くさび式パワーチャックの把握性能*
(生づめテーパ角の影響)江 馬 諭*¹, 丸 井 悦 男*²Chucking Performance of a Wedge-Type Power Chuck
(Effects of Taper Angle of Top Jaw Gripping Surface)

Satoshi EMA and Etsuo MARUI

In order to improve the chucking performance of a wedge-type power chuck with three top jaws, the top jaws with a tapered gripping surface were used in this study. Gripping accuracy tests of the chuck, bending tests of a chuck-work system and cutting tests were performed. The investigation showed that the use of the top jaws with the taper angle of 0° makes the gripping accuracy superior, while increase of the taper angle causes a lowering of it. The greatest bending stiffness can only be achieved when the gripping force is adjusted to the taper of the top jaw gripping surface used. The method of tapering the gripping surface of the top jaws is also effective for preventing chatter vibration in practical use.

Key Words: Machine Tool, Power Chuck, Top Jaw, Gripping Accuracy, Bending Stiffness, Surface Roughness, Chatter Vibration

1. ま え が き

従来、チャック、工具保持具、センタなどは、いわゆる工作機械の付属品とみなされてきた。しかし、工作機械や工具の性能が向上するにつれ、工作物や工具のチャッキングとセッティングに関する問題は、ますます重要になっている。このような状況において、近年機械加工システムとしての総合的な観点から、旋盤などに広く用いられているチャックの把握特性に関する研究が、積極的に進められている。例えば、三つづめスクロールチャックおよび四つづめ単動チャックに関しては、工作物の把握精度や加工精度⁽¹⁾⁽²⁾、びびり振動に及ぼす支持条件の影響⁽³⁾、つめの把握圧力分布⁽⁴⁾などに関する研究が行われ、多くの有益な事実が明らかにされている。しかし、くさび式チャックに関しては、剛性と把握精度⁽⁵⁾、軸推力と把握力の関係⁽⁶⁾などが明らかにされているものの、まだ十分とはいえない。とくに、NC旋盤などに広く用いられているくさび式パワーチャックにおいては、把握力を増加すると生づめの先開き現象によりチャック-工作物系の曲げ剛性

が低下する問題が指摘されている⁽⁷⁾。

そこで本研究では、くさび式三つづめパワーチャックで指摘された生づめの先開きによる曲げ剛性の低下を防止することを目的として、把握部をテーパ状にした生づめを用いて、チャック-工作物系での把握精度試験、曲げ試験および切削試験を行った。これより、生づめ把握部がテーパとなっているチャックの把握性能を評価するとともに、くさび式三つづめパワーチャックの把握性能の向上を試みた。

2. 実験装置および方法

前報⁽⁷⁾において、くさび式三つづめパワーチャックで工作物を把握したとき、生づめはおもに根元側で工作物を把握し、先端側は工作物の把握にほとんど寄与していない、いわゆる生づめの先開き現象が存在することを示した。このため、大きな把握力で工作物を把握すると生づめの先開きが大きくなり、チャック-工作物系の曲げ剛性が低下する。そこで、生づめの先開きによって生じる把握部のこう配とは逆のこう配(テーパ)をもつ生づめを使用することにより、くさび式パワーチャックの把握性能の改善を試みた。

2・1 実験条件 実験に使用した旋盤、チャックおよび工作物の寸法と材質を表1に示す。チャックは、

* 原稿受付 平成3年5月16日。

^{*1} 正員、岐阜大学教育学部(〒501-11 岐阜市柳戸1-1)。^{*2} 正員、岐阜大学工学部。

生づめの開閉が油圧シリンダとウェッジプランジヤで駆動されるくさび式の三つづめパワーチャックを用いた。工作物は、把握部も含めて直径(40 mm)が一樣なものを使用した。実験に使用した生づめは、長さ 75 mm、高さ 45 mm、幅 31 mm の大きさである。図 1 に生づめ把握部の形状(二つのつめ位置での断面)を示す。生づめ把握部の内径が根元側に向かって大きくなるように、CNC 旋盤のプログラム機能を用いて長さ 30 mm の把握部を加工した。すなわち、生づめ前端面での把握部の内径が工作物直径と等しく、根元側に向かって内径を直線的に増加している。したがって、把握部は旋盤主軸上に頂点をもつ円すいの一部であり、この円すいの頂角をテーパ角と呼ぶことにする。本実験では、表 1 に示すようにテーパ角を 3 種類に変化するとともに、比較のため把握部が旋盤主軸と平行である通常の生づめ($T_a=0^\circ$)も使用した。また、生づめの先開きの程度は把握力の大きさと密接に関連しているので、把握力も表 1 に示す値に変化させて実験を行った。この把握力 P は、生づめ 1 本当たりの把握力であり、実験で使用したチャックが許容する実用範囲内で変えられている。

なお、生づめ把握部の加工直後、接触式電気マイクロメータを用いて把握部を軸方向にトレースすることにより、各生づめのテーパがともに連続的かつ所定の大きさとなっていることを確認した。生づめ把握部の表面粗さは、約 $1.4 \mu\text{m}Ra$ である。また、使用した生づめは 2 本のボルトでマスタージョーに固定される形式のものであり、実験を通してボルト締付けトルクを表に示す値に保った。このような生づめ把握部のテーパ角と把握力がチャックの把握性能に及ぼす影響を評価するために、チャック-工作物系での把握精度試験、曲げ試験および切削試験を行った。以下にその詳細を示す。

2.2 把握精度試験 実験中に生ずる工作物表面の傷や工作物自身の加工精度(とくに真円度)などが、チャックの把握精度に及ぼす影響を極力小さくするため、焼き入れ後円筒研削を施した工作物(試験棒)を使用した。この試験棒は、直径 40 mm、長さ 100 mm であり、全長にわたって真円度 $1.9 \mu\text{m}$ 以下の精度となっている。

表 1 に示す所定の把握力で試験棒を把握した後、旋盤の主軸を低速で回転した。主軸端に装着したロータリエンコーダと、保持具を介して旋盤のベツトに固定した渦電流式変位計を用いて、試験棒の半径方向の振れを測定した。特定のつめ位置から測定を開始することによって、つめ位置に対する試験棒の偏心方向を明

らかにした。試験棒の振れの測定位置は生づめ前端面から 60 mm であり、この測定断面円周上で等間隔の 100 点における試験棒の半径方向の振れを測定した。試験棒を把握し直して、同様の測定を 10 回繰返した。これより、旋盤主軸に対する試験棒の偏心、すなわちチャックの工作物把握精度を求めた。なお、実験に使用した A/D 変換器の分解能と変位計の測定範囲から、測定精度は $0.49 \mu\text{m}$ であった。

2.3 曲げ試験 チャック-工作物系の曲げ剛性を図 2 に示す実験装置を用いて測定した。直径 $D=40$ mm、突き出し長さ 200 mm の旋削仕上げを施した工作物を、把握長さ $L_c=30$ mm と所定の把握力 P でチャックに取り付けた。この工作物の軸方向に測定した表面粗さは、約 $1.8 \mu\text{m}Ra$ であった。図に示すように、生づめ前端面より 190 mm の位置に、静的な曲げ荷重 W をリング形力計で加え、荷重作用点と反対側の工作物半径方向変位を上記の渦電流式変位計で検出した。これよりチャック-工作物系の曲げ剛性を求めた。

図 2 に示す曲げ荷重 W の作用方向は工作物半径方向であり、切削背分力の作用方向に一致する。切削時には、主分力、背分力および送り分力が切削点に作用

表 1 実験条件

CNC Lathe Chuck	Mori Seiki: SL 15 Three-jaw power chuck: #6
Work diameter D	40 mm
Overhang length	200 mm (70 mm)
Work material	Carbon steel S45C
Gripping length L_c	30 mm
Taper angle T_a	0, 0.076, 0.152, 0.228°
Gripping force P	4, 6, 8, 10 kN/Jaw
Clamping torque	59 kN·mm
Bending load W	0 ~ 490 N
Tool (Tip)	TNMG160404 11
Cutting speed	610 rpm
Feed rate	0.13 mm/rev
Depth of cut	0.3 mm

図 1 生づめ把握部の形状

している。これらの切削力によって曲げモーメントとねじりモーメントがチャックに作用している。しかし、チャックの把握能力は主に曲げモーメントに対する強さによって決まる。そこで、本実験では背分力方向に静的な曲げ荷重を加える方法によって、テーパ角や把握力が異なるときの曲げ剛性を検討した。本実験の場合、工作物の突き出し長さが直径に比べて長く、200 mm となっている。そこで、最大曲げ荷重を 490 N とし、チャックに作用する曲げモーメントが、工作物突き出し長さの短い通常の中切削から荒削り切削状態での大きさにほぼ等しくなるようにした。また、曲げ荷重の作用方向と円周方向での生づめの位置関係から、荷重作用点と反対側につめがある場合と、荷重作用点と同じ側につめがある場合について、曲げ試験を行った。前者の場合を「つめあり」、後者の場合を「つめなし」と呼ぶことにする。

2.4 切削試験 種々のテーパ角をもつ生づめチャックの切削安定性を検討するため、曲げ試験のときと同じ寸法の工作物の切削試験を行った。切削に伴うびびり振動の発生状態の観察を容易にするため、切削はチャック側から工作物自由端側へ送りかける、いわゆる逆引き加工にて行った。使用した工具および切削条件を表 1 に示す。なお、本実験の場合、通常の切削加工に比較して工作物直径に対する突き出し長さがかなり長い。切削点がチャックから遠ざかるにつれて工作物の剛性が低下し、びびり振動が発生しやすくなる。生づめのテーパ角がチャックの切削性能に及ぼす影響をびびり振動の発生位置により評価するため、このような長い工作物を切削した。

3. 実験結果および考察

3.1 把握精度に関する実験結果 テーパ角 $T_a = 0^\circ$ の生づめを使用して種々の把握力で試験棒を把握したときの、把握精度の測定例を図 3 に示す。旋盤主軸を原点にとり、把握された試験棒の中心位置（偏心）を生づめ位置に対してプロットした。図より、試験棒が特定の方向に偏って把握されていないこと、各把握力での偏心量にはかなりばらつきがみられることが、明らかである。

そこで、生づめのテーパ角と把握力がチャックの把握精度に及ぼす影響を明らかにするため、各種条件での偏心の平均値 $Av.$ と標準偏差 $S.D.$ を求め、図 4 に示した。図より、テーパ角 $T_a = 0^\circ$ の生づめを使用したとき、かなり高い把握精度が得られた。また、テーパ角が大きいほど、把握精度が低下する。いずれのテーパ角においても、把握力による明らかな影響はみられな

い。なお、本実験で得られた偏心の値は、JIS⁽⁶⁾ に規定されている生づめスクロールチャックの最大振れ 50 μm （偏心 25 μm ）に比べて、いずれも小さな値となっている。

3.2 曲げ剛性の測定例 曲げ荷重 W と工作物先端のたわみ y の関係の測定例を図 5 に示す。使用したテーパ角は $T_a = 0.228^\circ$ であり、つめ (J1) が曲げ荷重の作用点と反対側にある、つめありのときの結果で

図 2 チャック-工作物系の曲げ剛性測定装置

図 3 把握精度の測定例 ($T_a = 0^\circ$)

図 4 把握精度に及ぼすテーパ角の影響

ある。図の左側の測定例は把握力 $P=4 \text{ kN/Jaw}$ のときの、右側の測定例は $P=8 \text{ kN/Jaw}$ のときの結果である。把握力が小さい左側の測定例の場合、曲げ荷重 W の増加とともにたわみ y の増加率が大きくなっている。これは、生づめにより把握された工作物が完全な片持ばりの状態にあるのではなく、曲げ荷重が作用し工作物がたわんだときに、生づめと工作物の接触面において生づめに対して工作物がわずかに滑りうる状態にあること、および工作物の把握部がわずかに傾くためと考えられる。一方、除荷時には突き出し部の弾性変形および把握部の傾きが減少し、ほぼ平行な直線に沿ってたわみが回復している。しかし、 $W=0$ に達してもたわみが完全に回復せず、残留たわみ(図中 y_s)がみられる。この残留たわみ y_s が、最大負荷に対する生づめ接触面での工作物の滑りであると考えられる。このようにして負荷時と除荷時においてたわみの経路が異なることになる。一方、把握力が大きい右側の測定例の場合、負荷時の滑りや残留たわみがかなり小さくなっている。そこで本実験では、曲げ荷重の影響がほとんどない除荷時のたわみ曲線の傾きから求めた曲げ剛性をチャック-工作物系の曲げ剛性 K とした。

図5の負荷時において、原点を基準とした曲げ荷重とたわみの比として求めた曲げ剛性を図6に示す。図には、除荷時のたわみ曲線の傾きから求めた曲げ剛性も太い実線によって併記してある。いずれの把握力においても、曲げ荷重の増加に伴って曲げ剛性が低下している。これは、チャックの把握能力が切削抵抗によって変化することを意味しており、工作物の寸法精度や表面仕上げ精度の観点からも重要な問題である。

そこで、この曲げ剛性の変動に対する生づめテーパ角の影響について調べるため、最大曲げ荷重 490 N の範囲内における曲げ剛性の最大値 $K_{\max}$ と最小値 $K_{\min}$ の差 ΔK を求めた。ただし、曲げ荷重の増加に伴って曲げ剛性が低下するとき ΔK を負の値とし、逆に曲げ剛性が増加するとき ΔK を正の値と定義した。この ΔK の絶対値が小さいほど、曲げ荷重の変化に対する曲げ剛性の変動が少なく、寸法精度などの点からも望ましい。以上に述べた除荷時の曲げ剛性 K と負荷時の曲げ剛性の変動量 ΔK を用いて、テーパ角が異なる生づめの把握能力を比較検討した。

3.3 曲げ剛性に対するテーパ角の効果 図7と8は、曲げ剛性 K に及ぼすテーパ角 T_a と把握力 P の影響を示している。図7はつめありのときの、図8はつめなしのときの曲げ剛性の結果を示す。図中の各プロット点は、三つのつめに対する曲げ試験から求められた曲げ剛性の平均値を表している。ただし、各つ

めでの曲げ剛性のばらつきが $0.2 \text{ N}/\mu\text{m}$ 以上となるときには、曲げ剛性のばらつきの範囲も図示した。両図において、テーパ角 $T_a=0^\circ$ のときには、把握力 P が大きいほど曲げ剛性が小さい。これは、把握力の増加とともに生づめの根元側での把握圧力が高くなるものの、先端側では生づめが工作物から離れる、いわゆる生づめの先開き現象に起因している⁽⁷⁾。テーパ角 T_a が大きくなるといずれの把握力においても曲げ剛性は増加する。把握力が最も小さい $P=4 \text{ kN/Jaw}$ の場合、テーパ角 $T_a=0.05^\circ$ 付近で曲げ剛性 K が最大となっている。把握力が最も大きい $P=10 \text{ kN/Jaw}$ の場合、 $T_a=0.2^\circ$ 付近で曲げ剛性 K が最大となっている。この最大曲げ剛性の値は、把握力に比例して大きくなっている。このように把握部がテーパとなっている生づ

図5 曲げ荷重と工作物先端のたわみ

図6 負荷時の曲げ剛性の変動

めを使用した場合、曲げ剛性はテーパ角と把握力の大きさに密接に関連していることが明らかになった。したがって、使用したテーパ角に対応した適切な把握力を選択すべきである。また、テーパ角 $T_a=0.228^\circ$ における曲げ剛性と把握力の関係は、 $T_a=0^\circ$ のときとは逆の関係となっている。図7と8を比較すると、つめ位置と曲げ荷重の作用方向に関連した曲げ剛性の方向依存性も認められる。しかし、この影響はテーパ角が曲げ剛性に及ぼす影響に比べてかなり小さい。

図6のようにして求めた曲げ剛性の変動量 ΔK を図9に示す。図はつめありのときの結果である。各つめに対する ΔK の平均値を示したが、 ΔK の各つめにおけるばらつきが $0.2 \text{ N}/\mu\text{m}$ 以上のときには、図7、8と同様ばらつきの範囲も示した。把握力が小さいとき、とくに $P=4 \text{ kN/Jaw}$ のとき、曲げ荷重の増加に伴って負荷時の曲げ剛性がかなり低下している。また、テーパ角が大きくなると、曲げ剛性の低下傾向が増すとともに、そのばらつきの程度も大きくなっている。しかし、把握力が大きい $P=8, 10 \text{ kN/Jaw}$ の場合、 $T_a=0^\circ$ を除いて曲げ剛性が低下するものの、その低下の程度は図7と8に示した除荷時の曲げ剛性 K の大きさに比べて非常に小さい。したがって、把握力が大きいときには、曲げ荷重による曲げ剛性の変動は実用上無視しうるものとなる。

3・4 生づめ部の工作物把握状態からの検討 図7～9で示された種々のテーパ角と把握力におけるチャック-工作物系の曲げ剛性や曲げ剛性の変動は、生づめの工作物把握状態と密接に関係していると考えられる。そこで、感圧紙を用いて生づめの工作物把握状態を調べた。直径 $D=40 \text{ mm}$ の工作物を感圧紙の厚さ分 (0.18 mm) だけ細くして、把握圧力分布のようすを観察した。図10はテーパ角 $T_a=0.076^\circ$ のときの、図11は $T_a=0.228^\circ$ のときの観察結果である。図示の状態において、感圧紙の左方向は生づめの根元側、右方向は先端側である。濃淡の濃い場所は、把握圧力が高いことを示している。両図ともに、生づめの円周方向での把握圧力分布は様でない。これは、把握力による感圧紙自身のわずかな圧縮変形のため、円周方向での生づめと工作物のすきまが一定にならなかったためと考えられる。この点を考慮しながら、工作物軸方向での把握状態を観察する。図10から、把握力が 4 kN/Jaw と低いときには、工作物軸方向に沿ってほぼ同程度の圧力発生が認められる。しかし、把握力が $6, 8, 10 \text{ kN/Jaw}$ と増加すると、根元側の把握圧力はかなり高くなるものの、先端側の把握圧力はほとんど変わっていないことがわかる。一方、本実験で使用したテーパ

図7 曲げ剛性に及ぼすテーパ角の影響 (つめあり)

図8 曲げ剛性に及ぼすテーパ角の影響 (つめなし)

図9 曲げ剛性の変動 (つめあり)

角が最も大きい図 11 の場合、把握力が小さいとき生づめの先端部だけが工作物と接触し、根元側は工作物とまったく接触していない。把握力が増加するにつれて、先端側での把握圧力が増加するとともに、根元側でもかなり高い把握圧力が発生していることがわかる。

ここで、生づめの工作物把握状態に関する結果をもとに、図 7～9 に示した曲げ剛性 K とその変動量 ΔK に及ぼすテーパ角と把握力の影響について考察する。テーパ角が小さいとき ($T_a=0^\circ$)、把握力が増加すると、生づめの先開きが大きくなり、曲げ剛性が低下する。一方、テーパ角が大きいとき ($T_a=0.228^\circ$)、小さな把握力で工作物を把握すると、生づめ先端部だけが工作物と接触するので、工作物は傾きやすくなる。このため、曲げ剛性 K が低下するとともに、曲げ剛性の変動量 ΔK も大きくなる。しかし、把握力が増加すると、把握部の全域が工作物を堅固に把握するようになるため、曲げ剛性がかなり高くなる。したがって、把握力との関連で定まる生づめの先開き量を補正するような逆こう配のテーパ角をもつ生づめを使用すれば、把握部全域がほぼ均一に工作物を把握するので、曲げ剛性が高くなる。

なお、生づめの先開きには、生づめ自身の変形分の他に、生づめとマスタージョーの接合部での変形、クロスキー部での変形なども影響している。また、図 4 で示したテーパ角の増加に伴う把握精度の低下は、それぞれの生づめの変形などが一様ではなく、工作物が傾きやすくなったためと考えられる。これらも加工の高精度化に対して重要な事項であり、今後詳しく検討したい。

3.5 切削安定性に関する実験結果 2.4 節で述べたような方法で工作物を切削したときのびびり振動の発生状態を明らかにするために、切削の進行に伴って変化する工作物の表面粗さを測定した。表面粗さ ($R_{\max}$) の測定は、工作物軸方向で行った。把握力 $P=10 \text{ kN/Jaw}$ と、種々のテーパ角の生づめを使用した

ときの測定例を図 12 に示す。図より例えばテーパ角 $T_a=0^\circ$ の場合、生づめ前端面(原点)から測定した切削位置が 115 mm 付近より長くなると、表面粗さの値が急増していることがわかる。また、この切削位置は、工作物表面の観察から測定されたびびりマークの発生位置とよく一致している。そこで、図 12 のように工作物の表面粗さの値が急激に増加する切削位置をびびり振動発生限界長さと定義して、チャックの切削性能を評価した。

びびり振動発生限界長さに及ぼすテーパ角と把握力の影響を図 13 に示す。テーパ角 $T_a=0.152^\circ$ の生づめを使用したとき、把握力が 8 kN/Jaw 以下では工作物の突き出し長さ 200 mm まで切削しても、顕著なびびり振動の発生は認められなかった。図より、 $T_a=0^\circ$ の生づめでは、把握力が小さいほどびびり振動の発生限界長さが長い。テーパ角が大きくなると、びびり振動発生限界長さが長くなり、切削安定性が向上していることがわかる。 $T_a=0.228^\circ$ の生づめでは、切削安定性が再び低下するとともに、把握力が小さいほどびびり振動発生限界長さも短くなっている。これらの切削安定性に対するテーパ角と把握力の影響は、図 7, 8 に示した曲げ剛性に対するそれらの影響と定性的に一致している。もちろん、びびり振動の発生限界が系の曲げ剛性だけで決定されないことは明白である⁽⁹⁾。しかし、図 13 にみられるように生づめの把握部をテーパ状に

図 11 感圧紙を用いた把握圧力分布 ($T_a=0.228^\circ$)

図 10 感圧紙を用いた把握圧力分布 ($T_a=0.076^\circ$)

図 12 工作物の表面粗さ

図 13 切削安定性に及ぼすテーパ角の影響

することによって、切削安定性をかなり高めることができた。したがって、把握部をテーパ状にした生づめを使用することは、びびり振動防止の観点からもかなり有効である。ただし、図 4 に示したテーパ角と工作物の把握精度に関する実験結果から明らかなように、一次加工された工作物を再把握して加工するようなときには、工作物の把握精度が低下することに十分留意すべきである。また、本実験で使用した最大把握力と生づめの把握面積より求められる生づめ把握部の平均接触圧力は生づめの降伏応力に比較してかなり低いので、繰返し把握に伴う生づめ把握部の表面硬度の変化がチャックの把握性能に及ぼす影響は、小さいものと考えられる。しかしながら、生づめの降伏応力に匹敵するような大きな接触圧力が繰返し作用する場合には、生づめ把握部の表面硬度の変化、テーパ部の摩耗と変形などの影響についても考慮しなければならない。

4. 結 論

NC 旋盤に広く用いられているくさび式パワーチャ

ックの把握性能を改善するため、把握部がテーパとなっている生づめを使用して、チャック-工作物系での把握精度試験、曲げ試験、切削試験を行った。以下に得られた結果を示す。

(1) テーパ角 0° の生づめを使用したとき、かなり高い把握精度が得られる。しかし、テーパ角が大きくなるほど、把握精度が低下する。いずれのテーパ角においても、把握力による明らかな影響はみられない。

(2) 生づめ把握部をテーパ状にすることにより、曲げ剛性をかなり改善することができる。テーパ角に対応した適切な把握力を選択すれば、例えば本実験で使用した 0.152° のテーパ角の生づめに対しては 8 kN/Jaw の把握力を選択すれば、最も大きな曲げ剛性が得られる。

(3) びびり振動発生限界長さから得られた切削安定性と静的な曲げ試験から得られた曲げ剛性とは、定性的にほぼ類似の傾向を示した。したがって、テーパ状にした生づめ把握部によって工作物を把握する方法は、実用上有効である。ただし、一次加工された工作物を再把握するようなときには、把握精度の低下に留意すべきである。

おわりに、本実験にご協力いただいた岐阜大学教育学部卒業生 若山有里加氏に感謝の意を表す。

文 献

- (1) Pahlitzsch, G. and Hellwig, W., *Proc. 8th Int. MTDR Conf.*, (1967), 97.
- (2) 中野, 精密機械, 44-11(1978), 1299.
- (3) 土井・ほか 2 名, 機論, 49-443, C(1983), 1153.
- (4) 門脇, 機論, 49-441, C(1983), 827.
- (5) Ivashchenko, I. A., *Mach. Tooling*, 32-1(1961), 31.
- (6) Thornley, R. H. and Wilson, B., *Proc. Eng.*, 51-3 (1972), 87.
- (7) 江馬・丸井, 機論, 57-539, C(1991), 300.
- (8) 日本規格協会, JIS B 6005, (1978).
- (9) 例えば, 上野, 工作機械の剛性と加工精度に関する研究, 神戸大学学位論文, (1983).