

波数マッピングにおいて近似処理を要さない3次元高速デジタルフーリエビームフォーミングを用いた新しい医用超音波イメージング

研究代表者

炭 親良

上智大学 理工学部 准教授

1 はじめに

よく知られているフーリエビームフォーミングに古典的なモノスタティック開口面合成(但し、偏向無し)がある。理論は光学の分野で最初に報告されたが[1, 2]、医療や非破壊検査の分野の超音波イメージングでも扱われる様になった[3, 4]。計算速度が高速である特徴を実時間イメージングに生かそうとするものである。特に最近では、高速フレームレートを実現できる偏向有り又は無しの平面波送信時の処理が報告されている[5, 6]。しかし、その平面波送信時の処理では、後続の他グループから報告されている方法を含め、いずれもアンギュラスペクトルに近似を伴う波数マッピングを施す必要が有り[5-7, 他]、本研究代表者はアーチファクトが生じることを確認した[8]。

その様な中で、本研究代表者は、主として1次元アレイ型探触子を用いた2次元ビームフォーミング(2次元イメージング)に関し、それらのビームフォーミングに加えて[4, 9, 10]、偏向有りのモノスタティック開口面合成やマルチスタティック開口面合成、さらには、フォーカスビームやフォーカス無しの送信(円形波や球面波や円筒波等)[11, 12]や、複数波動の同時送信等の任意の送信時の受信ビームフォーミング処理の開発に取り組み[13]、波数マッピングにおいて近似処理を要さない送信及び/又は受信の偏向を可能にした(無論、開口の正面方向の偏向角度 0° のときを含む)。また、仮想の送信や受信のセンサを用いたり、また、任意形状の開口素子アレイ探触子を用いたり、また、送信座標系とは異なる任意座標系においてビームフォーミングを完了することも可能にした[14]。これより、高速且つ通常の近似処理を伴う整相加算(DAS: Delay and Summation)処理よりも高精度なビームフォーミング処理を可能にした。本研究代表者は、周波数領域における位相回転により、ナイキスト定理の下で近似無しに整相するDAS処理を実施して最高精度のビームフォーミングを行えることを報告しているが、本フーリエビームフォーミング処理によれば、それに比べて100倍以上の速度にて同精度を得ることができる[15]。

また、特に医用超音波イメージングの分野では、2000年初頭から2次元アレイ型探触子を用いた3次元ビームフォーミング(3次元イメージング)がDAS処理の下で行われる様になった。本研究では、高速性に関してより高い効果のある3次元フーリエビームフォーミング処理を実現し、シミュレーションファントムと幾つかの水中ファントムを対象として実行可能性を確認した。本稿では、上記の様々なビームフォーミングの基礎となるモノスタティック開口面合成と平面波送信時の受信ダイナミックフォーカシングの結果を報告する。本研究代表者の知る限りでは3次元フーリエビームフォーミングの実験データの報告は本稿の他に無い。

2 3次元フーリエビームフォーミング

3次元座標(x, y, z)を図1の様に定義する。深さ方向を y 軸、横方向を x 軸、エレベーション方向を z 軸とした。2次元処理の場合と同様に、開発したフーリエビームフォーミング法の特徴として、物理的な送信の偏向角度とは別に、ソフト的に、異なる送信と受信の偏向角度を設定できる。以下において、これらのソフト的な送信と受信の偏向角度は、図1にて定義されている偏向角度に、送信は t 又は1、受信は r 又は2を添え字として用いた。

2-1 開口面合成法

本研究代表者は、開口面合成における偏向処理法を考案し、2次元ビームフォーミングの場合について、[11, 12]にて報告して

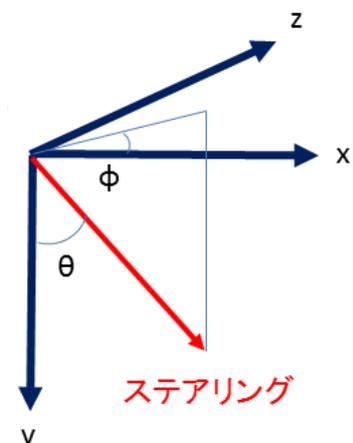


図1 座標と偏向(ステアリング)角度の定義。

近似有り

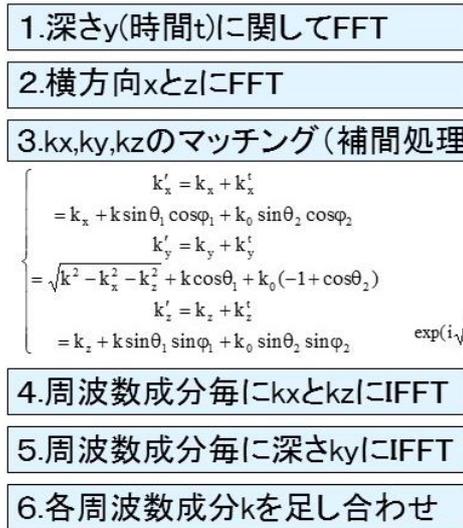


近似無し



図2. 開口面合成のフローチャート。

近似方法



本法



図3. 平面波送信時の受信ダイナミックフォーカシングのフローチャート。

いる。本稿では、これを3次元化した方法を用いた。図2にフローチャートを示す。図中の k_x, k_y, k_z は各方向の波数を表し、 k_0 は超音波周波数に対応する波数である。本法は波数マッピングにおいて近似処理を行わないことを特徴としているが、近似処理を行う場合も報告されていなかったため、両処理のフローチャートを示す。波数マッピングにおいて近似処理を行う場合は、3次元フーリエ変換によって得られるアンギュラスペクトルに対して波数マッピングを行い、その後3次元逆フーリエ変換を行う。一方、近似処理を行わない本法は、3方向に複素指数関数を乗ずることによって波数マッピングを行う。

2-2 平面波送信時の受信ダイナミックフォーカシング

次に、平面波送信時の受信ダイナミックフォーカシングのフローチャートを示す。波数マッピングにおいて近似処理を行う方法は、[5, 6]にて報告されている。開口面合成の場合と同様に処理される。また、本法も

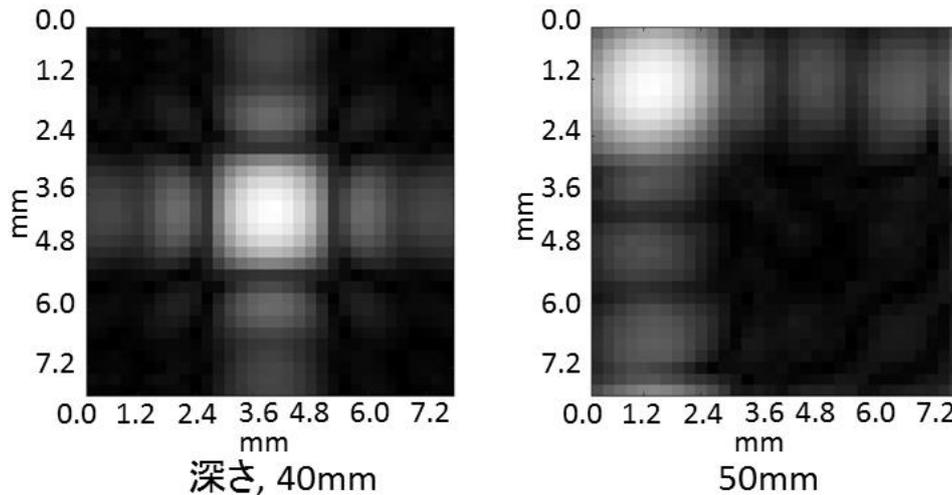


図4. 深さ 40mm と 50mm に位置する理想的な点散乱体の C モード像<シミュレーション>。

開口面合成の場合と同様に処理され、各方向に複素指数関数を乗じて波数マッピングを行う[4, 9, 10]。

実のところ、マイグレーション処理によってもこれらのビームフォーミングを行うことができる[13]。これらのフーリエ処理の詳細は、上記文献の他に、出願特許[16-20]や[21]にある。

3 実験

3-1 シミュレーション

まず、Field II [22]を用いて3次元数値ファントムにおいて開口面合成用受信データを作成した。2次元リニア型アレイ探触子のスペックは、超音波周波数 3MHz、素子幅 0.20×0.20 mm、間隙 0.04mm、32×32 素子である。理想的な点散乱体を深さ 40mm と 50mm の2カ所に設定した。

図4にそれらの点散乱体の存在する2つの深さにおけるCモード像を示す。開口面合成の結果として、深さに依らず、略同一のビーム幅が得られていることを確認できる。

3-2 水中のステンレス線ターゲット

次に、φ0.23mmのステンレス線を3本、横方向に6mmの間隔で、水中の深さ約30mmにエレベーション方向に平行に走らせ(図5)、水面(y=0)にて上田日本無線社製探触子(16×16素子)の2次元(x,z)の機械走査を行って64×64素子分の開口面合成用エコーデータを取得した。超音波周波数は1.5MHz、パルス長は2波、素子幅は0.35×0.35mm、間隙は0.05mmである(図6)。送受信器を含むエコーデータ取得装置はジャパンプローブ社製である。

図7と図8の各々に開口面合成と平面波送信時の受信ダイナミックフォーカシングの画像を示す。また、各々において、偏向角度 $\theta=20^\circ$ と -20° の結果も示す。開口面合成と平面波送信の両者において3つのステンレス線が結像されたことを確認できた。また、平面波送信の場合は、理論通りに、開口面合成に比べて横方向分解能が低かった。

3-3 水中の寒天孔穴ファントム

次に、寒天ファントム(100mm辺の立方体)を対象とし、ジャパンプローブ社製探触子(4×4素子)の2次元機械走査を行って開口面合成用のデータを取得した。超音波周波数は8MHz、パルス長は4波、素子幅は0.25×0.25mm、間隙は0.10mmである。水面にある探触子から2mmの深さにファントムを備える様にし、20mmと35mmの各々の深さに直径1cmの円形孔穴の中心がエレベーション方向に走っているファントムを2つ用いた

水中のステンレス線3本($\phi=0.23\text{mm}$)

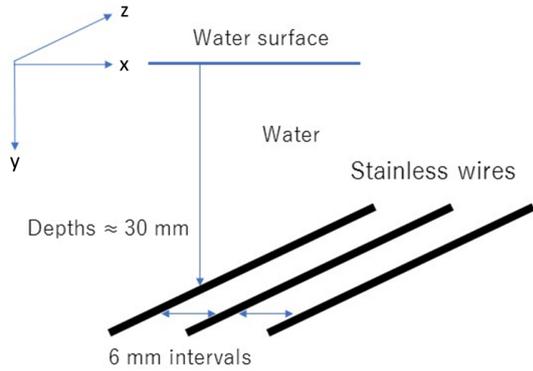


図 5. ステンレス線ファントム。

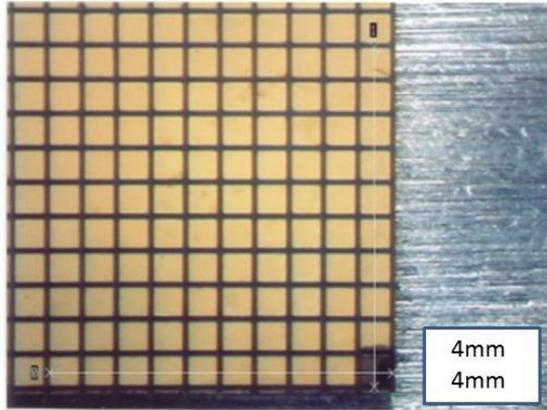


図 6. 2次元素子アレイ。

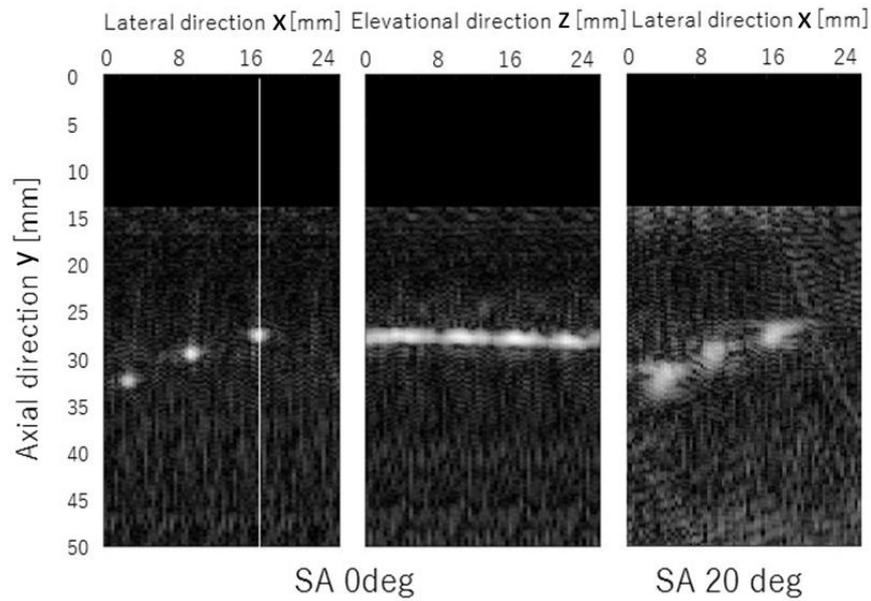


図 7. 開口面合成(SA: Synthetic Aperture)の結果。偏向角度 $\theta = 0^\circ$ と 20° のとき。

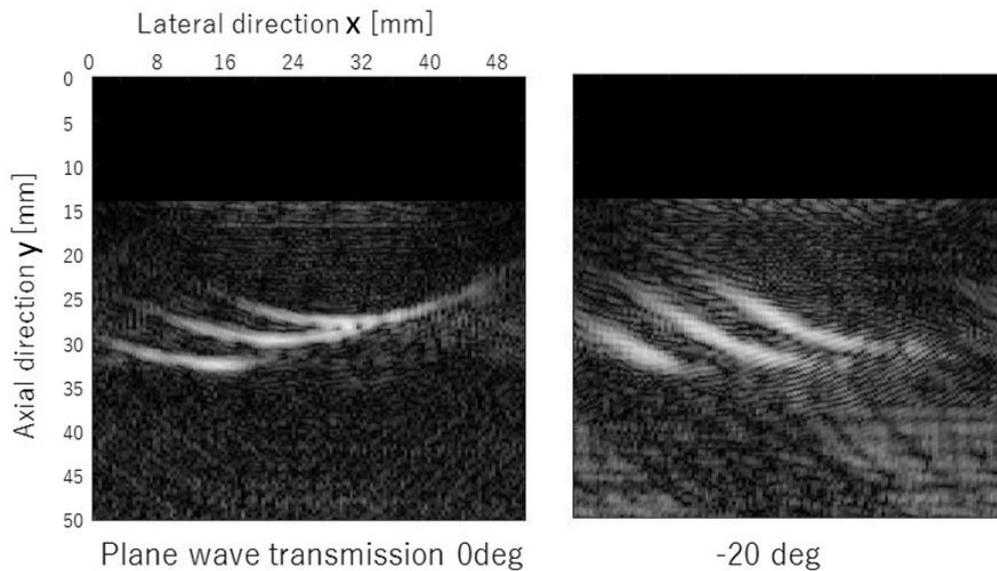


図 8. 平面波送信時の受信ダイナミックフォーカシング。受信偏向角度 $\theta = 0^\circ$ と -20° のとき。

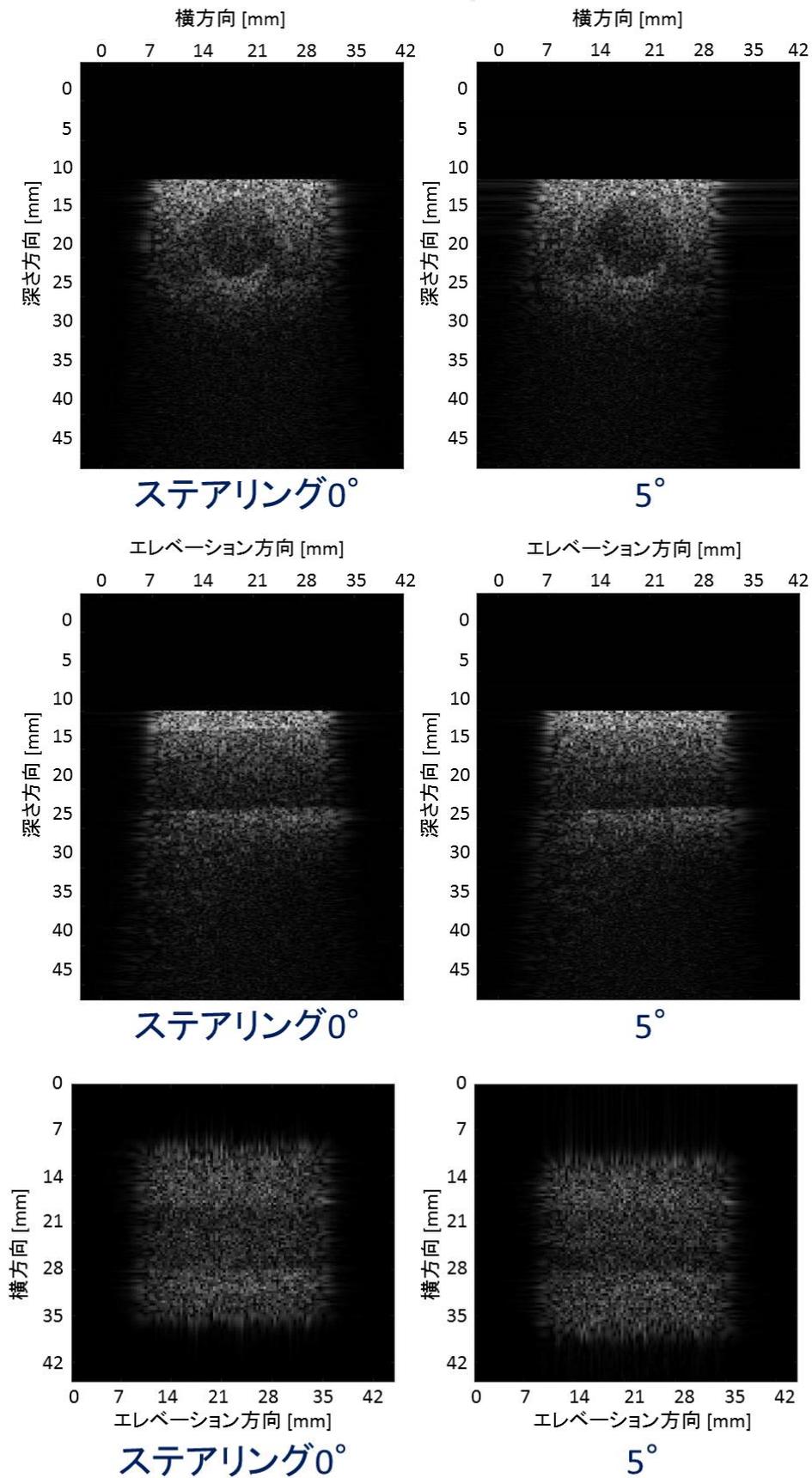


図9. 円形孔穴のある寒天ファントム(深さ20mm)。送受信偏向角度 $\theta = 0^\circ$ と 5° のとき。

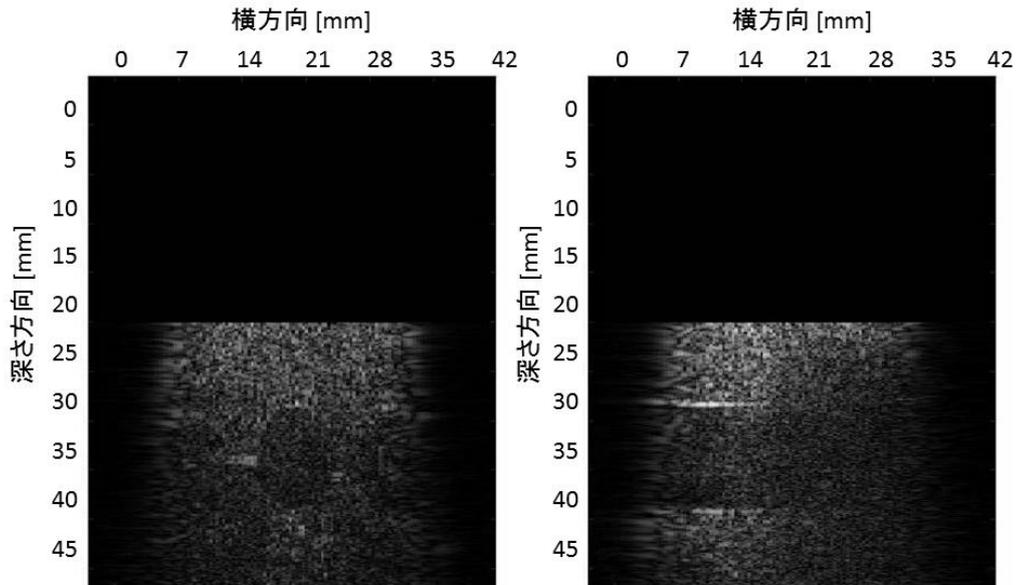


図 10. 円形孔穴のある寒天ファントム(深さ 35mm)。送受信偏向角度 $\theta = 0^\circ$ のとき。

(寒天は 3%、グラファイトは 4%)。孔穴の深さが 20mm のファントムでは、偏向角度 $\theta = 5^\circ$ の処理も行った。図 9 と図 10 に各々のファントムにおいて開口面合成を行って得られたエコー像を示す。いわゆる STC (sensitivity time control) 処理をしておらず、深さ 12mm までのエコー信号を除いて振幅を 256 階調化してある。孔穴の断面(円形)およびその走行を確認できた。孔穴の深さが 35mm のファントムは、横方向に 2mm 圧迫を加えてあり、孔穴の断面形状は縦長になっていた(図 10)。

4 結言

シミュレーションおよびファントム実験において、3 次元フーリエビームフォーミングの結果を得た。処理の高速性も確認できた。近似処理をしない DAS 処理と比較し、2 次元処理に比べて 3 次元処理においては少なくともさらに 1 桁以上は高速になった筈である(つまり、1,000 倍以上)。今後には、DAS 処理との詳細な比較を行うと共に、観測対象毎に超音波探触子のスペックの調整を行い、装置の実時間処理化も図り、上述の他ビームフォーミングを行う場合を含め、実時間性と精度に関する評価を行っていく。また、ドブラ観測等にも応用していく。本法は位相に関する誤差を生じない画期的な方法であり、今後は Analogue-to-digital (AD) 変換器の解像度や丸目誤差に関する考察を行い、最良のシステムパラメータを探し当てたいと考えている。電子ノイズを低減することが必要であり、特に 2 次元アレイ型探触子の送信又は受信の強度が低い場合においてはフレームレートの低下を代償に加算平均[23]を行うことが有効であることもあろう。また、今後には、弾性や温度等の 3 次元観測にも応用していく。その他、超音波の他、光波や電磁波(マイクロ波やテラヘルツ)への応用も図る。

【参考文献】

- [1] J. W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics" 2nd ed., McGraw-Hill Co, Inc., 1996.
- [2] M. Soumekh, "Fourier array imaging," PTR Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1994.
- [3] L. J. Busse, "Three-dimensional imaging using a frequency-domain synthetic aperture focusing technique," IEEE Trans. UFFC, vol. 39, no. 2, pp. 174-179, 1992.
- [4] 炭, 山崎, 石井"任意座標系における高速開口面合成ビームフォーミング," 電子情報通信学会超音波研究会技術報告書, vol. US2012-2, pp. 35-38, 2012年2月.

- [5] J. Cheng, J.-y. Lu, “Extended high-Frame rate imaging method with limited-diffraction beams,” IEEE Trans UFFC, vol. 53, no. 5, pp. 880-899, 2006.
- [6] H. Peng, J.-y. Lu, X. Han, “High frame rate ultrasonic imaging system based on the angular spectrum principle,” Ultrasonics, 44, pp. e97-e99, 2006.
- [7] P. Kruizinga et al, “Plane-Wave Ultrasound Beamforming Using a Nonuniform Fast Fourier Transform,” IEEE Trans. UFFC, vol. 59, no. 12, pp. 2684-2691, 2012.
- [8] 炭, “高速フーリエ変換を用いた高速ビームフォーミングの波数マッピングにおいて近似処理を行う場合と行わない場合の比較,” vol. US2015-8, pp. 19-24, 2015年8月.
- [9] 炭, 山崎 “フーリエ変換を用いた補間近似を要さない高速エコーデータ生成法,” 電子情報通信学会超音波研究会技術報告書, vol. US2012-6, pp. 55-59, 2012年6月.
- [10] 炭, 山崎 “フーリエ変換を用いた補間近似を要さない高速エコーデータ生成法 -フーリエ変換を用いたエコーデータ生成法(その3),” 電子情報通信学会超音波研究会技術報告書, vol. US2013-6, pp. 7-12, 2013年6月.
- [11] 炭, 山崎 “フーリエ変換を用いた補間近似を要さない高速エコーデータ生成法 -フーリエ変換を用いたエコーデータ生成法(その4),” 電子情報通信学会超音波研究会技術報告書, vol. US2014-2, pp. 19-24, 2014年2月.
- [12] 炭, “高速フーリエビームフォーミングの波数マッチングにおいて補間近似を要さない平面波やフォーカシングビームのステアリング,” 日本音響学会AI研究会資料, 8 pages, 2014年12月.
- [13] 炭, “複数の平面波またはフォーカスビームの同時送信時の高速フーリエ変換法を用いた高速ビームフォーミングとマイグレーション処理,” 電子情報通信学会超音波研究会技術報告書, vol. US2015-6, pp. 27-32, 2015年6月.
- [14] 炭, “物理開口形状に依らない送信フォーカシングや平面波、円形波、仮想音源を用いた高速フーリエビームフォーミング,” 電子情報通信学会超音波研究会技術報告書, vol. US2015-7, pp. 19-24, 2015年7月.
- [15] 炭, “高速ビームフォーミングと高速信号処理を駆使した高速且つ高精度な超音波イメージングおよび変位計測,” 電子情報通信学会超音波研究会技術報告書, vol. US2016-2, pp. 55-60, 2016年2月.
- [16] 炭, 山崎, “ビームフォーミング方法、計測イメージング装置、及び、通信装置,” 特開 2016-42036, 公開日 2016年3月31日.
- [17] 炭, “ビームフォーミング方法、計測イメージング装置、及び、通信装置,” 特開 2017-104476, 公開日 2017年6月15日.
- [18] 炭, “ビームフォーミング方法、計測イメージング装置、及び、通信装置,” 特願 2017-207592, 出願日 2017年10月26日.
- [19] C. Sumi, N. Yamazaki, “Beamforming method, measurement and imaging instruments, and communication instruments,” US patent application publication, Pub. no. US2016/0157828, Jun. 9, 2016.
- [20] Continuation-in-part application of [19]: “Measurement and imaging instruments and beamforming method,” 出願番号 15/951,459, Apr 12, 2018.
- [21] C. Sumi, “High speed beamforming using fast Fourier’s transform and migration for arbitrary simultaneous plural transmissions and using virtual source behind transducer,” Full paper version or proc of Int Tissue Elasticity Conf, ID: 039, Nov 2015.
- [22] J. A. Jensen, “Field: A program for simulating ultrasound systems,” Med, Biol, Eng, Comp, 10th Nordic-Baltic Conference on Biomedical Imaging, Vol. 34, Supplemental, Part 1, pp. 351-353, 1996.
- [23] 炭, “変位計測方法及び装置,” 特許第 5486046 号, 2014年2月28日登録(2005年1月21日出願).

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
超音波 3 次元フーリエビームフォーミング ～ ファントム実験 ～	超音波研究会技術報告書・電子情報通信学会	2018年7月 (in press)