

# フェムト秒増幅光カーゲートを用いた 3次元形状計測と顕微イメージングへの応用

## Three-dimensional shape measurement and microscopic imaging using femtosecond amplifying optical Kerr gate

<sup>1</sup>大阪大学、<sup>2</sup>産業技術総合研究所

安井 武史<sup>1</sup>、美濃島 薫<sup>2</sup>、松本 弘一<sup>2</sup>

Takeshi YASUI<sup>1</sup>, Kaoru Minoshima<sup>2</sup> and Hirokazu Matsumoto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Osaka University,

<sup>2</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

フェムト秒増幅光カーゲートは、(1)短オープニング時間、(2)高感度、(3)広スペクトル帯域幅、(4)実時間2次元イメージングといった特徴を有する高機能光ゲートである。このような特性は超高速時間分解イメージングに好ましいことから、我々はこのフェムト秒増幅光カーゲートを用いた超高速時間分解イメージングシステムを開発し、その基本特性とイメージング特性の評価を行った。その結果、マクロ配置で70 $\mu\text{m}$ 、マイクロ配置で5.5 $\mu\text{m}$ の空間横分解能が得られた。さらに、本システムを3次元形状測定(光透過物体、光散乱体)及び顕微イメージングに応用し、その有用性を探った。

### 1. はじめに

最近、安定なフェムト秒モードロック(fs-ML)パルスレーザーが比較的容易に利用可能になってきたことより、干渉計測<sup>1,2)</sup>、形状測定<sup>3)-5)</sup>、測距<sup>6)</sup>といった幾何計測の光源としてfs-MLレーザーが注目を集めている。フェムト秒パルス光を用いた幾何計測の特徴は、その光としての極限的特徴(高速性、高ピークパワー、広帯域、局在性)と非線形光学効果(光増幅、波長変換、光シャッター他)を有効に利用することにより、従来の連続発振(CW)レーザーやランプ光源を用いた手法では困難とされた高機能光計測(例えば、微弱光測定や選択的計測)への応用が期待できることである。

このようなフェムト秒レーザーを用いた幾何計測の一つに、超短パルス光の飛

行時間を利用した3次元形状測定がある。このための1つの手段として、短いオープニング時間、高感度、実時間2次元イメージングを有する超高速時間分解イメージングシステムが考えられる。我々のグループでは、そのような手段を実現するために、非線形光学効果である光カー効果と光増幅を用いたフェムト秒増幅光カーゲート (*fs-amp* OKG) を開発し、超高速時間分解イメージング応用への可能性を探ってきた<sup>4,5)</sup>。今回は、*fs-amp* OKG を用いた超高速時間分解イメージングシステムを試作し、3次元形状測定(光透過物体、光散乱物体)及び顕微イメージングへの応用を行った。

## 2. 実験装置

図1に、*fs-amp* OKG を用いた超高速時間分解イメージングシステム(反射型配置)を示す。光源には、増幅チタンサファイアレーザーを用いる。プローブ光には水の自己位相変調によって生じた白色コンティニウム光を用い、サンプルに照射する。サンプル表面からの散乱光は集光光学系を経て光カーゲートに導かれ、カー媒質内で一度結像される。カー媒質には、光カー効果と光増幅効果をあわせ持つレーザー色素溶液を用いた。プローブ光は、光カーゲートを通過後、分光用バンドパスフィルター(BPF)を通過し、最終的に CCD カメラ上に結像される。一方、ゲート光には、SHG結晶(LBO)で波長変換した後、複屈折性結晶(BBO)によって直交偏光化し時間遅れを持たせた、ダブルパルスSHG光を用いる。ここで、1番目のパルスは光カーゲートのオープニングとカー媒質の励起に、2番目のパルスは強制クロージングに用いられる。ポンプ光は、イメージ面でプローブ光とオーバーラップさせる。ポンプ光の時間遅延を調節することによって、

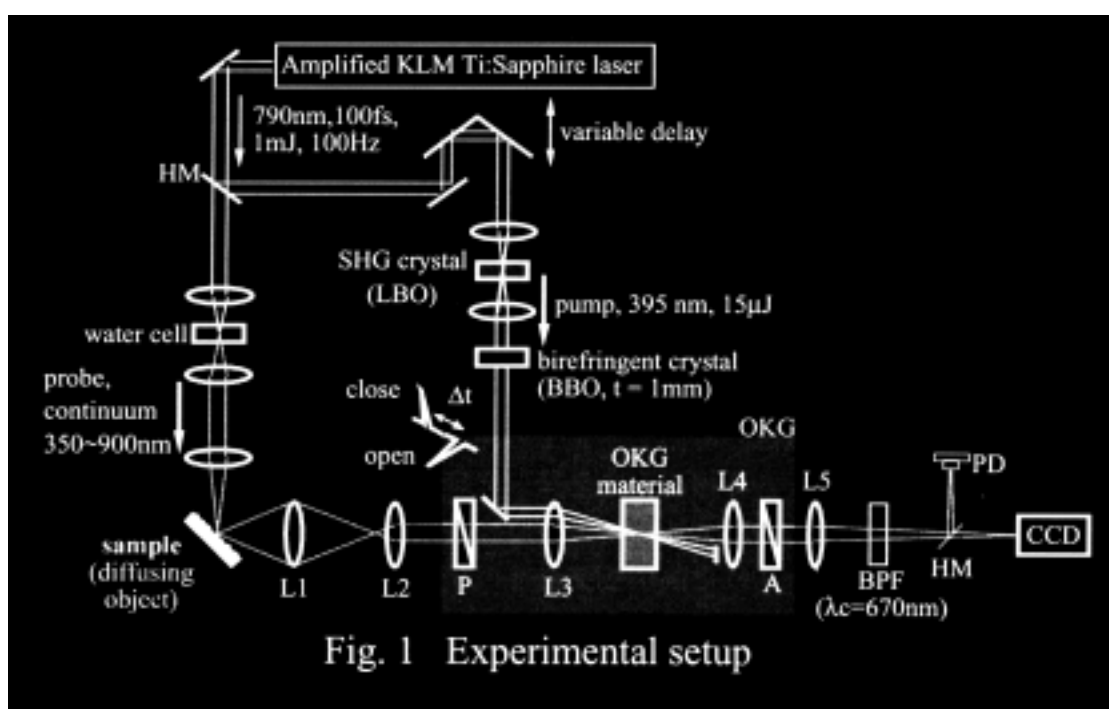


Fig. 1 Experimental setup

様々なタイミングでの時間分解イメージを得ることができる。

### 3. 基本特性

超高速時間分解イメージングシステムの時間特性を図2に示す。10回の測定に対して、オープニング時間 $459 \pm 28$ fs（平均値 $\pm$ 標準偏差）、ピーク位置決め精度28fs（標準偏差）、透過率185%の結果が得られた。また、ほぼ完全なゲートクロージングも得られている。従来よりピコ秒領域の高効率OKGとして用いられたきた二硫化炭素( $CS_2$ )の場合、同様な条件において透過率が7%であることを考慮すると、フェムト秒増幅光カーゲートは非常に優れた性能を有していると言える。

また波長スペクトル特性に関しては、図3に示すように各遅延時間において50nmのバンド幅が得られており、分光イメージングへの応用も期待できる。

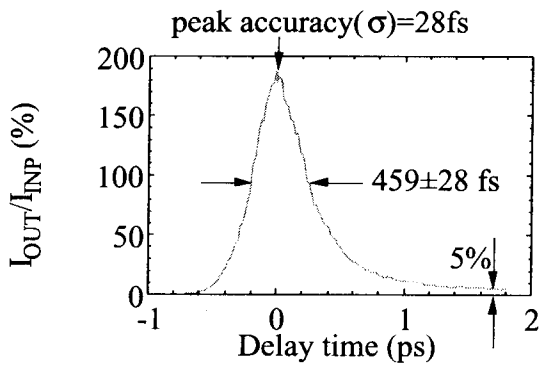


Fig. 2 Temporal behavior of OKG signal

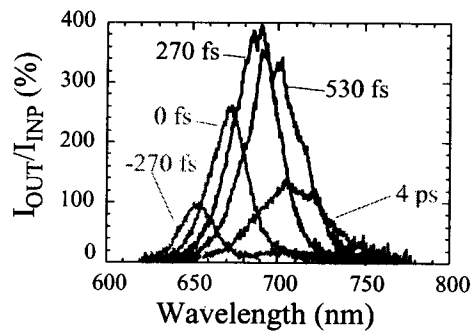


Fig. 3 Transient spectra of OKG signal.

### 4. イメージング特性

フェムト秒増幅光カーゲートを時間分解イメージングに応用する場合、そこで用いられている光カー効果や光増幅のような非線形光学効果が、イメージング特性に対してどのように寄与するかが問題となってくる。そこで、解像度テストターゲットを用いて、時間分解イメージの横分解能を測定した(図4)。横分解能に対する非線形光学効果の影響を評価するため、光カーゲートが無い場合のイメージと比較されている。その結果、図1に示すマクロ配置では、横分解能 $70 \mu\text{m}$ までの範囲で、時間分解イメージの横分解能低下は見られなかった。また、図1のプローブ光学系に顕微配置(対物

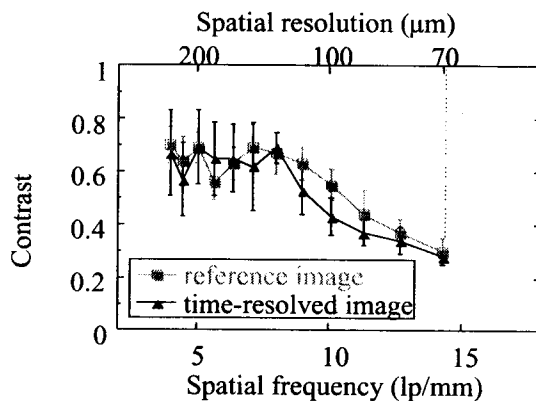


Fig. 4. Transverse resolution at macroscopic setup

鏡)を用いた場合、横分解能 $70 \mu\text{m}$ までの範囲で、時間分解イメージの横分解能低下は見られなかった。また、図1のプローブ光学系に顕微配置(対物

レンズ：20倍、NA=0.4) を導入した場合にも、横分解能 $5.5\mu\text{m}$ までの範囲で同様に時間分解イメージの横分解能低下は見られなかった。すなわち、フェムト秒増幅光カーゲートで利用されている光カー効果や光増幅は、時間分解イメージの画質を低下させない。

超短パルス光の飛行時間を利用した3次元形状測定では、物体の奥行き情報はゲートの時間特性によって決定される。図2のオープニング時間( $459\pm 28\text{fs}$ )及びピーク位置決め確度( $28\text{fs}$ )より、プローブ光入射角を考慮すると、各時間分解イメージの奥行き分解能は $97.4\pm 5.9\mu\text{m}$ 、位置決め確度は $5.9\mu\text{m}$ となる。

## 5. 応用

### (a) 光散乱物体の3次元形状測定

3次元形状測定への応用の一例を図5に示す。曲面形状のために光のロスが大きく入射光の0.01%しか検出器に到達しない粗面物体の形状[図5(a)]を測定した。図5(b)は各遅延時間における差分画像をあらわしており、曲面形状に対応して変化していったのが分かる。これを用いて3次元形状を再構成したものが図5(c)であり、非常に弱い信号効率にも関わらず物体の3次元形状を測定できた。

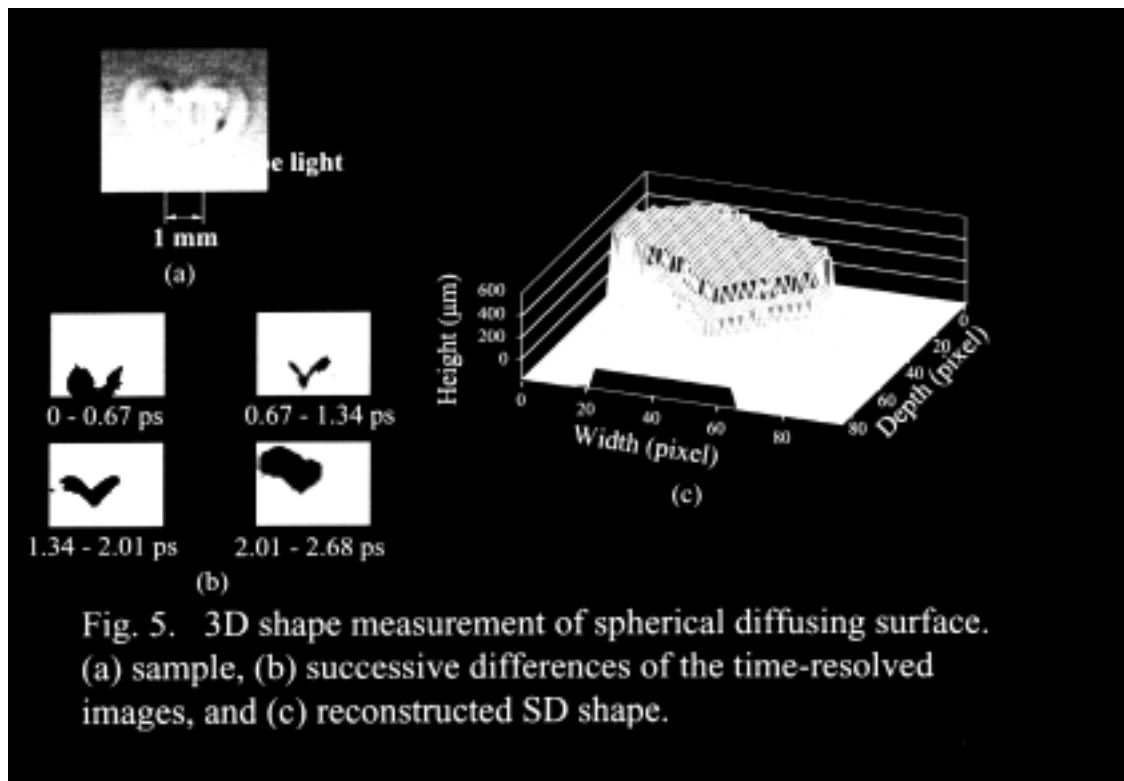
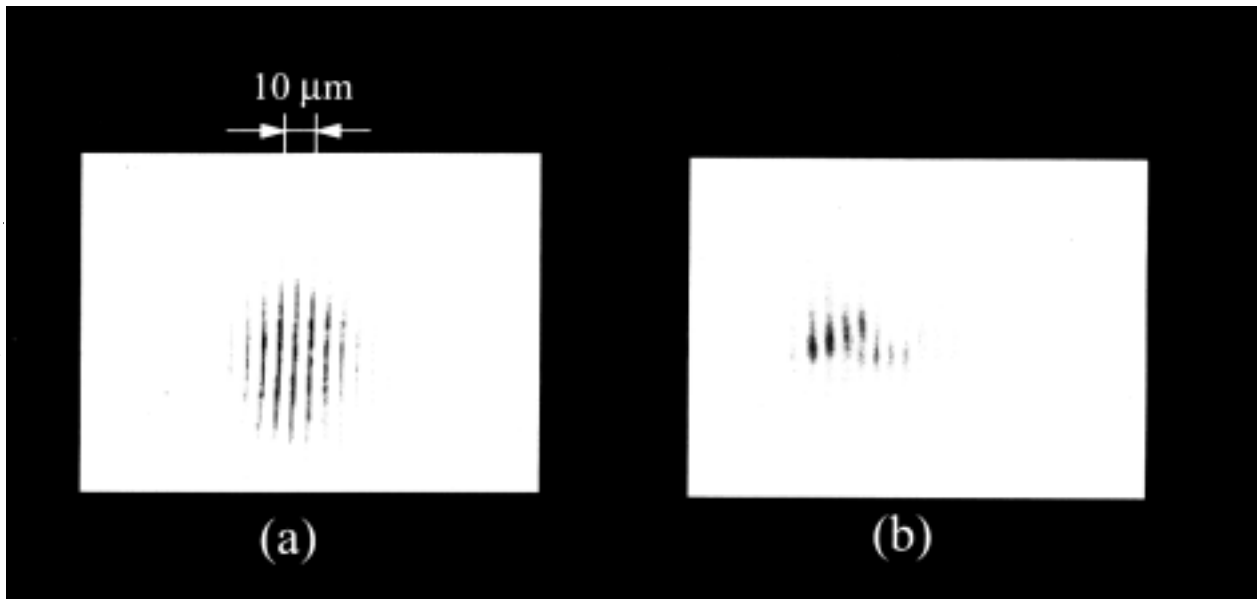


Fig. 5. 3D shape measurement of spherical diffusing surface. (a) sample, (b) successive differences of the time-resolved images, and (c) reconstructed SD shape.

### (b) 顕微イメージング

顕微イメージングの応用例として、グレーティング作成時に用いられるロンキールーリング (200line/mm) の顕微時間分解イメージの測定を行った。図6



は、40倍対物レンズ（NA=0.65）を用いて測定したときの(a)通常イメージと(b)時間分解イメージを示している。若干コントラストが落ちているが、間隔 $10\mu\text{m}$ のピッチパターンは認識できていることが分かる。

## 6. まとめ

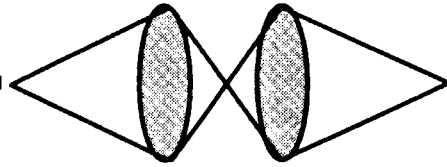
フェムト秒増幅光カーゲートを用いた超高速時間分解イメージングシステムを試作し、形状測定への応用を試みた。その結果、光透過物体・光散乱物体の形状測定や顕微イメージングに有効であるということが示された。これらの結果から、本システムが様々な応用（超高速現象の観測や生体イメージング他）に対して有効であると考えられ、実用の場で応用が期待される。

本研究は、通商産業省（現、経済産業省）産業科学技術開発制度『フェムト秒テクノロジー』のもとで行った研究である。

## 参考文献

- 1) K. Minoshima, and H. Matsumoto : Opt. Comm., Vol. 138, pp. 6-10, (1997).
- 2) E. Abraham, K. Minoshima and H. Matsumoto : Opt. Comm., Vol. 176, pp. 441-452, (2000).
- 3) K. Minoshima, and H. Matsumoto : Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 33, pp. L1348-1351, (1994).
- 4) K. Minoshima, T. Yasui, E. Abraham, H. Matsumoto, G. Jonusauskas, and C. Rullière: Opt. Eng., vol. 38, pp. 1758-1762, (1999).
- 5) T. Yasui, K. Minoshima, and H. Matsumoto : Appl. Opt., Vol. 39, pp. 65-71, (2000).
- 6) K. Minoshima and H. Matsumoto : Appl. Opt., Vol. 39, pp. 5512-5517, (2000).

SLM-27



SLM

レーザー顕微鏡研究会  
第27回講演会論文集

協賛

応用物理学会、日本光学会、日本分光学会  
計測自動制御学会、レーザー学会、日本生物物理学会  
精密工学会、日本組織細胞化学会、日本電子顕微鏡学会  
日本細胞生物学会、日本病理学会、日本解剖学会  
日本オプトメカトロニクス協会、日本材料学会  
日本材料科学会

Proceedings of 27th Meeting  
of  
Japan Society for Laser Microscopy

Cosponsored by

Japan Society of Applied Physics  
Optical Society of Japan  
Spectroscopical Society of Japan  
The Society of Instrument and Control Engineering  
The Laser Society of Japan  
Biophysical Society of Japan  
The Japan Society for Precision Engineering  
The Japan Society of Histochemistry and Cytochemistry  
Japanese Society of Electron-Microscopy  
Japan Society for Cell Biology  
The Japan Society of Pathology  
Japanese Association of Anatomists  
Japan Optoelectro-Mechanics Association  
The Society of Materials Science, Japan  
The Materials Science Society of Japan

2001年10月29, 30日  
一橋記念講堂  
東京都

Oct. 29-30, 2001  
Hitotsubashi Memorial Hall  
Tokyo, Japan