

切削加工の FEM 解析における迅速な材料特性の獲得と解析精度の向上

東京農工大学 ○楠瀬章太 ◎笹原 弘之, 土木研究所 中村 崇

要 旨

高速切削のFEM解析には高温・高ひずみ速度下での材料特性が不可欠である。本研究では、熱特性試験、圧縮試験、および高速切削試験と切削のFEM解析から得られる切削力の誤差を最少化することにより、アルミニウム合金A5083とA6061の応力-ひずみ関係の同定を行った。また、低速切削試験の結果を逆解析することで工具-ワーク間の摩擦特性を同定し、迅速な材料特性の獲得と解析精度の向上が可能であることを示した。

1. 緒 言

切削加工時の加工条件選定方法は確立されておらず、現在は実切削により最適条件を見つける場合が多い。鋼やアルミ合金などの従来材に加えチタン合金など新材料の切削の需要が高まり、同時にその加工条件選定のためのコストが増加している。また、品質向上のために被削材の切削後に生じる残留応力を予測することも重要である。本研究では、加工条件選定のコスト減と材料の内部応力である残留応力の予測を目的とし、FEMでのシミュレーションによる切削解析に注目する。切削における材料の変形と温度を正確に解析するには実際に対応する温度変化域と高ひずみ速度域に対応した材料特性が必要となるが、対応する高温・高ひずみ速度での材料試験は容易ではない。笹原らの研究では複雑な高速材料試験機を用いず、汎用の旋盤を用いた切削実験とFEMによる解析結果の比較により、切削解析の基礎式となる材料の流動応力を求める手法が提案されている⁽¹⁾。本報告では、それらの手法を、近年、土木構造物への利用が増加しているアルミニウム合金A53083-OとA6061-T6の流動応力導出に応用する。さらに、摩擦係数同定や解析パラメータの精査を行い、迅速な材料特性獲得方法の確立と高精度な解析手法を提案する。

2. 流動応力導出方法

図1に被削材の温度変化域と高ひずみ速度域に対応した材料特性の流動応力を求める手法のフローチャートを示す。いくつかの実験と解析の組み合わせにより、加工条件最適化や残留応力制御のための切削解析に用いる流動応力を求める。概要はつぎのとおりである。

まず、準静的・室温の条件下で一般的な圧縮試験を行い被削材の応力-ひずみ関係を求める。また、熱物性試験により被削材の熱伝導率と融点を求める。つぎに、温度が上昇しない極低速で二次元切削実験を行い切削力を求める。これらの結果を基に、FEMによる低速二次元切削解析を行う。なお、本研究では汎用有限要素ソフトウェアのDEFORMを使用した。この低速切削解析により工具/被削材間の摩擦係数を導出する。つぎに、旋

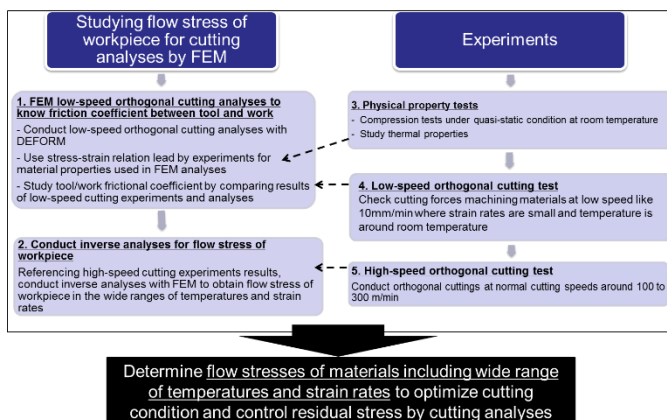


Fig.1 Steps to study flow stress of workpiece

盤を用いた高速二次元切削実験により切削力の測定を行う。この結果を用い、FEMを用いた逆問題解析の手法により被削材の流動応力を推定する。

得られた流動応力を用い切削解析を行うことで、実際に近い切削力や残留応力を解析により求められることとなる。

3. 常温・準静的条件での材料基礎式の導出

A5083とA6061の高温・高ひずみ速度域を含む応力-ひずみ関係を求めるために、まず、室温・準静的条件下で各材料の圧縮試験を行い、それぞれの応力-ひずみ関係を求めた。

図2に圧縮試験の測定値とそれらの外挿により予測したA5083-OとA6061-T6の応力-ひずみ関係を示す。試験片は5節に示す高速二次元切削実験で用いる円筒圧延材から切り出しを行い、寸法は $\phi 10 \times$ 長さ10mmとした。長さ方向は円筒圧延材の軸方向と半径方向の2種類とし、圧延による材料異方性を考慮した。軸方向と半径方向とも3回ずつ試験を行い、測定された各方向の応力値の平均を対象材の応力-ひずみ関係とし図2に示した。なお、図2の真ひずみは塑性ひずみを表す。試験装置は島津製作所社製オートグラフAG-X(300kN)を用い、試験速度は1mm/minとした。図2で各材料のひずみ約0.5までの値は実測値である。ひずみ約0.5以上の切削加工で生じうる大ひずみ域の応力は先に述べた予測値である。ここではひずみ約0.5以上では応力の上昇がないものとして仮定した。各材料とも、この実測と予測による応力-ひずみ関係に加え、その近似式もn乗硬化則に基づき算出し図示してある。これらの近似式は5節に述べる逆計算による流動応力算出の基礎式として用いる。

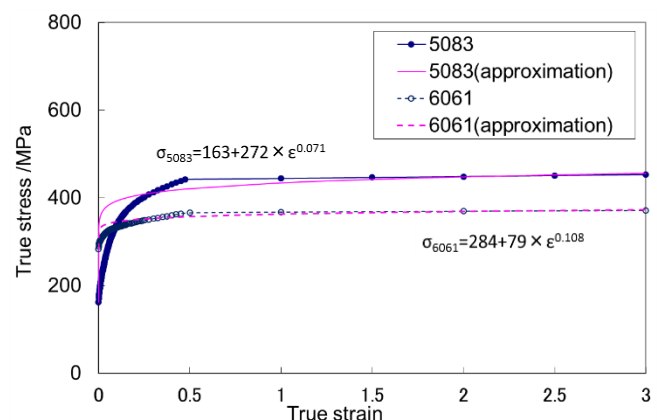


Fig.2 Stress-strain relations of 5083-O and 6061-T6

4. 工具-被削材間の摩擦係数の同定

流動応力を求める逆問題解析を行う際に、ツール/ワーク間の摩擦係数を用いる必要がある。摩擦係数を実際に近い正確な値とすることで、流動応力導出の精度が上がると考えられる。そのため、材料の温度とひずみ速度が上昇しない低速二次元切削実験を行い、切削力を測定し、それらと3節で得た材料の応力

一ひずみ関係を用いた FEM 二次元切削解析から算出される切削力を比較することで摩擦係数を同定した。解析に用いた摩擦条件は式(1)に示す関係とし⁽²⁾, その摩擦係数 λ を変化させ解析を行い, λ の最適化を行った。

$$\tau_t = k(1 - e^{-\lambda \sigma_t/k}) \quad \dots (1)$$

図 3 に低速切削試験の試験片と試験概観を示す。切削速度 10mm/min の低速で寸法 60×60×t3mm の A5083 と A6061 の各試験片を切削し, 動力計で切削力を測定した。工具はすくい角を 10°, 20°, 30° の 3 種を用意し, 切込み深さは 0.03~0.07mm とし流れ型の切りくずが発生するようにした。また, 実験と同様の条件で摩擦係数 λ を変化させながら DEFORM を用い低速切削解析を行い各 λ の値にて切削力を算出した。図 4 にすくい角 10°, $\lambda=1.0$ の解析例を示す。図 5 にすくい角 10° のときの実験結果と解析結果のまとめを示す。この場合, 実験と解析結果が近くなる $\lambda=1.0$ をすくい角 10° の摩擦係数とした。同様に決定した A5083 と A6061 の各工具すくい角条件における摩擦係数の一覧を表 1 に示す。

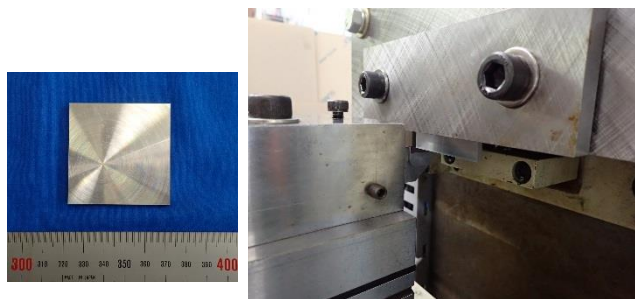


Fig. 3 Low-speed orthogonal cutting test

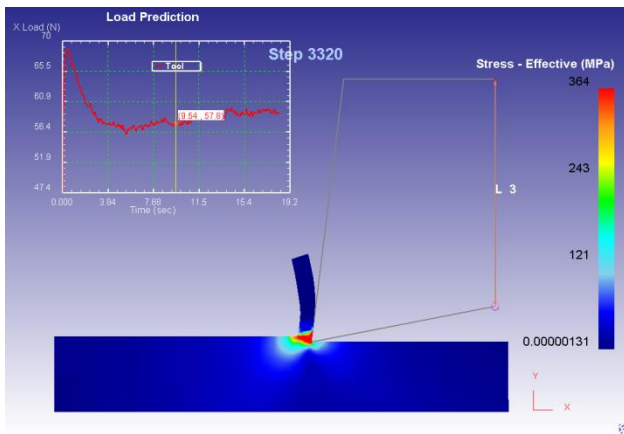


Fig.4

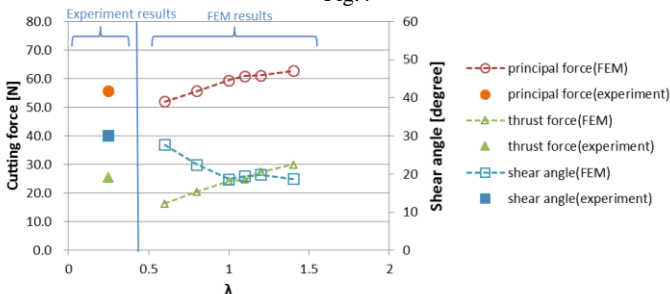


Fig. 5 Results of low-speed cutting tests and FEM (6061, 10°)

Table.1 Friction coefficient λ

	Rake angle		
	10 degrees	20 degrees	30 degrees
5083-O	0.6	1.2	1.0
6061-T6	1.0	1.4	2.0

5. 流動応力導出のための高速二次元切削実験と FEM 解析

旋盤を用いた高速二次元切削実験と, 上記の圧縮試験結果と摩擦係数同定結果を用いた切削解析を行い, それらの切削力の差を最小化する基礎式を求める逆問題解析の手法で材料の流動応力を求める。図 6 に高速二次元切削実験の概要を示す。

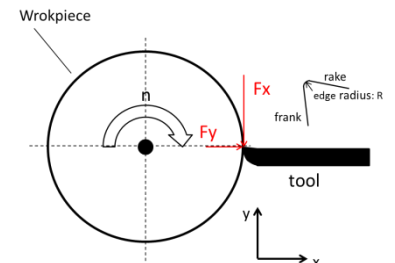


Fig.6 High-speed cutting test

本研究では, 高ひずみ速度域における応力-ひずみ関係として Johnson-Cook の構成式⁽³⁾を使用する。以下に Johnson-Cook の構成式を示す。

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C\ln\varepsilon)(1 - (\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}})^m) \quad (3)$$

Johnson-Cook の構成モデルはひずみに関する第 1 項, ひずみ速度に関する第 2 項, 温度に関する第 3 項で構成される。これらの係数 C と m を実験と解析の比較により求めることとなる。

図 7 に高速二次元切削実験により測定した A5083 と A6061 の各加工条件での切削力を示す。これらの結果を, 今後実施するパラメータ導出の FEM 切削解析の結果と比較し, 材料の流動応力を求めることとする。

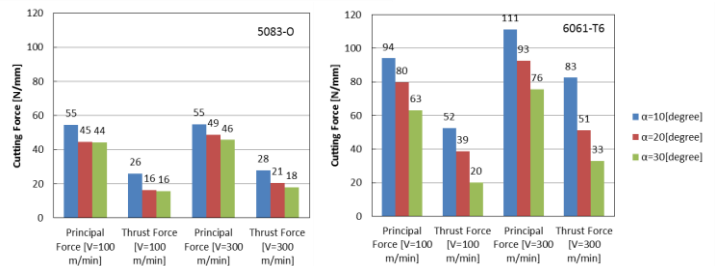


Fig.7 Results of high-speed orthogonal cutting tests

6. 結 言

本研究では材料の流動応力を簡易に精度よく求める手法の開発を進め, A5083-O と A6061-T6 の材料特性を検討した。それらの具体的な流動応力を求めるため以下の事項を行った。

- (1) 圧縮試験等により基礎的な材料特性を求めた。
- (2) 低速二次元切削実験と FEM 切削解析により切削時の工具と被削材間の摩擦係数を同定した。
- (3) 高速二次元切削実験を行い, すくい角等を変化させたいくつかの加工条件の下で切削力測定を行った。

これらの結果を基に逆問題解析を行い高温・高ひずみ速度を含むアルミ合金の流動応力を求める予定である。

参考文献

- (1) N.Wahab, H.Sasahara: Development of high-speed shearing method to Obtain flow stress under high strain rate, International Journal of Modeling and Optimization, Vol.5, No.2, April 2015, pp.140-144.
- (2) 白井英治, 現代切削理論—コンピュータ解析と予測システム, 共立出版株式会社, (1990).
- (3) G.R.Johnson, W.H.Cook : A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, in: Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, (1983), 541-547