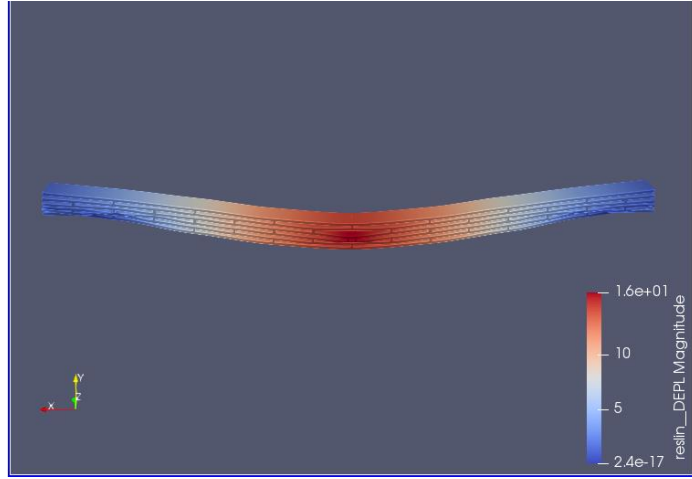
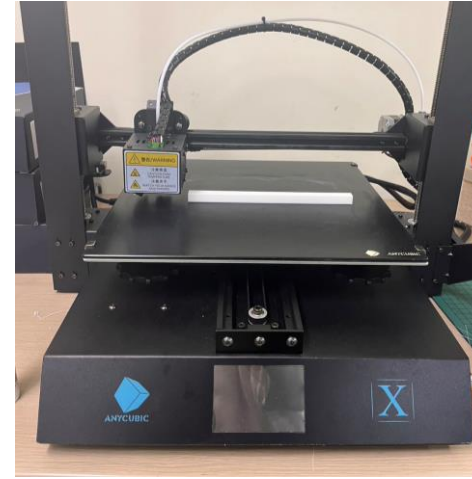


# 3Dプリンタを用いてせん断変形能を再現した異方性材料の試作

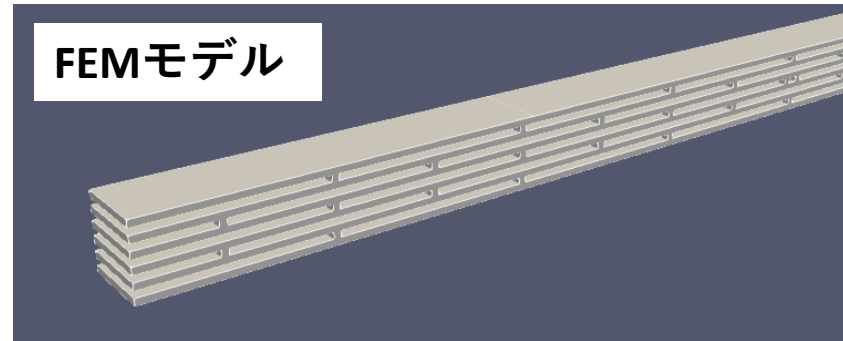
7019555 柴田桜花



3Dモデリングツール  
↓  
オープンソース化



3Dプリンタ  
↓  
安価に



そのまま印刷

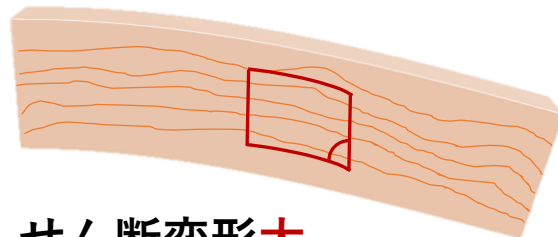
実験で検証  
FEMの精度検証



実験

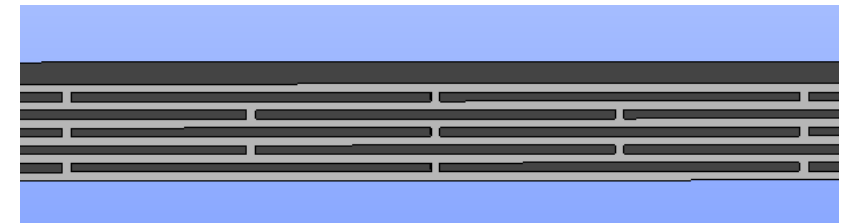
等方性なら簡単

異方性は??



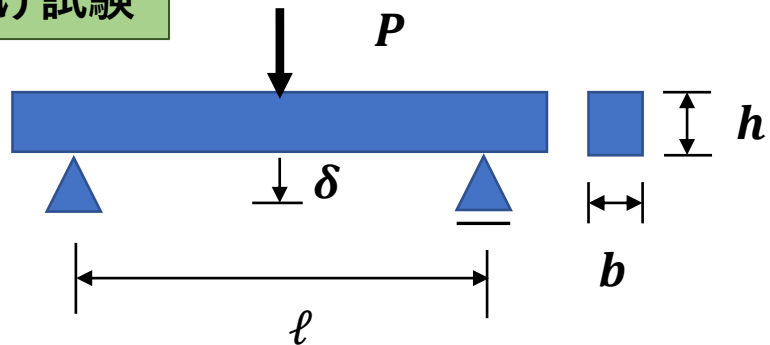
せん断変形大

ミルフィーユ状に  
印刷して異方性を  
模擬できないか



# 曲げヤング率 $E_{\text{曲}}$ ・軸ヤング率 $E_{\text{軸}}$ ・せん断弾性係数 $G$ の算出

## 曲げ試験



$$\delta = \frac{P\ell^3}{48E_{\text{曲}}I} \quad E_{\text{曲}} \text{ が求まる}$$

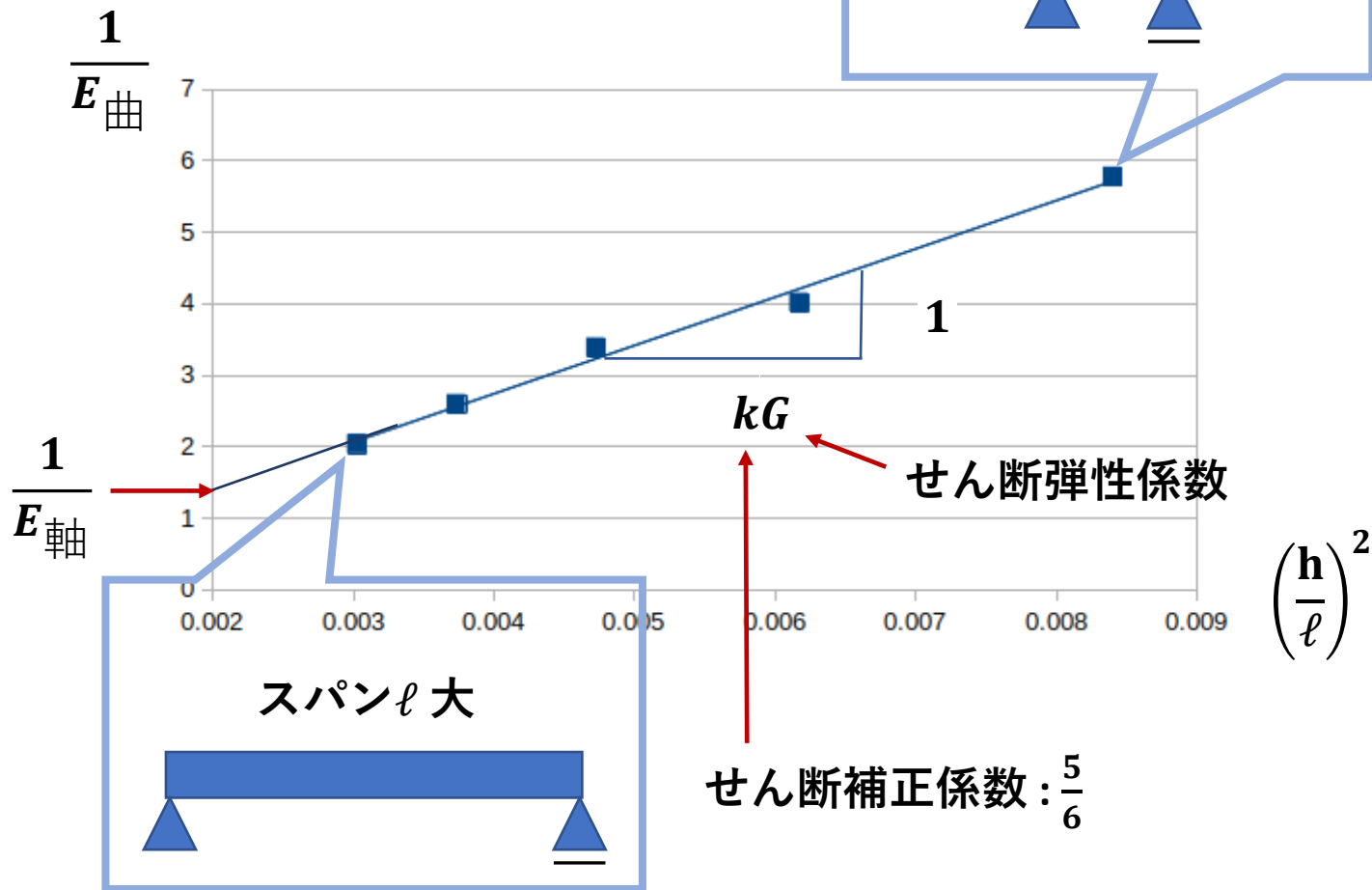
## ティモシェンコ梁のたわみ $\delta$ の公式

曲げたわみ    せん断たわみ

$$\delta = \frac{P\ell^3}{48E_{\text{軸}}I} + \frac{P\ell}{4kGA} = \frac{P\ell^3}{48E_{\text{曲}}I}$$

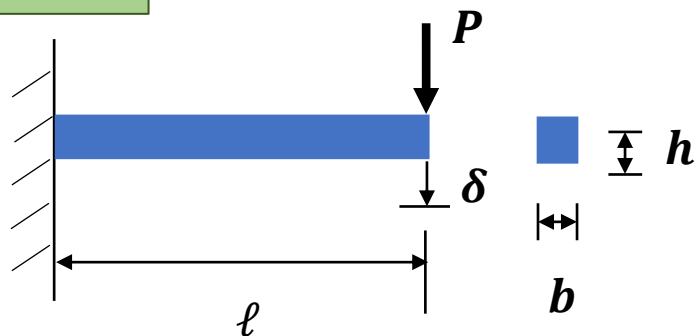
$$\longrightarrow \frac{1}{E_{\text{曲}}} = \frac{1}{E_{\text{軸}}} + \frac{1}{kG} \left( \frac{h}{\ell} \right)^2$$

## 曲げ試験シミュレーション



# Gの算定シミュレーション（鋼材の例）

## 曲げ試験



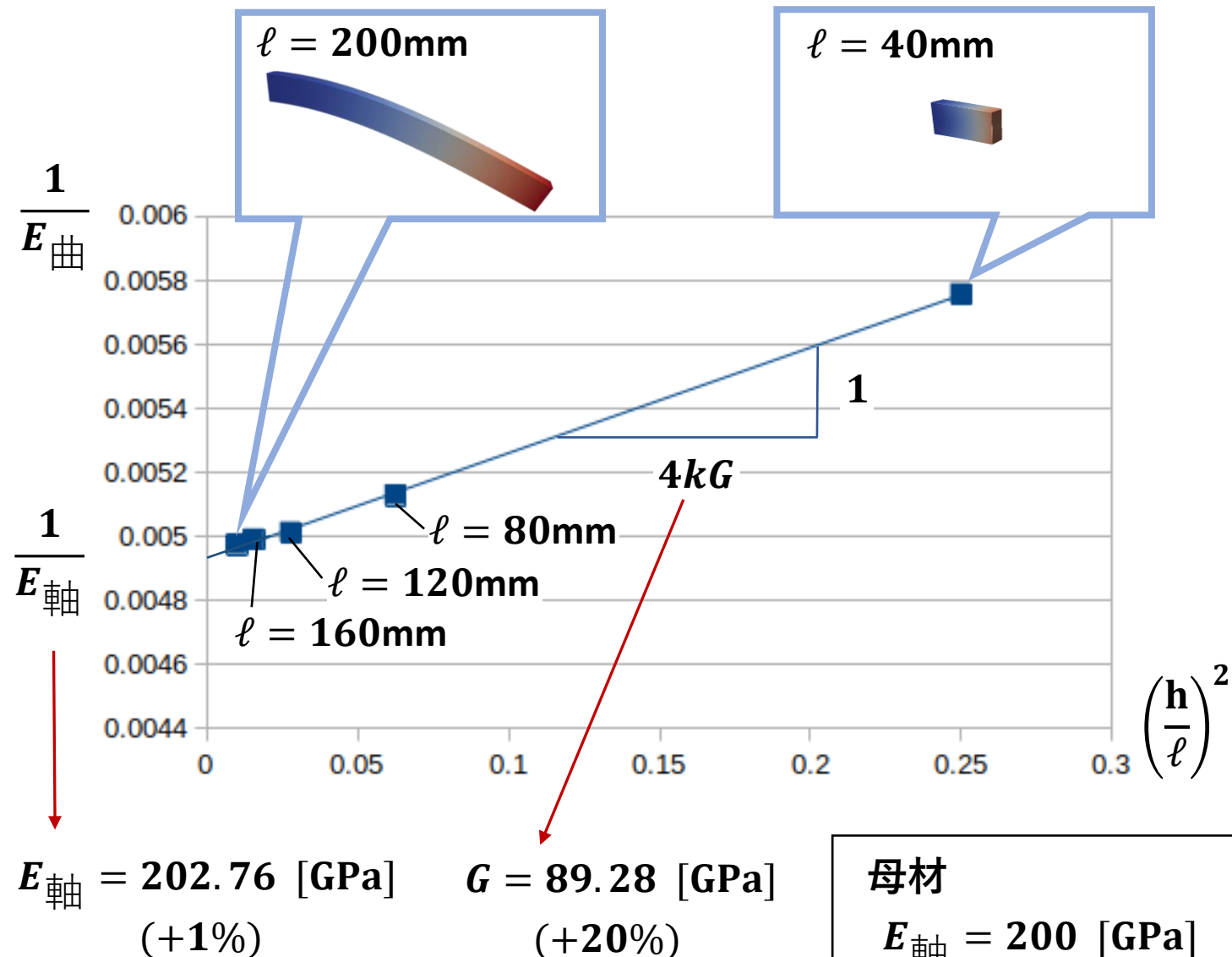
$$\delta = \frac{P\ell^3}{3E_{\text{曲}}I} \quad E_{\text{曲}} \text{ が求まる}$$

## ティモシェンコ梁のたわみ $\delta$ の公式

曲げたわみ    せん断たわみ

$$\delta = \frac{P\ell^3}{3E_{\text{軸}}I} + \frac{P\ell}{kGA} = \frac{P\ell^3}{3E_{\text{曲}}I}$$

$$\longrightarrow \frac{1}{E_{\text{曲}}} = \frac{1}{E_{\text{軸}}} + \frac{1}{4kG} \left( \frac{h}{\ell} \right)^2$$



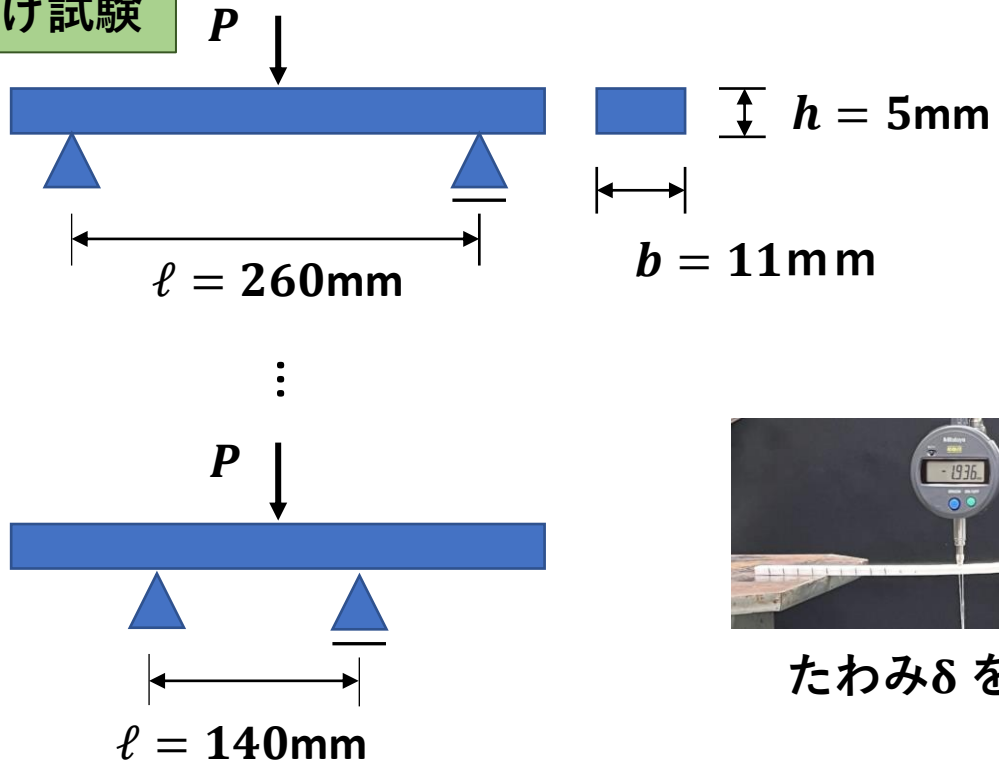
母材

$$E_{\text{軸}} = 200 \text{ [GPa]}$$

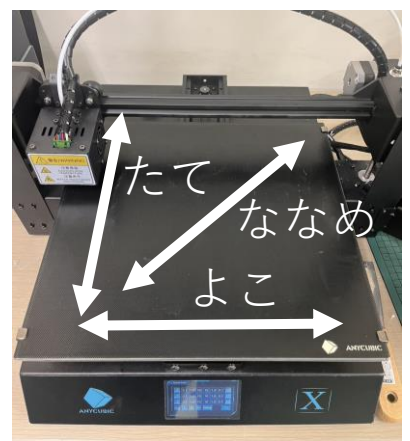
$$G = 75 \text{ [GPa]}$$

# 3Dプリンタ材料（母材）の材料試験

## 曲げ試験

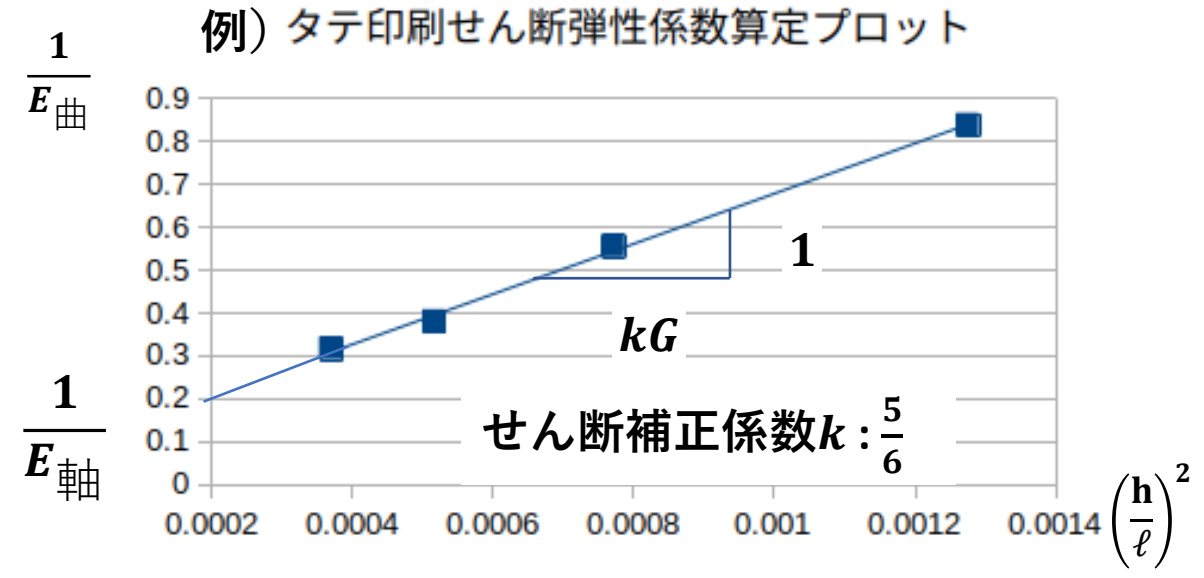


たわみ $\delta$ を測定



## ティモシェンコ梁のたわみ $\delta$ の公式

$$\delta = \frac{P\ell^3}{48E_{\text{軸}}I} + \frac{P\ell}{4kGA} = \frac{P\ell^3}{48E_{\text{曲}}I}$$
$$\longrightarrow \frac{1}{E_{\text{曲}}} = \frac{1}{E_{\text{軸}}} + \frac{1}{kG} \left(\frac{h}{\ell}\right)^2$$



3Dプリンタ材料（母材）

$E_{\text{軸}} = \begin{cases} 10.77 \text{ GPa} & \text{たて} \\ 9.62 \text{ GPa} & \text{よこ} \\ 8.11 \text{ GPa} & \text{ななめ} \end{cases}$

$G = \begin{cases} 20.49 \text{ MPa} & \text{たて} \\ 24.13 \text{ MPa} & \text{よこ} \\ 26.78 \text{ MPa} & \text{ななめ} \end{cases}$

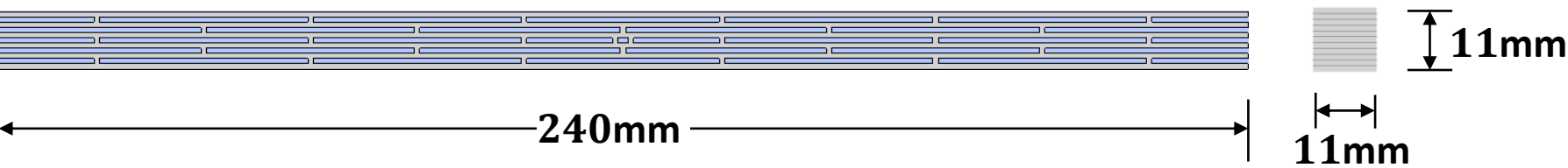
$G = \frac{E}{5000}$

等方性  $G = \frac{E}{3}$

不採用

母材の材料定数は不明だけど.....

# ミルフィーユ状のモデルで異方性を表現できるか

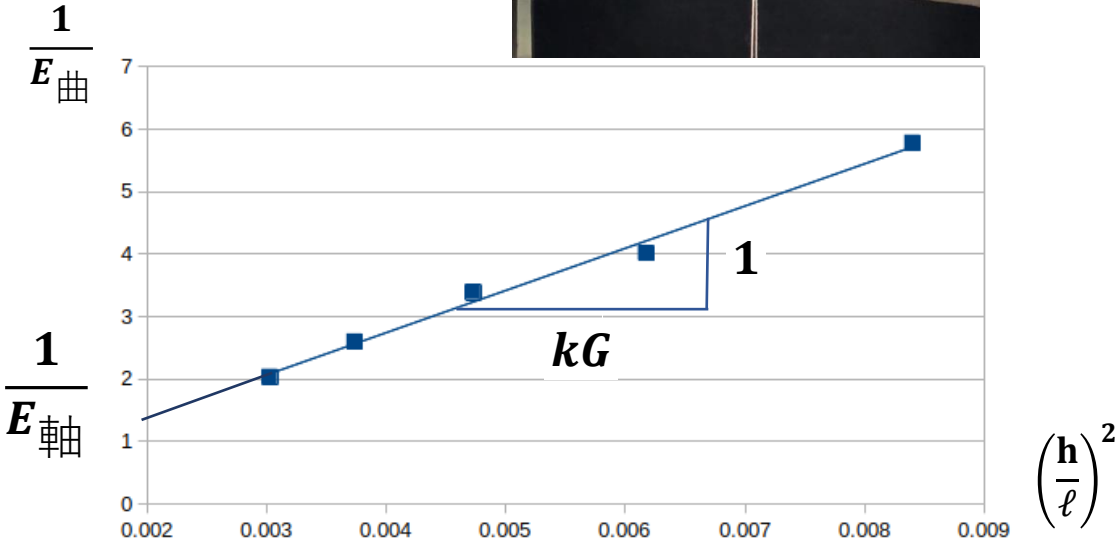


$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

等方性  $\frac{E}{3}$       木材  $\frac{E}{15 \sim 20}$

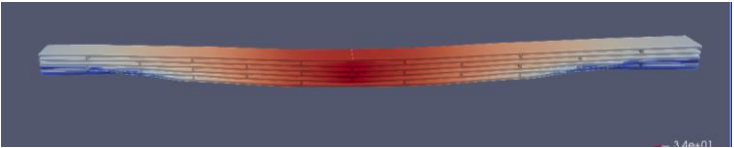
## 実物モデルの実験

せん断補正係数  $k : \frac{5}{6}$

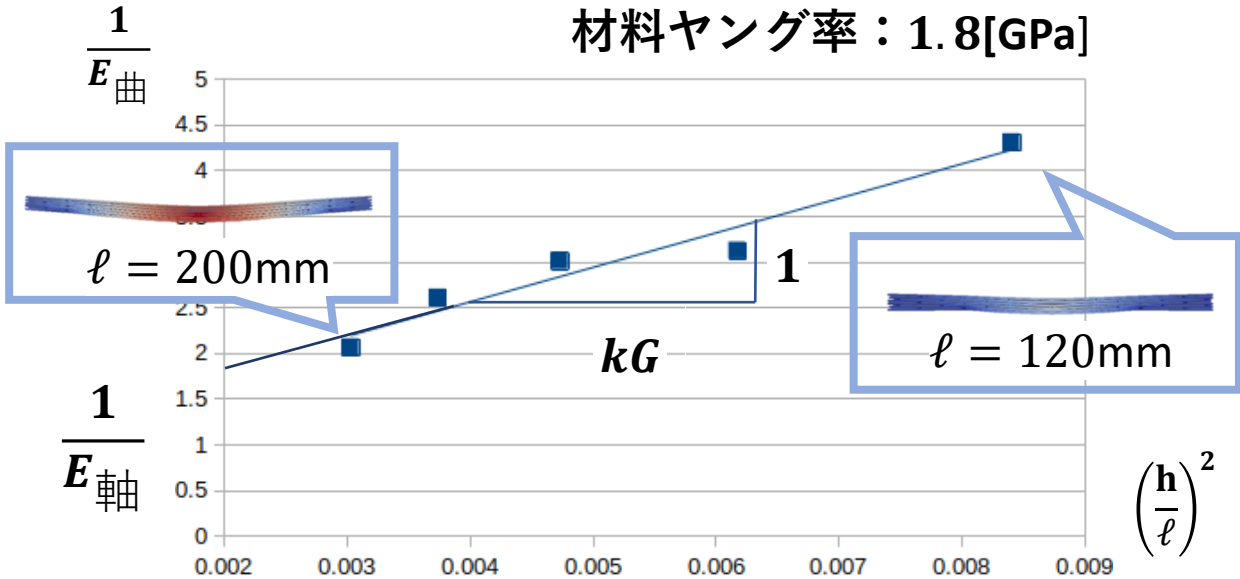


$$E_{\text{軸}} = 24.047 \text{ [GPa]}$$
$$G = 0.00178 \text{ [GPa]} \rightarrow G = \frac{E}{13500}$$

## 数値解析



材料ヤング率 : 1.8[GPa]



$$E_{\text{軸}} = 0.943 \text{ [GPa]}$$
$$G = 0.00318 \text{ [GPa]} \rightarrow G = \frac{E}{300}$$

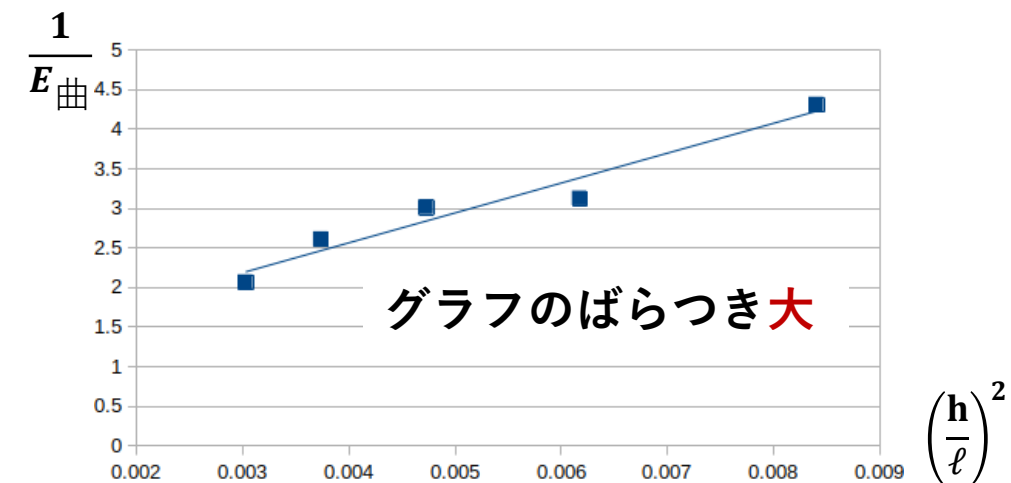
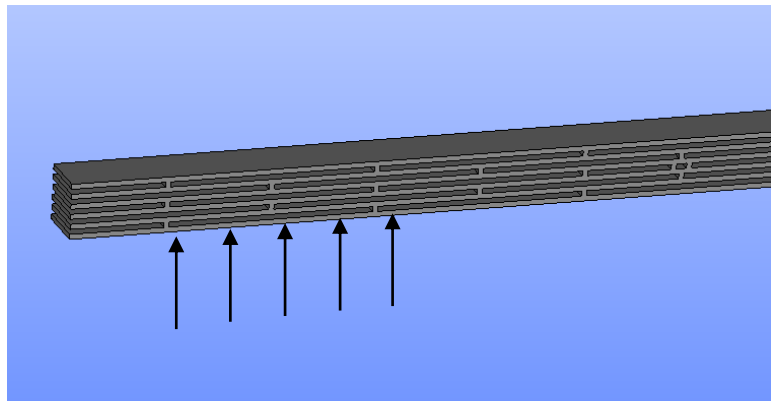
せん断変形する  
モデルが作れた

グラフのばらつき仕切り位置と支点の問題？

## 格子状のモデルで検証

ミルフィーユモデル

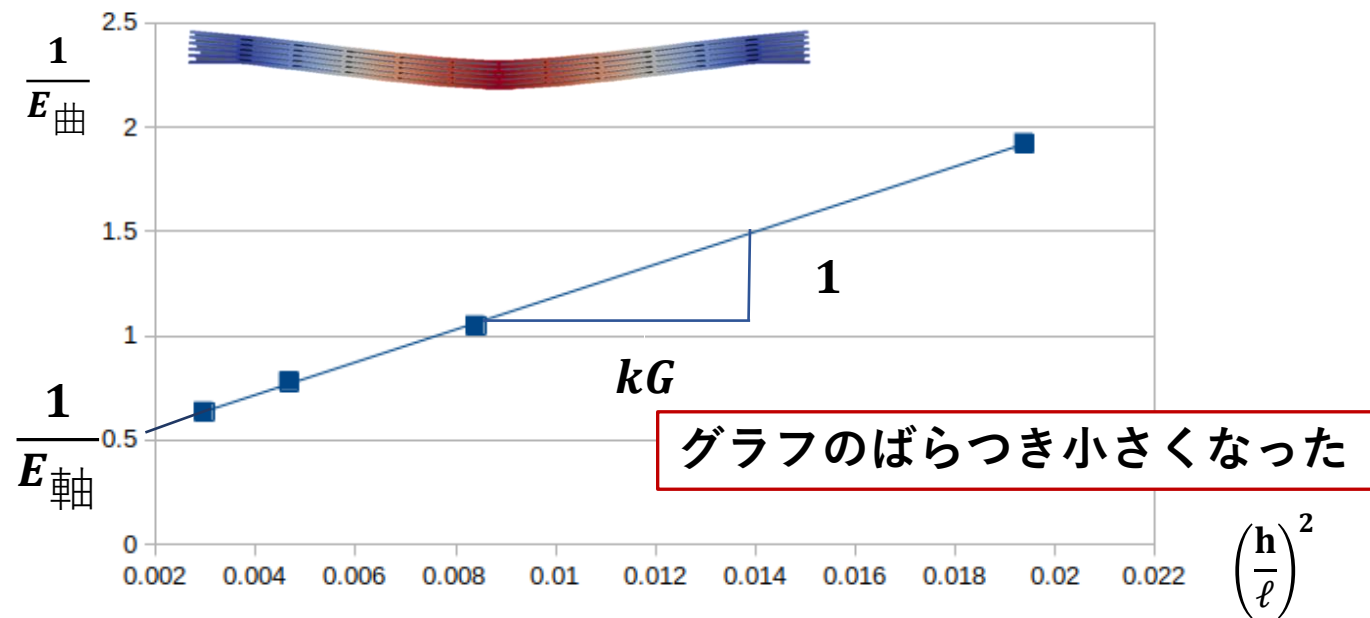
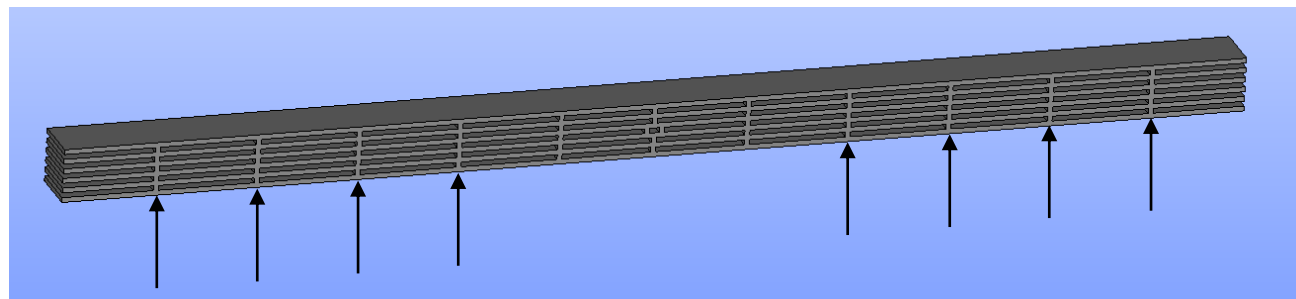
仕切り位置と支点がばらばら



数値解析

格子モデル

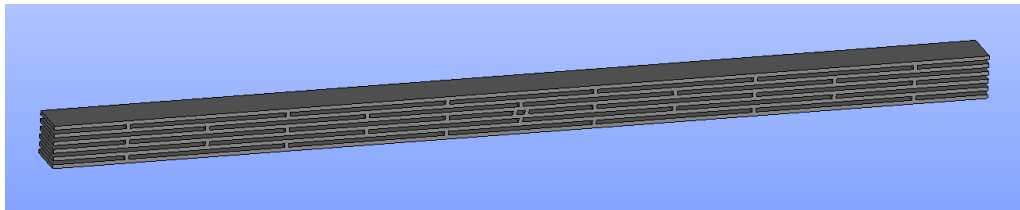
仕切り位置に支点を設ける



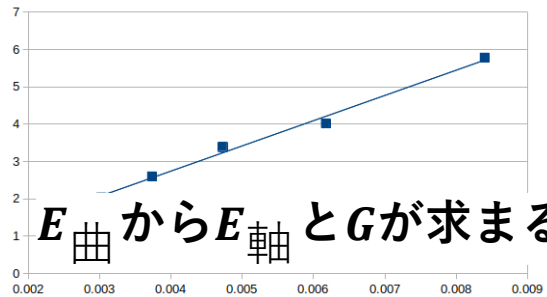
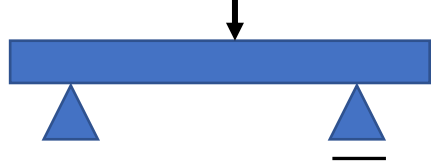
$$E_{\text{軸}} = 2.474 \text{ [GPa]} \rightarrow G = \frac{E}{160}$$
$$G = 0.0154 \text{ [GPa]}$$

# まとめ

ミルフィーユ状モデルで異方性材料を模擬

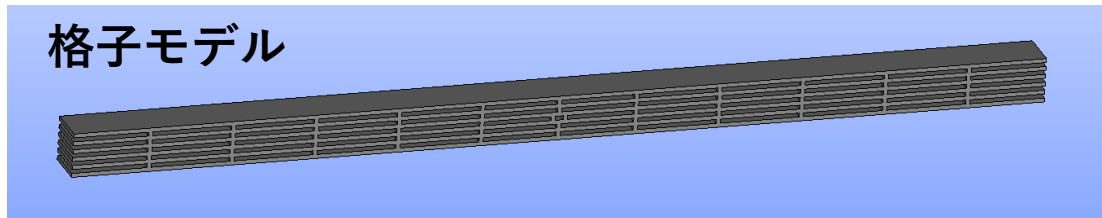


曲げ試験



グラフのばらつきの改善

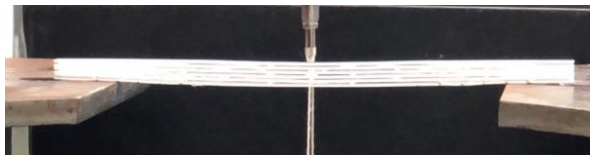
格子モデル



仕切り位置に支点で曲げ試験

→ グラフのばらつき小さく

実物モデルの実験

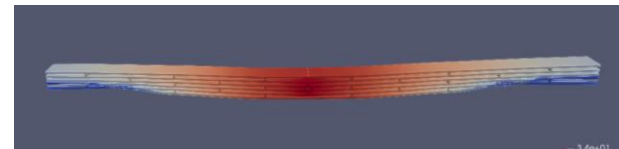


$$E_{\text{軸}} = 24.047 \text{ [GPa]}$$

$$G = 0.00178 \text{ [GPa]}$$

精度悪い

数値解析

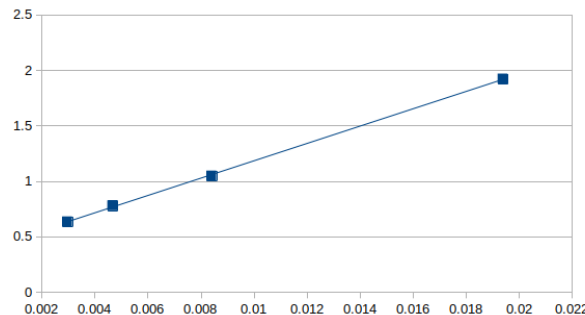


$$E_{\text{軸}} = 0.943 \text{ [GPa]}$$

$$G = 0.00318 \text{ [GPa]}$$

せん断変形する  
モデルが作れた

3Dプリンタで異方性材料の模擬 → 十分可能ではないか



$$E_{\text{軸}} = 2.474 \text{ [GPa]}$$

$$G = 0.0154 \text{ [GPa]}$$

課題

- ・ 実験精度の向上
- ・ 試験体のデザイン



## 参考文献

後藤文彦・麓貴行・薄木征三・佐々木貴信：

曲げ試験による木材梁のせん断弾性係数推定の精度、土木学会、2003

## アメリカ材料試験協会の基準（ASTM D198）

梁の曲げ試験で得られる梁長と曲げヤング率の関係から、せん断補正係数 $k$ を用いて木材のせん断弾性係数を推定する方法を提案しており、ねじり試験より簡単に行えるため、せん断弾性係数の推定に多く用いられている。

## 3Dプリンタ材料：PLA（ポリ乳酸）

再生可能資源で作られたバイオプラスチックでエコ素材として近年注目  
農業用マルチシートやハウス用フィルム、自動車の内装材として使われる。

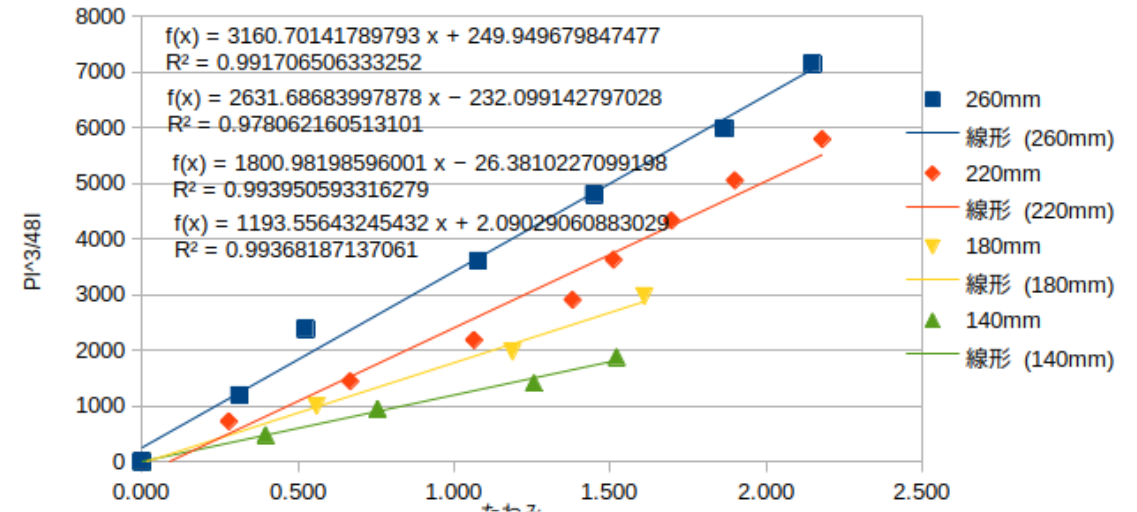
引張弾性率 3500MPa（射出成型グレードの一例）

## せん断補正係数 $k$

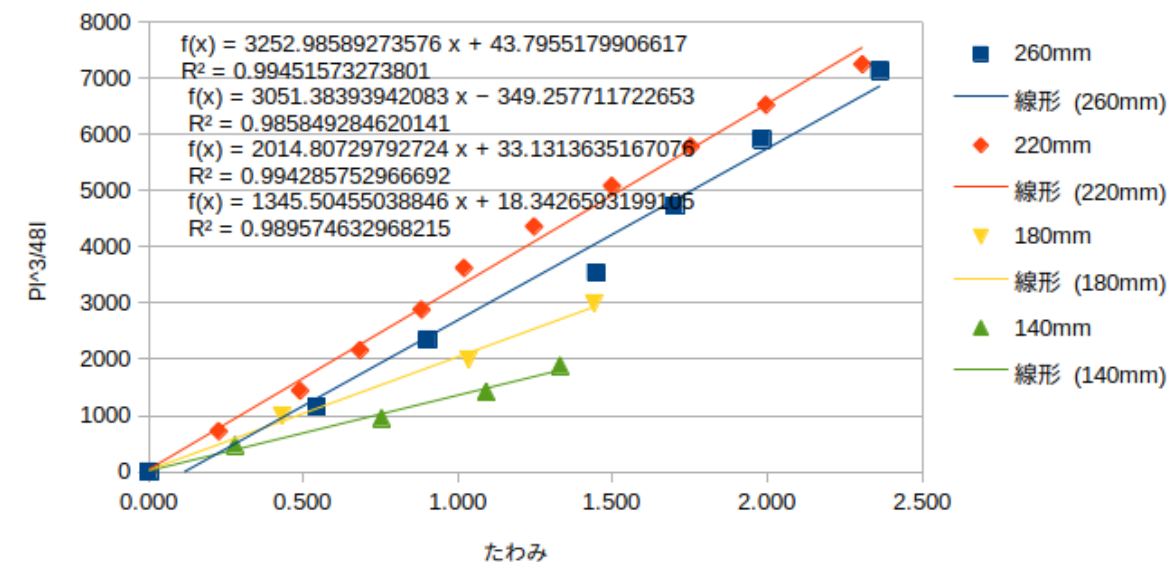
$$k = \frac{10(1 + \nu)}{12 + 11\nu} \cong \frac{5}{6} \quad \nu=0 \text{ とおく}$$

# 材料試験の曲げヤング率算定プロット

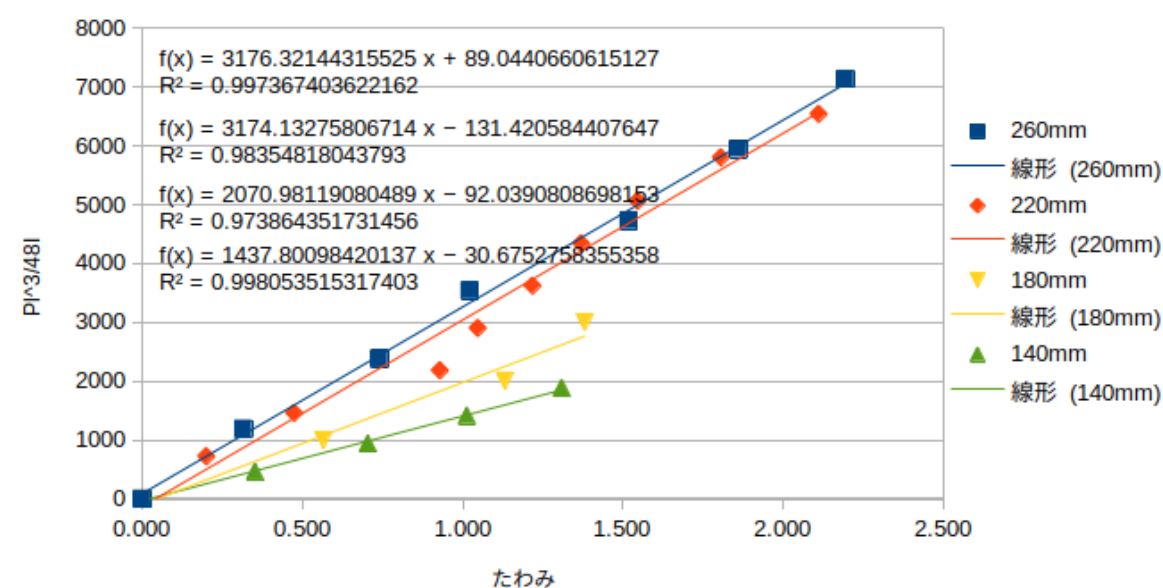
タテ印刷ヤング率



ヨコ印刷ヤング率



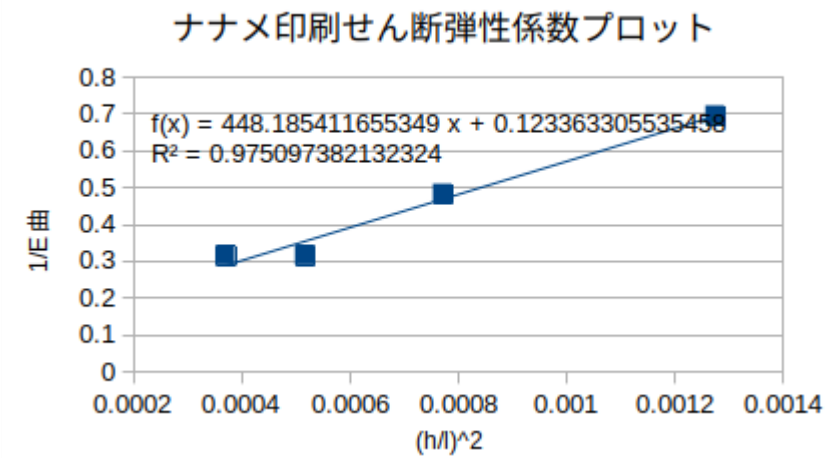
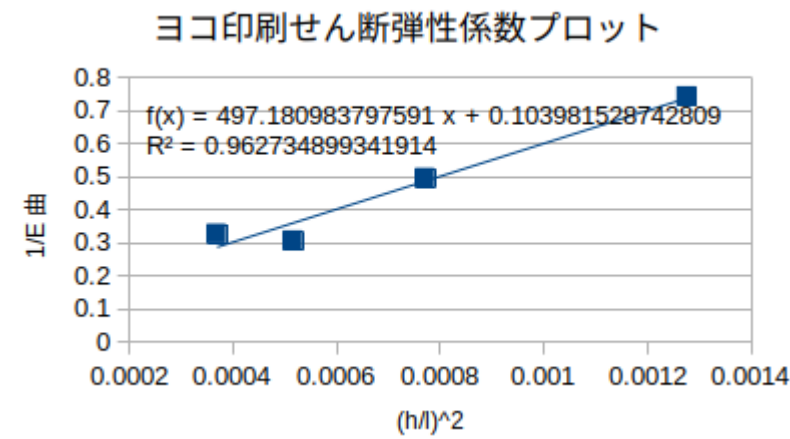
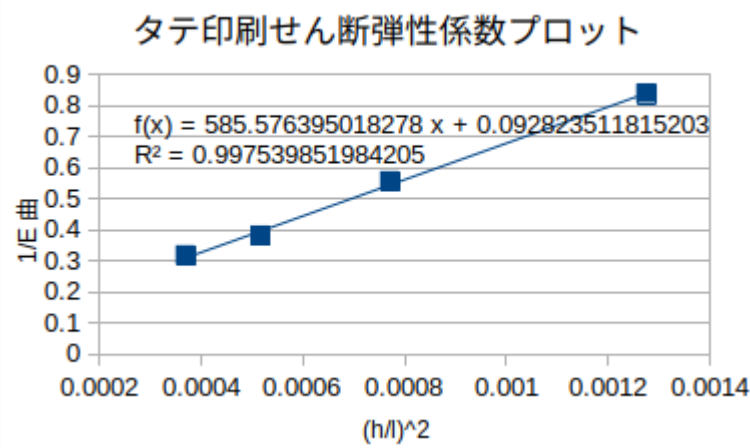
ナナメ印刷ヤング率



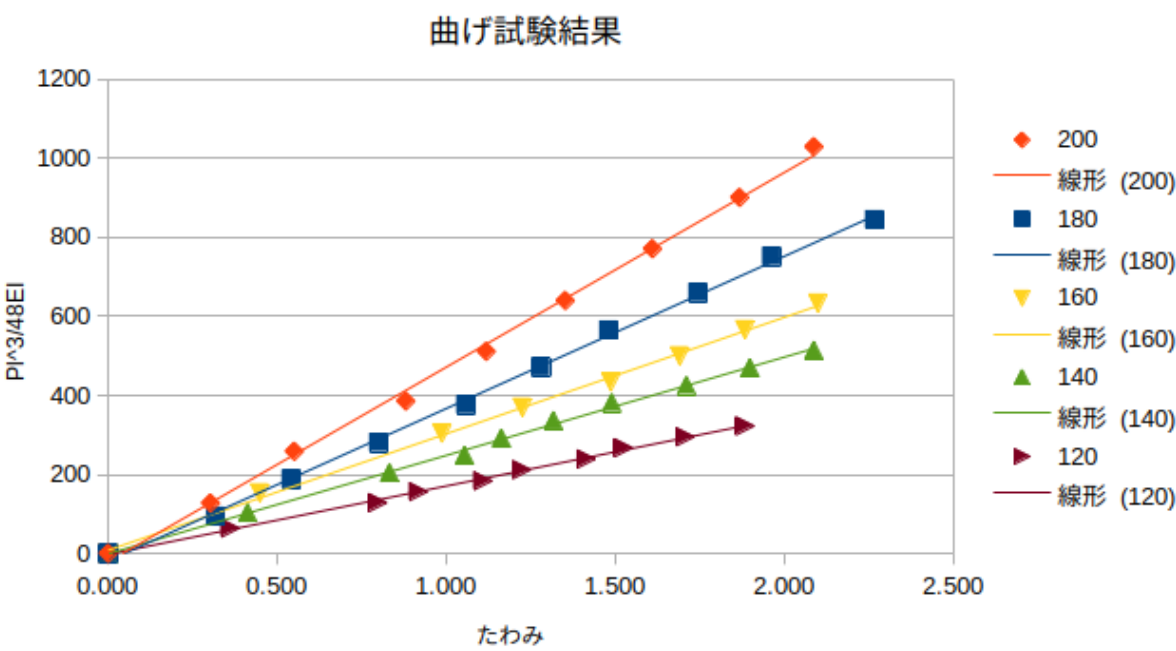
曲げヤング率 E[GPa]

|           | タテ    | ヨコ    | ナナメ   |
|-----------|-------|-------|-------|
| スパン 260mm | 3.161 | 3.051 | 3.176 |
| スパン 220mm | 2.632 | 3.253 | 3.174 |
| スパン 180mm | 1.801 | 2.015 | 2.071 |
| スパン 140mm | 1.194 | 1.346 | 1.438 |

# 材料試験のせん断弾性係数算定プロット



# ミルフィーユ状モデル



## 実物モデル

| スパン $\ell$ [mm] | 曲げヤング率 $E$ [GPa] |
|-----------------|------------------|
| 200             | 0.492            |
| 180             | 0.385            |
| 160             | 0.295            |
| 140             | 0.249            |
| 120             | 0.173            |

## 数値解析

| スパン $\ell$ [mm] | 曲げヤング率 $E$ [GPa] |
|-----------------|------------------|
| 200             | 0.483            |
| 180             | 0.382            |
| 160             | 0.332            |
| 140             | 0.320            |
| 120             | 0.231            |