

船外機の音開発プロセスの MBD 化 MBD of the Sound Development Process for Outboard Motors

原 和宏 高橋 徹 佐野 一樹

Abstract

The sound of an outboard motor is an important factor that helps to define comfort. In recent years, the demand for comfort has increased due to the more output and radiated sound due to the installation of multiple units, as well as changes in the user base and how they are used. In addition, the time span for introducing new models is becoming shorter, and therefore the company must try to realize higher marketability over shorter time periods. In order to meet these demands, we applied a new method using “Model Based Development” (MBD) to outboard motor sound development, and through this, we have looked into whether product development with a higher level of competitiveness could be realized over a shorter period of time.

1 はじめに

船外機の音は快適性を決める重要な要素である。近年、高出力化や複数機搭載による放射音の増加、そしてユーザー層や使われ方の変化により、快適性への要求が高まっている。また、新規モデル投入のスパンも短くなっており、短期間で高い商品性を実現しなくてはならない。

こういった要求を実現するために、我々は『モデルベース開発』(MBD: Model Based Development)を用いた新たな手法を船外機の音開発に適用し、短期間で高い競争力を持った商品開発が実現できないか検討を行った。本稿では、その取り組み内容を実際の結果も交えて紹介する。

2 MBD 化の背景と狙い

2-1. 現行プロセスとその課題

船外機では、V プロセスへ仕事のやり方を移行してきた。V プロセスとは顧客要求から製品目標、ユニット、コンポーネントそれぞれへの開発目標の設定を段階的に詳細化し、それを開発フェーズごとに検証していくプロセスである(図1)。船外機開発においてもこのV プロセスを適用し、後工程での手戻りリスク低減を目指してきたが、課題として機能ごとの個別最適による他機能との不整合の解消、そして仕様設定までの開発期間短縮の必要があった。現在の船外機は高い耐久性や信頼性を満足した上で、高出力化、軽量化を実現し、そして静粛性や意匠性などの背反する複数の機能を全体最適で実現することが求められている。このため、1つの機能をしっかりと作り込めば良いわけではなく、トータルの商品性として顧客要求を満たす製品が必要となる。また、市場での商品競争力強化のために開発スピードが求められており、開発生産性向上による期間短縮は急務である。

これらの課題を解決するために、我々は従来のモノベースからモデルベースに開発プロセスを変革することで課題解決を試みた。

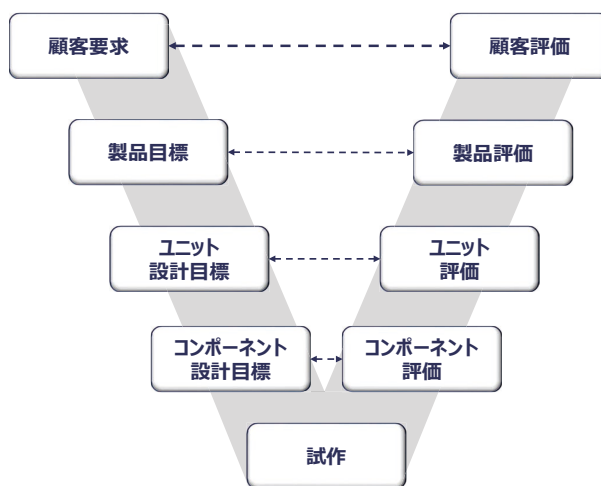


図1 Vプロセスの概要図

2-2. 音開発プロセスの MBD 化

一般的に MBD とはコンピューター上で再現した「モデル」を活用することで、部品試作やテストにかかる時間およびコストを減らそうとする開発手法である^[1]。

一方で、我々は MBD を以下のように捉えている。モデルを広義に捉えており、いわゆるシミュレーションモデルだけでなく、要求や機能を図や表にしたツリーやブロック図などの抽象化したものから統計値や実験値をつかって数学的な形として表現したものもモデルと定義している。従来の V プロセスの各開発フェーズの検証に見合うモデルを作成し、フェーズごとに成立性を検証した目標値を割り付けることを MBD 化としている。

モデルを使うことで、試作の必要がなくなることで、目標未達の際の手戻りを最小限に抑えられることから、期間短縮を行う

ことができる。また、各フェーズに見合ったモデルを使用することで、目標成立性を担保して、全体最適が可能なコンポーネントレベルまで詳細化することができる。そのため、各機能との最適な特性値を見出すことができ、個別最適ではなく全体最適による製品開発を可能とする。

2-3. 新プロセス試行の対象機

今回の新プロセスを適用する製品として「F425A」^[2] を選択した(図2)。「F425A」は当社のフラッグシップモデルであり、市場からの期待も高く複数の機能で高い商品性が求められる。そのため MBD を適用してさらなる商品競争力向上の検討に適すると考えた。



図2 「F425A」

「F425A」の主要諸元を表1に示す。

表1 主要諸元

エンジン形式	4ストロークV型8気筒 DOHC
総排気量	5,559cm ³
ボア×ストローク	96mm ×96mm
圧縮比	12.2
最大出力	312.6kW(425ps)/5,500rpm
燃料供給装置	電子制御筒内燃料直接噴射
推奨燃料	無鉛プレミアムガソリン
ギヤ比	1.79(25/14)

※仕向地:国内仕様

3 目標値設定

3-1. 目標値の設定方法

お客さまの要求、期待を満足する船外機を実現するためには、顧客要求からコンポーネント設計目標まで各特性の因果関係を明確化し、開発階層ごとに目標値を割り付ける必要がある。そこで各開発階層において適切なモデルを使って、各特性の関係と目標値の成立性を検証した。

3-2. 顧客要求の定義

市場調査の結果から、移動時に会話ができないことや船外機の騒音に長時間さらされることがマイナス要因であると分かった。市場ではエンジン回転数4,000rpm-5,000rpmのクルージング速度域の使用頻度が高い。このエンジン回転領域はスピードと燃費が最良となることから、使用頻度が高く、重要視される。この領域の静粛性を向上させることで顧客要求を満たせると考えた。そこで、我々は顧客要求を静粛性の向上とし、「クルージング領域で「F425A」に対して違いの分かる静けさの実現」を要求レベルとして定義した。

3-3. 製品目標の設定

顧客要求から製品目標へ根拠ある目標値設定を行うために、ベンチマーク結果から算出した統計モデルを活用した。航走時のキャビン内の音圧レベルをエンジン出力で整理したグラフを図3に示す。市場で静粛性が高いと評価されている船外機とそうでない船外機の近似曲線を算出し、その差分を比較すると約3dBAの違いがある。そこで、目標とする音圧レベルの低減量は「F425A」に対して「3dBA以上」とし、製品目標は「POT(Partial Open Throttle)=5,000rpmの船外機放射音が「F425A」に対して3dBA以上低減できていること」とした(図4)。

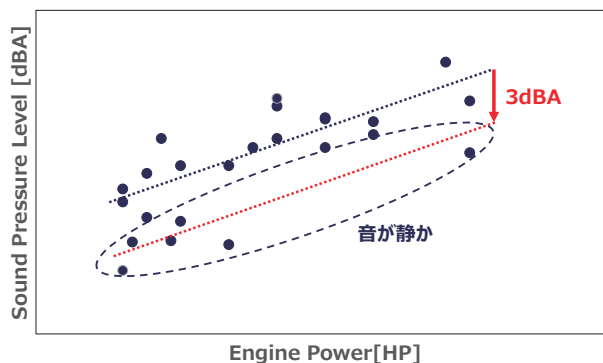


図3 航走時の音のベンチマーク結果

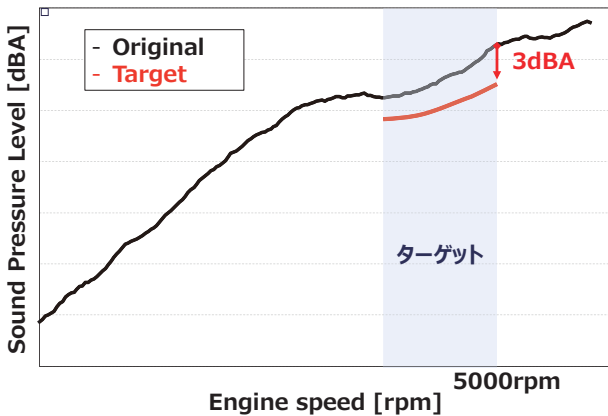


図4 製品目標

3-4. ユニットの設計目標設定

製品目標を達成するユニット目標を設定するために、各ユニットの音圧への寄与度から着目すべきユニットの特定と各ユニットへの設計目標の割付けを行った。図5に「F425A」の部品寄与と調査結果を示す。部品寄与調査の結果、吸気吸入口から放出される吐出音（以下、吸気音）の寄与が非常に高いことが判明した。そこで、設計検討すべき対象を吸気音に絞込んだ。次に、根拠を持って吸気音の低減目標を定めるために、全体音に対する吸気音の比率を定量化し、製品目標である3dBAの低減に必要な吸気音の低減量を65%と算出した（図5 赤字部分）。

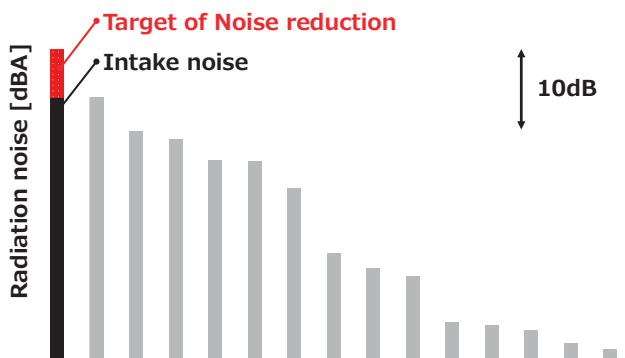


図5 部品寄与と調査結果と吸気音の目標設定

3-5. コンポーネントの設計目標設定

吸気音は吸気バルブ開閉時の圧力変動が吸気管内に伝播することで発生する脈動音と、空気が通過する際に発生する気流音がある。事前調査の結果、対象機においては気流音の影響は微小であることが判明しており、対象現象を脈動音に絞った。脈動音は、加振源と伝達特性の掛け算で表される。加振源の改善はエンジン出力性能への影響が大きいため、伝達特性で改善することとした。伝達特性は吸気管内の共鳴系の指標と

なる「音響伝達特性」を代用特性値として設定し、音響伝達特性の低減目標は吸気音の低減目標と同じ65%とした。

4 仕様検討

4-1. 部品の特性値の目標を満たす仕様の検討

4-1-1. 仕様検討の進め方

吸気音の低減目標達成のために、代用特性値を計算するモデルを活用し、目標成立性の検証を実施した。その際、背反影響を予め明確にすることで全体最適で仕様検討を行った。

音響伝達特性は、吸気管の径や長さ、容積や断面積比により決定する特性値であるが、スロットルボディより下流側の形状変更は出力性能および製造課題への影響が大きく、スロットルボディより上流側で対応することとした（図6）。

減音量と減音帯域および出力性能への影響の観点から拡張室形サイレンサをスロットルボディ上流に設置することを基本構造として検討することとした。

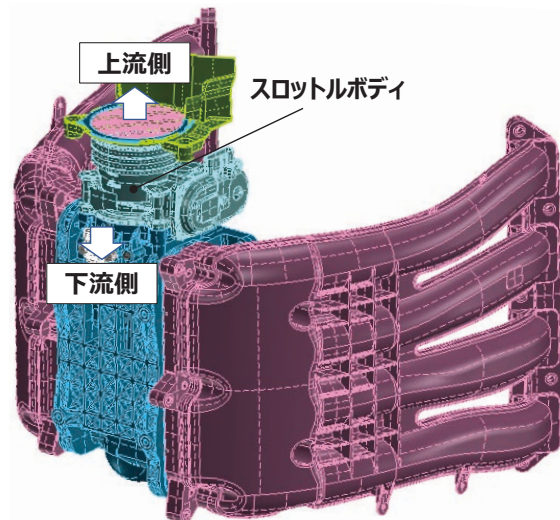


図6 「F425A」の吸気システム

4-1-2. 制約条件の設定

拡張室形サイレンサの背反影響として、圧力損失の増加による出力性能の低下がある。そこで、出力性能についても、音と同様に目標成立性を検討し、1%以下の出力低下を目標として設定した。また、出力性能に対する圧力損失の影響度をモデルによって算出し、出力性能を評価する代用特性値として圧力損失の目標値を設定し、制約条件とした。

製品として搭載可能な形状で検討を進めるため、サイレンサの外観寸法についても制約条件を付与して検討を実施した。

4-1-3. 検証モデルの概要

検証に用いたモデルを図7に示す。モデル化範囲は吸気ポート、インテークマニホールド、ミキシングチャンバ、スロットルボディ、ファンネルとし、各 부품の内部形状で構成される空間を3D-有限要素法 (Finite Element Method: FEM) でモデル化した。音響伝達特性は開口端補正端部の入力点とバルブ中心部の応答点の音圧比から式(1)を用いて計算した。拡張室形サイレンサの効果検証は図7のモデルの吸気口先端にサイレンサを設置して検討を行った。

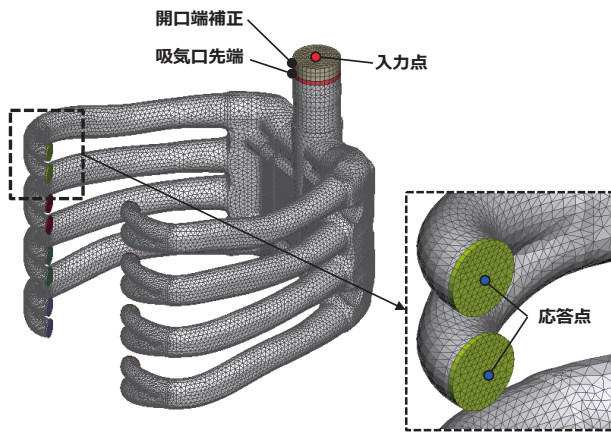


図7 検証モデル

$$\text{音響伝達特性} \left(\frac{1}{D} \right) = 20 \times \log_{10} \frac{\text{入力点 [Pa]}}{\text{応答点 [Pa]}} \quad (1)$$

4-1-4. 代用特性値への寄与度調査

拡張室形サイレンサの消音性能として感度が高いパラメータを特定するために、簡易モデルを用いてパラメータスタディを実施した(図8)。使用したパラメータを表2に、簡易モデルのみの音響解析結果の一例を図9に示す。図9の Type1 と Type2 は拡張室端面からの吐出口の位置の違いによる音響伝達特性を示している。この結果から、吐出口の位置(La)によって減音帯域が変化することを示しており、吐出口の位置(La)が短いと低周波側、長いと高周波側で減音帯域が発生する。これは、拡張室内で発生する定在波の節の位置が吐出口の位置(La)と重なるためである。パラメータスタディの結果から、吐出口の位置(La)は減音帯域に、吐出口と拡張室の断面積比(S₂/S₁)は減音量に感度が高いパラメータであることを特定し、音低減目標を達成するための吸気系部品の要件を設定した。

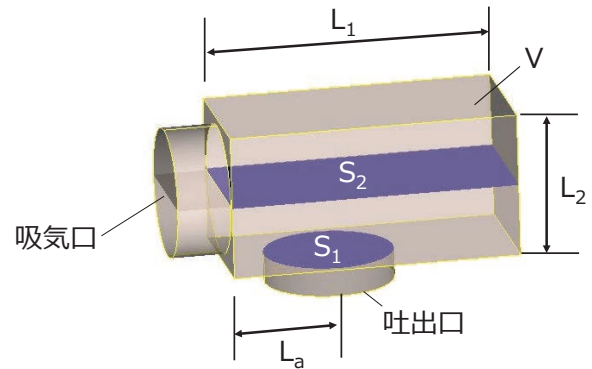


図8 拡張室形サイレンサの簡易モデル

表2 パラメータ

No	パラメータ	単位	記号
1	断面積比	—	S ₂ /S ₁
2	拡張室の縦横比	—	L ₁ /L ₂
3	拡張室の高さ	mm	L ₂
4	拡張室の長さ	mm	L ₁
5	拡張室の容積	mm ³	V
6	吐出口の位置	mm	La

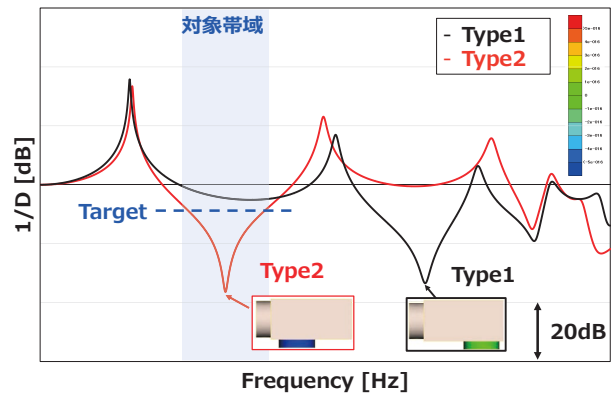


図9 簡易モデルの音響伝達特性

4-1-5. 製品形状検討

次に、他機能との両立と制約条件を考慮し、製品形状での目標成立性を検証した。4-1-2で定めた制約条件にレイアウトと製造要件を織り込み、4-1-4で明らかにした成立要件を基に拡張室形サイレンサの製品形状の検討を実施した。図10に製品形状の音響伝達特性を示す。パラメータスタディによって定めた音要件を適用することで、制約条件のある製品形状でも目標を満たす仕様を実現できた。

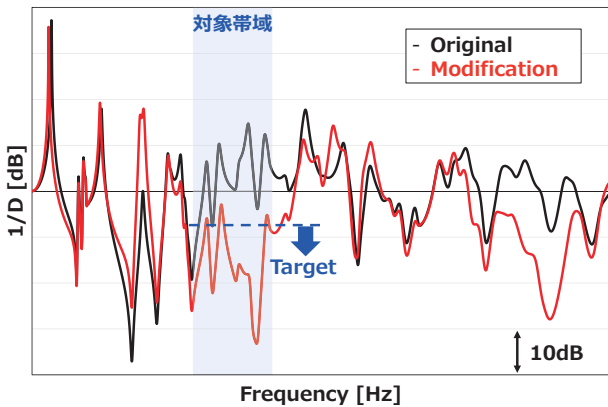


図10 製品形状の音響伝達特性

5 効果検証

5-1. 台上試験

モデルによる改善効果を検証するために、台上試験での効果検証を実施した。台上試験の様子を図11に、試験結果を図12に示す。図10の結果と同様に、サイレンサ設置により対象帯域で目標を満たしており、モデルで検証した代用特性値を実現できていることが確認できた。

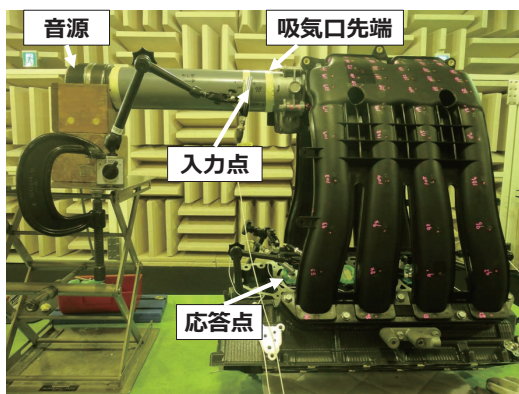


図11 台上試験の様子 (Original)

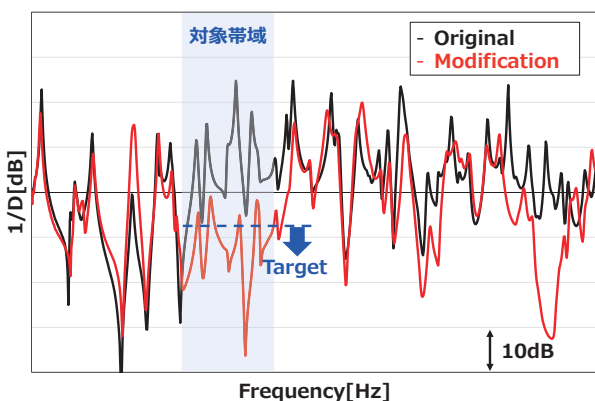


図12 台上試験の結果

5-2. 航走試験

音の商品性評価として航走試験による音圧評価を実施した。実際にお客さまが体感する音に近い音で評価するために、乗船席にダミーヘッドマイクロホンを設置した(図13)。

航走時のキャビン内の騒音分析結果を図14に示す。サイレンサ設置により、目標としていた POT=5,000rpm で3dBA以上の騒音低減が実現できた。また、関係者で乗船席の音の主観評価試験を実施した結果、ほとんどの被験者が「F425A」に対して静粛性で明確な違いを実感できたと回答した。この結果から、最初に掲げた顧客要求レベルである「違いの分かる静けさ」を実現できていることを証明した。



図13 航走試験の様子

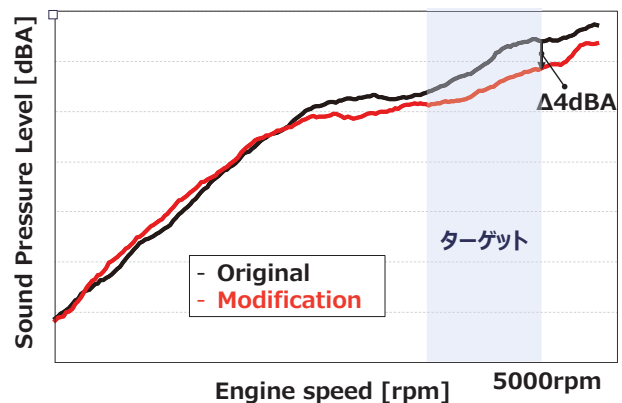


図14 航走時の騒音結果

5-3. 背反機能評価結果

サイレンサ設置による出力性能への影響は実機での評価から目標としていた1%以内を満足することを確認した。また、レイアウト確認の結果から干渉等はなく設計規定および製造要件を満たすことが確認できている。

6 おわりに

船外機の音開発を MBD 化することで、顧客要求を満たす音低減を短期間で実現できることが示せた。また、出力性能、レイアウトという全体最適化を実現できることも確認ができた。今回は出力性能とレイアウトという2つの機能に絞って音との成立性を検討したが、軽量化や意匠性など複数の機能に対しても機能間の繋がりを明確にし、モデルを使って最適化を行うことで対応できると考えている。

今後、船外機に求められる機能は高度化、多様化し、構造や制御システムは複雑化していく一方で、開発期間の短縮も実現していかななくてはならない。こういった環境変化の中で「お客さまの期待を超える価値」を実現していくためには、MBD は有効であり今後もこの取り組みを進めていく所存である。

■参考文献

[1] MBD 推進センター「MBD(モデルベース開発 *1) 推進センターが発足～モノづくりの輪を広げ、日本の自動車産業の発展に貢献～」P4 2021年 <https://www.jambe.jp/uploads/20210924a.pdf>

[2] 小久保幸栄、他 ヤマハ発動機技報第54号「船外機「F/FL425A」の開発」P56-59 2018年

■著者



原 和宏
Kazuhiro Hara
マリン事業本部
開発統括部
機能開発部



高橋 徹
Toru Takahashi
マリン事業本部
開発統括部
機能開発部



佐野 一樹
Kazuki Sano
ヤマハモーターエンジニアリング㈱
ボディ開発部