

## 塑性変形現象の時空4次元可視化システムの開発

機械技術部 牟禮雄二  
鹿児島大学 中西賢二

### 1. はじめに

複雑形状部品あるいは特別な変形特性を示す材料（例えば、Mg合金のように動的再結晶による加工軟化現象を示す材料）の鍛造加工プロセス設計（加工方法・加工条件の決定および金型設計）を最適化するためには、材料の変形特性と金型/材料間の摩擦によって定まる3次元的な塑性流動を実時間で高精度に予見する必要がある。筆者らは、平面ひずみあるいは軸対称問題に対して、加工を数段階に分けたシミュレーション実験を繰り返し、材料流動を可視化する成形加工物理シミュレーションシステム<sup>1)</sup>を開発し様々な加工プロセス設計に適用してきた。ところが、過去に静止物に対して3次元塑性流動現象を可視化した研究<sup>2)</sup>はあるが、多大な手間とコストを必要とし実用的ではなく、まして動体に対する3次元塑性流動の可視化例は皆無である。

本研究では、成形加工物理シミュレーションによる時空4次元（空間3次元+時間1次元）の塑性変形現象の可視化システムを開発した。同システムを用いてヘリカルギヤ鍛造の塑性流動現象を詳細に可視化した。以上について報告する。

### 2. 可視化システム

本研究では、材料流動を非破壊的に可視化するシステムを構築した。システムの概要図をFig. 1に示す。非破壊手段として電磁波を用いる。システムは、電磁波発生器、検出器およびPCで構成される。ここで、工具鋼製の金型を用いて金属材料の塑性流動現象を可視化するのは現実的ではない。そのため、実験材料として金属材料の変形特性を再現できるモデル材料と樹脂型を用いる。材料内部の塑性流動を可視化するために内部質点を時系列に追跡する必要がある。本研究では、電磁波による検知を容易にするために、質点としてモデル材料よりも密度が大きい鋼製マーカを用い、材料内部あるいは外周に、目的に応じて複数個配置する。

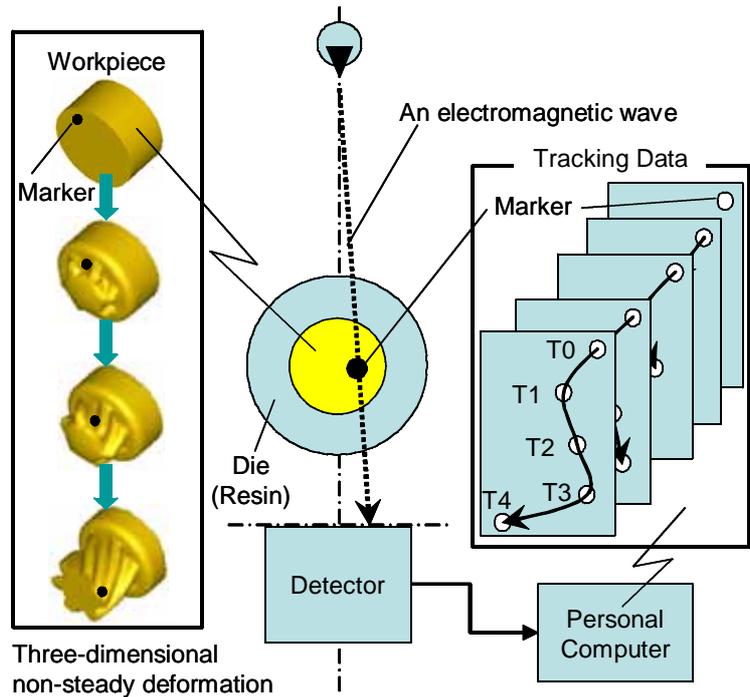


Fig.1 Schematic illustration of visualization system.

可視化の手順は以下のとおりである。

まず、位置調整が可能な設置台上に樹脂型を固定し、型内にモデル材料で作製した素材を設置する。次に、樹脂製の工具で素材を塑性変形させ、指標の位置を時系列に実時間で検知する。以上で指標の軌跡データが得られる。得られた軌跡データをPCへ取り込みデータ解析し、材料欠陥の有無、型への充満性等を評価する。

### 3. ヘリカルギヤ鍛造の可視化実験

#### 3.1 モデル材料

モデル材料としてデンマーク工科大学で開発されたWAX<sup>3)</sup>を用いた。本研究では、当該WAXをベースに独自の添加剤と油剤(粘度)を調製した。なお、加工硬化係数等の变形特性が一致すれば金属材料とWAXでメタルフローが一致することを予備実験で確認している。

#### 3.2 実験条件と方法

実験に用いた樹脂型とギヤの目標形状と仕様をFig. 2に示す。実験条件は、樹脂型の設置について電磁波の照射方向に対して指標配置面が直角方向と当該面から80°回転させた方向の2条件とした。素材は、加工硬化型の变形特性を示すWAXを用い、子午面で半分割し、指標として6mm間隔で直径1mmの鋼球を135個配置後、残りの半面と合わせた。実験は、素材温度25℃、加工ストローク13.7mm、加圧速度60mm/minで実施した。なお、潤滑剤としてワセリンを型側に薄く一様に塗布した。実験後、指標の軌跡データをPCへ取り込み、データ解析した。

#### 3.3 実験結果

実時間で得られた材料流動の2次元画像と3次元再構成した可視化結果をFig. 3に示す。なお、2次元画像において、背景の歯型形状と合わせて見ると3次元非定常塑性流動による指標の軌跡が詳細に確認できる。正面方向画像から樹脂型のギヤ成形部入口において指標が停滞するデッドゾーンが確認できる。また、横方向画像からギヤの捻れの影響で材料の未变形部が回転(計測の結果:19°)しているのが確認できる。

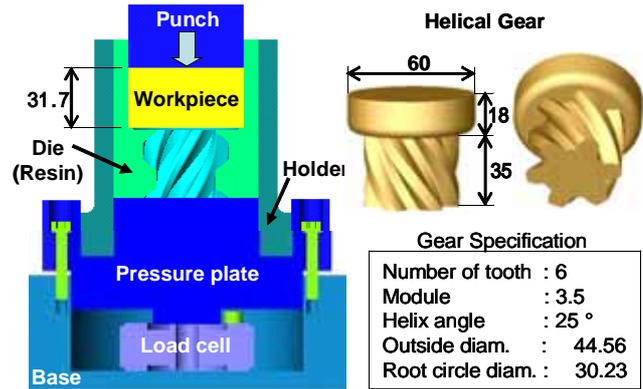


Fig.2 Experimental apparatus of helical gear forging.

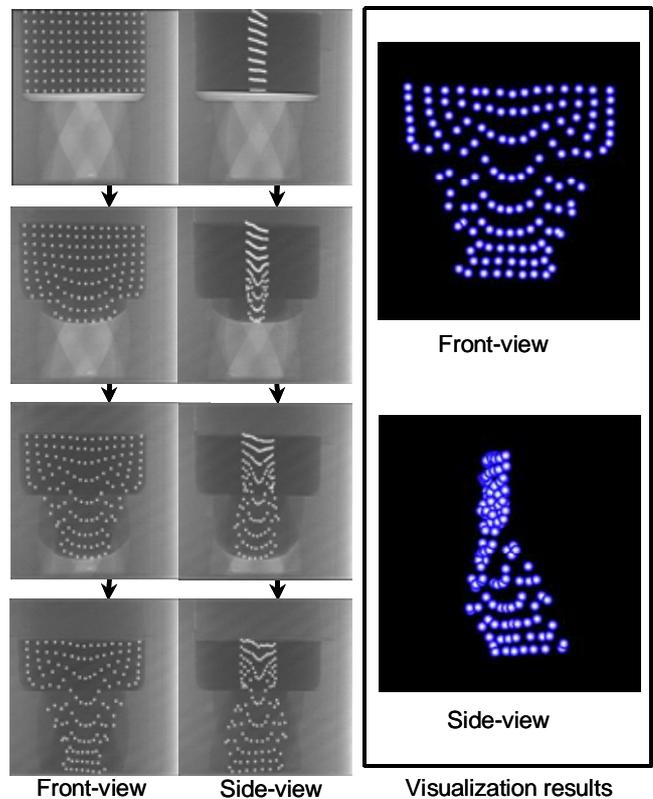


Fig.3 Sequential images and results of visualization obtained by three-dimensional physical simulation.

### 4. おわりに

鍛造現象を定量的に評価するため、非破壊による時空4次元可視化システムを開発した。システムをヘリカルギヤの鍛造に適用した結果、実時間で簡単に材料内部の指標の軌跡を詳細に追跡することができた。システムは、いかなる加工現象も可視化できるため、3次元FEMで得られた結果を検証する手段としても活用可能である。

### 参考文献

- 1) 中西, 牟禮 : 塑性と加工, Vol36, No.418, 1300-1305(1995)
- 2) Glibbery, S. : PhD Thesis, Technical Univ. Denmark, 23(1990)
- 3) Mogens, A. : PhD Thesis, Technical Univ. Denmark, 53-84(1996)