

氏 名	あ べ とし ひこ 阿 部 利 彦
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 62 年 10 年 14 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 42 年 3 月 室蘭工業大学工学部金属工学科卒業
学 位 論 文 題 目	鑄鉄の超音波伝播速度に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 井川 克也 東北大学教授 須藤 一 東北大学教授 坂上 六郎 秋田高専校長 島田 平八

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

物質中の超音波伝播速度（以下、音速と略す）は物質毎にほぼ一定の値であり、例えば鉄の場合は、高純度鉄も炭素鋼も 5900m/s 程度である。しかし、鉄、黒鉛、セメントイトから主に構成される鑄鉄の音速は黒鉛形状、黒鉛量、基地組織の変化に伴って 3500～5700m/s もの広い範囲内で変化する特徴がある。

鑄鉄の音速は黒鉛球状化率や引張強さと正の相関関係があるので、音速法はこれらを迅速に判定する方法として、最近、特に注目を集めている。一方、鑄鉄の音速は溶解方法、接種、熱処理等にも影響されることが知られており、目的以外の因子による音速の変動は音速法を実施する上での問題点となっている。

鑄鉄の音速はこのように種々の因子の影響を受けるが、各々の因子が音速に影響する機構、あるいは、各因子間の相互関係等についてはほとんど研究が成されていなかった。

このような背景のもとで、本研究は鑄鉄の音速に影響する諸因子と、その機構の究明を目的としている。

第 2 章 鑄鉄の音速に及ぼす組織、機械的性質の影響

本章では、鑄放し状態の片状黒鉛鑄鉄、CV 黒鉛鑄鉄、球状黒鉛鑄鉄の組織、機械的性質と音速

との関係を調べて、次のような結果を得た。

- (1) 鑄放し鑄鉄の音速は引張強さと正の相関関係がある。
- (2) 鑄鉄の音速は黒鉛形状によって変化し、次の順序で増加する。
粗大片状黒鉛 < 微細片状黒鉛 < CV黒鉛 < 球状黒鉛
- (3) 黒鉛形状一定の場合は、黒鉛量の減少とともに音速は増加する。化学組成が同じ鑄鉄では、鑄造後の冷却速度が大きいほど音速は増加する。

第3章 鑄鉄の音速に及ぼす応力とひずみの影響

鋼，銅，アルミニウム等の音速が応力によって、ごくわずかに変化する現象は音弾性効果として知られているが、鑄鉄についてはこれまでほとんど研究されていなかった。そこで、鑄鉄の音速に及ぼす引張りおよび圧縮応力の影響を調べて、次の結果を得た。

- (1) 鑄鉄の音速は応力のために生じるひずみによって非可逆的に減少する。音速減少率は最大7~15%にもおよび、鋼材等で観察される音弾性効果による減少よりも著しく大きい。
- (2) 音速はひずみと共に減少する。ひずみが同じならば、引張強さの小さな鑄鉄ほど音速減少量は大きい。球状黒鉛鑄鉄の音速-ひずみ、応力-ひずみの関係を図1に示す。
- (3) 圧縮応力の場合は引張強さの2倍以上になると、音速は減少する。
- (4) 球状黒鉛鑄鉄では、変形によって黒鉛直径の増加する方向の音速減少量は、それに垂直な方向よりも小さい。

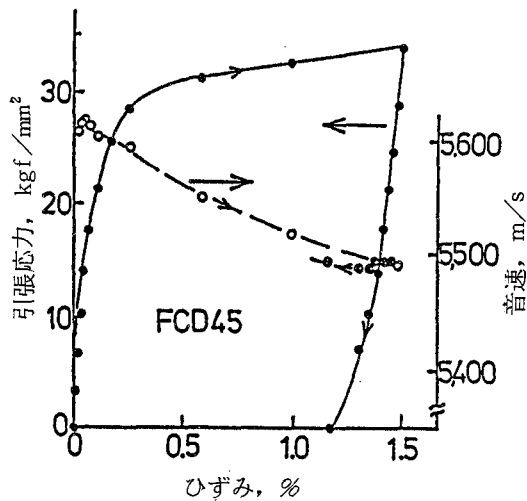


図1 球状黒鉛鑄鉄の音速-ひずみと
応力-ひずみの関係

第4章 鑄鉄の音速に及ぼす熱処理の影響

鑄鉄は鑄造応力の除去、あるいは、強度を向上させるために、しばしば熱処理が施されるが、音速法による鑄鉄の材料評価では熱処理による音速の変化が問題とされている。そこで次に、鑄鉄の音速に及ぼす熱処理の影響を調べて、以下の

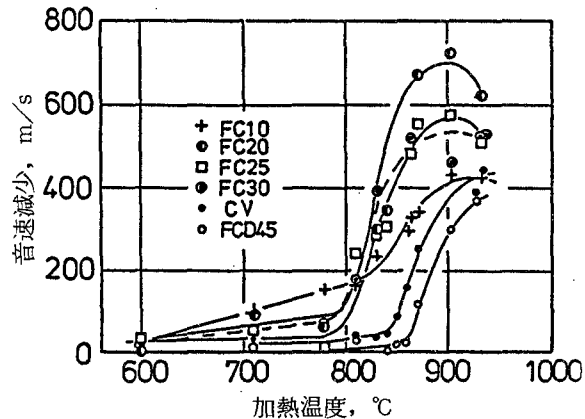


図2 各温度で30分間加熱後油焼入れした鑄鉄の、
加熱温度と音速減少の関係

ような結果を得た。

- (1) 鑄鉄の音速は熱処理によって減少する。加熱温度が一定の場合は、加熱時間が長く、加熱後の冷却速度が大きい熱処理法ほど音速減少量は大きい。熱処理条件が一定の場合は、引張強さの小さな鑄鉄ほど音速減少量が大きい。
- (2) 鑄鉄をある温度以上に加熱すると、図2に示すように音速減少量は急激に増加する。この温度は共析変態上部温度とほぼ一致することから、黒鉛の基地中への溶解が、音速減少に強く関係していると考えられる。

第5章 鑄鉄の密度と音速に及ぼす空けきの影響

前章までの結果から、鑄鉄は黒鉛量が多く、外力によってひずみを生じ、或は熱処理によって黒鉛が基地中に溶解すると、音速は減少することが明らかになった。これらの事柄は、すべて鑄鉄の密度を減少させる原因に成ると考えられる。したがって、まず鑄鉄の密度と音速の関係を調べた。この結果、応力や熱処理のために鑄鉄中に亀裂、空隙が生じることが判明した。一方、固体中の音速はヤング率と密接な関係があることが知られているので、そのような鑄鉄の見かけのヤング率について検討を加え、以下の結果を得た。

- (1) 黒鉛量の増加、引張り応力、熱処理によって鑄鉄の密度と音速は共に減少した。また、これらの鑄鉄の密度と音速の間には、球状、CV、片状の黒鉛形状ごとに正の比例関係が認められた。鑄鉄の密度減少の原因としては、黒鉛量の増加以外に、応力によって生じる亀裂や、基地と黒鉛との剥離、熱処理中に黒鉛から炭素原子が拡散して生じる空隙の発生等が考えられる。これらの存在は顕微鏡観察によって確かめることが出来た。
- (2) 鑄鉄中を伝ばする縦波の音速 v を均質な固体に対する音速の式(1式)によって計算した結果、実測値とよく一致する値が得られた。また、黒鉛の平均長さの厚さをもつ層を考え、この層の中で、超音波の伝ば方向に投影した基地の面積率を超音波伝ば効率 U と定義して、亀裂や空隙等の有無により、鑄鉄の見かけのヤング率 E^* (kgf/mm^2) を(2)及び(3)式で近似的に表わすこととした。

ただし ρ 、 ν は鑄鉄の密度とポアソン比であり、 x は亀裂、空隙等の面積率である。

$$v = \sqrt{\frac{E^*}{\rho} \cdot \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)}} \quad (1)$$

$$E^* = 21500 U + 1000(1-U) \quad (2)$$

$$E^* = 21500(U-x) \quad (3)$$

- (3) 上記(3)式内の x (亀裂、空隙等の面積率) と鑄鉄の密度減少率 (=体積増加率) との間には、正の相関関係が観察された。引張試験で破断した試験片を同じ x の値で比較すると、伸びの大きい鑄鉄ほど密度減少も大きかった。
- (4) 上記の(2)、(3)式から、音速減少の原因として、以下の各項が考えられる。カッコ内は変化を起こす原因を示す。
 - (a) 黒鉛量の増加による U の減少 (化学組成, 熱処理)

- (b) 黒鉛形状の変化（球状化率の低下等）によるUの減少 (変形, 熱処理)
- (c) 基地中に亀裂, 空隙の発生によるxの増加 (応力, 熱処理)
- (d) 基地と黒鉛の剥離のために(2)式中の黒鉛の項 (1000(1-U)) が無効になる。

この効果による音速減少率は片状黒鉛：2～5%，CV黒鉛：1%，球状黒鉛：0.4%程度と見積られる。

第6章 超音波伝ば効率モデルによる音速と引張強さの計算

これまでに述べたように、鑄鉄の音速は固体の音速の式 (1式) から求めることが可能であった。また、鑄鉄の見かけのヤング率は超音波伝ば効率を考慮した(2), (3)式で表すこととした。そこで、黒鉛を簡単な形状で近似した鑄鉄組織を考えて、これによって黒鉛量、黒鉛形状、密度、基地組織等の影響を調べるとともに、画像解析データを用いて、超音波伝ば効率モデルの検証を行なった。

- (1) 片状黒鉛, CV黒鉛を直径 d , 厚さ t の円板で, 球状黒鉛を直径 d の球で表し, 鑄鉄を厚さ d の層に分けて考える, 超音波伝ば効率 U は(4)式, (5)式で表わされる。

$$\text{片状, CV黒鉛} : U = 1 - \frac{(R+t)^2}{(4.5R(R+t) + 1.5t^2)} \cdot \frac{d}{t} w \quad (4)$$

$$\text{球状黒鉛} : U = 1 - 0.667 w \quad (5)$$

ただし R : 厚さ d の層中の黒鉛で作った, 厚さ t の半球殻の半径

w : 鑄鉄 1 cm^3 中の黒鉛の質量

d/t : 円板の直径/厚さ比 (片状黒鉛…………… 10.5, CV黒鉛…………… 5.5)

モデルによって計算で求めた音速と黒鉛量および黒鉛形状の関係は, 図3のように実測値と良く一致した。

- (2) 鑄鉄の音速と引張強さの関係 (計算値と実測値) を図4に示す。パーライト面積率が増加する

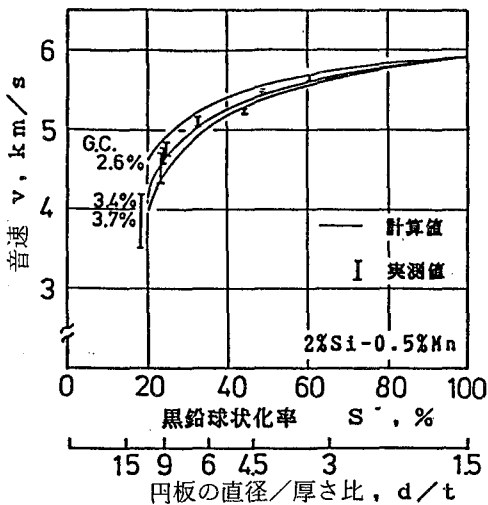


図3 鑄鉄の音速と黒鉛量及び黒鉛形状との関係 (G.C.: 黒鉛量)

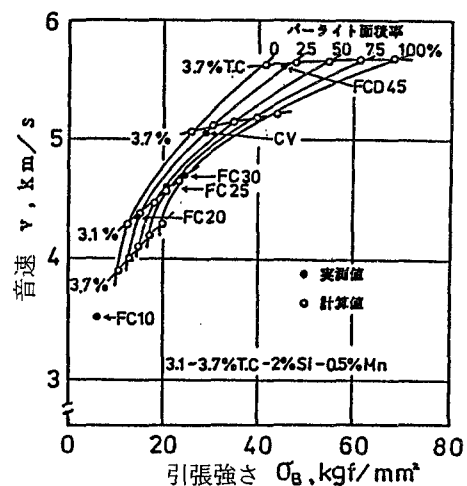


図4 鑄鉄の音速と引張強さとの関係 (T.C.: 総炭素量)

と球状黒鉛鑄鉄 (FCD45) の引張強さは増加するが、音速はほとんど変化しない。これに対して片状黒鉛鉄 (FC10～FC30) では引張強さと音速の両方が増加している。このように、パーライト面積率が増加すると、音速と引張強さ間の回帰曲線は高強度側に移動する。

第7章 総括

鑄鉄の黒鉛量、黒鉛形状、基地組織、密度、ひずみ、熱処理と音速の関係について研究を行ない、音速は主に黒鉛の量と形状ならびに空隙量に依存することを明らかにした。本研究の結果によると、音速値から球状黒鉛鑄鉄、CV黒鉛鑄鉄の黒鉛球状化率の判定が可能であり、また、片状黒鉛鑄鉄では引張強さを判定することが可能である。しかし、化学組成、鑄造後の冷却速度、応力、熱処理のように黒鉛量、黒鉛形状を変化させ、あるいは亀裂や空隙の発生に関係する因子は音速を変化させる原因となるので、音速値による鑄鉄の材質判定にあたっては、これらの点に留意することが大切である。

審査結果の要旨

鑄鉄の組織は鉄基地中に黒鉛が分布し、その量や形状によって機械的性質は幅広く変化する。一方鑄鉄の超音波伝播速度（以下音速と略称）も黒鉛の量や形状によって変化するので、最近鑄鉄材質の判定に音速測定が行われている。しかし音速には黒鉛組織以外の因子も影響し、複雑で不明の点が多く詳しい検討が望まれていた。

本論文は鑄鉄の音速に及ぼす諸因子の影響を調べ、音速と鑄鉄組織の関係を定量的に考察した結果をまとめたもので全編7章よりなる。

第1章は緒論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、鑄放し状態の片状黒鉛、CV（Compacted-Vermicular）黒鉛、球状黒鉛各鑄鉄の黒鉛組織、機械的性質及び音速の関係を調べ、黒鉛が片状、CV、球状と変化するにつれて音速は増加し、また黒鉛が増加したり粗大化すると音速は減少し、その結果音速は引張強さと正の相関関係があることを示している。

第3章では、鑄造応力や外力によるひずみの影響を調べ、音速は引張り又は圧縮応力によって生ずる塑性ひずみと共に減少することを見出し、塑性変形によって生ずる黒鉛周囲の空隙や黒鉛の形状変化によることを述べている。

第4章では、熱処理に際して加熱、冷却を受けた場合、特にオーステナイト域に加熱されると黒鉛の一部が基地中に溶解し、それに続く冷却時に完全には元の黒鉛上に再析出できないために、黒鉛と基地の間あるいは黒鉛中に空隙を生じ、音速が減少することを明らかにしている。

第5章では、上に述べた空隙の発生を密度測定によって確認すると共に、固体中の音速がヤング率、密度、ポアソン比によって支配されることを示す一般式を用いて音速を計算し、実測値とよく一致することを示し、ヤング率の寄与の大きいことを述べている。

第6章では、鑄鉄を鉄基地、黒鉛、空隙から構成される材料と考え、単純な組織モデルにより断面内に占めるそれぞれの面積率から見かけのヤング率を計算し、これによって音速を予測できることを示した。さらに画像解析によって求めた実測値ともよく一致し、用いた組織モデルの有効性を確かめている。

第7章は総括である。

以上要するに本論文は、従来不明であった鑄鉄の音速に及ぼす諸因子の影響を調べ、組織との関係を明らかにし、超音波による鑄鉄材質判定の基礎資料を提示したもので金属工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。