

論文・解説

28

ピストンスペック選定における品質工学の適用 Application of Quality Engineering for Piston Geometry Selection

須藤 康博^{*1} 村中 宏彰^{*2} 小泉 昌弘^{*3}

Yasuhiro Sudou

Hiroaki Muranaka

Masahiro Koizumi

山内 智博^{*4} 古野 貴久^{*5} 来住南 和雄^{*6}

Tomohiro Yamauchi

Takahisa Furuno

Kazuo Kisuna

要 約

これまでのピストンの開発プロセスは“仮説・構想 試作 実験検証”のルーチンを繰り返すことで各性能のOKを確認し商品化してきた。しかし上昇し続ける市場要求に対し、この開発プロセスのなかでは実験検証段階で、目標未達・背反性能との調整などの課題が生じるようになり、開発の『手戻り』が増えてきた。複数の商品目標に対する背反に対して、システムに要求される幾多の「品質特性」ではなく、システムに要求される1つの「機能」を改善し、結果として全ての品質特性を満足させる“パラメータ設計”をプロセスに組み入れる検討を行った。更に昨今のコンピュータ処理能力の向上に伴い、品質工学と机上でのシミュレーションを組み合わせ活用することで重要品質課題であったピストンスラップ低減のロバスト性向上を実現したので報告する。

Summary

In the current development process of the piston, functional target attainability has been verified by traditional “Testing verification method”; in terms of “Plan and Design Prototype Fabrication Testing”. With ever-increasing market demands, however, this development process started to bring “rework”; such as target shortfall and necessity of rebalance between incompatible attributes, in the design verification stage. For a resolution to these issues, we applied “parameter design method” in order find one solution to satisfy all quality requirements of piston system by improving the only one key function, for finding unique solution against each requirement. Moreover, by utilizing the CAE technology which is progressing drastically in the recent, we have successfully improved the piston slap characteristics and enhanced its robustness, which had been one of the neck engineering in the past.

1. はじめに

社会における環境意識の向上は、自動車に対しより一層の低燃費/低エミッションを要求している。更には、お客様の要求レベルも高まってきており、静粛性/快適性向上の要求も決して無視することはできない。価値ある商品を提供するためには、これらの性能を高次元でバランスさせる必要がある。

エンジンを構成する重要部品の1つであるピストンにおいても、抵抗損失(燃費)/スカッフ(信頼性)/ピスト

ンスラップ(異音)のバランス取りに多くの開発工数を投入している。特にピストンスラップに関しては、ピストン諸元などの影響要因が十分に把握できておらず、その開発は“仮説・構想 試作 実験検証”のルーチンを繰り返すことが多い(Fig.1)。このためエンジンの開発過程において“手戻り”が発生することがあり、開発工数増加の一因となっている。

このような状況下で上昇し続ける市場要求を満たし、お客様に満足いただける商品を提供し続けることは、一層難しくなっている。

*1~3 パワートレイン技術開発部
Powertrain Technology Development Dept.
*5 エンジン設計部
Engine Engineering Dept.

*4 エンジン実研部
Engine Testing & Research Dept.
*6 開発品質革新部
R&D Quality Dept.

マツダR&Dにおいて、技術開発段階での品質工学適用を開始しており、我々もピストン開発における“手戻り”防止とピストンスラップ低減のロバスト性向上を目的として、ピストンスペック選定において品質工学の一つの手法である“パラメータ設計”適用を実施した。

以下、2章に対象としたピストンスラップの概要を、3章に“パラメータ設計”の手順に従って実施した結果を示す。

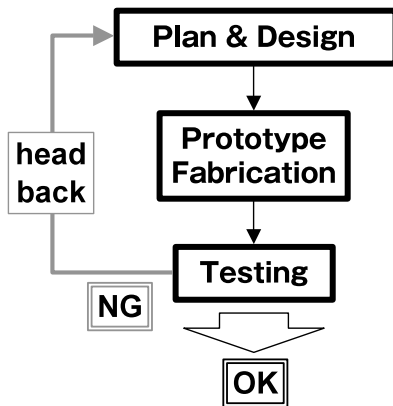


Fig.1 Development Cycle

2. ピストンスラップ

往復ピストン機関では、シリンダライナ内をピストンが上下運動し、コネクティングロッドとクランクシャフトによって回転運動へと変換する。シリンダライナとピストンの間には数十μmの隙間が設けられている中でピストンには燃焼荷重や慣性力等の力が作用し、前述の隙間の中でピストンはシリンダライナとの接触/離脱を繰り返す。この接触/離脱の動きが過剰になると、ピストンスラップ(異音)が発生してしまう (Fig.2)。

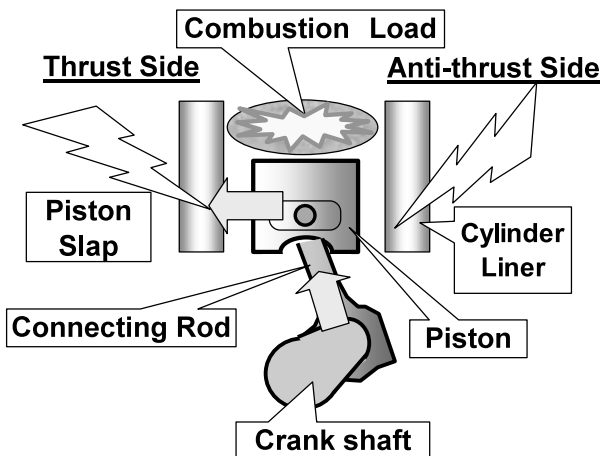


Fig.2 Generating Mechanism of Piston Slap

3. パラメータ設計

3.1 基本機能と制御因子・誤差因子の抽出

(1) 基本機能の定義

品質工学を適用する上での第1ステップは基本機能の定義である。

今回検討を行うピストンスラップは、ピストン挙動の乱れにより発生する現象であり、これはエネルギーのロスと考えられる。

ピストンには“燃焼室を形成する”、“燃焼ガスを密閉する”等、幾つかの機能があるが、今回の検討では上記エネルギーロスの低減が目的であり、ピストンの基本機能を“燃焼荷重をピストンピンを押し下げる力に変換すること”、その理想状態を“燃焼荷重が100%ピストンピンを押し下げる力に変換される状態”と定義した。したがってパラメータ設計を行う際のINPUTは“燃焼荷重”、OUTPUTは“ピストンピンを押し下げる力”となる (Fig.3)。

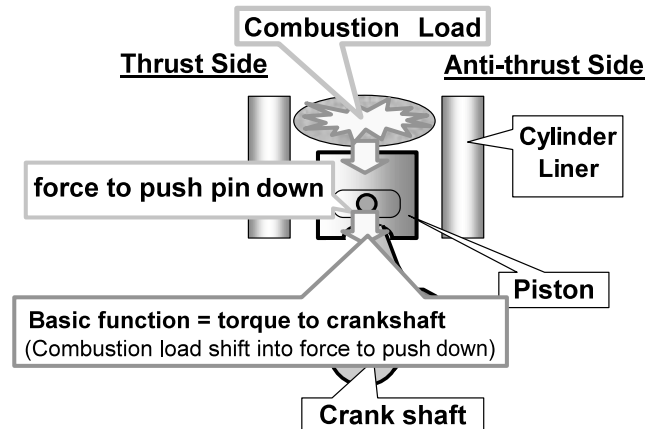


Fig.3 Definition of Basic Function

(2) 制御因子・誤差因子の抽出

第2ステップとして制御因子・誤差因子の抽出を行った。因子の抽出に当たっては、ピストンスラップに影響を及ぼす要因をもれなく抽出するため、1980年代から最近までのピストンスペックを洗い出すとともに、FTA (Fault Tree Analysis) による要因検討を実施した。

加えて過去のピストンスラップ発生事例の整理を行い、想定原因と上述の検討結果を突き合わせ、抽出した要因の妥当性を検証した。

これらの検討より、スカートプロフィール、ピン穴オフセット、スカート長さ等の8因子を制御因子として抽出した (Table 1)。

Table 1 Control Factor

Mark	Factor	Mark	Factor
A	Skirt Width	E	Skirt Compliance
B	Upper Skirt Prof.	F	Skirt Upper End Position
C	Lower Skirt Prof.	G	Skirt Length
D	Skirt Oval	H	Pin Hole Offset

誤差因子には、環境条件/使用条件/劣化など、制御できない特性を設定するのが一般的であるが、我々は以下に述べる考え方により、ピストンクリアランス/ピストン重心位置/シリンダライナ変形など8因子を誤差因子として抽出した。

今回の検討では、ピストンの基本機能を“ 燃焼荷重をピストンピンを押し下げる力に変換すること” と設定しており、この値を実験的に計測することは非常に難易度が高い。

計測準備/データ分析を含め、上記8つの制御因子/複数の誤差因子による実機テストを行うことは非常に困難であり、以後の検討は数値実験により実施することとした。

したがって、誤差因子には環境条件/使用条件/劣化などで変化し、なおかつシミュレーションにて検討可能な特性/スペックを設定する必要があり、前述の因子を誤差因子とした。

また、エンジン回転速度や負荷の影響も懸念されるため、これらは標示因子として扱うこととした。

これらの関係を模式的に示すとFig.4となる。

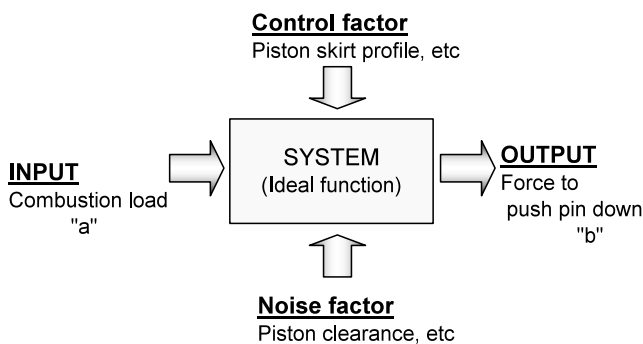


Fig.4 Energy Flow

3.2 検討手法

パラメータ設計を実施するために今回用いた数値シミュレーションは、燃焼荷重を外力として、ピストンの慣性力、ピストンとシリンダライナ間の油膜圧力及び金属接触圧力を計算可能であり、これらの荷重及びモーメントバランスからピストンの挙動を計算している。また、ピストンとシリンダライナ間の接触状態については、弾性流体潤滑モデルを用いて計算しており、詳細なスカートプロフィール、スカートの剛性等を考慮した潤滑状態の予測に基づくピストン挙動の計算が可能である。Fig.5に本数値シミュレーションにおける計算の流れを示す。

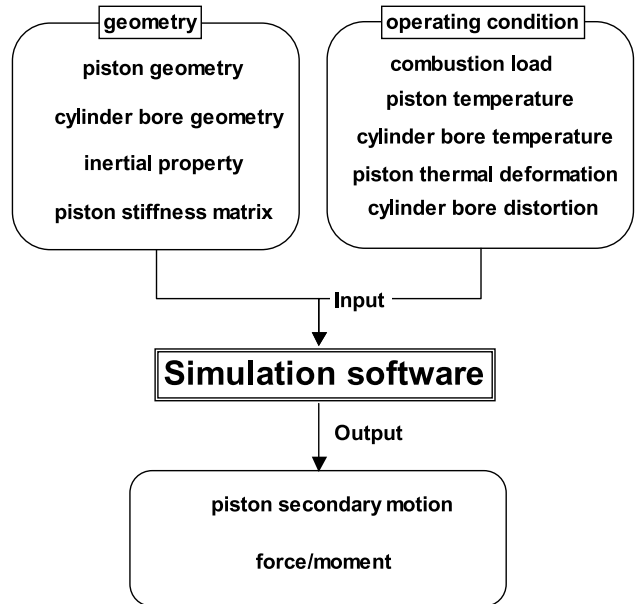


Fig.5 Simulation Flow

3.3 誤差因子の調合

効率的に実験を行うため、パラメータ設計の実施において誤差因子の調合を検討した。具体的には誤差因子のOUTPUTに対する定性的な傾向を確認するため、前項で定義した誤差因子をL18直行表に割り付け、OUTPUTである“ピストンピンを押し下げる力”に対する要因効果を確認する予備実験を実施した。Fig.6に示す予備実験結果の要因効果図から、OUTPUTに対して、必ずしも誤差因子に線形の傾向が見られなかったため、今回は調合不可能と判断し、直積実験を用いてパラメータ設計を実施することとした。

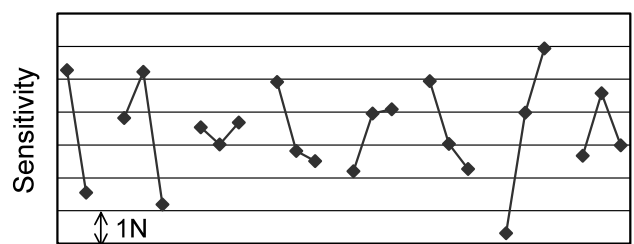


Fig.6 Sensitivity of Error Factor

3.4 直交実験

(1) 直積実験

3.1(2)で述べた制御因子・誤差因子を用い、L18 × L36の直積実験を行った (Fig.7)。

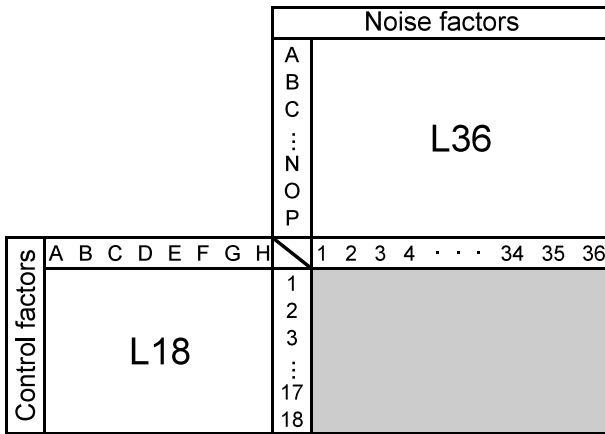


Fig.7 Orthogonal Array

得られた実験データから、SN比、感度を計算したところ、感度の値が制御因子の水準間でほとんど増減せず max minの差でも0.1db以下となり、実際の評価から得られている知見とはかけ離れたものとなった (Fig.8)。

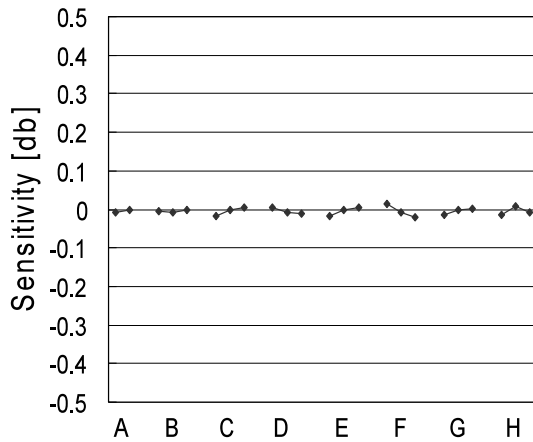


Fig.8 Sensitivity

(2) 再検討

(i) 考察

ピストンに作用する力を簡単に分解すると、次式で表すことができる。

$$a - (c + d) = b \tag{1}$$

ここで、

- a: 燃焼荷重
- b: ピストンピンを押し下げる力
- c: 摺動抵抗
- d: その他の抵抗成分

ピストンスラップは主に“d”により発生すると考えることができるが、“d”は他に比べてごく小さいことが分かっている。

先の検討では、“b”をOUTPUTとして、SN比と感度を評価しようとした。つまり、ピストンスラップに直結するエネルギーに対して、非常に大きな値を評価指標に選んだことになる。制御因子の水準間で感度に差が出なかったのは、

このためと推測した。

理想機能の定義そのものは間違っていないが、このままの方法ではピストンスラップの機能評価は難しい。

(ii) 評価指標の見直し

SN比及び感度は、“a: 燃焼圧力”を“b: ピストンピンを押し下げる力”に変換する安定性と効率を評価する指標であり、式(1)より“b”は、“a - (c + d)”に等しい。従って“b”の代わりに“d: その他の抵抗成分”を評価することでそれらが評価できると考えられ、“d”をゼロ望み特性で評価してみることにした (Fig.9)。

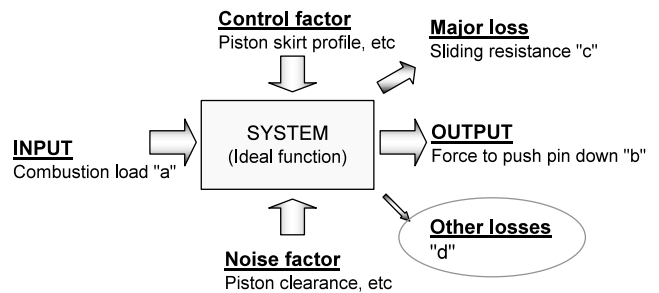


Fig.9 Energy Flow

(3) 結果検証

評価指標を“その他の抵抗成分”で再定義し評価した結果、SN比では各因子で2~3dbの効果が表れ、感度とともに影響が見えるようになった (Fig.10)。

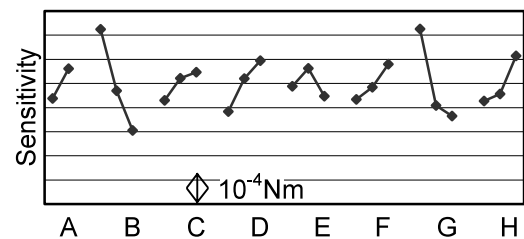
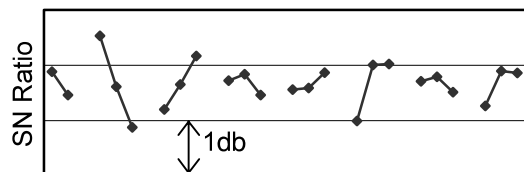


Fig.10 SN Ratio & Sensitivity

次に、この要因効果図の妥当性を検証するために、ベースとする仕様 (現状条件) と要因効果図から得られたSN比最大仕様とで利得の再現性を確認した。その結果良好な再現性がみられ要因効果図の妥当性に問題ないことも確認できた (Fig.11)。

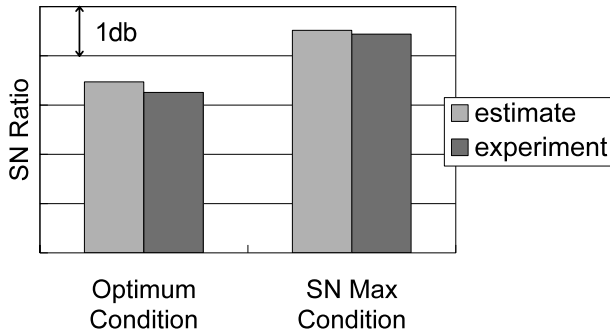


Fig.11 Reproducibility of the Gain

Fig.10の要因効果図からピストンスラップ選定を行った。その結果SN比を悪化させることなく感度を従来の1/2以下となる仕様を選定することができた (Fig.12)。

またこの仕様を実機で評価したところ各部寸法、評価条件を変えても良好な結果が得られ、選定した仕様が安定して狙いの効果が出ていることが確認できた。

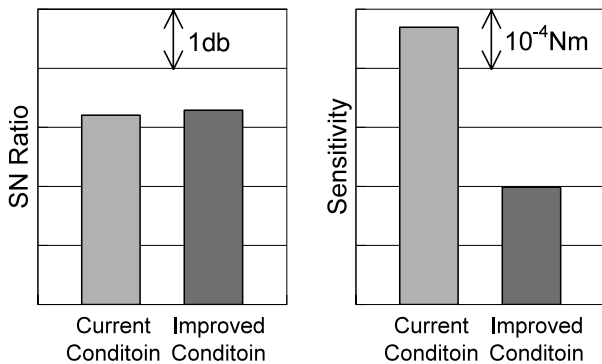


Fig.12 Improvement Effect

これらの結果からこれまでピストンスラップに効果があるとされていた、ピン穴オフセット、スカート長さ、ピストンプロフィールのほかにはスカート楕円量やスカート幅の影響も無視できないレベルでありピストンスラップに対してはスカート全体を配慮した設計が必要であることがわかった。

また経験的知見ともよく合致した結果となっており、過去実績の裏づけにもなる結果であった。

今回品質工学を用いることで、これまでは各パラメータの効果を個別に評価してきたものを、一括に評価でき、かつ最適な組み合わせを容易に見出すことができた。

これは設計パラメータの多いピストン開発において有効であり、スペック選定までの時間を大幅に短縮できるものであった。

またこれまでのピストンスラップの良し悪しの指標である感度を改善した仕様ではSN比が悪化するものもあることがわかった。これは通常の評価モードでは効果があるが運転条件、部品寸法が変わると狙いの効果が得られない仕

様もあるということを示している。

今回の評価方法を選定する上で“b:ピストンを押し下げる力”とピストンスラップではエネルギーのオーダーが大きく違うことから、式(1)において、エネルギーのオーダーが微小である“d:その他の抵抗成分”を評価指標として取り上げることにより、ピストンスラップを機能のばらつきとして評価することができるようになり、ピストンスラップについては机上評価方法を確立することができたと考えている。

また、今回はピストンの“燃焼荷重をピストンピンを押し下げる力に変換する”という機能そのものを評価しており、ピストンスラップ以外の抵抗損失や信頼性も向上しているものと考えられる。

今後はそれらが実現できているかを検証し、ピストンのパラメータ設計手法として仕上げていくことが課題である。

4. おわりに

“仮説・構想 試作 実験検証”の1サイクルでピストン開発を完了させることは長年の課題であり、マツダR&Dでは“物を作って評価”を“CAEで評価”に置き換えることで実現しようと考えている。そのためには高い精度でかつばらつきを含めて性能や寿命等の品質特性を予測することが課題である。しかし現状では計算精度は相対比較の上では十分な精度を確保できるレベルになっているが、“ばらつき”に対しては実際に機能する方法論が見出せていないのが現状である。

今回実施した品質工学のパラメータ設計では、“ばらつき”はお客様の使用条件下での“機能のばらつき”という捉え方をしており、お客様の使用条件を誤差因子として与えることで“ばらつき”を評価しようとしている。更にその“ばらつき”がお客様の使用条件下で再現するか否かも

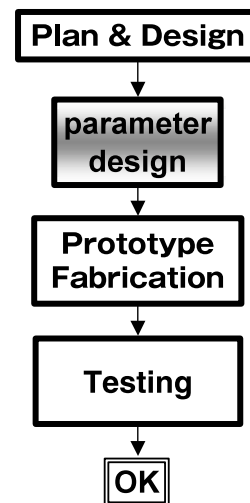


Fig.13 Improved Development Cycle

確認実験で検証することができる。このようなやり方で何故うまくいくかの理論は品質工学の専門書に譲るが、極めて自然な考え方であり、今回の取組でも有効であることが実証できたと考えている⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。

以上を取り込んだプロセスをFig.13に示す。ピストンスラップについては、これがうまく機能したが、今後はピストンスラップ以外の性能も含めたパラメータ設計の手法を確立していきたいと考えている。

参考文献

- (1) 田口ほか：ベーシックオフライン品質工学，日本規格協会（2007）
- (2) 長谷部：ベーシックタグチメソッド，日本能率協会マネジメントセンター（2005）
- (3) 長谷部：技術にも品質がある，日本規格協会（2008）
- (4) 矢野：やさしいタグチメソッドの考え方，日刊工業新聞社（2003）
- (5) 矢野：品質工学計算法入門，日本規格協会（1998）

著者



須藤康博



村中宏彰



小泉昌弘



山内智博



古野貴久



来住南和雄