

6.3 高強度・高延性球状黒鉛鑄鉄の開発

パラメータ設計による球状黒鉛鑄鉄の最適材料設計

The Optimum Material Design of Ductile Cast Iron by the Parameter Design

増田峰知 河合 真 樋尾勝也

Takanori Masuda Makoto Kawai Katsuya Hio

Abstract

The ductile cast iron is generary used as materials for machine structural use. However, the optimum material design of ductile cast iron has never accomplished. The parameter design which employs the signal-to-noise ratio optimizes control factors of manufacturing.

This paper describes a study of optimized factors for ductile cast iron with the parameter design.

As a result, the best combinatiion obtained up to three times more stability of yield strength than the general combination.

Keyword

ductile cast iron, spheroidizing, Quality Engineering, Parameter Design, signal-to-noize ratio, yield strength, optimum material design

1 緒言

近年、球状黒鉛鑄鉄は、ネットシェイプ成形が可能で高負荷に耐えられる機械構造用材料として、広く用いられている。その応用事例は、今後も増えると考えられ、より高強度・高延性な特性が望まれている。

機械構造用材料は、要求される特性（機械的性質など）が安定して得られなければならない。そのためには、材料特性のばらつきを小さくする製造方法の確立が重要である。即ち、「球状黒鉛鑄鉄の機械的性質が安定する最適材料設計手法」の開発が求められている。

しかしながら、多くの要因が複雑に絡み合う球状黒鉛鑄鉄の製造技術は、経験的な制御条件を設定している場合が多い。そのため、ばらつきを体系的に小さくする手段は、あまり検討されていない。

品質工学のパラメータ設計¹⁾は、最適製造条件の組み合わせを合理的に求めることができる手法である。

本報では、高強度球状黒鉛鑄鉄の製造条件に同手法を用い、機械的性質の安定性向上を試みた。特に、球状化処理等の諸条件を組み合わせ、最適化による効果予想を行い、著者らが経験的に設定した製造条件との比較をした。それらの結果から、最適材料設計手法としての同手法の効果を検討した。

2 パラメータ設計手法と基本機能

パラメータ設計は、品質工学のオフライン事例としていろいろな分野で応用例が紹介²⁾されている。しかし、鑄造技術関連の発表事例は見られない。その手法の特徴は、複数の制御条件を組み合わせる実験計画法と安定性の尺度を示すSN比での評価法により、合理的にばらつきの少ない最適製造条件を求めることである。それゆえ、制御要因の多い鑄造技術にも適していると考えられ、ばらつきを押さえた鑄造品の生産に有効であると期待できる。

本研究では、球状黒鉛鑄鉄の材料設計を図1に示すようなひとつのシステムと考えた。本システムの基本機能は、組織制御条件など（入力信号）に対し、安定した機械的性質（出力特性）が得られることである。

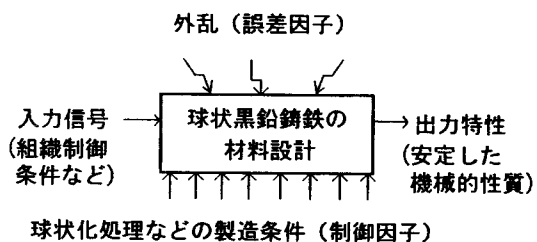


図1 本研究で検討したシステム

本報では、システムを評価する基準を0.2%耐力とし、これを本システムの目的機能とした。つ

まり、押し湯条件の違いや冷却速度の違いなどの外乱（ノイズ）に対して、最も安定した耐力値が得られる製造条件を求めることが、本システムの基本機能であり、本研究の目的である。

しかしここで、この基本機能の設定には2つの問題点が指摘される。1点は、球状黒鉛鋳鉄に求められる機能は機械的性質だけではないこと、もう1点は、通常、構造物設計に必要な許容応力度は、耐力ではなく疲労限から求められることである。

前者については、機械的性質は構造物にとって最も重要な機能であること、後者については、疲労限の測定が容易でないこと及び耐力値が安定すれば疲労限の安定も期待できること、の理由から本研究を進めた。

3 実験計画

3.1 実験計画

図2は、球状化処理を中心に、球状黒鉛鋳鉄の機械的性質に影響する製造要因をまとめた特性要因図である。これから、要因を信号因子、制御因子、誤差因子、表示因子³⁾に整理し、次項以降にまとめた。

実験計画には、L18直交表を用いた。L18直交表を表1に示す。

3.2 信号因子

球状黒鉛鋳鉄の機械的性質は、黒鉛の球状化率と基地組織の制御で決まる。望みの機械的性質を得たければ、球状化率を安定させ、基地組織を制御すればよい。基地組織の制御は、添加元素や熱処理などの手法も用いられるが、一般的には、銅添加量の調整⁴⁾で行われる。よって、本システ

ムの信号因子は、銅添加量とした。

本報では、高強度で機械的性質が安定する条件を検討する。そのため、信号因子は1種類とし静特性での解析を行った。

銅の添加量は、高強度な材料を得るため0.6%とした。

表1 L18直交表と信号因子、誤差因子

因子 実験 No.	信号因子(Cu=0.6%)								誤差因子			
	制御因子								誤差因子			
	水準								Yブロック		ノックオフ	
	A	B	C	D	E	F	G	H	1	2	1	2
1	1	1	1	1	1	1	1	1				
2	1	1	2	2	2	2	2	2				
3	1	1	3	3	3	3	3	3				
4	1	2	1	1	2	2	3	3				
5	1	2	2	2	3	3	1	1				
6	1	2	3	3	1	1	2	2				
7	1	3	1	2	1	3	2	3				
8	1	3	2	3	2	1	3	1				
9	1	3	3	1	3	2	1	2				
10	2	1	1	3	3	2	2	1				
11	2	1	2	1	1	3	3	2				
12	2	1	3	2	2	1	1	3				
13	2	2	1	2	3	1	3	2				
14	2	2	2	3	1	2	1	3				
15	2	2	3	1	2	3	2	1				
16	2	3	1	3	2	3	1	2				
17	2	3	2	1	3	1	2	3				
18	2	3	3	2	1	2	3	1				

3.3 制御因子

球状黒鉛鋳鉄の機械的性質には多くの要因が影響すると考えられる。制御因子は、制御が可能な要因とし、「球状化剤粒度」「球状化剤添加量」「接種剤添加量」「カバー材量」「フェーディング時間」「型ばらし時間」を用いた。

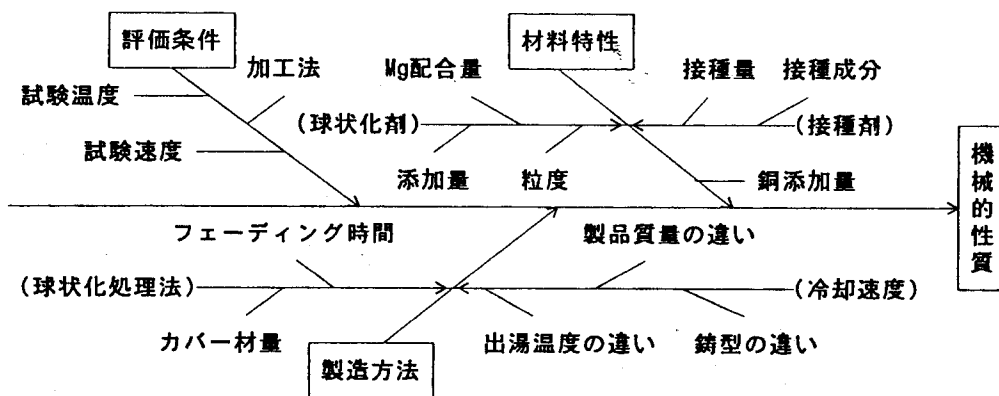


図2 特性要因図

また、「試験時間」「試験速度」も仮に制御因子とした。本来、最適制御条件を求める品質工学においては、制御条件でないものや製造現場で制御のできない条件を制御因子にすることは不適當である。

しかしながら、本研究ではこれらを積極的に取り上げることにより、みかけのばらつきに与える影響を検討した。

制御因子とその水準を表2に示す。各条件の第2水準には、経験的に一般的であると考えられる値を用いた。

球状化剤は、Fe-Si-4.5%Mgを用いた。一般に比べ、実験用の反応とりべは小さいため、市販の球状化剤を砕き、5mm以下(微粉をのぞく)を細粒、5~10mm程度を粗粒とした。

接種剤は、Fe-50%Siを用いた。

カバー材は、反応時間に影響すると考え、スチールスクラップを用いた。

フェーディング時間は、球状化反応が終わってから注湯するまでの時間である。この間にスラグ処理を行った。

型ばらし温度は、Al変態点の前後からの空冷と室温まで鑄型内で保持する条件を用いた。

表2 制御因子と水準

制御因子	水準			(単位)
	1	2	3	
A:球状化剤粒度	細粒	粗粒	—	
B:球状化剤添加量	1.4	1.6	1.8	%
C:Fe-Si接種量	0	0.2	0.4	%
D:カバー材量	0.8	1.2	1.6	%
E:フェーディング時間	60	120	180	sec
F:型ばらし温度	1073	873	R.T	K
G:試験速度	1	3	5	mm/min
H:試験温度	273	298	323	K

3.4 誤差因子

球状黒鉛鑄鉄の製造において、機械的性質のばらつきに影響すると予想されながら制御できない要因を誤差因子とした。「押し湯効果」「冷却速度」

「繰り返し回数」などが挙げられる。ネットシェイブ成形をする製品の部位間では、前2者は避けられない要因である。

本研究では、これらの条件を再現するものとして供試材の種類と繰り返し回数とした。供試材は、広く一般的に用いられているY形Bブロック、ノックオ

フKb形を、各実験にそれぞれ2本ずつ用意した。

また、あらかじめ両供試材の冷却温度、時間の関係を求めておき、前出の「型ばらし温度」の制御に用いた。

これらは、表1に示すように、誤差因子として直交表の外側にわりつけた。

3.5 表示因子

本実験では、「溶解方法」「溶解量」「出湯温度」「C量」「Si量」「Mn量」「Cu量」「試験片切削条件」などを製造条件や評価条件としない表示因子とした。

試料は、同一バッチで製造された原材料を基に、50kg高周波溶解炉で再溶解した。各成分は、仕上がった製品の成分が目標の成分になるように、高純度銑鉄や各種添加剤を用いて、あらかじめ溶解時に配合調整した。C量、Si量、Mn量の調整には、加炭剤、金属シリコン、電解マンガンを用いた。

1実験あたりの溶解量は30kgとし、出湯温度は約1800Kとした。

球状化処理に用いた反応とりべは、内径18cmポケット付きを用いた。反応方法は、サンドイッチ法によった。

試験片は、NC旋盤によって平行部直径12mmの引張試験片に仕上げて供試した。

これらを表示因子として表3にまとめた。

表3 表示因子

C量	(目標) 3.7%
Si量	(目標) 2.6%
Mn量	(目標) 0.23%
S量	(目標) 0.020%以下
P量	(目標) 0.020%以下
溶解量	30kg / 1実験
出湯温度	約1800K
Yブロック型	フェノールウレタン
ノックオフ型	シェルモールド
TP加工	NC旋盤により一定
TP形状	JIS Z 2201-4号比例

4 実験結果および効果予想

4.1 実験結果と解析方法

直交表に基づき18回の溶解実験をランダムに行った。得られた試験片は、精密材料試験機(最大荷重100kN、恒温槽付属)で引張試験を行った。結果を表4の耐力値の項に示す。

試験片でのC量、Si量は、3.5~3.7、2.6~2.7%であり、ほぼ目標値であることが確認された。Mn、P、Sについても、ほぼ目標値どおりであった。

データの解析は、静特性のうち望目特性のSN比により行った。以下にSN比の計算例を示す。

(計算例1) 実験番号1の場合

測定結果：

Yブロック 563、561 MPa

ノックオフ 565、566 MPa

全変動：

$$St = 563^2 + 561^2 + 565^2 + 566^2 = 1271271$$

一般平均の効果：

$$Sm = (563 + 561 + 565 + 566)^2 / 4 = 1271256.25$$

誤差変動：

$$Se = St - Sm = 1271271 - 1271256.25 = 14.75$$

誤差分散：

$$Ve = Se / f \quad (f: \text{自由度}(n-1)) = 14.75 / 3 = 4.9166667$$

SN比：

$$\eta = (Sm - Ve) / n / Ve = ((1271256.25 - 4.9166667) / n) / 4.9166667 = 64639.898$$

このSN比をデシベル値に変換すると

$$\eta = 10 \log(64639.898) = 48.105007 \quad (\text{dB})$$

同様の計算を18回の実験結果に対して行った結果が、表4のSN比の項である。

実験 No.	結果 耐力値測定結果				SN比 (dB)
	Yブロック		ノックオフ		
	1	2	1	2	
1	563	561	565	566	48.11
2	451	453	453	452	53.49
3	436	443	440	436	42.21
4	443	438	452	454	35.45
5	462	466	481	476	34.60
6	543	549	531	522	32.94
7	446	443	452	452	39.97
8	559	561	548	556	39.76
9	447	451	456	457	39.78
10	456	453	467	464	36.89
11	459	466	472	473	37.20
12	532	516	526	525	38.01
13	544	540	545	539	45.30
14	438	443	452	452	36.17
15	471	477	480	483	39.39
16	444	440	462	461	31.97
17	544	533	527	521	34.67
18	481	487	494	494	37.84

この結果から各因子の水準ごとにSN比平均値を求める。計算方法を以下に示す。

**(計算例2) フェーディング時間120秒の場合
(制御因子E、水準2)**

(実験番号2, 4, 8, 12, 15, 16のSN比の平均)

$$= (53.49 + 35.45 + 39.76 + 38.01 + 39.39 + 31.97) / 6 = 39.68 \quad (\text{dB})$$

直交表に従い、同様の計算を行った結果が、表5および図3の要因効果図である。

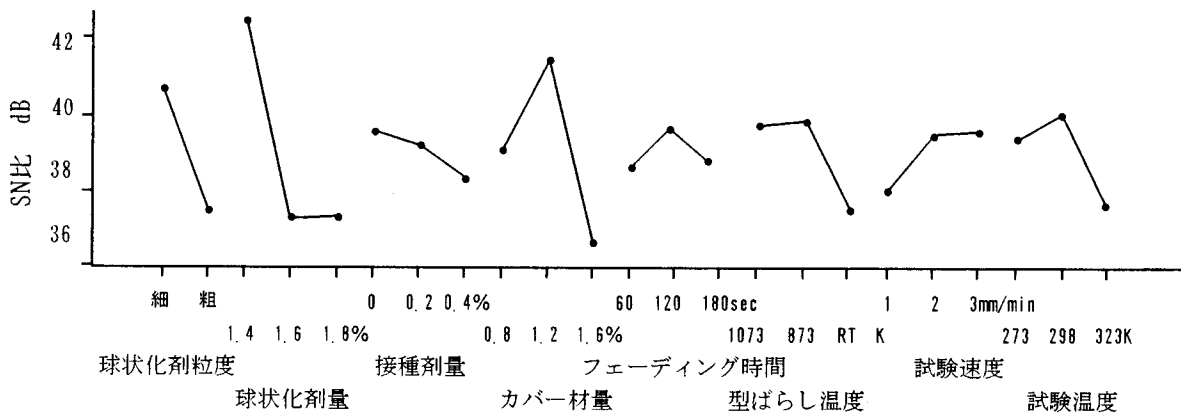


図3 要因効果図

表5 水準別のSN比

制御因子	水準		
	(dB)		
	1	2	3
A:球状化剤粒度	40.70	37.49	—
B:球状化剤添加量	42.65	37.31	37.33
C:Fe-Si接種量	39.61	39.31	38.36
D:カバー材量	39.10	41.53	36.65
E:フェーディング時間	38.70	39.68	38.91
F:型ばらし温度	39.80	39.93	37.56
G:試験速度	38.10	39.56	39.63
H:試験温度	39.43	40.11	37.74

組合せ実験の結果、特に「球状化剤粒度」「球状化剤量」「カバー材量」の水準間に大きな差が見られた。各制御条件に見られた特徴は、結言にまとめる。

4.2 効果予想

品質の安定性は、dB値が大きいほど高い。この場合は、dB値の大きい水準ほど、耐力値のばらつきが少ないことを示している。

図3より、安定性が高い組み合わせとして、(制御因子と水準の組合せで) A1, B1, C1, D2, E2, F2を最適条件とした。

一般的な球状化処理条件として考えられる条件は、A2, B2, C2, D2, E2, F2とした。予想される利得は、次式に示すとおり、両条件のそれぞれの水準でのSN比の合計の差となる。

最適条件：

$$\begin{aligned} & A1+B1+C1+D2+E2+F2 \\ & =40.70+42.65+39.61+41.53+39.68+39.93 \\ & =244.10 \text{ (dB)} \end{aligned}$$

一般的条件：

$$\begin{aligned} & A2+B2+C2+D2+E2+F2 \\ & =37.49+37.31+39.31+41.53+39.68+39.93 \\ & =235.25 \text{ (dB)} \end{aligned}$$

予想される利得：

$$\begin{aligned} \text{(利得)} & = \text{(最適条件でのSN比)} - \text{(一般条件でのSN比)} \\ & = 244.10 - 235.25 \\ & = 8.85 \text{ (dB)} \end{aligned}$$

以上の結果から本手法を用いることで、8.85dBの改善が期待できる。

5 確認実験

前項での予想を確認するため、最適及び一般的な条件の組合せについて、確認実験を行った。制御因子の組み合わせを変更した以外は、同様の実験をそれぞれ2回づつ行った。

ただし、実験の都合上、その内1回はロックオフが1ピースとなり、得られた供試体は、Yブロック型が4本、ロックオフ型が3本となった。

結果と得られたSN比及び利得を、表6に示す。

表6 確認実験結果

最適条件		一般的条件		利得
耐力	SN比	耐力	SN比	
K438		K456		
K439		K452		
K435		K459		
Y442	45.24	Y446	40.30	4.94
Y437	(db)	Y449	(db)	(db)
Y439		Y451		
Y435		Y452		

K：ロックオフ型 Y：Yブロック型

得られた利得は、4.94dBと予想された利得より少ないが、パラメータ設計は予想効果が大きくなるため、この値は妥当と考えられる。

dB値である利得の真値は、下式により示す。

$$\begin{aligned} \text{(真値)} & = 10^{(SN/10)} \\ & = 10^{(0.494)} \\ & = 3.12 \end{aligned}$$

これは、制御条件を最適化することにより、耐力値の安定性が約3.12倍向上したことになる。

言い換えれば、ばらつきによる損失が1/3.12(約32%減)になったことを示している。

6 結 言

本研究を通して以下の知見を得た。

- (1) パラメータ設計手法は、高強度球状黒鉛鋳鉄の製造において、ばらつきの低減に有効である本研究では、4.94dBの効果が確認された。

- (2) 球状化剤の粒度は、細かい方が安定する。球状化剤粒度は、反応取鍋の大きさに応じた適性があると考えられる。
- (3) 球状化剤の添加量は、1.4%と少ない方が安定した。ちなみに、この条件での残留マグネシウムと硫黄の差は、0.025~0.033%程度であった。
- (4) 接種剤を添加しない方が材質は安定する。
- (5) カバー材は、少ないと反応が激しく、多いと反応が不均一になった。これには、明らかに適量があると考えられ、本実験では1.2%であった。
- (6) フェーディング時間は、120秒が最も安定した。ある程度溶湯が落ちつくピークがあるものと考えられる。
- (7) 型ばらし時間は、873Kが最も安定した。自己焼鈍の効果を期待した「室温まで保持」は、ばらつきが大きかった。

また、Al変態点以上で型ばらしを行った場合、比較的安定して高強度の耐力値が得られた。

- (8) 試験速度、試験温度の違いは、みかけのばらつきにはなると予想したが、特に大きな影響はなかった。

本研究は、信号因子が一つの静特性（望目特性）で解析を行った。これにより、銅添加量0.6%の高強度特性の安定性は向上した。しかしながら、本報では、高延性特性での安定化までは行っていない。

「球状黒鉛鋳鉄の最適材料設計」は、両特性を両立させるか、目標どおりにコントロールできることが望ましい。

このことについては、信号因子の銅添加量を変化させて、動特性の解析を行うことが有効であると考えられる。これは、今後の課題とする。

最後に、本研究を行うに当たって、多大な御協力をいただいた株式会社ホクキャスト川北広明氏に謝意を表す。

参考文献

- 1) 田口玄一, 品質工学講座1~7巻, 日本規格協会, 1988~1990
- 2) 例えば 松永孝義他, 品質工学, Vol11 No2, P22 品質工学フォーラム, 1993
- 3) 田口玄一, 品質評価のためのSN比, P93, 日本規格協会, 1988
- 4) 田上勤他, 昭和59年度三重県金属試験場業務報告, P31, 三重県金属試験場, 1985