

# 光造形材の残留応力とひずみに関する研究

山 田 明 宏\*・河 合 伸 泰\*\*・山 岡 恒 治\*\*\*

## Residual stress and distortion of formed parts produced by rapid prototyping

Akihiro Yamada, Nobuyasu Kawai and Tsuneji Yamaoka

Rapid prototyping is said to be a promising technology that can answer needs of industries that want to develop rapidly. But parts subjected to severe LASER heat history tends to result in higher residual stress and distortion. Therefore residual stress measured by X ray diffraction and distortion are discussed in this paper. As a result the following is made clear.

- Residual stress increases with increasing thickness of layer contacting base plate.
- Residual stress increases with proceeding to forming step.
- Residual stress is influenced more by layer thickness contacting base plate than by forming step.
- Residual stress is higher in the center of part than in the peripheral.
- There is no correlation between residual stress and distortion, maybe due to insufficient removal of surface deformed layer on base plate.

### 1. 緒言

近年、企業間における開発競争の激化に伴い、試作品や金型の設計開発に要するコスト・製作時間を大幅に削減することができる光造形技術に注目が集まっている。しかしながら、光造形では精度の向上、熱による変形や残留応力など、解決しなければならない問題が存在すると報告されている<sup>1)</sup>。この報告を受け、過去に造形体の残留応力を測定するために、モデル部を除去する際に発生するひずみを測定する手法で測定されていた<sup>2)</sup>。

本論文では、X線応力測定装置を用いて非破壊的に残留応力を測定し、残留応力に与えるベースプレート接合部厚さの影響、および残留応力に与える造形部形状の影響を調べるために実験を行ったので、この結果について報告する。

### 2. 実験方法

#### 2.1 供試材料

本実験で使用した試料はベースプレートに S50C を、金属粉末に SCM440 をそれぞれ使用し、(株)松浦機械製作所の金属光造形複合加工機 LUMEX25C を用いて作製したもので

---

\* 機械工学専攻大学院生    \*\* 機械工学科    \*\*\* (株)松浦機械製作所

ある。表 1 に供試材の成分規定値を示す。

金属光造形複合加工とは図 1 に示すように、放電加工用電極などを用いずにレーザを使用することで金属粉末から三次元構造物を作製する加工法であり、従来工法よりも短時間で作製することができる技術である。まずレベリングブレードを水平に移動させ、ベースプレート上に一定厚さの金属粉末を供給する。その後、コンピュータ上に保存された 3D-CAD のデータを基にレーザを照射し、金属粉末を融解または焼結させる。粉末供給とレーザ照射を複数回繰り返す、造形体が一定の厚さになるまで積層造形を行い、切削工具を用いて造形体表面を切削加工し、再度積層加工を行い、所望形状に造形する。

本実験では図 2、3 に示すように異なる 4 形状の試料を造形し、それぞれの接合部厚さを変化させており試料番号は表 2 に示すとおりである。なお、造形部高さは 15mm とし、壁部、天板部の厚さは各 1mm とする。

表 1 化学成分

	Fe	C	Mn	Cr	Mo
S50C	bal	0.47~0.53	/	/	/
SCM440	bal	0.38~0.43	0.60~0.85	0.90~1.20	0.15~0.30

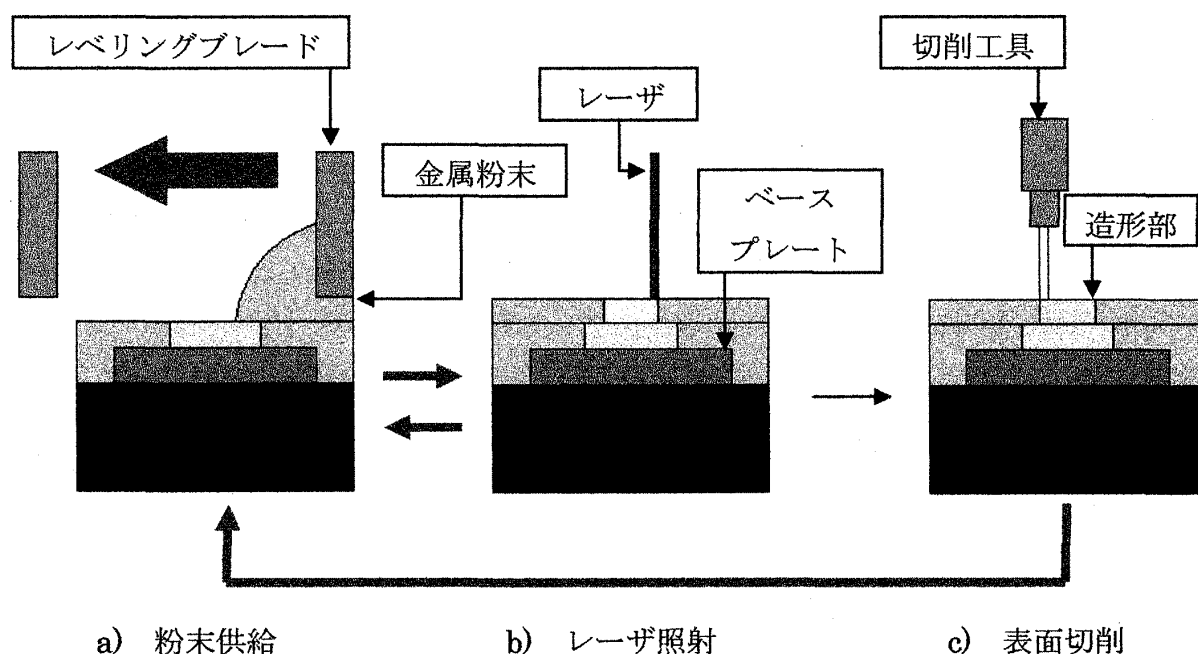


図 1 光造形複合加工

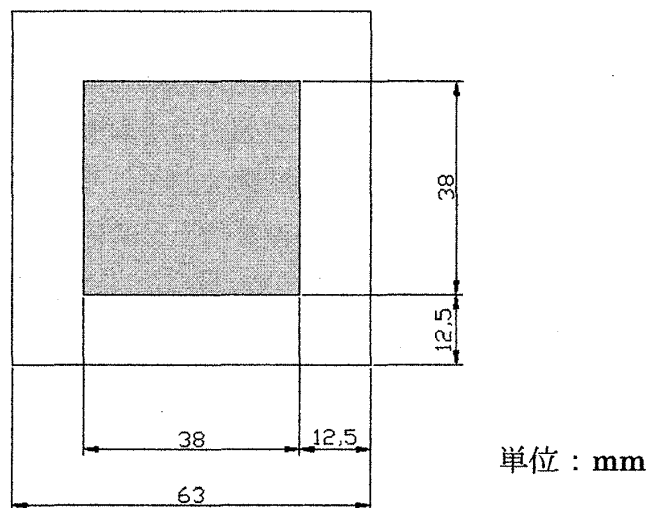


図 2 試料造形位置

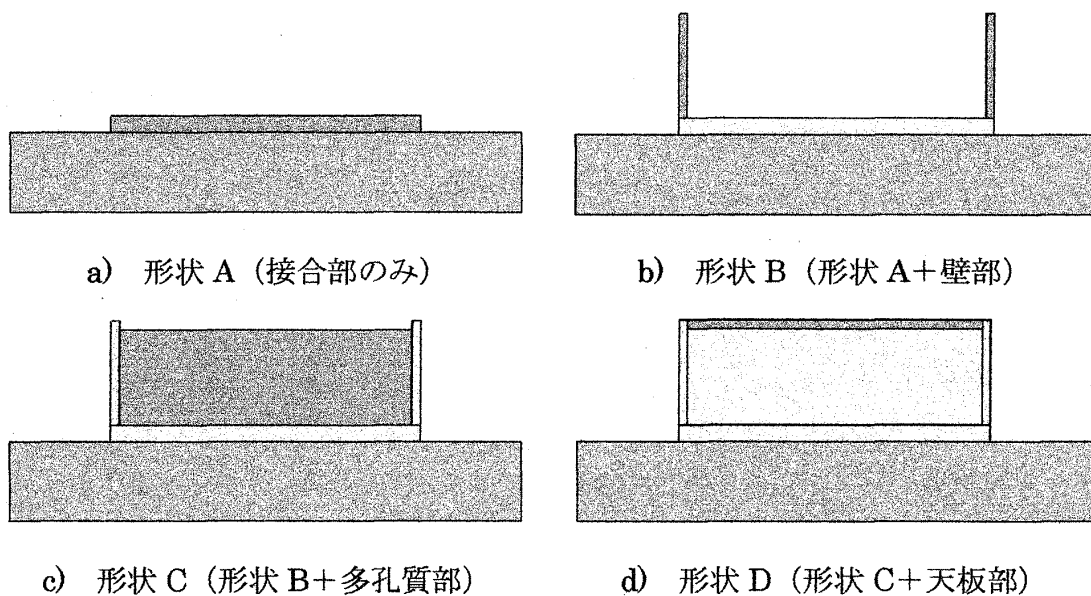


図 3 試料断面図

表 2 試料番号

		接合部厚さ [mm]			
		0.25	0.50	1.00	2.00
形状	A	A-1	A-2	A-3	A-4
	B	B-1	B-2	B-3	B-4
	C	C-1	C-2	C-3	C-4
	D	D-1	D-2	D-3	D-4

## 2.2 残留応力の測定

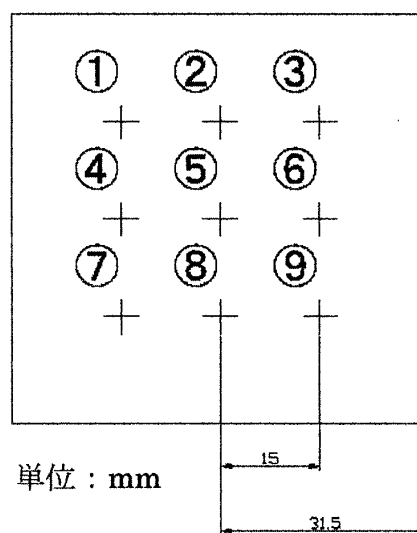
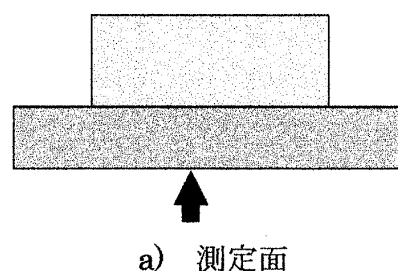
本実験では写真1に示す(株)リガク製のX線応力測定装置を使用し、表3に示す条件で、試料造形面裏側(以後、測定面)の残留応力を非破壊的に求めた。しかし、本実験で使用した試料は機械加工を施したままの状態である。そのため、ベースプレート表面には加工変質層が存在している。加工変質層は母材とは組織状態が大きく異なるため、残留応力に影響を及ぼすと考えられる<sup>3)</sup>。そのため、図4に示す測定位置において、そのままの状態での残留応力を測定するとともに、写真2に示す(株)リガク製電解研磨装置を使用し、電解研磨を行い、同一箇所での残留応力測定を行った。

また、被測定物の結晶粒が粗大である場合、応力測定に寄与する結晶数が減少し、正確な応力の測定が行われないことがある<sup>4)</sup>。対策として、照射するX線を揺動させ、回折格子面を増加させるX線揺動と呼ばれる手法があるが、本実験でもこれを採用し、電解研磨後の残留応力測定は、X線揺動の有無、2条件で測定を行った。

表3 実験条件

		条件1	条件2	条件3
電解研磨条件	電解研磨	×	○	○
	研磨電圧	10V		
	研磨時間	3.6ks (1時間)		
	研磨深さ	0.2mm		
	電解液	電解液A液 ※		
	研磨範囲	φ8mmの円形		
X線残留応力測定条件	使用管球	Cr		
	使用波長	$K\alpha_1$ (=0.229nm)		
	励起電圧・電流	40kV・30mA		
	測定法	並傾法		
	カウンタ	PSPC (直線)		
	走査範囲(2θ)	147.233° ~166.185°		
	測定時間	60s		
	φ角度	0.00~40.00° (10.00° 毎)		
	X線揺動	×	×	○

※ (株)リガク製鋼鉄用電解液 組成等詳細不明



b) 電解研磨および  
応力測定位置

図4 測定箇所

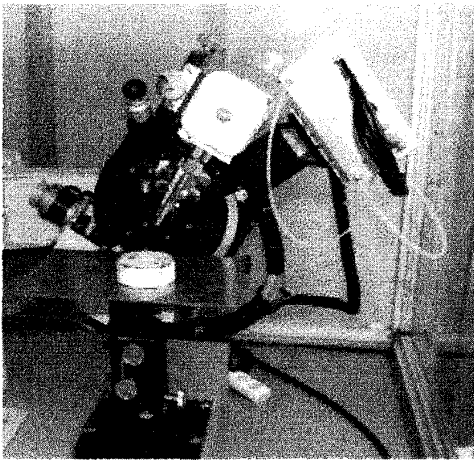


写真1 X線応力測定装置

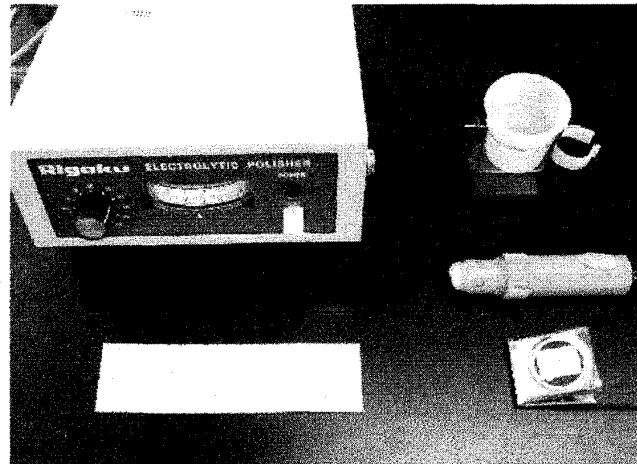


写真2 電解研磨装置

### 3. 実験結果および考察

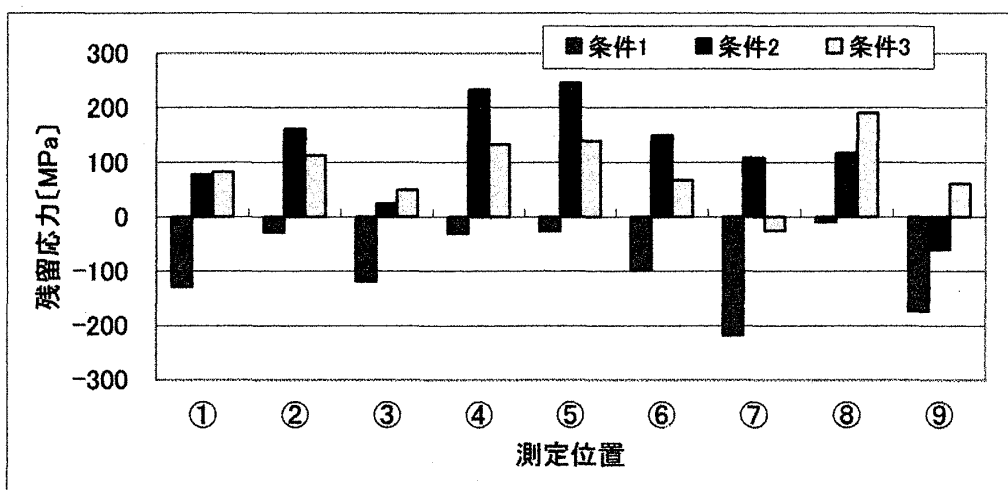
#### 3.1 電解研磨・X線揺動の影響

図5に各測定条件における試料D-1の残留応力測定結果を、図6に試料D-2の条件2における残留応力の分布を示す。

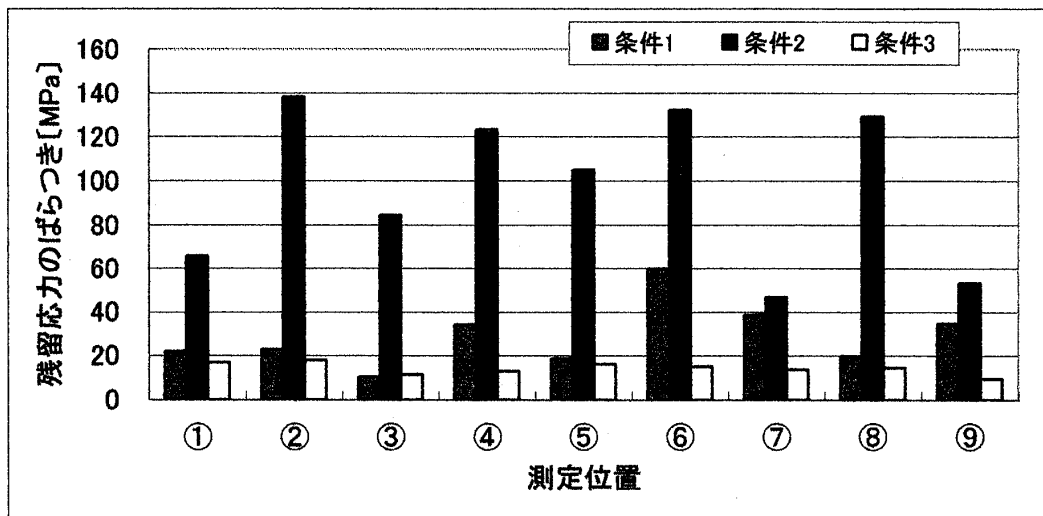
図5-aを見ると、測定条件によって測定値が大きく異なり、条件1では圧縮応力が測定されている。これは測定面表面に加工変質層が存在したためであると考えられる。また、図5-bを見ると条件2の値のばらつきが最も大きくなっている。

図6を見ると残留応力は中心である測定点⑤が最も大きく、中心からの距離が離れるほど小さくなっていることが分かる。また、他の多くの試料でも同様の傾向が見られた。

以上のことから、測定条件3、すなわち電解研磨有り・X線揺動有りの条件で測定点⑤における残留応力の数値を用いて解析を行った。



a) 条件別測定値



b) 条件別残留応力のばらつき

図5 残留応力測定結果 (試料 D-1)

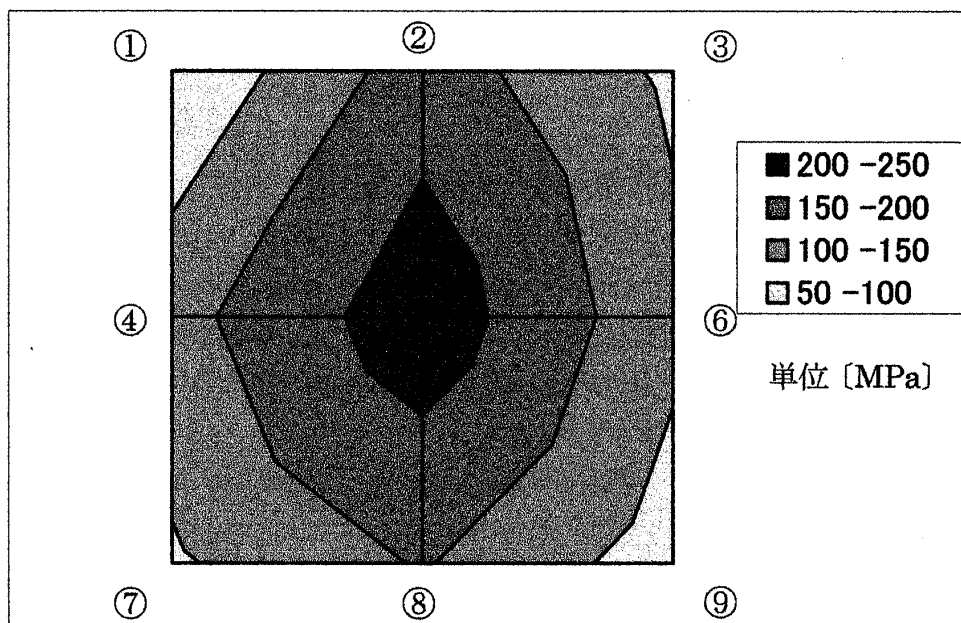


図6 残留応力の分布 (試料 D-2)

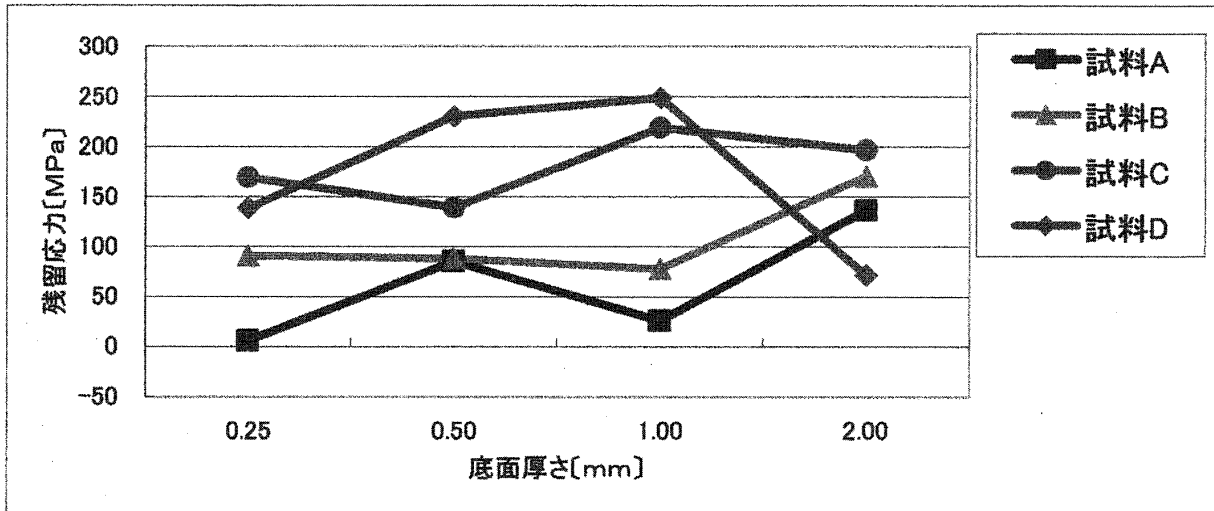
### 3.2 残留応力に与える接合部厚さ・試料形状の影響

図7に残留応力に及ぼす接合部厚さおよび試料形状の影響を示す。

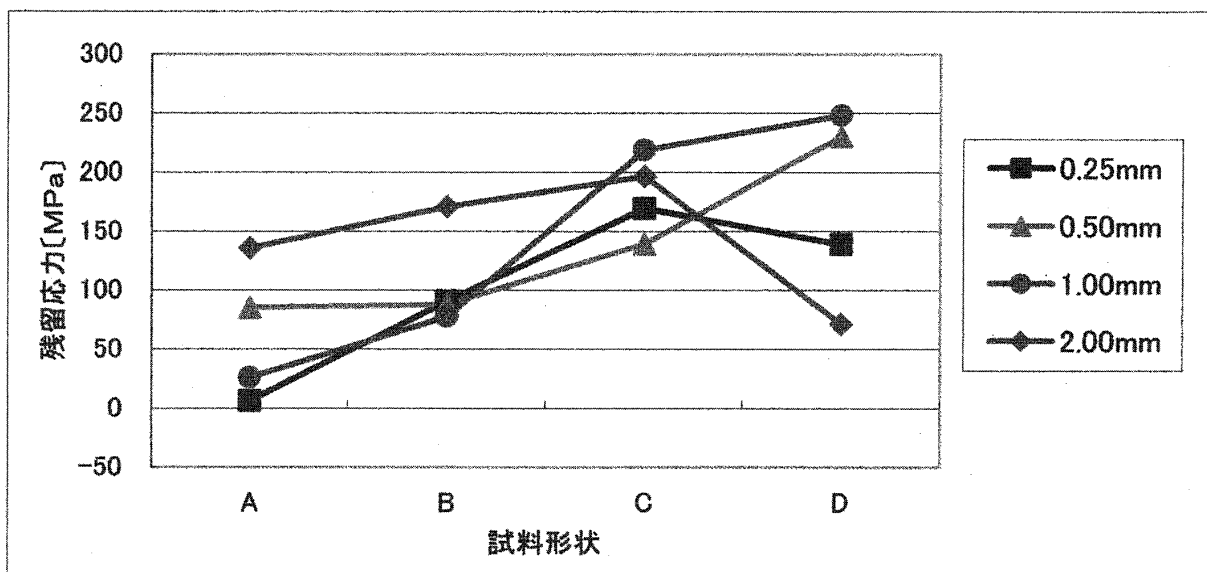
図7-aには、接合部厚さの影響を示している。これを見ると、接合部厚さが厚くなるにつれ残留応力は大きくなる傾向にあることが分かる。また、試料 D-4 (試料形状 D・接合部厚さ 2.00mm) において残留応力が大きく減少しているが、これは加工変質層が電解研磨により完全に除去されていないためであると考えられる。

図7-bには、試料形状の影響を示している。これを見ると、造形部分が多くなるにつれ残留応力が大きくなる傾向にあることが分かる。しかし、接合部厚さ 2.00mm の試料の場合、

造形部分が少ない形状 A において既に高い残留応力が計測されており、その増加量は他の試料に比べて小さいと言える。これは、試料形状よりも接合部厚さの方が残留応力に与える影響が大きいためであると考えられる。また、試料 D-1 (試料形状 D・接合部厚さ 0.25mm) および D-4 (試料形状 D・接合部厚さ 2.00mm) において残留応力の低下が見られるが、これも先ほど同様加工変質層の影響が考えられる。



a) 接合部厚さの影響



b) 試料形状の影響

図 7 残留応力に及ぼす影響

### 3.3 残留応力とひずみの関連性

電解研磨を行う前にダイヤルゲージを用いて試料測定面のひずみを測定した。測定箇所は残留応力測定点と同一箇所である (図 4)。測定したひずみと残留応力の関係を図 8 に図示した。試料 A-1 を見ると数値のばらつきは小さく、残留応力とひずみは相関関係が強い

といえる。また、相関係数を求めたところ 0.93 と非常に高い値であった。しかしながら、試料 A-4 を見ると数値のばらつきがあり相関があるとはいえない。また、相関係数は-0.03 と非常に低く、残留応力とひずみの相関は皆無であるといえる。

他の試料について相関係数を求めた結果、試料形状・接合部厚さによらず相関の強弱がみられ、現状そのようになった原因は不明である。しかし、加工変質層の除去が不完全であり残留応力が正確でないことが考えられ、このことが影響している可能性がある。

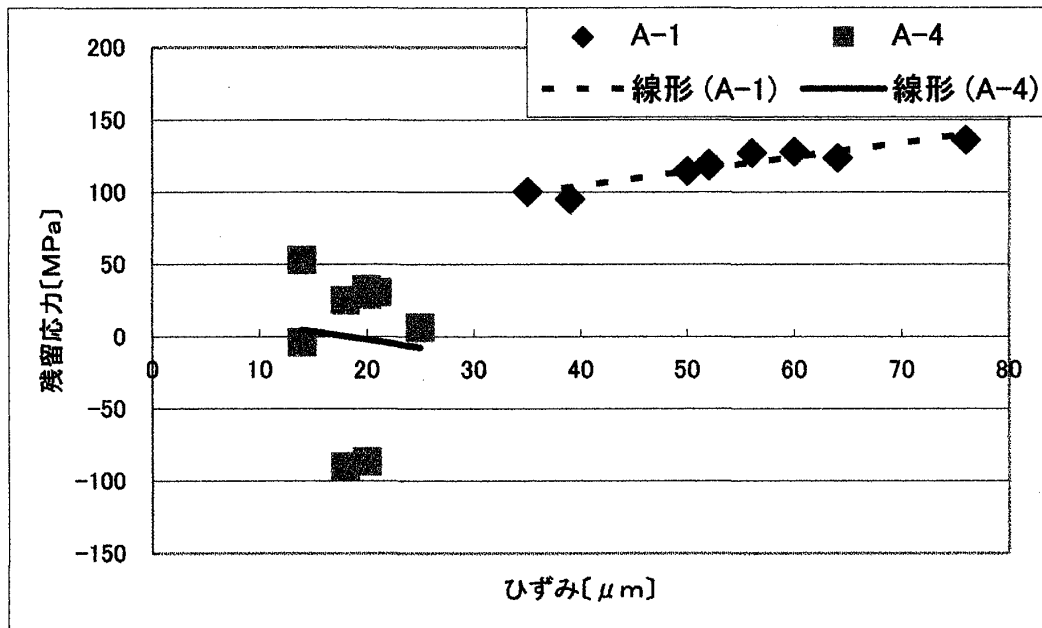


図8 ひずみと応力

#### 4. 結言

以上のことをまとめると

- ・接合部厚さが厚くなるほど、残留応力は高くなる。
- ・造形部分が増加するほど、残留応力は高くなる。
- ・残留応力に及ぼす影響は、試料形状よりも接合部厚さの方が大きい。
- ・試料中心部ほど残留応力は大きくなる。
- ・本実験では加工変質層が完全に除去されていない可能性がある。
- ・残留応力とひずみの相関係数は強弱があり、現状この原因は不明である。

#### 参考文献

- 1) 阿部史枝・小坂田宏造：塑性と加工（日本塑性加工学会誌），第42巻 第484号（2001.5），396
- 2) 中村謙太：レーザプロトタイプリングにより作製した金属モデルの残留応力，  
大阪大学基礎工学研究科修士論文（2003）
- 3) 田中義信他：精密工作法（上） 第2版，共立出版株式会社（2005）
- 4) 鈴木賢治他：残留応力のX線評価 基礎と応用，養賢堂（2006）

（平成19年3月22日受理）