

論文・解説

32

品質工学を用いた鋳鉄足回り部品の量産準備期間短縮 Reduction of Mass-production Preparation Period about Axle Parts Casting Process by Taguchi Method

黒谷 真司*¹ 佐川 述史*² 竹村 幸司*³
Shinji Kurotani Norifumi Sagawa Kouji Takemura

要約

量産準備プロセスにおいて、製品品質の原理追究や開発/工場とのリアルタイムコンカレント活動に重点を置いて、製品品質の向上と量産準備期間の短縮に取り組んでいる。今回、鋳鉄足回り部品の新規車種のフロントナックルにおいて、最適設計の早期化による量産準備期間の短縮を目指し、開発/工場とのコンカレント活動を行った。原理追究と品質工学の活用により、開発段階で量産時の品質のバラツキや工程のバラツキと製品機能を両立した設計を推進し、狙い通りの製品品質を得るとともに、実体による品質の造りこみ段階での手戻りを未然に防止し量産準備期間を短縮した。

Summary

Now we are proceeding improvement in product quality and shortening of mass-production preparation period in production preparation process, focusing on the pursuit of philosophy and real-time concurrent engineering with R&D / Plant. This time, we put concurrent engineering with R&D / Plant into practice on axle parts casting process, which correspondence to new products for the purpose of shortening mass-production preparation period by early implementation of optimum design. By using the pursuit of philosophy and Taguchi Method, we achieved product quality optimization and reworks prevention, effectively we accomplished shortening mass-production preparation period.

1. はじめに

従来の量産準備プロセス、及び今回の活動による量産準備プロセスをFig.1に示す。

従来は、製品開発完了直前に品質確認（湯流れ、凝固）のためCAE解析を行い、開発へ製品形状変更の提案や、金型レイアウト及び鋳造方を決定していた。しかし、この段階での提案が、量産中の永続的な安定品質を実現できるかについて判断できていなかった。これは、今までのCAE解析はノミナル条件のみでの解析であり、量産パラツキの上下限条件評価が行えていなかったからである。この全ての条件を評価するためには、膨大な解析時間が必要である。そこで、今回この問題を解決するため品質工学を取り入れ、手戻りのない工程と品質を造りこむとともに、量産準備期

間25%減を目標として以下のような活動を行うこととした。

まず、品質問題についてテストピース等を用いた基礎テストにより原理追究を行い、メカニズムを特定し、基本機能を設定する。

次にテストピース及び前モデルを活用した制御因子の検討及び実鋳造の結果をCAEへフィードバックし、再度実鋳造による検証を行う。これにより、CAEの解析精度向上を図り、より高い予想確率を実現する。

その後、更に他の因子を振らした解析をCAE上で繰り返し行い、因子の絞り込みと最適化を行う。

この活動を今回鋳鉄足回り部品の新規フロントナックルに適用し、CAEと品質工学を活用した最適設計を行い、開発への結果の情報開示と製品形状を提案した。

*1~3 パワートレイン技術部
Powertrain Production Engineering Dept.

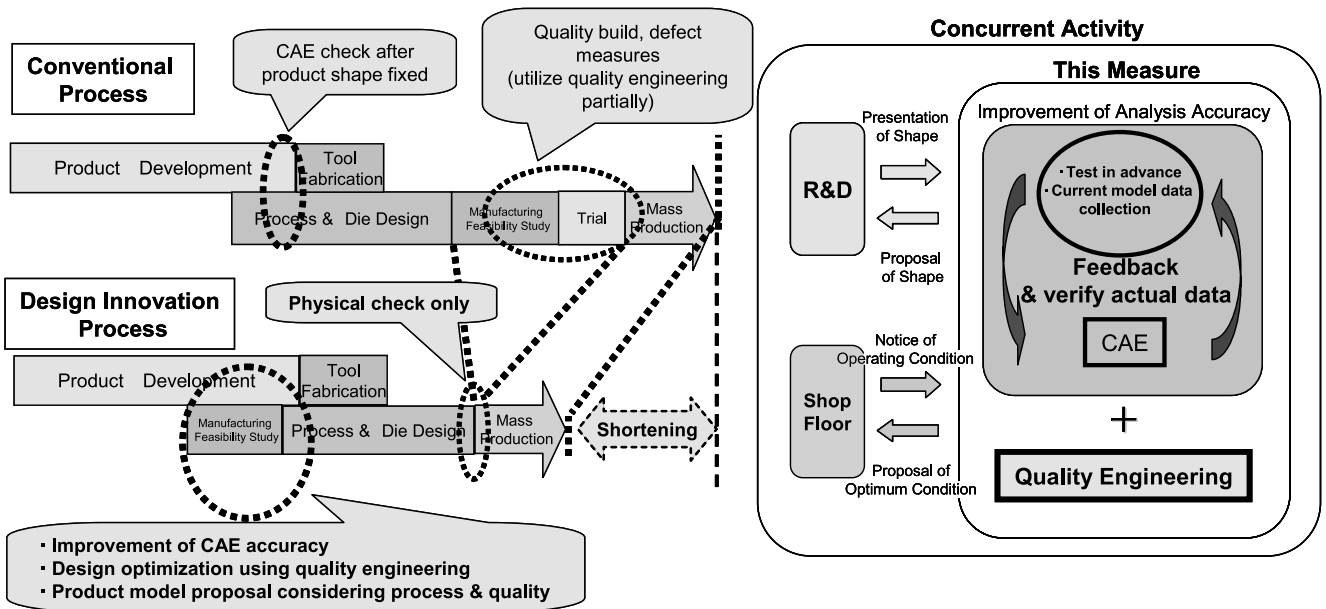


Fig.1 Outline of Activities

2. 新規フロントナックルの問題点とメカニズム

2.1 新規フロントナックルの問題点

前モデルと新モデルの形状をFig.2に示す。新モデルではアッパーアームが大型化されている。これにより、前モデルでも問題となったアーム部の内部欠陥（引け巣）の更なる増大や、大型化による鑄造時の熱量増加に伴う堰前の黒鉛球状化率の低下が懸念された。足回り部品の黒鉛球状化率は、製品の要求強度から規定されている。

2.2 内部欠陥（引け巣）の発生メカニズム

鑄鉄部品の製品内で引け巣の発生しやすい部位は、形状変動の大きい厚肉部である。これは、薄肉部が先に冷却され、厚肉部への溶湯の供給源が断たれ収縮分の補給ができないためである。Fig.3に前モデルで問題となった引け巣の発生部位と、CT撮像による引け巣画像を示す。一般的に引け巣の抑制には、発生部位近傍に堰を設け、その堰前に押し湯と呼ばれる溶湯のたまりを置く。この押し湯により指向性凝固を誘発させ、製品外に引け巣を発生させる手法をとる。

2.3 黒鉛球状化率低下のメカニズム

鑄鉄の冷却カーブをFig.4に示す。鑄型に注湯された溶湯は、冷却が進み（A）で黒鉛が晶出し始める。その後初晶黒鉛の晶出が終了すると、（B）で共晶黒鉛の晶出と成長が行われる。共晶時間が長くなり一定時間を超えると、黒鉛の異常成長により一旦丸くなった黒鉛の丸さが崩れ始め、黒鉛球状化率が低下する。黒鉛球状化率を向上させるためには、この共晶時間を一定時間内にすることが必要である。

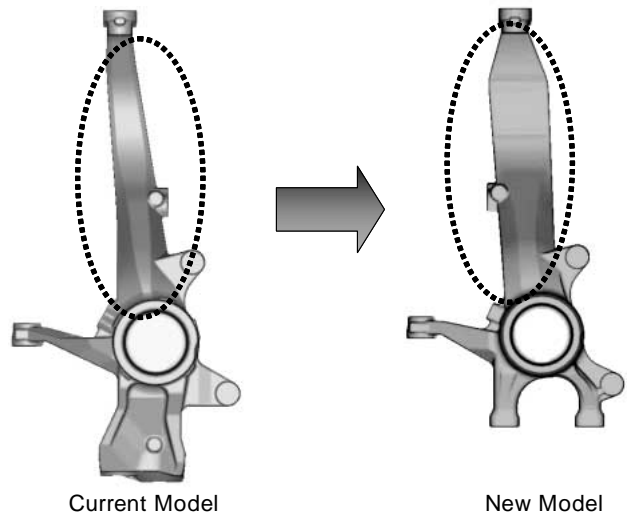


Fig.2 Product Shape Comparison



Fig.3 Shrinkage Form Section & CT Scanner Image

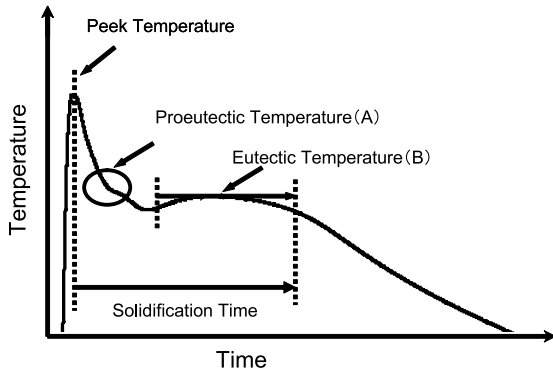


Fig.4 Cooling Curve Image

Process	Function	Primary cause	
Molding	Mold down material and optimize metal temperature to eliminate impurities	Mold down material Material Selection	First to the melting Inventive cleaning
Pouring	Match the metal level at constant temperature, and pour at a suitable rate	Keeping precise amount of molten metal Prevent temperature drop	Keep the level high Prevent the metal solid
		Prevent gas entrainment of molten metal Prevent metal oxidation Pouring at a suitable rate (at a constant speed)	Prevent the metal Prevent metal oxidation Prevent the metal
Cooling	Solidify molten metal and cooling	Solidification start after filling of molten metal	Keep the pouring in Preventing heat out
			Preventing heat out Preventing heat out
			Preventing heat out Preventing heat out Preventing heat out
Shake-Out	Separate products and gating system from molten metal	Sand stripping	Prevent sand break
Treatment	Separate products from resin gas	Resin bonding	Use of resin Preventing gas

Fig.7 Function Development

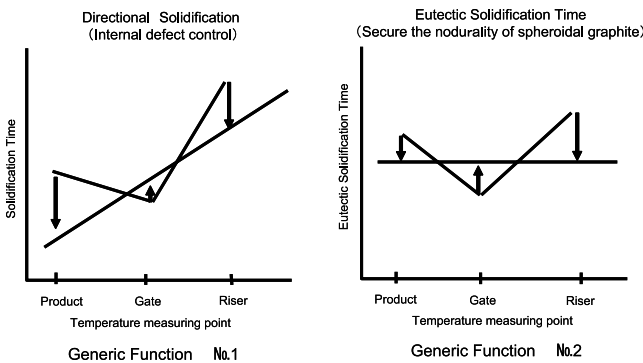


Fig.5 Generic Function

3. 品質工学を用いた実験

3.1 引け巣の抑制の基本機能

引け巣の評価方法として前述の指向性凝固を用い、製品・堰・押し湯の順で凝固すればよいので、各部位の最高到達温度から凝固完了までの凝固時間を比較した。これをFig.5の基本機能No.1とし、標準SN比で解析した。

3.2 黒鉛球状化率安定の基本機能

一般的に製品内で最も黒鉛球状化率が低くなる部位は、凝固が遅れる堰前であるが、今回は網羅的な評価を行うため、堰前を含む各部位の温度平衡時間を比較し、Fig.5の基本機能No.2として望小特性のSN比で解析した。

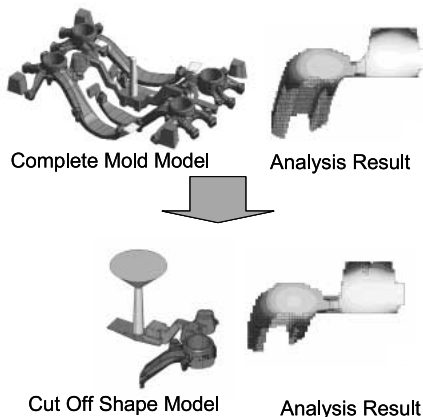


Fig.6 Analysis Model Study

3.3 実験方法の改善

今回の最適設計を実施するにあたり、凝固解析ソフトMAGMAを用いたCAEによる実験を実施した。また、フルモデルでは解析時間が18時間/条件もかかり、解析は数十回行うことになるので、この解析時間を短くするため簡易モデルの検討を行った。

1回の鋳造で4個の製品が取れる中で、引け巣・球状化に最も条件が悪い製品のみとした。また、前モデルを含め今までの解析を行った解析結果と実体評価結果から、共晶凝固完了までの時間が300秒以下の部位では引け巣の発生が見られなかったため、凝固時間が300秒以下の部位を除いた。以上のことから、フルモデルと同等の解析結果が確認できたFig.6の形状を簡易モデルとして採用した。これにより解析時間は、18時間から3時間となり83%減少した。

3.4 制御因子と水準

制御因子の選定は、有効な制御因子とするため、鋳鉄部品生産工程の機能展開 (Fig.7) を行い、Table 1に示す8因子を選定した。また、誤差因子は、製品の凝固に影響が大きく、量産ラインにおいてもバラツキが大きい注湯重量とした。制御因子に関しては引け巣と黒鉛球状化率に有効な水準を決定するため、テストピース及び前モデルによる検証を行った。

代表例として、Fig.8, 9に制御因子と引け巣・黒鉛球状化率との関係を、Fig.10に制御因子と引け巣の関係を示す。Fig.8, 9は前モデルを用いたテスト結果でFig.10は製品形状を想定し、肉厚変動が大きなテストピースを用いたテスト結果である。

Fig.8の堰位置と引け巣・黒鉛球状化率は、堰位置が製品厚肉部に近い程、引け巣量は少なくなり押し湯への指向性凝固が顕著になった。一方、黒鉛球状化率には差は見られなかった。

Fig.9の堰断面積と引け巣・黒鉛球状化率は、堰断面積が大きくなれば、押し湯への指向性凝固が顕著になり、引け巣量は少なくなった。また、黒鉛球状化率は断面積の大

きい方が、若干低下の傾向を示した。

Fig.10は溶湯成分のCE値(C%+1/3Si%)と引け巢の関係を調査した結果である。CE値が高い程凝固時の黒鉛化が促進され、黒鉛の晶出により引け巢量が少なくなっている。これは、基地部の凝固による体積収縮を黒鉛の晶出による体積膨張で補ったためと考えられる。

Table 1 Control Factor

No.	Control Factor	1	2	3
A	Bearing Shape (Gate Shape)	Rectangle	Square	
B	Upper Arm Shape (Gate Position)	Upper Arm Shape	Root of Upper Arm	Bearing
C	Caliper Shape (Gate cross-sectional area)	Narrow	Middle	Wide
D	Riser Height	Low	Middle	High
E	Riser Position	Near	Middle	Far
F	Carbon Equivalent	Low	Middle	High
G	Riser Width	Low	Middle	High
H	Molten Metal Temperature	Low	Middle	High

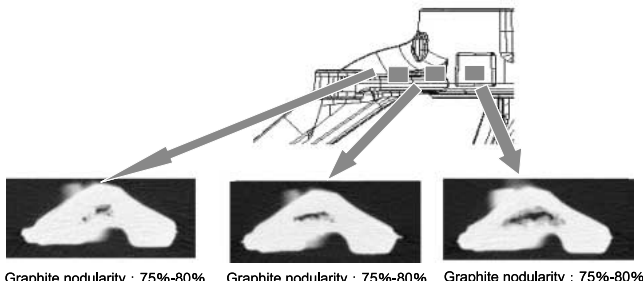


Fig.8 Gate Position Shrinkage Cavity and Graphite Nodularity

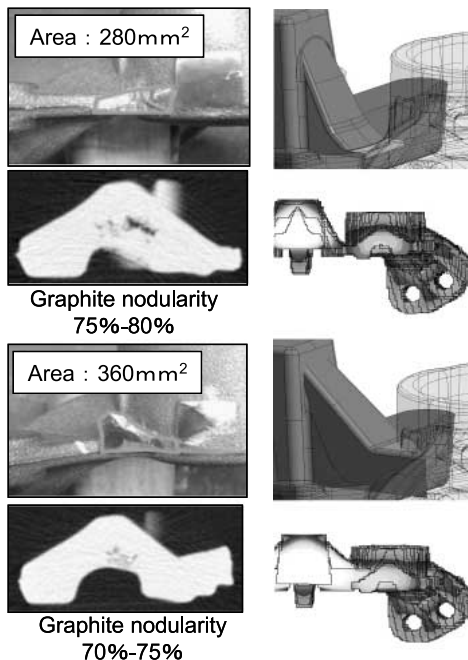


Fig.9 Gate Cross-Sectional Area, Shrinkage Cavity and Graphite Nodularity

4. 実験結果

4.1 データの解析

基本機能No.1については、標準条件N0における堰位置を信号として標準SN比の計算を行った。基本機能No.2は、3つの誤差条件下における測定部位でのデータを求め、望小特性のSN比を算出した。

4.2 最適条件の選定

得られた要因効果図 (Fig.11) から、製品に要求される機能を考慮し、最適条件を選定した。因子Bのアーム形状(堰位置)は、従来の引け対策(厚肉部に堰を設ける)で行われているように、大きな効果を示している。因子Eの押し湯位置は、製品と押し湯の距離を振らせた因子であり、押し湯位置が近い程引け巢に対する効果が大きい。

初期条件と最適条件をTable 2に示す。

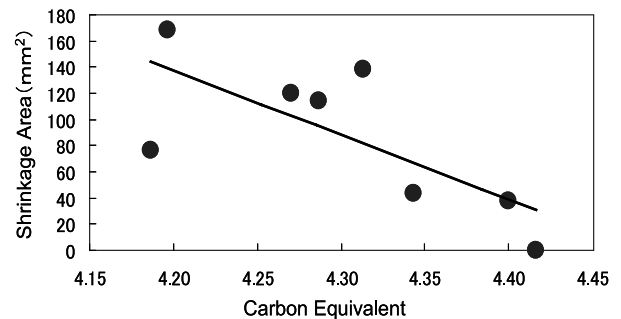
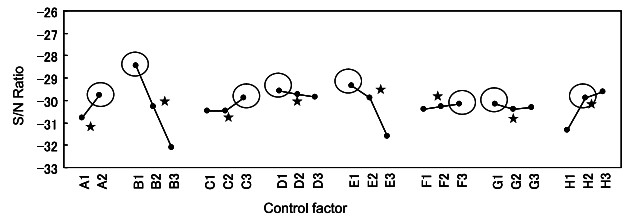


Fig.10 Relationship between Carbon Equivalent and Shrinkage Area

Generic Function No.1 ○ : Optimum Condition ★ : Initial Condition



Generic Function No.2

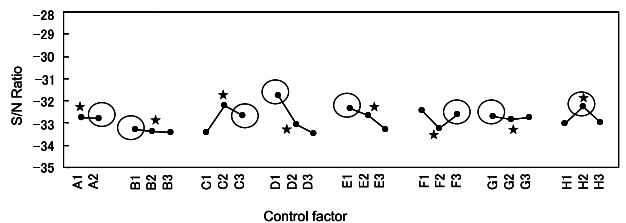


Fig.11 Graph of Factorial Effects

Table 2 Initial Condition and Optimum Condition

Optimum Condition	A2B1C3D1E1F3G1H2
Initial Condition	A1B2C2D2E2F2G2H2

Table 3 Gain Estimation

Generic Function No.1 (db)			
	Optimum Condition	Initial Condition	Gain
Estimated Quantity	-25.4	-29.7	4.4
Effect Confirmation	-23.9	-28.5	4.6

Generic Function No.2 (db)			
	Optimum Condition	Initial Condition	Gain
Estimated Quantity	-30.3	-33.1	2.7
Effect Confirmation	-31.5	-33.9	2.4

4.3 利得の推定及び確認テスト結果

利得の推定と確認テストの結果をTable 3に示す。利得の再現性も良く、十分な利得も得られており改善の方向は確認できた。

初期条件と最適条件の確認テスト結果をFig.12に示す。基本機能No.1については、右肩上がりの指向性凝固が得られ、誤差によるバラツキも小さくなった。基本機能No.2についても、各部位の共晶時間の差やバラツキは、一定時間内になることが確認できた。今回は、SN比の最適条件のみで良好な結果が得られたので、感度の合わせこみは行わないこととした。

4.4 実体での確認テスト

今回得られた最適条件を金型設計及び工程設計に織り込み実体部品による評価を実施した。引け巣の結果をFig.13に示す。引け巣の確認は、網羅性を高めるため切断による確認ではなく、CT撮像による連続撮像で評価した。その結果、引け巣は全ての部位において確認されなかった。また、黒鉛球状化率においても全ての部位で規格を満足し、問題ないことが確認できた。以上より、今回得られた条件及び結果を開発部門へ情報開示し製品形状へ織り込むため検討を依頼し、車両に組み込まれたときの他部品への干渉及び製品実体強度の検証を行った。最終的に開発部門より提示された製品設計図に基づき、金型仕様へ織り込み、以前のような実体品質確認後の金型修正(手戻り)を防いだ。

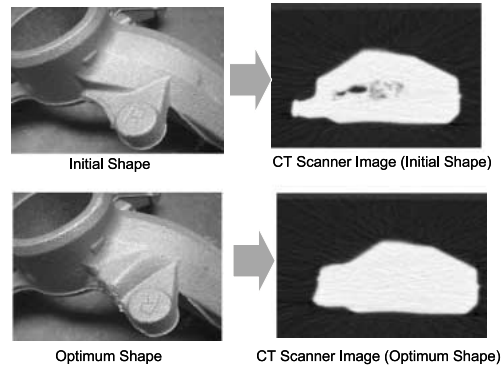


Fig.13 CT Scanner Image on Initial Condition vs Optimum Condition Check Report

5. まとめ

前述の品質系対策活動を、開発段階に開発/工場とのコンカレント活動として実施した。そのポイントは以下の通りである。

- ・ 開発段階での量産工程FMEAの実施と開発/工場との情報交換
- ・ 基礎実験、前モデルでのデータの蓄積
- ・ CAEへのデータのフィードバックによる確率の高い予測と情報開示

上記を確実に実施したことにより量産準備期間短縮が可能となった。今回量産準備期間は従来比25%減となり当初の目標が達成できた。また品質上の問題であった、引け巣・黒鉛球状化率も満足できる最適設計が実現できた。更にこの活動の中で、製品形状の変更が必要となった部位も、製品機能開発の段階で織り込むことで、機能の再評価という手戻りを未然に防ぐこともできた。

今後も新規鋳鉄部品の開発に、この評価プロセスを取り入れ、量産準備プロセスにおける製品品質の向上と量産準備期間の短縮を推進する。

参考文献

- (1) 椎野ほか：カムシャフト鋳造条件の最適化 品質工学, Vol.9, No.4, p.68-73 (2001)
- (2) 小島：CAEによる薄物Mg鋳造法の最適化, 品質工学, Vol.11, No.4, p.44-50 (2003)

著者



黒谷真司

佐川述史

竹村幸司

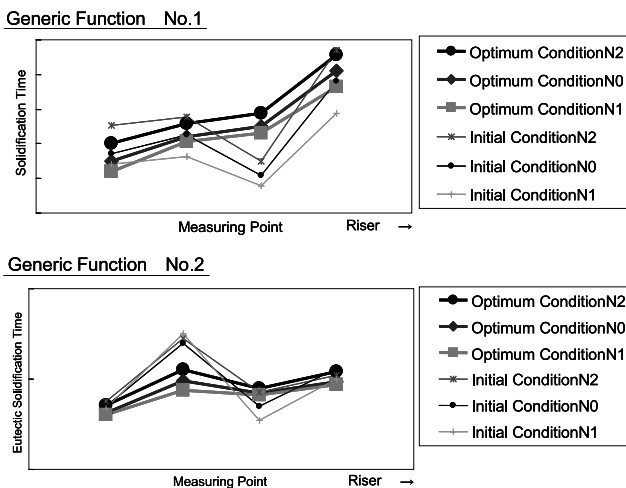


Fig.12 Check Report