

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月22日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21340095

研究課題名（和文） ヘリウム結晶の摩擦と超固体性

研究課題名（英文） Friction and supersolidity of He crystals

研究代表者

野村 竜司（NOMURA RYUJI）

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：00323783

研究成果の概要（和文）：音響放射圧によって微小重力中のヘリウム 4 結晶を駆動し、超流動ヘリウム中に浮遊させることに成功した。ピエゾ素子を用いたインチワーム駆動法で、ヘリウム結晶中にステンレス試料が埋もれた状況下でも、ステンレス試料を動かすことに成功した。ピエゾ素子の極低温高圧下での動作に問題ないことが確認され、ヘリウム結晶への適用へあと一歩のところまでこぎつけた。エアロジェル中でのヘリウムの結晶化を調べ、量子トンネリングによる自己組織化臨界状態を見出した。

研究成果の概要（英文）：<sup>4</sup>He crystals were blown off by acoustic radiation pressure and floated in the superfluid under the reduced gravity condition. A piece of stainless steel buried in a <sup>4</sup>He crystal was driven by the inch-worm method of piezo crystal. We succeeded in operating the piezo crystal at very low temperatures and are ready to apply it to He crystals. Crystallization of He was investigated in aerogels and self-organized criticality in quantum tunneling was discovered.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2010年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2011年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
年度			
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性Ⅱ

キーワード：量子結晶、超流動、摩擦、超固体

## 1. 研究開始当初の背景

摩擦研究には長い歴史がある。たとえば木材、金属、岩石など様々なマクロ物質でアモントン・クーロンの法則などが調べられてきたが、試料の不均一性などの影響で再現性に問題がある場合も多い。一方ではグラファイト小片などの、ナノ物質での精密な摩擦研究（超潤滑性の検証など）が進んでいる。ヘリ

ウムのマクロ結晶を用いた摩擦実験は両者をつなぐものとして、摩擦の物理に大きく寄与するに違いない。また結晶形の緩和時間の短いヘリウム結晶の摩擦は、古典系とどう異なるかは興味深い。

超流動状態の液体ヘリウム中で物体を動かすことは容易では無い。そもそも極低温実験で物を動かすこと自体が簡単ではなく、超

流動体中では尚更である。これまでに固体ヘリウムの方位や位置を自由に制御する方法は知られていない。ましてやヘリウム結晶の摩擦についての実験は皆無である。

我々はこれまでに、音響放射圧を用いればヘリウム結晶表面を自由に成長や融解させることが出来ることを見出した。表面の一部分に超音波を当てると、放射圧によって界面が押されて融解や成長が駆動されるのである。これは音響放射圧が一次相転移を駆動することを初めて示した実験である。また超音波を用いればヘリウムの種結晶を制御して作成できることも示した。放射圧によって音波の向きに界面の運動が駆動出来ると分かったが、さらに結晶自体も動かそうというのが目的の一つである。放射圧は非接触で物体を動かす手法として広く用いられているが、ヘリウム結晶を動かす目的で用いられたことは無い。小さな結晶全体を音響場中に置けば、音響放射圧によって結晶が押され、結晶を駆動できると考えられる。

## 2. 研究の目的

究極の清浄表面を有するヘリウム量子結晶を用いて摩擦の研究を行う。我々がこれまでにヘリウム研究で用いてきた実績のある音響放射圧やピエゾ素子を用いたインチワーム駆動などの方法を駆使して、超流動ヘリウム4中に存在するヘリウム結晶を自由に動かす技術を確認する。またそれを用いて、超流動液体と共存下のヘリウム結晶間の摩擦、およびヘリウム結晶と基盤間の摩擦について調べることを目的とする。これによりヘリウム固体の超流動（超固体）性との関連で最近議論されている、ヘリウム結晶粒界が超流動性を持つか否かという問いに答えることができる。また超固体性の問題に限定せずより一般的な視点に立ち、アモントン・クーロンの法則や超潤滑性などの、表面レオロジーの基礎的問題に答え得る、新たな清浄表面物理の舞台として極低温ヘリウムのマクロ結晶が有効であることを示したい。

また乱れた媒質中で結晶表面に働く摩擦の影響も調べる。熱揺らぎが無くなる極低温での一次相転移に対する乱れの影響が、古典系の摩擦で見られる振舞いとどれほど異なるかを明らかにしたい。

## 3. 研究の方法

超音波発信子から発せられる超音波の音響場中にヘリウム結晶を配置し、音響放射圧で駆動する。すべり始める閾値の測定から静止摩擦力が、移動距離から動摩擦力が分かるはずである。移動の検出は、直接の可視化に

よって行う。

ピエゾ駆動法は、ピエゾ素子にノコギリ状の電圧をかけ、速い電圧変化の位相で物体がすべることを利用する駆動方法である。走査顕微鏡などの粗動機構で馴染み深い。通常の装置構成では、ピエゾに固定された固定ステージと、そのステージに磁力などで張り付いた移動ステージからなる。移動ステージが静止摩擦で耐えられなくなると、すべり始めることとなる。ヘリウム実験での構成は、ピエゾ素子と一緒に動く基盤（固定ステージ）を作成し、その上に作成したヘリウム結晶を駆動する。つまり移動ステージの代わりにヘリウム結晶になる。ノコギリ波の振幅を上げていくと、どこかですべり始め、結晶が移動するはずである。ノコギリ波の1周期での移動は検出できないが、多周期に亘り観測すれば移動が検出できる。

エアロジェルという透明な多孔質物質中で進行するヘリウムの結晶化を可視化して調べる。温度一定化での結晶化を調べるために、断面積の異なる二つのペローズを利用した、体積可変セルによって結晶化の温度依存性を明らかにする。

## 4. 研究成果

航空機の放物線飛行によって作り出した微小重力環境中のヘリウム結晶を音響放射圧で駆動して、放出した結晶を超流動ヘリウム中で浮遊させることに成功した（図1）。また微小重力中のヘリウム結晶の一部分を音響放射圧で駆動し、結晶化波を励起することに成功した。

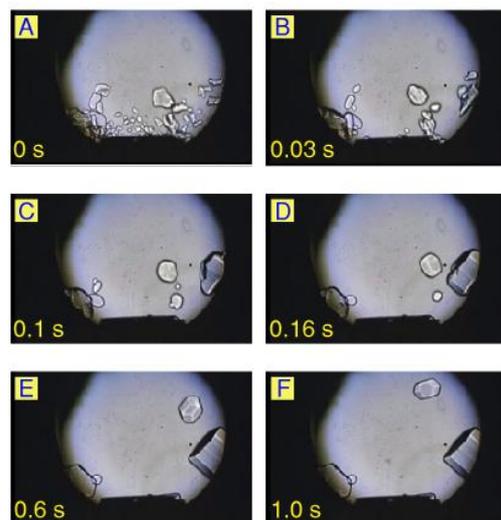


図 1、音響放射圧で駆動された微小重力中のヘリウム結晶

ピエゾ素子を用いたインチワーム駆動法で、極低温でのステンレス試料の駆動に成功した。極低温でのステンレス試料間の摩擦力の測定も行った。また超流動ヘリウムとヘリウム結晶が共存する融解圧において、ヘリウム結晶中にステンレス試料が埋もれた状況下でも、ステンレス試料を駆動することに成功した。ピエゾ素子の極低温高圧下での動作に問題ないことが確認され、ヘリウム結晶への適用へあと一步のところまでこぎつけた。

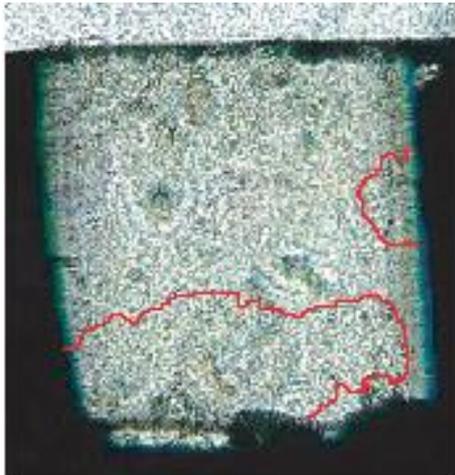


図 2、高温で滑らかに進行する結晶表面

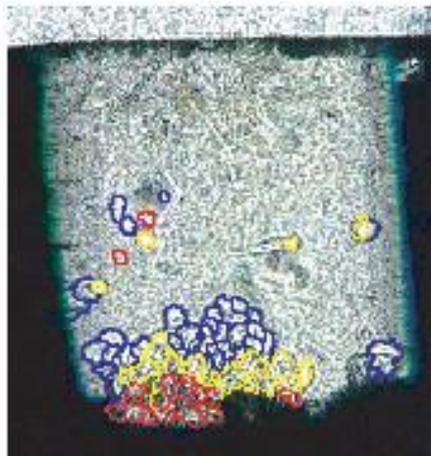


図 3、低温で雪崩的に生成する結晶群

エアロジェルによる乱れが、固体表面へ及ぼす摩擦の影響も調べた。これまでに、高温では固液界面が滑らかに成長し、低温では雪崩的に成長するという動的転移を見ることが分かっていた (図 2,3)。成長速度と核生成確率の温度依存性をより系統的に測定し、滑らかな成長は熱揺らぎによって乱れを超えていること、雪崩的成長は量子トンネリングにより乱れを超えていることが結論できた。また雪崩のサイズ分布はべき乗則に従い、

古典系での摩擦現象でも見られる自己組織化臨界性が、乱れの元で進行する極低温での一次相転移にも現れることが確かめられた (図 4)。

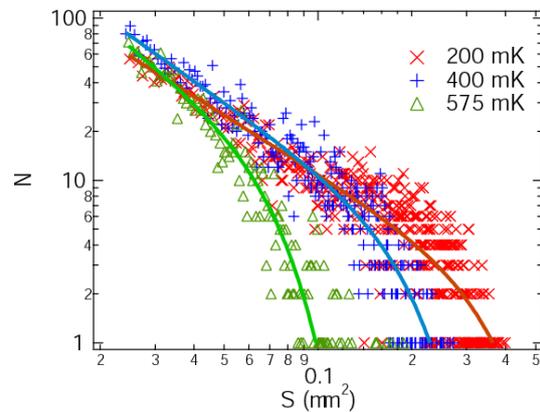


図 4、エアロジェル中で量子核生成するヘリウム結晶のサイズ分布。S は核生成した結晶の射影面積で、N はその面積をもつ結晶が生じた回数。

またエアロジェル中に取り残された液体領域が、冷却により更なる低温で再結晶化する現象を発見した。結晶化には質量輸送が伴うはずであり、この再結晶化には液体を取り囲む固体の超固体転移が関わっている可能性があり、研究を継続中である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① Critical Overpressure for Nucleation of 4He Crystals in Aerogel, H. Matsuda, R. Masumoto, A. Ochi, R. Nomura and Y. Okuda, Journal of Physics: Conference Series, in press. (2012) 査読有
- ② Creation and Annihilation of 4He Negative Crystals, T. Takahashi, R. Nomura and Y. Okuda, Journal of Physics: Conference Series, in press. (2012) 査読有
- ③ 4He Crystals in Superfluid under Zero Gravity, T. Takahashi, R. Nomura and Y. Okuda, Phys. Rev. E **85**, 030601(R)-1-5 (2012). 査読有
- ④ Macroscopic Quantum Tunneling and Avalanche Size Distribution of 4He Crystallization in Aerogel, R. Nomura, H. Matsuda, R. Masumoto, K. Ueno and Y. Okuda, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 123601 (2011). 査読有
- ⑤ Surface waves on Superfluid 4He under the Reduced Gravity, T. Takahashi, M. Suzuki, R.

Nomura, Y. Okuda, K. Kamiya, T. Numazawa and P. Shirron, *Microgravity Sci. Technol.* **23**, 365–372 (2011). 査読有

⑥Development of a  $^3\text{He}$  refrigerator for possible experiments of solid  $^4\text{He}$  on a small jet plane, T. Takahashi, M. Suzuki, R. Nomura and Y. Okuda, *J. Low Temp. Phys.* **162**, 733-739 (2011). 査読有

⑦Dynamical Transition of  $^4\text{He}$  Crystallization in a Very High Porosity Aerogel, R. Masumoto, K. Ueno, H. Matsuda, R. Nomura and Y. Okuda, *J. Low Temp. Phys.* **162**, 399-406 (2011). 査読有

⑧Nucleation and avalanche of  $^4\text{He}$  crystals in aerogel, K. Ueno, R. Masumoto, T. Mimori, A. Osawa, R. Nomura and Y. Okuda, *J. Low Temp. Phys.* **158**, 490-495 (2010). 査読有

[学会発表] (計 20 件)

①松田弘文, 越智亜玖利, 磯崎玲, 野村竜司, 奥田雄一, Aerogel 中での  $^4\text{He}$  の結晶成長 IV、日本物理学会第 67 回年次大会、関西学院大学、2012 年 3 月 27 日

②R. Nomura, H. Matsuda, R. Masumoto, A. Ochi, R. Isozaki and Y. Okuda, Self-organized criticality in quantum crystallization of  $^4\text{He}$  in aerogel, *Microkelvin workshop 2012*, Smolenice, Slovakia, 2012/3/23

③松田弘文, 増本亮太, 上野健一, 野村竜司, 奥田雄一, Aerogel 中での  $^4\text{He}$  の結晶成長 III、日本物理学会 2011 年秋季大会、富山大学、2011 年 9 月 24 日

④高橋拓也, 野村竜司, 奥田雄一、固体  $\text{He4}$  における負結晶のダイナミクス 2、日本物理学会 2011 年秋季大会、富山大学、2011 年 9 月 24 日

⑤高橋拓也, 野村竜司, 奥田雄一、微小重力下における  $\text{He4}$  結晶の観測、日本物理学会 2011 年秋季大会、富山大学、2011 年 9 月 24 日

⑥R. Nomura, H. Matsuda, R. Masumoto, K. Ueno, and Y. Okuda, Macroscopic Quantum Tunneling and Self-organized Criticality of  $^4\text{He}$  Crystallization in Aerogel, KAIST, Daejeon, Korea, 2011/8/19

⑦H. Matsuda, R. Masumoto, A. Och, R. Nomura, and Y. Okuda, Critical Overpressure for Nucleation of  $^4\text{He}$  Crystals in Aerogel, 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26)、The Beijing International Convention Center, Beijing, China, 2011/8/16

⑧R. Nomura, H. Matsuda, R. Masumoto, K. Ueno, and Y. Okuda, Self-organized Criticality in

Quantum Growth Regime of  $^4\text{He}$  Crystals in Aerogel, 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26)、The Beijing International Convention Center, Beijing, China, 2011/8/16

⑨T. Takahashi, R. Nomura, and Y. Okuda, Generation and Annihilation of  $^4\text{He}$  Negative Crystals, 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26)、The Beijing International Convention Center, Beijing, China, 2011/8/13

⑩T. Takahashi, R. Nomura, and Y. Okuda, Equilibrium Shape of  $^4\text{He}$  crystal under mGE, 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26)、The Beijing International Convention Center, Beijing, China, 2011/8/13

⑪高橋拓也, 野村竜司, 奥田雄一、固体  $\text{He4}$  における負結晶のダイナミクス、日本物理学会第 66 回年次大会、新潟大学、2011 年 3 月 28 日

⑫松田弘文, 増本亮太, 上野健一, 野村竜司, 奥田雄一, Aerogel 中での  $^4\text{He}$  の結晶成長 II、日本物理学会第 66 回年次大会、新潟大学、2011 年 3 月 28 日

⑬高橋拓也, 鈴木元也, 野村竜司, 奥田雄一、航空機を用いた固体  $^4\text{He}$  の実験のための  $^3\text{He}$  冷凍機の開発、日本物理学会 2010 年秋季大会、大阪府立大学、2010 年 9 月 24 日

⑭増本亮太, 上野健一, 松田弘文, 野村竜司, 奥田雄一, Aerogel 中での  $^4\text{He}$  の結晶成長、日本物理学会 2010 年秋季大会、大阪府立大学、2010 年 9 月 26 日

⑮ R. Masumoto, K. Ueno, H. Matsuda, R. Nomura and Y. Okuda, Dynamical Transition of  $^4\text{He}$  Crystallization in a Very High Porosity Aerogel, International symposium on quantum fluids and solids (QFS2010)、Grenoble World Trade Center, Grenoble, France, 2010/8/5

⑯T. Takahashi, M. Suzuki, R. Nomura and Y. Okuda, Development of a  $^3\text{He}$  refrigerator for possible experiments of solid  $^4\text{He}$  on a small jet plane、International symposium on quantum fluids and solids (QFS2010)、Grenoble World Trade Center, Grenoble, France, 2010/8/5

⑰増本亮太, 上野健一, 野村竜司, 奥田雄一、Aerogel 中における  $^4\text{He}$  の結晶成長速度の温度依存性、日本物理学会第 65 回年次大会、岡山大学、2010 年 3 月 23 日

⑱R. Nomura, R. Masumoto, K. Ueno and Y. Okuda, Thermal and quantum crystallizations of  $^4\text{He}$  in aerogel, APS March Meeting, Oregon Convention Center, Portland, USA, 2010/3/19

⑲ R. Masumoto, K. Ueno, R. Nomura and Y. Okuda, Dynamical Transition and Self-Organized Criticality in Crystallization of 4He in Aerogel, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials, Hamagin hall "VIA MARE", Yokohama, Japan, 2010/3/9

⑳ Y. Okuda, R. Masumoto, K. Ueno and R. Nomura, Thermal and quantum crystallizations of 4He in aerogel, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials, Hamagin hall "VIA MARE", Yokohama, Japan, 2010/3/9

[その他]

ホームページ

<http://www.ltp.ap.titech.ac.jp/>

新聞報道

科学新聞 2012年2月3日第3374号4面

「多孔体中でのヘリウム量子結晶」

JPSJ 2011年12月の注目論文

「多孔体中でのヘリウム量子結晶の雪崩的成長と冪乗則」日本物理学会誌 2012年3号

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野村 竜司 (NOMURA RYUJI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号：00323783

(2) 研究分担者

奥田 雄一 (OKUDA YUICHI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：50135670