

氏名(本籍)	新野正之 (宮城県)
学位の種類	工学博士
学位記番号	工博第357号
学位授与年月日	昭和47年3月24日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当
研究科専門課程	東北大学大学院工学研究科 (博士課程)原子核工学専攻
学位論文題目	レーザービームによる単一気泡の発生と成長に 関する研究
	(主査)
論文審査委員	教授 江草 龍男 教授 武山 斌郎 教授 長尾 重夫 講師 戸田 三朗

論文内容要旨

第一章

単一気泡成長の研究は、大別して気泡の発生、成長する液体の温度場の条件より、

- (1) 均一温度場における気泡成長
- (2) 不均一温度場における気泡成長

に分類される。前者は、後者に比して気泡の成長を支配する諸因子が比較的容易に把握できるため、理論的な取扱いは極めて容易であり、より深く諸因子の影響が解析されている。一方、これを実験的に立証しようとする、後者は比較的容易に実現できるのに対して、前者は、はるかに多くの技術的困難さを伴い現在までにこれを実現しえたのは極く小数であり、数編の報告をみるにすぎない。しかも、それらは後述する Dergarabedian の例に見られるように多くの問題点を抱えている。さら

に適切な単一気泡の発生技術が確立されていないため、気泡の発生に関する実験的研究にいたっては、皆無といってよい。たとえば、特に著名な Dergarabedian の実験を例にとってみれば、いかに均一温度場での実験が困難なものであるかがわかっていよう。すなわち、ガラス容器内の液体を赤外線で加熱し、種々の液体過熱度のもとで気泡を発生させ写真観察を行なったものである。しかし液体過熱度の最高が 6.4°C と小さく、その調整に砂、チョーク粉末などの不純物を加えているため、それに伴う溶存気体混入による誤差を生じる実験上の不都合がある。さらにそれらの不純物はいずれも気泡発生核となる恐れがあるため、気泡発生の際的、空間的予測が極めて困難であり、しかもそのような状態においては低速度、低倍率の現象撮影しか行なえないことになる。

以上のような観点から著者は均一温度場における単一気泡研究の実験技術確立の必要性を痛感して、任意の液体過熱度を実現し、時間的、空間的に極めて高い精度で気泡の発生、成長現象を観測するためには、次の手法を用いることが最も有効であると考えた。すなわち、1つはバブルチャンバにおける減圧機構の原理の応用であり、2つには気泡発生トリガとしての G.P.L (Giant Pulse Laser) の利用である。これら2つの手法を併用することによって本実験の目的を達成した。

第二章 実験装置

本実験装置は、主に衝撃波管方式バブルチャンバ、G.P.L発振および検出系、加熱装置、照明系、撮影系、計測系、加圧および真空系とから構成されており、以上の各装置の配置を図1に示す。また図2は、バブルチャンバ本体の断面図を示す。次に各装置の動作状態を順を追って説明する。まず、遠隔操作により、電気的にバブルチャンバの減圧を行なう。すなわち、図2において③の隔膜を境にして、上部が 10^{-1}mmHg 程度の真空度に、下部が2~3気圧に保たれている。電磁石①に電流が流れると撃針が射出し隔膜を破断する。上部には衝撃波、下部には膨張波が進行し、高圧容器⑤内の圧力は急激に減少する。なお、真空度 P_1 と高圧容器圧力 P_h の比 P_h/P_1 を種々変えるだけで高範囲の減圧時定数を容易に得ることができる。この圧力変化を図1における⑥の圧力変換器により検出し、その電気的出力を微分回路⑧により微分する。次にこの微分パルスをもノマルチバイブレータによる遅延回路⑩に入力し、所定の時間だけ遅らせた後、G.P.L発振器に入れ、G.P.Lビームを同期発振させる。このビームは⑬のアテニューエータ(硫酸銅水溶液)により単一気泡生成に必要なエネルギー強度まで落され、エキスパンダ⑭により光束が拡大される。そしてバブルチャンバ直前のコンデンサレンズにより、バブルチャンバ中心部にビームを収束し、レンズの焦点上に単一気泡を発生させる。一方、照明装置は、高速、高倍率の撮影を行なうために、ターゲット(気泡発生点)上の明るさは極めて明るいものが必要となり、ケラ法を採用している。また点光源としては、ハロゲンランプとキセノンランプを目的に応じて使い分けた。すなわち前者は駒取り撮影のための定常光源として、後者はストリークカメラ撮影のための瞬間光源として使用した。また撮影系は望遠レンズ、拡大レンズそ

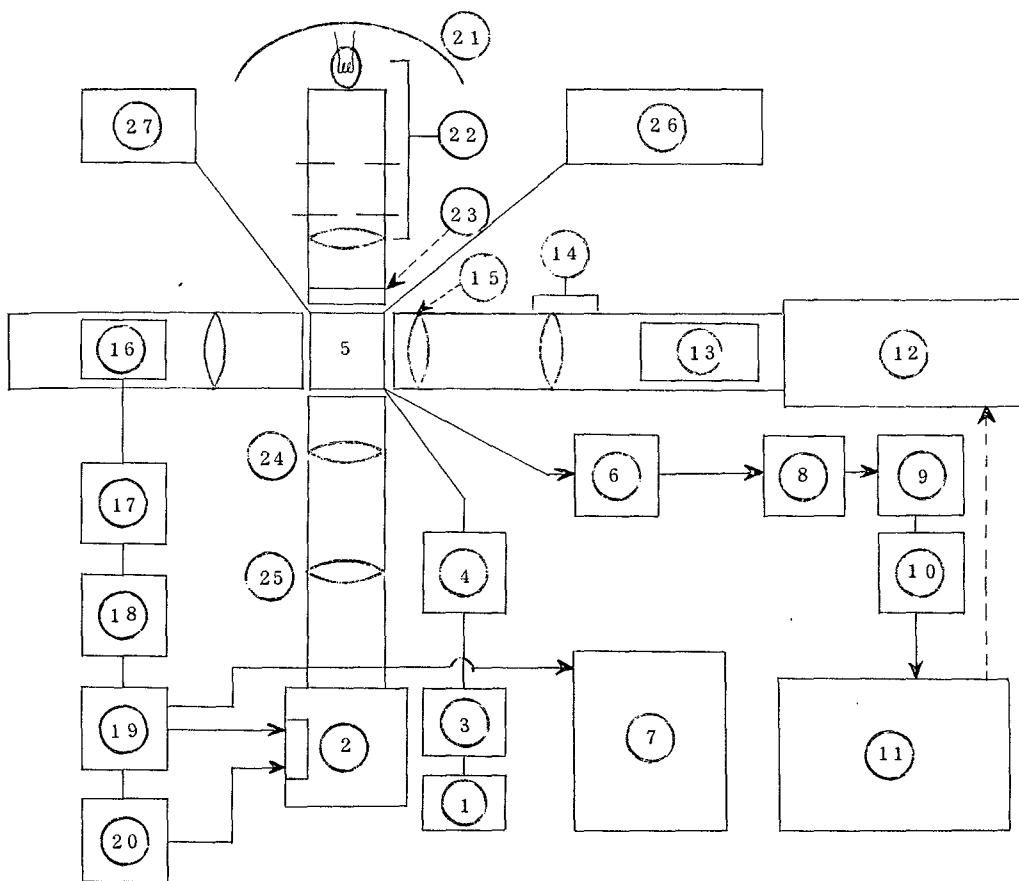


図1 実験装置全体図

- | | |
|--------------|----------------|
| 1. スタート・スイッチ | 14. エキスパンダ |
| 2. 高速度カメラ | 15. コリメータ |
| 3. リレー回路 | 16. フォト・トランジスタ |
| 4. 電磁撃針駆動回路 | 17. パルス増巾器 |
| 5. バブル・チャンバ | 18. 波形整形回路 |
| 6. 圧力検出器 | 19. SCRゲート回路 |
| 7. 記録装置 | 20. 水晶発振器 |
| 8. 微分回路 | 21. 大型集光装置 |
| 9. パルス増巾器 | 22. ケーラー法照明装置 |
| 10. 遅延回路 | 23. フィルタ |
| 11. GPL制御装置 | 24. 望遠レンズ |
| 12. GPL発振器 | 25. 顕微鏡レンズ |
| 13. 減衰器 | 26. 加圧真空装置 |
| | 27. 加熱装置 |

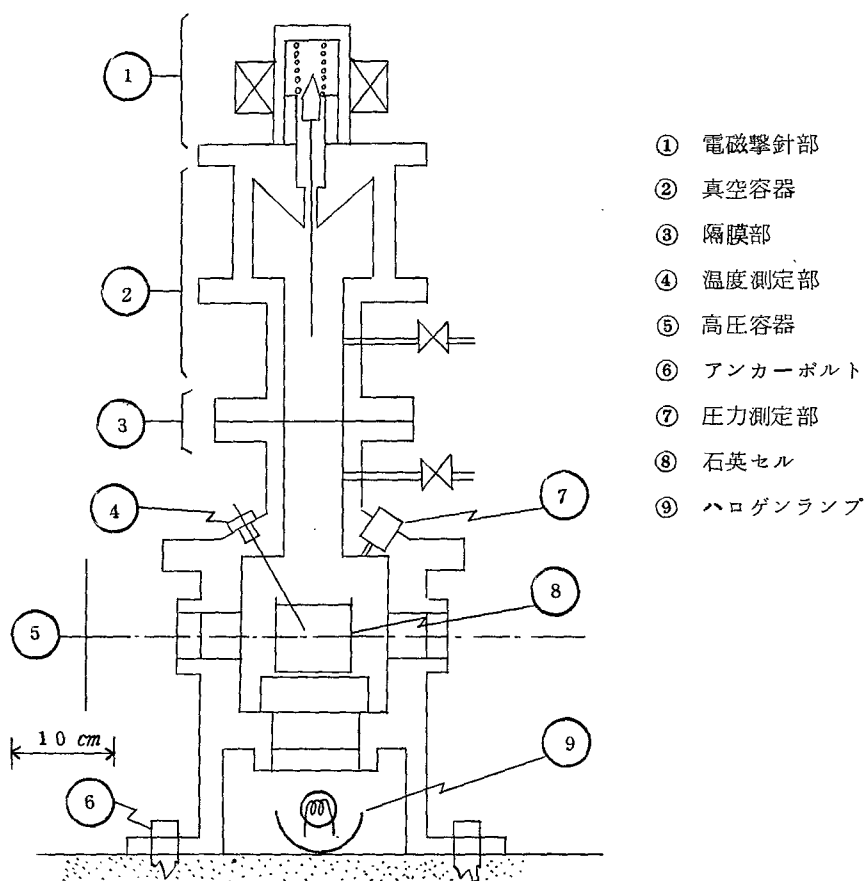


図2 実験装置本体

して高速撮影装置よりなる。

第三章 実験およびその結果

普通自然界に存在するあらゆる液体は、なにがしかの気体を含有する。特に空気の占める割合は大きい。従来キャピテーション研究においては、この溶存気体の影響が詳しく調べられており、たとえば、キャピテーション閾値は溶存気体の量によって大きく左右されることがわかっている。本実験でも気泡初生遅れなどの相変化に関する基礎的データを得ようとする場合、この溶存気体の影響は大きいと予想される。また気泡の成長速度に関しても溶存気体の影響は無視できない。

以上のような観点から本実験では、真空脱気装置を製作しこれにより試料液体の脱気を行ない溶存気体の影響を極力抑えることに努めた。脱気済試料を気泡発生容器に注入後は、空気の拡散による誤差を避けるため、速やかに実験を行なう必要がある。実験はG. P. Lビームを入射する時期により次の2つに分けられる。

1) 圧力一定下における気泡成長実験

これは液体過熱度が一樣で、かつ圧力が時間的に一定な体系中にG.P.Lビームを入射し、単一気泡を発生させ、これを毎秒7000~9000駒の速さで高速撮影したものである。その実験結果を整理したものが図3である。縦軸が気泡半径、横軸がG.P.Lビーム入射時期を0点とした時間軸である。実線がFleset & Zwickの漸近成長域における理論値であるが、実験値との一致は非常に良い。図4には液体過熱度が $\Delta T_{sat} = 3.8^{\circ}\text{C} \sim 14.3^{\circ}\text{C}$ までの実験結果を示す。そのいずれも両者の間には非常に良い一致を見ることができる。また図3において、実験値を半径 $R_u = 0$ に外挿した場合、時間軸との交点を t_d とすれば、 t_d はエネルギー供給後、気泡初生が開始するまでの時間遅れとみなすことができる。この気泡初生遅れ t_d と、液体過熱度 ΔT_{sat} の間には負の相関が存在することを見出し以下のような2種類の整理を試みた。図5には、 $1/t_d$ と ΔT_{sat} の関係を示す。図より $\Delta T_{sat} \rightarrow 0$ のときは $t_d \rightarrow \infty$ という傾向のあることがわかる。このことは物理的にも納得のいく関係である。図6には $\ln(t_d)$ と $1/T$ の関係を示す。ここで T は液体温度の絶対温度表示である。図から t_d は $\exp(H/T)$ と比例関係にあることがわかる。ここで H は図における勾配であるが、気泡を発生させるための活性化エネルギーに相当するものと解釈される。この2つの整理結果より t_d は近似的に

$$t_d \propto \frac{1}{\Delta T_{sat}} \exp\left(\frac{H}{T}\right) \quad (1)$$

という関係式で表わされるものと予想される。しかし実験点が少ないこと、単一の液体(アセトン)でしか実験を行なっていないことなどから定量的考察を加えることはできなかった。

ところで原子核実験で用いられるバブルチャンバの運転では、荷電粒子が入射してから約1 msec経ってから気泡軌跡の撮影を行なっている。これは気泡が発生するまでに本実験と同じような遅れ時間が存在するためである。また室岡・長尾らは、バブルチャンバの原理を用いて減圧した高過熱度液体中に一万V前後の高電圧パルスを印加し、液体の放電破壊による気泡生成を写真観察した。その結果、高圧パルス印加後、0.5~0.8 msec程度の遅れ時間が存在することを観測している。

以上の諸実験事実を通じていえることは、気泡の発生手段が高エネルギー粒子、高電圧パルスそしてG.P.Lビームと種々違い、また使用している液体の種類、およびその純度が異なるにもかかわらず、ほとんど同程度の遅れ時間が観測されていることは、非常に興味のあることである。

2) 圧力急減下における気泡成長実験

これは体系の圧力が6.0~20 msecの時定数をもって急激に減少している過熱液体中にG.P.Lビームを入射し気泡の非定常成長現象を高速ストリークカメラで観察したものである。たとえば圧力減少に伴い体系の過熱度の相対的増加速度が $10^{\circ}\text{C}/\text{msec}$ である場合、気泡の成長現象を液体過熱度 $\Delta T_{sat} = 0.05^{\circ}\text{C}$ の精度で捕えようとするに20万駒/秒以上の撮影速度が必要とされ、既存の駒取りカメラでは測定不能となる。このため高速ストリークカメラを製作、実験に使用した。ストリ

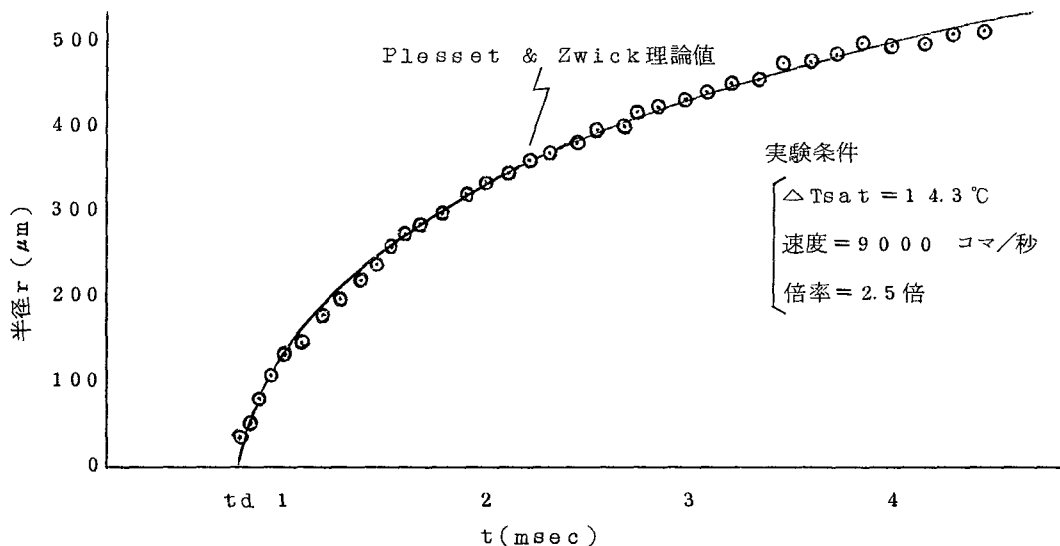


図3 均一温度場気泡成長実験結果

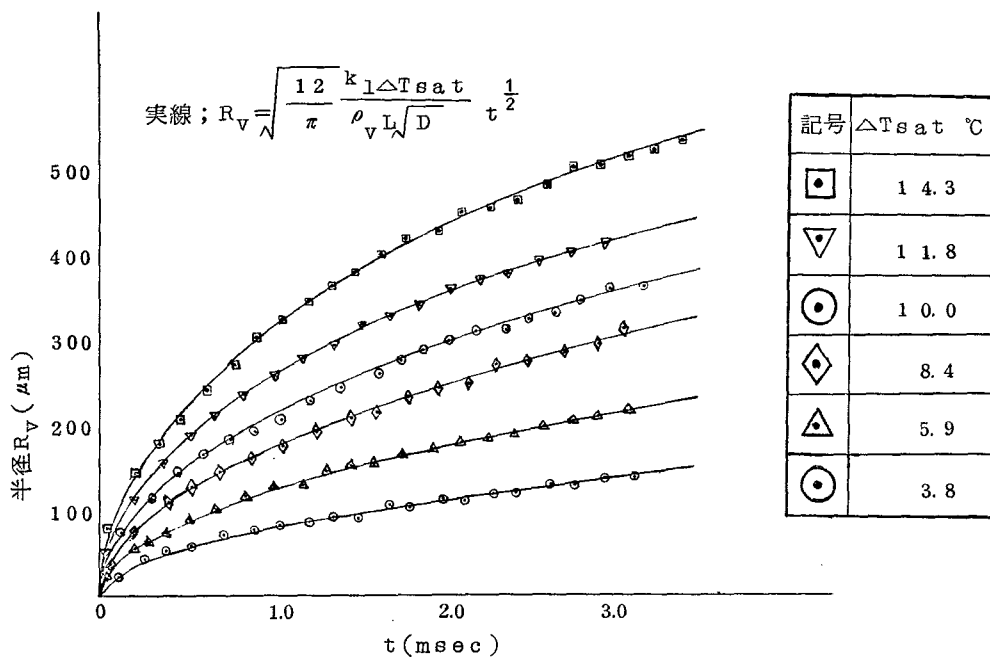


図4 均一温度場気泡成長実験結果

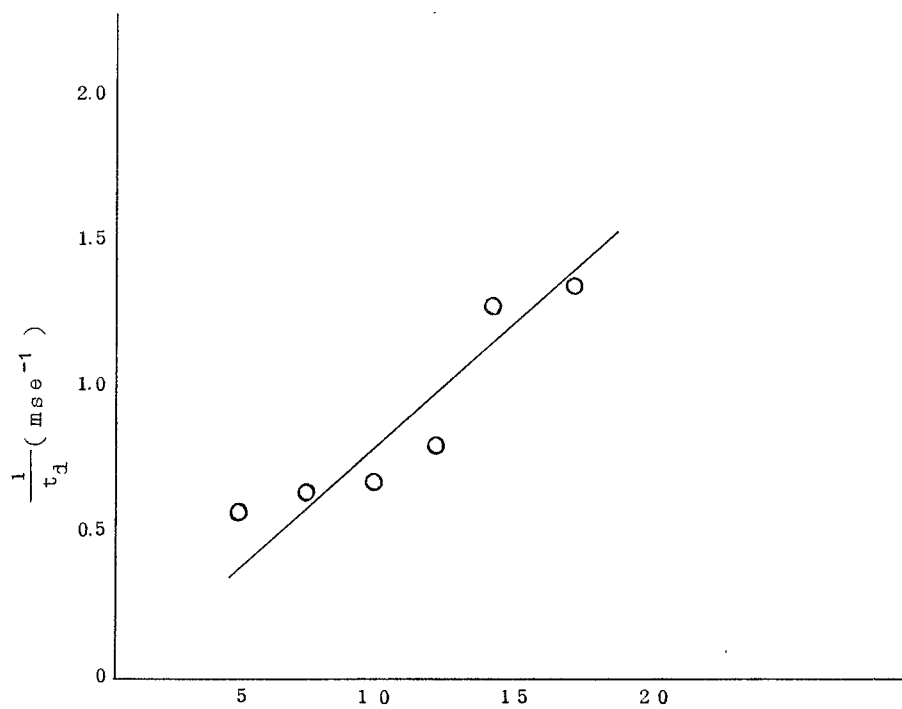


図5 $1/t_d$ と ΔT_{sat} の関係 $\Delta T_{sat} (^\circ\text{C})$

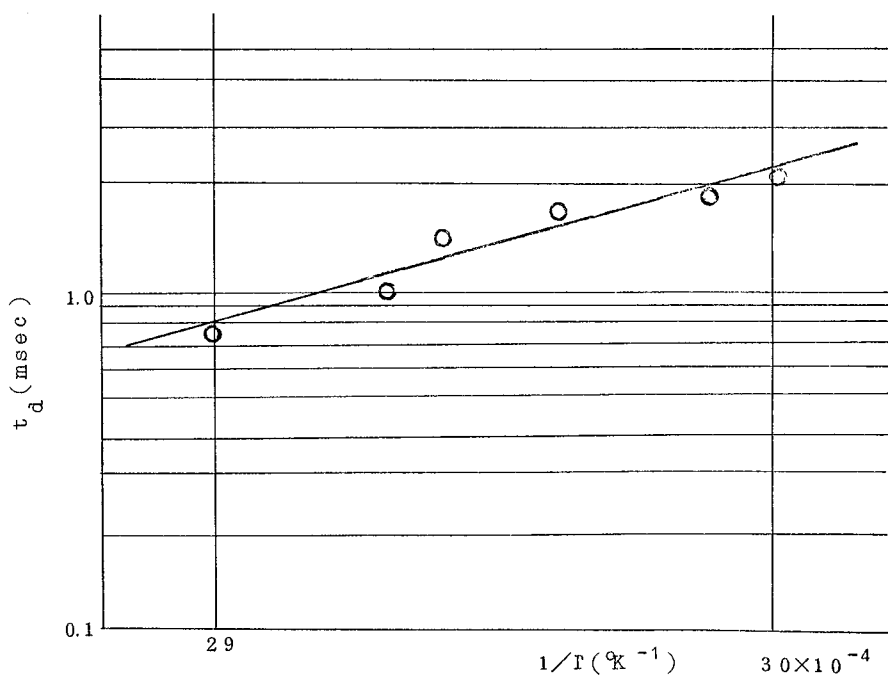


図6 t_d と $1/T$ の関係

ークカメラは容易に高速度の撮影が行なえ、しかも連続的に現象を追えるという長所をもつため、爆発、放電、プラズマなどの超高速現象の解析に有力な手段として使われている。ただしシャープなスリットを入れるため、現象の発生する位置を確実に押えられること、現象が線対称に成長することなどの使用上の制限条件がある。このため従来の均一温度場における気泡成長実験にストリークカメラを使用することは不可能であった。しかし、レーザービーム加熱によって定位置に気泡を発生できる本実験においては、これらの条件が満たされ、十分に使用しうることがわかる。図7に代表的な実験整理結果を示す。実験結果が斜線の領域で示されているのは、約±15 μm の読取り誤差があるためで、スリット幅を大きくとりすぎたことに起因するものである。一点鎖線は圧力一定としたPlesset & Zwickの理論式に気泡初生時の液体過熱度を代入して得られたものであり、実験とは大きく食い違っている。このことは、圧力変化に伴い液体過熱度が時間的に急増しているためで、十分予想されたことである。

第四章 圧力減少下における単一気泡成長速度の理論解析

均一温度場、圧力一定下における単一気泡の成長速度に関する理論的取り扱い、Plesset & Zwickをはじめとする多くの研究者によって行なわれている。しかし図7の実験結果からも明らかのように、これらの理論式では圧力急減少下での気泡成長速度を記述することは不可能である。圧力減少下での気泡成長の理論的取り扱いに関して最近2つの報告がなされた。これらは非線型の連立偏微分方程式を電算機により数値的に解いたものであるが、プログラミングが煩雑であり、計算時間も膨大となり実用的でない。また実験的補正係数を含むなど、物理的に不明な点もあり、多くの問題点がある。

以上のような観点に立ち、漸近成長域における理論表示式を解析的に導びいた。基礎式として以下の三つの方程式を導入する。

液体の連続の式

$$\rho_l r^2 U_r = (\rho_l - \rho_v) R_v^2 \cdot \dot{R}_v \quad (2)$$

液体の運動方程式

$$\ddot{R}_v + \frac{3}{2} \frac{\dot{R}_v^2}{R_v} + 4\gamma \frac{\dot{R}_v}{R_v^2} + \frac{2\sigma}{R_v^2 \cdot \rho_l} + \frac{P_\infty - P_v}{\rho_l R_v} = 0 \quad (3)$$

液体のエネルギー方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U_r \frac{\partial T}{\partial r} = D \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (4)$$

境界条件として

$$K \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=R_v} = \frac{L}{4\pi R_v^2} \frac{d}{dt} \left(\frac{4\pi}{3} \rho_v R_v^3 \right) \quad (5)$$

ここに、 r は気泡中心を原点とする球座標における液体中の任意の点、 U_r はその点における液体の速度、 ρ は密度、 R_v は気泡半径、 η は粘性係数、 σ は表面張力、 P は圧力、 T は温度、 D は温度伝導率、添字 \cdot は時間微分、 v は蒸気、 l は液体、 ∞ は無限遠方を表わす。

次に温度境界層厚さ δ を導入して 2 次の温度分布を仮定する。

$$T - T_l = (T_\infty - T_l) \left(\frac{2(r - R_v)}{\delta} - \frac{(r - R_v)^2}{\delta^2} \right) \quad (6)$$

(6) を (2)~(5) に代入し近似計算を実行する。最終的に次の微分方程式を得る。

$$3R_v \rho_v^2 \frac{dR_v}{dt} + \rho_v \dot{\rho}_v R_v^2 = \frac{6K^2}{L^2 D} \Delta T_{sat} \quad (7)$$

これを解いて、漸近成長域における表示式

$$R_v = \frac{2K}{L\sqrt{D}} \sqrt{\int_0^t \left(\frac{\Delta T_{sat}}{\rho_v} \right)^2 dt} \quad (8)$$

を得る。

第五章 本理論解析と実験結果との比較

このようにして得られた本理論式は次のような種々の利点を有している。理論式自体が非常に単純な形で表示され、かつ計算も手計算で実行できる。また式の物理的意味も明確であり実験的補正係数も含んでいない。実験結果との対応は図 7 に実線で示してあるが、両者の一致は非常に良い。

第六章 結 論

以下に本研究における結論を列記する。

- (1) 従来の均一温度場における気泡成長実験において、最も大きな障害であった単一気泡の発生手段を G.P.L ビーム加熱法により克服した。
- (2) G.P.L ビーム加熱法と衝撃波管方式減圧機構を採り入れたバブルチャンバの併用により、単一気泡の発生と成長現象を今迄にない高い精度で写真観察することに成功した。
- (3) 圧力一定下での気泡成長実験において、気泡の成長速度は、Plesset & Zwick の漸近成長域の理論式および本理論解析で圧力を一定とした理論式と非常に良く一致していた。
- (4) 圧力一定下での気泡成長実験において得られた気泡初生遅れ (G.P.L ビーム入射後、気泡が生成しだすまでの遅れ時間) と液体過熱度の間には負の相関があることを見出した。
- (5) 気泡初生遅れ t_d と液体温度 T (絶対温度表示) および液体過熱度 ΔT_{sat} の間に

$$t_d \propto \frac{1}{\Delta T_{sat}} \exp \left(\frac{H}{T} \right) \quad (15)$$

なる関係式が存在することを見出した。ここに、 H は相変化のための活性化エネルギーに相当する。

(6) G.P.Lビーム加熱による気泡発生手法においては、ストリークカメラの使用が可能であることをしめし、均一温度場、圧力急減下における非定常気泡成長現象を製作のストリークカメラにより超高速撮影することに成功した。

(7) その結果、圧力急減下での気泡成長速度は、従来の圧力一定下での理論式では記述し得ないことがわかった。

(8) 相平衡の仮定に立って、次式のような圧力減少下における気泡成長を記述する理論式を解析的に導びいた。

$$R_v = \frac{2K}{L\sqrt{D}} \sqrt{\int_0^t \frac{\Delta T_{sat}^2}{\rho_v^2} dt} \quad (52)$$

(9) 本理論式は、これまでに発表されている2つの理論解と比べて、多くの長所を有している。たとえば、実験係数を含まないこと、計算が非常に簡単なこと、式の物理的意味が明確であること、などである。

(10) 本理論式と実験結果との対応は非常に良好であった。また他の研究者の実験結果との対応も良好であった。

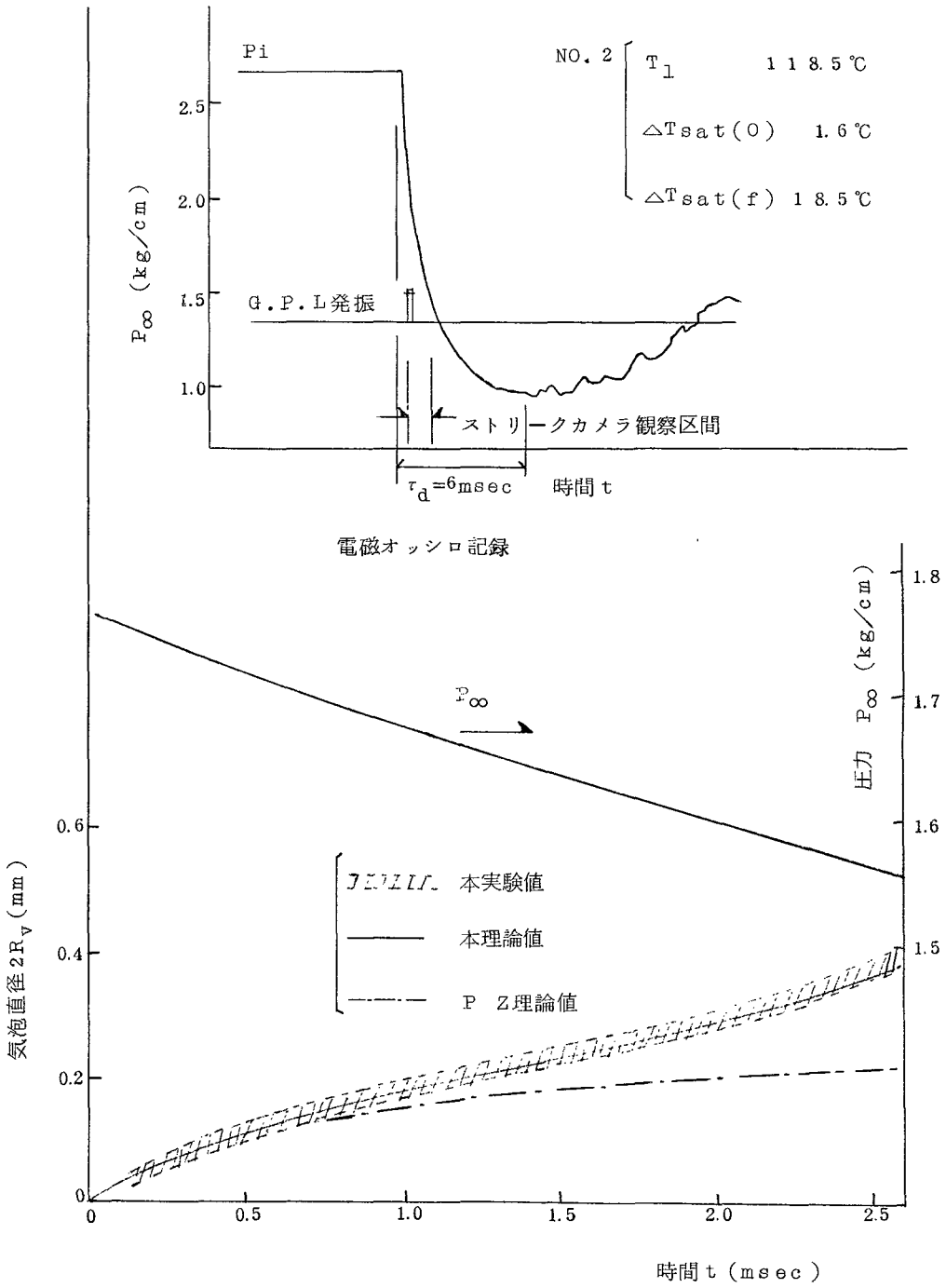


図7 気泡成長速度

審 査 結 果 の 要 旨

原子炉における熱発生は在来の熱機器の場合に比べ著しく大きい。したがって気泡発生と成長に関する過渡現象を高い精度で追求する必要がある。しかし従来均一温度場における単一気泡の発生と成長に関する実験的研究は、その技術的困難さのため極めて少なく、特にこのような条件における気泡発生と成長に関する実験としては見るべきものがない。

本論文は、バブル・チャンバーの原理に衝撃波管方式による減圧機構を採り入れ、液体中に任意の過熱度をもった均一温度場を実現し、さらにジャイアント・パルス・レーザー (G.P.L) を気泡発生トリガとして使用することによって時間的、空間的に極めて高い精度で気泡の発生と成長の現象を観測したもので6章からなる。

第1章は序論で本研究の意義および目的について述べている。

第2章は実験装置について述べている。従来技術的に困難とされていた均一温度場での単一気泡の発生と成長現象を高速度・高倍率で写真観察するために種々の新しい実験手法を開発している。すなわち、G.P.Lビーム加熱により単一気泡を発生させる手法、衝撃波管を用いてバブルチャンバー内液体圧力を急速に減少させる手法などは著者の独創によるものである。

第3章は実験およびその結果である。実験はG.P.Lビームを照射する時期によって、圧力一定下の気泡の発生実験、その成長実験および圧力急減下の気泡成長実験とに分かれる。圧力一定下での気泡の成長速度は精度がよく、従来の理論式と非常によく一致している。また種々の液体過熱度のもとにおける気泡発生の時間的遅れを測定し、液体過熱度と気泡発生遅れ時間との間に負の相関があることを見出している。また圧力急減下での気泡成長速度は従来の諸理論では記述し得ないことを見出している。

第4章は圧力減少下における気泡成長の理論解析である。

第5章は著者の理論式と実験結果との比較である。実験結果との対応は非常に良く、圧力減少下での適切な理論式が未だに提案されていないことを考えるとき、著者の提案した理論式は有用かつ興味深いものがある。

第6章は結論である。

以上のように本論文は均一温度場における気泡の発生と成長に関し、種々の新しい知見を加えたもので、原子炉工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。