

## 振動・音響連成下の室内騒音低減検討と折紙コアへの応用

Study of indoor noise reduction under acoustic and vibration coupling and application to origami cores



○阿部綾(明治大学)、楊陽(明治大学)、萩原一郎(明治大学)  
明治大学先端数理科学インスティテュート

### 発表者自己紹介

GISによる古地図上の街路幅員に関する研究で学士を得て街並みの歴史的イメージ分析に関する研究で修士号を得たのち民間企業でSEとして勤務、子育て専念期間を経て、特許庁非常勤職員として復職。

2016年度より明治大学萩原研究室にて、折紙構造の工学的な応用研究（2枚貼り折りのアルミ缶適用、折り畳み果物輸送箱、衝撃解析、振動・音響等）に取り組んでいる

室内騒音特性は商品性に大きな影響を与えるため、モード解析始めそれを利用した区分モード合成法など多様な技術が多くのリソースが注がれて検討開発されてきた

しかし設計段階で使用される騒音低減技術は、問題となる周波数範囲での乗員耳位置の騒音レベル積分値の最小化の1パターンである。どの部分を補強すべきかの結果が得られてもなぜそうなったかの因果は不明である

それに対し新たに開発した共振周波数のひずみ・運動エネルギー密度分布の情報からの対策は因果が分かり、しかもこれまで以上に優れた結果が得られることを示す

市場に出る自動車車両

トレードオフの関係にある多くの性能を同時に満たす必要

計算力学の進歩→開発スタイルの変革→開発期間の大幅な短縮に貢献

クレイモデル、試作、実験

→三次元CAD、精密なモデル生成、解析シミュレーション

室内騒音低減も同様に計算力学援用で対応



課題

計算時間が長い、固有周波数の情報が十分に生かされていない

著者らのグループで最近開発されシステム化がなされた

“固有モードの歪・運動エネルギーの情報をベースとした

位相変更による新しい高速・高効率固有値制御法”

が上記の課題を解決し得るか検討

## ① 音響-シェル連成解析



トラックキャビンモデルでフロア中心点に垂直z 軸上方向に加振し  
ドライバー耳位置の音圧を計算

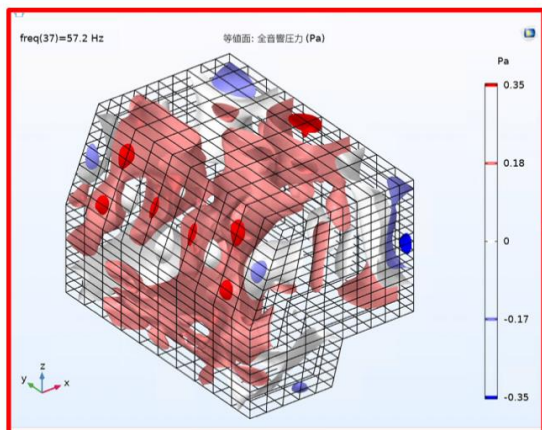
直接周波数応答、目標周波数:50~60Hz

耳の位置音圧座標:[1040、2400、1500]mm

板厚:2[mm]

底面中央の点荷重:1[N]

出力 : 0.2Hzの間隔で50~60Hzの間で計算



### ① 音響-シェル連成解析

トラックキャビンのシェルの振動と内部の音響との連成問題を考える

### ② 乗員耳位置の音圧最適化

目的関数: 耳位置における50~60Hz音圧積分値最小化

制御変数: 4枚の板厚、拘束条件: 板厚下限0.3mm、上限4mm、重量拘束2mmの90%以下

### ③ エネルギー法ベースの振動最適化(検討中)

・直接周波数応答 40~70Hzを実施

50~60Hzの範囲で耳位置音圧が大きくなを3点を選択

・固有値解析の実施

3点の結果に近い、ひずみエネルギー $W_s$ 、運動エネルギー $W_k$ の各分布をプロット

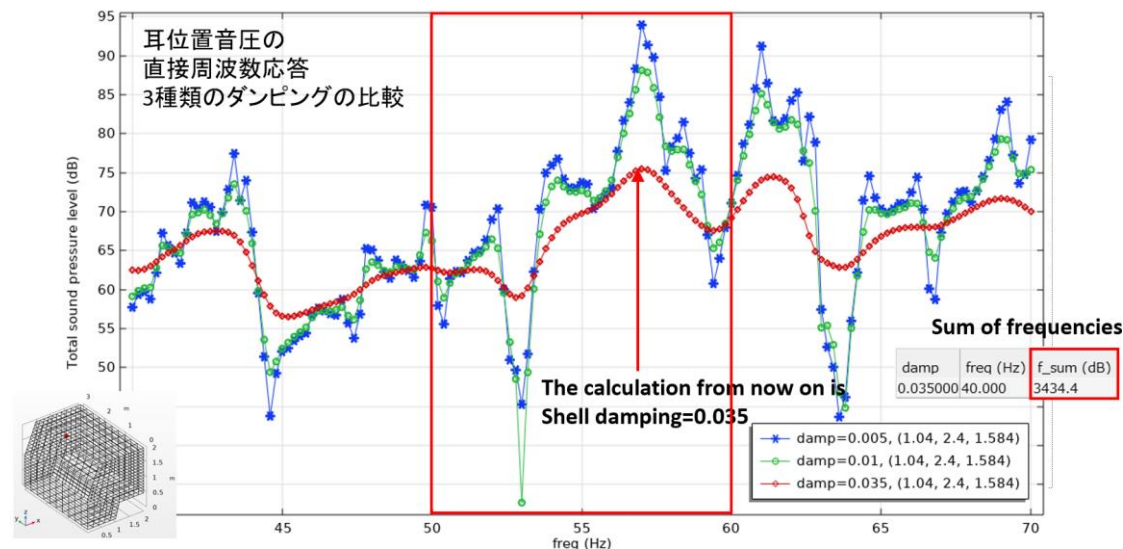
・ $W_s$ と $W_k$ を参照しつつ、最適化のためのパラメータとして板厚を使用

### ④ MPOD (Most Probable Optimization Design)の適用

・ステップ1: グローバルな解を探索

・ステップ2: 最適化の精度向上及び繰り返し

## ダンピングの影響の検討



## ② 乗員耳位置の音圧最適化



### Optimization settings

### Related Settings

Study 3\_OK, 直接応答, 一般最適化, 50~60Hz (damp=0.035)

Optimization  
ステップ 1: Frequency Domain

Solver  
方法: Nelder-Mead

Objective function  
comp1.f\_sum/1000

Design variables

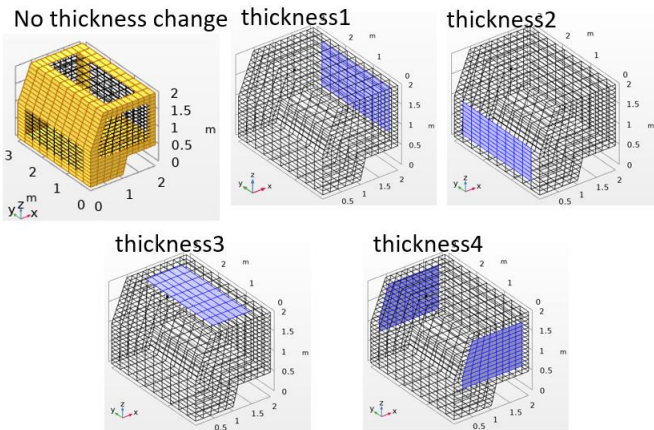
パラメーター名	初期値	スケール	下限	上限
thickness1	1[mm]	0.001	0.3[mm]	2[mm]
thickness2	1[mm]	0.001	0.3[mm]	2[mm]
thickness3	1[mm]	0.001	0.3[mm]	2[mm]
thickness4	1[mm]	0.001	0.3[mm]	2[mm]

Constraint conditions

式	下限	上限
comp1.constraint_sum		0.9

Related Settings	Value	Unit
ear_SPL	intop1(acpr.Lp_t)	dB
f_i	withsol('current', ear_SPL, setval(freq,i,2))	dB
f_sum	sum(f_i,i,50,100)	dB
i2	50+(i1-50)*0.2	
constrain1	intop2(1)*thickness1	m³
constrain2	intop3(1)*thickness2	m³
constrain3	intop4(1)*thickness3	m³
constrain4	intop5(1)*thickness4	m³
constraint_sum	(constrain1+constrain2+constrain3+constrain4)/((intop2(1)+intop3(1)+intop4(1)+intop5(1))*2[mm])	m³

f\_sum: Sound pressure level integration value between 50~60Hz

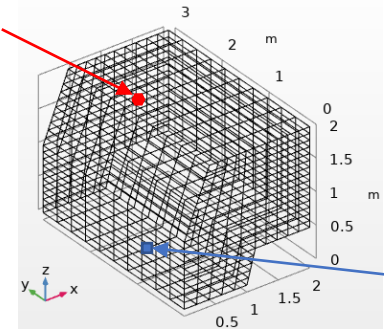


## 最適化条件

目的関数: 耳位置における50~60Hz音圧積分値  
 制御変数: 4枚の板厚  
 拘束条件: 板厚下限0.3mm、上限4mm  
 重量拘束2mmの90%以下

目的関数の最小化を図る

音圧計測点



加振点

## 最適化計算

反復数: 143回  
 計算時間(Laptop): 9h59min21s  
 問題点: 最適解の探索が初期値周辺

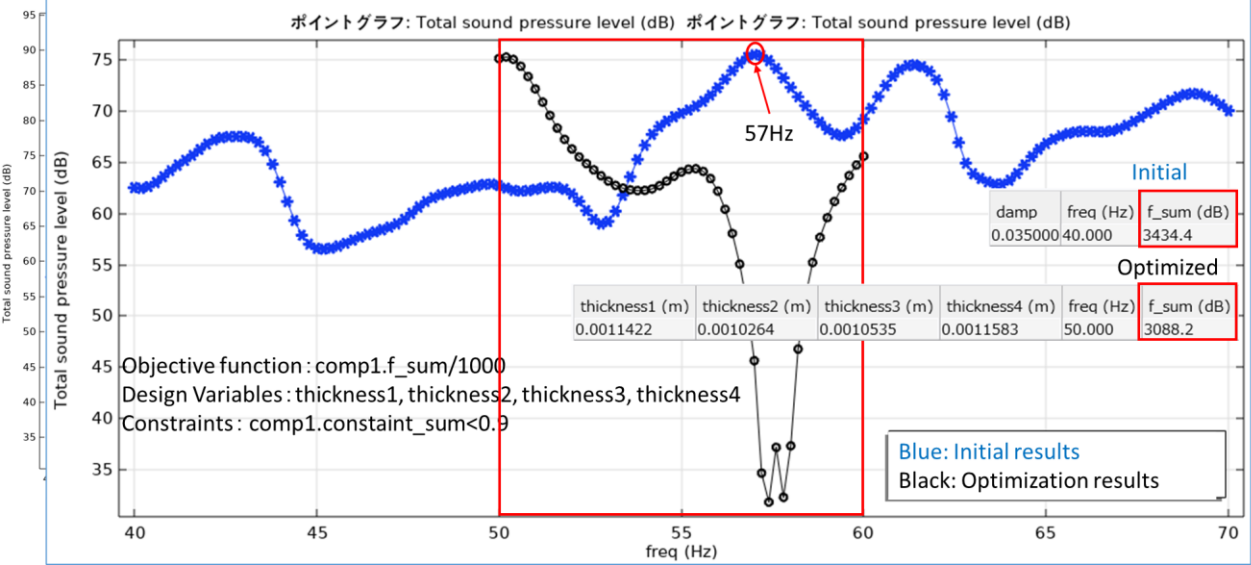
thickness1 (m)	thickness2 (m)	thickness3 (m)	thickness4 (m)	Objective
0.0010000	0.0010000	0.0010000	0.0010000	175.15
0.0013000	0.0010000	0.0010000	0.0010000	175.54
0.0010000	0.0013000	0.0010000	0.0010000	
0.0010000	0.0010000	0.0013131	0.0010000	
0.0010000	0.0010000	0.0011619	0.0011700	160.33
0.0011500	7.0000E-4	0.0011551	0.0011584	158.21
0.0011125	8.5000E-4	0.0011421	0.0011300	158.41
0.0010375	0.0011500	0.0011382	0.0011749	158.06
0.0010938	9.2500E-4	0.0011507	0.0011897	157.68
0.0010563	0.0010750	0.0011570	0.0012064	157.46
0.0010844	9.6250E-4	0.0011394	0.0012000	157.85
0.0011922	9.8125E-4	0.0011419	0.0012063	158.09
8.3828E-4	9.7187E-4	0.0011432	0.0012120	158.59
0.0011846	9.9297E-4	0.0011396	0.0012172	157.68
0.0012306	9.6836E-4	0.0011385	0.0012110	157.85
0.0011729	9.7627E-4	0.0011815	0.0012088	158.09
0.0010576	9.9209E-4	0.0011250	0.0012120	158.59
9.7111E-4	9.9235E-4	0.0011593	0.0011928	157.50
0.0011369	9.8407E-4	0.0011542	0.0012200	158.01
0.0011453	9.7768E-4	0.0011563	0.0012200	157.89
0.0012756	9.5861E-4	0.0011785	0.0012129	157.89
0.0012067	9.6896E-4	0.0011764	0.0012229	158.21
0.0010689	9.8965E-4	0.0011950	0.0011851	158.28
0.0011722	9.7413E-4	0.0012250	0.0011900	160.58
0.0010848	9.5622E-4	0.0011820	0.0011889	160.22
0.0011596	9.8378E-4	0.0012258	0.0011883	160.71
		0.0011934	0.0011861	159.21
		0.0012158	0.0011613	158.23
		0.0011746	0.0011729	159.68
		0.0011959	0.0011766	159.28
		0.0012258	0.0011757	158.99

Initial solution: thickness1=0.0010000, thickness2=0.0010000, thickness3=0.0010000, thickness4=0.0010000, Objective=175.15

Optimal solution: thickness1=0.0011422, thickness2=0.0010264, thickness3=0.0010535, thickness4=0.0011583, Objective=157.50

## 最適化結果

(耳位置音圧積分値の最小化)



# エネルギー密度を用いた位相変更方法

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_n}{m_n}} \rightarrow k_n \propto W_s \text{ (ひずみエネルギー密度)}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_n}{m_n}} \rightarrow m_n \propto W_k \text{ (運動エネルギー密度)}$$

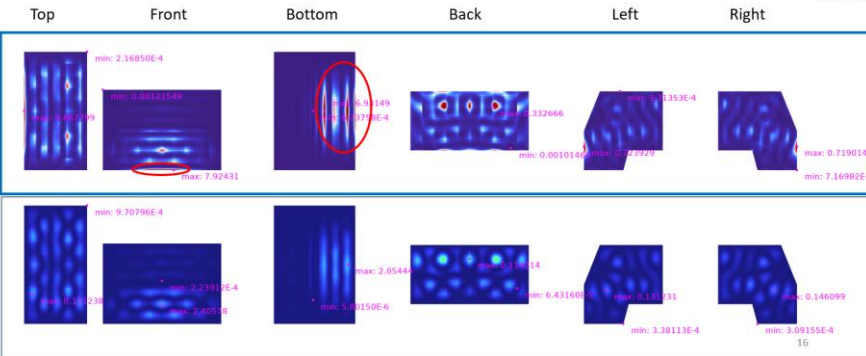
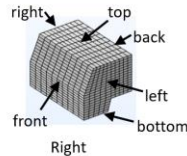
佐々木淑恵, 萩原一郎, 新しい位相最適化法の開発と折紙輸送箱への適用, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2021, 講演予稿集電子版 No.524

$\omega_n, k_n, m_n$ はそれぞれn次の固有角振動数, 等価剛性, 等価質量

- ・目的関数: 耳位置の指定周波数範囲の音圧積分値の最小化
- ・制御パラメータ: ローカル板厚(3ケース分: 0.3mm, 2mm, 4mm)
- ・手順: 次のプロセスを数回繰り返し  
固有振動数計算を実行し、直接周波数応答を得る  
⇒ エネルギー分布プロット  
⇒ 板厚調整  
⇒ 50-60Hz内耳位置音圧積分値の確認

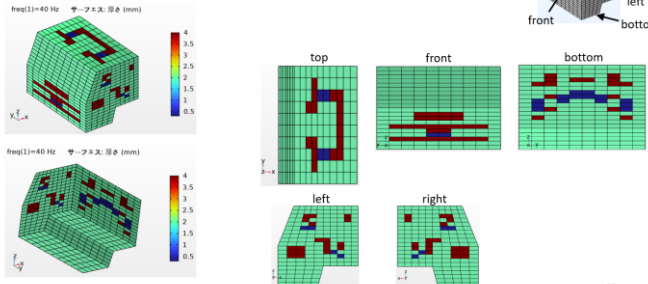
## エネルギー分布(初期板厚2mm)

初期板厚時の固有振動数 57.042Hzのときの6面のエネルギー分布

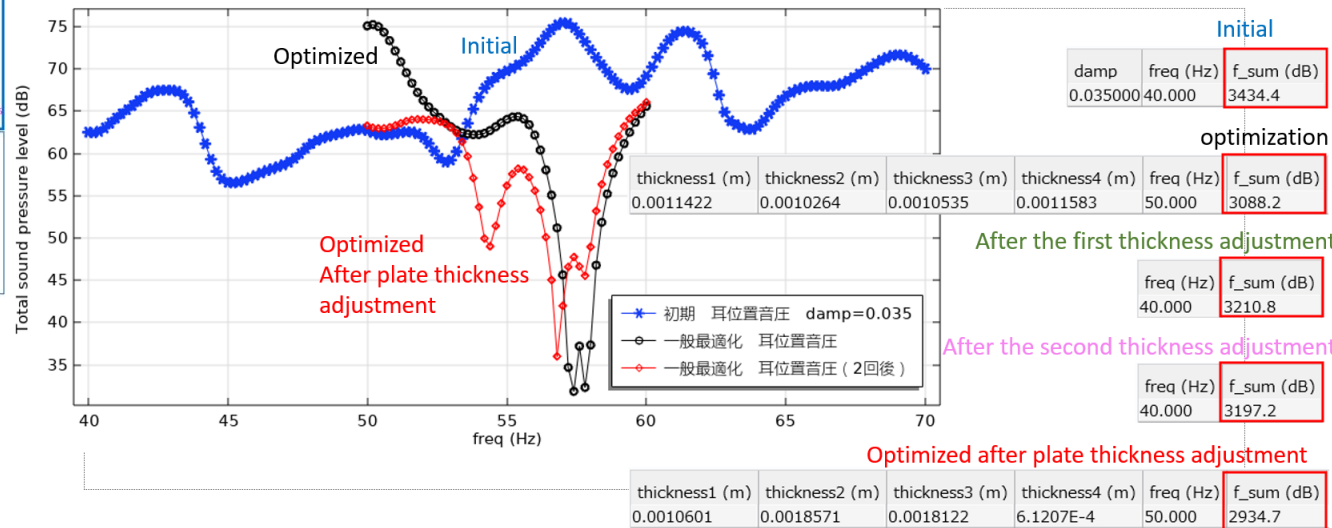


## 板厚調整(2回目)結果 板厚分布

板厚3種類: 0.3ミリメートル、2ミリメートル、4ミリメートル



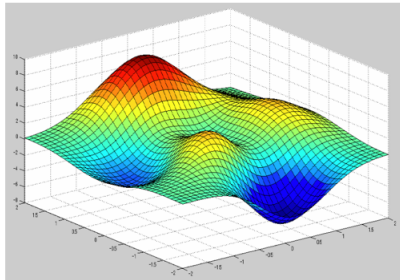
## 初期板厚と最適化とローカル板厚調整+最適化との比較



Test with Octave 6.4 GUI (2 control variables, 1 objective function)

$$\text{function } f = 3 \cdot (1 - x_1)^2 \cdot e^{-(x_1^2 - x_2 + 1)^2} - 10 \cdot \left(\frac{x_1}{5} - x_1^3 - x_2^5\right) \cdot e^{-(x_1^2 - x_2^2)} - \frac{1}{3} \cdot e^{-(x_1 + 1)^2 - x_2^2}$$

$-2 < x_1 < 2 \quad -2 < x_2 < 2$



The minimum value of the function is about -6

Procedure (GNU Octave (GUI))

1. Enable the function in the "Make\_Response\_Date.m" file (disable other functions).
2. Add output commands to each line of "Make\_Parameter.m" example: display(m);
3. Run the following command:  
`Make_Parameter(2,[-2,-2],[2,2],0.8,0.5,0.05,0.05);`
4. Run the following command:  
`[x_goal,f_goal] = MainMpod(3);`  
 Output : x\_goal = 0.030663 2.000000, f\_goal = -5.8526
5. Execute the following command (2 minutes and 15 seconds) :  
`[x_goal,f_goal] = MainMpod(5);`  
 First time result : x\_goal = -0.1545 1.6084, f\_goal = -7.9207  
 Second time result : x\_goal = -0.1806 1.6268, f\_goal = -7.8319

結論

① 音響シェル構造連成解析

トラックキャビンの音響構造連成問題

シェル構造と内部音響についてダンピングも考慮して解析

② 耳位置の音圧最適化

耳位置音圧の積分値を最小化

周波数帯域50~60Hzについて実施

③ エネルギーベースの振動最適化について検討中

- エネルギーベースの振動最適化方法の確立と自動化  
 運動エネルギーも、歪エネルギーも小さなところは、内板に穴を空けても可  
 ⇒この方法による最適化の再検討
- 同時に、アプリケーションとしてMPODを使用することを検討
- この最適化手法の折り紙コア構造(キュービックコアの客室)への応用



折り紙コアボディの概念:

今回、第1報としてトラックキャビンに適用

