

## ( $\vec{d}, p$ ) 反応による $41\text{Ca}$ の単粒子状態の研究

魚住, 裕介  
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

井尻, 秀信  
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

的場, 優  
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

桑折, 範彦  
九州大学大学院総合理工学研究科応用原子核工学専攻

他

<https://doi.org/10.15017/17159>

---

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 11 (3), pp.305-312, 1989-12-01. Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

## ( $\bar{d}$ , p) 反応による $^{41}\text{Ca}$ の単粒子状態の研究

魚住 裕介\* ・井尻 秀信\*\* ・的場 優\*\*  
桑折 範彦\*\*\* ・隈部 功\*\*\* ・中野 正博†  
牧 孝† ・久保 龍二\*\* ・佐島 隆生†††  
本村 信篤††††

(平成元年 8 月 31 日 受理)

### Investigation on the single particle states of $^{41}\text{Ca}$ with ( $\bar{d}$ , p) reaction

Yusuke UOZUMI, Hidenobu IJIRI, Masaru MATOBA  
Norihiro KOORI, Isao KUMABE, Masahiro NAKANO  
Takashi MAKI, Ryuji KUBO,  
Takao SAJIMA, and Nobutoku MOTOMURA

Single particle states of  $^{41}\text{Ca}$  were investigated with the ( $\bar{d}$ , p) reaction. Measurements were performed using 56MeV polarized deuteron beam from AVF cyclotron at RCNP. The data were analyzed with DWBA calculations. Level energies, spin-parities and spectroscopic factors for excited states at  $E_x = 0 \sim 5\text{MeV}$  were determined and analyzed. The spectroscopic strength of the ground state ( $1f_{7/2}$  state) of  $^{41}\text{Ca}$  was determined to be 0.76 and no other  $1f_{7/2}$  states were observed. It may be concluded that the imperfection of neutron occupation probability in the  $1f_{7/2}$  orbit is due to a break of closed shell structure of  $^{40}\text{Ca}$  neutron shell.

#### 1. 序 論

Ca 同位体核は陽子数と中性子数が共に魔法数20で殻模型の典型的核であり、その準位構造に関して多くの研究がなされている。一粒子移行反応による原子核分光学的研究は原子核構造に関する貴重な情報をもたらし、多数の粒子加速器等が実用化された1950年代から1970年代初めまで原子核実験における中心的テーマであって、Ca 同位体核に関する報告も多数存在する。その後、加速技術の向上、偏極イオン源の実用化等により詳細な情報の収集が可能になった。しかし、原子核研究の関心が核反応の機構へ移り分光学的データは

ほとんど収集されていない。近年、原子核の深部空孔状態、巨大共鳴、ストレッチ状態のクエンチング現象等が注目を集め、単粒子または単空孔状態をベースとした高励起状態に関するデータが不十分であると指摘されている。特に、 $^{40}\text{Ca}(p, n)^{40}\text{Sc}$  反応からの ( $\pi 1f_{7/2}$ ,  $\nu 1d_{5/2}^{-1}$ )  $6^-$  ストレッチ状態のクエンチング現象に関する議論<sup>1)</sup>から、 $^{40}\text{Ca}$  の  $1d_{5/2}^{-1}$  の強度関数のデータが重要になっている。しかし、従来の  $p$ - $f$  殻領域核の閉殻構造に関するデータには矛盾があるとされており、精度のよいデータが要望されている。そこで我々は、偏極ビームを使用した一粒子移行反応による測定を開始した。偏極ビームを使用することでベクター・アナライジングパワー (Vector analyzing power) の測定が可能になるため、これまで不確定だったスピンパリティの同定が正確になり準位構造に関するデータの質の向上が期待できる。入射重陽子のエネルギーを 56MeV としたが、このエネルギー領域では多段階反応や複合核反応の寄与が少なく単純な直接反応が主で

\*エネルギー変換工学専攻博士課程

\*\*エネルギー変換工学専攻

\*\*\*工学部応用原子核工学科

†産業医科大

††エネルギー変換工学修士課程 (現 川崎製鉄株)

†††エネルギー変換工学修士課程 (現 工学部機械工学科)

††††エネルギー変換工学修士課程 (現 東芝株)

あると考えられ、解析が容易である。さらに、励起エネルギー領域が 0 ~ 10 MeV では、重陽子の崩壊陽子からのバックグラウンドへの影響が少ないと考えられる。

実験データの解析には、DWBA (Distorted Wave Born Approximation) 理論を使用し移行角運動量並びに遷移強度関数の決定を行った。励起エネルギー 0 ~ 10 MeV 領域の全てのピークについて処理を行ったが、ここでは主として 0 ~ 5 MeV 領域の核表面の 3 本の殻軌道に関して確定出来た結果について、非偏極ビームを使用した以前の報告<sup>2)</sup>と比較し議論する。なお、6 MeV 以上の領域には異常励起と考えられるピーク群が観測されているが、現在の段階では確定できていないためここでは議論しない。

## 2. 実験

実験は大阪大学核物理研究センター (RCNP) において行った。偏極重陽子は AVF サイクロトロンで 56 MeV まで加速してターゲットに照射した。反応放出陽子の運動量は QDMDQ 型磁気スペクトログラフ RAIDEN<sup>3)</sup> と、その焦点面付近に設置した Kyushu SWPC システム<sup>4)</sup>により測定した。Kyushu SWPC シ

ステムは、3 台の位置検出型単芯線比例計数管と 1 台のプラスチック・シンチレータから構成されている。比例計数管は当研究室で開発、製作したもので、芯線には  $\phi 20 \mu\text{m}$ , 1.8 m 長ステンレス・スチール線を、計数管動作ガスには Ar + CH<sub>4</sub> (7:3) 混合ガスを大気圧で常時計数管内に流して使用した。なお、RAIDEN に対して上流の計数管は陽子の位置検出用に、下流の計数管はエネルギー損失の測定に、そして最下流のプラスチック・シンチレータは全エネルギー損失の測定に使用した。

測定回路系は同時計数粒子識別法に基づいており、エネルギー損失、全エネルギー損失から粒子識別を行うと同時に、位置情報との同時計数をとることでバックグラウンドの低減化を図っている。入射重陽子のスピン情報は偏極イオン源のスピン・コントロールユニットから得ており、位置情報 (12 ビット) と併せて全 13 ビットデータとして 16 ビットマイクロコンピュータ (NEC PC-9801) に読み込んだ。また、以上とは別系統にスケラ・システムを設けて計数効率と入射重陽子の偏極度 (polarization) を測定しており、これらを用いて実験データの補正、厳密な誤差評価を行ったさらに重陽子の弾性散乱の微分断面積を測定し、それ

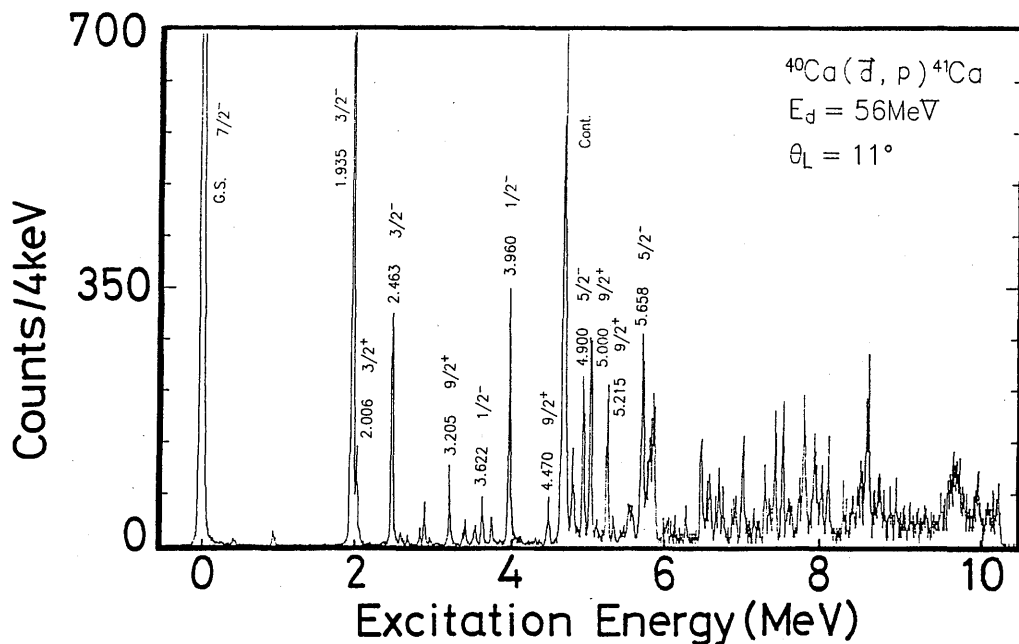


Fig. 1 Energy spectrum from  $^{40}\text{Ca} (\bar{d}, p) ^{41}\text{Ca}$  reactions.

と光学模型を用いた散乱断面積の計算値との比から反応微分断面積の規格化を行った。絶対値の誤差は10%程度であった。

測定は、実験室系角度で $5^\circ \sim 45^\circ$ までの十数点で行った。なお、前方角と後方角ではファラデーカップの位置を変えて測定する必要があるため、 $11^\circ$ の点を2回測定して両者間の規格化を行った。

### 3. 解 析

実験データの解析は、ローカル・エネルギー近似 (Local Energy Approximation) でのゼロ・レンジ DWBA 計算のためのプログラム DWUCK<sup>5)</sup> を用いて行った。この中で歪曲波 (Distorted Wave) の計算にはウッズ・サクソン型の光学模型ポテンシャル、

$$\text{Volume} \\ V_R f(x_R) + iV_I f(x_I) \quad (1)$$

$$\text{Surface} \\ V_R \frac{df(x'_R)}{dx'_R} + iV_I \frac{df(x'_I)}{dx'_I} \quad (2)$$

$$\text{LS} \\ [V_R \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \frac{df(x''_R)}{dx''_R} + iV_I \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \frac{df(x''_I)}{dx''_I}] L \cdot S \quad (3)$$

を使用している。ただし、

$$f(x_i) = [1 + \exp(\frac{r - R_{oi} A^{1/3}}{a_i})]^{-1} \quad (4)$$

である。これらのパラメータの選択には十分な注意をはらい、 $^{40}\text{Ca}(\bar{p}, d)^{39}\text{Ca}$  反応の実験データの解析<sup>6)</sup>とも併せて微分断面積とベクター・アナライジングパワーの角度分布パターンをできるだけ多くの遷移について再現できるように選んだ。その結果、陽子のポテンシャルには、Menet の平均化ポテンシャル<sup>7)</sup>を、重陽子には断熱近似ポテンシャル<sup>8)</sup>、

$$U_d(E) = U_p(E/2) + U_n(E/2) \quad (5)$$

を使用した。 $E$  は重陽子の入射エネルギーである。この際、陽子と中性子のポテンシャルには Becchetti-Greenlees 平均化ポテンシャル<sup>9)</sup>を使用した。ポテンシャルの実部、虚部の深さは若干の補正を必要とするが、わずかな変化なのでここでは無視している。また、

重陽子の  $d$  状態からの寄与は考慮していない。

遷移強度の決定の際、ターゲット・フォームファクター (Form factor) が持つ影響力は大きく、移行中性子の束縛状態の波動関数を決定する諸パラメータの選択は非常に重要である。束縛状態エネルギー  $E_B$  の計算には、次式で表現される有効束縛エネルギー法を使用した。

$$E_B = -(S_n^{gr} - E_x^J) \quad (6)$$

ここで、 $S_n^{gr}$  は基底状態での束縛中性子分離エネルギーである。 $E_x^J$  は一般には実験データから求めた軌道  $J$  についての平均値を使用するが、ここでは殻模型における単一粒子エネルギーを次式を使用して計算から求めた。

$$E_x^J = \hbar\omega \{(\Lambda + 3/2) + v_{ls} l \cdot S + v_{ll} l \cdot (l+1)\} \quad (7)$$

ただし、各項は次式で表される。

$$\hbar\omega = 41A^{-1/3} (\text{MeV}) \quad (8)$$

$$l \cdot S = \frac{1}{2} l \quad : J = l + 1/2 \\ = -\frac{1}{2} (l+1) \quad : J = l - 1/2 \quad (9)$$

スピン-軌道 (spin-orbit) 項は中性子に対して  $\lambda = 25$ 、すなわち Tomas 項の25倍とした。ポテンシャルの幾何学的パラメータ、すなわち半径  $r_0$ 、ディフューズネスパラメータ (diffuseness parameter)  $a_0$  は一般には  $r_0 = 1.25\text{fm}$ ,  $a_0 = 0.65\text{fm}$  とされており、文献5でもこの値を使用している。しかし、ミュンヘン大学グループの  $E_d = 20\text{MeV}$  のデータ解析の中では  $r_0 = 1.20\text{fm}$ ,  $a_0 = 0.65\text{fm}$  が使用されており<sup>10)</sup>、また  $^{40}\text{Ca}(\bar{p}, d)$  反応では  $r_0 = 1.27\text{fm}$ ,  $a_0 = 0.70\text{fm}$  が使用される<sup>6)</sup>など不確定である。今回は  $r_0$  を  $1.20 \sim 1.30\text{fm}$  の間で、 $a_0$  を  $0.65 \sim 0.70\text{fm}$  の間で選択した。その際、フェルミ面よりも高く、かつ核表面に位置する軌道については、各々のスペクトロスコピック・ファクターの和 ( $\sum C^2S$ ) が遷移強度の和則 (sum rule) を満足するように考慮した。その他にも、有限レンジ補正 (finite range correction) や、非ローカルレンジ補正 (non-local range correction) も考慮して解析を行った。

DWBA の解析結果と実験から求めた微分断面積との関係は、次式で表されている。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = N_0 \frac{2J_f + 1}{2J_i + 1} \cdot \frac{\sigma_{DW}}{2J + 1} C^2 S \quad (11)$$

ここで、 $J_i$  と  $J_f$  はそれぞれ反応の前後でのターゲットのスピンの値であり、 $J$  は全移行角運動量である。 $N_0$  は規格化定数で、重陽子の波動関数がハルテン関数で記述され  $\beta$  係数が  $1.48\text{fm}^{-1}$  であるとする、その値は 1.55 になる。なお、 $C^2 S$  はスペクトロスコピック・ファクターで  $^{40}\text{Ca}$  の基底状態における各軌道の中性子占有率に関連する値である。

#### 4. 結果と議論

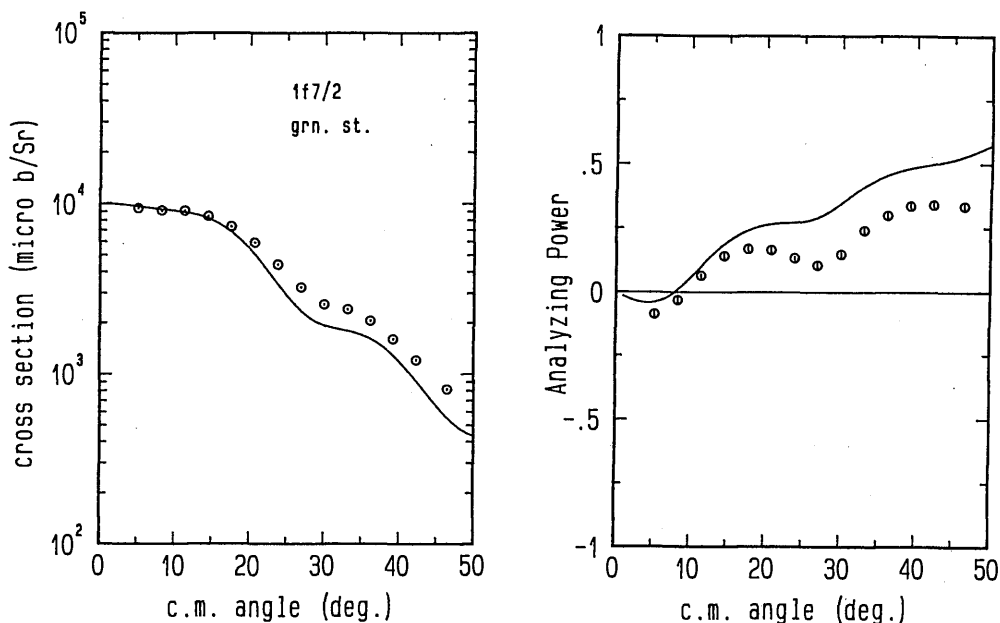
Fig. 1 は実験室系角度  $11^\circ$  で得られた陽子エネルギースペクトル ( $E_x = 0 \sim 10\text{MeV}$ ) である。エネルギー分解能は約  $40\text{keV}$  (FWHM) であった。

今回 DWBA 計算において使用した補正項を Table 1 に示す。移行中性子の束縛状態波動関数の幾何学的パラメータは文献 6 の場合を基準にし、かつ核表面付近の軌道の  $\Sigma C^2 S$  を規格化して  $r_0 = 1.27\text{fm}$ ,  $a_0 = 0.65\text{fm}$  と決定した。Fig. 2~4 は、 $^{41}\text{Ca}$  の基底状態

**Table 1** Corrections for zero-range DWBA calculation.

finite range	0.695
non-locality proton	0.85
deuteron	0.54

$1f_{7/2}$  と  $2p_{3/2}$ ,  $2p_{1/2}$  の各状態への遷移の反応微分断面積とベクター・アナライジングパワーとの角度分布である。丸印は実験データを、実線は DWBA 計算結果をそれぞれ表している。ただし、DWBA の微分断面積は実験データで規格化している。Fig. 2 の場合はかなり良い一致を示している。しかし Fig. 3 と Fig. 4 では微分断面積のパターンが  $30^\circ$  より後方で大きくずれて実験値は計算値より大きくなる。これは、フォノン励起を通過する多段階過程の影響が後方角で現れているためか、あるいは束縛状態波動関数が残留相互作用を考慮していないためではないかと考えられる。また、両者のアナライジングパワーの角度分布パターンは完全な逆位相を示していることから、その識別に非常に有利であることがわかる。なお、 $r_0 = 1.25\text{fm}$ ,  $a_0 = 0.70\text{fm}$  を選択した場合も、角度分布パターンと強度



**Fig. 2** Angular distributions of cross section and analyzing power of  $f_{7/2}$  transition. Circles show experimental data, and real lines show DWBA calculations.

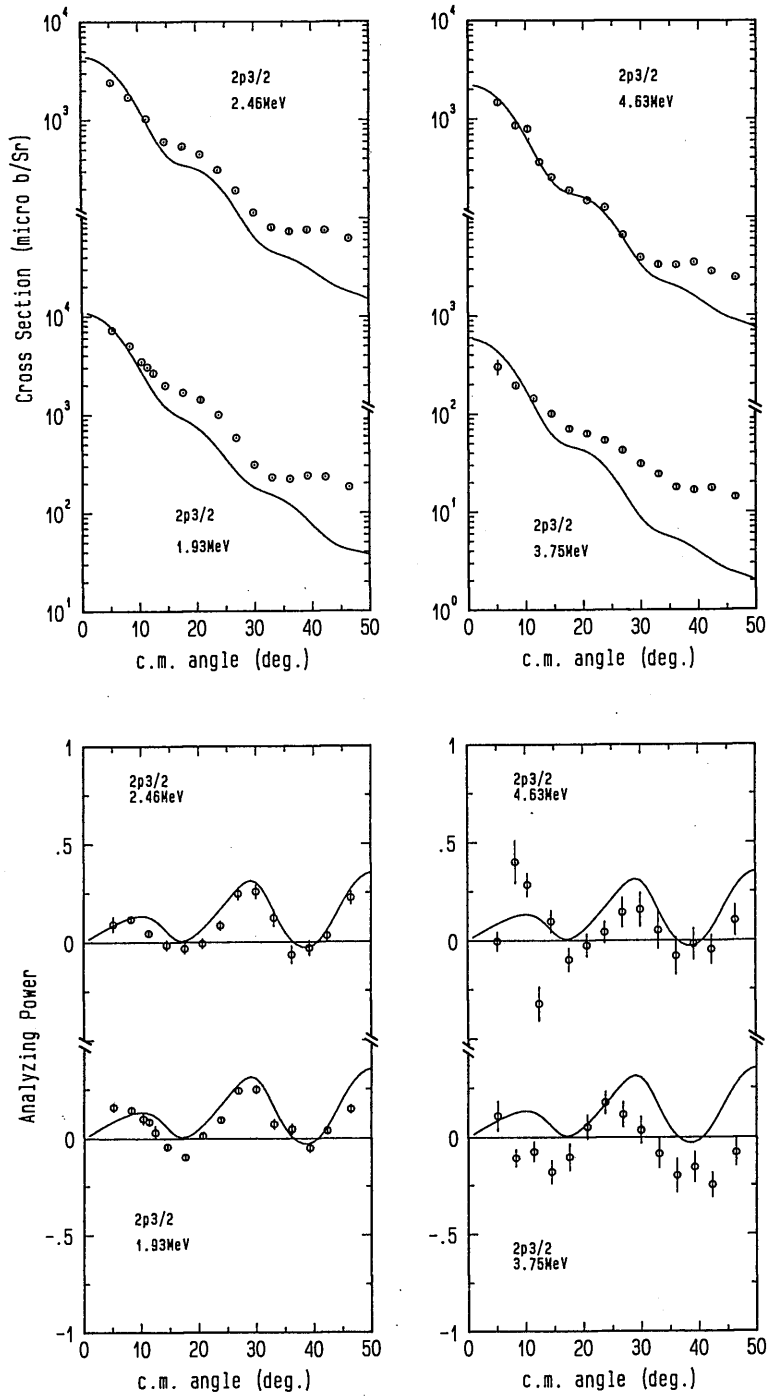


Fig. 3 Angular distributions of cross section and analyzing power of  $p_{3/2}$  transition. Circles show experimental data, and real lines show DWBA calculations.

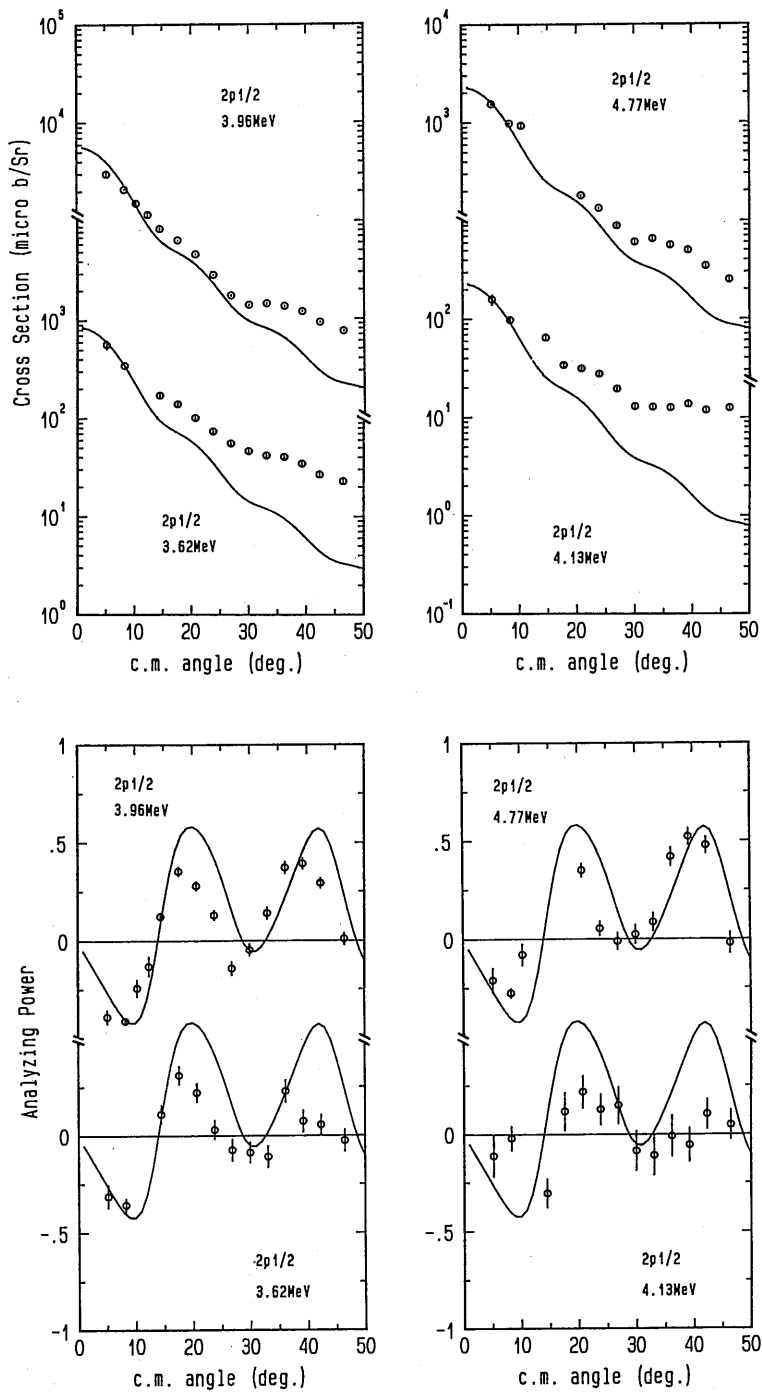


Fig. 4 Angular distributions of cross section and analyzing power of  $p_{1/2}$  transition. Circles show experimental data, and real lines show DWBA calculations.

**Table 2** Level structure of  $^{41}\text{Ca}$ 

Belote et al. (ref. 2)			Present work		
<i>Ex.</i> (MeV)	$\ell$	$J\pi$ <sup>1)</sup>	<i>Ex.</i> (MeV)	$\ell$	$J\pi$
0.0	3	7/2-	0.0	3	7/2-
1.949	1	3/2-	1.935	1	3/2-
2.017	2	3/2+	2.006	2	3/2+
2.479	1	3/2-	2.463	1	3/2-
			2.574		
2.680	0	1/2+	2.667	0	1/2+
			2.816		
			2.885		
			2.958		
			3.054	2	3/2+
			3.205	4	9/2+
			3.352		
3.408	0	1/2+	3.403	0	1/2+
			3.535	2	3/2+
3.623	1	1/2-	3.622	1	1/2-
			(3.668)	2	3/2+
3.740	2	5/2+	3.746		3/2-
3.859	1	1/2-	3.877	0	1/2+
3.954	1	1/2-	3.960	1	1/2-
4.198	1	1/2-	(4.129)	1	1/2-
			4.470	4	9/2+
			4.581		
4.618	1	1/2-	4.629	1	3/2-
4.765	1	1/2-	4.770	1	1/2-
4.829	2	5/2+	(4.830)	2	3/2+
4.894	3	5/2-	4.900	3	5/2-
4.983	4	9/2+	5.000	4	9/2+

1) Assignment of  $J$  is tentative.

**Table 3** Shell-model level structure of  $^{41}\text{Ca}$  (Present work)

Shell-model configuration	<i>Ex.</i> (MeV)	$C^2S$	Unperturbed level position (MeV)	$\Sigma C^2S$
$1f_{7/2}$	0.0	0.755 ± 0.095	0.0	0.755 ± 0.095
$2p_{3/2}$	1.935	0.538 ± 0.085	2.501	0.896 ± 0.093
	2.463	0.200 ± 0.031		
	3.746	0.027 ± 0.004		
	4.629	0.131 ± 0.019		
$2p_{1/2}$	3.622	0.092 ± 0.012	4.176	0.989 ± 0.116
	3.960	0.571 ± 0.108		
	4.129	0.032 ± 0.011		
	4.755	0.294 ± 0.040		

共にこの結果とほとんど違いはみられなかった。  
**Table 2** に決定した励起エネルギー  $Ex$ , スピン・パリティ  $J\pi$  を文献 2 の結果と共に示す。5 MeV までの領域で 33 本のピークを処理し 27 本のピークを同定した。文献 2 では非偏極ビームを使用しているため  $J\pi$  の同

定には不確定さが残っている。 $Ex$  の誤差は主に統計的誤差に起因しており、数% (約 5 keV) 以下の精度である。

**Table 3** は解析結果で、各準位の  $C^2S$  ならびにそれらの和、各軌道の分散状況を表している。表中にある



**Table 4** Shell-model level structure of  $^{41}\text{Ca}$ . Results of Belote et al. and a theory

Shell-model configuration	$E_x$ (MeV)	$C^2S$	Unperturbed level position (MeV)	$\Sigma C^2S$	Theoretical $\Sigma C^2S$ **
$1f_{7/2}$	0.0	1.00*	0.0	1.00*	0.9263
$2p_{3/2}$	1.949 2.471	0.94* 0.28*	2.07	1.22*	0.9662
$2p_{1/2}$	3.623 3.954 4.198 4.618 4.765	0.11* 0.73* 0.01* 0.11* 0.21*	4.13	1.17*	0.9680

\* Normalized

\*\* Nishizaki et al. ref. 11

$C^2S$  の誤差は、実験データの統計的な誤差と規格化の際のフィッティングの不確定さに起因する誤差である。**Table 4** は文献 2 の結果をまとめたものであり、理論計算から求めた  $\Sigma C^2S$ <sup>11)</sup> も併せて載せている。

次に主な軌道について議論する。

#### 1) $1f_{7/2}$ 軌道

$^{40}\text{Ca}$  は中性子数 20 であり、殻模型の観点からはこの軌道はほとんど空いていると考えられる。この軌道への遷移は基底状態への一本の強いピークのみが観測され、その  $C^2S$  は  $0.76 \pm 0.10$  であった。**Table 4** の理論値と比較すると、その誤差を考慮しても若干小さい。ただし、5 MeV 付近からの連続スペクトル領域に弱い遷移が存在する可能性が考えられる。

#### 2) $2p_{3/2}$ 軌道

この軌道は  $1f_{7/2}$  軌道の更の一つ上に位置するため、フェミル面からのしみ出しが更に小さくなると予想される。 $p_{1/2}$  と同じエネルギー領域に分散しているが、ベクター・アナライジングパワーから  $J\pi$  の確定が可能であった。文献 2 では、3 MeV 以下の準位を  $2p_{3/2}$ 、それ以上のピークを  $2p_{1/2}$  と同定しているがこれは誤りであることがわかった。全部で 4 本のピークが観測されており、 $\Sigma C^2S$  は  $0.90 \pm 0.13$  となった。

#### 3) $2p_{1/2}$ 軌道

5 MeV までの領域に 4 本のピークが観測された。 $\Sigma C^2S$  は  $0.99 \pm 0.15$  となり、これは理論値と比べても大きな値である。フィッティングの誤差が相対的に大きいと考えられる。

## 5. 結 論

$E_d = 56 \text{ MeV}$ ,  $(\vec{d}, p)$  反応から  $^{41}\text{Ca}$  の単粒子状態の

研究を行った。ゼロレンジ DWBA を使用した解析から基底状態  $^{40}\text{Ca}$  の各軌道の空孔状況を調査した。ターゲット・フォームファクターの計算に十分な注意をはらい  $C^2S$  の絶対値を決定することから、その殻模型構造に関する議論を行った。核表面付近の殻には閉殻からのしみ出しの影響があり、特に  $1f_{7/2}$  では  $\Sigma C^2S = 0.76$  が得られるなど、 $^{40}\text{Ca}$  の閉殻構造について示唆的なデータが得られた。また、従来のデータの  $J\pi$  の同定における誤りを訂正し、高い精度の核構造情報が得られた。

## 参 考 文 献

- 1) T. Chittarakarn et al.: Phys. Rev., **C34**, 80 (1986).
- 2) T. A. Belote, A. Sperduto and W. W. Buechner: Phys. Rev., **139**, 80 (1965).
- 3) H. Ikegami, S. Morinobu, I. Katayama, M. Fujiwara and S. Yamabe: Nucl. Instr. and Meth., **175**, 335 (1980).
- 4) M. Matoba, K. Tsuji, K. Marubayashi, T. Shintake, H. Ikegami, T. Yamazaki, S. Morinobu, I. Katayama, M. Fujiwara and Y. Fujita: Nucl. Instr. and Meth., **180**, 419 (1981).
- 5) P. D. Kunz: Univ. of Colorado. Private Communication.
- 6) M. Matoba, T. Fujiki, S. Uehara, H. Ohgaki, Y. Uozumi, H. Kugimiya, H. Ijiri, I. Kumabe, N. Koori, M. Nakano: Phys. Rev., **C39**, 1658 (1989).
- 7) J. J. H. Menet, E. E. Gross, J. J. Malinify and A. Zucker: Phys. Rev., **C4**, 1114 (1971).
- 8) R. C. Johnson and P. J. R. Soper: Phys. Rev., **C1**, 976 (1970).
- 9) F. D. Becchetti and G. W. Greenlees: Phys. Rev., **182**, 1130 (1969).
- 10) F. J. Eckle, H. Lenske, G. Eckle, G. Graw, R. Hertenberger and H. Kader: Phys. Rev., **C39**, 1662 (1989).
- 11) T. Nishizaki: Private Communication.