

## 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31日現在

機関番号：14301  
 研究種目：挑戦的萌芽研究  
 研究期間：2010～2011  
 課題番号：22654039  
 研究課題名（和文） 量子固体ヘリウム4中の極微量不純物ヘリウム3のNMR  
 研究課題名（英文） NMR of extremely diluted impurity helium-3  
 in quantum solid helium-4  
 研究代表者  
 佐々木 豊（SASAKI YUTAKA）  
 京都大学・低温物質科学研究センター・准教授  
 研究者番号：60205870

## 研究成果の概要（和文）：

量子固体ヘリウム4の示す超固体現象を理解するために、1ppm以下の微量不純物ヘリウム3のNMR測定を目指した技術開発を行った。量子干渉素子SQUIDを利用した前置増幅器により、室温部に半導体前置増幅器を設置した従来型のNMR測定装置と比べて1万倍程度の感度向上が可能であることを示した。また、ヘリウム3不純物が結晶中で偏在するしないに関わらず超固体特性を同程度に抑制する不思議な不純物効果を持つことを発見した。

## 研究成果の概要（英文）：

Technical development aiming NMR measurement on less than 1ppm of helium 3 impurity was carried out to investigate supersolid like behavior in solid helium 4. A factor of 10000 improvement over standard NMR measurement was shown to be feasible by using SQUID preamplifier. It was shown that the suppression of supersolidity remain unchanged regardless of the distributions of helium 3 impurity in a crystal.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	0	2,000,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,800,000	240,000	3,040,000

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：スーパーソリッド、不純物効果、NMR、MRI、SQUID

## 1. 研究開始当初の背景

KimとChanによる捻れ振動子測定による超固体(スーパーソリッド)発見の第一報が流れて以来、その解釈の正否を巡って様々な研究が展開されているが、現状では議論が終結しつつあるとすら言いがたい混迷した状況である。固体試料の結晶性の不完全さが関与

した現象であるとの報告もあるが、完全結晶に近い状態でも同種の応答が観測されるとの報告もある。また、ずれ変形応答で同種の現象が観測されるが、直流のスーパーフローが観測されない等、超固体という解釈に疑問を投げかける実験結果もある。

その中でも、わずか10ppm程度の微量不

純物としてヘリウム3を混入した固体ヘリウム4の超固体的応答が、不純物濃度に応じて阻害されたりそれと同時に高温側から出現したりと、不思議な現象が報告されている。我々はこの不純物効果の解明のために捻れ振動子に封入した超固体ヘリウム4の中の不純物ヘリウム3のNMR同時測定を開始した。微量不純物のNMR測定の困難さを考え0.1%の試料から開始したが、超固体応答の観測される10ppmの試料からNMR信号を検出できるところまで到達するなど世界に類を見ない成果を得た。しかし現状の半導体前置増幅器によるNMRとしては測定感度の限界に近づきつつあり、量子干渉素子SQUIDを前置増幅器に利用した超高感度測定法の開発に踏み切る必要があると判断した。

## 2. 研究の目的

100mK程度以下の温度で量子固体ヘリウム4の示す超流動的な捻れ振動応答(超固体応答)が持つ、極めて特異的かつ強力なヘリウム3不純物効果について、捻れ振動子測定と微量不純物ヘリウム3のNMRの同時測定を通して、その起源の解明を目指す。また、相分離温度以下で固体ヘリウム4中に析出したヘリウム3のマイクロクラスターが示す不思議な状態について解明を目指す。この研究を契機として極微量不純物のNMR測定の技術を確立し、孤立不純物の長時間コヒーレンスを量子計算へと応用する可能性を探求する。

## 3. 研究の方法

SQUID前置増幅器を利用した超高感度測定法の開発により、現行比100倍以上の超高感度を達成することで0.1ppmの試料までのNMR測定を可能にし、捻れ振動子との同時測定により不純物効果の起源を解明する。また、これまでの測定結果によれば相分離温度以下で固体ヘリウム4中に析出するヘリウム3のマイクロクラスターは固体でも液体でもないのとれるNMR応答を示している。より詳細な測定によりこのクラスターが量子ガラス状態にあるのか、それとも全く未知の状態にあるのか解明したい。

## 4. 研究成果

初年度は超低温SQUID-NMR/MRI装置を製作するために超伝導磁気シールド付小型高均一度超伝導磁石を開発した。製作した超伝導磁石は3軸の線形磁場勾配コイルを含み、およそ0.15テスラまでの磁場範囲で40ppmの磁場均一度を直径5mmの試料空間に提供することができた。

また、SQUIDを用いた低温低雑音増幅器の入力回路の最適化の知見を得るために、FET

を用いた低温低雑音アンプを用いたテストを行った。クライオスタットの低温部分にアンプや同調入力回路を実装することにより、室温アンプを利用している現行の測定回路と比べて約10倍のSN比向上を達成することが出来た。

またこれらの開発と並行して、捻れ振動子測定とNMR/MRI測定を用いた固体ヘリウム4中の微量ヘリウム3の研究を行った。約100mK以下の温度で発生する固体の相分離現象を10ppm, 40ppmの微量ヘリウム3を含む試料に対して観測し、高温ではヘリウム4中に均等に分布していたヘリウム3が相分離の進行に伴って結晶中のごく一部の場所に集積し偏在していることをつきとめた。またこのように大きな空間分布の変化があるにも関わらず、捻れ振動子測定で観測されるスーパーソリッド応答には有為な変化が見られないことを発見した。スーパーソリッド応答の大きさを約半分に減少させるに必要な不純物ヘリウム3の量はおよそ10ppmであるが、その大半が結晶生成時にあった場所から移動して結晶中の限られた場所に偏在するような変化の前後で、ほぼ同じ大きさのスーパーソリッド応答を示すということは、この不純物効果が通常考えられるようなものとは大きく異なったメカニズムで働いていることを示唆している。

最終年度は、小型DC-SQUID素子をNMR計測システムの低温前置アンプとして利用するための技術開発を行った。テスト用クライオスタットに組み込んだSQUIDに入力回路より数MHzまでの微小な高周波信号を導入し、NMR用の低温小信号ローノイズ増幅器として十分な性能を発揮することを実証した。テスト結果によれば、従来型の室温半導体アンプを用いた測定と比べて1万倍もの高感度が得られることがわかった。

パルスNMRにおいては、観測する信号より遥かに大きなレベルの励起信号からの漏れ込みが信号検出回路に流れ込むことが避けられず、SQUIDのような高感度素子を前置アンプとして用いることの障害となっている。

その問題を回避するためにQ-spoilerとして多段のSQUIDを入力回路に直列に取付けることとし、その動作のテストを行った。その結果SQUIDの動作点を適切に調整することで、十分な効果を得られることがわかった。

これらのテストを行い十分な知見を積み上げた上で、昨年度製作した超伝導磁気シールド付小型高均一度超伝導磁石を用いたテスト用ヘリウム3NMR測定クライオスタットに上記のSQUIDシステムを組み込んでテストを行った。しかしながらこの状況においてはSQUIDの入力回路に予備テスト段階とは比較にならぬ程巨大なノイズが混入しSQUIDの動作が極めて不安定になった。このノイズ混入

の対策に苦戦したが、年度末ぎりぎりになってようやくその目処が立った。そのため年度内にはこれ以上の発展を遂げることができなかったが、今後も開発を継続して、実用的な状態に持っていきたいものと考えている。完成の暁には超低温 MRI システムに組み込んで世界初の超低温 SQUID-NMR/MRI システムとし、これを利用して前人未到の 1ppm 以下の不純物ヘリウム 3 からの NMR 信号検出により未だに混迷しているスーパーソリッド現象の解明に一石を投じたい。

#### 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 3 件)

① “Simultaneous Measurement of Torsional Oscillator and NMR in Solid  $^4\text{He}$  with 10 ppm of  $^3\text{He}$ ”, R. Toda, W. Onoe, M. Kanemoto, T. Kakuda, Y. Tanaka, and Y. Sasaki, J. Low Temp. Phys. **162**, 476-482 (2011); DOI 10.1007/s10909-010-0279-z (査読有)

② “Simultaneous measurement of torsional oscillator and NMR of very dilute  $^3\text{He}$  in solid  $^4\text{He}$ ”, R. Toda, P. Gumman, K. Kosaka, M. Kanemoto, W. Onoe, and Y. Sasaki, Physical Review B **82**, 219901(E) (2010); DOI 10.1103/PhysRevB.82.219901 (査読有)

③ “Simultaneous measurement of torsional oscillator and NMR of very dilute  $^3\text{He}$  in solid  $^4\text{He}$ ”, R. Toda, P. Gumman, K. Kosaka, M. Kanemoto, W. Onoe, and Y. Sasaki, Physical Review B **81**, 214515-1-5 (2010); DOI 10.1103/PhysRevB.81.214515 (査読有)

[学会発表] (計 7 件)

① “極小ノイズの SQUID アンプを用いた NMR 装置の開発”, 笠井純, 宮津怜嗣, 渡會康介, Minki Jeong, 佐々木豊, 京都大学低温物質科学研究センター第 10 回講演会・研究交流会, 京都大学, 京都市, 2012 年 3 月 9 日

② “Evidence of Diluted Superfluid  $^3\text{He}$  in Aerogel”, 伊藤良介, 田中佑輔, 人見純司, 戸田亮, 金本真知, 佐々木豊, 物性研究所短期研究会「量子凝縮系における defects および topology」, 東京大学物性研究所, 柏市, 2012 年 1 月 5 日

③ “ $^4\text{He}$  超固体中の微量不純物  $^3\text{He}$  の NMR”, 佐々木豊, 理研シンポジウム「量子凝縮系の非線形・非平衡現象」, 理化学研究所, 和光

市, 2011 年 1 月 4 日

④ “Inhomogeneous Distribution of impurity  $^3\text{He}$  in Solid  $^4\text{He}$  with NCRI”, R. Toda, W. Onoe, M. Kanemoto, T. Kakuda, Y. Tanaka, and Y. Sasaki, Korea-Japan Solid Helium Workshop, KAIST, Daejeon, Korea, 2010 年 12 月 20 日 (招待講演)

⑤ “ $^4\text{He}$  固体中極微量  $^3\text{He}$  不純物の磁化緩和過程”, 戸田亮, 尾上わか奈, Patryk Gumann, 金本真知, 角田智幸, 田中佑輔, 佐々木豊, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 26 日

⑥ “Simultaneous measurement of torsional oscillator and NMR in solid  $^4\text{He}$  with 10ppm of  $^3\text{He}$ ”, R. Toda, W. Onoe, M. Kanemoto, T. Kakuda, Y. Tanaka, and Y. Sasaki, International Symposium on Quantum Fluids and Solids QFS2010, Grenoble, France, 2010 年 8 月 5 日

⑦ “NMR measurement on extremely diluted  $^3\text{He}$  impurity in solid  $^4\text{He}$  with NCRI”, R. Toda, W. Onoe, M. Kanemoto, T. Kakuda, Y. Tanaka, and Y. Sasaki, Supersolidity 2010, ENS, Paris, France, 2010 年 7 月 30 日 (招待講演)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

<http://www2.scphys.kyoto-u.ac.jp/Labos/Teion/>

<http://www.scphys.kyoto-u.ac.jp/gcoe/Announcements/Newsletter/Newsletter10.pdf>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐々木 豊 (SASAKI YUTAKA)  
京都大学・低温物質科学研究センター・  
准教授  
研究者番号：60205870

### (2) 研究分担者

該当なし

### (3) 連携研究者

該当なし

### (4) 研究協力者

戸田 亮 (TODA RYO)  
京都大学・大学院理学研究科・特定研究員

Patryk Gumann (Patryk Gumann)  
米国 Rutgers 大学・研究員

尾上 わか奈 (ONOE WAKANA)  
京都大学・大学院理学研究科・大学院生

金本 真知 (KANEMOTO MASATOMO)  
京都大学・大学院理学研究科・大学院生

角田 智幸 (KAKUDA TOMOYUKI)  
京都大学・大学院理学研究科・大学院生

田中 佑輔 (TANAKA YUSUKE)  
京都大学・大学院理学研究科・大学院生

伊藤 良介 (ITO RYOSUKE)  
京都大学・大学院理学研究科・大学院生

人見 純司 (HITOMI JUNJI)  
京都大学・大学院理学研究科・大学院生

笠井 純 (KASAI JUN)  
京都大学・理学部・学部生

宮津 怜嗣 (MIYATSU SATOSHI)  
京都大学・理学部・学部生

渡會 康介 (WATARAI KOSUKE)  
京都大学・理学部・学部生

Minki Jeong (Minki Jeong)  
京都大学・低温物質科学研究センター・  
研究員 (研究機関)