

レンズ収差を用いた群遅延分散補償法の研究

電子工学専攻 上久保 貴史

1. 序論

パルス幅が 10 fs の超短パルス光とは全幅で 100 THz 以上の帯域を持ち、その周波数毎のフーリエ位相が時間的に揃っている光である。その超短パルス光には様々な利点があり、多くの分野で応用が期待されている。超短パルス光の特徴を挙げると、とても狭いパルス幅であるがゆえに 1 パルスあたりのエネルギーが数 pJ でも数 kW のような高いピーク強度を得ることができる。応用例だとレーザー加工に超短パルス光を用いることで低エネルギーかつ高ピーク強度であることから熱による損傷や変質が低減され精密に加工できる。また時間分解能が高いことも特徴である。フェムト秒パルスを用いることでフェムト秒の時間分解能を持ち、物質での高速な応答を測定することができる。

現在ではモード同期Ti : Al₂O₃(チタンサファイア)レーザーの発展によって超短パルス光を発生できる発振器が市場に出回っており、パルス幅サブ 10 fs の超短パルス光を得ることも容易になってきた。しかし、10 fsパルス光は波形の維持が困難であり、その原因は群遅延分散である。

パルス幅が数百 fs のパルスでは 3 次以上の群遅延分散はあまり影響しないが、パルス幅が 20 fs 程度の超短パルスではパルス波形に影響が無視できなくなるほど大きくなる。2 次の群遅延分散(SOD: Second order dispersion)だけを打ち消すようにパルス伸張器と圧縮器を配置することは比較的簡単だが、3 次の群遅延分散(TOD: Third order dispersion)や、より高次の群遅延分散を打ち消すのは難しく、特別な設計にする必要がある。残留する高次の群遅延分散(HOD : Higher Order Dispersion)を補償するには FROG や SPIDER によるフーリエ位相測定とパルス圧縮器へのフィードバックが必要になる。パルス圧縮器はプリズム対・回折格子対の組み合わせや空間位相変調器があり、圧縮原理はパルスを空間的にフーリエ分解し、各フーリエ成分の群遅延を調整するものである。

そこで、本研究では光誘起回折格子を用いてレンズ収差を空間周波数の変調として記録し、光パルスの群遅延分散を補償する方法を提案する。この方法は波面位相を調整することでパルス圧縮ができる点で前述のフーリエ分解するパルス圧縮器とは圧縮原理が大きく異なる。レンズ収差は Seidel の 5 収差として出射瞳平面での波面を 1 次：歪曲収差、2 次：非点収差・像面湾曲、3 次：コマ収差、4 次：球面収差に分解できる。フーリエ位相の歪みとレンズ収差のアナロジーから 2 次、3 次、4 次の群遅延分散は像面、コマ、球面収差を与えたビームで独立に制御できる。

補償対象となるのは中心波長 800 nm、パルス幅 10 fs のモード同期Ti : Al₂O₃レーザーである。レンズ収差を与えて形成される干渉縞の 2 次～4 次の群遅延分散とレンズ収差量の関係、回折帯域の試料入射角とレンズの F ナンバー依存性を光線追跡ソフト ZEMAX と Mathematica を用いて定量的に評価した。

2. レンズ収差と群遅延分散の関係

$$\begin{aligned}
 \phi(\omega) &= \phi(\omega_0) + \frac{d\phi(\omega)}{d\omega}(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2!} \frac{d^2\phi(\omega)}{d\omega^2}(\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{3!} \frac{d^3\phi(\omega)}{d\omega^3}(\omega - \omega_0)^3 + \frac{1}{4!} \frac{d^4\phi(\omega)}{d\omega^4}(\omega - \omega_0)^4 + \dots \\
 &\quad \text{群遅延} \quad \text{2次のGDD} \quad \text{3次のGDD} \quad \text{4次のGDD}
 \end{aligned}$$

群遅延分散 (GDD : Group Delay Dispersion)

$$\begin{aligned}
 W(\rho, \theta) &= (DS\Theta^3 \cos\theta)\rho + \left\{ \left(-\frac{1}{2}FC - AS\cos\theta \right) \Theta^2 \right\} \rho^2 + (CM\Theta \cos\theta)\rho^3 + \left(-\frac{1}{4}SA \right) \rho^4 \\
 &\quad \text{歪曲収差} \quad \text{像面湾曲} \quad \text{非点収差} \quad \text{コマ収差} \quad \text{球面収差}
 \end{aligned}$$

Seidelの5収差

$\phi(\omega)$: 位相シフト、 ω_0 : 中心角周波数

$W(\rho, \theta)$: 出射瞳平面の波面を表す光路差、 ρ : レンズ中心からの距離 (見込み角)

$\theta = \text{Tan}^{-1}(y/x)$ (極座標)、 Θ : レンズ入射角

図 1 フーリエ位相とレンズ収差のアナロジー

位相シフトのテーラー展開とレンズ収差の式を図 1 示す、以下位相シフトをフーリエ位相と定義する。 ω_0 が中心角周波数で $\phi(\omega_0)$ がキャリアの位相(Carrier Phase)、 $d\phi(\omega_0)/d\omega$ が群遅延(Group Delay)、以下はパルス波形を歪ませる項である 2 次、3 次、4 次の群遅延分散となっている。2 次、3 次、4 次の群遅延分散はSOD, TOD, FOD(Second, Third, Forth Order Dispersion)と言われ、以下この略称で話を進める。

レンズを透過した光線の波面が焦点を中心にした正円からズレている状態を収差がある、と言う。収差の形状はレンズ中心からの距離を ρ とすると図 1 に示すように、1 次が歪曲収差、2 次が非点収差と像面湾曲、3 次がコマ収差、4 次が球面収差である。波面に収差が与えられると焦点での像がボケる。ボケるとは像が広がることを意味するが、これが光パルスの群遅延分散を与えられた波形の形状と同じ広がり方を示す。これはフーリエ位相の歪みとレンズ収差は時間歪みと空間歪みのアナロジーがあるためで、波面位相の歪みが空間周波数の変調となる焦点付近で超短パルスの瞬時波形とビームプロファイルが同じ形に歪むためである。要するにパルス波形の時間歪みをレンズ収差による空間歪みとして空間に作ることができるのである。

図 2 にレンズ収差と群遅延分散の関係を示した。回折格子(干渉縞)を誘起する光を Pump と定義する。 α は参照光のスクリーン入射角である。GD(Group Delay : 群遅延)は軸外れ、SOD は焦点位置ズレ、TOD はコマ収差、FOD は球面収差にそれぞれ対応する。この関係は焦点での像を超短パルスとして考えると簡単である。像に参照光が入射し干渉縞になることで超短パルスで言う「キャリア周波数(中心周波数)」が決まる。回折限界のビーム径が「パルス幅(周波数帯域)」に相当する。回折限界は $F\lambda$ (F : F ナンバー)で決まるので帯域は $1/F$ に比例する。群遅延とは「時間的な遅れ」を意味する、よって干渉縞ができる位置が変われば時間遅れと同じになるので光軸からの軸外れが群遅延に相当する。SOD は波面が 2

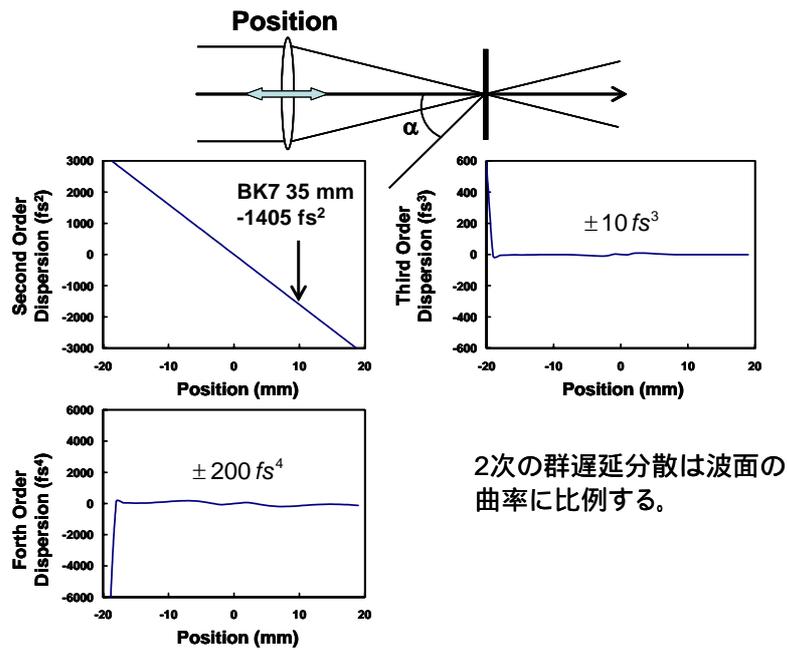


図 3 2 次の群遅延分散のレンズ位置依存性

図 3 はレンズ位置を-20~20 mmに変えたときの群遅延分散量を示している。2 次、3 次、4 次の群遅延分散量はそれぞれ左上、右上、左下の順である。2 次は比例し、3 次、4 次はノイズレベルでしか変わらなかった。よって 2 次の群遅延分散はレンズ位置(波面の曲率)で制御できることがわかった。なお、Position 10 mmで-1405 fs²となるが、これはBK7 35 mmのSOD : 1407 fs²に相当するSOD量となっている。

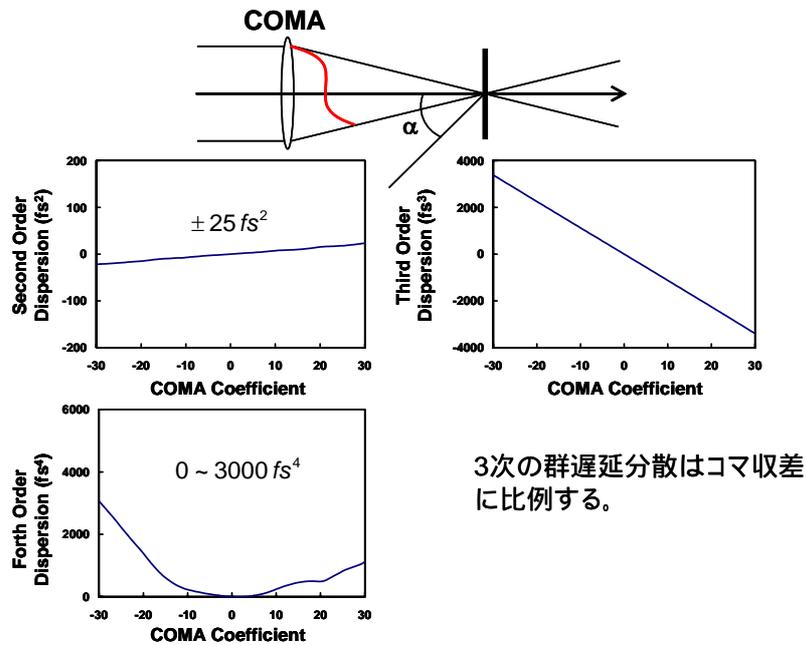


図 4 3 次の群遅延分散のコマ収差依存性

図 4 はコマ収差量を-30 ~ 30 に変えたときの群遅延分散量を示している。コマ収差量はレンズの回転角と同じと考えて良い。その結果 3 次は比例し、2 次、4 次はノイズレベルでしか変わらなかった。よって 3 次の群遅延分散はコマ収差で制御できることがわかった。

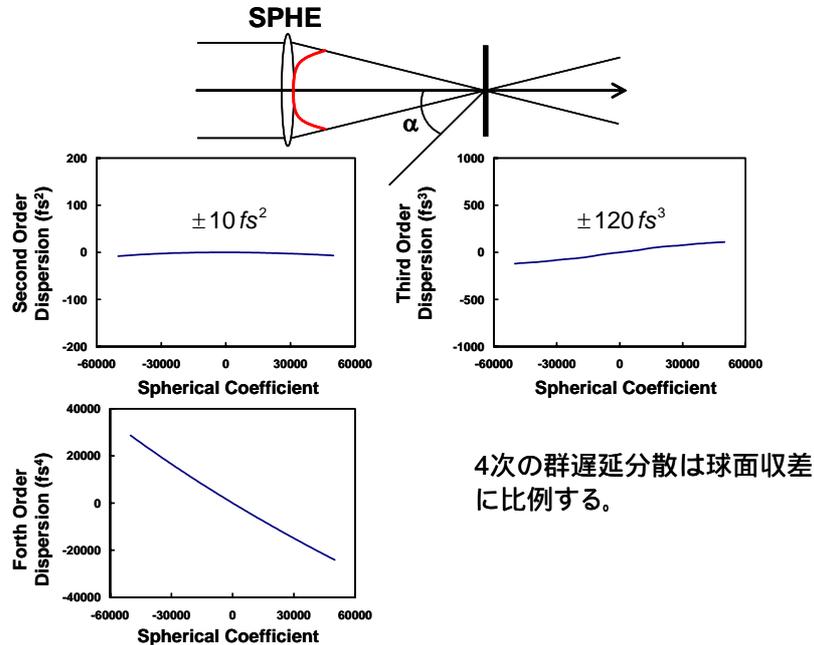


図 5 4 次の群遅延分散の球面収差依存性

図 5 は球面収差量を-60000 ~ 60000 変えたときの群遅延分散量を示している。球面収差量はレンズの F ナンバーと同じと考えて良い。その結果 4 次は比例し、2 次、3 次はノイズレベルでしか変わらなかった。よって 4 次の群遅延分散は球面収差で制御できることがわかった。

以上によりレンズ収差による群遅延分散の独立制御は計算上可能であることがわかった。

4. 10 fs パルスの群遅延分散補償の設計

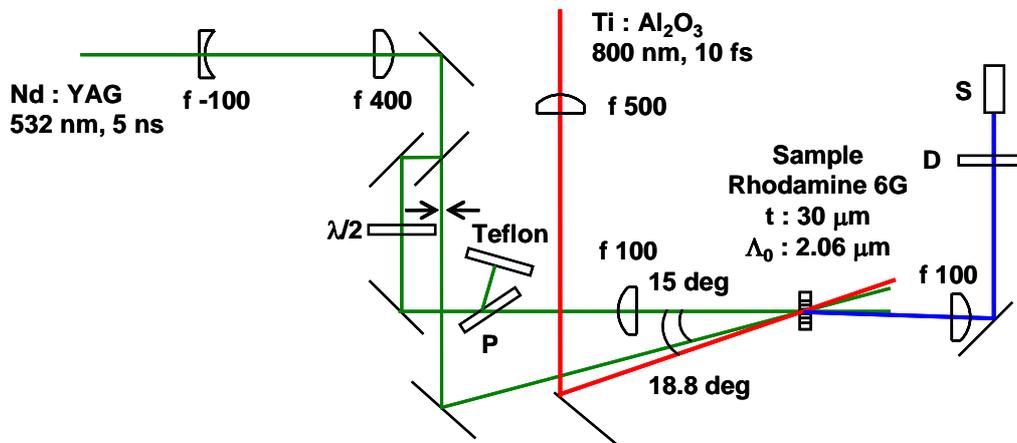


図 6 10 fs パルス用群遅延分散補償系配置図

図 6 に実験図を示す。緑線 : 532 nm (Nd : YAG), 赤線 : 800 nm (Ti : Al₂O₃), 青線 : 回折光である。焦点距離-100 mmと 400 mmのレンズでNd : YAGレーザーのビーム径を 10 mmまで広げる。焦点距離 100 mmのレンズでFナンバー-10 を満たす。レンズを透過するビームは $\alpha : 15 \text{ deg}$ で入射する参照光と干渉させた。パワーの違いは半波長板と偏光子でパワー調整を行った。

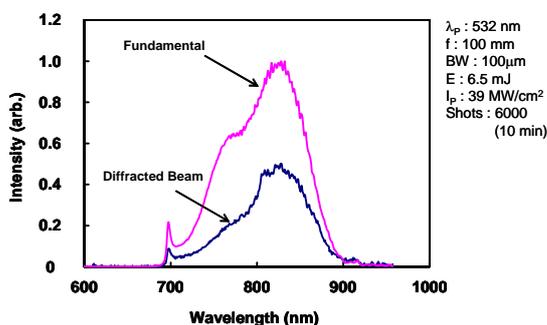


図 7 回折光と基本波のスペクトル

図 7 が基本波パルスと回折光のスペクトルの比較である。チャープ回折格子の書き込み条件は波長 532 nm, パルス幅 5 ns, エネルギー 6.5 mJ, 書き込み強度 39 MW/cm²で行った。基本波パルスは中心波長 800 nm, パルス幅 10 fsである。回折光のスペクトルは基本波パルスのスペクトルとほとんど変わらず、10 fsの帯域を持っていることがわかった。

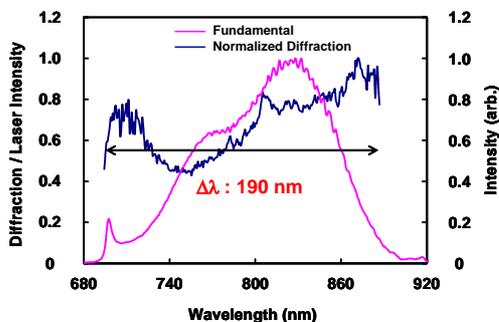


図 8 規格化した回折帯域

図 8 が波長ごとの回折効率を規格化したスペクトルである。700 ~ 890 nm まで波長分散のないほとんどフラットな回折効率を得られた。これから 10 fs パルスの帯域をカバーする回折帯域があることがわかる。

5. 結論

本研究ではレンズ収差を用いた群遅延分散補償法の提案と、10 fsパルス用に設計を行ない、SOD, TOD, FODがそれぞれレンズ収差で独立に制御できることを計算で確認した。参照光の入射角 16 deg, Fナンバー-10 のレンズを用いればSOD : -3000 ~ 3000 fs², TOD : -15000 ~ 15000 fs³, FOD : -30000 ~ 30000 fs⁴まで 10 fsパルスの群遅延分散補償が可能ながわかった。

Rhodamine6G を書き込み材料とした実験で回折帯域 190 nm のチャープ回折格子を作成した。ビームの横分散がないことから超短パルスの GDD 補償に適したシステムであることがわかった。

問題点としては回折効率が 30 μm の薄膜の場合 0.03 %程度であることがあげられる。回折効率は Nd : YAG レーザーの不安定さが影響している可能性がある。本研究で用いた Nd : YAG レーザーはフリーランで発振させるタイプのものであり、この状態ではパルス毎の縦、横モードが違う。またパルス形状もなめらかな強度変化ではなく、ピコ秒パルス列が重なった形をしているので、時間と空間がミリ単位で合っていないと高コントラストな干渉縞が得られず、回折効率は落ちてしまうのである。

今後はフーリエ位相変化量を観測し、レンズ収差を用いた群遅延分散補償法の完成を目指したい。