

平成 30 年 5 月 28 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18258

研究課題名(和文)超音波定在波および進行波を利用した混合粒子の分離と分級

研究課題名(英文)Classification and Separation of Mixed Particles by making use of Standing and Progressive Wave of Ultrasonic

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):はじめに超音波振動により生じる音圧および表面振動による粒子と壁面間の摩擦低減効果を調べた。その結果、粒子径が大きくなるほど音圧による低減効果、粒子密度が大きいほど表面振動による低減効果が大きくなることがわかった。そして、この効果差を利用したシリカ粒子群の分級ならびに鉄とチタンの混合粒子群からの分離を試み成功した。

次に、粒子の代わりに立方体を用いて、立方体の変形や振動板サイズによる影響を調べた。その結果、立方体が大きくなるほど粒子変形量が小さくなること、振動板サイズが大きいほど変形量も摩擦低減効果も大きくなり、粒子への振動エネルギー透過の影響も考慮する必要性を示すことができた。

研究成果の概要(英文):Firstly, friction reduction effect by acoustic pressure and surface vibration of ultrasonic was investigated. As a result, in case of large-sized particles, friction is decreased greatly by acoustic pressure. Moreover, the effect by surface vibration has relation to particle density. In short, this effect is enlarged with increasing of particle density. Then, separation for particle size and material was tried by making use of difference in friction reduction. Results showed silica was divided according to each size, and iron could be picked up from particles which include titanium.

Secondly, the factor of friction reduction effect between particles and ultrasonic vibration plate has been investigated by using cube. As a result, friction reduction effect and surface deformation of cube depends on not only frequency and amplitude but also plate size. This means the transmission of vibration energy from plate to the particle influences for the friction reduction effect.

研究分野：粉体工学

キーワード：超音波振動 音圧 表面振動 音響透過係数 粒子物性 振動板寸法 分離

1. 研究開始当初の背景

パソコン、液晶モニタや携帯電話の基板、電車や自動車等に搭載されているモータや燃料電池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のリサイクルが要求されている。しかし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てしまい、この中から特定の粒子のみを抽出し、リサイクルすることが困難となっている。混合粒子から材料種類ごとに分離する方法として、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、摩擦の違いを利用する方法、メカノケミカル法など種々存在し研究されている。しかしながら、流動化法は微小粉体を用いるため、分離操作後にこの微小粉体を取り除く必要がある。また、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、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

超音波振動による粒子-壁面間の摩擦低減の要因の1つとして超音波により板表面が振動し粒子が跳ね上げられ壁面との接触が減少する、表面振動効果が挙げられる。また超音波振動により空間に音圧差が生じ、粒子が浮遊しやすくなり、壁面との摩擦抵抗が減少する音圧効果が挙げられる。そこで、これら効果に及ぼす粒子物性を評価するため基礎研究を行った。しかし、この研究ではたわみ振動モードのため、振動しない節が存在し、同一の振動条件が粒子に作用しないため、正確に定量評価できているとは言えない。また、振動周波数も 20.5kHz の一種類であり、振動周波数による効果差については明らかにされていない。

そこで、粒子-壁面間の摩擦低減効果に及ぼす音圧・表面振動の効果について周波数を変えながら定量的に示し、リサイクルのための混合粒子群からの分離・分級の可能性を調べる目的で本研究を行った。また粒子への音響エネルギー透過による摩擦低減効果への影響も示し、摩擦低減効果のメカニズムを示すことも目的として行った。表面振動による低減効果メカニズムとして、振動エネルギーの粒子への透過による影響が考えられる。つまり、振動板に伝わってきた振動エネルギーの一部が粒子に透過し、このエネルギーを消散するた

め粒子が変形し、これにより摩擦低減効果にも相違が生じると考えられる。同一の振動振幅でも振動板サイズにより、板を振動させるのに必要なエネルギーが異なる。このエネルギーにより摩擦低減効果に影響がある場合、振動板の振幅や周波数だけでなく、振動板サイズも低減効果に影響を及ぼすと言える。しかし、これについては明らかにされていない。そこで、粒子では変形を測定することが困難なため、立方体材料を用い、摩擦低減効果や変形に関して周波数や振動板サイズを変更した実験を行い、振動エネルギー透過による影響を調べる。

3. 研究の方法

(1) 超音波振動による粒子-壁面間の摩擦抵抗低減効果の測定

使用する実験装置を Fig.1 に示す。振動板の材質はジュラルミン(A2017)で、本実験で用いる周波数 $f=20.5, 28.0$ および 39.0kHz の超音波振動を与えたとき、振動振幅 A_m が位置に関わらず一様であるピストンモードになるように設計した。

本測定では音圧のみの効果を調べる場合、Fig.1 のとおり鉛直方向上側から超音波振動を与え、平行に設置された反射板上に散布された粒子に音波を与え、装置全体を傾けて行き、粒子が動き出す角度より摩擦係数 μ_1 の測定を行う。

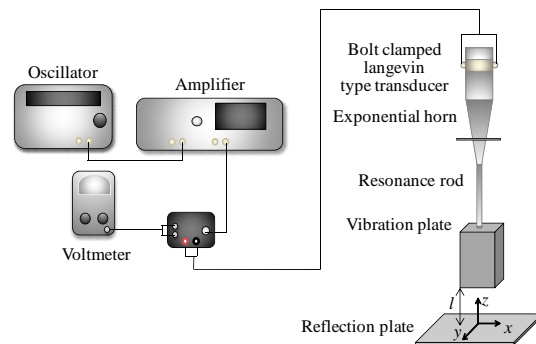


Fig.1 Experimental apparatus (Acoustic pressure)

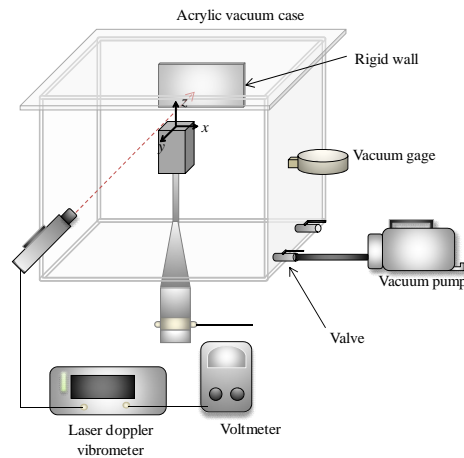


Fig.2 Experimental apparatus (Surface vibration)

Table 1 Particle properties

Particle	Mean diameter d_p [μm]	Particle density ρ_s [g/cm^3]	Acoustic impedance $Z_s \times 10^{-6}$ [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$]	Acoustic Transmission coefficient T	Friction coefficient μ
Silica	286	2.2	12.59	1.00	0.383
	377				0.337
	504				0.367
	620				0.335
	902				0.329
Aluminum	311	2.7	13.58	1.00	0.383
	399				0.365
	568				0.366
	697				0.364
	890				0.337
Titanium	285	4.5	22.87	0.92	0.383
	409				0.378
	550				0.366
	617				0.330
	860				0.340
Iron	297	7.8	39.68	0.75	0.350
	393				0.320
	540				0.358
	691				0.319
	998				0.328

Table 2 Cubic properties

	Young's modulus [GPa]	Density [kg/m^3]
Aluminum	69	2.70
Iron	205	7.87
Copper	117	8.96
Titanium	106	4.54
Acrylic	3.14	1.18
Tree	0.7	1.00
Zinc	89	7.13
Plastics	0.4	0.93
Alumina	380	3.95
Brass	101	8.50

表面振動のみの効果を調べる場合, Fig.2 の真空装置を利用する。内部の圧力を 0.02MPa まで減圧させ, 振動板表面に粒子を散布し, 超音波振動を与えて装置全体を傾けて行き, 粒子が動いた角度より粒子-壁面間の摩擦係数 μ_2 を測定する。

これら無振動時の摩擦係数 μ_0 との比をとり, 表面振動および音圧による摩擦低減効果を定量的に示す。供試粒子は 300~900 μm 程度のアルミ, シリカ, チタンおよび鉄とし, その物性を Table1 に示す。

(2) 分級および分離

分級については, 粒子径 d_p の異なる 4 種類のシリカ粒子を均一になるように混ぜる。この混合粒子群を No.0 とし, Fig.1 の反射板上に粒子を散布する。装置角度 $\alpha=17^\circ$ で固定し, 振動板に $A_m=0.3 \mu\text{m}$ を与える。板上に残留した粒子群と落下した粒子群を回収した後, α を変更せず落下した粒子を板上に戻し, 再度超音波振動を与える。そして, 残留粒子を回収後, 落下粒子を再度板上に戻す。この操作を 3 回繰り返した後, α を $11^\circ, 8^\circ$ の順に変更し, 同様の操作を行う。各 α で回収した残留粒子群に順番に No.1, 2, 3 と番号を付け, 最後に落下した粒子群に No.4 とつける。その後, レーザ回折/散乱式粒度分布測定器を用い, 各粒子群の粒子径分布を測定する。

次に分離については, 平均粒子径 d_p が 650 μm 付近のチタン粒子, 鉄粒子を均一になるように混ぜる。この混合粒子群を No.0 とし, Fig.2 の振動板上に散布し, $\alpha=11^\circ$ で固定する。

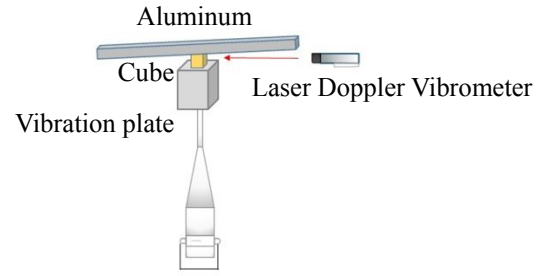


Fig.3 Experimental apparatus

容器内を 0.02 MPa まで減圧し, 振動板に $A_m=2.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ を与える。板上に残った粒子群を No.1 とする。分級と同様に再度板上に戻し落下させる作業を 3 回行い, 最後に落下した粒子群に No.2 と名付ける。その後, プラズマ発光分光分析装置を用いて各粒子群の元素を測定する。

(3) 立方体-壁面間の摩擦低減

超音波振動による立方体の摩擦低減効果を調べる。 $f=28, 39\text{kHz}$ とし, $A_m=0.1 \mu\text{m}$ ごとに最大 $0.5 \mu\text{m}$ になるよう発振器より入力電圧 V を発生させ, 超音波振動を与える。立方体の試験体は 5 種類 (アルミニウム, アクリル, 鉄, 銅, チタン) を一辺が 6, 8, 10 および 12mm の寸法で使用し, また 4 種類 (真鍮, 亜鉛, 木材, プラスチック) を一辺が 10mm の寸法で使用する。これら材料の物性値を Table2 に示す。振動板上の中心付近に立方体の試験体をのせる。装置全体をゆっくり徐々に傾けて行き, 振動板の角度を変えていく。立方体が動き出した時の角度をデジタル角度計で測定する。この測定を各条件において 10 回行い, 平均の角度 α を求める。この α の正接が振動板と立方体との摩擦係数 μ を表す。なお, 粒子固有の摩擦係数 μ_0 を基準とし, 各条件の摩擦係数 μ_i との比 μ_i/μ_0 を算出し, 評価を行う。

また m を質量, μ_0 を摩擦係数として以下の式から超音波振動により発生した立方体を動かすのをアシストした力 F を求める

$$\mu_0 (mg \cos \theta - F) = mg \sin \theta$$

このアシスト力と立方体の体積から単位体積あたりのアシスト力 F/VA を求め, 評価を行う。なお, 振動板サイズは $f=28\text{kHz}$ のとき $15 \times 15\text{mm}$, $f=39\text{kHz}$ のとき $15 \times 15\text{mm}$ および $20 \times 20\text{mm}$ を用いた。

(4) 材料の変形量

本実験は振動子より発生した超音波エネルギーを振動板上部に固定した立方体に透過させ, エネルギーを受けた立方体の変形を測定する。この実験装置を Fig.3 に示す。測定する立方体は前述の(3)と同一で実験を行った。なお振動板振幅が $A_m=0.1 \mu\text{m}$ ごとに最大 $0.5 \mu\text{m}$ になるよう発振器より入力電圧 V を発生させ, 超音波振動を与え, 立方体の変形についてレーザードップラー振動計を立方体側面に照射し測定する。このとき立方体が動かないようにアルミフレームで固定した。

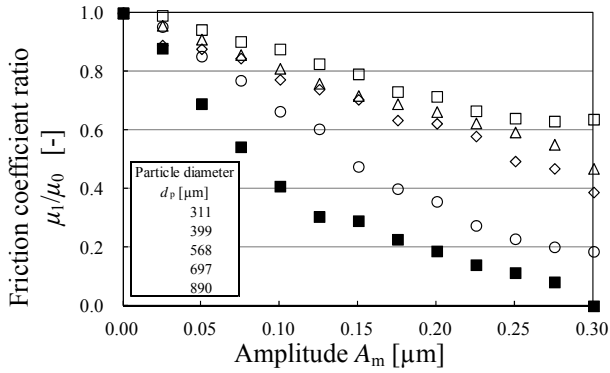


Fig.4 Friction reduction effect
(Only acoustic pressure, Aluminum)

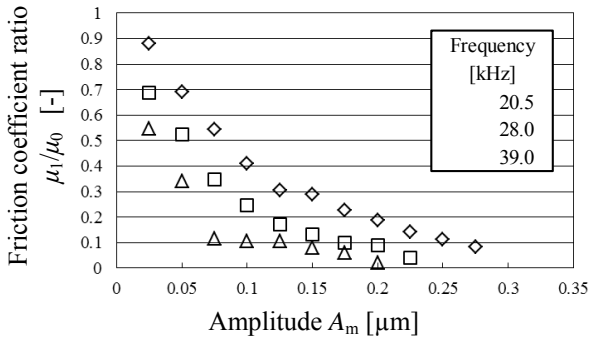


Fig.5 Friction reduction effect
(Only acoustic pressure, Aluminum)

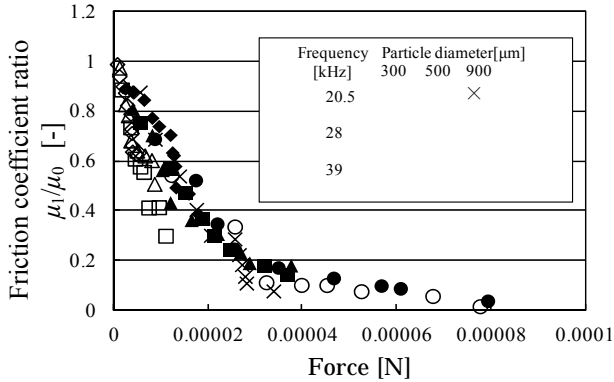


Fig.6 Friction reduction effect
(Acoustic pressure, Aluminum)

4. 研究成果

(1) 超音波振動による粒子-壁面間の摩擦抵抗低減効果の測定

Fig.4 に $f=20.5\text{kHz}$ における音圧のみをアルミニウム粒子に与えた場合の摩擦係数測定の結果を示す。Fig.4 より、 $d_p=311\mu\text{m}$ では $A_m=0.3\mu\text{m}$ において、 μ_1/μ_0 が 0.6 程度で摩擦低減量は 4 割程と小さい。しかし、 d_p が大きくなるにつれ、得られる低減量も増え、 $d_p=890\mu\text{m}$ では $A_m=0.3\mu\text{m}$ において、ほぼ摩擦が 0 まで減少している。これは、大きな粒子径ほど音圧を受ける表面積が大きくなり、より大きな力が垂直方向に作用することで浮遊しやすくなるためと考えられる。

次にアルミニウム、 $d_p=890\mu\text{m}$ における周波数違いの結果を Fig.5 に示す。この図より周波数が高くなるほど低減効果が大きくな

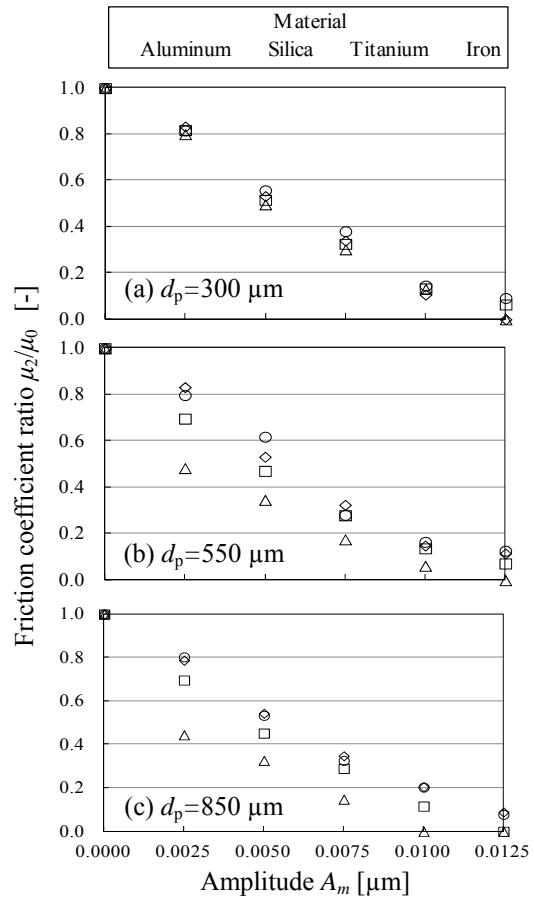


Fig.7 Friction reduction effect (Only surface vibration)

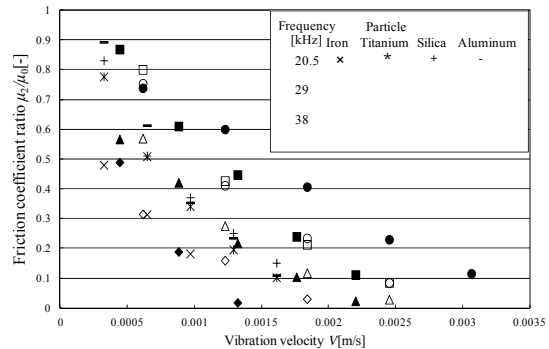


Fig.8 Friction reduction effect (Only surface vibration)

ることが分かる。これは同じ振幅でも周波数が高くなるほど音圧が大きくなるためと言える。音圧と粒子投影面積との積より粒子に作用する力 F_a を計算し、これと μ_1/μ_0 との関係を図.6 に示す。この図より、粒子に作用する力の大きさが音圧効果に支配的であり、周波数による影響が小さいことが言える。つまり、Fig.5 の結果は前述のとおり周波数が高くなることで音圧が大きくなったため、低減効果が大きくなったと言える。

Fig.7 に $f=20.5\text{kHz}$ における表面振動のみの場合の結果を示す。Fig.7 より、 $d_p=300\mu\text{m}$ では低減効果に材料ごとの差はないが、 d_p が大きくなるほど密度が高い粒子ほど低減効果が大きくなり、 $A_m=0.0125\mu\text{m}$ ですべての粒子の摩擦係数比が 0.1 程度になることがわか

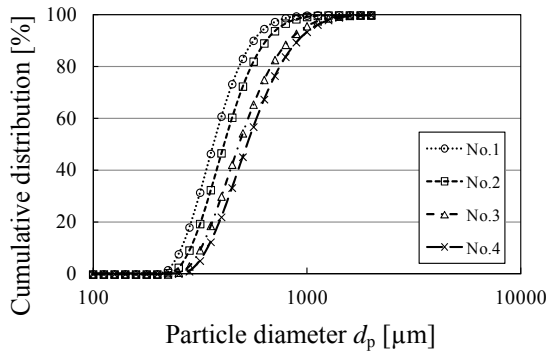


Fig.9 Result of classification using acoustic pressure

Table 3 Result of separation using surface vibration

	No.	Ti [%]	Fe [%]
Before separation	0	50.3	49.7
After separation	1	88.1	11.9
	2	19.3	80.7

る。また、音圧の影響と比較すると小さい A_m で μ_2/μ_0 が減少しており、明らかに摩擦低減に与える効果が大きく、超音波振動による摩擦低減効果は表面振動による影響が支配的であるといえる。また、Fig.8 に振動板の振動速度と摩擦低減効果との関係を示す。振動速度が速くなるほど低減効果が大きくなることわかる。しかし、同一材料でも周波数による摩擦低減効果への影響を一意的に表すことができない。つまり、表面振動による低減メカニズムとして、前述のように単純に慣性により表面の変動に追従できずに板から離れるだけではないことが言える。

(2) 分級および分離

分級後の各粒子群の粒子径分布を Fig.9 に示す。横軸を粒子径とし、縦軸を個数基準の累積通過割合を表す。Fig.9 より曲線の立ち上がり位置が異なり交わることがないため、分級できていると言える。

Table 3 に分離後の粒子群を元素分析し、質量基準で表した結果を示す。Table 3 より No.1 の粒子群のチタン粒子割合が約 90 %、No.2 の粒子群では鉄粒子が約 80 % 含まれており、分離に成功したと言える。

以上より、粒子物性による摩擦低減効果差を利用した分離および分級は可能であると言える。しかし、振動板面積が小さいため、大量の粉体を分離することは難しい。効率的に分離を行うには改善が必要とも言える。

(3) 立方体-壁面間の摩擦低減

Fig.10 および 11 に鉄における摩擦低減効果を示す。この図より立方体の大きさによる相違がないことがわかる。しかし、39kHz の 2 つの図を比較すると低減量が全く異なることがわかる。これにより振動板サイズにより立方体への摩擦低減効果が変化することがわかり、振動板サイズが大きいと摩擦低減効果が大きいと言える。

また、Fig.12 に示す単位体積あたりのアシスト力は材料密度が大きい立方体ほど数値

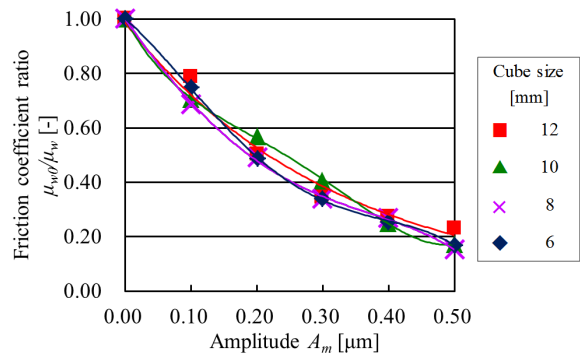


Fig.10 Friction reduction on cubic material ($f=39\text{kHz}$, Size:20×20, Iron)

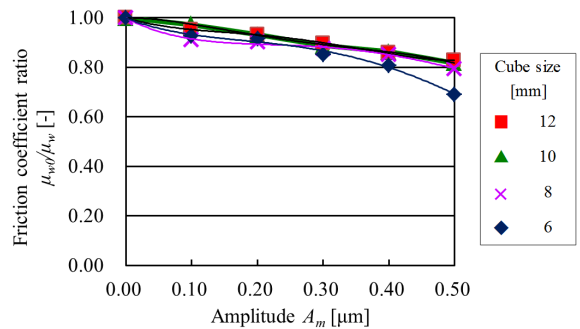


Fig.11 Friction reduction on cubic material ($f=39\text{kHz}$, Size:15×15, Iron)

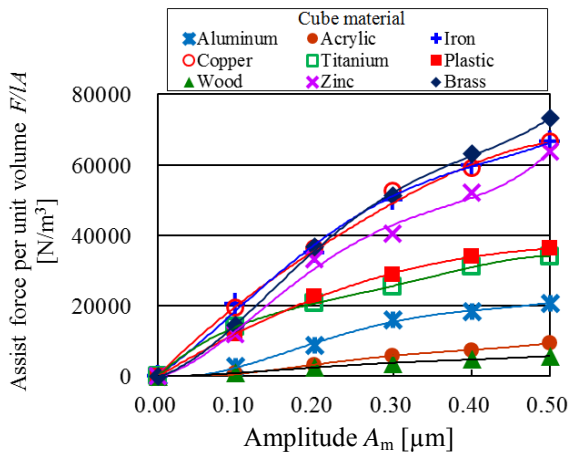


Fig.12 Assist force by ultrasonic vibration ($f=28\text{kHz}$, 15 × 15mm)

が大きいことが明らかになった。この結果より慣性効果の影響があることがわかった。ただし、 $f=39\text{kHz}$ において振動板サイズが大きいほうがアシスト力は大きかったため、慣性効果の影響だけではないことがわかった。故に、材料変形によるエネルギー透過の影響もあることが言える。また振動板サイズが大きいとエネルギー透過の影響を強く受けることがわかる。

(4) 材料の変形量

Fig.13 に立方体と振動板の振動振幅の関係を示す。Fig.13 より立方体の体積が小さくなるほど立方体の振幅が高くなることが分かる。立方体が振動板からエネルギーを受けると、立方体はこのエネルギーを放出する際に変形

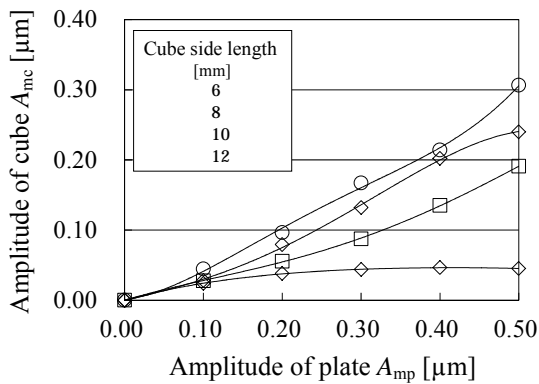


Fig.13 Friction reduction on cubic material (Plate size: 42×42mm, Titan)

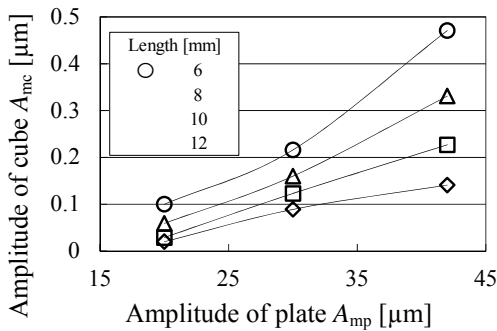


Fig.14 Cubic surface vibration amplitude (Aluminum)

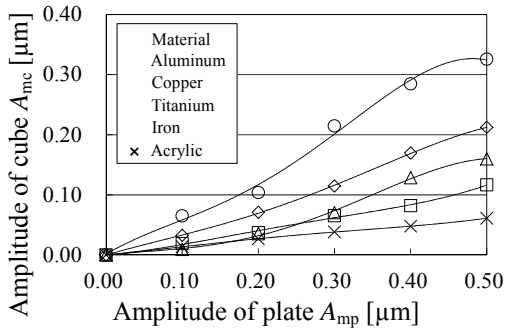


Fig.15 Cubic surface vibration amplitude (Aluminum)

する。ひずみエネルギーは体積により変わり、これにより低減効果も変化すると考えられる。

次に Fig.14 および 15 から、振動板サイズにより立方体の変形量も異なること、アルミの振幅が 1 番高く、2 番目に鉄の振幅が高いことがわかる。また、サイズ 10mm のみ用意している木、プラスチックの 2 種類の立方体は全体的に振幅が低い傾向がみられた。本実験で使用している振動板はジュラルミンであるため、アルミの立方体は振幅が最も大きくなり、木やプラスチック、アクリルは音響透過係数が低く、振動板から立方体へのエネルギー透過がかなり少なく、振幅に差が表れたと考えられる。以上の結果から、単に振動速度に追従できず、慣性により板から離れる低減効果だけでなく、音響エネルギー透過による影響も考慮する必要があることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

畠山豊, 稲葉啓太, 河府賢治, 三浦光: 超音波振動による粒子-壁面間の摩擦低減および混合粉体の分離, 粉体工学会誌, Vol.53, No.2, pp.74-84 (2016), 査読有

〔学会発表〕(計 3 件)

河府賢治: 超音波振動板上の粒子挙動差を利用した分離, 粉体工学会第 52 回技術討論会, 一般-23, pp.108-109 (2017)

河府賢治, 稲葉啓太, 三浦光: 超音波振動を利用した混合粒子群の分離および分級, 2016 年日本音響学会秋季研究発表会, 3-1-1 (2016)

Yutaka HATAKEYAMA, Keita INABA, Kenji KOFU, Hikaru MIURA, Separation and Classification of Mixed Powder Using Friction Reduction Effect by Ultrasonic, Proceedings of The 6th Asian Particle Technology symposium, PO02-51, pp.321 (2015)

6. 研究組織

(1)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