Ti-6Al-6V-2Sn の切削加工能率の向上に関する研究 (第3報)*

[JSPE-59-07
93-07-1133]

—切削機構のシミュレーション解析—

前川克廣** 大島郁也** 久保明彦*** 北川武揚***

Improvements in Cutting Efficiency of Ti-6Al-6V-2Sn Titanium Alloy (3rd Report)
- Simulation Analysis of Cutting Mechanism -

Katsuhiro MAEKAWA, Ikuya OHSHIMA, Akihiko KUBO and Takeaki KITAGAWA

Simulation analysis based on the empirical flow stress, friction and wear characteristic equations of Ti-6Al-6V-2Sn titanium alloy has been conducted to clarify the effects of cutting speed and feed upon the cutting mechanism. Due to both strong temperature dependence on flow stress and high friction on the rake face, the chip contact length shortens with increasing cutting speed. As a result, the heavy mechanical and thermal loads act on the tool tip, causing the severe wear to take place. By increasing feed and decreasing cutting speed, however, the chip contact length is widened and the concentration of the tool tip loads is relieved, which leads to the reduction of the wear. The simulation based on a wear characteristic equation reveals the above-mentioned mechanism, giving a physical meaning of the improvements in tool wear and cutting efficiency.

Key words: titanium alloy, cutting mechanism, computer simulation, flow stress, friction, tool wear, finite element method, machinability

1. ま え が き

切削機構の観点からチタン合金が難削材とされる理由は、切りくず内に塑性不安定が生じやすく、この大変形が小さな切りくず接触域に集中するために、切れ刃稜の近くが異常な高温となって、この部分の激しい工具摩耗を引き起こすため¹⁾と説明されている。しかし、送りが0.1mm/rev程度に小さいときには、切りくずは明りょうなこ歯状にはならず、流れ形に近い。また、送りが増えても、工具のすくい面摩耗はクレータ状となることが多い。このような場合には、工具と切りくず間の摩擦が切削機構、とくに切削温度を支配するので重要である。

本報告ではチタン合金の流動応力(変形抵抗)特性と工具面上の摩擦特性を測定し、これに基づいて、チタン合金の切削特性を解析的に検討する。さらに、工具摩耗特性についても検討し、加工能率を向上させる適切な切削条件に対して、理論的な考察を加える。なお、解析は二次元切削を対象に行うが、用語は旋削に準拠し、例えば切込み(切削厚さ)は送りと表現する。

2. 流動応力特性と摩擦特性

まずチタン合金の流動応力特性を、切削とは独立の衝撃圧縮試験²⁾によって測定した。図1は一定ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 1000 \text{ s}^{-1}$ における流動応力-塑性ひずみ曲線である。ひずみ $\bar{\epsilon} = 0.3$ までは加工硬化を示すが温度 $\theta = 300^\circ\text{C}$ 以下では巨視的な割れが発生する。それより高温では加工硬化率が減少し、加工軟化も生じている。実際の切りくずの変形は、大きな静水圧力が加わる三次元変形であり、しかも熱軟化の生じないmsオーダーのごく短時間の現象²⁾である。そこで、 $\bar{\epsilon} = 0.3$ までの加工硬化率を外挿して、流動応力 $\bar{\sigma}$ の実験式を求めると次のようになる。

$$\bar{\sigma} = 9.81 A(\theta) \left(\frac{\dot{\epsilon}}{1000} \right)^{M(\theta)} e^{k\theta} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{1000} \right)^{-m'} \left\{ \int_{\theta, \bar{\epsilon}=h(\bar{\epsilon})} e^{-k\theta/N(\theta)} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{1000} \right)^{m'/N(\theta)} d\bar{\epsilon} \right\}^{N(\theta)} \text{ MPa}$$

ただし

$$A(\theta) = 220 \exp(-0.00133\theta) + 3.0 \exp\{-0.00013(\theta - 80)^2\} + 0.76 \exp\{-0.00014(\theta - 300)^2\} + 4.8 \exp\{-0.00011(\theta - 700)^2\}$$

$$M(\theta) = 0.026 + 0.000060\theta$$

*原稿受付 平成4年4月18日

**正 会 員 茨城大学工学部(日立市中成沢町4-12-1)

***正 会 員 北見工業大学(北見市公園町165)

$$N(\theta) = 0.18 \exp(-0.0016\theta) + 0.015 \exp\{-0.000010(\theta - 550)^2\}$$

$$k = 0.0000898, \quad m' = 0.00550$$

Fig.1 Stress-strain curves at a strain rate of 1000 s^{-1}

Fig.2 Flow stress-temperature curves at a strain rate of 1000 s^{-1}

ここで積分項は、温度とひずみ速度の履歴効果²⁾を表す。図2は $\dot{\epsilon} = 1000 \text{ s}^{-1}$ の場合について、流動応力と温度の関係を示す。図中の記号は実験点、曲線は式(1)による近似である。炭素鋼に比べて²⁾、流動応力の温度依存性が大きく、加工硬化も激しいのが特徴である。

一方、工具すくい面上の摩擦特性は、分割型工具動力計³⁾を用いて測定した。図3は Ti-6Al-6V-2Sn を超硬 K20 で乾切削する場合の σ_t と τ_t の分布を、切削速度 $V=30 \text{ m/min}$ と $V=50 \text{ m/min}$ の場合について示す。その他の切削条件は図中に示す。いずれの速度においても、 σ_t は切りくず離脱点から切れ刃に向かって指数関数的に増大し、切れ刃近傍の σ_t は 3 GPa にも達する。一方、 τ_t も切れ刃に向かって増大するが、送り f に等しい $\ell=0.2 \text{ mm}$ で飽和している。飽和点の摩擦応力は 540 MPa であり、これは切削データから求めたせん断面せん断応力とほぼ一致する。図3を σ_t と τ_t の関係で整理すると図4が得られ、次式によって近似できる。⁴⁾

$$\frac{\tau_t}{\tau_e} = \left[1 - \exp \left\{ - \left(\mu \frac{\sigma_t}{\tau_e} \right)^n \right\} \right]^{1/n} \quad (2)$$

ただし、 τ_e は切りくずのせん断降伏応力、 μ と n は特性定数であり、その値は図中に示す。図4の実線と破線は式(2)による近似曲線である。切りくず離脱点付近の垂直応力が小さい軽摩擦下では、クーロン摩擦が成り立つが、摩擦係数は $V=30 \text{ m/min}$ のときに $\mu=1.77$ 、 $V=50 \text{ m/min}$ では $\mu=4.10$ と著しく大きい。

Fig.3 Stress distributions measured by the divided-tool method

Fig.4 Relationship between frictional and normal stresses

3. シミュレーション解析

3.1 解析方法

送りが大きい場合には典型的なこの歯状切りくずが生成する。この非定常解析に関しては臼井らの詳細な検討¹⁾があるので、ここでは取り上げない。切りくずがほぼ流れ形とみなせる、送りが0.1mm前後と小さい場合を解析の対象とし、迅速に定常解を得る近似解法の一つである反復収束法⁵⁾を用いる。送りの1/10程度の微小切削距離ごとに変形速度ベクトルから流線を構成し、この流線に沿ってひずみと流動応力（温度の効果も含む）を修正することを繰り返すことによって速度場、応力場、ひずみ場、温度場の定常解を得ることができる。塑性変形の解析には次式の構成方程式を用いる。

$$\dot{\bar{\sigma}}_{ij} = \left\{ \frac{E}{1+\nu} (\delta_{ij} \delta_{j,i} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \delta_{k,k}) - \alpha^* \frac{9G^2}{\bar{\sigma}^2 (3G + H')} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} \right\} \dot{\epsilon}_{k,k} \quad (3)$$

式(3)は、Misesの降伏条件とPrandtl-Reussの流動法則に従うひずみ硬化材に対する、構成方程式のテンソル表示である。 $\dot{\bar{\sigma}}_{ij}$ は真応力のJaumann速度。 $\dot{\epsilon}_{k,k}$ は真ひずみ速度、 σ'_{ij} は偏差応力、 $\bar{\sigma}$ は相当応力；E, G, H', ν はそれぞれヤング率、剛性率、加工硬化率、ポアソン比、 δ_{ij} はKroneckerのデルタ、 α^* は弾性変形的时候には0、塑性変形では1の値をとる。一方、温度解析には既報⁶⁾のエネルギー式を基礎式として用いる。有限要素法を用いて、式(3)とエネルギー式を解くが、その定式化は文献⁵⁾に詳しく述べられているので、ここでは省略する。なお、式(2)は式(3)を解くときの摩擦の境界条件として、式(1)は $\bar{\sigma}$ とH'を評価するために使用される。

3.2 解析結果

以下に解析結果を(a)V=30m/minと、(b)V=50m/minで対比して示す。その他の切削条件は同一で、f=0.2mm/rev、工具すくい角 $\gamma=5^\circ$ 、逃げ角 $\alpha=9^\circ$ 、二次元乾切削である。図5は温度 θ (°C)、図6は相当塑性ひずみ速度 $\dot{\bar{\epsilon}}$ (s⁻¹)、図7は相当応力 $\bar{\sigma}$ (MPa)の分布を示す。生成する切りくずの形状は(a)に比べて(b)、すなわち高速になるほど薄く、カールも小さい。切りくずの接触長さは高速ほど短い。すくい面の温度は図5に見るように、低速(V=30m/min)に比べて高速(V=50m/min)の方が約200°C高くなっている。しかし、温度の絶対値は大きくなるが、被削材、切りくずおよび工具内の分布の形状は変わらない。

Fig.5 Isotherms near cutting tip

Fig.6 Distribution of equivalent plastic strain rate

Fig.7 Distribution of equivalent stress

一方、相当塑性ひずみ速度は図6に見るように、高速の方が大きい。いわゆるせん断面よりやや前方の位置で最大となり、その概略値は低速で 1000s^{-1} 、高速で 2000s^{-1} である。ただし、いずれも刃先点前方の相当塑性ひずみ速度は 8000s^{-1} にも達している。すくい面を擦過する切りくず裏面のひずみ速度の最大値は、せん断面のその半分程度である。低速の方が切りくず接触長さが長い分だけ、塑性変形域は広がっている。

図7の相当応力の分布は、低速と高速を比べるとほとんど差がない。これは、式(1)と図2から明らかに、流動応力に及ぼす温度とひずみ速度の影響が

相殺関係にあるためである。ただし、すくい面を擦過する切りくず裏面側では、切りくず接触長さの違いによって応力分布に差が見られる。

4. 工具摩耗特性

切削機構は工具摩耗と密接に関係するので、チタン合金切削時の工具摩耗特性を検討しておく。炭素鋼や高マンガン鋼切削時の超硬合金工具のすくい面および逃げ面の摩耗に対しては、次の特性式³⁾⁷⁾が提案されている。

$$\frac{1}{\sigma_t} \frac{dW}{dL} = C_1 \exp\left(-\frac{C_2}{\theta}\right) \quad (4)$$

ただし dW/dL は単位面積、単位摩擦距離当たりの摩擦体積、 σ_t は垂直応力、 θ は絶対温度、 C_1 と C_2 は工具と被削材の組合せに対して決まる特性定数である。 σ_t は図4で求まっているから、 dW/dL と θ の測定を行えば、チタン合金と超硬K種の組合せに対しても式(4)を検証できる。 dW/dL の測定は丸棒の長手旋削によって求めた。 $f=0.2\text{mm/rev}$ 、 $d=2\text{mm}$ は同様であるが、工具は形状は(0, 5, 11, 6, 15, 15, 0.8)を用いた。一方、 θ は円板の二次元切削によって、切削幅中央のすくい面上の分布を、微小露出熱電対法³⁾によって測定した。図8は得られた温度分布を示す。比較のために、 $V=60\text{m/min}$ における高マンガン鋼(18%Mn-5%Cr)とS45C炭素

Fig.8 Measured isotherms on rake face

Fig.9 Plots of tool wear characteristics

鋼のすくい面温度を併記した。送りが異なるS45Cの場合には、0.2/0.26倍だけ等価的に分布を切れ刃に近づけてみても、いかにチタン合金切削時のすくい面温度が高く、切れ刃に接近しているかがわかる。

このようにして得られた σ_t 、 dW/dL 、 θ の測定結果を用いて $(1/\sigma_t)(dW/dL)$ と $1/\theta$ の関係をプロットすると図9が得られる。直線関係、すなわち式(4)が成り立つことがわかる。比較のために、S45C炭素鋼と超硬P20の組合せで得られた特性曲線³⁾⁷⁾を一点鎖線で示す。被削材と工具の組合せは異なるが、ほぼ同様な特性定数を持つことは興味深い。同図より $C_1=21770\text{K}$ 、 $C_2=12.6(\text{mm}^2/\text{N})(\text{mm}/\text{m})$ である。

5. 考 察

工具すくい面の諸量をシミュレーションと実験と比較してみる。切削条件は摩擦特性試験で用いたものと同じ $V=50\text{m/min}$ 、 $f=0.2\text{mm/rev}$ 、 $\gamma=5^\circ$ 、二次元乾切削である。図10はすくい面の垂直応力 σ_t 、温度 θ 、摩擦深さ W の比較である。解析に用いた多くの仮定を考慮に入れば、両者の一致は良好であるといえる。しかし、シミュレーションでは実測より最高温度の位置が切れ刃から後退している。これは、のこ歯状切りくずの生成に伴うせん断面での巨視的な塑性不安定に基づく、局所的な温度上昇¹⁾が考慮されていないことによるものと考えられる。また、クレータの最大深さは一致しているが、切れ刃近傍に生じる大きな摩擦は、シミュレートされていない。過大な機械的および熱的負荷による刃先の塑性変形等、他の要因が摩擦に関与しているものと思われる。

チタン合金の荒削りの場合には、 V を控え目にして f を増加させるのがよいこと、が実験的に示されている⁸⁾。その理由をシミュレーション解析によって検討してみる。図11は、単位時間当たりの除去体積が同一となる ($V=50\text{m/min}$ 、 $f=0.1\text{mm/rev}$) と ($V=30\text{m/min}$ 、 $f=0.167\text{mm/rev}$) の場合のすくい面の σ_t 、 θ 、 W の分布を示す。送りを増やすことによって、すべての分布が切れ刃から離れる方向に平行移動するとともに、分布も滑らかになる。すなわち、相対的に刃先点の機械的および熱的負荷が減少し、その結果、切れ刃付近の激しい摩擦も減少することになる。上述の切削条件の変更によって、チタン合金の切削加工能率の向上が図れた⁸⁾のは、このような物理的背景に基づいている。

最後に、切りくずのカールの機構について考察する。シミュレーション解析では、高速の方が低速よりもカール半径が小さく、実験的にも同様の傾向が見られた。図5～7に見るように、せん断面の現象に差がないこ

Fig.10 Comparison between simulation and experiment

Fig.11 Effects of cutting speed and feed

とから、切りくずのカールがすくい面の摩擦と密接に関係していることは明らかである。式(3)の摩擦特性の観点からは、チタン合金の場合には高速の方が高摩擦状態であり、したがって摩擦熱によって高温状態となりやすく、すくい面を擦過する切りくず裏面の流動応力は低下する。その結果、切りくず表面側よりもより容易に切りくず裏面の塑性変形が進行する。このよ

うな切りくず内の速度差がカールを生むことになる。切削速度が増大して接触長さが短くなれば、摩擦による拘束効果が減少するので、カールがさらに助長されるものと考えられる。

6. 結 論

本研究では流動応力、摩擦、摩耗の各特性式に立脚したシミュレーション解析によって、切削速度と送りがTi-6Al-6V-2Snの切削機構に及ぼす影響を検討した。得られた知見をまとめると、次のようになる。

- (1) チタン合金の流動応力特性は室温付近では加工硬化が激しく、高温では加工軟化が大ききといった強い温度依存性を示し、一方、工具すくい面の摩擦特性は切りくず離脱点付近で高摩擦状態となるのが特徴である。
- (2) 上述の両特性に起因して、高速切削ほど切りくず接触長さが減少するために、切れ刃に接近して機械的および熱的負荷が作用する。
- (3) 切削速度を下げ、送りを上げることによって、切りくず接触長さが増大し、刃先に集中する負荷を分散させることができる。
- (4) 切りくずのカールは、流動応力の強い温度依存性とすくい面の高摩擦に起因して、切削速度が増すほど顕著になる。
- (5) チタン合金-超硬K種の組合せについても、炭素鋼-超硬P種の工具摩耗特性³⁾⁷⁾が適用できる。

参 考 文 献

- 1) 臼井英治, 帯川利之, 白樫高洋: 難削材の切削過程の解析(第2報), 精密工学会誌, 52, 9(1986)1623.
- 2) 前川克廣, 白樫高洋, 臼井英治: 高温・高速変形における低炭素鋼の流動応力特性(第2報), 精密機械, 44, 12(1978)1495.
- 3) 北川武揚, 白樫高洋, 臼井英治: 切削工具寿命の解析的予測に関する研究(第1報), 精密機械, 42, 12(1976)1178.
- 4) 前川克廣, 久保明彦, 北川武揚: 快削鋼の被削性解析(第2報), 精密工学会誌, 57, 12(1991)2193.
- 5) 臼井英治: 現代切削理論, 共立出版, (1990)61.
- 6) T.H.C. Childs, K. Maekawa and P. Maulik: Effects of Coolant on Temperature Distribution in Metal Machining, Materials Sci. and Technol., 4, 11, (1988)1006.
- 7) 北川武揚, 前川克廣, 白樫高洋, 臼井英治: 切削工具寿命の解析的予測に関する研究(第4報), 精密工学会誌, 53, 9(1987)1414.
- 8) 大島郁也, 前川克廣: チタン合金の切削加工能率の向上に関する研究(第1報), 1991年度精密工学会春季大会学術講演論文集, (1991)281.