

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(B)
研究期間：2006～2008
課題番号：18360069
研究課題名(和文) 複雑曲面形状をもつ純チタン歯科補綴物のレーザ援用インクリメンタル成形
研究課題名(英文) Laser-assisted incremental sheet metal forming process of pure titanium dental prosthetic components with complicated shape
研究代表者 田中 繁一 (TANAKA SHIGEKAZU) 静岡大学・工学部・准教授 研究者番号：60197423

研究成果の概要：本研究では、インクリメンタルフォーミング技術に基づいて歯科技工のデジタル化と高精度化を検討した。本法では上顎総義歯用の純チタン床を主な対象物として、患部模型のレーザ非接触形状スキャンにより得たデジタルデータに基づいて CNC 成形する。純チタン成形の潤滑に対して陽極酸化被膜処理を提案しその有効性を示した。続いて、成形品がトリミング後に負のスプリングバックを示すメカニズムを三次元弾塑性有限要素解析により明らかにした。最後に、レーザで成形部を局所加熱する新プロセスを提案して加工荷重の低減効果などを明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	8,600,000	2,580,000	11,180,000
2007 年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2008 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：材料加工

科研費の分科・細目：(分科) 機械工学 (細目) 生産工学・加工学

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，歯科補綴，義歯床，金属床，チタン，フレキシブル加工，レーザフォーミング

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。

(3) 本研究では、チタン製補綴物を製作できる高精度なインクリメンタル成形技術の実用化を目指す。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。これに対して有望な技術がレーザ援用システムである。

(5) また、本技術は高度な熟練技術を必要とした歯科技工作業を、デジタル口腔データに基づくバーチャルモデリングにより中間工程を仮想化して最終製品をCNC成形機によりアウトプットするデジタルプロセス化する。



図1 金属歯科補綴物の例 (金属床)

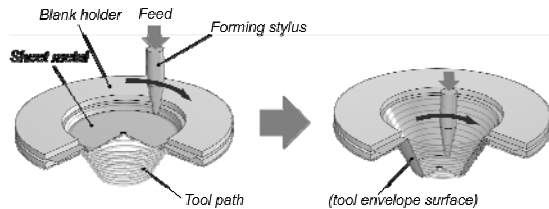


図2 インクリメンタルフォーミング

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の解明。

(2) トライボ特性を改善するための陽極酸化被膜の潤滑性の評価。

(3) 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残留応力の低減効果の検討。

(4) レーザ援用インクリメンタル成形機の開発とレーザ局所加熱により工具直下の被加工物の選択的軟化による成形力の低減効果と高精度化を検討。

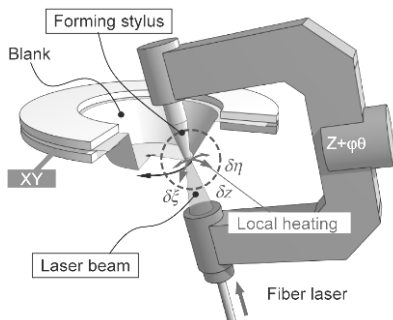


図3 レーザ援用インクリメンタル成形の概要

3. 研究の方法

(1) インクリメンタル成形後の残留応力

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4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。純チタン素材を仮定した。要素には板厚方向の変形が必ずしもシェル要素の仮定に適合しないのでsolid要素を用い板厚方向に8要素配置した。

(2) 陽極酸化皮膜処理による純チタンのインクリメンタル成形におけるトライボ特性の改善

リン酸を電解液として100Vで陽極酸化により素板に酸化膜を形成し、円錐形状を逐次成形してその性能を評価した。

(3) レーザ援用インクリメンタル成形プロセスのFEM解析

温度依存材料モデルを用いた図11のモデルを用いてレーザ局所加熱の効果を検討した。さらに、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。

(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、成形実験を行う。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する。

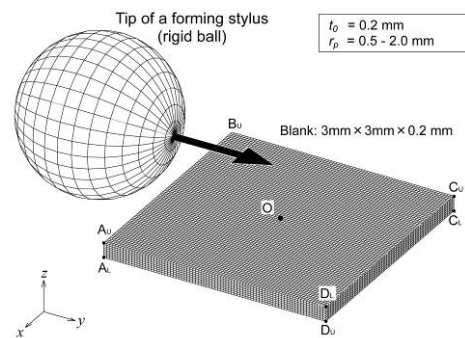


図4 計算モデル① (単一工具プロセス)

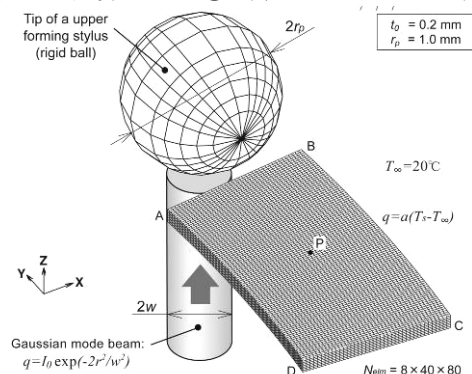


図5 計算モデル② (局所加熱成形プロセス)

4. 研究成果

(1) インクリメンタル成形後の残留応力

図 4.5 は、工具移動方向の応力および塑性ひずみを示している。工具の通過により素材表面側には引張り応力が裏面には圧縮応力が生成し、残留する。工具前方ではわずかな凸変形により表面にわずかな引張り応力が発生している。その後、工具直前では材料は強い圧縮をうけ圧縮塑性ひずみが生じる。このとき材料は工具形状にフィットして凹形状になる。その後、材料が工具下面を通過すると直線状に戻され、その結果引張り応力が表面に残留する。

(2) 陽極酸化皮膜処理による純チタンのインクリメンタル成形におけるトライボ特性の改善

陽極酸化皮膜は、過小な工具送りでは表面の摺動傷により表面あらさが増大する。図 9 は、複数回の逐次成形の適用において陽極酸化膜が有効であるかを調べた結果ある。繰返し逐次成形した A(□)および B(○)では、表面あらさは増大しており 2 回目以降では初期酸化膜は有効ではない。図中の C(●)は、1 回の成形後に陽極酸化膜を補修した場合であるが、表面性状は非常によい。

(3) レーザ援用インクリメンタル成形の FEM 解析

図 3(a)と(b)は、それぞれ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を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 14 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。

図 15 は厚さ 0.2mm の Ti 薄板を移動レーザスポット加熱した場合の温度分布を FEM 解析した例である。P=10W のレーザ出力(全吸収)でも、速度 1mm/s で照射スポット直径 1mm の場合には、十分な温度上昇が得られる。

図 16,17 は、一定の押し込み量で工具を直線移動させた場合の工具反力とトルクである。

図 16 はレーザ加熱を用いない場合の結果で、z 方位の荷重 F_z は最初の工具押し込み時には約 10N で、工具が素材中央にあるときは約 7N で

ある。図 17 では、加工点を工具裏面からレーザ局所加熱しながら成形を行った。P=10W のレーザを直径 1mm の円形領域に照射したこの結果で、図 16 と比較して F_z が大きく減少する。

(5) 今後の展望

インクリメンタル成形中の成形部位の局所加熱は加工力低下とトリミング後のゆがみの原因となる残留応力低減に有効である。しかし、素材の温度上昇による熱膨張に起因する座屈変形は成形の大きな障害となる。したがって、温度上昇を加工部位の局所化するための冷却が必須である。これが克服されて高精度化されれば新しい補綴物あるいは治療法が考案できるとともに、調整とトリミングを含めた完結した歯科技工技術とできる。

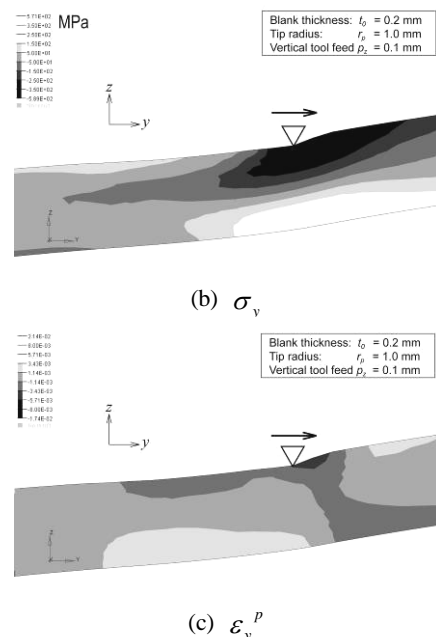


図 6 成形工具直下の応力および塑性ひずみ分布 ($t_0 = 0.2\text{mm}$, $r_p = 1.0\text{mm}$, $p_z = 0.10\text{mm}$, $N=1$)

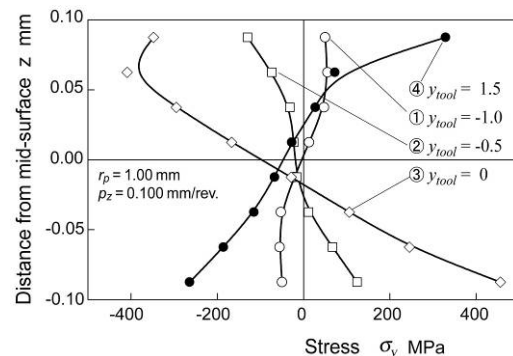


図 7 板厚方向の応力分布。

($t_0 = 0.2\text{mm}$, $r_p = 1.0\text{mm}$, $p_z = 0.1\text{mm}$, $N = 1$)

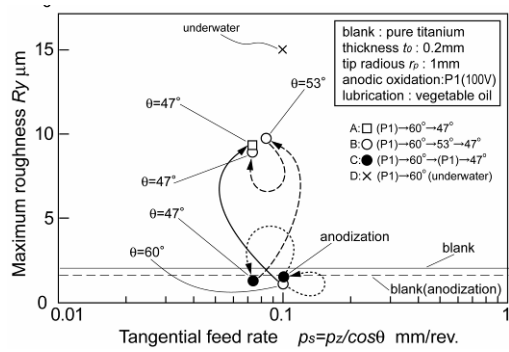


図 8 陽極酸化皮膜処理した純チタン薄板のインクリメンタル成形後の表面あらさ

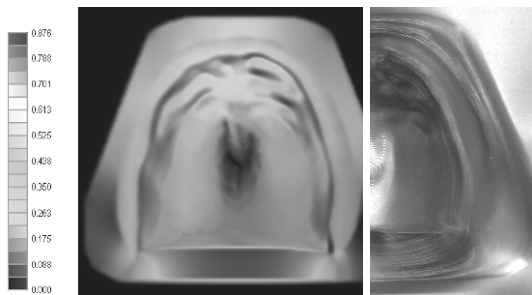
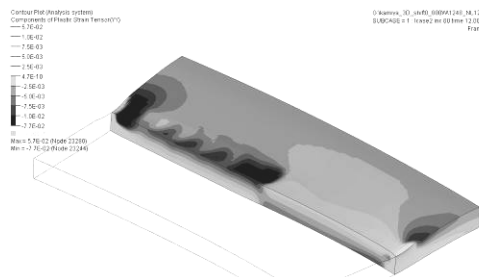
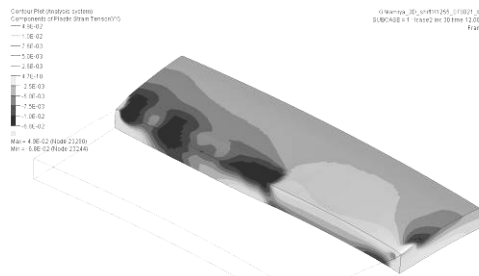


図 9 cosθとインクリメンタル成形床の摺動痕

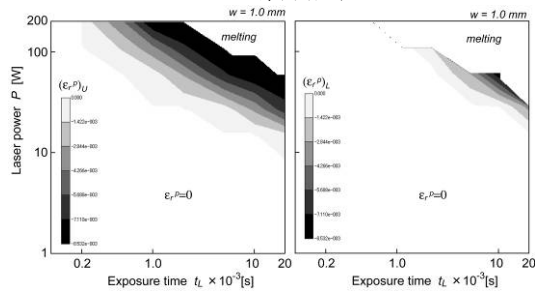


(a) Without laser heating



(b) With laser heating ($P = 100W$, $w = 0.2mm$)

図 10 レーザ援用インクリメンタル成形の FEM 解析結果



Radius of beam spot: $w = 1.0 mm$ ($w/t_0=5$)

図 11 レーザ成形線図

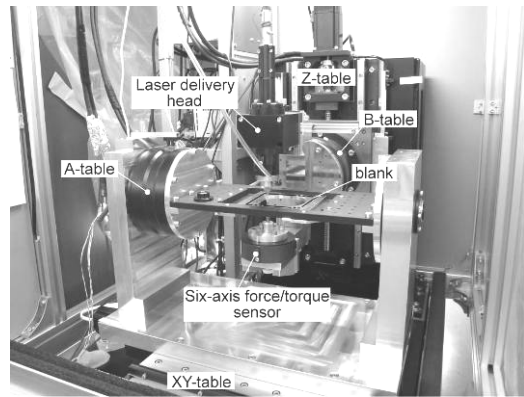


図 12 レーザ援用 5 軸インクリメンタル成形機

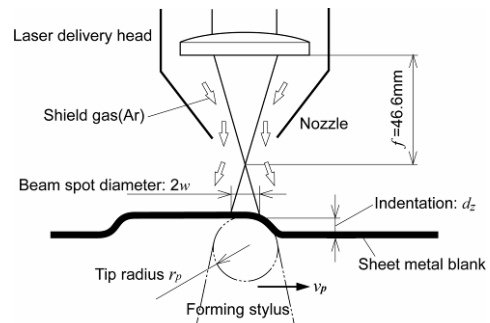


図 13 レーザ援用インクリメンタル成形機の光学系

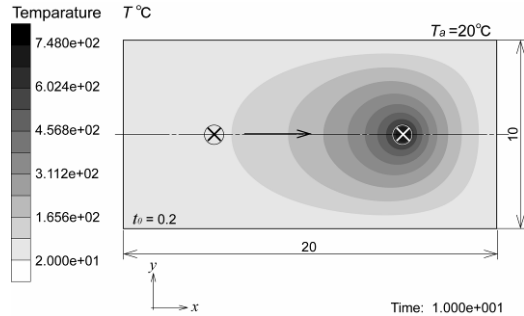
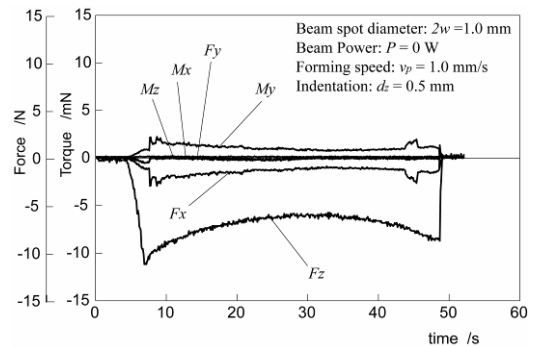
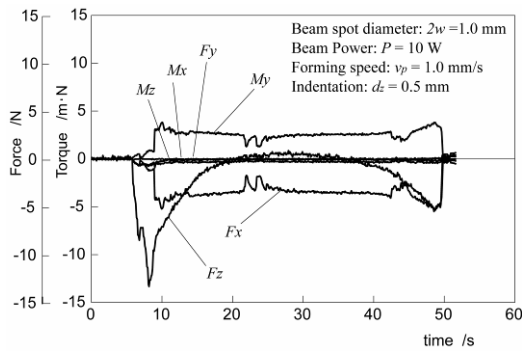


図 14 走査レーザスポットによるチタン薄板加熱の FEM シミュレーション



(a) Spot size $2w=1.0mm$, power $P=0W$, $v=1.0mm/s$



(b) 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
(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床を用いた試作例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

(1) Shigekzu Tanaka, Tamotsu Nakamura, Kunio Hayakawa, Hideo Nakamura, Kazuo Motomura, EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION ON NEGATIVE SPRINGBACK IN INCREMENTAL SHEET METAL FORMING, steel research international, Vol. 79-1, 55-62, 2008, 査読あり

(2) Shigekzu Tanaka, Tamotsu Nakamura, Kunio Hayakawa, Hideo Nakamura, Kazuo Motomura, Residual stress in SHEET METAL parts made by incremental forming process, NUMERICAL METHODS IN INDUSTRIAL FORMING PROCESSES, Subseries: Materials Physics and Applications, Vol. 908, 2007, 査読あり

〔学会発表〕(計 6 件)

(1) 田中繁一, 中村 保, 早川邦夫, 中村英雄, 本村一朗, チタン製義歯床のレーザー・アシスト・インクリメンタル成形(加工力の低減), 第 59 回塑性加工連合講演会, 2008. 11. 7, 広島.

(2) 三田明宏, 田中繁一, 山谷泰司, 森野浅実, 小俣 均, ラインレーザーを用いたレーザーフォーミングの有限要素解析, 第 59 回塑性加工連合講演会, 2008. 11. 9, 広島.

(3) Shigekzu Tanaka, Tamotsu Nakamura, Kunio Hayakawa, Hideo Nakamura, Kazuo Motomura, Experimental and numerical investigation on

negative spring back in incremental forming, 12th International Conference Metal Forming 2008, 2008. 9. 21, Krakow (Poland).

(4) 田中繁一, 中村 保, 早川邦夫, 中村英雄, 本村一朗, レーザ援用インクリメンタル成形に関する研究(成形シェル部品のレーザー矯正), 第 58 回塑性加工連合講演会, 2007. 11. 7, 北海道.

(5) Shigekzu Tanaka, Tamotsu Nakamura, Kunio Hayakawa, Hideo Nakamura, Kazuo Motomura, Residual stress in SHEET METAL parts made by incremental forming process, NUMERICAL METHODS IN INDUSTRIAL FORMING PROCESSES, 2007, 2007. 6. 18, Port (Portugal).

(6) 田中繁一, 中村 保, 早川邦夫, 中村英雄, 本村一朗, 対向する 2 つの成形工具を用いるインクリメンタル成形プロセス(工具動作が残留応力に及ぼす影響), 平成 18 塑性加工学会春季講演会. 2006. 5. 20, 東京.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

中村 保(NAKAMURA TAMOTSU)
静岡大学・工学部・教授
研究者番号: 70023322

早川 邦夫(HAYAKAWA KUNIO)
静岡大学・工学部・准教授
研究者番号: 80283399

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