

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05129

研究課題名(和文)超音波振動による粉粒体-壁面間摩擦低減効果の要因解明

研究課題名(英文)Clarification of Factors on Friction Reduction between Granular Materials and Walls with Ultrasonic Vibration

研究代表者

河府 賢治 (KOFU, Kenji)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：10424748

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：超音波振動による粒子-壁面間の摩擦低減効果に及ぼす要因を明らかにするため、はじめに粉粒体の代わりに立方体を用いて、超音波振動による摩擦低減量を測定した。その結果、いずれの条件においても振動振幅が大きくなるほど低減するが、立方体材料により変化し、さらに立方体サイズが小さく、振動板サイズが大きいと低減量が大きくなることが分かった。またレーザードップラー振動計により、立方体材料の変形量を測定した結果、摩擦低減効果が大きい条件ほど変形量も大きくなり、摩擦低減効果の主要因は粒子変形であることを明らかにした。さらに音響流による影響を調べた結果、流速が極めて小さく、摩擦低減効果も小さいことが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レアメタルなど製品に使用されている材料をリサイクルする必要がある、既に幾つかその方法が研究され、提案されている。しかし、既存手法では単一の物性差を利用するため、近い粒子同士の分離は困難である。本研究テーマに関する超音波法は複数の物性値が影響するため、既存手法で困難であった組合せの粒子群に対して活用できる可能性がある。また、流動化法など既存手法と組み合わせることで、例えば最小流動化速度の低減による省エネ化や分離精度向上に貢献できる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify the factors affecting on friction reduction effect between particles and wall by ultrasonic vibration, the amount of friction reduction by ultrasonic vibration was measured while the material and size of cube and vibration plate size were changed. This experimental result showed that the friction reduction increased as the vibration amplitude increased in spite of conditions. Then, the reduction was enlarged as cube size is small and vibration plate size is large. Additionally, this reduction effect also depends on the material of cube. The deformation of the cubic material was measured using a laser Doppler vibrometer, and it was revealed that the tendency of this deformation agrees with friction reduction effect. Therefore, it could be showed the deformation is the main factor for friction reduction. Finally, acoustic streaming effect was also investigated. As a result, this velocity is so slow, and it is concluded as acoustic streaming effect can be neglected.

研究分野：粉体工学

キーワード：超音波振動 粉粒体 摩擦低減効果 粒子径 振動板サイズ

### 1. 研究開始当初の背景

家電製品や自動車などには多くの金属が使われており、その中でも特にレアメタルが使用され、性能向上の一翼を担っている。これら製品の廃棄工程において一度粉砕すると、粒子径、材料、形状の異なる粒子群が生成され、この中からレアメタルなど特定の粒子のみを抽出し、リサイクルすることが要求されている。この手法として磁力差を利用する方法、溶液を用いる湿式法、流動化させ密度差を利用する方法、メカノケミカル法など種々存在し研究されている。しかし、流動化法は分離操作後に流動化に用いた微小粉体を取り除く必要があり、メカノケミカル法では抽出粉体が混合粉体の中で 50% 程度以上占めていなければならない。その他の手法では密度や磁性など 1 つの物性差を利用して分離するため、物性が近い粒子同士の分離には使用できない。

一方、分級法としてふるい分けやサイクロンがある。しかしふるい分けの場合、目詰まりが起きる、分級後洗浄が必要、網が破損するため定期的に交換が必要等の問題がある。またサイクロンは二次気流の利用などにより分級効率が非常に向上しているが、分級目標粒子径を境にして 2 種に分ける手法であり、3 種以上に分ける場合は複数のサイクロンが必要となる。

### 2. 研究の目的

新たな分離・分級手法として、超音波振動を用いた方法が考えられている。河府らは超音波による音圧と表面振動による見かけの摩擦低減効果について実験的に調べた。その結果、粒子径や材質により摩擦低減量が異なり、この差を利用した分離・分級が可能であることを示した。しかし、この摩擦低減のメカニズムについては不明であり、分離・分級効率を高めるため、また任意の粒子同士の分離・分級の実現のためには、摩擦低減の要因を明らかにする必要がある。この要因の一つとして、装置内を伝播してきた超音波振動エネルギーの一部が粒子に透過し、このエネルギー発散のために粒子が変形することが挙げられる。また振動板の上下運動に追従できなくなり、板と粒子とが離れる慣性による効果も考えられる。さらに超音波振動により空間に音圧分布が生じ、結果として音響流が発生し、これが粒子に作用して粒子を動かすことで、みかけ上の摩擦抵抗が低減されると考えられる。しかし、これら要因による摩擦低減効果への影響については明らかにされていない。

そこで、本研究では粒子の代わりに立方体を用いて立方体の材質や大きさ、ならびに振動板サイズを変化させ、摩擦低減量および立方体表面の変形を測定する。また、これら条件による摩擦低減効果の変化を調べ、低減メカニズムを明らかにする。さらに、振動により生じる音響流を測定し、音響流による摩擦低減効果への影響を明らかにする目的で実施した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 超音波振動板の振動モード

振動板頂面の振動振幅が位置に関わらず一様でなければ、立方体の置く位置により立方体を受取る振動エネルギーや摩擦低減効果が変わる。そのため、位置に関わらず均一な振動振幅となる振動板、つまりピストンモード振動板を用いる必要がある。このピストンモード振動板を設計・製作し、Fig.1 に示すとおり接続する。発振器より、共振周波数  $f=20\text{kHz}$  の出力電圧  $V$  を発振させ、増幅器により増幅後、ボルト締めランジュバン型振動子に入力する。このとき振動板中心の振動板振幅  $A_{mv}$  を  $0.5\mu\text{m}$  になるように  $V$  を設定する。レーザードップラー振動計(以降 LDV と記す)を鉛直方向上方から照射し、2mm 間隔で焦点位置を動かして、各位置の振幅を測定した。なお、振動板は一辺 20 および 40mm とした。

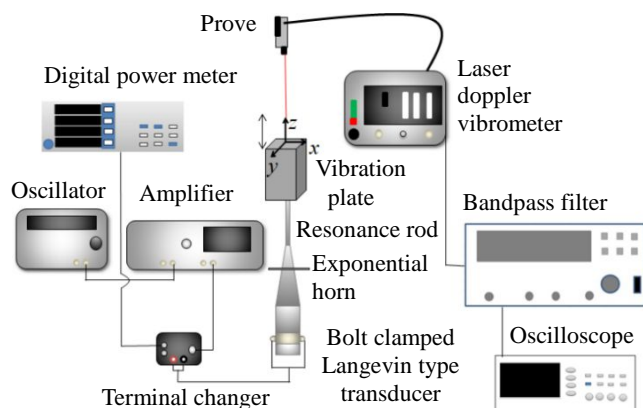


Fig.1 Ultrasonic generation apparatus

Table1 Cubic material property

	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Young's modulus [GPa]	Acoustic transmission coefficient
Aluminum	2.69	70.3	1.000
Titanium	4.54	106	0.941
Zinc	7.13	108	0.923
Iron	7.87	205	0.784
Copper	8.96	125	0.819

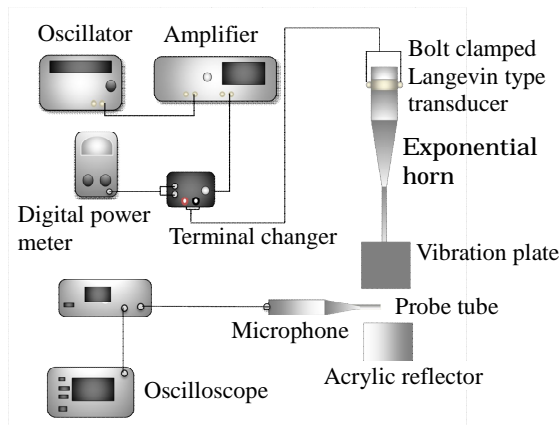


Fig.2 Measurement of Acoustic pressure

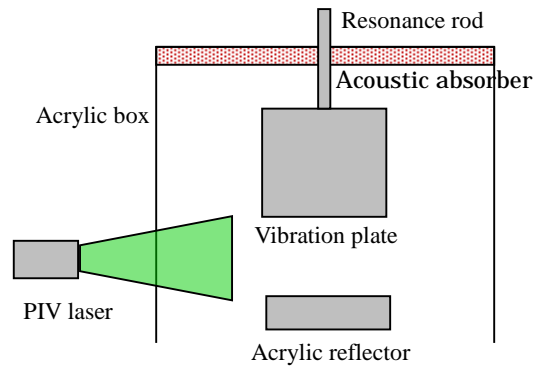


Fig.3 Measurement of Acoustic streaming

## (2) 立方体摩擦低減効果実験

Fig.1 の振動板上に立方体を乗せ、振動板ごと傾け立方体が滑り動き出す角度  $\theta$  を測定する。これを各条件で 10 回行い、その平均値より摩擦係数  $\mu_w = \tan\theta$  を求める。このとき  $A_{mv} = 0, 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2 \mu\text{m}$  になるよう  $V$  を設定し、測定した。用いる立方体の寸法は一辺 10 および 14mm を用い、材質はアルミニウム、鉄とする。さらに、10mm に関してはチタン、銅、亜鉛を追加して測定する。

## (3) 立方体変形測定実験

実験装置を  $\theta = 0 \text{deg}$  になるように固定し、3.2 節と同じ立方体を振動板上に置く。 $f = 20 \text{kHz}$  で  $A_{mv} = 0.0125, 0.0250, 0.0375$  および  $0.0500 \mu\text{m}$  になるように発振器を設定する。そして、LDV を立方体各面の中央に照射して、立方体振幅  $A_{mc}$  を測定する。得られた結果を立方体サイズ・材質、振動板サイズごとで振動板振幅と立方体振幅の関係を比較するとともに、3.2 節の摩擦低減効果とも比較し、低減メカニズムを調べる。

## (4) 音響流の影響実験

### 開空間の振動板反射板間の音圧測定

実験装置を Fig.2 に示す。振動板振幅が  $A_m = 0.3 \mu\text{m}$  となる  $V$  を発生させ、増幅器で増幅させ、ボルト締めランジュバン型振動子に入力し、振動板に超音波振動を与える。振動板反射板間に、マイクロホンにプローブをつけ、振動板と反射板間の中心から上下  $\pm 6 \text{mm}$ 、左右  $\pm 30 \text{mm}$  をそれぞれ 2.0mm 間隔で測定する。

### シミュレーションによるアクリル容器サイズの決定

上述の通り、音響流を可視化するため、アクリル容器で Fig.2 の振動板および反射板周囲を囲み、そこに煙を充満させた後に PIV レーザーを照射し、流れを可視化する必要がある。このとき、アクリル容器のサイド面は可視化を行うため吸音材を取り付けることはできず、振動により生じた音波がこの側壁に反射し音場を乱すことが考えられるため、板間の音圧分布へ影響しないサイズにてアクリル容器を製作する必要がある。そのため、Comsol Multiphysics により必要なアクリル容器サイズを決定する。

### 閉空間の振動板反射板間の音圧測定

上述で決定したサイズのアクリル容器で振動板と反射板を囲み、音圧分布測定を行う。なお Fig.3 に示すとおり、アクリル容器の天井面には吸音材を取り付ける。

### 音響流可視化実験

振幅  $A_{mv} = 0.3 \mu\text{m}$  を振動板に与え、音響流の可視化実験を行う。Fig.3 に示す通りアクリル容器にて振動板および反射板付近を囲み、煙を充満後、PIV レーザーを照射し、高速度カメラで撮影し音響流の可視化を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 超音波振動板の振動モード

代表として  $f = 20 \text{kHz}$ 、振動板サイズ  $20 \times 20 \text{mm}$  の結果を Fig.4 に示す。振動板中心の  $A_{mv}$  で無次元化している。Fig.4 からこの比がほぼ 1.0 であることから振動板上面が同じ振幅で振動していることが分かる。つまり、板上で立方体は位置にかかわらず同様に超音波振動効果を受けることができると言える。

### (2) 立方体摩擦測定の結果

一辺 10mm におけるアルミニウムの  $A_{mv}$  に対する摩擦係数比を Fig.5 に示す。摩擦係数比は無振動時の  $\mu_w$  を  $\mu_{w0}$  として、各  $A_{mv}$  における  $\mu_w$  との比をとったものである。この図から  $A_{mv}$  が大きくなれば振動板と立方体との摩擦係数比が減少していることが分かる。つまり、超音波振動により摩擦抵抗が低減できることが分かる。さらに、振動板サイズが大きい方が、摩擦係数比が小さく、摩擦低減効果が大きいことが分かる。故に、振動板表面の上下運動に追従できずに浮遊することで摩擦が低減される要因、つまり慣性による摩擦低減への要因は小さいと言える。

次に、立方体サイズが 10, 14mm におけるアルミニウムの結果を Fig.6 に示す。この図より、

立方体サイズが小さい方が摩擦低減効果が大きいことが分かる。つまり、立方体サイズにより低減効果が変わり、小さい方がその影響が大きいと言える。さらに Fig.7 よりアルミニウムが最も低減効果が大きく、鉄が小さく、材料により低減量が異なることも分かる。

### (3) 立方体変形測定

亜鉛 10mm における頂面(振動板と反対側の面)と側面 2 面の振幅測定結果を Fig.8 に示す。この図より、立方体側面の振幅は頂面と比べて極めて小さいことが分かる。この結果より、振動エネルギーは振動板から立方体に透過し、その結果立方体が変形していること、側面の振幅は小さく、摩擦低減効果への影響は小さいことが分かる。また、頂面の振幅が大きいため、これが摩擦低減効果へ影響していると言える。この頂面の振幅を高速フーリエ変換した結果を Fig.9 に示す。この図より、振動板と同じ 20kHz にてピークとなっていることが分かる。つまり、振動板と同じ周波数で立方体も変形していることが分かる。

次に、頂面の立方体振幅  $A_{mc}$  と  $A_{mv}$  の関係を Fig.10 に示す。アルミニウムについては 14mm の結果を追加して示す。この図において、アルミニウムが最も変形し、鉄が最も変形量が小さいことが分かる。これは Table1 に示した通り、音響透過係数とヤング率の影響と考えられる。つまり、音響透過係数が大きい場合、立方体は振動板から大きなエネルギーを受取ることができ、またそのエネルギーを変形することで消費するため、ヤング率が小さいほど変形量が大きくなると言える。また、立方体サイズが小さいほど、変形するために必要なエネルギー量も小さくて済むため、立方体が小さい方が変形が大きくなると言える。

以上の結果より、立方体変形が大きい条件ほど摩擦低減量が大きいことから、超音波振動による摩擦低減メカニズムの主要因として、振動板上の粒子変形を挙げることができる。

### (4) 音響流による影響

#### アクリル容器の決定

シミュレーションにおいて、アクリル容器なしおよびアクリル容器幅を変更して板間の音圧分布計算を行った結果を Fig.11 に示す。この図は振動板表面高さにおける水平方向の音圧分布を表している。この図より、アクリル容器幅が 100mm 程度であればアクリル壁面が無い条件と比べて誤差が大きくなっているが、250mm まで広げるとアクリル容器なしの状態と同じにできることが分かる。故に、幅 250mm のアクリル容器を用いて音響流の可視化実験を行う。

#### 振動板反射板間の音圧測定結果

振動板と反射板間の音圧分布測定結果を Fig.12 および 13 に示す。この図より、アクリル容器有無に関わらず節と腹が存在し、定在波音場を形成していることが分かる。また、その節腹の位置も同じであることも分かる。つまり、アクリル容器で囲んだ影響がないと言える。これにより、吸音材を取り付けたアクリル容器を用いることで開空間と同条件で音響流を可視化できると言える。

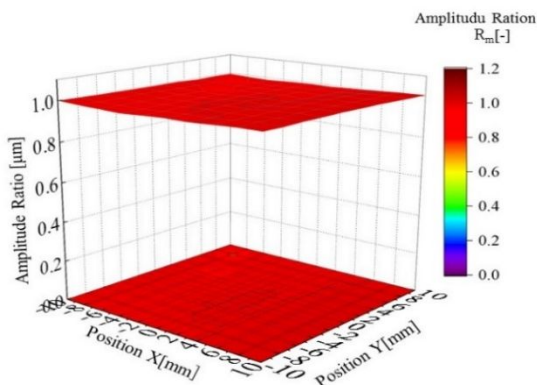


Fig.4 Vibration mode

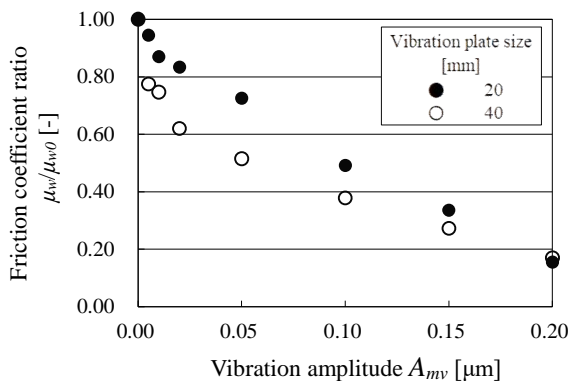


Fig.5 Friction coefficient ratio

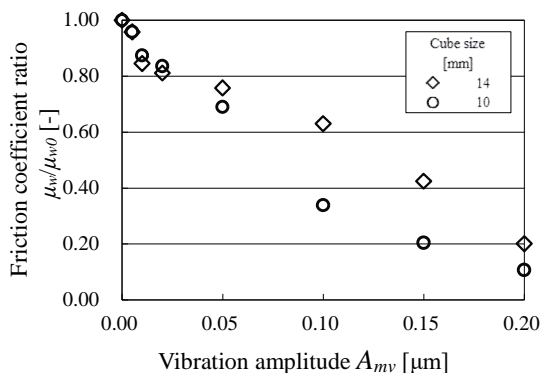


Fig.6 Friction coefficient ratio

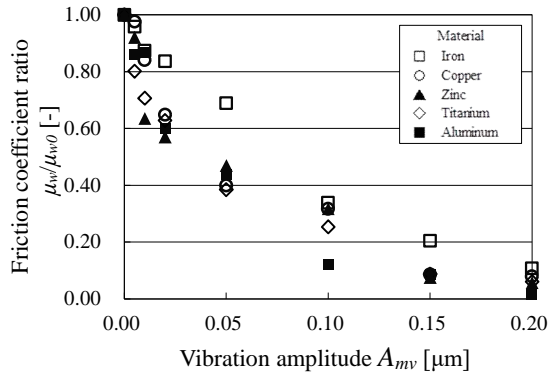


Fig.7 Friction coefficient ratio

### 音響流可視化実験

Fig.14 に振動板に超音波振動有無における音響流の結果を示す。この図より、振動を印加しても音響流が極めて遅く、ほぼ動いていないことが分かる。故に、粒子に対する流速も小さく、音響流による摩擦低減効果への影響は極めて小さいと言える。

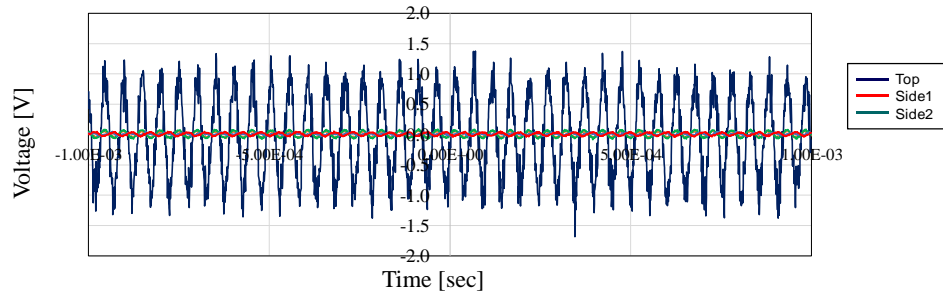


Fig.8 Vibration amplitude (Zinc, 10mm)

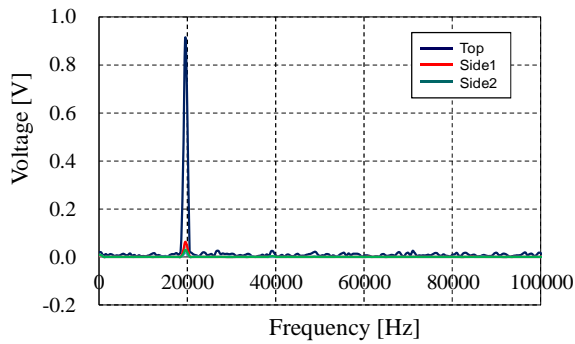


Fig.9 Vibration amplitude

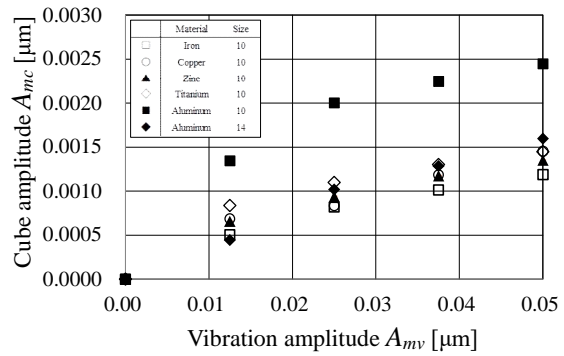


Fig.10 Vibration amplitude of cube and plate

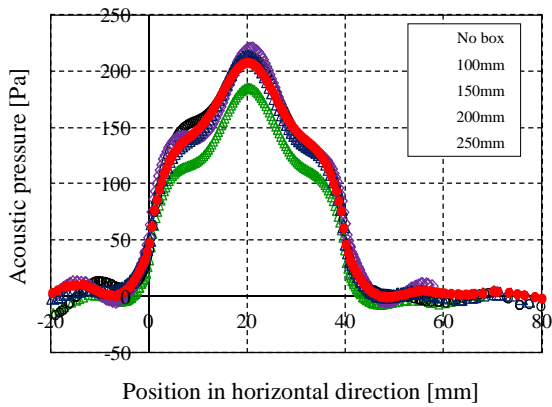


Fig.11 Acoustic pressure against acrylic box

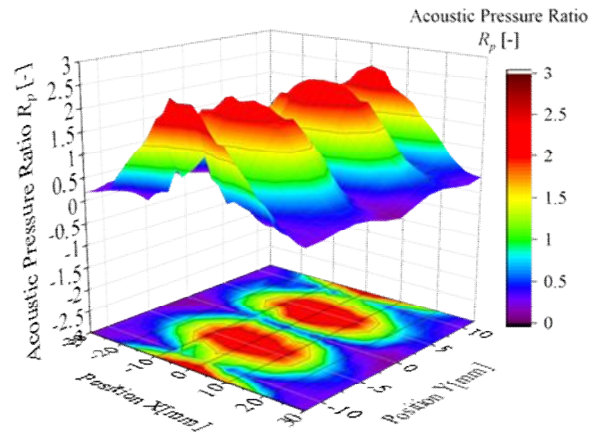


Fig.12 Acoustic Pressure Ratio without acrylic box

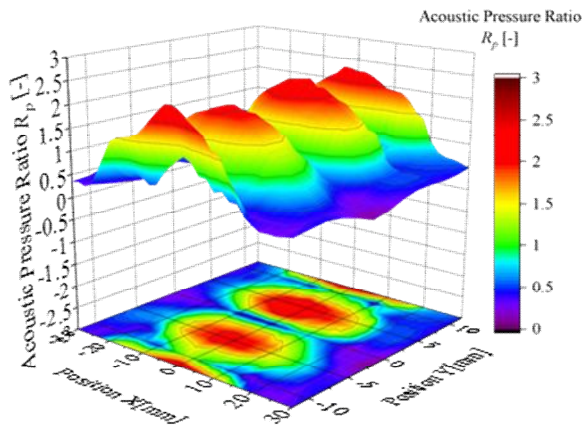


Fig.13 Acoustic pressure ratio with acrylic box and absorber

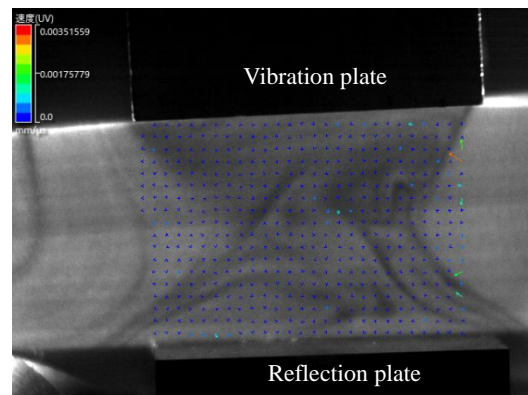


Fig.14 Acoustic streaming

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 河府賢治
2. 発表標題 超音波振動による粒子-壁面間摩擦低減の要因 -立方体による実験的解明-
3. 学会等名 2022年度粉体工学会春期研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 澤田稜司, 佐藤敦, 河府賢治
2. 発表標題 超音波振動による立方体-壁面間摩擦低減効果
3. 学会等名 令和元年度(第63回)日本大学理工学部学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------