

## § 2. 仁科記念賞

「仁科記念賞は、原子物理学およびその応用の分野できわめて優秀な成果をおさめた研究者に贈るものであります。この賞の特色は、功成り名遂げた大先輩に贈られるのではなく、むしろこれからの活躍を大いに期待される若い研究者に贈られる点にあります。」（“NKZ” 創刊号（1962）43ページより）

これまでの受賞者とその業績及び当時の所属を巻末に掲げます。

2005年度の仁科記念賞の受賞者と受賞業績を以下に紹介します。

### 2005年度 第51回 仁科記念賞 受賞者業績紹介

**研究題目** 異常ホール効果の理論的研究

**受賞者** 永長 直人（東京大学大学院工学系研究科教授）



固体中の電子波動の持つ位相の自由度は、量子輸送現象、超伝導にとって本質的に重要であることは良く知られている。特に高温超伝導を始めとする強相関電子系においては、スピンの自由度と電子位相の強い関連が、アンダーソンの原子価共鳴状態（RVB状態）の提唱以来多くの理論により研究されてきた。永長氏はこの問題に対してゲージ理論のアイデアから研究を進め、ゲージ構造が広く一般の磁性体の電子状態に存在することを見出し、その代表的な現象である異常ホール効果の理論をゲージ場の観点から世界に先駆けて構築した。実験的にも、SrRuO<sub>3</sub>, Nd<sub>2</sub>Mo<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, Fe, (Ga, Mn)Asなどでゲージ場理論と合致する結果が得られている。これらの研究は現在世界的な規模で大きな研究テーマとして広がっており、永長氏はその主導的役割を果たし続けている。

磁性体において外部磁場ではなく自発磁化によって生じるホール効果—異常ホー

ル効果—は古くから知られた現象であるが、1954年のKarplus-Luttinger (KL) 理論以来50年余り論争が続いている問題である。KL理論が主張するバンド構造に由来する内因的なメカニズムか、SmitやBergerらが主張する不純物散乱に由来する外因的な効果なのかが主要な論点であったが、両者ともに実験を理解する上で次の困難があった。(i)具体的な計算がなく定量的比較が不可能であったうえに、オーダー評価を行うと実験よりも桁違いに小さくなること、(ii)スピン・軌道相互作用に関する摂動展開に基づいているため両者とも磁化に比例したホール係数を予言するが、これを破るいくつかの実験事実があること、などである。一方、近藤による異常ホール効果の理論は有限温度に対する多くの実験事実から支持されていた。これは磁化の揺らぎによるskew散乱をs-d模型に基づき解析したもので、 $\sigma_{xy} \propto \langle M - \langle M \rangle \rangle^3$ を予言する。この関数は転移温度より少し下でピークを持ち、絶対零度に向けてゼロとなる。基底状態では磁化の揺らぎがなくなるからである。

このような状況で、永長氏は近藤理論が成功を収めた有限温度領域とは異なる低温領域でも異常ホール効果が有限となることに着目し、磁氣的基底状態におけるブロッホ波動関数の性質を吟味することから出発した（文献1）。この仕事では3重縮退したd軌道にスピン・軌道相互作用を取り込み、自発磁化の存在下でブロッホ波動関数のゲージ構造を調べ、(a)それがバンド間縮退に近い状況で特異的に大きくなること、(b)各バンドを特徴づけるトポロジー不変量である整数、Chern数が有限になることを見出した。このことは磁性体中のブロッホ電子状態がトポロジ的に非自明な構造を持つこと、バンド交差が運動量空間における「磁気単極子」に相当することを意味している。同時に、Chern数がスピン・軌道相互作用がないときには零であることを考えると、異常ホール効果はスピン・軌道相互作用の非摂動的な効果であることを示すものである。そして以上の知見は、ゲージ場の積分で表現される異常ホール効果に関する上述の謎を解決するものであった。つまり、バンド交差（磁気単極子）の近傍でゲージ場が増強されることから、フェルミエネルギーがその近傍にあるときには摂動論では扱えない大きなホール伝導度が現れ、また磁化が温度変化したときには交換エネルギーの変化でフェルミ面の位置が相対的に動くためにバンド交差を通過し、そのたびに符号変化を含む複雑な変化を

示すことが理解される。永長氏は、さらに進んで第一原理計算および実験のグループと協力することで、現実の物質に則してこのアイデアを検証した（文献2）。ここでは、遍歴強磁性体 SrRuO<sub>3</sub>を取り上げ、第一原理バンド計算で上述のゲージ構造を計算し、予言どおりの磁気単極子に付随したゲージ場分布が得られること、不純物散乱による効果も取り入れた計算で、実験で得られたホール係数の振る舞いがその「指紋」として理解できることが示された。これは固体のバンド構造にひそむこのゲージ構造をはじめて明らかにした基本的な仕事である。このようなアイデアは少し遅れて、Feの低温異常ホール効果でも A.H.MacDonaldらのグループによって検証された。

以上は、スピンの完全に平行に揃った強磁性体の理論であるが、一方、フラストレーションがある結晶構造ではスピンの向きが非共線構造、もしくは非共面構造を持つことがある。特に後者においては周期的にスピカイラリティーが発生するが、これがもたらすホール効果をも理論的に調べた（文献3）。具体的にはカゴメ格子を考え、3つの部分副格子にあるスピンの非共面構造をとると仮定して、バンド構造を計算し、上述と同様な運動量空間におけるゲージ構造が存在することを見出した。この構造が存在するためには、単位胞子の中に異なる2種類以上のループが存在することが必要で、例えば正方格子、三角格子では満たされない。永長氏は実験グループと協力することで現実の物質—「パイロクロア格子」と呼ばれるカゴメ格子の3次元への拡張に対応する格子形の強磁性体 Nd<sub>2</sub>Mo<sub>2</sub>O<sub>7</sub>においてこのアイデアが実現していることを示した（文献4）。

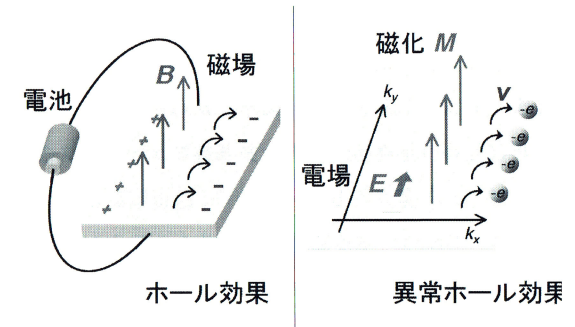
以上まとめると、永長氏は強相関電子系で発展したゲージ構造という観点から、広く固体中のプロット電子状態を捉え直し、異常ホール効果という顕著な現象の理論を発展させた。この理論は、将来さらに広範な現象へと広がる基本的重要性もっており、実際永長氏のグループは、スピンホール効果、強誘電体、強磁性超伝導体、光学など多岐にわたる問題にこの概念を応用しつつある（文献5）。

主要論文

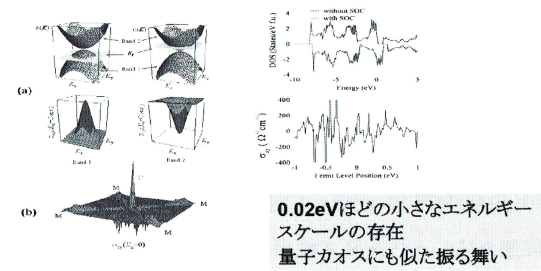
[1] M.Onoda and N.Nagaosa, “Topological Nature of Anomalous Hall Effect in

Ferromagnets” J. Phys. Soc. Jpn. **71** (2002) 19.

[2] Z. Fang, N. Nagaosa, K.S. Takahashi, A. Asamitsu, R. Mathieu, T. Ogasawara, H. Yamada, M. Kawasaki, Y. Tokura, and K. Terakura, “The anomalous Hall effect and magnetic monopoles in momentum space” Science **302** (2003) 92.  
 [3] K. Ohgushi, S. Murakami, and N. Nagaosa, “Spin anisotropy and quantum Hall effect in the kagome lattice : Chiral spin state based on a ferromagnet” Phys. Rev. B **62** (2000) R6065.  
 [4] Y. Taguchi, Y. Oohara, H. Yoshizawa, N. Nagaosa, and Y. Tokura, “Spin chirality, Berry phase, and anomalous Hall effect in a frustrated Ferromagnet” Science **291** (2001) 2573.  
 [5] 永長 直人 “固体電子論におけるベリー位相”(解説) 日本物理学会誌 59巻第8号



SrRuO<sub>3</sub>における異常ホール効果 - 運動量空間における磁気単極子



**研究題目** 加速器ビームによる長基線ニュートリノ振動の観測  
**受賞者** 西川公一郎（京都大学大学院理学研究科教授）



ニュートリノの質量が他のレプトンやクォークと比べて非常に小さいことは多くの研究者の好奇心を呼び起こし、この質量を観測する様々な試みが過去数十年にわたってなされてきた。しかし、その質量があまりに小さく質量の上限がわかるのみで、ニュートリノが有限の質量を持つことを確認するにはいたらなかった。これに関して革命的な研究をしたのが小柴・戸塚両氏に率いられるカミオカンデ実験である。1990年頃、カミオカンデ実験で、大気ニュートリノによる電子事象とミュオン事象の観測量が予想と異なる「大気ニュートリノ異常」が観測された。そしてこの「大気ニュートリノ異常」は、ニュートリノ振動によるものでないかと推測された。ニュートリノ振動が存在することは、最低一種類のニュートリノに有限の質量があることの証明になる。

西川氏はこの「大気ニュートリノ異常」に早くから着目し、ニュートリノ振動の観測に向けて、世界に先駆け加速器を使った長基線ニュートリノ振動実験案を提案した。このK2K実験は1996年から建設が始まり、1999年からデータ取得を開始した。K2K実験開始一年前の1998年に、スーパーカミオカンデ実験は、大気ミュオンニュートリノの到来方向の上下非対称度測定から、世界で最初にニュートリノ振動を発見し、ニュートリノ質量を確認した。それに続き、K2K実験は、研究者が自由にコントロールできる人工ニュートリノで、2002年にニュートリノ振動の徴候を捕らえた。そして2004年にニュートリノ振動の確証を得ることに成功した。K2K実験の成果の特徴は、ニュートリノ飛行距離が一定であるので、少数事象にもかかわらずニュートリノ間の質量差を高精度で決定したことである。

K2K実験における西川氏の多大な貢献は、実験の提案者兼責任者であることはもとより、K2K実験を可能にした様々な独創的な実験技術の開発にある。第一は、ニュートリノ生成地点にニュートリノ検出器を設置しニュートリノを振動前に測定することで、遠方検出器スーパーカミオカンデでニュートリノ振動効果を明確に観

測できるよう実験をデザインしたことである。前置ニュートリノ検出器は西川氏を中心に設計・製作され、ニュートリノ反応数とニュートリノエネルギー分布を高精度で測定することに成功した。そして、スーパーカミオカンデによってニュートリノ振動現象によるミュオンニュートリノの消失とエネルギー分布の歪みを観測した。次いで西川氏は、陽子ビーム強度が低いKEK陽子加速器から高いニュートリノビーム強度を得るために、陽子標的一体型の大電流による強磁場ニュートリノビーム収束装置（電磁ホーン）を提案し設計した。さらに、スーパーカミオカンデでのニュートリノフラックスを正確に予測するためには、ニュートリノを作り出すための親粒子である $\pi$ 中間子の運動量・角度分布の測定が必要になるが、西川氏は陽子標的下流で $\pi$ 中間子を測定するガステレンコフ検出器を提案し、この独創的な検出器によりスーパーカミオカンデにおけるニュートリノフラックスを高精度で予想することを可能にした。以上に加えて、250km離れたKEK-神岡間でニュートリノ事象の時間同期をとるGPSシステム、高精度ニュートリノ測定器の開発等、西川氏のアイデアと指導力がK2K実験の随所に見ることができる。

西川氏は、大型水チェレンコフ検出器における電子・ミュオン識別法の確立にも大きな貢献をした。当初、カミオカンデで観測された「大気ニュートリノ異常」は、水チェレンコフ検出器の電子・ミュオン識別能力に問題があるのではないかと、世界中の多数の研究者から疑念が出されていたが、これを一掃するために、西川氏は戸塚氏と共にKEKに1000トン水チェレンコフ検出器を建設し、KEK陽子加速器からの電子ビームとミュオンビームを使い、水チェレンコフ検出器における電子とミュオンの誤認率は数%以下という重要な結果を得ることに成功した。この実験で水チェレンコフ検出器の性能が実証され、カミオカンデ実験装置の優れた能力を示すことに成功した。

K2K実験の大きな物理成果は、ニュートリノ質量の確定であるが、将来のニュートリノ研究の方向性を決定したことも重要な功績である。米国で稼働中のMINOS実験、ヨーロッパで準備中のOPERA/ICARUS実験も、K2K実験が測定したニュートリノ振動パラメータを基に実験を最適化し、K2K実験の追試を行うことが予想されている。また西川氏は、現在3世代間でのニュートリノ振動現象の

全貌究明，ニュートリノにおける粒子反粒子非対称性の発見に向けて，東海村に建設中の大強度陽子加速器施設 J-PARC でのニュートリノ振動実験（T2K 実験）を提案した。現在は T2K 実験責任者として，世界12カ国総勢200名以上の研究者集団を率いて実験準備中である。「ニュートリノ質量は，現在の素粒子標準模型を越える新しい物理の手掛かりとしてもっとも有力な情報」と世界中の研究者から注目されている。西川氏の功績が素粒子物理学研究にとって非常に大きいものであることは異論の余地がない。

#### 主要論文

- [1] E. Aliu et al, "Evidence for Muon Neutrino Oscillation in an Accelerator-Based Experiment" Phys. Rev. Lett. **94** (2005) 081802.
- [2] M.H. Ahn et al, "Indications of neutrino oscillation in a 250km long baseline experiment" Phys. Rev. Lett. **90** (2003) 041801.
- [3] S. Kasuga et al, "A Study of the  $e/\mu$  identification capability of a water Cerenkov detector and the atmospheric neutrino problem" Phys. Lett. **B374** (1996) 238.

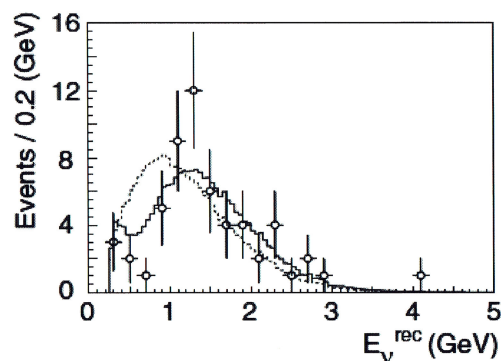


FIG. 3. The reconstructed  $E_\nu$  distribution for the SK 1-ring  $\mu$ -like sample. Points with error bars are data. The solid line is the best fit spectrum. The dashed line is the expected spectrum without oscillation. These histograms are normalized by the number of events observed (57).

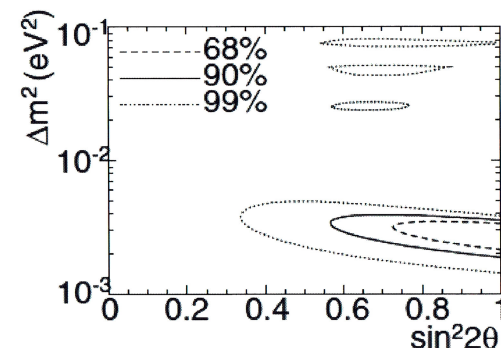


FIG. 4. Allowed regions of oscillation parameters. Dashed, solid, and dot-dashed lines are 68.4%, 90% and 99% C.L. contours, respectively.

研究題目 新超重113番元素の合成

受賞者 森田浩介（理化学研究所先任研究員）



周期表に記載される「元素」は自然界に存在するものが大半である。しかし，それにとどまらず，自然界には存在しないが，加速器等を用いて人工的に作り出される元素も存在する。このような元素としてよく知られているものには，テクネシウム，プルトニウム，アメリカシウム等がある。これらの元素の核となる原子核は有限の寿命を持ち，いわゆる不安定な原子核であるため，地上に存在しない。しかし，人工的に作ることができ，プルトニウムなどは現在では地上に多量に存在し，高速炉などに利用されている。

一方最近では，どこまで大きな原子番号を持つ元素が存在しうるのかという，いわば元素の存在の極限を探求する方向に研究者の興味が移っている。特に，原子番号の大きい超重元素の存在を見極める実験は，いくつかの研究拠点で進められている。その最先端は，アメリカ，ロシア，ドイツにあったが，日本でも20年近く前から地道な研究が続けられてきた。この研究の中心を担ってきたのが，森田浩介氏である。

最近の超重元素の合成研究には、加速器を用いて $^{58}\text{Fe}$ (鉄),  $^{64}\text{Ni}$ (ニッケル),  $^{70}\text{Zn}$ (亜鉛) などの中性子を多く含む原子核をビームとして加速し,  $^{208}\text{Pb}$ (鉛) や  $^{209}\text{Bi}$ (ビスマス) を標的に照射する手法が用いられる。森田氏らの研究では、加速器のエネルギーとしては、入射核と標的核が電氣的な力で反撥するのに打ち勝ち、かつ、両者が一緒に融合して「複合核」形成するぎりぎりのエネルギーが選ばれた。このようなエネルギーでは、複合核を作り出す確率はビームエネルギーが高い時に比べて減少するが、その複合核は核分裂をせずに1個の中性子のみを放出し、生成された原子核はその後  $\alpha$  (アルファ) 粒子を何回か放出して既知の原子核に到着するので、超重元素の確定が確実なものとなる。

新元素の合成実験には多くの工夫が必要となる。森田氏らの研究における工夫の最も大きな点は、バックグラウンドの低減化にある。その工夫点をさらに詳しく眺めると、3点ほどの着想に基づいている。第一は、複合核の分離についての工夫である。複合核が生成されると運動量保存則によってビームとほぼ同じ方向に放出される。そのため、GARIS (Gas-filled Recoil Ion Spectrometer) と呼ばれる分析器を開発し、質量の違いを利用して複合核のみを選択した。複合核はいくつかの電子をまとったイオンとして放出されるが、そのイオンをヘリウムガス中に導くことにより原子衝突を起こさせ、荷電状態に関係なく一定の質量の複合核原子を一カ所に集めてしまう工夫である。森田氏らは、独創的なアイデアにより、目標とする複合核の収集能力が非常に大きな GARIS を実現し、それまで世界的に最も進んでいたといわれるドイツの検出器系に比べ、収集率を2倍にし、バックグラウンドを100分の1に減少させることに成功した。第二の工夫は、このように GARIS によって分離された複合核を焦点面に導き、速度とエネルギーを別個に測定して複合核の質量範囲をさらに詳しく測定する検出器を配置したことにある。そして第三に、半導体検出器により、チェーン的に新元素の原子核から放出される  $\alpha$  粒子を測定し、偶発的なアルファ粒子の同時測定を無視できるまでに落とすために半導体検出器の位置分解能を向上させ GARIS の分解能の向上に努めたこと、等の工夫に見られる。

このように数々の工夫を施した実験装置が完成したあと、まず、これまでに合成

された超重元素の追試実験がなされた。手始めに、110番元素や111番元素を次々と測定した。111番元素の測定では、ドイツで数年間の照射で6個の合成にしか成功していなかったのに比し、森田氏のチームは50日で14個の合成に成功した。このように、世界で最も強力な装置を完成させ、その性能テストを経た後、原子番号112の元素を合成し、最近、 $^{209}\text{Bi}(^{70}\text{Zn}, n)^{278}113$ 反応により、世界で初めて113番新元素の合成実験に成功した。この新元素は、 $^{278}113 \rightarrow ^{274}111 \rightarrow ^{270}109(\text{Mt}) \rightarrow ^{266}107(\text{Bh}) \rightarrow ^{262}105(\text{Db}) \rightarrow$ (自発核分裂) というチェーンで崩壊することが解明され、これまで2イベントが見つかった (図参照)。

日本では1940年に、仁科芳雄博士と東大・木村健二郎教授らのグループが理研小サイクロトロンを用いて、アメリカの強力なグループよりも早く放射性ウラン237を発見し、そのベータ崩壊から生成している筈の93番元素の探索を世界で初めて開始したという歴史がある。そこでは超ウラン元素の発見を逸したが、それから65年たった今、世界で初めて最も重い新元素の合成に成功し、超重元素探索の最前線に立ったことは、仁科記念賞にふさわしい。新元素命名権を得るまでには、最低6イベントが必要だといわれているが、その日は近いであろう。

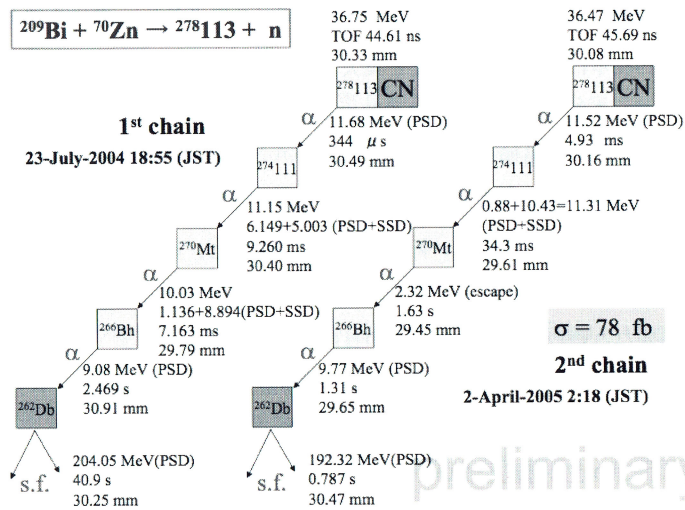
なお、この実験に向けて加速器チームが100%協力体制を引き、ビーム強度を従来の3桁以上も上げることになったことは、今回の実験の成功のもう一つの鍵となっている。この点も付記したい。

#### 主要論文

- [1] K. Morita, K. Morimoto, D. Kaji, T. Akiyama, S. Gono, H. Haba, E. Ideguchi, R. Kanungo, K. Katori, H. Koura, H. Kudo, T. Ohnishi, A. Ozawa, T. Suda, H. Xu, T. Yamaguchi, A. Yoneda, A. Yoshida, and Y.-L. Zhao, "Experiment on the Synthesis of Element 113 in the Reaction  $^{209}\text{Bi}(^{70}\text{Zn}, n)^{278}113$ " J. Phys. Soc. Japan **73** (2004) 2593–2596.
- [2] K. Morita, K. Morimoto, D. Kaji, H. Haba, E. Ideguchi, J. C. Peter, R. Kanungo, K. Katori, H. Koura, H. Kudo, T. Ohnishi, A. Ozawa, T. Suda, K. Sueki, I. Tanihata, H. Xu, A. V. Yeremin, A. Yoneda, A. Yoshida, and Y.-L. Zhao, T. Zheng, S. Goto,

and F. Tokanai, "Production and Decay Properties of  $^{272}111$ " J. Phys. Soc. Japan **73** (2004) 1738 – 1744.

- [3] K. Morita, K. Morimoto, D. Kaji, H. Haba, E. Ideguchi, R. Kanungo, K. Katori, H. Koura, H. Kudo, T. Ohnishi, A. Ozawa, T. Suda, K. Sueki, I. Tanihata, H. Xu, A. V. Yeremin, A. Yoneda, A. Yoshida, and Y.-L. Zhao, and T. Zheng, "Production and Decay of Isotope  $^{271}\text{Ds}$  ( $Z = 110$ )" Euro. Phys. J. A **21** (2004) 257 – 263.



### § 3. 仁科記念奨励金

この研究奨励金は、わが国の研究者の海外での研究への援助（1956年度から）、および発展途上国の研究者の来日研究への援助（1992年度以降）にあてられています。

研究者の海外での研究への援助について述べますと、仁科記念財団が派遣する研究者は、派遣された先の国で行われる研究の重要なメンバーとなっております。そ