金属材料内の超音波の減衰 (II) 純アルミニウム*

廣 根 徳太郎** 神 垣 知 夫**

Tokutaro Hirone and Kazuo Kamigaki: Attenuation of Ultrasonic Waves in Metals II, Pure Aluminium.

Attenuation of longitudinal ultrasonic waves in polycrystalline pure aluminium rods (99.9%) was measured with impulse method at several frequencies between 2 and 25 megacycles per second. with various heat treatments of rods. Due to the successive heat treatment the mean grain diameter of the aluminium rods made a growth from about 0.2 to 3mm, as shown in photo 1. Measured values of attenuation are plotted in Fig.3 as a function of frequency. As it shows, the value of attenuation changes greatly with the grain sizes of the specimens. When grain size is small, attenuation is nearly proportional to frequency and the proportional constant increases with grain diameter. For large grain size, however the attenuation curves seem to saturate at high frequency range. If the grain diameter becomes very large, attenuation reaches a constant value independent of frequency. Attenuation constant of the present experiment is considerably smaller than the previous results by Mason and McSkimin and Roth. Those changes of attenuation can be explained as follows. First, the attenuation of ultrasound in proportional range is due to elastic hysteresis loss. If the wave length becomes shorter, a considerable part of the attenuation is caused by the Rayleigh scattering and is proportional to the fourth power of frequency. If wave length becomes nearly equal to grain size, attenuation is proportional to the second power of frequency due to the change in phase of traveling sound at the grain boundaries. Last stage of constant attenuation will be explained as a result of reflection and refraction of the sound at the grain boundaries.

(Received April 27, 1953)

I. ま え が き

まえの報告⁽¹⁾によると、メガサイクルぐらいの周波数の超音波は、アルミニウムの多結晶體の中で、かなり著しい減衰を示すことがわかった。しかし使ったアルミニウム材は純度のひくいもので、焼鈍をくり返した材では射入超音波の異常な散乱現象が生じそのため結晶粒の大きさと減衰との関係を見つけたことができなかった。この研究では純度 99.99 % のアルミニウム材について、超音波の縦波の減衰を測り、結晶粒の大きさに對する減衰の様子を明ら

す法で、結晶粒度をとるのえるにも同じやり方をした。

II. 測定に使った試料

この測定に使ったのは、日新化学製の 99.99 % Al で、不純物としては硅素を 0.009 % ほど含んでいる。インゴットを熱間槌打した後、冷間で十分槌打して數十 % の加工を加え結晶粒を細かくした後、直径約 5 cm, 長さそれぞれ 5 cm と 10 cm の圓筒形に仕上げた。圓筒の両端の面はよく仕上げ、約 0.01 mm 以上の精度で互に平行になるようにした。この試料を次のような温度と時間で逐次に焼鈍

温度 時間 結晶粒徑 HL	150°C 1hr	270 1	330 1	360 1	410 1	470 1.5	520 1.4	570 1	610 2	620 8	660 2	250 1	300 1	380 1	420 1	470 1
	<0.2mm	0.21	0.22	0.25	0.26	0.28	0.35	0.42	0.85	1.3	2	0.21	0.22	0.25	0.26	0.28
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	m	n	o	p	q

かにした。この結果はアルミニウム材の超音波による非破壊欠陥検査においてその結果を解析するための一つの基礎のデータとなるであろう。測定の方法は前と同じインバル

を施した。

結晶粒は Photo. 1 でわかるように、大體一樣な大きさをもつてるとみなされる。このうち最後のものでは、焼鈍により結晶粒の境がどのように動くかを示しており、黒く見えるのが最終焼鈍後の境界である。

** 東北大学金属材料研究所

* 1952 年 11 月福岡本會大會に発表

(1) 廣根, 神垣, 本誌, 17 (1953), 8.

Photo. 1 Micrographs of Grain Sizes for Each Step of Annealing.

III. 測定の結果とそれについての議論

測定の方法や、求めた測定値を整理する方法は、まえの報告⁽¹⁾とまったく同じに行つた。Fig. 1 に示す結果から

Fig. 1 Linear Attenuation of Ultrasonic Waves as a Function of Traveled Path Length Separated by the Number of Round Trips.

がたしかめられる。そこで周波数毎に減衰の平均値を求めて圖に書いてみると、Fig. 2 のようになる。こゝで α は

長さ 5 cm, b は長さ 10 cm の試料についてのもので、 c は a の 2 倍をとつた曲線で、 b と c とに挟まれた部分が端面での反射などによる損失に當ると考えられる。 b と c は大

Fig. 2 Measured Values of Attenuation, for Specimens Annealed Successively from Low Temperature up to 470°; Curve a is for the Specimen 5 cm in Length, b for 10 cm in Length, c Shows the Values of a Multiplied by a Factor of Two. Difference between Curves b and c represents the Reflection Loss.

體平行とみてよさそうであるから、このような損失に對しては周波数はあまり關係しない。反射率は 95 % ぐらいである。

アルミニウム材の結晶粒の大きさをいろいろ變えて測定した減衰の値を、まえの報告でのべた方式にしたがつて整理し、周波数に對して目盛つてみたのが Fig. 2 の曲線群である。まえの純度のひくい (99.4 %) アルミ材のときとはちがつて、結晶粒を十分大きくしてもらくに測定ができ、減衰の値が大きくなり、周波数が高くなつても測定はさほど難しくはなかつた。

このような曲線群から法則をみつけ出すことはたやすくはない。しかし結晶粒が最小のものと、最大のものとをくらべてみると、どちらも大體直線とみてよさそうであるが、はつきりしたちがいのことがわかる。まず結晶粒の平均の大きさが 0.21 mm のアルミ材では、Fig. 3 a のように周波数に對する減衰の大きさの變化はかなり大きく、その比例常數は大體

$$1.9 \times 10^{-15} \text{ neper} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{cycle}^{-1}$$

である。また結晶粒のいちばん大きなものでは、Fig. 3 k の曲線で、6 MC 以上の大體直線とみなせる部分についてみると、ほとんど周波数に關係なく一定とみなしてもよさそうな値

$$0.052 \times 10^{-15} \text{ neper} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{cycle}^{-1}$$

となつている。ところがこの中間の大きさの結晶粒度のものでは粒が大きくなるにしたがつて、はじめのうちは減衰對周波数をあらわす直線の傾きが次第に増してゆき、僅かに上にくぼんだ曲線ともみられるようにさえるが、ある程度まで結晶粒が大きくなると、減衰曲線は周波数の高い方

で頭をうつような形になる。そしてこの頭うちのはじまる周波数が、結晶粒の大きさが増すにつれて低くなつてく

Fig. 3 Attenuation of Ultrasonic Waves versus Frequency, for Each Step of Annealing of Specimens, Having Various Grain Sizes.

ることがわかる。また減衰の値をくらべてみると、周波数の高いところでは結晶粒の大きい方が減衰が少く、周波数の低いところでは、逆に結晶粗の大きい方で減衰も大きくなっている。

次に以上の測定の結果と以前のそれとをくらべてみる。まずまえの報告⁽¹⁾と較べてみると、不純物の多い 99.4% Alの方が減衰も大きい。また右の不純アルミは焼鈍を重ねると、不規則な反射パルスがあらわれて、減衰の値が求められなかつた。ところが 99.99% Alでは、焼鈍を重ねても指数関数型に減少する反射パルスが主にみとめられ、不規則なパルスはとるにたりなかつた。もとのインゴットを除いては試料の作り方、熱処理のしかたは同じなのだから、このちがいは結局試料の純度のちがいのせいにしてよい。すなわち焼鈍に伴って不純物が結晶粒のさかいに析出し、粒界が超音波をよく反射するようになるために起ると考えられる。つぎに軽合金について他の測定としては Mason と McSkimin⁽²⁾ の 17-ST (95%Al, 4%Cu,

1/2% Mn, 1/2% Mg) と Al(99%以上)についての測定 Roth⁽³⁾ のマグネシウムについての測定がある。

Masonらのデータでは減衰は、波長が結晶粒の平均の直径の3倍位になるまでは $B_1f + B_2f^2$ であらわされる。 f は周波数、 B_1 , B_2 は常数である。また Rothの報告によると、波長が結晶の大きさよりもずっと小さいところまで、減衰と周波数の関係は直線であらわされ、その傾斜は粒の直径 D が増すと減少する。そしてどちらも減衰の値が大きく、周波数 15 Mcで Mason などのでは $D=0.23$ mm の 17 ST で、0.12 neper/cm, Roth のでは $D=0.21$ mm のマグネシウムで 0.11 neper/cm である。

さて上にのべたデータによれば、アルミニウム多結晶体の中の超音波の減衰には、結晶粒度あるいはこれを變えるために試料にほどこした熱処理が大きな役割をはたしている。いま熱処理によつて起る性質の變化、たとえば硬度を考えよう。熱処理の度毎に測定したピッカース硬度の値は Fig. 4 の通りで、最初少し減つた他には大して變つていない。また前に述べたように、試料にははじめかなりの加工をうけるが、その加工歪の恢復も指数関数型で、ある限度以上の熱処理時間に對しては、あまりひどい變化は起らない⁽⁴⁾。つまり超音波の減衰の値ほど熱処理時間に敏感でなく兩者直接の關連はつけにくい。

そこでこのような特徴のある減衰の原因を主に擔つていられる結晶粒の大きさの影響を考えてみる。今模型的に同じ大きさのある理想的な形の結晶粒が、びつたりくつつき合つて集まつた塊を考えてみよう。アルミニウムの中の音の速さを $6000 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ として、測定に使つた超音波の波長を當ててみると、2 MC

Fig. 4 Vickers Hardness for Each Step of Annealing Treatments.

では 3 mm, 25 MC では 0.24 mm である。ところで、熱処理をかさねて作つた結晶粒の大きさは、だいたい 0.2 mm から 2 mm ぐらいまでであるからちよつどの波長と同じぐらいになっている。このような時には、波長が結晶粒の大きさにくらべて長いような範圍では、弾性履歴が減衰の主な原因となり、減衰は波長に反比例することにな

(3) Roth, J. Appl. Phys., 19 (1947), 901.

(4) 國富, 本誌, 16 (1952), 365.

(5) Rayleigh, Theory of Sound, II, 152.

(2) Mason and McSkimin, J. Appl. Phys., 19 (1947) 940.

り。

減衰 $\propto 1/\lambda$, つまり 減衰 $\propto f$

のかたちであらわされる。そしてこれにくわえて次のことを考える。すなわち波長が結晶粒の大きさにくらべて、いくぶん長いときには、Rayleigh の音波の散亂の理論⁽⁶⁾をあてはめて考えられよう。一様な媒質のなかに弾性的な性質のちがう球形のものが一つある時は、音波は散亂されて減衰し、ある測定點での値は位置についてのものをばぶくと

$$\text{減衰} \propto D^3 f^4 (\text{弾性率をふくむ項}) / v^4$$

であらわされる。 D は球の半径、 v はそれぞれ音波の媒質のなかの速度である。

散亂體が澤山あるときは、多重散亂は起らないものとする。上の式の弾性率の項をすべての散亂體について平均した測定點の位置についても平均すると、縦波については次の式⁽²⁾が求められる。

$$\text{減衰} = \frac{2\pi^3 P^3}{\lambda^4} \left\langle \left[\frac{C_{11} - \langle C'_{11} \rangle_{\text{平均}}}{\langle C_{11} \rangle_{\text{平均}}} \right]^2 \right\rangle_{\text{平均}}$$

右邊の $\langle \rangle_{\text{平均}}$ は弾性率 C_{11} の平均値からのずれの割合の 2 乗の平均を表わし、結晶の對稱性や弾性率の異方性の相違などにより、金属によつて値が異なり、アルミでは 0.3×10^{-3} 程度の數となる。

一方波長が結晶粒の大きさにくらべて短い時⁽²⁾は、音波は結晶粒の境の面での反射、屈折をくり返しながら傳わり數多くの結晶粒にいろいろな角度で入射し通りぬける。このような場合には減衰は、

$$\text{減衰} \propto \bar{R}/D$$

であらわされる。 $\bar{R}$ は粒界での平均の反射係數である。

波長と結晶粒の大きさがほぼ等⁽⁶⁾しい位の時に、上のは二つの考えは當てはまらなくなる。互に結晶軸の方向のちがう數多くの結晶粒を、つぎつぎに音波が傳わつてゆく間に音波の位相はだんだん變つてゆく。位相が平均の値からずれる様子を、結晶粒の弾性率の平均の値からのずれを平均自乗誤差とするような Gauss 函數からあらわされるとすると、結局

$$\text{減衰} \propto D f^2 \left\langle \left(\frac{\delta k}{k} \right)^2 \right\rangle_{\text{平均}}$$

となり、周波數の 2 乗に比例するようになる。 δk は弾性率の平均の値からのずれである。

これをまとめると、ある大きさの結晶粒をもつた試料について、波長が結晶粒の大きさにくらべて長いところでは、減衰は周波數に比例し、波長が粒の大きさに近づくとき、 f の 4 乗に比例する項がいちぢるしくなる。次に粒の大き

さと等しいぐらいになると、 f の 2 乗に比例するようになり、もつと波長が短くなると、結晶粒の大きさによつてきまる一定の減衰の値をもつようになるということになる。

これを Fig. 3 の曲線群とてらしあわせてみると、上のような過程のすべてが、一つの曲線にすつかりあらわれているものはないが、焼きなましのはじめの頃に當るものは、減衰が周波數に對して直線的で、 f に比例する項に僅かに f の 4 乗の項が重なつたものと考えられる。また焼き戻しがすすみ、結晶粒が大きくなると、結晶粒の大きさが波長の 2~3 倍にもなり、周波數の高いところでは上にのべた粒界での反射屈折による減衰があらわれて、減衰は周波數によつて變らなくなる。しかも、この減衰の直線部分の高さは、 D が大きくなくなるほど低くなつていく。前に述べた Mason や Roth の測定は、どちらもこの測定結果の一部分をあらわすものと考えてよいであろう。つまり Mason の Data は減衰 $\propto B_1 f + B_2 f^4$ のなりたつ範圍の測定にあたり、 D が大きく周波數が高いところは、含まれていないし、また Roth の Data は f に比例することしかあらわしていない。これは Fig. 3 の終りの方の曲線とてらしあわされるように思える。しかしなおはつきりいえば、波長が短いところでは減衰の曲線は波長にかゝわりなく、全く一定な値をとつてはいないで、わづかの傾きをもっている。この傾きは、上にのべた音波の反射屈折のことだけからは説明出来ないし、波長の長いところでの f に比例するという法則が、どこまで成立つものかも、この測定からはわからない。

要するに、アルミニウム多結晶體の中で、メガサイクル程度の超音波が減衰する主な原因は、數多くの素結晶粒から出來上つていくことにあるので、しかもこの結晶粒の大きさが超音波の波長と同程度の時に、特別な周波數依存性をもつた減衰がみられる。だから現象はアルミニウムに固有なものではなくて、粒の揃つた多結晶體⁽⁷⁾の中では同じような現象がみられるであろう。しかし波長が短くなつた時に、減衰と周波數との關係が平らな直線になるとは限らないことや、周波數と比例關係が成立つ範圍などは、是非とも單結晶⁽⁸⁾を使つてみなくてはわからない。また試料の純度や組成によつて減衰がひどくちがつてくる理由もわかつていない。これらは上の結果を數式の上でまとめてあらわすこと⁽⁹⁾と共に、これから解かねばならない問題である。

(7) R. L. Roderick and R. Truell, J. Appl. Phys., **23** (1952), 267.

(8) H. B. Huntington, Phys. Rev., **72** (1947), 321.

(9) R. K. Roney, Ph. D. thesis, California Institute of Technology, (1950).

(6) Pekeris, Phys. Rev., **71** (1947), 268; H. B. Huntington, J. A. S. A., **22** (1950), 362.