

レーザー援用インクリメンタル成形における動的再結晶現象の発現に関する基礎的研究

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学 公開日: 2020-04-13 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 田中, 繁一 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10297/00027331

令和元年6月18日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06008

研究課題名(和文) レーザ援用インクリメンタル成形における動的再結晶現象の発現に関する基礎的研究

研究課題名(英文) Recrystallization phenomenon in laser assisted incremental sheet metal forming

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、インクリメンタル成形の特徴である「繰返し大ひずみ導入」とレーザ併用による「局所加熱」により、「材料組織(結晶粒微細化等)のCNC制御」に関する基礎的検討を行っている。とくに、「(インクリメンタル成形による)強加工」と「(レーザ援用)動的再結晶」はともに結晶粒微細化の有効な手段であり、各種条件が微細化に及ぼす影響を調べている。さらに、マルチステップ・プロセスを用いてより大きなひずみを材料に導入して、1 μ m程度の結晶粒微細化を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、インクリメンタル成形の特徴である「繰返し大ひずみ導入」とレーザ併用による「局所加熱」により、「材料組織(結晶粒微細化等)のCNC制御」に関する基礎的検討を行っており、各種条件が結晶粒微細化に及ぼす影響を調べている。さらに、マルチステップ・プロセスを用いてより大きなひずみを材料に導入して、1 μ m程度の結晶粒微細化を達成した。本研究の成果により製品上の総ひずみ量を制御して、それによる微細結晶粒分布を制御でき、製品上の組織分布を設計することができる。今後、生体適合性のよい純チタンに対してもこれを適切して高精度に制御できれば、新しい医療補綴物などの開発が可能となる。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have fundamentally studied "CNC control of material structure (grain refinement etc.)" by "repetitive large strain introduction" which is the feature of incremental forming and "local heating" by laser combination. In particular, "strong processing (by incremental forming)" and "(laser assisted) dynamic recrystallization" are both powerful means of grain refinement, and the effects of various conditions on the refinement are investigated. Furthermore, a large strain was introduced into the material using a multi-step process to achieve grain refinement of around 1 μ m.

研究分野：塑性加工

キーワード：インクリメンタルフォーミング レーザ 強加工

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

- (1) 塑性加工分野では、自由曲面を CNC 成形できる図 1 のインクリメンタルフォーミング（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) 一方で、強加工や動的再結晶による高強度、高延性、高靱性化を図る新たな材料組織制御への取り組みが行なわれている。
- (3) インクリメンタル成形技術の基礎研究が継続される一方で、その応用についても、例えば歯学分野の共同研究が進んでいる。
- (4) しかし、インクリメンタル成形に対する国外の最近の関心は高く、多額の予算が投入されて国際会議での海外の研究者の報告が急増しており、プロセスの高機能化により日本の技術を躍進させることが急務であった。
- (5) 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、組織制御の可能性を探った。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、他の加工技術との連携が必須である。これに対してレーザー援用システムは有望な技術であった。

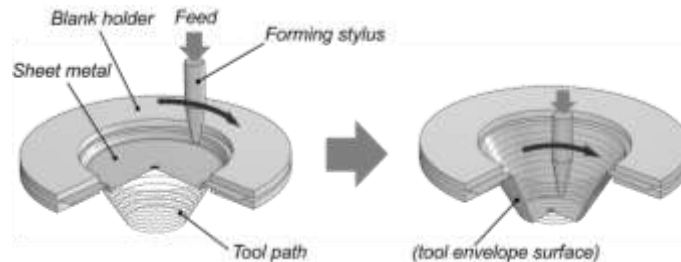


図 1 インクリメンタルフォーミング

2. 研究の目的

- (1) レーザ援用インクリメンタル成形（図 2）におけるステンレス薄板のレーザー局所加熱の熱伝導有限要素解析と、放射温度計によるリアルタイム素材温度モニタ機能をもつレーザー光学系の設計および製作。
- (2) インクリメンタル成形されたステンレス鋼薄板のレーザー局所加熱による結晶粒微細化に関する実験的検討。
- (3) 工具送りや製品形状などの成形条件とレーザー照射条件が結晶粒微細化に及ぼす影響を明らかにする。
- (4) 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総ひずみ量の見積もりと、成形条件が総ひずみ量に及ぼす影響を明らかにする。
- (5) より大きなひずみを導入できるマルチステップ・プロセスにおける総ひずみ量の見積もりと、それを用いた成形・レーザー加熱実験。
- (6) マルチステップ・プロセスにおける材料移動制御法の提案とそれによる製品ひずみ（板厚）分布の制御の試み。

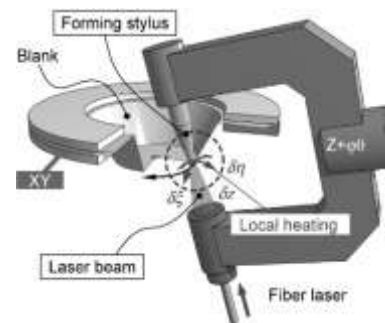


図 2 レーザ援用インクリメンタル成形の概要

3. 研究の方法

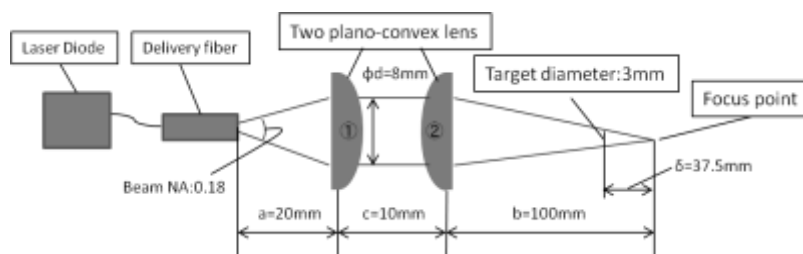
- (1) レーザ局所加熱の熱伝導有限要素解析とレーザー光学系の設計・製作
商用の有限要素法コードを使用して非定常熱伝導解析を行う。レーザー加熱は境界条件として与え裏面の工具接触による放熱も境界条件として考慮した。
半導体レーザーを光源とした加熱光学系を設計した。さらに、素材のリアルタイム温度計を計測を行うために放射温度計を併置した。
- (2) レーザ援用インクリメンタル成形実験
最初に素材における圧延の影響を除去するために適切な熱処理条件を決定した。熱処理後のステンレス鋼薄板をインクリメンタル成形およびレーザー局所加熱して、その結晶粒微細化の詳細を EBSD 解析により評価する。
- (3) 諸条件が結晶粒微細化に及ぼす影響を確認する実験
レーザー局所加熱時間、製品形状（壁傾斜角）、工具送り量を系統的に変更してそれらの製品の結晶粒微細化への影響を調べる。
- (4) インクリメンタル成形により導入される総ひずみ量の見積もり
弾塑性有限要素解析により明らかになった工具先端下の材料変形の詳細な結果に基づき、変形の幾何モデルを提案し、それに基づき材料内に導入される総相当ひずみ量を計算する。
- (5) マルチステップ・プロセスによる総ひずみ量の増大
結晶粒微細化を促進するためにはひずみ量の増大が有効であるために、マルチステップ・プロセスを採用して微細化への効果を確認する。

(6) マルチステップ・プロセスによるひずみ分布の制御
マルチブロック化とパス面方向制御を用いる製品のひずみ（板厚）分布の制御法を提案し、板厚分布に限定した実験を行う。

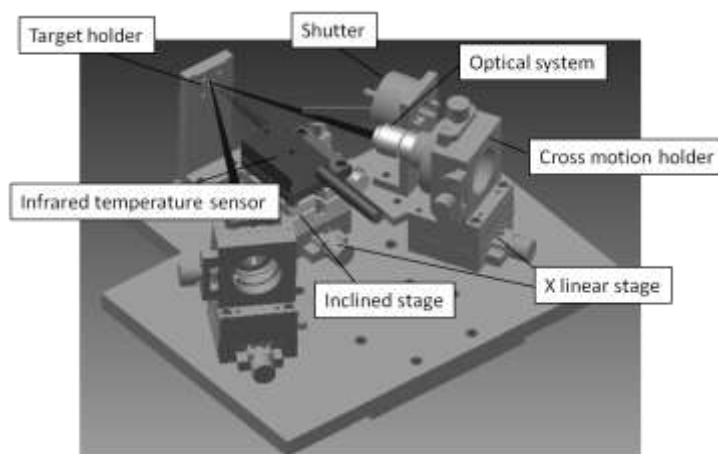
4. 研究成果

(1) レーザ局所加熱の熱伝導有限要素解析とレーザ光学系の設計・製作

熱伝導有限要素解析の結果に基づき、加熱源を半導体レーザの出力を 110W とし図 3 の光学系を設計した。ずらした光軸上にファイバー放射温度計を設置しレーザスポット中央の素材表面温度をリアルタイムにモニタできる。



(a) 加熱用レーザ光学系



(b) レーザ光学系外観

図 3 スポット加熱用レーザ装置

(2) レーザ援用インクリメンタル成形実験

熱処理後のステンレス鋼薄板の結晶粒サイズは、図 4 のように熱処理時間とともに変化するが、本研究では粒サイズが $10\mu\text{m}$ となる 15min とした。

一方、図 6 はインクリメンタル成形のみを行った場合に結果を工具送り量に対して示しているが、この変化は主に成形に伴う各結晶粒の扁平化による。

図 5 に各成形変数の定義を示す。

(3) 諸条件が結晶粒微細化に及ぼす影響を確認する実験

図 7~9 は、レーザ局所加熱時間、製品形状（壁傾斜角）、工具送り量を系統的に変更してそれらの製品の結晶粒微細化への影響を示している。

(4) インクリメンタル成形により導入される総ひずみ量の見積もり

図 10(a)は、弾塑性有限要素解析の結果に基づき提案した変形の幾何モデルを利用して見積もった材料内に導入される総相当ひずみ量である。その大きさは製品形状に依存するとともに、工具送り量に強く影響を受け、送りを小さくするとひずみ量は急激に増大する。たとえば、壁面角が 30° で送りが 0.05mm では 10 を超える。

(5) マルチステップ・プロセスによる総ひずみ量の増大

図 10(b)は、マルチステップ・プロセスを用いた場合の総ひずみ量であり、同一形状に対してステップ数を増加させると比例的にひずみが増大する。

図 11 は、マルチステップ・プロセスを用いた場合の結晶粒サイズの結果で、ステップ数 4 のときに結晶粒サイズが最小化して $1\mu\text{m}$ 程度にまで微細化されている。しかし、それ以上のステップ数では再結晶が進みサイズが増大している。

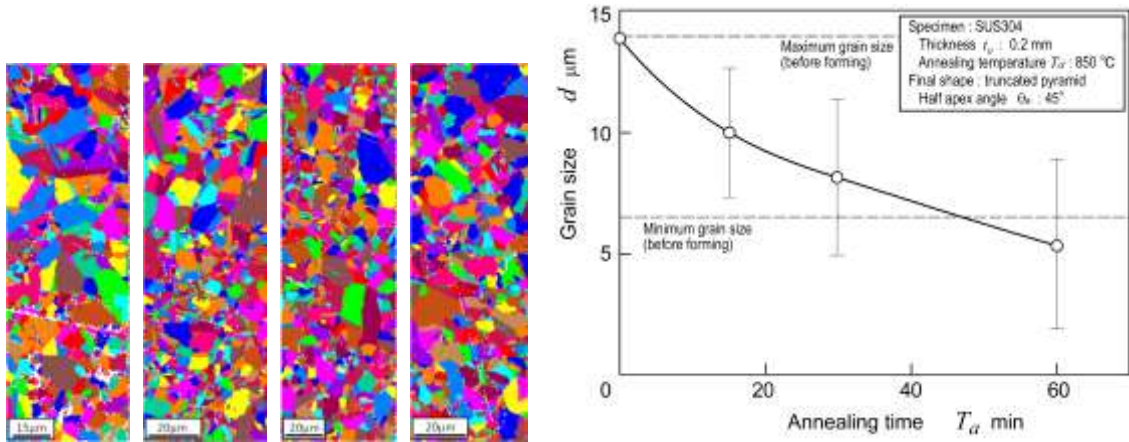
(6) マルチステップ・プロセスによるひずみ分布の制御

図 12(a)は、マルチブロック化のみで成形した角筒容器であるが、局所的に板厚（ひずみ）が極端に小さくなっている。一方、図 12(b)では、提案したパス面方向制御を併用するマルチステップ（マルチブロック）・プロセスでは材料移動を制御して一様な板厚（ひずみ）分布を得るこ

とができる。

(7) 今後の展望

上記(6)の成果によれば製品上の総ひずみ量を制御して、それによる結晶粒微細化分布を制御でき、製品上の組織分布を設計することができる。今後、生体適合性のよい純チタンに対してもこれを適切して高精度に制御できれば、新しい医療補綴物などの開発が可能となる。



(1) 0 min (2) 15 min (3) 30 min (4) 60 min

(a) 結晶粒マップ

(b) 結晶粒サイズと熱処理時間の関係

図 4 ステンレス鋼薄板の熱処理時間が結晶粒サイズに及ぼす影響

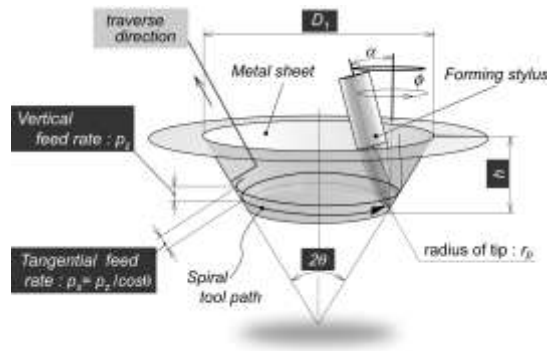
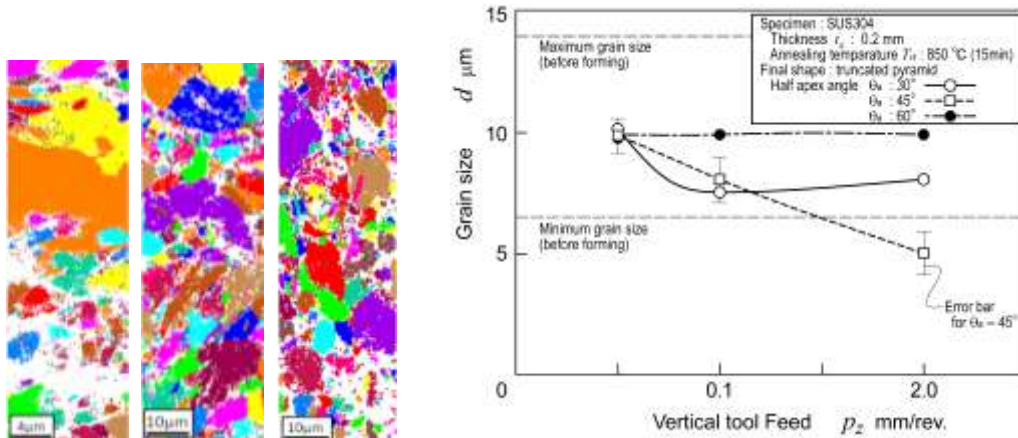


図 5 インクリメンタル成形における諸加工変数の定義

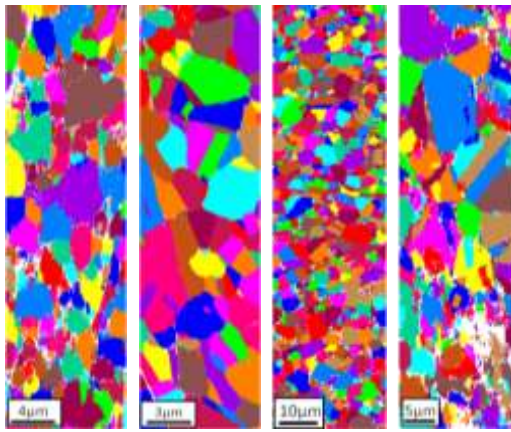


(1) $p_z = 0.05$ mm (2) 0.1 mm (3) 0.2 mm

(a) 結晶粒マップ ($\theta = 45^{\circ}$)

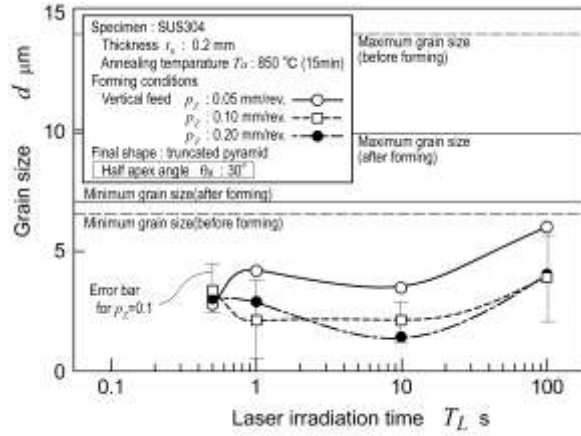
(b) インクリメンタル成形後の結晶粒サイズ

図 6 インクリメンタル成形されたステンレス鋼薄板の結晶粒サイズ



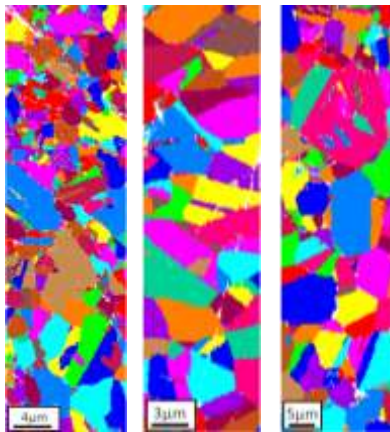
(1) $T_L=0.5$ s (2) 1 s (3) 10 s (4) 100 s

(a) 結晶粒マップ ($p_z = 0.05$)



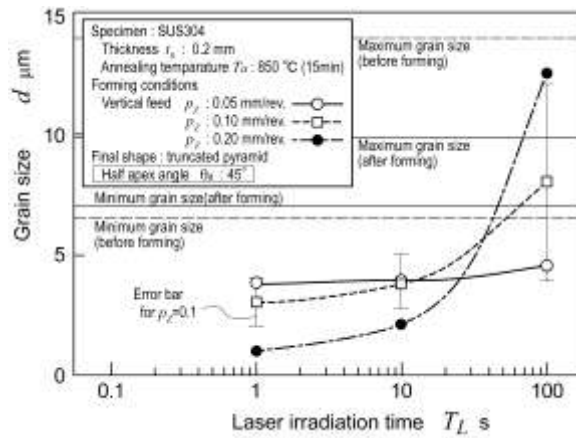
(b) レーザ加熱後の結晶粒サイズ

図 7 レーザ照射時間が結晶粒サイズに及ぼす影響 (四角錐台半頂角 $\theta = 30^\circ$)



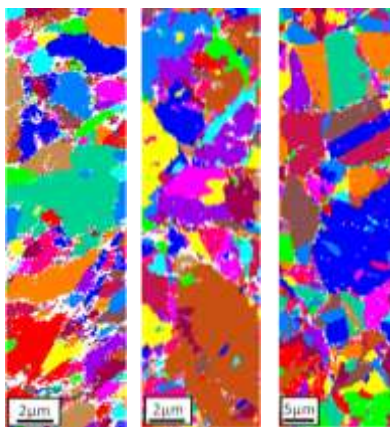
(1) $T_L=1$ s (2) 10 s (3) 100 s

(a) 結晶粒マップ ($p_z = 0.05$)



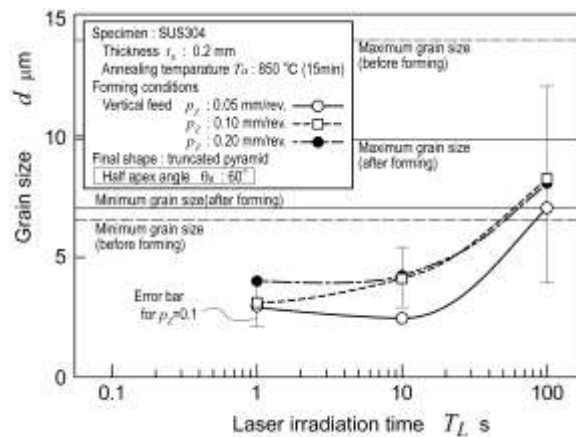
(b) レーザ加熱後の結晶粒サイズ

図 8 レーザ照射時間が結晶粒サイズに及ぼす影響 (四角錐台半頂角 $\theta = 45^\circ$)



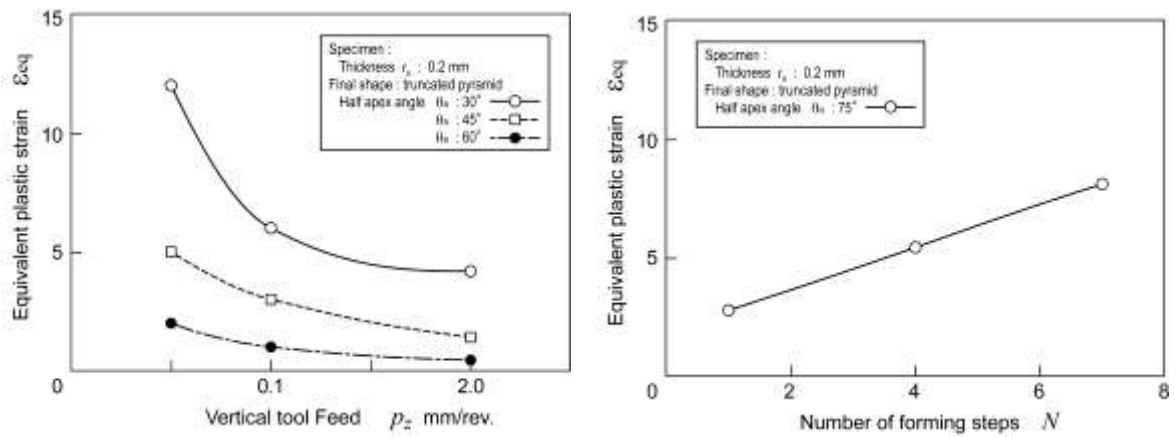
(1) $T_L=1$ s (2) 10 s (3) 100 s

(a) 結晶粒マップ ($p_z = 0.05$)

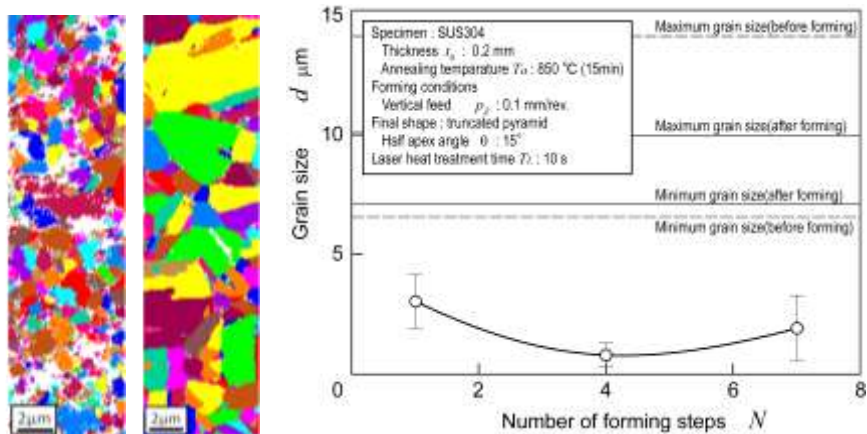


(b) レーザ加熱後の結晶粒サイズ

図 9 レーザ照射時間が結晶粒サイズに及ぼす影響 (四角錐台半頂角 $\theta = 60^\circ$)

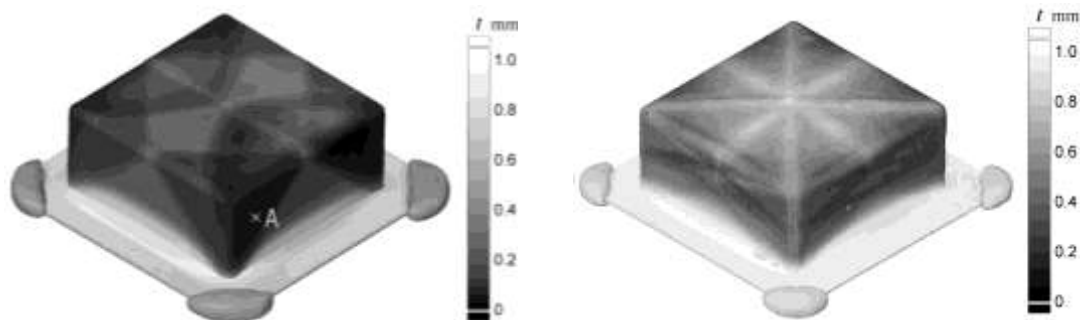


(a) 工具送りおよび製品形状 (b) ステップ数
 図 10 インクリメンタル成形された四角錐の全相当塑性ひずみ量



(1) 4-steps (2) 7-steps
 (a) 結晶粒マップ (b) 結晶粒サイズとステップ数の関係

図 11 マルチステッププロセスが結晶粒サイズに及ぼす影響 (四角錐台最終半頂角 $\theta = 15^\circ$)



(a) 最小ステッププロセス (b) 冗長ステップによるひずみ分布 (板厚) 制御
 図 12 マルチステップ・プロセスによる (板厚) ひずみ制御

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

Tanaka, S., Incremental sheet metal formed square-cup obtained through multi stepped process, *Procedia Manufacturing*, 15(2018), 1170 - 1176(査読有).

[学会発表] (計 1 件)

Tanaka, S., Incremental sheet metal formed square-cup obtained through multi stepped process, 17th International Conference on Metal Forming, 2018.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究分担者 なし

(2) 研究協力者 なし

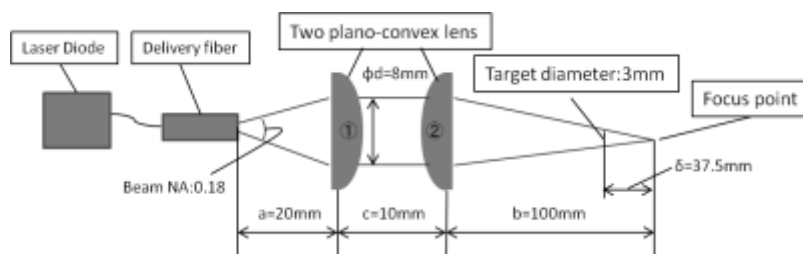
※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

(6) マルチステップ・プロセスによるひずみ分布の制御
マルチブロック化とパス面方向制御を用いる製品のひずみ（板厚）分布の制御法を提案し、板厚分布に限定した実験を行う。

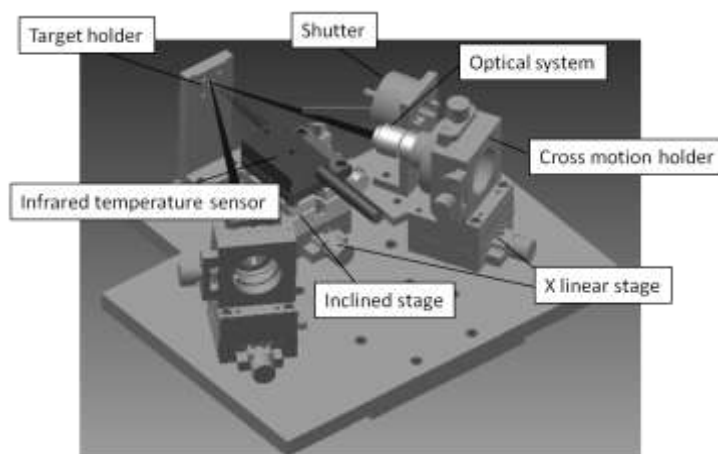
4. 研究成果

(1) レーザ局所加熱の熱伝導有限要素解析とレーザ光学系の設計・製作

熱伝導有限要素解析の結果に基づき、加熱源を半導体レーザの出力を 110W とし図 3 の光学系を設計した。ずらした光軸上にファイバー放射温度計を設置しレーザスポット中央の素材表面温度をリアルタイムにモニタできる。



(a) 加熱用レーザ光学系



(b) レーザ光学系外観

図 3 スポット加熱用レーザ装置

(2) レーザ援用インクリメンタル成形実験

熱処理後のステンレス鋼薄板の結晶粒サイズは、図 4 のように熱処理時間とともに変化するが、本研究では粒サイズが $10\mu\text{m}$ となる 15min とした。

一方、図 6 はインクリメンタル成形のみを行った場合に結果を工具送り量に対して示しているが、この変化は主に成形に伴う各結晶粒の扁平化による。

図 5 に各成形変数の定義を示す。

(3) 諸条件が結晶粒微細化に及ぼす影響を確認する実験

図 7~9 は、レーザ局所加熱時間、製品形状（壁傾斜角）、工具送り量を系統的に変更してそれらの製品の結晶粒微細化への影響を示している。

(4) インクリメンタル成形により導入される総ひずみ量の見積もり

図 10(a)は、弾塑性有限要素解析の結果に基づき提案した変形の幾何モデルを利用して見積もった材料内に導入される総相当ひずみ量である。その大きさは製品形状に依存するとともに、工具送り量に強く影響を受け、送りを小さくするとひずみ量は急激に増大する。たとえば、壁面角が 30° で送りが 0.05mm では 10 を超える。

(5) マルチステップ・プロセスによる総ひずみ量の増大

図 10(b)は、マルチステップ・プロセスを用いた場合の総ひずみ量であり、同一形状に対してステップ数を増加させると比例的にひずみが増大する。

図 11 は、マルチステップ・プロセスを用いた場合の結晶粒サイズの結果で、ステップ数 4 のときに結晶粒サイズが最小化して $1\mu\text{m}$ 程度にまで微細化されている。しかし、それ以上のステップ数では再結晶が進みサイズが増大している。

(6) マルチステップ・プロセスによるひずみ分布の制御

図 12(a)は、マルチブロック化のみで成形した角筒容器であるが、局所的に板厚（ひずみ）が極端に小さくなっている。一方、図 12(b)では、提案したパス面方向制御を併用するマルチステップ（マルチブロック）・プロセスでは材料移動を制御して一様な板厚（ひずみ）分布を得るこ