

テクスチャ金型による材料変形挙動の可視化

大阪大学 大学院工学研究科

杉原 達哉

1. はじめに

近年の塑性加工分野においては、複雑形状部品の加工における高精度化、高表面品位化、高強度化など、様々な要求が高度化しており、その適用範囲もチタン合金や複合材料といった難加工材の加工にまで広がっている。特に、難加工材の複雑形状部品の加工における金型-素材材間は、素材に極めて大きな材料流動が生じる、工具面圧が高くなる、素材表面拡大が顕著になる、摺動面温度が高くなる、といった特異な摩擦環境に晒される。したがって、上述の要求を満たすためには、金型-素材材間のトライボロジーに影響する因子を考慮し、任意に制御する技術の構築が極めて重要となる^[1]。

こういった状況の中で近年注目を集めているのが、摩擦摺動面に対する表面テクスチャリング技術である。例えば、本報告者は、切削工具の表面に、微細な周期溝構造やディンプル構造を付与することによって、切削工具の潤滑性・耐摩耗性・耐凝着性が飛躍的に向上し、様々な材料の加工において切削工具の高機能化が可能であることを明らかにしている^[2, 3]。そして、これらの技術は塑性加工分野にも展開されており、金型表面に形成された表面テクスチャが、潤滑剤の保持効果、摩耗粉の排出効果、接触面積の低減効果を発現することで、金型-素材間のトライボロジー特性が大きく改善し、加工抵抗の低減や金型寿命の向上が期待できることが報告されている^[4]。その一方で、同技術は、経験的なノウハウの蓄積が進んでいる一方で、依然として理論に基づく合理的な設計手法の確立には至っていない。そしてこの問題を解決するためには、加工中の素材-金型間の界面現象をより忠実に把握することが必須であると言える。

ここで、本報告者は切削加工における材料の塑性変形挙動の理解を目的に、「粒子画像流速計測法 (PIV) を援用した切削加工現象の観察手法」の構築に取り組んでいる。これは、Purdue 大学の Prof. S. Chandrasekar のグループが開発した手法を応用したものであり、本申請者は同グループと協力して、切削加工における切りくず流出過程の in-situ 観察を実現するとともに、様々な加工現象の可視化・解明を試みている^[5, 6]。そして、本手法の応用によって、「塑性加工における材料の変形挙動を直接的に観察する手法」が構築することが可能になれば、金型表面に形成された微細なテクスチャが、界面の摩擦現象やそれにとまなう素材の塑性変形挙動に及ぼす影響を、“見える化”することが期待できると言える。

2. 目的

塑性加工においては、金型からの圧縮応力、界面摩擦による摩擦応力によって、材料内部には摺動方向に引きずられるような形で塑性変形が生じる (図 1 (a))。そして本研究では、くさび状圧子 (インデント) を材料に押し込んだ際に、インデント側面近傍の材料内部において類似の変形場が生じることに着目し (図 1 (b))、くさび状インデントによる押し込み試験を援用した、塑性加工における新たな材料変形挙動の in-situ 観察技術を確立する。そして、テクスチャ金型を模擬した微細構造を有するインデントの開発を行うとともに、それらを用いた可視化実験を行うことによって、金型表面の微細なテクスチャがもたらす効果の可視化を試みる。これらを通じて、最適なテクスチャ設計手法の提案や、表面テクスチャによる新たな機能獲得を図ることによって、表面テクスチャによる金型の高機能化技術の確立を目指す。

3. 実用的な価値、実用化の見込など

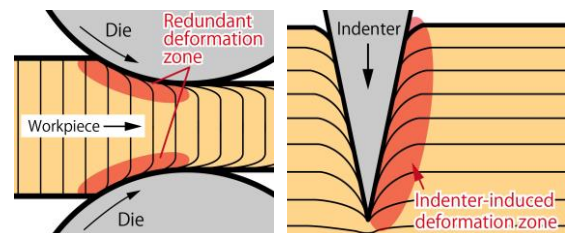


図 1：塑性加工とインデンテーション
(左：Rolling, 右：インデンテーション)

本研究が目指す『塑性加工における材料の塑性変形挙動の in-situ 観察手法』は、従来手法では困難であった下記のような知見の獲得が期待できる。

- 実際の塑性加工中の現象を直接的に可視化し、材料内部の Microscopic な情報 (すべり線場、ひずみ・ひずみ速度分布) を獲得できる
- 金型表面粗さ、金型形状、変形速度など、塑性加工中の各条件を変化させての評価が可能であるため、塑性加工の各種特性に影響を及ぼす因子の抽出が可能となる
- 金型が材料に接触した瞬間から定常状態に至るまでの径時変化が追跡可能である

そして、これらの技術を駆使して金型表面の微細なテクスチャがもたらす効果の可視化を図ることによって、表面テクスチャの効果が“見える化”されることにより、既存技術の飛躍的な性能向上が見込まれるだけでなく、理論に基づいた体系化が促され、様々な新技術の実用化展開に繋がることが期待できる。

4. 研究内容の詳細

4.1 インデントーションを活用した材料変形挙動の可視化装置の開発

本研究では、塑性加工における金型-材料間近傍における材料の塑性変形挙動を模擬するために、インデント(くさび状圧子)による押し込み試験を援用した実験装置の開発を行った。図2に、本研究で開発した実験装置の概要を示す。同図に示すように、ガラスによって材料のガラス面側への変形を拘束することによって、ガラス面に沿って平面ひずみ状態を実現する。この状態において、押し込み試験中のインデント近傍の材料の変形挙動を高速カメラで撮影した。図3に、本研究で使用したインデントを示す。インデントは高速工具鋼鋼材製のものを使用し、インデント先端は超精密研削加工によって $R0.02$ 以下に仕上げている。本研究では、塑性加工中に発生する様々な変形場を再現するために、

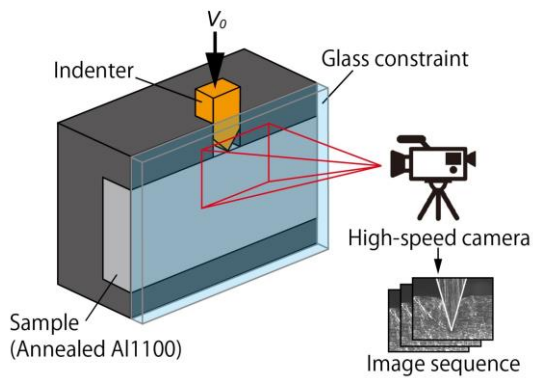


図2：塑性加工の In-situ 観察装置

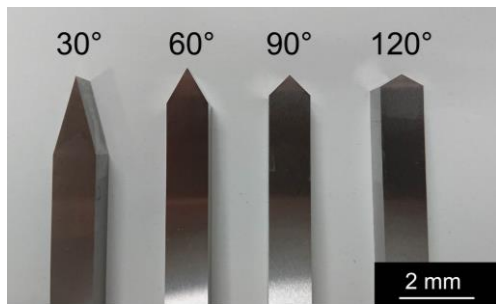


図3：インデント

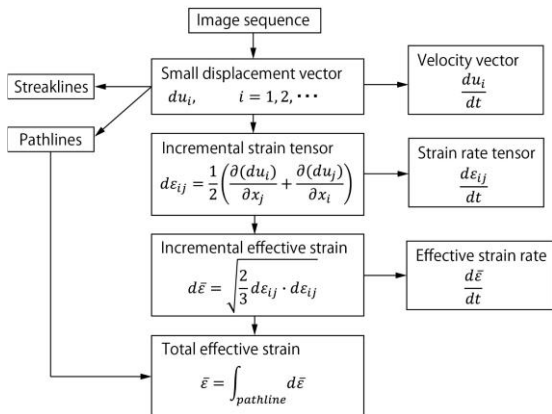


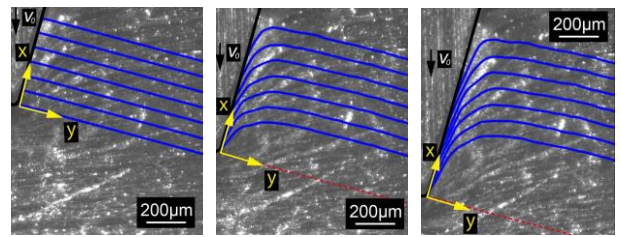
図4：PIV解析のフロー

異なる先端角(30, 60, 90, 120°)を有するインデントを用意した。また、加工対象の材料として、焼きなまし処理を行った純アルミニウムを用いた。

さらに、本研究では撮影した画像に対して粒子画像流速計測法(PIV)を適用することによって、材料の変形挙動の可視化を行った。図4に、PIV解析のフローを示す。高速カメラで撮影したデータを同フローに基づいて処理することで、インデント近傍における材料内部の速度分布、ひずみ速度分布、ひずみ分布、すべり線場などの情報が獲得できる。

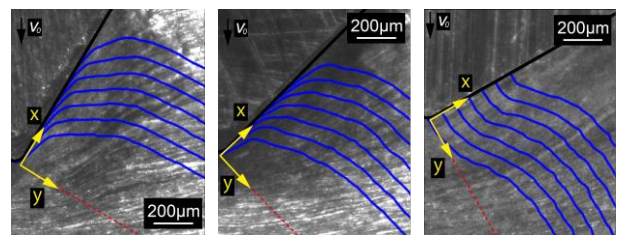
4.2 インデント近傍における材料変形挙動

本研究ではまず先端角 30°のインデントを用いた場合の押し込み試験(押し込み速度 1 mm/s)について、材料の塑性変形挙動の可視化を試みた。図5は、同条件におけるインデント近傍の材料の経時変化を示している。同図に示すように、インデント側面に対して直交方向に引いたすべり線場(図5(a))の変化を追うことで、同条件では材料がインデント側面に巻き込まれるようにして変形していることがわかる。これは、インデント近傍の材料は、主にインデ



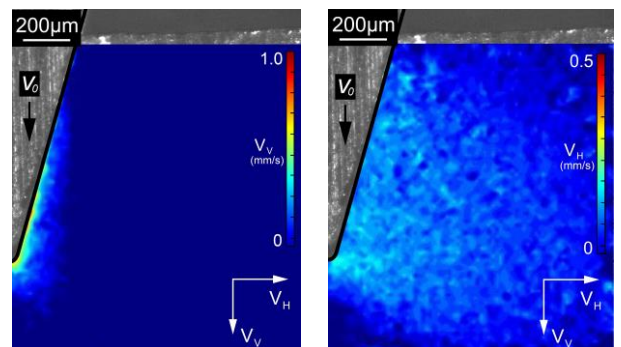
(a) $t = t_0$ (b) $t = t_0 + 0.3s$ (c) $t = t_0 + 0.5s$

図5：材料のすべり線場(先端角 30°)



(a) 先端角 60° (b) 先端角 90° (c) 先端角 120°

図6：材料のすべり線場 ($t = t_0 + 0.5s$)



(a) 垂直方向 (V_V) (b) 水平方向 (V_H)

図7：材料内部における速度分布(先端角 30°)

ンタ側面-材料間の摩擦力によって、せん断変形していることを示している。

さらに、塑性加工中に発生する様々な変形場を再現するために、異なる先端角(60, 90, 120°)を有するインデンタを用いて押し込み試験を行った。図6に、各先端角を有するインデンタ近傍における、材料のすべり線場を示す。同図に示すように、先端角30°のインデンタ(図5(c))では、材料の変形はインデンタ側面近傍のみで生じていたのに対して、先端角が60°(図6(a)), 90°(図6(b))と大きくなるにつれて、材料の変形領域が拡大していることが確認できる。さらに、先端角120°のインデンタを用いた場合においては(図6(c)), 先端角の小さいインデンタで見られたようなインデンタ側面に巻き込まれるようなせん断変形挙動が消失し、インデンタ近傍の材料はせん断変形を生じることなく沈み込んでいることがわかる。以上のように、インデンタの先端角度の変化にともなって、材料の変形挙動が大きく変化していることが示された。

さらに図7は、先端角30°のインデンタを用いた場合について、材料内部における垂直方向(V_V)および水平方向の速度分布(V_H)を示した結果である。同図からわかるように、同条件では V_V はインデンタ側面-材料界面のごく近傍において局所的に生じているのに対して、 V_H は材料内部においてほぼ一様に分布している。これは、先端角の小さいインデンタの近傍においては、インデンタ側面-材料界面の摩擦力によってせん断変形が生じているのと同時に、インデンタの押し込みによって材料が左

右方向に分離していることを示している。一方で、図8は、先端角120°のインデンタにおける各方向の速度分布を示している。同図に示すように、先端角の大きいインデンタ直下では、材料内部にはインデンタの押し込み速度(1 mm/s)とほぼ同程度の速度で鉛直方向に移動している領域が広く存在しており、水平方向への変形はこの領域外でのみ生じている。これは、先端角の大きいインデンタの直下においては、材料が圧縮変形を受けることによって加工硬化領域(Dead metal zone)を形成し、この領域がインデンタと一体となって材料を変形させていることを示している。

これらのインデンタ先端角度の違いに起因する材料変形挙動の変化は、図9に示す材料内部におけるひずみ分布にも反映されており、先端角30°のインデンタ(図8(a))ではインデンタ側面近傍のみに局所的にひずみが集中しているのに対して、先端角120°のインデンタ(図8(b))では、インデンタ下部の広範囲にわたってひずみが分布していることがわかる。

これらの結果に示すように、本開発装置においては、先端角の異なるインデンタを用いることによって、材料の切断による分離や摩擦摺動にともなうせん断変形、ならびに、材料の圧縮変形やそれにともなう加工硬化領域の形成など、塑性加工の材料-金型間で生じる様々な変形場を再現することができ、さらにそれらにおける材料流れや変形挙動の分布を定量的に評価できることが明らかとなった。

4.3 表面テクスチャを有するインデンタを用いた押し込み試験

表面テクスチャを有する金型を用いた場合の塑性加工を模擬するため、側面に微細表面テクスチャを有するくさび状インデンタの開発を行った。図9に、開発したインデンタ(先端角120°)を示す。同図に示すように、本研究ではまず周期溝構造テクスチャの影響を評価するため、インデンタ刃先稜線に対して平行方向の微細溝群(溝幅100 μm, 溝間隔100 μm, 溝深さ50 μm)を、超短パルスレーザを用いて加工した。なお、先端角30°のインデンタに対しても同様の構造の加工を施したが、微細構造によって刃先強度が低下し、押し込み試験中に欠損が生じてしまったため、今後、レーザ加工条件および溝構造寸法の見直しを行った上で、改めて試作を行う予定である。

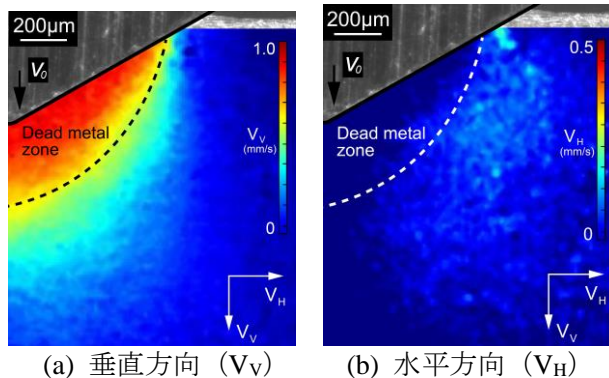


図8：材料内部における速度分布(先端角120°)

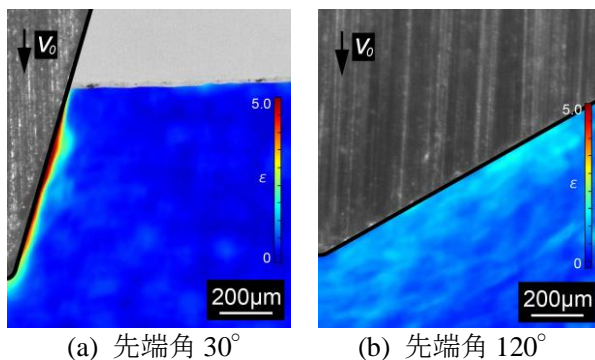


図8：材料内部におけるひずみ分布

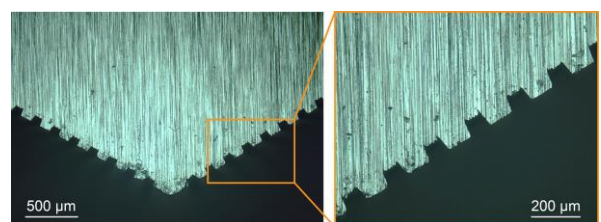


図9：試作したテクスチャを有するインデンタ

ここで、押し込み試験は深さ 1.5 mm までインデンタを押し込んだ後、1 秒間静止し、インデンタを材料から引き抜いている。このとき、押し込み時の抵抗の最大値を押し込み抵抗、引き抜き時の抵抗の最大値を離形抵抗として、それぞれのインデンタに対して評価を行った。図 10 に、各インデンタを用いた場合の押し込み抵抗、ならびに、離形抵抗を示す。同図に示すように、圧縮変形場が支配的となる先端角 120° のインデンタを用いた場合、表面テクスチャを有するインデンタにおいて押し込み抵抗が約 10% 程度増加するとともに、通常インデンタではほとんど生じていなかった離形抵抗が著しく増加していることがわかる。

さらに、図 11 は、表面テクスチャを有するインデンタを用いた場合の材料内部におけるひずみ分布を示している。同図からわかるように、先端角 120° のインデンタにおいては、インデンタの押し込みにもなって材料がテクスチャ内部に侵入するとともに、テクスチャエッジ部によって余剰な変形が発生し、局所的なひずみの増大が発生している。このように、圧縮が支配的となる変形場においては、表面テクスチャ内部への材料の侵入やそれにもなう接触面積の増大、テクスチャエッジ部による余剰な変形の発生などによって、押し込み抵抗や離形抵抗の増大に繋がったと考えられる。一方で、インデンタ-材料界面の摩擦に起因するせん断が支配的となる先端角の小さいインデンタを使用した場合は、表面テクスチャは接触面積の低減や潤滑剤の所蔵部としての作用をもたらすことで、押し込み抵抗や離形抵抗

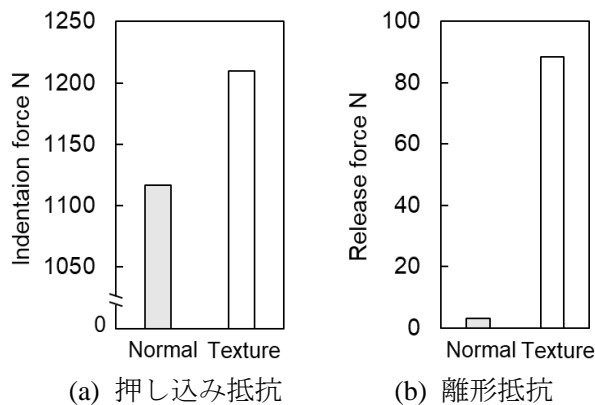


図 10 : 変形抵抗

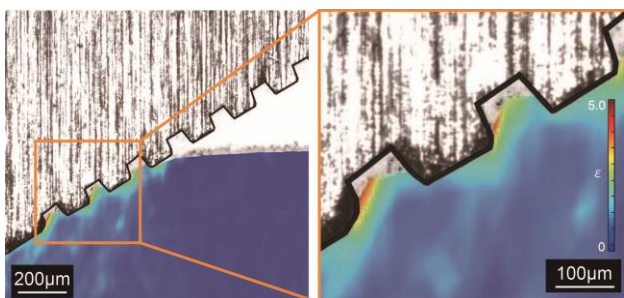


図 11 : 表面テクスチャ近傍のひずみ分布

抗の低減をもたらすことが予想される。今後、再設計した表面テクスチャを有する先端角の小さなインデンタを用いて実験を行うことで、せん断場における表面テクスチャの効果や作用機序の明確化に取り組む予定である。

5. まとめ(結言)

本研究では、テクスチャ金型による材料変形挙動の可視化を目的として、インデンタによる押し込み試験と PIV 解析を援用した塑性加工現象の in-situ 観察装置の開発に取り組んだ。その結果、先端角の異なるインデンタを用いることによって、材料の切断による分離や摩擦摺動にもなうせん断変形、ならびに、材料の圧縮変形やそれにもなう加工硬化領域の形成など、塑性加工の材料-金型間で生じる様々な変形場を再現することができ、さらにそれらにおける材料流れや変形挙動の分布を定量的に評価できることが明らかとなった。さらに、表面テクスチャを有するインデンタを用いて実験を行った結果、表面テクスチャ近傍における特異的な材料変形挙動の可視化が可能であることを明らかにした。

今後、様々な先端角/テクスチャ形状を有するインデンタを開発し、それらを用いた実験を進めることによって、変形場の違いの影響、潤滑剤や摩擦粉に及ぼす影響、テクスチャ寸法/形状の影響などを明らかにし、表面テクスチャによる金型の高機能化技術の確立を目指していく。

6. 参考文献等

- [1] 石川孝司, 塑性加工の将来展望, 塑性と加工, Vol. 57, No. 668, pp. 831-832, 2016
- [2] T. Sugihara, T. Enomoto, Performance of Cutting Tools with Dimple Textured Surfaces: a Comparative Study of Different Texture Patterns, Precision Engineering, Vol. 49, pp. 52-60, 2017
- [3] T. Sugihara, Y. Nishimoto, T. Enomoto, Development of a novel cubic boron nitride cutting tool with a textured flank face for high-speed machining of Inconel 718, Precision Engineering, Vol. 48, pp. 75-82, 2017
- [4] N. Bay, A. Azushima, P. Groche, I. Ishibashi, M. Merklein, M. Morishita, T. Nakamura, S. Schmid, M. Yoshida, Environmentally benign tribo-systems for metal forming, CIRP Annals, Vol. 59, pp. 760-780, 2010
- [5] A. Udupa, T. Sugihara, K. Viswanathan, S. Chandrasekar, Altering the Stability of Surface Plastic Flow via Mechanochemical Effects, Physical Review Applied, No. 11, 014021, 2019
- [6] T. Sugihara, A. Udupa, K. Viswanathan, JM. Davis, S. Chandrasekar, Organic monolayers disrupt plastic flow in metals, Science Advances, Vol. 6, No. 51, eabc8900, 2020