

氏名・(本籍) さとうとしみ  
佐藤敏美

学位の種類 理学博士

学位記番号 理博第 994 号

学位授与年月日 昭和 61 年 6 月 25 日

学位授与の要件 学位規則第 5 条第 1 項該当

研究科専攻 東北大学大学院理学研究科  
(博士課程) 物理学第二専攻

学位論文題目 超流動 He II の断熱流の研究

論文審査委員 (主査)  
教授 大塚 泰一郎 教授 都築 俊夫  
助教授 佐藤 武郎

# 論文内容要旨

超流動ヘリウムの様々な特異なふるまいの中でも際立っているのは、ある条件下では粘性なしに流れるという超流動性である。しかしこの性質は、ある流速を境に Vortex (渦) がヘリウム中に生ずることで、破れる。我々は図 1 に示した装置を用い、Vortex が存在する状態における細管内の超流動 He II の断熱流の研究を行なった。

超流動ヘリウムの流れは、二流体モデルによる二流体力学で記述されることが知られている。これは、超流動ヘリウムをエントロピー、粘性とももたない超流動成分と、エントロピー、粘性を持つ常流動成分の混合液と考えるモデルである。さてこのモデルによると、常流動成分の運動方程式は、定常状態において次の式で表される。

$$0 = -\frac{\rho_n}{\rho} \frac{dp}{dx} - \rho_s S \frac{dT}{dx} + F_{sn} - F_n$$

又細管内を流れるヘリウムに対するエネルギー保存則より、次の関係式を得る

$$V_n = \frac{\Delta p V - V \int_{T_A}^T S dT + K \frac{dT}{dx}}{ST}$$

ここに、 $\rho_n$  : 常流動成分密度、 $\rho_s$  : 超流動成分密度、 $\rho$  : 密度、 $V$  : 流速、 $S$  : エントロピー密度、 $F_{sn}$  : 相互摩擦力、 $F_n$  :  $\rho_n$  の粘性力、 $V_n$  : 常流動成分の流速、 $\Delta p$  : 流れによる圧力差、 $T_A$  : チェンバーの温度、 $K$  : 熱伝導度である。我々は以上の 2 式によって流れを理解する。そのために必要な温度分布 (図 2)、流れによる圧力差  $\Delta p$  (図 3)、熱伝導度に (図 4) を測定した。そして、 $\Delta p$ 、 $K$  の値と上の 2 式を基に温度分布を計算し、温度分布の測定結果の再現を試みた。ただし  $F_n$  としては乱流状態にある通常流体について成り立つ式を用いた。 $\rho_n$ 、 $\rho$ 、 $S$  についてはこれまでに測定されている値を利用した。

我々の対象とする断熱流では、熱を加えて作られる熱対向流などと異なり、流れの状態を決める上で相互摩擦力  $F_{sn}$  が重要な寄与をもつ。従って温度分布は  $F_{sn}$  の形によって大きく左右される。これまで  $F_{sn}$  としては、 $\rho_s$ 、 $\rho_n$  間の相対速度の 3 乗に比例した Gorter - Mellink 力が広く受けいれられている。しかしながら我々の温度分布の計算では Gorter - Mellink 力では測定結果を再現することができず (図 5、破線)、定数  $L_0$  をパラメータとした相対速度に比例した  $F_{sn}$  で測定をよく再現することができた。(図 5、実線)  $L_0$  はヘリウム単位体積中の vortex 密度を表している。計算と測定の最も良い一致を与える  $L_0^{1/2}$  を流速に対してプロットした。(図 6) 図で特徴的なことは、 $35 \text{ cm/s} \leq V \leq 55 \text{ cm/s}$  で  $L_0^{1/2}$  が  $V$  によらずにはほぼ一定の値をとることである。チェンバーの温度  $T_A$  の流速依存性を図 7 に示した。我々の系では、流れによって冷却の生じることが特徴である。さて図 7 でみると  $L_0^{1/2} = \text{一定}$  の領域は温度降下が急な所からゆるやかな所への境目に対応している。一方圧力差の結果図 2 との比較でみると、 $V \geq 55 \text{ cm/s}$  の領域では  $\Delta p \propto V^{1.75}$  (実線) の依存性を持っている。これらの対応は全て流れの状態の変化によって説明できるものと考えられる。

結論として、我々はヘリウムの断熱流を二流体力学でどのように理解できるかということを取り上げ、理論式と実験の比較のために温度分布、流れによる圧力差、熱伝導度を測定した。その結果、 $F_{sn}$ としてこれまでに受け入れられている Gorter-Mellink とは全く異なる、相対速度に比例した項を仮定することにより、 $\sim 100 \text{ cm/s}$  という高速流域まで実験をよく再現できることを見出した。

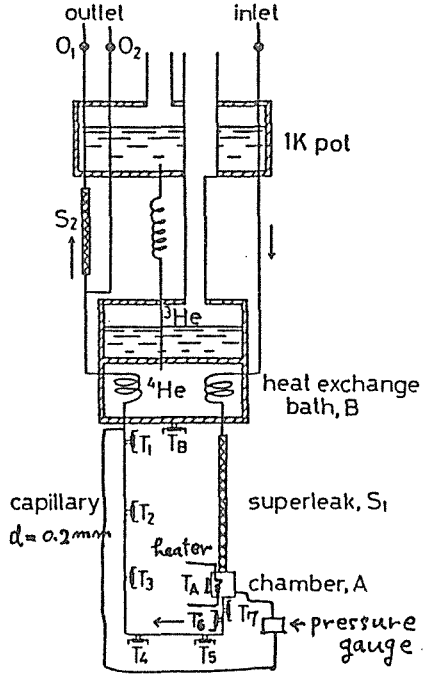


图1 装置

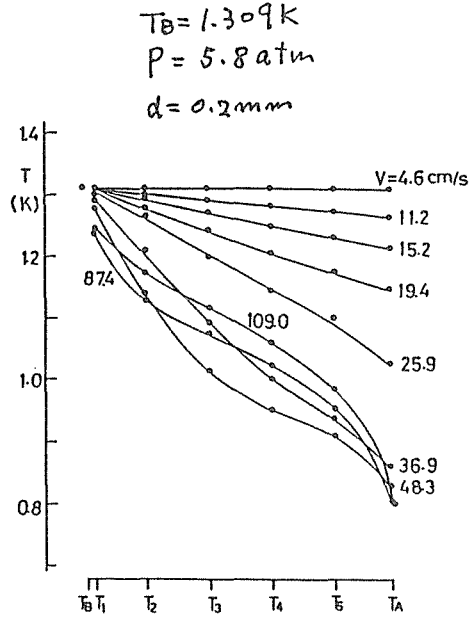


图2 温度分布

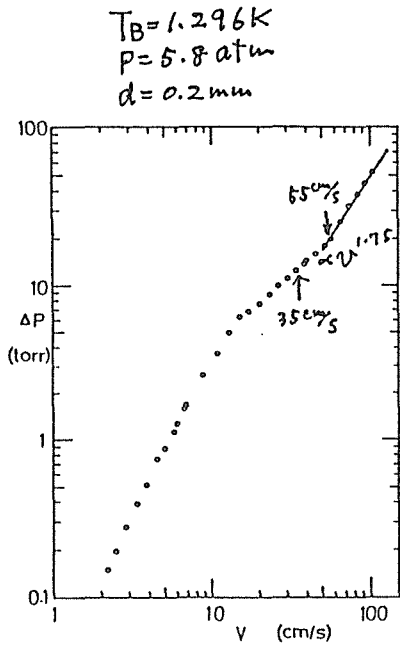


图3 压力差

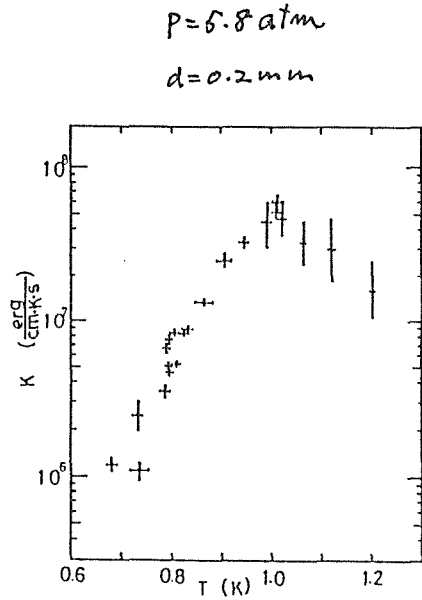


图4 热伝導度

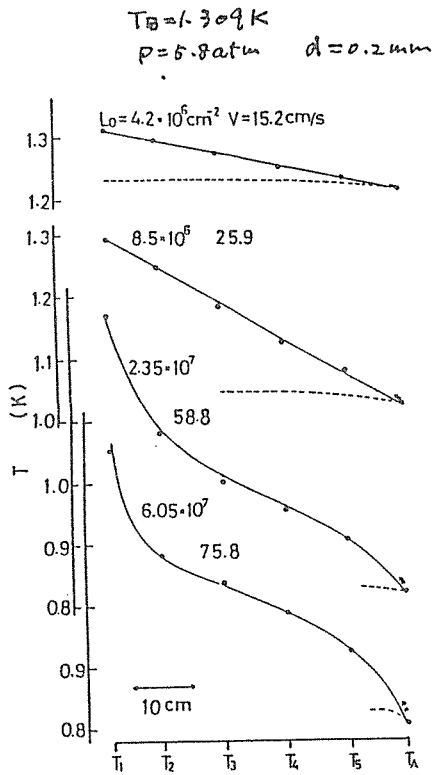


図5 温度分布計算結果

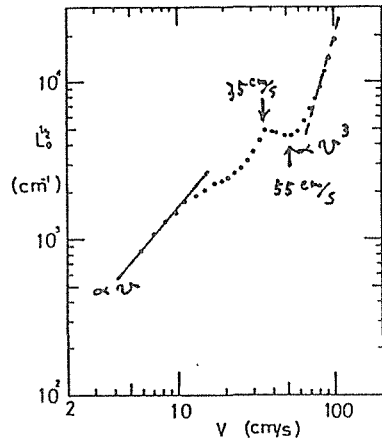


図6  $L_0^{1/2}$  v. s. V

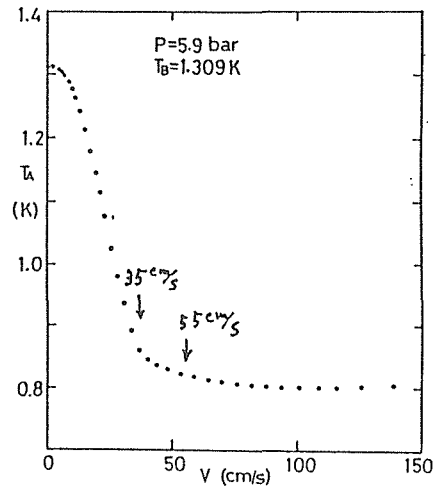


図7  $T_A$  (チャンバーの温度) の流速依存性

## 論文審査の結果の要旨

液体ヘリウム ( ${}^4\text{He}$ ) は 2.17 K で超流動状態 (HeII) に転じ、粘性を失うことが知られている。HeII の基本的性質は HeII が粘性とエントロピーをもたない超流動成分と粘性とエントロピーをもつ常流動成分よりなるとする 2 流体モデルでよく説明出来る。HeII の流速がある臨界値を越えると、超流動成分が渦糸を形成し、渦糸と常流動成分間の相互作用によって超流動成分も摩擦力をうける。

渦糸を介しての常流動・超流動成分間の相互摩擦力  $F_{sn}$  は常流動成分と超流動成分が全質量流速をゼロに保って反対向きに流れる熱対向流の実験から相対速度  $|V_S - V_N|$  の 3 乗に比例することが知られていた。ここで  $V_S$ ,  $V_N$  は超流動・常流動成分の速度である。熱対向流に対し、超流動成分しか通さないスーパーリーク (SL) を通して細管に HeII を断熱的に流す流れを断熱流という。いま SL の入口と細管の出口の温度を  $T_B$  に保つと断熱流では SL の出口に全流速  $V$  に依存する冷却効果が生じ、ある流速以上で一定の低温度  $T_A$  におちつくことが知られている。本研究はこの冷却効果が細管内の HeII の流れ状態に密接に関係していることに注目し、細管 (長さ 50 cm, 直径 0.1~0.2mm) にそっての温度分布、細管両端の圧力差を全流速  $V=0\sim 100\text{ cm/s}$ , 温度  $T_A = 0.63\sim 1.3\text{ K}$  の広い範囲にわたって測定し、さらに冷却効果を利用して従来測定が不可能とされていた HeII の熱伝導率を測定し、解析したものである。相互摩擦力の相対速度 3 乗則は HeII 中の単位体積当りの渦糸の長さ  $L_0$  が  $(V_N - V_S)^2$  に比例することによって説明出来るが、この結果を用いた解析は観測された温度分布を全く説明出来ない。しかし  $L_0$  が相対速度でなく、全流速  $V$  に依存するという新たな考えを導入すると複雑な温度分布が美事に説明出来ることが明らかにされた。さらに  $L_0$  は低流速領域では  $V^2$  に比例し、高速領域では  $V^0$  に比例し、冷却効果と密接な相関があることを見出した。これらの結果は、熱対向流と異り、断熱流では渦糸生成に管壁との相互作用が重要であることを示唆しており、HeII の流れ状態に新しい重要な知見を加えるものである。

以上のように HeII の断熱流の詳細な研究を通し、超流動・常流動成分間の相互摩擦力に対し、従来とは全く異なる新しい機構の存在を明らかにした本論文は高度の内容をもつもので、佐藤敏美が自立して研究活動を行なうに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。よって佐藤敏美提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。