1109 塑性加工における流体潤滑挙動の有限要素解析

Finite Element Analysis of Liquid Lubrication Behavior during Metal Forming Processes

○学 小寺 功史 (岡大院自然)

正 清水 一郎 (岡大院自然)

Norifumi KODERA, Okayama University, 3-1-1 Tsushima-naka, Okayama 700-8530

Ichiro SHIMIZU, Okayama University

Key Words : Metal Forming, Liquid Lubrication, Finite Element Analysis, Strip Drawing

1. 緒言

塑性加工においては、工具／被加工材界面での摩擦低減や焼付き防止のために流体潤滑剤を用いることが多い。この際、被加工材表面に存在する微小な凹凸は、局所的なマイクロ流体潤滑機構を引き起こし、潤滑性を向上させることが知られている⁽¹⁾⁽²⁾。しかしながら、そのような凹凸による局所的な潤滑剤挙動や、その潤滑性への影響については、実験的⁽³⁾および解析的⁽⁴⁾⁽⁵⁾に検討を行った例が幾つか報告されているものの、未だ不明な点が多く残されているのが現状である。

このような背景から本研究は、表面に微小な凹凸を有する材料の塑性加工に伴う潤滑剤挙動を、有限要素法を用いて解析的に明らかにすることを最終目的とする。ここでは、その最初の段階として、微小なポケットを表面に持つ板材の引抜き加工をモデル化し、2次元剛塑性有限要素法を用いて解析することを試みる。具体的には、潤滑剤ポケットの形状やダイス角度などの条件を変化させ、それらが引抜きに伴うポケット形状変化や、ポケット内の潤滑剤挙動に及ぼす影響について検討する。

2. 解析方法

本研究で用いる引抜き加工の解析モデルをFig. 1に示す。被加工材は相当応力-相当ひずみ関係が

$$\bar{\sigma} = 123\bar{\epsilon}^{0.208} \quad (1)$$

で与えられる金属材料を想定し、その工具との接触面に小さな潤滑剤ポケットを設ける。本来、引抜き加工では材料が連続的に供給されるが、ここでは解析を容易にするために、被加工材の長さをポケット部分に影響を与えない程度(10mm)にとどめる。

本モデルでは引抜きダイス角を α 、引抜き速度を u とし、板幅は板厚に比べて十分に大きく、寸法が変化しない平面ひずみ状態と仮定する。また、被加工材と工具の接触面には摩擦係数 μ のクーロン摩擦が働くとする。

潤滑剤ポケットの形状は、一辺が $d=500\sim 1100\mu\text{m}$ で、引抜き方向に角度 β の斜面を持つ形 (Type A, Fig. 2(a)) と、

Fig. 1 Model of strip drawing (mm)

その底を平面とした形 (Type B, Fig. 2(b)) の2種類とした。また、Fig. 2(c)のようにポケットは被加工材表面において板幅方向および長さ方向に一定間隔で並んでいるとした。このような問題に対して有限要素法を適用することは簡単ではない。厳密な解析には3次元モデルが有効であるが、被加工材全体とポケットの寸法が大きく異なるために、要素分割において節点数および要素数を極度に増やさなければならず、計算時間やコスト面で現実的ではない。しかしながらFig. 1のモデルをそのまま2次元的に要素分割すると、ポケットは板幅方向に続く溝となり大きな応力集中を招く。そこで、次のような3段階の手順によって解析を行うこととした。

第1段階

解析には2次元剛塑性有限要素法を用い、平面ひずみ条件とする。まず、ポケット内部を被加工材と同じ材料としたモデルを用いて解析を行い、ポケット左右端における節点変位を求める。

第2段階

第1段階と同じ要素分割でポケット内を潤滑剤 (剛粘性体) としたモデルを用いて解析を行う。このとき、ポケット左右端の節点には、第1段階で求めた節点変位を与える。このことは、ポケットの引抜き方向 (x方向) の変形に対して、ポケットがない部分による拘束を与えることを意味しており、ポケットが幅方向に続く溝状にモデル化されることを防いでいる。この段階の解析において、ポケット周囲の節点変位を全て求めておく。

第3段階

潤滑剤ポケットのみを取り出して改めて要素分割したモデルを用い、その周囲の節点に第2段階で求めた節点変位を与えて解析を行うことにより、ポケット内部での潤滑剤挙動や応力分布を求める。

この方法を用いて、まずポケット形状を変化させて解析を行い、解析方法の妥当性について検討するとともに、そ

Fig. 2 Shapes of lubricant pockets and their arrangement on workpiece surface

Fig. 3 An example of finite element mesh
(1974 elements, 2107 nodes)

れが潤滑剤挙動に及ぼす影響を調べた。被加工材の要素分割例およびそのポケット部分の拡大図を Fig. 3 に示す。今後、さらにダイス角 α 、ポケット寸法 d およびポケット斜面角 β などを変化させて解析を行う予定である。

なお、剛塑性有限要素法においては、潤滑剤をニュートン流体と仮定すると、剛粘塑性体として取り扱うことができる。このとき潤滑剤部分の構成式は、

$$\sigma_{ij} = 2\eta\dot{\epsilon}_{ij} - p\delta_{ij}, \quad \eta = \frac{\bar{\sigma}}{3\dot{\epsilon}} \quad (2)$$

のようになる⁽⁴⁾。ここで η は粘度、 p は圧力、 δ_{ij} はクロネッカーデルタである。

3. 結果と考察

以下では、条件をダイス角 $\alpha=4^\circ$ 、引抜き速度 $u=1\text{mm/s}$ 、摩擦係数 $\mu=0.15$ 、ポケット寸法 $d=0.8\text{mm}$ および斜面角 $\beta=20^\circ$ 、潤滑剤粘度 $\eta=1.8\times 10^{-4}\text{MPa}\cdot\text{s}$ として解析を行った例を示す。

まず、第1段階および第2段階後の相当応力分布を Fig. 4 に示す。なお、引抜き開始からの板材の移動量は $x=6\text{mm}$ である。ポケット内部を潤滑剤とした第2段階では、ポケット周囲に大きな応力勾配が現れるものの、特にポケットから離れた部分においては各段階において相当応力分布にほとんど違いがないことがわかる。このことは、ポケットに対する板材長さがほぼ充分であることを示している。また、板材は摩擦の影響を受けて変形しており、引抜き方向（図中の右側）に対して等相当応力線が湾曲する傾向が見られた。

次に第3段階における Type A および Type B の潤滑剤ポケットの形状変化を Fig. 5, 6 に示す。また、加工途中の相当塑性ひずみ速度の分布を Fig. 7 に示す。ポケットの輪郭については、初期に斜面であった辺が徐々に歪むが、Type B

Fig. 4 Distribution of effective stress after the each step of analysis ($x=6\text{mm}$, Pocket type A)

の底面は加工後もほぼ直線を保っていることがわかる。またポケット内部では、全体的に引抜きの後方へ向かう流れが生じている。一方、相当塑性ひずみ速度分布を見ると、ポケットの前端付近で大きな値を示している。これらのことは、引抜きにおいては前方ほど変形状態が厳しくなるために、ポケット内の潤滑剤がそれに応じて後方へ流れることを示唆していると考えられるが、詳細についてはさらに異なる加工条件で解析を行うことによって検討する予定である。

終わりに、本研究には（財）天田金属加工機械技術振興財団研究助成（AF-2000005）を受けたことを記して謝意を表す。

結言省略

参考文献

- (1) T. Mizuno and M. Okamoto, *Trans. ASME, J. of Lubrication Technol.*, **104** (1982), 53-59.
- (2) 池 浩, 塑性と加工, **34**-393 (1993), 1075-1081.
- (3) 小豆島 明, 塑性と加工, **39**-455 (1998), 1198-1201.
- (4) Y. G. Meng, S. Z. Wen and H. Saiki, *Wear* **160** (1993), 163-170.
- (5) 小島之夫, 機論, **67A**-656 (2001), 672-677.

Fig. 5 Change in shape of pocket after strip drawing (Type A)

Fig. 6 Change in shape of pocket after strip drawing (Type B)

Fig. 7 Distribution of effective strain rate in lubricant pocket ($x=4.8\text{mm}$)