

# 超 音 波 鑄 造

朴 鎮 黙・鳥 飼 安 生

超音波の冶金工業への応用として、溶融状態または凝固過程にある金属に超音波振動を与えることによって、結晶粒の微細化、脱ガス、分散作用等により金属の諸性質を改善させることができる。ここでは、超音波鑄造についての概略と、基礎的資料を得るため行なった実験結果について簡単に述べる。

## 1. は し が き

超音波鑄造は Boyle および Taylor<sup>1)</sup> が 1926 年最初に軽合金の脱ガスに成功して以来多くの人々に引き継がれ、古くから実験事実として一般に認められている。

この超音波鑄造は最近急速に脚光をあびるようになってきた広範な超音波の工業的応用のうちではむしろ目立たない分野の一つであるが、しかしその発展の歩みは遅いとはいえ着実に実験が積み重ねられており、特に最近のめざましい電子工業の発展に伴って大出力の音源が得られるようになったので、この超音波鑄造も工業的な規模で利用できるまでになりつつある。

高温の溶融物に強力な振動を与える方法としては、機械的な振動法、<sup>2)</sup> 電気力学的な振動法、<sup>3)</sup> 超音波法等があるが、ここでは超音波法について述べることにする。

超音波法では、振動子として電歪型（水晶、チタン酸バリウム等）と磁歪型（ニッケル、アルフェロ、フェライト等）とがあり、電歪型は電気音響変換能率がよく強力振動源としてすぐれているが、磁歪型振動子にくらべて機械的強度が弱く、しかもキュリー点が低いので工場での高温のふんい気で使用するには不適當である。

これらの振動子そのまま高温の溶湯に接触させることができないので、適当な材料を介して振動を伝達させるが、この材料としては、高温での機械的強度およびエロージョン抵抗が大きいこと、熱衝撃に対して強いこと、金属溶融物と反応しないこと等の特性が要求されるので、これらを十分に満足させる適当な材料を見いだすことが問題である。これが従来比較的低融点金属で小規模な実験が多かった理由の一つと考えられる。

超音波エネルギーを伝達させる方式としては、上部、下部、側面の三方式があって、上部方式は Crawford<sup>4)</sup> や Hueter<sup>5)</sup> 等が紹介しているが、Seemann<sup>6)</sup> の論文でも実用化する方式として適しているとの意見が述べられている。

次に下部方式については、ドイツの Schmid<sup>7)</sup> が 1937 年この方式を採用して歴史的な実験を行っており、おもに高い融点をもつ材料の処理に用いられる。たとえば

ソ連の Nikolaichik および Gurevich<sup>8)</sup> は鉄関係の材料に下部方式を採用して実験を行ない、1957 年 Stali に論文を発表している。アメリカでも 1959 年頃 Westinghouse 社の Lane および Kelley<sup>9)</sup> らも発表しているが、ドイツでは実用化方式としては難点があるとして、Schmid<sup>7)</sup> の実験以来発展しなかったようである。

また側面方式は 1 個以上の振動子を装備することができるので、実用化については連続鑄造に有望な方式である。

以上の三方式はおのおの長所、短所を持っており、その実用化の面では処理すべき材料の融点に応じて適当な方式を選べばよいと思われる。

処理材の溶解には普通電気炉や高周波炉を使用しているが、アメリカの Westinghouse の Lane<sup>9)</sup> らの発表では、処理材の溶解に消耗電極型アーク炉または真空アーク炉を使用し、優秀な鑄塊を生産したと述べており、現在ソ連でも真空中での超音波鑄造がアーク炉を用いて行なわれているようである。

当研究室では最近超音波鑄造に関する基礎的資料を得る目的で半田、アルミニウム、シルミン (Al 合金) 等について実験を行ってきたが、以下これらについて概略を述べる。

## 2. 実験目的および原理

超音波の冶金工業への応用として、溶融状態または凝固過程にある金属に超音波振動を与えることによって、結晶粒の微細化、脱ガス、分散作用等により金属の諸性質を改善させることが期待される。これらの諸効果は溶湯が単に振動でゆさぶられるためだけで起こるのではない。たとえば溶湯に低い周波数での機械的振動を与えた場合、湯がとび出るほどに振動していても効果はそれほど見られないが、超音波振動を与えた場合、湯面はほとんど振動してないようでもよい結果が得られる。この点が低い周波数での機械的振動を利用した場合と、超音波を利用した場合との違いである。

一般に、液体における超音波作用は、超音波照射に伴い発生する空洞現象 (Cavitation) によるものであると

いわれる。液体中に超音波が照射されると、液体中には引張り、圧縮の応力がくり返し加えられるが、その圧力振幅が静圧（一般に大気圧）以上になると引張りの際に負圧となり微視的な空洞が生じ、次の圧縮で空洞がつぶれる。この空洞がつぶれるとき生ずる予想外の大きな圧力（数百～数千気圧）が衝撃波となって、破壊、分散等の作用をするといわれる。

高温の金属溶湯中においても、超音波の同様な作用が存するかどうかは疑問であり、この場合の超音波の作用機構についてはまだ不明の点が多いが、Schmid と Roll は Wood 合金 (Bi 50%, Pb 13%, Sn 20%, Cd 7%, Zn 10%) その他の合金について実験を行ない、振動によって凝固過程に生じた針状結晶が破壊されると考え Stokes-Oseen の式を用いて針状結晶と溶湯との間の摩擦力を近似的に計算した結果、結晶粒の微細化あるいは破壊の機構は、周波数に依存することなく、音波強度によって溶湯中に起きる摩擦力に依存すると結論している。

この説とは反対に結晶粒微細化の過程は、一度できた結晶粒が破壊されるのではなく、超音波の影響はむしろ核生成の促進にあり、その生成確率の増加が結晶粒を微細化するという説もある。

D. H. Lane, J. W. Cunningham, and W. A. Tiller<sup>9)</sup> らによると、その機構として考えられるものは、固相・液相間の平衡状態の変化、温度分布に対する影響、触媒作用に対する影響等が考えられる。

ここで興味のあることは、融点より十分低い温度でも、振動の影響で金属中の介在物がこわれることで、たとえば Hiedemann<sup>10)</sup> の行なった実験の結果では、数 Mc の超音波で鋼鉄中の酸化物介在物が室温で破壊されたと報告されている。

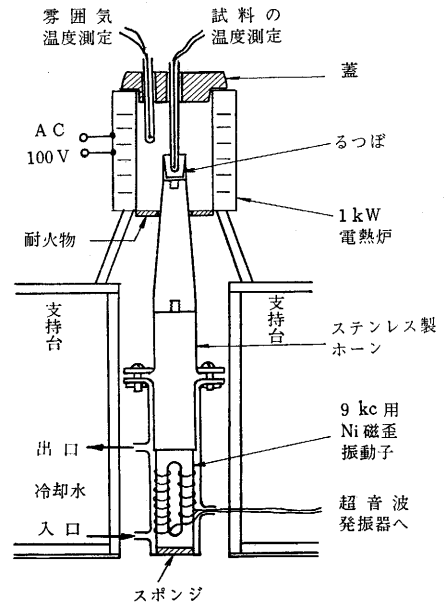
超音波鑄造の機構については、上述のように種々の場合・説があり、これを追究することは興味のあることであるが、またこれの実用化という観点から研究を進めることも大事なことである。ここではむしろ後者の立場から、その基礎的資料を得る目的で行なった実験結果について簡単に述べる。

### 3. 実験装置および実験方法

2 kW 超音波発振器と 9 kc 用 Ni 磁歪振動子を接続させ、超音波振動を溶融物に与えるが、振動子を高温の溶融物に直接接させることができないので、伝達法としてはステンレス製のホーンを用いる。振動子にホーンを接着し、振動子の部分は水冷を行なう。

振動子は純 Ni の薄板に窓を打ち抜き、1 枚ずつ絶縁して積層しコイルを巻いたもので、直流によって偏倚磁界を与え、それに機械的共振周波数と同一の交流を重畳して振動させると強力な超音波が得られる。

第 1 図で示す実験装置では、振動子が入っている水冷



第 1 図 実験装置（下部方式）

部とホーンとの全体の長さは 840 mm である。ホーンは振動子との接合面から先端までを 9 kc に対して 1 波長の共振するように設計されており、半波長ずつ二つの部分に切ってねじ込み接合するようになっている。振動子に近い部分のホーンの節部にはつぼが出ていて水冷筒に固定させてある。

#### (1) 比較的融点の低い半田合金（市販）についての実験

実験装置は第 1 図で示してあるが、ホーン先端にはステンレス製のつぼをねじ込み、1 kW 電熱炉内に納めてある。この電熱炉で半田 210 g を溶かした後炉の電源を切って、溶融半田の温度 240°C のとき下部から超音波振動を与える。

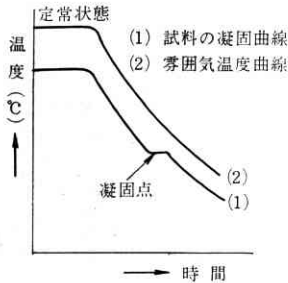
振動子への高周波電気入力（以下高周波を省略する）200W を与えると半田がとび出るので 100W に下げ、半田がほとんど凝固するまでの間超音波振動を与え、以後炉の余熱で徐冷を行なった。このときの超音波照射時間は約 40 分である。

この試料と超音波振動を与えない試料とを比較するため、半田 210 g を溶かし、温度 240°C で凝固させたサンプルを作った。

なお温度測定は超音波照射時に行なうのがむずかしいので、実験を行なう前にあらかじめ溶湯温度およびふんい気温度を同時に測定し第 2 図で示すようなグラフにしておき、実験時にはふんいき温度のみを測定し第 2 図の曲線にもとづいて溶湯温度を推定した。

#### (2) 比較的融点の高い Al(99.99%) についての実験

(1) の半田についての実験結果にもとづいて融点の少し高い Al について実験を行なった。装置は第 1 図と同



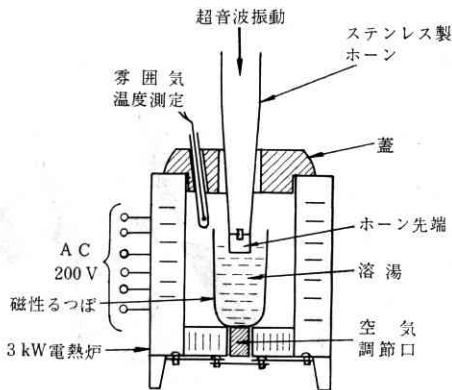
第 2 図 温度曲線

様であるが、ホーン先端のねじ込みるつぼはカーボン製のものを用い、1 kW 電熱炉は保温用とし、他の炉で溶かした溶融 Al をるつぼに注ぎ込み超音波振動を与える。保温用炉の温度があまり低いと溶湯を注ぎ込むと同時に凝固するので、保温用炉の温度を Al の融点付近まで高めた後溶融 Al 90 g をるつぼに注ぎ込み、溶湯がほとんど凝固するまでの間超音波振動を与え、以後炉の余熱で徐冷を行なった。振動子への電気入力 は 150W で、超音波照射時間は 15 分前後である。

この結果得られた試料をマクロ組織で見ると柱状晶は完全になくなっていて、結晶粒の大きさが試料によっておのの異なっている。たとえば結晶粒が相当微細化されたものや反対に成長したもの等がある。これは実験時に炉の蓋を取り、他の炉で溶かした溶融 Al をるつぼに注ぎ込み蓋を開けたままの状態で行なっていたので、ふんい気温度、超音波照射時間、振動子への電気入力等の違いから生じたものと思われる。

そこで今度は保温用炉内で試料を溶かし、ふんい気温度（定常状態で約 30 分間保持）、超音波照射時間、電気入力等を一定にして実験を行ない、以後炉の余熱で徐冷を行なった。これらの試料と超音波を照射しない試料とを比較するためのサンプルを作った。

(3) シルミン (Al 90%, Si 10%) についての実験  
実験 (1) および (2) では下部方式を採用して実験を行なったが、試料の量が少ない（るつぼが小さい）た



第 3 図 実験装置（上部方式）

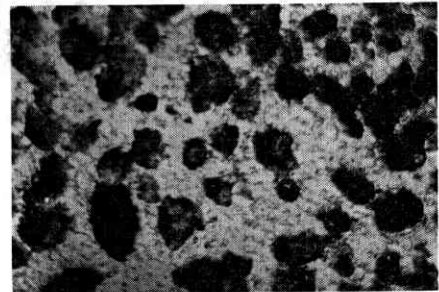
めふんい気温度による影響が大きいく、そのために実験条件を一定に保たせるのがむずかしいと考えられたので、今度は第 3 図で示す上部方式を採用して実験を行なった。この方式では試料の量が多いためふんい気温度による影響が少なく実験条件を一定にしやすいと思われた。

ステンレスホーンは溶湯と反応するのでホーン先端には軟鋼にアルミナライジングしたものまたはカーボン製のものを用いた。

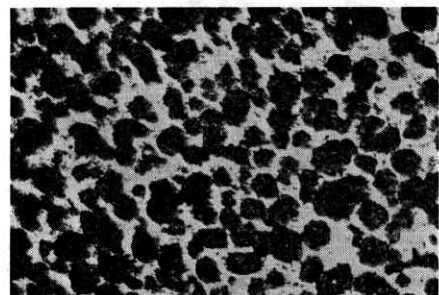
市販のシルミン 1 kg を 3 kW 電熱炉で溶かし、ホーン先端を溶湯中に深さ 10 mm ぐらいつけて超音波の照射を行なうが、常温のホーン先端を溶湯中につけると溶湯がホーン先端に付着凝固するので、あらかじめ先端を融点近くの温度まで加熱した後溶湯中につけて超音波照射を行なう。振動子への電気入力 200 W を一定にし、溶湯温度 588°C から溶湯がほとんど凝固するまでの間超音波を照射し、以後炉の余熱で徐冷を行なった。このときの超音波照射時間は 9 分であった。

この結果得られた試料を二つに切断してみると試料の外側から凝固を始め中心部が最後に凝固したので大きなホールができていた。これは試料の量が多いためと、炉底が密閉してあるためと考えられたので、以後の実験では炉底から空気が入るようにした。

振動子への電気入力 200 W を一定にし、超音波照射を始める溶湯の温度（たとえば 598°C, 605°C, 610°C, ……700°C）をいろいろと変え溶湯がほとんど凝固するまでの間超音波を照射し、以後炉の余熱で徐冷を行なった。このときの超音波照射時間は 10~40 分以内であった。この結果得られた試料と超音波を照射しない試料とを比較するためのサンプルを作った。



超音波無処理 ×81



超音波処理 ×81

写真 1 半田のマイクロ組織



無処理

超音波処理

写真2 Alのマクロ組織

#### 4. 実験結果および考察

3. (1)の半田についての実験結果をマイクロ組織(写真1)およびビッカース硬度で比較した。写真1で見るとおり超音波処理をしない試料のマイクロ組織にくらべ、超音波処理をした試料のマイクロ組織の方が明らかに微細化されている。

またビッカース硬度(荷重 25 g)の比較では、超音波処理をしないものが平均 13 であるのに対し、超音波処理をしたものは平均 17 であった。しかし部分的にばらつきがあったので、定量的な比較はできなかった。

3. (2)のAlについての実験結果を、マクロ組織(写真2)で比較した。写真2で示すとおり超音波処理をしない試料の結晶粒が柱状晶であるのに対し、超音波処理した試料の方は結晶粒が相当微細化されたものや、あるいは逆に結晶粒が成長して大きくなったものもある。

しかしいずれも柱状晶は見られない。

3. (3)のシルミンについての実験結果については、マイクロ組織(写真3)、マクロ組織(写真4)、およびロックウェル硬度(第5図)で比較した。

超音波処理をしない試料のマイクロ組織では共晶のSiが大きく、三元共晶も見られるが、超音波処理をした試料では共晶のSiが全般的に小さくなっており、三元共晶も見当たらず、超音波によってSiが破壊されたものも見られる。

同じくマクロ組織でも、超音波処理をしない試料は粗大な結晶をしているのに対し、超音波処理をした試料の方は非常に微細化されている。

また硬度での比較は、ロックウェル硬度試験機(H<sub>R</sub>, H, 荷重 60 kg, 1/8 Ball)を用いて試料1個について第4図で示すように20カ所の硬度を測定したが、試料の上下でのばらつきがあるので、その平均値で比較した。



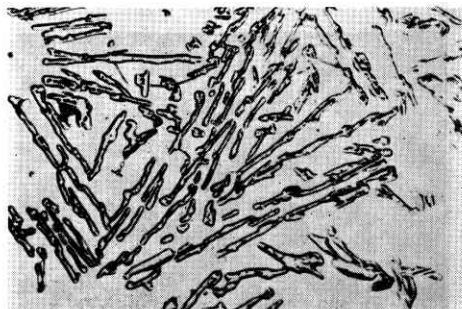
無処理

×81



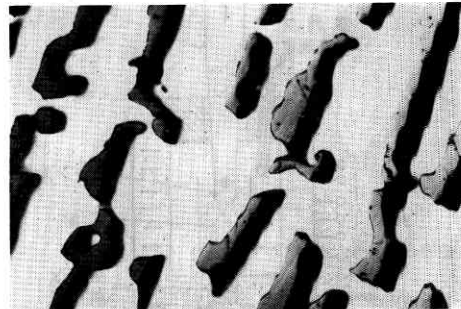
無処理(三元共晶)

×320



超音波処理

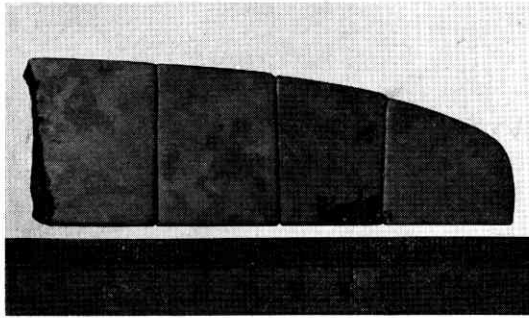
×81



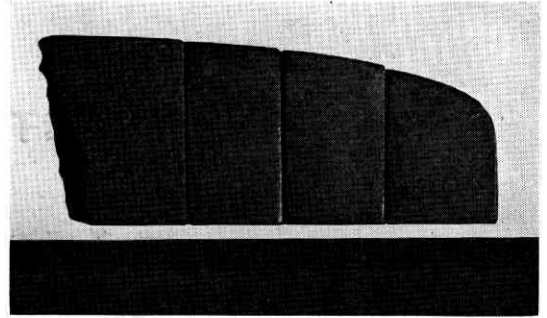
超音波処理(Siの破壊)

×320

写真3 シルミンのマイクロ組織

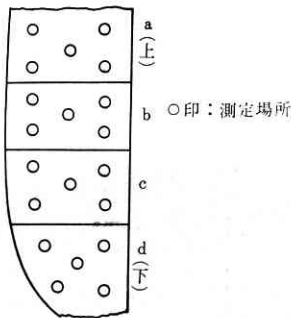


無 処 理

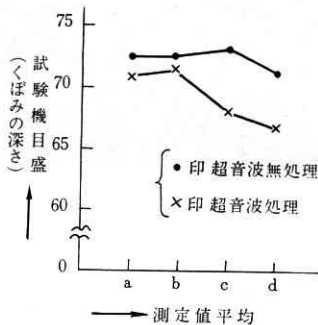


超 音 波 処 理

写真 4 シルミンのマクロ組織



第 4 図 ロックウェル硬度試験



第 5 図 ロックウェル硬度試験結果

測定結果は第 5 図に示すとおりであるが、超音波処理をしない試料の硬度平均値（硬度はくぼみの深さで表わし、数値が小さいほど硬い）が 72.4 で、超音波処理をした試料の硬度平均値は 69.5 でいくらか硬くなっている。

3. (1) の半田についての実験では、ある程度目的に沿うような結果が得られた。

3. (2) の Al については、実験条件（溶湯温度、電気入力、超音波照射時間等）を一定に行なったつもりであったが、得られた結果では、結晶粒が微細化されたものや、あるいは成長したものもあってばらつきが多く、再現性とばしかった。その原因としては、第 1 に試料の量が少ない。第 2 に温度制御の不確定さ、第 3 に超音波照射の不正確さ（装置を含めて）等が考えられ

る。第 2 については、電熱線、ふんい気、溶湯、それぞれの温度が定常状態に達していなかったため、温度制御の時間的遅れに起因する冷却曲線の違い等が考えられる。第 3 については、振動子への電気入力を電力計に依存していること、るつぼをホーン先端にねじ込みるつぼごと振動させるために、るつぼの締め具合やるつぼ壁の消耗の度合等による損失差の生ずること、振動状態がおのおの異なることのためと思われる。

3. (3) のシルミンについての実験では、3. (2) の問題を解決するために下部方式を中止して、上部方式を採用して実験を行なった結果、初期の目的までは達しなかったが、マクロでの微細化や、ミクロでの Si の破壊等の観察により、超音波処理をしない試料にくらべ全般的に粒子がこまかくなっていることが認められ、また再現性も得られた。

なおホーン先端には、軟鋼にアルミナイジングしたものとカーボン製のものを使用したが、結果はほとんど差がなかった。

### 5. む す び

以上超音波铸造についての概略と半田、Al、シルミン等の実験と結果について簡単に述べたが、超音波铸造法でのホーンの材料の問題と装置についての問題が残っているとはいえ、今回筆者らが行なった基礎的資料にもとづいて冷却条件のよい連続铸造に应用すればよい結果の得られることが期待される。

今後は融点のもっと高い金属材料について実験を進めてゆきたいと考えている。

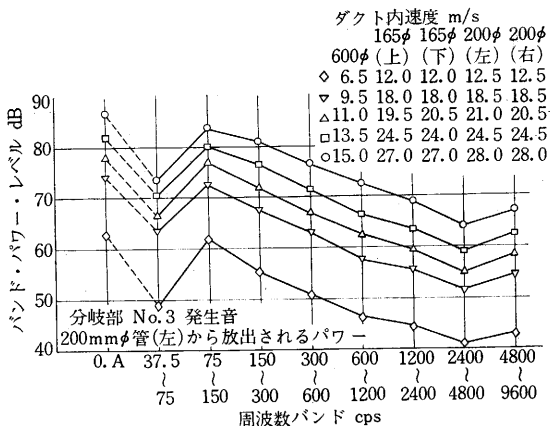
最後にこの研究を行なうに当たりいろいろご教示いただいた西川精一助教授、その他ご協力くださった方々に感謝する次第である。  
(1965年6月14日受理)

### 参 考 文 献

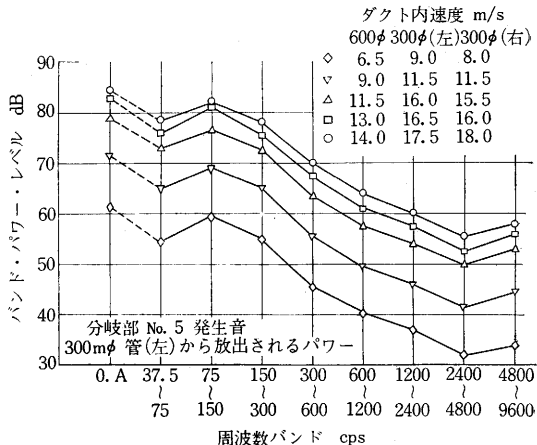
- 1) R.W. Boyle and G.B. Taylor; Transactions. Roy. Soc. Canada 20, 245, (1926)
- 2) O. Mühlhäuser; German Patent No. 569598 (1931)
- 3) A.P. and G. Mahoux; French patent No. 700049 (1929) with Supplement, No. 38999 (1930)

(22ページへつづく)

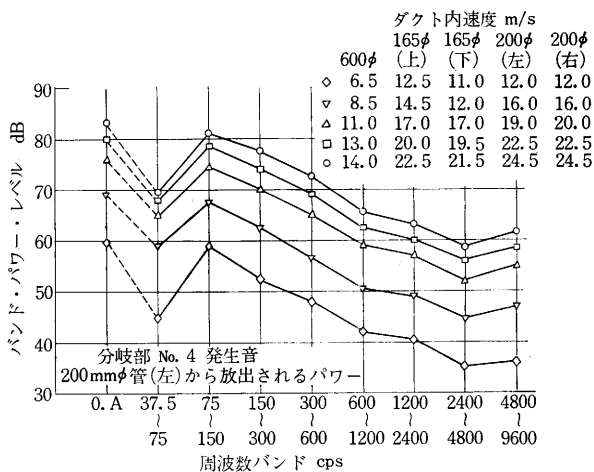
研究速報



第5図 分岐部 No.3 の発生音



第7図 分岐部 No.5 の発生音



第6図 分岐部 No.4 の発生音

大する。その増大のしかたは、速度が2倍になるときに約 20 dB である。

5. 結 言

本報告では1種類の流量比についてのみ述べたが、現在、流量比を変化した場合、さらに第1図の No.6 および7の供試体についても実験を行なっている。

本研究に対し、大成建設KKおよび菱井賢一郎、前田秀則両氏のご協力をいただき、実験に際しては斉藤一郎君の労を多とした。ここに記して深謝する。

(1965年5月26日受理)

文 献

- 1) 沖：水力学 (1948)
- 2) Vogel, et al : Mitt. Hydraul. Inst. T. H. München (1931)
- 3) Gilmann : ASHAE Trans., Vol. 61 (1955)
- 4) 井上：建築学会関東支部研梗概集, Vol. 33 (1962)
- 5) 勝田, et al : 建築学会論文報告集, Vol. 89 (1963)

(5 ページよりつづく)

G. Mahoux; Comptes rend (Paris) 191, 1328 (1930) No. 25 and Mécanique 21, 281(1937)  
 Esmarch, Rummel, and Beuther; Wiss. Veröffentl. Siemenswerken 78 (1940)

- 4) A. E. Crawford; Ultrasonic Engineering, with Particular Reference to high power Applications (1955)
- 5) F. Hueter and R.H. Bolt; Sonics, Techniques for the Use of sound and Ultrasound in Engineering and Science (1955)
- 6) H.J. Seemann and H. Menzel; Metallwissenschaft und Technik, 1, 39 (1947)
- 7) G. Schmid, und A. Roll; Ztschr Elektrochem. 43, 869(1937) and 45, 769 (1939)
- 8) E.N. Nikolaichik; Stali 4, 322 (1957)  
 IA. B. Gurevich, V. I. Leonchiv and I. I. Cheumin; Stali 5, 406 (1957)
- 9) D.H. Lane, J.W. Cunningham and W.A. Tiller; Metal Progress, 108 (1959)  
 D.R. Carnahan, J.H. Kelley and L.M. Bianchi; Trans. Vacuum Metallurgy conf 49 (1959)
- 10) E.A. Hiedemann; Stall u. Eisen 56, 600 (1936)  
 E.A. Hiedemann; Jour. Acous. Soc. America 26, 831 (1954)