

氏名・(本籍)	たかまつ じゆん 高松潤
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理博第1207号
学位授与年月日	平成3年3月28日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当
研究科専攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程) 原子核理学専攻
学位論文題目	陽子・重陽子非弾性散乱による ^{54}Cr , $^{56,58}\text{Fe}$ 核のミックスト・シンメトリー 2^+ 状態の研究
論文審査委員	(主査) 教 授 藤 平 力 教 授 織 原 彦之丞 教 授 笹 川 辰 弥

論 文 目 次

1. 一般的序論
 2. 実験方法
 3. 関連する理論
 4. 実験条件と結果
 5. 解析と議論
 6. 結論
- 謝辞
参考文献

論文内容要旨

最近、原子核の低励起エネルギー領域における集団運動状態の中で、陽子と中性子の自由度があらわに関わってくるような新しい励起モードによる状態が注目を集め、多くの理論的、実験的研究が行われている。

その契機となったのは、1984年、Darmstadt における電子非弾性散乱実験によって、重い変形核である ^{156}Gd に、軌道 M1 励起による $J^\pi = 1^+$ 準位 ($E_x \sim 3 \text{ MeV}$) が発見されたことである [1]。この状態は、はさみ型モード (scissors-mode) の励起と呼ばれているもので、回転楕円体に変形した陽子および中性子の分布が互いにわずかにずれていて、この2つの分布が共通の軸に関して小さな振幅で振動している状態と考えられている。

中性子-陽子ボソン模型 (the proton-neutron interacting boson model ; the IBM-2) [2] によれば、この M1 scissors mode は、mixed-symmetry state と名付けられる新しい励起モードの一部に対応している [3]。IBM-2 において、全ボソン系の波動関数は粒子の交換に対して完全対称となる。一方、空間 (sd-boson) 部分に加えて、F スピンと呼ばれる新しい量子数を導入して陽子・中性子の自由度を考慮した場合、F スピンおよび空間部分について反対称の組み合わせを含む状態が存在し得る。このような状態を mixed-symmetry state と呼ぶ。IBM-2 の予測によれば、mixed-symmetry state として、よく変形した核 [IBM-2 の SU(3) の極限] においては、 $J^\pi = 1^+$ 準位が、球形核 [IBM-2 の U(5) の極限] においては、 $J^\pi = 2^+$ 準位が強く励起される。この mixed-symmetry 2^+ state は、幾何学的には陽子と中性子の分布が 180° の逆位相で小さな振幅の β 振動をしている状態と解釈されている。

Mixed-symmetry 1^+ state (scissors-mode state) の存在については、 ^{46}Ti から ^{238}U に至る多くの核において実験的証拠が蓄積されており、現在では事実として広く受け入れられるに至っている。しかし、球形核における mixed-symmetry 2^+ state については、これまでにいくつかの候補が報告されているものの、いまだに決定的な実験的証拠に欠けるというのが現状である。

IBM-2 によれば、mixed-symmetry state の励起は、原子核に一般的に存在する励起モードである。しかし、これまでの主な研究対象は、励起に関わるボソン数が多く、集団度の高い、質量数 $A \sim 100$ を越える重い核が中心となっていた。一方、質量数 $A \sim 50$ 近傍の fp 殻領域の核では、mixed-symmetry state として 2^+ 準位が強く励起されると予想されている。この領域の核は、準位密度が重い核に比べて低い。そのため、mixed-symmetry 2^+ state が多くの状態に分散せずに、少数の準位に集中していると期待される。また、実験的にみれば、これらの準位を比較的容易に分離して測定することができる。さらに、この質量数領域では、大規模な殻模型計算が可能になるため、殻模型計算の結果と対比することによって精密な議論を行うことができる。これは、これまでの mixed-symmetry state に関する議論のほとんどが、IBM-2 の枠内でなされてきたことを考えれば、重要なことである。したがって、この領域における mixed-

symmetry state を研究することは、この状態の性質を詳しく知る上で意義のあることである。

fp 殻領域の核の中でも⁵⁶Fe は、陽子ボソン 1 個、中性子ボソン 1 個という最も単純なボソン系で記述することができるために注目を集め、これまでに γ 線崩壊の測定や電子非弾性散乱実験等によって mixed-symmetry 2^+ state の探索が試みられている。それらの報告によれば、⁵⁶Fe の mixed-symmetry state として、 $2^+_{2,3}$ 準位が候補に挙げられている [4, 5] が、いまだに実験的な確証を得るには至っていない。

一方、理論的なアプローチとして、最近、中田等により、⁵⁶Fe、⁵⁴Cr 等を対象に、0f1p 軌道をモデル空間とした大規模な殻模型計算が行われた [6]。彼らは、この殻模型計算に基づいて、mixed-symmetry state が、⁵⁶Fe においては $2^+_{2,4}$ 準位に、また、⁵⁴Cr においては $2^+_{3,4}$ 準位に分散していると予測している。⁵⁶Fe に対する彼らの予測は、上述の報告と矛盾している。したがって、fp 殻領域の mixed-symmetry state を明確に同定するためには、さらに実験データを蓄積して詳細な検討を加えていく必要がある。

本研究は、質量数 $A \sim 50$ 付近の fp 殻領域の原子核における、mixed-symmetry 2^+ 準位を探索、同定することを目的として行われた。標的核には、⁵⁴Cr、⁵⁶Fe、そして⁵⁸Fe を選び、偏極陽子ビーム、および重陽子ビームを用いた非弾性散乱実験を行った。

実験は、大阪大学核物理研究センターの AVF サイクロトロンによって加速された 65 MeV 偏極陽子ビーム、56 MeV 重陽子ビームを用いて行われた。放出された粒子は、反応粒子スペクトログラフ RAIDEN によって運動量分析された後、焦点面上におかれた位置検出型比例計数管によって検出された。図 1 (a) に⁵⁶Fe (\bar{p} , p') 反応の、また図 1 (b) に⁵⁶Fe (d , d') 反応のスペクトルの例を示す。各実験におけるエネルギー分解能は、30~45 keV (FWHM) であった。また、偏極陽子のビーム偏極度は 75% 程度であった。測定されたエネルギースペクトルから、⁵⁴Cr、⁵⁶Fe、⁵⁸Fe の励起エネルギー 5 MeV 程度までのいくつかの 2^+ 準位について、微分断面積および偏極分解能の角度分布を得た。

得られたデータに対して、まず 1 次の調和振動モデル (Harmonic Vibrational Model; HVM) を用いたチャンネル結合 (Coupled Channel; CC) 解析を、計算コード ECIS79 [7] を用いて行った。光学ポテンシャルには、弾性散乱のデータを再現するように求めた現象論的なものを用いた。その結果、⁵⁴Cr、⁵⁶Fe の各 $2^+_{3,4}$ 準位を除いて、理論値は実験値をおおむねよく再現することがわかった。表 1~3 に、この解析から得られた各 2^+ 準位の強度 β_2 を示す。

次に、さらに精密な議論を行うために (\bar{p} , p') 反応について微視的な歪曲波ボルン近似 (Distorted Wave Born Approximation ; DWBA) 解析、計算コード DWBA74 および、DWBA83 [8] を用いて行った。この解析において、殻模型波動関数には、中田等によって求められたものを用い、また核-核子有効相互作用には、M3Y 有効相互作用の他に、von Geramb 等による Paris-Hamburg (PH) 有効相互作用 [9] および Nakayama 等による Bonn-Jülich (GBJ) 有効相互作用 [10] の 2 種類の密度依存型有効相互作用を用いた。また、光学ポテンシャルには、CC 解析の場合と同じ現象論的なものを用いた。mixed-symmetry 2^+ 準位について、

大模型な殻模型計算から得られた波動関数を用いて微視的 DWBA 計算を行ったのは、今回の我々の計算が初めての例である。

^{56}Fe (\bar{p} , p'), ^{54}Cr (\bar{p} , p') の各反応について、PH 有効相互作用を用いた微視的 DWBA の理論値と実験値との比較を図 2, 3 にそれぞれ示す。実線が DWBA 理論値である。また計算値にかけられた再規格化因子を図中を示してある。

この解析の結果、DWBA の理論値は、 ^{56}Fe , ^{54}Cr の 2^+_{1} から 2^+_{4} のすべての準位についてと、 ^{58}Fe の 2^+_{1} , 2^+_{2} 準位の微分断面積の形を非常によく再現することがわかった。HVM では、再現性のわるかった ^{56}Fe の 2^+_{3} 準位、 ^{54}Cr の 2^+_{3} 準位の微分断面積の角度分布の形もよく再現することができた。2 種類の密度依存型有効相互作用による微分断面積の計算結果を比較すると、絶対値については、PH を用いたものが GBJ を用いた場合の 1/2 倍程度の大きさになるものの、角度分布の形は大きく変わらないことがわかった。2 つの相互作用による理論値の絶対値の違いは、各相互作用において対象としている入射核子エネルギーの違いによるものと考えられる。これらの結果は、この殻模型計算の信頼性の根拠になるものといえる。ただし、微分断面積の絶対値については、理論値は実験値の 1/2 ~ 1/8 倍程度の値となった。また、偏極分解能の角度分布の再現性も HVM に比べてわるかった。これらは、殻模型波動関数の計算において、モデル空間を切断 (truncate) したために生じる「芯偏極効果」に起因するものと考えられる。実際、各標的核の 2^+_{1} 準位で比較すると、 β_2 値が大きくなるほど、再規格化因子の値も大きくなっている。また、再規格化因子が、 ~ 2 と最も小さくなる ^{54}Cr 2^+_{3} , 2^+_{4} 準位では、偏極分解能の角度分布の再現性もよくなっている。

また、前述の γ 崩壊および電子非弾性散乱の解析で仮定された波動関数 (2^+_{2} と 2^+_{3} 準位を mixed-symmetry state と仮定しているもの) を用いた微視的 DWBA 計算 (図 2 の破線) では、実験値を再現できないことがわかった。

中田等による殻模型計算の結果と本論文の解析結果から考えると、 ^{56}Fe の mixed symmetry state は、これまで考えられてきたように 2^+_{2} , 2^+_{3} 準位に分散しているのではなく、 2^+_{2} , 2^+_{4} 準位に分散していること、また ^{54}Cr については、mixed-symmetry state が 2^+_{3} , 2^+_{4} 準位に分散しており、特に 2^+_{3} 準位は、典型的な mixed-symmetry state であることが、かなりの確からしさでいえる。特に、 ^{54}Cr の 2^+_{3} , 2^+_{4} 準位に関しては、電子非弾性散乱等のデータが少ないので、本論文の解析はこの殻模型計算の信頼性を確かめる上でも重要である。

References

- [1] D. Bohle, et al., Phys. Lett. 137B, 27(1984)
- [2] A. Arima, et al., Phys. Lett. 66B, 205(1977) ;
T. Otsuka, et al., Nucl. Phys. A309, 1(1979)
- [3] F. Iachello, Phys. Rev. Lett. 53, 1427(1984)
- [4] S. Eid, et al., Phys. Lett. 166B, 267(1986)

- [5] G. Hartung, et al., Phys. Lett. B221, 109(1989)
- [6] H. Nakada et al., private communication, and submitted to Phys. Rev. Lett.
- [7] J. Raynal, a computer code ECIS79(1979).
- [8] R. Schaeffer and J. Raynal, a computer code DWBA74 and DWBA83.
- [9] H. von Geramb and K. Nadano, in *Interaction between Medium Energy Nucleons in Nuclei*, edited by H.O. Meyer (AIP, New York, 1983), p. 44.
- [10] K. Nakayama, et al., Phys. Rev. C38, 51(1988)

表 1 : Comparison of the β_2 values of the 2^+ states in ^{56}Fe

	E_x (MeV)	(p, p') at 65 MeV	(d, d') at 56 MeV	(p, p') ¹⁾
2^+_{1}	0.845	0.248	0.197	0.2
2^+_{2}	2.654	0.069	0.045	0.06
2^+_{3}	2.957	—	—	—
2^+_{4}	3.367	0.061	0.043	0.06
2^+_{5}	3.598	0.049	0.031	0.05
2^+_{6}	3.748	—	—	—
2^+_{7}	3.829	0.029	0.025	0.03

1) G.S. Mani, Nucl. Phys. A165, 225(1971)

表 2 : Comparison of the β_2 values of the 2^+ states in ^{54}Cr

	E_x (MeV)	(p, p') at 65 MeV	(d, d') at 56 MeV	(p, p') ¹⁾
2^+_{1}	0.834	0.202	0.179	0.2
2^+_{2}	2.620	0.031	0.028	
2^+_{3}	3.073	—	—	
2^+_{4}	3.437	0.039	0.035	

1) E. Fabrici et al., Phys. Rev. C21, 844(1980)

表 3 : Comparison of the β_2 values of the 2^+ states in ^{58}Fe

	E_x (MeV)	(p, p') at 65 MeV	(d, d') at 56 MeV	(p, p') ¹⁾
2^+_{1}	0.811	0.249	0.212	0.229
2^+_{2}	1.675	0.073	0.058	0.056

1) G.S. Mani, Nucl. Phys. A169, 194(1971)

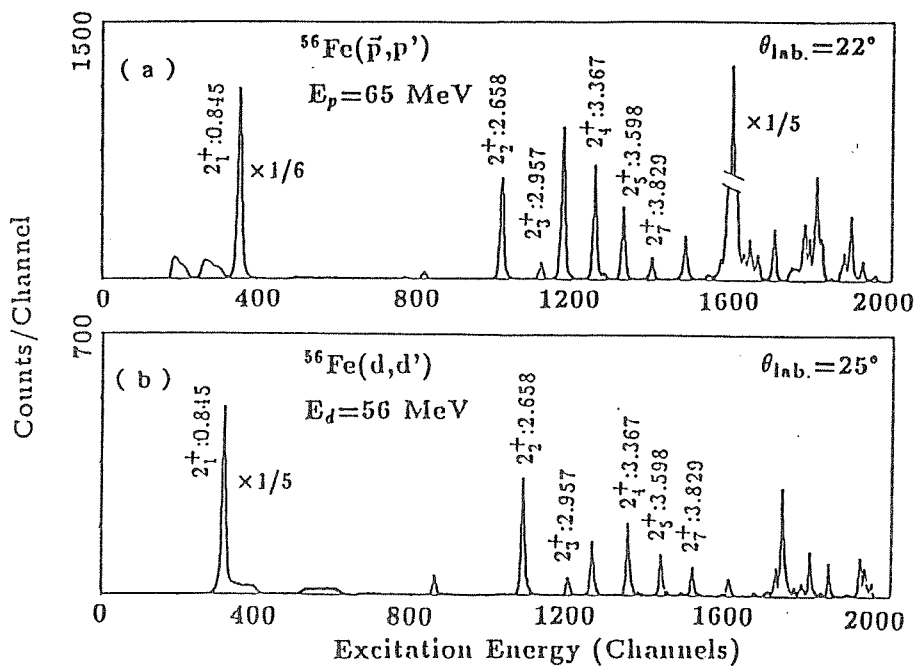


図1. (a) 65 MeV偏極陽子による $^{56}\text{Fe}(\bar{p}, p')$ 反応で得られたエネルギースペクトルの例。
 (b) 56 MeV重陽子による $^{56}\text{Fe}(d, d')$ 反応で得られたエネルギースペクトルの例。横軸は、運動量(ch)を表す。

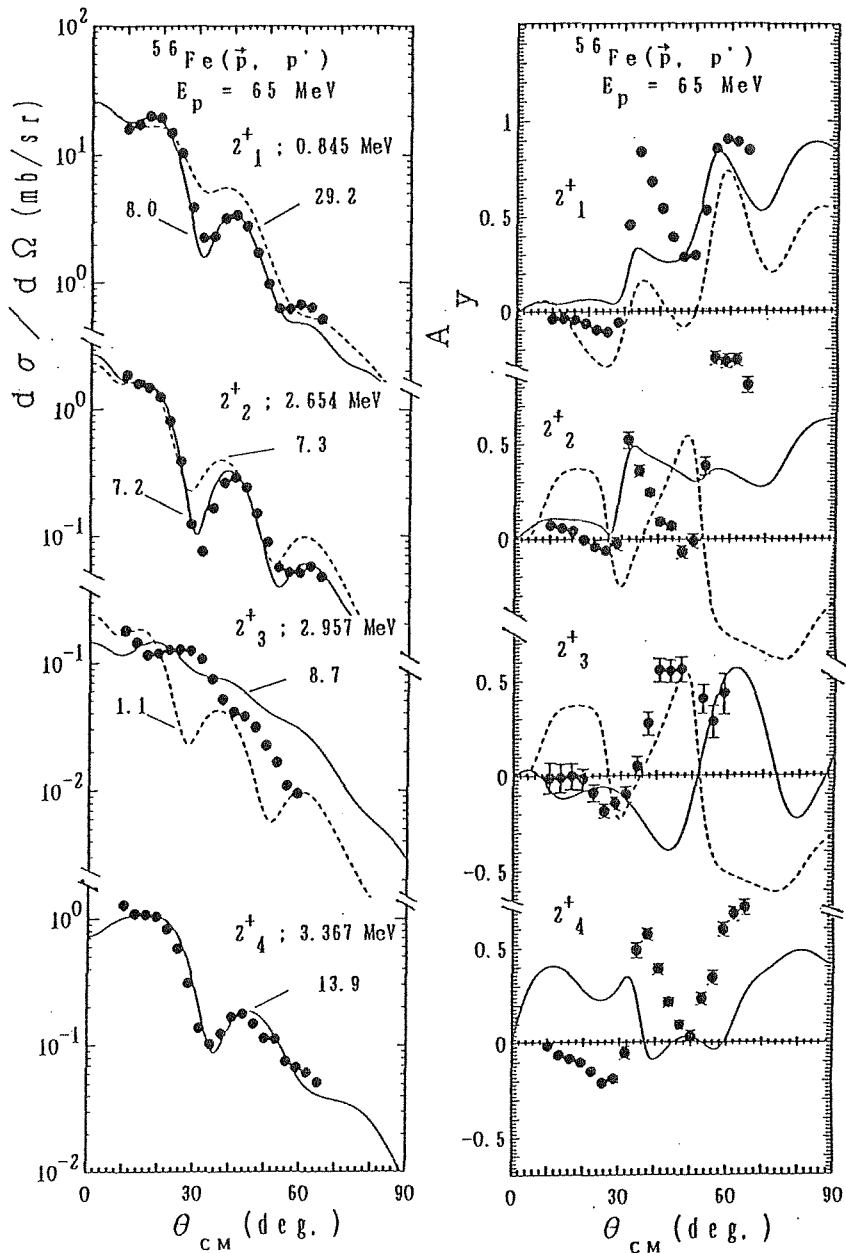


図2. $^{56}\text{Fe}(\bar{p}, p')$ 反応で得られた4つの 2^+ 準位の微分断面積と偏極分解能の角度分布。曲線は、Paris-Hamburg 密度依存型有効相互作用を用いた微視的 DWBA 計算による理論値を示している。実線は、中田等による殻模型波動関数を用いた計算、また破線は、Hartung et al.が電子散乱の解析に用いた波動関数を用いた計算である。DWBA 計算値にかけられた再規格化因子を矢印で示してある。

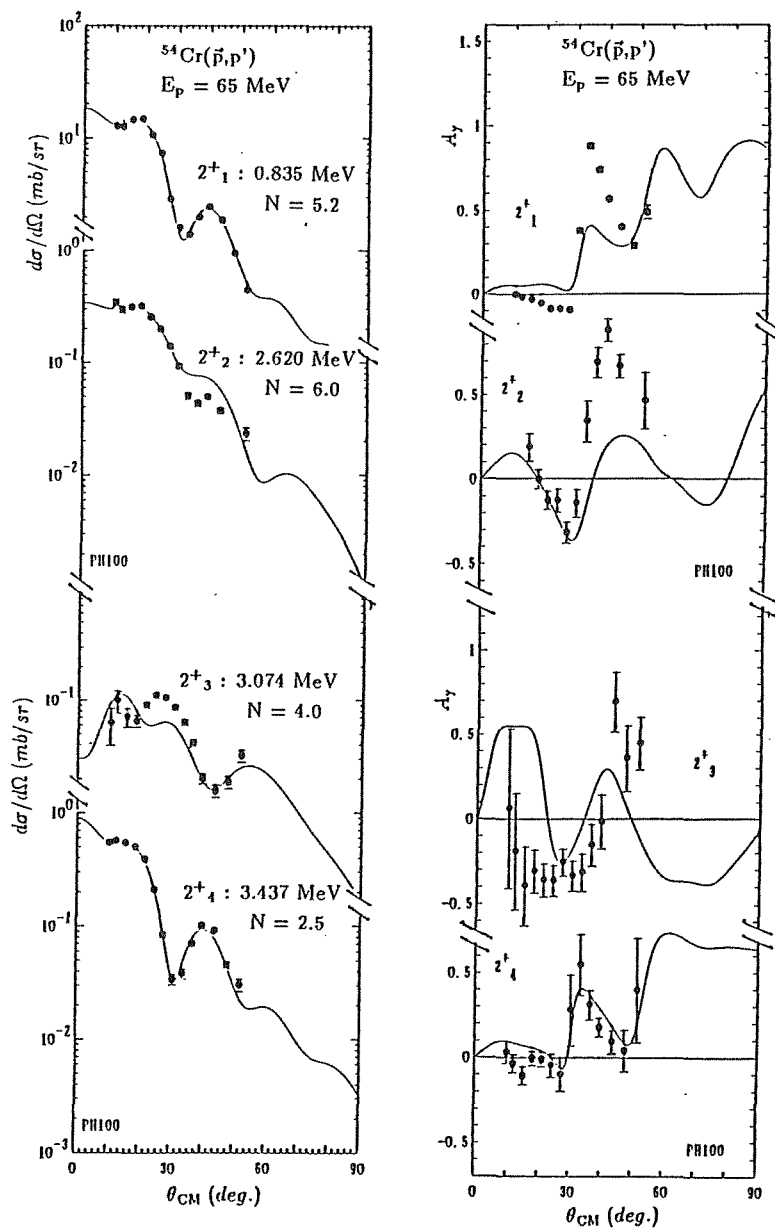


図3. $^{54}\text{Cr}(\bar{p}, p')$ 反応で得られた4つの 2^+ 準位の微分断面積と偏極分解能生の角度分布。実線は、Paris-Hamburg 密度依存型有効相互作用、及び中田等による殻模型波動関数を用いた微視的DWBA計算による理論値を示している。DWBA計算値にかけられた再規格化因子を図中に示してある。

論文審査の結果の要旨

本論文は、陽子、重陽子非弾性散乱により、新しい励起モードの mixed-symmetry state を実験的に研究したものである。原子核の集団運動状態に関する中性子-陽子ボソン模型 (IBM-2) によれば、陽子ボソン、中性子ボソンの導入によって、その交換に対して、反対称になる組み合わせが系に存在することが可能となり、この状態は mixed-symmetry state と呼ばれている。これは有馬・Iachello によって提唱された IBM に中性子、陽子の自由度を導入し、ボソンの交換に対して、完全対称な系のみならず、反対称の系が存在することを予測したものである。IBM が原子核の低エネルギー集団状態をよく記述し、実験的にもよく説明されてきたために、mixed symmetry state が存在するかどうかの問題とされていたが、電子非弾性散乱実験により、その 1^+ 準位が発見されるに及び大きな話題となった。そもそも mixed symmetry state の存在は重い変形核において予想され、電子散乱等で探索されたが、より軽い fp 殻核においても、その存在が予測され原子核の一般的な現象と考えられる。fp 殻核での比較的軽い核では信頼性のある殻模型計算が可能であり、励起エネルギー数 MeV 領域に強い 1^+ 準位と低励起 2^+ 準位に mixed symmetry state が期待される。しかし、振動核における mixed symmetry 2^+ 準位についてはいまだに決定的な実験的証拠が不足している。

質量数 $A \sim 50$ 近傍の fp 殻領域の原子核における mixed symmetry 2^+ 準位を研究するために、 ^{58}Fe , ^{56}Fe , ^{54}Cr をターゲットとして実験を行った。実験は阪大核物理研究センター AVF サイクロトロンよりの 65 MeV 偏極陽子及び 56 MeV 重陽子を用い、散乱された粒子は高分解能スペクトログラフ RAIDEN によって検出された。測定されたエネルギースペクトルから ^{58}Fe , ^{56}Fe , ^{54}Cr の励起エネルギー 5 MeV 程度までのいくつかの 2^+ 準位について微分断面積及び偏極分解能の角度分布を得た。

得られたデータに対して、チャンネル結合解析を行い ^{56}Fe , ^{54}Cr の各 $2^+_{3/2}$ 準位を除いて、理論値は実験値をよく再現することを示した。さらに精密な議論を行うために、微視的な歪曲波ポルン近似解析を行った。この解析において大規模な殻模型計算から得られた波動関数を用い核-核子相互作用は、いくつかの有効なものを比較した。これら計算結果は ^{56}Fe , ^{54}Cr の $2^+_{1/2}$ から $2^+_{3/2}$ 準位の微分断面積の形をよく再現することがわかった。チャンネル結合解析 (現象論的) では再現性のわなかった ^{56}Fe の $2^+_{3/2}$, ^{54}Cr の $2^+_{3/2}$ 準位の角分布の形もよく再現した。これらの解析結果は、中田等の殻模型計算結果と合わせ考えると ^{56}Fe の mixed symmetry state はこれまで考えられてきた $2^+_{2/2}$, $2^+_{3/2}$ 準位ではなく $2^+_{2/2}$, $2^+_{3/2}$ 準位に分散していること、また、 ^{54}Cr については $2^+_{3/2}$, $2^+_{4/2}$ 準位に分散して、特に $2^+_{3/2}$ 準位は典型的な mixed symmetry state であると推論される。

これらの結果は本論文の著者が自立して研究活動を行うのに必要な高度の研究能力と学識を有していることを示している。よって高松潤提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。