

# 精密加工へ用いる時空間波形歪が補償された超短パルスビームアレイの生成法に関する研究

東洋大学 理工学部 機械工学科  
教授 尼子 淳  
(平成 29 年度 一般研究開発助成 AF-2017215)

キーワード：超短パルスレーザー，ビームアレイ，回折光学

## 1. 研究の背景と目的

超短パルスレーザーを用いた精密加工の技術が注目されている[1-3]。この技術が広く産業へ応用されるには、製造に求められる加工精度と生産性が同時に満足されなければならない。超短パルスの非熱特性を利用すれば金属からガラスまで様々な材料を高精度に加工できる。一方で超短パルス光源の高出力化が進み、パルスビームを分岐して材料の複数部位を並列に加工すれば、パルスエネルギーは無駄にならず、加工スループットは上がる。レーザービームを分岐する手段としては回折ビームスプリッターが簡便であり、ナノ秒パルスレーザーを用いた加工では量産技術として実用化されている[4]。こうした背景から、回折ビームスプリッターを応用した超短パルスビームアレイの生成法に関する研究が関心を集めている。

しかし、超短パルスビームを回折ビームスプリッターに通すとやっかいな問題がおこる。パルスの波長帯域が広いため、回折されたパルスの波形は時空間で歪んでしまう。図1に示すように、回折で生じる色収差によりパルスビームの空間強度分布が歪む。時間軸でながめると、色収差のせいでパルスのスペクトル幅が狭くなり、パルスは伸びる。その結果、加工スループットを左右するビームアレイの長さは制限される。~100fs 程度のパルスの場合、光軸近傍のごく狭い領域にビームアレイをつくれれば、パルス波形歪の加工への影響は小さい[5-9]。が、加工用途は限られる。ビームアレイを拡大する方法が研究されてきたが、パルス波形歪はとりきれしていない[10-12]。回折ビームスプリッターの後ろに屈折レンズ

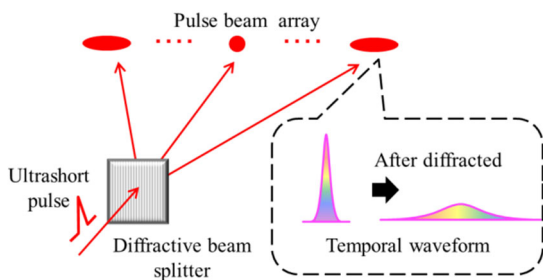


図1 回折ビームスプリッターで分岐された超短パルスビームに生じる時空間の波形歪。

と二枚の回折レンズを置いたトリプレット光学系が Minguez-Vega らにより提案されている。しかし、パルス波形歪が補償される回折角は小さく、回折角  $1.6^\circ$  でパルスは 28 fs から 63 fs まで伸びる、との実験結果が報告されている[13, 14]。

本研究では、超短パルスレーザー加工への応用をめざし、時空間の波形歪が補償された超短パルスビームアレイをつくる光学系を開発する。実用には数本から数十本のビームを数 mm の長さで並べれば足りる。光学系の設計と評価には時間幅 20 fs のパルスを用いる。非熱特性を利用するにはパルスは短いほうが有利であるが[3]、パルス品質の安定性にも配慮が要る。パルス波形を歪せるふたつの要因一色収差と分散一をいかに除くかが開発の鍵となる。

## 2. ビームアレイ生成の考え方

図2に、われわれが提案するビームアレイ生成光学系の構成を示す[15, 16]。光学系の前段は回折ビームスプリッター(DBS)と回折集光レンズ(DFL)から成る回折系であり、ここでビームアレイの横色収差を補正する。後段は一对のハイブリッドレンズ(HL<sub>1</sub>, HL<sub>2</sub>)から成るアフォーカル系であり、前段で発生した縦色収差を補正し、さらにレンズ形状を反映した不要なパルスの伸び(パルスフロント歪)を補償する。レンズ形状に依らないパルスの伸びについては、チャープミラー対でパルスに逆符号の伸びを与えて相殺する。回折ビームスプリッターで生じる角分散は必要に応じて位相差板(PP)で補償する。図中、F<sub>1</sub>は中間の集光面、F<sub>2</sub>は最終の集光面(加工エリア)である。集光面 F<sub>2</sub>で、時空間の波形歪が補償された超短パルスビームアレイが得られる。

上記のハイブリッドレンズは正の焦点距離をもつ屈折レンズと負の焦点距離をもつ回折レンズから成る。前者は主にビームの伝搬方向を決め、後者は主にアフォーカル系の分散を調整する。屈折レンズと回折レンズでは、1) 色収差の正負が反対であり[17]、2) 位相差面に対するパルス波面の進み遅れの関係も逆になる[18]。この性質を利用すれば、ビームアレイ

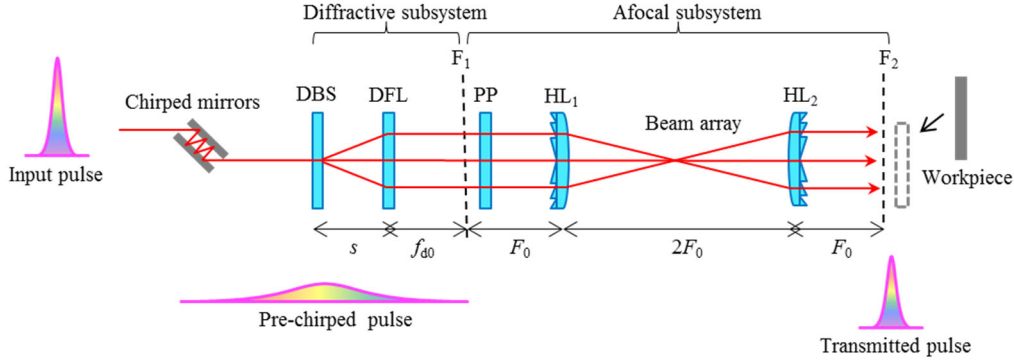


図2 提案する超短パルスビームアレイ生成光学系の構成。DBS: 回折ビームスプリッタ, DFL: 回折集光レンズ, PP: 位相差板, HL<sub>1</sub>, HL<sub>2</sub>: ハイブリッドレンズ。

生成光学系の色収差補正と分散補償を同時に行い、パルスフロント歪も除くことができる。

当初発案した光学系のプロトタイプでは、アフォーカル系を高分散ガラスから成る屈折単レンズで構成していた。われわれはこのプロトタイプを用いて色収差補正と分散補償の原理を 20 fs パルスで検証し、ビームアレイの長さを制限する要因について調べた [19, 20]。しかし、プロトタイプにはビーム半径の二乗に比例して増えるパルスフロント歪が残っていたため、光学系の空間分解能が制約されていた。パルスフロント歪は屈折レンズだけではとりにきれず、屈折レンズと回折レンズを組み合わせたハイブリッドレンズの導入が不可欠である。

### 3. 色収差補正と分散補償の定式化

ビームアレイ生成光学系の設計に用いる以下の式を導出した。式(1)は横色収差 $\Delta y$ を与える式、式(2)は縦色収差 $\Delta z$ を与える式、そして式(3)はパルスフロント歪 $\Delta \tau$ を与える式である。式(1)と(2)の導出には光線行列[21]を、式(3)の導出にはパルス伝搬の解析モデル[22]を用いた。近軸領域の仮定の下で、集光面 $F_2$ におけるビーム位置とパルスの伸びをそれぞれ波長で級数展開し、一次近似により式を導いた。これらの式は、光軸上を伝搬するビームに加え、光軸外に回折されたビームに対しても成立する。

$$\Delta y = [f_{d0} - s] \frac{u_0}{\lambda_0} \Delta \lambda \quad (1)$$

$$\Delta z = \left[ -\frac{f_{d0}}{\lambda_0} + 2 \frac{dF}{d\lambda} \right] \Delta \lambda \quad (2)$$

$$\Delta \tau = \left[ -\frac{f_{d0}}{\lambda_0} + 2 \frac{dF}{d\lambda} + 2\lambda_0 \frac{d}{d\lambda} \left( \frac{dF}{d\lambda} \right) - 4 \frac{\lambda_0}{F_0} \left( \frac{dF}{d\lambda} \right)^2 \right] \frac{R^2}{2cF_0^2} \Delta \lambda \quad (3)$$

回折系の設計には式(1)を用いる。式(1)で、 $\lambda_0$  はパルスの中心波長、 $\Delta \lambda$  はパルスの波長帯域幅 (半値全幅)、 $f_{d0}$  は $\lambda_0$  に対する回折レンズの焦点距離、 $u_0$  は回折角、 $s$  はスプリッタと回折レンズの距離である。式(1)から、 $s = f_{d0}$  の条件で $\Delta y = 0$  となり、横色収差が消える。中間の集光面 $F_1$ においては、回折角によらず、集光パルスビームは等しい縦色収差をもつ。この空間的並列性により後段のアフォーカル系でビームアレイの縦色収差を消すことが可能となる。

アフォーカル系の設計には式(2)と(3)を用いて、 $\Delta z = 0$  と $\Delta \tau = 0$  が同時に満足されるように、レンズパラメータを決める。式中、 $F_0$  は $\lambda_0$  に対するハイブリッドレンズの焦点距離、 $R$  はアフォーカル系でのビーム半径、そして $c$  は真空中の光速である。微分係数は $\lambda_0$  における値である。屈折レンズと回折レンズの焦点距離をそれぞれ $f_1(\lambda)$ 、 $f_2(\lambda)$  とするとき、薄肉レンズで近似すれば、 $F = f_1 f_2 / (f_1 + f_2)$  である。ただし $f_1(\lambda) = f_{10} [n(\lambda_0) - 1] / [n(\lambda) - 1]$ 、 $f_2(\lambda) = f_{20} \lambda_0 / \lambda$  と与えられる。添え字の 0 は中心波長 $\lambda_0$  におけるレンズの焦点距離を意味する。設計のパラメータに $f_{10}$  を選ぶと、 $\Delta z = 0$  となる $f_{10}$  と $\Delta \tau = 0$  となる $f_{10}$  の間にはわずかな差が生じる。この差をなくすには、屈折率の分散が小さい (アッベ数が大きい) ガラスを選ぶ必要がある。屈折レンズと回折レンズは同種のガラスでも異種のガラスでもよい。本研究では色収差の補正を優先し、 $\Delta z = 0$  となる $f_{10}$  の値に対して、あらかじめ設定した $F_0$  から $f_{20}$  を決める。ハイブリッドレンズの導入により光学系の設計の自由度は格段に広がる。

光学系に入力するパルスを時間幅 $\tau_0$  (半値全幅) のガウス型パルスと仮定すると、集光面 $F_2$  におけるパルス幅は $\tau = \sqrt{\tau_0^2 + \Delta \tau^2}$  で見積もれる。式(3)からわかるように、パルスフロント歪 $\Delta \tau$  は入力パルスの波長帯域幅 $\Delta \lambda$  に比例する、すなわち、時間幅 $\tau_0$  に反比例する。このためにパルス幅が狭くなるほどパルスフロント歪は顕著に現れる。

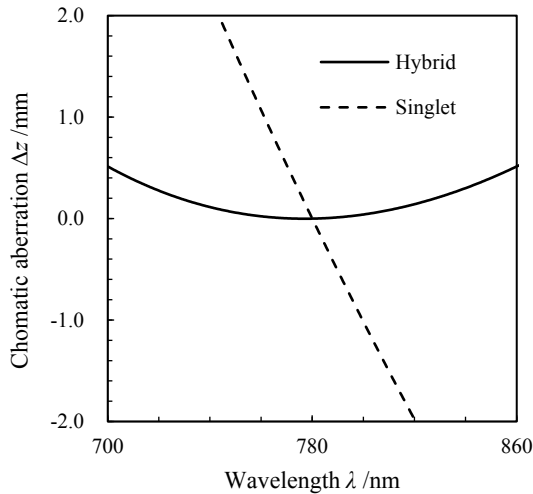


図3 色収差と波長の関係(計算値): 実線はハイブリッドレンズ, 破線は屈折単レンズ.

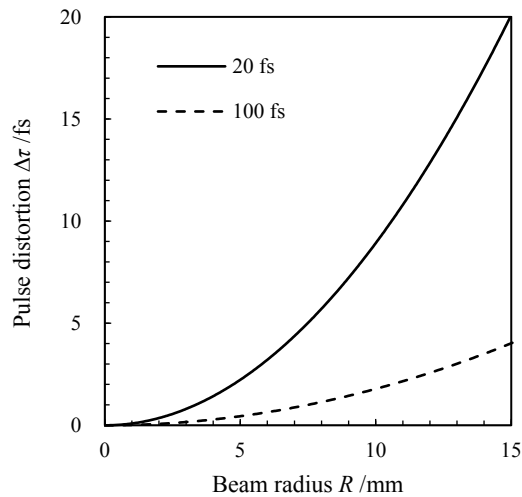


図4 パルスフロント歪とビーム半径の関係(計算値): 実線はパルス幅 20 fs, 破線は 100 fs.

#### 4. 光学系の設計と製作

中心波長 780 nm、パルス幅 20 fs (波長帯域幅 46 nm) のガウス型パルスの評価に使うことを前提に、先に導出した諸式を用いて光学系を設計・製作した。

まず、回折集光レンズの焦点距離を  $f_{a0} = 50 \text{ mm}$  として、式(1)から回折ビームスプリッタと回折集光レンズの距離を  $s = 50 \text{ mm}$  と定めた。評価に使うパルス光源の出力に制約があるため、スプリッタでビームアレイをつくる代わりに、ブレード回折格子がつくる+1次回折ビームを用いた。回折角の条件を  $1.7^\circ$  と  $2.9^\circ$  に選び、集光面  $F_1$  及び  $F_2$  における光軸からのビーム高さをそれぞれ 1.5 mm と 2.5 mm に定めた。回折格子と回折集光レンズは、断面形状をブレード化して、厚み 1.0 mm の石英ガラス基板上にフォトリソグラフィで製作した。どちらも回折効率は 90% を超え、波長や偏光には影響されない。そのため、波

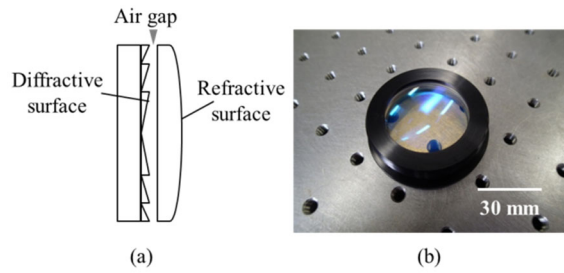


図5 ハイブリッドレンズの(a) 構造と(b) 外観.

長スペクトルの狭帯域化によりパルス幅が不要に広がることはない。

ハイブリッドレンズの基本構造を設計するにあたり、屈折レンズと回折レンズの材料には石英ガラス(アッペ数 69)を選んだ。ハイブリッドレンズの焦点距離を  $F_0 = 150 \text{ mm}$  とすると、式(2)から  $f_{i0} = 133 \text{ mm}$  のときに色収差が除かれ ( $\Delta z = 0$ )、薄肉レンズの式から  $f_{20} = -1144 \text{ mm}$  と決まる。入射ビーム径 5.0 mm ( $2R = 15 \text{ mm}$ ) を仮定すると、式(3)からパルスフロント歪は  $\Delta\tau = 5.0 \text{ fs}$  と算出される。光学系の集光面  $F_2$  におけるパルス幅は  $\tau_0 = 20.6 \text{ fs}$  と見積もれるので、ほとんど広がらないことがわかる。設計したハイブリッドレンズの実効的アッペ数は 18 である。分散が小さい石英ガラスをレンズ材料に使っても、回折面の作用により大きな色収差を補正できる。光学系の長さもプロトタイプの半分程度になる。設計した基本構造には後述する製作方法を考慮した微修正が必要となる。修正後のハイブリッドレンズの焦点距離は  $F_0 = 150.3 \text{ mm}$ 、屈折レンズの焦点距離は  $f_{i0} = 132.2 \text{ mm}$ 、回折レンズの焦点距離は  $f_{20} = -1062.2 \text{ mm}$  である。修正の前後でハイブリッドレンズの色収差特性に差がないことを確認している。

図3に光線行列を用いて計算した縦色収差と波長の関係を示す。ハイブリッドレンズを用いると、波長 780 nm を中心に広い波長帯域で、パルスの集光位置は波長に対してほぼ不感になる。比較のために図示した石英ガラスから成る屈折単レンズでは大きな色収差が生じている。図4に式(3)を用いて計算したパルスフロント歪とビーム半径の関係を示す。ハイブリッドレンズを用いた場合、パルスフロント歪はプロトタイプの場合の 1/8 まで小さくなる。比較のために図示した 100 fs パルスに対しては、歪はさらに小さい。図3と図4に示した結果は、製作に用いたレンズ仕様をもとに計算したものである。

ハイブリッドレンズの製作では、屈折レンズと回折レンズは別々に用意して、空気ギャップを介して鏡筒に組み込むことにした。屈折レンズは平凸レンズとし、回折レンズは平板上に形成した。屈折レンズの直径は 40 mm、中心厚は 5.93 mm、空気ギャップ

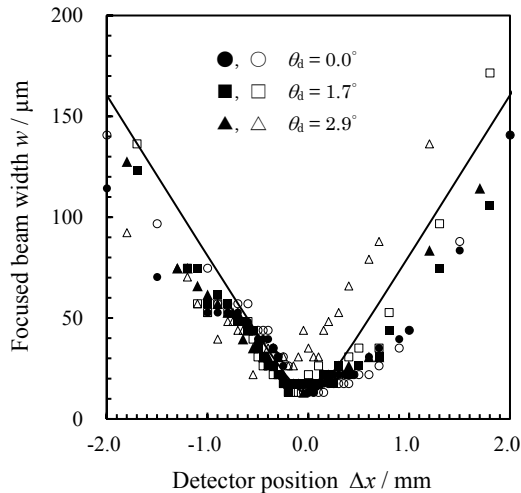


図6 集光面  $F_2$  の近傍における集光ビーム幅: 回折角  $\theta_d$  の条件は  $0.0^\circ$ ,  $1.7^\circ$ ,  $2.9^\circ$ .

は  $0.10 \text{ mm}$  と定めた。ギャップを設けることでガラスと空気の界面が増えるが、これらを含む全ての界面に反射防止コートをつけて反射迷光を防止し、光利用効率を高めた。レンズの材料と厚みも考慮して、チャープミラー対で与えるプリチャープを  $-850 \text{ fs}^2$  と設定した。図5に、製作したハイブリッドレンズの構造と外観を示す。

## 5. 光学系の評価

用意したブレイズ回折格子、回折集光レンズ、そして一對のハイブリッドレンズを配置して光学系を組み上げ、その性能を評価した。繰り返し周波数  $80 \text{ MHz}$  で動作するカーレンズモード同期チタンサファイアレーザー (TFS-1pw NEWFEMTO) を評価に用いた。パルスの諸元は、パルスエネルギー  $4 \text{ nJ}$ 、中心波長  $780 \text{ nm}$ 、パルス幅  $22 \text{ fs}$  (波長帯域幅  $45 \text{ nm}$ ) である。レーザーから出射された直線偏光パルスビームの空間モードはほぼ  $\text{TEM}_{00}$  であり、ビーム径は光学系の入口で  $4.2 \text{ mm}$  ( $1/e^2$ ) である。パルスビームの空間強度分布の測定には、高解像 CCD カメラを装備したビームプロファイラ (SP620U, Ophir-Spiricon) を使った。CCD の感度波長域は  $190\text{--}1320 \text{ nm}$ 、画素寸法は  $4.4 \mu\text{m} \times 4.4 \mu\text{m}$  である。プロファイラは精密微動ステージの上に固定して、測定の精度と再現性を確保した。パルス波形の計測にはフリンジ分解自己相関干渉計を用い、波形の微細構造を解像して、わずかな歪でも検出できるようにした。干渉計を通過した二本のパルスビームを、位相整合条件が満足されるように、集光面  $F_2$  に置いた非線形光学結晶 (BBO) へ入れた。BBO から放射された第二高調波を IR 除去フィルタを介してフォトダイオードへ結像し、出力信号をデジタルオシロスコ

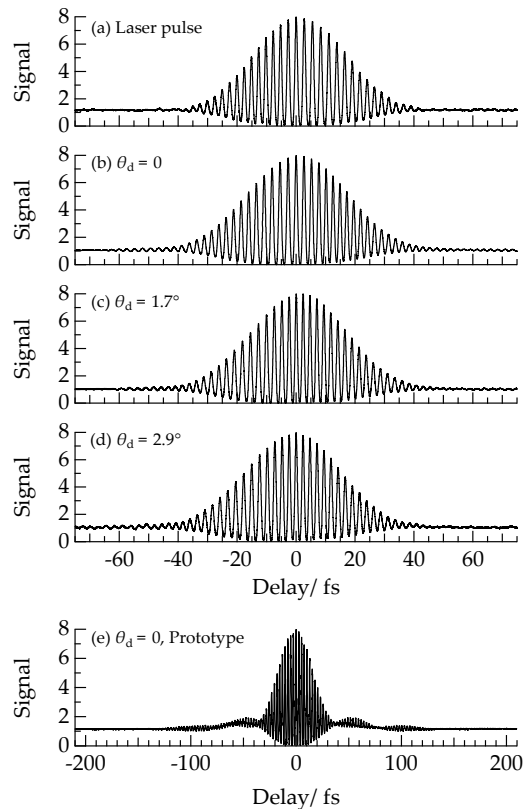


図7 集光面  $F_2$  で取得したフリンジ分解自己相関波形。(a) 入力パルス, (b)  $\theta_d = 0.0^\circ$  (光軸上), (c)  $\theta_d = 1.7^\circ$ , (d)  $\theta_d = 2.9^\circ$ , (e) プロトタイプ (光軸上).

ープ (DS-5624A, IWATSU ELECTRIC) により周波数  $250 \text{ Hz}$  でサンプリングして相関波形を取得した。干渉計の掃引周波数は  $0.025 \text{ Hz}$ 、掃引幅は  $\pm 50 \mu\text{m}$  である。

### 5.1 集光点におけるビーム幅

集光面  $F_2$  の前後  $\pm 2.0 \text{ mm}$  における集光ビーム幅の測定値を図6に示す。図中、 $\theta_d$  は回折角を表す。ハイブリッドレンズ  $\text{HL}_2$  から遠ざかる向きを測定位置  $\Delta x$  の正の向きと定めた。集光ビームの鉛直方向の幅を記号 (●, ■, ▲) で、水平方向 (回折される方向) の幅を記号 (○, □, △) で表す。実線は無収差ガウスビームの計算値である。回折角  $\theta_d = 0.0^\circ$  の条件では、ブレイズ回折格子を挿入せずに測定した。

回折角  $\theta_d = 0.0^\circ$  (●, ○) では、集光ビーム幅が最小となる位置は鉛直方向と水平方向で一致した。この位置での最小スポット径は  $13 \mu\text{m}$  であり、ほぼ回折限界の値が得られた。回折角  $\theta_d = 1.7^\circ$  (■, □) では、 $\sim 0.1 \text{ mm}$  の非点隔差が生じ、最小錯乱円の直径は  $18 \mu\text{m}$  であった。この非点隔差は集光ビームのレイリー長  $0.14 \text{ mm}$  と比べても短い。したがって、回折角  $\theta_d = 0.0^\circ$  と  $1.7^\circ$  における集光ビームの断面が円形でかつその直径が等しくなる平面を光軸と直交するように集光面  $F_2$

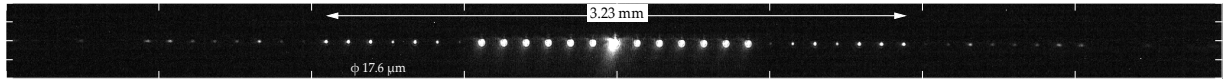


図8 開発した光学系に時間幅 20 fs のパルスビームを通して得られた集光ビームアレイ。

の近傍に定めることができる。一方、回折角  $\theta_d = 2.9^\circ$  (▲, △) では、非点隔差が  $\sim 0.5$  mm まで大きくなり、最小錯乱円も  $30 \mu\text{m}$  まで広がった。光軸外の集光ビームに生じる非点隔差は、ハイブリッドレンズを構成する平凸レンズに起因する。

### 5・2 集光点におけるパルス幅

集光面  $F_2$  で取得した相関波形を図7に示す。図7(a)は光学系に通す前のパルスの相関波形、図7(b)–(d)は回折角  $\theta_d$  が  $0.0^\circ$ ,  $1.7^\circ$ ,  $2.9^\circ$  の条件で光学系にパルスを通した後で得られた相関波形である。これらの結果は、集光点でのパルス波形が回折角によらずほぼ同じであることを示唆している。相関波形からパルス幅を推定するために、電場の複素包絡線が次式で表されるガウス型パルスを仮定した： $E(t) = E_0 \exp[-(2 \ln 2)(1 + ia)t^2/\tau_p^2]$ 。ここで、 $\tau_p$  はパルス幅（半値全幅）、 $a$  はチャープパラメータである。この式を用いて相関波形を再現するように  $\tau_p$  と  $a$  を求めると、回折角  $\theta_d$  によらず、 $\tau_p = 22$  fs、 $a = 0.30$  となった。このことから、集光面  $F_2$  における集光パルスはほぼフーリエ変換限界であり、不要な伸びはないと言える。

比較のために、アフォーカル系を一对の屈折単レンズで構成したプロトタイプから得た相関波形を図7(e)に示す。この相関波形を再現するように  $\tau_p$  と  $a$  を求めると、 $\tau_p = 35$  fs、 $a = 1.4$  となった。プロトタイプの相関波形には主ローブの外側に副ローブが認められる。この副ローブはパルスフロント歪によるものであり、ハイブリッドレンズを用いた場合は現れていない(図7(b)–(d))。測定では、波形幅が最小となるようにチャープミラーにおけるパルスビームの反射回数を調整した。屈折単レンズの材料が高分散ガラスのため、 $-3400 \text{ fs}^2$  という大きなプリチャープを要した。

以上の結果が示すように、ハイブリッドレンズを用いて色収差補正と分散補償を行うことにより、ビームアレイ生成光学系の空間分解能を制限していたパルスフロント歪が除かれる。したがって、光学系の空間分解能と時間分解能はどちらも限界まで向上する。このことは時間幅が 20 fs よりも長いパルスビームに対しては無条件に言える。

### 5・3 ビームアレイの長さ

前述の評価では、ブレード回折格子の+1次回折光を使い、回折角  $\theta_d$  が  $0.0^\circ$  (光軸上) と  $1.7^\circ$  (光軸外の高さ 1.5 mm) の条件で、時空間の波形歪がない集光

パルスビームが得られた。ここでは回折ビームスプリッタで時間幅 20 fs のパルスビームを分岐してビームアレイをつくり、波形歪がない集光ビームが並ぶ領域の広さを詳細に調べる。

図8に、13分岐の回折ビームスプリッタを用いて光学系の集光面  $F_2$  に形成したビームアレイを示す。 $-13$  次から  $+13$  次まで、強度に分布はあるが、ほぼ均一なスポット径 ( $18 \mu\text{m}$ ) をもつ 27本の集光ビームが長さ 3.2 mm にわたり並んでいる。集光ビームの間隔は 0.12 mm である。この結果は、開発した光学系を用いれば 1) 少なくとも長さ 3.2 mm のビームアレイをつくれること、2) 少なくとも直径 3.2 mm の円の中に縦横に並ぶビームアレイをつくれること、を意味する。 $\pm 14$  次の外側では、回折角が大きくなるとともに、集光ビームの形状は水平方向に少しずつ伸びている。ハイブリッドレンズに残る非点収差のせいで、鉛直方向と水平方向で集光位置がずれるからである。図中、ビームアレイ中央の 0 次光の強度が突出しているのは、実験に使用したスプリッタの設計波長 532 nm が超短パルスの中心波長 780 nm からずれているためである。

本研究では一方向にビームを分岐する回折ビームスプリッタを使ったが、縦横二方向にビームを分岐する回折ビームスプリッタも使える。スプリッタを液晶空間光変調器に替えれば、表示データの更新だけで、さまざまな集光ビームパターンを形成できる。

## 6. 結論

本研究を通じて、時空間の波形歪がない超短パルスビームアレイをつくる光学系の完成に目途をつけた。われわれが開発した光学系の特徴は、回折系とアフォーカル系をカスケード接続した配置でビームアレイをつくる点、屈折面と回折面を備えたハイブリッドレンズでパルスフロント歪を補償する点にある。この光学系を用いれば、実用に足る長さあるいは広さを有する超短パルスビームアレイを供給できる。

本研究の成果により超短パルスレーザーを用いたナノ・マイクロ加工技術の実用に向けた議論ができるようになった。今後は、パルス波長に合わせて設計した回折ビームスプリッタをビームアレイ生成光学系に装着し、超短パルス増幅システムを用いたレーザー加工へ試して、加工精度と生産性の評価を行う予定である。開発技術の価値はその使いみちで決まると考えており、産業界のニーズを先取りしつつ、既存プロセスの代用ではない、付加価値の高い加工用途を開拓したい。

## 謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団の平成 29 年度一般研究開発助成 (AF-2017215) を受けて実施されました。同財団に深く感謝いたします。

本研究の一部は科学研究費補助金 (19K04112) の助成をいただきました。また、ハイブリッドレンズの製作には住友電工ハードメタル株式会社の協力をいただきました。

なお、本研究は本学理工学部電気電子情報工学科の中野秀俊教授と共同で実施したものである。

## 参考文献

- 1) B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. von Alvensleben, and A. Tünnermann, "Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids," *Appl. Phys. A* **63**, 109–115 (1996).
- 2) X. Liu, D. Du, and G. Mourou, "Laser ablation and micromachining with ultrashort laser pulses," *IEEE J. Quantum Electron.* **33**, 1706–1716 (1997).
- 3) B. Chimier, O. Uteza, N. Sanner, M. Sentis, T. Itina, P. Lassonde, F. Legare, F. Vidal, and J. C. Kieffer, "Damage and ablation threshold of fused-silica in femtosecond regime," *Phys. Rev. B* **84**, 0941041–0941049 (2011).
- 4) J. Amako and E. Fujii, "Beam delivery system with a non-digitized diffractive beam splitter for laser drilling of silicon," *Optics and Lasers in Eng.* **77**, 1–7 (2016).
- 5) Y. Kuroiwa, N. Takeshima, Y. Narita, S. Tanaka, and K. Hirao: "Arbitrary micropatterning method in femtosecond laser microprocessing using diffractive optical elements," *Opt. Express* **12**, 1908–1915 (2004).
- 6) Hayasaki, T. Sugimoto, A. Takita, and N. Nishida, "Variable holographic femtosecond laser processing by use of a spatial light modulator," *Appl. Phys. Lett.* **87**, 031101–031103 (2005).
- 7) L. Kelemen, S. Valkai, and P. Ormos, "Parallel photopolymerisation with complex light patterns generated by diffractive optical elements," *Opt. Express* **15**, 14488–14497 (2007).
- 8) A. Jesacher and M. J. Booth, "Parallel direct laser writing in three dimensions with spatially dependent aberration correction," *Opt. Express* **18**, 21090–21099 (2010).
- 9) M. Sakakura, T. Sawano, Y. Shimotsuna, K. Miura, and K. Hirao, "Fabrication of three-dimensional 1x4 splitter waveguides inside a glass substrate with spatially phase modulated kaser system," *Opt. Express* **18**, 12136–12143 (2010).
- 10) J. Amako, K. Nagasaka, and K. Nishida, "Chromatic-distortion compensation in splitting and focusing of femtosecond pulses by use of a pair of diffractive optical elements," *Opt. Lett.* **27**, 969–971 (2002).
- 11) G. Li, C. Zhou, and E. Dai, "Splitting of femtosecond laser pulses by using a Dammann grating and compensating grating," *J. Opt. Soc. Am. A* **22**, 767–772 (2005).
- 12) S. Hasegawa and Y. Hayasaki, "Dynamic control of spatial wavelength dispersion in holographic femtosecond laser processing," *Opt. Lett.* **39**, 478–481 (2014).
- 13) G. Minguez-Vega, E. Tajahuerce, M. Fernandez-Alonso, V. Climent, J. Lancis, J. Caraquitena, and P. Andres, "Dispersin-compensated beam-splitting of femtosecond light pulses: Wave optics analysis," *Opt. Express* **15**, 278–288 (2007).
- 14) R. Martinez-Cuenca, O. Mendoza-Yero, B. Alonso, I. J. Sola, G. Minguez-Vega, and J. Lancis, "Multibeam second-harmonic generation by spatiotemporal shaping of femtosecond pulses," *Opt. Lett.* **37**, 957–959 (2012).
- 15) 尼子淳, 中野秀俊, "アクロマティックカスケード光学系による時空間波形歪が補償された超短パルスビームアレイの生成," *Optics and Photonics Japan 2018*, 1aC1 (2018).
- 16) 中野秀俊, 丸尾恵介, 尼子淳, "ハイブリッドレンズを導入したカスケード光学系による時空間的歪のないフェムト秒パルスビームアレイ生成," *光学シンポジウム*, 講演番号9 (2020).
- 17) T. Stone and N. George, "Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats," *Appl. Opt.* **27**, 2960–2971 (1988).
- 18) Z. Bor, "Distortion of femtosecond laser pulses in lenses," *Opt. Lett.* **14**, 119–121 (1989).
- 19) J. Amako and H. Nakano, "Distortion-compensated multifocusing of ultrashort pulse beams using cascade optical system," *Appl. Opt.* **57**, 33–41 (2018).
- 20) 中野秀俊, 尼子淳, "回折レンズによるフェムト秒レーザーパルスの光軸外への集光特性," 第79回応用物理学会秋季学術講演会, 20a-224a-6 (2018).
- 21) A. Yariv and P. Yeh, *Optical Waves in Crystals* (John Wiley & Sons, 2003), p.34.
- 22) Z. Bor: "Distortion of femtosecond laser pulses in lenses and lens systems," *J. Mod. Opt.* **35**, 1907–1918 (1988).