コンファレンスレポート

CLEO/QELS'93 報告 IV

— 環境応用, レーザー計測, プロセッシング, 光イメージング —

内田 成明*・岡田 龍雄**・小山 正***・張 吉夫†

Report on CLEO/QELS'93 IV

— Environmental Research, Laser Diagnostics, Processing, and Optical Imaging —

Shigeaki UCHIDA*, Tatsuo OKADA**, Tadashi KOYAMA*** and Yoshio CHO†

1. 環境応用

環境応用の口頭発表セッションでは14の講演(うち招待講演2件)が行なわれた。発表分野を大まかに分類するとライダーシステム, 航空機および宇宙飛翔体からの光学観測, 海洋観測, 分光観測用フィルタ, ライダー用光源などであった。

ライダーシステムについては千葉大の竹内とMaryland大のFlamantから報告があった。竹内らはQスイッチダイオードポンプYAGレーザーを用いて携帯可能で実用的な高出力パワー(70 mW)の得られるライダーシステムを開発した。装置はカメラ用三脚に装着できるほどの大きさで, 三沢空港での霧観測に応用した実験で数百メートルの範囲にわたって霧の構造を測定した例が報告された(CMC1)。Flamantらはアレクサンドライトの760.37 nm光を用いたライダーによる大気圏境界層の動特性を観測している。受光系には44cm径のニュートン型望遠鏡およ

び干渉フィルタ付き光電子増倍管を用いて感度を上げている。境界層の位置は上面でエアロゾルの密度と湿度が急激に変化するためにおこる散乱光の変化を捉えて計っている。この計測により境界層の高度の時間変化が容易に精度よく(秒単位)得られるようになり, 大気汚染の動特性解析に有用なデータを供給するものと期待される(CMC2)。

飛翔体からの対地観測の分野では高度観測と分光計測の高精度化についての報告があった。NASAのCoyleらは高度観測においてプローブパルス幅の不安定さに起因する“range walk”エラーを除去する試みとして, キャビティダンブによりプローブパルスの短パルス化を計っている。これにより1m以下の精度で航空機の高度が測定可能となった(CMC3)。高度測定の精度を制限するもう一つの要因として大気の分散関係を適当に評価する方法がないことが上げられるが, この問題を二波長のピコ秒パルスを用いて解決しようという試みがチェコ工科大の

* レーザー技術総合研究所 (〒661 尼崎市若王寺3-11-20)

** 九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

*** 日本板硝子(株)筑波研究所 (〒300-26 つくば市東光台5-4)

† 大阪府立大学工学部 (〒593 堺市学園町1-1)

* Institute for Laser Technology (3-11-20 Nakoji, Amagasaki, Hyogo 661)

** Department of Electrical Engineering, Kyushu University (Hakozaki 6-10-1, Higasi-ku, Fukuoka 812)

*** Tsukuba Research Laboratory, Nippon Sheet Glass Co., Ltd. (5-4 Tokodai, Tsukuba, Ibaraki 300-26)

† Department of Physics and Electronics, University of Osaka Prefecture (1-1 Gakuencho, Sakai, Osaka 593)

Hamalから報告された。Nd:YAGレーザーの第二高調波のラマンシフト光(0.68, 0.53mm)を用いている。パルス幅は25psで数ジュールのエネルギーを人工衛星に照射した実験では10分間の平均で数mmの測距精度が得られている(CMC6)。一方、分光計測の応用では高層大気中の光の吸収と放出を高分解能の赤外線分光により測定し、そこでの化学反応を同定しようという試みがMichigan大のHays(招待講演)からあった。装置はUpper Atmosphere Research Satellite(UARS)に搭載されたHigh Resolution Doppler Imager(HRDI)である。分光器はエタロンを用いたファブリ-ペロー干渉計であり、地上からのエタロンの更正を行うためピエゾ素子で駆動されるエタロンの電気容量がモニターされている(CMC4)。またレーザーはその指向性により惑星地学的探査においてレーダーより優れているが、最近のレーザーの軽量化、長寿命化、および高効率化により火星探査機に搭載可能となった例がNASAのAbshire(招待講演)により紹介された(CMI5)。

海洋観測応用に関する報告は2件あった。先ず第一は海面の微小波を計測するシステム(Scanning Laser Slope Gauge)がOcean Technology DepartmentのLee等によって開発された。波による海面の擾乱をレーザービームが海面で屈折する量から測定する。システムは小型ボートに搭載され16Hzで50cm四方の面積を約2mmの分解能でもってスキャンを行う。この装置は流体力学の基礎やレーダーによる海面のイメージングなどの応用に必要な海面の動特性の把握に重要な役割を果たすものと期待される(CMC5)。また航空機搭載の海洋深度計に使用できる背景光除去用多層膜フィルタがオーストラリアDefence science and technology organizationのSeymore等によって開発された。従来この種のフィルタには高い温度安定性と膜厚に対する精密さが要求されていたが、液晶を各層間に挟み込みフィルタを調節可能とすることにより要求を満たしている。この調節はフィルタの装置搭載後にも可能であり、フィードバックを

かけることにより実時間で温度変化に補正をかけて安定な性能を得ることができる(CMI1)。

フィルタ単独の開発もいくつか報告された。一つ目はFaraday anomalous dispersionを用いた高い背景光除去比($>8 \times 10^5$)を持つ光学フィルタで、Alvarez(ニューメキシコ州立大)等によって開発されている。フィルタは広い視野、速い応答性、高い透過率などの特長を持つ。磁場のかかった原子蒸気セルが二枚の直交する偏光子で挟まれた構造になっており、磁場、セルの長さ、蒸気の密度を適当に制御することにより所定の狭帯域バンドパスフィルタ($<1\text{GHz}$)が得られる。実験では弱いダイオードレーザー光で照明されたターゲットが手前においた炎のバックグラウンドを通して撮影された結果を示した(CMI2)。また原子の光吸収と放出を利用した高速応答、超狭帯域幅の原子フィルタがThe Aerospace CorporationのChanらにより開発された。このフィルタは $0.1\text{\AA}$ 以下のバンド幅で $10\mu\text{m}$ 以下の応答速度を実現している。これらの性能によりライダー、レーザー通信、リモートセンシング、水中通信などへの応用が期待される(CMI3)。

ライダーの光源では二つの報告があった。DIALのようなある種の大気ライダー観測には光源の線幅の狭さ($100\sim 500\text{MHz}$)が特に重要である。このような狭帯域幅のレーザー光源を波長可変型で実現するためダイオードレーザー注入型アレクサンドライトレーザーがLight Age Inc.のHeller等によって開発されている。レーザー光を水素、重水素その他のガス中でラマンシフトさせ紫外域から赤外域の範囲で高出力の光(200 mJ/パルス)を得ている(CMI6)。一方、風速を測るために設計されたダイオードポンプ方式のTm:YAGレーザー($1\text{ mJ}@2.015\mu\text{m}$)をライダーに搭載したシステムがLightwave Electronics社(Kmetec)によって開発された。Tm:YAGの特長は高い蓄積エネルギー密度、近室温運転、非常に高い平均出力密度などがあげられる。信号の検出はもう一つの周波数のロックされたレーザーを用いたヘテロダイン方式で

行っており、強風時の大きなドップラーシフトによる急激な周波数の変化も打ち消し、検出器の周波数応答に制限されない測定を可能にしている(CMI76)。

(内田 成明)

2. レーザー分光計測

レーザー分光応用計測関連の発表について報告する。招待講演はYale大のグループによるフレームの画像計測(CMG4)と、オークリッジのGeoheganによるパルスレーザーデポジション(PLD)の際のアブレーションプルームの画像計測(CTuJ1)である。前者(CMG4)は、ミー、レーリー、ラマン散乱法、レーザー誘起蛍光法(LIF)とICCDカメラを組み合わせた画像計測に関するものである。フレーム中の全粒子密度、温度、燃料密度等の2次元測定についていくつかの測定例が報告された。その一つは、アセトアルデヒド拡散炎での温度、燃料混合比の測定である。2台の独立なICCDシステムを用いてレーリー散乱により全粒子密度を、蛍光により燃料密度を

同時測定する。両者の比から燃料混合比を求める。また、圧力平衡を仮定して気体の状態方程式から温度の2次元分布を求めている。ガスノズル場の計測では、ジェット中に微粒子と蛍光物質を導入し、ダブルパルスのレーザー(Nd:YAG第2高調波)によるミー散乱像の時間変化をもとに速度場(ベクトル)を計測し、同時に蛍光像による粒子密度分布(スカラー)測定例を報告した。

GeoheganによるPLD用アブレーションの診断は、主に高速ゲート付き高感度ICCDカメラによる発光像のイメージングの結果に関するものであった(CTuJ1)。ターゲットにYBCOおよびBNを用いた場合の計測例が報告された。たとえば、YBCOを酸素ガス200 mTorr中でアブレートした際の発光プルームの進展の様子がFig.1のように示された。これから、発光プルームがターゲットから離れ酸素雰囲気中を飛行するにつれ衝撃波面が形成され、これが基板に入射した後反射しているような様子が見られる。この報告で最も面白いのは、Fig.1のプルームの発光強度が弱くなった後に微粒子による発光を観

Fig.1 The formation and propagation of the plasma plume generated by 2.5 J/cm^2 laser irradiation of YBCO in 200 mTorr oxygen as recorded by a gated, intensified CCD-array camera. (CTuJ1, D. B. Geohegan).

測していることである。さらに、微粒子からの放射スペクトルを分光し、パイロメトリーにより微粒子の温度(典型的には2000-3000 K)や、放射冷却による温度低下を観測している。PLDでは微粒子の発生を押さえることが重要な課題になっており、微粒子生成機構やその挙動解明のための有力な計測法として期待される。

ところで、Fig.1のアブレーションプルームの像は励起発光種の分布であり、全粒子の挙動を示しているわけではない。九大の筆者(岡田)らは、プラナーレーザー誘起蛍光による基底状態中性粒子種の1次元イメージング計測を行ない、中性粒子種はある距離まで衝撃波的に輸送された後、拡散により輸送されることを示した。また、衝撃波が基板に入射すると一度基板前面で淀み状態になることを報告した(CTuN102)。アブレーションの診断では、この他に生体組織のアブレーションに関するものが数件報告されている。診断法としては、サブナノパルス色素レーザーをフラッシュ光源に用いたゲート付きICCDカメラによる飛散物のイメージング(CTuB5)、シャドウグラフ(CTuN90)、アブレート用レーザー光のリフレクトメトリー(CTuB2)などである。

流れ場の計測に際して窓等からの迷光を除去するための手法としてfiltered Rayleigh散乱に関する報告がプリンストン大のグループよりなされた(CMG5)。原理は、励起光の波長を受光系に置いたガスフィルター吸収線の波長に一致させて迷光を除去し、ドップラーシフトした流れ場からのレーリ信号のみを高いSN比で検出するというものである。実験では、インジェクションシーディングした狭帯域Nd:YAGレーザーの第2高調波をI₂吸収線に同調し、レーリ散乱の画像計測を行なっている。

以上幾つかの報告を紹介した。今回の全体的傾向を以下にまとめておく。まず、計測対象としては、アブレーションに関するものが多く見られた。上で紹介した以外では、光音響分光による水中の汚染油の計測(CTuN80)、光吸収による原子炉冷却水を念頭に置いた純水中の塩素

イオン濃度の計測(CTuN72)、レーザー吸収分光法によるエキシマーレーザー放電中の励起活性種の時間分解計測(CWJ20)、LIFの生物医用関係への応用(CTuN83,CTuN84)などがあった。

一方、計測手法に関しては特に目新しいものは見られなくなっている。この数年、縮退四波混合(DFWM)による気相計測が比較的多く見られたが、今回はDFWMの信号飽和過程を考察した報告1件のみであった(CMG3)。これに対して、特に気相計測では、招待講演に見られるように画像計測はすでに一般化しており、さらに多粒子種同時計測やマルチパラメーターの同時計測など高度化が進んでいる。

また、今回は進展が著しいパラメトリック発振器(OPO)を光源に用いた報告が2編あった。一つは、従来の色素レーザー部を単にOPOに置き換えたもので、光音響スペクトルやコヒーレント反ストークス(CARS)スペクトルの測定例が示された(CThS31)。Boller等は、Nd:YAGレーザー第3高調波励起OPOの赤外アイドラー光(波長1.535mm付近)のアセチレンの共振器内吸収を、これとパラメトリック関係にある可視信号光(波長0.461 μ m付近)のクエンチとして検出している。今後、OPOの導入が盛んになるにつれ、色素レーザーでのアクセスが難しかった赤外域での分光応用計測の発展が期待される。

(岡田 龍雄)

3. レーザープロセッシング

Lasers in Electro-optical Materials: Growth and Processingのセッションにおける興味ある発表について紹介する。このセッションでの発表は、口頭が6件(内1件は中止)、ポスターセッションでの発表が8件あった。

Oak Ridge National Laboratory (USA) の D. B. GeoheganはIntensified CCDカメラを用いた、KrFレーザーアブレーションにおけるYBCOなどのプルームの観察結果について述べた。CCDカメラを時間分解的に用い、そのプルーム挙動

について、ガス中と真空中を比較した場合、真空中では初期の高温過程からブルームが楕円状に膨張していく。それに引き替え、酸素200mTorrのガス中では、1 μ s程度までは真空中と同じ挙動を示すが、その後先端が徐々につぶれだす。この様子を画像として鮮やかに捉えていたのが印象に残った(Fig.1)。また基板(ターゲットより5cmの位置にある)にブルームが到達した後にそのreboundが観察される。その形状はガス種によっても変化し、膜成長のメカニズムを検討するのに新しい情報をもたらす可能性がある。また非発光の粒子を観察するために、粒子から出る弱い熱輻射光をフォトンカウンターを用いて観測していた。この手法は概ねうまく作動しているようで、粒子の温度等を見積っており、新しい情報が得られることが期待される(CTuJ1)。

Colorado 大学(USA)のS.R.LeoneはNd:YAGレーザーの第9高調波(118nm)を用い、MBE成長の分子線の分子をイオン化し、それをマス分析することにより、分子線の状態診断、反応過程、分解過程についての研究を報告した。188nmの波長のレーザーによるイオン化は、分子のイオン化には充分なエネルギーであるが分解までには至らない点で、実際の状態をより良く反映するものと考えられる。具体的には砒素に関して、MBE成長の分子線診断、加熱による基板からの離脱の状態、基板上での再反応などについて報告がなされた。成長時において砒素分子線のクラッカー(熱分解炉)がない場合はAs₄が主な成分であり、As₂はわずか0.6%であることがわかった。そこにクラッカーを働かせるとAs₄はほとんどAs₂になる。このようなことはある程度知られていたが、成長時のモニターが容易であることが大きな特徴となる。また、Si基板上に付着させた砒素を加熱し再蒸発させた場合、As₂が主に観測され、Asはほとんど観測されないことがわかった。また、Si基板上にAs₄分子線をあて成長を行い、再離脱してくる砒素の分子状態を観測すると、基板温度によって観測される分子種の比が変わることがわ

かり、反応の解析にも有用であることが示された(CTuJ4)。

日本板硝子(株)の小山(筆者)らはNd:YAGの第二高調波によるレーザー蒸発法を用い、CdTe超微粒子をガラス中に分散させることについて報告した。方法は、CdTe超微粒子をArガス中で生成させ基板上に付着させる。さらにSiO₂をレーザーで酸素雰囲気中で蒸発させ、超微粒子をSiO₂ガラスで覆う。この操作を繰り返し超微粒子分散薄膜を得る。超微粒子のサイズは3nm~7nmのものが得られ、半導体の量子サイズ効果を観測した。この方法は、Si、GaAsなどの超微粒子をガラス中に分散させることも可能であり、複合材料作製にレーザー蒸発法が有用であることを示した(CTuJ6)。

Cochin 大学(India)のR.A.V.KumarらはYBCO、GBCOのNd:YAG(1.06nm)のレーザーアブレーションにおけるブルームの時間分解分光を、分光器とストレンジオシロで行った。レーザー照射後、まずイオン、原子の励起種が観測され、それより時間的に遅れて酸素と結合したCuOなどの発光を観測した。これは、プラズマが高温の状態では金属と酸素との結合が不可能で、プラズマの冷却とともに酸素との化合が可能になるためであると結論している(CTuN95)。

Rice 大学(USA)のH.PhillipsらはC₆₀の改質をエキシマーレーザーを用いて行った。C₆₀を蒸着した薄膜にアブレーションが始まるエネルギー(約20mJ/cm²)以下のエネルギーを照射すると、シート抵抗値が大幅に変化することが示された(CTuN98)。

(小山 正)

4. 光診断、光イメージング

CLEOにおけるレーザーの医用、生物応用に関する発表は毎回盛んで、今回も口頭発表22件、ポスター12件と大変盛んであった。これらを光切除・治療、光診断、光イメージングというように大まかに分類すると、光切除・治療12件、

光診断7件, 光イメージング15件となり, 光イメージングに関する発表が最も多かった。光イメージングに関しては, 新しい提案も多かったし, デイスカッションも活発であった。筆者の関心も主としてこの分野にあったので, 以下に, 光イメージングに重点を絞って報告させていただくことをお許し願いたい。

4.1 レーザー切除・治療

赤外光におけるレーザー切除のメカニズム, 紫外光による角膜や網膜の修正切除のメカニズムについての発表が多くなされた(CTuB1, 2, 3, 5)。近視, 遠視の矯正のため, 紫外レーザー切除による角膜表面の曲率半径修正が試みられている。Miami大のグループはYAGレーザーの5倍波(213nm)を用いて, アイバンク用眼球についてテストし, 修正量を光学的に測定している。修正された角膜表面は透明でなめらかであった(CTuB4)。ロシア, Novosibirsk研究所のグループは, KrClエキシマーレーザーからの223nm光を用いており, それまでに試みたArFエキシマーレーザーからの193nm光にくらべて切除スピードは約2倍とのことで, 24人の近視, 遠視の被験者に試みて, 両波長の効果の違いを検討している(CTuB8)。米, ロで, とともに, 210-220nm付近の紫外光で, いずれもよい結果を得ているのが注目される。

4.2 光イメージング

X線CTやMRIなど, かなり高分解な生体の断層イメージを提供できる診断装置が発達してきている現在, 光イメージングの目的とするところは, X線CTやMRIなどから得られる主として生体組織の形態的变化のみでなく, それに加えて生理活性上の機能的変化をも無侵襲に診断しようとするところにある。これは, 機能的変化が生体の組織上の化学的变化として現れることから, その診断に可視から近赤外にいたる分光法が適用できるということからきている。機能的変化は, 形態的变化が顕著となる以前に現れるのが普通であるから, 光イメージングが

実現すれば, 癌などの早期診断に役立つ。X線の被爆を伴わない点も利点である。

光イメージングを実現する上での大きな障害は, 光がX線と違って, 生体組織によってきわめて強い多重散乱を受けるという点にある。イメージングを, いわゆるCT像として得ようとすれば, 被写物体内の吸収係数分布の無数の直線上の積分値, いわゆる投影データが必要となる。投影データを得るには, 多重散乱フォトンのうちでも, ほぼ1直線に沿って散乱されてきたものがあれば, これについて, その透過確率を計測すればよい。このことはCT像でなくても, 透過像を得るのにも使える。ほぼ1直線に沿って散乱されてきたフォトン, より大きく迂回してきたフォトンよりも, より早く検出点に到着するから, これらを時間的なゲートで分離することができ, 投影データの取得に使える。また, 出射フォトンのうちでも, 入射方向の延長線上にあるものは, 1直線上を通過してきた確率が高いので, これをコリメーターによって空間的に分離することも, 投影データ取得に役立つ。

4.2.1 低コヒーレント光リフレクトメトリー(OLCR)

今回の光イメージングについての発表のうち, 透過像を得るのに, 時間ゲートについての新しい(少なくとも筆者には)方法が多く提案されたのが注目された。従来, 時間ゲートにはストリークカメラが用いられてきているが, この他に, SHG(第2高調波発生), 誘導ラマン散乱(SRS)などの非線形光学現象の利用が提案され試みられてきた。新しい方法は参照光を使うコヒーレントな方法で, 低コヒーレント光リフレクトメトリー(OLCR)と呼ばれている。

スイスLawsanneの応用光学研究所のSalatheが, このOLCRについて招待講演で現状を紹介した。OLCRは, Michelson干渉計に, 光源としてコヒーレンス時間の短い(つまり, 広帯域の)光源を用いる時間領域リフレクトメトリーの総称である。Michelson干渉計の一方のアームを

Fig.2 Schematic of the coherence-gated transillumination setup. Femtosecond pulses traversing a scattering sample interfere with light from a reference delay only when the path lengths are matched to within the coherence length of femtosecond pulses from a Ti:Al₂O₃ laser source. (CTuG1, J. A. Izatt et al.)

信号アームとし、他方を参照アームとすれば、干渉アーム上での検出シグナルの両アームの相互遅延に関する半値半幅 $\Delta z = v_g / 2 \Delta \nu$ で近似できる。ここに、 v_g は媒質中の群速度、 $\Delta \nu$ は光源のスペクトル幅である。 Δz は、LEDで $\sim 15 \mu\text{m}$ 、Tiサファイア結晶からの蛍光発光で $\sim 2 \mu\text{m}$ 程度であり、SiまたはGaAsのフォトダイオードを検出器として用いて、148dBのダイナミックレンジが得られている。OLCRは高散乱な生体組織中の反射プロファイルを μm オーダーの分解能で得るのに適しているといえる。

MITのFujimotoらのグループはFig.2の配置でフェムト秒パルスを用いたコヒーレントな方法による透過像の再生を実験的に示した(CTuG1)。彼らは、これをコヒーレンスゲートと呼んでいるが、上述のOLCRに分類されるべきものであろう。モード同期Tiサファイアレーザーからの波長830nm、平均出力50mWのフェムト秒パルスを単一モードファイバーで構成した変形Mach-Zehnder干渉計に入射させる。方向性結合器で分けられた一部は参照光を得るための遅延アームで反射し、PZT素子による位相変調をかけて参照光として干渉計の参照アームに入射する。一方のシグナルアームのパルスは、標準ラテックス(ポリスチレン球)(直径 $1 \mu\text{m}$)を懸濁させた散乱水溶液中に標準分解

Fig.3 Images of an Air Force Resolution Test Chart obtained by gating the reference delay on various portions of the transmitted pulse. (CTuG1, J. A. Izatt et al.)

能テストチャートを吊したテストサンプルを透過する。懸濁散乱水溶液の厚さはフォトン平均自由行程の27倍。シグナルパルスと参照光パルスは出力側方向性結合器で合波分離され、デュアルバランス配置の検出器でコヒーレント検出される。このようにコヒーレントに検出しているため、時間ゲートによる深さ方向の分解能はパルス幅で決まるのではなく、パルスのコヒーレント長によって決まる。モード同期Tiサファイアレーザーからのフェムト秒パルスの場合、コヒーレント長は50から500 μm の範囲で調整できる。実際、Fig.3に示すように、参照光との間の遅延を0としてサンプルを面内で2次元に掃引することにより、テストチャート像が再生されるが、遅延を0.3psとすると再生像はかなり劣化する。また、サンプル前後でのファイバーモードと空間モードとの変換に共焦点配置をとっているため、散乱媒質による散乱成分は、ここで除去されている。すなわち、共焦点配置は空間的なゲートの役目をも果たしている。このMITグループの方法は、高分解イメージングに適した方法であると同時に、コヒーレント検波によって量子雑音限界までの検出が可能(130dBのダイナミックレンジを得ている)と

なっており、高分解能を維持しながら、より厚いサンプルにまで適用可能と考えられる。

前述のFujimotoらのグループは、さらに、スーパーミネセントダイオード(SLD)からのインコヒーレント光を用いてOLCRによる人の網膜の生体断層像の鮮明な写真を示した(CTuG4)。先にも述べたように、OLCRの時間分解能を決定するのは、使用する光のコヒーレント長であるから、パルスを使う必要はないし、レーザー光であることも必要でないが、少なくとも空間的なコヒーレンスはある程度必要なので、この点、SDLはOLCRに適当な光源といえる。配置はOLCRの定石どおりMichelson干渉計構成とし、かつ、参照光の相互遅延を掃引する必要がある。実験では、参照反射光用反射ミラーを160mm/sで高速に掃引している。また、プローブ部は網膜面内掃引用の機構を備えている。Fig.4に、得られた人の網膜の生体断層像を示す。視神経頭部付近の断層構造が深さ方向分解能 $\sim 10\mu\text{m}$ 程度で鮮明に写し出されている。この分解能は用いたLEDのコヒーレンス長に対応している。このように高分解能な断層写真が生体について、光を用いて直接得られたのは画期的なことであり、今後、白内障、緑内障などの早期診断への適用が期待される。

Fig.4 Optical coherence tomograph of human retina in papillary region *in vivo*. Identifiable structure includes the vitreous region, retina, optic disk, retinal pigment epithelium, and sclera. (CTuG4, E. A. Swanson et al.)

4.2.2 時間ゲートによる透過像の改善

New York 市立大のAlfanoのグループは、ストリークカメラによるオーソドックスな方法で実際の生体試料についての透過像の再生を実験的に示した(CTuG2)。彼らは、散乱媒質を透過してきたパルスはFig.5に示すように弾道飛行(ballistic), 拡散(diffuse), 蛇行(snake)の各フォトン成分からなるとして、イメージングには弾道飛行成分が最も必要なものであるが、これらは殆ど希であり、またパルスの大部分を形成する拡散成分は必要な情報を持っていないとしている。一方、蛇行成分は、ほぼ直線に沿って散乱されながら飛行するフォトンで、これは拡散フォトンの前縁部を形成するもので、ある程度数があり、しかも透過やCTイメージングに必要な情報を担っている。ストリークカメラを使えば、この蛇行フォトンだけを計測することができる。CPMリング色素レーザーからの波長620nm, 5mW, 100fsの繰り返し82MHzのパルスを、厚さ40mmの鶏のささみに厚さ2.5mm, 幅7mmの鶏のあぶら身を埋め込んだサンプルを1mmステップで掃引しながら照射した。Fig.6に示すように、基準パルスから特定の時間ゲート(ここでは308-328ps)を用いた掃引データは明かに埋め込んだあぶら身の存在をmmオーダーの分解能で示している。すなわち、この時間ゲートに蛇行フォトンが集中しているものと考えられる。40mm厚の実際の生体試料で、このようなデータが得られたことは意義深い。

Fig.5 A cross-section of the chicken breast tissue sample in the plane of the scanning with a thin fat strip embedded in it. The snake photons from the early portion of the diffuse pulse. (CTuG2, B. B. Das et al.)

Fig.6 Time integrated intensity from the transmitted signal through the 4 cm thick sample with a 2.5 mm thick fat strip within a 20 ps window (308-328 ps) vs different beam incidence positions. (CTuG2, B. B. Das et al.)

4.2.3 光CT

先に、CT像再生に必要な投影データを得るのに、時間ゲートの他に空間的なゲートも役立つであろうことを述べたが、筆者らはピンホールとファイバーを用いた非常に簡単なコリメータだけで、時間ゲートを使うことなく散乱媒質中に置かれた吸収体のCTイメージが得られることを示した(CTuK7)。ファントムとして、厚さ8cm、散乱係数 3cm^{-1} に濃度調整したIntralipid(散乱媒質の共通基準試料としてよく使われる脂質エマルジョン)セルの中心付近に棒状吸収体を置いたものを用いた。上の散乱係数は生体組織のうちで最も軽い散乱部分に相当する。コリメータの受光角は 2.5×10^{-4} ラジアン、半導体レーザーからの波長830nm、10mWのcw光を用いて、80dBのダイナミックレンジを得ている。CTスキャンはT-R方式で、平行移動(T)18mmを100ステップ、回転(R)を全周100ステップで行い、Fig.7に示すCT像を得た。CT像再生の成功の一因は、CTスキャンによって引き起こされるファントム境界面での光線屈折を避ける配置をとった点にあることを指摘している。生体の最も軽い散乱部分に相当するファントムとはいえ、8cmの厚みについて空間ゲート

(a)

(b)

Fig.7 An example of obtained reconstructed CT image. Concentration of "Intralipid 10 %" aqueous solution is 1% and the light traversing depth is 80 mm. (a) Gray-scale gradation representation, (b) Contour representation. (CTuK7, Y. Cho et al.)

のみでCT像を得たことは、今後、時間ゲートとの組合せなどによって光CTを実現してゆく上で、一つの目途を与えたものといえる。

4.2.4 拡散光子密度波(DPDW)

散乱媒質が高密度になると、光子の多重散乱は拡散で記述できるようになる。従来、拡散光は完全にインコヒーレントな光で、イメージング情報を全く含まないものとして、これを如何に除去するかが主たる関心事であった。こ

Fig.8 Constant phase contours (in 20 degree intervals) as a function of position showing the propagation of a diffuse photon density wave across a planar boundary that separates 1 % concentrated Intralipid from 0.25 % Intralipid. The incident wave is measured in a homogeneous system. S_0 , source position; S_1 , apparent source position; A point on boundary. (CTuK2, M. A. O'Leary, et al.)

の拡散光を変調することによって、逆にイメージングに使おうというアイデアが、拡散光子密度波(DPDW; Diffuse Photon Density Wave)としてPennsylvania大のChanceらのグループから出された(CTuK2)。拡散媒質内における光子密度は、当然、拡散方程式に支配されるが、その振動タームは進行波の解を持つ。従って、

DPDWを、拡散媒質内に置かれた光源を正弦波強度変調することによって発生することができる。彼らの実験では、200MHzで注入変調された波長816nmの半導体レーザーが、拡散媒質(Intralipid)中に光ファイバーで導かれて使われた。拡散光子密度波は光エネルギーについてのスカラー波であり、その波長 λ は、拡散媒質の拡散係数を D 、変調周波数を ω として、 $\lambda = 2\pi (D/\omega)^{1/2}$ で与えられる。 D は拡散媒質の濃度に反比例するので、DPDWの拡散媒質中での波長は拡散媒質の濃度に依存して変わることになる。Fig.8はIntralipid-1%液(図上方)と0.25%液(図下方)の境界面(ガラス板)におけるDPDWの屈折の有様を等位相面を検出することによって示すデモンストレーションである。実際の光源位置 S_0 が見かけ上の光源位置 S_1 に移動して観測される様子がわかる。媒質の濃度で決まる屈折率に関して境界面でSnellの法則が成立していることが示され、それ以外にも、DPDWについての幾何光学の法則が成り立つことが示された。この結果は、光拡散媒質はDPDWに対してあたかも透明媒質のように振舞うことを意味しており、生体のごとき強散乱体を透視するのにDPDWが有力なツールになるものと思われる。

(張 吉 夫)