

レーザー加工材のミクロ組織の解明と

材料特性データベースの構築

成蹊大学 理工学部 エレクトロメカニクス学科

准教授 酒井 孝

(平成 20 年度一般研究開発助成 AF-2008203)

キーワード: レーザ加工, 曲げ, スプリングバック, 結晶方位, 集合組織, データベース

1. 研究の目的と背景

レーザーマシンにより切断された加工材の周辺部は、レーザー照射部に多大な熱的影響を受けるため、ブランクの部位により組織や材料特性が異なる。そのため、各部位でひずみ分布や結晶粒度などが異なり、機械的性質も一様ではない。レーザー加工材の曲げ加工において、スプリングバックを正確に予測して高精度の曲げ加工を実現するためには、材料の微視的な特性を考慮する必要があると考えられる。また、レーザーマシンにより材料の切断を行い、曲げ加工を施すと、レーザー加工面で反りが発生して高精度曲げ加工を行う上で大きな問題となっている。このようなレーザー切断材の反りの発生メカニズムを解明するためにも、材料の微視的な特性の変化について調査することが必要である。

このような背景のもと、本研究では一般冷間圧延鋼板 (SPCC) やアルミニウム合金 (A6022-H18) を対象として、レーザー加工が基本的な材料特性にどのような影響を及ぼすのかを調査することを目的として、レーザー加工時の熱的影響における組織変化を観察するとともに、各部位におけるマイクロピッカースによる硬さ分布を調べた。これらの実験結果から、組織変化と硬さ分布との関連性について考察した。さらに、ラボレベルでの曲げ試験を行うことにより、組織変化と硬さ分布がスプリングバック特性に及ぼす影響の基礎データを収集し、レーザー加工材の特性について調査した。これらの研究成果から、レーザー加工における出力や加工速度がミクロ組織や硬さに影響することが明らかになれば、高精度曲げ加工を行ううえでミクロ組織や残留応力等の材料特性を考慮し制御する必要性が明らかになる。

また、SEM-EBSD や XRD による組織観察と集合組織測定を行い、レーザー切断による結晶方位の変化について、各種の定量データを実験的に得た。このようにして得られたレーザー加工材の曲げ加工に関するスプリングバックデータと集合組織のデータを対にした結晶方位データを、本研究で構築したデータベース⁽¹⁾に蓄積した。そして、このデータベースから抽出した曲げ加工によるスプリングバック量と結晶方位分布の定量データを応用して、3 母数ワイ

ブル分布と統計的手法によるスプリングバック量の推定を試みた。

将来的にはこのデータベースを援用することで、レーザー加工材のスプリングバック量が高精度に予測できることになる。さらに、このデータベースは、集合組織を制御して所望の高精度曲げ加工を実現する高付加価値材料の創製にも応用できる。

2. 供試材および実験方法

本研究の供試材には、板厚 $t=1.2\text{mm}$ の一般冷間圧延鋼板 (SPCC)、アルミニウム合金板 (A6022-H18) を、(株)アマダ社製・レーザー加工機を用いて図 1 に示すように長さ $l=100\text{mm}$ 、幅 $w=50\text{mm}$ に切断して試験片を作製した。アシストガスを窒素とし、レーザー出力およびレーザーガンの移動速度の違いによる特性変化を調べるために、試験片を作製するにあたりそれぞれの加工条件を表 1 のように変化した。表内の①～⑩の表示は、実験結果の整理で用いた。

採取した試験片に対して、耐水研磨紙 (#600, #800, #1000, #1200, #1500) を使用して湿式研磨し、その後、 Al_2O_3 微粒子 (1.0, 0.05 μm) を使用したバフ研磨を行った。SPCC 試験片については、2vol% ナイタルを用いて 5s の化学腐食を行った。このようにして作製した試験片に対してレーザー加工により切断された面の一方を基準に、中央部、端部とそれぞれ定義し、それぞれの部位で光学顕微鏡を用いて圧延方向および板厚方向の組織観察を行った。また、撮影した写真をデジタル結合し、レーザー加工面からの組織の変化を観察した。平均結晶粒径の測定には交点係数法を用いた。

マイクロピッカース硬さ試験機・MXT-a7e を用いて、上のように定義した部位に対して、他方の切断面からの距離にしたがって硬さがどのように変化するかを調べた。試験条件は、測定荷重 490.3mN、圧子押込時間 15s とした。

曲げ試験は汎用の万能試験機と金型を組み合わせ、高精度角度センサによる少数第 2 位までの正確なスプリングバック量を調査した。また、結晶方位測定では微小部 X 線回折装置を用いて、非曲げ部と曲げ部に対して行い、描いた

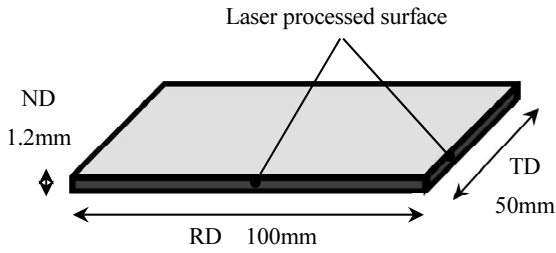


図1 レーザ切断材の形状および寸法

表1 レーザ切断の加工条件

材料	出力 kW	速度 m/min	ガス圧力 MPa	レーザタイプ
SPCC	3.0	2.0 ①	0.8	CW
		4.0 ②		
		6.0 ③		
		8.0 ④		
		10.0 ⑤		
A6022-H18	3.0	2.0 ⑥	0.8	CW
		2.5 ⑦		
		3.0 ⑧		
		3.5 ⑨		
		4.0 ⑩		

正極点図から結晶方位分布関数（ODF：Orientation Distribution Function）を求めた。

3. データベースシステムの概要

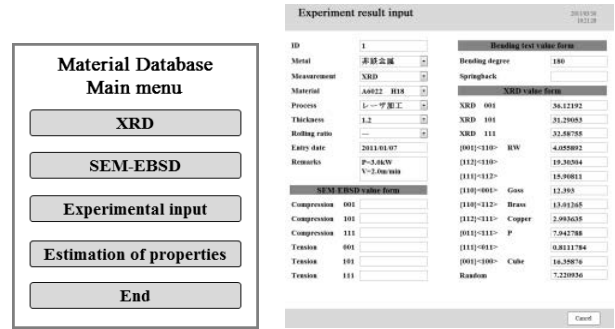
データベースは Microsoft 社製の Access2010 をツールとして設計した。データベースの各インタフェースを図2に示す。スタートフォームである (a) メインメニューから (b) 実験結果入力フォーム、または (c) 材料特性推定フォームを選択し、図3に示したフローチャートにしたがって操作を行った。データ内容は材料名とレーザ加工条件、板厚、目標曲げ角度、スプリングバック量、結晶方位特性を関連付けて管理し、試験片1本をデータセットの最小単位として入力した。したがって、データを検索した結果、異なる傾向を示したデータがあれば、試験片の材料や条件等を容易に検索することができる。

これまでに著者らは微細結晶粒の曲げ加工にともなう結晶方位データベースの構築とスプリングバック推定に関して良好な結果を得ており^{(2),(3)}、本報のレーザ加工材の材料特性のデータベース化についても学術的に大変有意義であると考えている。

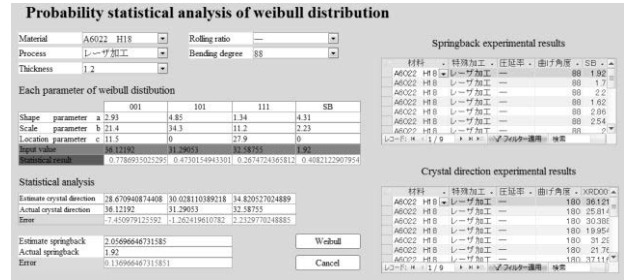
4. 実験結果および考察

4.1 SPCC レーザ加工材の組織観察結果

組織観察の一例として、レーザ加工による中央部、端部



(a) メインメニュー (b) 実験データ入力フォーム



(c) 材料特性値の推定結果フォーム

図2 本研究で提案した材料特性データベースのユーザインターフェイス

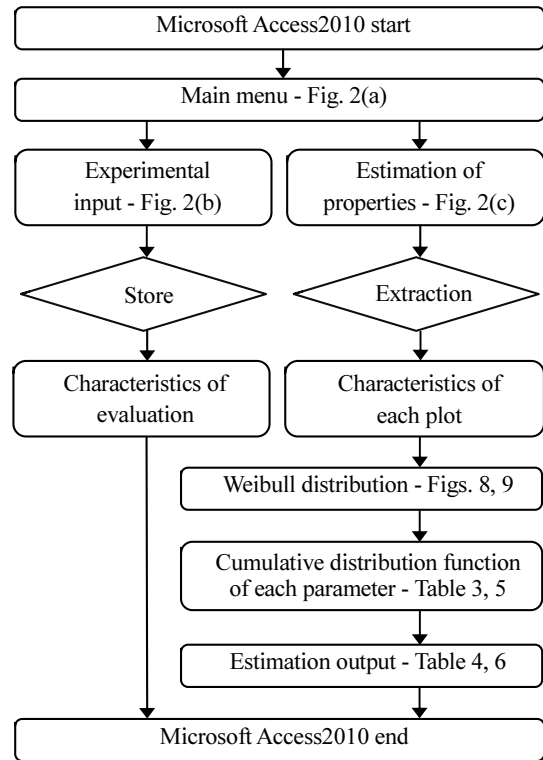


図3 データベース操作のフローチャート

の板厚方向の組織写真を図4に示す。レーザ加工条件については、先の表1に①～⑩を示した。また、表2にそれぞれ

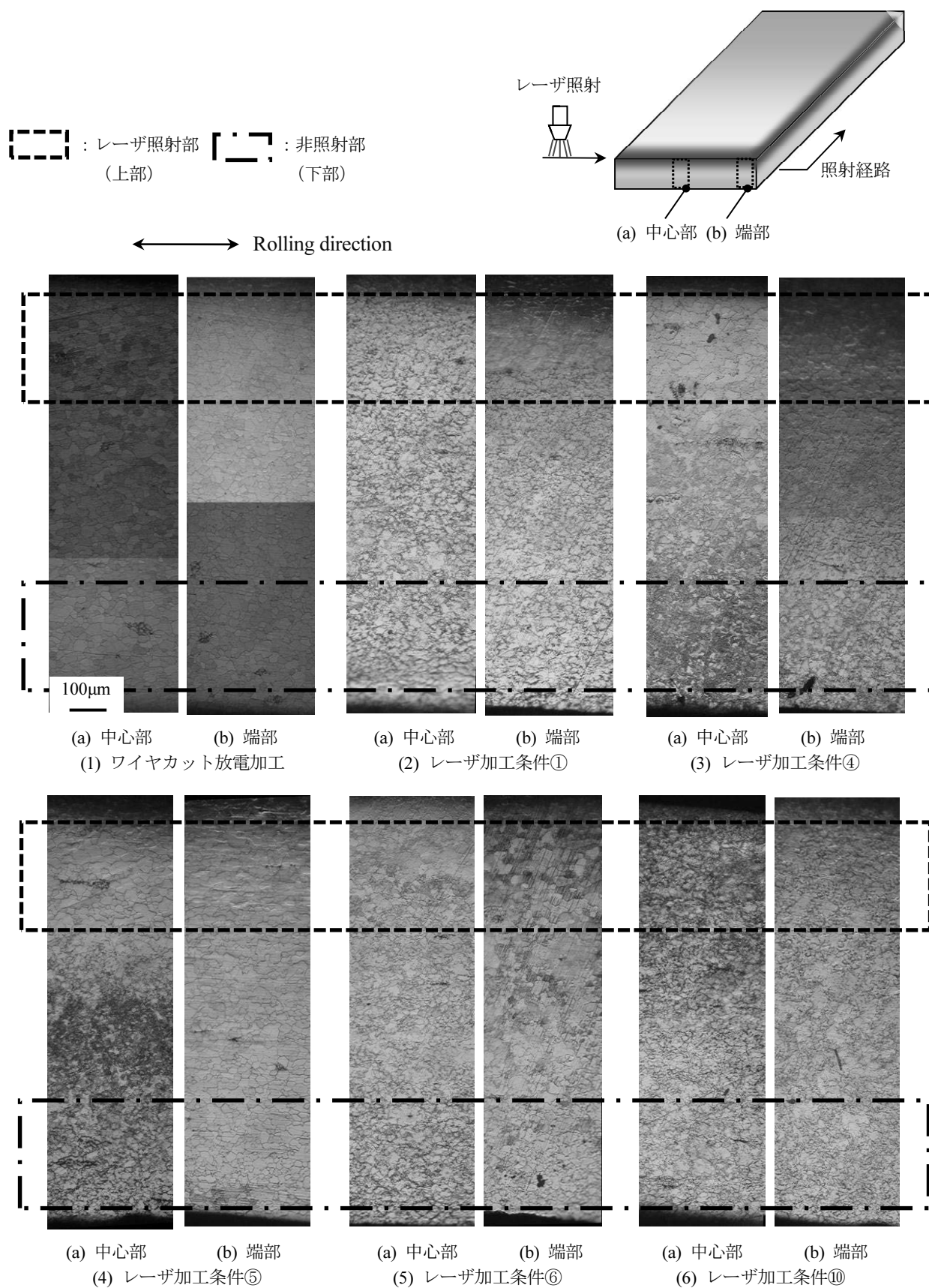


図4 SPCC材板厚方向の光学顕微鏡による組織写真（デジタル結合後のもの）

表2 加工条件別の平均結晶粒径の算出結果

加工条件	測定箇所		粒径 μm	加工条件	測定箇所		粒径 μm
(1) ワイヤカット ト放電加工	(a)中央部	レーザ照射部	95.5	(4) 加工条件⑤ (10.0m/min, 3.0kW)	(a)中央部	レーザ照射部	142.9
		非照射部	96.4			非照射部	25.3
	(b)端部	レーザ照射部	81.9		(b)端部	レーザ照射部	125.6
		非照射部	97.8			非照射部	85.5
(2) 加工条件① (2.0m/min, 3.0kW)	(a)中央部	レーザ照射部	34.6	(5) 加工条件⑥ (6.0m/min, 2.0kW)	(a)中央部	レーザ照射部	49.5
		非照射部	34.0			非照射部	26.5
	(b)端部	レーザ照射部	35.2		(b)端部	レーザ照射部	167.9
		非照射部	37.2			非照射部	118.1
(3) 加工条件④ (8.0m/min, 3.0kW)	(a)中央部	レーザ照射部	133.2	(6) 加工条件⑩ (6.0m/min, 4.0kW)	(a)中央部	レーザ照射部	98.3
		非照射部	11.4			非照射部	46.3
	(b)端部	レーザ照射部	138.1		(b)端部	レーザ照射部	86.3
		非照射部	25.08			非照射部	92.6

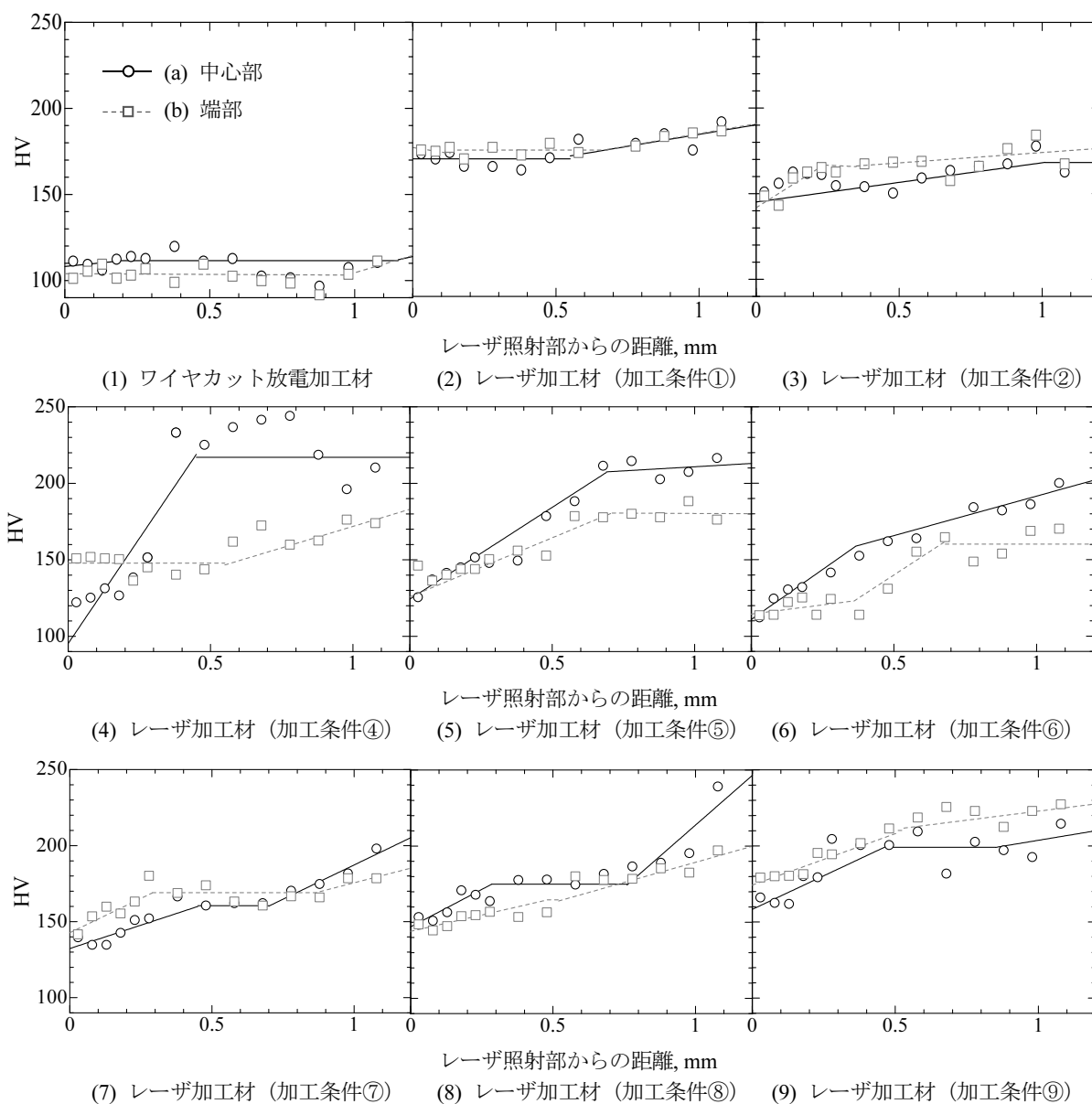


図5 SPCC レーザ加工材の板厚方向におけるマイクロビッカース硬さ分布

の照射部と非照射部の平均結晶粒径の算出結果を示す。組織写真の上部がレーザー照射部であり下部は非照射部となっている。参考として、同図(1)は同じ試料をワイヤカット放電加工により切断したものであり、どの部位でも同様な組織・粒径であることがわかる。それに対してレーザー加工材は入熱の条件により組織の変化に違いがあることがわかる。出力および、レーザー加工速度を低く設定した①のレーザー加工条件では、全体的に微細化されているが照射部からの距離にしたがって組織は変化していない。しかし、レーザー加工速度を速くした④および⑤を見ると照射部では多大な熱影響を受け、再結晶の後に粒成長して組織が粗大化しているが、距離が離れることで結晶サイズが小さくなっていることがわかる。これは、非照射部では急加熱およびレーザーガン的高速移動ともなう急冷却によりマルテンサイト変態が生じていることに起因する。出力を下げて加熱条件が緩やかな⑥についても板厚方向に熱が均一に伝達しておらず、レーザー照射部と非照射部で異なる組織を形成した。

4.2 SPCC レーザ加工材の板厚方向の硬さ試験結果

板厚方向のマイクロビッカース硬さ試験で得られた結果に対して、横軸をレーザー照射部からの距離（0～板厚1.2mm）、縦軸をHV値としてプロットした結果を図5に示す。それぞれの図から、(1)ワイヤカット放電加工材に比べて(2)～(9)のレーザー加工材では、試験片に熱的影響が付加されてマルテンサイト変態による微細結晶粒化、もしくは加工硬化の影響でより高い硬度を示している。

それぞれの図の(a)中心部と(b)端部を比べると、加工条件にもなって硬さ変化の様相が異なっている。(2)および(3)では部位の違いによって硬さの値に顕著な違いは現れない。これは加工速度が遅いためともに十分な量の熱が材料に入射し、その上で均一に冷却したために均一組織となったと考えられる。これらの条件下ではレーザー加工による加熱・冷却の一連の熱処理の効果により、50～70%の硬さの向上があった。 $t=1.2\text{mm}$ のSPCC材を被加工材とした場合のレーザー加工では、材料の板厚方向に均一に入熱できる加工条件は、出力が3.0kW、かつ移動速度が2.0～4.0m/minの範囲内であることがわかった。

(4)～(9)に示したレーザー加工条件下では、おおよそ(b)端部よりも(a)中心部が高い硬さの値を示した。(b)端部ではND方向とTD方向の2度にわたって入熱の影響を受けるので、静的再結晶が起こり再結晶化して加工硬化層が除去されて硬さが低くなった。

4.3 A6022-H18 レーザ加工材の曲げ加工前後での集合組織の変化

集合組織の変化について調べた結果の一例として、図6

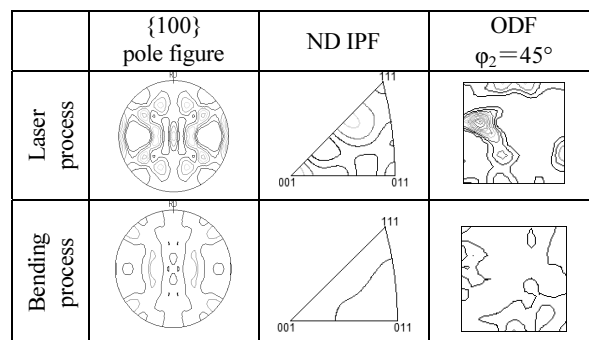
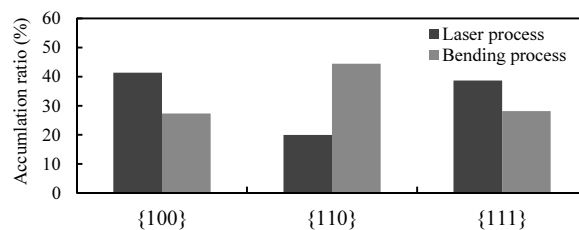
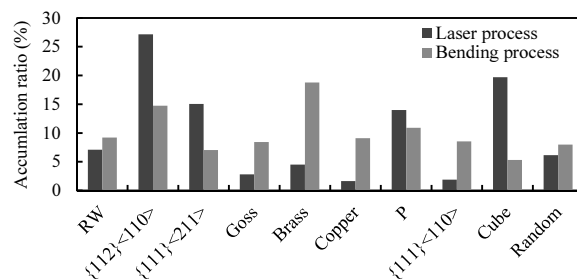


図6 A6022-H18 レーザ加工材の曲げ加工前後での結晶方位分布



(a) IPF から得られた各方位への面積率



(b) ODH から得られた集合組織の面積率

図7 結晶方位分布の定量的解析結果

に結晶方位分布関数による A6022-H18 レーザ加工材の曲げ前後における結晶方位分布をそれぞれ表示したものを示す。曲げ加工後の{100}極点図は、中心から25°と90°離れた位置に極密度の集積がみられた。さらに、ND逆極点図(IPF: Inverse Pole Figure)では{100}と{112}方位から{110}方位へ分布が変動している。これは $\varphi_2=45^\circ$ の結晶方位分布関数(ODF: Orientation Determination Function)によると、f.c.c.金属のせん断集合組織である{112}<110>・{111}<211>とレーザー照射によって発達した再結晶集合組織のCube方位{001}<100>が、曲げ加工と結晶すべり系によって、Brass方位{011}<211>およびP方位{011}<111>へ結晶回転・分散したと考えられる。なお、本研究に関するレーザー加工材の集合組織測定結果については業績が多数あり、詳しくは文献を参照されたい^{(4),(5)}。

このような結晶方位の変化を精細に把握するため、結晶方位集積プログラムを作成した。このプログラムはODF

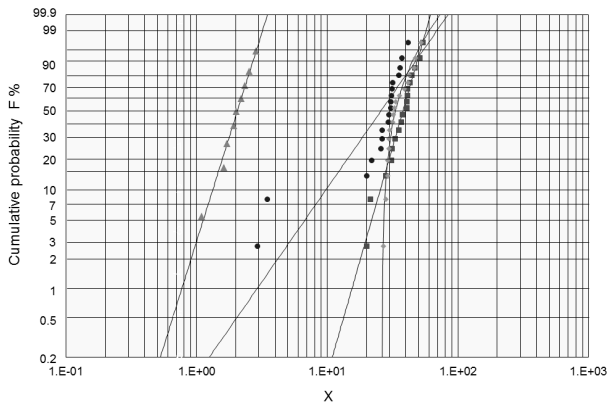


図8 3母数ワイブル分布の分布関数 (A6022-H18材)

表3 ワイブル分布の各母数値

	[001]	[011]	[111]	SB
形状母数	1.93	4.69	1.19	4.31
尺度母数	31.0	41.0	9.30	2.23
位置母数	0.00	0.00	26.4	0.00

表4 スプリングバック量の推定結果

	スプリングバック量
推定値 (°)	2.02
実験結果 (°)	1.92
誤差 (°)	0.10

によって得られた方位密度から、ND 逆極点図の各頂点 {100}, {110}, {111} 周辺と ODF の断面 $\varphi_2=45^\circ$ における代表的な方位の集積割合を算出し、結晶方位特性のパラメータとしてデータベースへ入力できる。図6に示したND面のIPFとODFにおける結晶方位の集積割合を図7に示す。この結果から、結晶方位分布の特徴を定量データとして理解できる。

4.4 材料特性データベースを援用したスプリングバック量の推定結果

データベースに蓄積された A6022-H18 材の結晶方位特性とスプリングバック特性を用いて、確率統計解析による曲げ後のスプリングバック特性と曲げ前の結晶方位特性を推定した。STANAD (Statistical Analysis Software for Material Strength Database for Reliability Design) を用いて作図した3母数ワイブル分布の累積分布関数を図8に示し、母数値を表3に示した。また、結晶方位特性とスプリングバック特性の推定結果を表4に示す。3母数ワイブル分布の各母数からスプリングバック量を推定する手法については、紙面の都合で省略するので参考文献を参照されたい(6),(7)。

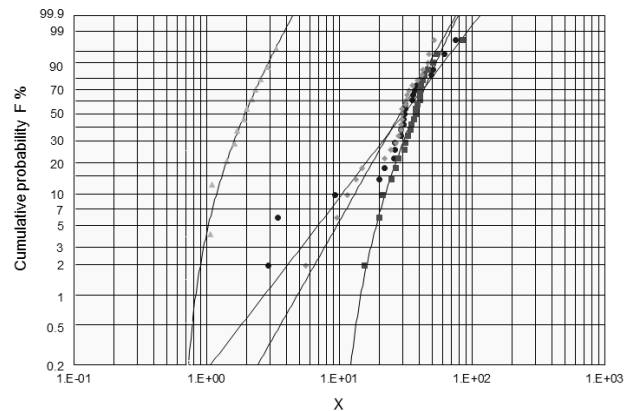


図9 3母数ワイブル分布の分布関数 (全ての材料)

表5 ワイブル分布の各母数値

	[001]	[011]	[111]	SB
形状母数	1.74	2.43	2.37	2.11
尺度母数	37.7	31.1	33.4	1.53
位置母数	0.00	9.80	0.00	0.65

表6 スプリングバック量の推定結果

	スプリングバック量
推定値 (°)	2.85
実験結果 (°)	1.92
誤差 (°)	0.93

図8において、データ点は直線状にプロットされているのでワイブル分布関数近似でばらつきがある。この3母数ワイブル分布と累積分布関数を用いて表3に示す各母数を推定した。その結果として表4より、A6022-H18材のスプリングバック量の推定は実験値と比較して大変良い結果が得られた。一般に、3母数ワイブル分布による推定は、データ点数が50以上必要と言われている。したがって、さらなるデータの補充をすることで推定値の誤差を小さくすることができると考えている。

同様に、SPCC材を含めたすべてのレーザ加工材を図9に示す3母数ワイブル分布にプロットし、表5の各母数を推定した。その結果として表6から、すべてのレーザ加工材によるスプリングバック量の推定に大きな誤差が現れた。このことから、確率統計解析による推定はデータの質が信頼性において重要であり、材料別にデータを取り扱う必要がある。このことは、同じ曲げ応力を負荷しても結晶格子型が異なれば最終安定方位が異なり、したがってワイブル分布関数の挙動も異なることを示している。

5. 結言

レーザ加工材におけるスプリングバック特性と結晶方

位特性の相関をデータベースに構築した。これを新しい曲げ加工システムとして統計的手法によるスプリングバック量の推定を行った結果、十分な予測精度を確認することができた。また、結晶方位特性をデータベースへ蓄積することで、近年盛んに行われている集合組織制御への媒体の1つとなり、スプリングバック量の制御ができると考えている。

謝 辞

本研究は天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成 (AF-2008203) により遂行された。ここに記して深甚な謝意を表します。また、研究の遂行にあたり実験・解析で多大な協力を頂いた研究室学生に感謝致します。

参考文献

- (1) 酒井 孝, 平尾哲郎, 小俣 均, 小山純一, 「微細結晶粒材の曲げ加工に関する結晶方位データベースの構築」, JCOSSAR2011 (構造物の安全性および信頼性) A 論文 (査読付き), 第7巻, pp. 554-559, (2011年10月).
- (2) 酒井 孝, 菊田進作, 小俣 均, 小山純一, 「高機能難加工材の曲げ加工に関する結晶方位データベースの構築」, 第61回塑性加工連合講演会講演論文集, pp. 277-278, 山形, (2010年10月).
- (3) 酒井 孝, 小俣 均, 小山純一, 「SEM-EBSD 結晶方位データベースを応用した微細結晶粒材のスプリングバック量の推定」, 日本材料学会第60期学術講演会講演論文集 CD-ROM, No. 623, 大阪, (2011年5月).
- (4) 菊田進作, 酒井 孝, 小俣 均, 小山純一, 「アルミニウム合金板の集合組織に及ぼすレーザ切断条件の影響」, 軽金属学会・第121回秋季大会講演概要, pp. 19-20, 東京, (2011年11月).
- (5) 菊田進作, 酒井 孝, 小俣 均, 小山純一, 「レーザ加工材の曲げ応力負荷にともなう集合組織の変化」, JCOSSAR2011 (構造物の安全性および信頼性) A 論文 (査読付き), 第7巻, pp. 548-553, (2011年10月).
- (6) 酒井 孝, 菊田進作, 小俣 均, 小山純一, 「結晶方位データベースを応用した難加工材料のスプリングバック量の推定」, 日本塑性加工学会第61回塑性加工連合講演会講演論文集, pp. 279-280, 山形, (2010年10月).
- (7) 菊田進作, 酒井 孝, 小俣 均, 小山純一, 「XRD 結晶方位データベースを応用したレーザ加工材のスプリングバック量の推定」, 日本材料学会第60期学術講演会講演論文集 CD-ROM, No. 622, 大阪, (2011年5月).