

超音波探傷法による鋳鉄材料の評価技術に関する研究

吉浦洋之*・高橋芳朗*・下郡貴久**・佐藤繁文***・清水一道****

*材料開発部・**新日本非破壊検査(株)・*** (株) 工藤製作所・**** 国立大分工業高等専門学校

Valuating Skill of Cast Iron by Ultrasonic Testing

Hiroyuki YOSHIURA *・Yoshirou TAKAHASHI *

Takahisa SHIMOGORI **・Shigefumi SATO ***・Kazumichi SHIMIZU ****

* Material Development Division ・** Shin Nippon Non Destructive Inspection Co.,Ltd.

*** Kudou Co.,Ltd. ・**** Oita National College of Technology

要旨

非破壊試験の中で鋳鉄製品に対してよく用いられている超音波探傷検査は機械的性質の判定、欠陥検査の両方を行うことができ、しかも迅速で安全性が高く、製品全体の評価を行うことができる。そこで本研究では、鋳鉄製品の超音波速度の測定により、鋳鉄の引張強度と基地組織の影響について調査し、実際の製品に適用可能かを検討した結果、片状黒鉛鋳鉄の引張強度と硬さには密接な相関関係がみられ、引張強度と超音波速度についても同様の結果が得られた。また、球状黒鉛鋳鉄の引張強度と硬さには密接な相関関係が得られたが、引張強度と超音波速度の関係では高い超音波速度域で引張強度がばらついた。鋳鉄の引張強度と超音波速度との関係について考察した結果、次の結論を得た。1) 鋳鉄の音速は黒鉛組織に敏感に反応した。2) 片状黒鉛鋳鉄では超音波速度測定で引張強度の推定が可能である。

1 緒言

地球環境保全、エネルギー問題等の観点から素材材の軽量化が強く要求される今日において、鋳造品特有の複雑形状付与性が見直されつつある。特に球状黒鉛鋳鉄は鋼材並の高強度特性を利用した薄肉軽量化指向が進み、また、鍛造品等の軽量代替品としての利用が進んでいる。更に、鋳鉄の材質高級化あるいは品質安定化技術の向上により、鋳鉄材料への信頼性は最近高まりをみせている。

鋳鉄材料の品質を保証する手段として非破壊試験を行うケースが増えてきており、非破壊試験の中で鋳鉄製品に対してよく用いられているのは超音波探傷試験、放射線透過試験、浸透探傷試験であるが、超音波探傷試験のように機械的性質の判定、欠陥検査の両方を行えるものはない。また他方法に比べて迅速でしかも安全性が高く製品全体の評価を行うことができる。しかしながら、片状黒鉛鋳鉄では引張強さが弱くなると超音波減衰により機械的性質等の評価が困難になる性質をもっている。そこで本研究では大分県内の鋳造企業の実態調査を兼ね、各社より成分の異なる実験材料を提供してもらい、超音波探傷法を利用して鋳鉄製品の超音波速度を測定し、鋳鉄の引張強度と基地組織の影響について調査し、実際の製品に適用可能かを検討した。

2 実験方法

2.1 試験片

片状黒鉛鋳鉄は直径約30mm、長さ約500mmの砂型で作られた鋳出し材を用い抗折試験を行った。Fig.1に抗折試験片の略図を示す。

球状黒鉛鋳鉄の場合は各社ごとに採取方法が異なり、ノックオフ形供試材、Y型供試材の2通りで採取を行った。Fig.2に球状黒鉛鋳鉄の採取方法の略図を示す。

片状黒鉛鋳鉄、球状黒鉛鋳鉄をそれぞれ8号試験片、4号試験片に機械加工し引張試験を行った。引張試験片の略図をFig.3に示す。

引張試験終了後、硬さ試験、超音波試験、組織観察を行うための試験片を引張試験片より切り出した。

各種の試験片の採取方法の略図をFig.4に示す。

化学分析は各鋳造企業より提供された全51試料のうち17試料について行い、機械加工を行う際に発生する破片を採取し分析を行った。化学分析の結果をTable1に示す。なおA~Hは片状黒鉛鋳鉄、I~Qは球状黒鉛鋳鉄を表し、D~Fはキュボラ溶製材であり、他の試料は電気炉溶製材である。また、球状黒鉛鋳鉄のうちOはノックオフ型供試材より、他のものはY型供試材より採取を行った。

Table1 Chemical composition

	mass%						
	C	Si	Mn	S	P	Mg	Cr
A	3.75	2.18	0.506	0.0411	0.0683	—	—
B	3.83	2.38	0.474	0.0389	0.0625	—	—
C	4.10	1.57	0.535	0.0245	0.0256	—	—
D	3.77	1.97	0.580	0.107	0.0996	—	—
E	3.41	1.99	0.624	0.104	0.0766	—	0.678
F	4.15	1.54	0.525	0.140	0.208	—	—
G	3.35	1.98	0.565	0.138	0.163	—	—
H	3.37	2.14	0.833	0.0216	0.0556	—	—
I	3.61	1.94	0.207	0.00906	0.0694	0.0382	—
J	3.51	2.02	0.387	0.00643	0.0521	0.0369	—
K	3.99	1.99	0.389	0.0146	0.0675	0.0428	—
L	3.95	2.40	0.776	0.0149	0.0674	0.0432	—
M	3.71	3.00	0.590	0.0169	0.0320	0.0293	—
N	3.88	1.99	0.530	0.0347	0.0548	0.0286	—
O	4.02	2.69	0.420	0.0170	0.0176	0.0483	—
P	3.63	3.21	0.314	0.0231	0.0185	0.0442	—
Q	3.66	3.01	0.485	0.0221	0.0211	0.0485	—

A~H : F C, I~Q : F C D, D~F : キュボラ溶製材, O : ノックオフ型供試材

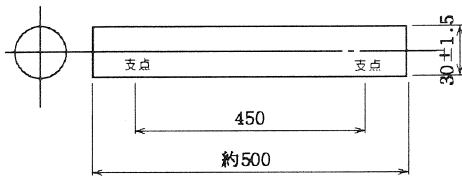
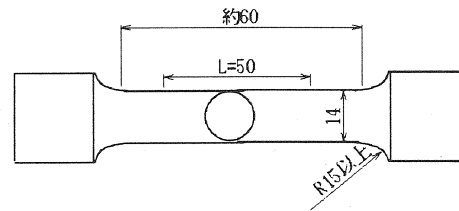
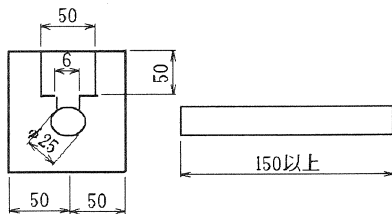


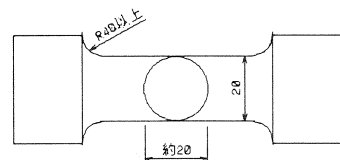
Fig.1 抗折試験片



a 4号試験片

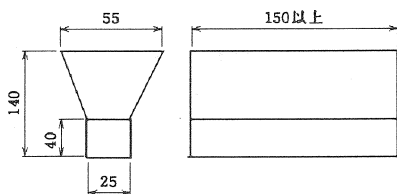


a ノックオフ形供試材



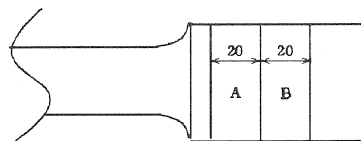
b 8号試験片

Fig.3 引張試験片



b Y型供試材

Fig.2 球状黒鉛鑄鉄採取方法



A: 硬さ試験用

B: 超音波試験用, 金属組織観察用

Fig.4 各種試験片採取方法

2.2 超音波法

2.2.1 超音波の発生と受信の方法

Fig.5に超音波発生の原理の略図を示す。図に示すように超音波は圧電効果を示す振動子にパルス電圧を加えることにより発生させる¹⁾。この振動子に数回の繰り返しのパルス電圧を加えると振動子に数回の繰り返し数のパルス振動が発生する。振動子を試験体にあてると試験体表面にこの振動が伝わり、超音波となって試験体中に伝わる。試験体中を伝わる超音波が欠陥又は試験体の裏面で反射してきて、再び、試験体表面に戻って来ると、試験体表面が振動する。この振動により振動子が伸縮振動し、電圧を発生させる。発生した電圧をブラウン管上で、縦振れの信号として表示させ、エコーと呼んで観察に利用している。今回の実験で使用した振動子は5MHzのジルコンチタン酸鉛である。

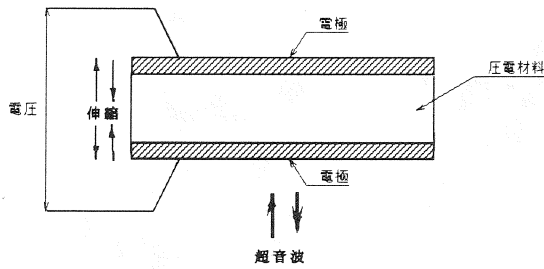


Fig.5 超音波発生原理

2.2.2 超音波探傷法

超音波探傷試験に用いられる超音波にはパルス波が広く利用されており、数 μ 秒程度の短い時間内の振動を試験体に送り込んでいる。超音波は空気のような気体中だけでなく、水のような液体中でも伝搬する。また、金属などの固体中では粒子の振動は弾性波として伝搬し、周波数が1~10MHz程度になると、超音波はあまり広がらずに特定の方向に細いビームとなって伝搬し、小さなきずでも反射しやすくなる。このような超音波の性質を利用して金属などの試験体中のきずを検出する。

2.2.3 超音波速度測定装置

超音波速度測定装置は、超音波探傷器、球状化率測定装置、測長台から構成されている。球状化率測定装置は超音波を利用して、球状黒鉛鑄鉄の黒鉛球状化率を測定する装置であり、超音波探傷器と組み合わせて使用した。測長台の略図をFig.6に示す。

試験片を測長台にセットすることにより試験片の長さが測定され、同時に超音波探傷子内にある振動子より超音波パルスが送信される。超音波パルスを送り込んだ瞬間から超音波パルスを受信した瞬間までの経過時間と、試験片の長さより超音波速度が求められる。

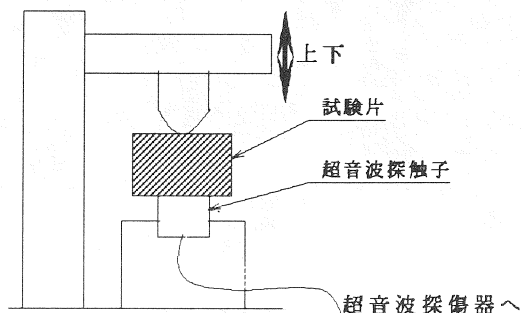


Fig.6 測長台略図

3 実験結果及び考察

3.1 片状黒鉛鑄鉄

Fig.7は片状黒鉛鑄鉄の顕微鏡組織写真の代表例について示す。

(1)の組織は一部バラ状のB型黒鉛であり、黒鉛形状も直線的に長く伸びており、引張強度も $200\text{N}/\text{mm}^2$ 以下と弱く、硬度も低く、フェライトも20%程度表れていることから、超音波の音速も低い結果となっている²⁾。

(2)の組織写真では、一部A型黒鉛又はC型黒鉛が析出し、基地もフェライトが少ないため引張強度が $200\text{N}/\text{mm}^2$ 以上、ブリネル硬さも200近い値を示していることから音速も(1)と比較すると高い値を示している。

(3)の組織写真は、黒鉛形状も細かく、A型黒鉛又は、C型黒鉛が析出し、強度、硬さとも(2)と比較して高い値を示し、同時に音速も高い値を示している。片状黒鉛鑄鉄の組織は暗黒色の層状パーライト基地に黒色の片状黒鉛が散在し、黒鉛の形状が細くなるにつれ引張強度、硬さとも増大する傾向にある³⁾。

Fig.8に片状黒鉛鑄鉄の引張強度と硬さの関係を示す。引張強度が $100\text{N}/\text{mm}^2$ から $350\text{N}/\text{mm}^2$ までの強度に対する硬さの関係では若干ばらつきはあるものの、ほぼ直線的な相関関係にある。Fig.9に引張強度と超音波速度の関係を示す。この図からも強度と音速とは直線的な相関関係にあることから、硬度と音速も直線的な相関関係にあることが言える。

片状黒鉛鑄鉄には引張強度と硬さには密接な相関関係がみられ、また、引張強度と超音波速度についても同様の結果を得ることができた。

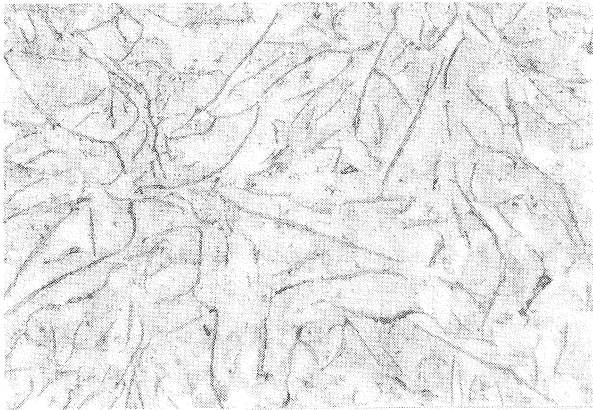
3.2 球状黒鉛鑄鉄

Fig.10は球状黒鉛鑄鉄の顕微鏡組織写真の代表例について示す。

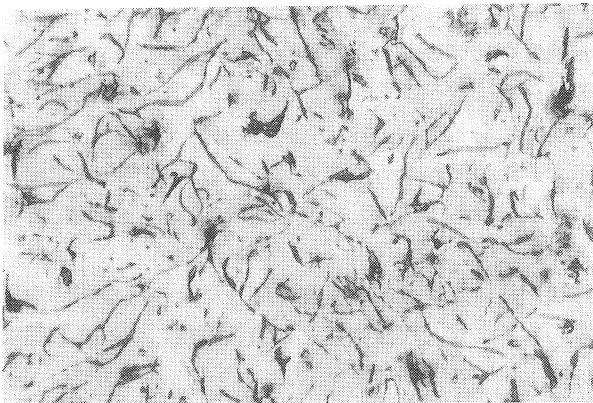
(1)はフェライト型で、黒鉛の形状も大小とばらついており、一部、球状化不良及び片状黒鉛も析出している。この組織的強度も $370\text{N}/\text{mm}^2$ と低く、音速も $5300\text{m}/\text{s}$ 台と低い。

(2)はフェライト及び一部ブルースアイ型で黒鉛粒径もばらつきが少なく安定しているため、引張強度も $500\text{N}/\text{mm}^2$ とやや高く硬度、音速とも高い値を示している。

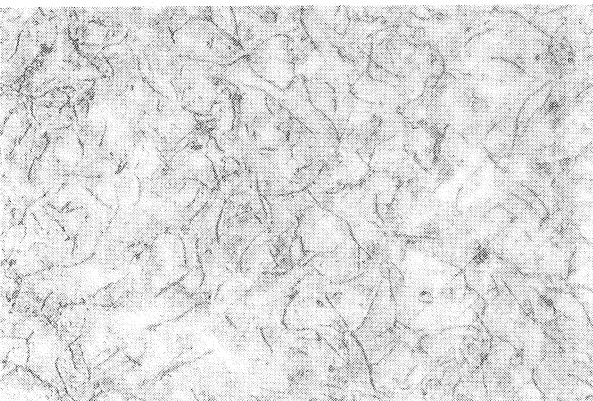
(3)はブルースアイとパーライトの混合組織であり、粒径は不揃いであるが、黒鉛形状はばらつきが少なく、基地がほとんどパーライトであるため強度も高く硬度、音速共に高い値を示す。このことから基地によって機械的強度は向上し、同時に硬さ、音速共に向上する⁴⁾。上記の球状黒鉛鑄鉄の組織は球状黒鉛がパーライトとフェライトからなる基地に散在する組織である。フェライトの面積率が小さくなる程強度が増大するが伸びは低くなる。Fig.11は、球状黒鉛鑄鉄の引張強度と硬さとの関係を示したものである。この図から、強度と硬さとの間には密接な相関が認められる。Fig.12は球状黒鉛鑄鉄の引張強度と音速との関係を示したものである。この図か



(1) $\sigma_B=195.7\text{N/mm}^2$
 HB=165
 V=4080m/s



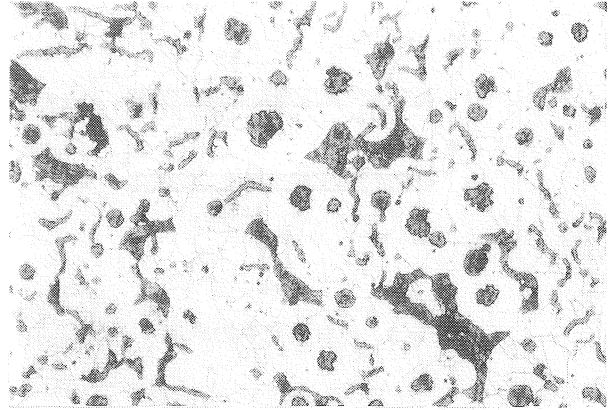
(2) $\sigma_B=238.4\text{N/mm}^2$
 HB=195
 V=4430m/s



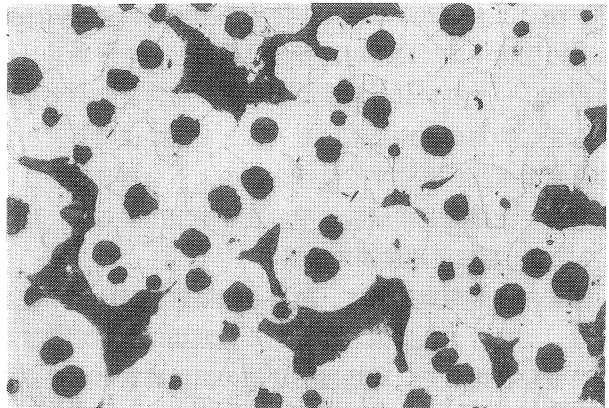
(3) $\sigma_B=266.1\text{N/mm}^2$
 HB=207
 V=4583m/s

┌───┐
 100 μm

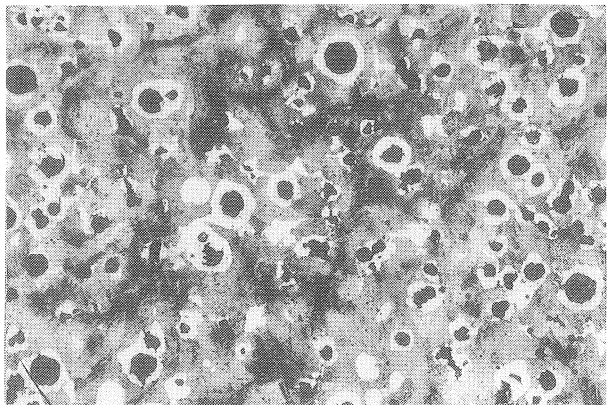
Fig.7 片状黒鉛鑄鉄の顕微鏡写真



(1) $\sigma_B=376.9\text{N/mm}^2$
 HB=148
 V=5352m/s



(2) $\sigma_B=527.0\text{N/mm}^2$
 HB=180
 V=5635m/s



(3) $\sigma_B=758.6\text{N/mm}^2$
 HB=234
 V=5653m/s

┌───┐
 100 μm

Fig.10 球状黒鉛鑄鉄の顕微鏡写真

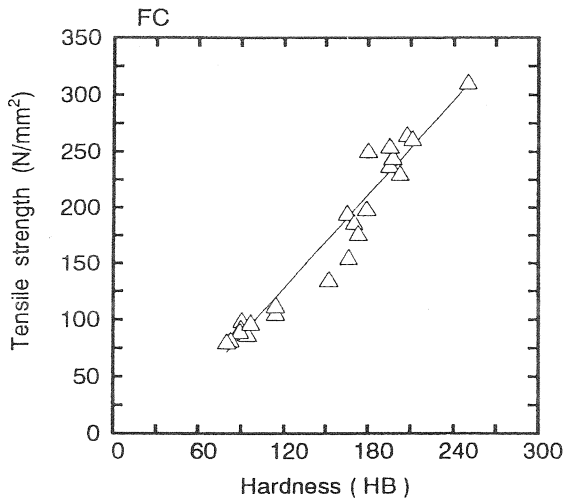


Fig.8 引張強度と硬さの関係 (FC)

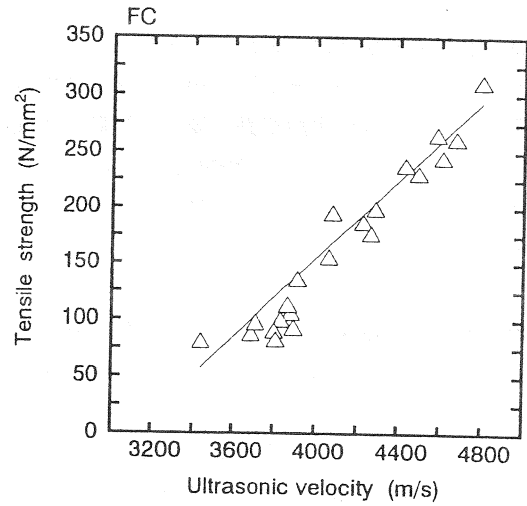


Fig.9 引張強度と超音波速度の関係 (FC)

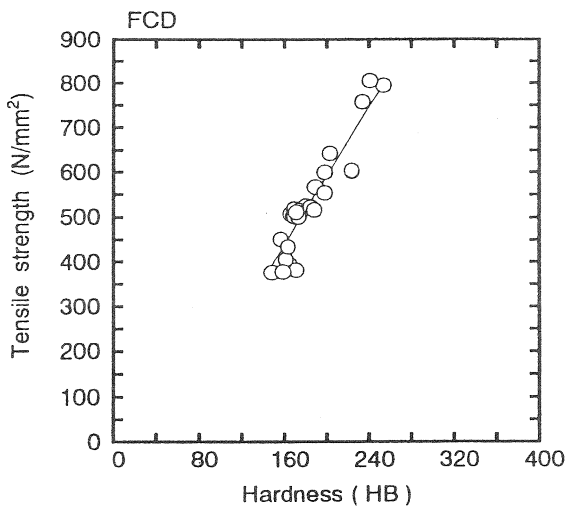


Fig.11 引張強度と硬さの関係 (FCD)

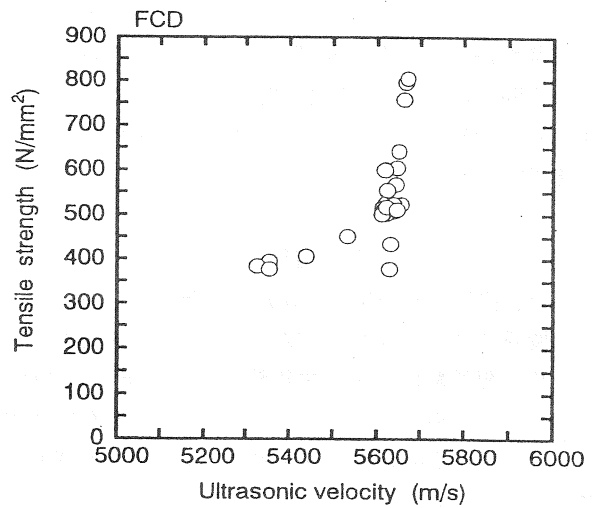


Fig.12 引張強度と超音波速度の関係 (FCD)

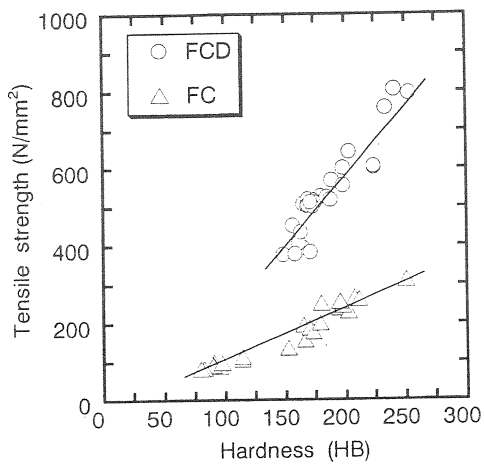


Fig.13 引張強度と硬さの関係 (FC · FCD)

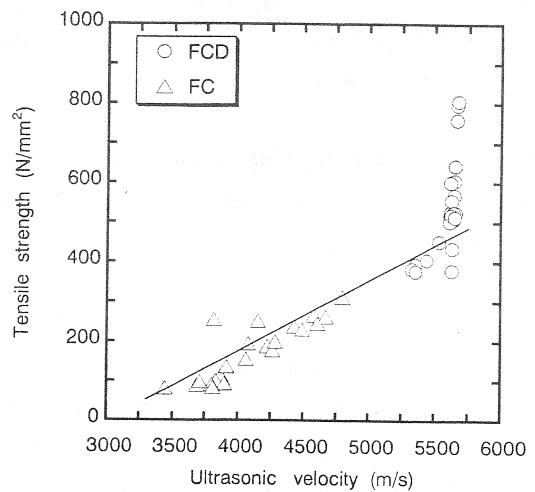


Fig.14 引張強度と超音波速度の関係 (FC · FCD)

らは、ばらつきが大きくはつきりとした相関は認められないが、引張強度が $500\text{N}/\text{mm}^2$ 以下とそれ以上に分類することができる。引張強度が高い超音波速度域でばらついていた理由として、球状黒鉛鑄鉄の場合は試験片の採取方法が各社ごとに異なっており、Table1で示したとおり化学成分も一様でないことから、基地組織や球状黒鉛の球状化率、大きさのばらつきにより生じたものと考えられる。また、各社ごとにばらつきの範囲が異なっており、例を挙げると、Fig.12で示した引張強度と超音波速度の関係で、引張強度が $700\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の3つの試験材は同じ会社のものである。先に挙げた高い超音波速度域というのは約 $5600\text{m}/\text{s}$ 以上の領域でこれは黒鉛の球状化率が80%以上の合格範囲にあたる⁵⁾。片状黒鉛鑄鉄、球状黒鉛鑄鉄双方の引張強度と硬さの関係をFig.13に、引張強度と超音波速度の関係をFig.14に示す。Fig.13では片状黒鉛鑄鉄、球状黒鉛鑄鉄双方に引張強度と硬さの関性に相関性があることが確認でき、Fig.14では超音波速度が約 $5600\text{m}/\text{s}$ 以上で引張強度がばらついていることが認められ、それ以下の超音波速度では相関性のあることが確認できる。

4 結言

超音波探傷法を利用して鑄鉄の引張強度と超音波速度との関係について考察した結果、次の結論を得た。

- 1) 片状黒鉛鑄鉄、球状黒鉛鑄鉄双方の超音波速度は、黒鉛組織に敏感に反応した。特に、片状黒鉛鑄鉄は黒鉛形状に、球状黒鉛鑄鉄は基地組織により超音波速度が影響を受けている。
- 2) 片状黒鉛鑄鉄では、超音波速度の測定により引張強度の推定が可能である。しかし、球状黒鉛鑄鉄では超音波速度と引張強度の関係(Fig.12)に示すとおり、ばらつきが大きく、超音波速度が約 $5600\text{m}/\text{s}$ 以上では引張強度を推定することができなかった。

今回の研究にあたり、試験片の提供をして頂いた、木本機器工業(株)、(株)八幡ハイキャスト、(有)豊国鑄造工業所、オダ工業(株)、(有)竹下鑄造所の皆様に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (社)日本非破壊検査協会：超音波探傷試験(1990)
- 2) 吉浦洋之：昭和57年度大分県工業試験場 業務年報 球状黒鉛鑄鉄の高延性に関する研究(1972)
- 3) (社)日本非破壊検査協会：非破壊検査技術者のための金属材料概論(1986)
- 4) (社)日本非破壊検査協会：非破壊検査技術の標準化

に関する調査研究 平成3年度 調査報告書(1992)
5) (有)日下レアメタル研究所：KUSAKA TECHNICAL NEWS(1995)