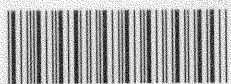


# 回転成形における 材料流れに関する基礎的研究

(A fundamental study on the metal flow  
in rotary forming)

2007年3月

横浜国立大学附属図書館



11911122

金 雄

377.51  
1<1

博士学位論文

# 回転成形における 材料流れに関する基礎的研究

(A fundamental study on the metal flow  
in rotary forming)

2007年3月

横浜国立大学附属図書館



11911122

指導教員 川井 謙一 教授

横浜国立大学大学院

金 雄

# 目次

第1章 緒言	1
第2章 V形工具およびW形工具押込みにおける材料流れ	9
2.1 緒論	11
2.2 実験方法	12
2.2.1 V形工具とW形工具	12
2.2.2 実験条件	13
2.2.3 モアレ法	14
2.3 解析方法	15
2.3.1 解析モデル	15
2.3.2 解析条件	16
2.4 結果および考察	17
2.4.1 プロファイル	17
2.4.2 モアレ縞	20
2.4.3 変位ベクトル	27
2.4.4 荷重およびストローク	29
2.4.5 n値が変化する場合の押込み荷重	30
2.5 結論	31
第3章 環状溝の転造における材料ながれ	33
3.1 緒論	35
3.2 実験方法	36
3.2.1 環状溝の転造	36
3.2.2 実験条件	36
3.2.3 材料試験	37
3.2.4 ビッカース硬さ試験	38
3.2.5 疲労試験	38
3.2.6 残留応力	40
3.3 解析方法	47
3.3.1 解析モデル	47
3.3.2 解析条件	48
3.4 結果および考察	49
3.4.1 圧縮試験	49

3.4.2 疲労強度	49
3.4.3 残留応力	50
3.4.4 ビッカース硬さ	55
3.5 ねじ転造への応用	57
3.6 結論	59
第4章 スプリットティングにおける材料流れ	61
4.1 緒論	63
4.2 実験方法	64
4.2.1 スプリットティング	64
4.2.2 実験条件	65
4.3 解析方法	68
4.3.1 解析モデル	68
4.3.2 解析条件	68
4.4 結果および考察	70
4.4.1 最大加工力	70
4.4.2 プロファイル	74
4.4.3 2次元解析による最大加工力	83
4.4.4 2次元解析によるプロファイル	85
4.5 結論	97
第5章 ボスフォーミングにおける材料流れ	99
5.1 緒論	101
5.2 実験方法	102
5.2.1 ボスフォーミング	102
5.2.2 実験条件	103
5.3 解析方法	105
5.3.1 解析モデル	105
5.3.2 解析条件	105
5.4 結果および考察	107
5.4.1 ボス高さ	107
5.4.2 最大ボス厚さ	109
5.4.3 最大加工力	111
5.4.4 2次元解析によるボス高さ	113
5.4.5 3次元解析によるボス高さ	120
5.4.6 3次元解析による最大ボス厚さ	123

5.4.7 3次元解析による最大加工力 .....	124
5.5 結論 .....	125
第6章 結言 .....	127
参考文献 .....	133
謝辞 .....	139
付録 .....	143

# 第 1 章 緒 言

## 第1章 緒言

様々な機械部品などのなかに特に回転加工による部品はよく使われている。その回転加工は生産性が高く、連続生産が可能で、加工力を低減出来る加工法である。ねじ転造や機械要素部品などの転造において製品の精度と強度の両面において最適な転造条件を確立することは工学的に重要な課題の一つである。しかし変形機構の解明が十分でないためトライ・アンド・エラーによる開発を余儀なくされているのが現状である。そこで、回転成形における材料流れを数値シミュレーション等で予測できる技術を、実成形との相関をとりながら開発する必要がある。

本研究では回転成形の材料流れを研究する。まず転造のような回転成形を考える場合変形機構は素材軸に直交する断面内における回転圧縮と素材軸を含む断面内における回転押し込みの組み合わせとみなすことが出来るので塑性域の干渉を伴うV形およびW形工具の押し込みにおける材料流れを実験によって調べた。ABAQUS、LS-DYNA 有限要素法プログラムを用いて実験の結果を比べ、数値シミュレーションの結果と比較して数値シミュレーションでの再現性を明らかにした。そしてV形およびW形工具の押し込みにおける材料流れより、さらに回転を加えた際の材料流れを調べるために環状溝の転造における材料流れを実験と共に数値シミュレーションによって材料流れを解析した。以上より回転成形における材料流れに関して、より複雑な形状の回転成形加工としてスプリッティングにおける材料流れ、ボスフォーミング加工における材料流れを実験と数値シミュレーションによって明らかにした。

まず第2章ではねじ転造を想定して A1050-H 材と A1050-O 材に対するV形およびW形工具押し込みにおける材料流れを取り上げ、加工硬化特性の違いによって製品の表面プロファイルや変位ベクトルが著しく変化することを実験的に確認するとともに、平面ひずみ状態を想定した弾塑性有限要素法による数値シミュレーションによって実験による材料流れの特徴が再現出来ることを明らかにした。V形およびW形工具押し込み実験は Fig. 1-1 に示す。V形およびW形工具押し込みにおける材料流れに関する研究は Hayama[1]と Kawai[2][3]の理論的解析と実験的解析などのレポートの報告がある。Kudo と Tamura[4]の報告では押し込みにおける平面変位の問題に最小エネルギー法を用いて解析したところすべり線場理論[5]から得られた結果とよく一致するとの報告がある。そして Shindo[6]の報告ではすべり線場法を用いた押し込み強度について、強度は材料の応力・ひずみと関係があることがわかった。Nakamura と Tozawa[7]の報告では Moire 法による  $n$  値の変化における平面変位などの報告で、工具の直下では押し込み方向の圧縮変形領域であってその周辺はせん断変形領域である。そして材料流れはその材料の弾性変形の影響と加工硬化の影響を受けることがわかった。また Kawai[8]の報告では転造環状溝付き製品の疲労強度がプロファイル形成度から受ける影響と押し込み速度の増大が強度の向上を招くという結果であった。そして工具先端直下の塑性変形域の存在の有無に工具半角、摩擦状態、押し込み量

が依存することがわかった[9]。

そして Hill[10]と Grunzweig[11]の延性材料の圧子による押し込み理論と実験においても、圧子の角度と材料流れ、圧子直下の表面に材料流れが起きることがわかった。

以上の報告より、様々の方向からV形およびW形工具の押し込みによる材料ながれ、強度などに関して関係をより明らかにするために、本研究では実験と共に数値シミュレーションによって材料流れに関する数値シミュレーションの重要性、再現性を検討した。

そして本研究では、ねじ山領域のような工具の下段部に塑性変形が起きるねじ転造のような材料流れを解明するため、変位分布 (Moire 法[12][13]を用いて)、押し込み量・荷重の関係、変形プロファイル、変位ベクトルを調査した。ねじ転造における材料流れを調べるための基本研究としてアルミニウム A1050 の H 材と O 材を用いて V 形と W 形工具押し込みの実験を行い、同じ条件で ABAQUS[14]、LS-DYNA[15]の有限要素法プログラムを用いてシミュレーションを行った。そして実験における平面ひずみ問題[16]を取り扱うために解析でも平面ひずみ問題のモデルを使用し、2次元と3次元の解析を行った。結果としては実験の変形プロファイルと解析後の変形プロファイルを比較し、実験の変位結果と解析の変位結果を比較し、加工力なども比較した。

以上の結果によって数値シミュレーションの重要性、再現性を検討した。そして応用として実際のねじの材料を想定した  $n$  値の変化による Force/ $F$  の関係について解析を用いて調べた。そして  $n$  値の変化による残留応力[17]との関係について調査した。

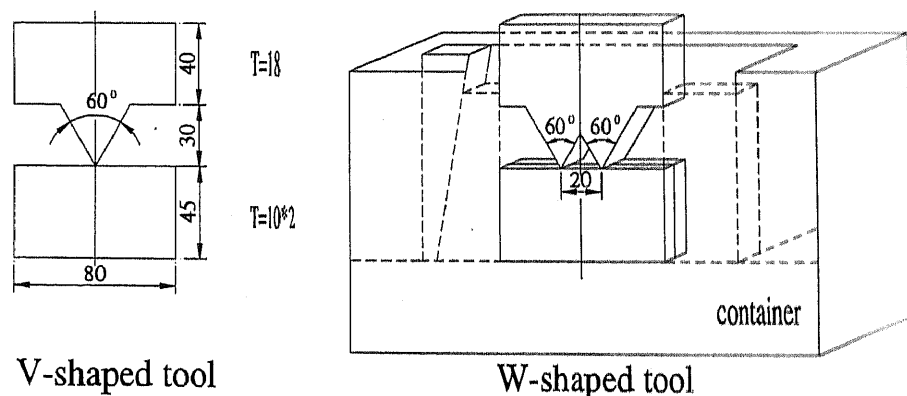


Fig. 1-1 Scheme of die-set for wedge indentation

第3章では、ねじ転造と同様に工具押し込みに伴う塑性域の干渉とプロファイル形成が可能な3条の環状溝における材料流れと製品に形成される残留応力の関係に着目し、工具押し込み速度が速い転造の場合には遅い場合と比較して転造された溝の谷底表面直下に高い軸方向圧縮残留応力が形成され、この残留応力と加工硬化によって高い疲労強度が得られる



ことを S45C と SUS304 に対して実験的に確認している。次いで、3次元の弾塑性有限要素法で工具押し込み速度によって変化する圧縮残留応力ならびに加工硬化層の形成の再現性を確認した。また転造における工具の断続的な押し込みと工具押し込み速度の相違を2次元弾塑性有限要素法においても負荷と除荷の繰返しによって再現出来ることを提案するとともに、押し込み速度によって谷底表面直下の残留応力が変化する様子は2次元弾塑性有限要素法によっても解析出来ることを明らかにした。

押し込みによる材料流れの研究を用いてさらに一般転造加工時の材料流れに関する研究を行った。転造加工とは素材または工具（ロール）あるいはその両方を回転させて工具の形に添った形状を素材に刻印する方法であり、回転しながら行う鍛造とみることが出来る。Fig. 1-2 に実験の試料を示す。転造には棒材または管材の比較的表面層のみに変形を施し、平均直径がほとんど変わらないねじ、歯車、フィンの転造、あるいは回転しごき加工などの他に、素材の直径を減らして素材内部まで変形が及ぶボールの転造やヘリカルローリングなどがある。また、転造加工は鍛造のように大きな力を必要とせず、切削加工のように切りくずを出さないことから、これらの短所を補う別の加工法とみることが出来る。

転造加工の特徴とは素材と工具は点で接触し、塑性変形が局部に限られているから比較的小さい加工力で成形が行える。素材に備わった繊維状に並んだ結晶組織を破断しない。塑性変形量が大きければ材料は加工硬化し、結晶が微細化して硬い組織になるから静的強度・衝撃強度及び疲労強度が増大する[18]。工具が少しずつ素材に押し込まれていくような転造では美しい表面で精度のよいものが得られるなど様々な特徴がある。

転造加工のなかで現在最も広く使われているのが、ねじ転造である。円筒形のねじ素材に転造ダイスを押し付けながら回転させる事によって、素材表面を塑性変形させ、ねじ山を形成する。この時、転造ダイスのねじ山が素材に食い込んで谷を形成し、押しつけられた材料が、半径方向に盛り上がって山を形成する。この加工法は一般に常温で行われているが、主として雄ねじの生産に適用され、雌ねじの転造には試験的に用いられているにとどまっている。機械構造物の破壊は、多くの場合疲労が原因であると言われている。金属材料の疲労は機械構造物の安全性や信頼性を高める上で、非常に重要な問題であると言える。その中で塑性加工の転造加工で作られるねじの強度の向上は必要不可欠になっている。

転造ねじの疲労強度についての研究は以前から行われている。以前の研究より、ねじの疲労強度[19]には多くの因子、Kawai[20][21][22]の報告によるプロフィール形成度や転造荷重などが影響を及ぼすことが調べられている。影響を与える因子の中で大きなものとしてねじ転造によって生じる残留応力の影響という物が考えられている。過去報告Yoshimoto[23][24][25]によれば疲労強度は工具の押し込み速度に依存しているとされている。しかし、工具の押し込み速度の依存性は明らかにはなっていない。

これらのことを踏まえ、本研究では、工具押し込み速度を変化させた複数環状溝の転造を行い、残留応力、疲労強度を測定し、転造品の残留応力における工具押し込み速度の影響を実験にて検討する。

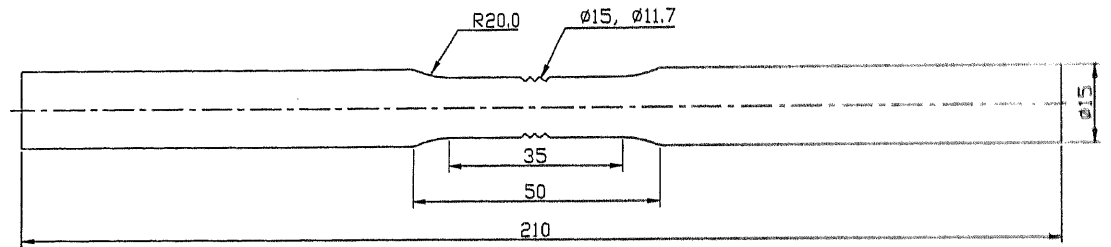


Fig. 1-2 Shape of the specimen (mm)

第4章では、Vプーリーの成形などに用いられるスプリッティングにおける材料流れについて研究を行った。まず Splitting とは metal spinning に類似な加工方法[26]で、Fig.1-3 に示すように円形の板材をジグに固定し、そのジグを回転させる。そこに自由に回転するロールを、ジグの軸に垂直に横方向から力を加え押し当てていく[27]。ロールは板材に当たると回転を始め、このロールをさらに押し込んでいくことで、板材の外周部を切り裂くようにして成形していく加工方法[28]である。

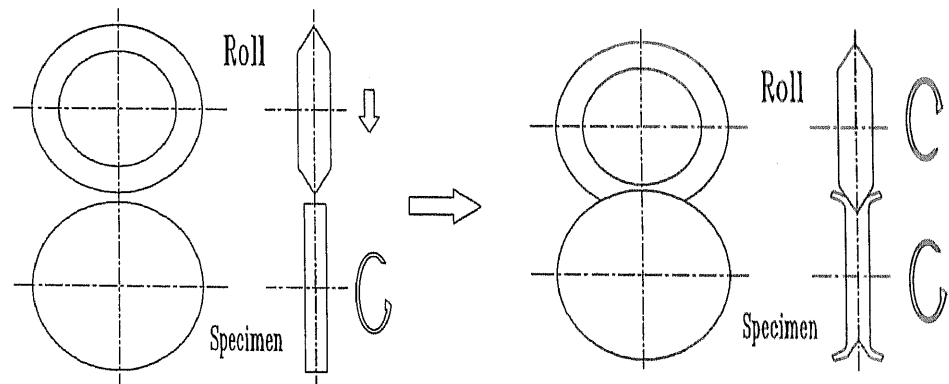


Fig. 1-3. Scheme diagram of splitting

この加工法は、1967年に W.J.Skinner によって考案されたもので、自動車の部品、Vプーリーやホイール等の製造に用いられている[29][30]。以前 D. Bauer[31]の研究調査として加工力[32]、工具の形状、試料、送り速度などについての研究報告がある。しかし、工業的には用いられているものの、変形機構が複雑であるということもあり、この加工法に対する研究はあまりなされていない。以上の背景より、スプリッティングについて、加工条件因子が加工に及ぼす影響や基本的なメカニズムについて調べることを目的とする。

解析ではスプリッティングにおける材料流れの解析に、環状溝の転造で提案した負荷と除荷を繰返す2次元弾塑性有限要素法を適用している。



## 第 2 章

# V 形工具および W 形工具 押込みにおける材料流れ

## 第2章 V形工具およびW形工具押込みにおける材料流れ

### 2.1 緒論

回転成形における材料流れに関する研究をするためにまず転造のような回転成形は素材軸に直交する断面内における回転圧縮と素材軸を含む断面内における回転押し込みの組み合わせとみなすことが出来るので塑性域の干渉を伴うV形やW形工具の押し込みの問題における材料流れを実験的に調べ、ABAQUS、LS-DYNA 有限要素法プログラムを用いて実験との結果を比べ、プログラムの再現性を検証した上により複雑な材料流れへの応用することを目的にする。

まず実験としてはアルミニウム板材H材とO材の2種類の材料で短軸圧縮試験を行ってその結果としてF値、n値を用いてプログラムなどで使用した。結果としては押し込み後のプロファイル、Moiré法による等変位線、変位ベクトル、加工力と押し込み量の結果などで押し込みにおける材料流れを調べた。そして解析では動的・高速問題に有効な動的陽解法、大変形な問題に有効なアダプティブメッシュを使用し2次元、3次元の解析を行った。解析結果としては実験と同じく押し込み後のプロファイル、変位ベクトル、加工力と押し込み量などで実験との結果と比較した。そしてn値の変化による残留応力との関係に関して調べた。

これらを踏まえて3章の環状溝の転造加工における材料流れでは2章のV形工具およびW形工具押し込み回転を加えて押し込みと回転の時、転造加工における材料流れを調べることである。

## 2.2 実験方法

### 2.2.1 V形工具とW形工具

試料の厚さは 18mm、工具の角度を 60 度、W 形工具の距離は 20mm である。試料はアルミニウム H 材と O 材が使われた。O 材は熱処理で 360℃に 2 時間焼き鈍し施した後冷却した材料である。熱処理していない材料を H 材と称することにする。単軸圧縮による材料試験結果と組成は Table 2-1 と Table 2-2 に示す。

Table 2-1. Material Properties in uniaxial compression of specimen used

Material	$F$ (Mpa)	$n$
A1050-H	129	0.070
A1050-O	128	0.288

Table 2-2. Chemical Properties in specimen used

Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
0.05%	0.25%	0.40%	0.05%	0.05%	0.05%	0.03%	99.50%

そして Moiré 法でひずみ分布を格子の変位より材料流れを測定するために試料片表面に格子を焼き付ける必要がある。Moiré 法は 250line/inch のリニア格子、材料流れは 1 辺が約 1 mm の正方格子である。格子の焼付方法は試験片の裏面をアセトンで脱脂し感光液を薄く均一になるように塗り十分に乾燥させる。そしてこの試験裏面に格子が試料の縦方向あるいは横方向になるべく平行となるように格子原版を置き真空室内に入れポンプで真空にして資料と格子原版を密着させて焼き付けを行う。照射時間は両方とも 12 秒間とした。

照射後現象液に約 20 秒間つけてすぐに流水で水洗いを十分に行う。そして十分に乾燥させる。十分に乾燥させたら染色液に一瞬だけつけてすぐに流水で水洗いを行う。流水はゆっくりの方がきれいに仕上がる。水洗いの後十分に乾燥させて完成した。そして焼き付けた格子が押し込み方向とそれに垂直な方向に一致するように焼き付けた面を重ね合わせて厚さ 20 mm になるようにした後テナ内にセットし材料試験機を利用して工具を押し込んだ。実験装置は Fig.2-1 に示す。

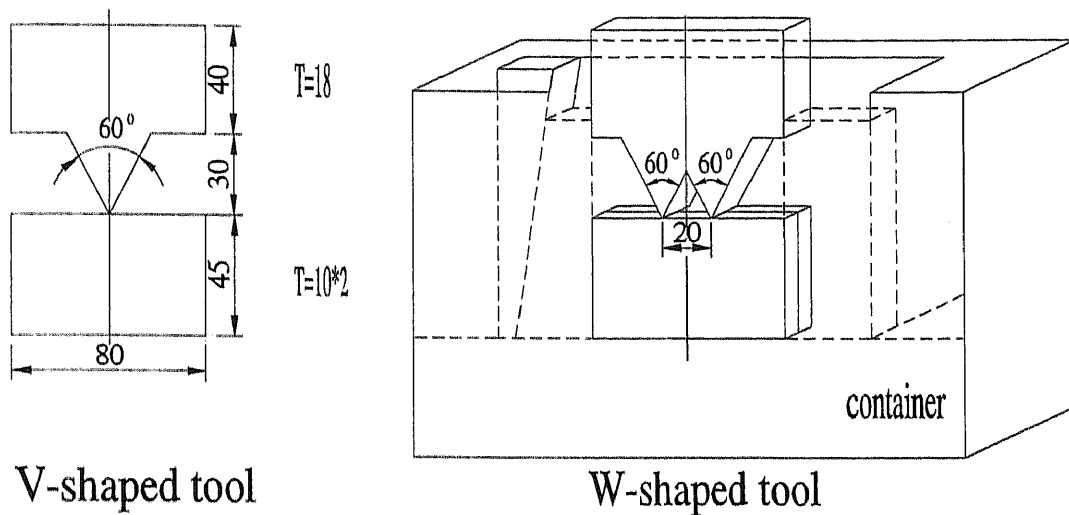


Fig. 2-1 Scheme of die-set for wedge indentation

実験方法は平面ひずみにおけるV形W形工具押し込みを考えているので平面ひずみ状態を作るために拘束台を用いる。まず裏面に格子を焼付けた2個の試験片を焼付け面を互いに向かい合わせ格子のはがれ防止のためにテフロンシートを間にはさんで拘束台にセットする。そしてストレインアンプがあったらロードセル、ダイヤルゲージを接続して拘束台ごとロードセルの上に乗せ圧子をセットする。そして50t万能試験機で圧子の押し込みを行う。

### 2.2.2 実験条件

押し込み量の決定は荷重のかかり始めた点を0mmとしてダイヤルゲージで測定する。実験条件と材料はTable 2-3に示す。

Table. 2-3. Experimental conditions and material properties

Tool type	V, W-shaped tool
Material	Aluminum (JIS A1050P-H24) Heart-treatment -- 360°C hearting 2hours and cooling (H – heart-treatment, F – 130.34MPa, n – 0.070 O – not heart-treatment, F – 128.478MPa, n – 0.288)
Indentation	3, 6, 9mm

### 2.2.3 モアレ法

ひずみ変位を調べるための方法では様々な方法の中で Moiré 法はよく使われている。Moiré 法とは二つ折にしたすだれに、曲線状の縞模様が現れるのはよく見かける現象である。これは、類似した縞束が重なり合って生じる一種の干渉縞であり、一般にモアレ縞と呼ばれている。すだれの場合には、二組の格子の重なり具合によって、ちょうど隙間がふさがれて、光の通過が妨げる線に沿って縞ができる。このような干渉の仕方を機械的、あるいは幾何学的干渉といい、波動現象として光の干渉と区別している。

二組の細かい平行格子を重ね合わせ、双方の間に移動、回転、あるいはひずみを生じると、これに応じたモアレ縞模様が現れる。このモアレ縞の現象を利用して、変位や変形の測定をするのがモアレ法である。

光の干渉が長さまたは距離の厳密な測定に用いられるがこの場合、ものさしの目盛りに相当するものは光の波長であり、そのオーダーは大体  $1/2000\text{mm}$  である。

これに対してモアレ法における測定の最小目盛りは用いる格子のピッチであり、例えばひずみ測定の実験に用いられているものは1インチ当たり 200 本~1000 本の線束よりなる格子であるからピッチは  $1/10\sim 1/50\text{mm}$  となる。つまりモアレ法は光干渉による測定に比べて大体 50 倍~200 倍ほど大まかなものさしを使うことにする。



## 2.3 解析方法

### 2.3.1 解析モデル

本研究は実験と同じ条件で ABAQUS プログラムの Explicit 法、Adaptive Mesh を用いて行った。特に Adaptive Mesh は塑性変形が大きい解析などで有効な法である。この解析の結果と実験の結果を比べた。解析はプロファイル、変位ベクトル、荷重とストロークなどを解析した。解析の効率を考慮して元のモデルの半分、そして Adaptive Mesh は最も変形が多い工具の下の領域を適用した。解析モデルは Fig. 2-2 に示す。

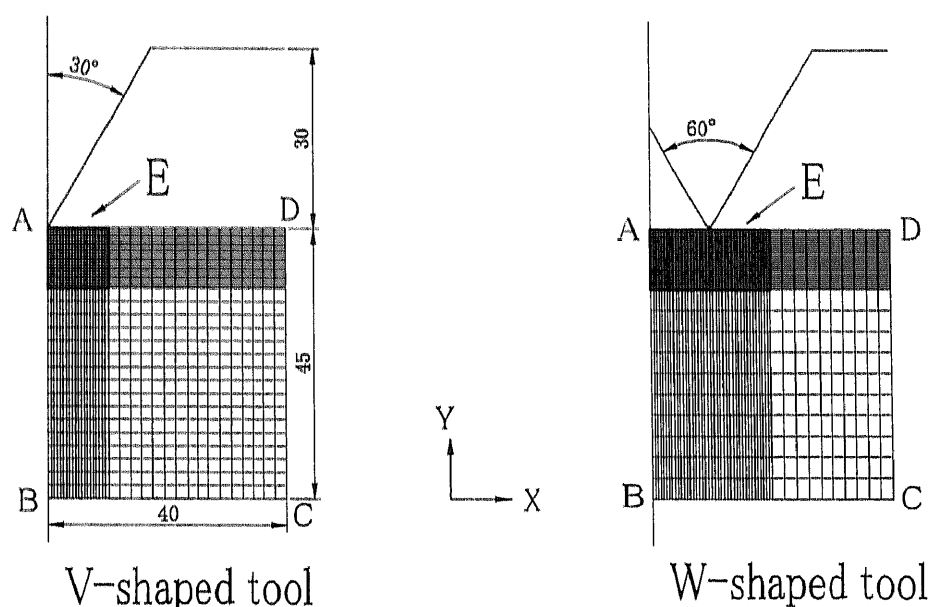


Fig. 2-2 FEM simulation model for wedge indentation of V- and W-shaped tools

Explicit 法は動的応答時間が場合や変形が大きい場合効果的である。Explicit 法は変形が大きい場合と回転変形が大きい場合などに主に使われている。このような Explicit 法は動的解析の早い応答性や適切な過程を行える。そして Adaptive Mesh は解析時起こる変形に高い Mesh の適切性があるのでメタルフォーミングのような大変形解析に効果的である。

節点と要素はそれぞれ V 形の場合は 1369、1296、W 形の場合は 2091、2000 である。試料モデル要素は CPE4R(4-node bilinear, reduced integration with hourglass control of plane strain element), そして工具モデル要素は R2D2 (2-node linear, for in planar geometries, plane strain or plane stress)が使われた。解析に使われたマシンは Pentium4, 2.4GHz。解析時間は one-step 当たり 1 時間。摩擦係数は 0.1 から 0.2, 0.3 までの 3 種類をやって最も実験の結果に近い傾向が出た 0.3 に決めた。

### 2.3.2 解析条件

解析は2次元を元にして厚さ方向への材料流れを調べるために3次元解析も行った。工具は実験と同じくV形、W形工具の剛性体で1/2モデルにした。境界条件も実験の条件に合わせて特に変形が多い工具の下のところはアダプティブメッシュを使用した。そして摩擦係数は予備解析によってより実験の結果に合う数値 0.3 にした。押し込み量は実験と同じく3mm, 6mm, 9mm とした。解析条件は Table 2-4 に示す。

Table.2-4 Analysis conditions for FEM analysis

Tool Type	V-shaped type and W-shaped type
Material	H- and O-material
Tool	Rigid material
Boundary Conditions	A-B ; $v_x=0$ , $v_y$ unknown B-C ; $v_x$ unknown, $v_y=0$ C-D ; $v_x=0$ , $v_y$ unknown D-A ; $v_x$ unknown, $v_y$ unknown E ; adaptive mesh
Coefficient of friction	0.3
Indentation	3, 6, 9 mm
Mesh Type	Material ; CPE4R (4-node bilinear, reduced integration with hourglass) Tool ; R2D2 (2-node linear, for in planar geometries, plane Strain or plane stress)

## 2.4 結果および考察

### 2.4.1 プロファイル

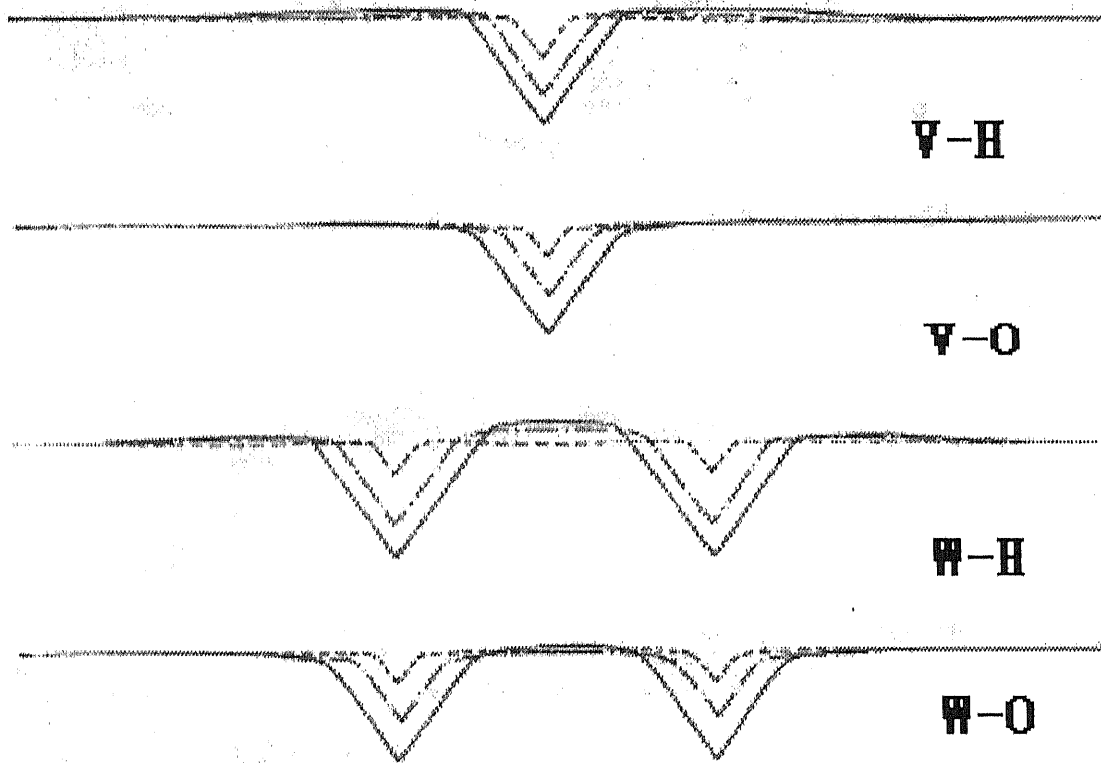


Fig. 2-3. Measured surface profile after wedge indentation of  $d=3, 6,$  and  $9\text{mm}$

Fig. 2-3 はそれぞれの押し込み量によるプロファイルを示すように V 形、H 材の場合、押し込み量 3 - 6 mm には Y 軸の表面に盛り上がりが増加している様子が見える。6 - 9 mm の場合工具の下段部だけの盛り上がりが増加している。O 材の場合、9 mm 以外は盛り上がりが見えなかった。W 形、H 材の場合、3 mm のねじ山部分の凹み以外は 6 mm 以後の場合だけ表面の盛り上がりが見えた。O 材は 3 mm のねじ山部分の凹みのおうな表面の盛り上がりが見えなかった。

H 材の材料流れは表面の盛り上がりになるがこれは変形が圧子下段部に集中することだと考えることができる。しかし O 材の場合は圧子下段部には変形が集中しないため材料流れは圧子の下段部に流れていく。だから H 材の方が O 材より表面の盛り上がり大きい。

これは V 形、W 形両方みられる。W 形の場合、圧子の間に O 材より H 材の方がより大きい盛り上がりが見える。これは圧子表面へ材料流れが流れる。しかし O 材の場合圧子下段部への材料流れが流れて弾性領域に吸収されることが認められる。

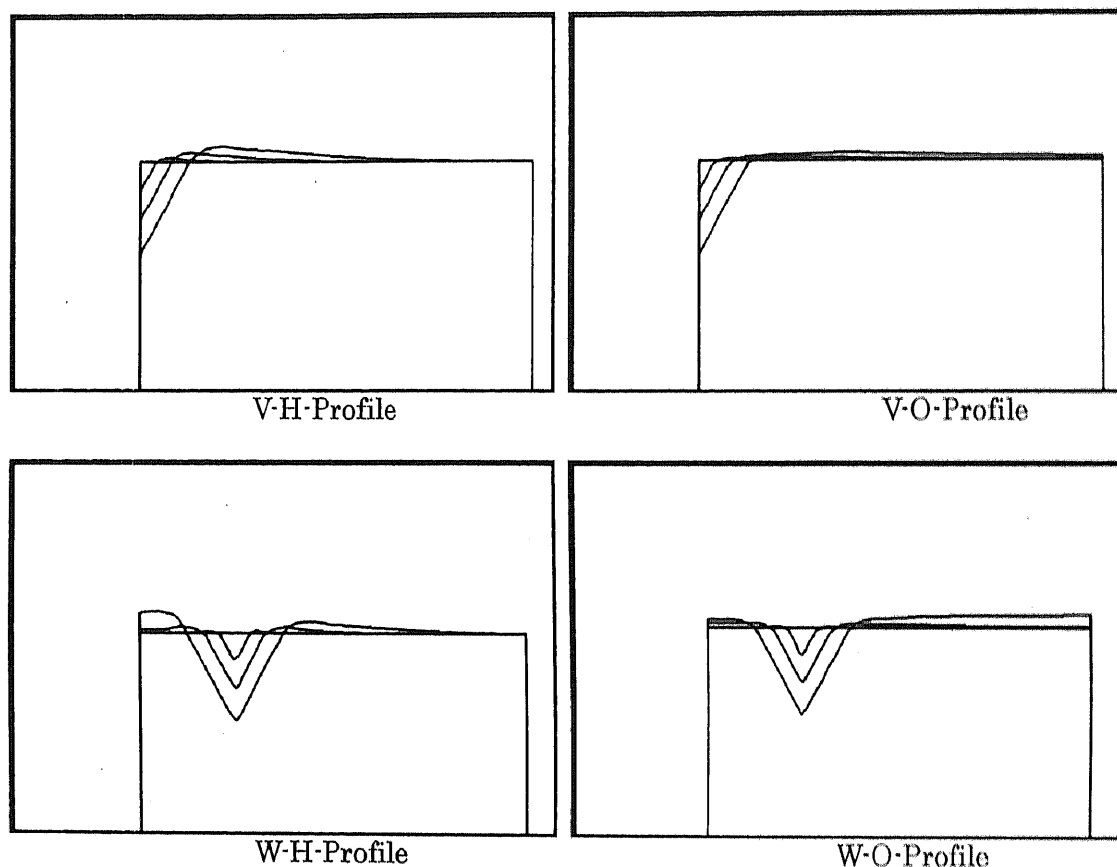


Fig. 2-4. Calculated surface profile after plane-strain wedge indentation of  $d=3, 6$  and  $9\text{mm}$  in 2-dimension

Fig. 2-4は解析によるプロフィールを示す。解析でも実験のようにV形とW形共にH材の方に盛り上がりが見えた。W形、H材の場合、圧子の間に大きい盛り上がりが見えた。これは圧子の間に塑性域の干渉が生じることがわかる。このように解析結果でもH材の場合、変形が圧子の下段部に集中し、材料流れは圧子の横方向に広がり表面が盛り上がるのがわかる。O材の場合は変形が圧子の下段部に集中するのではなく圧子の下段部に広く広がっていくことで表面が盛り上がるのではなく内部に吸収していくことがわかる。

ここで実験の結果と解析の結果を調べみると実験より解析でO材での表面盛り上がりが見える。これはH材の場合は変形が圧子の下段部近辺に起こるであるがO材の場合は圧子の下段部に広く広がっていくことと考えることができる。壁の部分に実験と解析の違いが見える。実験の場合緩やかなスロープの盛り上がり、壁の部分の盛り上がりが見えないが解析では実験よりは大きいスロープと多少盛り上がりが見えた。これは実験の場合は平面ひずみで厚さ方向への材料流れであるが解析の場合は2次元のため厚さ方向の材料流れを考慮していないためである。それで解析では厚さ方向の材料流れを考えて3次元の解析を行った。厚さ方向の材料流れの結果はFig2-5に示す。3次元の結果はFig. 2-6に示す。Fig. 2-6の結果は実験のように2次元の結果より緩やかなスロープと壁の部分の盛り上がりも見えなかった。

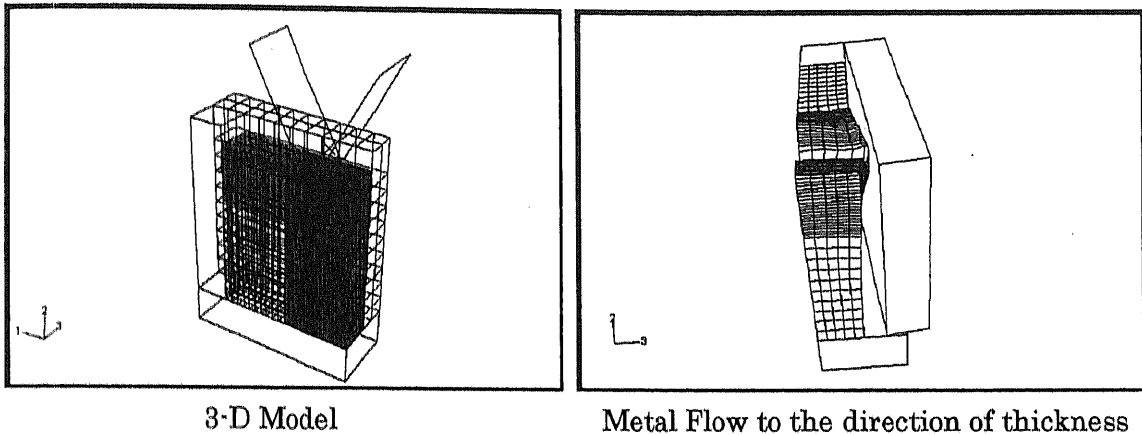


Fig. 2-5. Metal flow of thickness direction in 3-dimension

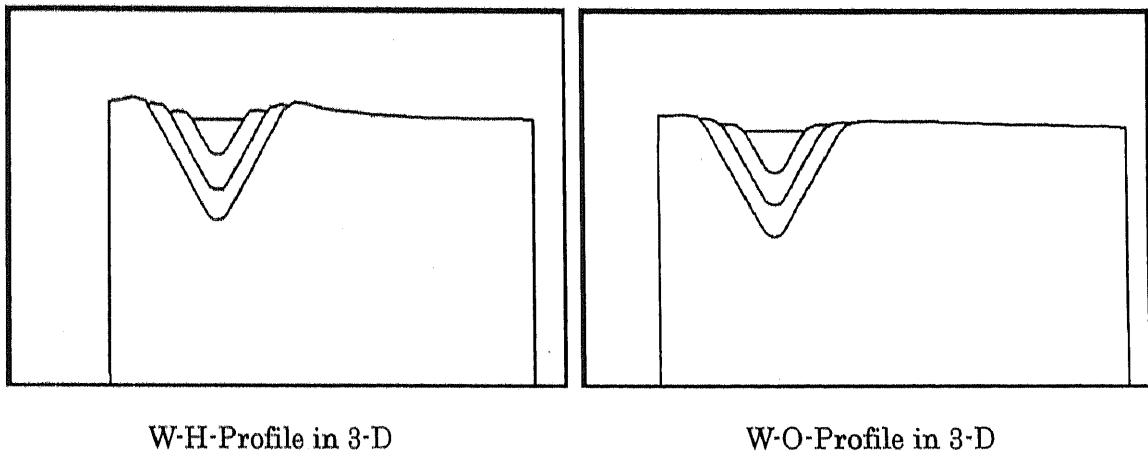


Fig. 2-6. Calculated surface profile after plane-strain wedge indentation of  $d=3, 6$  and  $9\text{mm}$  in 3-dimension

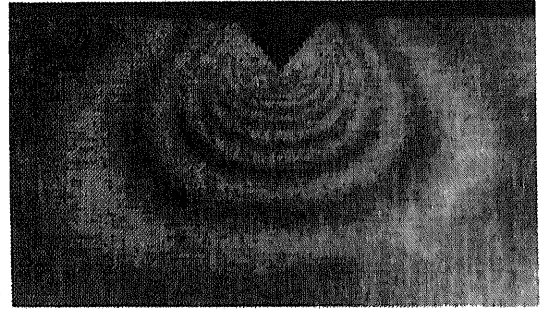
そして 3 次元の解析の場合は中央の盛り上がりも実験と似ている結果が出た。但し変位 Vector の場合は実験との相違な結果が出た。それは要素すべてに適用すると変位場合おかしい結果が出る可能性がある。Remesh の入る要素が境界条件（摩擦など）に与えられるとその境界条件を注意して設定しなければならない。Time と Step との関係については Time と Step との関係について Time と Step との関係によって Mesh の形あるいは荷重とストロークの関係に影響がある。（Step 比設定時間が早すぎると中央の部分が盛り上がりすぎ傾向が現れた。そして解析途中発散することがあった。）そして荷重—ストローク関係で時間比 Step を細かくすると荷重—ストロークの曲線がスムーズになった。但し荷重の値は実験結果の半分程度である。

## 2.4.2 モアレ縞

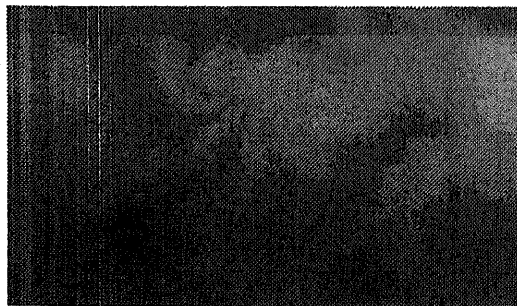
Fig. 2-7はV形、押し込み量3, 6, 9mm時のX、Y方向の等変位、すなわちMoiré縞を示す。H材の場合、圧子下段部と横の方に圧縮領域が広く広がっている。O材の場合、6mmまではH材のような盛り上がりや干渉がみえなかった。



A1050-H,  $y$ -fringes,  $d=3\text{mm}$



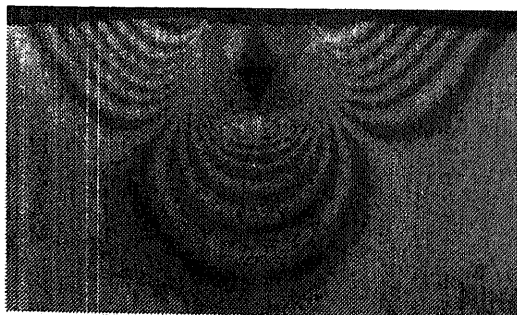
A1050-O,  $y$ -fringes,  $d=3\text{mm}$



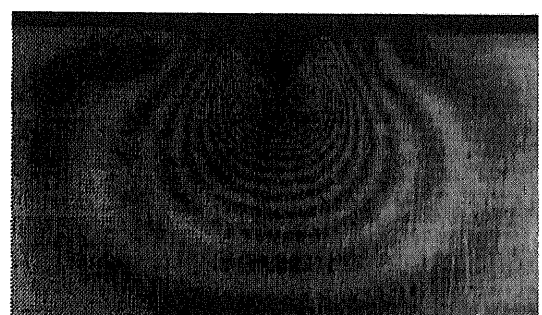
A1050-H,  $x$ -fringes,  $d=3\text{mm}$



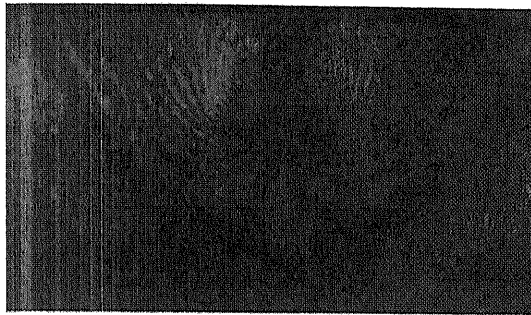
A1050-O,  $x$ -fringes,  $d=3\text{mm}$



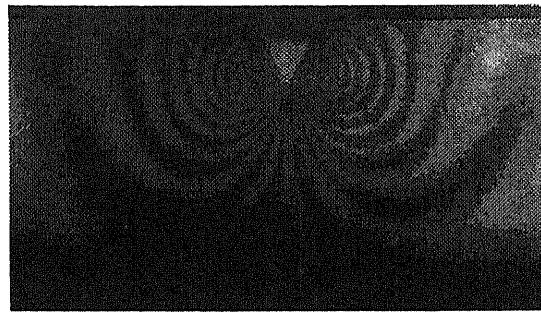
A1050-H,  $y$ -fringes,  $d=6\text{mm}$



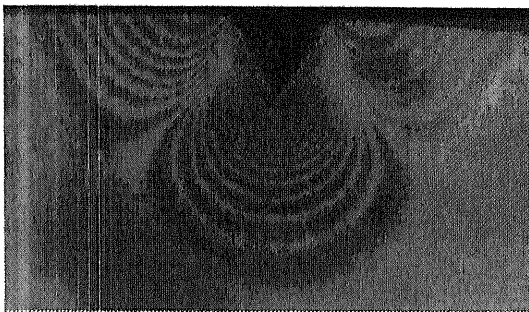
A1050-O,  $y$ -fringes,  $d=6\text{mm}$



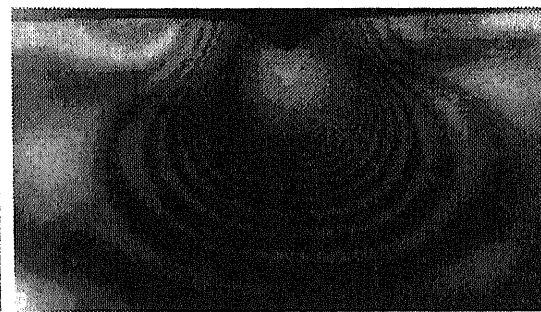
A1050-H,  $x$ -fringes,  $d=6\text{mm}$



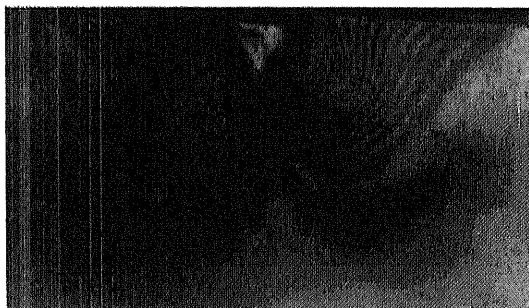
A1050-O,  $x$ -fringes,  $d=6\text{mm}$



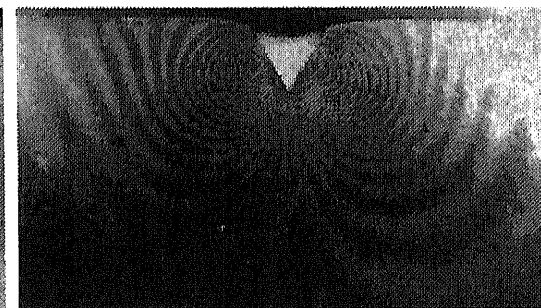
A1050-H,  $y$ -fringes,  $d=9\text{mm}$



A1050-O,  $y$ -fringes,  $d=9\text{mm}$



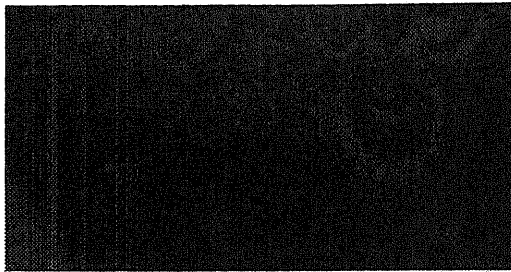
A1050-H,  $x$ -fringes,  $d=9\text{mm}$



A1050-O,  $x$ -fringes,  $d=9\text{mm}$

Fig. 2-7. Moiré fringes of wedge indentation of  $d=3, 6$  and  $9\text{mm}$  by V-shaped tool

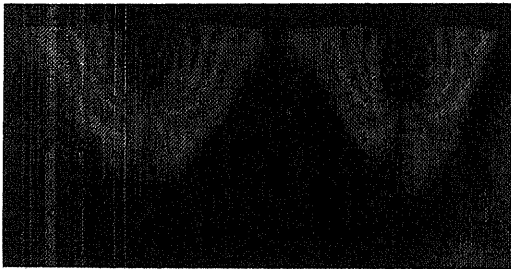
Fig. 2-8 は W 形の Moiré 縞を示す。ねじ転造加工のような圧子間に塑性干渉が起きた。H 材、Y 方向の場合、押し込み量  $3\text{mm}$  以後から表面の盛り上がりは V 形より増加していることがみえる。そして圧子間の部分の盛り上がりもみえる。これは圧子間の塑性干渉によることだと考えることができる。その塑性干渉は押し込み量の増加と共に増加する。しかし O 材の場合、押し込み量  $3\text{mm}$  に H 材のような多き干渉ではない干渉がみえた。押し込み量  $3\text{mm}$  以後の塑性干渉以後変位は材料の内部に移動、吸収されたと考えることができる。



A1050-H,  $y$ -fringes,  $d=3\text{mm}$



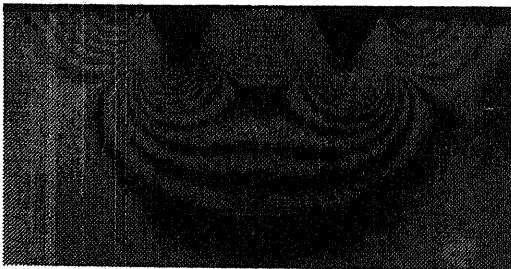
A1050-O,  $y$ -fringes,  $d=3\text{mm}$



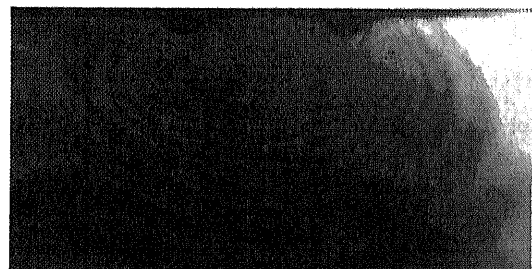
A1050-H,  $x$ -fringes,  $d=3\text{mm}$



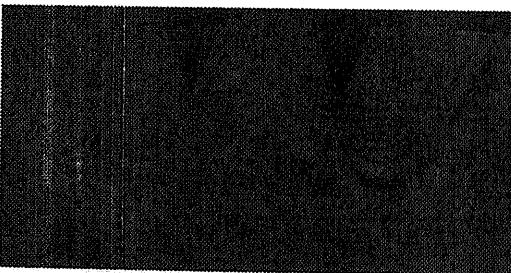
A1050-O,  $x$ -fringes,  $d=3\text{mm}$



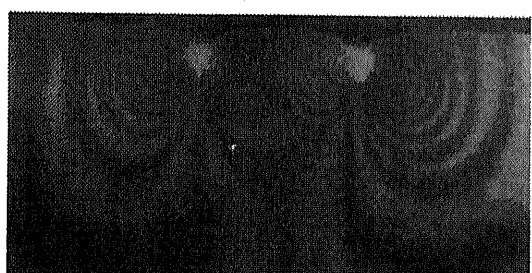
A1050-H,  $y$ -fringes,  $d=6\text{mm}$



A1050-O,  $y$ -fringes,  $d=6\text{mm}$

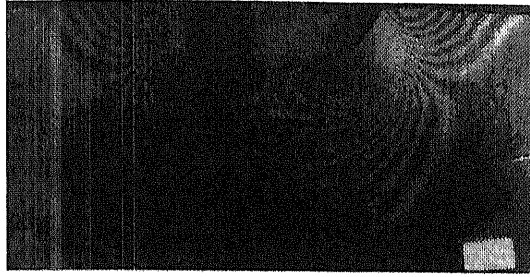


A1050-H,  $x$ -fringes,  $d=6\text{mm}$

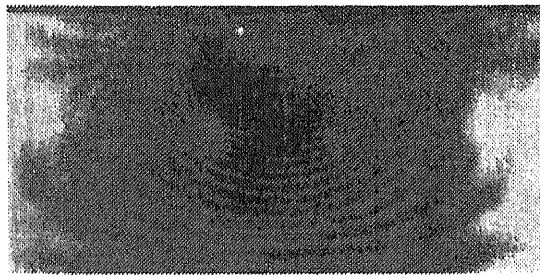


A1050-O,  $x$ -fringes,  $d=6\text{mm}$

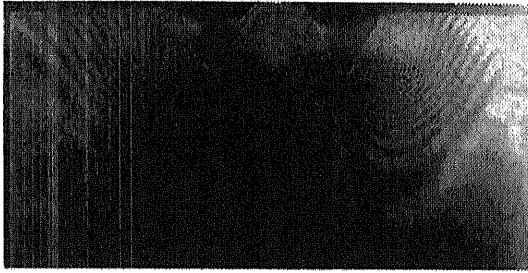




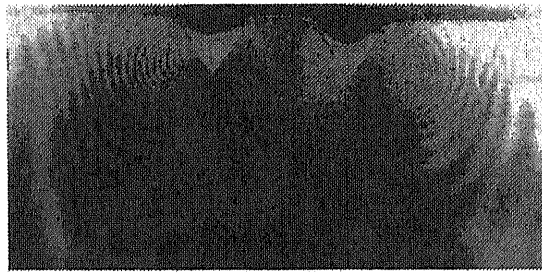
A1050-H,  $y$ -fringes,  $d=9\text{mm}$



A1050-O,  $y$ -fringes,  $d=9\text{mm}$



A1050-H,  $x$ -fringes,  $d=9\text{mm}$

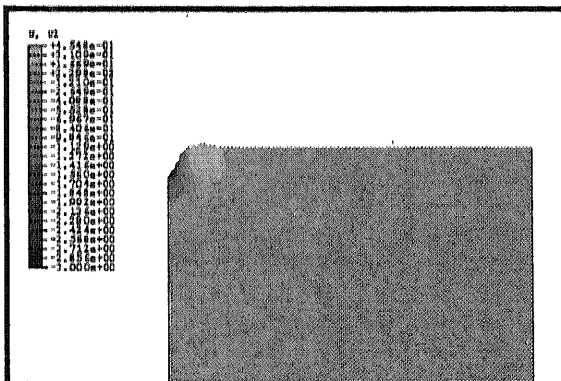


A1050-O,  $x$ -fringes,  $d=9\text{mm}$

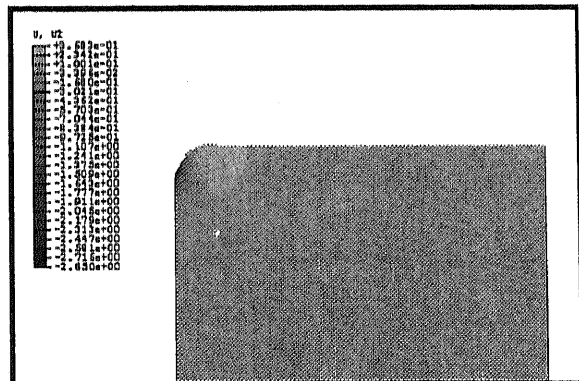
Fig. 2-8. Moiré fringes of wedge indentation of  $d=3, 6$  and  $9\text{mm}$  by W-shaped tool

Fig. 2-9 と Fig. 2-10 は解析による変位の等高線を示す。H材の場合、実験の Morie 縞の結果のように圧子下段部に集中して圧縮領域がみえる。そして圧子の両側に引っ張り領域が広がっている。これによって表面の盛り上がりが見えた。この圧子両側の盛り上がりで圧子間の部分が盛り上がり押し込み量  $6\text{mm}$  以後では圧子間に盛り上がりの干渉による凹みが見えた。

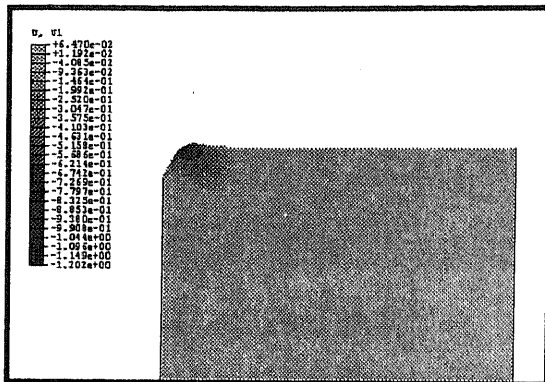
O材の場合、変位は圧子の下段部へ等高線が広く広がっている。これによる H材のような圧子両側の盛り上がりもなく圧子下段部に吸収され H材より緩やかな盛り上がりが見える。実験の結果と比べかなり一致する傾向が見えた。



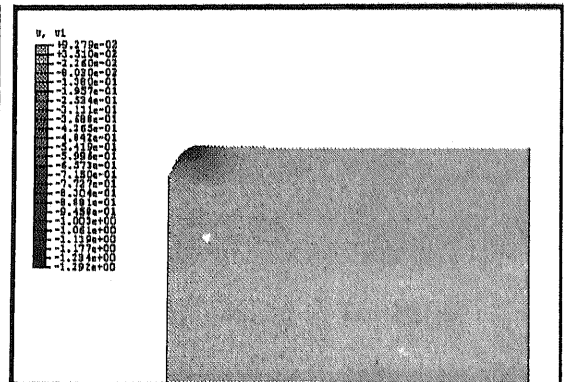
A1050-H,  $y$ -direction,  $d=3\text{mm}$



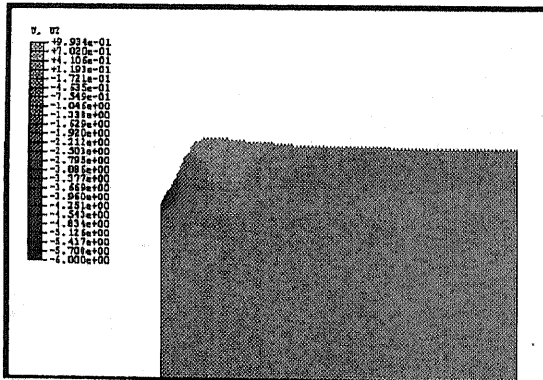
A1050-O,  $y$ -direction,  $d=3\text{mm}$



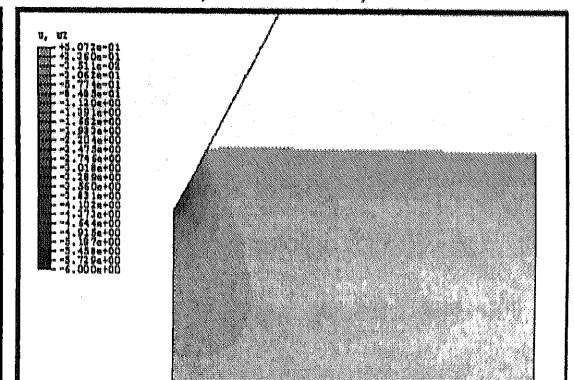
A1050-H,  $x$ -direction,  $d=3\text{mm}$



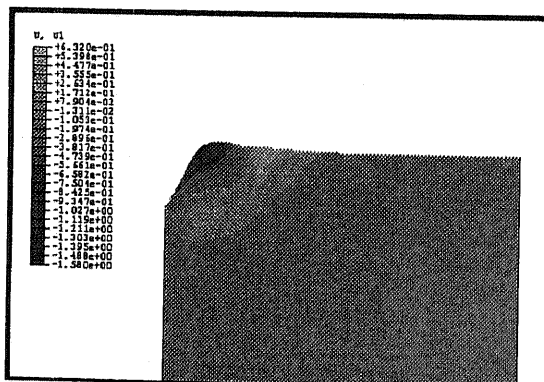
A1050-O,  $x$ -direction,  $d=3\text{mm}$



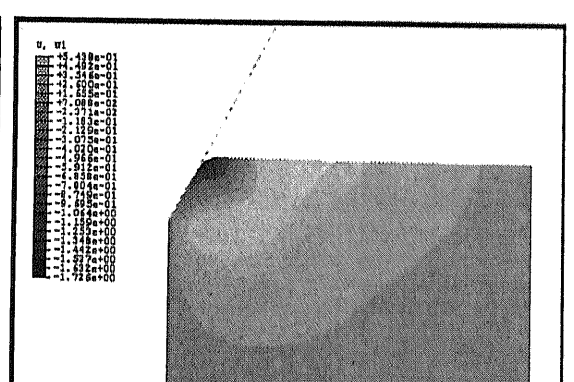
A1050-H,  $y$ -direction,  $d=6\text{mm}$



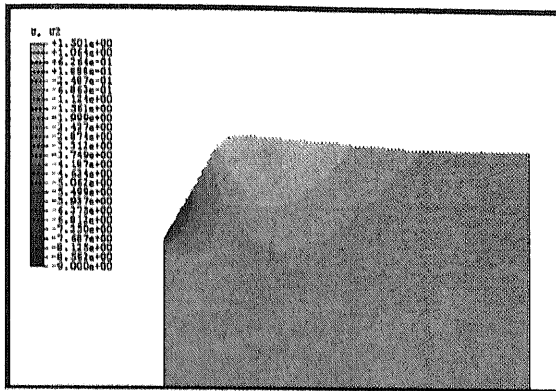
A1050-O,  $y$ -direction,  $d=6\text{mm}$



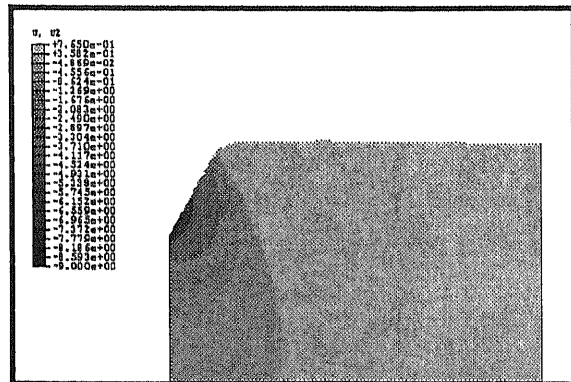
A1050-H,  $x$ -direction,  $d=6\text{mm}$



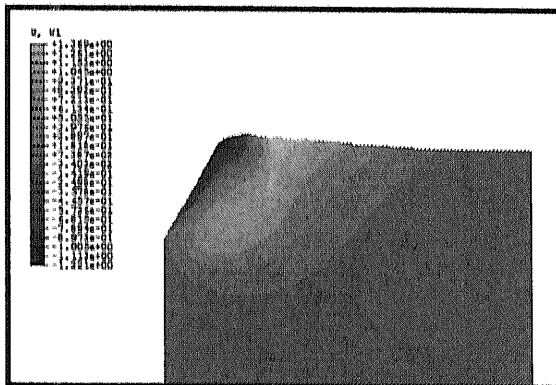
A1050-O,  $x$ -direction,  $d=6\text{mm}$



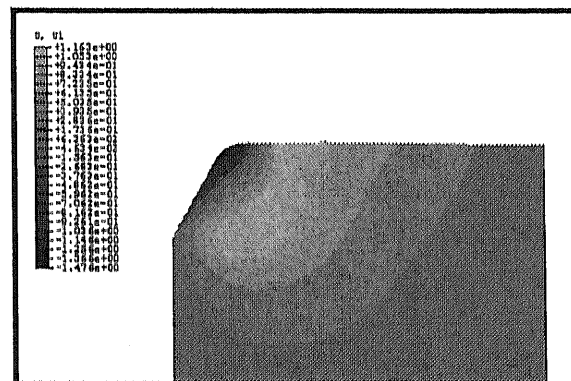
A1050-H,  $y$ -direction,  $d=9\text{mm}$



A1050-O,  $y$ -direction,  $d=9\text{mm}$

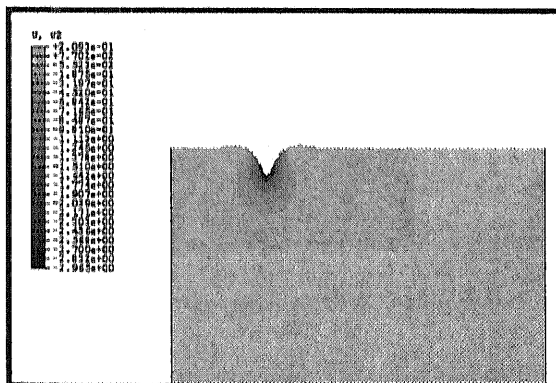


A1050-H,  $x$ -direction,  $d=9\text{mm}$

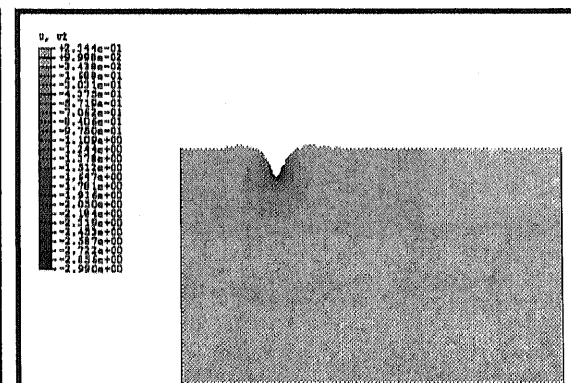


A1050-O,  $x$ -direction,  $d=9\text{mm}$

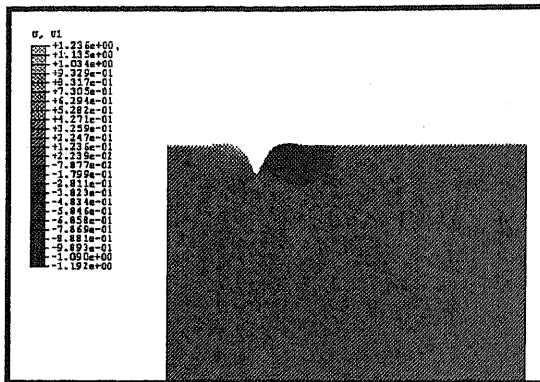
Fig. 2-9. Calculated equi-displacement contours after wedge indentation of  $d=3, 6$  and  $9\text{mm}$  by V-shaped tool



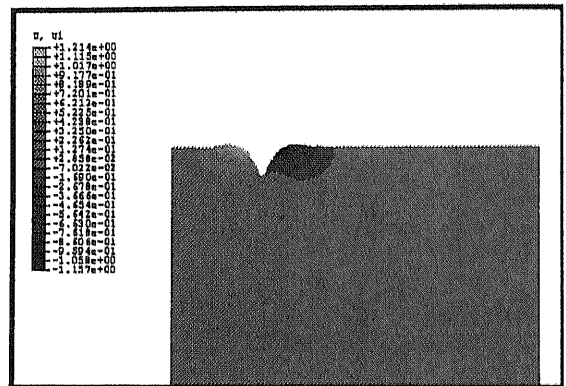
A1050-H,  $y$ -direction,  $d=3\text{mm}$



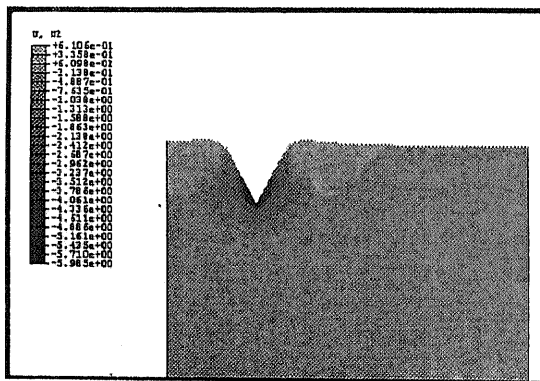
A1050-O,  $y$ -direction,  $d=3\text{mm}$



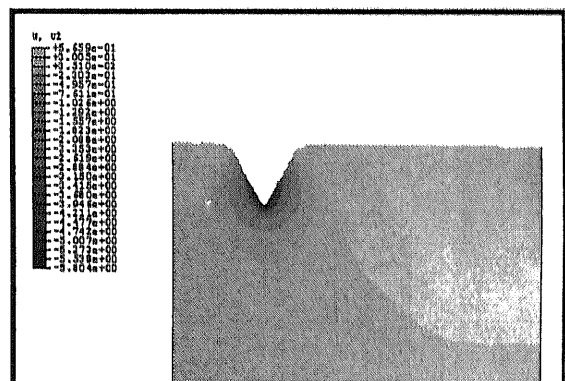
A1050-H, *x*-direction, *d*=3mm



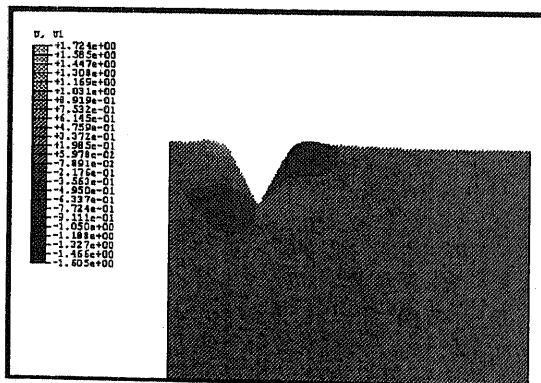
A1050-O, *x*-direction, *d*=3mm



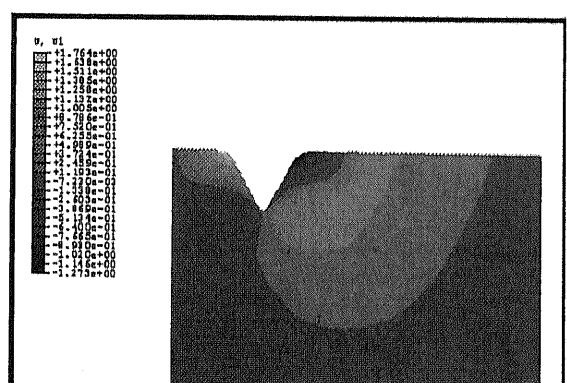
A1050-H, *y*-direction, *d*=6mm



A1050-O, *y*-direction, *d*=6mm



A1050-H, *x*-direction, *d*=6mm



A1050-O, *x*-direction, *d*=6mm

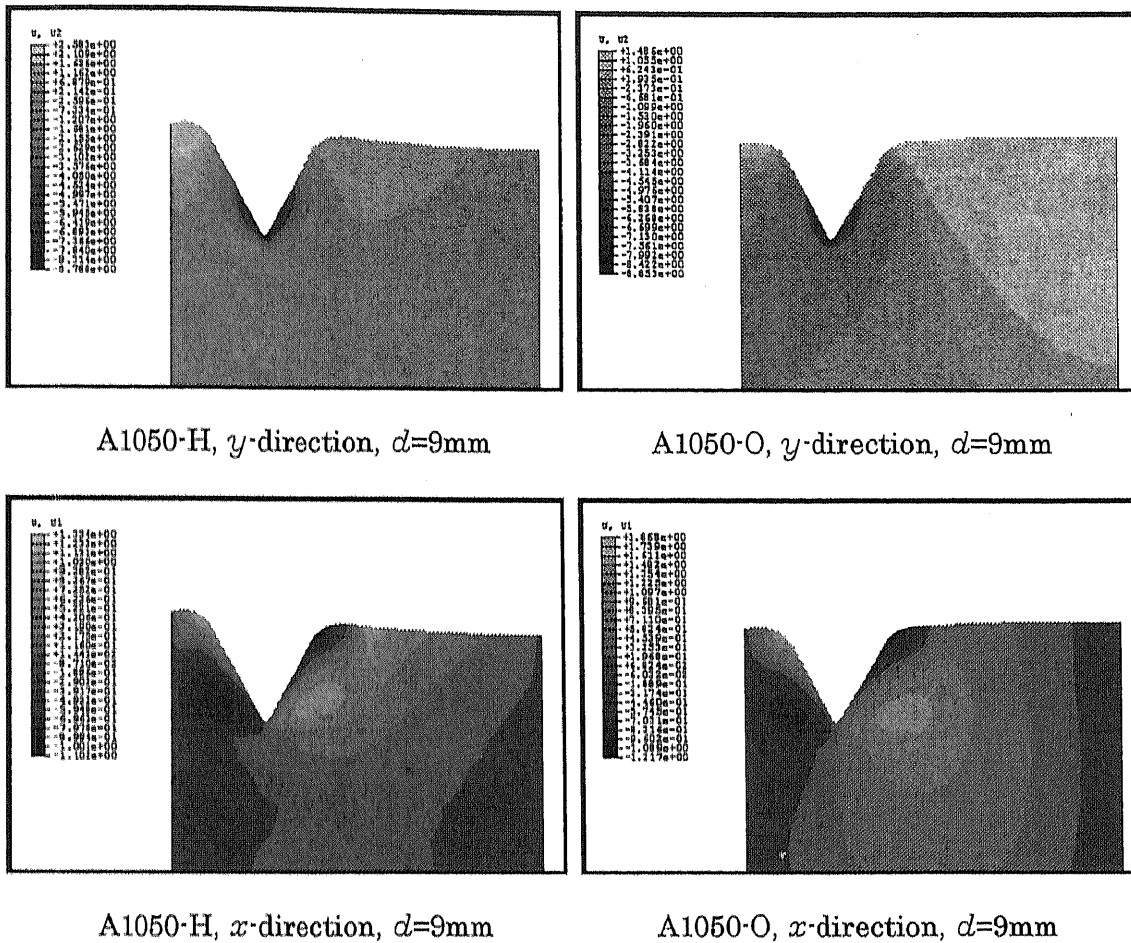
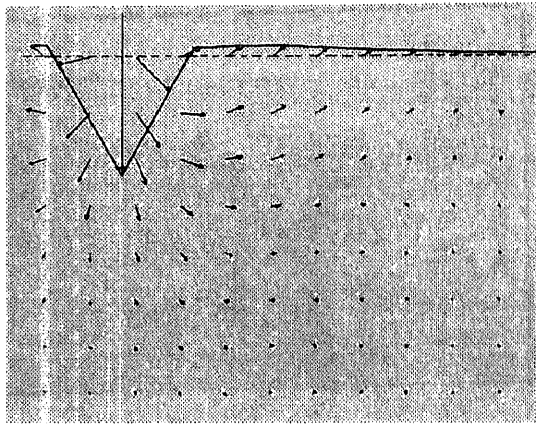


Fig. 2-10. Calculated equi-displacement contours after wedge indentation of  $d=3, 6$  and  $9\text{mm}$  by W-shaped tool

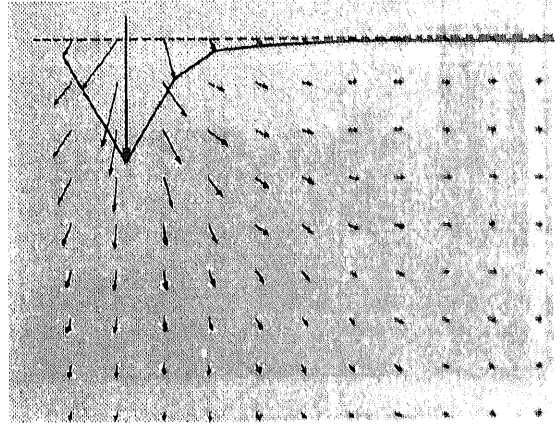
### 2.4.3 変位ベクトル

Fig. 2-11 と Fig. 2-12 はそれぞれの条件の変位ベクトルを示す。V形、O材の場合、変位ベクトルが圧子下段部へ広く広がっていることがわかる。H材の場合、表面に広がっていることがわかる。W形、O材の場合も、変位ベクトルが圧子下段部へ広く広がっていることがわかる。これは材料流れが弾性領域下に吸収され表面の盛り上がりがみえなかった。

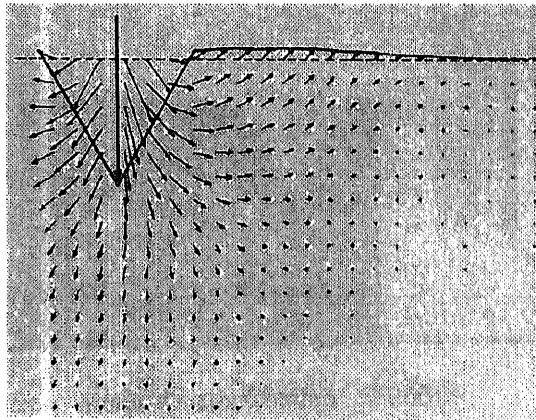
H材の場合、材料流れは表面へ流れ表面の盛り上がりが起きた。



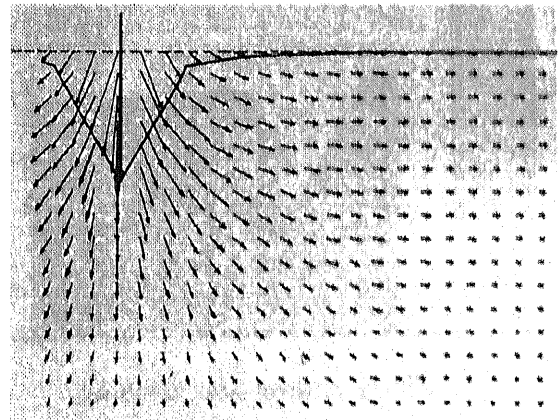
A1050-H,  $d=3\text{mm}$



A1050-O,  $d=3\text{mm}$

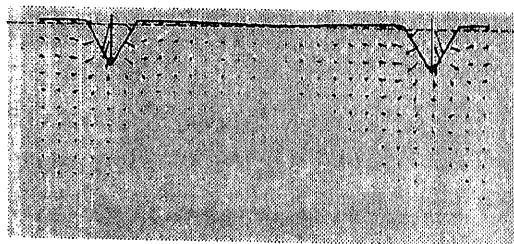


A1050-H,  $d=6\text{mm}$

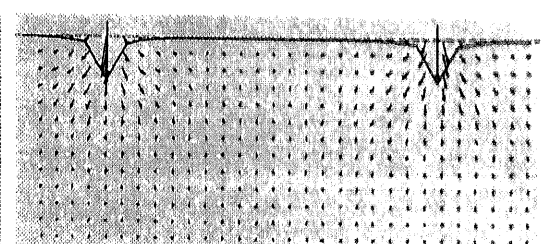


A1050-O,  $d=6\text{mm}$

Fig. 11 Displacement vectors after wedge indentation of  $d=3, 6\text{mm}$  by V-shaped tool



A1050-H,  $d=3\text{mm}$



A1050-O,  $d=3\text{mm}$

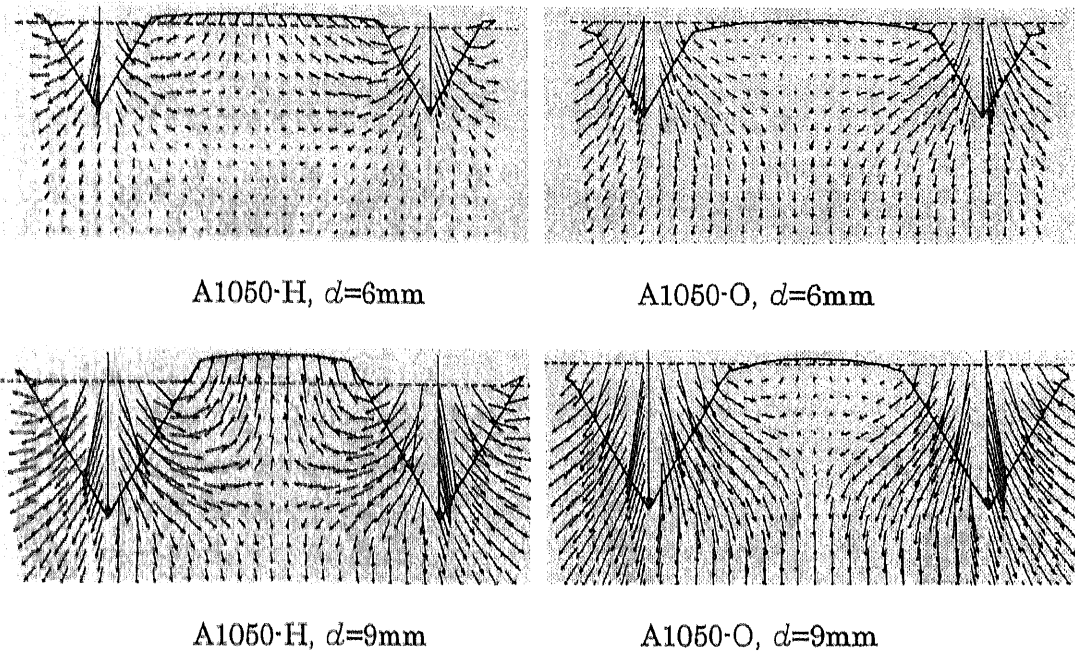


Fig. 2-12 Displacement vectors after wedge indentation of  $d=3, 6$  and  $9\text{mm}$  by W-shaped tool

#### 2.4.4 荷重およびストローク

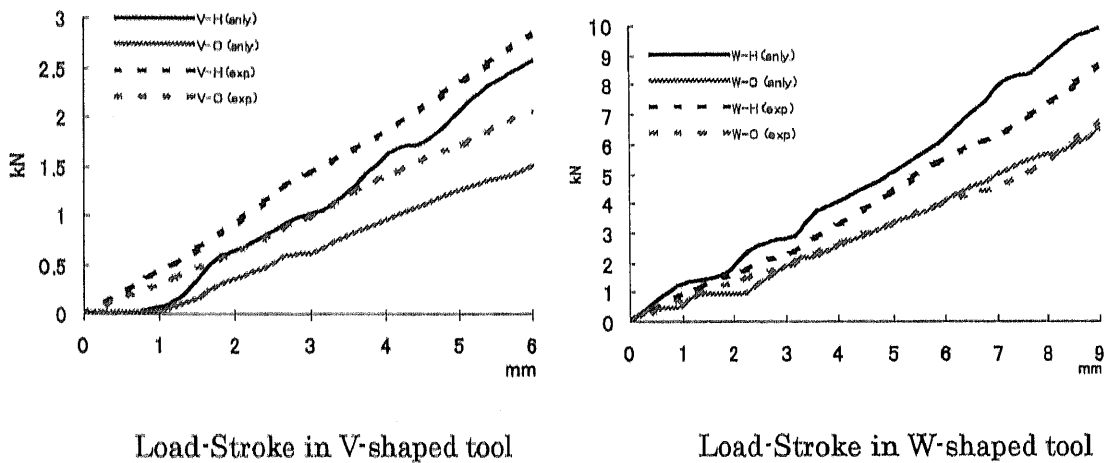


Fig. 2-13. Load-Stroke diagram in wedge indentation of V- and W-shaped tools

Fig. 2-13 はそれぞれの条件の実験、解析の荷重—ストローク関係を示す。押し込み量、ストロークの増加と共に荷重も増加する。H 材より O 材の方が緩やかなスロープを示す。実験結果と解析結果が良く似ていることがわかる。

### 2.4.5 $n$ 値が変化する場合の押し込み荷重

Fig. 2-14 は応力と  $n$  値との関係をグラフに示す。Fig. 2-14 のように様々な材料に対して  $n$  値の変化による応力の関係は S45C, SUS304, Al-H 共に  $n$  値増加と共に低下結果が現れた。これは一般的な塑性曲線のグラフと似ている。これを用いて実際使われる材料の性質、特性などが把握可能である。

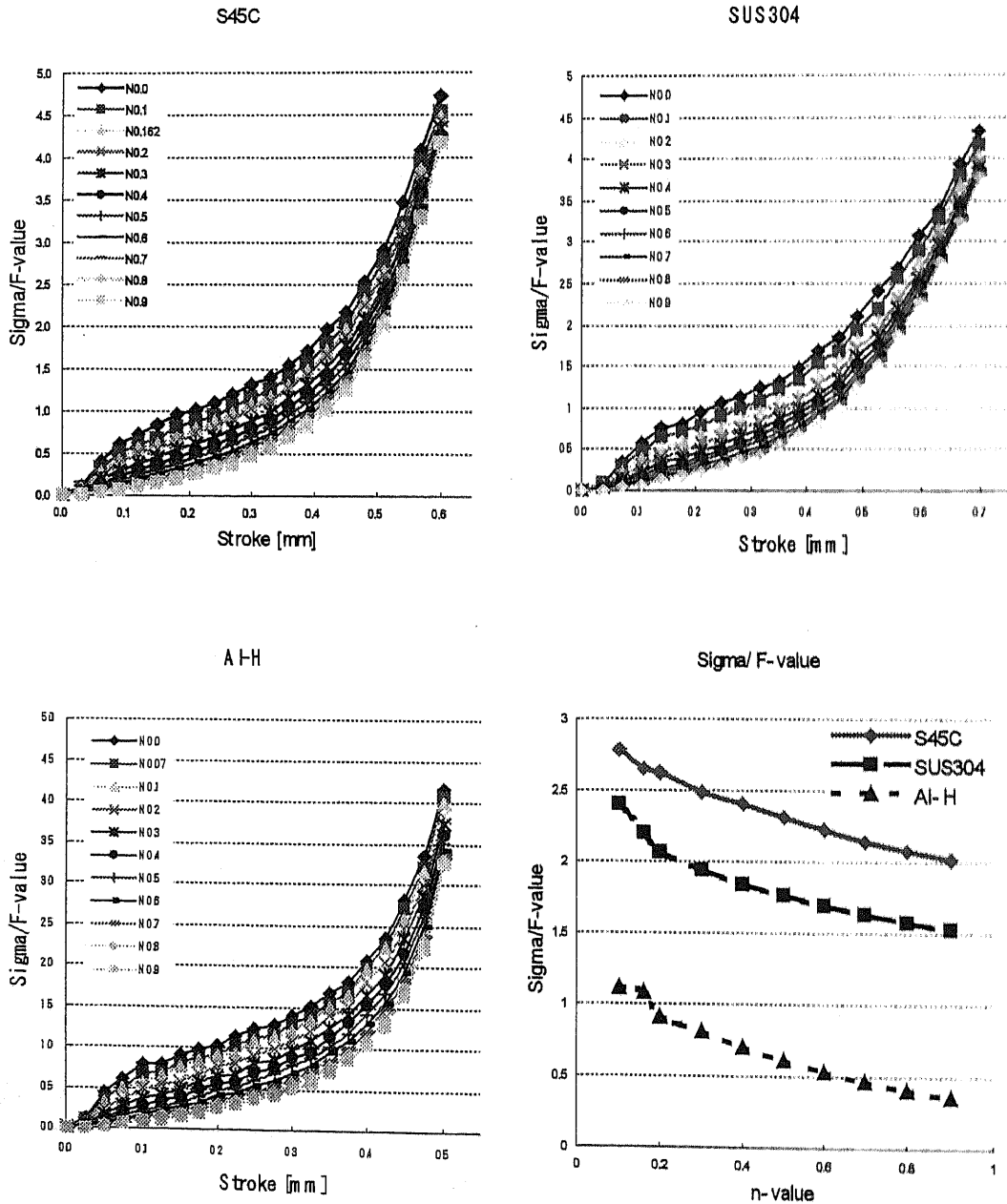


Fig. 2-14 Calculated Sigma/Force and  $n$ -value by S45C, SUS304 and Al



## 2.5 結論

### Profile

H材の場合、材料流れは圧子下段部に集中し圧縮領域が広がり表面は盛り上がりが見えた。  
O材の場合、材料流れは圧子下段部に広く広がり H材のような表面の盛り上がりは見えなかった。

### Metal flow

H材の場合、表面の盛り上がりで圧子間のねじ山の部分に盛り上がる。材料流れが圧子近辺に局所化し表面への盛り上がりが見えやすくなる。O材の場合、H材より塑性領域が大きく広がるが圧子下段部の弾性変形によって吸収されて沈降形となり盛り上がりが見えない。

### Load and stroke

押し込み量の増加と共にストローク荷重も増加する。H材の方がO材より約2倍高い荷重になった。解析の結果は実験との結果に似ている。

### Analysis

押し込みの結果を解析の再現を検討した結果、プロフィール、ひずみ、加工力などを解析により検討出来る。

# 第3章

## 環状溝の転造における 材料流れ

## 第3章 環状溝の転造における材料流れ

### 3.1 緒論

押込みにおける材料流れの研究を用いてさらに転造加工の材料流れに関して材料流れの研究を行うため工具押込み速度を変化させた複数環状溝の転造を行い、加工後の残留応力、疲労強度を測定し、転造品の残留応力における工具押込み速度の影響を実験にて検討する。そして ABAQUS, LS-DYNA などの有限要素法を用いて転造品の強度に大きな影響を及ぼす因子である残留応力の解析による検証し実験との検証、再現することによる実験と解析両面での材料流れを明らかにすることを目的にする。

まず実験では S45C、SUS304 の 2 種類の材料を用いてステアケース法による疲労試験、ビッカース硬度試験、片側外層除去法による残留応力を調べた。そして解析では 2 次元の解析と 3 次元の解析を行ったが 2 次元では 3 次元の解析の置き換えに転造加工時工具と材料の接するメカニズムのように工具が材料に当たる時の負荷工程、工具が材料から放れる除荷工程を仮定し解析を行った。3 次元の場合は実験と同じく工具が材料軸に回転しながら接する仮定で解析を行った。その結果として残留応力や谷のところの相当塑性ひずみなどを求め実験との検証、再現を確かめた。そしてメートルねじへの応用として  $n$  値と残留応力の関係を検討することによって転造加工時材料流れを実験的、解析的に応用が出来る。

## 3.2 実験方法

### 3.2.1 環状溝の転造

転造には丸ダイス式油圧転造盤(TUGAMI 製6型転造盤)を用いた。Fig. 3-1 に装置の概略図を示す。本研究では、プロフィール形成度 95%程度と定め複数環状ねじを製作した。転造機に付随のロールダイス前極位置調整ねじ(以後ストッパーと称する)を使用し、油圧による荷重を吸収し、ロールダイスの移動量を調節する事によって谷径を制御する。ストッパーの調整が同じでも、工具押し込み速度や試料にかかる荷重によって谷径が異なってくるので、転造条件毎にストッパーの調整を行った。

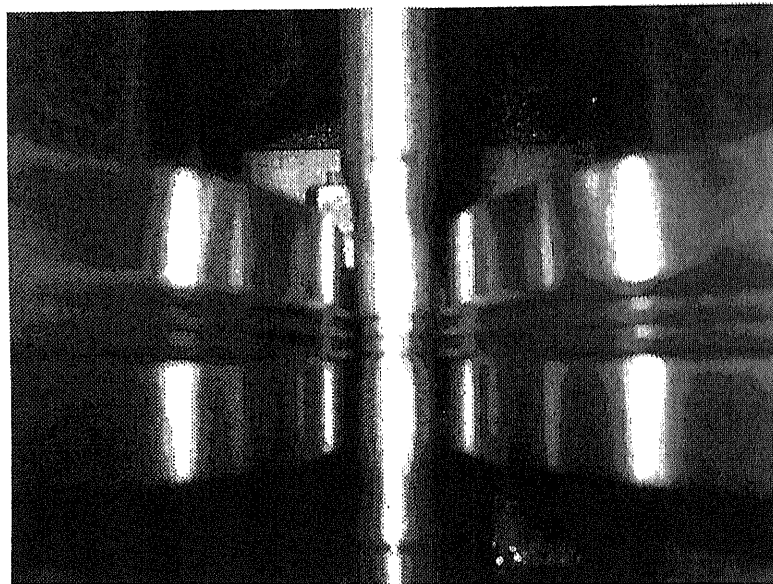


Fig.3-1 Thread rolling

### 3.2.2 実験条件

ねじの転造条件の一つとして、ねじ山のプロフィール形成度が挙げられる。

プロフィール形成度とは、ねじ山がロールダイスの形状と一致するとき、すなわちねじが完全に転造された時を基準として各々の谷底からのねじ山への高さを百分率で表したものである。これは、ロールダイスの高さを基準にとっているため、これに対する充填率と言うこともできる。

押し込み速度は工具が試料に接触した瞬間の位置、つまり荷重が急激に増加する位置から変位が一定になる位置までの変位の差を、その範囲での試料の転がり数で除した値を、

押し込み速度と定義した。本研究での押し込み速度は、S45Cは0.128mm/rev、0.1mm/rev、0.083mm/revそしてSUS304は0.120mm/rev、0.095mm/rev、0.075mm/revの3パターンにした。

試料はS45CとSUS304を用いた。炭素鋼はねじ用材料として多く使用されている材料であり、その中で構造用炭素鋼(SC材)は、不純物にりん、硫黄、銅、ニッケル、ロムがかなり低い値に規格されており、品質的に優れているので冷間成形用の素材として最も広い範囲で使用されている。また、用途に応じ適正な熱処理によってさらに強さと粘りを与えることができる。本研究で使用したS45Cは炭素量が0.45%の機械構造用炭素鋼である。

材料が直径16mmに製造されたもので、これを各試験所定の寸法まで旋削して試料として用いた。Table 3-1に本研究で使用したS45C、SUS304の化学成分を示す。

Table 3-1 Chemical Properties in specimen used

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
S45C	0.45	0.26	0.71	0.018	0.016	0.13	0.06	0.23	≤0.04
SUS304	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.03		8~10.5	18~20	

試料として使用するS45C、SUS304の材料特性を調べるために、圧縮試験、ビッカース硬さ試験を行った。ここで調べた材料特性を有限要素解析でも使用した。

### 3.2.3 材料試験

まず圧縮試験に使用する試料は、直径10mm、高さ10mmの円柱状試料とした。そして試験片の初期直径、初期高さをノギスにより測定する。試験片を材料試験機にセットする。このとき試験片の上下に潤滑として、テフロンシートを挟んだ。ダイヤルゲージを試験機にセットした。試験片に荷重をかけ圧縮し、ダイヤルゲージが一定間隔を示すたびに、その荷重を測定していった。S45Cは、9800kgfまで荷重を測定。SUS304は装置の都合上20000kgfまで測定し終了とした。測定は、各材料3回ずつ行った。測定結果から、真応力、真ひずみ、塑性ひずみを算出し、得られた応力ひずみ曲線からF値(塑性係数)、n値(加工硬化指数)を求めた。それはTable 3-2に示す。

Table 3-2 Material Properties in uniaxial compression of specimen used

Material	F(Mpa)	n
S45C	1716	0.425
SUS304	2074	0.501

### 3.2.4 ビッカース硬さ試験

まず試料 (S45C, SUS304) をそれぞれ長さ 20mm程の試験片にカットする。硬度測定面を研磨する。新聞紙の上に硝子板を置き、その上に紙やすりを置く。まず 800 番の紙やすりで試料の表面に一方方向にキズがつくまで研磨する。次に 1000 番の紙やすりで上でついたキズと直角方向に研磨する。ここでは、表面のキズが一定方向を向くまで研磨する。バフ研磨機で更に研磨し、水で洗淨後素早く乾燥させる。研磨した表面が鏡面仕上げになっている事を確認する。

そしてビッカース硬さの測定は試験片を受け台にセットし、測定顕微鏡を覗き込みながらピントを合わせる。測定顕微鏡からダイヤモンド針の圧子に手動で切り替える。圧子で荷重をかけるためのボタンを押し、動きが止まった所でもう一度ボタンを押す事により 10kgf の荷重を試料に掛ける。そのまま、40 秒保持する。圧子をレバーでもとの位置に戻し、再び測定顕微鏡に切り替え、覗き込みながら実験で付けられた正四角錐の圧痕の対角線長さを縦・横の両方を測定する。対角線長さの平均を取り、ビッカース硬さを所定の換算表から見積もる。各々の試料を 2 回ずつ測定する。求めた結果を Table 3-3 に示す。

Table 3-3 Vickers Hardness test results

S45C	211[HV]
SUS304	178[HV]

### 3.2.5 疲労試験

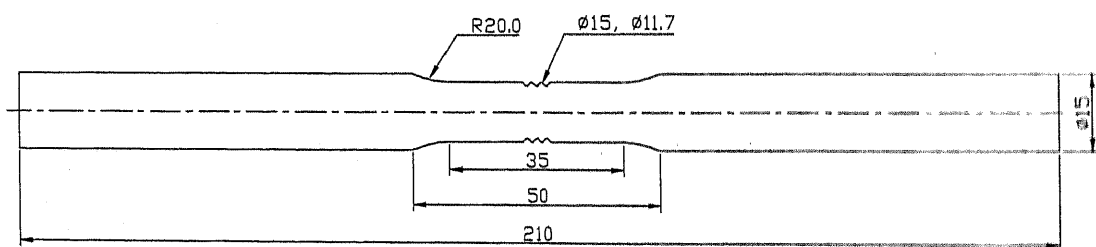


Fig. 3-2 Shape of the specimen (mm)

Fig. 3-2 は疲労試験に使われた試料を示す。切り欠き試験片を引っ張ったときの試験片断面における応力分布ができる。弾性限度内では切り欠き底で最大であるが、全断面降伏後は切り欠き部分の塑性拘束作用のために内部の方がむしろ応力が高くなっている。このため、引っ張り試験では内部から破壊が始まる。しかし、塑性変形量が極めて小さい場合、たとえば上降伏点や疲れでは、切り欠き部分の高い集中応力が重要な役割を果たす。工業

用材料は非金属介在物などの内部切り欠きが統計的に分散している。したがって、このような制御できない内部切り欠きの内、最も有害な物が破壊に直接的な役割を果たす。疲れ強さ、あるいは疲れ寿命は、実験結果のばらつきが非常に大きく、これらは統計的に処理されるべき性質のものである。このため目的の材料の疲れ寿命、あるいはS-N曲線を求めるには最小限10本の試験片を用意しなければならない。

試験片には材質的にも、試験片寸法の点でもそろったものが用意されなければならない。切り欠き部の加工には特に注意が必要である。段付き試験片の隅内部と平行部の移り変わりの部分機械工作上もっとも細くなりがちであるので注意しなければならない。試験片の軸に直角の方向(割れの進行方向)に研磨の条項が残らないよう、研磨方向はなるべく軸方向に行う。試験片が焼き入れ歪みで曲がっていたり、試験機の取り付けが正しくない場合に試験片に異常な振動荷重がかかるから、細心の注意が必要である。丸棒試験片の場合は、平板で試験片を転がしてみることは、試験片の曲がりの有無を確かめる方法として有効である。試験機に試験片を取り付けたなら、まず平均荷重が0の状態、小さい振動荷重で運転を行い、異常振動のないことを確かめてから、静かに所定荷重までもっていく。静止状態で負荷をして、試験片を塑性変形させてはいけない。

時間強さがある値以上であることを保証する場合には、その応力で、少なくとも3個以上の試験片について試験を行い、いずれの試験片も所定の繰返し数に耐える事を示す。耐久限についての決定の仕方としていくつかあるが、階段法(ステアケース法)により耐久限の決定を行うこととした。階段法(ステアケース法)による耐久限の決定はまず、予想された時間強さ(疲れ限度)になるべく近い応力で一本目の試験片を試験する。もし、所定の繰返し数(100万回転)までに破断した場合は一段階下げ、所定の繰返し数に耐えた場合は一段階応力を上げて第二番目の試験片を用いて疲労試験を行う。応力の1段階は0.5kg/mm<sup>2</sup>程度とする。以下同様の手順で、前回の試験片が破断したときは一段階下げ、耐えた時は一段上げて次の試験を行う。

データの数はn個であるが、n番目の結果により、n+1番目の応力が決定されているので、時間強さの平均値の推定 $\mu$ は応力 $a_i$ としたとき

$$\bar{\mu} = \sum_{i=1}^{n+1} a_i / (n+1)$$

で与えられている。

最初をいかなる応力から実験を開始すべきかは、単なる推測によるが、本実験の場合は、予備実験をして、ある程度の目安を設け本実験を行う事とした。

### 3.2.6 残留応力

残留応力を測る方法としては大別すると、非破壊測定と破壊測定に分けることができる。非破壊測定は、材料を破壊せずにそのままの状態での測定する方法であり、現在実用されている方法は、X線応力測定法[34]として知られている方法だけである。材料が応力を受けていると、結晶内の原子の格子間隔変化するので、その変化を、特性X線を用い回折現象を利用して測定するものである。このX線による方法では表面から百分の数 mm 程度の深さにおける残留応力が求められるのであり、さらに深い部分にわたっての残留応力の分布を求めたいときには、破壊測定法によらなければならない。

破壊測定とは部材を細かく分割したり、層状に切削したりして、その部材が使用できないように破壊して残留応力を求める方法である。部材を細かく分割する方法は、次のように行われる。残留応力のある部材の各点に、数方向に歪ゲージを張っておき、この点を含んで小片を周囲から切り離す。そうするとこの小片の残留応力が解放され、歪が変化するから、それを歪計で読み、その歪が解放前にあったとして応力を算出する。

材料を層状に除いて残留応力を求める方法[35]は、次のような原理によるものである。残留応力のある部材を層状に段階的に削っていくと、それぞれの段階で残った部材内の応力の釣り合いが破れて再分配される。その場合に残った部材は変形し、この変形は長さや曲率の測定から求められる。また残った部分の適当に張られた歪計、あるいはX線によっても測定させる。そこで残った部分の変形や歪や応力を段階的に測定していき、一方これらと除去された部分にあった応力との関係式をあらかじめ求めておき、この式によって表面から最後に除去した部分までの深さに沿っての残留応力分布を算出することができるのである。本研究では軸対称製品の残留応力を測定するのだが、その方法にもいくつかあるので今回使用する片側外層除去法と比較する意味でここに紹介する。

まずHein-Bauer [36]とは丸棒を外周から同心に段階的に薄層を除去していく。そして各段階ごとに残りの部分の断面積  $A$  と、長さの変化率すなわち軸ひずみ  $\epsilon$  を測定する。

残留応力を算出する式は次のようにして導かれる。丸棒を外周から同心円状に削っていったら、残りの部分の丸棒の断面積が  $A$  になったとき、この断面積  $A$  の丸棒の表面に最初からあった残留応力  $\sigma$  は、断面積  $A$  の状態で、さらに薄肉円筒面積  $dA$  を除去したとき、その部分から逃げた応力  $\sigma'$  から最初の状態から断面積  $A$  になるまで丸棒を削る間に断面積  $A$  の丸棒の表面で増加した応力  $\sigma''$  を引いた値に等しい。すなわち

$$\sigma = \sigma' - \sigma''$$

$\sigma'$  は微小断面積  $dA$  だけ除去したときに残りの丸棒の部分で増加した軸ひずみを  $d\epsilon$  とし、 $E$  を縦弾性係数とすると、次の関係から求められる。



$$\sigma'(-dA) = E(d\varepsilon)A$$

$$\therefore \sigma' = -EA(d\varepsilon / dA) \quad (2-1)$$

$\sigma''$ は最初の状態から残った部分の断面積が  $A$  になるまで削る間に、残った部分で増加した軸ひずみを  $\varepsilon$  とすると、次式のようになる。

$$\sigma'' = E\varepsilon$$

よって①式により②式が導かれる。

$$\sigma = -E\{A(d\varepsilon / dA) + \varepsilon\} \quad (2-2)$$

また、

$$A = \pi r^2$$

$$dA = 2\pi r dr$$

と置くと②式は③のようにも書ける。

$$\sigma = -E\{A(r d\varepsilon / 2 dr) + \varepsilon\} \quad (2-3)$$

一般に丸棒は軸方向だけではなく、円周方向にも半径方向にも残留応力がある。この一般の場合に対して軸方向残留応力しか求まらないこの方法を適用すると、もし円周方向応力が軸方向と同符号であれば小さめに求められ、異符号であれば大きめに求められる。その差は、最大30%ぐらいになるはずである。

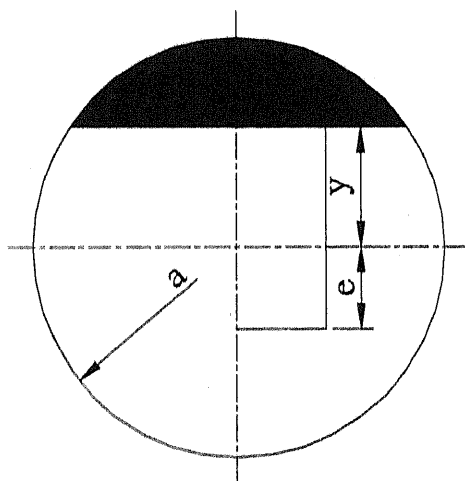


Fig. 3-8 Read method

そして Read 法[37]とは Fig. 3-3 のように半径  $a$  の円形断面を  $X$  軸に平行に表面から斜線部を除去したとき断面図心の位置  $y_G(y) = -e(y)$ 、断面積  $A(y)$ 、中立軸回りの断面二次モーメント  $I(y)$  は、

$$y_G = -(2/3)(a^2 - y^2)^{3/2} / A(y) \quad (2-4)$$

$$A(y) = y\sqrt{a^2 - y^2} + a^2 \{\sin^{-1}(y/a) + (\pi/2)\} \quad (2-5)$$

$$I(y) = \{(4/3)y_G(y) - y/2\}(a^2 - y^2)^{3/2} + \{a^2/4 + y_G(y)\}A(y) \quad (2-6)$$

また、軸力  $N(y)$  と曲げモーメント  $M(y)$  は、

$$N(y) = 2 \int_a^y \int_0^{\sqrt{a^2 - \xi^2}} \sigma(r) dx d\xi \quad (2-7)$$

$$M(y) = 2 \int_a^y \int_0^{\sqrt{a^2 - \xi^2}} \sigma(r) \{\xi - y_G\} dx d\xi \quad (2-8)$$

で与えられるが、式(4)を  $y$  で微分した

$$dN(r)/dy = 2 \int_0^{\sqrt{a^2 - y^2}} \sigma(r) dx \quad (2-9)$$

に適当な変数を施すと、特異核を持つ Abel の積分方程式に帰着できるので、式(2-9)の解は次式で与えられる。

$$\sigma(r) = (1/\pi)(d/dr) \int_a^r r / (y\sqrt{y^2 - a^2}) [dN(y)/dy] dy \quad (2-10)$$

一方、式(1)、(2)、(4)、(5)から、

$$N(y) = A(y) \int_a^y 1 / \{\xi - y_G(\xi)\} A(\xi) [dM(\xi)/d\xi] d\xi \quad (2-11)$$

となるので、 $y$  まで  $x$  軸に平行に斜線部を除去した際の曲げモーメント  $M(y)$  が実測できたとすると、式(2-11)から  $N(y)$ 、式(2-10)から残留応力  $\sigma(r)$  を求める事ができる。

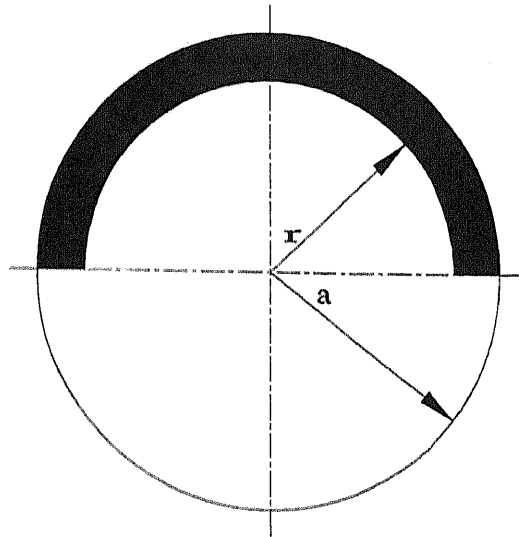


Fig. 3-4 Present method

本研究で用いた片側外層除去法とは Fig 3-4.で示すように、外半径  $a$  の円形断面に対して半径  $r$  の位置まで斜線部を除去した場合の断面の図心の位置  $e(r)$ 、中立軸回りの断面二次モーメント  $I(r)$  は、

$$e(r) = (4/3\pi)(a^3 - r^3)/(a^2 + r^2) \quad (2-12)$$

$$I(r) = (\pi/8)(a^4 + r^4) - (8/9\pi)(a^3 - r^3)^2/(a^2 + r^2) \quad (2-13)$$

で与えられ、片側外層除去法による曲げモーメント  $M(r)$  は次式のように表せる。

$$M(r) = \int_a^r \{2\xi + (4/3)[(a^3 - r^3)/(a^2 + r^2)]\} \xi \sigma(\xi) d\xi \quad (2-14)$$

式(11)は残留応力  $\sigma(r)$  に関する積分方程式であるが、

$$f(r) = 3 / \{3r(a^2 + r^2) + 2(a^3 + r^3)\} \quad (2-15)$$

$$\sigma(r) = \{(a^2 + r^2)/2r\} f(r) [dM(r)/dr] + \int_a^r f(\xi) [dM(\xi)/d\xi] d\xi \quad (2-16)$$

したがって、片側外層除去法に伴う曲げモーメント  $M(r)$  が実測できれば、式(13)から残留応力  $\sigma(r)$  を求められる。残留応力検出法は前に説明したのは、線材など円柱状製品の軸方向残留応力  $\sigma(r)$  の測定法であるが、以下では転載した環状溝付き製品の残留応力測定に付いて検討を加える。ここでは、製品の谷底を含む軸方向厚さ  $l_0$  の円柱状の応力分布  $\sigma(r)$  を測定する方法について検討する。製品に対する要素の位置は任意に選ぶるので、谷底を含む断面だけではなく任意の断面の残留応力が測定できると考えてよい。

ここでは、前述した非破壊測定法である X線応力測定法、破壊測定法である Hein-Bauer 法、Read 法について実際に数値例を代入して考察してみることにする。

まず、X線応力測定法について検討する。マスキングに工夫を凝らせばX線の照射面積を絞る事が可能であるが、ねじ山のようなプロファイルの存在によってX線の入射角が制限されるので、谷底部の残留応力を直接測定するのは難しい。

さらに、残留応力の分布 $\sigma(r)$ を測定するためには、外層を逐次除去して除去後の表面応力を測定すればよいが、X線応力測定法は基本的には表面応力の測定法であるので、外層除去によって残留した実質部内で再配列した表面応力を測定していることになる。従って、除去にともなう付加応力の補正等が必要になる。いずれにしても、軸方向にある程度の平坦なプロファイルがあり、その軸方向長さに対して残留応力が変化しないと言う前提条件があるので、X線応力測定法は転造環状溝の残留応力測定には適さない。

次に、Hein-Bauer法に付いて検討する。転造ねじの残留応力の測定値などを参考にして、Figに示すような残留応力分布 $\sigma(r)$ を仮定する。

$$\sigma(r) = (\sigma_0/2)\{1 - 3(r/a)\}, \quad \sigma_0 = 500 \text{ MPa} \quad (2-17)$$

ここで、

$$a = 5 \text{ mm}, \quad l_0 = 1 \text{ mm}, \quad E = 210 \text{ GPa} \quad (2-18)$$

と仮定すると、Hein-Bauer法で測定すべき長さの変化 $\Delta l_0$ はFigに示す通りである。ひずみ $\varepsilon(r)$ に対しては吉本らの実験値と同程度のオーダーであるが、 $l_0$ が小さいので、 $\Delta l_0$ は実験室で容易に測定できる量ではない。しかし、 $l_0$ が大きければ、Hein-Bauer法は原理的には最も精度よく測定できる方法である。

一方、Read法及び本実験で行う片側外層除去法の場合には、式(2-10)、(2-11)及び式(2-16)で示したように除去に伴う曲げモーメント $M(r)$ 、または $M(r)$ で曲げられているとき、その曲率を $\phi(r)$ 、曲率半径を $\rho(r)$ とすると、

$$M(r) = E I(r) \phi(r) = E I(r) / \rho(r) \quad (2-19)$$

のような関係がある。長さ $l_0$ の部分が曲率半径 $\rho(r)$ で曲がっているとすると、幾何学的関係から、

$$\phi(r) = 1 / \rho(r) = 8\delta / l_0^2 \quad (2-20)$$

すなわち、 $\delta$ が測定できれば、式(2-19)、(2-20)によって $M(r)$ が換算できる事になるが、 $\delta$ 自体は非常に小さな量である。そこで長さ $l_0$ の部分の両側に変位拡大機構として、それぞれ長さ $L$ の剛体があるものとする。この時、長さ $L$ の直線 $AB$ の傾き $\alpha$ は次式で与えられる。

$$\alpha = 4\delta \sqrt{l_0^2 - 4\delta^2} / (l_0^2 - 8\delta^2) \quad (2-21)$$

また、点Bに対する点Aの相対的な高さ $h_0$ は、

$$h_0 = \alpha L / \sqrt{\alpha^2 + 1} \quad (2-22)$$

となって $L$ に比例するので、 $L$ を十分大きくすることによって $h_0$ を測定可能な量にすることができる。さらに、

$$h = h_0 + \delta$$

なども被測定量になりうるが、場合によっては、

$$h_0 \gg \delta \quad \text{ならば} \quad h = h_0$$

のような近似も可能になる。

逆に、 $h_0$  が何らかの方法によって測定できたと仮定すると、式(2-22)から  $\alpha$  が次式のように求められる。

$$\alpha^2 = h_0^2 / (L^2 - h_0^2) \quad (2-23)$$

あるいは、 $\alpha$  や  $\tan^{-1} \alpha$  を直接測定しても良い。いずれにしても、式(2-21)に対して幾何学的に有意な項のみを考えると、

$$\delta = l_0 \{1 - 1/\sqrt{\alpha^2 + 1}\}^{1/2} / (2\sqrt{2}) \quad (2-24)$$

から  $\delta$  が求まる事になる。かくして、式(2-20)、(2-21)を用いれば、曲げモーメント  $M(r)$  が測定できる事になる。

Read 法では斜線部を除去するためには、ワイヤカット放電加工や細いワイヤを電極とする放電加工を施せばよい。また、片側外層除去法で斜線部を除去するためにはマスクングを施した電解加工や腐食法を採用すればよい。

変位拡大機構の剛体部の長さを、 $L=100\text{mm}$  と仮定し、その他の量は式(2-19)、残留応力分布として式(2-18)を仮定した場合の、Read 法及び本実験で行う片側外層除去法に対する被測定量  $h_0$  を示す。式(2-11)、(2-12)及び式(2-17)から明らかなように、転造によって形成される残留応力を調べるには、表層部の近傍のみを除去すればよい。そこで、表層部付近の  $h_0$  及び  $h$  の値を示すと式(2-24)で示した近似を採用できる事がわかる。

また、この片側外層除去法によって測定できる  $h_0$  の値は  $0.5 < r/a < 1$  の範囲において Read 法によるものの 2~3 倍であることがわかった。

一方、 $h_0$  または  $h$  が測定できた後の手順について考えてみる。 $h_0$  または  $h$  が実測できれば、式(2-20)~(2-22)によって  $M(r)$  や  $M(y)$  が得られる事になるが、 $h_0$  や  $h$  は Table に示したようなオーダーの量であるとともに、測定値であるから測定誤差をふくんでいる。

従ってそれらから換算される  $M(r)$ 、 $M(y)$  もまた同じ程度の測定誤差を含んでいる。さらに、式(2-12)及び式(2-17)には  $dM(r)/dr$  やその積分が含まれているので、測定値の数値積分や数値微分が必要になる。その際、数値微分に関しては Lagrange の 2 次補間式で近似して、その微分係数を用い、数値積分に関しては Simpson の 1/3 公式などを用いればよい。しかしいずれにしても誤差を含んだ測定値であるから、その数値微分や数値積分にはさらに誤差が重畳される事に注意を要する。この片側外層除去法に比較して、Read 法では被測定値の絶対値が 1/2 から 1/3 である。これは、測定値に占める誤差の割合が大きくなっている。さらに、式(2-12)によって  $N(y)$  を求めた後、さらに式(2-11)においてその数値微

分と数値積分が必要になるので誤差が拡大される危険性を含んでいる。

以上より環状溝の残留応力測定に適しているのは Read 法より本実験で用いた片側外層除去法の方が適していることがわかる。

一方マスキングは試料の転造部の谷底部分をおよそ 1mm の幅で随時腐食する際に、その他の部分を腐食液に接しないようにする必要がある。

過去の研究より塩酸を腐食液に採って数種の接着剤でマスキングし、その様子を見たところ試料の表面にまずスチロール樹脂系接着剤を腐食される部分に塗布し、さらにその上からマニキュア(エナメル系塗装剤)を塗布したものが、上の 3 つの条件を最も満たしていることが得られたため本研究でもマスキングには同様のものを使用した。

そして、転造部以外には対塩酸に強い無可塑軟質ビニールチューブを試料両端部から転造部直前のところまでかぶらせ、転造部および転造部付近の起伏の激しいところは二種のマスキングを施して試料を腐食液につけた。

そして腐食のために使用する液体には、塩酸の他にも一般的な液体が存在するが過去に行った研究により塩酸にて腐食を行ったものが腐食後の試料表面が最も滑らかであると知られている。この為、本研究では塩酸を腐食液に使用した。

腐食時間は、予備実験を通し設定した。腐食初期は、短時間で腐食が進む為、注意が必要である。終盤になると逆に長時間の腐食時間を必要とする。

そしてたわみ測定、腐食幅測定だがたわみ量の測定法は、まず試料を Fig 2.5.6.1 のように試料片側の剛体部を 3 つのローラーを用いて 2 カ所で支え、腐食部から L(=100mm)の位置にデジタルマイクロメーターを取り付ける。たわみを生じるのは全て腐食部によるもので腐食部両側の剛体は完全な直線とすると、試料を 180° 回転することにより、測定点での試料の振幅 H が測定できる。

転造後のたわみを  $H_0$  とすると、腐食によって生じたたわみは、

$$h = (H - H_0) / 2$$

として求められる。なお、全て 3 回ずつ測定を行い平均値を使用した。腐食部の半径および腐食幅を顕微鏡を用いて測定した。

硬度分布測定は押し込み速度を変化させた転造加工によって、試験片内部、特に転造加工部の硬度分布を調べる。

測定方法はそれぞれの速度で転造加工後の試験片を転造部分付近 3cm ほどファインカッターで取り出す。次に中心軸より若干上の断面をカットする。カットにはフライス盤を用いた。そして試料を樹脂に埋め込む。正確に中心軸上の硬度が測定できるようにカットした面から中心軸までバフ研磨で削っていく。なお、この際平面(平行面)を出す事も同時に行う。同じように測定面の裏面(樹脂面も測定面と平行になるようにバフ研磨を行う。

以上で作成した試験片でマイクロビッカース硬度計を用いて硬度測定を行う。試験は 200g の荷重を与えて測定を行う。(3 つの押し込み速度それぞれで行う)測定後、転造溝谷部からの距離を用いて整理する。

### 3.3 解析方法

#### 3.3.1 解析モデル

本研究は実験と同じ条件でABAQUS 陽解法と用いて解析を行った。ここで使われていたのは Adaptive Mesh という大変形塑性に有効なテクニックの一つである。解析モデルは計算の効率のため 2次元また 3次元共に 1/4モデルあるいは 1/2モデルを使用した。

特に 2次元の場合、実際転造加工のメカニズムである工具が試料に当たって加工する負荷工程と工具が試料から放れる除加工程を解析での同じく loading step と unloading step を分けて行った。Fig.3-5 はの 2次元、3次元解析モデル図である。

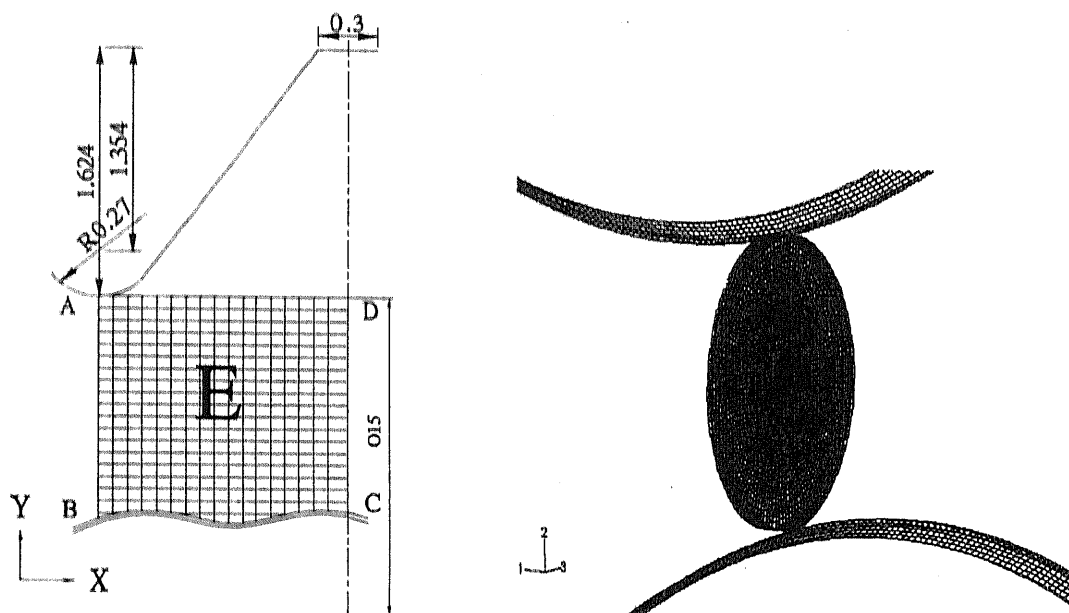


Fig. 3-5 model of 2-dimension and 3-dimension

2次元のノード数は 1071, 要素数は 1000、3次元の場合はノード数 26048, 要素数は 23070 である。2次元と 3次元共に平面ひずみ問題とする。

2次元要素としては CPE4R (4-node bilinear, reduced integration with hourglass control of plane strain element) を使って、3次元としては C3D8R (8-node linear brick, reduced integration with hourglass control) 要素を使った。摩擦係数は 0.3 とした。解析の条件は table 3-4 に示す。

### 3.3.2 解析条件

Table. 3-4 Analysis conditions

Process type	
2-dimension	Loading and unloading process
3-dimension	Rotating around of specimen
Material	S45C, SUS304
Tool	Rigid body (R2D2, R3D4 ; for in planar geometries, plane strain or plane stress)
Boundary Condition	A-B ; Symmetry of Y-direction B-C ; Symmetry of X-direction C-D ; Restriction of X-direction A-D ; Free surface
Coefficient of friction	0.3
Adaptive mesh	E - 2-Dimension, 3-Dimension
Mesh type	CPE4R; 4-node bilinear, reduced integration with hourglass control of plane strain element
2-dimension	
3-dimension	C3D8R; 8-node linear brick, reduced integration with hourglass control

3次元モデルの解析では実験とは違い材料を固定し工具が回転しながら加工するメカニズムを使用した。これはもし材料を回転させると加速度による応力変化の恐れがあるため解析では工具を回転させるようにした。



### 3.4 結果および考察

#### 3.4.1 圧縮試験

材料圧縮試験で得られていた F 値、1716MPa(S45C 材), 2074MPa(SUS304 材)と n 値、0.425(S45C 材), 0.501(SUS304 材)を用いて材料特性として使われた。Vickers 軽度はそれぞれ S45C、211[HV], SUS304、178[HV].である。

#### 3.4.2 疲労強度

疲労試験として材料は S45C と SUS304 が使われた。工具の速度は S45C の場合、高速(0.128mm/rev)、中速(0.1mm/rev)、低速(0.083mm/rev)そして SUS304 の場合、高速(0.12mm/rev)、中速(0.0958mm/rev)、低速(0.075mm/rev)である。

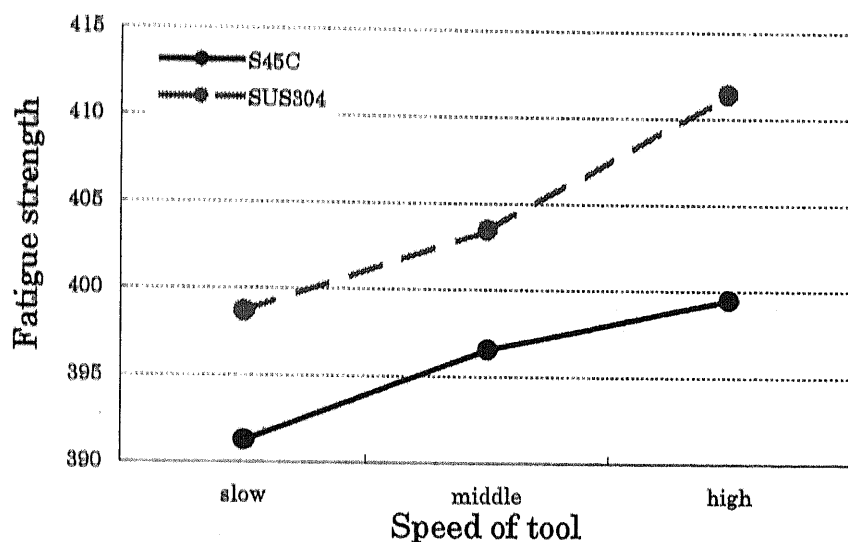


Fig. 3-6 Fatigue test at  $10^6$  for S45C and SUS304

疲労試験の結果を Fig. 3-6 に示す。結果によるとロール速度の増加によって疲労強度も増加することがわかる。これで疲労強度はロール速度に依存することがわかる。

### 3.4.3 残留応力

七つの試料を使って残留応力の結果を Fig. 3-7 に示す。ロールの速度は実験と同じく S45C の場合、高速(0.128mm/rev)、中速(0.1mm/rev)、低速(0.083mm/rev)そして SUS304 の場合、高速(0.12mm/rev)、中速(0.0958mm/rev)、低速(0.075mm/rev)である。

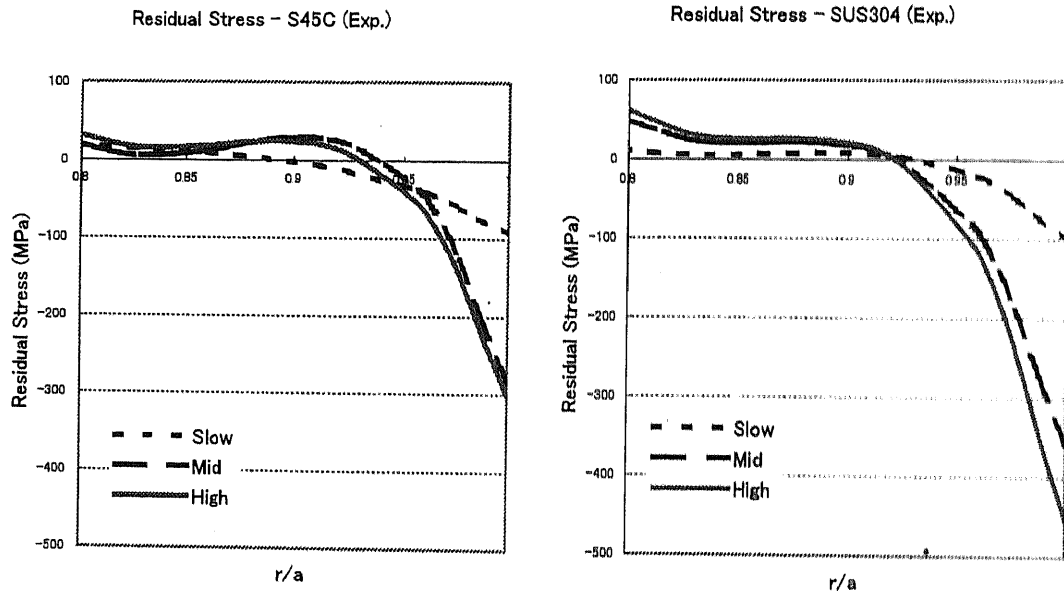


Fig. 3-7 Residual stress for S45C and SUS304

S45C の残留応力の結果によると 0.875 r/a のところで引っ張り応力から圧縮応力に変わり始めた。これは SUS304 の場合の 0.880 r/a のところで引っ張り応力から圧縮応力に変わり始める結果とほぼ同じ結果である。

残留応力は中速と低速の場合その差は小さいでも高速から中速、低速の順に低くなる。

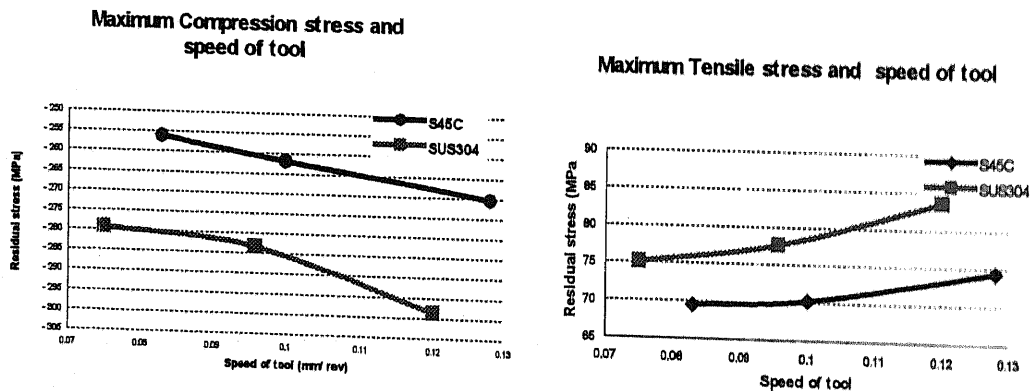
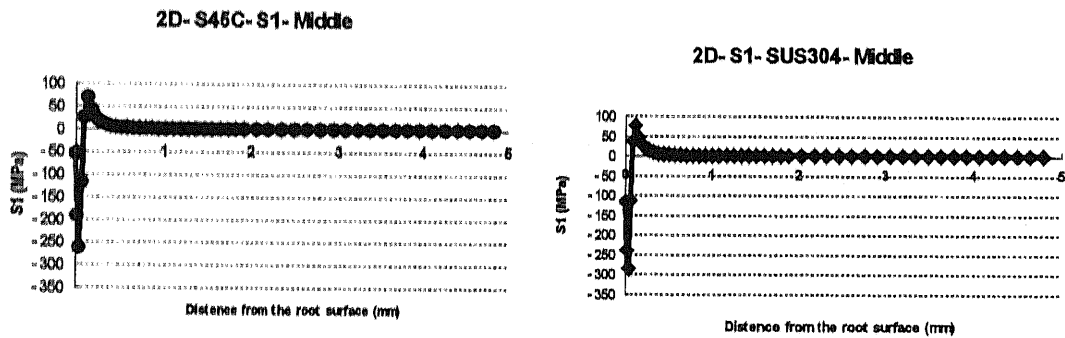
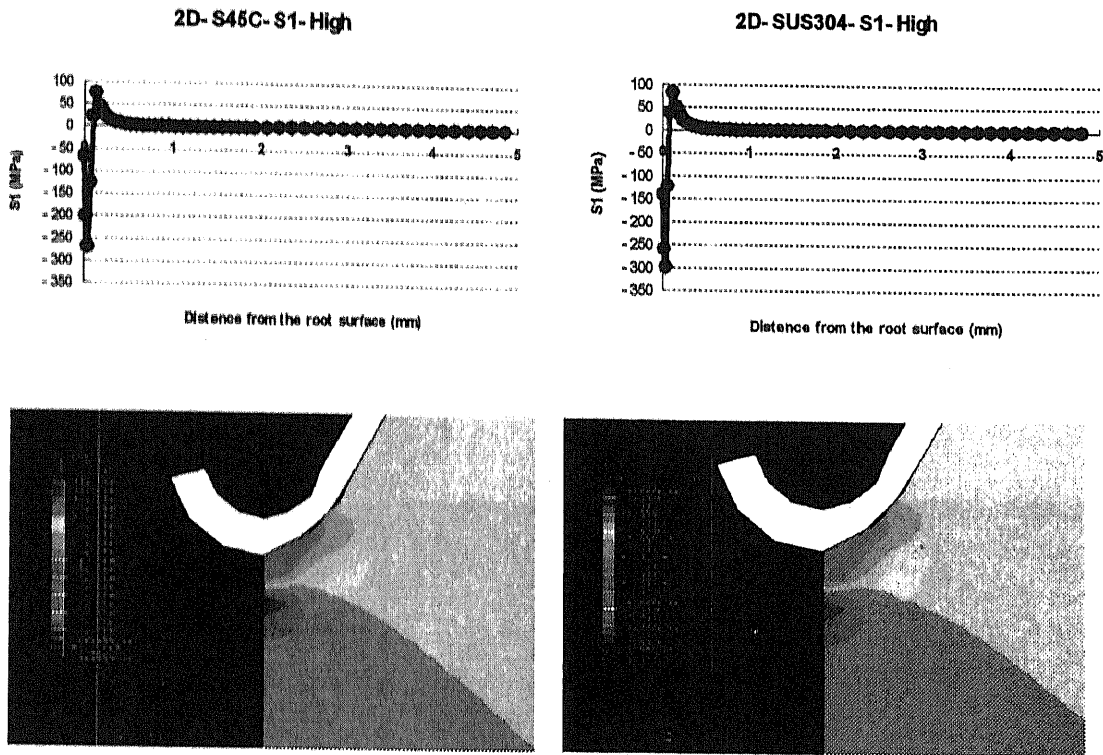


Fig. 3-8 The relation of Residual stress and speed of tool

Fig. 3-8 は 2 次元の S45C と SUS304 それぞれの最大圧縮応力と引っ張り応力を示す。圧縮応力は S45C と SUS304 共にロール速度の低下によって低下する。これは残留応力と Vickers 軽度と同じ傾向である。

次は解析による残留応力結果を示す。Fig. 3-9 は谷の部分から中心までの X 軸応力を格材料によって示す。



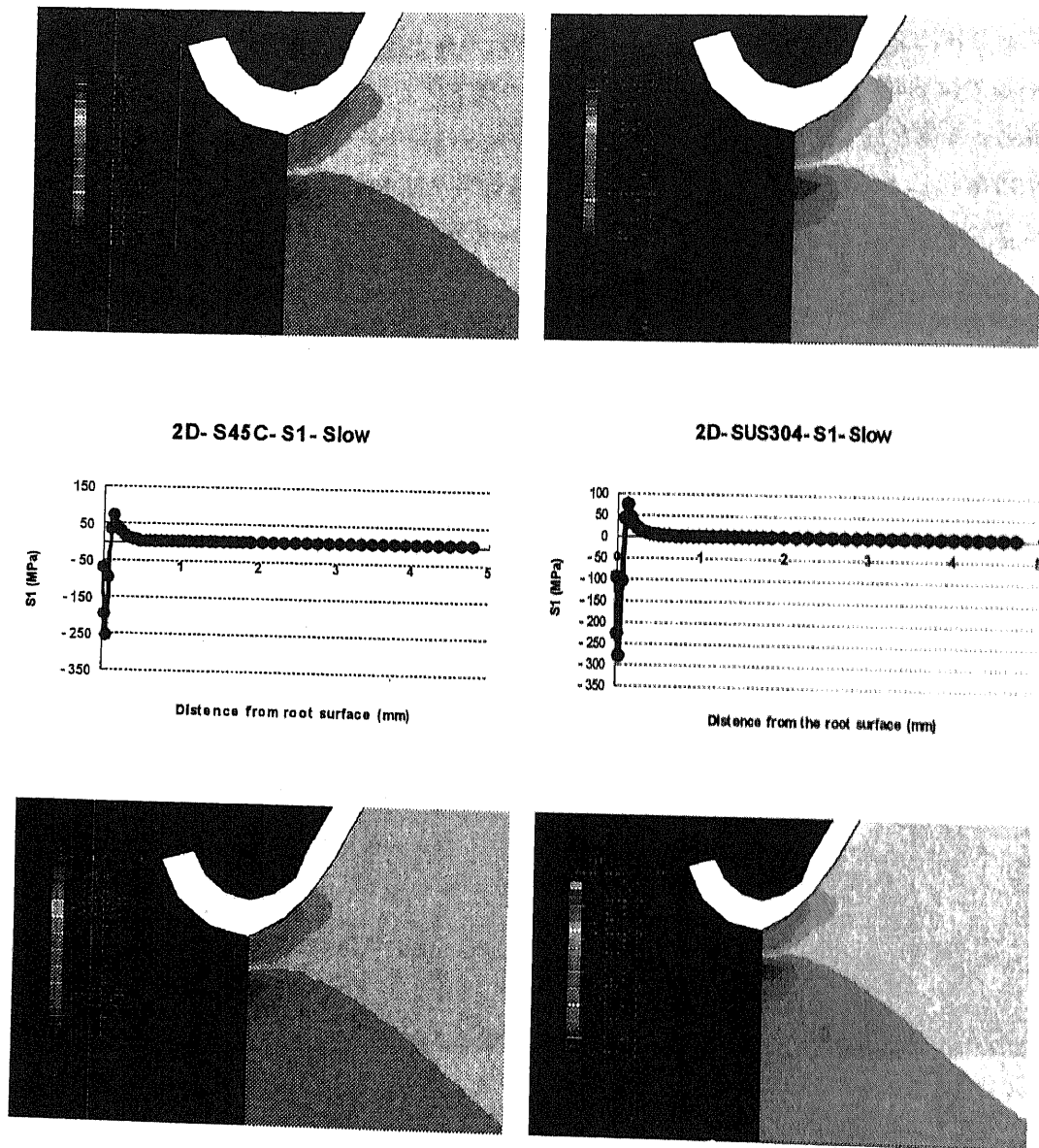


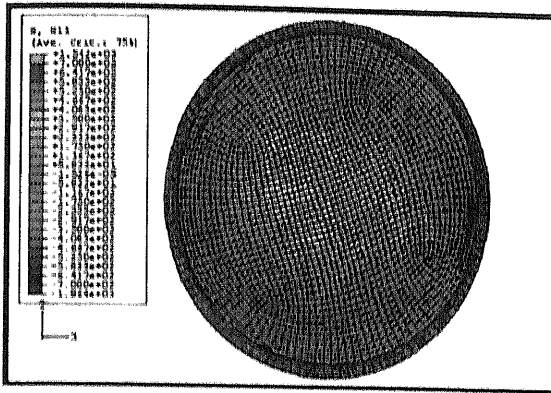
Fig. 3-9 Sigma-X diagram in high, middle, low speed in S45C and SUS304

高速の場合、Fig. 3-9の結果によると X 軸応力は谷の表面のところに生じる。最大 X 軸応力は谷の表面から 0.035mm のところである。このような圧縮応力は急激に低下し谷の表面から 0.1mm からは引っ張り応力に変わり始める。

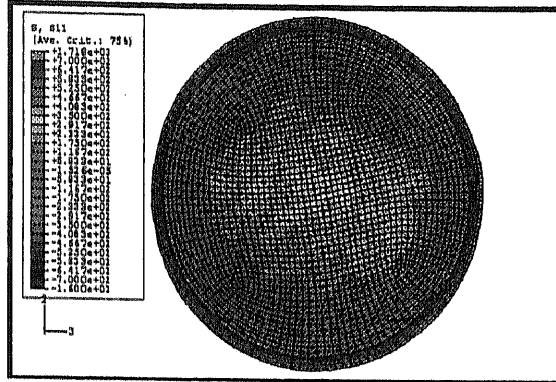
最大引っ張り応力は谷の表面から 0.12mm のところに生じる。そして引っ張り応力は中心に向かって 0 に近くなる。次の Graph は材料それぞれの中速と低速の時の X 軸応力を示す。

Fig. 3-9 の結果のように解析結果も実験結果の同じくロール速度の低下のよって応力も低下することがわかる。

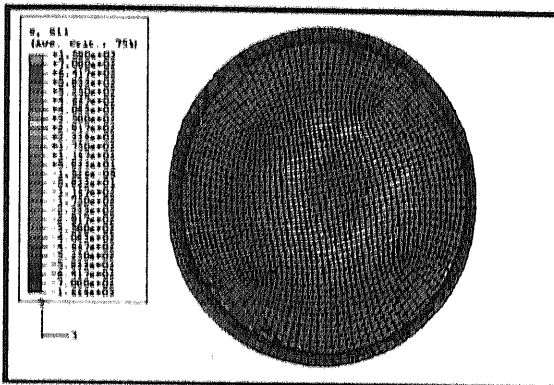
2 次元解析結果も実験結果のように最大圧縮応力は谷の表面から  $0.875r/a$ (谷の表面から 0.6mm)のところに生じる。次の Fig. 3-10 と Fig. 3-11 は 3 次元の解析結果を示す。



Low speed of roll

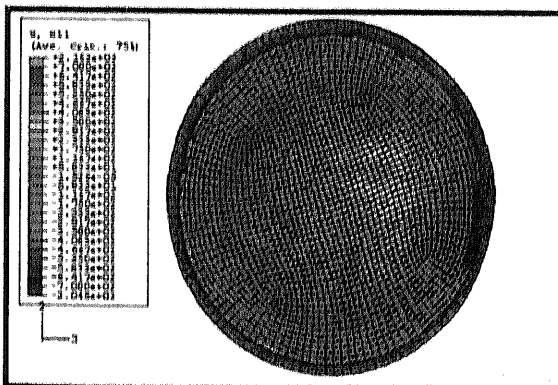


Middle speed of roll

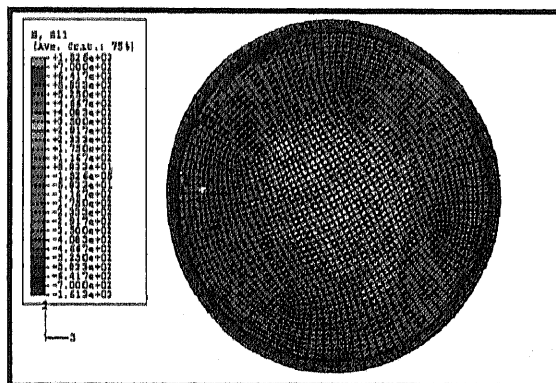


High speed of roll

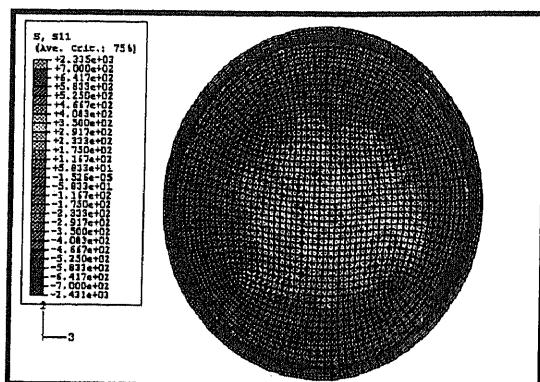
Fig. 3-10 Diagram of sigma X in low, middle, high speed  
And Graph in middle speed (S45C)



Low speed of roll



Middle speed of roll



High speed of roll

Fig. 3-11 Diagram of sigma X in low, middle and high speed  
And Graph in middle speed (SUS304)

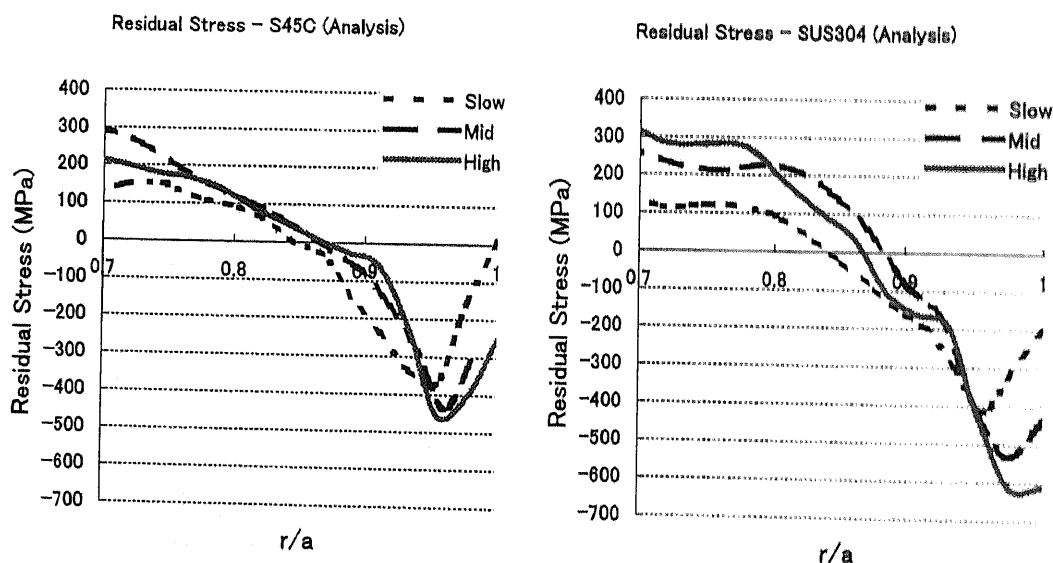


Fig. 3-12 Sigma-X of root surface in S45C and SUS304 by 3-Dimension analysis

Fig. 3-12はX軸応力の3次元解析結果を示す。3次元の場合、実験と同じく谷の表面から0.3mmのところまで圧縮応力が生じる。谷の表面から1mmのところまで0になって、試料の中心に向かって引っ張り応力が生じる。3次元の解析結果も圧縮応力、引っ張り応力は実験の結果と同じくロール速度の低下によって低下することがわかる。

### 3.4.4 ビッカース硬さ

格材料をロール速度、S45C の場合、高速(0.128mm/rev)、中速(0.1mm/rev)、低速(0.083mm/rev)、SUS304 の場合、高速(0.12mm/rev)、中速(0.0958mm/rev)、低速(0.075mm/rev) の条件で Vickers 軽度試験を行った。Fig. 3-13 は格材料の Vickers 軽度試験の結果を示す。

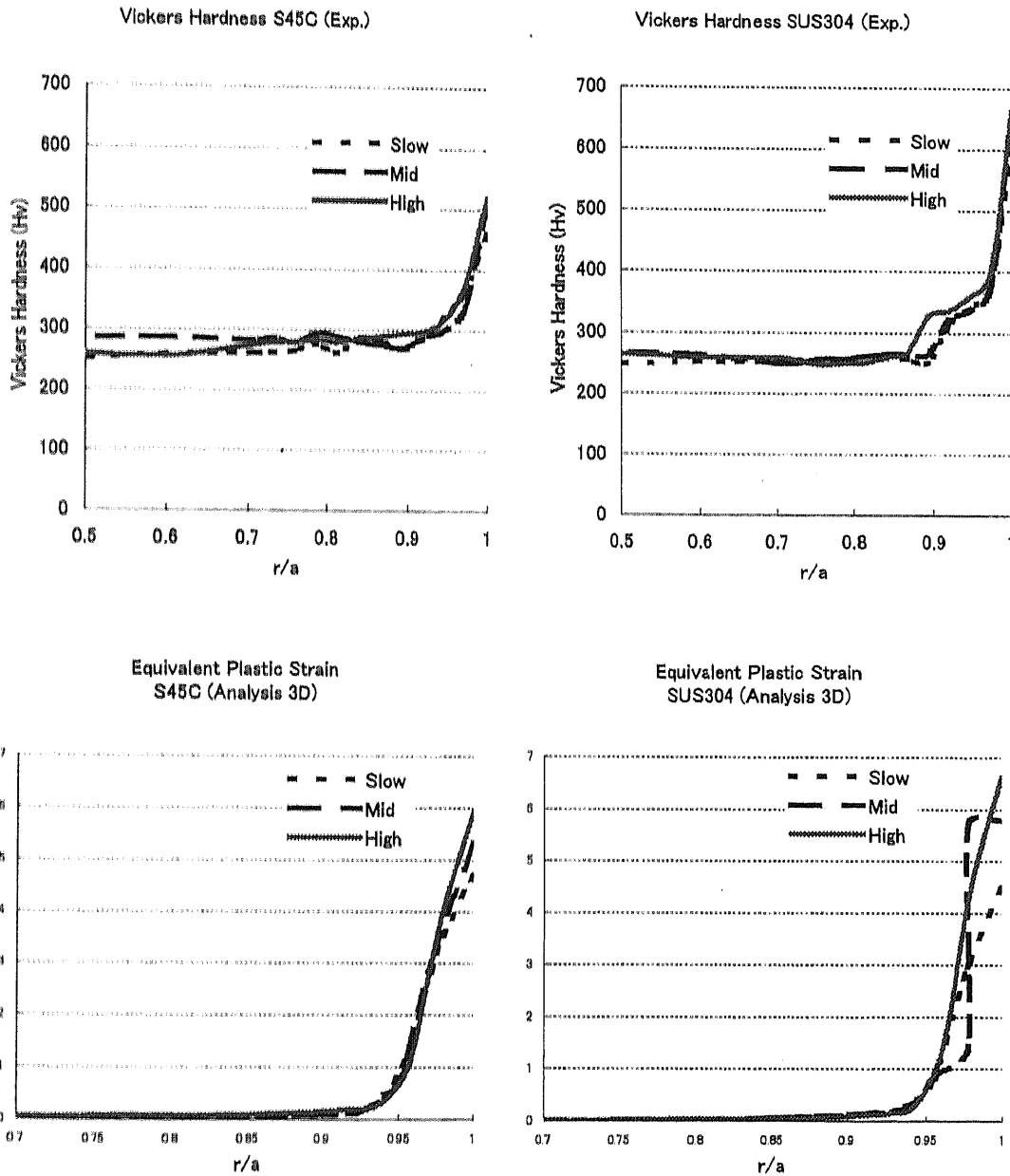


Fig. 3-13 The equivalent plastic strain of root surface in S45C and SUS304 by 3-Dimension analysis

Fig. 3-13 に実験と 3 次元解析の相当塑性ひずみを示す。谷の表面からロール速度の低下によって相当塑性ひずみも低下する。これは谷の表面が高い強度を現すのがわかる。S45C の場合、強度がロール速度の低下によって低下すること結果と同じく解析結果も同じ傾向が生じる。2次元の解析結果より3次元の結果がより実験の結果に似ている傾向が生じるのは2次元の場合は厚さを考慮していないである。少し差はあるが2次元3次元共に実験結果と同じ傾向が生じる。



### 3.5 ねじ転造への応用

Fig. 3-14 と Table 3-5 にメートルねじ M10 の寸法を示す。

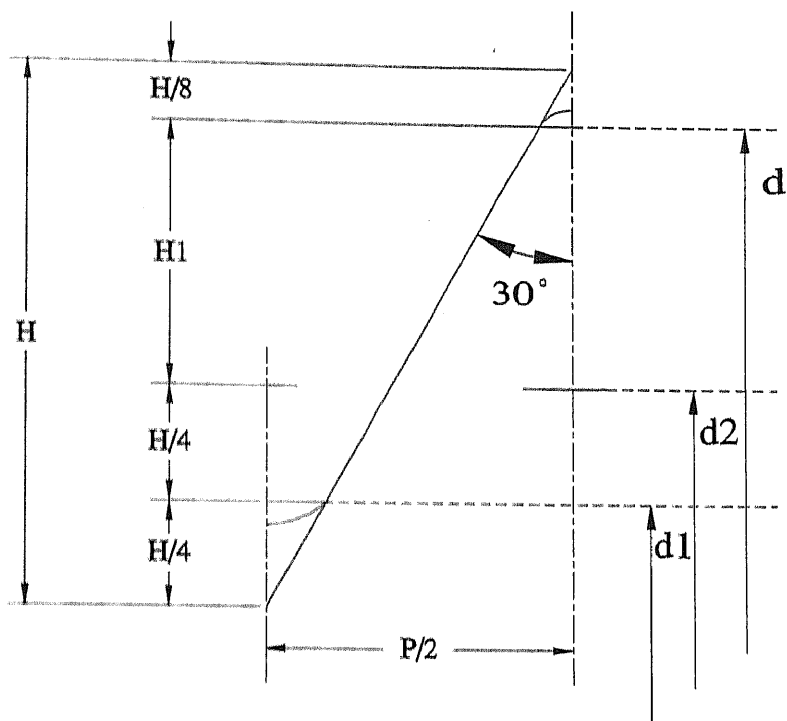


Fig. 3-14 Diagram of M10 metric screw thread

Table 3-5 Spec of metric screw thread unit (mm)

d1 (minor diameter of external thread)	8.376
d2 (pitch diameter of external thread)	9.026
d (major diameter of external thread)	10.000
H1 (depth of basic triangle)	0.812
P (pitch)	1.5

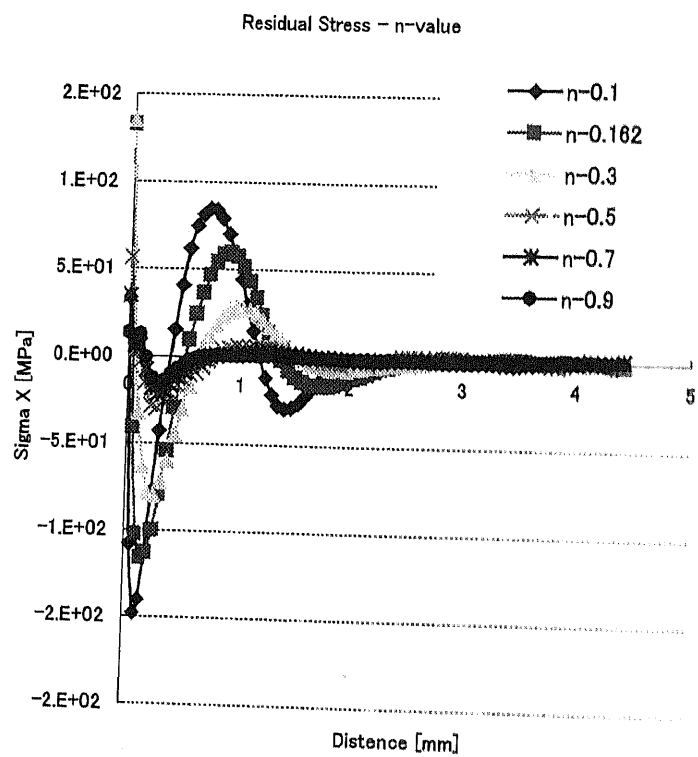


Fig. 3-15 Calculated relation Residual stress and n-value

Fig. 3-15 はメートルねじ M10 をモデルにして n 値による残留応力の結果を示す。2 次元解析の結果と同じく M10 の場合も表面部分に圧力応力が現れた。そして n 値の増加と共に応力が低下する。

### 3.6 結論

#### Feed rate & Fatigue Strength

送り速度の増加によって疲労強度が増加する。

#### Feed rate & Residual Stress

送り速度の増加によって残留応力が増加する。

#### Vicker's hardness & Equivalent Plastic Strain

谷の表面に高いビッカース硬度、高い相当塑性ひずみが形成される。

#### Analysis

2次元の解析に除荷&負荷のメカニズムを適用すれば、押込み速度などの加工条件の変化による残留応力、相当塑性ひずみなどへの影響が検討出来る。

3次元の解析では残留応力分布などを詳細に検討出来るが、計算時間が多くかかるので必要に応じて2次元の簡易解析を利用出来る。

## 第4章

# スプリッティングにおける 材料流れ

## 第4章 スプリッティングにおける材料流れ

### 4.1 結論

押込みにおける材料流れ、押込みに回転を加えた環状溝の回転加工における材料流れの研究を用いて軸方向へも材料流れを起こりより複雑な加工法であるスプリッティング加工における材料流れに関して研究を行った。

スプリッティング加工とは円形の板材をジグに固定し、そのジグを回転させる。そこに自由に回転するロールをジグの軸に垂直に横方向から力を加え押し当てていく。ロールをさらに押し込んでいくことで板材の外周部を切り裂くようにして成形していく加工方法である。実験の材料としてはアルミニウムのH材、O材、試料の厚さは3mm, 4mm, 5mmの3種類、送り速度は0.05mm/rev, 0.1mm/rev, 0.2mm/revの3種類。解析は2次元の負荷、除荷のメカニズムを使用した。実験の結果としては送り速度と加工力の関係、送り速度と加工後のプロファイルなどを調べて解析との比較し材料流れを検討する。

## 4.2 実験方法

### 4.2.1 スプリッティング

ロールは3通りのロールを用いることにした。ロール角は $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $50^\circ$ とした。ロール先端の変形を防ぐことも考慮に入れ、ロール先端には、一律 $\rho=0.2\text{mm}$ の丸み半径をつけた。ロールの幅は $22\text{mm}$ とした。Fig.4-1にロール( $\alpha=40^\circ$ )と試料を示す。

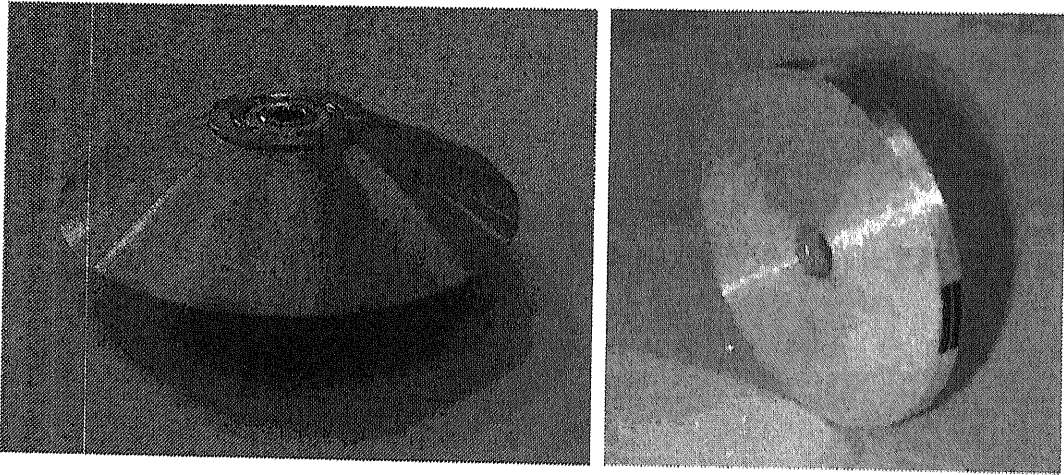


Fig. 4-1 Roll and Specimen

試験片の強さが加工力に及ぼす影響も調べるため、材質は A-1050-O 材と A-1050-H 材の2種類を用いた。試験片寸法は、直径： $D_o=54\text{mm}$ 、厚さ： $t_o=3, 4, 5\text{mm}$ 、試験片中央にはジグに取り付けるための $\phi 8$ の穴をあけた。

ロールを取り付けたシャンクを旋盤の刃物台に取り付け、これを本実験装置とした。以下に本実験装置を Fig.4-2 に示す。

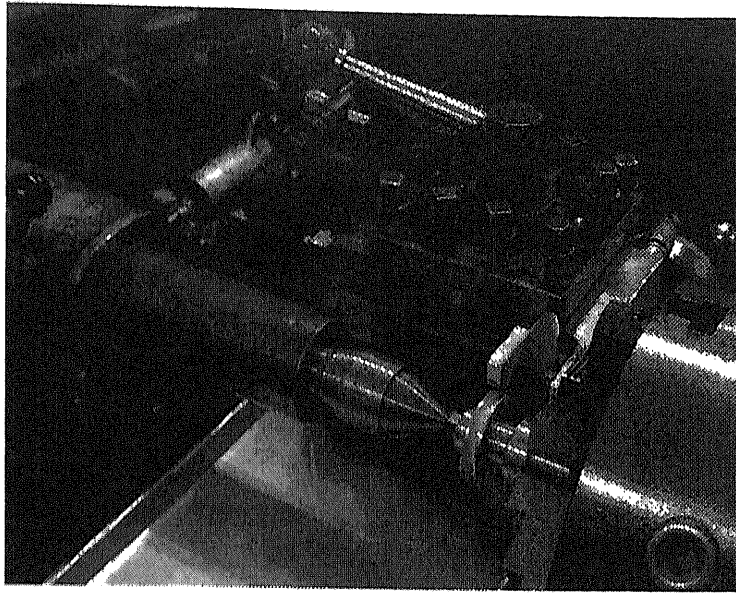


Fig.4-2 Splitting process

#### 4.2.2 実験条件

加工条件は Table4-2 に示す。試験片材質は A-1050-H 材, A-1050-O 材。試験片厚さは  $t_0 = 3\text{ mm}$ ,  $4\text{ mm}$ ,  $5\text{ mm}$ 。ロール角は  $\alpha = 30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $50^\circ$ 。ロール送り速度は  $s = 0.05\text{ mm/rev}$ ,  $0.1\text{ mm/rev}$ ,  $0.2\text{ mm/rev}$  である。それぞれの加工条件に対し、54 通りすべての組み合わせの実験を各 2 回ずつ行う。今回、試験片に対しロールを押し当てる位置は、すべて試験片厚さの中心とした。本実験に用いた試験片材料の、材料試験の結果得られた物性値を Table 4-1 に示す。

Table.4-1 Material Properties

	n 値 [-]	F 値 [MPa]
A1050-O	0.292	156.585
A1050-H	0.191	159.796

Table 4.2 Working Conditions

Material	A11050-H, O
Thickness of Specimen	3mm, 4mm, 5mm
Angle of roll	30, 40, 50
Feed rate	0.05mm/rev, 0.1mm/rev, 0.2mm/rev

シャンクにロールを取り付け、それを旋盤の刃物台に固定する。バイトを刃物台に取り付ける。変位計・加工力測定歪ゲージをPCに接続し、測定スタンバイ状態にする。旋盤のチャックにジグを固定する。ジグに試験片を固定する。刃物台を回転させ、バイトを用いて試験片直径が54mmになるように外周を切削する。刃物台を回転・移動させ、ロール先端を試験片中心にあわせる。送り速度にあったギアを選択し、ギアがかみ合っていることを確認する。旋盤の電源を入れ、試験片を回転させる。変位・加工力の測定を開始する。加工台の送り用クラッチをつなぎ加工を開始する。加工状況をよく観察し、もし不都合が生じた場合は速やかに旋盤の電源を切り、加工を中止する。ロールの送り量が8mmになったら加工を終了するため送り用クラッチを切り、続いて旋盤の電源を切る。加工力の測定を終了する。測定した加工力を保存する。製品をジグから取り外し、それに加工条件を記入する。以上の手順で、それぞれの加工条件に対し実験を行った。

まず加工力はロール先端での加工力は Fig. 4-3 に加工の際の、工具先端に加わる力の模式図を示す。図中の記号は、各部分での圧力：P、ロールと試験片間の摩擦係数： $\mu$ 、ロール先端丸み半径： $\rho$ 、ロールと試験片の接触幅： $w$ 、ロールと試験片の接触長さ： $l$ 、である。

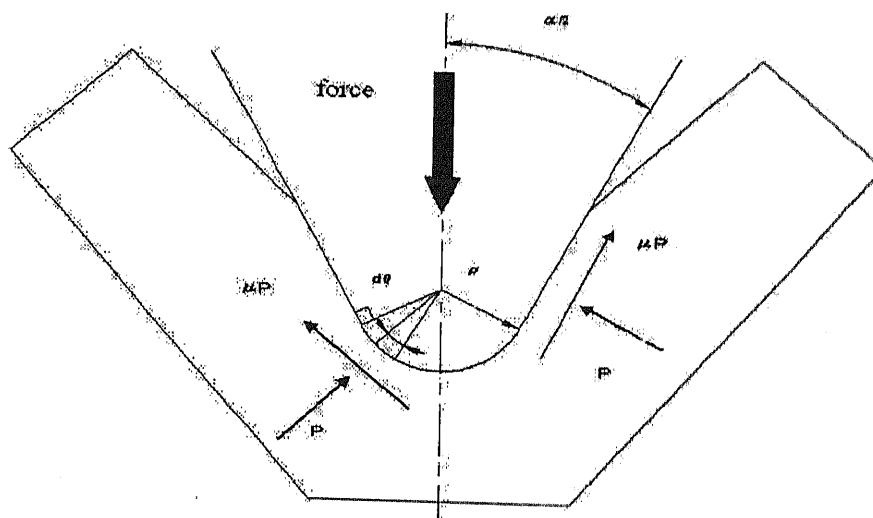


Fig. 4-3 Scheme diagram of force

このとき、ロール先端での加工力： $F_T$ は、

$$\begin{aligned}
 F_T &= 2 \int_0^{\pi/2-\alpha/2} \rho w P \cos \alpha/2 d\theta + \int_0^{\pi/2-\alpha/2} \mu \rho w P \sin \alpha/2 d\theta \\
 &= [2 \rho w P \sin \alpha/2]_0^{\pi/2-\alpha/2} + [2 \rho w P \sin \alpha/2]_0^{\pi/2-\alpha/2} \\
 &= 2 \rho w P \{ (\cos \alpha/2 + \mu (1 - \sin \alpha/2)) \} \text{となる。}
 \end{aligned}$$



このとき、ロール側面での加工力： $F_s$ は、

$$F_s = 2 \int_0^l lwP \cos \frac{\alpha}{2} d\theta + \int_0^l \mu \rho w P \sin \frac{\alpha}{2} d\theta$$

$$= \left[ 2lwP \sin \frac{\alpha}{2} \right]_0^l + \left[ 2lw\mu P \cos \frac{\alpha}{2} \right]_0^l$$

$= 2lwP(\sin \alpha/2 + \mu \cos \alpha/2)$  となる。

ロール先端の場合と異なり、送り速度： $s$ 、試験片厚さ： $t$ 、ロール角： $\alpha$ 、の変化が、それぞれ各部での圧力： $P$ 、接触長さ： $l$ 、に影響を与えらるため、ロール側面での加工力についての理論的予測は難しい。

### 4.3 解析方法

#### 4.3.1 解析モデル

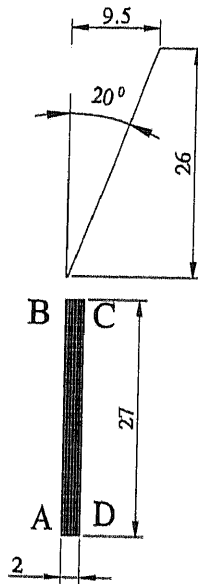


Fig. 4-4 Scheme of Splitting analysis model

Fig. 4-4 にスプリッティング解析モデルを示す。解析モデルは Fig. 4-4 のように実験のモデルの 1/4 の 2 次元モデルにした。工具の角度  $30^\circ$  ,  $40^\circ$  ,  $50^\circ$  ,  $60^\circ$  の 4 種類、先端丸み半径は 0mm, 0.1mm, 0.2mm, 0.4mm の 4 種類、送り速度は 0.05mm/rev, 0.1mm/rev, 0.2mm/rev, 0.4mm/rev の 4 種類で解析を行った。

#### 4.3.2 解析条件

解析条件では H 材と O 材の 2 種類、工具は剛性要素、境界条件は実験と同じくモデルは 1/4 の 2 次元モデルを採用した。摩擦係数は予備解析によってより実験の結果に相応しい 0.3 を使用した。そしてスプリッティング 2 次元の解析でも 3 章の転造加工の解析の 2 次元解析と同じく除荷&負荷のメカニズムを用いた。それによって転造加工より複雑な、材料流れが試料の軸方向にも流れていく解析を行った。

そして解析条件は Table 4.3 に示す。

Table 4.3 Analysis conditions

Material	A11050-H, O (4-node bilinear)
A11050-O	K=156.585MPa, n=0.292
A11050-H	K=159.796MPa, n=0.191
Tool	Rigid material (2-node bilinear)
Boundary Condition	A-B ; $\nu_x=0$ , $\nu_y$ unknown B-C ; $\nu_x$ unknown, $\nu_y$ unknown C-D ; $\nu_x$ unknown, $\nu_y$ unknown D-A ; $\nu_x$ unknown, $\nu_y=0$
Coefficient of friction	0.3
E	70000kg/mm <sup>2</sup>
Density	2.7e-7kg/mm <sup>3</sup>

## 4.4 結果および考察

### 4.4.1 最大加工力

加工力の上下動は、予備実験に対して小さくはなったものの完全にはなくならなかったため、最大加工力は、加工終了時付近の加工力の平均値とした。ロールの送りには旋盤の自動送りを用いたため、加工終了時のロール送り量は8 mm 前後で一定でない。このため、最大加工力は、ロール送り量が6.5~7 mm での平均値とした。

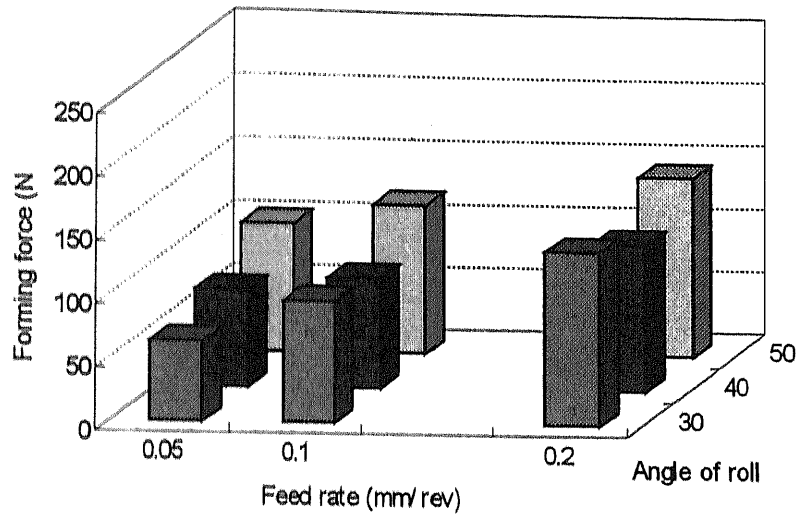
H材とO材での応力差は最小でも2.0% (ひずみが約-0.38 のとき) あるということがわかる。しかし、本実験の結果では、試験片材質の違いによる加工力の差は最大でも5%程度であった。したがって、この加工において、最大加工力に与える試験片材質の影響は小さいといえる。試験片先端でのロールに対する圧力は、変形量に伴って増加するひずみによって定まると考えられるため、試験片の材質による影響を受けるはずである。このことから、ロール側面での加工力に対する試験片材質の影響は大きくないと考えられる。

ロール送り速度の影響はグラフから、ロール送り速度の増加に伴って最大加工力が増加していくことが確認される。この原因として、ロール送り速度の増加に伴うロール1回転あたりの加工量の増加によって試験片の降伏応力が高くなっていくことで試験片からの圧力：Pが増加していくということが考えられる。

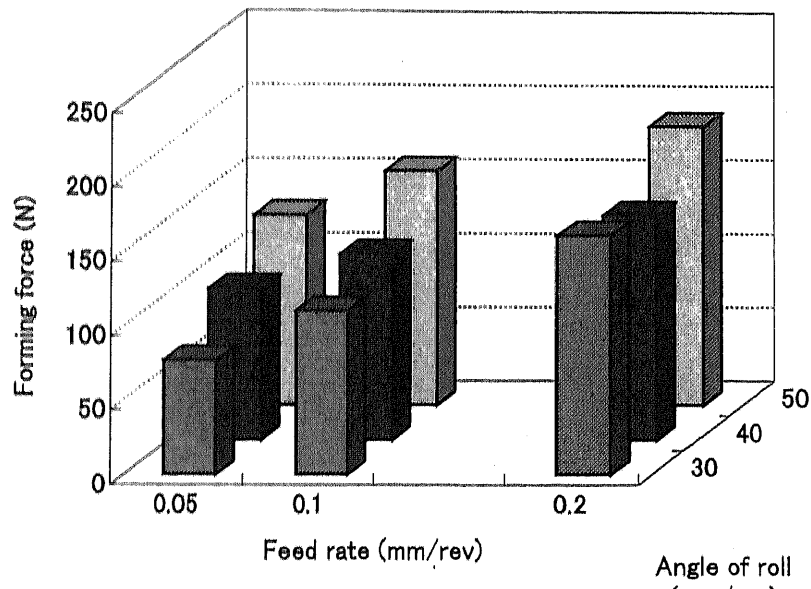
また、ロール角： $\alpha=30^\circ$  ,  $40^\circ$  ,  $50^\circ$  でグラフの傾きが異なっている。ロール先端での加工力はロール送り速度のみに依存するため、この傾きの違いはロール側面での加工力の影響によるものと言える。グラフの傾きが大きいほど、ロール送り速度の増加量に対するロール側面での加工力の増加量が大きいといえる。

最大加工力は試験片厚さの増加に伴って増加していることが確認される。試験片とロール側面の接触長さ： $l$  は、試験片厚さの増加に伴って減少する傾向が見られている。つまり、 $l$  の減少以上の割合で圧力：Pが増加するということが予想される。Fig. 4-5 と Fig. 4-6 に送り速度、先端丸み半径と加工力の結果を示す。

H-material, T=3



H-material, T=4



H-material, T=5

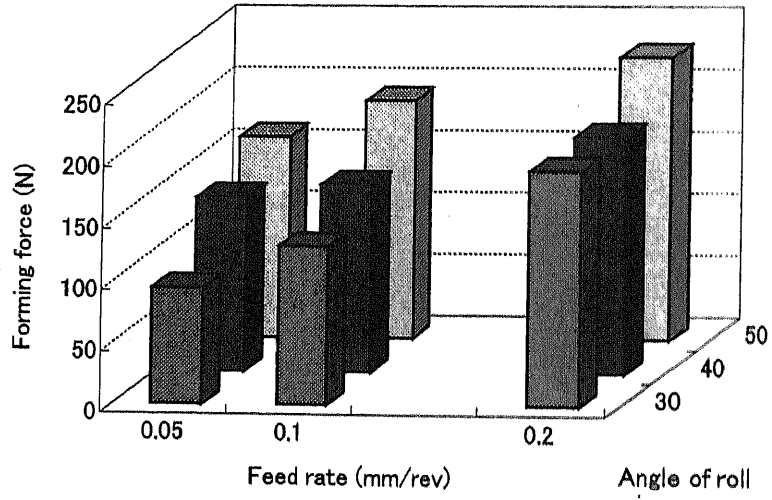
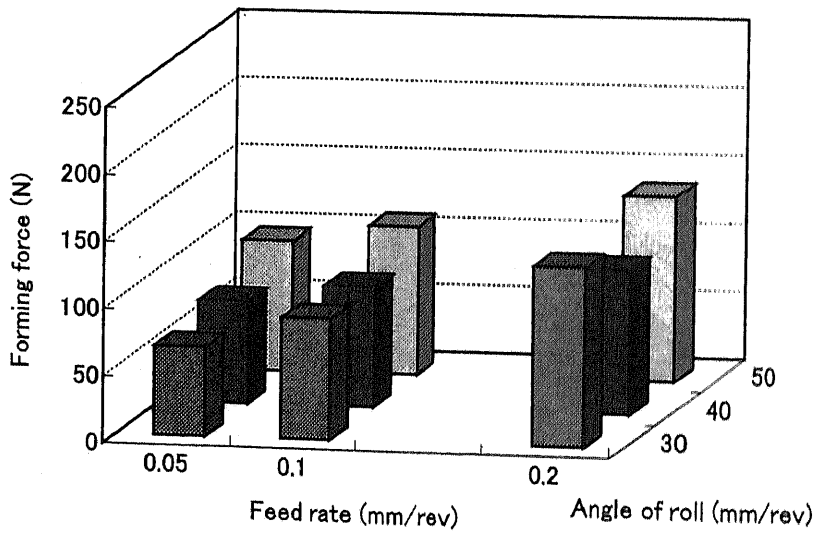
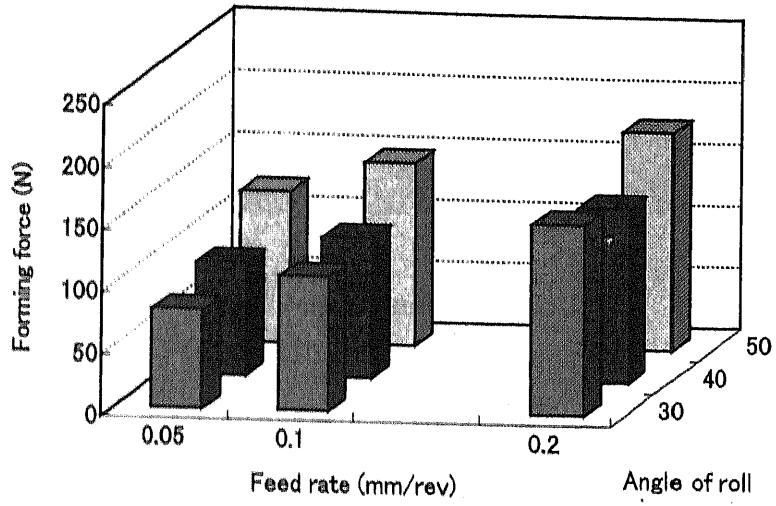


Fig. 4-5 Forming force (H-material, T=3, 4, 5mm)

O-material, T=3



O-material, T=4



O-material, T=5

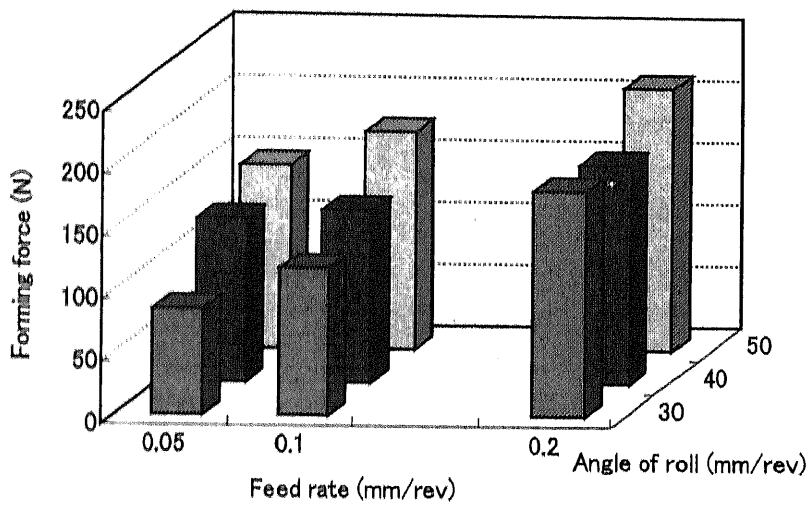


Fig. 4-6 Forming force (O-material, T=3, 4, 5mm)

#### 4.4.2 プロファイル

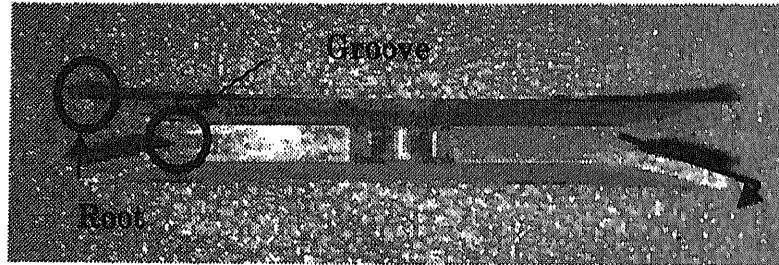
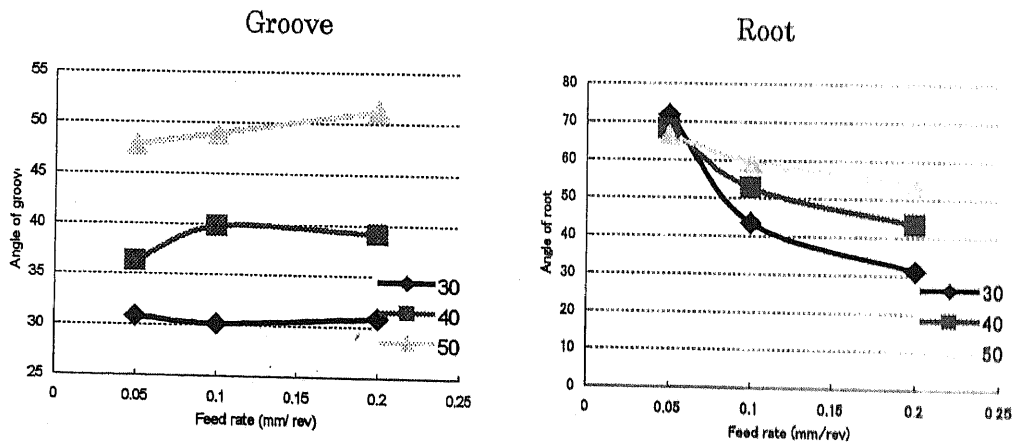


Fig. 4-7 Section of specimen

Fig. 4-7 には加工後の試料の断面図を示す。Root は断面のそりのところを示す。そして Groove は溝のところを示す。加工後のプロファイルとしてそりと谷の角度、長さを調べた。

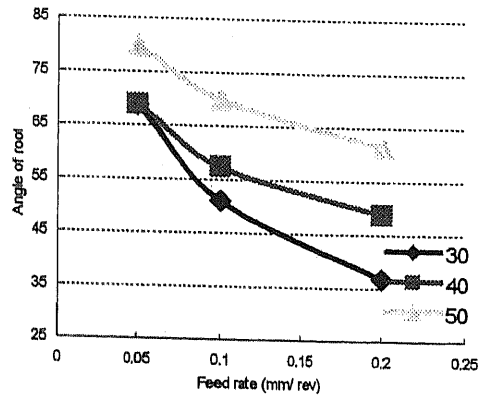
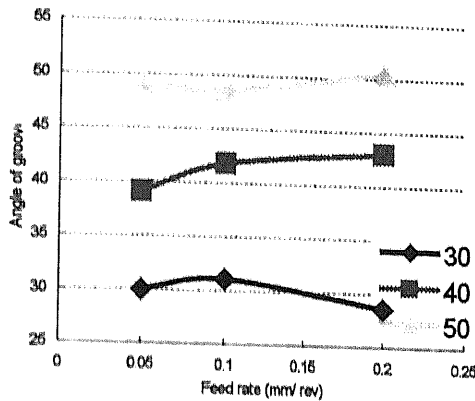
溝のところでは直線になってそりるところでは曲線になっている。格条件によるプロファイルで加工後の材料流れを検討する。

溝の角度、そりの字角に結果を Fig. 4-8, Fig. 4-9, Fig. 4-10, Fig. 4-11 に示す。

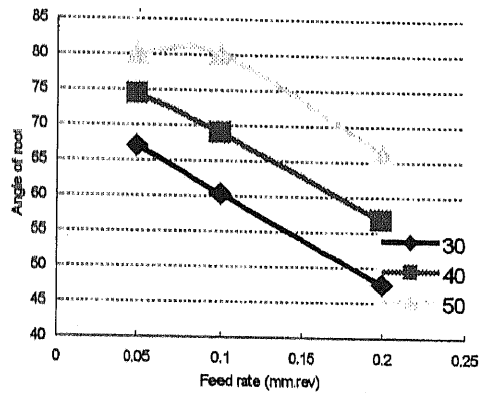
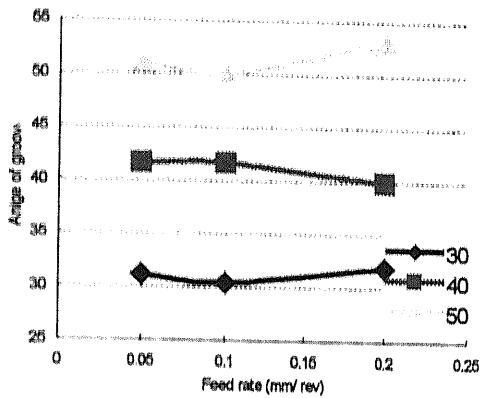


Thickness 3mm, V-0.05, 0.1, 0.2mm/rev, Angle of tool-30, 40, 50, H-material





Thickness 4mm, V-0.05, 0.1, 0.2mm/rev, Angle of tool-30, 40, 50, H-material



Thickness 5mm, V-0.05, 0.1, 0.2mm/rev, Angle of tool-30, 40, 50, H-material

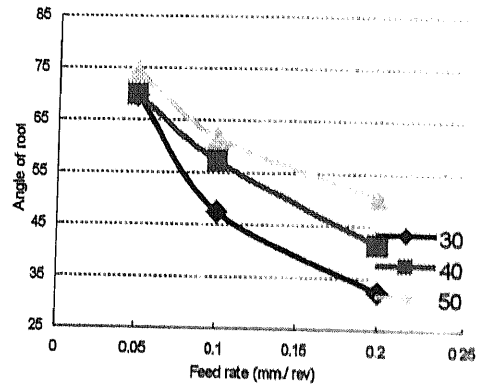
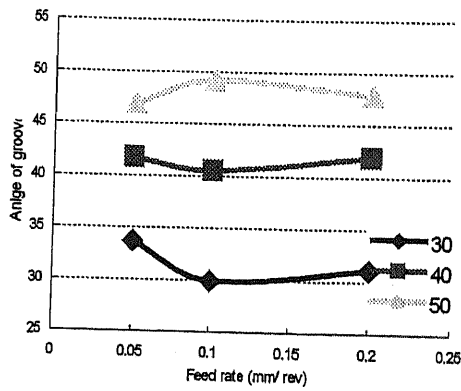
Fig. 4-8 Angle of groove and root in Nose radius of roll 30, 40, 50, H-material

Fig. 4-8 は試料の厚さ 5mm で送り速度は 0.05mm/rev, 0.1mm/rev, 0.2mm/rev、ロール角度は 30°, 40°, 50°, H材の溝のそりの角度の実験結果を示す。

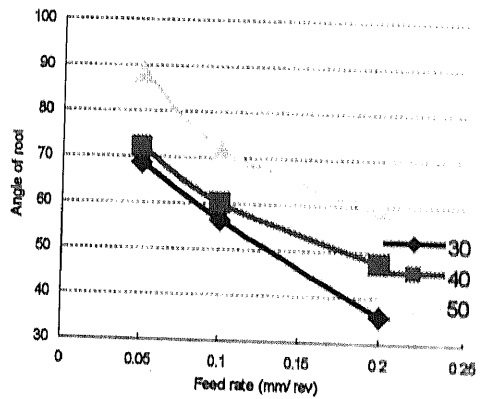
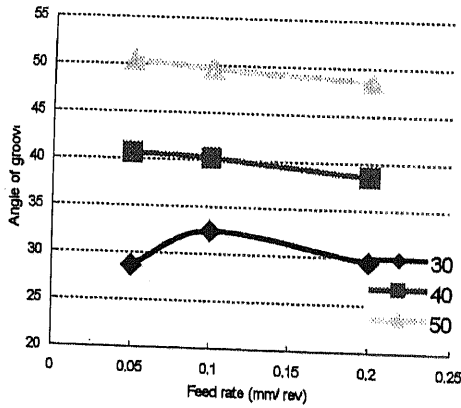
H材の溝の場合は、送り速度に関してはばらつきが多くて傾向が見られなかった。特に溝の角度の場合、測定が困難であり良い正確なデータをとるのが難しい。

そりの場合は送り速度の増加によってそりの角度が小さくなるのがわかった。ロール角度の場合は角度が大きいくほどそりの角度も大きくなるのがわかった。

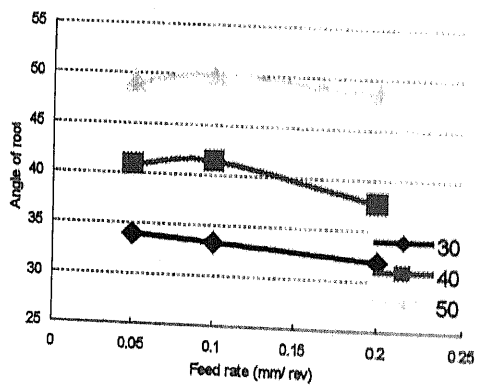
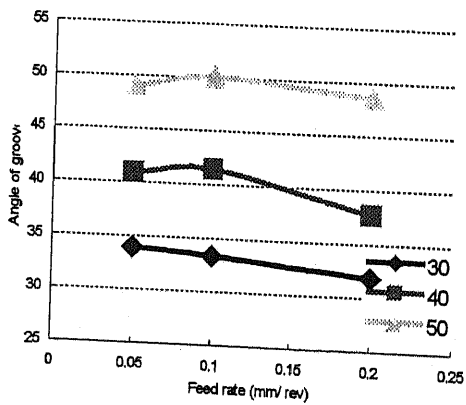
Fig. 4-9 はO材の場合もH材と同じく溝のところは測定が困難であり正確なデータをとるのが難しく結果はばらつきが多くて傾向が見られなかった。そりの場合は送り速度の増加によってそりの角度は小さくなるのがわかる。そしてロール角度が大きくなるほどそりの角度が大きくなるのがわかる。



Thickness 3mm, V-0.05, 0.1, 0.2mm/rev, Angle of tool-30, 40, 50, O-material



Thickness 4mm, V-0.05, 0.1, 0.2mm/rev, Angle of tool-30, 40, 50, O-material

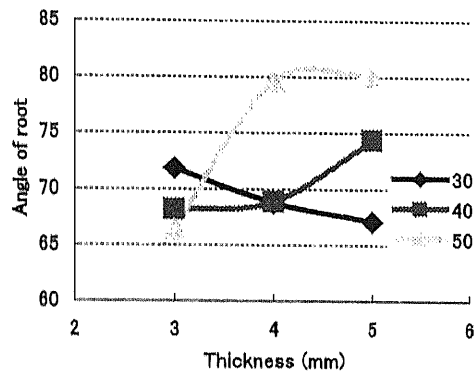
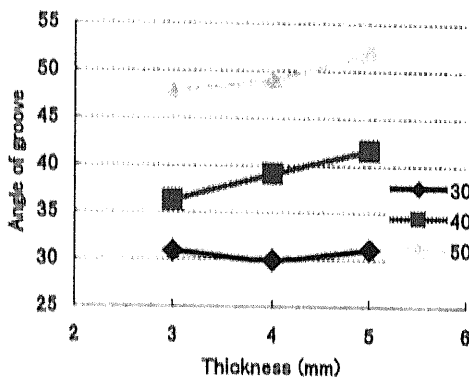


Thickness 5mm, V-0.05, 0.1, 0.2mm/rev, Angle of tool-30, 40, 50, O-material

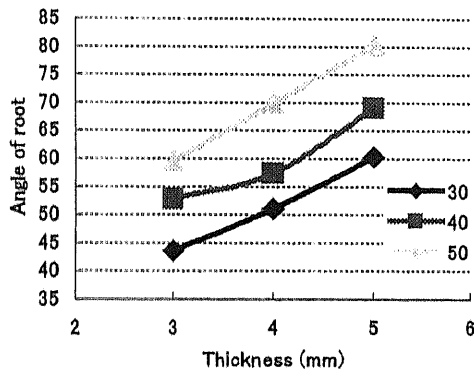
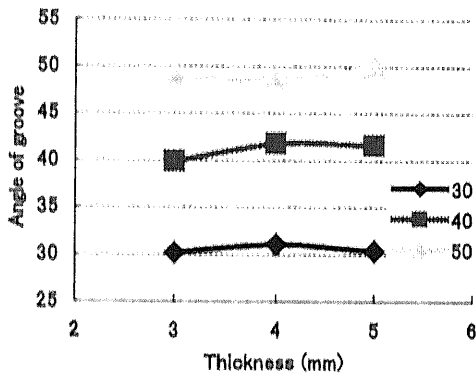
Fig. 4-9 Angle of groove and root in Nose radius of roll 30, 40, 50, O-material

Fig. 4-10は試料の厚さ3mm, 4mm, 5mm, ロール角度は30°, 40°, 50°, H材の溝のそりの角度の実験結果を示す。ここにも溝の場合、送り速度に関してはばらつきが多くて傾向が見られなかった。その場合は試料の厚さが厚いほどそりの角度が大きくなるのがわかる。ロール角度の場合も角度が大きいほどそりの角度も大きくなるのがわかった。

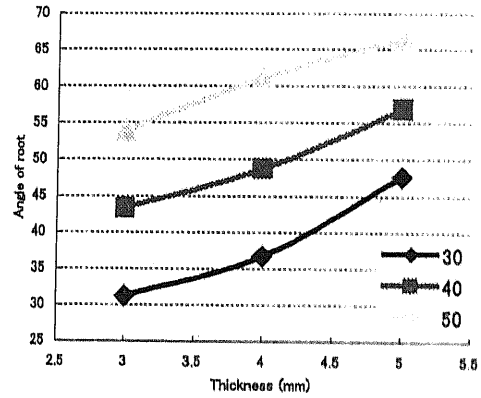
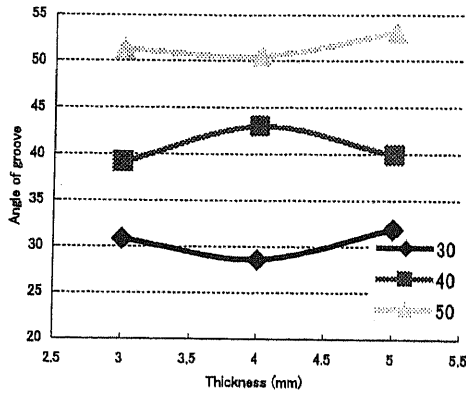
Fig. 4-12はO材の結果を示す。O材の場合もH材と同じく溝のところは測定が困難であり正確なデータをとるのが難しく結果はばらつきが多くて傾向が見られなかった。その場合は試料の厚さが厚いほどそりの角度が大きくなるのがわかる。ロール角度の場合も角度が大きいほどそりの角度も大きくなるのがわかった。



V-0.05, Thickness 3, 4, 5mm, Angle of tool-30, 40, 50, H-material,

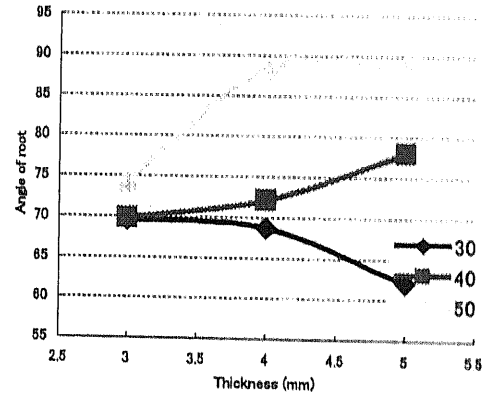
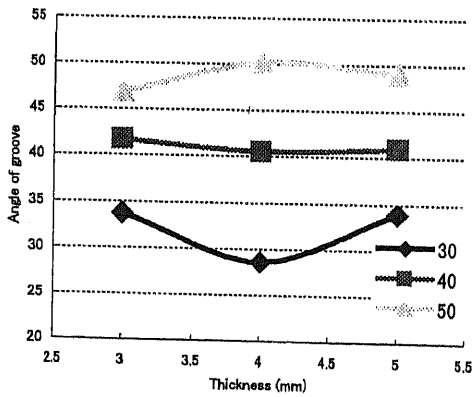


V-0.1, Thickness 3, 4, 5mm, Angle of tool-30, 40, 50, H-material,

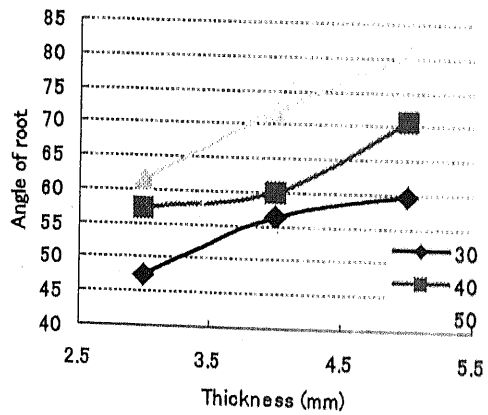
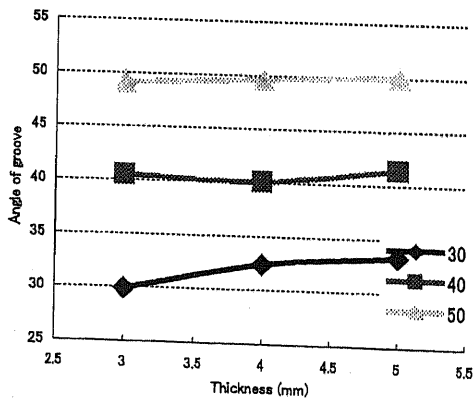


V-0.2, Thickness 3, 4, 5mm, Angle of tool-30, 40, 50, H-material,

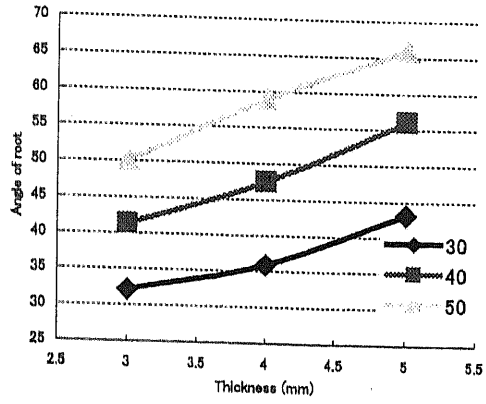
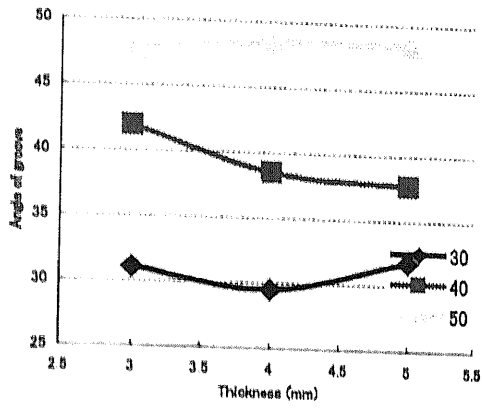
Fig. 4-10 Angle of groove and Feed rate 0.05, 0.1, 0.2mm/rev in H-material



V-0.05, Thickness 3, 4, 5mm, Angle of tool-30, 40, 50, O-material,



V-0.1, Thickness 3, 4, 5mm, Angle of tool-30, 40, 50, O-material,



V-0.2, Thickness 3, 4, 5mm, Angle of tool-30, 40, 50, O-material

Fig. 4-11 Angle of groove and Feed rate 0.05, 0.1, 0.2mm/rev in O-material

その長さ、溝の長さの結果を Fig. 4-12, Fig. 4-13, Fig. 4-14 に示す。

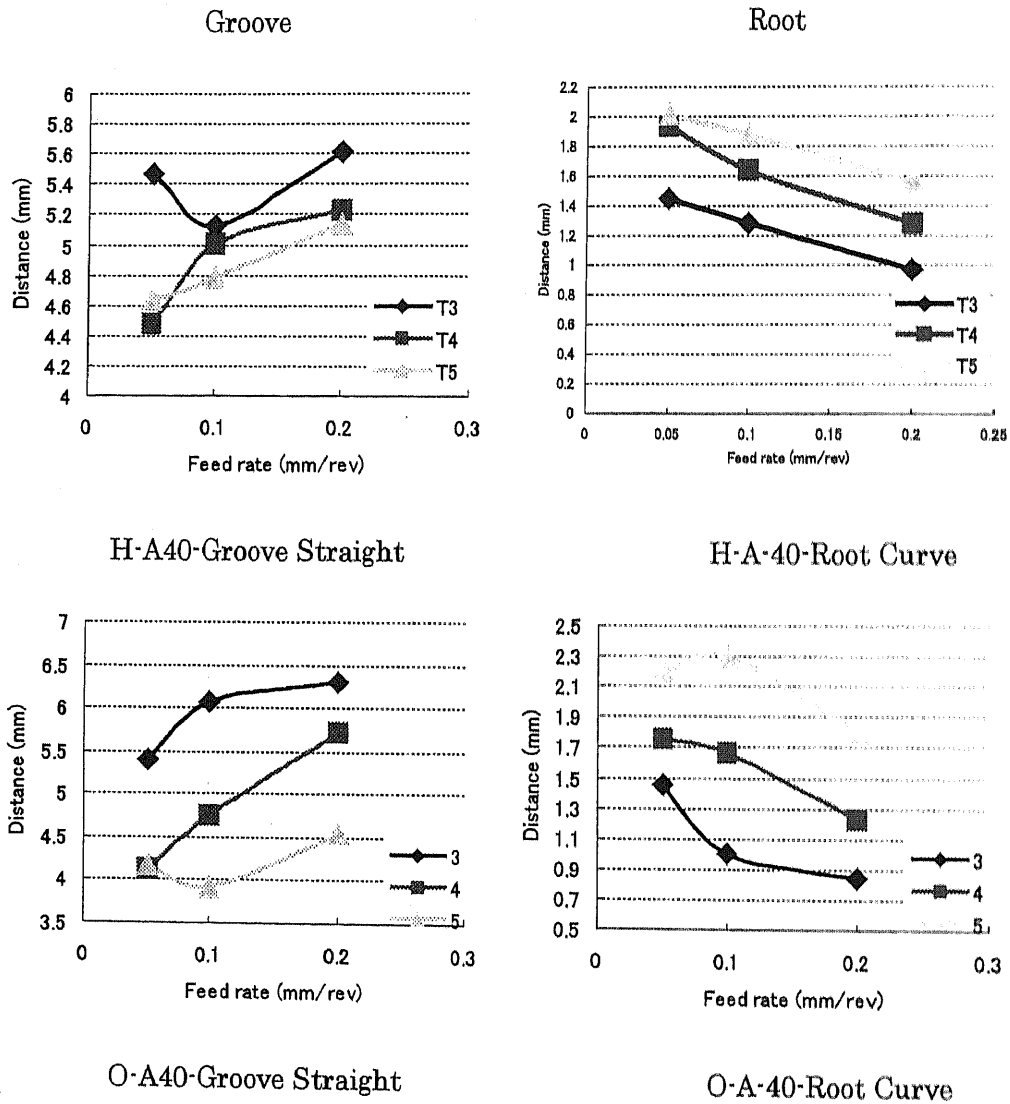
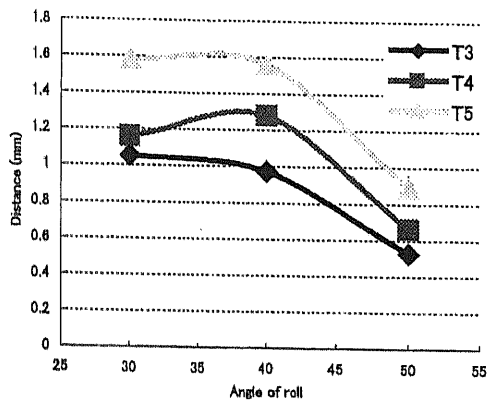
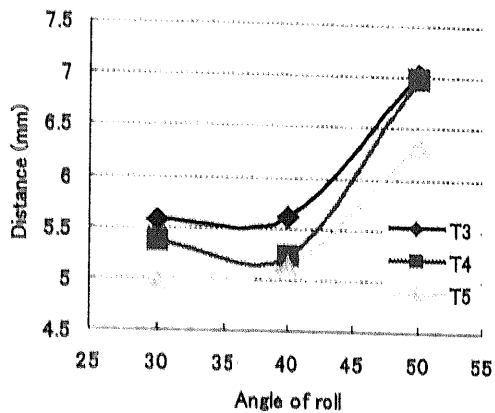


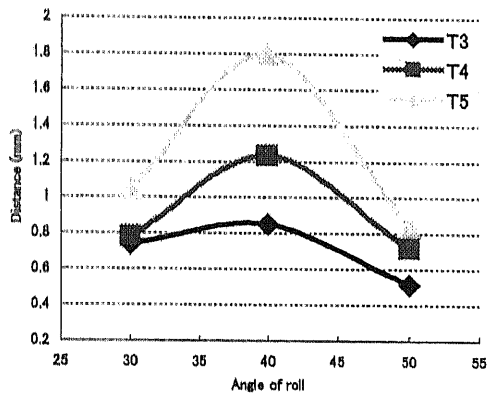
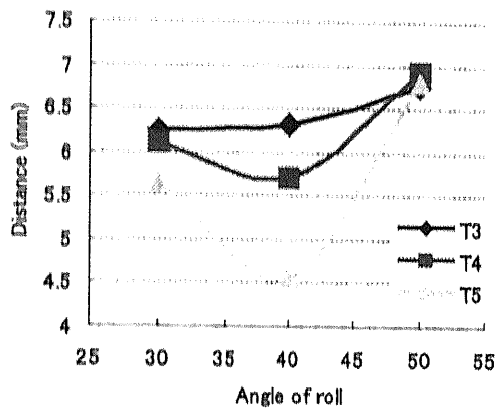
Fig. 4-12 Distance of groove and root in Feed rate & Thickness

Fig. 4-12 はH材、O材、ロール角度  $40^\circ$  の溝の長さとその長さの結果を示す。H材の場合、溝のところでは送り速度が増加することによって溝の長さは長くなることがわかる。試料の厚さが厚くなることによって溝の長さは短くなることがわかる。そのところでは送り速度が増加することによってその長さは短くなる。試料の厚さが厚くなることによってその長さは長くなることがわかる。O材の場合もH材と同じ傾向である。



H-V0.2-Groove Straight

H-V0.2-Root Curve



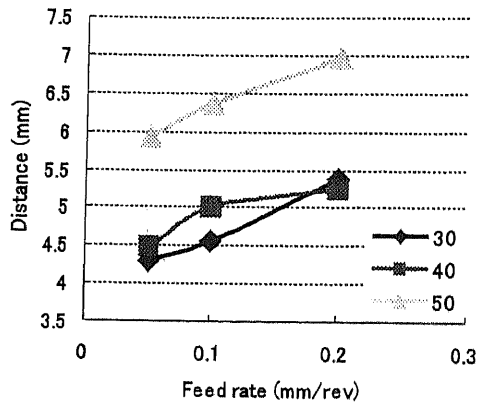
O-V0.2-Groove Straight

O-V0.2-Root Curve

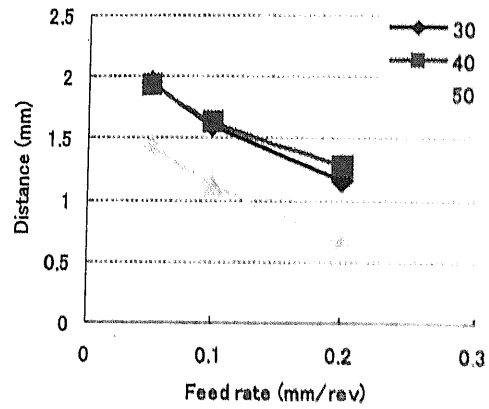
Fig. 4-13 Distance of groove and root in Angle of roll & Thickness

Fig. 4-13 はH材、O材、送り速度 0.2mm/rev の溝の長さとその長さの結果を示す。H材の場合、溝のところではロール角度が大きくなることによって溝の長さは長くなることがわかる。そして試料の厚さが厚くなることによって溝の長さは短くなることがわかる。

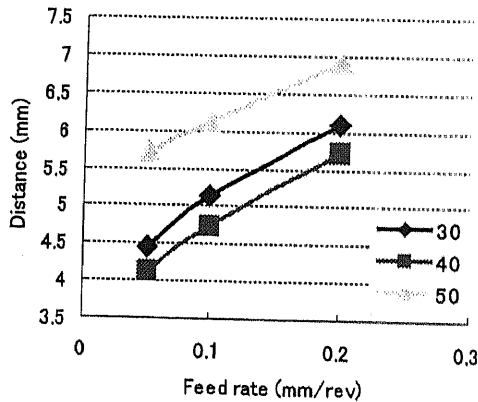
そりのところではロール角度が大きくなることによってそりの長さは短くなる。そして試料の厚さが厚くなることによってそりの長さは長くなることがわかる。O材の場合もH材と同じ傾向である。



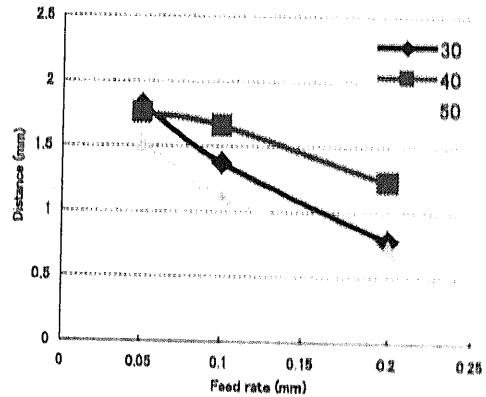
H-T4-Groove Straight



H-T4-Root Curve



O-T4-Groove Straight



O-T4-Root Curve

Fig. 4-14 Distance of groove and root in Feed rate & Angle of roll

Fig. 4-14 はH材、O材、試料の厚さ 4mm の溝の長さとその長さの結果を示す。H材の場合、溝のところでは送り速度の増加によって溝の長さは長くなることがわかる。そしてロール角度が大きくなることによって溝の長さは長くなることがわかる。そのところでは送り速度が増加することによってその長さは短くなる。そしてロール角度が大きくなることによってその長さは短くなることがわかる。O材の場合もH材と同じ傾向である。以上のことから加工力に対して、試験片材質の与える影響は小さい。加工力はこれにほぼ比例して増加した。ロールの送り速度が増加すると、加工力はこれに伴って増加した。もっとも加工力が小さくなるロール先端の角度は、ロールの送り速度が大きくなるのに伴い大きくなっていった。その角度は送り速度の減少と板厚の増加に伴い角度減少する。



#### 4.4.3 2次元解析による最大加工力

加工力についての実験と解析の結果を比較した。

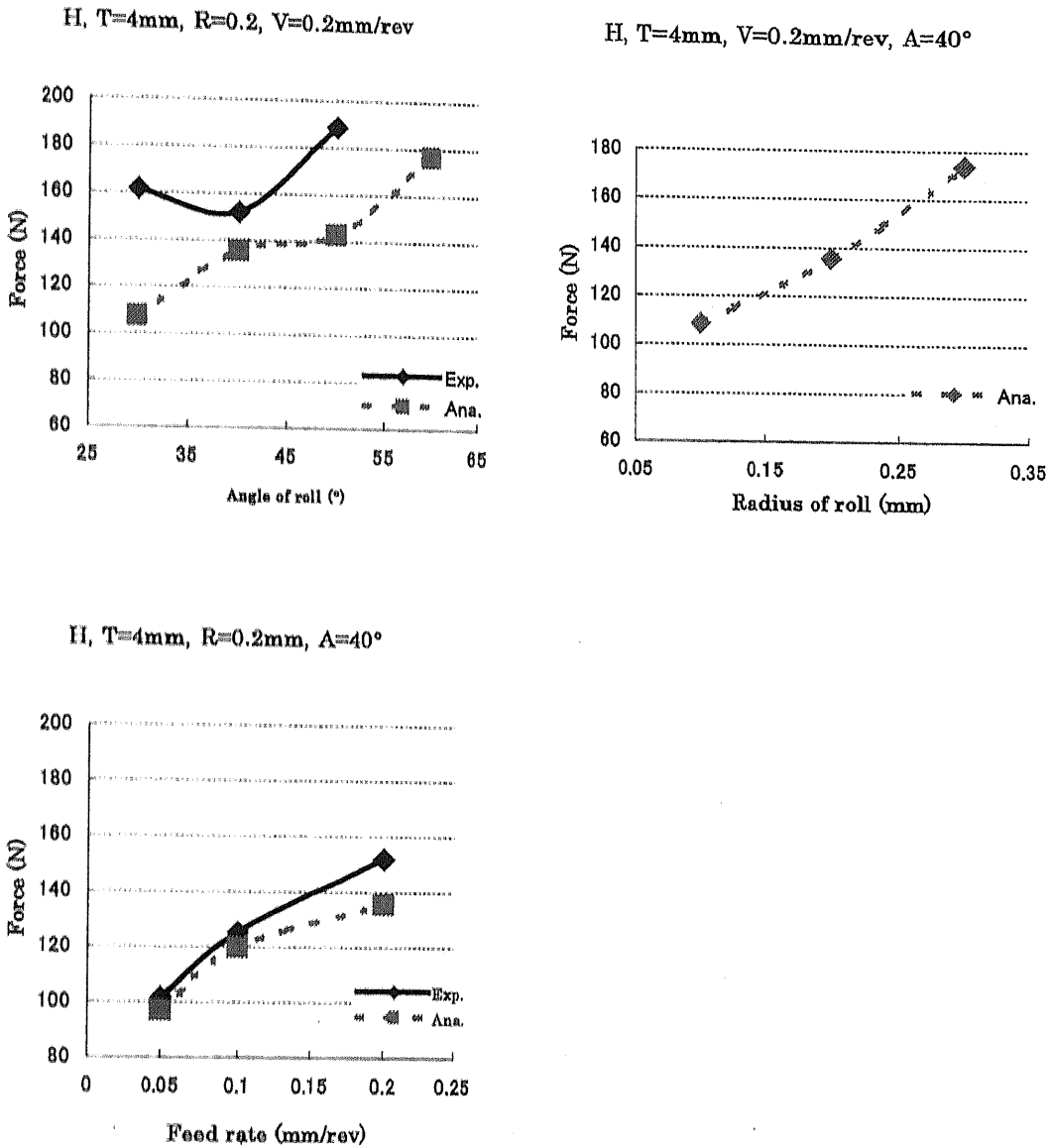
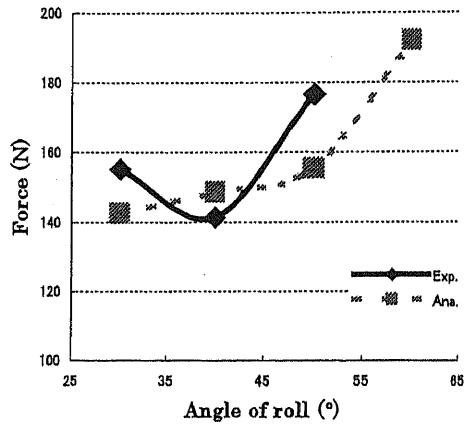


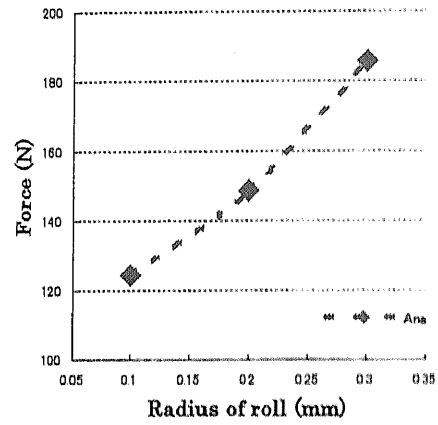
Fig. 4-15 Feeding force and Angle of roll, Radius of roll, Feed rate in H-material

Fig. 4-15 は各条件による加工力を示す。H材の場合、ロールの角度が大きくなるほど加工力も大きくなる。ロールの丸み半径が大きくなるほど加工力が大きくなる。送り速度が速くなるほど加工力が大きくなる。実験と解析の結果が同じ傾向の結果がわかる。

O, T=4mm, R=0.2, V=0.2mm/rev



O, T=4mm, V=0.2mm/rev, A=40°



O, T=4mm, R=0.2mm, A=40°

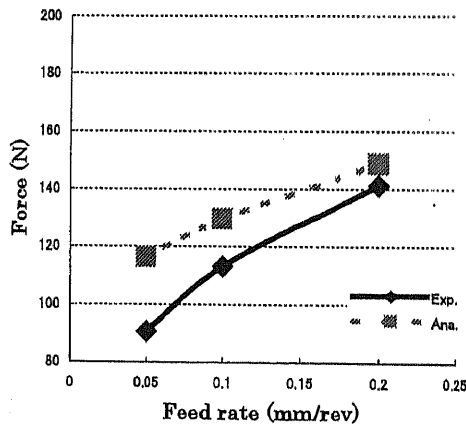


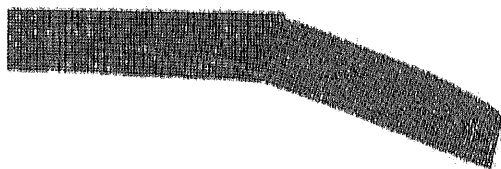
Fig. 4-16 Force and Angle of roll, Radius of roll, Feed rate in O-material

Fig. 4-16 は各条件による加工力を示す。O 材の場合も H 材の結果と同じ傾向がでた。ロールの角度が大きくなるほど加工力も大きくなる。ロールの丸み半径が大きくなるほど加工力が大きくなる。送り速度が速くなるほど加工力が大きくなる。実験と解析の結果が同じ傾向の結果がわかる。

#### 4.4.4 2次元解析によるプロファイル

##### 溝、そりの角度とプロファイル (送り速度)

実験の条件を用いて解析を行った。Fig. 4-17 は H 材を試料にし、ロールの先端丸み半径を 0.2mm、厚さ 4mm、ロールの角度を  $40^\circ$  に固定して送り速度を 0.05mm/rev, 0.1mm/rev, 0.2mm/rev, 0.4mm/v にして試料のプロファイルを示す。送り速度が遅いほどその角度は大きくなる。そしてそりのところにひずみが大いのがわかる。そのプロファイルを Fig. 4-17 に示す。



Profile in V0.05



Strain in V0.05



Profile in V0.1



Strain in V0.1



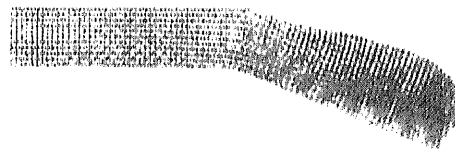
Profile in V0.2



Strain in V0.2



Profile in V0.4



Strain in V0.4

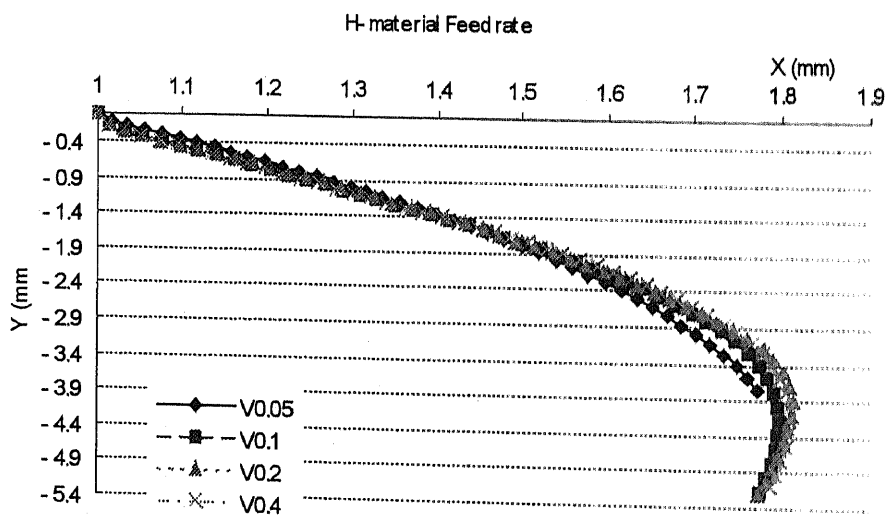
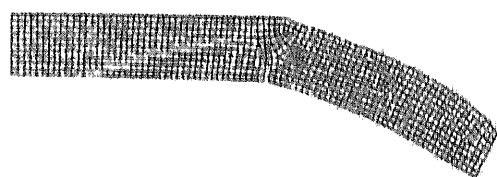


Fig. 4-17 Diagram of profile that variations of Feed rate  
(Radius = 2mm, Angle = 40°, H-material)

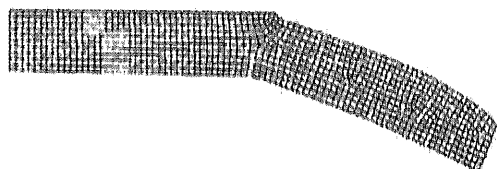
○材の場合、ロールの先端丸み半径を 0.2mm、厚さ 4mm、ロールの角度を 40°に固定して送り速度を 0.05mm/rev, 0.1mm/rev, 0.2mm/rev, 0.4mm/v にして試料のプロファイルとひずみを示す。H材と同じく送り速度が遅いほどその角度は大きくなる。そしてそのひずみも大きくなることがわかる。H材料は多少大きい値がわかる。そのプロファイルを Fig. 4-18 に示す。



Profile in V0.05



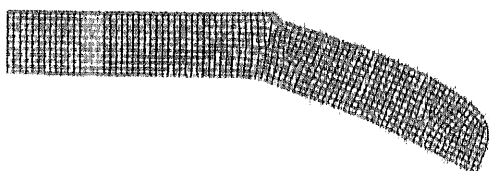
Strain in V0.05



Profile in V0.1



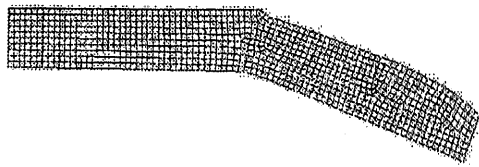
Strain in V0.1



Profile in V0.2



Strain in V0.2



Profile in V0.4



Strain in V0.4

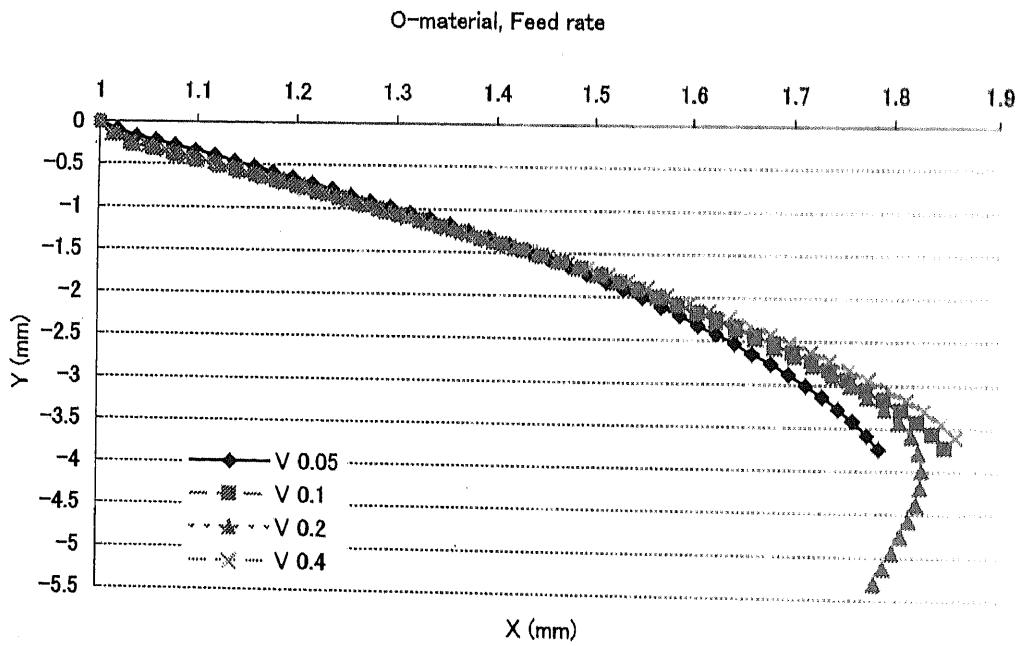
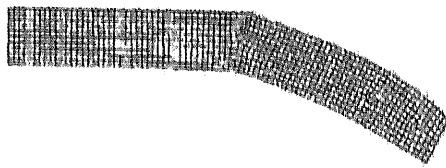


Fig. 4-18 Diagram of profile that variations of Feed rate  
(Radius = 2mm, Angle = 40°, O-material)

溝、その角度とプロフィール (先端丸み半径)

H材の場合、送り速度を 0.2mm/rev、厚さ 4mm、ロールの角度を 40°に固定して先端丸み半径を 0mm, 0.1mm, 0.2mm, 0.4mm にして試料のプロフィールを示す。先端丸み半径が大きくなるほどその角度が小さくなる。しかし送り速度の結果のように傾向が見られなく多少ばらつきがある。そのプロフィールを Fig. 4-19 に示す。



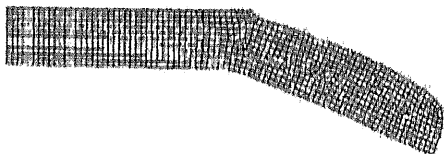
Profile in R0

Strain in R0



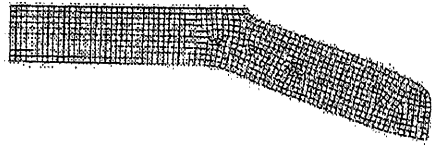
Profile in R0.1

Strain in R0.1



Profile in R0.2

Strain in R0.2



Profile in R0.4



Strain in R0.4

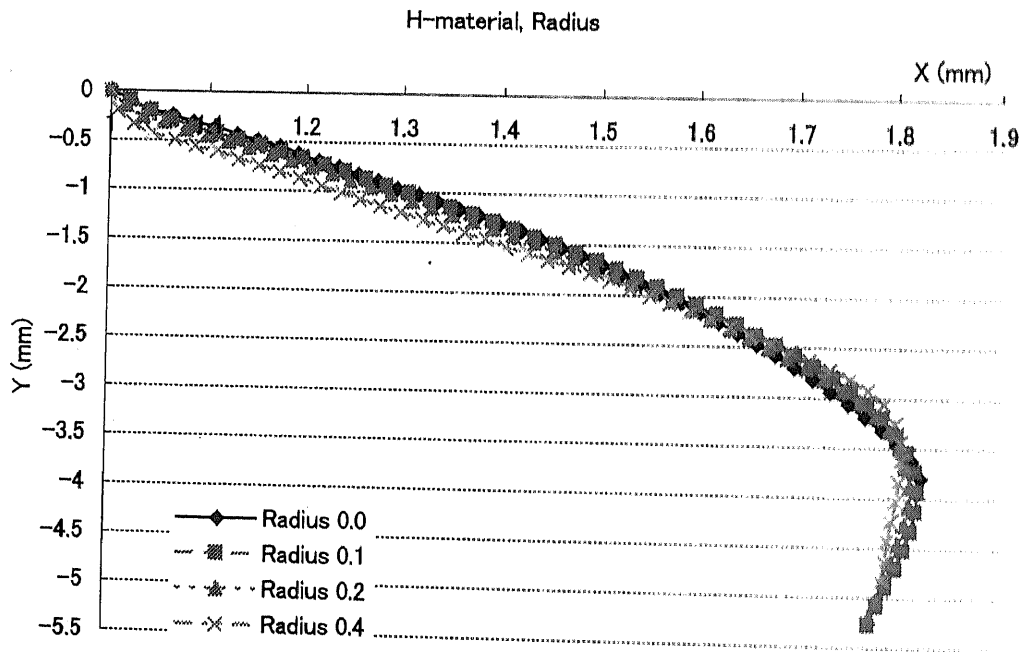
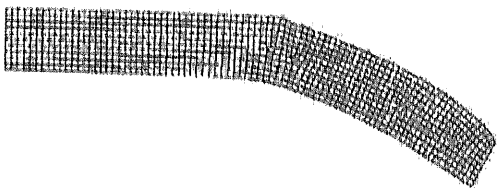


Fig. 4-19 Diagram of profile that variations of Radius  
 (Feed rate = 0.2mm/rev, Angle = 40°, H-material)



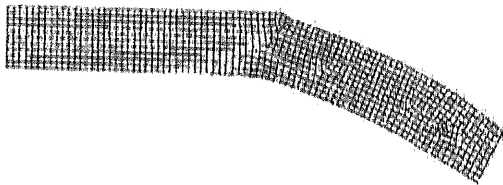
○材の場合、送り速度を 0.2mm/rev、厚さ 4mm、ロールの角度を 40°に固定して先端丸み半径を 0mm, 0.1mm, 0.2mm, 0.4mm にして試料のプロファイルを示す。先端丸み半径が大きくなるほどそりの角度が小さくなる。○材でも多少ばらつきがある。その値は Fig. 4-20 に示す。



Profile in R0



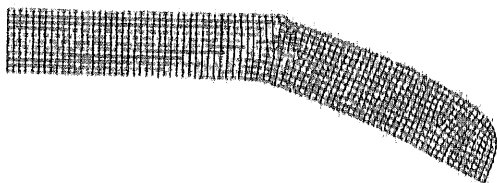
Strain in R0



Profile in R0.1



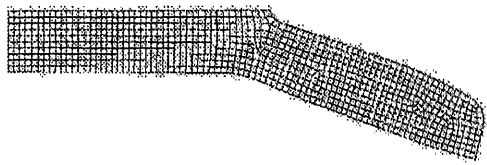
Strain in R0.1



Profile in R0.2



Strain in R0.2



Profile in R0.4



Strain in R0.4

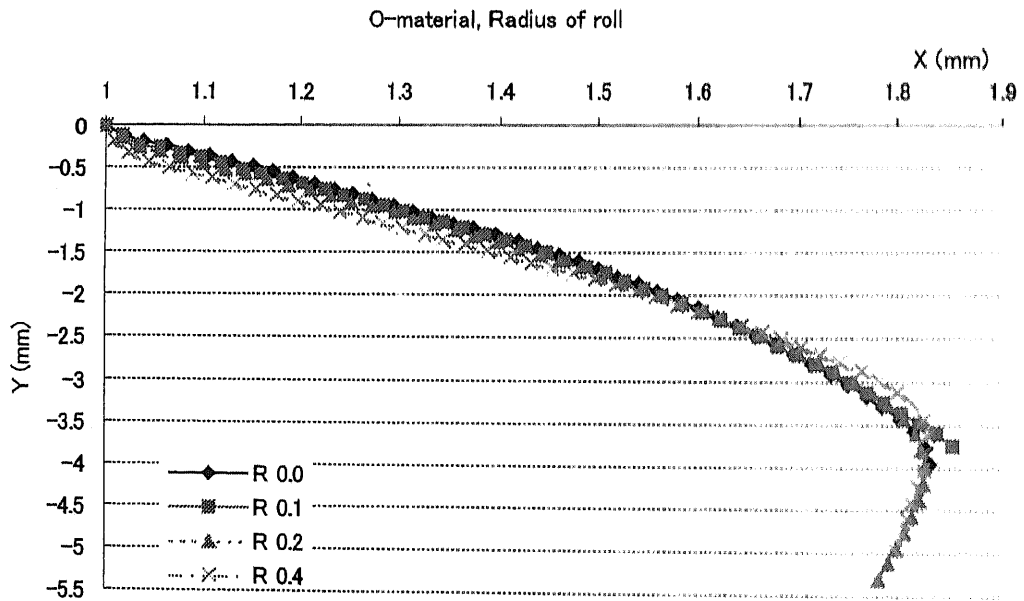
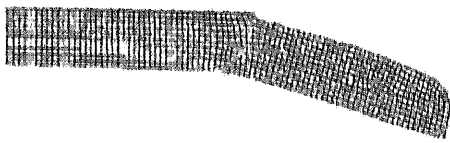


Fig. 4-20 Diagram of profile that variations of Radius  
(Feed rate = 0.2mm/rev, Angle =40°, O-material)

## Angle

H材の場合、ロールの先端丸み半径を 0.2mm, 厚さ 4mm, 送り速度を 0.2mm/rev に固定してロール角度を 30°, 40°, 50°, 60°, にして試料のプロファイルを示す。ロールの角度が大きくなるほど溝、そりの角度が大きくなる。そのプロファイルを図. 4-21 に示す。



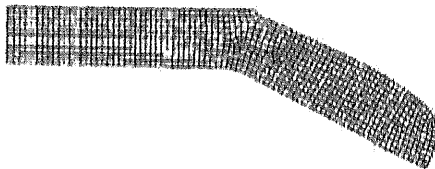
Profile in Angle30

Strain in Angle30



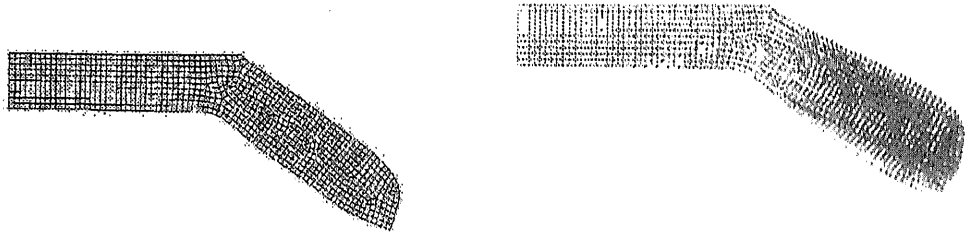
Profile in Angle40

Strain in Angle40



Profile in Angle50

Strain in Angle50



Profile in Angle60

Strain in Angle60

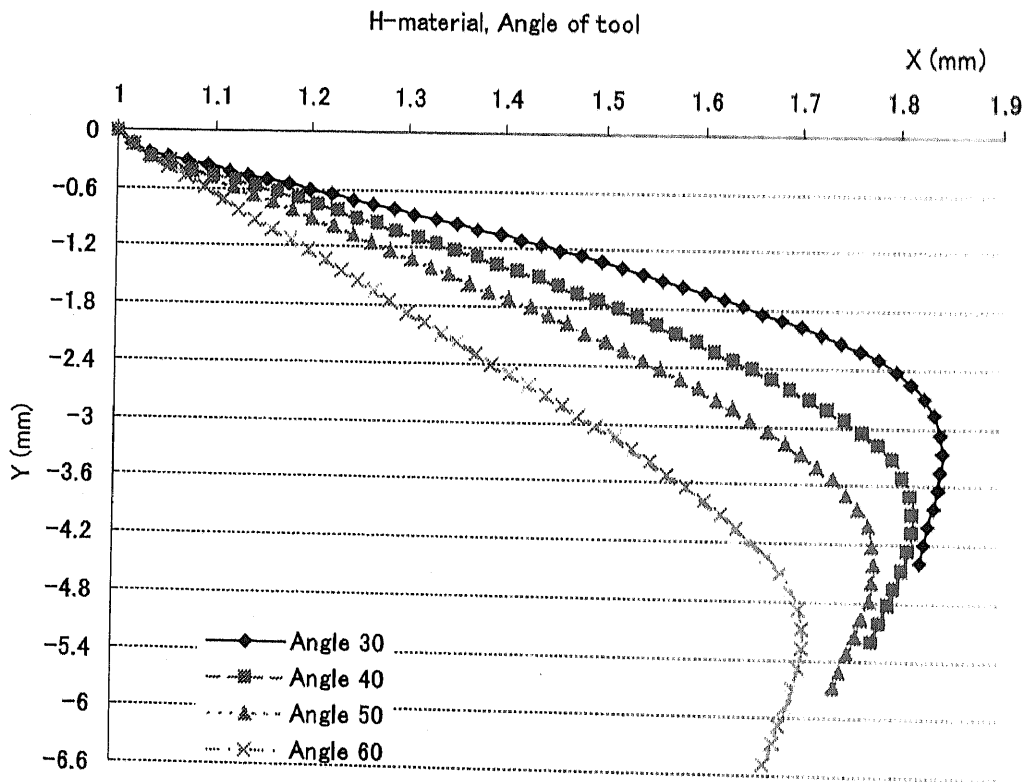
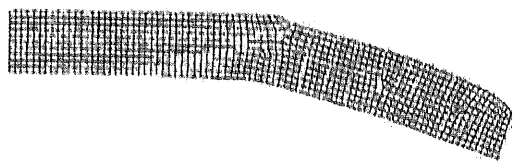
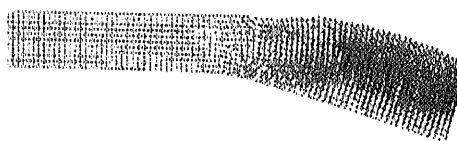


Fig. 4-21 Diagram of profile that variations of Angle  
 (Radius = 0.2mm, Feed rate = 0.2mm/rev, H-material)

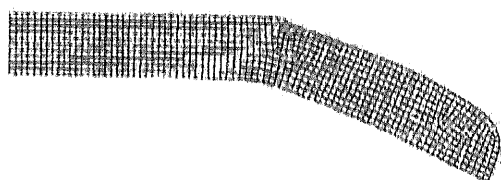
○材の場合、ロールの先端丸み半径を 0.2mm, 厚さ 4mm, 送り速度を 0.2mm/rev に固定してロール角度を 30°, 40°, 50°, 60°, にして試料のプロファイルを示す。ロールの角度が大きくなるほど角度が大きくなる。そのプロファイルを図. 4-22 に示す。



Profile in Angle30



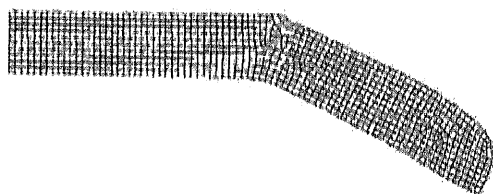
Strain in Angle30



Profile in Angle40



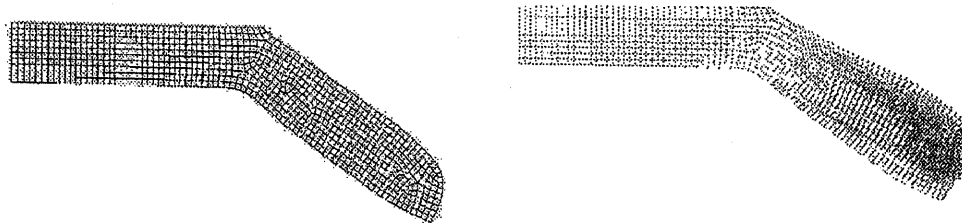
Strain in Angle40



Profile in Angle50



Strain in Angle50



Profile in Angle60

Strain in Angle60

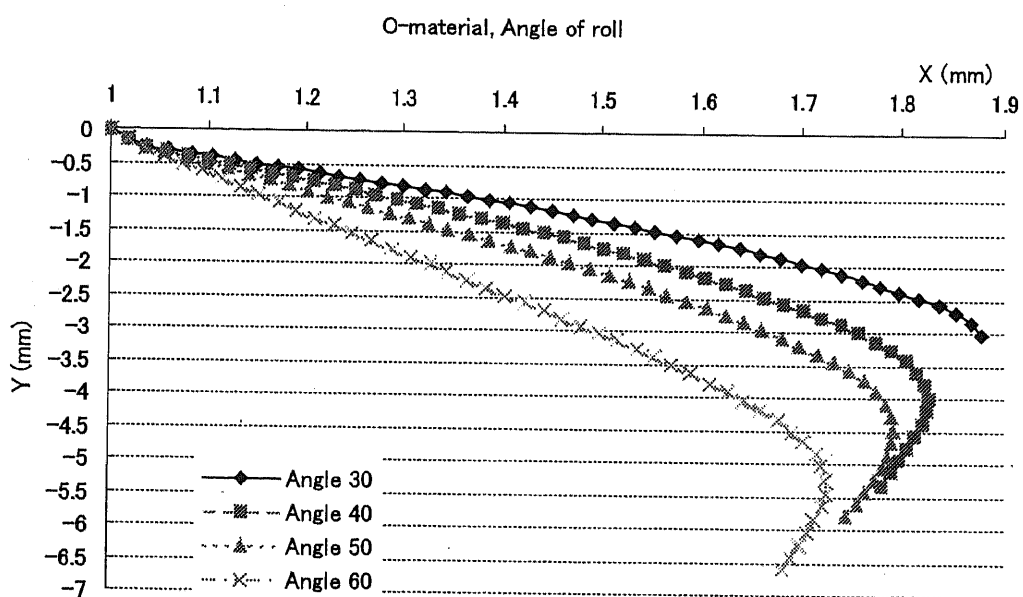


Fig. 4-22 Diagram of profile that variations of Angle  
(Radius = 0.2mm, Feed rate = 0.2mm/rev, O-material)

## 4.5 結論

### Feeding Force

送り速度の増加、ロール角度の増加によって加工力は増加する。

### Profile

送り速度の増加によってそりの角度は低下する。

送り速度の増加によってそりの長さが短くなる。

### Analysis

送り速度が加工力と材料流れに及ぼす影響は、除荷&負荷のメカニズムを導入した2次元の簡易解析で検討出来る。

## 第5章

# ボスフォーミングにおける 材料流れ



## 第5章 ボスフォーミングにおける材料流れ

### 5.1 緒論

押込みにおける材料流れ、環状溝の転造加工における材料流れ、スプリッティング加工における材料流れを検討してさらに複雑な材料流れのボスフォーミング加工における材料流れを検討する。ボスフォーミングとは回転する板材の半径方向から円錐形のロールを送ってボス部を成形する方法である。実験は押込み量、送り速度、先端丸み半径の条件での実験条件による材料流れを調べ解析では2次元では軸対象モデルでの負荷、除荷メカニズムを使用し3次元は実験と同じくロールが回転するメカニズムを使用した。そして実験との比較してより複雑なモデルでの解析の再現性を確かめる。

## 5.2 実験方法

### 5.2.1 ボスフォーミング

本研究の実験装置は、旋盤に XY テーブルを取り付けた装置を改造したものを使用する。試料は中央の穴にマンドレルを通し、主軸先端にボルトで固定する。ロールのシャンクは XY テーブルに加工力測定用の弾性板を介して取り付ける。XY テーブルの動作はモーターコントローラーに入力したコマンドに従い、モーターコントローラーよりモータードライバーを介してモーターにドライブパルスを出し制御する。主軸に加わる力をキャンセルするため、XY テーブルと同じ土台上にバックアップロールを取り付けてある。

XY テーブルの剛性不足により装置がたわんでしまい、安定した条件で実験を行うことができなかった。また、モーターコントローラーに直接コマンドを入力していたため、条件設定に時間がかかるという問題点があった。

この実験装置の剛性を向上させるために XY テーブルに改造を施した。また、条件設定に費やす時間を短縮し、効率的な実験を可能にするためにコンピューターによって制御できるよう改良した。実験装置の完成概略図を Fig.5-1 に示す。

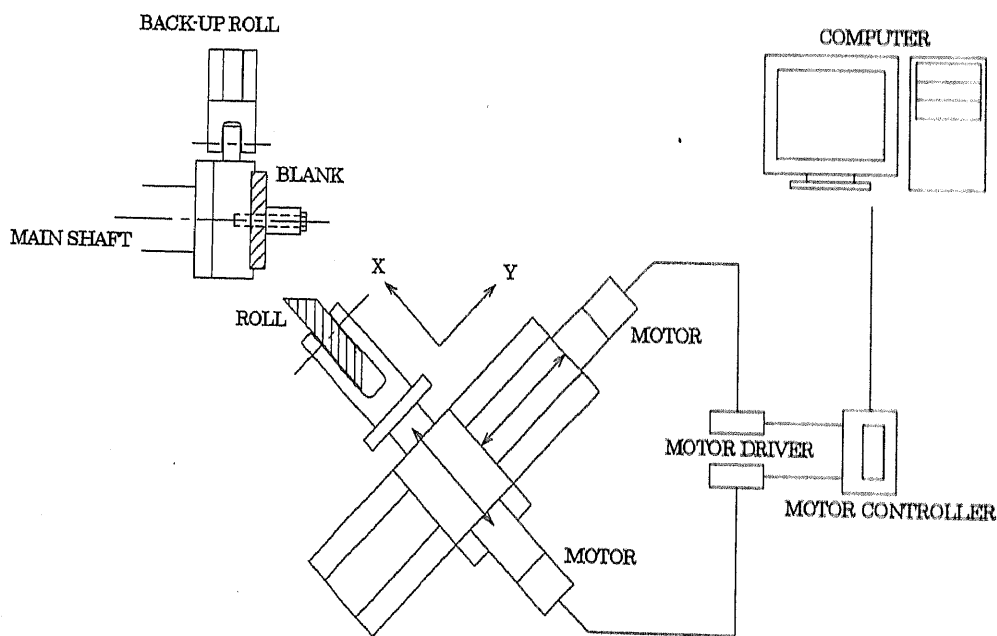


Fig.5-1 Scheme diagram of experiment

### 5.2.2 実験条件

本実験ではアルミニウム A1050-O 材の円盤状の試料を用いた。寸法は直径が 130mm で厚さが 10mm である。試料の機械的性質の K 値は 112.7MPa, n 値は 0.2316 である。

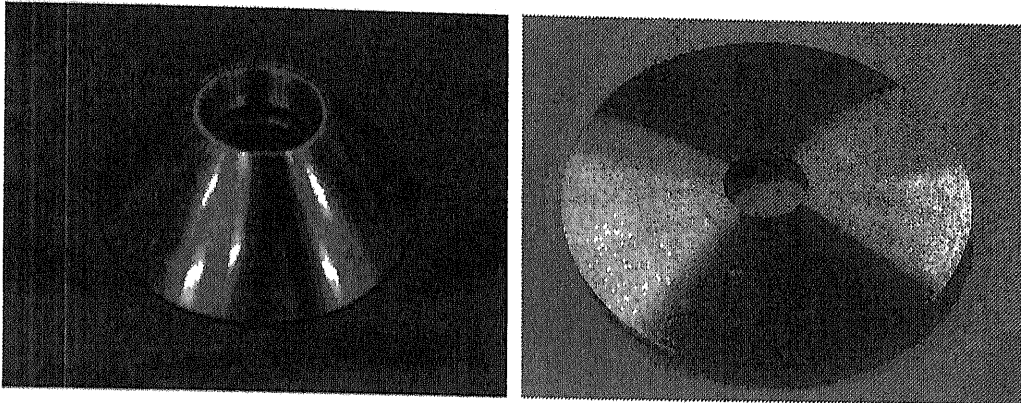


Fig.5-2 Roll & Specimen

Fig. 5-2 に実験で使用したロールと試料を示す。本実験では加工工具としてロールを用いた。試料の回転軸とロールの回転軸間の角度、チルト角は 45 度に設定し、直径を 125mm、ノーズの丸み半径は 2mm, 3mm の 2 種類である。ロールの厚さは 40mm、回転軸は直径 20mm とし、ベアリングはそれに合わせて円錐ころ軸受の 32204 番を使用している。

予備実験より本実験で実際に変化させた加工条件は先端丸み半径、切込深さ、送り速度、逃げ量、逃げ開始直径の 5 種類であるが、逃げ量、逃げ開始直径は実験装置の剛性不足を補正するための条件であるので加工条件は先端丸み半径、切込深さ、送り速度の 3 種類とし、設定切込深さと実際の切込深さがほぼ同じ値をとるように設定切込深さ、逃げ量、逃げ開始直径を調整し実験を行った。実用的なデータが得られた加工条件は Table.5-1 に示す 12 通りである。Fig.5-3 に実験の様子を示す。

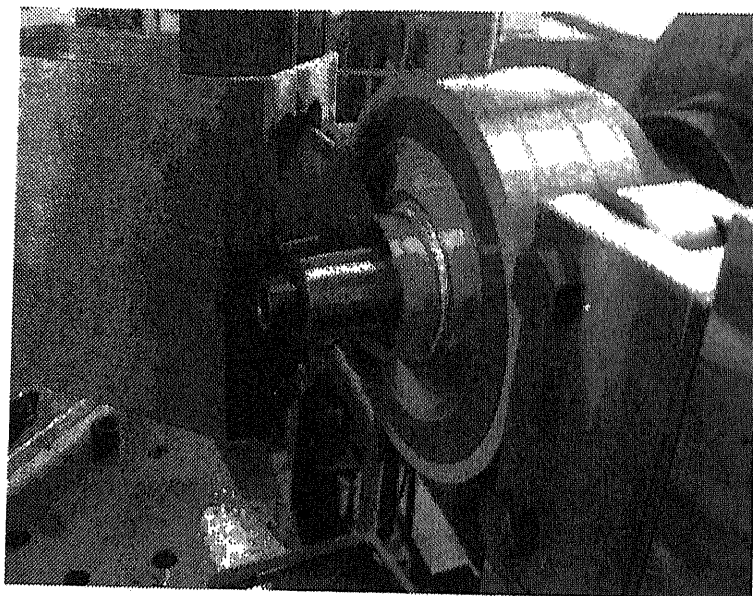


Fig.5-3 Scheme of boss forming

Table 5-1 Conditions of experiment

Radius of edge tool (R)	2mm, 3mm
Indentation (d)	1mm, 2mm
Feed rate (V)	0.1mm/rev, 0.3mm/rev, 0.5mm/rev
Number of specimen	12

加工手順はまず主軸に試料をマンドレルで固定する。加工プログラムを起動し、ロールの原点を設定する。加工条件を入力し、モーターコントローラにデータを送信する。ロールに潤滑油を塗布する。主軸を回転させる。データ測定用のプログラムを起動する。加工を開始する。ロールが試料に近づいたらサンプリングを開始する。加工が終了したらサンプリングを停止し、主軸を止める。製品を取り外し、寸法を測定する。

## 5.3 解析方法

### 5.3.1 解析モデル

LS-DYNA による解析は実験と同じ条件を用いて解析を行った。本解析では陽解法での大変形塑性の Adaptive Mesh モデルで行った。Boss forming の解析でも Thread rolling 解析と同じくロールが試料に回転するメカニズムを使った。解析の接点数は 2 次元の場合は 2238、要素数は 2080、3 次元の場合は接点数 210582、要素数は 52415 での平面ひずみ問題とした。要素タイプは八角面体、摩擦係数は 0.0 である。Fig. 5-4 は解析のモデルを示す。

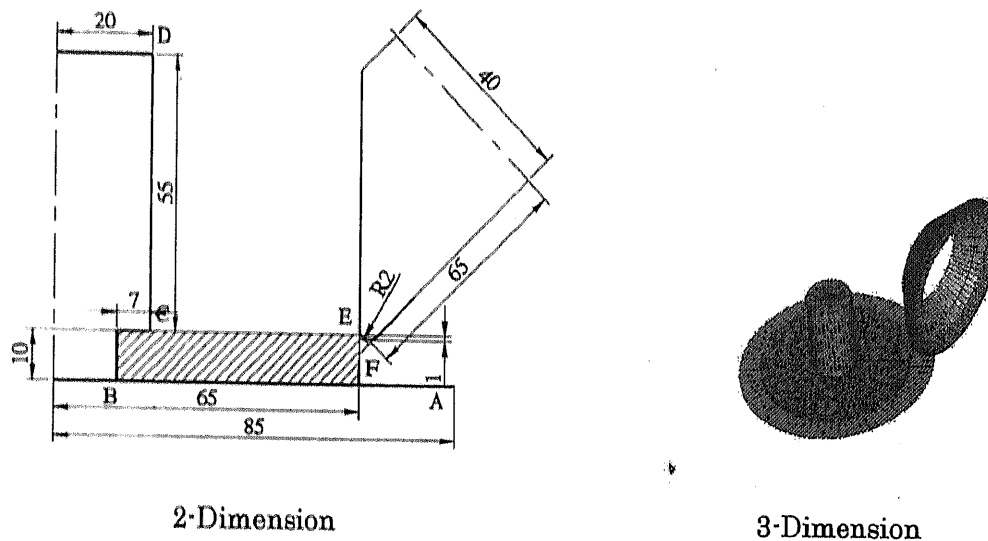


Fig. 5-4 Scheme of boss forming analysis model

### 5.3.2 解析条件

Table 5-2 では解析条件を示す。2 次元の場合は軸対称モデルとして転造解析の時と同じく工具が試料に接して当たる加工する負荷工程と工具が試料から放れる除荷工程を用いた。

3 次元の場合は解析上試料が回転すると加速度による応力変化などの恐れがあるためボスフォーミング 3 次元解析でも工具が試料に回転する方法を用いた。

2 次元と 3 次元共に変形が大きいため試料は全部アダプティブメッシュを用いた。

Table 5-2 Conditions of Analysis

Process Type	
2-Dimension	Load and Unload
3-Dimension	Rotation around of specimen
Material	Aluminum A1050-O
2-Dimension	K – 112.7MPa, n – 0.2316
3-Dimension	4-node bilinear 8-node linear brick
Tool	Rigidbody
2-Dimension	Beam element
3-Dimension	Surface element
Boundary Condition	A-B-C-D $v_x=0, v_y=0$ C-E-F $v_x$ unknown, $v_y$ unknown

## 5.4 結果および考察

### 5.4.1 ボス高さ

#### 送り速度及び切り込み深さの影響

Fig. 5-5 にボス高さに対する送り速度及び切り込み深さの関係を示す。本実験においては深絞りと同様な耳を生じるが、同図におけるボス高さとは、4つの耳部、谷部すべての高さを測定し、それらを平均した値を用いている。同図より明らかなように、送り速度の増加に伴ってボス高さが減少し、切り込み深さの増加に伴いボス高さが増加していることが確認できる。ここで、両条件のボス高さに対する寄与率を確認するため、実験計画法における分散分析を行った。その結果を Table 5-3 に示す。同表より、当然のことながら先端丸み半径の大小にかかわらず切り込み深さが高い寄与率を示している。また、送り速度も 20% 前後の寄与率を示しており、効率的にボス高さを得るには切り込み深さを大きく、かつ送り速度は遅く設定すれば良いといえる。

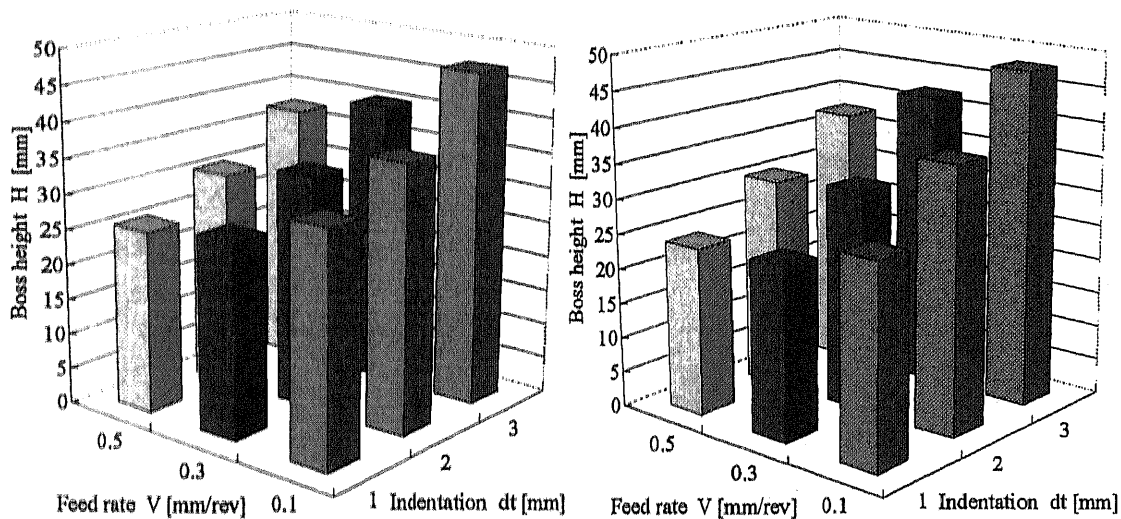


Fig. 5-5 Effect of feed rate and dt on maximum boss thickness

Table 5-3 Contributions of forming conditions by analysis of variance

	Contribution [%] (R=2)	Contribution [%] (R=3)
Feedrate V [mm/rev]	19.69	25.06
Indentation dt [mm]	70.84	66.95
error, etc.	9.47	7.99

### 先端丸み半径の影響

Fig. 5-5 より、先端丸み半径の違いによりボス高さに若干の差異は見られるが、極めて影響は小さいと考えられる。そこで先端丸み半径も含めた条件で分散分析を行い、各成形条件のボス高さに対する寄与率を調査した。分散分析は各実験条件で水準数が同じである必要がある。先端丸み半径は 2 水準しかないため、ここでは Table 5-4 に示すように送り速度と切り込み深さに関しては最大値と最小値を用いることで各 2 水準ずつとしている。したがって、精度は多少低下している可能性があるが、定性的な評価には十分であると考えられる。Table 5-5 に分散分析の結果を示す。同表より、先端丸み半径のボス高さに対する寄与率は 0.3% と極めて低く、今回行った実験条件の範囲では、先端丸み半径はボス高さにはほとんど影響していないといえる。

Table 5-4 Combination of testing parameters for analysis of variance

Parameter	Value
Nose radius R [mm]	2, 3
Feed rate V [mm/rev]	0.1, 0.5
Indentation dt [mm]	1, 3

Table 5-5 Contributions of forming conditions by analysis of variance

Parameter	Contribution [%]
Nose radius R [mm]	0.30
Feed rate V [mm/rev]	21.06
Indentation dt [mm]	75.45
error, etc.	3.19



## 5.4.2 最大ボス厚さ

### 送り速度及び切り込み深さの影響

Fig. 5-6 に最大ボス肉厚に対する送り速度及び切り込み深さの関係を示す。ここでの最大ボス肉厚とは、耳部直下及び谷部直下におけるボスの肉厚分布を測定、平均化したものの最大値である。同図より、送り速度及び切り込み深さの増加に伴って最大ボス肉厚が増加していることが確認できる。ここで、分散分析により両条件の最大ボス肉厚に対する寄与率を確認した。その結果を Table 5-6 に示す。ボス高さの場合と同様、当然切り込み深さが高い寄与率を示している。また、送り速度も 20%程度の寄与率を示しており、厚肉のボスを得るには切り込み深さを大きく、かつ送り速度を高く設定することが効率的であるといえる。

ところで先端丸み半径 2mm において、切り込み深さが先端丸み半径と同じ値である 2mm より大きな場合、送り速度 0.3mm/rev の場合と 0.5mm/rev の場合であまり最大ボス肉厚に差が生じていない。つまり、先端丸み半径以上の切り込み深さで加工を行った場合、送り速度を増加させてもある程度以上の肉厚は得られない可能性が考えられる。しかしながら、 $R=3\text{mm}$  の場合は同様の収束する傾向は見られず、また、従来の研究\*においても送り速度に対してボス肉厚はほぼ線形的に増加することが確認されている。ただし、本実験においては実験条件の不足により先端丸み半径 3mm の場合は丸み半径と同じ切り込み深さまでしか加工を行っておらず、また、従来の研究は切り込み深さに対して先端丸み半径が十分に大きい条件であるため、一概に比較することは出来ないが、先端丸み半径以上の切り込み深さで加工した場合の影響を検討するためには、より広範囲な実験条件でのデータ収集が必要である。

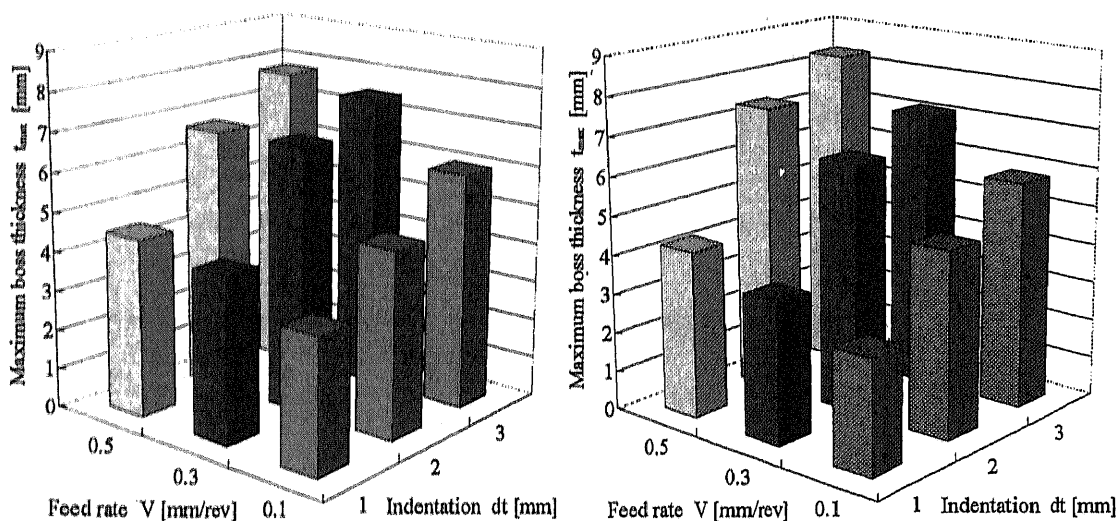


Fig. 5-6 Effect of feed rate and dt on maximum boss thickness

Table 5-6 Contributions of forming conditions by analysis of variance

	Contribution [%] (R=2)	Contribution [%] (R=3)
Feed rate V [mm/rev]	19.69	25.06
Indentation dt [mm]	70.84	66.95
error, etc.	9.47	7.99

先端丸み半径の影響

ボス高さと同様、ボス肉厚に対する先端丸み半径の影響を調査するため、Table 5-4 に示した条件で分散分析を行った。同結果を Table 5-7 に示す。同表より、今回行った実験の範囲では先端丸み半径はボス肉厚に対してほとんど影響していないことが確認できた。

Table 5-7 Contributions of forming conditions by analysis of variance

Parameter	Contribution [%]
Nose R [mm]	0.00
Feed rate V [mm/rev]	21.06
dt [mm]	76.01
error, etc.	2.93

### 5.4.3 最大加工力

#### 送り速度及び切り込み深さの影響

Fig. 5-7 に送り力に対する送り速度及び切り込み深さの関係を示す。ここでは送り力は加工中の最大値を採っている。同図より、送り速度及び切り込み深さの増加に伴い送り力が増加していることが確認できる。また Table 5-8 に示す分散分析の結果、送り力に対しては切り込み深さの影響が極めて高く、90%近い寄与率を示している。実加工における成形条件の設定に際しては装置の限界を考慮する必要があるが、送り速度の影響に関してはほとんど考慮する必要は無いと考えられる。ところでボス肉厚の場合と同様、先端丸み半径 2mm において、送り速度 0.3mm/rev の場合と 0.5mm/rev の場合で送り力がほとんど同じ値を示している。本実験においては実験条件が少ないため、実際にこのように収束する現象を示すのか、あるいは実験誤差であるのかは現状では不明である。本実験においては、装置の剛性不足のため先端丸み半径 2mm の場合、同 3mm に比べ安定した結果が得にくく誤差である可能性も否定できないため、今後も検討が必要である。

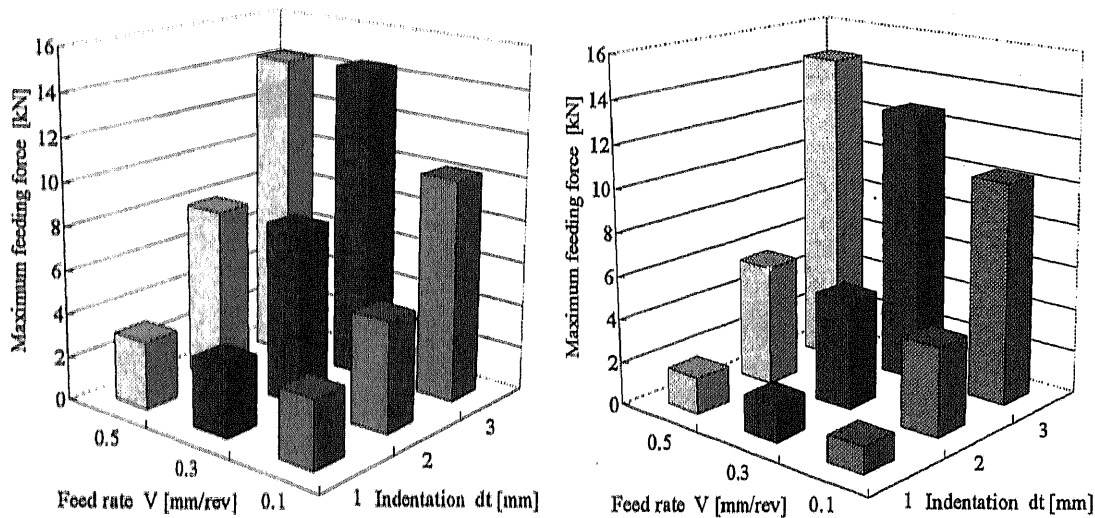


Fig. 5-7 Effect of feed rate and dt on maximum feeding force

Table 5-8 Contributions of forming conditions by analysis of variance

	Contribution [%] (R=2)	Contribution [%] (R=3)
Feed rate V [mm/rev]	3.96	2.69
Indentation dt [mm]	87.28	89.81
error, etc.	8.76	7.50

### 先端丸み半径の影響

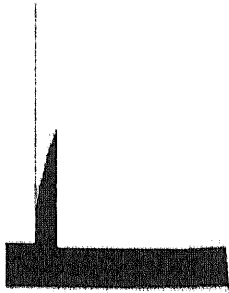
最大送り力に対する先端丸み半径の影響を調査するため、Table 5-4 に示した条件で分散分析を行った結果を Table 5-9 に示す。同表よりボス高さ、ボス肉厚の場合と同様、今回行った実験の範囲では先端丸み半径は送り力に対してほとんど影響していないことが確認できた。

Table 5-9 Contributions of forming conditions by analysis of variance

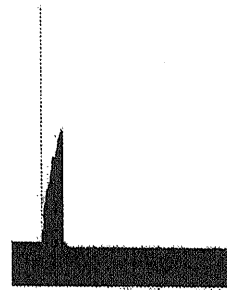
Parameter	Contribution [%]
Nose radius R [mm]	0.45
Feed rate V [mm/rev]	4.32
Indentation dt [mm]	90.88
error, etc.	4.35

#### 5.4.4 2次元解析によるボス高さ

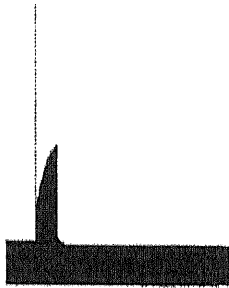
##### 2D analysis result



R1D1M



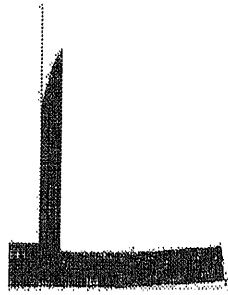
R2D1M



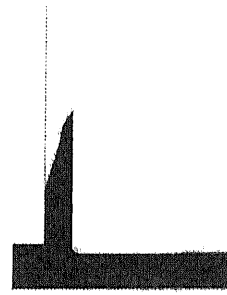
R3D1M

Fig. 5-8 Diagram of profile that variations of Radius  
in 2-Dimension (Indentation = 1mm)

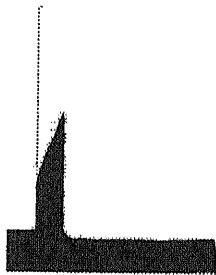
Fig. 5-8 には切込深さ 1mm と送り速度 0.3mm/rev での先端丸み半径の変化によるボス部分のプロファイルを解析で示す。丸み半径が大きくなるほどボス高さは低くなる。Fig. 5-14 にそのプロファイルの値を示す。



R1D2M



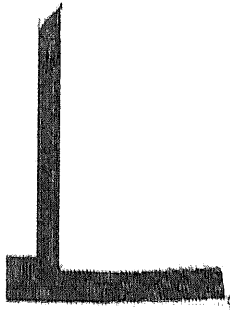
R2D2M



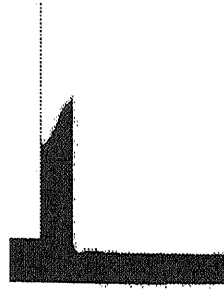
R3D2M

Fig. 5-9 Diagram of profile that variations of Radius  
in 2-Dimension (Indentation = 2mm)

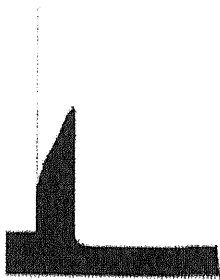
Fig. 5-9 は切込深さ 2mm と送り速度 0.3mm/rev での先端丸み半径の変化によるボス部分のプロファイルを解析で示す。切込深さが 2mm の場合も 1mm と同じく丸み半径が大きくなるほどボス高さは低くなる。そして Fig. 5-14 にそのプロファイルの値を示す。



R1D3M



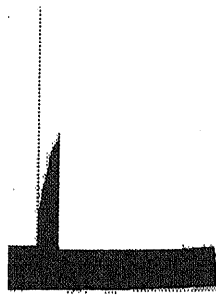
R2D3M



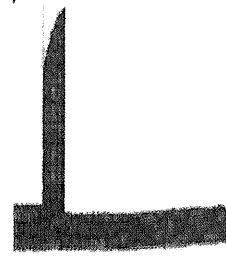
R3D3M

Fig. 5-10 Diagram of profile that variations of Radius  
in 2-Dimension (Indentation = 3mm)

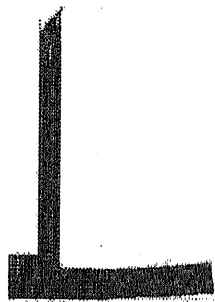
Fig. 5-10 は切込深さ 3mm と送り速度 0.3mm/rev での先端丸み半径の変化によるボス部分のプロファイルを解析で示す。切込深さが 3mm の場合も 1mm、2mm と同じく丸み半径が大きくなるほどボス高さは低くなる。切込深さ 1mm、2mm よりこのように 3mm の方がより確実に現れる。また Fig. 5-14 にそのプロファイルの値を示す。



R1D1M



R1D2M

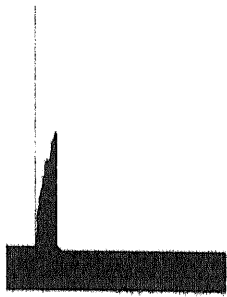


R1D3M

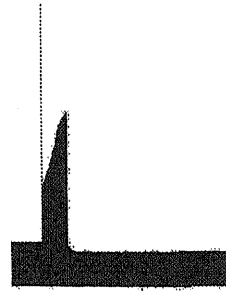
Fig. 5-11 Diagram of profile that variations of Indentation  
in 2-Dimension (Radius = 1mm)

Fig. 5-11 は先端丸み半径を 1mm と送り速度  $V$  は 0.3mm/rev に固定して切込深さの変化によるボス部分のプロファイルを解析結果に示す。切込深さ大きくなるほどボスの高さは高くなる。Fig. 5-14 にそのプロファイルの値を示す。

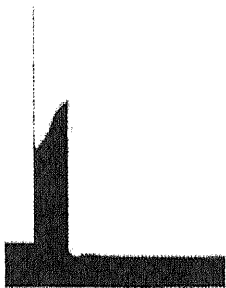




R2D1M



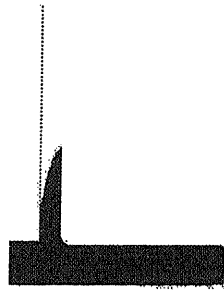
R2D2M



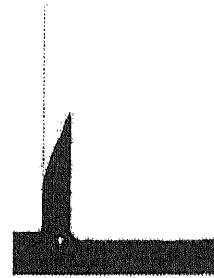
R2D3M

Fig. 5-12 Diagram of profile that variations of Indentation  
in 2-Dimension (Radius = 2mm)

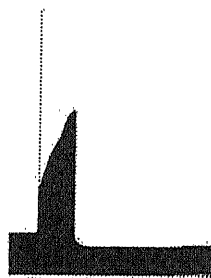
Fig. 5-12 は先端丸み半径を 2mm と送り速度は 0.3mm/rev に固定して切込深さの変化によるボス部分のプロファイルを解析結果に示す。先端丸み半径が 2mm の場合も切込深さが大きくなるほどボス高さが高くなる。Fig. 5-14 にそのプロファイルの値を示す。



R3D1M



R3D2M



R3D3M

Fig. 5-13 Diagram of profile that variations of Indentation  
in 2-Dimension (Radius = 2mm)

Fig. 5-13 は先端丸み半径  $R$  を 3mm と送り速度  $V$  は 0.3mm/rev に固定して切込深さの変化によるボス部分のプロファイルを解析結果に示す。先端丸み半径が 3mm の場合も切込深さが大きくなるほどボス高さが高くなる。Fig. 5-14 にそのプロファイルの値を示す。

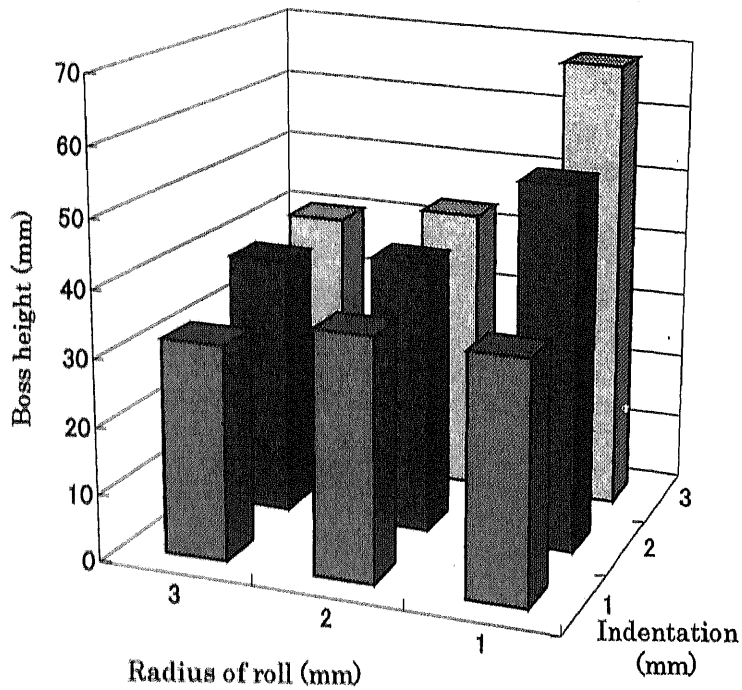


Fig. 5-14 Graph of boss height variation of indentation and radius in 2-Dimension

Fig. 5-14 は先端丸み半径と切込深さの変化によるボスの高さを解析結果として示す。このように先端丸み半径が大きくなるほどボス部分は低くなる。そして切込深さが大きくなるほどボスは高くなる。先端丸み半径が 1mm の場合が R 2mm, 3mm の場合より少し値が大きくなる。

#### 5.4.5 3次元解析によるボス高さ

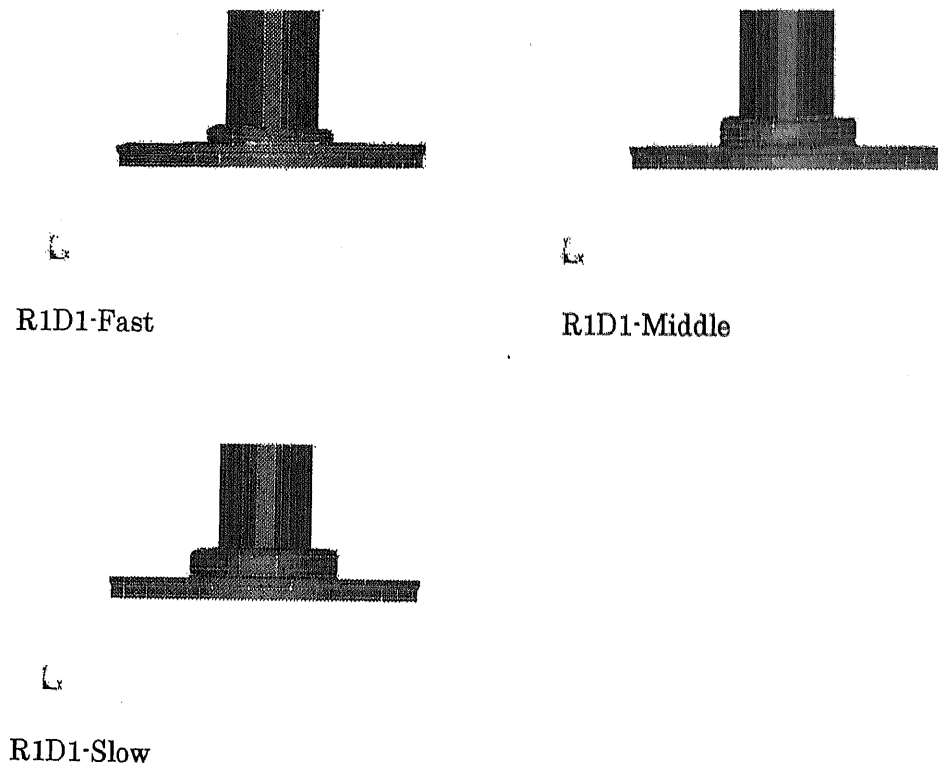


Fig. 5-15 Diagram of profile that variations of Speed  
in 3-Dimension (Indentation = 1mm, Indentation = 1mm)

Fig. 5-15 は先端丸み半径 R 1mm、切込深さ D 1mm を固定し送り速度の変化によるボス部分のプロファイル 3 次元解析結果を示す。このように送り速度が遅いほどボス部分が高くなる。中速 0.3mm/rev と低速 0.1mm/rev の場合はその差があまり大きくないが高速 0.5mm/rev と差は明らかである。ボスの下の部分を見ると加工による材料流れが外側に流れて行くのも見えた。これは実験の結果と一致する。ただ高速の場合はメッシュなどの問題でメッシュが少し崩れたりしたことで速度によるボス部分のプロファイルは中速と低速で解析を行った。Fig. 5-17 にプロファイルの値を示す。

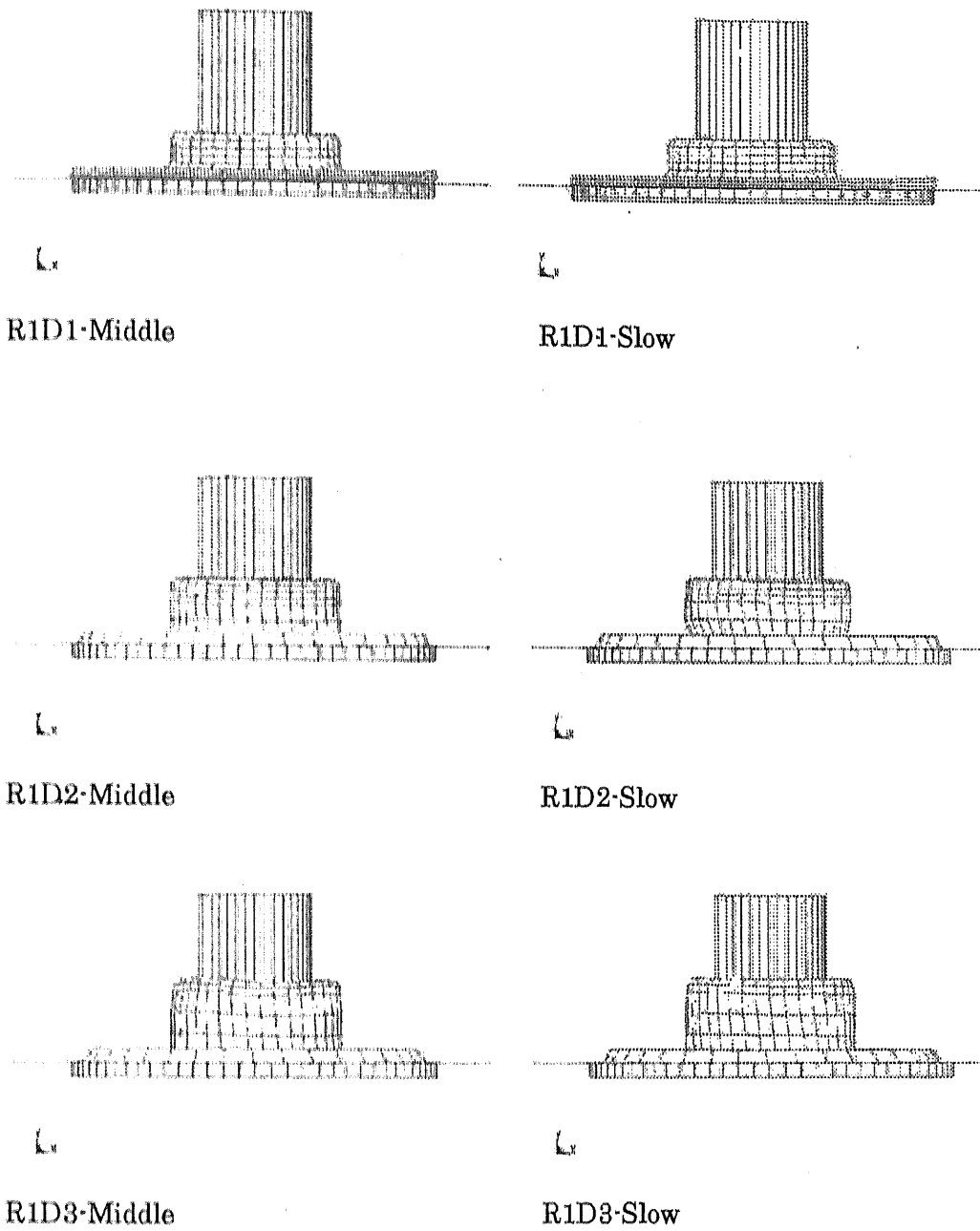


Fig. 5-16 Diagram of profile that variations of Speed  
in 3-Dimension (Indentation = 1mm, 2mm, 3mm, Radius = 1)

Fig. 5-16 は先端丸み半径 R 1mm を固定し切込深さ D 1mm, 2mm, 3mm と送り速度 V 0.1mm/rev, 0.3mm/rev によるボス部分のプロファイルを示す。

切込深さ 1mm, 2mm, 3mm と同じく、低速(0.1mm/rev)より中速(0.3mm/rev)の方がボス部分が高くなる。送り速度が遅いほどボス部分が高くなる。その差は 2 次元より少し少ない差である。切込深さが大きくなるほどボス部分は高くなる。Fig. 5-17 にプロファイルの値を示す。

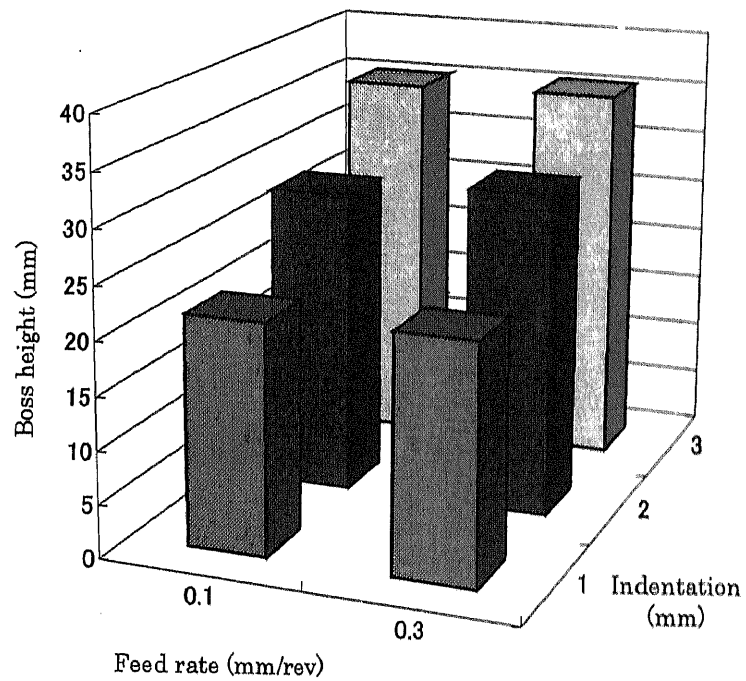


Fig. 5-17 Graph of boss height variation of speed and indentation in 3-Dimension

#### 5.4.6 3次元解析による最大ボス厚さ

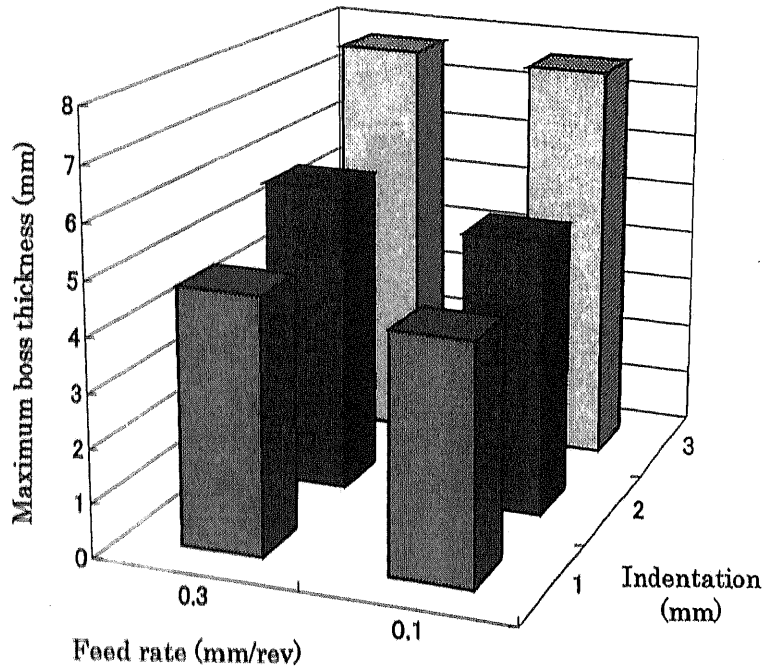


Fig. 5-18 Graph of boss thickness variation of feed rate and indentation in 3-Dimension

Fig. 5-18 は送り速度、押込み量によるボスの厚さの解析結果を示す。このように送り速度が速くなることによってボス厚さは厚くなる。しかしその値の場合、実験とは差があり小さいのがわかる。そして押込み量が大きくなることによってボス厚さは厚くなるのがわかる。

#### 5.4.7 3次元解析による最大加工力

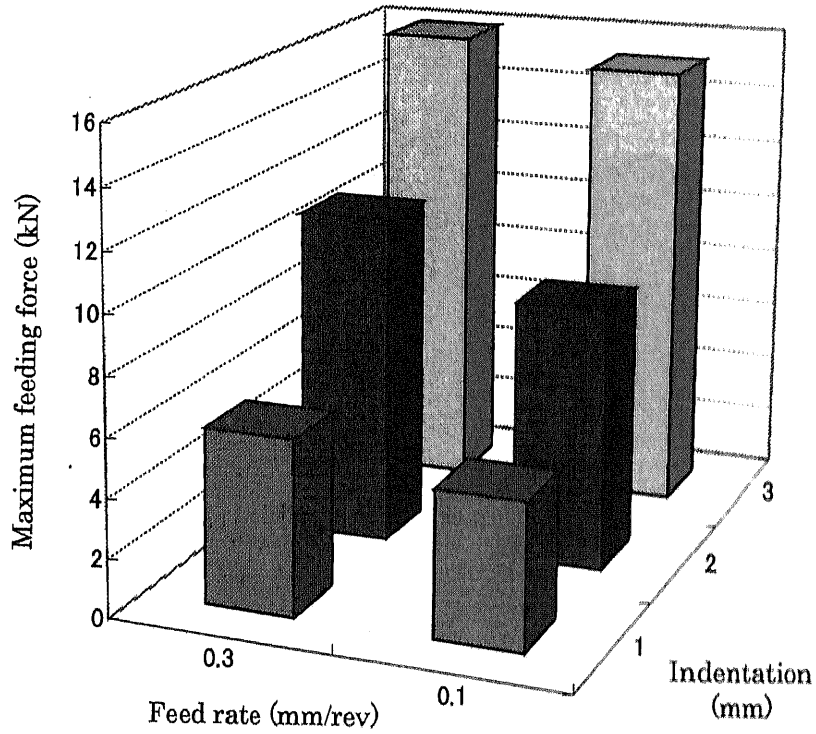


Fig. 5-19 Graph of feeding force variation of feed rate and indentation in 3-Dimension

Fig. 5-19 は送り速度と押込み量による加工力の解析結果を示す。このように送り速度が速くなることによって加工力が大きくなることがわかる。そして押込み量が多くなることによって加工力が大きくなることがわかる。



## 5.5 結論

### Feed Force

送り速度の増加、押込み量の増加によって加工力は増加する。

### Boss Height

送り速度の低下、押込み量の増加によってボス高さは高くなる。

### Boss Thickness

送り速度の増加、押込み量の増加によってボス厚さは厚くなる。

### Analysis

軸対称としての2次元解析の場合は先端丸み半径が大きい場合、押込み量が材料流れに及ぼす影響が再現出来ない。

3次元解析の場合は送り速度が材料流れに及ぼす影響を再現出来ない。

以上のことより、現状のコンピューター環境ではボスフォーミングのような複雑な材料流れを伴う回転成形の材料流れを精度よく解析するのは難しい。

# 第 6 章 結 言

## 第6章 結言

回転成形における材料流れに関する基礎的研究のため、まず押し込みの際の実験と解析を行って解析での再現を検討し、さらに回転を加えた転造加工の際の実験と解析を行い、またより複雑な工程の加工、スプリッティングそしてボスフォーミング加工での材料流れに関して実験と解析を行った。

### 1. V形工具およびW形工具押し込みにおける材料流れ

#### Profile

H材の場合、材料流れは圧子下段部に集中し、圧縮領域が広がり、上の表面は盛り上がりできた。O材の場合、材料流れは圧子下段部に広く広がり、H材のような表面の盛り上がりは見えなかった。O材の方がH材よりより材料流れが流れやすいため、H材のような上の表面の盛り上がりがなく、工具の押し込みによる下への材料流れが流れていく。

W形工具の押し込みでも、H材の場合は工具の間に工具の押し込みによる材料流れが流れていて衝突し、工具の間の上の表面は盛り上がりできた。O材の場合は、材料流れが工具の間ではなく両方工具の押し込み方向へ流れていて、内部へ吸収される。

#### Metal flow

H材の場合、表面の盛り上がりで圧子間のねじ山の部分に盛り上がる。材料流れが圧子近辺に局所化し、表面への盛り上がり容易となる。O材の場合、H材より塑性領域が大きく広がるが圧子下段部の弾性変形によって吸収されて沈降形となり、盛り上がりが少ない。

#### Load and stroke

押し込み量の増加と共にストローク荷重も増加する。H材の方がO材より約2倍高い荷重になった。解析の結果は実験との結果に似ている。

#### Analysis

押し込みの結果を解析の再現を検討した結果、プロファイル、ひずみ、加工力などを解析により検討出来る。プロファイルの場合、実験と比較するとよく似ている結果であり、押し込みの実験に解析の再現が出来る。ひずみ、加工力の場合もよく似ている結果である。以上のことで押し込みの場合、解析で再現出来る。

### 2. 環状溝の転造における材料流れ

#### Feed rate & Fatigue Strength

送り速度の増加によって疲労強度が増加する。送り速度を上げることによってより高い加工硬化によって疲労強度を高める。

#### Feed rate & Residual Stress

送り速度の増加によって残留応力が増加する。残留応力も送り速度を上げることによってより高い加工硬化によって残留応力が高くなる。解析でも工具の送り速度を上げることによって残留応力が高くなる。そして谷の表面から近いところに圧縮応力が形成した。内部へ行くことによって引張り応力が形成した。

#### Vicker`s hardness & Equivalent Plastic Strain

谷の表面に高いビッカース硬度、高い相当塑性ひずみが形成される。このように高い加工硬化によるビッカース硬度があがり、それに解析での相当塑性ひずみからでも相応する。

#### Analysis

2次元の解析に除荷&負荷のメカニズムを適用すれば、押込み速度などの加工条件の変化による残留応力、相当塑性ひずみなどへの影響が検討出来る。その応用としてメートルねじへの解析でも検討出来る。

3次元の解析では残留応力分布などを詳細に検討出来るが、計算時間が多くかかるので必要に応じて2次元の簡易解析を利用出来る。

### 3. スプリッティングにおける材料流れ

#### Feeding Force

送り速度の増加、ロール角度の増加によって加工力は増加する。

#### Profile

送り速度の増加によって、そりの角度は低下する。材料流れは、送り速度が増加することによって軸方向へ流れていて、そりの角度は低くなる。そして送り速度の増加によってそりの長さが短くなる。

#### Analysis

送り速度が加工力と材料流れに及ぼす影響は、除荷&負荷のメカニズムを導入した2次元の簡易解析で検討出来る。加工力、加工後のプロファイルでも2次元の簡易解析で再現出来る。

#### 4. ボスフォーミングにおける材料流れ

##### Feed Force

送り速度の増加、押込み量の増加によって加工力は増加する。工具の送り速度の増加によってより高い加工硬化による加工力が高くなる。

##### Boss Height

送り速度の低下、押込み量の増加によってボス高さは高くなる。工具の送り速度の低下によって、材料流れはボスの方に流れやすくなり、ボス高さが高くなる。

##### Boss Thickness

送り速度の増加、押込み量の増加によってボス厚さは厚くなる。

##### Analysis

軸対称としての2次元解析の場合は、先端丸み半径が大きい場合、押込み量が材料流れに及ぼす影響が再現出来ない。

3次元解析の場合は、送り速度が材料流れに及ぼす影響を再現出来ない。

以上のことより、現状のコンピューター環境ではボスフォーミングのような複雑な材料流れを伴う回転成形の材料流れを精度よく解析するのは難しい。

回転成形における材料流れに関する研究のため、まず回転のない押し込み時の加工での材料流れに関して実験と解析を行った結果、解析では加工力、プロファイルなどを再現出来る。さらに押し込みに回転を加えた転造加工時にも、解析での再現は加工力、プロファイル、残留応力などを再現出来る。そして3次元の解析でも再現出来るが、2次元解析の場合、回転加工の工程での応用のため除荷&負荷のメカニズムを導入することで簡易解析で再現が出来る。しかしボスフォーミングのような複雑な材料流れを伴う回転成形を現状のコンピューター環境で精度よく有限要素解析することは難しく、実験的な観測などに基づいて材料流れのモデルを仮定して、上界法などの古典的解析手法を有効に利用するなどの工夫を要する。

# 参考文献

参考文献

- [1] M. Hayama: Calculation for Thread Rolling Pressure, Bull. Fac. Eng. Yokohama National Univ., Vol. 16(1967), pp. 91-99
- [2] K. Kawai, H. Kato : Experimental Study of Indentation of W-Shaped Tool, Proc. 1986 Japan. Spring Conf. Techno. Plast., (1986), pp. 395-398
- [3] 川井謙一 : W形工具の押込み (転造変形機構に関する基礎的研究 4)、第35回塑性加工連合講演会、1984, pp. 379-382
- [4] Kudo & Tamura ; on the process of forming V-shaped groove on metal surface, precision mechanics, 34-6, (1968), pp. 38-43
- [5] W. Johnson, H. Kudo : Plane strain compression between rough inclined plates, Appl. Sci. Res. 1960, pp. 206-212
- [6] Akio Shindo : A theoretical analysis of indentation hardness, Pt. I. : Slip-line fields for wedge indentation : Memoirs of the faculty of engineering, Kobe Univ., No.18 (1972), pp. 65-88
- [7] Nakamura & Tozawa : on metal flow by indentation of the indenter under plane strain condition, plasticity and process 17-180, (1971), pp. 23-30
- [8] K. Kawai, K. Hattori, Y. Inomata: Effects of Profile Forming Ratio on the Fatigue Strength of Groove-Rolled Products, Advanced Technology of Plasticity 1993(ed. Z.R. Wang, Y. He), Vol. 1 (1993), International Academic Publishers, pp. 408-415.
- [9] 川井謙一、吉川映人 : UBET による複数くさび形工具押込みの解析、第41回塑性加工連合講演会、1990, pp. 395-398
- [10] R. Hill, E. H. Lee and S. J. Tupper : The theory of wedge indentation of ductile materials, Proc. Roy. Soc. A, Vol. 188, pp. 273-290
- [11] J. Grunzweig, I. M. Longman and N. J. Petch : Calculations and Measurements of wedge indentation
- [12] Vincker. A., Dechaene. R. : Use of Moiré effect to measure plastic strains, J. Basic Eng., Trans., ASME, 82-2 (1960-6), pp. 426-434

- [13] A, Vinckier & R, Dechaene : use of Moiré effect to measure plastic strains, ASME, 1960, pp. 426-434
- [14] ABAQUS manual, Ver. 6.3
- [15] LS-DYNA manual
- [16] J. B. Haddow : On a plane strain wedge indentation paradox, Int. J. Mech. Sci. 1967, Vol. 9, pp. 159-161
- [17] 川井謙一 : 転造環状溝の残留応力の測定法、第42回塑性加工連合講演会、1991, pp. 165-168
- [18] Joseph p. Domblesky, Feng Feng : A parametric study of process parameters in external thread rolling, 2002, Journal of Materials Process Technology, pp. 341-349
- [19] A measurement of residual stress, B. H., Han, Journal of Korea Institute of Metals, Vol.17, No.2, p.153-163, 1979
- [20] Effects of profile forming ratio on the fatigue strength of groove-rolled products, K. Kawai, K. Hattori, Y. Inomata, Advanced Technology of Plasticity, p.408-413, 1993
- [21] Rolling Condition and Fatigue Strength of Groove-Rolled Products, K. Kawai, Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, 1993, No.930-75
- [22] Formulas for the determination of residual stress in groove-rolled products, K. Kawai, Proceedings of the international conference on mechanics of solids and materials engineering, Vol. C, 1995-6, p.901-906
- [23] A hypothesis concerning fatigue strength of bolt-nut joints, Y. Yoshimoto, Journal of the Japan Society of Precision Engineering, Japan, 49, p.801-803, 1983
- [24] Prediction of fatigue strength of bolt-nut joints based on residual stress, Y. Yoshimoto, K. Maruyama, Y. Yamada, Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Japan, 50A, p.717-721, 1984
- [25] A modified hypothesis concerning fatigue strength of bolt-nut joints, Y. Yoshimoto,



Proceedings of the Japanese 1987 Spring Conference on Precision Engineering, Japan, p.131-132, 1987

[26] C. Mallana, H. N. Nagarajan and M. E. Visveswaran, Process Parameters in Flow Forming and how they affect the End Product, Proc. 1<sup>st</sup>. Int. Conference on Rotary Metal Working Processes, London, Nov. 20-22, 1979, IFS-Publication, Kempston, 1979, pp-231-242

[27] G. Thompson and J. B. Hawkyard, Crack Formation in Transverse Rolling, Proc. 1<sup>st</sup>. Int. Conference of Rotary Metal Working Processes, London, Nov. 20-22, IFS-Publication, Kempston, 1979, pp. 171-184.

[28] Dieter Schmoeckel, Stefan Hauk, Tooling and process control for splitting of disk blanks, Journal of Materials Processing Technology 98 (2000), pp. 65~69

[29] D. H. Politt, The Practice and Potential of Flow Forming Processes, Proc. 1<sup>st</sup>. Int. Conference on Rotary Metal Working.

[30] R. Noppen, Neue Werkstoffanwendungen in der Fahrzeugtechnik, Proc. Fertigungstechnisches Kolloquium FKT 85, Stuttgart, Oct. 10-11, 1985, Springer, Berlin, 1989, pp. 67-72

[31] D. BAUER, ROTARY SPLITTING ~ A NOVEL SHEET METAL FORMING TECHNIQUE, Journal of Materials Processing Technology, Vol.24 (1990) pp.225 ~233

[32] M. W. Storoschew and E. A. Popow, Grundlagen der Umformtechnik, 1<sup>st</sup> edn., VEB Verlag Technik, Berlin, 1968.

[33] 上野恵尉、上田雅信、谷口克己：V形ロールによる板材端面のY字加工、第36回塑性加工連合講演会、1985, pp. 389-392

[34] X-ray measurement of residual stress on bolt threads, M. Hagiware, K. Nakahara, Y. Yoshimoto, Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Japan, 55C, 2605-2610

[35] Formulas for the determination of residual stress in wires by the layer removal method, Journal of Applied Physics, U.S.A., 22, 415-416, 1951

[36] Inst. Z. f. Metallographie, 1, 16, E. Heyn and O. Bauer, 1991

[37] Journal of Applied Physics, W. J. Read, 22, P415, 1951

# 謝 辭

## 謝辞

本研究を行うにあたり、終始適切なご指導、様々な励ましを賜りました川井謙一教授に感謝し心より深くお礼申し上げます。

また、様々な援助、ご指摘をして頂いた、小山寛助手に深く感謝致します。さらに様々な面でご協力頂いた研究室の田中政資氏、和氣治氏、亀井丈広氏、千葉孝太氏、吉田浩祐氏、呂峰氏、平井真麻氏、前田直樹氏、竹尾隆史氏、鈴木将紀氏、高橋佳樹氏、渡辺翔氏、只野雄三氏に深く感謝致します。研究での活動を通して色々な面において大変お世話になり、どうもありがとうございます。

# 付 録

Appendix

1. Indentation-2D

\*HEADING

Indentation-2D

\*INCLUDE, INPUT=node.inp

\*INCLUDE, INPUT=elem.inp

\*SURFACE, TYPE=ELEMENT, NAME=SWTOP,

REGION TYPE=SLIDING

EWTOP, S3

\*MATERIAL, NAME=S35C

\*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC

70.0D+3, 0.30D0

\*PLASTIC, HARDENING=ISOTROPIC

83.7851, 0

93.7761, 0.01

104.9596, 0.05

110.1777, 0.1

113.3502, 0.15

115.6557, 0.2

117.4758, 0.25

118.9851, 0.3

120.2766, 0.35

121.4053, 0.4

\*DENSITY

2.3D-6

\*SOLID SECTION, MATERIAL=S35C,

ELSET=EWALL

\*\*

=====

=

\*NODE, NSET=REF-NODE

10000, 0, 75

\*\*ELEMENT, TYPE=MASS, ELSET=PMASS

\*\*10000, 10000

\*\*MASS, ELSET=PMASS

\*\*0.2,

\*INCLUDE, INPUT=toolsurf.r0.inp

\*SURFACE, TYPE=ELEMENT, NAME=TOOLSURF

ESURF, SPOS

\*RIGID BODY, REF NODE=REF-NODE,

ANALYTICAL SURFACE=TOOLSURF,

ELSET=ESURF

\*BOUNDARY

NWLEFT, XSYMM

NWRIGHT, XSYMM

NWCNT, YSYMM

10000, 1, 1

10000, 6, 6

\*STEP

\*DYNAMIC, EXPLICIT

, 0.1D0, ,

\*BOUNDARY, TYPE=VELOCITY

10000, 2, 2, -30.0D0

\*SURFACE INTERACTION, NAME=GRATING

\*FRICTION

0.3D0

\*CONTACT PAIR, INTERACTION=GRATING

SWTOP, TOOLSURF

\*\*.....

\*OUTPUT, FIELD, NUMBER INTERVAL=20,

OP=ADD

\*\*

\*ELEMENT OUTPUT, ELSET=EWALL

S, LE, PEEQ

\*\*

\*OUTPUT, HISTORY, FREQUENCY=999999,

OP=ADD

\*NODE OUTPUT, NSET=NWALL

U, COORD

\*\*

\*ADAPTIVE MESH, ELSET=EREME

\*RESTART, WRITE, OVERLAY

\*\*

\*END STEP

```

2. Indentation-3D
70.0D+3, 0.30D0
*PLASTIC, HARDENING=ISOTROPIC
*HEADING
83.7851, 0
Indentation-3D
93.7761, 0.01
*INCLUDE, INPUT=node.inp
104.9596, 0.05
*INCLUDE, INPUT=elem.inp
110.1777, 0.1
*INCLUDE, INPUT=wall1-1node.inp
113.3502, 0.15
*INCLUDE, INPUT=wall1-1elem.inp
115.6557, 0.2
*INCLUDE, INPUT=wall2node.inp
117.4758, 0.25
*INCLUDE, INPUT=wall2elem.inp
118.9851, 0.3
*INCLUDE, INPUT=wall3node.inp
120.2756, 0.35
*INCLUDE, INPUT=wall3elem.inp
121.4053, 0.4
*INCLUDE, INPUT=toolsurfr1.inp
**
2.3D-6
**
E-SURFACE *SOLID SECTION, MATERIAL=S35C,
=====
ELSET=EWALL
** MATERIAL PROF. of E
=====
**
** MATERIAL PROF. of WALL1, 2,
3=====
*MATERIAL, NAME=RIGID
*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC
200.0D+3, 0.30D0
*PLASTIC, HARDENING=ISOTROPIC
365.8D+0, 0.0D0
517.2D+0, 0.03188D0
565.8D+0, 0.04786D0
608.8D+0, 0.06955D0
647.1D+0, 0.09542D0
731.5D+0, 0.1961D0
764.2D+0, 0.2774D0
**
** MATERIAL PROF. of E
794.7D+0, 0.4009D0
=====
*MATERIAL, NAME=S35C
7.8D-6
*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC
*SOLID SECTION, MATERIAL=RIGID,

```





```

0.1D0
*CONTACT PAIR, INTERACTION=WALL1,
WEIGHT=0.0
SWFRONT, SW1BACK
*SURFACE INTERACTION, NAME=WALL2
*FRICTION
0.3D0
*CONTACT PAIR, INTERACTION=WALL2,
WEIGHT=0.0
SWRIGHT, SW2LEFT
**=====
**.....
*OUTPUT, FIELD, NUMBER INTERVAL=20,
OP=ADD
**
*ELEMENT OUTPUT, ELSET=EWALL
S, LE, PEEQ
**
**OUTPUT, HISTORY, FREQUENCY=999999,
OP=ADD
*NODE OUTPUT, NSET=NWALL
U, COORD
**
*ADAPTIVE MESH, ELSET=EREME,
FREQUENCY=100,
MESH SWEEPS=20
*ADAPTIVE MESH CONTROLS, NAME=name,
SMOOTHING OBJECTIVE=GRADED
**RESTART, WRITE, OVERLAY
**
*END STEP

```

### 3. Thread Rolling-2D

```
*HEADING
** --- to print a heading on the output.
Thread Rolling-2D
**
*PHYSICAL      CONSTANTS,      ABSOLUTE
ZERO=-273.16E0
**  0.0E0[Kelvin]=-273.16E0[Degree]
**
**=====**
** Geometrical data.
**=====**
**.....**
** Work
**.....**
*INCLUDE, INPUT=nodes.inp
**
*INCLUDE, INPUT=elem.inp
**
*SURFACE, TYPE=ELEMENT, NAME=SWTOP
EWTOP, S3
**
**.....**
** Tool
**.....**
*INCLUDE, INPUT=tool_node.inp
**
*INCLUDE, INPUT=tool_elem.inp
**
*SURFACE, TYPE=ELEMENT, NAME=SDEXT
EDEXT, S2
**
**=====**

=====**
** Material properties.
**=====**
** Density;      7800      [kg/m^3]
** Elastic modulus; 200.0D+0 [GPa]
** Yield stress;  364.8D+0 [MPa]
**=====**
**.....**
*MATERIAL, NAME=S35C
**
*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC
200.0D+3, 0.30D0
**
*PLASTIC, HARDENING=ISOTROPIC
365.8D+0, 0.0D0
517.2D+0, 0.03188D0
565.6D+0, 0.04786D0
608.8D+0, 0.06955D0
647.1D+0, 0.09542D0
731.5D+0, 0.1961D0
764.2D+0, 0.2774D0
794.7D+0, 0.4009D0
**
*DENSITY
7.8D-6
**.....**
*MATERIAL, NAME=RIGID
**
*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC
200.0D+3, 0.30D0
**
*DENSITY
7.8D-6
**.....**
*SOLID      SECTION,      MATERIAL=S35C,
```

```

ELSET=EWALL
*SOLID SECTION, MATERIAL=RIGID,
ELSET=EDALL
**SOLID SECTION, MATERIAL=S35C,
ELSET=EREME
**
**-----**
**... Forming step.
**-----**
** For /Standard
**STEP, AMPLITUDE=RAMP, INC=1000, NLGEOM
**
**STATIC
**1.0D-4, 1.0D0, 1.0D-6, 1.0D-2
**
** For /Explicit
*STEP
**
*DYNAMIC, EXPLICIT
, 0.15D0, , 1.0D-1
**
**-----**
**CONTACT PAIR, INTERACTION=GRATING
SDEXT, SWTOP
**
**SURFACE INTERACTION, NAME=GRATING
*FRICTION
0.0D0
**
**-----**
**BOUNDARY, TYPE=DISPLACEMENT, OP=NEW
*BOUNDARY, OP=NEW
NWLEFT, XSYMM
NWRIGHT, XSYMM
NWCNT, YSYMM
**
NDINN, XSYMM
**
**... begin of forming history
** For /Standard
**AMPLITUDE, NAME=TR1,
DEFINITION=TABULAR
**0.0D0, 0.0D0, 1.0D0, -0.771D0
**
**BOUNDARY, TYPE=DISPLACEMENT,
AMPLITUDE=TR1, OP=NEW
**NDINN, 2,2, 1.0D0
**
** For /Explicit
*BOUNDARY, TYPE=VELOCITY, OP=NEW
NDINN, 2,2, -1.0D0
**
**... the end of forming history
**
**-----**
** Write variables
**-----**
** For /Standard
**OUTPUT, FIELD, FREQUENCY=10, OP=ADD
**
**ELEMENT OUTPUT, ELSET=EWALL
**
**S, E, PEEQ
**
**OUTPUT, HISTORY, FREQUENCY=100, OP=ADD
**NODE OUTPUT, NSET=NWALL

```

```

**U, COORD
**
** For /Explicit
*OUTPUT, FIELD, NUMBER INTERVAL=20,
OP=ADD
**
**
*ELEMENT OUTPUT, ELSET=EWALL
S, LE, PEEQ
**
*OUTPUT, HISTORY, FREQUENCY=500000,
OP=ADD
*NODE OUTPUT, NSET=NWALL
U, COORD
**
*ADAPTIVE MESH, ELSET=EREME
**.....**
** For /Standard
**PRINT, FREQUENCY=10, CONTACT=YES,
PLASTICITY=NO, RESIDUAL=NO, SOLVE=NO
**
** For /Explicit
**PRINT, CONTACT=YES, PLASTICITY=NO,
RESIDUAL=NO, SOLVE=NO
**
*RESTART, WRITE, OVERLAY
**
*END STEP
**
**=====|=====|=====|=====|=====
==|=====|=====|72
**
... The END of
an ABAQUS Input File.
**=====
=====**

```

4. Thread Rolling-3D

```

*HEADING
Thread Rolling-3D
*INCLUDE, INPUT=node.inp
*INCLUDE, INPUT=elem.inp
*SURFACE, TYPE=ELEMENT, NAME=SSPEUP,
REGION TYPE=SLIDING
SPEUP·S4, S4
SPEUP·S6, S6
*****
*MATERIAL, NAME=S35C
*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC
200.0D+3, 0.30D0
*PLASTIC, HARDENING=ISOTROPIC
328.093449328725D+0, 0.0D0
389.463312075987D+0, 0.03D0
*****
890.039544531088D+0, 0.37D0
893.900212930707D+0, 0.38D0
*DENSITY
7.8D-6
*SOLID SECTION, MATERIAL=S35C,
ELSET=EWALL
*****
*RIGID BODY, REF NODE=100000,
ANALYTICAL SURFACE=STOOLOUT·R,
ELSET=EDALL·R
*RIGID BODY, REF NODE=300000,
ANALYTICAL SURFACE=STOOLOUT·L,
ELSET=EDALL·L
*ELEMENT,TYPE=CONN3D2,ELSET=TRANS·R
200000, 200000, 100000
*ELEMENT,TYPE=CONN3D2,ELSET=TRANS·L
400000, 400000, 300000
*CONNECTOR SECTION,ELSET=TRANS·R

```

```

TRANSLATOR,
LOCAL-ORR
*CONNECTOR SECTION,ELSET=TRANS·L
TRANSLATOR,
LOCAL-ORL
*ORIENTATION, NAME=LOCAL-ORR
**1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1.0, 0.0
0.0, 1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1.0
3, 0.0
*ORIENTATION, NAME=LOCAL-ORL
**1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1.0, 0.0
0.0, 1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1.0
3, 0.0
*BOUNDARY
200000,1,5,0.0
400000,1,5,0.0
100000,1,1
100000,5,5
100000,6,6
**
300000,1,1
300000,5,5
300000,6,6
*****
*
*INCLUDE, INPUT=tool·node1.inp
*INCLUDE, INPUT=tool·elem1.inp
*INCLUDE, INPUT=tool·node2.inp
*INCLUDE, INPUT=tool·elem2.inp
*NODE, NSET=REF·NODE·R
100000, 0, 75.85, 0.
*NODE, NSET=REF·NODE·L
300000, 0,-75.85,0
*NODE, NSET=TRANS·NODE·R
200000, 0,0,0
*NODE, NSET=TRANS·NODE·L

```

```

400000, 0,0,0
*ELEMENT, TYPE=ROTARYI, ELSET=TOOLRIGI-R
500000, 100000
*ELEMENT, TYPE=ROTARYI, ELSET=TOOLRIGI-L
600000, 300000
*ROTARY INERTIA, ELSET=TOOLRIGI-R
0.000003,0,0
*ROTARY INERTIA, ELSET=TOOLRIGI-L
0.000003,0,0
*ELEMENT, TYPE=MASS, ELSET=TOOLMASS-R
700000, 100000
*ELEMENT, TYPE=MASS, ELSET=TOOLMASS-L
800000, 300000
*MASS, ELSET=TOOLMASS-R
2000
*MASS, ELSET=TOOLMASS-L
2000
*****
*SURFACE, TYPE=ELEMENT,
NAME=STOOLOUT-R
EDALL-R, SNEG
*SURFACE, TYPE=ELEMENT,
NAME=STOOLOUT-L
EDALL-L, SPOS
*BOUNDARY
NWIN, XSYMM
NWOUT, XSYMM
**NWOUT, ENCASTRE
**NDALL, 1,1
**NDALL, 2,2
**NDALL, 3,3
***NDALL, 4,4
**NDALL, 5,5
**NDALL, 6,6
*****
***** STEP-1 *****
*****
*STEP
*DYNAMIC, EXPLICIT
, 0.001, ,
**, 0.0001D0, ,
**, 0.0027, ,
*CONNECTOR MOTION, TYPE=VELOCITY
200000, 1, -50.0
400000, 1, 50.0
*BOUNDARY, TYPE=VELOCITY
**200000, 4,4, 12560.0
**200000, 4,4, 25120
200000, 4,4, 6280
100000, 4,4, 6280
400000, 4,4, 6280
300000, 4,4, 6280
*SURFACE INTERACTION, NAME=GRATING
*FRICTION
0.0D0
*CONTACT PAIR, MECHANICAL
CONSTRAINT=PENALTY,
INTERACTION=GRATING
SSPEUP, STOOLOUT-R
SSPEUP, STOOLOUT-L
**.....
**OUTPUT, FIELD, TIME MARKS=YES, NUMBER
INTERVAL=20, OP=ADD
**OUTPUT, FIELD, NUMBER INTERVAL=20,
OP=ADD
**
**ELEMENT OUTPUT, ELSET=EWALL
**S, LE, PEEQ
**ELEMENT OUTPUT, ELSET=EDALL
**S, LE, PEEQ
**
**OUTPUT, HISTORY, FREQUENCY=999999,

```

```

OP=ADD
**NODE OUTPUT, NSET=NWALL
**U, COORD
**NODE OUTPUT, NSET=NDALL
**U, COORD
**
*ADAPTIVE MESH, ELSET=EWALL
*DIAGNOSTICS, CONTACT INITIAL
OVERCLOSURE=DETAIL
*RESTART, WRITE, OVERLAY
**
*END STEP
*****
***** STEP-2 *****
*****
*STEP
*DYNAMIC, EXPLICIT
, 0.001, ,
**, 0.0001D0, ,
**, 0.0027, ,
*CONNECTOR MOTION, TYPE=VELOCITY
200000, 1, 50.0
400000, 1, 50.0
*BOUNDARY, TYPE=VELOCITY
**200000, 4, 4, 12560.0
**200000, 4, 4, 25120
**200000, 4, 4, 12560.0
**200000, 4, 4, 25120
200000, 4, 4, 6280
100000, 4, 4, 6280
400000, 4, 4, 6280
300000, 4, 4, 6280
*SURFACE INTERACTION, NAME=GRATING
*FRICTION
0.0D0
**CONTACT PAIR, MECHANICAL

```

```

CONSTRAINT=PENALTY,
INTERACTION=GRATING
**SSPEUP, STOOLOUT-R
**SSPEUP, STOOLOUT-L
**.....
**OUTPUT, FIELD, TIME MARKS=YES, NUMBER
INTERVAL=20, OP=ADD
**OUTPUT, FIELD, NUMBER INTERVAL=20,
OP=ADD
**
**ELEMENT OUTPUT, ELSET=EWALL
**S, LE, PEEQ
**ELEMENT OUTPUT, ELSET=EDALL
**S, LE, PEEQ
**
**OUTPUT, HISTORY, FREQUENCY=999999,
OP=ADD
**NODE OUTPUT, NSET=NWALL
**U, COORD
**NODE OUTPUT, NSET=NDALL
**U, COORD
**
*ADAPTIVE MESH, ELSET=EWALL
*DIAGNOSTICS, CONTACT INITIAL
OVERCLOSURE=DETAIL
*RESTART, WRITE, OVERLAY
**
*END STEP
*****
***** STEP-3 *****
*****
*STEP
*DYNAMIC, EXPLICIT
, 0.001, ,
**, 0.0001D0, ,
**, 0.0027, ,

```



```

*CONNECTOR MOTION, TYPE=VELOCITY
200000, 1, -50.0
400000, 1, 50.0
*BOUNDARY, TYPE=VELOCITY
**200000, 4, 4, 12560.0
**200000, 4, 4, 25120
**200000, 4, 4, 12560.0
**200000, 4, 4, 25120
200000, 4, 4, 6280
100000, 4, 4, 6280
400000, 4, 4, 6280
300000, 4, 4, 6280
*SURFACE INTERACTION, NAME=GRATING
*FRICTION
0.0D0
**CONTACT PAIR, MECHANICAL
CONSTRAINT=PENALTY,
INTERACTION=GRATING
**SSPEUP, STOOLOUT-R
**SSPEUP, STOOLOUT-L
**-----
**OUTPUT, FIELD, TIME MARKS=YES, NUMBER
INTERVAL=20, OP=ADD
**OUTPUT, FIELD, NUMBER INTERVAL=20,
OP=ADD
**
**ELEMENT OUTPUT, ELSET=EWALL
**S, LE, PEEQ
**ELEMENT OUTPUT, ELSET=EDALL
**S, LE, PEEQ
**
**OUTPUT, HISTORY, FREQUENCY=999999,
OP=ADD
**NODE OUTPUT, NSET=NWALL
**U, COORD
**NODE OUTPUT, NSET=NDALL

**U, COORD
**
*ADAPTIVE MESH, ELSET=EWALL
*DIAGNOSTICS, CONTACT INITIAL
OVERCLOSURE=DETAIL
*RESTART, WRITE, OVERLAY
**
*END STEP
*****
***** STEP-4 *****
*****
*STEP
*DYNAMIC, EXPLICIT
, 0.001, ,
**, 0.0001D0, ,
**, 0.0027, ,
*CONNECTOR MOTION, TYPE=VELOCITY
200000, 1, -50.0
400000, 1, 50.0
*BOUNDARY, TYPE=VELOCITY
**200000, 4, 4, 12560.0
**200000, 4, 4, 25120
**200000, 4, 4, 12560.0
**200000, 4, 4, 25120
200000, 4, 4, 6280
100000, 4, 4, 6280
400000, 4, 4, 6280
300000, 4, 4, 6280
*SURFACE INTERACTION, NAME=GRATING
*FRICTION
0.0D0
**CONTACT PAIR, MECHANICAL
CONSTRAINT=PENALTY,
INTERACTION=GRATING
**SSPEUP, STOOLOUT-R
**SSPEUP, STOOLOUT-L

```

```

**.....
**OUTPUT, FIELD, TIME MARKS=YES, NUMBER
INTERVAL=20, OP=ADD
**OUTPUT, FIELD, NUMBER INTERVAL=20,
OP=ADD
**
**ELEMENT OUTPUT, ELSET=EWALL
**S, LE, PEEQ
**ELEMENT OUTPUT, ELSET=EDALL
**S, LE, PEEQ
**
**OUTPUT, HISTORY, FREQUENCY=999999,
OP=ADD
**NODE OUTPUT, NSET=NWALL
**U, COORD
**NODE OUTPUT, NSET=NDALL
**U, COORD
**
**ADAPTIVE MESH, ELSET=EWALL
**DIAGNOSTICS, CONTACT INITIAL
OVERCLOSURE=DETAIL
**RESTART, WRITE, OVERLAY
**
**END STEP
*****
***** STEP-5 *****
*****
**STEP
**DYNAMIC, EXPLICIT
, 0.001, ,
**, 0.0001D0, ,
**, 0.0027, ,
**CONNECTOR MOTION, TYPE=VELOCITY
200000, 1, 50.0
400000, 1, 50.0
**BOUNDARY, TYPE=VELOCITY

**200000, 4, 4, 12560.0
**200000, 4, 4, 25120
**200000, 4, 4, 12560.0
**200000, 4, 4, 25120
200000, 4, 4, 6280
100000, 4, 4, 6280
400000, 4, 4, 6280
300000, 4, 4, 6280
**SURFACE INTERACTION, NAME=GRATING
**FRICTION
0.0D0
**CONTACT PAIR, MECHANICAL
CONSTRAINT=PENALTY,
INTERACTION=GRATING
**SSPEUP, STOOLOUT-R
**SSPEUP, STOOLOUT-L
**.....
**OUTPUT, FIELD, TIME MARKS=YES, NUMBER
INTERVAL=20, OP=ADD
**OUTPUT, FIELD, NUMBER INTERVAL=20,
OP=ADD
**
**ELEMENT OUTPUT, ELSET=EWALL
**S, LE, PEEQ
**ELEMENT OUTPUT, ELSET=EDALL
**S, LE, PEEQ
**
**OUTPUT, HISTORY, FREQUENCY=999999,
OP=ADD
**NODE OUTPUT, NSET=NWALL
**U, COORD
**NODE OUTPUT, NSET=NDALL
**U, COORD
**
**ADAPTIVE MESH, ELSET=EWALL
**DIAGNOSTICS, CONTACT INITIAL
OVERCLOSURE=DETAIL
**RESTART, WRITE, OVERLAY
**
**END STEP
*****
***** STEP-5 *****
*****
**STEP
**DYNAMIC, EXPLICIT
, 0.001, ,
**, 0.0001D0, ,
**, 0.0027, ,
**CONNECTOR MOTION, TYPE=VELOCITY
200000, 1, 50.0
400000, 1, 50.0
**BOUNDARY, TYPE=VELOCITY

```

```

OVERCLOSURE=DETAIL
*RESTART, WRITE, OVERLAY
**
*END STEP
*****
***** STEP-6 *****
*****
*STEP
*DYNAMIC, EXPLICIT
, 0.001, ,
**, 0.0001D0, ,
**, 0.0027, ,
*CONNECTOR MOTION, TYPE=VELOCITY
200000, 1, -50.0
400000, 1, 50.0
*BOUNDARY, TYPE=VELOCITY
**200000, 4, 4, 12560.0
**200000, 4, 4, 25120
**200000, 4, 4, 12560.0
**200000, 4, 4, 25120
200000, 4, 4, 6280
100000, 4, 4, 6280
400000, 4, 4, 6280
300000, 4, 4, 6280
*SURFACE INTERACTION, NAME=GRATING
*FRICTION
0.0D0
**CONTACT PAIR, MECHANICAL
CONSTRAINT=PENALTY,
INTERACTION=GRATING
**SSPEUP, STOOLOUT-R
**SSPEUP, STOOLOUT-L
**.....
**OUTPUT, FIELD, TIME MARKS=YES, NUMBER
INTERVAL=20, OP=ADD
**OUTPUT, FIELD, NUMBER INTERVAL=20,

```

```

OP=ADD
**
**ELEMENT OUTPUT, ELSET=EWALL
**S, LE, PEEQ
**ELEMENT OUTPUT, ELSET=EDALL
**S, LE, PEEQ
**
**OUTPUT, HISTORY, FREQUENCY=999999,
OP=ADD
**NODE OUTPUT, NSET=NWALL
**U, COORD
**NODE OUTPUT, NSET=NDALL
**U, COORD
**
*ADAPTIVE MESH, ELSET=EWALL
*DIAGNOSTICS, CONTACT INITIAL
OVERCLOSURE=DETAIL
*RESTART, WRITE, OVERLAY
**
*END STEP
*****
***** STEP-7 *****
*****
*STEP
*DYNAMIC, EXPLICIT
, 0.001, ,
**, 0.0001D0, ,
**, 0.0027, ,
*CONNECTOR MOTION, TYPE=VELOCITY
200000, 1, -50.0
400000, 1, 50.0
*BOUNDARY, TYPE=VELOCITY
**200000, 4, 4, 12560.0
**200000, 4, 4, 25120
**200000, 4, 4, 12560.0
**200000, 4, 4, 25120

```

```

200000, 4,4, 6280
100000, 4,4, 6280
400000, 4,4, 6280
300000, 4,4, 6280
*SURFACE INTERACTION, NAME=GRATING
*FRICTION
0.0D0
**CONTACT      PAIR,      MECHANICAL
CONSTRAINT=PENALTY,
INTERACTION=GRATING
**SSPEUP, STOOLOUT-R
**SSPEUP, STOOLOUT-L
**.....
**OUTPUT, FIELD, TIME MARKS=YES, NUMBER
INTERVAL=20, OP=ADD
**OUTPUT, FIELD, NUMBER INTERVAL=20,
OP=ADD
**
**ELEMENT OUTPUT, ELSET=EWALL
**S, LE, PEEQ
**ELEMENT OUTPUT, ELSET=EDALL
**S, LE, PEEQ
**
**OUTPUT, HISTORY, FREQUENCY=999999,
OP=ADD
**NODE OUTPUT, NSET=NWALL
**U, COORD
**NODE OUTPUT, NSET=NDALL
**U, COORD
**
*ADAPTIVE MESH, ELSET=EWALL
*DIAGNOSTICS, CONTACT INITIAL
OVERCLOSURE=DETAIL
*RESTART, WRITE, OVERLAY
**
*END STEP
*****
***** STEP-8 *****
*****
*STEP
*DYNAMIC, EXPLICIT
, 0.001, ,
**, 0.0001D0, ,
**, 0.0027, ,
*CONNECTOR MOTION, TYPE=VELOCITY
200000, 1, 0.0
400000, 1, 0.0
*BOUNDARY, TYPE=VELOCITY
**200000, 4,4, 12560.0
**200000, 4,4, 25120
**200000, 4,4, 12560.0
**200000, 4,4, 25120
200000, 4,4, 6280
100000, 4,4, 6280
400000, 4,4, 6280
300000, 4,4, 6280
*SURFACE INTERACTION, NAME=GRATING
*FRICTION
0.0D0
**CONTACT      PAIR,      MECHANICAL
CONSTRAINT=PENALTY,
INTERACTION=GRATING
**SSPEUP, STOOLOUT-R
**SSPEUP, STOOLOUT-L
**.....
**OUTPUT, FIELD, TIME MARKS=YES, NUMBER
INTERVAL=20, OP=ADD
**OUTPUT, FIELD, NUMBER INTERVAL=20,
OP=ADD
**
**ELEMENT OUTPUT, ELSET=EWALL
**S, LE, PEEQ

```

```

**ELEMENT OUTPUT, ELSET=EDALL
**S, LE, PEEQ
**
**OUTPUT, HISTORY, FREQUENCY=999999,
OP=ADD
**NODE OUTPUT, NSET=NWALL
**U, COORD
**NODE OUTPUT, NSET=NDALL
**U, COORD
**
**
*ADAPTIVE MESH, ELSET=EWALL
*DIAGNOSTICS, CONTACT INITIAL
OVERCLOSURE=DETAIL
*RESTART, WRITE, OVERLAY
**
*END STEP
*****
***** STEP-9 *****
*****
*STEP
*DYNAMIC, EXPLICIT
, 0.001, ,
**, 0.0001D0, ,
**, 0.0027, ,
*CONNECTOR MOTION, TYPE=VELOCITY
200000, 1, 0.0
400000, 1, 0.0
*BOUNDARY, TYPE=VELOCITY
**200000, 4,4, 12560.0
**200000, 4,4, 25120
**200000, 4,4, 12560.0
**200000, 4,4, 25120
200000, 4,4, 6280
100000, 4,4, 6280
400000, 4,4, 6280
300000, 4,4, 6280

```

```

*SURFACE INTERACTION, NAME=GRATING
*FRICTION
0.0D0
**CONTACT PAIR, MECHANICAL
CONSTRAINT=PENALTY,
INTERACTION=GRATING
**SSPEUP, STOOLOUTR
**SSPEUP, STOOLOUTL
**.....
**OUTPUT, FIELD, TIME MARKS=YES, NUMBER
INTERVAL=20, OP=ADD
**OUTPUT, FIELD, NUMBER INTERVAL=20,
OP=ADD
**
**ELEMENT OUTPUT, ELSET=EWALL
**S, LE, PEEQ
**ELEMENT OUTPUT, ELSET=EDALL
**S, LE, PEEQ
**
**OUTPUT, HISTORY, FREQUENCY=999999,
OP=ADD
**NODE OUTPUT, NSET=NWALL
**U, COORD
**NODE OUTPUT, NSET=NDALL
**U, COORD
**
**ADAPTIVE MESH, ELSET=EWALL
*DIAGNOSTICS, CONTACT INITIAL
OVERCLOSURE=DETAIL
*RESTART, WRITE, OVERLAY
**
*END STEP
*****
***** STEP-10 *****
*****
*STEP

```

```

*DYNAMIC, EXPLICIT
.001, ,
**, 0.0001D0, ,
**, 0.0027, ,
*CONNECTOR MOTION, TYPE=VELOCITY
200000, 1, 0.0
400000, 1, 0.0
*BOUNDARY, TYPE=VELOCITY
**200000, 4,4, 12560.0
**200000, 4,4, 25120
**200000, 4,4, 12560.0
**200000, 4,4, 25120
200000, 4,4, 6280
100000, 4,4, 6280
400000, 4,4, 6280
300000, 4,4, 6280
*SURFACE INTERACTION, NAME=GRATING
*FRICTION
0.0D0
**CONTACT      PAIR,      MECHANICAL
CONSTRAINT=PENALTY,
INTERACTION=GRATING
**SSPEUP, STOOLOUT·R
**SSPEUP, STOOLOUT·L
**.....
*OUTPUT, FIELD, TIME MARKS=YES, NUMBER
INTERVAL=20, OP=ADD
**OUTPUT, FIELD, NUMBER INTERVAL=20,
OP=ADD
**
*ELEMENT OUTPUT, ELSET=EWALL
S, LE, PEEQ
*ELEMENT OUTPUT, ELSET=EDALL·R
S, LE, PEEQ
*ELEMENT OUTPUT, ELSET=EDALL·L
S, LE, PEEQ
**
**OUTPUT, HISTORY, FREQUENCY=999999,
OP=ADD
*NODE OUTPUT, NSET=NWALL
U, COORD
*NODE OUTPUT, NSET=NDALL·R
U, COORD
*NODE OUTPUT, NSET=NDALL·L
U, COORD
**
*ADAPTIVE MESH, ELSET=EWALL
*DIAGNOSTICS, CONTACT INITIAL
OVERCLOSURE=DETAIL
*RESTART, WRITE, OVERLAY
**
*END STEP

```

```

5. Boss Forming-2D
1 0 0.0000000 0.0000000 0.0000000
0.0000000 0
*KEYWORD $ al ol
Boss Forming-2D 0.0000000000000000 0.0000000000000000
*TITLE 0.00499999988824129-1.0000000000000000
~~~~~
$ 0.09749999642372131-9.64999961853027344
$----- 0.10000000149011612-10.0000000000000000
---$ $
$ CONTROL BLOCK *DEFINE_CURVE_TITLE
$----- y-direction
---$ $ lcid sidr sfa sfo offa
$ offo datyp
$ 2 0 0.0000000 0.0000000 0.0000000
*CONTROL_ADAPTIVE 0.0000000 0
$ adpfreq adptol adpopt maxlvl tbirth $ al ol
tdeath leadp ioflag 0.0000000000000000 0.0000000000000000
1.000e-04 0.2000000 8 0 0.0000000 0.00499999988824129 0.0000000000000000
0.0000000 0 0
~~~~~
$ 0.09749999642372131 0.34999999403953552
*CONTROL_TERMINATION 0.10000000149011612 0.0000000000000000
$ endtim endcyc dtmin endeng $
endmas *DEFINE_CURVE_TITLE
0.0100000 0 0.0000000 0.0000000 0.0000000 x-direction
$ $ lcid sidr sfa sfo offa
$----- offo datyp
---$ 40 0 0.0000000 0.0000000 0.0000000
$ DEFINE_CURVE BLOCK 0.0000000 0
$----- $ al ol
---$ 0.0000000000000000 0.0000000000000000
$ 0.00499999988824129-1.0000000000000000
$
~~~~~
*DEFINE_CURVE_TITLE 0.39750000834465027-39.7000007629394531
x-direction 0.40000000596046448-40.0000000000000000
$ $
offo datyp *DEFINE_CURVE_TITLE

```

Ydirection  
 \$ lecid sidr sfa sfo offa  
 offo datyp  
 41 0 0.000000 0.000000 0.000000  
 0.000000 0  
 \$ al o1  
 0.0000000000000000 0.0000000000000000  
 0.00499999988824129 0.0000000000000000  
 ~~~~~  
 0.39750000834465027 0.34999999403953552  
 0.40000000596046448 0.0000000000000000

\$  
 \*DEFINE\_CURVE\_TITLE  
 R1D1V5-X  
 \$ lecid sidr sfa sfo offa  
 offo datyp  
 49 0 0.000000 0.000000 0.000000  
 0.000000 0  
 \$ al o1  
 0.0000000000000000 0.0000000000000000  
 0.00499999988824129-5.0000000000000000

~::~~  
 0.08749999850988388-41.5000000000000000  
 0.09000000357627869-45.0000000000000000  
 \$  
 \*DEFINE\_CURVE\_TITLE  
 R1D1V5-Y  
 \$ lecid sidr sfa sfo offa  
 offo datyp  
 50 0 0.000000 0.000000 0.000000  
 0.000000 0  
 \$ al o1  
 0.0000000000000000 0.0000000000000000  
 0.00499999988824129 0.0000000000000000  
 ~::~~

0.08749999850988388 3.5000000000000000  
 0.09000000357627869 0.0000000000000000  
 \$  
 \*DEFINE\_CURVE\_TITLE  
 Undefined  
 \$ lecid sidr sfa sfo offa  
 offo datyp  
 51 0 0.000000 0.000000 0.000000  
 0.000000 0  
 \$ al o1  
 0.0000000000000000 0.0000000000000000  
 0.09000000357627869-45.0000000000000000

\$  
 \*DEFINE\_CURVE\_TITLE  
 straight  
 \$ lecid sidr sfa sfo offa  
 offo datyp  
 52 0 0.000000 0.000000 0.000000  
 0.000000 0  
 \$ al o1  
 0.0000000000000000 0.0000000000000000  
 0.00999999977648258-40.0000000000000000

\$  
 \$-----  
 ---\$  
 \$ MATERIAL & PART BLOCK  
 \$-----  
 ---\$

\$  
 \*MAT\_POWER\_LAW\_PLASTICITY\_TITLE  
 \$ mid ro e pr  
 k n src srp  
 1 2.700e-07 70000.000 0.3000000 112.70000  
 0.2316000 0.0000000 0.0000000



```

$ sigy vp scoor
0.0000000 0.0000000 4 8 0.0000000 0.0000000 0.0000000
$
*SECTION_SHELL_TITLE $ ts1 ts2 tt1 tt2 nsloc
spe ntloc
$ secid elform shrf nip propt 0.0100000 0.0100000 0.0100000 0.0100000 0.0000000
qr/irid icomp setyp 0.0000000
1 15 0.0000000 4.0000000 0.0000000 $
0.0000000 0 0 *PART
$ t1 t2 t3 t4 nloc wall0
marea $ pid secid mid eosid hgid
0.0100000 0.0100000 0.0100000 0.0100000 0.0000000 grav adpopt tmid
0.0000000 4 4 4 0
$ 0 0 0 0
*PART $
spe *MAT_RIGID_TITLE
$ pid secid mid eosid hgid $ mid ro e pr
grav adpopt tmid $ couple m alias
1 1 1 0 n 5 2.700e-07 70000.000 0.3000000 0.0000000
0 0 2 0 0.0000000 0.0000000
$ *MAT_RIGID_TITLE
$ mid ro e pr $ lco/a1 a2 a3 v1 v2
n couple m alias v3
4 8.000e-07 206000.00 0.3000000 0.0000000 0.0000000
0.0000000 0.0000000 $
$ cmo con1 con2 *SECTION_BEAM_TITLE
1.0000000 7.0000000 7.0000000 roll
$ lco/a1 a2 a3 v1 v2 $ secid elform shrf qr/irid cst
v3 scoor
0.0000000 5 8 0.0000000 0.0000000 0.0000000
$ 0.0000000
*SECTION_BEAM_TITLE $ ts1 ts2 tt1 tt2 nsloc
wall0 ntloc
$ secid elform shrf qr/irid cst 0.0100000 0.0100000 0.0100000 0.0100000 0.0000000

```

```

0.0000000
$
2 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000
$
4
*PART
roll
$
*CONTACT_2D_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURF
$ pid secid mid eosid hgid ACE
$ psid psidm sfact freq fs
grav adpopt tmid fd dc membs
5 5 5 0
0 0 0 0 1 2 0.0000000 0 0.0000000
$
0.0000000 0.0000000 0
$-----
$ tbirth tdeath sos som nds
---$
ndm ipf/cof init
$ BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION BLOCK 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0
$-----
0 0 0
---$
$
*SET_PART_LIST_TITLE
$
SET_PART_LIST
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID 3 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000
$ TYPEid dof vad lcid sf 1
vid death birth $
5 1 2 52 *SET_PART_LIST_TITLE
0.0000000 0 0.0000000 0.0000000 SET_PART_LIST
$
4 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000
$-----
5
---$
$
*CONTACT_2D_option1_option2 BLOCK *CONTACT_2D_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURF
$-----
ACE
---$
$ psid psidm sfact freq fs
$ fd dc membs
3 4 0.0000000 0 0.0000000
$
0.0000000 0.0000000 0
$ tbirth tdeath sos som nds
ndm ipf/cof init
1 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0
$
0 0 0
*SET_PART_LIST_TITLE
$
SET_PART_LIST
1 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000
1
$
0 0 0
*SET_PART_LIST_TITLE
$
SET_PART_LIST
$-----

```

```

----$
$ DATABASE_BINARY BLOCK
$-----
----$
$
$
$ dt/cycl      ledt      beam      npltc      psetid
istats  tstart      iavg
$
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
1.000e-04      0      0      0      0
0 0.0000000      0
$
$-----
----$
$ NODE BLOCK
$-----
----$
$
$
*NODE
      1      13.000000000000      0.000000000000
0.000000000000      0      0
      2      13.500000000000      0.000000000000
0.000000000000      0      0
~~~~~
      2236      65.060821533203      9.6565723419189
0.000000000000      0      0
      2237      65.027183532715      9.7684125900269
0.000000000000      0      0
      2238      65.006820678711      9.8834114074707
0.000000000000      0      0
$
$-----
----$

```

```

$ ELEMENT_BEAM BLOCK
$-----
----$
$
$
*ELEMENT_BEAM
      2081      4      2210      2211      0      0
0      0      0      0
      2082      4      2212      2213      0      0
0      0      0      0
~~~~~
      2106      5      2217      2220      0      0
0      0      0      0
      2107      5      2220      2221      0      0
0      0      0      0
$
$-----
----$
$ ELEMENT_SHELL BLOCK
$-----
----$
$
$
*ELEMENT_SHELL
$  eid      pid      n1      n2      n3      n4
      1      1      1710      1711      1814      1813
      2      1      2      3      250      249
~~~~~
      2078      1      2203      2204      127      128
      2079      1      2204      2205      126      127
      2080      1      2205      124      125      126
*END

```

6. Boss Forming-3D

```

$
*KEYWORD
$
*TITLE
Boss Forming-3D
$
$-----$
$ CONTROL BLOCK
$-----$
$
$
*CONTROL_ALE
$      det      nadv      meth      afac
bfac      cfac      dfac      efac
      3      1      1 0.0000000 0.0000000
0.0000000 1.0000000 0.0000000
$      start      end      aafac      vfact      vlimit
ebc
0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000
0
$
*CONTROL_TERMINATION
$      endtim      endeye      dtmin      endeng
endmas
0.6000000      0 0.0000000 0.0000000 0.0000000
$
$-----$
$ DEFINE_COORDINATE_SYSTEM BLOCK
$-----$
*DEFINE_COORDINATE_SYSTEM_TITLE
$      cid      xo      yo      zo      xl
yl      zl
$      xp      yp      zp
1-1.0000000 0.0000000 0.0000000-0.2928932

```

```

0.7071068 0.0000000
-0.5917517-0.4082483-0.8164966
$
$-----$
$ DEFINE_CURVE BLOCK
$-----$
$
$
*DEFINE_CURVE_TITLE
fast-Y
$      lcid      sidr      sfa      sfo      offa
offo      datyp
      5      0 0.0000000 0.0000000 0.0000000
0.0000000      0
$      al      ol
0.000000000000000000 0.000000000000000000
0.60000002384185791-219.910003662109875
$
*DEFINE_CURVE_TITLE
fast-X
$      lcid      sidr      sfa      sfo      offa
offo      datyp
      15      0 0.0000000 0.0000000 0.0000000
0.0000000      0
$      al      ol
0.000000000000000000 0.000000000000000000
0.00047619000542909-1.58754014968872070
~~~~~
0.59952378279010254-36.0394630432128906
0.60000002384185791-34.9999885559082031
$
*DEFINE_CURVE_TITLE
fast-Z
$      lcid      sidr      sfa      sfo      offa
offo      datyp
      16      0 0.0000000 0.0000000 0.0000000

```

```

0.0000000      0
$              al              ol
0.0000000000000000 0.0000000000000000
0.00047619000542909 17.83725357055666406
~~~~~
0.59952378273010254-11.9849748611450195
0.60000002384185791 0.0000000000000000
$
*DEFINE_CURVE_TITLE
middle-Y
$      lcid      sidr      sfa      sfo      offa
offo    datyp
          19          0 0.0000000 0.0000000 0.0000000
0.0000000      0
$              al              ol
0.0000000000000000 0.0000000000000000
1.20000004768371582-439.822967529296875
$
*DEFINE_CURVE_TITLE
middle-X
$      lcid      sidr      sfa      sfo      offa
offo    datyp
          21          0 0.0000000 0.0000000 0.0000000
0.0000000      0
$              al              ol
0.0000000000000000 0.0000000000000000
0.00047619000542909-1.57386195659637451
~~~~~
1.19904756546020508-39.1328048706054688
1.19952380657196045-36.0531349182128906
1.20000004768371582-35.0003356933593750
$
*DEFINE_CURVE_TITLE
middle-Z
$      lcid      sidr      sfa      sfo      offa
offo    datyp
          25          0 0.0000000 0.0000000 0.0000000
0.0000000      0
$              al              ol
0.0000000000000000 0.0000000000000000
0.00047619000542909 17.8404674530029297
~~~~~
1.79952383041381836-11.9817028045654297
1.79999995231628418-0.21596349775791168
$
*DEFINE_CURVE_TITLE
slow-X
$      lcid      sidr      sfa      sfo      offa
offo    datyp
          24          0 0.0000000 0.0000000 0.0000000
0.0000000      0
$              al              ol
0.0000000000000000 0.0000000000000000
0.00047619000542909-1.56930267810821533
~~~~~
1.79952383041381836-36.0576896667480469
1.79999995231628418-35.0003356933593750
$
*DEFINE_CURVE_TITLE
slow-Z
$      lcid      sidr      sfa      sfo      offa
offo    datyp
          25          0 0.0000000 0.0000000 0.0000000
0.0000000      0
$              al              ol
0.0000000000000000 0.0000000000000000
0.00047619000542909 17.8404674530029297
~~~~~
1.79952383041381836-11.9817028045654297
1.79999995231628418-0.21596349775791168
$
*DEFINE_CURVE_TITLE

```

```

slow-Y
$   lcid   sidr   sfa   sfo   offa
offo  datyp
      28      0 0.0000000 0.0000000 0.0000000
0.0000000      0
$         al           ol
0.000000000000000000 0.000000000000000000
1.79999995231628418-659.784375000000000
$
$-----$
$ MATERIAL & PART BLOCK
$-----$
$
*MAT_RIGID_TITLE
$   mid   ro   e   pr
n  couple   m  alias
      3 8.000e-07 21000.000 0.3000000 0.0000000
0.0000000 0.0000000
$   cmo   con1   con2
1.0000000 7.0000000 7.0000000
$   lco/a1   a2   a3   v1   v2
v3
0.0000000
$
*SECTION_SHELL_TITLE
man
$   secid  elform  shrf   nip  propt
qr/irid  icomp  setyp
      3      0 0.0000000 0.0000000 0.0000000
0.0000000      0      0
$   t1   t2   t3   t4   nloc
marea
0.0100000 0.0100000 0.0100000 0.0100000 0.0000000
0.0000000
$

```

```

*PART
man
$   pid  secid  mid  eosid  hgid
grav  adpopt  tmid
      3      3      3      0
0      0      0      0
$
*MAT_RIGID_TITLE
$   mid   ro   e   pr
n  couple   m  alias
      8 7.000e-06 206000.00 0.3000000 0.0000000
0.0000000 0.0000000
$   cmo   con1   con2
1.0000000 7.0000000 7.0000000
$   lco/a1   a2   a3   v1   v2
v3
0.0000000
$
*SECTION_SHELL_TITLE
wall
$   secid  elform  shrf   nip  propt
qr/irid  icomp  setyp
      8      0 0.0000000 0.0000000 0.0000000
0.0000000      0      0
$   t1   t2   t3   t4   nloc
marea
0.0100000 0.0100000 0.0100000 0.0100000 0.0000000
0.0000000
$
*PART
wall
$   pid  secid  mid  eosid  hgid
grav  adpopt  tmid
      8      8      8      0
0      0      0      0

```

```

$ 0.0000000
*MAT_POWER_LAW_PLASTICITY_TITLE $
$ *SECTION_SHELL_TITLE
$ mid ro e pr roll
k n src srp $ secid elform shrf nip propt
10 0.0002700 70000.000 0.3000000 112.70000
qr/irid icomp setyp
0.2316000 0.0000000 0.0000000 21 0 0.0000000 0.0000000 0.0000000
$ sigy vp 0.0000000 0 0
0.0000000 0.0000000 $ t1 t2 t3 t4 nloc
$ marea
*SECTION_SOLID_ALE_TITLE 0.0100000 0.0100000 0.0100000 0.0100000 0.0000000
specimen 0.0000000
$ secid elform aet $
10 5 0 *PART
$ afac bfac cfac dfac start roll
end aafac $ pid secid mid eosid hgid
0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000 grav adpopt tmid
0.0000000 0.0000000 21 21 21 0
$ 0 0 0 0
*PART $
specimen $-----$
$ pid secid mid eosid hgid $ EQUATIONS OF STATE BLOCK
$-----$
grav adpopt tmid $
10 10 10 0 $
0 0 0 0 $
$ *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL_TITLE
*MAT_RIGID_TITLE $ eosid c0 c1 c2 c3
n couple m alias c4 c5 c6
21 0.0008000 206000.00 0.3000000 0.0000000 1 1.0000000 1.0000000 1.0000000 1.0000000
0.0000000 0.0000000 1.0000000 1.0000000 1.0000000
$ cmo con1 con2 $ e0 v0
1.0000000 2.0000000 6.0000000 0.0000000 0.0000000
$ lco/a1 a2 a3 v1 v2 $-----$
v3 $ SET BLOCK

```

```

$-----$
$
*SET_NODE_LIST_TITLE
Node Group 1
  1 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000
  37803
$
*SET_NODE_LIST_TITLE
Node Group 2
  2 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000
  37803
$
*SET_SEGMENT_TITLE
mal-sur
  2 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000
  4118 4116 4126 4128
  4120 4118 4128 4130
  4122 4120 4130 4132
  ~~~~~
  4466 4117 4116 4116
  4124 4472 4122 4122
$
*SET_SEGMENT_TITLE
wall-sur
  3 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000
  4480 4482 4488 4487
  4482 4484 4490 4489
  4487 4488 4494 4493
  ~~~~~
  4479 4900 4906 4906
  4479 4906 4480 4480
$
*SET_SEGMENT_TITLE
rool-surf
  4 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000

```

|                                     |                 |             |           |      |       |
|-------------------------------------|-----------------|-------------|-----------|------|-------|
| 35388                               | 35389           | 35355       | 35354     |      |       |
| 35389                               | 35390           | 35356       | 35355     |      |       |
| ~~~~~                               |                 |             |           |      |       |
| 35383                               | 35384           | 37798       | 37797     |      |       |
| 35384                               | 35385           | 37799       | 37798     |      |       |
| 35385                               | 35386           | 37800       | 37799     |      |       |
| 35386                               | 35354           | 37768       | 37800     |      |       |
| \$                                  |                 |             |           |      |       |
| \$-----\$                           |                 |             |           |      |       |
| \$ BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION BLOCK |                 |             |           |      |       |
| \$-----\$                           |                 |             |           |      |       |
| \$                                  |                 |             |           |      |       |
| \$                                  |                 |             |           |      |       |
| *BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID   |                 |             |           |      |       |
| \$                                  | TYPEid          | dof         | vad       | lcid | sf    |
| vid                                 | death           | birth       |           |      |       |
|                                     | 21              | 1           |           | 2    | 15    |
| 0.0000000                           |                 | 0 0.0000000 | 0.0000000 |      |       |
|                                     | 21              | 3           |           | 2    | 16    |
| 0.0000000                           |                 | 0 0.0000000 | 0.0000000 |      |       |
|                                     | 21              | 6           |           | 2    | 5     |
| 0.0000000                           |                 | 0 0.0000000 | 0.0000000 |      |       |
| \$                                  |                 |             |           |      |       |
| \$-----\$                           |                 |             |           |      |       |
| \$ CONTACT BLOCK                    |                 |             |           |      |       |
| \$-----\$                           |                 |             |           |      |       |
| \$                                  |                 |             |           |      |       |
| \$                                  |                 |             |           |      |       |
| *CONTACT_SURFACE_TO_SURFACE_TITLE   |                 |             |           |      |       |
|                                     | 0CONTACT        |             | SURFACE   |      | TO    |
|                                     | SURFACE(type=3) |             |           |      |       |
| \$                                  | ssid            | msid        | sstyp     |      | mstyp |
| sboxid                              | mboxid          | spr         | mpr       |      |       |
|                                     | 10              | 3           | 3         |      | 0     |
| 0                                   | 0               | 0           | 0         |      |       |





| n5    | n6    | n7    | n8    |       |       |  |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| 15196 |       | 10    | 37804 | 37805 | 37806 |  |
| 37807 | 37813 | 37814 | 37815 | 37816 |       |  |
| 15197 |       | 10    | 37805 | 37808 | 37809 |  |
| 37806 | 37814 | 37817 | 37818 | 37815 |       |  |
| 15198 |       | 10    | 37807 | 37806 | 37810 |  |
| 37811 | 37816 | 37815 | 37819 | 37820 |       |  |

```

~~~~~
67607          10  213918  213921  213924
213922 214692 214695 214698 214696
67608          10  183567  214669  214692
183591 112683 187255 187278 112707
67609          10  214669  214671  214695
214692 187255 187257 187281 187278
67610          10  183591  214692  214696
183594 112707 187278 187282 112710
67611          10  214692  214695  214698
214696 187278 187281  37808 187282

```

```

$
$-----$
$ ELEMENT_SHELL BLOCK
$-----$
$
$

```

```

*ELEMENT_SHELL
$  eid  pid  n1  n2  n3  n4
   4083   3  4116  4117  4126  4126
   4084   3  4118  4116  4126  4128

```

```

~~~~~
15193          21  37798  37799  35385
35384
15194          21  37799  37800  35386
35385
15195          21  37800  37768  35354
35386
*END

```

```

7. Splitting-2D
0.0000000000000000 0.0000000000000000
0.00100000004749745-0.10000000149011612
$
$
*KEYWORD
Splitting-2D
0.01579999923706055-8.0000000000000000
*TITLE
0.01590000092983246-7.900000009536743164
$
$-----$
$ MATERIAL & PART BLOCK
$-----$
$ CONTROL BLOCK
$-----$
$
$ *MAT_POWER_LAW_PLASTICITY_TITLE
$ mid ro e pr
$ k n src srp
1 2.700e-07 70000.000 0.3000000 156.58501
0.2920000 0.0000000 0.0000000
$ sigy vp
0.0000000 0.0000000
$
*CONTROL_ADAPTIVE
$ adpfreq adptol adpopt maxlvl tbirth
tdeath leadp ioflag
0.0015900 0.2000000 8 0
0.0000000 0.0000000 0 0
$
*CONTROL_TERMINATION
$ endtim endcyc dtmin endeng
endmas
0.1590000 0 0.0000000 0.0000000 0.0000000
$
$-----$
$ DEFINE_CURVE BLOCK
$-----$
$
$
*DEFINE_CURVE_TITLE
curve
$ lcid sidr sfa sfo offa
offo datyp
1 0 0.0000000 0.0000000 0.0000000
0.0000000 0
$ al ol
0.0000000000000000 0.0000000000000000
0.00100000004749745-0.10000000149011612
0.01579999923706055-8.0000000000000000
0.01590000092983246-7.900000009536743164
$-----$
$ MATERIAL & PART BLOCK
$-----$
$ CONTROL BLOCK
$-----$
$
$ *MAT_POWER_LAW_PLASTICITY_TITLE
$ mid ro e pr
$ k n src srp
1 2.700e-07 70000.000 0.3000000 156.58501
0.2920000 0.0000000 0.0000000
$ sigy vp
0.0000000 0.0000000
$
*SECTION_SHELL_TITLE
spec
$ secid elform shrf nip propt
qr/irid icomp setyp
1 15 0.0000000 4.0000000 0.0000000
0.0000000 0 0
$ t1 t2 t3 t4 nloc
marea
0.0010000 0.0010000 0.0010000 0.0010000 0.0000000
0.0000000
$
*PART
spec
$ pid secid mid eosid hgid
grav adpopt tmid
1 1 1 1 0

```



|                                       |                       |           |           |       |           |                  |                                 |                                 |
|---------------------------------------|-----------------------|-----------|-----------|-------|-----------|------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 2                                     |                       |           |           |       |           | \$               |                                 |                                 |
| \$                                    |                       |           |           |       |           | *NODE            |                                 |                                 |
| *CONTACT_2D_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURF |                       |           |           |       |           | 266              | 17.257062911987 0.0060740485787 |                                 |
| ACE                                   |                       |           |           |       |           | 0.00000000000000 | 0 0                             |                                 |
| \$                                    | psid                  | psidm     | sfact     | freq  | fs        | 268              | 17.235378265381 0.0171510949731 |                                 |
| fd                                    | dc                    | membs     |           |       |           | 0.00000000000000 | 0 0                             |                                 |
|                                       | 1                     | 2         | 0.0000000 | 0     | 0.0000000 | 269              | 17.217016220093 0.0331433787942 |                                 |
| 0.0000000                             | 0.0000000             |           | 0         |       |           | 0.00000000000000 | 0 0                             |                                 |
| \$                                    | tbirth                | tdeath    | sos       | som   | nds       |                  |                                 |                                 |
| ndm                                   | ipf/cof               | init      |           |       |           |                  |                                 |                                 |
| 0.0000000                             | 0.0000000             | 0.0000000 | 0.0000000 |       | 0         | 2260             | 16.802326202393-2.0000004768372 |                                 |
| 0                                     | 0                     | 0         |           |       |           | 0.00000000000000 | 0 0                             |                                 |
| \$                                    |                       |           |           |       |           | 2262             | 17.000000000000-1.8000009059906 |                                 |
| \$                                    | -----                 |           |           |       |           | \$               | 0.00000000000000                | 0 0                             |
| \$                                    | DATABASE_OPTION BLOCK |           |           |       |           | \$               | 2263                            | 17.000000000000-2.0000007152557 |
| \$                                    | -----                 |           |           |       |           | \$               | 0.00000000000000                | 0 0                             |
| \$                                    |                       |           |           |       |           | \$               |                                 |                                 |
| \$                                    |                       |           |           |       |           | \$               |                                 |                                 |
| \$                                    | -----                 |           |           |       |           | \$               |                                 |                                 |
| *DATABASE_RCFORC                      |                       |           |           |       |           | \$               | ELEMENT_BEAM BLOCK              |                                 |
| 0.0007950                             |                       |           |           |       |           | \$               | -----                           |                                 |
| \$                                    |                       |           |           |       |           | \$               |                                 |                                 |
| \$                                    | -----                 |           |           |       |           | \$               |                                 |                                 |
| \$                                    | DATABASE_BINARY BLOCK |           |           |       |           | \$               |                                 |                                 |
| \$                                    | -----                 |           |           |       |           | \$               |                                 |                                 |
| \$                                    |                       |           |           |       |           | \$               |                                 |                                 |
| \$                                    | dt/cycl               | lcdt      | beam      | npltc | psetid    | 217              | 2 266 268 0 0                   |                                 |
| istats                                | tstart                | iavg      |           |       |           | 0                | 0 0 0 0                         |                                 |
| \$                                    |                       |           |           |       |           | 218              | 2 268 269 0 0                   |                                 |
| \$                                    | -----                 |           |           |       |           | \$               | 0 0 0 0                         |                                 |
| *DATABASE_BINARY_D3PLOT               |                       |           |           |       |           | 274              | 2 325 326 0 0                   |                                 |
| 0.0007950                             |                       | 0         |           | 0     | 0         | 0                | 0 0                             |                                 |
| 0                                     | 0                     | 0.0000000 |           | 0     |           | 275              | 2 326 327 0 0                   |                                 |
| \$                                    |                       |           |           |       |           | 0                | 0 0 0 0                         |                                 |
| \$                                    | -----                 |           |           |       |           | \$               |                                 |                                 |
| \$                                    | NODE BLOCK            |           |           |       |           | \$               | 276                             | 2 327 328 0 0                   |
| \$                                    | -----                 |           |           |       |           | \$               | 0 0 0 0                         |                                 |
| \$                                    |                       |           |           |       |           | \$               |                                 |                                 |
| \$                                    | -----                 |           |           |       |           | \$               |                                 |                                 |

\$ ELEMENT\_SHELL BLOCK  
\$-----\$

\$  
\$

\*ELEMENT\_SHELL

| \$ | eid | pid | n1  | n2  | n3  | n4  |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|    | 277 | 1   | 329 | 330 | 333 | 332 |
|    | 278 | 1   | 330 | 331 | 334 | 333 |

~~~~~

|  |      |   |      |      |      |      |
|--|------|---|------|------|------|------|
|  | 1135 | 1 | 2251 | 2259 | 2262 | 2254 |
|  | 1136 | 1 | 2259 | 2260 | 2263 | 2262 |

\*END