

論文・解説

32

# CAEによる鋳造用鋳型設計条件の最適化 Optimization of Mold Design Parameter with CAE

垣田 健\*<sup>1</sup> 堀 雄二\*<sup>2</sup> 菅谷 智\*<sup>3</sup>  
Takeshi Kakita Yuji Hori Satoshi Sugaya  
永田 亮平\*<sup>4</sup> 刀 祢英雄\*<sup>6</sup>  
Ryohei Nagata Hideo Tone

## 要約

新型ロータリエンジン「RENESES」の基幹技術の一つである吸排気方式の変更に伴い、吸排気ポート位置精度向上が、高出力、低燃費であるエンジンを量産化するためのキー技術となった。そこで、吸排気ポートを有するサイドハウジングの寸法精度向上を狙い活動を行った。

本研究では、品質工学による網羅的なCAE解析を効率的に遂行し鋳型設計条件の最適化を行った結果、吸気ポート位置精度を60%向上することができたので報告する。

## Summary

Novel exhaust port layout of a newly-developed rotary RENESES engine provides precise dimensions of intake and exhaust ports for its mass production, thus achieving high power and great fuel economy. These targets can be achieved by reducing the dimensional dispersion in casting side housing, including the intake and exhaust ports.

This paper reports that mold design parameters efficiently optimized with Taguchi method and CAE has achieved high precision - the dimensional dispersion in the intake port was reduced by 60%.

## 1. はじめに

本テーマの対象である新型ロータリエンジン「RENESES」の概要について述べる。ロータリエンジンはFig.1に示すように、ロータ、ロータハウジング、サイドハウジングなどの部品で構成されている。「RENESES」の基幹技術として、Fig.1に示すように従来のペリフェラル排気ポート方式からサイド排気ポート方式にしたことがあげられる<sup>(1)</sup>。これにより、Fig.2に示すように、出力、燃費に悪影響を及ぼすオーバーラップを解消でき、高出力と低燃費を実現する。

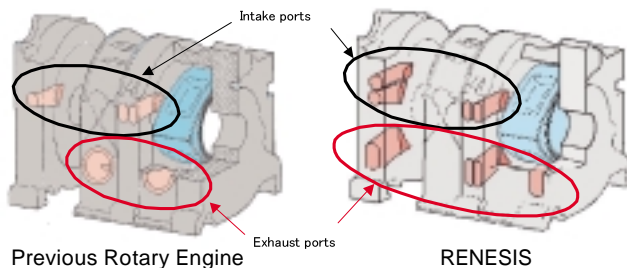


Fig.1 Exhaust Port

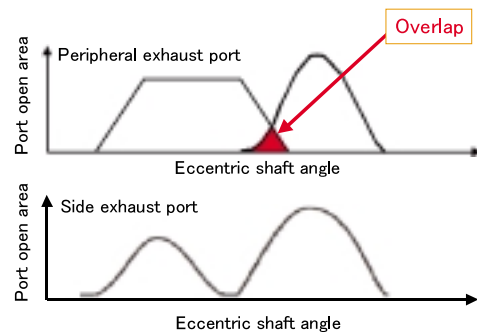


Fig.2 Port Open Area

ここで、吸排気ポートが設置されているのは、サイドハウジングという鋳造部品であり、以下に詳細を述べる。

## 2. サイドハウジングの生産上の課題

サイドハウジングは、Fig.3に示すように外形状を形成する主型に、中空部を形成する中子を組み付ける分割構造になっている。吸排気ポートも中子で形成され、これら中子の主型に対する位置ばらつきがFig.2に示す吸排気開口

\*1~6 パワートレイン技術部  
Powertrain Production Engineering Dept.

タイミングに影響してくる。このため、主型に対する吸排気ポート中子の位置ばらつき低減が非常に重要となる。これまで位置ばらつき低減に対して様々な活動を行い、主要因である鋳込み時の溶湯圧力や熱影響などに対して対策を織込んだ中子構造としており、現状の寸法精度を確保している。そこで今回は、他の要因と考えられる実際の鋳造工程における4M (Man, Machine, Material, Method) の誤差に対するロバスト性を高め、更なる寸法精度向上を図った。これは「RENESES」の高出力、低燃費の量産化には不可欠である。今回は、吸気ポートの位置ばらつきをこれまでの1/2まで低減することを目標に活動を行った。

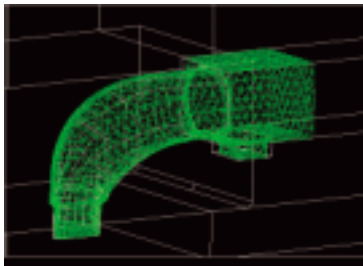


Fig.3 Mold of Intake Port

### 3. 位置ばらつき低減へのアプローチ

#### 3.1 アプローチ

中子の位置ばらつきは、中子のセットの仕方、中子や主型の寸法、熱膨張などの物理的特性、鋳込み時に鋳型に加わる溶湯の浮力などのばらつきが積み重なり発生する。つまり、これら4Mの誤差に対して安定性の高い鋳型設計が必要となる。この実現のために品質工学の手法であるパラメータ設計を用いて鋳型設計を行った。

#### 3.2 パラメータ設計

パラメータ設計とは、誤差の影響を受けにくい設計を実現する手法である。具体的には、まず目的となる特性の目標を設定(目的機能の設定)する。次に目的機能に影響する因子において、設計者が制御できる制御因子と、制御が困難な4Mといった誤差因子を設定し、制御因子を直交表に割り付け実験を行う。この際、誤差条件下での実験を行うため誤差条件の数だけ実験が増えることになる。目的機能に対する実験の出力のばらつき度をSN比という尺度を用いて評価した。

#### 3.3 実験方法

この実験計画を行うにあたり、実体を使う実験とCAE解析とが考えられる。現在、自動車鋳造部品では商品の多様化、短サイクル化の流れから、量産準備期間短縮がもたらされており、その中では、実体による実験は工数、コストがかかり、実用的とはいえない。更に、鋳造工程の4M誤差を網羅的に含ませた実験を行うには、CAEによる効率的な解析が妥当と判断した。

CAEには構造解析ソフトI-DEASを利用した。この解析ソフトは鋳込み時に鋳型へ加わる溶湯の熱影響や応力をパラメータとして入力することが可能であり、実プロセスに近い鋳造時の中子挙動のシミュレートができる。

## 4. パラメータ設計の実験計画

### 4.1 目的機能と評価方法

吸気ポート部分の鋳型寸法と鋳造後の製品寸法が比例関係になることが理想状態と考え、目的機能は転写性 $y = M$  (Fig.4)で評価した。理想的な転写とは、製品を形成する鋳型寸法(入力 $M$ )と出来上がった製品寸法(出力 $y$ )が一致することであり、大小様々な寸法をプロットすると両者の関係はFig.4のような原点を通る直線になる。

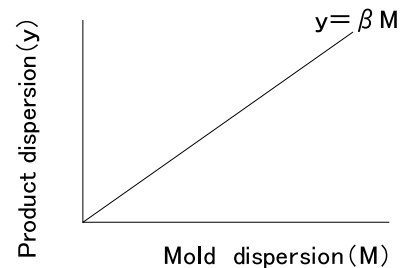


Fig.4 Purpose State of Transcript

評価方法としては、直交表の各実験ごとに誤差条件での直線関係からの隔たりをSN比で計算した<sup>(2)</sup>。

### 4.2 信号因子と水準

信号因子は、吸気ポートで位置精度が重要な部位の寸法とした。モデルの座標に位置精度が重要な部位を当てはめて13ヶ所のポイントの総組み合わせである78寸法を水準とし、解析データから読み取った。

### 4.3 制御因子と水準

制御因子は、鋳型製作から鋳込みまでの工程全体を通して、位置精度に大きく影響すると考えられる鋳型構造と設計寸法、鋳込み方案、鋳造の熱影響の中から8因子 (Fig.5)を抽出した。Table 1に制御因子の水準表を示す。この8因子をL18直交表に割り付け実験を行った。

Table 1 Control Factors and Level

	Control factor	Level value		
		1	2	3
A	Young ratio of mold and core	Small	Normal	Large
B	Thermal expansion coefficient of mold and core	Large	Normal	Small
C	Position of center of gravity	Inside	Normal	Outside
D	Volume of core print	Small	Normal	Large
E	Dowel length of core print	Short	Normal	Long
F	Side clearance	Large	Normal	Small
G	Height clearance	Large	Normal	Small
H	Mold direction	Side	Lower	Upper

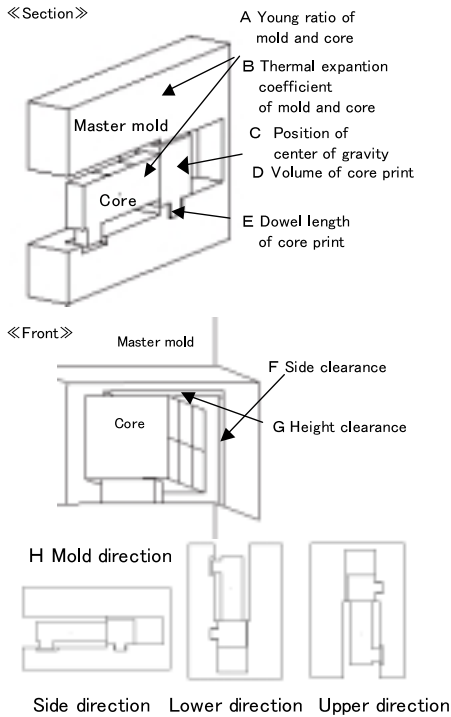


Fig.5 Influential 8 Factors on Dimension Dispersion

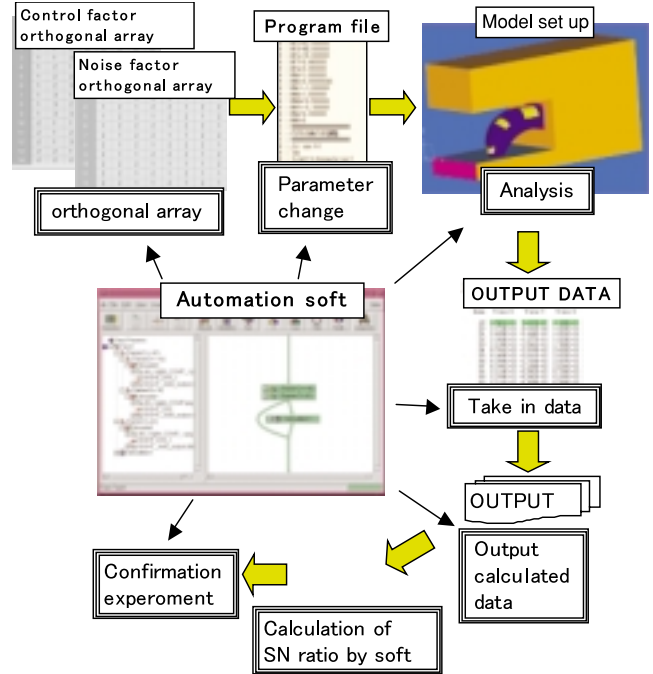


Fig.6 Automatic Analysis System Flow

4.4 誤差因子と水準

鑄造工程の4Mの誤差を網羅的に含ませた実験を行い、あらゆる条件に対するロバストな鑄型設計を追求するために、制御因子そのものを誤差としてパラメータ設計を行うこととした。つまり、制御因子をある水準に設定し設計しても製造時のばらつきや量産後の劣化などの誤差を含んでおり、これらに対するロバスト性を確保することが量産後の寸法精度の維持管理に重要であると考えた。

今回の実験では、各制御因子で考えられるばらつき幅をL12直交表に+/-側の2水準で割り付けた。Table 2に誤差因子の水準を示す。制御因子の狙い値からばらつき幅を+/-していることを示している。

Table 2 Noise Factors and Level

Noise factor		Level value	
A	Young ratio of mold and core	1	2
B	Thermal expansion coefficient of mold and core	+	-
C	Position of center of gravity	-	+
D	Volume of core print	-	+
E	Dowel length of core print	-	+
F	Side clearance	+	-
G	Height clearance	+	-
H	Mold direction	+	-

5. 効率的な解析方法の開発

5.1 自動解析システム

今回の取り組みにおける直交表 $L_{18}$ の外側に誤差因子の直交表 $L_{12}$ を割り付けた直積実験では、合計234回(18 × 12 + 18)の実験回数が必要となる。

この直積実験では実験回数が多いため、条件入力やデータ解析を手作業で行うと多くの工数が必要となる。そこでI-DEASと最適化ソフト(I-SIGHT)とを連係させ、全実験を自動解析した。更に解析データからSN比を自動計算させるプログラムを開発し、全自動解析システムを構築した。このシステムにより、各パラメータの条件を入力するだけで、SN比まで自動計算させることが可能になり、解析時間をこれまでの約1/40まで短縮させることができる。システムのフローをFig.6に示す。

5.2 パラメータ検討用モデル

今回の取り組みでは、CAE解析とパラメータ設計の新しい手法としてパラメータ検討用モデルによる解析を行った。この解析の概念と効果を以下に述べる。

これまで品質工学実験では、テストピースで最適化を行い、その結果を製品の製造条件に反映させ工程の安定化を図ってきた。CAE解析においても、実物モデルの形状特性を踏まえたパラメータ検討用モデルによる最適化が可能と考えた。この手法の一番の効果は、実物モデル設計の前段階でパラメータ検討用モデルにより最適化して、その結果を実物モデルの初期設計に織込むことにより、Fig.7のワークフローに示すように実物モデルの解析や設計変更に伴う型修正などが削減でき、実物モデル設計から型完成までの期間が大幅に短縮できるという点である。

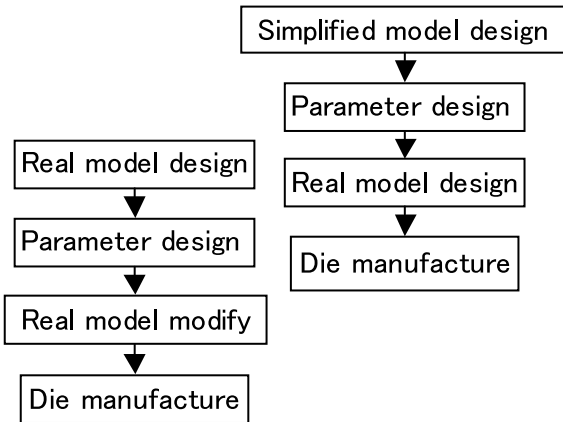


Fig.7 Die Manufacture Flow

パラメータ検討用モデルはFig.8に示すように、吸気ポートの曲面形状を排除して、四角柱を組み合わせたメッシュの粗い単純なモデルとした。このパラメータ検討用モデルは、中子や巾木の重心の位置関係や体積比は変更がないように設計した。なお、このモデルの付随効果として、解析時間を実物モデルの1/3まで短縮でき、全自動解析システムと合わせると1/120まで短縮できる点があげられる。

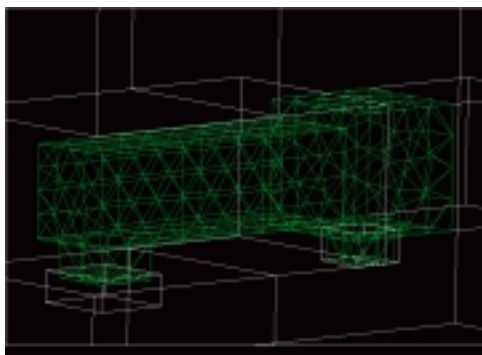


Fig.8 Model for Parameter Study

上記のようにメリットの大きいパラメータ検討用モデルの妥当性を確認するために、得られた最適条件を実物モデルにもあてはめ、利得の再現性を確認することにした。

### 6. 解析結果

各実験ごとのシミュレーション結果により求めたSN比の水準別平均値をTable 3に、要因効果図をFig.9に示す。

SN比の値が大きい水準はばらつきが小さくなることを表しており、この結果から最適条件の組み合わせを決定した。要因効果図より、D：巾木体積の効果が特に大きく、巾木の体積が大きいと主型に組み付けた中子が安定し、位置ズレが抑制できると考えられる。

Table 3 SN ratio Average on Each Control Factor and Level

Control factor		Level value		
		1	2	3
A	Young ratio of mold and core	9.39	9.14	-
B	Thermal expansion coefficient of mold and core	9.63	8.57	9.59
C	Position of center of gravity	8.65	11.41	7.74
D	Volume of core print	5.77	9.7	12.33
E	Dowel length of core print	9.97	7.95	9.87
F	Side clearance	7.97	8.67	11.15
G	Height clearance	8.93	9.05	9.81
H	Mold direction	8.42	9.96	9.41

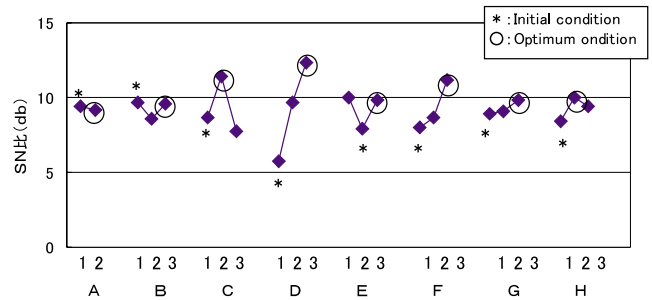


Fig.9 Factorial Effect Diagram

## 7. 確認実験

7.1 CAEによるパラメータ検討用モデルでの確認  
 要因効果図からA<sub>1</sub>B<sub>3</sub>C<sub>2</sub>D<sub>3</sub>E<sub>3</sub>F<sub>3</sub>G<sub>2</sub>H<sub>2</sub>を最適条件としてSN比の利得を推定し、推定値の妥当性を検証するために再現性の確認解析を行った。利得の推定と確認結果をTable 4に示す。

Table 4 Confirmation Experiment

	SN ratio	
	Estimation	Verification
Optimum condition	18.66	18.27
Mass production condition	3.89	6.18
Acquisition(db)	14.77	12.09

利得は推定の14.77dbに対し、確認では12.09dbとなり、ほぼ再現した結果となった。

### 7.2 CAEによる実物モデルでの確認

パラメータ検討用モデルで得られた最適条件を用いて、吸気ポートの実物モデルで確認解析を行った。確認結果をTable 5に示す。

Table 5 Confirmation Experiment with Real Model

	SN ratio	
	Simplified model	Real model
Optimum condition	18.27	19.35
Mass production condition	6.18	5.84
Acquisition(db)	12.09	13.50

実物モデルの確認解析でも利得が13.50dbとなり、パラメータ検討用モデルと同様の結果が得られた。

これより、パラメータ検討用モデルによる解析の妥当性が確認できた。

### 7.3 実製品での確認

以上の結果を基に、Fig.10のように中子の巾木を拡大したところ、実際の製品の位置ばらつきを60%低減し、目標の半減を達成することができた。また、量産後現在に至るも、目標の位置ばらつきを維持管理できている。

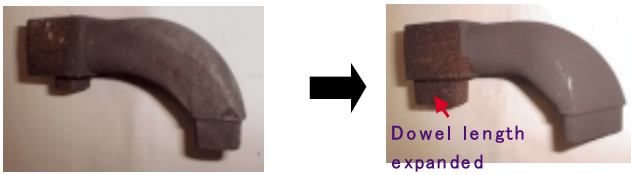
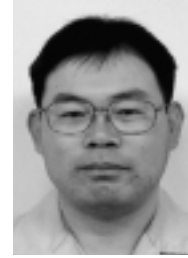


Fig.10 Present core and Improved core

著者



堀 雄二



菅谷 智



永田亮平

## 8. まとめ

- (1) 今回の鑄型のパラメータ設計では、サイドハウジングの吸気ポートの位置ばらつきを1/2.5まで低減できた。
- (2) CAEによる誤差因子の調合をしないパラメータ設計が有効であることが確認できた。
- (3) パラメータ検討用モデルの適用により、実物モデル設計から型製作までが大幅に効率化できるCAEパラメータ設計手法を開発した。

## 9. おわりに

今回の取り組みで得られた知見や手法は既にシステム化しており、現在ではパワートレイン領域のみならず車体、車両関係にも適用範囲を拡大している。今後は、シミュレーションを用いた設計プロセスを更に革新していく予定である。

最後に、この取り組みにご協力頂いた関係各位に紙面をお借りして感謝申し上げます。

## 参考文献

- (1) 田島誠司ほか：サイド排気ポート方式ロータリエンジンの概要，マツダ技報，No.21，p18-23（2003）
- (2) 田口玄一：品質工学講座1～開発・設計段階の品質工学，日本規格協会（1988）