He II流れにおけるキャビテーションの可視化および圧力変動

牧 正根[†], 石井 崇, 小林 清, 村上 正秀^{*}

筑波大学大学院 つくば市天王台 1-1-1 ([†]E-mail: maki@hotei.riko.tsukuda.ac.jp)

^{*} 筑波大学機能工学系 つくば市天王台 1-1-1

(1999年9月27日受理)

Visualization and Pressure Variation of Cavitation in He II Flow

Masane MAKI, Takashi ISHII, Kiyoshi KOBAYASHI and Masahide MURAKAMI^{*}

Graduate School, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba 305-8573

^{*}Institute of Engineering Mechanics and Systems, University of Tsukuba, 1-1-1Tennodai, Tsukuba 305-8573

(Received September 27, 1999)

Synopsis: The cavitation phenomenon in He II flow through a two-dimensional Venturi channel was investigated by visualization and pressure measurement. Liquid helium flow was made by shrinkage of bellows pump, and the cavitation was induced in the flow at the throat of the channel. The overview of cavitation can be observed through the optical windows of the cryostat, and was recorded by a high-speed video camera and a still camera. The pressure loss due to the flow through the channel was measured by a differential pressure transducer. By analyzing the pressure loss data, the static pressure at the throat of the channel could be estimated. Through this experiment, it was found that cavitation in He II flow has some unique characteristics different from ordinary fluids. Once cavitation is induced in an He II flow, it jumps suddenly to fully developed scale without the weak cavitation stage seen in other fluids.

Keywords: cavitation in He II, venturi channel, visualization, sudden pressure rise, λ -phase transition

1. はじめに

液体輸送機器の設計・制御において、キャビテーションは考慮しなければならない重要なファクターである。キャビテーションとは、液体中の静圧が流れの影響により極度に低下し、液体中に気泡の空洞（キャビティ）が生じる現象である。一般にキャビテーションの発生は、液体の輸送効率の低下や、振動、壊食、騒音などの悪影響をもたらす。液体ヘリウムを用いた冷却機器においても、小型軽量化のために流速が高められる傾向にあるが、その上限を決定する上でキャビテーションの発生には十分な配慮が必要である。

液体ヘリウムは極低温であるため、キャビテーションにとっては発生の原因とされている気泡核がほとんど存在しない特別な環境であるといえる。さらに超流動液体ヘリウム（He II）は超熱伝導性など通常の液体とは異なった特性を持ち、これらの特別な性質がキ

ャビテーションの発生にどのような影響を与えるのか、工学的にも物理学的にも興味を持たれる。

これまで液体ヘリウム流れに発生するキャビテーションの実験は、1980年代に液体ヘリウムを輸送する遠心ポンプやベンチュリ流量計の性能を調べる一環としてD.E. DaneyやP.L. Walstrom, Van Sciverらがやっている¹⁻³⁾。その結果として、He II流では通常の粘性流体であるHe I流とは異なり、キャビテーションの発生で流路内での圧力が大きく変化していることが捉えられた。特にベンチュリ流量計の実験ではキャビテーションの発生と同時に、スロート部の圧力が飽和蒸気圧へと不連続的に変化していることが発見された²⁾。一方、液体ヘリウムのキャビテーションの可視化実験については、公表されているものはあるものの⁴⁾、このような流れにおける特異な現象を、鮮明な可視化によって視覚的にその挙動を捉えた実験はまだ行われていない。

そこで本研究では、液体ヘリウム流におけるキャビテーションの様子を可視化し、また同時に圧力測定を行い、その挙動に関する特性を調べることを目的としている。

2. 実験装置・方法

本研究ではキャビテーションを発生させる方法として、装置が単純で可視化をするのに容易という観点から、Fig. 1 に示される2次元のベンチュリ型の流路を採用した。流路を流れる液体は、縮流部において流速が増すにつれベルヌイの法則に従い静圧が低下する。そしてさらに流速を増し、ある限界まで圧力が低下するとスロート部下流にキャビテーションが発生する。

Fig. 2, Fig. 3 に実験で用いたクライオスタットと装置主要部の概略図を示す。実験槽の液体ヘリウム温度は、蒸気圧レギュレーターによって制御されている。主要部はメタルベローズとベンチュリ流路から構成され、これらはすべて液体ヘリウム中に浸っている。流路の流れは、メタルベローズを収縮させて作る。ベローズは、それに直結したGFRP製のロッドをクライオスタット外部の電動アクチュエーター(IAI製)で駆動させることにより、一定速度で収縮させる。アクチュエーターの駆動速度は0~10 cm/sまで設定が可能で、ベローズの有効断面積が30.7 cm²に対しスロート部の断面積は15 mm²であるから、スロート部の流速は最大で約20 m/sとなる。ベンチュリ流路は2枚の石英ガラスに厚さ3 mmの整形真鍮板を挟んだ矩形断面の流路で、内部の流れが可視化できるようになっている。流れに外乱が加わるのを避けるため、流路内には圧力測定孔は設けていない。代わりに差圧計(Validyne製⁵⁾)につないだ測定孔を流路

の上流と流路下部の流れに影響を与えない箇所に設け、流れが流路を通る際の圧力損失について測定した。また、スロート部下流に生じるキャビテーション

Fig. 2 Illustration of the whole experimental apparatus.

Fig. 1 Two-dimensional Venturi channel.

Fig. 3 Illustration of the main parts of the experimental apparatus.

の様子は、流路の石英ガラスとクライオスタットに取り付けられた直径6 cmの可視化窓を通じて観察できる。実験ではその様子を、スチルカメラ、または高速ビデオカメラ（フォトロン製、FASTCAM）で撮影した。

3. 実験結果

3.1 代表的なキャビテーション発生の様子

Fig. 4 は実験で得られた代表的なキャビテーションの可視化写真である。(a), (b)はスロート部における流速が約6 m/s のとき, (c), (d)は約12 m/s のと

Fig. 4 Typical cavitation flows of liquid helium. Liquid helium flows downward. (a) He I: 2.30 K, $V_t=6.1$ m/s, $\rho gh_t=0.42$ kPa. (b) He II: 2.10 K, $V_t=6.3$ m/s, $\rho gh_t=0.41$ kPa. (c) He I: 2.30 K, $V_t=12.3$ m/s, $\rho gh_t=0.40$ kPa. (d) He II: 2.10 K, $V_t=12.3$ m/s, $\rho gh_t=0.42$ kPa. V_t , Velocity at the throat; ρgh_t , Hydrostatic pressure at the throat.

き、にそれぞれ発生した He I, He II のキャビテーションの様子である。(a), (b) の写真では両方とも流路右側の壁からキャビテーションが発生しているが、実際の発生場所、形態は流れている間、不規則に変化する。全体的な傾向として、He I のキャビテーションは(a)のように微小な気泡の集合によってキャビテーション流れが構成されているのに対し、He II のキャビテーションは(b)のように個々の気泡のサイズも大きくまた He I よりも広範囲にキャビテーションの領域が広がっていることが確認された。(c), (d) の写真は流速がさらに増加したときのもので、双方ともキャビテーションが流路全体に発達しているのがわかる。しかし、He II では(d)のように流路下流中央部で大きな気泡への合体が進行するのに対し、He I では(c)のように微小な気泡のままで拡流部を流れていく傾向が見られた。また(c)の He I では主流がスロート部からはく離しているが、He II では比較的一様なキャビテーションの流れを維持し、さらに流速を上げるまでこのようなはく離は見られなかった。

3.2 圧力損失の測定

差圧計の出力はベンチュリ流路の上流と出口の静圧の差から高さによる静水压を差し引いたものである (Fig. 3 参照)。Fig. 5 は He I, He II のそれぞれキャビテーションが発生した流れに対する代表的な差圧計の出力データである。流れは 0 秒で始まり約 2 秒で終わっている。この出力から上流と出口における流速の差を補正した値が流路全体の圧力損失となる。ここでは 2 つのデータの流速が等しいので、He II 流れの方が約 1 kPa ほど、損失が大きいと結論づけられる。

Fig. 5 Typical output signals of the differential pressure transducer. He I: 2.30 K, $V_t=8.2$ m/s, $\rho gh_t=0.41$ kPa. He II: 2.10 K, $V_t=8.2$ m/s, $\rho gh_t=0.40$ kPa.

また He II 流れには約 18 Hz の特徴的な圧力振動が見られるが、この振動はキャビテーション発生の有無にかかわらず λ 点以下の温度であれば、温度、流速にかかわらず、ほぼ同じ周波数で現れた。

Fig. 6 は流速を変化させて、圧力損失の平均値をスロート部における動圧に対し、プロットしたものである。流速の（つまり動圧の）増加にともない圧力損失は動圧に比例して増加している。キャビテーションが発生するまでは、He I, He II とも損失は全く同様に増加していくが、動圧が 3 kPa 前後（この辺りがキャビテーション発生の変移領域に当たる）になりキャビテーションが発生し始めると、He I では連続的に圧力損失が増加していくのに対し、He II ではキャビテーションの発生とともに損失が不連続に増加しているのが分かる。さらに流速を増加させた領域でも、He II 流れにおける損失は He I 流れより常に大きくなっている。これはキャビテーションがより発達した状態で発生していることを暗示し、前節の可視化の結果とも一致する。

3.3 キャビテーション発生時におけるスロート部の圧力変化

現象をさらに理解するため、スロート部における静圧について考察する。ベルヌイの定理よりスロート部とベンチュリ流路出口の全圧について次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} P_t + \frac{1}{2}\rho V_t^2 - \rho gh_t + L_t \\ = P_{out} + \frac{1}{2}\rho V_{out}^2 - \rho gh_{out} + L_{out} \end{aligned} \quad (1)$$

添字の t: スロート部, out: 流路出口, 記号の P : 静圧, ρ : 密度, V : 流速, g : 重力加速度, h : 液面からの深さ, とし, L_t, L_{out} はそれぞれ流路入口からスロート部, および出口までの圧力損失の総和とする。

Fig. 6 Relation between the dynamic pressure and pressure loss caused by flow through the channel.

L_t は一般の管内流における経験式⁶⁾を用いるとおおよそスロート部における動圧の5%程度になり、 L_{out} は前節における流路全体の圧力損失に対応する。また P_{out} は、液面にかかる飽和蒸気圧 P_s に、静水圧 ρgh_{out} を加えた圧力と等しいため、スロート部の圧力と飽和蒸気圧の差は次式で求まる。

$$P_t - P_s = L_{out} - \frac{1}{2} \rho (V_t^2 - V_{out}^2) + \rho gh_t - L_t \quad (2)$$

この結果をプロットしたものが **Fig. 7** である。この図より、He I、He II ともスロート部で圧力が飽和蒸気圧（細い点線で示した）より下回ってもすぐにはキャビテーションを起こしていないことが分かる。約1 kPa ほど下回るまで、いわば過加熱された状態で液体単相の流れを維持していることになる。そして流速が増し、さらに静圧が低下すると、He I では静圧が依然、低い状態のままでキャビテーションを発生する。これに対し He II ではキャビテーションの発生で静圧が初期温度に対する飽和蒸気圧付近まで急激に上昇回復しているのが分かる。前節に見られる不連続な圧力損失は、この過加熱された状態から急激にキャビテーションが発達する結果であるといえる。

本実験では、液体ヘリウムの他に液体窒素を用いた同様の実験も行った。その結果、液体窒素でも過加熱された状態からキャビテーションを発生したが、He I と同様、圧力は連続的に変化し、He II に見られるような初生（キャビティの発生）時における急激な発

達は見られなかった。

これらの結果から He II には、他の流体と比べ非常にキャビテーションが発達しやすい特性があるといえる。この原因として、He II の超熱伝導性の寄与が挙げられる。気泡の成長には蒸発潜熱が必要となるが、He II 中ではこの熱の供給が、気泡周囲の液体から瞬時に行われると考えられる。ただし初生それ自体に関しては、超熱伝導性よりもキャビティの元になる核の形成が重要なようで、この点では He I や液体窒素と同様であろうと推察される。

また工学的な視点からすると He II のキャビテーションは、飽和蒸気圧以下ですぐには発生しないものの、発生すれば瞬時に急激に成長するという点で、流体機器に幾つかの注意すべき影響を与えと考えられる。本実験で用いたようなペロウズポンプでは、キャビテーションの発生とともに急激な負荷がポンプにかかることになり、また下流において体積流量が増すことで突然激しい流れに遷移することが懸念される。一方、体積流量一定のポンプでは、顕著に液体輸送量が減少してしまうことにつながる。また大きなキャビティの突沸や消滅は強烈な衝撃を管内にもたらし、流体機器の寿命までも著しく縮める恐れもある。

3.4 キャビテーションによるλ相転移

温度を変化させて何回か実験を行った結果、He II の温度領域で起こるキャビテーションはすべて類似した挙動を示した。これに対し He I においては、λ点付近の温度であたかも He II におけるようなキャビテーションの挙動が見られた。Fig. 8, Fig. 9 に 2.18 K でのキャビテーションの代表的な可視化写真、差圧計の出力データを示す。He II のみに見られる 18 Hz 程度の特有な圧力振動は見られず、圧力孔がある流路上流においては確かに、まだ He I のはずである。しかしこの流速にしては、キャビティ全体の占める領域が広く、それに圧力値も高く、キャビテーションが He II の場合のように発達しているのが分かる。Fig. 10 は 2.18~2.30 K において、Fig. 7 と同様にスロート部の圧力を見積もったプロットである。これより、キャビテーション発生時において、2.3 K では連続的に変化していた圧力が、温度が低下するにつれ徐々に不連続な圧力上昇の傾向を強め、He II におけるキャビテーションの状態（ここでは 2.18 K）へと遷移していくのが分かる。この原因は、キャビテーションの発生・発達時に、気化に必要な潜熱が液体から奪われることで流体が冷却され、λ点付近の He I 流れでは局

Fig. 7 Estimation of differential pressure between the pressure at the throat and the saturated vapor pressure. The bars indicate that the differential pressure fluctuates during some experimental runs.

Fig. 8 Typical cavitation flows of He I at an initial temperature of 2.18 K. He I is supposed to be converted to He II downstream of the throat. $V_t = 6.1$ m/s, $\rho gh_t = 0.33$ kPa.

Fig. 9 Output signal of the differential pressure transducer for He I flow at an initial temperature of 2.18 K. $V_t = 8.2$ m/s, $\rho gh_t = 0.36$ kPa.

所的に He II への λ 相変化が起きたためと思われる。実際、潜熱の値は大きく、わずかな蒸発により λ 点付近までの温度低下は十分考えられ、今後、温度測定や数値計算で定量的に確認していきたい。

4. ま と め

ベンチュリ流路内の He II 流れにおいてキャビテーションを発生させ、その様子を可視化し、同時に圧力測定および解析を行った。その結果、He II 流におけるキャビテーションの特徴として以下の点が挙げられる。

Fig. 10 Estimation of the pressure at the throat during He I flow.

- 1) 大きな気泡で構成され、流路中を広範囲に発達する。
- 2) キャビテーションの発生とともに流路全体の圧力損失は不連続に上昇する。
- 3) 流れの静圧は、液体単相の状態を維持しながら飽和状気圧以下まで減少するが、キャビテーションの発生とともに飽和状気圧付近まで一気に上昇回復する。
- 4) λ 点近傍の He I 流においても、He II 流におけるようなキャビテーションが見られ、局所的に温度が低下したことによる He II への λ 相変化が考えられる。

1~3) はすなわち、He II 流におけるキャビテーションは他流体と比べ著しく成長しやすいことを示し、今後はこの原因の具体的な解明に向けて研究を進めていく予定である。

参 考 文 献

- 1) P.R. Ludtke and D.E. Daney : Cryogenics 28 (1988) 96
- 2) P.L. Walstrom, J.G. Weisend II and S.W. Van Sciver : Cryogenics 28 (1988) 101
- 3) D.E. Daney : Cryogenics 28 (1998) 132
- 4) M.S. Pettersen, C. Naud, S. Balibar and H.J. Maris : Physica B 194-196 (1994) 575
- 5) A. Kashani, R.A. Wilcox, A.L. Spivak, D.E. Daney and C.E. Woodhuse : Cryogenics 30 (1990) 286
- 6) 低温工学協会：超電導・低温工学ハンドブック、オーム社 (1993) 271