Ti-6Al-6V-2Sn の切削加工能率の向上に 関する研究 (第2報)*

——工具刃先温度を低下させるための検討——

前 川 克 廣** 大 島 郁 也** 鈴 木 一 幸***

Improvements in Cutting Efficiency of Ti-6Al-6V-2Sn Titanium Alloy (2nd Report)
- Investigations for Reducing Tool Tip Temperature -

Katsuhiro MAEKAWA, Ikuya OHSHIMA and Kazuyuki SUZUKI

This paper investigates the machinability of Ti-6Al-6V-2Sn titanium alloy from the viewpoints of cutting temperature and tool wear. Finite element temperature analysis shows that tool tip temperature decreases with increasing heat conductivity of a cutting tool. Either a diamond or a special tool which enhances heat conduction near the tool tip is recommended for finish turning of the titanium alloy since reduced tool face temperature is favorite for the prolongation of tool life. Using a diamond tool at a cutting speed of more than 105 m/min, not only the cutting efficiency is improved but also the cutting costs are lessened in comparison with using a straight tungsten carbide tool. A heat pipe-embedded cutting tool is also shown to be effective for the reduction of tool wear.

Key words: titanium alloy, cutting efficiency, cutting temperature, tool wear, diamond tool, heat pipe technology, thermal conductivity, finite element method

1. ま え が き

切削温度は $u\sqrt{Vf/K\rho C}$ (u :比切削抵抗, V :切削速度, f :送り, K :熱伝導率, ρ :密度, C :比熱)に比例して上昇する¹⁾。したがって, アルミニウム合金やステンレス鋼に比べて $K\rho$ が小さいチタン合金の切削では, 相対的に V と f を小さ目に設定して, 工具摩耗の支配因子である切削温度を抑制しなければならない。このことが, チタン合金の加工能率が向上しない最大の理由である。しかし, ここでの切削温度とは切りくずの平均的な温度上昇のことであり, チタン合金切削時の工具摩耗に直接に関与するすくい面や逃げ面の温度は, 全く明らかにされていない。

本報告では, 有限要素法による温度解析によって, 工具材種の相違, とくに熱伝導率の違いがTi-6Al-6V-2Sn 切削時の工具温度に及ぼす影響を調べるとともに, 具体的に刃先温度を低下させる方法を検討する。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. 有限要素法による工具の温度解析

温度解析は, 二次元定常切削の場合には, 被削材—切りくず—工具の系に対して次のエネルギー式

$$K\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial y^2}\right) - \rho C\left(u_x \frac{\partial\theta}{\partial x} + u_y \frac{\partial\theta}{\partial y}\right) + q_1 = 0 \quad (1)$$

を図1に示す境界条件

$$\left. \begin{aligned} 1) & \theta = \theta_s \quad (\text{境界} S_0) \\ 2) & -K \frac{\partial\theta}{\partial n} = 0 \quad (\text{境界} S_{q0}) \\ 3) & -\left(K \frac{\partial\theta}{\partial n}\right)_{II} - \left(K \frac{\partial\theta}{\partial n}\right)_{III} = q_2 \quad (\text{境界} S_{q2}) \\ 4) & -K \frac{\partial\theta}{\partial n} = h(\theta - \theta_0) \quad (\text{残りの境界} S_h) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

のもとで解くことに帰着する²⁾。ただし, 式(1)の左辺第2項は工具内では省略される。また, ふく射による熱伝達は無視している。上式において θ は温度, K は熱伝導率, ρ は密度, C は比熱, u_x と u_y は速度の x 成分と y 成分, q_1 はせん断面での熱源強さ, q_2 はすくい面での熱流束, n は境界の外向き法線, h は熱伝達係数,

*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)

***学生会員 茨城大学大学院

Fig.1 Analytical model

Table 1 Cutting data of Ti-6Al-6V-2Sn

Cutting speed	50 m/min
Depth of cut	0.1 mm
Width of cut	3 mm
Rake angle	10°
Clearance angle	6°
Cutting fluid	10 l/min(JIS2-2)
Horizontal force	724 N
Vertical force	587 N
Shear angle	43.1°
Shear stress	337 MPa
Shear velocity	57.8 m/min
Chip velocity	39.0 m/min
Chip contact length	0.794 mm

(a) $f=0.3$ mm/rev (b) $f=0.1$ mm/rev

Fig.2 Chip section at a speed of 50 m/min

Table 2 Constants used in the analysis

	Thermal conductivity K $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	Heat capacity $\rho C \text{ MJm}^{-3}$	Heat transfer coefficient h $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
Ti-6Al-6V-2Sn	17.2	2.29	—
Tool Al_2O_3	16.7	—	10^3
HSS	22.0	—	10^3
K10	79.5	—	10^3
cBN	1300	—	10^3
Diamond	2140	—	10^3

θ_s は固定温度, θ_0 は周囲温度である. 有限要素法の定式化は, 文献2)に詳しく述べてあるので, ここでは省略する.

表1は超硬K10によるチタン合金の切削データである. 旋盤による円筒端面の近似二次元切削を行って求めた. これをもとに図1に示す q_1 (一様分布熱源)と q_2 (三角形分布熱源)を求めた. また, 切りくず接触長さはクレータ最大摩耗幅とした. なお, チタン合金切削時の切りくずは, 図2に示すようにのご歯状となるが, 送りが $f=0.1\text{mm/rev}$ と小さい場合には流れ形の切りくずとみなせるので, 解析ではせん断面切削模型を仮定した. 表2は解析に用いた諸定数であり, それらの温度依存性は無視した. また, 工具材種の相違は工具熱伝導率の違いだけで, 図1の解析モデルと表1の切削データはそのまま用いた.

以下に表1の二次元切削データに基づいて得られた解析結果を示す. いずれも切れ刃に直角な断面での温

Fig.3 Isotherms within K10 tool

度である. 図3は超硬K10の定常温度分布である. 最高温度の位置は, 刃先から送りの3倍程度離れたすく

い面上にあり、1100℃に達している。逃げ面の最高温度は900℃前後である。

次に、工具の熱伝導率の相違が工具温度に及ぼす影響を示したのが図4である。図中のA～Eは添図に示す各位置を示す。同図より、熱伝導率の大きな工具ほど、すくい面上のA点（ほぼ最高温度位置）と逃げ面上のB点の温度が低下することがわかる。これに対してD点やE点のような、工具内部の温度は上昇している。これは熱流束 q_1 、 q_2 は一定であるが、このうち切りくずとの接触面を通して工具に流入する割合、すなわち熱流入率が熱伝導率の大きな工具ほど増大するためである³⁾このことから、工具摩耗の主支配因子である表面温度を低下させるためには、熱伝導率の大きなダイヤモンド工具⁴⁾あるいはcBN工具を用いるか、あるいは内部冷却工具⁵⁾のように、刃先付近の熱伝導を促進させる方法が効果的と考えられる。

Fig.4 Tool temperature as a function of thermal conductivity of tool

3. 焼結ダイヤモンド工具の検討

そこでダイヤモンド工具について、さらに検討してみる。図5は (a)工具全体がダイヤモンド、(b)厚さ0.5mmの焼結ダイヤモンド工具、(c)厚さ12μmのダイヤモンドコーテッド工具の刃先付近の温度分布である。(b)と(c)の場合の基材は超硬K10とし、焼結ダイヤモンドの熱伝導率を、Coなどの結合剤を含むためにダイヤモンド単体のその約1/4の560Wm⁻¹K⁻¹とした⁵⁾図3のK=79.5Wm⁻¹K⁻¹の超硬工具に比べて、すくい面温度(A点)はダイヤモンド単体で約1/2に、焼結ダイヤモンド工具で200℃、ダイヤモンドコーテッド工具で100℃程度低下している。逃げ面の温度も減少割合はすくい面に比べて少ないが、低下することがわかる。ただし、仕事率の100%が熱に変換されることや、切削幅方

Fig.6 Flank wear progress curves in finish turning

Fig.5 Isotherms within various diamond tools

向の熱伝導と工具側面からの熱伝達がないことを仮定しているために、温度は高目になっている。また、計算はダイヤモンド工具の切削データではなくK10のそれを代用したが、その後の切削実験で、両者の切削データ間に大差のないことを確認している。

以上の温度解析の知見をもとに、焼結ダイヤモンド工具を用いて工具摩耗試験を行った。なお、温度解析と摩耗実験は、用いた切削条件が異なるので厳密には対応づけられないが、第一近似として、解析の温度は切込み中央部の切りくず流出方向の温度とみなせる²⁾。工具は、超硬基材の上に厚さ0.5mmの人工ダイヤモンドをろう付けしたものである。図6は図示の仕上げ切削条件下での逃げ面摩耗経過曲線である。V=50m/minとV=100m/minの場合について、焼結ダイヤモンドを実線で、K10を破線で示す。高速切削ほど焼結ダイヤモンド工具の優位性が認められる。ただし、いずれの速度においても送り量を0.2mm/revに、切込みを2mmに上げた場合には、数分で欠損が生じた。このようにダイヤモンドは高硬度ではあるが高ぜい性でもあるという性質上、荒削りには向かないが、 $f=0.1\text{mm/rev}$ 、 $d=0.1\text{mm}$ 程度の仕上げ加工には、2h以上の長時間の使用にも耐える。また、仕上面も $Ra=0.5\mu\text{m}$ 前後と良好であった。したがってチタン合金の仕上げ切削には、ダイヤモンド工具を使用するのが加工率の観点からは好ましい。

4. ヒートパイプ装着工具の検討

工具刃先付近の熱伝導あるいは熱伝達を促進させる代表的な方法は、切削油剤を使用することである。しかし、その熱伝達係数²⁾は $1000\sim 5000\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ と十分に大きくはなく、また切りくずと工具間には大きな圧縮力が作用するために、切削油剤が刃先まで侵入せず、したがって刃先付近の温度を低下させるという観点からは、十分な冷却効果が得られない。そこで、冷却孔を刃先付近の工具内部に設けて、そこに水などの冷媒を通して冷却効果を高める内部冷却法⁵⁾が提案されている。ただし、有限要素法による熱解析⁶⁾によれば、冷媒の熱伝達係数が $10\text{kWm}^{-2}\text{K}^{-1}$ 以上であれば、刃先付近の温度が顕著に低下する。このような要求を満たす冷却方法の一つに、ヒートパイプ技術の応用⁹⁾がある。

種々の形式のヒートパイプがあるが、切削工具の先端に挿入できるような小型のものが製作可能なウィック式を採用する。ウィック式では、毛細管力が主にウィック内の液流の圧力損失と、重力による位置エネルギーの差による力の和より大きくなければ、液体の移動が起こらない。したがって、次式で与えられるウィ

Fig.7 Effects of working temperature and tilt angle on heat flow

Fig.8 Schematic of a heat pipe-embedded turning tool

ック限界によって最大熱輸送量が決まる。

$$Q_{wick} = \left(\frac{\rho_l \sigma \lambda}{\eta_l} \right) \left(\frac{\kappa}{r_c} \right) \left(\frac{A_w}{l_{eff}} \right) \left(2 - \frac{\rho_l \sigma r_c l}{\sigma} \sin \theta \right) \quad (3)$$

ただし、 ρ_l は液体密度、 σ は表面張力、 λ は潜熱、 η_l は液体の粘度、 κ は浸透率、 r_c は毛細管半径、 A_w はウィック断面積、 l_{eff} は実効長、 θ は傾き角度である。式(3)に基づいて、銅フォームをウィックにした、銅容器-水ヒートパイプの最大熱輸送量 Q_{wick} を計算してみる。図7は、銅容器の外径を3mm、内径を2mm、長さ200mm、蒸発部と凝縮部の長さをともに40mmとして、下部を加熱、上部を水冷した場合の Q_{wick} と作動温度との関係を示す。一方、切削データから概算した工具すくい面での発熱量は約300Wである。全部が工具に流入するとしても、作動温度を60°C、ヒートパイプの傾

Fig.9 Evolution curves for flank wear

Fig.10 Comparison of crater wear

き角度を 60° 以上に設定すれば、熱輸送量が入熱量を上回り、ヒートパイプによる冷却効果が出てくることがわかる。

図8は試作したヒートパイプ装着工具の概略図である。ヒートパイプを超硬K10の敷板と超硬K10チップの間に挟んで固定した。すき間には熱伝導性グリースを挿入し、またチップも0.5mmまで薄く成形するなど、

ヒートパイプによる冷却効果を高める工夫を行った。

図9は逃げ面摩耗経過曲線である。切削速度は $V=50$ m/min, そのほかの条件は図中に示す。逃げ面摩耗幅は標準工具(K10)よりも20~30%減少している。ただし、ヒートパイプ装着工具では切削時間が60 min($VB=0.15$ mm)に達したときに、刃先が欠けた。チップを薄くしたこと、あるいはチップ-ヒートパイプ-敷板の固定方法に不備があったために、刃先の強度が低下したのと考えられる。図10はすくい面上のクレータ摩耗の比較である。同図(a)はヒートパイプ装着工具、(b)は標準工具の場合を示す。切削速度 $V=70$ m/min以外は、図9と同じ切削条件である。5min間の旋削を行った後、腐食液(ふっ化水素:過酸化水素:純水=1:6:3)を用いて表層に付着したチタンを除去した。同図より、ヒートパイプ装着工具のすくい面摩耗の方が減少していることがわかる。

5. 考 察

チタン合金の仕上げ切削にダイヤモンド工具を使用すれば、高速切削が可能になるので加工能率の観点からは好ましいことが指摘された。一方、工具費用の観点からは、焼結ダイヤモンドチップは8000円/個 前後と超硬チップより10倍以上高価である。しかし、切削速度を上げることによって実切削時間が大幅に短くな

Fig.11 Relationship between cutting cost and cutting speed

Table 3 Constants used in cost analysis

Overhead cost + labor cost	$k_1 = 6600 \text{ ¥/h}$
Tool cost (K10)	$k_2 = 700 \text{ ¥/edge}$
(diamond)	$k_2 = 800 \text{ ¥/edge}$
Tool-replacement time	$\tau_0 = 0.5 \text{ min/pc}$
Preparation time	$t_3 = 1.0 \text{ min}$
Constants in Taylor's equation (K10)	$n=0.132, C'=95.9$
(diamond)	$n=1.29, C'=24000$

るので、加工費用は、超硬チップを使用した場合に比べて減少するものと予想される。そこで、 $f=0.075\text{mm/rev}$ の場合について加工費用 c と切削速度 V の関係をプロットしたのが図11である。ただし、表3に加工費用の計算に用いた諸定数を示す。同図より $V>105\text{m/min}$ のとき、ダイヤモンド工具を使用した場合の加工費用は超硬K10の最小加工費用よりも小さくなることわかる。

ダイヤモンド工具の摩耗が少ない理由は、ダイヤモンドが熱の良導体であるために切削温度が低下するという観点からだけでなく、ダイヤモンドそれ自体が高硬度であるという特性にも求められる。炭素原子が強固に共有結合したダイヤモンド構造であるために、摩擦面での原子の移動、すなわち摩耗が起こりにくいことは容易に想像される。しかし、切りくずが擦過する工具すくい面は高温・高圧の状況下にあり、したがって摩擦面の炭素原子の結合が弱まったり、あるいは拡散が起こりやすい状態にある。工具の高い熱伝導率に起因するすくい面の温度低下は、このような硬度の低下による摩耗の増大を抑制し、しかも空气中・常圧で 712°C 以上に加熱すると CO_2 になるといった化学変化を防ぐことにも寄与していることになる。

一般に、セラミックスは耐熱性や耐摩耗性、高温強度に優れているために、切削工具としても利用されている。しかし、例えばアルミナの熱伝導率は $16.7\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ と小さく、いわゆる熱遮蔽効果のために図4の解析結果をみると、すくい面の最高温度は 1500°C にも達している。このように熱の不良導体であることが、工具面温度を上昇させ、チタン合金の切削時にセラミック工具あるいはセラミックコーテッド工具の工具摩耗が激しく、したがって適合しない¹⁰⁾とされる大きな理由である。難削材の切削にはセラミックス等の高硬度の工具を用いるのがよいとされてきた従来の考え方は、チタン合金の場合にはあてはまらず、工具の熱伝導率の良否も、工具寿命の観点からは重要であることを指摘しておく。

6. 結 論

本研究では、切削温度の観点から Ti-6Al-6V-2Sn チタン合金の被削性を検討した。得られた知見をまとめると、次のようになる。

- (1) 有限要素法による工具の温度解析によって、工具の熱伝導率の相違が工具温度に及ぼす影響を明らかにした。
- (2) チタン合金のように熱伝導率と密度が小さく、切削温度が上昇しやすい材料に対しては、熱伝導率の大きな工具を使用すれば、工具摩耗に關与する工具面温度は低下する。
- (3) ダイヤモンド工具を、切削速度 105m/min 以上の高速で仕上げ加工に用いれば、加工能率が向上するだけでなく、加工費用も超硬K種に比べて少なくてすむ。
- (4) 工具の熱伝導を促進させるために、ヒートパイプを刃先に挿入した内部冷却工具を用いても、工具摩耗は減少する。

謝 辞

切削実験に協力された佐藤津紀夫氏（現、住友スリ－エム）にお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) M.C.Shaw: Metal Cutting Principles, Clarendon Press, Oxford, (1984)284.
- 2) 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.
- 3) E.G.Loewen and M.C.Shaw: On the Analysis of Cutting-Tool Temperatures, Trans. ASME, 76, (1954)217.
- 4) N.Narutaki, A.Murakoshi and S.Motonishi: Study on Machining of Titanium Alloys, Ann. CIRP, 32, 1, (1983)65.
- 5) 奥島啓次, 川嶋裕司: 工具冷却切削の研究, 精密機械, 34, 2(1968)97.
- 6) 東芝タンガロイ(株), 私信.
- 7) 臼井英治, 白樫高洋, 北川武揚: 三次元切削温度分布の数値解析, 精密機械, 41, 12(1975)1141.
- 8) 前川克廣, 大島郁也, 村田良司: 内部冷却切削工具の熱解析, 精密工学会誌, 57, 11(1991)2011.
- 9) 日本ヒートパイプ協会編: 実用ヒートパイプ, 日刊工業新聞社, (1985)5.
- 10) P.D.Hartung and B.M.Kramer: Tool Wear in Titanium Machining, Ann. CIRP, 31, 1, (1982)75.