地域イノベーション戦略支援プログラム 次世代自動車宮城県エリア 人材育成プログラム Advanced Phase 基礎 講義番号:121220PM

鋳造品の非破壊評価 電磁非破壊評価法 –

東北大学 流体科学研究所 内一哲哉

平成24年12月20日(木)

東北大学青葉山キャンパス中央棟2階大会議室





Phase diagram for F-C pseudo-binary system (2.4%Si)



片状黒鉛鋳鉄 (FC)



球状黑鉛鋳鉄(FCD)

黒鉛形状による鋳鉄の分類 В Α С G\ 黒鉛形状の分類 (ISO 945) F

片状黒鉛の分類 (ISO 945)

鋳鉄の基地組織の分類



FC

FCD

FCD with Chill

フェライト: 軟らかい パーライト: 硬い 極めて硬く、脆い チル:

鋳鉄の機械的特性



渦電流試験法



材質(透磁率、導電率)が変化する場合



渦電流試験法の原理

磁束



渦電流探傷法の回路によるモデル化



(a) 回 路

$$L_0 \dot{I}_P + M \dot{I}_S + R_0 I_P = V$$
$$L_S \dot{I}_S + M \dot{I}_P + R_S I_S = 0$$
$$I_P = I_0 \exp(j\omega t)$$

$$Z = \frac{V}{I_P}$$
$$= R_0 + j\omega L_0 + \frac{\omega^2 M^2}{j\omega L_S + R_S}$$





(b) R_sによる Z₁の軌跡

$$M = k \sqrt{L_0 L_S}$$

表皮深さ

$$J = 1/e J_0 \implies x_{1/e} = \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu\sigma}}$$





150 kHz

Current Density



Examples of Calculations







(b) R_sによる Z₁の軌跡

$$M = k \sqrt{L_0 L_S}$$





渦電流探傷装置の構成



渦電流法の長所と短所

長所

◆ 測定が容易(特別な技術を要しない) ◆ 信号処理が容易

短所

◆ 表面状態の影響をうけやすい
◆ 表面の情報しか得られない
◆ 温度の影響を受けやすい

磁気的手法の分類

探傷法	磁粉探傷法 磁束漏洩法
材質評価法	磁東漏洩法 バルクハウゼンノイズ(BHN)法 微分透磁率法 Magnetic Adaptive Testing 法 磁気光学法 自然磁化法

材料の磁気特性測定



Hysteresis – microstructure influences



Harmonic analysis of the magnetic field strength



 $K := \sqrt{\frac{|\tilde{A}_{3}|^{2} + |\tilde{A}_{5}|^{2} + |\tilde{A}_{7}|^{2}}{|\tilde{A}_{1}|^{2}}}$

 \widetilde{A}_{i} : coefficient of fundamental $\widetilde{A}_{3...7}$: coefficient of harmonics

Barkhausen noise and Bloch-wall movements





> 渦電流試験法による球状黒鉛鋳鉄の硬さ評価

- > 直流電位差法による片状黒鉛鋳鉄の黒鉛組織評価
- > 非線形渦電流法による鋳鉄におけるチル組織評価



経済産業省 平成13年度 即効型地域新生コンソーシアム研究事業

「電磁センシングによる鋳造品ライフ サイクル管理システム」の構築

平成13年3月~平成14年3月

総括研究代表者:内一哲哉、副総括研究代表者/鹿毛秀彦、 アドバイザー:阿部利彦、野口 徹 管理法人:宮城県中小企業団体中央会 研究実施機関:東北大学、日下レアメタル研究所、 東北電子産業

研究開発体制





▶ 組合せることにより完全な製品保証が可能

鋳鉄の超音波試験



鹿毛秀彦,田中雄一: 鋳鉄の超音波試験による材質判定, 鋳物, 第56巻, 7号(1984), 408

球状黒鉛鋳鉄の導電率



球状黒鉛鋳鉄の磁気特性



球状黒鉛鋳鉄の透磁率



渦電流探傷装置による評価



試験片シリーズA: ステップバー試験片

No.1	CE値 (3.8%CE)	3.05%C, 2.041%Si	No.11	残留Mg量	0.00%
No.2	CE値 (4.0%CE)	3.17%C, 2.341%Si	No.12	残留Mg量	0.02%
No.3	CE値 (4.3%CE)	3.44%C, 2.636%Si	No.13	残留Mg量	0.05%
No.4	熱翅 (4.3%CE)	900℃空冷	No.14	Cu添加	0.5%Cu
No.5	熱翅 (4.3%CE)	900℃炉冷	No.15	Cu添加	1.0%Cu
No.6	熱翅 (4.3%CE)	900°C→775°C	No.16	Cu添加	1.5%Cu
No.7	熱翅 (4.3%CE)	900°C→750°C	No.17	Cu, Sn添加	0.5%Cu, 0.025%Sn
No.8	熱翅 (4.4%CE)	900°C→725°C	No.18	Cu, Sn添加	0.5%Cu, 0.05%Sn
No.9	接 種 し (4.3%CE)		No.19	Cu, Sn添加	0.5%Cu, 0.075%Sn
No.10	イモル接種 (4	3%CE)			



ステップバー No.1





20 mm **206HB**



30 mm **149HB**





硬さと渦電流信号との間の相関



全試験片

合金鋳鉄を除いた場合

黒鉛形態の渦電流信号への影響 (合金鋳鉄を除いた場合)



黒鉛組織はほとんど依存しない

実体球状黒鉛鋳鉄試験片

- 製品供試体
- 実体から取り出した58片
- FCD450~600









A 150(HB)



C 204(HB)



B 172(HB)



D 259(HB)







渦電流硬さ計

試験片の上にプローブを置くだけで、ブリネル硬さ、 ビッカース硬さを測定することが可能





Institute of **Field**

所在地: 宮城県仙台市青葉区折立 1-14-9 **Generation E-mail:** toiawase@ifs.jp





Magnetic Adaptive Testing



Magnetic Adaptive Testing



Optimal $B_{ij}(HB)$ -degradation functions vs. Brinell hardness.

 $\mu_{ij}(BH)$ -degradation functions vs. graphite grain size

Gabor Vertesy, Tetsuya Uchimoto, Ivan Tomas, Toshiyuki Takagi, Nondestructive Characterization of Ductile Cast Iron by Magnetic Adaptive Testing, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol.322, (2010), pp. 3117–3121.

- > 渦電流試験法による球状黒鉛鋳鉄の硬さ評価
- ▶ 直流電位差法による片状黒鉛鋳鉄の黒鉛組織評価
- > 非線形渦電流法による鋳鉄におけるチル組織評価



自動車用ブレーキディスク





鋼と鋳鉄の減衰能

背景

片状黒鉛の特性







試験片

化学組成

Sussimon	Chemical composition (mass%)							CE
Specimen	С	Si	Mn	Р	S	Cr	Ti	(%)
CE4.7	3.77	2.78	0.78	0.025	0.015	0.029	0.015	4.71
CE4.1	3.36	2.15	0.69	0.018	0.010	0.014	0.011	4.08
CE3.7	3.13	1.66	0.72	0.017	0.002	0.038	0.010	3.69





✔ 焼準

熱処理後(850℃、1時間)に空冷

✔ 焼鈍

熱処理後(850°C、1時間)に炉冷





Specimen	Base metal	Heat treatment	Hardness (HB)	
CE4.7AS	CE4.7	NA (As-cast)	100	
CE4.7AN	CE4.7	850° C \times 1h, furnace cooling	89	
CE4.7NR	CE4.7	850° C \times 1h, air cooling	130	
CE4.1AS	CE4.1	NA (As-cast)	183	
CE4.1AN	CE4.1	850° C × 1h, furnace cooling	110	
CE4.1NR	CE4.1	850° C \times 1h, air cooling	209	
CE3.7AS	CE3.7	NA (As-cast)	207	
CE3.7AN	CE3.7	850° C × 1h, furnace cooling	130	
CE3.7NR	CE3.7	850° C × 1h, air cooling	221	





etched

etched _____ 200 μm CE4.7AS

CE4.1AS

CE4.7AS

etched

Relationship between Graphite Forms and Ultrasonic Velocity







試験片:円柱型、Φ3mm、高さ30mm

導電率と音速値の関係



Ultrasonic velocity, km/s

Morphology of Flake Graphite



Model of a graphite eutectic cell in cast iron.

"The Physical Metallurgy of Cast Iron", I. Minkoff, John Wiley & Sons Ltd. 1983



磁化曲線 (10 Hz)



(a) 黒鉛組織の依存性

(b) 基地組織の依存性

透磁率と音速値の関係



直流電位差法による測定







- > 渦電流試験法による球状黒鉛鋳鉄の硬さ評価
- ▶ 直流電位差法による片状黒鉛鋳鉄の黒鉛組織評価
- ▶ 非線形渦電流法による鋳鉄におけるチル組織評価









Ferrite

Pearlite: Ferrite + Cementite

Chill : Proeutectic Cementite

Magnetic Force Microscopy Observation





0µm

 $50 \mu m$

FC without Chill

FC with Chill

Magnetic Properties of FCD with Chill





Step-bar specimen with 5, 10, 20 and 30 mm steps



Chemical Composition (mass%)

Sample	С	Si	Mn	Р	S	Cr	Ti	Mg
0.1Cr	3.70	2.39	0.24	0.027	0.009	0.10	0.012	0.038
0.2Cr	3.59	2.27	0.18	0.023	0.006	0.20	0.011	0.037
0.3Cr	3.49	2.49	0.20	0.021	0.008	0.27	0.011	0.041
0.7Mn	3.60	2.27	0.73	0.023	0.004	0.02	0.012	0.040
1.2Mn	3.79	2.42	1.20	0.030	0.004	0.02	0.013	0.041
1.7Mn	3.57	2.36	1.61	0.027	0.004	0.02	0.012	0.041

Evaluation of structures (1.2 Mn FCD)



 $200 \ \mu m$

Evaluation of structures (1.2 Mn FCD)



 $200 \ \mu m$

磁化曲線と高調波との関係





Evaluation of Hardness and Chill Content by Nonlinear Eddy Current Method

