卒業論文

熱・構造連成解析を用いた切削による 表面加工層の残留応力評価 p.1~p.51 完

平成 28 年 1 月提出 指導教員 酒井 信介 教授 140252 山本 賢明

目次

目次

第1章	緒論	. 8
1.1	研究の背景	. 9
1.2	従来の研究	10
1.3	本研究の目的	10
1.4	本論文の構成	11
第2章	研究手法	12
2. 1	緒言	13
2. 2	旋削試験(Zhou ら, 2014)	13
2. 2.	1 供試材および試験片	13
2. 2.	2 試驗片加工条件	13
2. 2.	3 X 線応力測定条件	14
2.3	解析モデル	15
2. 3.	1 解析モデルの概要	15
2. 3.	2 材料構成則	18
2. 3.	3 熱物性值	20
2. 3.	4 摩擦モデル	21
2. 3.	5 発熱	21
2. 3.	6 残留応力の測定	22
第3章	解析結果	23
3. 1	緒言	24
3. 2	Zhou らによる実験と対応する解析との比較	25
3. 2.	1 切りくず形状	25
3. 2.	2 切削温度	26
3. 2.	 相当塑性ひずみ 	27
3. 2.	4 残留応力	29
3.3	考察	32
3.4	加工条件が残留応力に及ぼす影響	34
3. 4.	1 切り込み深さ	34
3. 4.	 クーラントへの熱伝達率 	35
3. 4.	3 工具-被削物間の摩擦係数	36
3.5	加工条件が残留応力に及ぼす影響の考察	37
第4章	結論	39
4. 1	総括	40
4. 2	今後の展望	40
付録A	輻射の影響	41
付録 B	X 線応力測定法概説	43

谢辞

図目次

4

Fig. 1-1 EBSD による試験片の表面加工層	9
Fig. 2-1 旋削と二次元切削との対応	16
Fig. 2-2 解析モデルの全体図	16
Fig. 2-3 応力-ひずみ曲線の温度依存性	19
Fig. 2-4 応力ひずみ曲線のひずみ速度依存性	19
Fig. 2-5 残留応力の測定点	22
Fig. 3-1 切削加工における変形域の概略	24
Fig. 3-2 解析における切りくず形状	25
Fig. 3-3 切削時の温度分布(v _c =200m/min, a _p =0.3mm)	26
Fig. 3-4 切削時の温度分布(v _c =350m/min, a _p =0.3mm)	27
Fig. 3-5 切削時の相当塑性ひずみ(vc=200m/min, ap=0.3mm)	28
Fig. 3-6 切削時の相当塑性ひずみ(vc=350m/min, ap=0.3mm)	28
Fig. 3-7 残留応力の試験結果(v=200m/min)[3]	30
Fig. 3-8 残留応力の試験結果(v=350m/min)[3]	30
Fig. 3-9 残留応力の解析結果(v=200m/min)	31
Fig. 3-10 残留応力の解析結果(va=350m/min)	31
Fig. 3-11 熱膨張 0 モデルの残留応力分布	33
Fig. 3-12 切削直後の残留応力分布	33
Fig. 3-13 切り込み深さ ap=0.1mm における残留応力分布	34
Fig. 3-14 切り込み深さ ap=0.5mm における残留応力分布	34
Fig. 3-15 クーラントの熱伝導率 <i>h</i> =5kW/m ² K における残留応力分布	35
Fig. 3-16 クーラントの熱伝導率 <i>h</i> =25kW/m ² K における残留応力分布	35
Fig. 3-17 摩擦係数µ =0.2 における残留応力分布	36
Fig. 3-18 摩擦係数µ =0.6 における残留応力分布	36
Fig. 3-19 クーラントへの熱伝達率 <i>h</i> =5kW/m ² K における切削時の温度分布	38
Fig. 3-20 クーラントへの熱伝達率 <i>h</i> =25kW/m ² K における切削時の温度分布	38
Fig. B-1 Direction of stress or strain in a Coordinate system	44
Fig. B-2 Schematic illustration of ISO-inclination method and side inclin	nation
method	46

表目次

表目次

Table 2-1 Chemical composition [mass%]	13
Table 2-2 Specifications of cutting tool	. 14
Table 2-3 Experimental conditions for machining Inconel 718	. 14
Table 2-4 Conditions of X-ray residual stress analysis	. 14
Table 2-5 解析条件	. 17
Table 2-6 Johnson-Cook parameters for Inconel 718[7]	. 18
Table 2-7 Al2O3-SiCw に使用した物性値	. 18
Table 2-8 Inconel 718 の比熱および熱伝導率[8]	20
Table 2-9 Inconel 718 の線膨張係数	20

第1章 緒論

1.1 研究の背景

繰り返し荷重を受ける機器は設計寿命に基づき運用がなされ,試験による機械的性質, 表面形状の評価に基づいて設計寿命が設定される.一般に,引っ張りの残留応力は疲労強 度を低下させ,圧縮の残留応力は疲労寿命を長くするなど,残留応力は疲労強度に大きな 影響を及ぼすことが知られている.ゆえに,材料強度の適切な把握には加工時に材料内部 に生じる残留応力を適切に制御することが重要である.

材料の切削加工に際しては、一般にトライアンドエラーや経験に基づき加工条件の設定 がなされる.しかしながら、難削材として知られる Ni 基超合金やチタン合金の加工では残 留応力のばらつきが大きく、材料の残留応力を適切にするために莫大な時間と費用を必要 とする.したがって、切削加工を表現した解析モデルを構築し、様々な加工条件が残留応 力に及ぼす影響を検討することができれば、材料加工における時間の短縮、費用削減、お よびシミュレーション精度の向上が期待できる.



Fig. 1-1 EBSD による試験片の表面加工層

1.2 従来の研究

表面仕上げが疲労寿命に与える影響については、多くの研究が行われてきた.当研究室 卒業生の桐谷[1]により行われた先行研究では、表面仕上げが異なる数種類のNi基超合金 Inconel 718 について低サイクル疲労試験を行い、表面仕上げが低サイクル疲労寿命に与え る影響を定量的に評価する手法を考案し、その有効性を確認した.また、当研究室卒業生 の磯崎[2]は、表面仕上げの疲労寿命への影響評価に向けて、Wilkinson 法とX線回析によ る残留応力の測定結果をもとにした残留応力分布の推定手法を提案した.

一方で、切削加工条件が残留応力に与える影響を明らかにしようとする研究も盛んに行われている. Zhou らは、ジェットエンジンに用いられる材料である Ni 基超合金 Inconel 718 の旋削試験により、切削速度やチップなどの加工条件が材料の微視組織、および残留応力に与える影響を明らかにした[3].

切削現象を有限要素法解析により再現しようとする試みも数多く行われている。笹原らは、熱伝導解析と弾塑性解析を連成し、加工変質層生成過程のシミュレーションを行った[4]. また、Outeiro らは、ひずみ速度、温度による硬化・軟化の影響を考慮した材料構成則である Johnson-cook の式、および Cockroft & Latham の延性破壊条件式を適用した二次元モデルを構築し、切りくずの生成、および残留応力の発生を再現した[5].

上記のように,有限要素法解析は切削現象における切りくずや表面加工層の生成を予測 する有効な手段であると考えられる.実際の加工では,材料の残留応力は加工条件によっ て敏感に変化することが知られているが,切削加工条件が残留応力に与える影響を解析に より予測した事例は未だ少ない.

1.3 本研究の目的

本研究の目的は、加工条件が残留応力に及ぼす影響を明らかにすることである.まず有 限要素法により、切削および切削後の冷却過程を再現する二次元解析モデルを構築する. 解析モデルについては、Zhou らによる旋削試験[1]で得られた残留応力と比較し、妥当性の 検証を行う.次に、構築したモデルに対し、加工条件を変更して解析を行うことで様々な 加工条件が残留応力に与える影響を明らかにする.

1.4 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す.

第1章「緒論」

本研究の背景,従来の研究,本研究の目的について述べる.

第2章「研究手法」

解析モデルとの比較・妥当性の検証に用いた, Zhou らによる旋削試験[1]について述べる. また,本研究で構築した解析モデルについての詳細を説明する.

第3章「解析結果」

解析の結果をまとめ、実験との比較および妥当性の検証を行う.また、様々な加工条件が 残留応力に与える影響を明らかにする.

第4章「結論」

本研究における結論と今後の展望について述べる.

第2章 研究手法

2.1 緒言

本研究では、切削により生じる残留応力を予測する解析モデルを構築し、旋削試験(Zhou ら、2014)から得られた残留応力との比較を行い、解析モデルの妥当性を検証する. さらに 構築したモデルに対し、加工条件を変更して解析を行うことで、様々な加工条件が残留応 力に及ぼす影響を明らかにする.

2.2 節では, Zhou らが行った旋削試験,および X 線回析装置による残留応力測定条件について述べる. 2.3 節では解析モデルの詳細を説明する.

2.2 旋削試験(Zhou ら, 2014)

2.2.1 供試材および試験片

Zhou らによる旋削試験で用いられた供試材は,ジェットエンジン材料の Ni 基超合金 Inconel 718 (Alloy718)である. Inconel 718 は,溶体化処理を施した後,時効処理を施して おり,ロックウェル硬さは HRC 45±1 である. Table 2-1 に Inconel 718 の化学成分を示す. また,試験片の形状はΦ70mm×200mm の丸棒である.

Table 2-1 Chemical composition [mass%]

Ni	\mathbf{Cr}	Nb	Mo	Ti	Al	С	Si	Fe
53.8	18.1	5.5	2.9	1	0.55	0.25	0.04	bal.

2.2.2 試験片加工条件

工具材として、ウィスカー強化セラミックの Al₂O₃-SiC_wが使用された.工具の幾何形状 および機械特性を Table 2・2 に示す.また、加工条件を Table 2・3 に示す.インサートは工 具ホルダ CRSNL3225P12 により、逃げ角 6°、すくい角-6°に固定した.また、すべて の旋削試験でクーラントとして Sitala D 201.03 (Shell)を使用し、直径 5 mm のノズル 5 本 から、40 L min⁻¹で供給を行った.切削速度は、実際の加工で推奨される $v_c=200$ m min⁻¹ および $v_c=350$ m min⁻¹の 2 通りとし、送りと切り込みはそれぞれ f=0.1 mm rev⁻¹、 $a_p=0.3$ mm の一定とした.なお、旋削試験は工作機械 SMT200 CNC により行われた.

		-
Details og cutting tools	Units	Al_2O_3 - SiC_w
Inserts		CC670
Composition		Al ₂ O ₃ 80%
		${ m SiC_w}\ 20\%$
Edge radius(r_{β})	μm	$20 \sim 25$
Chamfer		$0.1\! imes\!20^\circ$
Density	gm ⁻³	3.74
Hardness	HV	18
Young's modulus	GPa	390
Rupture strength	MPa	900

Table 2-2 Specifications of cutting tool

Table 2-3 Experimental conditions for machining Inconel 718

Workpiece	Inconel 718		
Tool material	Al_2O_3 - SiC_w		
Inserts Model Number	CRSNL3225P12, CC670		
Tool rake angle	-6°		
Tool clearance angle	$+6^{\circ}$		
Feed rate (mm/rev.)	0.1		
Cutting speed (m/min)	200, 350		
Depth of cut (mm)	0.3		
Cutting condition	Wet		

2.2.3 X 線応力測定条件

測定 ψ 角(deg)

回析装置は DRON-3M を使用した.測定は軸方向応力および周方向応力に対して実施した.測定毎に,電解研磨により表面を 20µm ずつ取り除くことで深さ方向の残留応力分布 を測定した.測定条件を Table 2-4 に示す.

	aj robradar birobb anarj bib
特性X線	Co-Ka
回折面	311

Table 2-4 Conditions of X-ray residual stress analysis

-30, -20, -10, 0, 10, 20, 30

2.3 解析モデル

本節では、2次元切削モデルを構築し、残留応力の解析を行う手法を説明する.まず2.3.1 項で解析モデルの概要について説明する.

2.3.1 解析モデルの概要

本研究では, Livermore Software Technology 社の有限要素法解析ソフトウェア LS-DYNA を用いて解析を行った.

一般的に、旋盤加工は3次元でモデル化する必要があるが、3次元的な形状をそのままモ デル化した場合、計算時間が膨大になる.そこで、本研究では切削現象を二次元平面とし てモデル化した.これは旋削でいうと、回転面を平面上に引き伸ばしたモデルと考えるこ とができ、切削方向が回転方向、奥行き方向が送り方向に対応する(Fig. 2-1).切削により 生じる残留応力に影響を与える因子としては、主に材料の温度勾配と塑性変形の2つがあ る.特に、引っ張りの残留応力については温度勾配による熱膨張が大きく影響すると考え られる.そこで、本研究では構造解析と熱伝導解析とを連成し、切削時の発熱やクーラン トへの熱伝達を考慮したモデルを構築した.構造解析には動的陽解法を使用した.熱伝導 解析については陰解法を使用し、時間積分法として Crank-Nicholson 法を採用した.

まず解析モデルの全体図を Fig. 2・2 に示す.モデルは、被削物、工具、NULL パートの3 つから構成される. NULL パートは被削物からクーラントへの熱伝達を模擬するためのパートである.要素は、いずれも 2 次元ソリッド要素(平面ひずみ)、積分点1とし、工具と NULL パートは剛体とした.メッシュサイズは 20µm とし、被削物については要素の大変 形による計算の安定性や精度の低下を防ぐため、数ステップ毎にメッシュを切りなおすア ダプティブリメッシュ機能を使用した.なお、本解析の単位系は[mm][ton][sec]とした.詳細な解析条件を Table 2-5 に示す.





解析	構造解析:動的陽解法
	熱伝導解析:陰解法(Crank-Nicholson 法)
要素	2 次元ソリッド要素(平面ひずみ),積分点 1
境界条件	被削物:下面 xy 固定
	工具:y方向固定
	-x 方向に一定速度(v _c =200, 350m/min)
熱境界条件	被削物-工具間: <i>h</i> =1000kW/m ² K
(熱伝達)	被削物-クーラント: <i>h</i> =10 kW/m ² K
材料	被削物:Inconel 718
	工具:Al ₂ O ₃ -SiC _w
単位系	[ton][mm][sec]
その他	アダプティブリメッシュ
	(メッシュサイズ: 20μm)

Table 2-5 解析条件

2.3.2 材料構成則

現実の切削においては、切削速度 100m/min 程度で最大のひずみ速度が10⁴程度に達する [6]. また、工具先端の温度は 1000℃以上にまで上昇し、被削物内に非常に大きな温度差が 生じる. ひずみ速度・温度の上昇は材料の硬化、軟化を生じ、材料の応力–ひずみ曲線に 大きな影響を与えるため、それらの影響を考慮する必要がある.本研究では、応力–ひず み曲線の温度・ひずみ速度依存性を考慮した材料構成則である、Johnson-cook モデルを用 いた.以下に Johnson-cook の式を示す.

$$\sigma_{y} = (A + B\varepsilon^{n}) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon_{p}}}{\dot{\varepsilon_{0}}} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}} \right)^{m} \right\}$$
(2.1)

ここで、*εp*は相当塑性ひずみ、T は絶対温度であり、添え字 melt および room はそれぞ れ材料の融点、室温を示す.また、定数 *A、B、C、D、m、n* は、それぞれ材料パラメータ である.本研究で使用した Inconel 718 の Johnson-cook パラメータを Table 2-6 に示す. この材料パラメータは、準静的ねじり試験(ひずみ速度 0.01 s⁻¹)、およびねじり型ホプキン ソン棒法(ひずみ速度 3000 s⁻¹)により算出されたものである[7].このパラメータを用いて算 出した、種々の温度、ひずみ速度における応力-ひずみ曲線を Fig. 2-3、Fig. 2-4 に示す. これらから、ひずみ速度よりも材料の温度変化の方が応力-ひずみ曲線に与える影響が大 きいことがわかる.

また、本解析で使用した工具材 Al_2O_3 -SiC_wの物性値を Table 2-7 に示す.工具は剛体としてモデル化したため、ヤング率、ポアソン比は接触計算のみに使用している.

A[MPa]	<i>B</i> [MPa]	C	n	m	$ ho(\mathrm{kgm}^{-3})$	$c_v(J(kgK)^{-1})$	$T_{ m melt}[{ m K}]$	$T_{ m room}[{ m K}]$
980	1370	0.020	0.164	1.03	8190	435	1573	298

Table 2-6 Johnson-Cook parameters for Inconel 718[7]

密度[g/cm ³]	3.74				
ヤング率[GPa]	390				
ポアソン比	0.20				
比熱[W/mmK]	1200				
熱伝導率[J/kgK]	0.020				

Table 2-7 Al2O3-SiCw に使用した物性値



Fig. 2-3 応力-ひずみ曲線の温度依存性



Fig. 2-4 応力--ひずみ曲線のひずみ速度依存性

2.3.3 熱物性値

切削により生じる残留応力には,材料の熱勾配による熱膨張の違いが大きく影響する. また切削中,被削物の高温部と低音部との温度差は 1000K 以上になるため,熱物性に大き な差異が生じる.したがって本解析では,Inconel 718 の比熱,熱伝導率,および線膨張係 数を温度に対するテーブルとして入力することで,熱物性の温度依存性を考慮した.本解 析で使用した Inconel 718 の比熱および熱伝導率を Table 2-8 に,線膨張係数を Table 2-9 に示す.

温度[K]	比熱[W/mmK]	熱伝導率[J/kgK]
293	427.14	0.0114
373	441.74	0.0125
573	481.74	0.0140
773	521.74	0.0155
973	561.74	0.0215
1173	601.74	_
1623	691.74	0.0313

Table 2-8 Inconel 718 の比熱および熱伝導率[8]

Table 2-9 Inconel 718 の線膨張係数

温度[K]	線膨張係数[×10⁻6/K]
294	10.6
366	13.1
533	14.3
611	14.7
1089	16.6
1255	18.0

2.3.4 摩擦モデル

本研究では、工具と被削物との間の摩擦モデルとして、クーロン摩擦モデルを使用した. 要素間の摩擦力は次式のように表される.

$$F_t = \mu F_n \tag{2.2}$$

ここで、 μ , F_n は、それぞれ摩擦係数、垂直抗力であり、 $\mu = 0.4$ とした.

2.3.5 発熱

切削中に生じる熱には、①塑性変形 と ②摩擦仕事 によるものの 2 つがある. ①, ②に より単位時間あたりに発生する熱量を, それぞれ(2.3)式, (2.4)式とした.

$$\dot{q_p} = f \dot{w_p} \tag{2.3}$$

$$\dot{q_f} = F_t v \tag{2.4}$$

ここで、f, w_p はそれぞれ塑性仕事から熱への変換率、および単位時間当たりの塑性仕事である.また、 $F_{t, v}$ はそれぞれ要素間の摩擦力、およびすべり速度である.一般に、塑性変形仕事のうち 90%程度が熱に変わると言われており、f = 0.9とした.

2.3.6 残留応力の測定

残留応力は温度勾配による影響を強く受けるため,残留応力を適切に測定するためには 切削終了後,被削物温度を室温付近の定常状態まで下げてから測定する必要がある.した がって、本解析では切削終了後,工具パートを削除して被削物とNULLパートのみでリス タート解析を行うことにより,被削物の冷却過程の解析を行った.温度は指数関数的に下 がっていくため、冷却が進むにつれて冷却効率がさがり,計算時間が膨大となる.そこで 本研究では,被削物の仕上げ面の温度が室温+50℃程度となり,残留応力の時間変化がほと んどなくなった時点で解析を終了し,残留応力を測定した.測定点は、切削により生じた 仕上げ面の中間(被削物右端から1mm)の点とし,深さ方向の残留応力分布を求めた.また, Zhou らの試験では X線の侵入深さを考慮していない.そこで、本解析では試験に合わせる ため、仕上げ面から 35 μm 深い点を原点として、深さ方向の残留応力分布を測定した.



Fig. 2-5 残留応力の測定点

第3章 解析結果

3.1 緒言

本章では、Zhou らによる試験結果とそれに対応した解析との比較を行うことで、解析モ デルの妥当性の検証を行う.次に、構築したモデルに対して加工条件を変更して解析を行 うことで様々な加工条件が残留応力に及ぼす影響を明らかにする.本研究では切り込み深 さ、クーラントへの熱伝導率、工具-被削物間の摩擦係数の3つの加工条件をそれぞれ3 つに振り分け、解析を行った.これらの加工条件に着目したのは以下の理由による.

①切り込み深さは、実際の加工において頻繁に変更されるパラメータであるから.

②クーラントへの熱伝導率は、切削時の温度勾配を変化させ残留応力に影響を及ぼすこ とが予想されるから.

③実際の加工では工具材を変更することで残留応力分布が変化するため、その一因とし て摩擦係数が考えられるから.

切削加工における用語および変形域の概略を Fig. 3-1 に示す.



Fig. 3-1 切削加工における変形域の概略

3.2 Zhou らによる実験と対応する解析との比較

3.2.1 切りくず形状

一般に、Ti合金やNi合金などの低熱伝導性材料の加工では、切削速度上昇に伴い鋸刃型の切りくずが生成することが知られている[9].本解析で得られた切りくず形状をFig. 3-2に示す.本解析においても、材料・加工条件は異なるが、切削速度 v=200m/min、350m/minの両条件で鋸刃型の切りくずが生成されている.また、切削速度が大きな v=350m/minの方が鋸型の切りくずになる傾向は強くなっており、実際の現象に一致している.

切りくずの厚さにはほとんど違いがなく,いずれも谷部で 0.37~0.40mm,山部で 0.41~0.45mm となっている.また,せん断角(仕上げ面に対するせん断面の傾きの大きさ) は切削速度 v_c=200m/min, 350m/min でそれぞれ 35.8±1.6(deg), 37.7±0.6(deg)であり, 切削速度の上昇に伴いせん断角が大きくなるという実際の現象に一致している.





3.2.2 切削温度

切削速度 v_c=200m/min, 350m/min における切削時の温度分布のコンター図をそれぞれ Fig. 3-3, Fig. 3-4 に示す.

図より、工具先端付近の温度はいずれも 1500K 付近と高く、せん断面に沿って温度が上 昇している. Ti 合金や Ni 合金などの低熱伝導性材料の加工ではせん断域で断熱的な温度上 昇が起こり、材料の軟化によりせん断面がずれることで鋸型の切りくずが生成すると考え られている[9].

切りくずと工具のすくい面との接触部近傍では摩擦などによる二次的な塑性変形を受け, これを二次塑性域というが,切削速度を上げると二次塑性域の温度が約70K上昇している.



Fig. 3-3 切削時の温度分布(v=200m/min, ap=0.3mm)



Fig. 3-4 切削時の温度分布(v=350m/min, ap=0.3mm)

3.2.3 相当塑性ひずみ

切削速度 v_c=200m/min, 350m/min における切削時の相当塑性ひずみのコンター図をそれぞれ Fig. 3-5, Fig. 3-6 に示す.

図より,温度分布と同様に,切削速度の上昇に伴い二次塑性域のひずみが大きくなっている.



Fig. 3-5 切削時の相当塑性ひずみ(v=200m/min, ap=0.3mm)



Fig. 3-6 切削時の相当塑性ひずみ(v=350m/min, ap=0.3mm)

3.2.4 残留応力

Zhou らによる旋削試験から得られた加工後の残留応力分布を Fig. 3-7, Fig. 3-8 に, 解 析より得られた残留応力分布を Fig. 3-9, Fig. 3-10 に示す.

残留応力は表面から内部にかけて圧縮が大きくなり、やがて 0 に近づいていくという傾向が, 試験と解析で一致した. 切削によりこのような残留応力分布が生じるメカニズムについて 3.3 節で考察する. 軸方向残留応力については, 表面の残留応力値, および圧縮のピーク値が試験と解析で概ね一致した.

また切削速度を上げると、材料表面の残留応力は引っ張り側に大きくなるという実験結 果を定性的に再現できた.

一方,周方向残留応力については解析が試験よりも圧縮側に大きくなっている.また残 留応力の深さは,解析結果が試験結果の約5倍となっており,この理由についても3.3節で 考察する.







Fig. 3-8 残留応力の試験結果(v=350m/min)[3]

第3章 解析結果







Fig. 3-10 残留応力の解析結果(v=350m/min)

3.3 考察

まず,切削により Fig. 3-7 のような残留応力分布が生じるメカニズムについて考察する. 先の解析に加え,線膨張係数を 0,すなわち温度勾配に起因する残留応力を排除し塑性変形 のみを考慮したモデルで解析を行った.その結果,残留応力の分布は Fig. 3-11 のようにな った.グラフから,表面の残留応力は圧縮であり,材料内部にかけて残留応力は 0 に近づ いていることがわかる.

一方,熱膨張ありとしたモデルでは、切削直後の残留応力分布は Fig. 3-12 のようになった.切削直後の表面の残留応力は圧縮であり、熱膨張なしのモデルと同じような分布となっている.しかし、冷却により表面の残留応力は引っ張り側に大きくなり、材料内部に圧縮のピークが生じている(Fig. 3-9).

以上の結果から、切削加工では、まず塑性変形により材料表面付近に圧縮の残留応力が 発生し、その後材料表面から熱が奪われていくことで表面の残留応力は引っ張り側に大き くなると考えられる.

次に Zhou らによる実験とそれに対応した解析とを比較し、考察をおこなう.切削速度を 上げたことで二次塑性域の温度および相当塑性ひずみが増加したが、これはひずみ速度の 増加により材料が硬化し、工具-切りくず間の摩擦力、およびそれに伴う発熱量が増大し たためだと考えられる.

解析では、試験よりも深いところまで残留応力が生じているが、この一因としてアダプ ティブリメッシュが考えられる.アダプティブリメッシュは数ステップ後にメッシュを切 り直し、応力を再配分するため、その前後で応力分布に差異が生じる.したがって、リメ ッシュ回数が増えるに伴い、残留応力分布が広範囲に拡大してしまうと考えられる.試験 的にリメッシュ回数を二倍に増やして解析を行った結果、残留応力の深さは約1.3倍となっ た.このことから、定性的な解析残留応力分布をより詳細に予測するためにはアダプティ ブリメッシュの回数をできるだけ削減する必要があることがわかる.しかし、メッシュの 大変形に伴う計算精度の低下、エラーを回避するには最低限のリメッシュが必要であり、 残留応力予測の計算精度向上には、アダプティブリメッシュを使用しない手法でモデルを 構築する必要がある.

また本モデルでは切りくずが被削物から完全に切り離されることはなく、冷却過程において高温の切りくずから仕上げ面に熱が流れるという現象が観察された.これにより材料 内部の温度勾配が拡大し、実験よりも残留応力が深くまで生じたと考えられる.

以上のことから、本研究で構築した二次元解析モデルでは、切削により生じる残留応力 の深さ方向の分布を定量的に評価することはできない.しかし、切削速度の上昇に伴う残 留応力分布の変化を定性的に再現できたことから、加工条件が残留応力に及ぼす影響の定 性的な評価は可能であると考えられる.次節では構築したモデルに対し、切り込み深さ、 クーラントへの熱伝達率、工具-被削物間の摩擦係数の3 つの加工条件を変更した解析を



行い、様々な加工条件が残留応力に及ぼす影響を明らかにする.







3.4 加工条件が残留応力に及ぼす影響

3.4.1 切り込み深さ

この項では v=200m/min のモデルに対し、切り込み深さを ap=0.1、0.5mm と変更した モデルで解析を行い、切り込み深さが残留応力に与える影響を明らかにする.切り込み深 さ ap=0.1、0.3、0.5mm に対する残留応力分布の解析結果をそれぞれ Fig. 3-13、Fig. 3-9、 Fig. 3-14 に示す. グラフから、切り込み深さが大きいほど、残留応力は深くなっている. 一方、圧縮残留応力のピーク値に大きな違いは見られない.







Fig. 3-14 切り込み深さ ap=0.5mm における残留応力分布

3.4.2 クーラントへの熱伝達率

この項ではクーラントが残留応力に与える影響を明らかにするため, *v*=200m/min のモ デルに対し, クーラントへの熱伝達率を *h*=5, 25kW/m²K と変更して解析を行った. クー ラントへの熱伝達率 *h*=5, 10, 25kW/m²K に対する残留応力分布の解析結果をそれぞれ Fig. 3-15, Fig. 3-9, Fig. 3-16 に示す. これらのグラフから, クーラントへの熱伝達率は残留応 力分布にほとんど影響していないことがわかる.







Fig. 3-16 クーラントの熱伝導率 h=25kW/m²K における残留応力分布

3.4.3 工具-被削物間の摩擦係数

この項では v=200m/min のモデルに対し, 摩擦係数をµ=0.2, 0.6 と変更したモデルで解 析を行い,工具-被削物間の摩擦係数が残留応力に及ぼす影響を明らかにする. 摩擦係数 µ=0.2, 0.4, 0.6 に対する残留応力分布の解析結果をそれぞれ Fig. 3-17, Fig. 3-9, Fig. 3-18 に示す.これらのグラフから,工具-被削物間の摩擦係数が残留応力分布に影響していな いことがわかる.



Fig. 3-17 摩擦係数µ =0.2 における残留応力分布



Fig. 3-18 摩擦係数µ =0.6 における残留応力分布

3.5 加工条件が残留応力に及ぼす影響の考察

切り込み深さを大きくすると材料に生じる残留応力は深くなった.この理由は、切り込み深さの増加に伴い応力分布が拡大し、塑性変形および温度勾配が広範囲に生じたためだ と考えられる.

クーラントへの熱伝達率は残留応力分布にほとんど影響しなかった.この理由として, クーラントへの伝熱量は摩擦や塑性変形による発熱量よりもはるかに小さく,熱伝達率が 切削時の温度勾配に与える影響も無視できるほど小さいためだと考えられる.クーラント への熱伝達率 *h*=5,10,25kW/m²Kにおける切削時の温度分布を Fig.3-19, Fig.3-3, Fig. 3-20 に示す.これらより,クーラントへの熱伝達率が切削時の温度分布にほとんど影響し ないことがわかる.

また,工具-被削物間の摩擦係数を変えても残留応力分布には変化がなかった.この理 由を,①塑性変形と②温度勾配の両面から考えると,

- ① 材料の塑性変形は、せん断面における塑性変形(1次塑性域)と工具-切りくず間の摩擦による塑性変形(2次塑性域)とに大別でき、残留応力に影響するのは1次塑性域のみであるため、摩擦力は寄与しない.
- ② 摩擦は主に 2 次塑性域で働き、摩擦による発熱量の大部分は切りくずに逃げるため、 仕上げ面の温度勾配にほとんど寄与しない。

ということが考えられる.

以上のことから、切り込み深さ、切削速度は残留応力分布に大きく影響する.一方、摩 擦係数は残留応力分布に影響しない.また、本研究の範囲ではクーラントへの熱伝達率は 残留応力分布に影響しない.



Fig. 3-19 クーラントへの熱伝達率 h=5kW/m2K における切削時の温度分布



Fig. 3-20 クーラントへの熱伝達率 h=25kW/m²K における切削時の温度分布

第4章 結論

4.1 総括

本研究では、切削および切削後の冷却過程を再現する二次元解析モデルを構築し、切削 により生じる残留応力の解析を行った.

次に,解析で得られた結果と Zhou らによる旋削試験で得られた残留応力とを比較し,解 析モデルの妥当性の検証を行った.残留応力の深さ方向分布の定量的な評価はできなかっ たが,材料表面から内部にかけて残留応力は圧縮側に大きくなり,その後緩やかに 0 にな っていくという大まかな概形は再現できた.また,切削速度の上昇に伴い材料表面の残留 応力が引っ張り側に大きくなるという傾向について,実験と解析とで定性的な一致が得ら れた.一方,解析では実験よりも表面から深いところまで残留応力が生じていたが,この 理由としてアダプティブリメッシュによる応力の再配分が考えられる.

続いて,加工条件が残留応力へ及ぼす影響を調べるため,構築したモデルに対し加工条件を変更して解析を行った.以上の結果から,切り込み,切削速度は残留応力に大きく影響し,工具-被削物間の摩擦係数は残留応力にほとんど影響しないことがわかった.また本研究の範囲では,クーラントへの熱伝達率は残留応力にほとんど影響しなかった.

4.2 今後の展望

本研究で構築した解析モデルでは、ラグランジュ要素を使用し、要素の大変形を再現す るためにアダプティブリメッシュが必要となった.オイラー要素や SPH 要素ではメッシュ を更新する必要がないため、これらを用いたモデルを構築することで残留応力の深さをよ り詳細に再現できる可能性がある.

また、本研究では、二次元ソリッド要素を使用し、平面ひずみ状態を仮定した.現実の 切削においては、工具と被削物とは3次元的に接触し、送りが存在する.したがって、3次 元モデルを構築することで、2次元モデルでは定量的な再現ができなかった残留応力をより 詳細に再現できる可能性がある.

40

付録A 輻射の影響

切削中,工具先端付近の温度は1000℃以上と,非常に高温となる.これに伴い,輻射に より被削物および工具から周囲に放出される輻射熱も大きくなると考えられる.本付録で は,輻射熱を簡単に見積もり,クーラントによる熱伝達と比較することでその影響を考察 する.

周囲の壁面を絶対温度 T_1 ,表面積 A_1 ,工具先端付近を絶対温度 T_2 ,表面積 A_2 とすると、 熱放射によって工具から放出される熱量 Pは以下の式になる.

$$P = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{A_2}{A_1} \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right)} A_2 \left(T_2^4 - T_1^4\right)$$
(A.1)

ここで σ はステファン=ボルツマン定数であり、 ϵ_1 、 ϵ_2 はそれぞれ周囲の壁面、および工具先端付近の放射率である.

周囲の壁面が十分大きい、すなわち $A_1 \gg A_2$ とすると、工具先端付近の単位面積あたりから 放出される熱量は(A.2)式のようになる.

$$\frac{P}{A_2} = \sigma \varepsilon_2 (T_2^4 - T_1^4)$$
(A.2)

$$= \sigma \varepsilon_2 (T_2^2 + T_1^2) (T_2 + T_1) (T_2 - T_1)$$

したがって、工具先端近傍から周囲の壁面への、見かけの熱伝達率は(A.3)式のようになる.

$$h_{rad} = \sigma \varepsilon_2 (T_2^2 + T_1^2) (T_2 + T_1)$$

$$\approx 50W/m^2 K$$
(A.3)

これは、クーラントへの熱伝達(h=10kW/m²K)よりもはるかに小さいため、その影響を無 視できる.

以上により、本研究では輻射熱の影響を無視し、クーラントによる熱伝達のみを考慮した.

付録 B X 線応力測定法概説

Zhou らは、旋削により生じた残留応力を調べるため、X線回析装置による残留応力測定 を実施した.本付録では、X線残留応力測定の概説を記す.

Fig. B-0-1 のような座標系を考える. ただし、3 方向を自由表面垂直方向とする.





OP 方向のひずみ $\varepsilon_{\varphi, \psi}$ は式(2.1)のように表される. X 線の侵入深さは数十 μ m 程度である ため、平面応力状態を仮定し、さらに(2.2)式を利用すると、(2.1)式は(2.3)式と書き直せる. (2.3)式は、X 線応力測定の基礎式と呼ばれる.

$$\varepsilon_{\varphi, \psi} = \frac{1+\nu}{E} (\sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{12} \sin^2 \varphi + \sigma_{22} \sin^2 \varphi - \sigma_{33}) \sin^2 \psi$$

$$+ \frac{1+\nu}{E} \sigma_{33} - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) + \frac{1+\nu}{E} (\sigma_{31} \cos \varphi + \sigma_{23} \sin \varphi) \sin^2 \psi$$

$$\nu : \# \mathcal{T} \vee \mathcal{V} \nvDash$$
(B.1)

$$\sigma_{xx} = \sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{12} \sin^2 \varphi + \sigma_{22} \sin^2 \varphi \tag{B.2}$$

$$\varepsilon_{\varphi, \psi} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{xx} \times \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \tag{B.3}$$

波長 λ の特性 X 線と多結晶試料に照射すると、X 線は式(2.4)で示される回折条件(Bragg の式)を満足する結晶粒によって回折される. 試料にひずみが生じると、回析面間隔が変化 し、回折角が変化する. 式(2.4)を波長 λ について全微分すると式(2.5)が得られる. ひずみ と格子面間隔の関係性と、式(2.5)より、式(2.6)を得ることができる. 式(2.3)、(2.6)により 式(2.7)が得られる. この式は、 $\theta_{\varphi, \psi}$ がsin² ψ と線形関係にあることを示している. よって、 複数の ψ で回折角 $\theta_{\varphi, \psi}$ を計測し、 $\theta_{\varphi, \psi} - sin^2\psi$ 線図の傾きを求めることで σ_{xx} が計算可能で ある. 実際の測定においては、一般的に回折角として2 θ が測定されるため、2 $\theta_{\varphi, \psi} - sin^2\psi$ 線図が使われる. 尚、式(2.7)式を $d_{\varphi, \psi}$ を用いて書き直すと、式(2.8)のようになる. 応力計 算に際しては、一般的に最小二乗法を用いて2 $\theta_{\varphi, \psi} - sin^2\psi$ 線図または $d_{\varphi, \psi} - sin^2\psi$ 線図の 傾きを計算している[10]-[13].

以上が X 線応力測定において最も一般定期な $sin^2\psi$ 法の測定原理である. $sin^2\psi$ では, X 線侵入深さ内が平面応力状態にあること, X 線侵入深さ内に応力勾配がないことが仮定され ている.よって圧延などの強加工,有向性加工を施し,これらの仮定がもはや妥当とは言 えない場合では, $\theta_{\varphi,\psi}$ と $sin^2\psi$ の線形関係が成り立たなくなり[14]-[16],大きな誤差を生じ る可能性がある[17].また,測定域を代表する残留応力値を得るためには,測定ゲージ体積 内に回折条件を満たす粒が十分多数存在する必要があり,ゲージ体積内に 1000 個程度の結 晶粒が存在していなければならないとされる[18].

実際の測定においては、回折角を求めるため、X線回折強度曲線(X線強度・検出器走査角 度線図)を測定する.測定時における、検出器を走査する面の取り方により、並傾法、側傾 法の2種類に分類できる(Fig. B-0-2).得られた回折強度曲線より、回折強度のピークとな る角度を求め、回折角を決定する.回折ピークの計算手法には、半値幅法、重心法など、 多くの手法が用いられている.

$$\lambda = 2dsin\theta$$
 (B.4)
 λ : 波長
 d : 結晶面間隔
 θ : 視斜角

$$\Delta\theta = -tan\theta \frac{\Delta d}{d} \tag{B.5}$$

$$\varepsilon_{\varphi, \psi} = \frac{d_{\varphi, \psi} - d_{0}}{d_{0}} \approx -\cot\theta_{0}(\theta_{\varphi, \psi} - \theta_{0})$$
(B.6)
$$d_{\varphi, \psi} : 試料回折面間隔$$
$$d_{0} : 無ひずみ状態での試料回折面間隔$$
$$\theta_{\varphi, \psi}, \theta_{0} : d_{\varphi, \psi}, d_{0}$$
に対応する回折角

$$\theta_{\varphi, \psi} = \frac{-(1+\nu)}{E} \sigma_{xx} tan \theta_0 \times sin^2 \psi + \frac{\nu}{E} tan \theta_0 (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + \theta_0$$
(B.7)

$$d_{\varphi, \psi} = d_0 \left(\frac{1+\nu}{E} \sigma_{xx} \times \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \right) + d_0$$
(B.8)



Fig. B-0-2 Schematic illustration of ISO-inclination method and side inclination method (<u>http://www.rist.or.jp/atomica/data/pict/08/08040216/04.gif</u>より引用)

謝辞	

本研究は酒井教授,泉教授,波田野助教のご指導の下で行われました.ご多忙にもかか わらず1年間指導してくださり,深く感謝申し上げます.

株式会社 JSOL 様には、衝撃・構造解析ソフトウェア LS-DYNA を提供していただきま した.同社の千代延様、功刀様には、解析モデルの構築に際し、何度も相談に乗っていた だき、問題の解決につながるアドバイスを頂きました.深く感謝いたします.

同研究室博士課程の蓮沼さんには同じ研究テーマとして,論文のチェックや,研究に行き詰ったときなどに的確なアドバイスを頂き,大変お世話になりました.ありがとうございました.

植田さんには同じLS-DYNA使用者として、ソフトの使用法やモデリングに関する注意 点などを教えていただきました.修士課程の橋本さん、舘さんには以前の研究テーマ(フ レキシブルマルチボディダイナミクスによる宇宙機器用転がり軸受ユニットの振動解析) について、Adamsの使い方や研究の進め方のアドバイスを頂きました.大変お世話になり ました.

研究室のいい環境にも助けられ,研究を進めることができました.遊ぶときは楽しく遊び,研究するときは黙々と研究するというメリハリのある生活を提供してくれました.大 学院入試の勉強の時期も卒論執筆の時期も非常に居心地がよかったです.大学院に進んで もこの雰囲気を継続できるように努力いたします.

最後に、これまで自分の思う道を進むことに対し、温かく見守りそして応援してくれた 両親、おばあちゃん、弟、コロに深い感謝の意を表し、以上を謝辞といたします.



Fig. 0-1 山本家家族写真(2016年1月撮影)

参考文献

- [1] 桐谷聡一, "表面仕上げが金属の低サイクル疲労に与える影響の確立的取り扱い", 東京 大学大学院工学系研究科機械工学専攻修士論文, 2013.
- [2] 磯崎洋平, "表面仕上げの疲労寿命への影響評価に向けた残留応力分布の解析",東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻修士論文, 2015.
- [3] J. Zhou, V. Bushlya, R.L. Peng, Z. Chen, S. Johansson, J.E. Stahl, "Analysis of subsurface microstructure and residual stresses in machined Inconel 718 with PBCN and Al₂O₃·SiC_w tools", Proceedia CIRP, vol.13, pp.150-155, 2014.
- [4] 笹原弘之,帯川利之,白樫高洋,"切削加工変質層生成過程のシミュレーション解析(第3報)—仕上面特性に及ぼす機械的・熱的要因の影響—",精密工学会誌,vol.60, no.12, pp.1801-1805, 1994.
- [5] J.C. Outeiro, D. Umbrello, R. M'Saoubi, "Experimental and numerical modelling of the residual stresses induced in orthogonal cutting of AISI 316L steel", International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol.46, pp.1786-1794, 2006.
- [6] 平塚裕太, Norfariza Binti Ab-Wahab, 中村崇, 笹原弘之, "高速シェアリングによる 材料特性獲得方法の開発", 精密工学会学生会員卒業研究発表講演会論文集, vol.22, pp.11-12, 2015.
- [7] T. Kobayashi, J.W. Simons, C.S. Brown, D.A. Shockey, "Plastic flow behavior of Inconel 718 under dynamic shear loads", International Journal of Impact Engineering, vol.35, pp.389-396, 2008.
- [8] D.G. Ahn, K.W. Byun, M.C. Kang, "Thermal Characteristics in the Cutting of Inconel 718 Superalloy Using CW Nd:YAG Laser", Journal of Materials Science & Technology, vol.26, no.4, pp.362-366, 2010.
- [9] 沖田淳也, 森口秀樹, 西岡隆夫, 野口和夫, 北川信行, "切削環境評価技術とその応用", SEI テクニカルレビュー, vol.173, pp.48-52, 2008-07.
- [10] B.D.Kallity, "X 線回折要論", アグネ承風社, 1980.
- [11] 日本材料学会, "X 線応力測定法", 養賢堂, 1966.
- [12] 田中啓介, 鈴木賢治, 秋庭義明, 菖蒲敬久, "放射光による応力とひずみの評価", 養賢 堂, 2009.
- [13] 後藤徹,大谷眞一,"X 線応力測定法の基礎と最近の発展:1.X 線応力測定法の基礎",材 料,vol.47,pp.1188-1194,1998.
- [14] H.Dolle, "The influence of multiaxial stress states, stress gradients and elastic anisotropy on the evaluation of (residual) stresses by X-rays", Journal of Applied Crystallography, vol.12, pp.489-501, 1979.
- [15] I.C.Noyan, "Effect of gradients in multi-axial stress states on residual stress measurements with X-rays", Metallurgical Transactions A, vol.14, pp.249-258, 1983.

- [16] 英崇夫,藤原晴央,西岡一水,"急激な応力こう配のあるときのX線的残留応力解析に おける重み付き平均解析法の理論",材料,vol.30, pp.247-253, 1981.
- [17] 中村栄浩,鷹合徹也,木村真一, "5083Al 合金の冷間圧延と表面残留応力",日本金属
 学会誌,vol.55, pp.1307-1314, 1991.
- [18] 友田陽,菖蒲敬久,S.Harjo,鈴木裕士,"量子ビームによる溶接部の残留応力測定", 溶接学会誌,vol.80, pp.159-165, 2011.

以上

p.1~p.51 完

2016 年 1 月提出 指導教員 酒井 信介 教授 140252 山本 賢明