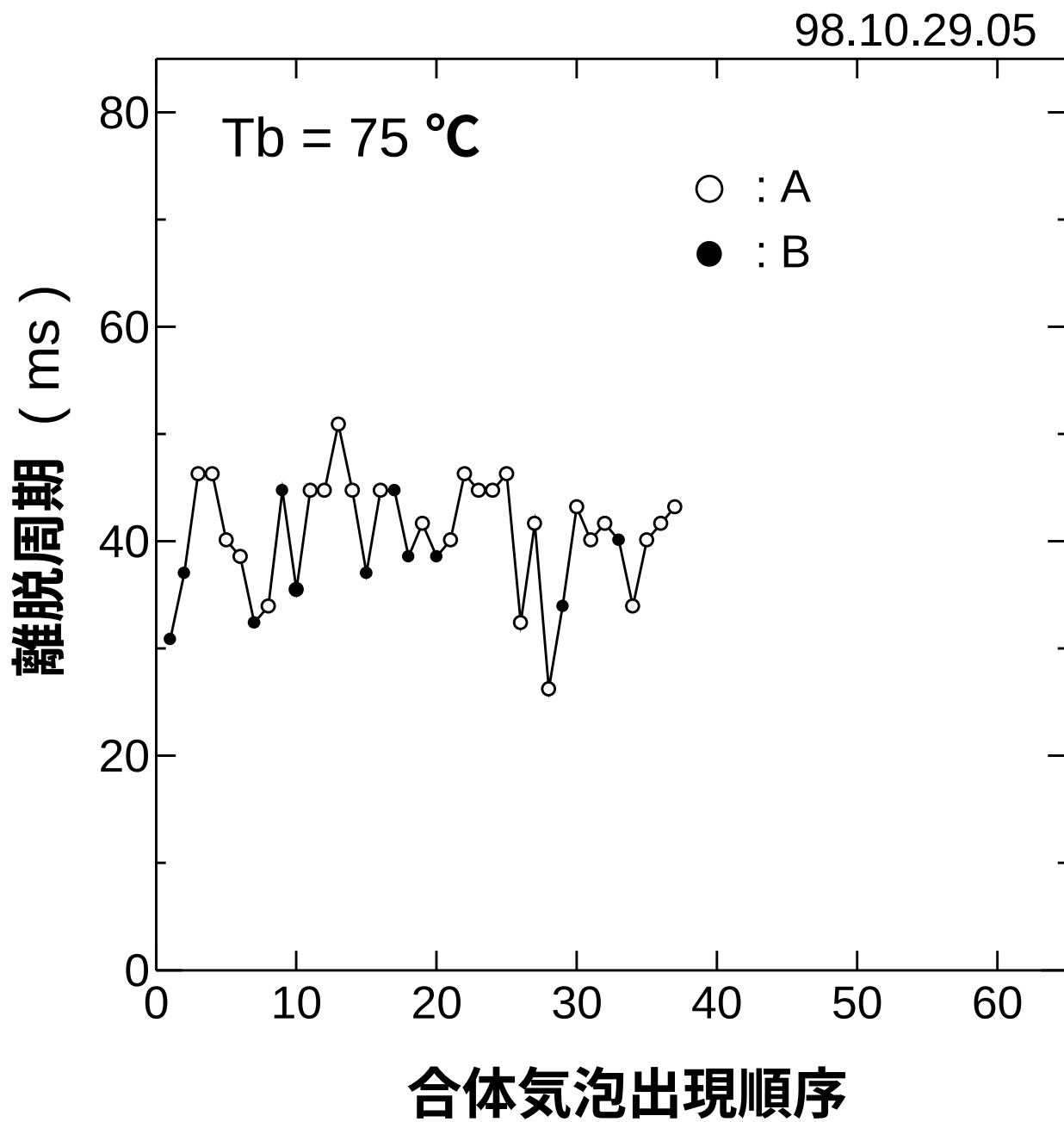


Fig.3.17

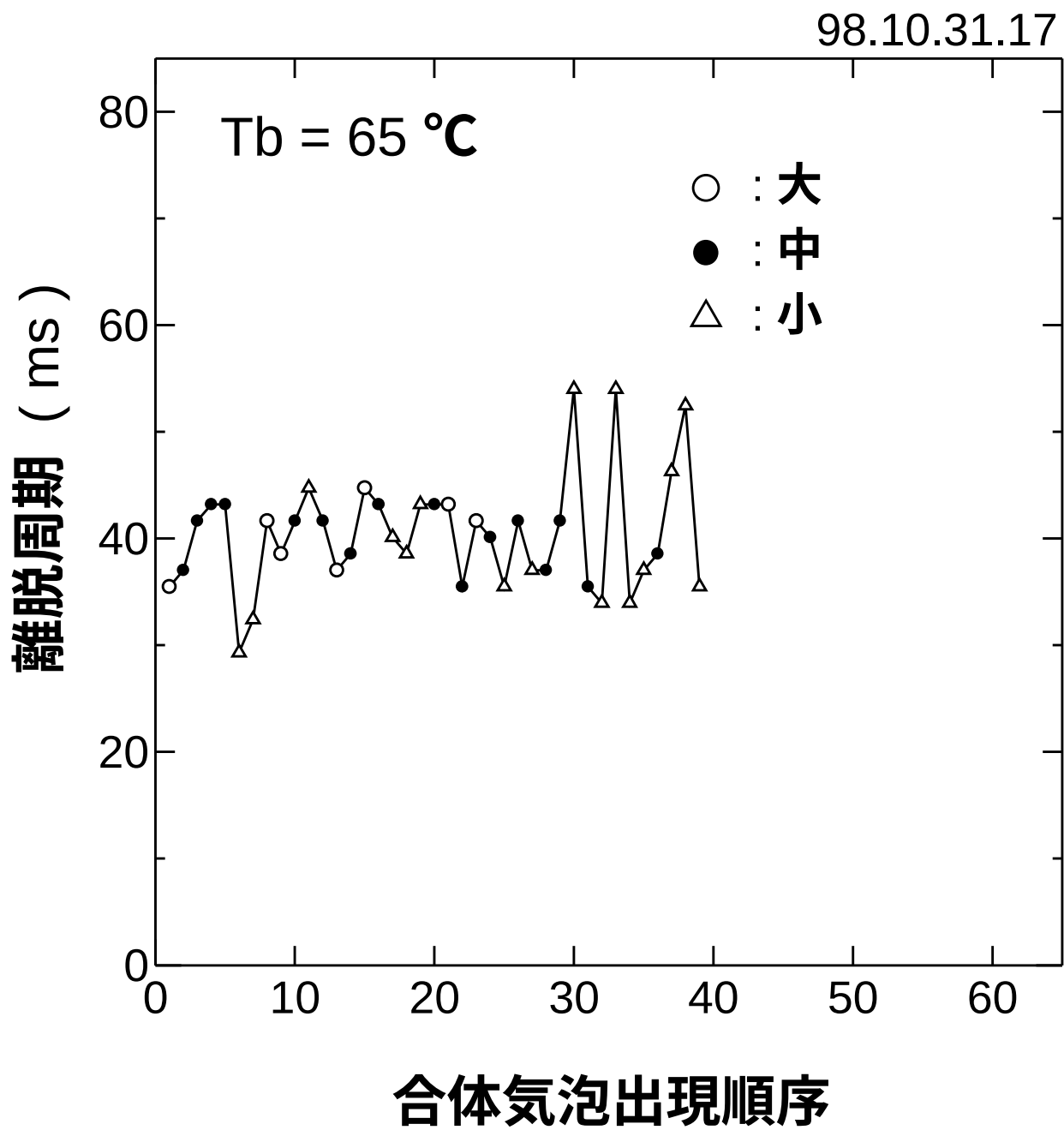


Fig.3.18

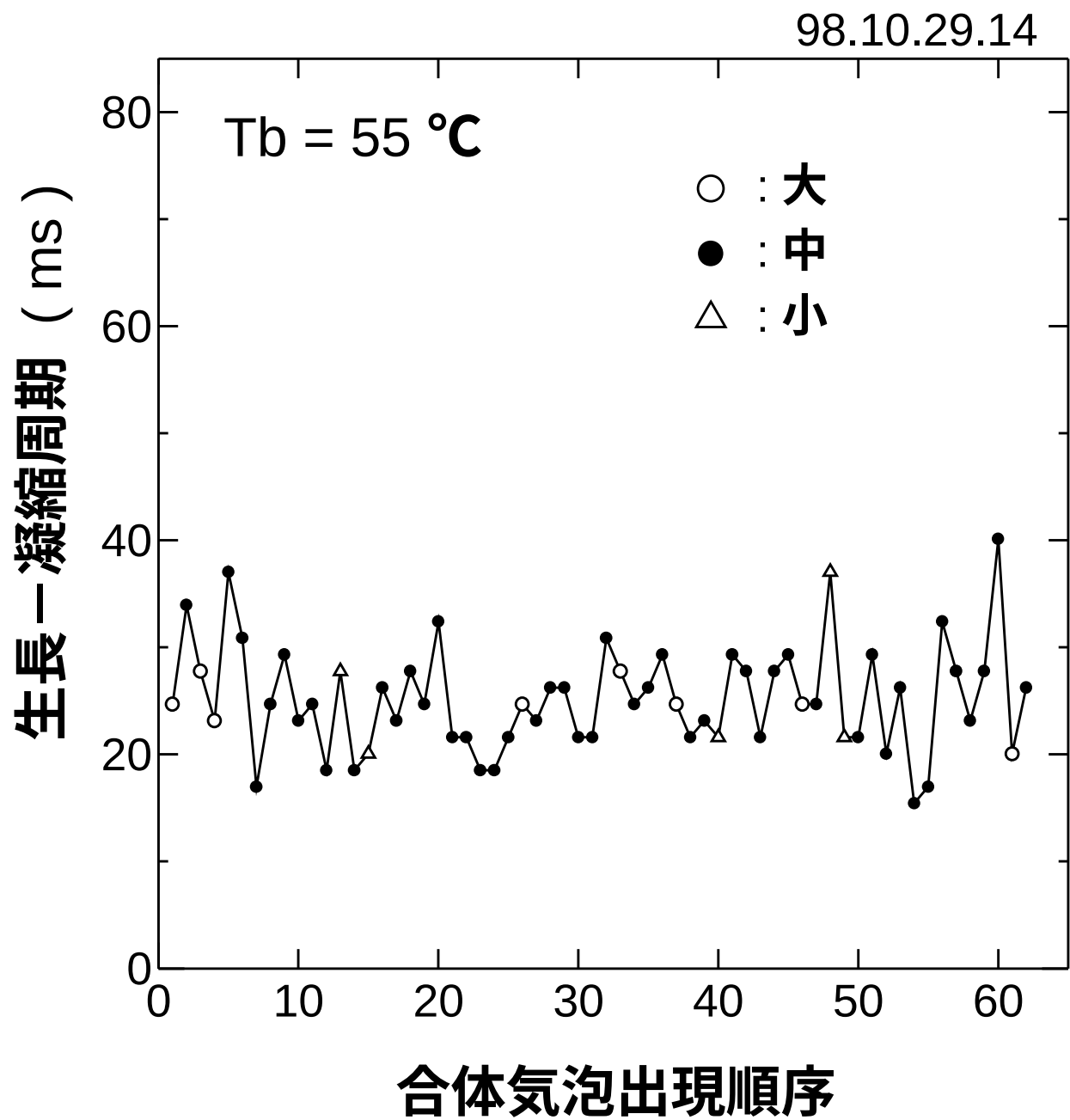


Fig.3.19

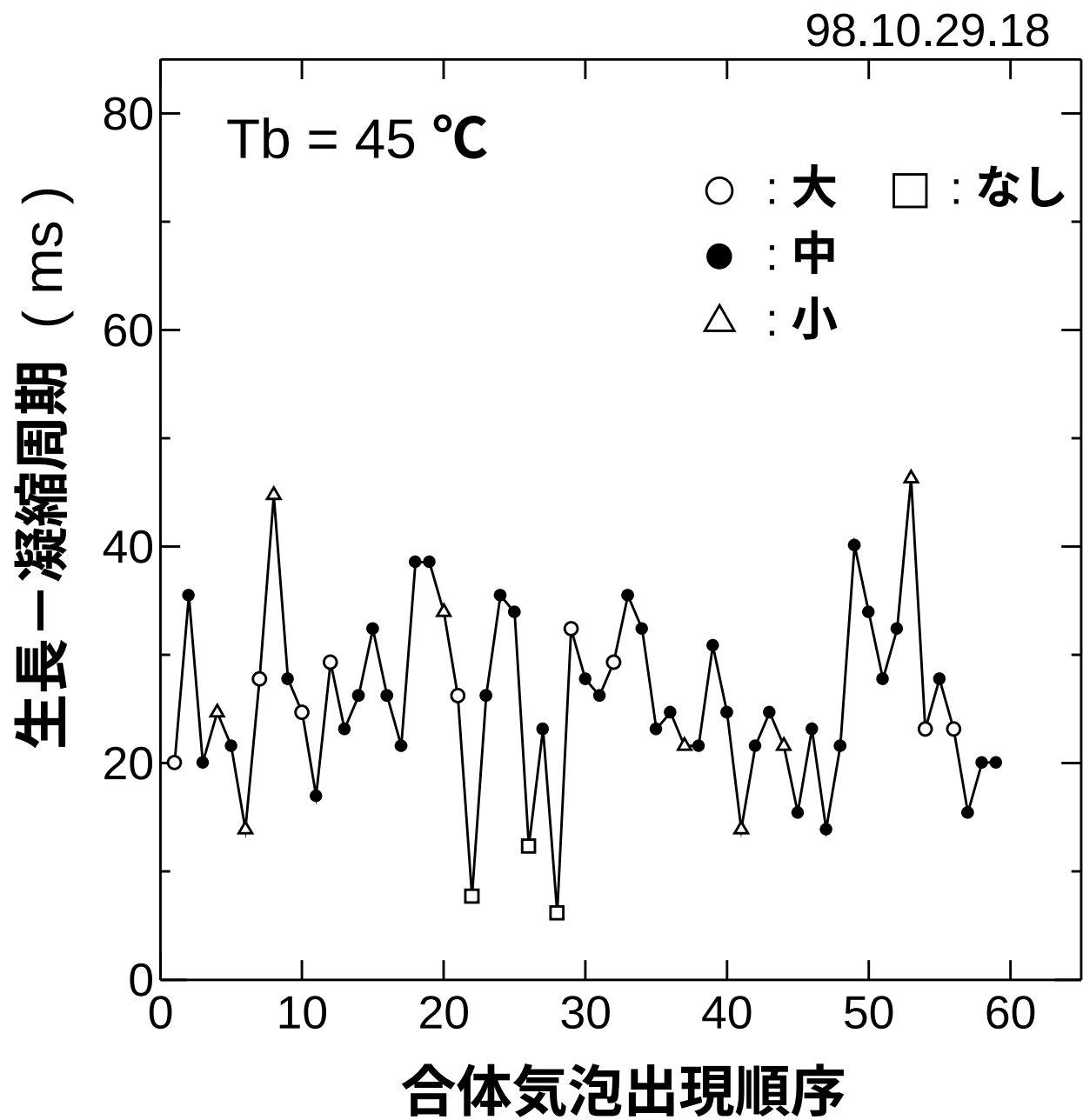


Fig.3.20

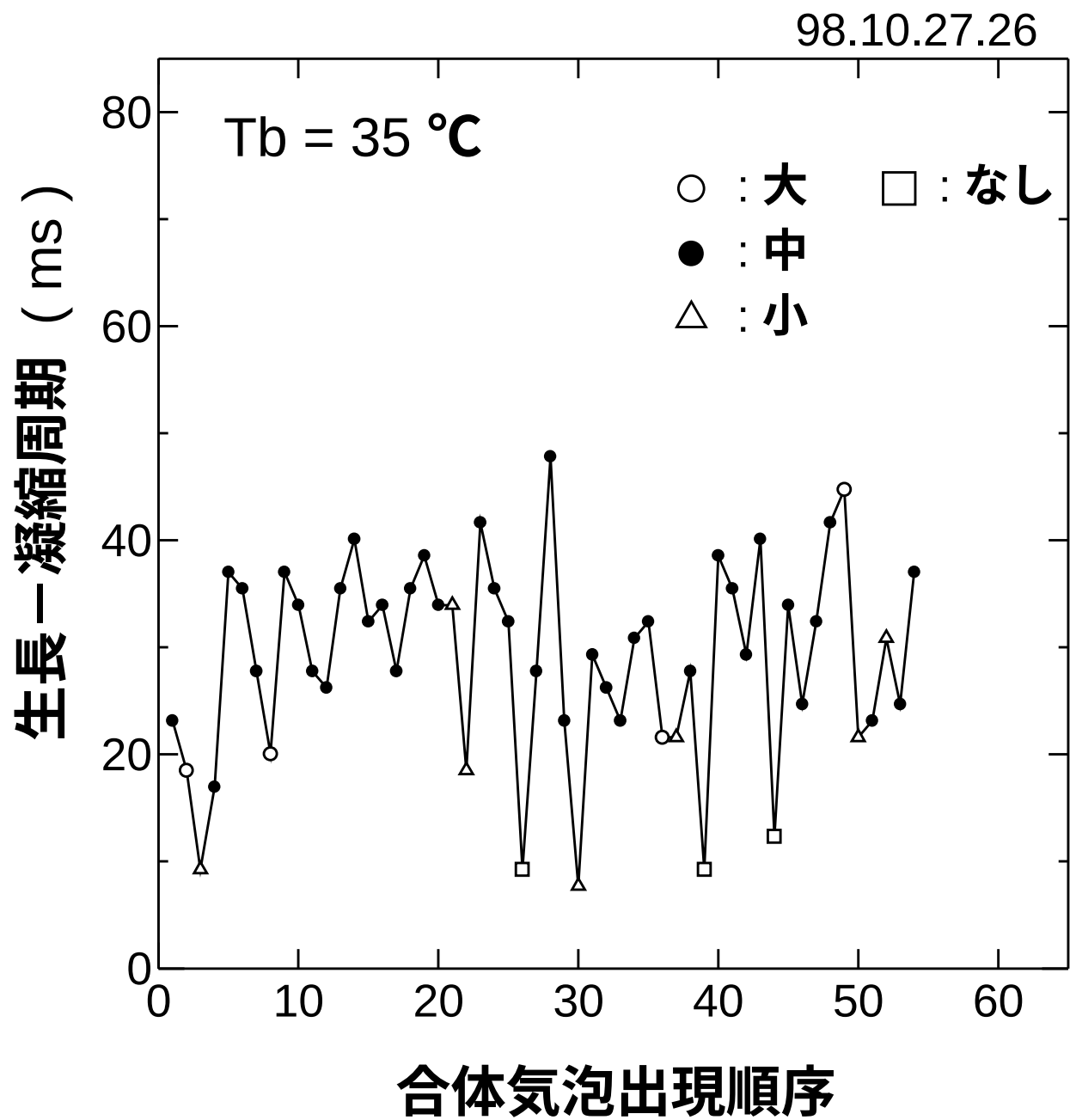


Fig.3.21

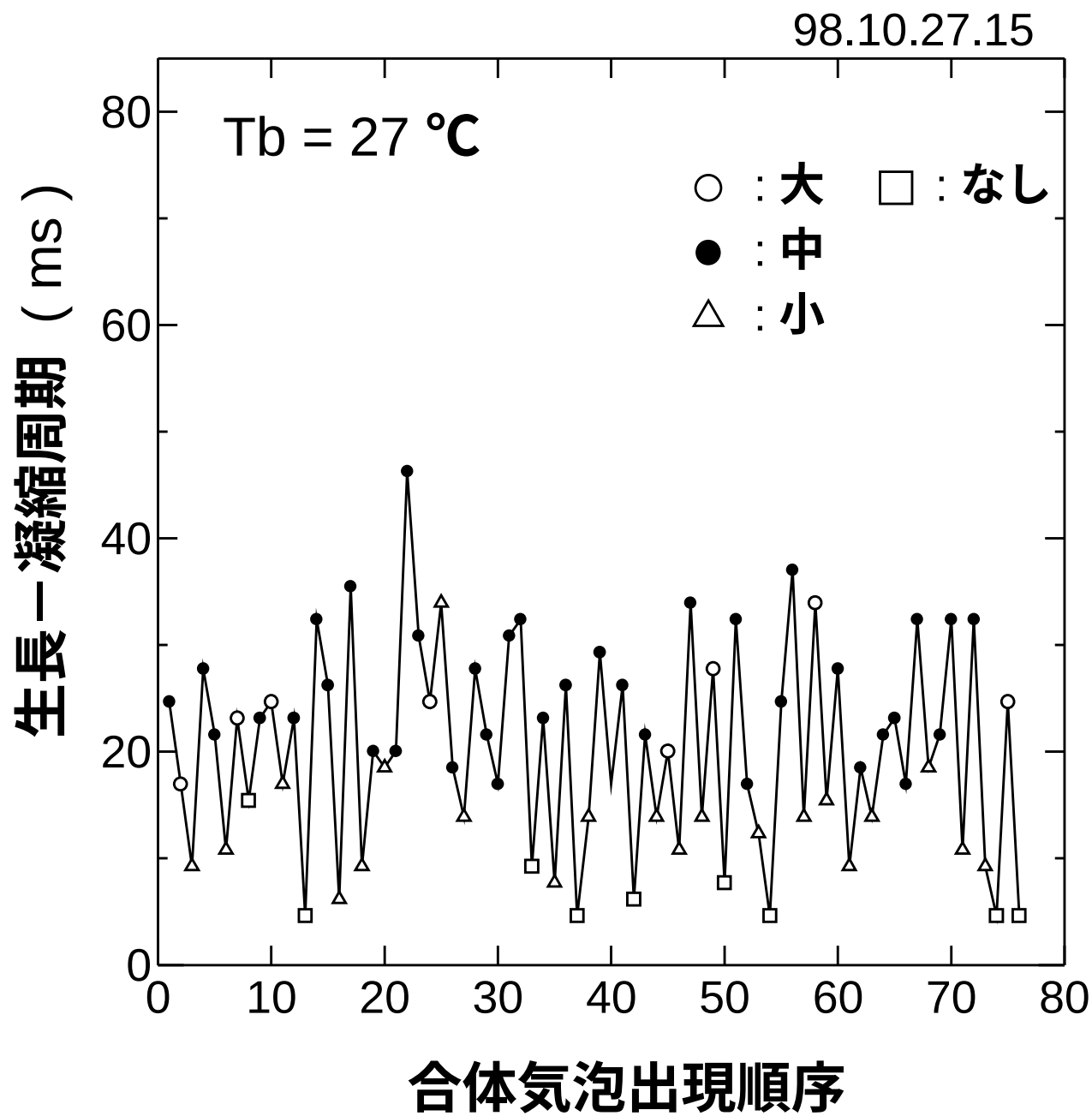


Fig.3.22

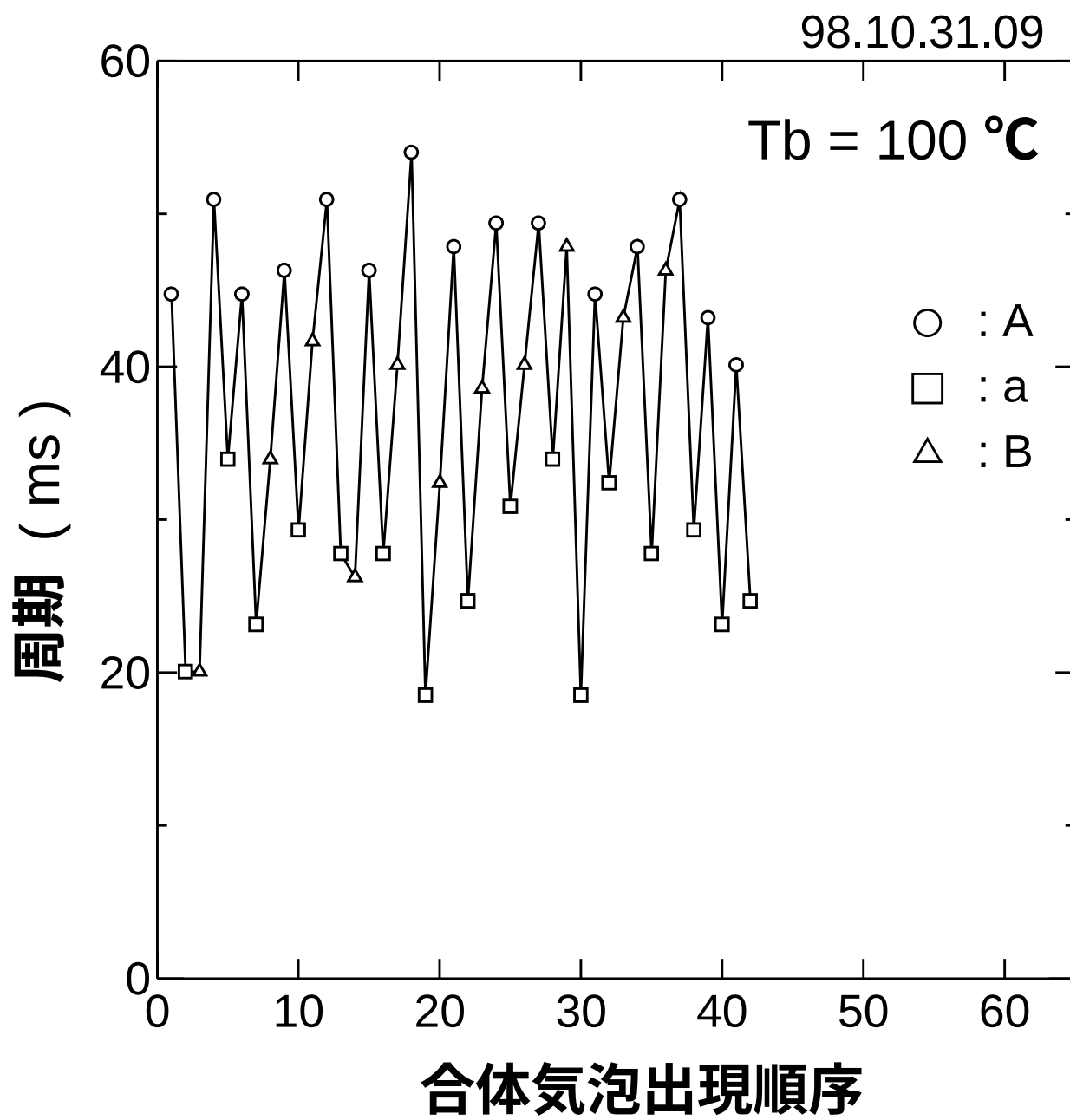


Fig.3.23

98.10.27.08

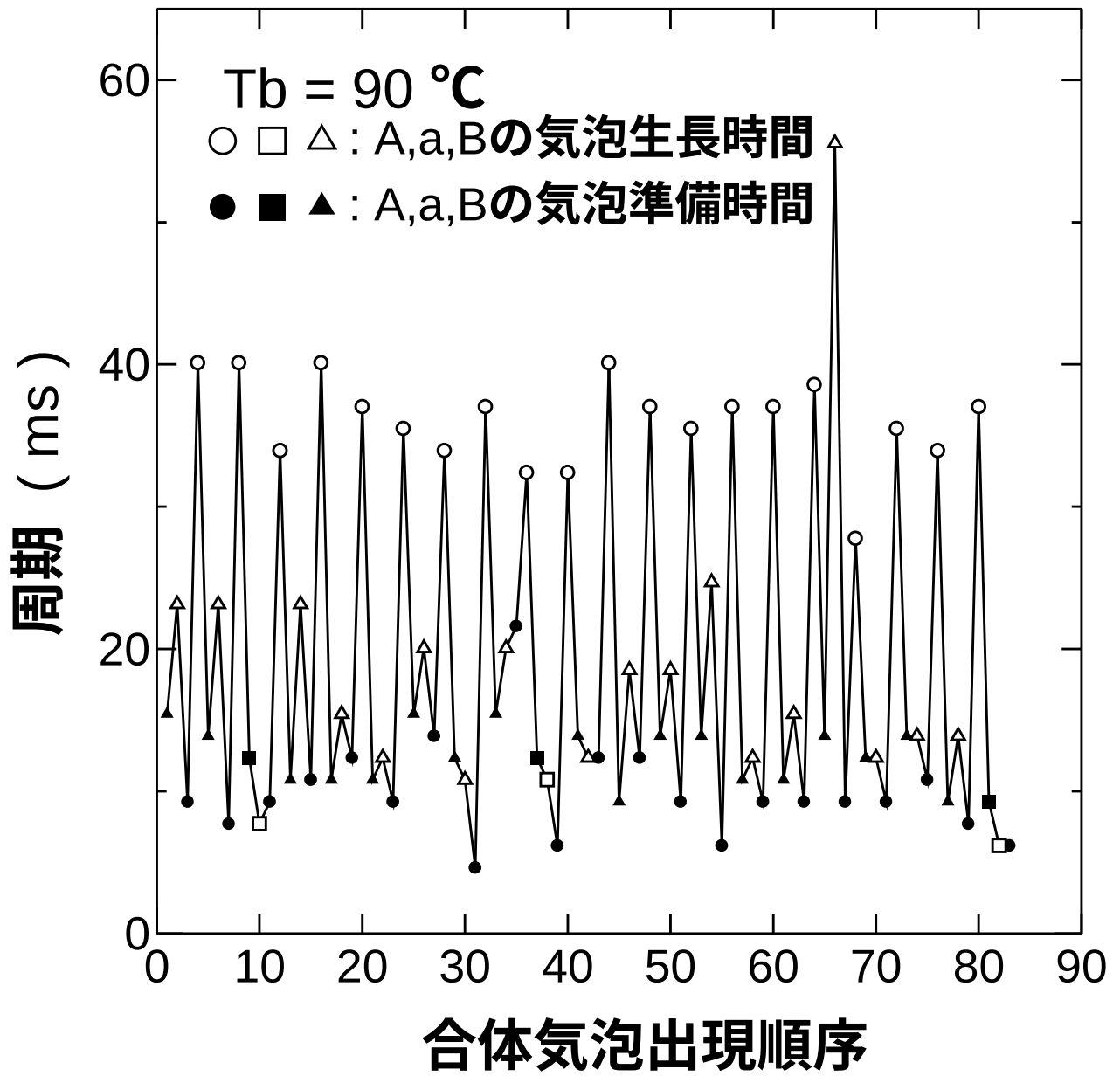


Fig.3.24

98.12.03.02

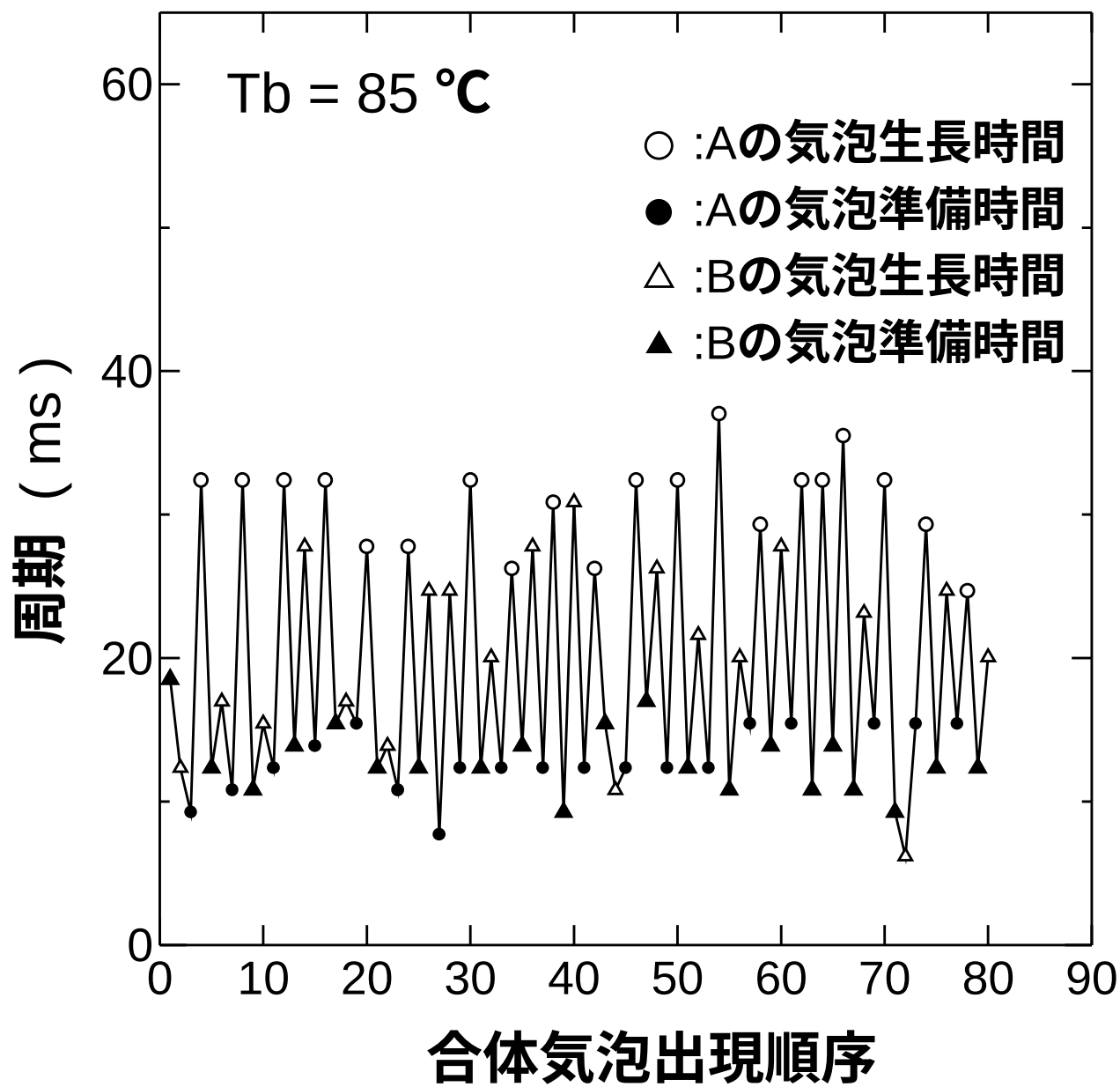


Fig.3.25

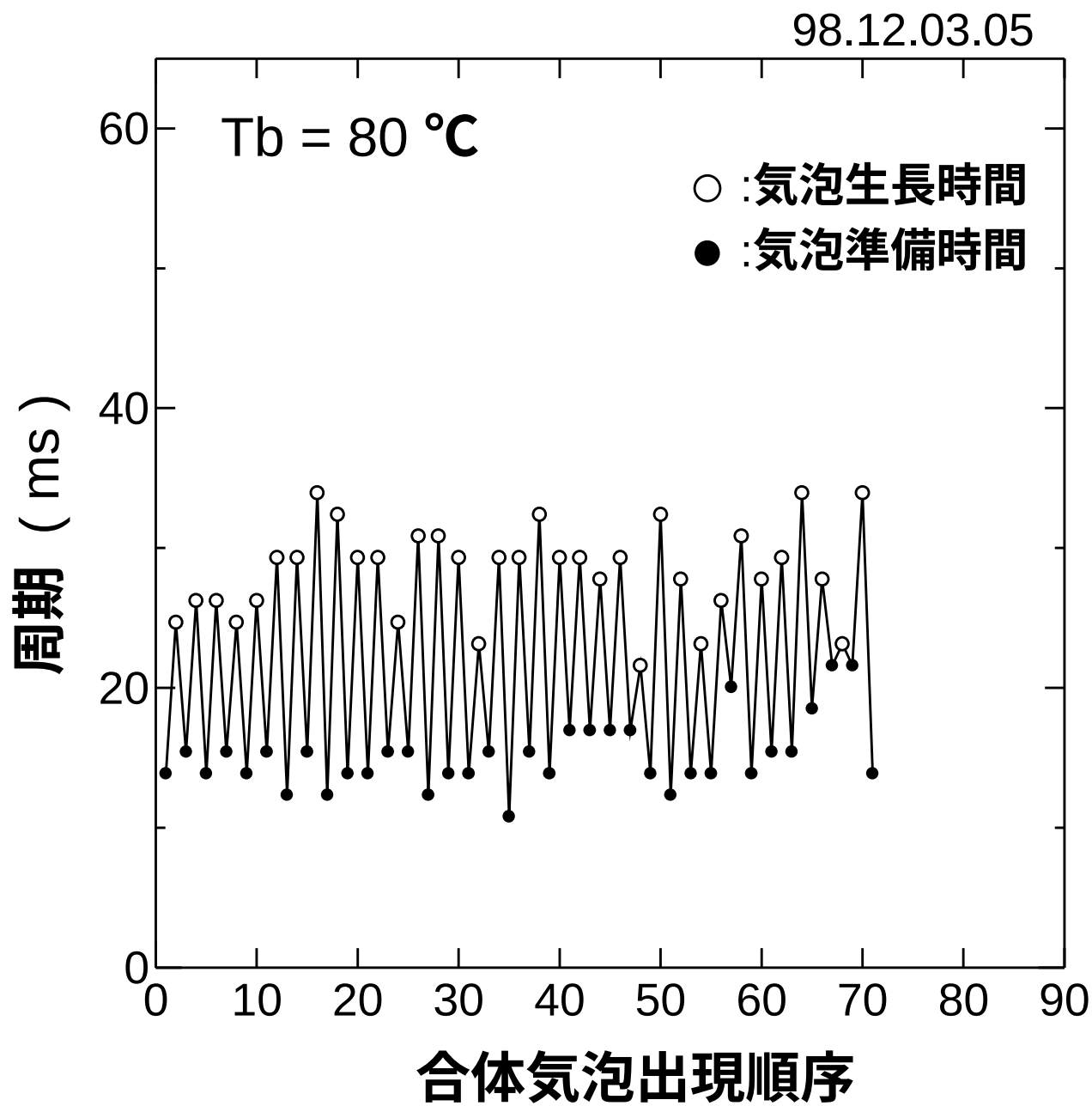


Fig.3.26

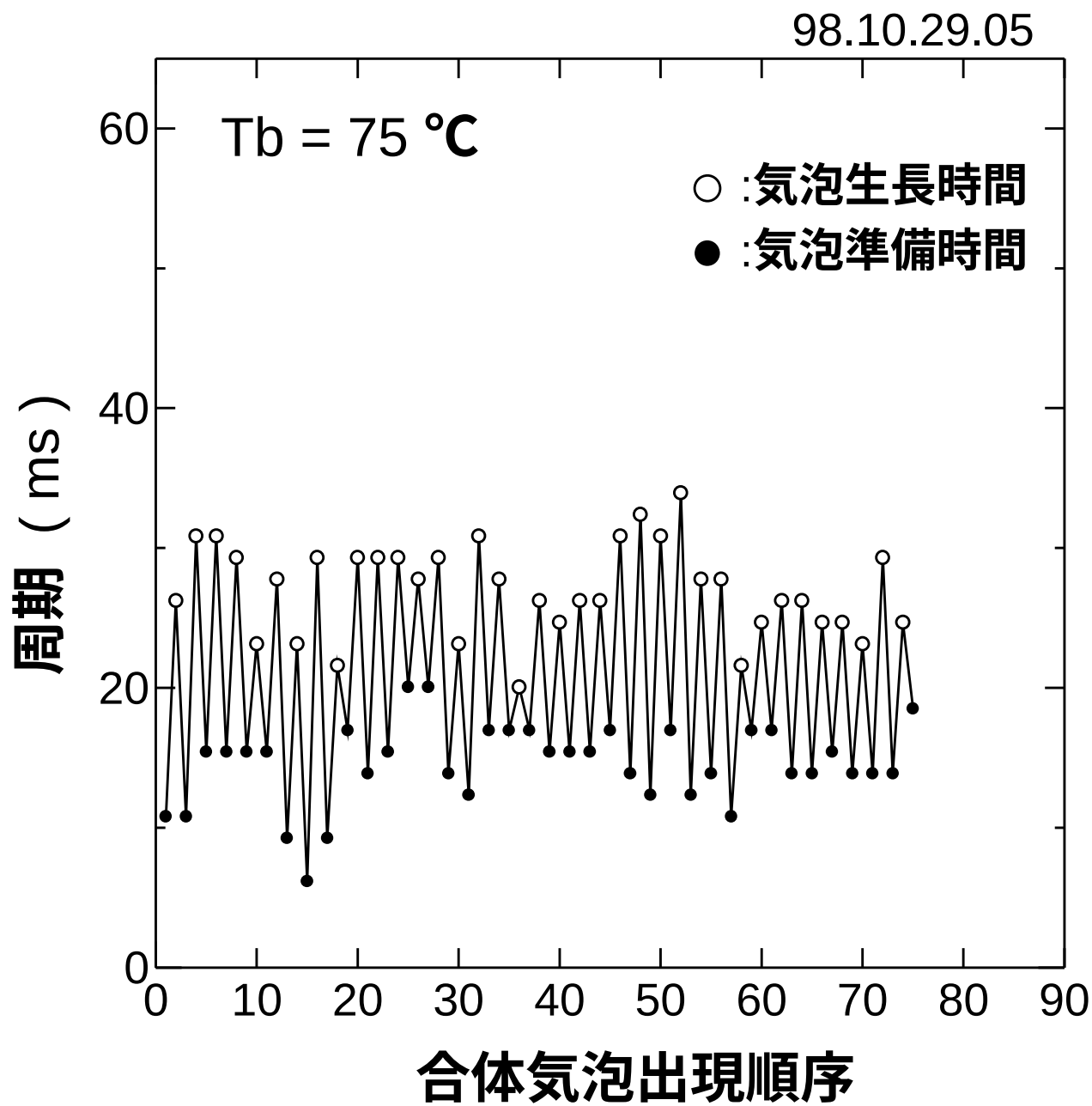


Fig.3.27

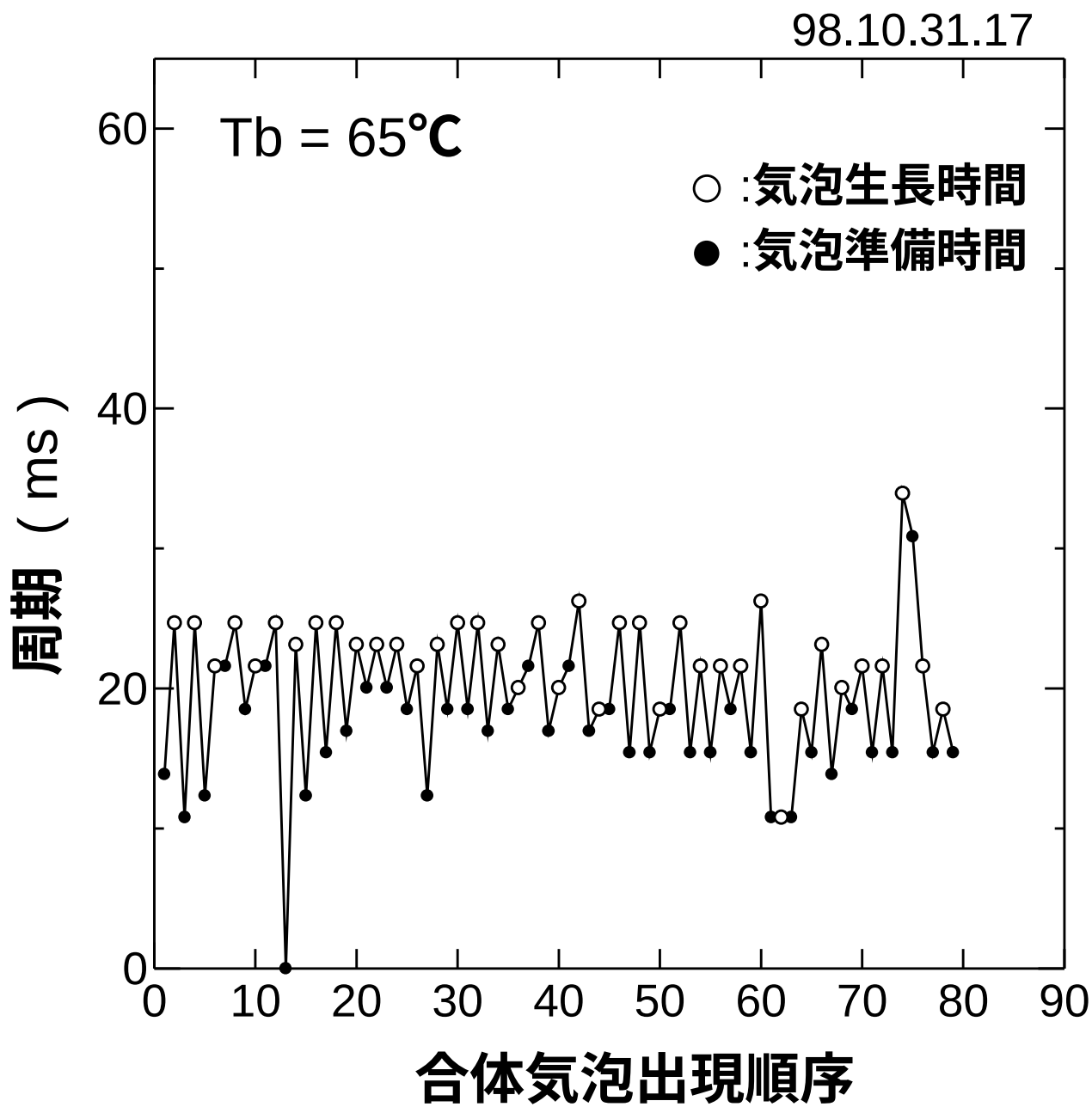


Fig.3.28

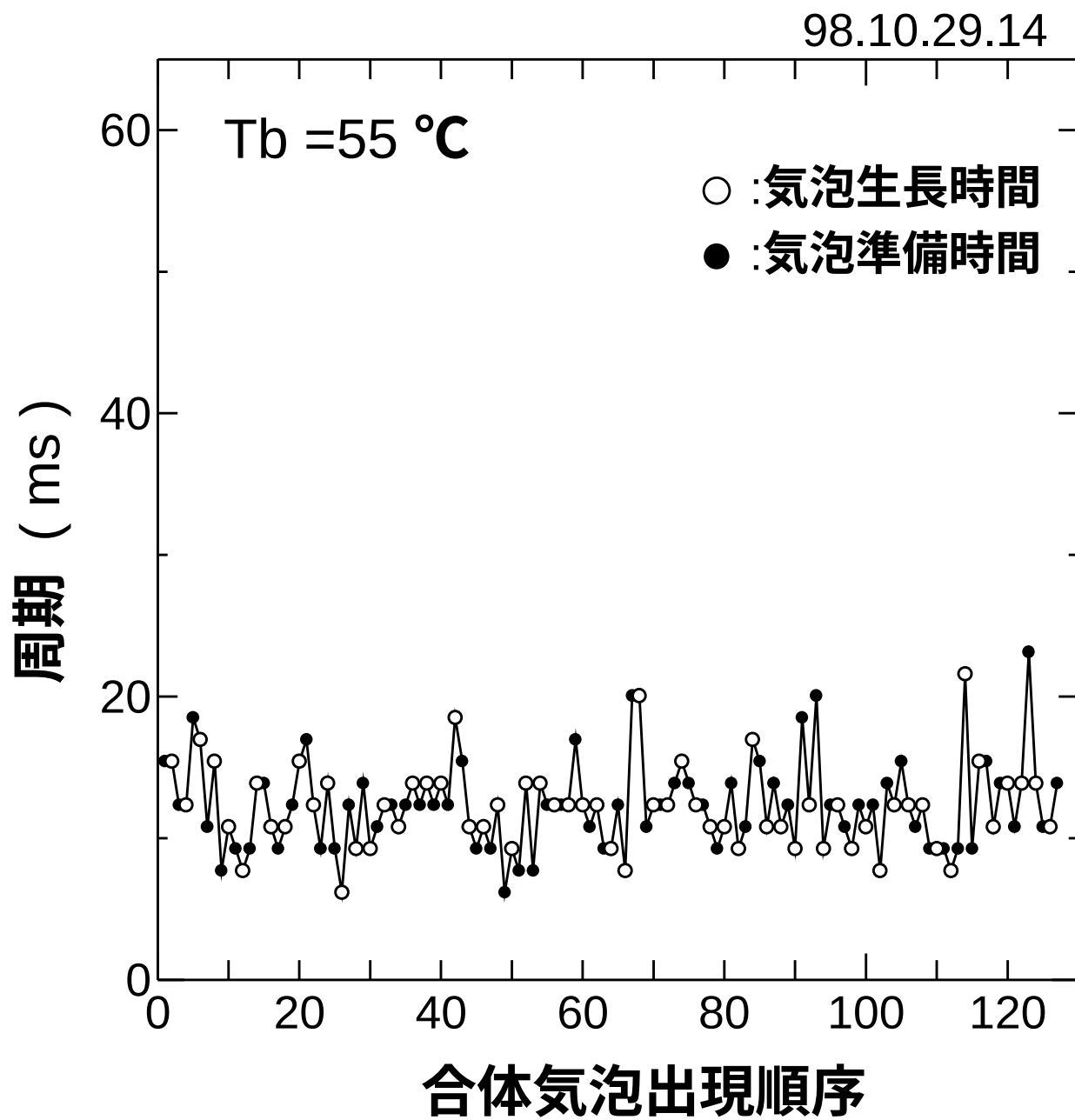


Fig.3.29

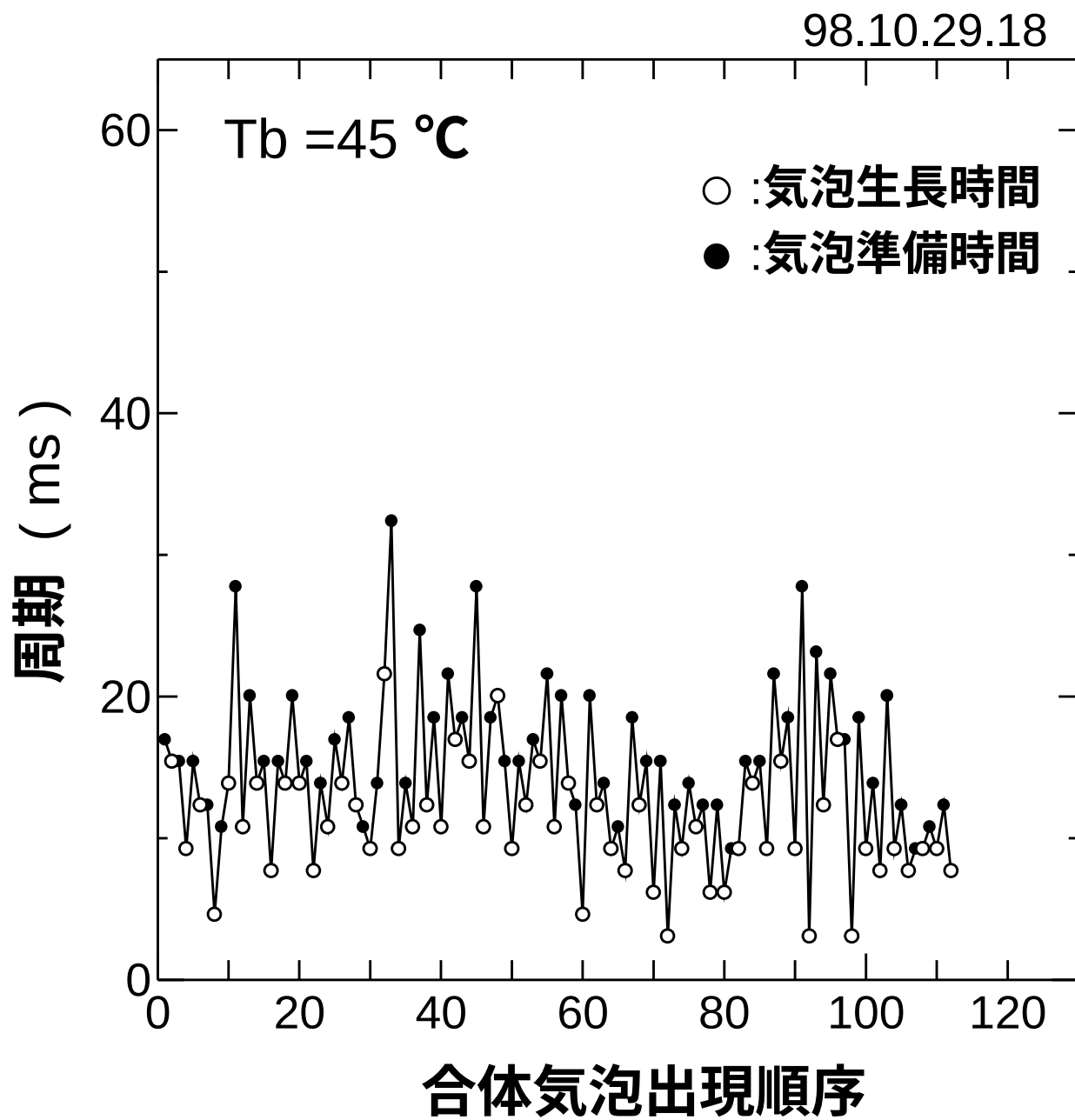


Fig.3.30

サブクール度と各周期の関係

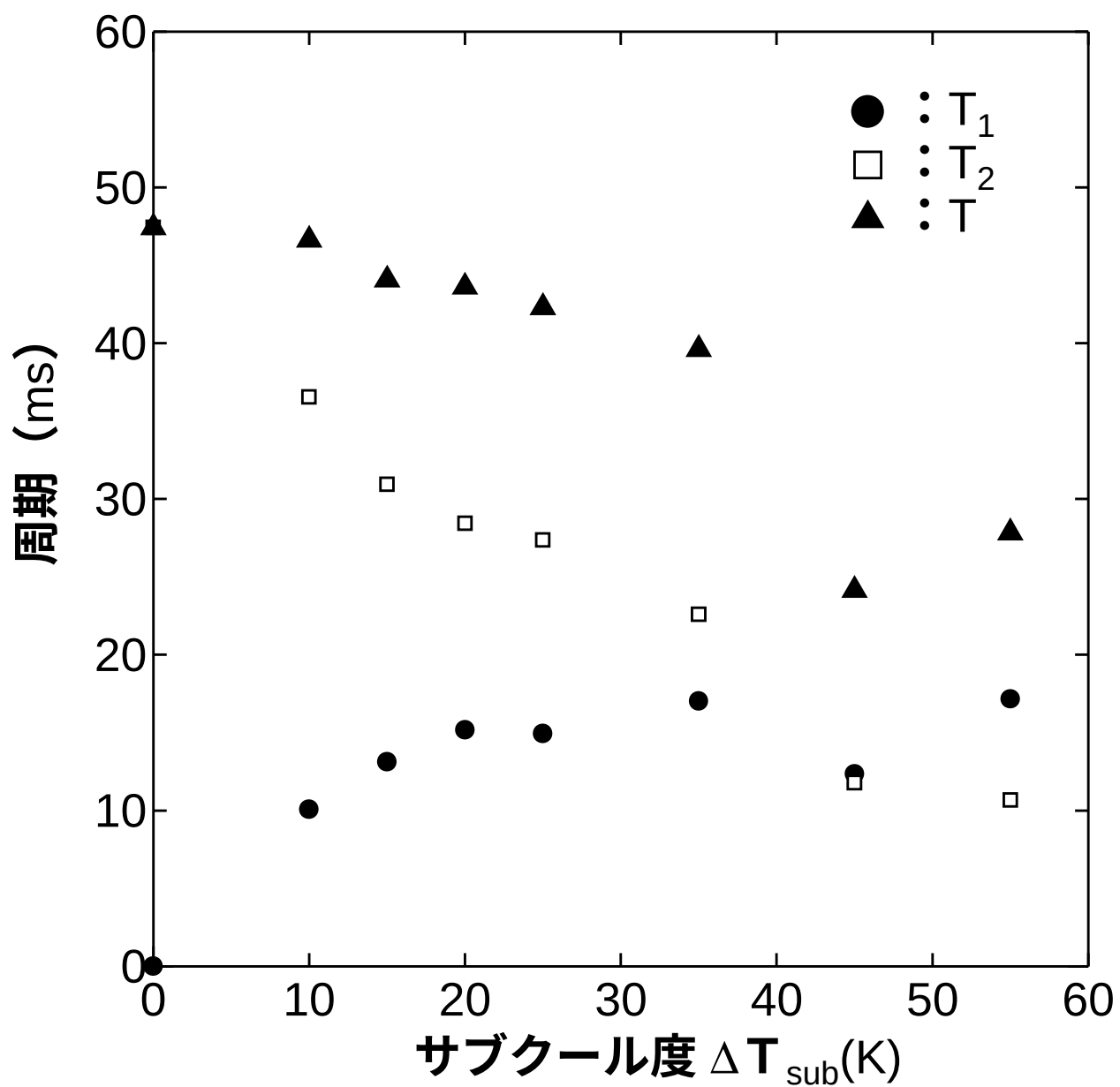


Fig.3.31

サブクール度と限界熱流束の関係

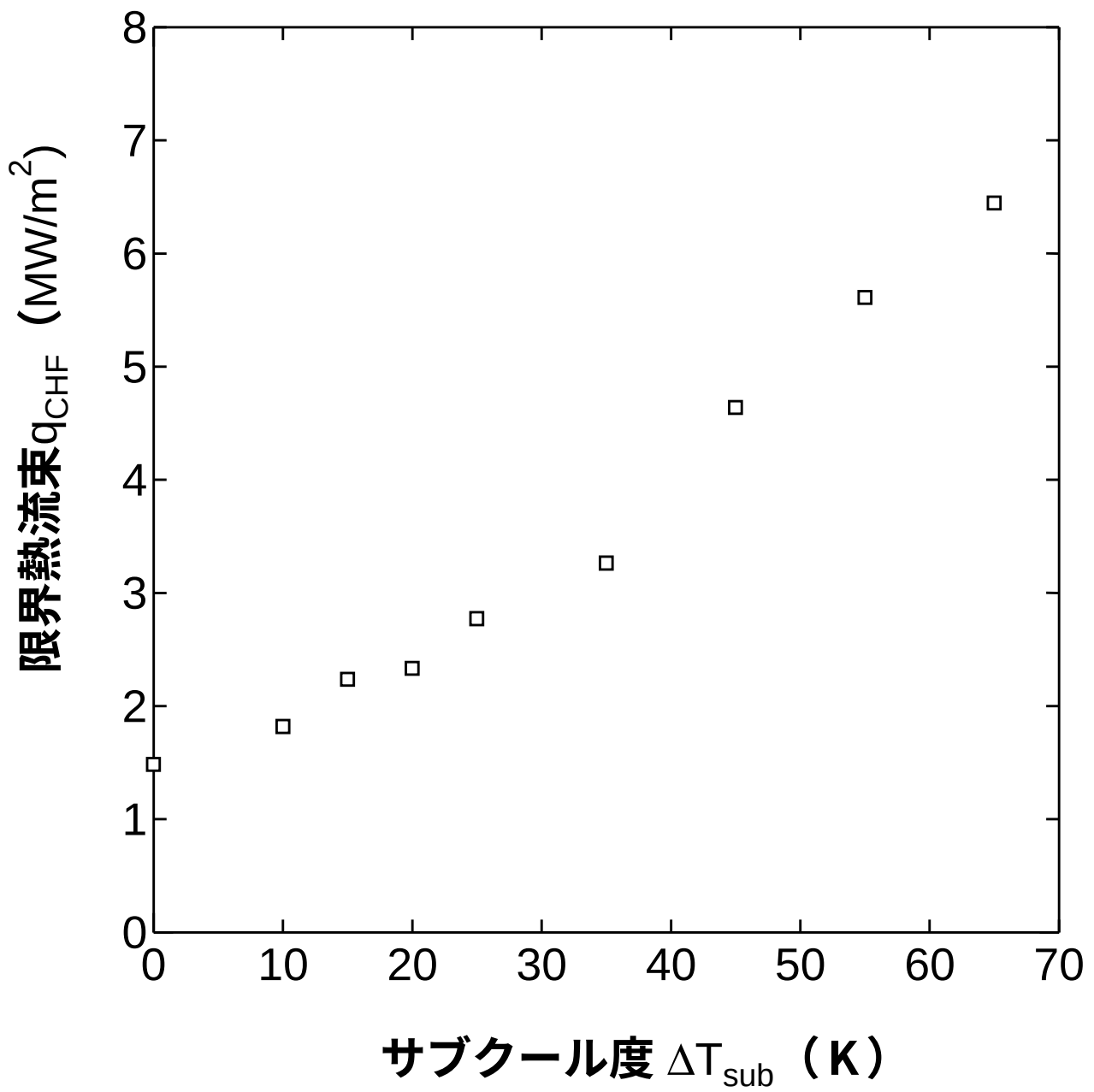


Fig.3.32

限界熱流束と T_2 の関係

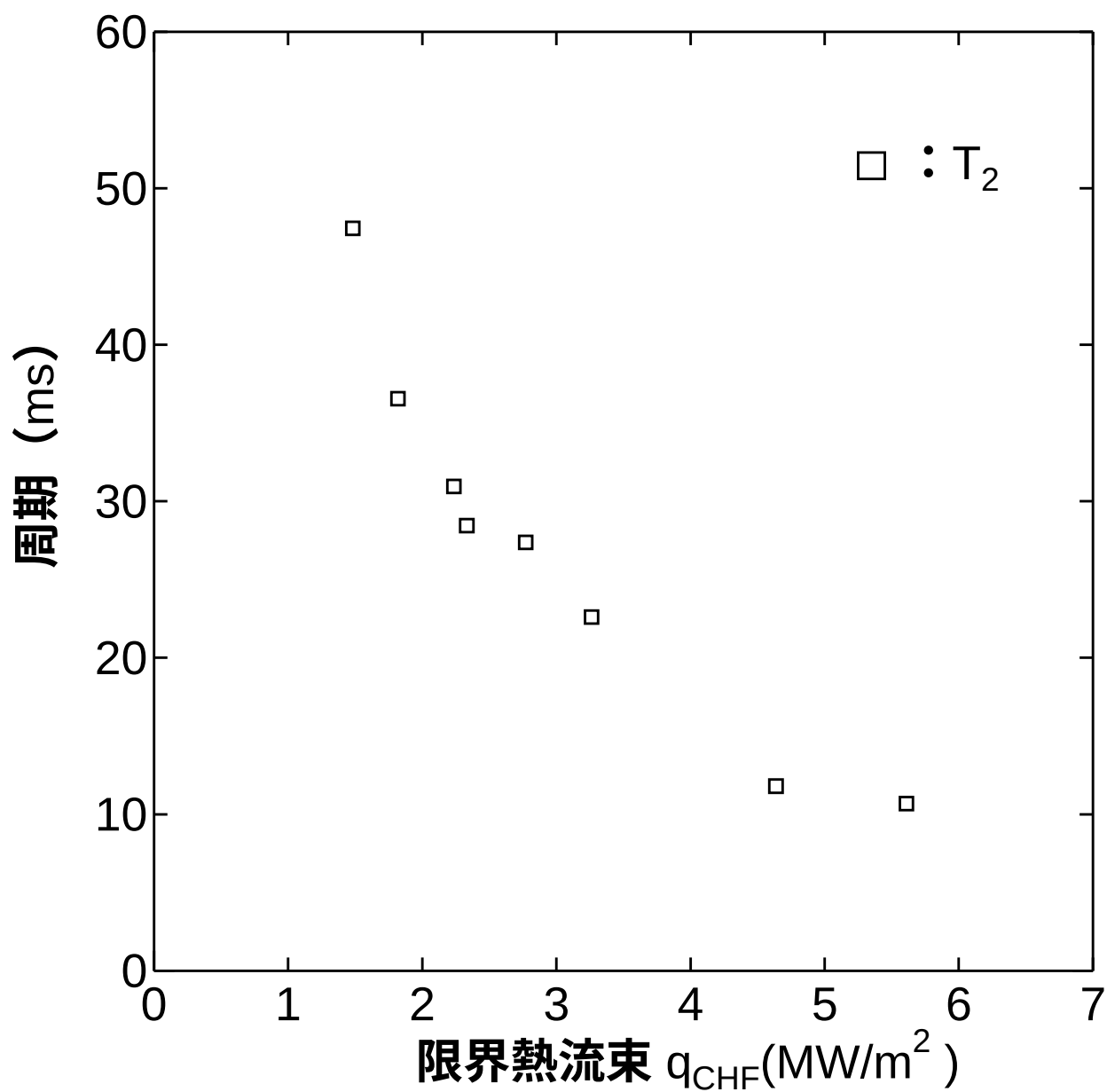


Fig.3.33

限界熱流束と T_2 の関係

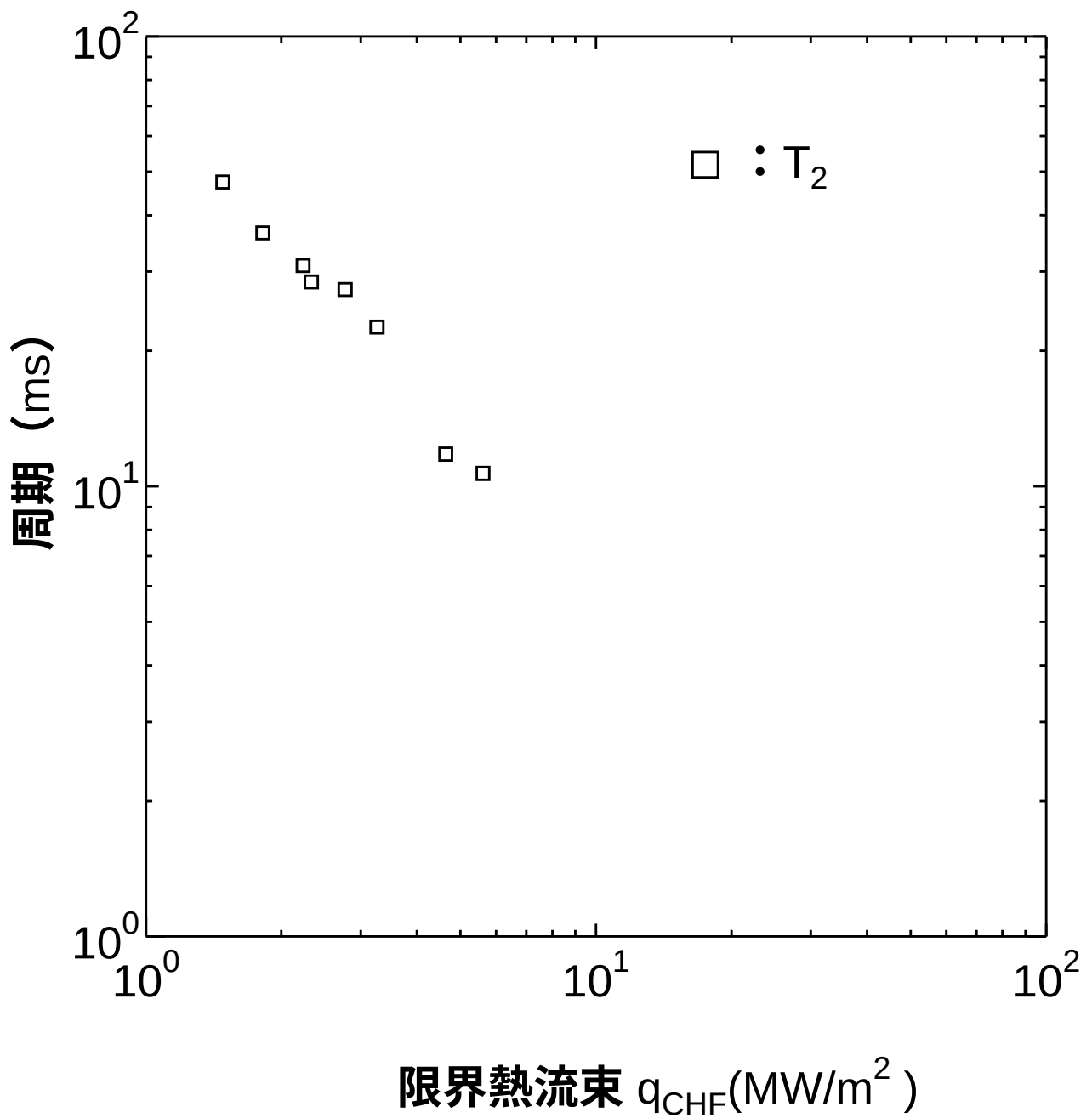


Fig.3.34

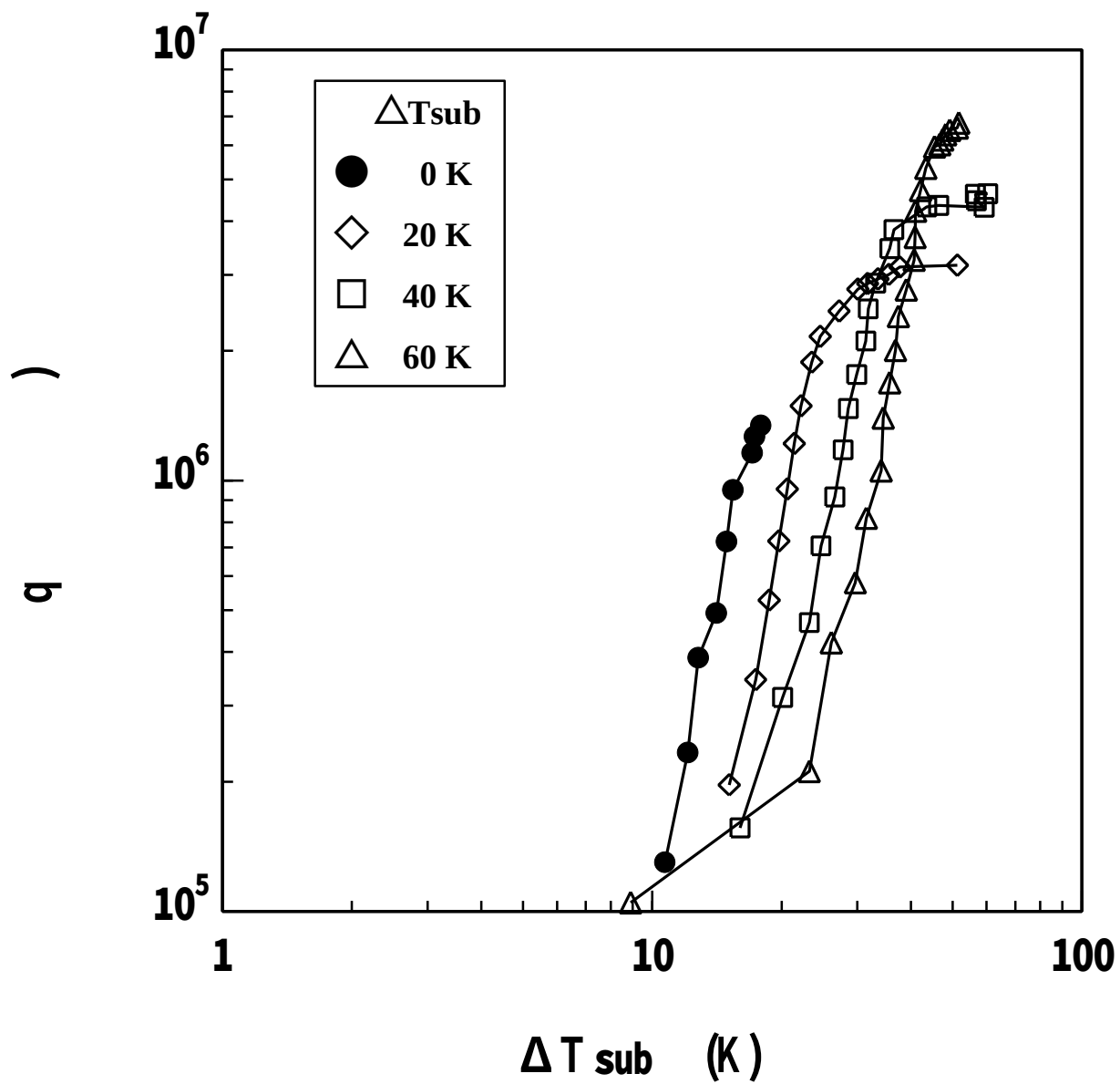


Fig.3.35

subcooled pool boilingにおける実験結果一覧表と分析計算表										
bulk温度	T_b	°C	100	90	85	80	75	65	55	45
限界熱流束	q_{CHF}	MW/m^2	1.483	1.819	2.236	2.333	2.772	3.263	4.638	5.61
加熱面温度	T_w	°C	118.5	120.7	127.3	124.7	119.8	116.5	122.1	119.9
蒸気塊sample数	n	n	15	19	20	35	34	33	56	50
加熱面を覆うまで 待ち時間	t_1	ms	0.00	10.07	13.12	15.17	14.93	17.02	12.35	17.16
	コマ数		0.00	6.53	8.50	9.83	9.68	11.03	8.00	11.12
蒸気塊滞在平均時間	t_2	ms	47.43	36.55	30.94	28.44	27.37	22.59	11.79	10.68
	コマ数		30.73	23.68	20.05	18.43	17.74	14.64	7.64	6.92
周期	$T=t_1+t_2$	ms	47.43	46.62	44.06	43.61	42.30	39.61	24.14	27.84
	コマ数		30.73	30.21	28.55	28.26	27.41	25.67	15.64	18.04

Fig.3.36

(6) 考察

①液温 $T_b = 75^\circ\text{C}$ と $T_b = 65^\circ\text{C}$ の気泡準備時間 T_1 のちがいについて

ビデオを観察すると、 $T_b = 75^\circ\text{C}$ で気泡が大きく生長するときは、先端が尖ることがおおい。(連続写真参照) これはまえの気泡による誘起流れのためであり、気泡の先端が尖らない(誘起流れのない) $T_b = 65^\circ\text{C}$ よりも伝熱面に液体が早く供給されて、気泡準備時間である T_1 が $T_b = 75^\circ\text{C}$ のほうが短くなっていると考えられる。

② $T_b = 65^\circ\text{C}$ の気泡と、 $T_b = 55^\circ\text{C}$ の気泡のちがいについて

$T_b = 65^\circ\text{C}$ のビデオを観察すると、気泡の離脱が確認できる。しかし、 $T_b = 55^\circ\text{C}$ では、気泡が離脱する前に凝縮して、伝熱面に液体が供給される。

一方、 $T_b = 80^\circ\text{C}$ 、 60°C 、 40°C 、 30°C の液温分布のグラフをみると、 $X=5\text{mm}$ 、 $Z=0.5\text{mm}$ の伝熱面付近では、それぞれ 87°C 、 83.5°C 、 72°C 、 71°C となっている。 $T_b = 60^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ の間で伝熱面に流入する液体の温度に急激に差が生じている。このことから次のことが考えられる。

1. 伝熱面に流入する液体の温度に差が生じたため、気泡が離脱するまえに凝縮するようになった。
2. 逆に、気泡が離脱しなくなったので、伝熱面付近の流れが安定し、伝熱面に流入する液体の温度に差が生じた。

③ $T_b = 65^\circ\text{C}$ と、 $T_b = 55^\circ\text{C}$ の限界熱流束について

伝熱面に液体が供給されるメカニズムが変化し、またその液体の温度にも大きな差があると考えられるので、限界熱流束が大きく変化したと考えられる。

④気泡準備時間 T_1 と合体気泡停滞時間 T_2 について

①、②より、気泡準備時間 T_1 がサブクール度に関係なく変動しているのは、誘起流れの強さや、液温分布など、さまざまな要因による。一方、合体気泡停留時間 T_2 は、気泡が離脱する $T_b = 65^\circ\text{C}$ と、気泡が離脱する前に凝縮される $T_b = 55^\circ\text{C}$ で大きく差があるものの、サブクール度が高くなるにつれ減少している。

第四章 結論

結論

今回の研究の結論は以下のとおりである。

- (1) 直径 10mm の伝熱面（平面）を用いた、プール・サブクール沸騰における限界熱流束は、Kutateladze および Ivey-Morris の結果とほぼ一致した。
- (2) ビデオを観察した結果、合体気泡の挙動は各サブクール度でさまざまな変化をしめすことがわかり、次のように合体気泡の挙動を分類することができた。
 - ① 低サブクール度：気泡が大きく生長し、それによる誘起流れによって 2 種類以上の気泡が発生する温度。
 - ② 中サブクール度：規則的に 1 種類の気泡が生長離脱する温度。
 - ③ 高サブクール度：気泡が離脱する前に凝縮する温度。
- (3) 高サブクール条件では、合体気泡が離脱するよりもはやく凝縮がはじまって、その結果伝熱面に液体が供給されることが確認できた。このことから、高サブクール域限界熱流束に対してマクロ液膜消耗モデルの適用は、伝熱面への液体供給のメカニズムが異なるだけなので、妥当であると考えられる。
- (4) 実験結果として、離脱周期とサブクール度、離脱周期と限界熱流束、限界熱流束サブクール度の関係を得ることができた。合体気泡の挙動は、考察で分析したように、液温分布をはじめ各種の要因に支配されており、サブクール度と離脱周期についての関係はさらに検討を必要とするが、とくに、離脱周期と限界熱流束の関係は、最小二乗法により

$$t = 5.308 \times 10^5 q_{CHF}^{-1.140} (\text{sec})$$

と求められた。

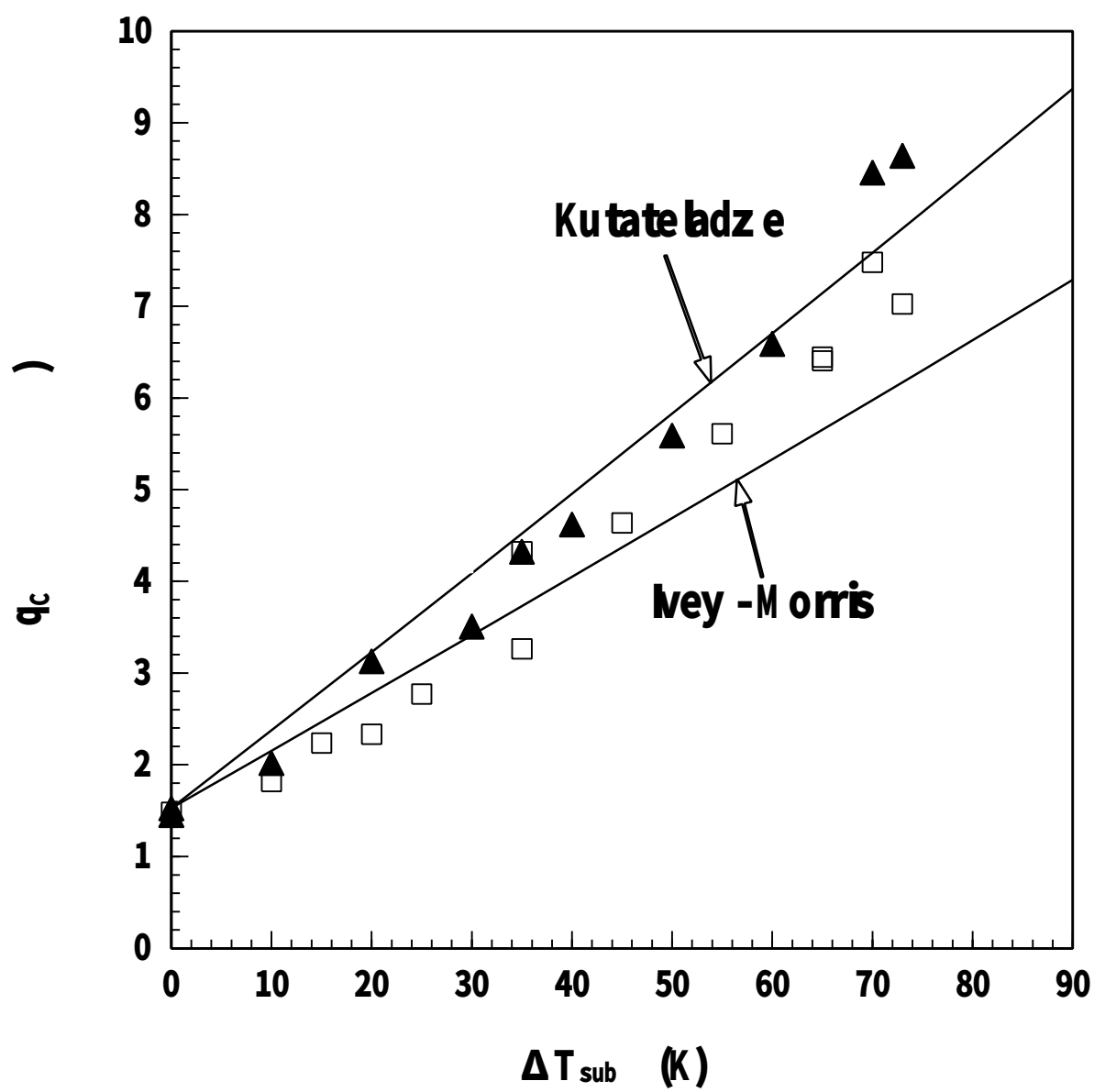


Fig.4.1

(2) 今後の課題

- ①気泡の挙動には、沸騰容器内の液温分布が深く関係している。そこで、今後は各サブクール度における液温分布を知ることが必要である。
- ②バルク液温度が 35 度以下の高サブクール条件では、合体気泡が伝熱面全体を覆うことがすくなくなる。そこで τ を、合体気泡が伝熱面全体を覆っている時間とするのか、他の時間でとるのか、検討する必要がある。

参考文献

- [1] 庄司正弘 伝熱工学 東京大学出版会
- [2] 土屋孝夫 沸騰機構の研究 昭和 41 年度 卒業論文
- [3] 河東杉雄 石津尚澄 バーンアウト及び遷移沸騰機構の研究
昭和 42 年度卒業論文
- [4] 甲藤好郎・横谷定雄、“プール沸騰バーンアウト機構の研究”、
日本機械学会論文集 34-258 (昭 43)、pp.345-354
- [5] 甲藤好郎・横谷定雄、“飽和プール核、遷移沸騰における蒸気
塊の挙動”、日本機械学会論文集、41-341 (昭 50)、pp.294-305
- [6] S.S.Kutateladze, Fundamental of Heat Transfer,
Edward Arnold, pp389,1963
- [7] Y.Katto and S.Yokoya, Int. J. Heat Mass
Transfer, Vol.11, No.6, pp993-1002, 1968
- [8] Y.Haramura and Y.katto, Int. J. Heat Mass
Transfer, Vol26, No.3, pp.389-399, 1983
- [9] H.J.Ivey and D.J.Moriss, UKAEA Report No.
AEEW-R 137, 1962

以上

通し番号 1－64 完

卒業 論文

平成 11 年 2 月 5 日 提出

学生証番号 70220 氏名 吉井 啓人