

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：12101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656094

研究課題名(和文) 複雑形状管内の非接触駆動研磨除染方式の考案と装置の開発に関する研究

研究課題名(英文) Feasibility study on in-tube decontamination system driven by non-contact acoustic levitation

研究代表者

周立波(Zhou, Libo)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：90235705

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：微粒子あるいは気泡が音波の定在波のノードの位置に捕捉される現象は、音響浮揚(Acoustic Levitation)として、以前から広く知られている。音波をエネルギー源に物質の浮揚、移動が非接触で可能で、化学やバイオの分野において音響浮揚技術の応用が広がりにつつある。

本研究では、この音響浮揚技術を用いて、非接触で粒状除染剤を駆動し、制御可能な運動を与えて、原発の配管内面のようなアクセスが極めて困難な箇所のカリーニングや除染を行なうと同時に、除染後の汚染物質分別・分級を行う方法の考案と装置の開発を目指している。

研究成果の概要(英文)：Phenomenon that bubbles or particles are trapped at the position of the node of the standing wave of sound is widely known as acoustic levitation. As objects are possible to be levitated and moved with non-contact by the sound power, therefore, this acoustic levitation technique has a huge potential in applications for semiconductor, aerospace and biology industries.

This research project is a feasibility study on design and development of an in-tube decontamination and classification system, and to explore the possibility to drive and classify fine particles with non-contact by the sound power only.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：音響浮揚 定在波 ツイン振動子 多重反射 砥粒加工 除染・洗浄 分級

### 1. 研究開始当初の背景

粒子あるいは気泡が音波の定在波のノードの位置に捕捉される現象は、以前から広く知られている。近年、その現象を利用した音響浮揚(Acoustic Levitation)技術が開発されつつある。これまでは、主に航空工学の分野で研究、開発及び応用に注力されてきたが、生産技術分野ではその応用は非接触型リニアガイドなど極めて限定的である。その主な原因は、1)物体浮揚に必要な出力及び 2)浮揚物体の安定性などの問題がまだ未解決であることにある。

一方、福島第一原発の事故以来、配管内の放射線物質の除染・分別が急務になっている。従来の方式は、除染剤の相対運動を与えるため機械式の回転運動や直線運動機構が不可欠で、複雑の配管には対応できない。ゼオライトなどの除染粒子(砥粒)の比重が低く比較的出力でも浮揚しやすく、加えて研磨除染では砥粒と工作物間に相対運動が必要となることから、浮揚の不安定性は、砥粒加工に必要な浮揚+振動+転動といった、砥粒の運動を得るには好都合と考えられる。音響浮揚技術を砥粒加工に応用できれば、これまでの砥粒加工に不可欠であった回転運動や直線運動機構が不要になり、複雑な原発配管の内面などアクセスが極めて困難な箇所を除染及び除染後の汚染物質の分級・分別が可能になる。

### 2. 研究の目的

本研究は、音響浮揚(Acoustic Levitation)の原理に基づいて、音波により非接触で粒状除染剤を駆動し、制御可能な運動を与えて複雑形状の管内の研磨除染、分級・分別を行なう方法の考案及び装置の開発を目指す。

### 3. 研究の方法

具体的な研究手法については、時間列で次のように示す。

- [1] 音響浮揚原理に基づく音波駆動型研磨除染装置の設計及び開発。
- [2] 除染粒子を実装した浮揚実験と砥粒運動の制御と計測
- [3] 汚染粒子の分級・分別及び研磨除染加工への応用とその評価

### 4. 研究成果

本研究は、音響浮揚に必要な定在波の生成条件及び浮揚力の理論構築からスタートする。気体や液体を音響媒質とする音場に置かれた物体の表面には、音波が周期的正・負の圧力が働く。したがって線形近似では、この音響放射圧はゼロとなるが、非線形効果を考慮に入れた場合、時間平均はゼロでない圧力が生じる。音響浮揚はこの非線形効果を利用している。図1に示す放射板-反射板からなる音響場における平面波、反射波とその合成波を考える。放射板から出た平面波の進行方向を  $z$  軸とすると、速度ポテンシャル  $\phi(t, z)$  は次の波動方程式を満たす。

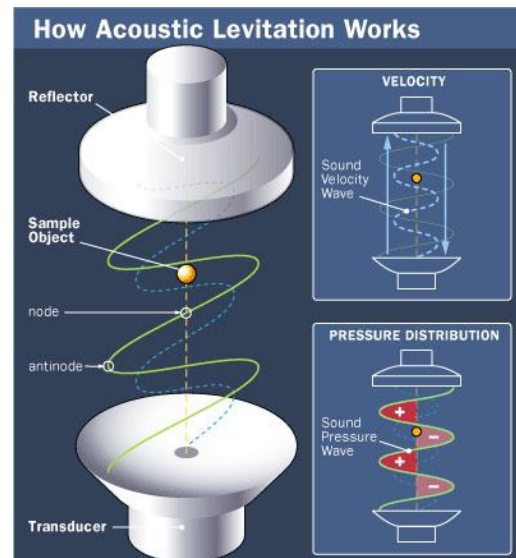


図1 音響浮揚の原理

$$\frac{\partial \phi}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \phi}{\partial t^2} \quad (1)$$

ただし、 $c$  は音速、 $t$  は時間である。式(1)の解は次式になる。

$$\phi(t, z) = Ae^{i(\omega t - kz)} \quad (2)$$

ここで、 $A$  は積分定数で、境界条件によって決定されるものである。 $\omega$  ( $\omega = ck$ ) は音波の角振動数で、 $k$  ( $k = 2\pi/\lambda$ ) は波数である。進行方向に放射板(音源)から距離  $l$  の所に硬い壁面がある場合、反射波は、入射はより位相差が  $\phi = \pi$  だけずれて、 $z$  の負方向に進行する平面波であるので、次式に表わされる。

$$\phi_{re}(t, z) = -Ae^{i(\omega t - 2kl + kz)} \quad (3)$$

したがって、その合成波は、次式になる。

$$\phi(t, l) = A(e^{i(\omega t - kz)} - e^{i(\omega t - 2kl + kz)}) \quad (4)$$

オイラーの式および三角関数を使って、(4)式を整理する、次式になる。

$$\phi(t, z) = 2A \sin k(z - l) e^{i(\omega t - kl - \frac{\pi}{2})} \quad (5)$$

(5)式より、合成波は、入射波及び反射波と同じ周波数で振動していること、その振幅が放射板からの距離  $z$  に依存していることがわかる。定在波が形成される場合、放射板と反射板の境界条件として、時間  $t$  に依存せず、 $z = 0, z = l$  の時、 $\phi(t, 0) \equiv 0, \phi(t, l) \equiv 0$  であるため、(5)式中の振幅に関する部分が、 $\sin k(z - l) = 0$  になる。したがって、放射板と反射板の距離  $l$  が、 $kl = m\pi$  のとき、つまり、

$$l = \frac{m\pi}{k} = m \frac{\lambda}{2} \quad (m: \text{自然数}) \quad (6)$$

を満たすとき、その間の音場が定在波になる。その時の速度ポテンシャル  $\phi_{st}$  は、(5)式により、

$$\phi_{st}(t, z) = \pm 2A \sin kz \cdot e^{i(\omega t - \frac{\pi}{2})} \quad (7)$$

に書き換えることができる。

速度ポテンシャル $\phi_{st}$ から、粒子速度 $v$ 、音圧 $\Delta p$ を求めると、

$$v(t, z) = -\frac{\partial \phi_{st}}{\partial z} = \mp 2Ak \cos kz \cdot e^{i(\omega t - \frac{\pi}{2})} \quad (8)$$

$$\Delta p(t, z) = \rho_0 \frac{\partial \phi_{st}}{\partial t} = \pm 2A\rho_0 \omega \sin kz e^{i(\omega t - \frac{\pi}{2})} \quad (9)$$

のように表される。そこから粒子速度の実効値 $v_{rms}$ と音圧の実効値 $\Delta p_{rms}$ を計算すると、

$$v_{rms}(z) = \frac{1}{\sqrt{2}} v_0 \cos kz \quad (10)$$

$$\Delta p_{rms}(z) = \frac{1}{\sqrt{2}} \rho_0 c v_0 \sin kz \quad (11)$$

と求まる。ただし $v_0 = 2Ak$ 、 $\rho_0$ は空気の密度である。

次に、浮揚力の導出について、Gor'kovは、時間ポテンシャルを次式のように提案している。

$$U = 2\pi r^3 \left( \frac{\Delta p_{rms}^2}{3\rho_0^2 c^2} - \frac{v_{rms}^2}{2} \right) \quad (12)$$

図2には、無次元化した $v_{rms}$ と音圧の実効値 $\Delta p_{rms}$ を示す。(12)式の右辺の第1項は、面圧力 $\Delta p_{rms}$ の差によって生じる浮力で、第2項は速度の差 $v_{rms}$ によるベルヌーイの負圧(揚力)である。圧力 $\Delta p_{rms}$ はノード位置で反転(上部では“+”/下向き)の圧力、下部では“-”/上向き)の圧力)分布している。いま半径 $r$ の物体を定在波のノードに置いた場合、上向きの圧力と下向きの圧力が相殺して、浮力がゼロになる。物体がノードより下に位置すると、上向きの圧力およびそれを受ける面積が大きくなるため、合力として上向きの浮力が働く。一方、速度 $v_{rms}$ がノード位置において最大で、ノードを軸に対称分布している。そのためノードの位置においては、物体の揚力がゼロになるが、ノードより下に位置した場合には、物体上部の速度が下部の速度より速いため、物体が上向きの揚力を受けることになる。

(10)、(11)式で求めた粒子速度の実効値 $v_{rms}$ と音圧の実効値 $\Delta p_{rms}$ を(12)に代入すると時間ポテンシャル $U$ は、

$$U = 2\pi r^3 \rho_0 \left( \frac{1}{6} v_0^2 \sin^2 kz - \frac{1}{4} v_0^2 \cos^2 kz \right) \quad (13)$$

と求められる。浮揚粒子が受ける力 $F$ は、 $F = -\nabla U$ により求められるから、

$$F(z) = \frac{5}{6} \pi r^3 \rho_0 v_0^2 k \cdot \sin 2kz \quad (14)$$

あるいは、音圧を用いて浮揚力を表すと、

$$F(z) = \frac{5}{6} \frac{\pi}{c^2 \rho_0} r^3 \Delta p_0^2 k \cdot \sin 2kz \quad (15)$$

になる。(14)式より、浮揚力 $F(z)$ は $z$ 軸方向

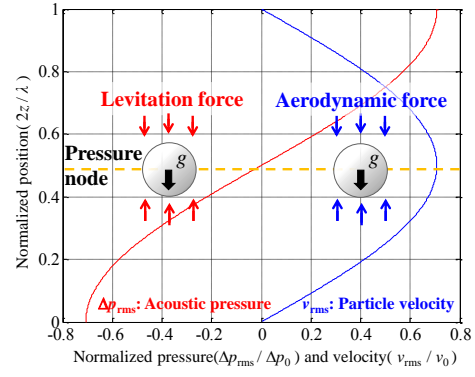


図2 粒子速度と音圧による浮揚力

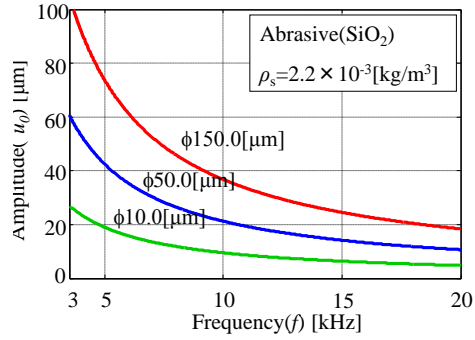


図3 密度と浮揚条件

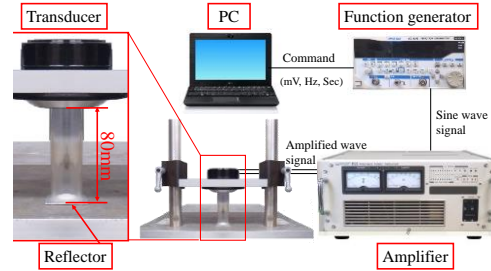


図4 試作した単振動音響浮揚装置

に音波の半波長の周期で変動している。この最大浮揚力 $F_{max}(z)$ が浮揚物体の重さ $(4\pi r^3 \rho_1 g / 3)$ より大きければ、音波により物体を浮揚させることができる。つまり、下記(16)式の条件式を満たす音響パワー(振幅と周波数)を与えられる場合、密度 $\rho_1$ の物体がノードより下の位置で浮揚することになる。

$$v_0^2 \omega \geq \frac{8}{5\pi} \frac{\rho_1}{\rho_0} c g \quad (16)$$

図3は、異なる密度の物体について、(16)式に従って算出した浮揚の境界条件(放射板の周波数および粒子速度)である。それぞれの物体を浮揚させるには、対応する境界線の上にある粒子速度および周波数を与える必要がある。つまり放射板に適切なパワーを設定すれば、異なる物質(密度 $\rho_1$ )の分別が可能になる。従来の重さによる方法と異なり、(16)式には浮揚物体の大きさ(半径 $r$ )が含まれておらず、物質の比重のみに依存することが特筆すべきである。

図4には、検証実験用に試作した装置を示す。放射板にツイータ (Fostex 社製), 反射板にアルミ板を使用した。これらに長さ85[mm]のポリエチレン管を設置し管内で定在音波を生成した。制御用 PC から振幅および周波数の指令を受け, ファンクションジェネレータより生成したサイン波形を, アンプにより増幅した後に放射板に送る仕組みになっている。図5には, 径 $\phi 3$ [mm]のポリスチレン ( $\rho_1=0.04\text{g/cm}^3$ ) の浮揚実験の一例を示す。このように, ポリスチレンが各ノードより少し下の位置で浮揚していることが確認できる。図6には, 周波数を変えて浮揚位置を制御するスキームを示している。path (a)は周波数によるノード位置を, また path (b)は浮揚するノード番号を変えることにより, 定在波音響場において音波の進行方向に任意の位置で物体を浮揚させることができた。

図7には平均粒径 $\phi 50[\mu\text{m}]$ の  $\text{Al}_2\text{O}_3$  研磨微粒子 ( $\rho_1=3.95\text{g/cm}^3$ ), また図8には半径が0.1~1.5mmのガラスビーズ ( $\rho_1=2.5\text{g/cm}^3$ ) をの浮揚実験の様子を示す。このように浮揚物体の半径が大きく異なるにもかかわらず, 比重が同じ同一物質であれば, すべて同一共振条件で浮揚することができ, これまでの定在波成立条件および浮揚条件に関する理論解析が妥当であることが裏付けられた。

一方, 浮揚条件の理論計算値と実験値を比較したところ, 図9に示すように両者に誤差がある。この誤差は浮揚物体の密度が大きくなるに従って, 大きくなっている。これは主に, 音波が伝播や反射時のエネルギーロスによるものと考えられる。図10には, 定在波生成条件下での放射波, 反射波及び合成波を示している。(a)のような減衰の無い場合 ( $\beta=0.5$ ) は, 前述理論解析通り定在波が正しく生成されている。それに対して反射率 $\beta=0.5$ に低下すると, (b)に示すように定在波が正しく形成されていないことがわかる。

そこで, 反射板の代わりに放射板と同じ振動子を設置し同期発振した場合の音響場の様子を図10(c)に示す。このようにツイン振動子の場合, たとえ減衰 ( $\beta < 1$ ) があっても, 定在波が正しく形成され, またその時の振幅は,  $1/(1-\beta)$ に増幅されていることがわかる。図11には, このシミュレーションの結果に基づいて新しく設計, 開発したツイン振動子音響浮揚装置を示す。ツイン振動子装置は, 上下対向に設置した一対の振動子からなっている。振動子にはPZTを使用した。PZTは共振周波数 ( $23 \pm 2\text{kHz}$ ) を使用することで小さな電力で大きな振幅を得ることができる。また, PZTの駆動する周波数帯域は非常に高いため, 音波の直進性が優れていることに加えて, ホーンを用いることでさらに出力の指向性を高めている。2つの振動子を同期しながら位相を変えられるように工夫した。前述の周波数を用いた浮揚位置制御では, 浮揚可能な位置は音圧ノードに依存するが, 新たに開発したツイン振動子装置は, 位相制御により, 浮揚位

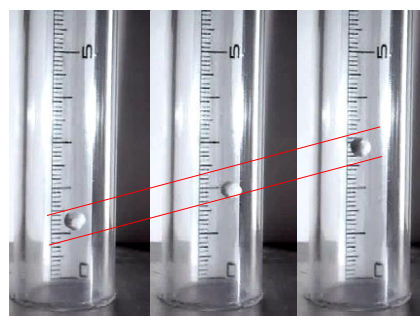


図5 浮揚実験と位置制御様子

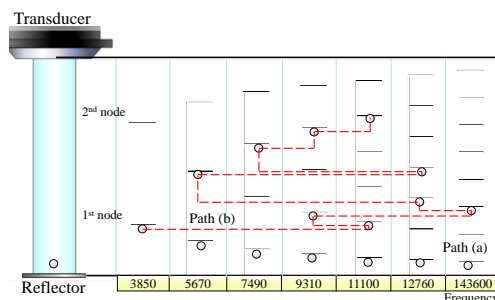


図6 浮揚粒子位置制御のスキーム

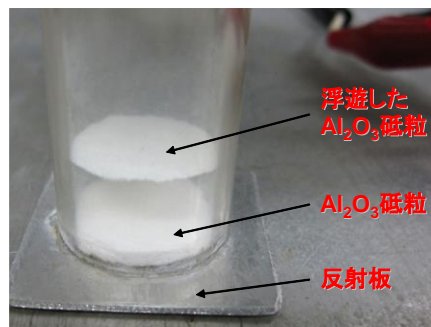


図7 除染研磨粒子の浮揚実験

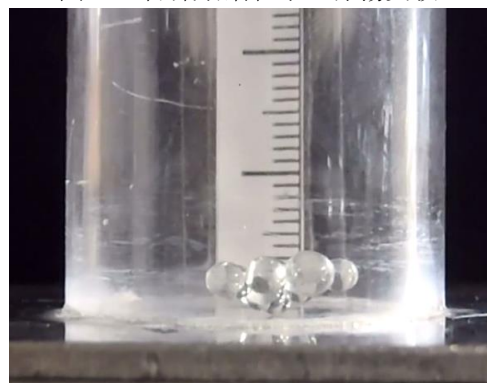


図8 異なる大きさガラスビーズの浮揚実験

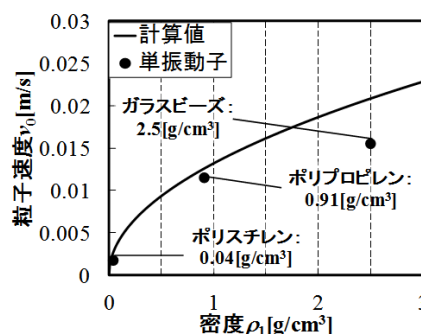
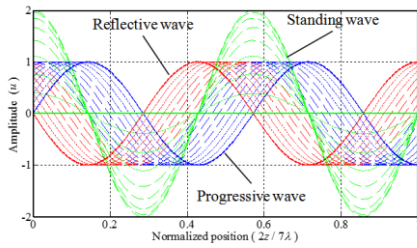
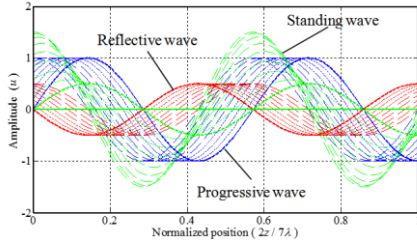


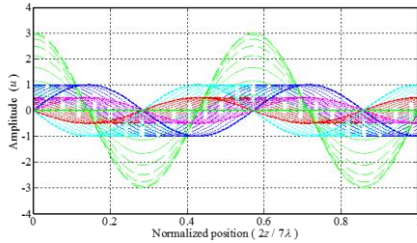
図9 浮揚条件の理論値と実験値の比較



(a)  $\beta=1.0$  (single transducer)



(b)  $\beta=0.5$  (single transducer)



(c)  $\beta=0.5$  (twin transducer)

図 10 減衰がある場合の合成波

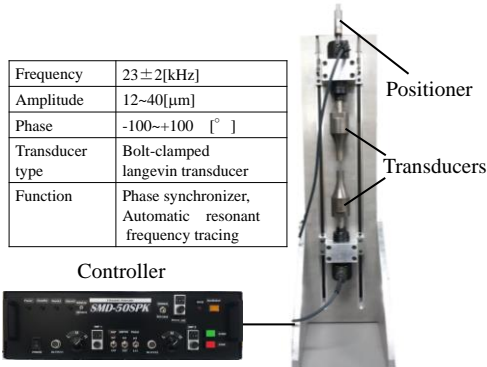
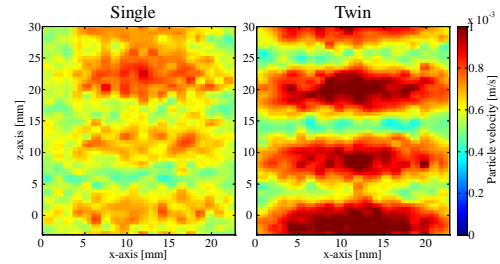


図 11 開発したツイン振動子音響浮揚装

置が無断可変できるようにした。

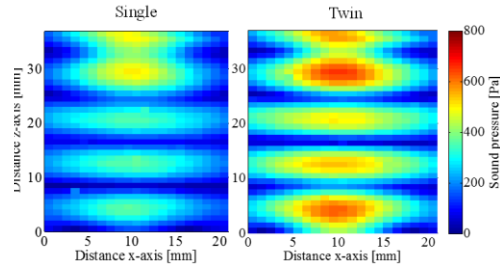
図 12 は、単振動子とツイン振動子システムにおける粒子速度についての実測結果である。この時の周波数は 23kHz で、振動子間距離は 40mm である。単振動子と比べて、ツイン振動子は減衰の影響が少なく、また良質な定在波が生成されていることが分かる。また、図 13 は、単振動子とツイン振動子システムの音圧を比較した結果である。粒子速度の結果と同じように、単振動子と比べて、ツイン振動子は減衰が少なく、音圧が約 2 倍に高くなっていることがわかる。さらに、この装置を水平配置した場合も、鉛直配置ほとんど変わらない特性を確認した。

図 14 は、ツイン振動子システムにおける振



(a) Single transducer (b) Twin transducer

図 12 粒子速度  $v$  の比較



(a) Single transducer (b) Twin transducer

図 13 音圧  $\Delta p$  の比較

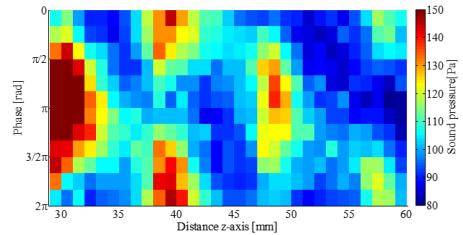


図 14 ツイン振動子間距離と位相の関係

動子間の距離と位相の関係を表したグラフである。縦軸に位相差で、横軸に振動子間の距離を置くと、振動子間の距離が半波長の偶数倍の距離では位相差  $0^\circ$  の時、振動子間の距離が半波長の奇数倍の距離で位相差  $180^\circ$  の時に音圧が大きくなり、このような条件が前述の理論解析結果と一致している。

最後に応用例として、水平配置したツイン振動子音響浮揚装置による分級・分別に関する研究を報告する。

装置を水平に設置した場合、浮揚力が水平方向に作用することになる。また、ストークスの式より、空気中を移動するときの抵抗力は、 $F_r = 6\pi\eta r z'(t)$  で与えられる。ここで、 $\eta$  は空気の粘性抵抗、 $z'$  は水平方向における物体の移動速度である。ニュートンの運動方程式より、

$$mz''(t) - \frac{5}{6}\pi\rho_0 r^3 k \sin[2kz(t)] + 6\pi\eta r z'(t) = 0 \quad (17)$$

となる。Verlet 法を用いて、この微分方程式を解いて  $z(t)$  を求める。一方、鉛直方向 (Y 軸) では、 $y(t) = v_y t$  で表す定速運動とする。したがって、時間  $t$  における位置座標  $(z, y)$  をプロットすれば、物体が定速で定在波音響場を横切

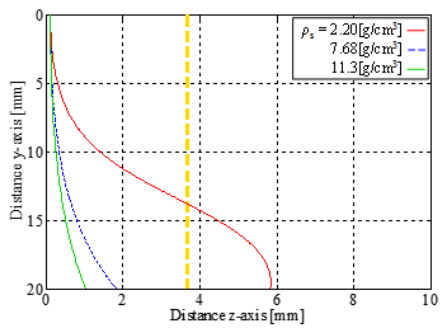


図 15 粒子比重の影響

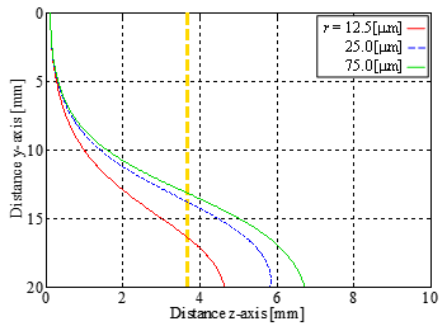


図 16 粒子サイズの影響

った時に、浮揚力の影響を受けた物体の移動軌跡が分かる。

音圧、周波数、物体密度、物体半径、初期位置、定速度の6つのパラメータを変化させて音場中における粒子の移動軌跡を調べた。図15には粒子比重、図16には粒子サイズの影響を示す。粒子サイズの影響に比較して、粒子比重の影響が大きく、これを利用した物質の連続分級分別が可能であることを示唆している。

図17には、上部のInjectorから自由落下したSiO<sub>2</sub>研磨粒子(ρ<sub>1</sub>=2.2g/cm<sup>3</sup>)が音響場を通過した時の運動軌跡である。振動子のPower-offのときは鉛直方向に落下しているが、Power-onになると、音圧ノードに引っ張られている様子がわかる。この方法を利用して鉄粉(ρ<sub>1</sub>=7.8g/cm<sup>3</sup>)とSiO<sub>2</sub>粒子(ρ<sub>1</sub>=2.2g/cm<sup>3</sup>)の分別・分級結果を図18に示す。この結果は、本研究で開発したツイン振動子音響浮揚装置は汚染物質の分別・分級に応用できることを示唆している。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3件)

- ① Tomohiro Inada, Libo Zhou, Jun Shimizu, Hirotaka Ojima and Takuya Ito: Development of non-contact classifying systems by use of acoustic levitation, *Advanced Materials Research*, 査読有, (掲載決定).
- ② Tomohiro Inada, Libo Zhou, Hirotaka Ojima and Jun Shimizu: Development of Finishing System using Acoustically Levitated Abrasive, *Int. J. of Automation Technology*, 査読有, Vol.7, 6(2013), 671-677.
- ③ Tomohiro Inada, Hirotaka Ojima, Libo Zhou: Development of Novel Polishing System by

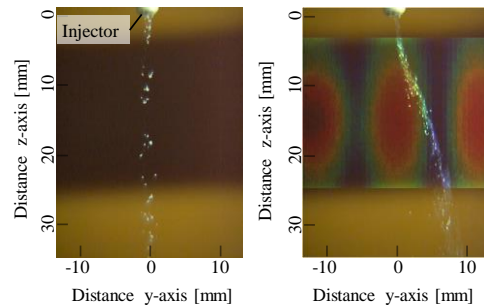


図 17 粒子の運動軌跡と音圧の関係

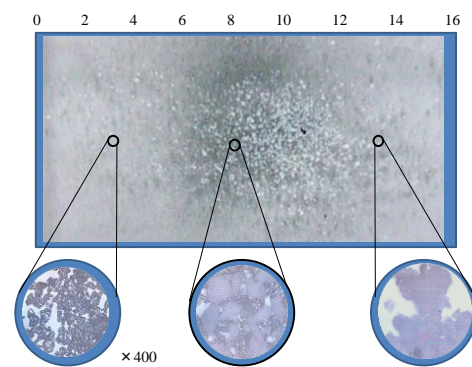


図 18 分別・分級結果

Use of Acoustic trap, *Key Engineering Materials*, 査読有, Vol. 615, (2012), 326-331.

[学会発表] (計 3件)

- ① 稲田智広, 周立波, 尾鷲裕隆, 小貫哲平: 音響浮揚の保持力の向上に関する研究, 日本機械学会第21回茨城講演会論文集, 茨城大学, 2013年9月6日, 181-182.
- ② 伊藤拓哉, 稲田智広, 牛腸広人, 周立波, 清水淳, 小貫哲平, 尾鷲裕隆: 定在音場における微粒子分級の一考案, 日本機械学会第9回生産加工・工作機械分門講演会論文集, 秋田県立大学, 2012年10月26日, 265-266.
- ③ 牛腸広人, 伊藤拓哉, 稲田智広, 周立波, 清水淳, 小貫哲平, 尾鷲裕隆: 音響浮揚を用いた微粒子分級法に関する研究, 日本機械学会第20回茨城講演会論文集, 茨城大学, 2012年8月24日, 11-114.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

周立波 (ZHOU LIBO)  
茨城大学・工学部・教授  
研究者番号: 90235705

### (2) 研究分担者

清水淳 (SHIMIZU JUN)  
茨城大学・工学部・教授  
研究者番号: 40292479  
小貫哲平 (Onuki Teppei)  
茨城大学・工学部・准教授  
研究者番号: 70400447  
尾鷲裕隆 (OJIMA HIROTAKA)  
茨城大学・工学部・講師  
研究者番号: 90375361