

## 技 術 資 料

### 超 音 波 鑄 造

佐 藤 隆 夫\*

Ultrasonic Casting.

Takao SATO.

#### I. 結 言

一般に金属材料の鑄造組織の優劣は、鑄物材はもちろん、加工材においても根本的に重要である。したがって鑄造組織改善のため幾多の努力がつけられている。一つの研究方向は母金属材料に大きな影響を与えないで、その鑄造組織のみを改善させるような、ある種の物質をさがし出すことである。この方向の研究は今後とも多くの努力がつけられるであろうし、そのような物質が見つかり、すぐにも現場的に適用できるという特徴をもっている。しかし母金属材料が、どうしても純粋でなければならぬとか偏析とかは別の方法を考えねばならない。他の一つの方法は物理的方法であつてすでに工業化の段階にある真空鑄造である。この方式では脱ガスなどに重点がおかれているのであつて結晶粒微細化とか偏析には効果的ではない。

もう一つの物理的方式は熔湯または凝固過程に振動を与えることである。この考えの歴史は古い。最近工業材料についての要求が益々きびしくなり、ある種の材料に関しては上述のような化学的方法とか、真空鑄造に対して幻滅を感じているので振動を与えるという物理的方法は今後の重要な研究課題であろう。

振動を与えるさい強制振動であるか固体の固有振動を利用するか二つに大別される。強制振動は比較的低い振動数に利用されるが固体の固有振動利用の方は比較的に高い振動数のところで利用される。ここではもちろん普通の電磁振動とか圧搾空気を利用するような強制振動は除外し固体の固有振動の利用についてのみ述べることになる。振動について、このような点を明確にしておくことはいわゆる超音波の偉力を理解していただく上に大切である。

超音波とは周知のように耳に感じないような高い周波数の音波のことである。周波数にして大体 16kC 以上と普通了解している。そして一応題目として超音波鑄造

ということであるが、実は耳に感ずるかどうかということとは重要ではなく“超”の字にこだわらない方がよい。むしろもつと広く考えて固体内とか液体内を伝播する音波の利用というように考えていただきたい。

一般に音波のエネルギーの種々な利用面が最近急速に発展しているが、そのような分野を総称して“sonics”とよんでいる。これは音波の独特な作用、効果を問題とし、他の如何なる方法でもできない独特の偉力を発揮できる場合もある一つの分野である。“electronics”とか“nucleonics”という分野に匹敵するようなものであるという見方をしている人もあるが、あながち不当であるといはえない面もあり予断をゆるさない新興分野であることはたしかである。超音波は偉力ある魔物であるがなかなか使いにくいといわれている。

超音波鑄造は最近ソ連やアメリカの情報に刺戟され、国内でもかなり活発な動きがあるように感ぜられる。筆者は数年前から鑄鉄の鑄造組織の改良を中心として超音波の効果を研究していたので外国文献などを参照しつつ超音波鑄造の現状について述べてみたいと思う。

まづ順序として超音波振動の発生方法や必要な一般的性質の説明から始めることにする。

#### II. 超 音 波 振 動

普通超音波振動は磁歪とか電歪というような現象を介して固体の固有振動を利用して発生させている。磁歪型としては純ニッケルか A F 合金 (Fe 87%, Al 13%) の薄板を成層したものが多いが、最近ではある種の目的でフェライトも使用されている。電歪型としては例えばチタン酸バリウム ( $\text{BaTiO}_3$ ) がある。純ニッケルや A F 合金の振動子による電氣的エネルギーを振動の機械的エネルギーに変換する能率は、フェライトやチタン酸バリウムなどの振動子による変換能率に比べてずっと悪く、

\* 東京都立大学理学部物理学教室教授 理博

供給する電氣的エネルギーのかなりの部分は渦電流による損失となつてしまう。しかし鑄造などのような場合の超音波エネルギー利用にはエネルギー損失が少々大きくても、今のところ純 Ni のような安定な振動子の方が多くの利点をもっている。また純 Ni 振動子のエネルギー変換率に関しては新しい設計方針も開発されつつあるので Ni 振動子は変換能率が悪いものと初めから決めてかかる必要もないであろう。

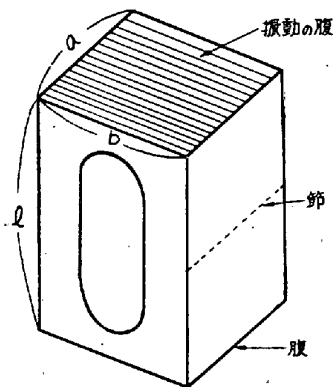
ニッケル振動子は純ニッケル板（厚さ 0.125mm）を適当な形に打抜き、磁氣的に熱処理し、一枚一枚絶縁処理をした上で、これらを成層して各層の間をアラルダイトのような膠着剤で固着したものである。

このような振動子の縦の共振は両端面が振動の腹になり、中央が節になる振動である。そのときの共振周波数  $f$  は、同じ長さの均一な棒の共振周波数  $f_0$  よりも必ず少し低い。 $f_0$  は棒の長さ  $l$  で決まり次式で与えられる。

$$f_0 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで  $E$  は棒のヤング弾性率で、 $\rho$  は密度である。

ある振動子からとり出すことのできる超音波エネルギーは大体成層したときの端面の面積で決まる。したがってとり出すエネルギーを増加するためにはニッケルの薄板を沢山重ねる必要がある。第1図で端面  $a$ ,  $b$  が長さ  $l$  と同程度になると振動の様子は簡単ではなくなり  $a$   $b$  面からとり出すエネルギーが側面から失われるエネルギーのため減少することになることは直観的に理解されるであろう。



第1図 ニッケル振動子

また渦電流損失、履歴損失などの点を考えると余りニッケル板を重ね合せないで、適当に分割し並行にいくつかの振動子をホーンにとりつけた方が有利になる場合がある。しかしこのような方法でも、振動子からエネルギーをとり出すホーンが一体であるならば、ホーンの縦方向と横方向の振動の兼ね合いがあるから周波数一定としておくと、すぐに利用できるエネルギーに限界があることがわかる。（第2図）

そこでエネルギーをとり出すための一つの方針は周波数を下げてゆくことである。（1）式によると周波数を下げるためには  $l$  を長くすればよい。つまり超音波領域の周波数にこだわらないで 10kC とか 6kC とかにす

れば条件はずつとよくなる。このような低い周波数では耳に強く感ずるようになり防音室で操作せざるを得ない場合も起りうるであろう。しかしこれは本質的な問題点ではない。

つぎに重要な点は波動が異なる媒質の境界で反射することと、ある媒質でのエネルギー吸収が周波数に依存することである。

ある媒質からつぎの異なる媒質に波が進行してゆくと一部エネルギーが反射によつて失われる割合はいわゆる固有音響インピーダンス  $R$  という媒質によつて特質づけられる量によつて決定される。固有音響インピーダンスとは、その媒質の密度  $\rho$  と、その中の波動の伝播速度  $c$  との積  $\rho c$  によつて与えられる。

反射波の振巾  $A_r$  は入射波の振巾を 1 とすると

$$A_r = \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。エネルギーは振巾の 2 乗に比例するから反射エネルギー  $E$  と入射エネルギー  $E_0$  との比は

$$E = E_0 \left( \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \dots\dots\dots (3)$$

である。 $R_1$ ,  $R_2$  はそれぞれ媒質 1, 2 の固有音響インピーダンス、つまり  $R_1 = \rho_1 c_1$ ,  $R_2 = \rho_2 c_2$  である。

2 媒質間での反射でとくに注意しておきたいことは、この 2 媒質が完全につながっているかどうかである。例えばきわめて薄いが空気層を介して、つながっていると、そこでの反射によるエネルギー損失は急激に増大する。第1表と（3）式とからすぐわかるように固相から気相に波が入る場合 100% 近く反射されるからである。実はこの事実がいわゆる超音波探傷の基本的な原理であ

第1表 固体、液体、気体の音速、密度、固有音響インピーダンスの例

物 質	音 速 cm/s ( $\times 10^5$ )	密 度 g/cm <sup>3</sup>	固有音響イン ピーダンス $\rho c$
真 銅	8.42	8.55	$2.92 \times 10^6$
鋼	3.58	8.93	$3.20 \times 10^6$
	5.05	7.80	$3.94 \times 10^6$
水	1.43	0.999	$1.43 \times 10^5$
グリセリン	1.92	1.260	$2.42 \times 10^5$
水 銀	1.45	13.55	$19.7 \times 10^5$
空 気	0.331	$1.293 \times 10^{-3}$	42.8
CO <sub>2</sub>	0.259	$1.977 \times 10^{-3}$	51.2
水 素	1.28	$0.090 \times 10^{-3}$	11.5

ることはよく知られている。しかし超音波エネルギーの利用面からはきわめてわずらわしい問題である。つまり鑄造の問題ではホーンと熔湯とがなじむかどうかが決定的役割をするからとくに注意すべきである。

またある媒質における超音波エネルギー損失に関してはいまだに問題は多く、その損失機構、その他については最近の研究課題である。しかし STOKES や KIRCHHOFF などの古い研究によると平面波の吸収係数  $2\alpha$  は次式で与えられる。

$$2\alpha = \frac{4\pi^2 f^2}{c^3 \rho} \left[ \frac{4}{3} \eta + \frac{(\kappa - 1)}{C_p} k \right] \dots \dots \dots (4)$$

この  $2\alpha$  は次式で定義される。波の強さが最初  $I_0$  であるとき、距離  $x$  だけ進行したときの強さ  $I$  は

$$I = I_0 \exp(-2\alpha \cdot x) \dots \dots \dots (5)$$

で表わされる。(4)式で  $\eta$ : 粘性係数,  $f$ : 周波数,  $\rho$ : 密度,  $c$ : その媒質中の音速,  $\kappa$ : 比熱の比,  $C_p$ : 定圧比熱,  $k$ : 熱伝導率である。

(4)式によればある物質を考えればエネルギーの吸収は周波数  $f$  の 2 乗に比例する。したがって周波数は低い方が有利である。波動エネルギーの放射面積を大きくするためには周波数を下げた方がよいことはすでに指摘したがエネルギー吸収の面からも有利である。さらに磁性体の履歴損失は周波数に比例し、渦電流損失は周波数の 2 乗に比例して増大するから、種々な条件が周波数を下げた方がエネルギー的に得策であることを示している。

今までの超音波エネルギーの利用面としては洗滌とか化学反応促進あるいは機械加工などがある。しかし鑄造の場合のように高温の熔湯にエネルギーを伝達させねばならないという点で問題が根本的に相違しているので別のむづかしさがあるように考えられる。

### III. 高温の熔湯に超音波エネルギーを伝達させる方式

超音波鑄造を実施する場合如何なる方法で高温の熔湯の凝固過程に超音波エネルギーを伝達させるかということが先決問題である。この方法は処理すべき材料の種類、融点、その他の目的によつて大体決定されるであろう。エネルギーを伝達する方式として上部、下部、側面の三方式が考えられる。どの方式にも一長一短があるが従来の研究状況や超音波の特性の立場からどの方式を採用すべきか検討して見よう。

#### (a) 上部方式

この方式はだれでも実施してみたくなる方式であろう。CRAWFORD<sup>1)</sup> や HUETER<sup>2)</sup> の本にも出ている(第3図および第4図)また SEEMANN (1947)<sup>3)</sup> の論文でも実

用化する方式としては、この方式に限るといような意見をのべている。

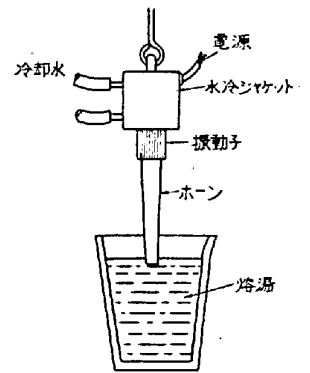
たしかに比較的融点の低い材料にはきわめて能率的な方式であろう。ところが高温の熔湯に超音波伝達棒(ホーン)が浸かり、棒の温度が上昇し、しかも引張り、圧縮の応力がくりかえされているのでホーンが疲労破壊することになる。

高温では金属材料の疲労限というものはないともいわれている。したがってホーン自身を水冷すればよいと考えるかも知れない。しかし何らかの原因で破壊したときは事故の原因となろう。また冷却していると熔湯とのなじみが悪く具合が悪い。また疲労しないとしてもホーン材料がエロージョンによつて熔湯とつけこみ、処理材料に

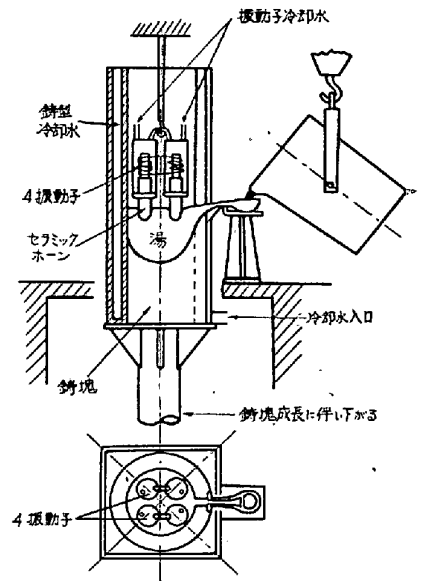
よつては好ましくない。それならば処理材料と同一の材質のホーンを使えばよいと考えられるが強度的には可能性は少ない。したがってホーン材料の選択が決定的に重要となるのがわかる。

超音波エネルギーを能率よく熔湯に伝達させるためには熔湯とのなじみのよい材質を選ばねばならないが、そうすると、その材料は湯に溶けこむし、なじみの少ないものでは超音波エネルギーの損失が大きい。しかし恐らくこのさいなじみのある程度犠牲にしても高温疲労強度の大きい材料が望ましいように思う。

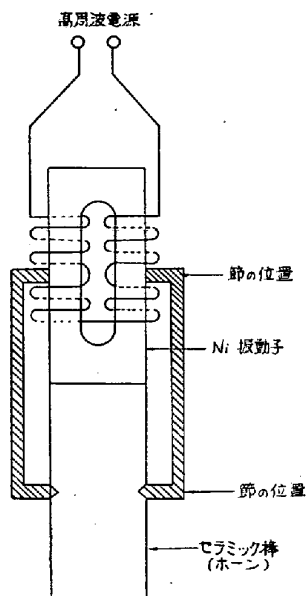
例えば Al 合金の処理には硬質の炭素棒を使用することである。この場合炭素棒の機械的強度が小さいため大きな振巾を利用することは困難であるし、熔湯とのなじみはよくない。しかし使用していると Al で被覆され、エネルギー損失はそれほどでもないらしい。この炭素棒



第 3 図



第 4 図 Thiede のセラミックホーン使用の実用化方式 (ドイツの Atlas Werke)



第5図 Thiede のセラミックホーン

を使用するという方法は古河電工の堀氏が提案している。しかもこの炭素棒は1000°C 前後の融点の Cu 合金にも使用可能であるとのことであるから有力なホーン材料である。(筆者は使用した経験はない。)

また THIEDE が採用した“Ardostan”という商品名でよばれている特殊な耐火物を利用する方法もある(第5図)。この耐火物はそのような特徴をもっているかわからない。恐らく熱衝撃に強いとは考えられないし機械的強度も大したこと

ではなく、湯とのなじみも良好であるとは考えにくい。またこの耐火物ホーンをニッケル振動子にうまく結合する技術的問題もあろう。この方法での水中への振動伝達効率約 14% というから良好ではない。この型のホーンを金属の連続鑄造に適用した装置が第4図である。SEEMANN および MENZEL がジュラルミンについて実験したが、振動強度は鑄塊の断面上で 2W/cm<sup>2</sup> であつた。

炭素やセラミック材料以外に WC, TiC などの超硬合金も使用される。これらは高温における機械的強度も強く熔湯との反応は金属材料よりははるかにすぐれている。ところがそれらを焼結するとき Co や Ni を結合剤として含んでいるので、それらが多少熔湯中に溶けこんでしまう。

(b) 下部方式

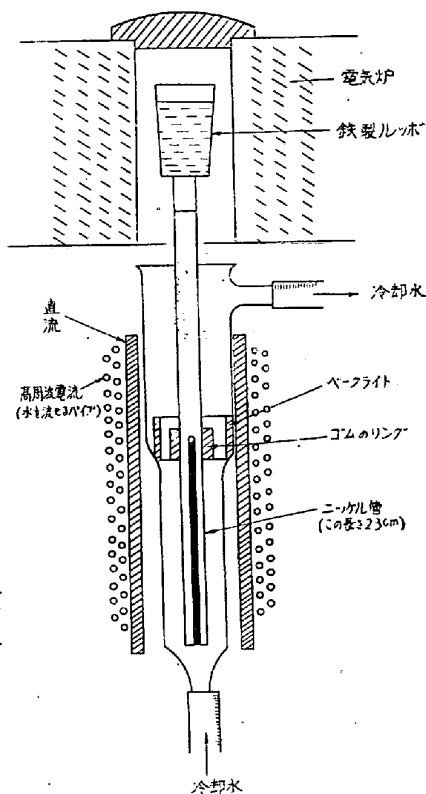
この方式は古くは SCHMIDT (1937) が採用して歴史的な実験をやつている(第6図)。最近ではアメリカ、ソ連などでも採用している。鉄関係のような高温の融点を有する材料を処理するためには、上部方式では致命的欠点をもっているのです。どうしてもこの下部方式が有力となるであろう。ドイツでは実用的方式としては難点があるとして SCHMIDT 以来発展しなかつたようである。

この方式でのエネルギー伝達率はホーンと湯との初期条件のなじみによつて決定づけられる。しかしよくなじんでしまうと鑄塊を簡単にとり出すことが不可能であるという致命的欠点を有している。また鑄塊の長さが長くなると波の減衰による処理材料の不均一性も問題とな

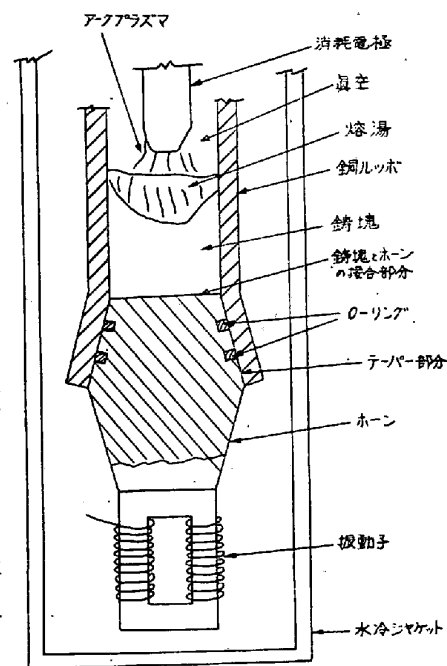
らう。

大きな鑄塊をつくる時超音波の放射面積を大きくする必要があるが、そのために周波数を下げた方が有利であり、この点は波の減衰の面からも好ましい、したがつて下部方式の実用化方式としては周波数はかなり低いことが期待される。例えば最近 Westinghouse などでは 5 kC 位まで下げて効果的であつたといつている。

この方式の場合鑄型とホーンとの関係が重要である。鑄型とホーンとをネジその他の方法で一体としておくことは好ましくないし、大きなエネルギーを利用しようとする取付は困難である。むしろ鑄型とホーンはゆるく結合させてエネルギーは鑄型の側面の方に伝達させないようにする。したがつて鑄型はホーンに簡単にのせておく



第6図 SCHMIDT の装置



第7図 消耗電極型アーク熔解の際超音波を利用した Westinghouse 方式

とか、相互に移動可能にして、おく方が望ましい。また真空アーク熔解のさいには Westinghouse での方法のように(第7図) O-リングで波のエネルギーが鑄型の側面に伝達しないようにしてある。鑄型は幾分テーパをつけておいて内面に適当な耐熱的な物質をぬつておく

と鑄塊から容易に分離可能である。

一般に鑄型をホーンに適当にのせておくだけで湯の表面張力のため湯が流れ出すことはないが超音波振動を与えると流れ出るような種類の材質もあるから注意すべきである。

また下部方式ではホーンの上面に鑄造する材料と同じ材質の板で座金をつくり、ロウ付しておいてから鑄造するのも一法である。この場合熔湯を流しこんだときまたはアーク熔解の初期アークのときロウ付部分とはけている部分を通じて超音波エネルギーが伝達することになるが側面を冷却しておくなら、しばらくして固化する。したがって鑄塊をホーンから取り出すとき、そのロウ付部分を適当に熱すると、鑄塊が分離することになる。もちろんこの方法は実用的には難点がある。

#### (c) 側面方式

この方式は最近厚い鋼板の熔接で問題になつているスラグ熔接などに使われているのと同様な方式であつて鑄造にも利用されるはずである。問題点はホーンと湯とのなじみ、ホーンの冷却効果、エロージョンなどである。恐らくホーンは冷却しておく必要があるから熔湯とのなじみは良好ではなく、エネルギーの損失が予想される。湯とホーンとがある程度なじめばエネルギー損失は少ないであろうが、ホーンがエロージョンでおかされホーンからの不純物が混入することは避けられない。

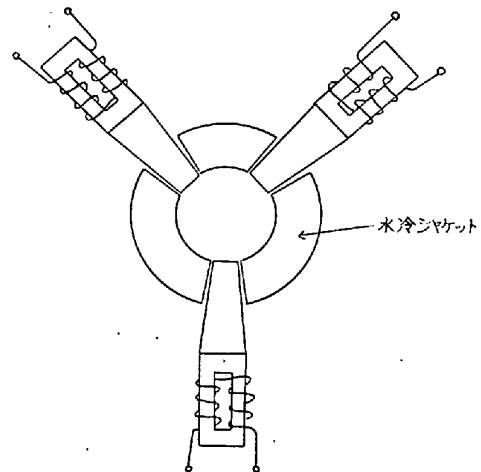
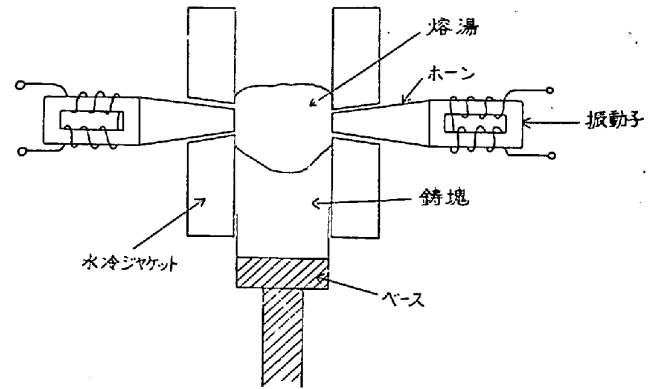
この方式の特徴は側面から一個以上の振動子を装備可能であることであろう。このような利点のためエネルギー損失が避けられなくとも実用面での可能性は十分ある。大きな鑄塊のとき下部方式では必然的に周波数を下げねばならないが、この方式ではほとんど下げる必要はないし、むしろ周波数を下げると振動子は大型になるし装備するのは、わずらわしい。(第8図)

この方式は下部や上部方式と同様に簡単にやつて見るというわけにはいかないので筆者は未だ実際の経験はもっていないが有望な方式であろう。

以上三方式は、いずれも長所短所がある。上部方式では炭素やセラミックのホーンを使用できないような材料にはあまりすすめることはできない。側面方式はそのまま連続鑄造方式であるが上部方式も連続方式として利用できるし、すでに工業化している。とくに下部方式は消耗電極型真空アーク熔解炉には一番適しているように思う。

#### IV. 超音波の作用機構

金属の熔融状態ならびに凝固過程における超音波の作用効果として異種物質の相互分散、脱ガス、偏析防止、



第8図 側面方式

結晶粒微細化などが期待されるが如何なる機構を介してそのような効果が生じるのであろうか。またそれに関連して周波数の選択とか、どの程度の波の強度が必要なのかという点を実施する場合問題となる。

まず重要な点は超音波の作用効果は熔湯が単に振動でゆさぶられるためだけではないということである。この点が強制振動を利用するか共振を利用するかの本質的な相違点でもあるし作用効果の機構を把握する鍵であると考られる。

熔湯を強制振動させたとき湯が飛び出るほどに振動していても効果はそれほどでもないが超音波を伝達させた場合、湯面はほとんど振動していると思われないほどでも結果は前者の場合よりも屢々良好である。

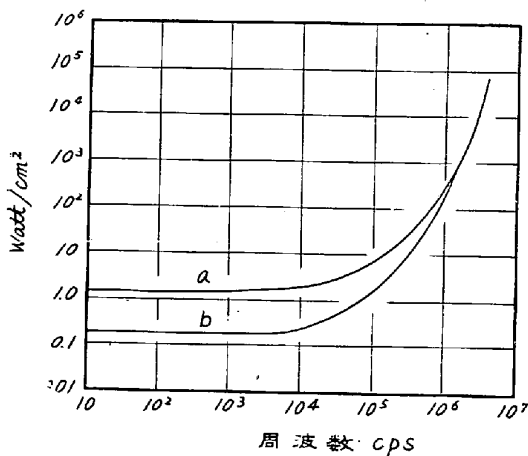
もしも作用効果がエネルギーが決め手となつていなら振動のエネルギーは  $(\text{周波数})^2 \times (\text{振巾})^2$  に比例するので例えば周波数が 50 cycle と 20kC の場合エネルギーが一定とするなら振巾比は  $4 \times 10^2$  となり共振を利用した超音波振動の  $10\mu$  は強制振動の 4mm に大体対応していると見てよい。

ある種の材料では低周波でまったく効果がないが他の

材料では、かなりの効果があることも知られている。超音波の場合にも同様な事実もあるらしいが、この場合には強制振動の場合と違ってエネルギー伝達方式などに不備な点もありうるという心配もあるので作用効果の機構については軽々しい結論は保留せねばならない。工業化という観点からは低周波とくに商用周波数で効果があるならきわめて好都合であるが、共振を利用する方式の効果は他の方式では得られないすぐれた点もあるので今後の重要な課題である。

一般的に液体における超音波の作用はいわゆる空洞作用を介して行なわれるというのが相当確なように考えられるが、とくに高温の金属熔湯における空洞作用の発生機構その他に関しては不明の点が多い。液体に引張り圧縮の応力がたえずくり返されて波が伝播してゆくと引張りで液体が破断して微視的な空洞が生じつぎの圧縮でその空洞がつぶれるが、そのとき生ずる予想外に大きな圧力で衝撃波が伴ない、そのとき偉力を発揮するであろうことは十分期待できる。

もし空洞作用が重要であるとする超音波の周波数とか振巾とかは如何なる役割をするであろうか。この問題は熔湯処理のみの問題ではない。これに関連してよく知られているのは Esche(1952)<sup>4)</sup>による結果であろう。それは室温での水の空洞を生ずるに要する超音波の強さの周波数依存性である。(第9図)この図からわかることは、ある周波数より低い周波数の方が空洞作用を起すに要するエネルギーは少なくてよい。この結果は常識化されているが Hueter(1957)<sup>5)</sup>が指摘しているように一般の液体に適用可能であるかどうかについては未だに謎である。とくに高温の金属の熔湯についてはどうかということになったら見透しは全々暗い。しかし、もし空洞作用の面からも周波数を下げた方が好ましいなら、放射面



a: 脱ガスした水 b: 炭酸水  
第9図 室温における水の空洞作用の閾値の周波数依存性

積を広くしたいこと、エネルギーの減衰の面からも好都合である。つまりいろいろな因子が周波数を下げることには協力しているように思う。

空洞作用を起し得ない程度の超音波エネルギーではどうなるかという例えれば異種物質の相互分散を行なわせようとした場合相互分散は行なわれず定常波が形成されているなら逆の現象が生じて節の位置にある物質が凝集することが期待される。したがって空洞作用説をより具体化するためには、これに似た実験によつていわゆる空洞作用の閾値という量を周波数の関数として求める必要がある。しかし残念なことに高温状態の熔湯における共振状態は鋭くなく期待されるような現象が観察されるか疑がわしい。

SCHMIDT と ROLL<sup>6)</sup>は振動によつて結晶微細化や樹枝状晶がこわれる機構に関して興味ある議論をしている。彼らは Stokes-Oseen の式を使つて結晶針と融体との間の摩擦力を近似的に計算し、ある周波数、ある振巾で結晶針がこわれて細分化されるに十分であることを結論している。

結晶針を理想化して半径  $r$ 、長さ  $l$  の円棒とし、それに直角方向に流れる湯との摩擦によつて針のうける力は

$$K = \frac{2\eta lv}{\pi \left( \ln \frac{4\eta}{\rho rv} - 0.0772 \right)}$$

で与えられる。(Stokes-Oseenの式)ここで  $\eta$ : 湯の粘性,  $\rho$ : 熔湯の密度,  $v$ : 速度振巾つまり  $v = \omega A = 2\pi f \cdot A$  ( $\omega$ : 角周波数,  $A$ : 振巾,  $f$ : 周波数) である。

波の強度  $J$  は

$$J = \frac{\rho c \cdot v^2}{2}$$

で与えられる。 $\rho c$  は固有音響インピーダンスで SCHMIDT は Wood 合金 (Bi 50%, Pb 13%, Sn 20%, Cd 7%, Zn 10%) に対して大体  $1.2 \times 10^6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$  とおいた。また  $\eta \approx 0.2 \text{ g/cm} \cdot \text{s}$ ,  $l \approx 0.1 \text{ cm}$ ,  $r \approx 0.001 \text{ cm}$ ,  $\rho = 10 \text{ g/cm}^3$  とするとつぎのような第2表をつくることのできた。

一方円棒 (長さ  $l$ , 半径  $r$ ) に  $P$  なる力が垂直に作用して折れるとすると  $P$  は

第 2 表

周波数	振巾 $A$ $\mu$	速度振巾 $V$ cm/s	強度 $J$ watt/ cm <sup>3</sup>	最大摩 擦 力 dyne	慣性力 $mav$ dyne
50 cycle	200	6.3	2	0.03	0.006
9 kC	4.5	26.	39	0.28	4.6
284kC	0.051	9.1	5	0.06	51.

$$P = \frac{1}{2} \frac{\varphi r^3}{l}$$

と与えられる。ここで  $\varphi$  は破断の強さである。今の場合一つの結晶針に対して

$$\varphi \approx 100 \text{ g/mm}^2$$

とすると

$$P \approx 0.05 \text{ dyne}$$

となる。この理想化した計算結果から周波数 9kC の場合にもつともよく結晶粒微細化が期待されるが、実際にもそうであると結論している。

堀氏(1959)<sup>7)</sup>も Al-Si 合金の実験結果に対して摩擦力の考え方から同様の計算をしているがきわめて妥当な結果を得たといっている。

しかし STOKES-OSEEN の式を使うため現象を理想化して考えることの妥当性とか、計算式に代入する具体的数値の信頼性という点についてはいろいろ問題は多いと思う。実際には結晶針は円錐針のようなものではないだろうし、摩擦力はずつと大きいことが予想される。

最初できた結晶粒が超音波によつて破壊されるという考え方の裏付となると実験としてつぎのような現象をあげている。Bi-Cd (50%) 合金の試料をまず普通に溶かし、固化させる。すると樹枝状晶ができていく。同じ試料を 160°C にした。この温度では液相線の中間にあつて結晶の針がある。このような状態にしておいて振動を与えながら固化させたものと完全に溶けた状態にしておいて振動を与えながら固化させたのと同じように結晶の針は破壊されている。

この事実に関連して興味あることは融点より十分低い温度で金属中の介在物が振動によつてこわれることが知られている。例えば FREUND と HIEDEMANN(1939)<sup>8)</sup> は数 MC の強い強度の波で鋼鉄中の酸化鉄介在物が室温でこわれたことを観察している。また筆者<sup>9)</sup> は鑄鉄中のセメント Fe<sub>3</sub>C が室温で超音波 (22.3 kC, 350W) によつて分解して黒鉛化が起つていくことを確認することができた。もちろんこの場合材料に急速に波のエネルギーが吸収され室温といえどもとくに定常波の節の部分では 300~400°C 位には上昇しているが、このような低い温度ではセメントが急激に黒鉛化することは今まで知られていない。したがつて超音波は固体状態においても強力な破壊力があることは確かなように思う。

ところが SCHMIDT の説とは反対に結晶粒微細化の過程は一たん生成した結晶粒が超音波によつて破壊されるのではなく核生成に直接関係するという考え方がある。金属溶湯の流動度が超音波処理によつて増加すると安定な核の生成確率は増加するであろう。その結果として結

晶粒が微細化すると考えられる。

## V. 従来の研究結果

超音波鑄造の最初の論文は BOYLE と TAYLOR(1926)<sup>10)</sup> のものであるといわれているが筆者はその内容は知らない。ソ連の SOKOLOFF(1935)の研究は、よく引合いに出されているが SCHMIDT 一派 (1937<sup>12)</sup>, 1939<sup>6)</sup>, 1940<sup>13)</sup> の報告が一番信頼感があるように考えられている。それ以後文献は各方面に出ているので原文を直接読むのは困難な場合も多いしとくに外国特許公報だけに出ているのは調べるのも大変である。また現在の技術レベルから考えて大きな差があつて、それほど頼りになるものは少ないのではないかと思う。しかし何らかの示唆が得られる可能性もないとはいえない。

SOKOLOFF は Zn, Sn, Al の溶湯に 600~4500 kC 程度の周波数の音出力 80W の超音波をあてた影響を調べ、超音波により融点が下り、速く固化することを報告している。しかしこの結果は SCHMIDT らによつて Sb, Cd, ジュラルミンおよびシルミンなどについて行なわれた追試によつて否定された。SOKOLOFF の結果はルツボからの不純物が溶湯中に溶け込んだことによるものと考えられた。SOKOLOFF は 5mm の厚さの水晶のモザイクを使用し、厚さ 10mm, 直径 200mm の鋼板に結合し、その上に鋼のルツボをのせてやつている。このような方法では反射によるエネルギー損失が多くよい結果は期待されないように思う。

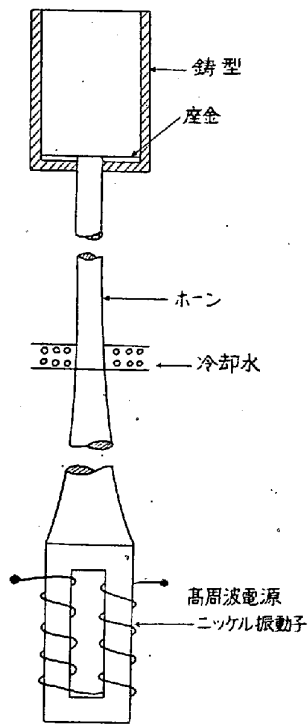
SCHMIDT-EHRET(1937)<sup>12)</sup>は周波数 10 kC を使い Sb, Cd, ジュラルミン, シルミンを処理した。Sb, Cd は結晶粒が大きくなるので有名であるが振動の影響で、その結晶粒が微細化しているのが観察される。超音波処理した Sb の脆さは少なくなつたしブリネル硬度は 34→52 と向上した。ジュラルミンでは結晶粒界は消失しブリネル硬度が 78→96 となつた。しかしシルミンでは実験誤差内でほとんど変らなかつた。彼らの使用した装置は第 6 図に示した。

さらに SCHMIDT-ROLL(1939)<sup>6)</sup>は結晶粒微細化の理由を周波数と強さの点から検討している。低融合金について周波数が 50 cycle, 9 kC, 284 kC のいろいろな強さの振動で処理している。振動の強さは 50 cycle, 9 kC の周波数の場合には鉄のルツボの振巾を顕微鏡ではかつて求めた。50 cycle では 2 watt/cm<sup>2</sup>, 9 kC では 39 watt/cm<sup>2</sup> と出している。284 kC の場合には振巾測定は困難なので Hg の上部にグリセリンと水の混合物をかぶせて超音波エネルギーを吸収させ、その温度上昇から 5 watt/cm<sup>2</sup> と推定した。彼らの議論については前

節にのべた。

SOUTHGATE(1957)<sup>14)</sup> は Al 合金について 1 kW の電力容量を使用した実験結果を報告している。純 Al (99.2%), Al-Fe (1.8%), Al-Fe(4%), Al-Si (12%) などの試料について調べている。作用効果として金属間化合物結晶の大きさの減少, 重力偏析の減少, 結晶粒微細化, 有孔性減少などをあげている。抗張力はそれほど増大しなかつた。作用機構としては SCHMIDT-ROLL のような摩擦力ではなく空洞作用効果を第一義的に考えている。

堀氏(1959)<sup>7)</sup> は Al-Si 合金の Si 量が共晶点 (11.7%) 以上のところの粗大な初晶が超音波で如何に微細化されるかを研究している。(周波数 28 kC, 電力容量 1.5 kW) 結晶微細化するためには超音波強度にある限界があつて, それ以下では効果がみとめられないという。この点については他の研究者も, しばしば指摘しているが重要な結論である。彼らが行なつた実験では高周波電力で 300W 以上である。その強度の限界値はもちろん金属の種類, 溶解量その他の条件によつて変わるであろう。また SCHMIDT-ROLL と同様に摩擦力で議論していることは前にのべた。

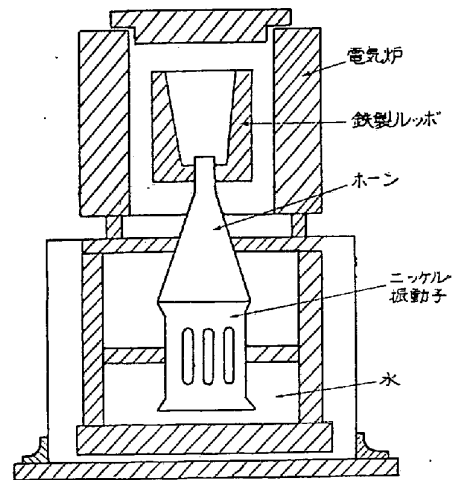


第10図 ソ連の一方式

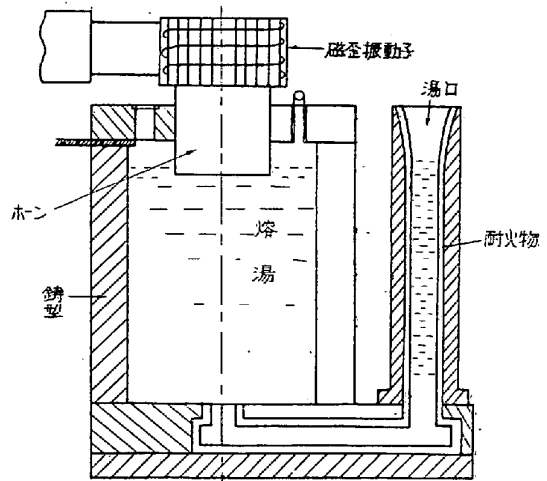
この装置によつて鋼鉄製ルツボに Pb と WC (タングステンカーバイド) とを入れて周波数 21.5 kC 電力容量 0.15kW の超音波にて 400°C で 10 分間処理してベアリングの材料を作つている。この場合には異種物質の相互分散だけを第一義的に問題にしている。

以上の他に Al を初め低合金に超音波とか振動の影響を問題にした研究はかなりあるがそれほど興味はわかない。ところが鉄関係の材料の処理に関する報告はきわめて少なく重要なものはソ連(1957)<sup>15)16)</sup>とアメリカ(1959)<sup>17)18)</sup>のもの位であろう。

超音波の研究で有名な HIEDEMANN などはかなり前に鋼鉄の鑄造に超音波を利用しているが結晶微細化には不成功であつたといつているが詳細はわからない。また英



第11図 ソ連の一方式 (Pb-WC)



第12図 ソ連の一方式

国の HINSHELWOOD も鋼鉄関係に超音波を適用して見ているらしいが結果はかんばしくないらしい。しかしどんなやり方でうまくゆかないかは不明である。

ソ連の報告はスターリ (1957) に 2 論文がある。最初の論文<sup>15)</sup>では肉眼観察とか伝達方式などの研究を中心としパラフィンなどを用いて超音波の基本的作用を調べ, つづいて鉄関係の材料について超音波処理した結果がのべられている。いろいろな形式の超音波伝達方式の図が出ていているのが目につく。例えば鑄型から離して上部に振動子をおいて空気相をとおして超音波エネルギーを伝達する方式, 鑄型の側面に穴をあけておいてそこに振動子を取りつけておく形式は変つた考え方である。しかし実際的には利用価値はないかも知れない。また第 12 図のように鑄型の上部に振動子を固定し熔湯を下部から入れて湯がほぼ鑄型を満したとき超音波エネルギーが伝達できるようになつているのもある。

この最後の形式でリムド鋼の超音波処理を行なつてい



第 3 表

種 類	組 成	抗 張 力 kg/mm <sup>2</sup>	伸 び %	
リムド鋼	0.05~0.12% C	超音波処理	47	50
		なし	35	30
鋼 (規格鋼) 鑄 鉄 (ねずみ鉄)	0.40~0.50% C	超音波処理	75	20
		なし	45	15
		超音波処理	56	5
			18	0

る。鑄塊の大きさは角型で 200×200×500mm である。その鋼は C: 0.07%, Mn: 0.34%, P: 0.021%, S: 0.023%, Si: 痕跡で O<sub>2</sub> は 0.059%, N<sub>2</sub> は 0.026% である。超音波処理することによつて O<sub>2</sub> や N<sub>2</sub> は痕跡ほどきり含まれないようになったという。つまり脱ガス効果が顕著であると報告している。

リムド鋼, 鋼, 鑄鉄について超音波処理したところ機械的性質は第 3 表のように向上している。

この論文の特徴は超音波鑄造で脱ガス効果をねらつていられる。またそれ以前の文献は全然引用していないのも変つている。超音波鑄造は圧力鑄造や真空鑄造がすぐれているようにすぐれていると結論している。また鑄塊は表面が美しくち密なものが得られるという。

アメリカの MORGAN<sup>19)</sup> はこのソ聯の論文を見て超音波鑄造の工業化について疑問視している。たしかにここで採用している方式には問題があると思われる。

II<sup>19)</sup> の論文ではかなり具体的にかかっている。この場合の実験装置は第 10 図に示した。超音波の作用でルツボの底に鑄塊が熔着するので、その予防のためルツボの底に鋼の座金をおいている。ホーンの先端はルツボの底の穴にねじではめこんである。振動体の電源は 10 kW の電力, 音出力 1 kW を出しうるものであつて周波数は 18 kC, 2 kg までの鑄塊を処理したとかいてある。鑄込温度は 1800°C までの温度であつて熔解は高周波炉を使用している。ルツボの底に鑄塊が熔着するので座金をおいている点などは見逃すことのできない点であつてそのために大きなエネルギー損失があるのではないかと

思う。また 18 kC で音出力 1 kW の大きなエネルギーを取り出せるホーン的设计などどうなつているのか不明である。10 kW の高周波電力で大体その 1/10 の 1 kW の音出力が出るといふことであつて実際にはずつと少ない電力用のホーンで運転しているものと理解するのが妥当であろうか。その他装置についての詳しいことはまったく不明である。しかし得られた結果はこれからのべるように注目すべきことが多い。

超音波処理によつて結晶粒微細化 (1/3~1/5) がよく行なわれるがとくに Ni の含有量の多い合金においていちじるしい。しかし Ni を含まず Cr を含む合金ではこの効果はいちじるしくないといつている。また樹枝状晶は實際上消滅し偏析はかなり弱くなつている。非金属介在物も均一に分布する。この論文ではとくに X27 と X25H20 という材料 (第 4 表) について詳しくやつていられる。超音波の出力を増加すると鑄塊の底にマクロな孔が生ずるらしいが、これは空洞作用の発生に起因すると考へている。しかし X27 の場合にはマクロな孔は出ない。マクロの孔は真空中で処理すると除かれるといつている。このような点を指摘しているところから見ると真空中での超音波鑄造も実施しているように思う。

X27 と X25H20 は普通の凝固のさいに結晶粒が粗大になり機械的性質が悪く加工が困難である。普通約 1 kg (35~40φ, 長さ 75~80mm) 位の鑄塊を超音波処理したので、すべての機械的試験は 1 φ 位の小さい試験片によつた。塑性的特性の増大はとくにいちじるしく、しぼりは約 7 倍、伸びは 3 倍以上、ねじり値はほとんど 2 倍になる。80% の熱間加工によつても超音波の影響は消えなかつた。衝撃値は鑄造状態で約 2.5 倍、熱処理して 1.5 倍位になるということである。データの一部を第 5 表に示した。

つぎに Westinghouse Electric Co. の LANE<sup>17)</sup> による報告を紹介する。彼らは超音波を消耗電極型アーク炉に適用し優秀なる鑄塊を製造している。特徴的な点は鑄型と鑄塊との境界でのエネルギー損失を極度に少なく

第 4 表

	%					10 <sup>-4</sup> %		
	C	Si	Mn	Cr	Ni	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
X 27	0.03~0.05	0.51~0.59	0.83~0.88	27.0~27.2	0.11~0.13	180~280	3~6	480~780
	0.03~0.06	0.52~0.62	0.82~0.88	27.0~27.4	0.11~0.14	120~240	2~6	540~830
X 25H 20	0.04~0.06	0.75~0.78	1.05~1.06	23.9~24.1	18.1~18.2	50~140	3~9	800~940
	0.06~0.08	0.75~0.76	1.05~1.06	23.9~24.0	18.0~18.2	20~90	5~13	900~1000

分子の数字が超音波処理前, 分母の数字が超音波処理後

第 5 表

		抗張力 (kg/mm <sup>2</sup> )	しぼり (%)	のび (%)	ねじりにおける せん断強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	ねじりにおける せん断率 (%)
X 27	鑄込のまま	43.4~48.3 46.0~53.5	3.3~7.8 19.5~60.8	4.1~7.4 13.6~23.7	33.0~36.4 33.6~38.1	45.5~61 71~103
	熱処理後	44.1~50.2 47.9~55.1	11.0~38.0 34.0~68.3	8.4~20.0 16.6~25.4	34.9~36.5 34.5~37.6	52~82 81~106
	加工後	76.0~85.7 70.5~72.0	53.0~61.5 63.0~66.5	12.5~14.5 17.5~22.0		
X 25H 20	鑄込のまま	43.0~49.0 53.0~58.5	26.0~52.0 67.5~74.0	20.0~29.5 22.5~36.5	43.0~55.0 48.5~60.5	76~156 124~184
	熱処理後	42.0~46.0 47.5~54.0	53.5~68.0 75.5~81.0	28.5~34.0 30.0~39.0	48.0~55.0 51.0~59.0	127~179 194~289

分子の数字は超音波処理しない場合、分母は超音波処理したもの。

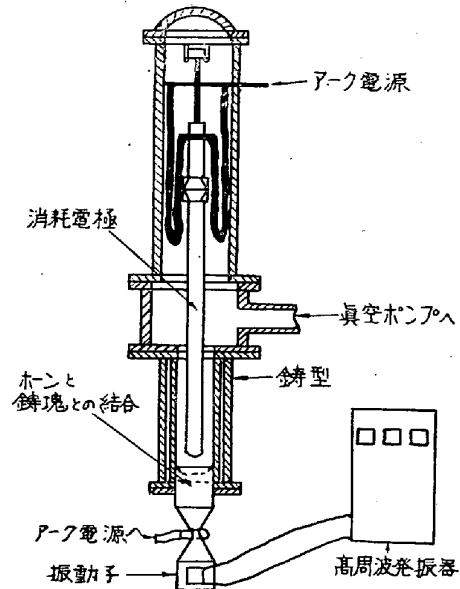
していることである。彼らの採用した装置の基本的考え方を説明する図はすでに第 7 図に示されている。

初期の実験で消耗電極としてオーステナイト系 Fe 合金 (18% Mn, 5% Cr, 0.5% C, 残 Fe) をアーク熔解し 2<sup>1</sup>/<sub>2</sub>in φ の鑄塊をつくっている。アーク熔解のさい最初のアークで強い電流を流しホーンとよく熔着させてつぎに正常な電流にし普通のアーク熔解のようにしてやる。このときの超音波の高周波電力は 400W, 周波数は 20 kC であつた。操作中共振条件を保つため振動子の底の近くに小さいピエゾ電氣を利用した振動子をつけて超音波振動の振巾を制御している。このようにして健全な鑄塊を得ている。他の材料についても同じ大きさで成功したといつている。さらに 12 in φ 位のいくつかの鑄塊の製造にもすでに成功している。また周波数は 5~60 kC の範囲で良好であるという。このような成功は真空アーク熔解という有利な条件にもとづいているともいえるが、さらに大氣中で成功することを期待している。恐らくすでに成功しているであろう。

Westinghouse Electric Co. のもう一つの報告<sup>18)</sup>では、真空アーク熔解の鑄塊が磁場攪拌, 電氣的入力調節, 超音波照射の三つの方法でどんな相違があるかを示している。処理した材料は第 6 表のようなものである。

第 6 表

	Ni	Cr	Mo	Mn	Ti	C
Rotor steel	2.5	0.75	0.5	0.5		0.35
Discalloy (商品名)	26	13.5	2.75	—	1.75	0.05
316 Stainless steel	12	17	2.5	2		0.05
Austenitic high-manganese alloy	—	5	—	18		0.50



第 13 図

装置は第 13 図に示した。具体的なことは何もかいてないがマクロ組織の写真が出ているのは興味深い。上述の 3 つの方法の中で超音波照射がすぐれているらしいが、まだ残された問題は多い。

われわれは 1955 年頃鑄鉄の超音波処理を計画し具体的に初めたのが 1956 年頃であつた。研究の大部分は超音波エネルギー伝達方式の確立であつた。上部方式のながい経験から下部方式に切りかえた。大体 Westinghouse 方式の大氣中での形式と見てよい。その要点はすでにのべた。

普通の鑄造では白鉄となるべき材料でも超音波の作用でセメントライトが分解して黒鉛が出るのが可能であることがわかつた<sup>20)</sup>。また球状化しない程度の少量の Ce でかなり微細化した黒鉛が出て、きわめて強靱な鑄鉄を

製造することができた。使用電力容量は 1 kW, 周波数 22.3 kC である。普通 1500°C 程度の温度の湯を処理している。鑄塊の大きさは 45φ×150mm 位であつた。これらの結果は一例であつて今後いろいろな配合条件で普通の鑄造と超音波鑄造の相違がかなり明瞭になることが期待される。

## VI. 結 言

これまで超音波鑄造の現状についてのべたが今後の見透しはどうか。どんな点が問題点であり解決せねばならないか。思いついた点を簡条書にして見るとつぎのようになる。

- ① ホーンの疲労, 材質, 冷却
- ② ホーンと熔湯とのなじみ
- ③ 下部方式でホーンと湯となじんだ後の始末
- ④ 振動子の電気音響変換能率改善
- ⑤ 周波数の選択
- ⑥ 処理量と電力との関係

以上の問題の中で④のように鑄造に限らない一般的な問題もある。②と③は下部方式に宿命的な問題であつて、この方式の実用化への最大のなやみである。⑥は②, ④, ⑤の問題と密接な関係がある。①は上, 下, 側面の三方式でいつでも問題となる。併し下部方式ではそれほど問題とならないのが、この方式の最大の長所である。

具体的には結晶粒が粗大であるとか樹枝状晶が出るとか偏析がいちじるしいとかいう特定の材料について、温度条件その他によつてエネルギー伝達方式をきめて個別的に解決せねばならない。現状では実際のどの材料でどんな問題になやんでいるかということが与えられれば恐らくその対策は示すことが可能であると思う。

超音波鑄造に対する不安の一つは大きな鑄塊が果して処理可能であろうかという点であろう。すでに 200mm φ位は成功しているが、それ以上も不可能でないことはあきらかである。もちろん例えば下部方式では周波数は下げて恐らく共振条件を利用するとして工業的には 5kC 位で処理することになるであろう。しかも電源は真空管発振方式ではなく高周波発電機が使用されるものと予想している。

しかしいずれにしろ現状では実験室規模で他の如何なる方法でも得られないが超音波のみで可能であるという有利な具体的材料をさがし出すことが先決問題であり、急務でもある。

(昭和36年1月寄稿)

## 文 献

- 1) A. E. CRAWFORD: Ultrasonic Engineering. With Particular Reference to High Power

Applications 1955

- 2) F. HUETER and R. H. BOLT: Sonics: Techniques for the Use of Sound and Ultrasound in Engineering and Science 1955
- 3) H. J. SEEMANN und H. MENZEL: Metallwissenschaft und Technik, Oktober (1947) 39~46
- 4) 2) の本の中で p. 230  
R. ESCHÉ: Akustische Beihefte (1952) 208~218
- 5) R. B. LINDSAY: Physics Today, 11 (1958) 14
- 6) G. SCHMIDT und A. ROLL: Zeit. f. Elektrochem. 45 (1939) 769~775
- 7) 堀 芳郎, 上沢育三: 日本金属学会誌, 23(1959) 168~172
- 8) E. A. HIEDEMANN: Jour. Acous. Soc. America 26 (1954) 831
- 9) 筆者未発表:
- 10) R. W. BOYLE and G. B. TAYLOR: Roy. Soc. Canada, 20 (1926) 245
- 11) S. SOKOLOFF: Acta Physicochim. (USSR) 3 (1935) 939~944
- 12) G. SCHMIDT und L. EHRET: Zeit. f. Elektrochem. 43 (1937)
- 13) G. SCHMIDT und A. ROLL: Zeit. f. Elektrochem. 46 (1940) 653~657
- 14) P. D. SOUTHGATE: Jour. Metals, Trans. AIME: April (1957) 514
- 15) ニコライチック, ニコライチック: スターリ, No.4 (1957) 322
- 16) グレヴィチ, レオンチエフ, テウミン: スターリ, No.5(1957) 406
- 17) D. H. LANE, J. W. CUNNINGHAM and W. A. TILLER: Metal Progress, September (195) 108
- 18) D. R. CARNAHAN, J. H. KELLEY, L. M. BIANCHI: Trans. Vacuum Metallurgy Conf. (1959) 49~57
- 19) P. M. UNTERWEISER: Iron Age, Sep. 11 (1958) 178
- 20) 筆者: 未発表
- 21) E. HIEDEMANN: Stahl u Eisen, 56 (1936) 600
- 22) H. J. SEEMANN: Metallwirtschaft: 15 (1936) 1067
- 23) Foundry: July (1953) 100
- 24) A. B. TESMEN: Metal Progress, May (1959) 106
- 25) M. B. AL'TMAN, B. I. SLOTIN, N. P. STROMSKAYA and G. I. ESKIN: Metall. i Toplivo, May/June (1959) 88
- 26) V. F. KRAVCHENKO, S. ENEKES, K. G. TRUBIN and E. V. ABROSIMOV: IZV. VUZ, Chern. Metall., July (1959), 23