

レーザーマーカを使ったグラフィットシートの加工

第43回天文学に関する技術シンポジウム

2024年1月19日

国立天文台先端技術センター
システム設計グループ 熱構造設計チーム

清水 莉沙

本発表の目次

レーザーマーカースのすすめ

- レーザーマーカースとは
- レーザーマーカースの方式
- 国立天文台にあるレーザーマーカース
- こんなことができます
- 加工作業の流れ
- レーザー波長と加工性

グラファイトシートを加工する

- グラファイトシートの加工の課題
- ファイバーレーザー (20W)でのカット
- レーザーダイオード (3.5 W)でのカット
- CO₂レーザー (30 W)でのカット
- まとめ

レーザーマーカーとは

レーザー光を金属や樹脂などに照射して表面状態を変化させて刻印を行う加工機



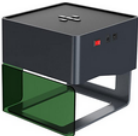
創新テック社 HSG-Z4030
30 W CO₂レーザー



Smart DIYs社 LM110F
20 Wファイバーレーザー

レーザーマーカのハードルが低くなっている

「レーザー彫刻機」の検索結果：1,013件
1～40件を表示
表示順：
標準



SEIHI 彫刻機 レーザー彫刻機 ミニ卓上レーザー彫刻機 小型レーザー彫刻機 刻印機 レーザー刻印機 ミニレーザー刻印機 レーザーカッター レーザー彫刻機 スマホ対応 アプリコント...

工具セット 👑 1位

★【高精度、高精細な彫刻】高い精度の450nmレーザーを採用する**レーザー彫刻機**は、寿命が10,000+時間と評価されているレーザーを搭載します。レーザー光の細さは約0.05mmですから、手彫りでは実現不可能な小さな文字や細かい線など...

¥20,898

[Amazon]SEIHI SHOP年中無休

ショッピングへ行く



レーザー彫刻機 刻印機 DEWALLIE 1600mw DIY道具 高速度 高安定性 家庭用 軽量 小型 耐久 刻印 彫刻切断機 windows/Mac対応 iOS/Android...

工具セット 👑 10位 Amazon.co.jp

彫刻の精度は、スマートフォンに比べて、刻印されたパターンがより良くなっています。また、彫刻機（ミニレーザー彫刻機）を介して、スマートフォンから直接彫刻することが可能です。

¥19,888

[Amazon]/バンキユイマオイ

ショッピングへ行く



レーザー彫刻機 LaserPecker 2 0.05mm高精度 2k彫刻解像度 diy (台座を付き)

その他の特徴

？【進化版】従来のレーザー彫刻機とは異なり、レーザー技術を採用し、同様の精度で、0.05mmレーザースポットで彫刻することが可能です。

¥138,999

[Amazon]LaserPecker公式ストア

ショッピングへ行く



Genmitsu JinSoku 0.05mm高精度 2k彫刻解像度 diy 彫刻機 微細圧縮スポット スマホ操作可能 金属対応 家庭用レーザー加工機 木材切断 レーザーカッター LightBurn、LaserPecker対応

その他の工具

マシンのパッシブエアアシスト設計も、くっきりとしたきれいな彫刻結果を実現するのに役立ちます。エクスペリエンスの向上: JinSoku LC-40 **レーザー彫刻機**のストックリミットスイッチ...

¥41,999

[Amazon]SOUZOU

ショッピングへ行く



レーザー彫刻機, LaserPecker 2 小型レーザー刻印機 0.05mm高精度 2k彫刻解像度 36000mm/min 日本語アプリ操作 レーザー刻印機 diy

¥109,999

[Amazon]LaserPecker公式ストア

ショッピングへ行く

手が出る価格帯に！？

https://kakaku.com/search_results/%83%8C%81%5B%83U%81%5B%92%A4%8D%8F%8B%40/

CAINZ DIY Style

DIY Style とは

キッズワークショップ ホームセンター

デジタル機械の紹介

※ご利用時間には準備・片付けの時間も含まれます。ご予約の際は時間に余裕をもってお申込みください。
 ※ご予約が続いている場合は、作業が終了していてもご利用を終了して頂きます。

3Dプリンター MF-1100

PLAを積み重ねて立体の形を造る新しい機械です。

造形可能サイズ

ズ：200×200×170mm

3Dプリンター 4VINCINI 1.0 Pro 3in1

造形可能サイズ

ズ：200×190×200mm

レーザー加工機

レーザーでカットしたり、彫刻したりできる機械です。

※加工できない素材もありますので、詳しくは係員にお尋ねください。

最大加工エリア：720×430mm

ご利用の注意事項

30分350円

(PLA樹脂代込)

ご予約の際は基本的に1時間単位でお願いします

※このサービスはお客様にデータの作成から出力までを行ってまいります。STLファイルでデータをお持ちください。

➤ サービス詳細を見る (PDF形式)

➤ 利用マニュアルを見る (PDF形式)

ご利用の注意事項

30分350円

(PLA樹脂代込)

ご予約の際は基本的に1時間単位でお願いします

※このサービスはお客様にデータの作成から出力までを行ってまいります。STLファイルでデータをお持ちください。

➤ 利用マニュアルを見る (PDF形式)

ご利用の注意事項

30分2,500円 (時間予約制)

※このサービスはお客様にデータの作成から出力までを行ってまいります。

➤ サービス詳細を見る (PDF形式)

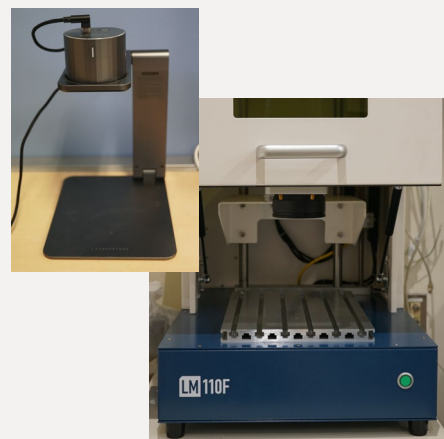
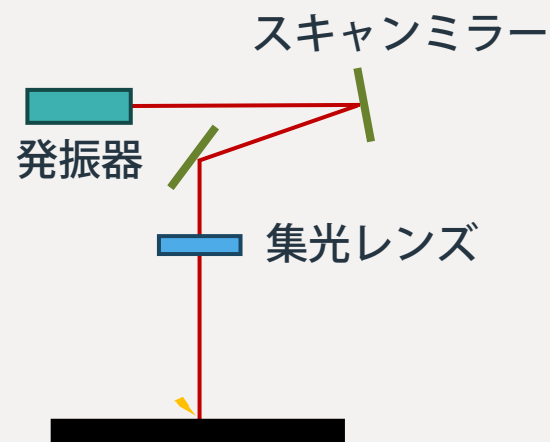
➤ 操作マニュアルを見る (PDF形式)

➤ レーザー加工できる素材・できない素材 (PDF形式)

➤ レーザー加工できる素材・できない素材：鶴ヶ島店のみ (PDF形式)

レーザーマーカーク方式

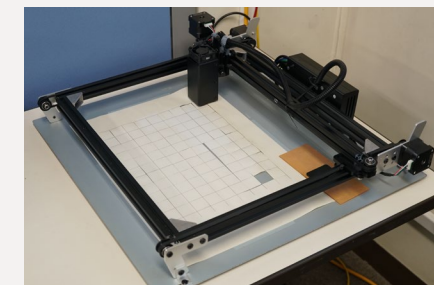
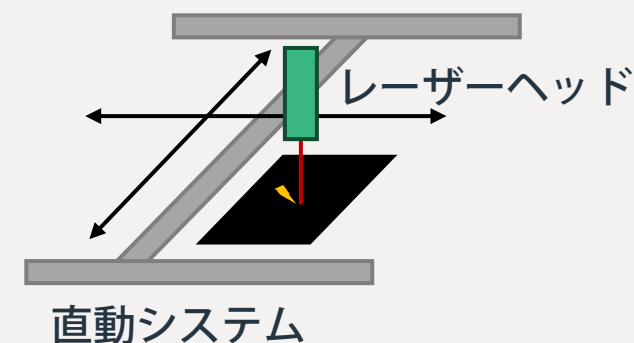
ガルバノスキャナー方式



反射鏡を用いてレーザー光を任意の方向に制御し
レーザー光をピンポイントで照射する

- ヘッドの位置が固定されていてコンパクト
- 加工の時間が短く済む
- × エリア外側に行くにつれて像が歪む
- × 加工可能エリアが狭い

XYプロッター方式

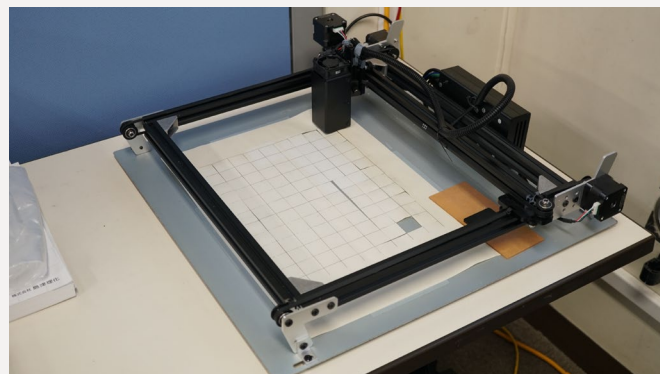


ヘッド自体をXY方向に動作しレーザー照射する

- × 加工機のサイズが大きくなる
- × ヘッドが動くため加工に時間がかかる
- エリア依存の像の歪みが小さい
- 加工可能エリアが広い

国立天文台にあるレーザーマーカ

• SMART DIYs社（山梨県） FABOOL laser mini



加工エリア
レーザー方式
対応加工方式
対応ファイル
電源
サイズ
重さ

300×230 mm

445 nmレーザーダイオード 3.5 W

ベクター加工、ラスター加工

png、jpeg、jpg、bmp、gif、tiff、tif、svg、dxf

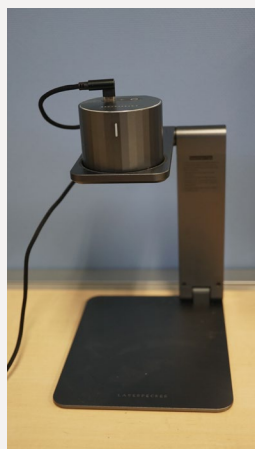
家庭用電源 AC100V～240 V

540×485×140 mm(ケーブル含まず)

約3 kg

国内メーカー
10万円程度

• LaserPacker L1 Pro



加工エリア
レーザー方式
対応
電源
サイズ
重さ

100×100 mm

405nmレーザーダイオード 0.5 W

スマートフォンアプリで操作

Type-C 5 V, 2 A

65×61×53 mm(本体のみ)

約860 g (本体のみ)

Amazonで買える
5～7万円程度

国立天文台にあるレーザーマーカ

国内メーカー
業務用



- SMART DIYS社（山梨県） LM110F

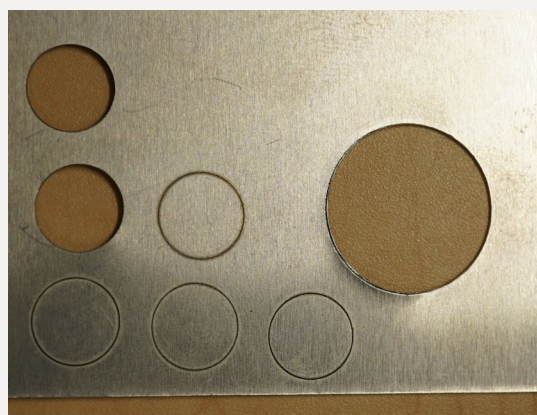
レーザー方式	ファイバーレーザー 1064 nm 20 W	
スポット径	約0.05 mm（理論値）	
周波数	30～60 Khz	1～4000 Khz
パルス幅	120 ns	2～500 ns
最高速度	≤4000 mm/s	
繰り返し精度	±0.03 mm	
サイズ	幅425 × 奥行500 × 高さ644 mm（突起物含まず）	
加工エリア	幅110 × 奥行110 mm	
加工できる素材の厚さ（高さ）	最大140 mm	
素材設置可能エリア	幅365 × 奥行398 mm	
電源	AC 100 V 50/60 Hz	
消費電力	275 W	
重量	約50 kg	
対応画像形式	ビットマップファイル：bmp / jpg / jpeg / gif / tga / png / tif / tiff ベクターファイル：ai (ver.8) / plt / dxf / jpc / svg / nc / q / qbr / bot / dst	

こんなことができます



木材への刻印

Smart DIYs社 FABOOL Laser Mini
3.5 Wレーザーダイオード
出力によって濃さを調整できる



アルミニウムの抜き加工

Smart DIYs社 LM110F
20 Wファイバーレーザー
出力や加工回数次第で
薄い金属であればカット可能



色紙への刻印

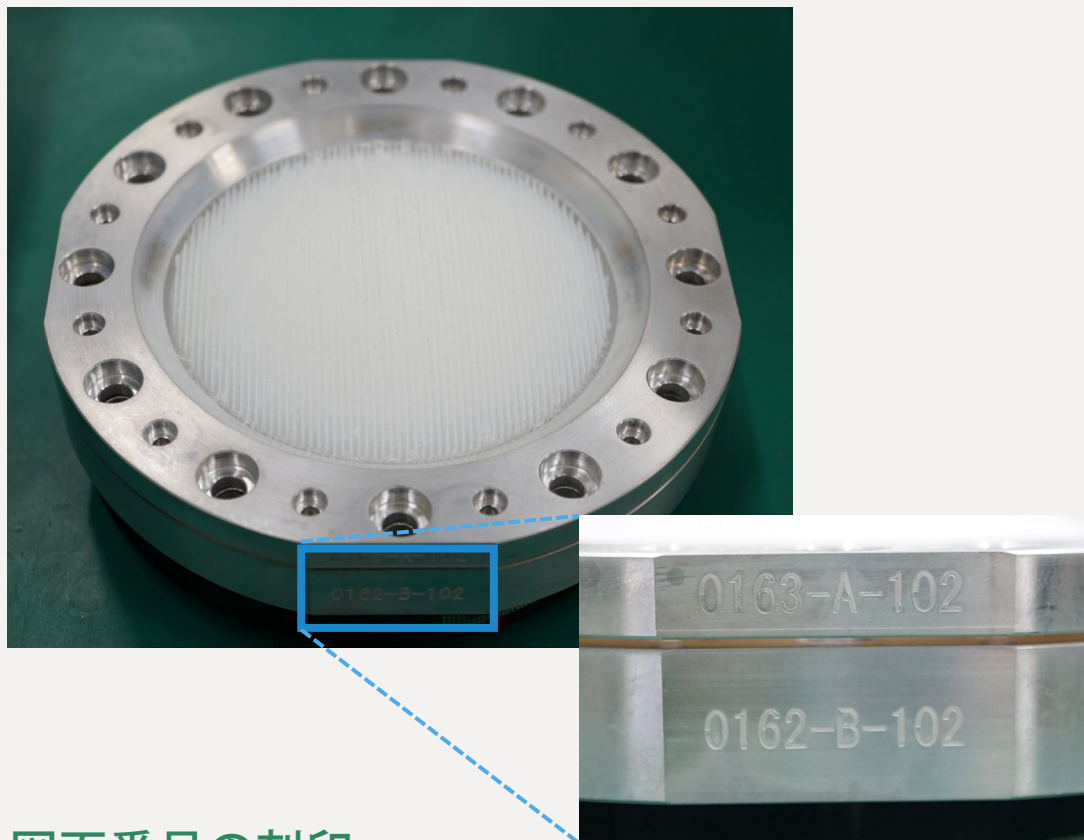
Smart DIYs社 FABOOL Laser Mini
3.5 Wレーザーダイオード
出力を弱めて表層だけを削る



アルマイトへのイラスト刻印

Smart DIYs社 LM110F
20 Wファイバーレーザー
SVG、DXG形式のベクターデータほか
JPEG、PNG形式の画像データが使用可能
(アプリケーションによる)

こんなことができます 実用例 Smart DIYs社 LM110Fを使用



図面番号の刻印

- 図面情報を加工品に記載することで作業効率のアップやトレーサビリティの確保が可能

材質：A6061-T6



材質：紙（黒）

マスクの製作

- 繰り返し精度に優れるので同じサイズ、同じ形状にできる
- 複雑な形状も可能
- 条件出しさえ出来れば一枚当たり数秒で加工できる



マスクを通して星形にした光を重ね合わせた様子

こんなことができるらしいです



<https://www.smartdiys.com/blog/lm110m-color-marking/>

カラーマーキング

ステンレスやチタン表面に酸化被膜を作り、
被膜と金属面との光の干渉により発色を制御
塗料ではないなので色が落ちない

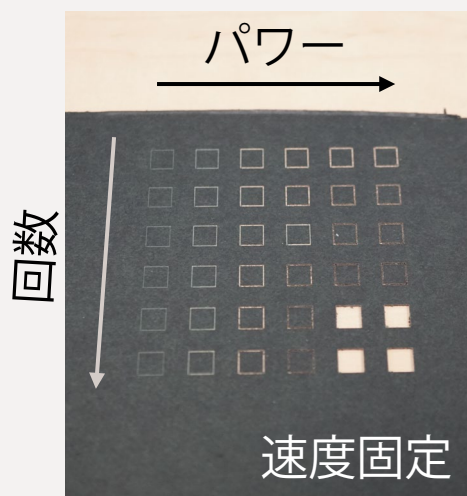


<https://ystaste.com/3d-fiber-laser/>

3Dマーキング

レーザー光の焦点をZ軸方向に移動
曲面形状にマーキング

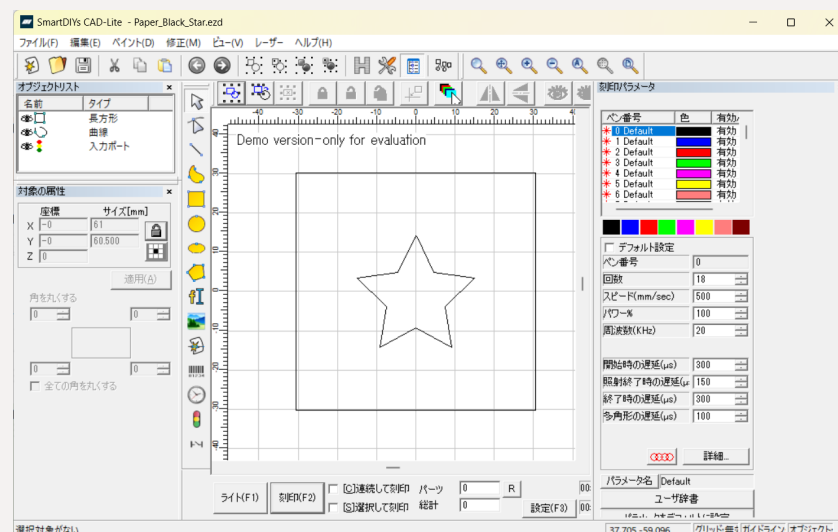
加工作業の流れ (LM110Fを例にして)



条件だし

加工パラメータを決定する
マトリクスを作るとわかりやすい

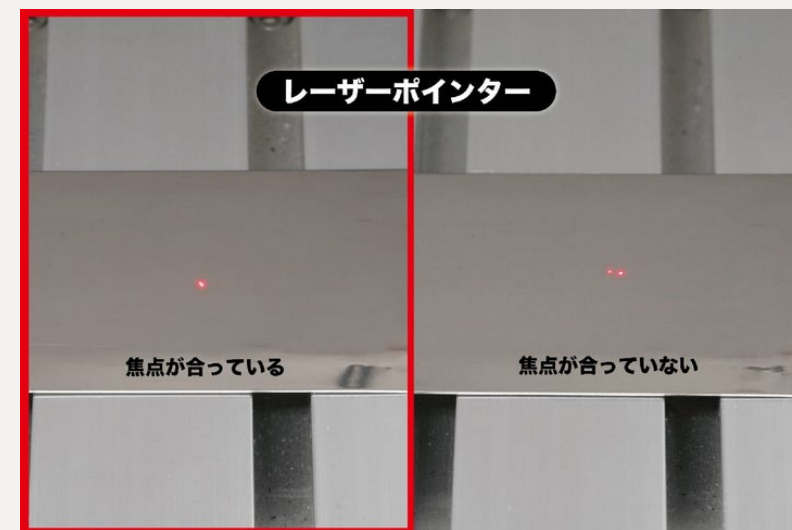
速度：レーザーの速さ(mm/sec)
パワー：最大出力に対するパワー(%)
回数：レーザーを走らせる回数(回)



データの作成

付属ソフトでパスを作成

LM110Fでは
画像やベクターファイルも
扱うことが出来る



<https://www.smartdiys.com/blog/lm110f-engraving/>

焦点あわせ

加工対象を置いて、光源と加工面の
位置を指定の距離にする

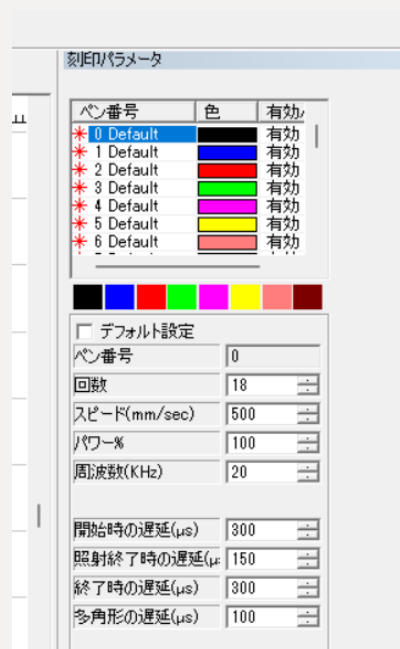
LM110Fでは2つのレーザー光を合わせる
定規で合わせるものもある

加工作業の流れ (LM110Fを例にして)



位置あわせ

ソフトにはレーザーが走る位置を表示させる機能がついている
加工したい位置にレーザーが来るかを確認する



パラメータ入力

条件だしで決めた
パラメータを
データに入力する



加工

加工ソフトを介して
レーザーの照射を行う

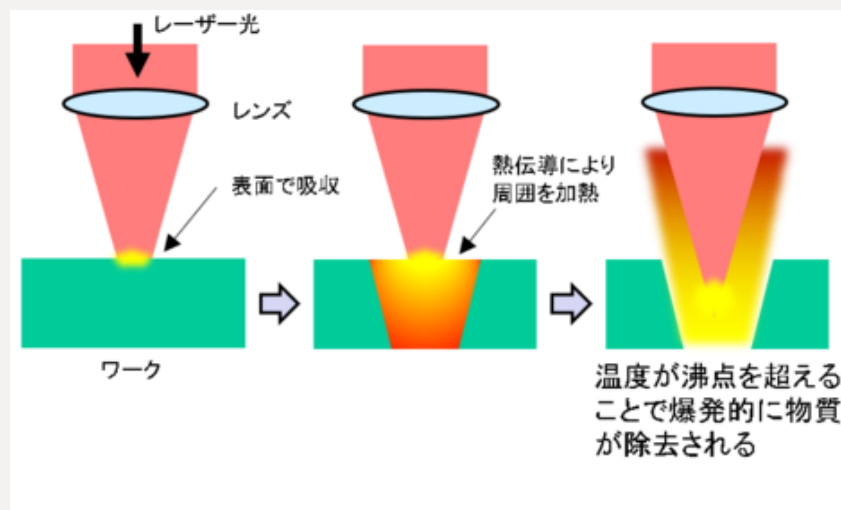
注意しなくてはいけないこと

- レーザーを使用するので、安全性については要確認
- 薄物を加工するときはステージに傷がつかないようにする
- 加工可能な材料は限られる

レーザー加工の原理

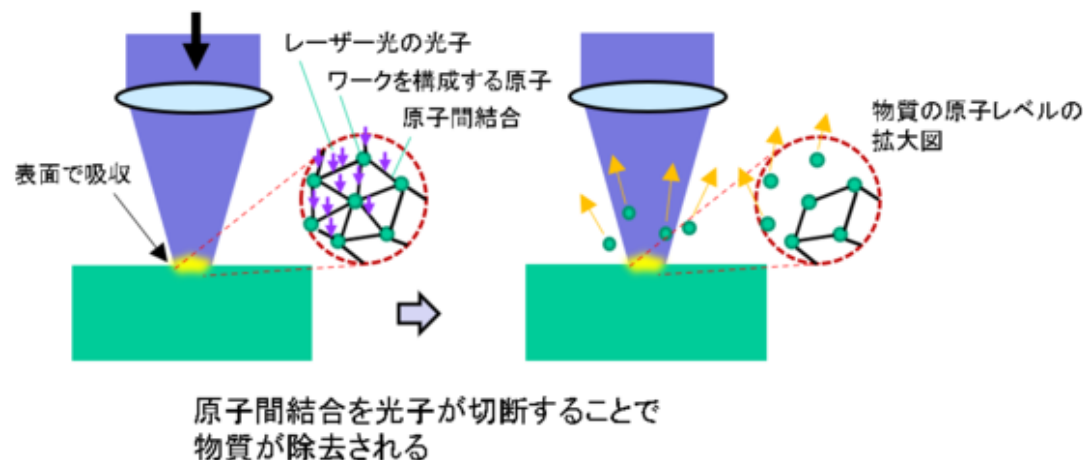
熱加工

- 光子エネルギーが小さい長波長（ファイバー、 CO_2 ）
- 材料にレーザー光が吸収されることで温度が上昇
材料を溶融することで除去する加工



アブレーション加工

- 光子エネルギーが大きい短波長（紫外線）
- 分子や原子の結合を切断し照射部表面が瞬間的に分解・飛散する非熱的加工



https://www.uht.co.jp/ja/technical/machine/post_4.html

熱加工プロセスの理論式 レーザーハンドブック 34.2.1より

半無限体上でビーム半径 α [m] の一様強度分布のレーザー光が吸収された場合のビーム中心軸(z軸)上での温度分布

$$T_{z,t} = \frac{2P}{\pi\alpha^2} \frac{\sqrt{\chi t}}{K} \left(\operatorname{ierfc} \frac{z}{2\sqrt{\chi t}} - \operatorname{ierfc} \frac{\sqrt{z^2 + \alpha^2}}{2\sqrt{\chi t}} \right)$$

$$\operatorname{ierfc} x = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2} - x \cdot \operatorname{erfc} x$$

$$\operatorname{erfc} x = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy$$

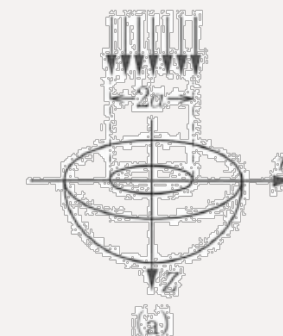


図 31-2 半無限体熱伝導モデルと温度上昇

ただし、 P : 吸収されたレーザーパワー[J/s], χ : 熱拡散率 = $K/\rho \cdot C$ [m^2/s], K : 熱伝導率 [$\text{J}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$],
 ρ : 密度[g/m^3], C : 比熱 [$\text{J}/\text{g} \cdot \text{K}$], t : レーザー照射時間 [s], α : ビーム半径 [m]

材料表面での温度は、 $z = 0$ であるので

$$T_{0,t} = \frac{2P}{\pi\alpha^2} \frac{\sqrt{\chi t}}{K} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} - \operatorname{ierfc} \frac{\alpha}{2\sqrt{\chi t}} \right)$$

この温度が加工対象の沸点を超えれば加工可能
つまり…

レーザー照射時間が十分長い場合($t \rightarrow \infty$)

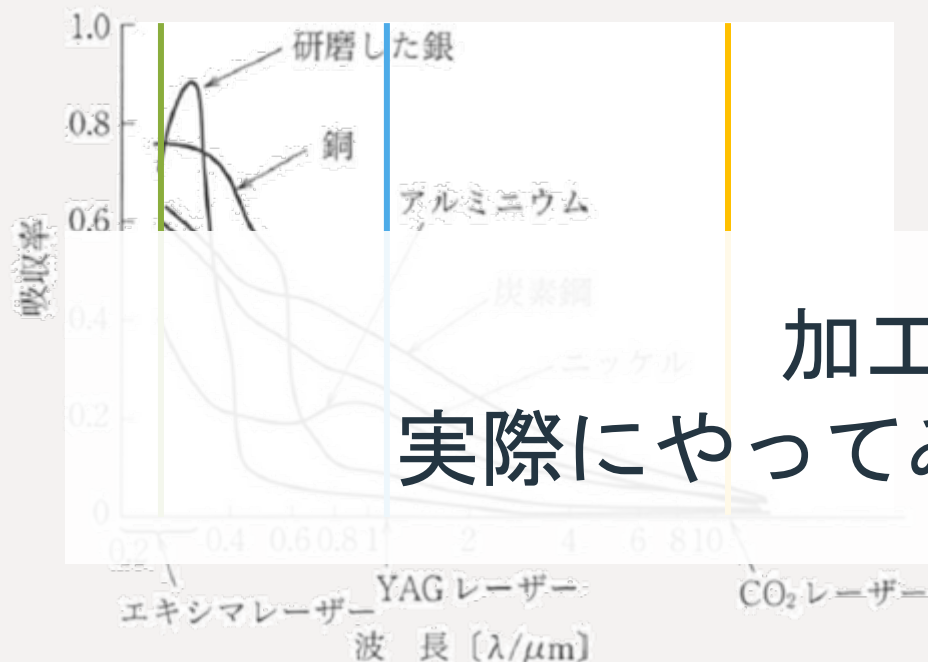
$$T_{0,\infty} = \frac{P}{\pi K \alpha}$$

- ・ レーザーのパワーが強い
- ・ ビーム半径が小さい
- ・ 加工対象がレーザー光を吸収しやすい
- ・ 加工対象の熱伝導率が悪い

装置

加工対象

レーザー波長と加工性



主要な金属の対波長吸収率

<https://optipedia.info/laser/handbook/laser-handbook-8th-section/34-2/>

主に使われるレーザー

UVレーザー

: 355 nm

YAG/ファイバーレーザー

: 1064 nm

CO₂レーザー

: 9.2 - 10.8 μm

加工対象の吸収率によって、最適なレーザーが異なる

加工条件次第なので
実際にやってみないことにはわからない

	ファイバー	CO ₂
研磨した銀	○	×
銅	○	×
アルミニウム	×	○
炭素鋼	×	○
ニッケル	×	○
鉄	×	○
銅	○	×
アクリル	×	○
紙	○	○
木	○	○

<https://www.smartdiys.com/blog/laser-marker/>

グラフィットシートを加工する

グラファイト

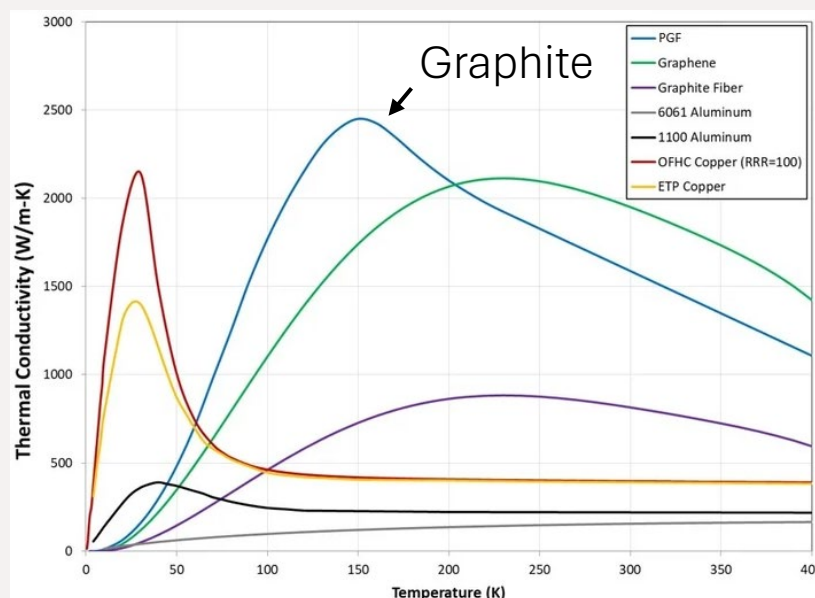


シャープペンシルの
芯の材料

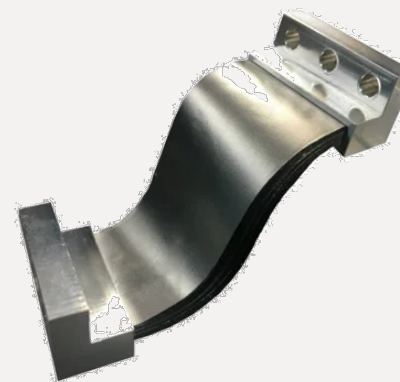
<https://hands.net/goods/4902505409011/>

グラファイト：炭素からなる元素鉱物

熱伝導率が非常に良い、柔軟性に優れる、軽量
→熱パスに良い材料（特に宇宙機）



<https://www.techapps.com/thermal-straps>
温度に対する各材料の熱伝導率



グラファイトストラップ (TAI社)

<https://www.techapps.com/blog/tai-introduces-the-x-series-the-worlds-only-pgs-and-graphene-based-thermal-strap-standard-product-line>

グラファイトの熱パスを作るにあたって…
面外方向熱伝導率や、接触抵抗など
分かっていないパラメータも多い

設計上の調査のため 実際にグラファイト
ストラップを作成して性能測定することになった

グラファイトの加工の課題



栃木カネカ製

宇宙用グラファイトシート 40 μm

グラファイトシート寸法：196mmx260mm



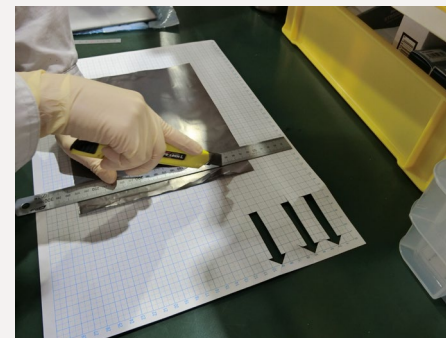
グラファイトを
シート状に切り
積層して使用する



シートを300枚ほど切る

技術営業さん

シートの加工はカッターで切る、が
おすすめです



薄いので破れたりする



カッターで切るのは確かに切りやすいが…
作成する量が多く、ばらつきもできる。穴あけも面倒…
→薄くて、同じ形状を大量に抜くならレーザーはどう！？

レーザーで切れますか？

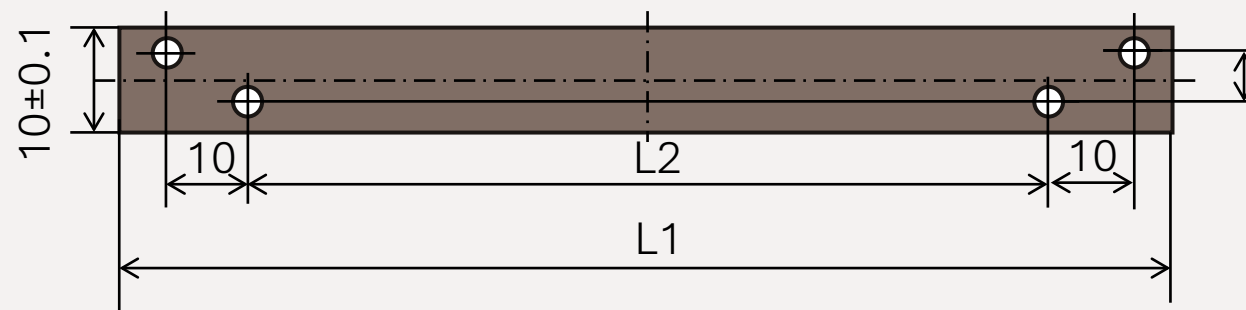


技術営業さん

グラファイトは熱伝導率が高いので
レーザー加工はできません

形状

- 幅 $10\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$
- 長さ 3種類 $\pm 0.2\text{ mm}$
- $\Phi 3.4\text{ mm}$ 穴 直径 $+0.1\text{ mm}$



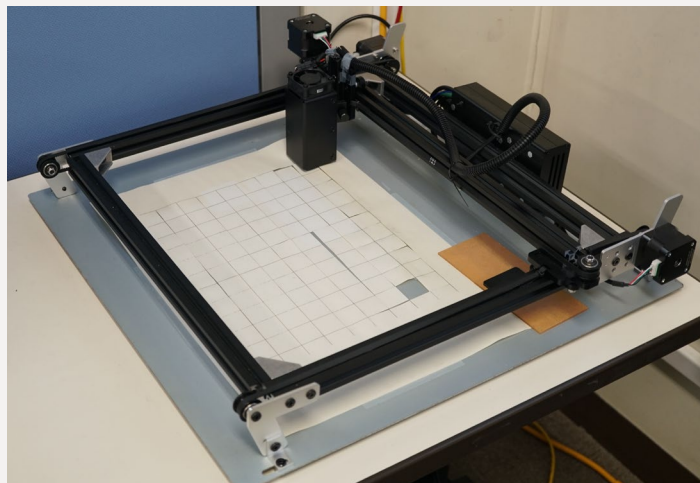
No	L1	L2
1	90 mm	$60 \pm 0.2\text{ mm}$
2	140 mm	$110 \pm 0.2\text{ mm}$
3	190 mm	$160 \pm 0.2\text{ mm}$

熱伝導率を測定するため、3種類の長さのシートを製作する

試したレーザー加工機



Smart DIYs社 LM110F
(国立天文台)



Smart DIYs社 FABOOL Laser Mini
(国立天文台)



創新テック社 HSG-Z4030
(宇宙科学研究所)

出力 レーザーマーカ 20 W

波長 ファイバーレーザー
(1064 nm)

エリア 狭い(110 mm x 110 mm)

出力 レーザーマーカ 3.5 W

波長 ダイオードレーザー
(445 nm)

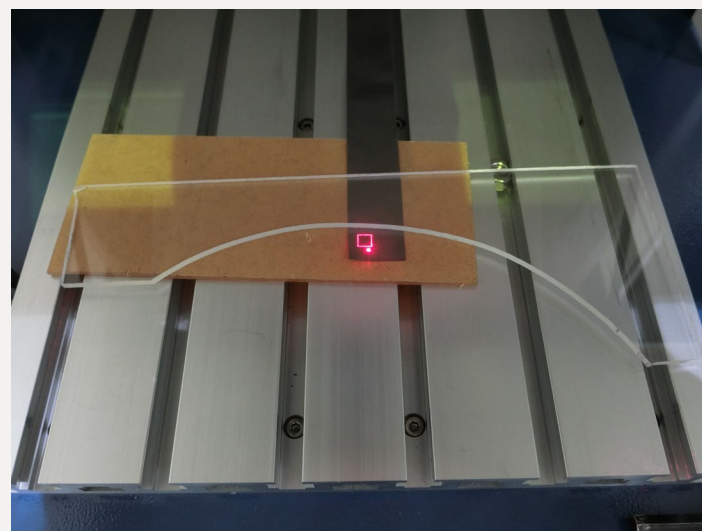
エリア 広い(300 mm x 230 mm)

出力 レーザー加工機 30 W

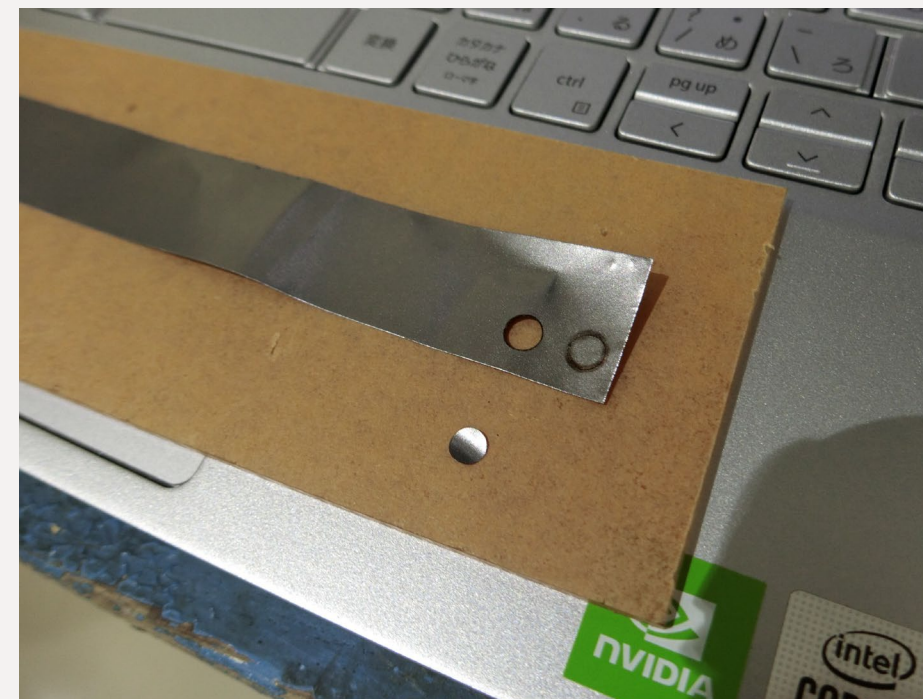
波長 CO₂
(10.6 μm)

エリア 広い(400 mm x 300 mm)

LM110F



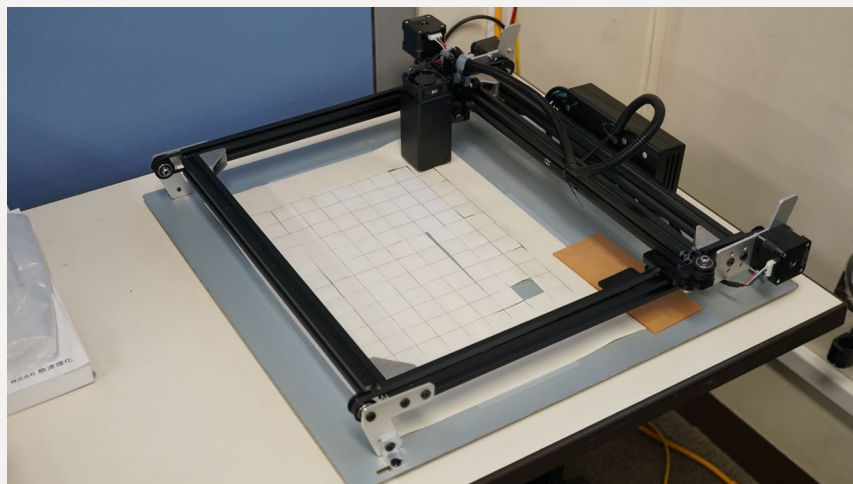
SMART DIYS社（山梨県） LM110F



1064 nm 20 W
 パワー 60 %
 スピード 1000 mm/sec
 回数 2回

切り落とすことが出来た○
 中心から離れると像の歪みが大きくなるが
 再現性がある

FABOOL Laser Mini



SMART DIYs社（山梨県） FABOOL laser mini

445 nm 3.5 W

パワー 100 %

スピード 1000 mm/min

全く跡が残らず×

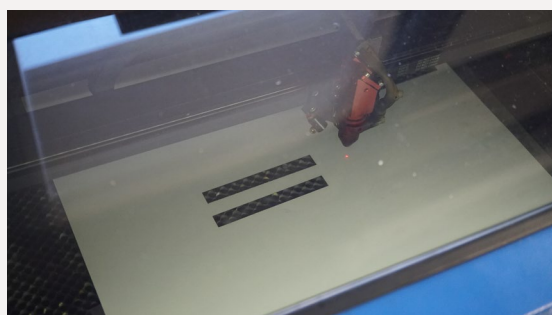
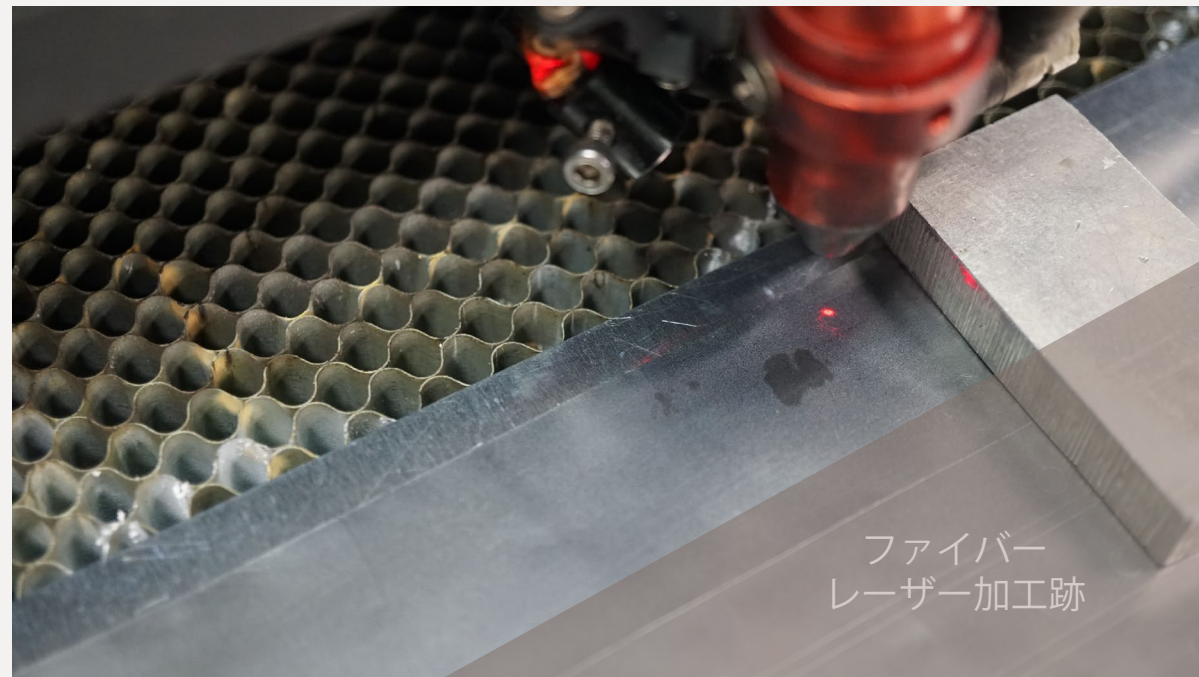


加工後

HSG-Z4030



宇宙研工作室にあるCO₂レーザー加工機



紙でのテスト加工では
精度も繰り返し精度も良好

設定値	実測値
10.0mm	9.8mm
10.4mm	9.94mm
90.0mm	89.70mm
90.4mm	90.01mm

10.6 μ m 30 W
パワー 100 %
スピード 10 mm/sec
回数 1回

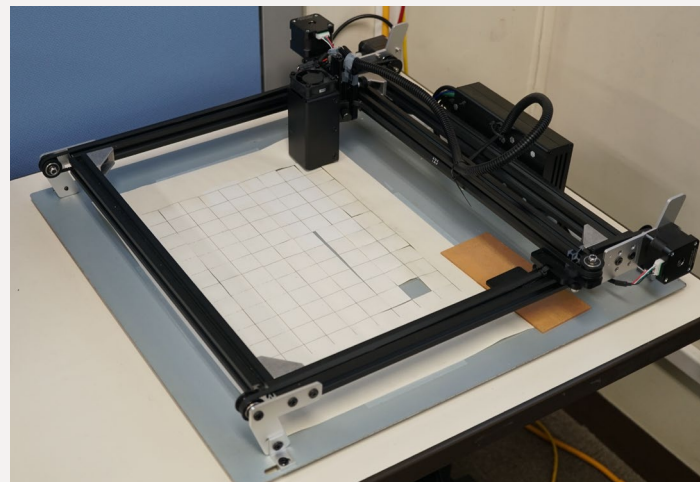
全く跡が残らず×

レーザーマーカーを使ったグラファイトシートの加工

結果



Smart DIYs社 LM110F
(国立天文台)



Smart DIYs社 FABOOL Laser Mini
(国立天文台)



創新テック社 HSG-Z4030
(宇宙科学研究所)

エリア △一番小さいもののみ

歪み ×

繰り返し ○

加工可否 ○

○

-

-

×

○

○

○

×

LM110Fでの加工の課題 (1/2)

- そもそも、彫刻用で精度が求められる加工用途ではない。精度はでるのか？ガルバノ方式であるため、場所によって像の歪みがある。指定した寸法と仕上がりの寸法の乖離がある。



最初		目標値	測定	
			左端	右端
上	幅	10.0	10.377	10.458
中	幅	10.0	10.400	10.401
下	幅	10.0	10.402	10.322



- 紙に出力し、光学顕微鏡による寸法測定で確認したところ、寸法をそのまま入力すると0.5 mmほど大きく加工された
- 1回の加工で、3枚に切るにとどめ、それぞれ目標値になるようにデータ上の寸法を調整した（出たとこ勝負）
- 寸法0.1 mm以内に入れることができた
繰り返し精度も良好だった

調整後		目標値	測定	
			左端	右端
上	幅	10.0	9.940	9.953
中	幅	10.0	9.940	9.934
下	幅	10.0	9.965	10.033

紙でのテスト加工における実測寸法（光学顕微鏡で測定）

LM110Fでの加工の課題 (2/2)

- グラファイトが薄く、浮いてしまい
焦点がずれてしまう
- 加工した断面に粉末が付いているが何か？
(エタノールでワイプするととれる)



- 装置の加工エリアが110 mm x 110 mmと小さい
全ての短冊を切ることができない

3Dプリンタで抑え治具を
作り、浮かないようにした

不明。
グラファイト積層体に含まれる
樹脂が焦げたものだと考えている
(特許情報より)

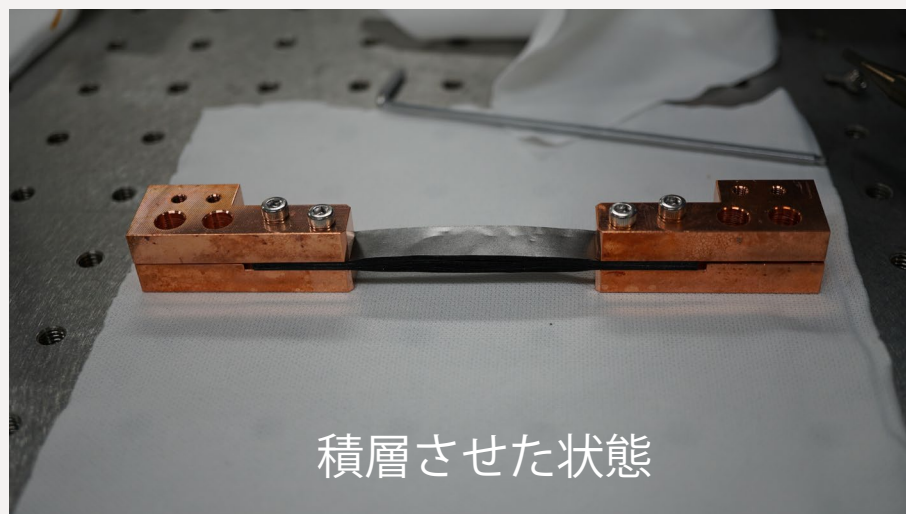
この装置では難しい。

→試験の供試体は打ち抜き加工で製作することに

…が、打ち抜き加工品が届くまで時間がある
供試体をLM110Fで作成することになった



グラフィイトに対しての加工結果



		目標値	測定		
			中央	左端	右端
上	幅	10.0	9.960		
	穴間隔	60.0	59.954		
	穴の位置A	2.6		2.528	2.613
	穴の位置B	10.0		10.062	9.945
中	幅	10.0	9.920		
	穴間隔	60.0	59.970		
	穴の位置A	2.60		2.690	2.563
	穴の位置B	10.0		10.012	10.009
下	幅	10.0	9.980		
	穴間隔	60.0	60.050		
	穴の位置A	2.60		2.693	2.618
	穴の位置B	10.0		9.902	9.995

グラフィイトシートの加工後寸法（光学顕微鏡で測定）

グラフィイトでも、紙で出した条件で
目標の寸法で加工できた

なぜCO₂レーザーで加工できなかったか？

放射率表 - 非金属 -

物質名	波長に対する放射率 (=吸収率)					備考
	約1 μm	約1.6 μm	約2.4 μm	3~5 μm	8~14 μm	
アルミナ Al ₂ O ₃	0.30	0.30	0.30	0.40	0.60	
レンガ 赤	0.80	0.80	0.80	0.93	0.90	
レンガ 白耐火	0.3	0.35			0.80	
レンガ シリカ	0.55	0.60			0.80	
レンガ シリマナイト	0.60	0.60			0.60	
マグネサイト(炭酸マグネシウム鉱)			0.60			
アスベスト	0.90	0.90		0.90	0.85	
アスファルト	0.85	0.85		0.90	0.85	
玄武岩				0.7	0.95	
カーボン すず	0.95	0.95		0.95	0.95	
カーボン グラファイト	0.85	0.85	0.85	0.85	0.80	
ガラス 厚さ3mm				0.96/5 μ		
炭化珪素				0.9	0.9	

<https://www.fintech.co.jp/etc-data/housharitsu.htm>

- 出力も30 Wと十分あった
- ネットに載っている吸収率一覧を見る限りCO₂レーザー波長に対するグラファイトの吸収率は低くない
 - 8~14 μmと広い範囲の情報
→10 μmのところだけ局所に吸収率低い？
→文献探し中
 - 表面をコーティングしていて反射する？
→メーカーに問い合わせ：コーティングはしていない
 - メーカーグラファイトシートの輻射率測定結果 0.3
- 熱拡散率に波長依存ある？

まとめ

- レーザーマーカは、簡単に文字や刻印を入れられる加工装置
- グラファイトの加工もファイバーレーザーであれば可能

みんなもつかおう！
レーザーマーカ―

参考文献

- レーザー学会編：レーザーハンドブック第2版(Web版), 平成17年4月25日発行
- カネカ. 森川 尚展、「加工グラファイト積層体、その製造方法および加工グラファイト積層体用レーザー切断装置」, 特許公報(B2) 6896873、2021年6月30日
<https://ipforce.jp/patent-jp-B9-6896873>