

株式会社名村造船所

Design Explorer を用いた 船舶の煙突に対する振動補強の最適化

一三 浩史*
Hifumi Koji



船舶では主機とプロペラが主な起振源となっており、その起振源と船体構造が共振しないように固有値解析を用いて防振設計することが一般的である。

共振が懸念される場合、船体構造の固有値を大きくするための補強を検討するが、補強コストを抑えつつ効果を最大化した最良の補強案を見出すことは容易ではなく、補強案を検討しその効果を確認して次の補強案を検討する繰り返しが必要なことから、相当な設計工数を要していた。

本稿では、HyperWorks の設計探索および最適化のツールである Design Explorer により、船舶の煙突の固有振動数の上昇に対して効果的な振動補強の検討を実験計画法にて探索し、その結果を用いた振動補強の最適化を行うことで、従来の設計工数から 78%の工数削減を行いつつ、補強重量を 36%削減した事例を紹介する。なお、本稿は ATC Japan 2023 (2023 年 8 月) で発表した内容である。

1. 緒言

船舶には主機やプロペラといった起振源があり、それらの起振力によって様々な構造物が振動させられるが、その構造物の固有振動数が起振源の起振周波数と一致した場合、共振が発生し、構造物に大きな振動が発生することになる。構造物が起振源と共振した場合、その構造物が疲労破壊するリスクや居住性の低下につながるため、起振源と共振しないように防振設計を行うことが基本となる。

起振源の起振周波数域(以下、共振域)に対象構造の固有振動数が入らないようにする(以下、共振回避)には、第1図に示す通り、対象構造の有限要素モデル(以下、FE モデル)を作成し、固有振動数の推定と評価をして、共振回避を達成する最終的な構造を決定することになるが、推定値が共振域に存在する場合、船体構造に振動補強を行って再評価を実施するため、補強・計算・評価のループが必要となる。この補強案の検討には、ループの完了時間が読めないことに

よるスケジュール管理の難しさやループ時間に比例した工数悪化、粗雑な補強案による重量の増加などが生じ、改善が求められている。



第1図 従来の防振設計フロー

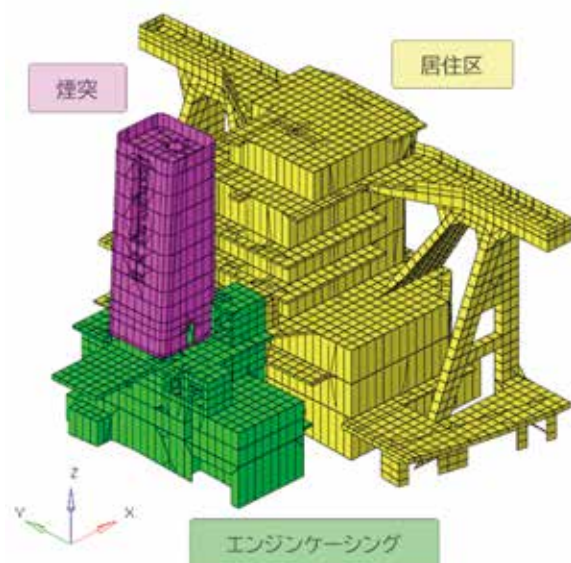
原稿受理日：July 31, 2024

*株式会社名村造船所 船舶海洋事業部 設計本部 基本設計部 船殻設計課

これらを解決するための手段として、振動解析に使用している解析ソフトウェアの HyperWorks の提供元であるアルテアエンジニアリング株式会社¹⁾より、ループ処理を自動化し、その中で最適な補強を提案する機能が搭載されている Design Explorer (以下、DE) の紹介を受け、具体的な活用を検討した。

本稿では、防振設計に対して DE を活用した場合に、従来の設計と比較して、どの程度作業時間と重量を削減できたかについて報告する。

本稿では、DE を用いた防振設計の対象として、検討が比較的簡便な煙突とエンジンケーシングを選定した。(第 2 図参照)



第 2 図 検討対象イメージ図

2. Design Explore の機能紹介

DE は HyperWorks の Ver. 2021 以降から標準搭載されているツールであり、設計探索の一種である実験計画法 (Design of Experience) や最適化 (Optimization) , AI による設計変数と出力応答の関係の予測を実行可能となっている。

2. 1 実験計画法とは

実験計画法は計画的・効率的に計算することで、入力の変化に対する応答への影響を調査する統計学的手法のことを意味しており、本稿の検討では、防振に効果のある変数を絞り込むために実施している。

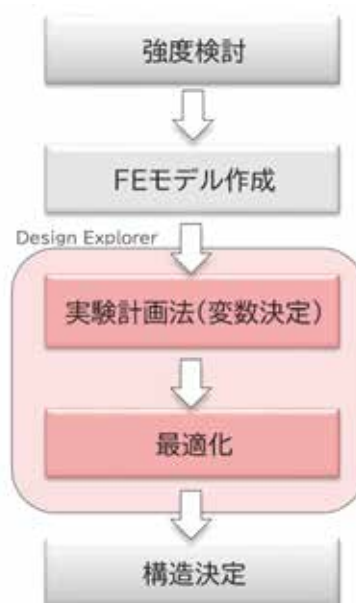
2. 2 最適化とは

当社でも既に取り組んでいた事例がある²⁾が、最適化は制約条件を満足させながら、目的関数の最小/最大を求める

ことを意味しており、本稿の検討では、十分に高い固有振動数を有した上で最も軽量の構造を求めるために実施している。

2. 3 DE を組み込んだ防振設計フロー

第 1 図に示した赤枠のループ計算の箇所に対して DE を組み込むことで、ループ計算を自動化し、振動補強を最適化する防振設計フローを考案した (第 3 図参照)。

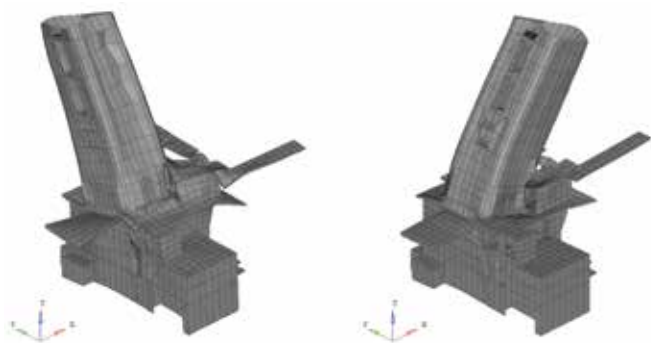


第 3 図 DE を組み込んだ防振設計フロー

防振設計フローに DE を組み込むことで、ループ計算に要する時間の予測が可能となり、スケジュールの策定が容易になる。また、検討作業の自動化によってループ時間が均一化され、作業工数の安定が図られる。さらに、補強案の最適化を通じて重量の削減が期待される。

3. 実験計画法

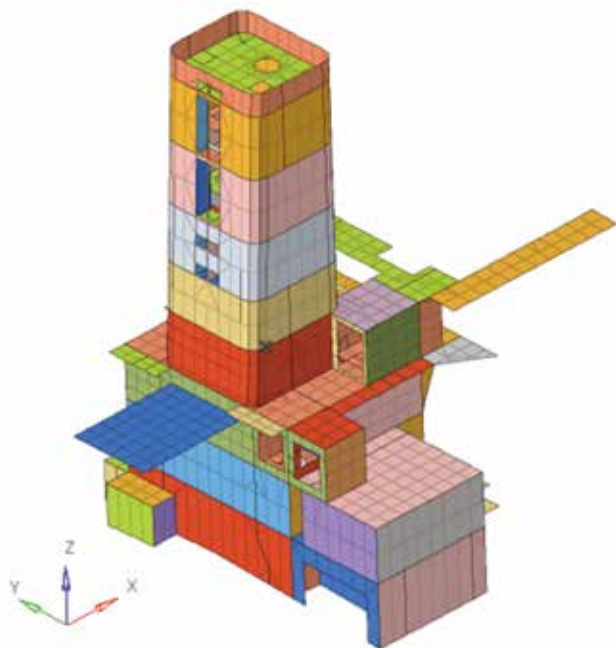
実験計画法を実施するには、対象となる構造のどんな状態に対して、何のパラメータを変数とするのかを決定する必要がある。今回の場合は、煙突の左右振動と前後振動の固有振動数に対して、煙突及びエンジンケーシングの板部材の板厚を変数とすることで、板厚が煙突の固有振動数に与える影響を調査した。検討対象となる煙突の固有振動モードを第 4 図に示す。



第4図 煙突の固有振動モード
(左：左右振動 / 右：前後振動)

3. 1 設計変数

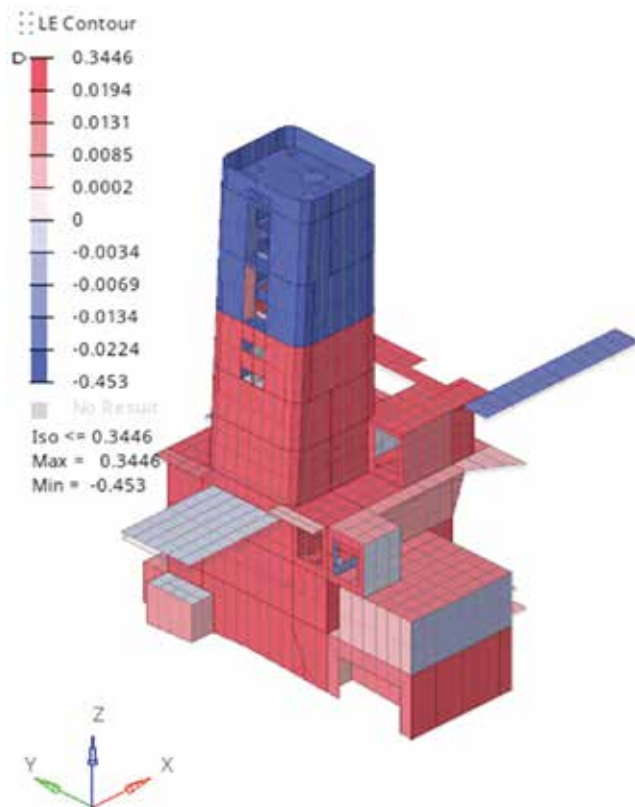
実験計画法においては FE モデルでの板厚分割を細かくする程, 滑らかに板厚を変更可能なため重量削減に効果があるが, 実験計画法を行う時間は大きく増加してしまうため, ある程度板厚分割を細かくしつつ, 今までの実績から明らかに煙突の固有振動数に影響が無い又は少ない箇所は設計変数からは外している. 第5図に板厚分割(色が変わる箇所毎に板厚を変更可能)と設計変数として考えている構造を示す.



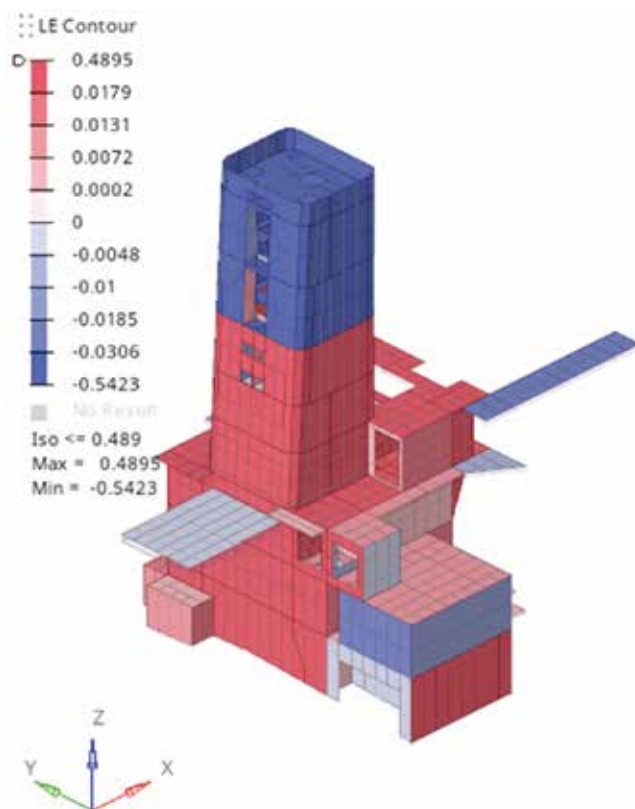
第5図 対象構造と板厚分割

3. 2 実験計画法の結果

実験計画法を実施した結果を第6図と第7図に示す. コンターの色は赤が濃い程板厚を増加させることで対象の固有振動数が上昇し, 青が濃い程板厚を減少させることで対象の固有振動数が上昇することを示している.



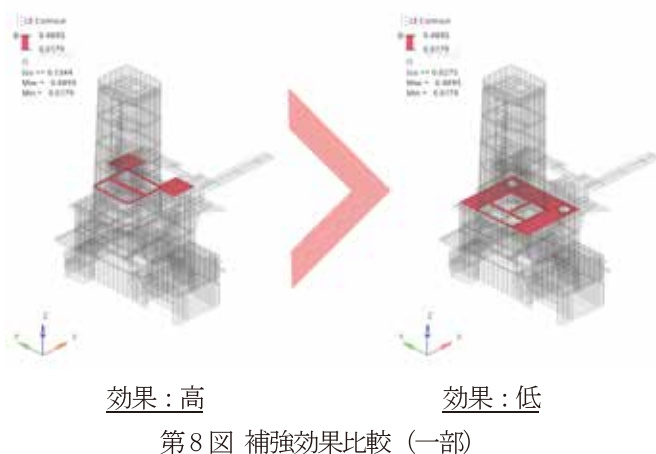
第6図 煙突左右振動の固有振動数に対する影響度



第7図 煙突前後振動の固有振動数に対する影響度

第6図と第7図の結果から、煙突の固有振動数を上昇させるには、一般的な片持ち梁の傾向と同じように、上部の板厚を減少させ、基部の板厚を上昇させることの効果が高いことを確認できた。

実験計画法を実施したことで、第8図に示すように、エンジンケーシングの頂板の板厚を上昇させるよりも煙突の内部のデッキやそれに連結する板部材の板厚を上昇させる方が効果的である、などの新たな知見を得ることができた。



第8図 補強効果比較 (一部)

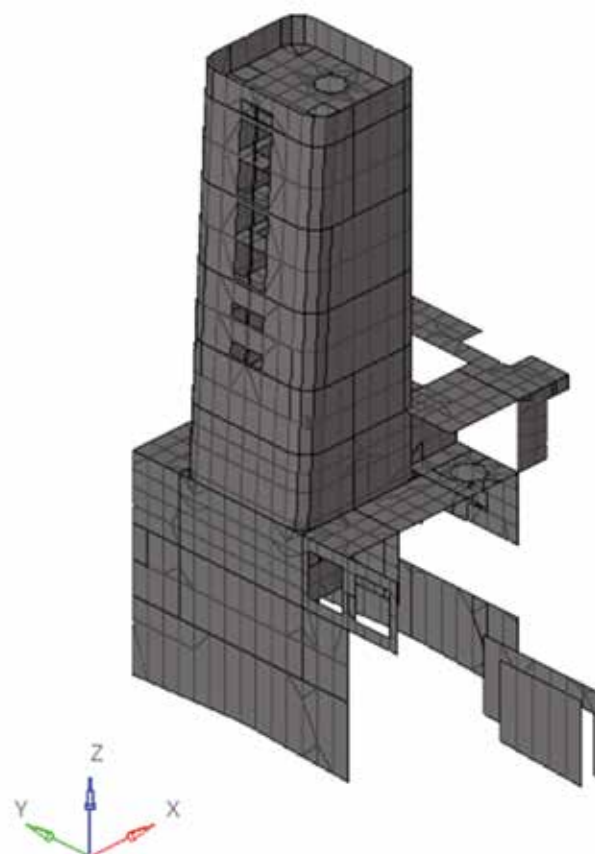
4. 最適化

実験計画法により、煙突の固有振動数に各板厚が与える影響を確認できたので、その結果を用いて煙突構造を最適化する。

4. 1 設計変数の削減

最適化は実験計画法を実施せずとも実行可能だが、設計変数が多いと最適化に要する計算時間が指数関数的に膨大になり、また最適化の精度も減少するため、実験計画法の結果から、最適化を実行する際の設計変数を絞った。今までの当社の知見から、実験計画法での影響度の絶対値が0.03を超えているものを最適化の設計変数とした。第9図に設計変数として板厚を変更する構造を示す。

今回のケースでは0.03という値を閾値にしたが、設計変数の数や影響度の分布によって、閾値は適切に設定する必要がある。



第9図 最適化による板厚変更を行う構造

4. 2 制約条件

共振回避を目的とし、実際に検討対象の煙突を搭載する船の共振回避の条件を流用して、煙突左右振動と煙突前後振動の固有振動数が8.62Hz以上となるように設定した。

4. 3 目的関数

振動補強の重量が最小になるように, モデル全体の重量が最小になるように設定した.

4. 4 設計変数範囲

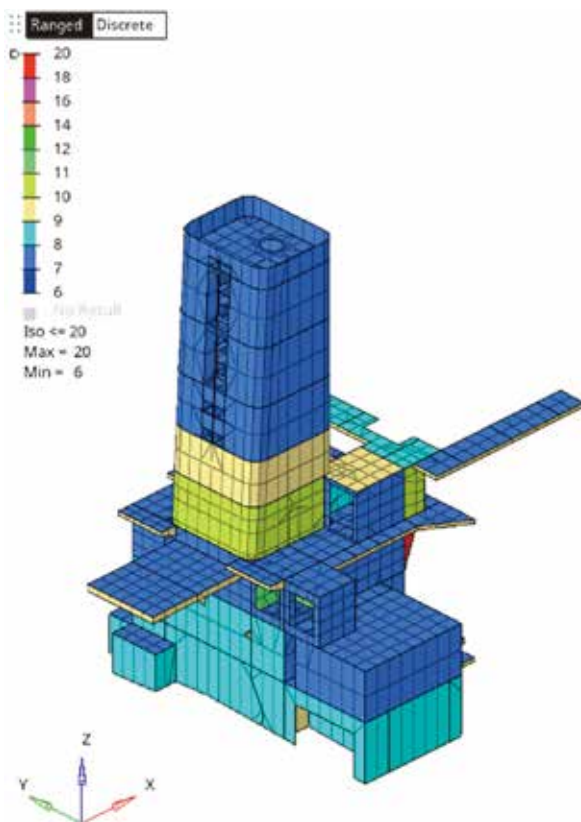
板厚は強度検討で求めた値を最小値として、0.5mm 刻みで40mm まで増厚することを許容するように設定した。

4. 5 最適化結果

DE を組み込む前の人の手で補強を検討していた設計フロー（以下、手動）によって検討した場合の板厚分布を第10図に、DEによる最適化を実施した場合の板厚分布を第11図に示す。



第10図 手動による板厚分布



第11図 DEによる最適化を実施した板厚分布

手動による検討と DE を用いた検討で固有振動数にどのような差が出たのかについて、手動で検討した場合の補強重量を 100%とし、DE による最適化を行った補強重量が何%だったのかを第1表に示し、作業時間の比較を第2表に示す。ただし、第2表の作業時間には解析時間は含まれていない。参考に DE の解析時間を第3表に示す。

第1表 固有振動数とモデル重量比較

	煙突左右 固有振動数 (Hz)	煙突前後 固有振動数 (Hz)	補強重量 割合 (%)
手動	8.64	9.99	100
DE	8.62	9.86	64
比較	-0.2 %	-1.3 %	-36

第2表 作業時間の比較

手動	DE	削減時間	削減割合
136 h	30 h	106 h	78% 減

第3表 DE の解析時間

	実験計画法	最適化
変数の数	109	33
ケース数	7000	2000
解析時間	80 h	24 h

DE を用いた設計フローを適用することで、煙突の固有振動数を最適化し、振動補強重量を手動での作業と比較して 36%削減することができた。また、振動補強を決定するまでの作業時間も 78%削減することができた。

DE の解析時間は合計 104h 発生しているが、解析時間中は作業者の時間を拘束しているわけではなく、あくまで PC が解析に使用した時間であるため参考値としている。例えば、夜間や休日に解析を行うことで PC のリソースを無駄なく使用できる。

5. 今後の課題

今回は煙突への適用を行ったが、他の構造にも同様の手法で問題なく適用可能か調査する必要がある。特に他の構

造も含めた大きなモデルに DE を適用すると、変数の数が多くなるため解析時間が膨大となり、当初の狙いよりメリットが減少する可能性があるため、どのように DE を実設計に適用していくのかは喫緊の課題である。

また、今回は板厚の最適化を実施したが、形状変更も含めた解析を行うことができれば、もっと重量削減に寄与する解析を実行可能と思われる。

今回の検討からは少しずれるが、周波数応答解析の結果を用いた最適化を実施できれば、固有振動数だけではなく、振動応答の評価からも最適化をすることが可能になると思われる。上記の最適化を実用化できれば、共振回避を達成せずとも振動応答が十分小さいので、共振回避は不要という判断を自動で行うことも可能になるかもしれない。

6. 結言

煙突の固有振動モードを共振回避させるための検討に DE を適用することで、煙突の固有振動数に影響のある構造箇所の知見の再確認や、煙突内部の基部近傍のデッキやそれに連続する部材の板厚上昇が固有振動数の上昇に寄与しているなどの新たな知見の取得、78%の作業時間削減や36%の振動補強重量削減などの改善を実施できた。

また、DE の大きなメリットとして、直感的な GUI によって、作業者の解析スキルに依存せず、効果的な補強を考案することが可能なことが挙げられる。現状では実設計で広く浸透するまでには至っていないが、本稿での検討を通して DE の可能性を大いに感じさせられた。

謝辞

本稿執筆にあたり、日頃より多大なサポートを頂いておりますアルテアエンジニアリング株式会社関係者の皆様に深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) アルテアエンジニアリング株式会社ホームページ
<https://www.altair.jp.co.jp/>
- 2) 伊藤 一智, 日本貴 秀一, 山口 順平
: 名村テクニカルレビュー No. 26
波形隔壁の設計における最適化と機械学習の連携
株式会社名村造船所 2023 年 p. 22-27