

平成 2 7 年 6 月 1 7 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560129

研究課題名(和文) レーザ援用インクリメンタル成形による形状・組織の同時CNC制御とその医療応用

研究課題名(英文) Laser-assisted incremental sheet metal forming process to obtain complicated shaped and small grain sized product

研究代表者

田中 繁一(Tanaka, Shigekazu)

静岡大学・工学研究科・教授

研究者番号：60197423

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000 円

研究成果の概要(和文)：本研究では、CNC形状付与という基本機能をもつインクリメンタル成形技術に微細組織制御機能をもたせることを目標に基礎的検討を行った。本法ではチタンやステンレス鋼などの医療用金属材料を想定しているが、一般プレス成形素材への適用においてもその有用性を発揮できる。最初に、インクリメンタル成形により導入されるひずみが非常に大きいことを、実験および有限要素解析により確認した。次に微細結晶粒をもつステンレス鋼薄板の成形特性を詳細に調べ、組織制御の有用性を明らかにした。最後に、インクリメンタル成形された製品とその熱処理後の微細組織をEBSD法を用いて調べ、その特徴を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Fundamental research on micro structure control in laser assisted incremental sheet metal forming process, basic function of which was forming a flat metal sheet into a complicated curved shape, was conducted. This process will be useful for titanium or stainless steel medical prostheses, also conventional sheet metal press operations. First, by using experimental and numerical means, it was confirmed that the strain introduced by incremental forming process was very large. Next the formability and the surface roughness evolution in stainless steel thin sheet that had small grains were examined systematically. Last, the micro structure of heat-treated incremental sheet metal formed products were observed with electron backscatter diffraction method.

研究分野：材料加工

キーワード：板プレス成形 インクリメンタルフォーミング フレキシブル加工 歯科補綴 レーザ

1. 研究開始当初の背景

- (1) 高齢化社会を迎えつつある現在、義歯の需要は増加の一途をたどり、また金属アレルギーを有する患者にとってチタン製補綴物は必須である。しかし、図1の義歯床に代表される現在のチタン補綴物の精密鋳造ではその高温活性等に対処するための高度な歯科技工の技が必要である。
- (2) 一方、塑性加工分野では、自由曲面形状をフレキシブルにCNC成形できる図2のインクリメンタル成形（逐次的な塑性加工プロセス）がラピッドプロトタイピングの1つとして活発に研究されている。
- (2) 本技術の可能性について、既に歯科分野の研究者と基礎的な検討を開始するとともに歯学分野の諸学会で発表して好評を得ているが、類似する研究は国内外で前例が全くなく、歯科のデジタル化先進国の欧米においてさえも本技術とその可能性には気が付いていないとともに、代わる技術も開発されていない。
- (3) しかし、インクリメンタル成形に対する国外の関心はこの数年急速に高まっており国際会議などでも海外研究者の報告の増加がみられる。
- (4) 本研究では、形状付与という当プロセスの本来の目的に加えて、レーザ援用システムを活用して組織制御の可能性を確認する。しかし、インクリメンタル成形技術単独ではその実用化は不可能であり、他の加工技術とのコラボレーションが必須である。これに対してレーザ援用システムは有望な技術である。

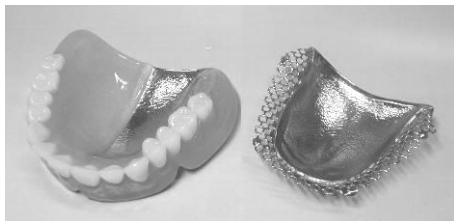


図1 金属歯科補綴物の例(金属床)

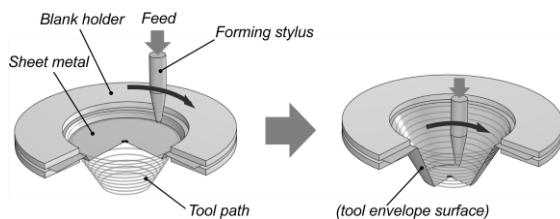


図2 インクリメンタルフォーミング

2. 研究の目的

- (1) インクリメンタル成形により金属薄板シェル製品に導入されるひずみの評価と弾塑性有限解析によるひずみ導入メカニズムの解明。
- (2) 微細結晶粒ステンレス鋼薄板のインクリメンタル成形特性に関する実験的考察。
- (3) ステンレス鋼薄板および純チタン薄板の温度依存性を考慮したFEMモデルによるレーザ援用プロセスの数値シミュレーションとそれによる成形特性の検討。

- (4) レーザ援用インクリメンタル成形機(図3)の開発とレーザ局所加熱を適用した成形実験。
- (5) インクリメンタル成形およびレーザ援用インクリメンタル成形された金属薄板のEBSDを用いた微細組織の評価。

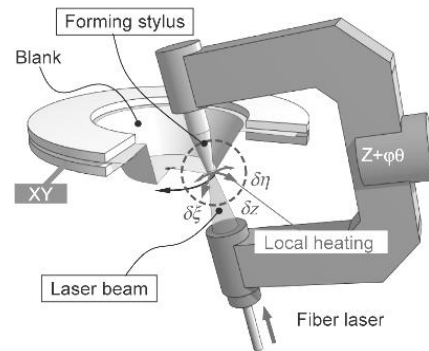


図3 レーザ援用インクリメンタル成形の概要

3. 研究の方法

- (1) インクリメンタル成形により導入されるひずみ
導入されるひずみが大きいプロセスの一例として、マルチステッププロセスで角筒容器を成形する場合の各ひずみをステップごとに追跡して、導入されるひずみを計測した。計測には試験片に転写されたスクライブドマークを用いて、その形状を画像取り込みして求めた。

- (2) 微細結晶粒ステンレス鋼薄板のインクリメンタル成形特性

0.1 から $10\mu\text{m}$ までの結晶粒をもつ極薄ステンレス鋼板を、最終的に導入される総ひずみ量を系統的に変更してインクリメンタル成形を行い、その特徴、破断限界と表面あらさを計測して、結晶粒を微細化することの有用性を確認した。

- (3) (レーザ援用)インクリメンタル成形プロセスのFEM解析

インクリメンタル成形後のトリミングにより負のスプリングバックが生じるメカニズムを調べるために、弾塑性FEM解析を行った。図5は計算モデルで、計算コストを下げるために、リング領域から中心角 10° 分を切り出して解析した。サイン側にに基づき、面BCを固定し面ADのXY方向の変位を拘束した。また、面AB、面CDは周期境界条件によりプロセスを近似し、3次元弾塑性解析を実施した。素材は、ステンレス鋼を仮定し、温度依存材料モデルを用いた。

- (4) レーザ援用インクリメンタル成形実験

加工部位を裏面から局所加熱できるインクリメンタル成形機を開発し、成形実験を行った。工具側には、6軸力覚センサを組み込み、成形力を同時に測定できる。

- (5) インクリメンタル成形後の微細組織評価

インクリメンタル成形された材料およびそれを種々の条件で熱処理された材料の微細組織をFE-SEMに取り付けられたEBSD解析装置を用いて評価した。研磨量は表面のマイクロビッカース圧痕の寸法変化により管理した。

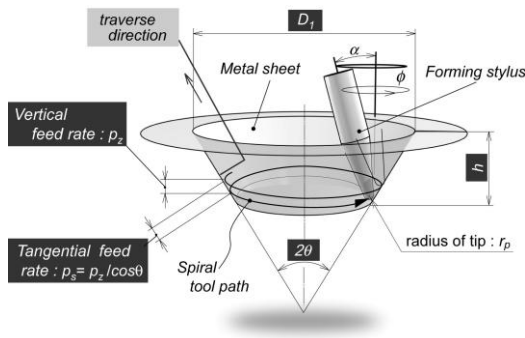


図4 加工変数と表面あさら計測線の定義

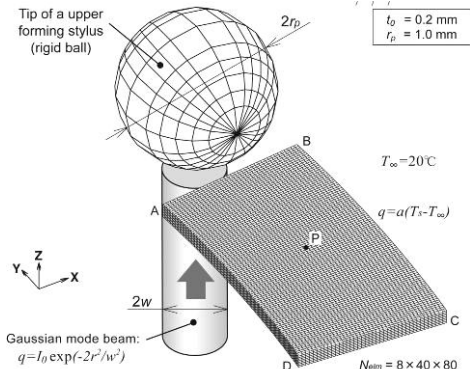


図5 計算モデル(局所レーザ加熱成形プロセス)

4. 研究成果

(1) インクリメンタル成形により導入されるひずみ

図6は、マルチステッププロセスで角筒容器を成形した場合の面内ひずみの履歴を主ひずみ面に示している。最終的に、2程度の相当ひずみが材料に導入されている。

(2) 微細結晶粒ステンレス鋼薄板のインクリメンタル成形特性

図7は、0.1から10 μm までの結晶粒をもつ極薄ステンレス鋼板を、総ひずみ量を系統的に変更してインクリメンタル成形を行い、その表面性状は非常に良い。一方、破断の直前には、そのあらかの大きさが減少する減少がすべての条件で確認された。

(3) (レーザ援用)インクリメンタル成形プロセスのFEM解析

図3(a)と(b)は、加工部位を裏面から加熱しない場合とした場合の結果である。(b)では、工具後方で塑性ひずみ量の板厚方向の勾配が減少している。また、図5は、レーザパルス照射により材料に導入される塑性ひずみを線図化したもので、中央上面および下面でのひずみを用いている。素材の溶融を避けて適切な塑性ひずみが得られる条件域は狭く、また、ビームスポット径が大きく照射時間が長い場合には素材裏面にも塑性ひずみが発生して曲げからすえ込みモードへの移行が始まる。

(4) レーザ援用インクリメンタル成形実験

図12に示すレーザ援用5軸インクリメンタル成形機を開発した。工具に対向する側に設置されたレーザヘッドを通してファイバーレーザ光源(SPI Lasers, SP-100C)から送光されたレーザ光で素材表面を加熱できる。加工中の

工具反力は成形工具下部の6軸力覚センサにより測定される。レーザヘッドと成形工具はコの字型のジグ先端に設置されて、一体で移動する。

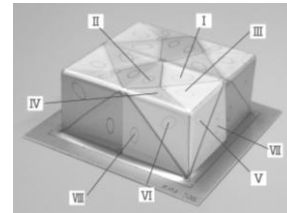
(5) インクリメンタル成形後の微細組織評価

図17は、インクリメンタル成形されたステンレス鋼薄板の微細組織である。(a)は素板、(b)FD(Forming direction)は素板圧延方向が水平方向が上下方向であり、(c)TD(transversal direction)は素板圧延方向が水平方向で、インクリメンタル成形時の成形工具の移動は上下のときの組織である。インクリメンタル成形により結晶粒は工具移動方向に大きく伸ばされている。図18は、純チタン板の場合の結果であり同様な結晶粒が大きく伸ばされている。図19は、各条件で熱処理を施した場合の結果である。再結晶により結晶粒が微細化する傾向がある。

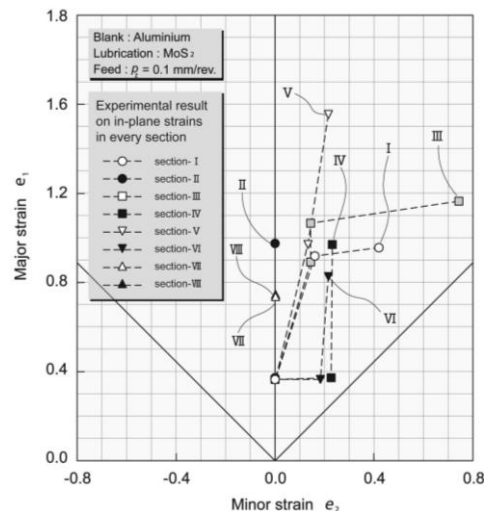
(6) 今後の展望

インクリメンタル成形では、みかけ上非常に大きなひずみが材料に導入されるとともに、曲げ曲げ戻しによる延べひずみは非常に大きく、相当ひずみ2以上の変形が容易に導入される。

熱処理により微細化される傾向があり、今後、動的再結晶などのプロセスを適切に利用・制御できれば、これが克服されて高精度化されれば、生体適合性のよい純チタンやステンレス鋼を用いた新しい医療補綴物などの開発が可能となる。



(a) Square cup obtained multi-pass process



(b) Strains in multi-pass process for square-cup

図6 四角容器のマルチパス成形におけるひずみ履歴
($t_0 = 0.2\text{mm}$, $r_p = 1.0\text{mm}$, $p_z = 0.10\text{mm}$)

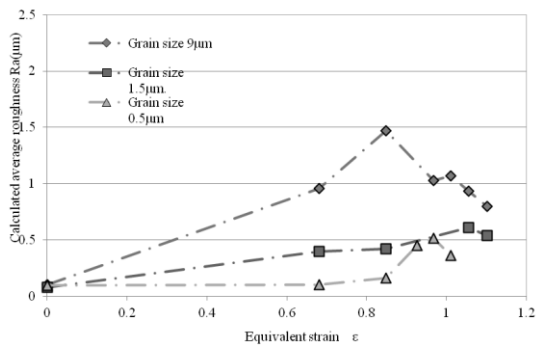


図7 微細結晶粒をもつステンレス鋼のインクリメンタル成形品の表面あらさ ($t_0=0.1\text{mm}$, $r_p=0.5\text{mm}$, $p_z=0.10\text{mm}$)

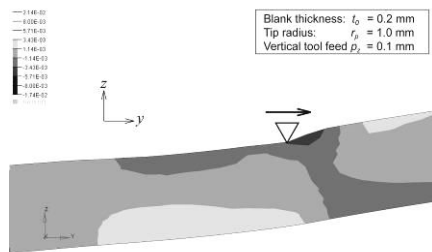


図8 成形工具直下の応力および塑性ひずみ分布 ($t_0=0.2\text{mm}$, $r_p=1.0\text{mm}$, $p_z=0.10\text{mm}$, $N=1$)

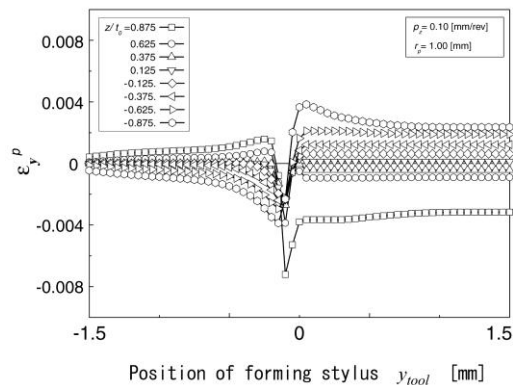


図9 成形工具直下の応力および塑性ひずみ分布 (Number of passes: $N=5$, $t_0=0.2\text{mm}$, $r_p=1.0\text{mm}$, $p_z=0.1\text{mm}$)

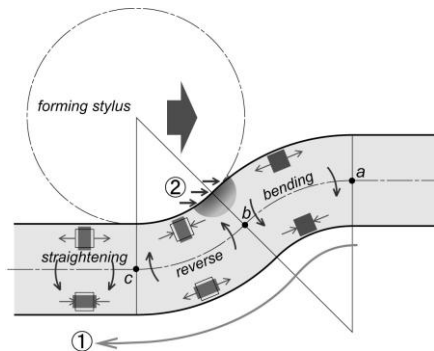
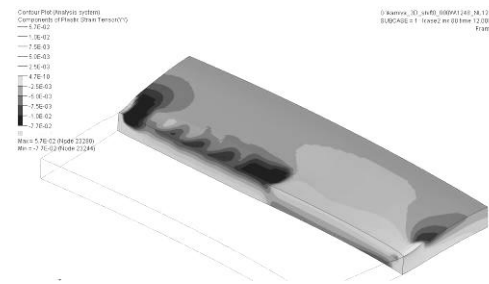
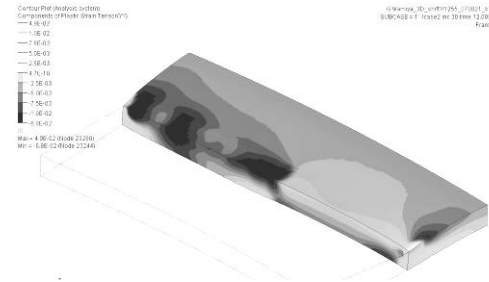


図10 成形工具直下の変形メカニズム



(a) Without laser heating



(b) With laser heating ($P=100\text{W}$, $w=0.2\text{mm}$)
図11 (レーザ援用)インクリメンタル成形の FEM 解析結果

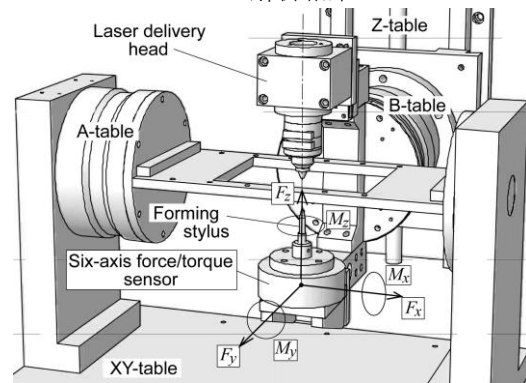


図12 レーザ援用5軸インクリメンタル成形機外観

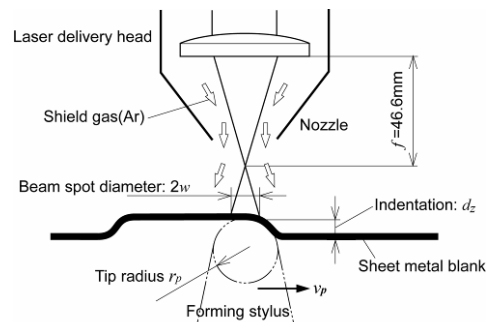


図13 レーザ援用インクリメンタル成形機のレーザ光学系概要

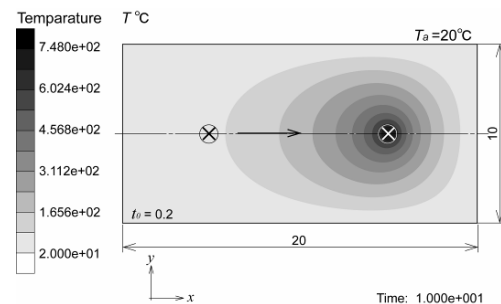
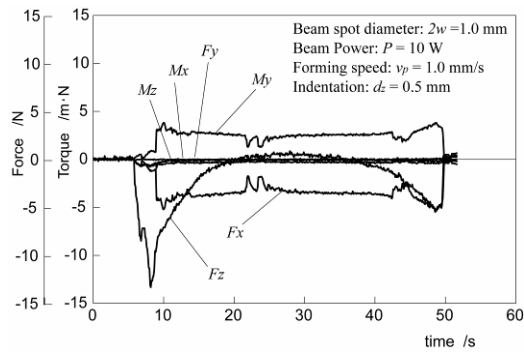


図14 走査レーザスポットによるチタン薄板加熱の FEM シミュレーション



(Spot size $2w=1.0\text{mm}$, power $P=10\text{W}$, $v=1.0\text{mm/s}$)
 図 15 レーザ援用インクリメンタル成形力実測例
 (Blank thickness: $t_0=0.2\text{mm}$, indentation: $d_z=0.5\text{mm}$)

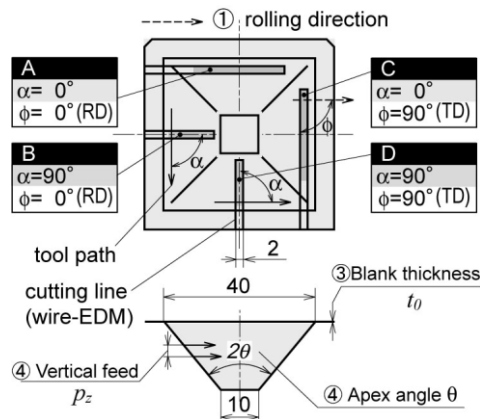
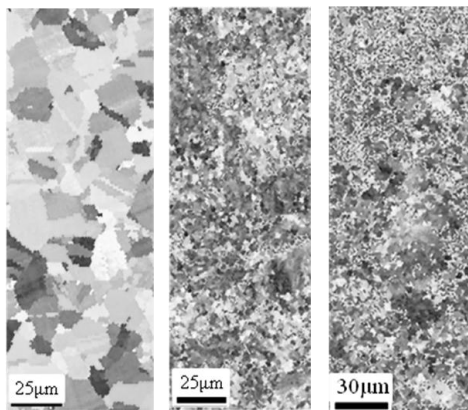
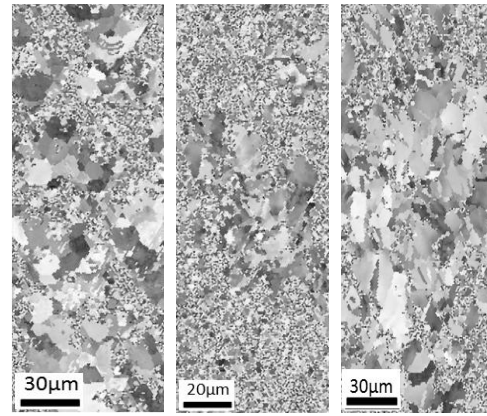


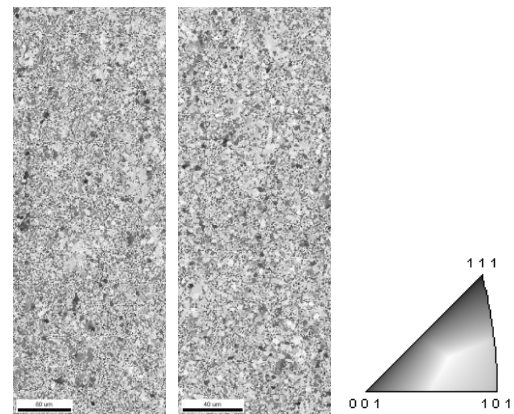
図 16 インクリメンタル成形された四角錐試験片
 (Blank: $t_0=0.2\text{mm}$, tool: $r_p=1\text{mm}$, feed: $p_z=0.1\text{mm/rev.}$)



(a) Blank (b) FD (c) TD
 図 17 ステンレス鋼薄板の微細組織
 (Blank: $t_0=0.2\text{mm}$, tool: $r_p=1\text{mm}$, feed: $p_z=0.1\text{mm/rev.}$)



(a) Blank (b) FD (c) TD
 図 18 純チタン薄板の微細組織
 (Blank: $t_0=0.2\text{mm}$, tool: $r_p=1\text{mm}$, feed: $p_z=0.1\text{mm/rev.}$)



(a) FD $\theta_a=650^\circ\text{C}$ $T_a=1200\text{s}$ (b) FD $\theta_a=800^\circ\text{C}$ $T_a=10\text{s}$
 図 19 ステンレス鋼薄板の微細組織(熱処理後)
 (Blank: $t_0=0.2\text{mm}$, tool: $r_p=1\text{mm}$, feed: $p_z=0.1\text{mm/rev.}$)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 3 件)

- (1) 田中繁一, 早川邦夫, 中村保, 工具パス面方向制御を用いるインクリメンタル成形, 第 63 回塑性加工連合講演会. 2012. 11. 2, 福岡.
- (2) 田中繁一, 早川邦夫, 中村保, 難加工材のレーザアシスト曲げに関する実験的検討, 第 63 回塑性加工連合講演会. 2012. 11. 2, 福岡.
- (3) 田中繁一, 中村英雄, 本村一朗, 歯科矯正アーチワイヤの通電加熱成形に関する基礎的検討, 第 63 回塑性加工連合講演会. 2012. 11. 2, 福岡.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 繁一(TANAKA SHIGEKAZU)
 静岡大学・工学部・教授
 研究者番号: 60197423

(2) 研究分担者

中村 英雄(NAKAMURA HIDEO)
 東京医科歯科大学・大学院医歯学総合研究科・助教
 研究者番号: 60172425

本村 一朗(MOTOMURA KAZUO)
 東京医科歯科大学・大学院医歯学総合研究

科・助教
研究者番号：60272598

(3)連携研究者
なし