

金属材料内の超音波の減衰 (第 7 報) ステンレス鋼*

廣根 徳太郎** 神垣 知夫**

Tokutaro Hirone and Kazuo Kamigaki : Attenuation of Ultrasonic Waves in Metals (7th Report) Stainless Steel. The ultrasonic attenuation coefficients in stainless steel were measured in the frequency range from 0.5 to 6 Mc/s. The stainless steel used here contained about 19 percent of chromium and 10 percent of nickel and had austenite structure at room temperature. The effect of austenite grain size on ultrasonic attenuation was examined. Specimens of various grain sizes were prepared by applying high temperature heat-treatments. The at-

** 東北大学金属材料研究所

* 1956年10月本会広島大会に発表

tenuation coefficient increases steeply with frequency and the main part of this attenuation is explained as Rayleigh scattering of ultrasound by austenite grains. The predominant factor determining the magnitude of this scattering is the degree of elastic anisotropy in austenite grains. The value of this anisotropy obtained here in stainless steel is about a hundredfold larger than that of aluminium.

(Received November 20, 1956)

I. ま え が き

ステンレス鋼材のなかの超音波の減衰係数を測つた結果を報告する。ここでは Ni-Cr 系のオーステナイト鋼を、高温で熱処理してオーステナイト結晶粒を成長させ、減衰係数の大きさを測つて、結晶粒の大きさと減衰係数とのつながりをしらべた。

まえに、炭素鋼と Cr-Mo 鋼について、超音波の減衰係数を測つた結果を報告⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾した。それらによれば減衰係数の大きさは鋼の組織によつてちがつた値をとり、超音波の周波数による減衰のかわりかたも違う。またオーステナイト結晶粒の大きさが、減衰の大きさとつながりのあることも判つた。しかしこれらはマルテンサイトやフェライトとセメンタイトとが共存する組織のものについての結果であつて、高温で安定なオーステナイト相のものについてはまだくわしく測つた報告はない。このごろオーステナイト系ステンレス鋼が、耐蝕、耐熱材料としてひろく使われるようになり、またそれが加工、熔接、熱処理などにより大きく性質を変えることから、非破壊欠陥検査の精度をあげることが要求されている。超音波による検査は、おもに熔接部分の精密な検査法として注目されているが、超音波の減衰係数のくわしい値は、その基本的なデータとしてかなり大きな意味をもつている。

II. 試料と測りかた

測定につかつた試料は、ステンレス鋼 6 種の Ni-Cr 系のもの*で組成は Table I のとおりである。このインゴットを熱間でよく鍛造

Table I Composition of the specimen.

C	0.11 (%)
Si	0.64
Mn	0.76
P	0.064
S	0.012
Ni	9.92
Cr	19.20
Cu	0.72

したのち、直径 5 cm の丸棒に仕上げた。長さは 4, 5, 9, 10 cm で、端面はよい平面に仕上げ、また平行度の狂いは長さに対して 1/1000 以下になるようにした。いろいろな長さの試料を作つたのは、端面での反射による超音波のエネルギー損失の大きさを知るためと、減衰が大きくなつた状態でもよく測定できるようにするためである。

試料には繰返し熱処理をして、オーステナイト結晶粒の大きさを変え、そのたびごとに超音波の減衰係数を測つた。熱処理のしかたは日本鉄鋼協会の作業標準⁽⁴⁾により、

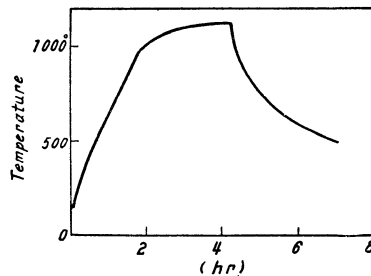


Fig. 1 A program of heat-treatment of the specimen invacuum.

約 1000° に 2 ~ 3hr おいて結晶粒が大きくなるようにし、温度を上げたり下げたりする条件は変えないようにした。そのプログラムの

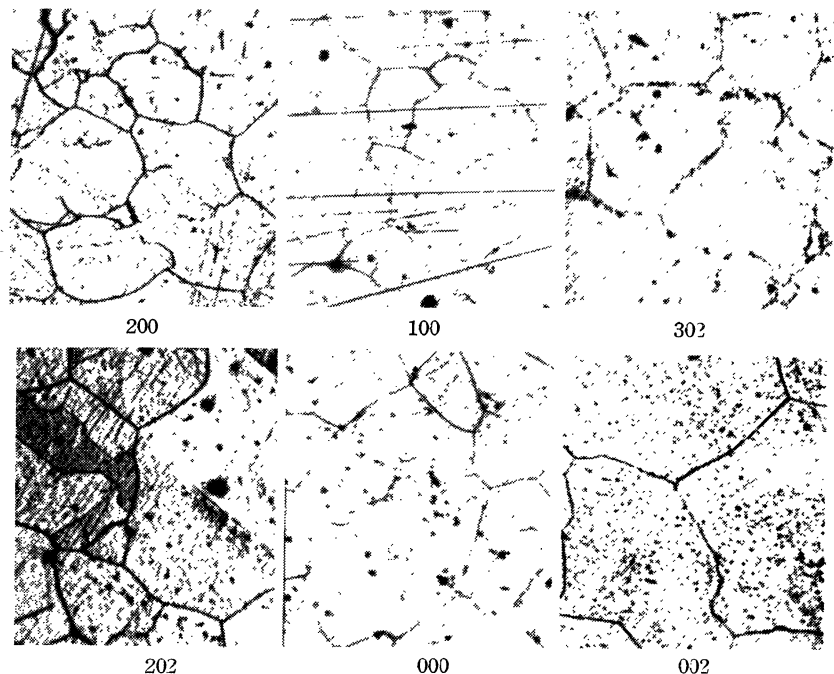


Photo. 1 The austenite grains in the stainless steel. (×100)

(1) 広根, 神垣, 科研報告, 29(1953), 297.

(2) 広根, 神垣, 本誌, 18(1954), 185.

(3) 広根, 神垣, 本誌, 18(1954), 483.

* 東北特殊鋼株式会社から提供された。

一例は Fig. 1 のとおりである。また表面を酸化させないために、熱処理はすべて真空のなかで行つた。

(4) 日本鉄鋼協会, 鋼の熱処理と作業標準, (1952), 112.

熱処理をした後で端面をみがいして組織をしらべ、またビッカース硬度を測った。それらは **Photo 1** と **Table 2** のとおりである。腐蝕は常温の王水で行い、ASTM の図⁽⁵⁾

Table 2 Vickers hardness of the specimens.

Specimen	Vickers hardness	Specimen	Vickers hardness
000	181	200	178
001	142	201	138
002	142	202	143
100	157	300	165
101	145	301	142
102	148	302	142

と比べて結晶粒度をきめた。結晶粒の大きさはすべて一様なのではなく、また双晶境界も認められるが、

熱処理をすゝめるとともに粒の平均の大きさが大きくなっている。ビッカース硬度の値は作業標準にするされた範囲内におさまっており、熱処理のしかたに異常のなかつたことが判る。

超音波の減衰係数を測るのに使った装置は、まえの報告⁽¹⁾に述べたとおりのもので、0.5~25 Mc/s の超音波が出せるものであり、ほかに 0.5~2 Mc/s 用の増巾器を使った。測定に使った周波数は 0.5, 1, 2, 3, 5, 6 Mc/s で、これよりも高い周波数では測ることができなかつた。

減衰係数の測りかたもまえと同じ⁽¹⁾で、試料の両端の面に X-カットの水晶片振動子をはりつけ、縦波の超音波パルスを試料に送りこみ、それが試料のなかをゆきかえりする間の振中の弱まりを測った。減衰係数の値はブラウン管は現われたパルス像の高さを一定の大きさに等しくなるようにしたときの

可変減衰器のよみからもとめた。超音波パルスが通つた距離によつて指数函数型に減衰していることは、**Fig. 2** のような減衰と超音波の通つた長さとの直線の関係から確かめられる。また端面での反射のロス、1 回ごとに 1 db であつた。

III. 測つた結果

試料を熱処理したたびごとに測つた減衰係数は、下に述べるようなありさまを示した。一般に減衰の値は周波数が高くなると大きくなり、しまいには測れなくなる。大体 9 Mc/s より高い周波数では測れなかつた。周波数が高くなつたときの減衰の増しかたはかなり大きく、また結晶粒の大きさによつてかなり違つている。

(5) ASTM Standards, (1952).

結晶粒のこまかいものについての例は **Fig. 3, 4** のようなものである。0.5~2 Mc/s では減衰の大きさはあまり違

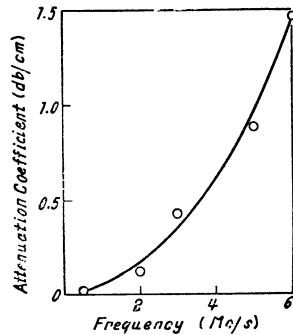


Fig. 3 Ultrasonic attenuation in specimen 201.

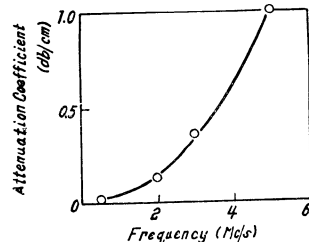


Fig. 4 Ultrasonic attenuation in specimen 301.

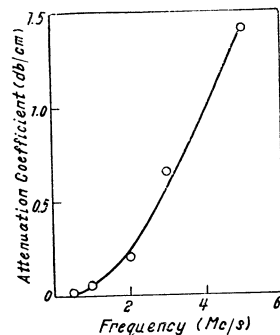


Fig. 5 Ultrasonic attenuation in specimen 102.

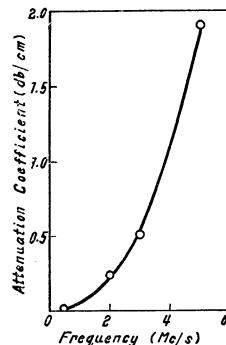


Fig. 6 Ultrasonic attenuation in specimen 000.

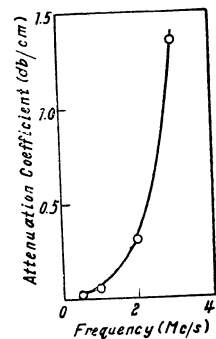


Fig. 7 Ultrasonic attenuation in specimen 002.

わず、それより高い周波数では増しかたが大きくなつている。6 Mc/s でも減衰係数の値はあまり大きくないが、9 Mc/s では測ることができなかつた。

結晶粒度の粗いものについての例は **Fig. 5, 6** である。曲線のかたちはまえの図と似ているが、周波数が高くなると減衰の増しかたは大きくなり、6 Mc/s でも測れなくなつている。粒度がもつと大きくなると **Fig 7** のようになり、3 Mc/s でも減衰係数はずいぶん大きくなつている。はじめの **Fig. 3** と比べると、形の違いがかなり大きい。

これらからみて、超音波の減衰係数は周波数の 1 乗よりはずつと大きな割合で増しており、その増しかたは結晶粒の大きさが大きいほど急であることがわかる。

IV. 結果についての考え

結晶粒の大きさと減衰-周波数曲線の形とをみると、まえの炭素鋼の結晶粒度による超音波の減衰のしかた⁽³⁾とよく

似た関係であることが判る。そこで前とおなじようにして周波数と減衰係数と粒度との関係式を求めてみる。

オーステナイト相の結晶粒の大きさは、この測定では 1/10~1/100 mm ぐらい、試料のなかでの超音波の波長は 1 mm ぐらいである。これは丁度結晶粒によつて Rayleigh 散乱⁽⁶⁾が起る条件をみたしている。そこで上に求めた減衰係数の値 α は、Rayleigh 散乱による損失をふくむものと考えて、周波数 f に対して

$$\alpha = B_1 f + B_2 f^4 \dots\dots\dots (1)$$

のようにあらわされるものとする。右辺の第 1 項は、低い周波数でおこる固体の内部摩擦のうちで、弾性ヒステリシスによつておこるような周波数によつて変らないエネルギー損失が、このような高い周波数でもあると考えたものである。 B_1 はこのような内部摩擦の大きさに当つている。第 2 項は、結晶粒が超音波を Rayleigh 散乱するために起るものである。係数 B_2 は

$$B_2 \propto KV \dots\dots\dots (2)$$

のようにあらわされ、オーステナイト結晶粒の弾性的な不均一さ K ⁽⁷⁾と粒の体積 V とに比例する量である。測定によつて Fig. 3~7 のようにもとめた結果を、式 (1) によつて整理して係数 B_1, B_2 を求めると Table 3 のようになる。

Table 3 The values of B_1, B_2 and B_2/V in relations (1) and (2).

Specimen	B_1 db/(cm·Mc/s)	B_2 db/[cm·(Mc/s) ⁴]	Grain size number	V (mm ³)	B_2/V db/[cm·(Mc/s) ⁴ ·mm ³]
000	0.09	23.6×10 ⁻⁴	3-4	18.6×10 ⁻⁴	1.27
001	0.2	51	2-3	52.7	0.97
002	0.03	157	2	83.7	1.88
100	0.11	6.5	4-5	6.6	0.99
101	0.05	21	3-4	18.6	1.13
102	0.05	62	2-3	52.7	1.13
200	0.08	3.1	4-5	6.6	0.47
201	0.09	6.6	4-5	6.6	1.00
202	0.07	20	3-4	18.6	1.08
301	0.03	9.6	4	10.3	0.93
302	0.03	11.3	3-4	18.6	0.61

B_1 は大体 10⁻¹ ぐらいの数*であつて、試料による大きさの違いはあまりない。 B_2 は試料によつてかなり大きさがちがつている。しかし B_2 を V で割つたものは大体 1 ぐらいの大きさとなつて、試料によるちがいはあまりない。こゝで V としては ASTM の粒度番号で、たとえば 3 と 4 のあいだぐらいものは、ちょうど中間のものとして求めてあるか

(6) Rayleigh, *Theory of Sound*, Vol. 2, p. 152.
(7) W. P. Mason, H. J. McSkimin, *J. Appl. Phys.*, **19** (1948), 940.

* 簡単のため単位をはぶいて論ずる。

ら、実際の平均の粒の体積とは少し違つてあろう。

こゝに求めた B_1 を、低い周波数で求められた内部摩擦の値とくらべてみると、 B_1 は内部摩擦の単位にする*と 10⁻³ となり、銅、アルミニウム、鉄などの内部摩擦の値⁽⁸⁾ 10⁻³-10⁻⁴ とおなじぐらいの大きさをもつている。

また B_2 はほかの金属などで求めた値とくらべるために、単位を nepers/[cm·(Mc/s)]⁴ であらわすと B_2/V が 10² となる。炭素鋼や片状黒鉛鋳鉄で求めた値⁽⁹⁾ 10³ とくらべると小さいが、銅、アルミニウム、鉄などで単結晶の弾性常数から計算でもとめた値⁽⁷⁾ 1~10 とくらべると大きい。ステンレス鋼の弾性常数の値や、オーステナイト相の鉄のそれはわからないが、面心立方晶であるから銅などと比べて大きな違いはないであらう。しかしステンレス鋼はニッケルやクロムと鋼との合金であつて、鉄のオーステナイト相とは弾性が違つてあろうし、また (2) を求める計算では結晶粒による多重散乱を考えていないことなどからみて、 K の値に 10 ぐらいの違いはあるとみてよい。 B_2/V が試料によらずほゞ一定になることを考えて、こゝに求めたものがステンレス鋼の結晶粒の弾性的な不均一さを表わしていると考えられる。

B_1 や B_2 の大きさが、このような意味をもつことからみてオーステナイト鋼のなかでの超音波の減衰係数は (1) によつて、周波数や結晶粒の大きさが矛盾なく表わされることがわかる。つまりオーステナイト系ステンレス鋼のなかでの 10⁶ c/s ぐらいの周波数の超音波の減衰には、結晶粒によつて超音波が散乱されるために起るものが主になつている。

これらの結果からみて、結晶粒度の小さいステンレス鋼材では超音波の減衰係数が小さく、かなり精度のよい欠陥検査ができることがわかる。熱処理がまずくて粒度があらくなつた部分は減衰係数が増すから、例えば溶接部分の検査がむづかしくなることもあろう。また逆に減衰係数の大小から材料の質をしらべることができるであらう。上にもとめたデータは、これまで実地に検査するときであつた難題をとく手掛りを与えるものと考えられる。

* 内部摩擦 Δ は、音速 $v = 5 \times 10^5$ cm/s とすれば $B_1 = 10^{-8}$ nepers/(cm·Mc/s)

$$\Delta = \frac{2 B_1 v}{2 \pi} \approx \frac{10^{-8} \times 5 \times 10^5}{3} \approx 10^{-3}$$

(8) 高橋, 本誌, **16**(1952), A-3.

(9) 広根, 神垣, 本誌, **19**(1955), 92.