論文

金型内蔵マイクロセンシングシステムの開発

小山 純一* 楊 明**

Development of Die-embedded Micro-sensing System

Jun-ichi KOYAMA and Ming YANG

(Received on December 7, 2009)

High-precision measurement and identification of deformation in metal forming is significant. In this study, a die-embedded sensing system with micro-semiconductor sensors fabricated using semiconductor process technology was developed. The die-embedded sensing system is a new sensing tool for measuring complex phenomena by monitoring stresses in the die during the process. As a case study, we applied the die-embedded sensing system to the V-bending process. A microsensor for the measurement of the load and bending angle during processing was designed and fabricated. The results show that the new sensing system has advantages over conventional sensors.

Key words: microsensor, die-embedded sensing system, sheet metal bending, measurement of bend angle.

1. 緒言

生産システムの自動化や高度化に伴い、各加工工程において、高い加工精度が要求される。塑性加工においても、廉価で大量生産できるメリットを保ちながらも加工精度の向上が求められている。そのためには、今まで無視されていた影響因子などもセンシングし、正確に把握する必要がある。

塑性加工の場合、材料が複雑な変形経路をたどり、その変形特性が複雑である。多くの場合、金型を用いるため、材料の変形状態を直接計測することは困難である。より多くの影響因子をセンシングするために、新しいセンサーやセンシング手法の導入によって、多くの情報を取り入れること、センシング情報を知識にレベルアップすることにより職人が持っている高度な知識や勘に近づけることが求められる。また、最近の傾向として、FEM 等を用いた加工シミュレーションが加工プロセスの最適化や金型の設計に適用されるようになってきている。シミュレーション精度評価の観点から、複雑な金型内での金型と素材との接触状態や素材の変形状態の可視化が大変重要である。

今まで、金型内における素材の変形状態や素材と金型との接触状態を計測評価する研究がいくつかなされた。金型壁面にひずみゲージを複数貼付け、加工中に計測したひずみ分布情報と境界要素法を用いた加工プロセスシミュレーション結果とを融合することにより、素材の変形状態を計測評価する研究がなされた¹⁾。また、金型側壁に AE センサーを複数取付け、加工中における素材と金型の接触状態及び摩擦状態を同定する研究がなされた²⁾。さらに、金型

を分割し、金型内部にアクチュエータやセンサーを組み込むことにより、金型が受ける荷重の計測や積極的に金型を変形させるようなアクティブ金型に関する研究があった。しかし、センサー感度や情報の信頼性などの課題が残されており、実用化されていないのが現状である。

そこで、本研究では、半導体加工技術を利用して複数の半導体ゲージから構成されるマイクロセンサーを製作し、それを金型の適切な箇所に内蔵させた新しいセンシングシステムを提案する。このシステムは、加工中の金型の微小変形とその分布の測定が可能であり、その情報から塑性の変形形態や素材変形に伴う複雑な事象を計測できる。本報では、板材曲げ加工を例に挙げ、マイクロセンサーの設計、開発を行い、曲げ加工中の材料変形抵抗や曲げ角度の測定についての可能性を検討する。

2. 曲げ加工用金型内蔵センシングシステムの設計

2.1 金型内蔵センシングシステム概念

半導体製造プロセスを用いて、シリコンウエハ上に複数の高感度半導体ひずみゲージを製作する。それらを数 mm の大きさに切出し金型に埋め込む。これにより金型内部の複数箇所のひずみを測定し、無線通信回路を用いてセンサー情報をリアルタイムにコントローラに伝送する。Fig.1 に金型内蔵センシングシステム概念を示す。このような

Fig.1 Concept of micro die-embedded sensing system

* (株)アマダ 技術研究所 〒259-1196 伊勢原市石田 200 番地
Research Laboratory, AMADA CO., LTD. 200 Ishida, Isehara-City,
Kanagawa 259-1196, Japan.

** 首都大学東京 システムデザイン研究科 〒191-0065 日野市旭ヶ丘 6-6
Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan University, 6-6
Asahigaoka, Hino-City, Tokyo 191-0065, Japan.

センシングシステムを用いることにより、金型の内部変形情報を定量的に、リアルタイムに評価することができる。またこれらの情報をセンサーフュージョンにより融合することで、素材と金型の接触情報や素材の局部変形状態などの計測対象を求めることが可能となる。さらに無線通信システムと組み合わせることにより、センサーの配線が簡単になり、コストとスペースの削減につながる。

2.2 曲げ加工用金型内蔵センシングシステムの設計

板材の曲げ加工は、一般にパンチとV溝形状を有するダイを用いて Fig.2 のように行う。曲げ角度 α には製品に応じて様々な角度が要求される。この目的の角度に加工するために加工中の角度をリアルタイムで計測するシステムが従来から切望され、提案もされてきている。しかしながら接触方式、非接触方式に係わらず、その計測には製品形状、フランジ部長さ、キズの発生など制約事項が多かった。本システムは金型内部にマイクロセンサーを内蔵させ、ダイ肩部における板材とダイとの接触状態に応じての金型変形の推移から加工中の角度を推定しようとするものであり、実現できれば上述した従来からの問題点より解放される。

Fig.2 Equipment of bending process

本システムを板材の曲げ加工へ適用するに当たり、まずは曲げに伴うダイの変形を評価し、その検出に適したセンサー設計を行う必要がある。評価項目は、曲げ時の金型のひずみ量、その分布及び加工の進行に伴う分布の変化である。本研究では、市販の有限要素法コード ABAQUS を用いて、曲げ加工プロセスのシミュレーションを行った。素材の変形を弾塑性モデル、金型の変形には弾性モデルを用いて表し、加工に伴うそれぞれの変形を計算した。また、金型内 4 箇所にセンサーを仮設し、加工中の各センサー箇所でのひずみ推移を求めた。Fig.3 に素材と金型のメッシュモデルを示す。シミュレーション条件を Table 1 に示す。シミュレーションにより得られた金型内部の上下方向垂直ひずみ分布の一例を Fig.4 に示す。Fig.4 (a)は、曲げ加工の初期段階、Fig.4 (b)は曲げ加工終盤でのひずみ分布を表している。また、曲げ加工開始から終了までの 4 箇所のセンサー一部でのひずみの計算結果を Fig.5 に示す³⁾。

シミュレーション結果から、金型内部にひずみが分布し、その分布が素材と金型との接触位置に応じて移動することが分かった。また、ひずみ量は金型表層からの距離に比例して減少していくことが分かった。以上の結果より、以下のような金型内蔵マイクロセンサー設計指針が得られた。

- ・ひずみ分布が素材との接触点の移動に伴って推移するため、測定範囲にセンサーを分布させる必要がある。
- ・マイクロセンサーの挿入位置はダイ肩の表層の近い所が望ましく、そのためセンサーは極力小さいほうがいい。

Fig.3 Mesh model for FEM simulation

Table 1 Dimensions and conditions of simulation

Sheet metal (SPCC)	Thickness	mm	1.2
	Young's modulus	MPa	194900
	Poisson's ratio		0.328
	Yield stress	MPa	215.3
	n -value		0.198
	F -value	MPa	552.4
Die (S45C)	Die opening	mm	14
	Die angle	degree	88
	Die shoulder radius	mm	2.5
	Punch radius	mm	0.4
	Young's modulus	MPa	206000
	Poisson's ratio		0.350
	Friction coefficient		0.3
Model	Nodes		55946
	Elements		49343

(a) Earlier stage (b) Later stage

Fig.4 Simulated strain distribution in bending die

Fig.5 Simulated strains in the die varied with the progress of the process

・表層から数 mm 程度の金型内部に最大 3×10^{-5} 程度のひずみが発生し、それに応じた感度を選ぶ必要がある。また、マイクロセンサーを設計するに当たり、大きさ、配置、チップの形状等は、内蔵を想定しているダイ形状により異なってくるため、以下の点を考慮しダイ形状を設計する必要がある。

- ・Fig.5 の結果では、センサー位置 4 箇所でのひずみ変化があまり明瞭ではない。よって、各センサーにひずみがダイナミックに伝わるようなダイ形状を検討する。
- ・ひずみの大きさ、方向に影響をあたえるダイ肩部での摩擦を極力小さくする。
- ・ひずみの変化を安定にするため、ダイ肩部形状の工夫

により単調増加の荷重特性をダイに持たせる。

・ダイ肩部は表面にセンサーを近づけられる形状とする。

これらの条件により、金型形状を決定した。Fig.6 (a)が通常の V 溝金型に対して Fig.6 (b)はセンサー内蔵用金型であり、肩 R が大きく、板材が肩部を転がるように加工が進行するため、ダイとの接触点が大きく変化し、かつ摩擦も小さい。また、2 種類の肩 R が繋がった複合 R を有しており、これにより荷重単調増加特性が与えられている⁴⁾。

(a) Standard die (b) Die for embedding sensor
Fig. 6 Shape of the bending die

3. 曲げ金型内蔵マイクロセンサーの製作と評価

3.1 半導体マイクロセンサーの設計、製作

厚さ 1mm のシリコンウエハ上に半導体製造プロセスを用いて、Fig.7 に示す寸法のひずみセンサーを製作した。4 本のひずみゲージ (ゲージ寸法: 幅 0.1mm×長さ 0.3mm) で、0.5mm 四方のホイートストンブリッジを構成するようにし、高感度が得られる設計とした。四隅の四角いエリアはそれぞれの端子台である。この半導体センサーを金型の表面近くに配置し、新たに設計したダイに対して、曲げ加工開始から角度 α が 90°になるまで、材料の変形を高い感度で連続的に測定できるようにセンサーの配置を設計した。Fig.8 (a)はその設計案、(b)はシリコンチップをダイに組み込んだイメージを示す。シリコンチップ上に 4 組のセンサーを作りこみ、曲げ加工時の板材とダイとの接触点がセンサー直上に来た時にダイ表面法線方向からのひずみを捉えるように、それぞれ肩 R の円心方向に傾き角 θ を付けて配置した。その間隔はそれぞれ $\theta_1=12.5^\circ$, $\theta_2=25^\circ$, $\theta_3=37.5^\circ$, $\theta_4=50^\circ$ の一定とした。表層からの距離は①と④のセンサーが 1.5mm まで近づけるようにした。直線的なチップ形状は、シリコンウエハからの切り出しを容易にするためである。

Fig.9 に実際のセンサーチップの写真を示す。大きさが 3.4×4.6mm の平行四辺形状となっている。光って見える所は 4 組のセンサーの端子台である。

Fig. 7 Dimensions and specification of microsensor

Fig. 8 Configuration of microsensor tip

Fig. 9 Photo image of microsensor tip

Fig.8 のマイクロセンサーを最適ダイに組み込んだ場合、曲げ時における各センサーからひずみ履歴及び荷重を前節と同様な条件で FEM シミュレーションを行い、その結果を Fig.10 に示す。4 つの測定点がダイの肩 R に沿う表層に配置されたため、個々のセンサーにおけるひずみ履歴がプロセスの進行に従い、位相の異なった変化を示すことが分かった。この場合、曲げの開始から 90°程度までの曲げ角度とセンサー情報との相関を式(1)のように表すことができ、式(1)による推定結果と FEM シミュレーション結果との比較を Fig.10 (b)に示す。このことから、センサー情報から曲げ角度 α の推定が可能であることが分かった。

$$\alpha = 1.7317 + 0.4043 \times S1 + 0.1946 \times S2 + 0.0258 \times S3 + 0.0457 \times S4 \quad (1)$$

但し、

$$Sn = 1.0E^4 \times sn \quad sn: \text{各センサーひずみ量}$$

(a) Strain history of each sensor for optimum design

(b) Comparison of bend angle between estimation from strains of sensors and FEM simulation

Fig. 10 Evaluation of optimum designed sensors allocation

3.2 曲げ金型への組み込み

前述までの設計に基づき製作されたマイクロセンサーを曲げ金型に内蔵した。Fig. 11 (a)はセンサー全体像である。左右一対のセンサーチップとフレキケーブルで構成される。Fig. 11 (b)のようにセンサーチップの端子部とフレキケーブルをワイヤーボンディングする事により、金型左右肩 R 部に対応するセンサーユニット一対ができあがる。

(a) General view

(b) Details for joint

Fig. 11 Photo image of microsensor unit

Fig. 12 Photo image of die embedded with microsensor

一方金型の方は、Fig. 12 のように 2 つのピースに分割された金型の一端面にフライスによる溝加工を施し、センサー本体挿入後に接着材と樹脂で封入する。センサーチップと挿入穴は $10\mu\text{m}$ のクリアランスが確保され、四隅の逃げ穴も含め接着材が周りに充填されている。その後もう片方の金型に対してピン及びボルトで締結し金型が完成する⁴⁾。

3.3 実機による金型内蔵センサーの評価

上述の金型を実機に装着して、加圧冶工具を用いての静的出力評価試験と、実際の曲げ加工を行っての動的出力試験の 2 種類の評価を行った。試験には Fig. 13 (a)に示す加圧能力 800kN、テーブル長さ 2500mm のプレスブレーキを用い、Fig. 13 (b)のようにテーブル中央に金型を配置し、曲げ加工時に板材の挟み込み角度が計測できるように、金型端部に Fig. 13 (c)に示すベンディングインジケータを装着した。曲げ加工時に、プレスブレーキからはパンチストローク、曲げ荷重情報、ベンディングインジケータからは挟み込み角度情報、センサー内蔵金型からは、動ひずみアンプを介して左右両肩部それぞれ 4 箇所、合計 8 箇所のひずみ情報がリアルタイムで取得できる。

静的出力試験に用いた加圧冶工具を Fig. 14 に示す。先端角度 PA が 170° 、 130° 、 90° の加圧冶工具を用いて、金型

(a) Press brake (b) Die placement (c) Angle measuring instrument

Fig. 13 Photo image of experimental apparatus

長 30mm 全体に 30kN までの荷重 F を負荷しマイクロセンサー①から④の各荷重時の出力を評価した。3 種類の PA は、曲げ加工時の板材が 180° から 90° までダイ肩 R 部に順次接触して行く状況を想定している。また、金型は左右対称なので、それぞれの出力を平均した。

Fig. 14 Configuration of experiment for static loading

3.4 評価結果と考察

静的出力試験の結果を Fig. 15 に示す。図から分かるように荷重に対する出力値は各センサーとも良好な直線性を示しており、また PA の角度変化に伴って、①～④のセンサー出力も順次変化している。 $PA=170^\circ$ では、ダイ肩部接触点に最も近い②と①の出力が一番大きく、 $PA=90^\circ$ では③と④の出力が大きくなっている。これらの事から、内蔵された 4 箇所のマイクロセンサーは、ダイと板材との接触位置及び負荷状況に応答できていることが分かる。また、センサーからのひずみ情報は荷重の増加に対して線形性が高く、センサー特性として優れていることが分かった。

Fig. 15 Relationship between strain of microsensor and static load

次に実際の曲げ加工を行い動的な出力状態を評価した。評価には曲げ加工で一般的に多く使用される軟鋼 SPCC $t=1.2\text{mm}$ を用いた。曲げ幅 100mm の板材での曲げ実験を行った。その結果を Fig. 16 に示す。Fig. 16 (a) は加工プロセスの進行に伴う曲げダイの両肩にそれぞれ埋め込まれた 4 セットのセンサーからのひずみ情報、(b) は加工力の変化を示す。①～④がそれぞれのセンサーからの出力で、L が左肩部、R が右肩部のセンサーを表す。曲げ加工時、左右の変形がダイナミックに変化し、それによって左右のひずみ情報も多少異なるが、センサー①からセンサー④へ向かって順次ひずみ量のピークが変化していく様子が分かる。金型形状を最適化し、4 つのセンサーをダイの肩 R に沿う表層に配置したことにより、プロセスの進行に従い、個々のセンサーから位相の異なったひずみ情報の変化を得ることができた。Fig. 10 (a) のシミュレーション結果と比較すると、個々のセンサーからひずみ情報の大きさに差異があるものの、位相差がほぼ同じであり、設計通りのセンサー配置効果が得られたことが分かった。また、Fig. 16 (b) に示す荷重の測定結果も設計通り、ほぼ線形的に増加していることが分かる。このように曲げ加工時の摩擦特性が安定し、荷重と曲げ角度が単調に増加するダイの設計及びダイ表面付近に適切に配置する内蔵センサーと組み合わせることにより、安定した曲げ角度の推定が可能であることを示した。

また、異なる材料に対して、同様な曲げ実験を行った結果を Fig. 17 に示す。材料の違いにより、ひずみの大きさが異なるが、センサー間の位相差はほぼ同じであることから本金型内蔵センサーが機能しており、曲げ角度への応用が十分可能であることを示した。

(a) Strain- Angle : SPCC $t=1.2\text{mm}$ Length=100mm

(b) Force- Angle : SPCC $t=1.2\text{mm}$ Length=100mm

Fig. 16 Resultant Strains and Force against bending angle from bending test

Fig. 17 Evaluation of microsensor for different materials

4. 結 言

半導体加工技術を利用して曲げ金型に内蔵できるマイクロセンサーを設計、製作した。加工中の金型ひずみ情報を用いて曲げ角度を測定する事を目的に、ダイ肩部形状に最適化を図った金型を製作し、マイクロセンサーを内蔵したセンシングシステムを開発した。センサーの荷重-ひずみ出力特性 (静的特性) は、良い直線性を示しており 4 箇所のマイクロセンサーの出力性能が確認できた。実際の曲げ加工における曲げ角度-ひずみ出力特性 (動的特性) では、曲げ角度の進行に伴って各センサーの出力が順次推移していく事が確認できた。今後は実用化に向けてセンサーシステムの信頼性向上のための金型加工精度、金型へ組込み精度、さらに接合方法などについて検討していく必要がある。

参 考 文 献

- 1) Yang, M., Manabe, K. & Nishimura, H.: J. Mater. Process. Technol., **60** (1996), 249-254.
- 2) Yang, M., Manabe, K., Hayashi, K., Miyazaki, M. & Aikawa, N.: J. Mater. Process. Technol., **139** (2003), 368-372.
- 3) Yang, M. & Koyama, J.: Proc. of the 8th ESAFORM Conference on Material Forming, (2005), 289-292.
- 4) 小山純一・今井一成・楊明：平 17 塑加春講論, (2005), 269-270.
- 5) 小山純一・今井一成・楊明：56 回塑加連講論, (2005), 447-448.
- 6) 小山純一・今井一成・楊明：57 回塑加連講論, (2006), 89-90.