

# オンライン面力センシングの開発

東京大学 工学部 金属工学科

助教授 相澤龍彦

(昭和63年度研究開発助成 AF-88011)

## 1. はじめに

塑性加工において工具と被加工材料との相互作用は、種々の形態で現れるが、その現象を記述する上で、力学情報、特に面力分布情報は工具-材料間の応力伝達そのものを表現しているため、きわめて重要な物理量である。しかし、その測定にはしばしば困難を伴う。

本研究では、オンプロセスでの表面力センシング・システムの開発を目的とし、その第一段階として、鍛造その他の塑性加工プロセスで広く採用されているリング圧縮試験をモデル実験対象として選択し、研究者らが開発したオンライン面力センシング法の精度・感度などを検討、考察した。特に、面力分布を圧下率ごとに測定することにより、従来よりも正確に工具-被加工材料界面での潤滑現象を考察できるようになった。

なお、本研究は平成4年度米国で開催されたアメリカ機械学会・総会 (WAM-93) の Sensors and Signal Processing for Manufacturing Div.において、招待講演として、題目 "On-Process Tribosensing System to Predict Change of Tractions with Work Reduction" の口頭発表を行った。なお、論文は ASME の規定に従い、

審査後、Volume Papers<sup>1)</sup>として公表されている。

## 2. 実験方法

研究者が提案しているオンプロセス面力センシングの概念図を図1に、また本研究で開発した面力センシングシステムの構成図を図2に示す。まず、図1では重要な点は、負荷時のダイス/工具の3次元変形に着目し、その変形モデルを計算機上に構築し、変位及び面力ともに未知である工具-材料界面以外の面あるいは工具/ダイス内部での測定値を併用して、界面における未知物理量、特に面力を精度よく推定することにある。もちろん、界面全体の面力の平均値で満足するのであれば、本研究で開発したシステムは不要であるが、面力分布からは圧下に伴う界面力学特性の変化を推定することが可能となり、実際の潤滑性を議論できる。まず工具/ダイスの3次元変形をモデル化する手法としては、1) 界面での変位、面力を精度よく求めることができること、2) 測定トランスデューサから得られる情報と精度よくマッチングがとれること、3) ダイス・工具の3次元形状を誤差なく表現できること、4) オンプロセスで測定を行うため、解析時間はできるだけ小さいこと、などを考慮する

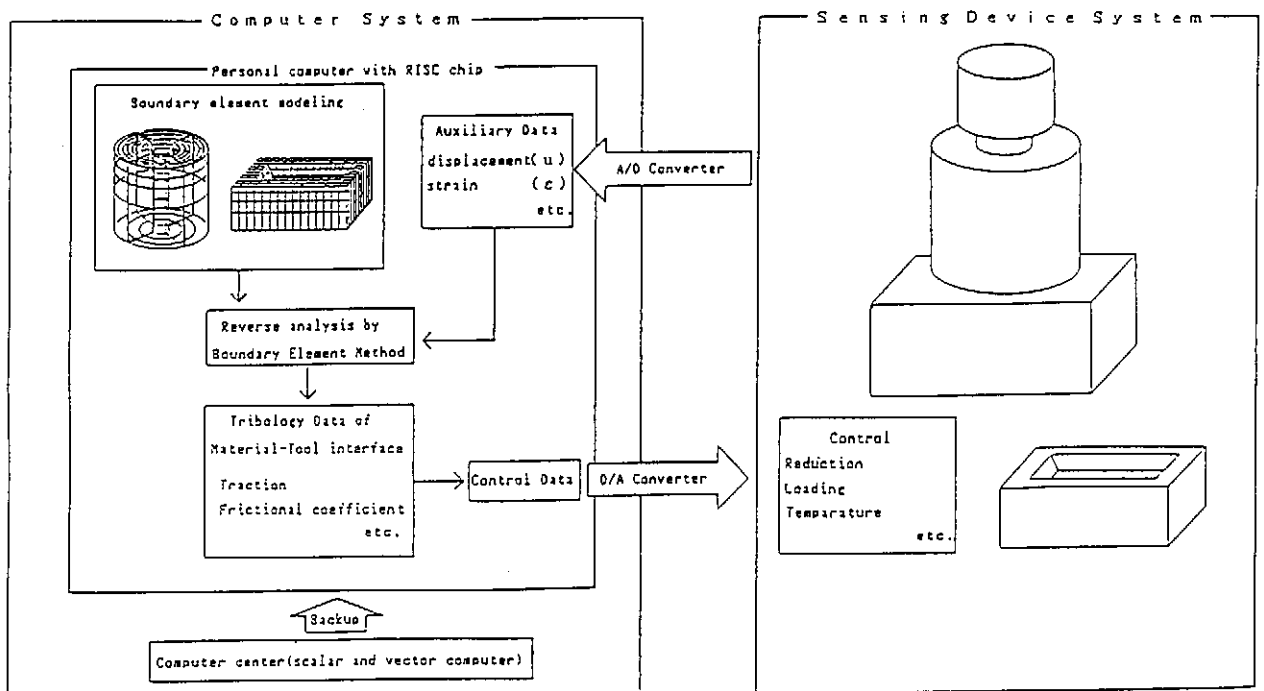


図1 工具・ダイスに内蔵型のトランスデューサを利用したオンプロセスセンシングシステムの概念図

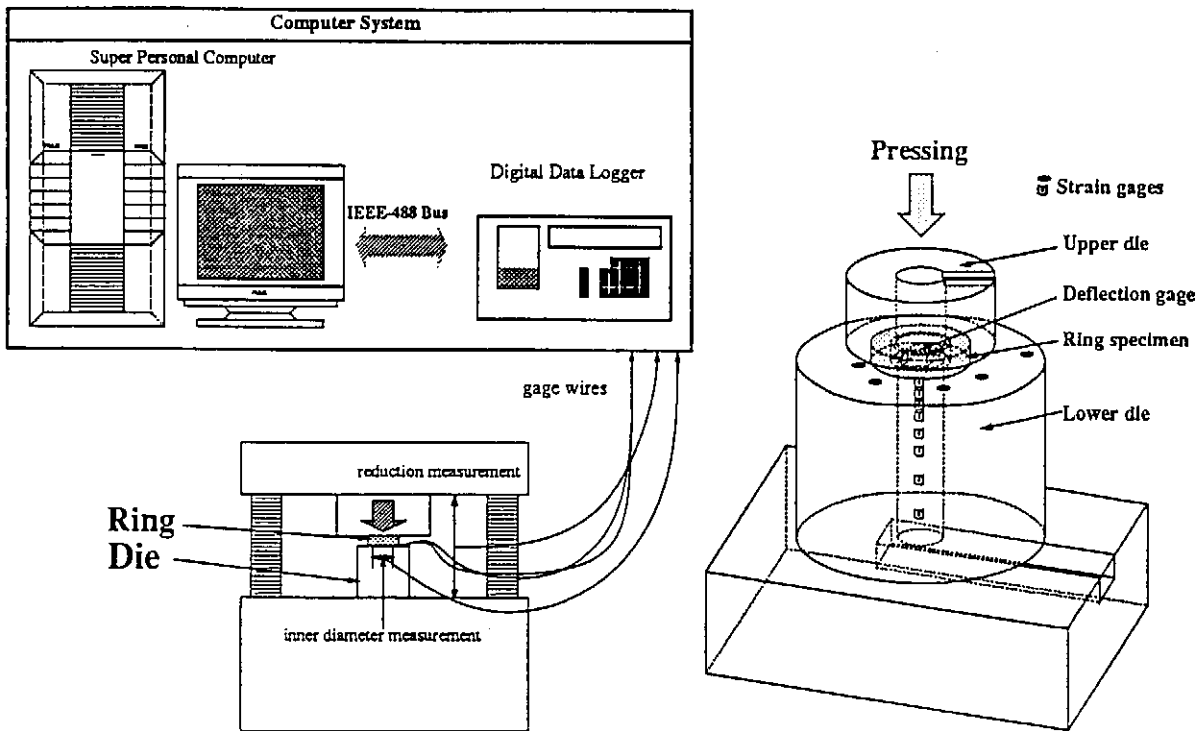


図2 本研究で開発したひずみゲージ/内径変化/デジタルゲージを併用したオンプロセスセンシングシステム：計算機上には工具の3次元弾性変形を記述する境界要素モデルが常時待機している。

と、1] 有限要素法に代表される領域型、すなわち3次元領域の内部も分割してモデル化する方法は、境界での離散化近似精度が内部よりも低下すること、2] 変位関数を未知関数とする解析法では、センサによって比較的精度よく測定可能なひずみなどのデータとマッチングがとれない、3] 比較的複雑な形状を呈している工具・ダイス形状へ応用することが難しいこと、などがあり、本研究では一貫して、3次元境界要素法により、工具・ダイスの3次元変形モデルを計算機中に構築することとした。

本研究では、オンプロセス測定に用いるトランスデュータとしては、1) 直接に面力分布を推定するためのひずみゲージ、2) リング試験片の変形特性を監視するための変位ゲージ、3) 圧下率のオンライン計測用のデジタルダイヤルゲージ、計3種類を用いた。前述したように、ひずみ、特に工具あるいはダイスの任意の位置で計測したひずみと、計算機上に構築した3次元モデルとを結びつける必要がある。本研究で明らかにしたように、境界要素法では、表面の物質量を用いて、任意のひずみを陽に表現することができるため、誤差なしに計測ひずみと、ひずみ表示式とのマッチングをとることができる。

### 実験結果

実験では、表1に示すような、無酸素銅のリング試験片を用い、表面粗さ・潤滑材粘度をパラメータとした。同表に

表1 本実験条件と測定条件

Specimen	Material	OFC
	Outer diameter	40mm
	Inner diameter	24mm
	Height	8mm
Surface Roughness	Buffed by 1 $\mu$ Alumina	
	Grined by sandpaper (# 150)	
	Grined by sandpaper (# 80)	
Lubricants	No lubricant	
	Polybutene 100R (high viscosity: 8300cSt@37.8°C)	
	Polybutene OH (low viscosity: 30.0cSt@37.8°C)	
Axiliary Information	Upper surface	$\epsilon_{\theta\theta}$ @ $r=29.5, 33.0$ mm
		$\epsilon_{rr}$ @ $r=29.5$ mm
	Inner surface	$\epsilon_{zz}$ @ $r=65.0, 75.0$ mm
		$\epsilon_{\theta\theta}$ @ $r=75.0$ mm

は、別途行った感度解析で、実用的に比較的感度のよい、ひずみ測定位置（トランスデューサ位置）も示した。なお、測定に用いたひずみ量を情報独立性を調べ、本実験では推定面力未知数を6個として評価を行った。

本実験結果について考察する前に、開発したシステムの有効性・実用性を検討する目的で、リング試験片と工具の界面にテフロンシートを設置し、ほとんど摩擦のない条件、すなわち半径方向の面力は法線方向（圧縮方向）面力に比較して、ほとんど無視できる状態で、実験を行い、本システムで予測した法線方向面力並びに半径方向応力を求めてみた。結果を表2並びに図3に示す。

表中の*i*, *m*, *o*はそれぞれリング試験片と工具界面の内周

表2 ほとんど摩擦のない系でオンライン計測された法線方向面力分布

Red.	$p_z$ (kgf/mm <sup>2</sup> )			Reference* (kgf/mm <sup>2</sup> )
	i	m	o	
14.9%	36.6	36.3	36.8	37.3
20.6%	38.8	38.9	39.1	40.5
29.5%	44.8	45.1	45.0	46.7

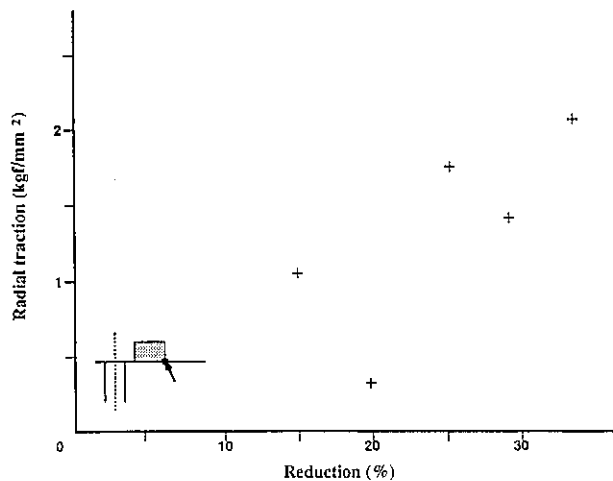


図3 ほとんど摩擦のない系における、外周点(o)での半径方向面力の変化

点、中間点、外周点を意味し、参考値として示した応力は負荷荷重を変形前の接触面積で除した値である。界面での法線方向面力にほとんど分布はなく、またその絶対値も参照値とほぼ対応することがわかる。

一方、半径方向面力の圧下率に対する変化をみると、図3のように、圧下率を増加させると増加する傾向も見られるが、その絶対値は同一の圧下率における法線面力の最大3-4%であり、ほぼテフロンで実現される摩擦係数程度であることがわかる。以上の実用試験により、本システムによって界面における物理状態を定量的に推定できることがわかった。

なお、本システムの開発にあたっては、前述した感度実験、感度性評価解析に加えて、計算機上に構築した境界要素法による3次元弾性変形モデルの精度評価、ひずみマッチング精度確認解析、システム全体の応答性確認実験などを行っており、面力推定誤差は数MPa程度である。

次に本実験結果について述べる。リング圧縮試験では、文献2), 3) で論じられているように、リング形状寸法、特に内径変化が摩擦係数とよい相関があり、①摩擦係数が小さいときには、中立点がリング内径よりも中にあり、内径

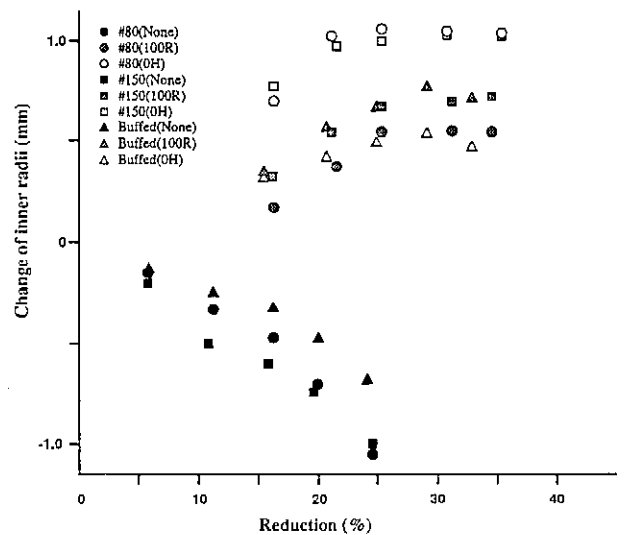


図4 種々の実験条件における圧力低下に伴うリング試験片内径変化

は圧下率とともに増大し、②摩擦係数が大きいときには、中立点が内径よりも外側に入ってくるため、内径は圧下率ともなっており、逆に減少すること、が知られている。したがって、前もって摩擦係数をパラメータとして圧下率に対する内径変化を求めておけば、内径変化から逆に摩擦状態を推定することも可能である。そこで、まず各種条件における圧下率に対する内径変化を図4にまとめた。

潤滑材が添加されない場合には、表面の粗さに応じて、内径は大きく減少しており、きわめて摩擦係数が大きい界面状態が達成されていることが容易に認められる。また試験片表面粗さがバフ研磨のようにほとんどない条件では、粘度の大きい潤滑材を使用した方が、明らかに内径増大量が大きく摩擦係数が小さいことが伺える。より興味深いには、適当に表面を粗した#80、#150の試験片であり、粘度の小さいものの方が大きな内径増大変化を示し、またその場合には粗さそのものの影響はほとんどないことがわかる。これは、通常の潤滑理論では説明が難しいが、片岡・木原・相澤らが提唱しているマイクロプールメカニズム(工具・被加工材料界面に存在する粗さによるマイクロなプールを介して、圧下時の材料の塑性変形により生じる静水圧を駆動力として潤滑材が界面全体に供給されるため、1) そのプールが適当な大きさ確保されていれば、その範囲で粗さには関係なく、粘度の低い潤滑材の方が駆動力に対する抵抗が低く、流動性がよいため潤滑性を向上させ、極端な場合、水でさえ潤滑効果を有する、2) プール規模が大きくなりすぎると、圧下初期に潤滑材が系外に流出して逆に潤滑性は低下する)<sup>4), 5)</sup>によると考えられる。

次に、実際開発したシステムによって予測された半径方向面力について考察してみよう。

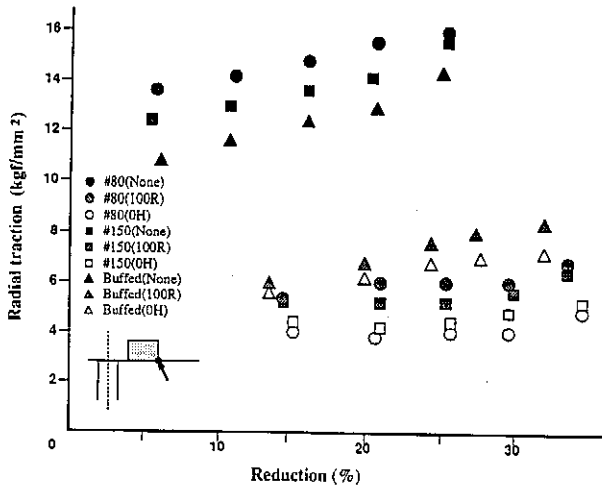


図5 外周点の半径方向面力の圧下率に伴う変化

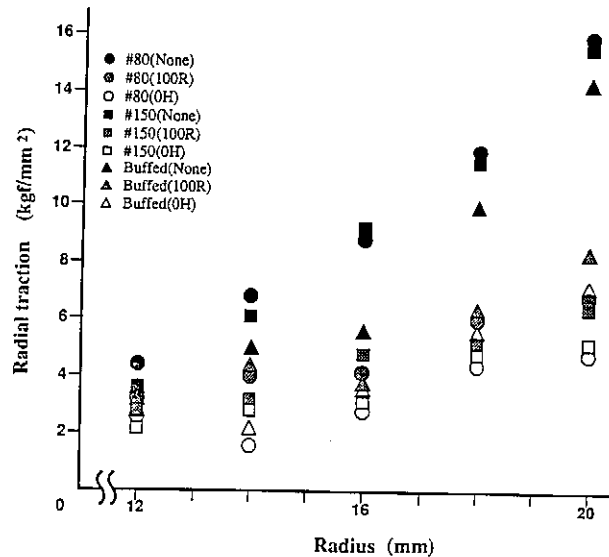


図6 圧下率30%における半径方向面力分布

リング試験片の外周点(o)における半径方向面力の圧下率に対する変化を示す。前述した内径の圧下率に対する挙動から推定された潤滑挙動からは、

- 1) 潤滑材を全く添加しない場合には粗さに応じて、半径方向面力、すなわち摩擦力は増大すること。
- 2) 適当な粗さであれば、低粘度の潤滑材がもっとも低い摩擦力を与え、その場合、#80、#150による差異は見られないこと。
- 3) 面粗度が粗い方がかえって潤滑特性がすぐれていること。

が想定されるが、図5に示した結果はまさにこの推定結果と一致しており、本システムにより、界面潤滑性を定量的に記述できる面力データを直接求めることができることがわかる。

実際には界面上に半径方向面力分布が存在するが、本システムでは界面を含む3次元弾性変形モデルが計算機上に構築されているため、評価点以外の中間位置での評価点における値も、内挿関係を利用して、精度低下なしに求めることができる。図6に圧下率30%における半径方向面力を示す。この分布形状は、この分布形状に応じて摩擦係数を定量化させた有限要素解析と光学顕微鏡観察により、1) 比較的高い半径面力は、リング外周近傍でのFolding現象による側面材料の界面への流入に伴う摩擦現象に対応すること、2) 内周にかけての平坦な面力分布はデッドメタル領域に対してしていること、などがわかっている。このことから、オンライン面力センシングによって、材料の弾塑性変形状を反映した界面特性を把握できることが明確となった。

#### 4. 結 論

塑性加工において、その加工法の種別を問わず、最後に問題となる技術分野は、塑性加工トライボロジーであり、その基礎的なデータ、特にオンプロセスでのトライボロジーデータを計測することは、非論理的なあるいは非物理/非化学的な先入観めきに、潤滑特性・摩擦特性などを考察、検討することができる。特に、本システムでは、工具それ自体をセンサとして用いているために、今後種々の加工、成形プロセスでオンライン測定が可能となるものと考えている。

現在、温度・超音波トランスデューサも内蔵したセンサ工具を設計、製作中であり、今後ともオンプロセス・センシングシステムの開発に本研究成果を反映させていきたい。

#### 文 献

- 1) T. Aizawa, T. Chihara and J. Kihara, PED-Vol. 55, ASME (1992) 161-176.
- 2) 久野木、科学研究報告 (1954) 63-76.
- 3) C.H. Lee and T. Altan, ASME J. Engineering for Industry (1978) 775-780.
- 4) 片岡、木原、相澤、トラボロジスト (1991) 891.
- 5) J. Kihara, Advanced Technology of Plasticity, Vol. 4 (1990) 1693-1702.