

船外機エンジンから船体へ伝わる振動の低減手法 Reduction of Transmitted Vibration from Outboard Motor to Hull

精密工学専攻 50号 三ツ橋 一茂
Kazushige Mitsuhashi

1. はじめに

船外機のエンジンはコンパクトで高出力2ストロークガソリンエンジンが主流であったが、排ガスに含まれるオイルによる水質汚濁や炭化水素の排出が多いことから、排ガスのよりきれいな4ストロークガソリンエンジンへ変化しつつある。この変遷に伴い、排気ガスの清浄化と燃費が大幅に改善され、エンジン音も静かになったが、重量、コスト増加が発生してしまった。重量が増えてしまうと搭載可能な船体が制限されてしまったため、軽量化を行うことで重量あたりの出力の向上、搭載可能な船体の増加等を目指している。

しかし、軽量化することと剛性の確保はトレードオフの関係にあり、適切な場所に最小限の変更を施す必要がある。

船外機の防振は上下に設置されているラバースタンプで行われている。ラバースタンプには防振以外にも懸架、操舵、推進力の伝達に関する機能を有しており、それらの機能を高い水準で満たす必要がある。そのため、ラバースタンプの構造変更は最小限にする必要がある。ラバースタンプ構造変更にはスタンプの体積そのものを大きくする、スタンプに穴を開ける方法などがある。

変更するラバースタンプの決定には伝達経路解析を用いる。伝達経路解析は自動車などの構造物においてどのように振動が伝達されるかを調べる手法である。

しかし、船外機においては実稼動時にはエンジンだけでなくプロペラからの影響を考えなければならないため、それぞれの入力毎の影響を考慮しなければならない。

本研究では実際に使用されているスタンプを使用したモデル、実機モデルに対して複数の入力を行い、スタンプの構造変更による振動の低減の手法について提案する。

2. 伝達経路解析について

伝達経路解析は評価点の応答 y_k は各経路の寄与の合計で表せるという考えの元以下の式(1)で表せる。

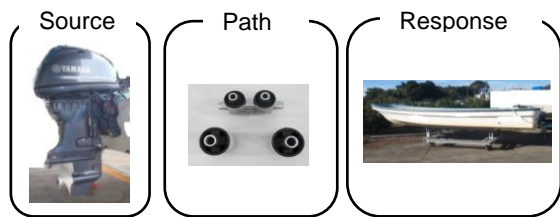


Fig. 1 TPA concept

$$y_k = \sum_{i=1}^n NTF_{ki} \times F_i \quad (1)$$

ここで NTF_{ki} は各経路とターゲットとの間の周波数応答関数(以下 FRF)であり、 F_i は各経路を介して伝達される加振力である。 F_i を求めるには逆行列法を用いる。この方法は実稼動時の経路の加速度 a^{op} と各経路間の FRF である H を使用して以下の式(2)で表せる。

$$F^{op} = H^+ a^{op} \quad (2)$$

ここで $+$ は擬似逆行列であり、経路以外の点を用いて F_i の同定精度を向上させることもできるが本研究では経路点での加速度のみを使用している。

Fig. 2 のように複数点の入力がある場合では入力同士の相関の有無によって式(1)を適用する際の前処理が異なる。入力同士の相関のある場合は式(3)において F_{in1} が決まる場合自動的に F_{in2} も決まるため接続点加速度 a_{Mn} の値も自動的に決まるのに対し、相関性が無い場合はそうはならない。

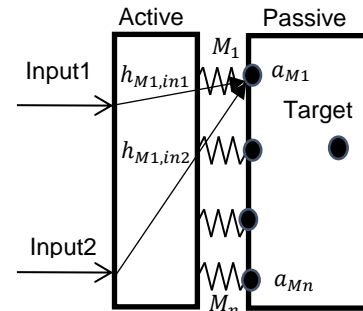


Fig. 2 Multi input model

$$a_{Mn} = FRF_{Mn,in1} \times F_{in1} + FRF_{Mn,in2} \times F_{in2} \quad (3)$$

相関性の有無は入力点での加速度または力 X を使用したオートパワーマトリックスを特異値分解に基づく主成分分析を用いることで求められ以下の式で表せる。

$$[XX^*]_{n \times n} = [U]_{n \times n} [\Sigma]_{n \times n} [V]^*_{n \times n} \quad (4)$$

ここで n は入力の数、 $*$ は共役複素数を表しており、 Σ は主成分行列、 U 、 V は(4)式を満たすユニタリ行列である。 Σ の対角成分 σ_j の大きさの比で判断する。本研究では2点での入力を考えているため Σ の対角成分は2つであり、小さいほうが5%以下のとき相関性が高いと判断し、それ以上のときは相関性が低いと考える。

相関性が高い場合、一方の入力は他方の入力と関係性があるので位相を考慮して式(1)の結果を足し合わせる。相関性が無い場合、主成分分析により相関性のある組に分けて組ごとに式(1)を適用し、エネルギーで足し合わせる。式で表すと以下ようになる。

$$[YX^*] = [YX^*][U] \quad (5)$$

$$Y'_{ij} = \frac{Y_i X_j^*}{\sqrt{\sigma_j}} \quad (6)$$

ここで Y は測定点での応答スペクトラム、 Y'_{ij} は分解後の第 j 番目主成分、 i 番目のスペクトラムとなる。本研究では船外機からの入力はエンジン側とプロペラ側の2種類が考えられるので複数の入力点があると仮定して検証していく。

3. 簡易モデル実験

3.1 マウント単体実験

簡易モデルでの実験に先立ち、実機モデルで使用されているマウント単体での特性を把握する。

マウントはFig. 3に示すように2点で拘束した状態で力を加え、入力点に取り付けたインピーダンスヘッドにより測定する力と加速度に加え、固定部に取り付けた三軸加速度計を使用してマウントのゴム部の相対変位を測定している。測定した加速度と力を式(7)に代入することで計算したマウントの剛性値をFig. 4に示す。マウントの剛性値は太枠線の値の平均から算出する。

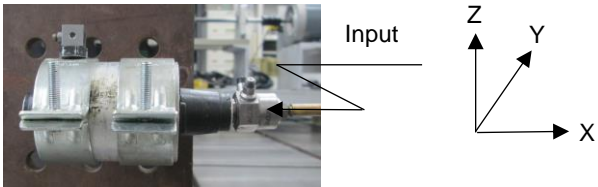


Fig. 3 Experiment set up (lower mount X direction)

$$k(\omega) = \frac{F(\omega)}{x(\omega)} = -\frac{\omega^2 F(\omega)}{\ddot{x}(\omega)} = \frac{\omega^2}{FRF(\omega)} \quad (7)$$

k : 剛性値 F : 力 x : 変位 ω : 角周波数

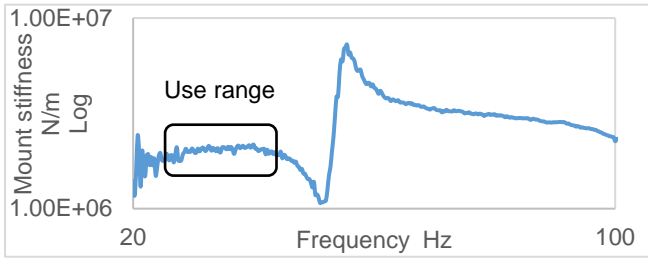


Fig. 4 Mount stiffness (vs. frequency)

3.2 簡易モデル実験

複数点での入力がある場合の例として実際のマウントを使用したモデルで実験を行う。実験のセットアップは Fig. 5 に示すとおりである。手前のブロックがアクティブであり、奥の板がパッシブ側である。アクティブとパッシブはマウントを介してボルトで接続されている。入力はお互いに無相関なランダム波とし、50 回平均で入力する。入力はロードセルで各マウント接続点とターゲット点での応答は加速度計で測定する。入力波形と 2 つの入力から作成したパワーマトリックスを前章の式(4)を用いて主成分分析した結果を Fig. 6 に示す。第二主成分の値は第一主成分の値の 25% 程度と大きい値をとっていることから 2 つの入力は無相関であるということがわかる。

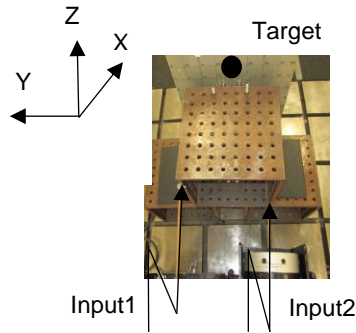


Fig. 5 Experiment set up

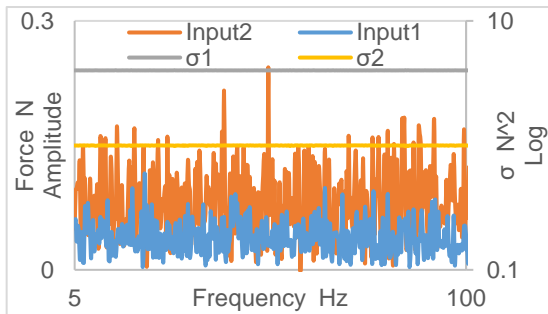


Fig. 6 Input force

Fig. 6 に示した入力に対する応答を前章の式(5), (6)に適用し、相関性のある組ごとに分解した場合と適用せずに TPA を行った結果を比較したものが Fig. 7 となる。Fig. 7 を見ると式(5), (6)に適用していない場合は応答波形が平均化によって 0 に収束していくため非常に小さい値になってしまうことから相関性が無い場合は式(5), (6)を使用しなければならないことがわかる。

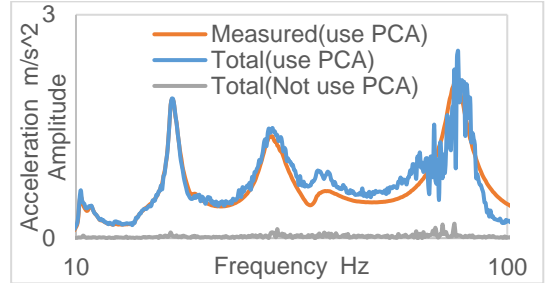


Fig. 7 TPA Result

4. 構造変更

4.1 マウント構造変更

ラバーマウントはスグリと呼ばれる穴が開いており、それによって剛性の方向付けが成されている。そのため、スグリ同士の成す角を変更することで方向性を変更する。

Fig. 8 に FEM での解析で使用するモデルを示す。外側カバーと内側のボルトを通す穴はアルミでその間の部分がゴムとしている。ゴムの物性値は同形状のラバーマウント単体実験で求めた剛性値を表現することができる値とする。マウントの剛性値は X 軸方向については外側の、Y, Z 軸方向については内側のアルミ部分を固定し、固定していないほうに 1N の分布荷重を加え、その変位と荷重からフックの法則を用いて算出する。解析上でスグリ同士の成す角を変更することでマウントに方向性を持たせることができ、ことを確認したので実際に変更したマウントで剛性の変化を求める。マウント剛性値の測定方法は前章で述べたとおりである。変更前後のマウントでの実測値の比較を Fig. 9 に示す。

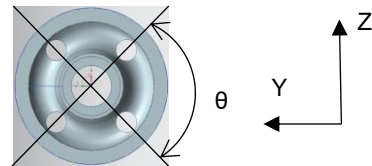


Fig. 8 Analysis model

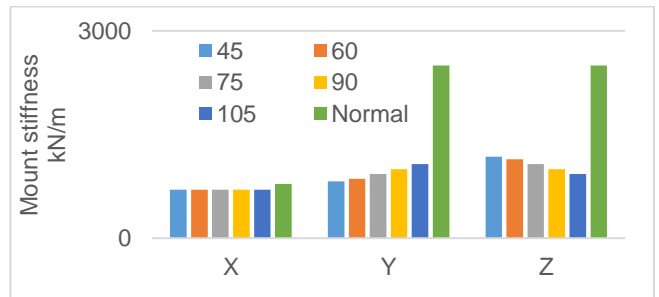


Fig. 9 Stiffness change due to angle (lower mount)

4.2 モデル変更

スグリを変更することで剛性が変更することが確認することができたので簡易モデルのマウントを変更して確認する。まず、解析によって最適なマウントの決定を行う。解析モデルは対象とするモデルにおいてマウント以外は変形が

1点入力を行った際のTPA結果をFig. 14にスペクトラム線図で、Fig. 15にカラーバーで示す。2点入力を行った際のTPA結果をFig. 16にカラーバーで示す。Y軸回転モードを除いた、Z方向並進とX方向並進モードは精度よく求められており、Y軸回転モードの応答は小さいため、残りの2つのモードに着目する。2点入力の結果から入力2の寄与が大きことがわかる。このことから、入力2のみを入力した1点入力の結果を使用しマウントを決定しても問題ないと判断できる。そのため1点入力時に寄与の大きいローアマウントを変更することで振動低減を図っていく。

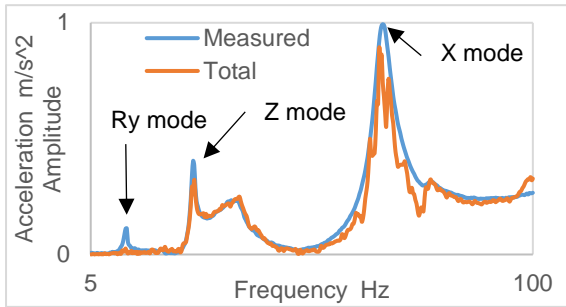


Fig. 14 Response by TPA result (single input)

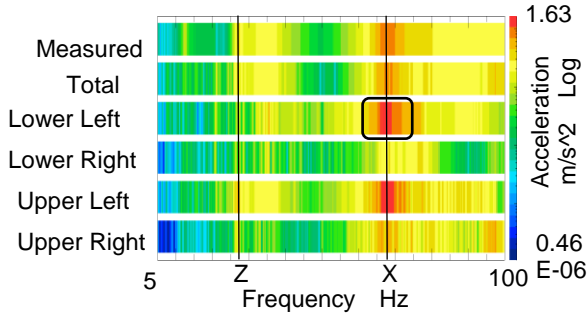


Fig. 15 TPA result (single input)

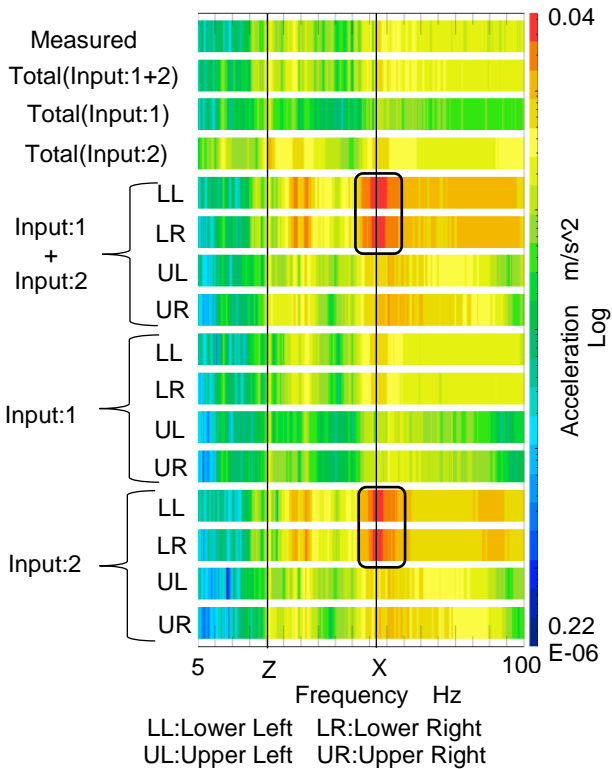


Fig. 16 TPA result (multi input)

変更するマウントの種類は前章と同様にスグリ間の角度を変更した5種類である。変更するマウントの種類には前章と同様に剛体とばねを組み合わせたモデルを使用する。しかし、システム全体系において今回対象としているX方向並進モードの周波数である57Hzまでにおいて船体側が弾性運動するモードが存在するため船体側は船外機が接続されている板のみを剛体とし、船体部分はばねとして表す。船体側の質量行列と剛性行列は船体単体で測定したモードベクトルと前項の式(8), (9), (10)を用いることで求められ、船外機単体での質量行列の算出は全体系のモードベクトルから求めた船体と船外機も相対的なベクトルを使用する。

これらを使用して解析した結果をTable2の解析値に示す。最も適当であるのは105°、適当でないのは45°であることがわかる。そのため、その2つに加えて初期状態でのスグリ間の角度と同じである90°の3種類についてローアマウントを変更した際の1点入力と同条件下で測定した入力とターゲット間のFRFを比較したものがTable2の実験値である。解析と似た傾向を持っており、狙い通り振動低減を行えていることが確認できる。

Table 2 The result of change lower mount

mode	Analysis [degree]			Experiment [degree]		
	45	90	105	45	90	105
Z	0.725	0.669	0.663	0.097	0.099	0.089
X	0.220	0.209	0.204	0.049	0.047	0.040

[(m/s²)/N]

6. 研究成果

- (1) 複数の入力のある伝達経路解析においてそれぞれのマウントの寄与を入力毎に分離できた。
- (2) 船外機を剛体と定義した解析モデルにおいてマウント剛性値を変更することで、ターゲットとする周波数応答を改善できることを確認した。
- (3) 半径方向のみの剛性変更によっても効果的な剛性のバランスを設定することで振動低減を行えることを確認した。

参考文献

- (1) 大久保信行, “機械のモーダル・アナリシス”, 中央大学出版部, (1982).
- (2) 大久保信行, “伝達経路解析の基礎から応用”, エルエムエスジャパン株式会社, (2012).
- (3) 大熊政明 他, “実験的特性行列同定法による船外機のモデル化”, 日本機械学会, Dynamics & Design Conference 2006, “240-1”-“240-4”, (2006).
- (4) 岡田毅 他, “実験モード解析を用いた大型船外機のエンジンマウント剛性値測定方法”, 日本機械学, Dynamics & Design Conference 2006, “239-1”-“239-6”, (2006).