

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月15日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540294

研究課題名（和文） 2重荷電交換反応によるハイパー核の生成・崩壊のスペクトルとハイペロン混合

研究課題名（英文） Production and decay spectra of hypernuclei by double-charge exchange reactions, and hyperon mixing

研究代表者

原田 融（HARADA TORU）

大阪電気通信大学・工学部・教授

研究者番号：70238187

研究成果の概要（和文）：2重荷電交換反応である( $K^-, K^+$ )や( $\pi^-, K^+$ )などを用いたハイパー核の生成・崩壊のスペクトルを歪曲波インパルス近似の範囲で計算し、反応機構を理論的に調べた。その結果、ハイペロン混合に起因する戸口の状態を経由する1段階過程が重要であり、今後のJ-PARC実験によるデータとの比較によって $\Xi N-\Lambda\Lambda$ および $\Sigma N-\Lambda N$ 結合など相互作用の性質についての貴重な情報が得られることが分かった。さらに中性子星の内部構造を解き明かす手掛かりにもなる。

研究成果の概要（英文）： We have theoretically demonstrated production and decay of spectra of hypernuclei by double-charge exchange reactions, e.g. ( $K^-, K^+$ ), ( $\pi^-, K^+$ ), using the distorted-wave impulse approximation. A one-step reaction mechanism, in which a doorway state is populated owing to a hyperon mixing, has been investigated. The result shows that these spectra provide valuable information on properties of the  $\Xi N-\Lambda\Lambda$  and  $\Sigma N-\Lambda N$  coupling interactions in a comparison with the forthcoming J-PARC facilities, and it is strongly related to understanding of the inner structure of neutron stars.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

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：理論核物理、核反応、ストレンジネス、ハイパー核、荷電交換

## 1. 研究開始当初の背景

ストレンジネスを含むハイペロン( $\Lambda$ ,  $\Sigma$ ,  $\Xi$ など)を持つ原子核(ハイパー核)は、私たちの周りには通常存在しないエキゾチックな状態である。ハイペロンはsクォークという不

純物を持つために核子(陽子・中性子)と区別され、原子核内ではパウリ排他原理が働かずに原子核の深部まで入り込んで原子核の深部の性質を探るプローブになる。 $\Lambda$ ハイパー核は、約60年前に写真乾板を用いた宇宙線

の測定で初めて発見されて以来、今日では加速器を用いた( $K^-$ ,  $\pi$ )や( $\pi$ ,  $K^+$ )反応の実験によって生成され、理論的・実験的研究から1粒子ポテンシャルやスピン軌道力などの基本的な性質が明らかにされてきた。また $\Lambda$ 粒子は核内で核子の波動関数を縮める糊(のり)として振る舞うことも分かってきた。しかし、これらの理解の基礎となる構成粒子間の $\Lambda N$ ,  $\Sigma N$ 相互作用については、わずかな散乱データしかなく、核子-核子(NN)相互作用と比べると定量的には未だ理解できてはいない。特に $S = -2$ の $\Xi N$ 相互作用や $\Xi$ ハイパー核においては全く不定である。最近、宇宙における中性子星やコンパクト星の内部では高密度状態のためにハイペロンが混在し、これが中性子星の最大質量に強く影響することが分かってきた。ハイパー核の研究は、原子核、素粒子および宇宙物理にも関連する重要な研究分野であり、高密度核物質を解明するためにはその進展が不可欠である。

## 2. 研究の目的

(1) 稼動を開始した大強度陽子加速器施設(J-PARC)で展開されるハイパー核物理において、( $K^-$ ,  $K^+$ )や( $\pi^-$ ,  $K^+$ )などの2重荷電交換反応によって生成されるハイパー核の反応機構を理論的に研究し、核内におけるハイペロン混合やいまだ未知の部分が多い $\Xi N$ - $\Lambda\Lambda$ や $\Sigma N$ - $\Lambda N$ 結合などの相互作用の性質を解明する。

(2) 微視的な核構造モデルに基づく「多配位チャンネルを結合したグリーン関数法」を活用し、ハイパー核の生成・崩壊スペクトル(断面積)を理論的に計算し、チャンネル結合などの効果を調べる。

(3) 模型空間に適合したハイペロンと原子核間のポテンシャルを構築して、その性質を調べる。

## 3. 研究の方法

( $K^-$ ,  $K^+$ )によるダブルハイパー核の生成を例に具体的な方法を示そう。ダブルハイパー核では、 $\Xi N$ - $\Lambda\Lambda$ 結合の大きさによって $\Lambda\Lambda$ 核の内部で $\Xi$ 粒子の成分が大きく混合する(~10%)ことが予想されるため、図1(a)に示す2段階過程よりも、図1(b)に示す核内の $\Xi$ 成分を $K^-p \rightarrow K^+\Xi^-$ で直接励起する1段階過程によって $\Lambda\Lambda$ ハイパー核が生成される可能性が高い。そこで2重荷電交換反応による生成・崩壊のスペクトルを歪曲波インパルス近似の範囲内で求める計算コードを開発した。さらに(a)微視的模型の模型空間に対応した有効相互作用をブリュックナー理論などの枠組みで求める、(b)畳み込み法によりハイペロンと芯核間のポテンシャルを求める、(c)多配位結合チャンネルのグリーン関数法を用いて生成断面積とそのスペクトルを求め、相互作用の依存性を調べる、などの手順で理論研究を行った。

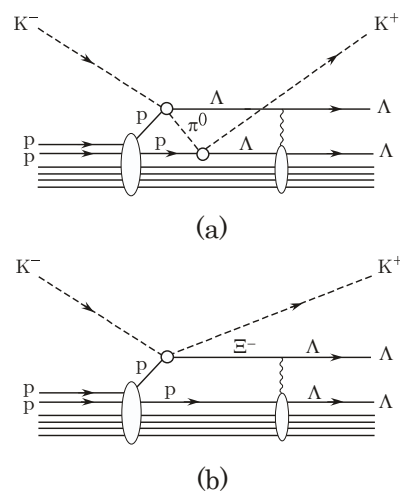


図1. ( $K^-$ ,  $K^+$ )反応のダイアグラム

## 4. 研究成果

(1) 2重荷電交換反応の( $K^-$ ,  $K^+$ )は、 $\Xi$ ハイパー核などのダブルストレンジネス核を生成する有望な方法の一つであり、J-PARCのDay-1実験として計画されている。この結果によって、いまだ実験的にほとんど分かっていない $\Xi$ ハイパー核の構造や核物質中の $\Xi$ ポ

テンシャルの性質が明らかになると期待されている。そこで $\Xi$ ハイパー核の生成スペクトルをウッズ=サクソン(Ws)型の $\Xi$ 核ポテンシャルを仮定して歪曲波インパルス近似で計算した。現在の理論解析から示唆されている実部の深さが  $V_{\Xi} = (0) - (-14)$  MeV の弱い引力である場合には、 $\Xi$ 状態の際立ったピークは見られない。 $K^-p \rightarrow K^+\Xi^-$  反応は $\Xi^-$ 粒子に  $q_{\Xi} \sim 400$  MeV/c の大きな移行運動量を与えるために束縛領域の生成断面積はおよそ  $10 - 20$  nb/sr と算定された。

(2) 2重荷電交換反応の( $K^-, K^+$ )は、通常の2段階過程である  $K^-p \rightarrow \pi^0\Lambda$ ,  $\pi^0p \rightarrow K^+n$  によって $\Lambda\Lambda$ ハイパー核を生成することが可能である。さらに、もし核内で $\Xi^-p - \Lambda\Lambda$ 結合が強ければ $\Lambda\Lambda$ ハイパー核の状態に $\Xi^-$ 成分が混在するために、この $\Xi^-$ 状態を戸口の状態にした1段階過程の  $K^-p \rightarrow K^+\Xi^-$  反応による $\Lambda\Lambda$ ハイパー核の生成も可能になる。図2には  $1.8$  GeV/c の  $K^-$  ビームを用いて、 $^{16}\text{O}$  を標的核にした $\Lambda\Lambda$ 生成スペクトルの計算結果を示した。ここでは $\Xi N - \Lambda\Lambda$ 結合による $\Lambda\Lambda$ 生成スペクトルの実現可能性を調べるために、 $\Xi$ 核ポテンシャルの実部を  $V_{\Xi} = -14$  MeV に仮定して、現存する理論から予想される $\Xi N - \Lambda\Lambda$ ,  $^1S_0$  の相互作用の強さを用いて計算を行った。 $v_{\Xi N - \Lambda\Lambda}^0 = 500$  MeV の場合には、 $^{16}\text{O}$  の  $1^-$  励起状態である、 $^{14}\text{C}(0^+) \times s_{\Lambda p\Lambda}$  ( $B_{\Lambda\Lambda} = 15.1$  MeV) と  $^{14}\text{C}(2^+) \times s_{\Lambda p\Lambda}$  ( $B_{\Lambda\Lambda} = 8.7$  MeV) の配位を持つピークが強く励起され、その断面積は  $7 - 12$  nb/sr である。スペクトルは $\Xi N - \Lambda\Lambda$ 結合の強さに依存するが、 $\Xi^-$ 混合率が  $5\% - 10\%$  程度であれば $\Xi^-$ 成分を戸口の状態にした $\Lambda\Lambda$ 生成が期待でき、その生成断面積は約  $10$  nb/sr になることが分かった。この理論スペクトルと今後の実験データの比較によって $\Xi^-$ ポテンシャルや $\Xi N - \Lambda\Lambda$ 結合の貴重な情報が得られると期待できる。一方、

$K^-p \rightarrow \pi^0\Lambda$ ,  $\pi^0p \rightarrow K^+\Lambda$  の2段階過程による $\Lambda\Lambda$ 生成反応をグラウバー近似の範囲で評価すると、1段階過程により1オーダー小さい生成断面積になることが分かった。ハイペロン混合に着目してハイパー核の波動関数の詳細を2重荷電交換反応から明らかにしようとする研究は、世界的に例を見ない。

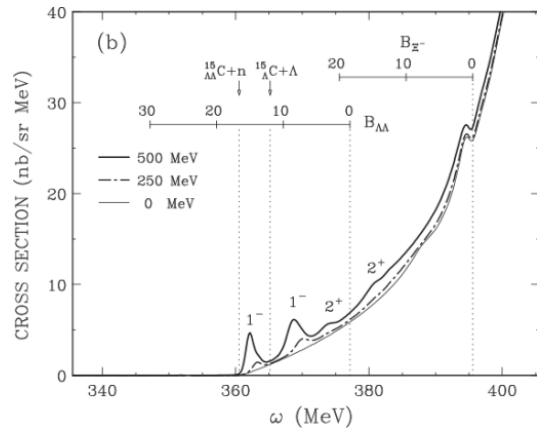


図2.  $\Lambda\Lambda$ ハイパー核の生成

(3) 中性子過剰 $\Lambda$ ハイパー核のリシウム同位体 ( $A=7-10$ ) のスピン2重項における $\Lambda N - \Sigma N$ 結合の効果を微視的殻模型の理論計算によって調べたところ、基底状態に対するエネルギーシフトが  $0.09 - 0.28$  MeV、 $\Sigma$ 混合率が  $0.10 - 0.34\%$  であり、中性子過剰に従って2重項間のエネルギー差が顕著になることを示した。図3に示すように、この結果はフェルミ(F)型とガモフ-テラー(GT)型による $\Lambda N - \Sigma N$ 結合がコヒーレントに効くためであることが分かった。

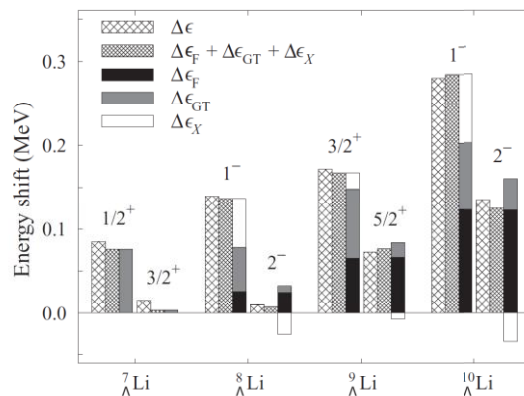


図3. 2重項のエネルギーシフト

(4) 核内でのハイペロンの振る舞いは、中性子星の質量とその構造を決定するための重要な要因であると考えられている。核内における $\Sigma$ 粒子の性質とその役割を明らかにすることは、ANN 3体力の効果とも関連して重要な課題のひとつである。最近、 $\Sigma$ 核ポテンシャルの実部は強い斥力芯と表面付近の引力からなることが分かってきた。この斥力は $\Sigma N$ の ${}^3S_1$ ,  $I = 3/2$ 状態の強い斥力芯によるものでスピン・フレーバーSU(6)対称性によるクォーク・パウリ禁止状態を起源とする。現在のところ、核物質中の $\Sigma$ ポテンシャルの斥力は $V_{\Sigma} = (-20) - (-30)$  MeV程度であると予想されているが、定量的に確定することは難しい。そこでポテンシャルの形が区別される方法の一つとして、 $E_{\text{Lab}} = 50\text{MeV}$ における $\Sigma^- + {}^{208}\text{Pb}$ 原子核の弾性散乱による角分布を調べた。図4に示したように、これまで違いを区別できなかった DD-A', LDA-NF や DD-OBE のポテンシャルを、それらの角分布を比較することで理論的に区別可能であることが分かった。

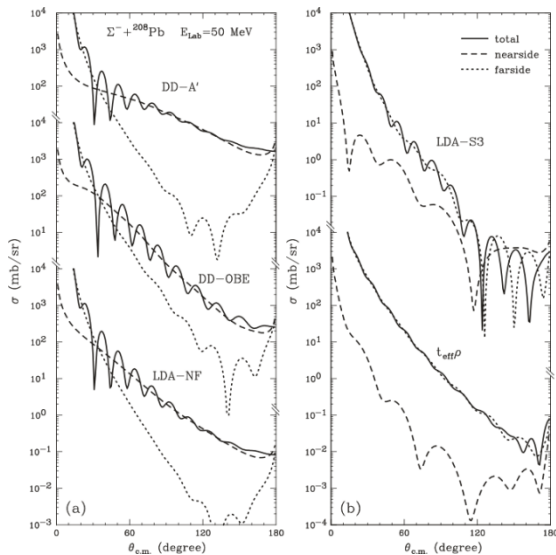


図4.  $\Sigma^- + {}^{208}\text{Pb}$  弾性散乱の角分布

(5) 現実的相互作用のモデルから予測されるYN相互作用を用いてベーテ・ゴールドスト

ン方程式を解いて有効相互作用を求め、栗原・赤石・田中による理論を適用したハイペロン-原子核間ポテンシャルを求めた。さらにYNNの3体系に適用し、ヘリウム3を標的核にした( $K^-$ ,  $\pi$ )反応のスペクトルを求め、核内におけるYNN 3体力の効果などを理論的に調べている。また、 $\Sigma NN$ の閾値付近には準束縛状態が存在する可能性が極めて高く、新たに実験データが得られれば、スペクトルの解析から未だ不定な $\Sigma N$ 相互作用の性質を解明する貴重な情報が得られると期待している。現在、YN有効相互作用の密度依存性やエネルギー依存性を詳細に調べている。

#### 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15件)

- ① T. Harada, Y. Hirabayashi, "Angular distributions of elastic scattering of  $\Sigma^-$  hyperons from nuclei and the  $\Sigma$ -nucleus potentials", *Physical Review C*, 査読有, 86, 2012, 014606-1-014606-8. DOI:10.1103/PhysRevC.86.014606
- ② Sh. Hamada, Y. Hirabayashi, N. Burtebayev, S. Ohkubo, "Observation of Airy minimum in elastic and inelastic scattering of  ${}^3\text{He}$  from  ${}^{12}\text{C}$  at 50.5 and 60 MeV, and alpha particle condensation in  ${}^{12}\text{C}$ ", *Physical Review C*, 査読有, 87, 2012, 024311-1-024311-6. DOI:10.1103/PhysRevC.87.024311
- ③ D. Ichinkhorloo, Y. Hirabayashi, K. Katō, M. Aikawa, T. Matsumoto, S. Chiba, "Analysis of  ${}^7\text{Li}(n, n){}^7\text{Li}^*$  reactions using the continuum-discretized coupled-channels method", *Physical Review C*, 査読有, 86, 2012, 064604-1-064604-7. DOI:10.1103/PhysRevC.86.064604
- ④ T. Koike, T. Harada, "Energy dependence of  $K^- \rightarrow \pi^0 p$  effective potential derived from coupled-channel Green's function", *Hyperfine Interactions*, 査読有, 210,

- 2012, 89–92.  
DOI:10.1007/s10751-011-0531-1
- ⑤ A. Umeya, T. Harada, “Doublet-spacing enhancement caused by  $\Lambda N$ - $\Sigma N$  coupling in  $\Lambda$ Li hypernuclear isotopes”, *Physical Review C*, 査読有, 83, 2011, 034310-1–034310-9.  
DOI:10.1103/PhysRevC.83.034310
- ⑥ A. Umeya, T. Motoba, T. Harada, “Structures and productions of typical sd-shell hypernuclei in shell-model calculations”, *Journal of Physics: Conference Series*, 査読有, 312, 2011, 022024-1–022024-6.  
DOI:10.1088/1742-6596/312/2/022024
- ⑦ D. Ichinkhorloo, T. Matsumoto, Y. Hirabayashi, K. Katō, S. Chiba, “Analysis of  $n + {}^6\text{Li}$  reactions using the continuum-discretized coupled-channels method”, *Journal of nuclear science and technology*, 査読有, Vol. 48, No. 11, 2011, pp. 1357–1360.  
DOI:10.1080/18811248.2011.9711827
- ⑧ T. Matsumoto, D. Ichinkhorloo, Y. Hirabayashi, K. Katō, S. Chiba, “Systematic description of the  ${}^6\text{Li} (n, n'){}^6\text{Li}^* \rightarrow d + \alpha$  reactions with the microscopic coupled-channels method”, *Physical Review C*, 査読有, 83, 2011, 064611-1–064611-6.  
DOI: 10.1103/PhysRevC.83.064611
- ⑨ D. Ichinkhorloo, T. Matsumoto, Y. Hirabayashi, K. Katō and S. Chiba, “ ${}^6\text{Li} + n$  reactions in the continuum discretized coupled channels method”, *AIP Conference Proceedings*, 査読有, 1342, 2011, 102–105.  
DOI: 10.1063/1.3583175
- ⑩ S. Ohkubo, Y. Hirabayashi, “Alpha-particle condensate states in  ${}^{16}\text{O}$ ”, *International Journal of Modern Physics E*, 査読有, Vol.20, No.4, 2011, 880–884.  
DOI: 10.1142/S0218301311018885
- ⑪ T. Harada, Y. Hirabayashi, A. Umeya, “Production of doubly strange hypernuclei via  $\Xi^-$  doorways in the  ${}^{16}\text{O}(K^-, K^+)$  reaction at 1.8 GeV/c”, *Physics Letters B*, 査読有, 690, 2010, 363–368.  
DOI: 10.1016/j.physletb.2010.05.053
- ⑫ T. Harada, “Neutron-rich hypernuclei”, *Nuclear Physics A*, 査読有, 835, 2010, 136–143.  
DOI:10.1016/j.nuclphysa.2010.01.186
- ⑬ A. Umeya, T. Harada, “Shell-model study of  $\Sigma$ -mixing in neutron-rich  $\Lambda$ Li hypernuclei”, *Nuclear Physics A*, 査読有, 835, 2010, 426–429.  
DOI:10.1016/j.nuclphysa.2010.01.235
- ⑭ T. Koike, T. Harada, “Formation of the essential kaonic nucleus,  $K^-pp$ ”, *Prog. Theor. Phys. Suppl.*, 査読有, 186, 2010, 367–372.  
DOI: 10.1143/PTPS.186.367
- ⑮ S. Ohkubo, Y. Hirabayashi, “ $\alpha$ -particle condensate states in  ${}^{16}\text{O}$ ”, *Physics Letters B*, 査読有, 684, 2010, 127–131.  
DOI: 10.1016/j.physletb.2009.12.066
- [学会発表] (計 25 件)
- ① 原田融, App 連続状態の生成スペクトル, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大学(西条市), 2013 年 3 月 27 日.
- ② 原田融, ハイパー核の生成反応について, 新学術「中性子星核物質理論班研究会」, 蒲郡市, 2013 年 3 月 7 日.
- ③ 原田融, 核物質中の  $\Sigma$  ハイペロン, 新学術「中性子星核物質」セミナー2012-1, KEK 東海キャンパス(東海村), 2012 年 11 月 24 日.
- ④ 原田融, ハイパー核生成と中性子星内部のストレンジネス (依頼講演), 新学術領域研究「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」キックオフシンポジウム, 理化学研究所(和光市), 2012 年 10 月 26 日.
- ⑤ T. Harada, Hypernuclear  $\Lambda\Lambda$  Production ( $K^-, K^+$ ) reactions and the  $\Lambda\Lambda-\Xi$  admixture in nuclei, The 11<sup>th</sup> International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2012), Barcelona, Spain, 2012 年 10 月 2 日.
- ⑥ 原田融,  ${}^3\text{He}$  を標的にしたハイパー核生成スペクトル, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 京都産業大学(京都市), 2012 年 9 月 12 日.
- ⑦ 原田融, ストレンジネス核物理と中性子星 (招待講演), 基研研究会「ハドロン物質の諸相と状態方程式 – 中性子星の観測に照らして –」, 京都大学基礎物理学研究所(京都市), 2012 年 9 月 1 日.
- ⑧ T. Harada, Production spectra of the  $\Sigma NN$  Quasibound states in  ${}^3\text{He}(K^-, \pi^\pm)$  reactions (招待講演), The 20<sup>th</sup> International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (FB20), 福岡, 2012 年 8 月 23 日.
- ⑨ 原田融, シグマ核ポテンシャルの影響について, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学(西宮市), 2012 年 3 月 25

- 日.
- ⑩ 梅谷篤史, 殻模型波動関数を用いた質量数 20 のラムダハイパー核の生成反応研究, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学(西宮市), 2012 年 3 月 25 日.
  - ⑪ **T. Harada**, Theoretical Studies of Production and Spectroscopy of Strangeness Nuclei (招待講演), International Conference on Physics (ICPM2012), Mandalay, Myanmar, 2012 年 2 月 3 日.
  - ⑫ 原田融,  $^3\text{He}$  を標的にした静止 K<sup>-</sup>法によるハイパー核生成スペクトル, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 弘前大学(弘前市), 2011 年 9 月 18 日.
  - ⑬ 原田融, ストレンジネスを含む原子核 (招待講演), 仁科センターミニワークショップ「中性子星の核物質」, 理化学研究所(和光市), 2011 年 9 月 13 日.
  - ⑭ T. Koike, Formation of essential kaonic nucleus, K<sup>-</sup>pp (招待講演), The 5<sup>th</sup> Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics (APFB2011), Sungkyunkwan University, Seoul, Republic of Korea, 2011 年 8 月 24 日.
  - ⑮ 原田融, ストレンジネスを持つ原子核 (招待講演), 「J-PARC で展開されるハドロン原子核物理」研究会, 高エネルギー加速器研究機構(つくば市), 2011 年 6 月 10 日.
  - ⑯ 原田融, 2 重荷電交換反応によるハイパー核の生成とハイペロン混合, KEK 理論センター研究会「ストレンジネス核物理 2010」, 高エネルギー加速器研究機構(つくば市), 2010 年 12 月 2 日.
  - ⑰ 小池貴久, K<sup>-</sup>pp 核間有効ポテンシャルの虚部のエネルギー依存性, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 九工大(北九州市), 2010 年 9 月 13 日.
  - ⑱ 原田融, Production of doubly strange hypernuclei in the (K<sup>-</sup>,K<sup>+</sup>) reaction, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 九工大(北九州市), 2010 年 9 月 12 日.
  - ⑲ **T. Harada**, Hypernucleus Formation (招待講演), YITP workshop on New Frontiers in QCD 2010 (HNQCD10), Hadrons in Nuclei, Yukawa Institute, 京都, 2010 年 2 月 23 日.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

原田 融 (HARADA TORU)  
大阪電気通信大学・工学部・教授  
研究者番号: 7 0 2 3 8 1 8 7

### (2) 研究分担者

平林 義治 (HIRABAYASHI YOSHIHARU)  
北海道大学・情報基盤センター・准教授  
研究者番号: 6 0 2 7 1 7 1 4

### (3) 連携研究者

梅谷 篤史 (UMEYA ATSUSHI)  
日本工業大学・共通教育系・講師  
研究者番号: 2 0 4 5 4 5 8 0

### (4) 研究協力者

小池 貴久 (KOIKE TAKAHISA)  
理化学研究所・仁科センター・協力研究員  
研究者番号: 2 0 3 9 1 9 4 8