

マイクロ固体フォトニクス研究会  
第12回 レーザー学会「ユビキタス・パワーレーザー」専門委員会

# マイクロチップレーザーを用いた レーザーピーンフォーミング



静岡県工業技術研究所  
浜松工業技術支援センター  
光科  
鷺坂 芳弘

## 静岡県工業技術研究所 浜松工業技術支援センター

3月8日 研究発表会(Web)開催 詳細はHPIにて



公設試験場：産業の振興、新産業の創出など、地域産業の技術力向上を目的に、企業の技術開発や課題解決を支援する地方自治体の試験研究機関

主な業務：技術相談、設備使用、依頼試験、研究開発、受託研究

〒431-2103 浜松市北区新都田一丁目3番3号(都田テクノポリス内)  
HP: <http://www.iri.pref.shizuoka.jp/hamamatsu/index.html>

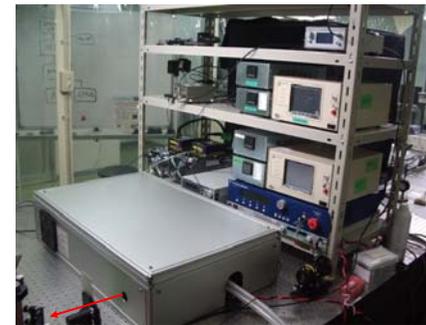
## 浜松工技センターのレーザー加工設備

各種レーザー装置を研究・設備使用・技術相談などに活用しています。

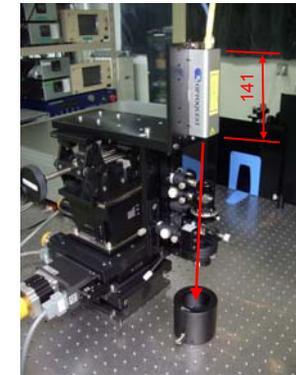


\*ただし県外は倍額

## レーザー試用プラットフォーム



増幅器付き据置き型発振器 (100mJ, 10Hz)



ハンドヘルド型発振器 (2.5mJ, 100Hz)

浜松工業技術支援センター内にサブナノ秒マイクロチップレーザーの試用プラットフォームを構築し、一般に無料で開放した

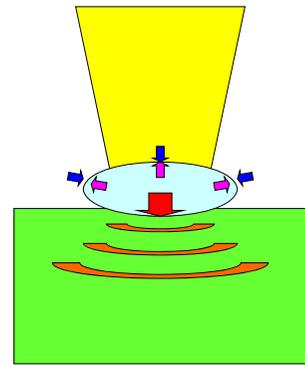


マイクロチップレーザーのアプリケーション開発を行うとともに、ユーザーの研究開発を支援している

# レーザー誘起衝撃波の発生原理

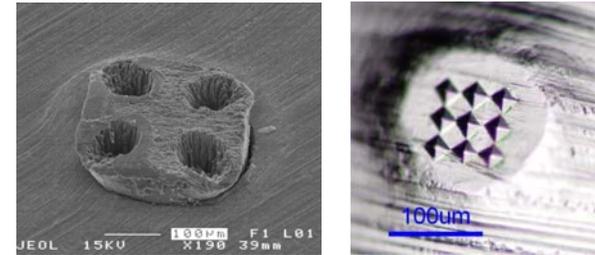
光で力を起こす

- ① 短パルスレーザーを集光照射
- ② 表面が瞬時にイオン化、除去され高圧のプラズマが発生(レーザーアブレーション)
- ③ プラズマが瞬間的に膨張するが雰囲気気の慣性力が膨張を妨げる
- ④ 照射された面に衝撃波が伝播する
- ⑤ 水中では水の慣性で膨張が抑制されるため大きな衝撃波が得られる



非接触の  
小さなハンマー打撃  
↓  
成形加工の  
成形力に応用

# レーザー誘起衝撃波の 塑性加工への応用



# ピーニングとフォーミング

	鋼球	パルスレーザー
バルク	<p>ショットピーニング</p>	<p>レーザーピーニング</p>
板	<p>ピーンフォーミング</p>	<p>レーザーピーンフォーミング</p>

# レーザーピーンフォーミングとは



Boeing 747-8

米、中、欧を中心にナノ秒レーザーでの研究が盛ん

米では航空機外板の成形法として実用化済、他は微細部品を対象として開発されている



F/A-18



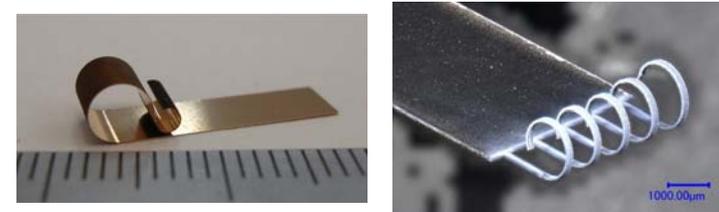
F-22

- 非接触、金型レス  
⇒ 金型が作れない大型部品に適する
- プログラムと照射条件で様々な形状に対応  
⇒ 多品種少量生産、一品物や試作品の加工
- 逐次成形でスプリングバックフリー  
⇒ 薄板、バネ材、緩やかな曲げに適する
- 力学的作用に基づく ⇒ 硬い材料ほど加工しにくい
- 熱によらない加工 ⇒ 熱影響小、熱伝導率に無関係
- 加工時間が長い
- 加工パラメータが非常に多い

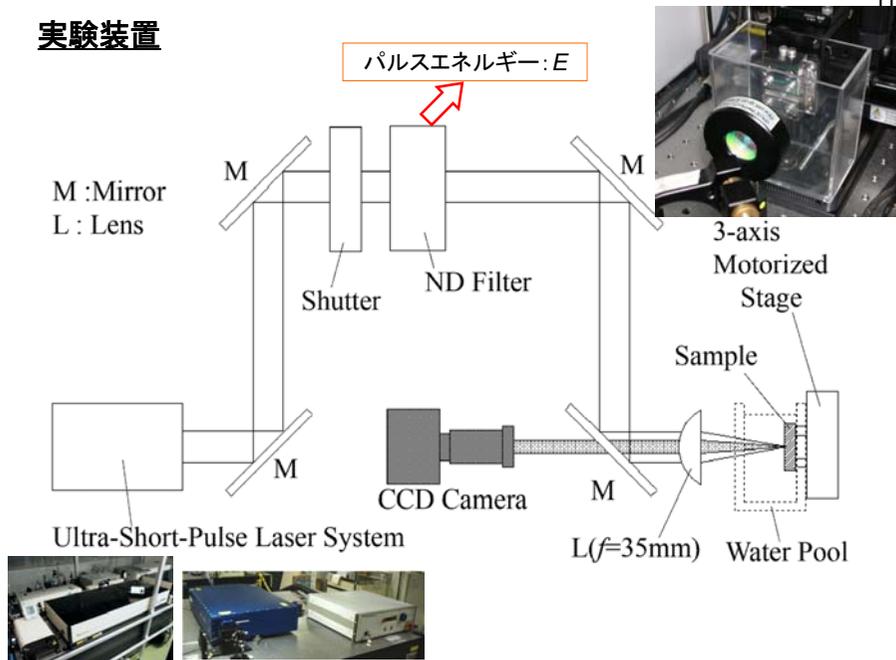
マイクロチップレーザーのレーザーピーンフォーミングへの適用を検討

## 超短パルスレーザーによるレーザーピーンフォーミング

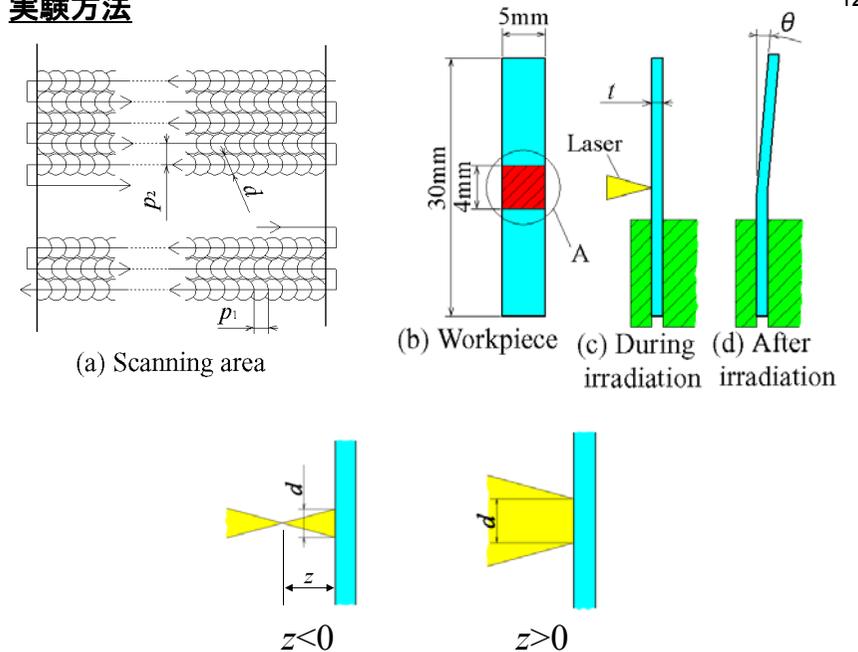
— フェムト秒、ピコ秒レーザーでの板曲げ加工 —



### 実験装置

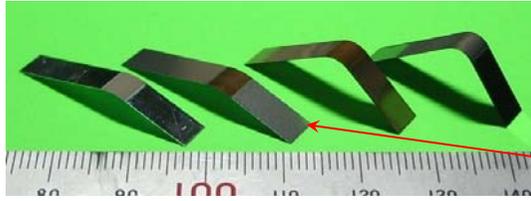


### 実験方法



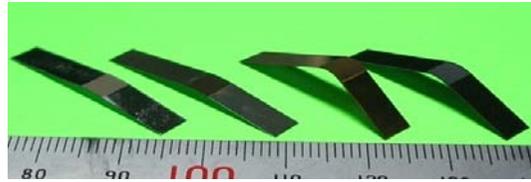
## フェムト秒、ピコ秒レーザーピーンフォーミング

13



Ti-Sapphire fsレーザー:  
波長 800nm パルス幅 80fs  
パルスエネルギー 400μJ  
スポット径 Φ0.04  
吸収層なし 空气中

パルス幅が短い分、硬い材料にも適用できた



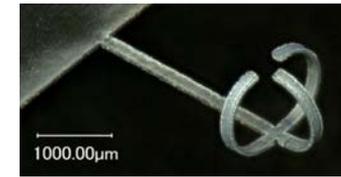
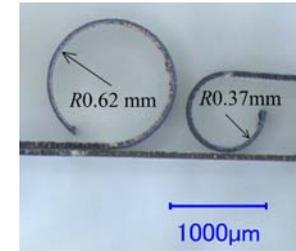
psレーザー:  
波長 1064nm パルス幅 10ps  
パルスエネルギー 150μJ  
スポット径 Φ0.04  
吸収層なし 空气中

左より純アルミ( $t=0.1$ ), SUS304, リン青銅, 純チタン( $t=0.05$ )

0.1mm以下の箔材にしか使えないが、スプリングバックが抑制できることから、微細部品の曲げ加工への展開を検討した

## 微細加工の試み

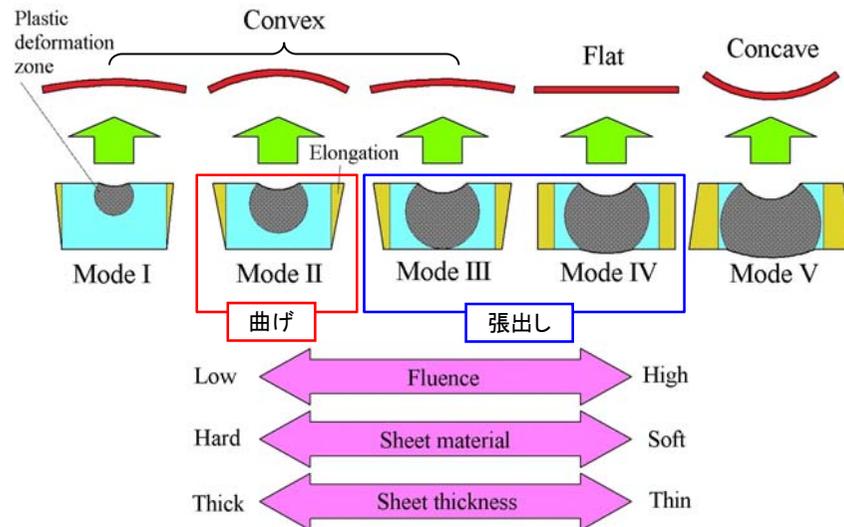
14



純チタン( $t=0.05$ )の加工事例

## レーザーピーンフォーミングの変形モード

15

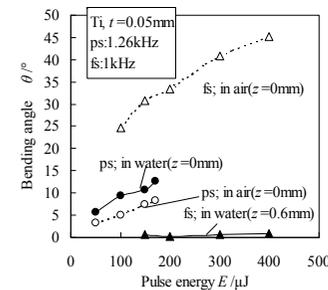


超短パルスレーザーでは塑性変形域が浅すぎて用途に限界がある

## パルス幅と雰囲気の影響

16

nsレーザーでは水中が有利だが、パルス幅によって傾向が変化する可能性がある。そこで純チタンについて空気中と水中でfs, psの曲げ角を比較

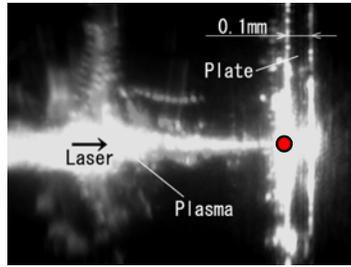


パルスエネルギーに対する曲げ角の変化(Ti)

	空気中	水中
ps		
fs		

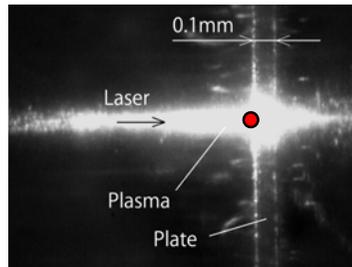
psでは水中、空気中は同程度、fsでは空気中が有利で水中では変形無し  
リン青銅、SUS304も同様の傾向

# パルス幅による水中プラズマの比較



fsレーザー(800nm,  $E=150\mu\text{m}$ )  
集光点の手前でほぼ水に吸収

衝撃波が弱い

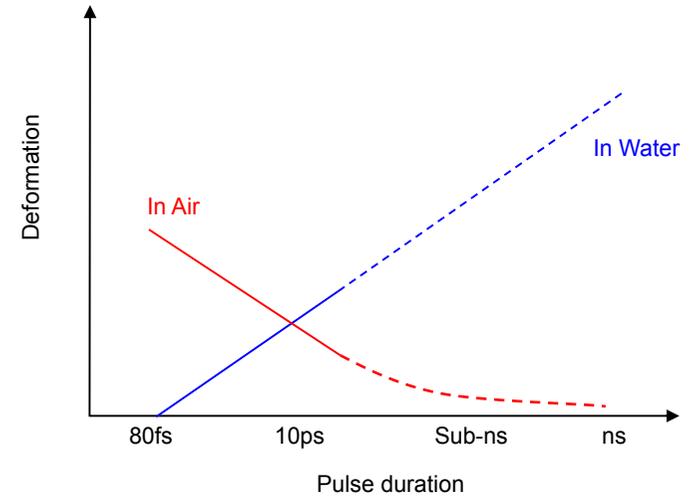


psレーザー(1064nm,  $E=150\mu\text{m}$ )  
集光点ではまだプラズマを生じるだけのエネルギー有り

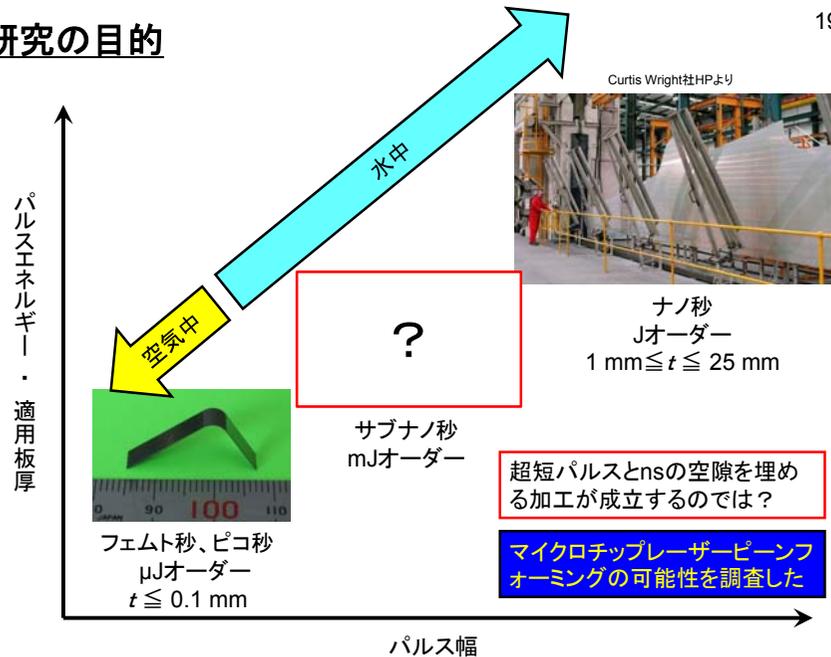
水の封じ込め効果により  
空気中と同程度の変形

# パルス幅と雰囲気による変形量の変化

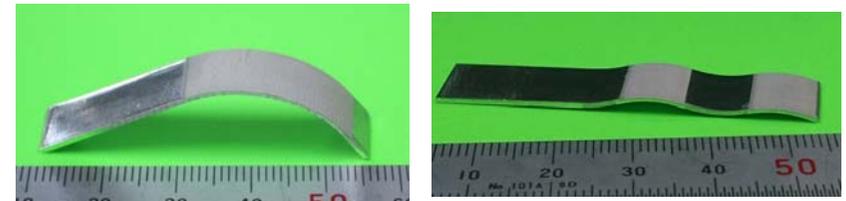
fs,psでの結果からの推測



# 研究の目的



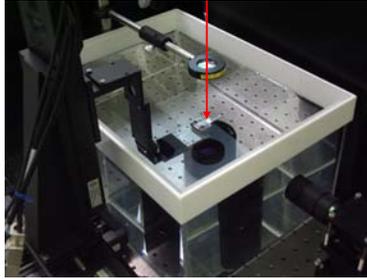
# マイクロチップレーザーによるレーザーピーンフォーミングの変形特性



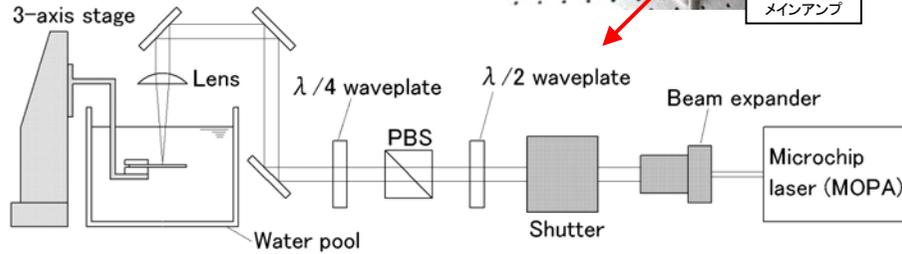
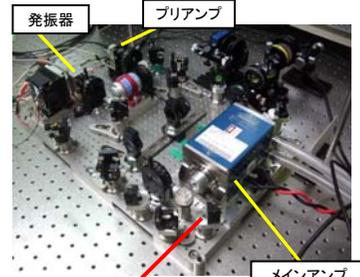
Ref. 鷺坂芳弘・川崎泰介・Vincent YAHIA・平等拓範・佐野雄二：  
塑性と加工(塑性加工学会論文誌), Vol.62, No.720 (2021), pp. 8-13.

## 実験装置

21

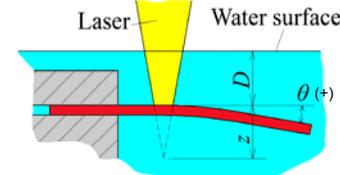


波長	パルス幅	発振周波数	パルスエネルギー $E$
1064 nm	700 ps	10 Hz	<100 mJ

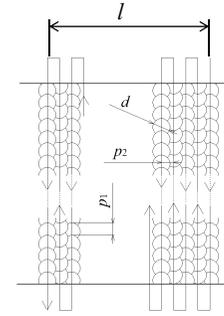
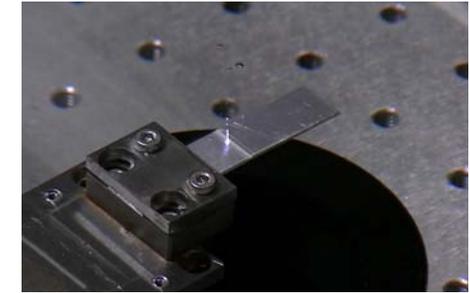


## 実験方法

22



実験方法



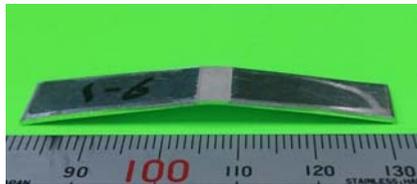
走査経路

試験片: 10 mm × 50 mm  
 材質: 純アルミ、純チタン、リン青銅、SUS304  
 レンズ: 焦点距離100mm単レンズ  
 走査領域長さ  $l$ : 4 mm  
 走査速度: 1 mm/s  
 走査ピッチ  $p_2$ : 0.1 mm

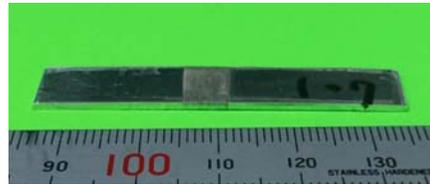
照射条件と加工対象を変えて曲げ加工を行い、走査後、曲げ角  $\theta$  を測定

## 雰囲気の影響

23



水中



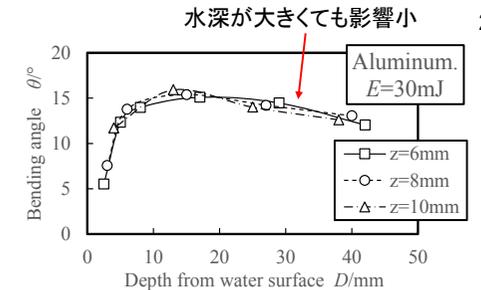
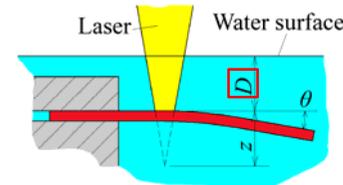
空気中+透明テープ

純アルミニウム  $t=1\text{mm}$  の例

水中で加工する方が成形効率、適用できる板厚で優れている

## 水深 $D$ の影響

24



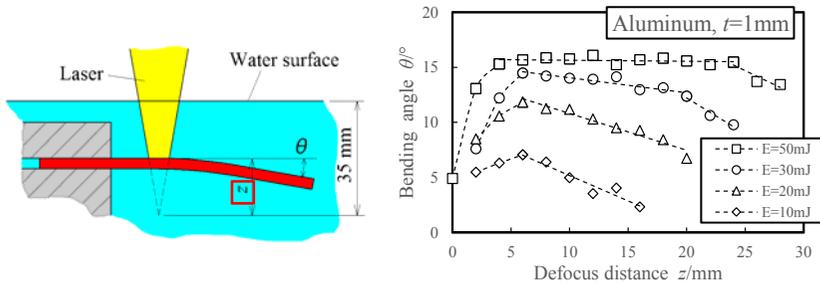
水深の影響



水滴の飛散



# パルスエネルギーとデフォーカスの影響



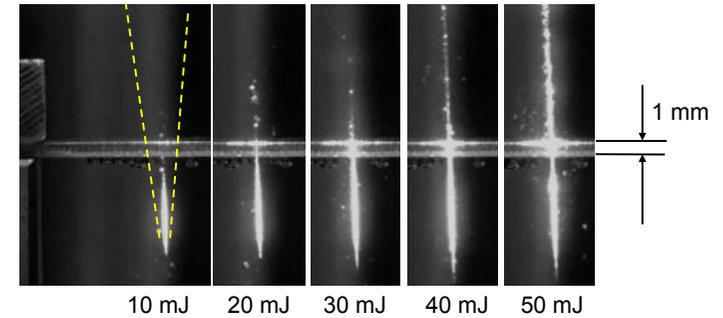
パルスエネルギー $E$ とデフォーカス量 $z$ による曲げ角の変化

デフォーカスするとフルエンスが下がるので、 $\theta$ は右下がりのグラフが予想された

- 集光して $z$ が小さくなると $\theta$ は減少する
- パルスエネルギーが高いほど右下がりの傾向が見られない  
⇒集光する意味が希薄になる
- 高 $E$ では $\theta$ がデフォーカスに対してかなり鈍感になる

# 水中プラズマの比較

1064nmの波長では集光点付近で水に吸収されてプラズマが発生する  
 $z=6mm$  での水中プラズマを比較

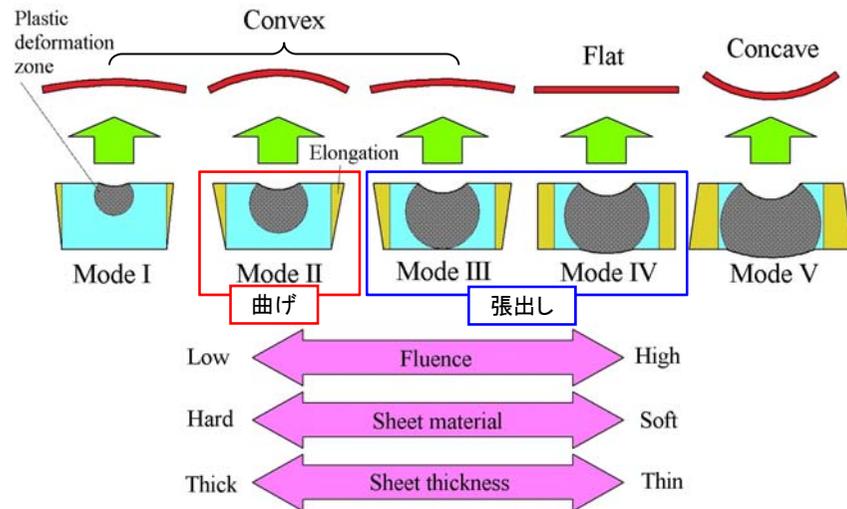


パルスエネルギーが上がると、照射面より上で光が顕著に吸収されている

集光しても照射面での実質的なパルスエネルギーはあまり上がっていない

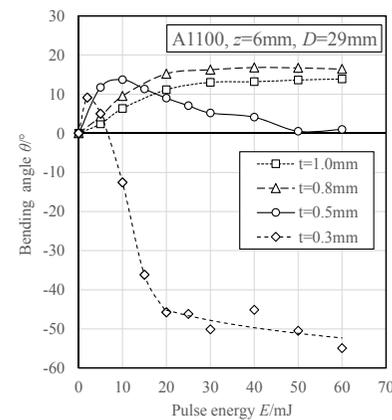
水中で透過率の高い波長の適用を検討する必要がある

# レーザーピーンフォーミングの変形モード

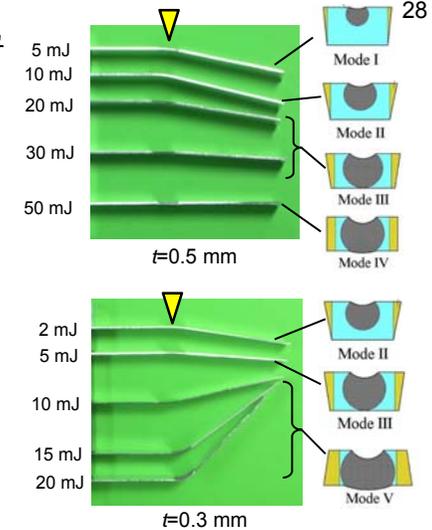


超短パルスレーザーでは確認できなかったモード変化を調査した

# 純アルミニウムのモード変化

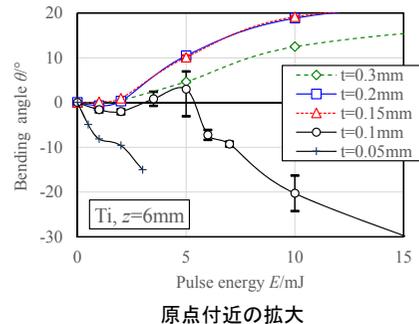
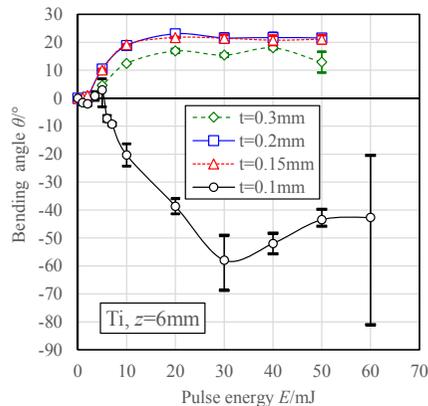


パルスエネルギー $E$ による曲げ角の変化



- パルスエネルギーと板厚に対する変形モードの変化が確認できた
- パルスエネルギーが30 mJ付近からは曲げ角の変化が停滞する傾向

## 純チタンのモード変化



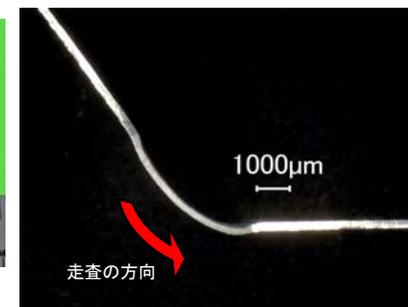
パルスエネルギーによる曲げ角の変化

- 純アルミほど明確ではないが、 $t=0.1$ でモードI~Vの変化が確認された。
- モードII~IVに相当する領域が極めて少ない。

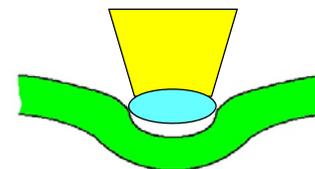
## Mode Vの変形



純アルミ  $t=0.3\text{mm}$   $E=30\text{mJ}$  の外観



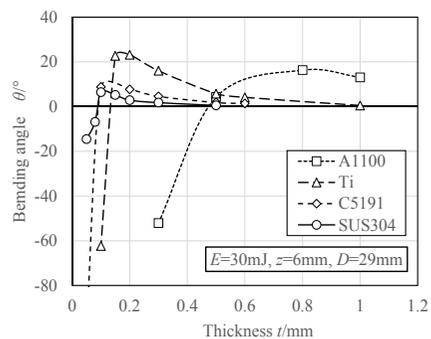
純アルミ  $t=0.3\text{mm}$   $E=30\text{mJ}$  の側面



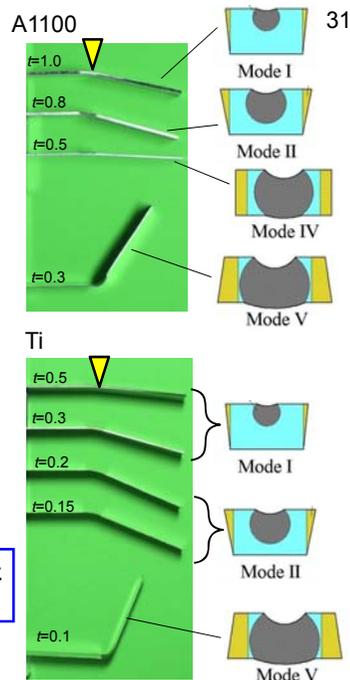
小さな張出しの蓄積による変形  
 ↓  
 曲率は場所によって不均一  
 曲げ角のばらつきも大きくなる

変形量は大きい品質に難あり

## 板厚による変形モードの変化

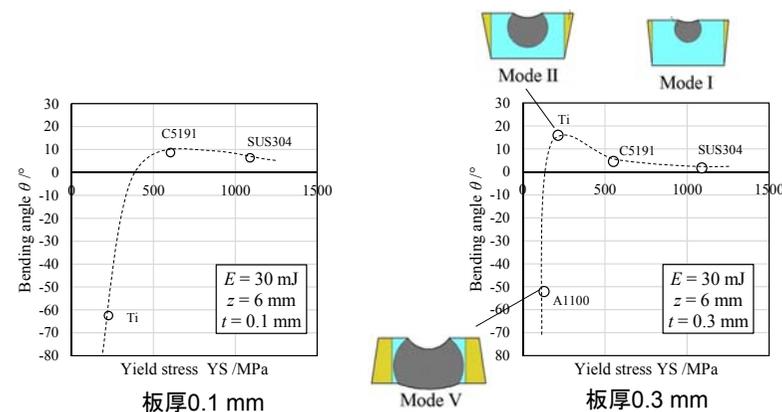


板厚に対する曲げ角の変化



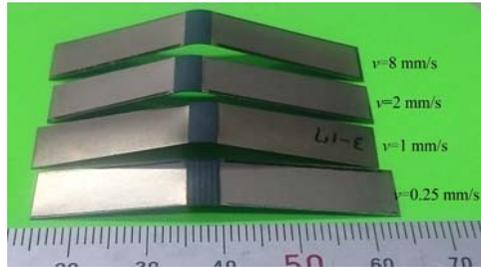
- 板厚についてMode I~Vの変化が確認できた
- fsとnsの苦手な板厚をカバーできている

## 降伏応力による変形モードの変化



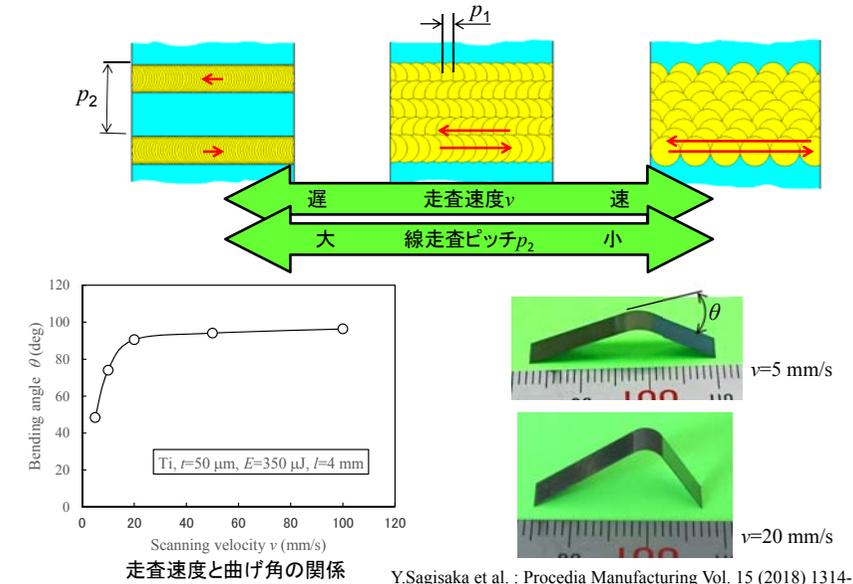
- 曲げ加工に望ましい加工条件はかなり把握できた
- Mode III, IVの領域が小さく張出し加工の条件設定が難しい

# レーザーピーンフォーミングにおける走査方法の影響



## フェムト秒レーザーでの走査条件の影響

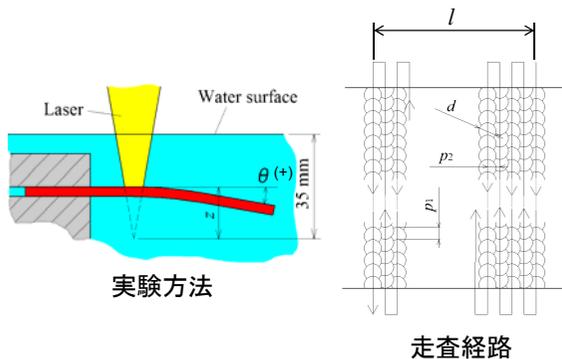
フェムト秒レーザーでは照射密度一定でも、走査方法で成形効率が変化した



## 実験方法

供試材料の機械的性質

材料	板厚 $t$ /mm	降伏応力 YS /MPa	引張強さ TS /MPa	加工硬化指数 n-value
A1100	0.8	142	144	0.008
Ti	0.15	566	648	0.06
	0.2	162	267	0.16

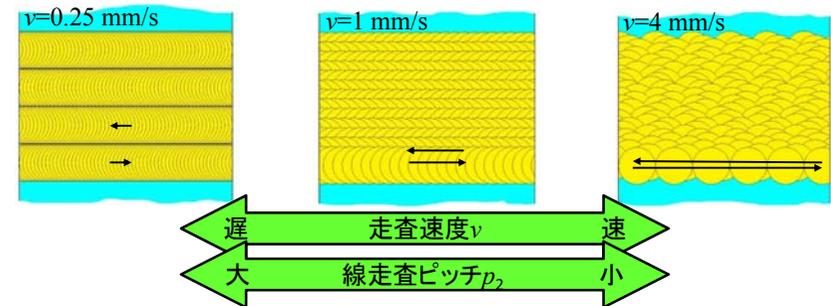


試験片: 10 mm × 50 mm  
 レンズ: 焦点距離100mm単レンズ  
 パルスエネルギー  $E$ : 30 mJ  
 デフォーカス量  $z$ : 6 mm  
 照射痕直径  $d$ : 0.4 mm  
 走査領域長さ  $l$ : 4 mm

走査速度  $v$  で  $p_1$ 、  
 走査プログラムで  $p_2$  を  
 変更して走査後、 $\theta$  を測定

## 走査条件

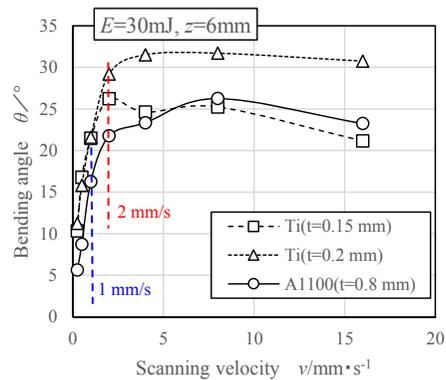
パルス照射密度が常に一定となるよう走査経路を設定



$v$ (mm/s)	$p_1$ (mm)	$p_2$ (mm)	走査回数 $n$
0.25	0.025	0.4	11
0.5	0.05	0.2	21
1	0.1	0.1	41
2	0.2	0.05	81
4	0.4	0.025	161
8	0.8	0.0125	321
16	1.6	0.0063	641

従来

## 実験結果



走査方法に対する曲げ角の変化

$v$ が  $2 \text{ mm/s}$  を境に、以下で成形効率は急減し、  
以上では変化が小さくなる

従来の  $1 \text{ mm/s}$  より高速走査した方が良い

37

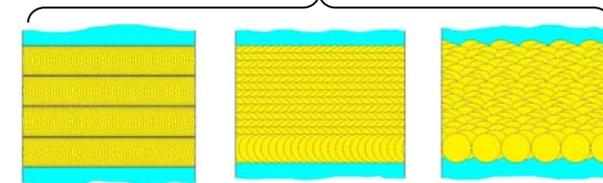
## 実験結果

加工度の指標としてカバレッジ  $C_V$  が用いられることが多い

$$C_V = \frac{A_L \cdot N}{A} \times 100\%$$

$A_L$ : スポット面積  
 $N$ : 照射パルス数  
 $A$ : 走査面の面積

本報では全ての走査条件で  $C_V$  は  $1257\%$  一定

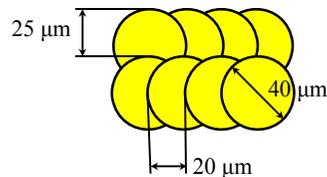
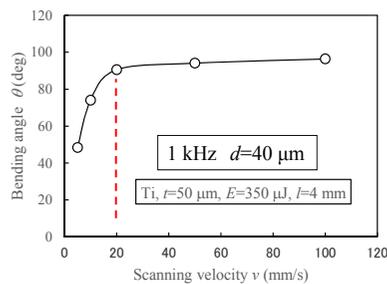


本法においては変形量はカバレッジのみによっては決定されない

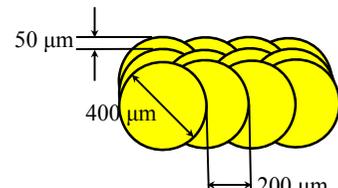
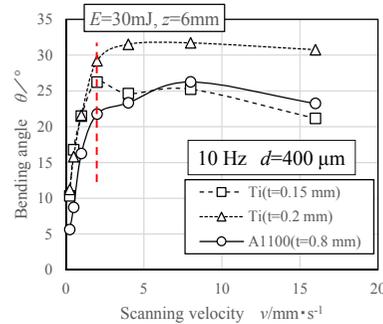
照射痕の配置の仕方が成形性に大きく影響している

38

## fsレーザーの結果との比較



fsレーザーの場合



サブナノ秒レーザーの場合

走査方向の照射ピッチ  $p_1$  を照射痕直径の  $1/2$  以上にするのが望ましい

39

## まとめ

- サブナノ秒マイクロチップレーザーを用いたレーザーピーンフォーミングを提案し、板曲げ加工に適用した。
- 本法によって、超短パルスレーザーとナノ秒レーザーがカバーできていなかった板厚領域の加工が可能となった。
- 本法では超短パルスでは見られなかった多彩な変形モードが実現できた。しかし、張出し加工に好都合なモードIII~IVは出現する領域が限定的であった。
- 本法では走査方法も成形効率を左右するパラメータであることが確認された。

## 謝辞

本研究は総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の一環として実施したものです。

40