

大幅な形状変化を伴う工作物の FEM 温度解析* (節点座標を移動させる計算法による演算時間の短縮)

横山 和宏*¹, 一宮 亮一*¹

FEM Temperature Analysis of Workpiece with Shape Change (Shortening of CPU Time by Calculation involving Nodes Movement)

Kazuhiro YOKOYAMA and Ryoichi ICHIMIYA

This paper deals with a FEM analysis of temperature distribution on a workpiece whose shape changes during machining. A calculation method involving the nodes movement accompanied by heat source movement during machining is proposed. Accuracy of the solution is influenced by the calculation parameters: number of moving surfaces, aspect ratio of finite element, moving distance and time step of calculation. The method proposed reduces the total number of nodes, and hence the CPU time is shortened in the calculation. The method is adopted for several cases of different heat transfer coefficients and workpiece materials.

Key Words: Finite-Element Method, Cutting, Grinding, Temperature, Workpiece, Shape Change, Node Movement, Element Size, Aspect Ratio, CPU Time

1. 結 言

工業製品の加工精度向上を妨げる重要な要因の一つに熱変形がある。熱変形への対策を講じ、高精度加工を実現するにあたっては、熱変形の正確な解析したかつてその基礎となる温度分布を精度よく解析する必要がある。フライス加工・クリープフィード研削・スライディングなどにみられるように、加工の進行とともに形状が大幅に変化する工作物の温度解析に厳密解を適用することは、問題のモデル化の精度が十分でないので現実的でない。この問題点を解決するため、現在では有限要素法を含め多くの数値解法が用いられている。

これまでも工作物の形状変化を考慮した解析⁽¹⁾が行われているが、有限要素法により精度のよい温度分布解析を行うには、要素分割を細かくする必要がある。しかし、解析に使用する総節点数が膨大になり、演算時間と費用の増大を伴うので、コンピュータ資源の有効利用という点で問題を生じる。

本研究では、形状が大幅に変化する工作物の三次元

非定常温度分布を解析する際、より少ない節点数を用いることにより演算時間の短縮を図る有限要素法の一適用方法を提示している。この方法を適用する場合の要素分割法・計算条件の影響について検討するとともに、解析精度と演算時間について明らかにしている。取り上げた熱伝導問題の境界条件・熱源の移動条件は、上述の各種機械加工における加工条件に対応して設定している。

2. 問題の定義

本研究では、提示する計算法の解析精度を基準となる解(以下に基準解と呼ぶ)と比較して判定するので、多種類の工作物形状について検討しなくても一般性を失うことはないと考えられる。また、実際の加工における加工領域の形状は円弧を含んでいるが、上述と同様の理由によりここでは平面状の熱源を用いることにする。そこで本研究においては、加工において数多くみられる直方体の工作物を解析対象とする。加工により形状が変化した状態の工作物を図1に示す。加工領域である熱源は、工作物断面の1/4とし、加工の進行とともに x 軸正の方向に移動するものとする。熱源の左側は加工により除去されている。加工により新たに現れる表面を含め、工作物の全表面は外界と熱伝達を

* 平成元年11月28日 第2回計算力学講演会において講演、原稿受付 平成元年5月24日。

¹ 正員、新潟大学工学部 (〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050)。

行うものとする。

3. 提示する計算法

実際の加工領域の形状は円弧を含むことが多い。この領域は熱源であるため高温であり、外界との伝熱をより正確に表現するにはこの表面積を正しく近似する必要がある。これを比較的容易に実現するには、四角柱要素よりも三角柱要素を用いるのが実際的であると考えられる。そこで本研究では、実際の加工に即した有限要素法の一適用方法について検討するため、図1に示すように三角柱有限要素を用いる。三角柱要素内の温度 θ は、式(1)により表されるものとする。

$$\theta = a_1 + a_2x + a_3y + a_4z + a_5xy + a_6yz \quad \dots\dots(1)$$

ただし、 $a_1 \dots\dots a_6$: 未定定数

工作物全体に対する有限要素方程式⁽²⁾は、一般的に式(2)で表される。

$$[H]\{\theta\} + [P]\left\{\frac{\partial\theta}{\partial t}\right\} + \{F\} = 0 \quad \dots\dots(2)$$

ただし、 $[H]$: 熱伝導マトリックス、

$[P]$: 熱容量マトリックス、

$\{F\}$: 熱流速ベクトル

式(2)に Wilson-Clough の方法⁽³⁾ [式(3)] を適用すると、式(4)が得られる。

$$\left\{\frac{\partial\theta}{\partial t}\right\}_t = -\left\{\frac{\partial\theta}{\partial t}\right\}_{t-\Delta t} + (\{\theta\}_t - \{\theta\}_{t-\Delta t}) \frac{2}{\Delta t} \quad \dots\dots(3)$$

$$([H] + \frac{2}{\Delta t}[P])\{\theta\}_t = [P]\left(\frac{2}{\Delta t}\{\theta\}_{t-\Delta t} + \left\{\frac{\partial\theta}{\partial t}\right\}_{t-\Delta t}\right) - \{F\}_t \quad \dots\dots(4)$$

式(4)を初期条件 $\{\theta\}_{t=0} = 0$, $\left\{\frac{\partial\theta}{\partial t}\right\}_{t=0} = 0$ のもとで解くことにより、非定常温度分布が求められる。本研究で取扱う問題では、工作物の形状が大幅に変化するの

で、式(4)中のマトリックス $[H]$, $[P]$ が加工の進行とともに変化する。また、ベクトル $\{F\}_t$ も作用する位置が変化する。これらの変化を考慮して、式(4)の適用方法を具体的に示せば以下ようになる。

すなわち、図2に示すように $[t \sim t + \Delta t]$ の間、熱源が x なる位置に存在するものとする。このとき、式(4)の代わりに式(5)を適用する。

$[t \sim t + \Delta t]$ において、

$$([H]_x + \frac{2}{\Delta t}[P]_x)\{\theta\}_{t+\Delta t,x} = [P]_x\left(\frac{2}{\Delta t}\{\theta\}_{t,x} + \left\{\frac{\partial\theta}{\partial t}\right\}_{t,x}\right) - \{F\}_x \quad \dots\dots(5)$$

ここに、添字 x は図2の状態における量を示す。その後、熱源を含む移動部 [面 A ~ 面 C] の各節点は右へ Δx だけ移動し、時刻 $[t + \Delta t \sim t + 2\Delta t]$ の間、熱源は $x + \Delta x$ なる位置に存在する。このとき、式(4)の代わりに式(6)を適用する。

$[t + \Delta t \sim t + 2\Delta t]$ において、

$$([H]_{x+\Delta x} + \frac{2}{\Delta t}[P]_{x+\Delta x})\{\theta\}_{t+2\Delta t,x+\Delta x} = [P]_{x+\Delta x}\left(\frac{2}{\Delta t}\{\theta\}_{t+\Delta t,x+\Delta x} + \left\{\frac{\partial\theta}{\partial t}\right\}_{t+\Delta t,x+\Delta x}\right) - \{F\}_{x+\Delta x} \quad \dots\dots(6)$$

式(6)中の $\left\{\frac{\partial\theta}{\partial t}\right\}_{t+\Delta t,x+\Delta x}$ は、式(3)の代わりに式(7)を用いて計算する。また、式(6), (7)中の $\{\theta\}_{t+\Delta t,x-\Delta x}$, $\{\theta\}_{t,x+\Delta x}$, $\left\{\frac{\partial\theta}{\partial t}\right\}_{t,x+\Delta x}$ は、それぞれ式(8), (9), (10)を用いて計算する。

$$\left\{\frac{\partial\theta}{\partial t}\right\}_{t+\Delta t,x+\Delta x} = -\left\{\frac{\partial\theta}{\partial t}\right\}_{t,x+\Delta x} + (\{\theta\}_{t-\Delta t,x+\Delta x} - \{\theta\}_{t,x+\Delta x}) \frac{2}{\Delta t} \quad \dots\dots(7)$$

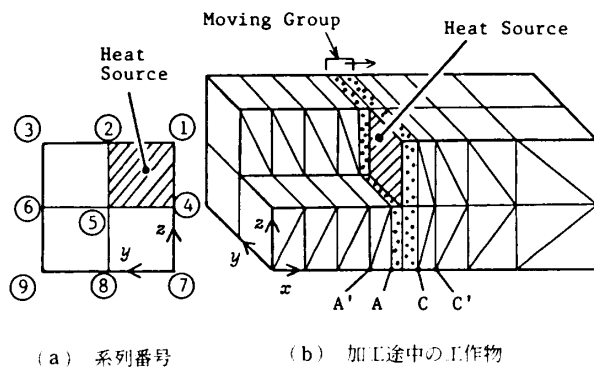


図1 工作物の要素分割(グループ移動計算法)

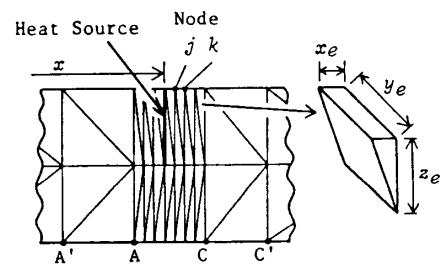


図2 移動部の状況 (熱源左右の移動部面数 [3, 4] の場合)

$$\begin{Bmatrix} \vdots \\ \theta_j \\ \vdots \end{Bmatrix}_{t+\Delta t, x+\Delta x} = \begin{Bmatrix} \vdots \\ \theta_j \\ \vdots \end{Bmatrix}_{t+\Delta t, x} + \frac{\Delta x}{x_k - x_j} \left(\begin{Bmatrix} \vdots \\ \theta_k \\ \vdots \end{Bmatrix}_{t+\Delta t, x} - \begin{Bmatrix} \vdots \\ \theta_j \\ \vdots \end{Bmatrix}_{t+\Delta t, x} \right) \dots\dots (8)$$

$$\begin{Bmatrix} \vdots \\ \theta_j \\ \vdots \end{Bmatrix}_{t, x+\Delta x} = \begin{Bmatrix} \vdots \\ \theta_j \\ \vdots \end{Bmatrix}_{t, x} + \frac{\Delta x}{x_k - x_j} \left(\begin{Bmatrix} \vdots \\ \theta_k \\ \vdots \end{Bmatrix}_{t, x} - \begin{Bmatrix} \vdots \\ \theta_j \\ \vdots \end{Bmatrix}_{t, x} \right) \dots\dots\dots (9)$$

$$\begin{Bmatrix} \vdots \\ \frac{\partial \theta_j}{\partial t} \\ \vdots \end{Bmatrix}_{t, x+\Delta x} = \begin{Bmatrix} \vdots \\ \frac{\partial \theta_j}{\partial t} \\ \vdots \end{Bmatrix}_{t, x} + \frac{\Delta x}{x_k - x_j} \left(\begin{Bmatrix} \vdots \\ \frac{\partial \theta_k}{\partial t} \\ \vdots \end{Bmatrix}_{t, x} - \begin{Bmatrix} \vdots \\ \frac{\partial \theta_j}{\partial t} \\ \vdots \end{Bmatrix}_{t, x} \right) \dots\dots\dots (10)$$

ここに、

添字 j は移動部に所属する任意の節点を、

添字 k は点 j の右隣の節点を表す。

以上の操作を移動部に対して繰返し(計算の時間ステップ Δt ごとに)用いることにより、大幅な形状変化を伴う工作物の非定常温度分布を解析する。

なお、移動部の右端(図2のC面)と非移動部のC'面間の距離が x_e になると、C'面を移動部の右端に追加する。また、移動部の左端が非移動部のA'面と一定距離だけ離れたとき、A面を移動部から削除し、A面に所属する節点の座標を固定する。ただし、A面を移動部から削除した後の繰返し計算においては、1回だけ節点を移動せず、熱源を右隣の節点へ変更する、と同時に新たな熱源の左側の要素を削除する。これは、熱源の左右にほぼ同数の細かな要素を常に配置することにより、温度こう配が急な熱源付近の温度をより正確に解析するためである。

以後、上述の計算法をグループ移動計算法と呼ぶことにする。

4. 鋼系工作物におけるパラメータの影響

4.1 基準解の決定

ここでは、鋼系の工作物に関する基準解を求める。有限要素法においては、より細かな要素を用いることにより解が正解に収束することが期待できるので、工作物を詳細に分割し、節点座標を固定して基準解を求めた。使用した有限要素はい

ずれも四角柱要素である。四角柱要素内の温度 θ は式(11)のように示され、三角柱の場合〔式(1)〕に比べ、 $y-z$ 平面内における温度分布の対称性がよいので、基準解を求める際に使用した。

$$\theta = a_1 + a_2x + a_3y + a_4z + a_5xy + a_6yz + a_7zx + a_8xyz \dots\dots\dots (11)$$

時刻 $[0 \sim \Delta t]$ の間、熱源は $x=0$ の面に存在する。 $[\Delta t \sim 2\Delta t]$ の間は、 $x=x_e (= U \cdot \Delta t)$ の面に存在し、熱源左側の要素を解析対象から削除する。以後同様にして、節点座標は固定したままで、計算の時間ステップ Δt ごとに熱源を右隣の面へ移しながら計算を続ける。工作物の詳細と解析の条件を表1に示す。有限要素の要素寸法比(：最長辺/最短辺)、要素寸法ならびに計算の時間ステップがそれぞれ異なる場合について計算を行い、解が十分に収束していることを確認して基準解とした。最終的に求められた基準解の計算条件を表2に示す。

4.2 解析結果に及ぼすパラメータの影響

4.2.1 移動部の面数の影響

表1の熱伝導問題にグループ移動計算法を適用する場合、解析結果に影響を及ぼすパラメータとして移動部の面数・要素寸法比・移動部の移動距離・計算の時間ステップがある。ここではまず、移動部の面数が解析結果に及ぼす影響を検討する。

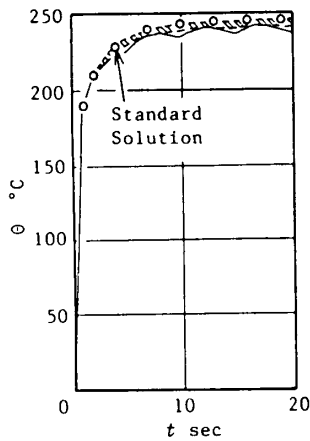
熱源左右の移動部面数が $[0, 0]$ (：すなわち、熱源が存在する面上の節点だけが移動する場合)、 $[1, 2]$ 、 $[3, 4]$ 、 $[5, 6]$ 、 $[10, 10]$ の各場合について計算した結果の一例を図3に示す。移動部における要素の寸法・

表1 工作物と解析の条件

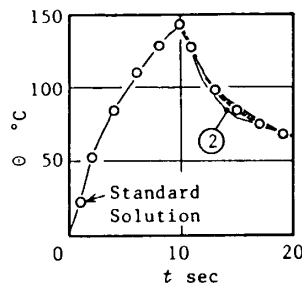
Material	Mild Steel (JIS:SS41)
Dimension of Workpiece	20×8×8 mm
Thermal Conductivity	$\lambda=5.108 \times 10^{-5}$ kJ/(mm·s·K)
Specific Heat	$c=4.857 \times 10^{-4}$ kJ/(g·K)
Density	$\rho=7.84 \times 10^{-3}$ g/mm ³
Heat Transfer Coefficient	$\alpha=1.164 \times 10^{-3}$ W/(mm ² ·K) (Flowing Oil Type Fluids)
Strength of Heat Source	$Q=4.178 \times 10^{-2}$ kW/mm ²
Speed of Heat Source	$U=0.4$ mm/s

表2 基準解における計算条件

Dimension of Element	$x_e=0.2, y_e=0.8,$ $z_e=0.8$ mm
Aspect Ratio of Element	$y_e/x_e=z_e/x_e=4$
Time Step in Computation	$\Delta t=0.5$ sec



(a) ①の温度 (x =熱源位置)



(b) ②, ④の温度 ($x=4\text{ mm}$)

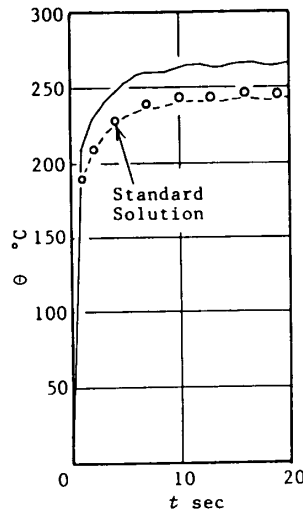
図 3 熱源左右の移動部
面数の影響

——: 面数 [0, 0]
 $\cdots\cdots$: 面数 [1, 2], [3, 4],
 [5, 6], [10, 10]

寸法比ならびに計算の時間ステップは表 2 と同一である。図 3(a) は、系列①〔図 1(a) 参照〕の熱源位置における温度である。移動部の面数が少なくなると、温度が基準解に比べて低くなるとともに変動する傾向が認められる。

図 3(b) は系列②, ④の $x=4\text{ mm}$ における温度である。図 1 に示す問題の特徴から、任意の $y-z$ 平面内の温度分布は①⑤⑨に関して対称になるはずである。しかし $t=10\text{ s}$ 以後において、移動部の面数が少ない場合に、この対称性が悪くなる傾向が認められる。すなわち、熱源通過後の温度が系列④では基準解に比べてやや高く、系列②では低く計算されることがわかる。これは、三角柱内の温度が式(1)で表されるように、四角柱要素の場合〔式(11)〕に比べ、 zr の項がないことによるものと考えられる。

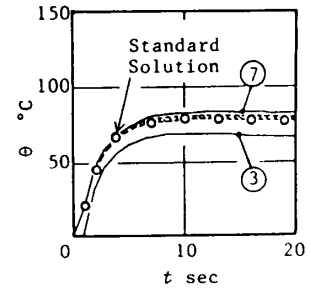
以上の結果から、移動部の面数は熱源の左右に [3, 4] 面程度であれば、基準解にはほぼ一致する解を得ることが明らかになった。



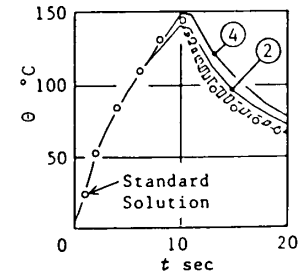
(a) ①の温度 (x =熱源位置)

図 4 要素寸法比の影響

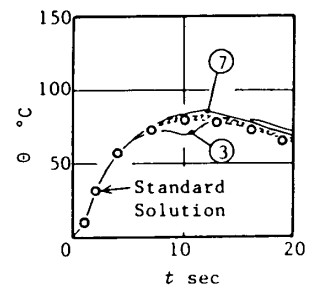
——: 寸法比=20
 $\cdots\cdots$: 寸法比=10, 6.7, 5, 4



(b) ③, ⑦の温度 (x =熱源位置)



(c) ②, ④の温度 ($x=4\text{ mm}$)



(d) ③, ⑦の温度 ($x=4\text{ mm}$)

4・2・2 要素寸法比の影響 つぎに、図 2 に示す移動部要素の寸法比 $y_e/x_e = z_e/x_e = 4, 5, 6.7, 10, 20$ の場合について計算した結果の一例を図 4 に示す。ただし、移動部の $x_e=0.2\text{ mm}$ 一定、熱源左右の移動部の面数は [3, 4] とした。

図 4(a), (b) は、熱源が存在する $y-z$ 平面上における工作物の温度である。要素寸法比が 20 の場合には、系列①の温度〔図 4(a)〕が基準解に比べて高く計算されることがわかる。また、系列③の温度〔図 4(b)〕は基準解に比べて低く、基準解によく一致している⑦の温度との差がみられ、温度分布の対称性が悪い。また、系列④の温度は基準解に比べて高く、②との差がみられた。

図 4(c), (d) は $x=4\text{ mm}$ の各点における工作物の温度を示している。 $t=10\text{ s}$ において、これら各点と熱源の x 座標が一致する。図 4(c), (d) から、系列③を除く各点において、熱源が近づくと温度が高くなり、

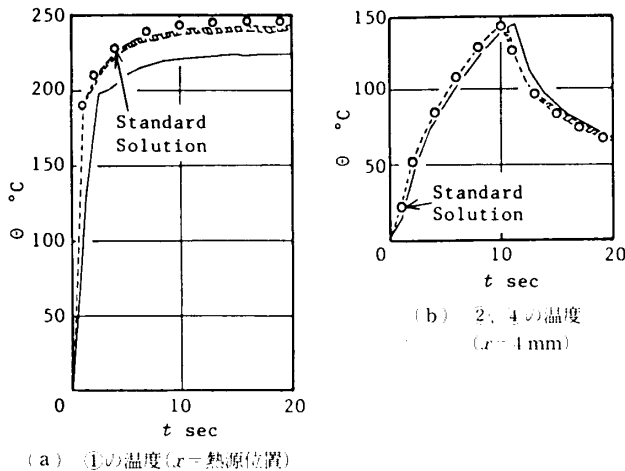
(a) ①の温度(x =熱源位置)

図5 移動部移動距離の影響

— : $\Delta x = x_e = 0.5$ mm
 ○○○○ : $\Delta x = x_e = 0.25, 0.2$ mm

熱源通過後も基準解に比べて高い温度を示す。これは、系列①〔図4(a)〕ならびに④の熱源位置における温度が高く、この熱源が通過することによるものである。また、図4(d)にみられるように、要素寸法比20・③における温度は熱源が通過する前後において低下する様子が認められる。これは、図4(b)のように、熱源位置の系列③における温度が低く、この部分が通過することによるものである。なお、本研究で実行したすべての計算結果を検討したところ、この現象は要素の寸法比が20の場合にのみ認められた。

以上述べたように、要素の寸法比について検討した結果、要素寸法比は1~6.7程度にするのがよいと考えられる。

4・2・3 移動部移動距離・計算時間ステップの影響
 さらに、グループ移動計算法における移動部移動距離ならびに計算時間ステップが解析結果に及ぼす影響を検討するため、移動距離 $\Delta x = 0.2, 0.25, 0.5$ mm の場合について計算を行った。移動距離に対応して、計算の時間ステップ Δt はそれぞれ 0.5, 0.625, 1.25 s とし、 Δt ごとの移動量 Δx が面間距離 x_e に等しい条件で計算した。要素の寸法は $y_e = z_e = 0.8$ mm であるので、移動部における要素寸法比は 1.6~4.0 の範囲に入っている。また、熱源左右の移動部面数は [3, 4] であるので、4・2・1~4・2・2 節において明らかになった条件は満たされている。

計算結果の一例を図5に示す。 Δx が大きくなると、図5(a)にみられるように熱源位置における工作物温度が低くなる。また、 $x = 4$ mm〔図5(b)〕におけると同様に、各点における温度変化が基準解に比べて遅くなることが明らかになった。この影響が最も顕著に認

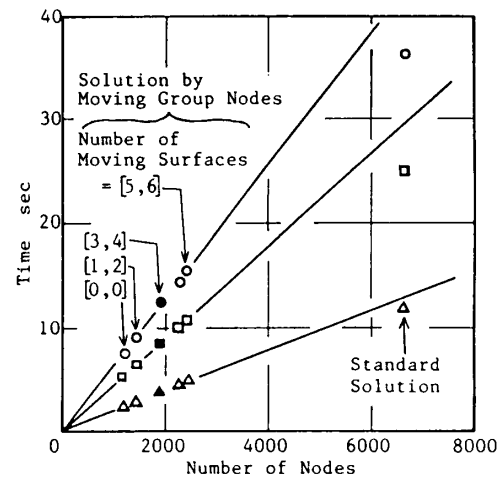


図6 総節点数と演算時間(要素寸法比=4)

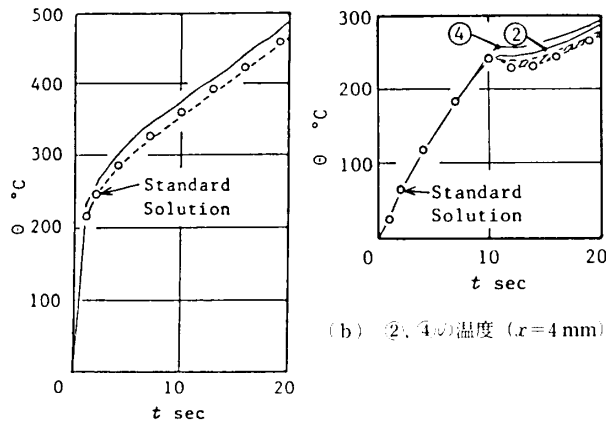
○ : CPU Time, □ : VPU Time, △ : SPU Time

められる図5(a)の結果から、熱源を含む移動部の移動距離・計算の時間ステップは $\Delta x = 0.2 \sim 0.25$ mm (: $\Delta t = 0.5 \sim 0.625$ s) 程度でよいことがわかる。

4・3 総節点数と演算時間 4・2節までに行った計算の中、代表的な計算の演算時間を図6に示す。計算には新潟大学情報処理センターを經由して東京大学大型計算機センターのスーパーコンピュータ S-820 を使用し、帯行列用の改訂コレスキー解法を用いた。図6中に示す SPU・VPU 時間はそれぞれスカラ演算・ベクトル演算に要した時間であり、CPU 時間は両者の合計である。これらの時間は、いずれも $\Delta t = 0.5$ s, $y_e/x_e = z_e/x_e = 4$ (帯幅 134), $\Delta x = 0.2$ mm とし、コンパイル時間の影響を除外して比較するため、繰返し計算 41 回に要する時間と 1 回に要する時間との差で示している。グループ移動計算法における所用時間は総節点数に比例している。これに比べ、基準解の場合(節点座標固定、四角柱要素を使用)の 1 節点当たりの演算時間はやや短いことがわかる。これは、総要素数がグループ移動計算法の場合(三角柱要素を使用)に比べ 1/2 であるため、 Δt ごとに式(4)の $[H]$, $[P]$ マトリックスとベクトル $[F]$ を計算する時間が短いこと、ならびに節点の座標移動に伴う式(5)~(10)の計算が不要であることによるものと考えられる。

図6中に示す●, ■, ▲印は、4・2節までの検討から、計算結果が基準解に十分一致し、演算時間が最も短いと考えられる場合の演算時間である。基準解の場合に比べ、演算時間は約 1/3 に短縮されている。

以上の検討結果から、提示したグループ移動計算法を用いることにより、解析の精度を実用的な範囲で維持しかつ演算時間を大幅に短縮できることが明らかに



(a) 1の温度 ($x=$ 熱源位置)

図7 熱伝達係数の影響
 $(\alpha=1.164 \times 10^{-5} \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{K}))$
 — : 要素寸法比=20
 - - - : 要素寸法比=10, 6.7, 5, 4

なった。

5. 熱伝達係数の影響

4章では湿式加工を対象として、グループ移動計算法の適用方法について詳細に検討した。本章では乾式加工の場合について検討するため、熱伝達係数を $1.164 \times 10^{-5} \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{K})$ 、その他の条件は表1と同じとした。

基準解は4.1節と同様にして決定した。グループ移動計算法において最も重要なパラメータと考えられる要素寸法比が異なる場合の計算結果の一例を図7に示す。図7(a)と図4(a)、図7(b)と図4(c)を比較すると、図7のほうが全体的に温度が高い。これは熱伝達係数が小さくなっているため、工作物から外界への放出熱量が少なくなったことによる。しかし、要素寸法比が小さくなると、解が収束し基準解に一致する様子は4章におけるのと同様である。

他のパラメータについても検討した結果、4章とほぼ同じ計算条件で基準解に十分一致する解を得られることが明らかになった。

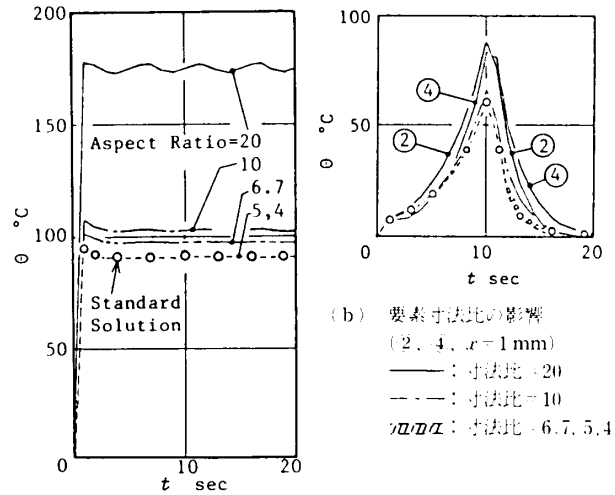
6. フェライト製工物への適用

5章までに鋼系工作物への適用について検討した。温度伝導率が小さい材質の工作物に関する解析においては、さらに多数の節点が必要になると考えられる。このような工作物の一例として、本章では Mn-Zn 系フェライト製工作物へのグループ移動計算法の適用について検討する。

工作物の詳細と解析の条件を表3に示す。基準解を

表3 フェライト製工作物と解析の条件

Material	Mn-Zn Ferrite
Dimension of Workpiece	5×2×2 mm
Thermal Conductivity	$\lambda=0.335 \times 10^{-5} \text{ kJ}/(\text{mm} \cdot \text{s} \cdot \text{K})$
Specific Heat	$c=7.118 \times 10^{-4} \text{ kJ}/(\text{g} \cdot \text{K})$
Density	$\rho=4.6 \times 10^{-3} \text{ g}/\text{mm}^3$
Heat Transfer Coefficient	$\alpha=11.64 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{K})$
Strength of Heat Source	$Q=4.178 \times 10^{-2} \text{ kW}/\text{mm}^2$
Speed of Heat Source	$U=0.1 \text{ mm}/\text{s}$



(a) 要素寸法比の影響
 (1) $x=$ 熱源位置

図8 フェライト製工作物の温度

(c) 移動部面数の影響
 (1) $x=$ 熱源位置
 — : 面数 [0, 0]
 - - - : 面数 [1, 2]
 ····· : 面数 [3, 4], [5, 6]

求める際に使用する総節点数が膨大になるのを避けるため、工作物の寸法・要素寸法・移動部移動距離をそれぞれ SS 41 製工作物の場合(表1参照)の 1/4 とした。

基準解は、4章と同様に十分収束したことを確認し、要素寸法比4、計算時間ステップ0.5sにおける解を採用した。グループ移動計算法による結果の一例を図8に示す。図3~5に比べて、全般的に温度が低く熱源通過時の温度変化が急激であることがわかる。これは、

水溶性切削油に相当した大きな熱伝達係数を採用していること、ならびに工作物の温度伝導率が小さいことによるものと考えられる。

図 8(a)にみられるように要素寸法比が 20 の場合、熱源位置の温度が基準解に比べて特に高く計算されることがわかる。また、図 8(c)の結果から、移動部左右の面数が [0, 0] の場合には温度変動が顕著に認められる。しかし、要素寸法比は 4~6.7、熱源左右の移動部面数 [3, 4] の場合には、基準解に十分一致することが明らかになった。

7. 結 論

加工の進行とともに形状が大幅に変化する工作物の非定常三次元温度分布の解析について検討した結果、以下の結論を得た。

(1) 有限要素法の一適用法として、グループ移動計算法を提示した。この計算法では、熱源付近のみを詳細な要素により分割し、この移動部に属する節点が

加工に伴い移動する。

(2) グループ移動計算法を適用する場合、重要なパラメータは移動部の要素寸法比、熱源左右の移動部面数、移動部の移動距離(計算の時間ステップ)である。実際の加工条件に即して検討したところ、要素寸法比 1~6.7、熱源左右の移動部面数 [3, 4] の条件で、精度のよい解が得られる。

(3) グループ移動計算法においては、移動部以外の領域は粗い分割でよいので、総節点数が少なく、したがって演算時間を大幅に短縮することができる。

最後に、本研究に卒研学生としてご協力いただいた山崎政則君〔(株)富山村田製作所〕、佐藤透君〔ダイニチ工業(株)〕に感謝する。

文 献

- (1) 大石・古田, 機論, 50-460, C(1984), 2399.
- (2) 例えば, 吉織訳, マトリックス有限要素法, (1971), 182, 倍風館.
- (3) 文献(2)の 183 ページ.