

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390109

研究課題名(和文)パイプを伝搬するガイド波のモード解析

研究課題名(英文)Modal analysis of guided waves propagating in pipes

研究代表者

佐藤 治道 (Harumichi, Sato)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・製造技術研究部門・主任研究員

研究者番号：90357145

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：パイプは生活インフラの中で広く使われている。それら安全性の確保や半導体や医薬品の性能や信頼性の向上と低価格化のためには非破壊検査や高精度な超音波流量計の開発が必要である。しかし、パイプを伝搬する超音波(ガイド波)はそのモードや変位の分布に周波数依存性があり、かつ複雑なため、基盤的、系統的な研究が不足している。そこで、円筒座標系に対応した3D-FEMのプログラムを開発し、波動方程式の解析解と比較しながらパイプを伝搬するガイド波のモード解析を行った。

研究成果の概要(英文)：Pipes are widely used in living infrastructure. In order to secure these safety, to improve the performance and reliability of semiconductors and pharmaceuticals and to lower the price, it is necessary to develop nondestructive inspection and highly accurate ultrasonic flowmeter. However, the ultrasonic wave (guided wave) propagating through the pipe has frequency dependence on the mode and displacement distribution, and it is complicated, so there is a lack of fundamental and systematic research. Therefore, we developed a program of 3D-FEM corresponding to the cylindrical coordinate system, and compared the analytical solution of the wave equation, and analyzed the mode of the guided wave propagating through the pipe.

研究分野：非破壊検査

キーワード：超音波 ガイド波 パイプ

1. 研究開始当初の背景

良く知られているように、異方性がない無限媒体(固体)を伝搬する弾性波(超音波)には縦波と横波(バルク波)が存在する。一方、媒質に界面があるとき、弾性波が界面に縦波が入射し、反射するとき、入射角によっては、縦波だけでなく横波も発生する。これをモード変換と呼ぶ。横波が界面に入射するときも、同様にモード変換が起こる。そのため、媒質のサイズが弾性波の波長ぐらいに小さくなると、モード変換によって縦波と横波が分離しなくなり、弾性波が縦波や横波の伝搬速度では伝搬しなくなる。このような、純粋な縦波や横波とは異なった性質を示す弾性波をガイド波(eg.板波,表面波)と呼ぶ。

ガイド波に関する研究は古くからなされている。その結果は、非破壊検査に活用されてきた。バルク波による非破壊検査は周波数が高く精度が高いが、1度に検査できる場所は狭い。これは回折によって遠方の欠陥からの散乱波強度が小さくなってしまふからである。一方、ガイド波による非破壊検査は周波数が低く精度は低いが、振動エネルギーが媒質内に閉じ込められるため、回折による信号強度の低下がなく、伝搬距離が長いので1度に広範囲の検査ができるという特徴がある。

パイプは社会的に広く使われているため、パイプを伝搬するガイド波の解析は、非破壊検査の重要なテーマの一つとなっている。中でも、中空パイプにおいては、1959年に Gazis が厳密解を発表したこと[1]と、実験の簡便さから多くの研究がなされてきた。

しかし、内部に流体を満たしたパイプを伝搬するガイド波の研究はあまりなされてこなかった。これは、パイプと流体の音響インピーダンスの差が大きいことから専門家ほど直感でパイプ内部の流体の影響を過小評価してしまうこと、中空における Gazis の厳密解に相当する全てのモードにおける厳密解が得られていなかったことと、実験の大変さに起因すると予想される。

2. 研究の目的

パイプは生活インフラの中で広く使われている。それら安全性の確保や半導体や医薬品の性能や信頼性の向上と低価格化のためには非破壊検査や高精度な超音波流量計の開発が必要である。パイプの検査効率向上や超音波流量計の高精度化にはパイプを伝搬するガイド波の解析が必要である。しかし、パイプを伝搬するガイド波はそのモードや変位の分布に周波数依存性があり、かつ複雑なため、基盤的、系統的な研究が不足している。そこで、それらへの応用を見据えつつ、パイプを伝搬するガイド波のモード解析を行う。

3. 研究の方法

ガイド波のモード解析をするために、既に得られている解析解を数値的に解き、その結果

を、数値シミュレーションで検証した。研究対象は中空および内部に流体を満たしたパイプを伝搬するガイド波である。それぞれの条件で分散曲線を厳密に計算し、変位分布の3D可視化を行い、モード毎の特徴を調べた。数値シミュレーションには陽解法の有限要素法を用いた。

4. 研究成果

パイプを伝搬するガイド波を効率よくシミュレートするため、過渡応答解析を行うための円筒座標系に対応した三次元の有限要素法(FEM)のプログラムを作成した。円筒座標系は半径方向を r 、円周方向を θ 、軸方向を z とし、それぞれの変位を $u = u_r, v = u_\theta, w = u_z$ で表すとひずみは

$$\{\epsilon\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_{rr} \\ \epsilon_{\theta\theta} \\ \epsilon_{zz} \\ 2\epsilon_{\theta z} \\ 2\epsilon_{rz} \\ 2\epsilon_{r\theta} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{u}{r} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \\ \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \end{Bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} & 0 & 0 \\ \frac{1}{r} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial w}{\partial r} \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} & 0 & 0 \\ \frac{1}{r} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial w}{\partial r} \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r} & 0 \end{bmatrix} [N]\{U\} = [B]\{U\}$$

と表される。本プログラムではアイソパラメトリック要素を採用し、8節点の1次の内挿関数として下式を用いた。

$$N_i(\xi, \eta, \zeta) = (1 + \xi\xi_i)(1 + \eta\eta_i)(1 + \zeta\zeta_i)/8$$

(ξ_i, η_i, ζ_i)
 $(-1,1,-1), (-1,-1,1), (1,-1,1), (1,1,1), (-1,1,1)$
 ここで転置行列の表記を T とすると、要素節点変位ベクトルは

$\{U\}^T = \{u_1 \ v_1 \ w_1 \ \dots \ u_8 \ v_8 \ w_8\}$
 と要素数 24 のベクトルで表される。また、形状マトリックスは下式のような 3×24 の行列で表される。

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & \dots & N_8 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & \dots & 0 & N_8 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & \dots & 0 & 0 & N_8 \end{bmatrix}$$

よって、 $[B]$ マトリックスは下式のような 6×24 の行列になった。

$$[B]^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial r} & \frac{N_1}{r} & 0 & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{1}{r} \frac{\partial N_1}{\partial \theta} \\ 0 & \frac{1}{r} \frac{\partial N_1}{\partial \theta} & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial r} - \frac{N_1}{r} \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{1}{r} \frac{\partial N_1}{\partial \theta} & \frac{\partial N_1}{\partial r} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial N_8}{\partial r} & \frac{N_8}{r} & 0 & 0 & \frac{\partial N_8}{\partial z} & \frac{1}{r} \frac{\partial N_8}{\partial \theta} \\ 0 & \frac{1}{r} \frac{\partial N_8}{\partial \theta} & 0 & \frac{\partial N_8}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_8}{\partial r} - \frac{N_8}{r} \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_8}{\partial z} & \frac{1}{r} \frac{\partial N_8}{\partial \theta} & \frac{\partial N_8}{\partial r} & 0 \end{bmatrix}$$

これによって、8 節点の変位から要素内の任意の箇所のひずみを計算した。積分には 2 次のガウス数値積分を用いた。

これらの結果を用いた FEM の過渡応答の計算結果を図 1 に示す。横軸が z 軸、縦軸が r 軸を表す。 $z = 50\text{mm}$ を中心にしたレーザー超音波法を模した励起条件で超音波を励起し始めてから $60\mu\text{s}$ 後の断面における輝度変調像である。 $z = 0\text{mm}$ と $z = 500\text{mm}$ の面には周期境界条件を設定している。(a)は変位の r 成分、(b)は変位の z 成分である。図 2 に厳密解[2]から計算した群速度を示す。なお、本研究においては図 2 にプロットした曲線(赤線および青線)をそれぞれモードと呼ぶ。赤線は軸対称な振動モードを、青線は面対称な振動モードを示す。固体と液体の境界面には軸対称の FEM プログラムを作成した時の技法[3]を円筒座標系に拡張して用いた。そのため、図 1(a)は固体と液体の境界面が連続だが、(b)は不連続になっていることが見て取れる。図 1の $z = 180\text{mm}$ 近傍および $z = 430\text{mm}$ 近傍には $F(1,1)$ が存在し、 $z = 300\text{mm}$ 近傍には $L(0,2)$ が存在することが確認される。L-modeだけでなく、F-modeのガイド波の計算ができていところが円筒座標系の FEM プログラムを作成した成果である。ウェーブレット変換を用いて周波数成分を抽出し、伝搬速度を計算した結果が図 2 の である。計算時間の短縮のために円周方向の分割を荒く(11.25 度刻みに)したが、ほぼ理論値と一致した。図 3 に解析解から計算した変位を 3D プロットしたものを示す。変位は解析解の固有ベクトルを用い

て変位を計算する手法[3]で計算した。図 3 の z 軸は上方向がガイド波の伝搬方向である。図 3 の x 方向の変位が大きい箇所を見ると $+z$ 側のパイプ部分は $u_z > 0$ で液体部分は $u_z < 0$ となっており、 $-z$ 側は逆になっている。これは図 1 の $z = 160\text{mm}$ 近傍と一致している。このことから、F-mode の変位の分布も解析解の固有ベクトルから得る手法を適用できることが確認された。なお、L-mode の変位の分布を同手法で計算できることはすでに確認済みである[3]。

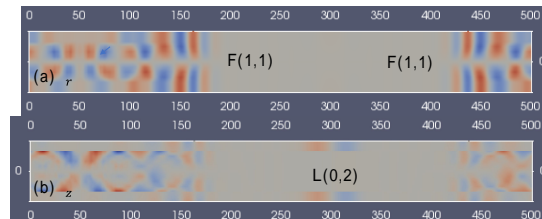


図 1 水を満たした $\phi 6 \times \phi 4$ の SUS パイプを伝搬する超音波の輝度変調像

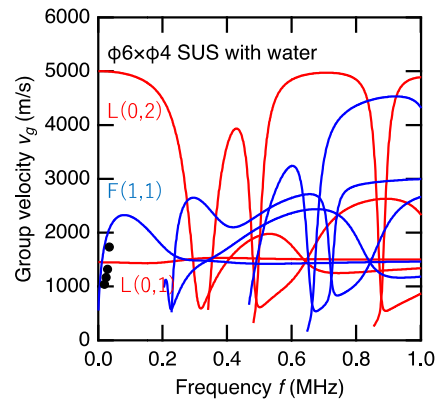


図 2 水を満たした $\phi 6 \times \phi 4$ の SUS パイプを伝搬する超音波の群速度と FEM の計算結果

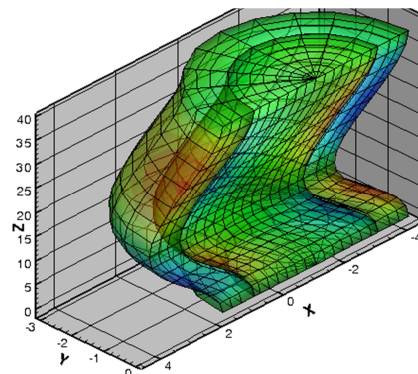


図 3 30kHz の $F(1,1)$ モードのガイド波の変位の解析解 色は u_z を表す。Z 方向は一周期分をプロットした。

図 4 に外径 34mm 内径 28mm の中空のステンレスパイプを伝搬する軸対称の L-mode および T-mode のガイド波の位相速度を、図 5 に面対称の $F(1,m)$ のガイド波の位相速度を示す。この分類法は Meitzler 等の分類法[4]に従ったものである。一方西野等は $F(n,m)$ をさらに $F(n,m)$ と $T(n,m)$ に分類する分類法を主張している[5]。ここに n は円周のモードパラ

メーターで、 $n = 0$ が軸対称を $n = 1$ が面対称であることを表す。そこで、西野等の表記法では $T(1,1)$ となる $F(1,2)$ と同じく西野等の表記法では $F(1,2)$ となる $F(1,3)$ の位相速度がほぼ同じ値となるエリアでの位相速度を詳細に計算した(図6)。 $L(0,2)$ と $T(0,1)$ は交差しているが、 $F(1,2)$ と $F(1,3)$ は交差しない。図7と8に $F(1,2)$ の変位の分布を、図9と10に $F(1,3)$ の変位の分布を示す。図7の変位は円周方向の変位が目立ち、面対称のT-modeと言えるが、図8の円周方向の変位より、肉厚方向の変位が中心になっている。つまり、 $F(1,2)$ と $F(1,3)$ は交差せず、 $F(1,2)$ モードのまま周波数の違いによりT-modeのように振動したり、円周方向に振動したりする。このことから、 $F(1,2)$ を高次のT-modeと呼ぶことには無理がある。また $F(1,3)$ の変位を見ると、図9の変位は肉厚方向の変位が中心で、図10の変位は円周方向の変位が中心である。図6-10から、1.108MHz近傍で高次のT-modeと肉厚方向の変位が中心のモードのミクスチャが起こっていると言える。これは図5の $F(1,6)$ と $F(1,7)$ や $F(1,8)$ 、 $F(1,9)$ 、 $F(1,10)$ が近づく箇所でも同様である。よって、高次のT-modeは独立して存在しないことから、ガイド波の分類法としては、Meitzler等の分類法に従い、軸対称以外のモードについては、F-modeとして統一するのが妥当だと結論づけられる。これは、波動方程式の特解を計算するとき、たとえば中空パイプであれば 6×6 の行列式を解く。 $n = 0$ ならその行列式は 4×4 と 2×2 の2個の行列式に別れて、それぞれの結果からL-modeとT-modeが計算される[1]ので、それぞれの解は影響されない。よって、図6に示したように位相速度が互いに影響を受けずに交差する。一方 $n > 0$ のときは常に 6×6 の行列式を解かねばならず、モードミクスチャが起こると考えられる。

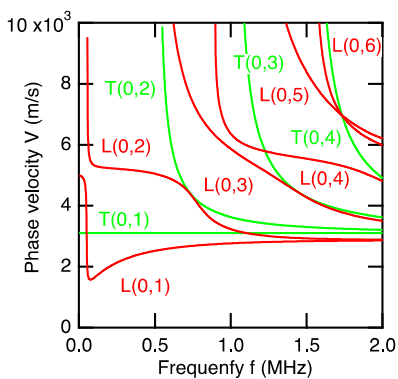


図4 中空パイプを伝搬するL-modeとT-modeのガイド波の位相速度

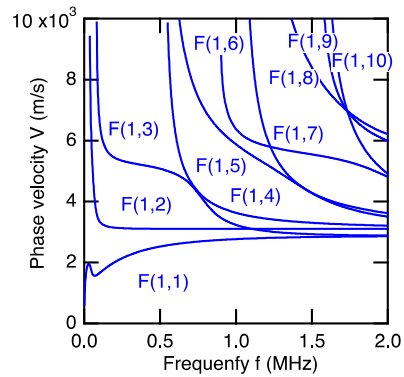


図5 中空パイプを伝搬する $F(1,m)$ のガイド波の位相速度

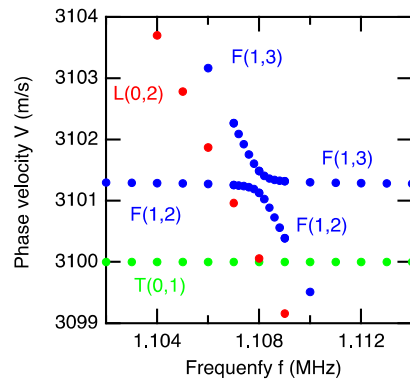


図6 中空パイプを伝搬する $T(0,1)$ 、 $L(0,2)$ 、 $F(1,2)$ 、 $F(1,3)$ のガイド波の位相速度

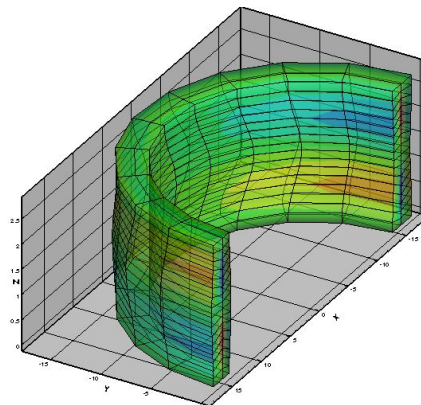


図7 1.106MHzにおける $F(1,2)$ の変位の分布色は u_z を表す。

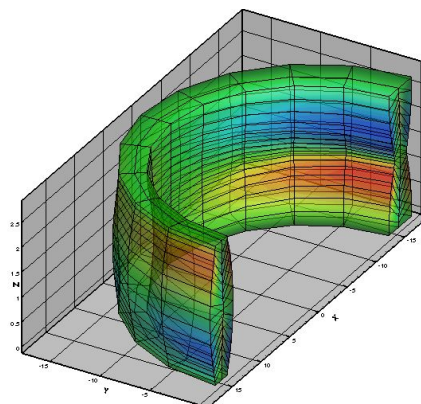


図 8 1.11MHz における F(1,2) の変位の分布色は u_z を表す。

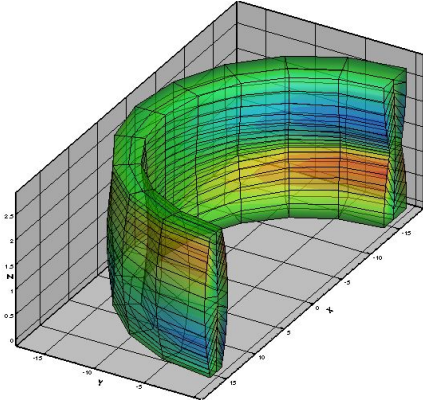


図 9 1.106MHz における F(1,3) の変位の分布色は u_z を表す。

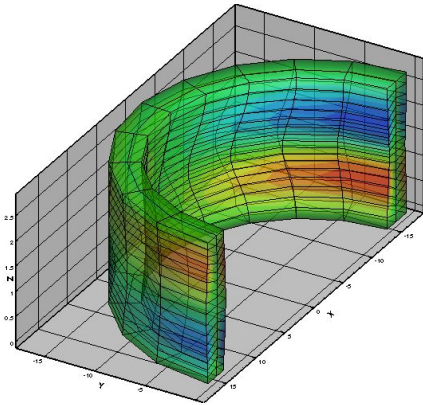


図 10 1.11MHz における F(1,3) の変位の分布色は u_z を表す。

図 11 に内部に水を満たした外径 34mm 内径 28mm のステンレスパイプを伝搬する L-mode および T-mode のガイド波の位相速度を、図 12 に F(1,m) のガイド波の移送速度を示す。中空の場合(図 4, 5)に比べてモードが複雑になっていることが確認される。図 13 は位相速度が約 9400m/s のときの変位の解析解であり、液体部分の r 方向の振動が中心の変位に見える。これが内部に水がある場合、中空に比べて cut off 周波数(位相速度が無限大になる周波数)が増える原因と考えられる。内部に水を満たしたパイプを伝搬するガイド波は周波数が高くなるに従って位相速度が水の音速 1500m/s に近づいていくように見える。図 14 は F(1,2) の位相速度が約 1524m/s のときの変位であり、この場合は水の z 方向の変位が中心の変位であることが分かった。

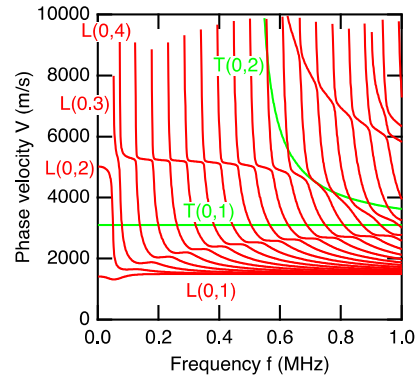


図 11 内部に水を満たしたパイプを伝搬する L-mode と T-mode のガイド波の位相速度

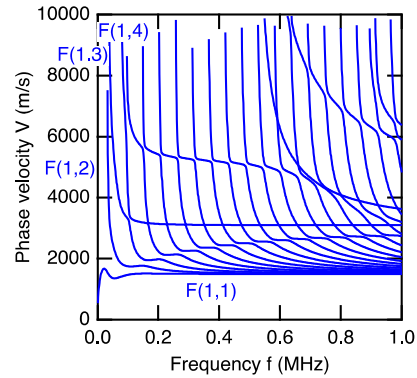


図 12 内部に水を満たしたパイプを伝搬する F(1,m) のガイド波の位相速度

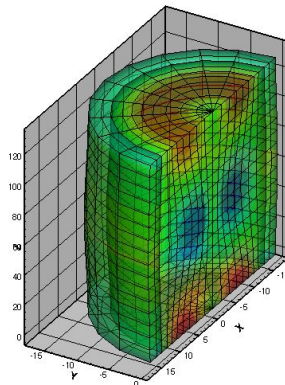


図 13 72kHz における L(0,4) の変位の分布色は u_r を表す。

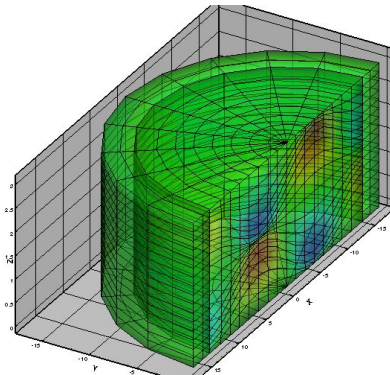


図 14 500kHz における F(1,2) の変位の分布色は u_z を表す。

引用文献

- [1] D. C. Gazis: J. Acoust. Soc. Am. **31** (1959) 568.
[2] H.Sato, M. Lebedev, and J. Akedo; JJAP **45** (2006) 4573.
[3] H.Sato and H.Ogiso; JJAP **49** (2010) 07HC08
[4] J. L. Rose: Ultrasonic Waves in Solid Media (Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 1999) p. 158.
[5] H.Nishino, S.Takashina, F.Uchida, M.Takemoto, and K.Ono; JJAP **40** (2001) 364.

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 3件)

(1) 佐藤治道, 小木曾久人, Analysis of leaky guided waves propagating in a water-filled pipe, 第35回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, 2014/12/05, 明治大学, 東京都千代田区

(2) 佐藤治道, 小木曾久人, 佐藤直子, 清水透, 中野禅, 小原良和, 山中一司, Laser ultrasonic characterization of additive manufacturing objects fabricated by powder bed fusion, 第36回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, 2015/11/07, つくば国際会議場, 茨城県つくば市

(3) 佐藤治道, 小木曾久人, 佐藤直子, 清水透, 中野禅, 小原良和, 山中一司, Imaging of laser excited surface acoustic wave for in-process evaluation of 3D additive manufacturing (AM) process, 第37回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, 2016/11/18, 釜慶大学, 韓国

〔産業財産権〕

出願状況(計 6件)

(1)名称: 超音波流量計
発明者: 佐藤治道, 明渡純, 村上英一
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特願 2014-110453
出願年月日: 2015/05/27
国内外の別: 国内

(2)名称: 超音波流量計
発明者: 佐藤治道, 明渡純, 村上英一
権利者: 同上
種類: 特許
番号: PCT/JP2015/065291
出願年月日: 2015/05/27
国内外の別: 国外

(3)名称: 超音波流量計
発明者: 佐藤治道, 明渡純, 村上英一

権利者: 同上
種類: 特許
番号: 15/352681
出願年月日: 2015/05/27
国内外の別: 国外

(4)名称: 超音波流量計
発明者: 佐藤治道, 明渡純, 村上英一
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 15799778.4
出願年月日: 2015/05/27
国内外の別: 国外

(5)名称: 超音波流量計
発明者: 佐藤治道, 明渡純, 村上英一
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 10-2016-7032149
出願年月日: 2015/05/27
国内外の別: 国外

(6)名称: 超音波流量計
発明者: 佐藤治道, 明渡純, 村上英一
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 201580025170.8
出願年月日: 2015/05/27
国内外の別: 国外

取得状況(計 1件)

(1)名称: 流量測定装置
発明者: 佐藤治道, 明渡純, 村上英一
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 第 6106338 号
取得年月日: 2017/03/10
国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

佐藤治道 (SATO, Harumichi)
産業技術総合研究所・製造技術研究部門・主任研究員
研究者番号: 90357145

(2)研究分担者

小木曾久人 (OGISO, Hisato)
産業技術総合研究所・製造技術研究部門・上級主任研究員
研究者番号: 40356704