

船舶居住区騒音を対象とした構造音響連成解析手法

加藤 國男* 大家 史** 松原 聖***

The method of assessment for noise levels on board ships by structure-acoustic interaction analysis

Kunio Kato*, Fumito Ohya** and Kiyoshi Matsubara***

国際海事機関（IMO）は、船員の保護のため 2014 年 7 月 1 日以降に契約する船舶および 2015 年 7 月 1 日以降に建造する船舶の居住区の騒音は客船の居室並みの騒音以下になるよう規制することを採決し公表した[1]。船舶の居住区の騒音は、機関室で発生した振動が船体構造を伝搬して居室壁を振動させ、それが音源となって居室の騒音となるという伝搬が主な伝搬経路である。本稿では、従来実施されてきた SEA 法よりも精度良く予測できる可能性のある手法を提案する。本手法は、構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR[2]で音源を求め、音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise[3]で音響伝搬を求める構造音響解析（一方向の連成解析）に基づいた手法である。

Key word: 音響解析、構造解析、一方向連成解析、船舶居住区、騒音、マッピング

1. はじめに

環境騒音の問題については、いくつもの分野で非常に重要になってきている。例えば、道路からの騒音・走行する列車からの騒音・航空機に起因する騒音や、集合住宅における近隣からの騒音・屋外から戸建てへの騒音等である。いずれの問題も、音源を発した音が空気中および構造物を複雑に伝播し、観測点に達するという現象である。

これらの問題では、音の伝播経路は非常に複雑であり、音の発生には多くの要因が関連する。例えば、機器を壁等に固定する場合のボルトの締め付け具合でも騒音のレベルが異なってくる。従って、音響シミュレーションに先立ち、エンジニアリング的な考察から、支配的な音源および音の伝搬経路（主として、空気中伝播と構造物中伝播の相互関連）を考察しておくことが必須である。

*アドバンスソフト株式会社 総合企画部
General Planning Division, AdvanceSoft Corporation

**アドバンスソフト株式会社 第 1 事業部
1st Computational Science and Engineering
Group, AdvanceSoft Corporation

***アドバンスソフト株式会社 代表取締役社長
President, AdvanceSoft Corporation

2014 年 7 月に IMO (国際海事機関) [1]により、新たに建造される船舶に対して居住区の騒音が制限されるよう規約が改正された。本稿ではこの改正への対応を目的とした騒音をシミュレーションで予測する手法を提案する。まず、「対象となる船舶の居住区の騒音は機関室で発生した振動が船体構造を伝搬して居室壁を振動させそれが音源となって居室の騒音となる」が主な伝搬経路である、という前提条件を設定する。その前提のもと、本手法により騒音レベルを定量的に求めることができ騒音レベルに対する各種の要因の寄与率を定量的に求めることができる。

従来では、騒音解析には SEA 法が主に利用され、SEA 法はこれまでの騒音評価には十分な実績を上げてきた。しかし、SEA 法では、振動および音のエネルギーの減衰のみを考慮するため、位相の情報を利用することができなかった。さらに今後は、より高い精度、より複雑な形状に対する騒音問題が問題になってくると考えられる。そこで、本稿では、複雑形状に適用の可能性のあり高精度の結果を得ることのできる有限要素法を用いた手法を提案する。本手法は、構造解析ソフトウェ

アで音源を求め、音響解析ソフトウェアで居室内の空気中の音響伝搬を求める構造音響解析（一方向の連成解析）に基づいた手法である。本稿ではこの手法と計算事例について述べる。

2. 解析方法

機関室を振動源として、その振動が船舶の構造を伝搬して居住区の壁に伝わる。ここでは、船舶の構造については音が伝搬する可能性のある部材をすべてモデル化する必要があり、本事例では主要な構造をシェル要素でモデル化することを行った。次に、居住区の壁の振動が居住区の音源となり、その音波が空气中を伝搬し居住区内で観測される騒音となる。居住区では、適切な位置に観測点を配置した。

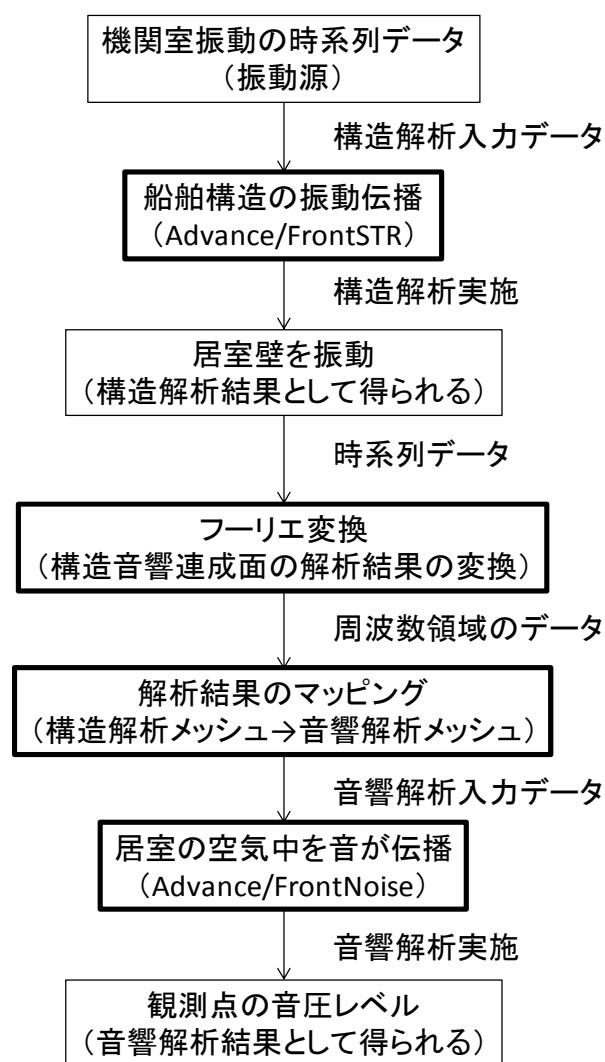


図 1 船舶騒音の構造音響連成による解析

この伝播経路以外にも、実際の居住区では隣室の騒音が居室壁を通して伝播することや、ドアの窓等を通して居室外の騒音等が居室内に伝搬することも考えられる。しかし、主な伝搬経路は船体構造を伝播した振動に起因する騒音と考えられるため、本手法ではこの前提条件とした伝搬経路をモデル化し、構造解析と音響解析の一方向連成解析を利用して解析を実施した。

有限要素法を利用することで、従来よりも精度の高い予測を行うことができる可能性がある。一方、従来の SEA 法と比較して有限要素法を用いて解析するデメリットとしては、1 日程度の処理時間がかかることがあげれる。しかし、この処理時間については、近年のハードウェアの進歩により解決される可能性は高い。また、ここで利用したソフトウェアは、最新のハードウェア（大規模並列計算用のハードウェア）のアーキテクチャに合わせた設計[2][3]となっている。このことから処理時間の課題は解決できると考えている。

3. 解析した事例

3.1. 解析形状と音源

ここでは、実際の船舶を模擬し、考慮すべき要素を適切に設定した諸源を利用した仮想的なモデルを用いて条件設定を行った。解析に利用した船体は、長さ 30m、幅 3m、深さ 5m である。また、その上に配置された居住区は、長さ 3m、幅 3m、高さ 2m とした。具体的には、前図のように船舶を模擬した形状を利用した。このモデルにおいて、船舶前方の機関室を音源として、その振動が船体の構造を伝播し、居住区の壁での振動すなわち音源となり、居室の騒音を発生させる。

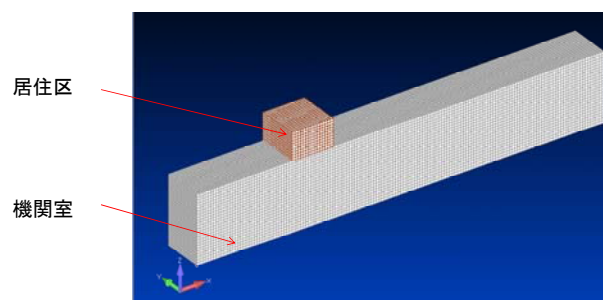


図 2 解析形状

対象とする船舶機関室におけるメインエンジンの回転数を 1800r.p.m. (30Hz) と仮定し、振動は、 $30\text{Hz} \times n$ (n は整数) で騒音が発生すると仮定して、本計算では $n=1,10$ の周波数でピークを持たせる。すなわち、音源は

$$q(t) = \sum_{j=1,10} \sin(60\pi j t) \quad (1)$$

とする。これを音源として構造解析の時系列解析機能で振動の伝搬を解く。ここでは、騒音の上限周波数を 1kHz までを解析対象とした。また、上限周波数 1kHz に対して、10Hz 毎に音響解析をするという問題設定にした。最終的には、1/3 オクターブバンドの結果としてまとめた。

3.2. 構造解析の条件設定

3.2.1. 解析時間

音響解析の周波数間隔 10Hz までのフーリエ変換による周波数分析の結果を得るためには、構造解析の解析時間は 0.1 秒が必要となる (周波数間隔 10Hz の逆数だけの解析時間)。構造解析で求めるべき状態は準定常状態 (周期的な振動としての定常状態) であり、その解析結果が 0.1 秒必要である。従って、その状態に達するまでの十分に長い時間の解析として、構造解析では 0.0 秒から 1.0 秒までの 1 秒間の解析を行う。実際には、その 1.0 秒間の 0.9 秒から 1.0 秒の結果をフーリエ変換する。1 秒で準定常状態になるという根拠は、船の大きさを音波が 10 往復するくらいの時間ということで設定した。これが正しいことは、解析後に解析結果からも判断可能である。

3.2.2. タイムステップ

一方、1kHz までの振動をフーリエ変換で求めるためには、1 つの波にデータが 10 点程度あることが必要である。1 つの波の大きさは、1kHz の逆数、すなわち 1msec である。従って、時系列データとして 0.1msec 毎のデータが必要である。従って、構造解析はタイムステップを 0.1sec として 1.0sec の解析を実行するために、構造解析は 1 万ステップを実行した。

3.2.3. メッシュサイズ

船舶構造物の構造解析におけるタイムステップは前節で述べたように $1e-4\text{sec}$ である。一方、金属中の音速は 5000m/sec である。これをもとに構造解析のメッシュサイズを決める。そのサイズは、1 ステップに音波が進む長さ程度が限度であるためメッシュサイズは $1e-4 \times 5e3 = 0.5\text{m}$ が限度となる。ここでは比較的安全側に考え、メッシュサイズを 0.2m 程度に設定した。このサイズのメッシュ分割を利用すれば、ここで設定した船舶をシェル要素でメッシュ分割した場合には節点数は数万程度で解析可能となる。ここで利用する構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR を利用すれば、並列計算機ではなく通常の PC を利用しても解析が可能なメッシュサイズである。

3.3. 音響解析の条件設定

空気中の音速から求めた 1kHz の波長は 30cm 程度である。音響解析においては、ひとつの波長に対して 10 点程度の節点で十分な精度が得られる。従って、1kHz までの居室内の音響解析を実施する上で、必要なメッシュサイズは 3cm 程度とした。ここで、解析対象とする居室の大きさを $3\text{m} \times 3\text{m} \times 3\text{m}$ 程度と考えると、音響メッシュは 100 万節点程度となる。これは、ここで利用する音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise では十分に解析可能なサイズである。また、1kHz までの周波数を 10Hz 毎に計算を行うため、100 周波数の解析が必要である。100 万節点、100 周波数の解析は、現在の並列計算機上で本ソフトウェアを利用すれば、十分に計算できる規模となる。

3.4. 解析条件

ここで述べた構造解析と音響解析に必要な条件をまとめ、これらを満たすように全体の解析条件を設定する。

- ① 構造解析では、メッシュサイズは $\Delta x = 0.2\text{m}$ のシェルを利用し 1 万節点程度となる。また、タイムステップは $\Delta t = 1.0e-4\text{sec}$ で、1 万ステップの解析を行う。解析の結果については、音響解析で利用する 0.9 秒から 1.0 秒の居室

壁面での結果（壁面節点における変位の時系列結果）を毎ステップファイルに保存する。

- ② フーリエ変換：ファイルに出力された 0.9 秒から 1.0 秒の 1000 ステップの結果に対して、節点毎にフーリエ変換をする。ここでは、解析対象とした 1kHz までについて、構造解析の居室壁面での全節点における 10Hz 毎のスペクトルを得ることができる。
- ③ マッピング：構造解析の居室壁面での全節点におけるフーリエ変換の結果を、音響メッシュの居室壁面に（相当する要素の面に）貼り付ける。ここで実施するマッピングでは、空間的な補間を行っている。
- ④ 音響解析：居室における音響解析のメッシュサイズは $\Delta x=0.03\text{m}$ 程度とし、規模は 100 万節点程度となる。また周波数については 10 ～1kHz までの 100 ステップについて解析を実施する。

これらの条件に基づいて解析を実施した。その手順と結果について 4 節以下に示す。

3.5. 計算機環境

本解析では、特に断らない限り、下記の計算機環境を利用した。

表 1 使用計算機の仕様

項目	内容
CPU	Intel Xeon X5660 2.80GHz
ノード構成	10 ノード×12 コア
メモリ	96GB／ノード
スワップ	96GB／ノード
キャッシュ	12MB／ノード

4. 構造解析 Advance/FrontSTR

4.1. 解析条件

構造解析の解析時間は 0.0～1.0 秒とし、タイムステップは 0.1msec とした。従って、ここでは、10000 ステップの解析を行った。また、物性については、船体構造に対してヤング率、ポアソン比、密度を与えた。音源となる機関室に対しては、機関台分の節点 22 点に対して荷重 500N を与えた。また、境界条件として船体下部 4 点を固定してい

る。構造減衰についてはレーリー減衰で適切なパラメータを与え、考慮するケースと考慮しないケースを実施した。

表 2 構造解析条件

項目		内容
解析時間		0.0～1.0 秒
タイムステップ		0.1msec
解析ステップ数		10,000 ステップ
物性	ヤング率	210.0e+3 N/mm**2
	ポアソン比	0.3
	密度	7.8e-9 g/mm**3
荷重		機関台分の 22 点に対して集中荷重 500 N
拘束境界条件		船体下部 4 点
減衰	α	10.0
	β	1.5e-5

4.2. 振動源

機関室の振動源を(1)式で与えた。この振動は具体的には下記に示すような振動となっている。解析においては、準定常状態が得られる解析時間の最後まで、この周期的な振動を与え続けるものとする。

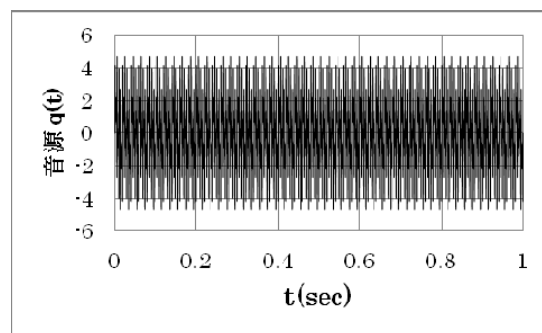


図 3 音源データ（全体図）

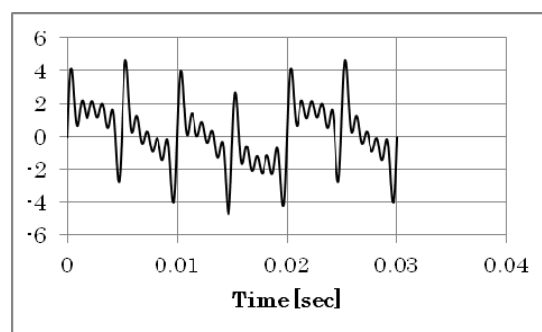


図 4 音源データ（拡大図）

4.3. メッシュ分割

先に示した船体形状を、1 次の四辺形シェル要素でメッシュ分割した。また、シェルの板厚は10mmとした。作成したメッシュは、節点数および要素数ともに数万程度のメッシュである。ほぼ、全体を均一にメッシュ分割を行った。

表 3 構造解析メッシュ

項目	内容
要素	四辺形一次シェル要素
節点数	13,884
要素数	13,950

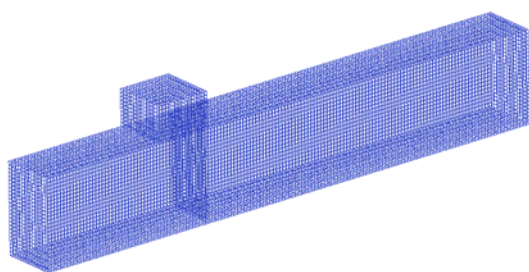


図 5 メッシュ図

4.4. 解析結果

構造解析では、減衰なしと減衰ありの2ケースの解析を実施した。減衰なしのケースの1.0秒の振動の変位コンタのスナップショットを示す。また、減衰ありの場合についても同様のスナップショットを示す。

また、それぞれのケースについて、居住区の床、天井、四面の壁に関する振動の時系列データをグラフに示す。減衰ありの結果と減衰なしの結果を

比較すると定性的には妥当な結果が得られていることが分かる。また、1.0秒の解析を実施することにより、ほぼ定常状態に達していることが分かる。また、実際にフーリエ変換および音響解析に利用する最後の0.1秒の時系列データについて示す。

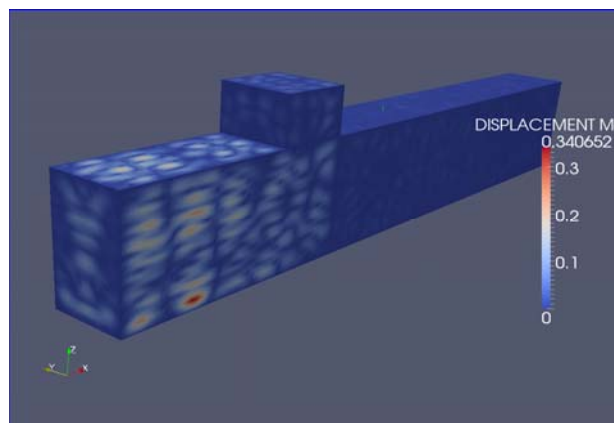


図 6 振動の変位コンタ（減衰なし、1sec）

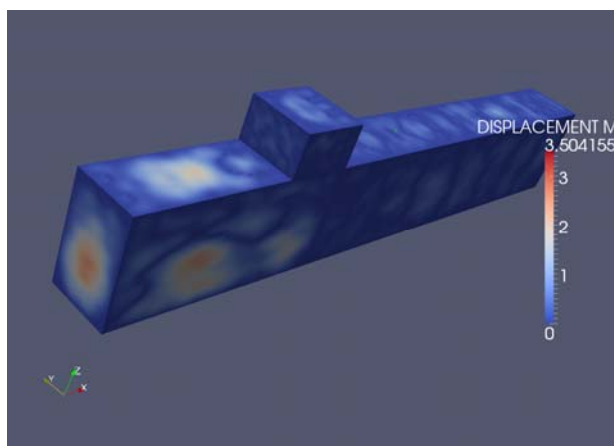


図 7 振動の変位コンタ（減衰あり、1sec）

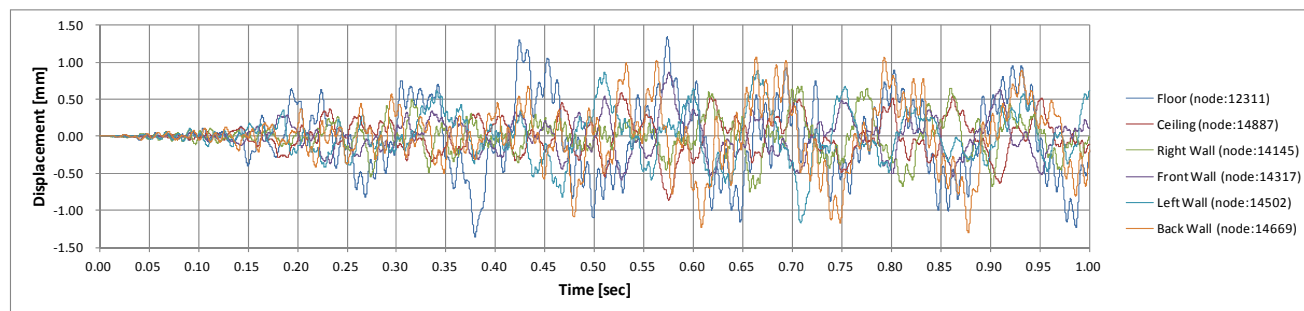


図 8 減衰なしの時系列結果（0.0～1.0秒）

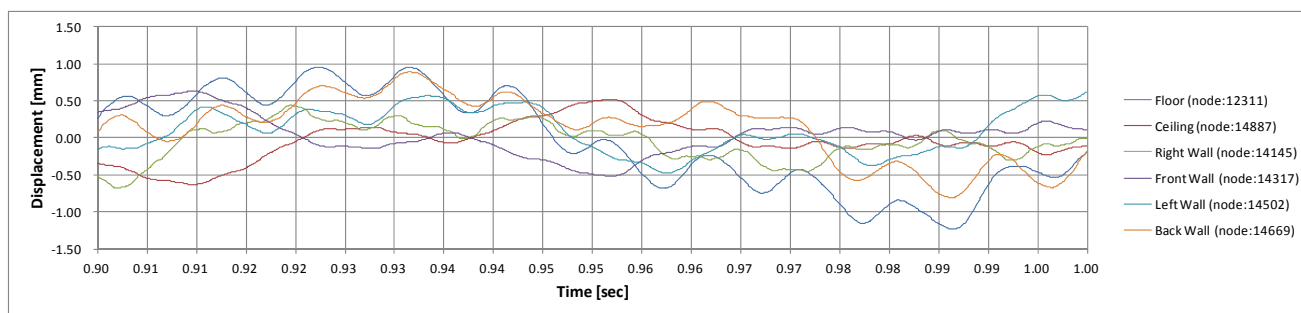


図 9 減衰なしの時系列結果 (0.9~1.0 秒)

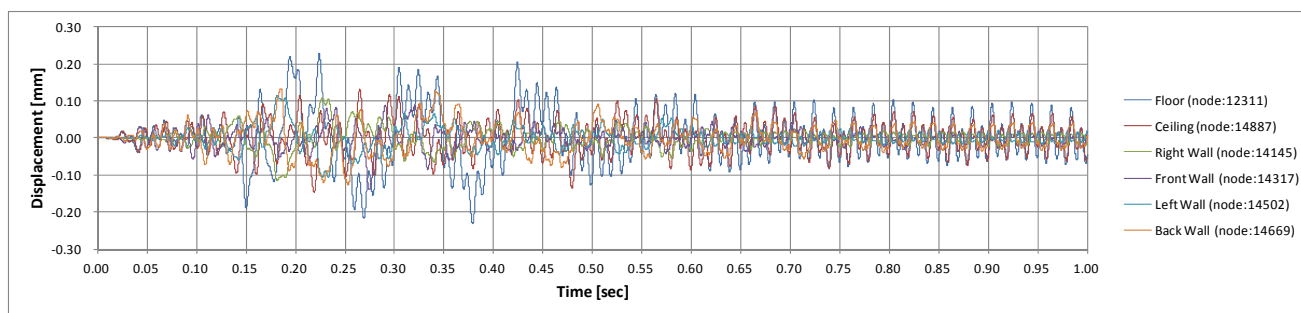


図 10 減衰ありの時系列結果 (0.0~1.0 秒)

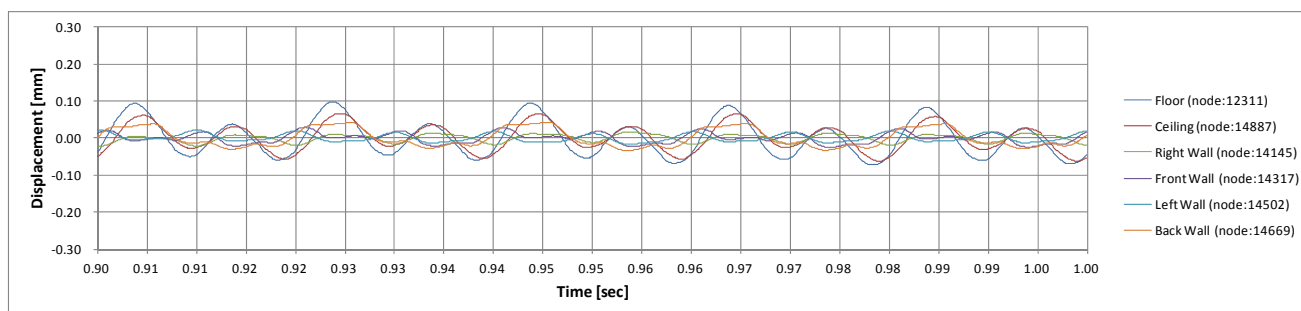


図 11 減衰ありの時系列結果 (0.9~1.0 秒)

5. フーリエ変換とマッピング

5.1. 概要

まず、構造音響連成面（居室壁面）の節点を対象として、構造解析の時系列結果をフーリエ変換する。フーリエ変換後に、構造解析から音響解析へのデータ変換では、マッピングへの入力として

- ・ 上流（構造解析）のメッシュデータ
- ・ 上流（構造解析）の結果ファイルのフーリエ変換結果

- ・ 下流（音響解析）のメッシュデータ

の3つを用意することが必要である。これらのデータに対して、処理結果として得られるのは

- ・ 下流（音響解析）の各節点における周波数領域の振動

である。

次に、フーリエ変換の結果を構造解析メッシュから音響解析メッシュにマッピングする。マッピングでは空間的な補間を行っている。音響解析では、マッピングで得られた連成面（居室壁面）における周波数領域の振動を音響解析の境界条件として利用する。音響解析では、境界条件として得られた変位の振動データを、速度の振動データに変換して、音響速度ポテンシャルの微分値を与える境界条件として利用する。すなわち、変位を $u_i(x)$ として

$$\alpha(x)\phi(x) + \beta(x)\frac{\partial\phi(x)}{\partial n} = f(x) \quad (2)$$

に対して、

$$\alpha(x)=0, \beta(x)=1, f(x)=-i\omega u_i(x) \quad (3)$$

として境界条件を与える。

5.2. フーリエ変換

構造解析から音響解析に渡すデータの最初の処理として、まず、構造解析の結果のフーリエ変換を行う。ここでは、構造解析から音響解析に渡す連成面でのすべての節点における時系列データのすべてをフーリエ変換する必要がある。すなわち、連成面に 1 万個の節点があれば、1 万回のフーリエ変換をする必要がある。それぞれのフーリエ変換では、1 万タイムステップの時系列データをフーリエ変換する。

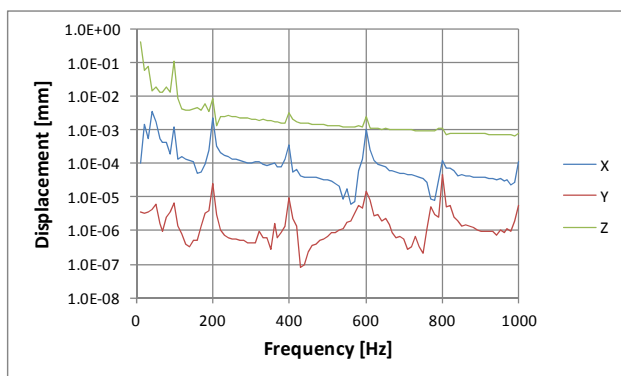


図 12 着目節点 3 方向変位のフーリエ変換結果

このような背景から Fourier 変換のツールには処理速度が要求される。本ツールでは、商用の FORTRAN intel compiler の MKL の Fourier 変換ライブラリ[4]を利用している。図 13 はその性能を計測した結果である。

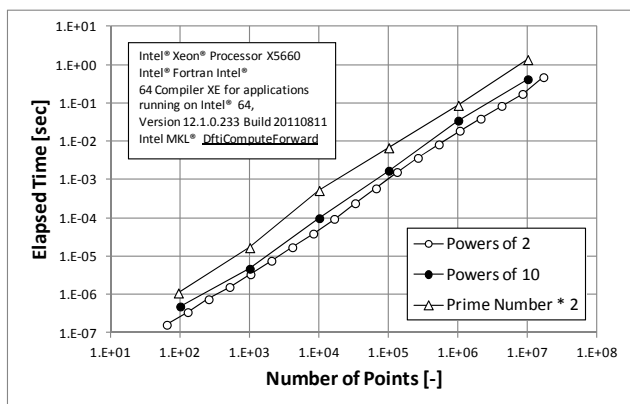


図 13 Fourier 変換の処理性能

横軸が時系列データの点数に相当し、縦軸がその 1 回の処理時間である。白丸は時系列データの

数が 2 の累乗の場合、黒丸のデータは時系列データの数が 10 の累乗の場合である。また、△は処理時間のワーストケースと考えられる素数個数の 2 倍のデータ列の場合である。例えば、下のグラフは、1 万点の時系列データを百万回処理すると、100 秒を要することを示している。ほぼ十分な処理速度と考えている。

5.3. マッピング処理

マッピングにおける上流メッシュは構造解析のメッシュであり、下流のメッシュは音響解析のメッシュである。この 2 つのメッシュファイルとともに、上流メッシュで定義された構造解析のフーリエ変換の結果がマッピングに対する入力となる。マッピング処理ではこの 3 つのデータをもとに、下流の音響メッシュにおける音源（居室壁面での境界条件）を計算し、音響解析の境界条件ファイルを出力する。

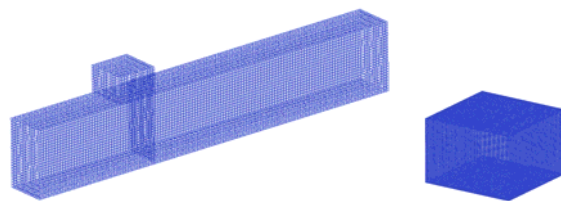


図 14 上流（左）と下流メッシュの拡大図（右）

5.4. マッピング結果

上流メッシュにおけるマッピングすべき構造解析の振動結果（マッピングに対する入力条件）および下流におけるマッピング結果（マッピングの出力の一部）を示す。ここでは、妥当な値にマッピングされていることが分かる。マッピングについては、構造解析の減衰なしと減衰ありの 2 ケースについて実施した。

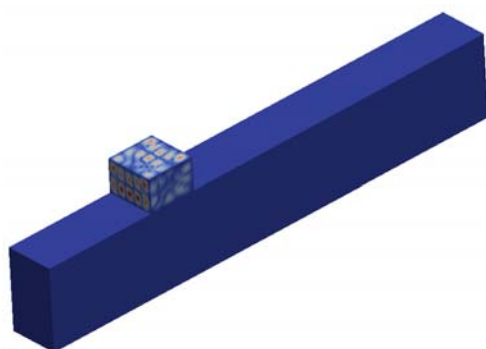


図 15 上流の計算結果
(マッピングすべきデータ)

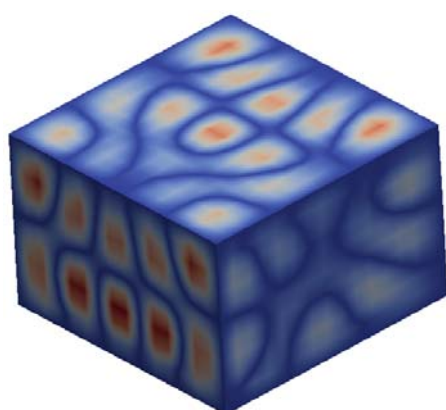


図 16 下流の計算結果
(マッピングされた結果)

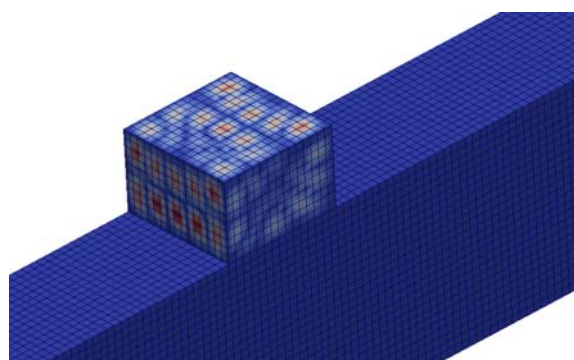


図 17 参考情報：上流のメッシュサイズ

6. 音響解析

6.1. 解析条件

マッピングで作成できた境界条件を利用して、下記に示す条件で音響解析を実施した。音響解析においては音の伝播する媒体の室温を仮定し、音速と密度を設定した。また、10Hz から上限周波数 1kHz までの周波数領域において 10Hz 毎に解

析を行った。音響解析については、構造解析の減衰なしと減衰ありの 2 ケースについて実施した。

表 4 音響解析条件

項目	内容
音速	346.0m/sec
密度	1.21kg/m ³
開始周波数	10Hz
上限周波数	1kHz
周波数間隔	10Hz

6.2. 音響メッシュ

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise は四面体ソルバーであり、メッシュは四面体一次要素で作成する。四面体メッシュを利用することで、複雑な形状にも対処可能となっている。ここでは、メッシュ幅を 3cm 程度とし、数十万節点および百万要素強の音響メッシュを作成した。この条件で、100 周波数の周波数領域の解析を行う場合には数時間で解析結果を得ることができる。ここで、計算機環境は先に示した資源を利用した。

表 5 音響解析メッシュ

項目	内容
要素	四面体一次要素
節点数	271,000
要素数	1,431,041

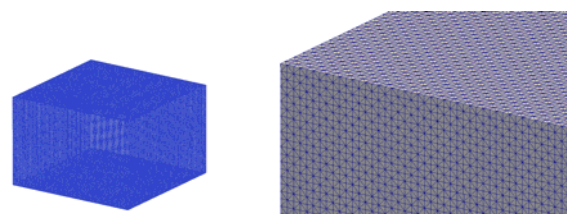


図 18 音響メッシュの全体図と拡大図

6.3. 境界条件

音響解析を行うにあたり、居室の境界壁となる六面の境界条件を設定する必要がある。ただし、本ケースでは、居室壁の六面すべてが連成面（床

面、天井面も連成面である）となっており、それらの振動データは、すべて構造解析の結果をマッピングした結果から得られる。従って、本ケースでは、境界条件はすべて連成面となるものとして解析を実施した。

6.4. 解析結果の出力

本ソフトウェアでは、周波数毎のメッシュ節点における解析結果がバイナリのファイルとして複数ファイル（周波数の数だけ）に出力される。解析の後処理として、解析結果を編集して必要な情報を取り出す。出力された解析結果の編集方法は下記の通りである。まず、結果確認のため、必要な周波数の結果ファイルを周波数毎の可視化ファイルに変換し可視化する。次に、居室の観測点における各周波数の音圧レベルをグラフにする。境界要素法（BEM）を利用した音響解析の手順とは異なり、解析が終了したのちに観測点を設定することができる。前者については、ParaViewで速度ポテンシャル、音圧、音圧レベルを可視化することができる。後者については、変換されたcsv ファイルをグラフツールでグラフ化することができる。いずれも、本ソフトウェアに付属するツール群でファイル変換を行う。ここでは、

- ・ 特定周波数の音圧レベル結果のコンタ
- ・ 全周波数に対する音圧レベル（スペクトル）のグラフ結果
- ・ 全周波数に対する音圧レベル（1/3 オクターブバンド）の結果

を示した。全周波数に対する音圧レベルについては、構造解析において減衰のあるケース、減衰のないケースについて比較した。これらの結果は定性的には妥当な結果を得ている。

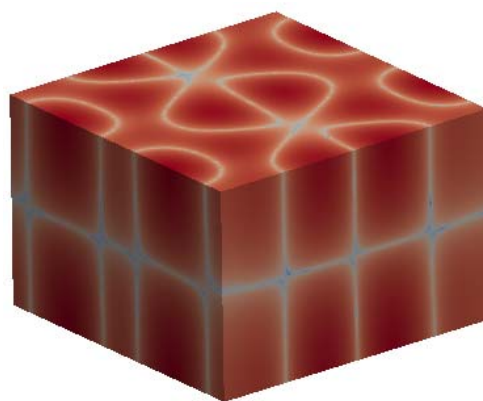


図 19 300Hz の音響解析結果（音圧レベル）

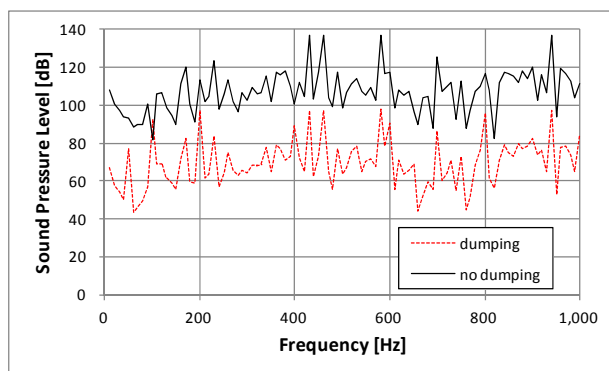


図 20 居室中央の観測点における音圧レベル（スペクトル）

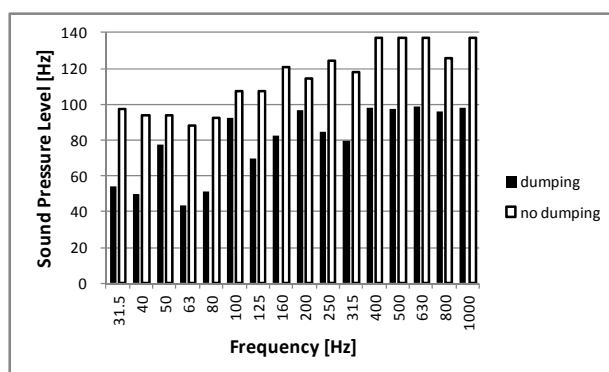


図 21 居室中央の観測点における音圧レベル（1/3 オクターブバンド）

7. まとめ

本稿では、IMO が設定した船舶の居住区における新たな騒音規制に対して、有限要素法を利用した構造音響連成手法が適用できることを示した。今後の複雑形状への騒音問題への対処、および、精度の高い騒音予測の必要性等により、従来から利用されてきた簡易的な SEA 法に替わり、ここで提案した有限要素法を用いた構造音響連成手

法にも大きな可能性があると考えている。

参考文献

- [1] 一般財団法人日本海事協会 秋季技術セミナー資料, “IMO における線内騒音規制の動向,”
http://www.classnk.or.jp/hp/pdf/research/seminar/ri2013_03.pdf, 2013
- [2] 松原 聖, 袁 熙, 末光 啓二, 大家 史, 徳永 健一, “構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR”, アドバンスシミュレーション Vol.10, 2011.12
- [3] 松原 聖, 桑原 匠史, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise の現状”, アドバンスシミュレーション Vol.15, 2013.5
- [4] インテル® マス ・カーネル・ライブラリー リファレンス・マニュアル, 資料番号:
630813-023J

※技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、PDF ファイルがダウンロードできます。(ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。)