

公益社団法人日本超音波医学会光超音波画像研究会抄録

代表：椎名 毅（京都大学大学院医学研究科医療画像情報システム学）

第1回

日時：平成30年6月10日（日）

会場：神戸ポートピアホテル地下1階（生田）（神戸市）

日本超音波医学会 第91回学術集会「特別プログラム：知を究めるシリーズ 基礎5 シンポジウム 光と超音波の融合による定量診断・機能イメージング技術」として開催のため、「超音波医学」45巻 Supplement 号に掲載されていますので、ご参照下さい。

第2回

日時：平成30年8月4日（土）

会場：北海道大学 大学院情報科学研究科棟（高層棟） 11階 大会議室（札幌市）

日本音響学会 平成30年度第2回アコースティックイメージング研究会，平成30年度第2回基礎技術研究会，第1回超音波分子診断治療研究会，日本生体医工学会 北海道支部 第53回生体医工学研究会，レーザー学会 第2回光音響イメージング技術専門委員会と共催のため，平成30年度基礎技術研究会抄録に掲載されていますので，ご参照下さい。

第3回

日時：平成30年10月4日（木）

会場：東北大学 青葉山キャンパス 電子情報システム・応物系 南講義棟 103（仙台市）

共催：電子情報通信学会・日本音響学会 超音波研究会，レーザー学会 光音響イメージング技術専門委員会

1) 集束超音波による超音波霧化におけるキャピラリー波の高速撮影解析

塚原健生，益子大作，吉澤 晋（東北大学）

集束超音波を液体中から気液界面に集束させると，焦点付近の水面が柱状に隆起し表面から微小な液滴が放出されることがある．この霧化現象が生じる原因の一つとして，キャピテーション気泡の寄与とともに表面波（キャピラリー波）の影響が提唱されているが，いまだ原理の完全な解明には至っていない．本研究では高速カメラを用いて，様々な周波数の集束超音波を照射した際の超音波霧化過程を撮影し，液柱表面に生じるキャピラリー波の時間変化について解析を行った．

2) 超音波による脂肪性肝疾患の診断と断層像の高分解能化を目指した生体内音速分布推定

阿部啓一郎¹，森 翔平¹，荒川 元孝^{2,1}，金井 浩^{1,2}（¹東北大学大学院工学研究科，²東北大学大学院医工学研究科）

超音波医用診断は生体内の多くの臓器の観察に非常に有用である．しかし，超音波断層像の画質は生体内組織の音速不均一性により低下してしまう．また，生体内，特に肝臓において組織の脂肪化により音速が変化することが知られている．これらの背景から，生体内音速分布推定による断層像画質向上および脂肪性肝疾患の診断を目指している．本報告では，我々が提案している音速分布推定法でターゲットとなる散乱体の直径と音速の推定精度について，水中に設置した大きさが異なる散乱体を用いた基礎実験を通して検討した．

3) 分極反転PZT/PTO薄膜を用いた周波数スイッチナブルな GHz 帯共振子

清水貴博^{1,2}, 森 剛志¹, 柳谷隆彦^{1,2,3} (1早稲田大学先進理工学部, 2早稲田大学各務記念材料技術研究所, 3JST さきがけ)

移動体通信機器の周波数フィルタ数増加を抑えるために、周波数チューナブルやスイッチナブルといった機能を持つフィルタが検討されている。分極反転構造の強誘電体薄膜は、電圧印加により共振モードを可逆的に切り替えることができ、スイッチナブルフィルタとして有望である。本研究では、抗電界の異なる PZT と PbTiO₃ の 2 層構造共振子をスパッタ法により作製し、中間電極を用いない簡単な構造での周波数スイッチングを試みた。PZT 層と PbTiO₃ 層の抗電界の中間の電界を共振子に印加し、抗電界の低い PZT 層のみの分極方向を反転することにより、基本モード共振 (0.56 GHz) と 2 次モード共振 (1.58 GHz) の可逆的なスイッチングに成功した。

4) 基板付き薄膜共振子からの新規 k_t^2 評価法と従来法の比較—共振周波数比法, 変換損失法, 共振スペクトル法, 共振反共振法—

戸塚 誠^{1,2}, 柳谷隆彦^{1,2,3} (1早稲田大学大学院先進理工学研究科, 2早稲田大学各務記念材料技術研究所, 3JST さきがけ)

圧電薄膜を用いた BAW 共振子の最終的な性能を決定付けるパラメータとして電気機械結合係数がある。電気機械結合係数 (k_t^2) の測定には IEEE Standard より共振反共振法が推奨されているが、薄膜自立構造 (FBAR) でのみ測定可能という欠点がある。基板付き薄膜構造 (HBAR) において電気機械結合係数が測定可能であればデバイス作製前に性能を把握でき歩留まり向上に寄与すると考えられる。今回我々は基板付き薄膜構造において共振周

波数比を用いた新たな電気機械結合係数測定法を見出したため、本手法と既存手法との比較を行った。その結果、IEEE 推奨の共振反共振法と本手法による電気機械結合係数の推定値の誤差は 7%以内となり本手法の妥当性が示された。

5) c 軸傾斜配向 ScAlN 薄膜/音響多層膜構造の共振子を用いた UHF 帯における液体粘性評価

山川愉生^{1,2}, 五月女巧^{1,2}, 唐澤 嶺^{1,2}, 柳谷隆彦^{1,2,3} (1早稲田大学先進理工学部, 2早稲田大学各務記念材料技術研究所, 3JST さきがけ)

水晶振動子 (QCM: Quartz Crystal Microbalance) を用いた液体の粘度評価において、測定感度を向上させるためには水晶板の薄片化が求められるが、機械強度の低下につながる。音響多層膜共振子 (SMR: Solidly Mounted Resonator) を用いることで機械強度を損なわない高感度測定が期待できるが、これまでの研究報告では圧電薄膜の擬似すべりモード電気機械結合係数 $k'_{15}{}^2$ がおよそ 1.7% とさほど高くない。そこで我々は、c 軸傾斜 ScAlN (傾斜角度: 48°) を用いた音響多層膜共振子を作製し、液体粘性の評価を試みた。結果、縦波が十分抑制され、 $k'_{15}{}^2 = 13.0\%$ と高品質な ScAlN 薄膜の作製に成功した。さらに、グリセリン水溶液の濃度変化に伴う反共振周波数ピークの変化が観測された。

6) c 軸傾斜配向厚みすべりモード ScAlN 薄膜共振子を用いた液体中生体分子相互作用の検出

矢崎 花^{1,2}, 五月女巧^{1,2}, 唐澤 嶺^{1,2}, 高柳真司³, 吉田憲司⁴, 柳谷隆彦^{1,2,5} (1早稲田大学先進理工学部, 2早稲田大学各務記念材料技術研究所, 3名古屋工業大学大学院工学研究科, 4千葉大学フロンティア医工学センター, 5JST さきがけ) 小型で高感度な生体高分子センサが求められている。ScAlN 薄膜の c 軸を傾斜させた共振子は横波

モードで励振し液体中でも効率よく動作させることができる。さらに、c 軸傾斜配向 ScAlN 薄膜は高い擬似横波の電気機械結合係数 k_{15}^2 を有するため共振ピークが大きく SN 比の高い測定が期待できる。本報告では、RF マグネトロンスパッタ法により c 軸傾斜配向擬似厚みすべりモード ScAlN 薄膜共振子を作製し、バイオセンサとしての動作をストレプトアビジン-ビオチン反応を用いて確認した。

7) 製法の異なる ScAl 合金スパッタターゲットから発生する負イオンが ScAlN 薄膜の特性に及ぼす影響—電子ビーム溶融、アーク溶融、焼結 ScAl 合金ターゲットの比較—

唐澤 嶺^{1,2}, 高柳真司³, 遠藤結佳^{1,2}, 今川 誠⁴, 森坂啓介⁴, 鈴木 雄⁴, 柳谷隆彦^{1,2,5} (¹早稲田大学先進理工学部, ²早稲田大学各務記念材料技術研究所, ³名古屋工業大学大学院工学研究科, ⁴株式会社フルヤ金属, ⁵JST さきがけ)

次世代の FBAR (Film Bulk Acoustic Resonator) に用いる圧電材料として、その圧電性の大きさから ScAlN 薄膜が注目を集めている。Sc 高濃度領域における ScAlN 薄膜の成膜技術の確立には、Sc 金属由来の負イオン照射の抑制が欠かせない。本報告では、3 種類の ScAl 合金ターゲット (電子ビーム溶融、アーク溶融、焼結ターゲット) から成膜中に発生する負イオン種の測定を行った。また、これらのターゲットを用いて ScAlN 薄膜を作製し、結晶配向性と電気機械結合係数を評価した。作製した試料の結晶配向性を示すロックンクカーブ半値幅は、自作電子ビーム溶融ターゲットで 2.4° 、アーク溶融ターゲットで 1.7° 、焼結ターゲットでは 1.4° であった。また、電気機械結合係数は電子ビーム溶融ターゲットで $k_t^2 = 20.3\%$ 、アーク溶融ターゲットで $k_t^2 = 20.6\%$ 、焼結ターゲットで $k_t^2 = 20.1\%$ と見積もられた。それぞれのターゲットから

の負イオンの発生量には違いが見られたが、作製した ScAlN 薄膜は同等の圧電性を示した。

8) 多波長光音響イメージングによる脂肪肝定量評価のための基礎的検討

浅田恭輔¹, 浪田 健¹, 近藤健悟¹, 山川 誠¹, 椎名 毅² (¹京都大学大学院医学研究科, ²京都大学人間健康科学系 (大学院医学研究科))

光音響イメージングによる非侵襲、簡便な脂肪肝の定量評価をめざし、脂肪率に伴う光音響信号強度の波長依存性および温度依存性を調査した。光音響信号強度は肝臓では波長 900 nm においてピークを持ち、脂肪では波長 1210 nm においてピークを持つことが明らかになった。また波長 900 nm および 1210 nm 付近の 2 波長における信号強度比が脂肪率に応じて変化することを確認した。またトリ脂肪肝の *ex vivo* 実験において、この 2 波長の信号強度比を用いることで脂肪率が推定できることの可能性を実証した。さらに波長 1210 nm 付近での温度変化における信号強度変化についても、脂肪率評価の有用なパラメータになりうることを明らかにした。

9) 多波長光音響イメージングによる皮下血腫評価に向けた基礎的検討

内本 陽¹, 浪田 健¹, 近藤健悟¹, 山川 誠¹, 椎名 毅² (¹京都大学大学院医学研究科, ²京都大学人間健康科学系 (大学院医学研究科))

皮下組織のイメージングは、外傷による内出血、皮下血腫、静脈血栓症などの病態把握に有用である。そこで我々は、非侵襲かつ操作が簡便なハンドヘルド型光音響イメージング装置の皮下血腫評価への応用をめざし、血腫模擬試料を用いた検討を行った。その結果、光音響像において模擬血腫の形状が正確に描出され、開発した装置の血腫形態評価への応用可能性が確かめられた。また、複数波長

を用いて計測を行い、異なる波長間で得られた光音響信号強度比により、血腫形成からの経過時間を反映するヘモグロビンとビリルビンの割合を算出できる可能性が確かめられ、開発した装置の血腫性状評価への応用可能性も実証した。

10) 深深度・波長低依存音響分解能光音響顕微鏡の光学シミュレーション

丸山真幸, 加瀬 究, 斎藤徳人, 和田智之 (理化学研究所)

これまでの音響分解能光音響顕微鏡は主に単波長計測であったり、複数であっても比較的近い波長が用いられることが多く、光学系の波長依存性が問題になることはなかったが、多様な機能イメージングを実現するために多波長を用いる場合、屈折率分散のために集光位置がずれてしまう。そこで反射光学系と対称透過光学系を用いることで、集光位置の波長依存性を減らすと同時に深深度での波長低依存光音響イメージングが期待できる音響分解能光音響顕微鏡光学系を提案する。

11) 多方向信号取得による高解像度光音響イメージング

佐藤幹太¹, 新橋 諒¹, 藤原光浩², 西條芳文¹
(¹ 東北大学大学院医工学研究科, ² 株式会社オークソニック)

光音響イメージングの臨床的使用には、主にリニアプローブが用いられている。しかし、リニアプローブを用いた光音響イメージングでは、信号受信領域の限定性により再構成像のコントラストが欠如すると考えられる。そこで本研究では、高解像な光音響イメージングを行うために、イメージング対象に対してリニアプローブを多方向に配置し、複数の方向から光音響信号を受信し、得られた全データから一つの再構成像を作成する手法を提案している。そして、シミュレーションをもとに、一

方向で信号取得した場合と提案手法の再構成像の比較を行い、分解能とコントラストの向上、音源の形状の再現性も向上することが示された。

12) 高周波数トランスデューサを使用した透過型光音響顕微鏡の設計

新橋 諒¹, 長岡 亮², 小林和人³, 西條芳文¹
(¹ 東北大学大学院医工学研究科, ² 富山大学大学院理工学研究部, ³ 本多電子株式会社研究開発本部)

光音響イメージングは光と超音波の双方の特性を有するイメージング手法であり、光や超音波単独では見ることができなかった領域を可視化する手法として近年医療応用が注目されている。しかし一方で、生体組織や細胞の光音響特性を調べた研究は少ない。したがって本研究の目的は、細胞レベルの可視化を可能にする光音響顕微鏡の開発である。

本目的を達成するため、高周波数トランスデューサ及び高 NA 対物レンズを使用した透過型光音響顕微鏡を製作した。製作した顕微鏡を用いた効率的な光音響信号の取得方法について検討を行い、黒テープおよび赤テープからの光音響信号を取得することで、その有用性を検証した。

13) 実時間光超音波を用いたヒト組織 in vivo イメージングの初期実験—スペクトル推定と力学計測—

炭 親良¹, 佐藤直人² (¹ 上智大学理工学部, ² CYBERDYNE 株式会社研究開発部)

我々は、最近に、光音響 (PA: Photoacoustics) 信号と rf 信号を用いた組織診断イメージング技法の開発を行っている。今回は、今後のヒト組織病変の鑑別への応用に向け、ヒト in vivo 手首において、スペクトルと点拡がり関数 (自己相関関数) と組織変位/歪を観測した結果を報告する。

14) 臨床研究のデータ理解のためのウサギを対象にした光音響測定

石原美弥¹, 平沢 壮¹, 大川晋平¹, 藤田真敬²
(¹ 防衛医科大学校医用工学講座, ² 防衛医科大学校防衛医学研究センター異常環境衛生研究部門)

光イメージングと超音波イメージングの利点を活用することで, 新しい特徴を持つ光音響イメージング技術について, 基礎と臨床をつなぐ光音響イメージング研究を概観する.

第4回

日時:平成31年1月14日(月)

会場:東海大学高輪キャンパス 4号館 4101(東京都港区)

共催:レーザー学会学術講演会第39回年次大会

1) 基礎と臨床をつなぐ光音響イメージング研究

石原美弥(防衛医科大学校)

光音響分光法(Photoacoustic Spectroscopy; PAS)の原理に基づく現象を利用する光音響イメージングは, 光吸収体分布の断層画像を取得する技術である. 顕微鏡タイプ, ハンドヘルドタイプ, ガントリータイプと装置の形態にバリエーションがあり, 生体内部の観察手法として, ヒトからモデル動物, 培養細胞までを対象にして, 幅広く盛んに研究されている. 臨床応用を目指した研究では, ヘモグロビンを撮像対象とした血管画像の研究が先行している. 生体の浅い部分を微細にイメージングする場合には, 500 nm代の波長を用い, より深部を画像化する場合であれば750 nmなどの近赤外光を用いている.

光音響イメージングで, いかにかに生体の機能を可視化できるか, 機能を可視化したと実証するため

にどのようなステップが必要であるか, 一考したい.

2) 光音響顕微鏡高性能化のための非線形光音響波検出

山岡禎久, 能塚雄介, 松本航希, 高橋英嗣(佐賀大学)

光イメージングにおいて, 非線形光学現象の利用は空間分解能や深達距離の向上に寄与する. その代表例として, 2光子蛍光顕微鏡がある. 2光子吸収は焦点近傍の微小領域においてのみ起こるため, 空間分解能が高く, かつ, 蛍光が生体で散乱されても2光子蛍光が起こる微小領域は既知であるため, 蛍光散乱が起こっても, 生体深部の高空間分解観察が可能となる.

一方, 近年, 生体深部を光のコントラストで観察する方法として光音響イメージングが注目されている. この方法は, 光励起によって測定対象内に存在する分子によってエネルギーが吸収され, その結果として発生する音響波を検出することによりイメージングを行う方法である. 生体表面から深部まで, 深達距離を空間分解能で割った性能指数をほぼ一定に観察できるのが特徴である. 生体表面の浅い部分は光で空間分解能が決定され, 深い部分は超音波で空間分解能が決定される. しかしながら, 特に空間分解能が光から超音波に変わる生体深さ(皮膚や管空臓器の厚さ)においては, 細胞レベルでの観察が可能となる更なる技術革新に期待が集まっている.

3) LED光源方式光音響イメージングの最新動向

佐藤直人, 市橋史行, 山海嘉之(CYBERDYNE株式会社)

光音響イメージングは光音響効果(photoacoustic effect)によりナノ秒幅のパルス光照射により光吸収で生じた熱弾性波から光吸収

分布を再構成するイメージング手法である。医用応用研究での画像化対象となる典型的な光吸収体は、血管(血液)やメラニン、ICG やメチレンブルー等の光増感材、針等の人工物等があり、さらに複数の波長を用いてヘモグロビンの酸素化度の分布の違いから機能情報を分析することも可能である。励起光源としては、レーザーが使われてきたが、我々は、励起光源として LED を使って光音響イメージングに成功した。キーファクターである、高出力短パルス LED 光源の開発について説明をする。

4) 光音響と超音波の統合イメージング

椎名 毅, 浪田 健, 近藤健悟, 山川 誠(京都大学大学院医学研究科人間健康科学専攻)

光音響効果を用いた光音響イメージングは、非侵襲で微細な血管の構造や酸素飽和度の分布を可視化できるため、新生血管によるがん腫瘍の検出や関節リウマチでの重症度の評価など、臨床適用が期待されている。また、原理的には光音響イメージングのセンサを超音波の送受信に用いることで、超音波エコー像を得ることができるため、光音響と超音波の画像を重畳して表示することで、超音波による筋や脂肪、骨などの組織構造の情報と、光音響による血管分布の機能情報を統合した画像診断が可能となる。

しかし、超音波エコー法と光音響イメージングでは、超音波信号の生成原理や周波数成分の違い、画像再構成法の違いなどにより、高画質を得るのに適した超音波センサの条件は異なる。

我々は、光音響と超音波の双方を高画質で計測可能な手法について検討した。1つは、血管の3D光音響像を得ることを重視して開発した半球型センサを用いて、超音波像においても高画質を得る計測法について検討した。また、リアルタイム性に

優れるリングアレイセンサを用いて、高画質な光音響と超音波を同時計測可能なシステムを構築し実験により有効性を検証した。

5) 光音響波を利用した弾性スティフネスの推定とCFRPの内部剥離のイメージング

中畑和之, 唐川和輝, 天野裕維(愛媛大学)

炭素繊維強化樹脂(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP)の重量比強度は鋼材の約10倍であり、腐食や疲労に対する耐性にも優れていることから、航空機や自動車等の工業部材等、幅広い分野で使用されつつある。CFRPの欠陥には様々なものがあるが、ここでは、現状の超音波探傷技術で検出・評価が困難とされる層間剥離(デラミネーション)の評価に、光音響波を用いたイメージングを試みる。本研究ではレーザーを材料に照射するが、レーザー強度が低い場合、一定条件下で光吸収による断熱膨張が起こり、光音響波が発生する。医療分野では光音響イメージングが盛んに研究されているが、医療の場合は、光が人体に浸透し、内部で発生した光音響波を利用する。しかし、CFRPの場合、材料表面近傍で光が殆ど吸収されるため、表面から光音響波が発生するものとして、映像化アルゴリズムを構築する必要がある。

CFRPはプリプレグの積層方法や数によって異方向性が生じるため、超音波の伝搬速度が方位に依存する。従って、映像化を実施する前にはCFRP中の波動伝搬特性を把握しておく必要がある。本研究では、CFRP表面の超音波伝搬を可視化した結果から、弾性スティフネスを求める方法を採用し、この結果から群速度分布を求める。この速度分布を、映像化アルゴリズムである開口合成法に導入することで、高精度な剥離イメージングが可能であることを示す。