

# 波面及び時間チャープ制御による非線形レーザー加工の最適化

米田研究室

吉田侃生

## 1. 背景・目的

小口径の穴あけ加工において超短パルスレーザーは短いパルス幅による高いピーク強度によって熱影響のない波長以下の加工が可能であるが、小口径という点においては電子ビームリソグラフィやイオンビームなどより優れた加工法が存在する[1]ため、より高い付加価値のある加工法がレーザー加工には求められている。

そこで注目されているのが非回折ビームを使用した高アスペクト比加工である。

しかしアキシコンレンズにガウシアンビームを入射するとアキシコンレンズの外側と内側では強度が異なるため集光スポットでの強度が一様ではなく、加工時にテーパのかかったものになってしまう可能性がある。また透明物質への加工では材料の分散を受けるためパルスの形状が材料内部を通過する距離が多くなるほど変化しピーク強度が低下しまう。

そこで本研究では超短パルスレーザーの空間、時間双方における波の制御を行い高いアスペクト比加工を目標とした。具体的にはこのようなスペックの超短波パルスレーザーに、空間モードの制御として、形状可変ミラーと波面センサーを用いた波面制御システムを用い、時間パルス波形については、パルス圧縮部の回折格子光学系を用いて制御するシステムの構築を目指した。

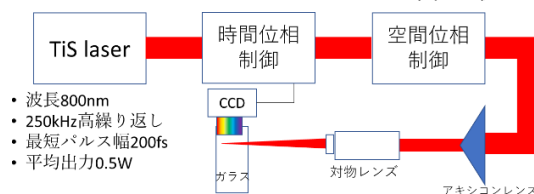


図 1,目標とする位相制御システムを搭載した非回折ビーム加工システム

## 2. 原理

### 2.1 補償光学

補償光学は主に地上の天体望遠鏡などでつかわれている技術である。地上から宇宙を観測すると大気の揺らぎによって本来持っている解像力を発揮することができない。そこで大気のゆらぎを測定しリアルタイムで補正をする補償光学が用いられることで地上の望遠鏡でも解像力を高めることを可能とした。

補償光学システムは波面の状態を測定する波面センサー、表面の形状を変形できる可変形状ミラー、センサーからの情報に基づいてリアルタイムで波面の補正を行うことができるソフトウェアの3つから構成される。[2]

### 2.2 自己位相変調

自己位相変調(Self Phase Modulation:SPM)は非線形光学媒質中を伝搬する際にパルスの強度に起因して起こる屈折率変化によって位相変調を受ける現象である。

超短パルスレーザーのようなパルス幅の短いレーザーになるとピーク値は非常

に高くなり非線形効果が無視できなくなる。n を屈折率、 $n_0$  を線形屈折率、I を強度、 $n_2$  を非線形屈折率とすると

$$n = n_0 + n_2 I \quad (6)$$

と表される。[3]

非線形屈折率の効果でパルスの付近ピークでは屈折率が高くなり、裾の部分では屈折率が低くなる。その結果パルスは引き伸ばされ正のチャープを持つパルスになる。

### 3. 実験

#### 3.1 波面制御システムの評価

形状可変ミラーとシャックハルトマン型波面センサーを使用した波面補正システムを使用するには参照用に波面の整ったレーザーを記録する必要があるが超短パルスレーザーの波面は増幅器内で歪みが生じてしまうため、別の光源を用いて参照用の波面を記録する必要がある。ここでは実際に超短パルスレーザーの波面補正を行う前に波面の整った Green laser を用いてシステムがどのように動作するか確認を行った。

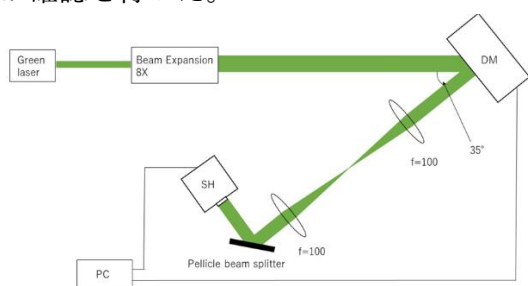


図 2.波面制御システム

#### 3.2. パルス波形制御の検証

超短パルスレーザーの圧縮部回折格子光学系の回折格子間隔を変化させることでパルス全体の分散を制御し波形制御を行った。このシステムを使用して分散を変

化させガラス内に集光した際の自己位相変調により発生する白色光 SPM を研磨された側面から観測しどのような変化が生じるかを検証した。

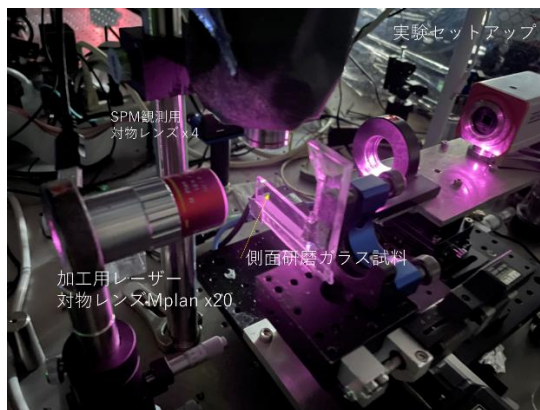


図 3,SPM 観測用セットアップ

### 4. 結果

#### 4.1 波面制御システムの評価

初めに波面の RMS 値 PV 値を 10 秒間測定しグラフにプロットした。初めに測定を行ったデータが紫色でプロットされたもので波面が全く安定していないことがわかった。システムを機能させるためには PV 値が 1um 以下かつ安定した波面が必要なためこの波面の状態では機能しないことがわかった。

この原因として考えられた空調などによる空気の擾乱や外部の振動を、システムの囲い作りと定盤を固定することで取り除いた。改善したセットアップで測定したデータが水色でプロットされたもので、波面は安定し PV 値が 1um 以下とシステムの動作条件を達成することができた。

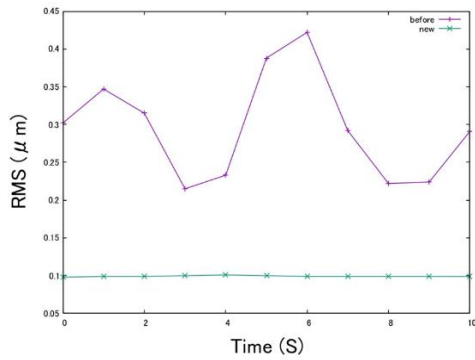


図 4, 時間経過による RMS の変化

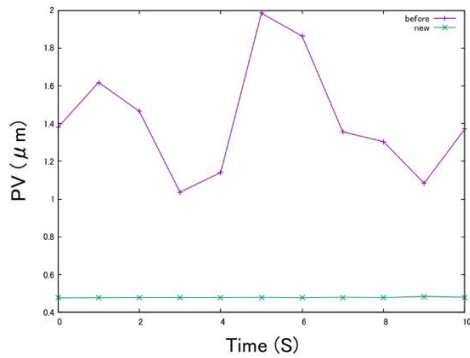


図 5, 時間経過による PV の変化

参照波の記録回数によってどの程度補正後の波面に変化が生じるか実験を行った。結果は波面の測定を行う回数を増やすことでよりフラットな波面を得ることができました。右の画像でわかるように補正前に比べてフラットになっている事がわかった。特に 50 回では参照はと同じ RMS 値で 0.1 $\mu\text{m}$  程度、すなわち  $\lambda/5$  まで補正可能であることが分かった。

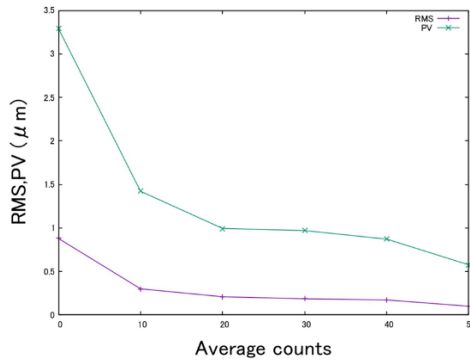


図 6. 平均回数の変化による RMS, PV 値の変化

#### 4.2 時間パルス波形制御

初めにアキシコンレンズを使う場合と使わない場合の SPM を比較したところアキシコンレンズを使わない場合 SPM の長さは 200 $\mu\text{m}$  であったのに対して使用した場合 500 $\mu\text{m}$  程度となり集光スポットが増加していることが確認できた。また強度分布を測定したところ強度分布にばらつきがあることが確認でき、光軸上に一定の強度を得るには位相制御が必要であることが再確認できた。

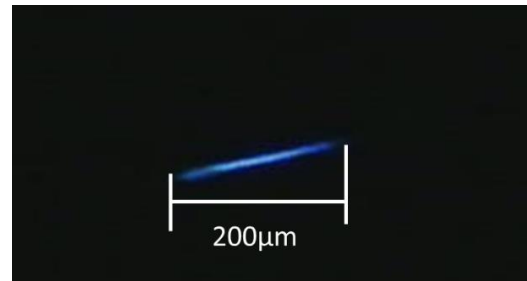


図 7, アキシコンなしの SPM

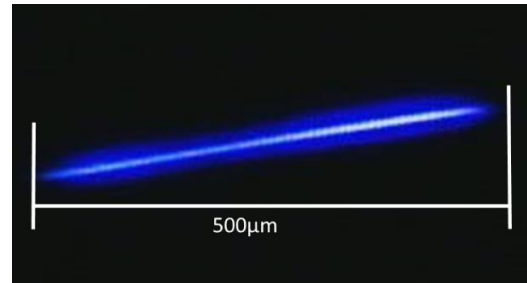


図 8, アキシコンありでの SPM

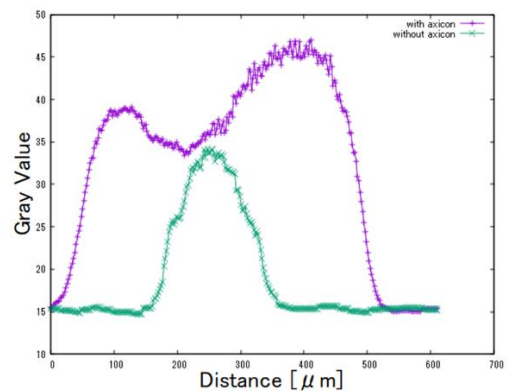


図 9, 強度分布の比較

次にもっともパルスが圧縮された回折格子間隔から負分散を持つように回折格子間隔を 0.5mm 移動させ、その強度を比較した。負分散を与えた場合ではガラス後方で分散無しの場合よりも発光強度が高くなり SPM が後方に移動したようになった。これはガラスの分散により短波長側の光が遅く進みガラス後方でパルスが圧縮されるためと考えられる。

この結果から前方では分散のないほうが SPM の発行に適していて、後方では負分散のものが適していることがわかり、ビーム全体で一様に分散をかけるのではなくビームの経方向に分散制御を行うことで適したビームが得られる可能性があることがわかった。

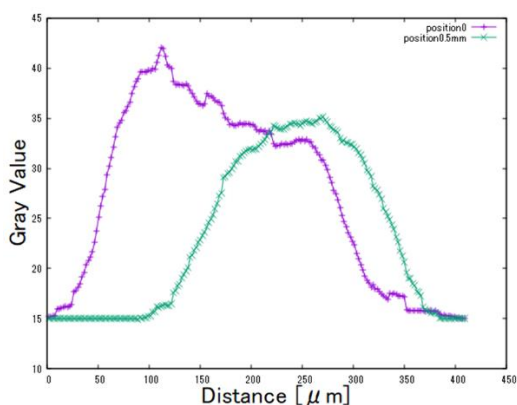


図 10,分散を変化させたときの強度分布

## 5. まとめ

この実験から波面の補正については、波面に影響を与える空気の擾乱や振動などを取り除かなければ機能しないことがわかった。また参照用のレーザー自体も波面の整った物が必要でありレンズなど光学素子もなるべくは面に影響を与えないものが必要である。このシステムを正しく機能させることができれば波面の

RMS は用いたレーザーの 1/6 程度まで整える事ができた。

パルスの分散については分散を変化させることで SPM の発光位置が変化しガラスの入射面に対し手前と奥では適した分散が異なることがわかった。よって一様にパルスの分散を変化させるのではなくビーム内で分散を制御する必要があることがわかった。

## 参考文献

- [1] 電子ビームリソグラフィを用いた 3次元ナノ加工 山崎 謙治 生津 英夫 NTT 物性科学基礎研究所 NTT 技術ジャーナル(2006)
- [2] Astronomical Adaptive Optics François Rigaut Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Volume 127, Number 958 (2015)
- [3] 非線形光学効果を用いた超短パルス光の波長変換 黒田 和男 東京大学生産技術研究所