

液体窒素中におけるレーザー生成気泡の挙動

—あまりに過激な蒸発—

東北大流体研

坪田 誠

1. はじめに

流体力学の分野で、昔からの重要問題の一つに Cavitation という現象がある。流体を高速で流すと、速度場の変動にともない大きな圧力変動が生じ、圧力が飽和蒸気圧より下がった場所から微細気泡群が発生するという、いわば液体の破壊現象である。例えば、船のスクリューが高速回転すると、その周囲に Cavitation が発生する。それだけならどうという事はないが、この気泡運動にともない生じる衝撃波の破壊力は、時には金属に穴を空けるほど激烈で、スクリューや船体の著しい損傷を引き起こす。そのため、古くから、Cavitation 発生条件、生成した気泡群の運動などに関する膨大な研究が行われてきた。気泡は液体の弱い部分から発生する事がわかっている。ここで、弱い部分とは、もともと液体中に溶解込んでいる空気泡や固体微粒子、また、固体境界壁での凸凹に潜んだ空気など（粘性流体は微細な穴を完全に埋める事が出来ない）の、気泡核と呼ばれる impurity を指す。

こうした Cavitation 研究の一端に、液体ヘリウム中での Cavitation、気泡生成の研究がある。

(1) この問題は以下のような二つの重要な意義を持っている。まず、液体ヘリウム中では気泡核が存在せず、Homogeneous Nucleation が期待できるという点である。ヘリウムというのは最も沸点の低い物質であり、その中で他の物質が気体となって溶けているという事はある得ない。また、固体微粒子も純化により除去できる。粘性のない超流動状態になれば、固体壁のどんな微細な穴にも潜り込める。つまり、Heterogeneous Nucleation を引き起こす impurity の候補が無いと言うのである。次に、この Nucleation は温度を下げていくと、Classical から Quantum への Cross Over（低温で Nucleation Rate の温度依存性がなくなる）が期待されるという点である。もし、理想的な Homogeneous Nucleation が起こるとすれば、その Cross Over は約 0.5K で起こると理論的に見積もられている。こうした興味深い目標の下、液体ヘリウム（超流動ヘリウム）での気泡発生の実験が行われてきたが、残念ながら、Homogeneous Nucleation も Quantum への Cross Over も観測されていない。これには幾つかの理由があるが、その一つは、超流動ヘリウムでは量子渦が気泡核となって Heterogeneous Nucleation が起こっているらしいという点である。液体に何らかの回転を加えると、Cavitation が起こり易くなる事が報告されていて、これは量子渦の関与を示唆している。量子渦自身、その芯の部分は周囲液体より圧力が下がった Defect なので、そこから気泡が発生する可能性はある。ただ、この実験は他にも不確定要素があり、まだあまり definite な事はわかっていない。量子渦が Homogeneous Nucleation を妨害するというのなら、それを逆手に取って、量子渦があるところで Cavitation を発生させ、量子渦の可視化をすれば面白いと個人的には思っている。

少々前置きが長くなったが、こうした事を念頭に置きつつ、液体窒素中の気泡発生の研究を行っている。詳しくは文献(2)、(3)を参照していただくこととして、ここでは概略を述べるにとどめる。

2. 実験装置

図1にクライオスタットの概略図を示す。クライオスタット本体は全長794mm、外径460mmのステンレス製で、その下部に設置されたアルミニウム製のテストチャンバー（内のり寸法105mm×105mm×110mm）を液体窒素が満たしている。気泡生成のためのレーザー光源として、パルス幅20nsのルビーレーザーを使用した。レーザー光はレンズホルダーによりテストチャンバー中央の焦点に集光され、単一球状気泡が生成される。このレンズホルダーの作成にはかなりの工夫を要した。水よりも蒸発潜熱の低い液体窒素は、僅かなエネルギー照射にも過敏に反応し、単一球状気泡の生成が困難となる。また、レーザー光の集光角が小さい場合には、焦点近傍で気泡群が発生してしまう。そこで、本研究では、レンズによりビーム径を拡大しつつもその中心部をカットし、大きい集光角を実現した。液温は白金抵抗温度センサーおよびクライオジェニック温度モニターで測定した。気泡の生成及び運動にともない生じる圧力波を圧力変換器により計測した。飽和状態での沸騰を防ぎ、かつ、気泡運動に対する圧力効果を調べるため、液体窒素を4.9kPaから147.1kPaまで加圧する。気泡運動は、Xeフラッシュを光源とし、イメコン超高速カメラで撮影した。

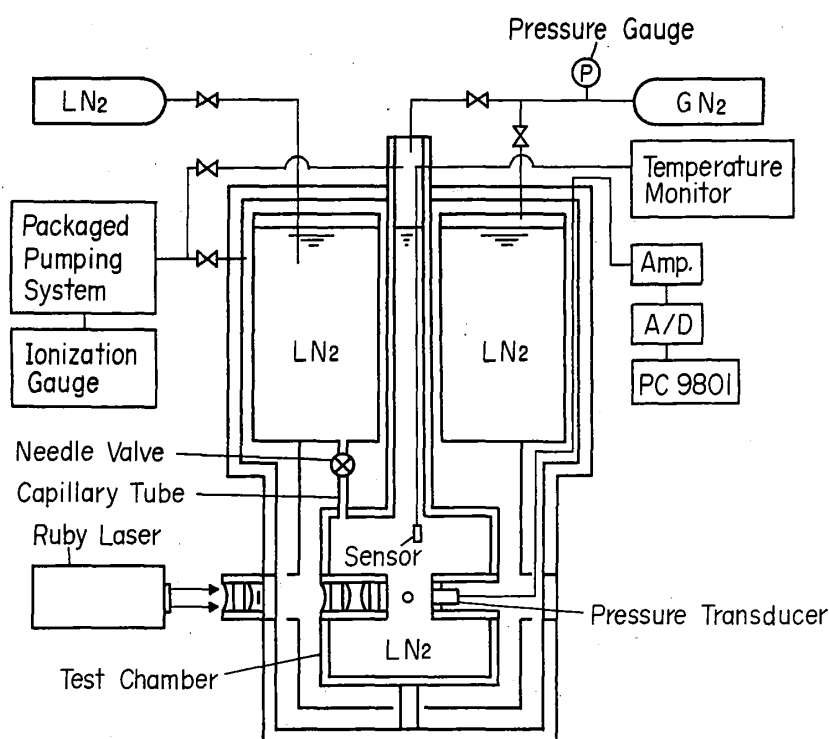


図1

3. 気泡の成長・崩壊と表面不安定

典型的な気泡の挙動のフレーミング撮影の結果を図2に示す。数字の順に運動が進行し、そのフレーム間隔は $10\mu s$ である。パルスレーザー光の集光によりルミネッセンスを放射して発生した気泡は成長し、8こま目で最大径に達した後、崩壊過程に転じる（図2(a)）。最大気泡半径 R_{max} は $0.85mm$ である。この後の挙動を図2(b)に示す。気泡は6こま目で最小となった後、リバウンドし、再び成長過程に転じる。注目すべきは、この再成長過程で気泡表面に発生する乱れである（気泡が黒くなっている）。この乱れは気泡の成長と共に増幅される。気泡は再び成長・崩壊過程を辿り、2回目のリバウンドを経た後、増幅された乱れのため、ついには微細気泡に分裂してしまう（図2(c)）。

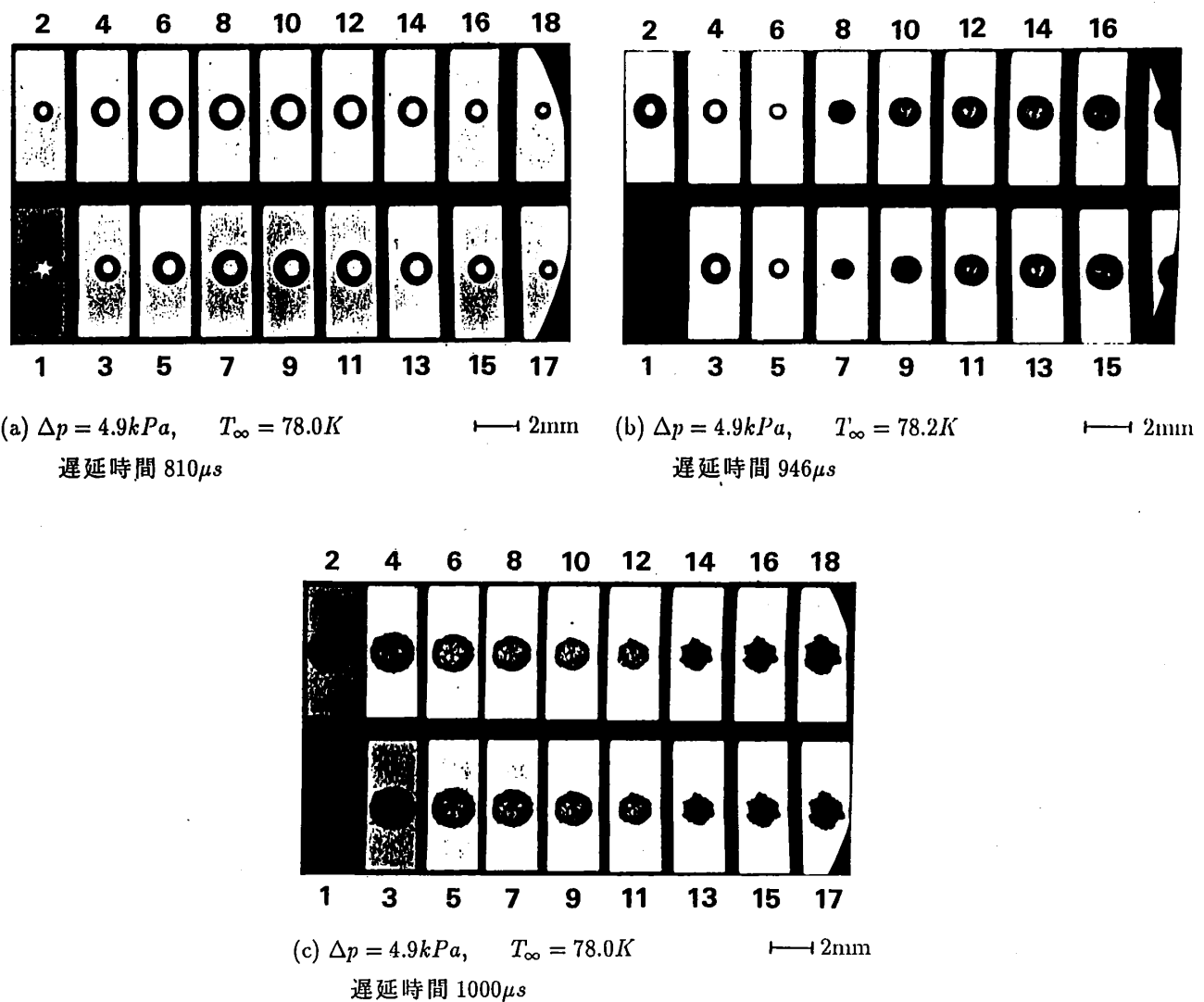


図2 気泡の挙動 (フレーム間隔 $10\mu s$, 露出時間 $2\mu s$)

4. 気泡運動にともなう圧力波

気泡運動のストリーク撮影、および発生する圧力波を図3に示す。横軸は時間で、上の写真で縦軸は気泡半径を表す（気泡が成長・崩壊を繰り返しているのがわかる）。下が、圧力変換器が計測した圧力の時間変化である。気泡の発生時、およびリバウンド時に高い圧力波が発生している事がわかる。

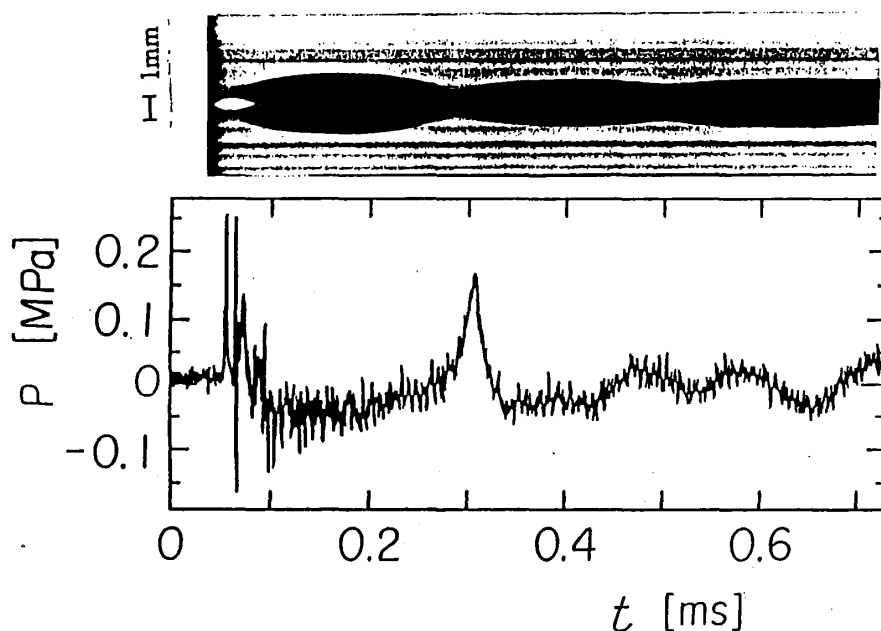


図3 液体：液体窒素, $\Delta p = 19.6 \text{ kPa}$, $T_{\infty} = 78.2 \text{ K}$

気泡運動の定量的評価、加圧の効果、常温水との比較等については、文献(2)、(3)を参照されたい。

参考文献

- (1) Maris, Balibar and Petterson, J. Low Temp. Phys., . 93 (1993) 1069.
- (2) Tomita, Shima, Tsubota and Kano, Proc. Sec. Int. Symp. Cavitation, (1994)311.
- (3) 坪田、富田、嶋、鹿野、日本機械学会論文集（出版予定）