

交流磁化法に基づく片状黒鉛鑄鉄におけるチル組織含有量の評価

Evaluation of Chill Contents in Flaky Cast Irons Based on AC Magnetization Method

東北大学大学院	松川 淳	Jun MATSUKAWA	Non Member
東北大学流体研	内一 哲哉	Tetsuya UCHIMOTO	Member
東北大学流体研	阿部 利彦	Toshihiko ABE	Non Member
東北大学流体研	高木 敏行	Toshiyuki TAKAGI	Member
東北大学流体研	佐藤 武志	Takeshi SATO	Non Member
岩手工技センター	池 浩之	Hiroyuki IKE	Non Member
岩手工技センター	高川 貫仁	Takahiro TAKAGAWA	Non Member
北海道大学	堀川 紀孝	Noritaka HORIKAWA	Non Member

This study proposes a novel nondestructive evaluation method of chill contents in gray cast irons by means of AC magnetization method. For the purpose, magnetic properties of cast irons with different chill contents were evaluated by B-H loop analyzer. Results were discussed in view of matrices and graphite, and it was found that some magnetic parameters, especially B-H loop area, correlate well with ratio of cementite area to graphite one. Focusing on the fact, AC magnetic method was applied to evaluation of cementite contents in flaky cast irons. Signals relevant to B-H loop area showed relatively good correlation to ratio of cementite area to graphite one, which indicates possibility of evaluation of chill contents in gray cast irons.

Keywords: Nondestructive Evaluation, Cast iron, Cementite, Chill, AC Magnetization Method

1. 緒言

自動車に使用されている鑄鉄部品において、薄肉化は自動車重量の軽量化に寄与する。一方で、薄肉化は鑄造時の冷却速度を大きくし、初晶セメンタイトであるチル組織の晶出を促進する。機械的特性の向上のための合金元素の添加もまた、チル組織の晶出を促進する要因である。チル組織を含む鑄鉄はきわめて硬く脆いため、機械的性質や切削性が著しく低下する^[1]。一方で、エンジンのシリンダボア摺動部において、耐摩耗性の向上に寄与するチル層を導入することについての研究報告もある^[2]。そのため、チル組織の含有量の評価と制御が重要となる。

現在、チル組織の有無や量の評価には、破面の目視、顕微鏡観察、硬さ試験が行われている。しかし、これらは切断、圧痕を残すため、実製品の全数検査が不可能である。従って、チル組織含有量を迅速かつ非破壊で定量的に評価する手法の確立が望まれている。

鑄鉄の組織はチル組織のほかにフェライトやパーライトといった基地組織、黒鉛が存在する。そのため、チル組織の非破壊評価を考える場合、黒鉛や基地組織などの様々な影響因子からチル組織に関係する情報のみを抽出することが必要となる。現在までに、フェライトやパーライトの電磁特性の違いに着目し、電磁現

象を用いた評価手法により、球状黒鉛鑄鉄の硬さの推定やフェライトとパーライトの比率の推定、片状黒鉛鑄鉄の黒鉛サイズの推定などが試みられている^{[3][4]}。また、球状黒鉛鑄鉄におけるセメンタイト含有量の評価に関する研究も報告されている。

著者らは、電磁非破壊評価法を用いて、チル組織を定量的に評価することを目指しており、このために渦電流法および交流磁化法に基づく評価方法について様々な視点から検討している。本稿では、チル組織含有量を変化させた試験片について、チル、フェライト、パーライト組織、黒鉛の含有量を定量化し、鑄鉄の磁気特性と各組織含有量との関係性について議論した。次に、磁気特性とチル組織含有量との関係について得られた知見に基づき、交流磁化法に基づく計測を行い、チル組織含有量を評価した。

2. 片状黒鉛鑄鉄試験片

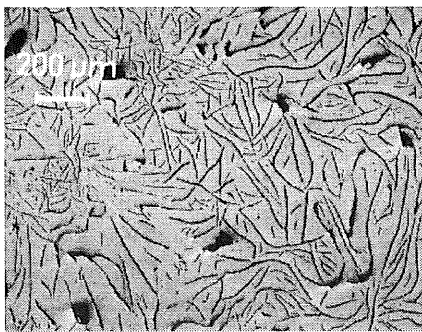
本研究で使用した片状黒鉛鑄鉄供試材の化学組成を表1に示す。チル組織を含まない片状黒鉛鑄鉄については、FC150、FC200、FC250相当(JIS規格)の溶湯を用いて鑄造し、それぞれについて鑄放し、焼鈍、焼準の処理を行った9種類の供試材を用意した。焼鈍、焼準

表 1. 片状黒鉛供試材の化学組成

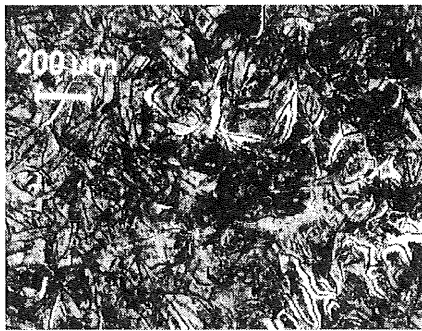
	C%	Si%	Mn%	P%	S%
FC150	3.77	2.78	0.78	0.025	0.015
FC200	3.36	2.15	0.69	0.018	0.01
FC250	3.13	1.66	0.72	0.017	0.002
I-1-1	3.40	1.81	0.66	0.016	0.008
I-1-2	3.23	1.84	0.66	0.016	0.009
I-1-3	3.01	1.84	0.66	0.016	0.009
I-2-1	3.99	2.59	0.77	0.025	0.011
I-2-2	3.78	2.62	0.77	0.025	0.010
I-2-3	3.48	2.63	0.76	0.024	0.010

表 2. 各試験片の基地組織および黒鉛含有量

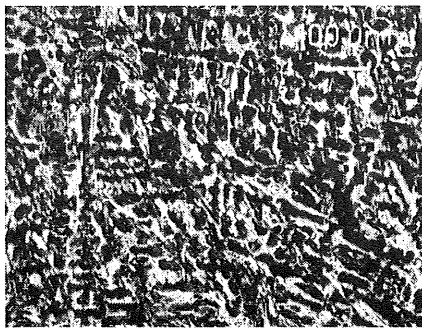
	Graphite%	Ferrite%	Cementite%	Chill%
FC150 as cast	16.4	32.1	51.6	0
FC150 furnace	11.8	74.7	13.5	0
FC150 air	20.1	29.3	50.6	0
FC200 as cast	8.25	40.7	51.1	0
FC200 furnace	6.45	84.5	9.00	0
FC200 air	6.45	40.1	53.5	0
FC250 as cast	4.33	44.98	50.7	0
FC250 furnace	4.65	65.2	30.2	0
FC250 air	4.50	45.8	49.7	0
I-1-1	0.45	27.3	72.3	31.4
I-1-2	0.17	30.4	69.4	28.3
I-1-3	0.25	32.7	67.1	22.9
I-2-1	16.4	19.8	63.8	8.1
I-2-2	6.54	23.5	69.9	15.0
I-2-3	1.78	26.0	72.2	21.2



(1) FC150 鋳放し試験片(腐食前)



(2) FC150 鋳放し試験片(腐食後)



(3) I-1-1 試験片(腐食後)

図 1. 鋳鉄のマイクロ組織

の溶湯を用いて鋳造した I-1 群と FC150 相当の I-2 群に大別される。各群において、溶湯を 1500℃で一定時間保持し、その後に注湯し、再加熱して 1500℃で保持することを繰り返した。この処理により、チル化に最も影響を及ぼす溶湯成分中の C および Si の量を変化させ、チル組織含有量の異なる供試材を作製した。そのため、I-1-1 供試材から I-1-3 供試材にかけて、C は減少しており、チル化が促進される。I-2 群についても同様である。

黒鉛および基地組織の形状、含有量を評価するために光学顕微鏡による組織観察を行った。パーライトの腐食は濃度 3% のナイトールを用いて行った。FC150 鋳放し試験片と I-1-3 試験片の腐食前後の組織写真を図 1-(1)、図 1-(2)、図 1-(3)に示す。図 1-(1)において、黒色領域および白色領域は黒鉛および基地組織を表している。また、図 1-(2)において、灰色領域、白色領域は、パーライト、フェライトを表している。今回使用したチル組織を含む試験片はパーライト中のみフェライトを含んでおり、図 1-(3)の白色領域はチル組織である。

次に、組織写真から画像解析により各組織の含有量の定量化を行った。得られたパーライト面積率から 2 元系状態図を用いてパーライト中のフェライトとセメンタイトの比率を算出し、鋳鉄中の全セメンタイト量と全フェライト量を定量化した。以上の処理により定量化した黒鉛および基地組織の含有量を表 2 に示す。

は、850℃で 1 時間保持した後に、炉冷または空冷を行った。チル組織を含む供試材に関しては FC250 相当

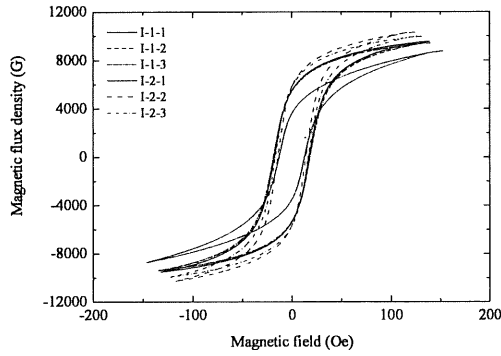


図 2. 100Hz における B-H 特性

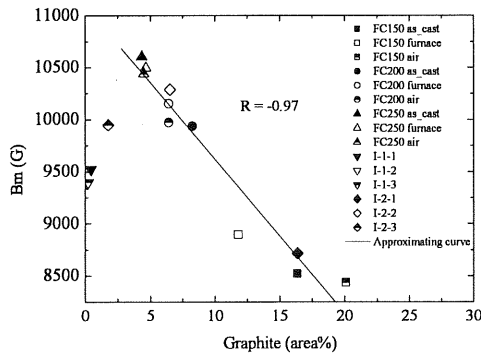


図 3. 最大磁束密度と黒鉛含有量の関係

3. B-H 特性の測定

磁気特性の評価を行うために B-H アナライザを用いて磁化曲線の測定を行った。B-H アナライザは試験片と同軸の励磁コイルと検出コイルから構成される。励磁コイルにより試験片の外部磁場を変化させ、このときの試験片の磁化変化を検出コイル信号から解析し、試験片のヒステリシス曲線を評価する。試験片は 2 節で示した供試材を加工し 3 mm, 長さ 30mm の円柱状試験片を作製した。試験周波数は 100Hz および 100kHz に設定し、磁気ヒステリシス曲線等を評価した。

図 2 に、試験周波数 100Hz において、チル組織を含む鑄鉄を測定対象として得られたヒステリシス曲線を示す。I-2-1 と I-2-2 を比較すると、I-2-2 では高磁場領域での磁束密度が増加している。一方で、I-2-3 と I-1 群では、チル組織の増加に伴って高磁場領域の磁束密度は減少している。この原因は、チル組織が比較的少量である場合、チル含有量の増加と共に黒鉛が片状から粒状の形態をとり、磁化容易性が増すためであると考えられる^[5]。しかし、チル組織含有量が増加するにつれてチル組織が支配的な磁気特性へと遷移するため

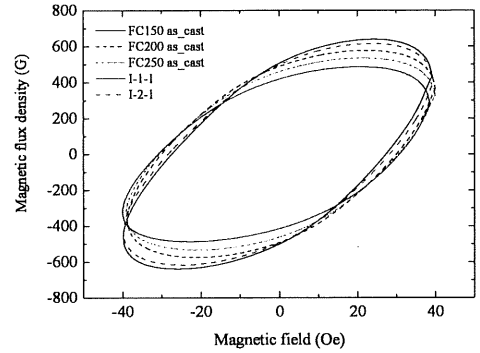


図 4. 100kHz における B-H 特性

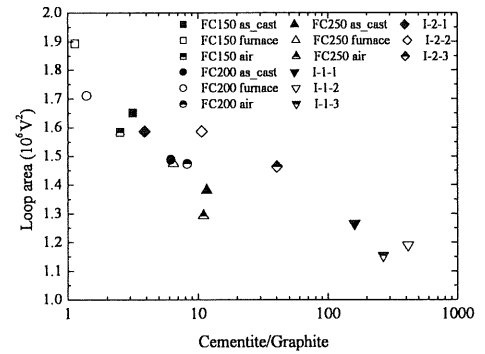


図 5. ループ面積と C/G 値の関係

に、I-2-3 と I-1 群では高磁場域での磁束密度が減少している。そこで、ヒステリシス曲線における磁束密度の最大値(最大磁束密度 B_m)と黒鉛含有量との関係の評価した。結果を図 3 に示す。黒鉛含有量が 5%以上の領域では黒鉛の増加に伴って B_m はほぼ直線的に減少する。しかし、チル組織含有量が増加し、黒鉛含有量が 5%以下になると、黒鉛が支配的な領域の回帰直線から遠ざかるように B_m が減少していることがわかる。

図 4 は 100kHz における各試験片のヒステリシス曲線を示している。高周波領域では試験片表面に発生する渦電流損失の影響が大きくなりループ面積が増す。図 4 のヒステリシス曲線から求めたループ面積と全セメントタイト量を黒鉛含有量で除したパラメータ(以下 C/G 値とする)との関係の評価した結果を図 5 に示す。全セメントタイト量が増加するほど、また、黒鉛含有量が減少するほどループ面積が直線的に変化している。フェライトは渦電流損失への寄与が小さいため、セメントタイトおよび黒鉛の影響が支配的であると考えられる。しかし、今回は含有比率のみの比較であり、含有量や黒鉛形状は考慮されていないため、今後は鑄鉄組

織の影響を評価するための独立変数の検討と設定した独立変数と磁気特性の関係から、チル組織の含有量を評価する方法について吟味する必要がある。

4. 交流磁化法に基く測定

交流磁化法に基く測定によってチル組織の非破壊評価の可能性を検討する。励磁・検出同軸コイル（上置プローブ）を試験体付近に配置し、交流電流を流す。コイルにより発生する磁場により試験体が磁化される。そのときの磁化の様子（磁化過程）は相互誘導作用により検出コイルの電圧として検出される。本研究ではコイルの芯にフェライトコアを用いることでより強い磁場範囲で測定する。出力された検出電圧と励磁電圧によるリサーチ波形（ヒステリシス相当曲線）や第3高調波を測定することで比較的容易にヒステリシスの変化を調べることができる。今回の計測は外径 8.4mm、内径 5.4mm、高さ 4.25mm、巻数 150 ターンの 1 組の励磁コイルと検出コイルを同軸上に配置した上置プローブを使用し、電源電圧 5 V、試験周波数 3 kHz で行った。

図 6 に鑄放し試験片とチル組織を含む試験片から得られたヒステリシス相当曲線を示す。また、図 6 のヒステリシス相当曲線から算出したループ面積と C/G 値の関係を図 7 に示す。図 5 と比較すると相関性がやや低くなっていることがわかる。測定条件の最適化やサンプリングタイム改善によるループ面積算出の厳密化を行うことにより相関性が向上する可能性がある。黒鉛含有量を定量的に評価することが可能な磁気パラメータを検証することにより、図 7 の結果を基にしてチル組織含有量を定量的に評価することが可能である。

5. 結言

チル組織含有量を変化させた試験片を作成し、磁気特性と鑄鉄組織の含有量の関係を議論した。評価過程で、チル組織含有量と相関を有する磁気パラメータと独立変数について検討し、評価可能性を示した。鑄鉄の磁気特性に影響を与える因子は多岐に渡り、今後は更なる検討が必要である。また、磁気特性とチル組織含有量の関係について得られた知見を基に、交流磁化法に基く測定を行いチル組織含有量を評価した。測定条件を最適化することで、チル組織含有量の定量化手法について吟味していく。

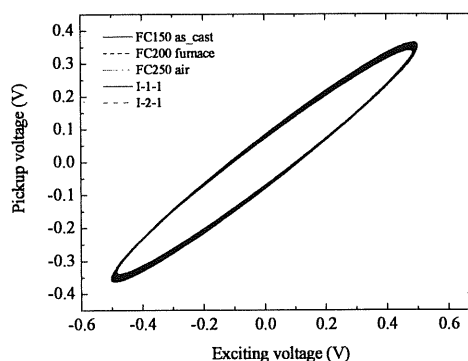


図 6. 3kHz におけるヒステリシスループ

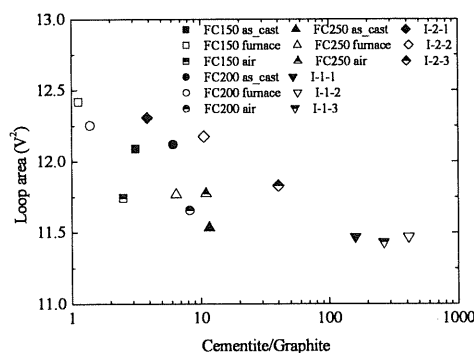


図 7. ループ面積と C/G 値の関係

謝辞

本研究は NEDO 産業技術研究助成事業「マルチスケール電磁アプローチによる省エネ型自動車用高性能鑄鉄の組織制御評価手法の開発」の一部として行われた。本研究で使用した試験片の加工に際して、流体科学研究所の渡邊努氏を初め技術職員の方々に多大なる支援を承った。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 日本鑄造工学会編、鑄造工学便覧（丸善）、2002、227
- [2] 永井亨、上村正雄、他、鑄造工学、第 76 巻、第 6 号、2004、pp.440-446
- [3] 阿部利彦、内一哲哉、高木敏行、多田周二、鑄造工学、第 75 巻、第 10 号、2003、pp.675-681
- [4] T. Uchimoto, T. Takagi, S. Konoplyuk, T. Abe, H. Huang and M. Kurosawa, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 258-259, 2003, pp.493-496
- [5] 中野幸紀、川野豊、鑄物、第 51 巻、第 6 号、1978、pp.315-321