

ダイカストにおける湯じわ不良対策への新しい試み

The New Trial to Take Measures for Flow Line Defect in Die Casting

鈴木利育 Toshiiku Suzuki

● 鑄造事業部 鑄造技術室

要 旨

当社のダイカストの湯じわ不良は、製品の外観要求品質レベルが高いこともあり、もろもろの対策を行ってきたがなかなか減少せず、慢性不良となっていた。そこで不良をつくれない条件を求めるために、PM分析、統計的品質管理（SQC）と品質工学の3つの手法を組み合わせ、原因の追求、重要品質コンポーネントの設定、最適鑄造条件の設定を行った。さらに不良を作れない条件を維持するために、重要品質コンポーネントの自動制御化を図った。その結果、対象とした製品の鑄造不良率を従来の3分の1まで低減することができた。

1 はじめに

TPM品質保全活動を行っている製造業においては、不良率がPPMオーダーの業界もめずらしくない。しかしながら、ダイカスト業界においては、依然数%の不良率があると言われている。（日本ダイカスト協会の集計した企業52社のアンケートによる平均不良率は8.8%とのことである。）また、慢性不良として湯じわ不良と鑄巣不良が2大不良に上がっている。⁽¹⁾

ヤマハ発動機（株）磐田第2工場は、モーターサイクルおよび船外機のエンジン部品を多種、かつ比較的少量生産している。そのため、非常状態が多く、定常状態に達するまでに不良が発生する。製品は外観部品でもあり、湯じわの品質基準はたいへん厳しいため、平均不良率は3%で推移していた。

鑄造は制御し難い要因が多く、技能で補われてきた部分も多かった。TPM活動では、不具合の現象を原理原則にしたがって物理的に解明するPM分析の手法を用いて、大いに成果を上げてきた。しかしながら、次のような問題点が残った。

- (1) 設備の各要因が、品質特性にどのくらい寄与しているかわからない。
- (2) 品質特性を向上させるのに、どの要因の精度をどれだけの水準にすればよいかわからない。
- (3) 4M（人、設備、材料、方法）の中の鑄造条件について、最適条件の追求ができない。⁽²⁾

そこで、TPM特別賞にチャレンジするにあたり、PM分析、統計的品質管理、品質工学という3つの手法の組み合わせを試みた。

本稿では、ダイカスト鑄造の湯じわ不良の対策について述べる。

2 ダイカスト工程の概要

ダイカスト法は、図1に示すように、金型に外部のスプレーにより離型剤を吹き付け、次に型を締め、高温の溶融金属を高速、高圧で金型内へ打ち込む鑄造法である。鑄造を終了すると、型が開き製品を押し出す。金型内部は冷却されており、製品1個ができる短時間の間に入熱と除熱を繰り返す。多くの品質コンポーネント（以下、Qコンボという）が、瞬時に作用する工法である。

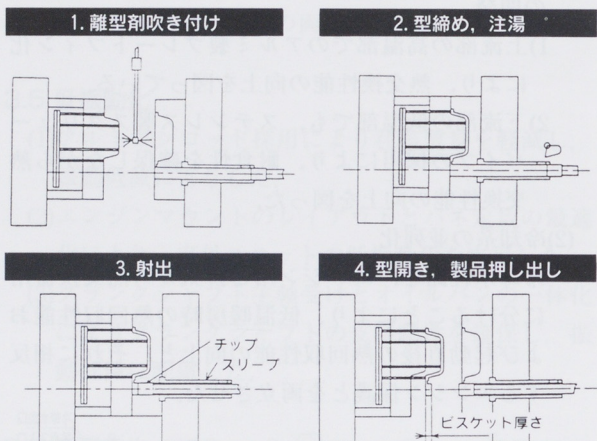


図1 作動状況

3 慢性不良対策の基本的考え方

新たに、慢性不良対策を行うにあたり、以下の進め方で取り組むこととした。

- (1) PM分析で要因の洗い出しを行い、設定基準値外の項目は復元する。
- (2) 要因の検討を行い、重要度の高い要因についてデータ収集をし、統計的品質管理により、品質特性に対して重要な要因を絞り出す。
- (3) 重要要因および鑄造条件の最適条件を品質工学⁽³⁾によって導き出す。
- (4) 最適条件を維持する自動制御方法を作る。
- (5) 確認実験をする。

4 湯じわ不良対策の目標とステップ展開

慢性不良で大きなウェイトを占める湯じわ不良対策の目標は、特に重要Qコンポを明確にし、鑄造条件の最適化を図ることである。次に、それを維持するQコンポの自動制御システムを開発し、ばらつきの極小化を図る。

進め方は、図2に示す7つのステップで展開した。

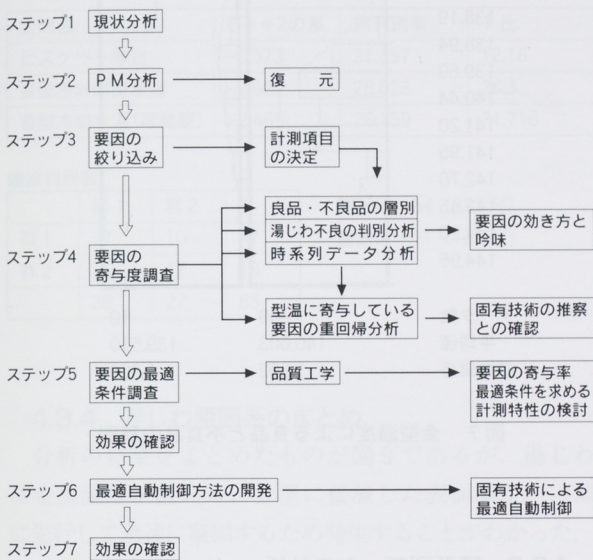


図2 湯じわ不良対策のステップ展開

4.1 現状分析（ステップ1）

鑄造工程での不良内容を調査してみると、図3に示すように湯じわ不良が76%を占めていた。

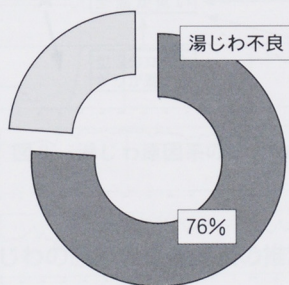


図3 鑄造工程での不良率

4.2 PM分析の実施（ステップ2）

4.2.1 湯じわのメカニズムの検討

湯じわとは「金型内に流入した溶湯が十分融合しないで、ダイカストの表面に現れる浅いしわ、あるいは湯流れ模様」をいう。⁽⁴⁾

湯じわが発生しやすい条件は、図4のような状態の時である。湯じわにはいくつかの原因が考えられ、水が型表面に残ってできる水残り湯じわ不良、充てん前になりに固まったアルミの溶湯を押し込んでできた凝固片湯じわ不良、アルミの溶湯が混じり合う際にアルミ同士が融合できない湯じわ不良などが考えられる。湯じわの代用特性に近い計測特性としては、充てん時間が知られている。⁽⁵⁾

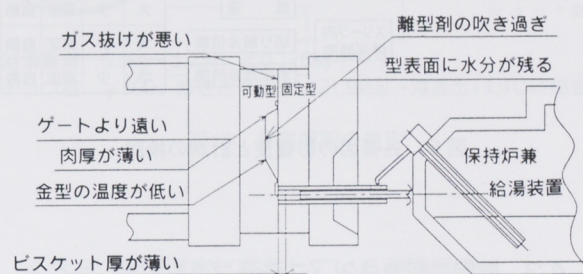


図4 湯じわの発生しやすい条件

4.2.2 PM分析の実施

PM分析では、湯じわ不良の発生するメカニズムを設備、人、材料および方法の面からリストアップしたが、それを表1に示す。

表1 PM分析表

現象	物理的見方	成立する条件	4M（設備、材料、方法、人）	
			1次	2次
ゲートから遠い商品の表面に湯じわが発生する	溶湯が金型に沿って融合しないで凝固した凹凸、しわ	スリーブ内で凝固層ができる	溶湯の温度が低い	配湯温度が低い
			溶湯重量が少ない	温調計の精度不良
			スリーブの温度低下	給湯精度不良
				外へこぼれる
				冷却水量が多い
				冷却水温が低い

次に各要因ごとに現状を調査し、明らかに基準値から外れる部位については、表2に示すように、この段階で条件の復元工事を行った。

表2 PM分析後の調査結果および対策内容

点検部位	点検項目	基準値	測定値	判定	対策内容
給湯装置	温度	$\sigma = 3^{\circ}\text{C}$	$\sigma = 5^{\circ}\text{C}$	NG	
給湯装置	給湯量	$\pm 2\%$	$\pm 3.7\%$	NG	増締め、部品交換、カス取り
給湯装置	こぼれ	無し	無し	OK	
金型	チョコ停	無し	ランナー取られ	NG	ランナー短縮型改造

さらに、各要因について定性的ではあるが、湯じわ不良に対しての影響度やばらつきの程度を評価することにより、どの要因について計測すればよいか検討し選択した。（図5）

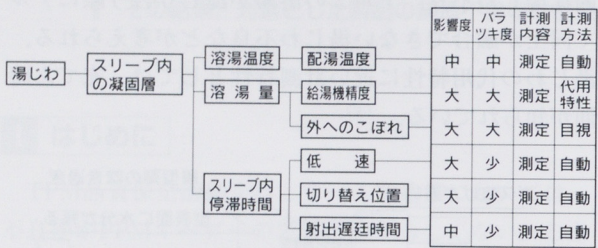


図5 各要因の影響度と計測の検討

4.3 要因の絞り込み（ステップ3）

計測により得たデータに対し、1変量解析（基本統計量、時系列データ）、2変量解析（層別、相関など）、多変量解析（判別、重回帰分析）などの解析方法を試みたが、その結果の一部を述べる。

4.3.1 良品と不良品の層別

スリーブ内に残った溶湯の固まったものをビスケットと呼ぶが、図6に示すように、この厚さが薄いと湯じわ不良が増加する（ビスケット厚さは溶湯重量に比例する）。これは金型内に入る熱量が減少するためと考えられる。

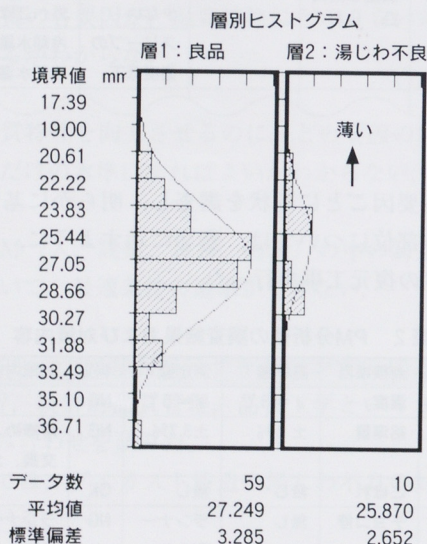


図6 ビスケット厚さによる良品と不良品の層別

また、図7に示すように、金型温度が低いと湯じわ不良が増加する。これは金型がアルミの溶湯を急激に冷却するためと考えられる。

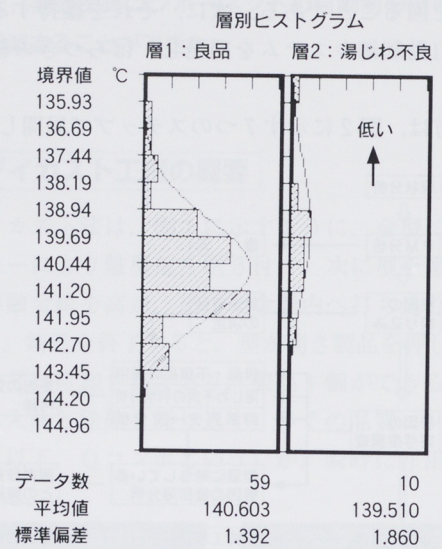


図7 金型温度による良品と不良品の層別

4.3.2 時系列データの分析

計測した30種類の時系列データの中より、溶湯温度と金型温度の時系列データを比較してみたところ、図8に示すとおり、A点では溶湯温度が約7℃低下しており、金型温度は約2～3℃低下していることがわかった。

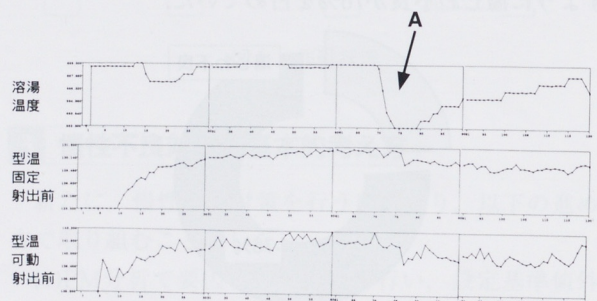


図8 溶湯温度と金型温度の時系列データの比較

4.3.3 湯じわ不良の判別分析

多変量解析のひとつである判別分析を使い分析してみたが、その結果を表3に示す。対象としたエンジン部品の同じ場所に発生した同程度の湯じわを判別分析してみると、ビスケット厚さ、金型温度と相関のある金型冷却IN側水温、金型冷却水温（可動型）などの要因が寄与していることがわかった。

表3 湯じわ不良の判別分析の結果

変数名	D*2の差	誤判別率	F比
ビスケット厚さ	-0.573	21.357	12.18
金型冷却IN側水温	-2.821	28.623	26.3
金型冷却水温(可動型)	-2.465	26.159	21.716

■誤判別表

	群1	群2	計
群1	37	10	47
群2	1	17	18
	38	27	65

■正答…54 (83.1%)

■誤答…11 (16.9%)

4.3.4 湯じわ原因系のまとめ

分析の結果をまとめたものが図9であるが、湯じわは金型温度が低い時に金型に接触した表面層が、内部に先行して急速に凝固するため発生することがわかった。ビスケット厚さが薄い、または溶湯の温度が低いとアルミニウムが早く凝固してしまう。

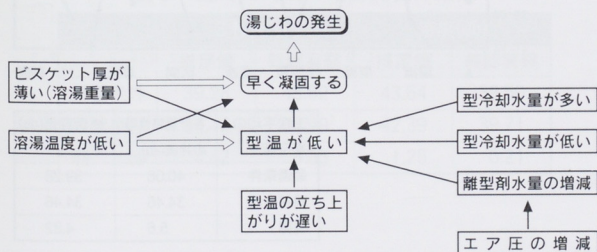


図9 湯じわ原因系のまとめ

4.3.5 湯じわの原因の重要要因の推定

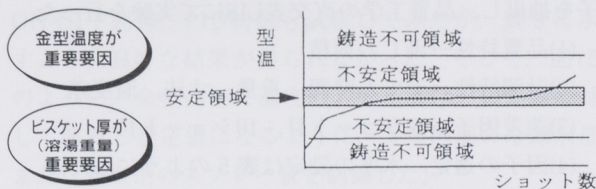
(1)金型温度

金型温度が低い領域では、湯じわ不良が出たり出なかったりする不安定領域があり、金型温度が高くなると焼き付きを生じる不安定領域がある。

(2)ビスケット厚さ

給湯装置の精度は溶湯の重量の±2%あり、例えば6.3kgの重量の時の±2%は±126gであり、これは680℃の温度の溶湯では±21.9kcalに相当す

る。これは図10に示すとおり、溶湯温度に換算すると実に±13.9℃になり、大変な影響力があると思われる。



溶湯重量 6.3kg→±2%、±0.126kg
チップ径 φ100、厚さ±7mm、±21.9kcal→湯温±13.9℃に相当

図10 重要要因の推定

4.3.6 金型温度に寄与している要因調査

表4に示す重回帰分析の結果から、金型温度に寄与している要因をまとめると図11のようになるが、多くの要因のうち、溶湯温度、ビスケット厚さ、離型剤の水温、水量などが寄与していた。

表4 重回帰分析の結果

変数選択の方法	手動選択
目的変数	金型温度固定型射出前
残差平方和 (Se)	11.883
重相関係数 (R)	0.892
寄与率 (R^2)	0.796
自由度調整寄与率	0.774

説明変数	偏回帰係数	標準係数	t 値
サイクルタイム	-0.117	-0.128	-2.237
ビスケット厚さ	0.053	0.136	2.191
スリーブ温度	0.056	0.176	2.178
離型剤水温	-0.787	-0.727	-6.795
溶湯温度	0.046	0.127	2.121
離型剤水量	1.419	0.097	1.763

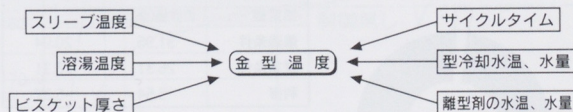


図11 金型温度に寄与している要因図

4.4 要因の寄与度調査および最適条件の設定 (ステップ4、ステップ5)

4.4.1 要因寄与度調査

要因の絞り込み、および铸造条件より7つの制御因子を抽出し、品質工学の直交表L18にて実験を行った。

- (1)品質特性→湯じわ面積
- (2)計測特性→充てん時間、重量、寸法、温度差
- (3)誤差因子→5ショット目、10ショット目
- (4)因子の選定、水準の設定は表5のようにした。

高速速度は射出時のチップが高速で動く速度であり、また、その区間を高速区間と呼ぶ。

表5 因子の選定と水準の設定

No	記号	因子	第一水準	第二水準	第三水準
1	A	e			
2	B	溶湯温度 (°C)	650	670	690
3	C	金型温度 (°C)	110	130	150
4	D	ビスケット厚 (mm)	15	30	45
5	E	高速速度 (m/s)	1.6	2.4	3.2
6	F	高速区間 (mm)	210	225	240
7	G	昇圧時間 (ms)	40	70	140
8	H	エアブロー時間 (S)	5	8.5	13.5

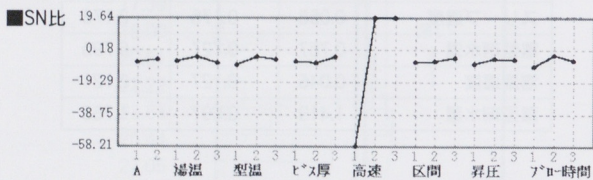
(5)実験の割り付け

直交表L18に割り付ける。

(6)要因効果図

1) 凝固片湯じわ面積の要因効果図

図12に示すとおり、凝固片湯じわは高速速度の寄与率が極めて高い。



■凝固片湯じわの要因別寄与率

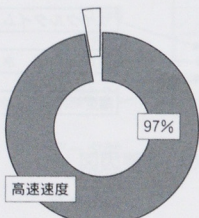
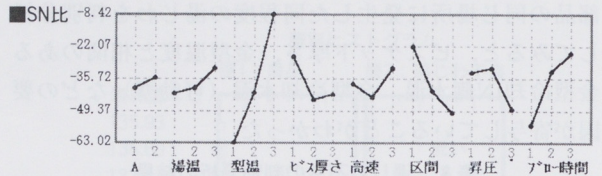


図12 凝固片湯じわ面積の要因効果図

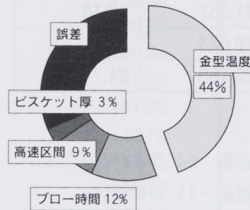
工程平均の 推定値	各計測特性毎 の評価(db)	総合評価(db)
最適条件	31.95	20.94
現状条件	26.31	26.31
利得	5.54	-5.37

2) 水残り湯じわ面積の要因効果図

図13のように、水残り湯じわは金型温度の寄与率が44%と高い。



■水残り湯じわの要因別寄与率

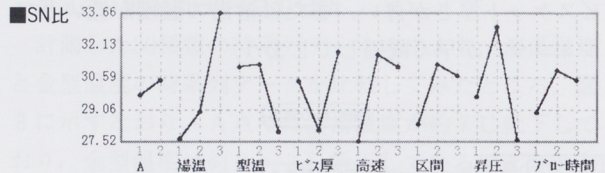


工程平均の 推定値	各計測特性毎 の評価(db)	総合評価(db)
最適条件	50.52	3.64
現状条件	-48.48	-48.48
利得	99	52.12

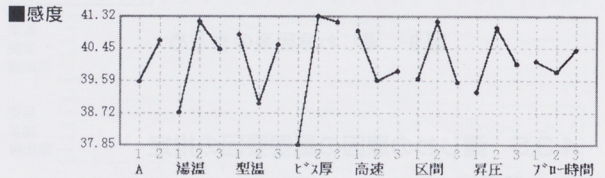
図13 水残り湯じわ面積の要因効果図

3) 充てん時間の要因効果図

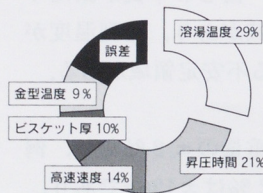
充てん時間は製品ごとに目標値がある。図14に示すように、早すぎると焼き付きを起こし、金型修繕費が増える。遅すぎると湯じわ、湯まわり不良をおこす。(6)



工程平均の 推定値	各計測特性毎 の評価(db)	総合評価(db)
最適条件	40.06	39.28
現状条件	34.46	34.46
利得	5.6	4.82



■充填時間の要因別寄与率



工程平均の 推定値	各計測特性毎 の評価(db)	総合評価(db)
最適条件	39.94	43.64
現状条件	42.39	42.39
利得	-2.45	1.25

図14 充てん時間の要因効果図

4.4.2 最適条件の設定

(1)実験での総合評価より、最適条件は表 6 のようになった。

表 6 最適条件

要因	水準	要因	水準
溶湯温度(℃)	690	高速速度(m/s)	2.4
金型温度(℃)	150	高速区間(mm)	225
ピケットの厚さ(mm)	45	昇圧時間(ms)	70
(溶湯の重量)		エアブロー時間(sec)	13.5

(2)湯じわ面積、充てん時間の確認実験の結果を、表 7 および表 8 に示す。

表 8 から分かるように、充てん時間の確認実験の利得は推定値の±30%以内にあり、再現性のある実験であった。

表 7 湯じわ面積の確認実験の結果

S N比(db)		
	推定値	確認実験
最適条件	—	-44.79
現状条件	—	-52.94
利 得		8.15

表 8 充てん時間の確認実験の結果

S N比(db)			感度(db)	
	推定値	確認実験	推定値	確認実験
最適条件	39.28	45.52	43.64	39.50
現状条件	34.46	35.99	42.39	39.71
利 得	4.82	6.53	1.25	0.21

(3)湯じわ発生のばらつきの比較

湯じわの利得より次のように計算できる。
標準偏差 $\sigma_1^2 / \sigma_2^2 = 10^{8.15 - 20} = 2.5$
従って、ばらつきは2.5分の 1 に減少する。(湯じわ不良率で2.5分の 1 になる)

4.5 最適自動制御法の開発 (ステップ 6)

要因の絞り込みおよび品質工学の実験の結果の寄与度より、重要Qコンボとして次の 2 点を設定し、最適自動制御方法を開発した。

4.5.1 金型温度制御システムの開発

ダイカスト鑄造の金型温度の変化の特徴は、1 サイクル間の温度の変化が大きく、金型温度の変化の遅れも大きいことである。制御方式として、通常使われる ON-OFF 制御、PID 制御も試験してみたが、表 9 に示すように良好な結果が得られなかった。そこで、図 15 のように、金型内部に温度センサを設け、設定値に対して演算し設定値になるように、金型内部の冷却水量または離型剤のスプレー量を制御した。

この制御を使うことにより、金型温度が安定するまでのショット数は、図 16 に示すように、制御なしに比べ 28 ショット低減させることができ、設定値に対するばらつきも 4 分の 1 に低減した。

表 9 制御方法ごとの実験結果

制御方法	立ち上げ時間	オーバーシュート	安定時間	オフセット量	総合評価
ON-OFF	○	×	△	×	×
PID	○	△	△	×	×

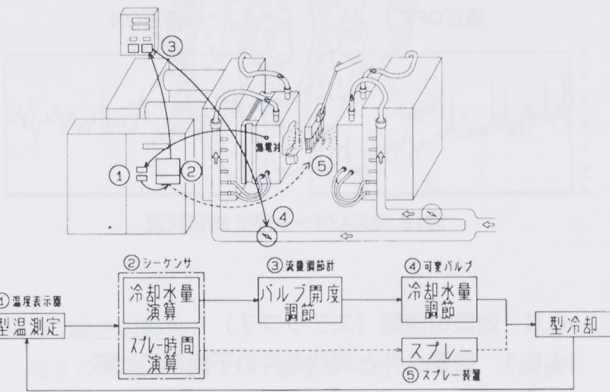


図 15 金型温度制御システム

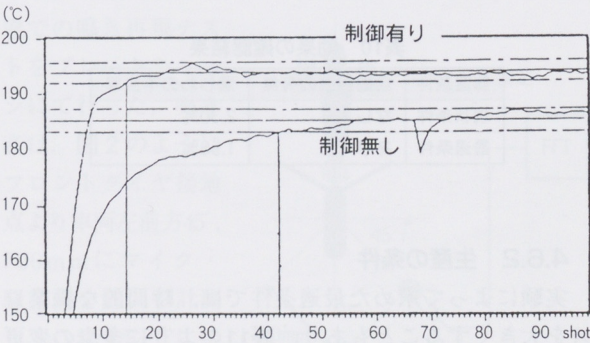


図 16 金型温度安定までのショット数

4.5.2 ビスケット厚さ制御システムの開発

ダイカストマシンの射出チップの位置検出機構をつけることによって、ビスケット厚さを計測し設定値になるように演算し、給湯機に給湯時間の指示を出して制御した。その制御システムを図17に示す。

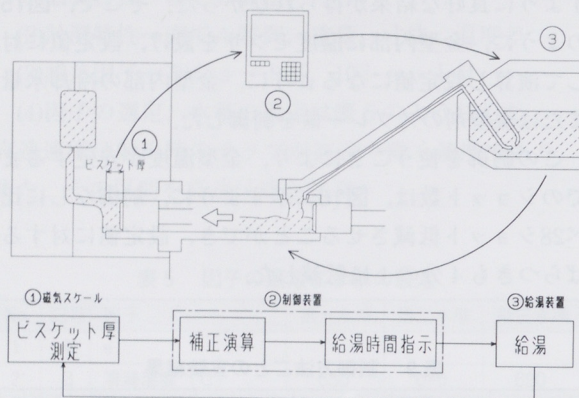


図17 ビスケット厚さ制御システム

この制御を使う効果として、図18に示すように、設定値からのばらつきが5分の3に低減した。

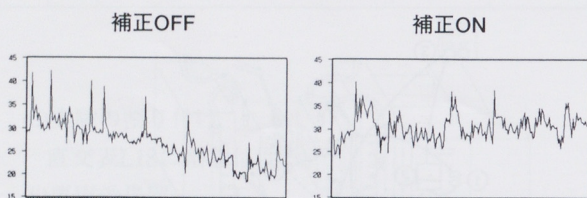


図18 ビスケット厚さ制御状況

4.6 効果の確認（ステップ7）

4.6.1 最適条件と現状条件の不良率の比較

生産において、最適条件と現状条件での不良率を比較したが、その結果を表10に示す。なお、比較はモーターサイクルのエンジン部品の金型で行った。

表10 効果の確認結果

鋳造条件	自動制御の有無	湯じわの不良率
現状条件	なし	2.30%
最適条件	あり	1.58%

4.6.2 生産の条件

実験によって求めた最適条件では、時間的な操業ロスを大きくすることもあり、表11のように多少の変更を行って確認した。

表11 生産条件

要因	水準	要因	水準
溶湯温度(℃)	670	高速速度(m/s)	2.4
金型温度(℃)	150	高速区間(mm)	225
ビスケットの厚さ(mm)	40	昇圧時間(ms)	70
(溶湯の重量)		エアブロー時間(sec)	9

この時の湯じわの不良率は0.7%となり、3分の1に低減することができた。

5 効果のまとめ

(1)湯じわ発生の重要要因は、金型温度とビスケット厚さであり、それらの寄与率が高い。従って、熱量の管理が非常に重要であり、これらをコントロールすることによって、不良の発生を大幅に抑えられることが定量的に実証された。

(2)対象とした製品で、湯じわの不良率を3分の1に低減することができた。

6 おわりに

従来、あまりに条件が多いためあきらめてきた慢性不良に対して、PM分析、統計的品質管理、品質工学の3つの手法を組み合わせることによって、効率的な要因の絞り込みと再現性の高い結果を得ることがわかった。

参考文献

- (1)植原寅藏，菅野友信共著：アルミニウム合金ダイカスト，軽金属出版
- (2)特集：PM分析とSQCでシナジー効果を！：プラントエンジニア，4(1995)9-40
- (3)田口玄一：開発・設計段階の品質工学，日本規格協会
- (4)ダイカストの標準，日本ダイカスト協会
- (5)田口玄一，横山翼子：品質設計のための実験計画法，日本規格協会
- (6)小池康彦，ほか：高生産型加圧鋳造技術の確立，中部品質管理大会(1993)109-114

著者



鈴木利育