

フェライト質黒鉛鑄鉄の成長について*

桑野正司***, 三亀秀人**

On the Growth of Ferritic Gray Cast Iron

Masashi Kuwano and Hideto Miki

Abstract

In the preceding paper, it was reported that the equation of thermal expansion of ferritic flaky graphite cast iron calculated on the conception which is proposed by prof. Naqaoka and others, accounts quantitatively well for the experimental expansion of the cast iron under several conditions.

Now in order to confine this attempt, the conception was adapted to the ferritic nodular graphite cast iron, and it was recognized that the attempt is appropriate for the thermal expansion and the growth of the cast iron, and also explains the difference between the growth of the flaky graphite cast iron and that of the nodular graphite cast iron.

Finally the temperature range at which cast iron tends to grow was confirmed.

1. ま え が き

長岡らの説⁽¹⁾に従って導いたフェライト質片状黒鉛鑄鉄の熱膨張式は、実測された同鑄鉄の熱膨張現象を定量的によく説明することを先に報告⁽²⁾した。本研究では更にこの事実を確認する目的で、フェライト質球状黒鉛鑄鉄に対して同様な熱膨張式を作り、その実測値と比較して式の合理性を検討し、更に片状黒鉛鑄鉄との熱膨張特性の相違点を長岡らの説より検討した。また更に鑄鉄が成長を起こす温度範囲を調べた。

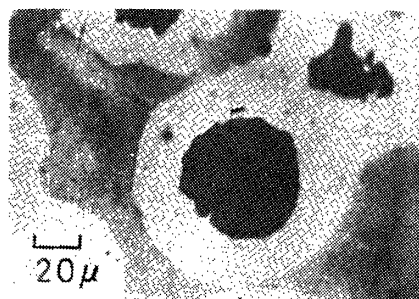
2. 試料および試料の熱膨張率の計算

試料素材の球状黒鉛鑄鉄 FCD の化学成分は、その熱膨張特性を片状黒鉛鑄鉄 FC と比較するために、先に報告した片状黒鉛鑄鉄の成分に近似させた。その成分を表 1 に、またその顕微鏡組織を写真 1・a に示す。この素材の基質に含まれるセメンタイトを黒鉛化して試料とした。その顕微鏡組織を写真 1・b に示す。試料の寸法及びセメンタイトの黒鉛化の方法は前報に示したものと

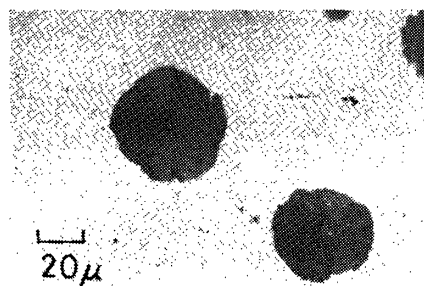
表 1. 球状黒鉛鑄鉄 FCD の化学成分

(wt %)

	C	Si	Mn	P	S
FCD	3.45	2.59	0.20	0.006	0.008



(a) 黒鉛化処理前



(b) 黒鉛化処理後

写真 1. 試料の顕微鏡組織

* 1973年10月日本金属学会秋期大会に発表

** 元宇部工業高等専門学校工業化学科

*** 宇部工業高等専門学校機械工学科

同じである。

この試料 FCD を t_0 °C より t °C に加熱することによる熱膨張率は前報に示した方法と同様に、次の4過程の膨張率を合計して近似的に求めた。

- (1) フェライト質球状黒鉛鑄鉄を t_0 °C より t °C に過熱するときの熱膨張率 (l_{α})
- (2) t °C で α 鉄の γ 鉄への A_3 変態による膨張率 (l_{tr})
- (3) t °C で γ 鉄の炭素飽和による膨張率 (l_s)
- (4) 黒鉛の表面の炭素原子が基質に溶出したあとの空孔のうち $(1-v)$ 分率が消滅し、 v 分率が何らかの形の空隙となって残留した場合の収縮率 (l_{gv})

計算に必要な数値は文献又は実測により求めた。その結果を表2に示す。

700°C より t °C に加熱して A_1 変態を完了させたときの膨張率 l は近似的に(1)式で表わされる。

$$l = (t - 700) \times l_{\alpha} + l_{tr} + l_s - l_{gv} \quad (1)$$

(1)式に表2の数値を代入して整理すると(2)式が得られる。

$$l = -0.514 + 0.458v + (0.0021 + 0.00131v) \times (t - 700) \quad (2)$$

v を0より1まで0.1きざみに変えたときの(2)式の l と t の関係を図1. に細線で示す。1点鎖線で示した α 線は、フェライト質基地のまま700°Cより900°Cまで過熱した場合の熱膨張線で、(1)式の第1項の $(t-700) \times l_{\alpha}$ を示す。これに第2項の l_{tr} 及び第3項の l_s を順次加えたものがそれぞれ t_r , s 線である。 s 線はまた $v=1$, 即ち発生した空孔が全部残留した場合の第4項の l_{gv} を加えた膨張率をも示している。そしてこの膨張率は空孔が消滅するに従って v の小さい線で表わされ、空孔が完全に消滅したときには $v=0$ の膨張線で示される。従って $v=0$ と $v=1$ の線間を表2の l_g で、これは発生する空

表2. 試料 FCD の熱膨張に関する基礎数値

項目	記号	単位	数値		備考	
			t_0 700°C	t 900°C		
格子定数	α 鉄	a_{α}	Å	2.89	2.90	
	γ 鉄	a_{γ}	Å	3.62	3.64	
試料の熱膨張係数	l_{α}	%/T		0.00145	0.00145	600~700°C間の平均測定値
試料の熱膨張率	$l_{\alpha t}$	%		0	0.290	$l_{\alpha t} = (t - t_0) l_{\alpha}$
A_3 変態による膨張率	l_{tr}	%		-0.456	-0.300	$l_{tr} = k_{\alpha} \times l_{tr}^{\circ}$
基質 α 鉄の体積占有率	K			0.893	0.844	$K_{\alpha} = \frac{(100 - G) / (\rho_{\alpha} \times \rho_2 / \rho_1)}{(100 - G) / (\rho_{\alpha} \times \rho_2 / \rho_1) + G / \rho_g}$
黒鉛の含有率	G	%		3.45	3.45	
密度	α 鉄	ρ_{α}	g/cm ³	7.67	7.59	格子定数 ⁽³⁾ より求む
	γ 鉄	ρ_{γ}	〃	7.79	7.67	〃
	20°Cの純鉄	ρ_1	〃			7.86 ⁽⁴⁾
	20°Cの2.59% Si 鉄	ρ_2	〃			7.72 ⁽⁵⁾
α 鉄の A_3 変態による膨張率	l_{tr}°	%		2.25	2.25	温度に関係なく一定 ^(5, 6)
						$l_{tr}^{\circ} = \left\{ \frac{a_{\gamma}^3/4 - a_{\alpha}^3/2}{a_{\alpha}^3/2} \right\} \times 100/3$
γ 鉄の炭素飽和による膨張率	l_s	%		0.400	0.636	$l_s = K_{\gamma} \times \Delta C \quad (3.2/a_{\gamma})$
基質 γ 鉄の体積占有率	k_{γ}			1.0	1.0	球状黒鉛鑄鉄の見掛上の値 ⁽¹⁾
2.5% Si 鑄鉄の炭素飽和度	ΔC	%		0.454	0.724	文献 ⁽⁷⁾
黒鉛の減量に伴う収縮率	l_g	%		0.458	0.721	$l_g = \frac{\Delta C (100 - G) / \rho_g}{(100 - G) / (\rho_{\gamma} \times \rho_2 / \rho_1) + G / \rho_g} \times \frac{1}{3}$
同上 850°C						$l_g (850^{\circ}\text{C}) = 0.656$
同上 (空孔係数= v)						$l_{gv} = (1 - v) l_g$
鑄鉄の膨張率 ($v=1$)	l	%		-0.0555	0.627	$l = (t - t_0) l_{\alpha} + l_{tr} + l_s - l_{gv}$
〃 ($v=0$)	l	%		-0.514	-0.095	

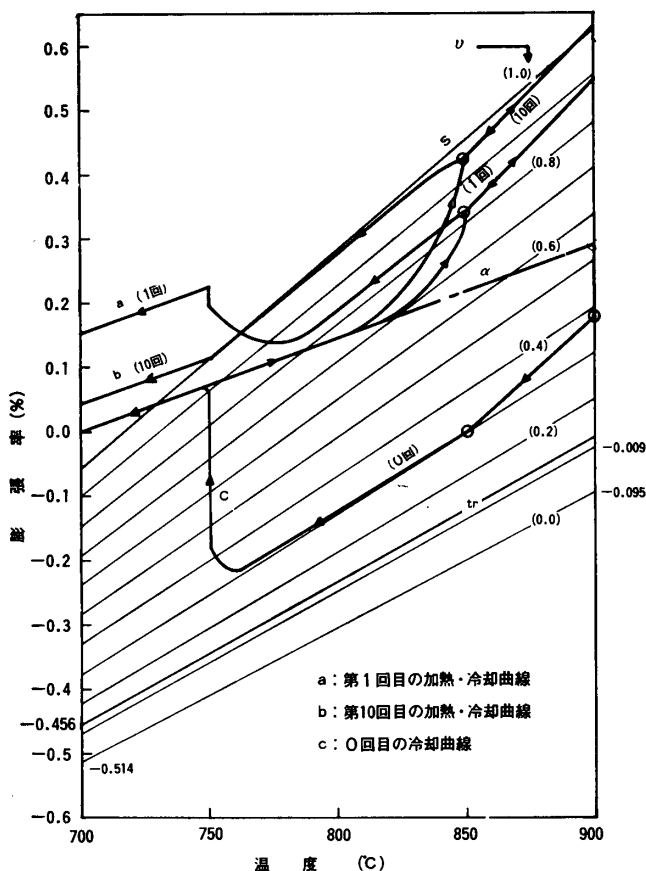


図 1. 試料 FCD の熱膨張曲線

孔が全部残留したための膨張率を示し非常に大きい。これ程の膨張が単純な空孔によるとは考えられない。空孔は集合して何等かの形の空隙となっておりと仮定せざるを得ない。その空隙の体積はまた溶解した黒鉛の体積と等しいとして計算しているが、黒鉛の密度は温度には無関係にほぼ一定であるので空隙も温度により膨張、収縮することはない。従って l_g は溶解黒鉛量のみの関数であると仮定している。

さて、この FCD に対する膨張率は前報⁽²⁾で報告した FC に対する膨張率より少し大きい。この主な原因は γ 鉄に炭素が溶解して基質が膨張するとき、球状黒鉛を内蔵している基質の空洞も、基質の膨張につれて膨張し、見掛け上鑄鉄が 100% 基質のみより出来ている、即ち基質の体積占有率 $K\gamma = 1^{(1)}$ とみなして計算したためである。

3. 実験方法と実験結果及びその考察

実験方法は前報⁽²⁾に記した方法に準拠した。

3・1 繰り返し加熱・冷却した場合の伸び率

フェライト質試料 FCD を下記の行程で10回繰り返し徐熱、徐冷した。

室温 — \ast — 700°C — \ast — 750°C — \ast — 850°C — \ast — 900°C

\ast : 加熱, 冷却速度 2°C/min

\ast : 各温度で伸縮が止まるまで約 1 hr 保持

第 1 回目の膨張曲線は図 1. a に、第 10 回目の膨張曲線を同 b に、また第 1 回目直前の黒鉛化処理中の冷却時の膨張曲線を 0 回目の膨張曲線として同 c に示す。全般に前報に報告した FC より膨張率が高く、900°C では初回より空孔係数 v は 0.89 にも及んでいる。各回の 850°C と 900°C における加熱時の伸び率を空孔係数でそれぞれ図 2 に a b で示す。図 1. に示されているように、

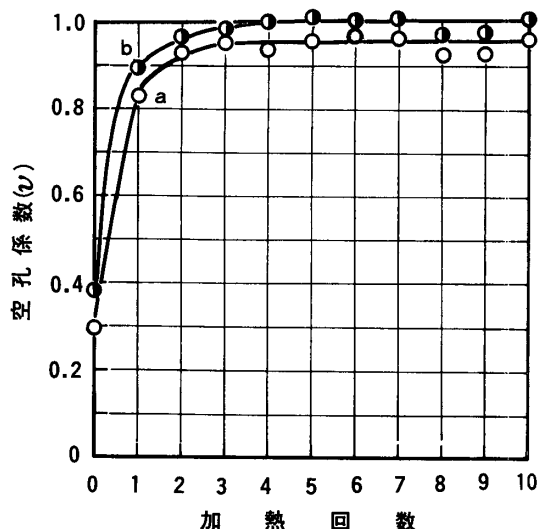


図 2 空孔係数 v で表わした FCD の加熱時の伸び率と繰り返し加熱回数との関係

a: 850°C, b: 900°C

これ等の値は冷却時も殆んど同じ値を示す。そして 0 回目の 850°C の値は冷却時の値である。膨張率は数回繰り返し加熱、冷却すると、850°C でも 900°C でもほぼ $v = 1$ の最大伸び値に近接し、以後この最大値に近い伸びを持続している。

このように最大伸び値が計算上の最大伸び値に近似していることは球状黒鉛鑄鉄に対して熱膨張式 (2) はほぼ妥当で、従って長岡らの説は正しいことを示している。ただ最小の伸び値を示す 0 回目の伸び値が計算上の $v = 0$ の最小伸び値よりかなり大きいのは、用いた球状黒鉛鑄鉄素材の基質が完全なパーライト組織でなく可成りのフェライト組織を混在していることと、セメントタイトの黒鉛化処理過程で急熱しても A_c1 変態を起こす前

にパーライトの一部が分解してフェライト化しやすいことに起因すると考えられる。このように素材にフェライト組織が混在していると、これを黒鉛化処理のため A_{r1} 変態以上に加熱中、黒鉛の溶解を伴い、そのあとにできた空孔が冷却時に析出黒鉛に埋められず空隙となってしまうためと推察される

3・2 鑄鉄の成長

鑄鉄を加熱・冷却するとき、冷却後、加熱前より膨張している現象を鑄鉄の成長という。これは図1. では A_{r1} 変態後、 α 線以上の伸びとして求められる。

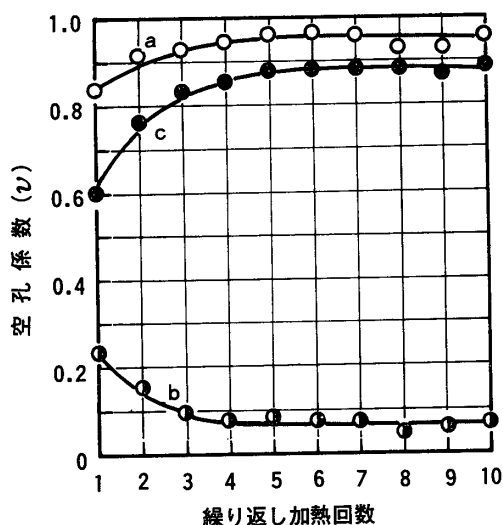


図3. 繰り返し加熱した FCD の A_{r1} 変態前と後の空孔係数

- a: A_{r1} 変態前 (850°C冷却時)
- b: A_{r1} 〃後 (750°C, 成長)
- c: A_{r1} 〃中 (850→750°C)

図3. a は先の実験で、試料 FCD を 900°C に加熱後 850°C に冷却したときの伸びを、また同 b は更に冷却して A_{r1} 変態及び黒鉛化を完了した後 750°C の成長を共に 50°C における空孔係数で示したものである。例えば初回で a 線は 850°C で溶解黒鉛体積の 0.83 分率の空孔が空隙として残留していることを示し、b 線は、これが 750°C に冷却後、析出黒鉛により一部埋められ、析出黒鉛体積 (850°C における溶解黒鉛体積と同量) の 0.23 分率に減じていることを示す。即ち析出黒鉛の 0.6 分率が埋められたことがわかる。この析出黒鉛により埋められた分率を同図中 c に示す。前報で示した試料 FC についても同様の実験を行った。その結果を図4. に示す。FCD 及び FC とともに繰り返し加熱、冷却するに従って、加熱時には空孔の残留率が増加し、冷却時には析出黒鉛が空隙を埋める率が増加している。これはまた

長岡らの説を裏付ける事実でもある。即ち、鑄鉄を繰り返し加熱、冷却すると、基質と黒鉛の境界付近に次第に空隙が蓄積して成長する。空隙が蓄積されるに従って加熱時には発生する空孔がその空隙に吸収され残留しやすくなり、また冷却時には析出する黒鉛はその空隙内またはその近傍に析出して空隙を埋めやすくなると説明されるからである。

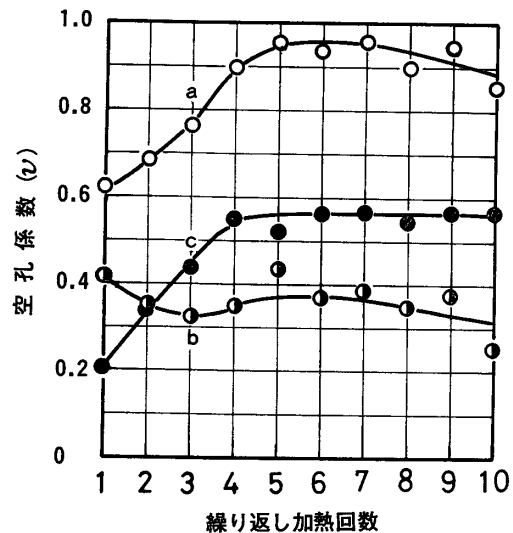


図4. 繰り返し加熱した FC の A_{r1} 変態前と後の空孔係数

- a: A_{r1} 変態前 (850°C冷却時)
- b: A_{r1} 〃後 (750°C成長)
- c: A_{r1} 〃中 (850→750°C)

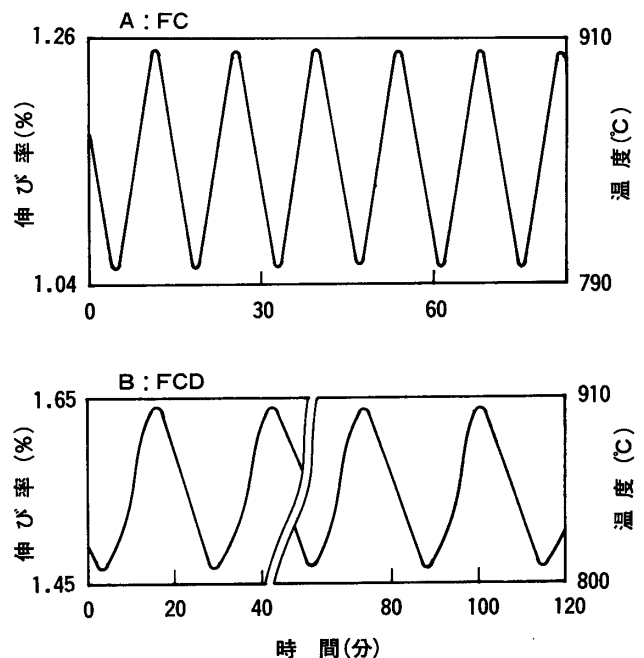


図5. オーステナイト域繰り返し加熱による鑄鉄の熱膨張曲線

図5. は A_1 変態点以上のオーステナイト域で繰り返し加熱、冷却した場合の膨張・収縮曲線である。a は FC, b は FCD に対する結果である。両者ともにほとんど可逆的に膨張、収縮して成長を起こしていない。この事実より図3. 及び図4. に示された成長は主として A_1 変態中に生じたものであることがわかる。即ち黒鉛の溶解・析出がオーステナイト域のように温度に対して連続的な平衡を保ちつつ静かに変化する場合には空孔の残留、消滅は可逆的に起こり、 A_1 変態のように温度に対して不連続な平衡を保ちつつ急激に変化する場合には、空孔の残留と消滅は不可逆的で成長を起こしやすいと考えられる。

3.3 FC と FCD の熱膨張特性の相違

図3と4を詳しく検討すると、加熱中の空孔残留率は FCD が FC より大きく、従って伸びが大きい。然し冷却時に空隙を埋める率も FCD が FC より大きいので、終極的には FCD の成長が FC より小さい。

これは長岡らの説から容易に理解される。即ち、FC の黒鉛は片状であるが FCD の黒鉛は球状で、黒鉛の溶解、析出が行われる黒鉛の表面積が FC に比較して非常に小さい。従って FCD では加熱時には狭い場所に多量の空孔が発生するので、空孔は集結して移動困難な空隙になって残留しやすい。又冷却時には基質に溶解した炭素が黒鉛となって既存の黒鉛の表面に析出するが、その黒鉛表面又はその近くに空隙が密集しているので、析出黒鉛はその空隙を埋めやすい。

4. む す び

鑄鉄の成長と長岡らの説との定量的関係を明らかにするために、先に報告したフェライト質片状黒鉛鑄鉄 FC に引き続き本報ではフェライト質球状黒鉛鑄鉄 FCD に対する熱膨張式を作り、実測された熱膨張率及び成長率と比較検討した。その結果は次のように要約される。

(1) 長岡らの考えを考慮して導いたフェライト質球状黒鉛鑄鉄 FCD の熱膨張式の最大膨張率は、その試料を繰り返し加熱、冷却中に実測された最大膨張率とよく一致した。この事実より、FC 同様、FCD に対する熱膨張式も妥当である。従って長岡らの説の妥当性が定量的に確認された。

(2) 空孔が残留又は消滅する度合を、空孔係数で定量的に表わすことが出来た。

(3) 空孔が残留又は消滅する温度範囲を明らかにすることができた。

(4) 充分酸化を防止した雰囲気中では、フェライト質鑄鉄はそのオーステナイト域で繰り返し加熱、冷却しても、可逆的に膨張、収縮してほとんど成長を起こさない。

(5) A_1 変態域での加熱、冷却による膨張、収縮は不可逆的で成長を起こしやすい。

謝 辞

本研究を行うにあたり、ご懇切なご指導を賜りました九州大学工学部 松田公扶教授ならびに試料作製にご協力をいただきました北川鉄工株式会社河村嘉洋氏に厚く御礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 長岡, 萩原: 鉄と鋼, 23 (1938), 863 等
- 2) 三亀, 桑野: 宇部高専研究報告, 26 (1980), 65
- 3) 日本金属学会: 金属便覧, 丸善 (1971), 666
- 4) 日本鑄物工業会: 鑄鉄の材質, コロナ社 (1962), 128
- 5) 日本化学会: 化学便覧, 丸善 (1960), 615
- 6) H. Jaβ, H. Hanemann: Die Giesserei, 25 (1938), 293

(昭和55年9月1日受理)