

## 2014年度 仁科記念賞 受賞者一覧

2014年11月11日  
公益財団法人仁科記念財団

受賞者：<sup>まつだ ゆうじ</sup>松田 祐司 氏（高知県出身、54歳）  
京都大学大学院理学研究科教授

受賞業績：重い電子の2次元閉じこめによる新しい電子状態の創出

受賞者：<sup>こばやし たかし</sup>小林 隆 氏（岡山県出身、46歳）  
高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所教授

<sup>なかや つよし</sup>中家 剛 氏（大阪府出身、46歳）  
京都大学大学院理学研究科教授

受賞業績：ミューニュートリノビームからの電子ニュートリノ出現事象の発見

## 2014年度 仁科記念賞 授賞理由

受賞者：松田 祐司 氏 Yuji Matsuda

京都大学大学院理学研究科教授

受賞業績：重い電子の 2 次元閉じこめによる新しい電子状態の創出

Creation of novel electronic states via the two dimensional confinement of heavy fermions

業績要旨：

松田氏は、重い電子系化合物のエピタキシャル成長に世界で初めて成功し、人工超格子の作製を通して系の空間次元性を制御することにより、重い電子系の研究に新たな局面を開拓した。膨大な数の電子が強いクーロン斥力により相互作用している強相関物質は、銅酸化物における高温超伝導現象などを含む驚くべき物理現象を生み出す現代物性物理学の宝庫である。そのなかで、重い電子系強相関物質の研究は多彩な磁気現象と特異な超伝導現象の発見を通して、物性物理学の研究を大きく深化させている。重い電子系物質の研究において、相互作用を制御して現象を解明する研究手法は、これまで物質の元素組成比の変化、あるいは温度、圧力、磁場などの物理的パラメータを変化させることで行われてきた。一方、系の次元性をエピタキシャル成長によって制御する試みは、過去 20 年間欧米の多数の研究グループによってなされたが成功しなかった。松田氏は、重い電子系物質の電子状態の次元性制御を世界で初めて実現

する画期的な成果を挙げ、その結果、①単結晶積層（エピタキシャル）技術によって作成した人工超格子を用いて電子間の相互作用の強さを制御して、2次元超伝導状態の特異性を解明し、また②磁気秩序の抑制による特異な電子状態を実現した。かつて、半導体への超格子構造の導入によって半導体物理学が飛躍的に進んだのと同様に、松田氏が成功した重い電子の空間次元制御を通して、今後、特異な超伝導物理現象の理解の深化のみならず、重い電子の界面を舞台にした予期せぬ創発的な物理現象が発見される可能性が大いに期待できる。

授賞理由：

電子の集団が強いクーロン斥力により相互作用しあう系は強相関電子系と呼ばれ、現代物理学の中心的研究課題の一つである。特に、最も強い電子相関を持った金属状態は、f 電子を持つ重い電子系化合物とよばれる強相関物質群で実現され、そこでは伝導電子の有効質量が自由電子の数百倍に達する。松田氏が主導する実験グループは、これまで不可能とされてきた重い電子系化合物のエピタキシャル成長を実現し、世界ではじめて重い電子系化合物の人工超格子を作製することに成功した(図1)。

これにより、重い電子系の次元性を人為的に制御する事が出来るようになり、2次元の重い電子系を実現した。そのことにより、バルクの系では実現が不可能な異常金属状態 [1] や特異なクーパ対の構造を持つ超伝導状態 [2] を創出しただけでなく、より一般的に人工超格子の手法を可能とすることで、強相関物質の電子相関相互作用の強さの制御や新しい自由度の導入を可能とした。

具体的には、単結晶積層技術を用いて f 電子を持つ  $\text{CeCoIn}_5$  と通常金属  $\text{YbCoIn}_5$  による人工超格子  $\text{CeCoIn}_5(n)/\text{YbCoIn}_5(5)$  を作製し、 $n=1$  の  $\text{CeCoIn}_5$  が超伝導転移す

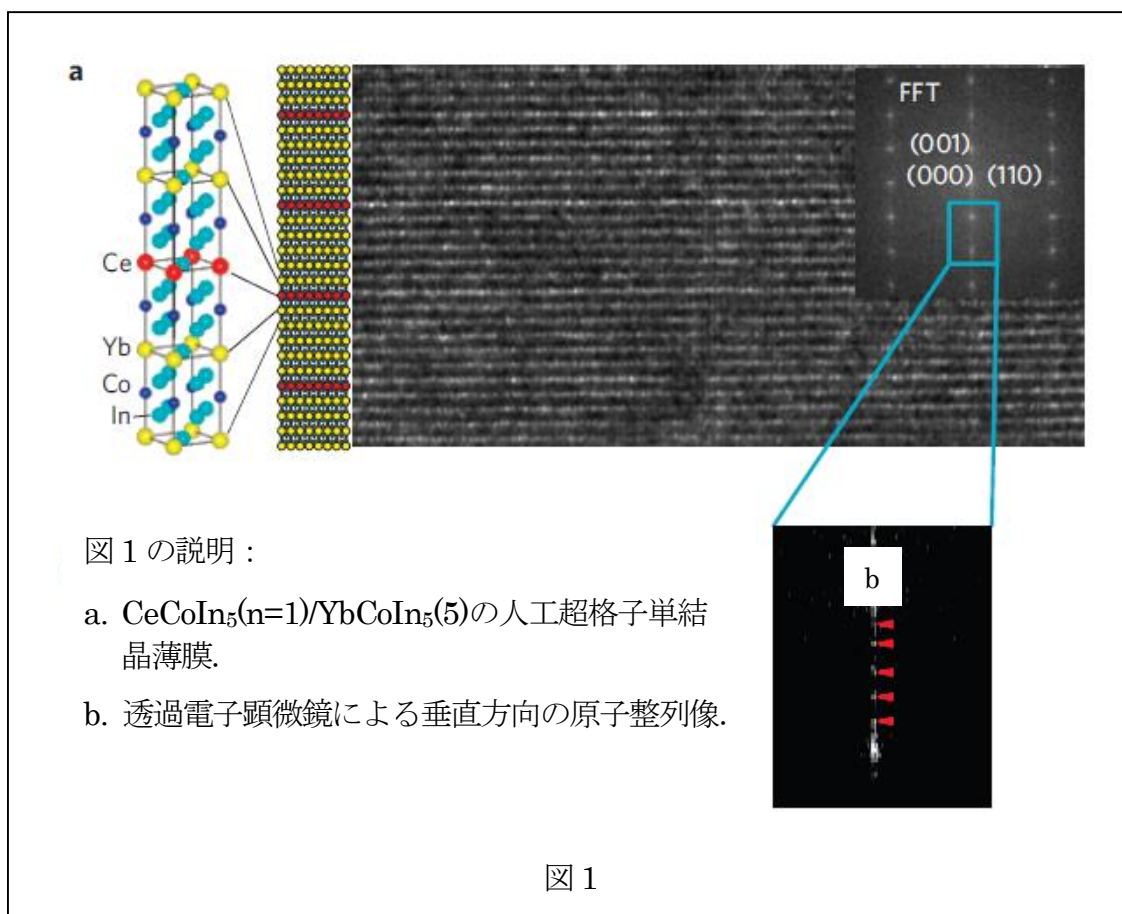


図 1 の説明 :

- a.  $\text{CeCoIn}_5(n=1)/\text{YbCoIn}_5(5)$  の人工超格子単結晶薄膜.
- b. 透過電子顕微鏡による垂直方向の原子整列像.

図 1

ることを示した[2]。これは、2次元に閉じこめられた重い電子による超伝導の初めての  
の実現であり、2次元重い電子系が超伝導になりうることを示しただけでなく、2次  
元的な量子臨界揺らぎにより超伝導が生じることを実験的に初めて示した (図 2)。

上記の研究結果はそれぞれが画期的な成果であるが、それに加えて、全体として重  
い電子系の研究に新展開をもたらした点も重要である。つまり、①人工超格子を用い  
て電子の相互作用の強さを人為的に制御する手法を可能にしたことと、それが ②ス  
ピン軌道相互作用や空間反転対称性の破れなどの新しい自由度を強相関物質に導入す  
る上で有効であることを実証した[3]。かつて半導体への超格子構造の導入によっ  
て、半導体物理学の内容が飛躍的に豊富化したのと同様に、松田氏の一連の研究が、  
今後、重い電子系の物理の内容を大いに豊富化することが期待できる。実際、松田氏

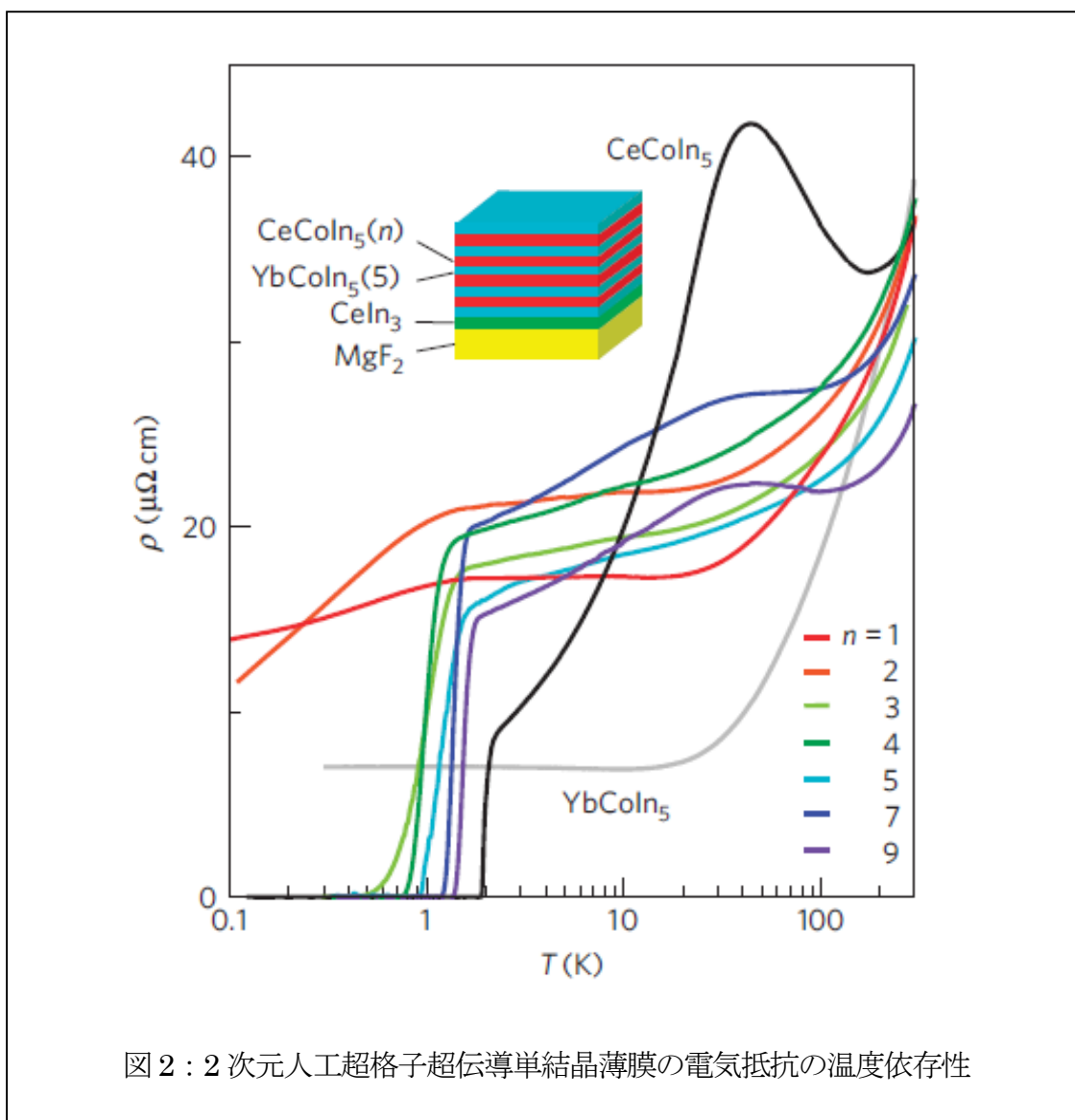


図 2 : 2次元人工超格子超伝導単結晶薄膜の電気抵抗の温度依存性

の研究を契機として、超伝導秩序パラメータが実空間や波数空間で変調を持つ新しいタイプの超伝導状態や、重い電子系におけるマヨラナ粒子の出現といったトポロジーに関連した新しいタイプの素励起生成が理論的に予測されている。また、実験的には、走査トンネル顕微鏡による重い電子系の界面における超伝導状態の研究が開始されているなど、関連分野への波及効果がすでに起こっていることも特筆に値する。さらに、物質科学の観点からは、新しい希土類化合物の創成という技術的ブレークスルーということができ、人工超格子において創り出される新奇な超伝導状態は、冷却原

子や原子核物理学とも密接に関連しており、研究のより広い分野への影響も非常に大きいと考えられる。

**参考文献：**

- 1) "Tuning the dimensionality of the heavy fermion compound  $\text{CeIn}_3$ " H. Shishido, T. Shibauchi, K. Yasu, T. Kato, H. Kontani, T. Terashima and Y. Matsuda, *Science* 327, 980-983 (2010).
- 2) "Extremely strong-coupling superconductivity in artificial two-dimensional Kondo lattices" Y. Mizukami, H. Shishido, T. Shibauchi, M. Shimozawa, S. Yasumoto, D. Watanabe, M. Yamashita, H. Ikeda, T. Terashima, H. Kontani and Y. Matsuda, *Nature Physics* 7, 849-853 (2011).
- 3) "Controllable Rashba spin-orbit interaction in artificially engineered superlattices involving heavy fermion superconductor  $\text{CeCoIn}_5$ " M. Shimozawa, S. K. Goh, R. Endo, R. Kobayashi, T. Watashige, Y. Mizukami, H. Ikeda, H. Shishido, Y. Yanase, T. Terashima, T. Shibauchi and Y. Matsuda, *Phys. Rev. Lett.* 112, 156404 (2014).

受賞者：小林隆氏 Takashi Kobayashi

高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所教授

中家剛氏 Tsuyoshi Nakaya

京都大学大学院理学研究科教授

受賞業績：ミューニュートリノビームからの電子ニュートリノ出現事象の発見

Observation of electron neutrino appearance in a muon neutrino beam

業績要旨：

茨城県東海村の J-PARC 大強度陽子加速器施設で生成されたニュートリノを 295km 離れた神岡のスーパーカミオカンデで測定する総勢 500 名からなる国際実験グループ (T2K 実験) は、2011 年にミューニュートリノから電子ニュートリノへの変化 (電子ニュートリノの出現) を示唆する観測結果を世界に先駆けて捉え、さらに 2013 年にはその存在の決定的な証拠を得た。小林隆・中家剛両氏は、T2K 実験の立案、主要測定装置の設計と建設に加えて、それぞれ T2K 実験グループの代表者および物理解析総責任者としてこの発見に大きな貢献をした。ニュートリノには 3つの種類があるため、3つの変化のパターンがニュートリノの間の混合をあらわすポンテコルボ—牧—中川—坂田行列では予想される。スーパーカミオカンデによる大気ニュートリノの観測および太陽ニュートリノの観測によって混合角 $\theta_{23}$  (2番目のニュートリノと3番目のニュートリノ間の混合、以下同様に表記) および $\theta_{12}$ による振動が発見されていた

が、混合角 $\theta_{13}$ による振動はその角度が小さいため見つかっていなかった。小林・中家両氏を中心とする T2K 実験は、混合角 $\theta_{13}$  が予想されていた値よりは大きい可能性を 2011 年に初めて指摘し、2013 年には実際にミューニュートリノから電子ニュートリノへの変化を世界で初めて観測し（すなわち電子数という概念は絶対的なものでは無いことを示し）、ポンテコルボ―牧―中川―坂田行列が示唆するようにニュートリノが3世代間で混合していることを明らかにした。同時に混合角 $\theta_{13}$  が 2012 年の原子炉ニュートリノを用いた実験の結果と矛盾しない値であることも確かめた。この発見は、宇宙の物質起源の謎を解明する鍵を握ると考えられているニュートリノにおける粒子と反粒子の性質の違い（CP 対称性の破れ）を実験的に明らかにできる可能性も示しており、今後の素粒子物理および宇宙物理の研究に多大な影響を与えるものである。

授賞理由：

小林隆・中家剛両氏は、T2K (Tokai-to-Kamioka) 国際共同実験に立案段階から中心メンバーとして参加し、それぞれグループの代表者および物理解析総責任者として、ミューニュートリノビームから電子ニュートリノが出現する現象を捉え実際に「ニュートリノが3世代間で混合」していることを世界で初めて明らかにした。

T2K実験は茨城県東海村に建設されたJ-PARC大強度陽子加速器でミューニュートリノビームを生成し、295km離れた岐阜県飛騨市神岡町にあるスーパーカミオカンデで観測して、ニュートリノが変化する「ニュートリノ振動」という現象を研究する実験である。(下図参照)



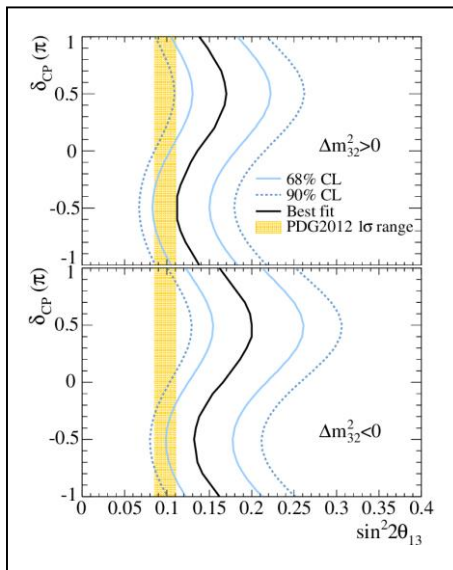


T2K実験の独創性およびその特徴は、その目指す物理の先進性と共に、世界最大規模のニュートリノ観測装置であるスーパーカミオカンデ、J-PARCに新設された世界最大強度の高品質ニュートリノビーム発生装置、および高性能前置ニュートリノ測定装置等を備えていることにある。T2K実験グループは、日本国内から約80名、世界11カ国から総勢約500名の研究者が集う、日本が中心になって組織された国際共同研究である。

T2K実験は2004年度にプロジェクトが認可され、5年間の建設期間を経て、2009年度にニュートリノビーム生成を開始し最初のニュートリノ事象の観測に成功した。2010年度からビーム強度を増強しながらデータ収集を継続し、2011年6月に世界で初めて「ミューニュートリノから電子ニュートリノへの変化」の証拠を捉えた [1]。この結果は、ミューニュートリノの一部が飛行中に電子ニュートリノに変化していることを示すもので、3世代のニュートリノ間の混合のうち最後まで未知であった「混合角 $\theta_{13}$ が有限」であること、「ニュートリノが3世代間で混合」していることを世界で最初に明らかにした。実験は2013年までデータ収集を継続し、電子ニュートリノ反応を28事象検出し、「ミューニュートリノから電子ニュートリノへの変化」の存在（すなわち電子数とかミューオン数という個々のレプトン数の概念は絶対的なものではないこと）

を決定的なものとした[2]。

「混合角 $\theta_{13}$ が有限」であるかという研究課題においては、ニュートリノの走行する距離が比較的短い短基線長 (Short Baseline) 原子炉ニュートリノ実験との競合となった。上記のように2011年6月にT2K実験が先行して $\theta_{13}$ が有限の予想よりは大きい値を持つことを示唆し、2012年3月に中国のDaya Bay実験が、同年4月に韓国のRENO実験が $\theta_{13}$ に関する決定的な結果を発表した。これらの原子炉ニュートリノが測定する実験値 (具体的にはニュートリノが減った割合) は混合角 $\theta_{13}$ のみに関係するが、T2K実験の特徴として電子ニュートリノの出現事象数が混合角 $\theta_{13}$ のみならずCP対称性の破れを記述する位相にも関係するという重要な差異がある。したがって、原子炉ニュートリノの結果を使って混合角 $\theta_{13}$ を決めたうえでT2K実験の結果を議論すればCP位



相について議論することができる。左図は横軸に $\theta_{13}$ 、縦軸にCP位相を取り、T2K実験から許される範囲を原子炉ニュートリノ実験から許される範囲 (図中では「PDG2012  $1\sigma$  range」と記載) と比較したものである (図は[3]より転載)。このように現状のデータでも既にCP位相が $0.5\pi$ のあたりは排除することができている。宇宙の物質の起源はいまだ解明されておらず、ニュートリノに

おけるCP対称性の破れがその謎の鍵を握っている可能性があり、CP対称性の解明は素粒子物理学において最重要な課題の一つである。T2K実験の結果は、このニュートリノにおけるCP対称性の破れを今後測定し物質起源の謎に迫る可能性を開いた、素粒子物理学の歴史において非常に重要な発見である。

小林隆・中家剛両氏は、1999年のT2K実験の立案段階から中心メンバーとしてグループを牽引してきた。それぞれ、T2K実験成功の正否を決定するもっとも重要かつ最先端技術を要するビーム生成施設と前置ニュートリノ検出器の最高責任者として、世界中から集う研究者と技術者をまとめ、それらの設計と製作を主導し、スケジュール通りの実験開始を実現させた。これらの先端装置の製作に加え、その後の長期間にわたる運転とデータ収集、そして物理解析において、両氏のリーダーシップが決定的であり、T2K実験における今回の発見に導いた。

**参考文献：**

- 1) “Indication of electron neutrino appearance from an accelerator-produced off-axis muon neutrino beam”, T2K Collaboration, Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 041801.
- 2) “Evidence of electron neutrino appearance in a muon neutrino beam”, T2K Collaboration, Phys. Rev. D88 (2013) 3, 03200.
- 3) “Observation of electron neutrino appearance in a muon neutrino beam”, T2K Collaboration, Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 061802.