

2024年7月9日

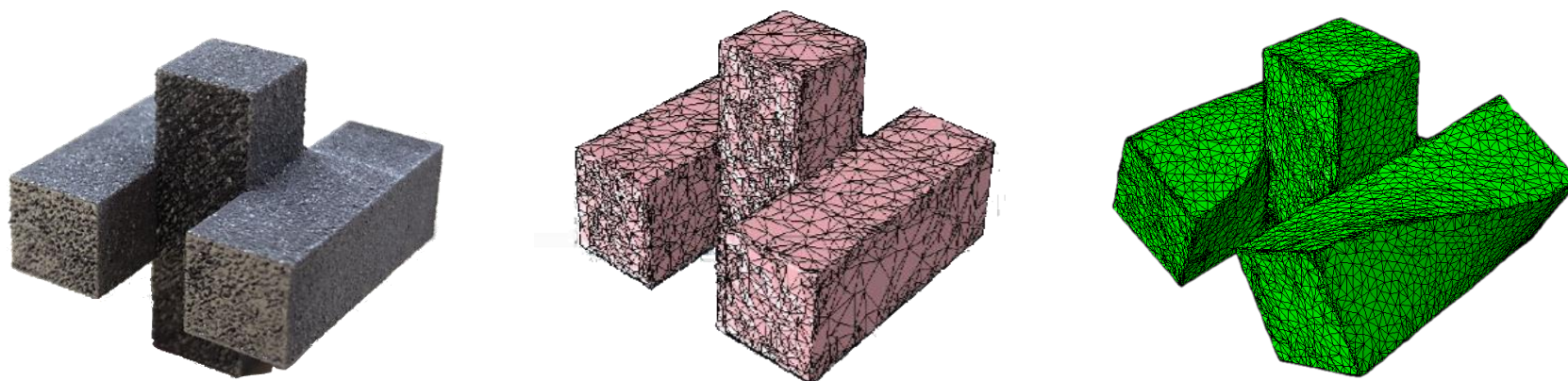
3次元・複雑構造・力学的異方性材料の 簡易な弾性定数計測法

東北大学大学院工学研究科

航空宇宙工学専攻

准教授 山本 剛

gyamamoto@tohoku.ac.jp



本日の内容

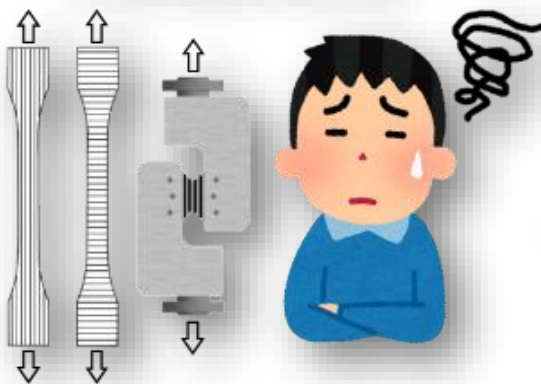
- 何ができるようになったのか？
- 従来技術とその問題点
- 新技術の特徴・従来技術との比較
- 想定される用途
- 研究面でどのような成果が出ているのか？
- 実用化に向けた課題など

何ができるようになったのか？

(a) シンプルな形状
力学的等方性材料



(b) シンプルな形状
力学的異方性材料



(c) 3次元かつ複雑形状
力学的異方性材料



本研究開発：3次元・複雑形状・力学的異方性材料の簡易な弾性定数計測

3次元・複雑構造・力学的異方性を有する材料の
弾性定数を簡易に測定することができる計測手法の開発



9つの独立弾性定数を一度の振動実験と振動解析で計測

$$E_{11}, E_{22}, E_{33}, \nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{31}, G_{12}, G_{23}, G_{31}$$

(機械的試験法の標準偏差に収まる測定精度)

従来技術とその問題点

3次元・複雑構造・力学的異方性を有する材料弾性係数の計測には、「機械的試験法」や「超音波法」などがあるが、

機械的試験法

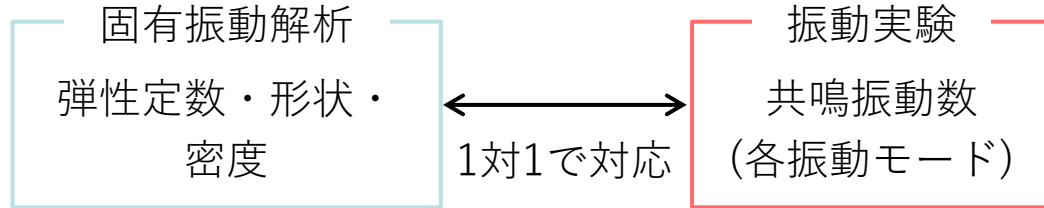
- ・ 試料準備の煩雑さ
- ・ 複数の試験法の組み合わせ

超音波法

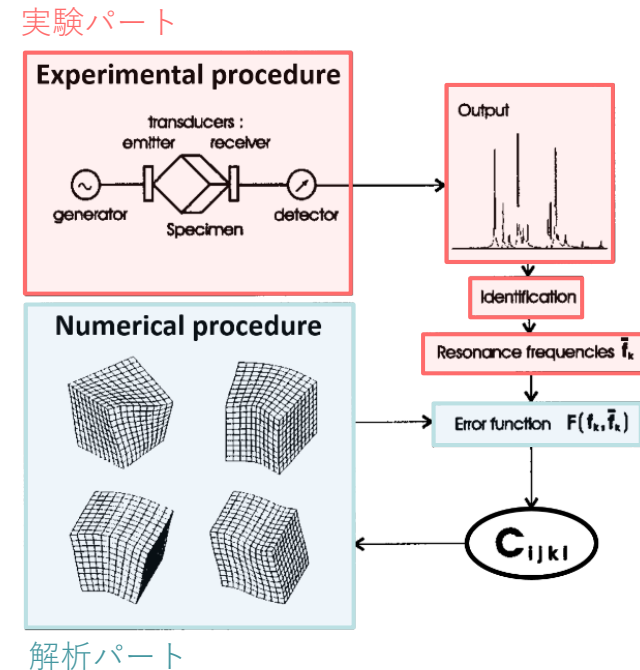
- ・ 試料準備の煩雑さ
- ・ 異方性材料の超音波波形の解析が複雑

などの問題がある。

固体材料の共振周波数が形状・密度・弾性定数に依存する原理を利用して、
実験と解析により弾性定数を決定する手法

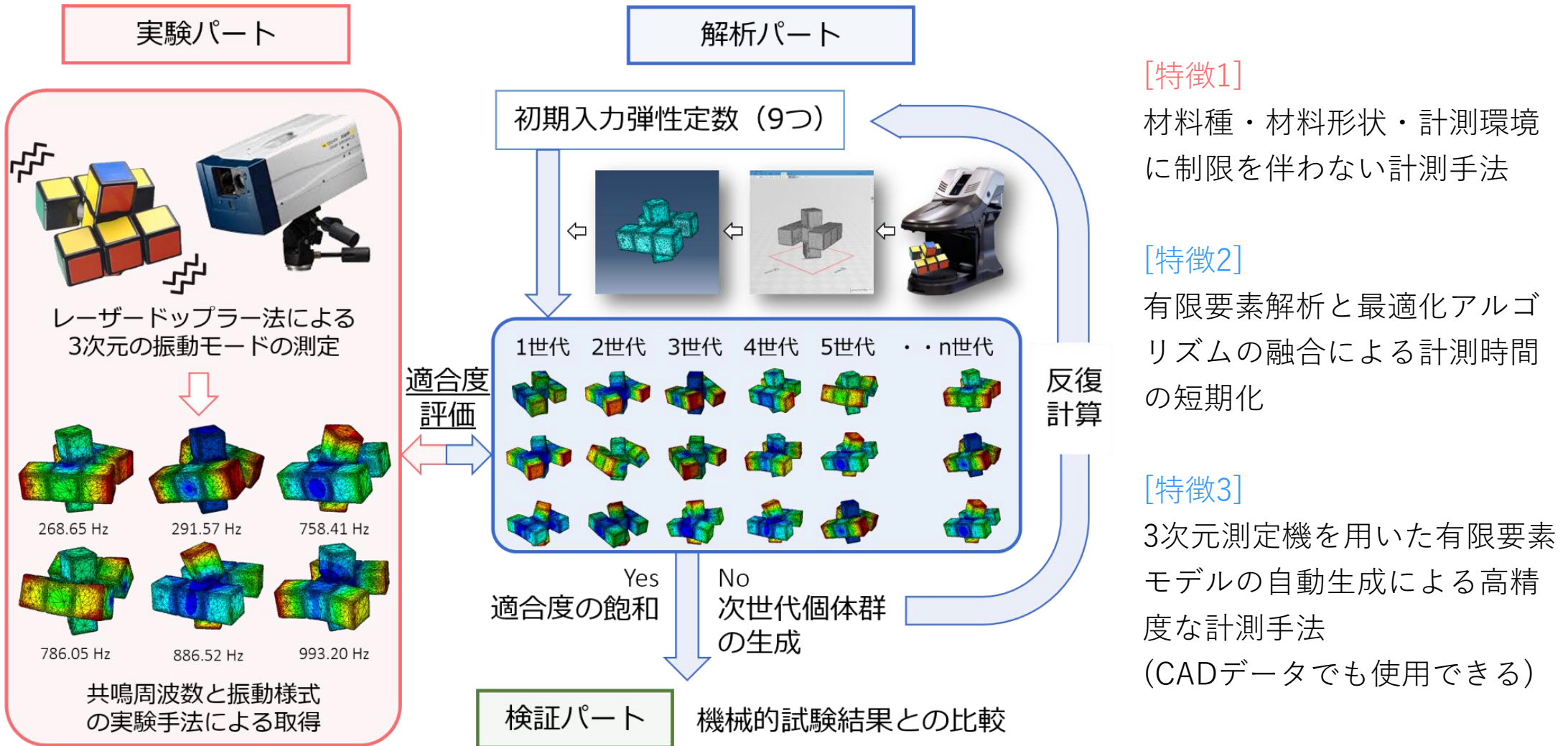


形状と密度が既知な条件において、
共鳴周波数がわかれば弾性定数を計測することができる



Schematic depiction of the RUS [1].

- 一度の振動実験と振動解析から材料の全弾性定数を計測することができる
- 原理的には複雑形状を有する材料に対しても適用することができる



* 振動実験より得られる「共鳴周波数」と「各振動モード」を再現する入力弾性定数とそれらの組み合わせを見つける。

新技術の特徴・従来技術との比較

- 固体材料の共鳴振動を利用することで、一度の振動実験と振動解析で9つの独立弾性定数を計測することができる。
- 「実試料の3次元形状測定による解析モデルの作成」と「振動モードマッチング技術」により、短時間で、機械的試験法で測定される弾性定数の標準偏差に収まる測定精度を有する。
- 材料内部欠陥の新しい欠陥探傷方法への発展性
(CT法では検出が困難な金属積層造形製材料の欠陥探傷)

想定される用途

- 弾性定数の測定が困難な製品・材料への適用
(3次元・複雑構造・力学的異方性を有する材料)
- 製品・材料の品質評価、設計
- 新規開発材料の基礎特性評価

例えば、航空機や自動車の変形・振動解析、

- 大規模有限要素法によるシミュレーション解析
- 弾性定数は数値シミュレーションに必須な入力値
- 解析精度に最も影響を与える材料物性

9つの弾性定数の計測 (直行異方性と仮定)

$$E_{11}, E_{22}, E_{33}, \nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{31}, G_{12}, G_{23}, G_{31}$$

Ti-6Al-4V試料

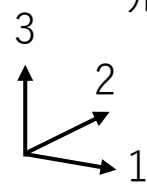
レーザー溶融法

3D Systems PROX100

水谷研究室 (東北大学大学院工学研究科)



ルービックキューブ形状
Ti-6Al-4V試験片



造形条件

粉末	Ti-6Al-4V
造形雰囲気	アルゴン
レーザースポット径	80 μm
レーザー波長	1070 nm
積層厚	30 μm
走査スタイル	1層ごと90°回転
走査速度	100 mm/s

試験片の密度

	測定密度 (Mg/m^3)	相対密度 (%)
RUS用試料	4.337	97.9
機械的試験用 試料	4.046 (3.970-4.128)	91.3 (89.6-93.2)

* 理論密度：4.43 (Mg/m^3) [5,6]

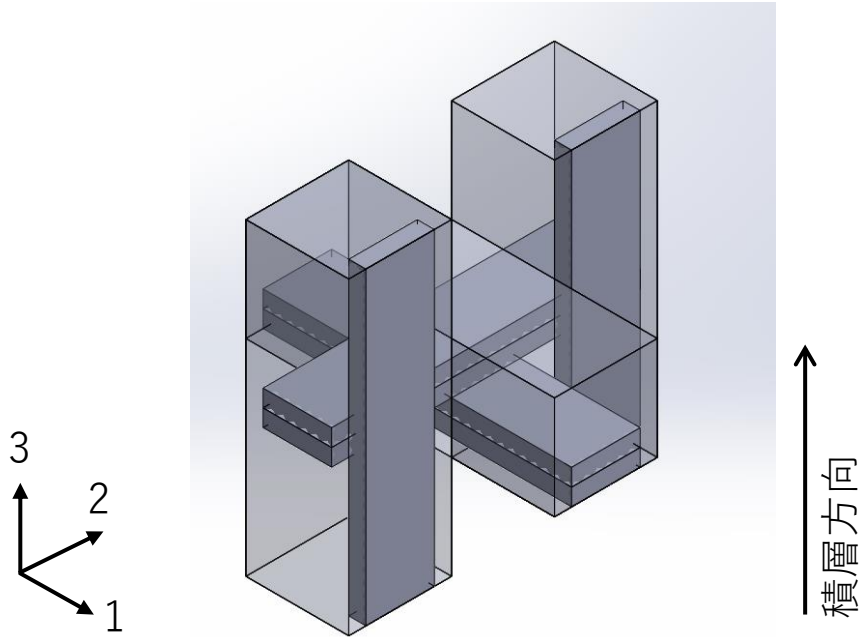
* 3次元形状測定機にて体積を測定

[5] M. Meyers, K. Chawla, Mechanical behavior of materials, 2nd edition, Cambridge University Press.

[6] 日本チタン協会 (http://www.titan-japan.com/technology/physical_properties.html) (参照日：2023/01/19)

RUS法+振動モードマッチング技術により得られた
弾性定数の妥当性評価

E_{11}, E_{22}, E_{33}



試験片寸法

18 mm × 4 mm × 0.5 mm

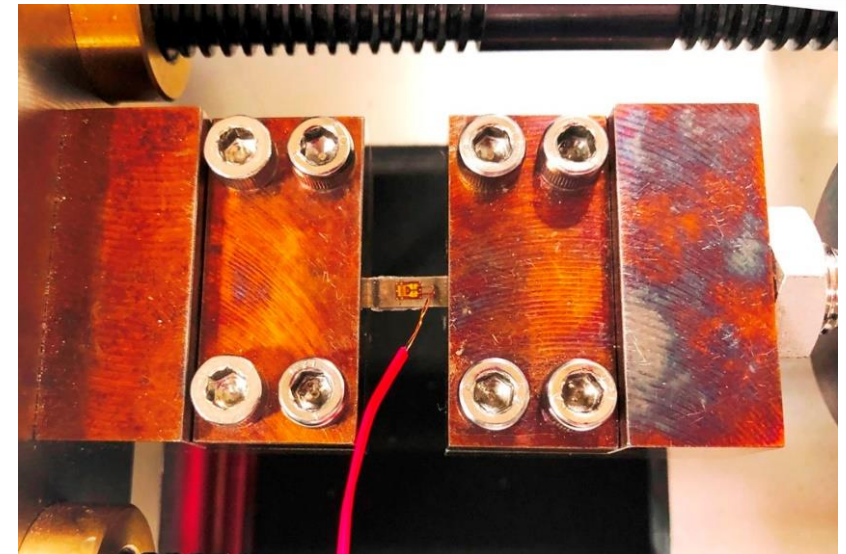
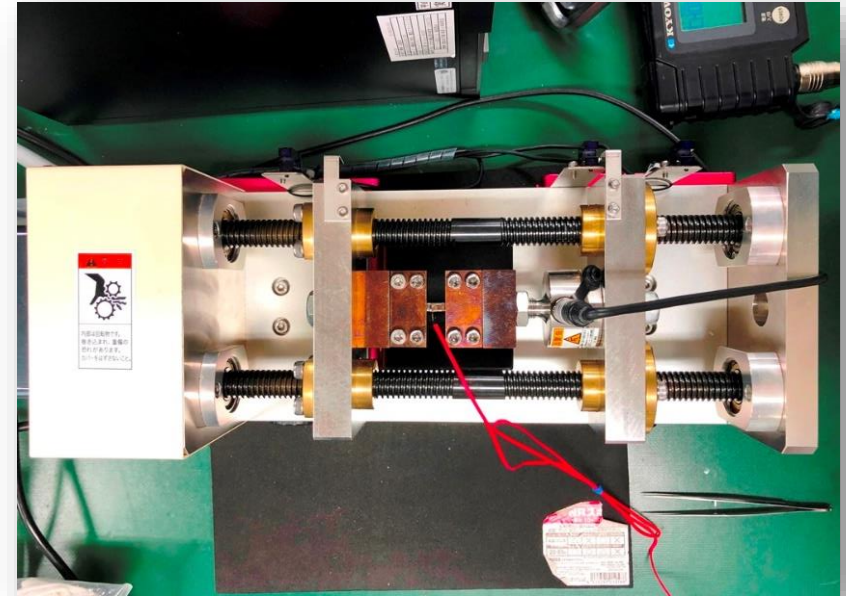
試験条件

クロスヘッド速度：0.1 mm/min

雰囲気：室温大気下

試験終了条件：1.6 kN

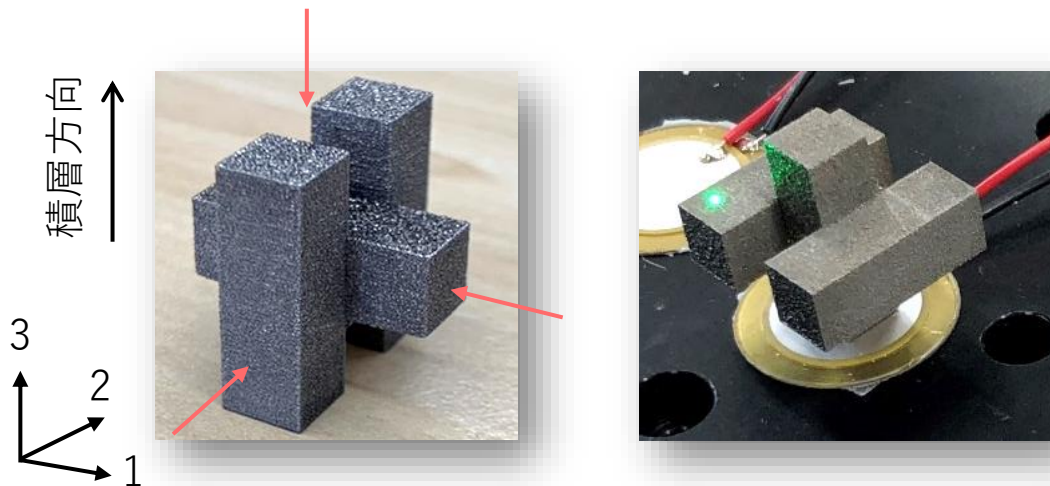
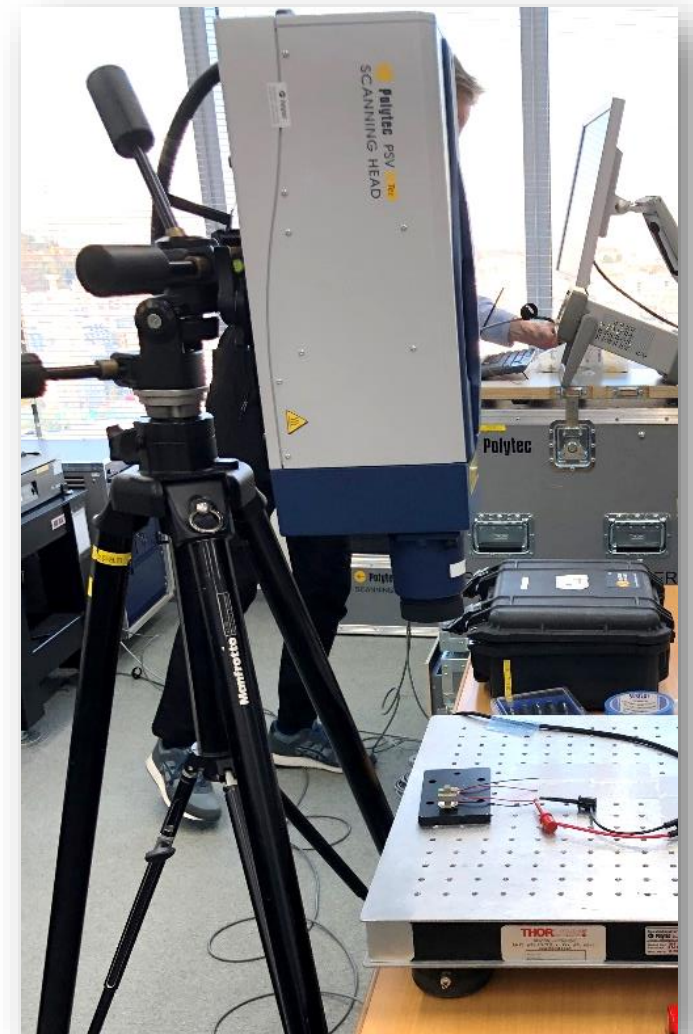
* 各軸方向に対してそれぞれ4本の試験片を評価



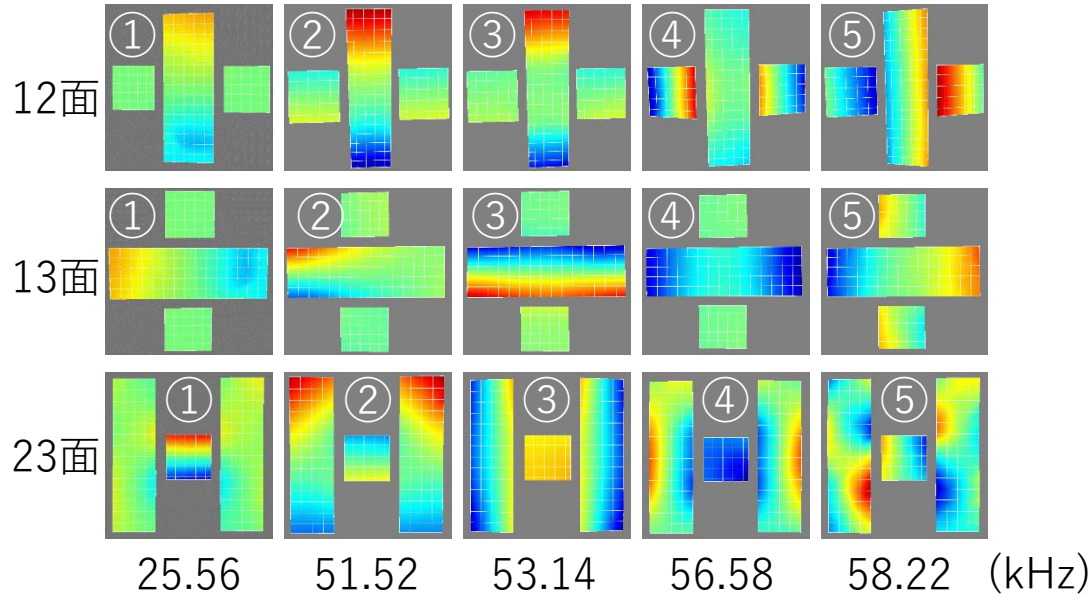
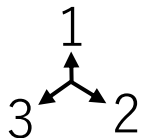
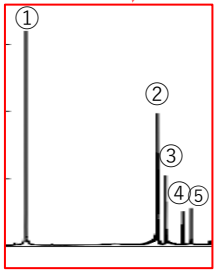
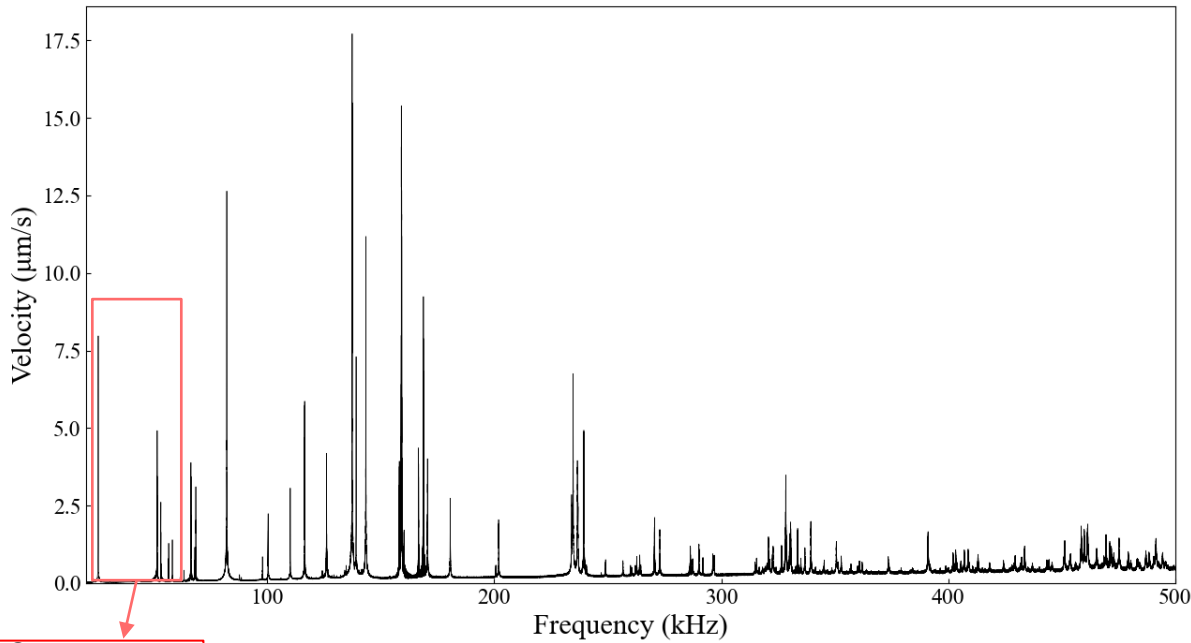
「共鳴振動数」と「各振動モード」の測定（実験パート）
振動様式マッチングの精度向上のため3面を測定

1. ファンクションジェネレータに接続した加振器に試験片を設置
2. 測定ポイントの決定(各面79点)
3. 入力周波数を掃引し, レーザーにより振動状態を測定
(周波数走査範囲: 20-500 kHz 分解能: 0.01 kHz)
4. 設定周波数帯域における周波数特性曲線, 共振周波数,
ならびに各振動様式の取得
5. 各面に対してステップ1-4を実施

スキャニング振動計 (PSV-Qtec)



周波数特性曲線、共振周波数、各振動モード



振動実験により得られた共鳴周波数

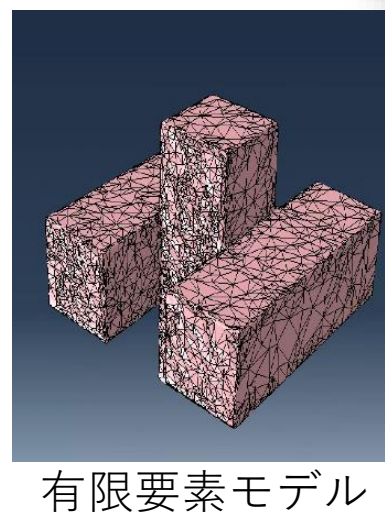
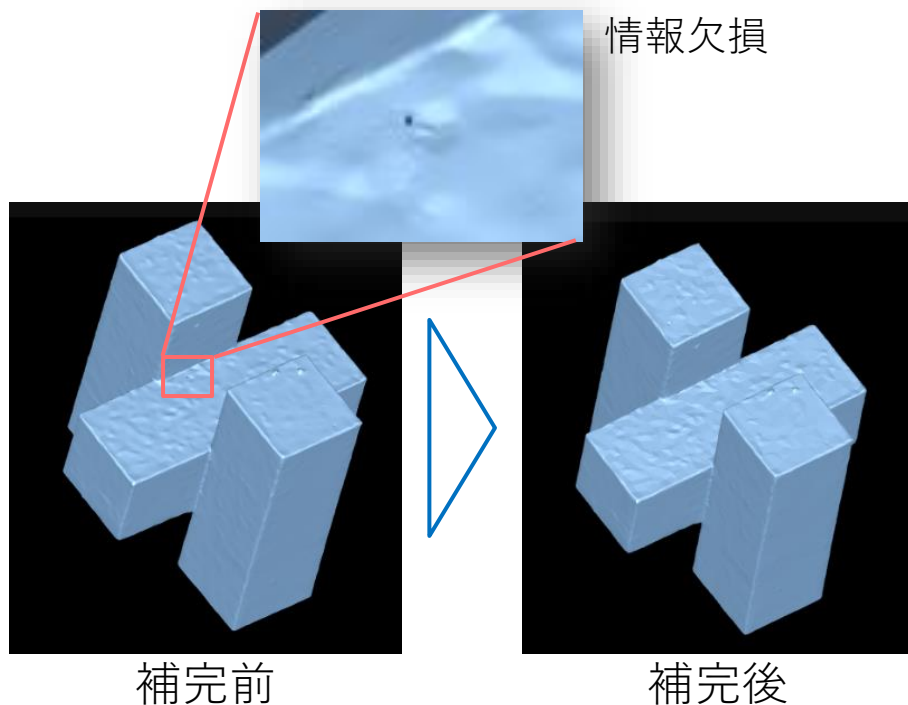
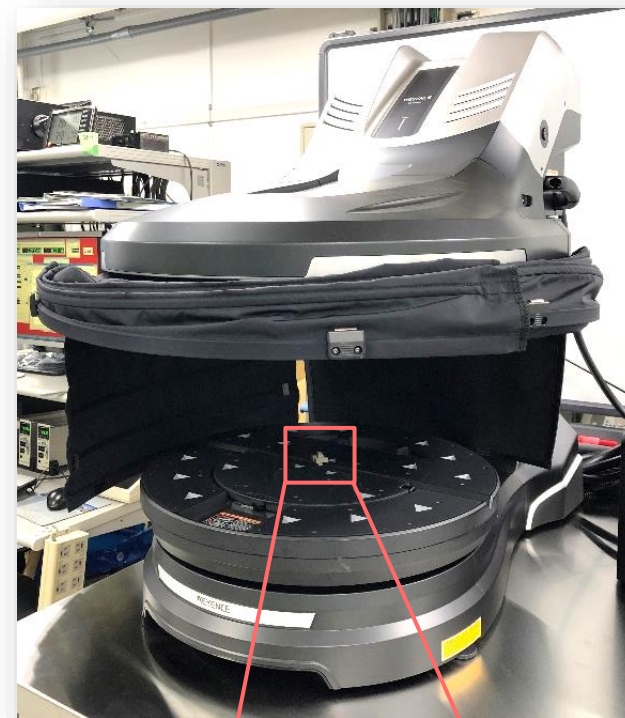
Mode #	\bar{f}_i (kHz)	Mode #	\bar{f}_i (kHz)
1	25.56	21	166.63
2	51.52	22	180.42
3	53.14	23	200.68
4	56.58	24	201.90
5	58.22	25	234.71
6	61.91	26	239.43
7	63.37	27	240.58
8	66.38	28	247.10
9	-	29	249.00
10	82.18	30	256.66
11	87.78	31	264.05
12	88.62	32	270.53
13	97.89	33	272.85
14	110.16	34	285.92
15	116.46	35	291.87
16	126.12	36	296.22
17	137.41	37	320.74
18	139.15	38	333.60
19	143.43	39	341.50
20	160.25	40	373.87

解析モデルの作成（解析パート）

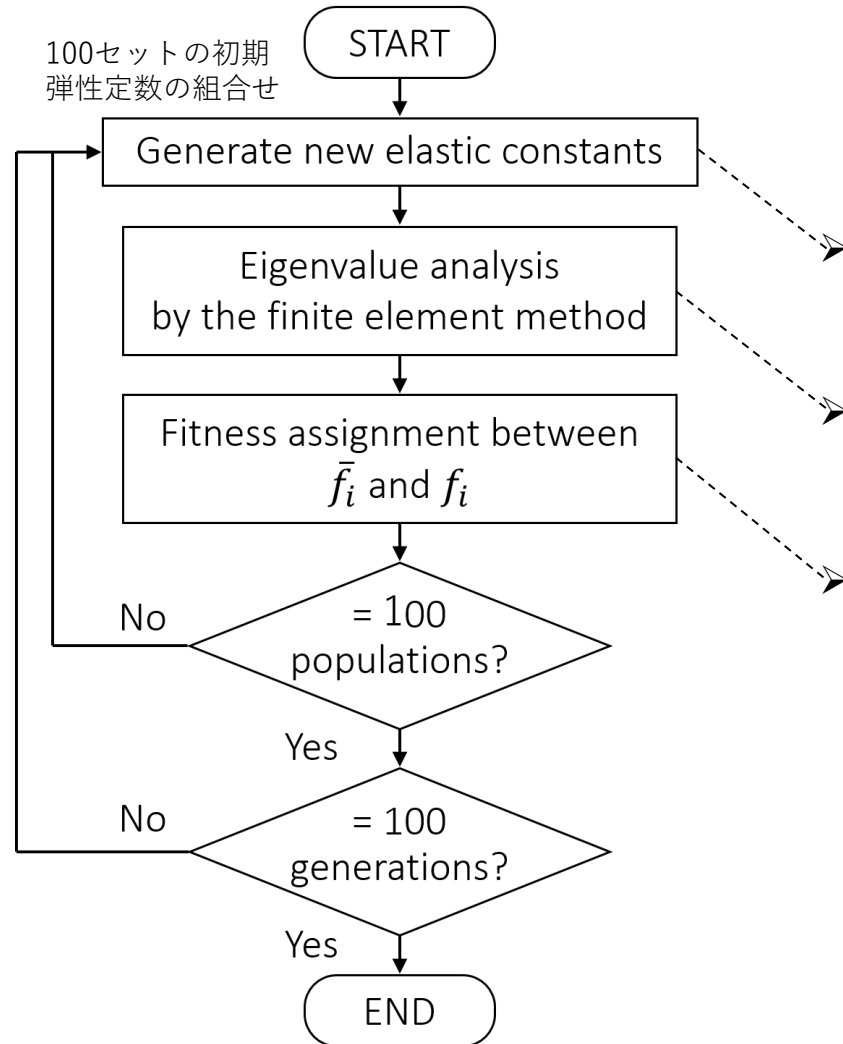
3次元測定機を用いた有限要素モデルの自動生成
による高精度な計測手法

1. 3Dスキャナ型三次元測定機を用いて試料をスキャン
2. 3D検査用ソフトウェアを用いて欠損情報を補完
3. 有限要素モデルの自動生成

3Dスキャナ型三次元測定機
Keyence, VL-500



弾性定数探索のフロー (解析パート)



直交異方性と仮定 (9つの弾性定数を同定)

$$E_{11}, E_{22}, E_{33}, \nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{31}, G_{12}, G_{23}, G_{31}$$

最適化手法：差分進化法(DE)
：遺伝的アルゴリズム(GA)

自由振動条件下での振動解析(有限要素法)
要素分割数：132624

「振動様式マッチング」と「適合度 F の評価」

$$F = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{f}_i - f_i)^2} \quad (5)$$

\bar{f}_i : i 番目の共振周波数の実験値

f_i : i 番目の共振周波数の解析値

n : 振動モードが一致した共鳴周波数の数

F を最小化する入力弾性定数が決定

固有振動解析 (解析パート)

有限要素法を用いて仮想的な振動実験を実施

完全弾性体の共振周波数は以下の固有値問題を解くことで得られる

$$Kv_i = \lambda_i Mv_i \quad (1)$$

$$\lambda_i = (2\pi f_i)^2 \quad (2)$$

K : 剛性マトリクス M : 質量マトリクス λ_i : i 番目の固有値
 v_i : i 次の固有ベクトル f_i : i 番目の共鳴周波数

M は試験片の形状・密度より既知
 K は弾性定数を仮定することで作成

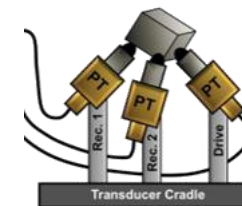


- ・式(1)と(2)を数値的に解いて、 f_i を取得
- ・本研究では自由振動条件で解析を実施

- ✓ 予備的な検討から、実験により得られる共振周波数は試験片が外力や変位の拘束を受けない自由振動条件下で得られるものと等価であることを確認



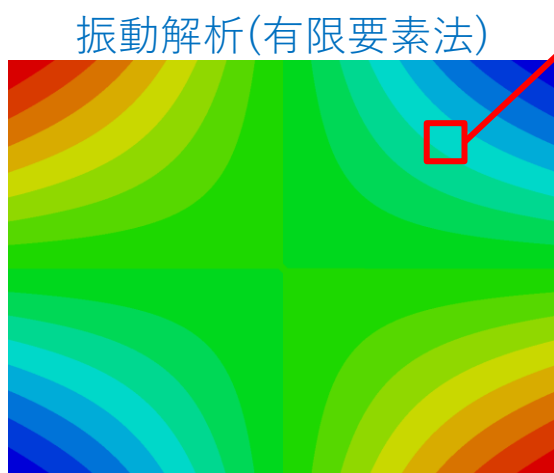
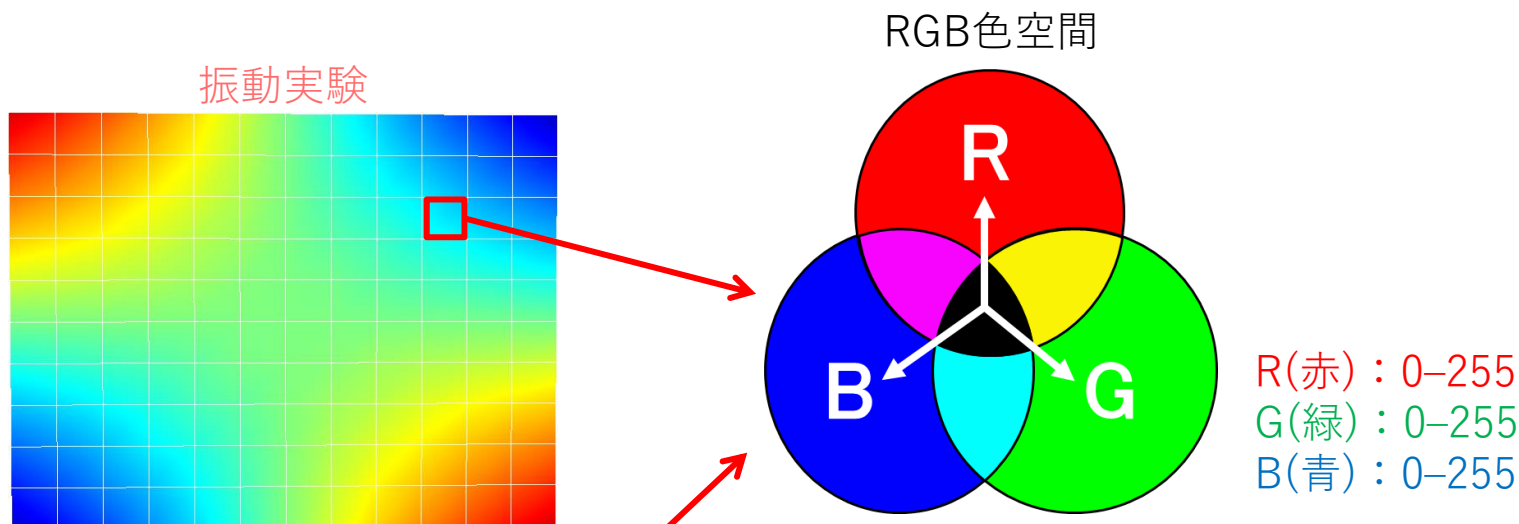
解析での境界条件も自由振動条件



f_i と \bar{f}_i が十分に一致するまで反復計算を行うことで入力変数を最適化

振動モードマッチング (解析パート)

入力弾性定数の組合せが異なると振動様式の順序が異なることがある



コサイン類似度

$$\begin{aligned} \cos(a_{ij}, b_{ij}) &= \frac{a_{ij} \cdot b_{ij}}{\|a_{ij}\| \|b_{ij}\|} \\ &= \frac{a_{ij}^R \times b_{ij}^R + a_{ij}^G \times b_{ij}^G + a_{ij}^B \times b_{ij}^B}{\sqrt{a_{ij}^{R^2} + a_{ij}^{G^2} + a_{ij}^{B^2}} \times \sqrt{b_{ij}^{R^2} + b_{ij}^{G^2} + b_{ij}^{B^2}}} \end{aligned} \quad (3)$$

a_{ij} : 振動実験, b_{ij} : 振動解析

全要素のコサイン類似度が閾値以上となるものを、
同一の振動様式と判定

RUS法により得られた弾性定数の妥当性評価



Table 2 List of elastic constants of the AM Ti-6Al-4V alloy and those reported in the literature. The units of E_{ij} and G_{ij} are GPa.

E_{11}	E_{22}	E_{33}	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12}	G_{13}	G_{23}	Remarks
111.0	113.0	109.0	0.337	0.352	0.309	40.2	41.4	42.0	RUS 相対密度 97.8%
109.2 (100.0-116.8)	112.2 (99.2-127.1)	112.1 (104.6-120.0)	-	-	-	-	-	-	Tensile testing 相対密度 91.3% (89.6-93.2)
99.5 (92.8-104.7)	102.0 (90.2-114.0)	102.1 (93.8-110.7)							
	113.8			0.342			42.4		[7]
	110			0.33			41		[8]

* Tensile testing；上段は空隙率を0%と仮定した値，下段は生データ

- ・本研究で用いたルービックキューブ形状AM Ti-6Al-4Vは概ね力学的等方性
- ・3次元・複雑構造・(力学的異方性)を有する材料の弾性定数計測に成功

[7] M. Meyers, K. Chawla, Mechanical behavior of materials, 2nd edition, Cambridge University Press.
 [8] 日本チタン協会 (http://www.titan-japan.com/technology/physical_properties.html) (参照日：2023/01/19)

Determination of elastic constants in complex-shaped materials through vibration-mode-pattern-matching-assisted resonant ultrasound spectroscopy

Cite as: J. Appl. Phys. 135, 205109 (2024); doi: 10.1063/5.0185423

Submitted: 31 October 2023 · Accepted: 11 May 2024 ·

Published Online: 30 May 2024



Go Yamamoto^{a)} and Yuto Sakuda

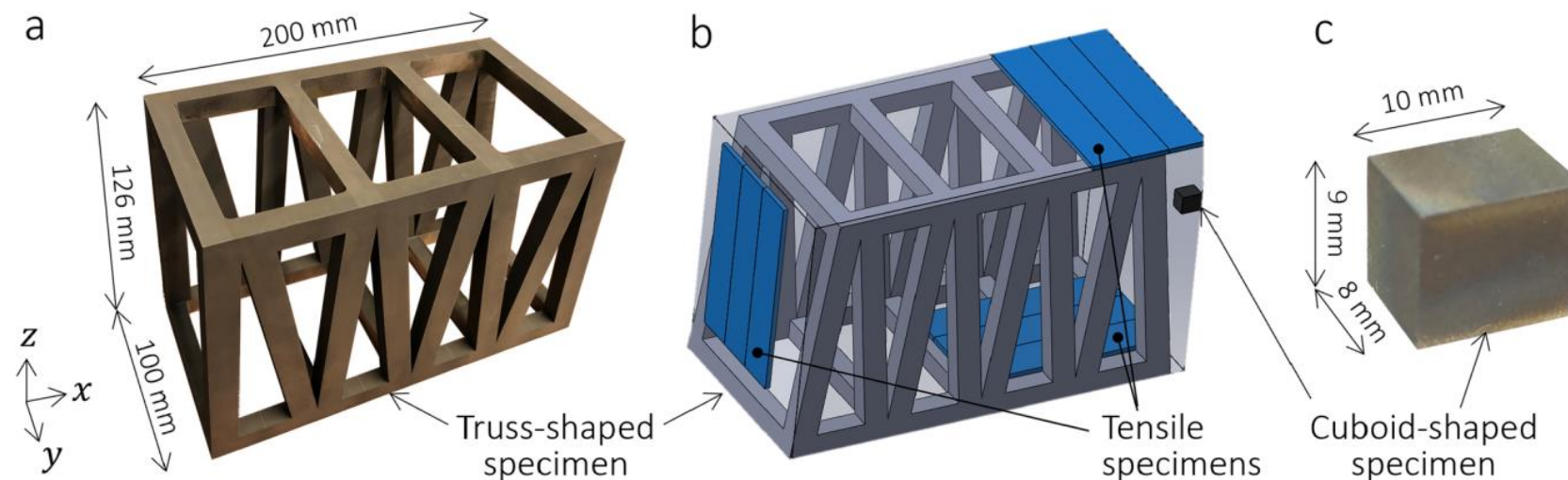


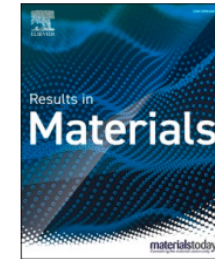
FIG. 1. (a) and (c) Images of the truss- and cuboid-shaped specimens employed in the vibration experiment. (b) Schematic of the locations where the three types of specimens were extracted from a single block of SUS304.



Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Results in Materials

journal homepage: www.sciencedirect.com/journal/results-in-materials



Determination of transverse isotropic elastic constants of nacre and constituent tablets based on genetic-algorithm-assisted resonant ultrasound spectroscopy

Go Yamamoto^{a,b,*}, Kazuma Matsui^a, Shuma Yuki^a, Ji Won Suk^{b,c,d}

^a Department of Aerospace Engineering, Tohoku University, 6-6-01 Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

^b School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 16419, Republic of Korea

^c SKKU Advanced Institute of Nanotechnology (SAINT), Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Republic of Korea

^d Department of Smart Fab. Technology, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Republic of Korea

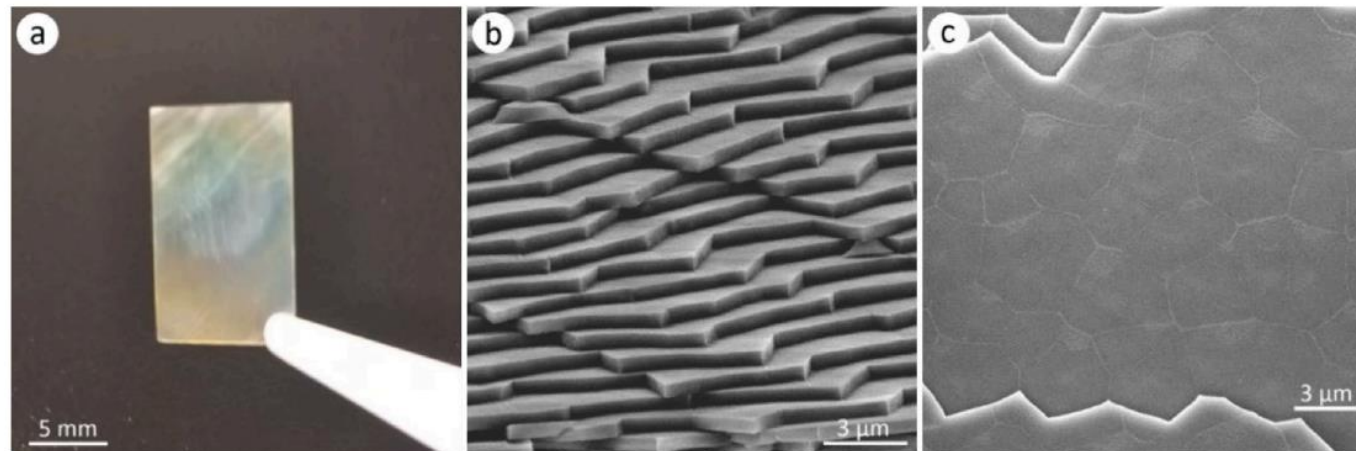
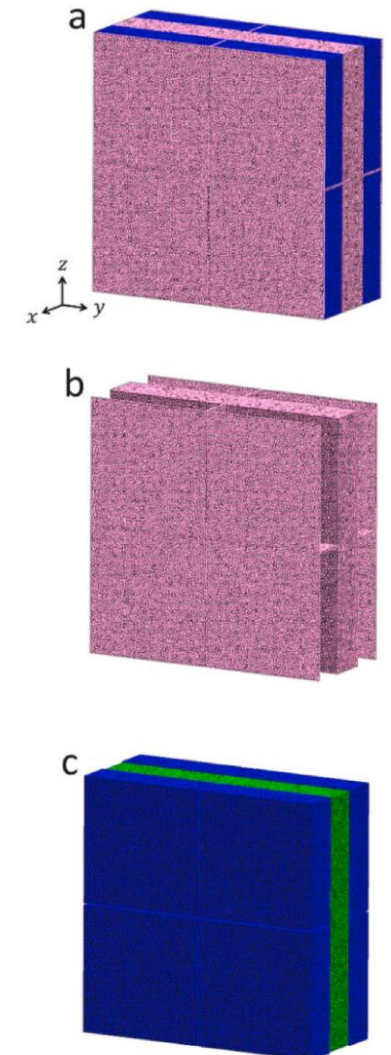


Fig. 1. (a) Photograph of the nacre sample subjected to vibration testing. (b,c) Electron microscope images of nacre fracture surfaces showing the lamellar structure consisting of polygonal tablets and thin interlayers.



実用化に向けた課題

- さらなる計測時間短縮のために、参照共鳴周波数の数をどの程度減らすことができるか？
(一般的な経験則：未知数の4~5倍)
- 粘弾性特性を有する試料の計測精度検証
(炭素繊維強化プラスチックなど)
- 安価な計測システムの構築
(ドップラー振動計、有限要素解析ソフトウェア)

企業への期待

本研究は、企業との知識の相互補完なしでは目的を達成することができないものです。我々は企業のneedsを知ることにより真に解決すべき課題が明らかになり、企業は、真に革新的な技術を創出するために必要な新概念や指導原理を開発研究に取り入れることができるようになります。

ご興味を持って頂けましたらご連絡お願い致します。

一緒に研究開発ができることを楽しみにしております。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 情報処理装置、システム、プログラム、提示方法
- 出願番号 : PCT/JP203/33939
(優先基礎 : 特願2022-151871)
- 公開番号 : WO2024/063053
- 出願人 : 東北大学
- 発明者 : 山本剛、結城秀麻、作田祐人

産学連携の経歴

- 2021年-現在 A社と共同研究実施
(CNT紡績糸の水素タンク補強材利用)
- 2021年-2023年 NEDO官民による若手研究者発掘支援事業に採択
(形状制約のない力学的異方性材料の簡易な弾性定数計測手法の開発)
- 2024年-現在 B研究所と共同研究実施
(一方向炭素繊維複合材料の引張強度予測モデル)

お問い合わせ先

東北大学

産学連携機構 ワンストップ窓口

問い合わせフォーム

<https://www.rpip.tohoku.ac.jp/jp/aboutus/form>

TEL 0 2 2 - 7 9 5 - 5 2 7 5

FAX 0 2 2 - 7 9 5 - 5 2 8 6