

Wed. May 31, 2023

Room G

OS25 マルチフィジックス解析の超スマート社会におけるあり方について

## [G-03] OS25 マルチフィジックス解析の超スマート社会におけるあり方について (1)

座長:萩原 一郎(明治大学)

1:15 PM - 2:45 PM Room G (3F Conference Room 304)

## [G-03-01] (キーノート講演)モード合成技術からインタラクティブ固有周波数制御に至る高速・高精度解析技術の開発

\*萩原 一郎<sup>1</sup> (1. 明治大学)

1:15 PM - 1:45 PM

## [G-03-02] 最適化法援用エネルギー密度法による固有周波数制御に関する検討

\*佐々木 淑恵<sup>1</sup>、楊 陽<sup>1</sup>、米 大海<sup>2</sup>、萩原 一郎<sup>1</sup> (1. 明治大学、2. 計測エンジニアリングシステム株式会社)

1:45 PM - 2:00 PM

## [G-03-03] 室内騒音低減に関する一考察

\*阿部 綾<sup>1</sup>、米 大海<sup>2</sup>、萩原 一郎 (1. 明治大学、2. 計測エンジニアリングシステム株式会社)

2:00 PM - 2:15 PM

## [G-03-04] 折紙構造による音響空間の開発のための音響解析シミュレーション

\*山崎 桂子<sup>1</sup>、米 大海<sup>2</sup>、橋口 真宜<sup>2</sup>、萩原 一郎<sup>1</sup> (1. 明治大学、2. 計測エンジニアリングシステム株式会社)

2:15 PM - 2:30 PM

## [G-03-05] Research on the Maximization of the Performance of Arbitrary Shaped Kirigami Honeycombs

\*Diago Luis<sup>1,2</sup>、篠田 淳一<sup>2</sup>、山崎 桂子<sup>1</sup>、萩原 一郎<sup>1</sup> (1. 明治大学、2. Interlocus Inc)

2:30 PM - 2:45 PM

OS25 マルチフィジックス解析の超スマート社会におけるあり方について

## [G-04] OS25 マルチフィジックス解析の超スマート社会におけるあり方について (2)

座長:米 大海(計測エンジニアリングシステム株式会社)

3:00 PM - 4:15 PM Room G (3F Conference Room 304)

## [G-04-01] 音響メタサーフェスの有限要素解析

\*橋口 真宜<sup>1</sup>、米 大海<sup>1</sup> (1. 計測エンジニアリングシステム株式会社)

3:00 PM - 3:15 PM

## [G-04-02] 説明可能 AI-FQHNNの因果の構造とリアルタイム性の一考察

\*安部 博枝<sup>1</sup>、ルイス ディアゴ<sup>1</sup>、南畑 淳史<sup>2</sup>、萩原 一郎<sup>1</sup> (1. 明治大学、2. 関西国際大学)

3:15 PM - 3:30 PM

## [G-04-03] 材料構成関係のカスタマイズによる固体力学解析

\*米 大海<sup>1</sup>、橋口 真宜<sup>1</sup> (1. 計測エンジニアリングシステム株式会社)

3:30 PM - 3:45 PM

## [G-04-04] ユビキタス CAE教育アプリの開発と展開

\*橋口 真宜<sup>1</sup>、米 大海<sup>1</sup>、村松 良樹<sup>2</sup> (1. 計測エンジニアリングシステム株式会社、2. 東京農業大学)

3:45 PM - 4:00 PM

## [G-04-05] 超スマート社会を支援するユビキタスマルチメディア教育スタイルの提案

\*米 大海<sup>1</sup>、橋口 真宜<sup>1</sup>、村松 良樹<sup>2</sup> (1. 計測エンジニアリングシステム株式会社、2. 東京農業大学)

4:00 PM - 4:15 PM

---

OS25 マルチフィジックス解析の超スマート社会におけるあり方について

## [G-03] OS25 マルチフィジックス解析の超スマート社会におけるあり方について (1)

座長:萩原 一郎(明治大学)

Wed. May 31, 2023 1:15 PM - 2:45 PM Room G (3F Conference Room 304)

---

[G-03-01] (キーノート講演)モード合成技術からインタラクティブ固有周波数制御に至る高速・高精度解析技術の開発

\*萩原 一郎<sup>1</sup> (1. 明治大学)

1:15 PM - 1:45 PM

[G-03-02] 最適化法援用エネルギー密度法による固有周波数制御に関する検討

\*佐々木 淑恵<sup>1</sup>、楊 陽<sup>1</sup>、米 大海<sup>2</sup>、萩原 一郎<sup>1</sup> (1. 明治大学、2. 計測エンジニアリングシステム株式会社)

1:45 PM - 2:00 PM

[G-03-03] 室内騒音低減に関する一考察

\*阿部 綾<sup>1</sup>、米 大海<sup>2</sup>、萩原 一郎 (1. 明治大学、2. 計測エンジニアリングシステム株式会社)

2:00 PM - 2:15 PM

[G-03-04] 折紙構造による音響空間の開発のための音響解析シミュレーション

\*山崎 桂子<sup>1</sup>、米 大海<sup>2</sup>、橋口 真宜<sup>2</sup>、萩原 一郎<sup>1</sup> (1. 明治大学、2. 計測エンジニアリングシステム株式会社)

2:15 PM - 2:30 PM

[G-03-05] Research on the Maximization of the Performance of Arbitrary Shaped Kirigami Honeycombs

\*Diago Luis<sup>1,2</sup>、篠田 淳一<sup>2</sup>、山崎 桂子<sup>1</sup>、萩原 一郎<sup>1</sup> (1. 明治大学、2. Interlocus Inc)

2:30 PM - 2:45 PM

# (キーノート講演) モード合成技術からインタラクティブ固有周波数制御に至る高速・高精度解析技術の開発

(Keynote lecture) Development of High-speed, High-precision Analysis Technology from Mode Superposition Method to Interactive Plural Eigen-frequencies Control

萩原一郎<sup>1)</sup>

Ichiro Hagiwara

工博 明治大学 研究特別教授 (〒101-8301 東京都千代田区神田駿河台1-1)

E-mail:ihagi@meiji.ac.jp

Here structural-noise coupled problem for a large scale model is discussed. In this phenomena, the FEM matrix is unsymmetric so that left and right eigen vectors are different each other where the mode method is difficult to be used. But we have discovered the relationship between left and right eigenvectors with which eigenmode sensitivity of the coupled problem can be expressed explicitly. Now they use broadly the mode acceleration method where the loss of precision caused by omitting higher eigenmodes can be compensated. But it is clear that Ma-Hagiwara mode method is superior to the mode acceleration one. And as far as mode synthesis method based on mode method which is necessary for a large scale model, Ma-Hagiwara method is superior to Super element of MSC/NASTRAN which is based on mode acceleration one. Moreover it is possible for us to get a faster and higher precision system with our response surface optimal method, interactive energy density topology change method and Ma-Hagiwara mode method.

**Key Words :** Vehicle Interior Noise, Ma-Hagiwara mode method, MPOD, Eigen mode sensitivity, Mode superposition method, Vibration- Noise coupled problem, Strain Energy Distribution, Kinetic Energy Distribution, Control for Plural Eigen Frequencies,

## 1. はじめに

多くの雇用を提供することから、自動車産業の国際競争は熾烈を極めるものとなる。衝突実験車は1億円程度し、繰り返しの実験ができないことから、計算科学は大いに期待され、衝突シミュレーションの成功[1]により、クレイモデルは三次元CADへ、試作車は解析モデルへ、実験は解析シミュレーションへと開発スタイルの変革がなされ、開発期間の大幅な短縮が得られたことは周知のとおりである[2]。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があることから、有限要素法と最適化の組合せも他の産業より逸早くなされた。本稿で扱う騒音振動分野は、衝突とは異なり、開発過程で切ったり貼ったりの対策も可能なため、様々な実験法の開発がなされ、計算科学の方は当初は衝突程の期待はなされなかった。しかし、GM社から発せられたビルディング・ブロックアプローチ[3]は刺激となりモード解析技術の大いなる発展が得られた[4]。ここでは、馬一萩原のモード法[5]が最も汎用性のあるものであることを思い出したい。室内騒音は、構造-音場連成問題となり、非対称行列を扱うことは困難であったが、右固有ベクトルと左固有ベクトルの関係式が得られた[6]ことは特筆すべきことであることも思い出したい。また均質化法を用いた位相最適化の誕生[7]も大いなる刺激となり関連の夥しい数の論文の誕生となった。これに関してはやや我田引水ではあるが著者らのインタラクティブエネルギー密度位相変更法[8]も実用的には画期的な手法と考える。あわせて、ニューラルネットワーク関数をベー

スとする応答曲面法などにも注目すべきである。その代表としてMPOD(Most Probable Optimal Design)[9]がある。ここでは、計算科学の黎明期から今日までの騒音振動に関わる解析技術について述べ、あるべき姿についての考察を行う。

## 2. 音響振動の基盤となる解析技術

### (1) モード合成技術

音響振動応答値は固有モードの重ね合わせで決まることから、モード合成技術は音響振動の最も基盤となる技術である。固有値解析法には非常に多くの手法が開発されているが、固有値、固有モードのうちどちらを先に求めるかで手法は大別される。更に、低周波、高周波のどちらから先に求めるかで大別すると計4種類に大別される。いずれも、興味のある周波数領域の固有値・固有モードだけを求めることは不可で、全てを求める必要がある。この手法だと大規模構造物への適用は困難である。サブスペース法の発見によって、必要な領域の固有値・固有モードだけが算出できるようになったことは大きな福音であった。構造全体の曲げや振りモード等は低周波で現れ高周波になればなるほど局部に集中した変形モードとなる。そのため、低周波の方が重要ということで、低周波の精度がより良い逆反復法など低周波から求める固有値解析が実用上利用される。それを使用し、低次の固有モード

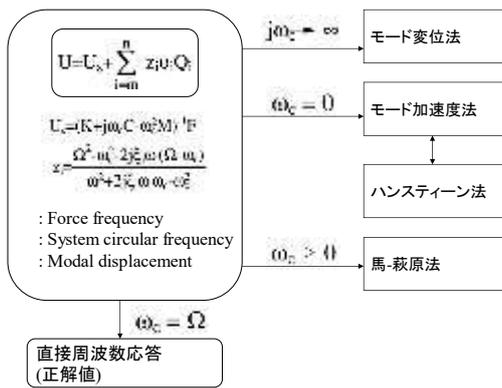


図1 馬一萩原のモード合成法  
従来のモード合成法との関係

だけを使用して応答値を求めるモード変位法は、19世紀から利用されている。応答変位の1階あるいは2階の微分で得られる音圧や応力などは、応答変位より精度は下がることもあり、省略する高次のモードを補正するモード加速度法が1945年に開発され[10]、これが、MSC/NASTRANやANSYSなどの汎用ソフトに利用されている。これで満足であろうか。車両開発でよく言われることは車体の箱が決まれば60Hz周辺あるいは120Hz周辺等、特に下げたい周波数帯域が決まる。たとえそれが60Hz周辺だとしても、自動車車両モデルとなると、60Hzまでに、すでに100以上の固有モードが存在することになる。このような問題にモード加速度法を適用すると、1番目の固有モードから正確に求める必要があり現実的でない。サブスペース法のように興味のある周波数帯域だけ正確に求め、あとは補正することができれば相当の効率を得られる。そこで開発されたのが馬一萩原のモード法[5]である。図1で $U_s$ は補正項で固有モード $\phi_i$ は $m$ 次から $n$ 次まで求めればよい。 $Q_i = \frac{\phi_i^T F}{\omega_i^2 + 2j\omega_i\omega_c - \omega_c^2}$ である。K, C, Mはそれぞれ剛性・減衰・質量行列、 $\Omega$ は入力の周波数、 $\omega_i = \sqrt{k_i/m_i}$ は $i$ 次の固有角振動数、 $\xi_i = c_i/(2m_i\omega_i)$ は $i$ 次のモード減衰比、 $j = \sqrt{-1}$ 、 $k_i, c_i, m_i$ はそれぞれ $i$ 次の等価剛性・減衰・質量、 $\omega_c$ はある与えられた角振動数で、通常は $\omega_c = (\omega_m + \omega_n)/2$ である。同図で、 $m=1$ 、 $\omega_c \rightarrow \infty$ とすると、馬一萩原法はモード変位法に等しくなり、 $m=1$ 、 $\omega_c = 0$ とすると馬一萩原法はモード加速度法になるなど、パラメータを変更するだけで従来の技術に一致する意味で馬一萩原法は最も汎用的なもので、文献[5]などには、低次を省略すると、モード加速度法はモード変位法よりかえって精度が悪くなること、モード加速度法が得意な高次モードを省略する場合も馬一萩原法の精度はモード加速度法に勝ることが示されている[5]。

## (2) 構造音場連成問題

車室内騒音は車室を囲むパネルの振動で生ずる固体伝搬音が主である。車室を囲む鋼板と空気とは剛性はけた違いに鋼板が高く通常はパネルが振動して音になるが、空

気音圧がパネル振動にも逆に影響を与える所謂音一構造振動の連成現象である。この場合、剛性、質量行列は  $K = \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sa} \\ 0 & K_{aa} \end{bmatrix}$ ,  $M = \begin{bmatrix} M_{ss} & 0 \\ M_{as} & M_{aa} \end{bmatrix}$  のように非対称となり

運動方程式  $M\ddot{u} + Ku = f$  は

$$M_{ss}\ddot{u}_s + K_{ss}u_s + K_{sa}u_a = f_s$$

$$M_{as}\ddot{u}_s + K_{ss}\ddot{u}_a + K_{aa}u_a = 0$$

となる。一般固有値問題

$$K\phi = \lambda M\phi, \quad K^T\phi = \mu M^T\phi$$

あるいは同じことであるが、左固有ベクトルを求める一般化固有値問題  $\phi^T K = \mu \phi^T M$  を考える。ここで  $M_{ss}$  は正定値である(a)。 $M_{as}$ は長方形で、 $M_{ss}$ と $K_{ss}$ は $N_s$ 次正方形行列、 $M_{aa}$ と $K_{aa}$ は $N_a$ 次正方形行列である。一般に $N_s$ 次の複素縦ベクトルを $\phi_s$ 、 $N_a$ 次の複素縦ベクトルを $\phi_a$ などで示すと、条件(a)は $\phi_s$ が零ベクトルでなければ  $(M_{ss}\phi_s, \phi_s) > 0$  となる。

ここで、つぎのような複素内積を用いる。

$$(\phi_s, \psi_s) = \sum_{j=1}^{N_s} \phi_s(j)\bar{\psi}_s(j),$$

$$\phi_s = \{\phi_s(j)\}_{1 \leq j \leq N_s}, \quad \psi_s = \{\psi_s(j)\}_{1 \leq j \leq N_s}$$

まず、一般固有値問題  $K\phi = \lambda M\phi$ ,  $K^T\phi = \mu M^T\phi$  は同じ固有値を有することに注意しよう。実際、 $K$ と $M$ は実行列で、それぞれの固有方程式において  $\det(K - \lambda M) = \det(K^T - \lambda M^T)$  となる。さらに次の命題を得ることによって、連成系でのモード合成法の適用が可能となった

〈命題1〉 右および左固有値問題のすべての固有値および固有ベクトルはつねに実数。

〈命題2〉 左固有ベクトル  $\psi^T = (\psi_s^T, \psi_a^T)$  は、右固有ベクトル  $\phi^T = (\phi_s^T, \phi_a^T)$  によって次式で求められる。

$$\psi^T = (\phi_{si}^T, \frac{1}{\lambda_i} \phi_{ai}^T) \quad (1)$$

〈命題3〉 連成系の直交条件

$\psi_i^T M \phi_j = 0$ ,  $\psi_i^T K \phi_j = 0$  (for  $i \neq j$ ) は式(1)を用いると、次式で表される。

$$\phi_{si}^T K_{ss} \phi_{sj} + \phi_{si}^T K_{sa} \phi_{aj} + \frac{1}{\lambda_i} \phi_{ai}^T K_{aa} \phi_{aj} = 0$$

$$\phi_{si}^T M_{ss} \phi_{sj} + \frac{1}{\lambda_i} (\phi_{ai}^T M_{as} \phi_{sj} + \phi_{ai}^T M_{aa} \phi_{aj}) = 0 \quad (\text{for } i \neq j) \quad (2)$$

〈命題4〉 右固有ベクトルの質量に関する正規化条件  $\psi_i^T M \phi_i = 1$  は、式(2)を用いると

$$\phi_{si}^T M_{ss} \phi_{si} + \frac{1}{\lambda_i} (\phi_{ai}^T M_{as} \phi_{si} + \phi_{ai}^T M_{aa} \phi_{ai}) = 1 \quad (3)$$

で表される。本方法により、これまではこの連成系の解析の主流であったマクニールらによる手法[11]のように、自由度数を二倍にすることなく、係数行列を対称化することが可能となった。これにより、固有モードの感度係数の表現が可能となった。

## 3. 音響振動の重要な解析技術への展開

### (1) 固有値・固有モード感度解析

つぎのような構造系の固有値問題を考える。

$$(K - \lambda_j M) \phi_j = 0 \quad (4)$$

ここに、 $\lambda_j$ は系の固有値、 $\phi_j$ は固有ベクトル、 $K, M$ はそれぞれ系の剛性行列と質量行列。単なる構造の場合には、系の固有ベクトルについて

$$\phi_i^T K \phi_j = 0, \quad \phi_i^T M \phi_j = 0 \quad (\text{for } i \neq j) \quad (5)$$

の直交条件と、

$$\phi_i^T M \phi_i = 1 \quad (6)$$

の正規化条件が成立する。系の設計変数を $\alpha_k$  ( $k=1, 2, \dots$ ) とし、式(4)、(6)を設計変数 $\alpha_k$ で偏微分すると、

$$-\lambda_j' M \phi_j + (K - \lambda_j M) \phi_j' = -(K' - \lambda_j M') \phi_j \quad (7)$$

$$\phi_j^T M \phi_j' = -\frac{1}{2} \phi_j^T M' \phi_j \quad (8)$$

が得られる。ここに、 $\lambda_j'$ 、 $\phi_j'$  はそれぞれ固有値  $\lambda_j$  固有モード  $\phi_j$  の設計変数  $\alpha_k$  に関する感度である。式(7)に  $\phi_j$  の転置を左から乗じ、かつ、 $\phi_j^T (K - \lambda_j M) = 0$  を利用すれば、固有値感度

$$\lambda_j' = E_{jj} \quad (9) \quad E_{jj} = \phi_j^T (K' - \lambda_j M') \phi_j \quad (10)$$

である。ただし、 $\phi_j^T M \phi_j = 1$  とする。

固有モード感度については式(7)が、つぎのように通常の線形方程式に書けることを用いて求められる。

$$A_j \phi_j' = b_j \quad (11)$$

$$A_j = K - \lambda_j M, \quad b_j = \lambda_j' M \phi_j - (K' - \lambda_j M') \phi_j \quad (12)$$

しかし、式(11)の係数行列  $A_j$  は特異行列なので、そのままでは解が得られない。従来から次の方法が提案されてきている。

#### (a) フォックスらのモード法 [12]

モード変位法では、固有ベクトル感度  $\phi_j'$  は次のように展開することができる。

$$\phi_j' = \sum_{i=1}^n \phi_i C_{ij} \quad (13)$$

式(13)を式(7)に代入してさらに  $\phi_i^T$  を左から乗じ、かつ直交条件式(5)を用いれば

$$C_{ij}^0 = \frac{-1}{\lambda_i - \lambda_j} E_{ij} \quad (\text{for } i \neq j) \quad (14)$$

が得られる。ここに、

$$E_{ij} = \phi_i^T (K' - \lambda_j M') \phi_j \quad (15)$$

である。また、式(8)を用いると、係数  $C_{ii}^0$  は

$$C_{ii}^0 = -\frac{1}{2} \phi_i^T M' \phi_i \quad (16)$$

である。フォックスらの感度解析では、高次モードの省略により感度の精度が悪くなることがある。そのため、より正確な固有ベクトル感度を得るには、より多くのモードを計算してそれを感度解析に用いることが必要となる。これは基本的にはモード変位法の欠点によって生じたことで、フォックスらの方法の限界といえる。これに対して、1976年ネルソンにより提案された手法は、より効率的な手法であると評価されている。

#### (b) ネルソンの方法 [13]

ネルソンの方法とフォックスらの方法の違いは、前者では、展開式(13)を使わず、式(11)と(8)から直接固有ベクトルの感度  $\phi_j'$  を求める点にある。系の全体自由度を  $N$  とすれば、式(11)の係数行列は  $N$  階の特異行列である。問題の解を得るため、ネルソンの方法ではまず次のような非特異方程式の解  $X_j^0$  を求める。

$$\bar{A}_j X_j^0 = \bar{b}_j \quad (17)$$

ここに、 $\bar{A}_j$  は係数行列  $A_j$  の第  $k$  行と第  $k$  列のすべての要素を零に置き換え、そして  $k$  番目の対角項を 1 にした行列で、 $\bar{b}_j$  は  $b_j$  の  $k$  番目の要素を零にしたベクトルである。また番号  $k$  は  $\phi_j$  の絶対値最大の成分の番号によって決める。そして、固有ベクトルの感度を

$$\phi_j' = X_j^0 + C_j \phi_j \quad (16)$$

とし、上式を式(11)に代入すると、

$$C_j = -\phi_j^T M X_j^0 - \frac{1}{2} \phi_j^T M' \phi_j \quad (19)$$

が得られる。 $K'$  と  $M'$  が厳密に得られると、ネルソンの方法により厳密な感度係数が得られる。ところがネルソンの方法では、一度に複数の固有モード感度係数が得られず非効率である。

#### (c) 萩原一馬のモード法 [14]

まず、式(11)の解はつぎのように得られる。

$$\phi_j' = X_j + \sum_{i=1}^n \phi_i C_{ij} \quad (20)$$

ここに、 $X_j$  はつぎの線形方程式

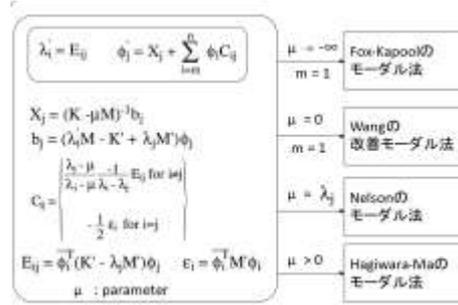


図2 萩原一馬の感度解析式と従来の感度解析式との関係

$$(K - \mu M) X_j = b_j \quad (21)$$

の解で、

$$C_{ij} = \frac{\lambda_j - \mu}{\lambda_i - \mu} \frac{\phi_i^T b_j}{\lambda_i - \lambda_j} \quad (22)$$

である。式(12)の  $b_j$  を式(22)に代入すれば

$$C_{ij} = \frac{\lambda_j - \mu}{\lambda_i - \mu} \frac{1}{\lambda_i - \lambda_j} E_{ij} \quad (\text{for } i \neq j) \quad (23)$$

が得られる。ここに、式(22)により分母が 0 となるので  $C_{ii}$  は不定となる。ところが、従来のように、式(20)を正規化条件式(8)に代入すれば

$$C_{ii} = -\phi_i^T M X_i - \frac{1}{2} \phi_i^T M' \phi_i \quad (24)$$

が求められる。一般の場合 ( $\mu = \lambda_j$  の場合を除く) には、次のような式が得られる。

$$\phi_i^T M X_j = 0 \quad (25)$$

そして  $C_{ii} = C_{ii}^0$  となる。特別な  $\mu$  を与えることによって、萩原一馬のモード法は従来の感度解析手法に退化することができる。すなわち、もし、 $\mu \rightarrow -\infty$  とすれば、式(21)により  $X_j \rightarrow 0$  となり、また式(23)の  $C_{ij}$  は

$$C_{ij} = \frac{1}{\lambda_i - \lambda_j} E_{ij} = C_{ij}^0 \quad (\text{for } i \neq j) \quad (26)$$

となる。従って、萩原一馬のモード法はフォックスらのモード法に退化する。もし  $\mu = \lambda_j$  とすれば式(23)によって  $C_{ij}$  ( $\text{for } i \neq j$ ) は零となり、式(20)は

$$\phi_j' = X_j + C_{ij} \phi_j = X_j^0 + C_j \phi_j \quad (27)$$

となる。したがって、萩原一馬のモード法はネルソンの方法に退化する。またもし  $\mu = 0$  とすれば式(63)の  $C_{ij}$  は

$$C_{ij} = \frac{\lambda_j}{\lambda_i} \frac{1}{\lambda_i - \lambda_j} E_{ij} \quad (\text{for } i \neq j) \quad (28)$$

となり萩原一馬のモード法はモード加速度法をベースとするヴァングの改善モード法 [15] に退化する。以上の関係を図 2 に示す。

#### (2) 部分構造合成法 (区分モード合成法)

大規模で複雑な構造の振動騒音問題に対する有力な解法の一つに、区分モード合成法とか部分構造合成法などと称される手法がある。計算機の内部記憶容量などの制約から、構造全体を一度には解くことができないような大規模問題でも、構造をいくつもの小さな分系に分割することにより解析を可能にする。部分構造合成法では、解析対象をいくつかの分系と称される部分構造に一旦分割し、分系内部の自由度をモード座標の導入などにより消去し、自由度を縮小したあとに再び合成する、という解析過程をとる。その利点は、少ない記憶容量で大規模問題を取り扱えることに加え、一部の構造変更に対して始めから解きなおす必要が

ないこと、実験で得られるモードモデルを直接利用できること、などにある。もともと部分構造合成法は、構造の低次振動においては、各部分の振動形状は非常に単純になるため、これをいくつかの区分モードなどの適当な関数で近似して応答を表現しようとしたものといえ、従来の研究は比較的低周波の応答解析が中心となっていた。しかし本題の、例えば車室内騒音に代表される構造—音場連成問題では、低次のモードも省略できることの重要さはすでに述べた通りである。これに対して従来の部分構造合成法ではその自由度縮小の過程において、高次モードは省略できても低次モードは省略できないため、解析の対象が高次振動になればなるほど解析に必要なモード数が増加し解析モデルの詳細化と相俟って解析効率の大幅な低下を招いている。そこでここでは、低次と高次のモードの省略可能な馬一萩原のモード合成法を基に、構造—音場連成問題の部分構造合成法による定式化を行うことにより高周波領域の応答でも少ないモード数で解析できることを示す。

(a) 部分構造合成法の定式

$$\begin{bmatrix} M_{s11} & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & M_{skk} & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & M_{sc} & 0 \\ M_{sa1} & \dots & M_{sck} & M_{sc} & M_{sa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_{s1} \\ \vdots \\ \dot{u}_{sk} \\ \dot{u}_{sc} \\ \dot{u}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{s11} & 0 & K_{s1c} & K_{s1a} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & K_{skk} & K_{ska} & K_{ska} \\ K_{sc1} & \dots & K_{sck} & K_{sc} & K_{sc} \\ 0 & \dots & 0 & 0 & K_{sa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{s1} \\ \vdots \\ u_{sk} \\ u_{sc} \\ u_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ f_{sc} \\ f_a \end{bmatrix} \quad (29)$$

複数の構造の分系と音場で構成される系を考える。その運動方程式は集中質量を用い、分系内部に荷重が作用しないものとすれば次のように表せる。

ここに、係数行列の添字  $i (i=1, 2, \dots, k)$  は分系の番号を、 $c$  は分系相互の結合部分の自由度に対応することを示す。式(29)より一つの構造の分系  $I$  内部に関する運動方程式を取り出すと、外部との相互作用に関する項を右辺に置いて、次のように書き表すことができる。

$$[M_{si}]\{\ddot{u}_{si}\} + [K_{si}]\{u_{si}\} = -[K_{sic}]\{u_{sic}\} - [K_{sia}]\{u_{sia}\} = \{f\} \quad (30)$$

ここで分系内部の変位  $\{u_{si}\}$  は、モード座標を用いれば次のように表すことができる。

$$\{u_{si}\} = \sum_{j=1}^{N_i} \{\phi_{sj}\} q_{sj} \quad (31)$$

ここに、 $\{\phi_{ij}\}$  は分系の区分 (拘束) モードを表し、 $N_i$  は分系内部の自由度数を示す。式(30)、(31)に対してモード合成法を適用し、高次、低次のモードを省略して  $m (> 1)$  から  $n (< N_i)$  次を用いるものとすれば、次式が得られる。

$$\{u_{si}\} = [\phi_{si}]\{q_{si}\} + [G_i]\{u_{sc}\} + [G_{sia}]\{u_c\} \quad (32)$$

ここに、

$$[\phi_{si}] = [\phi_{sm}, \dots, \phi_{sn}] \quad (33)$$

$$[G_i] = - \left( (K - \omega_c^2 M)^{-1} - \sum_{j=1}^{N_i} \frac{\{\phi_{sj}\}\{\phi_{sj}^T\}}{\omega_j^2 - \omega_c^2} \right) [K_{sic}] \quad (34)$$

$$[G_{sia}] = - \left( (K - \omega_c^2 M)^{-1} - \sum_{j=1}^{N_i} \frac{\{\phi_{sj}\}\{\phi_{sj}^T\}}{\omega_j^2 - \omega_c^2} \right) [K_{sia}] \quad (35)$$

式(34)、(35)の  $\omega_c$  は馬一萩原のモード合成法のパラメータで、ある一定の角振動数である。音圧ベクトル  $\{u_a\}$  もモード座標に変換し、 $k$  次までのモードを用いるものとすればつぎのように表せる。

$$\{u_a\} = \sum_{i=1}^k \{\phi_a\} q_a \quad (36)$$

式(35)、(36)をまとめて、次の変換関係式を得る。

$$\begin{Bmatrix} u_{s1} \\ \vdots \\ u_{sk} \\ u_{sc} \\ u_a \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{s1} & \dots & 0 & G_{s1c} & G_{s1a} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \phi_{sk} & G_{sck} & G_{ska} \\ 0 & \dots & 0 & I & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & \phi_a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_{s1} \\ \vdots \\ q_{sk} \\ u_{sc} \\ q_a \end{Bmatrix} = [T] \{\tilde{u}\} \quad (37)$$

式(37)を式(29)に代入し、変換行列の転置を前からかけることにより、つぎの縮小された全体系の運動方程式を得ることができる。

$$[M]\{\ddot{\tilde{u}}\} + [K]\{\tilde{u}\} = \{\tilde{F}\} \quad (38)$$

式(38)の自由度数は、境界部分の自由度数 + 分系内部の区分モード数であり、もとの運動方程式(30)に比べて、大幅に自由度数を縮小した方程式である。式(38)の係数行列は、構造—音場連成問題では依然として非対称であるが、左右の固有モードを導入することにより解き進めることができる。ここで例題で確認してみましょう。

(b) 実車両客室の構造—音場連成周波数応答解析例

図3に車両の構造振動—音場連成問題に区分モード合成法を利用する際の概念図を示す。図4は、4ドアセダン車両の(1) 構造モデル、(2) 客室音響モデルを示す。構造は部分構造数18に分割する。室内音場の部分構造数は1である。フロントサスペンション右用のショックアブソーバーを、振動入力点とする問題を取り上げる。構造モデルの節点数は3638、要素数5391、音場モデルの節点数728、要素数557と、かなり大きなモデルである。このように、車体形状が決まると、問題となる(室内騒音を特に下げたい)周波数帯域が決ま。ここでのそれは、200Hz - 400Hzである。馬一萩原のモード合成法では、高次に加えて、低次の固有モードも省略できるため、使用するモードの周波数範囲を100Hz~600Hz、 $\omega_c = 300\text{Hz}$ とし、全モードを利用する正解値と評価できる成果が得られている。

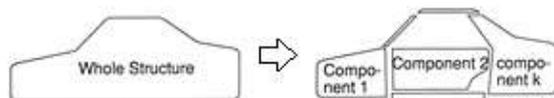


図3 構造振動—音場連成システムの区分モード合成法概念図



図4 車体構造振動 (左) 及び音場モデル (右)

ここでまず、計算時間を定評あるMSC/NASTRANのスーパーエレメント法(SE法)と馬一萩原の方法とで表1に比較する。馬一萩原法による区分モード合成法はSE法に比し、精度が格段に優れているうえ、計算時間はSE法の4割程度である。

表1 馬一萩原法の区分モード合成法と  
スーパーエレメント法(SE法)との計算時間比較

CPU (秒)	提案手法	スーパー エレメント 法 (NASTRAN)
物理座標での FEM 方程式の生成	8	8
CMS を使った全構造の自由度数の削減	141	89
縮約構造の固有値解析	301	1044
縮約された方程式の求解と物理座標への 再変換	34	52
トータル	484	1193

#### 4. 音響振動に有用な最適化解析技術

ここでは, MPOD (Most Probable Optimal Design) [9] 及び  
インタラクティブエネルギー密度位相変更法 [8] の概要を  
述べ, 解析例は当日示す.

##### (1) 応答曲面法に拠る最適化 MPOD 法

MPOD法は2つのステップからなっている. ステップ1では, 全設計領域から最適解が有りそうな領域を探索し, 次のステップ2では, その領域の近似精度を向上させる. 今回, 基底関数として用いたホログラフィックニューラルネットワーク (以下, HNN と略記) は, 入力データと出力データを複素平面上に写像することにより, その入出力関係を線形に表すことができる [17]. 実数設計変数データ  $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$  を変換関数を用いて複素データへ変換する.

$$\phi_k(x_k) = \lambda^k e^{i\theta(x_k)} \quad (k=1, 2, 3, \dots, n) \quad (391)$$

線形関係は式 (40) で表わされ, 出力値 Y は  $r$  の逆変換から求められる.

$$r(x) = \sum_{k=1}^n a_k \phi_k(X) \quad (40)$$

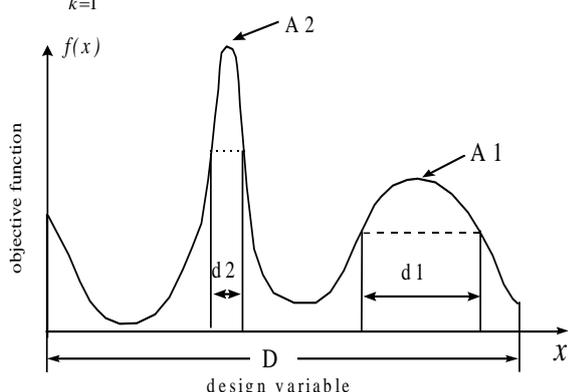


図5 多峰性関数の例

ここで,  $\alpha_k$  は応答曲面のモデル係数であり, 学習により決定される. この学習データの選び方が, 応答曲面の精

$$d_{\min} \leq \min(\|X_i - X_j\|), (i, j = 1, 2, \dots, N, i \neq j) \quad (41)$$

度に影響を与える.

##### (a) MPOD—ステップ1—

一様分布乱数により,  $N$  個の初期学習点を決める. このとき式 (41) の条件を付加することにより, 近接した点を選ばないようにする.

ここで,  $d_{\min}$  は許容最短距離であり, その値の大きさによって近似精度と解析回数のトレードオフのバランスを取ることができる. 図5に示すような多峰性関数形に対し,  $d_i$  ( $i=1, 2$ ) は領域の大きさで, その領域内の極大値の0.7倍より大きい区間長さである.  $d_{\min}$  を  $d_1$  より小さく  $d_2$  より大きく設定した場合には, ピーク A2 は近似できないが, ロバスト性の良いピーク A1 を近似できる. また, 通常は  $N = (n+1)(n+2)/2$  とするが, 詳細な精度が要求される場合や計算コストがかからない問題には  $N$  を大きくし, 逆にロバスト性の良い最適化が要求される場合や1回の試行計算の長い場合は  $N$  を小さくする. 得られた各学習点の応答値を求め, HNN に学習させ応答曲面を作成する. これより最適解  $\hat{X}_k$  を探す. 最適解の収束判定を, 式 (42) により行う.

$$\frac{\|\hat{X}_k - \hat{X}_{k-1}\|}{\|\hat{X}_{k-1}\|} \leq \varepsilon_1 \quad (42)$$

ここで  $k$  は反復の回数である. もし満たされなければ学習点の追加を行う. 追加学習点は, 条件 (41) を付加した  $\hat{X}_k$  を中心とする正規分布乱数を用いる. すなわち, 正規分布乱数の分散  $\sigma_i$  を式 (43) のように決定する.

$$\sigma_i = \alpha_i (\hat{x}_{i,k} - \hat{x}_{i,k-1}), (i=1, 2, \dots, n) \quad (43)$$

ここで,  $\alpha_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) は分散の制御係数で,  $\sigma_i$  は  $\hat{x}_{i,k}$  の変化量によって決めるものである. さらに,  $\alpha_i$  の大きさを調整することによってトレードオフの関係を統合的に考慮することができる. すなわち,  $\alpha_i$  を大きく取ることによって学習点のバラツキは大きく, 全領域にわたって応答曲面の近似精度が高く, 試行点の数は多くなる. 逆に,  $\alpha_i$  を小さく取れば, 全領域にわたって応答曲面の近似精度が低く, 学習点の数は少くなる. ただし, 1回目の反復では, 一様分布乱数を用いる. 追加学習点が決定したら, その応答値を求め, 再び HNN に学習させ, 最適解を求める. これを式 (44) を満たすまで繰り返す.

##### (b) MPOD—ステップ2—

$\hat{X}_k$  をステップ1で収束した近似最適値を与える設計変数の値,  $f(\hat{X}_k)$ ,  $\hat{f}(\hat{X}_k)$  と  $g(\hat{X}_k)$ ,  $\hat{g}(\hat{X}_k)$  はこれに対応する目的関数と拘束関数の正解値と応答曲面から得られる近似値, および  $\varepsilon_2$  を収束の閾値として, 式 (44), (45) の収束条件を満たせば, 終了とする. そうでなければ,  $\hat{X}_k$  を追加学習点として再学習を行い, 近似関数を更新する.

$$\frac{\|f(\hat{X}_k) - \hat{f}(\hat{X}_k)\|}{\|f(\hat{X}_k)\|} \leq \varepsilon_2 \quad (44)$$

$$\frac{\|g(\hat{X}_k) - \hat{g}(\hat{X}_k)\|}{\|g(\hat{X}_k)\|} \leq \varepsilon_2 \quad (45)$$

## (2) インタラクティブエネルギー密度位相変更法

本手法は、各固有周波数は、等価質量と等価剛性で決まるため、固有周波数を上げたい場合は、バネ部を補強するか、マス部に穴を空ける。逆に固有周波数を下げる場合は、バネ部に穴を設けるかバネ部を補強して位相を変化させるものである。著者は、均質化法や密度法による位相最適化解析を振動問題に適用し[18]、自動車設計にも応用している[19]。この経験から述べると、実際の設計にまで持つていくのは極めて難しいということである。これを解決すべく開発したのが、本手法である。インタラクティブに極めて効率よく複数の大幅な変更を司ることができることが示されている。本会でも佐々木淑恵らの講演を参照されたい[20]。

## 5. 結語

大規模な振動騒音連成問題を高速・高精度に解く手法をリストアップし著書にまとめている[21]が、その内容を中心に記述した。企業などで使用されている解析技術を凌駕すると考えており、今回の発表を機に紹介した手法の利用を進めて頂きたい。

### 参考文献

- [1] 萩原一郎, 津田政明, 佐藤佳裕, 有限要素法による薄肉箱型断面真直部材の衝撃圧潰解析, 日本機械学会論文集 (A 編), 55 巻 514 号 (1989-6 月), pp. 1407-1415.
- [2] 萩原 一郎, 計算科学における夢・ロードマップ, 学術の動向, 12-17, 619 (10), 3, 2014-10.
- [3] 萩原一郎, 応用数理の遊歩道—騒音振動・最適化シミュレーション, 応用数理, 31 (2), pp. 34-37 (2021 年).
- [4] 長松昭男, 萩原一郎, 吉村卓也, 梶原逸朗, 雉本信哉, 音・振動のモード解析と制御, コロナ社 (1996 年).
- [5] 馬正東, 萩原一郎, 高次と低次のモードの省略可能な新しいモード合成技術の開発, 第一報: ダンピング系の周波数応答解析, 日本機械学会論文集 (C 編), 57 巻 536 号 (1991-4 月), pp. 1148-1155.
- [6] Hagiwara, I., Ma, Z. D., Arai, A. and Nagabuchi, K., Reduction of Vehicle Interior Noise Using Structural-Acoustic Sensitivity Analysis Methods, 1991 SAE 910208 Transaction Section 6 (1992-4 月), pp. 267-276.
- [7] Bendsoe, M. P. and Kikuchi, N., Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method, *Comput. Meths Appl. Mech. Engrg.*, **71**, (1988), pp. 197-224.
- [8] Sasaki, T., Yang, Y. and Hagiwara, I., Proposition of a New High Speed and High Efficiency Control Method for Plural Eigen Frequencies by Changing Topology, *International Journal of Mechanical Engineering and Applications* 10(6), 2022-11, pp. 135-143
- [9] Hagiwara, I., Global Optimization Method to Multiple Local Optimals with the Surface Approximation Methodology and Its Application for Industry Problems [Online First], DOI: 10.5772/intechopen.98907. (2021-9), pp. 1-41.
- [10] Williams, D., Dynamic loads in aeroplanes under given impulsive loads with particular reference to landing and gust loads on a large flying boat, *Great Britain RAE Reports SME3309, 3316* (1945).
- [11] MacNeal, R. H., Citerley, R. and Chargin, M., A Symmetric modal formulation of fluid-structure interaction, *ASME Paper 80-C2/PVP-117* (1980).
- [12] Fox, R. L. and Kapoor, M. P., Rates of change of eigenvalues and eigenvectors, *AIAA Journal*, **6**, 12, pp. 2426-2429 (1968).
- [13] Nelson, R. B., Simplified calculation of eigenvector derivatives, *AIAA Journal*, **14**, 9, pp. 1201-1205 (1976).
- [14] 萩原一郎, 馬正東, 高次と低次のモードの省略可能な新しいモード合成技術の開発, 第二報: 固有モード感度解析への適用, 日本機械学会論文集 (C 編), 57 巻 539 号 (1991-7 月), pp. 2198-2204.
- [15] Wang, B. P., An improved approximate method for computing eigenvector derivatives, *AIAA/ASME/ASCE/AHS 26<sup>th</sup> structures, Structural Dynamics and Materials Conf.*, Orlando, FL (1985. 4).
- [16] 依知川哲治, 萩原一郎, 大規模高周波振動応答問題のための部分構造合成法とこれに基づく減衰系の周波数応答解析, 日本機械学会論文集 (C 編), 60 巻 569 号 (1994-1 月), pp. 10-15.
- [17] Tenek, L. H. and I. Hagiwara, I., Static and Vibrational Shape and Topology Optimization Using Homogenization and Mathematical Programming, *Comput. Methods in Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 109 (1993-10 月), pp. 143-154.
- [18] Tenek, L. H. and I. Hagiwara, I., A Substructure Method Incorporating Homogenization for Finding Optimum Vehicle Body Panel Topologies *JSME International Journal Series I*, Vol. 38, No. 1 (1995-1 月), pp. 44-51.
- [19] 萩原一郎, 自動走行車に必要な安全・安心確保のための基盤技術の構築に向けて、シミュレーション, Vol. 40, No. 4 (2021-12), pp. 209-216.
- [20] 佐々木淑恵, 楊陽, 米大海, 萩原一郎, 最適化法援用エネルギー密度法による固有周波数制御に関する検討, 計算工学講演会論文集 Vol. 28 (2023 年 5 月).
- [21] 萩原一郎, 橋口真宜, 米大海, エスマトラ, 次世代のものづくりに役立つ振動・波動系の有限要素解析とその応用, 近代科学者 (近刊予定) .

# 最適化法援用エネルギー密度法による 固有周波数制御に関する検討

A Study on Plural Eigen Frequencies Control by Optimization Method Aided Energy Density Method

佐々木 淑恵<sup>1)</sup>, 楊 陽<sup>1)</sup>, 米 大海<sup>2)</sup>, 萩原 一郎<sup>3)</sup>

Toshie Sasaki, Yang Yang, Mi Dahai and Ichiro Hagiwara

- 1) 研究員 明治大学 (〒164-8525 東京都中野区中野4-21-1 E-mail: tsasaki8@meiji.ac.jp)  
2) 博士 (工学) 計測エンジニアリングシステム株式会社 技術部 部長  
(〒101-0047 東京都千代田区内神田1-9-5 SF内神田ビル5階)  
3) 工博 明治大学 研究特別教授(〒101-8301千代田区神田駿河台1-1 E-mail: ihagi@meiji.ac.jp)

If there is a dangerous frequency band in the structure, it is required to avoid it at the design stage. Topology optimization is generally cited as a method to achieve this, but in fact, it has been shown that it is not easy to achieve the purpose with this method. Therefore, we have developed a new energy density method. We have shown that we can get interactively many solutions which satisfy the targeted situation. Here we obtain a more limited solution such as the lightest one by optimization method aided energy density method.

**Key Words :** Control of Plural Eigenfrequencies, Index of generalized eigenfrequency, Optimization Method, Strain energy density, Kinematic energy density

## 1. はじめに

構造物が持つ固有周波数を制御する手法について検討してきた。苺などの青果物、細胞、血液などが輸送中に傷む。これらの事態の最も大きな要因として、傷みやすい、死滅しやすい振動帯域があるものと推察される。列車や車の乗員の乗り心地に最も影響する周波数帯域は4~10Hzとされている。従って、乗員に加えて、シート、フロアなど直接乗員の乗り心地に影響する振動系の固有周波数が危険周波数帯域内にあればそれらを帯域外に移動するよう再設計される。固有周波数を制御するための方式については、一般には、トポロジー最適化[1][2]があげられるが、実は、これを使用して目的を達成することは容易でないことを示してきた[3]。そこで、本稿においてもここで議論できる程度にまず、やはり従来の方式では容易に目的のものが得られないことを2章で示す。そして、目的のものが得られない理由として、メッシュの細かさが不足するのか、そもそも、解が得られない課題を設定しているのか、不明だった所、エネルギー密度法で使用するエネルギー密度分布の情報で、課題の設定の妥当性も見れることを3章で示す。次に4章ではインタラクティブエネルギー密度法と称し、その応用を試み、非常に短時間で所期のものが得られることを示す。5章では、4章では沢山の解が得られるのに対し、重量最小の物とか、より、細部の設計に有効な方法を示す。

複数の固有周波数を同時に制御することから目的関数を式(1)の一般化固有値指標[1]とし、最適化法として数理最適化法を用いる。

$$f_x = f_0^* + \left( \frac{\sum_{i=1}^m W_i (f_i - f_{0i})^n}{\sum_{i=1}^m W_i} \right)^{1/n} \quad (1)$$

$f_{0i}$ は、 $i$ 次の目的とする固有周波数  $l, m, n$  は整数、 $W_i$ は重みで  $f_0^*$ とともに実数である。モデルは図1に示す420mm×300mm、厚さ1mmの矩形板である。材料はダンボールとし、材料データは、密度256.9kg/m<sup>3</sup>、ヤング率0.664GPa、ポアソン比0.34、重量は、32.4gである。全周単純支持の条件で固有値解析を行うと1次から5次の矩形板の固有周波数は、それぞれ、12.99Hz、26.13Hz、38.71Hz、47.96Hz、51.79Hzである。危険周波数帯域を25Hzから40Hzとすると、現行の1次と4次、5次の固有周波数は、この危険周波数帯域から離れており、考慮しないことから始める。危険周波数帯域内の2次及び3次の固有周波

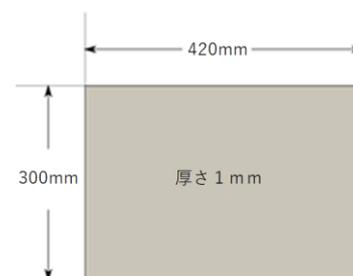


図1 矩形板の形状

## 2. 従来の密度法位相最適化解析による検討

ここで、新解析技術の比較対象として、目標関数として

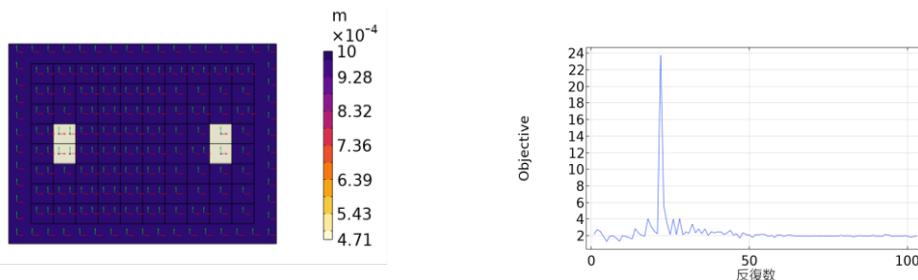


図2 左:収束グラフ 右:従来のトポロジー最適化による最終形状. ターゲット周波数:2次は25Hz, 3次は40Hz, 固有周波数:2次は24.76Hz, 3次は38.39Hzで, 目標に達しない.

数の目標値をそれぞれ24.0 Hz, 41.0 Hzに設定する. 以上, 式(1)で,  $l=2, m=3, f_{02}=24.0\text{ Hz}, f_{03}=41.0\text{ Hz}$ である.  $f_0^*=0.0\text{ Hz}, n=2, W_2=W_3=1.0$ とする. 以下, 次のように密度法による位相最適化解析を行う. (I) 設計変数は, 板厚とし最適化計算によって, 外形は変化しないよう外周に接する要素の板厚は, 設計変数に加えない. (II) 図2に示すように, 要素は上下左右対称に分割されており, 挙動もこの対称性が保たれるよう設定する. その結果, 四角形要素数は80で, 最適化の設計変数の数は20である. 各要素の板厚は, 下限0.0 mm, 上限1.0 mmとする. (III) 終了条件は, 式(1)の値が0.1以下, あるいは, 繰り返し最大数8000とする. (IV) 有限要素法および固有値解析, 線形近似法による最適化解析ともに COMSOL Multiphysicsを使用する. (V) 重量削減量を拘束条件として与える. ここでは, 全体の90%以下となるように設定する. 以上の最適化解析を行ったところ, 繰り返し回数80以降, 固有周波数は, 図2左に示すように殆ど動かなくなってしまう. 2次は, 24.76 Hzで目標に達したが, 3次は, 38.39 Hzで目標を満足することはない. 達成されない3次の重みを大きくするなどなされるため,  $[W_2, W_3]=[1, 1000]$ で検討したが, 同様に150回で(1次, 2次, 3次, 4次)=(13.00 Hz, 26.16 Hz, 38.79 Hz, 48.07 Hz)に収斂した. 依然として3次は初期値から殆ど変わらず, 逆に2次は, 重みを相対的に小さくしたこともあり改悪となった.

### 3. 所期の結果が得られない原因の解明の試み

前章で実施した従来の位相最適化解析で収束が得られなかったのは, そもそも正しい課題設定だったのか, 重みなどの設定に妥当性を欠いているのか, 更に, モデルの細密さ不足なのかなどは不明である. ここで, エネルギー密度位相変更法で利用するエネルギー密度分布から, 課題が正しいかどうかの判断ができないか検討する. 図1のモデルで全周単純支持の条件で得られる1次から5次までの固有周波数と各固有モードのひずみエネルギー密度及び運動エネルギー密度分布を図3に示す. 1段目は次数で2(1,2)とあるのは全体2次モードで, x方向1次, y方向2次を示す. 2段目は固有周波数, 3段目はモード形状, 4段目  $W_s$  はひずみエネルギー密度, 5段目  $W_k$  は運動エネルギー密度である. ここでの課題は, 補強を許容せず穴を設けるだけで位相を変えることであるので, 3次の固有周波数を上げるため, マス部に穴を設けることになるが, バネ部もマス部と同じ位置にあり, しかも, バネのエネルギー密度がマスのエネルギー密度より高く, そこに穴を設定すれば目的に反して3次の固有周波数は下がってしまうことになる. このことにより, 3次を上げることはもとより困難であり課題の設定に妥当性を欠いていたことになる.

一方, 2次の固有周波数のモードは, バネ, マスともに, 同じ位置に左右2か所に分かれてエネルギー密度が高い部分が存在する. 更にバネだけが顕著な所, マスだけが顕著なところがある. 2次の固有モード上でバネだ

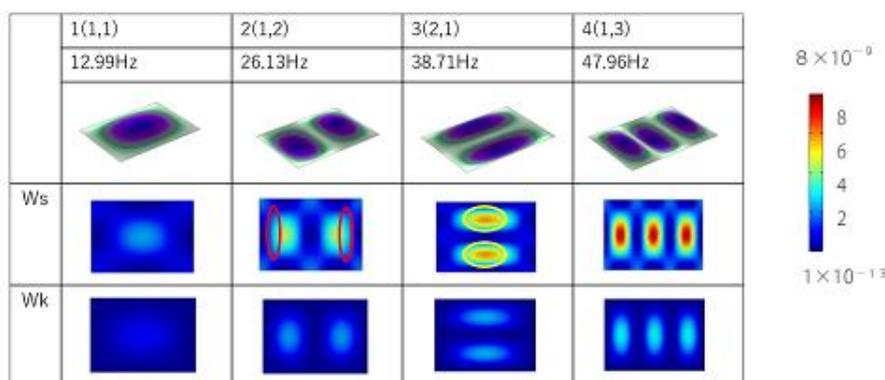


図3 図1の矩形モデルの全周単純支持における固有周波数, モード形状, 歪エネルギー密度 ( $W_s$ ), 運動エネルギー密度 ( $W_k$ )

けが顕著な所に穴を設けると2次を下げるという課題は達成される可能性がある。以上、エネルギー密度位相変更法で検討されるエネルギー密度分布を利用することにより、そもそも無理な課題であったことが分かった。

#### 4. インタラクティブエネルギー位相変更法について

提唱するインタラクティブエネルギー密度位相変更法は、対象とする固有周波数モードのエネルギー密度分布から、穴や補強の位置と大きさをインタラクティブに決めていくものである。その際、数理最適化法や応答曲面最適化法を援用することも可能である。ここでエネルギー密度位相変更法は、式(2)に示すように、固有角振動数が等価剛性と等価質量によって決定されるということを利用するものである。

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_n}{m_n}} \quad (2)$$

$n$  は、固有振動モードの次数、 $\omega_n$  は、 $n$  番目の固有角振動数である。 $k_n$  は、 $n$  番目の等価剛性、 $m_n$  は、 $n$  番目の等価質量である。ひずみエネルギー密度の大きなところは、そのモードのバネであり、運動エネルギー密度の大きなところはそのモードのマスであることを利用し、固有周波数を下げるには、そのモードのバネに穴を設けて等価剛性を下げるか、マスを補強して、等価質量を上げて固有周波数を下げるかの何れか、あるいは両方を施す。また、固有周波数を上げるには、マスに穴を設けるか、バネに補強するの何れか、あるいは両方を施して達成するものである。補強までも含めたインタラクティブエネルギー密度位相最適化解析を行う。モデル及び材料については、3章と同じものを使う。目標の周波数も3章と同様に25 Hz

から40 Hzを危険周波数帯域とする。また、2次を下げるべく、バネ部に穴を設ける。ここで、バネ部は、マス部と重複する部分は避け、図4に示すステップ1の2次の赤丸部に縦180mm、横10mmの穴を設ける。3次の固有周波数は、上げるため、マス部に穴を設けることは、前述の理由で断念し、バネ部として補強することで、固有周波数は上がることが予想できる。ここで、図4のステップ1の3次における赤丸部を縦60mm、横80mmの長方形で補強する。板厚は、2.0mmとする。この状態で固有周波数を計算すると、(1次,2次,3次,4次)=(11.30 Hz,22.31 Hz,39.06 Hz,41.13 Hz)となり、2次は目標に達した。3次の固有周波数は、初期のものと比較すると上がってはいるものの40 Hzに達しない。改めてこの状態で、エネルギー密度を表示すると、図4のステップ2になる。更に3次固有周波数を上げるべく、バネ部を見るとエネルギー密度の高い部分はない。3次のエネルギー密度分布では、板の左右両端に、ステップ1で2次用に考慮した穴部を包含する顕著なエネルギー密度の高いマス部分が認められた。そこで、新たに、この個所に縦180mm、横30mmの穴を設けると、固有周波数は、(1次,2次,3次,4次)=(11.62 Hz,22.64 Hz,40.66 Hz,46.00 Hz)となり、目的が達成された。最終形状は、図5左に示すとおりである。このように僅か2回のインタラクティブによる検討で課題の実現が得られている。

#### 5. 数理計画最適化法の援用

これらの手順では、上述の補強部では、縦横を一定とし板厚のみ変化させて得られたものであり、例えば、縦横を変化させても満足する組み合わせがあることは十分考えられるなど、他にも多くの解があることが予測される。このようにインタラクティブエネルギー密度位相変更法では、目標関数を決めて最適化をしたわけではな

目標		25Hz 以下		40Hz 以上		形状
		1次	2次	3次	4次	
初期固有周波数 <sup>①</sup>		12.99Hz <sup>②</sup>	26.13Hz <sup>②</sup>	38.71Hz <sup>②</sup>	47.96Hz <sup>②</sup>	形状
モード						
S T E P 1	2次を下げる バネに穴	Ws				
	3次を上げる マスに補強		Wk			
固有周波数 <sup>②</sup>		11.93Hz <sup>②</sup>		22.31Hz <sup>②</sup>	39.06Hz <sup>②</sup>	
S T E P 2	3次を上げる マスに補強	Ws				
			Wk			
収束した固有周波数 <sup>②</sup>		11.62Hz <sup>②</sup>		22.64Hz <sup>②</sup>	40.66Hz <sup>②</sup>	46.00Hz <sup>②</sup>

図 4 インタラクティブエネルギー密度位相変更法による固有周波数制御の流れ

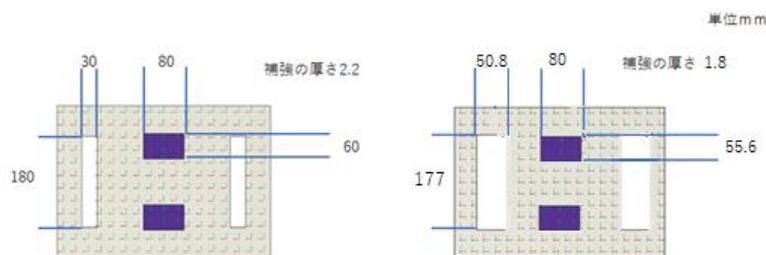


図 5 左：図 1 について，エネルギー密度位相変更法で導いた形状 固有周波数は，11.62 Hz, 22.64 Hz, 40.66 Hz, 46.00 Hz で，目標に達する．右：図 5 左のモデルから，数理計画最適化法援用エネルギー密度位相変更法を用いて，導いた形状 固有周波数は，11.66 Hz, 23.39 Hz, 40.64 Hz, 48.61 Hz

く，課題を満足させる穴や補強の仕様は，無限に存在する．そこで，より軽量で満たすなど特色ある解を求める検討を行う．固有周波数の最適化に数理計画最適化を援用して，定量化を図る際，軽量な形状を算出することは重要であり，その検討を行う．ここでの最適化解析では，(1) 目標関数：重量が最小．(2) 拘束条件：2 次及び 3 次の固有周波数の目標値をそれぞれ 24.0 Hz, 41.0 Hz に設定する一般化固有値指標を使う．(3) 収束条件として，一般化固有値指標の値が，0.1 以下になるように設定する．(3) 設計変数は，補強の板厚，縦，横の寸法，また，穴の縦，横の計 5 個とし，初期条件は，図 5 左に示す寸法とする． $D_i, i=1\sim 5$ ,  $D_1$ : 補強の横の長さ,  $D_2$ : 補強の縦の長さ,  $D_3$ : 補強の板厚,  $D_4$ : 穴の縦の長さ,  $D_5$ : 穴の横の長さで,  $10\text{mm} \leq D_1 \leq 60\text{mm}$ ,  $10\text{mm} \leq D_2 \leq 80\text{mm}$ ,  $0\text{mm} \leq D_3 \leq 2.2\text{mm}$ ,  $30\text{mm} \leq D_4 \leq 70\text{mm}$ ,  $180\text{mm} \leq D_5 \leq 200\text{mm}$  とし，重量最小化を目標としていることから，補強の設計変数  $D_1, D_2, D_3$  は，初期条件の縦 60 mm, 横 80 mm, 板厚 2.0 mm が最大になるようにし，穴は，初期条件の縦 180 mm, 横 30 mm が最小になるよう設定した．解析の結果，繰り返し回数 140 回で収束し，2 次，3 次の固有周波数は，23.39 Hz, 40.64 Hz となる．なお，1 次, 4 次はそれぞれ, 11.66 Hz, 48.61 Hz であり，いずれの固有周波数も危険周波数帯域外にあり，重量は，32.5 g から 29.6 g になり，軽量化の目的も達成した．最適化後の最終形状は，図 5 右である．穴は，縦 177.0 mm, 横 50.8 mm, 補強は，縦 55.6 mm, 横 80.0 mm, 補強の板厚は, 1.8 mm である．

## 6. 結語

固有周波数を制御するために，従来，最も期待されたものは，位相最適化法である．しかし，この手法では，収束しない場合，課題設定が正しいのかどうか不明である．た

とえ収束しても，板厚は分布しており，一枚の板の製造でも，多大な費用がかかり，現実的な設計は困難である．そこで，新しく開発したインタラクティブエネルギー密度法で用いるエネルギー密度の情報から，課題設定の妥当性について検討できることを示した．また，インタラクティブエネルギー密度法を使い，非常に短時間で固有周波数の制御をできることを示した．更に，数理計画最適化法を援用し，重量を最小にする条件を満たすなど，定量的に求めることが可能なことを示した．

## 参考文献

- [1] 馬正東, 菊池昇, 鄭仙志, 萩原一郎, 振動低減のための構造最適化手法の開発 (第一報 ホモジネーション法を用いた最適化理論), 日本機械学会論文集 (C 編), 59 巻, 562 号(1993-6), pp.1730-1736.
- [2] L. H. Tenek and I. Hagiwara, Static and Vibrational Shape and Topology Optimization Using Homogenization and Mathematical Programming, Comput. Methods in Appl. Mech. Engrg., Vol.109 (1993-10), pp.143-154.
- [3] 佐々木淑恵, 萩原一郎 “新しい最適化法の開発と輸送箱への適用”, 日本機械学会 計算力学講演会予稿集 (2021-9)
- [4] Sasaki, T., Yang, Y. and Hagiwara, I., International Journal of Mechanical Engineering and Applications Proposition of a New High Speed and High Efficiency Control Method for Plural Eigen Frequencies by Changing Topology 10(6), 2022-11, pp.135-143
- [5] 佐々木淑恵, 萩原一郎 “位相変更による新しい高速・高効率固有値制御法の提案” 日本機械学会論文誌 投稿予定
- [6] COMSOL Multiphysics® v. 6.0. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden(2019).

# 室内騒音低減に関する一考察

## A Study on Interior Noise Reduction

阿部綾<sup>1)</sup>, 米大海<sup>2)</sup>, 萩原一郎<sup>3)</sup>

Aya Abe, Dahai Mi and Ichiro Hagiwara

- 1) 研究員 明治大学 先端数理科学インスティテュート (〒164-8525 東京都中野区中野 4-21-1)
- 2) 工学 (博士) 計測エンジニアリングシステム株式会社 技術部 部長  
(〒101-0047 東京都千代田区内神田 1-9-5 SF 内神田ビル 5 階)
- 3) 工博 明治大学 研究特別教授 (〒101-8301 東京都千代田区神田駿河台 1-1,)

Under the Corona disaster, the number of people enjoying music at home is increasing, and noise complaints are increasing in residential areas. Therefore, we are studying the development of a foldable and lightweight origami sound insulation board so as not to disturb the neighbors. As a study on indoor noise reduction, to reduce and optimize the sound pressure at the ear position by applying it to truck cabins is studied so far, so applying this method is thought of. On the other hand, since the shape optimization of the shaded soundproof chamber using Bezier curves is studied, and good results can be obtained when the material is paper, models of origami sound insulation wall shape are proposed and simulated based on this.

**Key Words:** Sound pressure, Origami, Optimization

### 1. はじめに

コロナ下において自宅で音楽を楽しむ方が増え、集住エリアなどで騒音のクレームが増加している。そのため、隣の方に迷惑をかけないように、折畳み式にして軽量の折紙遮音板の開発検討を行っている。これまでに室内騒音低減に関する検討として、トラックキャビンに適用し、設計領域の板厚を変更することで、耳位置の音圧を低減し、最適化する検討を行っている[1]ので、その方法をここに応用することを考えている。

一方で、シェード形状の防音室についてベジエ曲線を用いて形状最適化する検討が行われ、材料が紙の場合に良い結果が得られることから[2]、それを元に折紙遮音壁形状でのモデル提案・シミュレーションを行うこととする。ここでは、折紙遮音壁モデルの作成やシミュレーションによりこれまでに得られた知見について検討する。

### 2. 折紙遮音壁モデルについて

折紙遮音壁モデルの作成手順について述べる。まず、シェード形状の防音室について形状最適化した図面を参考に、曲面を蛇腹折りに近似して立体形状として折ることのできる展開図を作成する(図-1)。展開図に記入の寸法

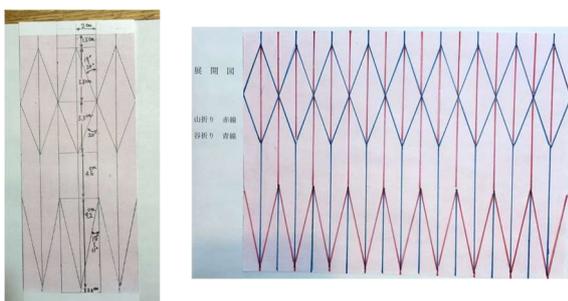


図-1 折紙遮音壁手書き展開図

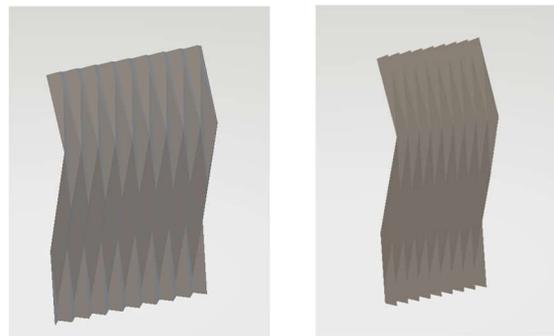


図-2 折紙遮音壁 3D モデル(左から 60%, 75%折畳み)を元にORIPA[3]でジオメトリ作成し、2Dモデル(SVGデータ)として出力する。2DモデルはOrigami Simulator[4]に取り込むことにより3Dモデル(STLデータ)に変換し(図-2)、COMSOL Multiphysics[5]にインポートする。

### 3. 折紙遮音壁構造を用いたシミュレーション

#### (1) 折り紙遮音壁音響モデル

図-3は折り紙遮音壁を二重とした構造を部屋空間に設置した音響シミュレーションモデルを示す。空間の寸法は壁水平方向幅3.6m (x方向)、壁垂直方向奥行4m (y方向)、高さ2.7m (z方向)で、遮音壁は2.3m四方の展開

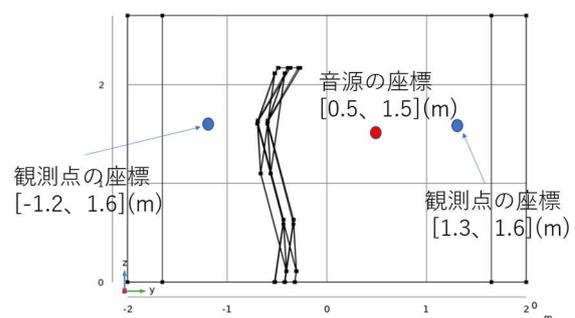


図-3 折紙遮音壁音響モデル (yz 断面からの図)

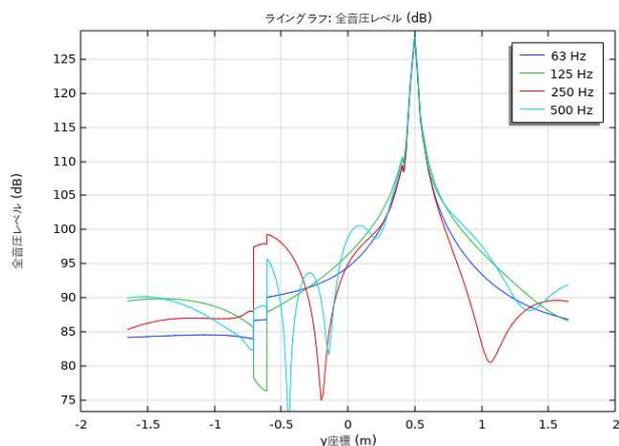


図-4 周波数ごとの音圧値 (y 座標位置による変動)

図からなる構造物とし、音源と遮音壁間距離は1m、遮音壁間隔は可変で図では0.1mに設定している。

同モデルでは音源は点音源とし、任意の周波数の音圧を発生させることが出来る。観測点として遮音壁と音源を挟んで2点を設定する。図-4は観測点を結ぶ直線上での音圧値を63,125,250,500Hzの周波数ごとに示す。y座標0.5mの位置に音源があるので最も音圧が高く、遠ざかるにつれて下がっている様子がわかる。y座標の位置-1m~-0.5m間でグラフが二カ所不連続になるのは遮音壁の存在により音圧値が大きく変化するためである。

#### (2) 二重壁の設置条件による音圧最適化検討

遮音壁間隔 (0.1~0.2mの範囲に設定) と音源から遠いほうの遮音壁角度 (床面との角度を0~10° の範囲に設定) を設計変数として、音源から遮音壁を挟んで反対側の観測点での周波数63Hz時の音圧値を最小化する最適化計算を行う。この計算の最適解は遮音壁間隔0.2m、遮音壁角度10度 (0.17453rad) となり、繰り返し数は15回で、目的関数は繰り返し数4回目で82.81dBと最小値を示し、この計算には6分45秒を費やした。

#### (3) 周波数ごとの音圧分布

音速340m/sにおいて、63,125,250,500Hzの各周波数の音波の波長はそれぞれ5.40m、2.72m、1.36m、0.68mとなる。壁垂直方向奥行が4mなので、これより波長が小さい (周波数が高い) 場合には解析空間内に音圧の腹・節ともに存在することになる。ここでは波長が解析空間幅よりも大きい場合 (周波数63.2Hz) と小さい場合 (周波数250Hz) の2例のyz断面での音圧分布について出力結果を示す。ここでは、(2)の検討により得られたモデルを使用する。

##### a) 波長が解析空間幅より大きい場合

図-5に示すように音源からの周波数63.2Hzの音波による音圧値の空間分布への影響としては、遮音壁前後で下がる傾向にあり、0~15dBほどの差となっている。

##### b) 波長が解析空間幅より小さい場合

図-6に示すように音源からの周波数250Hzの音波による音圧値の空間分布への影響としては、遮音壁中腹部前後で20dBほどの差となるが、高さにより異なり、部分的にはかえって遮音壁後部で音圧が上がる箇所も見受けられる。

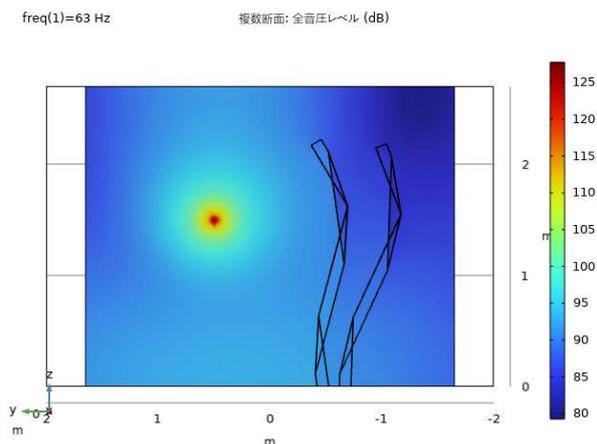


図-5 音圧分布 (周波数 63Hz のとき)

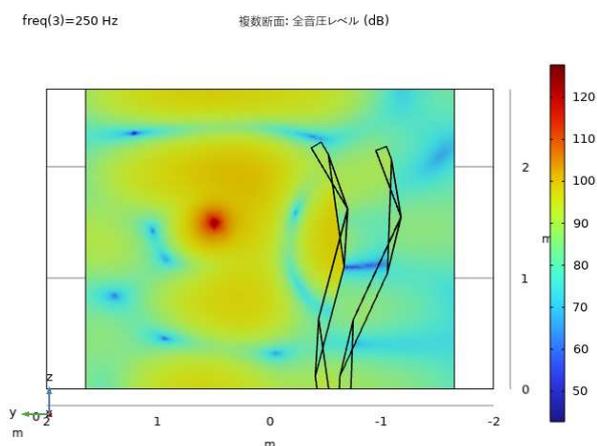


図-6 音圧分布 (周波数 250Hz のとき)

## 4. まとめ

折紙遮音壁モデル作成・シミュレーション検討を行い、折紙遮音壁の効果を三次元で視覚的に把握することが出来た。具体的な一例として、二重壁間の距離・角度を変更することによる検討も行った。今後の課題として、折紙遮音壁について、単純壁との比較を行うことで折りが純粋に音響に及ぼす特徴を明らかにすることや、壁間にグラスウールといった吸音材を詰める場合とで比較する。また、より大規模な計算について精度との兼ね合いも考慮しつつ検討を行えるようにし、最適な構造についてさらに詳細な知見を得る。実物大モデルを作成し、実験を行うことも考えている。

### 参考文献

- [1] 阿部綾, 米大海, 萩原一郎, 折紙コアを用いた室内騒音低減検討とシステム化, 日本応用数理学会第19回研究部会連合発表会
- [2] 山崎桂子, 橋口真宜, 米大海, 萩原一郎, 折畳軽量音響室開発の一考察, 日本応用数理学会第19回研究部会連合発表会
- [3] ORIPA <https://mitani.cs.tsukuba.ac.jp/oripa/>
- [4] COMSOL Multiphysics® v. 6.0. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden
- [5] Origami Simulator <https://origamisimulator.org/>

# 折紙構造による音響空間の開発のための 音響解析シミュレーション

Acoustic Analysis Simulation for Developing an Acoustic Space with Origami Structure

山崎桂子<sup>1)</sup>, 米大海<sup>2)</sup>, 橋口真宜<sup>2)</sup>, 萩原一郎<sup>1)</sup>

Keiko Yamazaki, Mi Dahai, Masanori Hashiguchi and Ichiro Hagiwara

1) 明治大学 (〒101-8301 東京都千代田区神田駿河台1-1グローバルフロント8F408研究室M, E-mail:

keyyamazaki@meiji.ac.jp, ihagi@meiji.ac.jp)

2) 計測エンジニアリングシステム株式会社 (〒101-0047 東京都千代田区内神田1丁目9-5 Sf内神田ビル, E-mail:

dahai1722@gmail.com, topology117@gmail.com)

The purpose of this research is to develop a simple sound-reducing shade to enjoy playing music at home. The requirements for the shade are relatively inexpensive, foldable, suitable size and acoustic environment, and most importantly sound dampening ability. Normally, the development of such a product requires many prototypes and verifications, but in this research, by utilizing finite element analysis (FEM), it is possible to find the optimum material and shape without producing a large number of prototypes. In this paper, we designed a new sound-reducing shade that incorporates the ideas of Origami engineering. We also report the results of the feasibility study by FEM analysis of the sound-reducing shade.

**Key Words** : Sound-reducing shade, Origami engineering, Metamaterial, Finite element analysis

## 1. はじめに

コロナ禍を契機として自宅滞在時間が増加し、住居での騒音問題が顕在化した。リモート会議の音声や、幼児・子供が発する音といった通常の生活に伴う音だけでなく、歌や楽器を嗜む人・時間が増加したために音楽に関する音の問題も増えている [1,2]。騒音問題の解決策として防音室がまず考えられるが、その設置には工事を要し賃貸住宅では実現が難しい。また本体及び工事費は高額であり、趣味のレベルでの導入は困難である。

そこで、本研究では、防音室ほどの機能までは持たないものの、比較的安価で折り畳み収納が可能であり、内部の空間の大きさと残響時間が演奏に適したものであり、かつ外部への音を居住地域の騒音基準値である55dB（昼間）（参考45dB（夜間））まで下げられる減音シェードの開発に取り組む。通常このような製品の開発には多くの試作と検証が必要となるが、本研究では有限要素解析（FEM）を活用することで、試作品を大量に制作することなく最適な素材、形状の減音シェードを得ることを目的とする。本稿では、主として空气中を伝わって届く音である空気伝搬音（透過音）を低減する効果のあるシェードとして折紙・切紙工学の考え方を取り入れた新しい遮音シェードの概念設計を行った。折紙・切り紙構造をもつ減音シェードのFEM解析によるフィジビリティの検討を行った結果とともに報告する。

## 2. 本研究で目指す防音シェード

### (1) 既存の簡易防音室

従来、防音ツールはいくつかありすでに販売されてい

る[3][4]がそれらには、次の課題がある。①購入者自らが組み立てられるがほとんどの製品で組立に最低二名が必要であり、移動や頻繁な収納は困難である。②ほとんどの製品で重量があり地震発生時にリスクとなりうる。③構造が不透明な材料で作成されており、内外の視認が出来ないことから万が一の際の安全確保が困難である。④：狭い、違和感、閉塞感がある。⑤天井空調ファンは内部環境に必要であるが、騒音源となり得る。⑥多くの楽器は100 dB程度の音まで発するが夜間の騒音基準値45dBはクリア困難である。⑦構造が可変となっておらず楽器の周波数特性に適応する必要がある場合は変更困難と推察する。

### (2) 本研究で目指す防音ツールの概念設計

- 一般家庭でコンパクトに片づけられるために折畳み可能とすること
- 内部スペースが演奏に必要なサイズがあり、内部の残響時間が適切であること
- 設置工事が不要で移動が簡単なこと。これは賃貸住宅などでは特に必要であること
- 騒音基準値を下回る性能があること。マンションなど規約があればその数値を下回ること

## 3. 有限要素法(FEM)による検討例

すでに述べたように減音シェードを試作レスで行うことも本研究の大きな目的である。試作レスを実現するには数値解析の適用が適しており、製品形状を忠実に表現できる手法としてFEMを適用することとした。試作レスを実現するには試作に含まれる物理現象を数値解析で表

現できねばならない．そこで多重物理連成の市販ソフトウェアCOMSOL Multiphysics[5]を利用して周波数領域での圧力音響解析と減音シェードの変形応力解析を実施した．

### (1) 形状の検討

高さを2mにそろえた5種類のシェード形状につき、内部音源を設けてシェード内外の音圧分布及び応力分布を解析する．シェードの形状は、円柱、直方体、及び3種類の底面形状の反転らせん構造(以下、「RSO」と記す)であり、RSOの底面形状は正方形、正五角形及び正十角形でその大きさは内接円の半径が円柱の半径となるサイズとする．

五種類のシェード共通のセッティングとして、シェードの天井部は側面と同一素材で側面と滑らかにつながって一体化しており、シェードの下端は閉じておらず設置床面に接触しているが拘束はされていないものとする．また、図-1の通り100dBの音圧を発生する球体音源を1.3m高さに設置し、また、シェードの周りに仮想的な境界としてPML (Perfectly Matched Layersの略で、開放的で無反射の無限領域を模倣するために音響モデルに追加される領域または層)を設け、50Hzから500Hzまで50Hz刻みでシミュレーションする．音圧測定位置はシェード中央から30cmの位置(a)と150cmの位置(b)であり、床より85~180cm高さの範囲を座っている人の座高から長身の男性の耳位置高さ範囲であると想定し、この範囲で音圧を平均する．

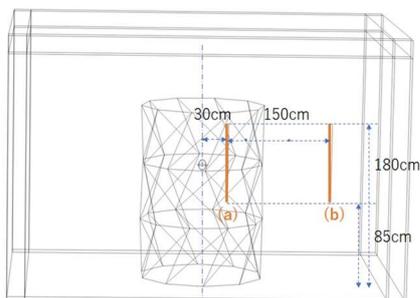


図-1 五種類のシェード共通のセッティング

ポリプロピレンのシェードの場合、500Hzでの応力分布は、図-2の通り円柱及び直方体で角の部分と音源近くの壁面の応力が高くなり、RSOでは、底面形状の頂点の数が増えるにつれ折目部分へ応力が集中している様子がみられる．

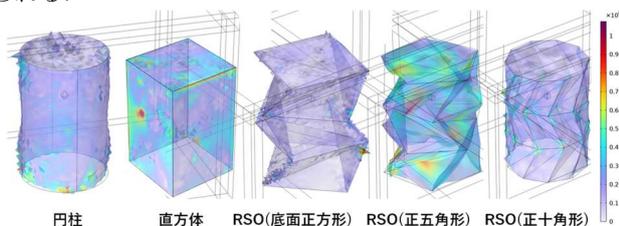


図-2 500Hzでのフォン・ミーゼス応力 (Pa)

シェード内外の音圧の状況を図-3に示す．おおむねいずれのグラフでもシェードを設けるとシェード外側の音圧は下がるが、一部の周波数では却って音圧が上がっている

部分が見られる．シェードを設けた場合音圧が高くなる部分に赤の点線を描画しているが、そこではシェード内側でも音圧が高くなっている．その周波数においてシェード自体が振動し音を増幅しているか、もしくはシェード内部表面で反射した音が内部の別の面に反射し音を増幅していると考えられる．

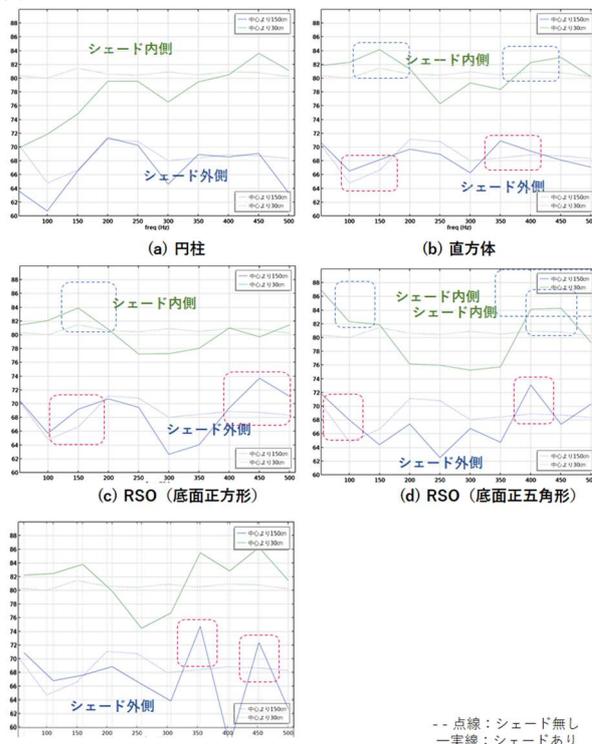


図-3 ポリプロピレンのシェード内外の音圧の状況

### (2) 素材の検討

ここまで素材としてポリプロピレンを用いていたが、紙を素材としたものと比較し、素材による音響への影響を検討する．ポリプロピレンの物性値はヤング率1313MPa、ポアソン比0.3、密度906 kg/m<sup>3</sup>であり厚み0.33mmである．これに対し、紙の物性値は実際にスケールモデルを作成した厚み0.22mmの厚紙について、段ボール製品の強度解析技術に関する研究(第2報)[6]を参考に密度818.18kg/m<sup>3</sup>、ヤング率2626.55MPa、ポアソン比0としている．

図-4に示す通り、素材を紙に変えた場合もシェードを設けた方がシェードの外側の音圧が上がるシェード形状及び周波数があるものの、全体的にポリプロピレンより音圧が下がる傾向がみられた．特に底面が正十角形のRSOモデルでその傾向が顕著である．但し、350Hzと450Hzではポリプロピレン素材のシェードより紙素材のシェードの方が音圧低減効果が大きく、逆に400Hzでは紙素材のシェードの方が音圧を下げる効果が小さくなっている．

その理由を考察するため、正十角形のモデルについて先に挙げた350Hz、400Hz及び450Hzに関して音響圧力の等値面を図-5に示す．

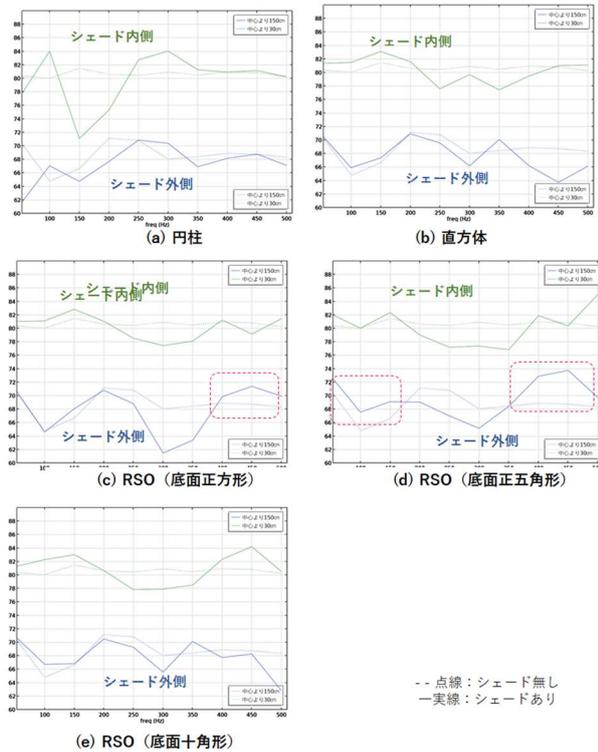


図-4 紙素材のシェード内外の音圧の状況

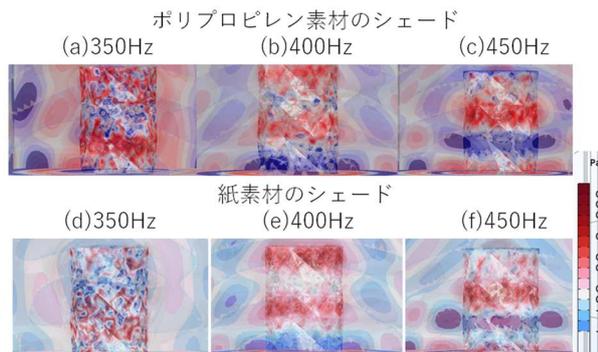


図-5 音響圧力 等値面表示 [Pa]

音圧の下がった350Hz及び450Hzの音響圧力等値面ではポリプロピレン素材の場合に音響圧力の高かった部分が穏やかに抑えられ、400Hzにおいては両素材で同じ場所に音響圧力が高い部分が分布し、紙の方がシェード近くで高くそれに合わせてシェード外側の音響圧力が高い様子が観察される。

ポリプロピレンは紙に対し重さで1.66倍であり質量則に従うならばポリプロピレンの方が音圧低減効果を発揮すると考えられるが、今回の結果からは紙のヤング率がポリプロピレンより2倍近く大きいことが音圧低減効果を生んだとみられる。

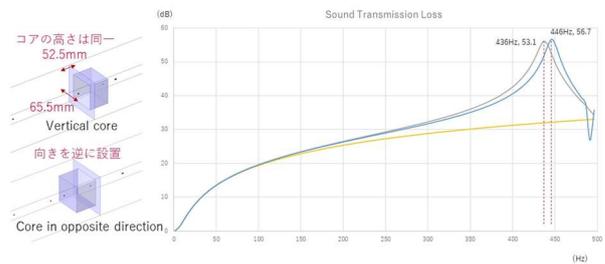
(3) アタッチメントとしての垂直コアに関する検討

音響管において垂直コアの透過損失が低周波領域で一重平板の透過損失を大きく上回ることがAbe-Hagiwara[7]によって示されている。

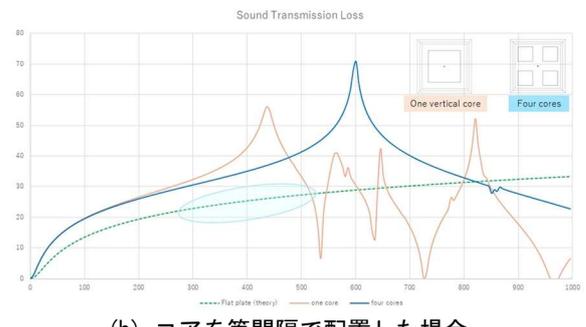
このコアをシェードにアタッチメントとして適用でき

るか検討する。

文献[7]では一つの垂直コアを入射側から透過側に突き出す向きに設置しそのサイズを最適化しているが、実際の構造に適用する場合はこれを複数個設置する必要があることから、まず(a)コアを逆向きに設置する場合の透過損失を調べ、元の向きの場合に比べ遜色ない透過損失を得ることを図の通り確かめた。次に(b)コアを等間隔で配置した場合の透過損失を調べたところ、図の通りより高い周波数領域でも高い透過損失を得ることが出来た。コアの向きが逆でも効果があることと併せて、こうしたコアを音圧が大きくなる部分を選んで設置する方法も今後シェードに適用検討を進めたい。



(a) コアを逆向きに設置する場合



(b) コアを等間隔で配置した場合

図-6 垂直コアを音響管に設置した場合の透過損失

4. まとめ

5種類のシェード形状に関する周波数領域での圧力音響解析の結果、軽量の紙素材であっても低周波領域で音圧を下げる効果を持つことを示せた。また、折の形状によってその効果の現れる周波数が異なることから、今後は最適な折パターンをシミュレーションを用いて検討してゆきたい。さらに、最適な形状のシェードを得られた場合にさらにアタッチメントとして適用可能な複数の垂直コアを組み合わせたものの音圧低減効果を示した。今後はシェードの天井部の最適形状及び素材の模索によりより音圧低減効果の高い折り畳み可能シェードの実現にとりくむ。

## 5. 謝辞

本研究は明治大学MIMS数理科学共同研究プロジェクトの助成を受け進めさせていただきました。ここに深く感謝いたします。

### 参考文献

- [1] 経済産業省, “みなさんはどのように過ごしていますか? ; コロナ禍で増えたおうち時間、楽器を楽しむ方が増えたようです”,  
[https://www.meti.go.jp/statistics/toppage/report/minikaisetsu/hitokoto\\_kako/20210528hitokoto.html](https://www.meti.go.jp/statistics/toppage/report/minikaisetsu/hitokoto_kako/20210528hitokoto.html), (参照日 2023年4月1日).
- [2] 株式会社nana music, “新型コロナウイルス感染症の影響による、Stay Home期間中の音楽の楽しみ方の変化について”,  
<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000082.000011341.html>, (参照日 2023年4月1日).
- [3] 株式会社ピアリビング, “組立式防音ブース おてがる一む”,  
[https://www.pialiving.com/c/soundproofing\\_mat/tatami\\_connectingmat](https://www.pialiving.com/c/soundproofing_mat/tatami_connectingmat), (参照日 2023年4月1日).
- [4] 合同会社 アーチ リテイルズ, “簡易 防音室 防音ルーム 日本製 簡単組み立て KANADE”,  
<https://item.rakuten.co.jp/arch-global/kanade/>, (参照日 2023年4月1日).
- [5] COMSOL Multiphysics v6.0. [www.comsol.com](http://www.comsol.com). (2022), COMSOL AB, Stockholm, Sweden.
- [6] 川島 義隆, 多賀 郁生, 伊田 徹士, 原田 匡人, 梅津 康義, 松井 和己, 手塚 明, “段ボール製品の強度解析技術に関する研究 (第2報) –IT/MT分野におけるシミュレーション技術の適用に関する研究–”, 岐阜県生産情報技術研究所 編, no.7, pp.18-23, 2006
- [7] Abe Aya, , Ichiro Hagiwara, “Development of New Sound Insulation Simulation Technology Using Finite Element Method for Efficiency of High Aspect Ratio Core in Low Frequency Range”, International Journal of Mechanical Engineering and Applications, vol. 10, pp.7-16, 2022

---

2:30 PM - 2:45 PM (Wed. May 31, 2023 1:15 PM - 2:45 PM Room G)

## [G-03-05] Research on the Maximization of the Performance of Arbitrary Shaped Kirigami Honeycombs

\*Diago Luis<sup>1,2</sup>、篠田 淳一<sup>2</sup>、山崎 桂子<sup>1</sup>、萩原 一郎<sup>1</sup> (1. 明治大学、2. Interlocus Inc)

---

OS25 マルチフィジックス解析の超スマート社会におけるあり方について

## [G-04] OS25 マルチフィジックス解析の超スマート社会におけるあり方について (2)

座長:米 大海(計測エンジニアリングシステム株式会社)

Wed. May 31, 2023 3:00 PM - 4:15 PM Room G (3F Conference Room 304)

---

### [G-04-01] 音響メタサーフェスの有限要素解析

\*橋口 真宜<sup>1</sup>、米 大海<sup>1</sup> (1. 計測エンジニアリングシステム株式会社)

3:00 PM - 3:15 PM

### [G-04-02] 説明可能 AI-FQHNNの因果の構造とリアルタイム性の一考察

\*安部 博枝<sup>1</sup>、ルイス ディアゴ<sup>1</sup>、南畑 淳史<sup>2</sup>、萩原 一郎<sup>1</sup> (1. 明治大学、2. 関西国際大学)

3:15 PM - 3:30 PM

### [G-04-03] 材料構成関係のカスタマイズによる固体力学解析

\*米 大海<sup>1</sup>、橋口 真宜<sup>1</sup> (1. 計測エンジニアリングシステム株式会社)

3:30 PM - 3:45 PM

### [G-04-04] ユビキタス CAE教育アプリの開発と展開

\*橋口 真宜<sup>1</sup>、米 大海<sup>1</sup>、村松 良樹<sup>2</sup> (1. 計測エンジニアリングシステム株式会社、2. 東京農業大学)

3:45 PM - 4:00 PM

### [G-04-05] 超スマート社会を支援するユビキタスマルチメディア教育スタイルの提案

\*米 大海<sup>1</sup>、橋口 真宜<sup>1</sup>、村松 良樹<sup>2</sup> (1. 計測エンジニアリングシステム株式会社、2. 東京農業大学)

4:00 PM - 4:15 PM

# 音響メタサーフェスの有限要素解析

## Finite-element analysis of acoustic metasurface

橋口 真宜<sup>1)</sup>, 米 大海<sup>2)</sup>

Masanori Hashiguchi, Dahai Mi

1) 技術士(機械部門) 計測エンジニアリングシステム株式会社 主席研究員 (〒101-0047 東京都千代田区内神田1-9-5 SF内神田ビル5F, E-mail: hashiguchi@kesco.co.jp)

2) 工博 計測エンジニアリングシステム株式会社 技術部 部長 (〒101-0047 東京都千代田区内神田1-9-5 SF内神田ビル5F, E-mail: midahai@kesco.co.jp)

Smart society requires high-level sound field control. Since the sound field is determined by the shape of the object, research on acoustic metasurfaces using the concept of metamaterials is important for sound field control. In this study, we examined how the sound field is formed in the space by controlling the phase of the sound field on the wall using finite element analysis.

**Key Words:** Sound Field Control, Metasurface, Finite-element analysis

### 1. はじめに

超スマート社会(Society 5.0)では、IoT (Internet of Things) ですべての人とモノがつながり、社会の変革を通じて希望の持てる社会、一人一人が快適で活躍できる社会を目指す。しかし人の活動の急速なグローバル化の副産物としてコロナ禍の世界的大流行が生じ、個々人の活動範囲が強く制限され、テレワークへの移行が余儀なくされることも経験した。それに伴って家庭での業務会議への参加の機会が増え、遮音がクローズアップされてきた。全自動型のEV (Electric Vehicle) では運転しないで済むので車室内はリビングルームの利用が促進され、風景を眺めながら映像や音楽を楽しむといったことが急速に進むであろう。大勢が集まる場所では個々人の嗜好を満たすための音情報が、ビームフォーミングや音響ホログラムで多重伝達されることも予想される。宇宙での室内活動では機械駆動よりは故障のリスクが少ない音場制御による物体搬送も重要な技術となる。従って、音の分野では静粛性も確保しつつ自由に音場を制御する技術開発が望まれていると言えよう。一方で既存の空間デザインの大幅変更は難しいことから空間の境界壁に工夫を施すことのできる音響メタサーフェスが有効と考えられる。

そこで本稿では、音場の自由な制御を求める目的で、音響メタサーフェスの理論を概観し、その中で有効と考えられる理論に基づいて音場の制御について検討したので報告する。音場を自由に制御するには音の理解、音の制御理論、音の設計と音場の確認が必須であり、そのためのツールとして、仮想空間での音場の可視化と定量化が可能な有限要素解析を選択し、市販ソフトウェアCOMSOL Multiphysics[1]を利用した。

### 2. 音響メタサーフェス

メタサーフェス (metasurface) はメタマテリアル

(metamaterial) の一種である。メタ (meta) とは「変化」「超越」といった意味であり、自然界の物質にはない振る舞いをするように変化させたという意味合いを持たせている。

メタマテリアルは電磁波の分野でV. G. Veselagoが1967年に負の屈折率をもつ物質を予言したことに始まる。D.R. SmithとJ.B. Pendryが2002年にGHzの周波数域で負の屈折率をもつ実物を制作したことでメタマテリアルの研究がスタートした。電磁波は波動現象であり波動の伝播速度、周波数と波長が関係する。波長以下のサイズをもつ微細構造をたくさん並べることで波長よりも大きな物体を制作すると観測される波動現象にはそれらの微細構造から決まる空間平均的な物性が、負の屈折率といった、自然界にない特性を持つようにできる。電磁波は縦波と横波が共に含まれるベクトル波のある波動系である。

音は縦波のみをもつスカラー波であるが、波動系であるので、電磁波で考案されたメタマテリアルの特徴のいくつかを利用できる。近年、メタマテリアルの考え方を利用して音波の向きを制御できるメタサーフェスが提唱されてきている。メタサーフェスの厚みはサブ波長をもつ。総説[2]によればメタサーフェスに使われるサブ波長構造は、

- ① 空間巻き上げ構造 (Coiling-up space structure)
- ② ヘルムホルツ共鳴構造 (Helmholtz-resonator-like structure)
- ③ 膜構造 (Membrane-type structure)

の三種類に分類される。各々の構造をFig.1に示す。

しかしながらこれらの構造は通常、複数個並べるので有限要素解析で音場の検討をするには個々の形状を描画する必要があり、細かなメッシュもその周囲に作成する必要があることから研究開発の早期段階では適用しづらい。

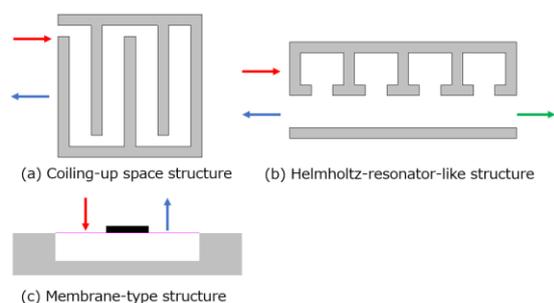


Fig.1 Typical three-types of acoustic metasurface.

Fig.2 に、空間巻き上げ (①) の一種である簡単構造による音圧の時間変化の計算例[3]を示す。これは境界を通過する音波の制御の例であるが、サブ波長のメタサーフェス構造によって境界面に沿って波の位相が制御されていることがわかる。従って、メタサーフェスの本質は境界面に沿う位相の制御ということになる。

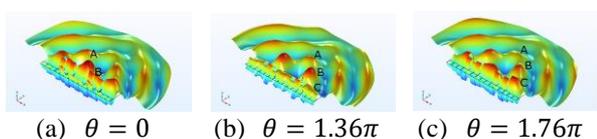


Fig.2 Wave motions with different phases along metasurface.

最近、電磁波メタサーフェスの研究で一般化スネル則 (GSL, Generalized Snell's Law) が見い出され[4]、音場への応用もすでになされている。さらに一般化スネル則をインピーダンス条件と関係づけることができれば、個々の微細なサブ波長構造を描画しなくてもインピーダンス境界条件を境界面に設定すれば計算解析を行うことができる。

基礎検討の段階では、まずは平面波を入射させ、それが所望の角度で反射する条件の検討が考えられる。Fig.3に示す2次元系を考え、平面 $y=0$ にメタサーフェスを設定する。音波は周波数領域で検討を行う(過渡状態は扱わず音場が確立した状態に注目する)ものとする。音圧 $p(\mathbf{x}, t)$ を一定基準圧 $p_0$ からのずれ ( $p(\mathbf{x}, t) \ll p_0$ )としたとき、音波を周波数 $f$  Hzで調和振動する正弦波 (音圧 $p(\mathbf{x}, t) = \hat{p}(\mathbf{x})e^{j\omega t}$ ,  $\omega = 2\pi f$ )と考えることができる。音波が伝搬する媒質は空気 (密度 $\rho_0 : 1.2\text{kg/m}^3$ , 音速 $c_0 : 343\text{m/s}$ )とする。音波は断熱変化をすると仮定すると、支配方程式はヘルムホルツ方程式となり、次の式で表される。

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (1)$$

ここで、波数 $k = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2\pi}{\lambda}$ , 波長 $\lambda = \frac{c_0}{f}$  の関係がある。

一般化スネル則 (GSL) は、境界面での位相の変化を考慮できるよう通常のスネル則を拡張したものであり、入射波と反射波のなす音響経路 (経路長=波数×伝搬距離)上に生じる位相差と境界面での位相不連続との総和が最小となる条件 (フェルマーの原理) から得られる。ヘルムホルツ方程式を、何らかの方法で求めたインピーダンス

境界条件を境界面に課して数値的に解けば、メタサーフェスによって創出される音場を求めることができる。

数値解は有限要素法によって求めた。実際には市販ソフトウェアCOMSOL Multiphysicsの音響モジュール[1]を利用して有限要素解を求めた。

### 3. 音響メタサーフェスの有限要素解の例

#### (1) 計算条件

周波数1kHzの平面波をFig3の下方に設置した水平境界 ( $y=0$ )へ向けて下向きに入射させる。境界に生じる反射波の可視化のために、音場を背景場 (平面波) と散乱波に分解して解析をした。メッシュは2次要素を使い、空間には波長の6分の1以下のサイズのメッシュを、境界には微細構造の解像ができる細かさをもつメッシュを配置した。下方の水平境界を除く上部と左右の3か所の境界は仮想領域 PML (Perfectly Matched Layer) を設置した。

#### (2) 計算例

Fig.3に示すように平面波を真上から境界面に入射させ、反射波を中央部に集めることができている。

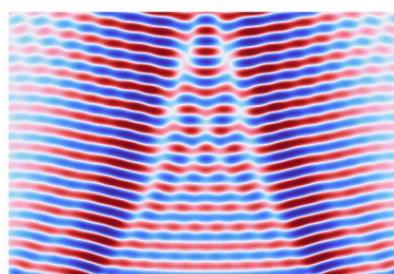


Fig.3 Converging reflected acoustic pressure waves scattered from metasurface.

### 4. まとめ

本稿では、音の静粛化と空間音場の制御を音響メタサーフェスに求めるべく、既往の研究をレビューした。その中で有効と考えられる一般化スネル則に基づいて、周波数領域での有限要素解を試行した。インピーダンス境界を使うことで、構造の詳細が固まっていない研究開発の初期段階での検討がしやすくなると考えられる。今後、解析の詳細部分を検討していく。

#### 参考文献

- [1] COMSOL Multiphysics: <https://www.comsol.jp/> (参照日2023年4月3日)
- [2] Assouar, B. et al.: Acoustic metasurfaces, Nature Reviews Materials (2018).
- [3] 橋口真宜, 米大海: 音響メタマテリアル解析動向とアプリの開発, 日本機械学会第35回計算力学講演会 (CMD2022) (2022).
- [4] Yu, N. et al.: Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction, Science 334 (2011).

---

3:15 PM - 3:30 PM (Wed. May 31, 2023 3:00 PM - 4:15 PM Room G)

[G-04-02] 説明可能 AI-FQHNNの因果の構造とリアルタイム性の一考察

\*安部 博枝<sup>1</sup>、ルイス ディアゴ<sup>1</sup>、南畑 淳史<sup>2</sup>、萩原 一郎<sup>1</sup> (1. 明治大学、2. 関西国際大学)

# 材料構成関係のカスタマイズ による固体力学解析

Solid Mechanics Analysis by Customizing Material Constitutive Relation

米 大海<sup>1)</sup>, 橋口 真宜<sup>2)</sup>

Dahai Mi, Masanori Hashiguchi

1) 工博 計測エンジニアリングシステム株式会社 技術部 部長 (〒101-0047 東京都千代田区内神田1-9-5 SF内神田ビル5F, E-mail: midahai@kesco.co.jp)

2) 技術士(機械部門) 計測エンジニアリングシステム株式会社 主席研究員 (〒101-0047 東京都千代田区内神田1-9-5 SF内神田ビル5F, E-mail: hashiguchi@kesco.co.jp)

Numerical analysis technology based on physics is an important technology to support the future smart society, Society 5.0. In the numerical analysis of solid mechanics, whether or not the constitutive relation of materials can be set correctly is directly linked to the validity of the calculation. In this research, we considered to customize and freely set the constitutive relation of materials that are not implemented in the analysis software.

**Key Words** : Society 5.0, Constitutive Relation, COMSOL Multiphysics

## 1. はじめに

Society 5.0では、より多くの現実世界の情報をコンピューター上で表現することが重要である。現在、人と人のつながりをメインとするソーシャルネットワーク (SNS, Social Network Service) や、各種センサー情報のオンライン化及びハードワイヤのつながりを重視するIoT (Internet of Things) の研究開発及び社会実装は進んでいる。CAE (Computer Aided Engineering) は数理方程式に基づいて現実現象をコンピューター上再現できる。さらに、CAEモデルをアプリにして配布することで、「誰でも・いつでも・どこでも」容易にユビキタスCAE環境にアクセスできる整備が徐々にできてきた[1]。今後のSociety 5.0の研究&開発をはじめ、製造プロセス、教育、日常生活まで支える重要な技術になりつつある。

CAEでは、現実世界中の対象を正確にモデリングするために、材料の構成関係を正確に反映することが極めて重要。しかし、現実世界にある材料の種類が膨大であるため、全てを解析ソフトに実装することは難しい。そこで、既存の解析ソフトに実装されていない材料の構成関係を、ソフトのユーザ側が自由にカスタマイズできる技術は、このようなニーズをバックアップする重要な機能になる。

本稿では、材料構成関係の部分のみプログラミングして、それを.dllにコンパイルすることでソフトと簡単にリンクする方法を紹介する。固体力学及び伝熱のマルチフィジクス連成を用いて、材料構成関係カスタマイズの一例を示す。

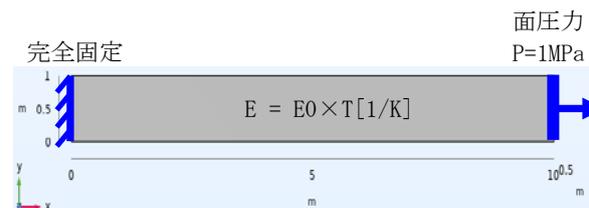
## 2. 問題定義

本稿では、汎用有限要素法ソフトウェアCOMSOL Multiphysicsの一般応力-歪み関係 (以後外部材料と称する) [2]を利用して、固体-伝熱マルチフィジクス連成問題に適用した。連成に関して、具体的には固体材料のヤング率を温度の関数として設定した。

検討対象のジオメトリ及び境界条件はFig.1に示す。長さ10m、断面1m×1mの直方体ビーム構造を考える。定常状態の伝熱及び固体力学計算を実施するため、正則化された伝熱の境界条件及び物性値を適用する。伝熱計算について、ビーム構造の左端に1K、右端に2Kのディリクレ条件を課す。固体力学計算について、左端完全固定、右端に1MPaの境界圧力を印加。



(a) ジオメトリ及び伝熱計算の境界条件



(b) ジオメトリ及び固体計算の境界条件

Fig.1 ジオメトリ及び伝熱、固体の境界条件

ここで、ヤング率 $E$ を $E0 \times T[1/K]$ に設定する。 $E0$ は基準ヤング率 $2e9Pa$ 、 $T$ は温度（単位：K）。他の材料物性に関して、密度を $8e3kg/m^3$ 、ポアソン比を $0.3$ 、熱伝導率を $1W/m/K$ 、定圧熱容量を $2J/kg/K$ に設定する。

### 3. 材料構成関係のカスタマイズと実装

#### (1) 全体流れ

外部材料によるカスタマイズの流れは以下になる。

- ① 材料構成関係を表現するプログラムをプログラミング言語cなどにて作成する
- ② 作成したプログラムをエディターによって.dllにコンパイルする
- ③ .dllをCOMSOL Multiphysicsに読み込んで、必要な変数をインプットとして入力する
- ④ 読み込んだ.dllを物理モデリングに適用して、計算実行する

今回実装時のインプット及びアウトプット設定、ヤング率の温度依存関数カスタマイズ設定部分のプログラムをFig.2に示す。

```
EXPORT int eval(double e[6], // Input: Green-Lagrange strain tensor
               double s[6], // Output: Second Piola-Kirchhoff stress
               double D[6][6], // Output: Jacobian of stress
               int nPar, // Input: Number of material parameters
               double *par, // Input: par[0] = E, par[1] = nu
               int nStates, // Input: Number of states
               double *states) { // States, nStates-vector

  int i, j;
  double E, nu, T;

  // Check inputs
  if (nPar[0] != 3) // only two parameters needed, E and nu
    return 1; // error code 1 = "Wrong number of parameters"
  if (nStates[0] != 0) // simple linear elastic, no states needed
    return 2; // error code 2 = "Wrong number of states"

  // Read input parameters from parameter vector
  T = par[2];
  E = par[0]*T;
  nu = par[1];
}
```

Fig.2 インプット・アウトプット及びヤング率のカスタマイズ関数定義プログラム

#### (2) 外部材料によるマルチフィジックス連成

上記プログラムにインプットとして温度変数 $T$ を渡す際に、下記Fig.3に示すように、ソフトに読み込んだ外部材料.dllに対して、伝熱計算の変数 $comp1.T$ を直接記述するだけで実現できる。

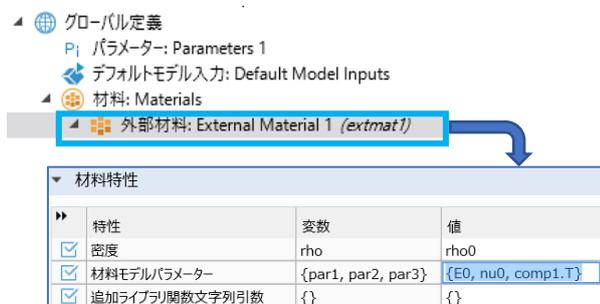


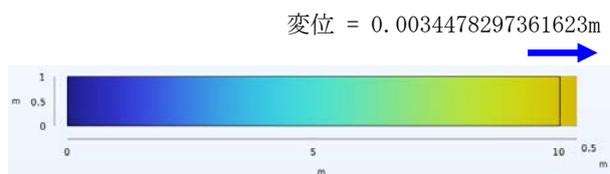
Fig.3 外部材料プログラムに温度変数を渡す

上記の設定によって、定常熱伝導計算の温度結果を固体力学計算のヤング率関数に適用でき、伝熱から固体力

学への一方向連成計算を実施できるようになる。

### 4. 結果とディスカッション

計算後の変位結果をFig.4に示します。Fig.4中の黒い枠線は変形する前の構造の形状を表す。サーフェスプロットはビーム表面の変位量分布を表す。直方体ビーム右端の最大変位は $0.0034478297361623m$ となり、ビーム全体長さの $10m$ よりはるかに小さいため、分布プロットは実際の変位より $100$ 倍拡大して分かりやすく表示している。



※変形拡大倍率：100倍

Fig.4 変位の計算結果

外部材料によるマルチフィジックス連成計算結果の妥当性を確認するために、COMSOL Multiphysicsの線形弾性の構成関係を利用して、検証計算を実施した。外部材料モデルと同じように、ヤング率 $E$ を温度の関数 $E0 \times T[1/K]$ のように定義して、伝熱と固体力学連成の比較モデルを作成した。結果として、外部材料によるマルチフィジックス連成モデルと同じ変位の結果が得られたため、今回の外部材料によるマルチフィジックス連成計算方法の妥当性を検証できた。

### 5. まとめ

本報では、汎用ソフトCOMSOL Multiphysicsの計算仕組みを利用して、材料構成関係をカスタマイズした固体力学モデルを作成し、伝熱とのマルチフィジックス連成計算を試みた。検証計算実施した結果、材料構成関係のカスタマイズ及びマルチフィジックス連成への拡張は実現可能であることが分かった。これらの検討結果によって、CAEツールの機能を構成関係のレベルで簡単に強化でき、研究開発だけではなく、Society 5.0における現実とバーチャル世界の融合にもCAEは更に貢献できると考えている。

これからは、このような自由度の高い機能を利用して、最新研究成果の実装による既存CAE解析の補強、作成した解析モデルのアプリ化による応用領域の拡大を検討して行き、CAEがSociety 5.0へどのように貢献できるかを模索して行きたい。

#### 参考文献

- [1] 橋口真宜, 佟立柱, 米大海, 次世代を担う人のマルチフィジックス有限要素解析, 近代科学社Digital (2022).
- [2] External Material Examples, Structural Mechanics, <https://www.comsol.jp/model/external-material-examples-structural-mechanics-32331> (2023年4月5日参照)

# ユビキタスCAE教育アプリの開発と展開

## Development and Deployment of Ubiquitous CAE Education Application

橋口 真宜<sup>1)</sup>, 米 大海<sup>2)</sup>, 村松 良樹<sup>3)</sup>

Masanori Hashiguchi, Dahai Mi and Yoshiki Muramatsu

- 1) 技術士(機械部門) 計測エンジニアリングシステム株式会社 主席研究員 (〒101-0047 東京都千代田区内神田1-9-5 SF内神田ビル5F, E-mail: hashiguchi@kesco.co.jp)
- 2) 工博 計測エンジニアリングシステム株式会社 技術部 部長 (〒101-0047 東京都千代田区内神田1-9-5 SF内神田ビル5F, E-mail: midahai@kesco.co.jp)
- 3) 博士 東京農業大学 生産環境工学科 教授 (〒156-8502 東京都世田谷区桜丘1-1-1, E-mail: y-murama@nodai.ac.jp)

The authors have developed an effective CAE application in the field of food cooking science. Furthermore, by building a new system environment, we started activities to create a ubiquitous CAE educational environment that can be used by anyone, anytime, and anywhere. Furthermore, by preparing textbook corresponding to the developed CAE application, we constructed a mechanism that allows application users to become familiar with the theoretical background. These series of results are reported in this work.

**Key Words** : Ubiquitous Education, CAE Application, Food Science

### 1. はじめに

世界はSDGs (Sustainable Development Goals, 持続可能な目標) を2030年までに達成するためにいろいろな活動を実施している。SDGsは目標を17項目に分けており、その中には「1.貧困をなくそう」「2.飢餓をゼロに」「4.質の高い教育をみんなに」「9.産業と技術革新の基盤を作ろう」「17.パートナーシップで目標を達成しよう」といった様々なものが掲げられている。

食品は人間が生きていく上で大切なものであるが、SDGsの観点から多くの課題を抱えている。例えば、食品ロス(まだ食べられるのに廃棄される食品)は日本では522万トンで、世界中で飢餓に苦しむ人々への食糧支援量(2020年で年間420万トン)の1.2倍である。美味の追求やファストフードの普及という技術の発達の影響もある。多くの飲食業での加熱調理と消費されるエネルギーの抑制との関係も工学分野ほどには最適化が普及しておらず、アクセスしやすい技術教育システムの必要性を感じる。

一方で、食品は物理・工学的な研究の対象でもあり、その性質を理解・予測するには、固体熱移動・対流熱伝達・水分などの質量輸送・相転移・多孔質体・電磁気といったマルチフィジックス解析が必要である[1]。その成果を多くの加熱調理現場に展開していくにはアプリによるユビキタス環境構築が有効に働くと考えられる。

そこで本稿では、食品分野に関わる次世代の研究者や技術者へ向けた質の高い教育(SDGsの4)を提供する目的で、食品の加熱調理へのマルチフィジックス解析を含むCAEの適用検討を工学と農学の専門家が共同研究をする(SDGsの17)ことで食品ロスを減らす(SDGsの1と2)ための理論的基盤構築(SDGsの9)を支援すべく、著者らが活動

してきた内容と成果を報告する。研究開発にあたってはCOMSOL Multiphysics[2]を利用した。

### 2. ユビキタスCAE実現のためのツール

筆者らは「誰でも・いつでも・どこでも」利用できるCAE環境であるユビキタスCAEを構築するために、市販のソフトウェアCOMSOL Multiphysicsによるモデル開発とアプリ作成、アプリの配布機能であるCOMSOL Compiler[3]に着目して食品加熱調理でのユビキタスCAE実現のツールと位置付けている[1]。その利用法の研究(モデルからアプリへの一連の開発手順検討、アプリの具備すべきGUIの設計、アプリの配布サイトの設置方法など)を進めてきた。大学の共通教育ではCOMSOL Server[4]によるアプリのWeb配信方式を導入し実際の教育に展開済み(120名超/クラス)である[5]。

### 3. 食品の加熱調理に関するアプリの設計・開発

#### (1) 本質過程の抜き出し

食品の加熱調理を扱うと言ってしまうと、多くの物理カテゴリーや化学変化を伴う複雑な内容を数値解析の対象になってしまう。調理は食材の温度・色・硬さ・食感・味・栄養素・調味料・添加物といったものが複雑に関与するのでそこを追求する数値解析の研究はとても重要ではあるがそのような研究は実現までに長期間を要する。一方で、技術者の基礎教育には、加熱調理を構成する本質的な物理過程を独立に抜き出す方が良いと考えられる。

#### (2) 温度・水分への限定

食品の加熱調理では必達事項として殺菌が挙げられる。食品の殺菌では、例えばボツリヌス菌の死滅量が規定されているが、それらを定める物理特性は温度である。

また、食品の食感は水分によって決まることから水分の質量輸送を解析することが重要である。この主題から外れるが食品の乾燥も重要であり、その点からも食品の水分輸送は取り上げるべき項目である。水分の凝縮熱は表面加熱に大きく寄与する。

### (3) 加熱源

#### a) 境界加熱方式

食品の調理加熱ではガスコンロの炎による直火焼きやオーブンによる放射加熱、コンロに乗せたフライパンの熱伝導と放射加熱の利用といった加熱方式が利用される。これらは食品を境界面から加熱する方式であり、境界加熱方式と呼ぶことにする。

#### b) 内部加熱方式

一方で、電子レンジによるマイクロ波加熱は電磁波によって食品内部の双極子である水分子が加振されその摩擦熱による食品の自己発熱を利用している。これは内部加熱方式である。食品の均一加熱や省エネルギーの視点から、高周波(30kHz以下)の電流印加によるジュール加熱の研究が行われている。これは練り食品(かまぼこなど)の加熱方法として日本で考案された方式であり、食品内部での自己発熱を利用するので内部加熱方式である。

従って、境界加熱方式と内部加熱方式の両方式を数値解析の対象に加えた。

## 4. アプリを活用した教育環境の整備

### (1) 理論説明とアプリを組み合わせた書籍の発刊

調理加熱に係る伝熱現象は、熱伝導、放射伝熱、対流熱伝達、境界加熱に加えて、マイクロ波、交流電流による食品内部の自己発熱がある。マイクロ波はマックスウェル方程式が関係する。交流電流はマックスウェル方程式に準定常近似を施した方程式を利用する。スチームコンベクションオープンでは水分の移動と凝縮熱を扱う必要がある。

技術者教育では理論的説明と実習が一体となっていると効果的である。理想化された状況を扱う場合には加熱調理の実習はアプリを使ってPC上で可能である。

しかしながら、既存の書籍でCAEアプリを含み、かつ理論解説と一体的な内容のものが皆無であるので、本研究の成果を反映した書籍を新たに作成し発刊した[6]。

マイクロ波加熱の例を示す。マックスウェル方程式についての解説に加えて、自己発熱量の式を明記した。他方、従来の食品関係の書籍では自己発熱量の簡易表現式がよく引用されている。そういう箇所は、今回の書籍では「なぜそのような簡易表現式になるのか」といった疑問を解消することなどに留意した。

### (2) 開発したアプリの例 [7]

マイクロ波加熱アプリの例をFig.1に示す。

#### 【アプリ使用手順】

1) まず初めに実施することは「①入力値をデフォルト設定のままで、「③計算実行」をクリックします。すると「④実行状況」で計算の進捗がわかります。

このアプリでは温度と電磁場の計算が行われます。「⑤温度結果」に横向きで並ぶ項目を順に試してみます。「④電場及び損失」に横向きで並ぶ項目を順に試してみます。

2) 続いて、例えば、試料高さ(半径rpotを基準に1.5倍とする場合、rpot\*1.5)、入力電力を「①入力」で変更後、「②形状表示」で食品形状を確認し、「③計算実行」をします。

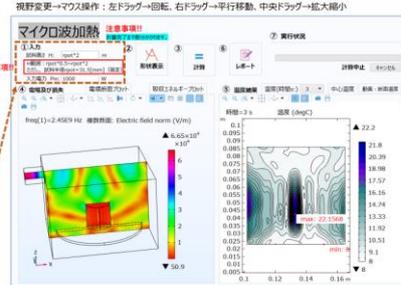


Fig.1 pdfによるアプリ画面と利用上の要点説明の例[7].

### (3) アプリのダウンロードサイトの設置

作成したアプリは筆者の一人(村松)によってコンパイルされダウンロードサイトを設置する[7]ことで自由に利用できるようにした。ライセンスフリーで利用できる。アプリに細かな説明を加えたpdf (Fig.1参照)を同じダウンロードサイトに置くことで利用者の便宜を図った。

## 5. まとめ

本稿では著者らが実施してきた食品の加熱調理における数値解析アプリの開発とその配布機能を利用したユビキタスCAEによる教育システムの研究開発の成果を報告した。いままでも実現に時間を要していた教育システムが異分野の専門家の協力で早期に実現できた。

本稿で活用した先進的CAE環境が周知されることで、確固とした理論とユビキタスCAEのもとに、我が国のモノづくりを見通し良くスムーズな製品開発方式に変革する一助になれば幸いである。今後は、省エネルギーや効率的な調理加熱につながる最適化に取り組む予定である。

### 参考文献

- [1] 橋口真宜, 米大海, 村松良樹: 美味技術学会誌総説, 食品物理アプリによる次世代の業務変革に向けて (20(2) 2021) ; 電子レンジによる食品のマイクロ波加熱研究の動向 (21(1) 2022).
- [2] COMSOL Multiphysics: <https://www.comsol.jp/> (参照日2023年4月3日)
- [3] COMSOL Compiler: <https://www.comsol.jp/comsol-compiler> (参照日2023年4月3日)
- [4] COMSOL Server: <https://www.comsol.jp/comsol-server> (参照日2023年4月3日)
- [5] 村松良樹ほか: 数値シミュレーションの工学系教育への適用, 農業食料工学会・農業施設学会・国際農業工学会第6部会合同国際大会(2019).
- [6] 村松良樹, 橋口真宜, 米大海: 「ことはじめ加熱調理・食品加工における伝熱解析-数値解析アプリでできる食品物理の可視化-」, 近代科学社Digital (2023).
- [7] 村松良樹: 数値解析アプリ, <http://nodaiweb.university.jp/comsol-app/> (参照日 2023年4月3日)

# 超スマート社会を支援するユビキタスマルチメディア教育スタイルの提案

Proposal of ubiquitous multimedia education style to support Society 5.0

米 大海<sup>1)</sup>, 橋口 真宜<sup>2)</sup>, 村松 良樹<sup>3)</sup>

Dahai Mi, Masanori Hashiguchi and Yoshiki Muramatsu

- 1) 工博 計測エンジニアリングシステム株式会社 技術部 部長 (〒101-0047 東京都千代田区内神田1-9-5 SF内神田ビル5F, E-mail: midahai@kesco.co.jp)
- 2) 技術士(機械部門) 計測エンジニアリングシステム株式会社 主席研究員 (〒101-0047 東京都千代田区内神田1-9-5 SF内神田ビル5F, E-mail: hashiguchi@kesco.co.jp)
- 3) 博士 東京農業大学 生産環境工学科 教授 (〒156-8502 東京都世田谷区桜丘1-1-1, E-mail: y-murama@nodai.ac.jp)

The production and utilization of valuable information play an essential role in Society 5.0. By overcoming the Covid-19 pandemic, its importance was strongly recognized. The authors have been researching and developing CAE applications with an emphasis on ubiquitousness (anyone, anytime, anywhere). However, from the educational site, both the teaching side and the learning side have a strong demand for an educational style that is "easy to understand, interesting, and easy to use". Therefore, this research discussed the method of utilizing multimedia through CAE application for next generation education style.

**Key Words :** Society 5.0, Ubiquitous Multimedia Education, CAE Application

## 1. はじめに

超スマート社会 (Society 5.0) は, 狩猟社会 (Society 1.0), 農耕社会 (Society 2.0), 工業社会 (Society 3.0), 情報社会 (Society 4.0) に続く新たな社会を指す. Society 5.0では, フィジカル空間 (現実空間) を高度な融合させたシステムにより, 経済発展と社会的課題の解決を両立することを考える. 具体的にはIoT (Internet of Things) で人とモノをつなぎ, 知識や情報を共有することで今までにない価値を創出し, 人工知能 (AI) によって必要時に適宜, 必要な情報を提供することで社会を変革することを目指す.

CAE (Computer Aided Engineering) は計算機援用工学の意味であり, CAEを活用すれば実際に試作や実験をしなくてもコンピュータ上でいろいろな計算解析を事前に行うことができ広く活用されているが, 専門家がいないという理由で導入が進まない分野もある. 一方でCOMSOL Multiphysicsでのアプリとその配布機能を使えば「誰でも・いつでも・どこでも」CAEを活用できるユビキタスCAE環境を容易に導入できる[1]. 大学における教育現場からは, さらに教育に活かすためにはマルチメディアを活用したより積極的な取り組みが期待されている[2].

本稿では, 上述の背景から超スマート社会を推進・持続する上で最重要課題として, CAEが行き届きにくい「遠隔地での技術者教育」を取り上げ, ユビキタスでかつマルチメディアを積極的に活用した新しい教育スタイルを検討したので報告する.

## 2. ユビキタス性を必要とする現場

CAEは一般に専門部署が解析モデルを開発し, それを専門家自身が使って解を出し, 報告書などを作成して関連部署に説明を行うのが従来の方式である. 従って, この場合では技術者教育は専門部署内部が対象となる. ところが, 現象の予測を必要とする場所が, 例えば汚染水の海洋流出を防ぐための凍土工法を実施するような現場であれば, 安全性の確保や不慮の事故といったリスクを低減するために, 現場の技術者がCAE解析を自由に利用できる具体的な手段が必須であろう. 現場の技術者は必ずしも解析モデルの専門家ではないので, 「誰でも」使えるCAEとしてCAEアプリが有効である. 「いつでも・どこでも」CAEアプリの利用にはライセンスフリーの実行形式ファイルを現場のPCにインストールすれば良い(Fig.1).

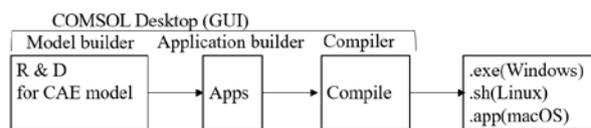


Fig.1 CAEアプリとライセンスフリー配布環境による現場の技術者教育へのユビキタスCAEの導入の提案.

## 3. 凍土工法のCAEアプリの開発例

### (1) 凍土と凍結管

地盤内に人工的に凍土を形成する現場を想定する. 人工凍土は, Fig.2に示すように, 土粒子 (Solid particles),

土粒子間隙の液相である水 (Liquid water), 温度が低下して水が相転移を経て固相になった氷 (Solid water, ice) から成る多孔質体でモデル化できる. 液相と固相が隣接する界面近傍には液相と固相の混在した領域 (Mushy zone) が存在する.

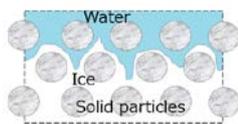


Fig.2 Freezing soil.

地盤に人工凍土壁 (AGF, Artificial ground freezing) を造成するには, 地盤内に冷却用凍結管を多数, 列状に埋め込み, その中に冷却液を循環させる. 冷却液の温度は時間方向に変化させて人工凍土壁の形成状態を制御する.

現場の技術者は冷却液の温度変化の時間的な計画を立案し, 地下水の流れのある地下に適正な人工凍土を形成する必要がある.

## (2) 基礎方程式

凍土の内部では地下水が流れており, ダルシー則で取り扱う. 温度はダルシー速度で移流する熱伝導方程式 (エンタルピー変化法による相転移モデルを含む) で扱う.

基礎式は次のような時間依存型の偏微分方程式とする.

$$\rho_f S_p \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{u}) = Q_m$$

$$\mathbf{u} = -\frac{\kappa}{\mu} \nabla p$$

$$S_p = S_w \beta \varepsilon_p$$

$$Q_m = S_w \varepsilon_p (\rho_{ice} - \rho_w) \frac{\partial S_w}{\partial t}$$

$$S_w = S_{w,res} + (1 - S_{w,res}) \theta_{12}(T)$$

$$(\rho C_p)_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f C_{p,w} \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q$$

これらは有限要素法を使って離散化し時間方向へは線の方法 (Method of lines) を使って離散化した. COMSOL Multiphysics のモデルビルダーでモデルを開発した.

## (3) 開発したCAEアプリ

下記項目を主な仕様として開発したアプリをFig.3に示す.

- ① 凍結管の直径を指定できること.
- ② 凍結管温度の時刻歴を任意に指定できること
- ③ 解析結果 (境界に沿う温度と凍結管の中心を結ぶライン上の温度分布の時刻歴) を定型表示すること.
- ④ 上記③を指定のメール宛先に自動送信すること
- ⑤ 技術者への CAE モデルの教育的説明の実現

アプリの作成は COMSOL Multiphysics のアプリケーションビルダを使用した.

CAE ではアプリの稼働が適正であるか Verification を実施することは必須であり, ベンチマーク問題と比較することで検証を実施した.

現場の技術者がこのアプリを使うことで, Fig.4 に示す

ように, 物理的メカニズムをグラフィックス表示で明確に把握でき, さらに, 温度の時間履歴の変更によって凍土の形成が成功あるいは不成功になるかといった What-if 分析が容易にできる.

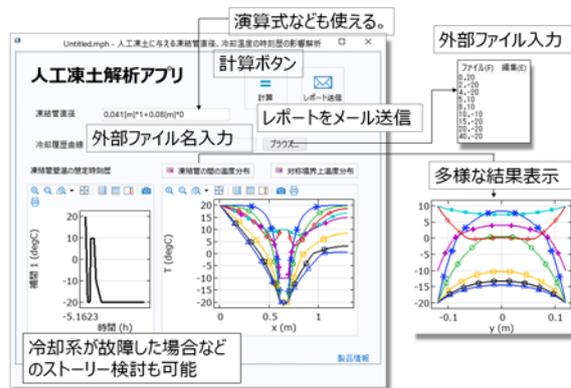


Fig.3 Apps for AGF multiphysics analysis.

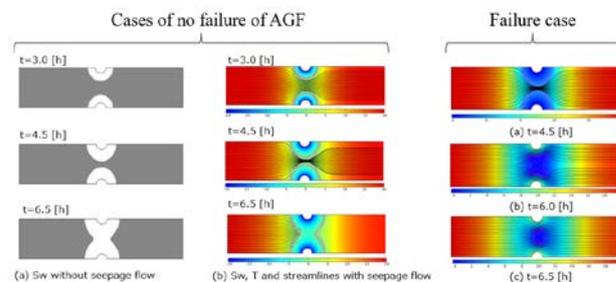


Fig.4 Simulation cases done by the present CAE app.

このアプリはGUI (Graphical User Interface) が使いやすいカスタマイズされ「誰でも」すぐに利用でき, COMSOL コンパイラーを使って実行形式ファイルに変換しライセンスフリーで「いつでも・どこでも」利用が実現する.

## 4. マルチメディア機能の取付け

- 技術者へのCAEモデルの教育的説明(⑤)の具体化は
- (a) Fig.3のレポート内容のレベルを詳細に設定すれば基礎方程式, 計算条件, メッシュ, 計算結果などを全て出力することで支援できることを確認した. マルチメディア機能はアプリのフォームへのオブジェクト挿入で
  - (b) ハイパーリンク機能を使って外部のURLを参照
  - (c) ビデオ機能でビデオ参照
- によって容易に実現できることを確認できた.

上記の(b)は技術者の教育資料の参照に有効 (豊富な文章・図面・写真説明, 他URLへのリンク), (c)は実験データの採取法の説明などデータの質確保等に有効である.

## 参考文献

- [1] 橋口真直, 佟立柱, 米大海, 次世代を担う人のマルチフィジックス有限要素解析, 近代科学社Digital (2022).
- [2] 吉岡修哉, 立命館大学理工学部准教授 (私信).