

金型の自動研磨のための諸因子
に関する基礎的研究

2000年9月

三木 一 隆

①

金型の自動研磨のための諸因子 に関する基礎的研究

2000年9月

三木 一 隆

目 次

第1章 緒 論	1
1.1 研究の目的	1
1.2 論文の構成と要旨	4
参考文献	5
第2章 金型製造の現状	7
2.1 はじめに	7
2.2 金型産業の現状	8
2.2.1 金型の生産実態	8
2.2.2 金型業界の状況	12
2.2.3 金型の世界市場における日本	14
2.3 金型製作の概要	16
2.4 金型研磨の現状と課題	16
2.5 金型研磨の自動化	19
2.6 小括	22
参考文献	22
第3章 自動研磨による研磨面特性と破壊強度	25
3.1 はじめに	25
3.2 実験方法	26
3.2.1 供試材と試験片	27
3.2.2 ポリシング加工条件	29
3.2.3 曲げ試験方法	31
3.2.4 表面残留応力測定	33
3.3 実験結果及び考察	34
3.3.1 ポリシング加工面の状態	34

3.3.2	表面残留応力	39
3.3.3	曲げ破壊強度	40
3.3.4	破壊形態	41
3.3.5	考察	43
3.4	小括	44
	参考文献	45
第4章 砥粒流動加工による研磨面特性と破壊強度		47
4.1	はじめに	47
4.2	実験方法	47
4.2.1	供試材と試験片	47
4.2.2	研磨加工条件	49
4.2.3	曲げ試験方法	50
4.2.4	表面残留応力測定	50
4.3	実験結果及び考察	51
4.3.1	研磨加工面の状態	51
4.3.2	表面残留応力	55
4.3.3	曲げ破壊強度	56
4.3.4	破壊形態	57
4.3.5	考察	59
4.4	小括	61
	参考文献	62
第5章 非接触センサによる形状認識		63
5.1	はじめに	63
5.2	センサの種類	63
5.3	センサの特性と実験方法	65
5.4	段差位置の認識法	68
5.5	小幅凸形試料の形状認識	72

5.5.1	小幅凸形試料の高さ測定	72
5.5.2	高さの解析	75
5.5.3	凸幅の解析	80
5.5.4	凸幅を用いた高さの補正	85
5.5.5	三角解析との比較	86
5.5.6	切削実験による検証	88
5.6	山形試料の形状認識	90
5.6.1	傾斜面の測定	90
5.6.2	頂点部の高さ測定	91
5.6.3	高さの解析	94
5.6.4	頂点位置の解析	97
5.6.5	頂点高さの補正	99
5.6.6	切削実験による検証	101
5.7	その他の不連続面の認識	104
5.8	CCD 受光素子タイプのレーザセンサ	105
5.9	小括	107
	参考文献	108
第 6 章 自由曲面のならい制御システム		111
6.1	はじめに	111
6.2	カム機構総論	113
6.2.1	ベクトルによる機構解析法	113
	(a) ベクトルの表示法	113
	(b) ベクトル方程式	114
6.2.2	カム設計	117
	(a) 円端直動従節板カム	117
	(b) 円端揺動従節板カム	119
6.3	不動点カム機構の設計	120
6.3.1	不動点カム機構の解析	120

6.3.2	直動従節カムの設計法	123
6.3.3	揺動従節カムの設計法	126
6.3.4	カムの加工法	127
6.3.5	圧力角の計算	128
6.4	システムの設計と製作	130
6.4.1	システム構成	130
6.4.2	位置決め用ロボットの仕様	133
6.4.3	傾斜軸モータの仕様	134
6.4.4	研磨工具とその駆動	134
6.4.5	センシングの方法	135
6.4.6	剛性の測定	136
6.5	ならい制御	138
6.5.1	形状認識のフロー	138
6.5.2	傾斜軸の追従性の測定	138
6.5.3	研磨加工のフロー	141
6.6	研磨加工実験	142
6.7	小括	145
	参考文献	146
第7章	結 論	147
	発表論文等	152
	謝 辞	154

第 1 章

緒 論

第1章 緒 論

1.1 研究の目的

われわれは大量に作り出された工業製品を使い、その恩恵のもとで便利な生活をおくっている。従来の生産活動は、その時代の生活水準をより便利にすることを追求し、そのことが科学的な解明や技術的な進歩を促して次々と多様な製品を生み出してきた。その結果、われわれの周りには家庭電化製品、パソコン、自動車、食品、日用品などの大量生産品があふれ、これらは現在の生活を支える上で不可欠なものとなっている。しかし、一方では工業製品を大量生産、大量消費することによるさまざまな歪が生じつつあり、最近はいくつかの予期せぬ細菌類や化学物質および廃棄物の問題が明らかになり、これらがわれわれをむしばみ始めている事実も否定できない。このような状況から、現在では「便利さからやさしさへ」、「自然との共存」といった考え方が大きな流れになりつつある。これらの認識変化をうけ、工業的な生産活動はその形態を再考する必要に迫られており重大な岐路にあるといえる。しかし、現在のさまざまな課題を克服し将来の生活を維持していくことを可能にするのは、科学技術や工業技術の進歩以外にないのである。工業活動の停滞、減速による極端な生活レベルの低下が社会に受け入れられないことは明らかであるから、今後のわれわれの生活はさまざまな問題を解決しながら「物」を大量に消費していくことに大きな変わりはないであろう。

大量生産を下支えしている最も重要な道具の一つに金型がある。金型とは金属に目的とする形状を作り、その形状を使って同じ形状を他の物質に転写することにより大量の製品を作ることができる主として金属材料を用いた型の総称である⁽¹⁾。すなわち、金型による生産方式は、可塑性材料に外力をくわえて金型内で変形させることにより品質の安定した製品を得ることができ、加工時間が短く、切削加工にみられるような加工屑をほとんど出さないという特長をもっている。金型は、それによって加工される材料や成形方法により多くの種類があり多様な産業に用いられているが、共通していえることは、金型そのものは受注生産品のいわゆる「一品物」であり、それぞれの種類毎に高度な専門性が要求される工業製品である。

金型業界は、90年代前半に各産業の NIES 諸国への工場移転などの影響で空洞化が懸念されたが、日本の技術力や製品の緻密さに追いつくことは現状では不可能であることがその後の経験から明らかになったため、依然として国内金型メーカーの優位性、必要

性は大きい。しかし、現在の日本経済はバブル崩壊後の後遺症が消えず不況のどん底にある。こうした状況では各産業の金型ユーザーは内製化比率を高める傾向があり、さらに金型メーカーに対する納期短縮やコスト低減の要求が厳しくなっている。このため金型製作における高速化、高精度化、自動化の必要性はさらに大きくなり、形状の複雑化、微細化にも対応せざるを得ない状況になっている。各金型メーカーは、金型製作のもつ高度な技術的専門性により一種類の単品受注生産形態をとっており、たとえばパンチ金型とモールド金型を同じ企業内や工場内で製作することはほとんどない。業界内では金型の種類や大きさによって分業化が進み、それぞれが特定な金型を得意として製作しているため、大量生産型の設備投資は必要なく、各メーカーの事業規模は比較的小さいままになっている。このような金型業界の体質が生産の自動化を遅らせている一因になっていることは否定できない。

金型の製作は、一般的に工作機械により形状創成加工された後、表面の最終仕上げ加工が行われる。近年の工作機械は大部分がNC化され、複雑な金型表面形状も短時間で作り出すことができるようになった。切削機械の精度や剛性は著しく向上し、以前では成し得なかった高硬度金型材の高速・高精度切削が可能になり、放電加工機では加工性能を上げるための加工液の開発や加工電源の改良が行われている。一方、金型の仕上げにおける研磨加工は、成形品の美観、加工変質層の除去、離型性やしぼり成形性の向上などの目的で行われ、形状創成加工による形状精度をくずさないように表面粗さなどの改善を行う。この作業は研磨工具を加工面に低圧で押し付けて移動するだけであるから一見単純であるかのように見えるが、繊細な部分が多く技術的なノウハウ、熟練が必要とされており、自動化がほとんど進展せず人手に頼っているのが現状である。この手作業による仕上げ加工は金型製造工程の30%を占める⁽²⁾とされ、この工程を自動化することが現在の大きな課題となっている。

金型研磨を自動化するにあたっての課題は三つに大別される。

第一は、自動研磨されたときの金型表面の特性や強度を調査・検討することである。現在行われている手作業では、金型の前加工面の状態が熟練工の経験や勘によって判定され、それに適した研磨条件が設定されている。この中には研磨後の表面特性、強度維持、寿命および形状の経年変化に至るまでの判断が含まれており、その技能の優劣で金型の品質が大きく左右される。これはハンドツールを含めた比較的簡単な自動研磨においても同様であり、それぞれのノウハウが開示されることは非常に少なく、研磨面特性

や強度についても明らかになりにくい。したがってこれらを調べることは、自動研磨を行うときの加工条件の最適化とそれによる金型表面の品質維持にとって極めて重要である。金型形状は外面部と内面部に大別され、研磨の省力化はこれら両面について行われるべきであるから、それぞれの形状に対応した自動研磨を行って、その研磨面特性を調べる必要がある。

第二は、金型の被研磨面の形状認識法を確立することである。金型形状の認識法は、CAD設計された金型形状データをCAM機能で研磨装置に適合したNCデータに変換して利用するものと、形状創成加工を終了した金型の表面形状を何らかの方法で研磨装置に教示するものとに大別される。このうち前者は、三次元CADが最近低価格になってきておりようやく金型メーカーにも普及しはじめてきたが、CAD技術者の養成はハード面の発達に比べかなり遅れているし、CAMの部分は各機械に合った専用のソフトウェアになるため一般化しているとはいえない。また生産工場においてはCAD側とCAM側のデータが整合性をもったシステムが必要⁽³⁾であるが、これを構築するには技術的にも、設備規模でも投資しにくいのが現実である。次に後者では、作業者が直接教示を行う方式の研磨加工機がいくつか実用段階にいたっている。しかし、これらの機械が加工できる形状はごく単純なものに限られており、また教示を行うための作業者の時間的負担も少なくない。したがって、自動研磨により研磨工程の省力化を図るには、何らかの方法でこのセンシング作業を自動化する必要があるといえる。

第三は、研磨工具が被研磨面に適合した姿勢を自動的にとることができる制御システムを構築することである。汎用的な研磨加工機は、金型の複雑な表面形状にならうことができる磨きのヘッドを備えていなければならないが、それには少なくとも五軸制御が必要になるので、マシニングセンタやロボットの使用が不可欠となる。最近ではパラレルメカニズム⁽⁴⁾とよばれる高速、高剛性のマニピュレータが開発され実用例もみられるようになった。しかし、いずれの機械も装置、ソフトウェアとも複雑かつ高額なものである。実際に金型メーカーが導入できる研磨装置は、投資の負担が少なく、フレキシビリティが高く、ソフトウェアを含めたメンテナンスの容易さを備えている必要がある。

本研究は、金型の自動研磨を実現するにあたって解決すべき上記諸因子を、それぞれについて検証した。すなわち、金型外面部を想定してマシニングセンタによる自動ポリシング加工を行い、また金型内面部については、近年内面研磨での利用が増加しその有効性が認識されている砥粒流動加工により自動研磨加工を行って、その研磨面特性や強

度を調べた。供試材は、精密プレス金型を中心とした金型材に多用され、今後も利用増加が確実な WC-Co 超硬合金とした。また、教示の作業が自動的に行われ、かつ研磨工具が金型形状にならって正確に動作する装置の開発を目的として、非接触センサによる金型形状の認識法の確立と、研磨加工用工具ヘッドの試作を行い、実用につながるシステムの構築を試みた。

1.2 論文の構成と要旨

本論文は7章で構成され、第1章は緒論、第7章は結論である。

第2章では、本研究の目的が自動化による金型の研磨法であることから、金型製造の現状と問題点について述べ、今後行うべき研究の方向性と課題について明らかにしている。すなわち、金型製作の現状とその背景にある金型業界の特徴、金型の多様性とそれによる問題点、金型製作工程における研磨加工工程の位置付けとその自動化の現状について述べ、金型の研磨を自動化する上で求められている技術をこれまでの研究から明らかにし、今後の研究動向を展望することにより本研究の位置付けを明確にする。

第3章は、金型の表面性状がその品質や強度および寿命に大きな影響を及ぼすことから、自動研磨を行ったときの研磨面特性と破壊強度について調べる。すなわち、近年精密プレス金型などに超微粒子タイプの WC-Co 超硬合金が多用されていることから、この供試材に自動ポリッシング加工を施して3点曲げ試験を行い、その研磨面特性と破壊強度について検討を行う。

第4章は、金型内面の自動研磨も省力化の重要な要素であり、外面と同様に特性評価が必要であるから、最近内面の自動研磨に用いられその有効性が認められつつある砥粒流動加工を WC-Co 超硬合金の供試材に施し、3点曲げ試験を行ってその研磨面特性と破壊強度について調査する。

第5章では、非接触センサによる金型形状の認識法について述べる。すなわち、半導体レーザセンサを用いて、形状創成加工された金型表面を非接触で測定し、自動研磨を行うための形状データを取得する方法について検討する。とくに、本章では連続自由曲面に比べ認識が困難とされるエッジ部の位置認識法について明らかにし、比較的精度の劣る安価なレーザセンサでもその保証精度以上の正確な位置認識が可能となる解析法を提案する。

第6章では、研磨工具ヘッドの姿勢が金型の連続自由曲面にならうことができる制御

システムについて述べる。すなわち、工具ヘッドに備えた非接触センサにより形状を測定し、そのデータに基づいてこのヘッドの姿勢を常に被加工面に対して一定に保つことができるシステムの構築を行う。研磨工具装置は実用上十分な剛性が得られるように、不動点カム機構と名付けた動作機構を独自に考案している。この採用により研磨加工点への位置決め制御と工具ヘッドの姿勢制御のプログラミングが分離可能になり、五軸マシニングセンタやパラレルメカニズムなどに比べソフトウェア側の負担が著しく軽減され、その結果比較的安価な研磨システムの構築が可能になると考えられる。このシステムを用いてならい制御実験と研磨加工実験を行い、有効性を確認している。

第7章は結論で、本研究で得られた主要な結果について総括し、今後の展望について考察している。

参考文献

- (1) 武藤一夫，高松英次：金型設計・加工技術，日刊工業新聞社，(1997)，5.
- (2) 斎藤勝政：金型仕上げ加工における新しい動向，機械と工具，40，9(1996)，10-15.
- (3) 武藤一夫：CAMシステムの現状と課題，機械と工具，41，2(1997)，10-20.
- (4) 例えば，フランソワ・ピエロ，内山勝，ほか2名：6自由度パラレルロボットの
新設計，機械の研究，44，2(1992)，281-288.

第2章

金型製造の現状

第2章 金型製造の現状

2.1 はじめに

機械部品の形状創成法は、除去加工、付加加工、変形加工に大別される⁽¹⁾。

除去加工は、材料から製品形状以外の不要部分を削り取る加工方法で、切削加工、研削加工、放電加工などがある。

付加加工は、溶接や溶射などの接合加工とメッキやコーティングなどの表面処理をいう。

変形加工は、材料の変形または流動を利用したもので、材料を型内に充満させ型形状を反転転写させて成形する方法で、形状転写加工とも呼ばれる。固体材料ではプレス、鍛造、圧延などの塑性加工、流体材料ではプラスチックやダイカスト、粘性体材料ではガラスやゴム、粉体材料では粉末成形がありその加工形態も多様であるが、共通した特徴は均一で品質の安定した製品が得られること、加工時間が短いこと、加工屑をほとんど発生させないことなどである。

日本の金型の年間生産高は1兆～2兆円で、その規模は全製造業の0.5%程度にすぎない。これは工作機械の生産額と同程度の規模であるが、金型業界には日本を代表するような大企業はなく、一般消費者への知名度も少ない産業である。それにもかかわらず製造関係の重要な位置を占めているのは、金型がものづくりの基本となる道具であり、大量生産に欠かすことができない手段だからである。

金型の生産は各企業が独自に築き上げてきた技術、経験、勘により行われていることが多く、それぞれの情報を公開し共有化する体制が遅れているといわれる。そのためこの業界は集合体としての意識が薄く、実態の把握や将来展望を業界全体として統一しにくい面がある。すなわち、各メーカーは独自の設計方式やノウハウおよび得意分野が確立されており、それぞれのユーザーと強く結び付いている。そのため金型製品全体を標準化して生産効率を業界レベルで向上させる努力が不足している。また後述のように、金型業界は中小零細企業が多いために常に人材不足の問題をかかえており、熟練技能者の高齢化と後継者不足は深刻な状況である。

金型製造は機械工学のあらゆる分野の技術を駆使して行われ、金型は先端技術の固まりであるといえるが、それを支えるのは熟練工の微妙で精密な加工技術や組立技術である。その実態から金型業界が持っている特長や特性および問題点が発生しているものと

考えられる。

本章ではこれら業界の現状について統計的観点から検討し、研磨工程を含めた金型製作の概要や課題、自動化に向けた取り組みについて述べることによって、本研究の目的や位置付けを明らかにしていく。

2.2 金型産業の現状

2.2.1 金型の生産実態

前節で述べたように、金型産業の重要性はその生産規模ではなく、他のさまざまな産業に及ぼす影響の大きさにある。すなわち、わが国の自動車や電気製品などが国際的に大きな競争力を持っているのは、金型に代表される生産手段の技術力が優れていることが大きな要因の一つである。

日本の金型製造業は、1962年に機械工業振興臨時措置法によって金型が特定機械として指定されたときに初めて独立した産業として認知され⁽²⁾、その時点で金型の種類はプラスチック型、プレス型、ダイカスト型、ゴム型、鋳造型、鍛造型、粉末冶金型、ガラス型、窯業型の9種類に分類された。これらはモールド型とダイス型に大きく分けられるが、金型工業会ではこれに沿って図2.1⁽³⁾のように小分類している。図が示すように、金型は非常に多くの種類がありさまざまな産業に用いられていることから、これらを一つの産業としてまとめて扱うことは難しさがあり、前節で述べた業界の体質を物語っている。

次に、図2.2は金型の国内生産額の推移を示している。図において、機械統計は従業者数が20人以上の事業所の統計で毎年発表される。工業統計は同じく4人以上の事業所の統計で2年遅れて発表になる。工業統計をみると、70年代後半から生産額が著しく伸びており、金型を用いた工業製品の製造が爆発的に伸びたと考えられる。1991年の1兆9575億円の最高生産額を記録した後は、バブル崩壊により急激にその生産額が落ち込んだが、1994年を境に上昇に転じている。しかし、機械統計をみると1997年以降には再度落ち込みがみられ、金型業界にとっては予断を許さない状況であるといえる。このように、金型業界は受注生産形式のため繁閑の差が大きく、景気の波を激しく受けてしまう傾向がある。

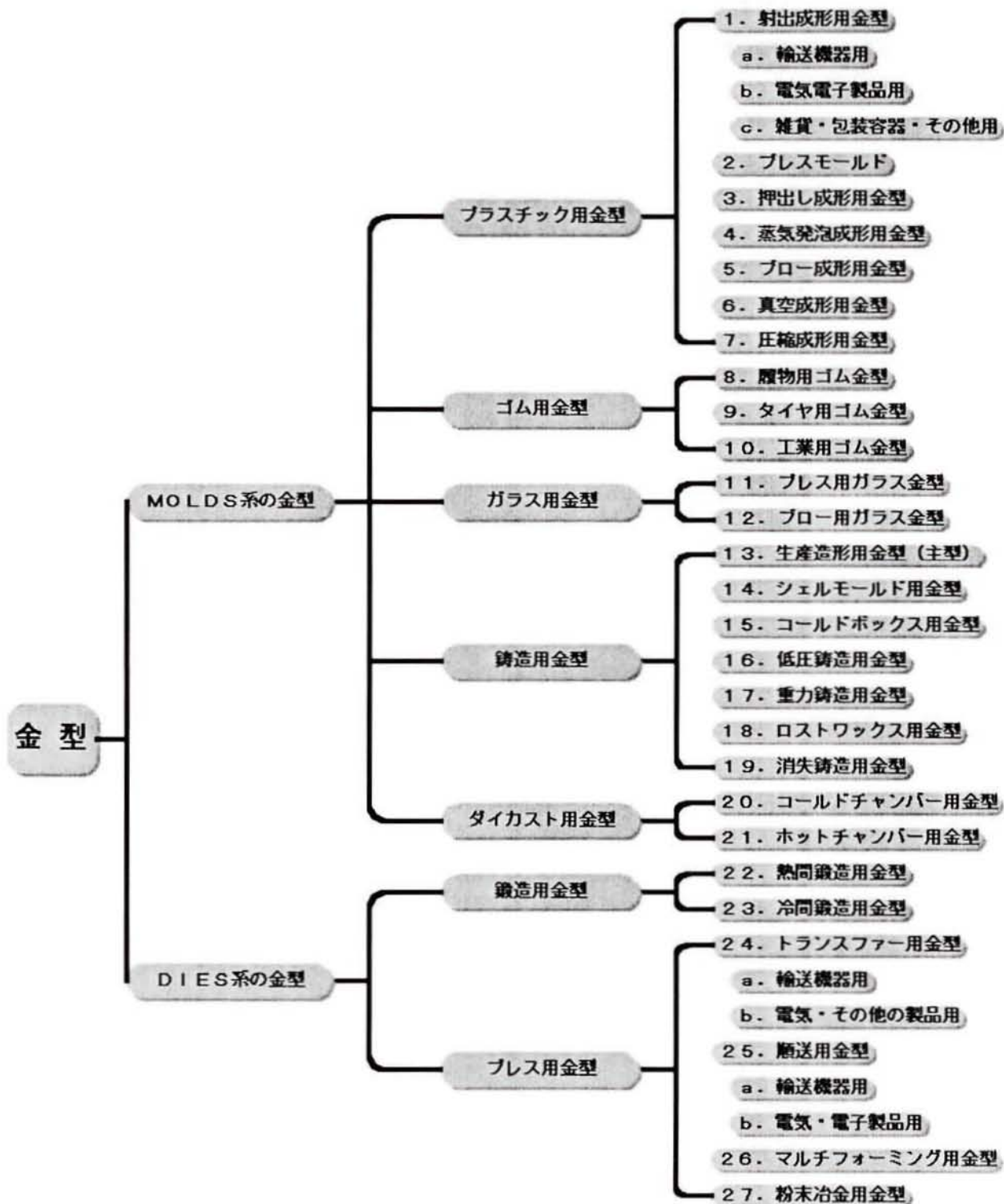


図2.1 金型の種類⁽³⁾

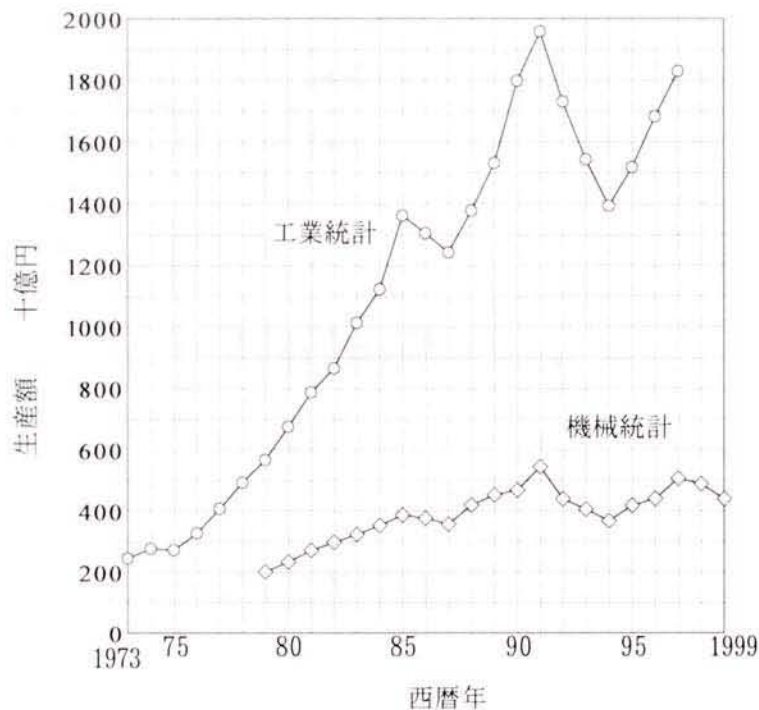


図2.2 日本の金型生産額の推移
(機械統計，工業統計による)

図 2.3 は 1999 年の型種による生産の比較である．生産額をみると，プラスチック型とプレス型が他の型に比べ圧倒的に大きくなっており，両者を合わせると全体の 80% を占めている．このことから，金型は種類の多様性はあるものの主力はプラスチック型とプレス型であり，この型を用いた製品が大量に造られていることがわかる．また生産組数をみると，ガラス型は生産額の割に生産組数が非常に多くなっているため，小物単純形状金型が多いといえる．二大主力金型のプラスチック型とプレス型を比べると，プラスチック型の生産組数はプレス型の約 1/3 になっていることから，1 組あたりの単価はプラスチック型の方が高い傾向にあることがわかる．

図 2.4 は金型生産に携わっている事業所(4人以上)とその従業者数の推移である．この図と図 2.2 とを比較すると，事業所数や従業者数は生産額の増大に比べ伸びが少なくなっている．このことから，金型製造業は需要があっても簡単に新規参入ができるような業種ではなく，既存の各事業所は従業員の増減を図りながら需要に対応していると考えられる．また，1994 年の両者の落ち込みは深刻で 10～16 年ほど逆戻りしている．この翌年には回復がみられるものの，このような大きな波が熟練技能者の離脱と技能低下を誘発するのではないかと懸念される．

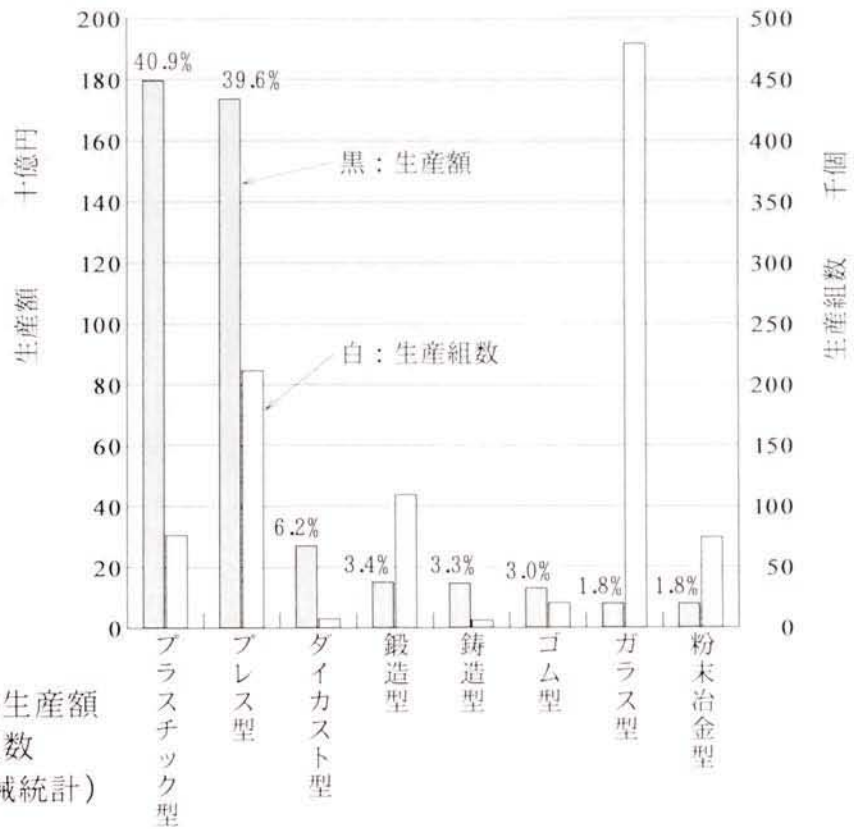


図2.3 型種別の生産額と生産組数
(1999年機械統計)

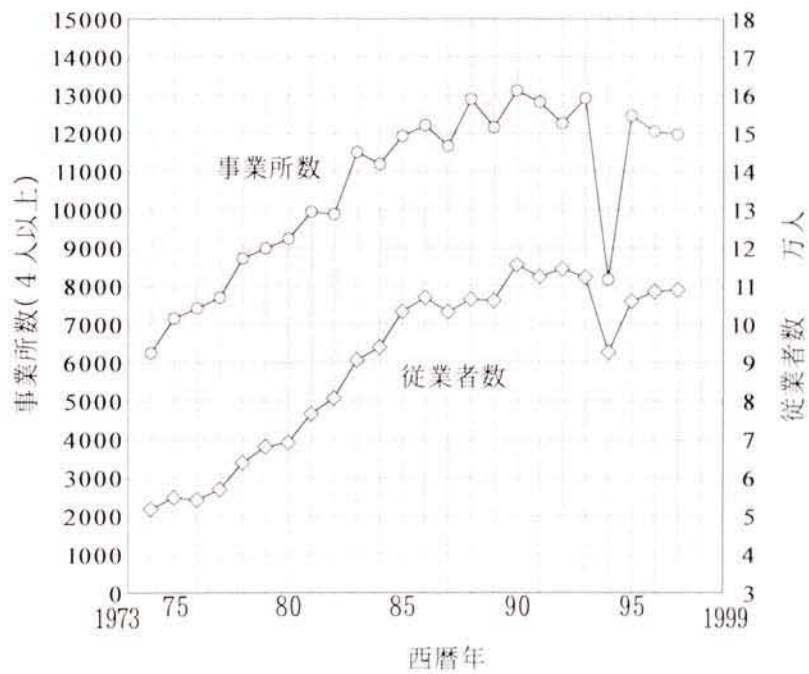


図2.4 金型生産事業所数と従業者数の推移
(工業統計による)

2.2.2 金型業界の状況

図 2.5 は 1997 年の従業員数別にみた事業所数と生産額の比率である。図より、従業員 100 名以下の小企業が全体の事業所数の 99%を超えており、それらの生産額も全体の約 80%を占めている。特に 20 人未満の事業所をみると、その数の割合は 90.4%で生

従業員数	事業所数	生産額（百万円）
4～9	9,516	428,559
10～19	1,299	297,831
20～29	596	258,019
30～49	253	185,347
50～99	213	283,174
100～199	71	202,181
200～299	11	69,631
300名以上	6	104,075
TOTAL	11,965	1,828,817

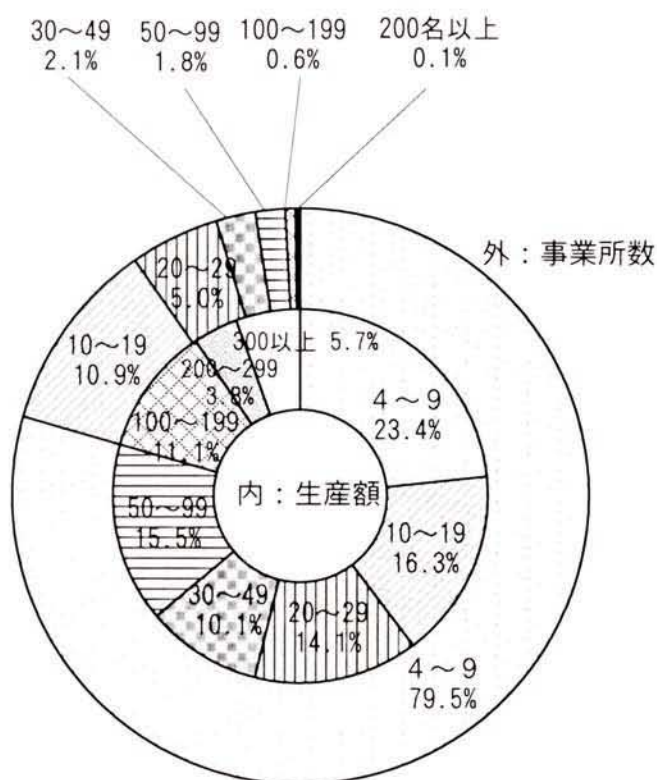


図2.5 従業員規模別事業所数と生産額
(1997年工業統計)

産額では 39.7%である。全製造業の場合では、20 人未満の事業所数割合が約 75%、生産額割合が約 11%になっていることから、金型産業は中小零細企業の構成比率が高い業種であるといえる。この理由としては、金型は多品種一品生産であるためスケールメリットがなく、生産規模が小さくなり易いので大きな設備投資がしにくい。そのため各メーカーはいろいろな種類の金型に対して製造設備を持つことができず、特定の金型やその部品に特化した技術を得意とするようになる。金型業界はこうした小さな技術集団の集合体といえる。

次に、図 2.6 は 1997 年の工業統計による都道府県別の金型生産額である。図より、金型生産額は一位の愛知県でも 15.8%であり、比較的各地域に分散していることがわかる。また図には表していないが、それぞれの地域において型種による生産量の偏り(例えばプレス型に比べ極端にプラスチック型が多い等)も大きくはない。これは、金型の主力ユーザー業種である自動車と電気製品の下請けが全国に散らばっていることと、金型がその他のさまざまな業種にも用いられていることで、中小の金型メーカーがそれらに付随して成り立っている結果であると考えられる。

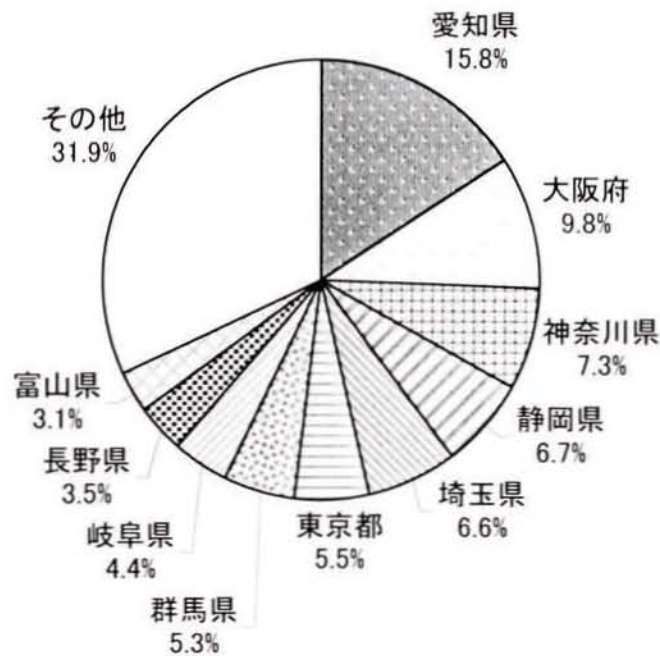


図2.6 地域別金型生産額 (1997年工業統計)

2.2.3 金型の世界市場における日本

図 2.7⁽⁴⁾は国際的な金型業者の組織である International Special Tooling Association (ISTA)に加盟している 16 カ国の 1994 年生産実績を比率で示したものである。日本の数値は工業統計よりとっている。各国の金型が含まれる産業分野はわずかず異なっており、また統計の対象となる事業規模の範囲も異なっているため、図の数値は概数を表したものであり、例えば 1990 年のアメリカの金型生産額は 1 兆 2300 億円と計算されており⁽²⁾、これから推定すると日本との差はこの数字よりはるかに小さいといえる。また、台湾やシンガポールなど ISTA に加盟していない国が相当あり、これらを含めて推計すると日本の生産額は全世界の約 1/3 になる⁽⁵⁾。しかし、日本が世界の金型生産のトップシェアを競っていることは事実である。

また、図 2.8 は金型の輸出と輸入の推移を示すものである。図より、日本は輸出が輸入よりはるかに多くなっているので金型輸出国であるといえる。日本の輸出先はアジアが約 60%を占めており、他はアメリカやヨーロッパである⁽⁶⁾。また、金型生産額（工業

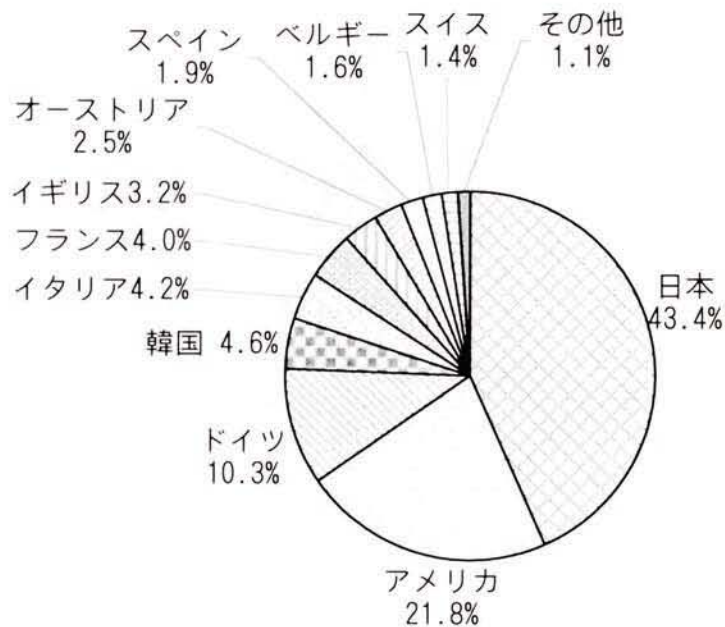


図2.7 各国の金型生産実績(1994年)⁽⁴⁾

統計)に対する輸出割合も年々増加しており、最近数年間は17%~19%程度の数値を示している。この中で、1990年~1994年までの輸出割合は急激に増加しており、自動車などのユーザー産業が海外進出した影響を受けながら、金型業界そのものは海外移転が進まない状況を表しているものと思われる。

日本の金型製造において、例えば自動車用大物プレス金型はアメリカに比べ納期が約半分、調達コストが約1/3という1988年の調査⁽⁷⁾があり、現在この分野では日本の金型メーカー三社が市場を独占してしまった。また半導体リードフレームの精密プレス金型は日本以外に造れる工場はないといわれている。このように、日本の金型はその製造技術で世界をリードしており、特に上記のように高度な技術力を必要とするものは今後も圧倒的な強さを発揮していくであろうが、精度や特殊設備をあまり必要としない一般的な金型は製造コストの競争になるため、国内のメーカーが有利とは必ずしもいえない。こういったことから、今後は海外との差別化を図るなどの取り組みが各金型メーカーに求められていくであろう。

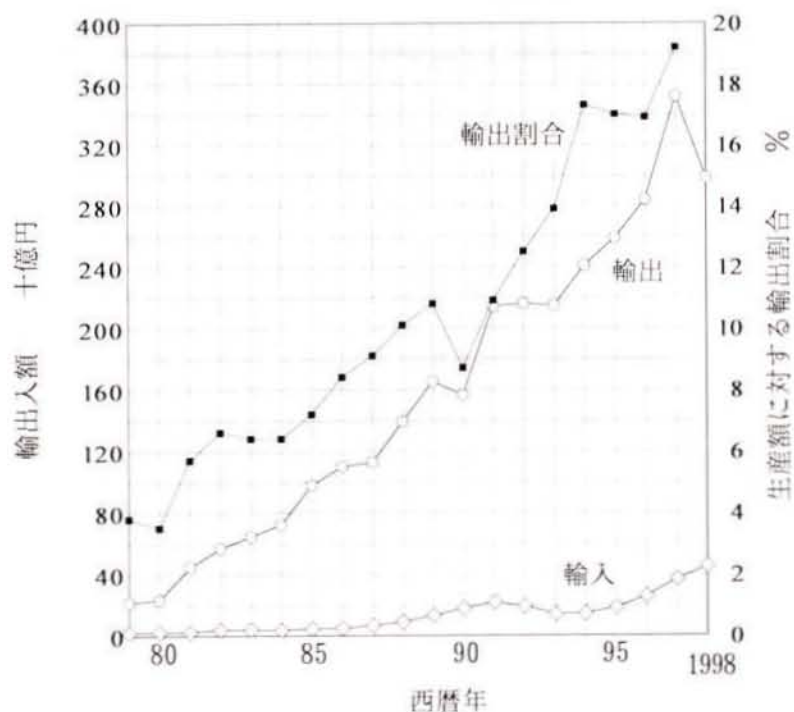


図2.8 金型輸出入の推移
(日本金型工業会による)

2.3 金型製作の概要

金型の製作工程は図 2.9 に示すように、設計、部品加工、組立・調整、検査、試し加工(試験成形)に大きく分けられる。

設計では、受注活動の一環としての見積り設計と受注後の金型設計が行われる。金型設計は、ユーザーの製品図に基づいた金型構造設計が主となるが、最近ではユーザーからの図面情報が CAD データそのもので流される例もみられるようになった。こうした場合、金型メーカーはユーザーとのデータ交換が可能な CAD システムを導入する必要があり三次元 CAD も徐々に普及しはじめている。

部品加工は大きく三工程に分けられる。型加工は工作機械を使用して金型の形状を仕上前の状態まで作り出す。この加工には切削加工、研削加工、放電加工などさまざまな加工法が用いられている。熱処理は金型に硬さ、強さ、耐磨耗性、組織安定性などを与えるために行われる。仕上げ加工は型加工において形状創成された金型表面に製品としての価値を付加するため、最終的に研削や研磨加工を施す作業である。

組立・調整は加工された金型部品を組合わせ、金型としての機能を与える作業である。金型は一般的に非常に精密で複雑であるから、この作業が最も熟練を要するといわれている。単純に部品を組上げれば金型が完成することはなく、この工程での部品相互のいわゆる「現合」作業が製品価値を左右するものとなる。したがって、金型メーカーでは、ここに熟練工を配置することが多い。

試し加工は、組み上がった金型が所定の製品を安定して成形することができるものであるかをチェックする工程である。これにより明らかとなった不具合点は、その程度によりその時点で修正されるか、前工程に戻って手直しがされる。この作業は金型が完成品となるまで、何回か繰り返されるのが普通である。

2.4 金型研磨の現状と課題

金型研磨は、形状創成された金型表面を研磨により仕上げて完成品にするための作業である。その目的は、

- ・成形品の美観確保（外観上の価値を付加）
- ・金型合わせ面精度の向上（樹脂漏れの防止）
- ・放電加工などによる加工変質層や残留応力の除去

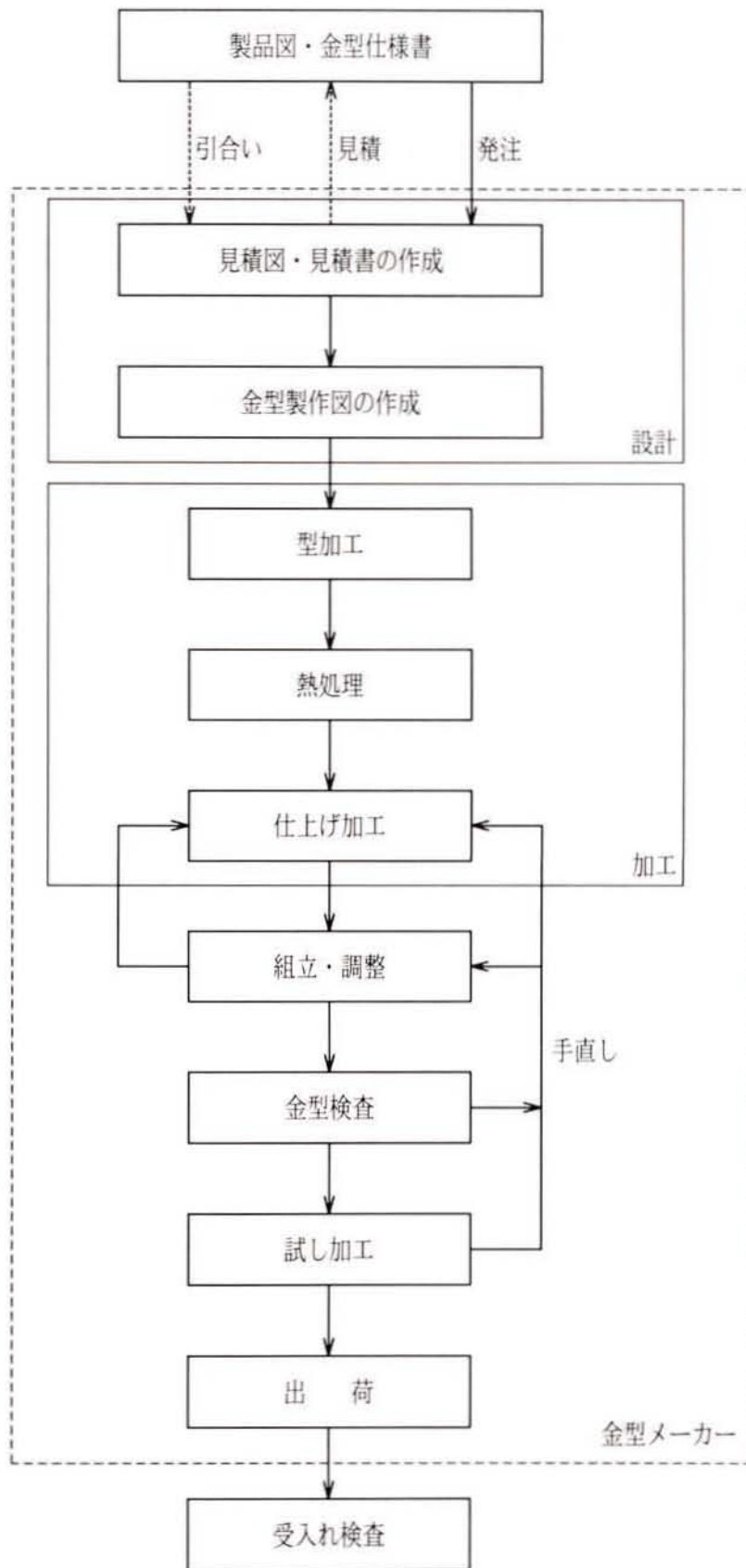


図 2.9 金型の製作工程

- ・ 離型性の向上
- ・ しぼり成形性の向上
- ・ 金属材料の型への焼付き防止
- ・ 樹脂流動性の向上（流動抵抗減少）
- ・ 腐食（さび）防止効果
- ・ 金型の強度アップ

などがあげられる。この工程を細かく分けると、平滑加工と鏡面仕上げ加工があり⁽⁸⁾、前者は前加工面のカッターマークの除去やエッジ部などの形状修正を目的に行われる。近年は NC 工作機械の高精度化により表面粗さが数 μm 程度まで加工できる機械も現れて、平滑加工をかなり省くことができるようになってきた。こういった背景から、金型研磨を鏡面仕上げ加工と解釈している場合も多い。

金型研磨は金型製造工程の約 30%⁽⁹⁾を占めるとされる。前工程の形状創成加工は、NC 工作機械の急速な発達により自動化が進展しているにもかかわらず、研磨はそのほとんどが熟練工の手作業に頼っているのが現状である。磨き作業は一見単純な反復動作のようにみえるが、実際はかなりの熟練技能が必要とされる。すなわち、

- ・ 金型の研磨面特性や強度を評価する能力(経験・勘)
- ・ 金型前加工面の材質、表面状態に合わせた研磨条件の設定能力
- ・ 金型の測定技術
- ・ 金型表面形状を損なわずに表面を均一に除去できる技能
- ・ 長時間にわたり作業が継続できる体力や根気
- ・ 各金型に適した作業工程順序の設定能力

などである。特に、研磨後の表面特性や強度は金型の寿命や経年変化に影響を及ぼすから、金型の完成時ばかりでなく経年後の状態を予知した評価が求められる。こうした熟練工は短期間で養成することが困難であり、また最近では熟練工の高齢化が進行し、一方で若者の理工系離れや現場軽視の傾向も加わり、熟練技能の伝承にも大きな危機が迫っていると見える。このような状況下では、人手を重要な部分のみに集中し、機械に置き換えることが可能な作業は自動化していくことが必要で、その早急な取り組みが求められている。

2.5 金型研磨の自動化

金型研磨を自動化するための課題は、図 2.10 に示すように大きく三つある。

第一は、研磨後の研磨面特性や材料強度について調べ、その評価に基づいた自動研磨を行うことである。これは、熟練工の経験やノウハウおよび勘などにより行われている研磨加工の条件設定を自動機でも行うための基礎的な調査である。これに関係した研究は齋藤ら^{(23)~(25)}により行われているが、手作業による研磨実験結果のデータ収集と評価法にとどまっている。自動研磨を行った後の材料評価を行うことが自動化の第一歩であり、極めて重要な研究項目といえる。研磨作業は外面研磨と内面研磨に大別されるから、この両面の自動研磨を行い、材料特性を明らかにする必要がある。表 2.1^{(10)~(22)}に自動研磨の課題に取り組んだ研究の例を示すが、ほとんどは外面研磨である。本研究では、第3章で外面研磨を想定した自動ポリッシング加工を、第4章で内面の自動研磨で多用されている砥粒流動加工を実施して、材料特性を調べている。

第二は、加工物形状の認識である。研磨は研磨工具が形状創成された金型表面上を一定の圧力を加えた状態で移動することにより行われるから、熟練工が手作業を行いながら判断している被加工物の形状をなんらかの方法で自動機に認識させる必要がある。その方法として、図 2.10 に示すようにティーチングと CAD データの利用がある。後述する実用機はほとんどが手動ティーチングである。現在自動ティーチングの研究が多方面で活発に行われているが、これについては第5章で述べる。また、CAD の現状については第1章の緒論で概要を述べた。

第三は磨き工具ヘッドの姿勢制御である。磨き工具は被加工物の形状に適した作業姿勢をとる必要があるが、金型形状は単純な平面だけではないので、加工機には位置決め用3軸以外の動作軸を装備して研磨工具の姿勢制御を行わなければならない。これらの動作軸を同時制御させるための装置は高度な機械技術と制御技術およびコストを要する。表 2.1 に示した研究は、それぞれが独自の姿勢制御法を用いているが、どれも研磨作業の特定の部分を自動化したもので万能なものはない。

実用化の例として、O K K(株)、黒田精工(株)、(株)トキワ、蔵田精密などから磨き作業を一部自動化した機械がいくつか市販されているが、全ての形状に対応できるわけではなく、使用上の制限や作業者の負担(教示の時間や磨き工具セッティングなど)も少なくない。現状ではフレキシビリティが高く、メンテナンスが比較的容易で、しかも投資の負担が小さくて中小企業に導入しやすい自動機はみられないのである。

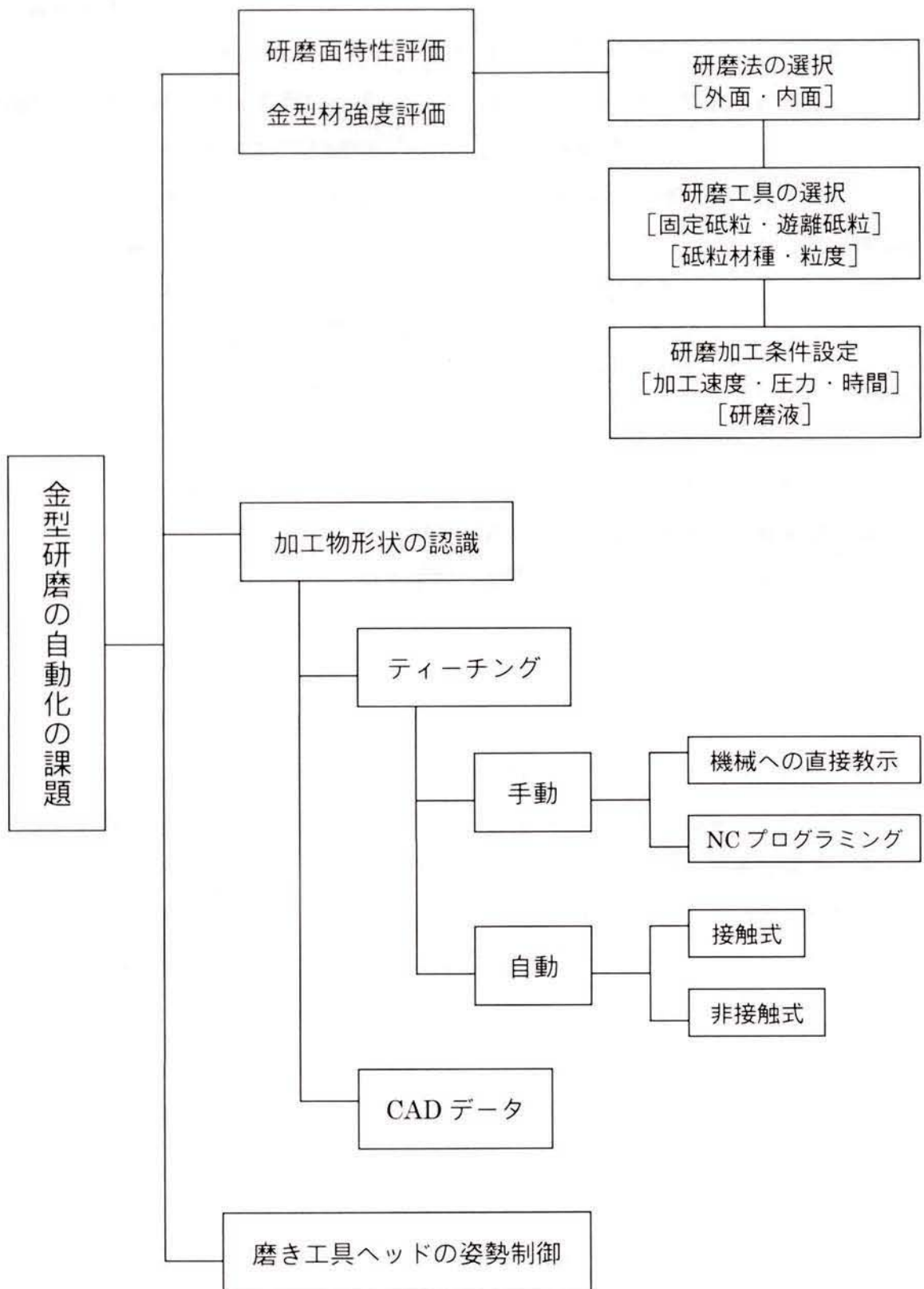


図 2.10 金型研磨の自動化の課題

表2.1 金型の自動研磨に関する研究報告^{(10)~(22)}

研究者	論文テーマ および 概要
① 宮沢 (機械技研)	曲面用研磨装置 (1984) 円弧型レールを用いた不動研磨点の姿勢制御
② 三好ら (北大)	二軸回転マイクロラインディング工具の運動機構と仕上性能(1986) 小型円板砥石の軸回転と公転を行う機構の考案
③ 国枝ら (東農大)	遊星歯車式磁力研磨工具の開発に関する研究 (1988) 自転と公転機構を備えたラッピング工具
④ 国枝ら (東農大)	磁力研磨工具を用いたロボットによる曲面の研磨 (1988) 磁力による研磨工具の一定圧制御
⑤ 檜原ら (北大)	工具先端部不動点を有する5軸曲面仕上げ工具の研究 (1991) 不動点リンク機構による研磨工具ヘッドの試作
⑥ 青山ら (慶大)	金型自動研磨ロボットシステムの開発(1991) 6軸フォースセンサの押付力検出による研磨工具姿勢制御
⑦ 鈴木ら (トヨタ)	データ駆動によるプレス金型自動仕上げロボットの開発 (1992) CAD/CAMデータによるロボット駆動
⑧ 安斎ら (理研)	5軸マシニングセンタを用いた金型材曲面の磁気研磨 (1994) 磁気研磨ヘッドと5軸制御による均一研磨の研究
⑨ 幸田ら (OKK)	金型自由曲面研磨法の研究 (1994) 定圧研磨工具の開発と熱可塑性樹脂による研磨工具
⑩ 手塚ら (信大)	センサフィードバック制御による曲面倣い制御について (1994) 不動点リンク機構による研磨工具ヘッドの試作
⑪ 矢川ら (東大)	未知表面研磨の適応受動制御(1995) 金型表面形状に自己適応する機構の研磨工具
⑫ 浅川ら (電通大)	ロボットによる磨き作業の自動化 (1997) ロボットヘッドの制御方式
⑬ 松澤ら (池上金型)	自由曲面加工法およびツールの開発 (1998) 回転中心点を避けた研磨ツールの試作研究

2.6 小括

本章は、金型産業の現状とそれがかかえる問題点を金型生産の現状から分析し、さらに金型研磨の現状と課題について説明して、本研究の目的である金型研磨の自動化に向かって取り組むべき研究課題を明らかにした。

すなわち、近年の産業構造の変化は急激であり、これに対応していくために各企業の合理化への取り組みは重要度を増している。金型業界も例外ではなく、金型ユーザーによる高精度、短納期、低コストの要求は一層強くなっている。こうした中で、金型生産工程の省力化、自動化は不可欠な条件でありその取り組みが急務であることから、本研究の必要性が大きいことを述べた。また、金型業界が持っている特性は、中小零細企業の占める割合が大きく、熟練技能を必要とする作業が多く、ユーザー産業の状況に左右されるため受注の繁閑が激しく、将来見通しが立てにくいところにある。このことから、金型メーカーが導入しやすい自動機は、構造が単純で異なった金型にも柔軟に対応できる汎用性を備え、操作性が良く、安価であることが重要であり、この開発が急務であることを述べた。また、金型の自動研磨に必要な諸因子について考察し、本研究の意義を明確にした。

参考文献

- (1) 型技術協会編：型技術便覧，日刊工業新聞社，(1990)，2.
- (2) 黒田彰一：金型の世界市場と新市場，精密工学会誌，59,7(1993)，1057-1060.
- (3) (社)日本金型工業会西部支部資料による。
- (4) 大村浩治：標準化による金型製作の高効率化，機械と工具，41,3(1997)，34-40.
- (5) 田原昭：金型統計からみた日本と海外の金型生産の現況，合成樹脂，40,8(1994)，2-6.
- (6) 西野浩介：日本の金型産業をよむ，工業調査会，(1998)，11.
- (7) (財)地球産業文化研究所：地球研ニュースレター，10,8(1998)，3-6.
- (8) 武藤一夫，高松英次：金型設計・加工技術，日刊工業新聞社，3(1997)，152.

- (9) 斎藤勝政：金型の仕上げ加工における新しい動向，機械と工具，40,9(1996)，10-15.
- (10) 宮沢伸一：曲面用研磨装置，精密機械，50,7(1984)，1097-1102.
- (11) 三好隆志，ほか2名：二軸回転マイクロライティング工具の運動機構と仕上性能，精密工学会誌，52,1(1986)，134-139.
- (12) 国枝正典，中川威雄，横塚勝：遊星歯車式磁力研磨工具の開発に関する研究，精密工学会誌，54,2(1988)，359-364.
- (13) 国枝正典，中川威雄，樋口俊郎：磁力研磨工具を用いたロボットによる曲面の研磨，精密工学会誌，54,1(1988)，125-130.
- (14) 榎原弘之，近藤司，三好隆志，斎藤勝政：工具先端部不動点を有する5軸曲面仕上げ工具の研究，精密工学会誌，57,7(1991)，1199-1204.
- (15) 亀崎俊一，青山藤詞郎，稲崎一郎：金型自動研磨ロボットシステムの開発，日本機械学会論文集(C編)，57,543(1991)，308-313.
- (16) 鈴木基之，一安俊平，桐井一成，砂原秀一，作田俊裕，浅井昭夫：データ駆動によるプレス金型自動仕上げロボットの開発，精密工学会誌，58,3(1992)，1309-1314.
- (17) 安斎正博，ほか4名：5軸マシニングセンタを用いた金型材曲面の磁気研磨，精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1994)，409-410.
- (18) 幸田盛堂，中林光徳，岡本満，杉田忠彰：金型自由曲面研磨法の研究，精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1994)，711-714.
- (19) 手塚佳夫，玉井伸児，三木一隆，孫運海，山崎隆夫，清水保雄：センサフィードバック制御による曲面微細制御について，先端加工学会誌，13(1994)，63-68.
- (20) 古川知成，矢川元基，ほか2名：未知表面研磨の適応受動制御，日本機械学会論文集(C編)，61,585(1995)，1987-1993.
- (21) 浅川直紀，竹内芳美：ロボットによる磨き作業の自動化，日本機械学会論文集(C編)，63,615(1997)，4043-4049.
- (22) 松澤隆，大森整，牧野内昭武，西尾雄次，守安精：自由曲面加工法およびツールの開発，日本機械学会東北支部秋田地方講演会講演論文集，No.981-2(1998)，515.
- (23) 佐々木哲夫，三好隆志，斎藤勝政，加藤木修：金型磨き作業の知識獲得と自動化に関する研究(第1報)，精密工学会誌，57,3(1991)，497-503.

- (24) 佐々木哲夫, 三好隆志, 斎藤勝政, 加藤正則: 同 (第 2 報), 精密工学会誌, 57, 12(1991), 2151-2156.
- (25) 佐々木哲夫, 三好隆志, 斎藤勝政, 岡田信一郎: 同 (第 3 報), 精密工学会誌, 58, 12(1992), 2037-2043.

第3章

自動研磨による 研磨面特性と破壊強度

第3章 自動研磨による研磨面特性と破壊強度

3.1 はじめに

金型表面の自動研磨は，研磨工具が表面形状にならって姿勢制御されることと，表面状態に対応した研磨加工条件を自動設定することにより行うことができる．このうち，研磨加工条件の最適化は定量切り込みの切削加工に比べ設定が非常に難しい．すなわち，研磨は砥石を金型表面に定圧で押し付けて表面の微細な凹凸を除去する加工であるから，形状精度を損なうことがないように表面状態によって使用砥石を適切に選択する必要がある．切削加工も研磨加工も金型材質に適した工具材種を選ぶことは同様に大切であるが，前工程の加工面状態にしたがった工具選択の重要度は，研磨加工が切削加工よりはるかに高くなる．

また，金型製作における研磨はその最終仕上げ工程で行われる加工であることから，金型の製品価値の一つであるできばえを左右するとともに，その性能や寿命にも大きく影響を及ぼすものである．現在，熟練工の手仕上げによる金型研磨では，この表面状態を経験的なもので判断し加工条件を最適化しており，ここが金型研磨の難しさの一つとなっている．したがって，この最適化設定を材料評価の面から捉え，研磨加工との関係を明確にすることは自動化にとって重要な課題である．これに関するデータ取得と定量化の研究は，斎藤ら⁽¹⁾により行われているが，金型材質，硬さ，表面状態，砥粒材種，ポリシング布種など，条件が多様なためデータベース化するのは非常に大変である．

金型材料は，金型の種類，用途，寿命，価格，加工性により選択されており，その種類は非常に多い．その中で WC-Co 超硬合金は，近年 IC リードフレームなどの精密プレス金型に広く使用され，金型の長寿命化に大きく寄与している．超硬合金は，その合金組成の大要が確立されて半世紀を過ぎるが，その間切削加工用材種としての実用化が急速に進み，目覚ましい発展をみた．一方，各種の機能性超硬合金についても性能改善の研究がなされ，製造技術の高度化と相まって優れた機械的性質を備えた材種が開発されている⁽²⁾．この超硬合金が金型に広く用いられるようになったのは，超硬合金の最大の特長である高硬度，耐磨耗性，高温環境下の安定性に加え，HIP 処理⁽²⁾などの組織安定化による耐衝撃性や抗折力の向上が図られた結果である．しかし，前述のように金型はその用途が多方面にわたっているので，現在金型メーカーがその用途に最適な超硬材種を用いているとはいえない．この生成には高度な専門性が必要で製造設備も簡単に導入

できないことから超硬メーカーから購入するのが一般的である。したがって、この超硬材種の機械的性質についても詳細にわたる検討は行われていないか、または公開されることが極端に少なくなっている。

超合金製の金型はその形状創成加工において、その特性による被加工性の悪さから、主に放電加工と研削加工により行われているのが現状である。放電加工は、最近では加工表面性状の研究^{(3)~(5)}や加工方式の改善が行われ、数 μmRy 程度の表面粗さに仕上げることができるようになってきた。しかし、精密金型での使用においては、その加工原理に起因する表面の加工変質層や表面粗さの問題があり、後工程で研削仕上げを行うのが一般的である。また、研削加工はダイヤモンドホイールを用いて荒加工から精密仕上げ加工まで広範に行われているが、成形研削盤などによる仕上げ研削が困難な形状や、プレス金型におけるダイやパンチの抜き方向を考慮した場合および金型表面性状の改善を計る場合には、研磨による仕上げが必要となる⁽⁶⁾。今後、プレス以外の金型でも WC-Co 超合金の使用が不可欠となり、その構造や形状が複雑化するのに伴い、成形加工法も多様化していくものと考えられることから、超合金の研磨加工がさらに増加していくと考えられる。そこで、本研究は市販の超微粒子タイプ WC-Co 超合金に自動研磨（他研磨法と区別するため、以後ポリシング加工とよぶ）を施して 3 点曲げ試験を行い、その研磨面特性と破壊強度について検討した。

3.2 実験方法

WC-Co 超合金を用いた金型は小型の精密金型が多く、一般的に形状精度が厳しい⁽⁷⁾ので、表面粗さが極めて小さくなるまでポリシング加工を行う必要がある。家電製品などのプラスチック製外観部品は表面の光沢（つや）や滑らかさが重要視されるので、その製作用金型の表面は鏡面状態に加工される。鏡面状態については工業的な規格はなく、一般的に表面粗さが $0.1\mu\text{mRz}$ 程度以下の傷のない面をよんでいる⁽⁸⁾。また、コンパクトディスクや光学的なレンズなどの金型表面は、表面粗さがおよそ $0.04\mu\text{mRy}$ 以下まで研磨されており、これを慣用的に「超鏡面」状態とよぶこともある⁽⁹⁾。

プラスチック成形品とその金型の表面粗さを比較判定するための基準が、JIS K 7104 に規格化されており、この中の金型表面粗さ比較用スチールゲージの区分を表 3.1 に示す。表より、区分 1 と区分 2 の表面粗さがポリシング加工によって得られるものであることが分かる。

以上を参考にして、本実験におけるポリシング加工は、表面粗さを $0.1\mu\text{mRy}$ および $0.03\mu\text{mRy}$ の 2 通りに到達させることをねらって行うことにする。

表3.1 粗さ比較用スチールゲージの区分⁽¹⁰⁾

スチールゲージの記号		1	2	3	4	5	6
スチールゲージ及び金型の加工条件		ダイヤモンドパウダー 粒度#8000番 ($1\sim 5\mu\text{m}$ サイズ) 仕上げ	ダイヤモンドパウダー 粒度#1200番 ($8\sim 20\mu\text{m}$ サイズ) 仕上げ	エメリーペーパー 粒度360番 仕上げ	砥石棒 粒度150番 仕上げ	砥粒120番 ドライブラスト 空気圧 5 kgf/cm^2 { 0.49MPa } 仕上げ	砥粒46番 ドライブラスト 空気圧 5 kgf/cm^2 { 0.49MPa } 仕上げ
表面粗さの範囲 (μmRz)	最小値	—	0.06	0.24	1.2	4.8	15
	最大値	0.03	0.12	0.48	1.7	6.6	19

3.2.1 供試材と試験片

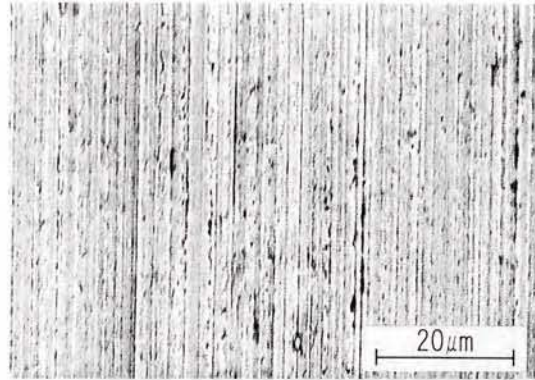
供試材に用いた WC-Co 超硬合金は、精密金型材料として市販されている超微粒子タイプのものである。その物性を表 3.2 に示す。試験片の寸法は厚さ 3.2mm、幅 8.0mm、長さ 27mm で、表面は表 3.3 に示すように加工してある。ポリシング加工は研削加工を行った試験片に対してのみ行い、ワイヤカット放電加工（以後、WED とよぶ）面と焼結面を有する試験片は比較のため同じサイズのものを用意した。図 3.1 はこの試験片表面の SEM 写真で紙面の上下方向が試験片の長手方向になっている。(a)は研削面、(b)は WED 面、(c)は焼結面で、それぞれに表面粗さも示してある。(a)は長手方向に研削による加工条痕が観察され、(b)は溶融後の再凝固によるクラックや空洞の発生がみられる。

表3.2 供試材の物性

WC 平均粒径	(μm)	0.6
結合相量(Co)	(%)	10
密度	(kg/m^3)	14.37×10^3
硬さ	(HRA)	92.9
ヤング率	(MPa)	5.8×10^5

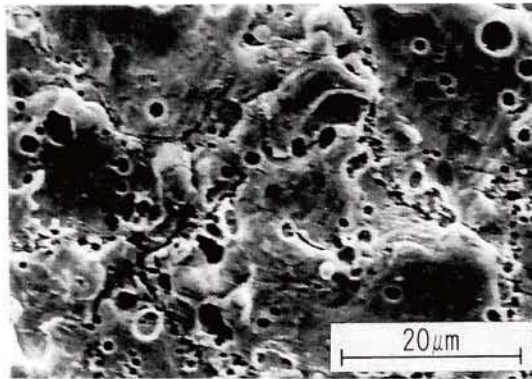
表3.3 試験片

表面加工法	表面粗さ(μmRy)	加工方向
研削	1.2 (幅方向)	試験片長手方向に研削
ワイヤカット放電加工	4.2 (長手方向)	試験片幅方向がワイヤ方向
焼結 (黒皮)	4.6 (方向性なし)	



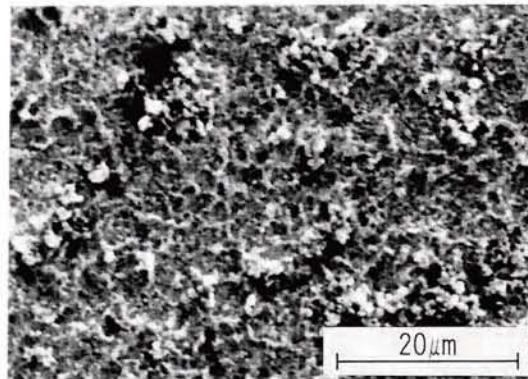
表面粗さ $1.2\ \mu\text{mRy}$

(a) 研削面



表面粗さ $4.2\ \mu\text{mRy}$

(b) WED 面



表面粗さ $4.6\ \mu\text{mRy}$

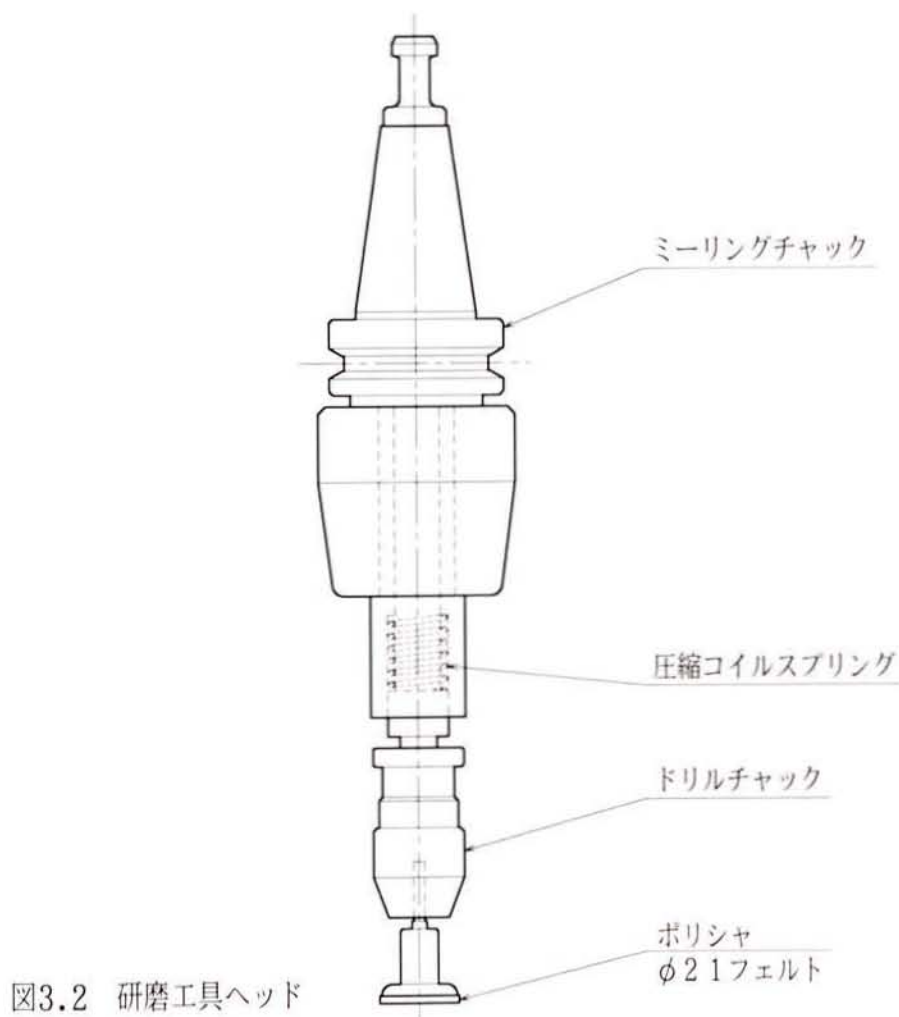
(c) 焼結面

図 3.1 試験片表面の SEM 写真

3.2.2 ポリシング加工条件

本実験のポリシング加工は自動機により行った。図 3.2 に研磨工具ヘッドを示すが、このヘッドには圧縮コイルスプリングが内蔵されており、この圧縮量を管理することにより所要の研磨圧を得ることができる定圧切り込み方式になっている。このヘッドを縦型マシニングセンタの主軸に装着し、主軸回転運動と送りスライドの往復運動との組み合わせにより、試験片の試験面全体を加工する。この模式図を図 3.3 に示すが、本実験のポリシング加工は、試験面全体を極力均等に磨いて平面を確保しなければならないので、試験片の周囲にそれよりわずかに薄いジグを配置し、ポリシャが試験片を完全に通過した位置で往復運動の停止点になるようにした。

砥粒は超硬合金をポリシングするのでダイヤモンドを用いる。ダイヤモンド砥粒は、ポリシング加工能率が高く、磨耗や破碎が少ないので被加工面の品質が安定し、粒径の



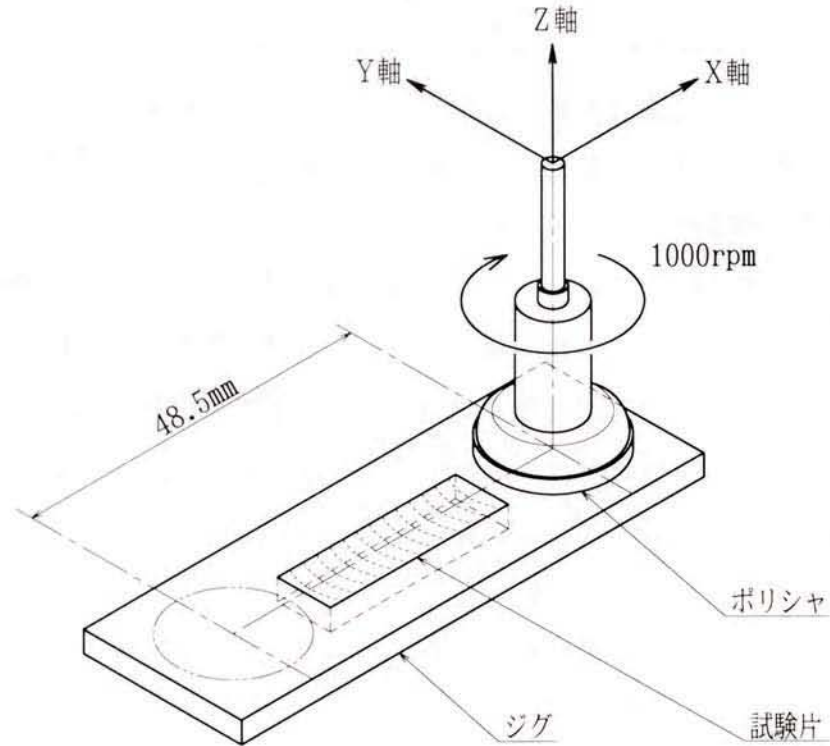


図3.3 ポリシング加工

分級が正確なため磨き条痕が均一になりやすい特長⁽¹¹⁾がある。また、砥粒径は被加工面の材質や硬さおよび表面粗さ、研磨代、目標表面粗さや目標形状精度により選択されるが、市販されている高級金型用鋼では、砥粒粒度#600で $0.1\mu\text{mRy}$ 、#14000で $0.03\mu\text{mRy}$ 程度の表面粗さに研磨できるとされている⁽⁷⁾。超硬合金はこれらの鋼より硬度が高いから、同じ砥粒径でも表面粗さはこの値よりも良くなると考えられる。本実験においては砥粒粒度と加工条件を決定するにあたって、熟練工が金型磨きを行うときの作業データの研究^{(12),(13)}を参考にして予備実験を行い、表3.4に示すように設定した。表において、目標表面粗さが $0.1\mu\text{mRy}$ は砥粒粒度#280でポリシングを行い、 $0.03\mu\text{mRy}$ は#600、#3000、#8000を順次使用し、#8000で目標に到達しない場合に#14000で行った。ポリシング加工時間は、48.5mmストロークの50往復を1単位（1工程とよぶ）とし、1工程終了毎に表面粗さとポリシングによる除去量を測定した。研磨油は、ポリシングの進行により油が黒ずむことを目視で観察しながら、最少量を手差しにて滴下した。

表3.4 研削試験片のポリシング加工条件

目標表面粗さ		0.1 μmRy	0.03 μmRy
砥 粒	材質	ダイヤモンド遊離砥粒	
	粒度	#280	#600 ↓ #3000 ↓ #8000 ↓ (#14000)
ポリシャ (磨き工具)	材質	フェルト材	
	直径	21 mm	
主軸回転数		1000 rpm	
工具押付力		20 N	
送り速度		500 mm/min	
ストローク		48.5 mm	
研磨油	油種	マシン油	
	動粘度	46 mm^2/S	

3.2.3 曲げ試験方法

超硬合金は一般的な金属材料にくらべ、破壊までの弾性ひずみ、塑性ひずみが著しく小さく破壊強度は高い。その強さは曲げ破壊試験の結果により抗折力として評価される⁽¹⁴⁾ので、本研究では3.2.1項に示した試験片に対して3点曲げ試験を行った。

曲げ試験は図3.4に示すインストロン型引張試験機(島津オートグラフAG-10TD)に、図3.5に示す支点スパン20mmの3点曲げ試験ジグを取り付け、ポリシング加工面を下にして試験片をセットし、クロスヘッド速度を0.5mm/minに設定して行った。曲げ破壊強度は、次の算出式を用いて破壊荷重より求めた。すなわち、

$$\sigma = \frac{3PL}{2bt^2} \quad (3.1)$$

ここで、 σ : 曲げ破壊強度 (MPa)

P : 破壊荷重 (N)

L : 支点間の距離(mm)

b : 試験片の幅(mm)

t : 試験片の厚さ(mm)

である。

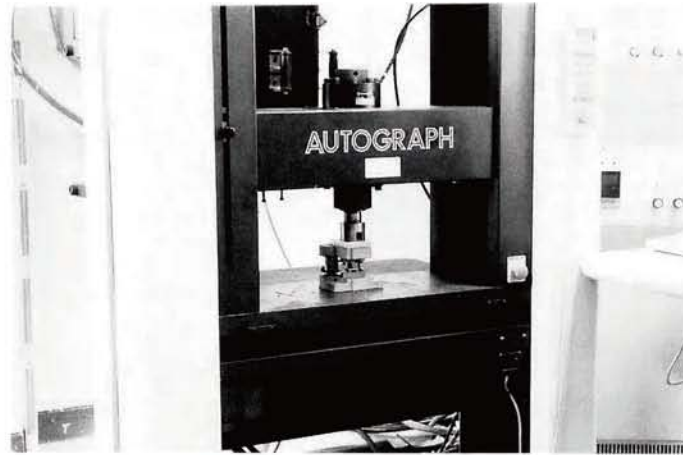


図 3.4 引張試験機

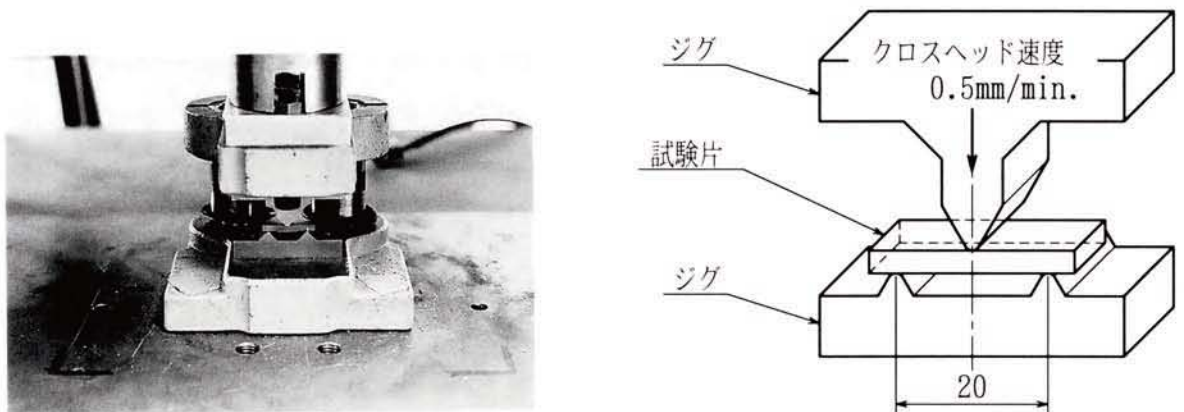


図 3.5 3点曲げ試験ジグ

3.2.4 表面残留応力測定

加工表面の残留応力は，理学電機(株)製 X線回折装置 MSF-2M を使用して測定し， 2θ - $\sin^2\psi$ 線図を用いて次式⁽¹⁵⁾より算出した．

$$\sigma = -\frac{E \cdot \cot\theta_0}{2(1+\nu)} \cdot \frac{\partial(2\theta)}{\partial(\sin^2\psi)} \quad (3.2)$$

ここで， θ_0 ：無ひずみ状態における回折角

E ：ヤング率

ν ：ポアソン比

表面残留応力は WC 相と Co 相で異なった測定値を示す⁽¹⁶⁾が，本試験片の Co の体積率は WC に比べ小さいので，本測定は WC 相を対象として行いこの残留応力値を採用した．表 3.5 に X線測定条件と WC の材料定数⁽¹⁷⁾を示す．

表3.5 X線測定条件とWC材料定数

特性X線	Fe-K α
フィルタ	Monochrometer
電圧，電流	40kV, 30mA
スリット	0.5 deg
照射マスク	5 × 8 mm ²
走査速度	1 deg/min
回折面	(112)
ヤング率	700GPa
ポアソン比	0.194
$2\theta_0$	145.178 deg

3.3 実験結果及び考察

3.3.1 ポリシング加工面の状態

図 3.6 は研削面とポリシング加工面の写真で、(a)が研削面、(b)が $0.1\mu\text{mRy}$ ポリシング面、(c)が $0.03\mu\text{mRy}$ ポリシング面である。ポリシング面は両者とも研削面より明らかに鏡映面の反射状態になっていることがわかる。また、図 3.7 にポリシング面の SEM 写真を示す。(a)は $0.1\mu\text{mRy}$ ポリシング面、(b)が $0.03\mu\text{mRy}$ ポリシング面で、いずれの図も紙面の上下方向が試験片の長手方向である。図より、両者とも前加工の研削筋はみられないが、(a)の $0.1\mu\text{mRy}$ ポリシングははっきりとした磨きの条痕が不規則な方向にいくつか観察され、一方 (b)の $0.03\mu\text{mRy}$ ポリシングは明確な条痕は観察されず、わずかな凹凸がみえるだけである。

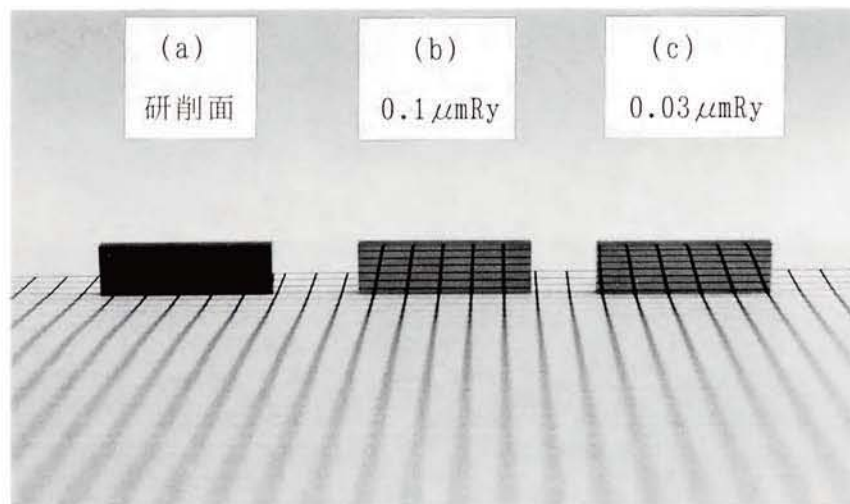


図 3.6 試験片表面の写真

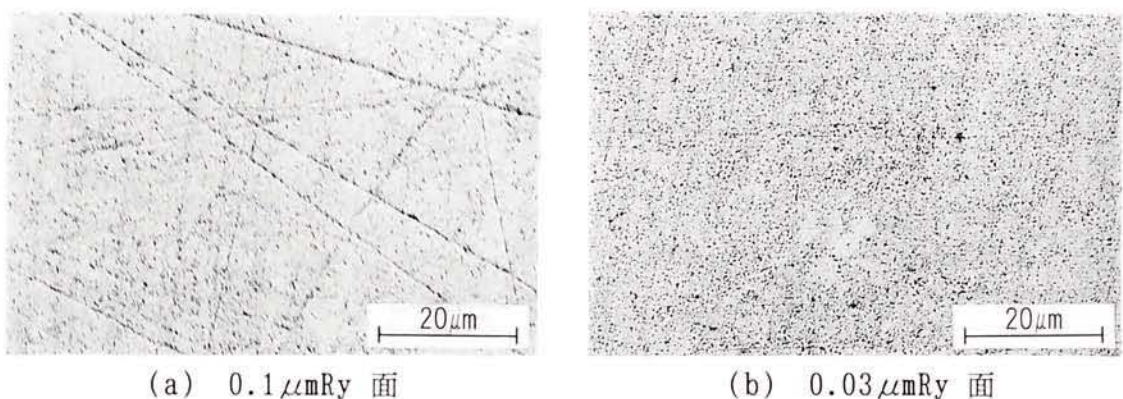


図 3.7 ポリシング面の SEM 写真

次に、図 3.8 はポリシング往復回数による表面粗さと除去厚さの変化を示したものである。(a)は砥粒粒度#280、(b)は#600 により加工したものである。(a)では表面粗さが $0.1\mu\text{mRy}$ に到達するのは最短で 300 往復、最長で 600 往復である。一方(b)では最短で 150 往復、最長で 250 往復になっている。いずれの場合も、表面粗さの変化は指数関数的になっている。また除去厚さは、両者とも回数が進むにつれて各試験片のばらつきが大きくなっているものの、平均値ではほぼ直線的に増加し、表面粗さが $0.1\mu\text{mRy}$ に到達する付近でその傾きが小さくなっていく傾向がみられる。この傾向は佐々木らの報告⁽¹²⁾と一致しており、これ以上ポリシングを行っても表面粗さと除去厚さ(加工能率)の大きな変化はないと考えられる。

また、図 3.9 は粒度#600 の砥粒で加工した後に、より細かい粒度に順次変えて加工したときの表面粗さと除去厚さの変化を示している。図より、除去厚さは図 3.8 と同様にかなりばらついているが、表面粗さは#8000 または#14000 の砥粒で加工することにより目標の表面粗さ $0.03\mu\text{mRy}$ まで達していることがわかる。また平均値をみると各砥粒粒度の到達可能な表面粗さは、#3000 では $0.04\sim 0.05\mu\text{mRy}$ 、#8000 では $0.03\sim 0.04\mu\text{mRy}$ 、#14000 では $0.02\sim 0.03\mu\text{mRy}$ 程度であると推定される。

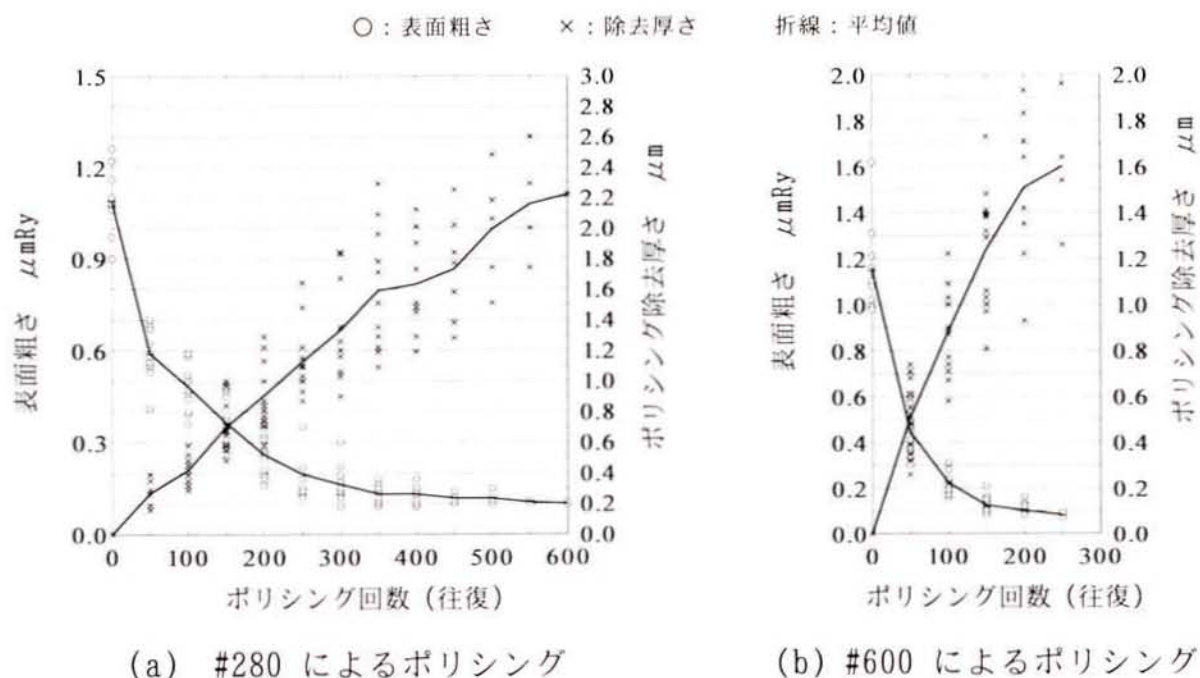


図 3.8 ポリシング回数による表面粗さと除去厚さの変化

次に、図 3.8 で示した#280 と#600 の砥粒を比較する。図 3.10 は、ポリシング加工により前加工の研削筋が消滅しかつ表面あらさが $0.1\mu\text{mRy}$ 以下になったときの除去厚さと往復回数との関係を示している。図より、#600 でのポリシングは#280 に比べ、ポリシング往復回数は 1/2 程度であるが除去厚さには大きな違いはなく、ばらつきも小さい。図 3.11 は 1 工程（50 往復）あたりの除去厚さを表したものであるが、これによれば明らかに#600 の砥粒は#280 よりポリシングの能率が良いといえる。一般的に同じ加工圧力ならば、ダイヤモンド砥粒の粒径を小さくすると表面粗さは小さくなり加工の能率は低下する⁽¹¹⁾が、本実験では異なった結果になっている。

以上のことは、ポリシング加工では被加工材材質やその前加工面粗さ、ポリシング工具押付力などの加工条件が複雑に関連し合っているため、これらのパラメータを考慮した検証が必要であることを示唆している。すなわち、このことはポリシング加工の最適化を探り、いくつかの条件を定量化することが非常に困難であることを示している。

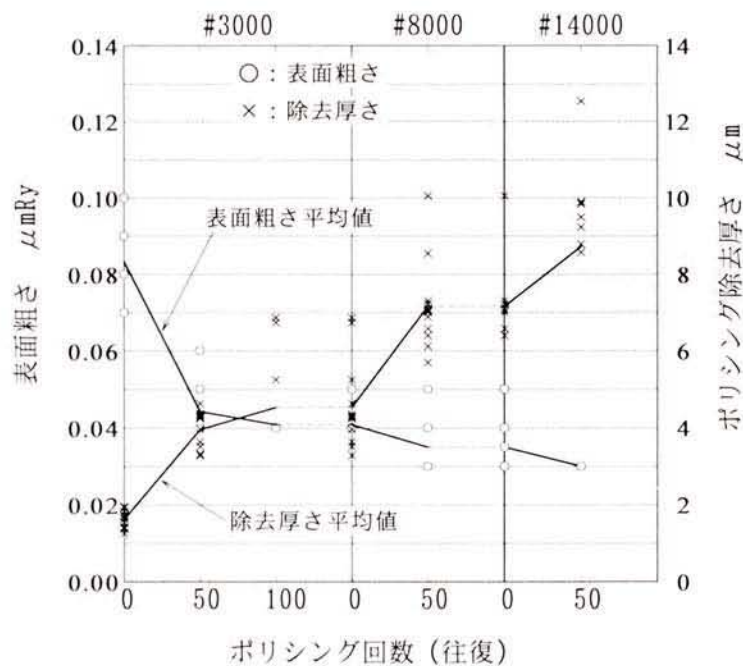


図3.9 ポリシング回数による表面粗さと除去厚さの変化 (#3000 → #8000 → #14000)

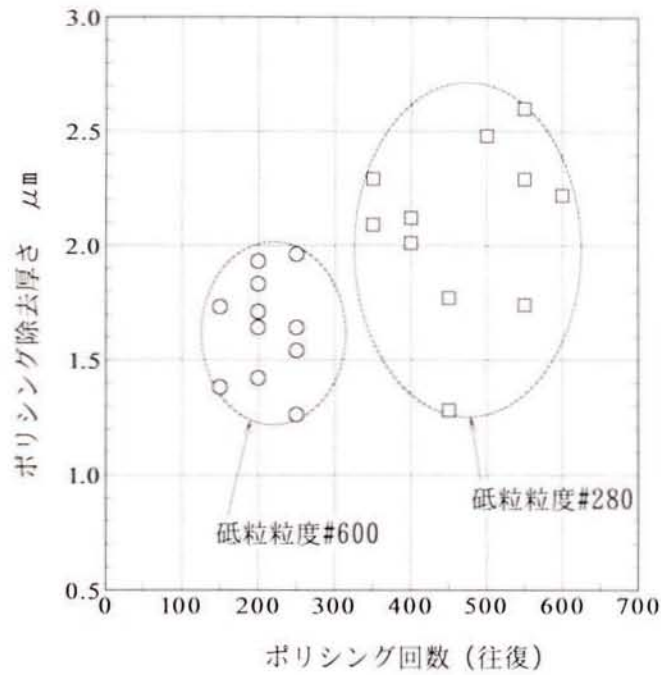


図3.10 砥粒粒度による研磨性能の違い

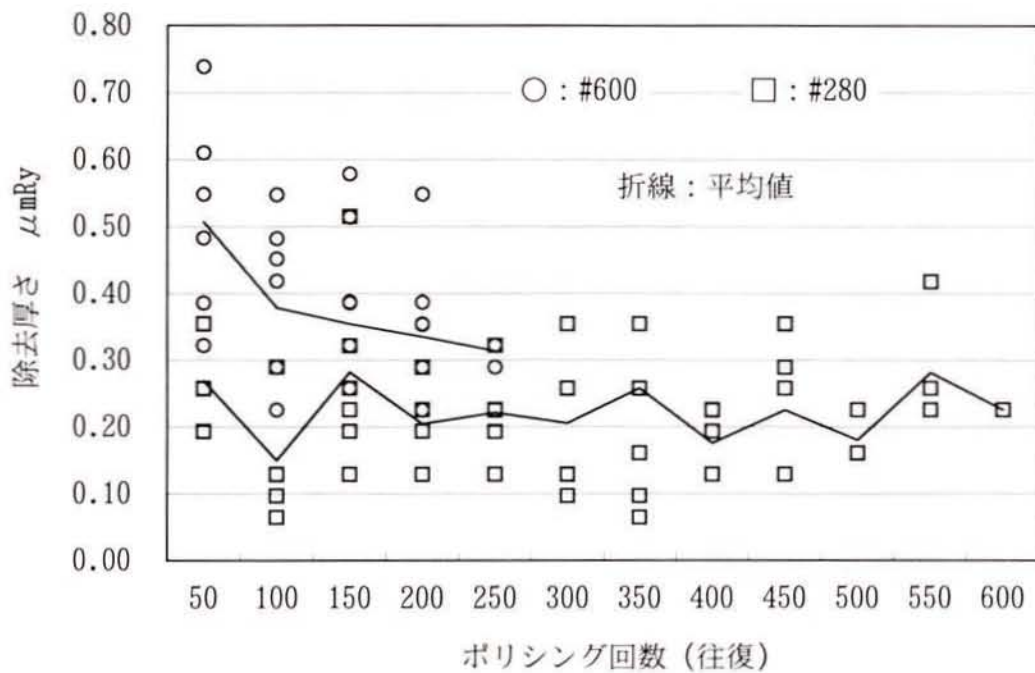


図3.11 1工程 (50往復) あたりの除去厚さの比較

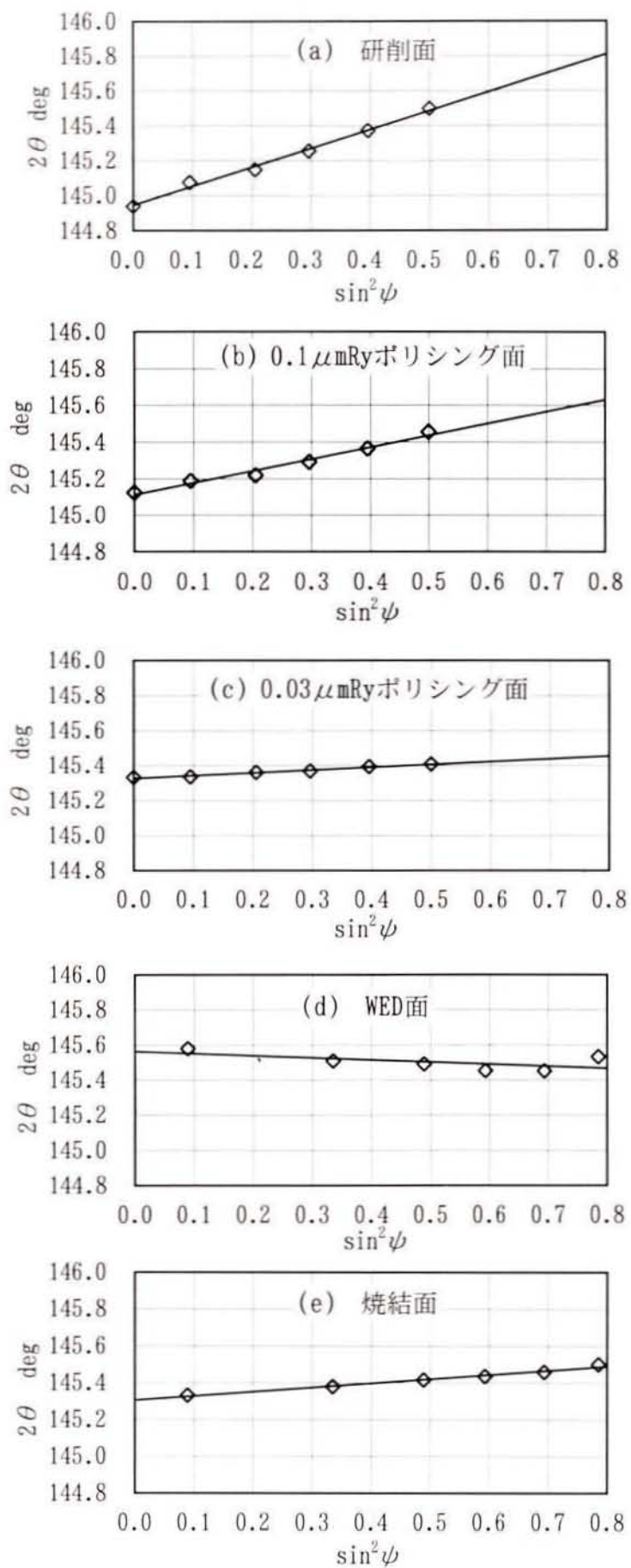


図3.12 2θ - $\sin^2\psi$ 線図の例

3.3.2 表面残留応力

図 3.12 は X 線回折法により測定された各試験片表面の WC112 回折面の $2\theta - \sin^2\psi$ 線図である。同じ加工を施した表面は同傾向の線図になっているので、それぞれの面毎に一つの例を示している。(a)は研削面、(b)は $0.1\mu\text{mRy}$ ポリシング面、(c)は $0.03\mu\text{mRy}$ ポリシング面、(d)は WED 面、(e)は焼結面である。式(3.2)より、(d)は近似直線の傾きがマイナスであるから残留応力はプラス、その他は(d)の逆で残留応力はマイナスである。また測定の精度は、(d)のばらつきが比較的大きいものの、全体的には近似直線上に測定点ののっており、信頼できるものと考えられる。

図 3.13 は各試験片の残留応力の平均値で、それぞれ長手方向と幅方向を示している。図より、研削、0.1 ポリシングおよび 0.03 ポリシングは、いずれも圧縮残留応力が生じており幅方向の値が長手方向より大きい。また、0.03 ポリシングは研削および 0.1 ポリシングに比べ圧縮残留応力値が著しく小さくなっている。次に、WED では幅方向が引張応力、長手方向が圧縮応力になっており測定方向により残留応力の方向が異なっている。ワイヤカット放電加工では引張残留応力になることが報告^{(3),(5)}されており、本実験ではこれらとは一致していない。しかし、焼結面の値は $289\sim 361\text{MPa}$ の圧縮応力を示しており、WED 加工前のこの母材からみると引張側に変化していると解釈できる。

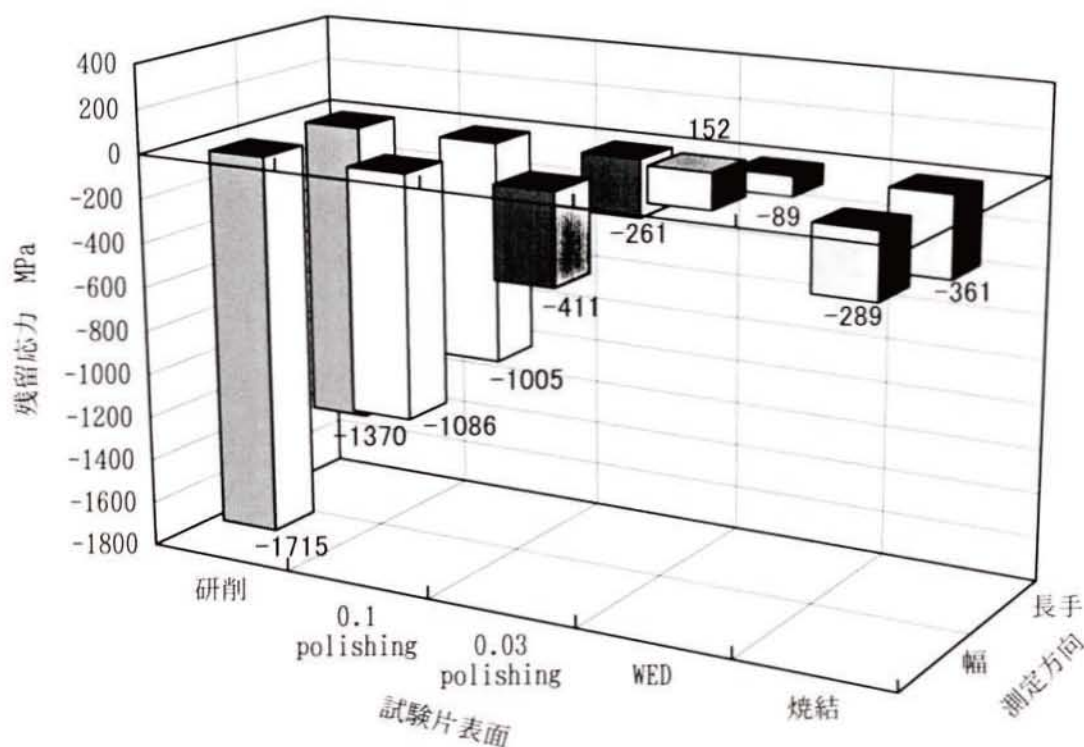


図3.13 残留応力測定結果

3.3.3 曲げ破壊強度

図 3.14 に各試験片の曲げ破壊強度をワイブル分布図として示す．本実験の場合，試験片の数が少ないので実験結果のプロットには累積破壊確率として対称試料累積分布法⁽¹⁸⁾の $(i-0.5)/n$ を用いた．ここで n は標本数、 i は順序数である．また，表 3.6 はそれぞれの試験片についてワイブル関数から求められた形状母数 m と平均強度⁽¹⁹⁾である．

これらより，研削，0.1 ポリシングおよび 0.03 ポリシング試験片の曲げ破壊強度は，母材（焼結）および WED に比べ非常に大きくなっていることが分かる．また，0.1 ポ

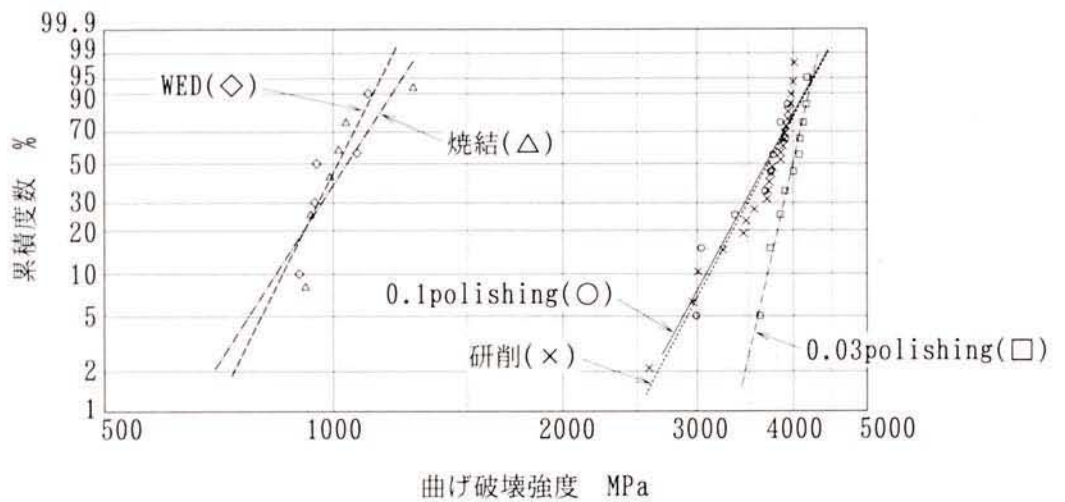


図3.14 曲げ破壊強度のワイブル分布図

表3.6 各試験片の形状母数 m と平均強度

	研削	0.1 polishing	0.03 polishing	WED	焼結
形状母数 m	10.6	10.4	24.6	11.2	8.8
平均強度 MPa	3671	3644	3972	1002	1029

リシング試験片は研削試験片と非常に近寄った分布を示しており、平均強度の値と近似直線の傾き（形状母数）もほとんど同じである。また 0.03 ポリシング試験片は、それらの試験片より曲げ破壊強度が大きくなっており、形状母数も大きくなっている。この値が大ききことは、曲げ破壊強度のばらつきが小さく、試験片の均一性（信頼性）が高いことを意味している。これは研磨により表面粗さが向上し、材料表面層の応力集中が減少したためと考えられる。

また WED 試験片は、母材（焼結）からの強度変化はほとんどないといえる。

3.3.4 破壊形態

図 3.15 に曲げ破壊した試験片の写真を示す。図より、研削、0.1 ポリシングおよび 0.03 ポリシング試験片は破片の数が多く、WED および焼結試験片は少なくなっている。これは曲げ破壊強度の大きさと考えられ、WED および焼結試験片では破壊の起点となる欠陥が存在する可能性が大きい。しかし、本試験片における SEM 観察では、白点⁽¹⁴⁾とよばれる明確な起点は確認できなかった。また、0.1 と 0.03 μmRy までポリシングを行っても、その前加工である研削試験片に対して破壊形態が変化している様子はほとんどみられない。



強度 3671 MPa

(a) 研削



強度 3644 MPa

(b) 0.1 μmRy ポリシング



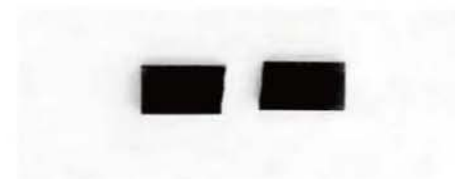
強度 3972 MPa

(c) 0.03 μmRy ポリシング



強度 1002 MPa

(d) WED



強度 1029 MPa

(e) 焼結

図 3.15 破壊試験片の外観

3.3.5 考察

まず、 $0.03\mu\text{mRy}$ ポリシングについて考察する。この試験片の残留応力は図 3.13 によれば、研削試験片の大きな圧縮残留応力の 20~24%程度まで小さくなっており、焼結試験片と同程度の大きさを示している。また図 3.9 によれば、この試験片の除去厚さは平均で $8.6\mu\text{m}$ に達している。中澤の報告⁽²⁰⁾では、この供試材の研削による加工変質層は表面層から $5\mu\text{m}$ 程度までであることから、 $0.03\mu\text{mRy}$ ポリシングでは研削によって生じた表面の加工変質層をほとんど除去している。それと共に、ポリシング加工自体はほとんど残留応力を発生させない加工であることから、図 3.13 に示した残留応力値が得られたものと考えられる。また、圧縮の残留応力が小さくなることは曲げ破壊強度を低下させると考えられるが、それにもかかわらず表 3.6 に示した曲げ破壊強度は 8%程度増加している。これは表面粗さが著しく改善し $0.03\mu\text{mRy}$ まで達していることによると考えられる。

次に $0.1\mu\text{mRy}$ ポリシングについて述べる。図 3.13 によれば、この試験片の圧縮残留応力は研削試験片の 63~73%程度に低下している。これは、除去厚さが図 3.8 に示すように $2.2\mu\text{m}$ 程度であり、これは上述の中澤の報告における $5\mu\text{m}$ に比べ小さく、また研削の加工変質層が残っているためと考えられる。圧縮残留応力の減少により曲げ破壊強度も低下すると考えられるが、図 3.14 や表 3.6 によれば曲げ破壊強度は研削試験片とほとんど変わっていない。これは、圧縮残留応力の減少による強度低下と表面粗さの改善（約 $1.1\mu\text{mRy} \rightarrow 0.1\mu\text{mRy}$ ）による強度増加が相殺した結果であると考えられる。

以上述べたように、ポリシングを行った試験片の曲げ破壊強度は、研削試験片に比べ同程度かそれより大きな値を示している。鈴木らの報告⁽²¹⁾によれば研削試料は研磨試料よりも曲げ破壊強度が高いとされており、本実験結果はそれとは異なっている。この知見は、本超硬合金を実用するにあたって大きな示唆を与えるものである。

また、測定方向による残留応力の相違については、本実験の研削試験片では長手方向に研削を行っているから、幅方向の残留応力が長手方向より大きくなる傾向があるが、図 3.13 によれば、 $0.1\mu\text{mRy}$ ポリシングだけではなく $0.03\mu\text{mRy}$ ポリシングでもそれと同じになっている。これは焼結試験片の残留応力とは違った傾向になっており、研削加工の影響がポリシングにより平均 $8.6\mu\text{m}$ の厚さを除去した後の試験片にもまだ残存していると考えられる。この原因は現在不明であり、今後破壊起点との関連性や曲げ破壊強度への影響を調べることにより明らかにしたい。

3.4 小括

自動研磨が WC-Co 超硬合金に及ぼす影響を明らかにするため、市販の超微粒子タイプの WC-Co 超硬合金 (10wt.%Co) に自動ポリシング加工を施して 3 点曲げ試験を行い、その研磨面特性と破壊強度について調べた。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 自動機を使用して WC-Co 超硬合金にポリシング加工を行ったところ、ダイヤモンド遊離砥粒を用いた上で加工条件を適切に設定することにより、磨き条痕がほとんど観察されない鏡面 ($0.03\mu\text{mRy}$) を得ることができた。また、硬鋼などの研磨時にしばしば発生するピンホールやオレンジピールは本実験では観察されなかったことから、超微粒子タイプの WC-Co 超硬合金は被研磨性が良い材料といえる。
- (2) 研削を施した同じ前加工面にポリシング加工を行ったが、砥粒粒径が小さい #600 が #280 より研磨能率が高い結果が得られ、一般的な研究とは逆の結果になった。このことから、前加工面に最適な加工条件を設定することは非常に困難であることが認識できた。
- (3) $0.03\mu\text{mRy}$ ポリシングは研削による圧縮残留応力を著しく小さくするが、これは研削による加工変質層をポリシング加工で大部分除去しているためと考えられる。また、 $0.03\mu\text{mRy}$ の残留応力は母材(焼結面)とほぼ同じ大きさであることから、ポリシング加工による加工変質層の生成はほとんどないといえる。ただし本実験では、試験片方向による残留応力の違いは母材ではなく研削と同じ傾向になっており、平均 $8.6\mu\text{m}$ 程度の研磨除去厚さでは研削加工の影響がまだ残存しているものと思われた。
- (4) 表面粗さ $0.03\mu\text{mRy}$ の鏡面を持った試験片は、圧縮残留応力が低下したにもかかわらず曲げ破壊強度が向上した。これは表面粗さが著しく向上したためと考えられ、ポリシング加工が WC-Co 超硬合金に対しても非常に有効であることが明らかになった。
- (5) 研削加工を施した試験片の曲げ破壊強度は、焼結試験片や WED 試験片に比べ 3 倍以上の値である。これは、圧縮残留応力と表面粗さの改善および破壊起点となるような組織上の欠陥の消滅によるものと考えられる⁽¹⁶⁾。このことから本合金の強度増加を図るためには、研削または研磨を行うことが重要であるといえる。

参考文献

- (1) 例えば, 斎藤勝政: 金型の仕上げ加工における新しい動向, 機械と工具, 40, 9(1996), 10-15.
- (2) 鈴木壽編: 超硬合金と焼結硬質材料, 丸善, (1995), 4.
- (3) 蒲地一嘉, 伊藤亨, 山本勉, 中村誠治: WC-Co 超硬合金のワイヤカット放電加工による機械的性質の劣化, 日本金属学会誌, 52,6(1988), 581-587.
- (4) 土屋信次郎, 福田雅秀, 池浩之, 鈴木壽: WC-Co 超硬合金のワイヤカット放電加工面に生じる他相, 粉体および粉末冶金, 39,2(1992), 98-102.
- (5) 後藤修一, 増田雪也, 神田幸也, 杉本公一, 小林光征: WC-Co 超硬合金の曲げ破壊強度に及ぼすワイヤカット加工の影響, 先端加工, 14,9(1995), 33-39.
- (6) 武藤一夫, 高松英次: 金型設計・加工技術, 日刊工業新聞社, (1997), 152.
- (7) 内尾舜二: 精密金型のみがき加工, 日刊工業新聞社, (1990), 43.
- (8) 佐々木哲夫: 型みがき技術の進歩, 日本塑性加工学会誌, 32,10(1991).
- (9) 精密工学会編: 精密工作便覧, コロナ社, (1992), 915.
- (10) JIS K 7104, プラスチック表面の粗さの比較方法, 日本工業規格.
- (11) 精密工学会編: 研削工学, オーム社, (1987), 175.
- (12) 佐々木哲夫, 三好隆志, 斎藤勝政, 加藤木修: 金型磨き作業の知識獲得と自動化に関する研究 (第1報) - 金型熟練工の手磨き特性 -, 精密工学会誌, 57,3(1991), 497-503.
- (13) 佐々木哲夫, 三好隆志, 斎藤勝政, 加藤正則: 金型磨き作業の知識獲得と自動化に関する研究 (第2報) - 金型磨き作業支援エキスパートシステム -, 精密工学会誌, 57,12(1991), 2151-2156.
- (14) 鈴木壽編: 超硬合金と焼結硬質材料, 丸善, (1995), 133-147.
- (15) 日本材料学会編: X線応力測定法, 養賢堂, (1990), 77.
- (16) 後藤修一, 神田幸也, 杉本公一, 小林光征: WC-Co 超硬合金の曲げ破壊強度に及ぼす研削加工の影響, 日本機械学会論文集 (A編), 61,589(1995), 1927-1932.

- (17) 田中啓介, 松井元康, 田中拓: 超合金(WC-Co)の X 線応力測定, 材料, 42, 472(1993), 96-102.
- (18) 酒井達雄, 田中道七: 母数推定の統計的手法, 材料, 31,348(1982), 941-947.
- (19) 北川賢司: 信頼性工学入門, コロナ社, (1995), 51.
- (20) 中澤清: リードフレーム打ち抜き金型用超薄肉超硬材料の強度特性に関する研究, 博士学位論文, (1999), 第 3 章 39.
- (21) 鈴木壽編: 超合金と焼結硬質材料, 丸善, (1995), 156-159.

第4章

砥粒流動加工による 研磨面特性と破壊強度

第4章 砥粒流動加工による研磨面特性と破壊強度

4.1 はじめに

砥粒流動加工はデバーリングや加工表面性状の改善を目的に、特に管などの内面の加工に有効な手段として用いられてきた⁽¹⁾。最近では、金型の内面や凹部の研磨作業を自動化して工程時間短縮を図る目的で、この加工法を金型表面研磨工程に使用する例⁽²⁾が増えている。この加工法は遊離砥粒を粘弾性媒体に混ぜる方法で研磨を行うが、砥粒にダイヤモンドを用いることによって超合金金型への適用も図られている。内面研磨は手作業で行った場合には厄介で非能率的であり、また3章で報告したような自動ポリッシングでは不可能であるから、砥粒流動加工が内面の自動研磨に有効であることは明白である。今後さらにこの加工法が増加していくと考えられることから、本研究は市販の超微粒子タイプ WC-Co 超合金に砥粒流動加工を施して3点曲げ試験を行い、その研磨面特性と破壊強度について調べた。

4.2 実験方法

4.2.1 供試材と試験片

供試材の物性は前章の表 3.2 と同じである。試験片は表面をワイヤカット放電加工(以後 WED とよぶ)したものと研削加工を行ったものの2種類(各25個)を用意した。試験片の寸法と加工方向および表面粗さを図 4.1 に示す。また、図 4.2 はこの試験片表面の SEM 写真で紙面の上下方向が試験片の長手方向になっている。(a)は WED 試験片で表面に放電加工によるクラックが観察される。また(b)の研削加工試験片では表面長手方向に研削の条痕がはっきりと現れている。これらの試験片を以後簡単のためそれぞれ WED 材、研削材とよぶことにする。

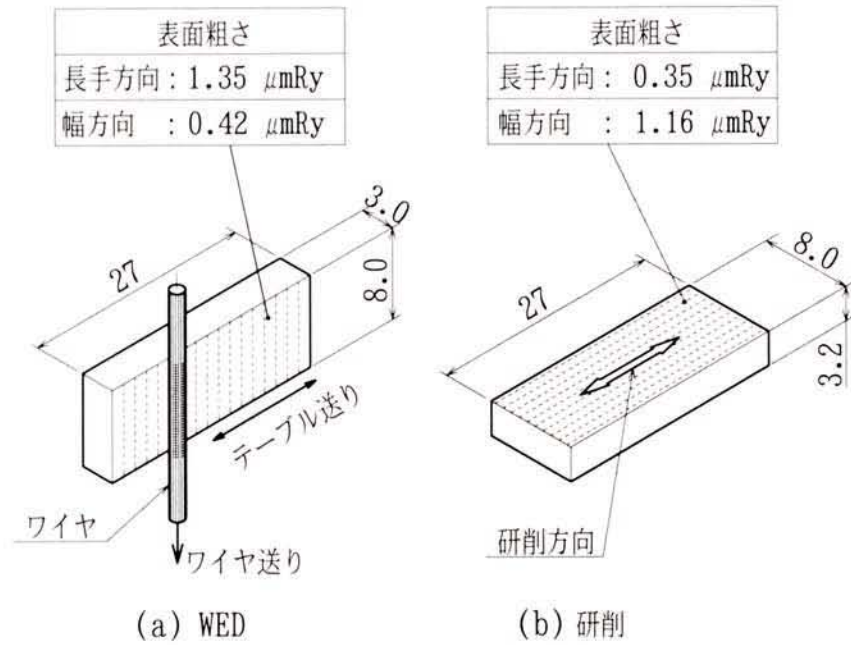


図 4.1 試験片寸法と加工データ

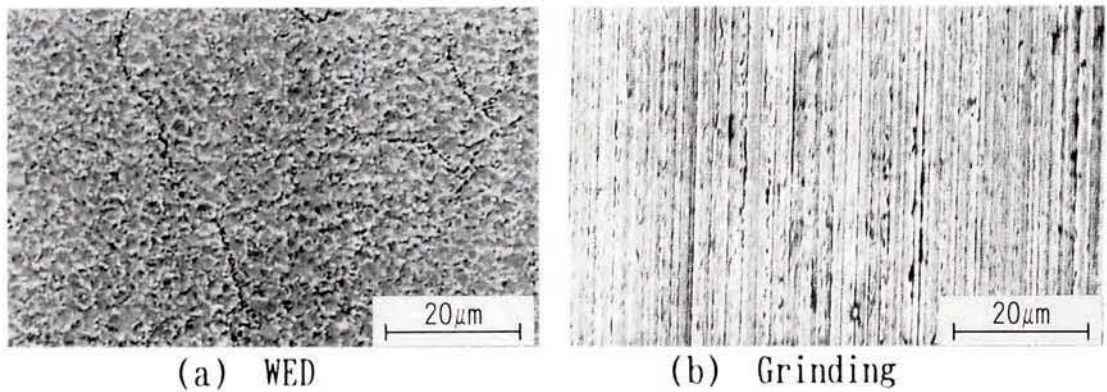


図 4.2 試験片表面の SEM 写真

4.2.2 研磨加工条件

この2種の試験片の前加工面に、表 4.1 に示す研磨方法（時間と方向）を設定して砥粒流動加工を施した。砥粒流動加工は、(株)東洋エクストールドホーン製 EX800 型専用機で行った。この加工は砥粒を半固体状の粘弾性媒体に混練し(これをメディアとよぶ)、これを研磨工具として加工部に押し込み、油圧力で機械的に移動させることにより研磨加工を行っている⁽³⁾。この物体は主に高分子系の合成樹脂と合成グリースでできており、それ自体の結合力や粘着力は強いが、金属面への付着、固着がほとんどないため、加工面とメディアとの相対運動が発生しやすい。また研磨圧力はメディアの弾性力による圧縮効果で得られ、これにより砥粒が加工面に圧接され研磨を行うことができる。研磨量は被加工面への研磨圧力と相対運動量に依存するが、この加工法においては研磨圧力と研磨速度を適切に得るため、メディアの硬さ、押し込み圧およびメディアの通過断面積の設定が重要になる。これらの加工条件は、加工面を通過するメディアの流れが層流になることを加工に先立って観察し決定される。本実験におけるメディアの硬さは、金型の面研磨に一般的に実用されているタイプを選定した。その加工条件を表 4.2 に示す。

表4.1 砥粒流動加工の方向と時間

前加工面	加工方向	加工時間	
		min.	
WED	長手方向	10	30
	幅方向	10	30
研削	長手方向	10	30
	幅方向	10	30

表4.2 砥粒流動加工の加工条件

メディアの材質	高分子系合成樹脂 高分子系合成グリース
砥粒材質	ダイヤモンド
平均砥粒径	30 μm
砥粒混合比率	約 80 wt%
メディアの押込み圧	9.8 MPa {100 kgf/cm ² }
メディアの通過断面積	75 mm ²
油圧シリンダの一往復時間	60 s

4.2.3 曲げ試験方法

曲げ試験方法は、前章 3.2.3 項と同じである。

4.2.4 表面残留応力測定

表面残留応力測定の方法は、前章 3.2.4 項と同じである。

4.3 実験結果及び考察

4.3.1 研磨加工面の状態

図 4.3 は WED 材と研削材の砥粒流動加工面の写真である。(a),(b)が加工前、(c),(d)が 30 分加工後である。加工時間 10 分のは 30 分と同様なので省略する。これらの写真より、砥粒流動加工によって鏡面状態の加工面が得られることがわかる。また、図 4.4 は WED 材と研削材に砥粒流動加工を 30 分行った表面の SEM 写真であり、それぞれにメディアの流れ方向を矢印で示してある。図より、(a)~(d)全てに砥粒流動加工の研磨条痕が加工方向に観察される。

次に、図 4.5 は砥粒流動加工時間による表面粗さの変化を示したものである。(a)が WED 材、(b)が研削材で、それぞれに長手方向と幅方向の粗さを表示した。図より、WED 材、研削材とも表面粗さが大きく向上しており、砥粒流動加工が WC-Co 超硬合金に対して極めて有効な研磨法であることがわかる。

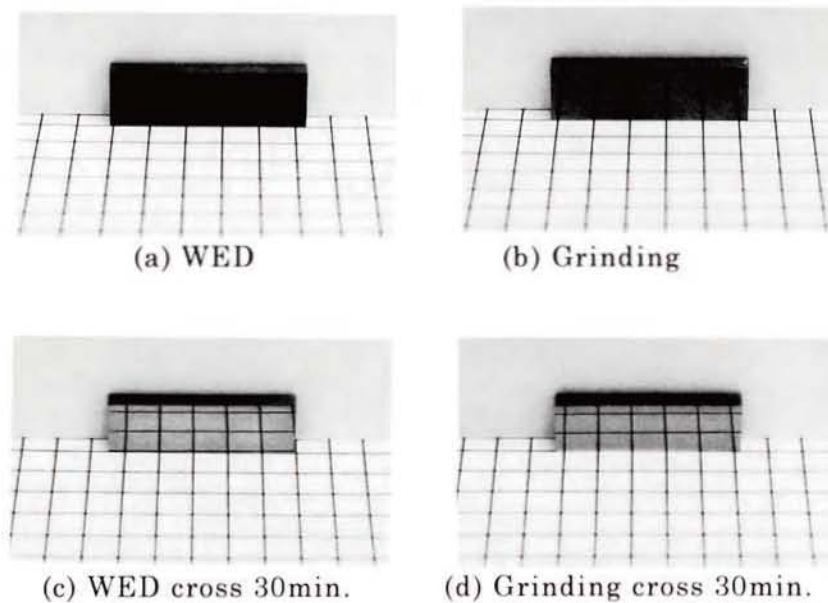


図 4.3 試験片表面の写真

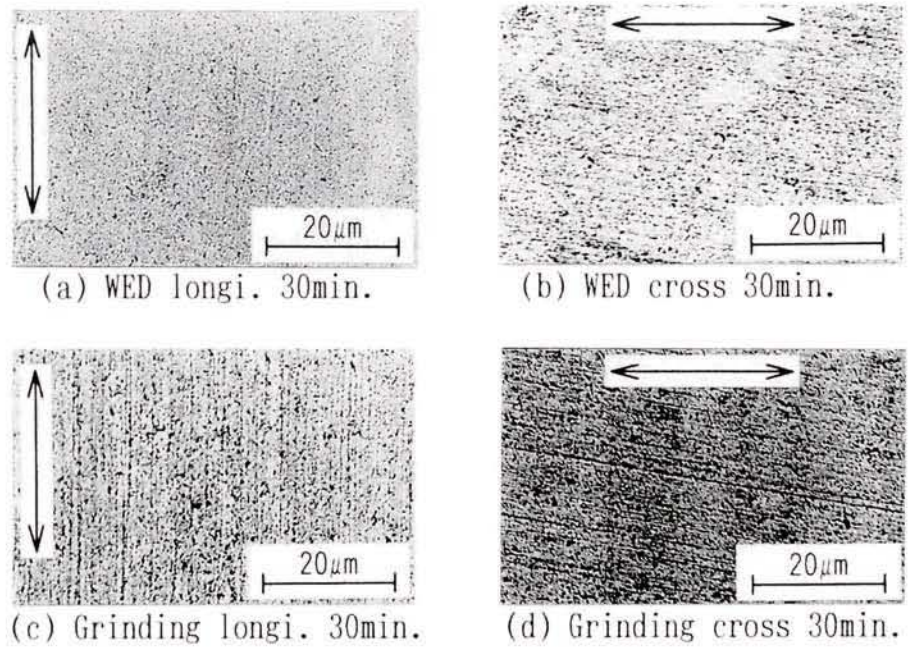


図 4.4 砥粒流動加工面の SEM 写真

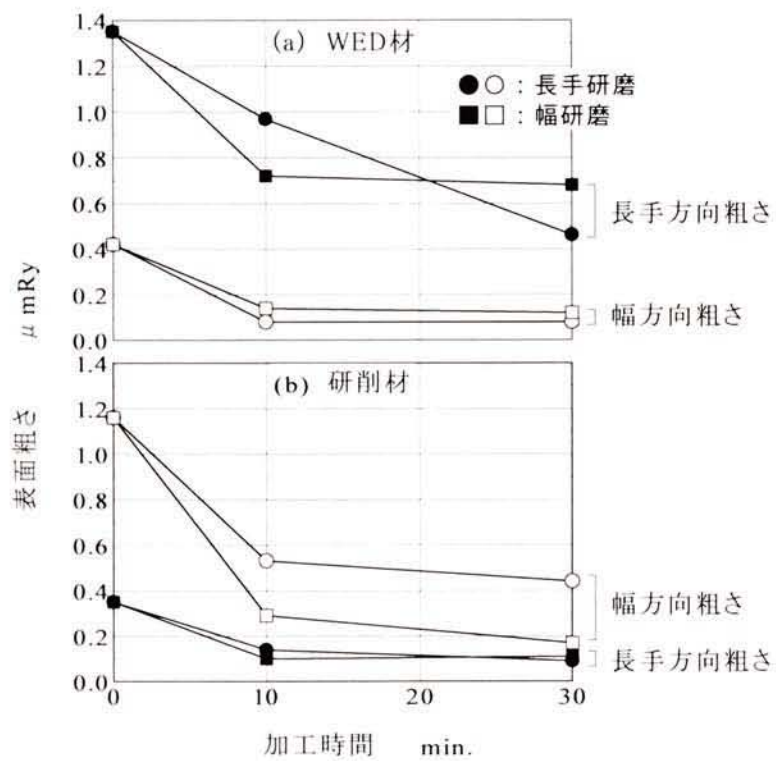


図4.5 砥粒流動加工時間による表面粗さの変化

このうち(a)のみに注目すれば、砥粒流動加工後の幅方向の表面粗さは長手方向に比べはるかに良好になっており、加工前の表面粗さの方向による違いが残存している。また、加工時間が 10 分以上になると表面粗さはほとんど変化しない傾向がみられる。この傾向は幅方向の砥粒流動加工(以後、幅研磨とよぶ)で顕著に現れるが、長手方向の砥粒流動加工(以後、長手研磨とよぶ)を行ったものの長手方向の表面粗さ(●印)にはばらつきがみられた。

一方(b)では、長手研磨、幅研磨とも加工時間 10 分以上での表面粗さはあまり改善されていない。

このように加工時間 10 分以上で表面粗さの大きな向上がみられなくなるのは、次のように考えられる。すなわち、砥粒流動加工は図 4.6 に示すように加工初期段階では砥粒が加工表面の凸部のみには接して表面粗さは加工の進行にしたがい向上していくが、表面がある程度滑らかになるとメディアの弾性力により砥粒が凹部にも同じ圧力で接するようになるため、その凹凸に倣って研磨加工が進行し、加工時間を長くしても表面粗さは大きくは変化しなくなる。したがって本実験の場合 WED 材、研削材とも砥粒流動加工前に約 $0.4\mu\text{mRy}$ であったものは、 $0.1\mu\text{mRy}$ 程度が限界であることが図 4.5 よりわかる。また、加工前に $1.2\sim 1.4\mu\text{mRy}$ であったものでは 30 分の加工時間でも $0.1\mu\text{mRy}$ まで達していないことから、砥粒流動加工後の表面粗さは加工前の粗さに依存すると考えられる。

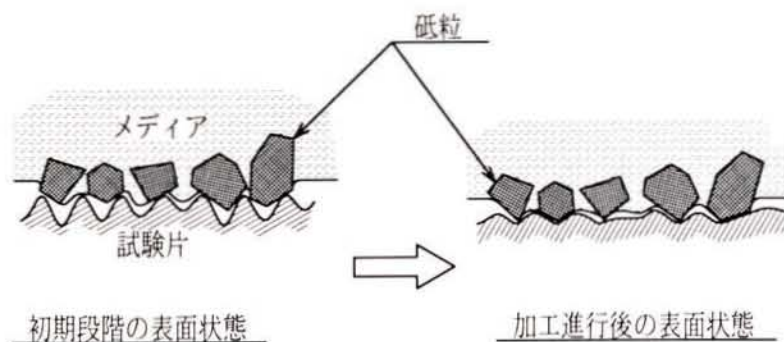


図 4.6 砥粒流動加工の模式図

次に、砥粒流動加工時間と研磨除去厚さの関係を図 4.7 に示す。この図より、長手研磨、幅研磨とも加工時間により除去厚さが増加しているが、WED 材ではワイヤ方向と同方向に磨く幅研磨(■印)、研削材では研削筋と直角に磨く幅研磨(□印)の除去厚さが大きくなっていることがわかる。一般的に、ラッピングやポリシングを行うときその加工方向を前工程の条痕と交差させるという経験則があるが、本実験の研削材の場合は幅研磨(□印)のほうが除去量が多く、図 4.5(b)に示したように表面粗さもよいことから、経験則通りに砥粒流動加工を行うことが有効であるといえる。一方、WED 材は長手方向の表面粗さが大きいにもかかわらず、除去厚さが幅研磨(■印)で大きくなっており、研削とは違った傾向を示している。このことから、WED の加工変質層を砥粒流動加工で除去する目的にはワイヤと同方向で研磨を行うほうが効率的といえる。この原因は現在不明であり今後精査していくが、この現象を明らかにしたことは、砥粒流動加工の加工現場に大きな示唆を与えるものである。

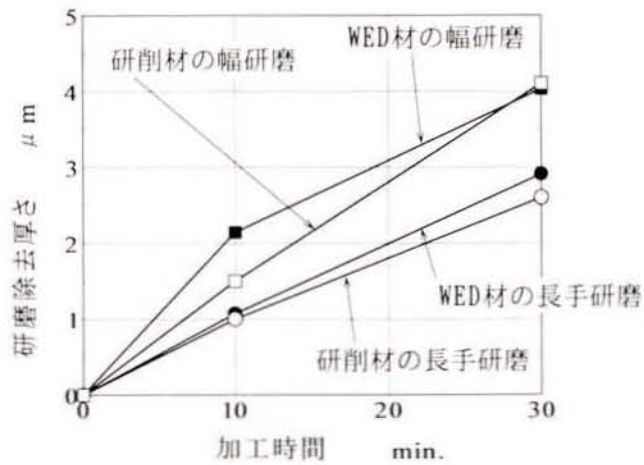


図4.7 砥粒流動加工時間による研磨除去厚さの変化

4.3.2 表面残留応力

図 4.8 に砥粒流動加工を行ったときの表面残留応力の変化を示す。WED 材では本加工前には引張の残留応力が発生しているが、長手研磨，幅研磨ともこれが圧縮の方向に変化し、とくに幅研磨では -400MPa 前後の残留応力になっている。また，研削材では大きな圧縮の残留応力が，砥粒流動加工を行うことにより減少しており，幅研磨 30 分の値は -400~-500MPa になっている。

これら WED 材，研削材の両値は，蒲地らの報告⁽⁴⁾による焼結面の残留応力値に近い値である。また，田中ら⁽⁵⁾によるラッピング後の残留応力値とも近い値を示している。これらより，砥粒流動加工はラッピング，ポリシング加工と同様に残留応力をほとんど生じない研磨加工であるといえる。

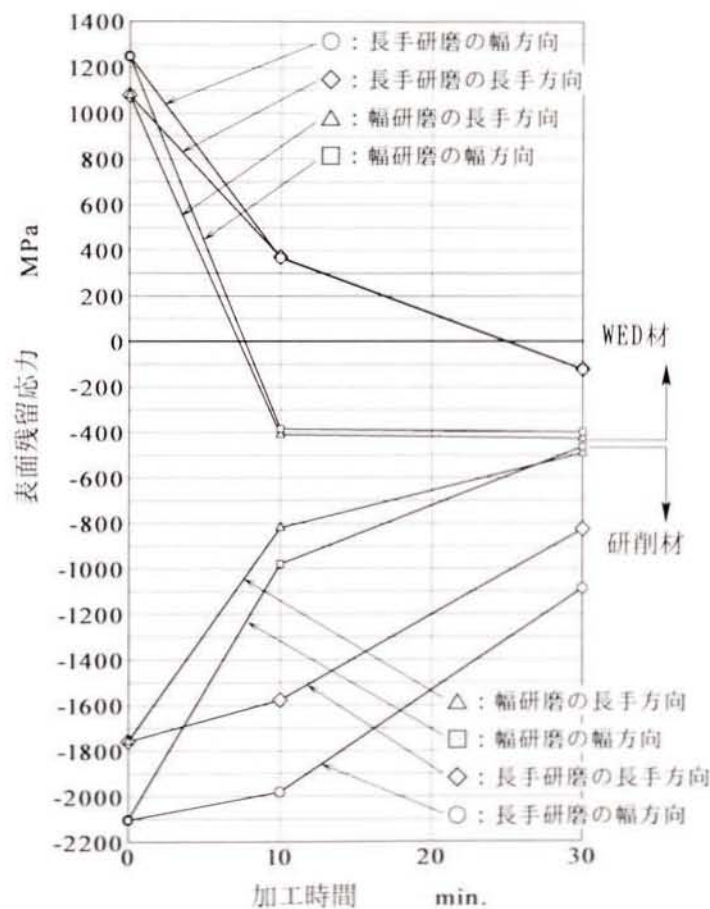


図4.8 砥粒流動加工時間による表面残留応力の変化

4.3.3 曲げ破壊強度

図 4.9 は各試験片の曲げ破壊強度をワイブル分布図に示したものである。本実験の場合試験片の数が少ないので、実験結果のプロットには累積破壊確率として対称試料累積分布法⁽⁶⁾の $(i-0.5)/n$ を用いた。ここで n は標本数、 i は順序数である。また、図 4.10 は曲げ破壊強度の平均値をとり、その変化を表したものである。両図より、研削材は全般的に WED 材より強度がかなり大きくなっている。また WED 材においては、WED のままに比べ砥粒流動加工した試験片の強度はいずれの場合も向上し、最大 1000MPa 程度増加している。とくに幅研磨では、磨き条痕が破断方向と一致しているにもかかわらず強度が大きくなっており注目される。

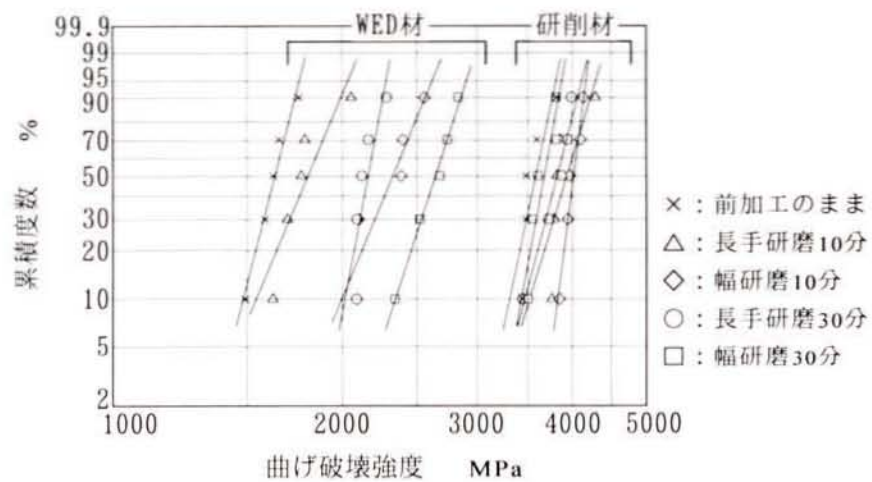


図4.9 曲げ破壊強度のワイブル分布図

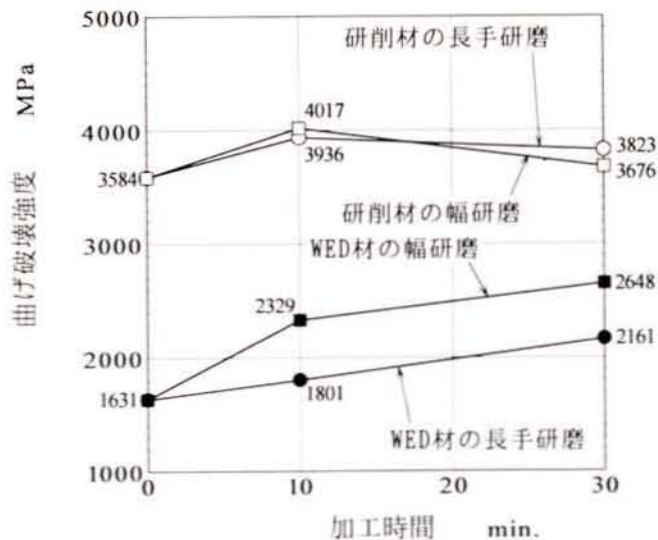


図4.10 砥粒流動加工時間による曲げ破壊強度の変化

一方研削材においては、砥粒流動加工後の強度は研削のままより 92~433MPa 大きくなっている。超合金では、表面が研磨状態より研削状態のほうが強さが優れているという報告⁽⁷⁾があるが、本実験ではこれと異なり砥粒流動加工で強度が増加しているのが注目される。

4.3.4 破壊形態

図 4.11 に 3 点曲げ試験を行った試験片の破壊状況の概観を示す。(a)から(e)までは WED 材であり(f)は研削材の一例である。これ以外の研削材も砥粒流動加工の有無に関係なく同程度の破片数になっている。この図より、曲げ破壊強度が大きくなるにつれて破片数は多くなるのがわかる。

図 4.12 に破断面の例を示す。(a)は WED のまま、(b),(c)は WED 材の幅研磨および(d)は研削のままのものである。(a),(b)は破壊の起点が明確で、その伝ば模様が観察されるが、(c),(d)でははっきりわからない。これらの試験片の表面に近い破断面を SEM で観察すると、いずれも図 4.13 のような粒界破壊の様相を示している。また(a),(b)にみられる破壊起点にはポイドなどの欠陥が存在するという報告⁽⁸⁾があるが、今回の観察ではこれらを発見することはできなかった。

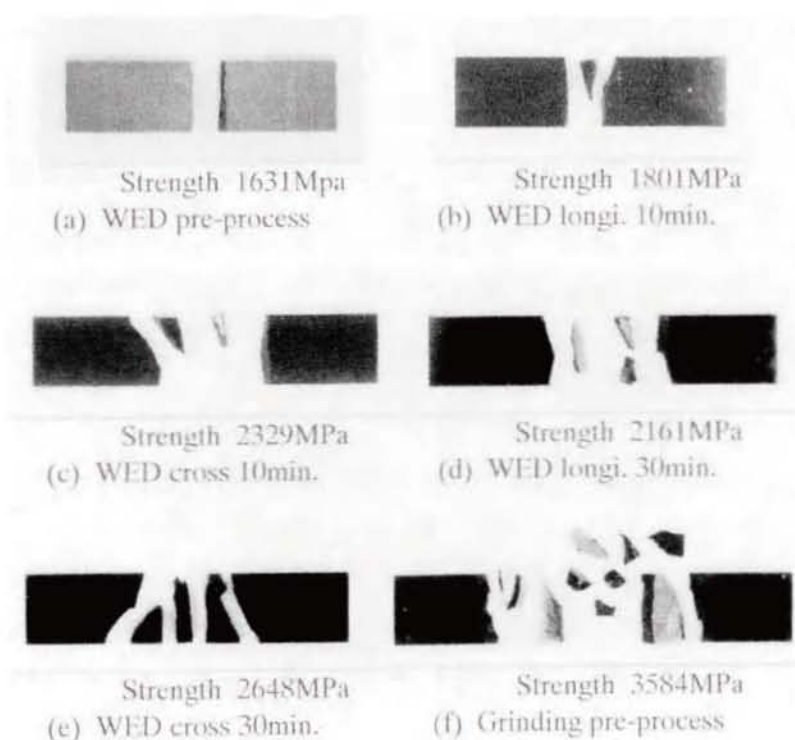


図 4.11 破壊試験片の外観

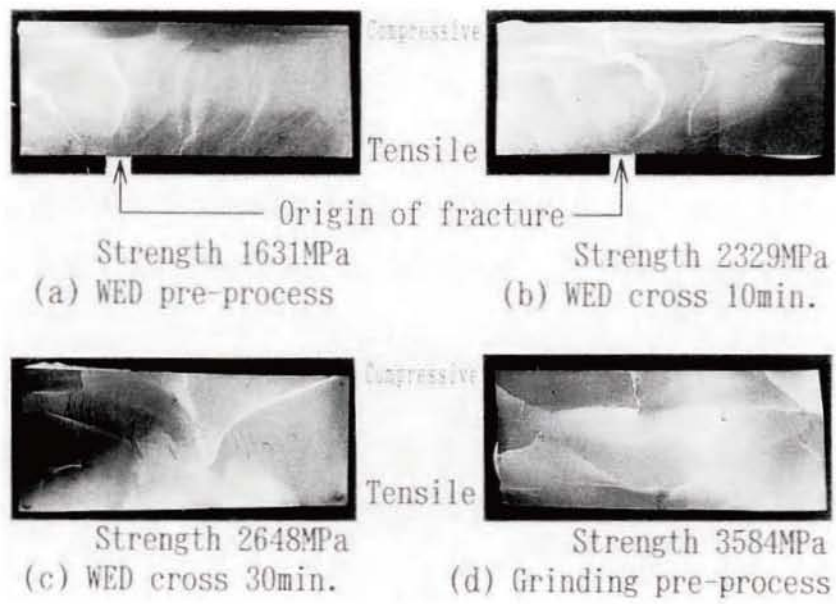


図 4.12 破断面写真

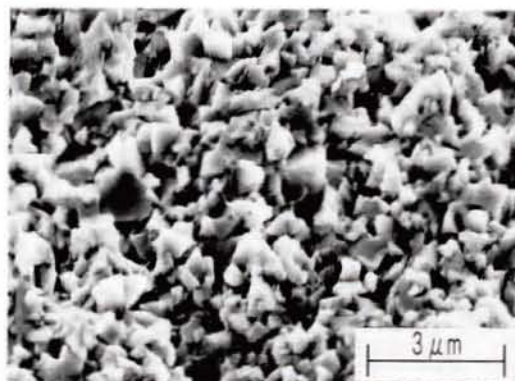


図 4.13 破断面の SEM 写真

4.3.5 考察

図 4.14 に曲げ破壊強度と表面残留応力の関係を示す。WED 材(黒印)では、表面残留応力が引張から圧縮方向に変化するのにもない強度が大きくなっていることがわかる。この強度変化は幅研磨でより顕著になっている。この結果は幅研磨の残留応力が圧縮側にあることに起因しているといえる。図 4.7 によれば WED 幅研磨 10 分は WED 長手研磨 30 分より研磨除去厚さが小さくなっていることから、砥粒流動加工では WED のワイヤ方向にメディアを流すことにより、除去量が少なくても引張残留応力を減少させることができ、曲げ破壊強度も向上すると考えられる。

一方、研削材(白印)では研削によって発生した大きな圧縮残留応力が砥粒流動加工により小さくなっていくが、これにともなう強度の低下はみられない。これは図 4.15 に示すように、表面粗さの改善による強度増加と圧縮残留応力の減少による強度低下が相殺するように作用し、その結果として曲げ破壊強度がわずかに増加したものと考えられる。

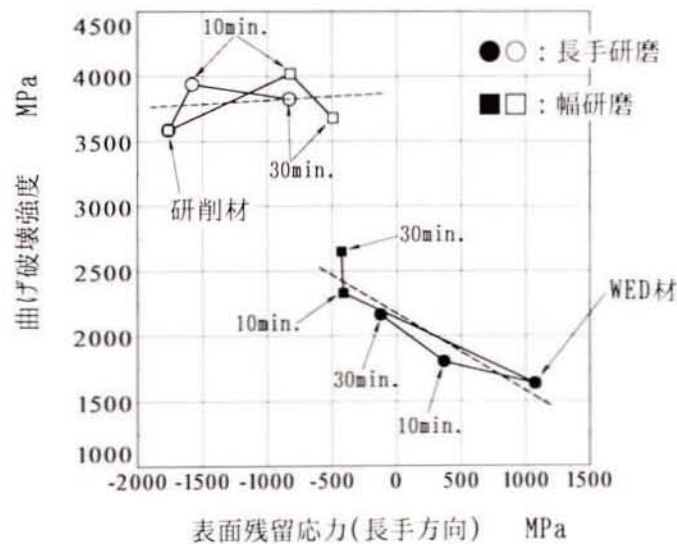


図4.14 曲げ破壊強度と表面残留応力との関係

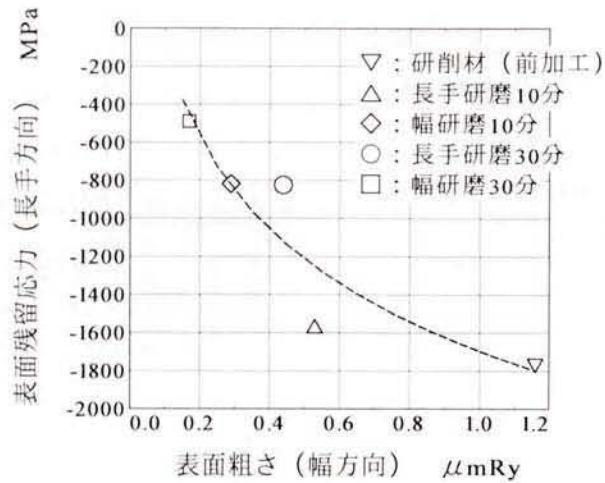


図4.15 研削材における表面残留応力と表面粗さとの関係

次に、両加工材の大きな強度差につき考察する。まず、図 4.14 中の幅研磨(□・■印)のみに注目する。研削幅研磨 30 分と WED 幅研磨 30 分および WED 幅研磨 10 分は、残留応力がほとんど同値であるのに曲げ破壊強度に大きな差がある。これは、図 4.5 に示した表面粗さの相違に起因すると共に、図 4.12 の破面写真などから判断すると次のように考えられる。WED 加工面にはマイクロクラック⁽⁴⁾や脆硬層⁽⁹⁾があり、砥粒流動加工の進行により研磨除去厚さが大きくなると、これらの欠陥で破壊の起点となるような致命的なものが減少していく。WED 幅研磨 30 分は、WED 幅研磨 10 分より除去厚さが大いなので、この欠陥の数は少なくなっており強度が大いだが、 $4\mu\text{m}$ 程度の除去厚さであるためまだ十分欠陥を取り去っておらず、いくつかの欠陥から破壊が同時に発生したと推定される。このことは図 4.11(e)の WED 幅研磨 30 分の破片数が(f)の研削のままに比べ少ないことから明らかである。研削面では WED 面のような大きな欠陥は存在しないので、曲げ荷重により大きな弾性エネルギーが蓄積され破壊時にこれが一気に破壊エネルギーに変換され何か所か同時に破断する。したがって WED 幅研磨 30 分は、破断面では研削に近い様相を示すが強度においては約 1000MPa もの差が現れているものと考えられる。

4.4 小括

金型内面の自動研磨として有効な砥粒流動加工が WC-Co 超硬合金に及ぼす影響を明らかにするため、市販の超微粒子タイプの WC-Co 超硬合金 (10wt.%Co) に砥粒流動加工を施して 3 点曲げ試験を行い、その研磨面特性と破壊強度について調べた。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) WED 材と研削材に、試験片の長手方向と幅方向に砥粒流動加工を施したところ、いずれの方向においても大幅な表面粗さの改善がみられた。
- (2) 砥粒流動加工による表面残留応力の変化を調べたところ、WED 材では本加工前に 1000MPa 程度の大きな引張残留応力が存在していたものが、約 400MPa の圧縮残留応力に変化した。一方、研削材では約 2000MPa の圧縮残留応力がこの加工により 500~1000MPa 程度に減少した。
- (3) 曲げ破壊強度は WED 材では砥粒流動加工により最大 60%増加したが、研削材では約 10%の増加にとどまった。この加工の長手方向と幅方向の影響をみると、WED 材では幅方向に加工したものは長手方向より若干強度が大きくなったが、研削材ではほとんど差はみられなかった。
- (4) 砥粒流動加工によるこのような曲げ破壊強度の変化はつぎのように考えられた。WED 材では本加工による残留応力の引張から圧縮への変化と前加工により発生したマイクロクラックの除去作用により強度が大幅に増加したのに対し、研削材では本加工による表面粗さの減少による強度増加と圧縮残留応力の減少による強度減少が相殺し、全体としては若干の強度増加にとどまった。
- (5) 以上のことから、WC-Co 超硬合金に対する砥粒流動加工はその強度を増加させ、かつ十分な表面性状を得ることができる極めて有効な加工法であることが明らかとなった。

参考文献

- (1) 坂本洋：砥粒流動加工によるバリ取り法，機械技術，36,9(1988)，30-35.
- (2) 坂本洋：エクストールドホーンプロセスによる金型研磨，機械と工具，3(1988)，49-55.
- (3) 精密工学会編：精密工作便覧，コロナ社，(1992)，438.
- (4) 蒲地一嘉，伊藤亨，山本勉，中村誠治：WC-Co 超硬合金のワイヤカット放電加工による機械的性質の劣化，日本金属学会誌，52,6(1988)，581-587.
- (5) 田中啓介，松井元康，田中拓：超硬合金(WC-Co)の X 線応力測定，材料，42,472(1993)，96-102.
- (6) 酒井達雄，田中道七：母数推定の統計的手法，材料，31,348(1982)，941-947.
- (7) 鈴木寿，林宏爾：WC-Co 超硬合金の抗折力におよぼす表面研削の影響，日本金属学会誌，39-7(1975)，754-759.
- (8) 鈴木壽編：超硬合金と焼結硬質材料，丸善，(1995)，133-147.
- (9) 土屋信次郎，福田雅秀，池浩之，鈴木壽：WC-Co 超硬合金のワイヤカット放電加工面に生じる他相，粉体および粉末冶金，39,2(1992)，98-102.

第5章

非接触センサによる形状認識

第5章 非接触センサによる形状認識

5.1 はじめに

本章では、金型の自動磨きシステムを構築するための重要な研究項目である金型形状の自動認識法に関して論ずる。

金型は種類が多く用途も多岐にわたっているので、その形状にもさまざまなものがある。特にプラスチック金型は、最近の消費者の個性化や個別化志向およびメーカー側の製品の差別化などの進展により、意匠デザインが多様化しその形状がますます複雑になってきている。形状を大きなパターンに分類すると、平面、斜面、連続自由曲面およびそれらの面と面が交わる稜部(エッジ部)を有する形状に分けられる。このうち、平面、斜面を含めた連続自由曲面は、その形状を非接触でセンシングするための研究が多数行われている^{(1)~(9)}。また範囲を限定すれば、市販されている形状認識センサで比較的簡単に計測が可能で、センサメーカーからその使用範囲の設定値が示され、精度的な保証がされている。それに対しエッジ部を有する形状(これを不連続面とよぶ)は後述するようにセンサの出力値を単純に測定値にすることはできず、また最悪の場合は測定そのものが不可能になることもある。不連続面を非接触センサにより認識する研究もいくつか行われているが^{(10)~(14)}、この形状認識は特に難しいとされ、それらの研究が全ての形状に応用できるまでには達していない。不連続面にはさまざまなパターンが存在し、全てをひとまとめに論ずるのは不可能であるから、基本的な形状の認識法をまず確立してからより複雑な形状に応用していくことが最善の方法であると考える。そこで本章では基本的な不連続面をいくつか設定し、それらの計測を行ってエッジ部の正確な位置認識が可能になるような解析法を提案していく。

5.2 センサの種類

形状のセンシング法は、接触式と非接触式に大きく分類される。接触式による形状データの取得は、3次元測定機のスキヤニング機能を用いることにより実現でき、その実用機も市販され始めている。スキヤニングスピードは毎秒1cmを超え、位置データ取得量も毎秒50ポイントを超える機種⁽¹⁵⁾も出現している。またCAD/CAMの急速な発達によってリバーエンジニアリングにおけるいわゆる「面張り」機能が充実してきており、両者を一体化して、より現物に近い形状データの取得が可能となってきた。しかし、

接触式においては次のような欠点もある。

- ・製品に傷が付く恐れがある。
- ・製品表面をきれいにする必要がある。
- ・測定形状がプローブの形により制限される。
- ・周囲環境(塵埃、油など)に弱い。
- ・点群データの取得と加工が別工程になる。
- ・一般的に高価な装置である。
- ・大型の装置になりやすい。

本研究における形状認識は、金型の自動磨きを前提にしており、その意味からは形状の点群データの精度として数 μm は不要である。また、安価な磨き加工機の開発を目指す意味からは、測定部と加工部の一体化は避けて通れない課題でもあり、接触式では現実的に不可能である。以上から、本章では非接触センサによる形状認識法を取り上げていく。

非接触センサには、

- ・オートフォーカス式……対象物までの焦点距離により計測
- ・渦電流式……センサヘッド内コイルの磁界による渦電流を距離に変換
- ・超音波式……超音波の発信から受信までの時間を距離に変換
- ・レーザ式……レーザ光の受光素子上の結像位置を距離に変換

があげられる。オートフォーカス式や渦電流式は測定精度が高いものの、測定距離が短くレンジも狭いため、磨き装置への組み込みには不向きである。それに比べ超音波式やレーザ式は測定距離が長く、測定レンジが広い。また市販されている機種も豊富であり、比較的安価である。

超音波式はこの他に、検出対象物体の制約がほとんどないという特長をもっているが、測定面(点)の範囲が広くなりやすく精度も他のセンサに比べるとかなり劣っている。

レーザ式は測定スポットの範囲が小さく、応答速度も速い反面、レーザ干渉があるため、取付や使用法に注意が必要である。測定対象物体からの反射光には正反射光と拡散反射光が存在するが、本章で扱うレーザセンサは測定距離の長いことが条件となるので、拡散反射光を受光するタイプである。

5.3 センサの特性と実験方法

実験に使用したセンサは、キーエンス社製の LB60 型レーザ変位センサである。これは、図 5.1 に示すように発光素子に半導体レーザを用い三角測量の原理で測定を行う反射型レーザセンサ⁽¹⁶⁾であり、測定対象物からの反射光は光位置検出素子(PSD)上に受光され、その位置を電圧で出力することにより高さの変位量を計測するものである。その仕様を表 5.1 に示す。分解能と応答時間は三種類が選択可能になっているが、本実験では測定精度を上げるため分解能 10 μ m を採用した。

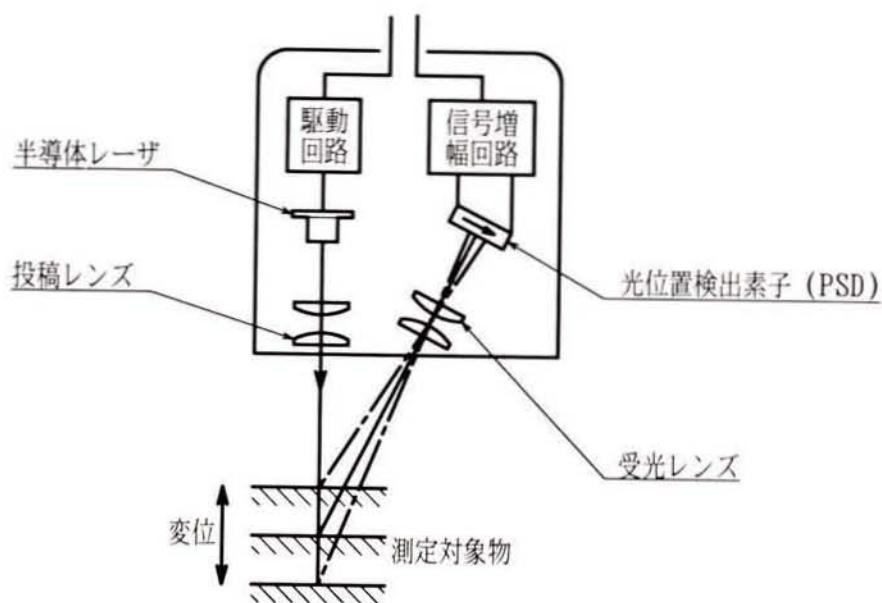


図 5.1 センサの構造

表 5.1 センサの仕様

基準測定距離	mm	100		
測定範囲	mm	±40		
光源		半導体レーザ (波長780 nm)		
スポットレンジ	mm	1.0×2.0 (長方形)		
分解能	μ m	10	40	180
応答時間	ms	500	20	0.7
受光素子		光位置検出素子 (PSD)		
出力電圧		アナログ ±4V (0.1V/mm)		
外形寸法	mm	t17×W45.5×H46		

本センサの特長は、測定範囲が広く分解能が高いことであるが、反射光を扱うため、対象物体の材質や表面状態の影響を受けやすい欠点がある。本実験ではこれらの影響を極力除くために試料表面を白色処理した。

このセンサを図 5.2 に示す加工機の X, Z 軸上に取り付け、Y 軸テーブル上に固定された試料の測定を行う。この加工機の静的運動精度を表 5.2 に示す。また、図 5.3 にシステム構成を、表 5.3 に構成機器を示すが、この中で A 軸は 5.6 節の山形試料の加工実験用である。

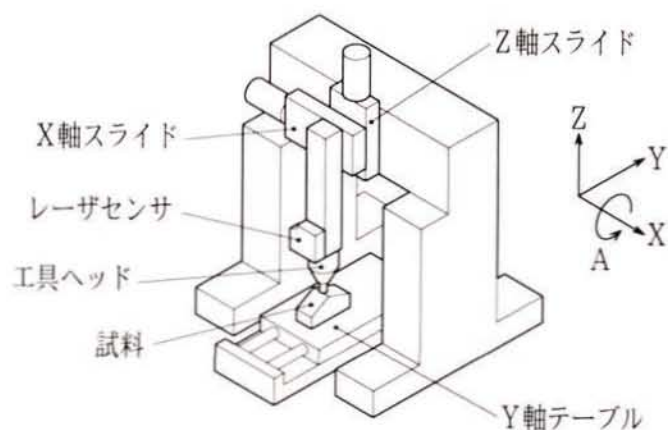


図 5.2 加工機の模式図

表 5.2 加工機の精度

		X 軸	Y 軸	Z 軸
ストローク	mm	55	125	55
繰り返し位置決め精度	μm	1.0	—	1.0
位置決め精度	μm	2.1	4.0	1.8
垂直真直度	μm	2.0	0.2	2.3
水平真直度	μm	—	7.1	—
ピッチング	sec	3.9	7.0	2.2
ヨーイング	sec	2.4	21.5	3.3

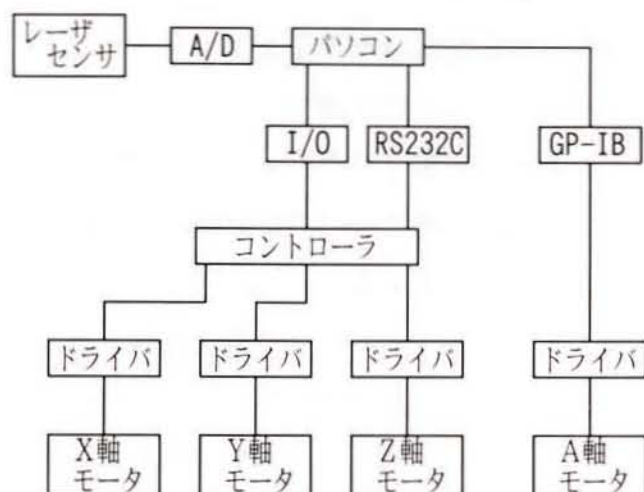


図 5.3 システム構成

表 5.3 構成機器

制御軸	X・Z軸	Y軸	A軸
モータ	DCサーボモータ 山洋電気 R720B-012EL8	DCサーボモータ 山洋電気 R840-012EL8	減速機付DCサーボモータ ハーモニックドライブ RH-5A-5502-E036-A0
ドライバ	サーボドライバ 山洋電気 PDT-A12E-15	サーボドライバ 山洋電気 PDT-A13E-15	DCサーボコントロール ユニット
コントローラ	デジタル位置決め装置 山洋電気 PDC-330E-PS		ハーモニックドライブ HS430G-05
パソコン	デスクトップ型パソコン (RS-232Cインタフェース 装備) NEC PC-801FA		
A/D 変換ボード	積分型アナログ・デジタル変換モジュール CONTEC AD12-16L(98)		
I/O ボード	双方向入出力モジュール CONTEC W-BUS(98)		
GP-IB ボード	GP-IB(IEEE-488)インタフェースボード NEC PC-9801-29n		

5.4 段差位置の認識法

不連続面のうちで、最も単純なものは段差である。ここではまず上の水平面と下の水平面の上に垂直面がある段差形状をあつかうことにする。エッジにはコーナーアールや面取りはないものとする。上下の水平面がセンサスポットよりも十分に広ければ、この高さはセンサの保証された精度で測定可能であり(ノイズ等の外乱要素がない場合)、垂直面による段差位置の測定のみが問題となるはずであり、これによれば1つの段差(単段差とよぶ)も複数の段差(多段差とよぶ)も同様にセンシングできると推測される。

本実験に使用したレーザセンサは前節に述べたように反射型であるから、センサの向きと段差の方向によっては反射光が段差で遮へいされ、不反応を起こすことがある。この対策としてはセンサの取付方向を変え、適切な位置関係にすることである。本実験では図 5.4 に示すような方向で測定を行うことにより不反応状態を避けた。測定間隔は 0.05mm ずつの等間隔に設定し、各点の試料高さを計測した。レーザのスポットが段差にかかると、図 5.5 に示すようにスポットが段差により上面と下面に2分割される状態

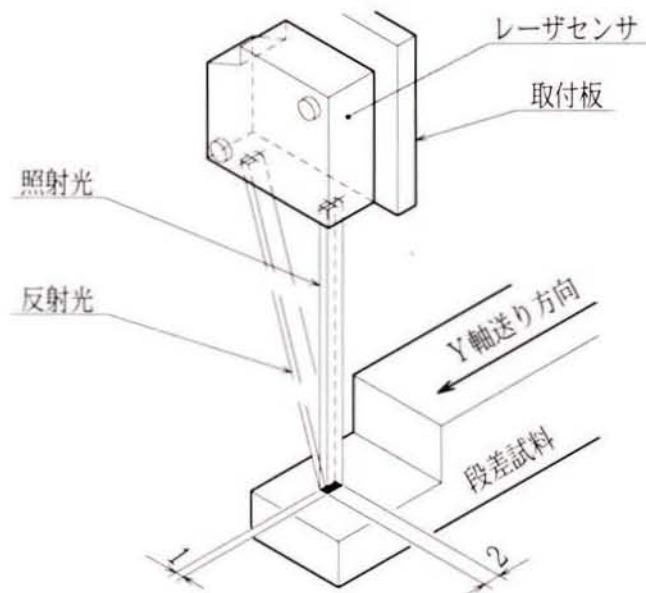


図 5.4 センシング方向

が生じる。PSD は、CCD イメージセンサのようにフォトダイオードの画素数の単位で測定精度が決まるものとは異なり非分割型の素子であるから⁽¹⁶⁾、連続した位置検出が可能で高感度な反面、分割された反射光を両方とも感知する。

段差位置をセンシングしたときのセンサ出力値を図 5.6 に示す。図より、試料形状は直角のエッジを有する段差であるが、センサ出力値は下面から上面にかけて漸増している。したがってこの値だけでは平面の高さは測定できても正確な段差位置が分からない。

図 5.7 は図 5.6 の値を 4 点前進差分法⁽¹⁷⁾で数値微分した結果を段差と位置を合わせて示したものである。図より、段差位置と最大微分値の現れる位置が一致しており、この方法を用いることにより段差の位置が認識できることが分かる。

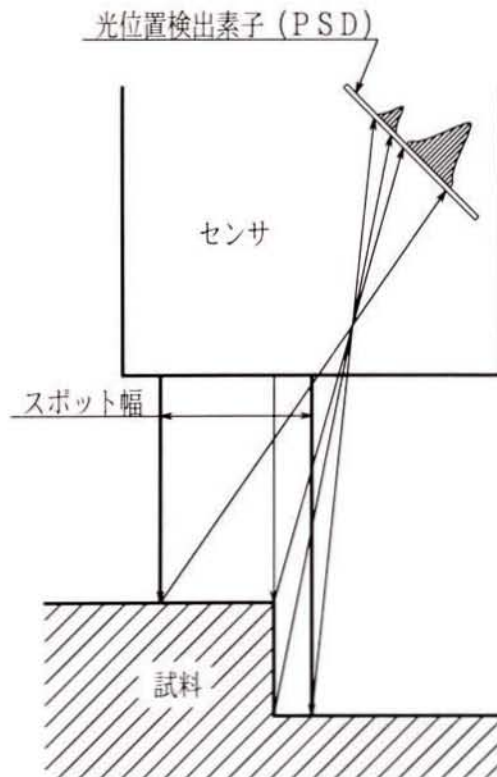


図 5.5 レーザ光の受光模式図

図 5.8 は二段の段差形状，図 5.9 は凸形の段差形状であるが，いずれも水平面の幅がセンサスポット幅よりも広いので，(a)に示すように水平面の高さは正確に測定でき，また(b)に示すように段差位置は数値微分の最大値または最小値を示す位置と一致しており正確に認識ができています．

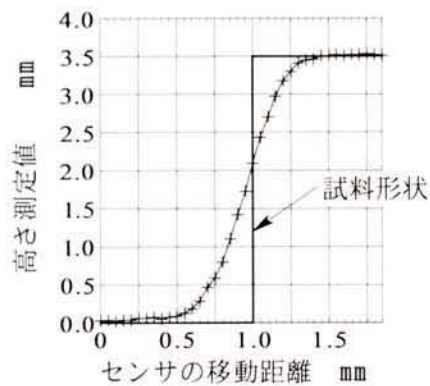


図 5.6 段差試料の高さ測定

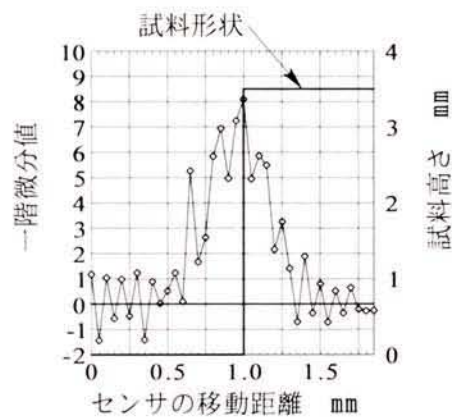
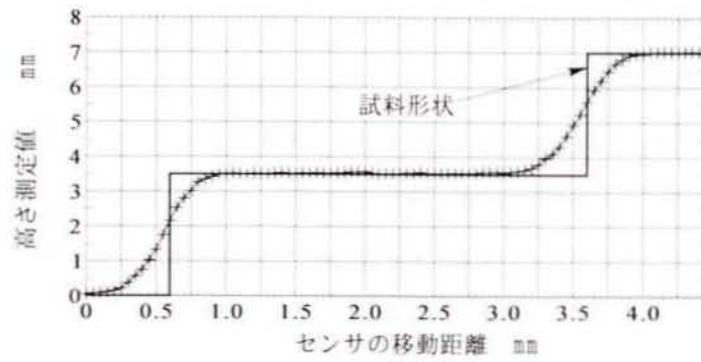
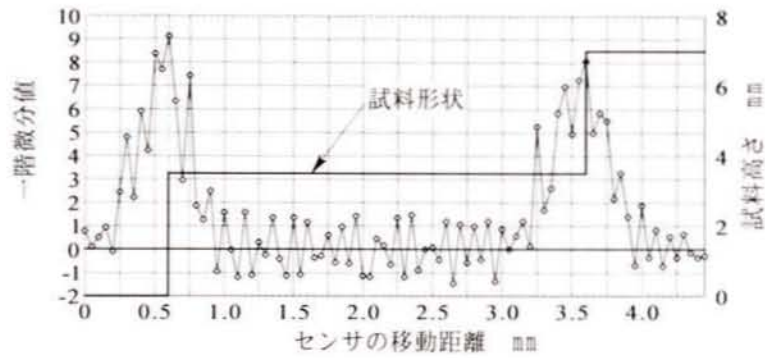


図 5.7 段差測定値の数値微分

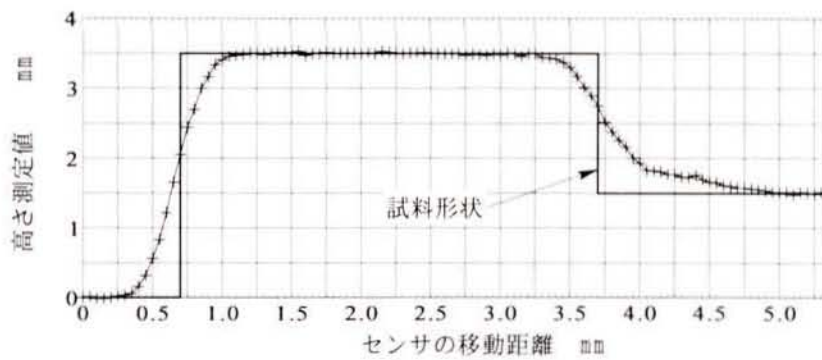


(a) 高さ測定

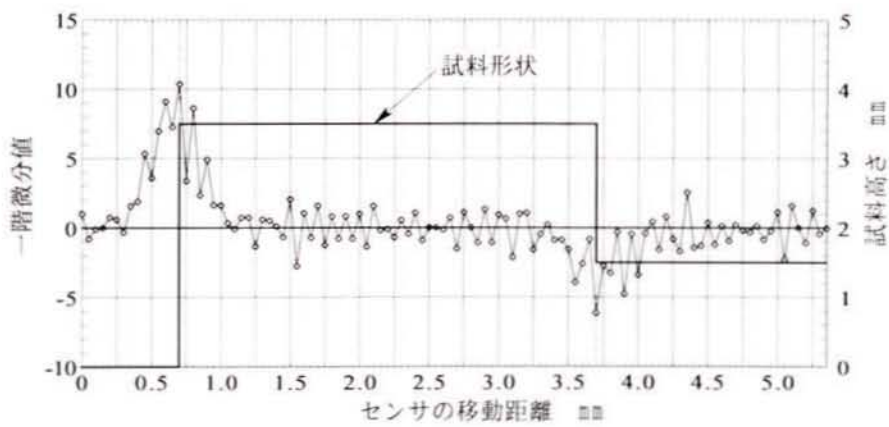


(b) 測定値の数値微分

図5.8 複数段差試料の形状認識



(a) 高さ測定



(b) 測定値の数値微分

図5.9 凸形段差試料の形状認識

5.5 小幅度凸形試料の形状認識

小幅度凸形試料とは互いに平行な2つの垂直面の幅が、使用するレーザセンサのスポット幅よりも狭くなっている矩形の凸形試料のことをいう。水平面と垂直面が互いに直角に交わるエッジにはコーナアールや面取りはないものとする。この形状は上面が十分には広くないので、前節よりも形状認識が困難になると考えられる。

5.5.1 小幅度凸形試料の高さ測定

凸幅がスポット幅よりも狭い試料の測定では、レーザスポットが段差によって三つに分割される位置関係が生じるため、測定結果が段差とは異なってくると考えられる。そこで試料形状を図5.10のように設定し、この測定を行った。

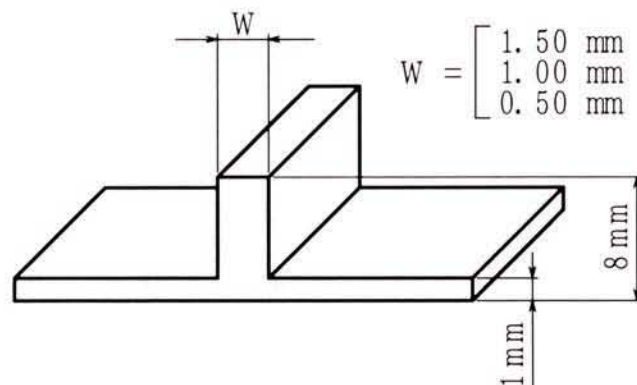
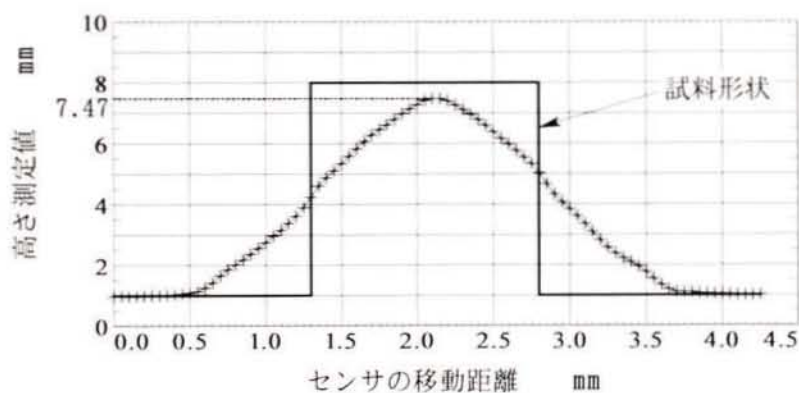


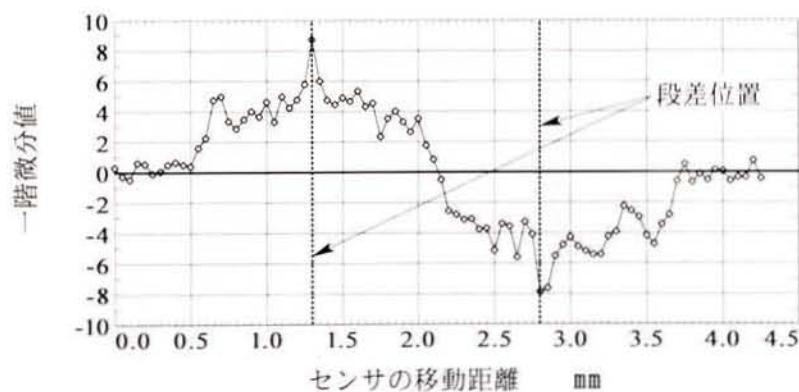
図 5.10 小幅度凸形試料形状

図 5.11, 図 5.12, 図 5.13 は、それぞれ凸幅 1.50mm, 1.00mm, 0.50mm の試料を測定した結果で、(a)は 0.05mm 間隔での高さ測定値をプロットし、試料の形状と比較して示したものである。(b)はその値を元に、前節と同じ方法で各測定点における一階微分を行った値である。前節によれば、単段差の一階微分値が最大値または最小値となる位置は段差位置と一致するので、これを小幅度凸形の測定にも適用できるか実験したものである。

各図の(b)をみると,凸幅 1.50mm と 1.00mm の場合は試料形状に対して段差位置が 0.05mm 以内の誤差で認識できていることがわかる. 一方,凸幅 0.50mm の試料については認識されていない. また(a)をみると,凸部高さは実際の高さより低くなっており,幅が狭くなるにつれてその傾向が大きくなっている. したがって,この測定結果だけでは小幅凸形の形状を認識することはできない. そこで,凸幅および高さの誤差の原因を明らかにし,それを基に形状認識が可能になるかを検討するために理論解析を行った.



(a) 高さ測定



(b) 測定値の数値微分

図 5.11 凸幅 1.50mm の凸形試料の形状認識

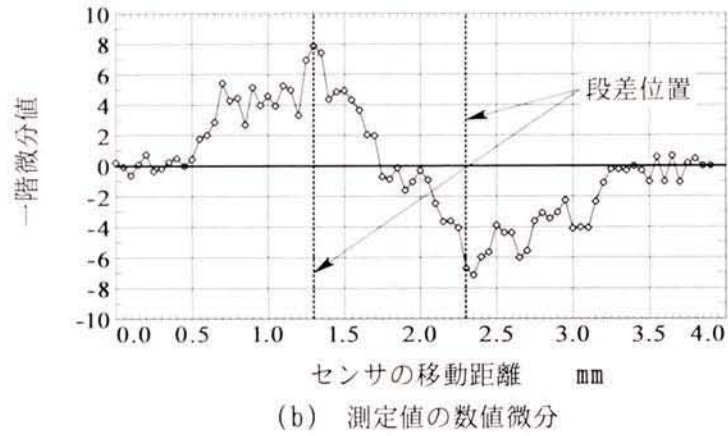
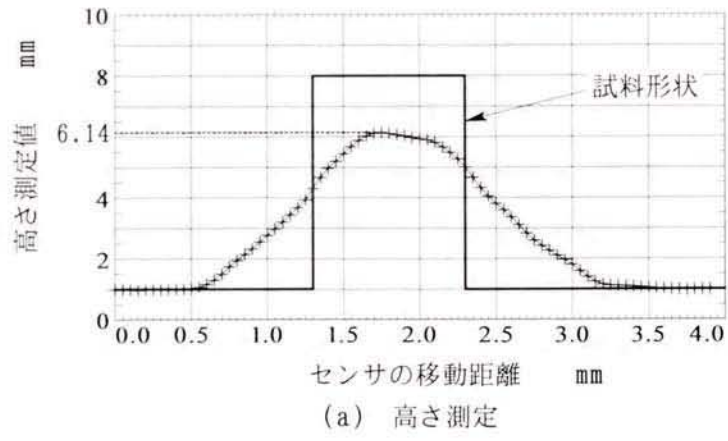


図5.12 凸幅1.0mmの凸形試料の形状認識

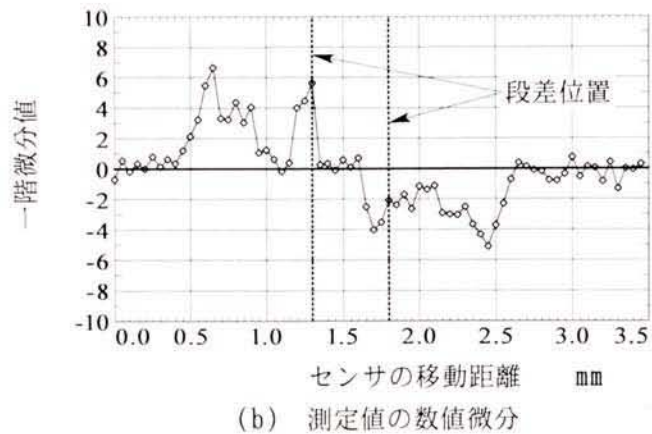
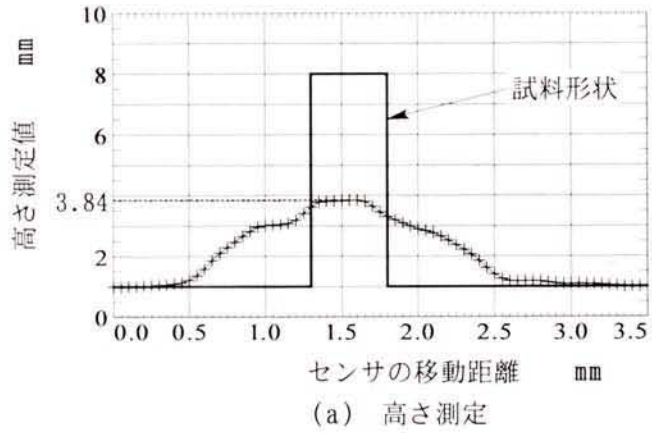


図5.13 凸幅0.5mmの凸形試料の形状認識

5.5.2 高さの解析

このセンサのセンシングは、半導体レーザー光が投光レンズを通して集光され試料面に照射される方式をとっているため、その光強度は正規型の分布をしていることが知られている⁽¹⁸⁾。スポットがエッジ部に照射されている場合には、スポット面が複数に分割されるので、光強度分布を考慮した解析を行っていく必要がある。すなわち、この光強度の分布状態と測定高さとの関係式を導くことにする。

以下の解析法は正規分布関数を用いるので正規解析とよばれているが、この他に孫⁽²⁰⁾らにより三角解析が提案されている。これについては後述する。

図 5.14 は小幅凸形試料のセンシングの模式図で、図中の記号の意味は次のとおりである。

- H : 試料凸部の上面の高さ
- L : 試料凸部の下面の高さ
- W : 試料凸部の幅
- R : レーザ光の照射スポット幅
- S : スポット幅内のレーザー光の全強度
- $\phi(z)$: 照射レーザーの光強度分布の状態を表す正規分布曲線

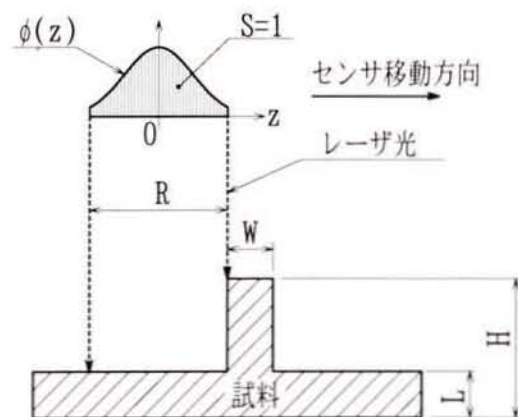


図 5.14 センシングの模式図 (スタート点)

図より、 S は R の幅における $\phi(z)$ と z 軸に囲まれた部分の面積として表され、 $S=I$ とすることにより無次元化して考える。また、センサは図の左から右へ移動するものとし、図示位置をスタート点とする。スポットと凸部の位置関係は、センサの移動に伴い図5.15に示す3つのパターンが順次現れる。(a),(b),(c)のそれぞれについて、センサが x 移動したときの高さ測定値(センサ出力値)を表す関数 $f(x)$ を求める。

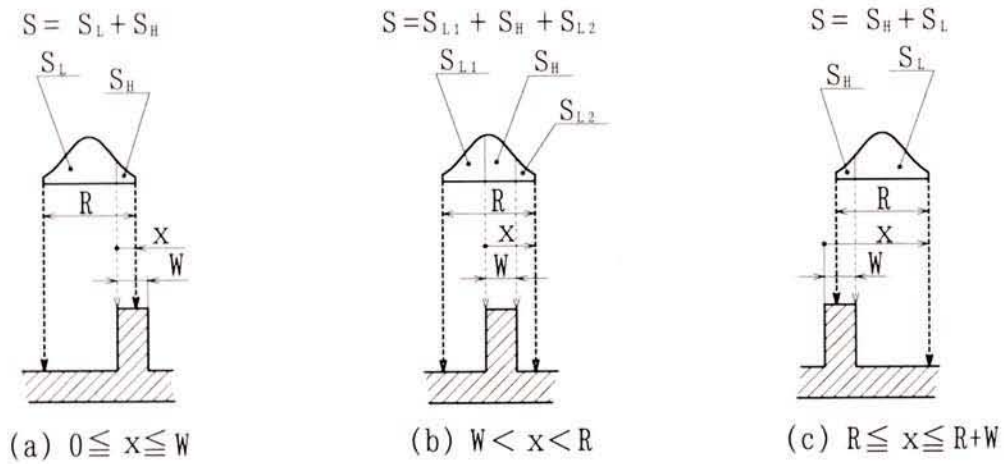


図 5.15 センシングパターン

(a) $0 \leq x \leq W$ のとき

$$\begin{aligned}
 f(x) &= L \cdot S_L + H \cdot S_H \\
 &= k \left\{ L \cdot \int_{-t}^{2t(R/2-x)/R} \phi(z) dz + H \cdot \int_{2t(R/2-x)/R}^t \phi(z) dz \right\} \quad (5.1)
 \end{aligned}$$

ここで、 t はスポット端における基準化確率変数 z の区間位置⁽¹⁹⁾、すなわちスポット中心からスポット端までの間にある正規分布の範囲を示している($-t$ はスポット左端)。したがって積分区間 $2t(R/2-x)/R$ は、試料段差によって二分割されているスポットの区間位置を表している。また、 $\phi(z)$ は標準正規分布関数で

$$\phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) \quad (5.2)$$

と表され、 k は $S=I$ にするための係数で、

$$\frac{1}{k} = \int_{-l}^l \phi(z) dz \quad (5.3)$$

である。

(b) $W < x < R$ のとき

$$\begin{aligned} f(x) &= L \cdot S_{L1} + H \cdot S_H + L \cdot S_{L2} \\ &= k \left\{ L \cdot \int_{-l}^{2l(R/2-x)/R} \phi(z) dz + H \cdot \int_{2l(R/2-x)/R}^{2l(R/2-x+W)/R} \phi(z) dz + L \cdot \int_{2l(R/2-x+W)/R}^l \phi(z) dz \right\} \end{aligned} \quad (5.4)$$

積分区間 $2l(R/2-x)/R$ は左側段差、同じく $2l(R/2-x+W)/R$ は右側段差に相当する区間位置を表している。

(c) $R \leq x \leq R+W$ のとき

$$\begin{aligned} f(x) &= H \cdot S_H + L \cdot S_L \\ &= k \left\{ H \cdot \int_{-l}^{2l(R/2-x+W)/R} \phi(z) dz + L \cdot \int_{2l(R/2-x+W)/R}^l \phi(z) dz \right\} \end{aligned} \quad (5.5)$$

式(5.1)、(5.4)、(5.5)を実際に計算するにあたっては、式(5.2)の標準正規分布関数が含まれているので、この定積分を解く必要がある。式(5.2)の定積分値は標準正規確率表から容易に読み取ることができるが、自動計測システムを構成するためにはコンピュータ計算が必要なので以下の手法を用いた。すなわち、式(5.2)の指数関数部は、

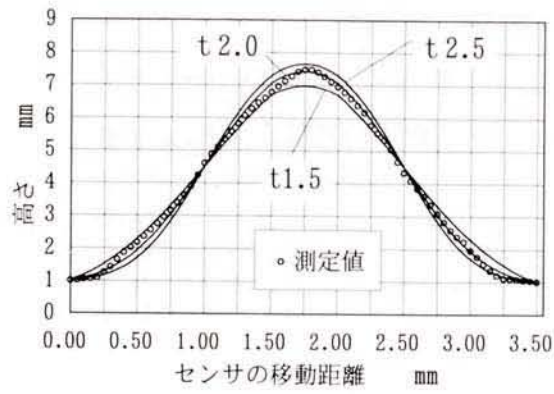
$$\exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) = 1 - \frac{z^2}{2 \cdot 1!} + \frac{z^4}{2^2 \cdot 2!} - \frac{z^6}{2^3 \cdot 3!} + \cdots + (-1)^n \frac{z^{2n}}{2^n \cdot n!} \pm \cdots \quad (5.6)$$

に級数展開できるので、その定積分は

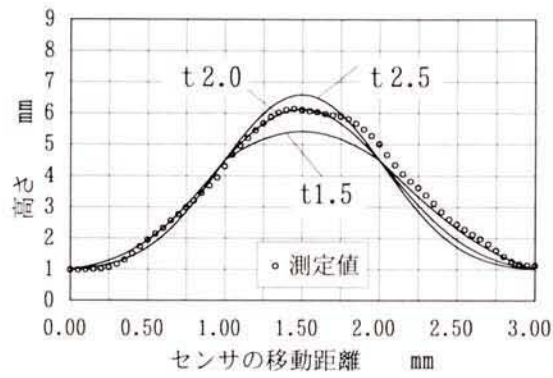
$$\int_0^x \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz = x - \frac{x^3}{3 \cdot 2 \cdot 1!} + \frac{x^5}{5 \cdot 2^2 \cdot 2!} - \frac{x^7}{7 \cdot 2^3 \cdot 3!} + \cdots + (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)2^n \cdot n!} \pm \cdots \quad (5.7)$$

と表される。この交代級数の積分区間を式(5.1), (5.4), (5.5)の区間にあてはめて、第20項目まで繰り返し計算した。これにより小数点以下十桁以上の正確な値が得られる。

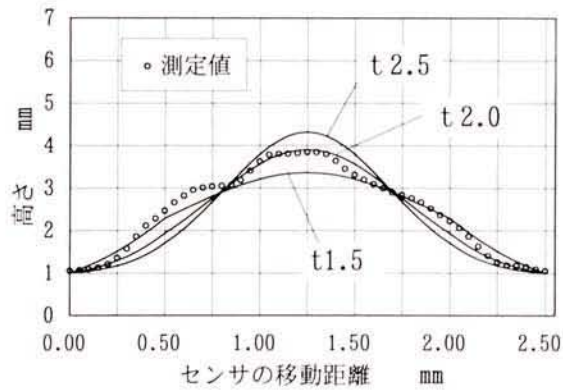
図 5.16 は図 5.11, 5.12, 5.13 の測定値と、式(5.1), (5.4), (5.5)の計算結果を比較して示したものである。 t の値は使用するセンサによって異なっているので、測定値に対して計算値の整合性をみるために、 t にいくつかの値を代入して計算した。図においては $t1.5$, $t2.0$, $t2.5$ の場合を表示しているが、この間をさらに細かく 0.1mm 間隔で計算すると、 t に 2.0mm を与えたとき最大測定値と最も近い計算値を示したので、このセンサの場合には $t2.0$ が最適値といえる。図によれば、計算値による曲線が測定値に対して近い線状を示すことから、この解析方法が有効であることが分かる。



(a) 凸幅1.5mm の解析高さ



(b) 凸幅1.0mm の解析高さ



(c) 凸幅0.5mm の解析高さ

図 5.16 小幅凸形の解析高さ

5.5.3 凸幅の解析

5.5.1 項で、段差位置を認識する方法として高さ測定値を数値微分したので、この項では解析的検討として式(5.1), (5.4), (5.5)の各高さ計算式を、センサの移動量 x で微分することにする。これらの正規確率関数式は変数 x が積分区間にあるので、まずこの一般形の導関数を示すと、

$$\frac{d}{dx} \left\{ \int_{cx+d}^{ax+b} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz \right\} = a \cdot \exp\left[-\frac{(ax+b)^2}{2}\right] - c \cdot \exp\left[-\frac{(cx+d)^2}{2}\right] \quad (a, b, c, d : \text{定数})$$

(5.8)

となる。これを用いて各式の計算を行う。

(a) $0 \leq x \leq W$ のとき

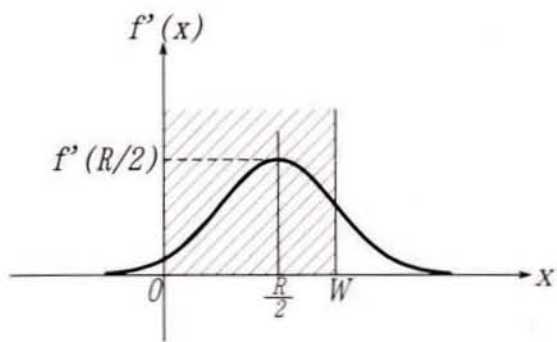
(5.1)式を x で微分すると、次式になる。

$$f'(x) = \frac{2kt}{\sqrt{2\pi} \cdot R} (H-L) \cdot \exp\left[-\frac{\{2t(x-R/2)/R\}^2}{2}\right] \quad (5.9)$$

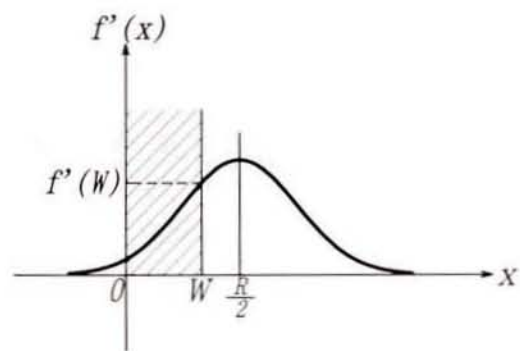
これをグラフにすると、図 5.17 のように $x=R/2$ を軸とした対称曲線で表される。(1)が $W \geq R/2$ の場合、(2)が $W < R/2$ の場合である。ここで(1)をみると、 $x=R/2$ のときに式(5.9)は最大値

$$f'(R/2) = \frac{2kt}{\sqrt{2\pi} \cdot R} (H-L) \quad (5.10)$$

をとることがわかる。この $x=R/2$ は、センサスポットの中心が凸部左側段差位置と一致したときである。一方、(2)の場合 $x=W$ のときに式(5.9)の最大値が現れるので、この位置 x は凸幅 W の値により変化してしまう。すなわち、センサスポット中心が凸部に対して一定の位置にならない。



(1) $W \geq R/2$ のとき



(2) $W < R/2$ のとき

図 5.17 $0 \leq x \leq W$ の場合の微分値曲線

(b) $W < x < R$ のとき

式(5.4)を x で微分すると、次式になる。

$$f'(x) = \frac{2kt}{\sqrt{2\pi} \cdot R} (H - L) \left\langle \exp\left[-\frac{\{2t(x - R/2)/R\}^2}{2}\right] - \exp\left[-\frac{\{2t(x - R/2 - W)/R\}^2}{2}\right] \right\rangle \quad (5.11)$$

これをグラフで表すと図 5.18 になる。(1)が $W \geq R/2$ の場合、(2)が $W < R/2$ の場合である。それぞれ実線で表した曲線が式(5.11)の指数関数の第一項目、点線が第二項目を示している。実線から点線を引いた値が式(5.11)の $f'(x)$ になるから、(1)の場合 x が W に最も近づいた点で式(5.11)の最大値をとることが分かる。ただし、(a)の $0 \leq x \leq W$ も含めた $0 \leq x < R$ の範囲でみれば、この式(5.11)の最大値は式(5.10)の $f'(R/2)$ よりも小さい値となる。したがって $W \geq R/2$ のときは、 $0 \leq x < R$ の範囲での $f'(x)$ の最大値は、 $x = R/2$ のときに現れると解析される。一方、(b)のグラフからは、式(5.11)の最大値のどの位置で現れるか特定できない。そこで式(5.11)の最大値をとるときの x が、 W によりどんな値になるか実際に計算すると図 5.19 のようになる。この図から、 $W < R/2$ の場合には式(5.11)の最大値が $x = R/2$ 以外の位置で現れていることが分かる。すなわちセンサスポット中心が凸部とずれた位置で最大値になってしまう。

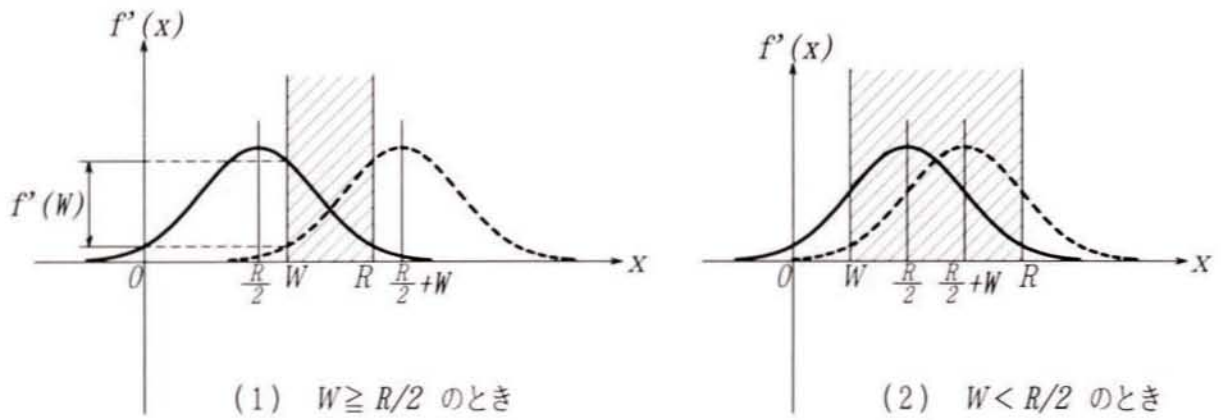


図 5.18 $W < x < R$ の場合の微分値曲線

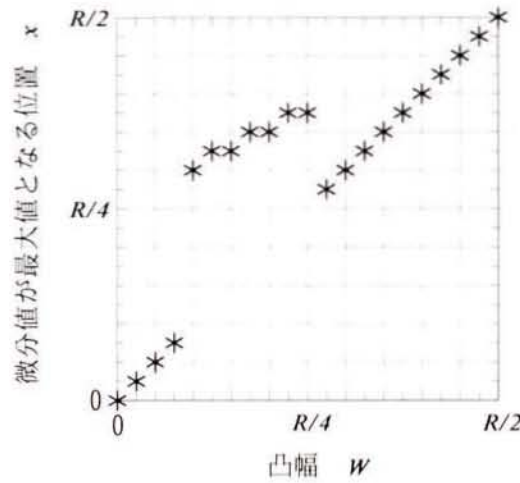


図 5.19 $W < R/2$ のときの W と x の関係

(c) $R \leq x \leq R+W$ のとき

式(5.5)を x で微分すると、次式になる。

$$f'(x) = -\frac{2kt}{\sqrt{2\pi} \cdot R} (H-L) \cdot \exp\left[-\frac{\{2t(x-R/2-W)/R\}^2}{2}\right] \quad (5.12)$$

これをグラフにすると、図 5.20 のように $x=R/2+W$ を軸とした対称曲線で表される。
 (1) が $W \geq R/2$ の場合、(2) が $W < R/2$ の場合である。(1) の場合 $x=R/2+W$ のときに式(5.12)は最小値

$$f'\left(\frac{R}{2}+W\right) = -\frac{2kt}{\sqrt{2\pi}\cdot R}(H-L) \quad (5.13)$$

をとる．この $x=R/2+W$ はセンサスポットの中心が凸部右側段差位置と一致したときである．一方，(2) の場合 $x=R$ のときに式(5.12)は最小値をとることになる．

最大値の場合と同じ考え方をすると， $W \geq R/2$ のときは， $W < x \leq R+W$ の範囲での $f'(x)$ の最小値は， $x=R/2+W$ のときに現れその値は式(5.13)になる．また， $W < R/2$ のときには $f'(x)$ の最小値が x のどの位置で現れるか特定できない．

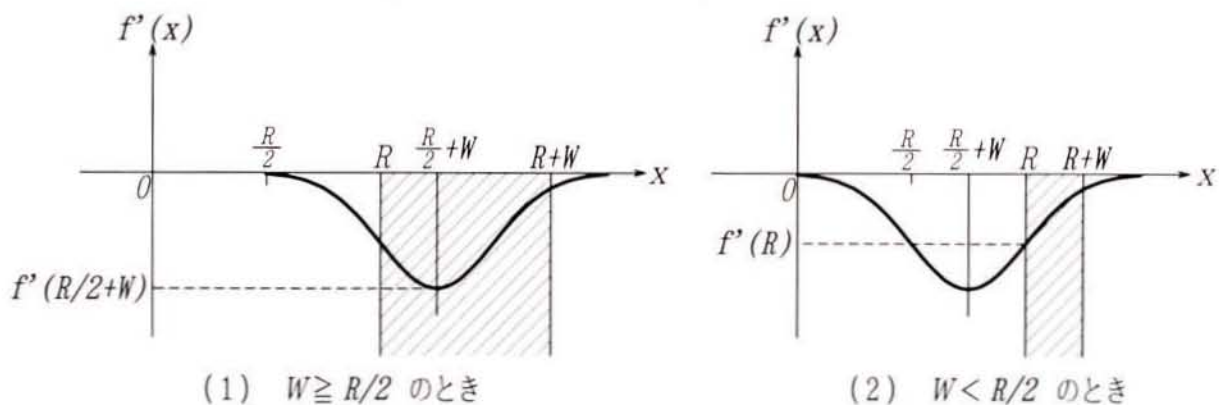


図 5.20 $R \leq x \leq R+W$ の場合の微分値曲線

x の全範囲 ($0 \leq x \leq R+W$) において，実際に $W=1.50\text{mm}$ ， 1.00mm ， 0.50mm の三種類の凸幅をそれぞれ式(5.9)，式(5.11)，式(5.12)に代入し $f'(x)$ を計算した結果が図 5.21，図 5.22，図 5.23 である．この微分値のグラフで，縦軸最小値を示す横軸位置と縦軸最大値を示す横軸位置の差をとれば，凸幅 1.50mm と 1.00mm では段差位置が正確に認識できているが，凸幅 0.50mm ではできていない．これは 5.5.1 項の実測定と同じ結果となっている．

試料凸幅 W の範囲 $0 < W \leq R$ に対して， $f'(x)$ の最小値をとる x の位置と最大値をとる x の位置の差を計算し(解析幅とよぶ)，これと実際の試料凸幅 W との関係を示したのが，図 5.24 である．これによると， $W \geq 1\text{mm}(R/2)$ のときは解析幅が W と等しくなるが， $W < 1\text{mm}$ のときには両者が一致していないことがわかる．これにより，凸幅がセンサスポット幅の $1/2$ 以上ある場合に限り，この凸部段差位置を認識できることが明らかになった．

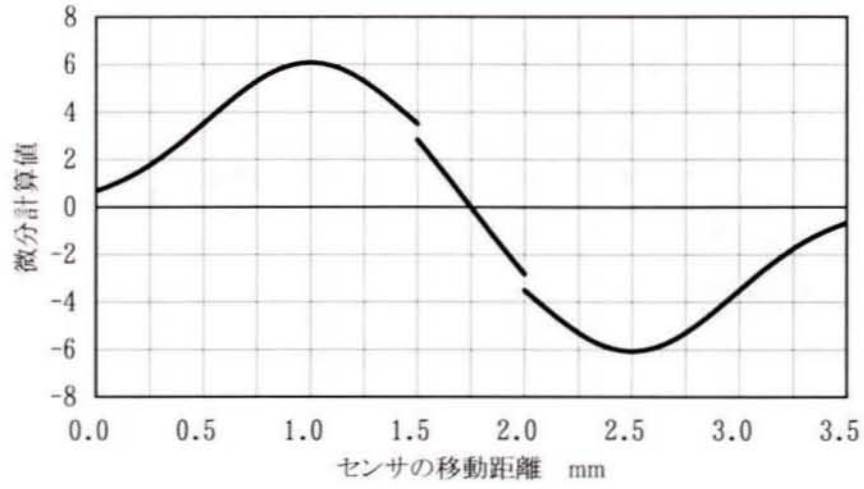


図 5.21 凸幅 1.5mm の微分計算値

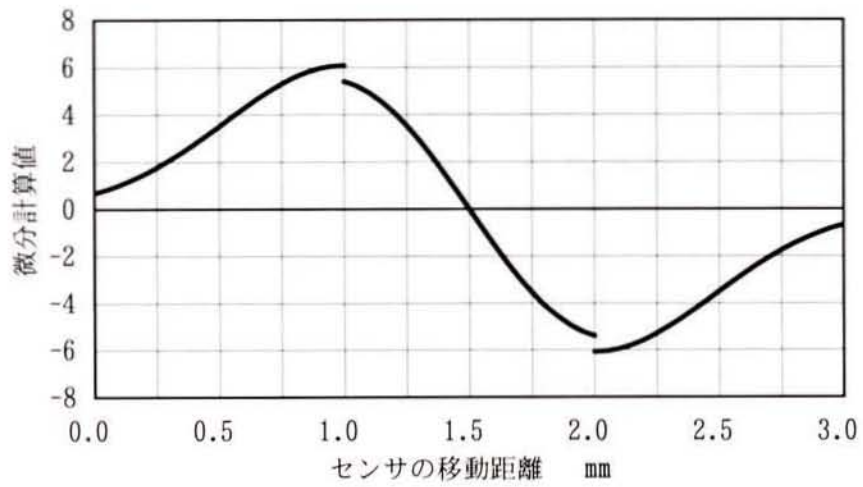


図 5.22 凸幅 1.0mm の微分計算値

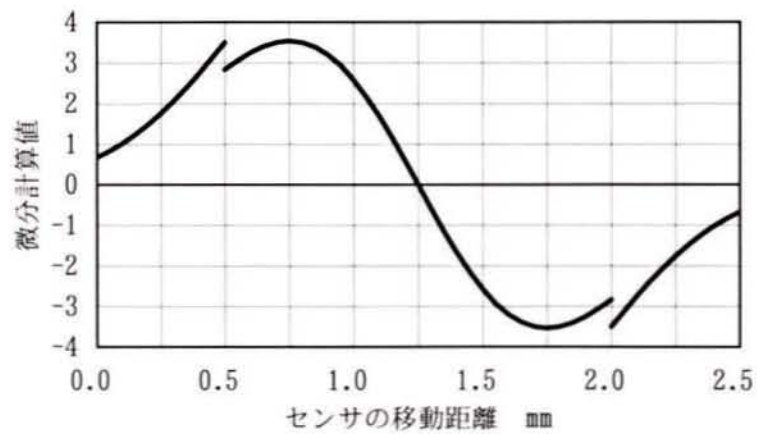


図 5.23 凸幅 0.5mm の微分計算値

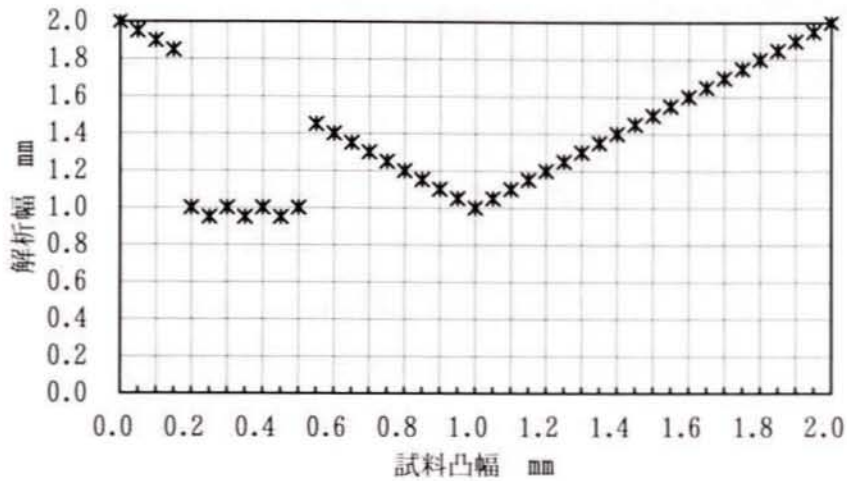


図 5.24 解析幅と試料凸幅の関係

5.5.4 凸幅を用いた高さの補正

高さ測定の最大値は、センサスポット中心が凸幅の中心まで進んだ位置 $x=(R+W)/2$ で現れる。センサの最大出力値を Y_{max} 、測定値を一階数値微分することによりえられる凸幅を w とし、これらを高さの解析式(5.4)に代入し変形すると

$$H = \frac{Y_{max} - L}{2k \cdot \int_0^{w/R} \phi(z) dz} + L \quad (5.14)$$

がえられる。凸幅がセンサスポット幅の 1/2 以上ある凸部については w が認識できているので、この補正式により測定値から凸部高さを精度よく求めることができる。表 5.4 は凸部の測定値に式(5.14)の計算を行って得られた補正值と試料高さを比較したものであり、凸幅 0.50mm 以外はほぼ正確に認識できていることがわかる。

表5.4 凸部高さの補正計算結果 (mm)

試料凸幅	試料凸部高さ	最大測定高さ	補正計算高さ	補正誤差
1.50	8.00	7.47	8.05	0.05
1.00	8.00	6.14	8.02	0.02
0.50	8.00	3.84	3.91	-4.09

5.5.5 三角解析との比較

以上、正規解析による小幅凸形状の認識について論じたが、ここで三角解析との比較検討を行う。5.5.2 項で述べたように、本実験に使用したレーザセンサの光強度はほぼ正規型の分布をしているが、三角解析はこれを近似的に三角形分布として計算を行っている。この解析法の特長は、光強度分布を表す関数が直線になるため、定式化が容易で、式(5.7)のような級数の繰り返し計算も不要になることである。しかも、小幅凸形の段差位置の認識においても、解析上の説明が可能であり、非常に有効な方法である。しかし、試料高さを認識するためにセンサの測定高さから補正計算を行う場合には、実際の光強度分布との形状誤差が大きいため計算後の誤差も大きくなる。表 5.5 は前述の図 5.10 に示す 8 mm の高さをもった小幅凸形試料を、凸幅 0.50mm~2.00mm まで 8 種類作製し、センサによって実際に凸部の測定を行ってその最大値から補正高さを求めたものである。正規解析の計算は式(5.14)で行い、三角解析式は次式を引用⁽²⁰⁾した。

$$H = \frac{Y_{max} - \left(1 - \frac{W}{2}\right)^2 \cdot L}{1 - \left(1 - \frac{W}{2}\right)^2} \quad (5.15)$$

H : 補正高さ mm

Y_{max} : 最大測定値 mm

W : 凸幅 mm

L : 試料下面の高さ (=1mm)

なお、両計算における凸幅は数値微分による認識幅ではなく、試料の幅をそのまま用いて高さの補正計算のみが比較できるようにした。図 5.25 は、試料の凸部上面高さ (=8mm) に対して表 5.5 の補正高さがどれくらいの誤差になっているかを示したものである。使用したセンサのスポット幅が 2mm であるから、凸幅 2mm での補正高さの誤差は測定の誤差そのまま、両解析法の差もない(表 5.5 により誤差 0.05mm)。凸幅が 2mm より小さくなると正規解析に比べ三角解析の誤差が大きくなっており、凸幅が小さくなるにつれ大きくなっていく。この三角解析の高さ補正誤差が実用上許容できるものであるかは、自動磨きシステムの設計法にも関連する問題であるから一概に判断することはできないが、いずれにしても正規解析を用いて補正誤差を小さくしていく取組は

有用であり、また最近ではコンピュータによる級数の繰り返し計算速度も飛躍的に速くなっているため、形状の自動認識計算がシステム全体に大きな時間的負担を与えることはない。したがって、今後実用可能な自動磨きシステムを開発していくにあたって、正規解析を用いる意義は大きいと考える。

表5.5 正規解析と三角解析の比較

(mm)

凸幅	高さの最大測定値	解析による補正高さ	
		三角解析	正規解析
0.50	3.84	7.50	7.85
0.80	5.24	7.63	7.83
0.90	5.69	7.73	7.90
1.00	6.14	7.85	8.02
1.20	6.71	7.80	7.95
1.50	7.47	7.90	8.05
1.80	7.84	7.91	8.01
2.00	7.95	7.95	7.95

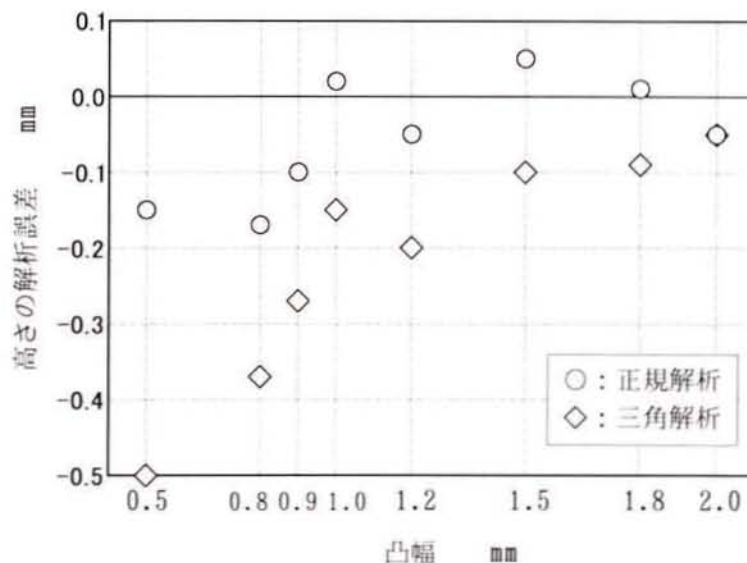


図5.25 正規解析と三角解析の高さ誤差の比較

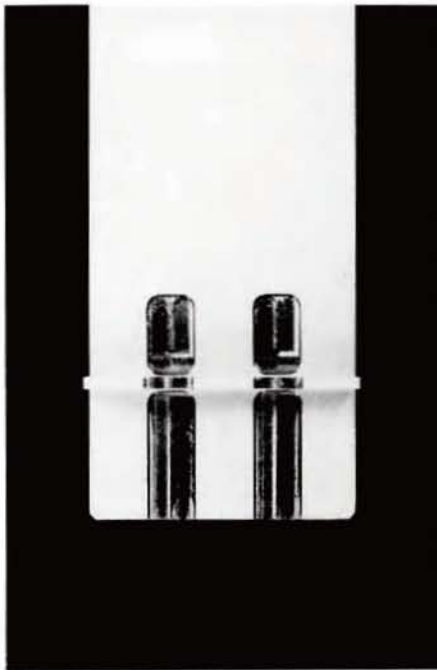
5.5.6 切削実験による検証

本章で用いているレーザセンサは凸幅 1.00mm 以上に対して形状認識が可能と分かったので、1.20mm の凸幅を有する凸形試料による実験的な検証を行った。

センシングとそれによる解析計算を行って位置データを作成し、これを磨き加工用の NC データに変換して図 5.2 に示した加工機に指令することにより、磨き工具が正確な位置や移動経路をとれるかを確認した。ここでは砥石による磨き加工の代わりに、加工システムの精度が明確な形で試料に転写できる切削加工を行った。回転主軸は日本精密機械工作(株)製のハンドグラインダーを用い、これを加工機のヘッド部に垂直に固定した。切削工具には直径 3mm のエンドミルを用い、試料凸部の上面と下面の溝削りを行うこととし、工具軸方向の切込み深さは 0.5mm に設定した。段差壁面の側面削りは工具の剛性が小さくびびり発生のおそれがあるため、エンドミル外径が段差壁面と干渉しない長さ 1.7mm(エンドミル半径 1.5mm+干渉回避量 0.2mm)を工具位置オフセット量として設定し、センシングにより認識された段差の水平方向位置データに加算または減算した。

図 5.26 はこの切削痕の写真である。(a)は凸部の上方から、(b)は横方向からである。それぞれの図に加工溝が二カ所ずつあるが、左側の溝は式(5.14)による高さの補正値を、右側は測定値そのものを用いて切削したものである。

また、この切削痕の測定結果を図 5.27 に示す。図より、式(5.14)の高さ補正式を用いることにより凸部切削深さが 1.70mm から 0.58mm になっており、この高さ補正の効果が大きいことは明らかである。ただし設定切込み深さ 0.5mm に対する誤差は 0.08mm あり、また下面のエンドミル外径切削部と段差壁面との距離は 0.16mm になっているから、設定したオフセット量とは 0.04mm の誤差がある。これらの原因は、高さ測定誤差、凸幅認識誤差、加工機の位置決め誤差、切削工具の剛性による誤差であると考えられる。使用したセンサの測定精度や測定間隔(0.05mm)から判断すると、高さ測定誤差と凸幅認識誤差が大きいと考えるのが妥当であるが、本研究の目的が自動磨き作業であることから、誤差としては許容できる範囲にありこの認識法の加工システムへの応用は十分可能である。



(a) 切削痕全体



(b) 凸部の切込み

左側溝：補正計算による加工

右側溝：補正計算なしの加工

図 5.26 凸幅 1.2mm の凸形試料の切削痕

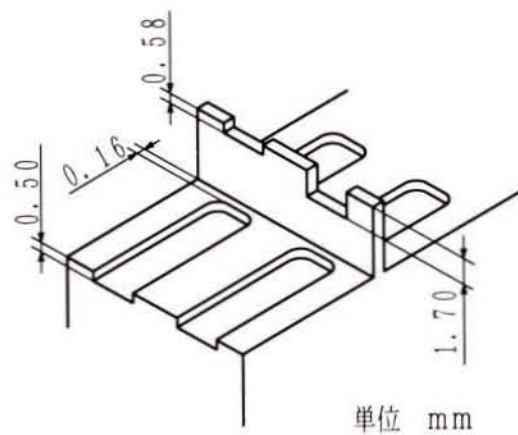


図 5.27 切削試料の測定値

5.6 山形試料の形状認識

本節で扱う山形試料は、傾斜面が平面を成し山の頂点はコーナールなどをもたないとかがり(エッジ)形状を有している。この頂点近傍の高さをセンシングし、その測定値から頂点の位置と高さを認識する方法について論じる。

5.6.1 傾斜面の測定

山形試料の高さ測定にあたり、傾斜面の方向およびその角度とセンサの姿勢との関係について調べた。5.3 節で前述したように、本実験で使用するレーザセンサは反射型であるから、投受光面により方向性が発生する。本実験では図 5.28 に示すように、投受光面に平行と直角に回転する二つの傾斜面を扱うこととする。図において、センサの向きに対して ω 回転方向の傾斜面を測定すると、測定値に誤差が発生する。これについては、その誤差と傾斜角度に一定の関係があることを実験からつきとめ、導出した補正式を用いることによりレーザ光軸に垂直な平面と同程度の精度で高さの測定が可能であること

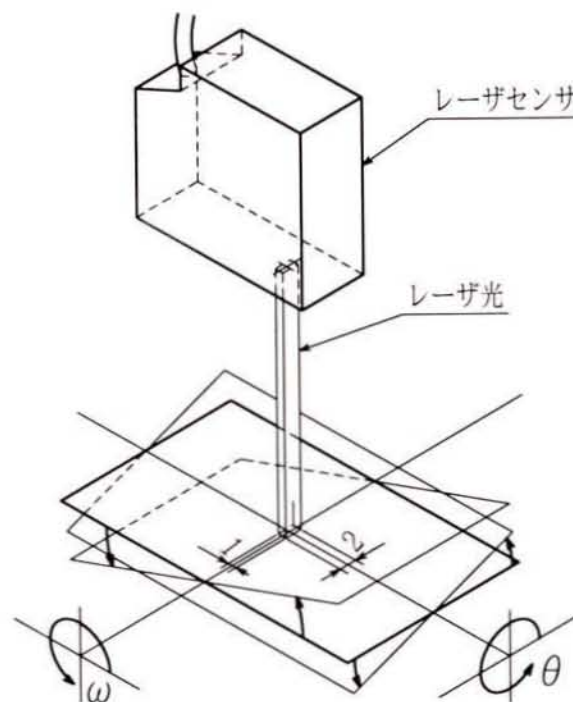


図 5.28 傾斜面の測定

がすでに報告されている⁽²⁰⁾。また、 θ 回転方向の傾斜面を測定すると、図 5.29 に示すような測定誤差が発生する。図より、 30° 以下の傾斜面の測定誤差範囲は $\pm 30\mu\text{m}$ 以内になっており、レーザ光軸に垂直な平面と同程度の測定精度⁽²¹⁾がえられているが、 30° を越えると誤差が大きくなっていく傾向がある。よって本実験では、傾斜による高さ補正を行う必要がない θ 回転方向で測定を行い、傾斜角度の適用範囲を 30° までとした。

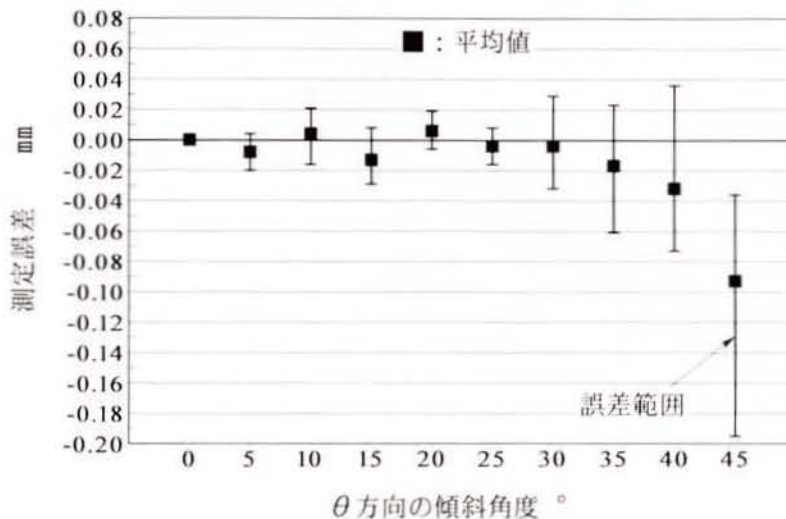


図 5.29 傾斜面の測定誤差

5.6.2 頂点部の高さ測定

センサスポットが山形の頂点にかかる位置では、スポットが頂点のエッジにより両側斜面に分割されるため、前項の傾斜面の測定とは結果が異なってくると考えられる。そこで試料形状を図 5.30 に示す 3 種類に設定し、頂点付近の高さ測定を行った。

図 5.31、図 5.32 および図 5.33 は、それぞれ傾斜角が 30° と 30° 、 30° と 20° および 30° と 10° の試料の頂点付近を 0.05mm の間隔で測定した結果をプロットしたもので、試料の形状と比較して示してある。各図から、高さの最大測定値は試料の頂点高さに比べ低くなっており、傾斜角が大きくなるほど両者の差が大きくなる傾向がある。また、傾斜角が左右で異なる試料では最大値の位置が頂点位置から傾斜の緩やかな斜面方向にずれている。したがって、この測定結果だけでは頂点の位置と高さを正確に認識しているとはいえないので、以下の理論解析を行って補正式を導き出すことにする。

	試料1	試料2	試料3
α	30°	30°	30°
β	30°	20°	10°
H mm	11.97	12.16	12.04

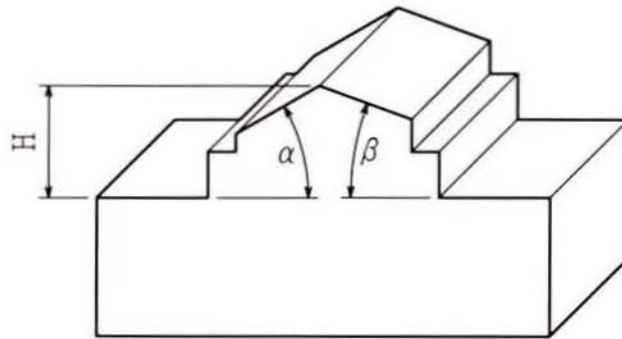


図 5.30 山形試料形状

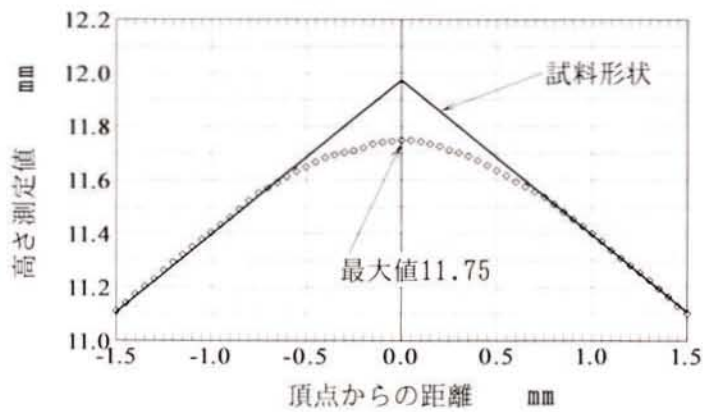


図 5.31 傾斜角 30° と 30° の山形試料の高さ測定

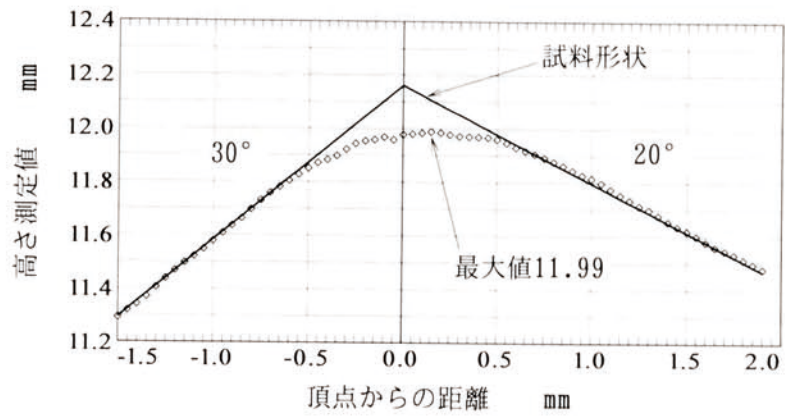


図 5.32 傾斜角 30° と 20° の山形試料の高さ測定

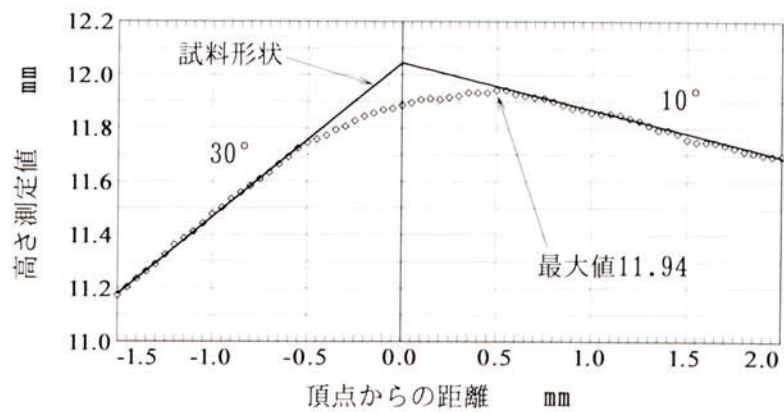


図 5.33 傾斜角 30° と 10° の山形試料の高さ測定

5.6.3 高さの解析

前節でも述べたように、使用しているセンサのレーザ光の強度分布は照射スポット内において正規型の分布をしているので、山形の頂点部においてもこの光強度分布に着目して解析を行っていく。図 5.34 はセンシングの模式図で、 H が試料頂点高さ、 R がレーザ光の照射によるスポット幅で、 $\phi(z)$ は照射されたレーザの光強度分布の状態を表している正規分布曲線である。センサはそのスポット右端が試料の頂点位置と一致する点をスタート点とし、左端が頂点位置と一致する終点までの間を右方向に移動するものとする。図示位置はスポット中心が試料頂点位置から x の距離まで移動したときのものである。したがって x の範囲は $-R/2 \leq x \leq R/2$ となる。スポット幅内におけるレーザ光の全強度 S は、 R の範囲で $\phi(z)$ と z 軸に囲まれた部分の面積で表され、これを 1 とすることにより無次元化して考える。また t は区間位置で前節と同じ意味である。図中の試料形状を表す関数 $P(y)$ は、

$$P(y) = ay + H \quad (y \leq 0) \quad (5.16)$$

$$P(y) = by + H \quad (y \geq 0) \quad (5.17)$$

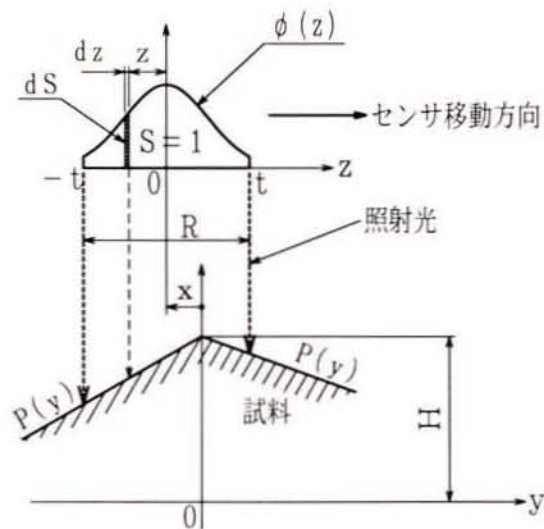


図 5.34 センシングの模式図

で示される。ただし、 a と b はそれぞれ左側斜面と右側斜面の傾きである。一方、 $\phi(z)$ は標準正規分布関数で前述の式(5.2)で表される。いまスポット中心から z の区間位置にある微小区間 dz の面積(光強度)を dS とすれば、

$$dS = k \cdot \phi(z) \cdot dz \quad (5.18)$$

となる。 k は $S=1$ にするために用いた係数で式(5.3)で表される。

センサが出力する高さの値は試料高さ x と光強度との積で求められる。微小区間 dz におけるこの値は $P(y) \cdot dS$ で表されるので、全体では $P(y) \cdot dS$ を区間 $-t$ から t まで積分すればよい。したがってセンサスポットが図示の位置にあるときにセンサ出力値を表す式 $f(x)$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} f(x) &= \int_{-t}^t P(y) \cdot dS \\ &= \int_{-t}^t P(y) \cdot k \cdot \phi(z) dz \\ &= \int_{-t}^{-2tx/R} \left\{ a \left(x + \frac{Rz}{2t} \right) + H \right\} k \cdot \phi(z) dz + \int_{-2tx/R}^t \left\{ b \left(x + \frac{Rz}{2t} \right) + H \right\} k \cdot \phi(z) dz \\ &= \frac{k a R}{2t} \int_{-t}^{-2tx/R} z \cdot \phi(z) dz + k(a x + H) \int_{-t}^{-2tx/R} \phi(z) dz \\ &\quad + \frac{k b R}{2t} \int_{-2tx/R}^t z \cdot \phi(z) dz + k(b x + H) \int_{-2tx/R}^t \phi(z) dz \end{aligned} \quad (5.19)$$

ここで、積分区間 $-2tx/R$ は頂点位置に相当する正規分布の区間位置を示す。また、定積分内の $P(y)$ は区間位置 z に相当する y の位置が $y = x + Rz/2t$ で表されるので、 x の関数に置き換わっている。この式には第1項と第3項に標準正規分布関数 $\phi(z)$ と区間位置 z の積が含まれている。これを前節にならって級数展開すると、

$$z \cdot \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) = z - \frac{z^3}{2 \cdot 1!} + \frac{z^5}{2^2 \cdot 2!} - \frac{z^7}{2^3 \cdot 3!} + \dots + (-1)^n \frac{z^{2n+1}}{2^n \cdot n!} \pm \dots \quad (5.20)$$

であるから、この定積分は

$$\int_0^x z \cdot \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz = \frac{x^2}{2} - \frac{x^4}{4 \cdot 2 \cdot 1!} + \frac{x^6}{6 \cdot 2^2 \cdot 2!} - \frac{x^8}{8 \cdot 2^3 \cdot 3!} + \dots + (-1)^n \frac{x^{2n+2}}{(2n+2) \cdot 2^n \cdot n!} \pm \dots \quad (5.21)$$

となり、この式を用いた繰り返し計算により式(5.19)の値が精度よく求められる。

図 5.35 は前述の図 5.31, 図 5.32, 図 5.33 の測定値と、式(5.19)の計算結果を比較して示したものである。計算にあたり、 R および t は使用したセンサが前節と同じであるので $R=2.0$, $t=2.0$ にとった。図より、両者がかなり近い値を示しており、この解析方法が有効であることがわかる。

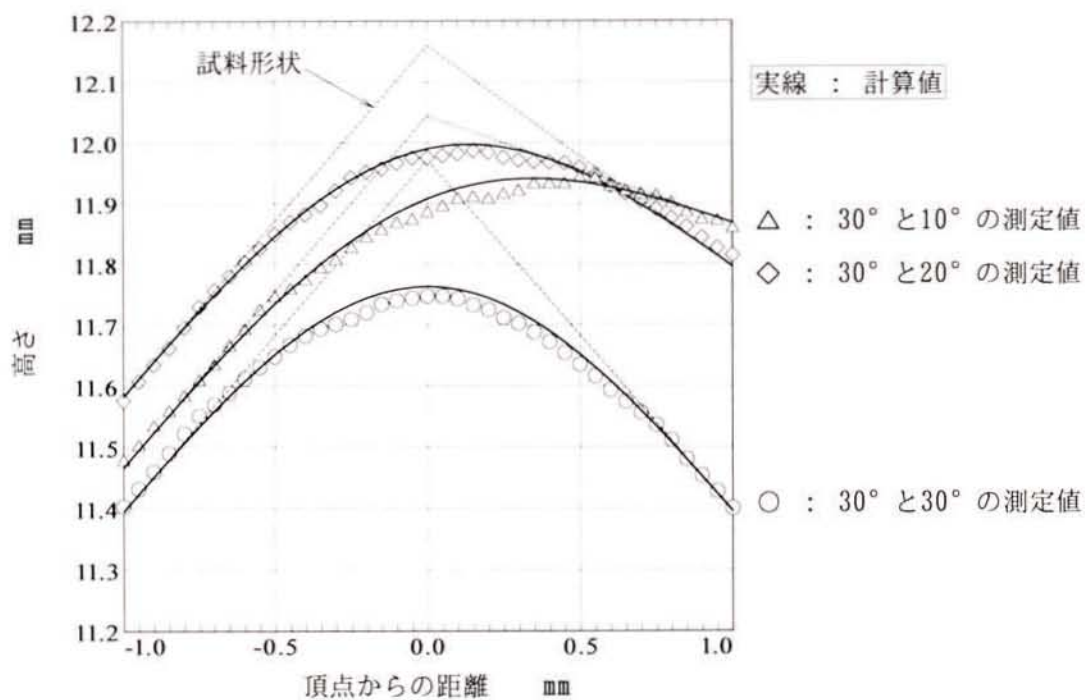


図 5.35 測定値と計算値の比較

5.6.4 頂点位置の解析

式(5.19)を x で微分するにあたって、この式に含まれている標準正規分布関数 $\phi(z)$ と区間位置 z の積の定積分を x で微分した一般形を示すと、

$$\frac{d}{dx} \left\{ \int_c^{ax+b} z \cdot \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz \right\} = a \cdot (ax+b) \cdot \exp\left[-\frac{(ax+b)^2}{2}\right] \quad (a, b, c: \text{定数}) \quad (5.22)$$

となる。これと式(5.8)を用いて式(5.19)を x で微分して整理すると、

$$f'(x) = k \left\{ a \int_{-t}^{-2tx/R} \phi(z) dz + b \int_{-2tx/R}^t \phi(z) dz \right\} \quad (5.23)$$

となる。この式をさらに x で微分すると、

$$f''(x) = -\frac{2kt(a-b)}{R\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(2tx/R)^2}{2}\right] \quad (5.24)$$

となる。この式をグラフに表すと図 5.36 のようになり、 $f''(x)$ は $x=0$ のとき最小値

$$f''(0) = -\frac{2kt(a-b)}{R\sqrt{2\pi}} \quad (5.25)$$

をとる。この $x=0$ の位置はセンサスポットの中心が頂点位置と一致したときである。言い換えれば、センサによる実際の高さ測定値を二階数値微分し、その最小値を示すセン

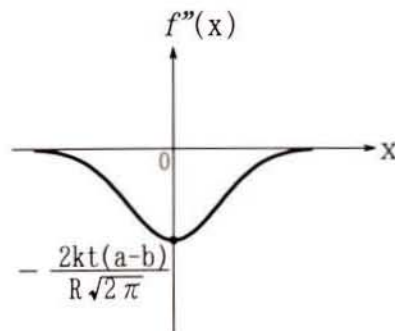


図 5.36 2次導関数曲線

シング位置を求めれば、それが頂点の位置である。これをセンシングの形態から考えると、二階微分の最小値とは高さ測定曲線の傾きの変化率が最も小さいことを示している。したがって、測定が微小一定間隔で行われる場合には、ある測定位置における高さ測定値とその前後の位置の測定値との差をそれぞれとったとき、その2つの値の差が最小となる位置が、二階微分の最小値の位置と一致している。これをセンサ出力値からみれば、図 5.34 において試料高さ $P(y)$ と光強度曲線 $\phi(z)$ がそれぞれ最も変化の小さくなる点で一致したときに $P(y) \cdot dS$ の変化も最小になるので、その位置が二階微分の最小値の位置である。 $P(y)$ の変化が最も小さい点は頂点位置であり、 $\phi(z)$ はスポット中心であるから、 $x=0$ の位置で高さ測定曲線は二階微分の最小値をとるのである。

図 5.37 は、図 5.31, 図 5.32, 図 5.33 に示した高さ測定値を最小二乗近似⁽¹⁷⁾し、それを二階微分した結果である。ここでは、第2次導関数に最小値が存在する(すなわち2次関数になる)ように、4次式による近似を行った。前節の小幅凸形では測定値を直接数値微分したが、山形の場合は測定点毎の高さ測定値の変化が小さいため微分値がばらつきやすく、また二階微分まで行う必要性から最小二乗近似を行った。図より、最小値を示す位置が試料頂点位置から 0.10mm 以内にあることがわかる。

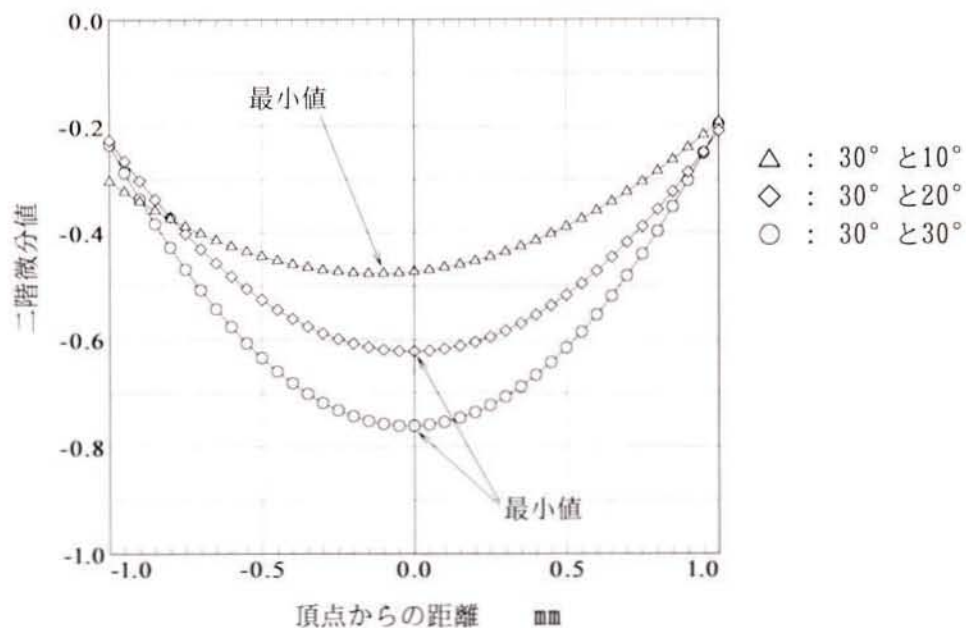


図 5.37 高さ測定値近似の二階微分値

5.6.5 頂点高さの補正

図 5.31～図 5.33 で示したように、センサの最大出力値は試料の頂点高さには達していないので、この差を補正して、正確な頂点高さを求める必要がある。そこで高さの最大測定値を Y_{max} 、それが現れる位置を $x=L$ とし、これを式(5.19)に代入して H について整理すると、

$$H = Y_{max} - \frac{kR}{2t} \left\{ a \int_{-t}^{-2L/R} z \cdot \phi(z) dz + b \int_{-2L/R}^t z \cdot \phi(z) dz \right\} \quad (5.26)$$

となる。この式の右辺において、 Y_{max} と L の値は測定から得られ、 R, t および k は使用センサの固有値である。また、 $z \cdot \phi(z)$ の定積分は 5.6.3 項で述べたように繰り返し計算を行うことができる。したがって未知数は a および b のみであり、これが求められれば式(5.26)の補正計算が可能になる。ここで式(5.23)に注目すると、高さの最大測定値が現れる位置では $f'(L)=0$ になるので、

$$k \left\{ a \int_{-t}^{-2L/R} \phi(z) dz + b \int_{-2L/R}^t \phi(z) dz \right\} = 0$$

$$\therefore \frac{b}{a} = - \frac{\int_{-t}^{-2L/R} \phi(z) dz}{\int_{-2L/R}^t \phi(z) dz} \quad (5.27)$$

となる。一方、式(5.25)の左辺 $f''(0)$ はセンサ出力値の近似値を二階数値微分し、その最小値をとればよい。これにより

$$a - b = - \frac{R\sqrt{2\pi} \cdot f''(0)}{2kt} \quad (5.28)$$

が計算できる。式(5.27)と式(5.28)より a および b を計算すると、

$$a = - \frac{R\sqrt{2\pi} \cdot f''(0)}{2t} \cdot \int_{-2L/R}^t \phi(z) dz \quad (5.29)$$

$$b = \frac{R\sqrt{2\pi} \cdot f''(0)}{2t} \cdot \int_{-t}^{-2L/R} \phi(z) dz \quad (5.30)$$

となる。この式(5.29), 式(5.30)により未知数 a および b が求められるから, これらを式(5.26)に代入することにより高さの補正計算ができることになる。

表 5.6 はセンサ出力値の近似をとり, この解析法を用いて頂点高さの補正計算を行った結果である。表より, 補正計算値 H は, いずれの試料においても試料頂点高さに対して 0.06mm 以内の誤差になっており, 頂点高さが精度よく認識できることがわかる。

以上のように, この補正法は, 傾斜面の角度が測定できない場合でも試料頂点高さが求められることに特長をもっている。

表 5.6 頂点高さの補正計算結果

		(mm)		
		試料1 (30°と30°)	試料2 (30°と20°)	試料3 (30°と10°)
試料の頂点高さ		11.97	12.16	12.04
測定	最大測定値 Y_{max}	11.75	11.99	11.94
	測定誤差	-0.22	-0.17	-0.10
計算	補正計算値 H	11.91	12.12	12.02
	認識誤差	-0.06	-0.04	-0.02

5.6.6 切削実験による検証

傾斜角が 30° と 15° の試料による実験的な検証を行った。前節と同様に、加工システムの精度がより明確に試料に転写できるエンドミル切削加工を行った。加工装置や工具類は前節と同じであるが、ここでの工具軸はA軸(回転軸)により両側斜面の法線方向にそれぞれ合わせるように制御し、試料表面を溝削り加工する。工具軸方向の切込み深さは 0.50mm に設定した。図 5.38 に加工機のヘッド部を、図 5.39 に試料の切削痕を示す。

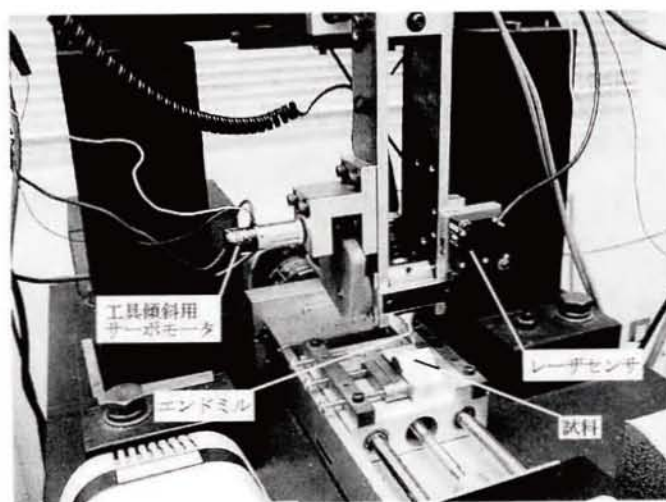


図 5.38 加工機

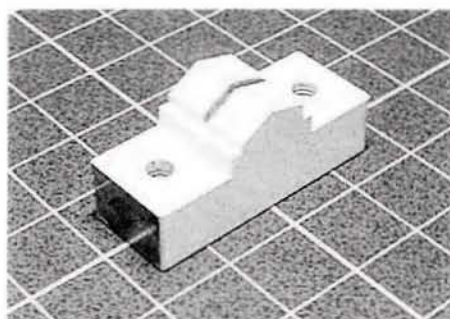


図 5.39 山形試料の切削痕

ここで、頂点の位置および高さの認識誤差が、切込み深さに及ぼす影響を検討する。
 図 5.40 において、 $P(y)$ は試料形状を表す関数で、頂点を原点 O にとれば、

$$P(y) = ay \quad (y \leq 0) \quad (5.31)$$

$$P(y) = by \quad (y \geq 0) \quad (5.32)$$

となる。ただし a と b はそれぞれ左側斜面と右側斜面の傾きである。また、図中の点 Q はセンシングデータによる頂点の認識位置で、水平方向 (y 軸) に Δy 、高さ方向に ΔP の認識誤差が発生しているものとする。このとき、点 Q から直線 $P(y)$ におろした垂線の足を図のように M 、 N とすれば、 MQ 、 NQ が傾斜面に垂直な方向の誤差(切込み誤差)になり、

$$MQ = \frac{a \cdot \Delta y - \Delta P}{\sqrt{a^2 + 1}} \quad (5.33)$$

$$NQ = \frac{b \cdot \Delta y - \Delta P}{\sqrt{b^2 + 1}} \quad (5.34)$$

で表される。この式から、 MQ 、 NQ の大きさは Δy と ΔP の符号(誤差の方向)やその値に大きく依存していることがわかる。本節で解析している 3 種類の試料について式 (5.33)、(5.34) を計算したものが表 5.7 である。これによると、頂点認識誤差によって -0.033mm から 0.052mm の工具軸方向の切込み誤差 MQ 、 NQ が生じている。

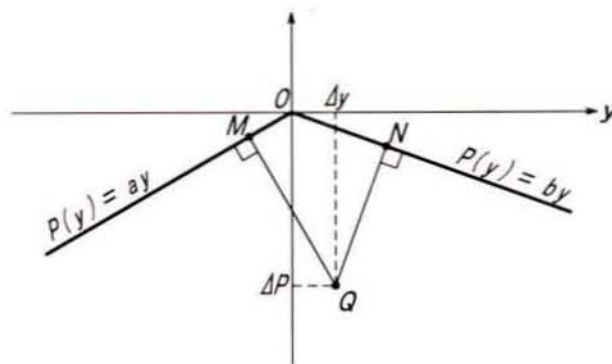


図 5.40 切込み深さの誤差

表 5.7 認識誤差による切込み誤差

傾斜角	試料 1		試料 2		試料 3	
	30°	30°	30°	20°	30°	10°
Δy (mm)	0.00		0.00		-0.10	
ΔP (mm)	-0.06		-0.04		-0.02	
a	0.577		0.577		0.577	
b		-0.577		-0.364		-0.176
MQ (mm)	0.052		0.035		-0.033	
NQ (mm)		0.052		0.038		0.037

図 5.41 は図 5.39 に示す切削痕の測定結果である。図より，30°傾斜面では切削面の深さは 0.56mm，15°傾斜面では 0.54mm になっており，設定切込み深さ 0.50mm に対する誤差は，それぞれ 0.06mm，0.04mm である。この加工誤差の原因は前節の小幅凸形で既述したように，測定誤差，形状認識誤差，切削工具の剛性不足による誤差および加工機の位置決め誤差であると考えられるが，表 5.7 の数値から判断すると加工誤差の大部分は，測定誤差とそれに伴う認識誤差であると考えるのが妥当である。この加工誤差の大きさは前節と同程度であり，本研究の最終目的が自動磨き作業であることからこの認識法の加工システムへの応用は十分可能であると判断する。

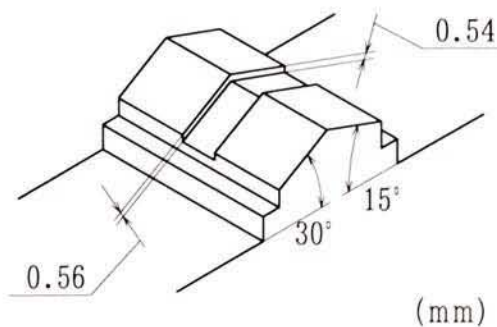


図 5.41 切削試料の測定値

5.7 その他の不連続面の認識

前節までで論じた段差，小幅凸形および山形のほかにも不連続面は多数のパターンがある．しかし，5.5 節および 5.6 節で不連続面の基本的パターンについて扱ってきたので，その他の形状についても正規解析を用いることによって認識が可能であると考えられる．

他の形状で特に注意を要するものは，溝形状や谷形(V形状)などの凹部である．これらは一例として図 5.42 に示すように，多重反射光の影響を受けやすい．多重反射光とは，レーザの照射光が試料表面で複数回反射する光をいう．この多重反射光の影響を防ぐためには，多重反射光が光学的に排除されるような光学系を設計する光学的方法と，多重反射光を受光素子で受けた後演算処理で排除するソフトウェア的方法がある⁽²²⁾．本実験に使用したセンサは，三角測量の原理で測定を行うものなので多重反射光を受光する可能性が大きく，また上記のような防護策も講じていないため，凹部の測定では誤差が生じて安定性に欠ける可能性がある．これら溝や谷形の測定については，今後の検討課題である．

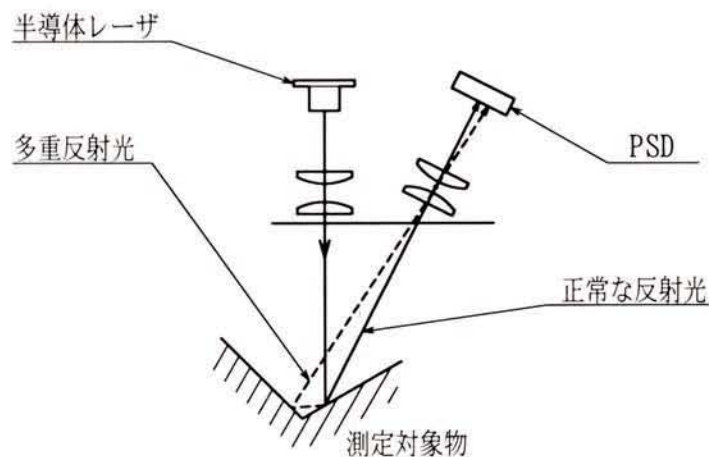


図 5.42 多重反射光

5.8 CCD 受光素子タイプのレーザセンサ

5.4 節で述べたように、PSD が非分割型素子であるのに対して、CCD イメージセンサはフォトダイオードの画素単位で受光するものである。これを受光素子に採用したレーザセンサは、PSD タイプのように受光素子上での連続した位置検出ができず、複数の画素に受光された場合には最も光強度が大きい画素位置を出力する。しかし、画素の密度が向上するのにともない精度の良いレーザセンサが作られるようになってきた。表 5.8 はキーエンス社製の LK-080 型レーザセンサの仕様である。分解能 $3\ \mu\text{m}$ の精度を確保するため、測定範囲が狭く外形寸法もかなり大きくなっているが、CCD 方式の採用により多重反射光の影響を受けにくくなり、被測定面の状態に制約されずに測定ができる可能性がある。また、受光のピーク値を感知するため光強度分布を考慮した解析を行う必要もないと推測される。

表 5.8 センサの仕様

基準測定距離	mm	80
測定範囲	mm	± 15
光源		半導体レーザ (波長670 nm 可視光)
スポットレンジ	mm	0.07 (円形)
分解能	μm	3
サンプリング周期	ms	1.024
受光素子		電荷結合素子 (CCD)
出力電圧		アナログ $\pm 5\text{V}$ (3 mm/V)
外形寸法	mm	t36×W95×H76

そこで、まず被測定面の表面状態が測定値に及ぼす影響について実験を行った。図 5.43 はレーザの照射光軸に直角な平面において、その表面の材質や色および反射光の違いにより発生する測定誤差を示している。白色面は PSD タイプと同じく白色塗料を均一に塗布したものである。鏡映面は正反射光を受光するためのものである。S45C から樹脂までの試料は、表面粗さを $10\mu\text{mRy}$ 前後に仕上げている。樹脂は青色の MC ナイロンである。各試料に対して 25 回ずつ高さ測定を行い、試料高さとの誤差を算出してばらつきをみた。図より、白色面は他に比べ測定精度がかなり良く、他については材質や色による影響はあまりないことが分かる。また、PSD 方式では測定不能な鏡映面も測定が可能になっている。

次に 5.4 節と同じ方法で段差試料の高さ測定を行ったが、スポット中心が段差位置にくるとセンサがアラームを出力し測定不能になってしまう。アラームは光量不足や光量オーバーのときに起こるが、この原因と対策法は現状では不明であり、さらに検討を加えたい。

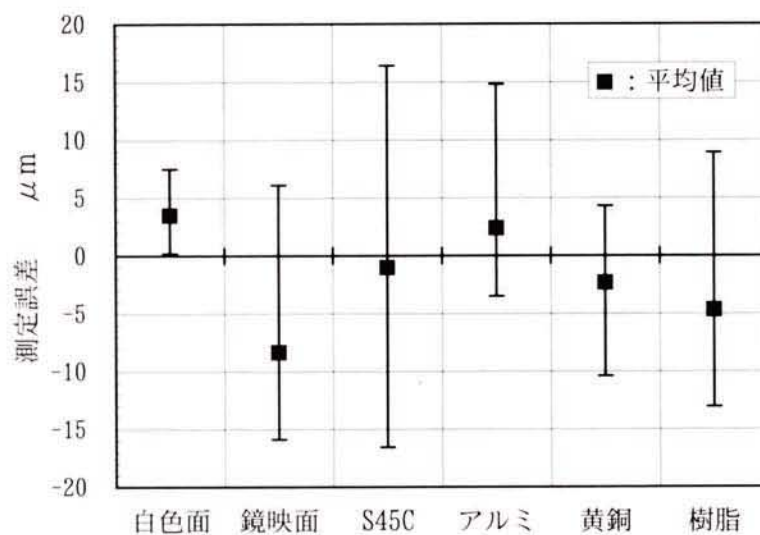


図 5.43 CCD センサによる平面測定誤差

5.9 小括

金型の自動磨きを実現するにあたって、被加工物の形状を加工に先立って認識する必要があることから、センシング法とそれに基づく認識法について述べた。金型形状のなかで特に不連続部（エッジ）を有する形状にしほり、レーザセンサによる非接触計測を行い、精度の高い認識法を提案した。

以下に本章の研究成果をまとめる。

- (1) エッジ部を有する形状のうちで基本的パターンである段差形状、小幅凸形形状および山形形状をとりあげ、レーザセンサによりこれらの高さ測定を行い、そのセンシング特性を明らかにした。
- (2) 照射レーザ光の光強度分布が正規型(ガウス型)をしていることを用いて、スポットがエッジ部によって複数の面に分割されることにより、高さ出力値がどのような影響を受けるか解析した。
- (3) センサ出力値の解析において、小幅凸形は測定値を一階数値微分、山形は測定値の最小2乗近似値を二階数値微分することにより、エッジの位置が正確に認識できることを証明した。ただし、小幅凸形ではその凸幅がセンサスポット幅の1/2より小さい場合は認識不可能であることも分かった。
- (4) 小幅凸形の凸部高さや山形の頂点高さを測定すると、センサ出力値はマイナス側に大きな誤差を生じるが、本章で提案した正規解析法を用いて補正計算を行うことによりその誤差が大きく改善され、精度よく認識できることが明らかになった。
- (5) 切削実験を行うことにより本手法の妥当性を確認した。被加工物の加工誤差は、センサの測定誤差とそれによる認識誤差にほとんど起因していることが明らかになり、加工システムへの適用上有効な知見を得た。
- (6) CCDタイプのレーザセンサは、被測定物の表面状態に影響されない計測が可能で有効なデバイスである。今後さらに検討を行いたい。

次章では、本章で提案した形状認識法を応用して、自動認識と自動磨きをインプロセスで実行することを検討し、それに基づいた磨き装置の試作研究を行う。

参考文献

- (1) 三好隆志, 中村智彦, 近藤司, 斎藤勝政: 金型用模型の非接触自動形状測定装置の開発, 精密工学会誌, 55,2(1989),393.
- (2) 真下寛治, 北林秀也, 谷村吉久: 3次元自由曲面形状の光非接触測定装置, 精密工学会誌, 59,7(1993),1091.
- (3) 真下寛治, 谷村吉久: 3次元自由曲面形状の光非接触測定装置(第2報), 精密工学会誌, 60,9(1994),1340.
- (4) 真下寛治, 中村哲也, 谷村吉久: 3次元自由曲面形状の光非接触測定装置(第3報), 精密工学会誌, 62,6(1996),855.
- (5) 三好隆志, 青木洋, 斎藤勝政: 三次元自由曲面の非接触形状測定センサの開発研究(第1報)ー光リング式センサの解析ー, 精密工学会誌, 58,11(1992),1886.
- (6) 三好隆志, 青木洋, 斎藤勝政: 三次元自由曲面の非接触形状測定センサの開発研究(第2報)ー光リング式センサの特性ー, 精密工学会誌, 58,12(1992),2087.
- (7) 三好隆志, 高谷裕浩, 滝澤暢, 福沢亮太: 三次元自由曲面の非接触形状測定センサの開発研究(第3報)ー光リング式 3-D 形状計測センサー, 精密工学会誌, 61,2(1995),258.
- (8) 青山英樹, 山崎和雄, Kee Sein LEE, 沢辺雅二: 非接触型傾き・距離検出センサによる三次元形状の自律高速測定に関する研究(第1報), 精密工学会誌, 60,6(1994),847.
- (9) 青山英樹, 山崎和雄, Kee Sein LEE, 西村国俊: 非接触型傾き・距離検出センサによる三次元形状の自律高速測定に関する研究(第2報), 精密工学会誌, 60,7(1994),954.
- (10) 山田隆一, 柳和久, 柳瀬克則: ガウス形レーザービームの平行走査による透過光型エッジ位置検出法, 日本機械学会論文集C編, 57,533(1991),118.
- (11) 小板橋竜雄, 工藤誠一: プレス製品自動検査装置の開発(第3報)(測定対象の傾き及び段差による影響), 長野県工業試験場研究報告, 15(1995),45.
- (12) 清野慧, 大垣英章: ソフトウェアデータムによ段差形状の測定, 精密工学会誌, 59,8(1993),1319.

- (13) 格内敏, 中本邦博, 坂本亨, 岩田耕一: プロジェクタを用いた三次元形状計測—
段差を持つ物体の測定, 精密工学会誌, 62,11(1996),1592.
- (14) 笠島永吉, Oleg RYABOV, 森和男: レーザセンサを用いたインプロセス工具モニタ
リング法, 日本機械学会論文集C編, 63,608(1997),1237.
- (15) 大竹尚: スキャニングシステムによる金型加工の効率化, 機械と工具, 41, 3 (1997),
47-51.
- (16) 豊岡了: 機械工学のための光センシング技術, 機械の研究, 40,4(1988), 463.
- (17) 長嶋秀世: 数値計算法, 槇書店, 2(1995), 55.
- (18) 山口一郎, 角田義人: 半導体レーザーと光計測, 学会出版センター, (1992), 26.
- (19) 刈屋武昭, 勝浦正樹: 統計学, 東洋経済新報社, (1994), 132.
- (20) 孫運海: 自動研磨システムにおける倣い制御に関する基礎的研究, 博士学位論文,
(1995), 第5章.
- (21) 孫, 手塚, 三木, 清水, 佐藤: 外界センサ情報による倣い制御に関する研究, 設
計工学, 29, 9(1994), 350.
- (22) 片山淳: 3次元を捉えるレーザー視覚センサ, MECHATRONICS, 5(1995), 79.

第6章

自由曲面のならい制御システム

第6章 自由曲面のならい制御システム

6.1 はじめに

金型製作の最終仕上げ工程である研磨加工は、放電加工や研削加工などの前工程の加工変質層を除去し表面粗さを改善することにより、成形品の金型からの離型性やしぼり成形性を向上させたり美観をより良くさせたりする。最近では工作機械の進歩により、従来の荒研磨作業を省略できるような表面加工精度を得ることも不可能ではなくなりつつあるが、金型成形品に対する品質的な要求がますます厳しくなっているなかで、研磨作業が必要不可欠な工程であることに変わりはない。

金型の磨き仕上げ作業は金型製作上自動化が特に難しい工程であり、依然として人手に頼っているのが現状である。この原因として

- (1) 金型表面形状が複雑で、それにならって研磨する制御が難しい。
- (2) 被研磨面に適した研磨工具の選定が必要である。
- (3) 金型は一品物であるから、研磨機にはフレキシビリティが必要である。
- (4) 形状データの取得が難しい。
- (5) 研磨作業は高度な熟練、ノウハウに基づいた手順、判断が要求される。

があげられる。これを自動化する装置の研究がいくつか行われている^{(1)~(6)}が、どれも全ての研磨作業に適用できるわけではなく、研磨の一部分を自動的に行えるものにすぎない。逆にいえば金型研磨の目的や方法が多種多様であるため、研磨の自動化も個々に対応しているのが現状なのである。この自動化を実現するための必要条件は、金型表面形状の認識、磨き工具の姿勢制御および磨き加工条件の最適設定が行われることである。

本研究は、金型表面形状の認識と磨き工具の姿勢制御を一つのユニット内で行うことができる、比較的安価で汎用的な装置を実現することが目的である。すなわち、加工点への位置制御と工具ヘッドの姿勢制御を分離させることにより、比較的簡単な制御プログラムで加工システムを動作させることができる自動磨きシステムを構築する。このためには、研磨工具ヘッドが形状認識用の非接触センサを備えており、かつ工具が姿勢を変化させても先端部の研磨点が移動しない「不動点機構」が必要である。この機構はこれまでに榎原⁽⁶⁾らにより研究が行われており、そのなかで特長、利点についても述べられている。また、図6.1に示すような不動点リンク機構が考案され⁽⁷⁾、サーボモータ1個

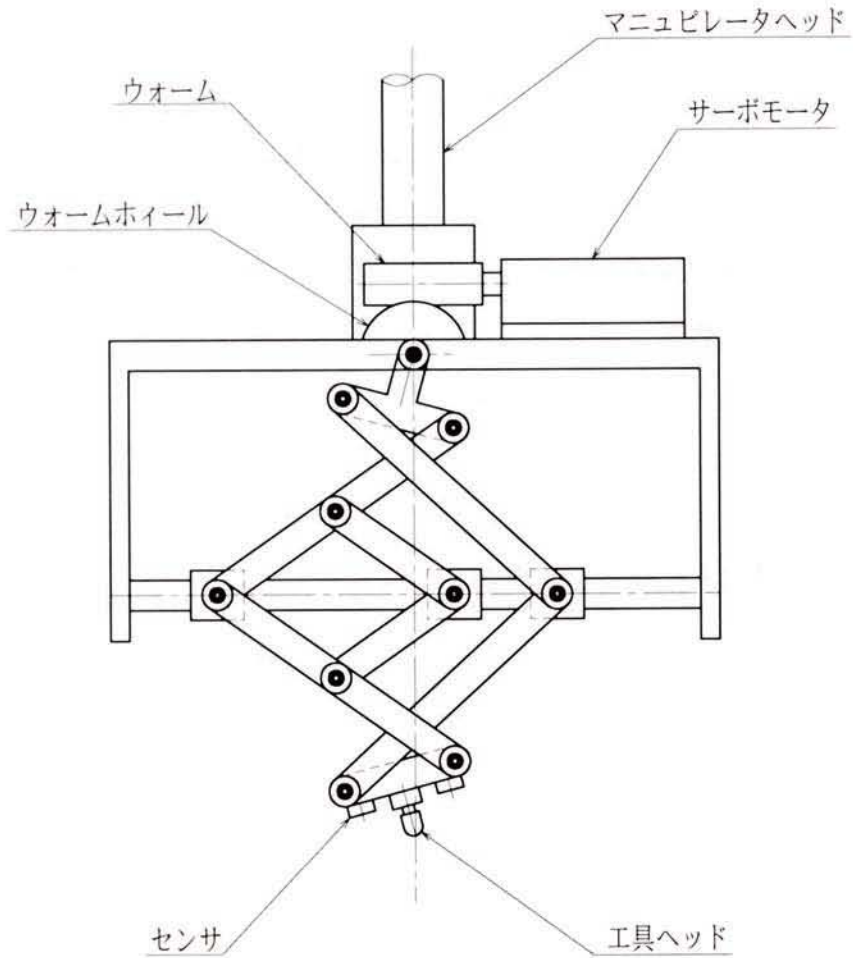


図6.1 不動点リンク機構

のみの作動で研磨点が変化することなしに工具を傾けることができる制御を実現してきた。ただし、これらのリンク機構はいくつかの節の剛性が直接工具ヘッド全体の剛性に影響を及ぼすため、剛性不足の問題が起こりやすい。

これを改善する方式としてカム機構を用いた不動点機構（以後、不動点カム機構とよぶ）を試作した。カム機構は、求められる工具姿勢位置に対して確実に位置制御ができ、リンク数が少ないために剛性も向上すると考えられるので、より精度の高い磨きが可能であると考えられる。しかし、カム機構の解析とカムの設計、製作は、コンピュータやNC工作機械を必要とする難しさがある。そこで、ここではまずカム機構についての一般的な解析法を述べ、それを不動点カム機構に応用して設計を行うこととする。

6.2 カム機構総論

6.2.1 ベクトルによる機構解析法

(a) ベクトルの表示法

ベクトルは大きさと方向をもつ量で、終点に矢印を付けた始点から終点までの線分で表される。この定義によれば、ベクトルを平行移動して始点を空間のどの位置にしても、ベクトル量は同じである。しかし、扱いを容易にするため、始点を座標系の原点に固定したベクトル（拘束ベクトル）を考えると、たとえば xy 座標系の平面ベクトルでこの原点から始まる拘束ベクトル R を x 軸方向と y 軸方向に分解して表すと、

$$R = R_x + R_y = x \cdot u_x + y \cdot v_y \quad (6.1)$$

である。ここで、 R_x 、 R_y ： x 軸方向、 y 軸方向の成分ベクトル

x 、 y ： x 軸方向、 y 軸方向の成分（スカラー）

u_x 、 v_y ： x 軸方向、 y 軸方向の単位ベクトル

である。

ここで、このベクトルを実平面から複素数平面に拡張して扱う⁽⁸⁾と、式(6.1)において

$$\begin{aligned} u_x &= 1 \\ v_y &= i = \sqrt{-1} \end{aligned}$$

であるから、式(6.1)は

$$R = x + iy \quad (6.2)$$

と書き換えることができる。また、このベクトル R を極座標 (r, θ) で表すと、

$$x = r \cos \theta$$

$$y = r \sin \theta$$

であるから

$$R = r \cos \theta + ir \sin \theta = r(\cos \theta + i \sin \theta) \quad (6.3)$$

である。式(6.3)にオイラーの公式

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta \quad (6.4)$$

を用いれば、ベクトル R は

$$R = r \cdot e^{i\theta} \quad (6.5)$$

となり、極形式複素ベクトルの形で表せる。この形はベクトルの長さ r と方向 θ が一つの項に入っているので、次に述べるベクトル方程式を扱う際に便利である。

(b) ベクトル方程式

図6.2において、この平面ベクトルの三角形を示すベクトル方程式は、

$$X = A + B \quad (6.6)$$

$$x \cdot e^{i\theta} = a \cdot e^{i\alpha} + b \cdot e^{i\beta} \quad (6.7)$$

である。ここで A および B が既知のベクトルであれば、未知ベクトル X を決定することができる。式(6.7)を式(6.4)のオイラーの公式を用いて書き換えると

$$x(\cos\theta + i\sin\theta) = a(\cos\alpha + i\sin\alpha) + b(\cos\beta + i\sin\beta) \quad (6.8)$$

となる。このベクトル式を実軸投影と虚軸投影に分けると、

$$x \cos\theta = a \cos\alpha + b \cos\beta \quad (6.9)$$

$$x \sin\theta = a \sin\alpha + b \sin\beta \quad (6.10)$$

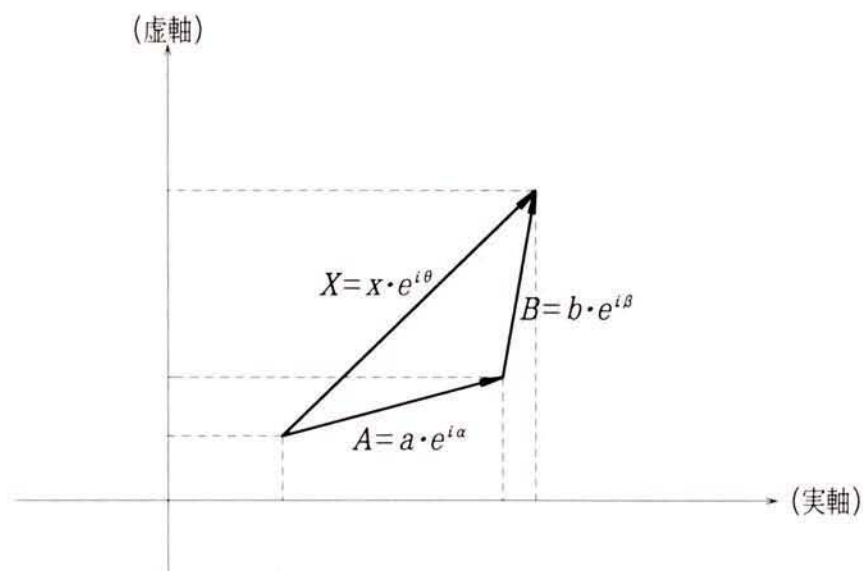


図6.2 ベクトルの平面三角形

となり，スカラー量の連立方程式になる．式(6.9)，(6.10)のなかで未知数は x ， θ の二つであるから，既知の数 a ， b ， α ， β からこれらを求めることができる．このようにベクトル量からスカラー量への変換は容易に可能である．

以上から，スカラーの連立方程式の代わりにベクトル方程式を用いることによって，一つの方程式に長さや方向の二つの未知要素を包含することができ，ベクトル表示と同様な扱いができる．したがって，機構の解析はベクトル方程式で扱ってから最終的にスカラー方程式に変換すれば簡潔になる．

また，ここでは未知数が x と θ の二つであるが，他の要素が未知でも良く，たとえば式(6.7)において，

- ・ x と a が未知
- ・ x と α が未知
- ・ θ と α が未知

などのケースもあるが，後述の不動点カム機構解析はこれらの解法を用いないので省略し， x と θ が未知の場合のみをとりあげ，この解法例を示すことにする．

まず，方向 θ を求める．式(6.10)を式(6.9)で左辺，右辺とも割ると

$$\tan \theta = \frac{a \sin \alpha + b \sin \beta}{a \cos \alpha + b \cos \beta} \quad (6.11)$$

となり，この式の右辺の \tan^{-1} をとれば θ が求められる．このときの右辺の条件は

- (分母) > 0 かつ (分子) > 0 のとき， $0 < \theta < \pi/2$
- (分母) < 0 かつ (分子) > 0 のとき， $\pi/2 < \theta < \pi$
- (分母) < 0 かつ (分子) < 0 のとき， $-\pi < \theta < -\pi/2$
- (分母) > 0 かつ (分子) < 0 のとき， $-\pi/2 < \theta < 0$
- (分母) > 0 かつ (分子) $= 0$ のとき， $\theta = 0$
- (分母) $= 0$ かつ (分子) > 0 のとき， $\theta = \pi/2$
- (分母) < 0 かつ (分子) $= 0$ のとき， $\theta = \pi$
- (分母) $= 0$ かつ (分子) < 0 のとき， $\theta = -\pi/2$

である．（すなわち，C言語等におけるATAN2関数）

次に、長さ x を求める。式(6.7)の両辺を $e^{i\theta}$ で割る、すなわち図6.2におけるベクトルを θ だけ時計回りに回転させ、ベクトル X を実軸と平行に置くと、

$$x = a \cdot e^{i(\alpha-\theta)} + b \cdot e^{i(\beta-\theta)} \quad (6.12)$$

となる。このベクトル方程式の実部のみを取ってスカラー方程式に変換すると、

$$x = a \cos(\alpha - \theta) + b \cos(\beta - \theta) \quad (6.13)$$

となり、 x が求められる。

以上、長さ x と方向 θ を求めることによりベクトル方程式が解けるが、リンク機構やカム機構のような確動する機構は一般的にすべてこのようなベクトルの三角形のつながりとして表せるから、ベクトル方程式を順次解くことによって入力の変位に対する出力の変位を求めることができる。

表6.1 カム機構の分類⁽⁹⁾

形状	カムの運動	従節の運動	カムの種類	従節先端形状
平面カム	直進	直動 揺動	平板カム	尖り端 円端
			溝カム	円端
	回転	直動 揺動 間欠回転	板カム	尖り端 円端 平端
			溝カム	円端
立体カム	回転	直動 揺動 間欠回転	端面カム	尖り端 円端
			円筒溝カム	円端
		揺動 間欠回転	鼓形リブカム	円端

6.2.2 カム設計

カムは任意形状をもった機械要素であり、この形状にローラなどの従節要素が直接接触することにより従節系に任意の運動を与える。カム機構はその形状などによって表6.1⁽⁹⁾のように多くの種類に分類される。カム曲線の設計とは、従節側の出力部（従節作動端）に必要とされる運動を設定し、その運動を得ることができるような各節の動きを機構に沿って解析してゆき、最終的にカムに形状を作り出すことをいう。したがって、従節作動端が同じ運動でもカム機構の違いによりカム形状は異なってくる。ここでは、本実験装置に使用している板カムに限定して解析法を示す。板カムとは、円板状のカム素材の外周部にカム形状を成形するものをいい、一般にカム軸とよばれる回転軸に固定され、これが回転することにより運動の行程を得るものである。板カムは、表6.1に示すように従節の運動形態や従節先端形状によりいくつか分類され、その種類により解析手順や形状が少しずつ異なっている。本研究で試作した研磨工具ヘッドは従節作動端にローラを用いているので、ここでは円端直動従節板カムと円端揺動従節板カムについてその解析法を示す。

(a)円端直動従節板カム

図6.3は円端直動従節板カムの機構図である。カム軸が原位置から θ だけ回転したとき従節が h 移動したとして、このときのベクトルを図示のように表すと、

$$P_1 = C + L \quad (6.14)$$

の関係が成り立つ。ここで、各ベクトルを

$$C = c \cdot e^{i\alpha}$$

$$L = l \cdot e^{i\beta}$$

$$P_1 = p \cdot e^{i\gamma}$$

とおくと、 c 、 α および β は機構上の設計(配置)で決定される値である。また、 l は

$$l = h_0 + h$$

で表される。ここで、 h_0 は定数、 h は従節に与えられる運動、すなわち変位や速度や加速度の形態によって決まる変数なので、 l も時間の関数として表せる既知の値となる。

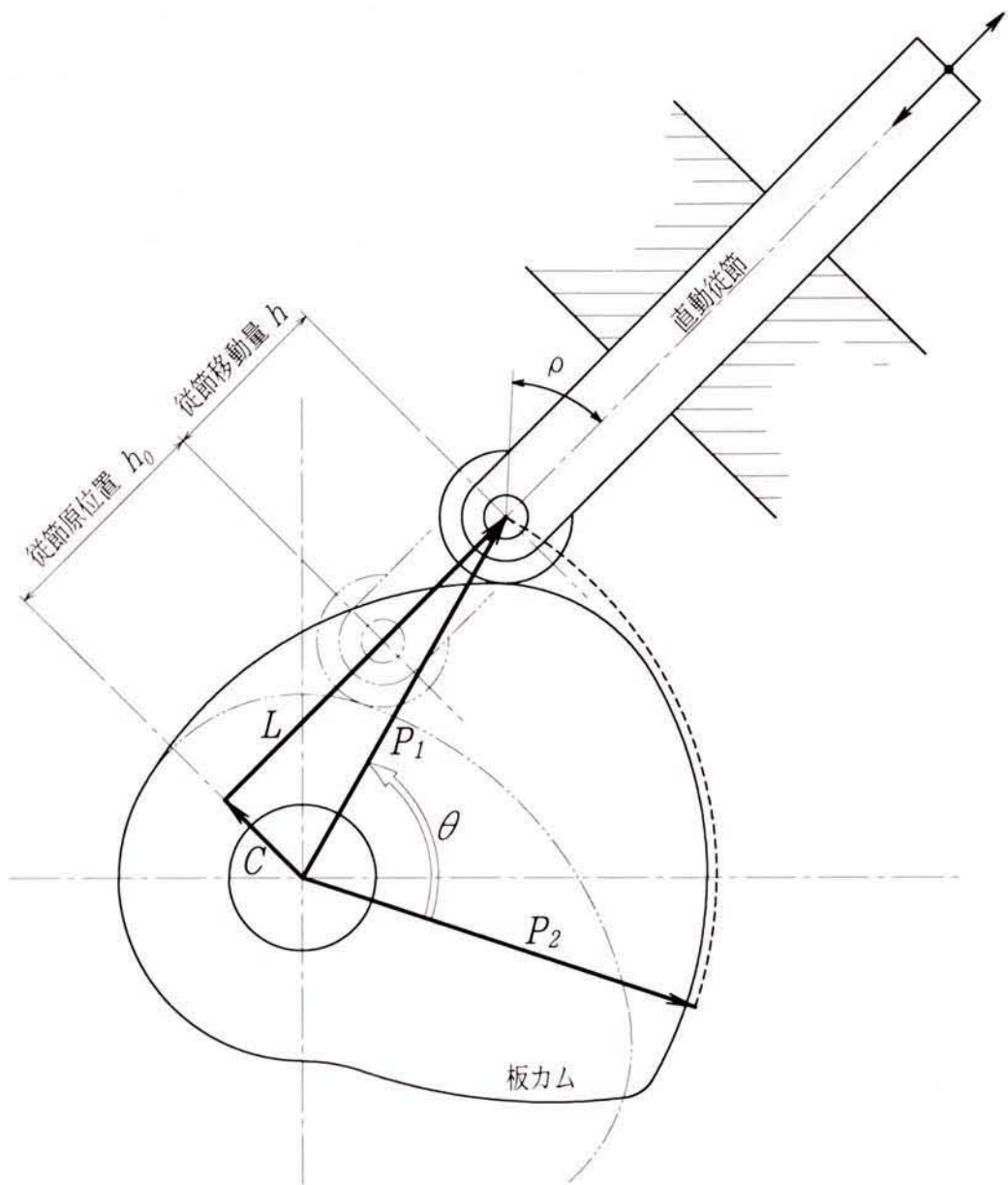


図6.3 円端直動従節板カム

したがって式(6.14)は6.2.1項(b)と同様に解け、

$$\tan \gamma = \frac{c \sin \alpha + l \sin \beta}{c \cos \alpha + l \cos \beta} \quad (6.15)$$

$$p = c \cos(\alpha - \gamma) + l \cos(\beta - \gamma) \quad (6.16)$$

となり、ベクトル P_1 (カム軸に対する従節ローラ中心) が求められる。このベクトルはカム側からみると回転開始点から θ だけ回転した時の値であるから、カム形状を求める

ためには、これを θ だけ戻して時間0の時点のベクトル P_2 にする必要がある。すなわち

$$P_2 = P_1 \cdot e^{-i\theta} = p \cdot e^{i(\gamma-\theta)} \quad (6.17)$$

となる。この式を移動開始点（時間0）から終了点まで連続的に解くことによりカム形状（正確には従節ローラ中心軌跡）が求められる。

(b)円端揺動従節板カム

図6.4は円端揺動従節板カムの機構図である。カム軸が θ だけ回転したとき従節が τ だけ回転したとして、このときのベクトルを図示のように表すと、(a)の直動従節と同様に、

$$P_1 = C + B \quad (6.18)$$

の関係が成り立つ。ここで、各ベクトルを

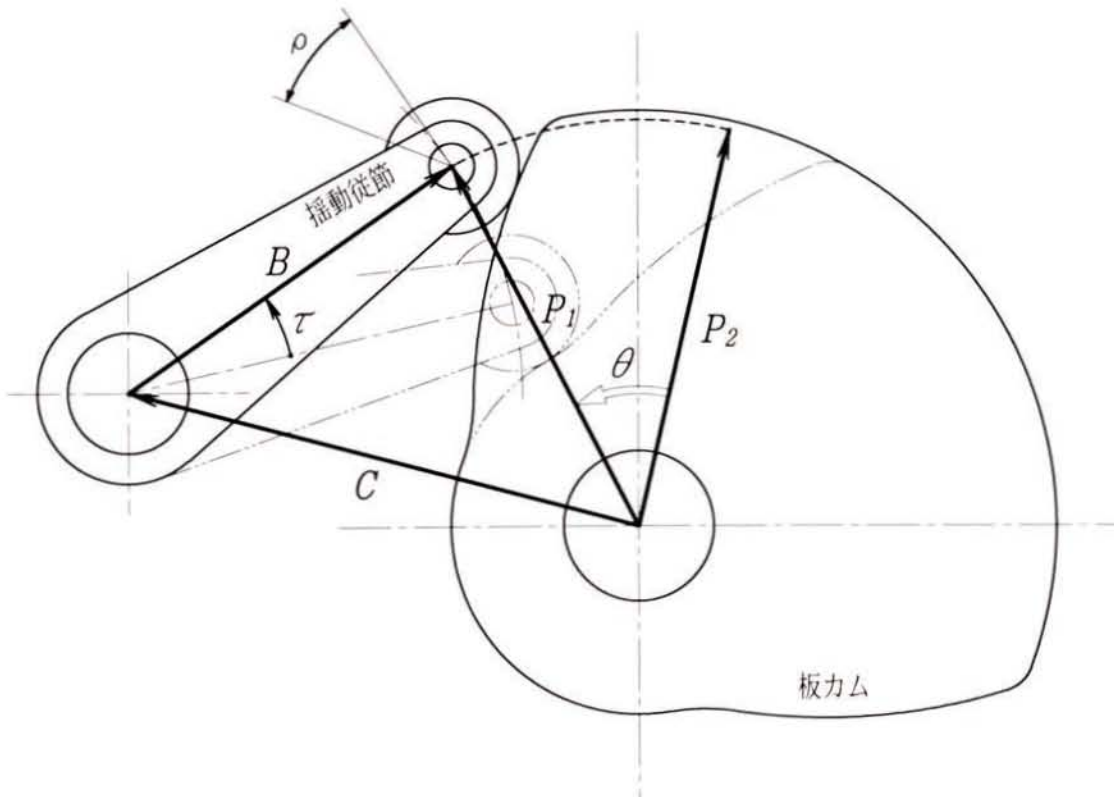


図6.4 円端揺動従節板カム

$$C = c \cdot e^{i\alpha}$$

$$B = b \cdot e^{i\beta}$$

$$P_1 = p \cdot e^{i\gamma}$$

とおくと、 c 、 α および b は機構上の設計(配置)で決定される値である。また、 β は従節レバーに与えられる運動によって決まる変数なので時間の関数として表せる既知の値となる。したがって式(6.18)は前項(b)と同様に解け、

$$\tan \gamma = \frac{c \sin \alpha + b \sin \beta}{c \cos \alpha + b \cos \beta} \quad (6.19)$$

$$p = c \cos(\alpha - \gamma) + b \cos(\beta - \gamma) \quad (6.20)$$

となり、ベクトル P_1 (カム軸に対する従節ローラ中心)が求められる。このベクトルはカム側からみると(a)と同様に、

$$P_2 = P_1 \cdot e^{-i\theta} = p \cdot e^{i(\gamma - \theta)} \quad (6.21)$$

となり、これを解くことによりカム形状(正確には従節ローラ中心軌跡)が求められる。

6.3 不動点カム機構の設計

図6.5は試作した不動点カム機構の組立図である。図において、研磨工具は傾斜軸サーボの回転駆動により傾斜動作を行うが、両者の動作角度が一定の比例関係になるようにカムの形状を設計することが必要である。以下にその解析を示す。

6.3.1 不動点カム機構の解析

図6.6は磨き工具先端部に不動点を与えるカム機構図である。図中の記号の意味は、

A点	: 工具先端部の磨きポイント(不動点)
AA'軸	: 磨き工具軸(エアースピンドル軸)
BCDE系, B'C'D'E'系	: カムレバー(揺動従節)
CD間, C'D'間	: カムレバー上の往復スライド機構(直動従節)
F点	: カム軸
D点, D'点	: カム軸 兼 カムレバー支点
C点, E点, C'点, E'点	: カムローラ

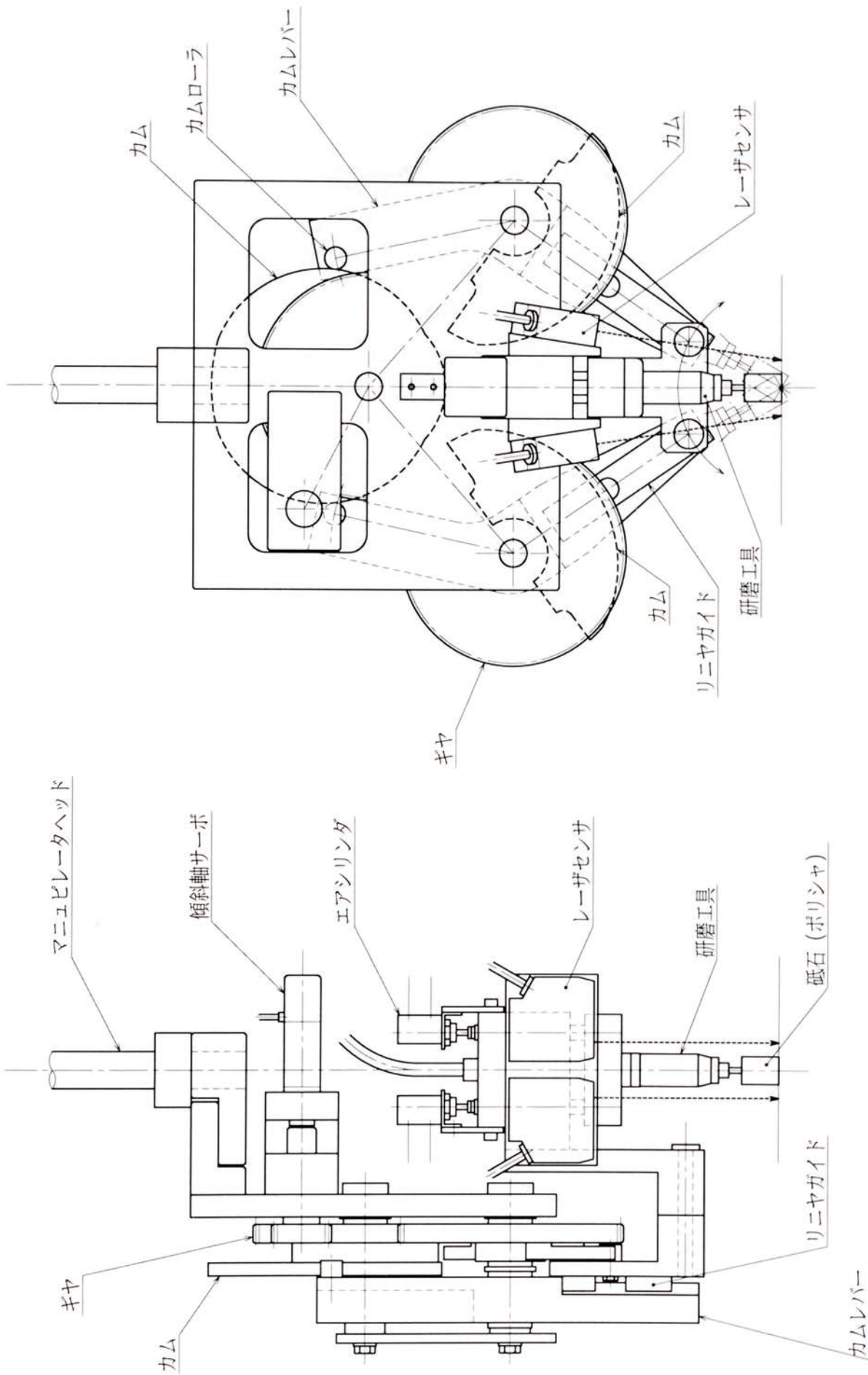


図6.5 不動点カム機構

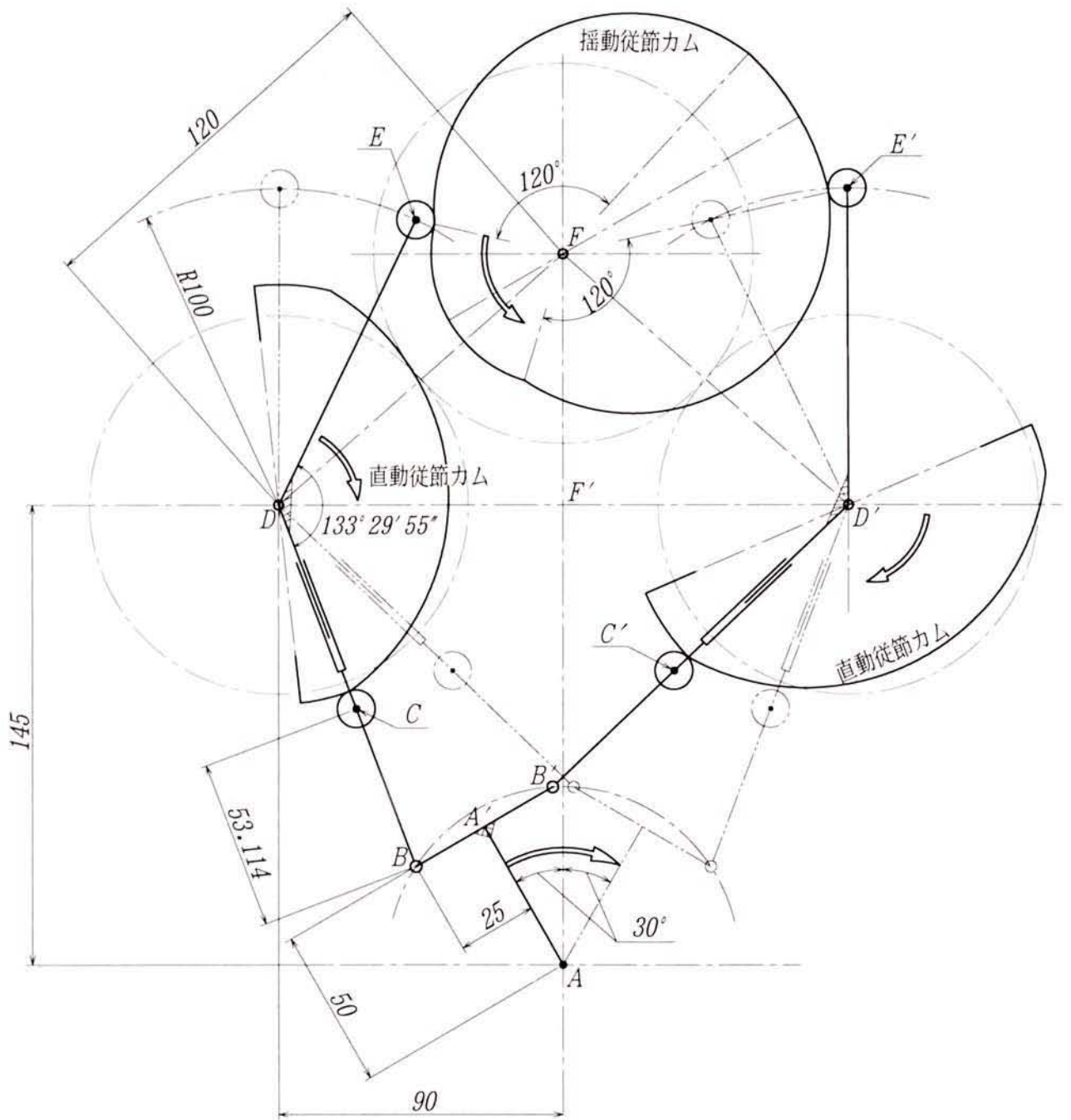


図6.6 不動点カム機構図

であり、機構設計上の初期設定寸法は図中に示してある。カム軸 F, D, D' は傾斜軸サーボモータにより一元駆動され、三軸の回転比は 1:1:1 である。カム軸回転角は最大 120° で、この間に磨き工具軸 AA' を 60° 変化させる。すなわち、磨き工具軸は、垂直方向 (A F 方向) に対し ±30° の傾斜角範囲内で動作する。この範囲内でサーボパルス指令、すなわち傾斜軸サーボモータの回転によるカム軸回転角と工具傾斜角とが 2:1 の比例関係になるようにカム機構全体が作動しなければならない。そこで図 6.6 に示された AA' の角度を 30° とし、ここをスタートして工具傾斜が A 点を中心に時計回りに -30° まで回転するときの D 軸のカム (直動従節カムとよぶ) と F 軸のカム (揺動従節カムとよぶ) の輪郭を求めることにする。コンピュータ計算にあたって、角度の分割数を細かくするほどカムの輪郭ポイントが増え精度の高いカムが得られるが、反面 NC プログラムの容量が膨大になるなどの不具合も生じる。カムの形状精度はカムおよびカムローラの大きさやカムの加工法にも関係するので、この微小角度をどの程度にするかはそれらも考慮して決定されるが、本実験においては 0.1° にとった。したがって、一つのカム輪郭形状における計算ポイントは始点終点を含め 601 ポイントになる。ここで、図示右側の B'C'D'E' のレバー系は AF を対称軸として BCDE 系の対称形になるので、計算は図示左側のみを行い、右側は左側の結果に準じればよいことになる。

6.3.2 直動従節カムの設計法

図 6.7 にこの機構のベクトル図を示す。A 点から F 点はそれぞれ図 6.6 の記号と同一点である。図より ABD 間のベクトル方程式は

$$P_1 = C_1 + K_1 \quad (6.22)$$

となる。それぞれのベクトルを極形式複素ベクトルの形で

$$C_1 = c_1 \cdot e^{j\alpha}$$

$$K_1 = k_1 \cdot e^{j\beta}$$

$$P_1 = p_1 \cdot e^{j\theta}$$

とおけば、式 (6.22) は

$$p_1 \cdot e^{j\theta} = c_1 \cdot e^{j\alpha} + k_1 \cdot e^{j\beta} \quad (6.23)$$

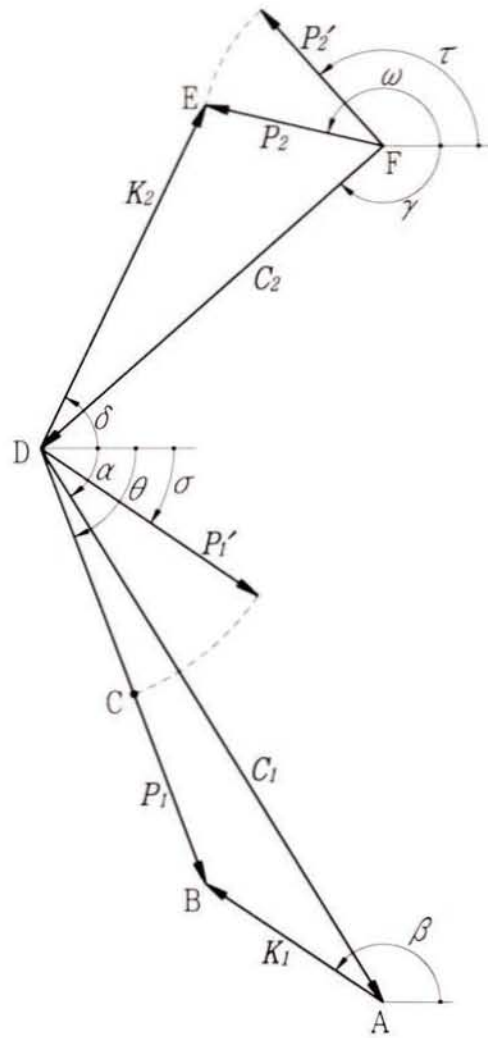


図6.7 不動点カム機構のベクトル図

となる．ここでベクトル C_1 は図6.6で示すように定数ベクトルで，

$$c_1 = \sqrt{(AF')^2 + (DF')^2} = \sqrt{145^2 + 90^2} = 170.660 \text{ mm} \quad (6.24)$$

$$\tan \alpha = \frac{-145}{90} \quad (-\pi < \alpha \leq \pi)$$

$$\therefore \alpha = -1.0153 \text{ rad} = -58.172^\circ \quad (6.25)$$

である．またベクトル K_1 において，長さ k_1 は図6.6より

$$k_1 = \sqrt{(\overline{AA'})^2 + (\overline{BA'})^2} = \sqrt{50^2 + 25^2} = 55.902 \text{ mm} \quad (6.26)$$

となる。一方、

$$\angle A'AB = \tan^{-1} \frac{\overline{BA'}}{\overline{AA'}} = \tan^{-1} \frac{25}{50} = 26.565^\circ$$

であるから、方向 β は初期値 $\beta_0 = 146.565^\circ$ から最終値 $\beta_{600} = 86.565^\circ$ の間を 0.1° ずつ時計回りに変化していく。したがってベクトル K_1 は既知ベクトルとなる。以上により、式(6.23)における未知数は p_1 および θ となるので、6.2.1項(b)の解法に従ってこれを導くと次のようになる。

$$\tan \theta = \frac{c_1 \cdot \sin \alpha + k_1 \cdot \sin \beta}{c_1 \cdot \cos \alpha + k_1 \cdot \cos \beta} \quad (6.27)$$

ただし、 $-\pi < \theta \leq \pi$ 。

$$p_1 = c_1 \cdot \cos(\alpha - \theta) + k_1 \cdot \cos(\beta - \theta) \quad (6.28)$$

ここで、ベクトル K_1 の方向が β_0 から β_{600} まで変化する間に、図6.7に示すようにカムが $(\theta - \sigma)$ だけ時計方向に回転しているとすれば、6.2.2項で示したようにその分だけ回転を戻すとカムの輪郭ポイントが得られる。これを表すベクトルを P_1' とすると、カム軸回転角は工具回転角の2倍で設計してあるので、このベクトルは

$$P_1' = p_1' \cdot e^{j\sigma}$$

とおけば、

$$p_1' = p_1 - 53.114 \quad (6.29)$$

$$\sigma = \theta + 2(\beta_0 - \beta) \quad (6.30)$$

と表される。式(6.27)~(6.30)を601ポイント繰り返し計算するとカム輪郭形状が求められる。ただし、この点はカムに接するローラを中心軌跡になり、カム輪郭上のポイントデータにするにはさらに補正計算が必要である。本実験ではそれを省くために、カムの成形加工に使用するエンドミル径をローラ径と一致させることにより、上記の点軌跡データをそのまま用いて加エプログラムを作成した。

6.3.3 揺動従節カムの設計法

図6.7におけるD E F間のベクトル方程式は

$$P_2 = C_2 + K_2 \quad (6.31)$$

となるから、これらの極形式複素ベクトルを

$$C_2 = c_2 \cdot e^{j\gamma}$$

$$K_2 = k_2 \cdot e^{j\delta}$$

$$P_2 = p_2 \cdot e^{j\omega}$$

とおけば、

$$p_2 \cdot e^{j\omega} = c_2 \cdot e^{j\gamma} + k_2 \cdot e^{j\delta} \quad (6.32)$$

となる。ここでベクトル C_2 は定数ベクトルであり、図6.6より

$$c_2 = \overline{DF} = 120 \text{ mm} \quad (6.33)$$

$$\cos \gamma = \frac{-90}{120} \quad (-\pi < \gamma \leq 0)$$

$$\therefore \gamma = -2.4189 \text{ rad} = -138.590^\circ \quad (6.34)$$

である。またベクトル K_2 は既知ベクトルであり、その長さ k_2 は

$$k_2 = \overline{DE} = 100 \text{ mm} \quad (6.35)$$

であり、方向 δ は、

$$\angle BDE = 133^\circ 29' 55''$$

により

$$\delta = \theta + 133^\circ 29' 55'' \quad (6.36)$$

となる。したがって式(6.32)における未知数は p_2 および ω である。したがって、

$$\tan \omega = \frac{c_2 \sin \gamma + k_2 \sin \delta}{c_2 \cos \gamma + k_2 \cos \delta} \quad (6.37)$$

ただし、 $-\pi < \omega \leq \pi$ 。

$$p_2 = c_2 \cos(\gamma - \omega) + k_2 \cos(\delta - \omega) \quad (6.38)$$

が得られ、カム輪郭点を表すベクトル P_2' は

$$P_2' = p_2 \cdot e^{j\tau}$$

とおけば

$$\tau = \omega - 2(\beta_0 - \beta) \quad (6.39)$$

と表され、式(6.38)および式(6.39)の繰り返し計算によりカム輪郭形状（正確にはローラ中心軌跡）が求められる。

6.3.4 カムの加工法

図6.8は6.3.2項と6.3.3項の計算に基づいて作製した直動従節カムと揺動従節カムである。計算式はカムローラの中心点の軌跡をとっているため、今回の加工にあたっては、ローラ直径12mmに対して荒加工用エンドミル直径は11.8mm、仕上げ加工用は12.0mmを使用した。加工機は日立精工(株)製U-MACC48/HF型三軸制御マシニングセンタを用い、NCプログラムは、計算結果の極座標値をXY直交座標値に変換して作成した。

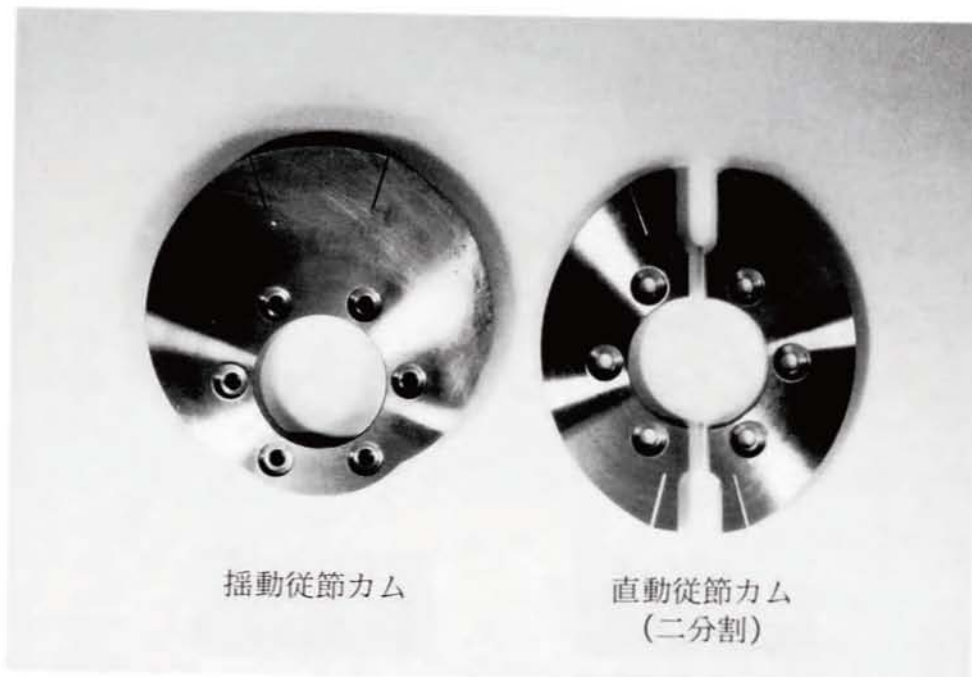


図6.8 カム外観写真

6.3.5 圧力角の計算

カムと従節との共通法線方向と従節の運動方向とのなす角，すなわち図6.3および図6.4の ρ を圧力角という⁽⁹⁾．圧力角が大きくなると，従節負荷が同じ大きさでも法線力が大きくなってカム磨耗の原因となるとともに，側圧による従節のたわみが大きくなって運動が円滑に行われなくなる．極端に圧力角が大きい場合にはこじれが生じて従節が動かなくなってしまう．したがって，従節の運動に対しては圧力角が小さいほど良いといえる．一般に圧力角の限界値は直動従節で 30° ，揺動従節で 45° 程度とされる⁽¹⁰⁾が，軸受方式や機構の配置，負荷やスピードなどによってかなり違った値になり，実設計では経験的な判断が必要になってくる．

このように，カム機構においてはカムの圧力角を調べるのが極めて重要であるから，試作したカムについてこの検討を行った．まず，カムと従節との共通法線方向を求めるために，その 90° 方向となる接線方向を考える．カム上の一点の接線方向は，その点を表すベクトルを時間で微分したベクトル（速度ベクトル）の方向であるから，図6.7においてはベクトルDCとベクトル P_2 を時間で微分したものとなる．6.3.2項で求めたカム輪郭形状（正確にはローラ中心軌跡）は，時間の連続関数として表せない離散的な数値列であるから，数値計算を行う必要がある．ここでは，三点の離散データからラグランジュの補間多項式⁽¹¹⁾を用いて2次の関数を求め，それを微分することにより接線方向を求める方法をとった．すなわち，

$$F(x) = \sum_{k=0}^n f(x_k) \left\{ \prod_{\substack{m=0 \\ m \neq k}}^n \frac{x - x_m}{x_k - x_m} \right\} \\ = \sum_{k=0}^n f(x_k) \frac{(x - x_0) \cdots (x - x_{k-1})(x - x_{k+1}) \cdots (x - x_n)}{(x_k - x_0) \cdots (x_k - x_{k-1})(x_k - x_{k+1}) \cdots (x_k - x_n)} \quad (6.40)$$

（ただし Π は， $\prod_{m=0}^n (x - x_m) = (x - x_0)(x - x_1) \cdots (x - x_n)$ なる乗積の関数）

で表される補間公式により， x_k に対応するデータ値 $f(x_k)$ の補間多項式 $F(x)$ が得られる．したがって三点の離散データの場合では，

$$F(x) = f(x_0) \frac{(x - x_1)(x - x_2)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2)} + f(x_1) \frac{(x - x_0)(x - x_2)}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2)} + f(x_2) \frac{(x - x_0)(x - x_1)}{(x_2 - x_0)(x_2 - x_1)} \quad (6.41)$$

となり、これを x で微分すると

$$F'(x) = f(x_0) \frac{x-x_1+x-x_2}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)} + f(x_1) \frac{x-x_0+x-x_2}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)} + f(x_2) \frac{x-x_0+x-x_1}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)} \quad (6.42)$$

となる。したがって、 $x=x_1$ における微分値は

$$F'(x_1) = f(x_0) \frac{x_1-x_2}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)} + f(x_1) \frac{2x_1-x_0-x_2}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)} + f(x_2) \frac{x_1-x_0}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)} \quad (6.43)$$

で表される。この関係を図6.9に示すが、図中のベクトル P_1 は、図6.3の直動カムでは式(6.17)、図6.4の揺動カムでは式(6.21)でそれぞれ求められたカム輪郭形状の任意の一点を示し、 P_0 、 P_2 は P_1 に隣接した点のベクトルである。 $F'(x_1)$ の方向は点 x_1 上におけるカムの接線方向であるから、 $F'(x_1)$ の直角方向がカムと従節との共通法線方向になる。また従節の運動方向は、図6.7において直動従節ではベクトル P_1 方向、揺動従節ではベクトル K_2 の直角方向であるから、これらからカム輪郭形状各点における圧力角が計算できる。

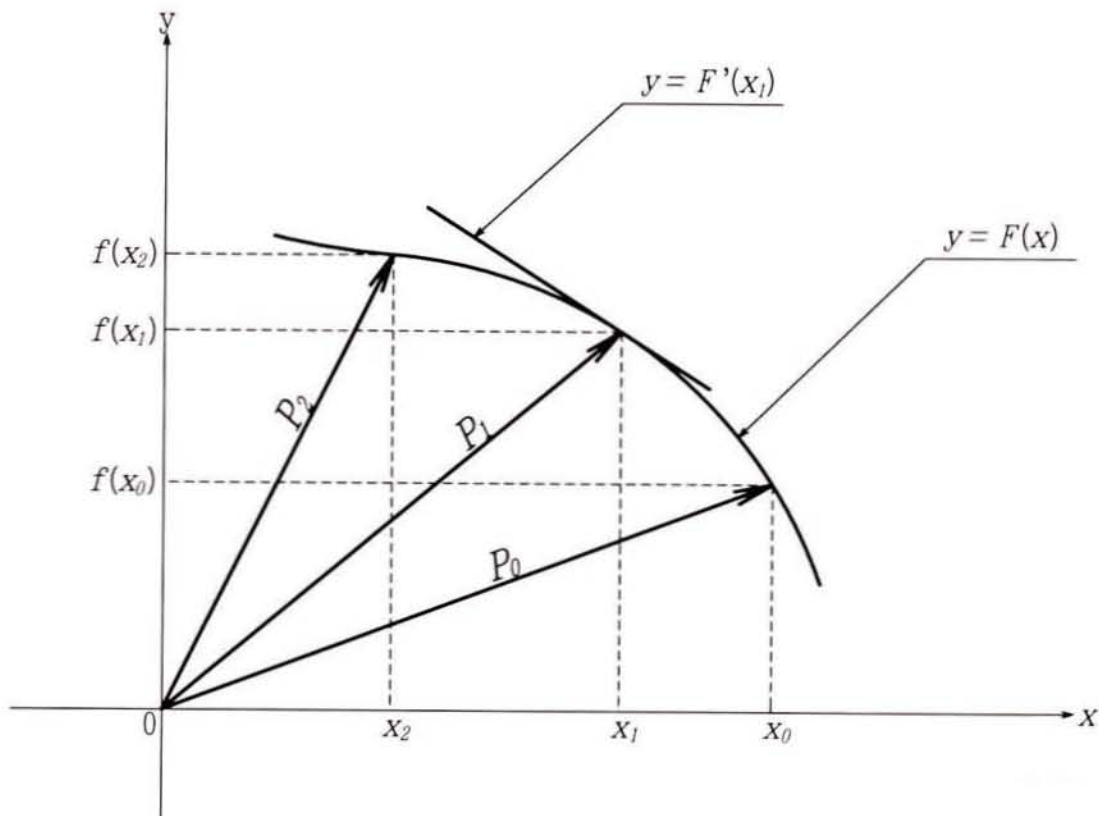


図6.9 数値微分法

図6.10は直動従節カムと揺動従節カムの圧力角の計算結果であるが、最大圧力角は直動従節カムで 13.8° 、揺動従節カムで 32.0° になっており、作動上まだ余裕のある角度であることがわかる。

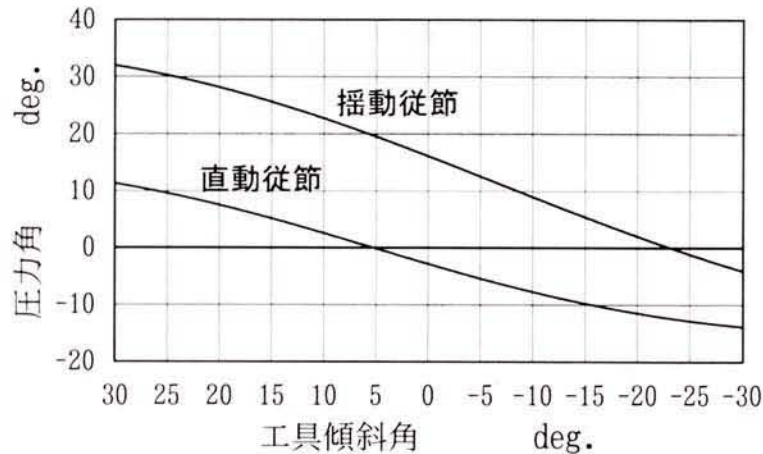


図6.10 カム圧力角

6.4 システムの設計と製作

6.4.1 システム構成

図6.11に制御システムの構成を示す。XM3000ロボットはセイコーエプソン(株)製の直交型ロボットで、研磨加工点への位置決めを行う。また、このロボットにはX・Y・Zの制御軸のほかにZ軸まわりの回転軸(U軸)が装備されているので、これを工具ヘッドの回転用に使用する。このロボットの稼動先端部に前節で述べた不動点カム機構を備えた工具ヘッドを取り付ける。工具傾斜(傾斜軸とよぶ)の駆動には、(株)ハーモニックドライブシステムズ製のサーボモータとコントロールユニットを使用している。したがって、これら全体としては5軸制御のシステム構成になる。

センサはレーザ式を三個使用して研磨ポイントを1つの面として測定する。

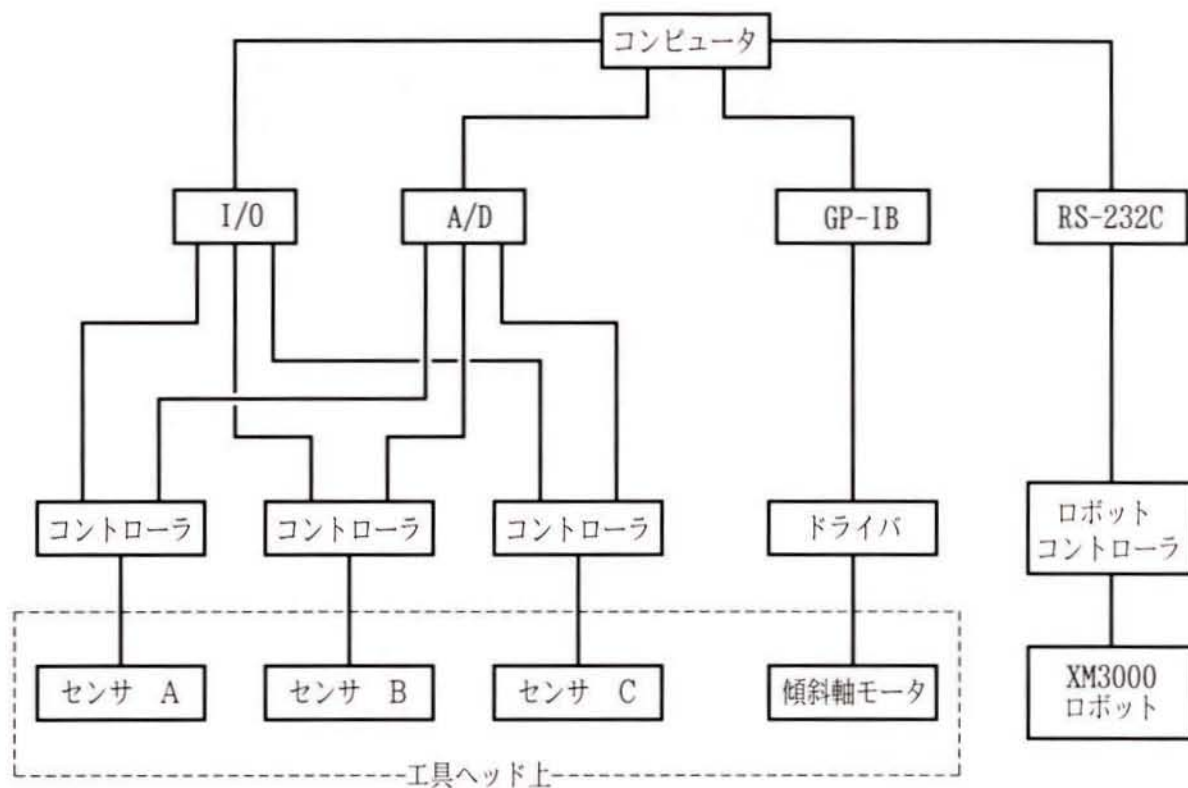


図6.11 制御システム構成

コンピュータは、このシステム全体をコントロールし、それぞれの機器に対する指令などを行っている。すなわち、センサの発光タイミングをI/Oボードを介して指令し、そのセンシングデータをA/D変換ボードを通して読み取り、その結果にしたがって傾斜軸モータとロボットU軸に回転指令を出力して、測定面に適合した工具姿勢をとらせることにより面のデータを得る作業を行っている。また、その後にはロボットに移動指令を出力する。

加工システムの外観を図6.12に、不動点カム機構部を図6.13に示す。

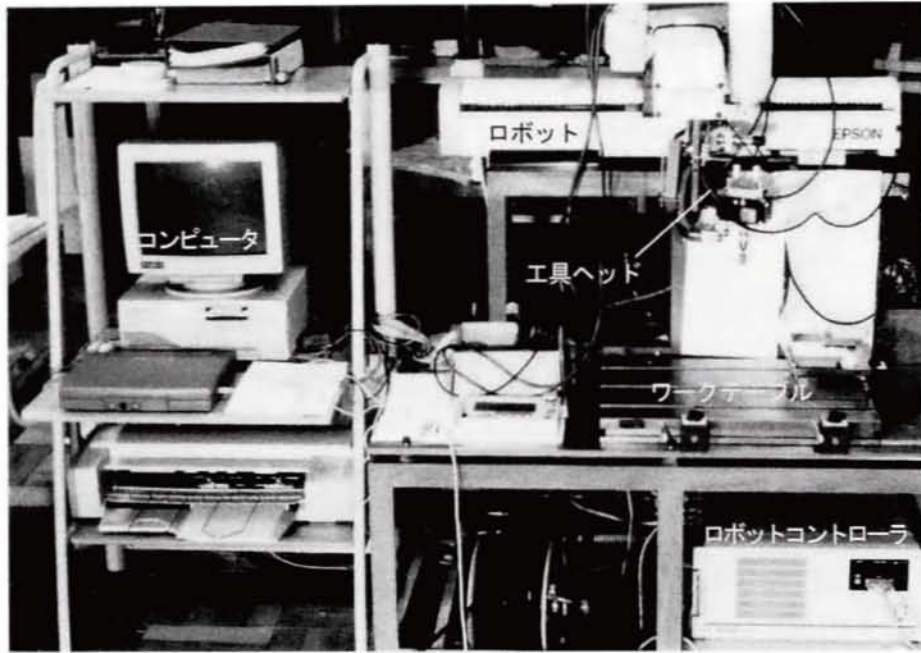


図6.12 システムの外観

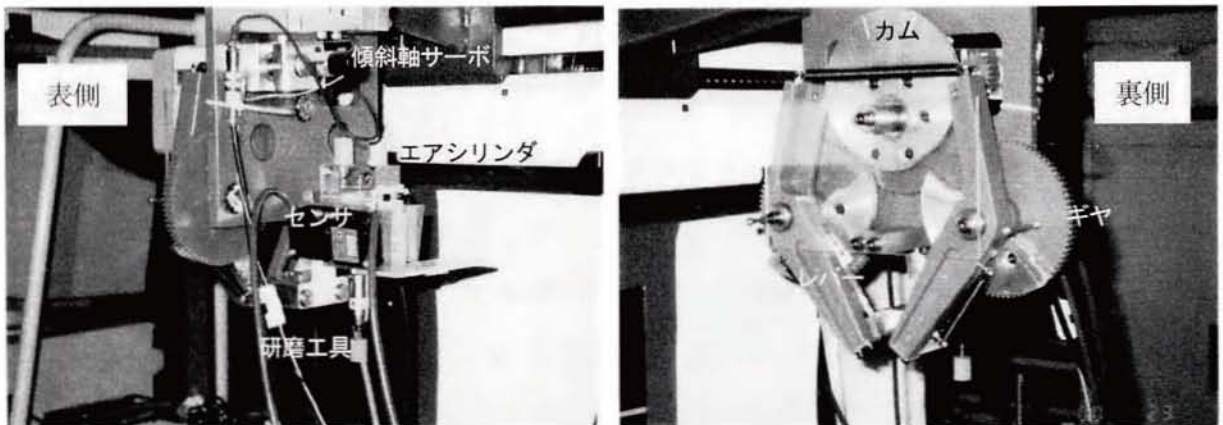


図6.13 不動点カム機構

6.4.2 位置決め用ロボットの仕様

XM3000ロボットの仕様を表6.2に示す。このロボットの制御はセイコーエプソン専用のロボット言語「SPEL」で行われる。この言語はBASICに準じて作られており、またBASICのコマンドもほとんど使用可能であるため、扱いが簡単で便利である。また、RS-232Cインターフェースにより外部機器との通信も比較的容易にできるため、本システムにおいても傾斜軸との待ち合わせ機能を持つことができる。

表6.2 直交型ロボットの仕様

	X軸	Y軸	Z軸	U軸
動作範囲	600 mm	400 mm	150 mm	
最大動作速度	2045 mm/s		1000 mm/s	19.90 rad/s
繰り返し精度	±0.015 mm		±0.01 mm	5.24×10^{-4} rad
分解能	3.33×10^{-3} mm		1.63×10^{-3} mm	3.65×10^{-5} rad
可搬重量	5 kgf			
Z軸押込み力	100 N			
マニピュレータ重量	83 kgf			

表6.3 傾斜軸サーボモータの仕様

定格出力	W	1.7
定格トルク	Nm	0.29
瞬時最大トルク	Nm	0.59
定格回転速度	rpm	55
最大回転速度	rpm	110
出力軸分解能	パルス/度	80
エンコーダ分解能	パルス/回転	360
減速比		1/80
外形寸法	mm	φ20×90.4
重量	kgf	0.09

6.4.3 傾斜軸モータの仕様

傾斜軸モータの仕様を表6.3に示す。このモータは減速機付きのDCサーボモータで、減速比は1/80になっている。減速機一体型のため、モータ外部に減速機構を設ける必要がなく便利である。エンコーダの分解能は一回転あたり360パルスであるが、モータ出力軸では1°あたり80パルスになる。また、傾斜軸の駆動系は図6.14に示すようにギヤにより減速しているため、研磨工具の傾斜軸に換算すると1°あたり640パルスである。

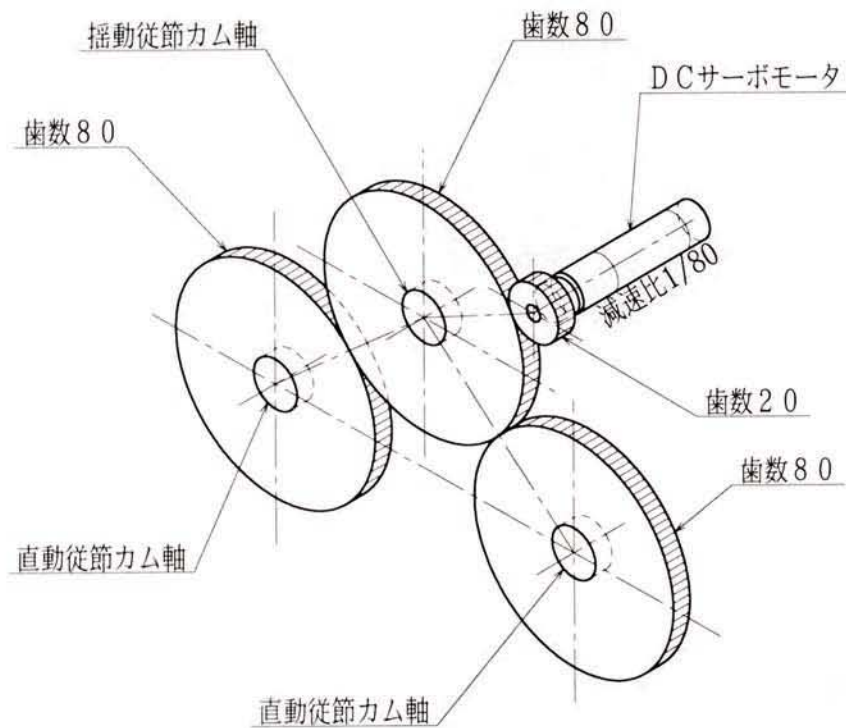


図6.14 傾斜軸の駆動系

6.4.4 研磨工具とその駆動

研磨工具は空圧式マイクロスピンドルを用いた。形式はUHT(株)製のMSB-3である。この研磨スピンドルは空圧駆動のペーンモータであるため、高速回転が可能であるが研磨の負荷能力は小さい。仕様上の最高回転数は駆動空気圧力が0.6MPaで毎分65000回転である。また、使用する研磨砥石径は13mm～21mmである。

この研磨工具はエアシリンダで駆動されるスライド上に取り付けられており、このエア圧による定圧切込みで研磨作業を行う。エアシリンダは(株)コガネイ製のNDA6×5型（シリンダ径6mm）で、これを二個使用している。研磨加工面への押し付け力はエアシリンダの推力で得られ、エア圧力を調整することにより表6.4に示すように調整できる。

表6.4 エアシリンダの推力

空気圧力 MPa	推力 N
0.2	11.4
0.3	17
0.4	22.6
0.5	28.4
0.6	34

6.4.5 センシングの方法

本実験における被加工物の表面形状の認識は、図6.15に示すように拡散反射型のレーザーセンサを三個使用して行った。このセンサの特性や特長は前章5.3節で述べたとおりであるが、外形が大きいため磨き工具のヘッド部に装着する際スペースを必要とし、コンパクトな設計が難しい。したがって表面形状の認識を行うエリアは、研磨ポイント（研磨工具軸）を中心として30mm×30mmになっており、曲率半径が小さな曲面の場合には適用することができなくなってくる。このセンサは前章5.6.1項で述べたように、レーザー光の入射角度が被測定面の法線方向に対して30°以上傾くと測定が不安定になることから、この条件により計算すると曲率半径は45mm程度以上に制限される。

また、三つのレーザーセンサを接近して取り付けているため、レーザーを同時に発光させると相互干渉が起り測定困難になる。このため、レーザー光をセンサAからCまで順次ループして発光させるようにパソコン側で制御している。

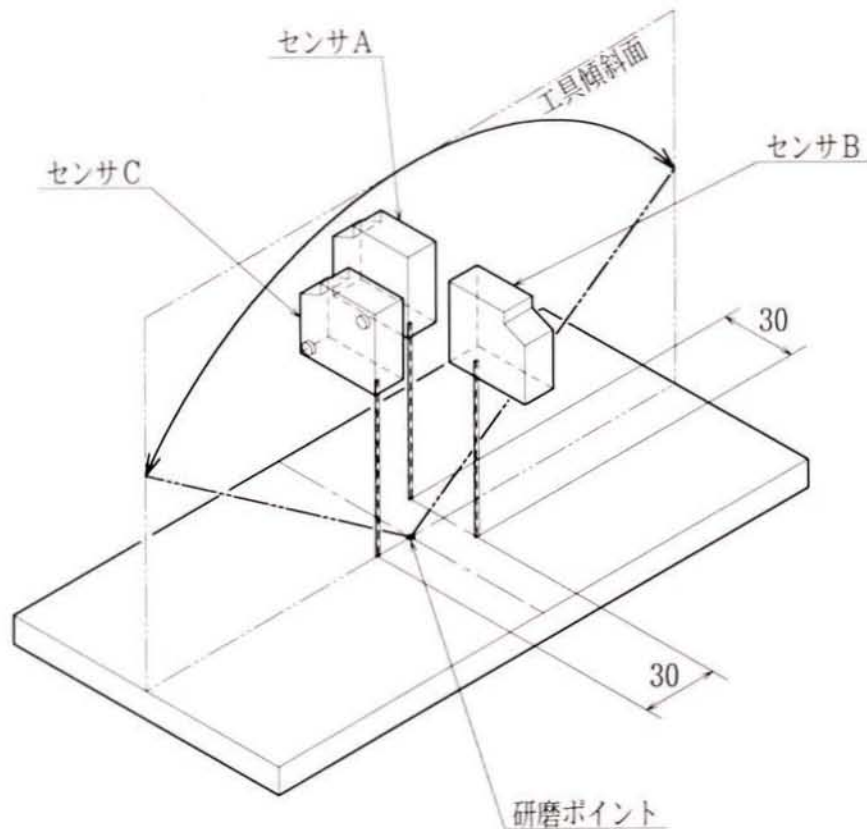


図6.15 センシング法

6.4.6 剛性の測定

研磨工具の剛性（外力を加えたときのたわみ量）は精密な研磨面を得るために重要であるから、この測定を行った。方法は、図6.16に示すように研磨工具を中間位置（垂直方向）にして、工具先端部に10N～30Nの荷重を加え、ロボットへの取り付け部を基準とした工具先端部の変位量をダイヤルゲージで読んだ。図に示す方向をカムと平行、その90°方向に荷重を加える場合をカムと直角とよぶ。また、比較のため図6.1に示す不動点リンク機構のたわみ量も測定したが、この方向をカム機構に準じてリンクと平行、リンクと直角とよぶ。

図6.17に測定結果を示す。図より、カム機構の剛性はカムと直角の方向の変位量が多いという異方性がみられるものの、両方向ともリンク機構に比べ大幅に向上しているのがわかる。また、測定値の近似直線が0点近傍を通過していることから、測定値の中にはいわゆるガタはほとんど含まれず、この結果がたわみ量を表していると解釈される。

この測定値の妥当性評価は難しいところであるが、たとえば榎原らの報告⁽⁶⁾による不動点リンク機構の剛性は20Nの荷重に対して0.2~0.3mmであることから、本測定値はこれに比べても優れた結果になっておりカム機構の有用性がわかる。

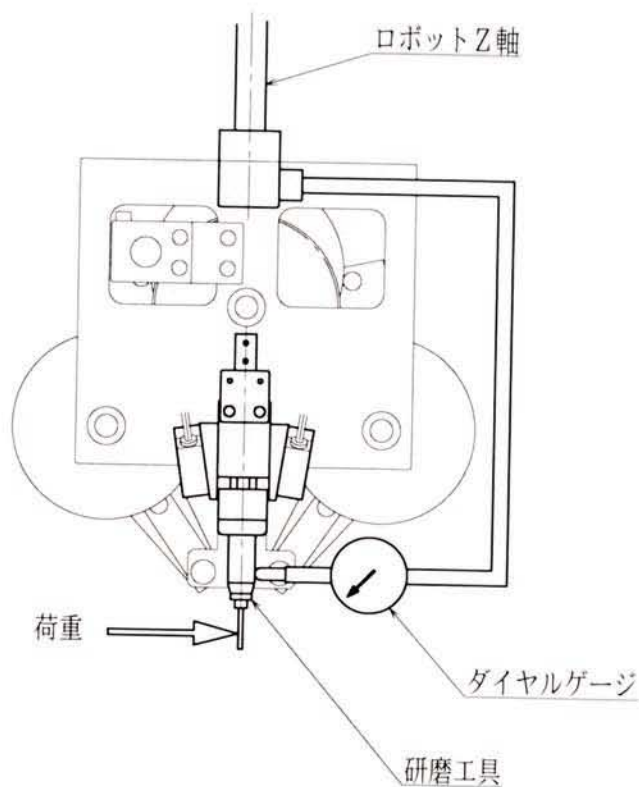


図6.16 剛性の測定

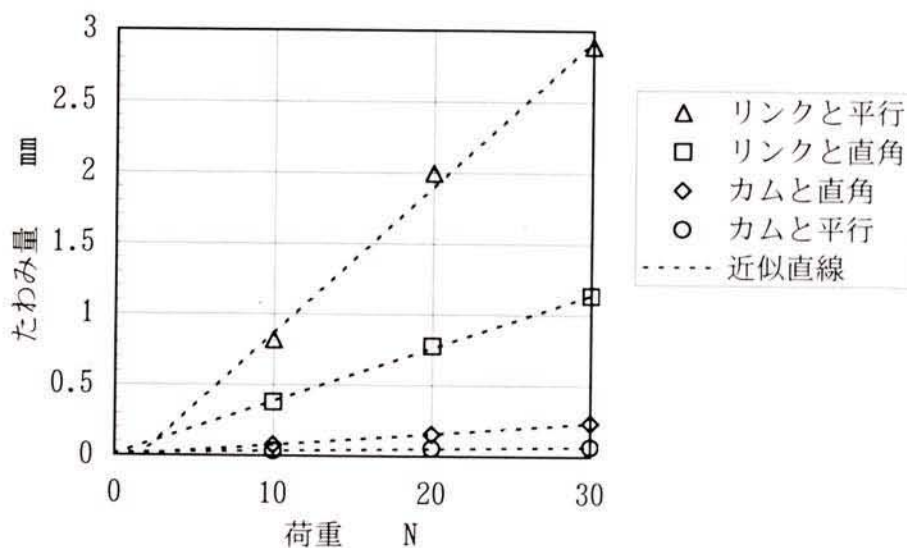


図6.17 不動点機構の剛性

6.5 ならい制御

6.5.1 形状認識のフロー

ならい制御は、形状創成加工された被研磨面の形状を自動的に認識し、そのデータにしたがって工具姿勢を制御して研磨を行うことである。このうち前者はセンシングと姿勢制御が同時に行われるため特に複雑である。図6.18に形状認識のフローチャートを示す。その主要な順序は次のとおりである。

- ① 起動をかけたら、まず形状認識を行う被測定面の範囲を入力する。
- ② センサはレーザ干渉を避けるため、交互発光させる。
- ③ 測定点に移動後、センサA・B・Cの基準測定位置までZ軸を移動する。基準測定位置とは被測定面上にカム機構の不動点があるときのセンシング値をいい、斜面においてはセンサA・Bの測定値の平均値とセンサCの測定値との平均値で示される。
- ④ センサAとBの測定値を比較し、異なっている場合にはそれが一致するまでロボットのU軸を回転させる。図6.15からわかるように、センサAとBの高さ測定値が一致する位置は、工具傾斜面と被測定面の傾斜方向が一致する位置である。この動作中で、図6.18の左列下部に示してあるセンサAとBの測定値の比較によるU軸回転方向の選択は、U軸の回転を大きくしない（90°以内）ための処理である。
- ⑤ センサA、Bの測定値とセンサCの測定値とが一致するまで傾斜軸サーボモータを回転させる。図6.18の右列における傾斜軸右回転・左回転は、不動点カム機構を表側（研磨工具側）からみたときの回転方向を意味する。
- ⑥ センサA、B、Cの測定値が一致したら、その点の位置データをファイルに格納して次の測定点に移動する。
- ⑦ ③～⑥の動作を各点ごとに繰り返し、測定範囲全体のデータをファイリングする。

6.5.2 傾斜軸の追従性の測定

被測定面が傾斜している場合、その傾斜面に対して工具傾斜軸がどの程度の精度で追従できるかを検討した。サインバー（角度誤差0.005°以内）を用いて傾斜面を5°、10°、15°、20°に設定し、それぞれについて工具傾斜軸の傾斜角度を測定した。計測器は新潟精機(株)製のデジタル式角度計（最小読取値0.1°）を用い、これを研磨工具部に取り付ける。この研磨工具が垂直の位置、すなわち水平面をセンシングしているときの角度計の読みを0に設定し、この位置からセンサA、BとセンサCの高さ測定値を常に比較しな

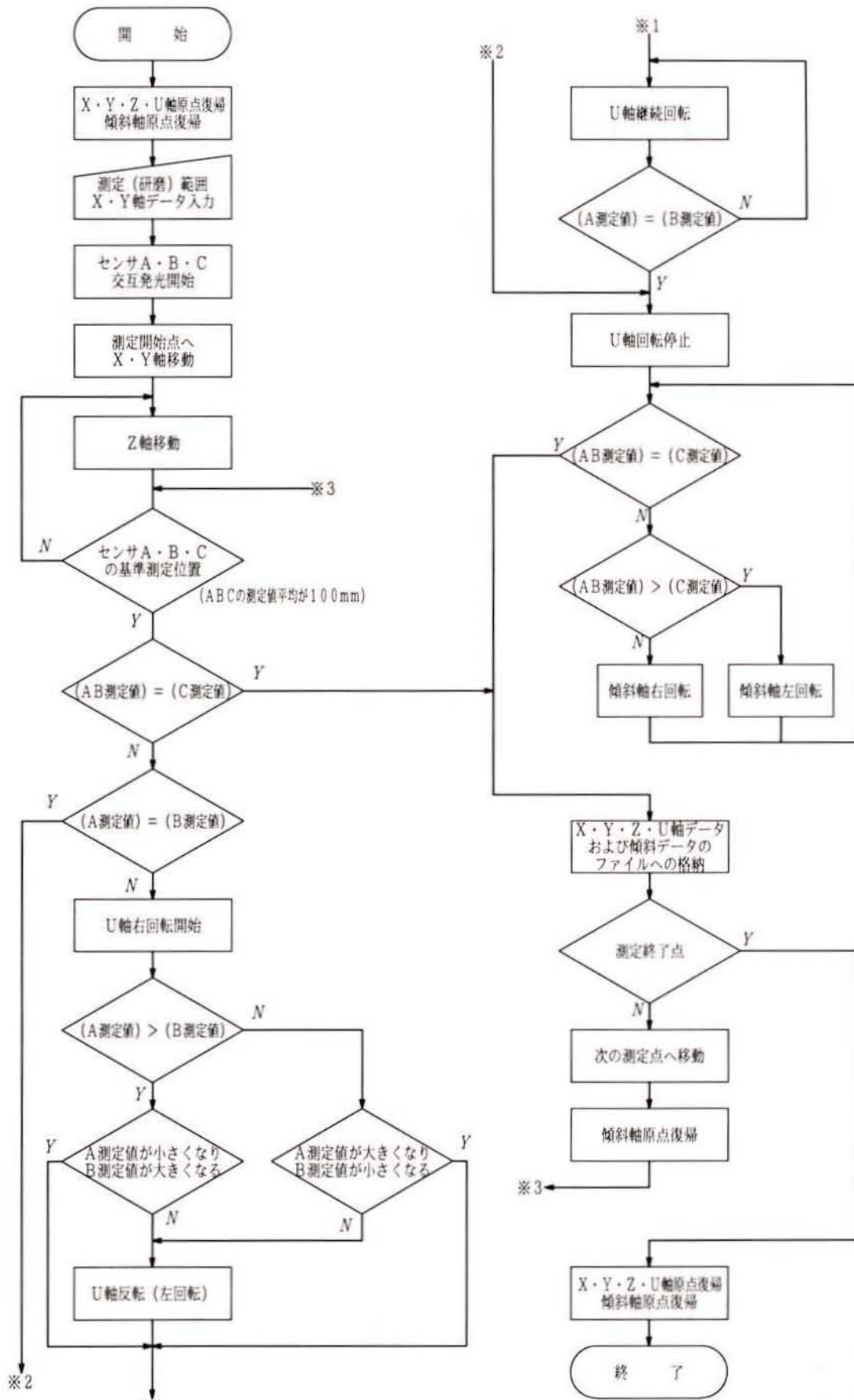


図6.18 形状認識フローチャート

がら両者が一致するまで傾けていく。3つのセンシングの値を完全に一致させることは不可能であるから、一致の条件を0.05mmに設定し3つの値の差がこの範囲に収まった時点で傾斜駆動を止め、角度計の読みと指令角度の表示を読み取った。指令角度は傾斜軸駆動モータの指令パルス数を角度に変換しパソコン上に表示したものである。

図6.19は各傾斜面に対して3回ずつ実験を行った結果である。図中の左側が角度計による測定の誤差、右側が指令角度の誤差である。それぞれに測定値のばらつきと平均値を示してある。図より次のことがいえる。

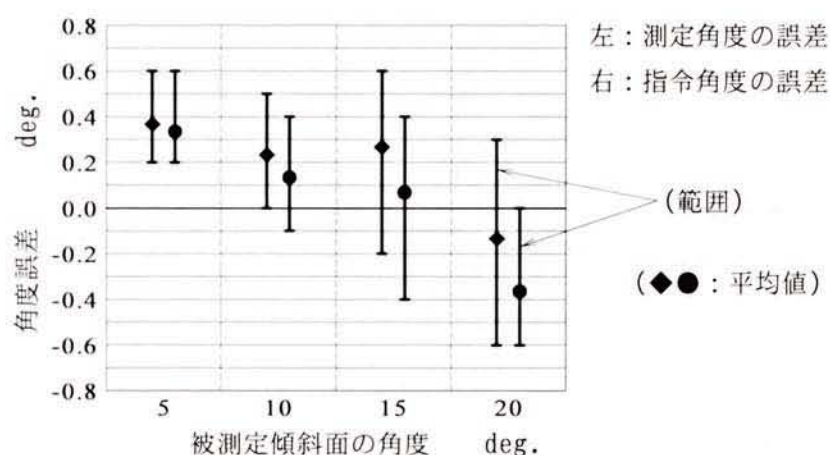


図6.19 工具傾斜軸の追従性

(1) 測定角度（角度計の読み）は、被測定傾斜面に対して最大で 0.6° の誤差が発生している。この誤差の発生要因はセンシング誤差と機構のたわみであるが、図6.17によれば工具に荷重がかからない場合たわみは0近傍に収束するので、この実験の誤差は大部分がセンシング誤差であると考えられる。 0.6° の誤差をセンシング高さ方向に換算すると0.157mmになり、0.05mmの約3倍になっている。この原因として考えられるのは、一致条件を一回のみ参照しているため工具姿勢が安定しないうちに停止しその結果角度のずれが大きくなる。一致条件を何回か連続で満たすように設定すれば精度が向上するが、そのことにより時間が多く費やされてしまうという欠点も発生する。トータルとしての改善には、センサの精度向上(0.05mm幅の縮小)、プログラムの処理スピードの向上、機構の追従速度の向上が必要であるが、この装置が金型研磨を目的にしていることから、最大 0.6° の誤差は許容できる範囲にあると考える。

(2) 研磨加工点の傾斜データは傾斜軸サーボの回転量(パルス量)で保存されるから、被測定面の傾斜角度に対する指令角度の誤差量は重要である。図6.19によれば、指令角度の誤差は最大で 0.6° で、全体的に測定角度の誤差と同じ傾向になっている。本装置に使用している駆動用ギヤは標準平歯車であるから、バックラッシにより測定角度と指令角度の誤差が大きくなると考えられるが、この実験結果では影響はほとんどみられない。しかし、今後実用に近づけるためにはテーパギヤ等によるバックラッシ減少を考慮する必要性は残されている。

6.5.3 研磨加工のフロー

研磨加工は6.5.1項に述べた形状認識データをファイルから読み込んで、それにしたがって各制御軸を駆動させることにより行われる。したがって、この流れは形状認識ほど複雑なものとはならない。図6.20にそのフローチャートを示す。

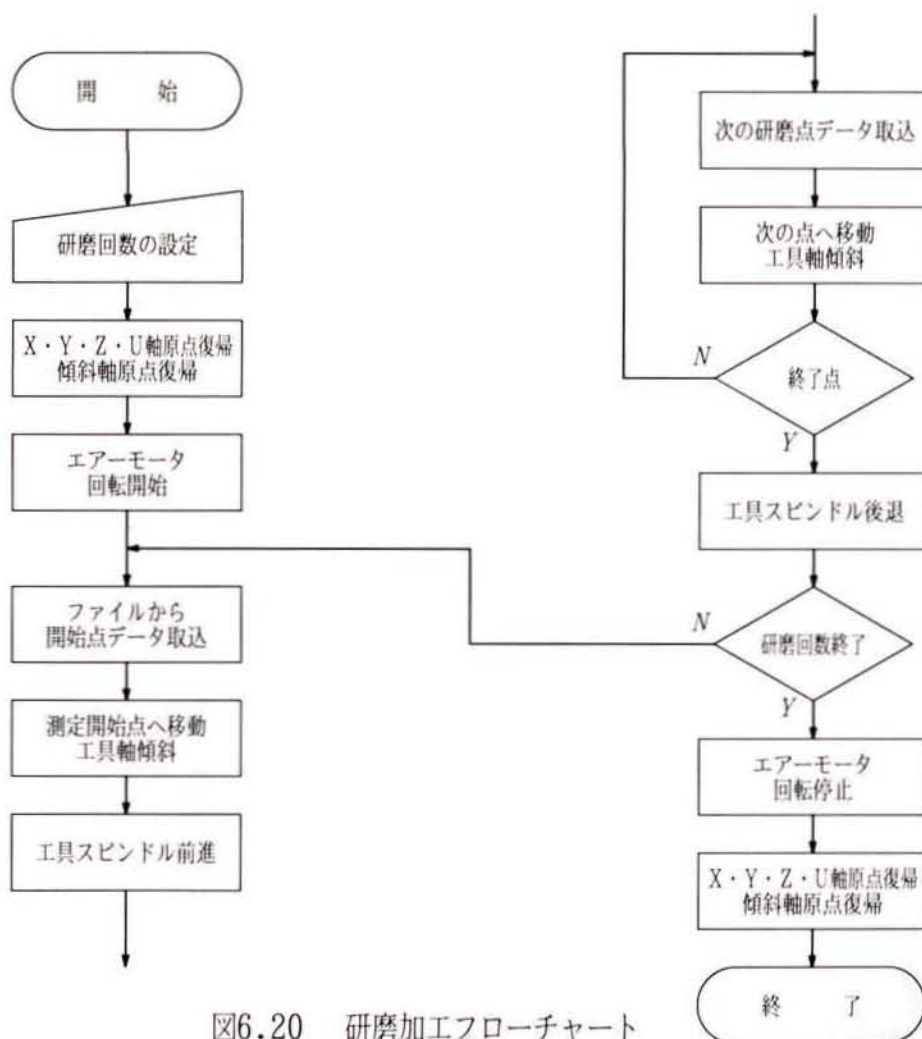


図6.20 研磨加工フローチャート

6.6 研磨加工実験

センシングによる形状認識とそのデータによる工具姿勢制御が正常に行われることを検証するため研磨加工実験を行った。研磨試料は図6.21に示すように大きさが155×100×30mmのS45C材で、凸曲面の表面粗さが平均 $4.2\mu\text{mRy}$ （4か所測定）である。形状認識範囲は一点あたりのセンシング範囲が図6.15で示した大きさになってしまうため、試料面全域は不可能で曲面中心部の105×50mmである。また、測定点間隔は $2.0\times 5.0\text{mm}$ に設定したので、測定点は全部で $53\times 11=583$ ポイントになる。

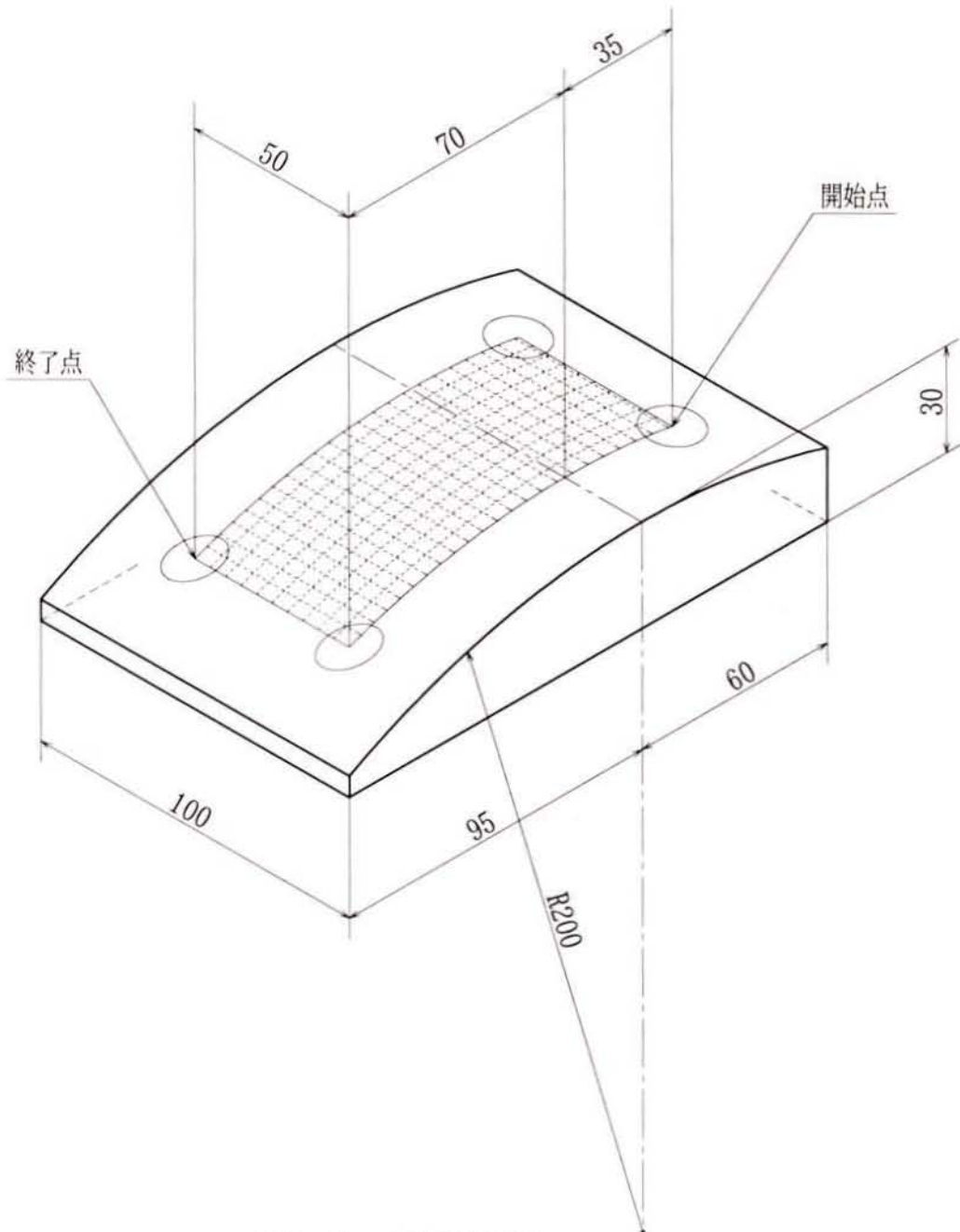


図6.21 研磨実験試料

研磨工具はミニター(株)製の直径21mmの研磨ディスクで、砥粒が布製のディスクに電着されたものを使用した。研磨加工は、まず粒度#80のサンドペーパーディスクで荒取りを行い、次にダイヤモンドディスクで粒度#600、#1500、#3000の順にそれぞれ10回ずつ行った。押付力は#1500までが20N、#3000は5Nとした。送り速度は500mm/minに設定したが、研磨工具の回転数はエア駆動のため正確には把握できない。また研磨油は動粘度 $48\text{mm}^2/\text{s}(\text{cSt})$ のマシン油を用いた。

図6.22に研磨前後の試料表面写真を示す。図より、研磨後は鏡面に近い光沢が得られていることがわかるが、一部の格子線が乱れており目視観察でも研磨模様が確認されることから完全な鏡面に到達しているとはいえない。この原因としては、次の項目が考えられる。

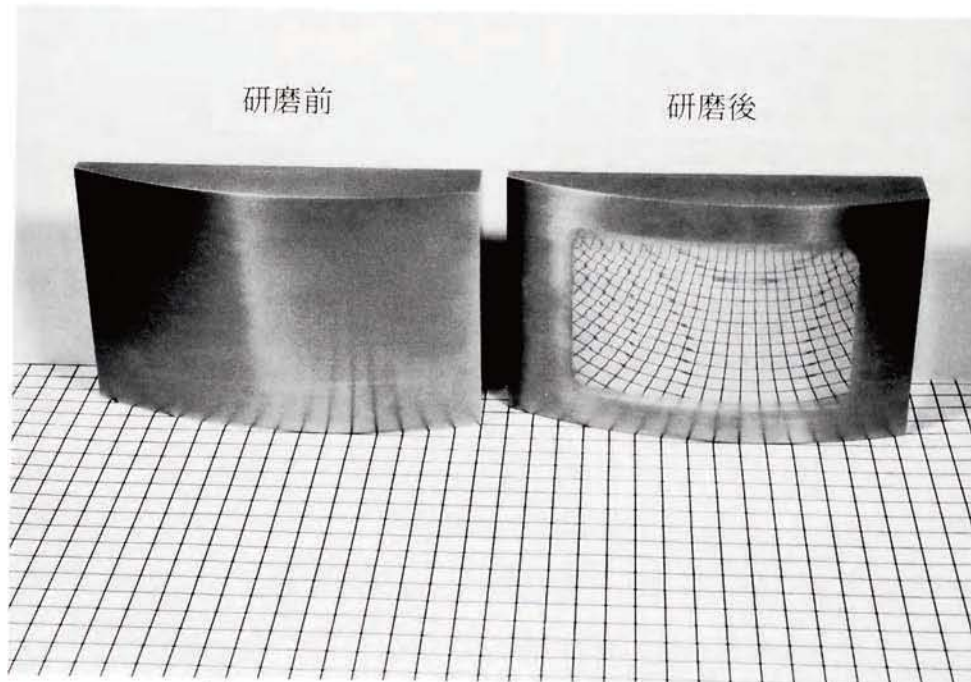


図6.22 研磨加工実験試料の表面写真

(1) 研磨工具の通過経路（工具中心の通過位置）が常に同じであった。

研磨加工を行うとき、長手方向、幅方向、斜め方向の経路がとれるプログラムを作成し、研磨動作パターンを多様化する必要がある。

(2) 研磨押付圧力が大きすぎた。

研磨押付力の設定値は、第3章のポリッシング実験を参考にして、表6.4の換算表にしたがってエア圧力制御弁を調整することにより得た。この圧力設定法は容易に行うことができるので、エア圧による定圧切込み方式は研磨作業にとって有効な手段であることがわかった。ただし、現在は研磨面の曲率に関係なく一定の押付力であるため、曲率状態に合わせたエア圧制御が今後の検討課題である。

(3) 固定砥粒のみの研磨であった。

研磨工具に空圧式スピンドルを用いており、回転速度制御が困難であったため、遊離砥粒によるポリッシングを行わなかった。この研磨スピンドルを回転速度制御が可能な電気式モータに改良し、砥粒や研磨油の飛散防止対策を行いたい。

(4) 研磨工具の送り速度が一定であった。

精度の高い研磨面を得るためには、研磨条痕が不規則に交錯するような加工条件設定が必要である。本システムにおいては、工具傾斜軸とロボット制御軸を完全に同期させていないため、確実な速度コントロールは困難である。したがって、動作の円滑さや速度の向上を目指した同時5軸制御のコントロールを構築することが今後の課題となる。

6.7 小括

研磨工程は金型製作上で最も自動化が困難とされているが、本章は汎用性のある比較的安価な装置を使いこの作業を自動化し、手作業の範囲の縮小を図ることを目的に、不動点カム機構を備えた研磨工具システムの試作研究を行った。以下にそのまとめを記す。

- (1) 工具先端部に不動点を有する曲面研磨装置の開発を目的として、カム機構を用いて研磨工具を傾斜させる装置（不動点カム機構と名付けた）を考案し、これをロボットヘッドに取り付けて5軸制御の加工システムを試作した。

これにより、工具先端が不動点となる板カムを設計することは十分可能であることがわかった。ただし、本装置ではカムは一方向に対してのみ拘束力を持っており、カムローラはスプリング力によりカムに密着保持されている。完全な確動を得るためには、共役カム等の拘束カムを採用していく必要がある。

- (2) レーザセンサを工具ヘッドに3個装備し、任意の自由曲面のセンシングを同一装置上で行い、対象物形状の認識と研磨加工を一連の動作内で行うことを可能にした。

現在実用化されている三角測量型のレーザセンサは、低価格ではあるがその精度維持のため、外形が大きくなっており、研磨工具先端部へ装備し易い省スペース型の開発が課題となる。

また、レーザ干渉に対しては対応策を講じたが、レーザ発光の立ち上がり時間が作業能率に大きく影響するので、この時間短縮も必要課題となる。（使用センサの70%発光立上り時間は500ms）

- (3) 不動点カム機構を用いた研磨工具ヘッドの剛性は、工具傾斜面とその直角方向でたわみ量の異方性はあるものの、いずれの値も不動点リンク機構に比べ大幅な改善が認められた。

試作したヘッドは研磨工具部が片持ち構成であるから、両持ち機構を採用することによりこれがさらに向上すると考えられるので、小型化が可能になる。

- (4) レーザセンサによる形状認識は、本装置上においては連続自由曲面形状に対応しているのみであり、また傾斜面への追従性がセンサの分解能に比べて低下する現象もみられ、さらに検討をすすめる必要性はあるものの、金型研磨を前提とすれば十分許容できるものであった。

- (5) 研磨砥石を適切に選定することにより、金型表面を鏡面に近い状態まで仕上げることができ、実研磨実験例が不足してはいるものの連続自由曲面形状においてはそ

の有効性が確認できた。また、エア圧による定圧切込みは、その圧力設定が容易であることから、有効な手段であることがわかった。

さらに精度の高い鏡面を得るには、遊離砥粒によるポリッシングを行う必要があるが、そのためには研磨スピンドルを回転速度制御が可能な電気式モータに変更し、砥粒や研磨油の飛散防止対策を行う必要がある。

- (6) 本システムは研磨工具ヘッドを産業用ロボットに装着しており、5つの制御軸が完全に同期しているとはいえない。したがって、動作の円滑さや速度の向上を目指すには同時5軸制御のコントロールを構築することが最終的に必要となる。

また、実用にあたってはソフト面の充実も課題となる。

参考文献

- (1) 鈴木基之，一安俊平，桐井一成，砂原秀一，作田俊裕，浅井昭夫：データ駆動によるプレス金型自動仕上げロボットの開発，精密工学会誌，58,3(1992)，1309-1314.
- (2) 鈴木基之，渡辺一樹：ロボットによる金型磨き，機械と工具，3(1996)，29-35.
- (3) 国枝正典，中川威雄，樋口俊郎：磁力研磨工具を用いたロボットによる曲面の研磨，精密工学会誌，54,1(1988)，125-130.
- (4) 宮沢伸一：曲面用研磨装置，精密機械，50,7(1984)，1097-1102.
- (5) 松澤隆，大森整，牧野内昭武，西尾雄次，守安精：自由曲面加工法およびツールの開発，日本機械学会東北支部秋田地方講演会講演論文集，No.981-2(1998)，515.
- (6) 榎原弘之，近藤司，三好隆志，斎藤勝政：工具先端部不動点を有する5軸曲面仕上げ工具の研究，精密工学会誌，57,7(1991)，1199-1204.
- (7) 手塚佳夫，玉井伸児，三木一隆，孫運海，山崎隆夫，清水保雄：センサフィードバック制御による曲面倣い制御について，先端加工学会誌，13(1994)，63-68.
- (8) 牧野洋：自動機械機構学，日刊工業新聞社，(1997)，47.
- (9) 牧野洋，高野政晴：機械運動学，コロナ社，(1995)，101,112.
- (10) 牧野洋：自動機械機構学，日刊工業新聞社，(1997)，161.
- (11) 長嶋秀世：数値計算法，槇書店，2(1995)，17.

第7章

結 論

第7章 結 論

金型は、品質と価格および納期がその製品価値を決める要素になる。日本の金型は、品質的には世界をリードし確固たる地位を築いているが、価格面では一般金型において NIES 諸国などの追い上げがあり、その優位性は薄れてきた。

こういった状況を背景に、金型製造工程の自動化、省力化の要求が増している。金型加工のうち、形状創成加工は工作機械の NC 化、システム化の進展によりその自動化が実現されてきた。一方、仕上げ加工は依然として熟練工などの人手による研磨作業が大部分を占めており、これを自動化することは金型のコスト低減や納期短縮に大きな影響を与える。

本論文は、このような現状をふまえ、金型研磨の自動化を目的として、これを実現するにあたっての諸課題に関して基礎的な研究を行ったものである。その概要については、まず、金型産業の現状とそれがかかえる諸問題およびそこから波及する金型研磨の課題について述べ、研究の意義と方向性を明らかにした。次に、自動研磨を行うことによる被研磨面の特性や強度が金型の品質や寿命にとって極めて重要であることから、精密プレス金型を中心に金型材種として最近多用されている WC-Co 超硬合金に自動ポリシング加工と砥粒流動加工を施して、その表面特性や破壊強度について調べた。さらに、金型の表面形状を自動的に認識することが時間短縮の重要な要素になることから、レーザセンサによる非接触センシングを試み、特に認識が難しいとされるエッジ部について精度の高い認識法を提案した。次に、研磨工具の姿勢が金型表面に自動的に倣うことができる制御システムを試作した。この特徴は、一つのユニット内にセンサと研磨工具を備えて、形状認識から研磨作業までを一連の動作で行うことができ、また研磨ポイントの位置決め制御と工具姿勢制御を分離できる「不動点カム機構」を独自に考案したことである。

本論文は7章から成り、以下にその内容あるいは得られた成果について各章ごとに要約する。

第1章は緒論であり、金型産業の位置付けと成り立ちおよび現状について概要を明らかにし、本研究を進めるに至った動機について述べた。また本論文の構成と要旨についても述べた。

第2章は、金型産業の現状と金型研磨の課題について説明し、本研究において取り組むべき研究課題を明らかにした。すなわち、金型産業の現状と問題点についてこれまでの金型生産のデータから分析し、また金型業界の特質が中小零細企業による構成で、熟練工に依存した作業が多く、受注の繁忙が激しく、将来の見通しが立てにくいところにあることを指摘した。こうした中でも、金型ユーザー産業からの高精度、短納期、低コストの要求は一層強くなっており、金型生産工程の省力化、自動化が今後の生産活動にとって不可欠な条件でありその取組みが急務であることを述べて、本研究の必要性が大きいことを明らかにするとともに、汎用性を備え、操作性の良い安価な装置の開発を目指した本研究の方向性に間違いのないことを確認した。

第3章は、自動研磨を行ったときの研磨面特性や強度を明らかにするため、市販の超微粒子タイプの WC-Co 超硬合金 (10wt.%Co) に自動研磨 (ポリシング加工) を施して3点曲げ試験を行い、その研磨面性状や破壊強度を調べた。得られた結果は次の通りである。

- (1) 自動機を使用して WC-Co 超硬合金にポリシング加工を行ったところ、ダイヤモンド遊離砥粒を用いた上で加工条件を適切に設定すれば、磨き条痕がほとんど残らない鏡面 ($0.03\mu\text{mRy}$) を得られることがわかった。
- (2) $0.03\mu\text{mRy}$ ポリシングは研削による圧縮残留応力を著しく小さくするが、これは研削による加工変質層をポリシング加工で大部分除去しているためと考えられる。また、 $0.03\mu\text{mRy}$ の残留応力は母材 (焼結面) とほぼ同じ大きさであることから、ポリシング加工による加工変質層の生成はほとんどないといえる。
- (3) 表面粗さ $0.03\mu\text{mRy}$ の鏡面を持った試験片は、圧縮残留応力が低下したにもかかわらず曲げ破壊強度が向上した。これは表面粗さが著しく向上したためと考えられた。この曲げ破壊強度は母材や WED 試験片に比べ3倍以上の値であることから、自動ポリシング加工が WC-Co 超硬合金に対して非常に有効であることが明らかになった。

第4章は、金型内面にたいして有効な自動研磨法である砥粒流動加工を、市販の超微粒子タイプの WC-Co 超硬合金 (10wt.%Co) に施して3点曲げ試験を行い、その研磨面特性や破壊強度について調査を行った。得られた結果は次の通りである。

- (1) WED 材と研削材に砥粒流動加工を施したところ、いずれの試験片においても大幅な表面粗さの改善がみられた。
- (2) 砥粒流動加工による表面残留応力の変化を調べたところ、WED 材では本加工前に 1000MPa 程度の大きな引張残留応力が存在していたものが、約 400MPa の圧縮残留応力に変化した。一方、研削材では約 2000MPa の圧縮残留応力がこの加工により 500~1000MPa 程度に減少した。
- (3) WED 材と研削材に砥粒流動加工を施したところ、いずれの試験片も曲げ破壊強度が向上した。特に WED 材は最大 60% の大幅な増加がみられたが、これは WED 材では砥粒流動加工による残留応力の引張から圧縮への変化と前加工により発生したマイクロクラックの除去作用が重畳したためと考えられる。
- (4) 以上のことから、WC-Co 超硬合金に対する砥粒流動加工はその強度を増加させ、かつ十分な表面性状を得ることができる極めて有効な加工法であることが明らかになった。

第 5 章は、金型の自動研磨を実現するために必要となる被加工物の形状センシング法とそれに基づく認識法について述べた。そのうち不連続部（エッジ部）を有する形状は特に認識が困難とされるので、これに焦点をあててレーザセンサによる非接触計測を行い、精度の高い認識法を提案した。得られた結果は次の通りである。

- (1) エッジ部を有する形状のうちで基本的パターンである段差形状、小幅凸形形状および山形形状をとりあげ、レーザセンサによりこれらの高さ測定を行い、そのセンシング特性を明らかにした。
- (2) 照射レーザ光の光強度分布が正規型(ガウス型)をしていることを用いて、スポットがエッジ部によって複数の面に分割されることにより、高さ出力値がどのような影響を受けるか解析した。
- (3) センサ出力値の解析において、小幅凸形は測定値を一階数値微分、山形は測定値の最小 2 乗近似値を二階数値微分することにより、エッジの位置が正確に認識できることを証明した。
- (4) 小幅凸形の凸部高さや山形の頂点高さを測定すると、センサ出力値はマイナス側に大きな誤差を生じるが、正規解析法を用いた補正計算を行うことによりその誤差が大きく改善され、それぞれの高さが精度よく認識できることが明らかになった。

- (5) 切削実験を行うことにより本手法の妥当性を確認した。被加工物の加工誤差は、センサの測定誤差とそれによる認識誤差にほとんど起因していることが明らかになり、加工システムへの適用上有効な知見を得た。

第6章は、汎用性のある比較的安価な装置を使うことによって研磨作業を自動化し、この工程の省力化を図ることを目的に、不動点カム機構を備えた研磨工具システムの試作研究について述べた。得られた結果は次の通りである。

- (1) 工具先端部に不動点を有する曲面研磨装置の開発を目的として、カム機構を用いて研磨工具を傾斜させる装置（不動点カム機構と名付けた）を考案し、これをロボットヘッドに取り付けて5軸制御の加工システムを試作した。これにより、工具先端が不動点となる板カムを設計することは十分可能であることがわかった。
- (2) レーザセンサを工具ヘッドに3個装備し、任意の自由曲面のセンシングを同一装置上で行い、対象物形状の認識と研磨加工を一連の動作内で行うことを可能にした。
- (3) 不動点カム機構を用いた研磨工具ヘッドの剛性は、工具傾斜面とその直角方向でたわみ量の異方性はあるものの、いずれの値も不動点リンク機構に比べ大幅な改善が認められた。
- (4) 本装置上のレーザセンサによる形状認識は、曲率半径が比較的大きい連続自由曲面形状に対しては金型研磨を前提とすれば許容できる精度であった。
- (5) 研磨砥石を適切に選定することにより、金型表面を鏡面に近い状態まで仕上げることができ、連続自由曲面形状においてはその有効性が確認できた。また、エア圧による定圧切込みは、圧力設定が容易であることから有効な手段であることがわかった。

第7章は結論であり、本研究で得られた主要な結果について総括し、今後の展望について考察した。

以上、金型製造工程の中で特に熟練工の手作業依存が大きい研磨作業を自動化するための諸因子について検討を加えてきた。すなわち、金型外面研磨として自動ポリシング加工、自動内面研磨として砥粒流動加工を WC-Co 超硬合金に施して、研磨面特性や破壊強度について明らかにし、次に金型表面形状の認識法の提案と比較的簡単な制御法に

よる自動研磨装置の試作研究を行い、それらの成果について述べた。

さらに完成度を高めるための課題としては、結合相量(Co)および WC 粒度の異なる超硬合金や今後金型材として有望なセラミックスなどを自動研磨したときの材料評価、それに基づく研磨加工条件の最適化、形状認識におけるセンシングエリアの縮小や性能アップ、研磨装置における動作可能形状の拡大やソフト面を含めた操作性の向上などがあり、今後もこれらの研究を行うことにより実用可能な研磨システムの構築を行いたい。

金型の自動研磨に関する研究は多方面で行われているが、いずれもある特化された部分の研究であり、あらゆる形状や品質に対応できる自動研磨機は現れていない。本研究は、自動研磨における材料特性評価と非接触センシング機能を備えた金型研磨システムの試作を行い、自動化の方向性と金型メーカーが導入し易い装置の実現性を示唆したものであり、本論文の意義は十分大きいものであると考える。

発表論文等

1. 本論文に関連する論文および発表資料

1.1 学会論文

- 1) 三木一隆, 孫運海, 手塚佳夫, 山崎隆夫, 川久保英樹, 土屋和博, 佐藤元太郎: レーザセンサによる小幅凸型試料の形状認識, 先端加工学会誌, 16,1(1997), 54-61.
- 2) 三木一隆, 孫運海, 手塚佳夫, 山崎隆夫, 川久保英樹, 土屋和博, 小林光征: レーザセンサによる山型試料の形状認識, 先端加工学会誌, 18,1(1999), 49-56.
- 3) 三木一隆, 手塚佳夫, 孫運海, 川久保英樹, 小林光征: レーザセンサによるエッジ部の位置認識法, 日本設計工学会誌, 34,7(1999), 230-237.
- 4) 三木一隆, 山崎隆夫, 川久保英樹, 中澤清, 牛立斌, 小林光征: WC-Co 超硬合金の曲げ破壊強度に及ぼす砥粒流動加工の影響, 日本機械学会論文集 (C 編), 66,648 (2000), 2852-2857.

1.2 学会発表

- 1) Kazutaka MIKI, Takao YAMAZAKI, Hideki KAWAKUBO, Kiyoshi NAKAZAWA, Libin NIU, Mitsuyuki KOBAYASHI : Bending Fracture Strength of a WC-Co Alloy Finished by Abrasive Flow Machining Process, 5th International Conference on Progress of Machining Technology, (Sep. 16-20,2000), Beijing.
- 2) 孫運海, 柏木寛, 加藤以千弘, 山崎隆夫, 佐藤元太郎, 三木一隆: 非接触センサを用いた小幅凸型試料の認識, 日本機械学会山梨講演会講演論文集, (1993)51.

2. 本論文関連以外の論文

2.1 学会論文

- 1) 手塚佳夫, 玉井伸児, 三木一隆, 孫運海, 山崎隆夫, 清水保雄: センサフィードバック制御による曲面倣い制御について, 先端加工学会誌, 13(1994), 63-68.
- 2) 孫運海, 手塚佳夫, 三木一隆, 山崎隆夫, 榊和彦, 清水保雄, 佐藤元太郎: レーザセンサによる段差位置の認識, 先端加工学会誌, 13(1994), 77-82.
- 3) 孫運海, 手塚佳夫, 三木一隆, 清水保雄, 佐藤元太郎: 外界センサ情報による倣い制御に関する研究, 日本設計工学会誌, 29,9(1994), 350-354.
- 4) 山崎隆夫, 石黒周司, 三木一隆, 佐藤元太郎: コレットチャックの把持特性, 先端加工学会誌, 17,1(1998), 74-79.
- 5) 川久保英樹, 土屋和博, 孫運海, 手塚佳夫, 三木一隆, 山崎隆夫: 単純混合型磁性研磨材を用いた円管内面研磨, 砥粒加工学会誌, 43,2(1999), 75-80.
- 6) 川久保英樹, 土屋和博, 孫運海, 手塚佳夫, 三木一隆, 山崎隆夫: 単純混合型磁性研磨材の研磨性能に関する研究, 日本機械学会論文集 (C編), 65,632(1999), 1690-1697.
- 7) 川久保英樹, 土屋和博, 孫運海, 手塚佳夫, 三木一隆, 山崎隆夫, 佐藤元太郎, 進村武男: 平面研磨における単純混合型磁性研磨材の研磨性能に関する研究, 砥粒加工学会誌, 44,6(2000), 282-287.

2.2 学会発表

- 1) 土屋和博, 佐藤元太郎, 布施雅彦, 中尾敬, 宗像滋記, 三木一隆: 単純混合磁気研磨法における添加油脂の研磨性能への影響, 日本機械学会山梨講演会講演論文集, (1993)18.
- 2) 川久保英樹, 土屋和博, 孫運海, 手塚佳夫, 三木一隆, 山崎隆夫: 単純混合型磁性研磨材を用いた円管内面研磨, 1998年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集.
- 3) 川久保英樹, 土屋和博, 孫運海, 手塚佳夫, 三木一隆, 山崎隆夫, 佐藤元太郎, 進村武男: 平面研磨における単純混合型磁性研磨材の研磨性能に関する研究, 1999年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集.
- 4) 川久保英樹, 土屋和博, 孫運海, 手塚佳夫, 三木一隆, 山崎隆夫: 単純混合型磁性研磨材に関する研究-添加油脂が研磨性能におよぼす影響, 1999年度精密工学会秋季大会講演論文集.

謝 辞

本論文をまとめる機会をお与えいただき、本研究の遂行にあたりまして懇切丁寧なご指導とご鞭撻を賜りました信州大学工学部教授 小林光征先生に心より感謝を申し上げます。

また、大変ご多忙中のところ本論文の査読・校閲をいただき、ご助言とご指摘を賜りました信州大学工学部教授 賀勢晋司先生、同教授 清水保雄先生、同教授 杉本公一先生に心より御礼申し上げます。

さらに、本研究を始めるにあたりましてその指針を賜り、その後今日に至るまで長年に渡りまして、ご指導、ご助言と温かい激励をいただきました長野県工科短期大学校長（前信州大学工学部教授）佐藤元太郎先生に心より感謝し、御礼を申し上げます。

また、本研究全般にわたりまして、常に貴重なご助言、ご指摘をいただきましたセイコーエプソン株式会社課長 土屋和博様、新光電気工業株式会社 佐藤運海様、長野県工科短期大学校助教授 山崎隆夫先生、同助教授 手塚佳夫先生、同講師 川久保英樹先生に深く感謝の意を表します。

本研究の調査、実験に際しましてご指導とご協力をいただきました信州大学工学部助手 牛立斌様、同技官 二夕村朝比古様、長野県精密工業試験場技師 増田雪也様、元新光電気工業株式会社課長 故中澤清様、株式会社東洋エクストールドホーン係長 山中豊様、同係長 押見泰志様に厚くお礼申し上げます。

本研究における実験等を卒業研究の一環として共同で進めていただきました信州大学工学部（現 矢崎総業株式会社）梅田勝之氏に心から感謝申し上げます。また、本研究は長野県工科短期大学校生産技術科の卒業研究として多くの実験が行われ、川上明教授を始めとして生産技術科の先生方、卒研生諸氏に多大なご協力をいただきました。

ここに、ご協力を賜りました皆様に心から感謝の意を表し、厚く御礼申し上げます。

2000年 8月

三木一隆