

傾斜翼と後退翼との攪拌特性の比較

Comparison of Agitating Characteristics between Pitched Impellers and Retreated Impellers

化工機事業部 技術部 化工機設計課

岡本 幸道

Yukimichi Okamoto

There are various types of impellers used for the mixing of low viscous liquid, i.e., under the turbulent regime.

In this paper, some types of impellers, mainly pitched blade impellers and retreated blade impellers are compared in their agitating characteristics such as power, discharge, flow pattern, and solid particle suspension.

比較的粘度の低い液の攪拌、いわゆる乱流攪拌に用いられる翼には種々の形式の翼がある。ここでは、それらの形式のうちから、傾斜翼と後退翼に重点をおいて、各翼の特性——動力特性、フローパターン、粒子懸濁能力など——を比較する。

1. 乱流用の攪拌翼の形式

乱流用攪拌翼には、パドル、タービン、それらの傾斜翼および後退翼、プロペラ、ブルマージン、ファウドラ、ゲート、ミグ、コーン、軸流翼^{*}などの形式がある。これらの翼は、基本的には次の3種のいずれかに分類される。

1) 垂直平羽根翼系

パドル、タービン、ゲート

2) 傾斜翼系

傾斜パドル、傾斜タービン、プロペラ、ミグ、軸流翼

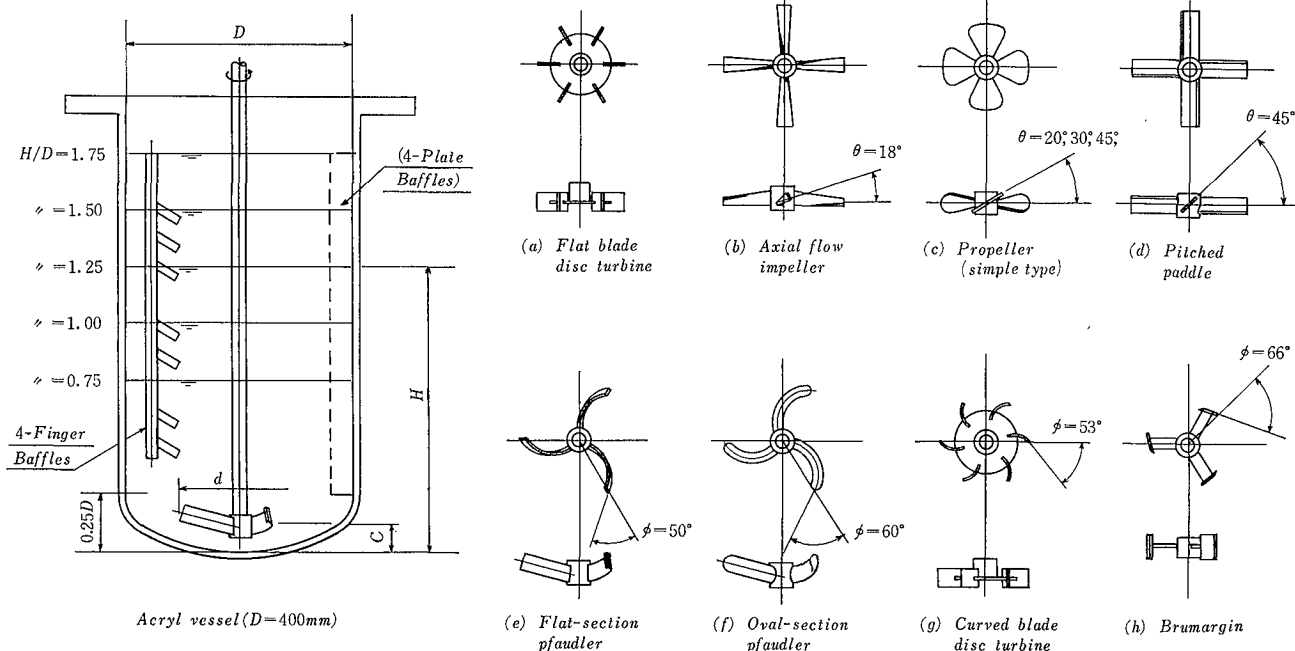
3) 後退翼系

湾曲パドル、後退タービン、ブルマージン、ファウドラ、特殊ゲート

よく知られているように、回転するパドル翼から吐出される流れは、放射流と旋回流の合成流である。傾斜翼は、このうちの放射流を軸流に変更するべく採用された翼であり、後退翼は、放射流の比率を増し吐出効率を高めるために採用された翼であると考えられる。

傾斜翼の最も簡単な形状は傾斜パドルであり、スラリー攪拌での使用例が多い。プロペラ翼は弱い攪拌でブレンディングや、ドラフト・チューブと組み合わせて伝熱操作に用いられる。軸流翼はマリーン・プロペラの一部を傾斜パドル状に切り取った形状であり、プロペラなみの非常に良い吐出効率をもった翼であるといわれている。

*広義の意味では傾斜翼系を軸流翼とよぶが、ここでは第1図(b)の翼を軸流翼とよぶ。



第1図 実験用の攪拌槽と翼

Fig. 1 Mixing vessel and impellers used in the experiments

一方、後退翼としての端的な特徴を示す翼はブルマージンである。この翼も非常に良い吐出効率をもつ。過去に懸濁重合や乳化重合に使用された例が多い。後退タービンやファウドラ翼の後退角はブルマージンよりも小さく、その後退翼としての特徴もブルマージンに比べればやや弱い。後退タービンはガス分散に、ファウドラ翼は懸濁重合や乳化重合などに使用されることが多い。

2. 攪拌動力特性、吐出特性およびフローパタン

攪拌翼の最も基本的な性質は動力特性、吐出特性およびフローパタンによって表示される。

本章では、タービンおよび数種の傾斜翼と後退翼について、攪拌動力数と吐出流量係数の測定結果を示し比較する。また各翼でのフローパタンについてもその概略を示す。

第1表 各翼の N_p , N_q の測定結果

Table 1 Measured data of N_p , N_q for several impellers ($Re=10^5 \sim 2 \times 10^5$)

Impeller	d/D	b/d	n_p	θ	p/d	ϕ	Baffles*	H/D	C/D	N_p	N_q	N_p/N_q
Flat blade disc turbine	0.40	0.20	6	90°	—	0°	4-P	0.75	0.38	4.60	0.79	5.8
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	1.00	0.50	4.96	0.88	5.6
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	1.25	0.63	5.11	0.92	5.6
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	1.50	0.75	5.41	0.88	6.1
Axial flow impeller	0.54	0.12	4	—	1.0	0°	4-P	0.75	0.38	0.26	0.44	0.59
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	1.00	0.50	0.28	0.41	0.68
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	1.25	0.63	0.28	0.40	0.70
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	1.50	0.75	0.29	0.40	0.73
Propeller	0.38	0.45	4	30°	—	0°	4-P	0.75	0.38	0.52	0.70	0.74
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	1.00	0.50	0.62	0.65	0.95
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	1.25	0.63	0.68	0.64	1.06
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	1.50	0.75	0.68	0.65	1.05
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	1.75	0.88	0.67	0.67	1.03
	0.38	0.45	4	20°	〃	〃	〃	1.25	0.63	0.27	0.44	0.61
0.38	0.45	4	45°	〃	〃	〃	1.25	0.63	1.67	1.25	1.34	
0.38	0.35	4	30°	〃	〃	〃	1.25	0.63	0.67	0.61	1.10	
Pitched paddle	0.50	0.20	4	45°	—	0°	4-P	1.00	0.50	1.25	0.74	1.69
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	1.25	0.63	1.27	0.76	1.67
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	1.50	0.75	1.22	0.76	1.61
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	1.75	0.88	1.25	0.77	1.62
Flat-section pfaudler	0.53	0.14	3	90°	—	50°	4-F	0.75	0.10	1.03	0.46	2.2
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	1.00	〃	1.31	0.50	2.6
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	1.25	〃	1.41	0.51	2.8
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	1.50	〃	1.47	0.51	2.9
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	1.75	〃	1.49	0.50	3.0
〃	〃	〃	〃	〃	〃	4-P	1.25	〃	1.56	0.54	2.8	
Oval-section pfaudler	0.53	0.14	3	90°	—	60°	2-D	1.40	0.10	0.61	0.26	2.3
Curved blade disc turbine	0.16	0.20	6	90°	—	53°	4-P	1.25	0.63	3.06	0.95	3.2
Brumargin	0.38	0.30	3	90°	—	70°	4-P	1.25	0.63	0.48	0.59	0.81

*Baffles: P=Plate baffles, F=Finger baffles, D=D-type baffles

て、攪拌動力数と吐出流量係数の測定結果を示し比較する。また各翼でのフローパタンについてもその概略を示す。

測定に用いた槽と各翼を第1図に示す。攪拌動力は回転計と歪ゲージ式トルク計により測定し、吐出流量は井上・佐藤¹⁾の粒子追跡法により測定した。これらの測定による誤差は、動力で5%以内、吐出流量で10%程度と見込まれる。

攪拌動力と吐出流量の測定値を、それぞれ、攪拌動力数 N_p および吐出流量係数 N_q に換算し、その結果を第1表に示す。約半数の翼については、参考までに、液深を変えた場合の結果も併記した。これは、吐出流量測定の見直しを兼ねて、混合不良な領域が存在する場合の吐出流量と循環時間の関係を調べる目的で行われた。詳細は省略するが、結果的には、わずかでも液が動いている限り、均相系での液の平均循環時間は液容量と吐出流量の比に等しく、少なくとも液深と槽径の比 $H/D=1.75$ 程度まではこの関係が成立している。

各種の翼を比較する場合、その特性は N_p , N_q の個々の値よりも、 N_p/N_q の比を比較する方がよい^{2,3)}。第1表に示す各翼の N_p/N_q 値を液深 $H/D=1.25$ について比較した結果が第2図である。この図から、従来いわれるように、次の3点が確認できる。

傾斜翼系、後退翼系とも垂直平羽根翼系に比べ N_p/N_q が小さく吐出効率の良い吐出型としての性格をもつ。特に、傾斜翼系では軸流翼(A.F.I)とプロペラ(Pr.)、後退翼系ではブルマージン(Br.)が強い吐出型の翼である。タービンを剪断型の翼とするならば、後退タービン(C.B.D.T.)、ファウドラ翼(Pf.)、45°傾斜パドル(P.Pa.)は吐出剪断折中型の翼といえる。

簡単な解説をさらに付け加えれば、傾斜翼の傾斜角の効き方と後退翼の後退角の効き方にはかなり差がある。今、仮に傾斜角および後退角を通常のパドルやタービンからの変移角、 $90^\circ - \theta$ および ϕ として評価すると、傾斜翼では、この変移角が 0° から 30° あたりまで N_p/N_q が急激に減少し、 45° 以上では比較的ゆるやかに減少すると推測される。一方、後退翼では、逆に 0° から 30° あたりまでゆるやかな減少を示し 45° 以上

では比較的急な減少を示すようである。

近年、ブルマーzinの使用例が少なくなっている理由の一つに、この翼の特性が不安定であることがあげられている。わずかな形状の差異によって N_p や N_p/N_q の値が大幅に変化するためであり、上記の推測と合致する。後退翼のこのような傾向を考慮すれば、典型的な吐出型の翼としては、 N_p/N_q 特性の安定した傾斜翼の方が望ましい。

各翼での典型的なフローパターンを第3図に示す。プロペラおよび後退タービンについては省略したが、 $\theta=20^\circ$ のプロペラは軸流翼に、 $\theta=45^\circ$ のプロペラは 45° 傾斜パドルに類似であり、後退タービンはタービンに類似のフローパターンを示す。

軸流翼での流れは、槽下半分を見る限り十分その名に値する流れとなるが、槽上部では流れの弱い領域を生じ易い傾向がある。 45° の傾斜パドルでは軸流になりきらず、まだ幾分か放射流としての吐出が見られる。また、ブルマーzinは、タービン、ファウドラ翼など放射流吐出を行うグループの中では、比較的整った循環流路を形成する点に特徴がある。

以上で、各翼の基本的な特性をほぼ示したことになるが、いずれも、重要な因子である槽と翼の寸法比——端的には翼径と槽径の比 d/D で表示される——を比較の考慮には入れていない。実際には、上記の特性はフローパターン

第2表 循環時間(θ_{cir})と混合時間(θ_{mix}), $P_v=0.5\text{kW/m}^3$

Table 2 Circulation time θ_{cir} and mixing time θ_{mix} at $P_v=0.5\text{kW/m}^3$

Impeller	n [R/M]	$\pi n d$ [m/sec]	θ_{cir} [sec]	θ_{mix} [sec]
Flat blade disc turbin	227	1.90	4.1	9.8
Axial flow impeller	365	4.10	2.4	9.0
Propeller (20°)	674	5.29	3.5	10.4
〃 (30°)	495	3.89	3.3	10.4
〃 (45°)	367	2.88	2.3	10.3
Pitched paddle (45°)	249	2.61	2.3	9.1
Flat-section pfaudler	222	2.44	3.4	9.0
Oval-section pfaudler	293	3.19	5.0	8.6
Curved blade disc turbine	269	2.25	3.4	10.0
Brumargin	556	4.37	3.2	10.5

1) n , θ_{cir} and θ_{mix} are calculated from the data shown in Table 1, under the conditions, $D=400$ mm, $H=500$ mm, $P_v=0.5$ kW/m³-water.

2) θ_{mix} is calculated with the following equation⁴⁾

$$\frac{1}{n\theta_{mix}} = k_1 \left\{ \underbrace{\left(\frac{d}{D}\right)^3 N_q}_{\text{circulation effect}} + 0.21 \underbrace{\left(\frac{d}{D}\right) \left(\frac{N_p}{N_q}\right)^{0.5}}_{\text{turbulence effect}} \right\} \times \left[1 - \exp\left\{-13\left(\frac{d}{D}\right)^2\right\} \right]$$

も含めて d/D の影響を受ける。また、吐出と循環の動力効率も大いに d/D の値に依存する。一方、上記の各翼を実際に使用する場合には d/D の選定範囲がある。例えば、タービンは $d/D=0.3\sim 0.5$ 、ファウドラ翼は $d/D=0.5\sim 0.7$ で使用する。したがって、各翼の比較を行うには、その翼が常用される d/D の値をも考慮に入れた上で比較することが望ましい。さいわい、この実験に用いた翼はすべて 10m^3 以上の実装置と幾何学的に相似に作られた翼であり d/D の値もほぼ実装置での実情を反映している。そこで、試みに各翼の d/D 値の効果を含む評価として、攪拌動力が一定の条件で各翼の循環時間*)を比較した結果を第2表に示す。

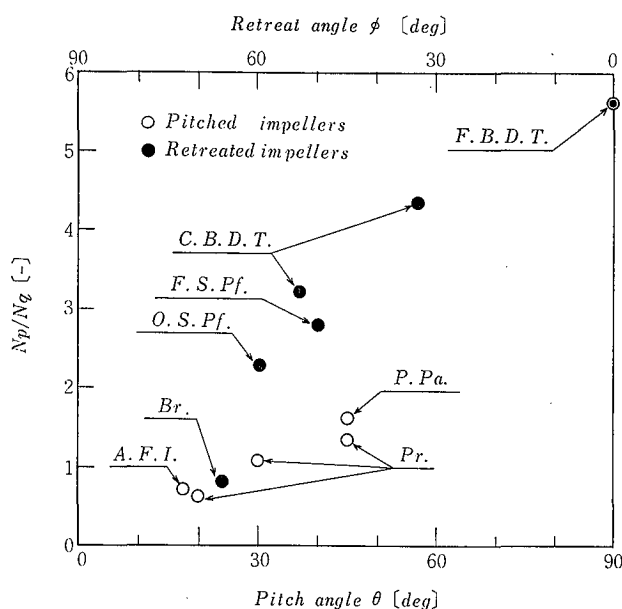
この表と第2図の N_p/N_q 値を見れば、 N_p/N_q の値と吐出循環の動力効率との相関が弱いことが理解される。これが寸法比の効果である。具体的には、翼径が比較的大きく N_q 値が大きい翼の効率が良くなっており、傾斜翼系と後退翼系では、幾分か傾斜翼系の方が良い傾向にある。第2表には、参考のため、混合時間(計算値)の比較も併記した。混合時間に対しては、剪断作用の効果も加わるため、各翼の性能と N_p/N_q 値との関係は一層弱まり、両者が無関係にすら見える。これらの結果は、翼形式、寸法比のみならず場合によっては剪断作用と循環作用のバランスをも考慮した翼の選定が必要となりうることを示唆する。

3. 粒子懸濁

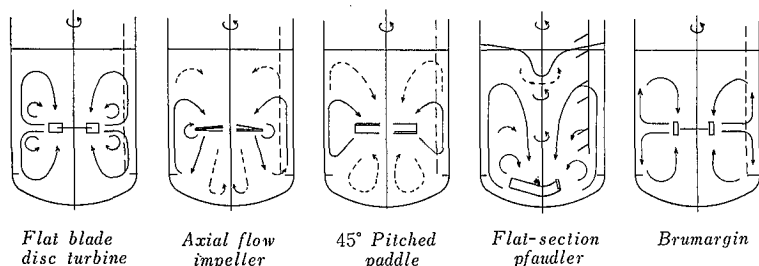
ここでは先に示した各翼を用いて粒子懸濁を行い、その結果について比較する。

攪拌槽で粒子懸濁を行うと、槽内では高さ

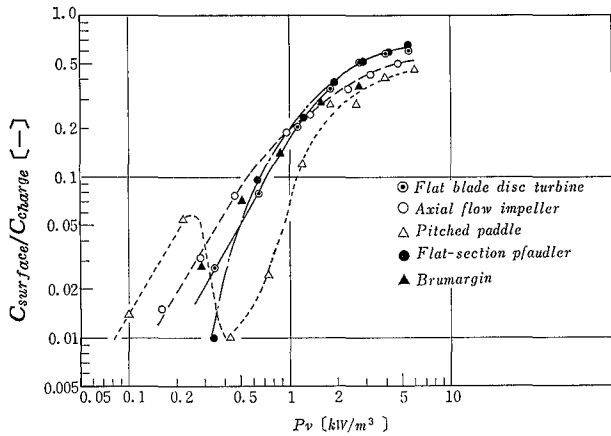
*) 検査面を翼回転体とする時の循環時間で同伴流を含まない。



第2図 傾斜翼と後退翼の N_p/N_q (第1表の $H/D=1.25$ のとき)
Fig. 2 N_p/N_q of pitched impellers and retreated impellers (The data at the liquid depth, $H/D=1.25$, in Table 1 are plotted)



第3図 各翼でのフローパターン
Fig. 3 Typical flow pattern of several impellers



第4図 液表面付近でのガラス・ビーズ濃度と攪拌動力
Fig. 4 Glass beads concentration near the liquid surface ($C_{charge}=140g/l$)

方向に粒子濃度分布を生じる。液体よりも重い粒子であれば、粒子濃度は下方で大きく上方で小さい。そこで、液面付近での粒子濃度と仕込粒子濃度の比をもって粒子濃度分布の均一性を評価することにし、各翼について攪拌速度を変えて液面付近での粒子濃度を測定した。

実験に用いた粒子は径約 500μ のガラスビーズであり、その水中での沈降速度は平均 $7.4cm/sec$ 、沈降速度の標準偏差は約 $0.7 cm/sec$ であった。仕込濃度は約 $140 g/l$ とし、全液量は $58.6 l$ とした。また、粒子濃度は液面から少量ずつ計 $2l$ の液を採取して測定した。液深は $H/D=1.25$ とし、各翼の取付け高さは次の通りとした。

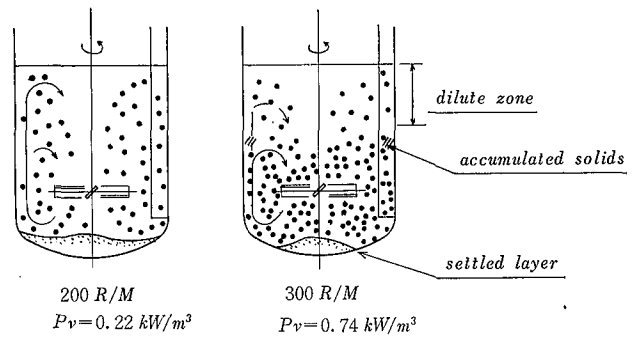
タービン: $0.42D$ ファウドラー翼: $0.10D$
軸流翼: $0.63D$ ブルマージン: $0.42D$
傾斜パドル: $0.42D$

実験結果を第4図に示す。縦軸に粒子濃度を、横軸に攪拌動力をとり、各翼の懸濁状態を比較している。いずれの翼でも動力を十分に大きくすれば粒子濃度は粒子仕込濃度に漸近し、均一な懸濁状態に近づく。各翼により均一化の度合は多少異なるが、全体的にみれば、翼形状の差異よりも攪拌動力自体の過不足に依存するところが大きい。いずれの翼でも、均一な懸濁を目的とするのであれば、この系では約 $3 kW/m^3$ 程度の攪拌は必要であろう。

懸濁操作の一つのクリテリアとしてオフボトム攪拌速度という考え方がある。各翼のオフボトム時の攪拌動力は概略次の通りであった。

タービン: $2 kW/m^3$
軸流翼: $4 kW/m^3$
傾斜パドル: $4 kW/m^3$
ファウドラー翼: $1 kW/m^3$
ブルマージン: $3 kW/m^3$ 以上 (未確認)

ファウドラー翼はボトム設置であるためにオフボトムという点では優れているが、槽全体の均一性という点では、タービンと良く似た結果になっている。一方、オフボトムに多大な動力を必要とする軸流翼、傾斜パドル、ブルマージンでは、大きな動力を与えた時の均一性においても若干タービンやファウドラー翼に劣る傾向がある。このような懸濁困難な粒子の均一浮遊では攪拌トルクの大きい翼がオフボトムの条件において有利であるため上記の結果に至っ



第5図 傾斜パドル翼による懸濁状況の変化
Fig. 5 Change in solid suspension patterns with a pitched paddle impeller

たと考えられる。

ただし、第4図で動力が極端に小さい時には各翼での粒子濃度が逆転し、翼形式による懸濁能力の差異が固一液系の条件や攪拌条件により変わる可能性がある。一概に優劣のみを論じることには疑問の余地がある。

なお、傾斜パドルの懸濁の状況は $P_v=0.3 kW/m^3$ あたりで急激に変化している。これは次の現象が生じることに対応する。 $0.3 kW/m^3$ 以下ではパドルの手前にボトムから液面まで達する細い流路があり、ここで粒子が運ばれる。 $0.3 kW/m^3$ 付近から、液面と翼と中間の高さでこの流路の位置に粒子群が停滞しはじめ、流れは内側に曲り翼に回帰するようになる(第5図参照)。この粒子群は $P_v=0.3\sim 2 kW/m^3$ の範囲で周方向に成長しリング状の境界面を形成するに至る。

以上の点を考慮して、ここでの実験に限って各翼の粒子懸濁能力をまとめれば、懸濁困難な固一液系の均一分散には、トルクが小さい極端な吐出型の翼よりも、タービンやボトム設置のファウドラー翼の方が適しているといえる。このことにも増して、対象とする固一液系の分散に必要な動力レベルを適切に判断することが重要である。

4. むすび

以上、乱流攪拌用の種々の形式の翼について、動力および吐出特性、粒子懸濁能力の比較を行い次の結果を得た。

- 1) N_p/N_q 比という観点からは、吐出型の翼として特性の安定した軸流翼やプロペラが有効である。
- 2) 循環と吐出の動力効率という観点からは、 d/D が大きく N_q の大きい翼が有効である。必ずしも、 N_p/N_q 比にはよらない。
- 3) 混合時間の動力効率は循環作用と剪断作用のバランスに依存するため一概に翼の優劣を決定することはできない。
- 4) 懸濁困難な固一液系の均一分散にはトルクの大きいタービンやファウドラー翼が有効である。

参考文献

- 1) 井上・佐藤: 化学工学, Vol.33 (1969), p. 293
- 2) Nagata: Mixing, (1975), Kodansha, p. 136
- 3) 山本: 京都大学学位論文, (1961), p. 79
- 4) 山本: 京都大学学位論文, (1961), p. 129