

音速による鋳鉄の材質判定

山田 聡

(株)アイメタルテクノロジー

鋳鉄の材質を非破壊で判定する方法として音速測定器を用い、機械的性質や顕微鏡組織との相関関係を示した。また超音波探傷器で鋳物表皮下にある微細欠陥をどの程度検出できるかを示した。しかし、これらを使いこなすには鋳物に関する基本的な知識と熟練が必要である。

1. はじめに

SQDEC（安全、品質、納期、環境、原価）を求められる鋳造技術者にとって、Qの大きな柱は日常の工程管理と不適合品が発生した時の不良対策である。その第一歩は鋳造欠陥を正しくとらえることである。現場で現物を現実のこととして我が眼で確かめ、その鋳造欠陥が発生した原理を考え原則に基づいて原因を究明する。そこから対策を立案し、実施する。得られた効果を再確認し、更なる対策を重ねていく。それら技術の標準化と熟成によって不適合品は減少し収斂していくかに見える。しかし時に再発し、今までの対策が必ずしも恒久的ではなかったのかと困惑した経験をさせられたというのが著者の実感である。一般にPDCAをスパイラルに回していくということは対策後の結果に満足せず、得られた事実を更に分析し続け結果（系）に対する原因（系）を観測、測定する方法を見出していくことである。

それには全工程の要因を地道に掘り起こし結果系因子との相関関係を把握していくことが肝要となる。さらに見出した工程の測定値と相関の高い要因を制御の対象にまで抽出し、観測、測定、管理できる工程を築き上げていけば工程管理はさらに一步を踏み出せたことになる。

さて、材質とは鋳造分野では機械的性質、物理的性質、化学的性質を示しており、さらに鋳物製品の静的な特性と動的な特性の基盤となっている。それは化学組成と液体状態、凝固あるいは固体状態での冷却速度という2つの大きな因子によって制御することが出来る。本稿では、鋳鉄の材質を検査判定する手段として普及している音速測定に関して、ダクタイル鋳鉄とCV黒鉛鋳鉄の黒鉛球状化率や機械的性質と音速との関係を示す。また超音波探傷器による表面欠陥の識別について事例を紹介する。

2. 鋳鉄鋳物が要求されている品質保証項目

鋳鉄鋳物素材を製造していく各工程において品質確認／保証には様々な方法が用いられている。品質の造り込みは最終出荷検査ばかりでなく材料受け入れからはじまり、鋳造、仕上、検査、荷造り、出荷

まで、各工程での管理に負うところが多い。

管理の対象の大きさを鋳造ロット毎に又は直毎になどと決めて、その中から抜き取りあるいは全数を検査対象として種々の方法によって測定／検査している。

鑄鉄の鑄造品が要求されている品質保証項目は外観、寸法、材質、内部欠陥、化学組成である。各項目の一般的な検査確認管理方法を記述しておく。

1) 外観：製品一個一個に発生したいわゆる表面欠陥（砂、のろ、型こわれ、湯じわ、湯境、ガスなど多種に及ぶ）を目視で確認し、限度見本などと比較して選別している。量産品など製品形状が限られてくると画像処理による識別、選別も行われているようである。評価基準の明確化および客先との仕様合意が肝要となる。

実機疲労試験などによって鑄造メーカーが自ら仕様規格を提案できることが望ましいが狙った欠陥などの再現が難しい。すじ状を呈する割れ、湯じわ、湯境などは磁粉探傷法等を用いて仕上工程でのインライン検査も行われている。カラーチェックはもっとも簡易的な方法であるが、前処理、後処理など時間を要する。また塗装品では塗膜の剥がれは目視で確認し、塗装の膜厚は厚さ計を用いる。

2) 寸法：模型の寸法測定と試作品のケガキ検査で製品の細部寸法が確認され、3次元測定器やCAEデータを活用したCATシステムも普及してきている。工程のばらつきを把握するためには抜き取りでの代表寸法の測定を実施し、ノギスやパスなどが使用できない形状の鑄物の寸法を確認するには、音速を利用した厚さ計が活用されている。

3) 材質：試作時や量産時に抜き取り検査として製品から実体TPを採取して機械的性質を測定する。実用的には硬度で代用する場合が多い。鑄物表面を研磨し、ブリネル硬度計などで測定する。またダクティル鑄鉄製品では、シュリンカーを折った後の湯口の破面の色と緻密さなどを目視で判定する極めて現場的な方法なども熟練した技能員によって行われていた。現在では製品と同時に採取したTPの音速を測定することで黒鉛球状化率と材質種別を判断する方法もとられている。

また鑄鉄製品の決められた箇所をテストングハ

ンマーで打ち、残響音を経験から識別して判定する音響検査を行うこともあり、これを周波数分析器で可視化し閾値に対して判定する特殊な方法もある。最近では硬さ測定に渦電流の利用が検討され始めている。

4) 内部欠陥：試作鑄造時に製品を抜き取り、機械的に切断し、カラーチェックで微細な巣を検出する方法がとられている。内部欠陥が発生しやすい箇所に絞ってX線やγ線などを使った放射線透過法は古くから利用されており、連続走査型X線透過装置での詳細な撮像確認が出来るまでなっている。また、超音波探傷法は小回りが効き、もっとも普及した方法であるが熟練を要する。内部欠陥の範疇からはそれが凝固収縮巣以外に鑄物表皮から内部に潜在するガス欠陥（フカレ）や表面近傍のピンホールはやっかいな検査対象である。超音波探傷器では検出表面から数mm以下の深さに在る欠陥は検出できないといわれている。従って、確実な検出を目指すべく表皮より深い箇所に意図的にガスを集中して発生させる鑄物製品形状や鑄造方案を適用して超音波探傷器で全数検査を実施するか、欠陥発生箇所を表皮に集合させて加工して除去してしまう方法がとられることになる。製造工程のばらつきを如何に抑えるかによって不良を減らし、これら無駄ともいえる検査工程を省略できる鍵となっている。溶湯の化学組成、溶湯温度、中子からのガスや水分の発生量、鑄型からの水分、方案、注湯温度や注湯時間など欠陥発生との因果関係を掌握する必要がある。

5) 化学組成：製品から採取した試料の化学組成を湿式分析あるいは機器分析によって定量する。製造工程で管理された分析値を、製品の検査項目の管理値として用いる場合が多い。溶解あるいは注湯工程において、CEメーターでの炉内溶湯化学組成管理から始まり、注湯中の溶湯から試料を採取して発光分光分析器や蛍光X線分析器などで迅速分析される源流管理が主流である。

3. ダクティル鑄鉄の材質と音速

生砂鑄型で量産しているダクティル鑄鉄の製品と同時に鑄造した1"YブロックからJIS 4号試験片を採取し、機械的性質を測定した。また破断後の試験片の握り部の音速を測定（5MHz、10φ；基準片50mm 8.432μs）してその相関関係を調べた。また、顕微鏡組織を観察し、黒鉛球状化率、パーライト率を測定した。図1、図2に硬度と引張強さ、0.2%耐力の関係を示す。一般的な言われているような直線

関係を呈している。次に音速と機械的性質の関係を見てみる。図3～図5に音速と硬度、引張強さ、0.2%耐力の関係を示した。試料の硬度がFCD450材のHB160から200のサンプルとFCD700材のHB240から300のサンプルをあわせて表示してあり広い範囲で見ると、かなり相関が高いことがわかる。また音速も±10m/sの幅に収まっている。図6にはより相関が高くなるとされている（音速×硬度）と引張

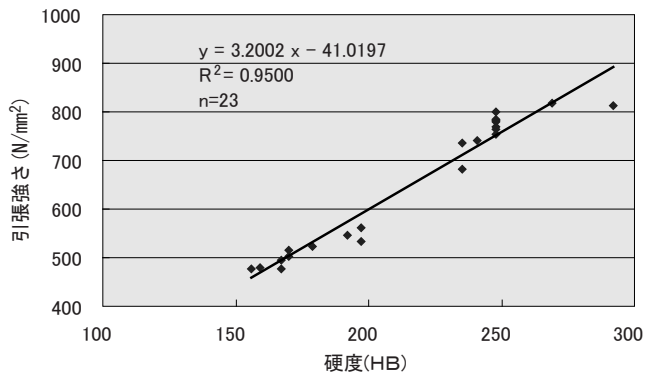


図1 硬度と引張強さの関係
(生型ライン、ダクタイル鑄鉄)

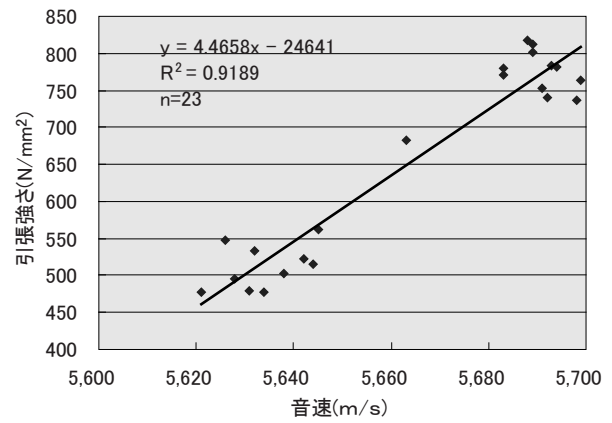


図4 音速と引張強さの関係
(生型ライン、ダクタイル鑄鉄)

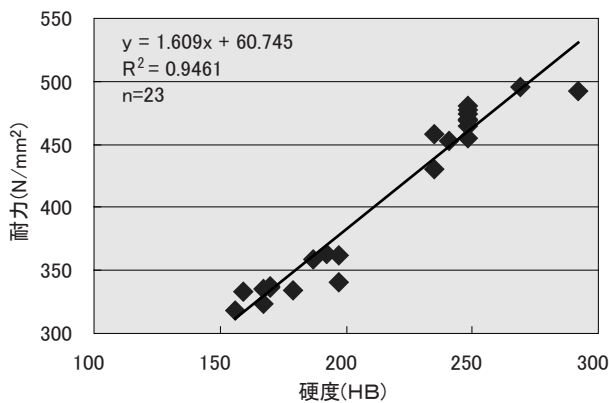


図2 硬度と耐力の関係
(生型ライン、ダクタイル鑄鉄)

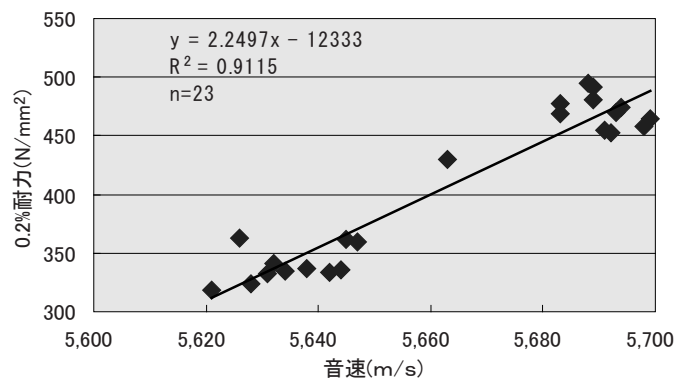


図5 音速と0.2%耐力の関係
(生型ライン、ダクタイル鑄鉄)

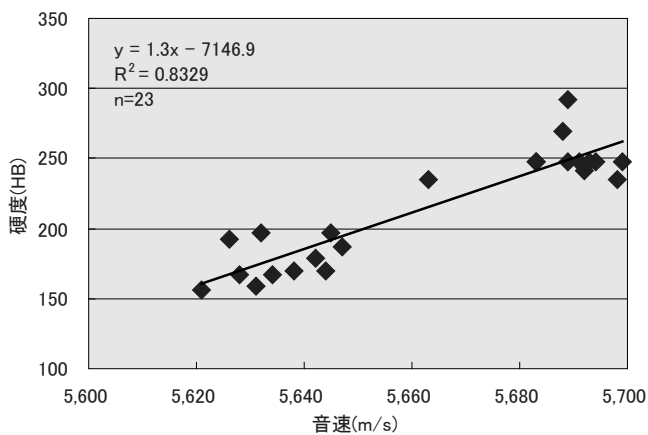


図3 音速と硬度の関係
(生型ライン、ダクタイル鑄鉄)

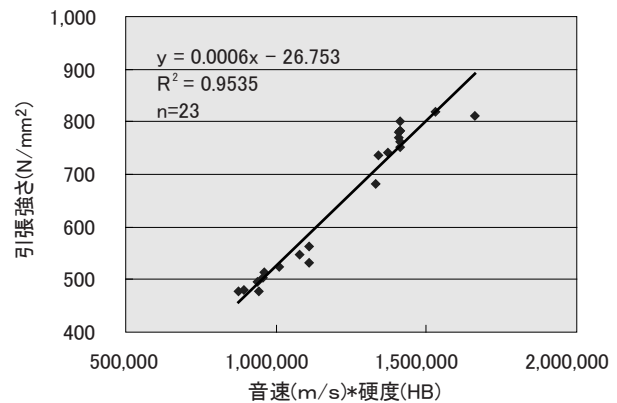


図6 音速 * 硬度と引張強さの関係
(生型ライン、ダクタイル鑄鉄)

強さの関係を示した。2つのファクターを合わせて引張強さを推定する方が良い相関を示している。しかし、実用面では両者を測定して目標とする材質になっているかを判定するのではなく、音速のみで機械的性質を推測したいところである。一方、機械的性質に影響する顕微鏡組織の基底を構成するパーライト率と黒鉛の形状を表す黒鉛球状化率と音速と

の関係を図7に示す。パーライト率と音速には相関関係が見られ音速の幅をみると±15m/sを示している。このばらつきが大きくなっている原因の1つとなっているのは、引張TPの握り部を測定した音速とその1切断面を代表組織として対応させたためと考えられる。

溶解材料、化学組成や注湯温度、注湯時間など工

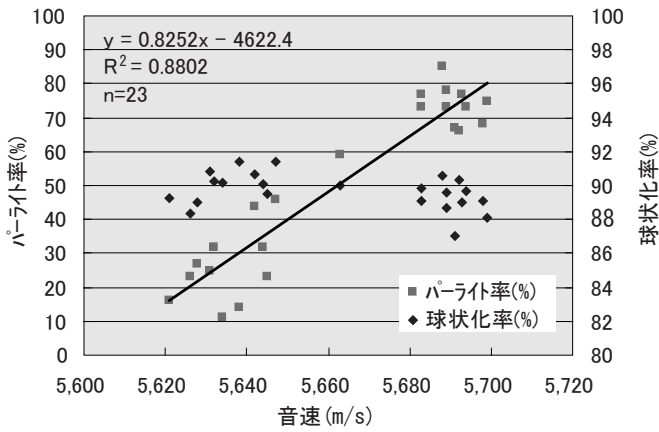


図7 音速と黒鉛球状化率、パーライト率との関係 (生型ライン、ダクタイル鋳鉄)

程が管理されたダクタイル鋳鉄では材質により音速が異なることを利用し、同一材質を有する製品群から材質グレードが大きく異なる製品を検出し合否判定を行うことは可能であろう。

音速は被検体の物理的性質のなかでも密度やヤング率に依存しており、ねずみ鋳鉄 = 3,000 から 5,000m/s、CV 鋳鉄 = 5,100 から 5,500m/s、ダクタイル鋳鉄 = 5,570 から 5,750m/s との報告がある。

実務的にはダクタイル鋳鉄の黒鉛球状化率を音速で推定し、黒鉛球状化不良の製品を選別する場合には、1つの製品内の黒鉛球状化率のばらつきを調査し、黒鉛球状化率が最も低く、ノギスなどでの寸法測定が正確にでき、平面研磨がし易くかつ探触子を安定して押しつけられる箇所を選定し、ピンポイントで音速と黒鉛球状化率の関係を見ながら合否判定を慎重に行う必要がある。

図8にはCa系CV化剤で処理したCV黒鉛鋳鉄に関して各種肉厚のYブロックと丸棒で得られた黒鉛球状化率と音速の変化を示す。また図9には上記

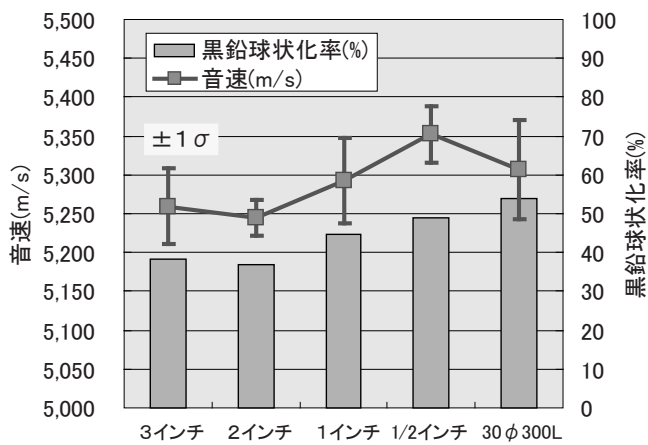


図8 黒鉛球状化率と音速の肉厚変化 (CV黒鉛鋳鉄)

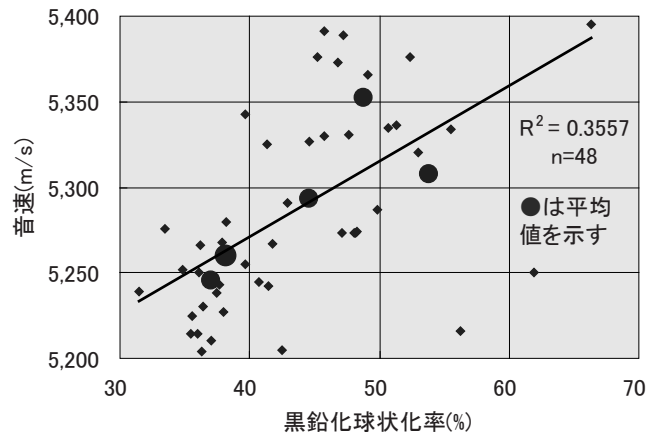


図9 黒鉛球状化率と音速 (CV黒鉛鋳鉄)

の黒鉛球状化率と音速の関係を示す。平均値と各測定値を併記してある。

図10にダクタイル鋳鉄とCV黒鉛鋳鉄の黒鉛球状化率と音速の関係を示した。ダクタイル鋳鉄とCV黒鉛鋳鉄は音速で識別することは可能であることがわかる。

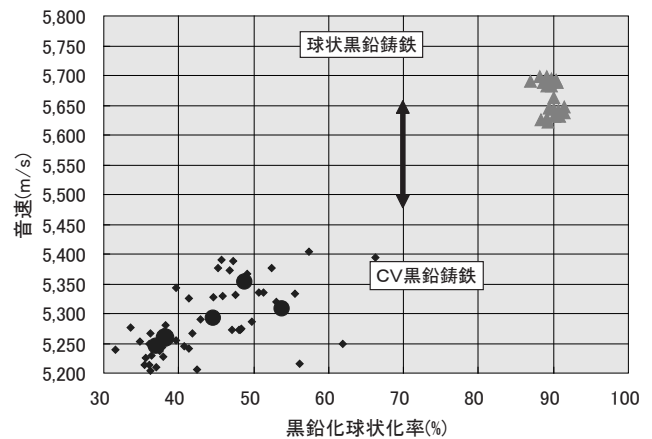


図10 黒鉛球状化率と音速 (CV鋳鉄とダクタイル鋳鉄)

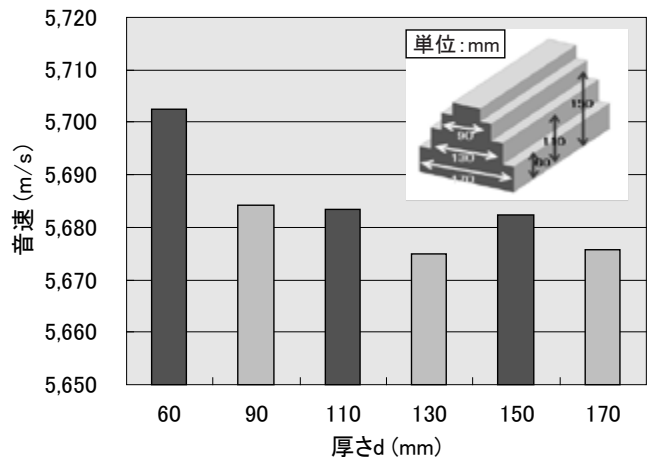


図11 TP寸法と音速

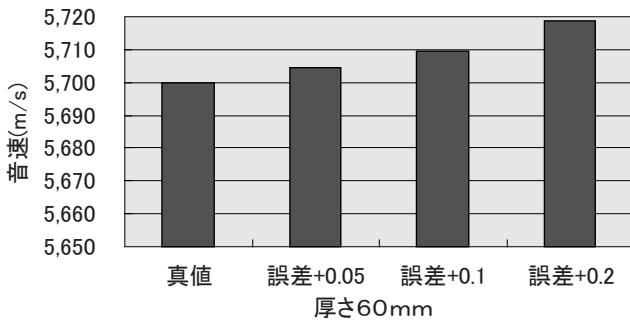


図 12 60mm 厚さでの寸法測定誤差と音速への影響

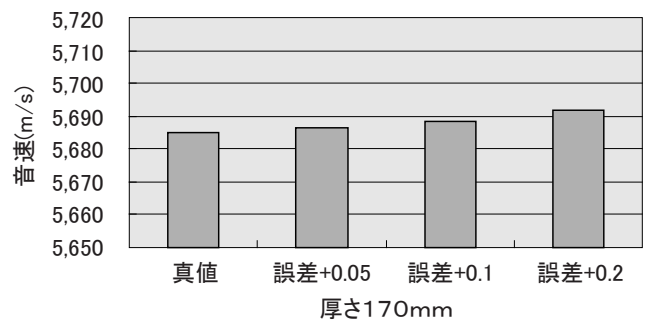


図 13 170mm 厚さでの寸法測定誤差と音速への影響

ダクタイル鑄鉄の音速を測定する時の誤差について触れておく。測定対象の肉厚をノギスなどで測定し、それをもとに音速を測定する。この時の厚みや長さの測定誤差の影響を確認した。図 11 に肉厚を縦 60、110、150mm、横 70、130、170mm の階段状の鑄物に関して各肉厚方向で音速を測定した例を示

す。また図 12 には縦方向 60mm の値に対して測定誤差が生じた場合の音速を示す。また同様に図 13 には横方向 170mm の値に対する測定誤差の影響を示す。肉厚が薄い程その厚みの測定の誤差が音速に現われることがわかる。

4. 表面欠陥の検出

ダクタイル鑄鉄に発生する表面欠陥に関してどの位の深さまでなら検出できるのか、超音波探傷器を用いて検討した。

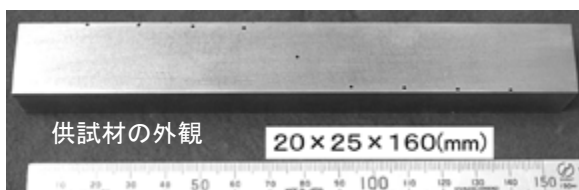
鑄物黒皮面から深さ 0.3mm、0.5mm、1.0mm、1.5mm の箇所にてφ1.0x10L の孔をあけて擬似欠陥とし、プローブも 5MHz (φ10mm)、10MHz (φ7.5mm)、20MHz (φ5.0mm) を用いてどこまで検出できるのかを確認した。検出試験結果と供試材の外観を表 1 に示す。

黒皮表面から研磨なし (接触媒質は使用) で検出を試行したが、写真 1 に示すように 0.3mm 深さの欠陥はノイズに邪魔され判別が難しく、それよりも深い 0.5mm 以上の箇所は欠陥の検出ができた。

表 1 検出評価結果 鑄物黒皮面からの測定可能範囲

孔深さ プローブ	①	②	③	④	⑤
	0.3mm	0.5mm	1.0mm	1.5mm	12.0mm
5MHz (φ 10)	△	○	○	○	○
10MHz (φ 7.5)	×	×	×	×	×
20MHz (φ 5.0)	×	×	×	×	×

(孔 : φ 1.0mm × 10mm) ○ : 検出可 △ : 検出難 × : 検出不可



① 深さ 0.3mm では検出は困難。



② 深さ 0.5mm では検出が出来た。

写真 1 鑄物製品黒皮表面下の孔を検出した時のモニターの様子

またこの黒皮表面層の光学顕微鏡組織写真を写真2に示す。フレーキ層、フェライト層が約0.3から0.5mmあり、この影響も超音波のノイズなどに関係しているものと考えられる。

この例を検証してみる。5MHzの探触子で球状黒鉛鑄鉄(5,600m/s)の1.0mmφの孔は探傷できるのであろうか。一般的に用いられている関係式 λ (波長) = 速度/周波数 に上記を代入して計算すると、波長: 1.12mmが得られる。探傷可能限界は波長の1/2とすると0.56mmまでは可能であるということが解る。

このことから、鑄造品の黒皮表面に発生するフカレやピンホールも操作条件やプローブの選択により、超音波探傷器で検出することが可能であることがわかる。

しかし、最終検査段階でこのような欠陥が無いことを確認して出荷するにはかなりの経験が必要である。表面状態のばらつきを軽減するための研磨を行

い、1つの製品の発生しやすい箇所を予測し、予想外の場所に欠陥(ピーク)が発生した場合にも対処できるようになるには、先ず鑄物の鑄造方案や欠陥の特徴を知らなければならない。

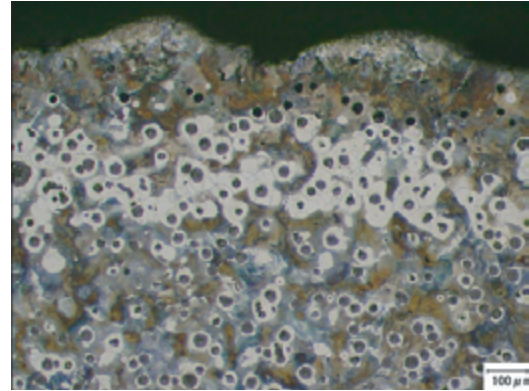


写真2 黒皮表面の光学顕微鏡組織

5. まとめ

ダクタイル鑄鉄やCV黒鉛鑄鉄の黒鉛球状化率、機械的性質と音速の関係、また表面欠陥の超音波探傷器による識別について実例を紹介した。まとめると以下ようになる。

- 1) 音速によってダクタイル鑄鉄の材質の識別は可能である。
- 2) 音速によってCV黒鉛鑄鉄の黒鉛球状化率の管理は可能である。
- 3) 音速によってダクタイル鑄鉄とCV黒鉛鑄鉄の識別は可能である。
- 4) 超音波探傷器によってダクタイル鑄鉄の表面欠陥を検出する試みを行った。

表面から0.5mm以上深く、φ1mm以上の欠陥であれば検出が可能である。

最後に、機械化された検査装置は量産効果による投資回収の見込まれる製品に適用されるが、それ以外の多種少量製品などを対象とした場合には汎用性の高い超音波探傷器が便利である。しかし使い勝手の良い装置を如何に活用出来るかはその特性を理解し、どこまでが限界なのかを明確にしておく必要がある。

株式会社アイメタルテクノロジー
研究開発部

〒300-0015 茨城県土浦市北神立4-2
TEL. 029-831-6761 FAX. 029-831-6768
<http://www.imetal.co.jp/>