



## 中村誠太郎賞を受賞して<sup>1</sup>

関澤 一之

新潟大学 研究推進機構 超域学術院

【受賞論文：K. Sekizawa, Microscopic description of production cross sections including deexcitation effects, Phys. Rev. C **96**, 014615 (2017)】

### 1 はじめに

この度は、2017年度（第12回）中村誠太郎賞を頂くことになり、身に余る光栄に存じます。中村誠太郎賞は、素粒子奨学会（協賛：湯川記念財団）が授与する単著の論文を評価する賞で、広い意味での素粒子論（原子核理論、宇宙物理理論を含む）分野の若手研究者を奨励するという目的で設立されたものです [1]。2006年度から2016年度までに総勢21名の方々が中村誠太郎賞を受賞されているのですが、今回の受賞は、核子多体系として原子核の物理を探求する低エネルギー原子核理論としては初の受賞となりました。そうした背景もあり、何か後進の役に立つであろう情報を紹介してほしいと、編集委員の方にお声を掛けていただきました。

そこで本稿では、大変恐縮ではありますが、中村誠太郎賞への応募に至るまでの私の体験談を紹介させていただければと思います。第2節において、私が中村誠太郎賞応募に至った経緯について紹介します。第3節において、非常に簡潔にはありませんが、受賞論文の内容について紹介します。最後に、第4節で、まとめの言葉を述べます。

### 2 応募に至るまでの経緯

私は素粒子論グループの運用するメーリングリスト sg-1 を通じて中村誠太郎賞を知りました。実際に応募を意識したのは、2016年（第11回）の募集のアナウンスのときでした。応募規定には「広い意味での素粒子論（原子核理論、宇宙物理理論を含む）の研究に従事する者のうち、大学および研究機関（これに準ずるものを含む）の常勤のポストについていない者。 [1]」とあり、自分にも応募資格があることを認識しました。しかし、2015年3月に筑波大学で学位を取得し、同年4月にポーランドのワルシャワ工科大学（Warsaw University of Technology）にポスドクとして移って新しい共同研究を開始したこともあり、当時の私には応募できる論文がありませんで

<sup>1</sup>この記事は、[原子核研究, Vol. **62**, No. 2, pp. 1–6, 2018年3月] に掲載されたものです。「原子核研究」 (<http://www.genshikaku.jp>) では著作権が著者に残るため、ウェブページでの再配布が許可されています。

した。そのため、翌年に応募できるよう、より一層研究に励もうと決意を新たにすることを記憶しています。

ワルシャワ工科大学では、核子の超流動性を記述できるように拡張された時間依存密度汎関数法 (Time-Dependent Density Functional Theory: TDDFT) を用い、多数の GPU (Graphics Processing Unit) を活用した大規模並列計算を実行することにより、核子多体系に発現する超流動ダイナミクスの研究に取り組みました。この共同研究が実を結び、1) 中性子星内核における超流動中性子の渦と原子核の間の相互作用に関する論文 [2] [ワシントン大学 (University of Washington) との共同研究] と、2) 超流動原子核の衝突に伴うソリトンの励起に関する論文 [3] の2本の論文を、Physical Review Letters 誌に発表するに至りました。1本目の論文では、パルサーの回転速度が急に上昇する現象 (グリッチ) を理解する鍵を握ると考えられる渦・原子核間相互作用を微視的な計算に基づいて導出することに成功しました。2本目の論文では、超流動原子核の衝突に伴って発現するソリトンの励起がエネルギー散逸や核融合反応を阻害し、反応ダイナミクスが大きな影響を受けるという、定性的に新しい現象を予言しました。中村誠太郎賞は単著の論文を評価する賞ですが、共同研究に基づく論文であっても、共同研究の内容と応募者が寄与した内容を明記した説明書を提示し、応募者が寄与した部分に重点をおいた論文を単独で書き下ろすことにより、応募することができます [1]。そのため、応募の締め切りが2017年4月末に迫った同年1月の時点では、これらの共同研究をもとにした論文を書き下ろし、応募することを想定していました。

しかし、実際に応募に用いた論文は、ワルシャワ工科大学との共同研究に基づくものではなく、私が大学院生時代から続けている重イオン多核子移行反応の研究に関する論文です。その論文では、重イオン反応の微視的な TDDFT 計算と生成された原子核の脱励起過程を記述する統計モデルを組み合わせ、核子放出や核分裂といった2次的脱励起過程の影響を考慮に入れた断面積を評価する枠組みを提案しました。実は私は長い間、この仕事を実現させようと頭の片隅に置いて取り組んでいたのですが、最初に実装を試みた統計モデル計算コードが難解であったことや他の共同研究に着手し始めたこともあり、数年間実現できずにいたのです。

転機が訪れたのは、2017年2月20-24日にオーストラリアのタスマニアで開催された低エネルギー重イオン反応の国際会議 FUSION17 に出席したときのことでした。会議の終盤にある研究者の方と話している際に、その方が用いている最新の統計モデル計算コード (GEMINI++ [4]) の情報を教えていただきました。長い間やりたいと思っていたことが実現できるかもしれないという喜びもあり、この仕事を4月末までに論文にまとめ、独自の研究に基づく単著論文で中村誠太郎賞に応募したいと思い至りました。

ポーランドに帰国後すぐにその計算コード [4] を入手し、自身の計算結果に基づいた解析コードの実装に取り組みました。他の共同研究も進めていたためすぐには実現できませんでしたが、3月中に無事に実装することができました。そして、4月中頃までに計算・分析を終え、残りの2週間ほどで応募論文を書き上げ、締め切り間際に応募手続きを終えました。(その後、応募論文の文章をさらに磨いたものを5月末に Physical Review C 誌に投稿し、最終的に7月末に出版されたものが論文 [5] となっています。) 日程的に非常に厳しい中でも論文を書き上げ応募に至った背景には、後に公開される講評に「核理論分野の応募者が無かった/少なかったのは残念」と書かれることを避けたいという思いもありました (過去の講評にそういった記述がありました)。その後受賞が決まった際には、大変嬉しく思うと同時に、まさか自分がと驚いたことを覚えていま

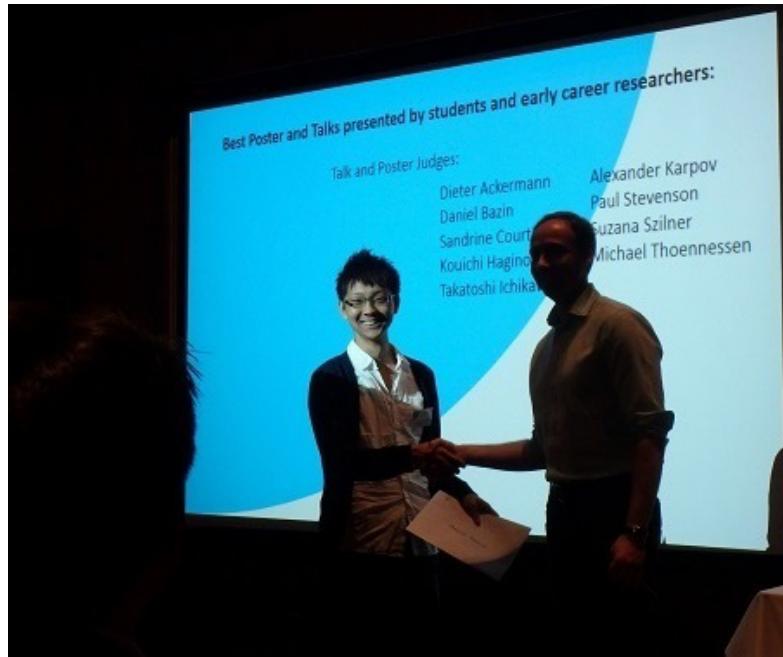


図 1: 写真は、転機となった 2017 年 2 月 20–24 日にオーストラリアのタスマニアで開催された低エネルギー重イオン反応の国際会議 FUSION17 において、若手研究者による最優秀口頭発表として「The Paulo Gomes and Valery Zagrebaev Prize」を受賞した際のものであります。

す。2017 年 8 月にワルシャワ工科大学での任期を終えた後には、同年 9 月から米国シアトルのワシントン大学、そして 2018 年 1 月からは新潟大学へと所属が移っていったのですが、この中村誠太郎賞の受賞が少なからず助けになったのではないかと思います。

### 3 受賞論文について

受賞論文 [5] は、低エネルギー重イオン反応を微視的に記述することができる時間依存密度汎関数法 (TDDFT) に原子核崩壊の統計モデルを組み合わせることにより、核子放出や核分裂といった 2 次的脱励起過程の影響を考慮に入れた断面積を評価できる枠組みを提案したものです。

この業績は、私がこれまでにやってきた重イオン多核子移行反応に関する研究をさらに深化・発展させるものとして位置付けられます。TDDFT は、原子核や核物質の性質を再現するように構築されたエネルギー密度汎関数のみが計算のインプットであり、反応についての経験的なパラメータを含みません。一方で TDDFT は、単一の平均場によって主要な反応ダイナミクスを記述しているため、移行反応の様な個々の反応毎の断面積をどの程度定量的に記述できるのかということは、自明ではありません。そこでまず、反応後の TDDFT 波動関数に対し、生成された原子核の陽子数・中性子数の固有状態を抜き出す粒子数射影法 [6] を適用し、移行反応確率および断面積を計算可能としました [7]。しかし、この方法で得られた移行反応断面積は反応直後の励起した原子核に対するものであり、実験データに含まれる核子放出や核分裂といった 2 次的な脱励起過程の影響が含まれていません。そのため、生成された原子核が高い励起エネルギーを伴う反応の場合に実験データとの間にずれが見られるという問題に直面しました。この問題を解決するために、粒子数射影法を拡張し、個々の放出核の励起エネルギー・角運動量等を計算する方法を考案

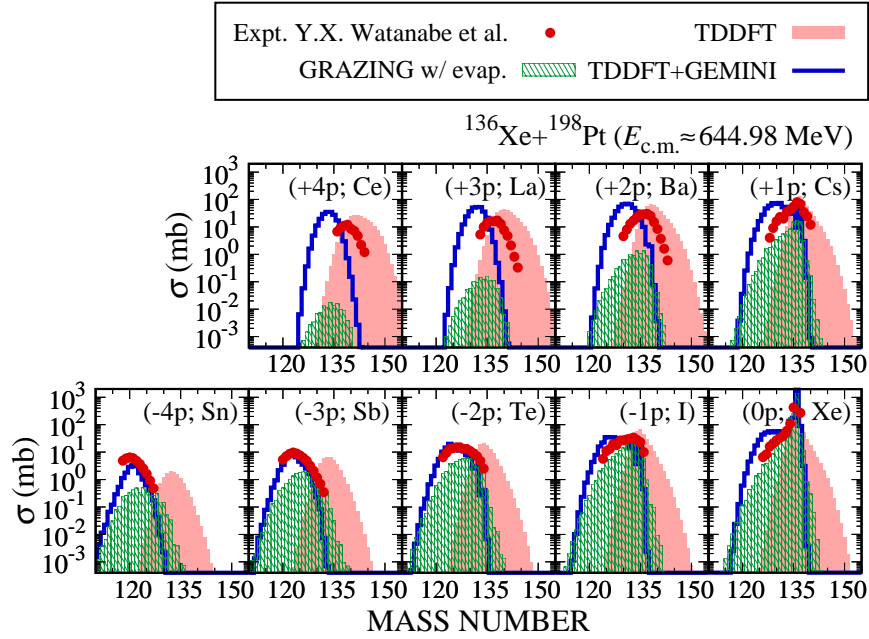


図 2:  $^{136}\text{Xe}+^{198}\text{Pt}$  反応 ( $E_{c.m.} \approx 645$  MeV) における生成された軽い放出核の生成断面積です。点が実験データ [11] を、実線（塗り潰された領域）が TDDFT 計算で得られた脱励起の影響を含む（含まない）断面積を、斜線の領域が半古典理論（GRAZING[12]）によって得られた中性子放出の影響を含む断面積を、それぞれ示しています。図は American Physical Society から許可を得て、論文 [5] の図を転載したものです。

しました [8]。そして、受賞論文 [5] では、TDDFT 計算に基づいて得られたこれらの情報を用い、2 次的な脱励起過程を統計模型（GEMINI++[4]）によって評価する枠組みを完成させました。この方法を実験データのある様々な反応に適用し、定量的な比較を行うことにより、2 次的な脱励起過程を考慮することによってデータの再現性が大きく向上することを示しました [5, 9, 10]。

図 2 に、分析した反応の中で最も脱励起の影響が顕著である、 $^{136}\text{Xe}+^{198}\text{Pt}$  反応 ( $E_{c.m.} \approx 645$  MeV) の例を示しました。図は、入射核 ( $^{136}\text{Xe}$ ) が標的核 ( $^{198}\text{Pt}$ ) と核子をやり取りすることによって、反応後にどの原子核がどれだけ生成されるのかを表したものです。各パネルは、異なる移行陽子数 ( $\pm xp$ ) に対応する同位体毎の生成断面積を、横軸を質量数にとって示しています。実験データ（点）[11] と通常の TDDFT 計算の結果（塗り潰された領域）を比べると、実験データの方が質量数の小さい側（図の左側）に分布がずれていることが分かります。このことは、反応後の励起した原子核が、中性子等を放出して脱励起したことを示唆しています。TDDFT に統計模型を組み合わせることによって脱励起の影響を取り入れたものが、実線です（TDDFT+GEMINI）。図から、陽子が取れる反応 ( $-xp$ , 下のパネル) については、実験データを定量的に再現できていることが分かります。しかしながら、陽子が加わる反応 ( $+xp$ , 上のパネル) については、実験データに比べて脱励起の影響が大きく出過ぎている傾向があります。このずれの原因はまだ分かっておらず、今後より詳細な分析によって明らかにしたいと考えています。比較のため、重イオン多核子移行反応の分析によく用いられている、GRAZING と呼ばれる半古典理論 [12] の結果も示しました（斜線の領域）。この GRAZING 計算には、中性子放出の効果が含まれています。図から、GRAZING（斜線の領域）に比べて、受賞論文 [5] の成果で

ある TDDFT+GEMINI (実線) の方が、実験データをより定量的に再現していることがわかります。GRAZING には実験データをより良く再現するように調整できるパラメータが含まれているのに対し、TDDFT+GEMINI にはその自由度がないという点を、強調しておきます (統計模型計算には、様々な質量数の原子核に適用できるように調整された GEMINI++ のデフォルトのパラメータ [13, 14] を用いています)。

近年、クーロン障壁近傍の入射エネルギーで起こる多核子移行反応が、重い中性子過剰核を生成する方法の一つとして注目を浴びており、理論・実験双方から研究が精力的に進められています。例えば、重元素を合成する  $r$  過程の詳細を理解する上で重要であると考えられている  $N = 126$  近傍の中性子過剰核や、“安定の島” 到達へ向けた中性子過剰な超重元素の生成への応用が議論されています (例えば論文 [15] 等)。受賞論文で提案した方法は、反応・ダイナミクスについての経験的なパラメータを含まない微視的な枠組みに基づくため、予言力があると考えられます。現在は、未知の不安定核を生成するための最適な条件を明らかにするための系統的な分析を進めており、近い将来実験の動向にも波及する成果が上げられると期待しています。受賞論文 [5] の成果は微視的 TDDFT 計算の到達点を示しており、実験データとの間に見られるずれは、現在用いている枠組みで十分に記述することができない物理の存在を示唆しています。今後はそうした理論的枠組みの拡張にも取り組みたいと考えています。(論文 [16] はその一例で、TDDFT 計算によって記述される平均軌道まわりの揺らぎの効果を取り入れることによって、生成された原子核の質量数分布の幅の実験値を定量的に再現することに成功しました。) 重イオン反応の TDDFT 計算のより詳細な説明については、以前寄稿させていただいた解説記事 [17] 等をご参照ください。

## 4 おわりに

何か後進の役に立つ情報を、と本稿執筆の依頼を受けましたので、最後にいくつか挙げまして、まとめの言葉とさせていただければと思います。まず第一に、当然のことですが、積極的に応募することが何よりも重要です。中村誠太郎賞に限らず、若手を育て、分野を盛り上げようという様々な取り組みがなされています。若手はそのような機会を逃さぬよう常にアンテナを張り、その機会を大いに活用すべきだと思います。そういった賞に応募することは、審査を担当される第一線で活躍する研究者の方々に論文を精読していただき、自身の仕事を知っていただく貴重な機会を生み出します。また、私の場合、論文賞への応募という明確な期限付きの目標を定めたことにより、研究を推進する原動力が得られたように思います。私の体験が示していますように、限られた時間の中で書いた書き下ろしの論文であっても、論文の内容・学術的価値を適切に評価していただくことができました。このことは、中村誠太郎賞が、論文の引用数や掲載雑誌のインパクトファクター等の形式的指標に頼らずに自身の自信作で挑戦できる賞であるということを示しています。今後、より多くの原子核理論研究者の方々が中村誠太郎賞を受賞し、活躍の場を広げ、分野がさらに発展していくことを期待します。

本稿で私が中村誠太郎賞を受賞するに至った経緯を紹介する機会を頂いたことを、大変光栄に思います。私は (あまり参考にするべきではないかもしれない) かなり過密なスケジュールで応募に至ったわけですが、結果的には、それにより自身の研究が進展しましたし、その業績が評価されたことは大変喜ばしい限りです。この受賞を励みにし、今後もより一層研究・教育活動に尽力し、原子核分野の発展に貢献できるよう、誠心誠意取り組みたいと考えています。

本稿が後進の若手研究者に参考にしていただけることがあれば幸いです。

## 謝辞

筑波大学大学院在籍中にご指導を頂いた矢花一浩氏にこの場をお借りして深く感謝を申し上げます。研究を進める上で、筑波大学計算科学研究センターの超並列クラスタ型スーパーコンピュータ T2K-Tsukuba システム, および, 京都大学基礎物理学研究所計算機システムを利用しました。また, HPCI 共用計算資源の一般利用課題 (課題 ID : hp120204, hp140010, hp150081, hp160062, hp170007) として北海道大学情報基盤センターのスーパーコンピュータ HITACHI SR16000/M1 を利用しました。本研究の一部は, 日本学術振興会特別研究員奨励費 (25-241), および, Polish National Science Centre (DEC-2013/08/A/ST3/0070) の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] 素粒子奨学会ウェブページ, <https://bit.ly/soryushi>.
- [2] G. Wlazłowski, K. Sekizawa, P. Magierski *et al.*, Phys. Rev. Lett. **117**, 232701 (2016).
- [3] P. Magierski, K. Sekizawa, and G. Wlazłowski, Phys. Rev. Lett. **119**, 042501 (2017).
- [4] R.J. Charity, in *Joint ICTP-AIEA Advanced Workshop on Model Codes for Spallation Reactions*, Report INDC(NDC)-0530 (IAEA, Vienna, 2008), p. 139; <https://bitbucket.org/arekfu/gemini>.
- [5] K. Sekizawa, Phys. Rev. C **96**, 014615 (2017).
- [6] C. Simenel, Phys. Rev. Lett. **105**, 192701 (2010).
- [7] K. Sekizawa and K. Yabana, Phys. Rev. C **88**, 014614 (2013).
- [8] K. Sekizawa and K. Yabana, Phys. Rev. C **90**, 064614 (2014).
- [9] K. Sekizawa, Phys. Rev. C **96**, 041601 (2017).
- [10] B.J. Roy, Y. Sawant, P. Patwari *et al.*, arXiv:1707.04164 [nucl-ex].
- [11] Y.X. Watanabe, Y.H. Kim, S.C. Jeong *et al.*, Phys. Rev. Lett. **115**, 172503 (2015).
- [12] A. Winther, Nucl. Phys. **A572**, 191 (1994); **A594**, 203 (1995).
- [13] R.J. Charity, Phys. Rev. C **82**, 014610 (2010).
- [14] D. Mancusi, R.J. Charity, and J. Cugnon, Phys. Rev. C **82**, 044610 (2010).
- [15] V.I. Zagrebaev and W. Greiner, Phys. Rev. C **83**, 044618 (2011).
- [16] E. Williams, K. Sekizawa, D.J. Hinde *et al.*, Phys. Rev. Lett. **120**, 022501 (2018).
- [17] 関澤一之, 原子核研究, Vol. **61**, No. 1, pp. 32–45, 2016年9月.