

## < 1 > 超高密度フォトン利用実証レーザーシステムの開発

### < 1 - 2 > 超高密度フォトン反応制御技術の開発

サブテーマリーダー：光科学技術研究振興財団 コア研究室 研究リーダー 青島 紳一郎

応用のための計測・制御技術の開発

小テーマ： 非熱加工のための計測・制御 ~ ファイバー利用加工

研究従事者：光科学技術研究振興財団 コア研究室 研究員 浦上 恒幸、伊藤 晴康、竹内宏之、  
野嶋 芳紀、奥村 秀生、東 孝憲、西川 慎二

#### ( 1 ) 研究の概要、新規性及び目標

##### 研究の概要

高強度フェムト秒レーザーを産業応用する際に重要となる、高強度フェムト秒パルス光のファイバー伝送について研究を実施した。

高強度フェムト秒パルス光のファイバー伝送を実現するために、a) 石英ガラス、Ge ドープ石英ガラス、多成分ガラス等のファイバー材質の検討、b) 光入射端面の平坦度による違いや異なる集光レンズを用いた場合等の集光条件の検討、c) コア径の異なるGI型ファイバーやSI型ファイバー等の構造の検討を系統的に実施し、有用な基礎データを蓄積した。

また、約 100 m のマルチモードファイバーを伝搬する光のパルス波形を崩すことなく効率よく伝送するためのファイバー伝送の検討をおこない、小型・高効率・高耐光強度 フェムト秒波形整形器を用いて、光パルスエネルギーが 0.3 nJ 程度に限定されるが、ファイバーを伝播させた後のパルス広がりを入力パルスの 2 倍以下の 170 fs にすることができた。

以上の検討により蓄積された諸データより、実証レーザーシステムに適合するファイバーの選定を行い、ファイバー伝搬パルスによる非熱加工を検討し、操作性の良い高精度加工を目指した。また、これまでの研究成果をまとめ、各種コア径に対するビームスポット形状、加工状態等に関する諸データの蓄積・整理を行い、サンプルに適した加工条件を明確にした。また、より実用的な長尺ファイバーについて、曲げによる影響や引き起こされる現象を調べ、適用化の検討を実施した。

最終的に、中空ファイバーに着目し、光入射部も含めてこれを真空化することで、高強度フェムト秒パルス光のファイバー伝送を実現するとともに、伝送パルスを用いて被加工物を移動しない方式でのフェムト秒加工を世界で初めておこなった。さらに、PET 樹脂加工に適用して、その有効性を確認した。

##### 研究の独自性・新規性

高強度フェムト秒パルス光のファイバー伝送を実現するために、光ファイバーについて、材質の検討、集光条件の検討、構造の検討などを系統的に実施し、複数のパラメータと高強度フェムト秒パルスのファイバー伝送特性との関連について研究した例は皆無に等しい。この過程で、ファイバー伝送前後のパルス幅、スペクトルの変化を高い技術レベルの超高速光計測技術、分光計測技術を駆使して計測するとともに、フェムト秒レーザー光がファイバー中を実際にどのように伝播しているかを独自の計測技術である FTOP を用いて調べ、有用なデータを取得した。

また、本事業で開発した小型・高効率・高耐光強度 フェムト秒波形整形器を用いて長さ約 100 m、コア径 50  $\mu\text{m}$  の GI 型マルチモードファイバー マルチモードファイバーから 170 fs の光パルスを、世界で初めて出力することに成功した。さらに、真空化中空ファイバーで、高強度フェムト秒パルス光のファイバー伝送を実現するとともに、伝送パルスを用いて被加工物を移動しない方式でのフェムト秒加工を世界で初めて実現した。この過程で、ファイバー出射部に独創的な機構を取り入れ、特許出願した。

以上、独自の研究を実施し、新規で有用な研究成果が得られた。

##### 研究の目標

[フェーズ ]

超高密度フォトン利用実証レーザーシステムを実現する際に必要となるファイバー伝送技術を構築するために、高強度フェムト秒パルス光がファイバー中を伝播する際に発生する諸現象に対し

て、各種材質との関連性等の基礎データを取得すると共に、高いエネルギーを効率良く伝送する条件を模索する。

[フェーズ ]

実証レーザーシステムを産業応用分野に適応するために、フェーズ で蓄積された要素技術を融合することによって、高強度フェムト秒パルス光伝送システムを構築する。同時に、非熱加工のための計測・制御技術の構築を図ると共に、前記システムを用いた各種材料の非熱加工を行い、操作性の良い高精度加工を実証する。

## (2) 研究の進め方及び進捗状況

フェーズ で、平成 13 年度から、< 1 - 2 > 超高密度フォトン反応制御技術の開発のうちの< 1-2-a > 計測・制御技術の開発のなかで、ファイバー伝送という小テーマで研究を開始し、ファイバー伝送の基本特性の評価、FTOP によるガラス媒質中の伝播特性測定などを検討した。

以下では、フェーズ における研究の進め方及び進捗状況を記述する。

フェーズ では、実用レーザーシステムに適応させるための問題点の解決に努め、一体化技術の概念設計を推進するために、実用レーザーシステムの構築に重要となるフェムト秒パルスレーザーを有効にファイバーに伝搬させることに着目し、基礎データの取得を行った。

平成 13 年度は、主に汎用的なファイバー材料へのレーザー照射実験及びレーザー光のファイバー伝搬への可能性を探った。その結果、各種ファイバーに集光して入射した際のファイバー入射端面の状態の観測・各種材質の損傷しきい値の評価など、高強度フェムト秒光パルスのファイバー伝播によって発生する諸現象を観測した結果、損傷現象がファイバー材質に依存するなどの知見が得られた。

平成 14 年度は、一体化技術の概念設計を推進するため、実用レーザーシステムの構築に重要となるフェムト秒パルスレーザーのファイバー伝播途中のパルスを観測する基礎実験を行った。FTOP による測定を行った結果、光パルス伝播に伴うファイバーの破壊や変色の原因を特定することはできなかったものの、ガラス中をレーザー光が伝播していく様子に関して、平行光伝播という条件下では世界で初めて測定に成功した。

フェーズ では、フェーズ で取得した基礎データを元に、より実用化に近い研究開発を実施するために、< 1 - 2 > 高密度フォトン反応制御技術の開発「～応用のための計測・制御技術の開発」の中の小テーマ(2) 非熱加工のための計測・制御 で、ファイバー利用加工 として研究を推進した。

以下では、フェーズ における研究の進め方及び進捗状況を記述する。

平成 15 年度は、ファイバー利用加工の実現を目指して、各種石英ファイバーによるフェムト秒光パルス伝搬特性の計測を継続して行い、基礎特性を蓄積した。ここでは、種々の光ファイバーにおける曲げによる影響や引き起こされる現象を調べ、適用化の検討を実施した。次に、種々の光ファイバーに対して、フェムト秒光パルスを導光させた場合の特性を評価した。上記の GI 型、SI 型ファイバーに加えて、銀蒸着中空光ファイバーの三種に対して、パルス幅広がり有無、光ファイバー中での非線形効果に起因するスペクトル広がりの有無、ファイバー出射点における強度分布を測定した。以上のような種々のファイバーの評価によって、高強度フェムト秒光パルスを伝送するには中空ファイバーが最適であるという結論が得られた。また、本事業で開発した波形整形器を用いて分散補償を行うことにより、170 fs のフェムト秒光パルスの 100 m のマルチモードファイバー伝送を実現した。

平成 16 年度は、中空ファイバーによる高強度フェムト秒光パルス伝送における、光伝送の高品質化に関する実験を継続して行った。ファイバー出射光のパルス広がり、空間強度分布歪、およびファイバーの損傷等の要因となるブレイクダウンを回避するために、集光点を含めた伝送系の真空システムを構築するとともに、ファイバー出射光の光学特性の評価を行った。その結果、0.2 Pa に減圧することによってブレイクダウンを起こすことなく、フェムト秒光パルスを伝送できることを明らかにした。さらに、伝送した中空ファイバーの出射部を走査することによる金属加工実験を実施し、加工サンプルを動かすことないフェムト秒レーザー加工を実現した。

平成 17 年度は、真空化中空光ファイバーを利用したファイバー伝搬パルスによる非熱加工を引き続き検討し、操作性の良い高精度加工のためのファイバー伝送の実用化を推進し、高強度フェムト秒パルスを伝送でき、かつ出力光はそのまま焦点を結ぶ真空化中空ファイバー伝送を構築した。

その結果、従来の加工用レーザーでは不可能な透明樹脂の加工を可能とした。また、実証レーザーシステムの伝送システムとしての試作機を構築し、本試作機において開発した着脱式コネクタを用いた集光モジュールに関する特許を出願した。また、本試作機がグリーンレーザーにも対応できる波長特性を有することを確認した。

以上、フェーズ、のそれぞれにおいて、本研究テーマに関連する研究は順調に進捗し、プレス発表を行うなど、世界で初めての研究成果を複数得ることができた。

予定していた以上の成果が得られたため、目標達成度は 120 % であった。

### (3) 主な成果

「超高密度フォトン利用実証レーザーシステム」の実例として、「ファイバー伝送フェムト秒パルス加工」(プレス発表実施)を実現した。これを用いて、被加工物を移動しない方式でのフェムト秒加工を世界で初めておこなった。さらに、PET樹脂加工に適用して、その有効性を確認した。

#### ファイバー伝送の基本特性の評価

高強度フェムト秒パルス光のファイバー伝送を実現するために、a) 石英ガラス、Geドープ石英ガラス、多成分ガラス等のファイバー材質の検討、b) 光入射端面の平坦度による違いや異なる集光レンズを用いた場合等の集光条件の検討、c) コア径の異なるGI型ファイバーやSI型ファイバー等の構造の検討を系統的に実施し、有用な基礎データを蓄積した。ファイバー入射端面が破壊されないためには、焦点距離 200 mmのレンズを用いて、レンズ集光点から 約30~50 mm離れた位置にファイバー入射端面を設置するのが良いことなどが明らかになった。詳細を以下に述べる。

高強度フェムト秒光パルスのファイバー伝送を実現するための基礎評価として、まず初めにファイバー伝播に伴うファイバーの損傷についての検証を行った。

中心波長 800 nm、パルス幅 50 fs、繰返し周波数 1 kHz、パルスエネルギー 630  $\mu$ J、平均強度 630 mW の高強度フェムト秒光パルスを焦点距離 200 mm のレンズを用いて、多成分ガラス、Ge

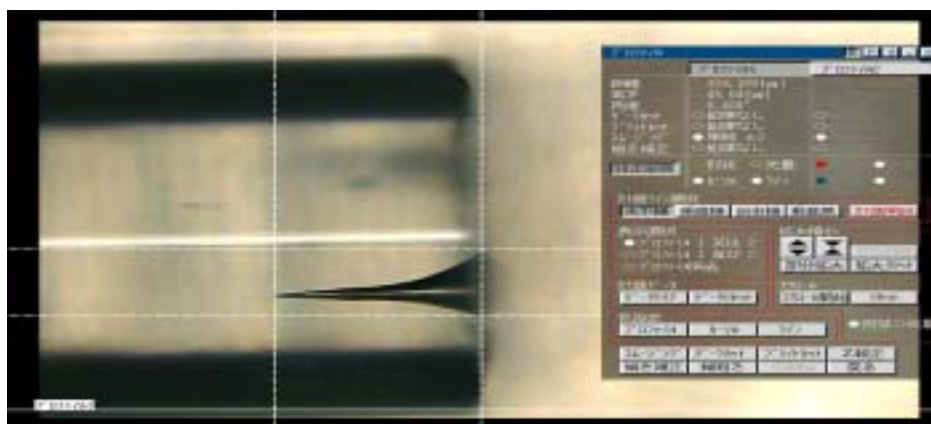


図1 再生増幅パルス光で損傷を受けた純粋石英ファイバーの観察像

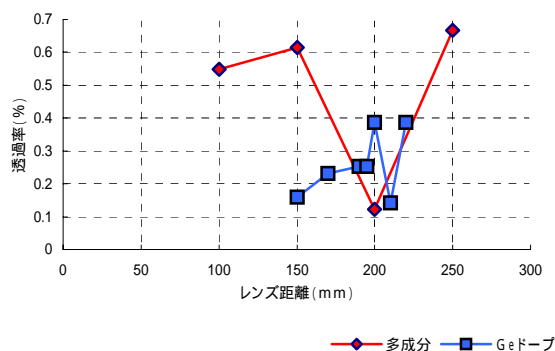


図2 2種のファイバーの透過率測定結果

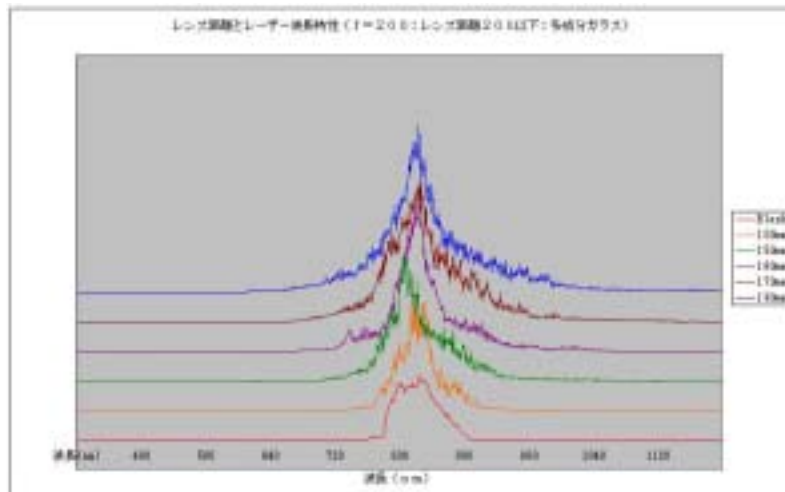


図3 Geドープ石英ファイバーにおいて入射条件を変化させた場合のスペクトル計測結果

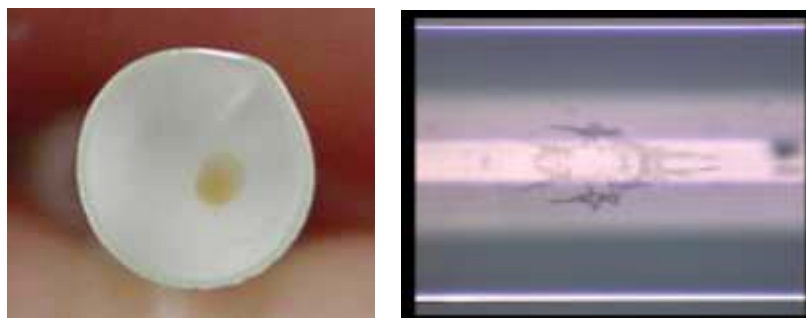
ドープ石英、純粋石英の各ファイバーに集光し、ファイバー入射端面および内部の状態を調べた。図1は、端面に焦点を合わせて光パルスを入射したために損傷を受けた純粋石英ファイバーの様子を横から観察した像である。数秒の照射によって、光入射端面がこのように破壊され、幅 150  $\mu\text{m}$ 、深さ 300  $\mu\text{m}$  程度の円錐状に穴が掘られることを確認した。これを解決する入射条件を探すために実験を行ったところ、ファイバー入射端面が破壊されない条件は、レンズ集光点から 30~50 mm 程離れた位置にファイバー入射端面を設置するのがよいことがわかった。図2はこのときの伝送効率であり、多成分ガラスファイバーでは、50~70 %、Geドープ石英ファイバーでは 20~40 %であった。

また、コア径 800  $\mu\text{m}$  の Geドープ石英ファイバーにおいて、集光点をファイバー軸方向に移動させて出射光のスペクトルを計測して波長特性を比較した結果を図3に示す。グラフ上の縦軸上段になるほど、ファイバーが集光点へ近づいていることを示している。集光点の移動によってスペクトルが変化していることが確認された。また、入射時のスペクトル成分が 75 nm 程度であったものに対し、集光点位置によっては出射時に数百 nm に広がった場合もあった。コア径 3000  $\mu\text{m}$  の多成分ファイバーにおいても同様にスペクトル広がり確認されたが、その広がり量は Geドープ石英ファイバーの場合よりも小さかった。

端面の破壊が発生しない入射光強度においても、図4に示すように(a)多成分ファイバーにおいては茶色変色が、(b)Geドープ石英ファイバーにおいては入射端面から約 4.5 mm の位置に損傷が生じた。Geドープ石英での内部損傷現象は、光パルスの自己集束によるものと推察された。

次に、高強度フェムト秒光パルスの光ファイバー伝送について、エネルギーを効率良く伝送する条件を調べた。

実験系を図5に示す。レンズでレーザーを集光し、光ファイバー端面近傍に照射する。光ファイ



(a) 多成分ファイバーの茶色変色 (b) 多成分ファイバー内部の損傷

図4 ファイバー伝送実験で生じた変色と損傷の例

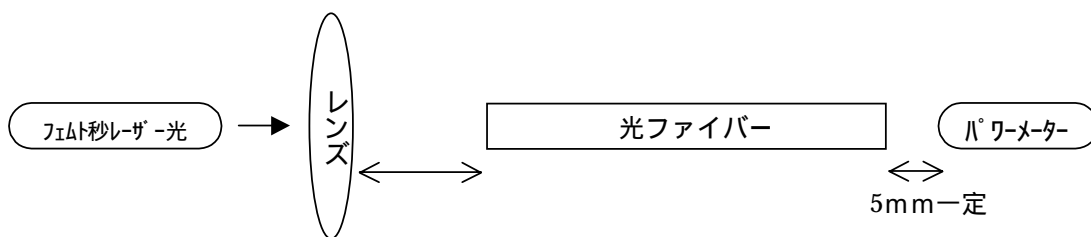


図5 ファイバー伝送効率評価の実験系

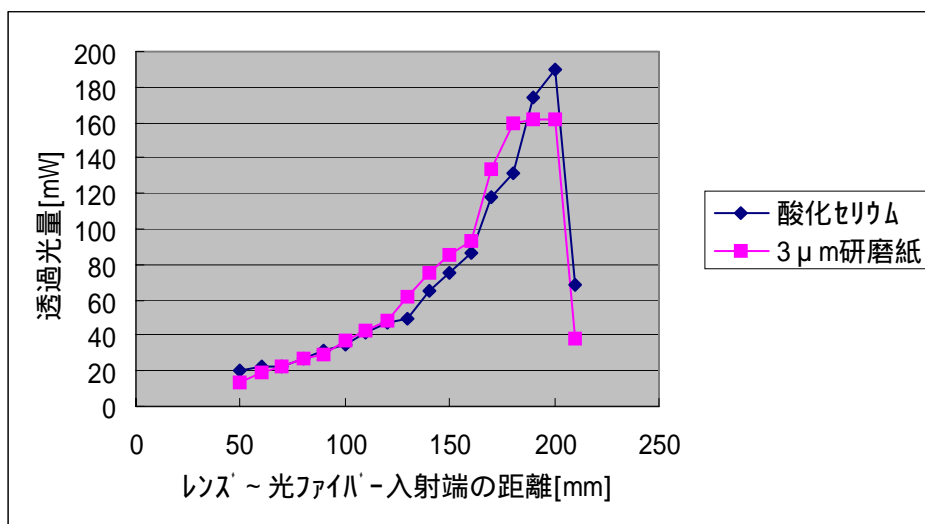


図6 光ファイバー仕上げ研磨の違いによる透過光量の様子

バー端面位置をレンズから 50 mm 離れた位置から焦点位置 200 mm 側に 10 mm ずつ移動させ、それぞれの位置における透過光量をパワーメーターで測定した。光ファイバーはグレーテッドインデックス型（以下 GI 型）無水石英光ファイバー（コア 800 μm、クラッド 1000 μm 以下 800/1000 と表記）を使用した。また、同時にファイバー端面の研磨面精度による透過光量の差異についても評価した。最終研磨工程（酸化セリウム 1.5 μm）まで処理したものと中研磨工程（3 μm 研磨紙）まで処理したものを比較した結果を図 6 に示す。最大透過光量の集光点位置は等しいが、面精度を高くした前者の方が高い透過光量が得られることがわかった。

また、同様の 2 種類のファイバーに対して、照射時間に対する透過光量変化を調べた。レンズと光ファイバーの入射端の距離 190 mm で測定を行った。実験結果を図 7 に示す。この結果からも同

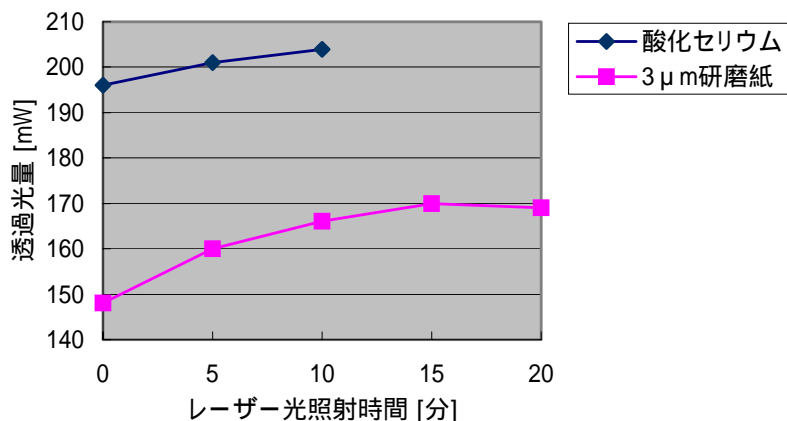
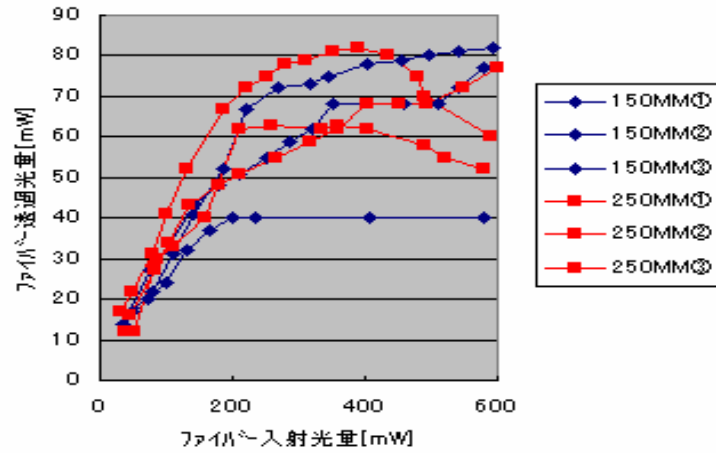


図7 光ファイバー仕上げ研磨の違いと照射時間と透過光量の関係の実験結果

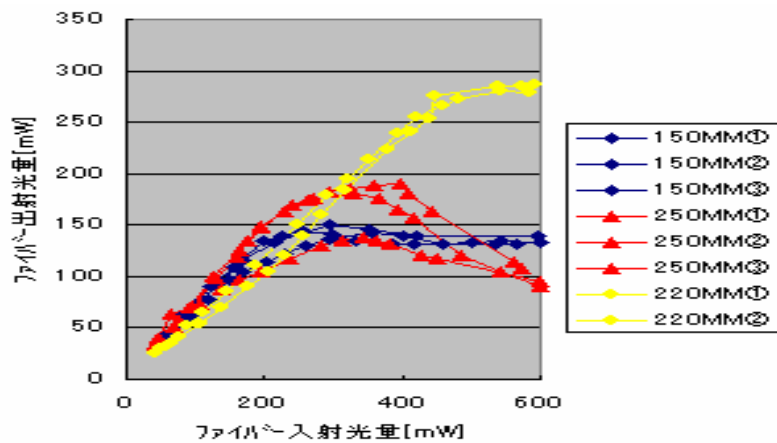
様に、レーザー光を効率良く導光するには光ファイバー端面研磨の精度が高い方が良いことが明らかになった。ただし、時間経過とともに、透過率が良くなる理由については、単にレーザー強度の時間変動に依存したものであるかは明確ではない。

ここまでの実験で損傷閾値が高く高効率伝送が可能なファイバーは石英系のファイバーに絞られた。石英ガラスにはステップインデックス型（以下SI型）、GI型、Geドープさらに無水、有水と多種類あるため、さらに詳細に測定を行った。

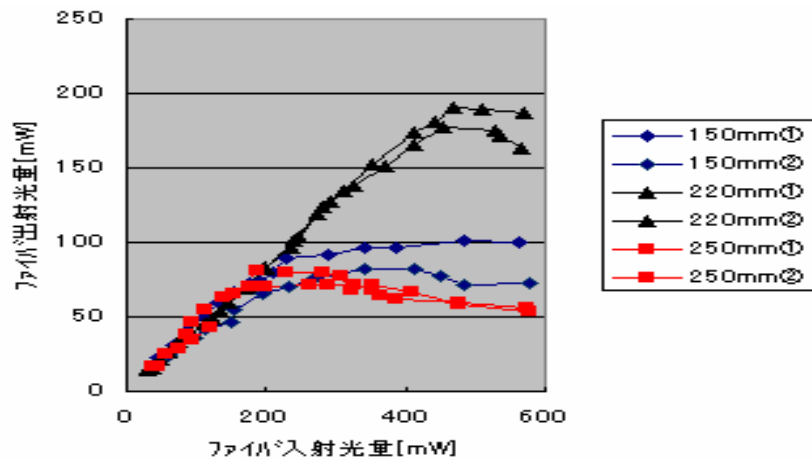
純粋石英、Geドープ石英材質の各種光ファイバーについて、再生増幅光パルスの入射光強度を変化させて、焦点距離200mmのレンズとファイバー端面間の距離を150mm, 220mm, 250mmとした



(a) SI型無水石英光ファイバー（800/1000）



(b) SI型有水石英ファイバー（800/1000）



(c) GI型Geドープ無水石英ファイバー（800/1000）

図8 各種光ファイバーの透過光量と透過率





図9 ファイバー内部の損傷

時の透過光量を調べた。実験結果を図8に示す。

最も高強度の光パルスを伝搬できたのは、レンズとファイバー端面間距離が220 mmの時の(b) SI型有水石英ファイバー(800/1000)であり、この時、平均強度300 mW程度まで透過させることができた。この場合でも、入力・出力光強度の線形関係が維持できているのは、入射光平均強度が400 mW程度までであり、その時の透過光平均強度は250 mW程度である。また、(a) SI型無水石英光ファイバー(800/1000)は、最大でも80 mWしか透過しなかった。

いずれの光ファイバーでも、入射光強度を大きくした時に透過光量が減少するのは、ファイバー内部で図9のような破壊や変質が起きたためである。また、実験後に破壊が生じた複数本のファイバーを調べた結果、破壊部分はファイバー入射端面から4.5 mmの箇所に一様に存在していることが明らかになった。

#### FTOPによるガラス媒質中の伝播特性測定

フェムト秒レーザー光がファイバー中を実際にどのように伝播しているかを独自の計測技術であるFTOPを用いて調べ、有用なデータを取得した。詳細を以下に述べる。

項において汎用的なファイバー材料へのレーザー照射実験を実施したが、ファイバーの破壊・変色等が起こった。そこで、これらの現象の原因を探るために、フェムト秒レーザー光がファイバー中を実際にどのように伝播しているかをFTOP計測で調べた。

FTOP計測をする上で、光ファイバーのような円筒形状では、プローブ光が結像せず、測定が困難であることが確認されたため、コア材(屈折率1.62の鉛系多成分ガラス)を断面10 mm×10 mm、



図10 使用した多成分ガラスの外観

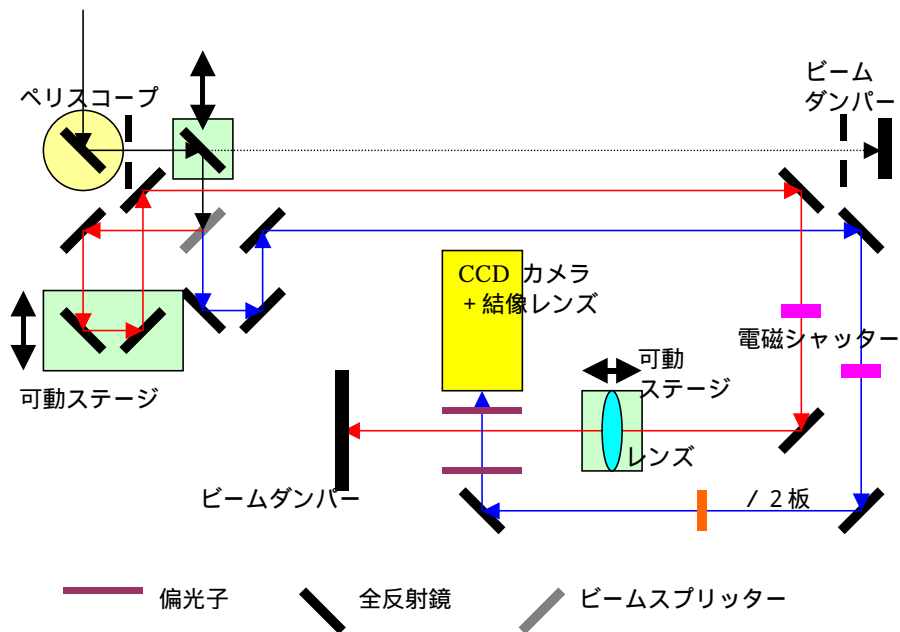
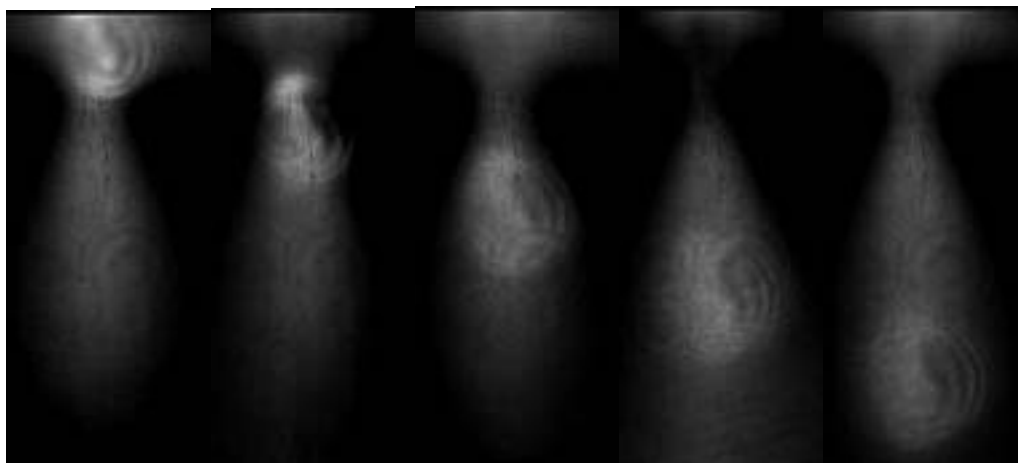


図 11 FTOP 実験系

長さが 58 mm の直方体形状に切断したものを光伝播媒質として用いた。使用した多成分ガラスの外観を図 10 に示す。ここで、ポンプ光とプローブ光の入射面は研磨してある。

実験は図 11 に示した FTOP 計測系により行った。サンプルを横切るように入射したプローブ光で、コア材の長手方向に入射したポンプ光の伝播を計測した。ポンプ光、プローブ光のエネルギーはそれぞれ 0.3 mJ、1.7  $\mu$ J とした。ポンプ光の集光には、焦点距離 200 mm の平凸レンズを用い、焦点より 20 mm 後方にサンプルを設置して観測した。観測した FTOP 像を図 12 に示す。6 ps 間隔の遅延時間で測定した 5 枚の FTOP 像 (a) ~ (e) を遅延時間順に並べて示した。伝播方向は図の上から下の向きである。通常の FTOP 測定と異なり、FTOP 像は暗部として観測されたため、画像処理により輝度の符号を反転して表示した。また、個々の画像で少し明るく丸い部分が光パルスとして存在している部分であるが、輪郭がはっきりと現れていない。これらは、ガラス加工中に発生した歪みをサンプルが内包しているためと考えられる。また、図 13 に示すように、FTOP 測定後のサンプルには、  
での報告と同様に茶変部が現れた。

ここまでの FTOP による測定では、光パルスの存在位置は確認できるものの詳細な形状の計測には至らず、破壊や変色の原因を特定することはできなかった。計測の改善を試みた。FTOP 計測では、固体媒質の歪みに起因する複屈折を有するとき、観測が非常に困難になる。前回の実験では、



(a) (b) (c) (d) (e)  
図 12 多成分ガラスの FTOP 像 (厚さ 10 mm のサンプルにて測定)



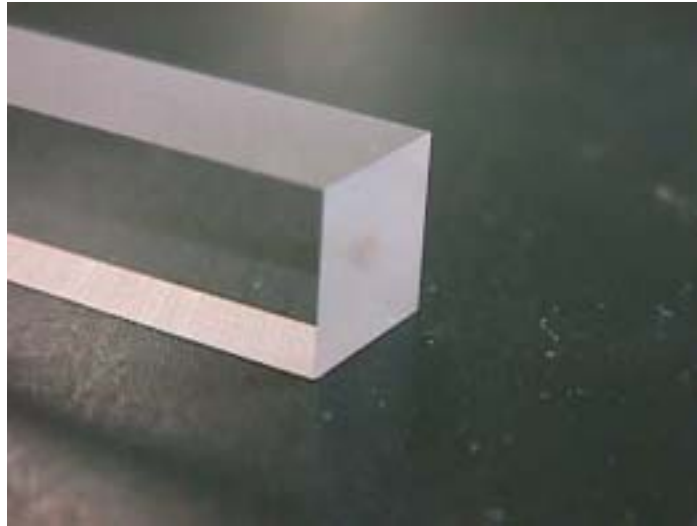
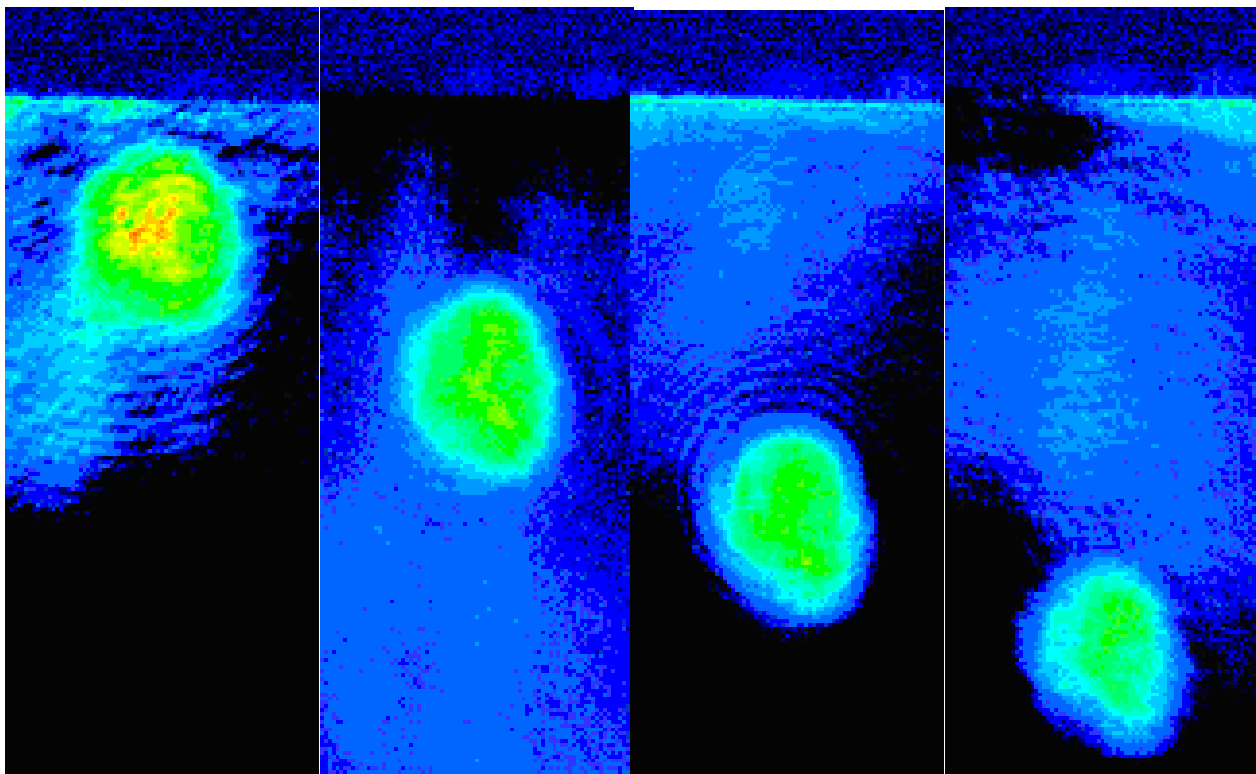


図 13 FTOP 測定後のサンプル

コア材を断面  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  で長さが  $58\text{ mm}$  に加工したものを用いたが、このとき、媒質自体の複屈折のため FTOP 像に背景光が観測され、画像処理してこの影響を除去した。複屈折の影響を小さくできれば、十分な精度の FTOP 像が得られると期待されるため、コア材の厚みを  $5\text{ mm}$  とし、プローブ光路を短くすることで歪みの影響を小さくして、再度 FTOP 計測を試みた。

前回と同じ集光条件で、ポンプ光がガラス断面の中心付近へと入射するように調整した。取得した画像は、 $12.5\text{ }\mu\text{m}/\text{pixel}$  のサイズに対応している。画像取得は、1 秒間 (1000 ショット) 積算で行った。また、ポンプ光、プローブ光のエネルギーはそれぞれ  $79\text{ }\mu\text{J}$ 、プローブ光が  $1.7\text{ }\mu\text{J}$  とした。観測した FTOP 像を図 14 に示す。6 ps 間隔の遅延時間で測定した 4 枚の FTOP 像 (a) ~ (d) を遅延時間順に並べて示した。各画像が  $6.0 \times 2.5\text{ mm}^2$  ( $480 \times 200\text{ pixel}^2$ ) の大きさに対応する。また、伝播は図の上から下の向きである。背景光は除去して表示している。個々の画像で、丸いプロファイルが光パルスとして存在している部分である。また、上方に見える縦線がガラスの入射端



(a) (b) (c) (d)

図 14 多成分ガラス中の FTOP 像 (厚さ  $5\text{ mm}$  のサンプルにて測定)

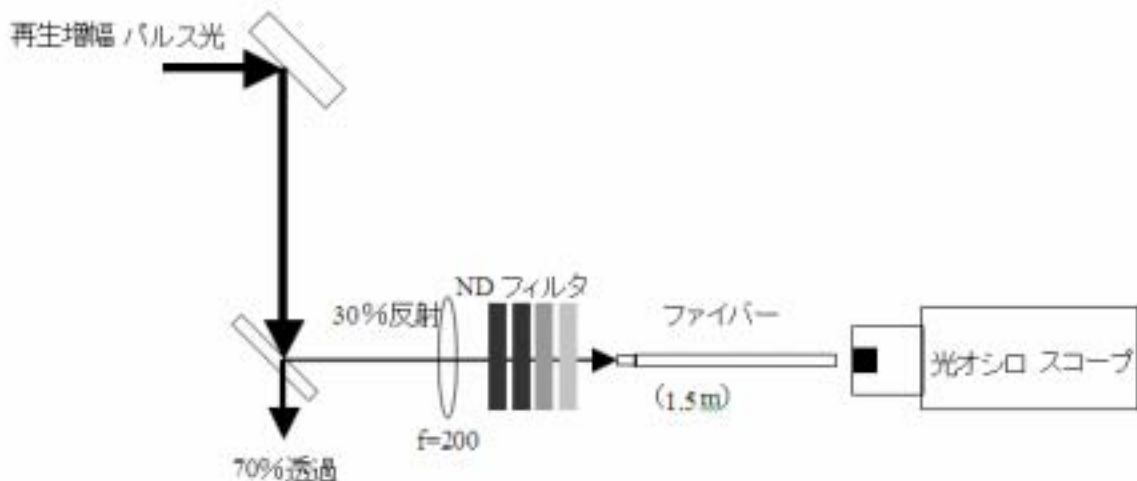


図 15 光オシロスコープによるパルス幅測定実験系

である。ここで、パルス幅に比べて奥行き方向の強度分布のほうがはるかに広いので、これらの画像は断面強度分布に対応している。

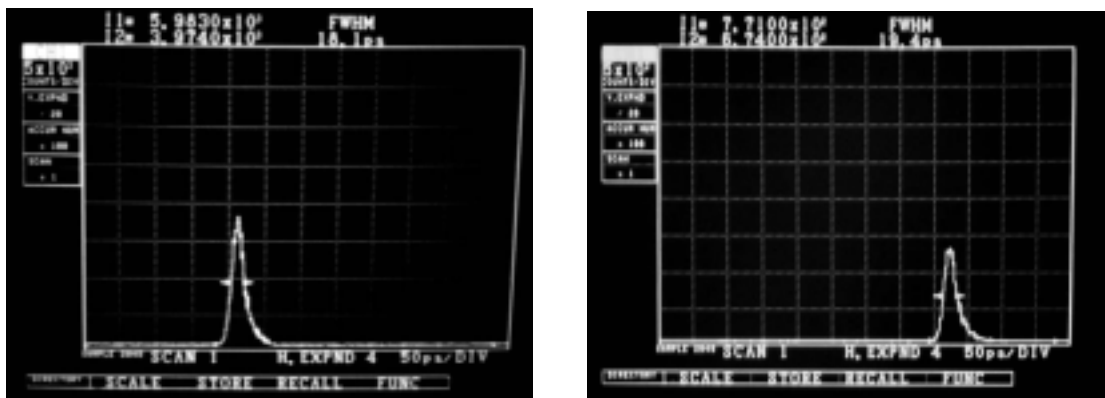
以上、FTOP による測定で光パルスの存在位置は確認できるものの詳細な形状の計測には至らず、破壊や変色の原因を特定することはできなかった。しかしながら、ガラス中をレーザー光が伝播していく様子に関して、平行光伝播という条件下では世界で初めて測定に成功した。

#### 各種（石英、中空）ファイバーのパルス時間的・空間的伝送特性評価

ファイバー伝送前後のパルス幅、スペクトルの変化を高い技術レベルの超高速光計測技術、分光計測技術を駆使して計測した。高強度フェムト秒パルス光の伝送に中空ファイバーが有効であることが明らかになった。詳細を以下に述べる。

フェムト秒レーザー光を用いて非熱加工を実現するためには、光ファイバーで加工を行う部位までレーザー光のピークパワーを維持しつつ導光する必要がある。その際に問題となるのが、光ファイバーの光損傷と波長分散によるパルス幅広がりである。そこで、フェムト秒光パルス伝搬特性の計測を行い、基礎データを蓄積するとともに、この特性を利用したファイバー伝搬パルス加工を検討した。

まず初めに、加工に適した光強度を有する再生増幅パルス光を用いて、コア径 800  $\mu\text{m}$  の GI 型、SI 型のファイバー端面および内部の損傷を観察した。その結果、内部の損傷閾値（平均光量）は、GI 型が 100 mW 程度、SI 型ファイバーは 600 mW 以上であり、強度面では SI 型が適していること



a. ファイバー通過前 18.1ps

b. ファイバー通過後 19.4ps

図 16 0.6  $\mu\text{J}/\text{pulse}$  の時の測定結果

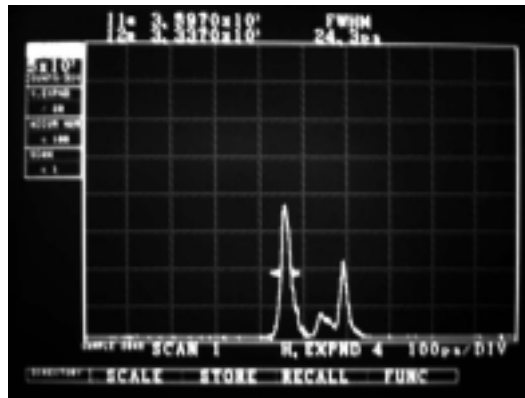


図 17 47  $\mu$ J/pulse の時の測定結果

が明らかになった。

そこで、SI 型ファイバーについて伝送後のパルス幅の測定を行った。まず、ファイバーに入・出射する光パルス幅を SHG 自己相関器で測定することを試みた。ところが、ファイバー出射光パルスは空間的に広がっており、対物レンズや凸レンズで平行光に変換しても測定出来なかった。そこで、時間分解能 10 ps の光オシロスコープ（浜松ホトニクス:00S-01）を用いて測定した。この場合、材料分散から計算される出射パルス幅は 3 ps 程度と計算されるが、伝搬モードの分散に伴うパルス幅広がりが大きい場合には、測定できる可能性がある。

実験系を図 15 に、実験結果を図 16 に示す。用いた光パルスは、波長 800 nm、パルス幅 40 fs、0.6  $\mu$ J/pulse、1 kHz 繰り返しであった。測定の結果、パルス幅はファイバー通過前 (a) で 18.1 ps であり、これがトリガー・ジッタを含んだ測定系の時間分解能の限界の数値である。ファイバー通過後のパルス幅 (b) は 19.4 ps であり、測定系の限界分解能との比較から、実際のパルス幅は、 $(19.4^2 - 18.1^2)^{1/2} = 7$  ps と求まる。但し、測定系の時間分解能より小さい値であるため換算値の確度は高くない。ただし、材料分散の影響以上にパルス幅が大きく広がっている可能性は少ないことがわかった。

また、パルスエネルギーを 47  $\mu$ J/pulse として実験した場合、図 17 のようにメインパルスの後に予期しないパルス成分が生じた。この原因は明確になっていないが、ファイバー出力パルス光を非熱加工に利用するには、種々の工夫が必要であることが明らかになった。

以上、高強度の光伝送に適していると思われる SI 型ファイバーを通過するとパルス幅は広がることが確認された。

次に、種々の光ファイバーに対して、フェムト秒光パルスを導光させた場合の特性をより詳細に評価した。石英系の GI 型、SI 型ファイバーに加えて、アルミ反射コート付き中空光ファイバーの三種に対して、パルス幅広がりの有無、光ファイバー中での非線形効果に起因するスペクトル広がりの有無、ファイバー出射点における強度分布を測定した。光パルス幅は、ストリークカメラ（時

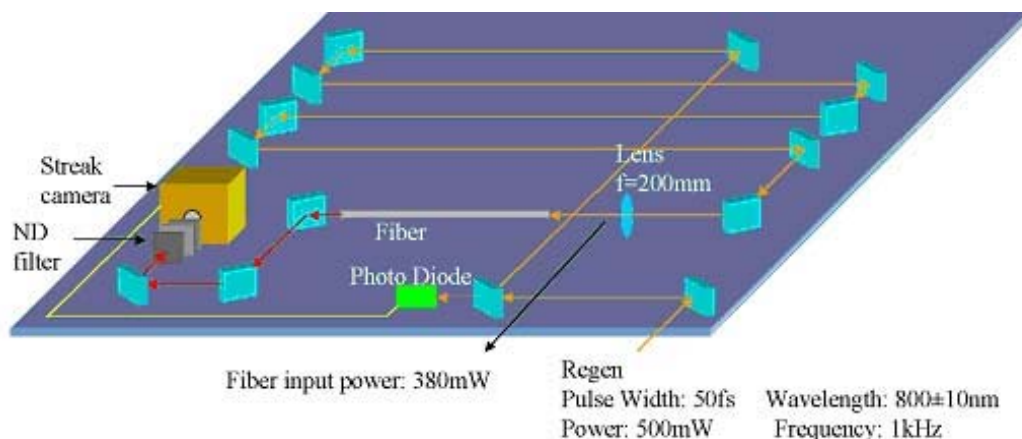


図 18 ストリークカメラによるパルス幅測定系

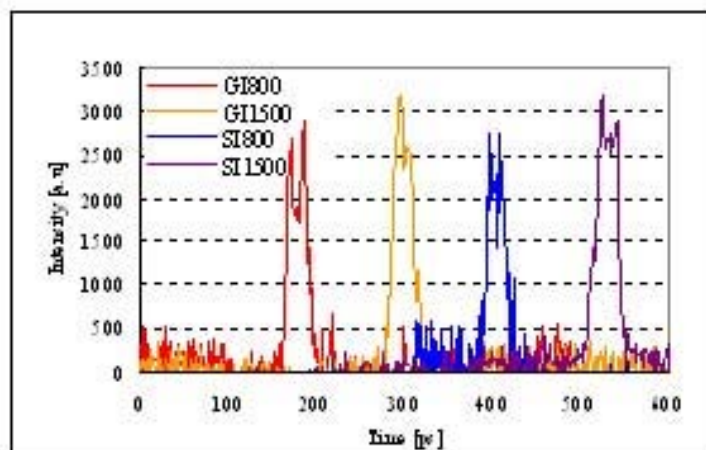


図 19 種々の石英系光ファイバーからの出射パルスのパルス波形計測結果

間分解能 3 ps 以下) を使用してパルス幅測定をおこなった。測定光学系を図 18 に示す。光ファイバーへの入射光パルスは、再生増幅光 (パルス幅 50 fs、中心波長 800 nm、繰り返し 1 kHz、ファイバー入射点における光強度 380 mW) を用いた。被測定光の一部を分岐して発生させる電気トリガー信号を、被測定光に対して数 10 ns 早いタイミングでストリークカメラに入力する必要があるため、今回の実験では、光パルスをトリガー信号に対して光学定盤上で 16.4 m 遅延させる光学系を構築した。この距離は、光パルスの遅延時間に換算して約 55 ns に相当する。

測定された時間波形を図 19、図 20 に示す。また、測定した時間波形から得られた評価結果を表 1 に示す。

石英系光ファイバーにおいては、いずれもパルス幅が大きく広がっており、時間波形も均一に広がっておらず、パルスのピークが 2 つに分離した形のものが観測されている。中空ファイバー伝播後の出力光パルス幅は、ストリークカメラの時間分解能によって制限されていると考えられ、真のパルス幅は入射パルスと比較してあまり広がっていない可能性が高い。アルミ反射コート付き中空ファイバー 1 m を伝播した光パルス幅を SHG 自己相関器により別途評価したところ、210 fs で出力されていることが確認された。以上の評価結果より、ファイバー長の違いを加味しても、中空ファイバーの伝送特性が優れていることは明らかである。この結果は伝送媒質が空気であるため材料分散や非線形効果によるパルス幅広がりほとんどないことを示唆している。

また、石英系光ファイバーと中空光ファイバーにおける光ファイバー出射端での強度分布を測定した結果を図 21 に示す。石英系光ファイバーは光がファイバーコア部の中心部を伝播しているのに対して、中空ファイバーはコア部の周辺を伝播していることがわかった。ただし、中空光ファイ

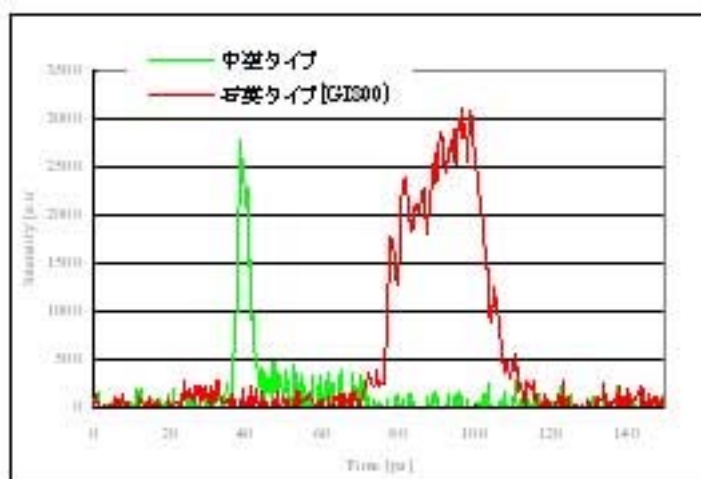


図 20 石英系ファイバーと中空ファイバーからの出射パルスのパルス波形計測結果



表1 各種ファイバにおける出射光パルス幅計測結果

	サンプル種類	出射光パルス幅
石英系ファイバー	SI 型コア 800 $\mu\text{m}$ 1.5 m	21 ps
	GI 型コア 800 $\mu\text{m}$ 1.5 m	25 ps
	SI 型コア 1500 $\mu\text{m}$ 1.5 m	26 ps
	GI 型コア 1500 $\mu\text{m}$ 1.5 m	23 ps
中空ファイバー	アルミ反射コート付き コア 1000 $\mu\text{m}$ 1.0 M	0.21 ps

バーの場合には、光の入射の方法によって、空間強度分布が変化することも観測された。また、中空光ファイバーは曲げ特性が悪く、わずかに傾げるだけでも伝送できる光強度が極端に減衰した。

以上より、強度分布や曲げによる減衰があるものの、高強度フェムト秒パルス光の高効率、高ピークパワー伝送に中空ファイバーが有効であることが示された。

波形制御を用いたフェムト秒光パルスの石英ファイバー伝送

本事業で開発した小型・高効率・高耐光強度 フェムト秒波形整形器を用いて、長さ 100 m の GI 型マルチモードファイバーから 170 fs の光パルスを、世界で初めて出力することに成功した。詳細を以下に述べる。

時間波形の制御を行ったファイバー出力パルス光での加工が可能のように、ファイバーでフェムト秒パルスを伝送する方法を検討した。従来の方でフェムト秒光パルスをファイバー伝送させると、ファイバーの分散によりパルス波形が歪む。そこで、ファイバー出力端においてフェムト秒パルスが得られるように、あらかじめチャープさせた光パルスをファイバーに入力して、ファイバーの分散で出力時に短パルスに圧縮する方法、及び波形整形技術を併用した方法を検討した。

本概念を実証するために、オシレーターから出力される低強度フェムト秒を用いて実験を行った。実験にはコア径 50  $\mu\text{m}$  の GI 型ファイバーを用いた。コア径の大きなマルチモードファイバーを用いることで、シングルモードファイバーの場合より、大きなエネルギーを伝送できると期待されるが、その一方で、伝播モードの分散の影響が重畳されて、出力端から短パルスを出力することが困難になる。また、他の部屋へ伝送して用いることも想定して、長さ 100 m のファイバーを用いた。

伝送前の光パルス幅は、図 22 に示す SHG 自己相関波形から 95 fs であった。このフェムト秒光パルスを 100 m のファイバー伝送させると、ファイバーの分散によってパルス幅が 382 ps に広がる。ファイバーの 2 次の分散量は、ファイバーの材質と長さから計算で見積もることが可能であり、グレーティング対を用いてこれをあらかじめ補正して光ファイバーに入力した。実験では、グレー

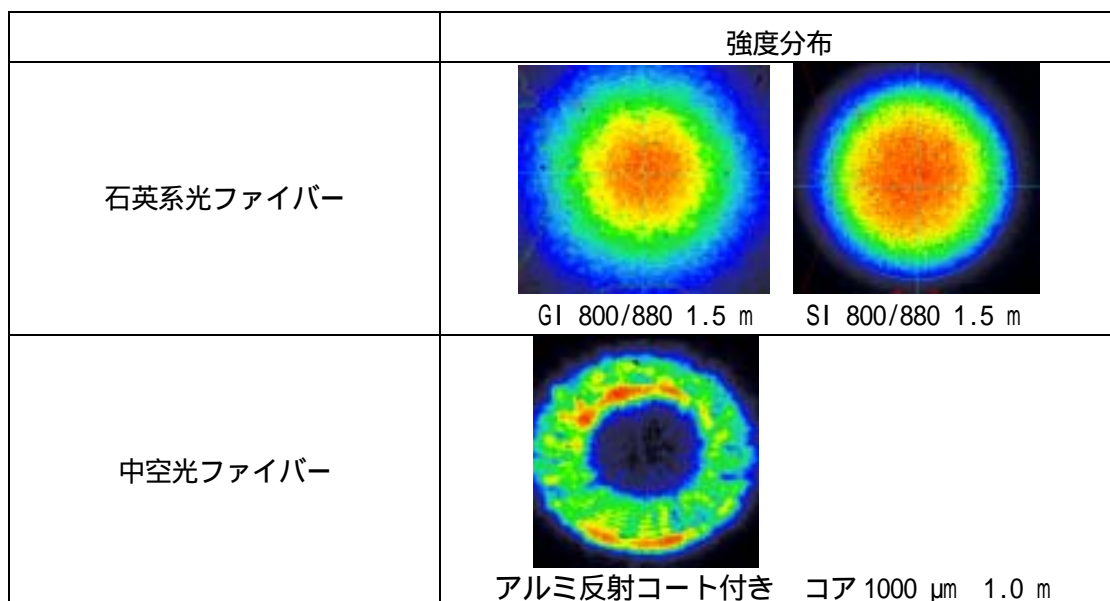


図 21 出射パルス光の強度分布測定結果  
(赤色の強度が強く、青色に近づくにつれて小さい)

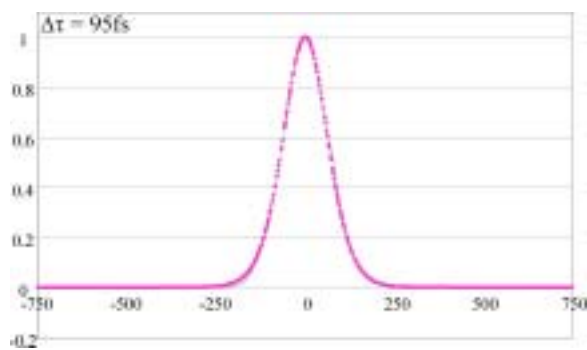


図 22 光パルスの SHG 自己相関波形

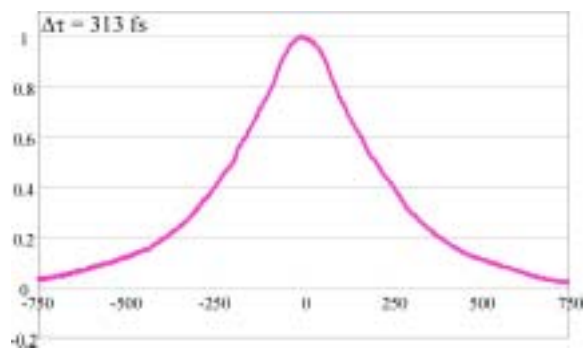


図 23 2次分散補正後のファイバー出力パルスの SHG 自己相関波形

ティング対の間隔を調整して2次分散を正確に補正した。

図 23 は、2次分散補正後のパルス幅測定結果であり、パルス幅は 313 fs であった。これは、2次分散以外の高次の分散や伝播モードの分散の影響と考えられる。このパルスに対して、波形整形器を自動制御し、短パルス化を試みた。

実験の構成を図 24 に示す。パルス幅のモニター量として、SHG 自己相関器の SHG 信号強度を用い、これが増加するように制御をおこなった。自動制御の過程で、この SHG 強度が少しずつ大きくなっていく様子を図 25 に示す。最適な位相パラメータの探索のアルゴリズムには、SA (Simulated Annealing) 法を用いた。

尚、この実験では、空間光変調器の4チャンネル分を1つの素子として動作させ、128チャンネルの分解能とすることで制御パラメータ数を減らし、解への収束時間を短くするようにした。

最終的に得られた波形整形パルスの SHG 自己相関波形を図 26 に示す。パルス幅は 170 fs であり、100 m のマルチモードファイバーを伝播させた後でも、パルス広がりを入力パルスの2倍以下にすることができた。

以上のように、低強度フェムト秒光パルスに対して、ファイバー伝搬パルスに対する波形整形技術の有効性を確認できた。高次分散が支配的な場合には、波形整形器で与えた変調を専用部品で与えることで安価な装置が構築できると期待される。また、伝播モードの分散が支配的な場合には、刻々と変化する条件に対して随時補正していくための波形整形器と自動制御機構を組み込むことで対応可能である。

以上の実験で用いた光パルスは、80 MHz 繰り返しの平均強度 40 mW のパルスであり、ファイバー内での光非線形効果は生じていない。加工に適用可能な高強度フェムト秒光パルスに対する本手法の適用性を評価するために、チャープした再生増幅光パルスに対する光ファイバー入射端面の損傷しきい値を調べた。チャープパルスのパルス幅は、長さ 100 m のファイバーを利用することを想定し、この長さのファイバーで短パルス化されると思われる約 400 ps とした。

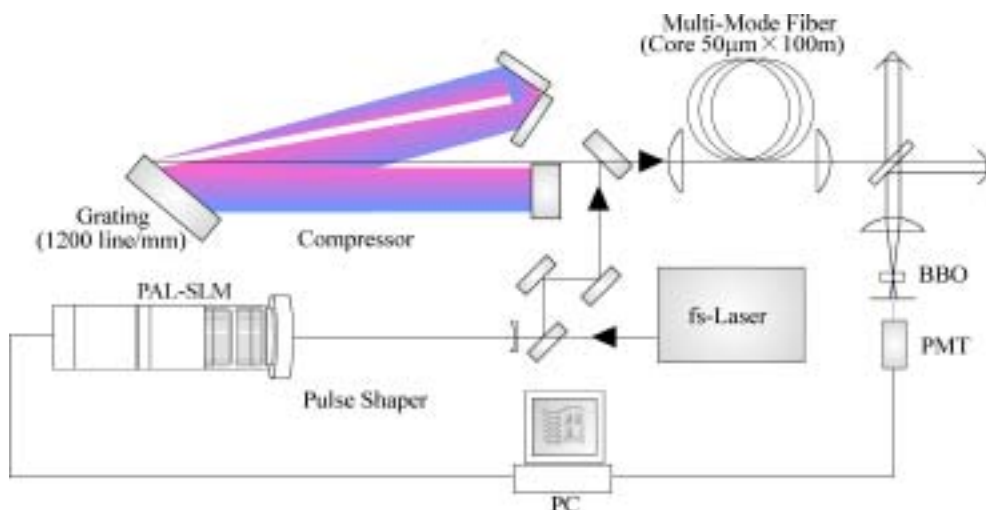


図 24 自動制御によるパルス圧縮の実験系



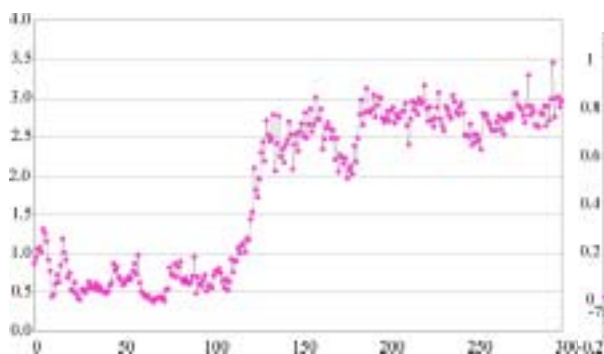


図 25 自動制御過程での SHG 強度の変化

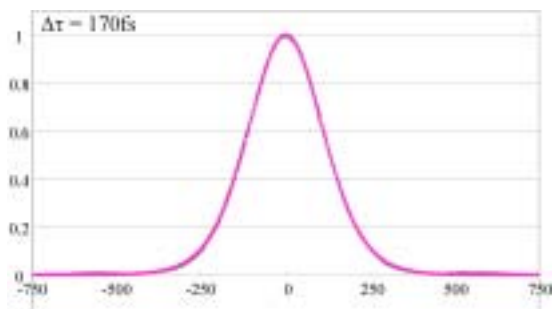
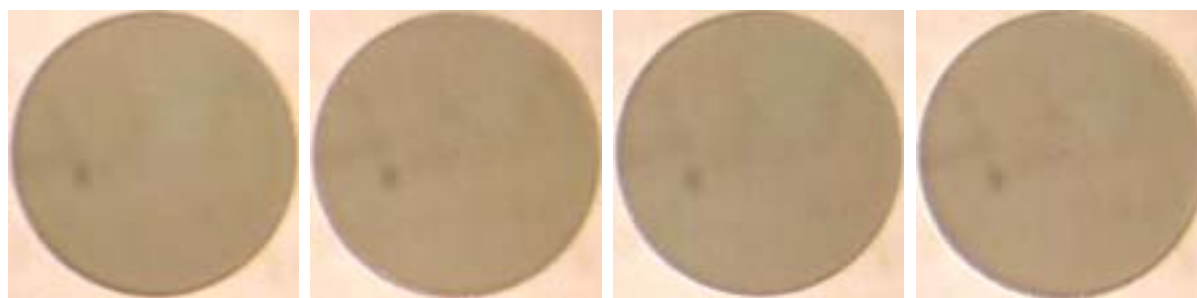


図 26 波形整形パルスの SHG 自己相関波形

平凸レンズ（焦点距離 60 mm, AR コート付）を用いて、チャープパルス（GI、コア径 50  $\mu\text{m}$ 、長さ 2 m）に集光する。10 分間照射した後に入射端面と出射端面とを観測した。実験結果（丸い物体がクラッドで直径 125  $\mu\text{m}$ ）を図 27 に示す。入射光強度（レンズ透過後）が 73.2 mW に達した時点で入射端面の損傷が確認された。出射端面の破壊は観測されなかった。以上から、パルス幅約 400 ps のチャープパルスを焦点距離 60 mm の平凸レンズで集光した場合の最大入射光強度は約 60 mW（出射強度 25 mW）であることが明らかになった。しかしながら、ファイバー内部での非線形効果を回避できないために、本手法を用いても石英ファイバーによる高強度フェムト秒光パルス伝送が困難であることが確認された。

#### 中空ファイバーによる高強度フェムト秒光パルスのファイバー伝送

中空ファイバーの高強度フェムト秒光パルス伝送について、出力光の特性評価を行った。中空ファイバー（長さ 1.5 m、コア径 700  $\mu\text{m}$ ）を曲げずに用いた場合において伝送効率は約 80 % であり、石英ファイバー以上の効率が得られることがわかった。しかし、約 200  $\mu\text{J}$  以上のパルスエネルギーでは空気のブレイクダウンが生じ、伝送効率の低下、パルス波形の歪等が生じることが確認された。詳細を以下に述べる。



入射端面 出射端面  
(e) 入射強度 37.2 mW、出射強度 15.7 mW

入射端面 出射端面  
(f) 入射強度 51.6 mW、出射強度 21.7 mW



入射端面 出射端面  
(g) 入射強度 58. mW、出射強度 24.2 mW

入射端面 出射端面  
(h) 入射強度 73.2 mW、出射強度 27.8 mW

図 27 f 60 の平凸レンズを用いた場合の端面損傷評価結果

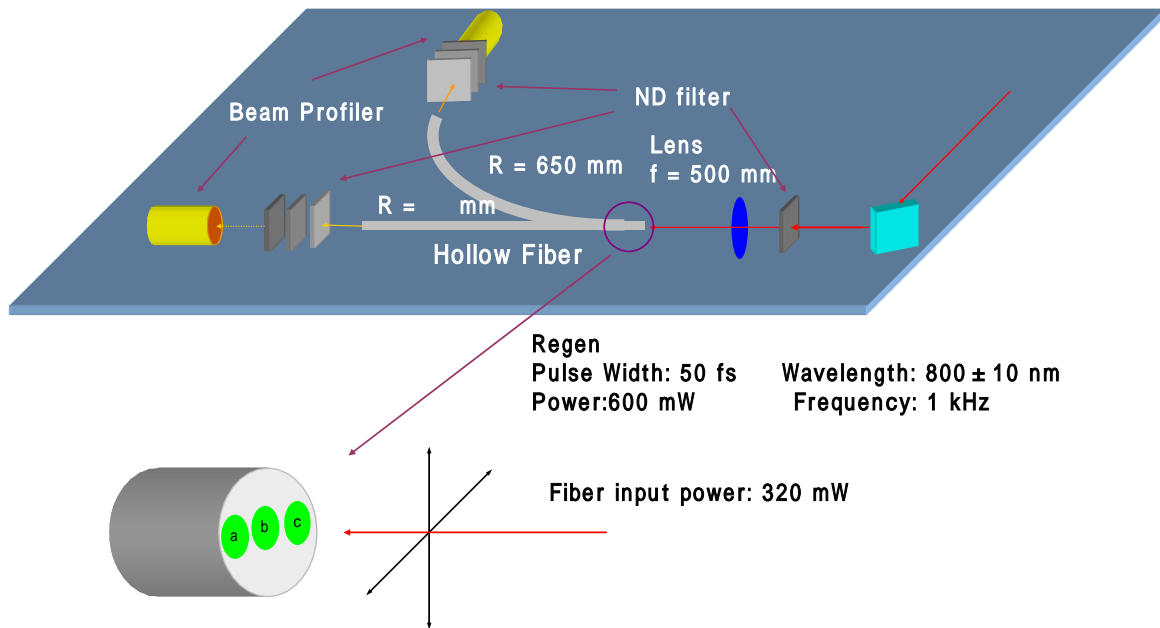


図 28 実験系

ファイバー伝搬パルス光による非熱加工を目指して、中空光ファイバーの利用について検討した。高強度フェムト秒光パルスの中空光ファイバー伝送特性を調べた。出射ビームの強度分布は加工面に大きな影響を与えることが予想されるため、種々の条件で、中空光ファイバー（長さ 1.5 m、コア径 700  $\mu\text{m}$ ）の出力光の強度分布測定を行った。ファイバーの曲げ曲率半径を  $R$  と表したとき、 $R =$  （入射端面に対して出射端面  $180^\circ$  の位置）、 $R = 650 \text{ mm}$ （入射端面に対して出射端面  $90^\circ$  の位置）の時の出力光強度分布を測定した。強度分布測定にはレーザービームアナライザー（Beam View 33-2700-LC：コヒーレント社製）を用いた。

図 28 に実験系を示す。中空光ファイバーは、入射平均光量が 320 mW を越えると損傷するため、ND フィルターで 320 mW に減光してから実験した。中空光ファイバーは内面がアルミ反射コートしたものを使用した。焦点距離 500 mm のレンズで集光し、それぞれ、集光ビームの位置を a, b, c の 3 個所とした場合について強度分布を計測した。なお、強度分布を測定する際、必要に応じて ND フィルターを挿入した。

$R =$  と  $R = 650 \text{ mm}$  の時の強度分布測定結果をそれぞれ図 29 と図 30 に示す。 $R =$  の場合には光入射位置によらずほぼ同じ出力光強度分布となるが、 $R = 650 \text{ mm}$  の時には入射位置が異なると明らかに出力光強度分布が変化し、曲げ方向に対して外側 (a) に入射すると良い強度分布となることが明らかになった。また、曲げ方向に対して内側 (c) に入射すると光ファイバーの外周部分

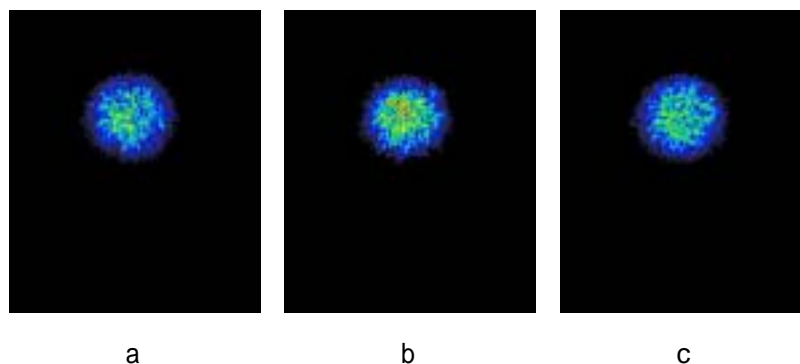


図 29  $R =$  の時の強度分布測定結果

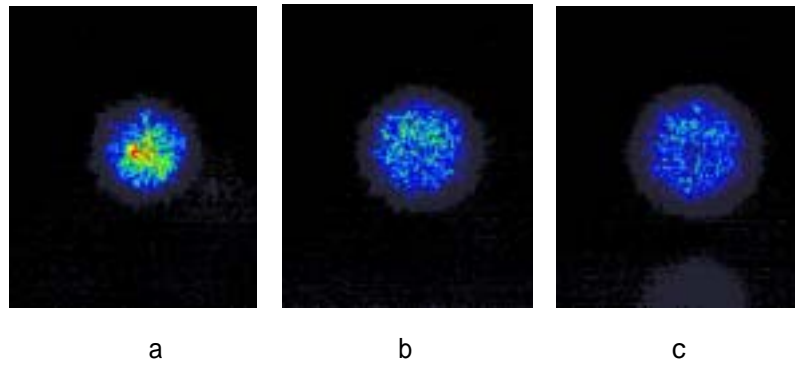


図 30 R = 650 mm の時の強度分布測定結果

から光が出力し、中央部分には光が存在しない強度分布になった。

次に、R = と R = 650 mm の時の伝送効率を測定した。入射位置 a, b, c の違いに対して、R = の時は b が、R = 650 mm の時は a が最も伝送効率が高かったため、この条件で入射光量を変化させて測定した。測定結果を図 31 に示す。R = の時の伝送効率は約 80 % であり、石英系光ファイバー以上の効率で伝送することができた。また、R = 650 mm の時の伝送効率は約 60 % であり、光ファイバーを曲げることによって、およそ 25 % の光が損失することが分かった。しかし、これまで調べてきた種々の光ファイバーのなかでは、最も曲げに対する影響が少なかった。また、ファイバー入力光量が約 200 mW 以上になると、空気のブレイクダウンが生じ、伝送効率が少し悪化した。

以上、中空光ファイバーのフェムト秒光パルス伝送における出力光の強度分布と伝送効率を明らかにし、光ファイバー利用加工の可能性を示す有用なデータを取得することができた。

中空光ファイバーの出力光の強度分布を変化させる要因は曲げと入射位置であり、同時に射出光量にも影響を与えることを明らかにした。特に R = 650 mm の曲がった状態では強度分布の変化が顕著に表れるため、加工実験を行う際にはこれをモニターする必要がある。また、空気のブレイクダウンが伝送効率を悪化させたり光ファイバーを損傷させたりするため、さらに射出光量を増やすには、真空引き等の対処が必要と考えられる。

#### 真空中空ファイバーによる高強度フェムト秒光パルスのファイバー伝送

中空ファイバーの入・出射部に真空部品を装着し、真空度を 0.2 Pa に減圧することを着想した。真空化中空ファイバーで、高強度フェムト秒パルス光のファイバー伝送を実現するとともに、伝送

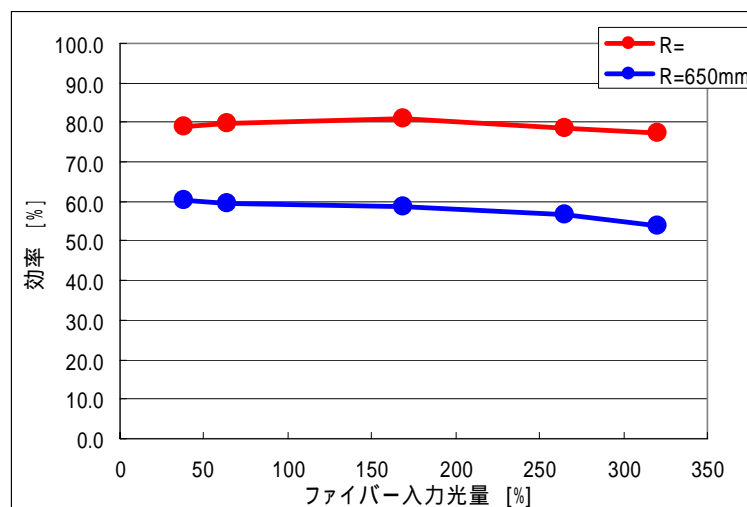


図 31 伝送効率の測定結果

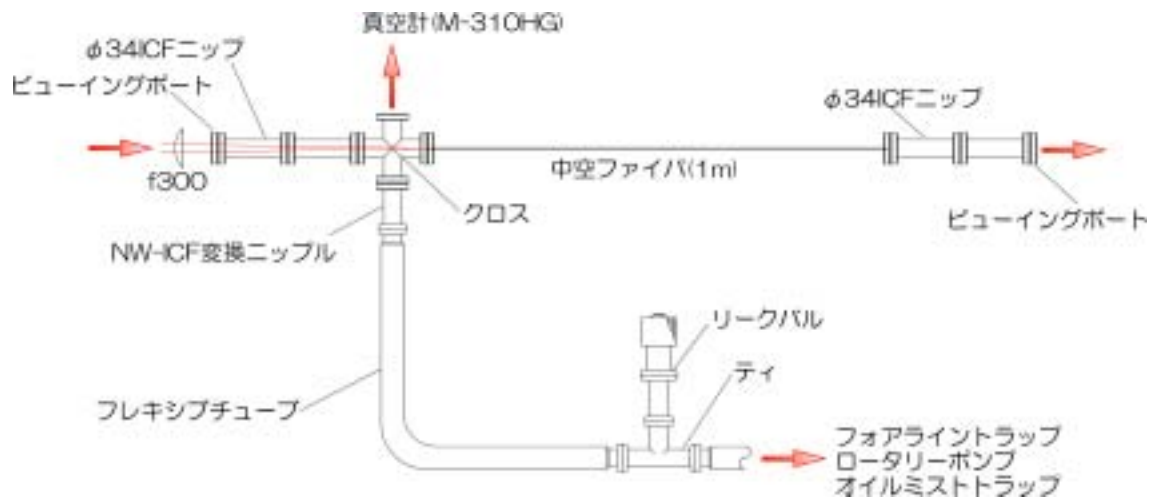


図 32 真空化中空ファイバーの光伝送実験系

パルスを用いて被加工物を移動しない方式でのフェムト秒加工を世界で初めて実現した。この過程で、ファイバー出射部に独創的な機構を取り入れ、特許出願した。詳細を以下に述べる。

これまでの実験により、高強度フェムト秒光パルスを伝送するためには、中空ファイバーが有効であると考えられる。ただし、大気中に高強度のフェムト秒光パルスを集光すると、集光点において空気のブレークダウンが生じ、伝送効率の劣化、パルス波形の歪、空間モード歪、スペクトル広がり等が生じる。これらの問題を回避するために、中空光ファイバー周辺の真空化を検討した。

実験の構成を図 32 に示す。高強度フェムト秒光パルスの集光部分に改良をおこない、集光には、焦点距離 300 mm の AR コーティング付き平凸レンズを用いた。また、中空ファイバーには、長さ 1.0 m、コア径 530  $\mu\text{m}$ 、アルミ反射コート付きのものを用い、これに再生増幅光パルスを入射した。

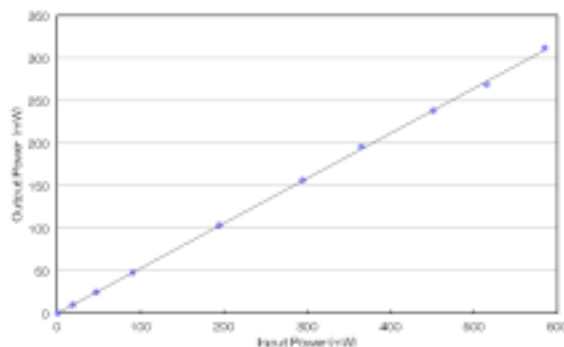


図 33 光入出力特性

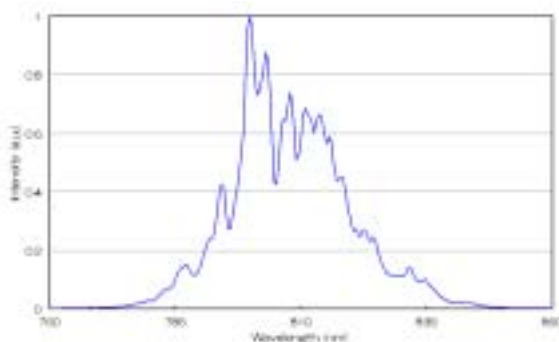


図 34 ファイバー出力光のスペクトル

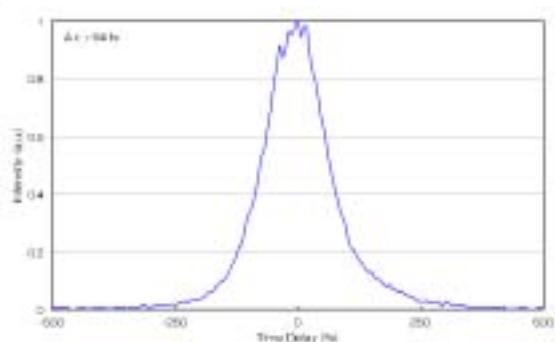
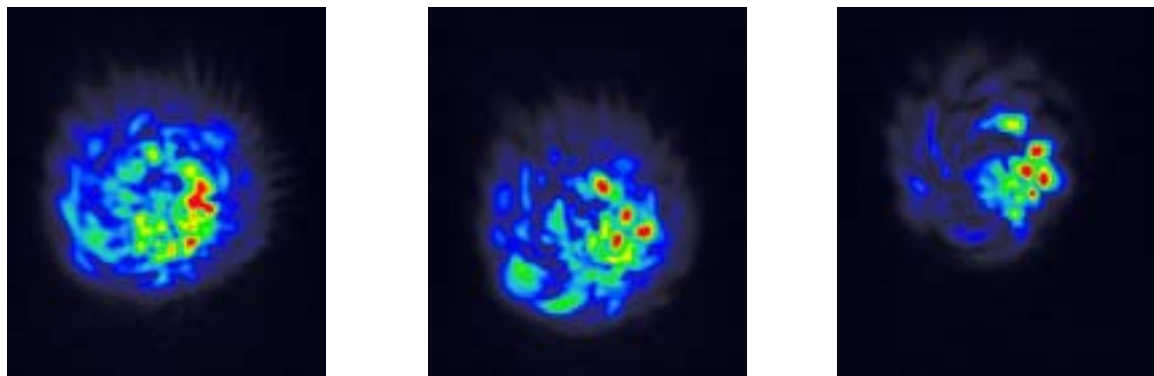


図 35 ファイバー出力光の SHG 自己相関波形

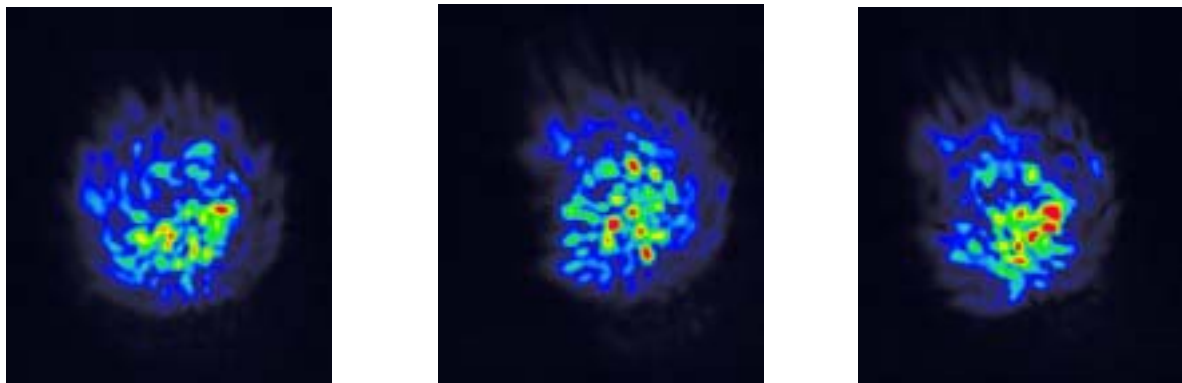


f = 100 mm

f = 200 mm

f = 300 mm

(a) 直線状態 ( R = ∞ )



f = 100 mm

f = 200 mm

f = 300 mm

(b) 曲線状態 ( R = 650 mm )

図 36 コア径 300  $\mu\text{m}$  ファイバー出力光の空間強度分布計測結果

この構成で、0.36 Pa の真空度が確認された。入射光強度に対する出射光強度を測定した結果を図 33 に示す。これまで実施してきた大気環境下では、入射光強度を上げると集光点において空気のブレイクダウンが生じ、入力伝送効率が低下して入出力特性の飽和が観測されたが、図 33 ではこの傾向がなく、実験可能な最大入射光強度に至るまで出射光強度は直線で増加した。

最大入射光強度 585 mW を入射した場合の、出力パルスのスペクトルおよび SHG 自己相関波形を、それぞれ図 34 および図 35 に示す。図 34 から、スペクトルに大きな変化がないことがわかった。すなわち、自己位相変調等の非線形効果が回避できたものと判断される。また、入射パルス幅 50 fs に対して、図 35 で観測された出力パルス幅は 94 fs であった。これは、伝播モードが多数存在することに起因して、伝播モードごとに伝搬長が異なるためと思われるが、そのパルス幅広がりには 2 倍以下で、100 fs 以下の光パルスを出力できているため、非熱加工を行うには十分な短パルスである。よって、高強度フェムト秒光パルスの伝送において真空化中空ファイバー系が有効であることが確認できた。

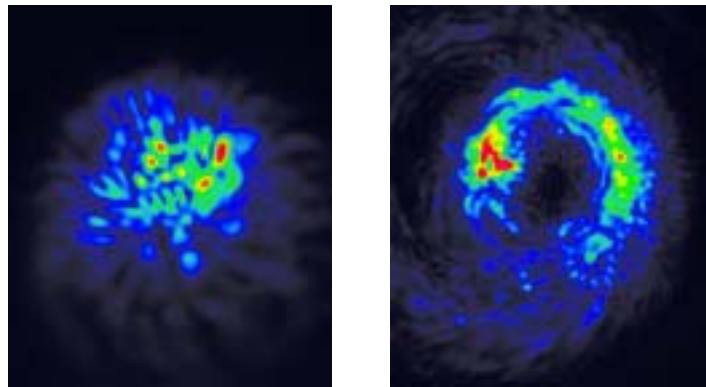
以上、真空化中空ファイバー系で、集光点における空気のブレイクダウンと非線形効果によるスペクトル変化を回避することができ、伝送効率の低下がなく、パルス幅 94 fs、出力光強度 312 mW の伝送を実現した。

空間モードの改善を図るために、コア径 300  $\mu\text{m}$  の真空化中空ファイバーを用いて実験を行った。ファイバーには、長さ 1.0 m、コア径 300  $\mu\text{m}$  (銀反射膜) を、集光レンズには焦点距離 100 mm、200 mm、300 mm の AR コーティング付き平凸レンズを用いて実験した。真空度は、これまでと同様に約 0.3 Pa で実験した。

ファイバーを(a) 直線状態 ( R = ∞ ) と (b) 曲線状態 ( R = 650 mm ) とし、集光レンズを焦点距離 100 mm、200 mm、300 mm と変化させた時の出力光の空間強度分布計測結果を図 36 に示す。比較のため、図 37 にコア径 700  $\mu\text{m}$  のファイバーと焦点距離 300 mm の集光レンズを用いた場合の (a) 直線状態 ( R = ∞ ) と (b) 曲線状態 ( R = 650 mm ) の出力光の空間強度分布計測結果を示す。

これらの結果から明かなように、コア径 300  $\mu\text{m}$  のファイバーを用いた場合には、ファイバーを





(a) 直線状態 ( R = ) (b) 曲線状態 ( R = 650 mm )

図 37 コア径 700  $\mu\text{m}$  ファイバー出力光の空間強度分布計測結果 ( f = 300 mm )

表 2 各種条件における伝送効率計測結果

	焦点距離 (mm)	伝送効率 (%)
直線状態 R =	100	7.0
	200	17.1
	300	31.1
曲線状態 R = 650 mm	100	5.6
	200	5.8
	300	9.5

曲げた状態にすると出力光の強度分布が極端に悪化し、中心付近に光が存在しなくなったが、コア径 300  $\mu\text{m}$  の場合にはファイバーを曲げても大きな変化はなく、ファイバーを曲げた際の空間強度分布を改善することができた。また、コア径 300  $\mu\text{m}$  のファイバーは焦点距離が短いレンズを用いた場合の方が空間強度分布が若干良い。

実験時の伝送効率を表 2 にまとめて示す。集光レンズの焦点距離は長いほど伝送効率が良い。一方、いずれの焦点距離のレンズでもファイバーを曲げるにより伝送効率が低下するが、その低下の度合いは焦点距離が短い方が小さかった。また、ファイバー出力光のパルス幅は、入射したパルス幅 60 fs の 2~3 倍程度であり、加工において大きな問題にはならない程度と思われる。

以上より、コア径 300  $\mu\text{m}$  のファイバーにおいては、コア径 700  $\mu\text{m}$  のファイバーよりも曲げによる空間モードの歪みが少ないことがわかった。また中抜けしていない空間モードパターンによって高い集光性が得られ、高品質の加工が可能になると期待される。一方で、コア径が小さくな

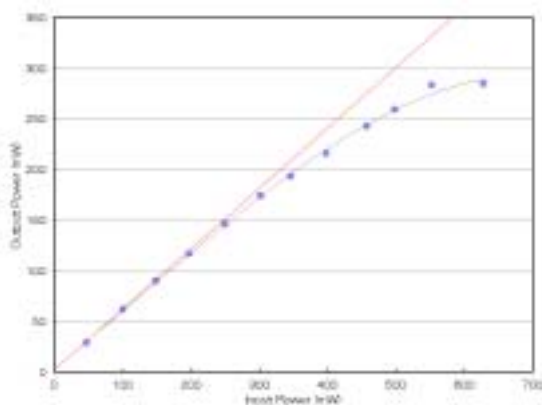


図 38 大気圧下における入出力特性

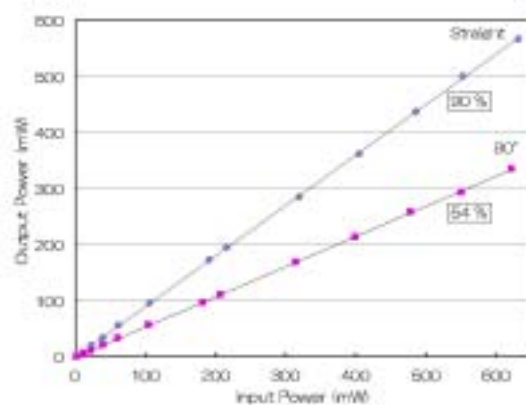
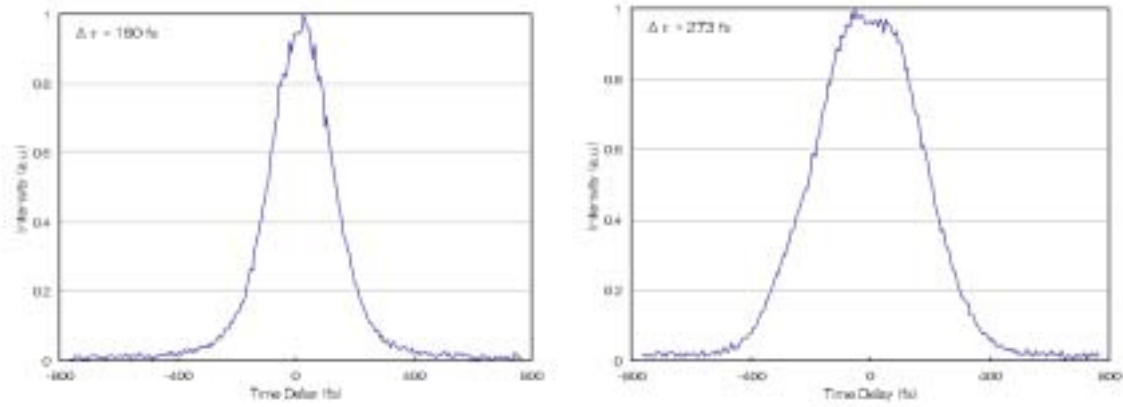


図 39 0.2 Pa における入出力特性





(a) 直線状態 (b) 90° 曲げた状態(R=500)

図 40 ファイバー出力光の自己相関波形

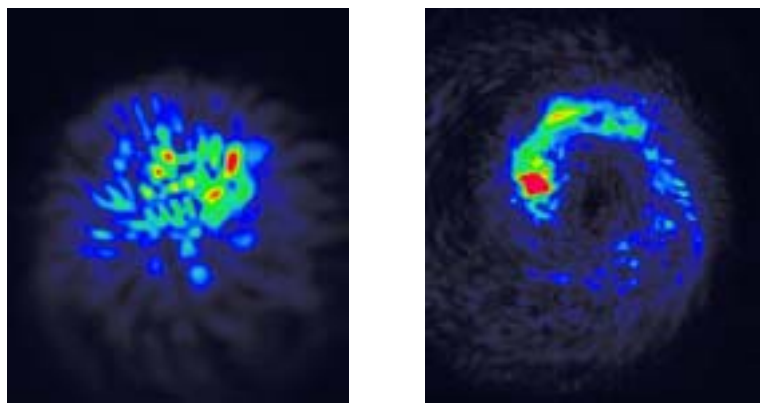
ることにより伝送効率が低下し、曲げに対する変化も大きいことが明らかになった。

AR コーティング付きの合成石英の入射および出射ウィンドウを用いて、伝送効率の劣化・パルス波形歪等の抑制を試みた。中空ファイバーには、コア径 700  $\mu\text{m}$  (日立電線(株)製、銀反射膜、長さ 1 m) のものを用いた。

大気中における中空ファイバーの伝送効率を図 38 に示す。大気中では、入射光強度の増加に伴って伝送効率が低下した。一方、真空度を 0.2 Pa にした場合の入出力特性を図 39 に示す。高真空化することにより、ブレークダウンによる伝送効率の低下が回避され、飽和のない入出力特性を実現することができた。この時、光ファイバーを直線状態としたとき、632 mW の入力に対して 567 mW の出力 (伝送効率 90 %)、90° 曲げた状態 (R=500) のとき 622 mW の入力に対して 336 mW の出力 (伝送効率 54 %) を得ることができた。

中空ファイバー伝送後の自己相関波形を図 40 に示す。ファイバーを直線状態とした場合のパルス幅は 160 fs であり、90° 曲げた状態でのパルス幅は 273 fs であった。入射光のパルス幅 50 fs に対してパルス幅が広がっているのは、光がファイバー内部を伝播する際に生じる伝播モード分散によるものと考えられる。

また、このときのファイバー出力光の空間強度分布を図 41 に示す。直線状態(a)では良質な空間強度分布が観測されたが、90° 曲げた状態(b)では円環状の空間強度分布が観測された。この結果は、90° 曲げた際の伝播モード分散が増加していることを示唆している。



(a) 直線状態 (b) 90° 曲げた状態(R=500)

図 41 ファイバー出力光の空間強度分布

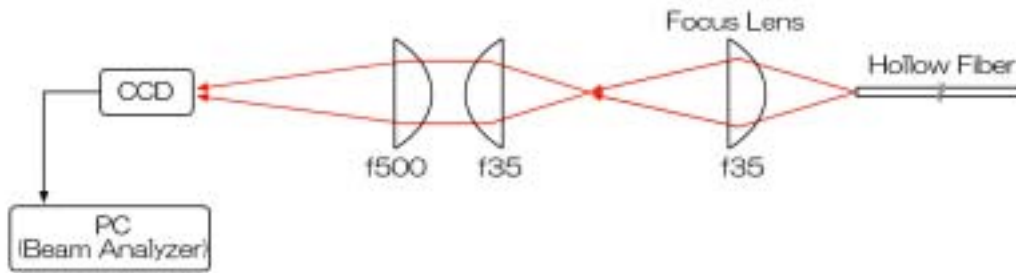


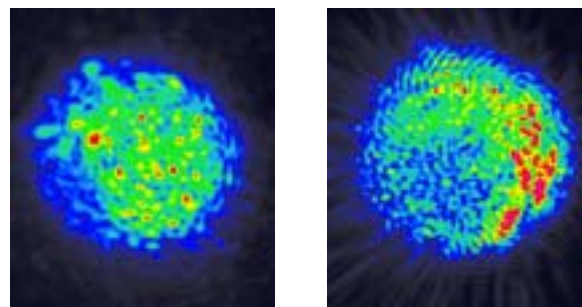
図 42 ビームスポット観測光学系



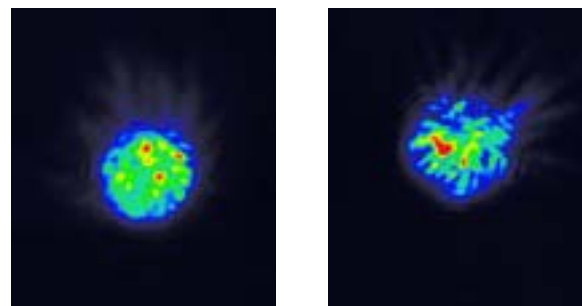
図 43 レーザー出力光を集光した場合のビームスポット形状計測結果  
(横 : 247  $\mu\text{m}$  × 縦 : 280  $\mu\text{m}$ )

次に、加工状態を左右するビームスポット形状を計測した。ビームスポットを計測するための構成を図 42 に示す。これまでに行った加工条件におけるビーム形状を把握するために、中空ファイバー出射光を焦点距離 35 mm の平凸レンズで直接集光し、集光点におけるビーム形状を観測した。また、比較のためにレーザーから出力された光を焦点距離 35 mm の平凸レンズで集光した場合のビームスポット形状も同時に計測した。

レーザーから出力された光を集光した場合の測定結果を図 43 に、中空ファイバー出射光を集光した場合の測定結果を図 44 に示す。コア径 700  $\mu\text{m}$  における集光径は 200  $\mu\text{m}$  程度、コア径 320  $\mu\text{m}$  における集光径は 100  $\mu\text{m}$  程度であることが確認された。レーザーから出力された光を集光

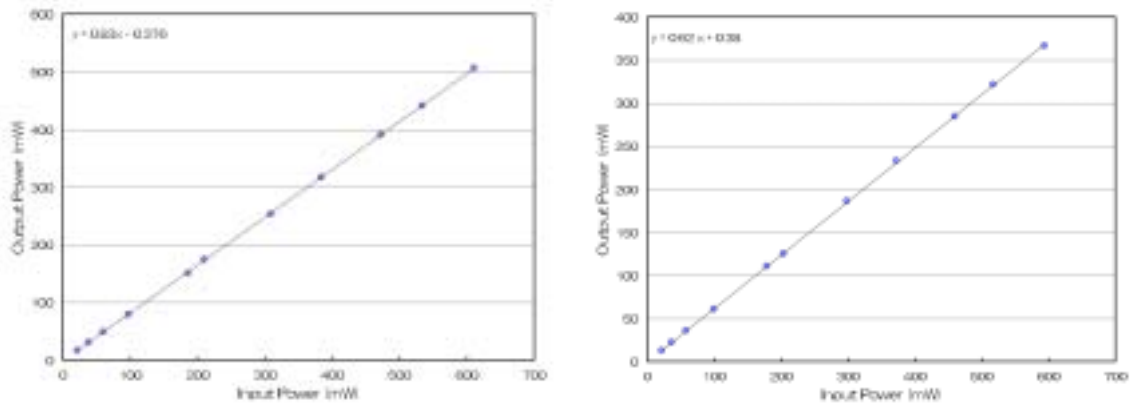


(a) コア径 700  $\mu\text{m}$ 、ストレート (b) コア径 700  $\mu\text{m}$ 、90°



(c) コア径 320  $\mu\text{m}$ 、ストレート (d) コア径 320  $\mu\text{m}$ 、90°

図 44 中空ファイバー出力光を集光した場合のビームスポット形状計測結果  
(横 : 247  $\mu\text{m}$  × 縦 : 280  $\mu\text{m}$ )



(a) ファイバー長 2 m (b) ファイバー長 5 m

図 45 ファイバー長に対する伝送特性の変化

した場合のビームスポット径 (12  $\mu\text{m}$ ) と比較すると 20 倍程度に広がっているが、コア径 700  $\mu\text{m}$  およびコア径 320  $\mu\text{m}$  のファイバー共に、コア径以下のビームスポット径が得られており、加工に十分な光密度(コア径 700  $\mu\text{m}$  の場合で 1.7 J/cm<sup>2</sup>/Pulse)が得られることが確認された。また、コア径 700  $\mu\text{m}$  のファイバーを 90° (R=500) 曲げた状態では円環状の強度分布となることが確認された。

これまでに用いた中空ファイバーは、コア径が 700  $\mu\text{m}$ 、長さが 1 m のものであった。加工の用途によっては、1 m 以上のファイバー長が必要になることが想定されるため、長さが 2 m、および 5 m のファイバー(コア径は共に 700  $\mu\text{m}$ )を用いた場合の伝送特性を評価した。ファイバーを直線状態とした場合に得られた伝送特性を図 45 に示す。伝送効率はそれぞれ 83 %および 62 %であり、0.41 dB/m の損失が生じることがわかった。



図 46 ファイバー出力パルス光による加工実験結果 (厚さ: 0.5mm、加工速度: 5  $\mu\text{m}/\text{sec}$ )

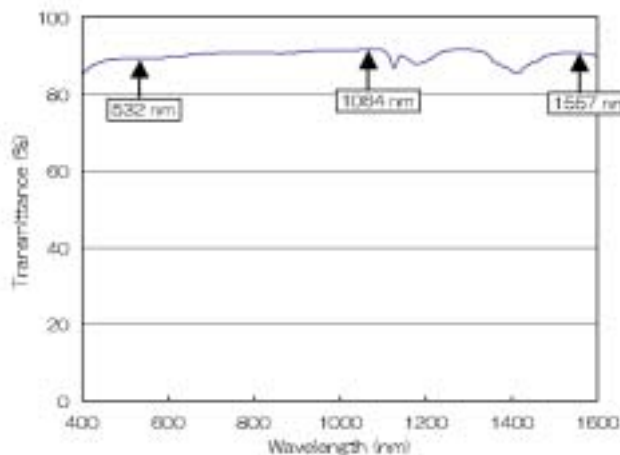


図 47 加工サンプル (PET 樹脂) の分光透過特性



図 48 Yb ファイバーレーザー（中心波長 1085 nm、光強度 80 W）による加工結果



図 49 高強度フェムト秒レーザー光による加工結果

次に、中空ファイバーの出射部を走査することにより、金属加工実験を実施した。ファイバーをほぼ直線状態とし、ファイバー出射部に平凸レンズ（焦点距離 35 mm、両面 AR コート付）を装着し、ファイバー出射部を 5  $\mu\text{m}/\text{sec}$  にて走査することにより金属サンプル（炭素工具鋼、材質：S K-2）を加工した結果を図 46 に示す。ファイバー伝送した高強度フェムト秒パルス光により金属加工を実現することができた。

また、高強度フェムト秒パルス光による加工の優位性を示すために、透明材料の加工を行った。サンプルとして用いた PET 樹脂（厚さ 1 mm）の分光透過特性を図 47 に示す。PET 樹脂は可視域から近赤外域にわたって、90%程度の透過率を有する上に、耐熱温度が 68 と低いために、材料が光を吸収する際に発生する熱を利用する従来のレーザー加工では加工が困難な材料である。

まず、Yb ファイバーレーザー（IPG 製、YLR-100、CW、1085 nm、最大 100 W）を用いて加工実験を行った。出力光強度を 80 W に設定し、トリプレットレンズ（焦点距離 50 mm：シグマ光機）を用いて上記サンプルに集光した。メーカー側の資料によると焦点距離 50 mm のレンズを用いて集光した場合のビームスポット径は 11.4  $\mu\text{m}$  である。このときの加工結果の一例を図 48 に示す。この場合の加工速度は 600 mm/sec である。尚、加工速度を遅くした場合、あるいは光強度を上げた場合には、サンプルが加工台から弾き飛ばされるほどの破壊が生じて、切断には至らなかった。

次に、真空化中空ファイバー（真空度 0.17 Pa）を用いて伝送された高強度フェムト秒パルス光（入射前の中心波長 800 nm、繰り返し 1 kHz、パルス幅 50 fs、エネルギー 630  $\mu\text{J}/\text{Pulse}$ 、平均強度 630 mW、出射後はパルス幅 160 fs、エネルギー 530  $\mu\text{J}/\text{Pulse}$ 、平均強度 530 mW）を、焦点距離 35 mm の平凸レンズによりサンプルに集光し、加工速度を 2.2 mm/sec として、同じ工程

表 3 中空ファイバの長さによる諸特性変化計測結果

ファイバ		伝送効率	出力パルス幅	ピーク出力
1 m	直線の状態	90 %	160 fs	3.54 GW
2 m	直線の状態	83 %	170 fs	3.07 GW
5 m	直線の状態	74 %	200 fs	2.34 GW
1 m	90 度曲げた状態	54 %	273 fs	1.25 GW



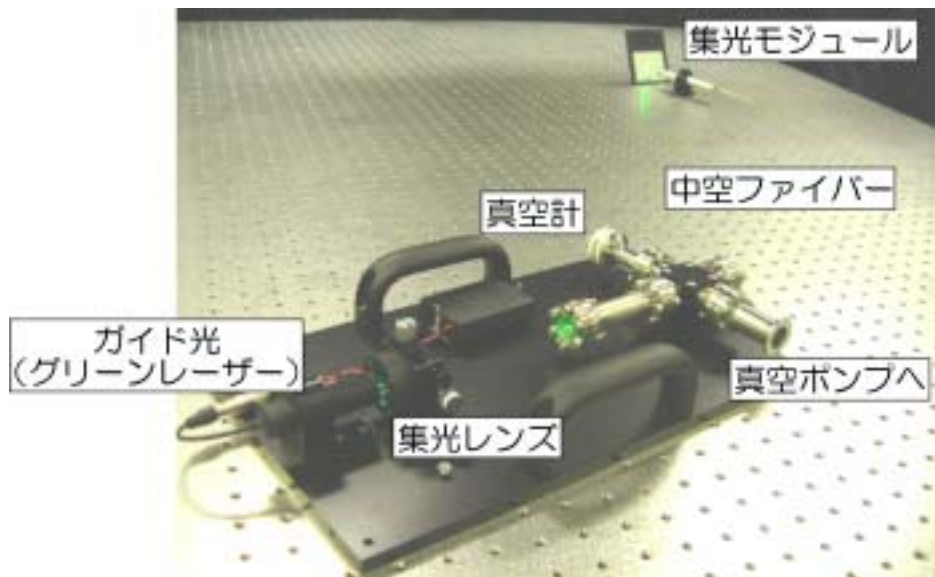


図 50 試作機

を 40 回繰り返したときの加工結果を図 49 示す。従来の加工用レーザーでは困難である PET 樹脂の加工が実現され、高強度フェムト秒パルス光加工の優位性が示された。

更にパルス幅を測定しピークパワーを求めた結果を表 3 に示す。ファイバー長が長くなると伝送効率減少、パルス幅は延び、ピーク出力は低下する。また、1 m ファイバーを 90° に曲げた状態では直線で 5 m ファイバーを用いたときよりもピーク強度が低くなることが確認された。

以上の成果を用いて作製した試作機を図 50 に示す。

特許件数： 4      論文数： 1      口頭発表件数： 6      プレス発表件数： 1

#### (4) 研究成果に関する評価

##### 国内外における水準との対比

複数のパラメータと高強度フェムト秒パルスのファイバー伝送特性との関連について研究した例は皆無に等しい。高い技術レベルの超高速光計測技術、分光計測技術を駆使して計測するとともに、フェムト秒レーザー光がファイバー中を実際にどのように伝播しているかを独自の計測技術である FTOP を用いて調べ、有用なデータを取得した。また、本事業で開発した小型・高効率・高耐光強度 フェムト秒波形整形器を用いて約 100 m のマルチモードファイバーから 170 fs の光パルスを、世界で初めて出力することに成功した。さらに、真空化中空ファイバーで、高強度フェムト秒パルス光のファイバー伝送を実現するとともに、伝送パルスを用いて被加工物を移動しない方式でのフェムト秒加工を世界で初めて実現した。この過程で、ファイバー出射部に独創的な機構を取り入れ、特許出願した。

以上、国内外において、高い水準で研究開発を実施し、世界で初めての研究成果を複数得ることができ、高い水準で研究開発を完了した。

##### 実用化に向けた波及効果

産業応用に向けて強い要求があった高強度フェムト秒パルス光のファイバー伝送を実現するとともに、伝送パルスを用いて被加工物を移動しない方式でのフェムト秒加工を世界で初めておこなった。この技術を適用することで、ファイバー出射部での局部 X 線発生の可能性が拓けた。開発した技術を直接生体治療に用いることができるだけでなく、局部 X 線発生によるフレキシブル X 線源による生体治療など、全く新しい応用が可能になる。

#### (5) 残された課題と対応方針について

フェーズ までの事業の目標を十分満足して完了した。フェーズ では、参画企業において、ネット販売などを試行し、ニーズ調査を実施しつつ具体的な産業展開を図る。