

平成23年度科学研究費補助金（特別推進研究）自己評価書 〔追跡評価〕

◆記入に当たっては、「平成23年度科学研究費補助金（特別推進研究）自己評価書等記入要領」を参照してください。

平成23年 6月26日現在

研究代表者 氏名	大塚 孝治	所属研究機関・ 部局・職	東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究課題名	モンテカルロ殻模型		
課題番号	13002001		
研究組織 (研究期間終了時)	研究代表者 大塚 孝治（東京大学・大学院理学系研究科・教授） 研究分担者 下浦 享（東京大学・大学院理学系研究科・教授） 梶野 敏貴（国立天文台・理論研究部・助教授） 水崎 高浩（専修大学・法学部・助教授） 本間 道雄（会津大学・コンピュータ理工学部・講師）		

【補助金交付額】

年度	直接経費
平成13年度	104,000 千円
平成14年度	130,000 千円
平成15年度	132,000 千円
平成16年度	47,800 千円
平成17年度	16,000 千円
総計	429,800 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。)

特別推進研究の研究期間終了後、原子核構造の解明と、原子核での多体問題計算の2つの側面で発展があったので、それらについて述べる。

先ず、原子核構造の解明については、特別推進研究の研究期間の1年目の2001年8月に、Physical Review Letters 誌に論文を発表した(PRL, 87, 082501 (2001))。この論文は、特別推進研究の始まりと同時に出版されたのであるが、特別推進研究の研究内容を大きく前進させた。即ち、特別推進研究によって行われるモンテカルロ殻模型計算に対して、核力の立場からの指針を与え、数値計算で得られる結果を深く考察するための見方を与えた。その後のさらなる研究により、その論文に書かれたことはより完全な理論に発展され、特別推進研究の最終年度である2005年の12月にPhysical Review Letters 誌に発表された(PRL, 95, 232502 (2005)、特別推進研究への謝辞あり)論文で報告された。そこには、特別推進研究の研究活動の成果が反映されていることは当然である。この論文で、核力の効果として、陽子数(Z)や中性子数(N)の変化とともに原子核の殻構造が変わることを意味する、殻進化(shell evolution)という概念が提起された。それは核力の中でもとりわけ特徴的な成分であるテンソル力によって起こることが、世界で初めて示された。2001年の論文ではテンソル力の意義は認識されていなかった。この成果は、特別推進研究の研究期間終了後の研究に対して、非常に強力な指針を与えるものとなり、その成功の原動力である。この殻進化という新しいパラダイムに沿って多くの研究が成された。その代表的なものとしては、ページ3-3の【研究期間終了後に発表した論文】のリストのNo. 3の論文が挙げられる。そこでは、フランスのグループと協力して、 $N=28$ あたりの原子核に現れるテンソル力の効果を、フランスGANIL研究所からの実験データを検討しながら検証した。このような研究は多数あり、それを反映して、この2つの論文の被引用数(トムソンロイター社調べ、以降も同様)はそれぞれ337と228に達している。

これら、原子核多体構造の基本理論に関する新しい知見は、特別推進研究での研究の主要な枠組みであった殻模型を越えて、平均場理論に対しても、特に一粒子的性質に関して、大きな変更を迫ることとなった。Gogny型相互作用にテンソル力の効果を加えた研究の論文などが出ており、平均場模型の計算においてもテンソル力の効果が重要であることを示し、2006年の出版ながらも、被引用数が84と46になっている。

核力による殻進化の研究の最近の成果は2010年に2つの論文により出版された。一つは、ページ3-3の【研究期間終了後に発表した論文】のリストのNo. 5の論文であり、主に陽子と中性子の間の相互作用について、テンソル力と中心力がどのようなものであるかを示した。この論文は1年半で28回引用され、その重要性を表している。もう一つはさらに新しく、3体力の効果が殻進化に如何に現れるかを示したものである。2010年7月に、Physical Review Letters 誌に論文を発表した(PRL, 105, 032501 (2010))。

特別推進研究ではsd殻全体とpf殻のエネルギーの低い側の6割からなる配位模型空間に対して有効なsd-pf相互作用による計算を系統的に実行した。その結果の実験的な検証が、特別推進研究終了後も世界各地の大学や研究所で進められた。それらに対する理論的立場からの協力を行い、その成果が多くの論文になっている。それらの例としては、ページ3-3の【研究期間終了後に発表した論文】のリストのNo. 6, 8, 9の論文が挙げられる。特にNo. 9の論文は、理化学研究所の世界最新鋭の加速器RIBF(RIビームファクトリー)による最初の実験(Day One実験)の一つとして行われた、重要なものであり、実験データから物理的な意義を抽出するのに特別推進研究で発展させられたモンテカルロ殻模型による理論研究が大いに貢献した。

特別推進研究以降も進められた理論研究の内重要なものは、宇宙核物理学への応用で、その例がページ3-3の【研究期間終了後に発表した論文】のリストのNo. 4の論文である。そのような一連の研究では、弱い相互作用によるガモフテラー遷移や第一禁止遷移が中性子過剰なエキゾチック原子核を含めて、どのように起こるかを調べ、さらに同じ相互作用によるニュートリノと原子核の間の相互作用の効果も調べている。それらの成果は爆発的天体現象に関わることが知られている。

特別推進研究ではpf殻全体からなる配位模型空間に対して有効なGXPF1相互作用を提案し、その改良を含む系統的な研究を実施した。それをさらに発展させた研究がその後も展開され、その例がページ3-3の【研究期間終了後に発表した論文】のリストのNo. 7の論文である。この配位模型空間よりさらに上の空間として、 $g_9/2$ 軌道を含み、その代わり $f_7/2$ 軌道ははずしたものを考えることができる。これによって扱える原子核の数は多い。そこで有効相互作用を決定した研究成果がページ3-3の【研究期間終了後に発表した論文】のリストのNo. 10の論文である。この成果は現在、さまざまに使われており、今後多くのさらなる研究成果につながっていくと見なされる。

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。）

上記の項目(1)で、主な研究展開を代表的な関係論文を引用しつつ述べた。特別推進研究と深く関わっていて、特別推進研究の終了以降に出版されたレフェリー付きの国際的な学術雑誌に掲載されたオリジナル論文は60篇以上あり、それらの被引用数の合計は600程度に達する。ここでの国際的学術雑誌とは、Physical Review Letters, Physical Review C, Physics Letters B を指し、いずれも厳格な審査に基づいており、インパクトファクターが高い雑誌である。

研究成果は国際会議等への招待講演でも報告されている。特別推進研究の終了以降に行った、国内外の国際会議での招待講演数の年度別集計は以下のとおりである。

年度	国際会議招待講演数（代表者が行ったもののみ）
2006年度	13件
2007年度	15件
2008年度	8件
2009年度	15件
2010年度	11件

以上の講演数の内、国内開催のものは少なく、大部分は海外開催のものである。

国際会議講演の内、次の2つは参加者1000人規模のものであり、なおかつプレナリー講演として行ったもので、当該特別推進研究の成果として特筆できるものである：

T. Otsuka, “Exotic Nuclei and Yukawa’s Forces”, International Nuclear Physics Conference, June, 2007, Tokyo, Japan.

T. Otsuka, “New Aspects of Nuclear Structure”, Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS, 13-17 October 2009, Waikoloa, Hawaii, USA.

このように、多くの機会に当該特別推進研究から始まった研究の成果は報告発信されている。国際会議には、国際サマースクールが6件（うち5件は海外開催）含まれており、これからの研究を担う世界の若手研究者にも広く発信されている。

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）

研究代表者として取得した科学研究費補助金は

科学研究費補助金 基盤研究（A）平成20～22年度「不安定核構造の統一的記述」
（課題番号 20244022）、直接経費配分額総額 36,900千円

である。他に獲得した科学研究費補助金は単年度平均で1,000万円以上の配分という基準に達していない。

他に、以下の研究費が取得されていることを記載する。

文部科学省 次世代スーパーコンピューター戦略プログラム 平成23～27年度
分野5 物質と宇宙の起源と構造 課題2代表者

分野5は筑波大学が代表機関となって研究費を受託し、それをさらにいくつかの大学に配分して研究を進める。

当該特別推進研究の代表者が、東京大学への配分を受託する代表者である。

配分額は未確定であるが、平成23年度は約6,000万円で、後年度もほぼ同程度と見込まれる。

(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

原子核物理学上の研究成果としては、核力による殻進化があげられる。陽子数と中性子数が通常の安定原子核に比べてアンバランスな原子核は、エキゾチック原子核と呼ばれる。それらは、ベータ崩壊などのプロセスによって安定原子核へ向けて短寿命で変わっていくので、不安定原子核とも呼ばれる。それらのエキゾチック原子核の構造の基本的な性質が、安定原子核の構造と違うのか、同じなのか、という問題がある。当該特別推進研究以前には、過剰に含まれる中性子がゆるく束縛されることに起因する効果が主に研究され、中性子ハローの概念が導入されるなどした。しかし、陽子数に比べて中性子数が多くなっていった時に、核力の効果がどのように現れるか、という観点は存在していなかったと言っても過言ではない。それが当該特別推進研究、及び、それ以降の研究を通じて覆されて、エキゾチック原子核の殻構造は、核力の特徴を反映して、安定原子核から大きく変わることが明らかになった。魔法数さえも変わることがある。殻構造は一粒子運動に関わるだけでなく、ヤーンテラー効果の一つである原子核の表面の変形にも大きな影響を与える。そこで、殻構造は、核力の特質により、陽子数、中性子数の変化とともに変わっていく、という「殻進化」のパラダイムシフトを生み出したと言える。

当該特別推進研究では、モンテカルロ殻模型を量子多体計算の手法としたが、その方法論の改良は以後も一貫して続けられ、最近新しい外挿法を含めて、さらに大きな進歩を遂げた。その進歩の最初の報告の論文は既に出版されている（PHYSICAL REVIEW C 82巻, 061305）。計算方法は常に改良され続けており、最近それを加速して、京スーパーコンピューターの大規模で先端的な計算を目指してさらに進んでいる。

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

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）

項目1－(4)で述べたように、原子核物理学上のパラダイムシフトとしての、「核力による殻進化」を提唱した。これによって、エキゾチック原子核の構造は核力の特徴を反映して、安定原子核から大きく変わることがあることが明らかになった。さらに、その変化の仕方についても、分かりやすい描像を与えた。これは、RIビームを用いての原子核物理学研究に対して全く新しい視点を与えたことになる。そのため、当該特別推進研究以降の、世界の先端的な重イオン大型加速器の、重要テーマや目標に必ず「殻進化」、又は、それと同義の言葉が現れるようになった。つまり、新しい分野を作ったことになり、学術研究へのインパクトとしては大変大きなものと考えられる。このように、新分野を創出し、それによって多くの研究を引き起こした、という形で当該特別推進研究の成果は他の研究者に活用されている。この新しい分野は、様々な殻進化の様相を探究すべく、現在もその研究範囲を拡げつつある。それが故に、関連論文の被引用数は依然として早いペースで増え続けているし、代表者が多くの国際会議に招待されている。

計算方法としては、他のどの方法でも解くことのできない大きな問題が解ける。その結果は、世界中の多くの実験研究者によって、実験で検証すべき予言などとして使われている。

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	“Evolution of nuclear shells due to the tensor force”, Otsuka T, Suzuki T, Fujimoto R, et al., PHYSICAL REVIEW LETTERS 95 巻, 232502, 2005 年	核力中のテンソル力によって、原子核中の陽子や中性子の軌道のエネルギー（一粒子エネルギー）がどのように変わるかを初めて示したパイオニア論文。	228
2	“Effective interaction for pf-shell nuclei”, Honma M, Otsuka T, Brown BA, et al., PHYSICAL REVIEW C, 65 巻, 061301, 2002 年	p f 殻を模型配位空間とする有効相互作用 G X P F 1 を提唱し、その有効性を検証した。	192
3	“New effective interaction for pf-shell nuclei and its implications for the stability of the N=Z=28 closed core”, Honma M, Otsuka T, Brown BA, et al., PHYSICAL REVIEW C 69 巻,034335, 2004 年	p f 殻を模型配位空間とする有効相互作用 G X P F 1 を提唱し、その有効性を中性子数も陽子数も 28 のニッケル 56 原子核で検証した。	190
4	“Structure of Ti-52, Ti-54 and shell closures in neutron-rich nuclei above Ca-48”, Janssens RVF, Fornal B, Mantica PF, et al., PHYSICS LETTERS B 546 巻, 55-62, 2002 年	チタン 52, 54 原子核の構造を実験的に調べ、モンテカルロ殻模型の理論計算と比較。	100
5	“Shell-model description of neutron-rich pf-shell nuclei with a new effective interaction GXPF1”, Honma M, Otsuka T, Brown BA, et al., EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL A 25 巻, 499-502 Suppl. 1, 2005 年	p f 殻を模型配位空間とする有効相互作用 G X P F 1 を提唱・改良し、その有効性を中性子数が陽子数よりも大きい、中性子過剰原子核で検証した。	97
6	“Onset of intruder ground state in exotic Na isotopes and evolution of the N=20 shell gap”, Utsuno Y, Otsuka T, Glasmacher T, et al., PHYSICAL REVIEW C 70 巻,044307, 2004 年	エキゾチックな Na 原子核における侵入者状態を N = 20 のシェルギャップの進化と結び付けて議論、予言	88
7	“Measurement of the spin and magnetic moment of Mg-31: Evidence for a strongly deformed intruder ground state”, Neyens G, Kowalska M, Yordanov D, et al., PHYSICAL REVIEW LETTERS 94 巻, 022501, 2005 年	Mg - 31 原子核の低い状態のスピント定と磁気モーメントの測定とモンテカルロ殻模型の理論計算との比較を行った。強く変形した侵入者状態の基底状態を示唆。	64
8	“Reduced transition probabilities to the first 2(+) state in Ti-52, Ti-54, Ti-56 and development of shell closures at N=32,34”, Dinca DC, Janssens RVF, Gade A, et al., PHYSICAL REVIEW C 71 巻, 041302, 2005 年	Ti - 52, 54, 56 原子核の最初の 2+ への遷移確率を求め、N = 32, 34 という新魔法数の理論予言の検討を行った	59
9	“Lowest excitations in Ti-56 and the predicted N=34 shell closure”, Liddick SN, Mantica PF, Janssens RVF, et al., PHYSICAL REVIEW LETTERS 92 巻, 072502, 2004 年	Ti - 56 の原子核の低い励起状態への励起を調べ、その結果を通じて、N = 34 新魔法数の検証を行う	57
10	“Gamow-Teller transitions and magnetic properties of nuclei and shell evolution”, Suzuki T, Fujimoto R, Otsuka T, PHYSICAL REVIEW C 67 巻, 044302, 2003 年	比較的軽い核のガモフテラー遷移や磁気的な性質を殻進化との関連に着目して議論。	52

【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	“Mean field with tensor force and shell structure of exotic nuclei”, Otsuka T, Matsuo T, Abe D, PHYSICAL REVIEW LETTERS 97 巻, 162501, 2006 年	テンソル力を平均場理論の計算に含めた初めての論文。平均場模型としては G o g n y 模型を採用。	84
2	“Tensor interaction contributions to single-particle energies”, Brown BA, Duguet T, Otsuka T, et al., PHYSICAL REVIEW C 74 巻, 061303, 2006 年	テンソル力の効果を、スキルム模型に適用した初めての論文。	46
3	“Reduction of the spin-orbit splittings at the N=28 shell closure”, Gaudefroy L, Sorlin O, Beaumel D, et al., PHYSICAL REVIEW LETTERS 97 巻, 092501 2006 年	N = 28 のシェルギャップの縮小化を殻進化とからめて議論。	45
4	“Neutrino-nucleus reactions based on new shell model Hamiltonians”, Suzuki T, Chiba S, Yoshida T, et al., PHYSICAL REVIEW C 74 巻, 034307, 2006 年	新しい殻模型のハミルトニアンによる、ニュートリノと原子核との反応を議論。	33
5	“Novel Features of Nuclear Forces and Shell Evolution in Exotic Nuclei”, Otsuka T, Suzuki T, Honma M, et al., PHYSICAL REVIEW LETTERS 104 巻, 012501, 2010 年	中心力とテンソル力について、どのようなものが原子核で働いているかを、一般的なものを提案して議論。	28
6	“Direct evidence for the onset of intruder configurations in neutron-rich Ne isotopes”, Terry JR, Bazin D, Brown BA, et al., PHYSICS LETTERS B 640 巻, 86-90, 2006 年	侵入者状態がどの中性子過剰ネオン原子核で現れ始めるかを直接的な証拠で議論	27
7	“Shell model analysis of the Ni-56 spectrum in the full pf model space”, Horo M, Brown BA, Otsuka T, et al., PHYSICAL REVIEW C 73 巻, 061305, 2006 年	ニッケル 56 原子核のエネルギー準位を精確に計算	27
8	“Spectroscopy of Mg-36: Interplay of normal and intruder configurations at the neutron-rich boundary of the "Island of Inversion"”, Gade A, Adrich P, Bazin D, et al. PHYSICAL REVIEW LETTERS 99 巻, 072502, 2007 年	マグネシウム 36 原子核のガンマ線分光を行い、通常の配位の状態と侵入者状態のからみあいを議論	27
9	“Halo Structure of the Island of Inversion Nucleus Ne-31”, Nakamura T, Kobayashi N, Kondo Y, et al., PHYSICAL REVIEW LETTERS 103 巻, 262501, 2009 年	「逆転の島」に属するネオン 31 原子核のハロー構造を調べることにより、この原子核へ向けての殻進化を解明	16
10	“New effective interaction for f(5)pg(9)-shell nuclei”, Honma M, Otsuka T, Mizusaki T, et al., PHYSICAL REVIEW C 80 巻, 064323, 2009 年	f 5 / 2、p 3 / 2、p 1 / 2、g 9 / 2 から成る配位模型空間での有効相互作用を導き、多くの原子核の系統的な記述を行った	16

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。）

モンテカルロ殻模型は、現在、一層の改良を受けて、重い原子核への応用が可能になりつつある。計算が可能になる重い原子核の中には、核分裂で生成される分裂片原子核になっていて、原子力でデータを必要とするものが少なくない。さらに、それらの多くは実験によっては、データが取れないものである。そのようなものに対して、信頼性の高い理論計算が可能になりつつある。

それらの理論計算により、例えば、いくつかの放射性廃棄物の半減期がこれまで確定していなかったのが、ある程度精密に計算可能になり、社会への還元につながる。他にも、中性子捕獲断面積などにも実験ができないものがある。このように、理論計算の能力が向上して、原子核物理学理論の計算がやっと社会貢献ができる段階になってきたと言える。

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（助手やポスドク等の研究終了後の動向を記述してください。）**

若手研究者の内、清水則孝は当該特別推進研究の期間前後は大学院学生からポスドク（理化学研究所基礎科学特別研究員）であったが、その後、東京大学の理学系研究科物理学専攻の助教となり、最近は同研究科附属原子核科学研究センターの特任准教授に就任した。研究者として、成長しつつあり、計算手法を中心に多くの成果を出している。