

機関番号：12401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20540250

研究課題名（和文） 電気双極子モーメントによる素粒子標準理論の理論的検証

研究課題名（英文） Theoretical investigation of the standard model through electric dipole moment

研究代表者

吉永 尚孝 (YOSHINAGA NAOTAKA)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：00192427

研究成果の概要（和文）：本研究では中重核領域の原子核構造およびシッフモーメントについて研究を行い、次のような研究成果を得た。(1) 中性子過剰な Se、As、Ge、Ga アイソトープに対して殻模型計算を行い、計算で得られたエネルギーレベルと電磁遷移を実験値と比較した。殻模型の結果の解析から、高スピン領域では  $0g_{9/2}$  軌道にある中性子2個の整列が現れることを確認した。(2) 遷移核の構造を調べるため、生成座標法による計算の新しいアルゴリズムを開発した。この理論の Se、Ge 偶偶核への適用により質量数 80 領域の三軸非対称変形の重要性を示した。(3) 質量数 130 領域の原子核の基底状態について、核子固有の EDM により生じるシッフモーメントを殻模型により計算した。また、シッフモーメントの結果を用いて  $^{129}\text{Xe}$  原子の EDM の上限値を評価した。

研究成果の概要（英文）：We studied the nuclear structure and nuclear Schiff moments and obtained the following results. (1) We performed shell-model calculations for neutron-rich Se, As, Ge, and Ga isotopes, and compared the calculated energy levels and electromagnetic transitions with the experimental data. Through the analysis of the shell model results, it is confirmed that the spin alignment of two neutrons in the  $0g_{9/2}$  orbital becomes apparent at high spins. (2) We developed a new algorithm for generator coordinate method calculations in order to investigate the structure in transitional nuclei. The application of this model to the even-even Se and Ge nuclei indicated the importance of triaxial deformation in the mass 80 region. (3) Nuclear Schiff moments for the ground states around the mass 130 arising from the nucleon intrinsic EDM are calculated in terms of the nuclear shell model. We estimated the upper limit for the EDM of neutral  $^{129}\text{Xe}$  atom using the Schiff moment.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：原子核構造・中重核・殻模型・核子対殻模型・生成座標法・シッフモーメント・

電気双極子モーメント

## 1. 研究開始当初の背景

基本粒子が電気双極子モーメント (EDM) を持つことは、時間反転対称性  $T$  の破れを意味する。現在の相対論的場の理論では  $T$  対称性の破れは、 $CP$  対称性の破れ、すなわち荷電共役  $C$  とパリティ  $P$  の積が破れることを意味する。 $CP$  対称性は  $K^0$  中間子の崩壊で破れているので、 $T$  対称性も破れていると考えられる。ただ、実験的にはこの破れは非常に小さく、実際、標準模型では、現在の技術では測定不可能なほど小さな EDM を予言する。一方、標準模型を越える超対称性理論の幾つかでは、現在の実験で十分測定可能な EDM の値を予言するので、基本粒子がどのくらいの EDM を持つかということは、素粒子理論に対してきわめて重要な影響を与える。

原子核が点状であれば原子に一樣な電場をかけると、原子核の外場を打ち消すように原子中の電子配位は変位し、原子の EDM の検出は妨げられる (シッフの定理)。しかし、原子核が大きさを持ち変形しており、電荷の密度分布が異なれば、原子核はシッフモーメントと呼ばれるモーメントを通じ、原子に EDM を生み出させることになる。原子核のシッフモーメントは、原子核が点状粒子から大きくずれている場合、すなわち重い原子核や四重極変形をしている場合には、そうでない場合に比べ非常に大きくなると考えられている。現在、原子核のシッフモーメントの理論研究は、海外のいくつかの研究グループにより行われている。しかしながら、これらの研究すべてが平均場近似に基づいて行われており、信頼性は高くない。

原子の EDM の探索実験は、世界的に見ても  $^{129}\text{Xe}$  や  $^{199}\text{Hg}$  などの限られた原子でしか実験が行われておらず、上限値 ( $^{129}\text{Xe}$ :  $4.1 \times 10^{-27}$  ecm,  $^{199}\text{Hg}$ :  $3.1 \times 10^{-29}$  ecm) が得られているに過ぎない。国内では東京工業大学の研究グループが  $^{129}\text{Xe}$  原子に対して測定を始めている。この状況で、どの原子で大きな EDM の観測値が得られるかの理論的予想は未だはっきりせず、平均場を越えた理論によるシッフモーメントの系統的な精密計算が必要とされている。

本研究課題の代表者と分担者は、核子を完全に微視的に扱うと同時に、ハミルトニアン of 回転不変性、粒子数不変性を一切破らない核子対殻模型を提案、発展させてきた。質量数が 100 以上の奇核や奇奇核に現れる核子の単一粒子的な運動は理論的取り扱いが難しく、半古典的アプローチや現象論的アプローチを用いた研究しか行われてこなかったが、この枠組みにより初めて奇核・奇奇核のエネルギー準位や電磁遷移を定量的に議論することが可能となった。この核子対殻模型を用い、質量数 130 領域の原子核の数値解析を実

行し、幅広い範囲の偶偶核・奇核・奇奇核のエネルギー準位や電磁遷移を再現することに成功した。さらに、奇奇核に現れる回転バンドは、今まで知られていなかった新しい励起メカニズムにより生じることを明らかにした。これらの研究により、中重核の単一粒子的および集団運動的な状態に対し、核子対殻模型はほとんど唯一の信頼できる理論であることが確かめられた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、原子核により生じる EDM およびシッフモーメントを系統的に計算し、どの原子核で EDM およびシッフモーメントが大きくなるかを予言し、どのような原子核で実験をすべきかについて示唆を与えることである。この計算には原子核波動関数の精度が要求されるため、核子自由度に基づく微視的な平均場を越えた理論により、原子核のエネルギー準位・電磁遷移・電磁モーメント等の実験値を再現する必要がある。本研究では質量数 130 領域 ( $^{129}\text{Xe}$  周辺) の原子核に対して、EDM の数値解析を実行する。質量数が 100 以上の原子核では、核子の一粒子エネルギーの特徴的な変化 (核構造の進化) や、高スピン軌道にある中性子と陽子によって作られたと考えられるエネルギー的にほぼ縮退した 2 つの回転バンド (ダブルットバンド) などが観測されており、原子核波動関数を求める段階で、これらの多様な原子核構造が明らかになる。

## 3. 研究の方法

本研究では集団運動性と単一粒子性が混在する中重核領域の原子核構造について、様々な理論的枠組みにより研究を行うと共に、質量数 130 領域の原子核に対してシッフモーメントの数値解析を実行した。以下に、それぞれの研究の方法とその成果についてまとめる。

### (1) 質量数 80 領域の原子核の殻模型計算

原子核は陽子と中性子が共に魔法数になったとき、非常に安定になる。陽子数と中性子数が魔法数から少し離れた原子核の低エネルギー状態は、安定な原子核に幾つかの陽子と中性子を付加した構造により説明できることが知られている。本研究で用いた殻模型では、安定な原子核の周りには陽子と中性子 (バレンス核子) の占める状態を幾つかの一粒子軌道に制限して、原子核構造を記述する。質量数 80 領域の原子核を記述するため、本研究では一粒子軌道として  $0g_{9/2}$ 、 $1p_{1/2}$ 、 $1p_{3/2}$ 、 $0f_{7/2}$  軌道を用いた。中重核領域では有効相互作用の研究はほとんど行われていないため、現象論的な相互作用を仮定し、その

パラメータは幅広い領域における偶偶核・奇核のエネルギー準位の実験値を再現するように決めた。

### (2) 生成座標法による集団運動状態の解析

生成座標法は核子自由度に基づく微視的で、同時に半古典的な描像を持つ完全に量子力学的多体理論であり、核子多体系である原子核の集団運動と単一粒子運動を同時に記述する強力な理論である。生成座標法では原子核の変形に応じた波動関数を平均場模型などにより用意し、その波動関数に角運動量射影等を行うことで基底ベクトルを生成する。本研究では、陽子系と中性子系に対して別々に角運動量射影を行い、この陽子系と中性子系の基底ベクトルを結合することで原子核全体の状態を生成する、新しいアルゴリズムを開発した。陽子系または中性子系の取り扱いを容易にするため、平均場の波動関数としてニルソン状態を用いた。

質量数 80 領域の原子核について生成座標法を適用するにあたり、バレンス核子が占有する一粒子軌道と核子間相互作用は殻模型計算と同じものを用いた。また、生成座標法の計算は、原子核の三軸非対称変形の効果を取り入れた場合と軸対称変形の効果のみを取り入れた場合に対して行った。

### (3) 質量数 130 領域の原子核の EDM の評価

原子核のシッフモーメントは、核子固有の EDM から生じる部分と、パリティと時間反転対称性 (PT) を破る 2 体相互作用により生じる部分があると考えられている。本研究では、核子固有の EDM により生じるシッフモーメントを計算する枠組みを整備し、質量数 130 領域の原子核に適用した。申請代表者らはこの領域の偶偶核・奇核・奇奇核に対して系統的な研究を行っており、シッフモーメントの計算に必要な原子核の波動関数は、この計算結果を用いた。質量数 130 領域の核子間にはたらく相互作用の研究はこれまであまり行われてこなかったため、この系統的な研究では現象論的な有効相互作用を用い、その強さは幅広い核種のエネルギー準位や電磁遷移の実験値を再現するように決定している。

## 4. 研究成果

### (1) 質量数 80 領域の原子核の殻模型計算

本研究は、質量数 80 領域の偶偶核・奇核に対して系統的な数値解析を実行したが、以

下では  $^{80}\text{Se}$  原子核の結果のみを示す。殻模型によるエネルギー準位の計算結果と実験値を図 1 に示す。この図より、イラスト状態に関して、殻模型の計算結果は実験値を良く再現していることが分かる。特に実験では、スピンの 6 と 8 の状態におけるエネルギーの差が小さくなっており、殻模型でもその傾向をよく示している。

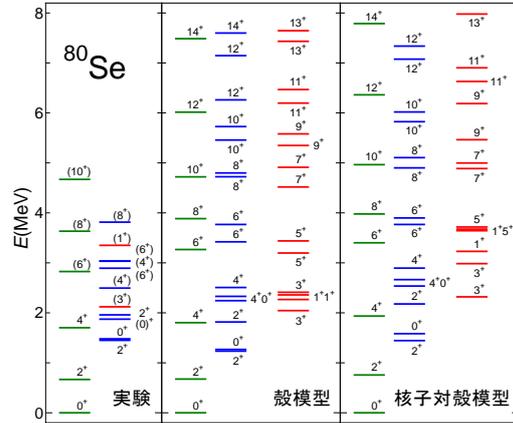


図 1  $^{80}\text{Se}$  原子核に対する実験のエネルギー準位と殻模型・核子対殻模型による計算結果の比較。図中の数字と符号は状態が持つスピンとパリティを表している。右の二つの枠内で、左の 1 列がイラスト状態、右の 2 列が他の状態である。

次に、 $^{80}\text{Se}$  の原子核構造を明らかにするため、殻模型計算で用いたものと同じ有効相互作用を用い、核子対殻模型による数値解析を実行した。核子対殻模型は全殻模型空間を対象とはせず、その空間を集団運動核子対によって作られる空間に制限して殻模型計算を行う理論である。本研究では角運動量がそれぞれ 0、2、4 の集団運動核子対、S 対、D 対、G 対と  $0g_{9/2}$  軌道にある 2 つの核子でできた H 対により殻模型空間を制限した核子対殻模型を用いた。核子対殻模型計算で得られたエネルギー準位と殻模型の計算結果の比較を図 1 に示す。この図より、核子対殻模型で作られる模型空間は殻模型の計算結果を再現するのに十分であることが分かる。特に、核子対殻模型によるイラスト状態の計算結果は、殻模型計算を良く再現している。

計算で得られた波動関数を解析するため、 $^{80}\text{Se}$  原子核のイラスト状態における D、G、H 対 ( $\pi$  は陽子、 $\nu$  は中性子を表す) の数の期待値をスピン  $I$  の関数として図 2 に示す。

スピンの0～6の状態では、スピンが増加すると陽子と中性子のD対の数が増加し、これらの状態では角運動量が0と2の集団運動核子対の寄与が大きいことが分かった。また、スピンの8の状態では、陽子と中性子のD対の数が減少すると共に、角運動量が8の中性子のH対の数がほぼ1となり、この状態は $0g_{9/2}$ 軌道にある2つの中性子の整列が生じていることが分かった。このことから角運動量が6と8の状態の間で、集団運動状態が単一粒子状態へと相転移するバックベンディング現象が生じることを確認した。

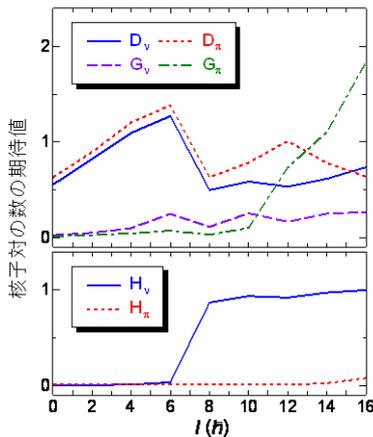


図2 上段：イラスト状態に対する集団運動核子D対、G対の数の期待値。下段：イラスト状態に対する角運動量が8のH対の数の期待値。

(2) 生成座標法による集団運動状態の解析

本研究では、質量数80領域のSe、Geアイソトープに対して数値解析を実行したが、以下では $^{78}\text{Ge}$ 原子核の計算結果についてのみ議論する。生成座標法と殻模型の計算により得られた励起エネルギーをスピン $I$ の関数として図3に示す。この図より、イラスト状態に関して、2つの生成座標法の結果は殻模型計算を良く再現していることが分かる。特に殻模型の結果では、スピンの6と8の状態におけるエネルギーの差が小さくなっており、生成座標法でもその傾向をよく示している。

他の状態に関しては、軸対称変形の場合、殻模型計算のスピンの2、3、5の低エネルギー状態を再現することができない。これに対して、三軸非対称変形の場合はこれらの状態を再現することに成功した。このことから、三軸非対称変形の効果を波動関数に取り入れることが重要であることが分かった。質量数80領域の偶偶核において三軸非対称変形

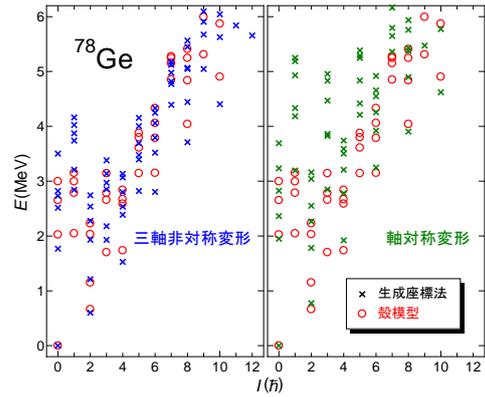


図3  $^{78}\text{Ge}$ 原子核に対する生成座標法(×印)と殻模型(o印)によるエネルギー準位の計算結果の比較。図の左が三軸非対称変形の効果を取り入れた生成座標法の計算結果で、右が軸対称変形の効果のみを取り入れたもの。

の重要性を明らかにした研究は行われておらず、本研究により初めてそれが示された。

(3) 質量数130領域の原子核のEDMの評価

核子対殻模型による $^{129}\text{Xe}$ 原子核のエネルギー準位の計算結果と実験値を図4に示す。この図より、正パリティ状態に関して、核子対殻模型の計算結果は実験値を良く再現していることが分かる。特に基底状態から3つ目までの励起状態は、スピンの順番を良く再現している。負パリティ状態については $9/2^-$ 状態と $11/2^-$ 状態が逆転しているが、計算結果は実験値を良く再現している。

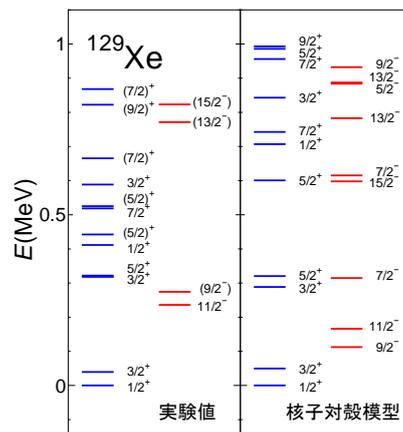


図4  $^{129}\text{Xe}$ 原子核に対する実験のエネルギー準位と核子対殻模型による計算結果の比較。図中の数字と符号は状態もつスピンとパリティを表している。

このように実験値を良く再現する核子対殻模型計算で得られた波動関数を用いて、原子核のシッフモーメントを計算した。この研究の理論的枠組みでは、原子核のシッフモー

メント  $S$  は陽子固有の EDM  $d_\pi$  と中性子固有の EDM  $d_\nu$  を用いて

$$S = s_\nu d_\nu + s_\pi d_\pi$$

と表わされる。1/2<sup>+</sup> 状態に対する原子核のシッフモーメントの要素  $s_\pi$  を中性子数  $N$  の関数として図 5 に示す。中性子の要素  $s_\nu$  は  $N = 81$  の同中性子体で正の値をとるが、 $N = 75$  の同中性子体では負の値をとる。一方、陽子の要素  $s_\pi$  は全ての原子核においてほとんど 0 となる。このことから、この領域の原子核のシッフモーメント  $S$  は中性子固有の EDM  $d_\nu$  による効果が重要であることが分かる。

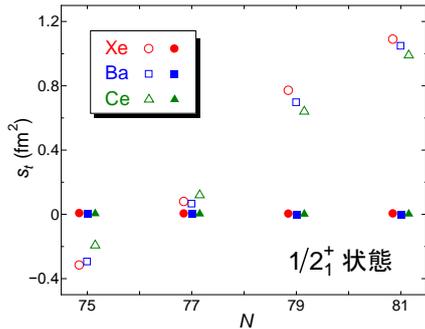


図 5 Xe、Ba、および Ce 同位体の要素  $s_\pi$  の計算結果。●印 (○印)、■印 (□印)、▲印 (△印) は、それぞれ Xe 同位体、Ba 同位体、および Ce 同位体の要素  $s_\pi$  ( $s_\nu$ ) を表す。

最後に、<sup>129</sup>Xe 原子の EDM の値を評価する。先行研究より、<sup>129</sup>Xe 原子の EDM  $d_{\text{Atom}}$  とシッフモーメント  $S$  は

$$d_{\text{Atom}} = 0.38 \times 10^{-17} \left( \frac{S}{\text{efm}^3} \right) \text{ecm}$$

で関係づけられる。実験で得られる中性子固有の EDM の上限値  $|d_\nu| < 2.9 \times 10^{-26} \text{ ecm}$  を用いると、<sup>129</sup>Xe 原子の EDM  $d_{\text{Atom}}$  の上限値は

$$|d_{\text{Atom}}| < 9.0 \times 10^{-27} \text{ ecm}$$

となる。これまで殻模型を用いたシッフモーメントの理論研究は行われておらず、本研究により初めてそれが示された。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 1 件)

- ① Koji Higashiyama, Naotaka Yoshinaga, Pair-truncated shell-model analysis of nuclei around mass 130, Physical Review C, 査読有, Vol. 83, 2011, pp. 034321/1–19

- ② Naotaka Yoshinaga, Koji Higashiyama, Ryouichi Arai, Shell model estimate of nuclear electric dipole moments, Progress of Theoretical Physics, 査読有, Vol. 124, 2010, pp. 1115–1123

- ③ Naotaka Yoshinaga, Koji Higashiyama, Effective interactions between a neutron and a proton in high- $j$  orbitals around mass  $A = 100$ , Journal of Physics G, 査読有, Vol. 37, 2010, pp. 115104/1–13

- ④ Naotaka Yoshinaga, Akito Arima, N Extrapolation methods for obtaining low-lying eigenvalues of a large-dimensional shell model Hamiltonian matrix, Physical Review C, 査読有, Vol. 81, 2010, pp. 044316/1–6

- ⑤ N. Yoshinaga, K. Higashiyama, P. H. Regan, Shell Model Study of Neutron Rich Se and Ge Isotopes, AIP Conference Proceedings, 査読無, Vol. 1120, 2009, pp. 255–259

- ⑥ N. Yoshinaga, K. Higashiyama, A Simple Description of Doublet Bands in Mass around 100, AIP Conference Proceedings, 査読無, Vol. 1120, 2009, pp. 599–600

- ⑦ N. Yoshinaga, K. Higashiyama, P. H. Regan, Band structure of doubly-odd Tc and Rh isotopes, AIP Conference Proceedings, 査読無, Vol. 1090, 2009, pp. 599–600

- ⑧ Naotaka Yoshinaga, Koji Higashiyama, Band structure of doubly-odd Tc and Rh isotopes, AIP Conference Proceedings, 査読無, Vol. 1090, 2009, pp. 589–590

- ⑨ N. Yoshinaga, K. Higashiyama, Systematic studies of doublet bands in doubly-odd nuclei using a simple model, INPC 2007, 査読有, Vol. 2, 2008, pp. 376–378

- ⑩ N. Yoshinaga, K. Higashiyama, P. H. Regan, High-spin structure of neutron-rich Se, As, Ge, and Ga isotopes, Physical Review C, 査読有, Vol. 78, 2008, pp. 044320/1–12

- ⑪ Koji Higashiyama, Naotaka Yoshinaga,  
Simple Description of Doublet Bands  
with Mass of Approximately 100,  
Progress of Theoretical Physics, 査読  
有、Vol.120、2008、pp.525-548

[学会発表] (計14件)

- ① 吉永尚孝、東山幸司、荒井亮、  
中重核のシッフモーメントの殻模型による  
評価、日本物理学会第65回年次大会、  
2010年3月20日、岡山大学(岡山県)
- ② 東山幸司、吉永尚孝、質量数80領域の偶  
偶核・奇核の生成座標法と殻模型、日本物  
理学会第65回年次大会、  
2010年3月20日、岡山大学(岡山県)
- ③ Koji Higashiyama, Naotaka Yoshinaga,  
Generator coordinate method analysis of  
low-lying and high-spin states in  
medium- and heavy-mass nuclei, T Third  
Joint Meeting of the Nuclear Physics  
Divisions of the American Physical  
Society and the Physical Society of  
Japan, 2009年10月17日、Hilton Waikoloa  
Village (アメリカ)
- ④ Naotaka Yoshinaga, Koji Higashiyama,  
Effective interactions between  
neutrons and protons in the intruder  
orbitals, T Third Joint Meeting of the  
Nuclear Physics Divisions of the  
American Physical Society and the  
Physical Society of Japan,  
2009年10月15日、Hilton Waikoloa  
Village (アメリカ)
- ⑤ 吉永尚孝  
Xe 領域の原子核構造、  
Fundamental Physics Using Atoms、  
2009年8月5日、東京工業大学(東京都)
- ⑥ 吉永尚孝、東山幸司、  
中重核領域奇奇核での中性子・陽子間有効  
相互作用、日本物理学会第64回年次大会、  
2009年3月27日、立教大学(東京都)
- ⑦ 東山幸司、吉永尚孝、  
生成座標法による開殻系の解析、日本物理  
学会第64回年次大会、  
2009年3月27日、立教大学(東京都)
- ⑧ Naotaka Yoshinaga,  
Shell model study of neutron rich Se and  
Ge isotopes (ASR2008)、  
2008年11月11日、  
テクノ交流館リコッティ(茨城県)

- ⑨ Naotaka Yoshinaga,  
A simple description of doublet bands in  
mass around 100, The 6th Japan-Italy  
Symposium on Heavy-Ion Physics  
(ASR2008)、2008年11月11日、  
テクノ交流館リコッティ(茨城県)

- ⑩ 吉永尚孝、東山幸司、  
中性子過剰 Ge-Se 同位体の核構造、日本物  
理学会 2008 年秋季大会、  
2008 年 9 月 20 日、山形大学(山形県)

- ⑪ 東山幸司、吉永尚孝、  
生成座標法による中重核の記述、日本物理  
学会 2008 年秋季大会、  
2008 年 9 月 20 日、山形大学(山形県)

- ⑫ Koji Higashiyama, Naotaka Yoshinaga,  
Shell model study of neutron rich Se and  
Ge isotopes, The 13th International  
Conference on Capture Gamma-Ray  
Spectroscopy and Related Topics (CGS13)、  
2008年8月26日、  
The University of Cologne (ドイツ)

- ⑬ Naotaka Yoshinaga, Koji Higashiyama,  
Band structure of doubly-odd Tc and Rh  
isotopes, The 13th International  
Conference on Capture Gamma-Ray  
Spectroscopy and Related Topics (CGS13)、  
2008年8月26日、  
The University of Cologne (ドイツ)

- ⑭ K. Higashiyama, N. Yoshinaga,  
P. H. Regan,  
High-spin structure of neutron rich Se  
and Ge isotopes, The CNS-RIKEN Joint  
Symposium on Frontier of gamma-ray  
spectroscopy and Perspectives for  
Nuclear Structure Studies (gamma08)、  
2008年4月3日、理化学研究所(埼玉県)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉永 尚孝 (YOSHINAGA NAOTAKA)  
埼玉大学・理工学研究科・教授  
研究者番号：00192427

### (2) 研究分担者

東山 幸司 (HIGASHIYAMA KOJI)  
千葉工業大学・工学部・助教  
研究者番号：60433679