

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420107

研究課題名(和文) 圧力振動場における気泡近傍の流動構造の解明とその応用

研究課題名(英文) Local flow structure around bubbles under pressure-oscillating field and its application

研究代表者

岩田 修一 (Iwata, Shuichi)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00293738

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)：高い粘性を持つ粘弾性流体中に設置された1 μ L程度の気泡について、数百Hz程度の圧力振動場における気泡界面近傍の特異な流動構造の解明を目指す。微粒子の追跡と2次元偏光イメージング計測により、気泡近傍の遅延分布(流動複屈折を利用した2次元主応力分布、配向分布)を取得した。その結果、気泡収縮時には、気泡収縮に伴う上下方向の一軸伸張変形が圧力振動を与える側に存在し、その伸張速度は気泡界面に近づくにつれ、急激に増加したことが明らかになった。流動構造の検討から、気泡下部でNegative wakeの存在が示唆された。また、流通系においても気泡の振動印加部側にNegative wakeが生じた。

研究成果の概要(英文)：The aim of this research is to find local flow structure around 1 micro-liter bubble(s) under pressure oscillating field. We tried measuring the retardation profile near the bubble(s) by the high speed polarization camera, as well as flow visualization experiments using tracer particles. It turns out that there is a uniaxial extension behind each bubble, and strong retardation can be seen at the region. Due to expansion and contraction of the bubbles, there are complex flow structures in the vicinity of bubbles in a viscoelastic fluid. We have studied the effect of a pressure-oscillation source position on the motion of bubbles. It turned out that an uniaxial extension was observed in the opposite side of the movement direction of the contracting bubble. It was considered that strong retardation and the motion of fine bubbles were suggested to generate negative wake. The similar flow structure was observed around a bubble in a continuous flow channel.

研究分野：非ニュートン流体力学

キーワード：非ニュートン流 粘弾性流体 流動複屈折 伸張粘度

1. 研究開始当初の背景

微小気泡の液体中への混入は、塗工プロセスにおける塗膜不良の原因となる。そのため、溶液からの脱泡処理が必要である。脱泡処理には、静置操作をはじめ、加熱操作、遠心分離操作、真空操作、超音波操作等がある。加熱操作では化学物質の気化や劣化が懸念され、超音波操作では発振装置の指向性問題や溶解・消滅した気泡が後段プロセスで再発泡する可能性が指摘される。これらは全てバッチ式操作であるために、脱泡処理のために移液作業などが加わり、作業工程が複雑化する。時間的なロスと、移液作業を安全に行なうために冷却・加熱が必要であり、エネルギーロスが生じる。このような事情から、インラインで連続的に操作が可能で、材料特性に影響を与えない脱泡方法の開発が望まれる。

申請者は圧力振動脱泡法を提案している。高分子を含む多くの流体は粘弾性流体であり、その多くは剪断によりみかけ粘性が下がる **Shear-thinning** 性を示す。キャップにゴム膜を取付けたセルに試料流体を満たし、その中に気泡を設置する。外部よりゴム膜に振動を印加し、系内圧力を周期的に変動させると、気泡は膨張・収縮する。その時、気泡表面近傍の流体速度は大きく、気泡表面から離れるにつれて速度が急激に減衰することから、気泡近傍には局所の剪断流れが誘起される。つまり、気泡をベール状に包む液体の見かけ粘度は低下し、気泡上昇速度が向上することが予想される。

筆者らは、ポリアクリル酸ナトリウム水溶液(SPA)溶液で満たされたセルに $1 \mu\text{L}$ の気泡を設置し、下部より連続的に 300 Hz の圧力変動を与えた場合の気泡の挙動を観察し、圧力振動場での気泡上昇速度が静止圧力場での自然上昇速度の約 100 倍が得られ、圧力振動の印加により、気泡の上昇速度は大幅に加速された。圧力振動の度合いを増加させると、条件によって気泡上昇速度は自然上昇速度の約 400 倍にも加速された。一方、ニュートン流体では、高々 $2\sim 3$ 倍であり、レオロジーの関与が示唆される。顔料系インクによる粒子追跡法(PTV)では、セル内部に大きな循環流やジェット流が存在せず、気泡表面で約 700 s^{-1} の強い剪断が確認された(岩田ら, 化学工学論文集, 2007, 2008)。また、単一気泡周りの軸対称流れの非ニュートン有限要素解析(岩田ら, 日本機械学会誌, 2009)でも前述と同程度の剪断速度を得た。この剪断速度では、剪断粘度の低下と同時に弾性応力の出現が強く示唆される。圧力振動場で自然上昇速度の約 300 倍で上昇する場合、気泡は、気泡の収縮期にだけ気泡の下部が尖ったカスプ形状が出現した(Iwata *et al.*, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 2008)。このことは、気泡近傍の非定常で局所的な伸長流動によって Wake が出現したことが予想され、そのメカニズムの解明が待ち望まれる。

2. 研究の目的

本研究では、数百 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ という高い粘性を持つ粘弾性流体中に設置された $1\mu\text{L}$ 程度の気泡について、数百 Hz 程度の圧力振動場における気泡界面近傍の特異な流動構造の解明を目指す。溶液の種類によっては、圧力振動の印加により、単一気泡では気泡上昇速度が自然上昇速度よりも数倍から 400 倍程度の促進効果が得られ、 2 気泡が近接する場合、促進効果はさらに向上する。また、別のレオロジー特性を示す溶液では、圧力振動の印加により、移動方向と気泡の対称軸が直交するという極めて特異な気泡形状を示す。本申請では、微粒子の移動を追跡することと、 2 次元偏光イメージング計測を用いて気泡近傍の遅延分布(流動複屈折を利用した 2 次元主応力分布)を取得することにより、圧力振動場での気泡近傍の流れ構造を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 供試流体

試料溶液には、 0.03 M 臭化セチルトリメチルアンモニウム(CTAB)と 0.23 M サリチル酸ナトリウム(NaSal)の混合水溶液を用いた。この溶液はひずみを与えると、ひも状ミセルが一定の向きに配向し、強い流動複屈折を引き起こすことが知られている。(高橋ら, 日本レオロジー学会誌 **35-2**, 107-114(2007))

(2) 偏光高速度カメラを用いた 2 次元偏光計測

図 1 に実験装置と偏光高速度カメラの模式図を示す。光学石英セル($10\times 10\times 40 \text{ mm}$)に試料溶液を満たし、 $4 \mu\text{L}$ の 1 気泡、及び $2 \mu\text{L}$ の 2 気泡を鉛直に設置し、ゴム膜付きキャップで密閉した。ゴム膜下部から振動発生装置(旭製作所製 SL-0505)により、圧力振動を与えると、セル内の気泡は繰り返し収縮・膨張する。その様子を偏光高速度カメラ(Photron 社製 FASTCAM-SA5P-S)により撮影する。シャッタースピード $1/6000 \text{ s}$ 、フレームレート 6000 fps 、撮影解像度 $512\times 512 \text{ pixels}$ とした。光源より照射された円偏光に調光された光は、光学石英セル内部のサンプルを透過し、流動場の配向に応じた遅延が生じ、偏光状態が変化する。これをカメラ内部に設置された異なる 4 方向の直線偏光素子のアレイによりとらえられ、遅延が計測される。隣接する 4 画素を組み合わせて遅延を測定するため、得られる遅延分布図の解像度は $256\times 256 \text{ pixels}$ である(大沼ら, 精密工学会誌. **78.12**, pp.1082-1086 (2012))。

複屈折 $\Delta n'$ と応力 σ は光弾性則 $\sigma = (1/C) \Delta n'$ により関係づけられる。ここに、 $\Delta n' = \lambda \delta' / (2\pi \zeta C)$ であり、 C は光弾性定数、 λ は波長、 δ' は遅延、 ζ は光路長である。光路長を一定と仮定した場合、遅延分布を求めることは応力分布を求めることを意味する。

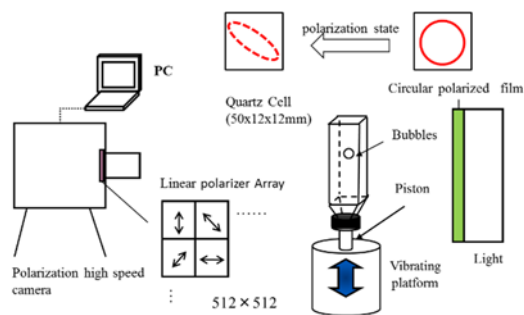


図1 二次元偏光分布の計測原理と装置図

(3) 流動可視化実験

トレーサー粒子を用い、気泡近傍の流れを可視化する。供試流体に中空ガラスビーズ(粒径 $40\ \mu\text{m}$ 、比重 $0.998\sim 1.002$)を分散させた。これに、レーザーシート光を照射し、反射したガラスビーズをトレースする。シート光はレーザー光をシリンドリカル凹レンズと凸レンズを通し、シート状にしたものを使用した。これをセル側面から、気泡中心を通る鉛直断面に照射することにより、同一平面の流れの可視化を可能にした。また、気泡の界面形状を明瞭にするため、LEDバックライトを設置した。前述の(1)と同様の振動印加条件となるように、セル内に設置された気泡に $100\ \text{Hz}$ の振動を印加し、偏光高速度カメラで撮影した。ここでは遅延計測は行わないため、解像度 $512\times 512\ \text{pixels}$ のグレースケール画像を可視化画像として用いた。

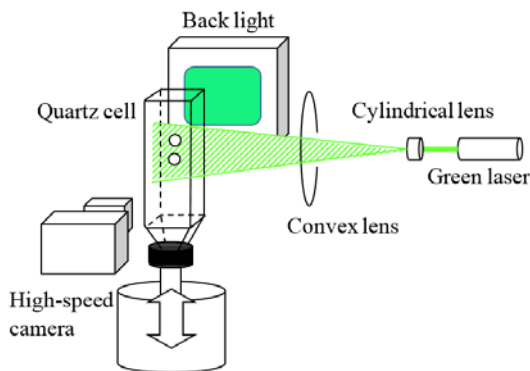


図2 可視化用実験装置

(4) 流通系流路における実験装置

図3に実験装置の模式図を示す。高圧マイクロフィーダーで流路へ試料溶液を供給し、テストセクション上流側に設置された電極より気泡を導入する。今回導入した気泡は直径約 $0.83\ \text{mm}$ のサブミリバブルである。周囲に存在する、トレーサーとしてのファインバブルの大きさはサブミリバブルの 60 分の 1 以下である。同時に振動発生装置により周波数 $f = 200\ \text{Hz}$ の圧力振動を印加する。テストセクションの下流側のバルブを調節し、流量比 $q_B/(q_A + q_B) = 0.9$ 、総流量 $q \equiv q_A + q_B = 4.1$

g/min で測定を行った。水平流路下部より圧力振動を印加した。緑色で示す範囲がガラス窓となっており、観察が可能な範囲である。流路高さは $7\ \text{mm}$ である。

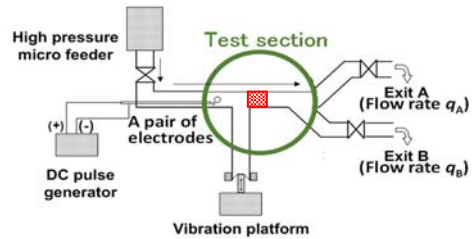


図3 流通系における実験装置図

4. 研究成果

(1) 単一気泡における気泡近傍計測

セル内に $4\ \mu\text{L}$ の単一気泡を設置し、 $100\ \text{Hz}$ の圧力振動を印加した。圧力振動印加機構のより、内部圧力は歯車形状で変化しており、気泡が最も膨張した時と最も収縮した時の時間は、 $100\ \text{Hz}$ の周期の半分に相当する $1/200\ \text{s}$ ではなく、更に短い $1/500\ \text{s}$ の変化であった。それ以外の時間は、膨張状態と収縮状態がそれぞれ保持された。遅延分布図と流動可視化画像をそれぞれ図4と図5に示す。図4の膨張時の遅延分布に注目すると、気泡を取り囲むような遅延が生じていることが分かる。膨張に伴い、気泡近傍の流体が二軸伸長変形をしたことが分かる。一方、収縮時においては、膨張時とは全く異なり、気泡下部に鉛直方向に対称軸を持つ強い遅延が見られた。

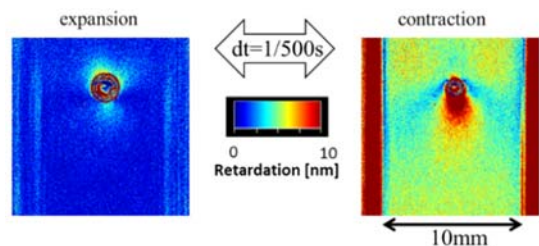


図4 遅延分布図(左:膨張時, 右:収縮時)

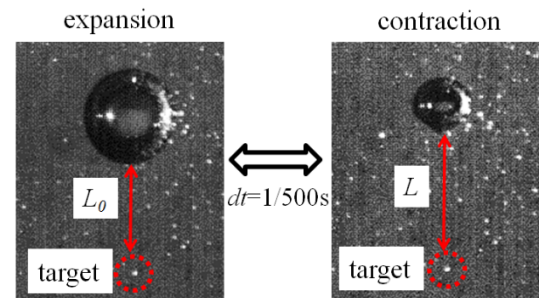


図5 気泡近傍の流動可視化写真

そこで、図5の流動可視化画像より、気泡下部のトレーサーについて Hencky ひずみ量 $\varepsilon = \ln(L/L_0)$ と一軸伸長変形速度 $\dot{\varepsilon} = (L_0 - L)/L_0 dt$ を求めた。図6に示すよう、気泡下部—トレーサー間距離は L_0 (膨張時), L (収縮時) である。結果を図7 (b)に示す。 L_0 を気泡形状が軸対称形状であると仮定した際の真球相当直径 D_{eq} で無次元した $\xi [-]$ を横軸とした。これより、気泡下部流体では気泡収縮に伴う上下方向の強い一軸伸長変形が存在し、伸長速度は $\xi=1$ から気泡界面 ($\xi=0$) に近づくにつれ、急激に増加したことがわかる。さらに、 ξ と気泡下部における遅延分布の値を図7 (a)に示す。遅延の値 retardation δ' [nm] は $\xi=1$ 付近より急激に増加し、トレーサーより求めた $\dot{\varepsilon}$ と同様の挙動が得られた。

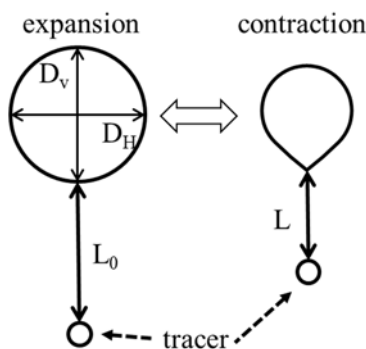


図6 気泡膨張時と収縮時におけるトレーサーと気泡下部界面との距離

これより、気泡下部の遅延は一軸伸長変形が大きく影響していることがわかった。

これら流動構造の検討から、気泡下部で Negative wake の存在が示唆される。図4から、収縮時では遅延の弱い領域が気泡上部から斜め下側へコーン状に伸びている。コーン状の領域に沿って気泡下部に集中した流れは、鉛直下向きに向きを変えて流れる。この時、界面近傍の流体に鉛直方向の強い一軸伸長変形が生じる。これにより、ミセルが一方へ配向され、強い遅延を示す。また、収縮時に気泡下部が尖るカスプ形状を確認することができ、これも一軸伸長変形によるものであると考えられる。なお、気泡近傍の最大 Hencky ひずみ

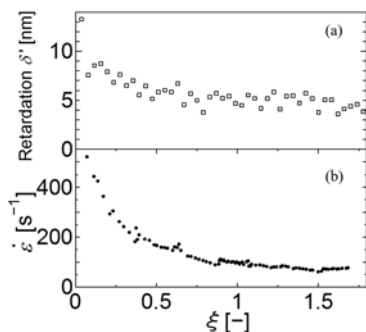


図7 収縮時の気泡下部における(a)遅延分布と(b)一軸伸張変形速度

量 $\varepsilon_{max}=0.72$ であることと長時間緩和が必要な物質が見られないことから、紐状ミセルの構造変化(Shear Induced Structure)が起こっていないと考えられる。

(2) 2気泡における気泡近傍計測

セル内に $2 \mu\text{L}$ の気泡を鉛直方向に近接させた状態で2個設置した。100 Hz の圧力振動を印加した。気泡の最大膨張時と最大収縮時の遅延分布を図8に示す。上側気泡下部に比べ下側気泡下部の方が強い遅延が見られた。 ξ に伴う気泡下部の遅延値を図9に示した。上側気泡に比べ、下側気泡の方が強い遅延が生じていることがわかる。また、1周期に相当する連続画像から、上側・下側気泡の真球相当気泡径 D_{eq} と気泡中心位置 $z - z_0$ の推移をまとめたものを図10に示した。横軸には無次元周期 t/T をとった。ここに $T[\text{s}]$ は周期、 $t[\text{s}]$ は実時間である。気泡が収縮した際、下側気泡の中心位置が上側気泡に比べ、大きく上昇する。これは、上側気泡の収縮より、急速に下側気泡が引っ張り上げられる形で上昇すると考えられる。この時、2気泡間では下側気泡が鉛直上向きに流体を押し出す流れが生じ、上側気泡下部の遅延が減衰したと予想される。また、気泡間には下側気泡の斜め上から上側気泡下部へ繋がるループ状の遅延分布が見られた。これは、上側気泡と下側気泡の接近に伴い、気泡間に相互作用が働いたものであると考えられる。

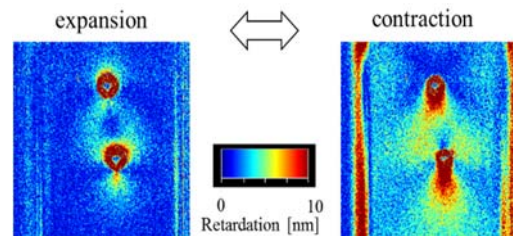


図8 2気泡を設置した場合の遅延分布

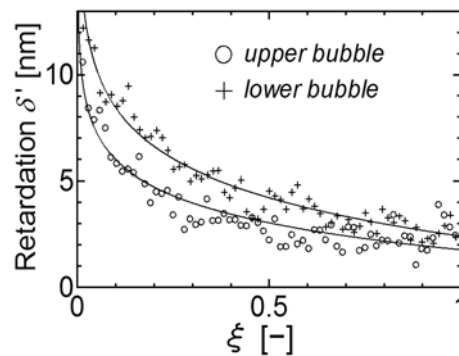


図9 気泡下部の遅延分布

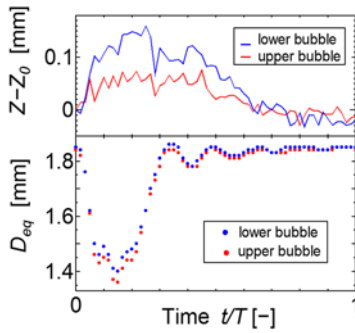


図 10 周期内の気泡径の平均気泡径と重心位置の推移

(3) 流通系流路における気泡近傍計測

Y 字型分岐型流路において分岐前の水平テストセクションにおける流通状態における 200 Hz の圧力振動印加時の流動複雑屈折を測定した。具体的には、左の上流側から下流側へ移動する繰り返し膨張・収縮するテストセクション部の気泡を 2 次元偏光高速カメラ (Photron 社製 CRYSTA PI-1P) を用い、後方から平行円偏光を照射し、シャッタースピード 1/6000 s, フレームレート 6000 fps, 複屈折画像の解像度 512x512 pixels にて撮影した。気泡直径 0.83 mm の単一気泡を流路に導入し、テストセクションにて撮影した気泡の最膨張時と最収縮時の遅延分布図を測定し、図 11 に示す。

圧力が上昇する気泡収縮時の系内は全体的に強い遅延分布を呈しており、特に気泡の左側 (上流側), つまり気泡の進行方向の反対側で強い遅延がみられた。この時の気泡の膨張・収縮によって変化する気泡径を計測し、気泡表面上の近傍流体の剪断速度を推算したところ、 47.8 s^{-1} であった。供試流体のレオロジー特性よりこの値は、供試流体の不安定流動がみられる高剪断場の範囲であり、強い弾性を示すことが分かる。気泡の収縮による流体の移動により、気泡近傍の流体に対し強いひずみが加えられたため強い流動複雑屈折を引き起こし、収縮時には膨張時より強い遅延値の分布が得られたと考えられる。また、着目気泡近傍に存在する微細気泡の動きから着目気泡近傍流

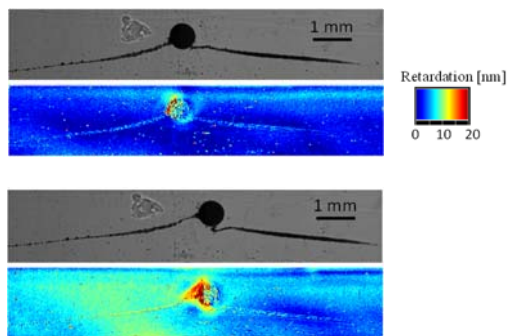


図 11 流通系における気泡膨張時 (上側) と気泡収縮時 (下側) の遅延分布

体の動きを解析し、粘弾性流体中を上昇する気泡の下部にみられる Negative wake と同様な流れが気泡収縮時に生じたと考えられる。

以上を総括する。圧力振動場において、応力場と流動場より、気泡近傍流体構造について考察を行い、1 気泡の場合では、収縮時にみられる気泡下部の遅延は、下部流体の一軸伸長変形が大きく影響していることがわかった。2 気泡の場合では、気泡が鉛直方向に接近した際、上側気泡による一軸伸長変形が下側気泡の上昇速度の促進に関与することがわかった。また、この知見は、圧力振動を印加した流通系においても同じ現象が生じることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

岩田 修一, 水越 彩加, 南雲 亮, 森 秀樹, 圧力振動場における非ニュートン流体中の気泡運動に関する実験的考察, 日本機械学会論文集, Vol. 81(823), 14-00609 (2015)

[学会発表] (計 5 件)

①Hikaru Horiuchi, Shuichi Iwata, Ayaka Mizukoshi, Ryo Nagumo, Hideki Mori, Tsutomu Takahashi (Nagaoka Univ. Tech.) and Takashi Onuma (Photron Co. LTD), Effect of pressure-oscillation on bubble shape and birefringence profile of CMC liquid around a tiny bubble, Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF '15), Budapest, Sep. 1-4, 2015

②Md Walid Bin Quashem, Ayaka Mizukoshi, Shuichi Iwata, Ryo Nagumo, Hideki Mori, Tsutomu Takahashi (Nagaoka U. Tech.), Rheo-optic Stress Measurement around Vertically Aligned Bubbles under Pressure-oscillating Field, 第 63 回レオロジー討論会, 神戸大学, 2015 年 9 月 23 日 ~ 25 日

③Ayaka Mizukoshi, Shuichi Iwata, Ryo Nagumo, Hideki Mori, and Tsutomu Takahashi (Nagaoka U. Tech.), Experimental Study of Motion for Tiny Bubbles in the Continuous Flow Channel under Pressure-oscillating Field, The XVIIth International Congress on Rheology (ICR2016), Aug. 8-13, 2016, Kyoto, Japan

④ Shuichi Iwata, Ryo Nagumo, Shuichi

Iwata, Hideki Mori, Tsutomu Takahashi, and Takashi Onuma, Deformation and Birefringence Profile around a Vertically Aligned Oblate Spheroid Bubble under Pressure Oscillating Field, The XVIIth International Congress on Rheology (ICR2016), Aug. 8-13, 2016, Kyoto, Japan

⑤ Ayaka Mizukoshi, Shuichi Iwata, Ryo Nagumo, Hideki Mori and Tsutomu Takahashi, Local Flow Around A Bubble In Viscoelastic Fluid In A Branched Channel Under Pressure-Oscillating Field, International Workshop on Process Intensification 2016, Sep. 29-30, 2016, Manchester, UK

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩田 修一 (IWATA, Shuichi)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：00293738

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

高橋 勉 (TAKAHASHI, Tsutomu)
長岡技術科学大学・機械系・教授
研究者番号：20216732

(4) 研究協力者

大沼 隼志 (ONUMA, Takashi)
株式会社フォトロン