

応答曲面解析を活用した鋳巣不良の低減

株式会社アーレスティ
東海工場 鋳造技術課
八木 浩一

1. はじめに

対象製品は自動車メーカー様で最終加工、圧検、組立を行っているエンジンのシリンダーブロックであり、量産立ち上げ当初からポンプ取付部に鋳巣不良が多く発生していた。これまでも改善活動を行ってきたが、鋳巣の要求品質が高く、製品形状としても対策が難しくなっており、顧客との目標を達成することができていなかった。

加工完成後の生産性向上のためにも目標値を達成し、鋳巣の発生につながる要因を絞り込み、その要因を制御する設定条件の最適化が必要である。

2. 現状把握

2.1 加工後の鋳巣不良率の推移

p 管理図(図 1)を用いて、加工後の鋳巣不良率の推移を確認した。日々の不良率はばらつきが大きく安定していないため、ばらつきを小さくして不良率の平均値を低減する必要がある。

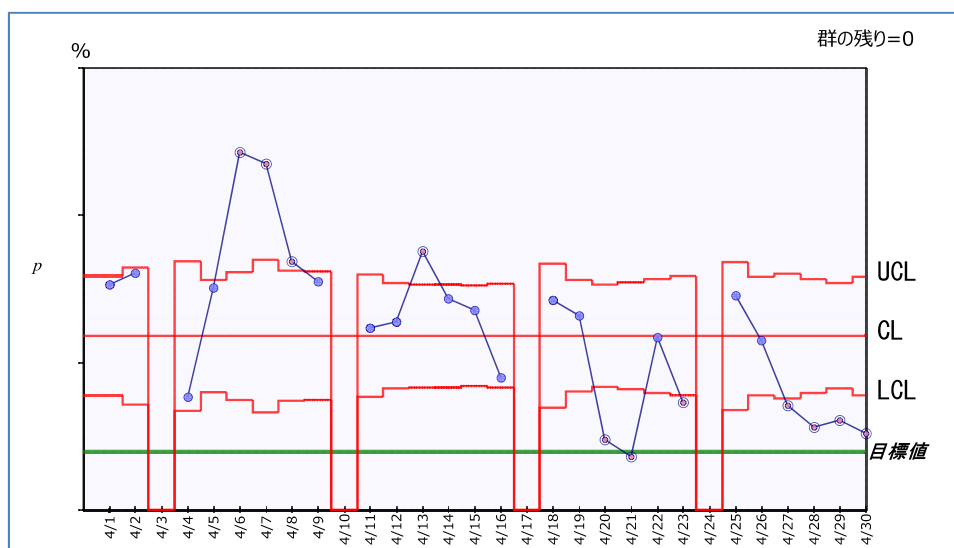


図 1. p 管理図

2.2 鋳巣の形態

光学式顕微鏡を用いて、不良事象品の観察を行った。鋳巣の表層には溶湯がうまく融合していない湯じわが見られるが、アルミの組織自体は緻密であり、異常な組織ではない。

走査型電子顕微鏡(SEM)による観察でも、充填中にアルミ溶湯の湯先がぶつかり合って融合していない鋳巣であることが観察できた(図 2)。

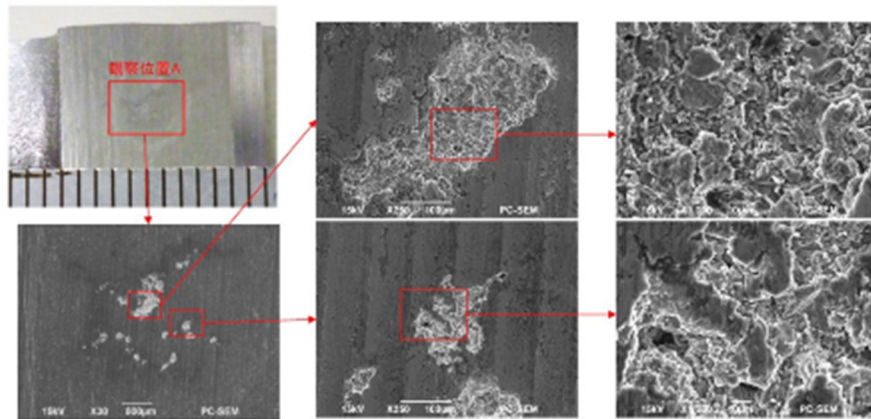


図 2. SEM 写真

溶湯の流動解析結果(図 3)からも、溶湯の湯先部分が融合していることが分かり、顕微鏡による事象品の観察の所見を裏付けることができた。

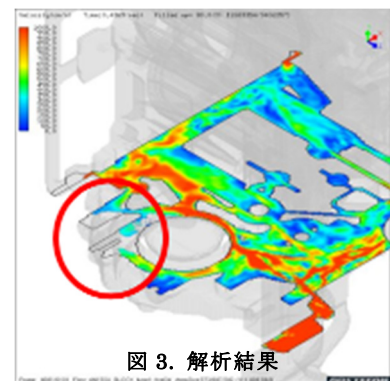


図 3. 解析結果

2.3 良品と不良品との差異

CT スキャナーによる内部欠陥率(鑄巢体積/製品体積)を、特性値として使用できるか検討した(図 4)。特性値が確率であり、得られた数値をロジット変換している。

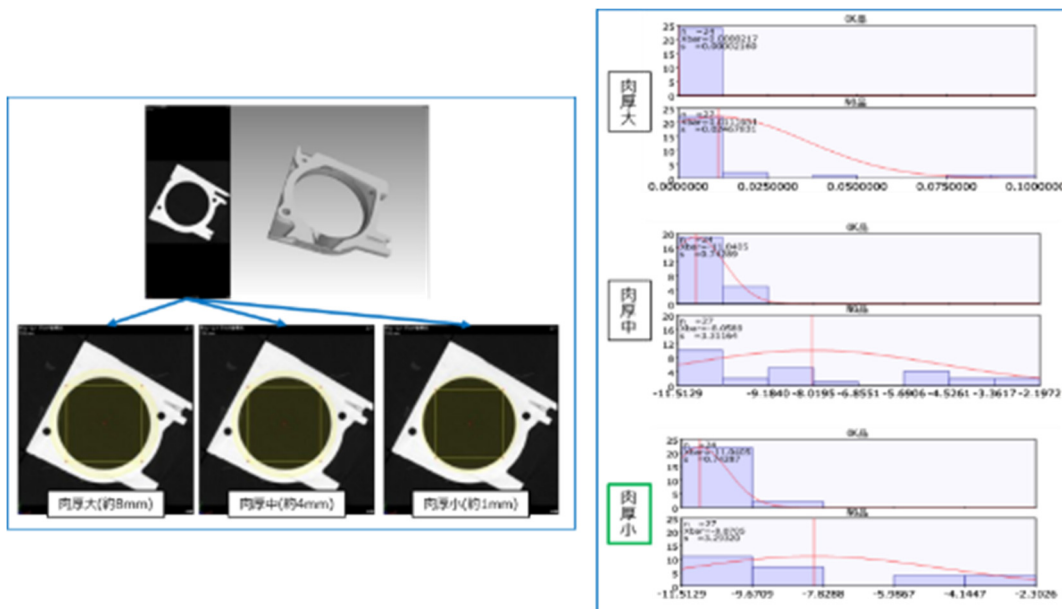


図 4. 欠陥率のヒストグラムによる比較

鑄巣が発生している部分の良品と不良品をそれぞれ $n=25$ ずつ切り出し、肉厚大(約 8mm)肉厚中(約 4mm)肉厚小(約 1mm)の 3 種類で内部欠陥率に差があるか比較した。どの水準でも良品の方が欠陥率は低い傾向であり、肉厚を少なく取るにしたがって平均値の差は大きくなる。肉厚を薄くした状態での評価であれば判定は可能と判断し、特性値として使用することとした。

3. 要因解析

特性要因図(図 5)から「スリーブの摺動抵抗」「最終充填部への溶湯補給が足りない」「充填時間が長い」を要因として取り上げ、検証を進めることとした。

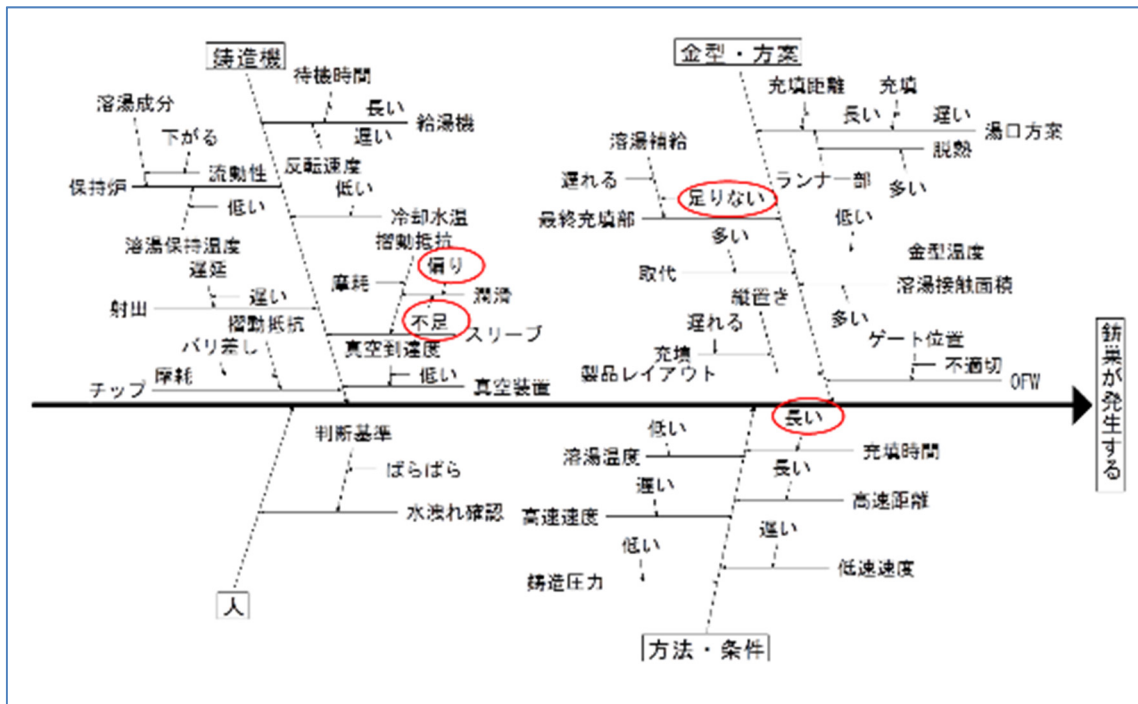


図 5.特性要因図

4. 要因検証

4.1 溶湯補給と充填時間の応答曲面解析

特性要因図より、「溶湯補給」と「充填時間」の2因子を用いて、応答曲面解析を実施した。

表 1.因子と水準

因子	水準1	水準2	水準3
A: 溶湯補給	0.9	1.8	2.7
B: 充填時間	129	113	100

表 2.分散分析表

目的変数名	重相関係数	寄与率R ²	R [*] 2	R ^{**} 2	残差自由度	残差標準偏差
欠陥率	0.657	0.431	0.296	0.170	21	0.184
要因	平方和	自由度	分散	分散比	検定	P値(上側)
回帰	0.540	5	0.108	3.4312	*	0.024
当てはまりの悪さ	0.146	3	0.049	1.5467		0.237
純誤差	0.566	18	0.031			
計	1.252	26				

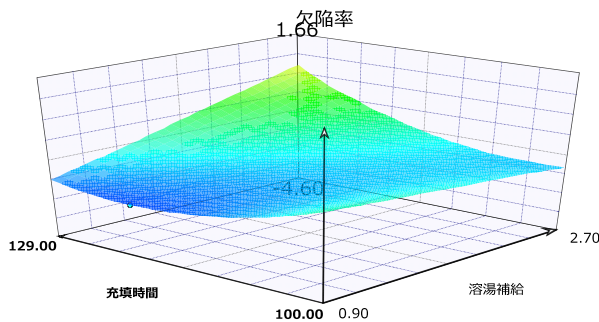


図 6.応答曲面

表 3.予測値

目的変数	予測値
欠陥率	-2.5638
説明変数	水準
溶湯補給	0.900
充填時間	118.688

① 実験の目的:各因子の最適水準を選定する

② 実験方法

特性値:欠陥率(鋳巣体積/製品体積)

因子と水準:「溶湯補給タイミング」「充填時間」の2因子3水準(表1)

実験の型:2因子3水準2元配置(繰り返し3回)

解析方法:分散分析

③ 得られた結果

応答曲面解析結果より最適値は「溶湯補給タイミング:0.9sec」「充填時間:118msec」となった(表3)。分散分析表(表2)より、回帰は有意となった。

予測値として得られた欠陥率 0.072%は、図4における良品の範囲には入るものの、不良品の平均値とほぼ同等であり、明確に良品の条件になるとは言えない。

最適化グラフ(図7)からも溶湯補給の最適値は0.90以下に存在する可能性があり、この部分については再検証が必要である。

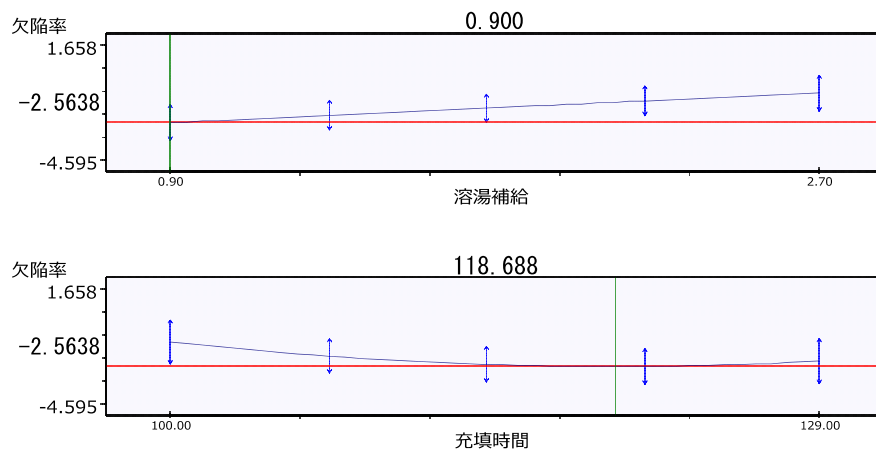


図7.最適化グラフ

4.2 溶湯補給タイミングの一元配置実験

溶湯補給タイミングについて、一元配置実験で検証した。

表4.因子と水準

因子	水準1	水準2	水準3	水準4
溶湯補給	0.1	0.4	0.7	1.0

表5.分散分析表

No	要因	平方和	自由度	分散	分散比	検定	P値(上側)
1	A:溶湯供給	13.62109	3	4.54036	9.911	**	0.005
2	誤差e	3.66473	8	0.45809			
3	計	17.28582	11				

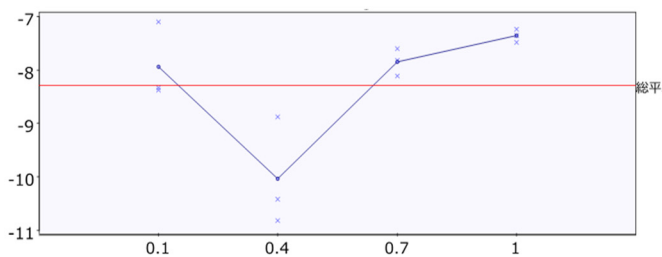


図8.特性値プロット

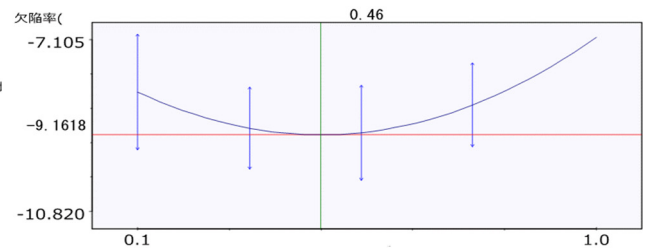


図9.応答曲面

① 実験の目的:応答曲面解析結果の水準外に最適値が存在するか確認する

② 実験方法

特性値:欠陥率(鋳巣体積/製品体積)

因子と水準:「溶湯補給タイミング」の1因子4水準(表4)

実験の型:1因子4水準1元配置(繰り返し3回)

解析方法:分散分析

③ 得られた結果

最適水準はA2であり、3.1での実験の水準外に最適水準が存在した。分散分析表(表5)より回帰は高度に有意となった。特性値プロット(図8)より、水準A2のものは全体の水準よりも低く、総平均を下回っている。応答曲面(図9)より最適値は0.46secとなった。

4.3 射出潤滑の実験

射出潤滑系の因子についての検証を実施した。

表 6.因子と水準

因子	水準1	水準2	水準3
A: 射出待機時間	0	10	20
B: 潤滑滴下量	1	8	15

表 7.分散分析表

目的変数名	重相関係数	寄与率R ²	R* ²	R** ²	残差自由度	残差標準偏差
圧力のばらつき	0.681	0.464	0.367	0.276	22	3.417
要因	平方和	自由度	分散	分散比	検定	P値(上側)
回帰	222.459	4	55.615	4.0215	*	0.017
当てはまりの悪さ	7.944	4	1.986	0.1436		0.964
純誤差	248.929	18	13.829			
計	479.332	26				

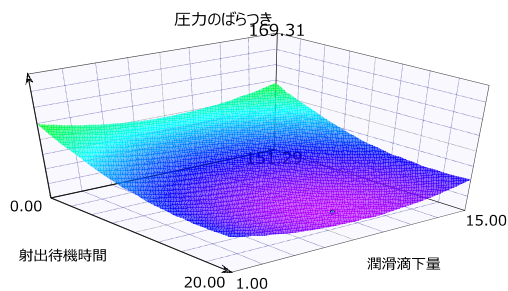


図 10.応答曲面

表 8.予測値

目的変数	予測値
圧力のばらつき	153.8551
説明変数	水準
射出待機時間	17.32
潤滑滴下量	8.31

① 実験の目的:射出の潤滑性能に影響する因子の最適値を確認する

② 実験方法

特性値: 射出圧力の標準偏差

因子と水準:「射出待機時間」「潤滑滴下量」の2因子3水準(表6)

実験の型:2因子3水準2元配置(繰り返し3回)

解析方法:分散分析

③ 得られた結果

応答曲面解析結果より最適値(表8)は「射出待機時間:17sec」「潤滑滴下量:8cc」となり、分散分析表(表7)より、有意な結果となった。

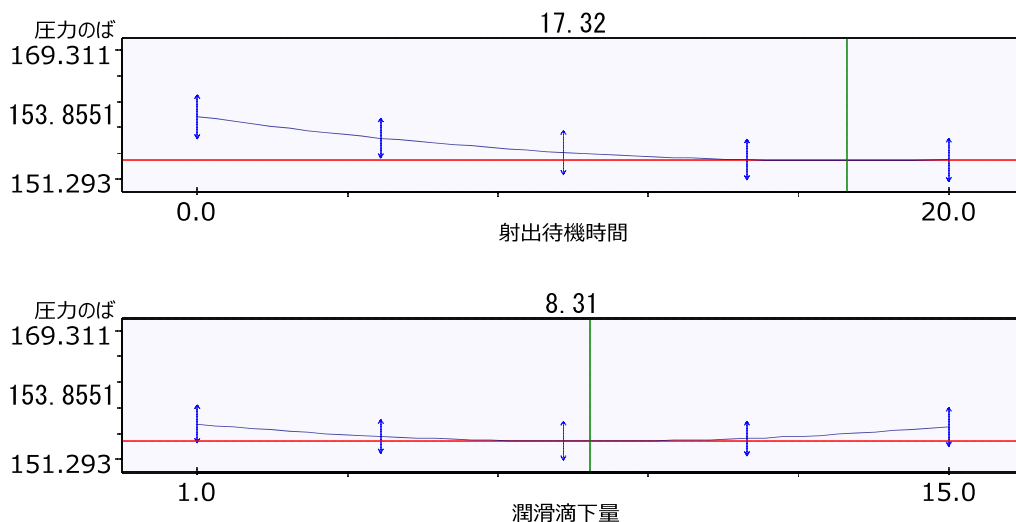


図 11.最適化グラフ

表 9.変数選択

目的変数名	重相関係数	寄与率R ²	R* ²	R** ²	
圧力のばらつき	0.681	0.464	0.367	0.276	
	残差自由度	残差標準偏差			
	22	3.417			
vNo	説明変数名	分散比	P値 (上側)	偏回帰係数	トレランス
0	定数項	6844.5047	0.000	158.235	
3	射出待機時間	14.2371	0.001	-0.304	1.000
4	潤滑滴下量	0.0589	0.811	-0.028	1.000
A	(射出待機-10.00)*(潤滑滴下-8.00)	0.0049	0.945	-	
B	(射出待機-10.00) ²	2.2115	0.151	0.021	1.000
C	(潤滑滴下-8.00) ²	2.5451	0.125	0.045	1.000

5. 最適値の適用

それぞれの解析から得られた最適値を元に、条件を設定し量産に適用した。対策前と比べると平均値が大きく下がり、日々のばらつきも小さくなり安定した(図 12)。

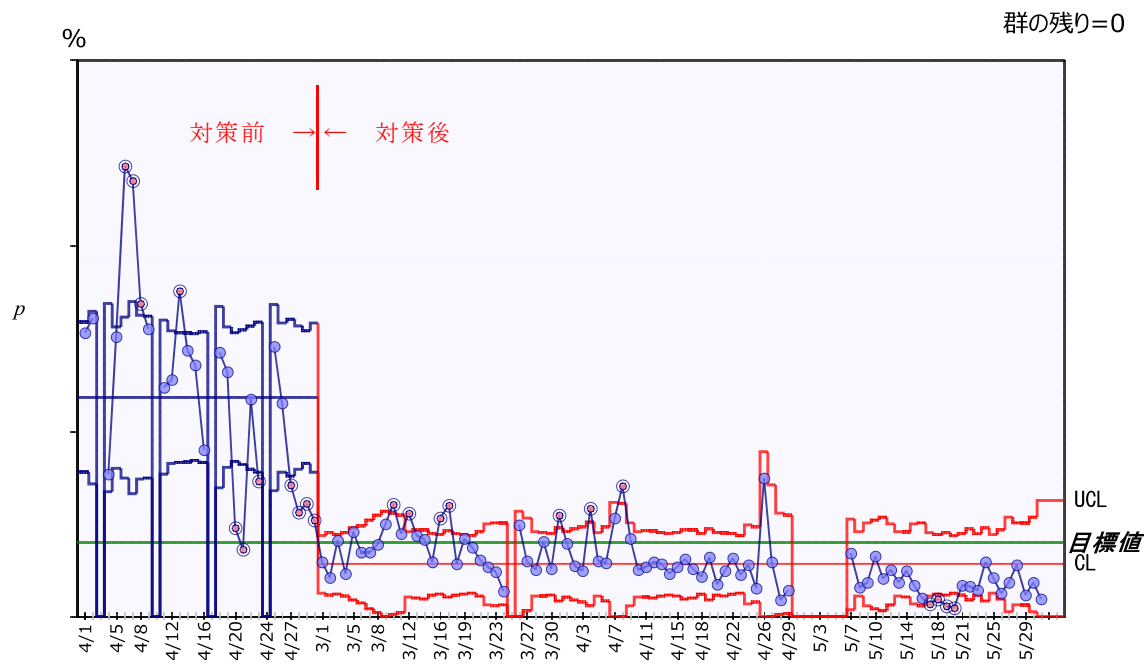


図 12.層別管理図

6. まとめ

要因になり得ると考えられた因子に対して、応答曲面解析を用いることで最適な組み合わせを導き出すことができ、不良率の低減につながった。またその結果、顧客との目標値についても安定的に達成できるようになった。

参考文献

1. 棟近雅彦[編著]奥原正夫[著], 回帰分析入門[第2版], 日科技連, 2012
2. BCテキスト, 第5章 計数値データの解析[第4版], 日科技連, 2010
3. 棟近雅彦[監修]山田秀・立林和夫・吉野陸[著], パラメータ設計・応答曲面法・ロバスト最適化入門, 日科技連, 2012

解析ソフト

JUSE StatWorks/V5 株式会社 日本科学技術研修所

本著作物は原著作者の許可を得て、株式会社日本科学技術研修所（以下弊社）が掲載しています。本著作物の著作権については、制作した原著作者に帰属します。

原著作者および弊社の許可なく営利・非営利・イントラネットを問わず、本著作物の複製・転用・販売等を禁止します。

所属および役職等は、公開当時のものです。

■公開資料ページ

弊社ウェブページで各種資料をご覧ください <http://www.i-juse.co.jp/statistics/jirei/>

■お問い合わせ先

(株)日科技研 数理事業部 パッケージサポート係 <http://www.i-juse.co.jp/statistics/support/contact.html>