

氏名	おお  た  しゅう の すけ 太 田 正 之 輔
授与学位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭 和 57 年 3 月 10 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最終学歴	昭 和 46 年 3 月 大阪大学大学院理学研究科 物理学専攻修士課程修了
学位論文題目	超流動液体ヘリウムにおける熱伝播機構の研究
論文審査委員	東北大学教授 沢田 康次    東北大学教授 武内 義尚 東北大学教授 脇山 徳雄

## 論 文 内 容 要 旨

超流動性をもつことで知られる液体ヘリウムを対象にして熱伝播機構を解明するため、液体中の熱伝播機構、気相-液相界面を通しての熱伝播機構及び 2 つの相界面を通しての新しい熱伝播機構の研究を行った。

液体ヘリウム中の熱伝播が第 2 音波によって記述されることは良く知られているが、エントロピー波の性質をもった第 2 音波がエントロピーをもたない超流動体の流れによって受ける影響を調べるため第 2 音波の超流動流による随伴の研究を行った。実験では定常的な超流動流の中を伝播する第 2 音波の音速を測定し、図 1 に示されるような温度依存性をもった超流動流による第 2 音波の随伴係数  $\alpha_2$  を得た。液体ヘリウムに対する 2 流体方程式から超流動流速  $V_s$ 、常流動流速  $V_n$  の流れの中を伝播する第 2 音波の音速  $u_2$  は次式で与えられる。

$$u_2 = C_2 + \left( 2 - \frac{S}{\rho_n} \frac{\partial \rho_n}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial S} - \frac{\rho_n}{\rho} \right) (V_n - V_s) + V_s \quad (1)$$

ここで  $C_2$  は流れのない場合の第 2 音速、 $S$  はエントロピー、 $\rho$  と  $\rho_n$  は液体ヘリウムと常流動成分の密度である。第 2 音波は  $V_s$  によってガリレイ交換に従う随伴を受けるが、 $V_n - V_s$  で表わされ

る液体ヘリウム内部励起がもつ分布関数のドリフトによっても随伴を受けることが示されている。第2音波が励起ガスの断熱圧縮波として記述されることから、ボルツマン方程式を用いて随伴係数を考察することが出来る。その結果  $V_n - V_s$  にかかる随伴係数の2項目は励起スペクトルに依存し、密度保存が成り立つロトン励起や粒子的なスペクトルをもつ素励起では1を与えることが判明した。又3項目の  $\rho_n / \rho$  は固体の第2音波にはない超流動成分をもつ液体ヘリウム特有の項で、第2音波伝播に伴う空間的な速度変化をもった超流動流の中を素励起が伝播する際受けるエネルギー変調いわゆるドップラー効果に起因していることが明らかとなった。ロトン励起

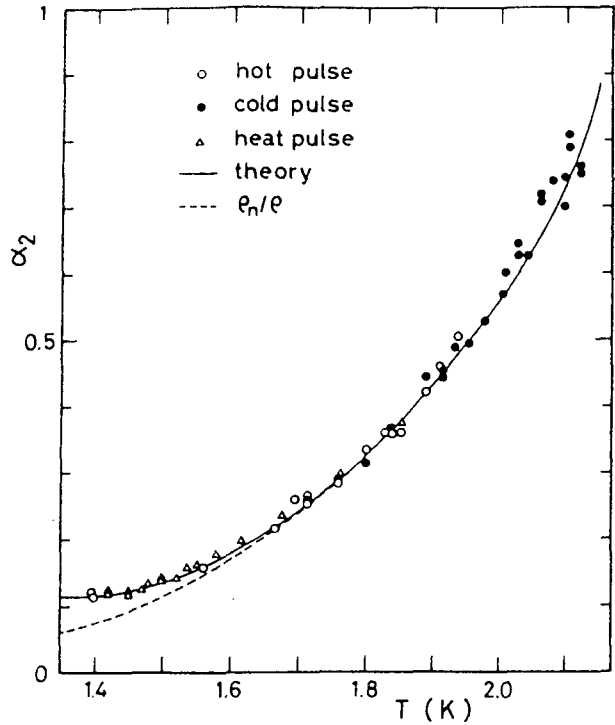


図1 第2音波の随伴係数

の寄与が大きい1.7 k以上の温度では  $\alpha_2 = \rho_n / \rho$  となり、理論と実験との良い一致が得られた。

気相と液相に分離した系の相界面を通しての熱伝播機構を解明するには、蒸発、凝集という潜熱を伴った相転移現象の微視的な機構を理解しなければならない。このため相界面の微視的な構造や界面量子状態の知識を得ることが重要な課題となっている。純粋  $^4\text{He}$  の相界面に比べ  $^3\text{He}$  を不純物として混入した系での界面状態については表面張力の実験等から比較的良く研究されており、 $^4\text{He}$  の界面状態を調べる目的で  $^3\text{He} - ^4\text{He}$  混合系の蒸発、凝集の研究を行った。図2には蒸発によって生ずる気相の圧力変化  $\Delta P$  と凝集によって生ずる単位圧力当りの液相の温度変化  $\Delta T / \Delta P$  の  $^3\text{He}$  濃度依存性が示してある。

$\Delta P / \Delta P_4$  は液相の濃度  $X_l$  に比例し、 $(\Delta T / \Delta P) / (\Delta T / \Delta P)_4$  は気相の濃度  $X_g$  に比例しているが、両者の比例係数は一致せず単に  $^3\text{He}$  と  $^4\text{He}$  の潜熱の違いだけでは実験を説明することは出来ない。図3に示すように、界面状態を占有している  $^3\text{He}$ 、 $^4\text{He}$  準粒子と気相との間で蒸発、凝集が行なわれるモデルを作り、又気相と液相とが非平衡状態にある場合の境界条件には界面に接する気相に境界層を考えるとという純粋  $^4\text{He}$  で用いられたモデルを混合系に拡張して実験を解析した。その結果  $^3\text{He}$  濃度について界面と液相との比で表わされる濃縮率は8.2となり表面張力の実験から得られた値8.0と良い一致が得られた。又界面における  $^3\text{He}$  粒子の束縛エネルギー  $\Delta_3$  については

濃縮率とは独立に 5.1 k の値が得られ、表面張力の実験では濃縮率から Andreev のモデルを用いて計算される値 5.07 k と一致しており、Andreev モデルの実験的検証を与える結果が得られた。一方表面準位を占有する  $^4\text{He}$  準粒子数に関しては、表面の  $^3\text{He}$  準粒子数には依存せず、液相の  $^3\text{He}$  濃度程度しか影響されないこと、すなわち  $^4\text{He}$  が有する表面状態の自由度とが競合しない別の自由度に属することが示された。

ヘリウム膜を伝播する膜厚変化の波は第 3 音波と呼ばれているが、第 3 音波の伝播に伴ってヘリウム膜は気相と蒸発、凝集による熱交換を行い、膜は等温化されている。平行な 2 枚のヘリウム膜を向い合わせ、蒸発、凝集の効果が互いに影響しあうほど近づけたなら、第 3 音波とは違った新しい機構による熱伝播の可能性をもった音波が伝播するであろう。このような観点から行ったのがヘリウム膜の第 5、第 6 音波の研究である。蒸発、凝集によって結合した 2 枚のヘリウム膜に対する運動方程式を解くなら蒸発、凝集の効果が弱められた音波（第 5 音波あるいは S-mode）と強められた音波（第 6 音波あるいは e-mode）とが伝播することが示される。結合強度が完全である場合には、2 つの音波の音速は次式で与えられる。

$$C_{3,A}^2 = C_3^2 + C_5^2 \quad (2)$$

$$C_6 \simeq C_3 \quad (3)$$

ここで  $C_3$ 、 $C_5$  は第 3 音速、第 5 音速で膜厚が十分厚い時は  $C_5^2 = (\rho_n / \rho) C_2^2$  となる。(2)式は蒸発、凝集の効果が完全に無視された断熱的な波を示し、(3)式は蒸発、凝集の効果が第 3 音波より 2

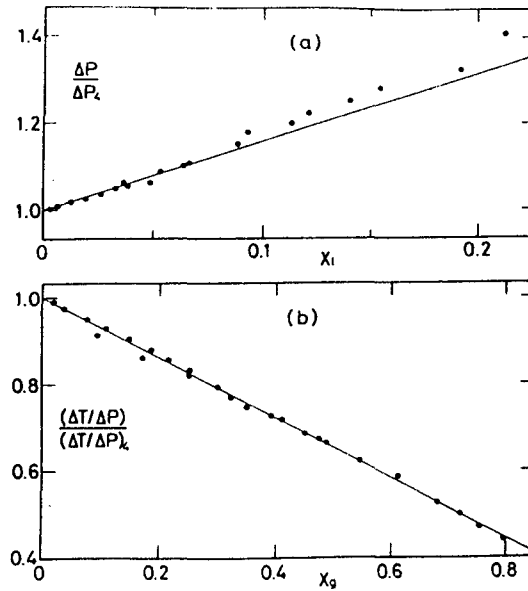


図 2 信号振幅の濃度依存性  
(a) 圧力信号振幅 (b) 温度信号振幅

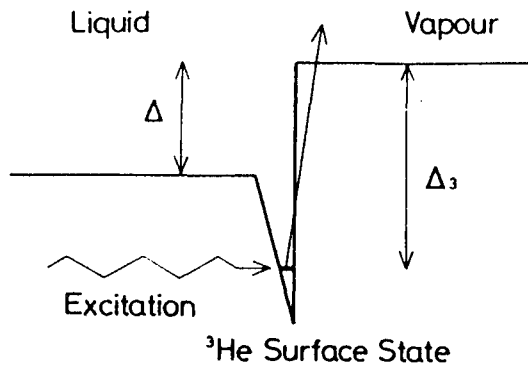


図 3  $^3\text{He}$  の蒸発機構

倍大きく作用した波を示しているが、等温化の効果が第3音波でも十分大きいため近似的に第6音速と第3音速とが等しくなっている。鏡面仕上げをした2枚のパイレックス板を1.4  $\mu\text{m}$ の隙間で向い合わせた実験装置を用い、5 KHz 正弦波の半周期で音波を励起した場合、図4に示されるような音速の異なる2つの信号が観測された。第3音速と一致することから e-mode で示される信号が第6音波、又これより大きい音速をもつ s-mode で示される信号が第5音波である。新しい伝播機構をもった第5、第6音波の存在が予言され、実験的にこれが検証された。

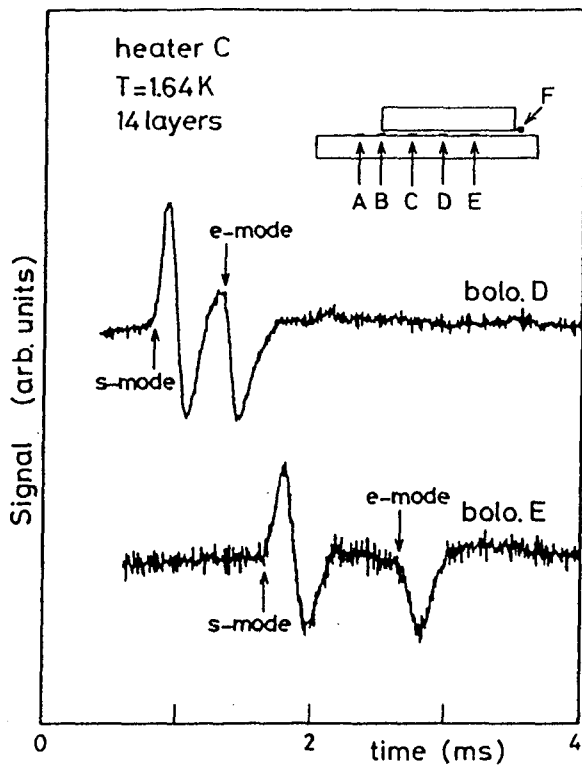


図4 第5、第6音波の受信信号

## 審査結果の要旨

液体ヘリウムは超流動性を示す唯一の液体として多くの基礎的研究がなされてきた。しかし液体ヘリウムと気相や固相との界面を通しての熱の伝播の微視的機構についてはまだ理解されておらず興味ある研究対象として残されていた。一方、超伝導エレクトロニクスをはじめとする低温工学の分野においても液体ヘリウムが冷却剤として利用されるようになり、液体ヘリウムを介しての熱の伝播機構をしらべて冷却効果をあげることが要求されるようになった。

著者は、液体ヘリウム中の熱の伝播に対する超流動流の影響、液相-気相界面を通しての熱の伝播機構を研究し、更に2つの液体膜が蒸発・凝集を通して相互作用するとき、新しい熱伝播モードが存在することを予言してそれを検証した。本論文はそれらの成果をまとめたもので、全文6章よりなる。

第1章は緒論であって、本研究の背景と目的を述べている。第2章では超流動ヘリウム中を伝わる熱の伝播モードについて、従来確認されていた第1音波から第4音波迄の概説を行い、著者が発見した新しいモードである第5音波と第6音波を理論的に導出し、その予想される性質を記している。

第3章では、熱波またはエントロピー波である第2音波が、本来エントロピーを持たないはずの超流動流に随伴されて速度を増す機構について研究し、その随伴係数は1.6 k 以上においてはヘリウム中の常流動成分に比例することを確認した。

第4章では、従来ミクロな機構が全く知られていなかった気相-液相界面を通しての熱伝播をしらべるために、ヘリウム中にその同位元素である $^3\text{He}$ を微量混入し、熱パルスによって気相中にとび出す蒸発粒子の圧力と温度を測定した。著者はその結果を用いて表面状態にある原子が液体中の熱励起を吸収して気相にとび出すことを示し、そのミクロな素過程が生じる確率及び相界面の表面状態に関して有用な知見を得ている。

第5章では、近接した2つの液体膜の間を蒸発凝集をくり返しながらかつて伝播する新しいモードについての第2章で得られた理論的予測を裏づける実験結果について記している。この新しい熱伝播モードの発見は、蒸発凝集過程や2次元超流動現象を解明する上で新しい手段を提供したばかりでなく、稠密化する電子デバイスの冷却効果に対して新しい知見を与えるものとして高く評価される。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文は液体ヘリウムを介する熱の伝播機構について基礎的研究を行い数多くの新しい知見を得たもので、物性工学、低温工学に資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。