

ねじれ振子における量子渦糸の生成

岡山理科大学・理学部

藤井佳子、信貴豊一郎、小川智之

重松利信、中村改樹、山口稔

1、はじめに

超流動ヘリウムの入ったバケツを回転させるとき、角速度 Ω がある臨界値を超えると回転軸に平行な方向に並んだ渦糸が生じ、その本数は単位面積あたり $2\Omega/\kappa$ で与えられる。ここで $\kappa = h/m$ (h : プランク定数、 m : ^4He 原子の質量) であり、超流動ヘリウム中の渦度は κ を単位として量子化されている。¹⁾一方、細管中に超流体と常流体の熱カウンター流を生じさせた場合、両者の相対速度がある臨界値を超えると渦糸が発生する。この渦糸は細管中で複雑に絡み合った状態になっていると考えられている。²⁾

さて、1 KHz程度の周波数で、しかも $1\ \mu\text{m}$ 程度の僅かな振幅で振動する容器中の超流動ヘリウムには、どのような状態の渦糸が生じるであろうか。我々は、高いQ値をもつねじれ振子を使って、その固有振動数の変化を測定することにより渦糸の生成の様子を調べた。

超流動 ^4He 中の渦糸についての理解は、渦糸密度が十分大きい場合にはかなり深まってきたが、^{1, 2)}渦糸はいかにして発生するのかという問題については、未だ分からない点が多い。

2、測定と結果

測定装置の構造を図1に示す。全体は、黄銅ブロック、トーションロッド、サンプルセル、バイアス電極、ドライブ電極、ディテクト電極よりなりたっている。黄銅ブロックは振子のねじれ運動の支点となるものであり、振子のねじれ軸に対する黄銅ブロックの慣性能率は、振子の慣性能率と比べて3桁以上大きく作ってある。トーションロッドは振子のQ値を決める重要な部分であり、BeCuを加工後熱処理して剛性率を高めた。円筒状のサンプルセルは、後述するようにサイズを変えて測定した。基本となるサイズは、内径16 mm、高さ16 mmである。セルはエポキシ樹脂スタイキャスト1266で製作し、旋盤加工後、内壁にスタイキャスト

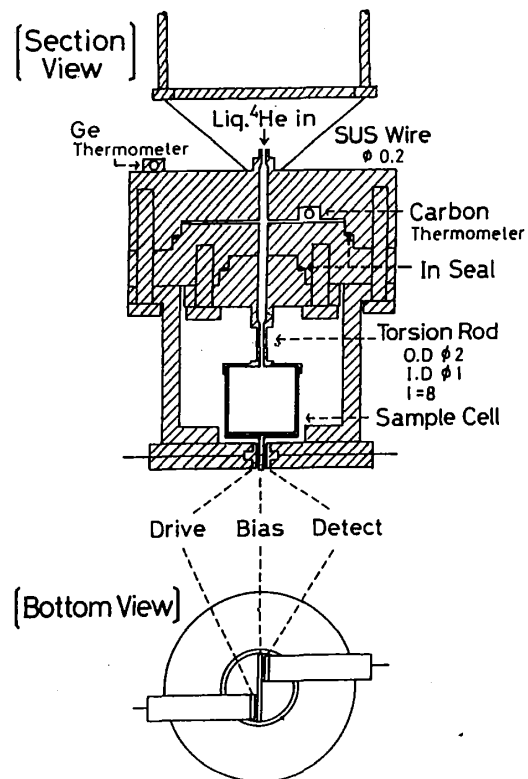


図1 測定セル

1.266を塗って滑らかな壁面とした。ドライブおよびディテクト電極は、バイアス電極との間隔を狭く保って黄銅ブロックにビスで固定し、組立後カプトン膜を使って間隔を測った。サンプルセルの温度測定は、ゲルマニウム温度計と液体 ^4He に浸されているカーボン抵抗温度計で行った。

振子を自動振動させ、その固有振動数を測定する電気回路を図2に示す。ドライブ電圧を変化させると、セルの振幅が変わる。セルの振幅は、ディテクト側に流れる電流とバイアスディテクト電極間の間隔より求められ、振幅と振動数よりセルの壁の平均速度がわかる。

初め、セルが空の状態では固有振動数 f の温度変化を測る。次に液体 ^4He をセルに一杯に満たし f を測定する。粘性侵入深さ程度のある液がセルに引きずられることにより、空の時に比べ f は減少する(図3)。ドライブ電圧を変えて測定したところ、超流動転移温度 T_λ 以上では f はドライブ電圧に依存しなかったが、 T_λ 以下ではドライブ電圧がある値以上になると f は減少した。この様子をよりわかりやすく示すために、セルが空の時と液が入っている時との振動数の差 Δf を縦軸にとり、

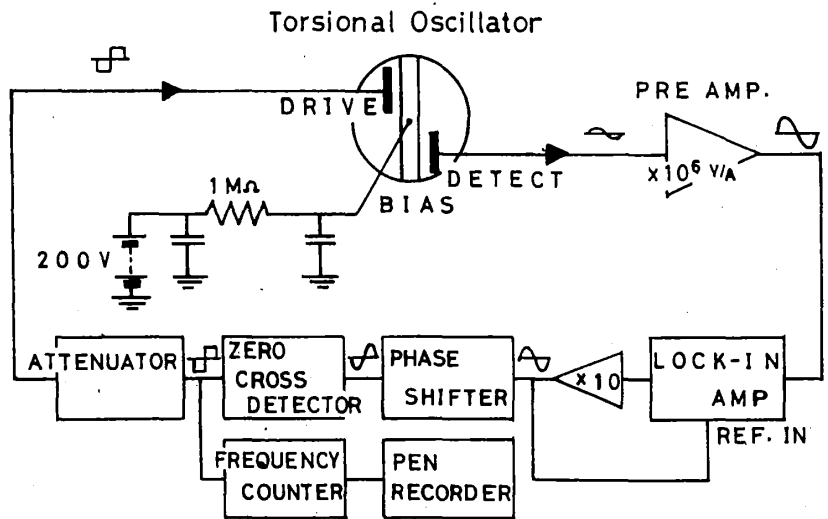


図2 ねじれ振子を自動振動させる電気回路

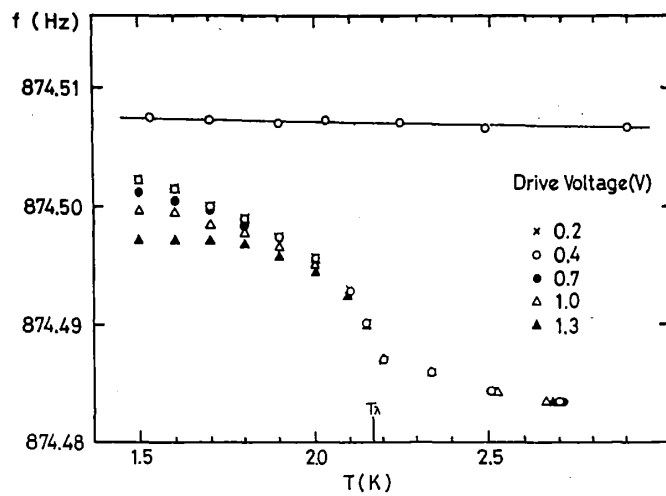


図3 固有振動数の温度変化

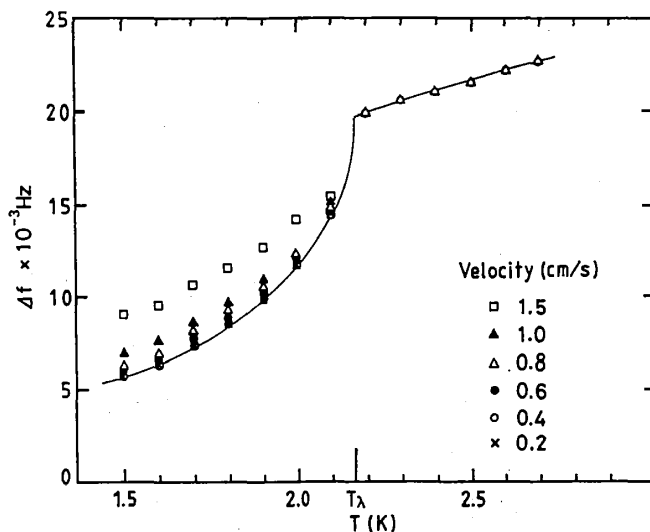


図4 固有振動数の差の温度変化

パラメータをドライブ電圧からセルの壁の平均速度に変えて示したのが図4である。 Δf は液によって生じる振子への負のトルクの大きさに比例する量である。図の実線は、 T_λ 以上の測定点および T_λ 以下において壁の平均速度が 0.4 cm/s 以下のときの測定点を連ねたものである。この実線の値より液の粘性率を求めると、Welber³⁾が測定した常流体の粘性率(T_λ 以上では液体の粘性率)と2%以内の精度で一致することがわかった。⁴⁾壁の平均速度がある臨界値を超えると、 T_λ 以下では量子渦糸が発生し、これによりセルの壁は余分な負のトルクを受けると考えられる。セルの壁の平均速度が臨界値以下の時の Δf を改めて Δf_0 と書くと $(\Delta f - \Delta f_0)$ は渦糸がセルに及ぼす負のトルクに比例する量を示す。図5は、 $(\Delta f - \Delta f_0)$ が壁の平均速度 v の増加につれ増える様子を温度をパラメータとして示したものである。 v が約 0.5 cm/s で渦糸が検出されるようになることがわかる。1.5 Kから2.0 Kの間では温度依存性は小さい。

振子の中に生じている渦糸の分布について、図6に示すように2つのモデルが考えられる。モデル(a)は粘性侵入深さ程度($1 \mu\text{m}$ のオーダー)の幅の中にのみ絡み合った渦糸が定常的に存在するというものであり、モデル(b)は粘性侵入深さのところで発生した渦糸が1本に連なりセルの内部に

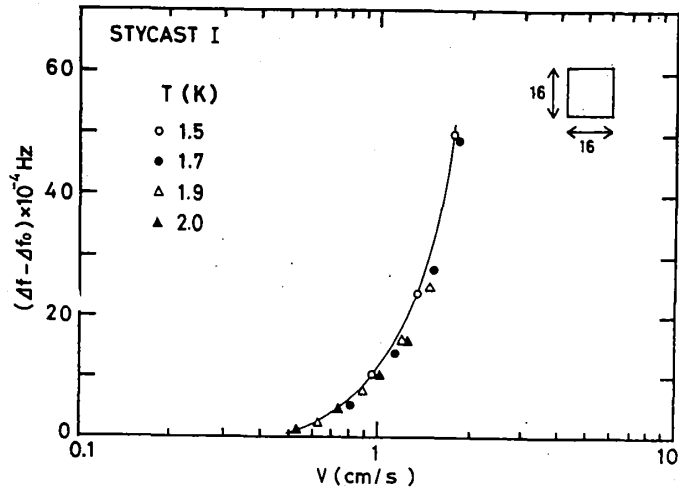


図5 $(\Delta f - \Delta f_0)$ と壁の平均速度

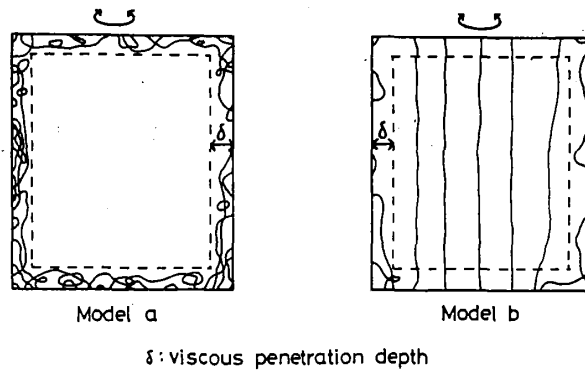


図6 ねじれ振動するセル内の渦糸の分布

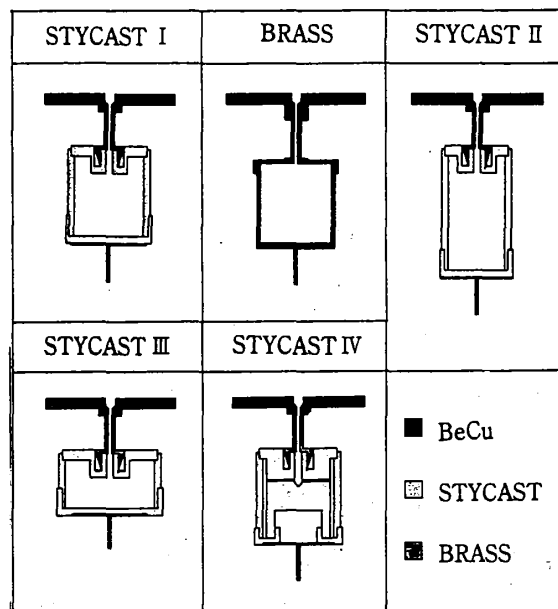


図7 測定に使用した振子

拡散していき、渦糸の両端がセルの上下にある程度ピン止めされた状態になっているというものである。どちらの状態であるのかという情報を得るために、図7に示すような形のセルを作り、同様の測定を行った。スタイキャストセルIは基本形であり、これまでに述べてきた結果はこのセルで測定したものである。スタイキャストセルIIは内径13mmφ、長さ24mmの縦長のセルで、スタイキャストセルIIIは内径21mmφ、長さ11mmの扁平のセルである。これら3つのセルの内表面積はほぼ同じである。スタイキャストセルIVは、同心円筒形で、外側の円筒のサイズはセルIと同じであり、内側円筒との隙間は1mmである。隙間の大きさは粘性侵入深さに比べて十分大きい。残りの黄銅製セルのサイズはセルIと同じである。黄銅の内壁は旋盤加工したままの状態であり、スタイキャスト壁に比べ粗く、数μm程度の筋が入っている。

図8にスタイキャストセルIIの結果を、図9にセルIIIの結果を示す。図5、8、9を比較すると、渦糸が検出されるはじめる v はほぼ同じであることがわかる。しかし、渦糸がセルに及ぼす負のトルクの増加の様子はセルの形に大きく依存し、扁平なセルでは v の増加につれ急激に大きくなる。図10にセルIVの結果を示す。この場合、渦糸は v が約0.05cm/sにおいてすでに検出される。 $(\Delta f - \Delta f_0)$ の v に対

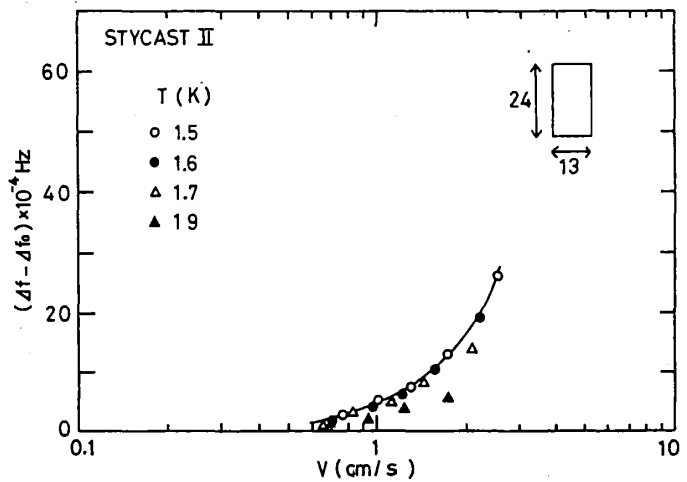


図8 $(\Delta f - \Delta f_0)$ と壁の平均速度

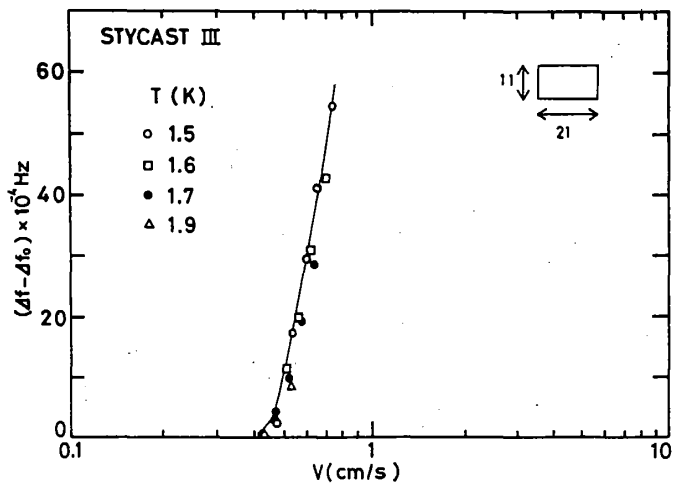


図9 $(\Delta f - \Delta f_0)$ と壁の平均速度

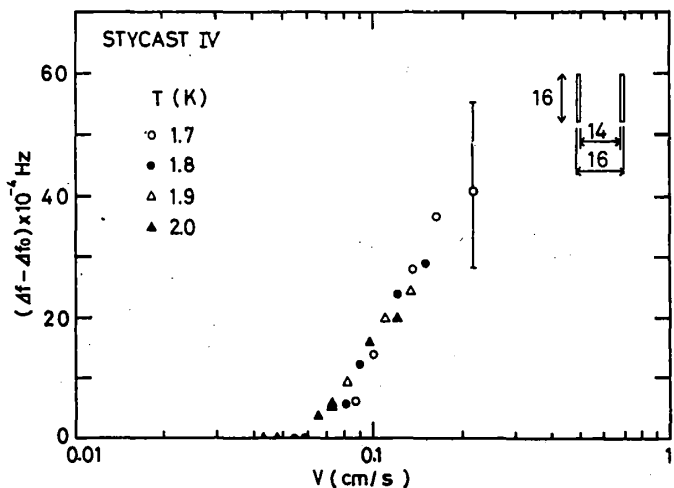


図10 $(\Delta f - \Delta f_0)$ と壁の平均速度

する傾きは、セル I とほぼ同じであるが、測定点のバラツキが大きく、 v が 0.15 cm/s 以上では f の不安定性は図にエラーバーで示した程大きくなる。図 11 に黄銅製セルの結果を示す。渦糸は v が約 0.2 cm/s で検出され、この値はセル I に比べ小さい。しかし、 v の増加に対する $(\Delta f - \Delta f_0)$ の増え方は非常に緩やかである。

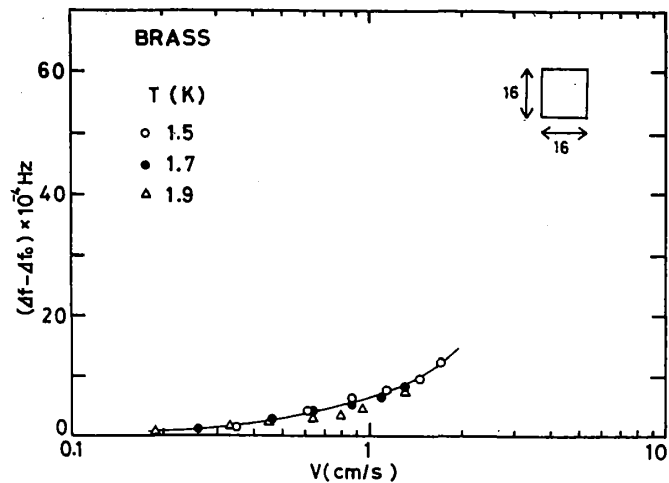


図 11 $(\Delta f - \Delta f_0)$ と壁の平均速度

3、考察

形状の異なるスタイキャスト製セル I、II、III について、セルの側壁の平均速度 v に対する渦糸の生長の様子を図 5、8、9 において比較する。この 3 つのセルの内表面積はほぼ同じであるので、もし渦糸の分布がモデル (a) のようであれば、セルが渦糸から受ける負のトルクに比例する量 $(\Delta f - \Delta f_0)$ の v に対する依存性はほぼ同じになると予想される。しかし、実験結果はセルの形状によって大きく異なり、高さの低いセルでは $(\Delta f - \Delta f_0)$ の v に対する傾きは非常に大きい。この結果から、渦糸はモデル (b) のようにセルの内部にも分布していると考えられる。つまり、側壁近くで生じた渦糸が 1 本に連なり内部にはじき出される確率は、高さの低いセル程大きいと予測されるからである。渦糸は上蓋と底にある程度ピン止めされて、セルの振動運動を妨げるようにトルクを及ぼす。上向きと下向きの渦糸が混ざって存在し、渦糸間の相互作用により再結合や消滅を繰り返していると考えられる。そして、温度 T と v が決まれば $(\Delta f - \Delta f_0)$ は決まった値をもつことより、渦糸の密度は T と v の関数として与えられる。

次に、同心円筒状スタイキャストセル IV の結果について考える。渦糸が検出される v (臨界速度と呼ぶことにする) はセル I に比べ約 1 桁小さく、この結果は液の入っている空間が狭いと臨界速度が小さいことを示している。我々の実験において、渦糸または渦輪が発生する主となる条件については、現段階では明かでないので、臨界速度について詳しく議論することはできないが、一方向に回転する容器における臨界角速度の議論では、⁵⁾ 同心円筒の隙間が小さい程臨界角速度は大きくなることを考えると、我々の結果はこれとは矛盾する。セル IV の測定において、 v が大きくなったとき固有振動数のフラツキが大きくなったが、これは、液の入っている空間が小さいので渦糸の密度が他のセルに比べて大きくなり、渦糸間の大きな相互作用のために渦糸密度の揺らぎが大きくなったためであろうと推測している。今後、揺らぎの様子について詳しく調べる必要がある。

最後に、黄銅製セルの結果について考える。スタイキャスト製セル I と比較すると、臨界速

度は小さいが、 v の増加に対する $(\Delta f - \Delta f_0)$ の増加は非常に揺るやかである。壁面の粗い黄銅製セルでは、壁面近くの速度場の一様性や渦糸のピン止め力が滑らかな壁面の場合とは異なる。⁶⁾ このため側壁に生じた渦糸が1本に連なってセル内部にはじき出される確率が、壁の粗いセルでは小さいと考えられる。

渦糸が壁面に及ぼすピン止め力を定量的に取り扱うためには、⁷⁾ 今後、壁の粗さを体系的に変えて測定する必要がある。また、超流動ヘリウムをセル一杯に満たした状態と、自由表面をもつ状態とで測定し比較する必要がある。

(参考文献)

- 1) R. J. Donnelly : Quantized Vortices in Helium II, Cambridge Univ. Press, Cambridge (1991).
- 2) J. H. Tough : Progress in Low Temperature Physics Vol. 8, North Holland, Amsterdam (1982) Chap. 3.
- 3) B. Welber : Phys. Rev. **119** (1960) 1816.
- 4) 藤井佳子、小川智之、竹迫憲浩、重松利信、中村改樹、山口稔、信貴豊一郎 : 低温工学 **29** (1994) 97.
- 5) 参考文献1) の p 67.
- 6) S. G. Hegde and W. I. Glaberson : Phys. Rev. Lett. **45** (1980) 190.
- 7) P. W. Adams, M. Cieplak and W. I. Glaberson : Phys. Rev. **B32** (1985) 171.