

要 旨

切削状態が時間的に定常でない断続切削の場合であっても、定常な切削モデルを用いて工具すくい面温度の予測が可能であるかを検討する。

1. まえがき

旋盤などによる連続切削ではなく、エンドミルやフライスなどで見られる断続切削においては、切削力や切削温度が時間的に定常ではないためその解析が複雑であると考えられていた。本研究では、工具摩擦に大きな影響のある工具すくい面温度に注目し、これを切削状態が定常なモデルを用いた簡便な方法による断続切削の温度数値解析を試みた。

2. 被削材と切削条件

解析の対象とした被削材はチタン合金であり、その計算に用いた2次元切削データ及び熱定数を表1に示す。切削条件は被削材を幅3.4mmの円盤として用い、切削速度V=30m/min、送りf=0.1mm/revの傾斜切削(傾斜角30°)とし、工具は超硬K20(すくい角5°)を用いた。また計算値と比較のための実測温度は、工具と切りくず、または工具中に埋込んだタングステン線と工具を熱電対として測定した平均温度と局所温度を用いた¹⁾。

3. 解析の方法

(1) 切削モデルの考え方

本研究で対象とする傾斜切削モデルを図1に示す。このモデルによる切削は3次元切削であるが、切削幅が送り量に比べて十分大きいことから、切りくず流出方向に沿い、工具すくい面に垂直な断面を考え、そこに現われた2次元切削モデルの集積として考えることにより、この切削を切削幅を考慮に入れない2次元切削に置き換えて考えることができるものとした。

(2) 数値解析法

2次元塑性流れの面内で解くべき微分方程式を式(1)に示す²⁾。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) - u \frac{\partial \theta}{\partial x} - v \frac{\partial \theta}{\partial y} + \frac{q}{\rho c} \quad (1)$$

ただし、 θ : 温度、 t : 時間、 u, v : x 及び y 方向の速度、 q : 単位体積当りの熱源強さ、 a : 熱拡散率、 ρc : 被削材または工具の密度、比熱である。右辺第1項は熱伝導項、2, 3項は熱伝達項、第4項は発熱項である。境界条件として空気との接触面を断熱境界、工具と切りくず接触面を異媒質境界として、それぞれ次式を満たすように解けば良い。

$$\left. \begin{aligned} \text{断熱境界} : \frac{\partial \theta}{\partial n} &= 0 \\ \text{異媒質境界} : k_1 \frac{\partial \theta}{\partial n} &= k_2 \frac{\partial \theta}{\partial n} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし、 n は境界面の法線、 k_1, k_2 は境界面側の熱伝導率である。なお解析においては、せん断面仕事及び摩擦仕事は全量が熱に変換され、被削材、切りくず及び工具は熱的に等方であると仮定する。式(1)はこのままでは解けないので差分化し、図2に

	チタン合金	超硬
単位切削幅当りの荷分力 F_c (kgf/mm)	6.7	
せん断角 ϕ (deg)	47.5	
せん断応力(平均) τ_w (kgf/mm ²)	52	
切りくず流出角 η_c (deg)	37.5	
せん断速度 V_w (m/min)	31.1	
切りくず流出速度 V_c (m/min)	24.6	
比熱 c (J/kg·K)	0.540	0.398
密度 ρ (kg/m ³)	4430	11800
熱伝導率 k (W/m·K)	16.7	67.0

表1

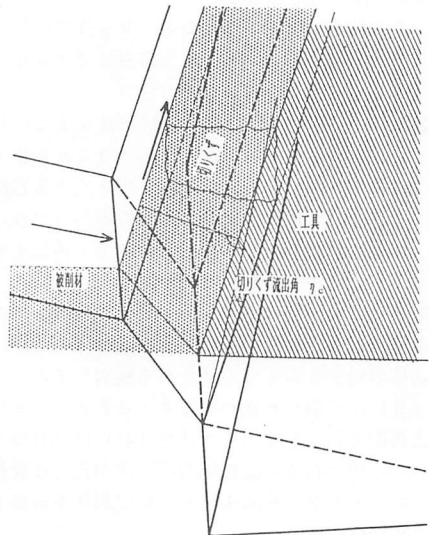


図1 切削モデル

示す格子間隔 $h=0.02\text{mm}$ の正方差分格子網について、初期温度を室温とし温度 θ が定常になるまで Δt 時間刻みに繰り返し計算を行えば良い。またせん断面及びすくい面摩擦発熱による温度上昇 $\Delta\theta_s$ 、 $\Delta\theta_t$ は、それぞれ式(3)によって与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta_s &= \tau_s V_s \Delta t (J \rho c h) \\ \Delta\theta_t &= \tau_t V_t \Delta t (J \rho c h) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで τ_s 、 τ_t はせん断及び摩擦応力、 V_s 、 V_t は切削速度のせん断面及びすくい面分速度、 ρc は切りくずと工具の平均の密度と比熱の積である。なお応力分布については、 τ_s 、 τ_t 共に切れ刃に向かうに従って応力が増大する三角形分布とした。

4. 解析結果と検討

図3に切削温度が定常になったときの工具すくい面温度分布を示す。実測値と計算値の間に良好な対応が見られる。図4に30mmの空転時間をはさみ6, 12, 24, 48, 96mmの切削を繰り返す断続切削を行った時の計算値と工具すくい面局所温度の実測値及び工具すくい面平均温度の実測値を示す。ただし、工具すくい面平均温度の空転時温度は測定されていない。また計算値は切れ刃より0.14mm、実測値は0.15mmの局所温度であるため定常温度に僅かな差が見られる。工具すくい面局所温度計算値と工具すくい面平均温度の実測値は共に切削開始から約15mm切削した所で定常となっている。断続切削の切削開始直後は切りくずや応力状態が定常ではないが、工具すくい面応力状態は切削距離 $L \approx 0.5 \sim 0.9\text{mm}$ ではほぼ定常³⁾となり時間的にも非常に短いため、定常なモデルを使った計算でも実測値との良好な対応が得られたものと考えられる。また切削時の工具すくい面局所温度実測値に関しては、定常温度になるまでの切削距離が計算値や工具すくい面平均温度の約2.5倍となっているが、これは工具に埋め込んだタングステン線と切りくずの間に僅かな切りくずが堆積するために温度の時間的変化の遅れが生じているものと考えられる。したがって、実測値の経過時間を1/2.5にすれば、実測値は計算値に接近するものと考えられる。また各切削開始時の計算値が実測値より約30℃低くなっているが、これは計算と違って実際の工具の大きさが有限であるためと、実測値はすでに数回の切削を繰り返してきた後の値であることが影響していると考えられ、計算の境界のとり方を変えることによって実測値に近い値が得られると考えられる。またこの温度差は切削中の温度にはほとんど影響がないと考えられる。

5. まとめ

断続切削の数値温度解析を行い、切削状態が非定常な場合でも定常な切削モデルを用いて工具すくい面温度の予測が可能であることを確認した。

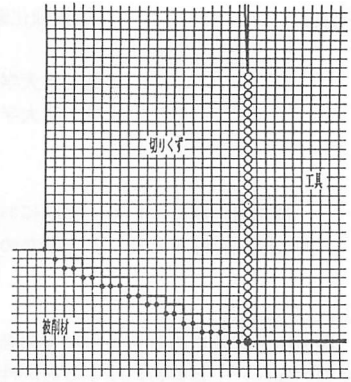


図2 正方差分格子網

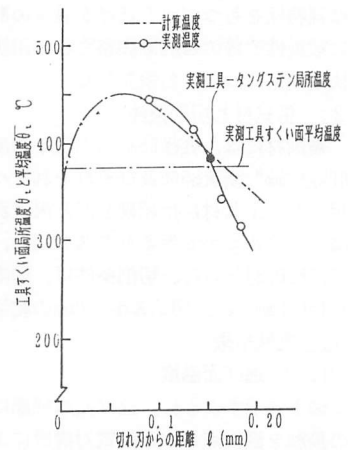


図3 工具すくい面温度分布

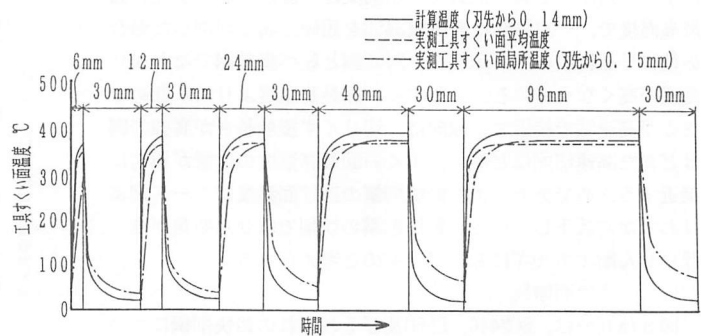


図4 切削温度の時間的変化

参考文献

- (1) 北川ほか：1994年精密工学会北海道支部学術講演論文集
- (2) 臼井ほか：精密機械38巻6号 昭47
- (3) 笹原ほか：精密工学会誌59巻8号 平5