

単発レーザー励起超音波の可視化

竹下 照雄¹⁻³, 沖原 伸一郎¹, 瀧口 義浩^{1,2}

¹光産業創成大学院大学 光産業創成研究科(〒431-1202 静岡県西区浜松市呉松町1955-1)

²浜松ホトニクス(株)(〒430-8587 静岡県浜松市中区砂山町325-6 日本生命浜松駅前ビル)

³株式会社ジーワン・ラボ(〒431-1202 静岡県西区浜松市呉松町1955-1)

Visualization of Propagating Ultrasonic Waves Induced by a Single Laser Pulse

Teruo TAKESHITA^{1,2,3}, Shin-ichiro OKIHARA¹, and Yoshihiro TAKIGUCHI^{1,2}

¹The Graduate School for Creation of New Photonics Industry, 1955-1 Kurematsu, Nishi-ku, Hamamatsu, Shizuoka 431-1202

²Hamamatsu Photonics K.K., 325-6 Sunayama, Naka-ku, Hamamatsu, Shizuoka 430-8587

³GI Lab. Co., Ltd., 1955-1 Kurematsu, Nishi-ku, Hamamatsu, Shizuoka 431-1202

(Received November 20, 2007)

We have been studying non-invasive and non-destructive methods for inspecting internal structures that use laser-induced ultrasonic waves and an optical measurement technique. As one solution, we propose a new method for determining the internal structure from images of propagating ultrasonic waves induced by a single laser pulse, using a visualization technique that uses a laser beam for illumination and an image-converter tube. In this paper, the captured images of propagating ultrasonic waves in the space-time domain with nano-second time resolution and two-dimensional dynamic images with fifty nanosecond exposure time are presented and analyzed. This investigation demonstrates the suitability of this proposed method for industrial applications.

Key Words: Laser induced ultrasonic, Non destructive inspection, Single event measurement, Visualization, Framing streak camera

1. はじめに

半導体素子の生産過程においては、超音波探傷装置を用いた素子の内部構造検査による品質管理が行われている。現在行われている検査法は超音波振動子により超音波の発生と検出を行うものが主流である。超音波振動子を用いた検査法は、センサー部を検査試料に対しジェルや水などの液体を介して接触させた状態で二次元走査を行うために液体除去工程が必要となり、更には品質管理工数の増加やデータ取得に時間が掛かるなどの問題点が指摘されている。

これに替わる1つの方法として、パルスレーザーで超音波を励起し、異なるレーザー光を用いて試料表面に現れる表面弾性変位を検出する非接触・非破壊内部構造検査法が研究¹⁻⁴⁾されている。報告されている検出法の多くは、検査試料上にフォトダイオードなどの検出器を配置し、これを二次元走査することで試料全体のデータを取得する走査・積算方式であり、更にはこれにポンプアンドプローブ方式を組み合わせた時間分解計測手法⁴⁾もある。近年では超音波探傷子を試料に固定し、代わりにレーザーを走査する半非接触方式⁵⁾も報告されているが、これらの方法は1点1点のデータをコンピュータ上で画像に再

構成するために計測時間が掛かるという問題がある。

このような状況の中で筆者らは、産業応用を目指し、スルーホットの高い非接触・非破壊内部構造検査法の開発に着手した。その第一フェーズとして、内部構造推定のための情報を得るために検査試料表面に単発パルスレーザーを照射することで超音波を励起し、この超音波が試料内部あるいは表面を伝播する動的挙動を励起パルスレーザーと波長の異なるCWレーザー光により可視化し、これをイメージコンバータ管を用いた超高速画像取得装置で単一イベント撮影する手法⁶⁾以後、単発パルスレーザー励起超音波画像化法を開発したので報告する。この手法は、1回の撮影で単発パルスにより励起された超音波の時間に対する1次元空間挙動、あるいは二次元空間分布の時間変化の取得が可能であるために計測時間を大幅に短縮することができる。

本稿では、提案した単発パルスレーザー励起超音波画像化法の動作原理と装置構成を述べると共に、超音波探傷を模したアクリルブロック内を伝播する超音波とアクリルブロック表面に蒸着した金属薄膜を伝わる超音波の可視化・時間分解撮影例を示し、それらの超音波の伝搬の解析について述べる。

2. 動作原理と装置構成

単発パルスレーザー励起超音波画像化装置⁶⁾は、動作原理をFig. 1(a)に示すようにパルスレーザーと、検査試料照明用CWレーザー、および試料表面を時間分解撮影するイメージコンバータ管^{7,8)}とその接続光学系および駆動回路により構成する。

本装置は、検査試料表面にパルスレーザーを照射することにより超音波を励起する。検査試料表面あるいは内部を伝播する超音波は、試料の圧力変化や微小な変位を起すため、これを検査試料照明用CWレーザー光によって可視化し時間分解撮影することで、超音波伝播を画像化計測する。

試料の撮影には単一光子検出が可能な超高感度なイメージコンバータ管^{7,8)}を用いる。ここでいうイメージコンバータ管とは光電面、偏向板、蛍光面を備えた電子管である。イメージコンバータ管の光電面に結像された試料からの反射光像は外部光電効果により電子像に変換され、撮影現象とタイミングに合わせて垂直・水平偏向板に加えた偏向電圧によって時間情報が空間分布に置き換えられた後にMCP (Micro-Channel Plate)⁹⁾で2次元電子増倍され、再び蛍光面で2次元蛍光像となり出力される¹⁰⁾。イメージコンバータ管は入射光像の切り出し方法により、単発現象をFig. 1(b)に示すように空間軸Xと時間軸T、および光強度Iにより構成されるストリーク像¹¹⁾、または同図(c)に示すように空間軸Xと空間軸Y、および光強度Iにより構成される連続した瞬間像を8枚並べたフレーミング像^{7,8)}として画像化することができる。フレーミング像には、撮影の時系列の順番を番号で示した。蛍光面に出力

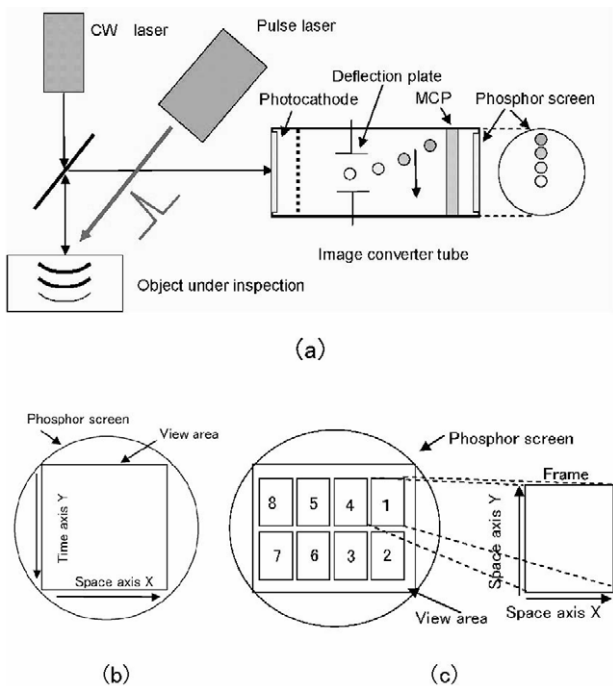


Fig. 1 (a) Operation principle of time-resolved imaging of this method, (b) streak image, and (c) framing images of 8 output frames.

されたストリーク像あるいは、フレーミング像はCCDカメラ入力型画像解析機で読み取る装置構成とした。

3. 超音波の可視化 - バルク波

励起に用いたパルスレーザーの照射形状を整形することで得られる超音波の平面波をプローブとし、探傷検査を模擬した固体内の超音波伝播の可視化実験を行うことで、単発パルスレーザー励起による超音波探傷の実現性を探った。これまでも透明な固体内を伝播する超音波の可視化は報告されている^{12,13)}が、これらは1回の現象に対して1枚の画像のみが取得されるが、本方式は1回の現象に対して一次元時間連続画像あるいは複数枚の2次元瞬間像の撮影が可能なため、超音波励起レーザーのパワー変動の影響を除いた超音波伝播の観測が可能となり、またデータ取得の時間を短縮することもできる。加えてレーザーアブレーションのように塑性変形を伴うために現象の再現が困難な超音波伝播の連続撮影も可能となる。

3.1 実験方法

超音波探傷試料の簡易モデルとして透明なアクリルブロックを用い、その端面にパルスYAGレーザーの2倍高調波(以後、YAG-SHGパルスレーザー)を照射し超音波を励起した。このアクリルブロックを、Fig. 2に示すようなCWレーザー照明によるシャドウグラフ光学系¹⁴⁾の平行ビーム内に配置し、超音波の伝播による屈折率変化を可視化した。YAG-SHGレーザーには、SPECTRON社製805G(パルス幅14 ns, パルスエネルギー約6.2 mJ)を用いた。照明用のCWレーザーにはCrystal Laser社製RLC-100-2449(= 640 nm, 20 mW出力)を採用した。時間分解撮影はイメージコンバータ管を内蔵する高速度カメラ(浜松ホトニクス製フレーミング・ストリークカメラC4187)を用いた。パルスレーザーとフレーミング・ストリークカメラのタイミング調整には、YAGレーザーコントローラのクロック信号を基準として、ジーワン・ラボ社製タイミング回路により同期を取った。

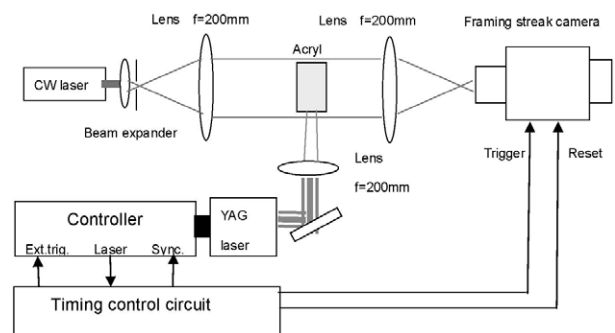


Fig. 2 Experimental configuration for shadow graph imaging with Spectron laser model 805G having a pulse energy of approx. 6.2 mJ and a pulse duration of approx. 14 ns.

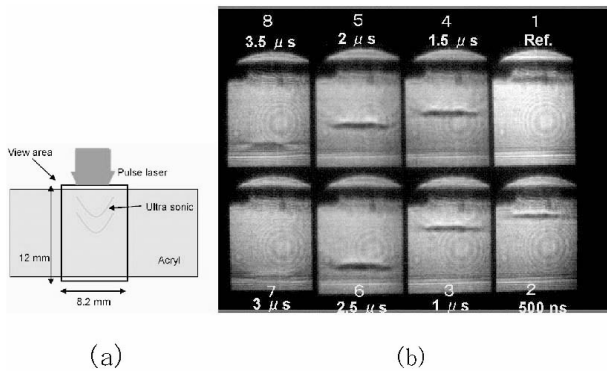


Fig. 3 (a) View area of acrylic block sample, and (b) framing images of ultrasonic plane waves.

3.2 超音波探傷を模した波面の伝播

光学系の調整により直径6 mmのYAG-SHGレーザーをアクリルブロックへ照射することで超音波の平面波を励起し、この伝播をレーザーの照射タイミングを基準として50ナノ秒の露光時間、500ナノ秒のフレーム間隔でフレーミング撮影した。10 mm角で長さ100 mmのアクリルブロックにおける撮影視野の説明をFig. 3(a)に示す。同図(b)に示した超音波伝播画像における黒い平面状の像は、超音波により生じた屈折率の高い部分に対応する。発生した平面波は、均一な材質においてはその波面が乱れることなく超音波が伝播していく様子が捉えられた。

次に超音波探傷試料の簡易モデルとして、直径3 mmの円筒状の穴を開けた同一形状のアクリルブロックを用いて、レーザー励起超音波の伝播・反射波形を撮影した。Fig. 4(a)は、撮影視野の説明であり、観測は穴の中心軸方向からであることを示している。超音波は、穴に対して上部から照射した。同図(b)は、このモデル試料における超音波伝播の撮影像であり、観測画像中央の輝度の高い円形部分が穴である。

撮影像においては、アクリルブロック内部を伝播する平面波(第1フレーム)が穴の部分で反射・回折し(第2, 3フレーム)、反射波が試料表面に戻っていく(第4 - 6フレーム)様子が捉えられた。反射波が戻るタイミングは、表面から穴までの深さ情報を持ち、反射波の3次元空間分布は穴の形状情報を持つため、反射超音波を時間的・空間的に検出・解析することで検査試料の内部構造を推定できる¹⁵⁾ことが分かる。

4. 超音波の可視化 - 表面波

非破壊計測は主に不透明素材を対象とするため、検査試料の表面に現れる反射超音波による表面弾性変位または圧力を2次元的に検出することで内部構造を推定する。表面弾性変位を検出する方法は、表面が鏡面の場合には反射光を検出する方法が用いられるが、粗面の場合にはFabry-Perotポリマフィルム超音波センサを貼るなどの手法¹⁶⁾やスペックル干渉計測法¹⁷⁾が報告されている。また、位相速度走査法¹⁸⁾を用いて励起した表面波によるSiウエハの表面欠陥評価法も提起されている。これらを模擬

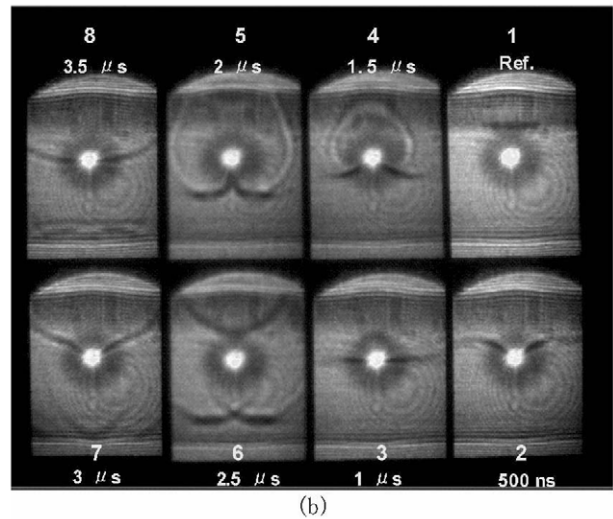
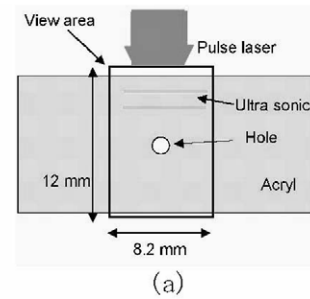


Fig. 4 (a) View area of acrylic block sample with a 3 mm dia. cylinder defect, and (b) framing images of propagating ultrasonic waves in the sample model.

し、本稿では金属薄膜を伝播する超音波の検出・可視化を試みた。

4.1 実験方法

超音波の音圧や変位は、試料表面の反射光強度を変調する¹⁹⁾。この特性を利用して、YAG-SHGパルスレーザー(パルスエネルギー: 4.1 mJ, パルス幅14 ns)を直径 $\phi 200 \mu\text{m}$ に集光・照射することによって金属薄膜(厚さ2.75 mmで40 mm角のアクリル基板の裏面に厚さ数10 nmのアルミニウムを蒸着)に励起した超音波の伝播をフレーミング撮影およびストリーク撮影した。実験系はFig. 5に示すように、YAG-SHGパルスレーザーと照明用CWレーザー、

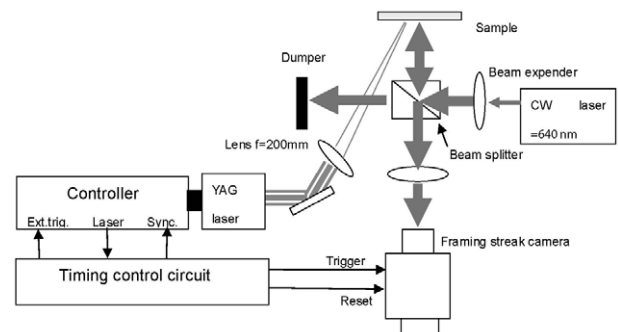


Fig. 5 Experimental configuration to observe dynamic reflection process of an Al mirror coated on an acrylic plate after YAG-SHG laser pulse exposure.

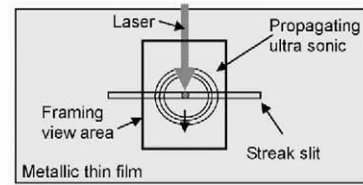
ビームスプリッタ，フレーミング・ストリークカメラ C4187により構成した．CWレーザー光はビームスプリッタで分岐され，金属薄膜プレートを垂直方向から落射照明した．超音波で変調された反射光は再びビームスプリッタを通過した後に金属表面像としてフレーミング・ストリークカメラ入力部に結像した．金属表面の動的挙動はフレーミング・ストリークカメラで時間分解撮影され，CCDカメラ入力型画像解析機により定量解析した．

4.2 金属薄膜を伝わる表面波

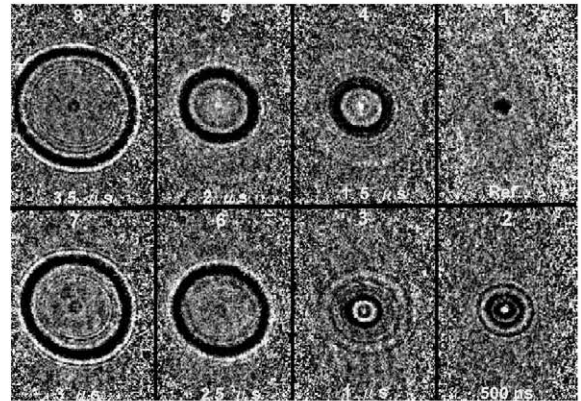
Fig. 6(a)に示すように，YAG-SHGレーザーパルス照射点を中心として，幅9.3 mmで高さが14 mmの金属薄膜表面をフレーミング撮影，及び幅12.3 mmで高さ60 μm の同一表面をストリーク撮影にて時間分解観測した．パルスレーザーによって誘起された超音波が，金属薄膜をレーザー照射点から同心円状に広がっていく様子が捉えられた．同図(b)はパルスレーザー照射後3.5 μs まで50 nsの露光時間で，500 ns毎に得られたフレーミング像である．それぞれのタイミングにおける超音波波面の広がりが捉えられた．同図(c)は，超音波の広がりを7.4 μs の時間窓でストリーク撮影した時間分解画像である．

時間分解画像Fig. 6(b)，(c)の両者に伝播速度の異なる2種類の波が観測された．ストリーク像Fig. 6(c)における波面の伝搬に伴う斜めの濃淡像の傾きを解析することで第1波の伝播速度は約3.4 km/s，第2波の伝播速度は約1.4 km/sと解析された．また，レーザー照射位置に発生した振動現象を解析するために，Fig. 6(c)の中央に示した枠内に置ける画像の輝度分布プロファイルを求めFig. 6(d)に示した．横軸は時間軸であり，縦軸は光強度を表す．時間幅560 nsに相当するカーソル間に生じた4つの波の超音波振動の周波数は7.2 MHzである．アルミニウムの横波音速は3.04 km/sであることから，第1波はアルミ薄膜を伝わるマッハ1.1で伝搬する衝撃波あるいは横波または板波と考えられる．第2波はその発生メカニズムとしては，衝撃波に伴って発生する渦輪のような現象，あるいはアルミ薄膜内の励起電子によって発生するプラズマ状態の伝搬による反射率の低い部分の伝搬と推定されるが，その詳細なメカニズムの解明は，今後の課題である．

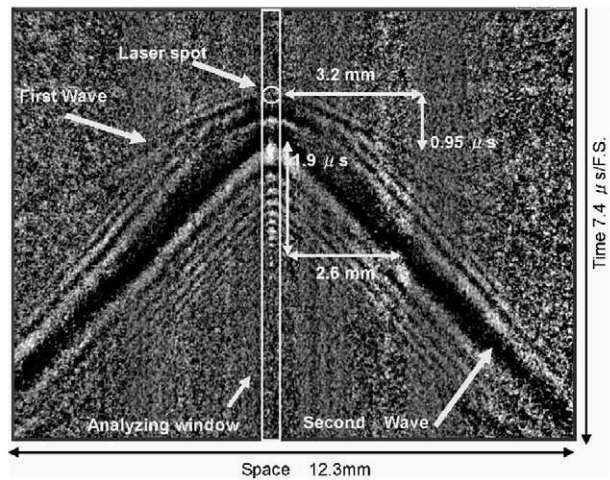
一方，表面波発生と同時に生じた超音波バルク波の亚克力板反対端面からの反射は，レーザー照射時より2.0 μs 後にアルミ薄膜に戻ると計算されるが，データには現れていない．この原因は，Fig. 6(b)のフレーミング像の第2駒から第4駒に現れているように，第1の超音波バルク波が球面上に広がることでエネルギーが分散することに加えて，CWレーザーの照明光強度不足により画像のS/Nが十分でないためにその微少な形状変化を捉えられなかったと考える．また，上記のように，観測された各種の反射率の変調成分の発生メカニズムにも依存すると考えられ，これらのメカニズムの探求は，今後はCWレーザー光のパワーを上げるなどの対策を行ったうえで更なる議論が必要である．



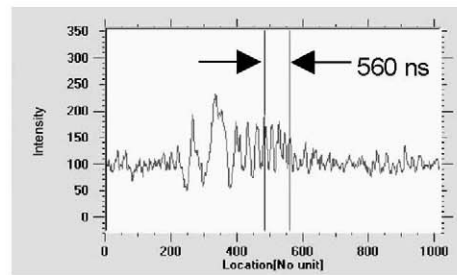
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6 (a) View area of Al mirror surface, (b) framing images, (c) streak image of propagating surface acoustic waves, and (d) indicates intensity profile of the streak image at the center of the YAG-SHG pulse excitation along time axis.

5. まとめ

超音波探傷計測を目指した超音波の可視化実験を通して次の点が明らかとなった．

1)本稿で提起した単発パルスレーザー励起超音波画像化

装置は、誘起された超音波の透明試料内部あるいは金属蒸着表面に現れる超音波振動を高い時間分解能にてシングルイベント撮影することができる。

- 2) フレーミング計測法とストリーク計測法の双方を用いることは、超音波の時間 - 多次元的な挙動を理解するために極めて有効である。
- 3) 2)により得られたデジタル化された撮影データから、被測定試料内部や表面での超音波の時間・空間的振る舞いを定量解析することができる。
- 4) 提起した単発パルスレーザー励起超音波画像化法の特徴である単一イベントの超音波伝播を画像として捉える手法は短時間に多くの情報を得るために有効であり、分かりやすい検査法である。

一方、超音波探傷を行うために検査試料内部からの反射超音波による表面弾性変位や反射率変化の定量化は必要不可欠であり、今回得られた種々の超音波などのダイナミックな挙動の詳細な発生メカニズムの解明、理論解析とともに今後の課題である。

謝 辞

本研究は、光産業創成大学院大学において浜松ホトニクス(株)の支援をもとに行われたものです。本研究の機会を与えて頂いた晝馬輝夫大学理事長兼浜松ホトニクス代表取締役社長、晝馬日出男取締役、飯田等システム事業部長に深く感謝いたします。また光産業創成大学院大学の山中正宣教授をはじめとした教員の皆様のご指導に感謝いたします。最後に、本研究は故土屋裕教授のご指導の下で始めたものです。改めて深く感謝いたします。

参考文献

- 1) O. Kotiaev, 島田 義則: *Laser Cross* **211**(2005)p.1.
- 2) 田中 崇雄: 博士論文(2002)
- 3) 高坪 純治, 今出 政明, 茫 秋林, 山本 茂之: 日本機学会論文集中集(C編) **65**(1999)
- 4) オリバライト, 菅原 美博, 松田 理: *応用物理* **73**(2004)732.
- 5) 高坪 純治, 王 波, 津田 浩, 遠山 暢之: 日本機学会論文集中集 **72**(2006)
- 6) 竹下照雄: 特願 2006-93797(2006)
- 7) T. Takeshita, K. Suzuki, A. Takahashi, and M. Koishi: *Proc. SPIE* **539**(1991)
- 8) 竹下照雄, 鈴木一孝, 高橋 聡, 小石 結: *ITEJ Technical Report* **15**(1991)31.
- 9) 浜松ホトニクス(株): *光電子増倍管*(1993)p.82.
- 10) 土屋 裕: *超高速光エレクトロニクス*, 末田 正, 神谷 武志 編(倍風館, 1991)p.220.
- 11) 土屋 裕: 博士論文(1985)p.16.
- 12) M. Matsukura and Y. Ito: *J. Physics: Conference Series* **59**(2007)749.
- 13) 三原 毅, 大塚 康典, 長 秀雄, 山中 一司: 第6回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集(1999)p.112.
- 14) 流れの可視化学会: *流れの可視化ハンドブック*(朝倉書店, 1986)p.310.
- 15) 椎名 毅: *非侵襲・可視化技術ハンドブック*, 小川 誠二 上野 照剛 編(NTS, 2007)p.153.
- 16) E. Z. Zang and P. Beard: *Proc. SPIE* **6086**(2006).
- 17) 村田 滋, 駒井 優樹: 日本機学会論文集中集 2003 78(2003)p.10.
- 18) 長 秀雄, 竹本 幹男, 西野 秀郎, 塚原 祐輔, 佐藤 卓暢, 佐藤 治道, 中野 禅, 山中 一司: *電子情報通信学会* **96**(1996)41.
- 19) H. Maris: *Scientific American*(1998)p.86.