

超音波の作用とその工業的応用

鳥 飼 安 生

ここ数年来超音波エネルギーの工業的応用面が急速に拓かれてきている。超音波洗浄、超音波加工がその代表的なものであるが、他の方面への進展も著しく、新しい技術革新の時代にふさわしい新しい技術、新しい手段として超音波が登場してきた。本稿はかような超音波の動力的応用の基礎となるその諸作用と、種々の分野にわたる工業的応用の展望を試みた。

は し が き

超音波の応用には大別して次の二通りがある。すなわち、通信的応用と動力的応用である。通信的応用は超音波という波動を利用して諸測定を行なう応用であり、測深機・魚探機・探傷機・厚み計・流速計等々の工業計測、医学的診断への応用、物性研究への応用などいろいろあり、本誌でも二三の紹介・報告がなされている¹⁾。

これに対して動力的応用では、超音波という形であらわれた動力を用いて、その作用が物体におよぼす変化を利用したものであり、超音波洗浄、超音波加工など最近特に工業的利用面で注目されている分野である。

超音波とはいうまでもなくその周波数が可聴範囲を越えた音波の一種をいい、周波数が高いことしたがって波長の短いことがその特徴である。波長が短いことはどちらからかといえば通信的応用と結びつき、動力的応用にはむしろ周波数の高いことの方が関連が深い。

音の強さ I 、圧力振幅 Δp 、角周波数 ω 、変位振幅 ξ 、速度振幅 $\dot{\xi}$ 、媒体の音響インピーダンス ρc の間には、

$$I = \frac{1}{2} \frac{(\Delta p)^2}{\rho c} = \frac{1}{2} \rho c \dot{\xi}^2 = \frac{1}{2} \rho c (\omega \xi)^2 \quad (1)$$

の関係があり、高い周波数では小さい変位で大きな強度が得られ、また媒体粒子の加速度振幅は、

$$\ddot{\xi} = \omega^2 \xi = \omega \sqrt{\frac{2I}{\rho c}} \quad (2)$$

となるので、比較的弱い超音波でも大きな加速度が得られる。

超音波の定義は上述の通りももとは耳に聞こえないほど周波数の高い音の意であるが、その性質と応用の究明や展開と共にその包含する内容も変化して、最近人間の耳に対する感覚のいかに問題をしない扱い方をしたときの音波をすべて超音波という名の下に統一して論ずるようになってきている。この場合周波数や媒体のいかに問わないので、たとえば煙霧質の凝集や海中の測深などには可聴周波数を用いるが、いずれも超音波技術の領域に入るのである。アメリカの Hueter と Bolt はこのように定義された超音波工学を 'Acoustics' に対して 'Sonics' と呼んでいる²⁾。

超音波の作用

超音波の実用性に初めて緒口を与えたのは 1917 年フランスの Langevin 教授で、かれは第一次大戦中ドイツの潜水艦探知の目的で水晶のピエゾ効果を利用した水中送受波器を develop した³⁾。その後アメリカの Wood と Loomis は Langevin の振動子を用いて強力超音波を発生し、その呈する諸効果を詳しく観察報告している⁴⁾。かれらは 300 kc のピエゾ水晶板に変圧器油中で 5 万 volt の電圧を加えてその付近に強い超音波を発生させ、ガラス板に対する放射圧・発熱効果・加工作用・乳濁作用・噴霧作用・発泡作用・凝集作用・化学作用・生物に対する作用などを見出しているが、今日の強力超音波の工業的応用のほとんどすべてがその端緒を Wood-Loomis の実験に見出しているといっても過言ではない。

上にその一端を示した通り、超音波の作用は非常に多岐にわたっているが、もともとが音波である以上、その多くの作用の原因となっているものはその力学的効果である。以下初めに力学的効果のいくつかを述べ、次いでよって生じた効果の概略を述べる。

(1) 直線の効果⁵⁾

微小振幅の超音波では諸量間の関係が (1)、(2) 式に与えたような直線の関係にあると考えられる。有限振幅の場合にもこの関係が大体成立するが、その場合 (1)、(2) で与えられる音の強度や圧力変化、速度、加速度の呈する効果を直線の効果という。

すでに述べた通り、超音波の特徴は周波数、強度、粒子加速度などの大きいことで、加速度の場合たとえば水 ($\rho c = 1.5 \times 10^9$ cgs) の中で $f = 500$ kc に対して、 $I = 1$ watt/cm² のとき、 $\ddot{\xi} = 3.61 \times 10^7$ cm/sec² となって重力の加速度の 36,000 倍に達する。

超音波の集塵・加工・振動切削・疲労試験・溶接・治療の諸作用はこの効果より生まれたものである。

(2) 音の放射圧⁶⁾

媒体中に超音波が伝播するとき、音波の中の圧縮された部分は伸張の部分に比べてその範囲が狭くなっている結果、液体では側圧の平均値が音波のない部分の静圧よ

りも低くなり、音波の存在する流体部分が圧縮されて放射圧の現象を生ずる。

液体中の超音波音場中に板をつるしたときそれにおよぼす放射圧は、板に垂直入射の場合常に板の前面における音波のエネルギー密度に等しくなる。

この超音波の呈する放射圧を測定することにより音の強さを求めることができるが、かような測定器を放射圧計といい、その主なるものは吊線のねじれの弾性、または重力とつりあわせて放射圧を測定するものである^{9), 2)}。

液中から超音波が液の表面に投射されると、放射圧により液面が隆起してさらに噴出するに至る。この噴出の際、液の一部は細かい霧となるので、atomizer として吸入療法などに利用される。

また液中には多少なりとも音の吸収があるため、音の方向に沿って放射圧が減少し、これが原因で音場中に音波の進行方向に向かう直進流が発生する。このため液中に攪拌作用が起こり、脱気作用、洗浄作用に付加的な効果を与える。ただ前述の放射圧計による測定ではこの直進流が誤差のもととなるので、普通その前に薄い膜をはってこれを阻止するようになっている。

(3) キャビテーション⁹⁾

液体中の超音波の強さがある値（キャビテーション閾値）を越えるとキャビテーションが発生する。

キャビテーション (cavitation) はまた空洞現象といい、減圧によって液体中に空孔のできる現象で、その原因としては超音波に伴う負圧のほか、静的な負圧力、流体力学的に生じた負圧などがある。

キャビテーションは気体性キャビテーション (gaseous cavitation) と蒸気性キャビテーション (vaporous cavitation) の二種に区別される。前者は液体に気体が溶存するとき、気泡の振動の非直線性の結果、一方向きの拡散 (rectified diffusion) により気泡内へ気体が入って成長するものをいい、比較的小さい振幅で起こり現象は緩慢である。これに対して蒸気性キャビテーションは溶存気体がずっと少ない場合にも生じ、気泡の発生は爆発的で、したがってその内部は液の蒸気で満たされるかまたは真空に近い。これについては最近筆者らその他が高速映画などによる観察を行なっている⁷⁾。

キャビテーションにより生じた空洞が外部圧力の下で（音圧正の位相で）破壊するとき、大きな圧力・温度（数千気圧、10,000°C 程度）を生じ、これが多くの化学作用、生物学的作用などの原因となる。

(4) 衝撃的破壊作用⁹⁾

液体中に浮かぶ固体粒子が超音波により振動して他の固体面に衝突した際、破壊作用を生ずることがある。後述の超音波加工機はこの原理によるもので、水に砥粒を混合して用い、振動子の端面が水中の砥粒を被加工材にたたき込んで小さい割目を作ってゆくのである。これは

いわゆる直線的効果の代表的なもので、工具先端の運動量が砥粒を通して被加工材に与えられた結果によるものである。

超音波バリ取り装置も同じ作用によるものである。また、細菌や細胞の破壊効果もその一部はこの衝撃作用によるものと考えられる。

(5) 脱気作用⁹⁾

キャビテーションにより生成した気泡が成長し、放射圧や浮力により除去されるもので、ガラスや金属の溶融物からの気泡の除去に効果がある。

(6) 分散作用⁹⁾

水と油、水と水銀のように普通では混合しにくい液体間の境界面に超音波を当てると分散作用を呈し、乳濁化が生ずる。

水銀と水のときは水銀の微小粒の黒灰色の雲が境界面から水中へひろがり、油と水のときは分散された水あるいは油の白い雲が境界面に生ずる。

この乳濁化には限度があり、ある値以上には濃度は増さない（水とベンゼンで 50~60 gr/l、水と水銀の場合 6 gr/l）が、適当な乳化剤の添加により濃度はずっと増加する。

この作用には一般に界面擾乱とキャビテーションがあずかっているが、水と水銀の場合には水滴が容器の壁にはじかれて水銀内に入り、水銀の皮膜をかぶった水泡が生じさらに皮膜が破れて分散するのであることが知られている。

この分散作用は必ずしも液体同志とは限らないので、雲母・石鹼・石膏・硫黄・石墨などの固体でも水中でコロイド状に近い粒子に分散されることが認められている。金属の場合にも電気分解によって析出する金属に超音波を当てて微細なコロイドを得ることができる。

また、液体の気体への分散は、噴霧作用としてすでに述べた通りである。

超音波洗浄・超音波腐食・写真乳剤に対する超音波処理・電子顕微鏡のプレパラート作製・超音波ハンダごて・超音波噴霧器などこの作用は実用面に広く用いられている。

(7) 凝集作用⁹⁾

超音波による凝集の作用はよく知られた Kundt の実験ですでに知られているが、その機構には、力学的作用、流体力学的作用、放射圧の作用の三つが考えられる。

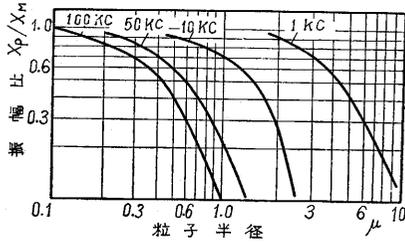
i) 力学的作用 媒体中に超音波が伝播すると、その中に懸濁している粒子が媒体の粘性によりある程度の induced vibration を生ずる。Brandt および Hiedemann の理論によると、懸濁粒子と媒体の振動振幅間には

$$X_p/X_M = \left[1 + \left(\frac{\pi \rho_f d^3}{9\mu} \right)^2 \right]^{-1/2} = \cos \phi \quad (3)$$

の関係がある。ここに X_p は粒子の振幅、 X_M は媒体の

振幅, ρ は粒子の密度, f は周波数, d は粒子の直径, μ は媒体の粘性係数, ϕ は粒子と媒体の振動の位相差である.

(3) より X_p/X_M と粒子半径との関係を空气中に懸濁する水滴の場合について周波数を parameter にして図に画くと第 1 図となり, 微小粒子, 低周波では粒子振幅は媒体の振幅と同じであるが, 逆の場合には粒子はほ



第 1 図 粒子と媒体の振動振幅比と粒子の大きさの関係 (空气中の水滴の場合)⁹⁾

んど運動を行なわない. 媒体と周波数が与えられている音場内の粒子は, その粒径の大きいものは小さい振幅で小さいものは大きい振幅で振動し, これらの大小粒子同志が互いに衝突して凝集を起こすにいたる.

ii) 流体力学的作用 二つの隣り合った粒子間の媒体が振動によって粒子と相対速度を生じ, 2 粒子間を流れるときは狭いので流速が増し, Bernoulli の定理により圧力が下がって粒子は互いに引き合う. この力は粒子間の距離の 4 乗に逆比例するので近距離の時のみ効果がある.

iii) 音波の放射圧 音波の伝播している媒体中に浮かんでいる粒子は先にのべた振動的な力のほかに放射圧による駆動力を受ける. Kundt の実験のような定圧波の中では, 媒体と粒子の密度の比 ρ_0/ρ_1 の大小によって力の方向がことなり, 大体 $\rho_0/\rho_1 > 1$ ならば粒子は節に集まり, $\rho_0/\rho_1 < 1$ ならば腹に集まる.

この凝集作用は気体中の粒子ならびに液体中の粒子のいずれにも認められるが, 特に液体中では同時にキャビテーションによる分散作用が起こり, 現象はちょうどこれと相反する. 先に分散作用にはある限度があることを述べたが, Sollner と Bondy¹⁰⁾ によるとこれは同時に起こる凝集作用との balance によるものである. 液体に外圧を加えるか, または音の強さを低 level にしてキャビテーションが起こらないようにすると, 分散は起こらず凝集作用だけが認められる.

(8) 加熱作用⁵⁾

媒体中を超音波が伝播するとき多かれ少なかれ吸収が伴い, 音波のエネルギーの一部は熱エネルギーに変わる. この加熱作用は吸収の大きいほど大きくて, これが障害となることもあるが, また超音波の医療作用では骨などにおける吸収による加熱効果が効いているといわれ, 超音波手術では加熱による破壊効果が主役をかって

いる.

また固体との境界面では摩擦あるいはヒステリシス損による加熱効果がある. 固体中の吸収あるいは境界面発熱は音場測定器として利用されている.

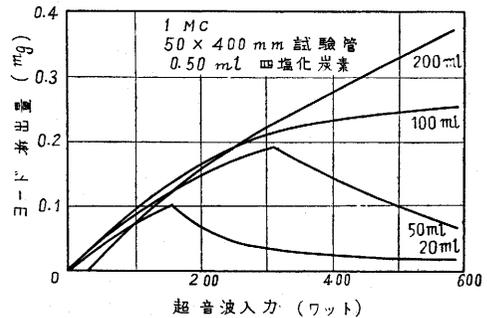
このほか, 多孔質の物体中を音波による媒体 (主に気体) の流れが通過するときの粘性流による発熱, 液体中のキャビテーション気泡の圧潰による局部的発熱がある. キャビテーション気泡内の加熱効果は超音波の化学作用と密接な関係があるといわれている.

(9) 化学作用^{5), 6)}

放射圧, 直進流による攪拌作用も化学反応促進に影響があるが, 超音波の化学作用に主として寄与しているのはキャビテーション効果である.

超音波の化学作用のうちよく研究されているのは水溶液中の酸化・還元反応とこれと関連した音響ルミネッセンスであり, これらがキャビテーション発生と密接に結びついていることは確かめられているが, キャビテーションのどの面が化学作用を起こすのに基本的に重要であるのか確かなことは分かっていない.

キャビテーションによる気泡がつぶれるとき気泡内の温度が数千~1 万°C になることが化学反応および音響ルミネッセンスの原因とする考え方と, 気泡内の電荷分布のゆらぎに基づく強い電場によって気泡内に放電を生ずることを化学作用の原因とする考え方がある.



第 2 図 ヨードカリ溶液よりの析出ヨードの量と超音波入力との関係 (曲線に付記した量は溶液の体積)¹¹⁾

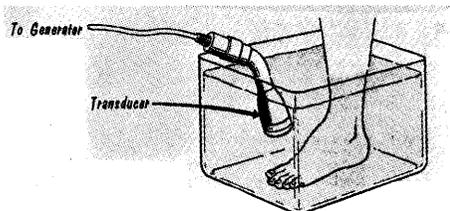
超音波の化学作用は音の強さがキャビテーション閾値を越えると共にはじまり, 強度の増加と共に増すが, ある強度のときに極大となり, それより強度を増すとかえって減少する. 第 2 図は超音波入力とヨードカリ溶液の酸化によるヨード析出量との関係を示すもので, 単位体積当たりの入力がある一定値に達すると析出量が極大になることを示している¹¹⁾.

過飽和溶液や過冷却溶液からの結晶の析出の促進作用や高分子の解重合作用は主として力学的効果によるもので, 特に後者はキャビテーション気泡の圧潰時の高圧によるといわれている.

(10) 生物学的作用⁹⁾

強い超音波の生体に対する影響は複雑で容易に理解し難いが、超音波に伴う大きな加速度、激しい圧力の変化あるいは二次効果であるキャビテーションや加熱作用がその主な原因であるといえる。

人間が空気中で 16~30 kc の強い超音波にさらされると、異常な疲労・嘔気・めまいなどを訴えるにいたるが、超音波はまた適当な使い方で医療にも用いられる。第3図¹²⁾のように音源から湯を介して、または直接に体内に 1~3 W/cm² の中程度の強さの超音波を作用させ



第3図 超音波照射による医療¹²⁾

ると、関節炎・捻挫・ぜんそくなどに効果があるといわれているが、これは加熱作用、マイクロマッサージといわれる機械的作用、さらに新陳代謝の促進作用などの効果による。音強度が数百 W/cm² 以上になると細胞や組織を破壊、死滅させる。超音波脳手術などはこの例である。

細菌¹³⁾、細胞あるいは血球の破壊作用はキャビテーションによるものが主原因で、酸化作用がこれに付加的に働く。

船舶その他の海中施設の海中生物付着による汚損防止のため、超音波の生物に対する作用が最近利用されている¹⁴⁾。

超音波の作用の工業的応用

超音波の作用の工業的応用は最近各方面で著しく伸びており、とくに洗浄・加工では多くの工場に設備され生産列の一翼としてその威力を発揮している¹⁵⁾。以下工業的応用の若干について述べるが、これは必ずしも全貌を伝えるものではない。現在工業の各方面で超音波が有効

第1表 穴あけ加工例¹⁷⁾

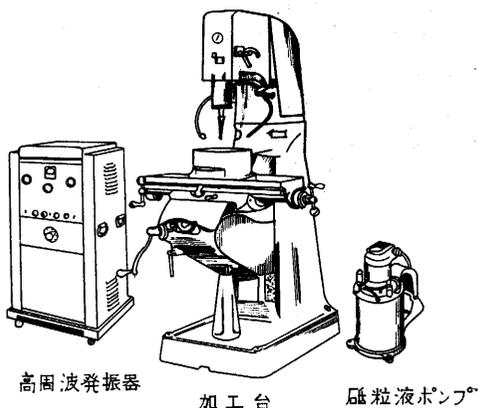
被加工物		工 具		貫通時間 分	砥 粒	送り力 g/mm ²	
材 料	厚 さ (mm)	材 料	直 径 (mm)				
ガラス	3.0	軟 鋼	3.0	1	カーボラダム	400	200
ステアタイト	3.0	〃	3.0	3	〃	240	500
ひすい	3.0	焼入鋼	3.0	1.5	〃	320	60
人工ルビー	0.5	ピアノ線	0.5	0.3	ボロンカーバイト	600	1,000
ダイヤモンド	1.0	〃	0.8	150	ダイヤモンド粉	320	20
ゲルマニウム	3.0	〃	3.0	2	ボロンカーバイト	600	60
タングステンカーバイト	1.5	〃	1.0	4	〃	600	1,000

周波数 24.6 kc または 28 kc, 砥粒は水と混合 (ダイヤモンドは油)

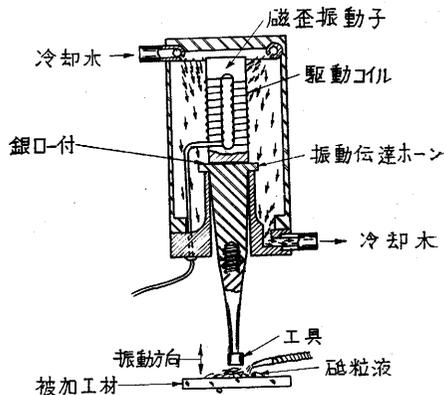
に用いられているらしいにもかかわらず必ずしも成果が発表されていないため、完全な情報を得ることは困難である。

(1) 超音波加工⁹⁾

ガラス・宝石・ゲルマニウム・超硬質合金のように硬くて脆い材料の加工法として新しく発達したもので、第4図のような装置を用いる¹⁶⁾。磁歪振動子の端面に先端に工具を取りつけた金属ホーンを接着し、18~25 kc の縦振動を行なわせ、適当な静的送り力をかけながら工具



(a) 装置外観 (Cavitron-Sheffield)



(b) 振動部 (Raytheon)

第4図 超音波加工装置¹⁶⁾

を被加工物に押しつける。

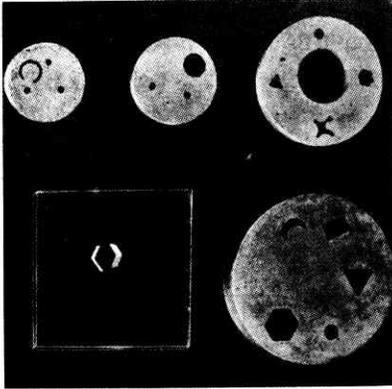
砥粒を適当な加工液に混合したものを工具と被加工物の間に供給すると、工具の形通りの打抜き加工が行なわれる。

この加工の機構についてはまだ決定的な説はないが、砥粒が工具の振動によって得られた運動量による被加工物の破壊とも、工具と砥粒一体となつての衝撃効果ともいわれ

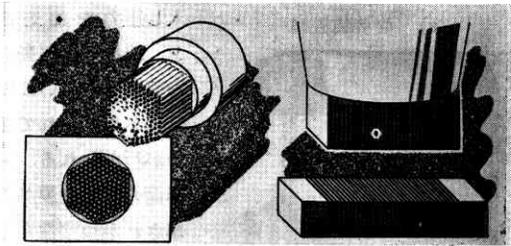
る。

工具は軟鋼・バネ鋼・ピアノ線などの弾性材料を用いるので、衝撃によって砥粒がくいこむことはあっても欠け落ちることはない。

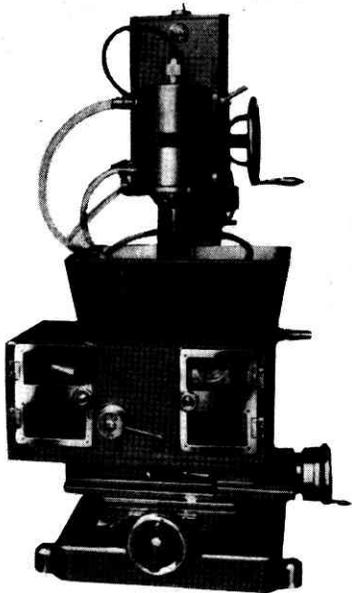
第 1 表に穴あけ加工例を示す¹⁷⁾。



第 5 図 ガラスとセラミックの超音波加工例 (Courtesy of Mullard Ltd, London)⁸⁾



第 6 図 超音波加工工具の 2 例¹²⁾

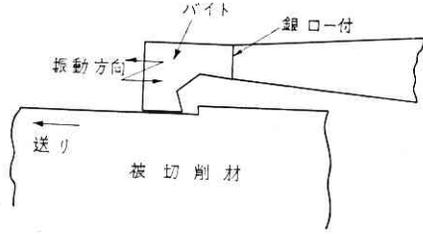


第 7 図 超音波加工機例 (卓上型, 島田理化)

第 5 図は加工例で任意の形に穴あけのできることを示すが⁸⁾, また第 6 図のような工具を用いて多数同時に加工を行なうこともできる¹²⁾. 第 7 図は市販の加工機の一例である. この型の加工機はまた歯科用ドリルとしても用いられる.

次に普通の金属材料の切削加工時に工具を切削方向に数ミク

ロン程度の振動振幅で 20 kc 程度の振動をさせながら切削を行なうと (第 8 図), 切削面の面仕上精度が向上



第 8 図 超音波切削加工

し, かつ切削力または切削抵抗が著しく低下するなどの効果があることが報告されている¹⁸⁾. この方法はまたねじ錐加工に適用しても好結果を得ている¹⁹⁾.

(2) 超音波洗浄⁹⁾

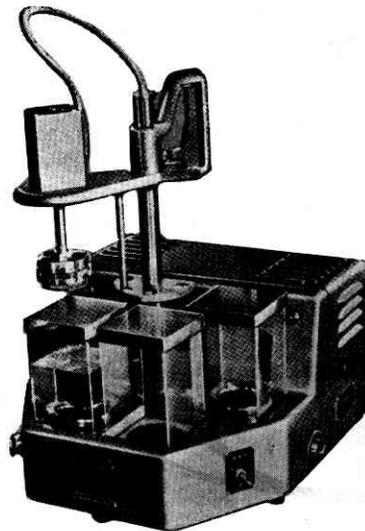
超音波工業の中でも最も広範囲に数多く用いられているのが超音波洗浄である.

超音波による洗浄の原理については条件が複雑で解明は困難であるが, だいたい次の三つが考えられる.

一つは洗浄液に与えられる高い速度と加速度ならびに直進流で固体表面の汚物剝離の機械的作用と常に新鮮な洗浄液を供給する作用を与える. 次にキャビテーションによる大きな圧力変動はさらに強い機械的な力をおよぼして狭い隙間や表面固着の汚物を除去し, 最後に超音波の分散作用により油性の粘着物を乳化し去るのである.

洗浄に用いられる周波数は 400 kc 付近の高いものと 20 kc 付近の低い周波数が用いられる. 高い周波数では超音波エネルギーの集中度が高いが指向性が大きいため精密小型部品の洗浄に適し, 低い周波数ではキャビテーション発生が良く音場は一様に近いので大型部品の洗浄に適している.

出力は 50 W から数 kW におよぶものが市販されている.

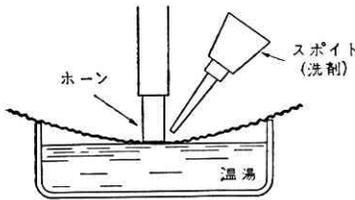


第 9 図 超音波洗浄機例 (時計・精密部品用, 海上電機)

洗浄液は対象によっていろいろあるが, 金属部品の脱脂洗浄にはトリクロルエチレンなどの有機溶剤あるいはアルカリ溶液が用いられる.

第 9 図は時計などの小型部品の洗浄に適した洗浄機の一例で, 400kc のチタン酸バリウム磁器を用い出力 50 W である.

織物などの繊維類の洗浄はその柔軟性のためにかえって不向きであるが、第 10 図のような方法でその一部分



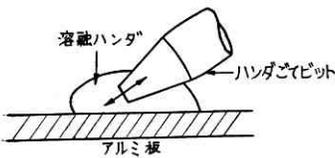
第 10 図 超音波によるシミぬき

のシミ抜きには有効に用いられる。金属の熱処理後のスケール除去に従来酸洗いやショットブラストなどが用いられたが、これらと超音波を併用するとさらに効果を増す。

超音波はまた機械加工の途中で生じたいわゆるバリを除去するのにも用いられ、特に小物部品に有効で、研磨砥粒を水または油に混入して使用する。

(3) 超音波によるハンダ付け、メッキ^{5), 8)}

アルミニウムのハンダ付けはその表面の強固な酸化皮



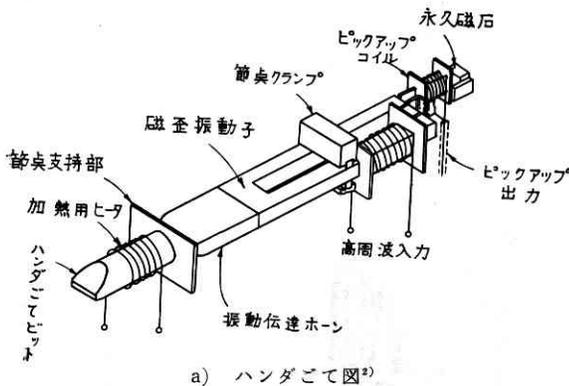
第 11 図 超音波によるハンダ付け⁵⁾

膜のため普通では困難であるが、第 11 図のように 20 kc 程度の超音波振動を溶融ハンダ中に伝えて皮膜を除去することにより特に溶剤を用いることなくハンダ付けを行なうことが

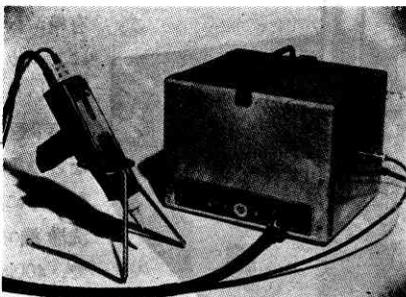
のシミ抜きには有効に用いられる。

金属の熱処理後のスケール除去に従来酸洗いやショットブラストなどが用い

膜のため普通では困難であるが、第 11 図のように 20 kc 程度の超音波振動を溶融ハンダ中に伝えて皮膜を除去することにより



a) ハンダごて図²⁾



b) ハンダごて装置例 (Courtesy of Mullard Ltd, London)⁸⁾

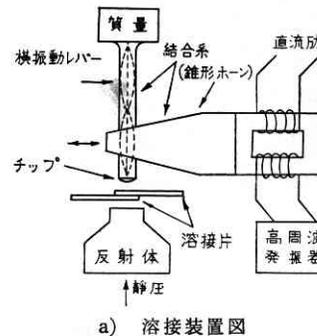
第 12 図 超音波ハンダごて

できる。第 12 図 (a), (b) はこの原理によるハンダごての図と市販されているものの一例である。

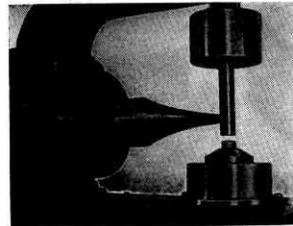
また下方から磁歪振動子で駆動されるつば型のものの中にハンダをとかしこみ、これに線をつけることによってあらかじめハンダメッキを行なうことができる。

(4) 超音波溶接²⁰⁾

アメリカの J. B. Jones²¹⁾ が偶然に見出した新しい溶接法で、冷間圧接の一変形であるが、荷重や変形が少なくすみ、また抵抗溶接の困難な材質でも溶接を行なうことができる。



a) 溶接装置図



b) 溶接機例 (島田理化)

第 13 図 超音波溶接装置

装置の概略は第 13 図に示すようなもので²⁰⁾、磁歪振動子の振幅を金属ホーンによって適当な値にまで増幅して上部チップに伝え、下部の台と上部のチップとの間に溶接片を挿入し圧力を加えると、溶接点に振動的な剪断力あるいは圧縮力が与えられて接合が行なわれる。境界面の酸化皮膜が破壊されかつ塑性変形が行なわれるのであるが、この点の温度が融点にまで達しな

くても溶接することが認められている。

第 2 表はこの方法で溶接し得る金属の組み合わせを示す²²⁾。

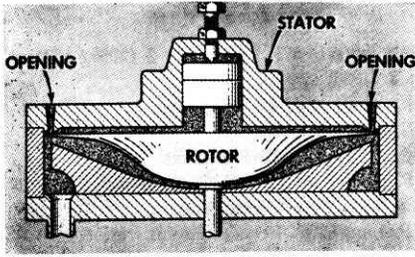
第 2 表 超音波溶接可能金属の組み合わせ

	Al	Be	Cu	Fe	Mg	Mo	Ni	Ta	Ti	W	Zr
アルミニウム	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ベリリウム	●								●		
銅			●	●	●	●	●	●	●	●	●
鉄			●	●	●	●	●	●	●	●	●
マグネシウム	●										
モリブデン	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ニッケル			●						●		
タンタル				●							
チタン				●							
タングステン				●							
ジルコニウム											●

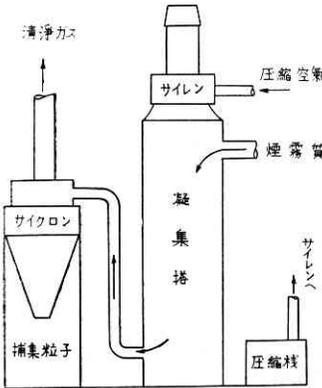
(5) 超音波集塵^{5), 8)}、微粉炭の回収²³⁾

超音波集塵法は空気中の煙霧質を音波の凝集作用によ

り凝集除去するもので、 10μ 以下の小さい粒子を対象にしている。用いる周波数は $4\sim 7\text{kc}$ であるが、百数十



第 14 図 超音波サイレン図¹²⁾



第 15 図 超音波集塵装置⁸⁾

ささせるサイレン、音場を作り粒子の凝集を促進させる凝集塔および凝集粒を捕集するサイクロンとからなっている。第 16 図は具体例である。



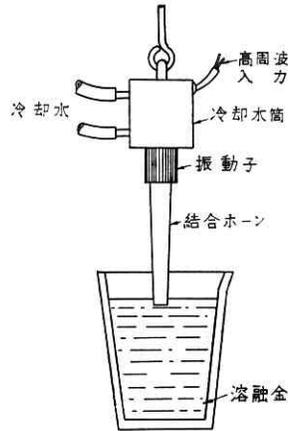
第 16 図 集塵装置具体例 (Courtesy of Ultrasonic Corpn, Cambridge, Mass, U. S. A)⁸⁾

超音波の液体中での凝集作用の応用として微粉炭の回収がある²³⁾。炭鉱からの選炭廃水はその汚濁水のため農

業、漁業その他に大きな障害を与えていると共に、その含有微粉炭量が全国出炭のほぼ 10% に当たるといふ膨大な量に達するので、その回収が重要な課題となっているが、 $400\sim 600\text{kc}$ 程度の超音波による微粉炭の凝集回収が最近工業的規模で行なわれている。

(6) 超音波 casting^{8), 25)}

金属の溶湯あるいはその凝固時に機械的な振動を与えて鑄塊の性質を改善しようという試みは古くからあり、超音波照射の方法も Boyle と Taylor²⁶⁾ 以来多くの人の研究によって実験室的にはその効果が認められているが、工業的にはまだ実用の域に達しているとはいえず、これからの問題である。

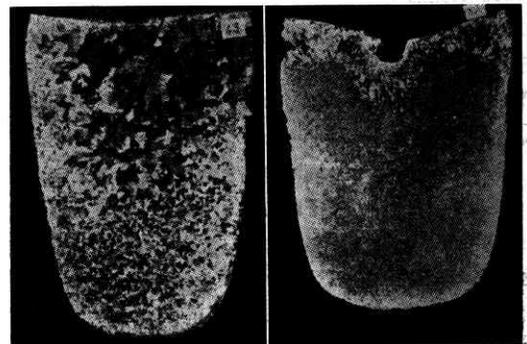


第 17 図 超音波 casting 装置⁸⁾

う。溶湯中での振動の減衰から一度に多量の溶湯の処理はできないが、その場合には連続 casting 方式に適用することにより、効果的に超音波振動を利用できる。

超音波 casting の主なる効果は次の三点にある。

i) 結晶の微細化 超音波振動による結晶の微細化と、それに基づく弾性的性質の改善については、多くの特許もあり、多くの金属について認められている。この微細化の機構については、初めにできた針状結晶が超音



(a) 照射なし (b) 超音波照射
第 18 図 超音波照射による結晶の微細化例 (Al-4% Cu), (Courtesy of the Physical Society, London)²⁷⁾

波によって機械的に壊されるとする説と、超音波を原因として安定な核が多数形成されて結晶が細かくなるという説とがある。

第 18 図はアルミニウム鑄塊についての結晶微細化の例である²⁷⁾。

ii) 脱ガス作用 キャビテーションによる水その他の液体からの脱気作用については先に述べたが、金属溶湯についても、溶け込んだガスをできるだけ放出して、ピンホールのない鑄塊を得ることは重要な問題であり、超音波の利用が有効と考えられる。脱ガスの方法としては他に真空鑄造法があるが、超音波法との併用により効果は倍増するであろう。熔融ガラスの脱ガスにもよい。

iii) 分散作用 金属中に他の金属あるいは非金属材料を一様に分散させて、良性能材料の得られることがあるが、超音波の分散作用をこの場合にも応用することができる。

アルミニウムへの鉛の分散、鉄鋼中への duralumin の分散、ベアリングに用いる黄銅中へのグラファイトの分散などが報告されている。

(7) その他の応用

上述のほか工業的応用として、超音波疲労試験、乳化処理、繊維の染色、酒・香料の熟成、ビールの空気ぬき、ホップからの抽出、食肉の良質化、医療装置等々各方面にわたって各種の応用がなされているが、紙面の都合上省略した。

あ と が き

本稿では、超音波の動力的応用の面からみた超音波の作用と、その工業的応用についての概略を述べた。

超音波はもともと音波の一種で力学的波動にすぎないのであるから、その作用も単純なものと考えられ易いが、実際にはキャビテーションという極めて不規則な現象を伴うため、問題を複雑にし、また応用面をはなやかに彩っている。

超音波エネルギーの工業的応用の拓けてきたのは、Wood-Loomis の実験以来 30 年を経たここ 4~5 年来のことである。これには戦後急激に発展した電子工業がその背景となっていることはもちろんであるが、最近のはなばなしい技術革新の波が新しい技術としての超音波の登場を促したものであろう。

今後の問題は新しい面の開拓と共に、超音波エネルギーの単価をできるだけ下げることである。現在の真空管発振器方式には限度があるので、大出力のものとして発電機方式の開拓が望ましい。Jet generator と称する流体力学的音源も有力と考えられる。

本技術のようないわゆる境界領域に属するものでは、単なる一方的な知識では進展を望めないで、関係各方面の方々のご教示、ご協力をお願いしたい。

ともあれ今日のような超音波技術隆盛の気運を見るこ

とは、当該研究にたずさわるものとして張りもあり楽しみなことでもある。

(1961 年 7 月 7 日受理)

参 考 文 献

- 1) 鳥飼他: 生産研究 1 (1949) 90; 2 (1950) 367; 4 (1952) 85; 8 (1956) 219.
高木, 丹羽: 同上 4 (1952) 185.
丹羽, 奥野: 同上 8 (1956) 391.
石橋, 市川: 同上 10 (1958) 397.
- 2) T. F. Hueter and R. H. Bolt, *Sonics* (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1955).
- 3) M. P. Langevin: France Patent No. 502913 (1918), 505703 (1918), 575435 (1923), 576281 (1924), 622035 (1926).
- 4) R. W. Wood and A. L. Loomis: *Phil. Mag.* (7) 4 (1927) 417.
- 5) 実吉, 菊池, 能本監修, 超音波技術便覧 (日刊工業新聞社刊行, 1960).
- 6) L. Bergmann, *Ultraschall* (Hirzel Verlag, Stuttgart, 1954) S. 212.
- 7) G. W. Willard: *J. Acoust. Soc. Amer.* 25 (1953) 667.
菊池, 清水, 奥山: 電気四学会連合大会, 昭34・4, No. 727.
鳥飼, 藤森, 李: 生産研究 11 (1959) 350, 12 (1960) 228.
- 8) A. E. Crawford, *Ultrasonic Engineering* (Butterworths Scient. Publ., London, 1955).
- 9) K. Sollner: *Chem. Rev.* 34 (1944) 371.
- 10) K. Sollner and C. Bondy: *Trans. Faraday Soc.* 32 (1939) 616.
- 11) A. Weissler, H. W. Cooper and S. Snyder: *J. Amer. Chem. Soc.* 72 (1950) 1769.
- 12) C. Glickstein, *Basic Ultrasonics* (John F. Rider Publ., Inc., New York, 1960).
- 13) 実吉, 森, 井出: 通信学会超音波専門委資料 (1957-2).
- 14) 栄: 同上 (1961-2).
- 15) 松田: 同上 (1959-11).
- 16) B. Carlin, *Ultrasonics* (McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1960) p. 286.
- 17) G. Nishimura, Y. Jimbo and S. Shimakawa: *J. Fac. Eng. Univ. Tokyo*, 24 (1955).
- 18) 隈部: 日本機械学会論文集, 24 巻, 138 号 (1958).
- 19) 実吉, 隈部: 通信学会超音波専門委資料 (1958-12).
- 20) 野老山, 福本: 同上 (1959-6).
- 21) J. B. Jones: *Welding J.* (Aug, 1956).
- 22) S. Vogel: *Electronics* 34 (1961) 52.
- 23) 佐々木, 出崎: 通信学会超音波専門委資料 (1958-2).
- 24) C. H. Allen and I. Rudnick: *J. Acoust. Soc. Amer.* 19 (1947) 857.
- 25) E. A. Hiedemann: *Ibid*, 26 (1954) 831.
- 26) R. W. Boyle and G. B. Taylor: *Trans. Roy. Soc. Can.* 20 (1926) 245.
- 27) G. Bradfield: *Proc. Phys. Soc. Lond.* 63 (1950) 320.

正 誤 表 (8 月号)

頁	段	行	種別	正	誤
7	右	下より10	本文	⁵⁷ Co	⁵⁷ Ce
8	"	12	"	J. K. Lancaster (第2図)などの…	J. K. Lancaster などの…
"	"	下より3	"	第3図からわかるように	第2図からわかるように
9	"	下より1	"	イオウ分の…	トオウ分の…
13	"	"	第7図上の方	δ	5