

金型仕上げ自動化のための磨きシステムの開発

芝浦工業大学機械工学第二学科

柴田順二

(平成元年度研究開発助成 AF - 89004)

目 次

	ページ
1. 緒 論	
1-1 金型製作の現状と当面するその技術課題	50
1-2 自由曲面の磨き技術と問題点	52
1-3 研究目的	56
2 磨き加工における平坦度の創成機構	56
2-1 仕上げ面創成シミュレーションの原理	56
2-1-1 Work 上の設定	56
2-1-2 工具の送り速度の与え方	57
2-1-3 工具移動軌跡の与え方	57
2-1-4 工具回転数の与え方	59
2-1-5 研磨量の求め方	59
2-1-6 Work 表面性状による圧力分布の求め方	62
2-2 シミュレーションの流れ	66
3 仕上げ面創成のシミュレーションによる検討	69
3-1 仕上げ面うねりの抑制対策	69
3-2 シミュレーション結果及び仕上げ面うねりに関する考察	69
3-2-1 工具移動軌跡パターンによる影響	70
3-2-2 工具形状による影響	74
3-2-3 工具回転数による影響	76
3-2-4 ばね定数（砥石の弾性係数）による影響	76
3-2-5 Work 端部に関する検討	77
3-2-6 実用化工具パターンのための検討例	79
4 結 論	80

1. 緒 論

1-1 金型製作の現状と当面するその技術課題

加工は原材料と製品との重量関係によって、
(1) 除去加工 (-加工) (機械加工)

(2) 変形加工 (0加工)

(3) 付加加工 (+加工)

の3種類に大別することができる。

このなかでも、今日の大量生産、大量消費時代を支えているのは均一な品質の製品を量産する加

工技術である。その意味で、切屑を出さず、かつ迅速に製品形状を創成できる金型成形法の現代における意義は極めて大きいといえる。少品種多量生産の場合、図1-1のように工程数が多くなるにもかかわらず金型成形法が行われているのが現状である。

金型成形法の原理は金型の形状・表面性状を直接、転写するものである。金型形状は、一般に多様な面と稜線の入り混じって3次元的に構成された複雑なものになりがちである。あるいは、単純幾何学では表現が難しい意匠を目的に、デザインされた自由曲面を含む形状を、単品製作する態勢が求められるのも、金型加工ならではの特色である。

このように幾何学的あるいは構成的に複雑な3次元形状を、極めて高い品質と精度で、難削材の典型と目される金型母材のなかに造形するためには、極めて多彩な加工工程と長い加工時間を要しているのが実状である。

金型には、プラスチック型、プレス型、ダイカスト型、ガラス型などがあり、それを構成する形状、さらには要求精度も多種多様である。製品の多様化、高精度化が進み、その需要は増大する一途をたどっている。とりわけ、競争が激化しているOA機器、家電製品を対象としたプラスチック金型の需要は目覚ましいものがある。同時に生産性と品質の向上、低コスト化、納期の短縮化が迫られているといった社会状況でもある。

しかし、金型を製作するにあたって、

- ・ 耐久性の必要な金型の材質は難削材であり、加工が難しい。
 - ・ デザイナーの意匠設計に基づく金型には、数式では表現不可能な3次元自由曲面で構成されるものが多い。
 - ・ 意匠部品、外装部品ほど最終仕上げ面粗さ(光沢)の要求精度が高く、 $0.3 [\mu\text{m}] R_{\text{max}}$ 以下の鏡面が必要とされる。
- などの問題から、その自動化、省力化が遅れている。

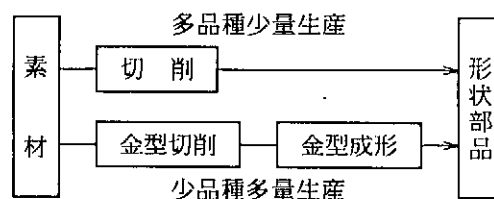


図1-1 形状部品の生産形態

金型の加工手順を示すと図1-2のようになる。自由曲面をもった金型の製作工程は大別して、

- 1) 形状加工工程
- 2) 平滑加工工程
- 3) 磨き加工工程

の3つに分けることができ、2)の平滑加工工程、3)の磨き加工工程の両者を含めて“仕上げ加工”と呼ばれている。このうち、1)の形状加工工程についてはNC工作機械の発達により、プログラミングの問題を除けばその自動化は十分進んでいる。しかし、金型品質の決め手であるこの後工程の2)の平滑加工工程、3)の磨き加工工程については、目標とする最終仕上げ面を得るためには今もなお、熟練された生産技術者の手作業に頼らざるを得ないのが現状であり、その生産技術者の確保も益々厳しくなるばかりである。そこで、その対応として金型の自動磨き加工機、例えば金型磨きロボットによる自動化への期待は高く、その実用化が強く望まれている。しかし、金型磨きの自動化は、

- ・ 1個ずつ形状の違う型の磨き作業は一品料理に似て専用機の製作が不可能である。
 - ・ 複雑な形状の曲面上を、巧みに砥石を動かす制御が難しい。
 - ・ 研磨の手順や粒度の選定などに、高度な判断が必要。
 - ・ 鏡面仕上げには精巧な触覚や視覚が必要。
 - ・ 自動化のためには摩耗し難い砥石が必要だが、任意の曲率に対して広い接触面積を保持する砥石はない。
- というような理由で困難なものとされている。

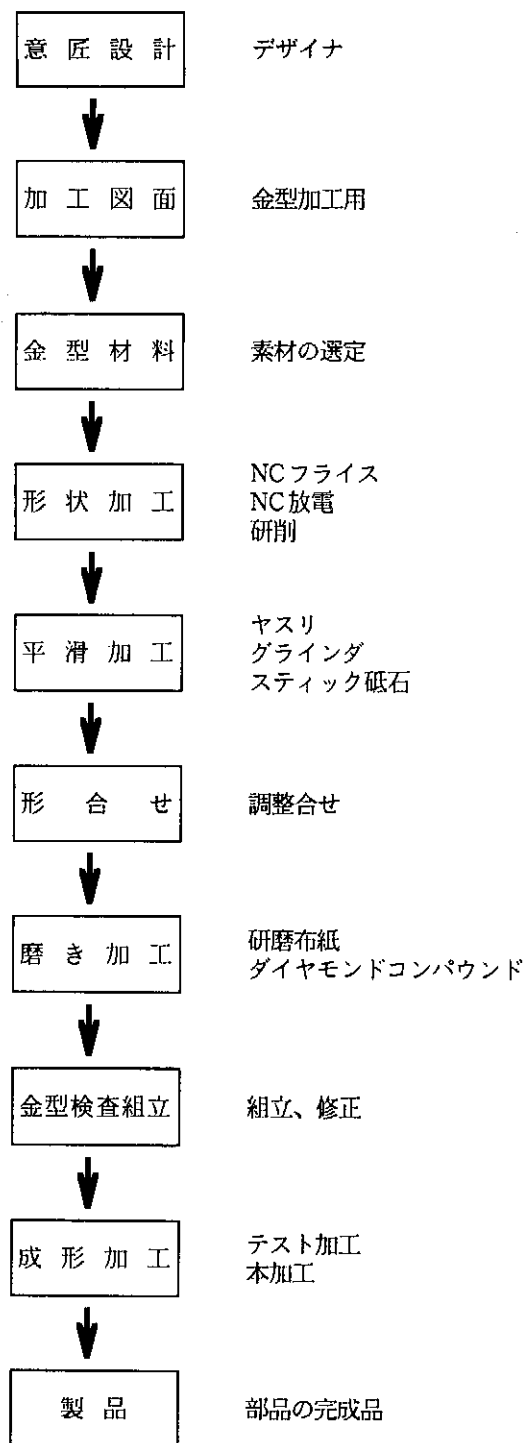


図1-2 金型の加工手順

そこで、この金型磨き自動化の試みとして、近年各種の金型仕上げ用機械装置が開発され、普及し始めているが、それらはそれぞれ、仕上げ加工の一部を自動化したにすぎず、それぞれ表面形状の異なる金型に対するフレキシビリティを持った機械はまだ現れていないと言える。

1-2 自由曲面の磨き技術と問題点

図面上に描かれた自由な曲面形状を、素材の上に具現する手段の基本は素材の不要な箇所を何らかの手段で屑として強制的に機械除去することにある。この破壊を生じさせる媒体が工具であり、切削工具が最も馴染みが深い。幾何学的曲面形状のみを創成するという観点に立てば、工具の運動軌跡を制御し、工具と干渉する素材箇所をことごとく破壊除去することによって、所望の形状を創成するのが最も効率的であるが、工具運動の包絡面と素材の破壊面とが厳密にはなかなか一致するものではない。したがって、この破壊機構による加工精度は、次の3つの要因によって完全に支配されていると推察できる。

- 1) 工具の運動精度
- 2) 工具自体の形状精度
- 3) 工具形状の転写精度

母性原則の観点に基づく1)の問題は、コンピュータの普及によるCADの利用、NCの発達、機械性能の向上によって、いかに複雑な曲面形状であろうとも対処できる十分な見通しの立つ技術レベルに既に達していると思われる。

問題は、いかに理想的に工具運動を制御できたとしても、素材の破壊過程を正確に究明できていない現状では、切削加工工程のみで目的とする精密な曲面形状の最終精度を達成することは到底不可能である。

自由曲面創成のための加工工程を破壊加工機構の観点から分析したのが図1-3である。形状・寸法のみを要求するのであれば、通常、強制加工工程のみで十分実現できるはずである。しかし仕上げ面あらさや性状に関しては、サブミクロンの

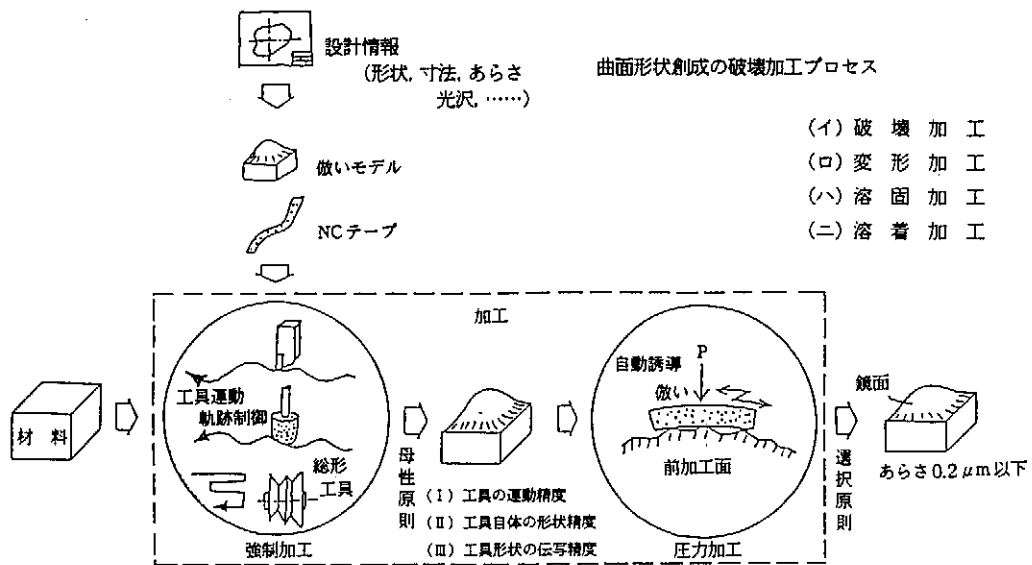


図1-3 金型の加工工程とそこに働く原則²⁾

オーダの要求が近年益々増大しつつある。

それは一つには、極度に高い加工精度を必要とする機械部品の製造にせまられたこともあるが、その他、光沢など美的商品価値、あるいは耐磨性、耐食性などトライポロジカルな要求による場合も多い。

プラスチック金型の表面仕上げなどは、後者の好例と言える。このような精密加工の要求に応じるためには、極度に微細な破壊作用が加工に要求される。

そのための工具としては光（レーザ）や熱（放電）、あるいは化学作用なども適用可能であるが、最も簡便なため広く普及しているのが、微小切れ刃として砥粒を用いる研削（研磨）加工と言える。しかし破壊現象が微小になる程幾何形状の創成能力は低下するので、これらの加工は通常、荒形状創成後の仕上げ加工としての利用に制限されざるを得なくなる。特に最終仕上げ工程に用いられる研磨加工は、形状修正能力をほとんど期待できないので、できる限り広い加工面で接触できる工具を一定圧で前加工面に押し付け、その面にならって相対ランダム運動させ、選択原則（図1-3）を

十分発揮できるよう心掛けなければならない。この点、母性原則に基づく強制除去加工とは、大幅にその趣を異にしている。金型磨き工程には、次のような固定砥粒形態の磨き工具が主として用いられる。

- ・ 磨き用砥石…スティック砥石、油砥石、その他
- ・ 研磨シート…研磨布紙、電着研磨シート

このような固定砥粒形態の磨き工具に用いる砥粒粒径はJISによって規格化され、厳密な選別を経て粒度番号によって定量的に管理されている。その結果、これらの磨き工具では、粒度番号に対応して、それぞれの磨き工具が達成可能な仕上げ面あらさの限界（固有あらさ）が生れることになる。元来、実用的には、例えば図1-4に示すように、粒度番号と仕上げ程度を漠然と対応させて、一応選択の目安としてきた。

固定砥粒工具で、達成可能な限界仕上げ面あらさの目安は、 $0.1 \sim 0.3 \mu\text{m} R_{\text{max}}$ 程度である。もし、それ以上の仕上げ面粗さが要求される場合、遊離砥粒による磨き工程に頼らなければならない。

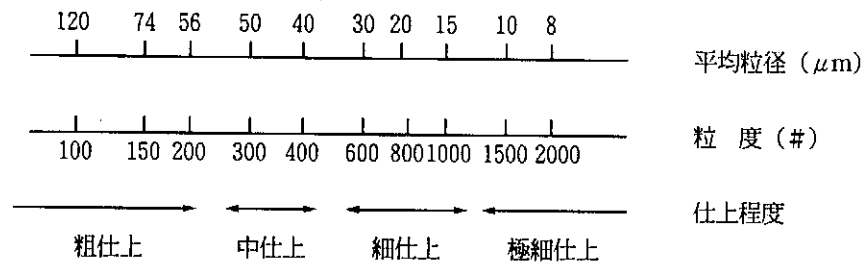


図1-4 粒度番号とそれに対応する仕上げ程度³⁾

金型磨き用ラップ砥材の主流はやはりダイヤモンドであり、その粒径は数十 μm からsub- μm 程度である。粒度と用途分類を表1-1に示す。

表1-1 ダイヤモンドラップの粒度と用途分類³⁾

適用ラップの分類	平均粒径	粒度
鏡面仕上ラップ用	0.25 μm	100,000
	0.5	60,000
	1	14,000
精密ラップ用	3	8,000
	6	3,000
	9	1,800
予備ラップ用	15	1,200
	30	600
	45	325
粗仕上ラップ用	60	230
	90	200

ラップ作業の原点は、金型曲面へ容易になじみやすい軟質のラップ工具—例えば軟らかい金属(鋳鉄、真鍮、銅など)や木材(柳、竹、柘植など)をこれらラップ砥粒を介して加圧し、加工面と相対運動させ、仕上げ面の突出部のみを選択的に除去するものである。固定砥粒形態の研磨工具では、その切れ刃形状と分布が、固有あらさとして仕上げ面に転写されるのに対し、ラップ加工では固有あらさという概念があまり明確に定義できない点にも、その扱いにくさがあるといえよう。このラップ運動を電動機、空気圧あるいは超音波などの回転や揺動運動で代替して省力化を図ろうとする手持ち式磨き工具がかなり普及し、金型磨き作業の能率化に貢献している。ここで用いられる工具の種類は、図1-5のように往復運動工具と回転運動工具とに大別することができる。

現在、この工程の自動化はかなり進んできてい

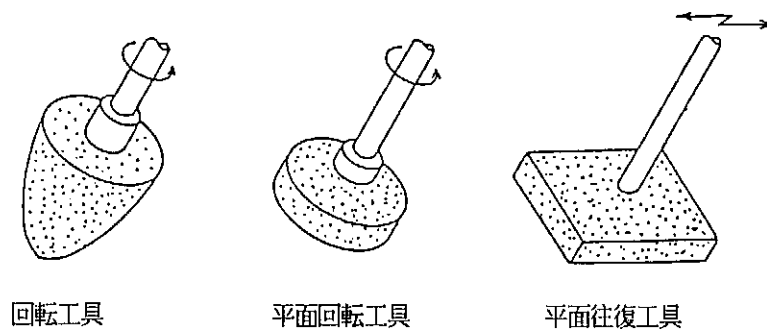


図1-5 磨き加工工具の分類

るが、能率などの面から、また往復運動を得意としないロボットの特長上、回転運動による磨き工具を用いたものが殆どである。

例えば、図1-6に示すような金型の場合、数箇所に分けた部分(パッチ)を図1-7にあるようなティーチングパターンによって加工している。

しかし、回転工具を用いると、回転中心軸からの距離によって砥石に接する各点における速度が異なることから、各点の滑り接触距離が異なり、加工量も異なってしまふ。そのため、回転研磨工

具をただ単純に動かしただけでは、どうしても仕上げ面にうねりを生じてしまふ。このうねりの抑制が現在この分野における大きな技術問題となっている。

例えば、砥石に磁気吸引式ダイヤモンド砥石を用いたロボットによる半自動磨きシステムでは、螺旋状研磨により、直線移動による研磨よりもうねりの少ない表面を得ている。しかし、依然として回転研磨工具によるうねりは残っていると云える。

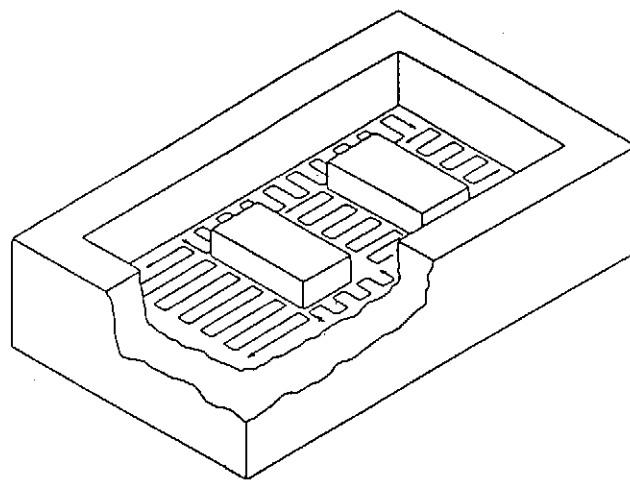


図1-6 金型加工面のパッチ分割例

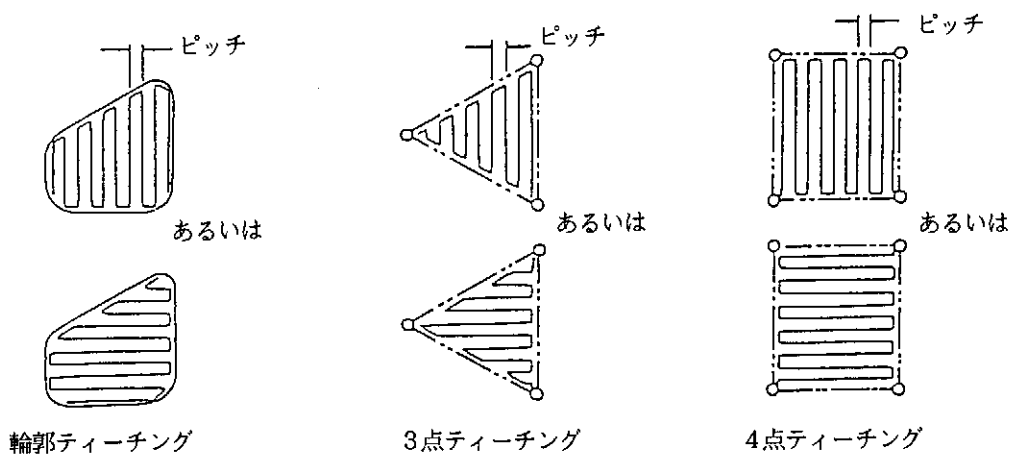


図1-7 ティーチングの種類⁹⁾

1-3 研究目的

現在、仕上げ工程において、その自動化を目指す場合、加工能率などの面から回転研磨工具を用いるのが最も一般的である。しかし、回転研磨工具を用いると仕上げ面にうねりが生じ易いことが大きな技術問題となっていることは前述したとおりである。

本研究では、この金型製作の形状加工工程において形成される“前加工面粗さ”を回転研磨工具を用いてうねりを極力抑制しながら、目標とする鏡面に近づけるための自動磨き工程について検討し、より実用性の高い自動仕上げ研磨システムの開発を目指している。そこで本年度は、回転研磨工具の移動軌跡が形状精度に及ぼす影響について、より現実に近いシミュレーションの開発を目指すと共に、回転研磨工具による金型面の自動研磨実現の可能性と限界を追究する。

2. 磨き加工における平坦度の創成機構

金型を製作するにあたって、形状加工工程において残される加工法特有のスクラッチや加工変質層などの“前加工面粗さ”を目標とする鏡面に近づけるために磨き仕上げする必要がある。

磨き仕上げ工程の自動化を目指す場合、回転研磨工具を用いるのが最も望ましいことは前述したとおりであるが、同時に work 表面にうねりが生じてしまうという問題も忘れてはいけない。

ロボットを用いて研磨を行う場合、その加工条件を設定するのは、技術者の経験からか、または、実験による試行から行うのが一般的である。しかし、それにかかる労力は、はかり知れないものである。シミュレーションを用いることは、仕上げ面を予測し、適切な加工条件を迅速に求めることができる利点がある。

そこで本章では、回転研磨工具による仕上げ面創成シミュレーションの基本概念について述べる。

2-1 仕上げ面創成シミュレーションの原理

本研究では、巻末の試料に示した BASIC で作成したプログラムにより仕上げ面創成シミュレーションを行った。このシミュレーションは、以下に示すような原理により行っている。

2-1-1 work 上の設定

work の形状は、より様々な工具移動が可能とされる長方形（正方形を含む）を想定する。その長方形の頂点のうち一つをとり、0 点とし、その頂点より辺を構成する頂点二つをとり、それぞれその辺を、X 軸、Y 軸とおく。

work の鉛直方向からの形状寸法は、図 2-1 に示すように、maxX、maxY で示されるものとする。この二つの値は任意に与えられるものとする。更に、work の節点分割を行う。その際、節点間距離を dx、dy とし、任意に与えられるものとする。それぞれの点は、 $P(\alpha * dx, \beta * dy)$ で示される。ここで、 α 、 β は、 $0 \leq \alpha \leq n_x$ 、 $0 \leq \beta \leq n_y$ である（ $\because n_x * dx = \text{maxX} / dx + 1$ 、 $n_y * dy = \text{maxY} / dy + 1$ ）。ここにおいて、maxX、maxY、dx、dy を任意に与えられるようにしたことにより、maxX、maxY を大きく、または dx、dy を小さくすることにより節点分割数を増やすことができるし、その逆で、少なくすることができる。

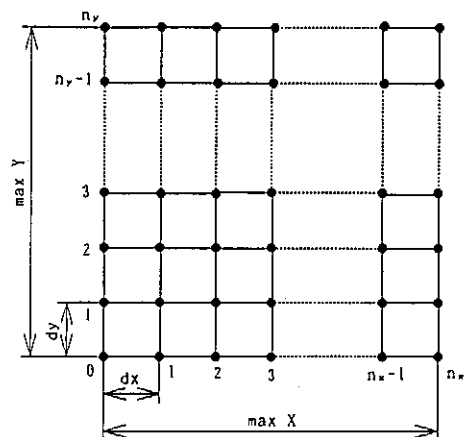


図 2-1 work 上の設定

work形状には、上記で設定したXY座標に凹凸の情報Z座標を付け加えることができる。そこで、配列を用いることにする。任意の点 (X_i, Y_i) のZ座標は、 $Z(X_i, Y_i)$ によって示されることになり、その初期情報は、データとして読み込める形をとる。つまり、そうすることにより様々な凹凸をもったworkに対して初期設定が可能であることになる。

2-1-2 工具の送り速度の与え方

砥石は、一般的に送り方向に送り速度を与えられ、連続的に移動している。このシミュレーションでは、単位時間 dt ごとの砥石中心の座標を求め、それぞれの座標を順に追い、工具に送り速度を与えるものとする。その際、送り速度は次式のように与える。

$$V_{x_i} = a_x * dt + V_{x_{i-1}}$$

$$V_{y_i} = a_y * dt + V_{y_{i-1}}$$

V_{x_i}, V_{y_i} ; X、Y方向の送り速度

a_x, a_y ; X、Y方向の加速度

dt ; 単位時間

更に、この送り速度を用い、中心座標を求める。

$$X_i = V_{x_i} * dt + X_{i-1}$$

$$Y_i = V_{y_i} * dt + y_{i-1}$$

(X_i, Y_i) ; 中心座標

dt ; 単位時間

この概念は、根本的に不連続であるが、単位時間 dt を限りなく小さくすることにより連続のものとする。送り速度は、それぞれ配列を用い順次送ることにより与えられる。つまり送り速度は、経過時間 $n * dt$ で与えられる。このことにより作業時間の推定が可能になる。また、2-1-3で述べる工具移動軌跡もより与えやすくなる。

2-1-3 工具移動軌跡の与え方

Workは、 $x-y$ 平面上に深さ z を与えることにより設定することは2-1-1.Work上の設定で述べた。また、送り速度は、 x 方向、 y 方向それぞれの加速度、速度を与え、単位時間 dt により進んだ距離を求めて与えることは2-1-2.工具の送り速度の与え方で述べた。工具移動軌跡というのはWork上を砥石がどのように動き、Workを研磨するかという際の砥石の動き方である。その例として、図2-3のようなものがある。2-1-2において、速度を x 方向、 y 方向に分割することを述べたが、そのことにより $x-y$ 平面上を自由に動けることになっているので、後は加速、減速変化時間及び速度方向変化時間を与えることにより、様々な軌跡が与えられる。

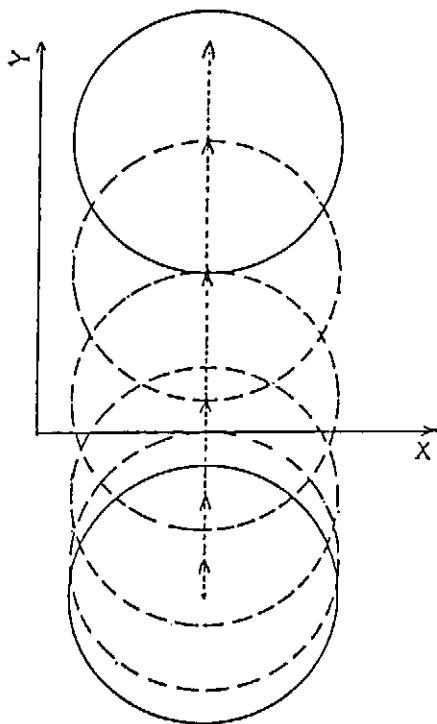
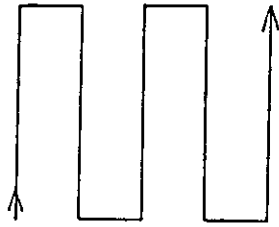
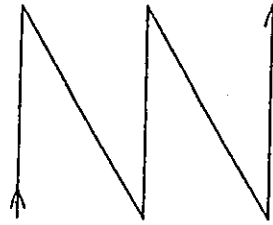


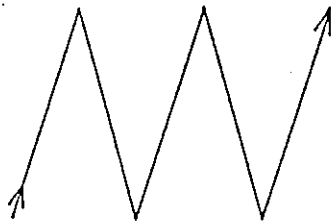
図2-2 工具の送り速度



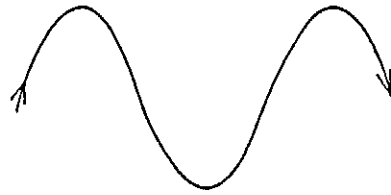
矩形



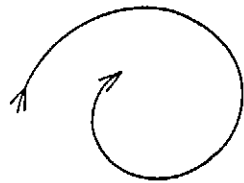
N形



三角形



sin形



螺旋形



ランダム形

図2-3 工具移動軌跡の種類

2-1-4 工具回転数の与え方

工具回転数は、工具中心軌跡を求める際に、その回転数を2-1-2、2-1-3と同様に回転数変化時間を用いて求める。このことにより回転数の設定は、加速、減速回転を行うことや、部分的に回転数の与え方をより細かく与えることが可能になる。

2-1-5 研磨量の求め方

研磨量は、接触圧力 $P(x, y, t)$ と研磨速度 $V(x, y, t)$ に比例すると仮定すると、次のPrestonの式が成立する。

本研究では、研磨量はこの考え方に基づいて求めることにする。

研磨除去に関して図2-5にコンポリューションモデルを示す。数式で表現すると、

$$h(x, y) = \iint A g(u, v) f(x-u, y-v) du dv \dots (2.2)$$

$$H(\omega_x, \omega_y) = G(\omega_x, \omega_y)$$

$$F(\omega_x, \omega_y) \dots (2.3)$$

となる。ここで、記号は図2-5に準じ、大文字はフーリエ変換したものを表し、 A は研磨領域を表す。目標研磨面形状 h を得る(デコンボリューション)ための工具滞留時間関数 g は、

$$G = H/F \dots (2.4)$$

の逆フーリエ変換より求まる。

デコンボリューションを用いると、目標研磨面形状 h と単位除去形状(単位滞留時間当たりの工具面砥石特性分布) f を与えると滞留時間関数 g を求めることができる。しかし、実際の研磨の場合、単位除去形状において砥石の接触圧力分布を考慮した場合、このモデルのように定式化することは非常に難しいことである。そこで、圧力分布を考慮し、図2-7のようなモデルでシミュレーションを行うことにする。

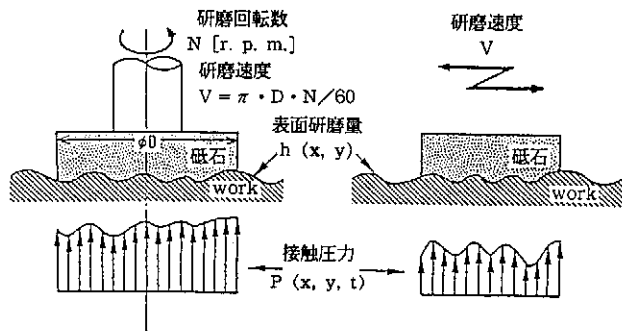


図2-4 研磨の基本概念

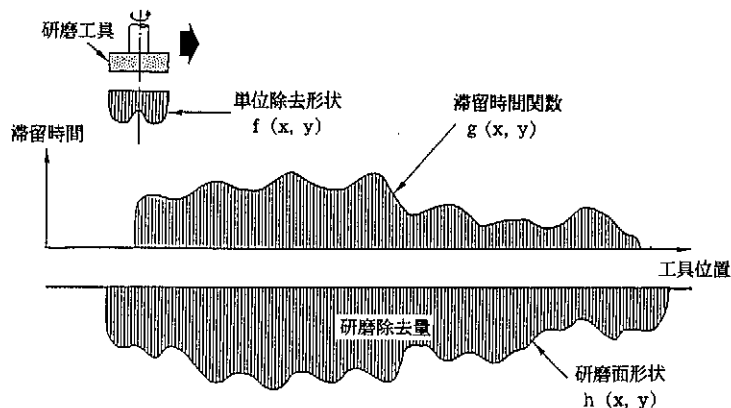


図2-5 研磨のコンボリューション

まず工具の中心座標を単位時間ごとに決め、その位置での研磨量を求めて加え合せていく。その際、単位時間を限りなく小さくすることにより、工具が連続的に移動するものとする。単位除去形状は、工具が接しているworkの回帰面を求め、workの各節点では工具弾性に相当するばねを介して接触すると仮定し、荷重とばねの変位の関係より求められる各接触圧力分布を用いて求める。図2-6は圧力一定の場合、図2-7は圧力分布考慮の場合のモデルを示す。

2-1-6 work表面性状による圧力分布の求め方

1) workの表面情報を与える。

$$f(x_n, y_n) = z_n$$

x_n, y_n : workの節点座標

z_n : workの節点の深さ

2) 砥石の接しているwork表面の回帰面を最小二乗法を用いて求める。回帰面の式 $ax + by + c = z$ は次のようにして求めることができる。

$$ax + by + c = z$$

$$a = \frac{\begin{vmatrix} [x, z] & [x, y] & [x, 1] \\ [y, z] & [y, y] & [y, 1] \\ [1, z] & [1, y] & [1, 1] \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} A \end{vmatrix}}$$

$$b = \frac{\begin{vmatrix} [x, x] & [x, z] & [x, 1] \\ [y, x] & [y, z] & [y, 1] \\ [1, x] & [1, z] & [1, 1] \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} A \end{vmatrix}}$$

$$c = \frac{\begin{vmatrix} [x, x] & [x, y] & [x, z] \\ [y, x] & [y, y] & [y, z] \\ [1, x] & [1, y] & [1, z] \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} A \end{vmatrix}}$$

$$\begin{vmatrix} A \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} [x, x] & [x, y] & [x, 1] \\ [y, x] & [y, y] & [y, 1] \\ [1, x] & [1, y] & [1, 1] \end{vmatrix}$$

$$[x, x] = x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2$$

$$[x, y] = x_1 y_1 + x_2 y_2 + \dots + x_n y_n$$

$$[x, z] = x_1 z_1 + x_2 z_2 + \dots + x_n z_n$$

$$[y, x] = [x, y]$$

$$[y, y] = y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2$$

$$[y, z] = y_1 z_1 + y_2 z_2 + \dots + y_n z_n$$

$$[z, x] = [x, z]$$

$$[z, y] = [y, z]$$

$$[z, z] = z_1^2 + z_2^2 + \dots + z_n^2$$

$$[x, 1] = x_1 \cdot 1 + x_2 \cdot 1 + \dots + x_n \cdot 1$$

$$[y, 1] = y_1 \cdot 1 + y_2 \cdot 1 + \dots + y_n \cdot 1$$

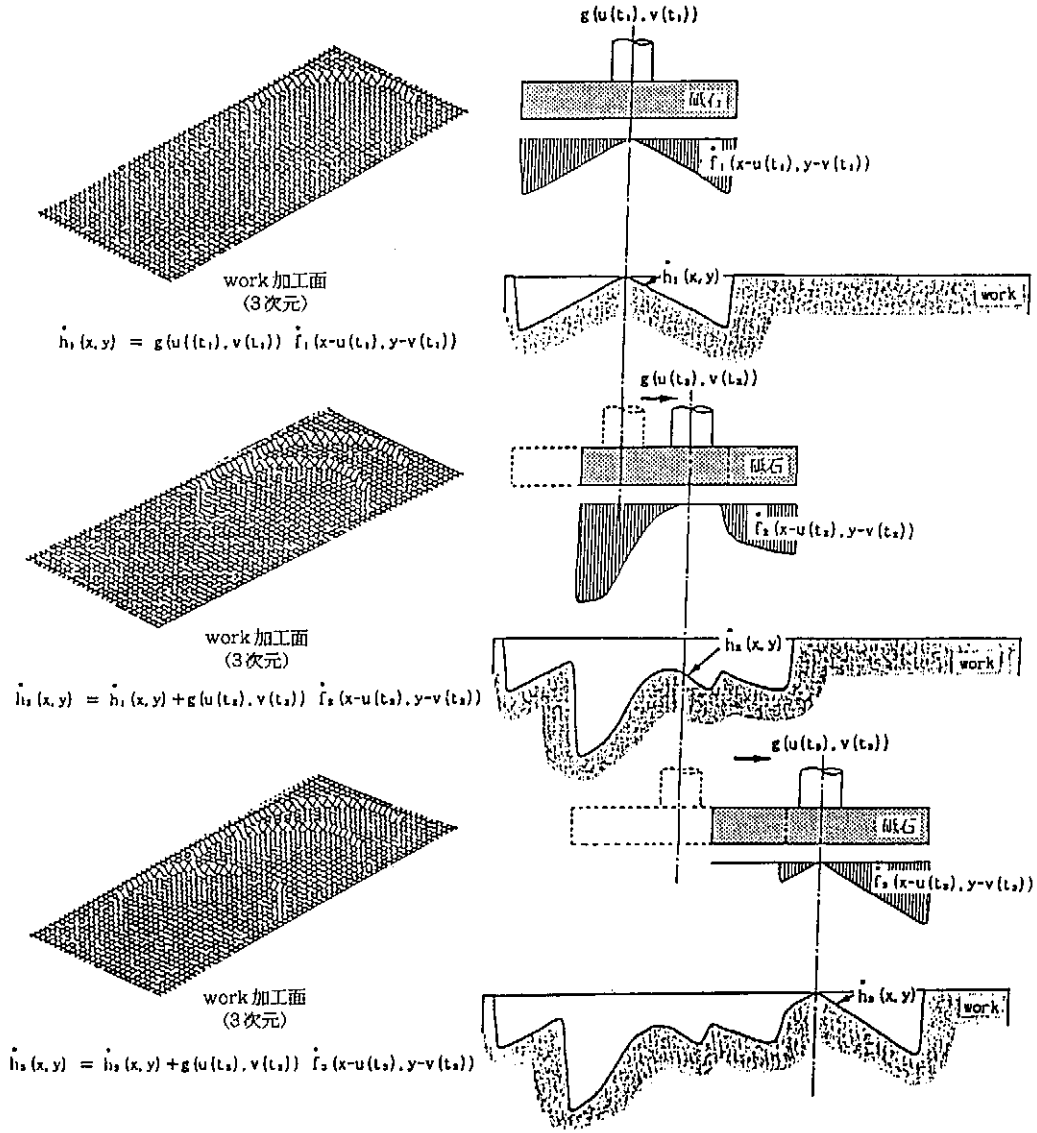
$$[z, 1] = z_1 \cdot 1 + z_2 \cdot 1 + \dots + z_n \cdot 1$$

$$[1, x] = [x, 1]$$

$$[1, y] = [y, 1]$$

$$[1, z] = [z, 1]$$

$$[1, 1] = n$$

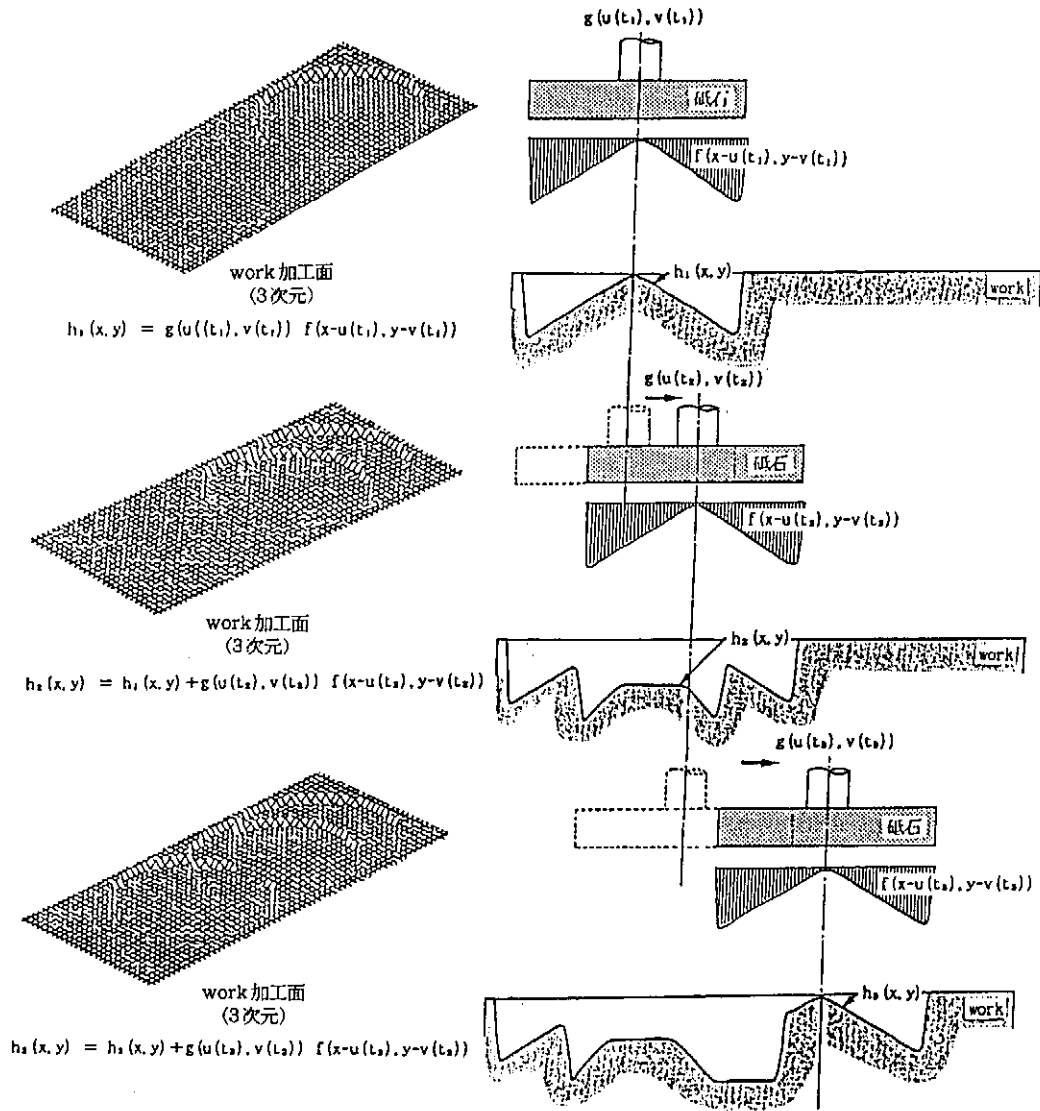


圧力分布考慮

$$\dot{h}_n(x, y) = \sum_{i=1}^n g(u(t_i), v(t_i)) \dot{f}_i(x-u(t_i), y-v(t_i))$$

- $\dot{h}_i(x, y)$: 目標面 or 加工面
- $g(u(t_i), v(t_i))$: 工具中心軌跡
- $\dot{f}_i(x-u(t_i), y-v(t_i))$: 単位時間除去形状
(work凹凸情報による
圧力分布考慮)

図2-7 圧力分布考慮モデル



圧力分布一定

$$h_n(x, y) = \sum_{i=1}^n g(u(t_i), v(t_i)) f(x-u(t_i), y-v(t_i))$$

- $h_1(x, y)$: 目標面 or 加工面
- $g(u(t_i), v(t_i))$: 工具中心軌跡
- $f(x-u(t_i), y-v(t_i))$: 単位時間除去形状

図2-6 圧力分布一定モデル

3) 各節点における荷重を求める。

砥石は弾性体であるので、ばねであると仮定する。ここでは、work表面の各節点に、ばね定数一定のばねがあると仮定して、各節点の荷重を求める。

荷重Pについて考えると、Pは、

$$P = P_z + P_{xy}$$

$$(P_z = P \cos \theta, P_{xy} = P \sin \theta)$$

である。

ここで、 θ が微小であると仮定すると、次のようになる。

$$P_z = \lim P \cos \theta = P$$

$$P_{xy} = \lim P \sin \theta = 0$$

よって、 θ が微小のとき、水平方向の荷重 P_{xy} は、

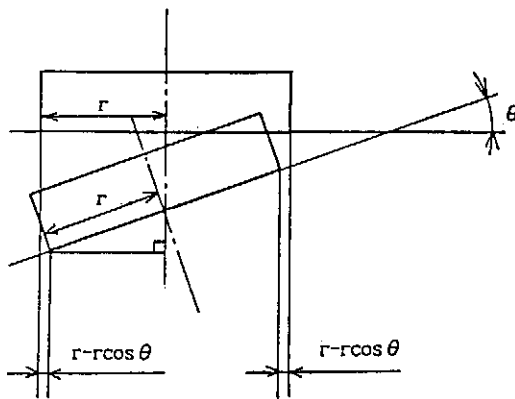


図2-8 圧力分布ベクトル化

無視することができ、Z方向の荷重 P_z は、Pと等しいとおける。

よって、研磨量は、

$$M(P) = M(P_z)$$

となる。

砥石が、傾き角 θ で傾いている場合、その中心座標は、変わらないものとして、次のようにして考える。(図2-9参照)

θ が微小のとき、

$$\lim (r - r \cos \theta) = \lim r (1 - \cos \theta) = 0$$

となる。よって、 θ が微小のとき、砥石の鉛直方向からみた半径は変わらないものと考えられる。

以上のことをまとめると、図2-10に示すような圧力分布モデルになる。

$$P = p_1 + p_2 + \dots + p_n$$

$$= \sum p_i = k \sum (X - M_i) = k (nX - \sum M_i)$$

$$X = (P + k \sum M_i) / (kn)$$

$$M_i = (ax_i + by_i + c) - z_i$$

$$\therefore P_i = k (X - M_i)$$

k : ばね定数 (一定)

P_i : 各節点の荷重

P : 砥石にかかる総荷重

X : 無荷重のときのばねの長さ

M_n : workの深さとworkの回帰面との距離

$X - M_n$: ばねの縮んだ長さ

次に、work表面に特異な深さの節点がある場合について考える。workの節点が、求めた基準面よ

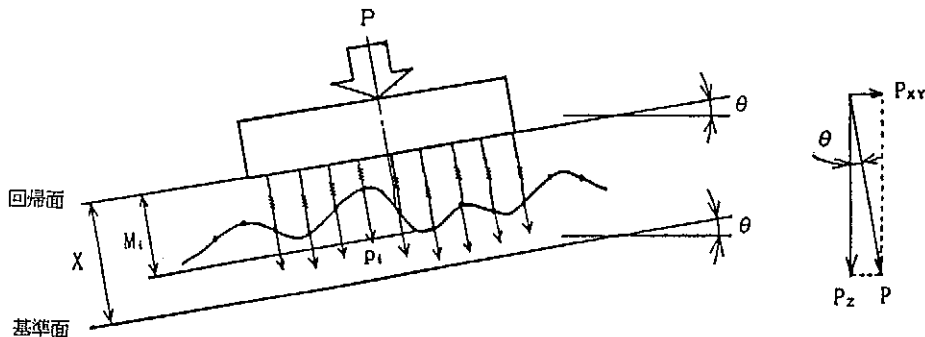


図2-9

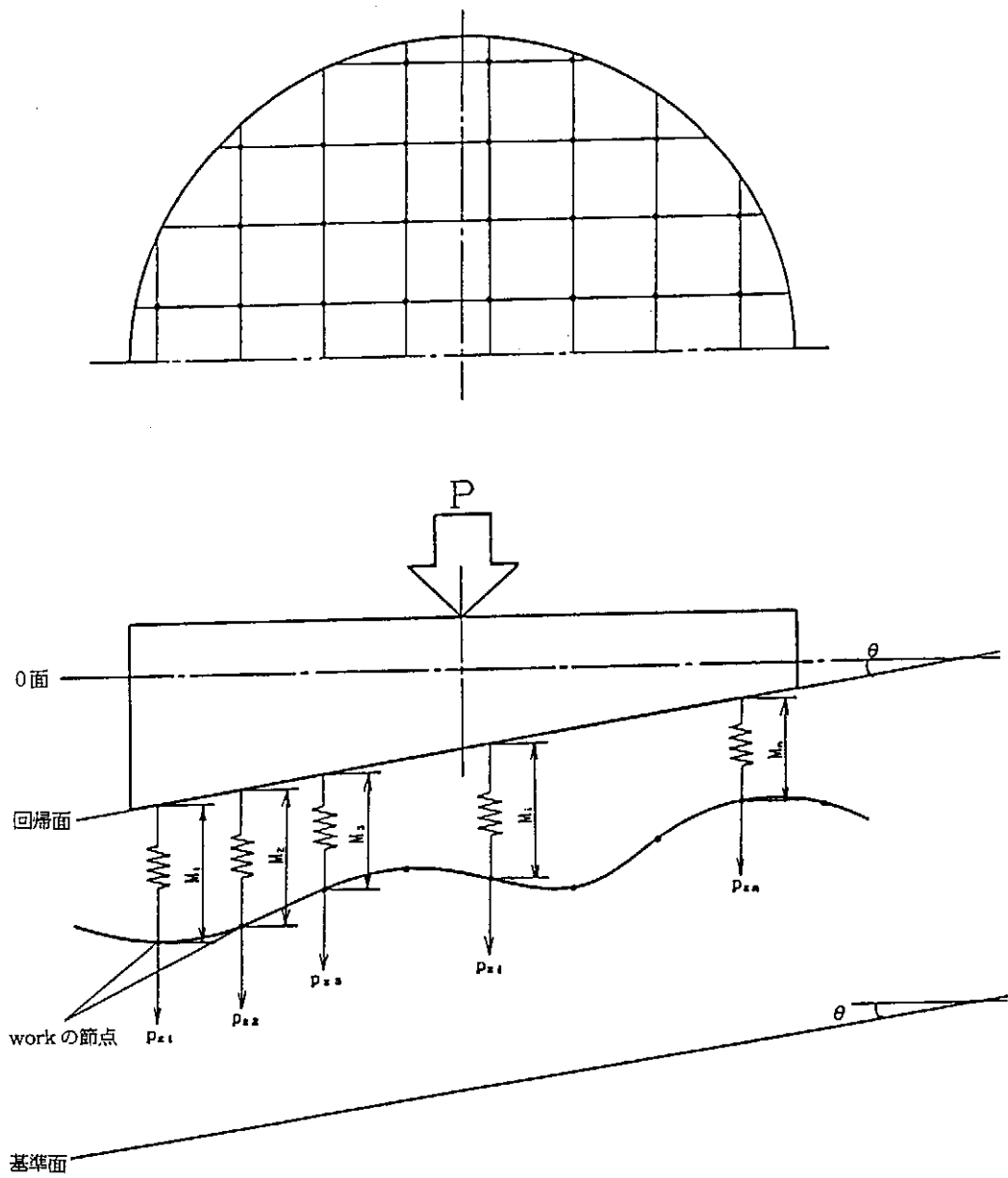


図2-10 圧力分布モデル

りも下になった場合、その節点を除いて回帰面を その手法を図2-11に示す。
 求め直して、もう一度各節点の荷重を求める。

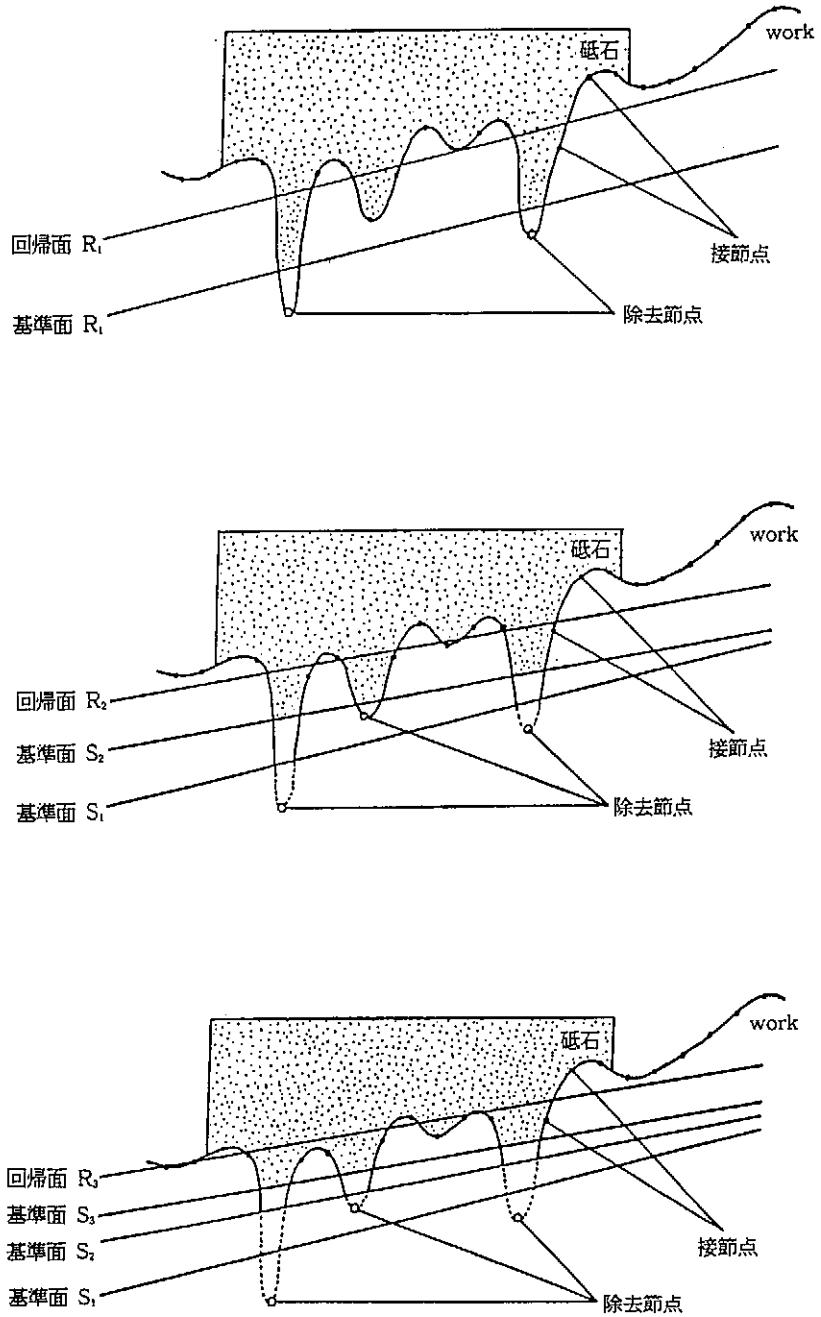


図2-11 基準面の求め方

- ① 無視出来る領域（基準面 S_1 より下の部分）に接点が存在するので、その点を除去し基準面を求め直す。
- ② 基準面 S_2 より下に接点が存在するので、その点を除去し基準面を求め直す。尚、基準面 S_1 より下の領域には、既に接点は存在していないものとする。
- ③ 基準面 S_3 より下に接点が存在していないので、 S_3 を基準面として採用し、各接点における圧力を求める。

2-2 シミュレーションの流れ

本研究のシミュレーションは、2-1で述べた原理によって行っている。ここでは、その流れについて説明する。

- ① 計算に必要な数値の入力をする。

計算に必要な数値として

dX, dY	: 分割の最小単位の大きさ
$\max X, \max Y$: work上の計算する範囲
$z(x, y)$: 各節点の凹凸情報
x_0, y_0	: 砥石の初期中心座標
dt	: 最短移動時間
T_1	: 軌跡を与える時間
N_0	: 初期回転数
dt_n	: 最短回転数変化時間
T_n	: 回転数を与える時間
d, D	: 砥石の内径、外径
μ	: 摩耗係数
k	: 砥石の弾性係数
P	: 砥石にかかる総荷重

を与える。

- ② 分割の最小単位の大きさ dx, dy とwork上の計算する範囲 $\max X, \max Y$ をもとに、workの表面を節点に分割する。その際、配列を用いて、各節点にはそれぞれ節点番号を付ける。
- ③ 砥石に送り速度を与えて、砥石の中心軌跡を求める。
- ④ 求めた砥石の中心軌跡を一つずつ読み込

む。

- ⑤ dx, dy と中心軌跡及び砥石の外径 D より検索範囲を決定する。
- ⑥ 検索範囲内のworkの凹凸情報より最小二乗法を用いて回帰面を求める。
- ⑦ 砥石にかかる総荷重 P 、ばね定数 k を用いて基準面を求める。
- ⑧ $P = kx$ の関係より各節点荷重を求める。
- ⑨ 求めた節点荷重が正か負か調べ、負の場合の節点を除いて回帰面を求め直し、⑦、⑧の計算を繰り返す。
- ⑩ 各節点の研磨量を求め、各節点の凹凸情報に加える。
- ⑪ すべての中心軌跡読み込みが終了したら研磨後のworkの三次元曲面形状、数値データを出力する。

以上のような流れでシミュレーションを行っていく。このシミュレーションでは、

- ・ 回帰面と $x-y$ 平面の傾き角 θ は微小であるとし、荷重は z 方向にしかかからないと仮定しているため、work表面はマクロ的に見て平面でなくてはならない。
- ・ プログラム上、節点分割に配列を用いているためwork上の節点数に限りがある。というような短所がある。また逆に、長所としては、
- ・ 工具移動軌跡を自由に与えることができる。
- ・ 工具回転数を自由に与えることができる。
- ・ work表面の凹凸情報を与えることができ、それにより荷重配分ができる。
- ・ シミュレーション初期設定条件を容易に与えることができる。

上記のことより設定条件による相違を求めやすく、実際の研磨状態の予測が容易にできる。そこで、

- ・ 工具移動軌跡の与え方（パターン、オーバーラップ量）
- ・ 工具回転数の与え方

- ・ 砥石の設定の与え方（砥石の形状、ばね定数等の砥石の物性値、etc.）

以上のようなポイントに留意してシミュレーション

を行っていく。また、他の角度からも検討し、適切な加工方向を求める。

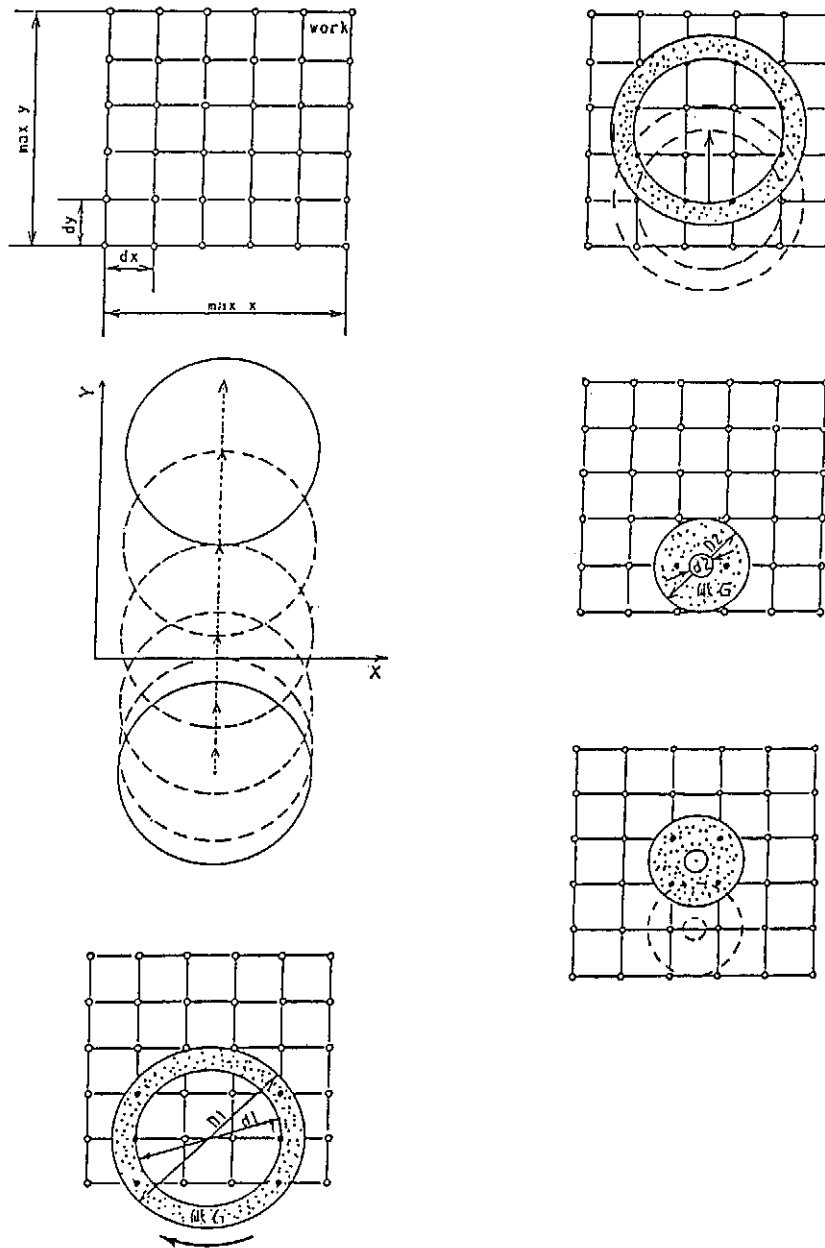


図2-12 シミュレーションの原理

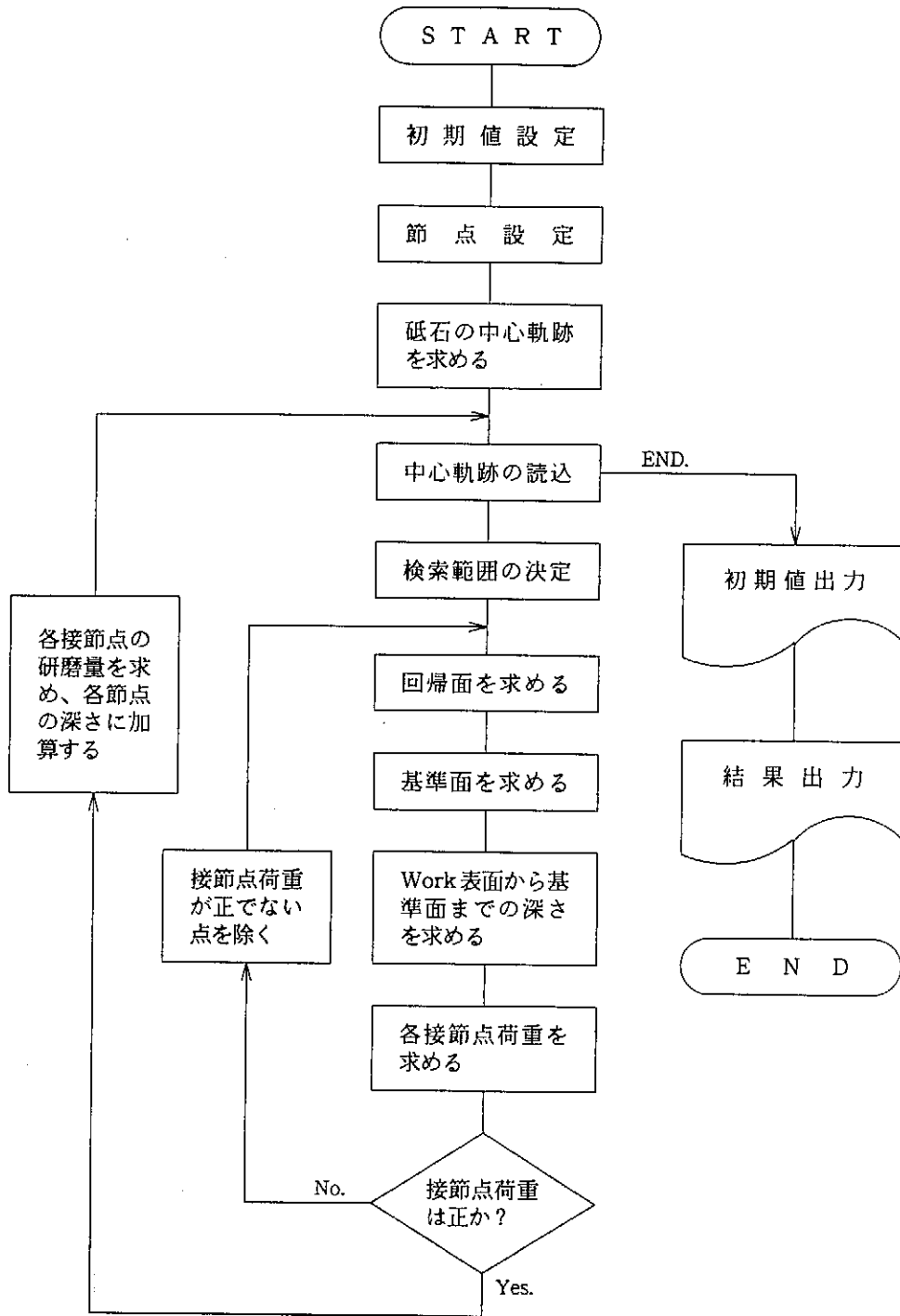


図2-13 シミュレーションの流れ

3. 仕上げ面創成のシミュレーションによる検討

3-1 仕上げ面うねりの抑制対策

回転研磨工具を用いた場合、仕上げ面にうねりが発生してしまう。そこで、仕上げ面うねりに対する抑制対策を考えなければならない。

工具移動軌跡の面では、いろいろ試行錯誤され行われている。工具移動軌跡には図2-3に挙げたような種類のパターンがある。その一例として螺旋形運動を挙げると、図3-1に示すような実験結果が得られている。直線運動に比較すると螺旋形運動のほうがうねりが少なく、形状精度が向上していることがわかる。しかし、螺旋形運動においても加工量の偏りは明らかに存在している。つまり、工具移動軌跡による効果も期待できるが、それだけではなく工具形状の面、回転数の面、送り速度の面等からも検討を加えていく必要があるといえる。

3-2 シミュレーション結果及び仕上げ面うねりに関する考察

本研究では、次に挙げるような項目でシミュレーションを行った。

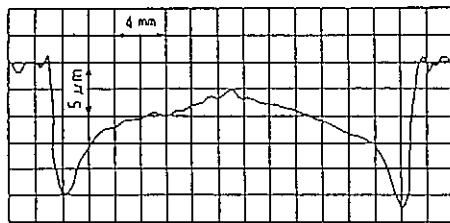
- ・ 工具移動軌跡パターンによる影響
 - ・ 工具形状による影響
 - ・ 工具回転数による影響
 - ・ ばね定数（砥石の弾性係数）による影響
- また、シミュレーション結果より得られたうねりに関しては、次のようにしてうねり創成率を求めて評価した。

$$\text{うねり創成率 } W_p = \Delta L / \Delta L_0 \dots\dots\dots (3.1)$$

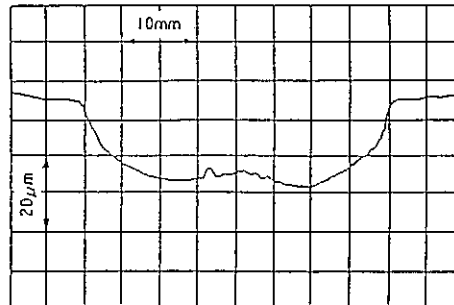
ΔL : 最大深さ - 最小深さ

ΔL_0 : 最大深さ

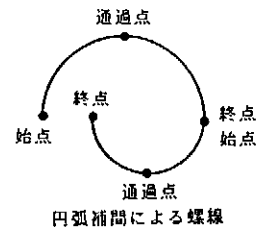
ただし、うねり創成率を求める際、workの端部は除外して考える。(図3-2)



直線移動による加工量の偏り
($r_1 = 11\text{mm}$, $r_2 = 15\text{mm}$, 吸引力 40kgf
140, 1000rpm, 10分研磨)



らせん運動研磨による加工量の偏り
($r_1 = 11$, $r_2 = 15$, $R_1 = 8$, $R_2 = 6$, # 325
2000rpm, 吸引力 4kgf , 研磨時間 10分)



円弧補間による螺旋

図3-1 直線移動研磨と螺旋運動研磨との比較

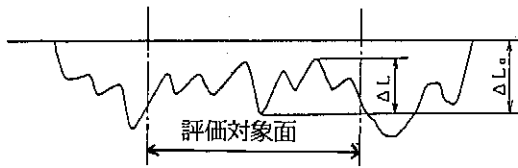


図3-2 表面うねり

3-2-1 工具移動軌跡パターンによる影響

回転研磨工具の工具移動軌跡が、形状精度に及ぼす影響について検討した。工具移動軌跡が、矩形(図3-3)、N形(図3-4)、トロコイド形(図

3-5)、さらに矩形の重ね合わせ(図3-6)、矩形における工具のオーバーラップ量を変えたもの(図3-7、図3-8)についてシミュレーションを行った。これらの工具移動軌跡パターンにおけるシミュレーション結果より、work表面にそれぞれの工具移動軌跡に応じたうねりが生じることが認められた。砥石のオーバーラップのさせ方によってはうねりが大きくなる場合もある。しかし、完全に等速になる領域では、基本的に移動方向にうねりが生じないことがわかる。また、全てに共通していえることは、工具の滞留時間の長い所、つまり速度の遅いところや重なりが多いところで大きく削れている。

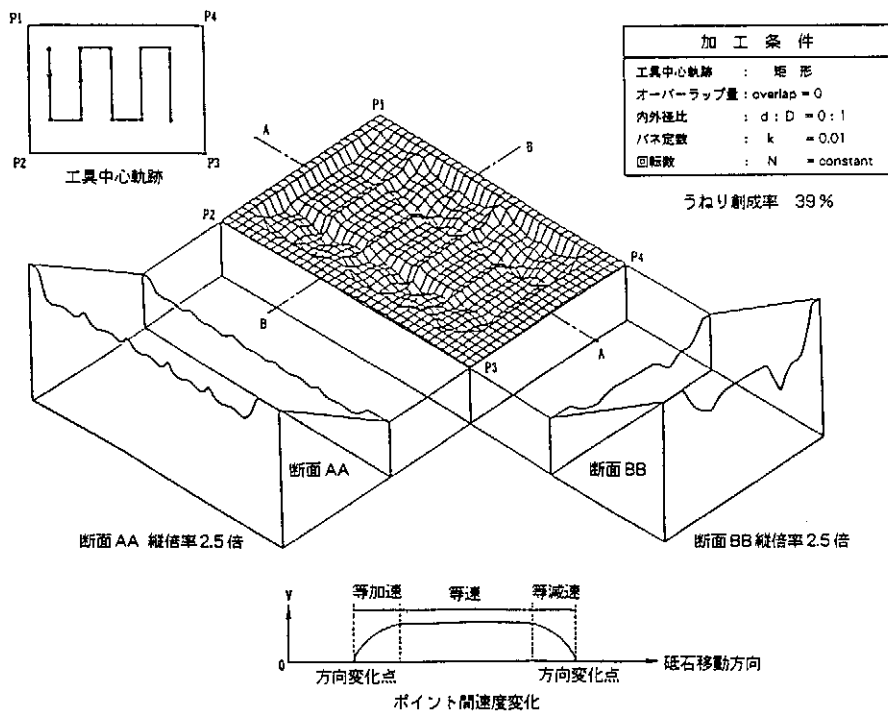


図3-3 シミュレーション結果1(矩形)

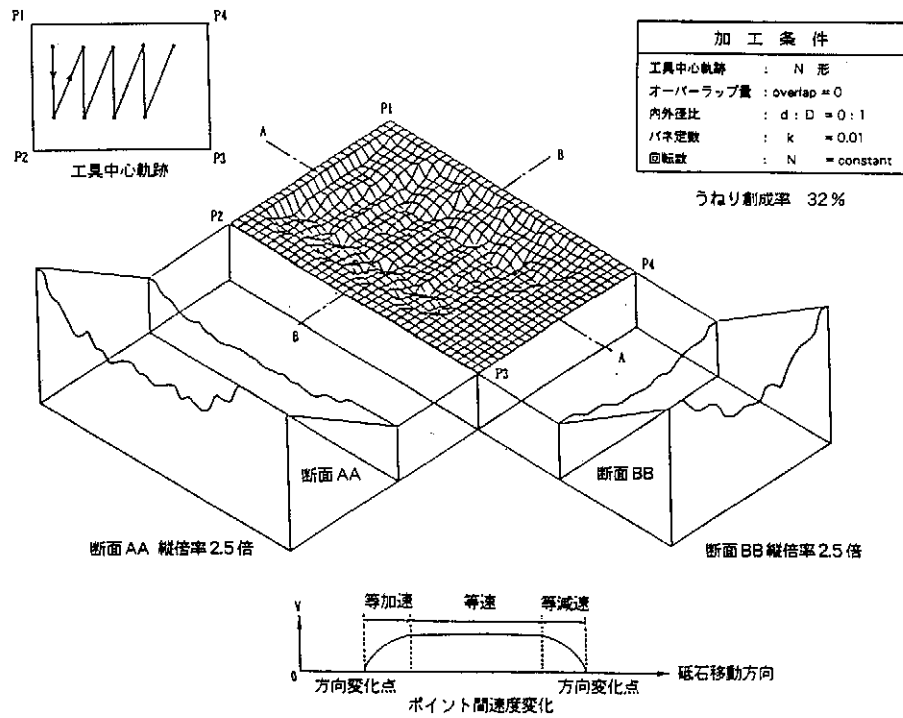


図3-4 シミュレーション結果2 (N形)

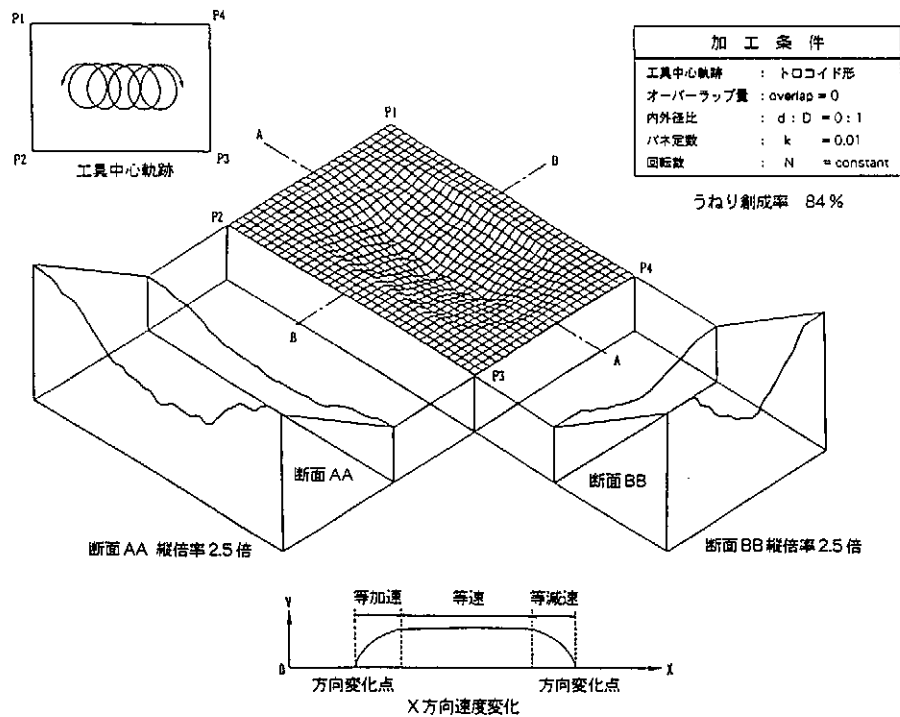


図3-5 シミュレーション結果3 (トロコイド形)

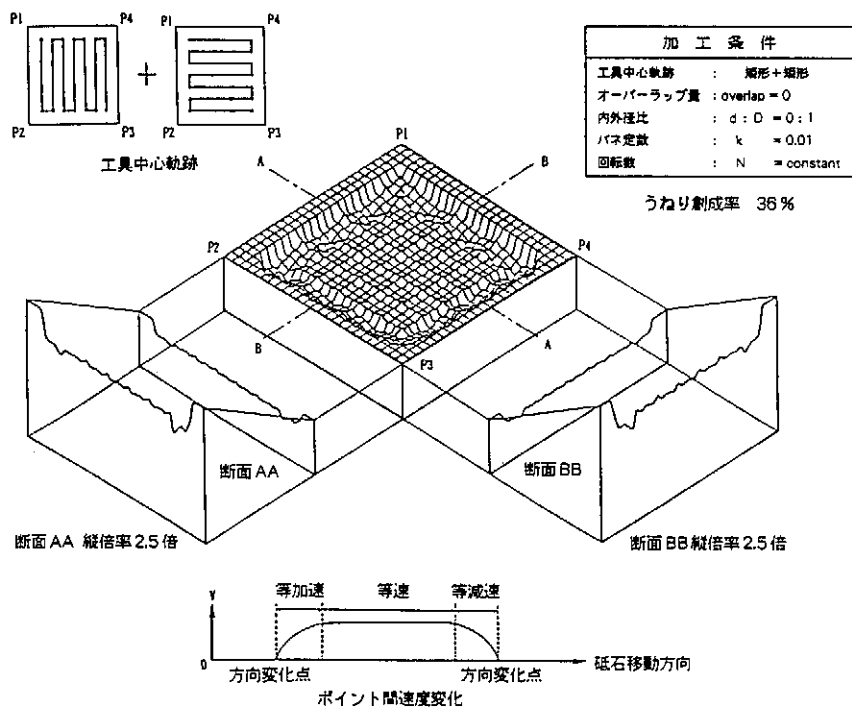


図3-6 シミュレーション結果4 (矩形重ねせ)

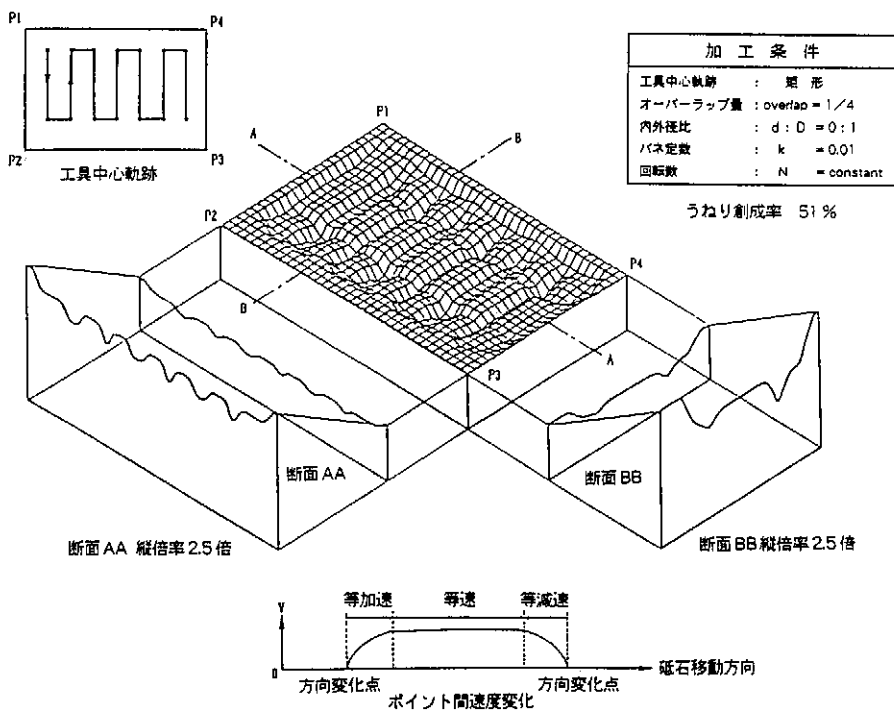


図3-7 シミュレーション結果5 (オーバーラップ1/4)

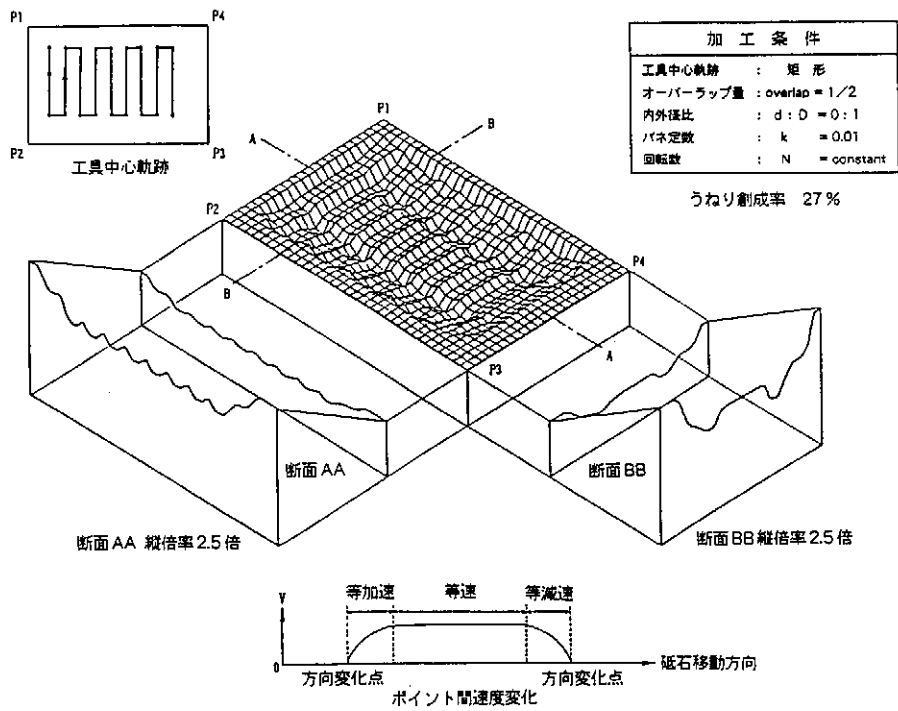


図3-8 シミュレーション結果6 (オーバーラップ1/2)

3-2-2 工具形状による影響

工具形状を円環状にしてシミュレーションを行った。その結果を図3-9 (内径0)、図3-10 (内径:外径=1:2)、図3-11 (内径:外径=3:4)

に示す。工具形状により異なったうねりを生じていることがわかる。工具形状が研磨形状に与える影響を考慮すれば、自動磨きに適した砥石の開発にも適用できるものと思われる。

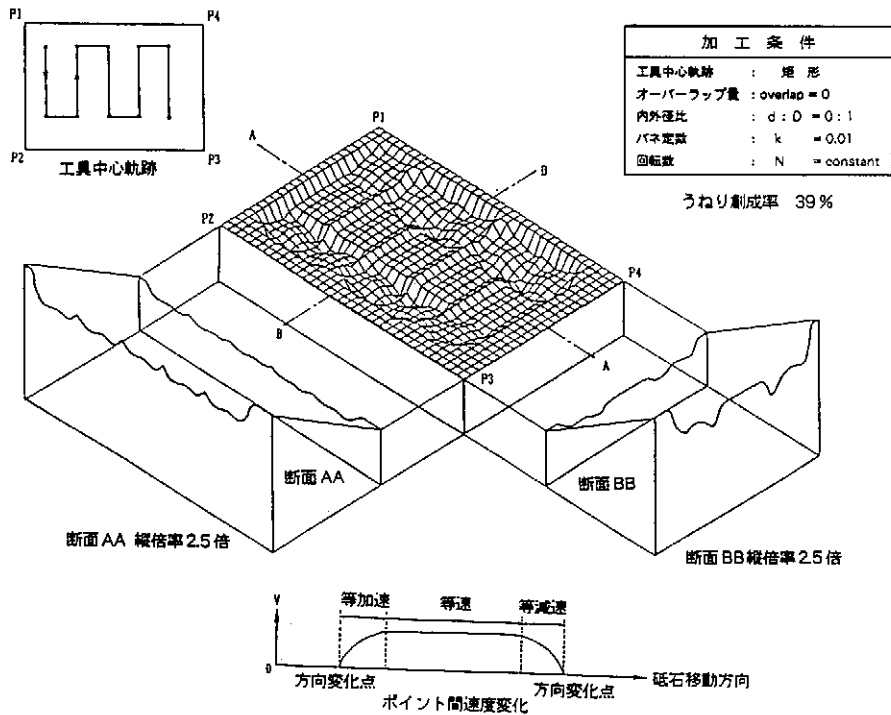


図3-9 シミュレーション結果7 (矩形)

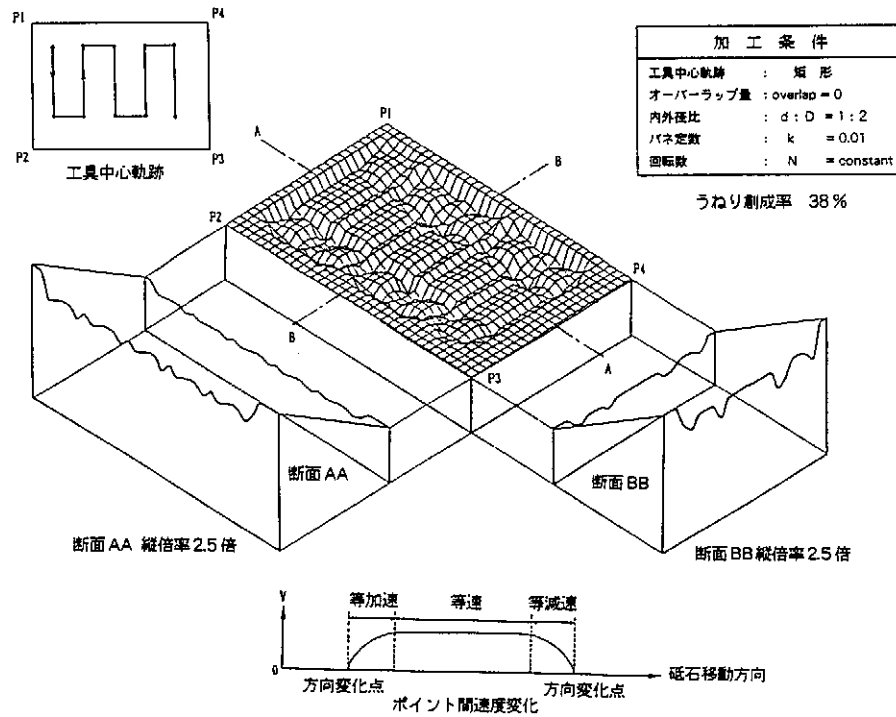


図3-10 シミュレーション結果8 (内径:外径=1:2)

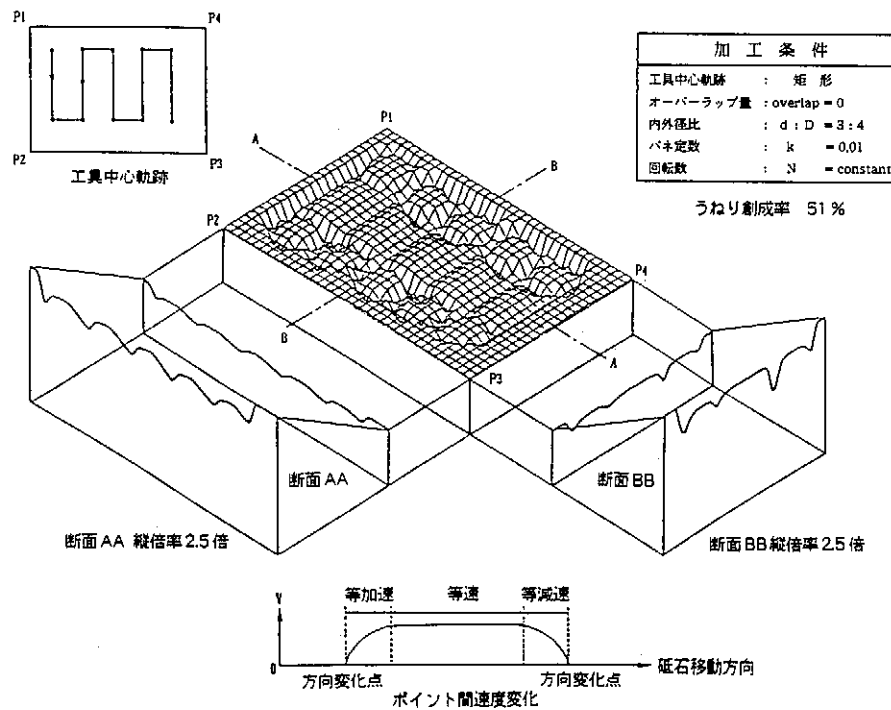


図3-11 シミュレーション結果9 (内径:外径=3:4)

3-2-3 工具回転数による影響

研磨量は研磨速度に比例し、また研磨速度は回転数に比例する。つまり研磨形状は回転数の影響を大きく受ける。この特性を利用すれば大変有効であると考え、その一例として、工具移動軌跡が矩形で回転数一定の場合(図3-9)において、工具の送り速度が加速、減速域の所で見られる大きなうねりをなくすことを目標にして、回転数を送り速度と同様に加速、減速回転させ、また重なりが多いところの回転数を低下させた結果、うねりは小さくなった(図3-12)。そこで、目標とする面や工具移動軌跡に応じて回転数の与え方について検討していけば、よりよい研磨方法が求まるであろうと確信した。

3-2-4 ばね定数(砥石の弾性係数)による影響

2-1-6で述べたように、砥石は弾性体であるので、ばねであると仮定して接触圧力分布を求めた。そのため、砥石の物性値である弾性係数、つまりシミュレーションにおけるばね定数と研磨量の間には深い繋りがある。一例として、工具移動軌跡が矩形の場合(図3-9)において、ばね定数を大きくしてシミュレーションを行った結果、研磨形状は工具の送り方向、その鉛直方向共に図3-9のものとは異なる形状になった(図3-13)。そこで、ばね定数(砥石の弾性係数)は、目標とする面に応じた砥石の使い分けを判断する指標になると考えられる。

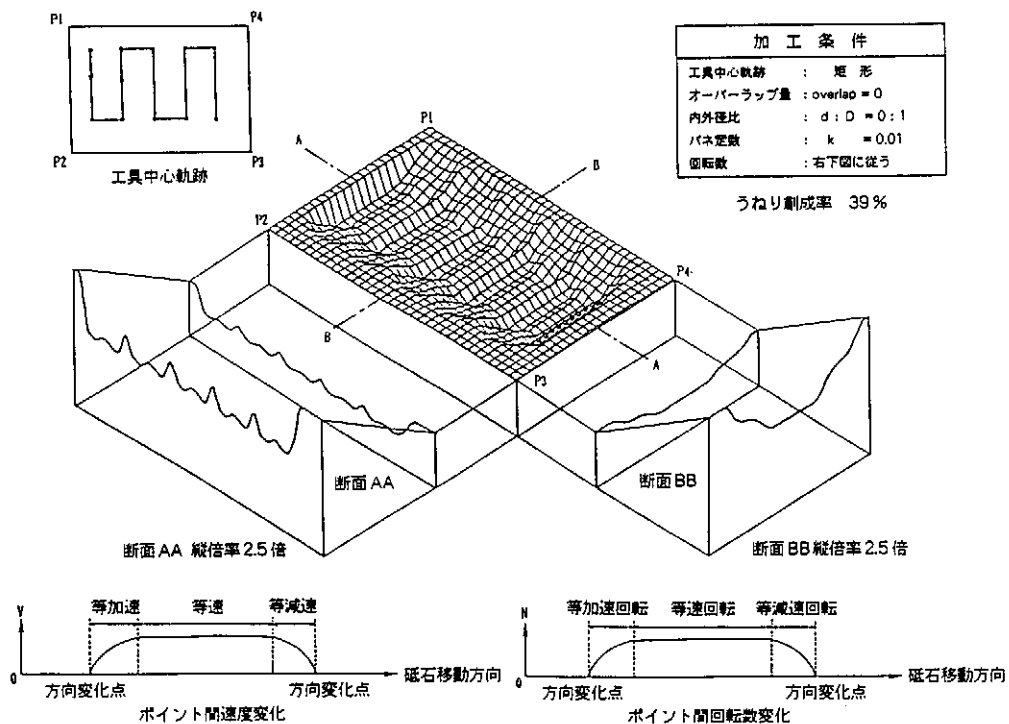


図3-12 シミュレーション結果10(回転数)

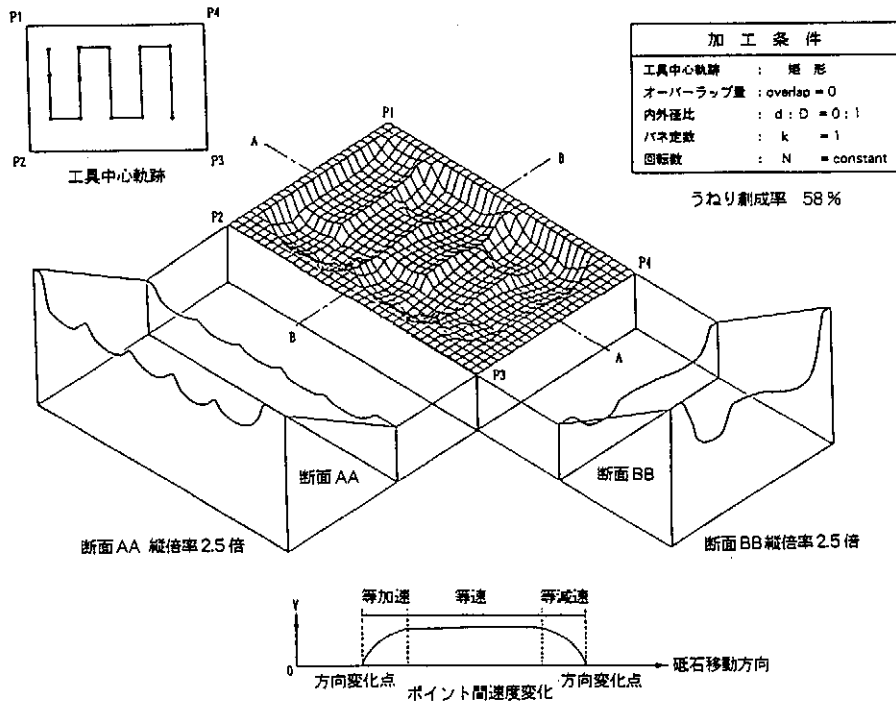


図3-13 シミュレーション結果11 (ばね定数)

3-2-5 work 端部に関する検討

現在、ロボットによる自動磨きシステムでは、図1-6に示したように金型加工面をパッチ分割して行われている。そこで、各分割の境界線付近のうねりが問題となっている。

今まで述べてきたシミュレーション結果（図3-3、4、5、6、7、8、9、10、11、12、13）を見ると、それぞれ特性をもったうねりを生じていることがわかる。特に work 端部に関しては、いづれも望ましくない結果が得られている。シミュ

レーション結果における work 端部の断面図を図3-14に示す（但し、それぞれの深さの値は、シミュレーション結果における最大深さの値を全て統一し、その値に対する比率で求めたものなので、実際の計算値とは異なる。）。

実際に現場では、自動化が進んできてはいるが、work の端部に関しては手作業で行われているのが現状である。シミュレーション結果より、work 端部に関しては、工具移動軌跡、送り速度、回転数などの面で特別な配慮が必要であるといえる。

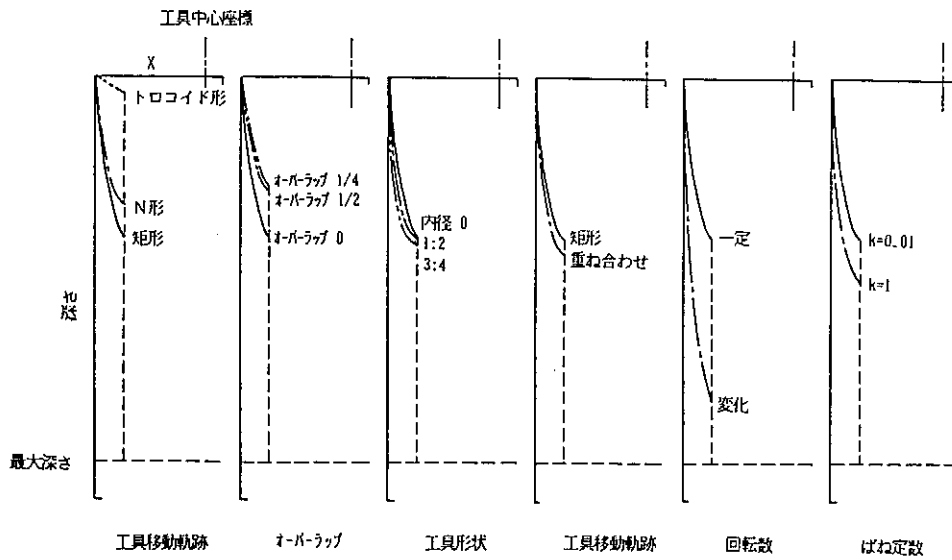


図3-14 work 端部 (断面AA)

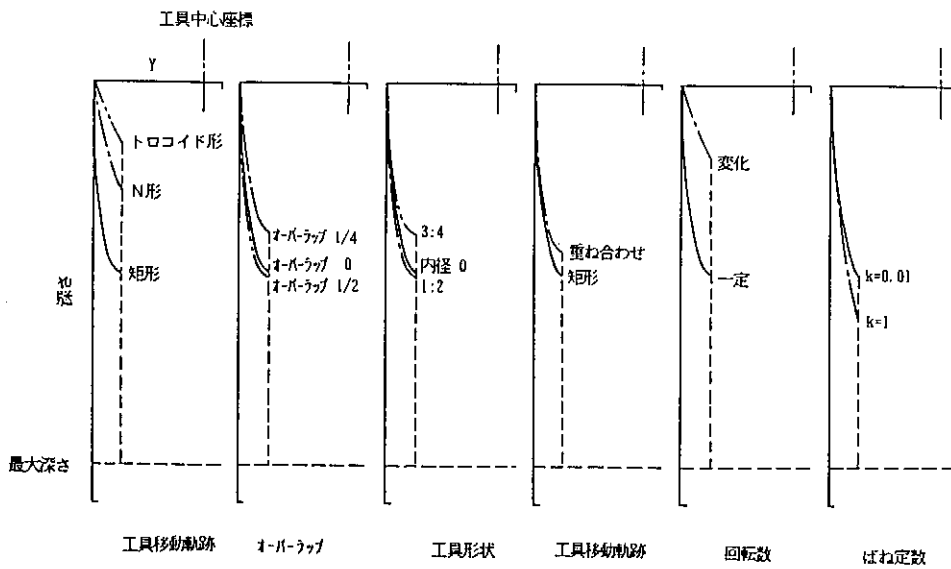


図3-15 work 端部 (断面BB)

3-2-6 実用化工具パターンのための検討例

今まで述べてきたシミュレーション結果に基づき、3-2-5のwork端部を考慮したうえで、実用化するための検討を行った。その一例として行ったシミュレーション結果を図3-16に示す。図は、まず最初に工具をworkの隅に沿って移動させwork端部を磨き、次にN形で移動させ、また、工具回転数を工具の送り速度に合わせて等加速、等速、等減速回転させたものである。その結果、work端部に関しては断面AA、断面BBともに似た形状となり、今までの結果よりは良いが、手作業を不要とするまでには至っていない。しかし、

工具移動軌跡パターン(オーバーラップ量も含む)を中心に、更に検討していけば、実用化が期待できる。

シミュレーション結果は以上で終わりである。

最後に、加工平面のうねりについて述べる。それぞれの結果から求めたうねり創成率をまとめて図3-17に示す。回転研磨工具を用いた場合、約3割から5割のうねりが生じていることがわかる。但しうねり創成率を求める際、workの端部のうねりを除いて求めたため、加工平面全体をみるとうねり創成率はもう少し大きくなる。

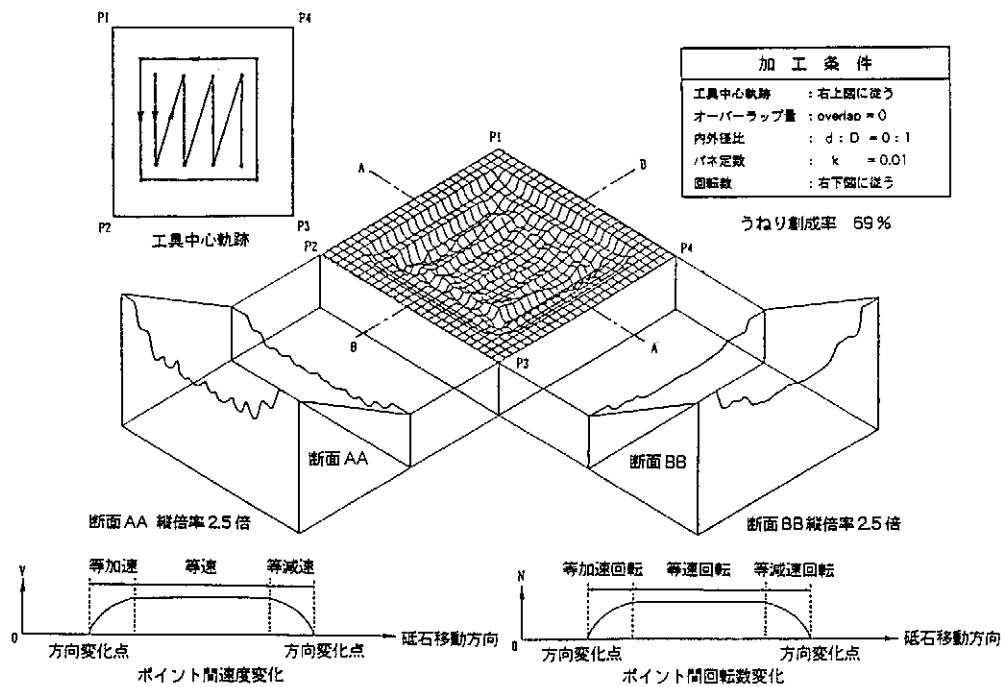


図3-16 シミュレーション結果12

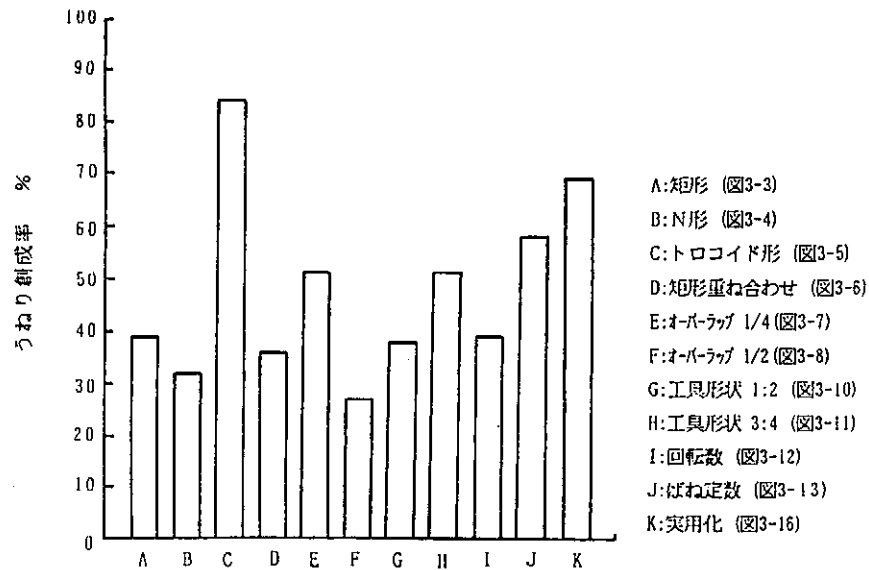


図3-17 うねり創成率

4. 結論

回転研磨工具は作業能率の極めて高い工具であり、磨きの現場で現在、最も広く利用されている。しかし、磨き加工工程において安易に回転研磨工具を用いた場合、原理的には必ず work 表面にうねりを発生させ、形状精度を狂わせてしまう。そこで、仕上げ面創成シミュレーションにより工具移動軌跡パターン、工具回転数の与え方、砥石の

設定などについて検討した結果、うねりの発生を極力おさえ、目標とする加工平面精度を達成する手掛りを得ることができた。今後、workの端部を考慮し、先に述べた項目について更に検討することにより、実用化が期待される。また、平面だけでなく、3次元自由曲面についても考えてく必要がある。