刃先点近傍における温度分布と発生熱の配分の数値解析*

(第1報, $0 \leq \alpha \leq \phi$ なる二次元切削について)鍵和田忠男^{*1}, 金内忠彦^{*1}Numerical Analyses of Cutting Temperatures and Flowing Ratios of Generated Heat
(1st Report, Orthogonal Cutting with $0 \leq \alpha \leq \phi$)

Tadao KAGIWADA and Tadahiko KANAUCHI

A new numerical analysis model for the finite difference method is applied to the analysis of cutting temperatures and flowing ratios of cutting heat. This model uses hexagonal finite elements, which stand parallel with the cutting direction, the rake surface, and the shear plane; and can be applied to all geometrical cutting conditions. In this paper, as the first report, the cutting temperatures and the flowing ratios of cutting heat about the geometrical cutting conditions of $0 \leq \alpha \leq \phi$ are presented.

Key Words: Cutting, Temperature, Flowing Ratio of Heat, Numerical Analysis, Finite Difference Method, Hexagonal Finite Element

1. 緒 言

切削・研削加工における発生熱の配分に関しては、理論的、実験的に多くの研究がなされている。⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾ 実験結果は客観的事実ではあるが、物質の変形と移動を伴う苛酷な条件下での温度測定に基づいているため、不正確になりやすい。一方、この問題は原理的には簡単ないくつかの現象が複合することによって、表面上は複雑になっているのである。これに対して多くの理論においては、表面上の複雑さを原理的なものとして説明しようとするため、必然性よりは可能性をもとに大胆な仮定をし、また本来は異なるはずの温度を等しいとおいたりされている。この種の問題のように、原理的には簡単ないくつかの現象が複雑な境界条件のもとで複合している場合には、数値解析を用いることが有用である。

刃先近傍における温度分布を有限階差法を用いて数値解析した例はあるが、^{(7),(8)} 長方形(とくに正方形)の有限要素を用いているため任意のすくい角、せん断角、にげ角と、それらに対応した物質移動を考慮するうえでは、対象としうる幾何学的条件に限界がある。

著者らは以前から砥粒内の三次元的な温度分布と熱応力分布を求めるために、球座標系⁽⁹⁾⁻⁽¹²⁾およびとくに考案した平行円錐座標系^{(11),(12)}によって定義される有限要素を用いているが、これらも境界面(線)が直交しているためこの場合には適用が困難である。

そこで本研究においては新たに六角形有限要素を用い、要素の配列がせん断面も含めたすべての境界面に平行であるような分割模型を考案することにより、幾何学的に考えうるすべてのすくい角、せん断角、にげ角に対しての温度分布の有限階差法による数値解析を可能にした。有限階差法における六角形有限要素模型は基本的には三角形格子模型⁽¹³⁾と同じであるが、後者も含めてこれを用いるのは、少なくともこの分野においては本研究が最初であると思われる。本報はその第1報として、要素配列が最も単純となりしかも条件として一般的な、正のすくい角とそれより大なるせん断角をもつ二次元切削について解析を行った。

なおここでは一般性を持たせるため、すべての量を無次元量として扱った。

2. 数値解析模型

2.1 境界条件 はじめに、すくい角 α 、せん断角 ϕ 、にげ角 γ_r に関する二次元切削の前提条件として、

$$-90^\circ < \alpha < 90^\circ \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$0^\circ < \phi < \min(\alpha + 90^\circ, 90^\circ) \quad \dots\dots\dots (2)$$

* 昭和62年4月3日 第64期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和61年8月29日。

^{*1} 正員、北海道大学工学部(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)。

$0^\circ < \gamma_r < -\alpha + 90^\circ$ ..... (3)
を設定する。

図1に示したように、二次元切削における切削点近傍に任意に設定した領域内について数値解析を行う。被削材はこの領域の左方から進入し、一部はせん断面から方向を変え切りくずとなり、残りはそのまま移動して領域の右方へ退出する。切りくずは移動して領域の上方へ退出する。せん断面では塑性変形による熱が発生する。工具-切りくず接触面では摩擦熱が発生し、これを除く工具すくい面と切りくず背面、および他のすべての表面には熱伝達があるものとする。またこの領域の外側には被削材、切りくず、工具が無限に広がっており、これらの境界面を介して上述の物質移動と平行して熱伝導が存在するものとする。

2.2 要素分割 この領域内の被削材と切りくずを一体として、切削方向 (x_0 方向) およびすくい面に沿う方向 (y_0 方向) にそれぞれ m , n 等分する。ここで斜めに隣接する2要素 (i_0, j_0), (i_0+1, j_0-1) を結ぶ方向 (x_1 方向) をせん断方向に一致させると、すべてのすくい角 α 、せん断角 ϕ に対して x_0, y_0 方向における要素間隔 $\Delta x_0, \Delta y_0$ の比が切削比と完全に一致し、被削材と切りくずの移動を扱う上で極めて有用である。これを実現するための条件は以下に述べる通りである。各方向における無次元の要素間隔 $\Delta \hat{y}_0, \Delta \hat{x}_0, \Delta \hat{x}_1 (= \Delta x_0, \Delta y_0, \Delta x_1 / d$; d は切込み深さ) は、

$$\Delta \hat{y}_0 = 1 / (l \cos \alpha) \quad \text{..... (4)}$$

$$\Delta \hat{x}_0 = \{ \cos(\phi - \alpha) / \sin \phi \} \Delta \hat{y}_0 \quad \text{..... (5)}$$

$$\Delta \hat{x}_1 = \sqrt{\Delta \hat{x}_0^2 + \Delta \hat{y}_0^2 - 2 \Delta \hat{x}_0 \Delta \hat{y}_0 \sin \alpha} \quad \text{..... (6)}$$

となる。各要素の代表点は図1に示される通りであるが、物質移動および変形時の要素の体積を明確にする必要から、格子模型は用いず六角形有限要素を考える。

図1 境界条件と要素分割模型

この六角形は鋭角三角形を形成して隣接する要素の要素間隔の垂直二等分線によって形成されるが、上述の $\Delta \hat{y}_0, \Delta \hat{x}_0, \Delta \hat{x}_1$ が鋭角三角形を形成するための条件と式(1), (2) から、副題および1章に示した、本報で扱う条件範囲が次式で与えられる。

$$0^\circ \leq \alpha \leq \phi < 90^\circ \quad \text{..... (7)}$$

$\alpha \leq 0$ の範囲を扱うためには、 $\Delta \hat{x}_1$ の代わりに2要素 (i_0, j_0), (i_0+1, j_0+1) の間隔を用いて鋭角三角形を形成させるが、これについては次報以下で扱う。

工具については、上の座標系がにげ角 γ_r 分だけ左に回転し、その分すくい角に相当する角が増加して、 $\alpha_r = \alpha + \gamma_r$ となっているみなして、上とほぼ同様に分割することが有用である。 y_0 方向の要素間隔は全く同じとし、上の x_0 方向に相当するにげ面に沿う方向の要素間隔 $\Delta \hat{x}_{0r}$ を

$$\Delta \hat{x}_{0r} = \min(\Delta \hat{x}_0, \Delta \hat{y}_0 / \sin \alpha_r) \quad \text{..... (8)}$$

とする。 $\Delta \hat{x}_1$ に相当する $\Delta \hat{x}_{1r}$ は、式(6)の $\Delta \hat{x}_1$, $\Delta \hat{x}_0, \alpha$ に添え字 r をつけた式で求められる。なお工具については式(7)に相当する条件は必要ない。

3. 温度の数値解析

3.1 六角形有限要素における有限階差式 ある要素 (i_0, j_0) の温度を $\hat{T}(i_0, j_0)$ [$\hat{T} = T\lambda / (a \cdot \tau_0)$]; λ, a, τ_0 は被削材の熱伝導率、温度伝導率、降伏せん断応力] とし、時間 $\hat{t}$ ($\hat{t} = t a / d^2$) の間に要素の境界面を通して流れる3つの熱量を図2のように定義すると [$\hat{Q} = Q / (d^3 \tau_0)$], これらは

$$\hat{Q}_{y0}(i_0, j_0) = (\Delta \hat{t} \Delta \hat{z} / \tan \phi) \times \{ \hat{T}(i_0, j_0-1) - \hat{T}(i_0, j_0) \} \quad \text{..... (9)}$$

$$\hat{Q}_{x0}(i_0, j_0) = \Delta \hat{t} \Delta \hat{z} \tan(\phi - \alpha) \times \{ \hat{T}(i_0-1, j_0) - \hat{T}(i_0, j_0) \} \quad \text{..... (10)}$$

$$\hat{Q}_{x1}(i_0, j_0) = \Delta \hat{t} \Delta \hat{z} \tan \alpha$$

図2 要素の境界を通して流れる熱量

$\times \{ \hat{T}(i_0-1, j_0+1) - \hat{T}(i_0, j_0) \} \dots (11)$
で求められる。ここで $\Delta \hat{z}$ は切削幅である。これから一般的な要素の $\Delta \hat{t}$ 後の温度が

$$\begin{aligned} \hat{T}'(i_0, j_0) = & \hat{T}(i_0, j_0) + \{ \hat{Q}_{y0}(i_0, j_0) \\ & - \hat{Q}_{y0}(i_0, j_0+1) + \hat{Q}_{x0}(i_0, j_0) \\ & - \hat{Q}_{x0}(i_0+1, j_0) + \hat{Q}_{x1}(i_0, j_0) \\ & - \hat{Q}_{x1}(i_0+1, j_0-1) \} / \hat{V} \dots (12) \end{aligned}$$

で求められる。ここで $\hat{V}$ は要素 (i_0, j_0) の体積であり、次式で求められる。

$$\begin{aligned} \hat{V} = & [\Delta \hat{y}_0^2 / (2 \tan \phi) + \Delta \hat{x}_0^2 / \{ 2 \tan(\phi - \alpha) \} \\ & + \Delta \hat{x}_1^2 / (2 \tan \alpha)] \Delta \hat{z} \dots (13) \end{aligned}$$

同様に要素 (i_{0T}, j_{0T}) については式(9) ~ (13)の $\Delta \hat{t}$, $\Delta \hat{z}$ を除くすべてに添え字 T をつけた式で求められる。ただし $\hat{V}_T$ は要素 (i_{0T}, j_{0T}) の体積であり、また $\hat{T}_T = T_T \lambda / (a \tau_0)$ である。

式(12)は一般的な内部の要素に関するものであり、境界上の要素に関しては違った形となるが、その扱いは従来の直交した境界面(線)をもつ有限要素の場合と同様なので詳細は省略する。

刃先点と、被削材表面と切りくず表面の交点では、それぞれ体積 $\hat{V} - \hat{V}_1 - \hat{V}_2 + (\hat{\lambda}_T / \hat{a}_T)(\hat{V}_{1T} + \hat{V}_{2T})$, $\hat{V}/2 + \hat{V}_1 + \hat{V}_2$ を考慮するが、 $\hat{V}_1, \hat{V}_2$ は次式で求められ、 $\hat{V}_{1T}, \hat{V}_{2T}$ (いずれも図3参照)はこれらに添え字 T をつけて得られる。

$$\begin{aligned} \hat{V}_1 = & (\Delta \hat{y}_0 \Delta \hat{x}_1 \cos(\phi - \alpha) / 4 \\ & - \Delta \hat{x}_1^2 \tan \alpha / 4) \Delta \hat{z} \dots (14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{V}_2 = & \Delta \hat{y}_0 \Delta \hat{x}_1 \tan \alpha \cos(\phi - \alpha) \\ & \times \{ \tan(\phi - \alpha) + 1 / \tan \phi \} \Delta \hat{z} / 8 \dots (15) \end{aligned}$$

また $\hat{\lambda}_T, \hat{a}_T$ はそれぞれ被削材における量 λ, a との比で定義された工具の熱伝導率、温度伝導率の無次元量である。

任意に設定した領域の境界面では熱伝導が存在し、著者らが以前から行っているように⁽⁹⁾⁻⁽¹²⁾内部の要素の温度から外そうする。例えば左の境界については

$$\hat{T}'(i_0, j_0) = \hat{T}'(i_0+1, j_0) / \hat{T}'(i_0+2, j_0) \dots (16)$$

とし、領域の他の境界についてもこれに準じる。

3.2 物質移動と変形、熱発生 時間間隔 $\Delta \hat{t}$ は要素の寸法から決まる値 $\Delta \hat{t}_{MAX}$ より小さい必要がある。切削速度が大きく $\Delta \hat{t}_{MAX} > \Delta \hat{x}_0 / \hat{V}_H$ の場合には $\Delta \hat{t} = \Delta \hat{x}_0 / \hat{V}_H$ として、 $\Delta \hat{t}$ における被削材、切りくずの移動量を $\Delta \hat{x}_0, \Delta \hat{y}_0$ に一致させることができる。この場合、上流側に隣接する要素の $\hat{T}'$ を新たな $\hat{T}$ と置くことにより物質移動を実現し、同時に当該箇所においては移動量に相当したせん断変形および熱発生を行う。これについては3.2.1 および3.2.2 項で扱う。

$\hat{V}_H = \Delta \hat{x}_0 / \Delta \hat{t}$ とできない場合については3.2.3 項で扱う。

3.2.1 変形のない場合 被削材におけるせん断面以外の要素については変形も熱発生もなく、

$$\hat{T}(i_0, j_0) = \hat{T}'(i_0-1, j_0) \dots (17)$$

を用いる。また切りくずにおける、せん断面と工具-切りくず接触面以外の要素では次式となる。

$$\hat{T}(i_0, j_0) = \hat{T}'(i_0, j_0-1) \dots (18)$$

領域の左の境界では式(17)の右辺が得られないので、温度計算のときと同様の外そうを用いる。

工具-切りくず接触面における摩擦応力を $\hat{\tau}_f (= \tau_f / \tau_0)$ とすると、切りくずが1要素分移動するときに生じる摩擦熱は $\Delta \hat{y}_0^2 \Delta \hat{z} \hat{\tau}_f$ であり、せん断面以外の接触面では次式となる。

$$\begin{aligned} \hat{T}(i_0, j_0) = & \{ \hat{T}'(i_0, j_0-1) \hat{V} / 2 \\ & + \hat{T}'(i_0, j_0) (\hat{\lambda}_T / \hat{a}_T) \hat{V}_T / 2 \\ & + \Delta \hat{y}_0^2 \Delta \hat{z} \hat{\tau}_f \} / \{ \hat{V} / 2 + (\hat{\lambda}_T / \hat{a}_T) \hat{V}_T / 2 \} \dots (19) \end{aligned}$$

3.2.2 変形のある場合 せん断面におけるせん断歪みを $\gamma = [\tan(\phi - \alpha) + 1 / \tan \phi]$, せん断応力を $\hat{\tau}_s (= \tau_s / \tau_0)$ とすると、被削材はせん断面の通過によって $\gamma \hat{\tau}_s$ の温度上昇が加わる。またこの際に変形が生じるが、要素形状は不変としているから(図1), 変形後の要素間において内容の一部を授受する必要がある。当然ながらこの考え方は本研究が初めてである。

図3はこれを厳密に図解したものであるが、図形(0)の要素が移動してせん断面上に来ると一部が変形して図形(1+2+3+4)となる。同様に図形(0')は(1'+2')に、(0'')は(1''+2''+3''+4'')となる。そしてこの際に2, 3, 4, 2', 2'', 3'', 4'' にはせん断面の通過による温度上昇がある。一方せん断面上で図形(1+2+3+5)を占める要素が移動すると(5+6+7+8)となり、同様に(1'+2'+3'+5')は(5'+6'+7'+8')に、(1''+2'')の刃先より上の部分は(7''+8'')となる。そして5, 6, 7, 5', 6', 7', 7'' には温度

図3 せん断変形の前における要素内容の授受

上昇がある。したがって例えばせん断面上の一般的な要素については、

$$\begin{aligned} \hat{T}(i_0, j_0) = & [\hat{T}'(i_0-1, j_0) \hat{V}/2 \\ & + \{\hat{T}'(i_0-1, j_0) + \gamma \hat{\tau}_s\} (\hat{V}/2 - \hat{V}_1 - \hat{V}_2) \\ & + \{\hat{T}'(i_0, j_0-1) + \gamma \hat{\tau}_s\} \hat{V}_2 \\ & + \{\hat{T}'(i_0, j_0) + \gamma \hat{\tau}_s\} \hat{V}_1] / \hat{V} \quad \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

となり、これの上隣の要素および被削材表面と切りくず表面の交点、その上隣の要素についても式(20)に準じる。刃先点およびその上隣の要素についてはさらに式(19)と同様の摩擦熱の項 $\Delta \hat{y}_0^2 \Delta \hat{z} \hat{\tau}_f$ が加わる。

3.2.3 移動量が要素間隔に一致しない場合 $\hat{V}_H$ が小さく $\Delta \hat{t}_{\max} \leq \Delta \hat{x}_0 / \hat{V}_H$ の場合には整数 N_s を $N_s = \text{int}[(\Delta \hat{x}_0 / \hat{V}_H) / \Delta \hat{t}_{\max}] + 1 \quad \dots\dots\dots (21)$ と定義し、この整数 N_s を用いて $\Delta \hat{t}$ を

$$\Delta \hat{t} = (\Delta \hat{x}_0 / \hat{V}_H) / N_s \quad \dots\dots\dots (22)$$

と定める。そして $\Delta \hat{t}$ の間には1要素の体積の $1/N_s$ が移動し、残りが留まるものとする。すなわち、前述の式(17)~(20)の右辺(仮に $\hat{T}_m$ とおく)を用い、

$$\begin{aligned} \hat{T}(i_0, j_0) = & \hat{T}_m / N_s \\ & + \hat{T}'(i_0, j_0) (1 - 1/N_s) \quad \dots\dots (23) \end{aligned}$$

とする。

4. 熱配分の算出

熱源を完全に包含する形で任意の領域を設定し、その境界面(表面も含む)を通して被削材、切りくず、工具へ流入する一定時間($\Delta \hat{t}$)の熱量 $\hat{q}_w, \hat{q}_c, \hat{q}_t$ を算定することから、熱配分が求められる。ここで各表面から流出する伝達熱量は、その表面が属する物体への流入熱量として扱う。この任意の領域としては図1に設定したものでも良いが、小さく、熱源に近いほうがより早く定常値が得られる。ここでは図4のように設定したが、各境界における境界条件は図1と同じである。

各境界を通して流れる熱量は、それぞれに位置する要素の境界における伝導熱量と表面における伝達熱量、さらに被削材については左右における物質移動による熱量 $-\hat{T}'(m_A-1-2, j_0) \hat{V} / N_s, \hat{T}'(m_A+1, j_0)$

図4 流入熱量算定のための三つの境界

$\hat{V} / N_s$ 、切りくずについては上側における物質移動による熱量 $\hat{T}'(i_0, n_C+2) \hat{V} / N_s$ の和で求められる。熱配分は $\hat{q}_a = \hat{q}_w + \hat{q}_c + \hat{q}_t$ として $\eta_w = \hat{q}_w / \hat{q}_a, \eta_c = \hat{q}_c / \hat{q}_a, \eta_t = \hat{q}_t / \hat{q}_a$ で求められる。

5. 結 果

5.1 設定条件と定常値 設定条件は表1に示した通りである。摩擦応力は奥島ら⁽¹⁵⁾の結果を参考にし、 $\tau_f = 2(n_C - j_0) / (n_C - n_A), [j_0 > (n_C + n_A) / 2]$ $\tau_f = 1, [j_0 \leq (n_C + n_A) / 2] \quad \dots\dots\dots (24)$ とした。 α に対する ϕ は図6中に示した通りで、 $\alpha \leq 25^\circ$ については通常の実験データ⁽¹⁴⁾によったが、 $\alpha > 25^\circ$ についてはこれが式(7)の範囲を越えるため参考データとして $\phi = \alpha$ を用いた。 n_C は、点 (m_A-1, n_A+1) と点 (m_A, n_C) を結ぶ直線がせん断面と 45° をなすように定めた。ここで被削材として炭素鋼を想定する場合には得られた無次元温度に135Kを乗じればよい。さらにここで切込み深さ $d = 0.1\text{mm}$ を想定すると無次元切削速度 $\hat{V}_H (= V_H d / \alpha)$ に 9.84m/min を乗じ、 $d = 1\text{mm}$ を想定すると 0.984m/min を乗じればよい。

図5に切削速度の3例について、切削時間 $\hat{t}$ に対する発生熱の配分割合とすくい面上の最高温度 $\hat{T}_{f\max}$ の変化を示した。おのおの切削距離 $\hat{x}_0 = 124$ に相当する時間まで表したが、この時点でほぼ定常となっていることが分かり、以後この時点の値を定常値として用いることにする。なお工具内の温度分布はさらに変化を続けるが、配分割合に対する影響は無視できる。

表1 設定条件

m	16
n	30
m_A	8
n_A	4
l	4
$\hat{\alpha}_T$	1
$\hat{\lambda}_T$	1
$\hat{\tau}_s$	1
$\hat{\tau}_f$	Eq. (24)
$B\hat{t}$	1×10^{-4}
γ_T	5

図5 切削時間 $\hat{t}$ に対する変化

5.2 すくい角, 切削速度による変化 図6は切削速度 $\hat{V}_H=20$ ($d=0.1\text{mm}$ で197m/min, $d=1\text{mm}$ で19.7m/min) の場合について, すくい角 α に対する諸量の変化を表したものである。図中の $\hat{T}_{smax}$ はせん断面における最高温度である。また η_s, η_f はせん断面およびすくい面における発生熱の割合である。 $\alpha < 30^\circ$ においては, α の増加によって η_c が増加し η_w, η_t が減少しているが, その変化量は小さい。 α の大きい範囲では η_c が減少し η_w が増加してくる。 $\hat{T}_{smax}$ は α の増加によって一様に減少する。 $\hat{T}_{fmax}$ も一部を除き一様に減少している。図7はこの間の温度分布の変化の例を示したものであるが, 全体に温度が低くなる以外には, 定性的な顕著な違いは見られない。

図6 すくい角 α に対する変化

図8はすくい角 $\alpha=10^\circ$, せん断角 $\phi=20^\circ$ の場合について, 切削速度 $\hat{V}_H$ に対する諸量の変化を表したものである。 $\hat{V}_H$ の増加によって一様に η_c が増加し η_w, η_t が減少している。これはShawら⁽¹⁾の結果と同傾向であり, またそこで扱われている速度範囲 $\hat{V}_H=0\sim 30$ ($V_H=0\sim 600\text{ft/min}$, $d=0.00632\text{in}$) における値もほぼ一致している。なお文献(1)においては η_w と η_t の表示位置が本研究と逆なので注意を要する。一方, 図8からただちに研削における配分割合を論じることができないが, 試みに研削速度1230m/min および砥粒切込み深さ $1\mu\text{m}$ を当てはめると $V_H=1.25$ である。図8におけるこのときの値は, 先に著者ら^{(5), (6)} が求めた値 $\eta_c=52\%$, $\eta_t=15\%$, $\eta_w=33\%$ に比較的近いことが分かる。

切削距離当たりの発生熱量は切削速度によらず一定であるから, 被削材および工具へ流入する熱量は切削速度の増加によって減少することになる。このことは被削材の全体的な温度上昇を抑制する上では有利であるが, 工具の温度上昇については, 図中の $\hat{T}_{fmax}$ の変化にも見られるように不利である。

図9はこの間の温度分布の変化の例を示したものであるが, (a) と (b) の中間に先の図7(b) が位置することになる。切削速度の増加によって $\hat{T}_{fmax}$ が増加す

図7 すくい角 α による温度分布の変化 ($\hat{V}_H=20$, $\hat{t}=6.2$) 図8 切削速度 $\hat{V}_H$ に対する変化 図10 摩擦応力 $\hat{\sigma}_f$ に対する変化

(a) $\hat{V}_H=2.5, \hat{t}=49$ (b) $\hat{V}_H=160, \hat{t}=0.77$ 図9 切削速度 $\hat{V}_H$ による温度分布の変化 ($\alpha=10^\circ, \phi=20^\circ$) (a) $\alpha=10^\circ, \phi=20^\circ, \hat{V}_H=20, \hat{t}=6.2$ 図11 $\hat{\tau}_r=0$ とした場合の温度分布

ると同時にその位置が上方へ移動することが分かる。また低速においてほとんど一様であった切りくず内の温度分布 [図9(a)]は、切削速度の増加によって切りくずの厚さ方向に温度分布を生じてそれが急になると同時に、直線状の分布 [図7(b)]から切りくず表面および背面において急な分布 [図9(b)]へと移行する。

5.3 摩擦応力の分布の影響 以上の解析においてはすくい面上の摩擦応力の分布を式(24)で与えているが、ここではこれの妥当性を検討する。図10はすくい面上の摩擦応力の分布を一様とした上で、その値を $\hat{\tau}_r=0 \sim 1$ と変化させたときの諸量の変化を表したものである。ここで注目すべきことは $\hat{\tau}_r$ の変化による η_o, η_t, η_w の変化が無視できるほど小さく、 $\hat{\tau}_r=0$ においてすらもほとんど同じ値を取ることである。また式(24)に従った場合 ($\hat{\tau}_r$ の積分値は $\hat{\tau}_r=0.75$ の場合に等しい) は $\eta_o=79.7\%, \eta_t=5.9\%, \eta_w=14.4\%$ であるから、これともほとんど同じであることが分かる。したがって式(24)の妥当性はさておき、これを用いた結果は十分に妥当であると言える。

参考までに、 $\hat{\tau}_r=0$ における温度分布を図11に示したが、切りくず厚さの中央から表面側の温度分布は図7(b)と変化がなく、また刃先点から仕上げ面付近の温度分布のちがいはわずかである。

6. 結 論

(1) 幾何学的に考えうるすべての切削に適用可能な有限階差法の要素分割模型が考案され、正のすくい角とそれより大なるせん断角をもつ二次元切削における温度分布と発生熱の配分割合が数値解析された。

(2) ここで扱った範囲では、すくい角による配分割合の変化は小さい。

(3) すくい角の増加によって温度は全体に低下するが、温度分布には定性的な顕著なちがいはない。

(4) 切削速度の増加によって発生熱の切りくずへの配分割合が増加し、被削材および工具へのそれが減少する。

(5) 切削速度の増加によってすくい面上の最高温度が増加すると同時に、その最高点が上方へ移動する。

(6) 切削速度の増加によって切りくず厚さ方向に温度分布が生じ、切りくず表面および背面で急な分布となる。

(7) すくい面における熱源の存在、したがってまたその分布が、発生熱の配分割合に与える影響は無視できるほど小さい。

文 献

- (1) Loewen, E.G. and Shaw, M.C., Trans. ASME, 76-2 (1954), 217.
- (2) 佐藤, 精密機械, 19-4 (昭28), 154.
- (3) 高沢, 精密機械, 30-12 (昭39), 914.
- (4) 小野, 研削仕上—理論とその応用—, (昭41), 31, 横書店.
- (5) 鍵和田・斎藤, 機論, 43-369 (昭52), 1966.
- (6) 鍵和田・斎藤, 機論, 43-373 (昭52), 3500.
- (7) 長谷川・奥山, 精密機械, 47-7 (昭56), 867.
- (8) 臼井・白樫, 精密機械, 38-6 (昭47), 510.
- (9) 鍵和田・斎藤, 機論, 46-401 (昭55), 109.
- (10) 鍵和田・金内, 機論, 47-416 (昭56), 536.
- (11) Kagiwada, T. and Kanauchi, T., Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., Vol. 15, No. 4 (1981), 263.
- (12) 金内・鍵和田, 機論, 48-429 (昭57), 741.
- (13) Dusenberre, G.M., Heat-Transfer Calculations by Finite Differences, (1961), 85, International Textbook.
- (14) 臼井, 切削・研削加工学 上, (昭53), 28.
- (15) 奥島, ほか3名, 精密機械, 36-9 (昭45), 629.

討 論

〔質問〕 斎藤 義夫〔千葉大学工学部〕

貴論文は数値解析の手法について論じているが、切削現象を具体的にどのように仮定しているのか理解しにくいので、以下の点にご回答願いたい。

(1) 発熱源の場所や発熱のメカニズムをいかに考えて解析しているのか。

(2) 工具と工作物の接触状態については、接触長さ、接触部の応力・摩擦状態などをどのようにモデル化しているのか、また、その状態と計算での境界条件との関係はいかに考えているのか。

(3) 実際の加工では刃先丸みや塑性変形領域の存在が切削現象に大きな影響を及ぼし、その意味ですくい角や切削速度が密接に関連すると考えられるが、貴論文の解析結果と切削現象との対応づけにおいて仮定条件の影響はどの程度と想定しているのか。

〔回答〕 (1) せん断面で塑性変形による熱が発生し、工具-切りくず接触面で摩擦熱が発生しているものとしている(1885 ページ左欄 8~9 行め)。これら二つの面はモデルにおいては面を含む要素となっている。

(2) 接触長さ、摩擦応力の分布については、明確

なデータあるいは決定のための理論的根拠についての定説もないため、境界条件(2・1 節)として規定してしまうことはさけ、設定条件(5・1 節)の中で与える立場をとった。

接触長さは n_c の値によって与えるが(図1)、これは 1887 ページ右欄 14 行めに述べたように定めた。摩擦応力の値と分布は式(24)によって与えた。

(3) 刃先丸みについては、著しい丸みをもつ場合(付1)をのぞいて、すなわちたとえば丸み半径が切込み深さの 0.1 倍程度に小さければ、この影響は無視できると思う。当然ながら影響がでると思われる場合にはこれを考慮したモデルを考えるべきであろう。

次に、本解析においては、せん断面は 1 要素分の厚さをもつせん断域と同等である。塑性変形域は一般に切削速度が小さい場合に大きくなるが、同じく速度が小さい場合にはせん断面および仕上面付近の温度分布はなだらかになる[図9および図7(b)]ので、結果的に熱源が分散したとしてもこれによる影響は小さいと思う。

(付1) 文献(14)の 71 ページ。