

UBETの応用に関する研究 (第2報)

— 軸対称問題への適用(2) —

Study on UBET (Upper Bound Elemental Technique) · 2nd Report

— Application to Axisymmetric Problems —

木内 学*・村田 良美*

Manabu KIUCHI and Yoshimi MURATA

1. 緒言

前報¹⁾ではUBETの基礎理論を概説し、それを用いた解析例を通して、UBETの塑性加工における解析手法としての有効性を検討した。本報ではUBETの新しい分野への応用として、軸対称問題における工具面圧の解析を試み、すえ込みおよび後方押しの際の工具面圧の計算を試み、この手法の可能性について検討した結果について報告する。²⁾

2. 解析方法 (仮想要素法の導入)

UBET (上界法)は他の解析手法 (有限要素法, 下界法など) と異なり, その理論構成上, 直接的に圧力 (応力) を求めることはできない。したがって以下に示す手法 (仮想要素法と呼ぶ) を新たに導入して面圧を求めた。

例として図1の単純すえ込みモデル (3要素) を考える。基本的な仮定として,

(i) 接触圧力を検討しようとする工具の微小面を一つの構成面とする仮想要素 E^* を考える。

(ii) 仮想要素 E^* を含めて, 被加工材の変形に対してはUBETの理論が適用され, エネルギー最小の条件が満足されるものとする。

適宜に際しての考え方は以下のとおりである。

(a) 仮想要素 E^* を含めて, 工具が全体的に同一速度 \dot{U} で動く場合の変形をUBETを用いて解く。この場合の被加工材全体のエネルギー消費率を \dot{W} とする。その際境界 Γ_1^* , Γ_2^* での材料の速度 \dot{V}_1^* , \dot{V}_2^* も定まる。

(b) 仮想要素 E^* と工具の微小面に微小相対速度 $\Delta\dot{U}$ の外乱が加わり, この部分のみ $\dot{U} + \Delta\dot{U}$ の速度, 他の工具面は \dot{U} の速度で動く場合の変形状態をUBETを用いて解く。ただしこの場合境界 Γ_1^* , Γ_2^* (仮想要素を設定したため生じるせん断面) におけるせん断仕事率は無いものとする。

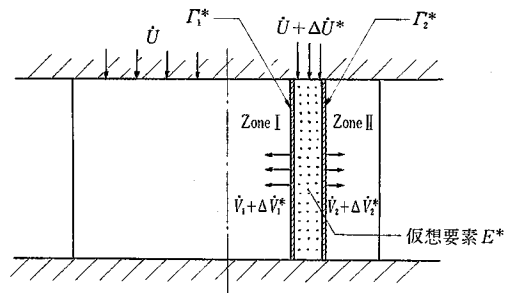


図1 面圧分布解析モデル (すえ込み)

この場合の全エネルギー消費率 \dot{W} は次のように分けて考えられる。

$$\dot{W} = \{ \text{仮想要素 } E^* \text{ の内部仕事率と摩擦損失の和 } \dot{W}_E^* \} + \{ \text{Zone I の全仕事率 } \dot{W}_I \} + \{ \text{Zone II の全仕事率 } \dot{W}_II \} \quad (1)$$

また境界 Γ_1^* , Γ_2^* における垂直速度は次式で示される。

$$\Gamma_1^*: \dot{V}_1^* + \Delta \dot{V}_1^*, \quad \Gamma_2^*: \dot{V}_2^* + \Delta \dot{V}_2^* \quad (2)$$

(c) (a), (b) 両者の全エネルギー消費率の差 $\Delta\dot{W}$ は次のように理解することができる。

$$\begin{aligned} \Delta\dot{W} &= \dot{W} - \dot{W} \\ &= \left\{ \begin{array}{l} \text{仮想要素 } E^* \text{ に対して微小相対速度 } \Delta\dot{U}^* \\ \text{がなす内部仕事率と摩擦損失の和: } \Delta\dot{W}_E^* \end{array} \right\} \\ &+ \left\{ \begin{array}{l} \text{Zone I に対して境界 } \Gamma_1^* \text{ における速度増} \\ \text{分 } \Delta\dot{V}_1^* \text{ がなす全仕事率増分: } \Delta\dot{W}_I \end{array} \right\} \\ &+ \left\{ \begin{array}{l} \text{Zone II に対して境界 } \Gamma_2^* \text{ における速度} \\ \text{増分 } \Delta\dot{V}_2^* \text{ がなす全仕事率増分: } \Delta\dot{W}_{II} \end{array} \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

(d) 仮想要素 E^* を設定した部分の通常変形時の流動状況を考えると速度場の中立点位置に相当する場合を除いて必ず一方の流動が発生している。すなわち境界 Γ_1^* , Γ_2^* における通常変形時の速度 \dot{V}_1^* , \dot{V}_2^* は必ず同方向を向いている。

(e) 外乱 $\Delta\dot{U}^*$ が加わった場合速度場の中立点位置の変化は無視できるとすれば, 境界 Γ_1^* , Γ_2^* に発生する速度

* 東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

増分 $\Delta\dot{V}_1^*$, $\Delta\dot{V}_2^*$ について次の関係が成立する.

$$\Delta\dot{V}_1^* \neq 0, \Delta\dot{V}_2^* = 0 \quad \text{または} \quad \Delta\dot{V}_1^* = 0, \Delta\dot{V}_2^* \neq 0 \quad (4)$$

仮想要素が中立点位置にきた場合に限り,

$$\Delta\dot{V}_1^* \neq 0, \Delta\dot{V}_2^* \neq 0 \quad (5)$$

(f) 一方 $\Delta\dot{U}^*$ と $\Delta\dot{V}_1^*$, $\Delta\dot{V}_2^*$ の間には体積一定の条件より次の関係が成立する.

$$\Delta\dot{U}^* \cdot S^* = \Delta\dot{V}_1^* \cdot \bar{\Gamma}_1^* + \Delta\dot{V}_2^* \cdot \bar{\Gamma}_2^* \quad (6)$$

ただし $\left\{ \begin{array}{l} S^* : \text{工具面上の微小面面積} \\ \bar{\Gamma}_1^*, \bar{\Gamma}_2^* : \text{境界}\Gamma_1^*, \Gamma_2^*\text{の面積} \end{array} \right.$

(g)(c)で示した外乱付加時と通常変形時の全エネルギー消費率の差 $\Delta\dot{W}$ は外乱 $\Delta\dot{U}^*$ を与えた微小面に作用する面圧 p^* によりなされた仕事増分であると考えると,

$$p^* \cdot S^* \cdot \Delta\dot{U}^* = \Delta\dot{W} = \Delta\dot{W}_E^* + \Delta\dot{W}_1 + \Delta\dot{W}_2 \quad (7)$$

すなわち

$$p^* = \frac{\Delta\dot{W}_E^*}{S^* \cdot \Delta\dot{U}^*} + \frac{\Delta\dot{W}_1 + \Delta\dot{W}_2}{S^* \cdot \Delta\dot{U}^*} \quad (8)$$

(h)(e), (f)で述べたことより次の関係が成立する.

$$\frac{\Delta\dot{W}_1 + \Delta\dot{W}_2}{S^* \cdot \Delta\dot{U}^*} = \frac{\Delta\dot{W}_1}{\Delta\dot{V}_1^* \cdot \bar{\Gamma}_1^*} \quad \text{または} \quad \frac{\Delta\dot{W}_2}{\Delta\dot{V}_2^* \cdot \bar{\Gamma}_2^*} \quad (9)$$

上式の右辺は境界 Γ_1^* または Γ_2^* に作用する面圧 p^* , p_2^* を意味している. さらに仮想要素 E^* の幅を無限小とすれば, 境界 Γ_1^* と Γ_2^* は一致し, p^* または p_2^* は通常変形時のその位置での面圧と考えられる. 以上より面圧 p^* は

$$p^* = \frac{\Delta\dot{W}_E^*}{S^* \cdot \Delta\dot{U}^*} + (p^* \text{または} p_2^*) \quad (10)$$

上式右辺第1項は仮想要素の単純圧縮変形抵抗 σ_0 を意味する. 故に上式は

$$p^* - (p^* \text{または} p_2^*) = \sigma_0 \quad (11)$$

この式は直交する2方向から p^* および $(p^* \text{または} p_2^*)$ なる応力が作用する時のTrescaの降伏条件と一致する.

3. すえ込み加工の面圧分布の解析

図2~5には円柱ビレットのすえ込みの際の解析例を示す. 図2~3は要素分割数が3の場合であり, 高橋³⁾の実測値との比較のためにビレットの寸法を同一としてある. 解析値はいずれも, いわゆるfriction hillを示しており, かつSiebelによるスラブ法の解と完全に一致している. 一方, 高橋の研究その他によりこの場合の圧力分布はビレットの寸法比 h/d の影響を受け, h/d が概略

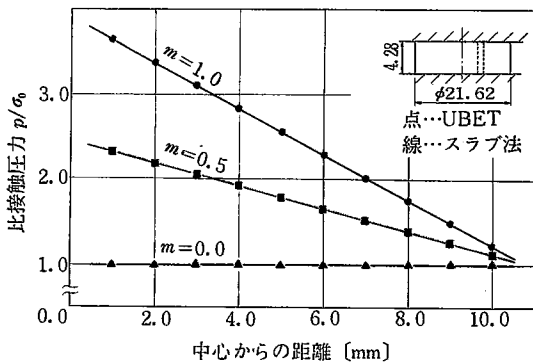


図2 UBETによるすえ込みの接触圧力分布(3要素)

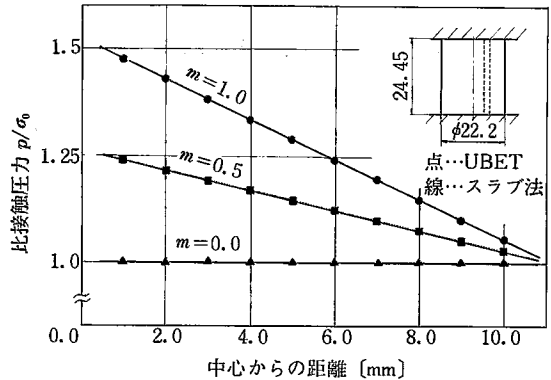


図3 UBETによるすえ込みの接触圧力分布(3要素)

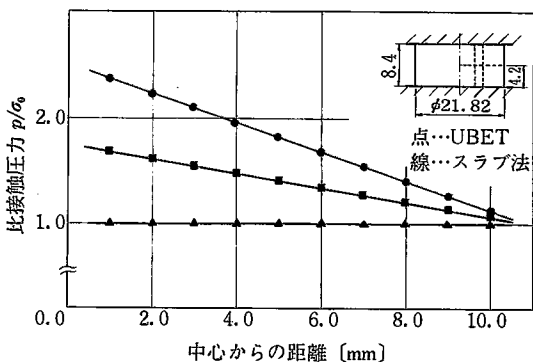


図4 UBETによるすえ込みの接触圧力分布(6要素)

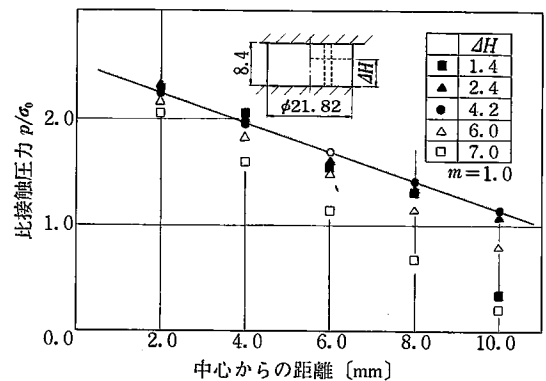


図5 要素分割位置が面圧分布の解析値におよぼす影響

1.0 以下の場合には中高の圧力分布となり、 h/d が概略 1.0 以上の場合には外周部が中心部より高い凹形の圧力分布となることがよく知られている。圧力分布が凹形になる原因としては材料の不均一塑性流動が指摘されているが、本解析の UBET では均一変形要素を用いているため、その適用範囲に限界があり、より実際の解析を行うためには不均一変形要素の導入が必要となる。

図4は要素分割数が6の場合の解析結果である。この場合もスラブ法の解と一致している。要素数を多くすると、要素の分割位置によって面圧分布が変化する場合があるが(図5参照)、これは要素数がまして流れの自由度が大きくなるため、仮想要素に与えた外乱 ΔU^* により、通常変形時には起こり得ない流動モードが発生する可能性があるためであり、本手法を適用する際に注意すべき点である。なお、3要素、6要素の場合とも得られた面圧分布を積分して得た全荷重は UBET により得た通常変形時の全荷重と完全に一致した。

2. 後方押し加工の面圧分布の解析

すえ込みの場合と同様の考え方を用いて後方押しの際の工具面圧の解析を行った。結果を図8~10に示す。解析の際の諸条件は松原、工藤⁴⁾の実験と同一にした。要素分割は図6の9要素モデル、および図7の5要素モデルを用い、9要素モデルについてはあらかじめ軸方向に見た分割位置の最適化処理を行い、その分割状態で面圧分布を求めた。加工初期(ポンチ・ストローク $S=2$ mm)で摩擦大、リダクション大の時には材料のポンチ近傍のみが変形域となり、残りの部分は剛体域となる。加工後期($S=10, 14$ mm)では剛体域は消失し、材料全体が

変形域となる。加工初期のポンチ底面の面圧分布の解析例を図8に、加工後期の解析例を図9に示す。加工後期では変形が軸方向に一様であると仮定し、5要素モデルでの解析も行った。(図10)

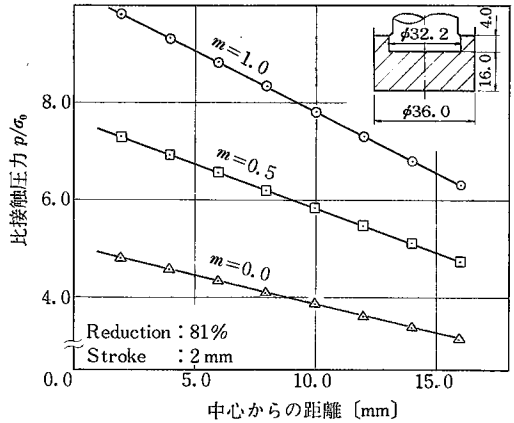


図8 UBETによる後方押し加工の接触圧力分布(9要素)

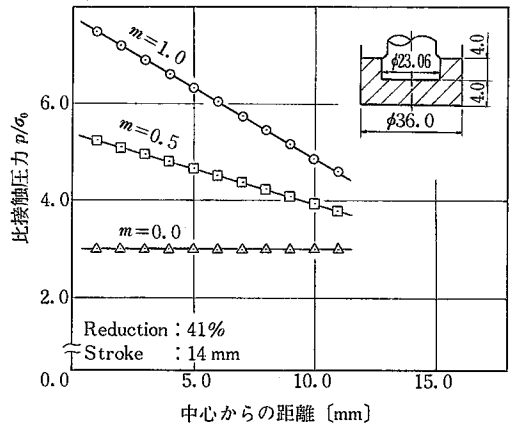


図9 UBETによる後方押し加工の接触圧力分布(9要素)

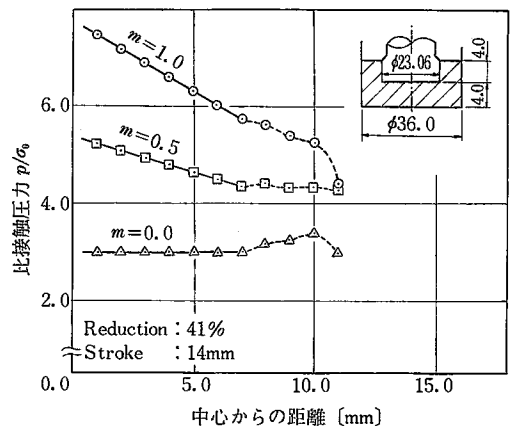


図10 UBETによる後方押し加工の接触圧力分布(5要素)

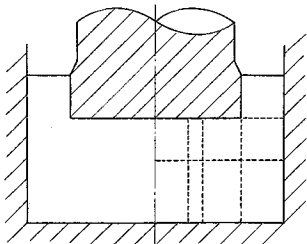


図6 後方押し 9要素モデル

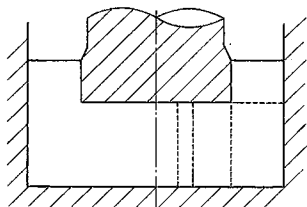


図7 後方押し 5要素モデル

研究速報

松原, 工藤の測定では断面減少率が小さく, 押し残り厚さが大の場合(加工初期)にはポンチ底面の外周付近で圧力が高くなるが, 本解析結果ではすえ込みの場合と同様中高の圧力分布となる。この相違の原因としては, 本解析では材料の加工硬化を考慮に入れていないことが考えられる。加工後期では実測値も中高の圧力分布となり, 解析結果は実測値と傾向的に一致する。加工後期の面圧の解析結果は5要素モデル, 9要素モデルでよく一致した。なお, いずれの場合も面圧を積分して得られる荷重はUBETにより得た荷重とほぼ一致した。

5. 結 言

円柱ピレットのすえ込みおよび後方押し出しの場合の工

具面圧について, UBETを応用した仮想要素法による解析を試みた。得られた結果はスラブ法による解とよく一致し, 実測値と比較してほぼ妥当な結果と考えられるものであった。これらの試みを通して, いまだ手法上改善すべき点が多く残されてはいるもののUBETにより簡便に工具面圧を推定できる可能性が見出されたと考えられる。(1979年9月5日受理)

参 考 文 献

- 1) 木内, 村田: 昭和54年度塑性加工春季講演会講演論文集
- 2) 木内, 村田: 第30回塑性加工連合講演会講演論文集
- 3) 高橋: 塑性と加工 Vol. 6 No. 52 (1965. 5)
- 4) 松原, 工藤: 第28回塑性加工連合講演会講演論文集

東京大学生産技術研究所報告刊行案内

第28巻 第1号(英文)

水 町 長 生・吉 識 晴 夫・遠 藤 敏 彦

A Study on Performance of Radial Turbine under Unsteady Flow Conditions

ラジアルタービンの非定常流特性に関する研究

ラジアルタービンは約200馬力以下の小型ガスタービン原動機のタービンとして多く使用されており, またピストン機関の過給機駆動用の排気タービンとしても多数使われている。さらに, 寒冷発生用のターボ膨張機用タービンとしても多く用いられている。このラジアルタービンは軸流タービンに比して, 小流量, 高膨張比用のタービンとして適しており, 比速度 N_s が40~50以下の場合に, 軸流タービンよりも高い効率を出せる。また, 軸流タービンに比べて構造が簡単であり, コストが安くなるという長所を持っている。

ラジアルタービンの定常流特性に関しては多くの研究成果が発表されている。しかし, ラジアルタービンは定常流の下で運転される場合の外, 非定常流の下で運転されることがある。たとえば, ターボ膨張機用のタービンでは部分負荷で流量を減少させる場合はノズルの全周を使用せず, その一部を使用し, 部分送入の下で運転される。また排気タービンでは, エンジンシリンダからの排気圧力の干渉を避けるために数シリンダの排気を1本の排気管にまとめ, 1台のエンジンに対して通常2本の排気管を用いる。このときタービンは入口, スクロールおよびノズルを2分割し, それぞれ1本ずつの排気管に接属し, 一方のノズル部分にガスが流れている時は, 他方のノズル部分には流さず, 部分送入で運転される。さらに, 排気タービンを動圧駆動で使用する場合には, エンジンシリンダからの脈動排気がそのままタービンに流入し, タービン内の流れは周期的な脈動流となり, 場所的にも時間的にも非定常な流れとなる。

本研究は, 2つの部分から成立しており, 第I部ではラジアルタービンが部分送入で運転される時のタービン内の流れを明らかにするために実験的および解析的研究を行い, 定常流の場合と流れがどのように相違するかを明らかにした。第II部では動圧駆動されるラジアル排気タービンについて, エンジンシリンダをも含めた排気タービン系全体を一つの系として取り扱い, 特性曲線法を用いた解析的研究を行い, また実験により, その解析結果の妥当性を確認し, 実用的価値のある解析手法を明らかにした。

(1979年12月発行)