

アルミニウム切削ひずみ挙動の解析に関する
実験的研究

Experimental Study on Behavior of
Cutting Strain in Aluminum Workpiece

1995. 9

隈 部 晃

主要記号表

| | |
|--------------------------|--------------------------------|
| N | : 光弾性縞次数 |
| ε | : 垂直ひずみ |
| γ_{\max} | : 最大せん断ひずみ |
| P | : 単位厚さ当たりの切削力 |
| r | : 刃先点からの半径 |
| θ | : 切削力の方向から任意の点までの時計まわりの角度 |
| $\tau_{r\theta}$ | : せん断応力成分, 極座標系 r, θ 表示 |
| σ_r | : 垂直応力成分 |
| σ_θ | : 垂直応力成分 |
| τ_{\max} | : 最大せん断応力 |
| t_h | : 皮膜の厚さ |
| β | : 皮膜の主ひずみ差感度 |
| ε_{r1} | : 接着皮膜の主ひずみ成分 |
| $\varepsilon_{\theta 1}$ | : 接着皮膜の主ひずみ成分 |
| ε_{r2} | : 下地アルミニウム材の主ひずみ成分 |
| $\varepsilon_{\theta 2}$ | : 下地アルミニウム材の主ひずみ成分 |
| $\gamma_{C.\max}$ | : 切削瞬間の刃先より前方での最大せん断ひずみ |
| $\gamma_{T.\max}$ | : 切削瞬間の刃先より後方での最大せん断ひずみ |
| $\gamma_{R.\max}$ | : 切削後の残留最大せん断ひずみ |
| $N_{C.m}$ | : 切削瞬間の刃先より前方での等色線縞次数の最大値 |
| $N_{T.m}$ | : 切削瞬間の刃先より後方での等色線縞次数の最大値 |
| $N_{R.m}$ | : 切削後の残留等色線縞次数 |
| X | : 切削力の方向 |
| Y | : 切削力に垂直な方向 |
| x | : 切削方向 |
| y | : 切り込み方向 |
| z | : 厚さ方向 |

- μ : ポアソン比
- α : 工具すくい角
- α_0 : 初回切削工具のすくい角
- α_1 : 一回目重複切削工具のすくい角
- V : 切削速度
- V_0 : 初回切削速度
- V_1 : 一回目重複切削速度
- ϕ_0 : 初回切削切り屑生成せん断角
- ϕ_1 : 一回目重複切削切り屑せん断角
- r_c : 切削比
- t_0 : 初回切削切り込み深さ
- t_1 : 一回目重複切削切り込み深さ
- t_{b0} : バニシ深さ
- T_1 : 自由端面で切削開始・終了する被削材
- T_2 : 半無限板の途中から切削開始・終了する被削材
- $\sigma_{\theta c}$: 圧縮応力成分
- $\sigma_{r c}$: 圧縮応力成分
- $\sigma_{\theta t}$: 引張り応力成分
- $\sigma_{r t}$: 引張り応力成分
- ϕ : 切削力と切削方向に対する垂線のなす角度
- d : 円孔の直径
- D_p : 定常域での加工面と円孔中心間の距離
- L_i : 切削開始側自由端面と円孔中心間の距離
- L_o : 切削終了側自由端面と円孔中心間の距離
- $(\gamma_{max})_{max}$: 円孔まわりの最大せん断ひずみの最大値
- α_L : L_i, L_o の変化に伴う円孔まわりのひずみ集中度
- α_D : D_p の変化に伴う円孔まわりのひずみ集中度
- $\gamma_{max, ST}$: 円孔が定常域にあるときの円孔まわりの最大せん断ひずみ
- l : 円孔中心間距離

目次

| | |
|----------------------------|----|
| 第1章 緒言 | 1 |
| 第2章 実験装置と実験方法 | |
| 2・1 切削実験 | 4 |
| 2・2 反射型光弾性実験装置 | 7 |
| 2・3 FEM弾性解析および弾塑性解析 | 12 |
| 第3章 延性材切削ひずみ挙動の光弾性皮膜法による解析 | |
| 3・1 緒言 | 14 |
| 3・2 ひずみ解析方法 | 15 |
| 3・3 実験結果および考察 | |
| 3・3・1 無ひずみ材の切削 | 16 |
| 3・3・2 切削加工硬化材の切削 | 24 |
| 3・3・3 一様な加工硬化材の切削 | 26 |
| 3・4 結言 | 28 |
| 第4章 重複切削 | |
| 4・1 緒言 | 29 |
| 4・2 重複切削およびバニシ加工方法 | 30 |
| 4・3 実験結果および考察 | |
| 4・3・1 切り屑形状 | 32 |
| 4・3・2 せん断角の変化 | 33 |
| 4・3・3 切削抵抗 | 36 |
| 4・3・4 切削ひずみ | 37 |
| 4・4 結言 | 39 |

第5章 光弾性皮膜法によるアルミニウム被削材端面近傍のひずみ挙動解析

| | | |
|--------|----------------------|-----|
| 5・1 | 緒言 | 4 0 |
| 5・2 | 被削材形状 | 4 1 |
| 5・3 | 実験結果および考察 | |
| 5・3・1 | 自由端面間の切削ひずみ | 4 2 |
| 5・3・2 | 半無限板の切削ひずみ | 4 4 |
| 5・3・3 | 定常域での切削ひずみ分布 | 4 5 |
| 5・3・4 | F E M解による考察 | 4 6 |
| 5・3・5 | 切削開始位置近傍のひずみ分布 | 4 9 |
| 5・3・6 | 切削終了位置近傍のひずみ分布 | 5 1 |
| 5・3・7 | 切削終了位置近傍のF E M解による考察 | 5 2 |
| 5・3・8 | 終端部形状とひずみ分布 | 5 5 |
| 5・3・9 | 切削油剤の効果 | 5 6 |
| 5・3・10 | フライス切削ひずみ | 5 8 |
| 5・4 | 結言 | 6 1 |

第6章 有円孔被削材の切削ひずみ挙動解析

| | | |
|--------|---------------------|-----|
| 6・1 | 緒言 | 6 2 |
| 6・2 | 被削材形状 | 6 3 |
| 6・3 | 実験結果および考察 | |
| 6・3・1 | 連続体および有円孔材切削後の残留等色線 | 6 4 |
| 6・3・2 | F E M解による考察 | 6 5 |
| 6・3・3 | 定常域にある円孔近傍の等色線 | 7 4 |
| 6・3・4 | 端面部にある円孔近傍の等色線 | 7 7 |
| 6・3・5 | 円孔深さの影響 | 7 8 |
| 6・3・6 | 自由端面からの円孔中心距離の影響 | 7 9 |
| 6・3・7 | 円孔位置とひずみ集中度 | 8 2 |
| 6・3・8 | 切削速度の影響 | 8 4 |
| 6・3・9 | 切削油剤の効果 | 8 5 |
| 6・3・10 | 重複切削の影響 | 8 6 |

| | |
|----------------|----|
| 6・3・11 円孔間隔の影響 | 88 |
| 6・4 結言 | 90 |
| 第7章 総括 | 91 |
| 謝辞 | 92 |
| 参考文献 | 93 |

第 1 章 緒 言

切削加工は、刃物を用いて被削材の不要部分を局部的に破壊し取り除くことにより、製品に求められる形状精度や表面品位を得るための重要な手段である。このとき、被削材に損傷を与えずに切削除去し、所要品位に到達することは除去加工の究極の目的である。しかし局部的であっても、切削は材料を破壊するプロセスであるから被削材を傷めずに除去することは不可能である。一般に、製品の小型化、軽量薄肉化が進むにつれて非磁性など優れた物理的、機械的性質を有するアルミニウム材が多用される傾向にあるが、アルミニウムおよびその合金については、切削による除去加工以外に高精度を得るための有効な加工手段が未だに確立されていない。しかし、アルミニウムのような延性材は、切削によって材料内部深くまで損傷を受けやすく、加工後に現れる精度低下などの問題が多い。

このような延性材切削の際には、不可避な損傷を軽減できる加工法などの対策を考案する必要があるが、そのためには切削に伴う被削材損傷のメカニズムを解明しなければならない。切削機構に関しては、古くから工具切れ刃近傍の切り屑生成に伴う変形機構が切削加工理論を構成する上での重要項目として取りあげられ、多くの研究が行われている。しかし、未だに切削現象についてすべてを説明できる理論は確立されていない。

切削加工は切り屑を出す加工であるから切り屑形状に着目し、これにより切削機構を把握する研究が早くから行われ、Rosenhain & Stunrey¹⁾ や大越²⁾ らによって切り屑の形態が分類されている。また、延性金属材料を切削する際の工具と被削材間の親和力に起因する構成刃先の生成についても数多く研究³⁾ されている。

一方、切り屑生成機構を理想化したいいわゆる二次元切削模型について力学的関係を求める試みは古典的切削理論の中心的存在としてせん断角関係式⁴⁾ やすべり線理論⁵⁾ による解析など詳細な研究が行われてきた。しかし、せん断面応力やすくい面摩擦角など切削現象を支配すると考えられている多くの特性値については材料試験値の結果と一致せず、複雑な切削現象をせん断角モデル的に解析する方法がきわめて限られた場合以外にはその妥当性を持たないために、それら特性値を用いて切削現象を説明することには汎用性がなく、結局は削ってみなければわからない⁶⁾ と言われている。

最近では切削理論を構成する特性方程式をコンピュータを用いて近似的に解き、切削における摩擦角その他の諸量を求め、有限要素法解析によって切削過程をシュミレーションする試み⁷⁾ が行われている。しかし、これらのほとんどはせん断面理論に根拠を置き、

切り屑として除去される部分の切り屑生成メカニズムを中心に、刃先近傍の現象についてのみを取り上げている。切削が刃先による局部的破壊の現象ではあっても、被削材の受ける損傷が広い範囲におよぶことは、加工後の寸法の狂いなどからも予想される。しかし、延性材を切削加工する場合に生ずる被削材の広範囲にわたる切削残留ひずみや応力について、これまでの研究結果では十分に説明できない。ところが、切削加工後に現れる寸法の狂いなどによって製品精度に悪影響を与えるのはむしろ被削材深く残留するひずみであると考えられ、切削加工を行う際に避けることができない切削ひずみの発生メカニズムの解明と、その最少化の対策が望まれている。近年、特に機械部品の軽量化や高精度化が進むにつれて使用される材料の信頼性がいっそう重要になって来ているが、それとともに切削によるそれら材料の除去加工に対しても単に加工時点での幾何学的精度だけでなく、仕上げ面近傍の残留応力や硬度の変化および広範囲にわたる残留ひずみの挙動などについて厳密に管理することが求められている。この分野での体系的な研究は最近始められ、1990年精密工学会では「切削加工専門委員会」に「表面性状改良分科会」が設置されてこれらの問題がとりあげられている。

除去加工に伴って生ずる加工変質層の測定には従来から、腐食法、顕微鏡、X線回折法、硬さ法、再結晶法などが用いられているが、これらの測定法によって得られた結果には大きな差異が生じ、定量的評価に問題があると言われている。一方、切削ひずみの測定には、加工前後の格子線の変位からすべり線場を求める格子線法やSEM観察法などが用いられているが、観察前後の処理が煩雑であり広範囲の連続観察には適した方法とは言いがたい。切削中の被削材ひずみを広範囲かつ連続的に容易に観察できる方法の開発が期待されている。以上の現状から本研究では、切削中および切削後に残留する被削材のひずみについて光弾性皮膜法を用いて定量的に調べる方法を提案し、この方法によってアルミニウム被削材切削ひずみ挙動のマクロ的解析を行い、切削ひずみの影響を最小化できる加工法を見いだす事を目的として取り組んできた。光弾性皮膜法によって切削ひずみを可視化すれば、切削現象の結果としての切削中および残留ひずみを被削材全域にわたって定量的に知ることができる。しかし、切削ひずみ挙動を知り、その最少化について検討する上では、結果としてのひずみだけでなく、移動する荷重点である工具近傍についてそれぞれの位置での切削瞬間の各応力成分を分離し、それらの釣り合い状態について知る必要がある。

これを光弾性法によって実験的に求めるためには多大な労力と時間を要し、事実上困難である。ところが、有限要素法を用いて弾性あるいは弾塑性解を求めると、各応力成分の

釣り合い状態について容易に知ることができる。従って、本論文では光弾性皮膜法による結果をFEM解析結果で補い、切削ひずみの挙動について考察した。また、実際の切削加工の多くは三次元切削であるが、一般に切削現象を扱う場合、二次元問題として処理し得るいわゆる二次元切削が基本であるとして考えられているので本文に於いても二次元切削について取り扱った。その結果得られた成果を第2章から第7章にわたり本論文にまとめた。まず第2章では、切削実験装置および光弾性皮膜法によるひずみ測定法、FEM弾性および弾塑性解析条件などの実験方法について述べた。第3章では、光弾性皮膜法による切削ひずみの可視化の原理とこの方法を用いた実験結果について述べた。第4章では、損傷を最少化する場合の手掛かりとなる重複切削による加工履歴について述べた。

第5章では、被削材の端面近傍のひずみ挙動を皮膜法により解析し、FEM弾性解による結果と併せて述べた。また、製品に穴などが設けられるために連続体でない被削材を切削することも避けられない。第6章では、加工面近くに円孔がある有円孔被削材の円孔近傍の切削ひずみ挙動を皮膜法およびFEM弾塑性解により解析し、切削条件や円孔位置の影響について述べた。第7章では本研究で得られた成果をまとめて示した。

第 2 章 実験装置と実験方法

第 2・1 節 切削実験

切削実験の工作機械には立型マシニングセンターを用いた。実験の際には、スピンドルの回転をオリエンテーション位置に固定し、テーブル送りあるいはコラム送りで切削した。使用した切削実験装置の概要について図 2-1 に示す。被削材はテーブルに設置したバイスを用いて固定した。工具は、SKH4 の完成バイトをすくい角 30° 、にげ角 5° 、刃先半径の丸みを $2\sim 3\mu\text{m}$ に仕上げ用いた。刃先の成形には工具研削盤を使用し、ダイヤモンドホイール加工後に手研ぎでGC #600 を用いてかえりを除き、アルカンサス #2000 で仕上げた。刃先の丸みについては、実体顕微鏡により確認しながら加工した。成形した工具は図2-2 に示す専用に製作したホルダーに取り付け、マシニングセンターのスピンドルにチャックした。切削抵抗を測定するために制作した工具動力計を図2-3, 2-4 に示す。図 2-3 は工具側、図2-4 は被削材側で測定できる動力計であり、工具側の動力計は微小切り込みの際に使用した。実験は基本的には乾式切削で行った。その際には、切削実験を行う度に工具表面をアセトンで脱脂して油膜介在の影響を避けた。湿式の場合には、被削材の必要な部分にのみ切削油剤を塗布する方法を用いた。実験条件は、切削中の被削材

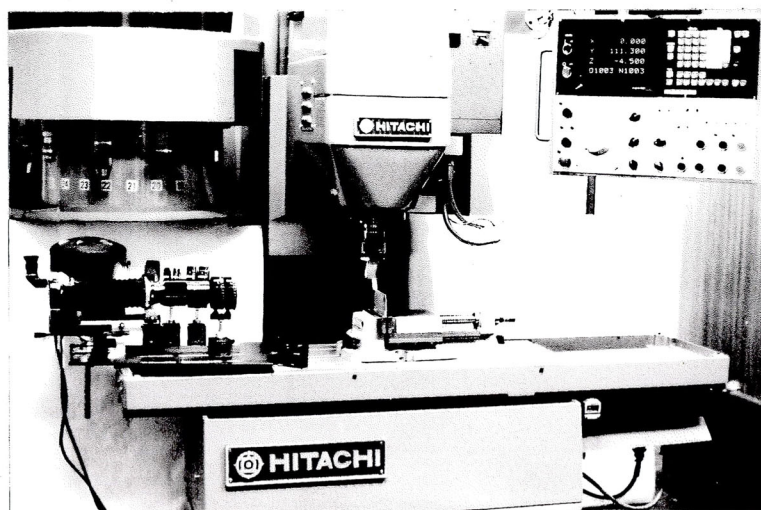


図 2-1 切削実験装置

が室温を維持し，切削熱が解析部へ影響を与えないように配慮して切削速度を毎分10m, 1m, 5mm, 切り込み量を0.1mm, 0.05mm とした。切削中の被削材表面温度は放射温度計により連続測定し，温度変化が室温範囲内であることを確かめた。

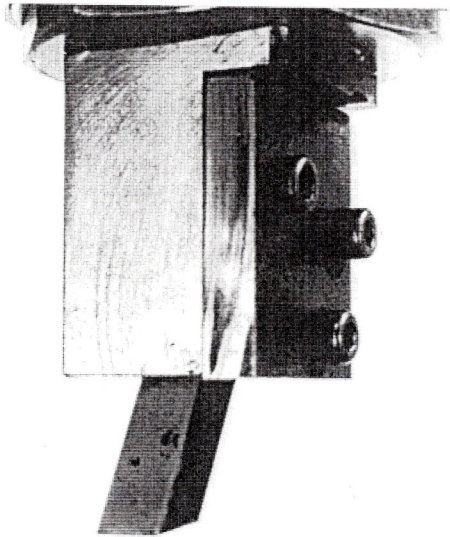


図 2-2 工具ホルダー

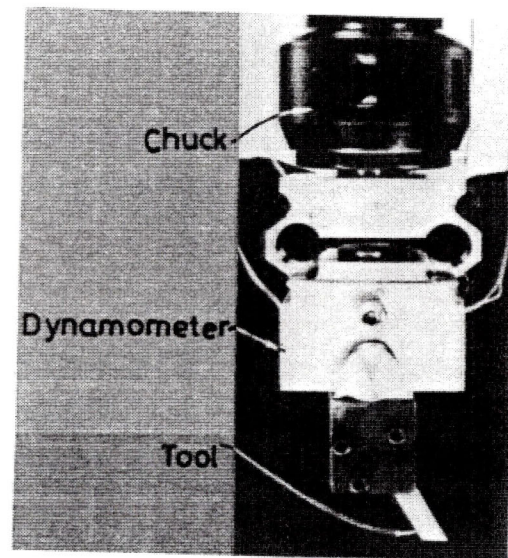


図 2-3 工具動力計（工具側）

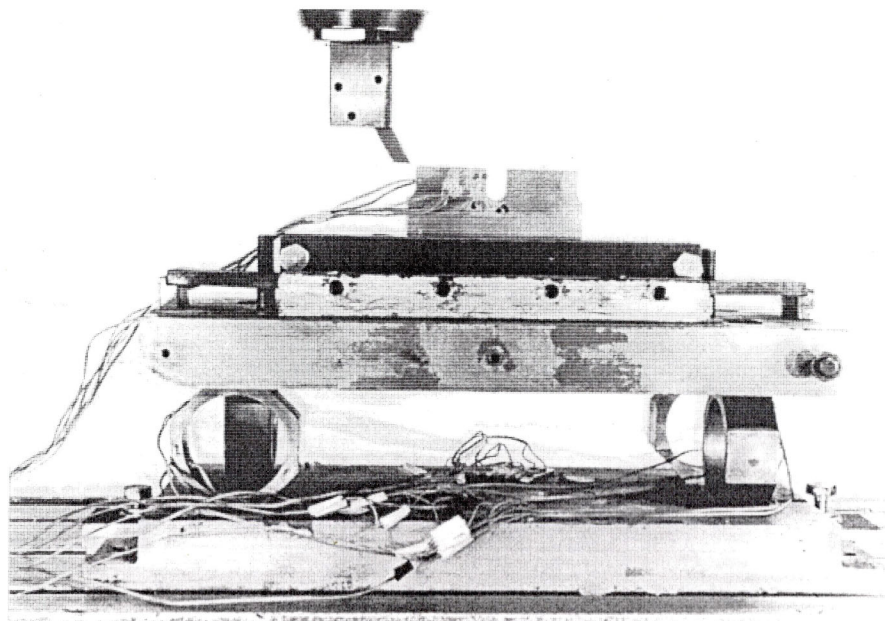


図 2-4 工具動力計（被削材側）

被削材にはJIS 1070、厚さ3mmのアルミニウム材を用い、全て同一ロットの帯板材を使用した。材料の化学成分、機械試験および検査結果を表2-1に示す。実験に用いた被削材は、加工によるひずみを極力抑えるために、手のこにより帯板材から5mm残しの形状に切り出し、新しい切れ刃のハイス二枚刃エンドミルにより一刃当たり0.01mmの送りで湿式加工した。所要形状に仕上げ加工した後にアセトンで脱脂し、570K、4時間の焼きなまし処理を行い、実験に使用した。有円孔被削材の場合は、穴を加工した後に焼鈍した。

無ひずみ被削材とは異なり一様に加工硬化した被削材についても切削実験を行った。一様な加工硬化材を得るために、図2-5に示す大型の単軸引張り試験片を使用した。

インストロン型引張り試験機によってあらかじめ20%の単軸引張りひずみを与えた大型試験片から図2-5に示すように引張り軸に対して0°、45°、90°方向の切削面を持つ被削材を切り出して用いた。このとき、切り出しによるひずみを少なくするために鋭利な切れ刃のエンドミルを用いて送り0.01mm/toothで湿式加工した。加工後の被削材はレビンダー効果を防ぐためにアセトンに浸して切削油剤を完全に取り除いた。このようにして得られた被削材は、切削面に対して0°、45°、90°の方向性を持つ一様な加工硬化材であ

表2-1 被削材の材料試験結果

| 製造ロット番号 | 品名 | 種類 | 寸法 (mm) | 質別 |
|---------|----|------|----------------|----|
| 615-12 | 角板 | 1070 | 3.0 X500 X1000 | 0 |

1, 化学成分 (%)

| 項目 | Al | Cu | Si | Fe | Mg | Ti | Zn | Mn | Cr |
|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|----|
| 規格 | 99.7 | 0.04 | 0.20 | 0.25 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.03 | - |
| 番号 | 以上 | 以下 | 以下 | 以下 | 以下 | 以下 | 以下 | 以下 | - |
| 5653 | 99.76 | Tr | 0.05 | 0.16 | Tr | 0.03 | Tr | Tr | Tr |

2, 機械試験

| 項目 | 規格 | 測定値 |
|-----------|------|------|
| 再結晶粒度 | - | Good |
| Hv | 20±2 | 20.4 |
| 出荷重量 (kg) | 500 | |

3, 検査結果

| 項目 | 規格 | 測定値 |
|----|-----------|--------|
| 板厚 | ± 0.050mm | 3.000 |
| 板幅 | ± 0.50 mm | 500.00 |
| 長さ | ± 1.00 mm | 1000.0 |

る。このような加工硬化を受けた異方性材では、測定する方向によって機械的性質が異なるので、加工硬化被削材と同様の方法を用いて大型単軸引張り試験片に20%の引張りひずみを与えた後、引張り軸方向に対して 0° ～ 90° 方向にそれぞれJIS7号試片を切り出して応力～ひずみ特性を調べた。

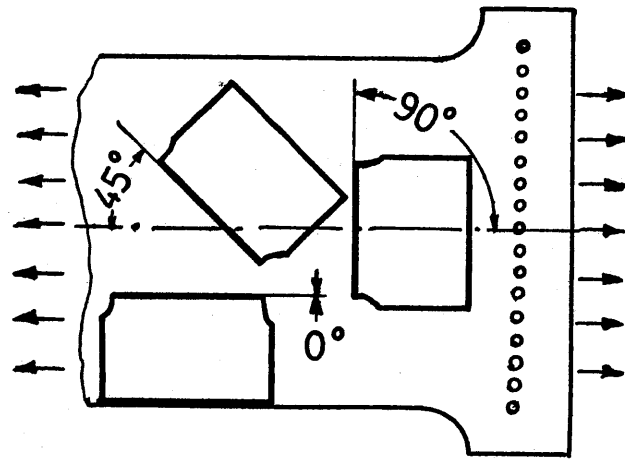


図2—5 加工硬化材採取位置

第2—2節 反射型光弾性実験装置

二次元切削中の被削材ひずみおよび切削後に残留するひずみを光弾性皮膜法により求めた。実験に用いた反射型光弾性装置による切削ひずみ測定方法の概要を図2-6に示す。

光源から出た単色光は偏光子、四分の一波長板を通り円偏光となり皮膜を通過後に被削材表面で反射して再び皮膜、四分の一波長板、検光子を通過する。このために皮膜を通過する光路は皮膜厚の2倍となり、厚さ1mmの皮膜を用いても切削ひずみの測定に十分な縞感度を得られる。等色線測定用には、水銀灯光源から緑色フィルターおよび熱線吸収板を

通過した単色光を、等傾線測定用には熱線吸収板を通過した白色光を使用した。

皮膜法の自由境界での等色線次数の読み取りには、皮膜法縁効果に注意しなければならないが、実用上の皮膜は厚さ 3 mm 以下であれば問題がない⁸⁾とされているので本実験では 1 mm を用いた。自由境界の等色線編次数の読み取りの際には、皮膜法縁効果除去のための外向き外挿法⁹⁾を用いた。

光弾性編はカメラあるいはビデオを用いて記録した。被削材表面からの反射光が記録面に垂直に入射し、入射光と反射光がなす光軸角度は 5° 以下になるように設定した。

皮膜等色線は皮膜の主ひずみ差に比例し、接着皮膜のひずみと下地材料のひずみが等しいことから、皮膜に現れる等色線編次数より下地アルミニウム材の主ひずみ差すなわち最大せん断ひずみを知ることができる。下地材料の応力～ひずみ関係と皮膜のひずみ感度と

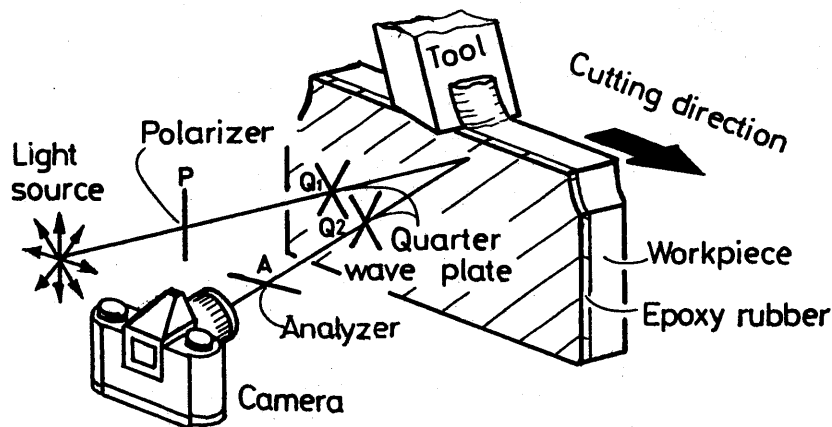


図 2—6 反射型光弾性装置による切削ひずみ測定法の概要

を与える検定曲線は、皮膜を接着したアルミニウム材の単軸引張り試験により求めた。

ひずみの測定に用いる光弾性皮膜材には、エポキシラバー（エポキシ・ポリサルファイド共重合体）を常温で無圧縮成形し、これを皮膜材と同一成分のエポキシラバーによってアルミニウム被削材に接着して使用した。その組成は塑性域で十分に追従できるようにエピコート（エポキシプレポリマー）100g、チオコール（ポリサルファイド）100g、ヂエチ

レントリアミン（硬化剤DTA）8ccとし、攪拌および成形時の吸湿を避けるために作業はすべてデシケータの中で行った。成形用鋳型には板ガラスに厚さ0.03mmのポリエチレンフィルムをセロテープで弛みなく張りつけ、それを用いて厚さ1mmのポリエチレンスペーサーを挟む方法を採用した。ポリエチレンに皮膜材は接着しないことに加えて、ポリエチレンフィルムに挟まれているから、反応熱による皮膜の膨張収縮が拘束されず無ひずみの皮膜を作ることができる。

成形および接着した皮膜の無ひずみ判定は光弾性実験装置によって行った。西田¹⁰⁾によれば共重合は293Kの室温で十分に進行し、24時間放置後313Kで5時間程度経つと架橋硬化は完成するとされているが、実験には更に時間をかけて、室温で10日以上硬化させたものを使用した。下地材と皮膜材の線膨張係数が異なるので、温度差による皮膜のひずみ発生を防ぐために、皮膜接着硬化時と切削実験時に温度差が生じないように注意した。

上述したように皮膜の主ひずみ差感度は、被削材と同一材料に光弾性皮膜を接着した帯板試験片の単軸引張り試験による $N \sim \epsilon$ 特性から求めた。このときの引張りひずみ ϵ は、皮膜と反対側の試験片表面に接着したひずみゲージにより求めた。その概略を図2-7、得られた皮膜編次敷〜下地材応力〜下地材ひずみ関係特性を図2-8に示す。図2-7の試片には、厚み方向に非対称とならないように皮膜を両面に接着した。

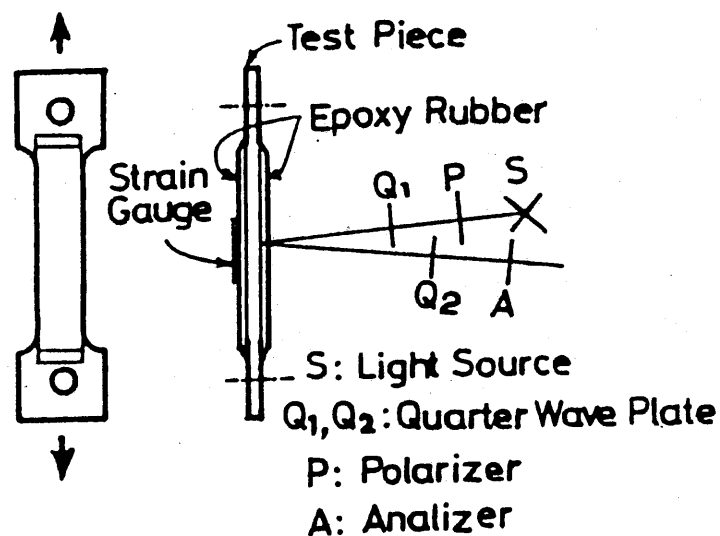


図2-7 検定用引張り試験の概要

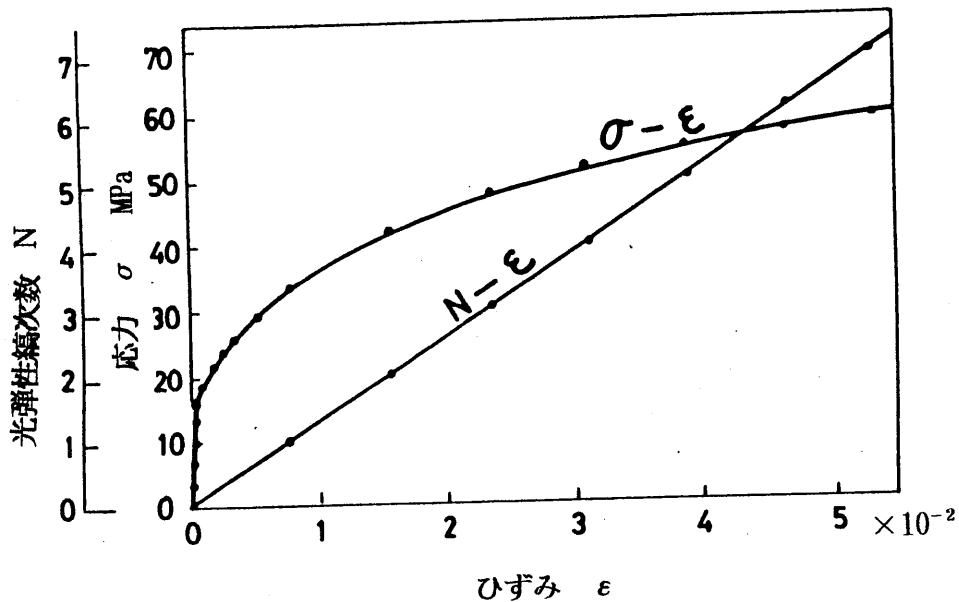


図2—8 $N \sim \sigma \sim \epsilon$ 関係特性

皮膜接着被削材を切削する時にあらわれる刃先前後の等色線（図2-9, Case A）には、刃先前方で生じた等色線およびその残留成分と、刃先直後で生ずる等色線が重複している。

これらを分離し、切削瞬間の刃先前後の等色線を得るために、あらかじめ同一切削条件で被削材中央位置まで切削し、途中で急停止した被削材に皮膜を接着した後、再び停止位置より切削を開始した直後の記録を取った。この実験手順について図2—9, Case B に示す。このようにして残留成分を含まない切削瞬間のひずみ分布を知ることができる。

また、一様に加工硬化した材料でなく切削により加工硬化した被削材の加工面を繰り返し切削（以下重複切削と言う）する時の切削ひずみは、前もって同一条件で被削材を切削した後に皮膜を接着し、その後重複切削した時の等色線および等傾線により求めた。このようにして重複切削する時に生ずる被削材ひずみを分離できる。この実験手順を図2—9, Case C に示す。同図において、Case D は前述の様な加工硬化を受けた被削材の製作および実験手順について示す。これより、加工硬化によって異方性となった材料の切削ひずみ分布について知ることができる。

このようにして光弾性皮膜法によって直接得られる等色線および等傾線は、被削材の主ひずみ差すなわち γ_{max} をあらわしているから、切削現象の結果としての切削ひずみの値

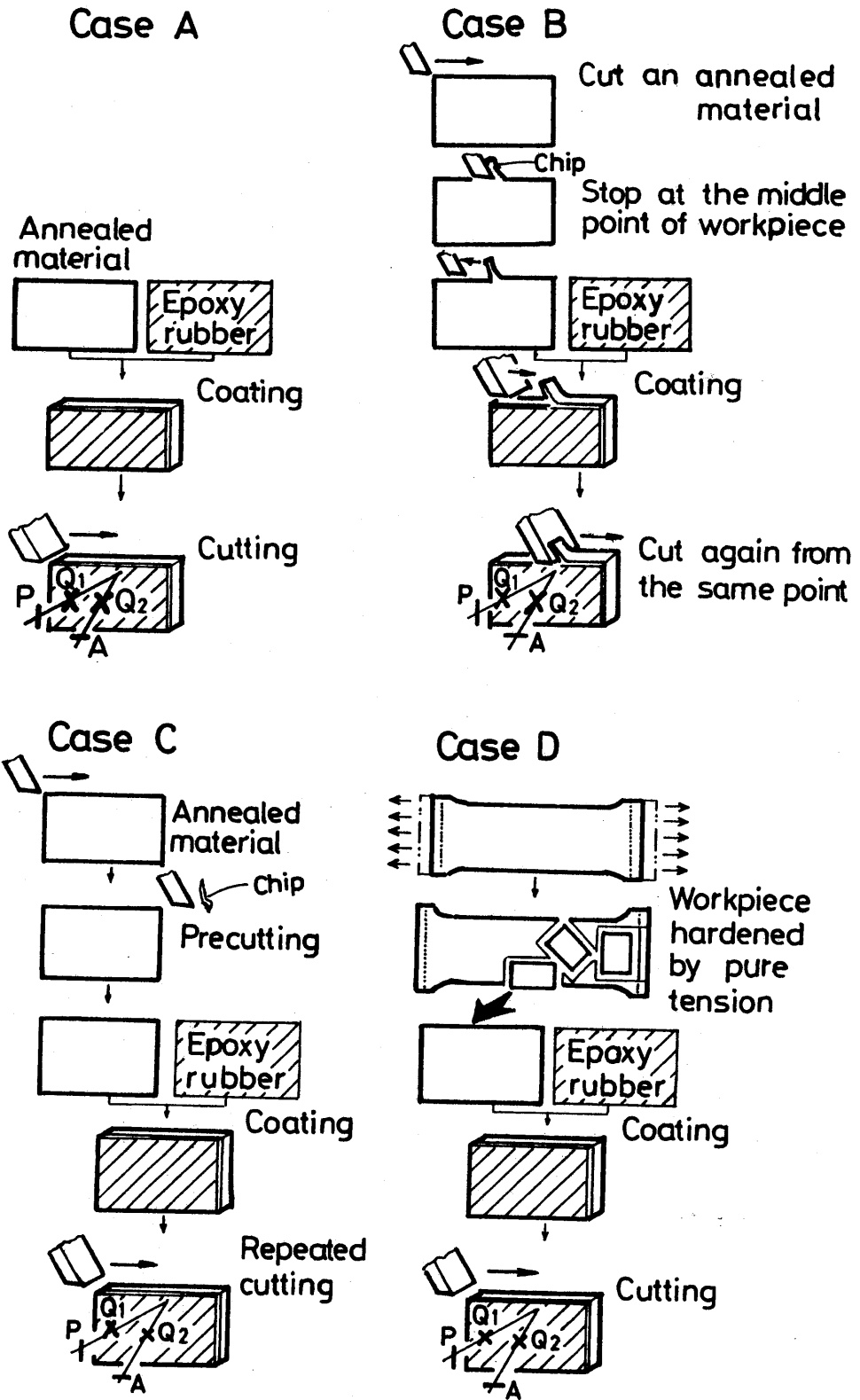


图2-9 实验手順

とその方向について知ることができるが、ひずみの最少化について検討するためには、進行する刃先の位置の変化につれて被削材に生ずる応力の各成分の釣り合い状態について知る必要がある。しかし一般に、自由境界でなく内部の主応力成分を光弾性皮膜法の結果から求めることは可能ではあるが、そのためには煩雑な手数が必要となる上に、得られる精度は必ずしも良くはない¹⁰⁾とされている。このことは光弾性解析の一つの難点でもある。そこで本研究では、有限要素法による弾性あるいは弾塑性解により、工具すなわち移動する荷重点近傍のそれぞれの位置での切削瞬間の応力成分についてその分布を求めた。

第2-3節 FEM 弾性解析および弾塑性解析

切削中の延性被削材に生ずる塑性域でのひずみ挙動は、残留成分を含まない切削瞬間のひずみの方向や分布により知ることができる。それらは刃先のごく近傍およびひずみ勾配を除くと弾性応力釣り合い状態と定性的に同じである。そこで本研究では光弾性皮膜法による実験に加えて有限要素による弾性解および弾塑性解を求め、切削中の被削材に生ずる応力分布のマクロ的解析を行い、問題があると予想される切削終了端面および円孔近くの切削ひずみについて検討した。

FEM弾性解析には三次元の静弾性問題を20個の節点をもつ六面体要素を用いて有限要素解析を行った。解析モデルを図2-10に示す。用いた要素数は897、接点数488、要素分割の大きさは0.2および0.5mmとし、加工面と自由端面近くは細かなメッシュにした。解析範囲は皮膜法による実験結果を参考にし、複雑なひずみ挙動を示すことが予想されて問題があると思われる切削終了端面近傍の切削方向長さ10mm、深さ5mmとし、刃先位置は自由端からの距離(10-x)を8種類変化させた。

境界条件には切削実験による実測値を用いた。その時の二方向ひずみゲージの接着位置は図2-11に示す。

連続体ではなく加工面近くに直径2mmの円孔がある有円孔被削材についても同様にFEM弾性および弾塑性解析を行った。いずれも解析モデルは、円孔周囲の切削ひずみが自由端の影響を受けないように被削材の中央位置とした。弾性解析モデルでは、円孔深さ2.5mm、解析範囲は円中心の前後5mmおよび加工面からの深さ5mmとし、要素数は600、節点数は3462とした。弾塑性解析モデルでは、円孔深さ2.5~4mmの場合について弾性解と同

様の範囲について計算した。このとき用いた要素数は 1000，接点数は1855とした。境界条件は連続材と同様に切削実験での実測値を用いた。

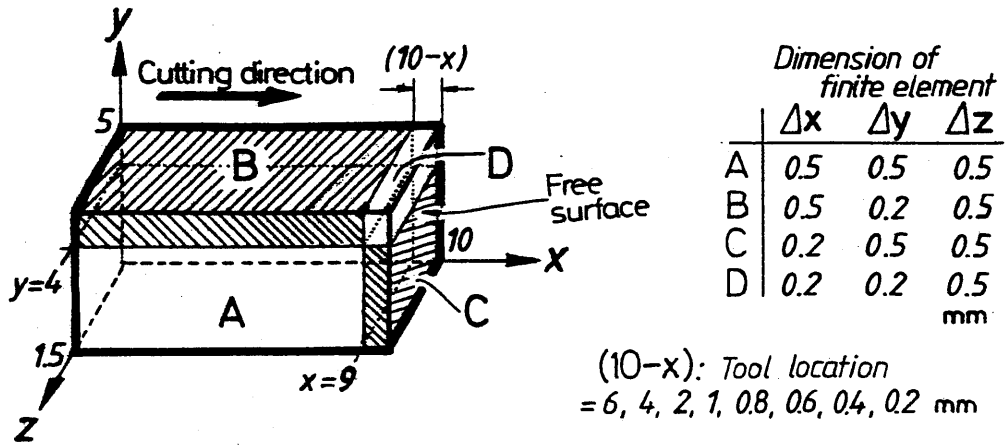


図 2-10 FEM弾性解析モデル

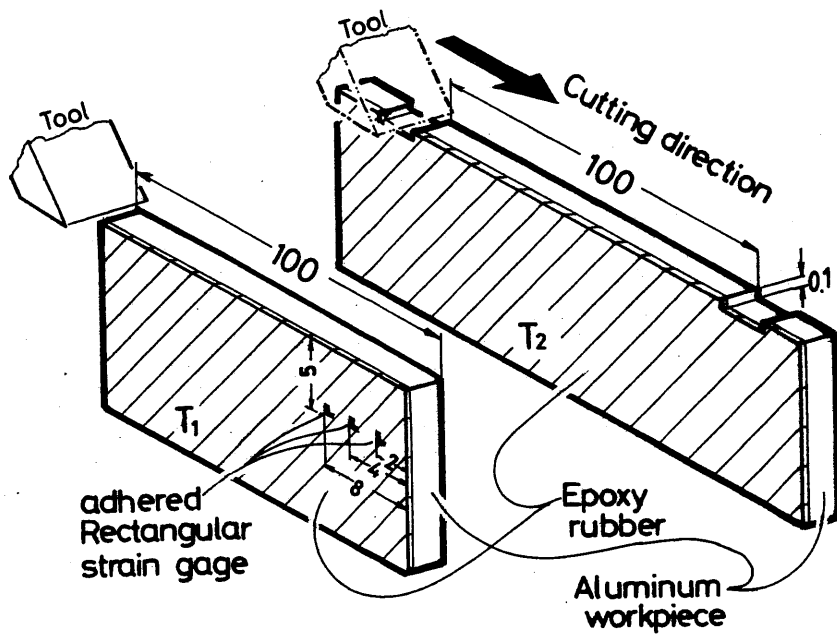


図 2-11 境界条件測定位置

第3章 延性材切削ひずみ挙動の光弾性皮膜法による解析

第3・1節 緒言

切削機構については、古くから多くの研究¹¹⁾ がなされている。その多くは、切り屑として除去される部分である刃先のごく近傍の切削現象、すなわち切り屑生成機構を中心に述べられている。確かに、生成する切り屑から切削に関する重要な情報が数多く得られることは既知の事実である。ところが延性材を切削するとき、製品の品位上、様々な問題を引き起こすのは除去される部分でなく製品側の切削によるひずみであると考えられる。

しかし、切削によって被削材内部に広く発生するひずみとその残留機構についてはまだ不明な点も多く、切削ひずみ挙動の解明が望まれている。

一方、切削中の被削材ひずみをリアルタイムで定量的に面で捕らえる有効な手段として、著者は光弾性皮膜法を提案した。^{12) 13) 14) 15) 16) 17)} 光弾性皮膜法を用いると、切削ひずみを可視化することができ、広範囲にしかも連続的な観察が可能であり、定量的解析が容易となる。本研究でも光弾性皮膜法によって二次元切削中のアルミニウム被削材のひずみ挙動を可視化して観察した。その結果、切削中の延性材に生ずるある瞬間の刃先前方のひずみ分布と、刃先後方で生ずるひずみ分布、および切削後の残留ひずみについてそれぞれを分離することができた。これより、切削中の被削材にあらわれるひずみの挙動と、切削後にひずみが残留する機構について明らかにした。また、これらのひずみ挙動は被削材の機械的性質に依存する。そこで、材料の加工硬化が切削ひずみの挙動におよぼす影響について調べるために、切削加工によってひずみ勾配が生じた材料、すなわち切削加工硬化材を用いた重複切削、および一様にひずみ硬化した異方性被削材を用いた切削実験を行った。その結果、切削ひずみの可視化によって、ひずみ硬化材を切削した場合の切削ひずみ挙動は、延性材無ひずみ面加工の場合と異なり、弾性切削状態に近いことを明らかにした。このことは上述のひずみ残留機構によって説明できる。

第3・2節 ひずみ解析方法

被削材を連続体とみなせる加工単位、すなわち結晶粒の影響を考慮しなくて良い範囲の切り込み深さで二次元切削をする場合の被削材について考える。この時、被削材に生ずる応力状態は刃先のごく近傍を除くと、マクロ的にみればまっすぐな自由境界の任意の点に厚さ方向に一様な集中力が作用する場合に相当する。被削材が弾性材であれば、その内部に生ずる応力はFlamant¹⁹⁾によって示されたように単純半径応力分布状態を示す。

その場合、半径方向応力 σ_r 、接線方向応力 σ_θ およびせん断応力 $\tau_{r\theta}$ のそれぞれの応力成分は、 $\sigma_r = - (2 P \cdot \cos \theta) / (\pi \cdot r)$ 、 $\sigma_\theta = 0$ 、 $\tau_{r\theta} = 0$ で表される。

従って、最大せん断応力 τ_{max} の値は $\tau_{max} = (\sigma_r - \sigma_\theta) / 2 = P \cdot \cos \theta / \pi r$ となる。図3-1は、単位厚さ当たりの切削力Pが作用している場合の弾性釣り合いモデルを示す。同図において、刃先点OでY軸に接する直径dの円を考えると、刃先からこの円周上の任意の点までの距離は、 $d \cdot \cos \theta = r$ であるから $\cos \theta / r = 1 / d$ となり、刃先点Oを除いてこの円周上でのすべての点では σ_r および τ_{max} の値が等しい。言い換えれば、最大せん断応力の等しい点の軌跡は、刃先点に接する円弧を描くことになる。

一方、延性材のような塑性変形をする被削材の場合は、直接的に応力状態を知ることができない。しかし、延性被削材に光弾性皮膜を接着した後、二次元切削すると被削材に生じた切削ひずみは接着皮膜のひずみと等しいから、下地金属が塑性状態であっても光弾性装置により接着皮膜の光弾性縞を観察すれば、下地の被削材の塑性ひずみを可視化できることになる。ひずみが得られると、応力～ひずみ特性から応力を知ることができる。

この方法を用いると、切削中の被削材全域のひずみおよび切削後の残留ひずみの状態について知ることができる。光弾性皮膜を接着した被削材を切削すると、図2-9, Case Bの手順によって切削瞬間のひずみは放射状分布であることが観察される。この時の光弾性縞次数は、 $N = 2 t_h \beta (\varepsilon_{r1} - \varepsilon_{\theta1}) = 2 t_h \beta (\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{\theta2})$ で示される。ここで、皮膜厚さは t_h であり、皮膜の主ひずみ差感度 β は皮膜接着試験片の単軸引張り試験によってすでに既知である。単軸引張り試験の際に、被削材の接着皮膜と同じ厚さを用いれば、 $2 t_h \beta$ が縞次数～主ひずみ差特性の傾きとして一度に求められる。従って、縞次数Nを知ることができれば、下地の被削材について主ひずみ差が求まる。最大せん断応力説に従う材料については、主ひずみ差の値とその方向を知ることにより、その材料のせん断すべりを説明できることになる。

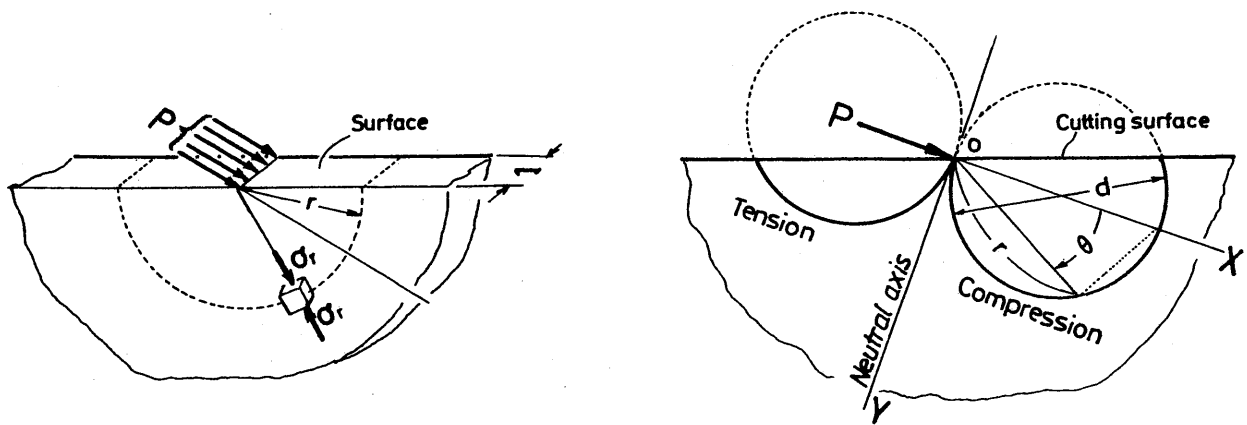


図 3-1 弾性釣り合いモデル

第 3・3 節 実験結果および考察

3・3・1 無ひずみ材の切削

無ひずみ材を切削するとき、切削中の被削材接着皮膜に現れる等色線を図 3-2 に示す。このときの切削後の被削材接着皮膜に残留する等色線を図 3-3 に示す。これは、図 2-9 の実験手順に示す Case A の方法によって得られる。図 3-2 において、刃先より前方の等色線すなわち最大せん断ひずみは、刃先点で最も次数が高くなっており、その分布形状は円弧状である。刃先の下方では等色線にくびれが生じているが、それは刃先後方でわずかに膨らんだ後、徐々に減少して刃先から遠ざかるにつれて加工面に平行な分布となっていくことがわかる。切削後には図 3-3 に示すように等ひずみの軌跡である残留等色線縞が加工面に平行な分布となっている。

縞次数で約 0.2 次が耐力に相当することから、切り込み量 0.1mm に対して深くまで塑性域が広がっており、その大部分が残留していることがわかる。

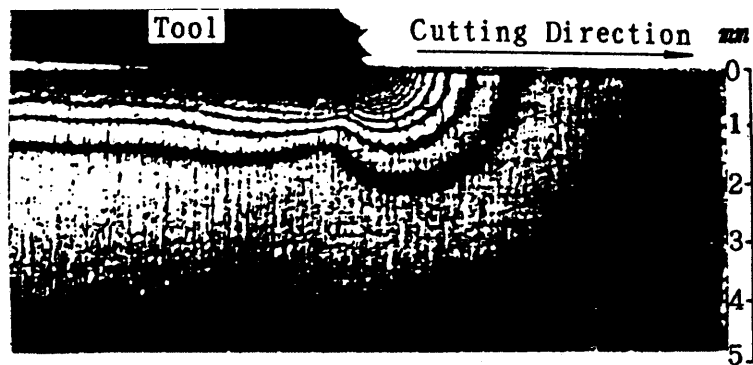


図 3-2 切削中の等色線 (Case A)

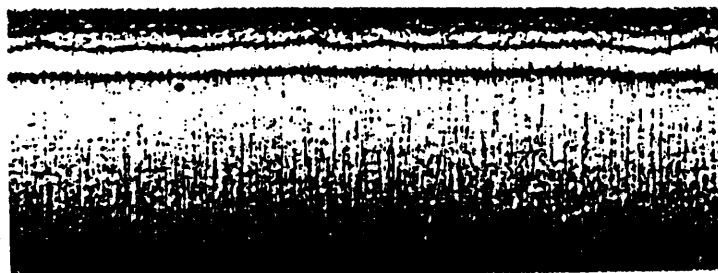


図 3-3 切削後に残留する等色線 (Case A)

しかし、図 3-2 で得られた等色線に於いて、刃先後方の等色線縞分布には刃先前方で生じたひずみの残留成分と、刃先直後で発生する切削ひずみ成分とが重複してあらわれている。そこで、刃先直後の位置での切削中のひずみ成分を知るために、無ひずみ被削材の切削中にその切削を途中で急停止し、その後に皮膜を接着した被削材を用いて停止した位置から切削を再開した直後の皮膜等色線を図 3-4 に示す。この方法は、図 2-9 において Case B に示した手順である。

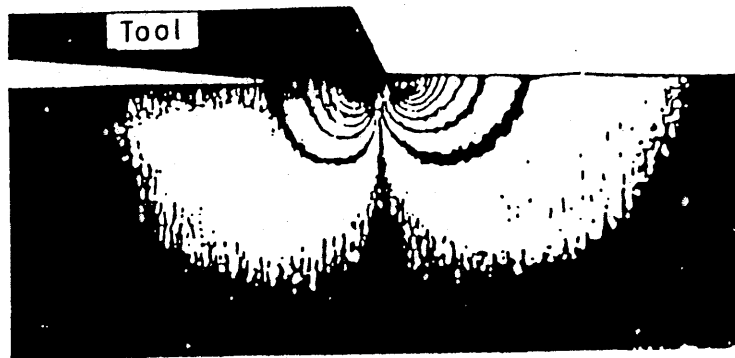


図 3-4 切削瞬間の皮膚等色線 (Case B)

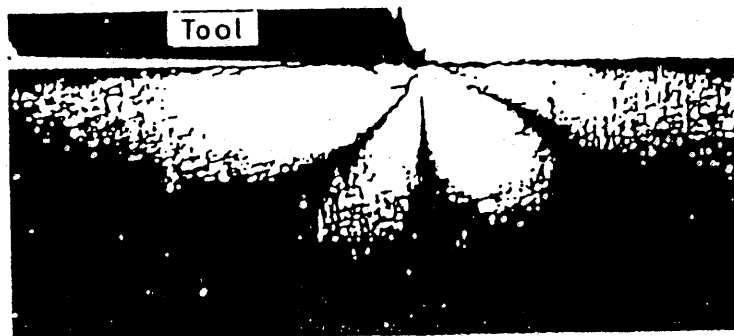


図 3-5 切削瞬間の皮膚等傾線 (Case B, $\theta = 30^\circ$)

図 3-4 において、刃先より後方位置に生じている等色線は、刃先前方での残留成分を含まない切削瞬間のひずみ分布を示している。またこのとき同時に求めた等傾線の一例を、 $\theta = 30^\circ$ の場合について図 3-5に示す。図 3-5より、刃先直下にある中立軸の位置には 0 次の縞があり、直交する 2 本の $\theta = 30^\circ$ の等傾線が刃先点より放射状に出ていることがわかる。全く同様にして、 $\theta = 0^\circ$ から $\theta = 90^\circ$ までの等傾線を求めることができる。これらの等傾線群より、切削中のある瞬間に生ずる被削材主ひずみ $\epsilon_{r,2}$ 、 $\epsilon_{\theta,2}$ の方向は、弾性材と同じく刃先を原点とする単純放射状分布 $\epsilon_{r,2}$ であることがわかる。

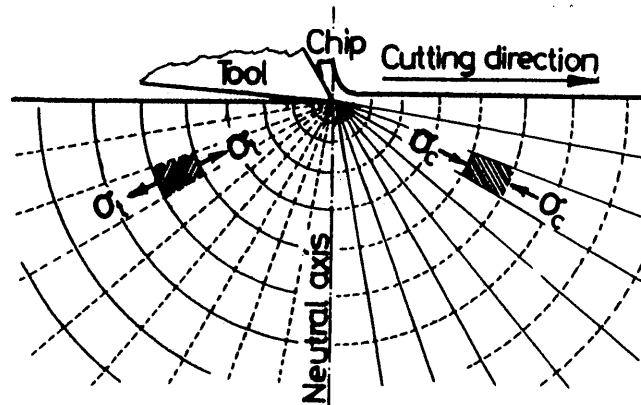


図 3-6 切削瞬間の主ひずみ線図 (Case B)

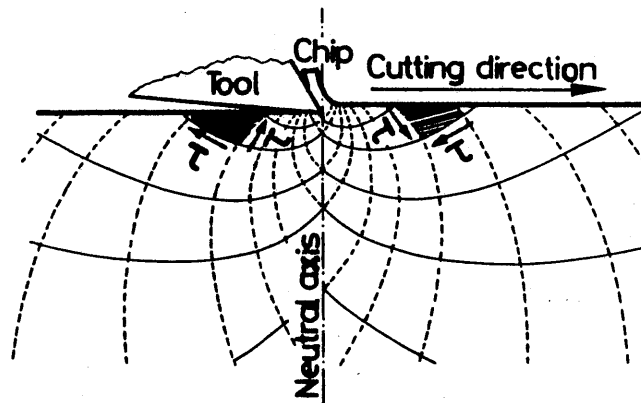


図 3-7 切削瞬間の最大せん断ひずみ線図 (Case B)

このようにして求めた切削瞬間の主ひずみ線図を図 3-6に示す。さらに、図 3-6の主ひずみ線図から得られた切削中のある瞬間に生ずる被削材内の最大せん断ひずみ線図について図3-7 に示す。

次に示す図 3-8では、刃先点を通る中立軸より刃先の前方位置には図 3-2, すなわち無ひずみ被削材切削中の刃先より前方での等色線分布を、刃先の後方位置には図 3-4, すなわち刃先より後方での切削瞬間の等色線を同時にあらわした。さらに、図 3-3に示す切削後の残留等色線を並べて示した。

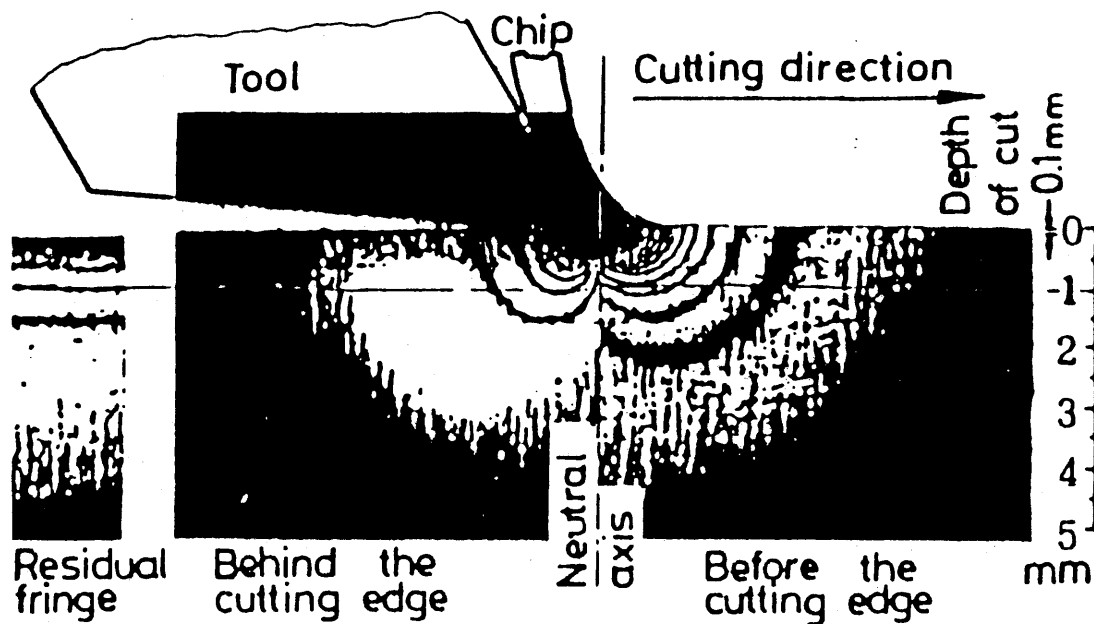


図 3-8 刃先前方の切削中，後方の切削瞬間および残留の組み合わせ等色線

これらの結果より，切削中のある瞬間の被削材ひずみ分布は，刃先点を通る中立軸を境にして，刃先前方では放射状の単軸圧縮，刃先後方では放射状の単軸引張り応力によるひずみが生じ，その結果，切削によって被削材に生ずる最大剪断ひずみの方向が刃先の前後で逆転していることがわかる。

すなわち，被削材は刃先の移動につれて，刃先より前方に位置するときには刃先点方向の単純圧縮を受け，刃先が通り過ぎて，刃先の後方になると逆に刃先点方向の引張り作用を受ける。そのために，刃先の前後において，被削材に生ずる最大せん断ひずみによるすべり方向は逆転する。

図 3-2 に示した切削中の等色線では，刃先の進行につれてこれらの現象が重なって現れている。従って前述したように，刃先前方に生ずる同心円状の等色線分布は，刃先の直下で減少し，その後わずか弾性回復した後に，切削面に平行な分布となって残留していることになる。

これらのことは，後述の加工硬化材切削の場合の実験結果からも同様に示される。

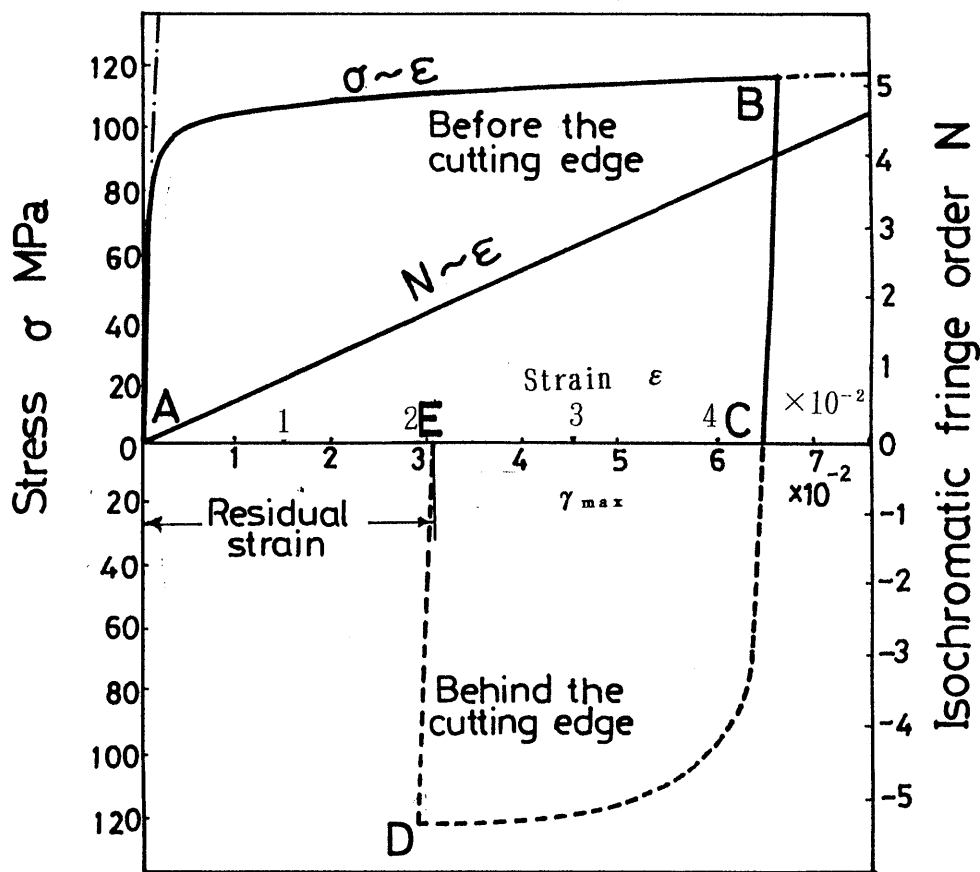


図 3-9 延性材切削ひずみ挙動 ($N \sim \epsilon$, $\sigma \sim \epsilon$ 関係特性)

次に、図 3-9 には、被削材と同一のアルミニウム材に皮膜を接着した帯板試験片（図 2-7）の単軸引っ張り実験によって求めた $\sigma \sim \epsilon$ および接着皮膜の $N \sim \epsilon$ 関係特性を示す。このときの引っ張り速度は切削速度と等しく 0.5mm/min とした。

一般に、焼きなましたアルミニウムなどの延性材料について、単軸圧縮特性は引っ張り特性とほぼ等しいとして取り扱われるので、ここでも同様に扱うことにする。図 3-9 では、横軸にひずみ ϵ 、縦軸に応力 σ および等色線縞次数 N を表し、横軸より上方に圧縮領域を、下方に引っ張り領域を示した。

切削によって被削材内部に生ずるひずみの挙動を、図 3-8 および図 3-9 に示す特性を用いて説明すると次のようになる。

被削材内部のある点、例えば図 3-8 において、被削材表面からの深さ 1 mm の位置のある点が切削によって受けるひずみ変化について考えると、刃先が無限遠方にあるときにはひずみが 0 であるが、刃先の接近に伴って刃先点方向の単純圧縮を受けるためにひずみが徐々に増加して、図 3-9 に示す A⇒B へとひずみ硬化する。さらに、刃先が近づき、刃先点を通る中立軸に接近すると、急激に除荷の状態、図 3-9, C となり、刃先の通過すなわち中立軸の直後では、逆に急激な刃先点の方向の単軸引張り作用を受けて、図 3-9 に示す C⇒D へと逆方向のひずみの変化経過をたどる。しかし、ひずみ硬化のために、刃先より後方位置で生ずるひずみの方が刃先より前方位置で生じたひずみに比較して少ないために、同図において、切削後には A C - C E, すなわち E 点に相当するひずみが残留することになる。

このとき、被削材に作用する単軸引張りあるいは単軸圧縮の軸方向は、刃先の移動に伴って変化する。そこで、被削材と同一材料を用いて大型の試験片に 0.2 の引張りひずみを与えた後、引張り軸に対して $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 方向の軸を持つような単軸引張り試験片を製作し、それぞれについて引張り試験を行った結果を図 3-10 に示す。

図 3-10 より、軸方向の変化が応力～ひずみ特性におよぼす影響は 5% 程度であった。また、軸方向の変化が $\sigma \sim \varepsilon$ 特性におよぼす影響が大きければ、切削中に生ずる等色線は円形分布とはならず歪んだ形状となるはずである。ところが、図 3-8 ではほぼ円形分布

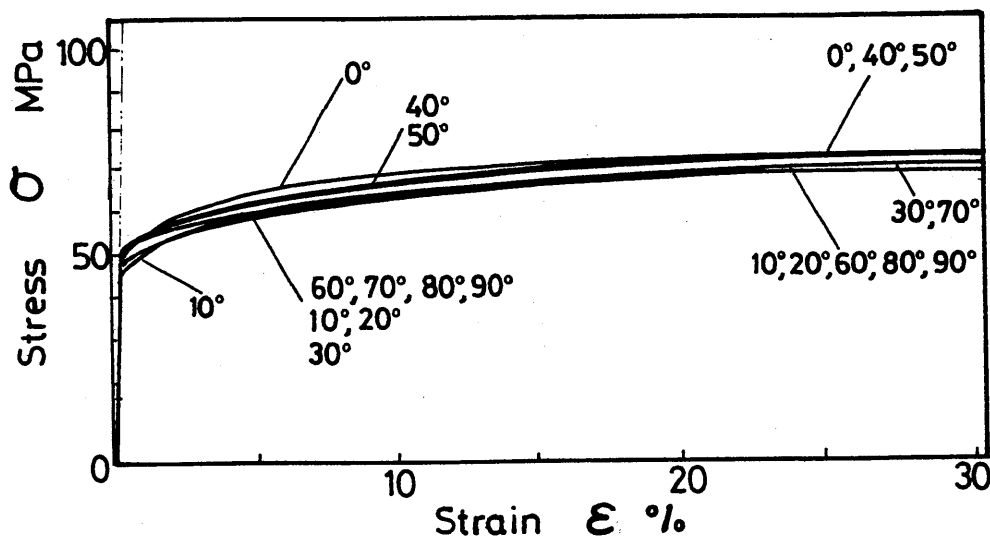


図 3-10 被削材の $\sigma \sim \varepsilon$ 特性 (パラメータ ; 引張り軸に対する試片採取方向)

に近いと認められるので、図 3-9 の特性図ではこのような軸方向の変化については考慮していない。

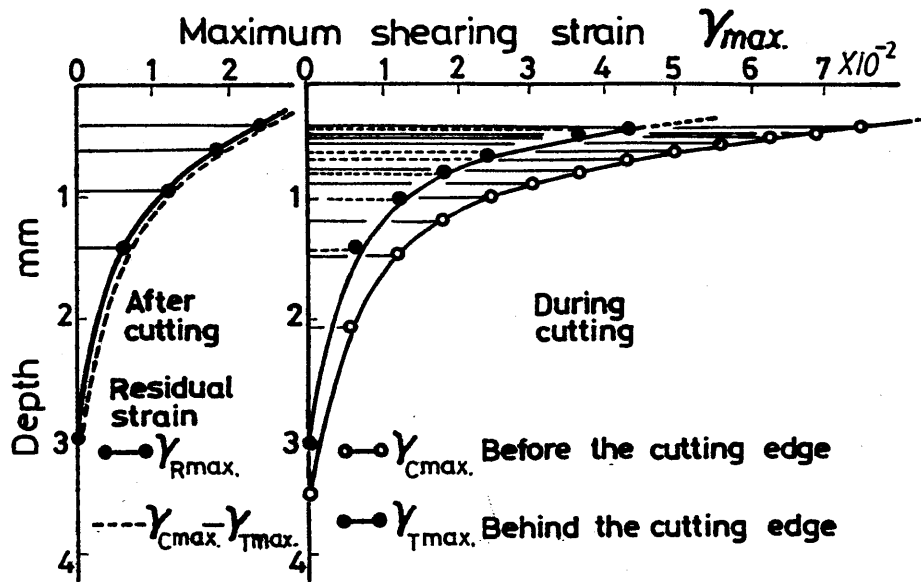


図 3-11 被削材切削中および残留ひずみの深さ方向断面上の分布

図 3-8, 3-9 より求めた切削中の刃先より前方と後方および切削後の残留最大せん断ひずみの最大値をそれぞれ γ_{Cmax} , γ_{Tmax} , γ_{Rmax} とすると、これらと $(\gamma_{Cmax} - \gamma_{Tmax})$ について深さ方向断面上の分布を図 3-11 に示す。

ここで、切削瞬間の被削材は弾性釣り合い状態であるから γ_{max} は $\gamma_{max} = \epsilon_r - \epsilon_o$ で求められる。刃先より前方は単軸圧縮、後方では単軸引っ張りなので $\epsilon_o = -0.5 \epsilon_r$ となり $\gamma_{max} = 1.5 \epsilon_r$ が得られる。ただし、塑性域でのポアソン比を $\mu = 0.5$ とする。

図 3-9 の単軸特性においても同様であるから、 $N \sim \gamma_{max}$ 関係特性が求まる。この特性を用いて、残留等色線から求めた γ_{Rmax} 分布と $(\gamma_{Cmax} - \gamma_{Tmax})$ の分布を図 3-11 に示したが、両者は良く一致している。

刃先前後の等色線縞次数の最大値を $N_{C.m}$, $N_{T.m}$, 残留等色線縞次数を $N_{R.m}$ とすると、刃先前後での弾性回復量はほぼ等しいので、 $N_{C.m} - N_{T.m} = N_{R.m}$ となる。

図 3-8 , 図 3-9の等色線および特性図より, 被削材加工面からの深さ 1 mmの位置の点では, 切削によって受けるひずみ変化のために, 刃先の前後の等色線の最大値が $N_{c.m} = 4.0$ および $N_{r.m} = 2.1$ であるから, 残留する等色線は $N_{r.m} = N_{c.m} - N_{r.m} = 4.0 - 2.1 = 1.9$ となる。従って, この位置に残留する最大せん断ひずみ $\gamma_{r.max}$ の値は 3.1×10^{-2} となり, 定量的に求められる。また, この値は残留等色線から直接求めることもできる。

3・3・2 切削加工硬化材の切削

次に, 切削によって表面近くが加工硬化した材料, すなわち切削面で最大となるような勾配分布のひずみが残留している被削材を, 無ひずみ材と同一条件で切削した場合の, 切削中および切削後に残留した等色線を図 3-12 に示す。一般の切削加工の際に, 1回の切り込み作業で仕上げることは殆どなく, 切削を繰り返すことによって所要の寸法形状に到達することが多い。最終の仕上げ工程においても通常は重複切削が行われる。前加工と同じ切り込み量で重複切削するときの被削材の切削ひずみ状態を図 3-12に示す。この手順は, 図 2-9 の Case C の方法である。

図 3-12より, 前加工の切り込み量を越えない範囲で重複切削するときの切削ひずみ状態は, 無ひずみ材の場合の初回切削の結果(図 3-2)とは明らかに異なっており, むしろ弾性切削状態に近いことがわかる。ただし, 縞の勾配については弾性材と異なっている。

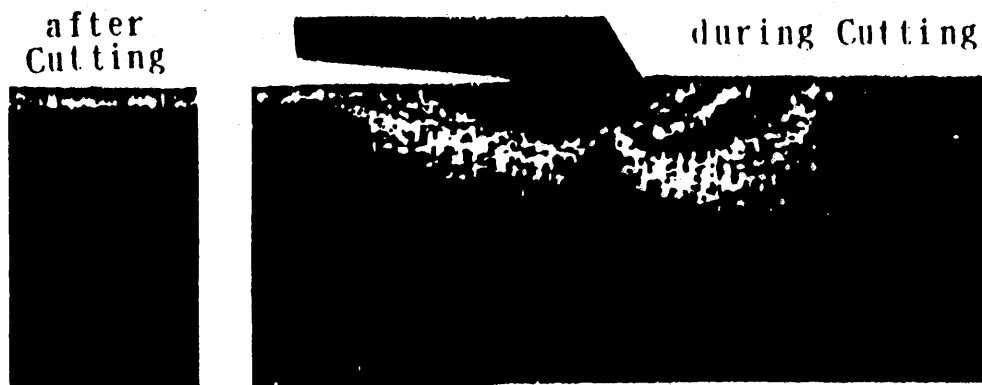


図 3-12 重複切削中および切削後残留等色線 (Case C)

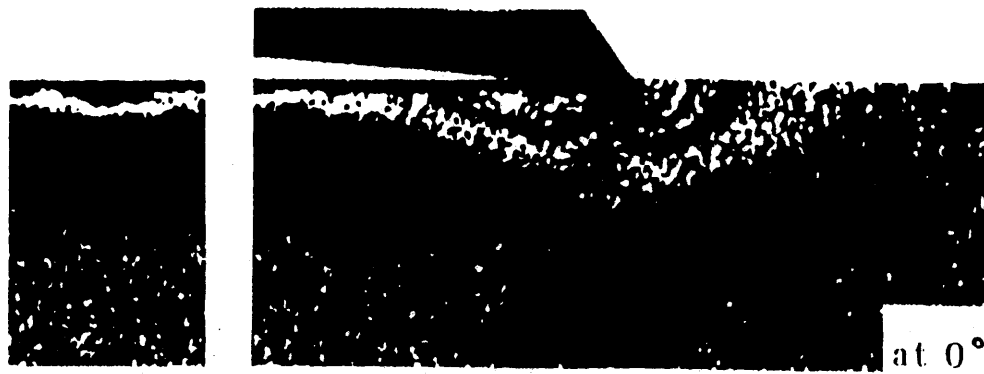


図 3-13 加工硬化材切削中および切削後に残留する等色線 (Case D, 0°)



図 3-14 加工硬化材切削中および切削後に残留する等色線 (Case D, 45°)

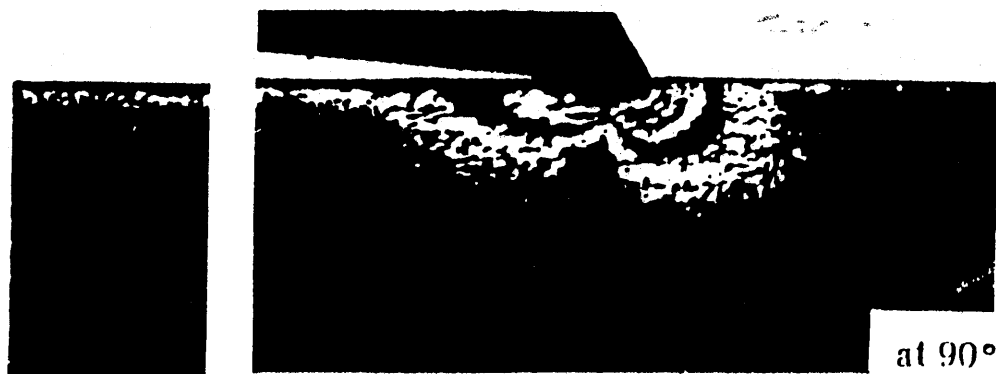


図 3-15 加工硬化材切削中および切削後に残留する等色線 (Case D, 90°)

この時の切削後に残留する等色線より明らかなように、重複切削の際に後加工によって増加する新たな残留ひずみは、無ひずみ材の初回切削の場合に比べてごくわずかである。

3・3・3 一様な加工硬化材の切削

図 3-13, 図 3-14, 図 3-15 には、一様に加工硬化した材料として単軸引張り20%のひずみ硬化材 (図 2-5) から取り出した引張り軸方向に対し 0° , 45° , 90° 方向に切削面がある被削材を用いて、それぞれを切削したときの切削中および切削後の残留等色線を示す。板取り方向によって多少分布形状の差はあるが、上述の重複切削による加工硬化材と同様に、無ひずみ材切削時と比較すると弾性的な編であることがわかる。

0° 方向に切削する場合が重複切削時に類似した分布となっており、 45° は最も円形分布に近い結果が得られた。

しかし、無ひずみ材と比較すれば、方向性を持つひずみ硬化材の場合の等色線編の形状はいびつである。従って、加工硬化度が大きい材料についてひずみを定量的に求める場合には、材料の方向特性をも考慮する必要があると思われる。

3・3・2の切削加工硬化材と同様に、20%ひずみ硬化材をいずれの方向に切削しても残留する等色線はわずかである。このような加工硬化材を切削したときの被削材内のひずみ挙動を図 3-16 の特性図によって説明すると、加工硬化した材料は皮膜接着以前にあらかじめAEのひずみを持つ材料であるから、この材料に皮膜を接着した後に切削すると、切削によるひずみは刃先の前方の圧縮領域でEFG, 後方の引っ張り領域でGHIのひずみ変化の経過をたどる。その結果、新たに残留するひずみは図 3-16 のEIとなり、ひずみ増分はごくわずかな値となる。

このことは、図 3-12 ~ 図 3-15 に示した等色線による結果と一致する。また、更に同一条件で重複切削を繰り返す場合の被削材内のひずみ挙動は、図 3-16 特性図中に二点鎖線で示したようにIJKLMのひずみサイクルを繰り返すことになる。

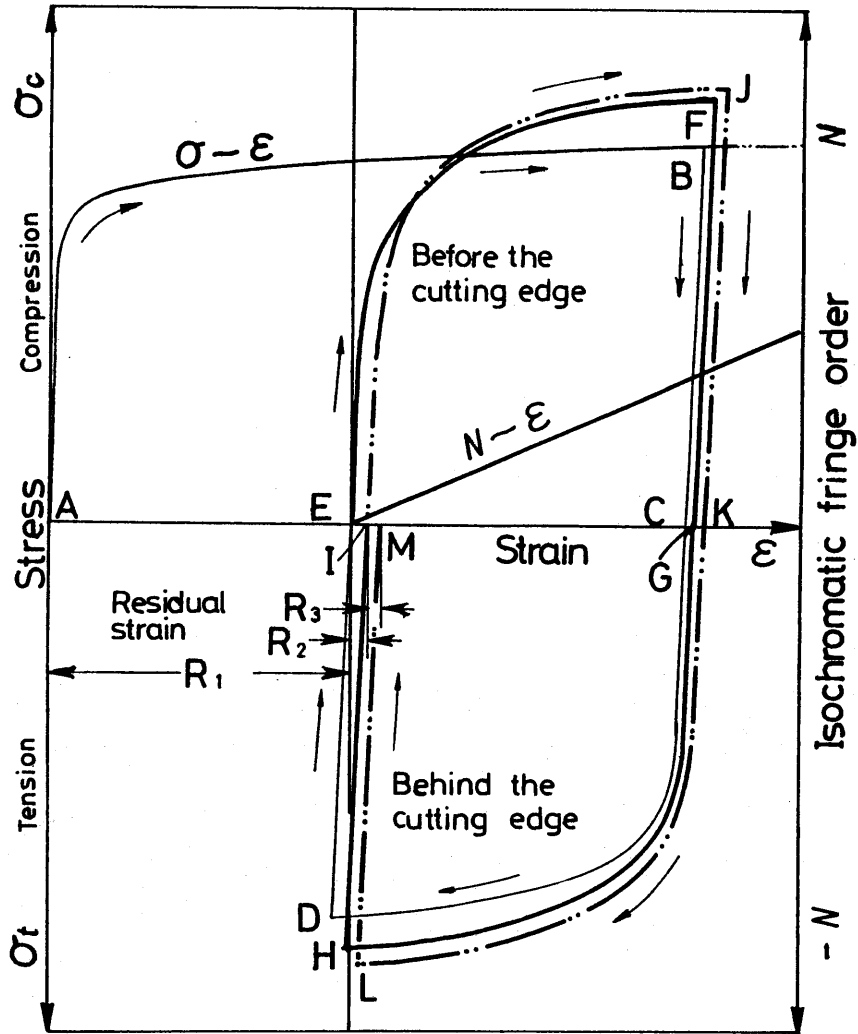


図 3-16 加工硬化材の切削ひずみ挙動

第3・4節 結 言

光弾性皮膜法を用いてアルミ材の二次元切削における被削材ひずみを可視化することによって、切削中の被削材に生ずるある瞬間の刃先より前方での切削ひずみ分布と、刃先より後方で生ずる残留成分を含まないひずみ分布および切削後の残留ひずみ分布についてそれぞれ分離し、つぎのことが明らかとなった。

- (1) 延性材切削中の被削材の切削ひずみ生成残留機構について明らかにし、切削後に残留するひずみの値を定量的に求めることが出来た。
- (2) 加工硬化材を切削する場合の被削材に生ずるひずみ挙動についても同様にひずみ生成残留機構により説明できることを明らかにした。ひずみ硬化材の切削の際に生ずるひずみは無ひずみ延性材の場合に比べて弾性的挙動を示すことがわかった。
- (3) 切削加工による加工硬化材の場合も一様にひずみ硬化した被削材と同様の傾向を示す。

第4章 重複切削

第4・1節 緒言

3・3・2で触れたように、実際の生産現場で行われる切削加工では、無ひずみ材を一度の切削によって最終的な仕上げ状態にまで到達させるようなことは稀である。

通常は、粗削り、中間仕上げ、最終仕上げ加工のように、いくつかの工程を重ねることが行われる。勿論、加工によるひずみが問題となるような厳密な仕上げが求められる製品を切削加工する場合には、一般に、最終仕上げ加工工程の前工程として、仕上げ前工程までに生じた加工応力を除去するための焼鈍、場合によっては完全なましが行われる。

このとき、焼きなまし処理後の仕上げ工程における最初の切削加工は、無ひずみ材の切削となるが、この場合でも所要の寸法形状に至るまでに、目標値との寸法差が許容範囲内に納まるように、切り込み量を段階的に減少させて切削を繰り返すことになる。

したがって、3章で述べた重複切削のひずみサイクルを考慮した加工、言い換えれば、加工履歴を踏まえた切削加工法は、工作物に最終的に残留するひずみを最少化するという目的にアプローチするための重要な手がかりの一つであると思われる。

ところが、繰り返して切削することが、切削抵抗やせん断角などの切削での諸現象にどのような影響をおよぼすかという基本的な問題についても、未だ明らかでないことが多い。

そこで、4章では切削あるいはバニシ加工によって、切削面が最大となるひずみ勾配が生じているアルミニウム材を被削材とし、加工硬化部の繰り返し切削を行い、重複切削による加工履歴が切削の諸現象におよぼす影響について調べた結果を述べる。

ここで、切削だけでなくバニシ加工による実験を併せて行った目的は、3章で述べた加工硬化材切削による結果から、バニシ加工との組み合わせを行うことによって、最終的な残留ひずみの低減に結びつく可能性を検討するためである。焼きなました延性材は変形しやすく、ある意味では難削材とも言える。しかし、適度な加工硬化を加えることにより被削性を向上させることができれば、結果としてのひずみ軽減に結びつくと考えられる。

第4・2節 重複切削およびバニシ加工方法

以下では、無ひずみ材を最初に切削することを初回切削と呼ぶ。また、一旦、無ひずみ材を切削すると3章で述べたように、加工面が最大となるひずみ勾配が生ずる。これを切削加工硬化と呼び、この初回切削による切削加工硬化面を初回切削と同一方向に再度繰り返して切削することを重複切削と呼ぶことにする。さらに、繰り返しを重ねる場合を順に、2回目重複切削、3回目重複切削……とする。益子らの反転切削¹⁹⁾では切削を繰り返す際に、その都度、切削方向を逆にすることにより残留ひずみが減少するとしている。しかし、この方法では見かけ上のひずみは減少するが、実質的には往復のひずみが重なっていることから、切削加工硬化の軽減に対する直接的効果は望めない。初回切削と重複切削あるいは反転切削での切削諸現象の差異に注目する必要がある。

説明に用いる記号の添字について、たとえば切削速度では V_0 、 V_1 などの0は初回切削、1は1回目重複切削での速度を表す。二次元切削の説明で一般に用いられるせん断角 ϕ は、初回切削の場合、切削比 r_c および $\phi = \tan^{-1}[r_c \cos \alpha_0 / (1 - r_c \sin \alpha_0)]$ から求めた。

このときの切り屑厚さはマイクロメータにより測定した。その際には、アンビル・切り屑間の接触を顕微鏡を用いて観察し、測定圧によって切り屑が変形しないように注意した。切削速度 V_0 、 V_1 には毎分0.5、 4×10^2 、 2.5×10^3 、 5×10^3 、 1×10^4 [mm]を用いた。

その他の切削実験条件および被削材、実験装置は、3章で用いたものと同一とした。

バニシ加工に用いたバニシ工具について図4-1に示す。同図Aの詳細に示すバニシ部分には、直径0.38、0.57、0.97 [mm]の縫い針を先端に溝加工したホルダーに瞬間接着材で固定した。また、バニシ工具の直後にはSKH4の切削工具を固定し、バニシニードルの先端と切れ刃刃先との差 t_1 を切れ刃による切り込み量とした。バニシニードル自身の押し込み量は、光弾性皮膜法の観察からSKH4による切り込み0.1 [mm]での被削材ひずみの値以下になるように設定した。用いたニードルの押し込み量は、0.03 [mm]以下であるから、切り込み t_1 には押し込み後の弾性回復量は考慮していない。

切削工具のすくい角 α_0 、 α_1 は 30° とし、一部で比較のため $\alpha_0 = 90^\circ$ を用いた。

切削はすべて乾式で行った。切り込み量は0.005~0.1 [mm]とし、切削抵抗の測定には工具ホルダーに設置した工具動力計(図2-3)を製作し使用した。

被削材ひずみは図4-2に示す光弾性皮膜法により求めた。

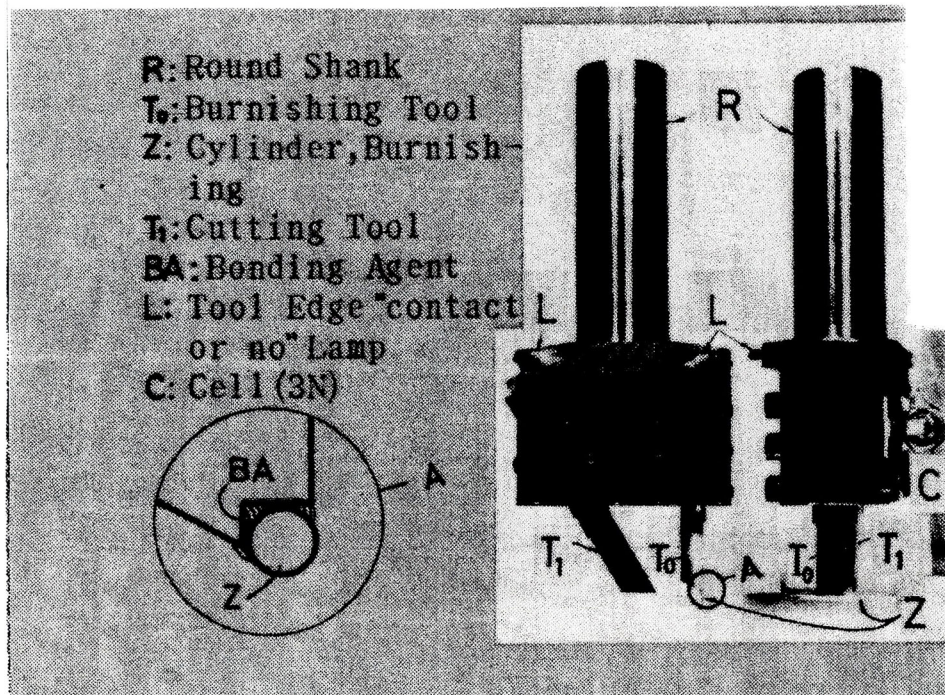


図4-1 バニシ工具

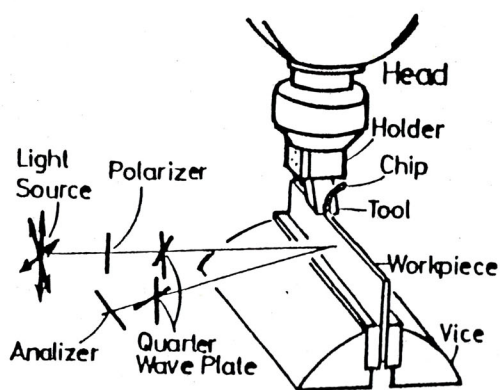


図4-2 光弾性皮膜法

第4・3節 実験結果および考察

4・3・1 切り屑形状

図4-3には、無ひずみ材の初回切削および重複切削したとき得られた切り屑写真の一例を、 $V_0 = 2.5 \times 10^3$ [mm/min], $V_1 = 400$ [mm/min]の場合について示す。同図において、 t_0 が無ひずみ材を用いた初回切削での切り込み量である。 t_1 は初回切削した材料を重複切削したときの切り込み量である。したがって、 $t_0 = 0$ の欄に示すのは無ひずみ材初回切削での切り屑をあらわしている。

実験に用いた被削材はアルミニウム材で、切削長さはすべて100 [mm]である。図4-3よりわかるように無ひずみ材初回切削では、切り込み量が増加すると切り屑長さはやや増す傾向にあるが、その差はすくない。これは、切り込み量がいわゆるせん断角におよぼす影響は、それほど大きくないことを意味している。このときの切り屑形状は、断面中央にやや盛り上がりがあり、背面には間欠的なすべりに似た微細な凸凹が見受けられる。

同図より、無ひずみ材の初回切削に比べて、重複切削したときの切り屑はいずれも長くなっていることは明らかである。このことは、初回切削での切り込み量 t_0 が大きいほど、また重複切削での切り込み量 t_1 が小さいほど顕著に現れている。

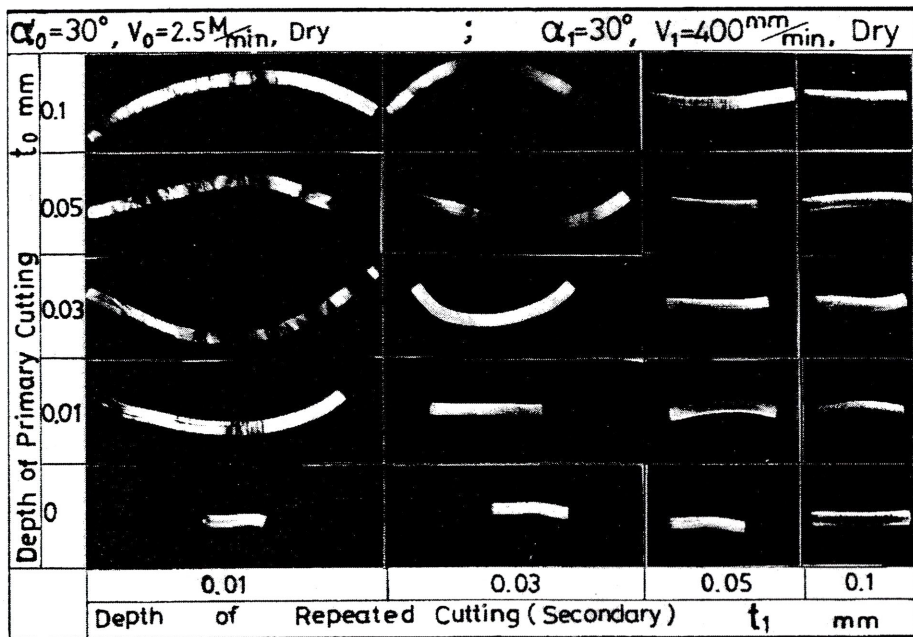


図4-3 初回切削および重複切削時の切り屑

この場合の長い切り屑は、初回切削時の短い切り屑と外見的にも違っており、厚さは薄く一様な連続型である。いわゆるせん断角が大きくなっていると考えられる。また、重複切削において、初回切削の切り込み量を越えた切り込みを与えると、切り屑長さは急に減少して、初回切削状態に近くなることが窺える。このように切り屑状態から判断すると、初回切削での切り込み深さを越えない範囲で重複切削を行えば、被削性がかなり向上すると思われる。

このことは、3章で述べたように延性材では、切削による加工硬化が著しいが、さらに繰り返して切削すると、ひずみ硬化層を切削するから初回切削とは異なって、切削ひずみがより弾性的挙動を示すことを裏付けている。

重複切削での残留ひずみの増分は少ないことに着目すると、前加工による加工変質度合と後加工による切り込み深さを最適に選択することによって最終的に残留するひずみを少なくできる可能性を示している。

4・3・2 せん断角の変化

図4-4~7には、重複切削での切り込み量 t_1 と、無ひずみ材初回切削での切り込み量 t_0 および重複切削時のせん断角 ϕ_1 の関係を示す。図4-4, 5, 6では、それぞれ $V_0 = 4 \times 10^2, 2.5 \times 10^3, 1 \times 10^4$ [mm/min] , V_1 は共に 4×10^2 [mm/min] の場合である。これらの図において、無ひずみ材初回切削でのせん断角 ϕ_0 については $t_0 = 0$ の位置に示した。

図4-4, 5, 6からわかるように、いずれの切削速度の場合でも、重複切削の際に、初回切削時の切り込み量より小さな切り込み深さで切削すると、せん断角が大きくなっており、被削性が改善されている。また、無ひずみ材の初回切削時の切削速度 V_0 が大きいほどせん断角の最大値も上昇しているが、せん断角増大効果の認められる範囲は逆に狭くなっている。初回切削で用いる切削速度は高い方が重複切削での被削性改善の点で有利であるが、効果のある切り込み深さ範囲は狭いことになる。

図4-7には無ひずみ材初回切削の際にすくい角 $\alpha_0 = 0^\circ$ の工具を用い、 $t_0 = 0.03$ [mm] の場合について得られた結果を破線で示す。重複切削では $\alpha_0 = 30^\circ$ を用いた。 0° のすくいの工具で初回切削した時の方が 30° の場合よりもせん断角は大きい結果となっているが、その差はそれほど大きくない。

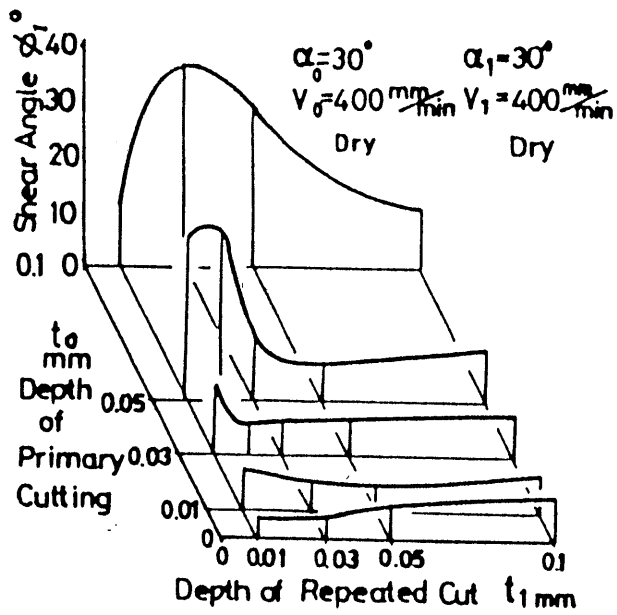


図4-4 t_0 , t_1 と ϕ_1 の関係

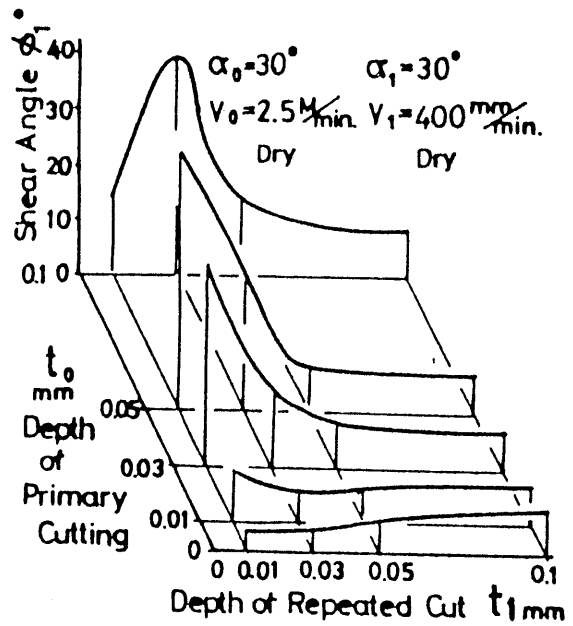


図4-5 t_0 , t_1 と ϕ_1 の関係

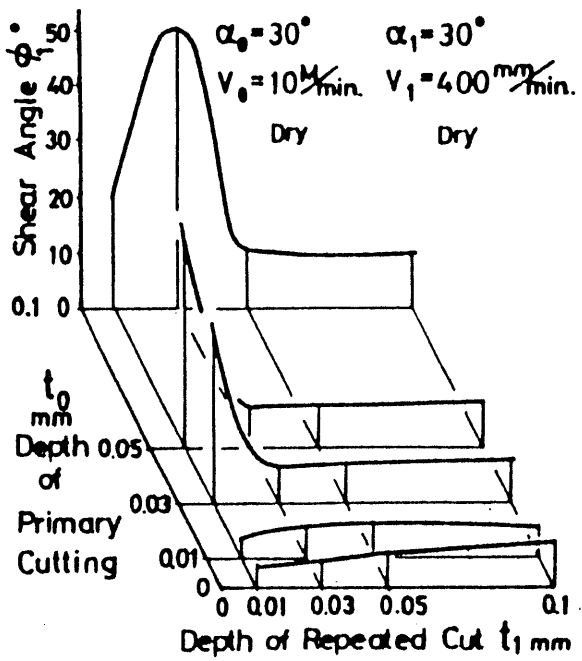


図4-6 t_0 , t_1 と ϕ_1 の関係

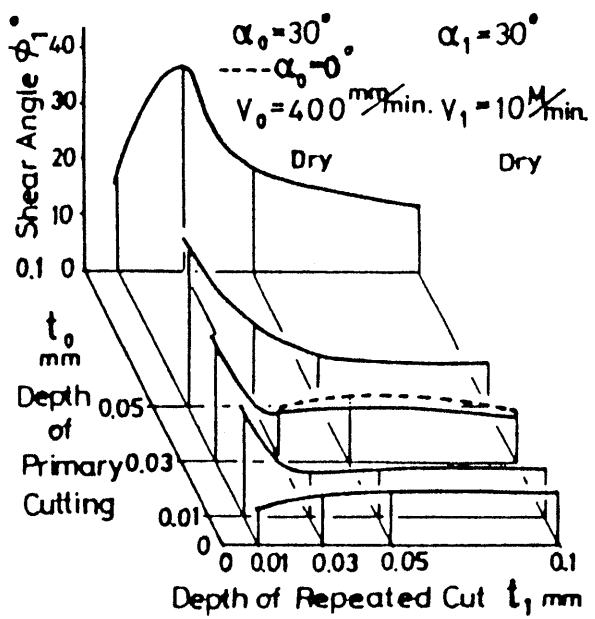


図4-7 t_0 , t_1 と ϕ_1 の関係

図4-8には、無ひずみ材を初回切削したときの切削速度 V_0 とせん断角 ϕ_0 の関係を示す。同図からわかるように、いずれの切り込み深さにおいても高い速度でのせん断角は大きくなっているが、速度比にくらべてせん断角増加の割合は少ない。初回切削の時よりも、それを重複切削する時に高い速度の選択によるせん断角増加の効果が望める。

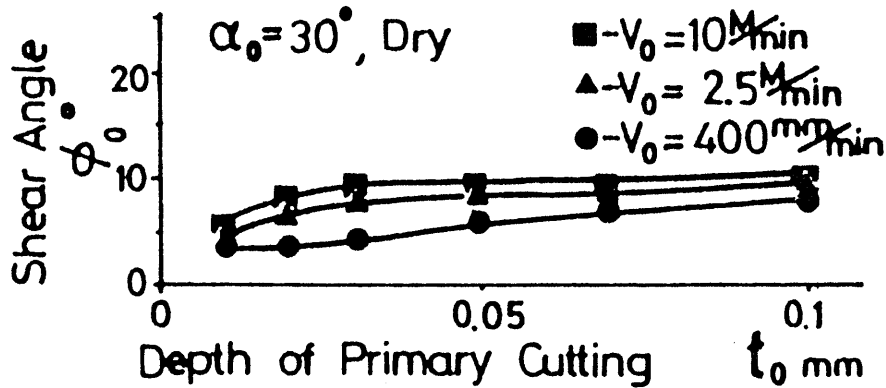


図4-8 初回切削時の切削速度とせん断角の関係

図4-9にはバニシ工具を用いて、無ひずみ材をバニシ加工した後に、 30° ずくい角の工具で切削したときの、切り込み量 t_1 およびバニシ深さ t_{b0} とせん断角 ϕ_1 の関係を切削速度 V_0 、 $V_1 = 4 \times 10^2$ [mm/min]について示した。同図では同一条件での t_{b0} 、 t_1 、 ϕ_1 の関係も同時に実線で示す。

同図よりわかるように、重複切削での切り込み量 t_1 が深い場合にはバニシ加工の方がせん断角は大きくなっている。しかし、 t_1 が浅い場合には、切削工具による切削加工硬化部を重複切削することによる ϕ_1 の改善効果は大きい。本実験の範囲では、 $t_1 = 0.02$ [mm]を境にして切り込み深さを大きく取る場合にはバニシの方が有利と言える。

この結果は、刃物による切削の場合と円筒・平面の固体接触とはひずみ生成メカニズムが異なり、接触によって生ずる材料内部の最大せん断応力は接触点の少し内側に生ずるためであると思われる。

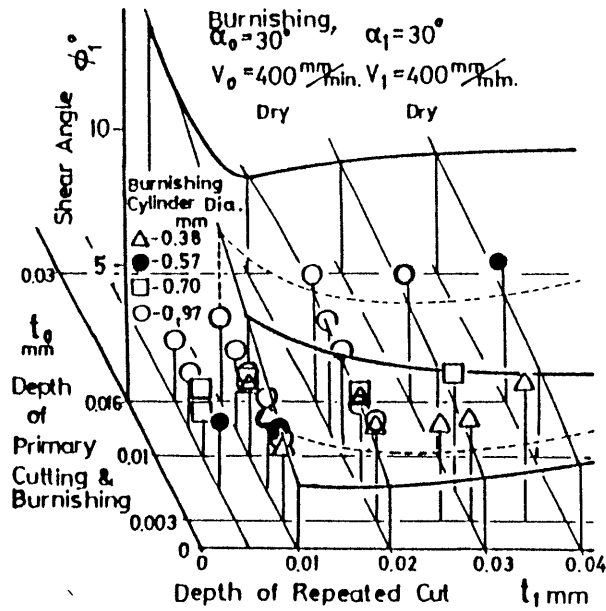


図4-9 t_1 , t_0 , t_{b0} と ϕ_1 の関係

4・3・3 切削抵抗

図4-10には切り込み量 t_0 、 t_1 と切削抵抗の関係を示す。切削の繰り返し回数をパラメータとして表した。同図において、実線は無ひずみ材を用いた初回切削の場合の切削抵抗値を示し、破線は5回繰り返して重複切削した時のほぼ平均値に相当する切削抵抗を示す。

同図より、明らかに初回切削での切削抵抗が重複切削の場合に比べて、いずれの切り込み深さにおいても低くなっていることがわかる。また、重複切削においては、繰り返し回数を重ねるとやや切削抵抗が増加する傾向にあるように見受けられるが明確ではない。繰り返し切削したときのそれぞれの切削抵抗値相互の差は少ない。

これらのことは、3章で述べたように、図4-11に示す加工硬化材切削ひずみ挙動による結果と良く符合する。

延性材切削の場合に、被削材に生ずるひずみは初回切削によるものが支配的であり、その後の重複切削での増分が少ないことを考慮すると、最終的な残留ひずみの軽減のためには特に初回切削の切り込み深さに注意する必要がある。

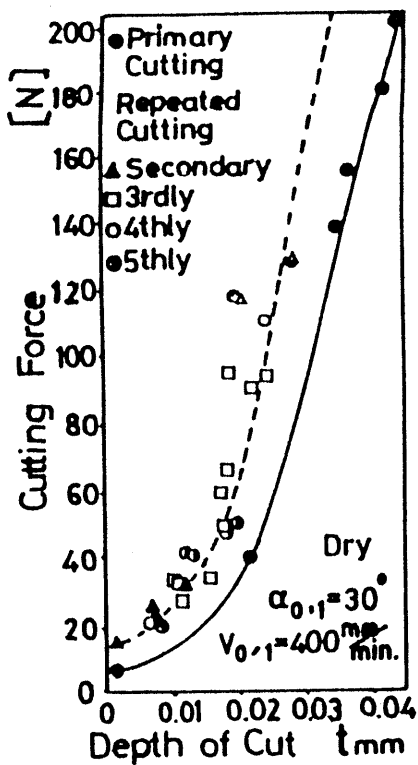


図4-12 t_0, t_1 と切削抵抗

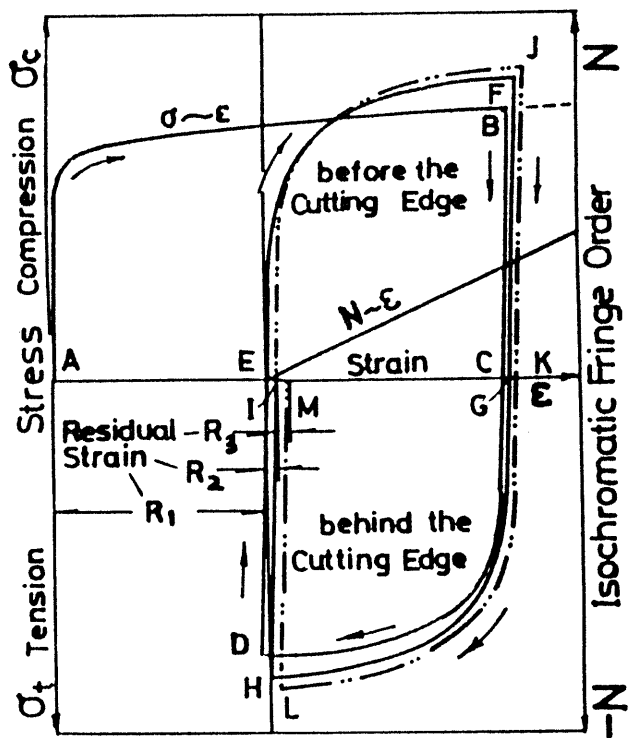


図4-13 延性材切削ひずみ挙動

4・3・4 切削ひずみ

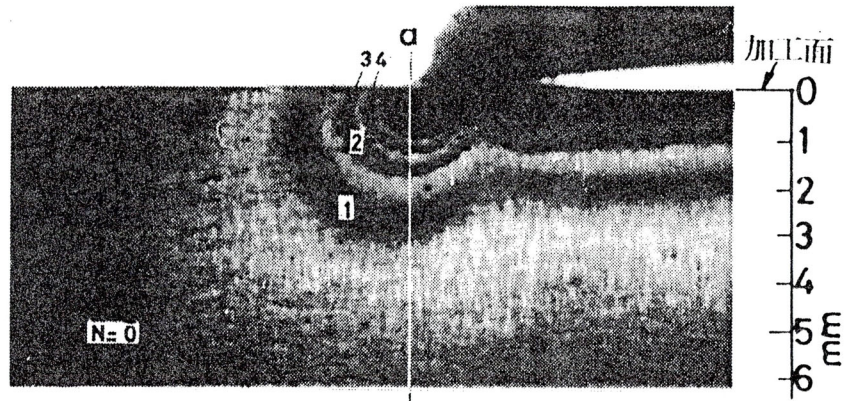
図4-14には被削材接着皮膜の等色線を示す。同図において(a)は無ひずみ材を用いて初回切削中の等色線, (b)は初回切削後の残留等色線である。(c)は初回と同一条件を用いて繰り返し切削中の等色線, (d)は繰り返し切削後の残留等色線を示した。

図4-15には、切削面に直角な断面上の切削による最大せん断ひずみ分布を図4-14の等色線と編字数~ひずみ関係特性より求めた結果について示す。図4-15において、断面位置a, b, c, dは図4-14に表した位置である。

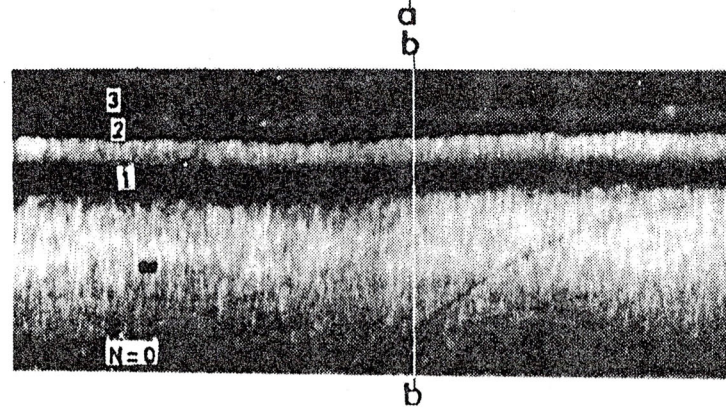
図4-15よりわかるように、無ひずみ材の初回切削で生じた刃先の前方位置での圧縮によるひずみ(a)は、刃先後方の引張り作用で減少し、(b)に示す残留ひずみ分布となる。

この状態の被削材を繰り返し切削する時のひずみ(c)は初回切削での(a)よりも少なくなっている。(c)に示すように、重複切削による残留ひずみの増分はわずかであることがこれらの結果から明らかである。

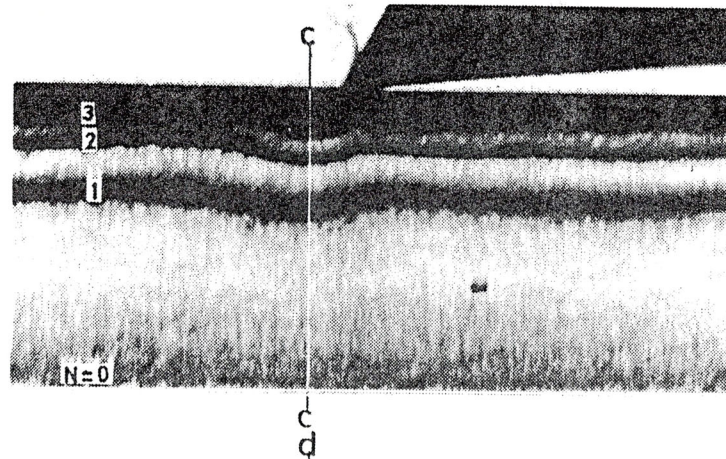
(a) 初回切削中の等色線



(b) 初回切削後の残留等色線



(c) 重複切削中の等色線



(d) 重複切削後の残留等色線

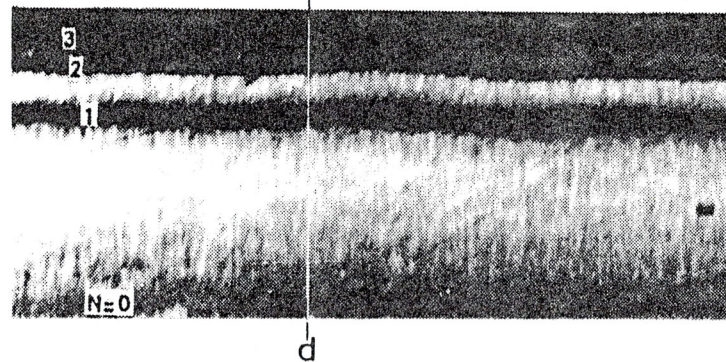


図4-14 初回切削および重複切削における等色線

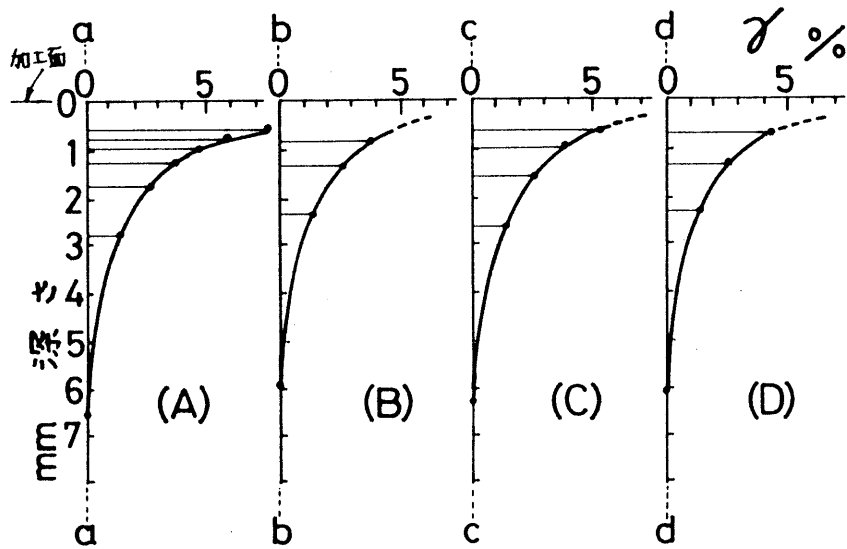


図4-15 切削面に直角な断面上のひずみ分布

第4・4節 結 言

アルミニウム材の無ひずみ状態と切削加工硬化状態およびバニシ硬化材について二次元切削実験を行い、繰り返し加工による履歴が切削現象におよぼす影響について次のことが明らかになった。

- (1) 無ひずみ材初回切削ではせん断型の短く厚い切り屑であるが重複切削を行うと長く薄い連続型の切り屑が生成する。重複切削切り込み量が少ないほど顕著となる。
- (2) せん断角は重複切削によって増大する。重複切削で初回切削切り込み量以上切り込むとその効果は消える。
- (3) 初回切削時の切削速度は高い程、せん断角は増加するが、その効果は重複切削において大きくあらわれる。
- (4) 切削抵抗は初回切削時には低く、重複切削すれば高くなる。
- (5) 重複切削による残留ひずみの増加はわずかである。
- (6) これらの切削現象は3章の延性材切削ひずみ挙動を裏付けている。

第5章 光弾性皮膜法によるアルミニウム被削材端面近傍のひずみ挙動解析

第5・1節 緒言

近年、機械部品に用いられる材料に対して高品位加工が求められている。切削などの除去加工に対しても幾何学的精度の向上のためには、加工による残留応力やひずみの挙動について、仕上げ面近傍だけでなく広範囲に把握することが必要である。切削によって被削材に生ずる応力やひずみのアンバランスは、加工時のみならず時間の経過によって形状精度や表面性状に変化をもたらす。その原因となる切り屑生成や刃先のごく近傍の現象については多くの研究^{2,9)} がなされているが、延性材などを切削する際の広範囲におよぶひずみの生成とその残留機構に関してはまだ不明な点も多い。そこで、ひずみの影響が出やすい材料などを用いる際にはその影響を最小化できる加工法を見いだすことが望まれている。これらを解析する一つの方法として、著者らは光弾性皮膜法を用いて切削中の被削材全域のひずみを可視化し、しかも連続的に観察しながら定量的に求める方法について提案^{2,1)} した。

本文でも光弾性皮膜法を用いて、二次元切削中のアルミニウム被削材内部に生ずるひずみ、および切削後に残留するひずみの挙動を調べ、自由端面の影響について検討した。

また、切削中の延性被削材に生ずる塑性域でのひずみ挙動は、残留成分を含まない切削瞬間のひずみの方向や分布により知ることができる。それらは刃先のごく近傍およびひずみ勾配を除くと弾性応力釣り合い状態と定性的には同じである。そこで、この研究では光弾性皮膜法による実験結果に加えて、弾性FEM近似解による被削材の応力分布の解析を行い、問題点が多いと思われる切削終了端面近くのひずみ分布挙動について検討した。

光弾性皮膜法で、移動する刃先のそれぞれの位置における被削材内部の応力成分を分離し、その釣り合いを求めることは煩雑な上に高い精度が望めない。そこで、本論文では皮膜法による結果をFEM弾性解により補って考察した。

さらに、加工後に同一形状を確保できる範囲内で、自由端面の影響を少なくできる被削材端面の形状についても検討した。

第5・2節 被削材形状

被削材はJIS 1070, 厚さ3 [mm], アルミニウム材の同一ロットの帯板材を使用した。

アルミニウム材の化学成分, 機械試験および検査結果については表2-1に示した通りである。実験にはこの板材から切り出した後, 所要形状に加工し, 熱処理を行った。その詳細については2.1で説明した方法を用いた。

実験に用いた被削材の形状を図5-1に示す。同図において, T_1 は切削の開始位置および終了位置に自由端があり, 自由端面の存在とその形状が周囲の被削材のひずみ分布におよぼす影響について検討できるように, 詳細Fに示す5種類の端部形状とした。そのいずれもが, 切削後には直角な端面となるように, 切り込み深さの範囲内で形状を変化させた。 T_2 は, 切削開始時および終了時の切削ひずみ分布に自由端が影響をあた得ない形状であり, 切削開始時の刃先より後方および終了時の刃先より前方の被削材がそれぞれ半無限板として扱えるように, 溝の内側を切削範囲とした被削材である。

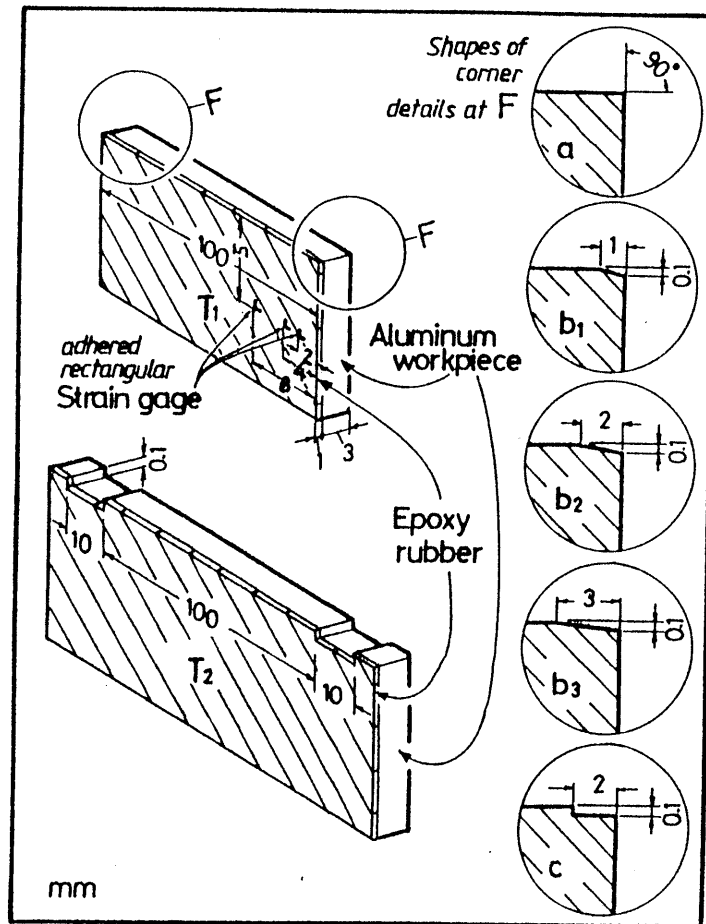


図5-1 被削材形状

第5・3節 実験結果および考察

5・3・1 自由端面間の切削ひずみ

直角な自由端面で切削を開始し、終了する被削材，図5-1のT₁(a)を切削中の等色線を図5-2に示す。そのときの切削後の被削材接着皮膜に残留する等色線を図5-3に示す。図5-2，図5-3より明らかなように，直角な自由端面間を二次元切削する場合の切削ひずみおよび残留ひずみは一様に分布していないことがわかる。

この残留等色線の形態について図5-4に示す。図5-4において，Bは切削開始位置から約10mmまでの領域であり，開始位置から徐々に切削ひずみの影響範囲が増加するひずみ漸増域を示している。これに続いてCの領域では，ひずみの深さ方向断面上の分布が安定して一定となる定常域である。最後に，切削終了端面近くでひずみ急増域Dが生じている。

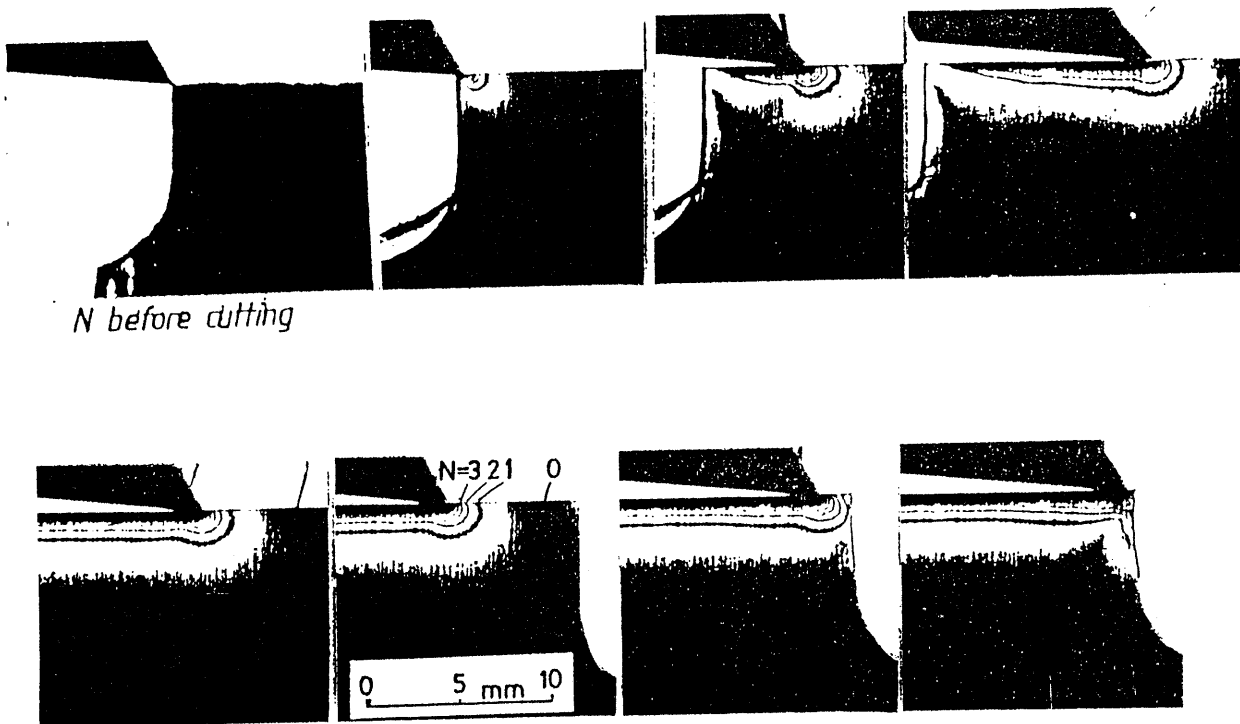


図5-2 自由端面間を切削中の等色線〔被削材T₁(a)〕

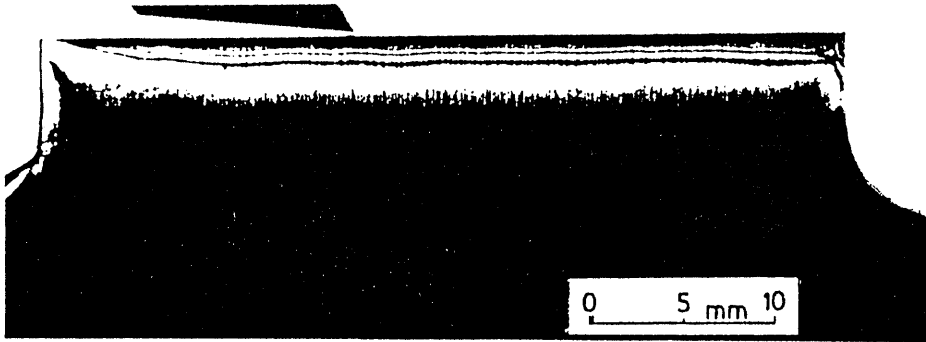


図5-3 切削後の残留等色線〔被削材T₁(a)〕

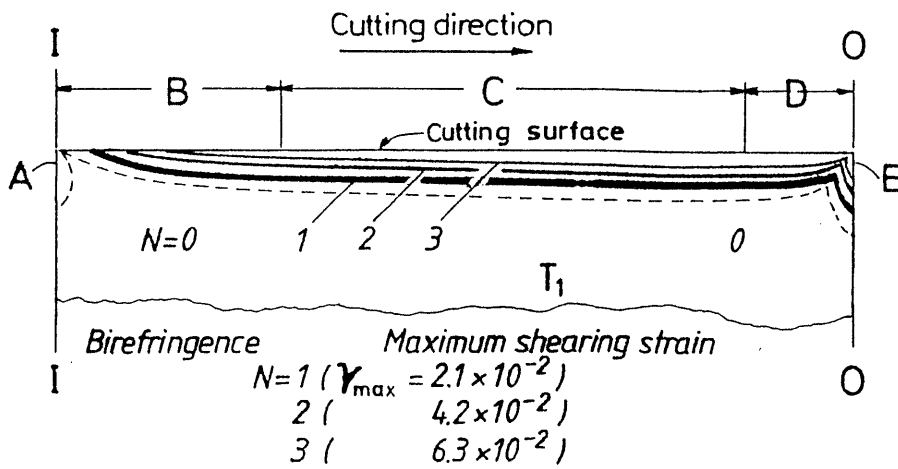


図5-4 自由端面間切削後の残留ひずみ分布の形態〔T₁(a)〕

5・3・2 半無限板の切削ひずみ

自由端面間を切削すると、領域B、Dでは切削開始側自由端および終了側自由端の影響を受けることが考えられる。したがって、自由端の影響を受けない切削ひずみ分布を得るために図5-1、 T_2 に示す形状の被削材を用いて切削実験を行った。

被削材 T_2 では、あらかじめ両側に切り込み深さの溝があり、溝の内側を切削範囲とするために、切削開始および終了時の切削ひずみは自由端の影響を受けず、半無限板の中途から切削を開始し終了する場合に相当するひずみ分布が得られる。このようにして求めた半無限板切削後の残留ひずみ分布の形態を図5-5に示す。同図よりわかるように、切削開始位置近くでのひずみ漸増領域 B' は自由端から切削を開始する場合の図5-4、 B とほとんど変わらない。したがって、ひずみ漸増現象は自由端の影響ではないことがわかる。これ続く C' も当然、自由端の影響を受けていない。しかし、自由端面間を切削するときの切削終了点近くで現れるひずみ急増域、図5-4、 D に相当する図5-5、 D' ではひずみ分布の様子が異なっている。切削終了端近傍でのひずみ分布は明らかに自由端面の影響を受けていることがわかる。

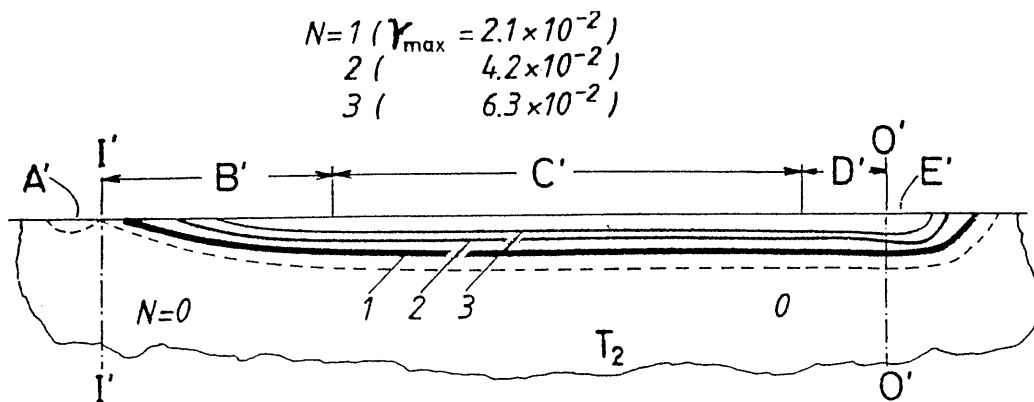


図5-5 半無限板切削後の残留ひずみ分布の形態〔 T_2 〕

5・3・3 定常域での切削ひずみ分布

3・2・1で述べたように、被削材を二次元切削するとき生ずる残留成分を含まない切削瞬間の主ひずみの方向は放射状分布であり、刃先より前方の被削材には圧縮応力が、後方には引っ張り応力が作用している。その結果、図5-6に示すように刃先の前後で最大せん断ひずみの方向は逆転する。

従って、光弾性法を用いて延性材定常域切削中に観察される被削材接着皮膜の等色線縞は図5-7に示す形状となる。すなわち、刃先前方に生ずる刃先点方向の単軸圧縮による縞が刃先で最も次数の高い同心円状分布となるが、刃先直下の中立軸以降で逆に刃先点方向の単軸引っ張り作用を受けて次数が減少し、刃先の通過後には加工面に平行な縞の分布として残留する。このようにして得られた等色線は被削材の最大せん断ひずみをあらわしており、これより切削ひずみ分布を知ることができる。

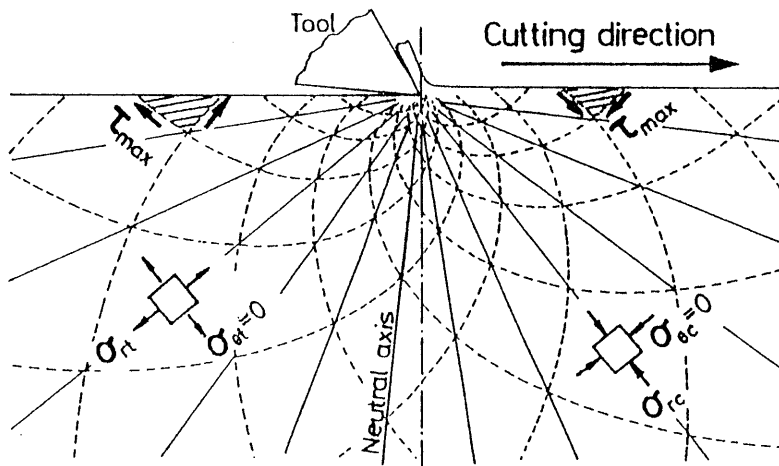


図 5-6 主ひずみおよび最大せん断ひずみ線図 (切削瞬間)

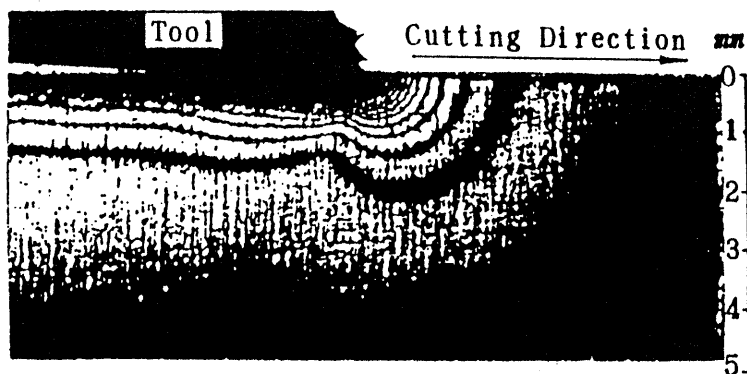


図 5-7 延性材切削中の等色線

5・3・4 FEM解による考察

定常域を切削中の残留成分を含まない切削瞬間の等色線，図5-8は3・3・1で述べた方法，切削途中で急停止を行い，皮膜接着後に停止位置から切削を再開した直後の等色線より得られる。

一方，刃先のごく近傍を除いたマクロ的な領域において，残留成分を含まない切削瞬間のひずみ状態は弾性応力の場合と定性的に同じであると考えられる。そこで，2・3で示した条件で有限要素法による弾性解を求め，その結果えられた τ_{max} ， τ_{xy} ， σ_y についてそれぞれ図5-9，図5-10，図5-11に示す。図4-12には，まっすぐな自由境界の任意の点に厚さ方向に一樣な集中力が作用するときの弾性釣り合いモデルを示す。

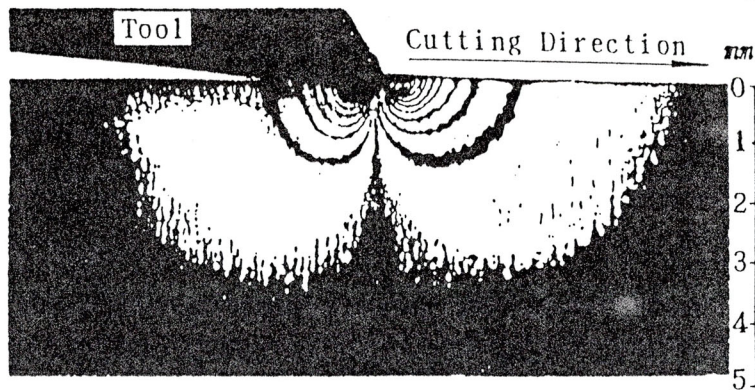


図5-8 残留成分を含まない切削瞬間の被削材接着皮膜等色線

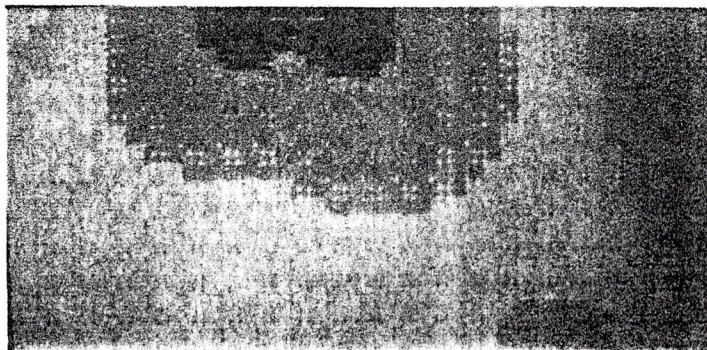


図5-9 FEM弾性解による τ_{max} 分布

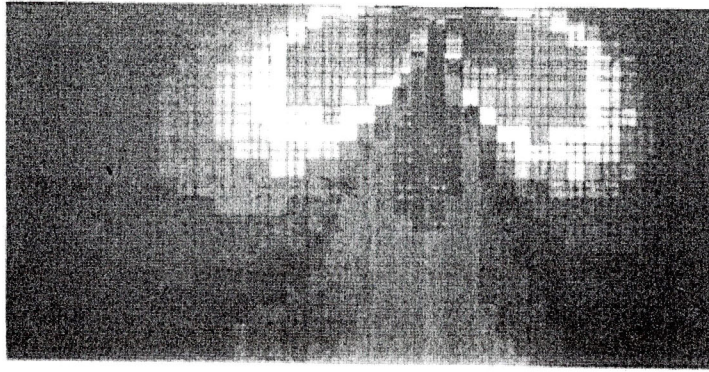


図5-10 FEM弾性解による τ_{xy} 分布

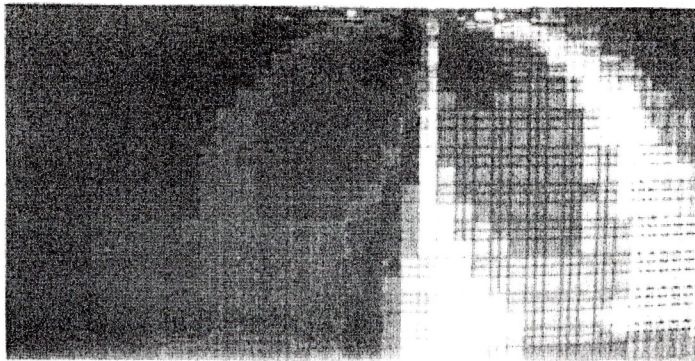


図5-11 FEM弾性解による σ_y 分布

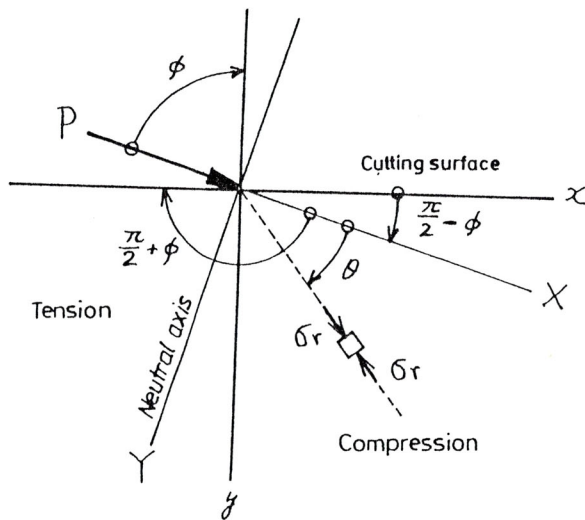
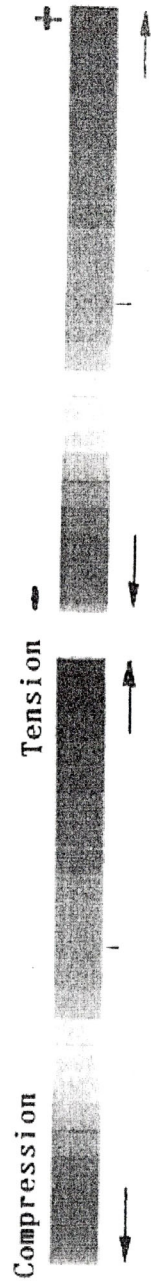


図5-12 弾性釣り合い状態

図5-8の等色線分布とFEMによる図5-9の τ_{max} 分布とは定性的に良く一致している。要素分割上の問題で刃先直下に生ずる範囲の狭い0次ニュートラルが図5-9では見えないが、分布形態は同じである。

弾性釣り合い状態の図5-12に示すように切削力の方向を ϕ とすると、極座標であらわした σ_r を用いて τ_{xy} 、 σ_y を求めると次のようになる。ここでPは単位厚さ当たりの切削力を示す。

$$\sigma_r = - (2 P \cos \theta) / \pi r \quad (5-1)$$

$$\tau_{xy} = (\sigma_r / 2) \sin(\pi - 2\phi + 2\theta) \quad (5-2)$$

$$\sigma_y = \sigma_r \sin^2[(\pi/2) - \phi + \theta] \quad (5-3)$$

σ_r は圧縮の場合を負にとるから、式(5-2)より切削面では $\theta = \phi \pm \pi/2$ であり $\tau_{xy} = 0$ となる。 $\theta = \phi$ 、 $\theta = \pi/2$ においても $\tau_{xy} = 0$ であり、 $\phi - \pi/2 < \theta < \phi$ および $\pi/2 < \theta < \phi + \pi/2$ では $\tau_{xy} < 0$ となり、 $\phi < \theta < \pi/2$ では $\tau_{xy} > 0$ である。

このことは図5-10に示す τ_{xy} の分布と完全に一致する。

また、 σ_y についても同様の検討を行うと、 $\theta = \pi/2$ および切削面で $\sigma_y = 0$ であり符合も一致する。これらの結果は、被削材が放射状応力状態であることを裏付けている。

5・3・5 切削開始位置近傍のひずみ分布

図5-13には切削開始位置近傍の切削中および残留の皮膜等色線を示す。刃先が被削材に食い込む以前では、無ひずみであるから皮膜接着皮膜は全域にわたり0次である。刃先が被削材に食いつき始めると、刃先より前方の被削材に圧縮領域の等色線があらわれるが、その範囲は狭い。刃先が進行するにつれて、圧縮領域は次第に広がり深くなる。しかし、引っ張り領域による縞の回復は比較的大きく、刃先直下にはニュートラル軸が明瞭に認められる。切削開始端面より約10mm程度離れるとこのひずみ漸増現象は安定し、5・3・3で述べた定常域へと移行する。

切削開始端面では、図5-4、II面A位置に、引っ張りによるひずみが残留しているが、その値は少ない。また、切削開始点に向かって0次の縞であるニュートラル軸がそのまま残留している。これらの切削開始位置で見られるひずみ漸増現象には切削開始側の自由端面が影響していることも考えられる。そこで、5・3・2で述べた半無限板切削後の残留ひずみ分布図5-5と自由端面間切削後の残留ひずみ分布図5-4について比較してみると、切削初期にひずみが漸増する現象は両者に同じくあらわれている。半無限板切削では自由端の影響を受けないことから、切削初期のひずみ漸増は自由端によるものではなく、切削開始時の刃先前方の圧縮ひずみ硬化領域形成途中の過渡的現象であると考えられる。

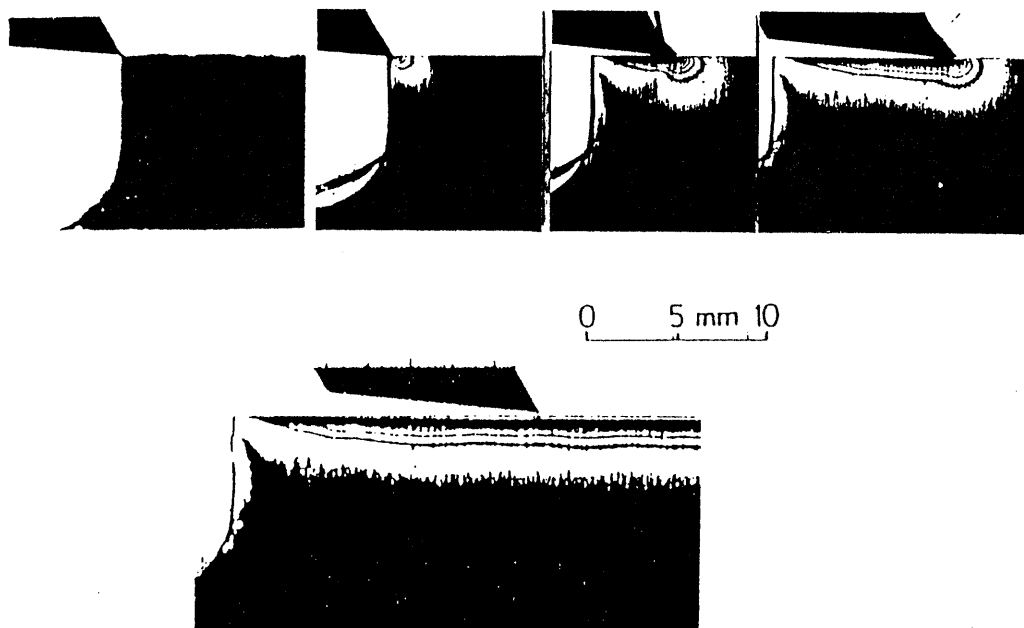


図5-13 切削開始位置近傍の等色線

切削開始側の自由端面に残留する引っ張りひずみ領域，図5-4に示すAは半無限板切削では図5-5に示すA'の位置に残留する。このときのニュートラル軸は，加工面には垂直にI'I'位置となる。

図5-14には，切削開始位置近傍の残留等傾線を示す。図5-14よりわかるように，切削開始位置の直下には，全く切削ひずみが生じない無ひずみ特異点が存在している。このゼロ特異点は，切削による影響がひずみにあらわれない位置として重要である。

また，開始時の圧縮ひずみ領域形成途中の過渡的領域で生ずる切り屑形状は，定常域と異なり，いわゆるせん断角の小さい厚い切り屑が生ずる。

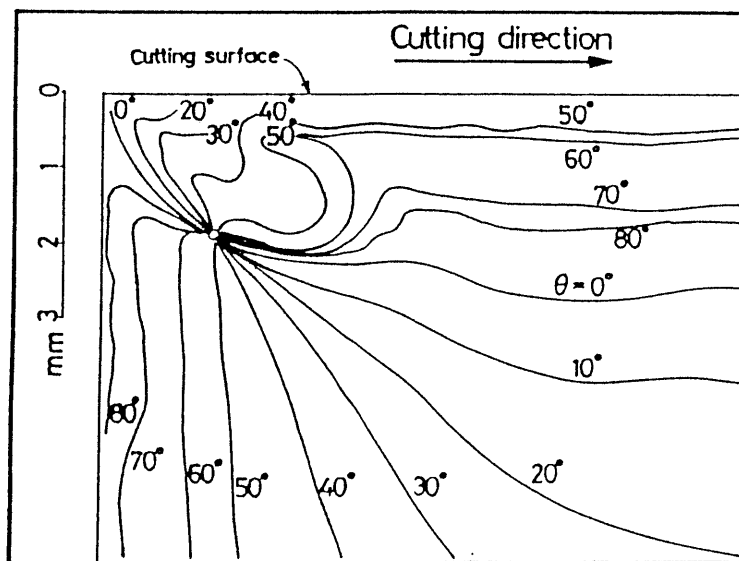


図 5-14 切削開始位置近傍の残留等傾線

5・3・6 切削終了位置近傍のひずみ分布

図5-15には切削終了位置近傍の切削中および残留の等色線を示す。定常域では等色線は安定し、切削後には加工面に平行な縞として残留する。この定常域のひずみは深さ方向について分布は一定である。ところが切削終了点、図5-4に示すOO端面からの距離が3mmの位置まで刃先が達すると、刃先より前方の圧縮領域が急に膨れて自由端面OO上まで深く広がった分布状態となり、切削が終了する。したがって、終了側自由端に残留するひずみは開始側と異なり圧縮ひずみであり、その値は大きく範囲も広い。切削終了位置に生ずるひずみ急増域は、バリの生成に関係し、形状精度などに悪影響をおよぼすと考えられる。この終端部でのひずみ急増は、図5-4、図5-5の比較でわかるように半無限板では見られずに平行な縞から1/4円弧を描いて閉じていることから自由端の影響を受けていると考えられる。しかも、図5-4に示すB~D領域は、刃先前方での圧縮ひずみを後方の引っ張り作用によって多少は回復するが、Eでは圧縮作用のみであり値が大きく、問題であると思われる。

切削終了端部では開始位置に現れたような無ひずみ特異点は生じないが、終了端に向かってニュートラル軸の名残の0次が突き出ている。この部分のひずみは小さい。

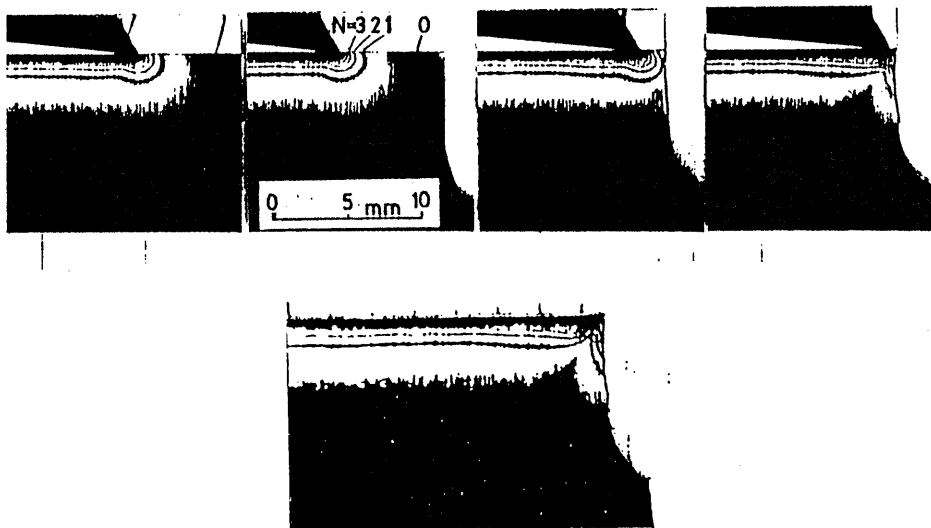


図5-15 切削終了位置近傍の等色線

5・3・7 切削終了端部近傍のFEM解による考察

これまでの結果から、自由端面間を切削するときの切削終了端近くでのひずみ挙動が最も問題であると思われる。そこで、直角な自由端面の終端部近傍を切削しているときに相当する残留成分を含んでいない切削瞬間の応力状態を知るために、FEM弾性計算を行った。解析には図2-10に示したモデルと条件を用いた。得られた結果を図5-16、図5-17に示す。勿論、被削材の応力ひずみ特性は非線型であり、弾性解をそのまま当てはめることはできないが、それぞれの位置での切削瞬間の釣り合い状態について定性的に知ることができる。図5-16、図5-17では、刃先位置を切削終了端からの距離(10-X)で示し、応力値が大きいほど青色あるいは赤色を、0に近いほど緑色を用いてそれぞれ濃色になるように分布をあらわしている。

切削瞬間の τ_{max} 分布を示す図5-16において、終端部から十分に離れて自由端の影響を受けない位置(10-X=6mm)の場合について同図(a)に示す。これは図3-4で示した、皮膜法で得られる切削瞬間の等色線分布に対応している。

しかし、刃先位置が終端面に接近するにつれて刃先前方の τ_{max} は自由端面側へ広く分布するようになる。端面までの距離が2mmに達すると、 τ_{max} は刃先前方の圧縮域でそれまでの円形分布から外れて自由端面へ向かって深く膨らむ形となる。端面までの距離が0.6mmでは、その傾向はさらに顕著であり自由端面には端面角部に比べて大きなひずみが深い位置まで分布していることがわかる。このとき、それぞれの瞬間には刃先の直下に無ひずみ点(図5-16に緑色で示す)が存在していることがわかる。しかし、刃先の進行つれてこの無ひずみ点は刃先後方で引張り作用を受けるために、切削後ではひずみ0にならない。これらの結果は、皮膜法で得られた5・3・6の結果とよく対応している。

次に、終端面から離れた位置と刃先離脱点近くの τ_{max} 、 σ_y 分布について図5-17に示す。 τ_{max} 、 σ_y のいずれについても刃先離脱点では自由端の影響を受けていることがわかる。特に σ_y の圧縮域は、狭い範囲で深く分布しており、刃先離脱時にはこの部分の弾性成分によるスプリングバックが大きいことを示している。これは、鋭利な刃物を使用する場合の刃先離脱時の工具損傷^{22) 23)}にも影響を与えらると思われる。

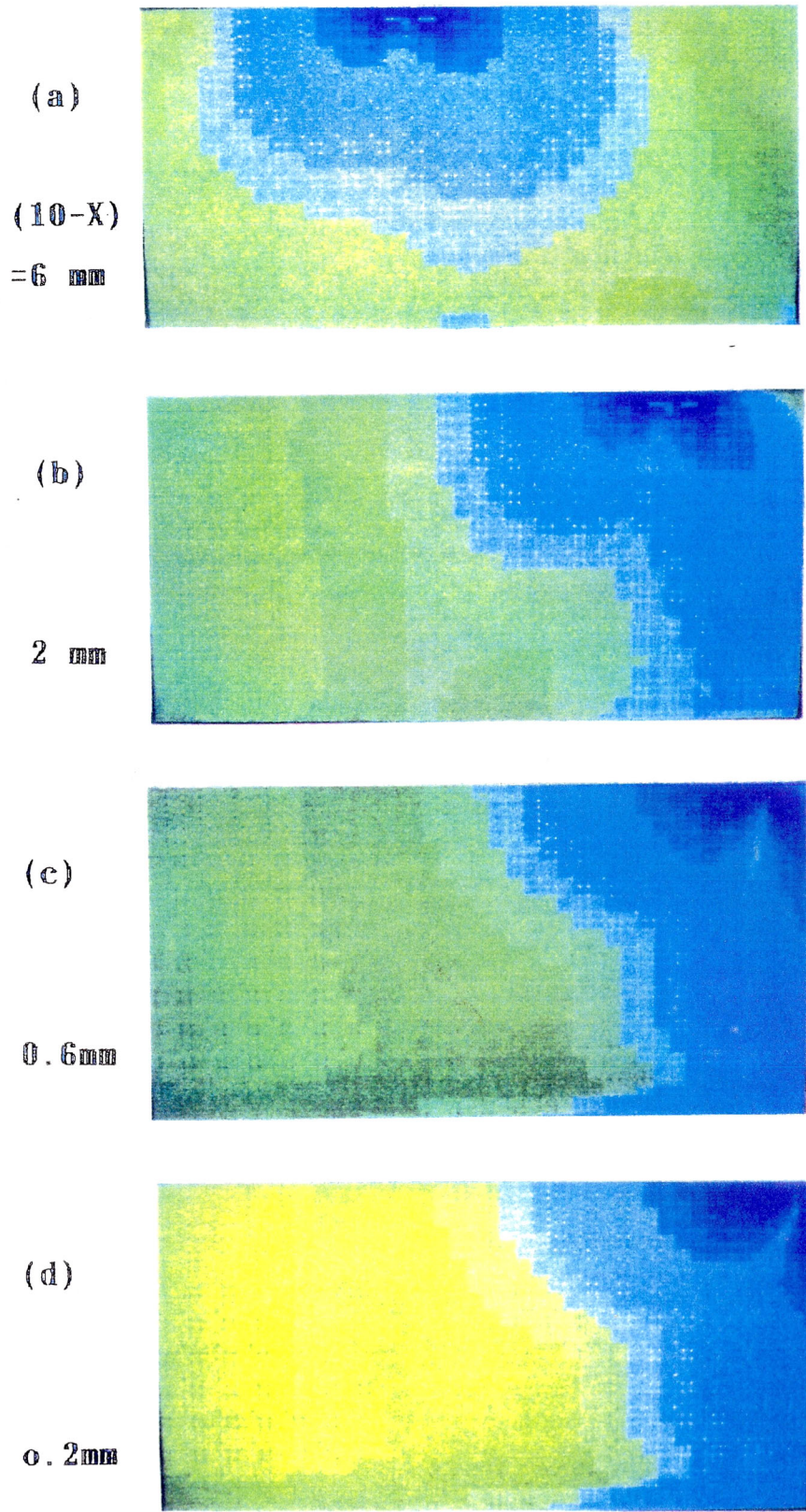


図5-16 FEM弾性解による τ_{max} 分布

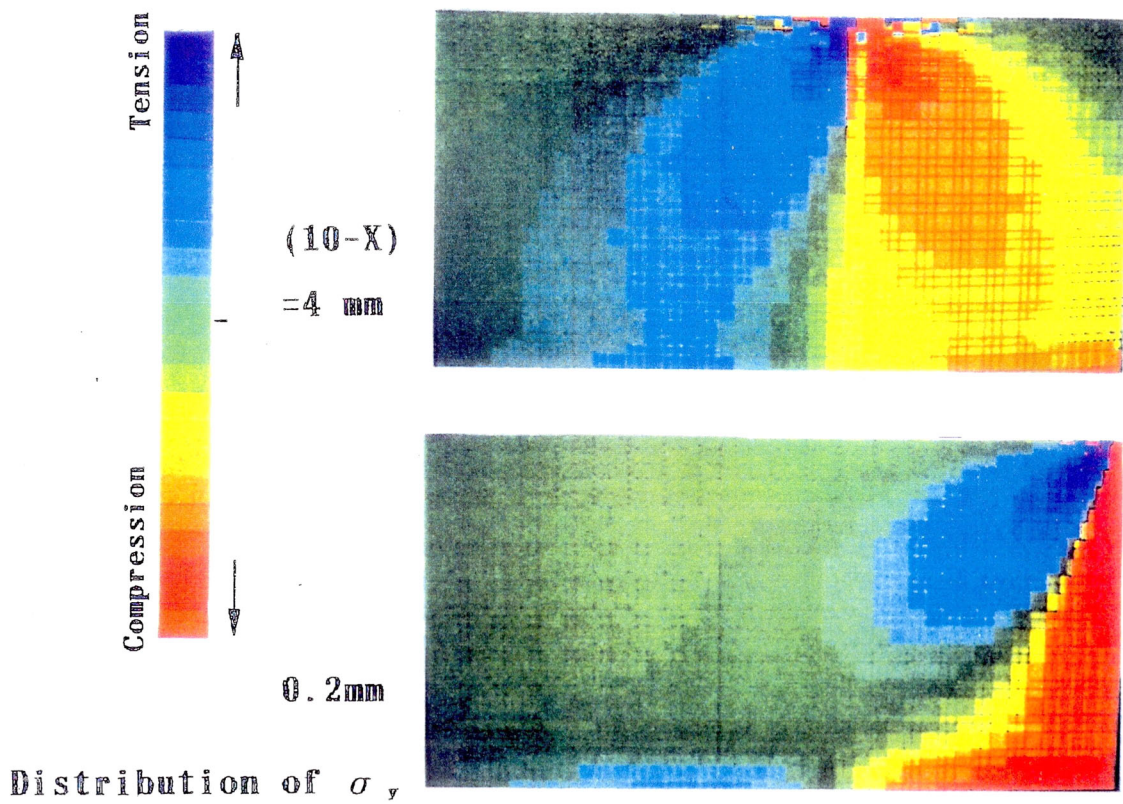
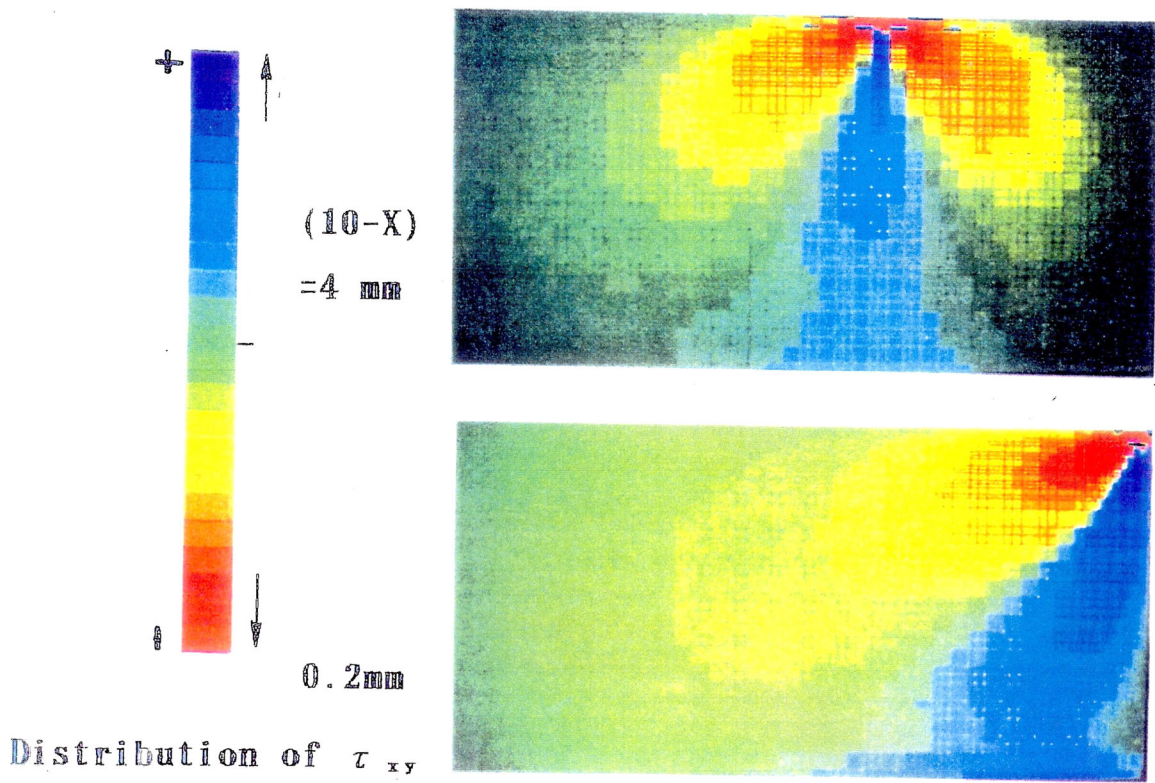


図5-17 FEM弾性解による τ_{xy} , σ_y 分布

5・3・8 終端部形状とひずみ分布

皮膜法やFEM解による結果から、切削によるひずみは終端部での分布に最も問題があることがわかった。切削終了直前でひずみが急増する現象は、刃先前方の圧縮ひずみ領域が自由端面に接近して歪んだ分布となるために生ずる。そこで、この現象の軽減に有効と思われる端部形状をこれまでの結果から5種類選定し、皮膜法によりその有用性について比較した。いずれも切削後には同一形状となるように切り込み深さの範囲内で図5-1に示す寸法とした。

端部形状の異なる被削材に残留する $N=1$ ($\gamma_{max}=2.1 \times 10^{-2}$) の分布について図5-18に比較した。図5-18より、実験範囲では形状(c)のひずみ軽減効果が最も大きい。実際に採用しやすい面取りの場合には終了端までの勾配距離を大きくした(b_2, b_3)を用いると残留ひずみを少なくできることがわかる。この形状では、刃先が勾配の始点位置にあるときに終端面に到達した刃先前方の圧縮ひずみとその後の刃先の実質負荷の減少によって増加しないために、残留ひずみが軽減される。したがって、終端部のひずみ急増は端部形状の工夫により軽減できることが確かめられた。

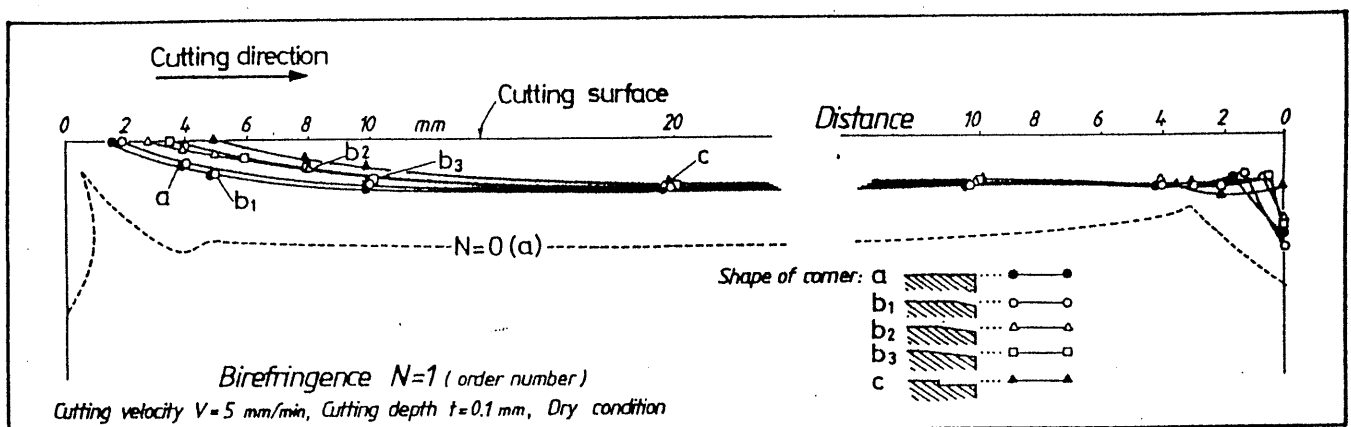


図5-18 終端部形状による残留ひずみ分布比較

5・3・9 切削油剤の効果

切削の際に、工具寿命を改善し被削性を向上させる目的で切削油剤が用いられる。一般に、切削油剤を使用すると切削抵抗が減少するので被削材ひずみの改善にも効果があると思われる。油剤による被削材ひずみ分布への改善効果を定量的に調べるために、図5-19に示す形状の被削材を用いて切削実験を行った。使用した切削油剤は、不水溶性1種1号AL101であり、図5-19に示すように被削材の後半部の加工面上に前もって薄く塗布する方法を用いた。したがって、被削材の前半部は乾式切削、後半部は湿式切削となる。

切削条件は今まで述べてきた内容と同一とした。実験によって得られた残留等色線を図5-20に、1次の縞分布の比較を図5-21に示す。明らかに被削材全域にわたって湿式の等色線が少ないことがわかる。また、両者の0次の位置はそれほど変わらないことから、高次のひずみについてその効果があらわれていると思われる。

図5-22には、乾式と湿式共に中央の安定域での等色線から求めた深さ方向断面上の残留最大せん断ひずみ分布を比較して示した。深さ1mmの位置では、湿式の方が乾式に比べて半減していることがわかる。

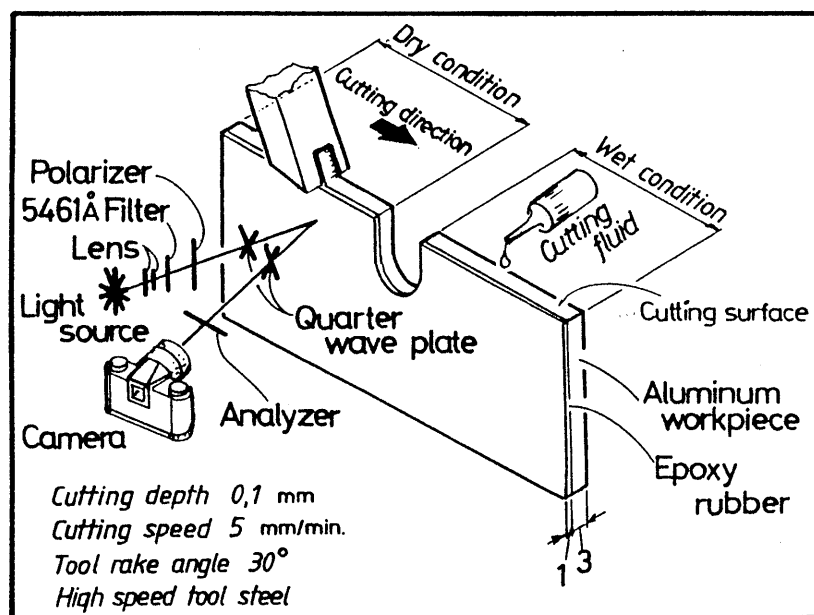
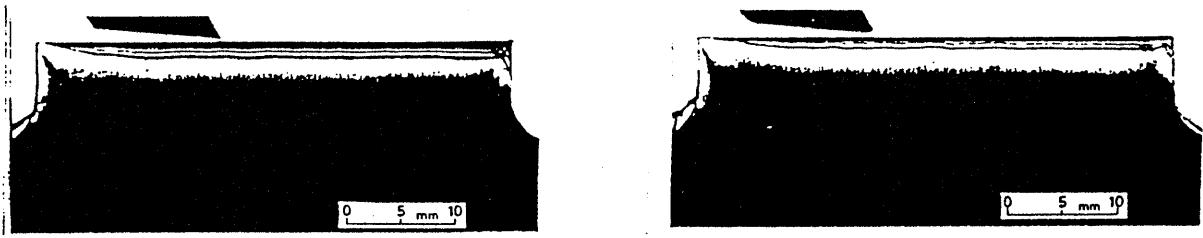


図5-19 乾式・湿式比較用被削材



乾式

湿式

図5-20 残留等色線

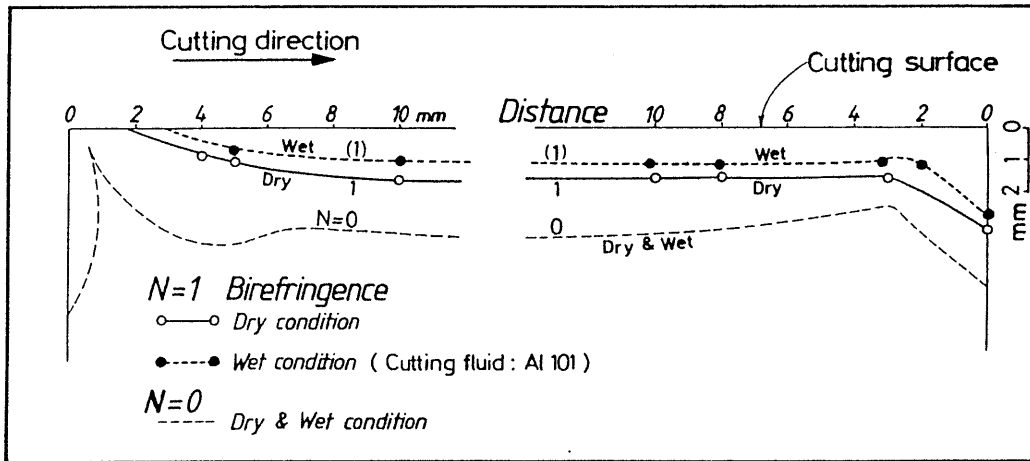


図5-21 乾式・湿式の等色線1次の比較

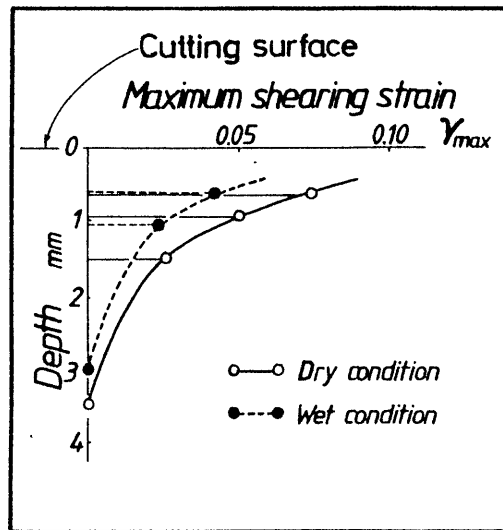


図5-22 定常域断面上の残留最大せん断ひずみの分布

5・3・10 フライス切削ひずみ

切れ刃の運動方向が直線ではなくトロコイド曲線を描くフライス削りの場合について、切削中のひずみおよび切削後に残留するひずみを光弾性皮膜法により求めた。実際に用いられるフライス加工では、フライス工具の外径に対して一刃当たりの送り量が極めて小さいので切れ刃の切削軌跡を円弧として近似できる。そこで、一枚のフライス刃が被削材を除去する状態を観察するために、あらかじめ切れ刃軌跡相当の円弧形状に加工した材料を焼きなまし処理した後に光弾性皮膜を接着して使用した。その概要を図5-23に示す。

この時用いた一本刃平フライスを図5-24に示す。フライス切れ刃には、二次元直線切削に用いたSKH-4 工具をそのまま使用して半径方向のすくい角 30° 、逃げ角 5° 、軸方向のすくい角 0° となるように植刃フライス工具を製作して用いた。

一刃当たりの送り量は 0.1 [mm] とし、半径方向切り込み以外は直線二次元切削での諸条件と同一にした。切れ刃の運動方向は上向き切削および下向き切削で実験した。

実験には刃先円弧と被削材円弧とを一致させた後、被削材に 0.1 [mm] の送りを与える間欠式送りを採用した。

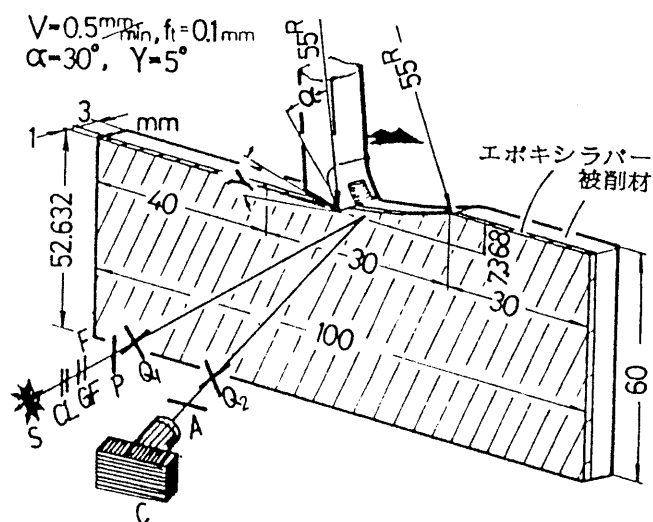


図5-23 フライス切削実験の概要

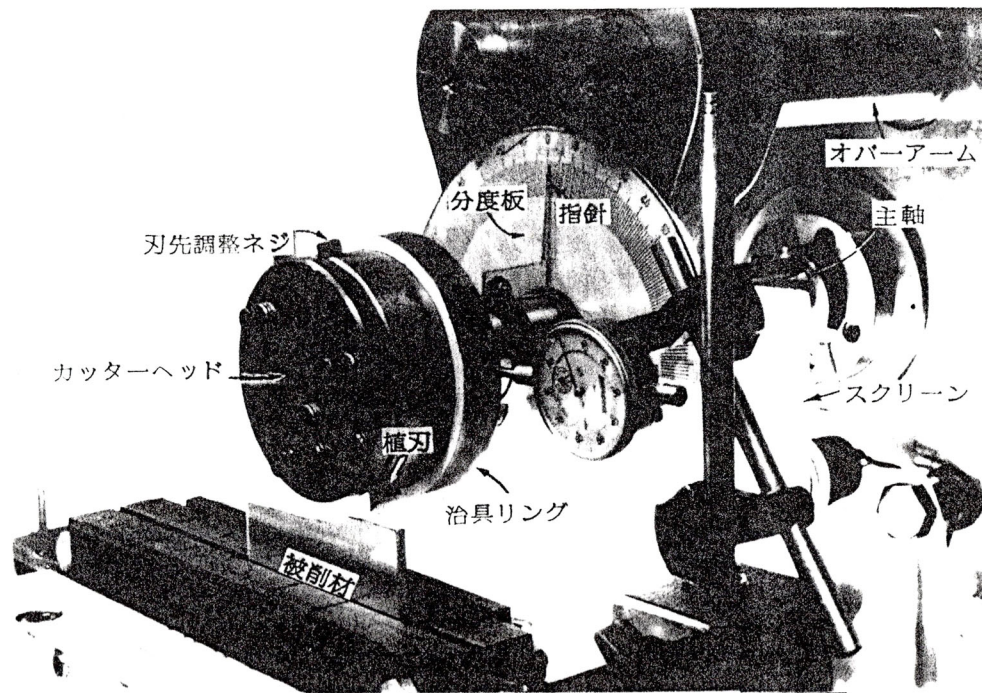


図5-24 一本刃平フライス

得られた切削中の等色線を下向き切削について図5-25、上向き切削について図5-26に示す。図5-25よりわかるように、下向き切削では切削開始直後に最大切削厚さとなるが、5・3・5で述べた切削開始初期に見られるひずみ硬化領域形成途中の過渡的現象のために生ずるひずみは少ない。また、下向き切削において切削終了位置近くでは幾何学上の切削厚さが減少するのに対してひずみの変化は少ない。これは、切削によって刃先より前方にひずみ硬化領域がすでに形成された状態から除去量を徐々に減少させながら切削する場合に相当する。このとき、4・3・2で述べた重複切削の際に前加工より浅い切り込み深さで繰り返し切削する場合と同様の効果のためにせん断角が増加し、被削性が改善されて切削終了位置近くの微小切り込みにおいても除去が行われているためであると考えられる。その場合は、寸法効果のために切削厚さと切削ひずみは比例せず、幾何学上の切削厚さの減少に対して終了位置近くのひずみの変化は少ないことが考えられる。

また、終了位置には自由端面がないために図5-5に示した半無限板の途中で切削終了する場合に類似した等色線が残留する。したがって、終了点でひずみが急増することはなく四分の一円弧状に閉じた分布形状となる。

一方、図5-26の上向き切削の場合の切削開始位置には自由端がなく半無限板の中途から切削を開始することになる。しかも、実質上の切削厚さは0から切削開始するために除去作用が行われずバニシのみが作用する不安定な状態から切削が始まると考えられる。

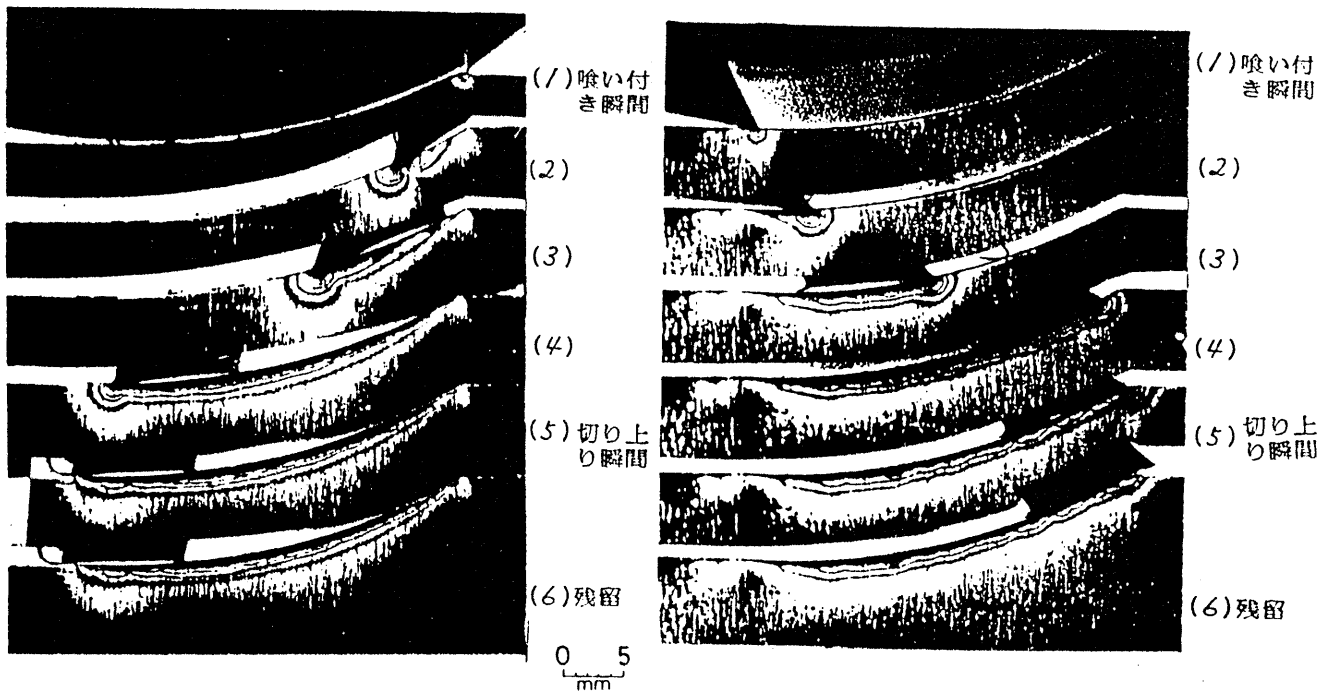


図5-25 下向き切削中の等色線

図5-26 上向き切削中の等色線

上向き切削での切削開始位置には5・3・2半無限板と同様に中立軸が残り、刃先より後方で生ずる引っ張りによるひずみが残留する。切削の初期では切削厚さが微小であり不安定であるが、有効な切り込みの開始と共に刃先より前方の圧縮領域は急に増加する。

このとき、幾何学上の半径方向切り込み深さの増加が少ないことを考慮すれば、下向き切削あるいは直線切削に比べて切削初期の過渡的現象が認められる範囲が狭いように見受けられる。一方、上向き切削での切削終了位置には自由端面があるが、鈍角な端面形状であるから終了位置のひずみ急増現象の影響は少ない。しかもこの部分は一般にはフライス切削において後続の切れ刃により除去される部分であるから残留ひずみは全く問題とならない。フライス切削後に問題となるのは、下向きの切削終了位置および上向きの開始位置での残留ひずみであるが、等色線の比較から上向き切削の方が有利であると言える。

第5・4節 結 言

光弾性皮膜法を用いたアルミニウム被削材の二次元切削実験を行い、端面近傍の切削ひずみ分布について調べた。残留成分を含まない切削瞬間のひずみ状態に相当する弾性FEM解析によって皮膜法で得られた結果を考察し、延性材切削における端面近傍のひずみ挙動について次の結果が得られた。

- (1) 被削材の自由端面間を二次元切削する場合にはひずみ漸増域とそれに続いてひずみの深さ方向分布が一定となる定常域および終了点近くの急増域が生ずる。
- (2) 切削開始位置に見られるひずみ漸増減少は、刃先より前方での被削材圧縮ひずみ硬化領域形成途中の過渡的現象であり自由端面の影響ではない。この位置には無ひずみ特異点が現れる。
- (3) 切削終了位置近傍の切削ひずみ分布は自由端面の存在により大きく影響されるが、刃先より前方の圧縮ひずみ領域が終端面に到達する時の刃先位置から端部に勾配をつける面取りなどによって、最終形状を変えずに終端部の残留ひずみを最少化できる。
- (4) 切削油剤を用いることによって全域にわたり残留ひずみを減少させることができる。特に切削面に近い部分の高いひずみほど効果が大きい。
- (5) フライス切削の際にもひずみ漸増域、定常域および急増域が現れる。フライス加工後に残留するひずみは直線切削に比べて少なく、下向き切削よりも上向きの方が有利である。

第6章 有円孔被削材の切削ひずみ挙動解析

第6・1節 緒言

切削加工の際に被削材に生ずるひずみの複雑な挙動は、形状精度や径年変化などの原因となり工作物の品質に対して悪影響をあたえる。そこで著者らは切削による被削材ひずみを可視化できるうえに定量的に求め得る一方法として光弾性皮膜法を提案し、この方法を用いて延性材の切削ひずみ挙動を、これまでは連続体について述べてきた。

一方、実際に用いられる被削材は必ずしも均一な連続体として扱えるものばかりでなく、製品の軽量化や小型化の必要性から加工面の近くに位置決め穴やネジ穴あるいは油穴などが設けられ、その近傍を切削することもしばしば見受けられる。このような場合には連続体でない被削材を切削することになる。アルミニウム材のようなひずみの影響が出やすい延性材を切削する場合には、加工変質領域が切り込み量に比べて深い²⁴⁾ ために、加工面近くにある円孔などの不連続部分近傍では複雑なひずみ状態が生ずると思われる。このような被削材内部の不連続部分近傍の切削ひずみについてはまだ十分に明らかにされていない。特に、高い精度が求められる位置決め基準の穴などを加工面に近接して設ける際には、切削の影響を考慮しなければならない。そのためには、基礎となる切削ひずみによる円孔付近の損傷メカニズムについて解明する必要がある。

この研究では、連続でない延性被削材として加工面近傍に円孔を設けたアルミニウム被削材を用いて二次元切削を行い、光弾性皮膜法により円孔まわりの切削ひずみ挙動を観察した。これより、円孔の周囲にひずみ集中が生ずることを明らかにし、円孔の位置や切削速度などが円孔周囲の切削ひずみ分布におよぼす影響について検討した。

また、切削中の延性被削材に生ずる塑性域でのひずみ挙動は、残留成分を含まない切削瞬間のひずみの方向や分布²⁵⁾ により知ることができる。そこで、FEMによる弾性および弾塑性近似解を用いて、光弾性皮膜法では分離しづらい各応力の成分を刃先位置を移動させながら求めた。

皮膜法による有円孔被削材に関する実験結果をFEM弾性および弾塑性解による結果で補い、切削によって円孔まわりにひずみ集中が生ずるメカニズムについて明らかにした。

以上の結果について述べる。

第6・2節 被削材形状

実験には、連続体でない延性被削材として、加工面近くに円孔があるアルミニウム有円孔材を用いた。有円孔被削材の形状および円孔の位置について図6-1に示す。穴の直径は2 [mm] とし、穴の位置については、自由端面の影響を受けないように被削材切削範囲の中央での円孔中心深さを D_p とする。また、自由端面近くでは5章で述べたように、定常域とは異なった切削ひずみ挙動を示す。この自由端面による影響について調べるために、加工面からの円孔中心深さを一定の4 [mm] に固定し、自由端面からの距離が異なる被削材を用いた。切削開始側の自由端面から円孔中心までの距離を L_i 、終了側の自由端面から円孔中心までの距離を L_o 。として D_p 、 L_i 、 L_o 。をそれぞれ個別の被削材に2.5~10 [mm] 間で5種類の異なった寸法になるように製作して用いた。

このとき、自由端近くの円孔深さを4 [mm] とした理由は、通常、円孔列などにおいて隣接する最少ピッチは円孔直径の2倍あるいは端部までの最短距離は直径の1.5倍程度とされることが多いのでこれを参考にした。

被削材に接着した皮膜材にも接着硬化させた後、円孔と同一位置に1.8 [mm] の穴を加工した。

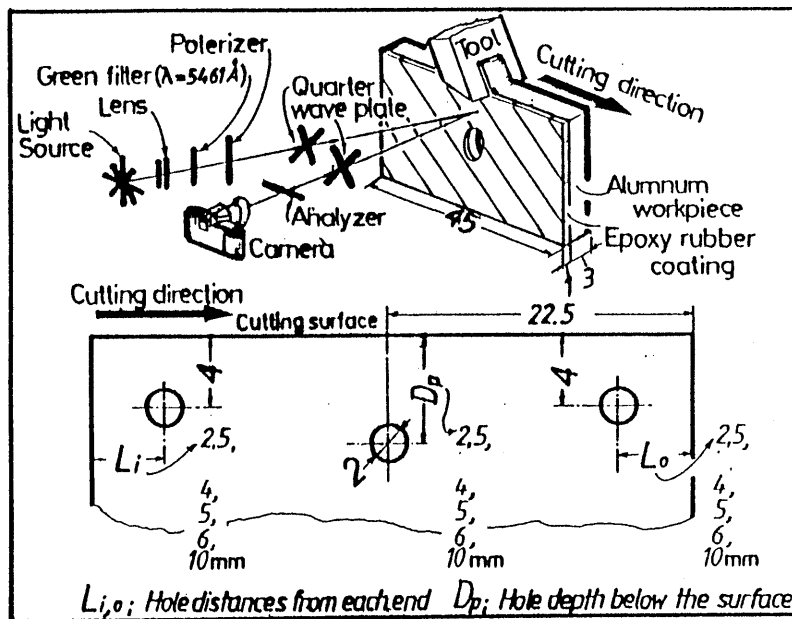


図6-1 有円孔被削材形状

第6・3節 実験結果および考察

6・3・1 連続体および有円孔材切削後の残留等色線

円孔などが無い連続な被削材を切削した後に残留するひずみは5・3・1で述べたように、図6-2の等色線より知ることができる。被削材に残留する γ_{max} は全域に一樣とはならず、切削開始初期のひずみ漸増域とそれに続いてひずみの分布が安定する定常域および終了端近くで見られるひずみ急増域が生ずる。このために、有円孔被削材を切削する際の円孔周囲のひずみ分布は円孔位置の深さだけでなく、自由端からの距離によっても影響を受けると思われる。図6-3には定常域で深さ2.5 [mm]位置の有円孔材を同一条件で切削した後の残留等色線を示す。明らかに円孔縁で縞が乱れていることがわかる。

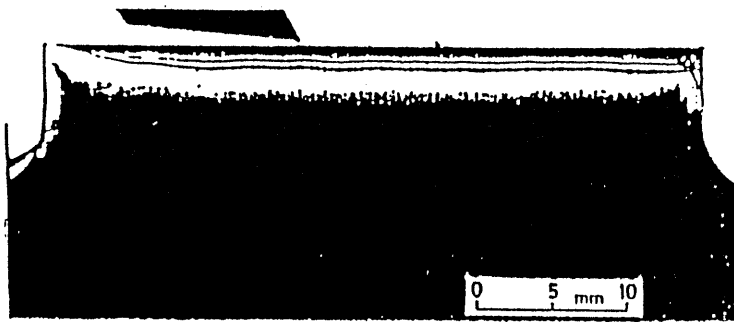


図6-2 連続体切削後の残留等色線



図6-3 円孔まわりの残留等色線

6・3・2 FEM解による考察

工具によって被削材を削るとき刃先は切削力の作用点であるが、切削の際にはこの作用点が移動する。延性材を切削すれば当然、被削材には刃先の移動に伴うひずみが残留する。しかし、被削材内のある定点での切削ひずみについて考える場合には、工具が移動するから、時間の経過に伴うその位置でのひずみの変化について知らなければならない。ところが、延性材の切削では大部分のひずみが残留するために、切削後のひずみから刃先の移動に伴い時系列的に変化するそれぞれの瞬間でのひずみについて直接的に知ることはできない。そこで、ある刃先の位置における残留成分を除いた切削瞬間のひずみ状態を知るために、FEMによる弾性計算および弾塑性計算を行い、これより切削瞬間の応力分布を求めた。解析条件は2・3で述べた方法で行った。

直径2 [mm]の円孔が切削面から2.5 [mm]の深さ位置にある場合について、刃先の位置が円孔の直前および直後にあるときの円孔まわりの τ_{max} 分布をFEM弾性解により求めて図6-4(a)に示す。同図では、円孔縁を最上部から時計まわりに角度で示した。図中の実線は刃先が円孔直前位置にあるときの分布を、破線は直後位置について表した。

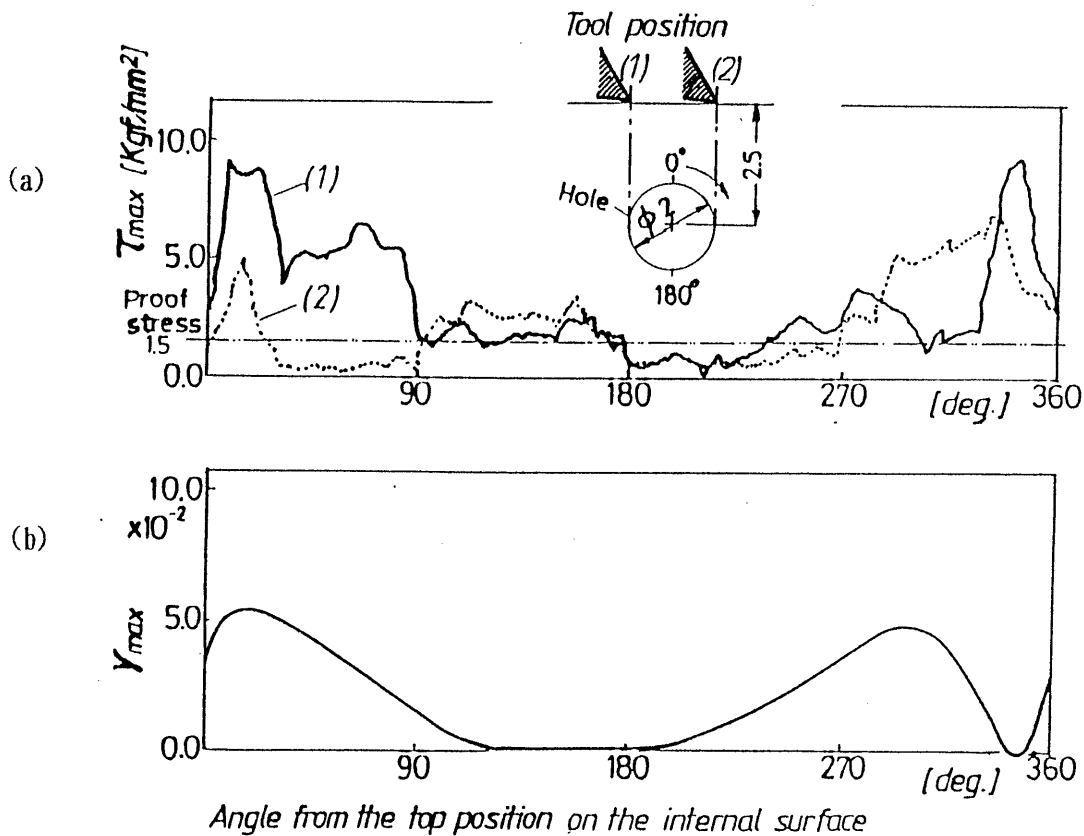


図6-4 (a) FEMによる円孔縁の τ_{max} , (b)皮膜法による円孔縁の残留 γ_{max} 分布

さらに、皮膜法で得られた残留 γ_{max} 分布について図6-4(b)に示す。一般に、アルミニウムのような延性材では耐力までを弾性域として取り扱われるのでここでも同様に考えて、図6-4(a)には、耐力に相当する応力を一点鎖線で示す。

図6-4(a)からわかるように、刃先が円孔の直前位置(1)にあるとき、円孔まわりには $0^\circ \sim 90^\circ$, 270° および 360° 近くの位置で耐力を大きく越える τ_{max} が生じている。

さらに、破線で示す円孔の直後位置(2)では、 0° , $270^\circ \sim 360^\circ$ の位置に耐力を越えた応力の集中が見られる。したがって、この部分に塑性ひずみの残留が予想される。

一方、 180° 近傍では刃先前後(1), (2)共に値が小さく、切削後には殆ど残留しないことになる。

この結果は、皮膜法により得られた円孔縁の残留 γ_{max} 分布図6-4(b)とよく一致している。円孔などが無い連続体を切削するときの残留成分を含まないある瞬間の τ_{max} 分布をFEM弾塑性解で求め、その結果を図6-5(a)に示す。同図よりわかるように、切削中の被削材に生ずる瞬間の τ_{max} は刃先よりある程度離れるとほぼ一樣な分布となっており、その範囲は切削面より下方 45° の直線で囲まれる内側である。この領域では切削主分力と被削材下方の固定力による純せん断応力場にはほぼ近い状態であると考えられる。

この応力場に円孔がある場合について、刃先の位置が $D_p = 3$ [mm] の円孔直前にあるときを図6-5(b)に、直後にあるときを図6-5(c)に示す。

せん断応力場に円孔があれば円孔まわりの自由端には図6-6に示すように圧縮応力 σ_c , 引っ張り応力 σ_T が生ずることになる。

一方、定常域での切削瞬間の刃先近傍の応力状態は、3・3・1で述べたように、図6-7に示す放射状応力場である。刃先が円孔に接近すると放射状応力場が円孔まわりのせん断応力場に近づくことになり、刃先より前方の単軸圧縮領域と円孔縁のせん断による引っ張り領域が干渉する。従って、この位置での応力は互いに相殺されて減少するから、ひずみは減少することになる。

しかし、刃先が進行して図6-5(b)のように、刃先前方の圧縮領域が円孔縁の圧縮領域に接近すると、双方の応力は加算され増加する。その結果、円孔縁には応力が集中することになる。このとき、せん断応力場における円孔縁の最上部位置にある応力 θ は、反時計方向に移動する。さらに刃先が進行して、刃先より後方の放射状応力場における単軸引っ張り応力領域と、せん断応力場における円孔縁の引っ張り領域が干渉すれば、図6-5(c)のように円孔近傍での応力は加算されて応力集中する。

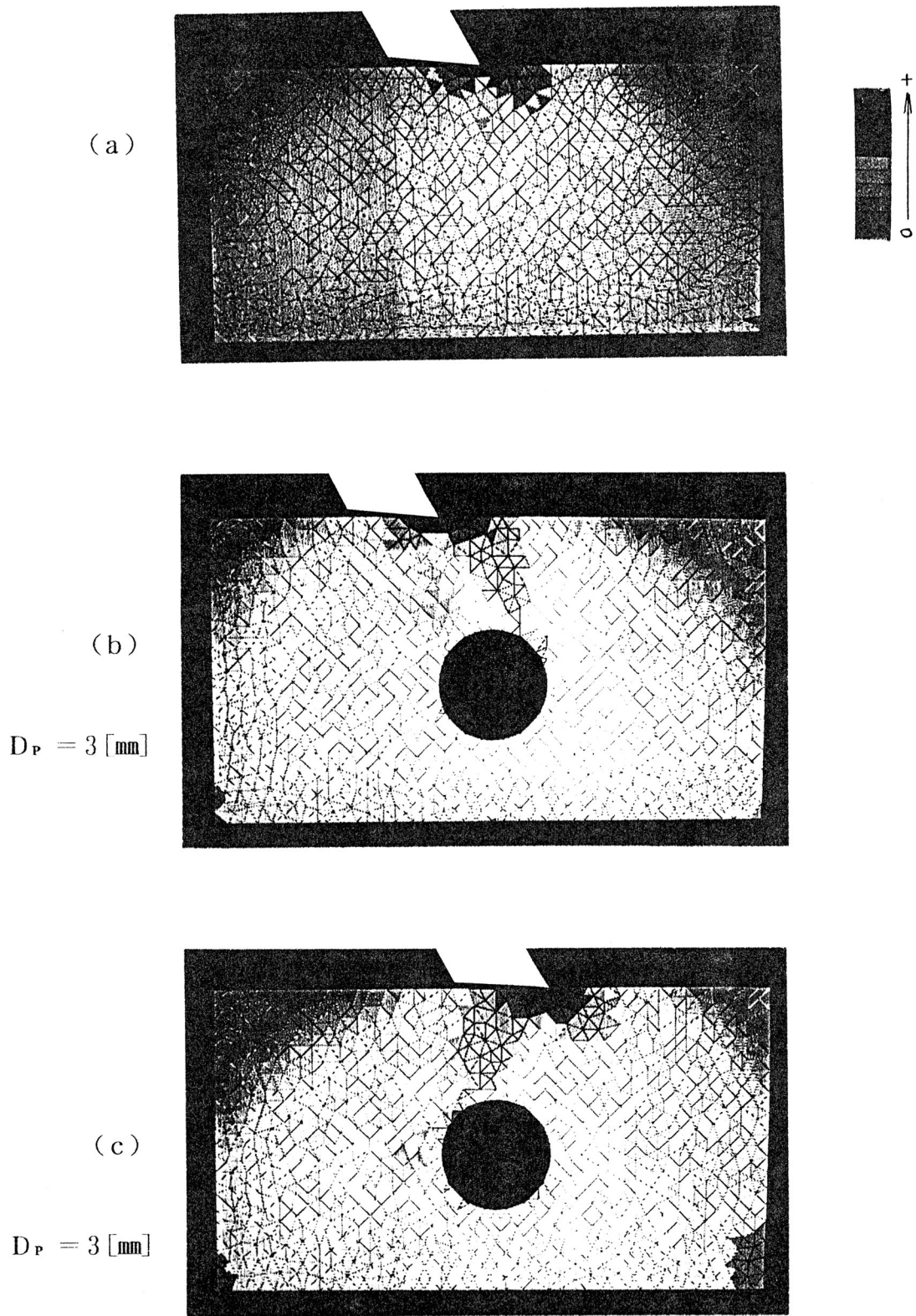


図6-5 弾塑性FEM解による連続体および有円孔材切削瞬間の τ_{max} 分布

一方、図6-6に示したようにせん断応力場に円孔があると、円孔縁の上方だけでなく下方にも引張りおよび圧縮応力が生ずるが、この円孔縁下方のせん断応力による引張り応力および圧縮応力については、それらの値が上方の応力に比べてやや小さいことに加えて刃先との距離が離れているために、刃先近傍の放射状応力場の影響も少ないから上述の加減算が起きにくく、切削後に円孔縁下方の応力の大部分は弾性回復すると思われる。

したがって、切削後の円孔まわりには上死点よりわずかに反時計回り方向に最小値があり、その左側に引っ張りによるひずみ、右側に圧縮によるひずみが残留するが、円孔の下半分にはひずみが残留しないことになる。

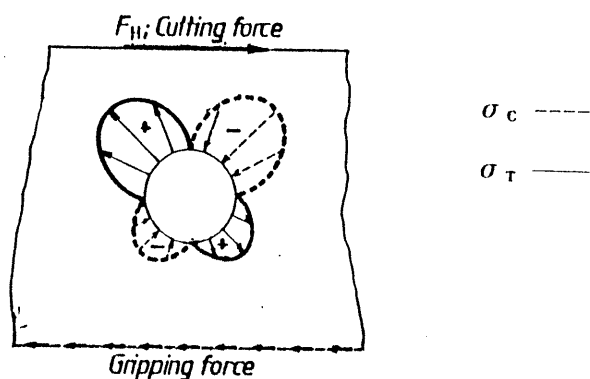


図6-6 円孔まわりの応力（せん断応力場）

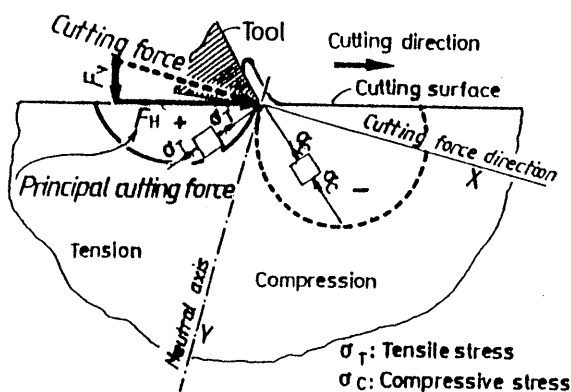


図6-7 切削瞬間の主応力（放射状応力場）

このような円孔まわりで見られる切削ひずみの挙動は、円孔の位置が深くなっても全く同様の傾向があらわれる。D_p = 5 [mm]の場合の一例を、刃先が円孔の直前の場合の σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 、 τ_{max} について図6-8～図6-11に、刃先が円孔の直後の場合の σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 、 τ_{max} について図6-12～図6-15に示す。

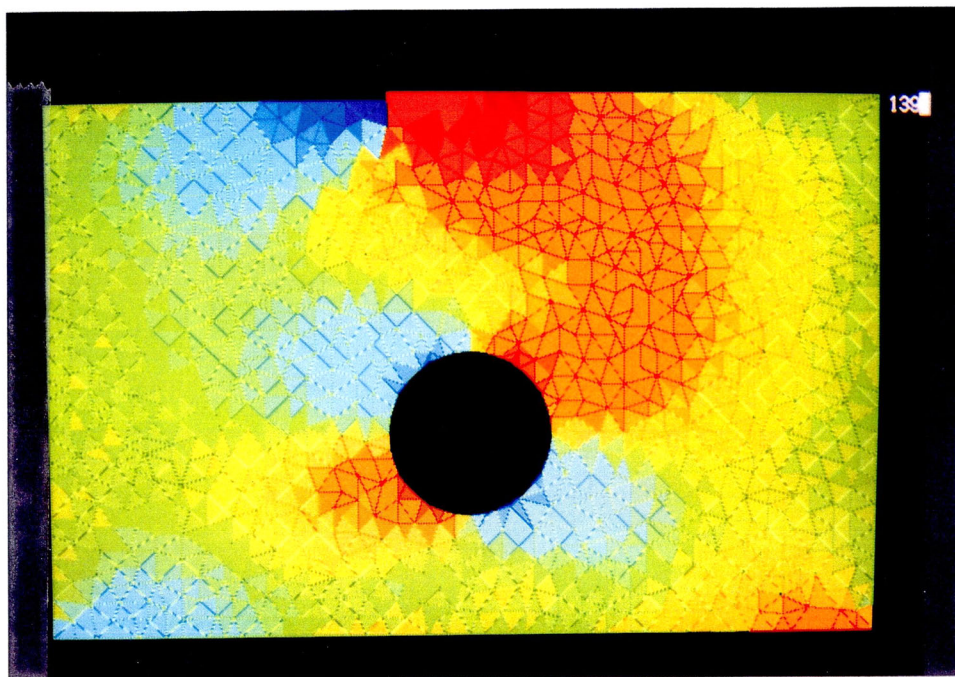


図6-8 有円孔材切削瞬間の σ_x 分布, D_p = 5 [mm]

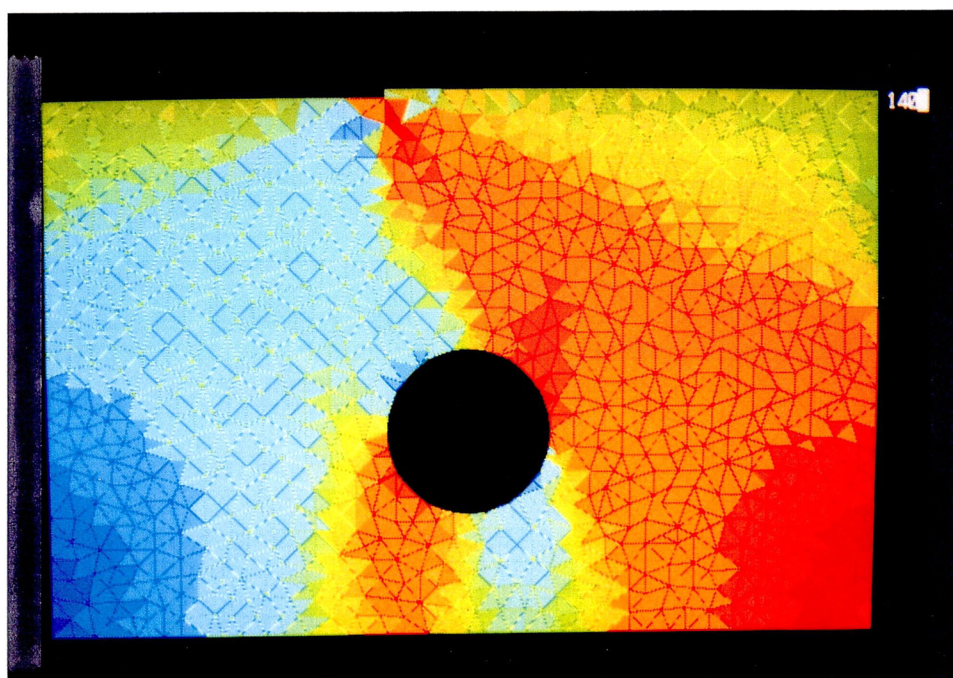


図6-9 有円孔材切削瞬間の σ_y 分布, D_p = 5 [mm]

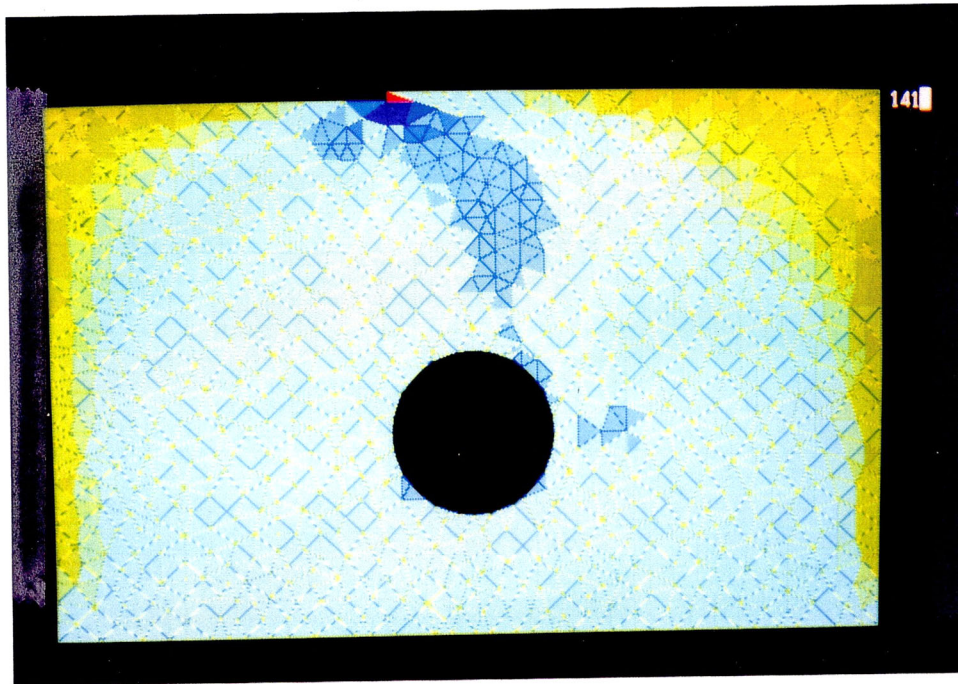


図6-10 有円孔材切削瞬間の τ_{xy} 分布, $D_p = 5$ [mm]

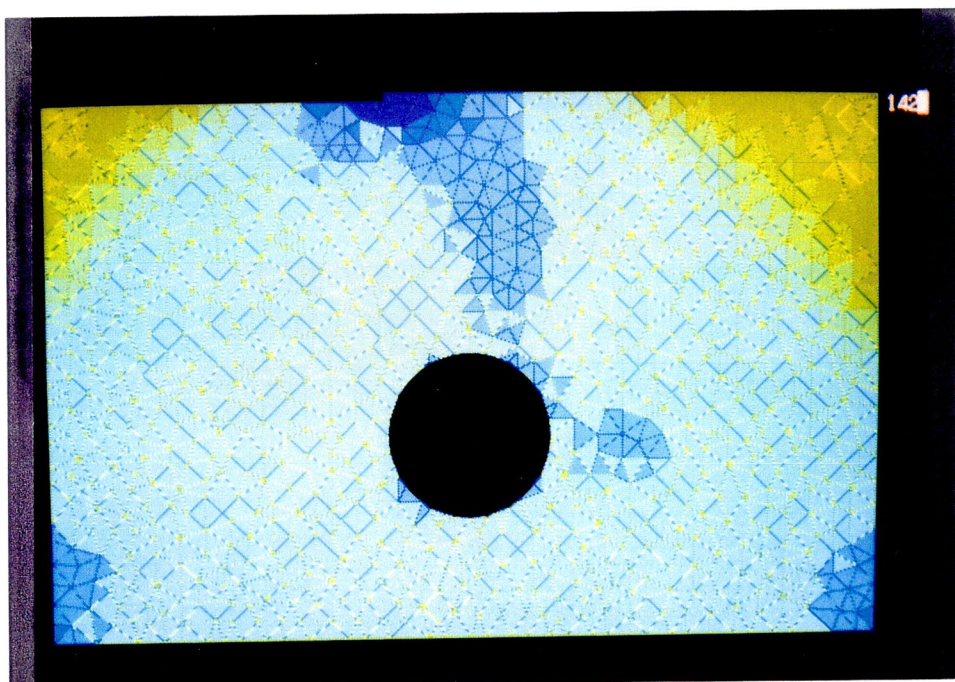


図6-11 有円孔材切削瞬間の τ_{max} 分布, $D_p = 5$ [mm]

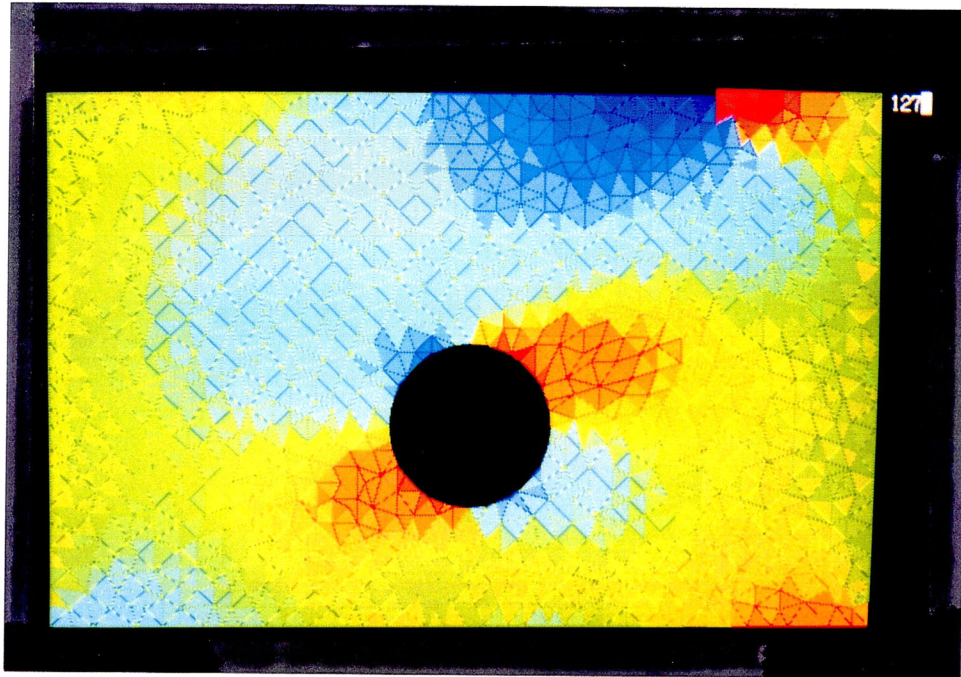


図6-12 有円孔材切削瞬間の σ_x 分布, $D_p = 5$ [mm]

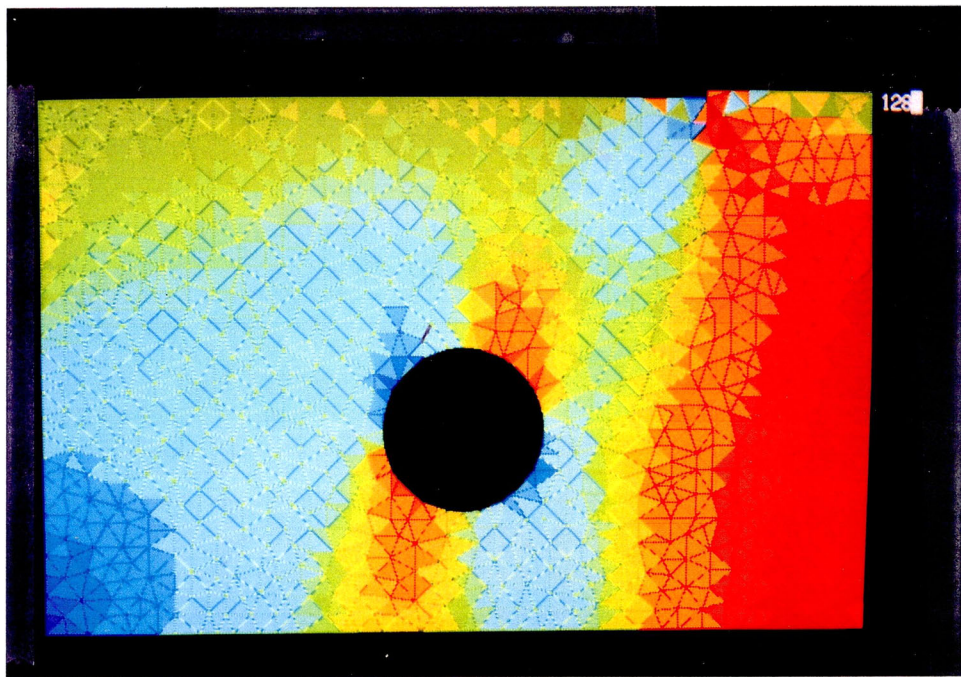


図6-13 有円孔材切削瞬間の σ_y 分布, $D_p = 5$ [mm]

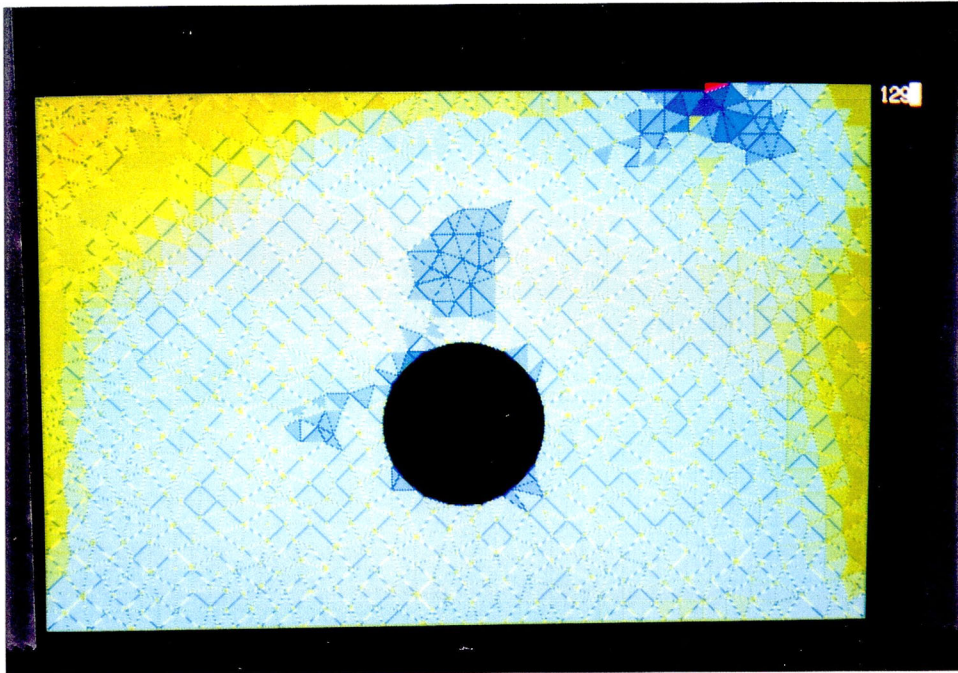


図6-14 有円孔材切削瞬間の τ_{xy} 分布, $D_p = 5$ [mm]

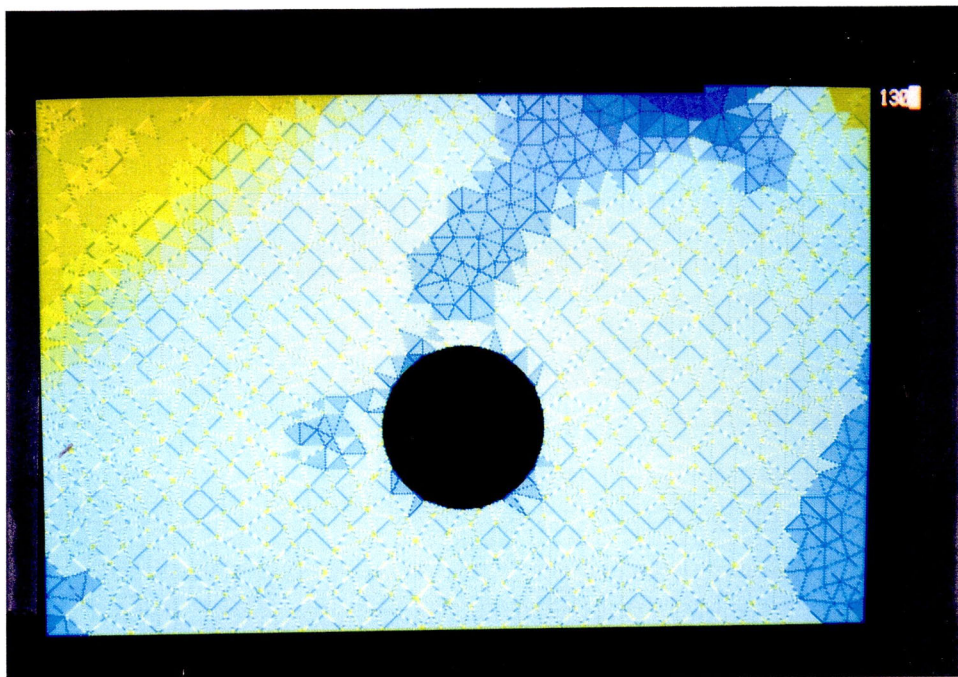


図6-15 有円孔材切削瞬間の τ_{max} 分布, $D_p = 5$ [mm]

また、図6-5(a)の τ_{max} 分布では、放射状応力のおよぶ範囲が、皮膜法による結果の図5-8およびFEM弾性解による結果の図5-9に比べて狭いように見受けられる。

これは、FEM弾塑性解による計算の場合には、延性無ひずみ材をある位置から切削開始する瞬間という条件であるから、得られた結果に時間的経過が含まれていない。

従って、この弾塑性解による結果は、5・3・5で述べた切削開始初期に現れる過渡的現象すなわち、刃先前後のひずみ硬化領域が刃先の進行と共に拡大して安定な定常域に到達するという経過が完了する以前の状態であるために、狭い分布となっている。

図6-5(a)は切削初期の状態であり、図5-8は定常域において十分に安定した刃先の前方の圧縮硬化した部分を削っており、一方、図5-9は弾性解である。切削初期にあたる弾塑性解の τ_{max} 分布が狭いのはこのためであると考えられる。

6・3・3 定常域にある円孔近傍の等色線

定常域に円孔がある被削材として図6-1に示したように、自由端の影響を受けない切削範囲の中央位置に穴が設けられている場合について考える。有円孔被削材を切削中の等色線の一例として、加工面からの深さ $D_p = 2.5$ [mm]の場合について図6-16に示す。

また、円孔がない連続体および有円孔被削材の $D_p = 2.5 \sim 10$ [mm]の場合について、切削後にそれぞれ残留する等色線を図6-18に示す。

図6-16は、切削中の被削材の刃先より前方位置で生ずる圧縮域に円孔が入り始めてから刃先が円孔を通り過ぎるまでの円孔まわりの等色線の経過を示している。同図より、刃先と円孔中心までの距離が5 [mm]近くからさらに接近すると、刃先と円孔中心を結ぶ線上で等色線縞が急に反転し、この部分で γ_{max} が減少していることがわかる。

これは6・3・2で述べたように、刃先の前方で生ずる放射状応力場での圧縮応力と、円孔まわりに生ずるせん断応力場での引っ張り応力とが、刃先・円孔間距離の接近につれて干渉し始めることにより緩和され、 γ_{max} が減少したためである。刃先が円孔に接近するにつれてこの傾向は強まるが、さらに刃先が進行すると刃先より前方の圧縮応力と、円孔縁のせん断応力場の圧縮応力とが干渉により加算される位置では円孔縁のひずみが大き

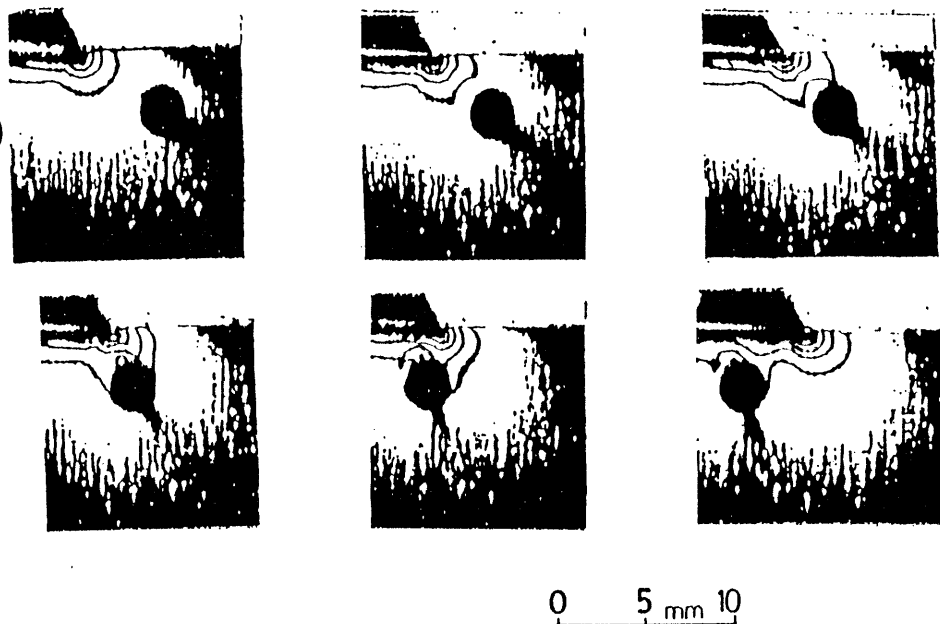


図6-16 有円孔被削材切削中の等色線, $D_p = 2.5$ [mm]

くなっていることがわかる。

刃先・円孔間距離が接近する過程では、刃先・円孔中心線上で等色線は反転減少するが、その左右では増加している。刃先が円孔位置を通過するときには、接近過程での等色線の大部分が円孔のまわりに残留し、刃先が円孔位置から遠ざかる際には刃先より後方での引張り応力と円孔縁での圧縮応力との干渉で等色線はやや回復する。

このように刃先と円孔の位置関係が変化するとき、円孔の中心と刃先を結ぶ線上で、刃先と反対側の円孔縁には必ず0次の縞すなわち無ひずみ領域があらわれる。この0次は刃先の進行とともに時計回りに移動してゆくが、切削後には円孔縁の真下よりわずかに反時計回りに偏った位置にそのまま残留する。

穴の深さに関係なく $D_p \leq 5$ [mm]であれば全く同様の傾向を示す。

有円孔被削材を切削する際に、円孔まわりにひずみが発生し切削後に残留する過程のモデル図を図6-17に示す。同図で、(a)は刃先が接近し干渉による応力緩和、(b)(c)は加算、(d)は切削後に残留する様子をあらわした。

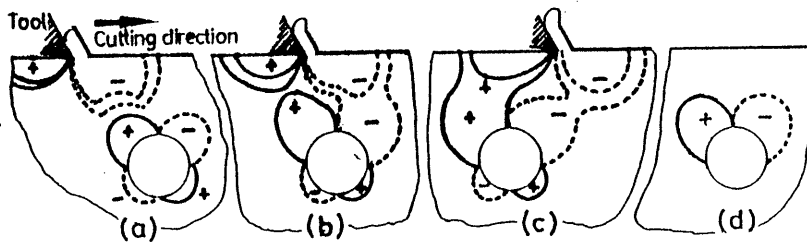


図6-17 有円孔材切削前後のひずみ生成残留過程のモデル

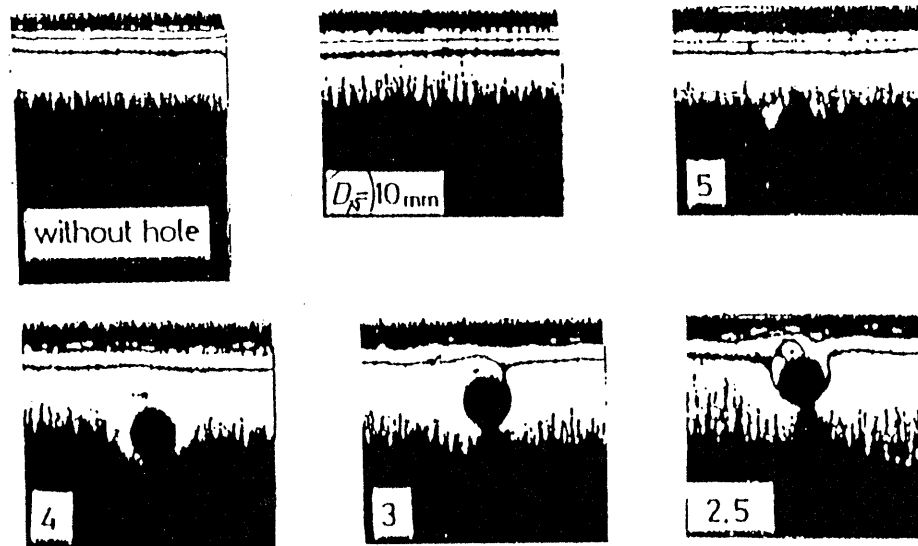


図6-18 有円孔被削材切削後の残留等色線

$$D_p = 2.5 \sim 10 \text{ [mm]}$$

図6-18には定常域での残留等色線を示す。同図では、円孔中心深さが2.5~10 [mm]の場合および円孔のない連続体について示しているが、これからわかるように、円孔深さが5 mmより浅い場合には、加工面および円孔周囲の残留等色線の分布は乱れている。

円孔の位置が切削面に近いほど複雑な残留等色線分布となっている。いずれも切り込み量が0.1 [mm]であることを考慮すれば、円孔の存在によってひずみ分布が受ける影響は、深い範囲に及んでいることがわかる。

これらの皮膜法による結果は、6・3・2で述べたFEMによる結果と良く一致している。

6・3・4 端面部にある円孔近傍の等色線

自由端面の存在が円孔近傍の切削ひずみ分布へおよぼす影響について知るために、円孔の深さ D_p を4mmに固定し、両端面からの距離 L_i 、 L_o を2.5~10[mm]の範囲で変化させて実験した。被削材の詳細については、図6-1に示した通りである。このときの深さ D_p の値は通常、円孔列において隣接する最小ピッチは円孔直径 d の2倍が限度であり、端部までの距離は $1.5d$ とされるのでこれを参考にして決めた。

得られた残留等色線の一例として、 L_i 、 L_o が2.5[mm]および L_i が10[mm]の場合について図6-19に示す。

5・3・5および5・3・6で述べたように、切削範囲が有限であり自由端面間を切削するような場合には、両端部の近くで自由端面の影響を受ける。さらに、5・3・5で指摘したように、切削開始位置近くでは自由端の有無に関係なく、切削初期のひずみが漸増する過渡的現象が生ずる。また、切削開始側自由端では、値は少ないが引張りによる残留ひずみが残留する。一方、終了側自由端では値が大きくしかも広く圧縮によるひずみが残留する。したがって、図6-19に示すように、同一深さ位置に円孔があっても両自由端からの距離によって円孔周囲の等色線分布が異なっている。



図6-19 有円孔被削材切削後の残留等色線

$$L_i = 2.5, 10[\text{mm}], L_o = 2.5[\text{mm}]$$

6・3・5 円孔深さの影響

図6-16には、等色線から求めた残留 γ_{max} の分布と、自由端の影響を受けない位置での円孔深さ D_p との関係を示す。図6-20には、円孔の中心を含む断面上に残留している γ_{max} の分布について、 D_p をパラメータとして(a)に示す。また、円孔まわりに残留する γ_{max} の分布について同図(b)に示す。さらに、 D_p と穴のまわりの最大せん断ひずみの最大値 $(\gamma_{max})_{MAX}$ との関係について同図(c)に示す。

図6-20(a)より明らかなように、円孔中心を含む断面上に残留する γ_{max} の分布は、円孔中心の位置が切削面に接近するにつれてその値が減少している。しかし、同図(b)に示すように、円孔位置が切削面に近いと円孔まわりの残留 γ_{max} は逆に増加している。

円孔まわりに残留する最大せん断ひずみの分布形状について見ると、深さ D_p にかかわりなく、いずれも穴の真上より半時計回りに約 15° 切削開始側に偏った位置に最小値を持ち、中心に対してその点対称位置は常に $\gamma_{max} = 0$ となり、最小値の左右に最大値を持つ

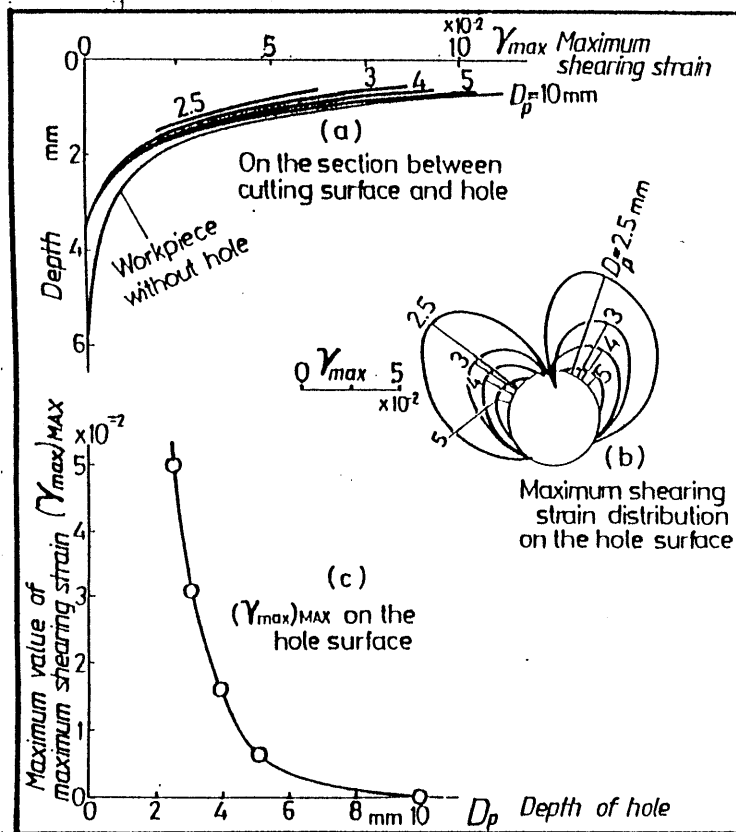


図6-20 円孔の深さと残留最大せん断ひずみの関係

特有の形となる。また、図6-20(c)に示すように、円孔位置が切削面に近づくとも円孔まわりの γ_{max} の最大値は急激に増加する。円孔中心深さ $D_p = 2.5$ [mm]では、円孔縁に生ずる $(\gamma_{max})_{MAX}$ が穴の真上における切削面直下の0.8 [mm]深さでの γ_{max} と同じレベルの残留ひずみとなる。

6・3・6 自由端面からの円孔中心距離の影響

図6-21は円孔深さ4 [mm]の場合について、切削開始側自由端面から円孔の中心までの距離 L_i と円孔縁の残留最大せん断ひずみの関係を示す。図6-21(a)は、 L_i をパラメータとして中心をを含む断面上の残留 γ_{max} 分布について、同図(b)は円孔縁の γ_{max} 分布について示す。同図(c)は L_i と円孔縁に残留する $(\gamma_{max})_{MAX}$ との関係について示している。図6-21(a),(b)より、 L_i の値が小さくなり切削開始側自由端面に接近すると、中心断面上および円孔縁の残留 γ_{max} はいずれも減少していることがわかる。

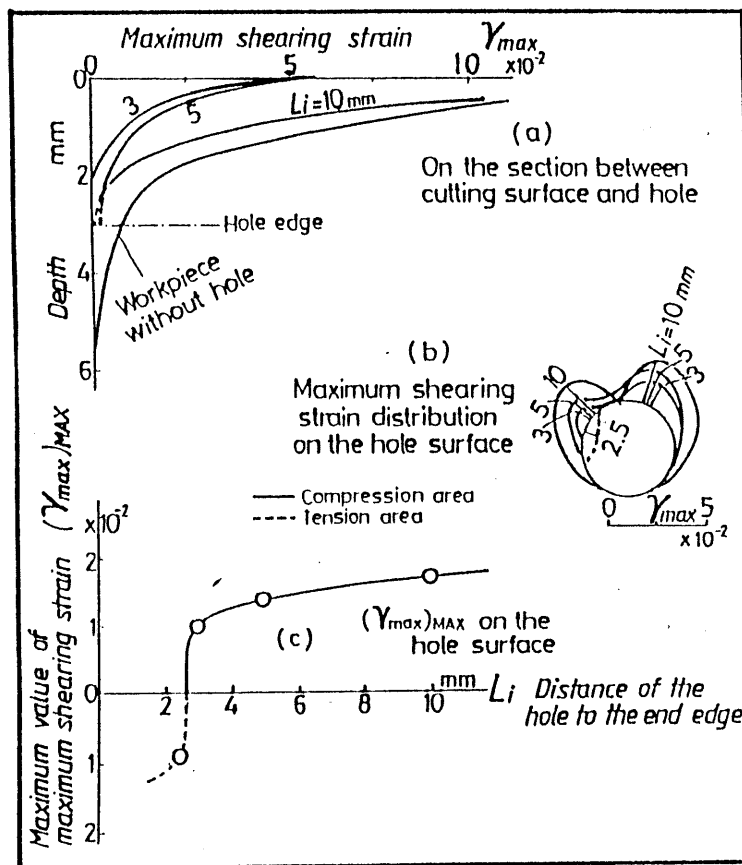


図6-21 円孔位置 L_i と残留最大せん断ひずみの関係

同図(c)の円孔縁に残留している $[\gamma_{max}]_{MAX}$ についても同様の傾向を示しているが、 $L_i < 2.5[\text{mm}]$ では引張りによる残留ひずみ域に転ずる。

これは、図6-19に示したように切削開始側の自由端面近くに生じている値は小さいが引張りによる γ_{max} 領域の内側に円孔縁が入ったためである。また、この切削開始端面付近の引張り領域と切削面下の圧縮後に引張り作用を受けた領域との境界には、5・3・5で述べたように無ひずみ特異点が存在し、この近傍では切削によって受けるひずみの変化が極めて小さい。

次に、図6-22には図6-21と同様に、円孔の深さが4[mm]のときの切削終了側自由端面から円孔中心までの距離 L_0 と残留 γ_{max} の関係を示す。同図(a)では、 L_0 をパラメータとして中心断面上の残留最大せん断ひずみ分布について、同様に同図(b)には円孔縁に残留する最大せん断ひずみ分布について示す。また、同図(c)には L_0 と円孔縁の残留 $[\gamma_{max}]_{MAX}$ の関係について示す。

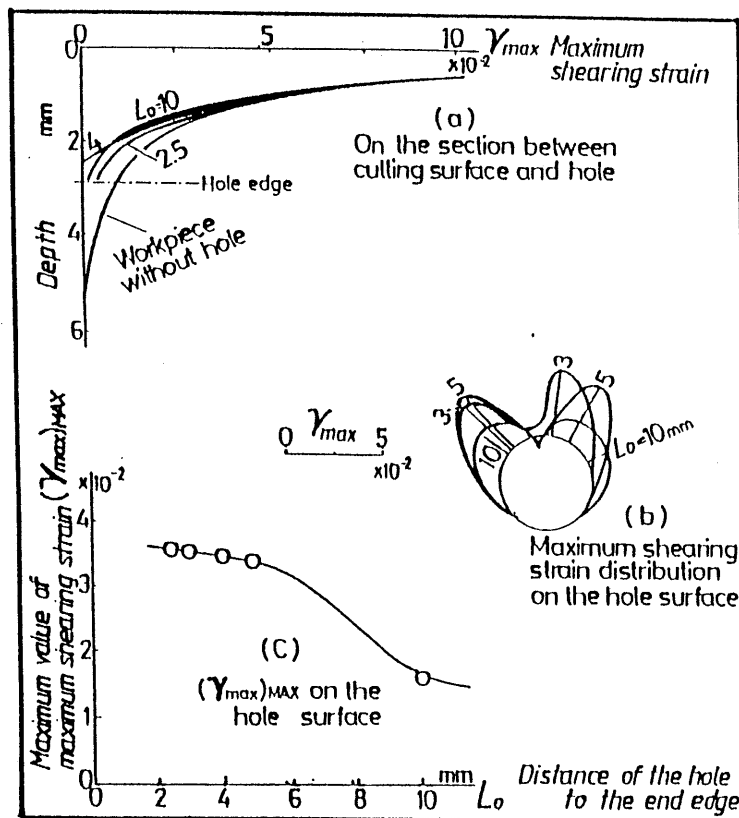


図6-22 円孔位置 L_0 と残留最大せん断ひずみの関係

切削範囲が有限な連続体被削材を自由端面位置で切削を終了する場合には、刃先が終了端からある限界距離にまで到達すると、5・3・6で述べたように刃先より前方の被削材の圧縮領域が急に膨れて、終了側の自由端面にまでひずみが深く広がり、切削終了後にはその状態のまま残留する。したがって、切削開始側とは異なり終了端面近くに残留するひずみは大きくしかも深く分布する。しかし、図6-22(a)に示す断面上のひずみ分布では大きな変化は見受けられない。

一方、図6-22(b)に示す円孔縁の残留 γ_{max} 分布の形態は、切削開始側と類似しているが、その値は開始側とは異なり、円孔が終了側端面に接近すると増加していることがわかる。これを円孔縁に残留する γ_{max} の最大値について見ると、図6-22(c)より $L_0 = 5$ [mm]では、自由端面の影響を受けない位置で生ずる円孔縁での値の約2倍のひずみが集中している。

このように L_0 の減少に伴い、円孔まわりにはひずみ集中が見られるが、それに対して断面上でのひずみの変化が少ないのは、円孔が存在することによってこの位置でのひずみ集中が緩和されたためであると思われる。

6・3・7 円孔位置とひずみ集中度

穴のない連続材を切削したとき、定常域の対応する位置で生ずるひずみを基準ひずみとして、円孔深さ D_p の円孔材に生ずるひずみとの比を α_D で表す。さらに、定常域に円孔がある被削材の対応する位置での切削ひずみを基準ひずみとして、自由端までの距離 L_i 、 L_o の円孔材に生ずる切削ひずみに対する比を α_L で表し、 α_D 、 α_L を円孔位置に関するひずみ集中度とする。

また、円孔が切削面に最も近い位置 $D_p = 2.5$ [mm]にあるときの円孔縁と切削面の中点にほぼ相当する中心断面上の深さ 0.8 [mm]位置のひずみを加工面直下の残留ひずみの代表値とする。加工面直下の残留ひずみおよび円孔縁に残留するひずみの最大値についてそれぞれひずみ集中度を求め、 D_p / d と α_D 、 L_i / d と α_L および L_o / d と α_L のそれぞれの関係を図6-23(1), (2), (3)に示す。同図では、加工面直下の残留ひずみを実線で、円孔縁の残留ひずみについて破線で示す。

図6-23(1)より明らかなように、 $D_p < 2.5d$ では円孔縁に高いひずみ集中がみられる。一方、断面上では D_p が小さな値となっても逆にひずみが減少していることから、円孔があるためにひずみ緩和があらわれていることがわかる。しかし、円孔深さが切削面から離れるにつれてその影響は減少し、 $\alpha_D = 1$ に近づいている。

これは一般に知られている“応力集中の場合にも応力の拡散に関する Saint-Venant の原理が成立する”^{26) 27)} ことと矛盾しない。すなわち、応力集中要素の存在があればその影響によって応力分布の乱れが生ずるが、それは要素からの距離と共に減少し、直径の2倍程度離れると拡散されて影響が少なくなっている。

また、円孔縁のひずみに関しては“直線へり上に一樣な圧力を加えた場合の西田の結果²⁸⁾”と類似した傾向となっている。

図6-23(2)より、円孔位置が切削開始側自由端面に接近すると、断面上のひずみおよび円孔縁のひずみ共に減少するために $\alpha_L < 1$ となることがわかる。従って、円孔位置が開始側自由端に接近してもひずみの集中が起こらず、このための問題は生じないことになる。加工面近くに円孔を設けなければならない場合には、切削側自由端に近い位置が望ましいといえる。

図6-23(3)に示すように、 L_o が減少して切削終了側自由端面に円孔位置が近づくと、円孔縁には明らかにひずみ集中が見られる。しかし、切削面直下のひずみについては殆ど変化は見られない。

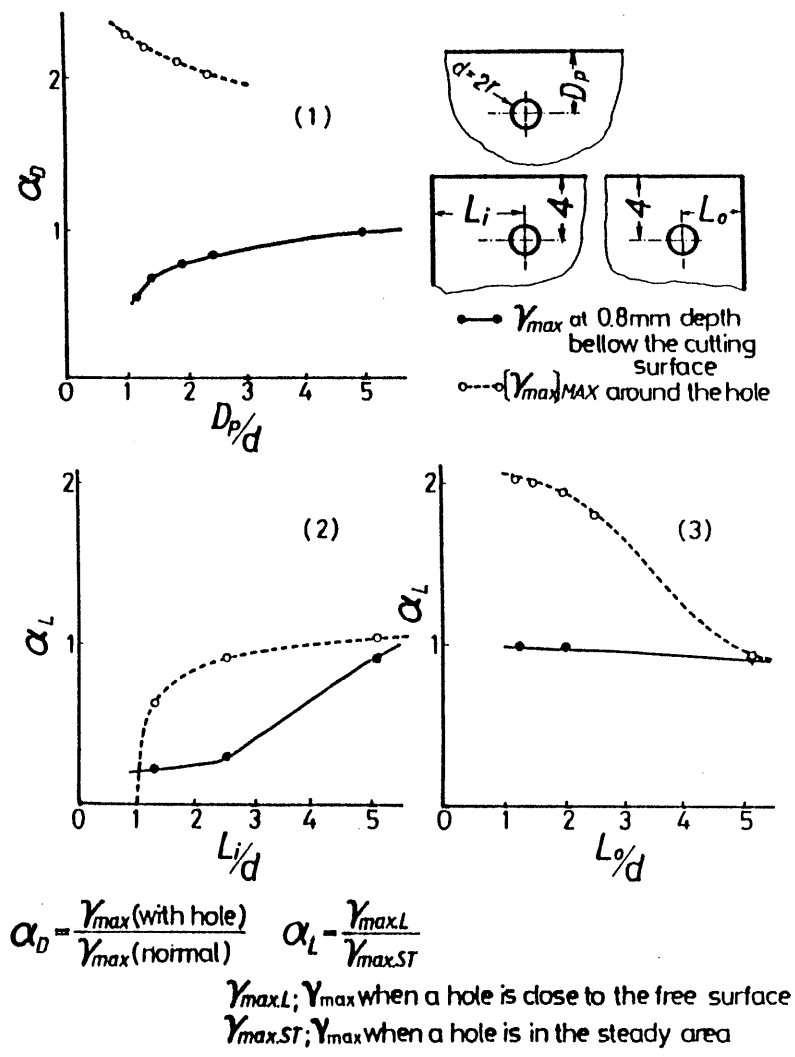


図6-23 円孔位置とひずみ集中度

断面上のひずみについては、6・3・6で述べたように、終端部近くでのひずみ増加が円孔の存在により緩和されたためであると思われる。円孔縁の $[Y_{max}]_{MAX}$ に関しては、 D_p の場合と同様に $L_o < 2 \sim 2.5 d$ では約2倍のひずみ集中がみられるが、円孔位置が自由端から離れると次第に $\alpha_L = 1$ に近づいている。

加工面あるいは自由端面に接近した位置に穴を設ける場合には、上述したように円孔の縁に特有な分布のひずみ集中が生ずることは避けられない。従って、真円度や位置決め精度などの加工品位におよぼす切削ひずみの影響を少なくするためには、円孔中心の位置が、 $D_p, L_o > 2.5d$ となるように選定することが望ましいと言える。

また、切削加工による影響を受けない位置に穴を設ける場合には D_p, L_o 共に $5d$ 以上離さなければならない。

6・3・8 切削速度の影響

切削条件が変化すれば被削材に生ずる切削残留ひずみの分布は異なってくる。切削ひずみに影響を与える切削条件には多くの項目が考えられるが、ここでは工具に関する条件は変えずに乾式切削の下での切削速度の影響について検討する。ただし、実験に用いた切削速度の範囲は、切削による熱の影響を避けるために毎分10 [m]以下の低速度域とした。

図6-24には、切削速度と円孔まわりに残留する最大せん断ひずみの最大値との関係を示す。 D_p が2.5 [mm] および4 [mm] の場合について示す。

図6-24よりわかるように、切削速度が大きいほど円孔縁に残留する $(\gamma_{max})_{MAX}$ は減少しているが、実験範囲ではその差はわずかである。また、円孔の位置が深くなると、切削速度の影響はさらに減少する。

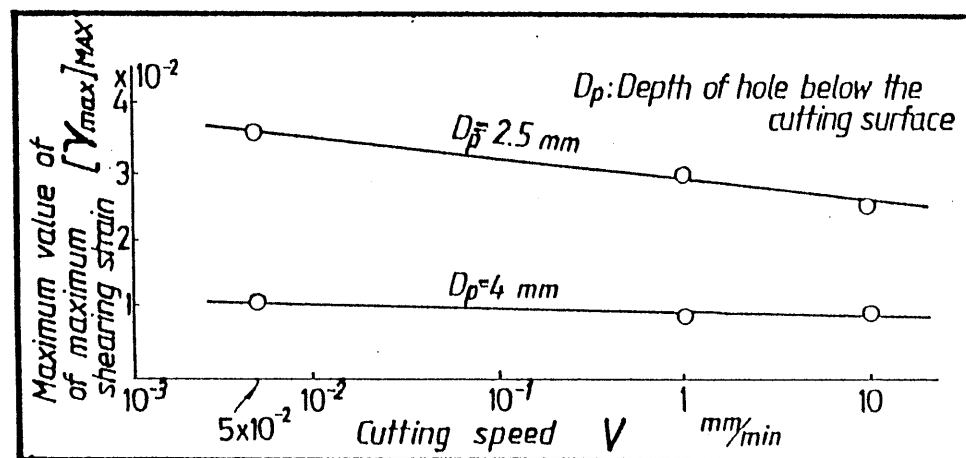


図6-24 切削速度と円孔縁の最大せん断ひずみの最大値

$D_p = 2.5$ [mm], 4 [mm]

6・3・9 切削油剤の効果

5・3・9で述べたように、切削油剤を用いた湿式切削によって被削材全域での残留ひずみを軽減できる。有円孔材の場合にも同様に図5-19の方法によって、切削面のみならずあらかじめ薄く油剤を塗布した後に、乾式と同一の条件で切削を行った。

得られた等色線を図6-25に示す。さらに、この等色線より求めた円孔まわりの残留最大せん断ひずみの分布を、 $D_p = 2.5$ [mm]の場合について、図6-26に示す。同図より、切削表面に薄く油剤を塗るだけでも明らかに切削面より2.5 [mm]離れた位置にある円孔縁に残留するひずみを軽減していることがわかる。工具・切り屑接触面には油剤を塗布していないので、レビンダー効果が切削ひずみの軽減にも寄与しているためと思われる。

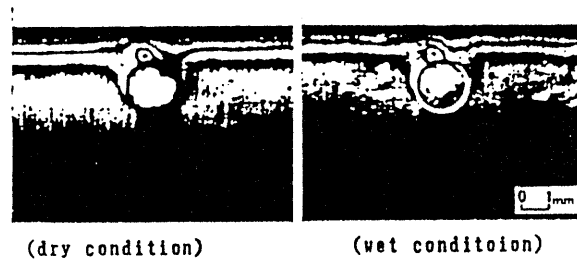


図6-25 乾式および湿式切削後の残留等色線

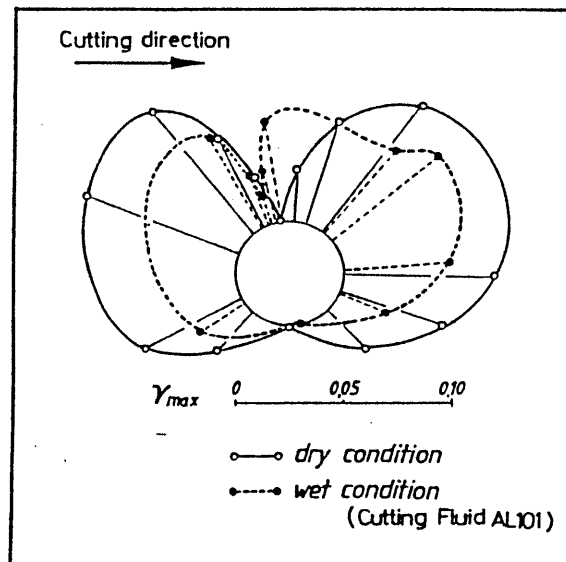


図6-26 乾式および湿式切削後の円孔縁の残留 γ_{max}

6・3・10 重複切削の影響

3・3・2で述べたように、初回切削によって一度、表面に近い部分に勾配をもつひずみの硬化層が形成されてしまうと、その被削材をさらに重ねて切削しても無ひずみ材の切削とは異なって、より弾性的なひずみの挙動となる。

円孔のある被削材について重複切削するとき、円孔周囲のひずみ分布におよぼす影響を皮膜法によって調べた。無ひずみの有円孔被削材を、切り込み量 0.1 [mm] で乾式切削した後に全く同一条件で繰り返し切削した時に得られる重複切削中の等色線を、 $D_p = 4$ [mm]の場合について図6-27に示す。重複切削の終了後に残留する等色線を図6-28に示す。

図6-27よりわかるように、重複切削でのひずみは弾性的であり、図6-28に示すように、切削後残留する重複切削による等色線の増分は少ない。このことは、3・3・2および3・3・3で述べたように、繰り返し切削する際のひずみ硬化した延性材料の切削ひずみ挙動によって説明できる。

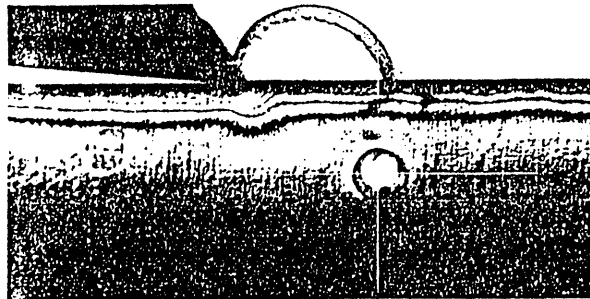


図6-27 有円孔材重複切削中の等色線 ($D_p = 4$ [mm], 乾式)

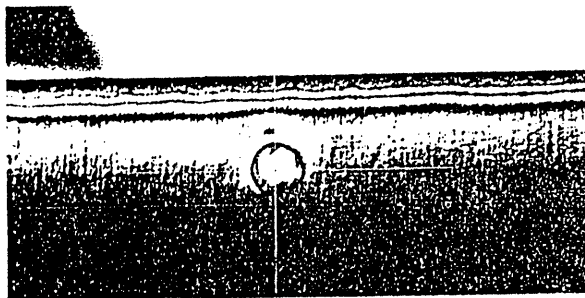


図6-28 有円孔材重複切削後の残留等色線

次に、重複切削による新たなひずみの増分が初回切削に比べて極めて少ないことに着目して、最終的な除去深さは同じ量であるが、一回の切り込みで切削する場合と少ない切り込み量で重複切削する場合の円孔縁のひずみについて調べた。

残留等色線より求めた円孔まわりのひずみ分布を、切り込み量 0.1 [mm] で初回切削した場合および切り込み 0.05 [mm] で初回切削の後に再び 0.05 [mm] で重複切削した場合のそれぞれについて図 6-29 に示す。

図 6-29 より、切削ひずみ分布におよぼす切り込み量の影響は、初回の切り込み量が支配的であり、同じ切り込み深さでの重複切削によるひずみ増分は、ごくわずかであることが明らかである。したがって、初回切削の切り込み量を少なくして重複切削することにより、円孔まわりの残留ひずみを大きく減少させることができる。

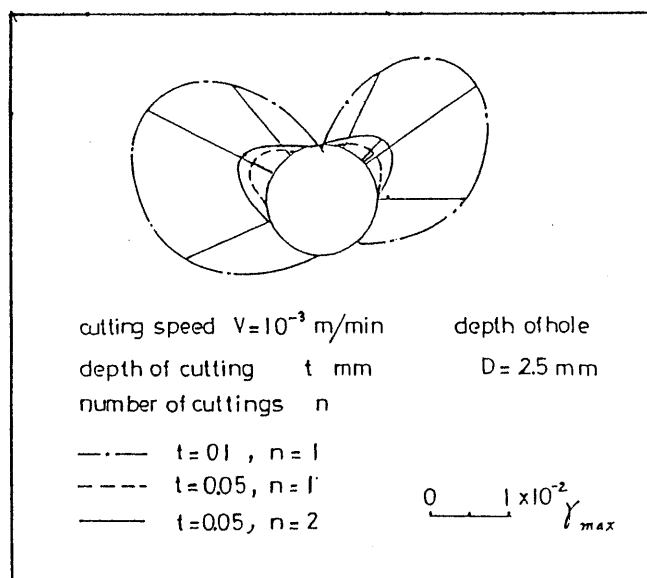


図 6-29 初回切削および重複切削後の円孔縁の残留 γ_{max} 分布

6・3・11 円孔間隔の影響

円孔が複数個ある被削材を切削する場合には、円孔の中心間隔が円孔まわりの切削ひずみ分布に影響をおよぼすことが考えられる。そこで、円孔間隔の影響について調べるために、切削ひずみが安定する定常域において、円孔直径2 [mm], 円孔深さ $D_p = 2.5$ [mm], 円孔間隔 $l = 3, 4, 5, 6, 8, 10$ [mm] の二円孔を持つ被削材を用いて切削実験を行い光弾性皮膜法により切削ひずみの分布を求めた。

得られた残留等色線の一例を円孔中心間隔 $l = 6$ [mm] の場合について図6-30に示す。6・3・2で述べたように有円孔材を切削するときの円孔まわりのひずみ集中は、刃先近傍の放射状応力と切削主分力によって生じる円孔まわりのせん断応力場での応力とが干渉するために生ずる。その結果、円孔縁では最上部よりやや切削開始側に最小値があり、その左側には引っ張りによるひずみ、右側には圧縮によるひずみが集中する特有の残留ひずみの分布が見られる。図6-30に示した二円孔の場合も同様に、移動する刃先の近傍での放射状応力場と円孔縁のせん断応力場との干渉はそれぞれ個別の円孔縁で起きる。

従って、切削後の円孔まわりに残留する等色線の分布形態は単独円の場合と殆ど変わらない。ただし、後続円孔縁に残留する等色線次数の方が僅かに低くなっている。

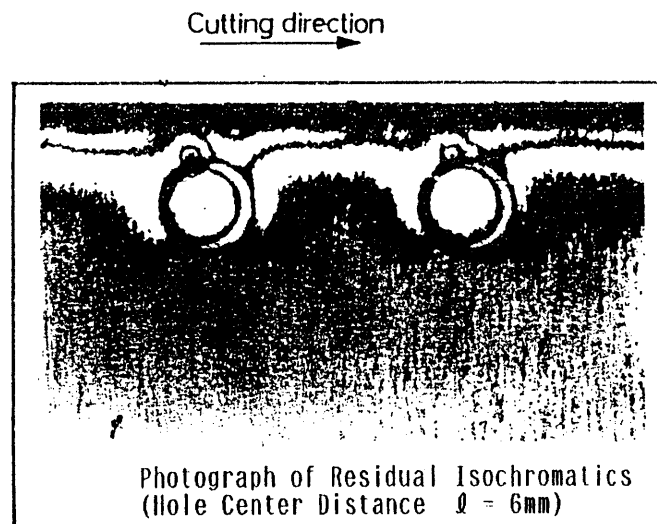


図6-30 2個の円孔を持つ被削材切削後の残留等色線
 $D_p = 2.5$ [mm], $l = 6$ [mm], 乾式切削

これらのことことから有円孔材切削の際に生ずる円孔縁のひずみ集中は、‘2個の円孔を持つ無限板が円孔を結ぶ中心線に対して直角方向に圧縮力を受ける場合’に見られる円孔縁の応力分布²⁹⁾によるひずみ等とは、その生成機構が異なっていることがわかる。

次に、円孔間隔 l/d に対する円孔縁の残留ひずみの最大値の変化について単独円孔との比 α_l を用いて図6-31に示す。同図において実線で示すAは2円孔で最初に干渉する円を、破線のBは後続円について示す。後方にあるBのひずみがAより少ない傾向を示しているのは、円孔間隔が小さい場合は円Aとの干渉中に円Bと接近するので後方円との干渉が軽減されるためであると思われる。

円孔間隔が接近すると単独円孔の場合よりもA円、B円ともに円孔縁の残留最大せん断ひずみは増加することが図6-31よりわかる。

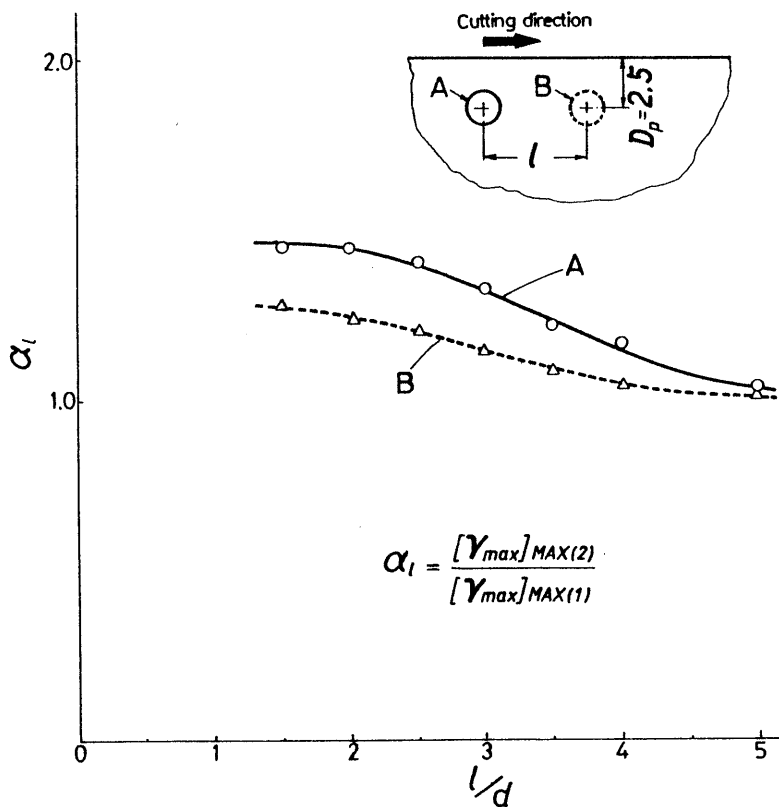


図6-31 円孔間隔が円孔縁の残留 $[\gamma_{max}]_{MAX}$ におよぼす影響

第6・4節 結 言

有円孔アルミニウム被削材を使用して二次元切削実験を行い，光弾性皮膜法により切削中および切削後の残留ひずみを調べ，これより円孔まわりのひずみ分布を求めた。

さらに，残留成分を含まない切削瞬間に相当する円孔近傍の応力分布状態をFEMによる弾性・弾塑性解を用いて求めた。これらの結果から，加工面の近傍に不連続部分として円孔が存在する場合の円孔周囲の切削ひずみ挙動について検討を行い，次のような結言が得られた。

- (1) 円孔周辺には，刃先の近傍での放射状応力場と切削主分力による円孔縁でのせん断応力場との干渉によって切削に特有なひずみ集中が生ずる。切削後の円孔上半部には二つの極大値をもつ分布のひずみが残留する。最下部のひずみは常に小さい。
- (2) 加工面あるいは切削終了端面に近接した位置に穴を設ける場合にはひずみ集中を考慮しなければならない。そのときの円孔中心位置は，加工面あるいは端面より円孔直径の2.5倍以上離れたほうが望ましい。切削ひずみの影響を受けない位置を選択する場合には，直径の5倍以上離さなければならない。
- (3) 円孔位置を切削開始側自由端面に近接して設ける場合には，切削による円孔まわりのひずみへの影響は少ない。切削開始位置近くの0特異点付近であれば切削によるひずみの影響は殆ど受けない。
- (4) 低速度域では，円孔縁の残留ひずみ分布におよぼす切削速度の影響は少ない。円孔の位置が深くなれば，切削速度は殆ど影響しない。
- (5) 切削油剤を使用することにより，円孔縁の切削による残留ひずみを軽減できる。
- (6) 切削ひずみ分布におよぼす切り込み深さの影響は，初回切削での切り込み量が支配的であるから，切り込み量を考慮した初回切削と重複切削との組み合わせにより円孔縁に生ずる残留ひずみを大幅に軽減できる。
- (7) 2個の円孔が近接してある場合には，円孔縁でのひずみ集中がそれぞれの円孔で個別に生ずるために単独円と同様のひずみ分布形状となるが，ひずみの値は後続円の方がやや少ない。2円孔間隔が接近すると，2円孔共に残留ひずみは増加する。

第7章 総括

本研究はアルミニウム材を切削除去するとき生成残留する延性被削材のひずみについて、光弾性皮膜法による可視化手法を用いて定量的に求め、ひずみの挙動を解明することによって切削ひずみの影響を最少化できる加工法を見いだすことを目的として行ったものである。本論文はその目的達成のために今日まで取り組んできた実験を中心に一部に数値解析の結果を加えてまとめたものである。これらを総括すると次のとおりである。

まず第1章で研究の背景や目的、国内外の研究状況などについて述べた。

次に、第2章では研究対象としたアルミニウム材や光弾性皮膜材の組成や性質および被削材製作方法、光弾性皮膜法による実験方法、実験装置、FEM解析条件などについて述べた。

第3章では、光弾性皮膜法によってひずみを可視化する方法を用いて、延性材を切削除去するとき生成するひずみおよび切削後に残留するひずみを定量的に把握できる根拠について述べた。また、この方法を用いて残留成分を含まない切削瞬間の最大せん断ひずみの分布およびその方向を解析し、半無限板状の無ひずみ材での切削ひずみ挙動を明らかにした。さらに、被削材が無ひずみ状態でなく一様にひずみ硬化した材料および切削除去により加工硬化した材料についても同様の方法で解析して無ひずみ材と同じくその切削ひずみ挙動を説明できることを示した。

第4章では、ひずみ硬化材の切削ひずみ挙動は無ひずみ状態の被削材よりも弾性的であり、その場合の切削加工による残留ひずみの増分は少ないことに着目した。重複して切削を繰り返すことが切削抵抗やせん断角および残留ひずみなど切削での諸現象におよぼす影響について実験的に示した。

第5章では、切削開始位置および終了位置が自由端である自由端面間切削と半無限板の中途から切削を開始し終了する場合について比較し、自由端面間の切削ではひずみ漸増域とそれに続く定常域および終了端付近の急増域が生ずることを明らかにした。皮膜法およびFEM解の結果から、特に切削終了側自由端で見られるひずみ急増現象とそれに伴う圧縮応力域の拡大は製品精度上の問題だけでなく工具離脱時に被削材のスプリングバックを引き起こすことから工具損傷問題に一つの回答を示した。

また、開始側自由端近くの無ひずみ特異点の存在を示した。さらに切削終端部の形状を切り込み深さの範囲で工夫することにより終端部でのひずみ急増を軽減できること、切削

油剤の使用による軽減効果などについて示した。さらに、フライス切削の場合にもひずみ漸増域、定常域および急増域が現れるために上向き加工の方が残留ひずみを少なくできることを示した。

第6章では、連続体でない被削材として加工面に近接した位置に円孔がある有円孔被削材の円孔まわりの切削ひずみ挙動について、光弾性皮膜法による実験結果およびFEM弾塑性解によって考察を行い、円孔まわりにひずみが集中するメカニズムについて明らかにした。また、円孔の深さや自由端からの距離によって変化する円孔周囲の残留最大せん断ひずみと円孔位置の関係をひずみ集中度で示した。さらに、切削速度や油剤および重複切削によるひずみ軽減効果についても示した。また、2円孔の場合の円孔中心間距離が円孔まわりの残留ひずみにおよぼす影響について示した。

加工履歴など切削ひずみの生成残留機構に関与する多くの項目を考慮した最適切削条件の選定により、被削材の切削除去にともなう不可避な損傷についてその最少化を図ることができる。このような経験的要素を排除した加工知識の定量化は、今後進められるCAD/CAMによるエキスパートシステムの構築の際には不可欠な条件であると思われる。

参考文献

- (1) W. Rosenhain & A. C. Sturney : Flow and Rupture of Metals during Cutting, Proc. Institutions of Mechanical Engineers, Part I, 1925.
- (2) M. Okosi and S. Fukui : Research on the Cutting Action of Planing Tool by Microkinematographic Photoelastic and Piezoelectric Methods, Institution of Physical and Chemical Research, Science Papers, Vol.22, 455, 1933.
- (3) 例えば, K. Hoshi : On the Built-up Edge and Counter-plot for it, JSME Abst., Vol. 5, No. 18, 1937.
竹山秀彦, 大野幸彦 : 構成刃先に関する基礎研究, 第1報 (構成刃先の発生), 日本機械学会論文集, 32巻, 242号, 昭和41年10月
奥島啓式, 星鉄太郎, 鳴滝則彦 : Ca脱酸鋼切削時の工具面付着物の挙動, 精密機械, Vol. 34, 7号, 1968, p478/483.
- (4) 例えば, M. E. Merchant : Mechanics of the Metal-Cutting Process, Journal of Applied Physics, 16, June (1945) 267.
E. H. Lee & B. W. Shaffer : The Theory of Plasticity Applied to a Problem of Machining, Trans. ASME, Journal of Applied Mechanics, 73, Dec. (1951) 405.
- (5) 例えば, M. C. Shaw, & K. L. Chien : Discussion for "Deformation Work Absorbed by the Work-piece During Metal Cutting" by E. G. Thomsen, J. T. Lapsley, Jr. & R. C. Grassi, Trans. ASME, May (1953) 591.
臼井英治, 白樫高洋, 高田幸次 : 切削における二, 三の特別な場合のすべり線場解, 精密機械, 38, 8 (1972) 672.
- (6) 臼井英治 : 現代切削理論コンピュータ解析と予測システム, 共立出版 (1990), 38.
- (7) 白樫高洋, 臼井英治 : 二次元流れ型切削のシミュレーション解析, 精密機械, 42, 5 (1976) 340.
- (8) 辻二郎, 西田正孝, 河田幸三 : 光弾性実験法, 日刊工業, 昭和52年, 8版, 421/422.
- (9) 辻二郎, 西田正孝, 河田幸治 : 光弾性実験法, 日刊工業, 昭和52年, 8版, 421.
- (10) 辻二郎, 西田正孝, 河田幸治 : 光弾性実験法, 日刊工業, 昭和52年, 8版, 141.
- (11) 文献(3)(4)に同じ.

- (12) 隈部晃, 三木教 : 切削中被削材内応力に及ぼす切屑挙動の影響, 久留米工業大学研究報告 第5号, (1981) 31.
- (13) 隈部晃, 三木教 : 切削中の切屑工具接触面応力とその影響, 久留米工業大学研究報告 第5号, (1981) 39.
- (14) 隈部晃, 三木教 : 切削中の鉛被削材内歪分布におよぼす切削圧の影響, 久留米工業大学研究報告 第6号, (1982) 35.
- (15) 隈部晃, 山本耕之, 北川亮三 : 切削ひずみの残留挙動について—延性材の切削—, 山口大学工学部研究報告, 第38巻第1号, 昭和62年10月, 9.
- (16) 隈部晃, 山本耕之, 北川亮三 : 皮膜法による切削抵抗の測定, 山口大学工学部研究報告 第39巻第1号, 昭和63年10月, 47.
- (17) 隈部晃, 山本耕之 : 延性材切削ひずみ挙動の光弾性法による解析, 精密機械, 54, 11 (1988) 2144.
- (18) A. Flamant : EQUILIBRE D'ELASTICITE—Sur la repartition des pressions dans un solide rectangulaire charge transversalement, Compt. Rend., Paris, 114, (1892) 1465.
- (19) 益子正己, 隈部淳一郎 : 低い削り速度でも良い表面精度をうる二, 三の新しい切削加工法(低温切削・反転仕上切削・超音波振動切削), 日本機械学会誌, 第62巻480号, 98.
- (20) 参考文献(4), (5) に同じ.
- (21) 参考文献(17)に同じ.
- (22) Pekelharig, A. J. : The Exit Failure in Interrupted Cutting, Annals of the CIRP, Vol. 27, (1978), 5.
- (23) M. C. Shaw : Fracture of Metal Cutting Tools, Annals of the CIRP, Vol. 28, (1979), 19.
- (24) 参考文献(17)に同じ.
- (25) 参考文献(17)に同じ.
- (26) S. Timoshenko & J. N. Goodier : Theory of Elasticity, McGraw-Hill (1951), 33.
- (27) 西田正孝 : 応力集中, 森北出版, 1973年増補版, 28.
- (28) 西田正孝 : 応力集中, 森北出版, 1973年増補版, 251/252.
- (29) 西田正孝 : 応力集中, 森北出版, 1973年増補版, 434/437.

謝 辞

本論文を終わるに臨みまして、本研究に対して終始懇切なご指導とご鞭撻を賜りました山口大学教授北川亮三博士，ならびに同大学助手関谷克彦氏に衷心より感謝の意を表します。また，学位論文の作成に当たりまして貴重なご指導とご助言を賜りました山口大学教授瀧本昭夫博士，飯野牧夫博士，河野俊一博士ならびに山口大学助教授石田 武博士をはじめ最先端の専門分野の研究についてご教授戴きました博士後期課程ご指導の諸先生方や山口大学大学院工学研究科および山口大学工学部機械工学科加工学研究室の卒業生各位，さらに生産ラインを停止して特別に均一高品位の材料を溶解圧延し提供戴きましたアカオアルミ株式会社取締役浜野駿氏，および日頃から本研究の遂行に当たりましてご協力戴いています久留米工業大学講師山本耕之氏に厚くお礼申し上げます。

研究者としての道を歩む手ほどきについてご指導戴き，研究の基礎をご教授下さいました三木 教博士（元山口大学教授，久留米工業大学名誉教授）ならびに博士後期課程に学ぶ機会を与えて戴きました高田 勝博士（元久留米工業大学学長）に深く感謝しお礼申し上げます。