

「騒音最適化船(6500kl 積みタンカー)の設計調査」

事業報告書

独立行政法人

鉄道建設・運輸施設整備支援機構

目次

1.はじめに	1
2.最適化について	2
3.船体構造の改良による騒音最適化の検討	3
3.1 簡易モデルによる検討	3
3.2 実船モデルによる検討	10
4.騒音対策品による騒音最適化の検討	33
4.1 簡易モデルによる検討	33
4.2 実船モデルによる検討	50
5.騒音最適化されたモデル船の図面	69
6.まとめ	70

付録

付録 I 騒音最適化されたモデル船の図面	省略
付録 II モデル船の SEA モデル	省略
付録 III 騒音最適化手法	210

1. はじめに

2012年11月の国際海事機関(IMO)第91回海上安全委員会(MSC91)において、船内騒音コードの改正案及び同コードを強制化する海上人命安全条約(SOLAS条約)の改正案が採択された。同コードの適用対象は、2014年7月1日以降に建造契約が結ばれた総トン数1,600トン以上の船舶であり、我が国では、3年の猶予期間を設けて2017年7月1日以降に建造契約が結ばれる限定沿海以遠を航行する総トン数1,600トン以上の船舶に適用することが決定された。

こうしたことから、現在、国内の造船所では騒音コードに適合させるための設計の見直しを行っているところである。内航船のなかでは、6,500kL積みタンカーの占める割合は大きく、また、騒音規制に適合させることが困難だといわれている。本事業では、内航6,500kL積みタンカーを対象に、騒音最適化の設計検討を行う。

騒音最適化の検討にあたっては、①船体構造の改良による観点から、及び、②騒音対策品の施工による観点から行う。船体構造の改良による観点では、上部構造物の構造図及び機関室配置図の変更を行うことを念頭に、重量、施工等の影響をみながら最適な組み合わせを決定する。騒音対策品の施工による観点からは、各騒音対策品の組み合わせによってかかるコストの影響をみながら最適な組み合わせを決定する。これら騒音最適化の検討は、SEA法による騒音予測計算と最適化計算手法を組み合わせで行う。最後に、騒音最適化されたモデル船の図面を作成し、本事業の目的である騒音対策技術の開発負担を軽減すること、騒音規制適合船舶の建造を促進することに役立つ。

2. 最適化について

船舶は、あらゆる規則・設計要件に対して最適な組み合わせとなるように、設計・建造される。騒音規制に対する要件もそのひとつである。

騒音規制を満足させるために、基本設計において機関区域・上部構造物の構造設計、居室配置、機関室配置、内装設計等を行う。そして、鋼材重量を出来る限り最小化すること、鋼材、騒音対策品等購入にかかるコストを最小化することを念頭におく必要がある。

騒音低減最適化の検討にあたって、**図 2-1** に示すような流れとする。はじめに、構造寸法すなわち重量最小化の観点から騒音レベルの最適化を行った後、コストを考慮した上で、騒音対策品による騒音規制をクリアする確率を高める組み合わせ最適化を行う。

実船モデルを対象とした SEA 解析、最適化計算のための SEA 解析には長時間を要することから、先行して簡易モデルを対象に、最適化の手法を検討した。検討手法を確立したうえで実船モデルを対象とした最適化の検討を行った。したがって、以下、簡易モデルによる検討と実船モデルによる検討の結果を示す。

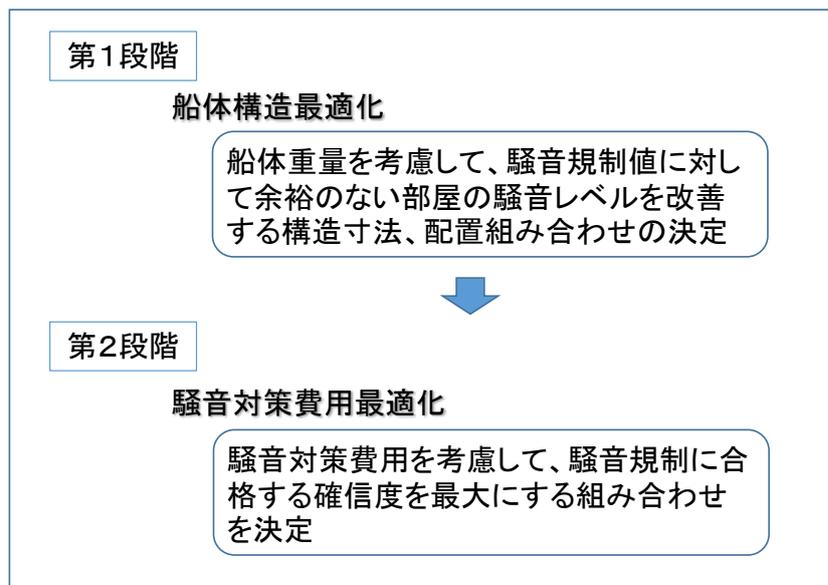


図 2-1 最適化検討の流れ

3.船体構造の改良による騒音最適化の検討

3.1 簡易モデルによる検討

3.1.1 船体モデル

モデル船を簡易表現した簡易船体形状モデルを作成した。図 3.1.1-1 に簡易船体モデルを示す。簡易船体形状モデルを作成にあたって、モデル船情報の利用は、表 3.1.1-1 に示すとおりとした。船体外板形状を曲線形状から直線形状にすること、二重底構造を単底構造で表現すること、桁材及び柱材を省略することによって、SEA モデル作成時間を大幅に短縮している。そして、平成 26 年度「内航船における船内騒音の予測手法及び対策指針に関する調査」事業で検討したように、簡易船体形状モデルであるものの、その騒音解析結果は、実船で計測される騒音レベルの特徴を十分表現している。

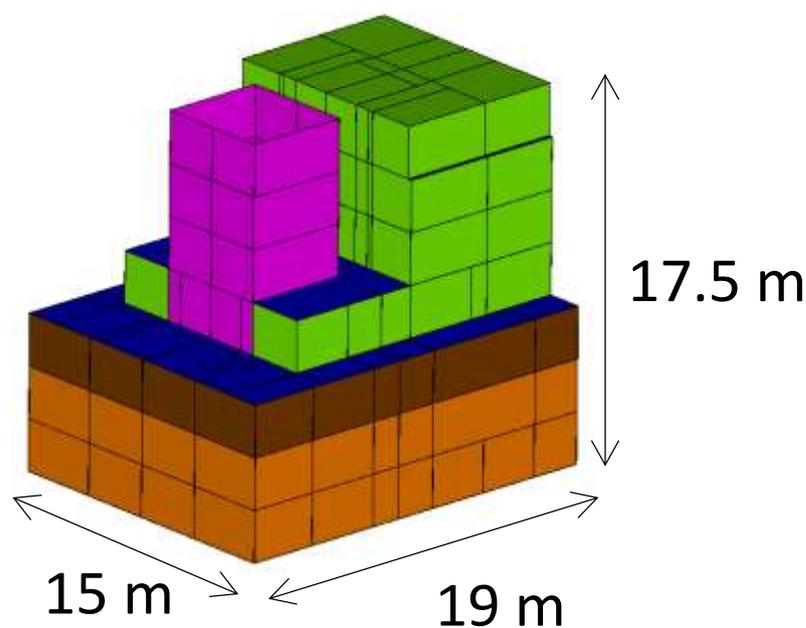


図 3.1.1-1 簡易船体モデルの図

表 3.1.1-1 簡易船体形状モデル作成におけるモデル船情報の利用

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">✓ 船幅、デッキ高さ、機関室長さはモデル船を参考にする✓ デッキ数はモデル船と同じ✓ モデル船と同じ板厚を使用（二重底構造でない）✓ 桁材、柱等は省略✓ 居住区床はモデル船と同じデッキコンポジションを使用✓ 部屋内装は、モデル船と同じ。✓ 主機、発電機の騒音・振動データは実船計測結果を使用 |
|---|

3.1.2 構造寸法(配置)の最適化

3.1.2.1 設計パラメータ

表 3.1.2-1 に示すように、騒音低減に寄与し、かつ、現実的に設計変更可能な設計パラメータ及びその水準を検討する。本最適化問題は 3 水準が 5 つ、2 水準が 1 つの計 6 つの設計パラメータからなる。これらの設計パラメータは機関室ケーシングと発電機位置を除き、本来的には連続パラメータではあるが、ここでは最適化問題を簡略化することを目的として、全ての設計パラメータが離散的であるとする。つまり、板厚やデッキ高さなどは本来、水準値の間の値も取り得るが、ここでは考慮せず、水準値の組み合わせの最適化のみを検討する。

デッキ板厚、壁板厚はモデル船の寸法(6 mm)をベースに、構造健全性が損なわれない増厚する方向(+2 mm, +4 mm)で設計パラメータを 3 水準で変化させる。

デッキ高さは、簡易船体モデルデッキ高さ 2.5 m (モデル船のデッキ高さは 2.55 m) をベースに、天井裏の工事に支障をきたさない増大する方向(+50 mm, +100 mm)で設計パラメータを 3 水準で変化させる。

機関室ケーシングと居住区が暴露甲板でつながっている現構造を、切り離れたときとの 2 水準で検討する。また、それぞれ隣接および切離と呼称する。各 SEA モデルを図 3.1.2-1 に示す。

発電機の位置は、モデル船では主機後方に配置されているのに対し、主機横及び主機前方の 3 水準で変化させる。

3.1.2.2 最適化問題

本最適化問題は船体構造の面から騒音レベルが小さい組み合わせを得ることを目的とした最適化計算を、重量または共振周波数を制約条件として行う。騒音レベルの計算は、VA One を使用した SEA 解析により行う。

各居室には図 3.1.2-2 に示す騒音規制値が定められており、これと各居室の実際の騒音の差(騒音-騒音規制値)を求め、この最小値を最大化することを目的関数とする。これは「騒音規制値は基本的に全ての居室で満たしていなければならない」ことを踏まえた上で、「最も成績の悪い居室の成績を最良化する」という設計思想に基づいている。

表 3.1.2-2 に、全組み合わせ計算条件を抜粋して示す。全組み合わせは $3^5 \times 2^1 = 486$ 通りとなる。

船体重量においては僅かな計算コストで全組み合わせを計算することは可能であるが、騒音計算を行うためには SEA モデルの作成やその解析に膨大な計算コストや手間を要する。そのため、騒音計算においては次項以降で記載する実験計画によって選択された実験点のみのモデルを作成および解析し、応答曲面法により各居室の騒音レベルを設計パラメータの多項式で近似することにより、少ない計算コストで全組み合わせの騒音予測(RS 予測値)を行う。

3.1.2.3 実験計画法

本最適化問題ではインターネット上で公開されている RSMaker for Excel Ver.0.1 を用いた D 最適基準実験計画法によって実験点を選択する。一般的に実験計画によって選択される実験点の変数の 2 倍程度が望ましいとされている。つまり、設計パラメータ同士の共役を無視して 1 次の設計パラメータのみに着目すれば、実験点は $6 \times 2 = 12$ 点、2 次の共役まで考慮すれば $(6+1)C_2 + 6 \cdot 1 \cdot 2 = 52$ 点の計算が必要となる。

本最適化問題では 52 ケースもの SEA モデルの作成が困難なこと、および共役を無視しても十分な精度が得られたことを踏まえて、共役を無視した 12 点の実験点を選択した。選択した実験点を表 3.1.2-3 に示す。

3.1.2.4 応答曲面法

前項で求めた実験点において VAONE を用いた SEA を行い、各居室の周波数ごとの騒音レベルを求めた。この各居室の周波数ごとの騒音レベルを、応答曲面法を用いて設計パラメータの 1 次多項式で近似し、居室ごとの騒音 OA 値を予測した。

3.1.2.5 最適解

前項までの手順を踏まえて得られた船体構造の最適解を表 3.1.2-4 に示す。ここでは重量を制約条件とし、110 トン未満の構造で最適解を探索した。この重量制約値は、造船所の経験上から判断した。また、参考までに全組み合わせにおける上部構造物重量の頻度分布を図 3.1.2-3 に示す。

最適解の設計パラメータに関しては、下記のとおり結果となった。

- ・ 居住区デッキ高さを可能な限り高くする
- ・ 居住区外壁および内壁板厚を現状のまま用いる
- ・ 居住区デッキ板厚を僅か(+2 mm)に厚くする
- ・ 機関室ケーシングを現状のままとする
- ・ 発電機位置を後方にする

また、この時の上部構造物の重量は 105 トンであり、各居室の騒音レベルは表 3.1.2-5 に示す。最適解においては最も成績の悪い居室は B-5 であり、規制値との差は -1.0 dB となった。すなわち、最適解以外での設計パラメータの組み合わせでは RS 予測値と規制値との差が -1.0 dB 以上の居室が必ず存在することになる。

最適解の設計パラメータで SEA モデルを作成し、解析を行ったところ、表 3.1.2-5 に示すように全ての居室でおおよそ一致していた。また、図 3.1.2-4 に示すように最も成績の悪い B-5 で周波数ごとに RS 予測値と SEA 解析値を比較したところ、ほぼ全周波数で一致していた。このため、応答曲面の精度は十分であるとした。

表 3.1.2-1 設計パラメータと水準

設計パラメータ	水準値		
	-1	0	1
居住区デッキ高さ	オリジナル(2.5 m)	+50 mm (2.55 m)	+100 mm (2.6 m)
居住区外壁板厚	オリジナル(6 mm)	+2 mm (8 mm)	+4 mm (10 mm)
居住区内壁板厚	オリジナル(6 mm)	+2 mm (8 mm)	+4 mm (10 mm)
居住区デッキ板厚	オリジナル(6 mm)	+2 mm (8 mm)	+4 mm (10 mm)
機関室ケーシング		オリジナル (隣接)	切離
発電機位置	後方	中央	前方

表 3.1.2-2 全組み合わせ計算条件 (抜粋)

ID	居住区 デッキ高さ	居住区 外壁板厚	居住区 内壁板厚	居住区 デッキ板厚	機関室 ケーシング	発電機位置
1	-1	-1	-1	-1	0	-1
2	-1	-1	-1	-1	0	0
3	-1	-1	-1	-1	0	1
4	-1	-1	-1	-1	1	-1
5	-1	-1	-1	-1	1	0
6	-1	-1	-1	-1	1	1
7	-1	-1	-1	0	0	-1
8	-1	-1	-1	0	0	0
9	-1	-1	-1	0	0	1
10	-1	-1	-1	0	1	-1
...
...
484	1	1	1	1	1	-1
485	1	1	1	1	1	0
486	1	1	1	1	1	1

表 3.1.2-3 実験計画 (計算条件 : 12 ケース)

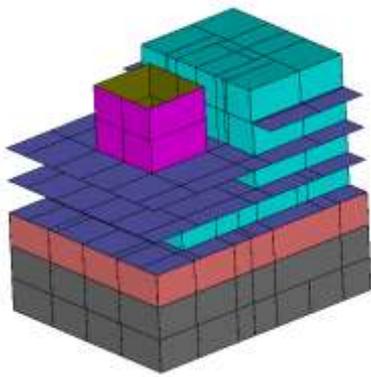
ID	居住区 デッキ高さ	居住区 外壁板厚	居住区 内壁板厚	居住区 デッキ板厚	機関室 ケーシング	発電機位置
1	-1	-1	-1	-1	0	-1
3	-1	-1	-1	-1	0	1
54	-1	-1	1	1	1	1
124	-1	1	-1	1	1	-1
148	-1	1	1	-1	1	-1
159	-1	1	1	1	0	1
339	1	-1	-1	1	0	1
366	1	-1	1	-1	1	1
373	1	-1	1	1	0	-1
394	1	0	-1	1	1	-1
438	1	1	-1	-1	1	1
469	1	1	1	-1	0	-1

表 3.1.2-4 最適解での設計パラメータ

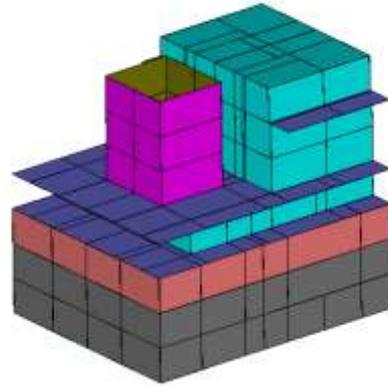
パラメータ	水準値	値
居住区デッキ高さ	1	2.6 m
居住区外壁板厚	-1	6 mm
居住区内壁板厚	-1	6 mm
居住区デッキ板厚	0	8 mm
機関室ケーシング	0	隣接
発電機位置	1	後方

表 3.1.2-5 最適解での各居室の騒音レベル

居室	規制値 [dB]	RS 予測値 [dB]	RS 予測値-規制値[dB]	SEA 解析値 [dB]
N-1	65.0	53.5	-11.5	54.1
C-1	60.0	56.6	-3.4	57.0
C-2	60.0	56.8	-3.2	57.3
C-3	60.0	56.7	-3.3	57.1
C-4	60.0	56.8	-3.2	57.3
C-5	60.0	57.2	-2.8	57.6
C-6	75.0	59.9	-15.1	60.1
B-1	60.0	58.8	-1.2	59.2
B-2	60.0	58.2	-1.8	58.8
B-3	60.0	58.4	-1.6	58.9
B-4	60.0	58.3	-1.7	59.0
B-5	60.0	59.0	-1.0	59.5
B-6	75.0	60.6	-14.4	60.7
P-1	65.0	61.8	-3.2	62.6
P-2	65.0	61.2	-3.8	61.9
P-3	65.0	60.9	-4.1	61.7
P-4	65.0	61.1	-3.9	61.9
P-5	65.0	61.8	-3.2	62.6
P-6	65.0	62.6	-2.4	63.5
P-7	75.0	64.1	-10.9	64.3

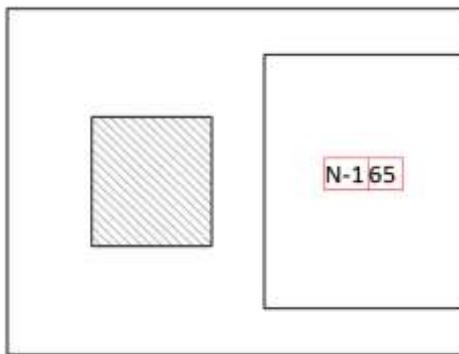


(a) 隣接

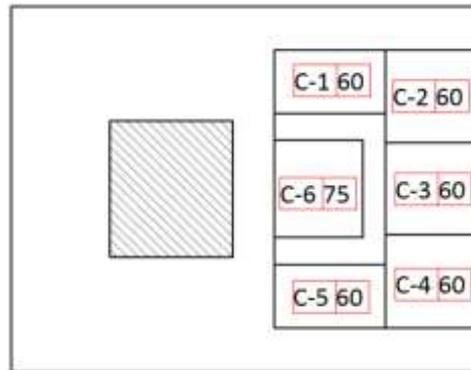


(b) 切離

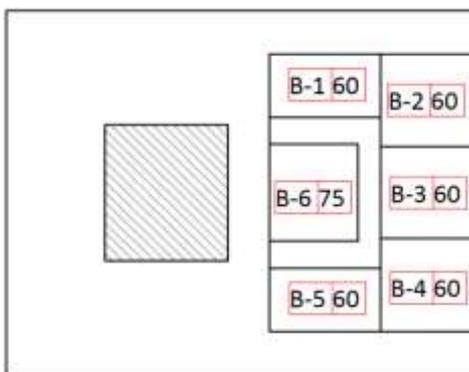
図 3.1.2-1 各機関室ケーシングの SEA モデル



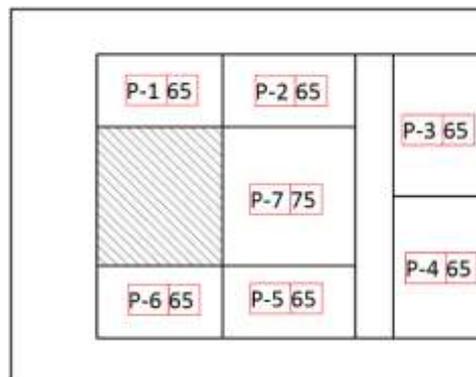
N DECK



C DECK



B DECK



P DECK

図 3.1.2-2 各居室の騒音規制値

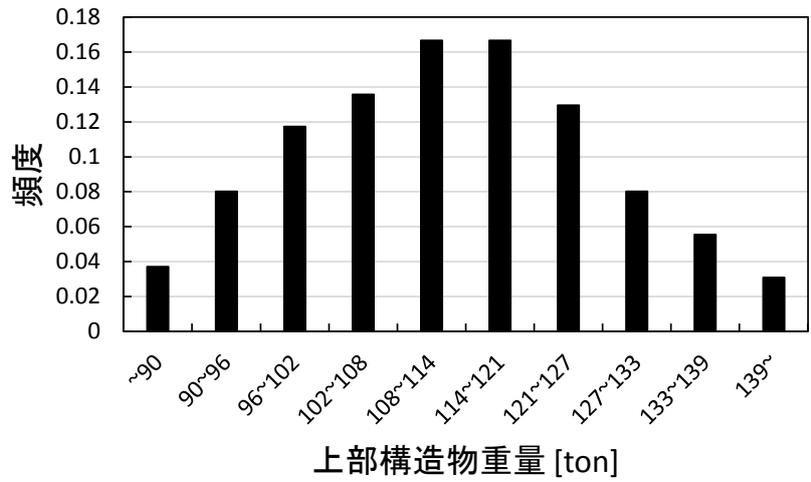


図 3.1.2-3 全組み合わせにおける上部構造物重量の頻度分布

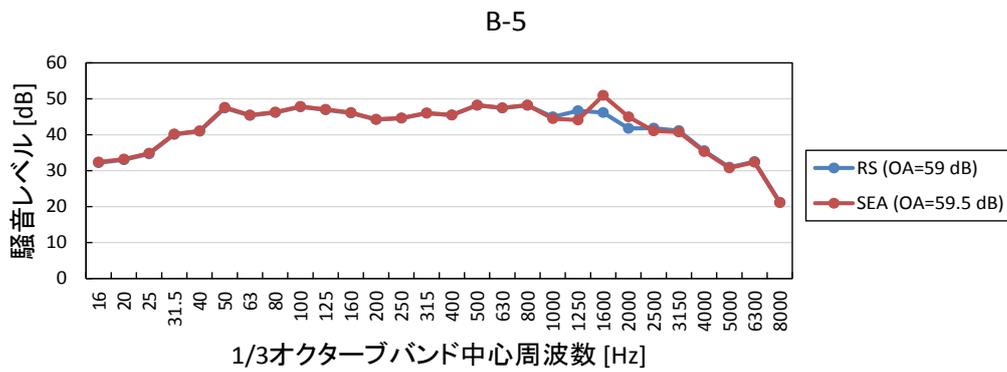


図 3.1.2-4 最適解における居室 B-5 の RS 予測値と SEA 解析値の比較

3.2 実船モデルによる検討

3.2.1 ベースシップモデル仕様

第一浪速丸の図 3.2.1-1 赤枠に示す船側外板は、特別な事情により、周辺の板厚(13mm)よりも厚く補強し、23mm の鋼板を使用している。第一浪速丸の同型船では、このような鋼材配置はみられないため、今次最適化の検討に当たってベースとなるベースシップモデルとしては、特別な事情を考慮しない鋼材配置にする必要がある。そこで、付録 II 1.6.2 で船側板厚を 23mm から 13mm に変更した場合、振動レベルに影響があるか否かを検証した。検証の結果、23mm から 13mm に変更しても振動レベルにはほとんど影響が無いことが判明した。また、一般的に船殻の鋼板厚が 13mm であるため、予測精度を十分確保できた浪速丸の SEA モデルから、船殻の鋼板厚が 23mm あるところを 13mm に変更したものをベースシップモデルとする。

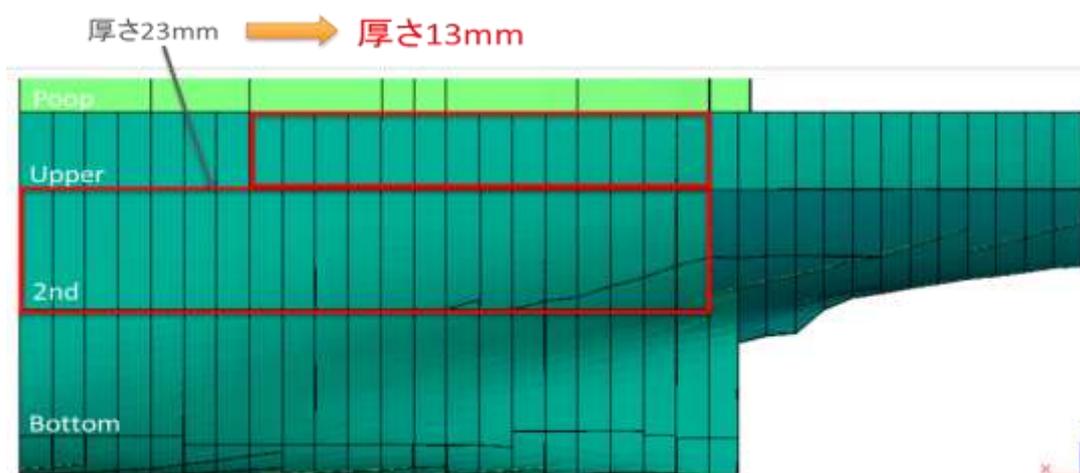


図 3.2.1-1 船殻の鉄板厚

3.2.2 設計因子と水準

3.2.2.1 実験計画の決定

簡易モデルの設計パラメータ設定と同様の理由から、表 3.2.2.1-1 に示す設計パラメータと水準値にした。その後、D 最適基準実験計画表を用いて 16 点の実験点をピックアップした。

D 最適基準実験計画とは、変数マトリックスに対して $\det(X^T X)$ を最大化する実験計画のことで、パラメータを内挿で補間しやすい、パラメータの回転可能性を考慮できるなどの特徴がある。

D 最適基準実験計画に関しては、付録 III 「騒音最適化手法」 に詳細に説明する。

表 3.2.2.1-1 最適化設計因子と水準値

No.	設計パラメータ	記号	水準値		
			-1	0	1
1	居住区デッキ高さ [m]	h	2.55	2.60	2.65
2	居住区外壁板厚 [mm]	t_o	6	8	10
3	居住区内壁板厚 [mm]	t_i	6	8	10
4	居住区デッキ板厚 [mm]	t_D	6	8	10
5	EC板厚 [mm]	t_E	6	8	10
6	居住区内壁の変更	f_i	減らす	現状	増やす
7	Cデッキ暴露甲板	f_D	現状		切離

水準
[-1] [0] [1]

3.2.2.2 実験計画表

実験計画は、簡易モデルで検討したケースと同じ 16 ケースとした。最適化設計因子と水準値を割り付けた実験計画表を表 3.2.2.2-1 に示す。

表 3.2.2.2-1 実験計画表

ケース	居住区デッキ 高さ h [m]	居住区外壁 板厚 t_o [mm]	居住区内壁 板厚 t_i [mm]	居住区デッキ 板厚 t_d [mm]	エンバンケーシ ング板厚 t_e [mm]	居住区内壁の 変更 f_i	Captain deck 暴露甲板 f_o
1	2.55	6	6	6	6	増やす	現状
2	2.55	6	6	10	6	増やす	切離
3	2.55	6	10	6	6	減らす	現状
4	2.55	6	10	10	10	増やす	現状
5	2.55	8	6	10	10	減らす	切離
6	2.55	10	6	8	10	増やす	現状
7	2.55	10	10	6	6	増やす	切離
8	2.55	10	10	10	6	減らす	現状
9	2.65	6	6	6	6	減らす	切離
10	2.65	6	6	6	10	減らす	現状
11	2.65	6	10	10	6	増やす	切離
12	2.65	6	10	10	8	増やす	現状
13	2.65	6	10	10	10	減らす	切離
14	2.65	10	6	10	6	減らす	現状
15	2.65	10	6	10	6	増やす	現状
16	2.65	10	10	6	10	増やす	切離

3.2.2.3 構造モデル変更表

16 ケースの中から板厚変更以外の構造変更パラメータを取り出した構造モデル変更表を表 3.2.2.3-1 に示す。この表に基づいて、8 個の基本モデルを作成した。その後、各種板厚を変更して 16 ケースのモデルを作成した。

表 3.2.2.3-1 構造モデル変更表

基本モデル	居住区デッキ高さ	居住区内壁	Captain deck暴露甲板
①	2.55	増やす	現状
②	2.55	増やす	切離
③	2.55	減らす	現状
④	2.55	減らす	切離
⑤	2.65	減らす	切離
⑥	2.65	減らす	現状
⑦	2.65	増やす	切離
⑧	2.65	増やす	現状

3.2.2.4 居住区内壁の変更箇所

設計因子の居住区内壁の変更箇所について、図 3.2.2.4-1 を用いて説明する。居住区内壁を減らす変更では Poop deck 平面図の青線箇所を鋼板から仕切壁に変更し、内壁を増やす変更では Boat deck、Captain deck 平面図の赤線箇所を仕切壁から鋼板に変更している。

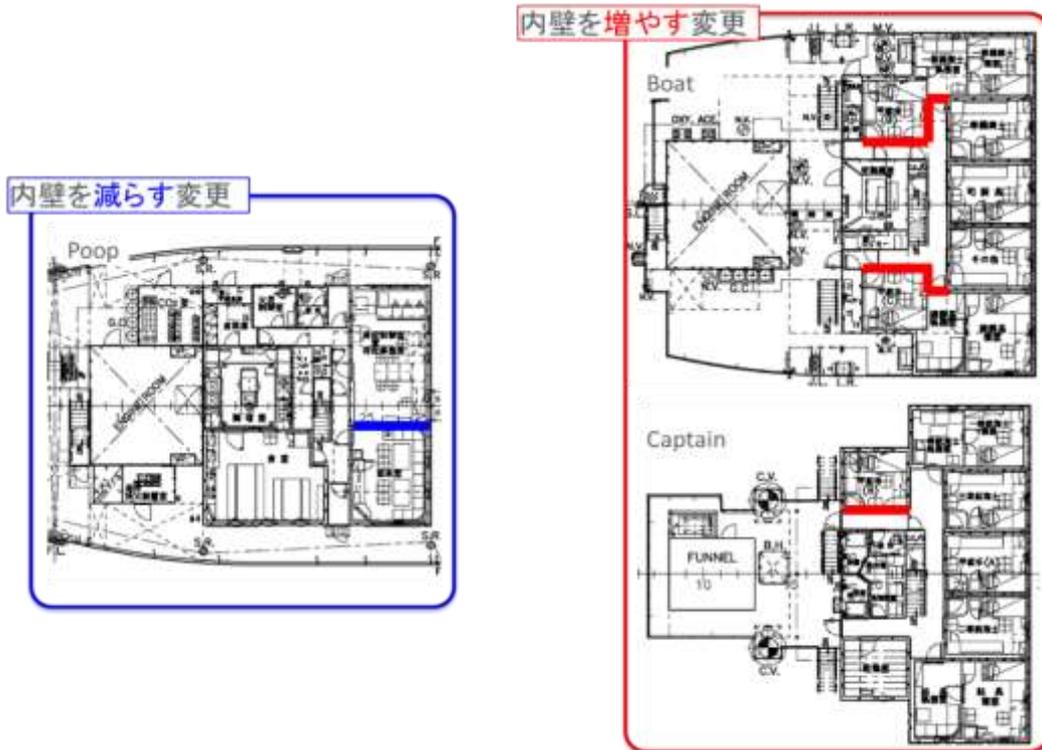


図 3.2.2.4-1 居住区内壁の変更箇所

3.2.2.5 Captain deck 暴露甲板切離し箇所

Captain deck 暴露甲板の切り離し箇所を図 3.2.2.5-1 に示す。暴露甲板の切り離しは該当箇所の SEA プレートを削除することでモデル上再現している。



図 3.2.2.5-1 暴露甲板切離し箇所

3.2.2.6 居住区の板厚変更区分

居住区内の各板厚の変更該当箇所を図 3.2.2.6-1(1)、図 3.2.2.6-1(2)に示す。

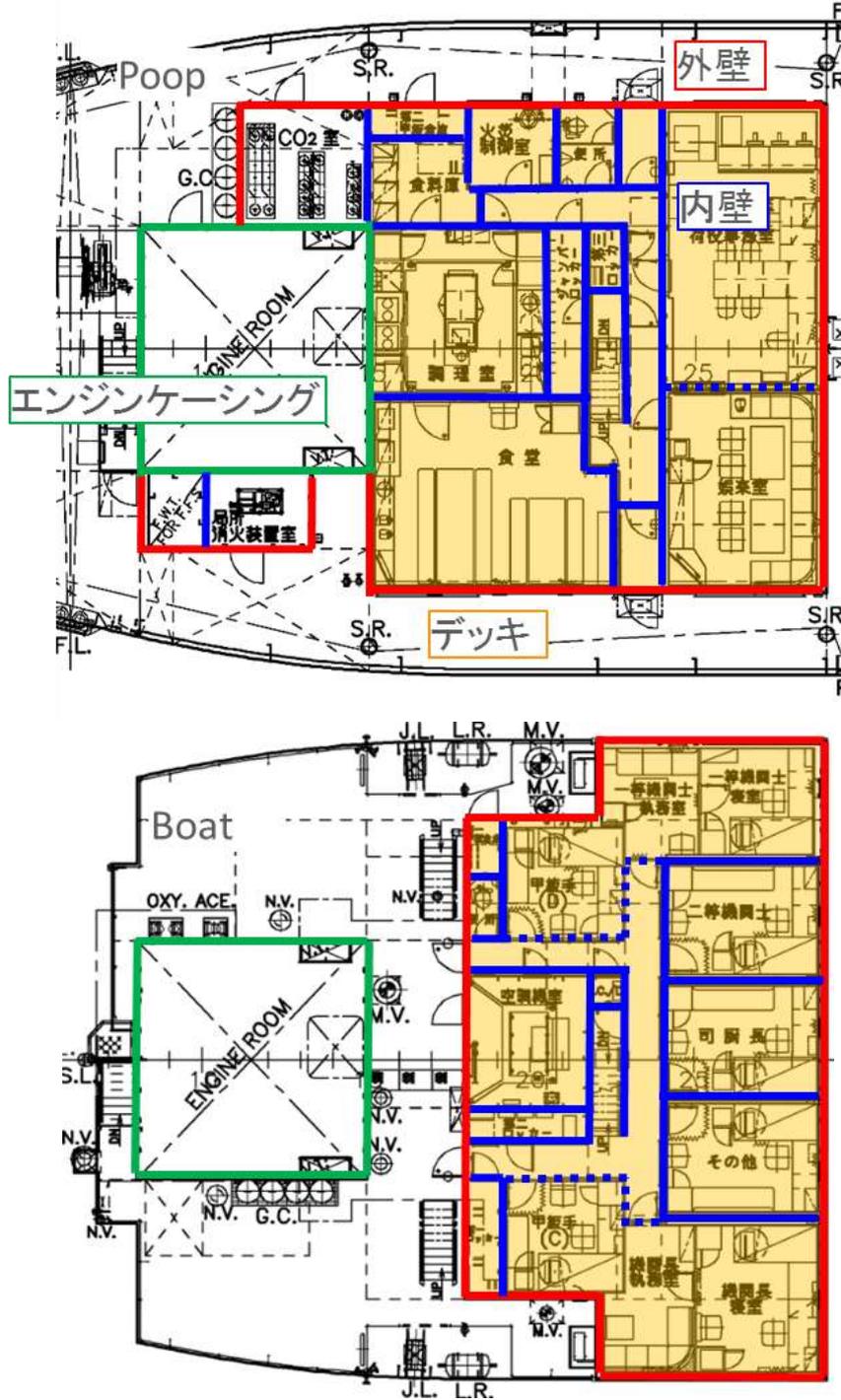
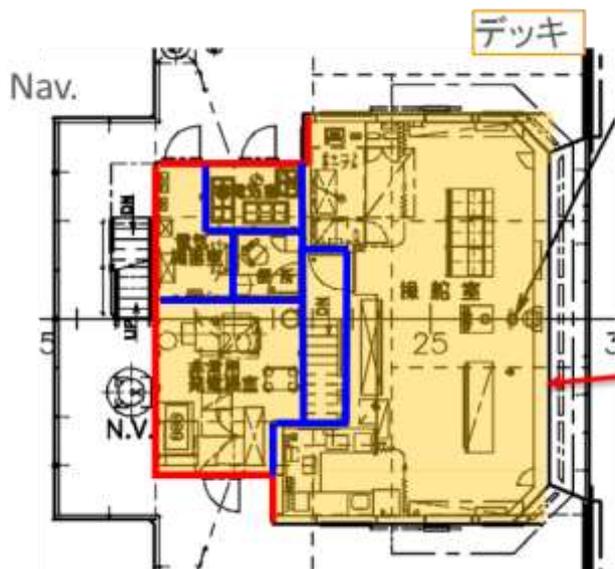
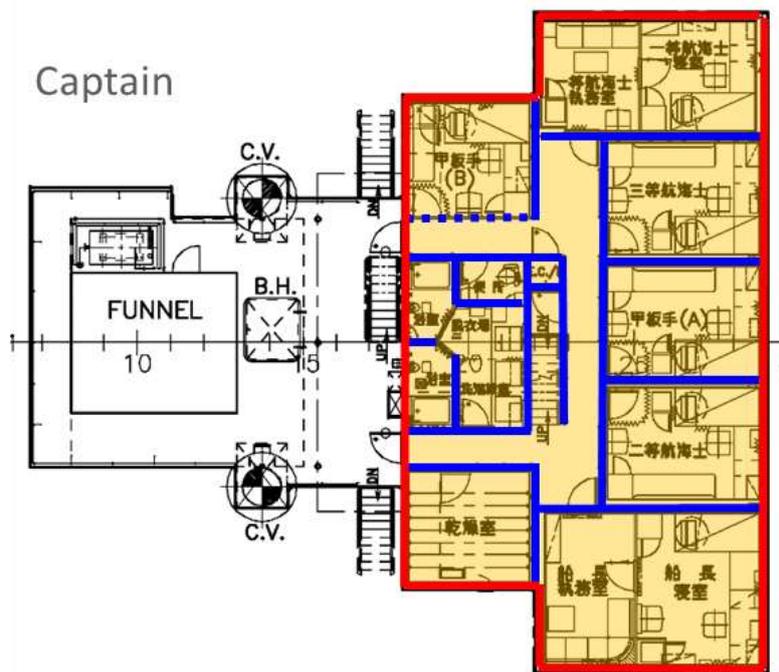


図 3.2.2.6-1(1) 居住区内の各板厚の変更該当箇所



※操舵室の壁は、窓の占める割合が大きく、周りの壁板厚(6mm)よりも厚い(8mm)。したがって、現行板厚(8mm)より薄くすることは現実的ではなく、また厚く(10mmに)することも現実的な設計変更ではないため、最適検討から除外した。

図 3.2.2.6-1(2) 居住区内の各板厚の変更該当箇所

3.2.3 騒音解析結果

SEA モデルを用いた設計因子の感度解析結果として、ベースモデルと各因子の騒音レベル OA 値を図 3.2.3-1(1)~図 3.2.3-1(7)に示す。グラフ内の横黒線はベースモデルでの解析値を示し、図 3.2.3-1(1)~(7)中の赤字 t_D は居住区デッキ板厚パラメータを 10mm にしているケースを示している。

- Poop deck

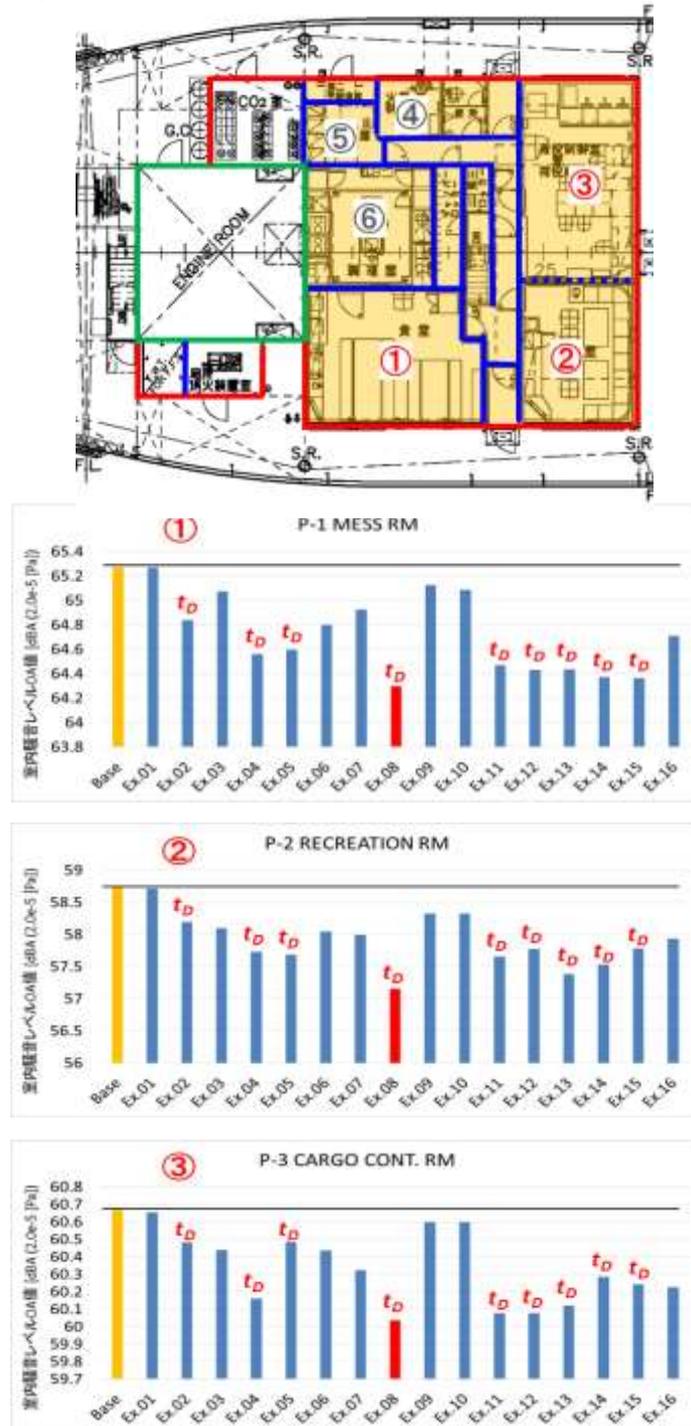


図 3.2.3-1(1)ベースモデルと各因子の騒音レベル OA 値

• Poop deck

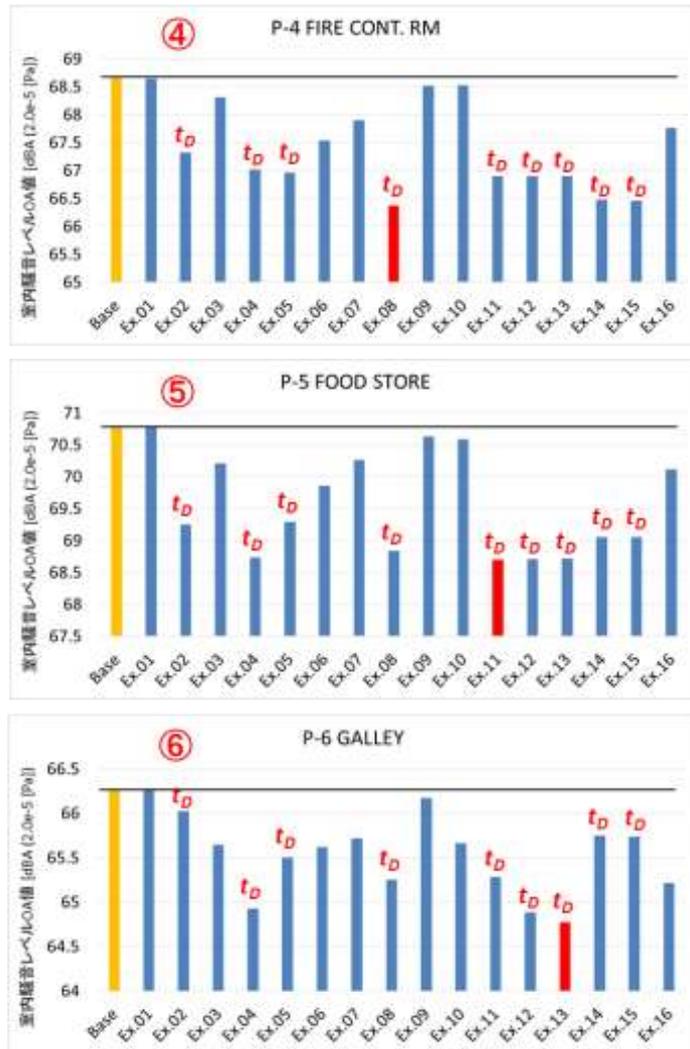
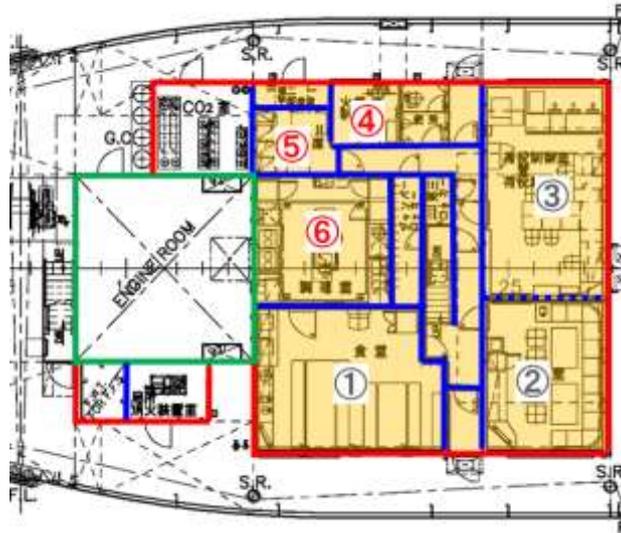


図 3.2.3-1(2)ベースモデルと各因子の騒音レベル OA 値

・ Boat deck

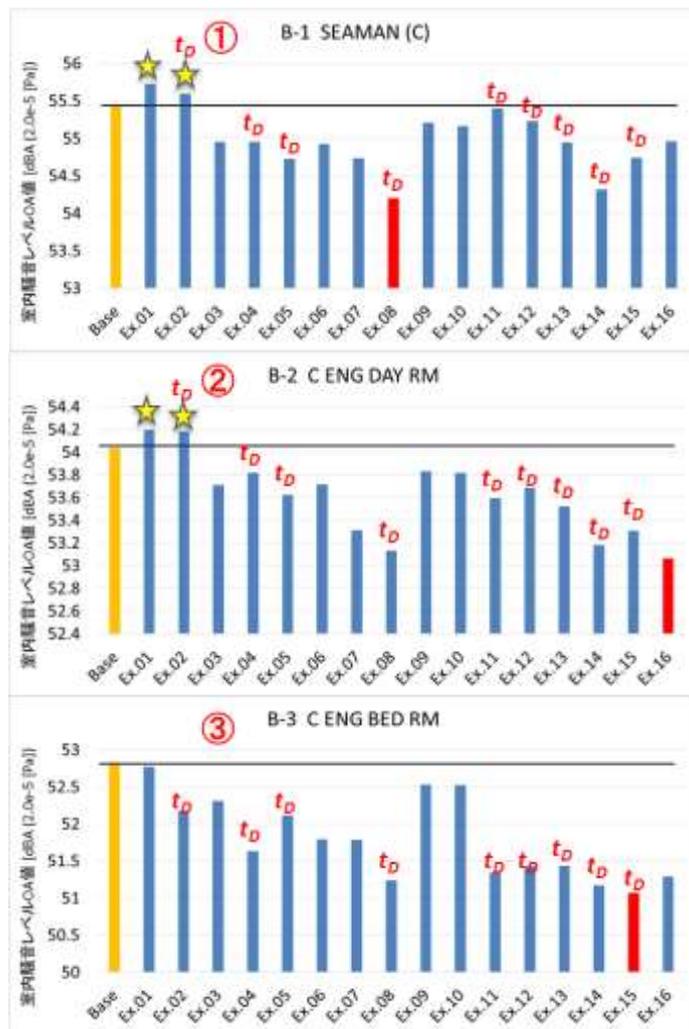
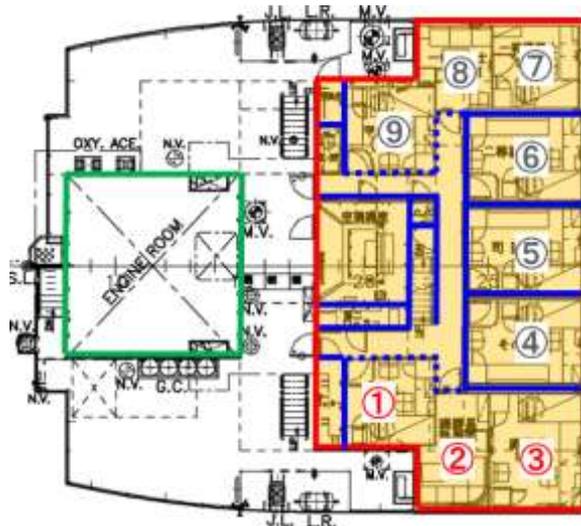


図 3.2.3-1(3)ベースモデルと各因子の騒音レベル OA 値

①②の部屋について、ベースモデルから騒音レベルが悪化しているケースは内壁を増やす因子の影響が大きいと考えられる。

• Boat deck

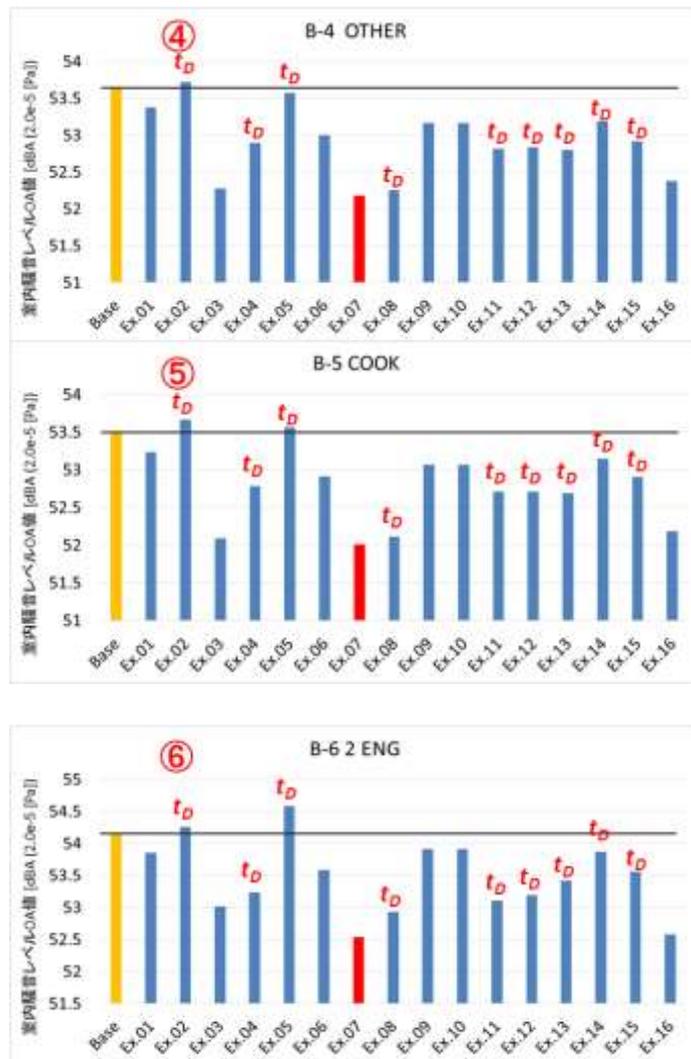
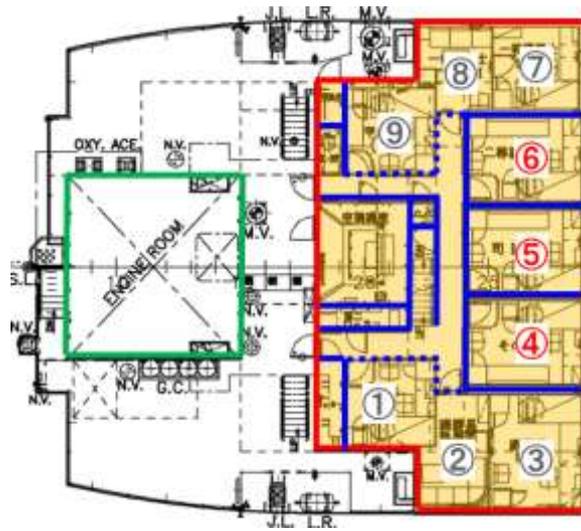


図 3.2.3-1(4)ベースモデルと各因子の騒音レベル OA 値

- Captain deck

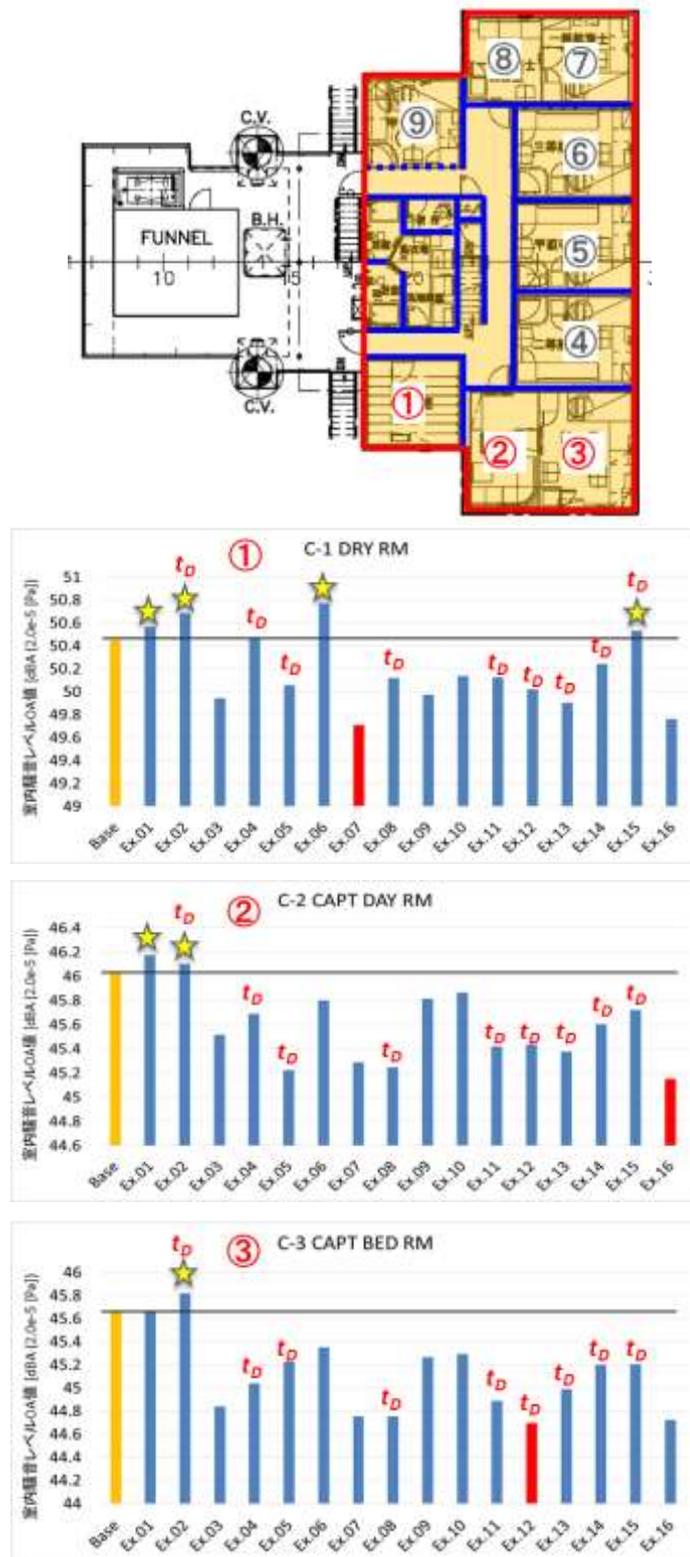


図 3.2.3-1(5)ベースモデルと各因子の騒音レベル OA 値

①②③の部屋について、ベースモデルから騒音レベルが悪化しているケースは、内壁を増やす因子の影響が大きいと考えられる。

- Captain deck

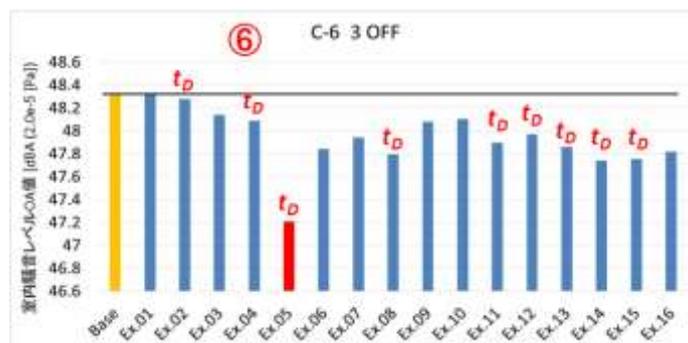
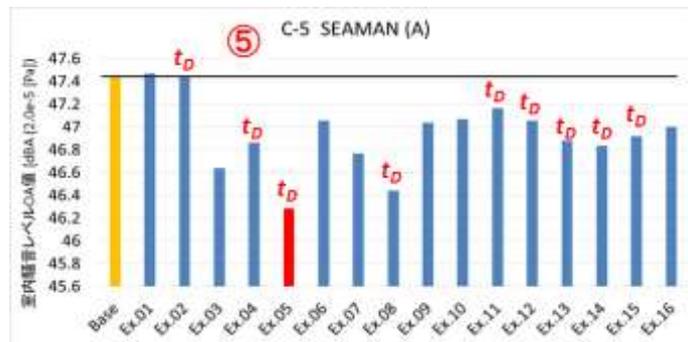
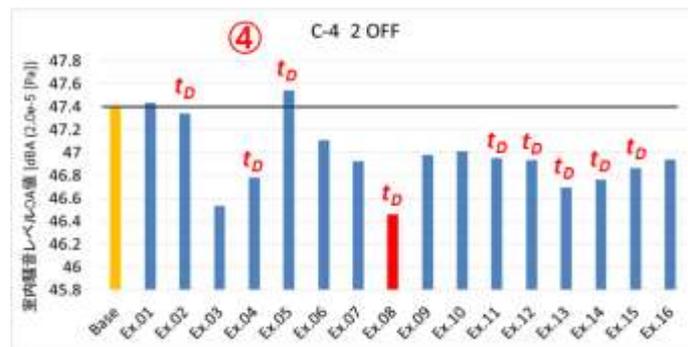
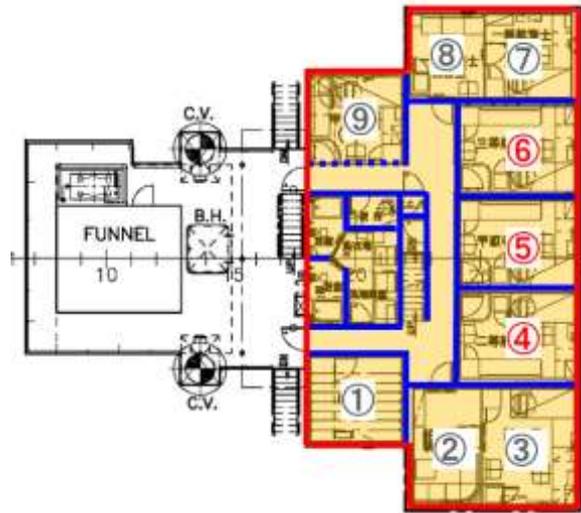


図 3.2.3-1(6)ベースモデルと各因子の騒音レベル OA 値

- Captain deck

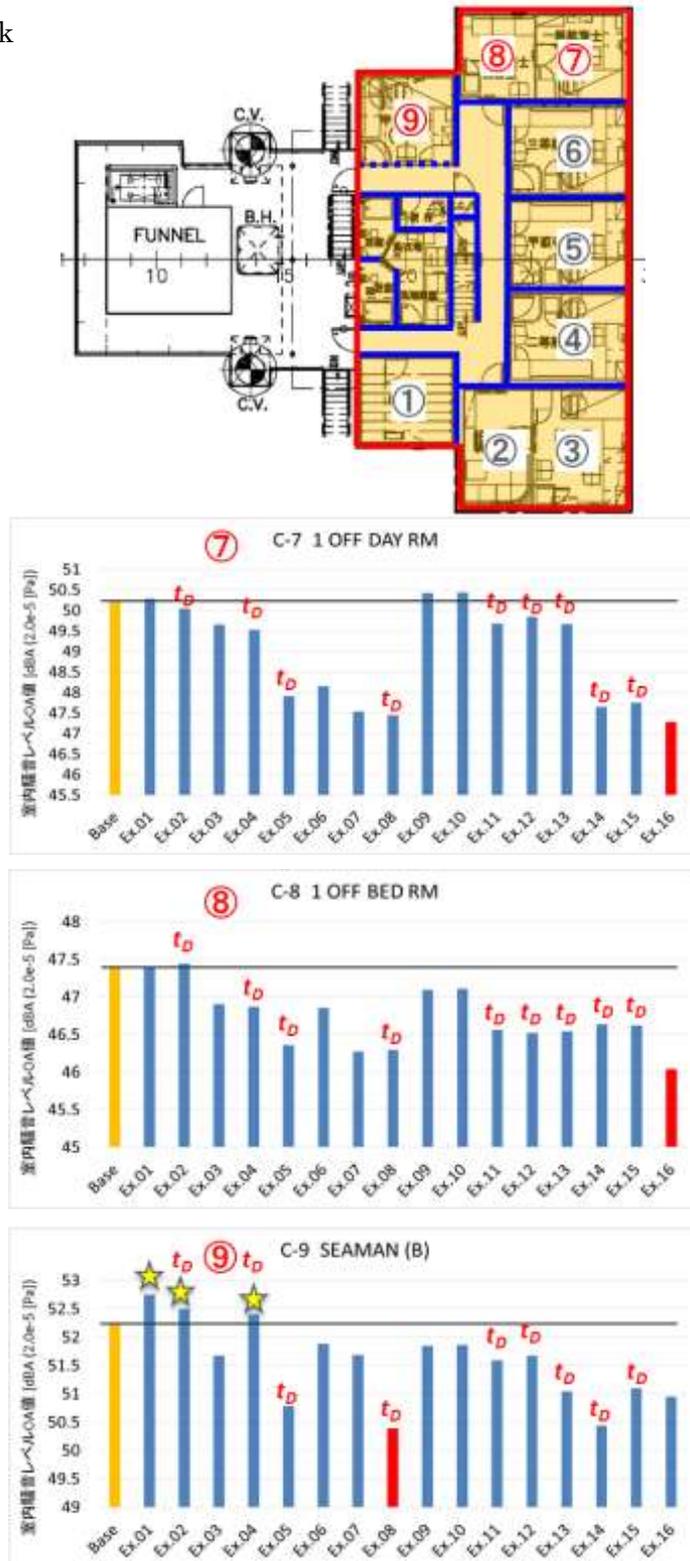


図 3.2.3-1(7)ベースモデルと各因子の騒音レベル OA 値

⑨の部屋について、ベースモデルから騒音レベルが悪化しているケースは、内壁を増やす因子の影響が大きいと考えられる。

3.2.4 考察

1. 16ケースの中で最も平均の騒音レベル低減効果の高いものはケース8である。また、全部屋を対象とした騒音レベル低減代の最大値ではケース16が最も大きい。
2. 設計パラメータの中で騒音レベル低減効果の高いものは、居住区デッキ板厚の増加と推定される。
3. 内壁を増やす構造変更を行うと、その部屋で騒音レベルが悪化する。

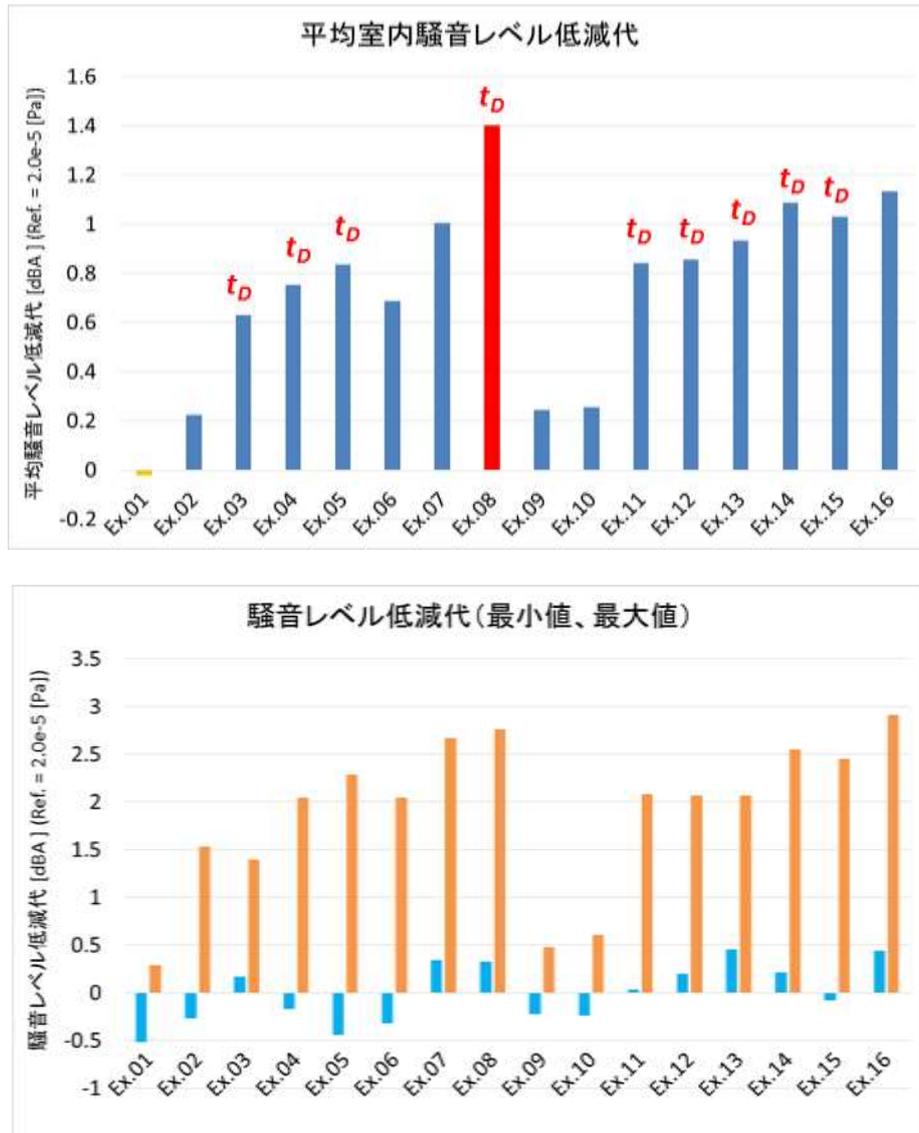


図 3.2.4-1 騒音レベル低減代

3.2.5 船体構造最適仕様の確認解析

3.2.5.1 最適仕様の決定

D 最適基準実験計画に基づいた 16 ケースの騒音解析結果から、各居室の周波数成分ごとに応答曲面法を用いて騒音レベルを予測する。その後、下記の条件のもとに最適解を探し、最適水準値を決定した。

最適水準値の探索及び決定に関する説明は、付録 III 「騒音最適化手法」に示す。

表 3.2.5.1-1 設計パラメータと水準値

制約条件：上部構造物の重量増分の規制値 **10ton** ※1

目的関数：最も成績の悪い居室の最良化

(「各居室の騒音レベルー騒音規制値」が最大の居室)

＜設計パラメータと水準値＞				＜最適水準値＞		
No.	設計パラメータ	記号	水準値			水準
			-1	0	1	
1	居住区デッキ高さ [m]	h	2.55	2.60	2.65	2.65
2	居住区外壁板厚 [mm]	t_o	6	8	10	6
3	居住区内壁板厚 [mm]	t_i	6	8	10	6
4	居住区デッキ板厚 [mm]	t_D	6	8	10	8
5	EC板厚 [mm]	t_E	6	8	10	8
6	居住区内壁の変更	f_i	減らす	現状	増やす	減らす
7	Cデッキ暴露甲板	f_D	現状		切離	現状

※1：本事業の中での制約として設けた数値（造船所の経験上から判断した値）であり、実際には船体の性能（積載重量、速力、復原性等）及び重心位置の変化に伴う固有振動と船体振動との関係を確認する必要がある。

3.2.5.2 室内騒音レベル比較

ベースシブモデルと最適仕様に基づいてモデル変更を行った最適仕様モデルで、各居室の室内騒音レベル比較結果を以下に示す。

- Poop deck

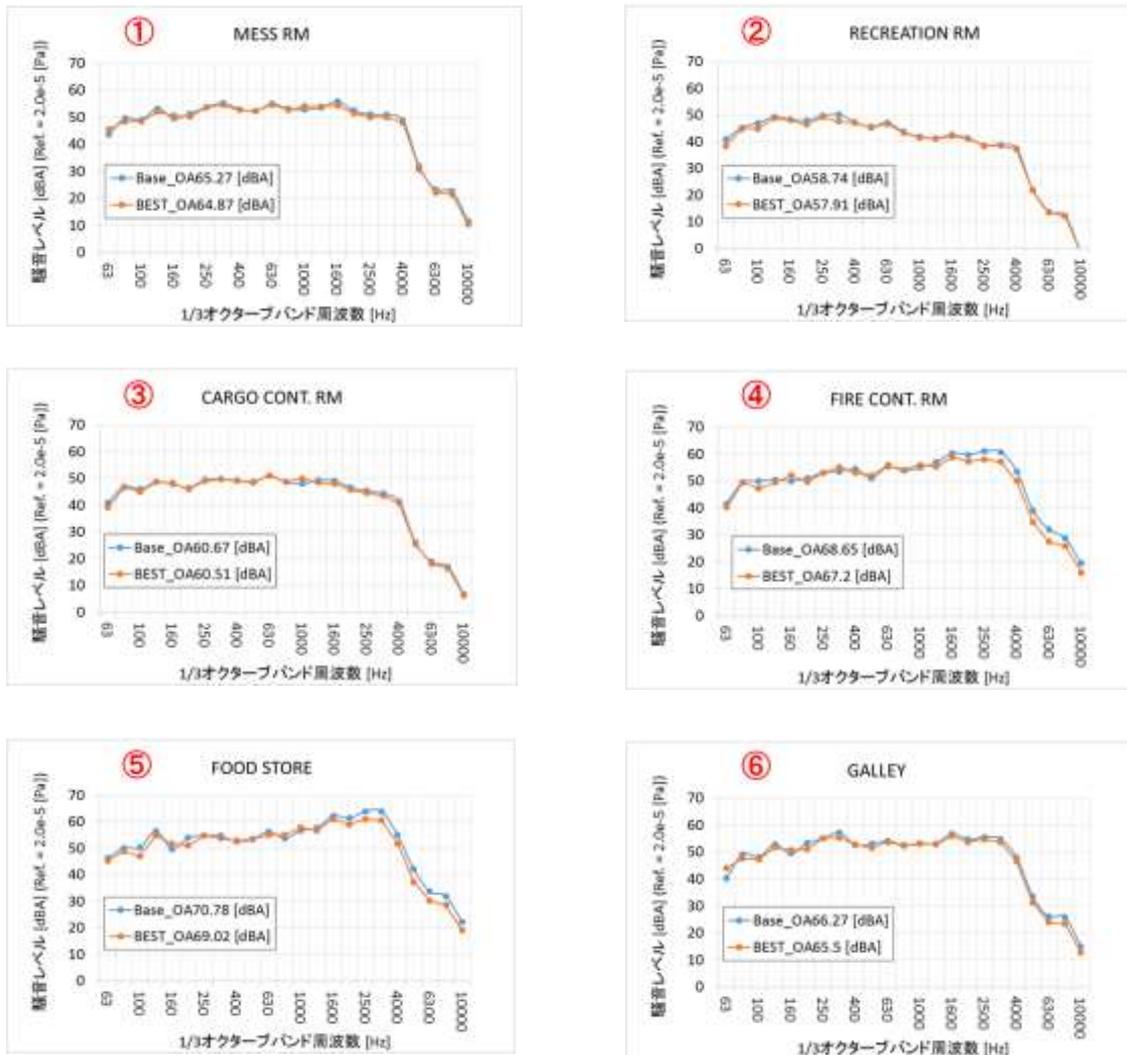
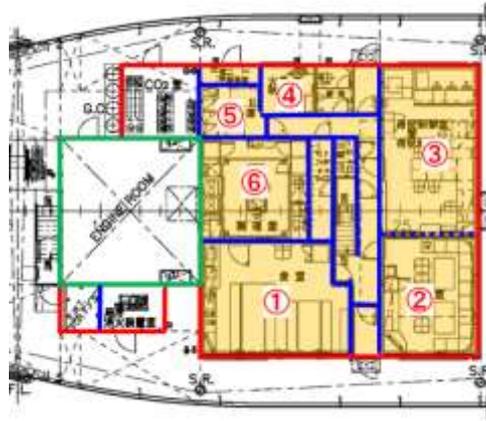


図 3.2.5.2-1(1) 室内騒音レベルの比較

- Boat deck

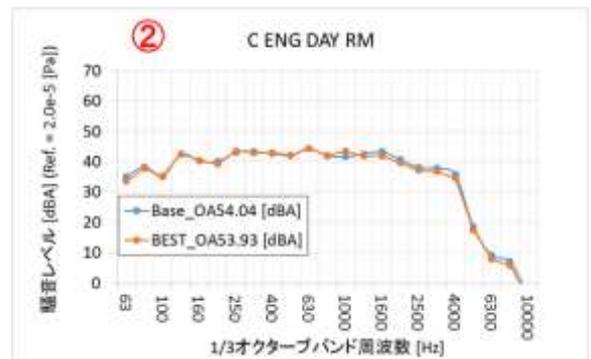
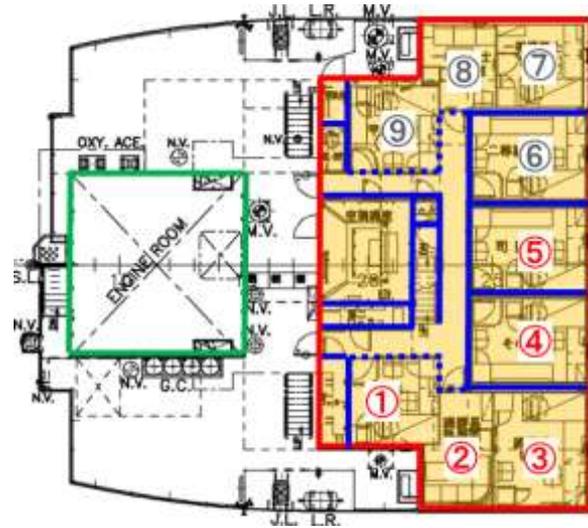


図 3.2.5.2-1(2) 室内騒音レベルの比較

- Boat deck

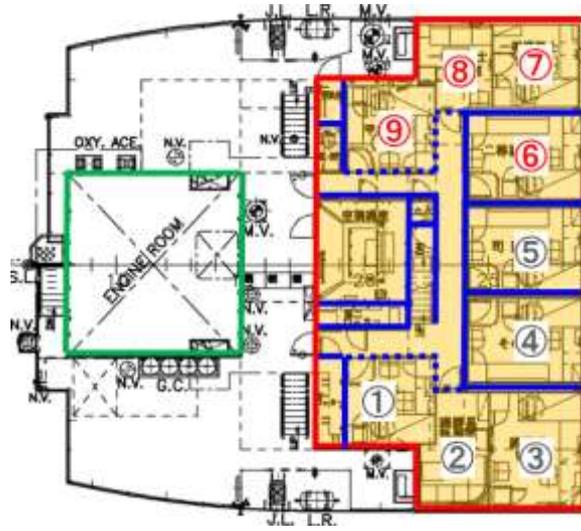


図 3.2.5.2-1(3) 室内騒音レベルの比較

- Captain deck

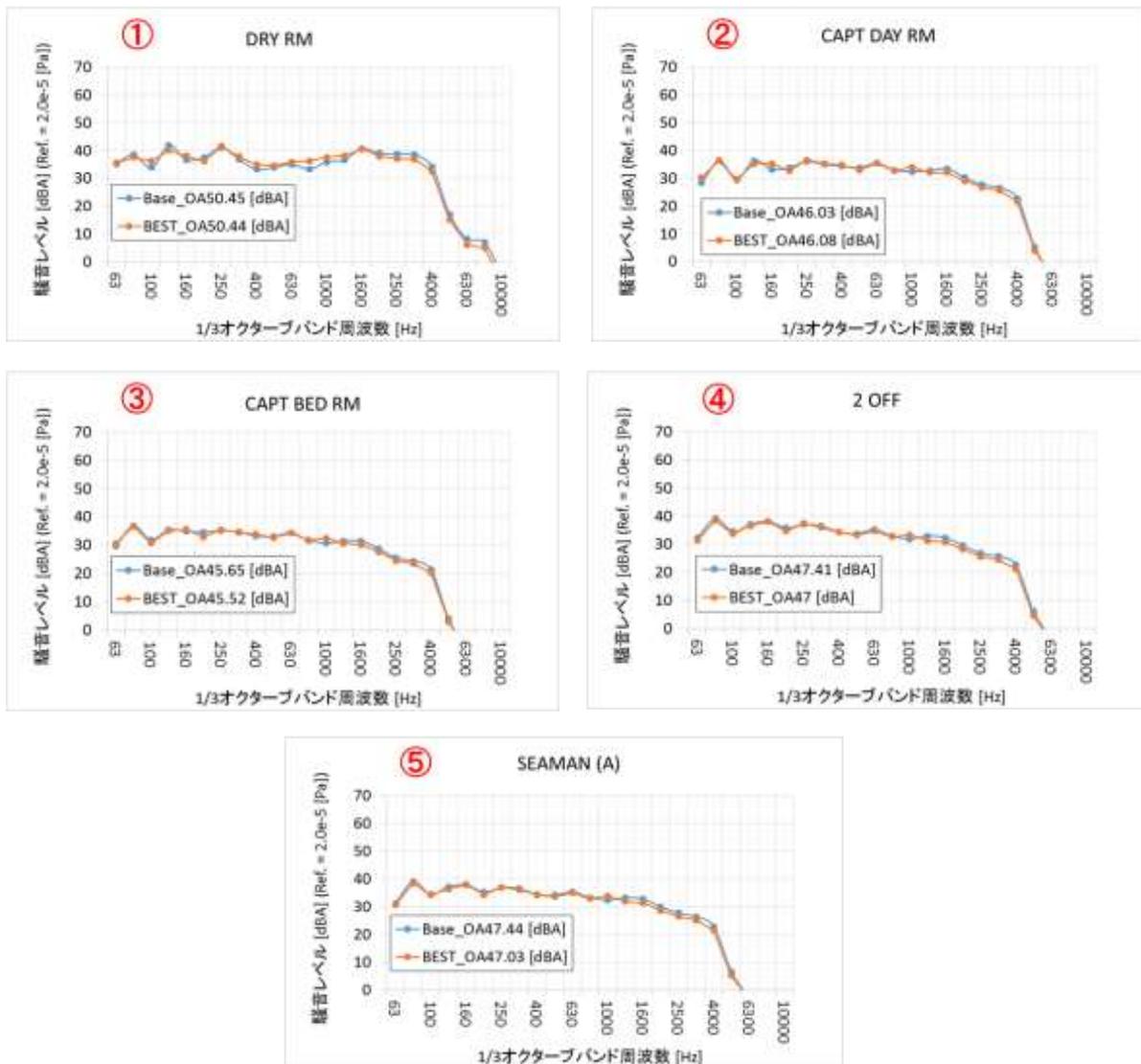


図 3.2.5.2-1(4) 室内騒音レベルの比較

- Captain deck

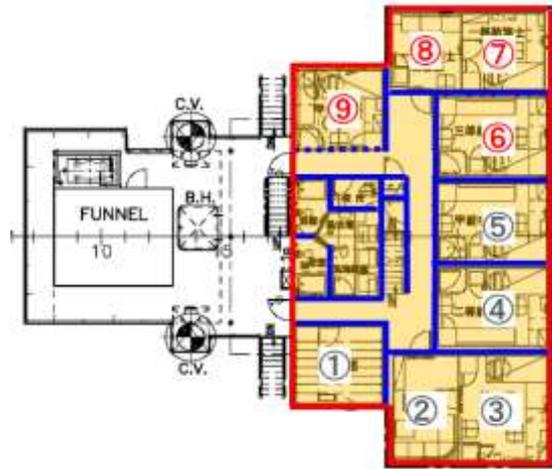


図 3.2.5.2-1(5) 室内騒音レベルの比較

3.2.5.3 室内騒音レベル低減代

ベースシップモデルを基準としたときの最適化仕様の騒音レベル低減代を以下に示す。最適化仕様での平均騒音レベル低減代は 0.4 dB 程度となった。

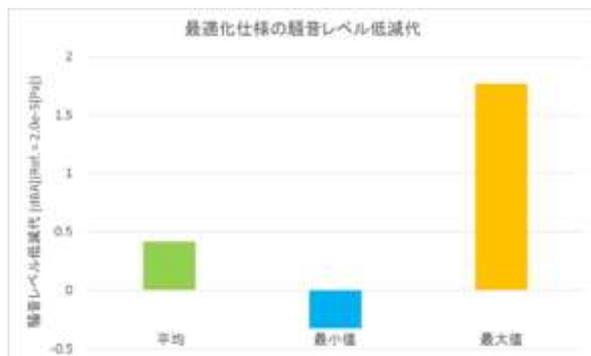


図 3.2.5.3-1 最適化仕様の騒音レベル低減代

3.2.6 考察

①SEA モデルを用いた設計因子の感度解析：

船体強度を考慮した最適化設計パラメータと水準値の組み合わせ 16 ケースのモデルを解析した結果、16 ケースの中で最も平均の騒音レベル低減効果の高いものはケース 8 であった。また、設計因子の中で騒音レベル低減効果の高いものは、居住区デッキ板厚の増加と推定される。

②船体構造最適仕様の確認解析：

16 ケースの騒音解析結果から応答曲面法を用いて騒音レベルを予測し、上部構造物の重量制限を満たす最適解を探索し、最適水準値を決定した。ベースシップモデルと最適仕様モデルで各居室の室内騒音レベルの比較を行い、最適仕様での平均騒音レベル低減代は 0.4dB 程度となった。

3.3 設計パラメータの設計効率

3.1 節、3.2 節では、「最も成績の悪い居室の成績を最良化する」という最適設計思想に基づいた検討を行った。ここでは、全部屋が合格する確率（ここでは確信度といい、詳しくは 4.1 節に示す）を評価関数とし、上部構造物の重量増分と確信度の上昇の比率から設計パラメータごとの設計効率についての一般的考察を加える。両者は異なる目的関数であるが、確信度を上げる（全体の合格率を上げる）ためには、基本的には成績の最も悪い部屋を改善する必要があるため、結果として同じような検討を行っているといえる。

図 3.3-1 は、上部構造物重量増分 (dM) に対する確信度の計算結果をプロットしており、重量増分と確信度の傾き (確信度/dM) が求まる。図 3.3-1 の凡例は、表 3.2.5.1-1 の記号と同じである。図 3.3-1 は、一般的な見解として、

- ・ 傾き (確信度/dM) が大きいほど効率がよい
 - ・ 傾きが負の場合は重量増加と確信度がトレードオフ関係にない
 - ・ 現状モデルを基本とした場合であって、他のモデルを基本とした場合には傾きは変化する
 - ・ 傾きが大きいものから必ず最適解が選ばれるとは限らない
- である。

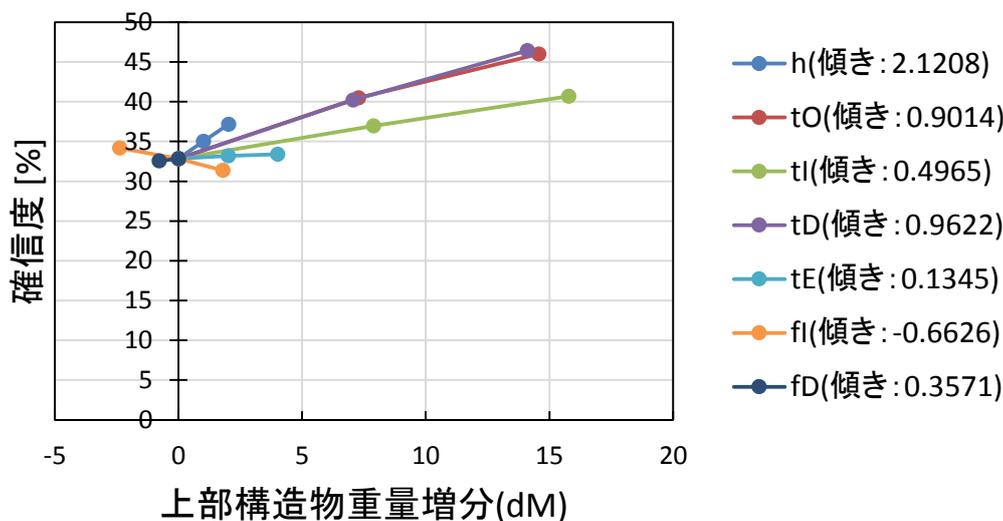


図 3.3-1 上部構造物重量増分と確信度の関係

第一浪速丸に対して、図 3.3-1 から求まる傾き (確信度/dM) の大小関係は、

$$h > tD > tO > tI > fD > tE \quad fI \text{ の傾きは負}$$

であった。このことから以下のようにまとめられる。

- **h**（居住区デッキ高さ）は設計効率が最も良く，設計可能領域内での重量増分変化が小さい。したがって表 3.3-1 に示すように，最適解では **h**（居住区デッキ高さ）が最優先に上げられる
- **tD**（居住区デッキ板厚），**tO**（居住区外壁板厚）は 2 番目，3 番目に設計効率が良い。したがって，表 3.3-1 に示すように，最適解では **tD**（居住区デッキ板厚），**tO**（居住区外壁板厚）が 2 番目，3 番目に優先的に上げられている
- **tE**（機関室ケーシング板厚）は設計効率が良くないにもかかわらず，最適解では 4 番目に優先的に上げられている。設計可能領域内での重量変化が小さいため，補佐的に採用されていると思われる
- **fI**（居住区内壁の変更）の傾きが負であった。したがって，確信度と **dM** がトレードオフ関係にないため，最適解では **fI**（居住区内壁の変更）は全て-1 となっている。

表 3.3-1 上部構造物重量増分に対する最適な設計パラメータ組み合わせと確信度

dM規制値 [ton]	水準値							dM [ton]	確信度
	h	tO	tI	tD	tE	fI	fD		
0	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-0.5	0.38
10	1	-1	-1	0	0	-1	-1	8.7	0.47
20	0	0	-1	1	-1	-1	1	19.3	0.57
30	1	1	-1	1	-1	-1	-1	28.8	0.65
40	1	1	0	1	0	-1	-1	38.2	0.68
制限なし	1	1	1	1	1	-1	-1	47.7	0.70

4 騒音対策品の最適化

騒音対策品の施工による最適化を、騒音対策品のコストの観点から最適な組み合わせを求めた。ここでは、騒音対策品として多く利用される①発電機防振ゴム、②浮床、③多孔質天井パネルを対象に行った。

先行して簡易モデルによる検討をおこない、検討方法を確立した後実船モデルによる検討を行った。簡易モデルによる検討では、予測計算を行う条件（計算数）が膨大となるため、SEA による方法ではなく、Janssen 法による騒音予測と最適化計算の組み合わせで検討した。

4.1 簡易モデルによる検討

4.1.1 浮床施工

第1段階で最適化された構造（表 4.1.1-1 参照）を対象に、騒音対策品である浮床材を部屋床面に施工するか否かを、浮床施工コストを制約条件として最適化を行う。

表 4.1.1-1 最適化された構造

ID	居住区 デッキ高さ (mm)	居住区 外壁板厚 (mm)	居住区 内壁板厚 (mm)	居住区 デッキ板厚 (mm)	機関室 ケーシング	発電機位置
331	オリジナル+100	オリジナル	オリジナル	オリジナル+2	オリジナル	後方

設計パラメータは居住区内の部屋とし、浮床を施工するか否かの2水準とする。図 4.1.1-1 に、検討対象とする簡易船体形状モデル部屋の配置を示す。表 4.1.1-2 に、簡易船体形状モデル部屋に関する情報を示す。フレーム No は、モデル船の寸法と整合を取るよう設定した。設計パラメータ（部屋）の数が14であるから、組み合わせの全ケースは16,384 ケースとなる。表 4.1.1-3 に組み合わせケースの一部を示す。表中の0は浮床を施工しない状態、1は浮床を施工する状態とする。

騒音レベルの計算は Janssen 法予測プログラムを使用する。使用するデータベース（振動伝達損失の各種係数）は、構造最適化されたケースの VA One による騒音レベルでチューニングした結果を用いる。構造最適化した表 4.1.1-1 の状態における VA One による騒音予測結果とチューニング後の予測結果を表 4.1.1-4 に示す。表 4.1.1-5 に、浮床施工の有無による各部屋の騒音レベルを示す。

Janssen 法予測プログラムによる計算結果は確定値であるが、騒音対策品最適化の検討では、騒音レベルを確率分布とみなして、応答曲面の算定及び最適化計算に合格確率をパラメータとする。浮床対策を施さない部屋の騒音レベルのばらつきは、Janssen 法による予測計算結果と実船計測結果との誤差（ばらつき）の統計的性質を考慮して、標準偏差を1.5 dB(A)とした。よって、騒音レベルは、騒音予測結果を平均値とし、標準偏差1.5dB(A)の正規分布をあてはめる。浮床を採用した部屋の騒音レベルは、浮床の挿入損失を確定値

として予測計算を行い、その騒音レベルの計算結果を確率特性の平均値とする。浮床対策を施した部屋の騒音レベルのばらつきは、挿入損失も標準偏差 1.5 dB(A)のばらつきを持った特性をもっているとみなして、挿入損失を差し引いたことにより、浮床を採用した部屋の騒音レベルの標準偏差は、 $1.5 \times \sqrt{2}$ dB(A)とする。浮床を採用した部屋の騒音レベルも正規分布をあてはめる。各部屋の合格率は、図 4.1.1-2 に与えられた正規分布の確率分布で規制値を超えない確率(図中の斜線)を求める。表 4.1.1-6 に、浮床施工の有無による各部屋の合格確率を示す。この各部屋の合格確率を基に、全部屋が合格する確率（ここでは確信度という）を全ケース(16,384 ケース)に対して求める。

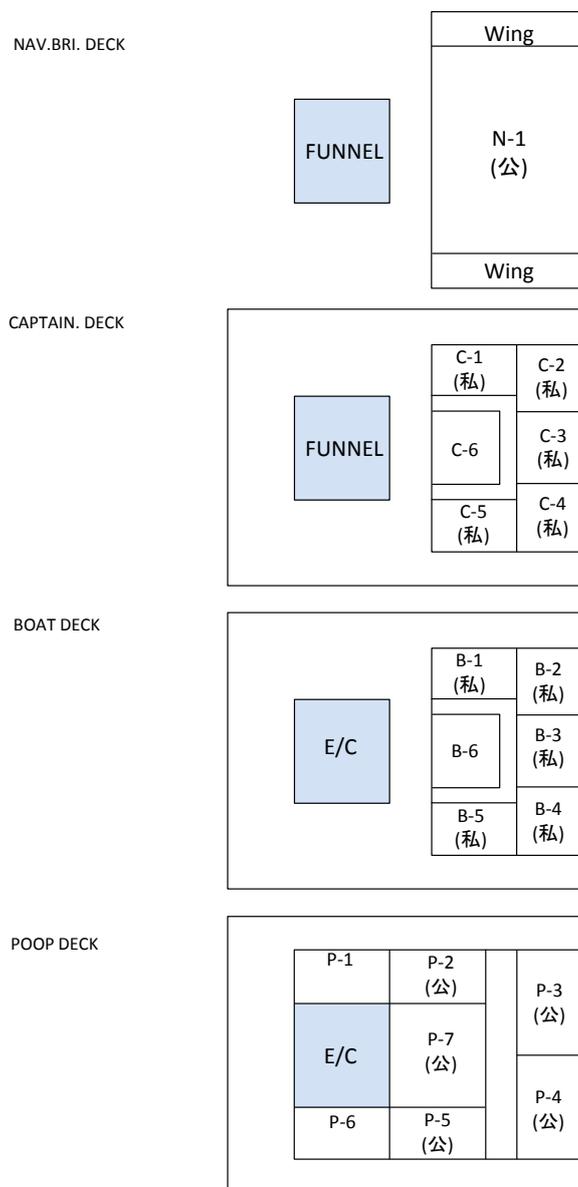


図 4.1.1-1 簡易船体形状モデル部屋の配置

表 4.1.1-2 簡易船体形状モデル部屋の情報

デッキ	部屋記号	公室／私室	規制値 (dB(A))	デッキNo	フレームNo	部屋面積 (m ²)
C Deck	C-1	私室	60	5	21.0	11.7
C Deck	C-2	私室	60	5	26.5	14.44
C Deck	C-3	私室	60	5	26.5	14.44
C Deck	C-4	私室	60	5	26.5	14.44
C Deck	C-5	私室	60	5	21.0	11.7
B Deck	B-1	私室	60	4	21.0	11.7
B Deck	B-2	私室	60	4	26.5	14.44
B Deck	B-3	私室	60	4	26.5	14.44
B Deck	B-4	私室	60	4	26.5	14.44
B Deck	B-5	私室	60	4	21.0	11.7
P Deck	P-2	公室	65	3	20.0	15.37
P Deck	P-3	公室	65	3	26.5	21.66
P Deck	P-4	公室	65	3	26.5	21.66
P Deck	P-5	公室	65	3	20.0	15.37

表 4.1.1-3 全組み合わせケース (一部抜粋)

ID	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	P-2	P-3	P-4	P-5
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1
16382	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
16383	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
16384	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

表 4.1.1-4 構造最適化状態での騒音レベル (VA One 予測結果と Janssen 予測結果)

	VAOne 計算結果 dB(A)	チューニング後 予測値 dB(A)
C-1	57.0	57.5
C-2	57.3	57
C-3	57.1	57
C-4	57.3	57
C-5	57.6	57.5
B-1	59.2	59.4
B-2	58.8	58.9
B-3	58.9	58.9
B-4	59.0	58.9
B-5	59.5	59.4
P-2	61.9	62.2
P-3	61.7	61.8
P-4	61.9	61.8
P-5	62.6	62.2

表 4.1.1-5 浮床施工の有無による各部屋の騒音レベル

	騒音レベル (dB(A))	
	浮床施工 無	浮床施工 有
C-1	57.5	56
C-2	57	55.3
C-3	57	55.3
C-4	57	55.3
C-5	57.5	56
B-1	59.4	57.5
B-2	58.9	56.8
B-3	58.9	56.8
B-4	58.9	56.8
B-5	59.4	57.5
P-2	62.2	59.3
P-3	61.8	58.6
P-4	61.8	58.6
P-5	62.2	59.3

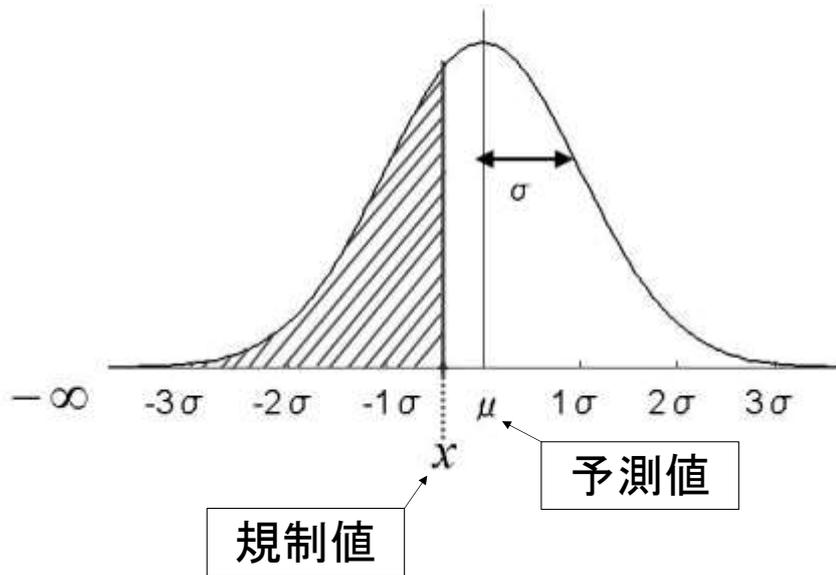


図 4.1.1-2 確率的騒音レベル

表 4.1.1-6 浮床施工の有無による各部屋の合格確率

	合格確率	
	浮床施工 無	浮床施工 有
C-1	0.95	0.97
C-2	0.98	0.99
C-3	0.98	0.99
C-4	0.98	0.99
C-5	0.95	0.97
B-1	0.66	0.88
B-2	0.77	0.93
B-3	0.77	0.93
B-4	0.77	0.93
B-5	0.66	0.88
P-2	0.97	1.00
P-3	0.98	1.00
P-4	0.98	1.00
P-5	0.97	1.00

つぎに、浮床施工の費用を考慮して浮床施工を行う部屋の最適な組み合わせを求める。

ここでは、浮床施工の単価を 40,000 (円/m²) とする。浮床施工費用の上限を 100 万円とした場合、表 4.1.1-7 に示す組み合わせ結果となった。この費用内であれば、規制値に対して余裕の無い 2 部屋(B-1、B-5)に対策することが最も確信度が高い結果となった。図 4.1.1-3 に、全ケースを対象に、費用と確信度の関係を示す。300 万円までの費用では、合格確率は投じた費用に対して合格確率も上がっているが、300 万円を超えると確信度は伸びない。図 4.1.1-3 で赤丸を付したケースが費用に対する確信度が高い最適な組み合わせであり、その結果を表 4.1.1-8 に示す。本モデルでは、部屋 B-1、B-5 に優先して浮床を施工し、ついで費用に応じて部屋 B-2、B-3、B-4 のいずれかまたはその組み合わせ順に浮床を施工することが最適であることがわかった。B Deck の部屋すべてに浮床を施工し、さらに C Deck の部屋に浮床を施工しても費用対効果は伸びない。

表 4.1.1-7 浮床施工費用 100 万円を上限とする組み合わせ

ID	部屋名	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	P-2	P-3	P-4	P-5	確信度	浮床施工面積 (m ²)	浮床施工費用 (円)
273		-	-	-	-	-	対策	-	-	-	対策	-	-	-	-	0.27	23.4	936,000
529		-	-	-	-	対策	-	-	-	-	対策	-	-	-	-	0.21	23.4	936,000
8209		対策	-	-	-	-	-	-	-	-	対策	-	-	-	-	0.21	23.4	936,000
769		-	-	-	-	対策	対策	-	-	-	-	-	-	-	-	0.21	23.4	936,000
8449		対策	-	-	-	-	対策	-	-	-	-	-	-	-	-	0.21	23.4	936,000
17		-	-	-	-	-	-	-	-	-	対策	-	-	-	-	0.20	11.7	468,000
257		-	-	-	-	-	対策	-	-	-	-	-	-	-	-	0.20	11.7	468,000
33		-	-	-	-	-	-	-	-	対策	-	-	-	-	-	0.18	14.44	577,600
65		-	-	-	-	-	-	-	対策	-	-	-	-	-	-	0.18	14.44	577,600
129		-	-	-	-	-	-	対策	-	-	-	-	-	-	-	0.18	14.44	577,600
8705		対策	-	-	-	対策	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.16	23.4	936,000
2		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	対策	0.15	15.37	614,800
9		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	対策	-	-	-	0.15	15.37	614,800
513		-	-	-	-	対策	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	11.7	468,000
8193		対策	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	11.7	468,000
3		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	対策	-	0.15	21.66	866,400
5		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	対策	-	-	0.15	21.66	866,400
1025		-	-	-	対策	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	14.44	577,600
2049		-	-	対策	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	14.44	577,600
4097		-	対策	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	14.44	577,600
1		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	0	0

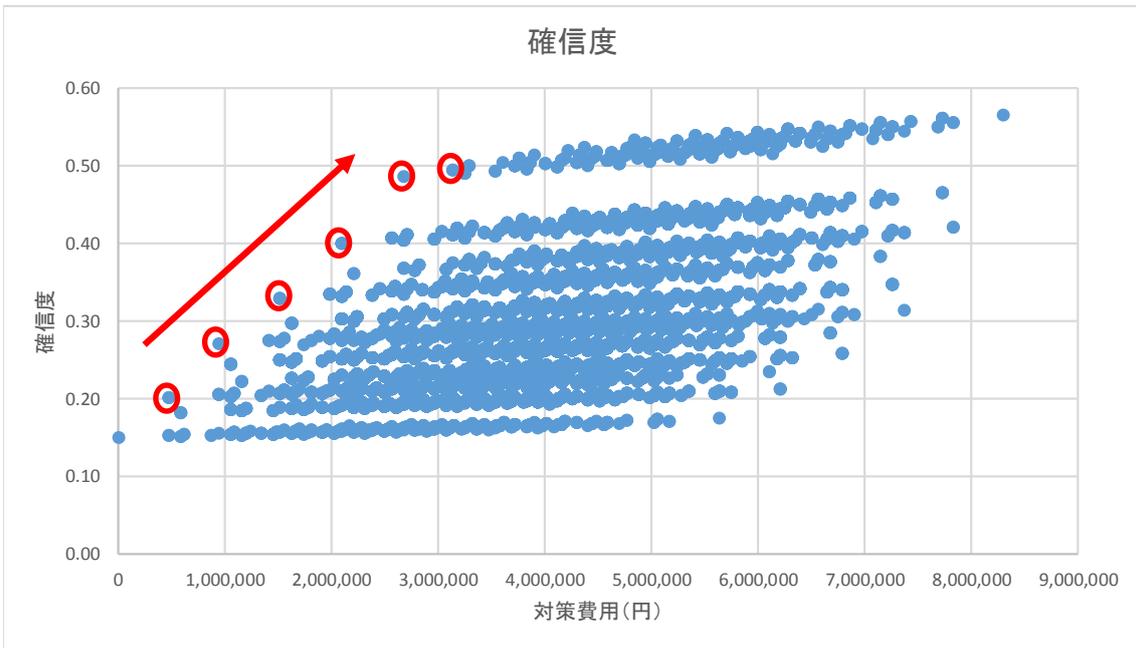


図 4.1.1-3 費用と確信度

表 4.1.1-8 費用に対する最適な組み合わせ

ID	部屋名	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	P-2	P-3	P-4	P-5	確信度	浮床施工面積 (m ²)	浮床施工費用 (円)
17		-	-	-	-	-	-	-	-	-	対策	-	-	-	-	0.20	11.7	468,000
257		-	-	-	-	-	対策	-	-	-	-	-	-	-	-	0.20	11.7	468,000
273		-	-	-	-	-	対策	-	-	-	対策	-	-	-	-	0.27	23.4	936,000
305		-	-	-	-	-	対策	-	-	対策	対策	-	-	-	-	0.33	37.84	1,513,600
337		-	-	-	-	-	対策	-	対策	-	対策	-	-	-	-	0.33	37.84	1,513,600
401		-	-	-	-	-	対策	対策	-	-	対策	-	-	-	-	0.33	37.84	1,513,600
369		-	-	-	-	-	対策	-	対策	対策	対策	-	-	-	-	0.40	52.28	2,091,200
433		-	-	-	-	-	対策	対策	-	対策	対策	-	-	-	-	0.40	52.28	2,091,200
465		-	-	-	-	-	対策	対策	対策	-	対策	-	-	-	-	0.40	52.28	2,091,200
497		-	-	-	-	-	対策	対策	対策	対策	対策	-	-	-	-	0.49	66.72	2,668,800
1009		-	-	-	-	対策	対策	対策	対策	対策	対策	-	-	-	-	0.50	78.42	3,136,800
8689		対策	-	-	-	-	対策	対策	対策	対策	対策	-	-	-	-	0.50	78.42	3,136,800

4.1.2 浮床施工および多孔質天井パネル施工

本節では、前節の浮床に加え、多孔質天井パネルの施工も検討したうえで、騒音最適化を行う。浮床は Janssen においては挿入損失に影響を及ぼすが、多孔質天井パネルは居室吸音率に影響を及ぼすものとする。また、多孔質天井パネルの追加施工費用は 2000 円/m²とする。

各居室では浮床および多孔質天井パネルの施工の有無により 4 ケースの騒音が想定される。各ケースにおける水準値を表 4.1.2-1 に示す。居室の数は 14 のため、全てのケースを計算するには 4¹⁴=268,435,456 通りとなり、前節の 2¹⁴=16,384 通りと比べて計算コストが非常に高い。そのため、本節では計算を簡略化するために、同じデッキ、フレーム数かつ面積が等しい居室で 6 つのグループを作り、このグループ内では同様の施工を行うものと仮定した。これらのグループを表 4.1.2-2 に示す。これにより、全ての組合せは 4⁶=4,096 通りとなる。これら全ての組合せを表 4.1.2-3 に示す。

Janssen の騒音予測計算により求めた各グループの騒音予測値、ルールによって定められる騒音規制値、およびこれらより求めたグループごとの合格率を表 4.1.2-4 に示す。解析結果のばらつきは、前節と同様、正規分布を仮定した。標準分散は水準値が 0 の場合は 1.5 dB、その他は 1.5×√2 dB とした。表 4.1.2-4 より、今回の計算条件に限れば、多孔質天井パネルによる騒音低減量は浮床に比べて高い結果となった。また、施工費用もより安価なため、今回の最適解の検討では多孔質天井パネルが浮床に比べて優位に働くものと予測される。

全ての水準から計算された施工費用と確信度の関係、ならびにパレート最適解を図 4.1.2-1 と表 4.1.2-5 に示す。最適解では事前の予想通り、多孔質天井パネルの施工が優先されている。また、最適解における施工費用と確信度のトレードオフ関係は表 4.1.2-5 ならびに図 4.1.2-2 で色分けしたように、大きく分けて 4 段階に分類できることが伺える。表 4.1.2-5 から読み取った、各モードにおける施工の傾向を表 4.1.2-6 に示す。いずれのモードにおいても、最も規制値に対して厳しいと思われる B デッキ後方を優先的に施工しており、その点においては妥当な検討が行えているといえる。

表 4.1.2-1 浮床ならびに多孔質天井パネルの施工の有無と水準値の関係

	多孔質天井パネルなし	多孔質天井パネルあり
浮床なし	0	1
浮床あり	2	3

表 4.1.2-2 同じ施工を行う居室のグループ

グループ名	居室 1	居室 2	居室 3
C デッキ後方	C-1	C-5	C-4
C デッキ前方	C-2	C-3	
B デッキ後方	B-1	B-5	B-4
B デッキ前方	B-2	B-3	
P デッキ中央	P-2	P-5	
P デッキ前方	P-3	P-4	

表 4.1.2-3 全ての水準の組合せ抜粋

C デッキ後方	C デッキ前方	B デッキ後方	B デッキ前方	P デッキ中央	P デッキ前方
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	2
0	0	0	0	0	3
0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	1	1
:	:	:	:	:	:
3	3	3	3	2	3
3	3	3	3	3	0
3	3	3	3	3	1
3	3	3	3	3	2
3	3	3	3	3	3

表 4.1.2-4 グループごとの騒音予測値とそれに基づく合格率

	規制値 [dB]	水準ごとの騒音予測値 [dB]				水準ごとの合格率			
		0	1	2	3	0	1	2	3
C デッキ後方	60.0	57.5	55.0	56.0	53.4	0.91	0.98	0.94	1.00
C デッキ前方	60.0	57.0	54.5	55.3	52.7	0.93	0.99	0.96	1.00
B デッキ後方	60.0	59.4	56.9	57.5	54.9	0.43	0.86	0.78	0.98
B デッキ前方	60.0	58.9	56.4	56.8	54.2	0.45	0.87	0.82	0.99
P デッキ中央	65.0	62.2	59.0	59.3	56.5	0.94	1.00	0.99	1.00
P デッキ前方	65.0	61.8	58.5	58.6	55.8	0.97	1.00	1.00	1.00

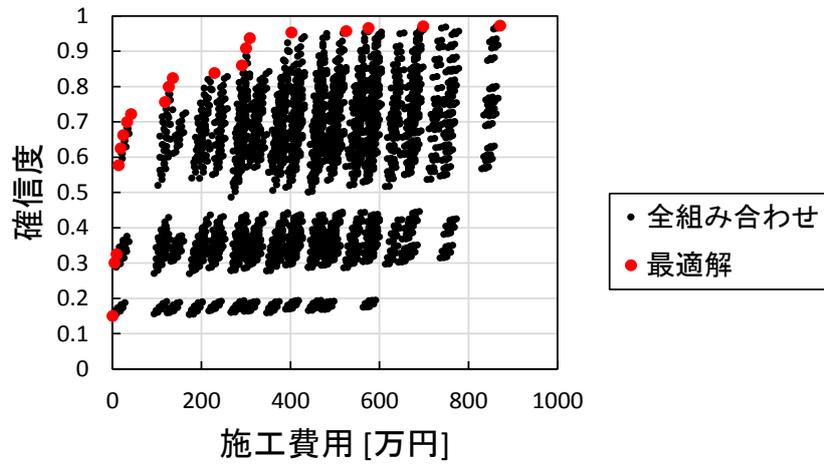


図 4.1.2-1 施工費用と確信度の関係

表 4.1.2-5 最適解における各グループの水準値と施工費用および確信度の関係

水準値						施工費用 [万円]	確信度
Cデッキ 後方	Cデッキ 前方	Bデッキ 後方	Bデッキ 前方	Pデッキ 中央	Pデッキ 前方		
0	0	0	0	0	0	0	0.15
0	0	1	0	0	0	5	0.30
1	0	1	0	0	0	9	0.33
0	0	1	1	0	0	13	0.58
1	0	1	1	0	0	18	0.62
1	0	1	1	1	0	24	0.66
1	1	1	1	1	0	33	0.70
1	1	1	1	1	1	42	0.72
1	0	3	1	1	0	118	0.76
1	1	3	1	1	0	126	0.80
1	1	3	1	1	1	135	0.82
3	1	3	1	1	1	229	0.84
1	0	3	3	1	0	291	0.86
1	1	3	3	1	0	300	0.91
1	1	3	3	1	1	308	0.94
3	1	3	3	1	1	402	0.95
3	1	3	3	3	1	525	0.96
3	3	3	3	1	1	575	0.97
3	3	3	3	3	1	698	0.97
3	3	3	3	3	3	872	0.97

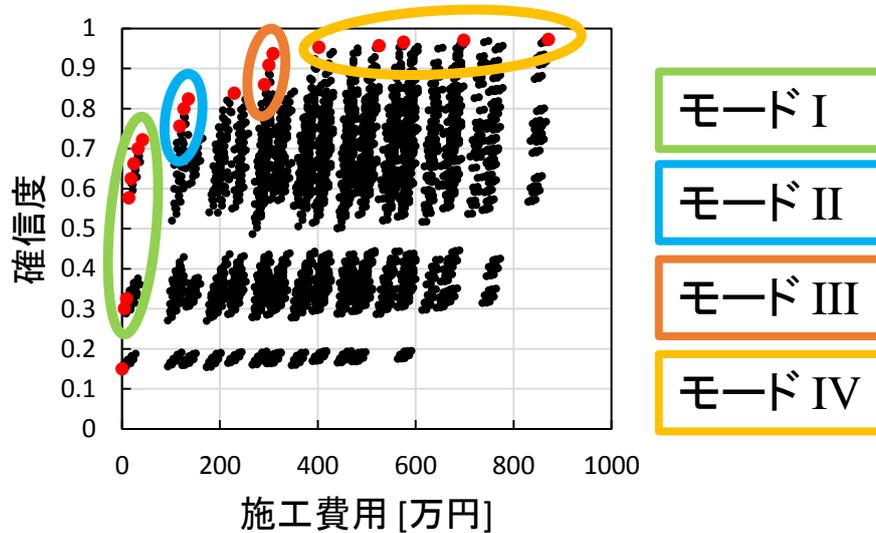


図 4.1.2-2 最適解における施工費用と確信度のトレードオフ関係ごとのモード定義

表 4.1.2-6 各モードにおける施工の傾向

モード	施工の傾向
モード I	最も厳しい B デッキ後方に多孔質天井パネルを施工した上で、他の居室の多孔質天井パネルの施工を増やしているモード
モード II	最も厳しい B デッキ後方に多孔質天井パネルと浮床を施工し、次いで厳しい B デッキ前方ならびに C デッキ後方と P デッキ中央に多孔質天井パネルを施工した上で、他の居室の多孔質天井パネルの施工を増やしているモード
モード III	B デッキ全てに多孔質天井パネルと浮床を施工し、次いで厳しい C デッキ後方ならびに P デッキ中央に多孔質天井パネルを施工した上で、他の居室の多孔質天井パネルの施工を増やしているモード
モード IV	全ての居室に多孔質天井パネルを施工し、加えて B デッキ全てと C デッキ後方に浮床を施工した上で、他の居室の浮床の施工を増やしているモード

4.1.3 浮床施工、多孔質天井パネル及び発電機防振施工

本節では、前節の浮床、多孔質天井パネルに加え、発電機防振も検討したうえで、騒音最適化を行う。発電機防振は発電機振動レベルを低減する。発電機防振の施工費用は、発電機2台に設置するとし、2,000,000円とする。

各居室では浮床、多孔質天井パネル、発電機防振の施工の有無により8ケースの騒音が想定される。各ケースにおける水準値を表4.1.3-1に示す。表2.4-9中の0は対策無し、1は対策有りに相当する。居室の数は14のため、全てのケースを計算するには計算コストが非常に高い。そのため、前節同様のグループを作り、このグループ内では同様の施工を行うものと仮定した。これらのグループを表4.1.3-2に示す。これにより、全ての組合せは $2^4=16$ 通りとなる。これら全ての組合せを表4.1.3-3に示す。

Janssenの騒音予測計算により求めた各グループの騒音予測値、騒音コードによって定められる騒音規制値、およびこれらより求めたグループごとの合格率を表4.1.3-4に示す。解析結果のばらつきは、前節と同様、正規分布を仮定した。標準分散は水準値が0の場合は1.5dB、その他は $1.5 \times \sqrt{2}$ dBとした。表4.1.3-4より、今回の計算条件に限れば、発電機防振対策が他の対策より低減量は高い結果となった。

全ての水準から計算された施工費用と確信度の関係、ならびにパレート最適解を図4.1.3-1と表4.1.3-5に示す。最適解では事前の予想通り、多孔質天井パネルの施工が優先されている。また、最適解における施工費用と確信度のトレードオフ関係は表4.1.3-5ならびに図4.1.3-2で色分けしたように、大きく分けて4段階に分類できることが伺える。表4.1.3-5から読み取った、各モードにおける施工の傾向を表4.1.3-6に示す。いずれのモードにおいても、最も規制値に対して厳しいと思われるBデッキ後方を優先的に施工しており、その点においては妥当な検討が行えているといえる。

表 4.1.3-1 対策品の組み合わせと水準値の関係

水準値	0	1	2	3	4	5	6	7
浮床	0	0	1	1	0	0	1	1
多孔質天井パネル	0	1	0	1	0	1	0	1
発電機防振	0	0	0	0	1	1	1	1

表 4.1.3-2 同じ施工を行う居室のグループ

グループ名	居室 1	居室 2	居室 3
C デッキ後方	C-1	C-5	C-4
C デッキ前方	C-2	C-3	
B デッキ後方	B-1	B-5	B-4
B デッキ前方	B-2	B-3	
P デッキ中央	P-2	P-5	
P デッキ前方	P-3	P-4	

表 4.1.3-3 全ての水準の組合せ抜粋

C デッキ後方	C デッキ前方	B デッキ後方	B デッキ前方	P デッキ中央	P デッキ前方
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	2
0	0	0	0	0	3
0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	1	1
:	:	:	:	:	:
7	7	7	7	6	7
7	7	7	7	7	4
7	7	7	7	7	5
7	7	7	7	7	6
7	7	7	7	7	7

表 4.1.3-4 全ての水準の組合せ抜粋

名前	騒音レベル [dB]									合格率							
	規制値	0	1	2	3	4	5	6	7	0	1	2	3	4	5	6	7
Cデッキ後方	60	57.5	55	56	53.4	53.9	51.2	54.1	51.5	0.91	0.98	0.94	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00
Cデッキ前方	60	57	54.5	55.3	52.7	53.3	50.7	53.5	50.9	0.93	0.99	0.96	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Bデッキ後方	60	59.4	56.9	57.5	54.9	55.6	52.9	55.6	53	0.43	0.86	0.78	0.98	0.96	0.98	0.96	1.00
Bデッキ前方	60	58.9	56.4	56.8	54.2	55	52.4	55	52.4	0.45	0.87	0.82	0.99	0.97	0.98	0.97	1.00
Pデッキ中央	65	62.2	59	59.3	56.5	57.9	54.8	57.3	54.5	0.94	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Pデッキ前方	65	61.8	58.5	58.6	55.8	57.4	54.3	56.7	53.9	0.97	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

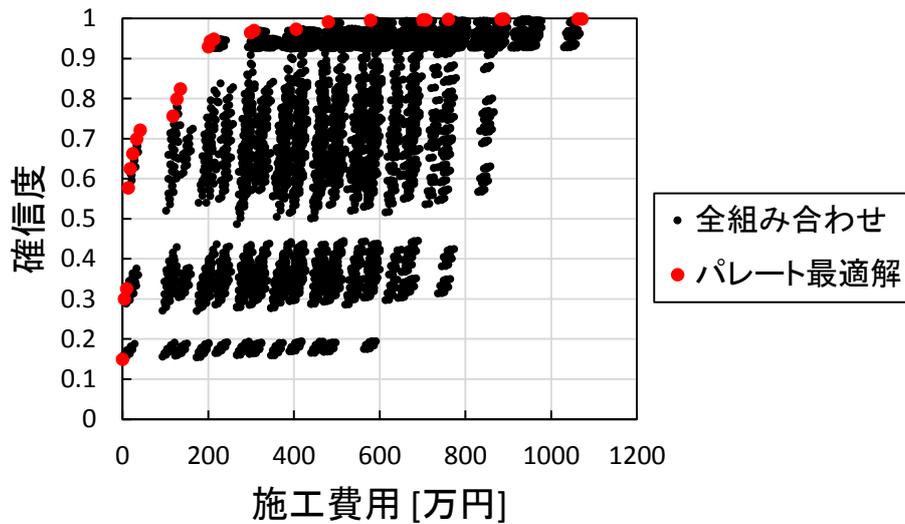


図 4.1.3-1 施工費用と確信度の関係

表 4.1.3-5 最適解における各グループの水準値と施工費用および確信度の関係

水準値						施工費用 [万円]	確信度
Cデッキ 後方	Cデッキ 前方	Bデッキ 後方	Bデッキ 前方	Pデッキ 中央	Pデッキ 前方		
0	0	0	0	0	0	0	0.15
0	0	1	0	0	0	5	0.30
1	0	1	0	0	0	9	0.33
0	0	1	1	0	0	13	0.58
1	0	1	1	0	0	18	0.62
1	0	1	1	1	0	24	0.66
1	1	1	1	1	0	33	0.70
1	1	1	1	1	1	42	0.72
1	0	3	1	1	0	118	0.76
1	1	3	1	1	0	126	0.8
1	1	3	1	1	1	135	0.82
4	4	4	4	4	4	200	0.93
4	4	5	4	4	4	205	0.94
4	4	5	5	4	4	213	0.95
4	4	7	4	4	4	298	0.96
4	4	7	5	4	4	307	0.97
7	4	7	5	4	4	405	0.97
4	4	7	7	4	4	480	0.99

7	4	7	7	4	4	579	0.99
7	4	7	7	6	4	701	1.00
7	4	7	7	7	4	708	1.00
7	7	7	7	4	4	760	1.00
7	7	7	7	6	4	883	1.00
7	7	7	7	7	4	890	1.00
7	7	7	7	7	6	1063	1.00
7	7	7	7	7	7	1072	1.00

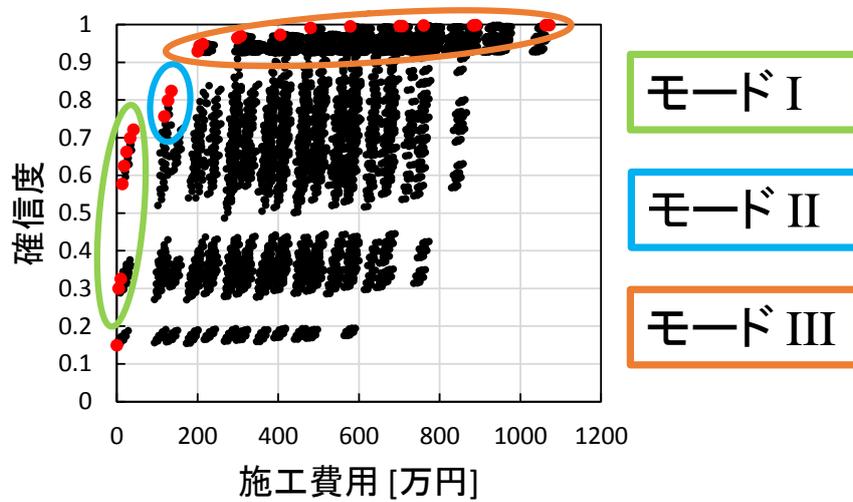


図 4.1.3-2 最適解における施工費用と確信度のトレードオフ関係ごとのモード定義

表 4.1.3-6 各モードにおける施工の傾向

モード	施工の傾向
モード I	最も厳しい B デッキ後方に多孔質天井パネルを施工した上で、他の居室の多孔質天井パネルの施工を増やしているモード
モード II	最も厳しい B デッキ後方に多孔質天井パネルと浮床を施工し、次いで厳しい B デッキ前方ならびに C デッキ後方と P デッキ中央に多孔質天井パネルを施工した上で、他の居室の多孔質天井パネルの施工を増やしているモード
モード III	発電機防振を行っているモード

4.1.4. 考察

最適化された構造を対象に、騒音対策品である浮床材を部屋床面に施工するか否かを、浮床施工コストを考慮して騒音規制に合格に対する確信度が最大となるように最適化計算を行った。騒音予測の計算は、Janssen 法による騒音予測プログラムを使用した。最適化の結果から、ある費用までは投じた費用に対して確信度は高くなるが、その費用を超えると確信度が伸びない結果となった。騒音規制値に対して余裕の無い部屋を優先的に浮き床施工することが費用対効果の面で最適であることが分かった。

また、浮床に加えて多孔質天井パネルの施工も考慮した解析を行い、施工費用と確信度のトレードオフ関係を求めた。最適解でのトレードオフ関係は大きく分けて4つのモードに分かれていることが判明し、各モードにおける施工の傾向を考察した。結果としては、いずれのモードにおいても多孔質天井パネルが優先的に施工されており、また最も騒音規制に対して厳しいBデッキ後方を優先して施工されていることが判明した。

さらに、発電機防振の効果も含めた解析を行い、施工費用と確信度のトレードオフ関係を求めた。最適解でのトレードオフ関係は大きく分けて3つのモードに分かれていることが判明し、各モードにおける施工の傾向を考察した。結果としては、施工費用が200万円未満の場合にはBデッキ後方を優先した、浮床、多孔質天井パネルの施工がパレート最適解として現れたが、施工費用が200万円を超える場合には発電機防振を最優先で施工するのがパレート最適解として現れた。

モデル船の構造・寸法・内装仕様を参考に、また、主機・発電機の振動・騒音実船データを用いて、モデル船を模擬した簡易船体形状モデルを対象に最適化計算を行った。構造最適化、騒音対策品の施工最適化いずれの結果も、モデル船(実船)の最適設計を行う上で合理的な検討結果となっている。なお、居住区デッキ高さが増すことによる復原性の検討、デッキ板厚が増すことによる共振対策の検討は、ここでは考慮されていない。

4.2 実船モデルによる検討

4.2.1 各種騒音対策品の騒音レベル低減効果代予測

4.2.1.1 騒音対策品適用最適化検討について

船体構造最適化モデルを基準に、騒音対策品（浮床、多孔質パネル、発電機防振）の適用最適化を行う。騒音対策品の適用組み合わせ表に基づいてモデルを作成し、実験計画法による計算条件に対する SEA 解析結果（各居室の騒音レベルスペクトル）を基に最適化計算を行う。

ここでは各種騒音対策品の騒音レベル低減効果代を報告する。

表 4.2.1.1-1 各種騒音対策品の騒音レベル低減効果代

	モデル	浮床	多孔質パネル	発電機防振
船体構造最適化モデル →	Ex1	×	×	×
	Ex2	○	×	×
	Ex3	×	○	×
	Ex4	×	×	○
	Ex5	○	○	×
	Ex6	×	○	○
	Ex7	○	×	○
	Ex8	○	○	○

4.2.2 騒音対策品の適用箇所

騒音対策品適用検討モデルにおいて、騒音対策品（浮床、多孔質パネル）を適用する居室を図 4.2.2-1 に示す。なお、発電機防振は入力値を変更しているため、全ての居室に効果がある。



図 4.2.2-1 騒音対策品を適用する居室

4.2.3. 騒音レベル低減効果代

騒音レベルの結果を図 4.2.3-1 に示す。なお、浮床による騒音解析結果をみると 400Hz 以上の高周波帯域で大きく低下しているが、エアコン他暗騒音による影響で実際には、これほどまで低減しないと見込まれる。

・ Poop Deck

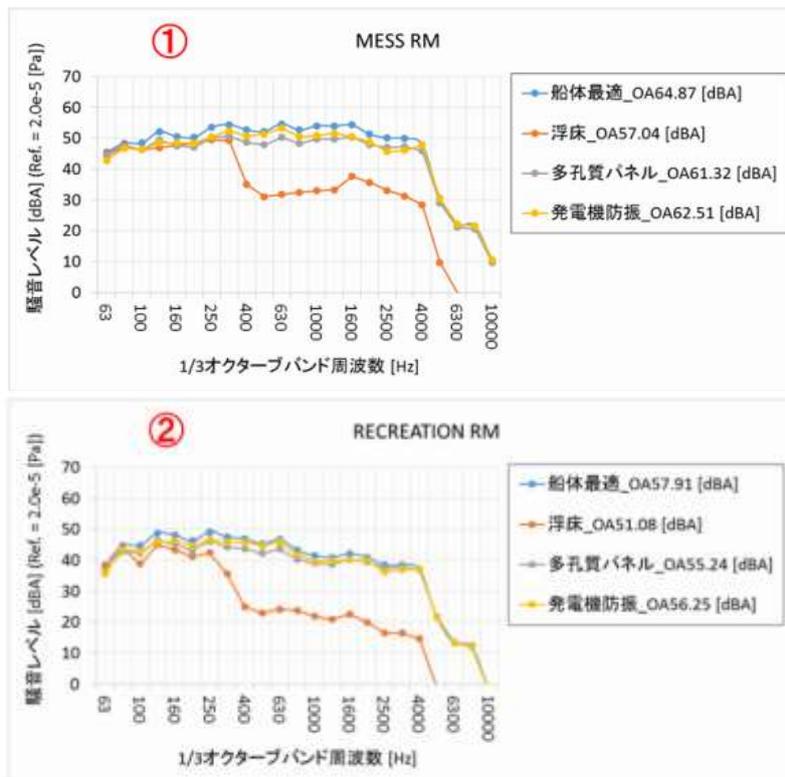
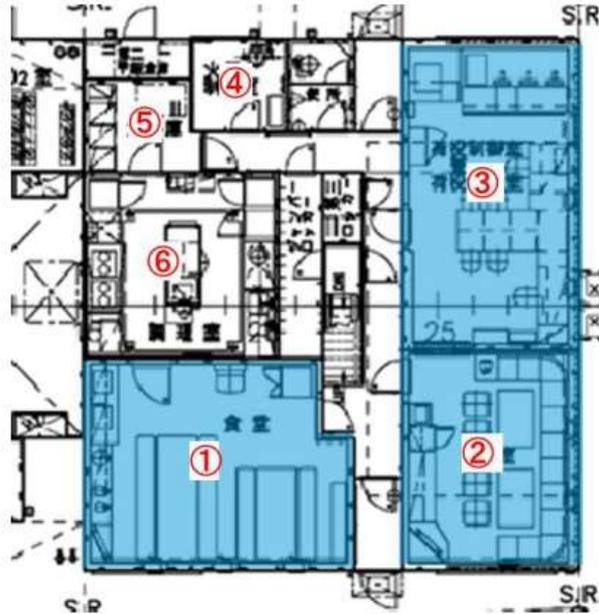


図 4.2.3-1(1) 騒音レベルの結果

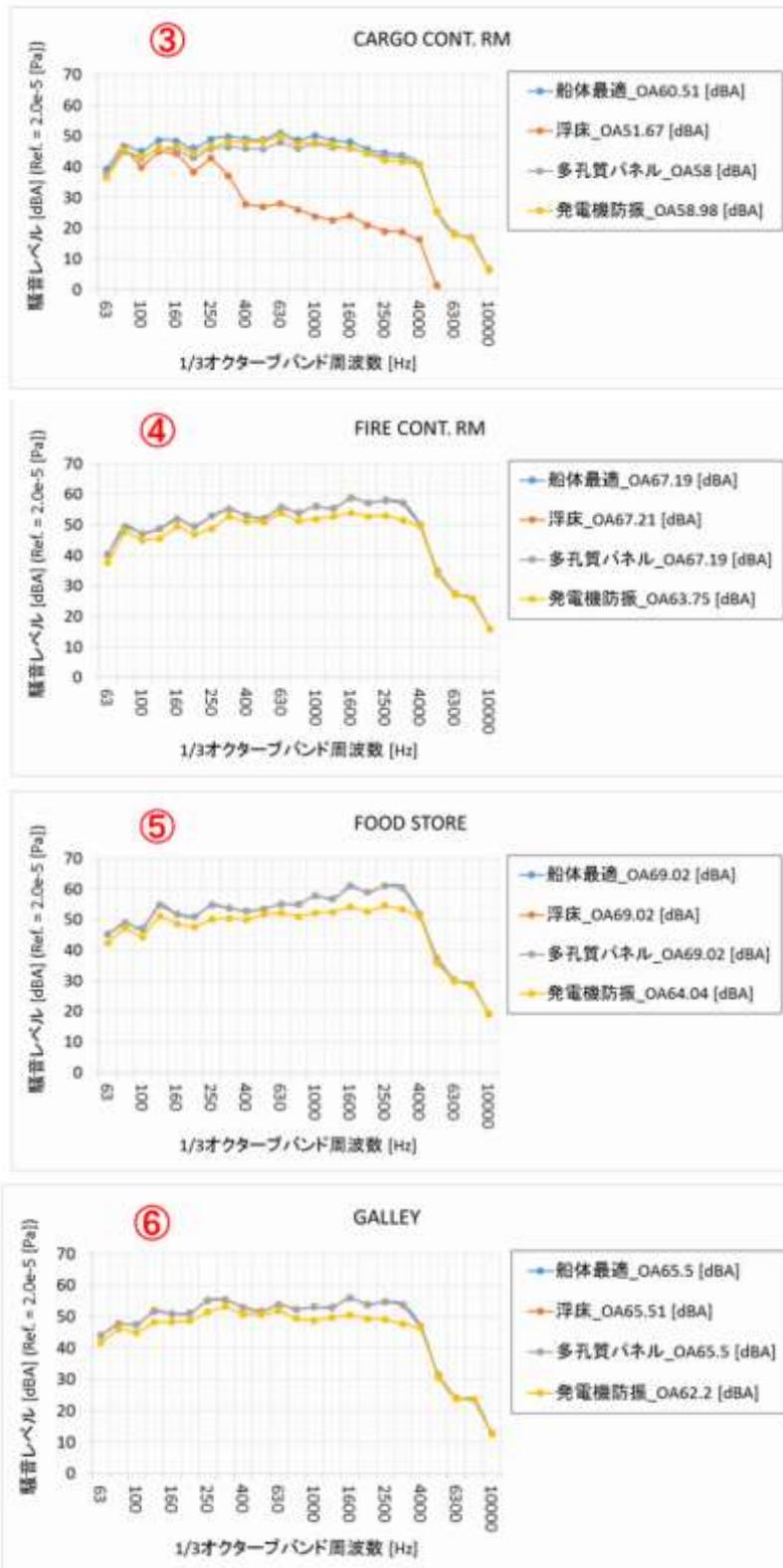


図 4.2.3-1(2) 騒音レベルの結果

・ Boat Deck

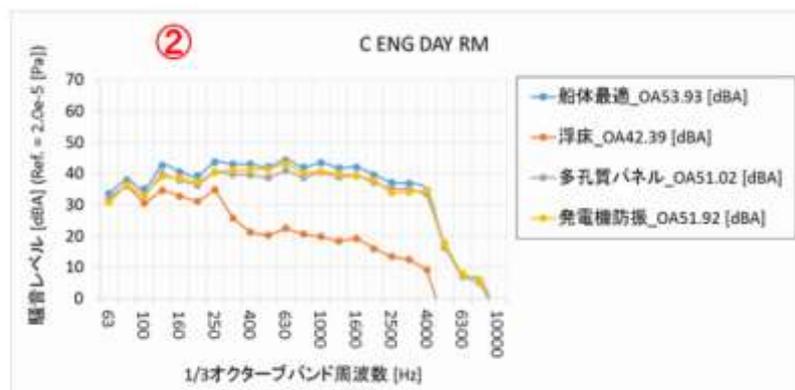
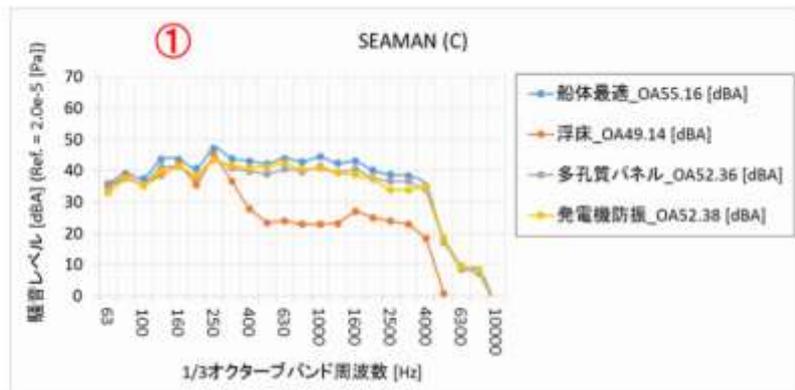
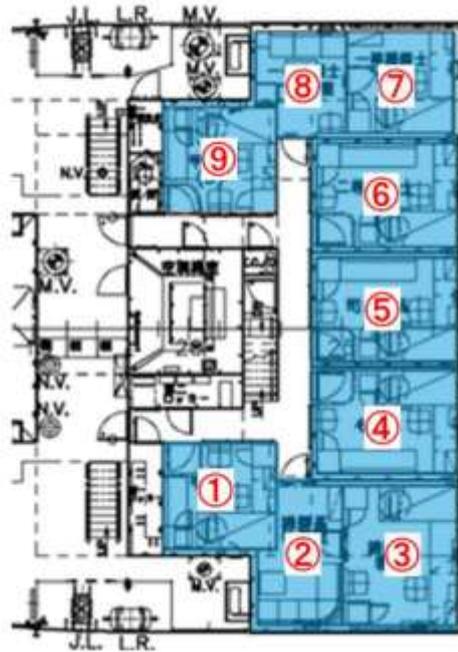


図 4.2.3-1(3) 騒音レベルの結果

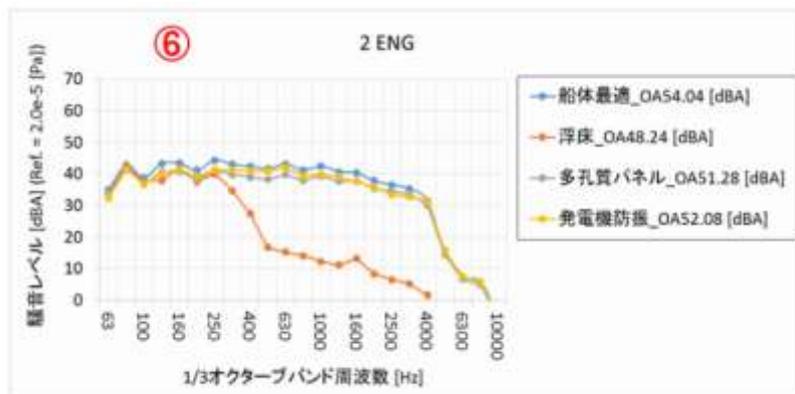
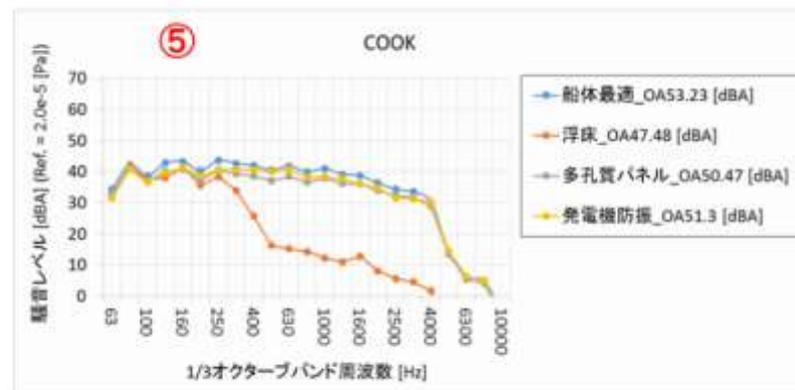
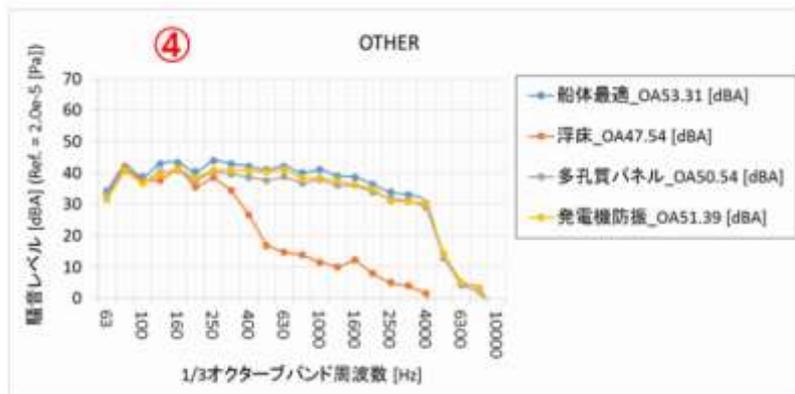
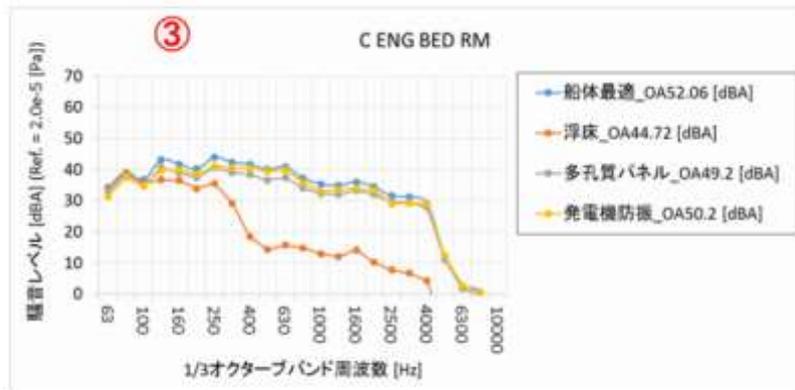


図 4.2.3-1(4) 騒音レベルの結果

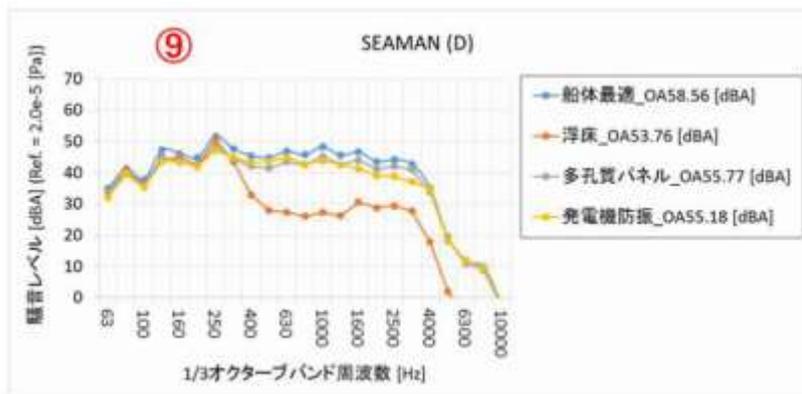
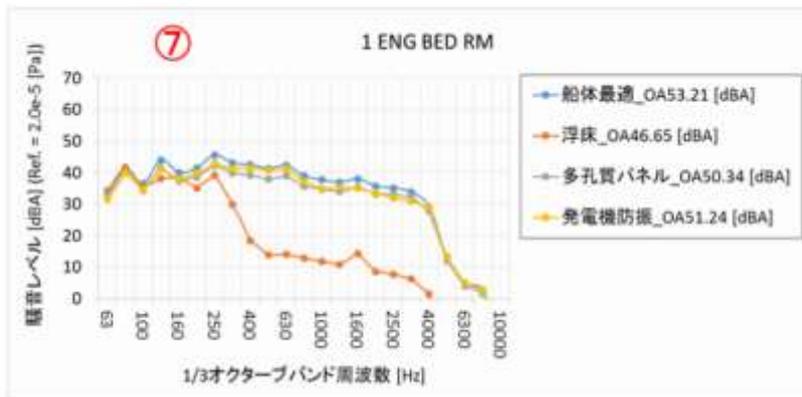
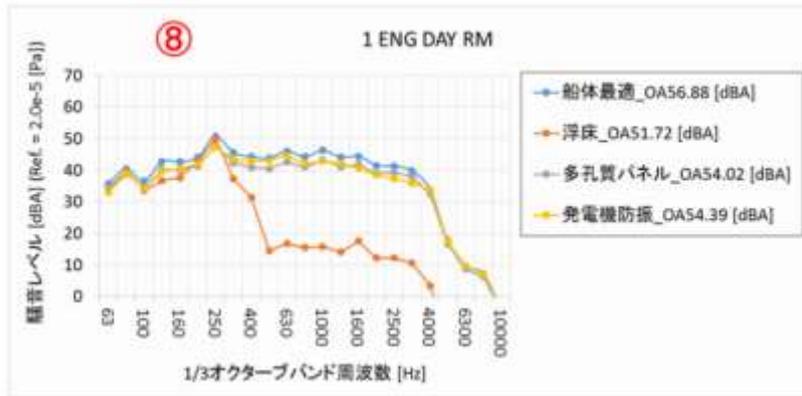


図 4.2.3-1(5) 騒音レベルの結果

・ Captain Deck

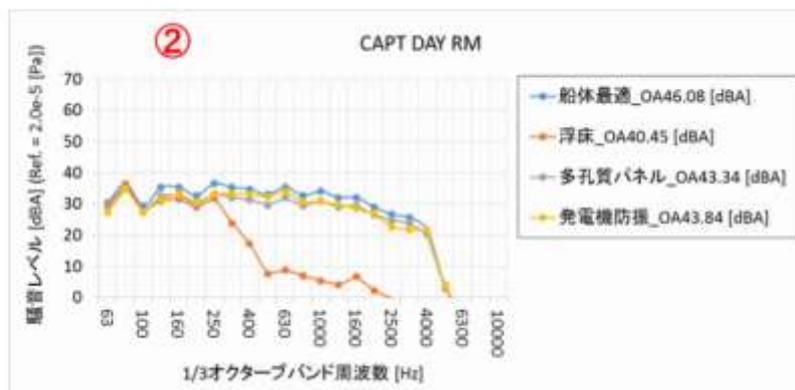
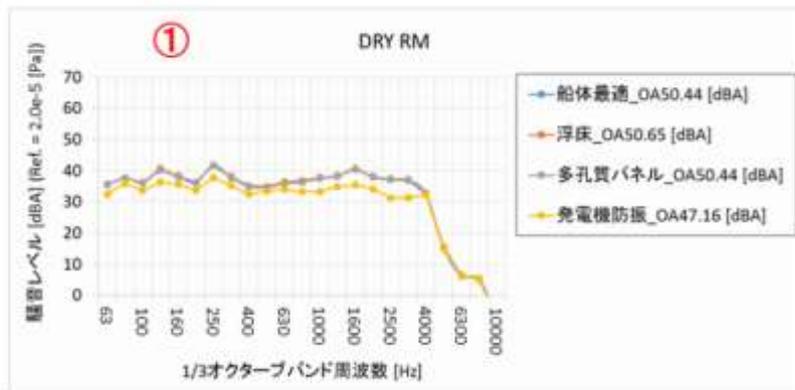
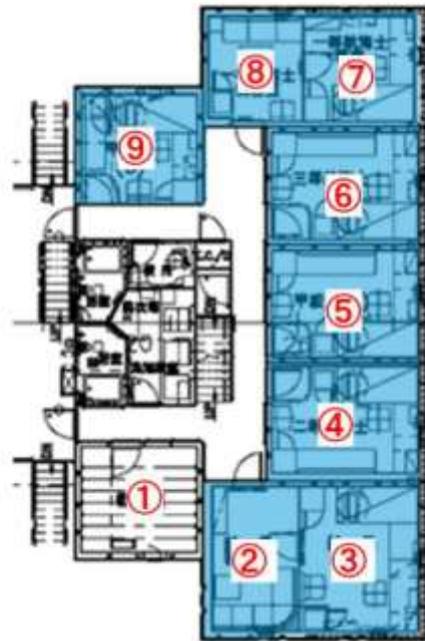


図 4.2.3-1(6) 騒音レベルの結果

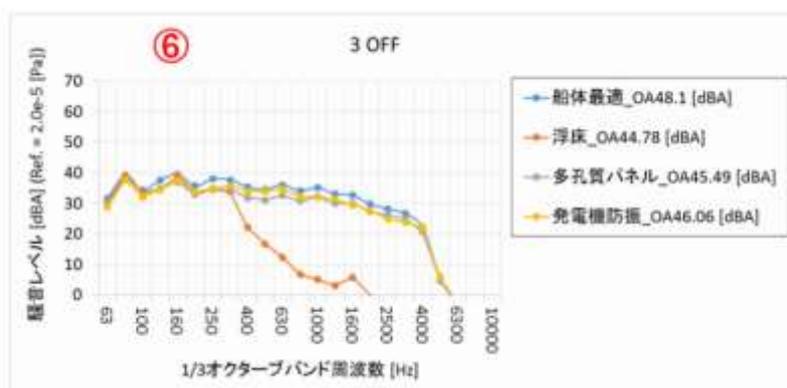
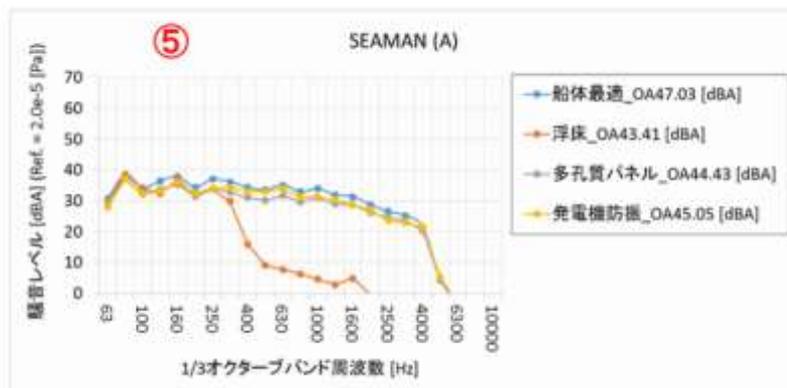
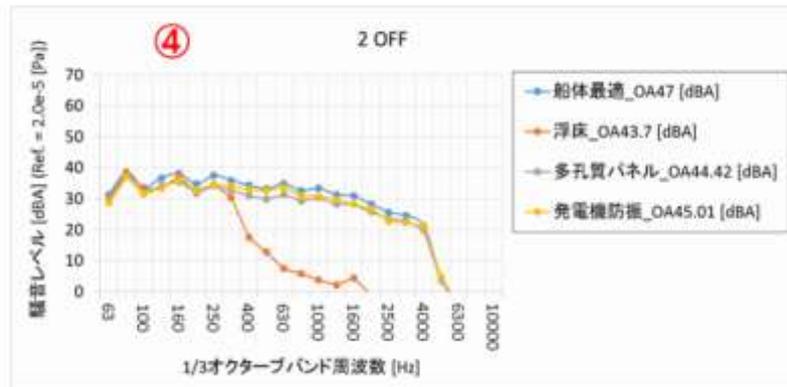
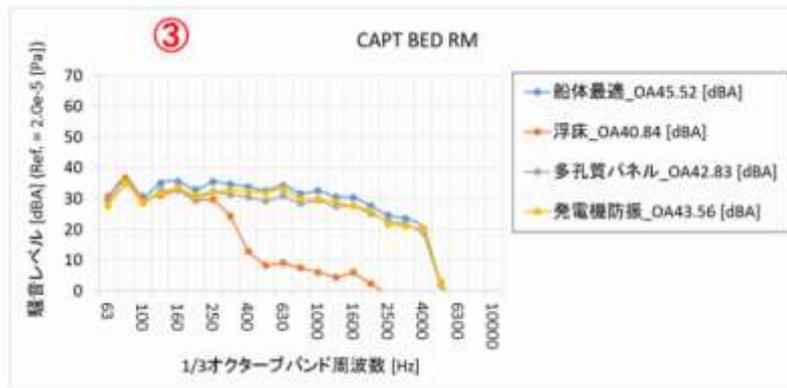


図 4.2.3-1(7) 騒音レベルの結果

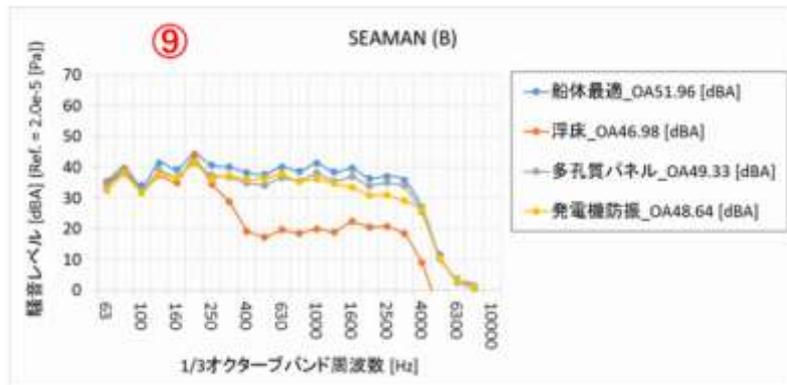
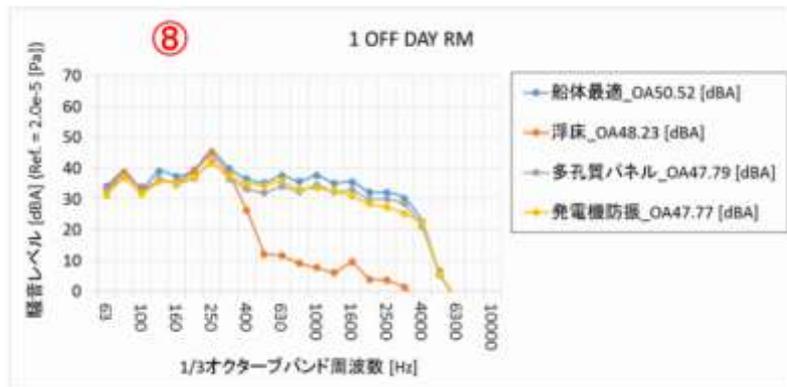
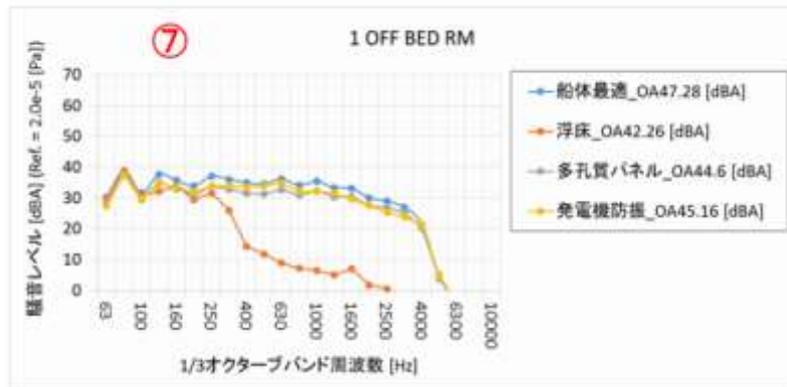


図 4.2.3-1(8) 騒音レベルの結果

4.2.4. 騒音対策品別騒音レベル低減代

船体構造最適化モデルを基準に、各騒音対策品別に騒音レベル OA 値の低減代を居室ごとに算出し図 4.2.4-1 に示す。浮床が騒音対策に一番効果があった。ベースシップモデルと最適仕様に基づいてモデル変更を行った最適仕様モデルで、各居室の室内騒音レベル比較結果を図 4.2.4-2 に示す。

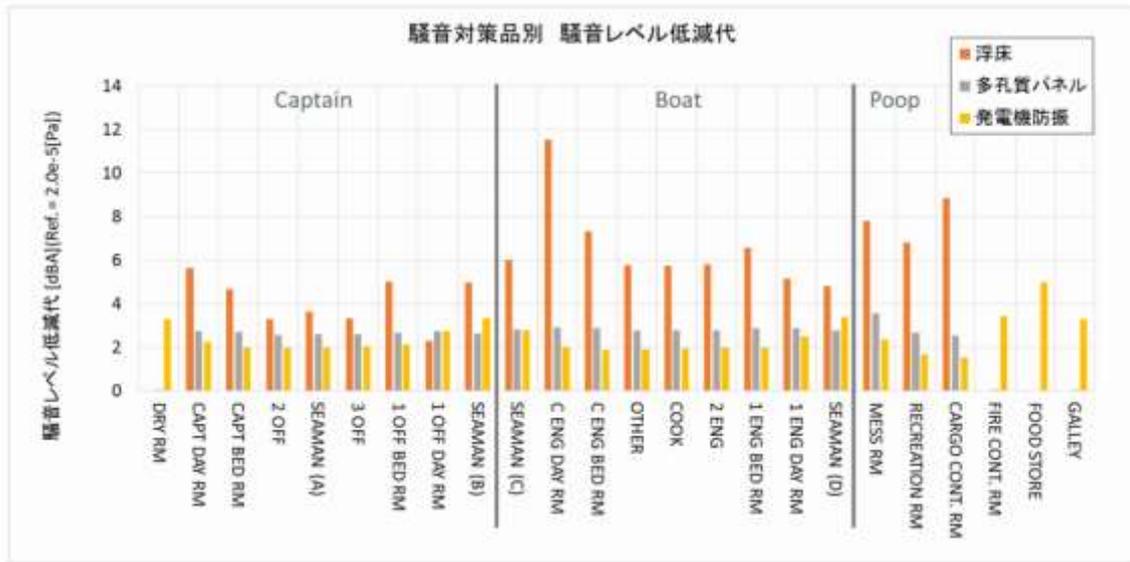


図 4.2.4-1 各騒音対策品別の騒音レベル低減代

● Poop deck

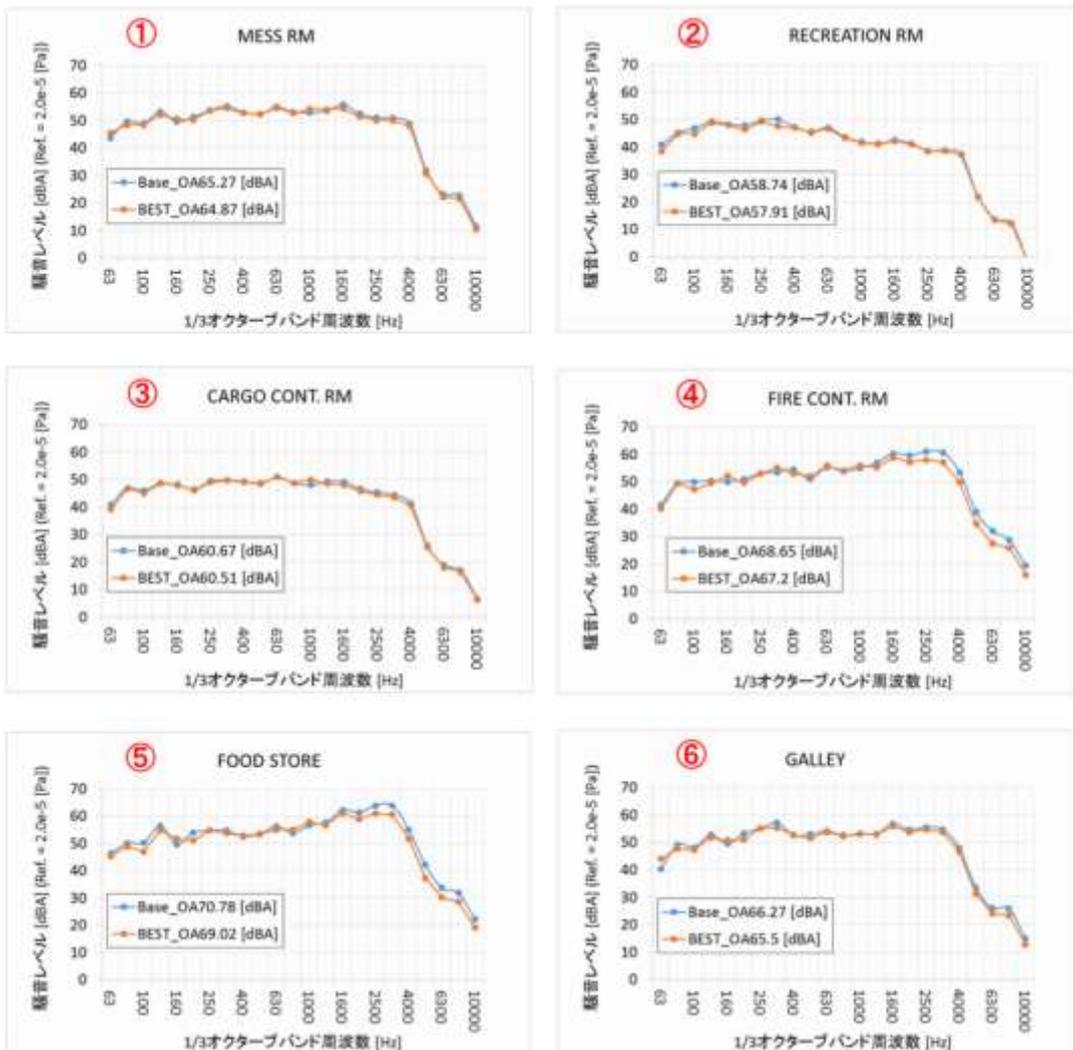
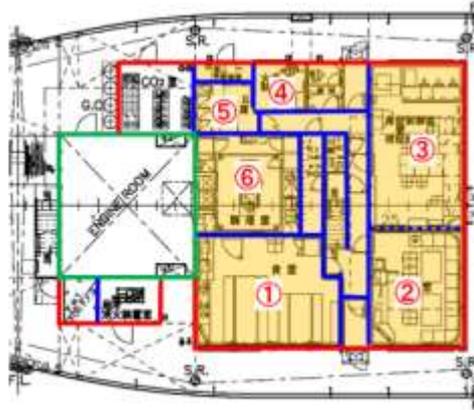


図 4.2.4-2 (1) 室内騒音レベル比較結果

● Boat deck

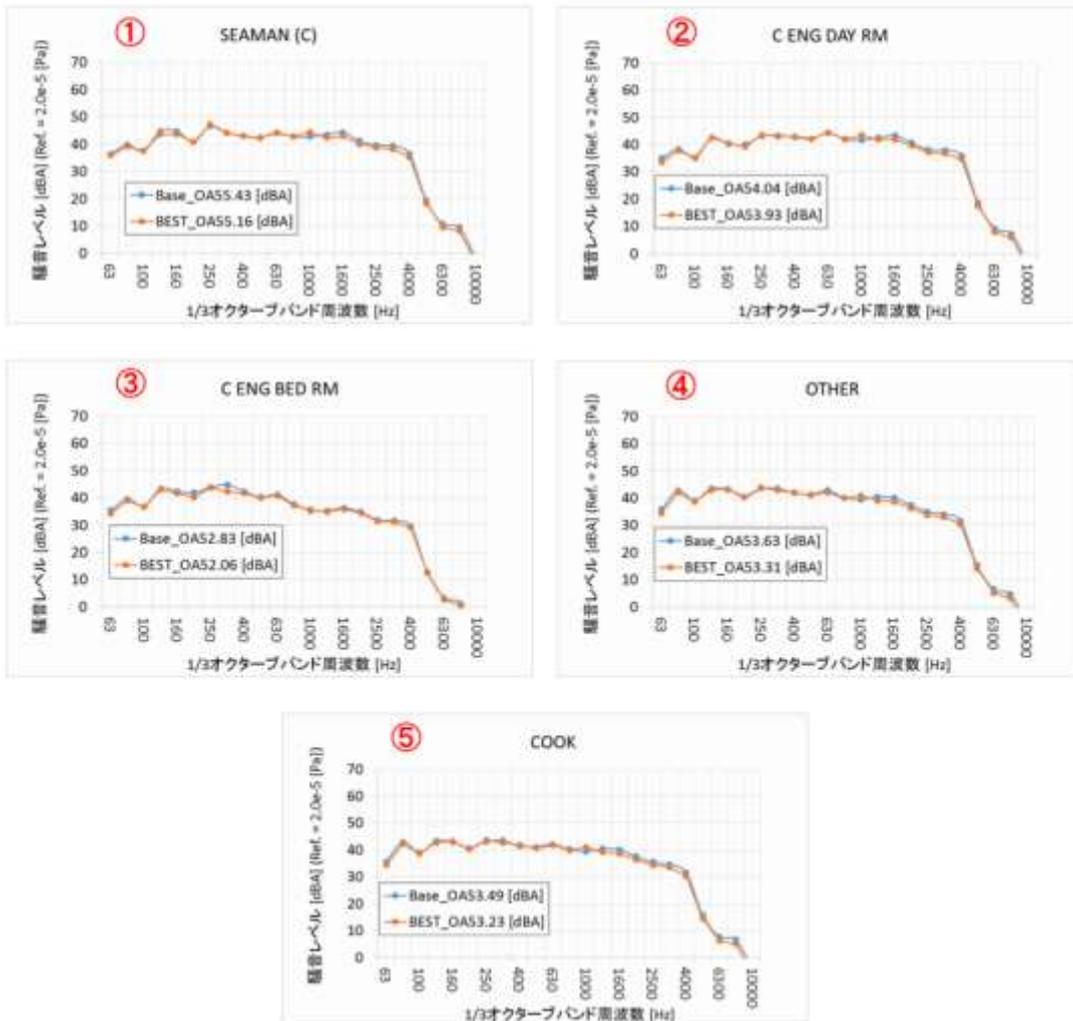
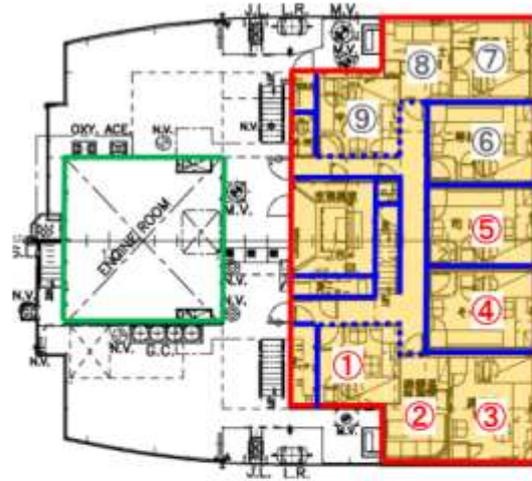


図 4.2.4-2 (2) 室内騒音レベル比較結果

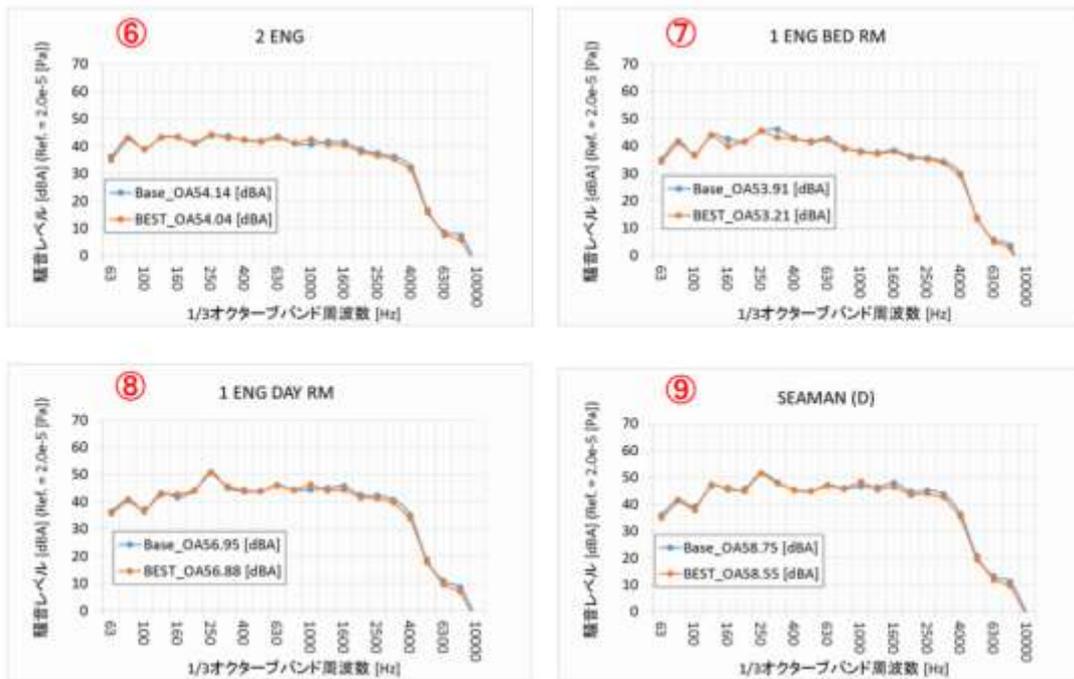
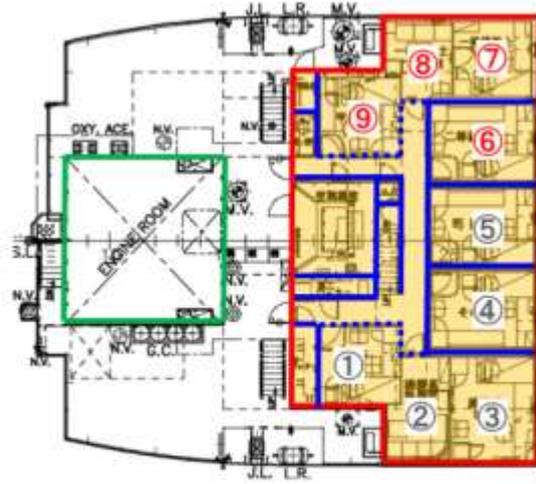


図 4.2.4-2 (3) 室内騒音レベル比較結果

- Captain deck

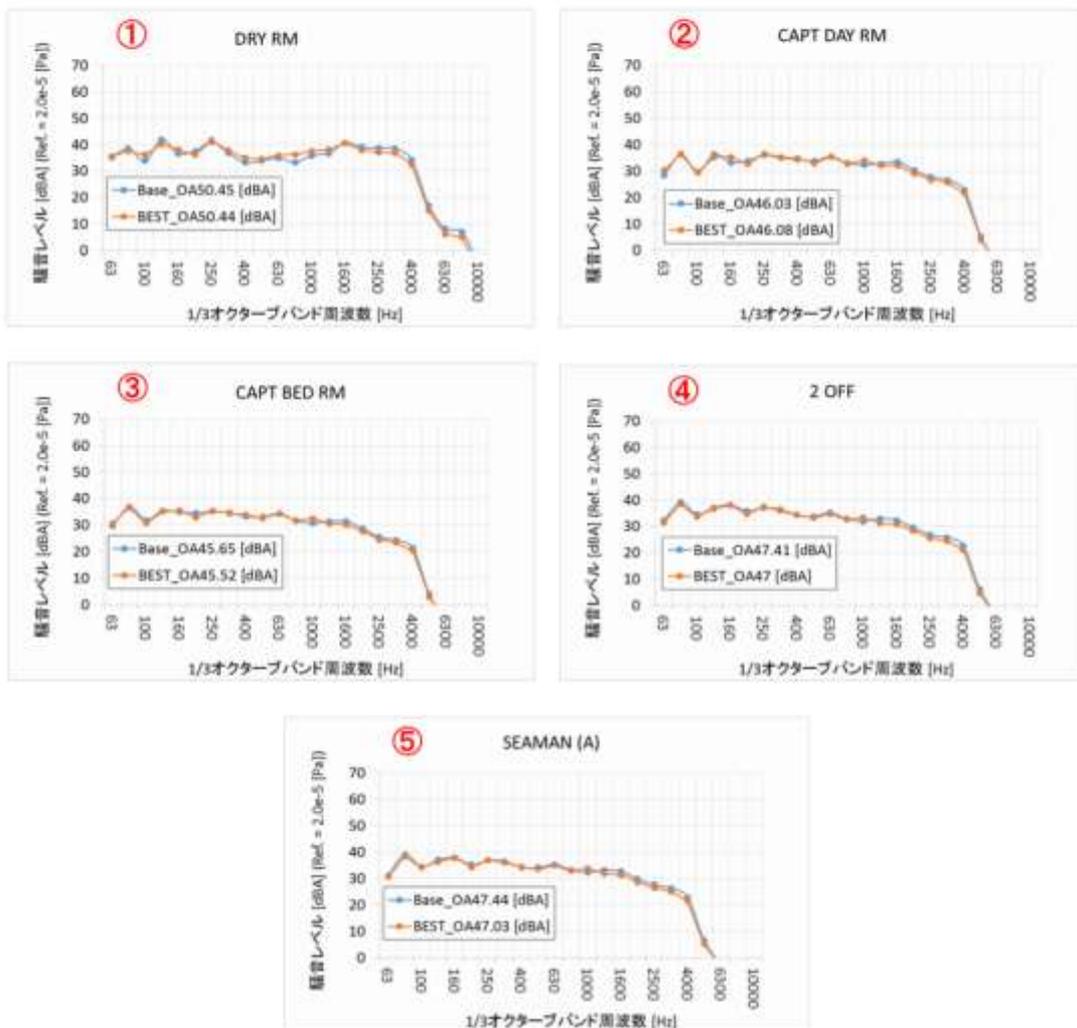
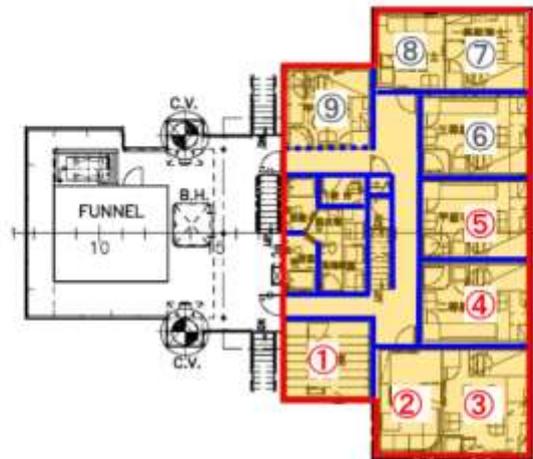


図 4.2.4-2 (4) 室内騒音レベル比較結果

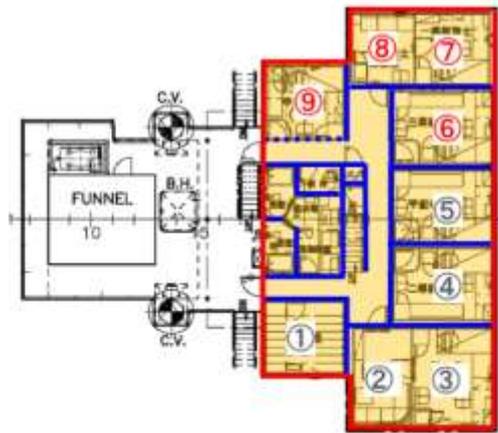


図 4.2.4-2 (5) 室内騒音レベル比較結果

4.2.5 費用に対する確信度の考察

4.2.5.1 Boat Deck の全居室を浮床施工することを前提にした検討

計算コストの観点から、また、Boat Deck 居室床面の空気音遮断性能(R_w)を規則上 45 以上が必要であり、現状、浮床対策が求められるとの観点から、全ケースの騒音対策品の組み合わせ検討に先行して、Boat Deck の全居室を浮床施工することを前提に計算条件を減らして最適化の検討を行った。

騒音対策品の組み合わせと水準値を表 4.2.5.1-1 に示す。図 4.2.5.1-1 に最適解における施工費用と確信度のトレードオフ関係ごとのモード定義を示す。表 4.2.5.1-2 に各モードにおける施工の傾向を示す。

表 4.2.5.1-1 騒音対策品の組み合わせと水準値

水準値	騒音対策品の組み合わせ
0	発電機防振なし_多孔質天井パネルなし_浮床なし
1	発電機防振なし_多孔質天井パネルなし_浮床あり
2	発電機防振なし_多孔質天井パネルあり_浮床なし
3	発電機防振なし_多孔質天井パネルあり_浮床あり
4	発電機防振あり_多孔質天井パネルなし_浮床なし
5	発電機防振あり_多孔質天井パネルなし_浮床あり
6	発電機防振あり_多孔質天井パネルあり_浮床なし
7	発電機防振あり_多孔質天井パネルあり_浮床あり

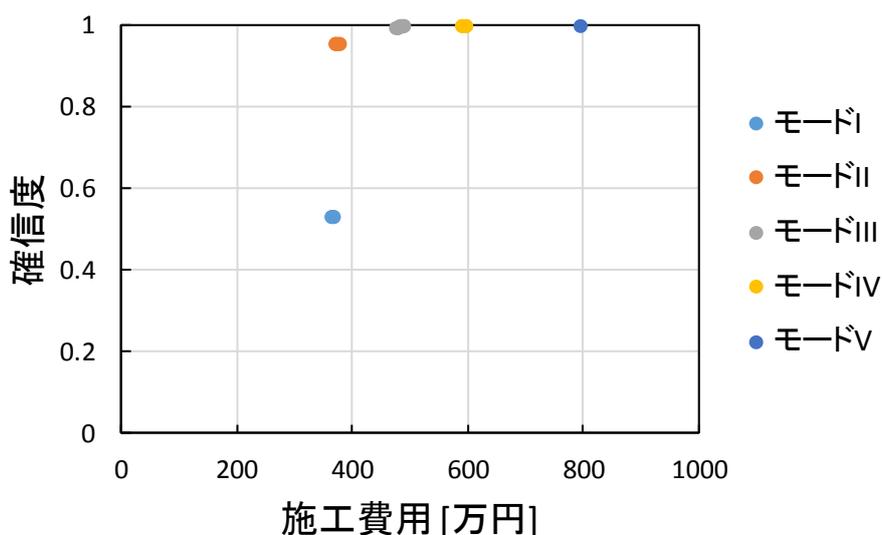


図 4.2.5.1-1 最適解における施工費用と確信度のトレードオフ関係ごとのモード定義

表 4.2.5.1-2 各モードにおける施工の傾向

モード	施工の傾向
モードI	MESS ROOMに何も施工しない
モードII:	MESS ROOMに多孔質パネルのみ施工する
モードIII:	MESS ROOMに少なくとも浮床を施工し、Cargo CONT. RMIに浮床を施工しない
モードIV	MESS ROOMに少なくとも浮床を施工し、Cargo CONT. RMIに浮床を施工
モードV	発電機防振を施工

4.2.5.2 全ケースによる検討

騒音対策品の組み合わせと水準値を表 4.2.5.2-1 に示す。図 4.2.5.2-1 に最適解における施工費用と確信度のトレードオフ関係ごとのモード定義を示す。表 4.2.5.2-2 に各モードにおける施工の傾向を示す。

表 4.2.5.2-1 騒音対策品の組み合わせと水準値

水準値	騒音対策品の組み合わせ
0	発電機防振なし_多孔質天井パネルなし_浮床なし
1	発電機防振なし_多孔質天井パネルなし_浮床あり
2	発電機防振なし_多孔質天井パネルあり_浮床なし
3	発電機防振なし_多孔質天井パネルあり_浮床あり
4	発電機防振あり_多孔質天井パネルなし_浮床なし
5	発電機防振あり_多孔質天井パネルなし_浮床あり
6	発電機防振あり_多孔質天井パネルあり_浮床なし
7	発電機防振あり_多孔質天井パネルあり_浮床あり

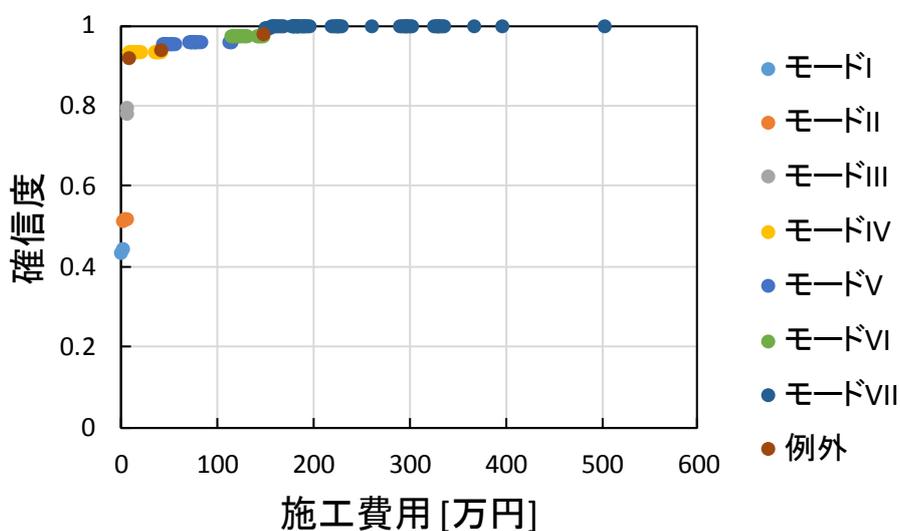


図 4.2.5.2-1 最適解における施工費用と確信度のトレードオフ関係ごとのモード定義

表 4.2.5.2-2 各モードにおける施工の傾向

モード	施工の傾向
モードI	MESS ROOMとSEAMAN(D)に何も対策をしない
モードII	MESS ROOMに何も対策をせず、SEAMAN(D)に多孔質パネルのみ施工
モードIII	MESS ROOMに多孔質パネルのみ施工し、SEAMAN(D)に対策をしない
モードIV	MESS ROOMとSEAMAN(D)に多孔質天井パネルのみ施工
モードV	MESS ROOMに多孔質パネルのみ施工し、SEAMAN(D)に少なくとも浮床を施工
モードVI	MESS ROOMに少なくとも浮床を施工し、SEAMAN(D)に多孔質パネルのみ施工
モードVII	MESS ROOMとSEAMAN(D)に少なくとも浮床を施工

4.2.6. 考察

船体構造最適化モデルに、3種類の騒音対策品（浮床、多孔質パネル、発電機防振）を適用して騒音レベル低減効果代予測を行った。結果、浮床が最も効果代が高く、特に Poop, Boat deck に適用したときの効果代が高いことが分かった。ただし、追加コストを考慮すると多孔質パネルを天井に施工することによっても 2dB 程度の低減効果が得られると予測できる。

5. 騒音最適化されたモデル船の図面

3.「船体構造の改良による騒音最適化の検討」、4.「騒音対策品による騒音最適化の検討」で検討した最適設計の結果(表表 4.2.5.1-2 のモード II)を踏まえ、以下の図面を作成した。作成した図面は、付録 I に示す。

- ・ 一般配置図
- ・ 羅針艀甲板構造図
- ・ 航海船橋甲板構造図
- ・ 船長甲板構造図
- ・ 端艇甲板構造図
- ・ 船尾楼甲板構造図
- ・ 機関室配置図
- ・ 防火構造図
- ・ 諸室配置図

6. まとめ

静音性に優れた 6,500kL 積みタンカー（モデル船）を対象に、騒音最適化の検討を行った。本船は、騒音規制適用船ではなく、騒音対策品を追加で施工した船舶ではないが、すでに騒音規制値を満足する設計となっている。そこで、今次検討では、騒音規制を確実に満足させるための追加の対策（①船体構造の改良による観点、②騒音対策品の施工による観点）を行うことを目的に、騒音予測計算と最適化計算を組み合わせた検討を行った。

① 船体構造の改良による騒音最適化の検討

船体構造の観点から重量の制約（重量増分を 10 トンとする）をもとに騒音最適設計を行った。騒音最適化にあたって考慮する設計パラメータは、騒音対策に効果が見込まれる設計パラメータである、①居住区デッキ高さ、②居住区外壁板厚、③居住区内壁板厚、④居住区デッキ板厚、⑤機関室ケーシングの板厚、⑥居住区内壁の変更、⑦C Deck 暴露甲板を居住区と分離するか否かとした。実船モデル、簡易モデルともに、現行のモデル船の寸法、配置に対して居住区デッキ高さを 100(mm)、居住区デッキ板厚を 2(mm)増す結果となった。これは、いずれの設計変更も、今回設定した重量増分の制約値の範囲内で、騒音エネルギーを低減する方向に寄与したためと考える。

上部構造物の重量増分(dM)と確信度の傾き（確信度/dM）で、最適な設計パラメータの組み合わせについて考察した。上記 7 つの設計パラメータに対して傾きを評価したところ、居住区デッキ高さが最も大きかった。最適計算においても最優先にあげられる設計効率が高いパラメータであることが分かった。

② 騒音対策品の施工による騒音最適化の検討

騒音対策品の施工による観点から、騒音対策品のコストの観点から最適な組み合わせを求めた。ここでは、騒音対策品として多く利用される①発電機防振ゴム、②浮床、③多孔質天井パネルを対象に行った。

考察を容易にするために評価する指標をひとつにした。ここでは、各部屋の騒音予測値を確率分布とみなし、すべての部屋が騒音規制値を満足する確率（ここでは、確信度という）を指標にした。施工費用をパラメータに確信度をプロットすると、施工費用のまとまりごとにいくつかのモードがあらわれた。実船モデルによる検討では、Boat Deck の全居室に浮床を施工することを前提にした計算では、5 つのモード（施工費用の安い順番にモード番号をわりふる）があらわれた。モード I からモード II へは、施工費用の追加がわずかにもかかわらず、確信度が大きく向上した。モード II からモード III へは、また、それ以外のケースも、施工費用の追加にもかかわらず、確信度の大きな改善は見当たらなかった。よって、ここでは、モード II を最適解とみなした。

③ 騒音最適化されたモデル船の図面作成

上記①、②の検討結果を踏まえ、最適化されたモデル船（騒音対策品の最適施工：モードⅡの設計パラメータ）で下記図面を作成した。

- ・ 一般配置図
- ・ 羅針艙甲板構造図
- ・ 航海船橋甲板構造図
- ・ 船長甲板構造図
- ・ 端艇甲板構造図
- ・ 船尾楼甲板構造図
- ・ 機関室配置図
- ・ 防火構造図
- ・ 諸室配置図

付 録

付録 I

騒音最適化されたモデル船の図面

<省略>

付録 II

モデル船の SEA モデル

<省略>

付録 III

最適化手法

1. 最適化の概要

本稿における最適化は「制約条件を満たした上で目的関数を最大化（最小化）する設計パラメータを探索すること」とする。離散パラメータにおいて最適解を正確に求めるには全ての設計パラメータの組み合わせで計算・実験をおこない、その中で最適解を見つければよい。（図付録 III 1-1 参照）しかし、設計パラメータの組み合わせが膨大にあるいは連続パラメータによって無数に存在する場合には全ての計算点・実験点で値を求めるのは場合によっては計算コストや労力などの面から困難であることが多い。本最適化事業では SEA による騒音予測計算がこれに該当し、SEA モデルの作成や解析およびポスト処理などに膨大な時間を要する。

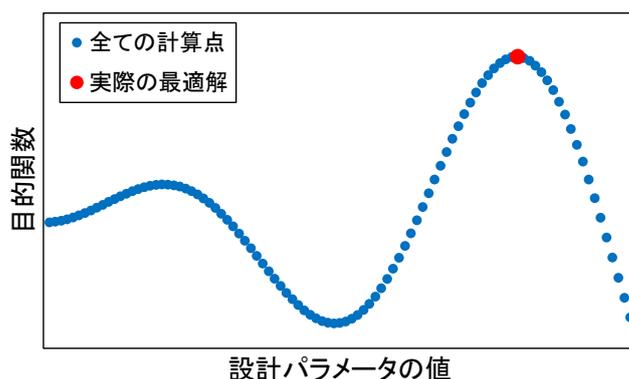
そこで、本最適化事業では実験計画法と応答曲面法の考えを用いて少ない計算点・実験点で最適解の探索を行う。

実験計画法ではある規則に基づき計算点・実験点を選択し、選択されたもののみで計算・実験を行う。（図付録 III 1-2 参照）これにより、実際にかかる計算コストや労力を削減する。

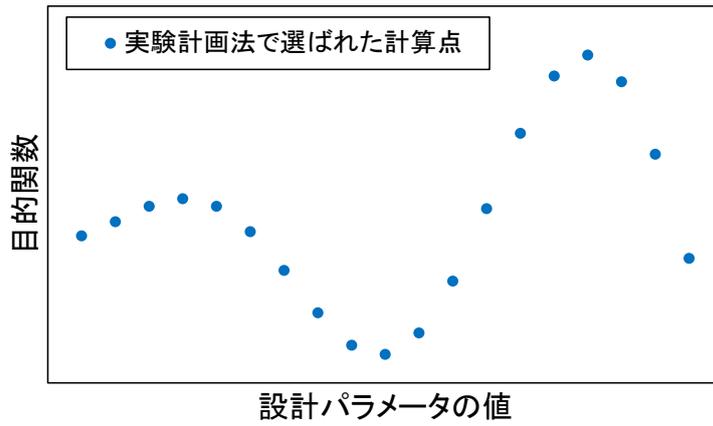
続いて応答曲面法（回帰式）により計算点・実験点の結果から目的関数（制約条件）を設計パラメータの簡略な関数で近似する。（図付録 III 1-3 参照）これにより、最適解の探索アルゴリズムを用いる際に任意の設計パラメータにおける目的関数を低コストで求めることができる。

最後に最適解の探索アルゴリズムを用いて目的関数が最大（最小）となる設計パラメータを求める。

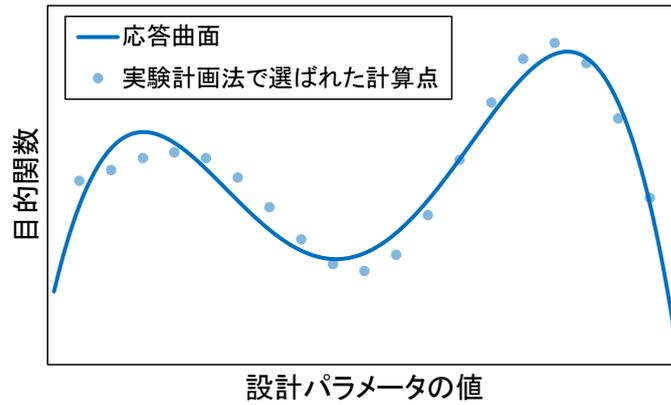
次章以降で実験計画法および応答曲面法に関して詳細に記載する。



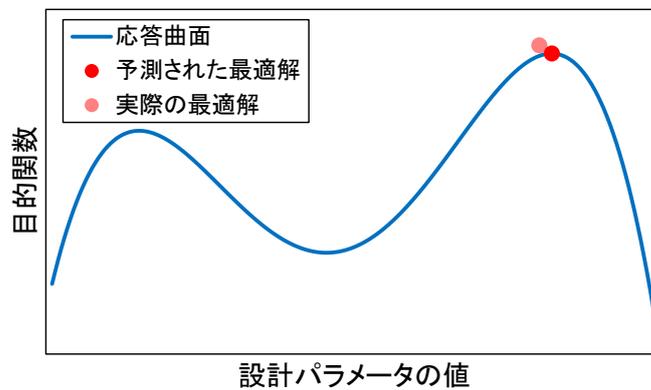
図付録 III 1-1 全ての計算点と実際の最適解



図付録 III 1-2 実験計画法で選ばれた計算点



図付録 III 1-3 計算点から作成された応答曲面



図付録 III 1-4 応答曲面により予測された最適解と実際の最適解

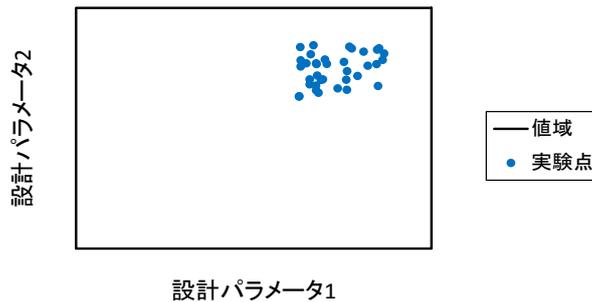
2. 実験計画法

2.1 概要

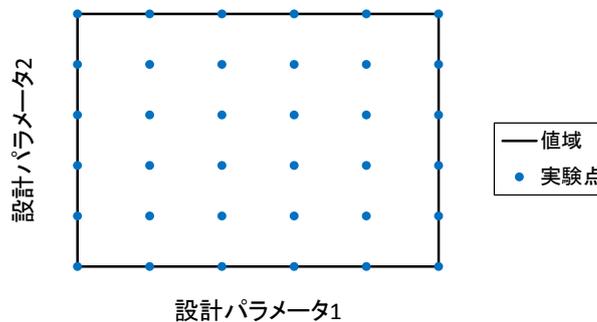
実験計画法では実際に計算・実験をおこなう設計パラメータの組合せを選択する。当然ながらこの選択する設計パラメータの組合せは何でもよいというわけではない。例えば図付録 III 2-1 のように選択された設計パラメータの組合せに偏りがあると、計算点が集中している箇所の応答曲面（回帰式）の精度は向上するが、計算点から外れた設計パラメータの結果が予期せぬ値となり、設計領域全体での応答曲面（回帰式）の精度が低下する恐れがある。

そのため、実験点としては設計領域内を万遍なく計算する（図付録 III 2-2 参照）、もしくは外挿をしないよう、設計領域の境界付近（図付録 III 2-3 参照）が選択される方がより望ましい。

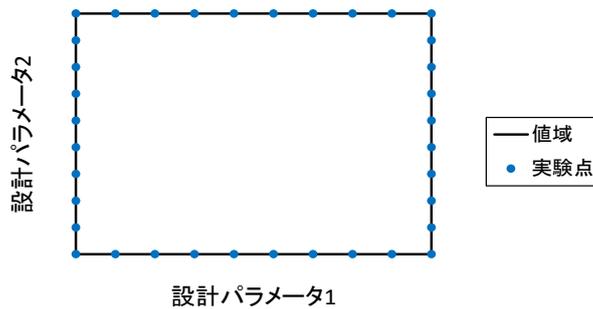
より正確には選択された設計パラメータの組合せマトリクス X に対して $(X^T X)^{-1}$ の対角成分を小さくするのが一般的によいとされており、多くの実験計画ではこのような設計パラメータの組合せが選択されるようになっている。



図付録 III 2-1 偏りのある実験計画



図付録 III 2-2 設計領域に対して満遍なく行われる実験計画



図付録 III 2-3 値域の境界上に集中している実験計画

2.2 水準

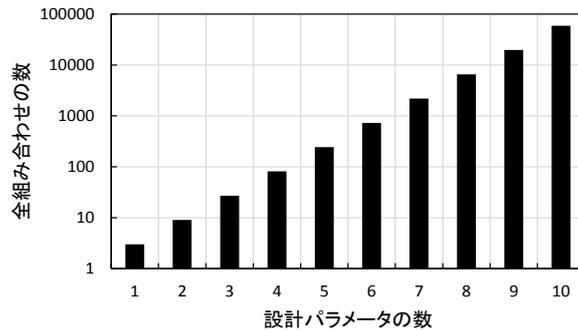
連続的な設計パラメータを最適化する場合，その実験点を選択することは離散的なものを最適化する場合と比べて計算コストが一般的に高くなる．そこで，多くの実験計画では連続的な設計パラメータにおいても離散的なパラメータとして扱うよう，水準値を用いて実験計画を行う．また，定量的でない変数も水準化を行ってあたかも定量的に取り扱うことが可能である．

水準値は一般的に各設計パラメータの最小値が-1，最大値が1となるようにし，間を一次関数的に変換する．本最適化事業では板厚などがこれに当たり，板厚の最小値を6 mm，最大値を10 mmと仮定したために，水準値が-1の場合は6 mm，0の場合は8 mm，1の場合は10 mmとしている．

本最適化事業で定量的でない変数として機関室ケーシングが挙げられる．水準値が0の場合は隣接，1の場合は切離としており，本来定量的でない機関室ケーシングの形状も，水準値として定量的に評価を行っている．

2.3 全因子計画

全ての水準値の組合せで計算・実験を行う．設計パラメータが少ない場合には十分適用可能であるが，組み合わせは設計パラメータの数に対して指数関数的に増大していく（図付録 III 2-4 参照）ため，設計パラメータが多くなると実行が困難になる．



図付録 III 2-4 設計パラメータの数と全組合せの数の関係 (3水準)

2.4 直交計画

直交表を用いて実験計画を行う。直交表とはどの 2 つの列をとっても、全ての水準の組合せが同数存在する配列である。例として L8 直交表を表付録 III 2-1 に示す。L8 直交表は 2 水準の設計パラメータに対して 8 つの実験点を定める直交表であり、変数の数が 7 以下であれば適用できる。組み合わせは A~G のどの列を用いても良い。ただし、変数の数が 7 の場合、定数項を含めて未定係数が 8 のため、8 つの実験点では飽和回帰 (残差 0) となるので、適切ではない、一般的に実験点は未定係数の 2 倍程度が適切であるとされているため、L8 直交表は 3 変数程度まで適用するのが妥当と思われる。

表付録 III 2-1 L8 直交表

	A	B	C	D	E	F	G
Ex.1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Ex.2	-1	-1	-1	1	1	1	1
Ex.3	-1	1	1	-1	-1	1	1
Ex.4	-1	1	1	1	1	-1	-1
Ex.5	1	-1	1	-1	1	-1	1
Ex.6	1	-1	1	1	-1	1	-1
Ex.7	1	1	-1	-1	1	1	-1
Ex.8	1	1	-1	1	-1	-1	1

2.5 A 最適基準

先に述べたように、実験点は $(\mathbf{X}^T\mathbf{X})^{-1}$ の対角成分を最小化するのがよいとされており、A 最適基準実験計画ではこれを行う。

一例を挙げると、前節の L8 直交表の内、A、B および C 列を用いた 3 つの設計パラメータの実験計画を行った場合、行列 \mathbf{X} は式(1)となる。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、モーメント行列 \mathbf{M} を $\mathbf{X}^T\mathbf{X}$ を実験数 n で除したものと定義する.

$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{X}^T\mathbf{X}}{n} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} / 8 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2)$$

モーメント行列 \mathbf{M} の逆行列の対角和は式(3)となる.

$$\text{trace}(\mathbf{M}^{-1}) = \text{trace} \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \right) = 4 \dots\dots\dots(3)$$

実験点の組合せごとに $\text{trace}(\mathbf{M}^{-1})$ を求め、これが最小となる組合せを選択することが A 最適基準である. ちなみに、L8 直交表を使用した場合、モーメント行列 \mathbf{M} は必ず単位行列となるため、どの組み合わせをとっても $\text{trace}(\mathbf{M}^{-1})$ は等しくなる. なお、A 最適基準は対角成分だけを考慮しており、設計パラメータごとの共分散を考慮していない. そのため、設計パラメータごとの実験計画に偏りがあるため、回転可能性という観点からは良好でない実験計画となりうる.

2.6 D 最適基準

D 最適基準は式(2)のモーメント行列の行列式を最大化する実験計画である.

$$\text{Max}|\mathbf{M}| \dots\dots\dots(4)$$

変数の座標範囲が-1~1 に正規化されている場合、D 最適性を表す D_{eff} は式(5)で定義される.

$$D_{\text{eff}} = \frac{|\mathbf{X}^T\mathbf{X}|^{1/p}}{n} \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 p は未知係数の数（設計変数の数+1, \mathbf{X} 行列の列数）である。 D_{eff} は最大値が 1 であり、高いほど D 最適基準において良好な実験計画である。例えば、前節のように L8 直交表の A, B および C 列を使用した実験計画の場合、 D_{eff} は式(6)となる。

$$D_{eff} = \left[\begin{matrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 \end{matrix} \right] \left[\begin{matrix} 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \end{matrix} \right]^{1/4} / 8 = 1$$

.....(6)

2.7 A 最適基準と D 最適基準の回転可能性に関して

表付録 III 2-2 および図付録 III 2-5 に示す、6 水準の 2 つの設計パラメータ a と b に関して、A 最適基準と D 最適基準の両面から実験計画を行う。実験数は 12 とする。

この場合は A 最適基準, D 最適基準いずれの実験計画も同じ結果となり、図付録 III 2-6 の実験点のように実験点が設計領域の角に集中している。なお、それぞれの実験計画の最適性を示すパラメータである、 $\text{trace}(\mathbf{M}^{-1})$ は 3.542, D_{eff} は 0.8522 である。

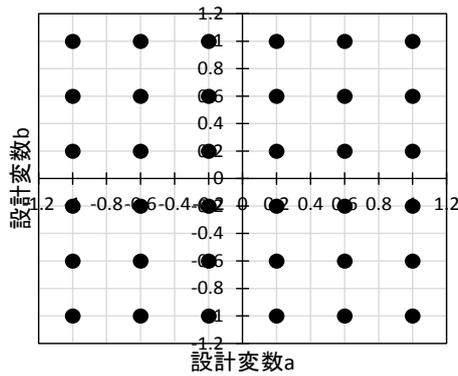
一方、設計パラメータ a と b に従属する新たなパラメータ c を定義し、 $c=0.9a+0.1b$ とする。表付録 III 2-3 に示す設計パラメータ a と c に関して再度 A 最適基準と D 最適基準の両面から実験計画を行う。実験数は先ほどと同じ 12 である。

この場合の A 最適基準と D 最適基準の実験計画の結果は異なっており、図付録 III 2-7 のとおりである。D 最適基準は設計パラメータ a と b の時の実験計画と同じであるが、A 最適基準の実験計画はこれまでのものと大きく異なり、設計領域の上下に集中している。なお、それぞれの実験計画の最適性を示すパラメータである、 $\text{trace}(\mathbf{M}^{-1})$ は 184.1, D_{eff} は 0.1836 である。なお、D 最適基準で得られた実験点の $\text{trace}(\mathbf{M}^{-1})$ は 232.4 である。

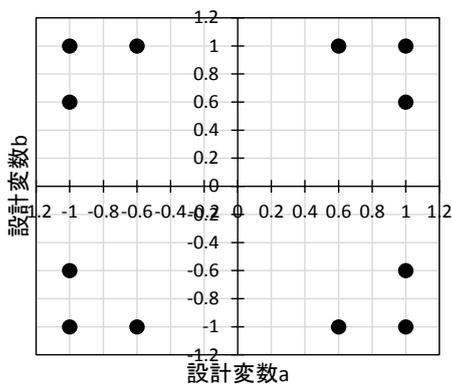
設計パラメータ c は設計パラメータ a と b の線型和であるため、本質的に両者の実験計画は等しくなければならない、しかし、A 最適基準はパラメータの回転可能性がないため、両者の実験計画が異なるものとなり、逆に D 最適基準はパラメータの回転可能性があるため、両者の実験計画が等しいものとなった。

表付録 III 2-2 6水準2変数の全実験点

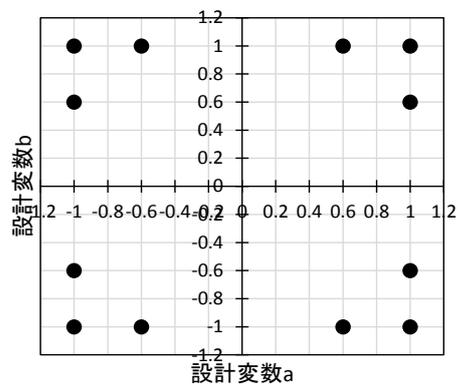
番号	a	b	番号	a	b	番号	a	b
Ex.1	-1	-1	Ex.13	-0.2	-1	Ex.25	0.6	-1
Ex.2	-1	-0.6	Ex.14	-0.2	-0.6	Ex.26	0.6	-0.6
Ex.3	-1	-0.2	Ex.15	-0.2	-0.2	Ex.27	0.6	-0.2
Ex.4	-1	0.2	Ex.16	-0.2	0.2	Ex.28	0.6	0.2
Ex.5	-1	0.6	Ex.17	-0.2	0.6	Ex.29	0.6	0.6
Ex.6	-1	1	Ex.18	-0.2	1	Ex.30	0.6	1
Ex.7	-0.6	-1	Ex.19	0.2	-1	Ex.31	1	-1
Ex.8	-0.6	-0.6	Ex.20	0.2	-0.6	Ex.32	1	-0.6
Ex.9	-0.6	-0.2	Ex.21	0.2	-0.2	Ex.33	1	-0.2
Ex.10	-0.6	0.2	Ex.22	0.2	0.2	Ex.34	1	0.2
Ex.11	-0.6	0.6	Ex.23	0.2	0.6	Ex.35	1	0.6
Ex.12	-0.6	1	Ex.24	0.2	1	Ex.36	1	1



図付録 III 2-5 6水準2変数の全実験点



(a) A 最適基準

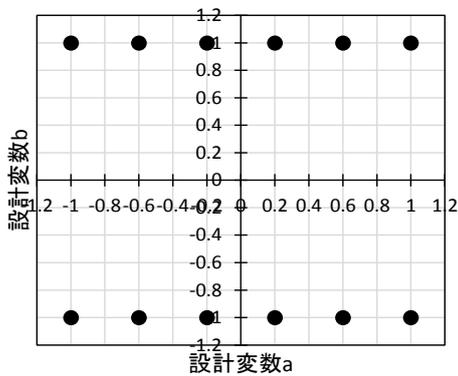


(b) D 最適基準

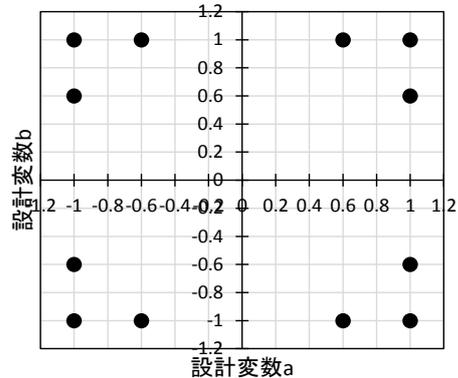
図付録 III 2-6 設計パラメータ a と b における実験計画の結果 (実験数 12)

表付録 III 2-3 設計変数 a と c の全実験点

番号	a	c	番号	a	c	番号	a	c
Ex.1	-1	-1	Ex.13	-0.2	-0.28	Ex.25	0.6	0.44
Ex.2	-1	-0.96	Ex.14	-0.2	-0.24	Ex.26	0.6	0.48
Ex.3	-1	-0.92	Ex.15	-0.2	-0.2	Ex.27	0.6	0.52
Ex.4	-1	-0.88	Ex.16	-0.2	-0.16	Ex.28	0.6	0.56
Ex.5	-1	-0.84	Ex.17	-0.2	-0.12	Ex.29	0.6	0.6
Ex.6	-1	-0.8	Ex.18	-0.2	-0.08	Ex.30	0.6	0.64
Ex.7	-0.6	-0.64	Ex.19	0.2	0.08	Ex.31	1	0.8
Ex.8	-0.6	-0.6	Ex.20	0.2	0.12	Ex.32	1	0.84
Ex.9	-0.6	-0.56	Ex.21	0.2	0.16	Ex.33	1	0.88
Ex.10	-0.6	-0.52	Ex.22	0.2	0.2	Ex.34	1	0.92
Ex.11	-0.6	-0.48	Ex.23	0.2	0.24	Ex.35	1	0.96
Ex.12	-0.6	-0.44	Ex.24	0.2	0.28	Ex.36	1	1



(a) A 最適基準



(b) D 最適基準

図付録 III 2-7 設計パラメータ a と c における実験計画の結果 (実験数 12)

3. 応答曲面法

応答曲面法は実験値・計算値を設計パラメータの簡単な関数で近似したものである。また、ここでは応答曲面による回帰式は設計パラメータの一次関数で近似するものとする。

$$f_i = \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij}$$

.....(7)

ここで、 f_i は i 番目の実験点における応答曲面による推定値、 β_j は定数項($j=0$)および j 番目の設計パラメータにおける係数、 x_{ij} は i 番目の実験点における j 番目の設計パラメータの値 ($j=0$ は定数項で $x_{i0}=1$) である。また、 i 番目の実験点における実験値と応答曲面による推定値の誤差 ϵ_i を式(8)で定義する。

$$\epsilon_i = y_i - f_i \dots\dots\dots(8)$$

式(7)および式(8)をまとめた行列式を式(9)に示す。

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\epsilon} \dots\dots\dots(9)$$

実験値と推定値の誤差 $\boldsymbol{\epsilon}$ は設計パラメータの係数 $\boldsymbol{\beta}$ に依存し、最小二乗法による応答曲面の推定ではこの誤差二乗和が最小になる $\boldsymbol{\beta}$ を求める。

$$\boldsymbol{\beta}: \min[\boldsymbol{\epsilon}^T \boldsymbol{\epsilon}] \dots\dots\dots(10)$$

誤差二乗和が最小になるということは $\boldsymbol{\epsilon}^T \boldsymbol{\epsilon}$ が $\boldsymbol{\beta}$ に対して極値を持つということである。

$$\frac{\partial \boldsymbol{\epsilon}^T \boldsymbol{\epsilon}}{\partial \boldsymbol{\beta}} = 0 \dots\dots\dots(11)$$

式(11)に式(9)を代入すると、設計パラメータの係数ベクトル $\boldsymbol{\beta}$ が式(12)で求められる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta})^T (\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta})}{\partial \boldsymbol{\beta}} &= 0 \\ \frac{\partial (\mathbf{y}^T \mathbf{y} - \mathbf{y}^T \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{X}^T \mathbf{y} + \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{X}^T \mathbf{X}\boldsymbol{\beta})}{\partial \boldsymbol{\beta}} &= 0 \\ -2\mathbf{y}^T \mathbf{X} + 2\boldsymbol{\beta}^T \mathbf{X}^T \mathbf{X} &= 0 \\ \boldsymbol{\beta} &= (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \end{aligned} \dots\dots\dots(12)$$

応答曲面の精度の代表値として、しばしば式(13)で定義される決定係数 R^2 が用いられる。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - f_i)^2}{\sum_i (y_i - y_{ave})^2} \dots\dots\dots(13)$$

ここで、 y_{ave} は y の平均値である。式(13)は 1 から二乗誤差の平均と y の分散の比を引いたものであり、 y のばらつきに対していかに y に対する f の誤差を抑えられているかという値である。 R^2 は 1 以下の値であり、 y に対する f の誤差が 0 ($f=y$) の時に 1 となる。 R^2 が高いほど一般的に応答曲面の精度が良いとされている。応答曲面の推定精度が著しく悪い場合、 R^2 は負の値も取り得るが、応答曲面による推定が設計変数によらず常に y の平均値 ($f=y_{ave}$) であれば R^2 は 0 となる (y のばらつきと誤差が等しい) ため、一般的に 0 より高い値となる。

一例として表付録 III 3-1 に示す 1 変数, 6 点の実験点で応答曲面を作成する. 応答曲面法ではこの y を x の一次関数で近似する. なお, 実際の y の関数は $\sin(\pi x/2)$ であるが, 応答曲面法を用いる以上, 実際問題ではこの関数が未知である, もしくは計算に膨大な時間を要することを前提としている. 式(12)に表 3-1 の値を代入して β を式(14)にて求める.

$$\beta = \left(\begin{bmatrix} 1 & 0.0 \\ 1 & 0.2 \\ 1 & 0.4 \\ 1 & 0.6 \\ 1 & 0.8 \\ 1 & 1.0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0.0 \\ 1 & 0.2 \\ 1 & 0.4 \\ 1 & 0.6 \\ 1 & 0.8 \\ 1 & 1.0 \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0.0 \\ 1 & 0.2 \\ 1 & 0.4 \\ 1 & 0.6 \\ 1 & 0.8 \\ 1 & 1.0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 0.0000 \\ 0.3090 \\ 0.5878 \\ 0.8090 \\ 0.9511 \\ 1.0000 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -0.0990 \\ 1.0211 \end{bmatrix}$$

.....(14)

よって, 応答曲面による y の近似式 f は式(15)となる.

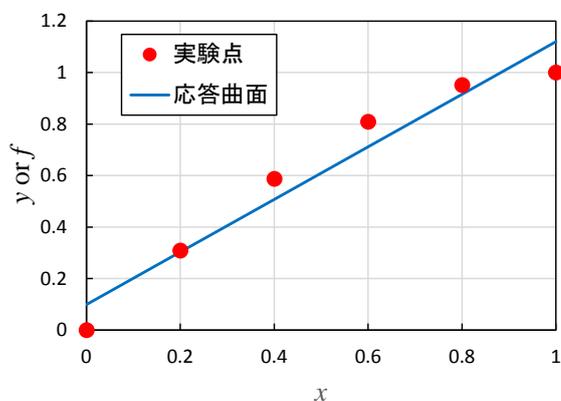
$$f = -0.0990 + 1.0211x$$

.....(15)

実験点と応答曲面を比較した物を図付録 III 3-1 に示す. この応答曲面における決定係数 R^2 は 0.9463 である.

表付録 III 3-1 応答曲面を作成する実験点

x	$y (= \sin(\pi x/2))$
0.0	0.0000
0.2	0.3090
0.4	0.5878
0.6	0.8090
0.8	0.9511
1.0	1.0000



図付録 III 3-1 実験点と応答曲面の比較

[参考文献]

轟章, 応答曲面法による非線形問題の最適設計入門資料 9, 1999, 日本機械学会講習会