

港湾技研資料

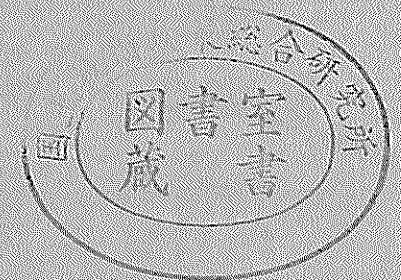
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 939 June 1999

超音波を利用した浮遊泥の凝集沈殿技術の開発

剣 持 知 浩
白 井 一 洋
吉 江 宗 生

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	3
2. 疑似定在波による凝集・搬送・保持の原理	3
2.1 疑似定在波について	3
2.2 凝集・搬送・保持の原理	4
2.3 凝集槽の構成の検討	4
3. 実験装置の構成と実験方法	5
3.1 実験装置	5
3.2 流速の変換について	6
3.3 凝集・搬送の様子	6
4. 浮遊泥凝集における特性の検討	7
4.1 流量に関する特性	7
4.2 初期濁度に関する特性	7
4.3 入力パワーに関する特性	7
4.4 懸濁粒子径に関する特性	8
4.5 入射角 θ_{zx} に関する特性	8
4.6 照射面積に関する特性	9
5. フロック搬送速度における特性の検討	9
5.1 入射角 θ_{yz} に関する特性	9
5.2 入力パワーに関する特性	9
6. まとめ	9
謝 辞	10
参考文献	10

Development of the Turbid Water Agglomeration and Seclimentation Technology Using Ultrasonic

Tomohiro KENMOCHI*

Kazuhiro SHIRAI*

Muneo YOSHIE**

Synopsis

Conventionally, we have removed small particles in muddy water mainly by using agglomerating medicine and filter. In place of this conventionally method, we carried out research by utilizing radiation pressure of ultrasonic. We produced experimental devices that occurs pseudo standing waves by ultrasonic. We succeeded to cause the small particles in muddy water to agglomerate and transport. Through the experiments, we researched characteristics of agglomerating and transporting the small particles . The parameter of experiments is the speed of a running fluid, early muddy degree, input power, flow diameter etc. We clarified the following by the experiment. There is a big transition between the inflow speed and processing capability when certain speed(threshold velocity)gets over. We can obtain the processed water of a regular turbidity unrelatedly to initial turbidity under threshold velocity. The threshold velocity does not rely on initial turbidity. Also, the threshold velocity gets faster and faster when we input power, diameter of particles and incident angle higher. The transporting speed of flocks which is made of agglomerated small particles become first, as the inputted power is high. We confirmed the following in an experiment. When ultrasonic (frequency 2MHz, input power 200W, diameter of small particles ϕ 7.9 μ m)was inputted, muddy water contains diameter 7.9 μ m particles became clean water at the speed of 4.2 ml/sec to 50ppm. In this examination, the device couldn't process so much quantity of muddy water. We need more research in order to raise the system efficiency furthermore. However, we have been able to show the possibility of a new muddy water processing system without medicine and a filter.

Key Words: ultrasonic, agglomerating, transporting, holding force, muddy water processing system

* Member of Instrumental Construction Control Laboratory, Machinery Division

** Senoa Research Engineer Machinery Division

超音波を利用した浮遊泥の凝集沈殿技術の開発

剣 持 知 浩*
白 井 一 洋*
吉 江 宗 生**

要 旨

従来、濁水中の懸濁粒子を取り除く手法としては主に凝集剤やフィルターを用いている。これに代わる手法として、超音波の放射圧が微小物体を動かすことを利用し、懸濁粒子を除去するための研究を行った。実験装置を製作して、超音波により疑似定在波を発生させ、水中の粒子を凝集し、さらに搬送させることができた。

この装置を用いて流量、初期濁度、入力パワー、粒径などをパラメータとして実験を行い、粒子の凝集特性、搬送特性を調べた。

実験の結果次のことが明らかになった。流入速度と処理能力との間には、ある速度（しきい速度）を境にして2種類の特性があり、しきい速度以下では初期濁度に関係なく一定の濁度の処理水が得られる。しきい速度の特性として、初期濁度には依存せず、入力パワー、粒径、入射角を大きくするとしきい速度も大きくなる。懸濁粒子が凝集してできるフロックの搬送速度に関しては入力パワーが大きいほど速く搬送される。実験的には2.0MHzの場合、200 Wの音響パワーを入力することで、7.9 μm の懸濁粒子を含む懸濁液を1秒間に4.2ml（15 l/h、0.36 m^3/d に相当）の速さで50ppmにまで処理できることを確認した。今回開発した手法では大量の濁水処理には及ばず、さらに効率を向上させるための研究が必要である。しかし薬剤、フィルターを用いず濁水を処理できることから、新しい濁水処理システムの可能性を示すことができた。

キーワード：超音波、凝集、搬送、保持力、濁水処理

1. まえがき

港湾の機能保持のため、堆積土砂の浚渫事業が行われている。これらの浚渫土砂は埋立処分される事が多く、この場合に生じる余水は、余水吐きから外洋に放流されるが、放流水の濁度が規制値以下の範囲に入るように濁水処理が行われている。濁水処理の方法としては、凝集剤等の薬剤を投入して浮遊粒子の沈降を促進し、沈殿地内に沈降させる方法や汚濁防止膜を展張する方法等がある。その他、凝集剤の添加量を低減できる技術として、ろ布やろ膜等のろ過剤を使用したろ過装置の開発が進められている。

本研究では、新たな濁水の処理方法として超音波の放射圧が微小物体を動かす現象を応用し¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾、濁水中の懸濁粒子を除去するための研究を行った。

実験装置を製作して、超音波の入力パワー、照射角な

どと凝集・搬送能力の関係を検証するため、超音波により疑似定在波を発生させ水中の粒子を凝集・保持し、さらに搬送させることを試みた。

2. 疑似定在波による凝集・搬送・保持の原理

2.1 疑似定在波について

平板を2枚平行に配置して、その外側から超音波を斜めに照射すると、片側から入射した音波が両板間で反射を繰り返す。板間には疑似定在波(Quasi standing wave)と呼ばれるモードができる。

図-1に疑似定在波の様子を模式的に示す。ここでは、波の等位相面を実線で表している。

2枚の平板に対して平面波を θ_1 の入射角をもって斜めに照射すると、板間には $2\theta_1$ 、ほどこれた方向へ進む2つの波を重ね合わせた疑似定在波と呼ばれる音場がで

* 機械技術部 計測施工研究室

** 機械技術部 主任研究官

きる。この音場には板と垂直な方向には定在波、板に沿う方向は進行波の成分を持っている特徴がある。

つまり、定在波と進行波とを同時に励振させることができ、定在波には懸濁粒子を凝集する力、進行波には懸濁粒子を動かす力が存在するため、凝集と搬送を同時に行うことができる。

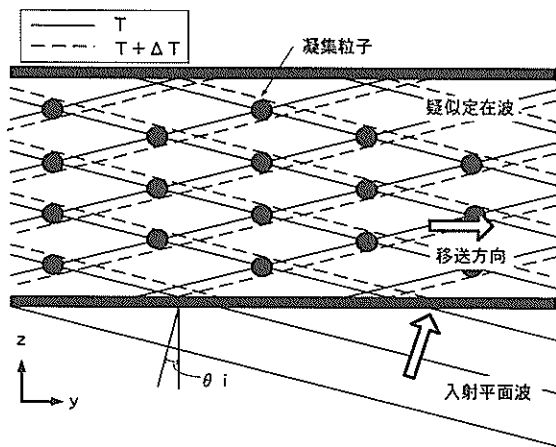


図-1 疑似定在波

本論文では、疑似定在波を生じさせる2枚の板から成る装置を凝集槽と呼ぶ。

2.2 凝集・搬送・保持の原理

図-2を用いて懸濁粒子にかかる凝集力 (Agglomerating force), 搬送力 (Transporting force), 保持力 (Holding force) を説明する。

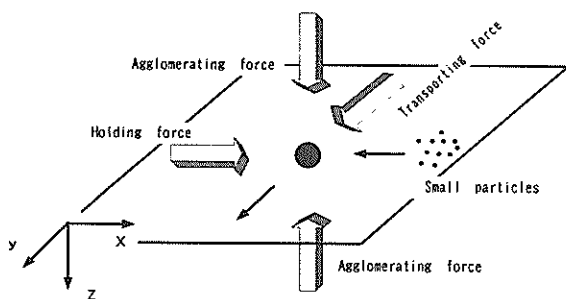


図-2 懸濁粒子に加わる力

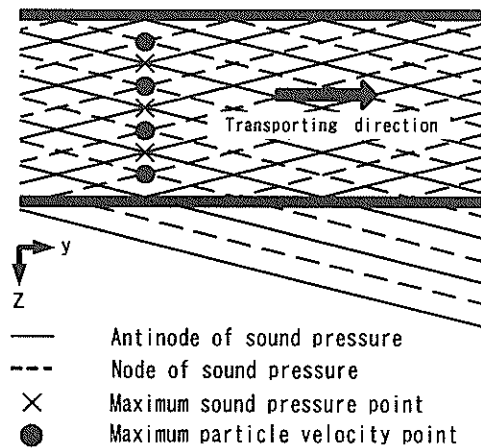
z 軸方向には定在波音場が生じており、これによる放射圧が流入してくる懸濁粒子を凝集させる (凝集力)。

y 軸方向に働く進行波による放射圧が凝集した懸濁粒子を搬送し (搬送力) 取り除く。

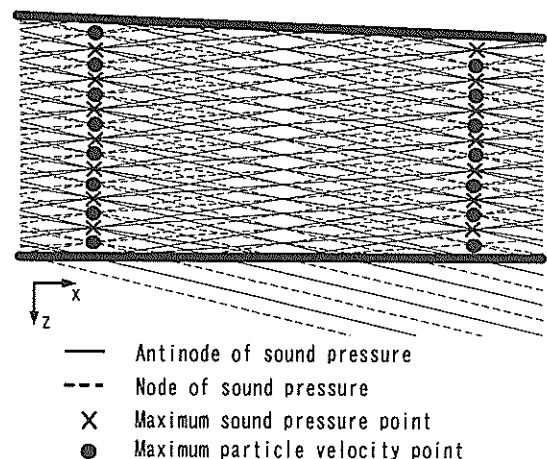
さらに2枚の板を平行から少しずつずらすことにより x 軸方向に図-3 (b)に見られるような音圧勾配が生じ、これによる放射圧で流水に乗って流れてくる懸濁粒子を止

める力 (保持力) が発生する。図-3は理想的な音圧分布をあらわしたものであり、図-3 (a)の見かけ上平行になる yz 面内に比べ、図-3 (b)においては板間隔が半波長の整数倍になる部分に強力な定在波が立つが、それ以外の部分では音波どうしが打ち消し合ってあまり強い音場は立たない。

懸濁粒子ほど小さい物体では搬送力は微弱で、そのままの大きさで搬送を行うことは非常に困難である。これに対して定在波による凝集力は比較的大きいため、搬送が可能な大きさになるまで粒子を凝集することができる。それに加えて保持力が生じると懸濁粒子を押しとどめ、さらに処理能力が向上する。



(a) yz 平面



(b) zx 平面

図-3 理想音圧分布

2.3 凝集槽の構成の検討

ここで用いる超音波の波長は1mm以下と大変短い上に、水中の音速が温度や静水圧によって変化するため、これらの外乱で理想的な定在波形成が難しくなってくる。そこで2枚の板を平行から少しずつずらして配置してみる。

図-4の上側に見るように、2枚の板を平行に配置する場合は、懸濁粒子は板状に凝集し、その面に沿う方向へと搬送される。一方で下側に見るように2枚の板を平行から少しずらして配置する場合は、懸濁粒子は糸状に凝集し、その線に沿う方向へと搬送される。平行な場合は板間全体を利用できる利点があるが、板間隔を正確に半波長の正数倍に設定しなければ効率良く搬送させることができない。一方、平行からずらした場合は必ず板間隔が半波長の整数倍になる部分が生ずることになり確実に粒子をトラップすることが可能となる。

この他にも平行からずらして配置することによる利点がある。平行な場合、下板を100%透過して入射した音は上板で反射した後、再び同じ角度で下板へ入射するため波数整合条件を満たし、透過して出ていってしまう。ところが、非平行な場合は上板で反射する際に角度が変化してから下板へ当たるため、下板を透過する音波は少なく、ほとんどは再反射する。このように、音波は板間に閉じこめられ、高音圧が生じる。また、搬送方向と直角な方向へ保持力が生じるので懸濁粒子を取り除きやす

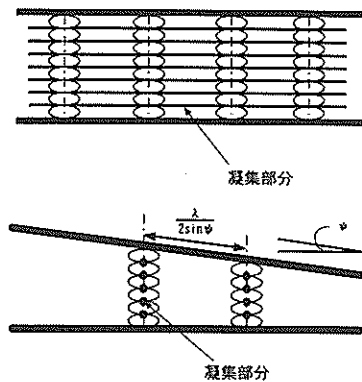


図-4 2枚の板の状態による違い

くなる。2枚の板が平行からずれる角度を ψ とする。

また板の厚さについて考慮することは、定在波を励振させるために下板を音波が透過しなければならないことである。板とはつまり層のことであり、層を音波が透過する場合、層の厚さと音波の波長との関係で透過の割合が変わってくる。つまり、層の厚さが音波の半波長の整数倍になっている場合、100%透過することができる。これを波数整合 (Coincidence principle) と呼んでいる。

3. 実験装置の構成と実験方法

3.1 実験装置

本実験で用いる装置の概要図を図-5に、実際に使用した装置の写真を写真-1に示す。

搬送に与える重力の影響を受けないように凝集槽は水平に固定し、振動子を傾けることにより入射角を持たせる。凝集槽は水面すれすれの位置に置く。

凝集槽は2枚のガラス板を振動を妨げないように柔らかい発泡スチロールを介してアラライトで接着して作られている。

振動子は2 MHzで洗浄機用に市販されているものである。懸濁粒子には砥粒を用いた。これは粒径がそろっており3種類の大きさのものを手に入れられたためである。

凝集槽内に懸濁液を流すために、内径6mmのビニールチューブを2本取り付け、ソースとドレインの高低差を利用して懸濁液を流し、連続処理する。流量は懸濁液源から単位量の懸濁液が流れ出る時間から計算によって求めた。

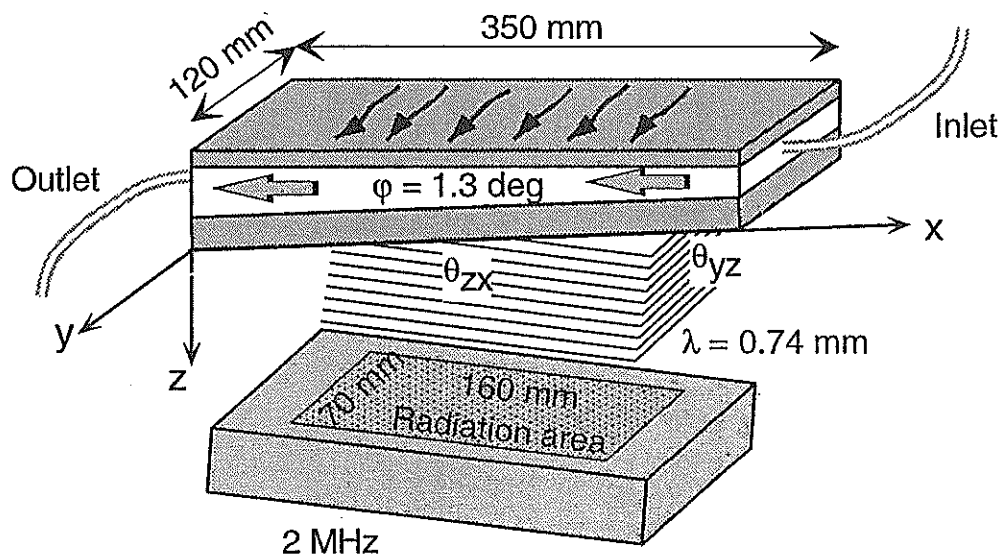


図-5 実験装置

- ・装置全体を縦置きにして重力の作用により逃げ幅となる箇所に粒子が近づかないようにする。
などの対策が考えられる。

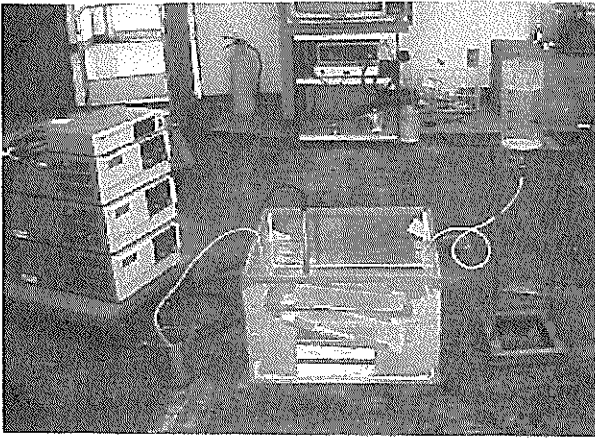


写真-1 実験装置

3.2 流速の変換について

実験では流量を単位時間あたりの体積 [ml/sec] として測定したが、懸濁粒子に働く抵抗力の理論値を得るためには単位時間あたりに進む距離 [cm/sec] を知る必要がある。凝集槽での観察の結果、流入口から勢い良く流れ込んだ懸濁液は、凝集槽内を通過する間に広がって、超音波が照射されている位置に達する所では幅約 40mm のゆっくりとした流れへと変わっていた。この位置の板間隔は約 12mm なので、例えば 1 [ml/sec] の流水は、

$$0.2 \text{ [cm/sec]} \approx 1000 \text{ [mm}^3\text{]} / (40 \text{ [mm]} \times 12 \text{ [mm]})$$

と変換可能である。

3.3 凝集搬送の様子

本装置内へ懸濁液が流入し、懸濁粒子が取り除かれていく様子を写真-2 に示す。第2章で述べた通り、板間隔が半波長の整数倍になる位置に凝集筋が現れている。懸濁液をこの筋に直行する方向へ流すと懸濁粒子は凝集筋で一旦停止し、ある程度の大きさのフロックになるまで成長してから、流れに垂直な方向、つまり筋の方向へと搬送されて取り除かれていく様子が観察された。

写真-2 では見づらいが、凝集槽の端（写真-2 では左端）には疑似定在波は十分に励振されておらず、一部の懸濁粒子はここから下流へと流れてしまった。この部分を逃げ幅と呼ぶことにする。

ここを通る粒子は凝集・搬送の作用を受けないので、逃げ幅が大きいと処理能力の低下につながる。

逃げ幅を通る粒子を減らす方法としては、

- ・逃げ幅が小さくなるよう θ_{yz} を小さくする。
- ・流入口を +y 側に近づけ、逃げ幅の部分から遠ざける。

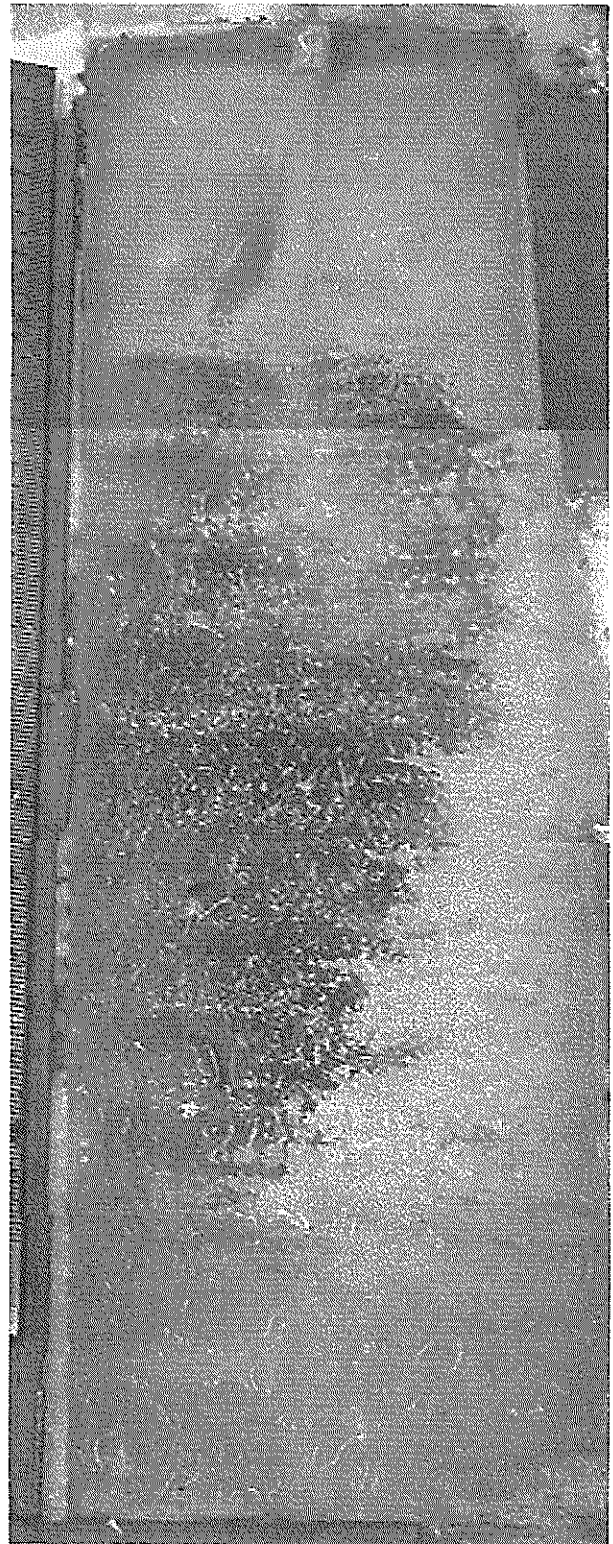


写真-2 凝集・搬送の様子

4. 浮遊泥凝集における特性の検討

4.1 流量に関する特性

超音波照射の有無で比較した処理水濁度の流量特性を図-6に示す。実験条件は初期濁度 750ppm, 入力パワー 150W, 懸濁粒子径 ϕ 7.9 μ m, 入射角 θ $zx7.3^\circ$, 入射角 θ $yz1.1^\circ$ である。

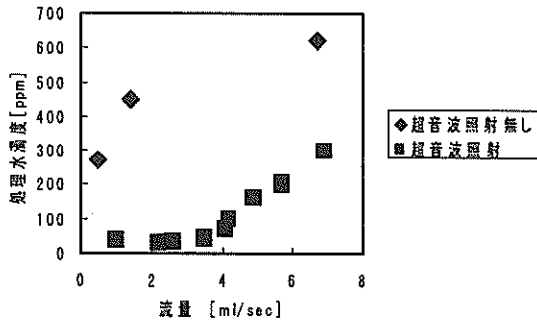


図-6 流量と処理水濁度の関係

図-6から明らかな通り、音波を照射しない場合でも、自然沈降の効果により処理水は浄化される。しかし、自然沈降による浄水効果は音波照射による効果と比べて十分に小さいと考え、以降考察上は無視することにする。

音波を照射した場合、流量によって2つの領域に分けることができる。図-6においては4 ml/secを境にして、流量が少ない場合は流量にあまり依存せずほぼ一定の処理水(約50ppm)を得られる。一方多い場合は流量の増加と共に処理水の濁度は急激に上昇する。この処理特性が急激に変化する流水速度(図-6における4 ml/sec)をしきい速度(Threshold velocity)と呼ぶことにする。

このしきい速度は放射圧と流体抵抗との釣り合いから説明することが可能である。つまり、濁度粒子が流水から受ける抵抗が放射圧よりも小さい場合には懸濁粒子は音波に捕らえられて搬送され、取り除かれる。逆に流量が大きく抵抗が放射圧よりも大きい場合、懸濁粒子は音波に捕らえられることなく凝集槽内を通過して排水される。(図-2参照)

理想的には、しきい速度以下の場合、処理水濁度は0になる。しかし実際には逃げ幅から漏れる粒子があるので少ない流量でも処理水濁度は0にはならず、多い流量であっても一部の粒子は凝集・搬送されるため、自然沈降が促されて浄水される。

4.2 初期濁度に関する特性

懸濁液の初期濁度を変化させて実験を行った。実験条件は入力パワー 150W, 懸濁粒子径 ϕ 7.9 μ m, 入射角 θ $zx7.3^\circ$, 入射角 θ $yz1.1^\circ$ である。

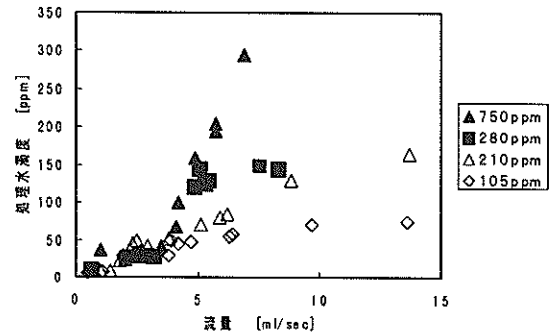


図-7 初期濁度と処理水濁度の関係

図-7は各初期濁度の懸濁液について、処理速度に対する処理液の濁度を示している。初期濁度約210ppm以下では緩やかな濁度変化であるが、210ppmを上回る濃度では4 ml/sec付近を境にして急激な濁度変化が認められる。

図-7を見るとしきい速度以下では、処理液の濁度は初期濁度にほとんど依存していない。このことからしきい速度以下で処理すれば十分な浄水効果が得られると判断できる。

そこで以後は200ppm以上の濁水を用いて実験を行い、しきい速度を処理能力と考えて検討を行う。

4.3 入力パワーに関する特性

入射音波のパワーを変化させ実験を行った。

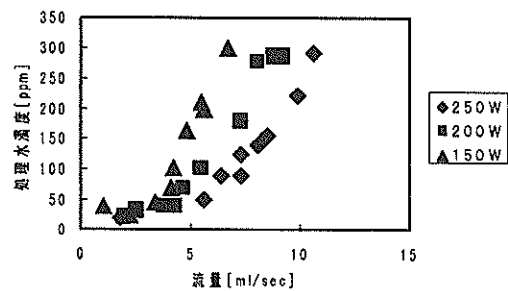


図-8 入力パワーと処理水濁度の関係

図-8は各入力パワーについて、処理速度に対する処理液の濁度を示している。パワーを上げるに従って濁度曲線は下方へと移動して処理能力が向上することが分かる。

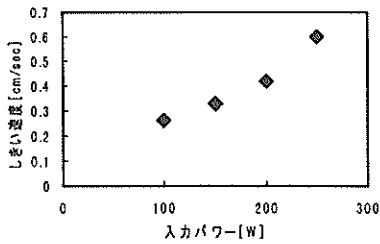


図-9 入力パワーとしきい速度の関係

図-9は図-8からしきい速度を読みとった結果を示したグラフである。やや線形的に増加する傾向を示している。従ってキャピテーションの影響、振動子の限界を考慮しなければ、大量処理のためには可能な限り大きなパワーを加えた方が良いことが分かる。

4.4懸濁粒子径に関する特性

800番 ($\phi 16.0 \mu\text{m}$), 1500番 ($\phi 7.9 \mu\text{m}$), 3000番 ($\phi 5.0 \mu\text{m}$) の3種類の砥粒を懸濁粒子として用い、実験を行った。実験条件は初期濁度 750ppm, 入力パワー 200W, 懸濁粒子径 $\phi 7.9 \mu\text{m}$, 入射角 $\theta_{zx} 7.3^\circ$, 入射角 $\theta_{yz} 1.1^\circ$ である。

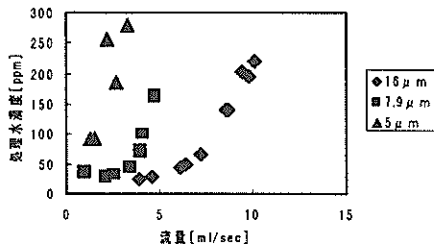


図-10 粒径と処理水濁度の関係

図-10から粒径が大きいほど処理能力が向上することが分かる。これは粒子径の3乗に比例して放射圧が大きくなり⁸⁾、水の抵抗は粒子の径の1.5乗に比例するため⁹⁾、粒径が大きいほど放射圧が卓越して取り除きやすくなるためと考えられる。

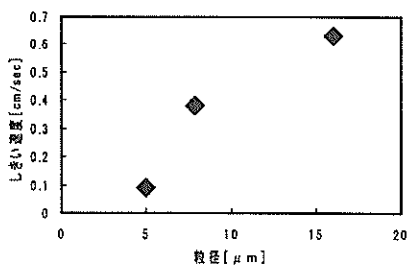


図-11 粒径としきい速度の関係

図-11は図-10からしきい速度を読みとった結果を示したグラフである。

実験値については $5 \mu\text{m}$ の場合が特に誤差が大きい。これは実験の際、遅い流速では速度を一定に保つことが難しく、実験中の平均速度を流速とする以外方法がなかったため、本来の流速よりも小さく見積もられたことが誤差の原因と言える。

小さい粒子では実験値に誤差が出やすくなるが、逆にあまり大きな粒子を用いると重力による影響が強くなって観察が難しくなるため、以降は1500番 ($\phi 7.9 \mu\text{m}$) の砥粒を用いることにする。

4.5入射角 θ_{zx} に関する特性

振動子の角度を変化させながら超音波の入射角 θ_{zx} に対する依存性の実験を行った。実験条件は初期濁度 750ppm, 入力パワー 200W, 懸濁粒子径 $\phi 7.9 \mu\text{m}$ である。

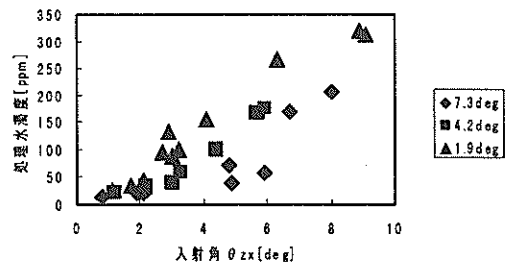


図-12 入射角と処理水濁度の関係

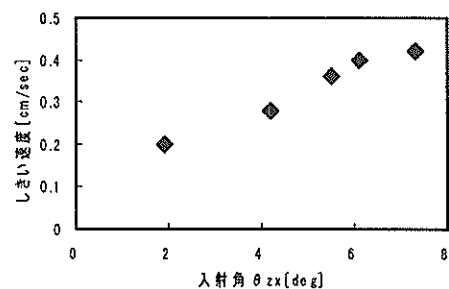


図-13 入射角としきい速度の関係

図-12, 13から入射角 θ_{zx} が大きいほど保持力が大きくなることわかる。

これは θ_{zx} が粒子の流れに逆らう方向を向いていることから容易に理解できる。

4.6 照射面積に関する特性

凝集槽と振動子との位置関係を 90° ずらすことで照射面積を変化させて実験を行った。凝集槽の幅いっぱいに超音波を照射することが前提なので、ここでの照射面積の変化とは流れの方向の長さの変化である。

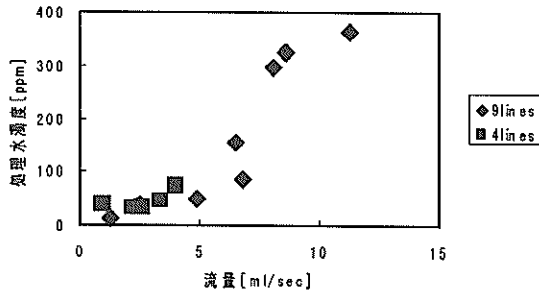


図-14 照射面積と処理水濁度の関係

振動子の照射面が長方形なため、振動子を 90° 回転して配置すると照射面積は変化して凝集槽に現れる凝集筋の本数が変わる。グラフの中の lines は筋の数を示している。

流入した懸濁液は凝集槽内を進むにつれて広がり、流量も少なくなっていく。図-14において照射面積が広い場合、狭い場合と比べてしきい速度が大きくなっているのは、懸濁液がより広範囲に広がって流量がさらに遅くなったためである。

しきい速度以上では照射面積の広い方が処理能力が高い。これは、照射面積が広いと懸濁粒子に凝集力が加わる時間が長くなって自然沈降が起きやすくなる効果の他に、凝集槽の端にまで搬送される時間に余裕ができて取り除かれやすくなるためである。

5. フロック搬送速度における特性の検討

本章ではフロックの搬送速度 (Transport velocity) について検討する。

5.1 入射角 θ_{yz} に関する特性

入射角 θ_{yz} を変化させ、懸濁粒子が凝集しフロックとなって搬送され取り除かれる速度を計測した。実験条件は初期濁度 500ppm、入力パワー 200W、懸濁粒子 $\phi 7.9 \mu m$ である。フロックは平均 $120 \mu m$ くらいの粒径となった。 θ_{yz} フロック毎に速度は若干異なるため、数個のサンプルの平均値をとった速度を図-15に示す。

θ_{yz} が大きいほど進行波の成分が大きくなって搬送

速度が増加すると予想されたが、実験の結果、搬送速度は極値を持つように変化している。

この現象の要因を説明するにはフロックの形成速度、フロックの粒径、保持力、粒子の径など多くの要素が含まれるため難しいが、搬送速度を大きくするためには、この実験から θ_{yz} はある程度小さい方が良いという結果が得られた。

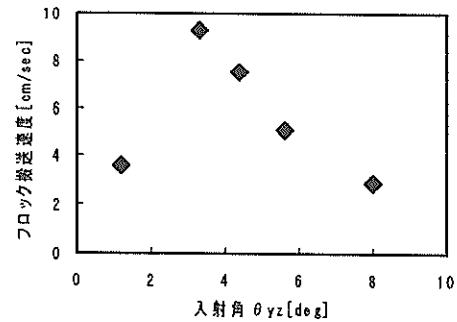


図-15 入射角 θ_{yz} とフロック搬送速度の関係

5.2 入力パワーに関する特性

各入力パワーにおける、フロックの平均搬送速度を調べた。懸濁粒子径は $\phi 5.0 \mu m$ でフロック粒径は平均 $90 \mu m$ となった。

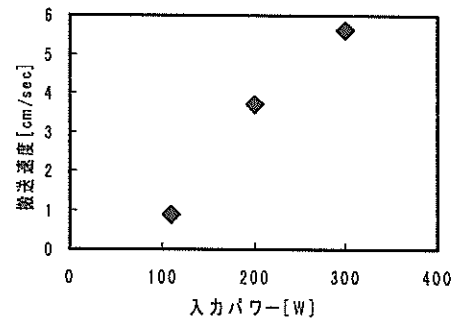


図-16 入力パワーとフロック搬送速度の関係

図-16から入力パワーを上げるにつれて搬送速度は増加することが分かる。

6. まとめ

本研究では超音波による疑似定在波を利用して濁水を処理することを目的とし、凝集槽を作成して実験によって各条件における処理状態の特性を調べ以下に示す結論を得た。

(1) 懸濁液の凝集・搬送を同時に行う手法として疑似定在波が活用できる。

(2) 2枚の板を平行から少しだけずらすと板間隔が半波長の整数倍になる位置が必ず現れ、安定した疑似定在波が得られる。

(3) 2枚の板を平行から少しだけずらすと音場を凝集槽内に閉じ込める働きがある。

(4) 2枚の板を平行から少しずらすことにより保持力が生じる。

(5) ある速度(しきい速度)を境にして、流速に応じて2種類の特性を持ち、このしきい速度は放射圧と流体抵抗との釣り合いにより決定される。

(6) 処理水の濁度はしきい速度以下では初期濁度に依存しない。

(7) しきい速度に関しては以下の特性がある。

- ・初期濁度に依存しない。
- ・実験の範囲内では入力パワーは大きい程良い。
- ・粒子径が大きいほどしきい速度が上昇して除去しやすくなる。

- ・入射角度は θ_{zx} が大きい程良い。

- ・照射面積には依存しない。

(9) しきい速度以上の場合、照射面積は広いほど効率がよい。

(10) 懸濁粒子が凝集してできるフロックの搬送速度に関して、以下の特性がある。

- ・入射角 θ_{yz} は極値を持ち、今回の実験では 3° 付近で最も搬送速度が大きくなる。

- ・入力パワーは大きいほど速く搬送される。

以上をふまえて濁水処理する際の諸条件の設定をする場合、考慮すべき点を述べる。この際、初期濁度を考慮する必要はない。この懸濁液を基準濁度にまで浄水するためには、まず粒径から周波数を決定してその波長から望ましいなす角、板厚をシミュレーションにより求める。入射角 θ_{zx} は保持力が大きくなるよう大きめに設定する。次に基準濁度にまで落とすための逃げ幅を考慮して凝集槽の形を設計する。最後に入力パワーを最大にしても処理できない場合は、並列化して処理量を稼ぐ。

実験的には2.0MHzの場合、200Wの音響パワーを入力することで、 $7.9\ \mu\text{m}$ の懸濁粒子を含む懸濁液を1秒間に4.2ml(15 l/h、 $0.36\ \text{m}^3/\text{d}$ に相当)の速さで50ppmにまで処理できることを確認した。今回開発した手法では大量の濁水処理には及ばず、さらに効率を向上させるための研究が必要である。しかし薬剤、フィルターを用いず濁水を処理できることから、新しい濁水処理システムの可能性を示すことができた。

謝辞

本研究をすすめるにあたって東京工業大学の谷敬亮氏にご協力いただき、多くの成果を得ることができた。この場をお借りして感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Thomas L.T. and Donald L.F., Separation devices based on forced coincidence response of fluid-filled pipes. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.91, 1992, pp3152-3156
- 2) F. Trampler and et al., Aggregation and separation of hybridoma cells by ultrasonic resonance fields, *Ultrasonics International 93 Conference Proceedings*, 1993, pp511-514
- 3) 安田賢二ほか：超音波放射圧を用いた微粒子連続濃縮，第15回超音波エレクトロニクスシンポジウム，1994年，pp221-222
- 4) 芦村秀人：超音波を用いた非接触物質搬送法に関する研究，Master's thesis, 東京工業大学，1996年
- 5) 竹内正男・山之内和彦：超音波マイクロマニピュレーションにおける波動ビームの形状効果について，第271回音響工学研究会資料，東北大学電気通信研究所，1994年
- 6) 小塚晃透ほか：超音波を用いた微粒子の選択的マニピュレーション，電気情報通信学会技術研究報告，1994年
- 7) 実吉純一ほか(編)：超音波便覧，日刊工業新聞社，1978年，pp16-21・pp62-74
- 8) 実吉純一ほか(編)：超音波便覧，日刊工業新聞社，1978年，pp.427-445，4.4.1音の放射圧，
- 9) 東京理科大学理工学事典編集委員会編：理工学事典，日刊工業新聞社，p60

港湾技研資料 No. 939

1999. 6

編集発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 あんざい

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan

Copyright © (1999) by P.H.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I.

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。