

超流動ヘリウムの渦と乱流

矢野 英雄 (やのひでお)



所属：理学研究科 数物系専攻

専門分野：物性物理学（低温物理学）

趣味：中古PCでネットワークづくり。自宅でも研究室のネットワークとつながるので便利ですが、仕事をすると遊んでもらえないので子供には不評です。写真は自宅で子供に撮ってもらいました。

1. はじめに

19世紀から20世紀にかけてガスの液化競争が始まり、今から100年前の1908年7月10日、最後の永久気体と言われたヘリウムが、オランダのカマリン・オンネスによって初めて液化されました。ガスの液化は低温を得るための寒剤となり、また液化ガスを真空引きすることで蒸発させ、さらなる低温を得ることができます。通常の液化ガスは真空引きで温度を下げると固化し蒸発が止まるため、温度は下がらなくなります。しかし液体ヘリウムは温度が下がっても固化することがありません。ヘリウムの液化に成功したカマリン・オンネスは、液体ヘリウムを真空引きすることでさらなる低温を得ることに成功し、水銀の電気抵抗がゼロになること（超伝導）や液体ヘリウムの性質が変わること（後の研究から超流動であることがわかった）を発見しました。これらの現象は、金属の電子やヘリウム粒子の量子性が温度を下げることによって顕在化する物理現象で、ヘリウムの液化は低温物理学の始まりそのものでした。カマリン・オンネスは、低温物理学への貢献により1913年にノーベル物理学賞を授与されました。ヘリウム液化から100年たった今日では、大阪市立大学でもヘリウム液化施設でふんだんに液体ヘリウムを供給していただき、低温を必要とする研究を支えています。

本稿で紹介する超流動は、液体ヘリウムに現れる現象です。ヘリウムは気球などに使われるように空気よりも軽いガスで、絶対零度（これより下げることのできない究極の温度）でも固体にならず液体でいられる唯一の物質です。“軽い”という特性が、量子性のために超流動現象を起こします。“量子性”は、不確定性原理という言葉で知られるように、形の定まらない難しいイメージがありますが、超流動ヘリウムでは逆に、水などの普通の液体がもつ流れの多様性がなくなります。超流動ヘリウムには粘性がなく、棒でかき混ぜても流れが起こらず、流れが量子化されるために渦が1種類しかありません。水などの液体では大きな渦（たとえば鳴門の渦）から小さな渦（たとえば洗面台に流れる水がつくる渦糸）まであり、渦が途中で消え発生するなど、多様性に富んでいます。一方超流動ヘリウムの渦は、大きな渦が

作れないため細い渦糸が束になり、また途中で切れたり発生したりできません。

このような渦の性質が乱流にも現れます。水流の乱れ（乱流）は種々の渦からなり、流れの速さによって渦は千切れまた発生し、乱流を形作っています。このように流れが大変複雑なため、現代の科学をもってしても渦と乱流の関係はいまだ解明されていません。一方超流動の乱流は、流れの速さにかかわらず1種類の渦糸のみで構成されています。超流動の乱流は普通の乱流とはかなり違ったものですが、渦糸のみで構成される簡単な乱流なので、渦と乱流の関係を調べるのに適しています。我々は、この超流動の乱流と渦の関係を解き明かそうと、研究を行っています。本稿では、我々が行っている超流動の乱流を調べる実験と、最近明らかになってきた渦と乱流の関係を紹介します。

2. 乱流を調べる実験装置

2.1. 超流動のかき混ぜ棒：振動ワイヤ

超流動のかき混ぜ棒には振動ワイヤを使います(図1)。ワイヤは細い金属線（直径 $3\mu\text{m}$ ぐらいのニオブ・チタン合金）からできています。ニオブ・チタン合金は低温にすると電気抵抗がゼロの超伝導になります。市販のマルチフィラメント超伝導線（ $\phi 1.3\mu\text{m}$ ニオブ・チタン合金線150本が銅の中に埋め込まれた線材）をダイスで丁寧に引き延ばしたあと、銅を溶かし、ニオブ・チタン線150本を取り出し、そこから一本だけ切り出します。この切り出しはとても根気のいる作業ですが、4年生や大学院生の若い人で2ヶ月ぐらいの修練を積み、みな細いワイヤを切り出すことができるようになります。切り出したワイヤは図1のように柱（ポリミドチューブ）の上に半円状に曲げ、振動ワイヤを作ります。写真ではわかりにくいのですが、細く光っているものが切り出したワイヤです。

切り出したワイヤの電子顕微鏡写真を図2に載せます。

ワイヤは図2(a)のように表面がでこぼこしているものと、(b)のように表面が滑らかなものが

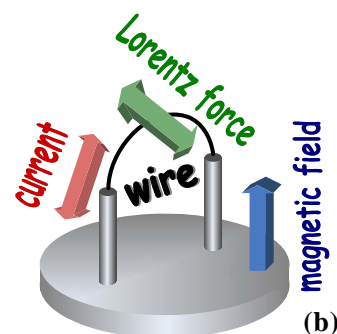
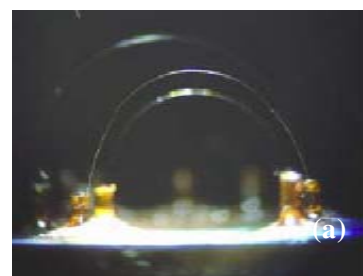


図1. 振動ワイヤの(a)写真と(b)模式図

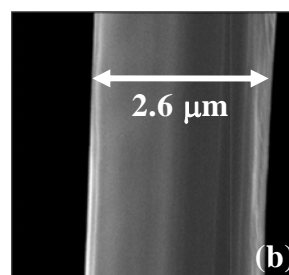
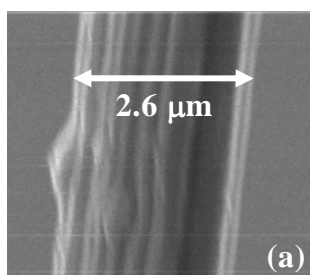


図2. 振動ワイヤ（ニオブ・チタン合金線）の電子顕微鏡写真

あります。引き延ばす前のワイヤでは、このような違いが見られず、でこぼこしているのです。ダイスで引き延ばすことで滑らかな表面のワイヤができるようです。この表面の違いが超流動の渦と乱流の関係を明らかにしてくれました。

振動させるために、ワイヤを磁場の中に置きます。ワイヤに電流を流すと磁場の向きと電流の向きに垂直な方向(図 1 (b))に働く力を受け、ワイヤが動きます。ワイヤに交流を流すと力の向きが交互に逆転するので、ワイヤは振動します。ワイヤのバネ定数と質量で決まる周波数の交流を流すことで、ワイヤを共鳴振動させます。図 3 に共鳴振動の様子をグラフにしました。金属線が磁場の中を横切ると、電磁誘導によって金属線の速度に比例した電圧が出ます。グラフの横軸はワイヤに流す交流の周波数、縦軸には金属線の誘導起電圧を取っています。グラフからわかるように共鳴は狭い周波数の幅で起こります。細い金属線を半円に曲げただけの簡単な構造ですが、共鳴のQ値(共鳴の品質を表す係数)は1000~5000と高い値になります。振動ワイヤは超伝導なので、直径が $3\mu\text{m}$ と非常に細い金属線でも電気抵抗がゼロになり、電気抵抗によるエネルギー損失がないために高いQ値を得ることができます。

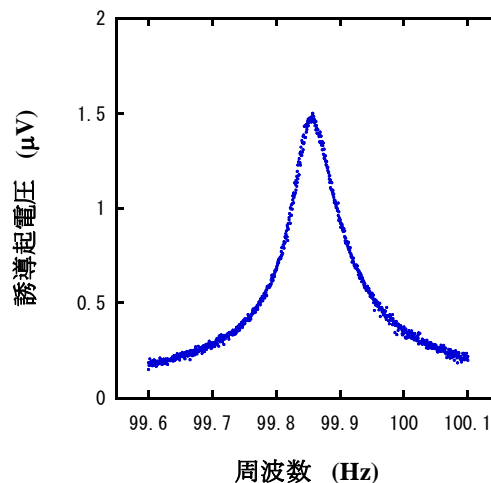


図 3. 振動ワイヤの共鳴曲線。縦軸は振動ワイヤに誘起される電圧でワイヤの速度に比例する。横軸は振動周波数。

2.2. 冷凍機

ヘリウムが液化され超流動状態になる温度は -271°C (絶対温度で 2.2K)以下と、大変低い温度です。この低い温度まで下げるために寒剤として液体ヘリウム(-269°C 、絶対温度で 4.2K)を用い、さらに希釈冷凍機と核断熱消磁冷凍機(図 4)で絶対零度近くの極限まで、温度を下げていきます。

以下では温度の指標として絶対零度から測った温度(絶対温度)を用います。絶対零度はこれ以下に下げることができない究極の温度で、マイナスの温度はなく、温度が下がるにつれて温度の数字が小さくなっていきます。当研究室では絶対零度に向けて、低温を開発してきた歴史があります。なお絶対温度の刻み幅 1K は、ほぼ摂氏 1°C に対応します。



図 4. 希釈冷凍機(上部)と核断熱消磁冷凍機(下部、銅のブロック部分)

希釈冷凍機

ヘリウムは周期律表では水素に次いで2番目に軽い元素で、陽子2個中性子2個の原子核からなる ^4He と、陽子2個中性子1個からなる ^3He の、2種類の同位元素があります。化学的には安定な単原子分子のヘリウムですが、温度を下げていくと量子性が現れ、 ^4He はボース液体となり2.2 K以下で超流動状態になります。一方 ^3He は低温でフェルミ液体となります。これらの液体は全く異なった性質を持ち、この2つの液体を希釈混合することで、さらなる低温を得ることができます。図4の装置は研究室において作成したもので、冷凍機の部品を工作技術センターに作成していただきました。この装置で絶対温度数mKまで冷却することができます。

核断熱消磁冷凍機

2種類のヘリウムの内、 ^4He は2.2 K以下で超流動状態になるので、希釈冷凍機を用いれば必要な温度まで冷却することができます。もう一方の ^3He は量子性が異なるために超流動状態になる温度が2 mK以下となり、 ^4He に比べて3桁も低い温度です。前述した希釈冷凍機ではまだ能力不足なので、核断熱消磁冷凍機を用います。図4に核断熱消磁冷凍機（冷凍機下部の銅ブロック部分）の写真を載せます。冷凍機は銅のブロックを加工したもので、これを強磁場中に置き、断熱に保ったまま消磁することで温度を下げます。核断熱消磁冷凍機も工作技術センターに作っていただいたもので、最低到達温度が48 μK と世界でもトップクラスの冷凍能力をもちます。

2.3. 振動ワイヤによる乱流の観測

超流動の乱流生成は、振動ワイヤの応答にあらわれます。ワイヤを共鳴状態で振動させ、ワイヤに流す交流電流を徐々に上げていきます。電流に比例してワイヤにかかる力も増えるので、ワイヤの振動速度も上がっていきます。超流動ヘリウム中でワイヤを振動させたときの典型的な応答を、図5に示します。横軸にワイヤにかける力を、縦軸に振動が一番大きいワイヤ頂点のピーク速度をプロットしています。最初は流す電流が増えるにしたがって振動速度が徐々に増していきますが、ある程度まで振動速度が上がると、急に速度が減少します。この応答は乱流が発生したことを意味します。なお乱流が発生していないときは、超流動には粘性がないために、ワイヤは超流動から力を受けません。しかしグラフでは、乱流が発生していなくても力を受けているように見えます。これはワイヤ内部に発

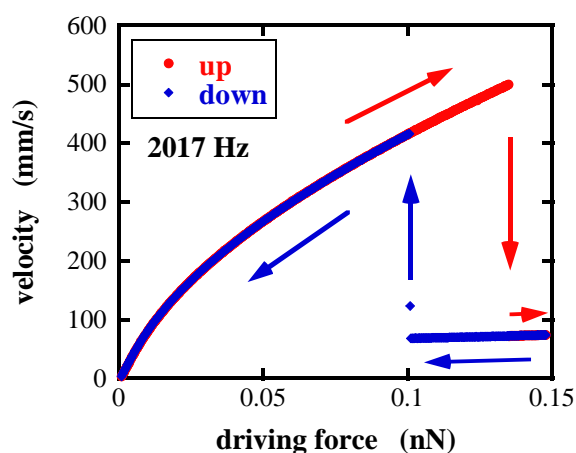


図5. 超流動ヘリウム中の振動ワイヤの応答。ワイヤに交流電流で力（driving force）を加えていくと振動速度（velocity）が増すが、乱流が発生すると速度が急激に減少する（図の右下の部分）。

生ずる摩擦の影響です。超流動ヘリウムを抜いてワイヤの振動を調べると、乱流を発生していないときと同じ変化になります。

図5に書いた矢印は、速度変化の方向を示しています。力を上げながら応答を観測した場合と、力を徐々に抜きながら観測した応答では、乱流の発生・消滅する位置が異なり、ヒステシスを示すことがわかります。

3. 超流動の渦と乱流

実験装置は2章で説明したとおりですが、振動ワイヤの応答だけでは渦と乱流の関係はイメージできません。この章では、我々の実験とそれをシミュレーションした研究からこれまでにわかったことを紹介します。

3.1. 超流動の渦

超流動ヘリウム (^4He) の渦は1種類しかありません。図6 (a)の様に、渦芯のまわりを超流動が流れます。渦芯は直径 1 \AA ぐらいと大変細く、流れの速度は渦芯の距離に反比例します。渦芯がどのような構造になっているか、まだ解明されていません。ヘリウム原子の大きさが 3 \AA ぐらいなので、渦芯は何もない真空状態になっているのかもしれませんが、渦は1種類しかないため、ヘリウムを入れた容器を回転しても真ん中に大きな渦ができることはなく、たくさんの渦糸に分かれます (図6 (b))。このような性質があるため、渦芯を糸とみなした渦糸でヘリウムの渦を考えることができます。

超流動の渦糸は、途中で途切れることはありません。渦糸が自身で閉じている輪か、容器の壁と壁の間を橋渡しする渦糸、たとえば図6 (b)の容器の上側の壁と下の壁の間にできる渦糸しかありません。また渦糸が輪を作ると、回転する超流動流があるのでスモークリング (タバコ好きのおじさんが見せてくれます) やスナメリの口から出る泡の輪 (芸達者なイルカやスナメリがいる水族館で見られます) のように、渦糸の輪が動いていきます。このように超流動の渦は制約があるために、超流動の流れがどのように乱れても渦糸のみで構成されます。このようなわけで渦と乱流の関係を調べるのに超流動の乱流は適しています。

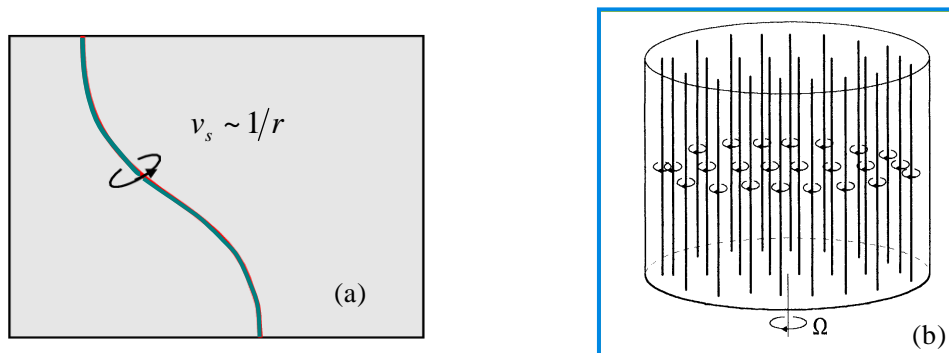


図6. 超流動の渦。(a) 渦芯のまわりを流れる超流動。(b) 超流動ヘリウムを入れた容器を回転してできる渦糸。渦は1種類しかないため大きな渦ができず、図のようにたくさんの渦糸に分かれます。

3.2. 振動ワイヤが作る乱流

水の渦は流れが止まると消えてなくなります。しかし超流動の渦糸は、壁と壁の間にあるようなときには、なかなかなくなります。もし振動ワイヤと容器の壁との間に渦糸が残っていると、ワイヤの振動によって渦糸が伸び始め、乱流へと発展します。図7にこの様子を示します。これは球が超流動ヘリウムの中を振動するシミュレーションで、初めに球と容器の壁との間に渦糸が付着しています。この状態で球を振動させると、(a)150ミリ秒後には渦糸が波立ち、(b)波立った渦糸から渦輪が発生し、(c)乱流へと発展していきます。わかりづらいですが、真ん中の大きな球が振動球で、波だった細かい線は渦糸を表しています。このシミュレーションは、ヘルシンキ工科大学（フィンランド）のハンニネン氏が大阪市立大学物理学教室の坪田先生のグループ（素励起物理学研究室）に在籍していたときに計算していただいたものです。

我々も含めこれまでの実験では、超流動ヘリウムの中でワイヤや球などを振動させると、かならず乱流が発生しました。我々は、渦糸が振動ワイヤに付着しない状態を試行錯誤の結果ようやく実現し、乱流生成しない振動ワイヤを作ることになりました。この状態から渦糸を付着させると乱流を生成するようになり、シミュレーションで示されたように、ワイヤと容器の壁との間に付着する渦糸が乱流を引き起こすことが確立しました。この研究は、大阪市立大学の理論グループと実験グループのコンビネーションが、乱流生成の解明にうまくつながった最初のケースとなりました。

3.3. 渦輪が振動ワイヤにぶつかって発生する乱流

図7を眺めると、球のそばに渦糸がたくさん集まる乱流の領域と、そこから発生してまわりに広がるたくさんの渦輪があることがわかります（図7(c)）。このような渦輪が乱流から発生していることを確かめるために、図8のように2つの振動ワイヤを置いた装置を作って実験を行いました。図8(a)のように2つの振動ワイヤを銅製の小箱の中に入れます。ヘリウムの導入口は、片方のワイヤの後ろ側の壁にあります。小箱の外側にも振動ワイヤを置きましたが、今回の実験では使いません。これらの振動ワイヤを上下逆にして、図8(b)の実験セルに入れます。この実験セルは前述の希釈冷凍機にセットしています。

前述したように、ただヘリウムを入れて冷やすだけでは、振動ワイヤに渦糸が付着してし

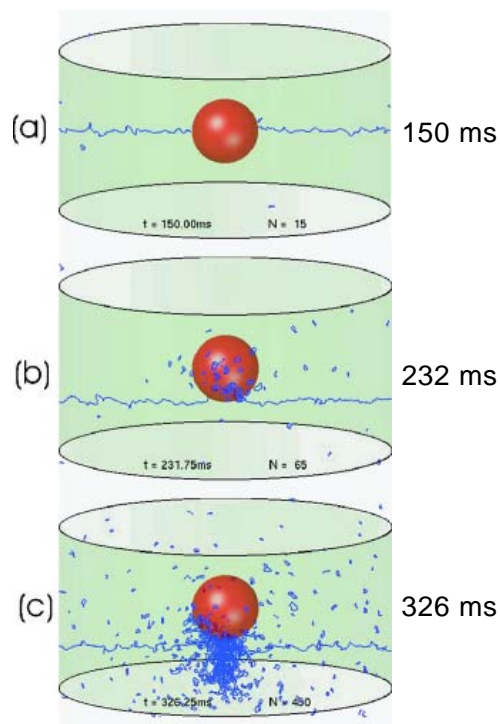


図7. 振動する球に渦糸が付着していると、乱流が発生する。真ん中の球は上下に振動している。

(R. Hänninen, M. Tsubota, W.F. Vinen, Phys. Rev. B 75, 064502 (2007)より)

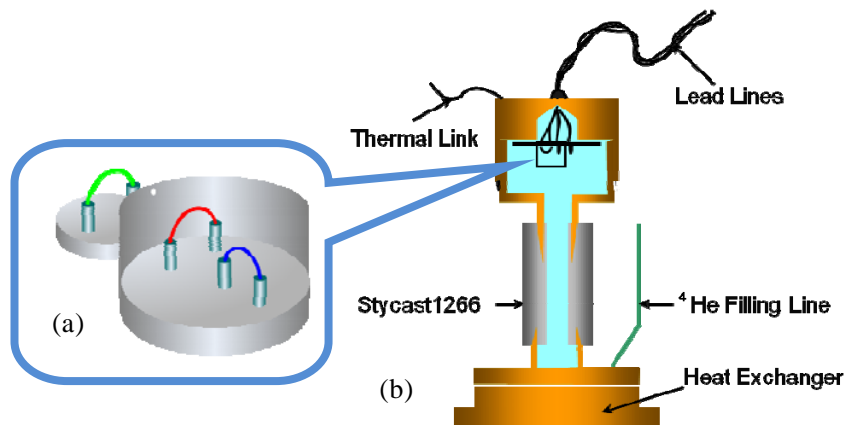


図8. 2つの振動ワイヤを用いた実験装置。(a)振動ワイヤの配置。3つの振動ワイヤのうち、2つの振動ワイヤを銅製の箱の中に置く。(b)実験セル。図(a)の振動ワイヤを上下逆にして、セル内に配置している。

まいます。そこで、ヘリウムを入れる前に冷凍機で実験セルを100 mK以下まで冷却しておき、その状態でゆっくりヘリウムを入れていきます。そうすると、図8(a)の小箱にある2つのうちヘリウム導入口から遠いほうの振動ワイヤには、渦糸が付着しません。ちなみに導入口に近い振動ワイヤには渦糸が付着します。導入口で渦糸が発生して近いほうのワイヤに付着したようです。

実験の方法は以下の通りです。まず導入口に近い渦糸の付着する振動ワイヤで、乱流を生成します。そうすると図7(c)のようにたくさんの渦輪が乱流で生成されて、周りの空間に放出するはずですが、隣に配置した振動ワイヤは、渦糸を付着させずに振動させておきます。渦糸が付着していないので、こちらの振動ワイヤは乱流を生成しません。この状態で渦輪を生成してぶつけると、付着渦糸がない振動ワイヤでも乱流を生成することを発見しました。

なぜ乱流を生成するのか。この様子も坪田先生のグループの藤山氏によってシミュレーション(図9)を行っていただきました。最初に渦糸が付着しない球を振動させ、その振動球

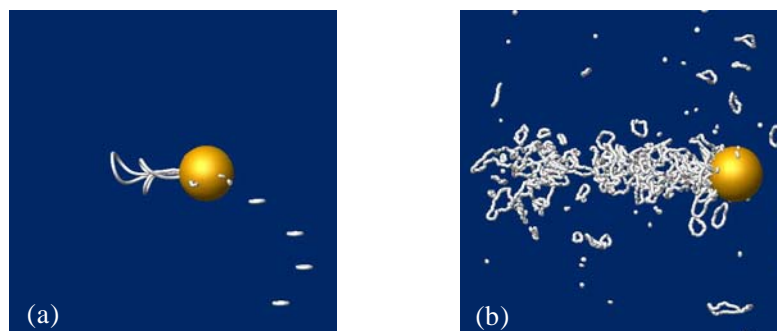


図9. 左右に振動する球に下側から渦輪をぶつけたときの、乱流の成長の様子。(a)渦輪が振動球にぶつかり、球の運動によって渦糸が引き延ばされ、(b)渦糸に何度もぶつかることで増殖し、乱流へと発展する。(大阪市立大学物理学教室素励起物理学研究室藤山氏より提供)

に下側から渦輪をぶつけます。ぶつかった渦輪は球に付着する渦糸となりますが、球の動きで後方に付着渦糸が伸びていきます（図9 (a)）。球は振動の端で向きを変えて戻ってくるので、伸びた渦糸に球が再びぶつかり、渦糸が伸びていきます。このように渦糸は球が振動する範囲でどんどん増え、乱流に発展します（図9 (b)）。

図9ではわかりにくいのですが、藤山氏がこの数値シミュレーションをアニメーションにして、坪田グループのホームページの中にある数値計算ギャラリーで公開しています（<http://matter.sci.osaka-cu.ac.jp/~bsr/tsubotag/vibwiresim-j.html>）。なかなか楽しいアニメーションです。またこれらの研究の結果は、我々の実験と坪田先生のグループの理論とを合わせて共同の論文として発表しています（R. Goto, S. Fujiyama, H. Yano, M. Tsubota, *et al*, Phys. Rev. Lett. 100, 045301 (2008)）。

4. おわりに

これまで見てきたように、超流動ヘリウムの渦は壊れにくい性質があり、また1種類の渦糸だけしかありません。このような性質は水などの渦とはだいぶ異なっていますが、超流動の乱流では渦糸の集まったものとして視覚化できるので、乱流中の渦の役割を調べるのに適しています。我々の研究では今のところ、乱流が始まるときの渦の役割を解明したにすぎません。現在進めている研究では、振動ワイヤが生成する乱流中の渦糸密度は一定であることがわかってきました。乱流を作るためにエネルギーを投入し続けるので、渦糸密度が変わらないことは乱流中のエネルギー流が一種の平衡状態を作っていることになります。このような考え方は、水などの乱流にも応用できそうです。今後、乱流の背景にある共通の物理現象の解明につながっていくことを期待しています。

これらの研究は多くの方に支えていただいています。実験研究は超低温物理学研究室の大学院生や学生によって行なわれています。また実験を進めるにあたって研究室スタッフの助力をいただいています。工作技術センターには冷凍機の製作を、またヘリウム液化施設では寒剤である液体ヘリウムを供給していただいています。素励起物理学研究室の坪田先生や大学院生の方々と実験結果の検討を行い、乱流の背後にある物理現象を解明しつつあります。研究を支えていただいている多くの皆様に感謝します。