

平成27年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書
〔追跡評価用〕

平成27年4月20日現在

研究代表者 氏名	鈴木 治彦	所属研究機関・ 部局・職 (研究期間終了時)	金沢大学・数物科学系・特任教授
研究課題名	マイクロK温度領域における量子臨界現象の研究		
課題番号	17002004		
研究組織 (研究期間終了時)	研究代表者 鈴木 治彦（金沢大学・数物科学系・特任教授） 研究分担者 松本 宏一（金沢大学・数物科学系・准教授） 阿部 聡（金沢大学・数物科学系・講師） 辻井 宏之（金沢大学・学校教育系・准教授）		

【補助金交付額】

年度	直接経費
平成17年度	52,600 千円
平成18年度	37,400 千円
平成19年度	46,100 千円
平成20年度	38,251 千円
平成21年度	30,300 千円
総計	204,651 千円

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか

特別推進研究によってなされた研究が、どのように発展しているか、次の(1)~(4)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究の概要

(研究期間終了後における研究の実施状況及び研究の発展過程がわかるような具体的内容を記述してください。)

研究代表者鈴木はこの研究の開始時は金沢大の教授として研究を共同研究者と開始し、2年目からは特任教授として研究に専念した。研究期間の終了と同時に金沢大学は退職し名誉教授となった。研究は各共同研究者が個別に続行した。特に松本、阿部の両氏はこの研究に用いた大型の核断熱消磁冷却装置を用いて研究を続行した。代表者鈴木は退職後も助教の金子氏と共同研究で在職中に開発した低温 X 線解析装置を用いて研究を行っている。また 2012 年まで 6 年間客員教授を務めた中国浙江大学とはその後も共同研究を続けている。

1, マイクロ K 温度領域における量子臨界現象の研究およびその後の発展

量子相転移と言うのは絶対零度における相転移で、その相転移点を量子臨界点 (QCP) と呼ぶ。特に二つ以上の相互作用が拮抗している系において QCP 近傍に於いて量子ゆらぎにより特異な現象が顕著に現れる。この量子臨界現象は物性物理の根幹をなす研究でありその解明は物性物理の発展に大きく寄与する物と思われる。しかし本来絶対零度における相転移にも関わらず、多くの量子臨界現象の研究が温度の高い所で行われている。そこで我々はマイクロ K 温度領域の研究を行う事によって新しい概念が出てくるのではないかと考えこの研究を開始した。

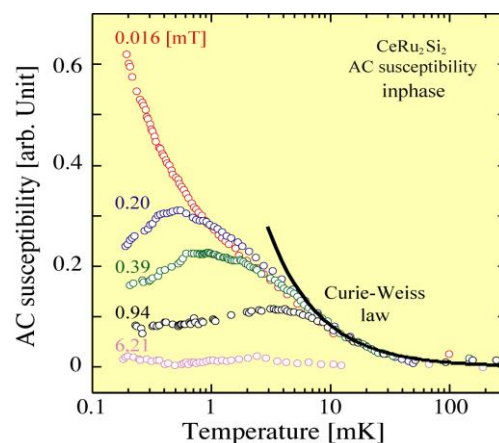
1), CeRu_2Si_2 ; これまで量子臨界現象は広く SCR 理論によって説明された。しかし我々が特別推進研究で行った CeRu_2Si_2 の結果は YbRh_2Si_2 と並んで SCR 理論では説明できない。例えば図に示してある帯磁率 $\chi_0(0)$ の絶対零度への発散が $\chi_0^{-1} \sim T^{0.6}$ で表される。SCR では $\chi_0^{-1} \sim T^1$ である。一方小さな磁場の下で右図のように温度によらない量子ゆらぎ (ゼロ点振動) による温度によらない帯磁率の観測に成功した。(我々の結果は Phys. Rev. B 67 (2003) 180407(R), Phys. Rev. Letters, 101 (2008) 256402)。我々は研究期間中から我々の実験結果の理論的解釈について、東大、今田正俊、および阪大、三宅和正の両氏と議論を深めてもらっていた。研究終了後の量子臨界現象の理論の発展は主としてこの両氏による。今田氏の量子三重臨界点 (QTCP) 理論は我々の結果を良く説明している。(T.Misawa, Y.Yamaji, and M.Imada, J. Phys. Soc. Jpn, 78 (2009) 084707)。一方三宅氏の価数揺動転移は量子臨界現象の新しい分野を拓いている。

2), トポロジー量子相転移; 最近の量子臨界現象の研究にフェルミ面の変化によるトポロジー変化の量子臨界現象の研究が行われるようになった。これはフェルミ面に関したもので温度が高いとフェルミ分布によるぼやけでクリアな測定が難しいにも関わらず我々の様な超低温での研究は行われていないのが現状である。

3), 鉄系超伝導体と量子ゆらぎ; 量子ゆらぎの研究は物性の他の分野でも応用されて来ている。高温超伝導体の発見以来、相転移の近傍で現れる事が指摘されて来た。特に鉄系超伝導体の超伝導出現機構として軌道の量子ゆらぎが提案され成功を収めて来た。我々も研究期間中に開発した低温 X 線解析装置を用いて実験的研究をして成果を上げた。(Quantum Criticality and Superconductivity in $\text{SmFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{AsO}$, H.Kaneko, H.Suzuki et al., J.Phys.: Conf.Ser.,400(2012) 022047)

2、核磁性

特別推進研究では上記 CeRu_2Si_2 以外にエアロジェル中の液体 ^3He の超流動研究と Pt 金属の核磁性の量子臨界現象も研究した。残念ながら量子ゆらぎの観測までには至らなかったが、研究期間終了後これらの研究で進展が見られる。特に核磁性では物性研究に於いて核スピンの重要性、核スピンと電子系の hyperfine 相互作用の重要性が認識され、これまで理解できなかった電子系の磁性に核スピン系を取り入れる事によりその磁性が理解される事を指摘した論文が出された。(Y. Aoki, H. Shiba et al., J. Phys. Soc. Jpn. 80 (2011) 054704)。核磁性 (核スピン・オーダー) の研究はオーダーの起きる温度が低温なので超低温装置が必要である。研究期間終了後も共同研究者の松本宏一、阿部聡の二人は引き続きこの量子臨界現象の研究に用いて来た装置を用いて超低温領域の研究を続行している。このような時間と労力のかかる研究を敬遠する風潮の中で、彼らの超低温研究は貴重である。その成果の一つに、 $\text{Pr}_3\text{Pd}_{20}\text{Ge}_6$ の核スピン・オーダーの研究が有る。(O.Iwakami et al., Phys. Rev.B, 90 (2014) 100402(R))。



CeRu_2Si_2 の交流帯磁率

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(2) 論文発表、国際会議等への招待講演における発表など（研究の発展過程でなされた研究成果の発表状況を記述してください。）

【1】論文発表（研究代表者および共同研究者を含む、主なもの）

- 1) K. Matsumoto, H. Tsuboya, K. Yoshino, S. Abe, H. Tsujii and H. Suzuki; Ultrasound Study of the Solid-Liquid Transition and Solid-Liquid Interface of 4He in Aerogel, J. Phys. Soc. Jpn., 78 (2009) 034601-1-7
- 2) Y. Luo, Q. Tao, Y. Li, X. Lin, G. Cao, Z. Xu, Y. Xue, H. Kaneko, A. V. Savinkov, H. Suzuki, C. Fang and J. Hu; Evidence of magnetically driven structural phase transition in RFeAsO (R = La, Sm, Gd, and Tb): A low-temperature x-ray diffraction study, Phys. Rev. B 80 (2009) 224511-1-224511-5
- 3) N. Kuwata, K. Ono, E. Kobayashi, Y. Sugita and H. Suzuki; Magnetic properties of enriched 195Pt metals, J. Low Temp. Phys. 155 (2009) 114
- 4) J. Yoshida, S. Abe, A. Tada, H. Tsujii, K. Matsumoto, H. Suzuki and H S Suzuki; Magnetic susceptibility of PrMg3 at ultra low temperatures, J. Physics, Conf. Series (LT25) 150 (2009) 042241
- 5) Y. Xue, H. Kaneko, Q. Tao, Z. Xu, N. Takeda, Y. Nemoto, T. Goto and H. Suzuki; Low temperature x-ray diffraction study on superconductivity, J. Physics, Conf. Series (LT25) 150 (2009) 052284
- 6) H. Tsujii, S. Mihara, S. Abe, H. Suzuki and K. Matsumoto; Acoustic properties of superfluid 3He in 97% aerogel, J. Physics, Conf. Series (LT25) 150 (2009) 032114
- 7) K. Matsumoto, H. Tsuboya, K. Ohmori, S. Abe, H. Suzuki and D A Tayurskii; Frequency dependence of fast mode ultrasound attenuation of liquid 4He in aerogel, J. Physics, Conf. Series (LT25) 150 (2009) 032054
- 8) Y. Zhu, K. Asamoto, Y. Nishimura, T. Kouen, S. Abe, K. Matsumoto, T. Numazawa; Magnetocaloric Effect of (Er_xR_{1-x})Co₂(R=Ho,Dy) for Magnetic Refrigeration between 20 and 80 K, Cryogenics, 51 (2011) 494-498
- 9) H. Suzuki, H. Kaneko, Y. Xue, N. Shumsun, A. Savinkov, H. Xing, Z.A. Xu, S. Zhang and Y. Ishikawa; Low temperature x-ray diffraction study on phase transitions, J. Physics: Conference Series 400 (2012) 022118.
- 10) S. Abe, F. Sasaki, T. Oonishi, D. Inoue, J. Yoshida, H. Tsuji, H. Suzuki, K. Matsumoto; A compact capacitive dilatometer for thermal expansion and magnetostriction measurements at millikelvin temperatures, Cryogenics, 52 (2012) 452-456.
- 11) H. Kaneko, X. Yun, N. Shumsun, A. Savinkov, H. Suzuki, Y. K. Li, Q. Tao, G. H. Cao and Z. A. Xu; Quantum Criticality and Superconductivity, J. Phys.: Conf. Ser. 400 (2012) 022047.
- 12) T. Numazawa, K. Kamiya, T. Utaki, K. Matsumoto; Superconductivity and Cryogenics, 15 (2013) 1-8.
- 13) O. Iwakami, Y. Namisashi, S. Abe, K. Matsumoto, G. Ano, M. Akatsu, K. Mitsumoto, Y. Nemoto, N. Takeda, T. Goto and H. Kitazawa; Magnetic ordering of hyperfine-coupled nuclear and 4f-electron moments in clathrate compound Pr₃Pd₂₀Ge₆, Physical Review B, 90 (2014) 100402(R).
- 14) Satoshi Abe and Koichi Matsumoto; Nuclear demagnetization for ultra-low temperatures, Cryogenics 62 (2014) 213.

【2】招待講演

鈴木（研究代表者）

1. 中国物理学会 2011年9月15-18日
Haruhiko Suzuki; Phase transition studied by low temperature x-ray diffraction.
2. International Conference on Advances in Physics 2013, 3-5, January, 2013,
Shahjala University of Science and Technology, Sylhet-3114, Bangladesh
Haruhiko Suzuki; Low temperature Physics- Quantum fluctuation and Superconductivity.

松本（共同研究者）

1. International Cryogenic Engineering Conference, 2010, July, Poland
K. Matsumoto, T. Numazawa; Magnetic refrigeration of hydrogen liquefaction.
2. Thermag. VI, 2010, September 7-10, Victoria, Canada,
Koichi Matsumoto; Magnetic Refrigeration for Hydrogen Liquefaction.

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(3) 研究費の取得状況（研究代表者として取得したもののみ）

該当せず

(4) 特別推進研究の研究成果を背景に生み出された新たな発見・知見

量子臨界現象および量子ゆらぎの研究は物性物理学研究の基礎となる理解を与える。本来量子相転移と言うのは絶対零度に於ける相転移を言い、低温でも有限温度の相転移は古典的相転移と呼ばれる。しかし熱力学第3法則で絶対零度には到達できないので出来るだけ低い温度で量子ゆらぎによる現象が顕著に現れる系を選んで研究している。しかし殆どの研究が比較的高い温度で低くても数十 mK 程度の温度で行われている。我々、特に研究代表者の鈴木はより低い温度、マイクロ K 或はそれ以下の温度での測定は、より本質的な、或は新しい量子臨界現象の研究が行われると考えて研究を開始した。一方超低温生成技術および超低温に於ける測定技術の開発は今後の物性研究に取って重要な拠点となりうると考えて研究を開始した。

ここで超低温冷却技術について少し述べる。1972年の超流動 ^3He の発見は我が国の物性物理学会に衝撃をもたらした。追試を行うにもその温度まで冷却する技術が日本には無かった。それで当時の中島貞雄、芳田圭先生達を中心に超低温冷却装置の開発が奨励され成果が出て来た。しかし世の中は次第に成果主義に傾き今に至っている。超低温領域は熱緩和時間が長くなり測定に長時間を要する。畢竟、論文数が少なくなり敬遠されて来る。それは世界中で同じ傾向である。従って、発表した論文が引用される数も少なく、論文数、引用数で業績を評価される現状では益々敬遠される。超流動 ^3He の研究を行っている研究室は今でも核断熱消磁冷却装置を用いているが広く物性測定に超低温装置を用いているのは、少なくとも日本では研究代表者の共同研究者達、松本、阿部の両氏だけであろう。

マイクロ K 温度領域での研究によって量子臨界現象研究の新しい知見を得る事を目的に実験を開始した。それまで量子臨界現象の特異な振る舞いは守谷達の SCR 理論によって良く説明されて来た。しかし我々が測定した CeRu_2Si_2 は SCR 理論では説明されない実験結果が得られた。帯磁率、磁化の測定他に熱膨張、磁歪の測定などにより CeRu_2Si_2 はゼロ磁場、大気圧の下で量子臨界点のすぐそばに有る事が分かった。この SCR 理論では説明されない実験結果を説明するために我々は守谷先生を始め、東大今田さん、阪大三宅さん達と議論を深めた。その結果今田さんが出された量子3重臨界点 (QTCP) 理論は我々の実験結果を良く説明する事が分かった。

実験結果の図にも示したが低温で磁場中でゼロ点振動の温度に依存しない量子ゆらぎによる帯磁率の観測に成功した。これは量子ゆらぎの本質的理解に重要な鍵を与える物と思われる。

量子ゆらぎの応用では、鉄系超伝導体の超伝導発現機構として f 電子の軌道の量子ゆらぎによる電子対生成の理論が有力である。我々も我々が開発した超低温 X 線解析装置を用いて $\text{SmFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{AsO}$ の量子相転移近傍の Co 濃度で超伝導転移温度が最大となる事を見だし超伝導と量子ゆらぎの関係を裏付けた。(発表論文の 1 1)

研究期間終了後も共同研究者の松本、阿部の両氏は超低温冷却装置および測定装置の開発に努めている。核磁性の様な超低温で現れる現象の研究に於いてその威力を発揮している。(発表論文の 1 3)

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況

特別推進研究の研究成果が他の研究者に活用された状況について、次の(1)、(2)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 学界への貢献の状況（学術研究へのインパクト及び関連領域のその後の動向、関連領域への関わり等）

量子臨界現象の解明

本来、絶対零度に於ける相転移である量子相転移の転移点、量子臨界点近傍は量子ゆらぎによって特異な現象を示す。我々は量子臨界現象の解明のために出来るだけ絶対零度に近い温度、マイクロ K 温度領域での研究を行った。結果は CeRu_2Si_2 においてそれまで多くの量子臨界現象を説明できた SCR 理論では説明できない帯磁率、磁化の温度変化を観測した。さらにこの現象を理解する為に熱膨張、磁歪の測定を行った。その結果 CeRu_2Si_2 はゼロ磁場、大気圧の下で量子臨界点のすぐそばにある。少し圧力をかけた所に量子臨界点が存在する事を示した。

今田正俊氏は我々の CeRu_2Si_2 の SCR 理論では説明できない実験結果を同じく SCR 理論で説明できない YbRh_2Si_2 と一緒に量子三重臨界点 (QTCP) 理論を作り説明した。T.Misawa, Y.Yamaji, and M.Imada, J. Phys. Soc. Jpn, 78 (2009) 084707 に詳しく述べられている。この論文の中で量子臨界現象の研究にこの我々の CeRu_2Si_2 は最適の物質であると言われている。これにより対称性の破れによる量子臨界現象が現段階ではほぼ完全に理解できたと言える。

トポロジ-量子相転移

もう一つのタイプの量子相転移、すなわちフェルミレベルの上下でフェルミ面が出現、消滅する絶縁体、金属転移のようなトポロジ-量子相転移が有る。現在はこのトポロジ-量子相転移の研究も盛んになりつつ有る。トポロジ-量子相転移もフェルミ面が関与しているので有限温度ではフェルミ分布により現象がぼやける。やはり超低温での測定が有効であろう。

鉄系超伝導体と量子ゆらぎ

量子ゆらぎが広く研究されている例の一つに鉄系超伝導体の超伝導発現機構として軌道の量子ゆらぎによる超伝導形成理論が有り成功を収めている。我々も低温 X 線解析装置を用いて $\text{SmFe}_x\text{Co}_{1-x}\text{AsO}$ の量子ゆらぎと超伝導を論じた。

(Quantum Criticality and Superconductivity in $\text{SmFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{AsO}$, H.Kaneko, H.Suzuki et al., J.Phys.: Conf.Ser.,400 (2012) 022047)

核磁性

量子臨界現象の研究の1つの分野として ^{195}Pt の核スピン・オーダーが有ったが研究期間終了後も超低温に於ける物性として核磁性の研究が行われている。特に電子と hf 相互作用している増強核磁性はまた活発に研究され始めている。

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況（続き）

(2) 論文引用状況（上位10報程度を記述してください。）

【研究期間中に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	J. Yoshida, S. Abe, D. Takahashi, Y. Segawa, Y. Komai, H. Tsujii, K. Matsumoto, H. Suzuki and Y. Onuki; Novel Quantum Criticality in CeRu ₂ Si ₂ near Absolute Zero Observed by Thermal Expansion and Magnetostriction, Phys. Rev. Letters, 101 (2008) 256402	CeRu ₂ Si ₂ の測定された負の熱膨張、および磁歪の測定から新しい QCP が圧力を増大する方向に存在すると予測した。	4
2	K. Matsumoto, H. Tsuboya, K. Yoshino, S. Abe, H. Suzuki and D.A. Tayurskii; Possible Sound Mode Conversion in “Superfluid 4He-97%Open Aerogel” system, J. Low Temp. Phys. 148 (2007) 615-620.	空孔率97%のエアロジェル中の液体Heを超音波で研究し超流動 ⁴ Heの第一音波および第2音波とエアロジェルの音波との相互作用によりモード変換の可能性について議論した。	9
3	Matsumoto, K., Tsuboya, H., Yoshino, K., Abe, S., Tsujii, H., Suzuki, H.; Ultrasound study of the solid-liquid transition and solid-liquid interface of 4He in aerogels, Journal of the Physical Society of Japan, 78 (2009) 34601	空孔率92から97%のエアロジェル中の液体 ⁴ Heの固化および融解を超音波を用いて研究した。エアロジェル中には液体、固体或はその共存状態が有る。エアロジェル中の固体-液体の境界面を透過してくる音波を始めて観測した。	7
4	Yoshida, J., Abe, S., Tada, A., Tsujii, H., Matsumoto, K., Suzuki, H., Suzuki, S.; Magnetic susceptibility of PrMg ₃ at ultra low temperatures, Journal of Physics: Conference Series, 150 (2009) 42241	hf-Enhanced核スピン系のPrPb ₃ を170μKまで冷却し帯磁率、静磁化の温度変化を測定し約5mKに転移点をもつ反強磁性に核スピンの転移を観測した。	2
5	M. Nishikawa, K. Yoshino, S. Abe, H. Suzuki, K. Matsumoto, D.A. Tayurskii, K. Tajiri; Pressure dependence of the sound velocity of 4He in aerogel, Journal of Physics and Chemistry of Solids, 66 (2005) 1506	空孔率92.6と94%のエアロジェル中の液体 ⁴ Heの縦方向の超音波速度と減衰を飽和圧から融解圧まで上げて測定した。正常相ではバルク ⁴ Heと同じであったが超流動相では明らかに異なっている。	7
6	Koichi Matsumoto, Masaaki Nishikawa, Keiichi Yoshino, Satoshi Abe, Haruhiko Suzuki, Dmitrii A. Tayurskii, Koji Tajiri; Superfluid transition and solidification of 4He in Aerogel, J. of Physics and Chemistry of Solids, 66 (2005) 1486-1489.	エアロジェル中の液体 ⁴ Heの超流動転移と固化を超音波で研究した。超流動転移温度はバルクの液体よりも飽和蒸気圧から固化圧の方向に数mKシフトしている。	2
7	V. Savinkov, S. L. Korableva, A. A. Rodinov, I. N. Kurkin, B. Z. Malkin, M. S. Tagirov, H. Suzuki, K. Matsumoto and S. Abe; Magnetic properties of Dy ³⁺ ions and crystal field characterization in YF ₃ :Dy ³⁺ and DyF ₃ single crystals, J. Phys. Condens. Matter 20 (2008) 485220.	DyF ₃ の帯磁率および磁化の測定からDyF ₃ の磁性が双極子-双極子相互作用による強磁性で2.55Kに転移点がありこの磁性が結晶場と分子場近似で理解できる事が分かった。	5
8	Tsujii, H., Mihara, S., Abe, S., Suzuki, H., Matsumoto, K.; Acoustic properties of superfluid 3He in 97% aerogel, Journal of Physics: Conference Series, 150 (2009) 32114	量子臨界現象をエアロジェル中の液体 ³ Heの超流動転移で観測する。97%の空孔率のエアロジェル中の ³ Heを400μKまで冷却し超音波の減衰と音速の測定から超流動転移点を測定した。転移点は98%のエアロジェル中の ³ Heと比べて大きく抑圧されている。	0
9	Kuwata, N., Ohno, K., Abe, S., Matsumoto, K., Suzuki, H.; Magnetic properties of enriched 195Pt metals, Journal of Physics: Conference Series, 150 (2009) 42107	Pt金属の同位体の中で核スピンのモーメントを持っているのは ¹⁹⁵ Ptだけである。NaturalなPtは33.8%の ¹⁹⁵ Ptを含んでいる。 ¹⁹⁵ Ptを種々の割合で含んだ試料で核スピン-核スピン相互作用によって転移温度を変化させられる。まずこれらの試料での磁性を明らかにしておく。	0
10	Matsumoto, K., Kouen, T., Nishida, R., Abe, S., Kamiya, K., Numazawa, T.; Magnetocaloric effect of RCo ₂ (R: Er, Ho, Dy) compounds for regenerative magnetic refrigeration, AIP Conference Proceedings, 850 (2006) 1581.	水素の液化のために磁気熱量効果を用いて磁気冷却を行うためにRCo ₂ (R: Er, Ho, Dy)について比熱測定を行いその転移点温度およびその比熱からこれらの物質が磁気冷却に適した物質だと分かった。	4

【研究期間終了後に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	Zhu, Y., Asamoto, K., Nishimura, Y., Kouen, T., Abe, S., Matsumoto, K., Numazawa, T.; Magnetocaloric effect of $(Er_xR_{1-x})Co_2$ ($R = Ho, Dy$) for magnetic refrigeration between 20 and 80 K, <i>Cryogenics</i> 51 (2011) 484	水素液化のための磁気冷凍機に用いる物質として $(Er_xR_{1-x})Co_2$ ($R=Ho, Dy$) を測定した結果非常に良い磁気熱量効果がこの磁気転移温度 T_c 近傍で得られる事が分かりこの2元系を作る事により T_c を調節出来る事が分かった	13
2	Abe, S., Sasaki, F., Oonishi, T., Inoue, D., Yoshida, J., Takahashi, D., Tsujii, H., Suzuki, H., Matsumoto, K.; A compact capacitive dilatometer for thermal expansion and magnetostriction measurements at millikelvin temperatures, <i>Cryogenics</i> , 52 (2012) 452	mK 或はそれ以下の温度で熱膨張、および磁歪を測定する膨張計をキャパシタンス法で小型に製作し量子臨界現象の測定に用いて威力を発揮した。	1
3	Satoshi Abe and Koichi Matsumoto; Nuclear demagnetization for ultra-low temperatures, <i>Cryogenics</i> 62 (2014) 213.	核断熱消磁冷却技術は殆ど確立していると言える。しかし実際に実験する場合、測定したい物質、測定装置に最適な冷却方法、そのとき得られる最適な素材を使う必要が有る。その例を示してある。	0
4	Savinkov, A.V., Shakurov, G.S., Korableva, S.L., Dooglav, A.V., Tagirov, M.S., Suzuki, H., Matsumoto, K., Abe, S.; NMR, high frequency EPR and magnetization studies of $YF_3:Tm^{3+}$ and TmF_3 , <i>Journal of Physics: Conference Series</i> , 324 (2011) 12033	TmF_3 の単結晶および粉末試料を用いて NMR および高周波 EPR の測定により hf-Enhanced 核スピンの T_m のエネルギーレベルを測定し核スピン系について議論した。	0
5	Inoue, D., Kaido, D., Yoshikawa, Y., Minegishi, M., Matsumoto, K., Abe, S.; Thermal expansion and magnetostriction measurements using a high sensitive capacitive dilatometer at millikelvin temperatures, <i>Journal of Physics: Conference Series</i> , 568 (2014) 32001	$CeRu_2Si_2$ の量子臨界現象の研究で量子臨界点近傍の高磁場下の測定を行うために 9 T の磁場中で mK 領域で作動させる熱膨張、磁歪の測定装置を制作し高感度、の装置が出来た。	0
6	H.Suzuki, H. Kaneko, Y. Xue, N. Shumsun, A. Savinkov, H. Xing, Z.A. Xu, S. Zhang and Y. Ishikawa; Low temperature x-ray diffraction study on phase transitions, <i>J. Physics: Conference Series</i> 400 (2012) 022118.	我々が開発した超低温 X 線解析装置で多くの興味ある物質を測定した。特に相転移近傍における格子のソフトニングを Debye-Waller factor から観測した。物質としては、 $PrCu_4Ag$, Nd_2TiO_2 , $SmFeCoO_4$ などなど。	0
7	H. Kaneko, X. Yun, N. Shumsun, A. Savinkov, H. Suzuki, Y. K. Li, Q. Tao, G. H. Cao and Z. A. Xu; Quantum Criticality and Superconductivity, <i>J. Phys.: Conf. Ser.</i> 400 (2012) 022047.	鉄系超伝導の $SmFe_xCo_{1-x}O_4$ は $x=0.75$ の辺りで T_c が最大となる。丁度その辺りが量子臨界点に対応し、その量子ゆらぎを低温 X 線測定で観測した。	0
8	O. Iwakami, Y. Namisashi, S. Abe, K. Matsumoto, G. Ano, M. Akatsu, K. Mitsumoto, Y. Nemoto, N. Takeda, T. Goto and H. Kitazawa; Magnetic ordering of hyperfine-coupled nuclear and 4f-electron moments in clathrate compound $Pr_3Pd_{20}Ge_6$, <i>Physical Review B</i> , 90 (2014) 100402(R).	$Pr_3Pd_{20}Ge_6$ を 500 μ K まで冷却し帯磁率の温度変化を測定した。f 電子の電気四重極は 250 mK でオーダーし f 電子は 77 mK で反強磁性的にオーダーする。一方 Pr の hf-Enhanced 核スピンは 9 mK で磁気秩序を示す事が分かった。	0
9	Oshi Iwakami, Naoaki Kawata, Misato Takeshita, Yusuke Yao, Satoshi Abe and Koichi Matsumoto, Thermal expansion and magnetostriction measurements using Quantum Design physical property measurement system, <i>Journal of Physics Conf. Series</i> , 568 (2014) 032001.	Quantum Design 社製の PPMS の高感度性を利用して熱膨張、および 5.5 T までの磁歪の測定を行った。	0
10	B.Andraka, C.R. Rotundu, P. Kumar and H. Tsujii. Investigation of the heavy fermion state and superconductivity in $Pr_{1-x}La_xOs_4Sb_{12}$ by the upper critical field slope at T_c ,	重い電子系で超伝導を示す $Pr_{1-x}La_xOs_4Sb_{12}$ の H_c2 の T_c における勾配を比熱測定で求め、この重い電子系の有効質量の増大の起原を議論した。	0

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報

次の(1)、(2)の項目ごとに、該当する内容について具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究成果の社会への還元状況（社会への還元の程度、内容、実用化の有無は問いません。）

量子ゆらぎ、ゼロ点振動、量子相転移などと言うテーマは非常に物理の基礎的なテーマであるが知的好奇心を刺激するテーマの様である。そのため北陸3県の高校に対する出前授業、放送大学石川支部での授業、学術会議中部支部の講演会、さらに金沢の民間テレビでの私の研究に対しての15分間のインタビューなどなど。この研究成果を易しく説明する事を求められた。その為と思うが平成21年度の金沢市文化賞が鈴木に授与された。

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報（続き）

(2) 研究計画に関与した若手研究者の成長の状況（助教やポストク等の研究終了後の動向を記述してください。）

研究分担者は

松本宏一が研究代表者鈴木跡を継ぎ、数物系教授となり超低温冷却装置を用いて量子臨界現象の研究を続行するとともに超低温物性一般の測定を内外の研究者との共同研究を含めて行っている。さらに低温精製技術の開発も行っている。

阿部聡講師は准教授となる。松本宏一と共同で超低温の研究一般を行っている。さらに9Tのマグネットを購入し希釈冷凍機と組み合わせて超低温、高磁場の測定にも幅を広げている。

ポストク

研究の開始時にポストクとして参加してもらった辻井宏之は研究の終了間際から金沢大学学校教育系准教授となる。

同じくポストクとして参加した中国からの留学生は金沢大学の研究系事務職員として働いている。

院生

研究の開始時に博士課程の院生として研究に参加し、CeRu₂Si₂について成果を上げた高橋大輔は理研の研究者から現在は足利工業大学の工学部准教授となっている。

海外からの留学生

また研究期間中留学生として研究に参加したロシア・カザン大学からの留学生は二人ともカザン・大学で研究教育職を得ている。

バングラデシュからの留学生

帰国後、助教授から教授と昇格し母国で活躍している。研究代表者鈴木とも密接なコンタクトを取り共同研究を行っている。