

## 2012年度 仁科記念賞 受賞者一覧

2012年11月9日

公益財団法人仁科記念財団

受賞者：いのうえ くにお井上 邦雄 氏（大阪府出身、47歳）  
東北大学ニュートリノ科学研究センター教授  
受賞業績：地球内部起源反ニュートリノの検出

受賞者：ほその ひでお細野 秀雄 氏（埼玉県出身、59歳）  
東京工業大学フロンティア研究機構教授  
受賞業績：鉄系超伝導体の発見

受賞者：はつだ てつお初田 哲男 氏（大阪府出身、53歳）  
理化学研究所仁科加速器研究センター主任研究員  
あおき しんや青木 慎也 氏（東京都出身、53歳）  
筑波大学数理物質科学研究科教授  
いしい のりよし石井 理修 氏（香川県出身、44歳）  
筑波大学数理物質科学研究科准教授  
受賞業績：格子量子色力学に基づく核力の導出



## 2012年度 仁科記念賞 授賞理由

受賞者：井上 邦雄 氏 Kunio Inoue

東北大学ニュートリノ科学研究センター教授

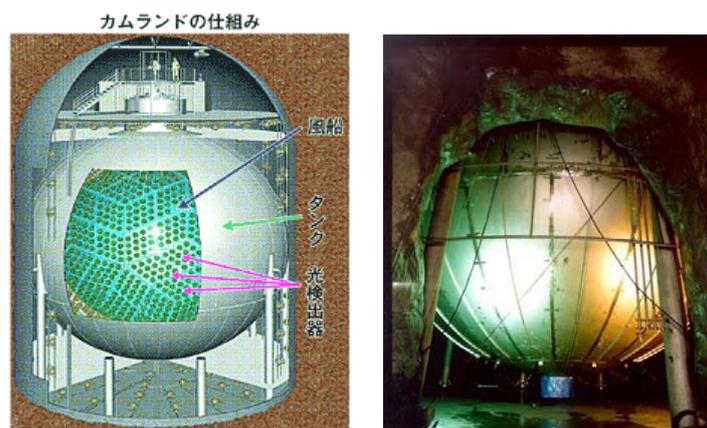
受賞業績：地球内部起源反ニュートリノの検出

業績要旨：

井上邦雄氏は、カムランド（神岡液体シンチレータ反ニュートリノ観測装置）実験において指導的役割を果たし、現在、実験代表者として研究を推進している。井上氏は原子炉ニュートリノ振動観測の成功によるニュートリノ伝搬の理解、検出装置の緻密な較正、バックグラウンドの詳細な評価を行い、2005年に地球内部のウラン、トリウム放射性物質の崩壊から来る反電子型ニュートリノの観測を世界で初めて成功に導いた。さらに2010年には99.997%の信頼度で地球ニュートリノを検出し、2011年には、地球内部での放射性熱生成  $21 \pm 9$  兆ワットを導出し、地表の熱流量  $47 \pm 2$  兆ワット（測定）と比べて半分程度であることを突き止め、地球が冷え続けていることを初めて直接的な実験で検証した。これによって、地球内部化学組成モデルを評価し、ニュートリノ地球科学研究の第一歩を築いた。これらの成功は、ニュートリノを利用した学際的研究を新たに開拓し、地球内部の直接的観測を通じたニュートリノ地球科学の発展の礎となるものである。

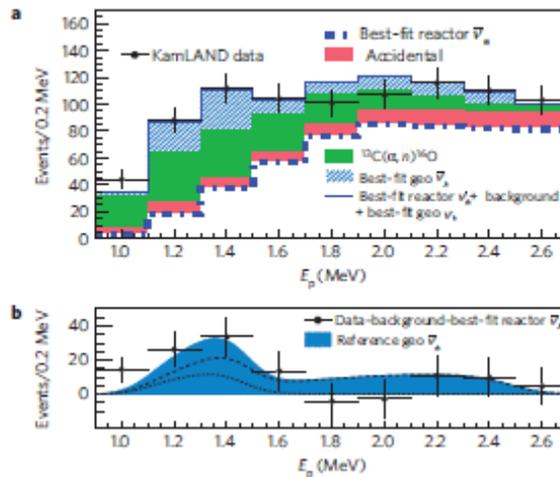
## 授賞理由：

授賞対象の井上邦雄氏の研究は、東北大学が中心になって進めてきた大型液体シンチレータを用いた研究装置、カムランド、による地球内部で発生したニュートリノ（正確には反ニュートリノ）の観測である。同装置を用いた研究では、既に、原子炉で創られるニュートリノを観測しニュートリノの粒子間振動現象を（原子炉からのニュートリノに対しては）世界で最初に観測し、ニュートリノに質量がある証拠をさらに強固なものにした。井上氏は、同研究の創始者である鈴木厚人氏（鈴木氏は、その業績により2003年度に仁科記念賞を受賞）と共に、この計画を最初から推進してきた。



カムランド実験装置

井上氏は、観測装置、カムランド、の大幅な改善を研究責任者として推進し、様々なバックグラウンドの軽減に成功した。これにより困難と思われていた、微弱でエネルギーの低いニュートリノの観測に成功し、地球の内部に起源をもつニュートリノの観測に世界で初めて成功した。（参考論文1、2。下図は参考論文2による。）



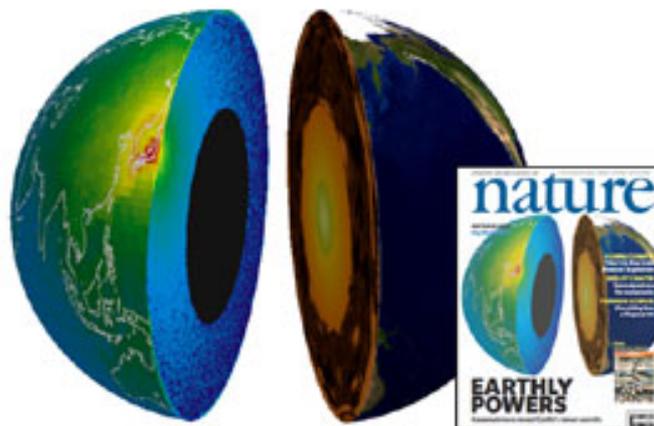
観測されたニュートリノデータ

地球内部に起因するニュートリノ（以下では地球ニュートリノという）は、ウラン、トリウム、カリウムなどの崩壊過程で発生すると考えられる。崩壊の際に発生する熱エネルギーは、地球創成時に生まれたと考えられる熱エネルギーと共に地球内部で発生する熱エネルギーの大きな部分を構成すると考えられ、地震や噴火を引き起こすプレートテクトニクスの研究、生命を太陽風から守る地磁気の研究などで非常に重要なものであると考えられている。地球ニュートリノ観測の重要性は、1960年代には既に指摘されており、その後も繰り返し議論され、地熱の生成や地球内部の化学組成等の情報を直接もたらす新しい手法として注目されてきた。

カムランド実験装置は、1000 トンの液体シンチレータを有するニュートリノ観測装置として建造された。井上氏は、今回の地球ニュートリノ観測成功の鍵となるバックグラウンドの軽減のために、様々な工夫を重ね、実験装置の徹底した洗浄や放射性物質防護板の設置等を実行し、装置の低バックグラウンド化に成功した。実験に使用されている液体シンチレータは純水で洗われ、通常の物質より1兆倍も放射性不純物量の少ない世界最高純度である。また、反電子型ニュートリノの反応で生じる陽電子と中性子を時間差のある2つの信号として捕らえる能力を持っており、反電子型ニュート

リノの識別に非常に優れた観測装置である。

今回、直接地球ニュートリノの観測に世界で最初に成功し、各種の地球内部化学組成モデルを評価し、地球内部での放射性熱生成が $21 \pm 9$  兆ワットであることを導出し、地表の熱流量 $47 \pm 2$  兆ワットと比べて半分程度しかないこと、また、地球が冷え続けていることを直接的な実験的観測により世界で初めて検証した。この「世界初の地球ニュートリノ観測結果」は、将来のより詳細な地球モデルの検証に道を開くもので、「ニュートリノ地球科学の創出」であるといえる。



地球の断面図： 左半分は、カムランドで検出された地球ニュートリノの発生点（青い色の部分）を示す。地表に近い明るい色のついている部分は、カムランドの設置場所とカムランドで観測されたニュートリノの発生点を示す。右半分は、地震波などの解析から現在理解されている地球の内部の様子を示す。（KEKのホームページより。イギリスの雑誌 Natureの表紙を飾った図）

注) カムランド実験は、約180 km遠方の原子炉群から来るニュートリノの観測に成功し、ニュートリノの伝搬の解明につながる「原子炉ニュートリノの欠損」の証拠を得て、30年来未解決だった「太陽ニュートリノ問題の解決」、ニュートリノ振動の

直接的な証拠となる「原子炉ニュートリノのエネルギースペクトルの歪みの観測」の成功などニュートリノの性質の解明に大きな貢献をした。(参考論文3)

参考論文：

- 1) KamLAND collaboration, “ Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements,” *Nature geoscience* **4** (2011) 647-651.
- 2) KamLAND collaboration, “ Experimental Investigation of Geologically Produced Antineutrinos with KamLAND,” *Nature* **436** (2005) 499-503.
- 3) KamLAND collaboration, “First Results from KamLAND: Evidence for Reactor Antineutrino Disappearance,” *Phys.Rev.Lett.* **90** (2003) 021802.

受賞者： 細野 秀雄 氏 Hideo Hosono

東京工業大学フロンティア研究機構教授

受賞業績： 鉄系超伝導体の発見

業績要旨：

細野秀雄氏は、2008年1月に  $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$  ( $T_c=26\text{K}$ ) という層状オキシニクタイトで鉄系の超伝導体を発見した。過去には、大きな磁気モーメントをもつ 3d 遷移金属である鉄を含む化合物は、超伝導の発現には極めて不向きと信じられてきた。発見された  $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$  は転移温度  $T_c$  が比較的高かったことから、大きなインパクトを与え、世界中で鉄系超伝導の研究が急速に立ち上がり、最高の  $T_c$  は銅酸化物超伝導体に次ぐ 56K まで上昇している。多彩な母物質、多バンド由来のペアリング機構や高い磁場下でも大きい電流密度を持つなどが見出されるなど急速に展開しており、新大陸の発見と形容される大きな拡がりをみせている。さらに細野氏は、フッ素イオンの代りに水素マイナスイオン  $\text{H}^-$  で酸素イオンサイトを置換するという斬新な発想で従来の 2~4 倍量の電子ドーピングに成功し、 $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{H}_x$  ではこれまでに見出されていた領域に加え、 $0.23 < x < 0.45$  の領域で  $x$  に対して  $T_c$  がドーム状に変化することを見出した。この結果は鉄系の高い  $T_c$  を支配する機構を再考する貴重な知見を提供している。

授賞理由：

超伝導は、電気抵抗=0，超伝導体内部の磁束=0（マイスナー効果）、ジョセフソン効果等の物理的に大変興味ある現象を示すと共に多くの応用が考えられている。しかし、その応用に今一步の拡がりがないのは、超伝導転移温度（ $T_c$ ）が低いためであると考えられている。実際、1986年までは  $T_c$  は 20K(−250°C)が上限であろうと考えられてきた。

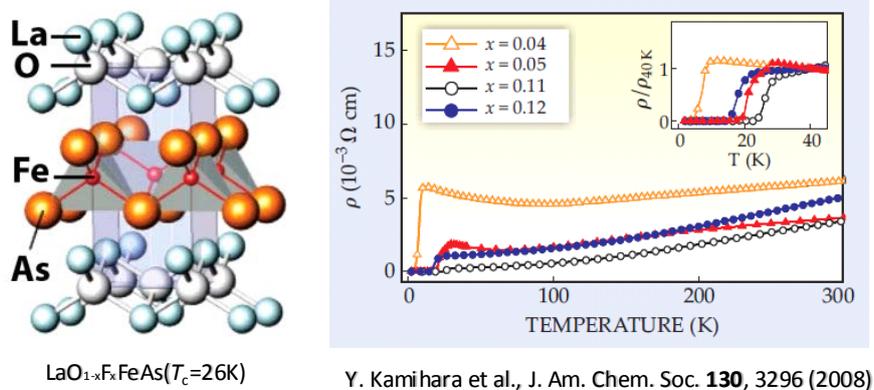


図 1

それに新しい革命をもたらしたのが銅酸化物超伝導体の発見であり、数年で  $T_c$  は一気に 160K(−113°C)まで上昇した。細野氏らは、2008年1月に新しい鉄を含む超伝導体として LaFeAsO<sub>1-x</sub>F<sub>x</sub>を発見した<sup>1)</sup> (図1参照)。この物質の  $T_c$  が 26K と比較的高かったことから、直ちに中国をはじめ世界の研究者が参入し、猛烈な勢いで競争が開始された。細野氏のグループは日本大学の高橋博樹氏らと共同で 2GPa 程度の高圧下で  $T_c$  が 43K まで上昇することを発見し<sup>2)</sup> その後 La を Sm で置換することで  $T_c$  は 56K まで上昇している (図2参照)。これは S=1/2 を持つ銅酸化物に続いて鉄という大きな磁気モーメントを持つ系が大変高い  $T_c$  を示したことで多くの注目を集めた。

その後、 $\text{Fe}^{2+}$ の正方格子を含む  $\text{FePn}$ (Pn:プニクトゲン)または  $\text{FeCh}$ (Ch:カルゴゲン)層からなる結晶の多くが超伝導の母物質になることが判明し、“鉄系超伝導グループ” という大きな山脈を形成するに至った。またこの系は角度分解光電子分光などの物理測定や理論計算などによって多バンド系に特徴的な電子状態を持つことが次第に明らかになりクーパー対の形成機構についても、大きな論争を呼び、現在の物性物理における中心的話題になりつつある。

また最近、細野氏は  $\text{LnH}_2$ (Ln:ランタノイド)が安定であることにヒントを得て、 $\text{LnFeAsO}$  ではフッ素イオン(F)の代わりに水素マイナスイオン(H)で酸素サイトを置換するという発想により、高压合成を駆使して従来の 2~4 倍量の電子ドーピングに成功した。これらにより、超伝導領域はかなり広い領域に渡っていることが判明し、既報の、 $x$ が小さい領域での  $T_c$  のドーム状の変化に対し、 $x$ が大きい領域でも  $T_c$  がドーム状に変化して

いることを明らかにした<sup>3)</sup>。これらは鉄系超伝導の機構解明につながる重要な知見として注目されている。

以上のように、細野秀雄氏は固体化学

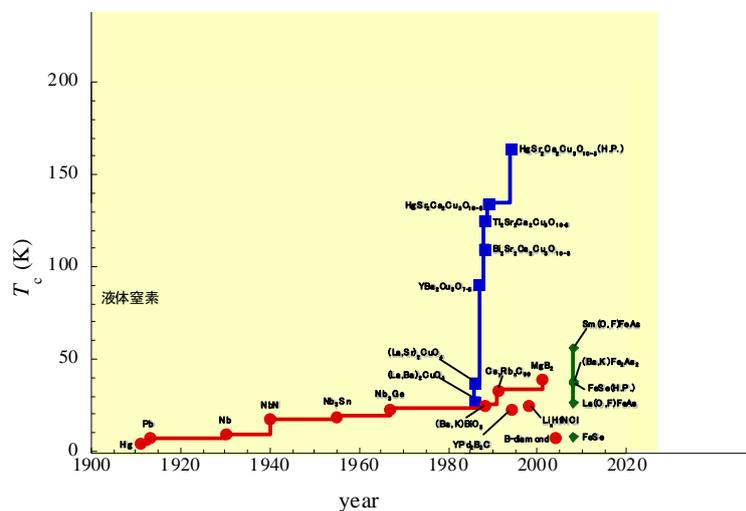


図 2

の深い造詣と独自の物質センスにより 3d 磁性元素の化合物で新規の超伝導体を創製し、物性物理の分野に新しい領域を拓いた。特に鉄系超伝導の発見は、銅酸化物超伝

導体に匹敵するインパクトを与えた。

これらは仁科記念賞にふさわしい業績である。

参考論文：

- 1) Y.Kamihara, T.Watanabe, M.Hirano, H.Hosono, “Iron-based layered superconductor  $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$  ( $x = 0.05-0.12$ ) with  $T_c \sim 26$  K,” J. Am. Chem. Soc., **130** (2008) 3296.
- 2) H.Takahashi, K.Igawa, K.Arii, Y.Kamihara, M.Hirano, H.Hosono , “Superconductivity at 43 K in an iron-based layered compound  $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ ,” Nature **453** (2008) 376.
- 3) S.Iimura, S.Matuishi, H.Sato, T.Hanna, Y.Muraba, S.W.Kim, J.E.Kim, M.Takata, H.Hosono, “Two-dome structure in electron-doped iron arsenide superconductors,” Nat. Commun. **3** (2012) 943.

受賞者：初田 哲男 氏 Tetsuo Hatsuda

理化学研究所仁科加速器研究センター主任研究員

青木 慎也 氏 Shinya Aoki

筑波大学数理物質科学研究科教授

石井 理修 氏 Noriyoshi Ishii

筑波大学数理物質科学研究科准教授

受賞業績：「格子量子色力学に基づく核力の導出」

業績要旨：

初田哲男、青木慎也、石井理修の三氏は、陽子や中性子等の核子の中に働き、原子核の性質を理解する上で基本的な役割を果たして来た核力を、核子を構成する粒子クォークの従う基本法則である量子色力学に基づき、時空格子上に定義された量子色力学の大規模数値シミュレーションにより導出した。導出された核力は、核子間の距離が遠い領域では、原子核の存在に必要であり 1935 年に湯川秀樹博士により予言されたパイ中間子の交換による引力を示し、距離が近い領域では、原子核の飽和性を理解するために必要な反撥力を示している。この結果は、従来は原子核の性質を説明するために仮定しなければならなかった核力の様々な性質を、量子色力学という基本法則に基づいて定量的に導き出す道を開いたものである。この研究は、理論物理学における近年の大きな成果の一つと位置付けられ、当該分野に大きなインパクトを与えている。

## 授賞理由：

初田哲男、青木慎也、石井理修の三氏は、陽子や中性子等の核子と呼ばれる粒子の間に働き、原子核の性質を理解する上で基本的な役割を果たして来た核力を、核子を構成する粒子クォークの従う基本法則である量子色力学に基づき、時空格子上に定義された量子色力学の大規模数値シミュレーションにより導出した。

原子の中心にある原子核は、陽子や中性子等の核子と呼ばれる粒子が複数個集まって出来ている。核子同士の間に関わる力を核力と呼ぶ。原子核が形作られるには、核子同士の間に関わる力が働かなければならない。1935年に、湯川秀樹博士は、未知の粒子が核子同士の間で交換されることによって核子同士の力が引き起されるとする、中間子論を提唱した（1949年ノーベル物理学賞）。この粒子は1947年になって宇宙線の観測を通じて発見され、パイ中間子と名付けられた。

核力は原子核の性質を理解する上での基本概念であるので、核子同士の散乱実験等を再現するように、核力を精密に定める実験的な研究は数多く行われて来た。しかしながら、どのように考えれば核力自身を理論的に導出することができるかは長らく不明であった。

1950年代からの加速器実験により、自然界には核子やパイ中間子を例とする数百種類の粒子が存在することが明らかになった。1964年には、これら多種類の粒子は、クォークと呼ばれるより基本的な粒子から構成されていると考えれば説明できることがゲルマンとツバイクにより提案された。例えば、核子はクォーク3個が束縛した状態であり、パイ中間子はクォークと反クォークが束縛した状態である。さらに1970年代になって、クォークの間には、電磁気力を数学的に拡張して得られる“色電磁気力”が働いているとする“量子色力学”が提案された。現在、クォークは6種類存在する

ことが実験的に確認されている。また、量子色力学がクォークの力学を支配する基本法則であることも、様々の実験的・理論的研究により検証されている。

量子色力学によれば、クォークの自由度から出発して、核子やパイ中間子の性質を理論的に求め、さらに進んで、核子の間に作用する核力も導出できるはずである。しかしながら、量子色力学は連続無限の自由度と非線形な相互作用を持つ相対論的な量子力学系であるために、解析的な計算は極めて困難であった。この点を解決したのが“格子量子色力学”である。

格子量子色力学では、本来は連続な時間空間を離散な格子点で置き換えて、時間空間格子上に量子色力学を定式化する。この定式化を用いれば、数値シミュレーションの方法により、核子の質量等の物理量を数値的に計算することができる。実際の計算は、最先端のスーパーコンピュータを大規模に利用する必要があり、この方法による研究が発展した 1980 年代以降、我が国や米国におけるスーパーコンピュータの開発・発展に大きな影響を与えて来た。

初田哲男、青木慎也、石井理修の三氏は、格子量子色力学において、核子の二体系を記述する量子力学的な波動関数から、核子間の核力を記述するポテンシャルエネルギーを求める方法を理論的に定式化した。三氏は、この定式化に数値シミュレーションの方法を適用することにより、核力のポテンシャルエネルギーを、クォークの基本法則である量子色力学から導出した。

図 1 の結果に見るように、導出された核力は、核子の間の距離が遠い領域では、原子核の存在に必要であり 1935 年に湯川秀樹博士により予言されたパイ中間子の交換による引力を示し、距離が近い領域では、原子核の飽和性を理解するために必要な反撥力を示している。

この結果は、従来は原子核の性質を説明するために仮定しなければならなかった核力の様々な性質を、量子色力学という基本法則に基づいて定量的に導き出す道を開いたものである。

三氏は引き続きハイペロンと核子の間のポテンシャルの導出、 $\Lambda$  ハイペロンと呼ばれる6つのクォークからなる系の束縛状態の研究、三体力の研究など、核力に関わる長年の様々な課題に取り組んでいる。三氏の業績は、原子核の理論的研究に大きなインパクトを与えると共に、新たな潮流をもたらすことが期待される。

参考文献：

- 1) N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, “The Nuclear Force from Lattice QCD,” *Physical Review Letters*, **99** (2007) 022001.
- 2) S. Aoki, T. Hatsuda, N. Ishii, “Theoretical Foundation of the Nuclear Force in QCD and its applications to Central and Tensor Forces in Quenched Lattice QCD Simulations,” *Progress of Theoretical Physics*, **123** (2010) 89-128.

図1 格子量子色力学に基づき求められた核力のポテンシャル。横軸の  $r$  は二つの核子間の距離、縦軸はポテンシャルエネルギーを MeV 単位で表している。 $^1S_0$  と  $^3S_1$  は二つの角運動量チャンネルを表す。囲みは拡大図。文献1より転載。

