

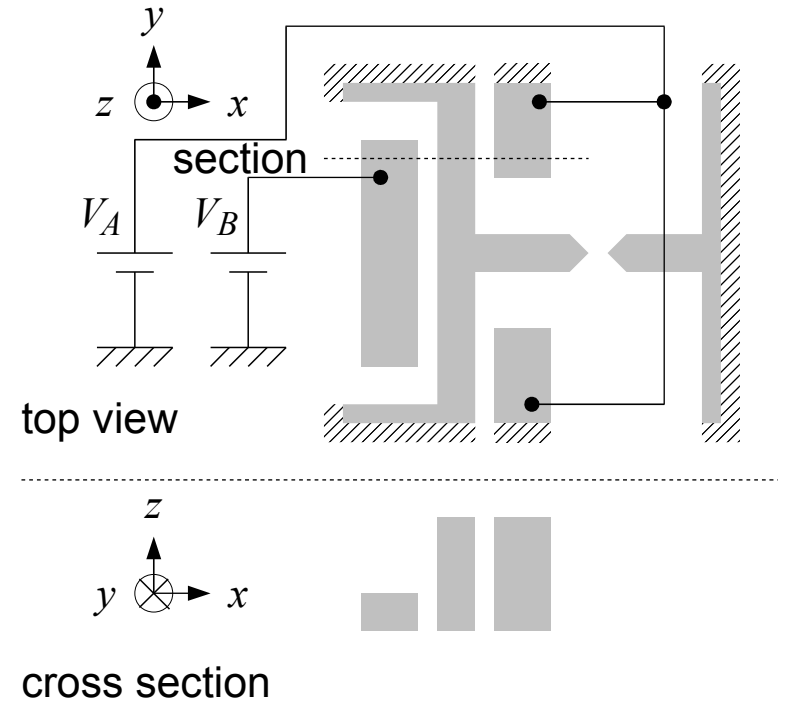
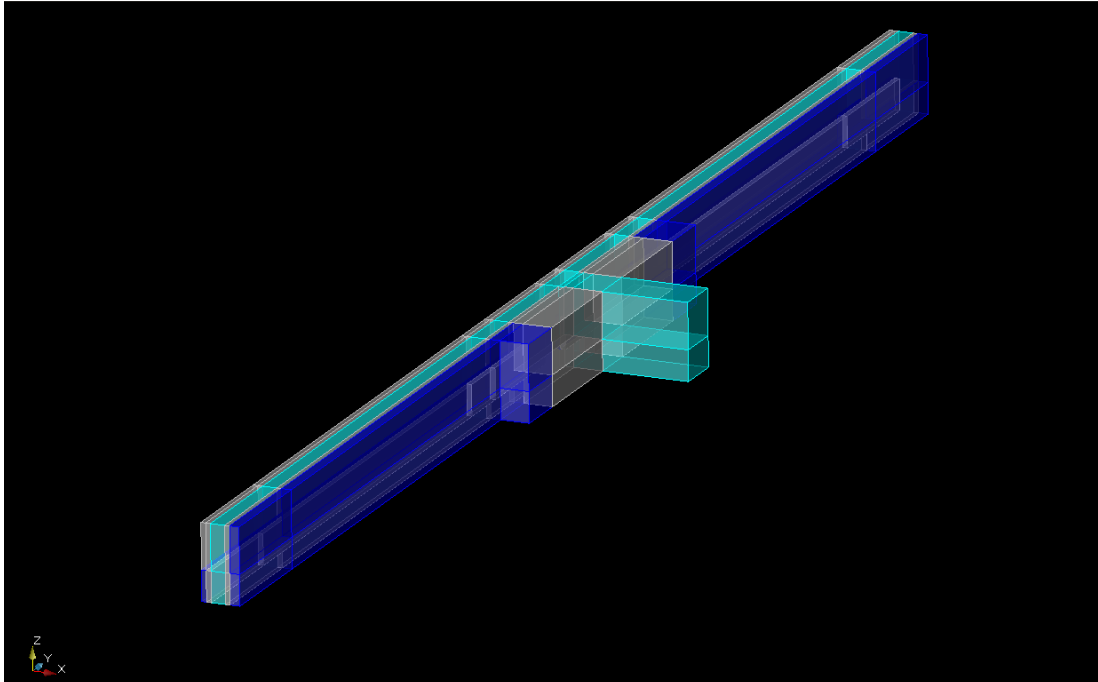
解析事例紹介

MemsONEによる 面内および面外の2自由度駆動を 実現する静電アクチュエータの シミュレーション

東京大学 生産技術研究所
藤田博之研究室

修士2年 岡田 利裕 Toshihiro Okada

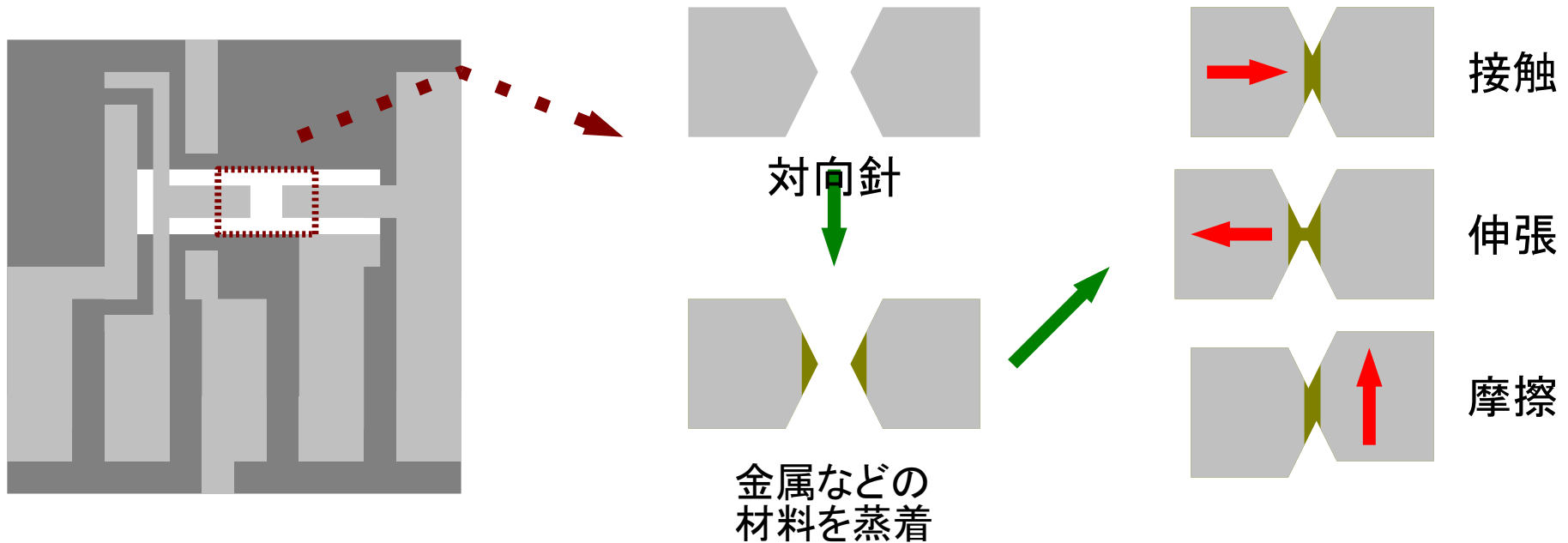
MEMSデバイスのモデル



梁の変形と同時に針が移動するMEMSデバイス

駆動電圧と針の先端の変位との関係を予測

MEMSデバイスの目的



針の先端に金、銀などの材料を蒸着
針どうしを接触、その後伸張、摩擦などを与えたときの
材料の挙動を原子レベルでリアルタイム観察

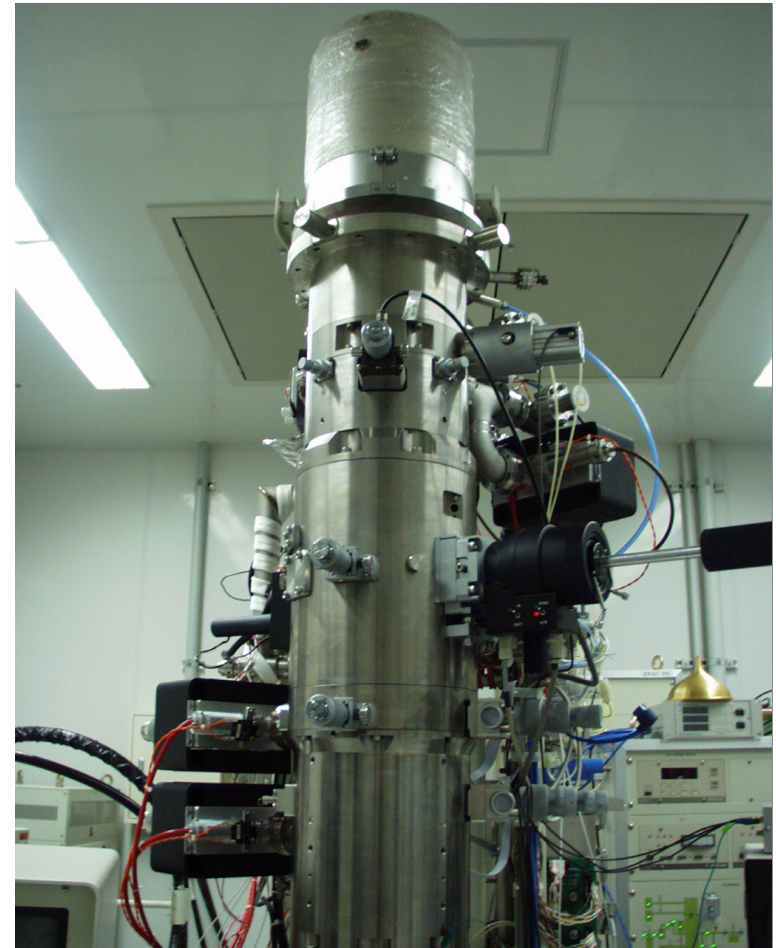
ナノスケールでの材料の物性を知る

材料の観察手法

TEM

Transmission Electron
Microscope
透過(型)電子顕微鏡

ナノスケール、
原子レベルの分解能
情報をTEM像として
一度に取得可能
...走査型顕微鏡では
両立できない



当研究室の保有する
TEM装置

MEMSとTEMの融合

TEMの特長

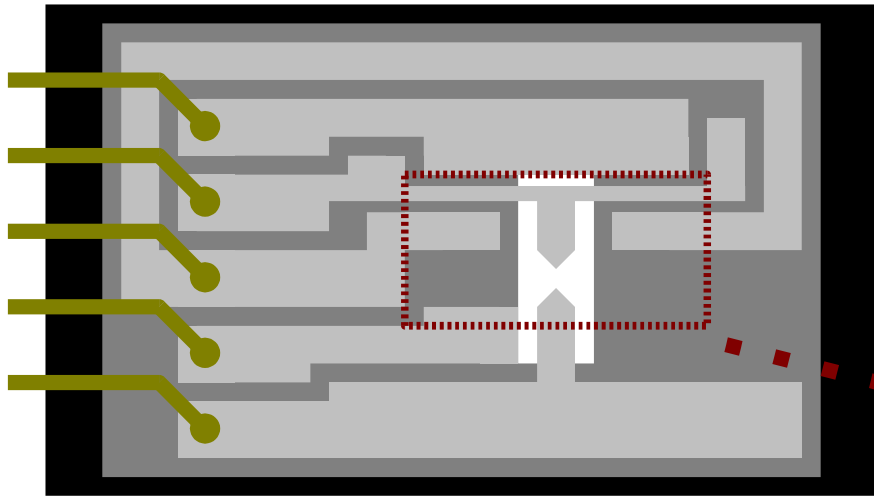
ナノスケール、原子レベルで
材料のリアルタイム観察が可能

こうしたTEMの特長を活かすシステム...
材料に機械的動作を与える微細なシステム

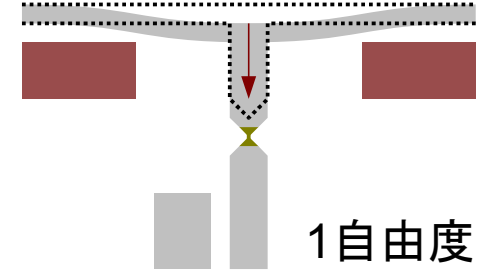
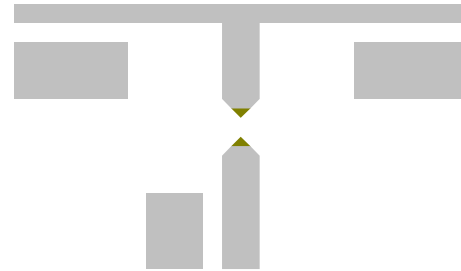


MEMS Micro Electro Mechanical Systems

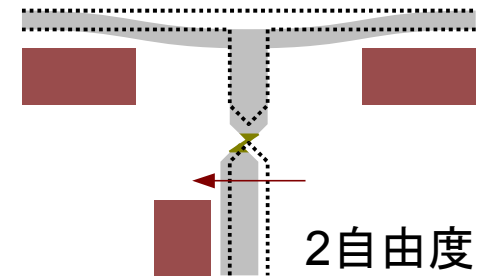
TEM観察用MEMSデバイス



TEMの試料ホルダに装着されたMEMSデバイス



1自由度

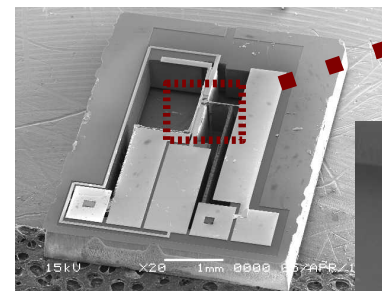


2自由度

SOI基板を加工
デバイス層を
導体として利用

材料を蒸着する針を備える
針を支える梁を静電引力で駆動

デバイスのサイズ 数mm四方
試料ホルダに装着可能

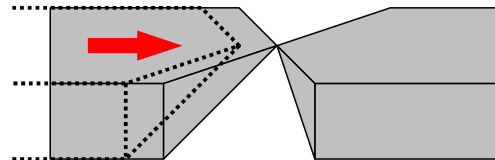
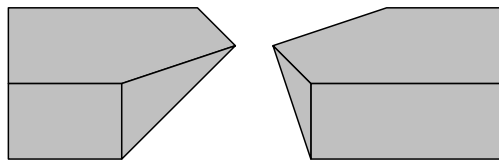


TEM用MEMSデバイスの問題点

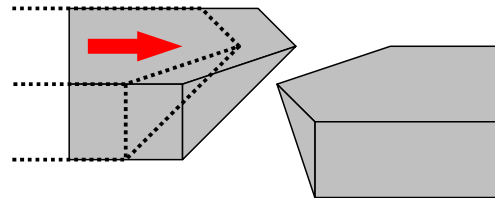
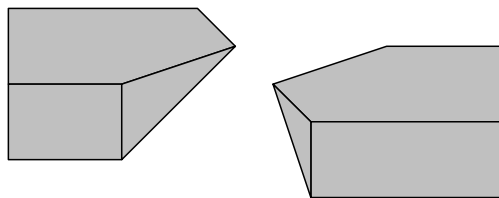
駆動前

駆動後

TEM像 違いがない



接触している
電流が流れる
成功

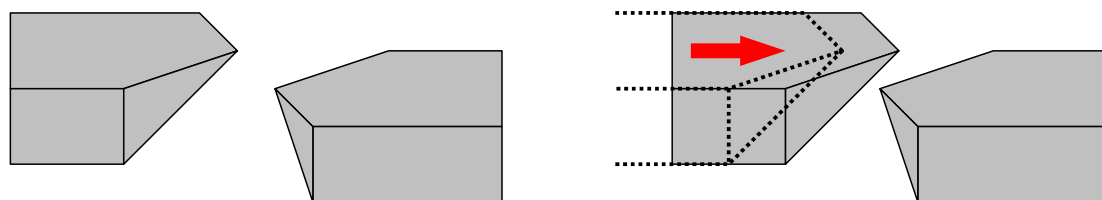


接触していない
電流が流れない
失敗

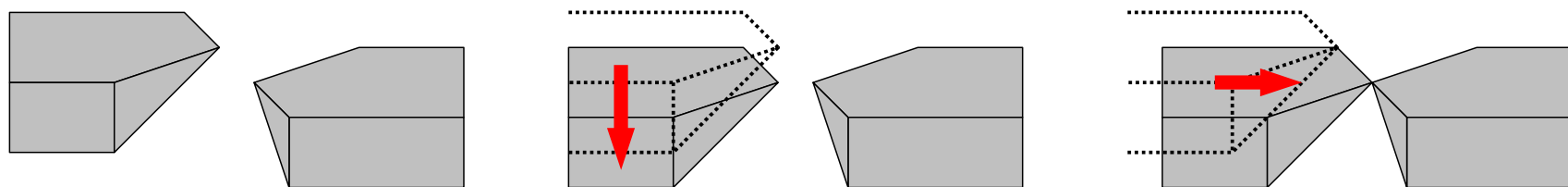
接触点が隠れていると観察不能
歩留まりが非常に低い 1%程度の場合も

30nm 程度のずれで観察不能になるとされる
(当研究室の先行研究より)

問題点の解決方法



改良前

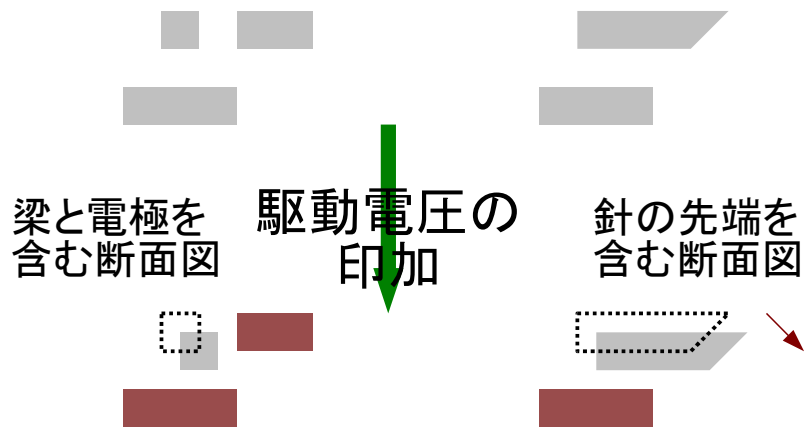


改良後

針を基板に垂直方向に駆動
面外方向に駆動するアクチュエータの追加

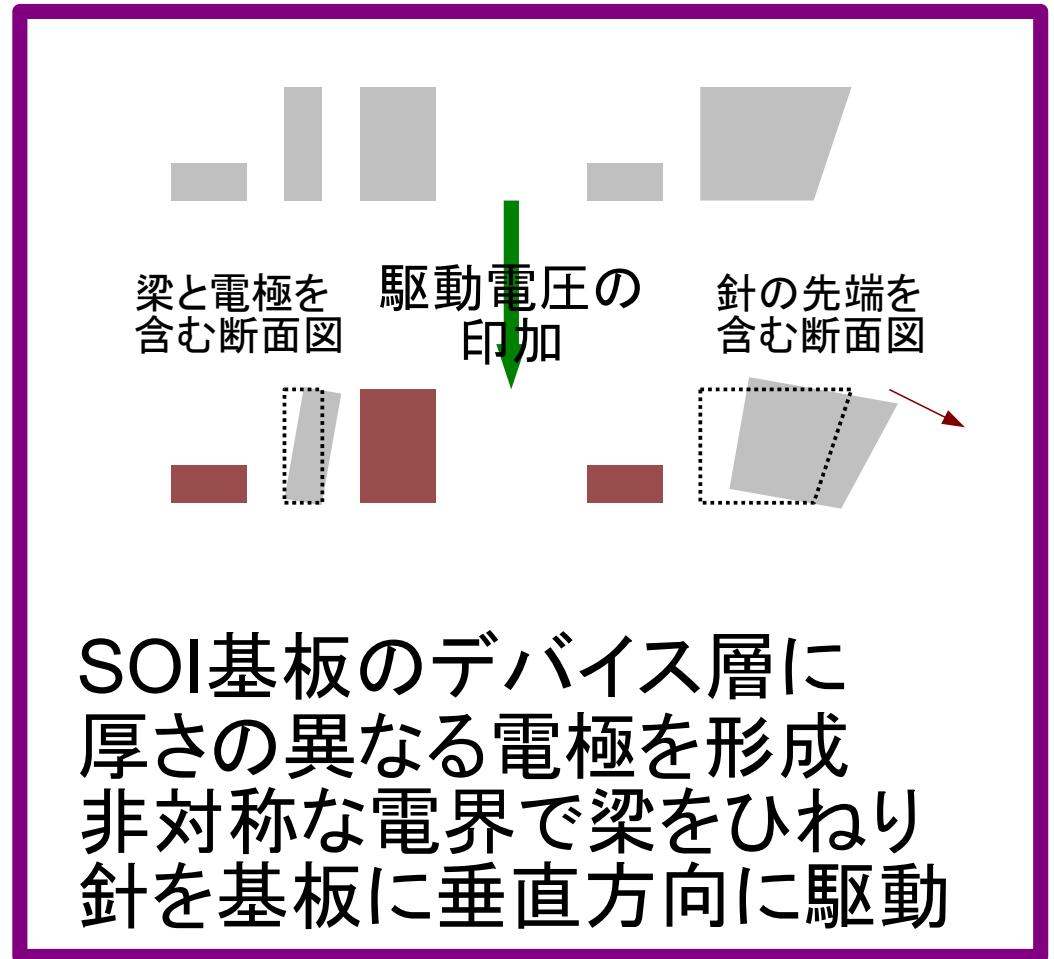
垂直方向のずれをTEM実験のときに補正

面外方向への駆動方法



SOI基板のハンドル層に
電極を形成
静電引力で直接梁と針を
基板に垂直方向に駆動

デバイス作製



SOI基板のデバイス層に
厚さの異なる電極を形成
非対称な電界で梁をひねり
針を基板に垂直方向に駆動

シミュレーション、
デバイス作製

デバイスの動作の予測

駆動電圧と針の先端の変位との関係を知る
面内、面外方向の駆動を独立して制御できないなか
どう操作するかの指針を立てる

電圧の印加 静電引力の発生 構造の弾性変形

ひねりについて理論から求めるのが難しい

MemsONEの

**「弾塑性解析と電界解析」の連成解析
を利用**

シミュレーションの手順

予備 連成解析

適当なメッシュ分割のもとで、応力集中部の場所や静電引力のおおよその値の見積もり

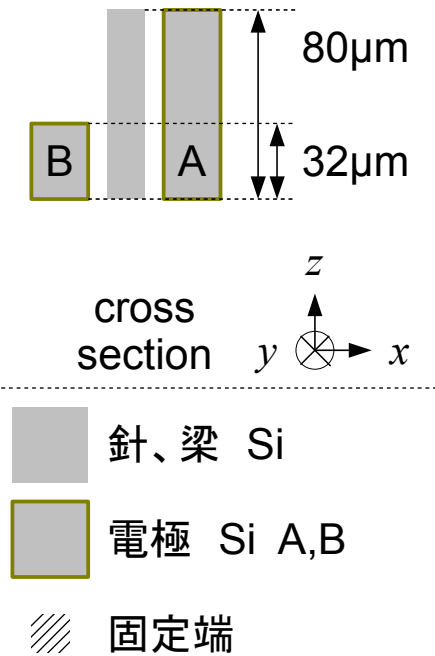
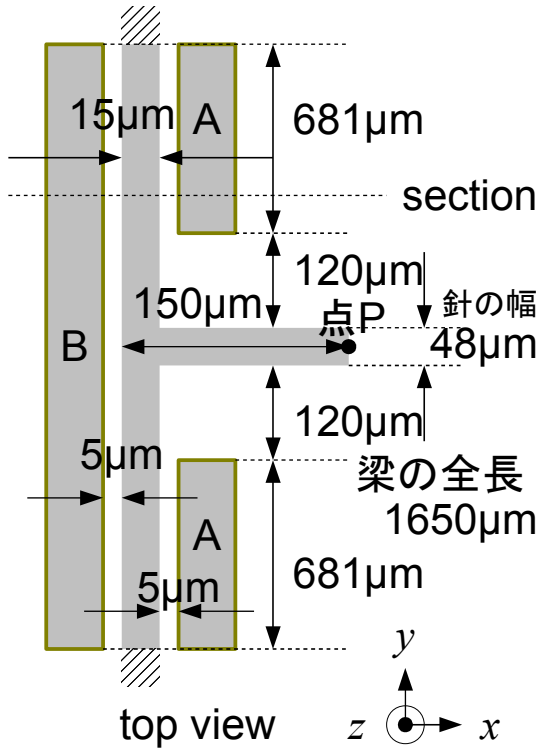
力学解析

梁に機械的に圧力を加えた場合の変形を予測
メッシュ分割の細かさを検討

連成解析

実際の構造に近い条件で予測

シミュレーションの条件



針の先端に相当する
点Pの変位

x成分 Δx

z成分 Δz

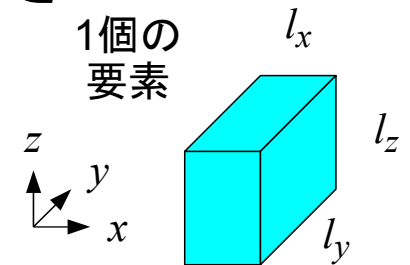
針の長さ方向 x 軸
梁の長さ方向 y 軸
基板の法線方向 z 軸

メッシュの大きさ

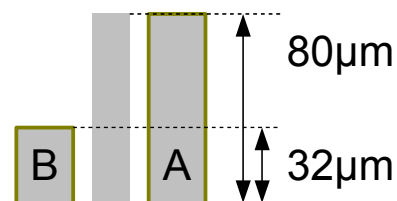
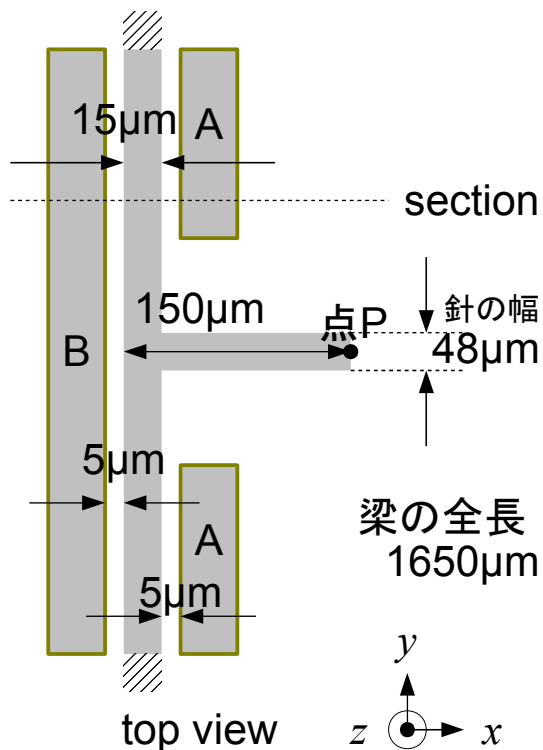
x 方向 l_x

y 方向 l_y

z 方向 l_z



予備解析



解析の条件

[メッシュの大きさ]

(梁) l_y 固定端付近 4μm

その他 10μm

l_x 1.5μm l_z 4μm

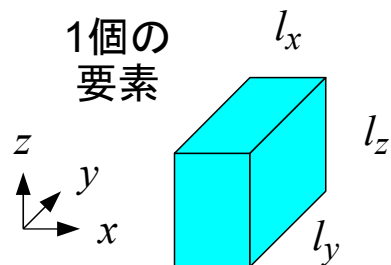
(空気) l_y, l_z 梁と同じ

l_x 1.5μm

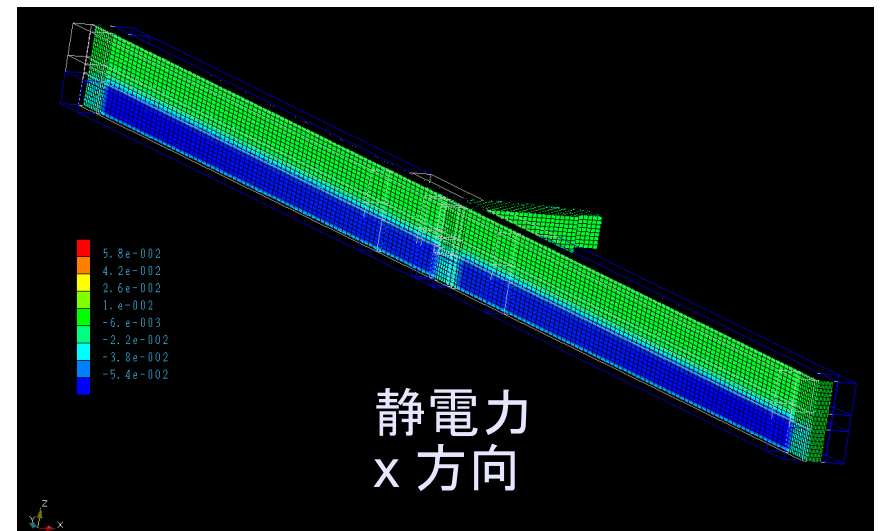
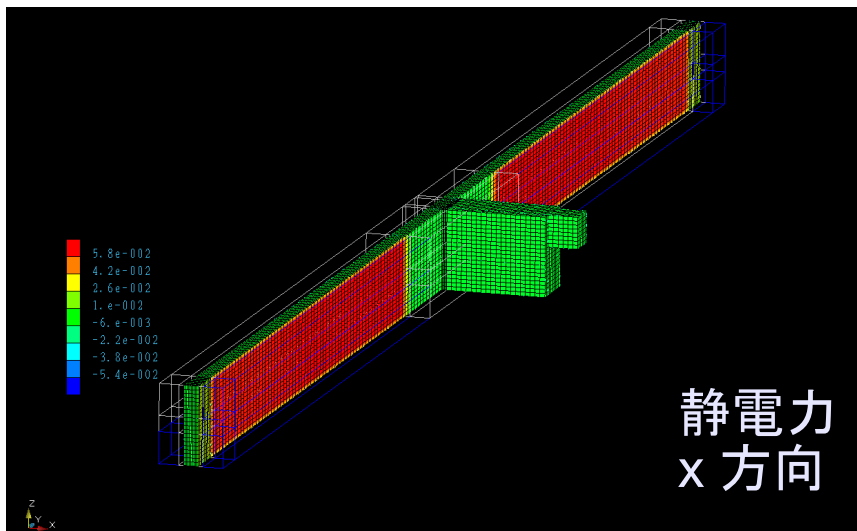
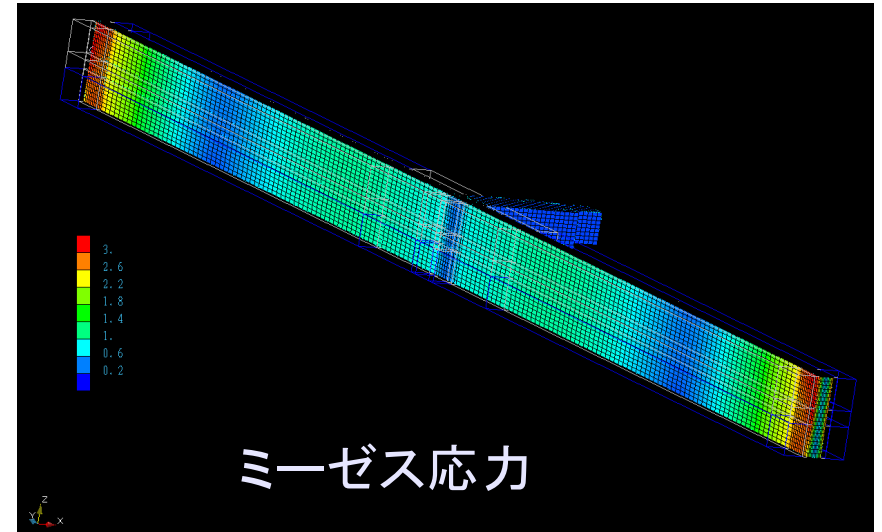
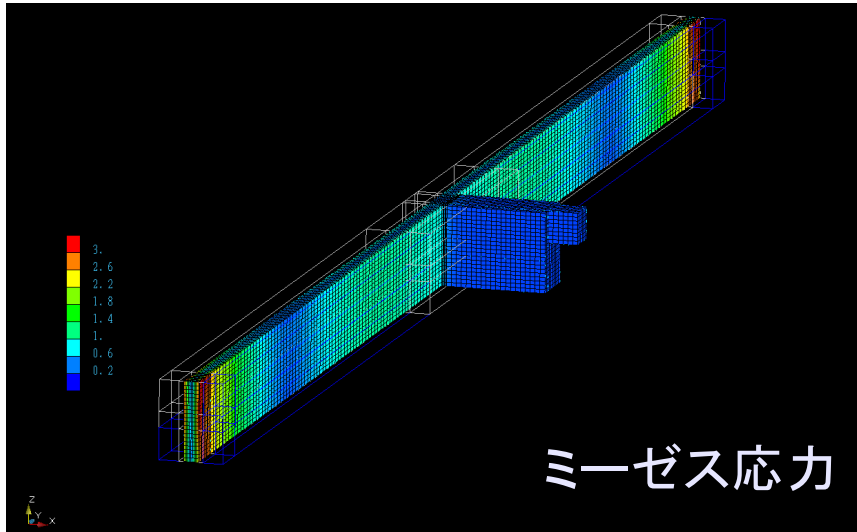
[駆動電圧]

電極A V_A 100V

電極B V_B 100V



予備解析の結果 画面



予備解析の結果 応力集中部

梁の固定端付近に最も応力が集中して
直感的なイメージと同じとなっていることを確認した

梁の中央付近もやや応力が集中する傾向が
見られることを確認した

その他空気層のメッシュ分割について
x方向のメッシュの大きさを変えても
ほとんど影響がないことを確認した

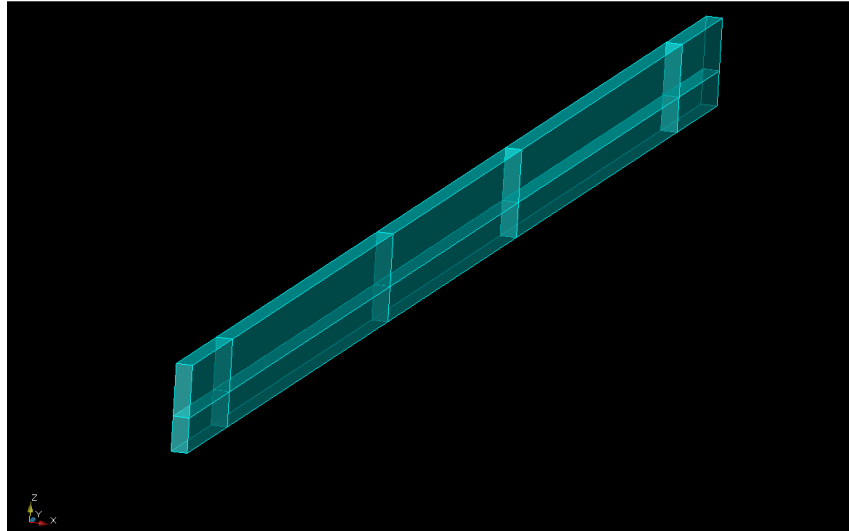
この予備解析の結果を以後のシミュレーションにおける
メッシュ分割の参考にする

予備解析の結果 静電引力

梁について 1要素あたり
電極A側の面 約75nN 電極B側の面 約70nN
の静電引力を受けていることが分かった

1要素について電極側と向かい合う面積は
約 $40\mu\text{m}^2$ であるから 梁が受ける静電引力は
電極A側の面 約1.80kPa 電極B側の面 約1.75kPa
として次のシミュレーションを行うことにする

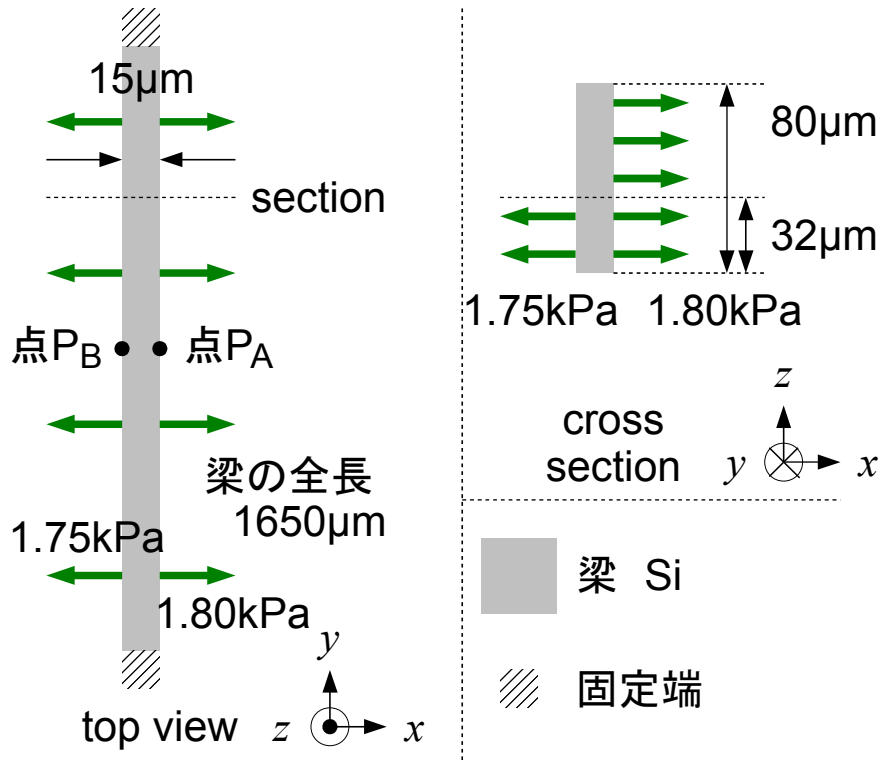
力学解析



「弾塑性変形」の「力学解析」を利用

メッシュの大きさと変形との関係を調べ、
連成解析における要素分割の参考にする

力学解析の条件



実際のデバイスのうち
梁の部分のみを
抽出したモデル

予備解析で得られた
静電引力に相当する
圧力を加える

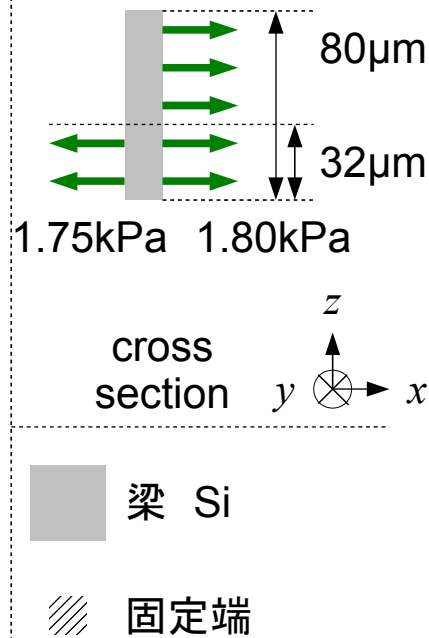
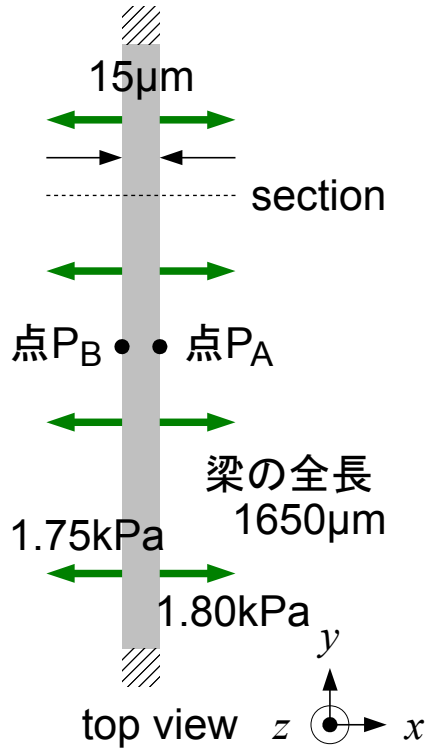
Δx 点P_Aの変位の x 成分

Δz_A 点P_Aの変位の z 成分

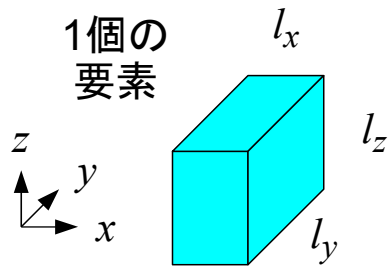
Δz_B 点P_Bの変位の z 成分

$$\Delta z = | \Delta z_A - \Delta z_B |$$

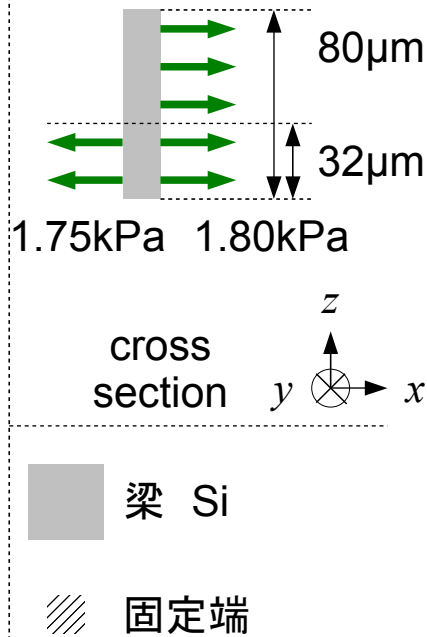
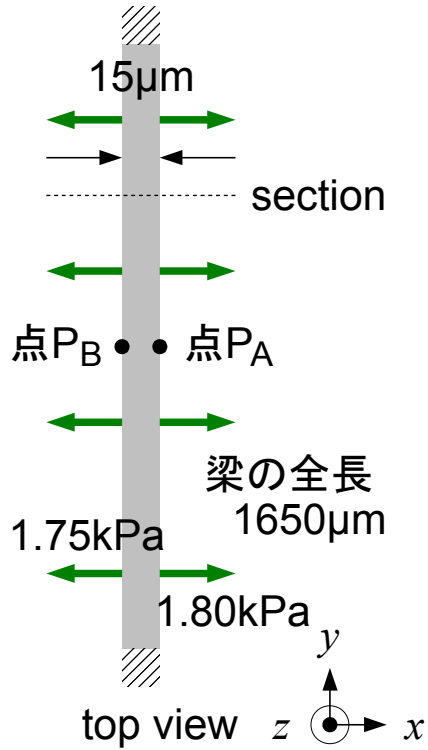
力学解析 1-1



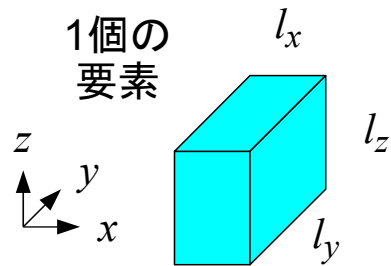
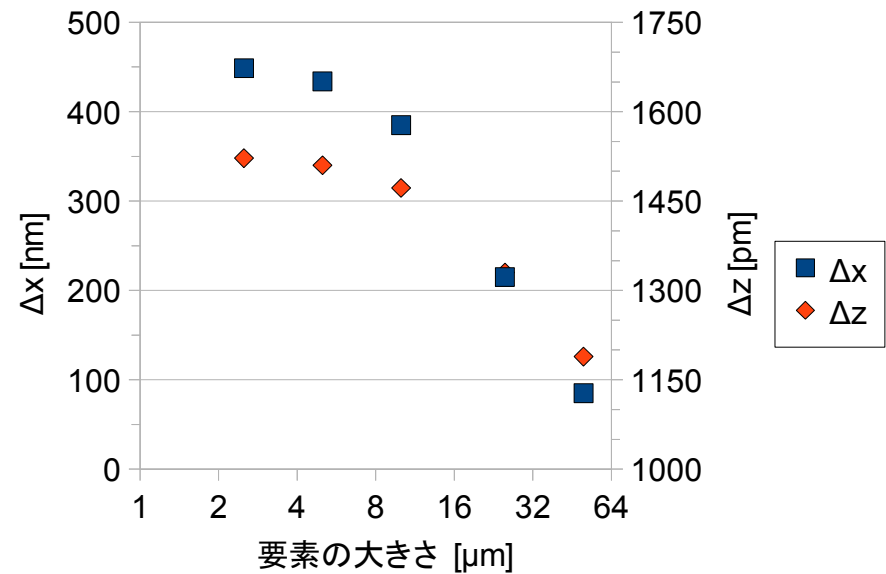
解析の条件
[メッシュの大きさ]
(梁) l_y を変化させる
 l_x $5\mu\text{m}$ l_z $8\mu\text{m}$
 l_y は全体で一定とする



力学解析 1-1 結果

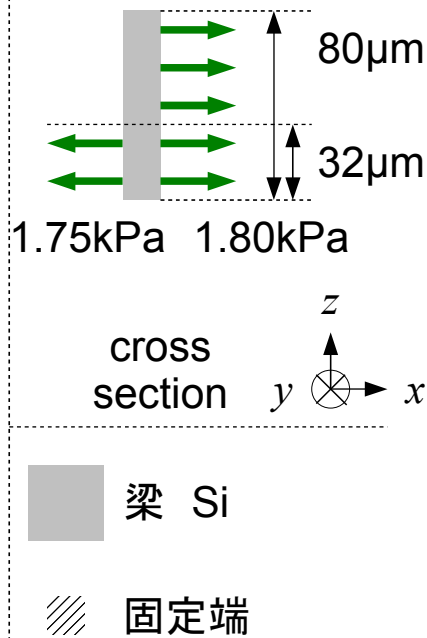
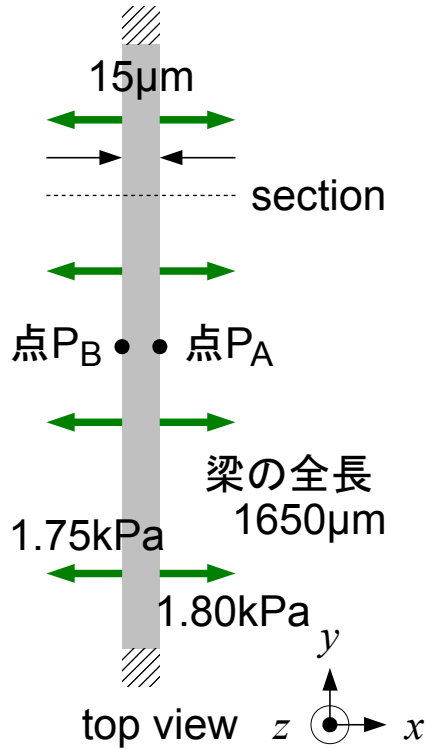


メッシュの大きさについて
 l_y だけを変化させた結果



l_y [μ m]	50	25	10	5	2.5
モデル全体の節点数			7304	14564	29084

力学解析 1-2



解析の条件

[メッシュの大きさ]

(梁) l_y を変化させる

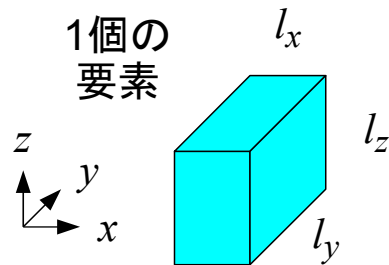
l_x 5 μ m l_z 8 μ m

l_y の比率は

(固定端付近) 5

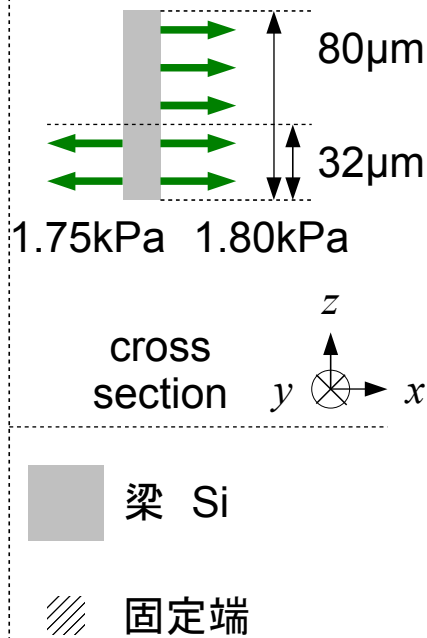
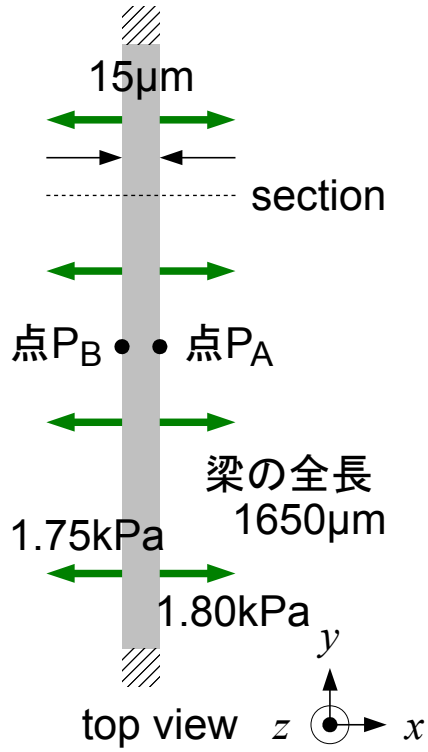
(中央付近) 8

(その他) 10 とする

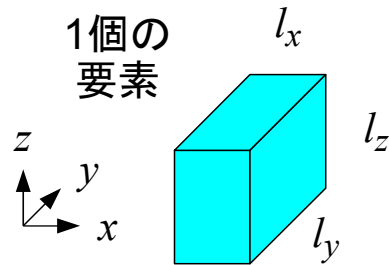
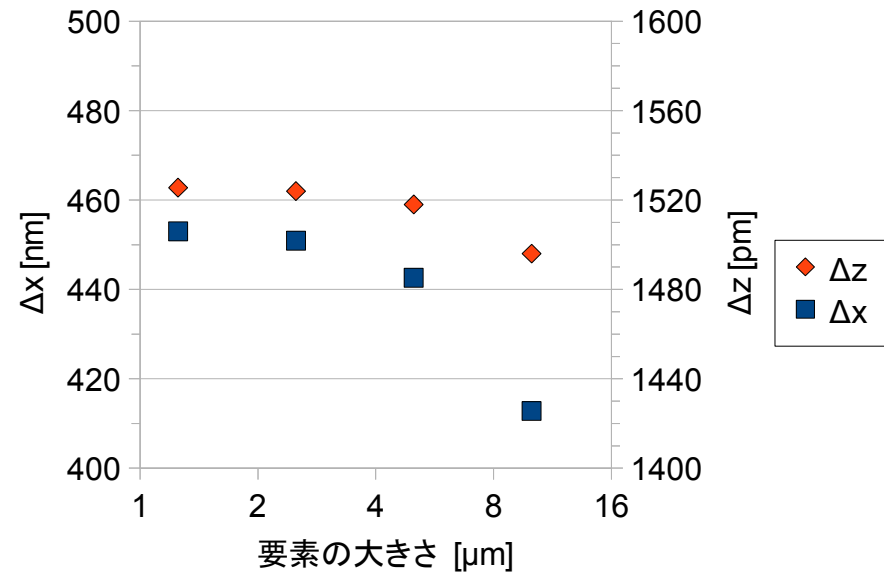


応力集中部の
メッシュの大きさを
小さくしたシミュレーション

力学解析 1-2 結果

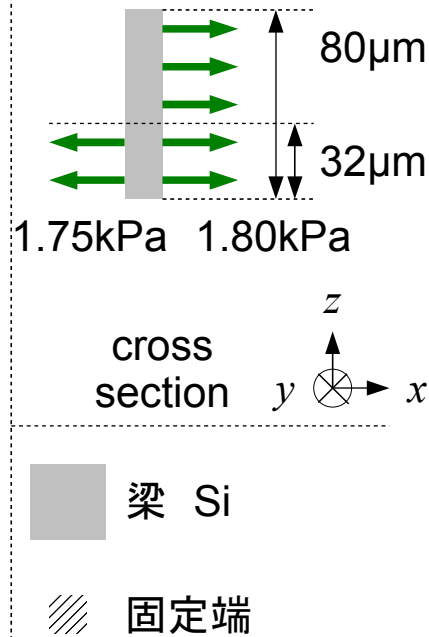
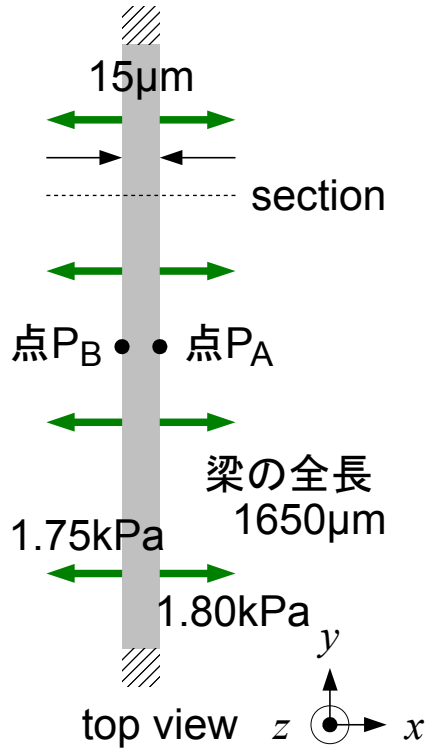


メッシュの大きさについて
 l_{y0} だけを変化させた結果



l_y [μ m]	固定端付近 / 中央付近 / その他 (l_{y0})	5 / 8 / 10	2.5 / 4 / 5	1.25 / 2 / 2.5	0.625 / 1 / 1.25
モデル全体の節点数		8844	17644	35244	70444

力学解析 2



解析の条件
[メッシュの大きさ]
(梁) l_z を変化させる

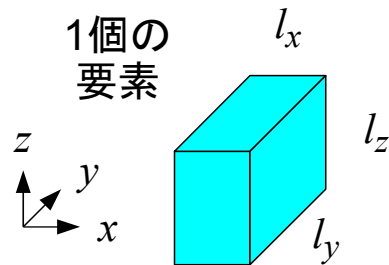
l_x 3 μm

l_y 固定端付近 5 μm

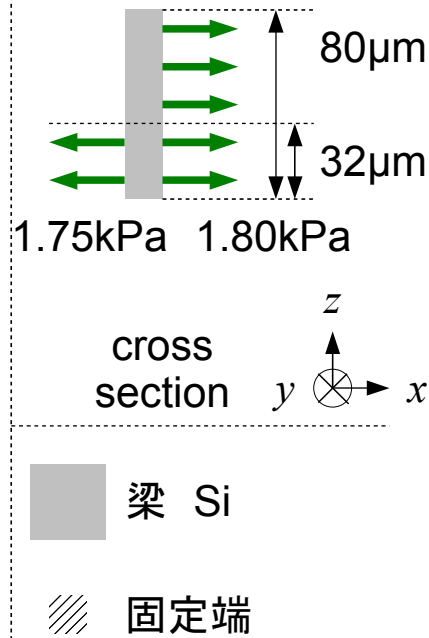
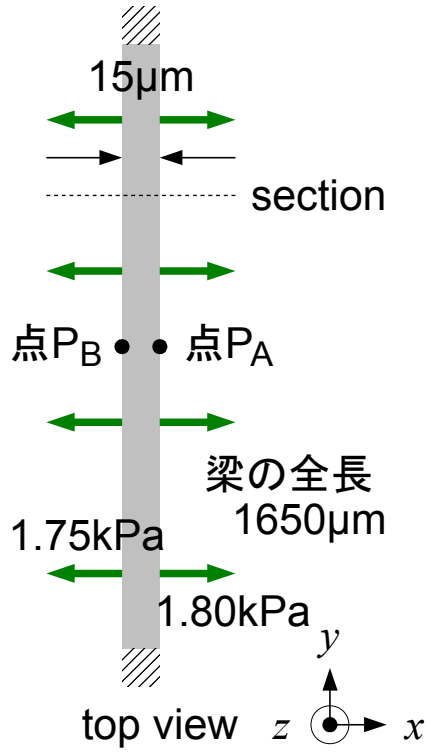
中央付近 8 μm

その他 10 μm

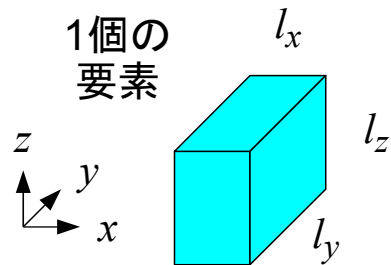
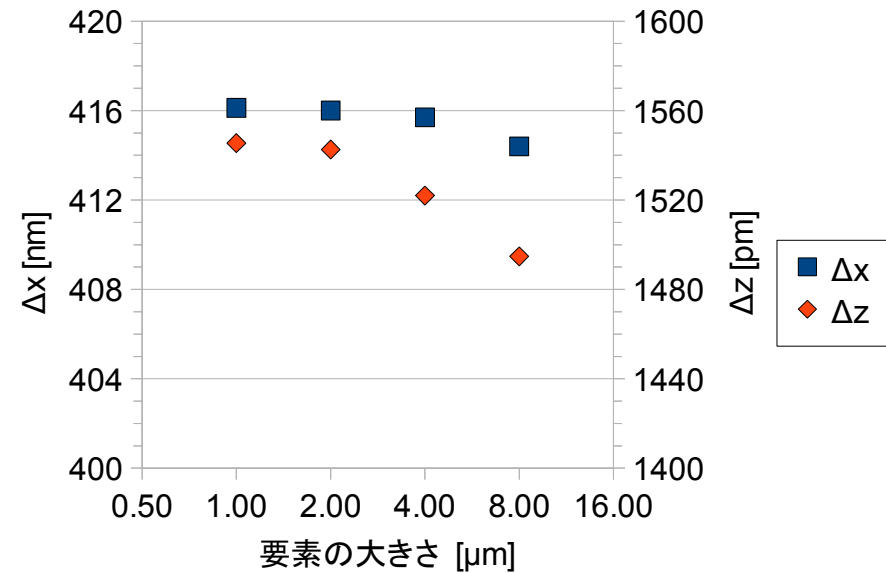
l_z は全体で一定とする



力学解析 2 結果

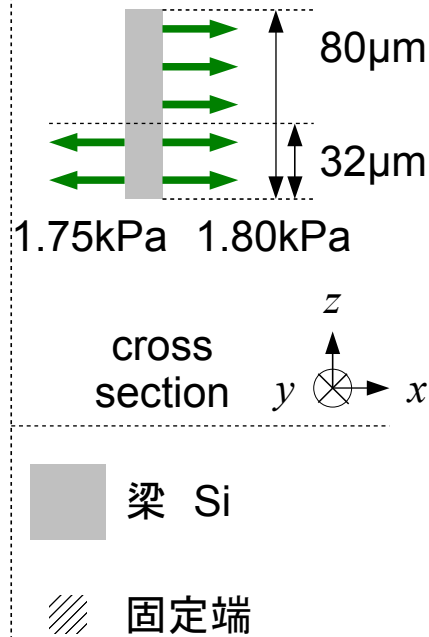
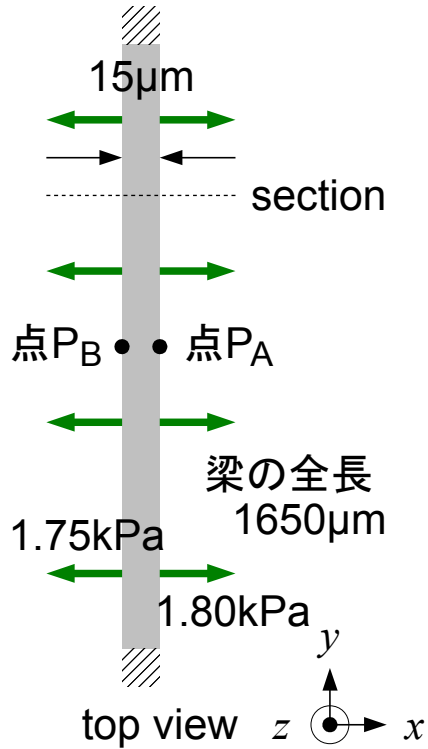


メッシュの大きさについて
 l_z だけを変化させた結果



l_z [μm]	8	4	2	1
モデル全体の節点数	13266	25326	49446	97686

力学解析 3



解析の条件

[メッシュの大きさ]

(梁) l_x を変化させる

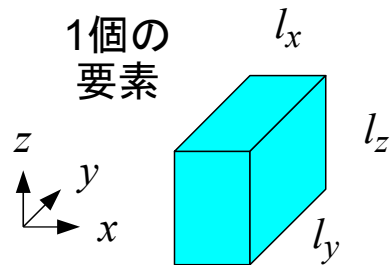
l_y 固定端付近 5 μ m

中央付近 8 μ m

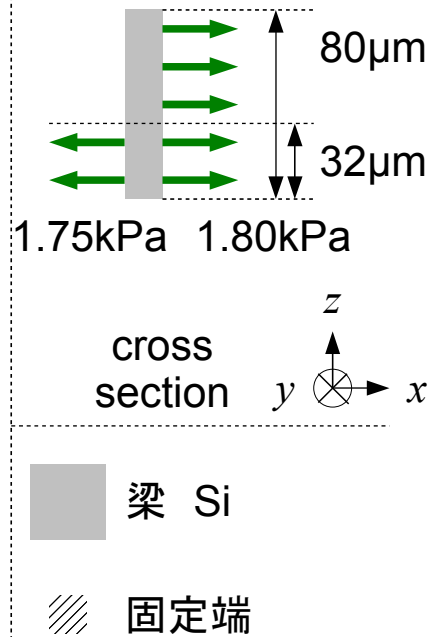
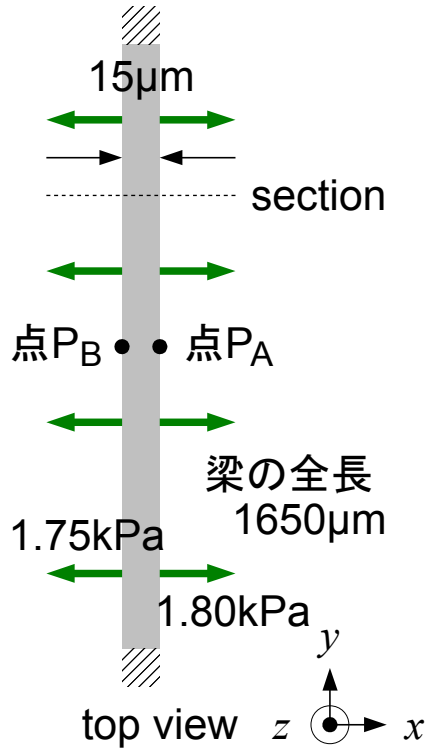
その他 10 μ m

l_z 8 μ m

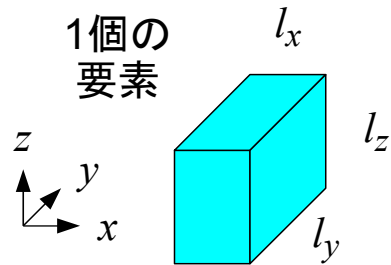
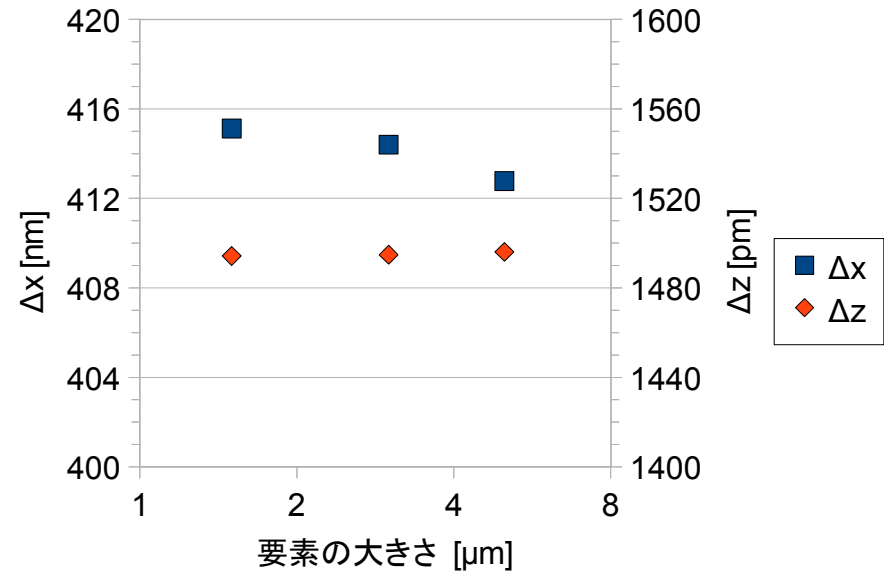
l_x は全体で一定とする



力学解析 3 結果

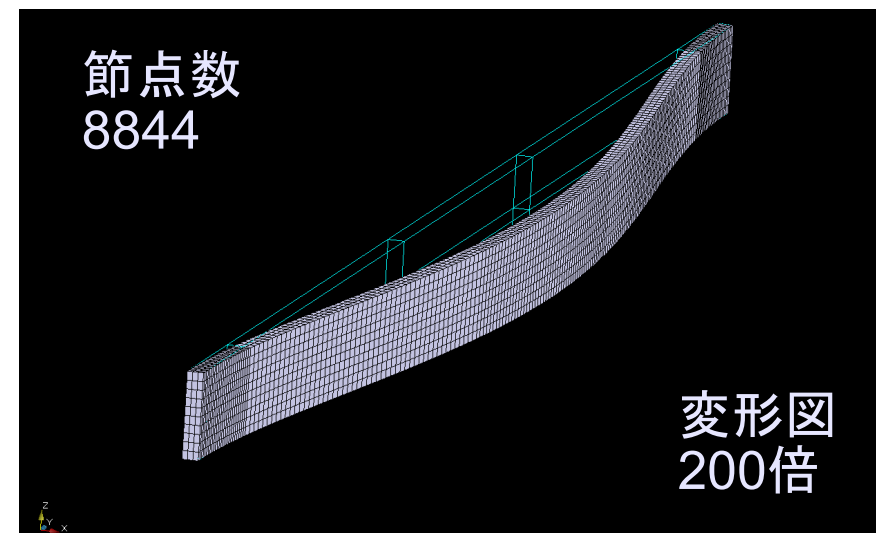
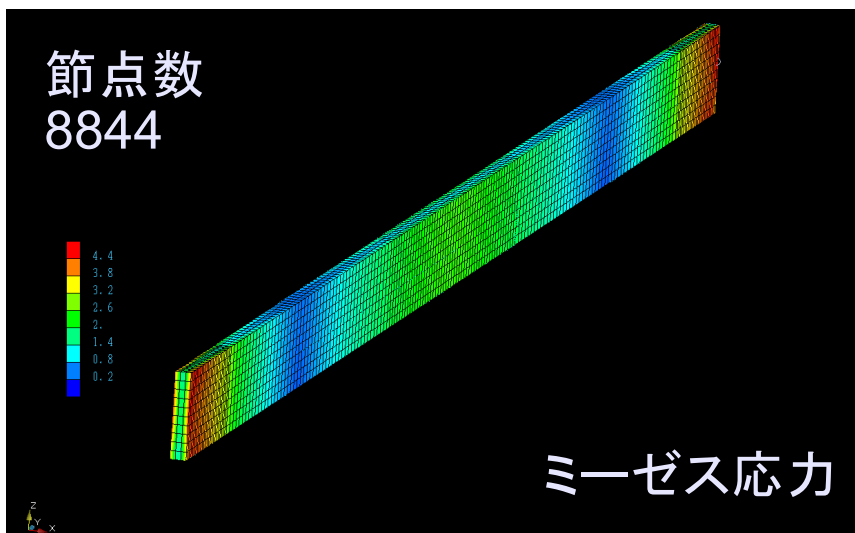
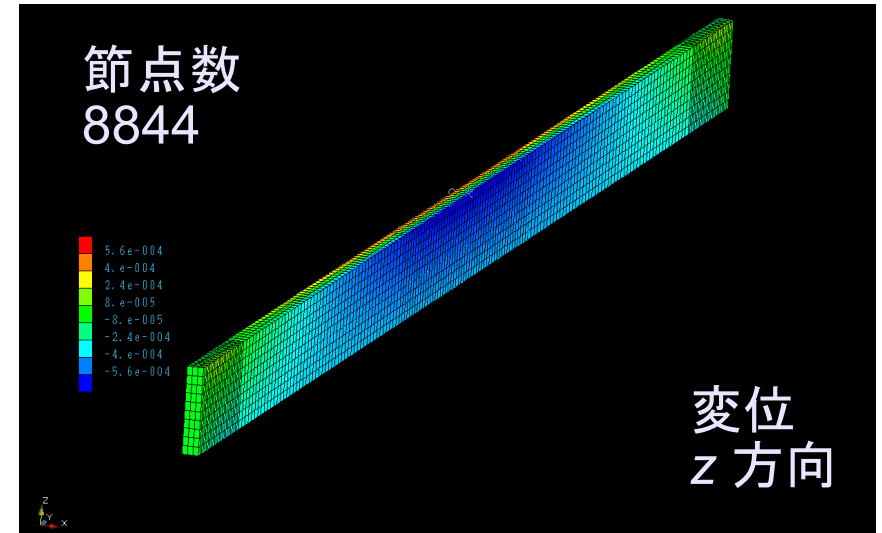
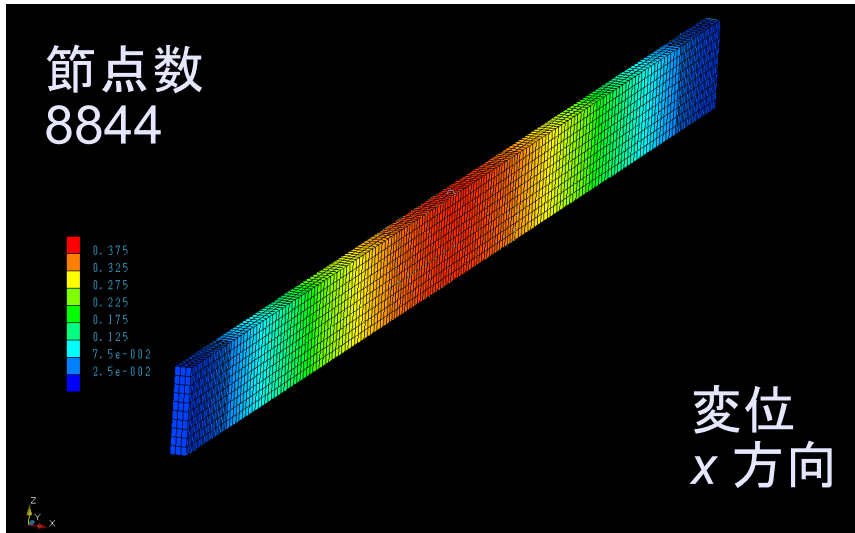


メッシュの大きさについて
 l_x だけを変化させた結果



l_x [μ m]	5	3	1.5
モデル全体の節点数	8844	13266	24321

力学解析の結果 画面



力学解析の結果

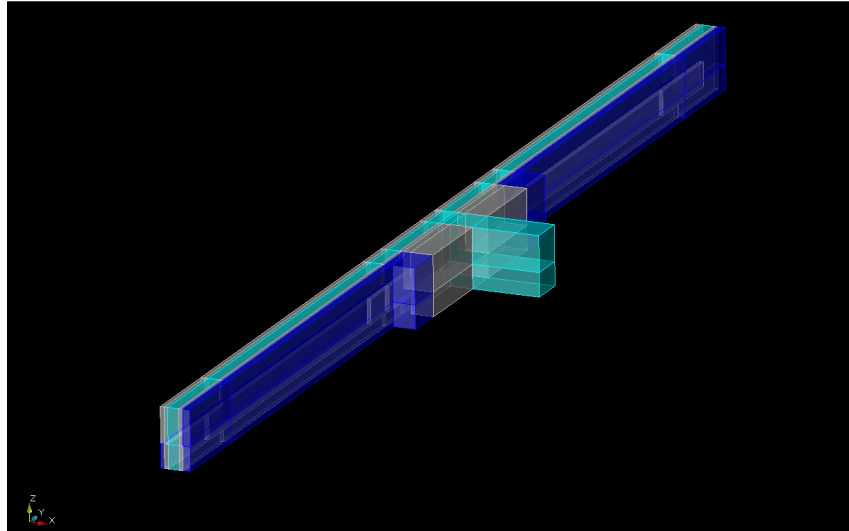
変位の予測とメッシュの大きさとの関係

l_y に大きく依存する l_y を小さくしていくとき、
 $l_y = 3 \sim 5 \mu\text{m}$ 程度でほぼ収束する

l_z に少し依存する l_x にほとんど依存しない

計算時間とのバランスをとり、 l_y は
固定端付近で $5\mu\text{m}$ 、中央付近で $8\mu\text{m}$ 、
その他で $10\mu\text{m}$ 、 l_x は $5\mu\text{m}$ 、 l_z は $8\mu\text{m}$ として
連成解析を実行する

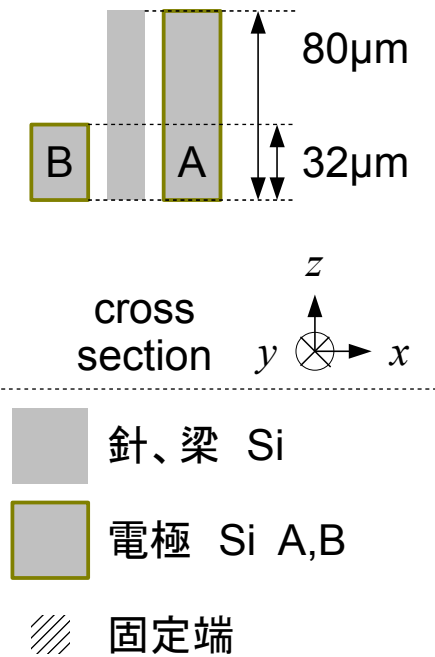
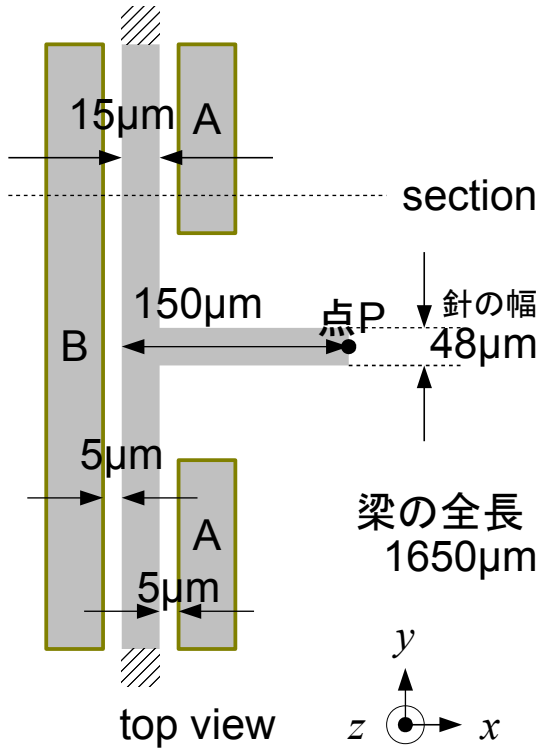
連成解析



「弾塑性解析と電界解析」の連成解析を利用

実際に作製しようとするデバイスに近い
モデルについてシミュレーション

連成解析



解析の条件

[メッシュの大きさ]

(梁) l_x 5μm

l_y 固定端付近 5μm

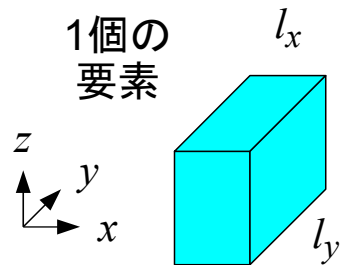
中央付近 8μm

その他 10μm

l_z 8μm

[駆動電圧]

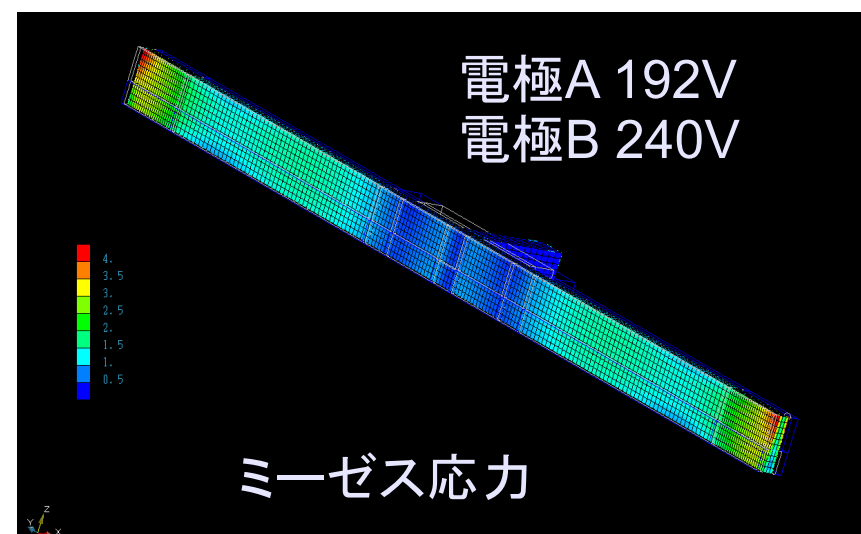
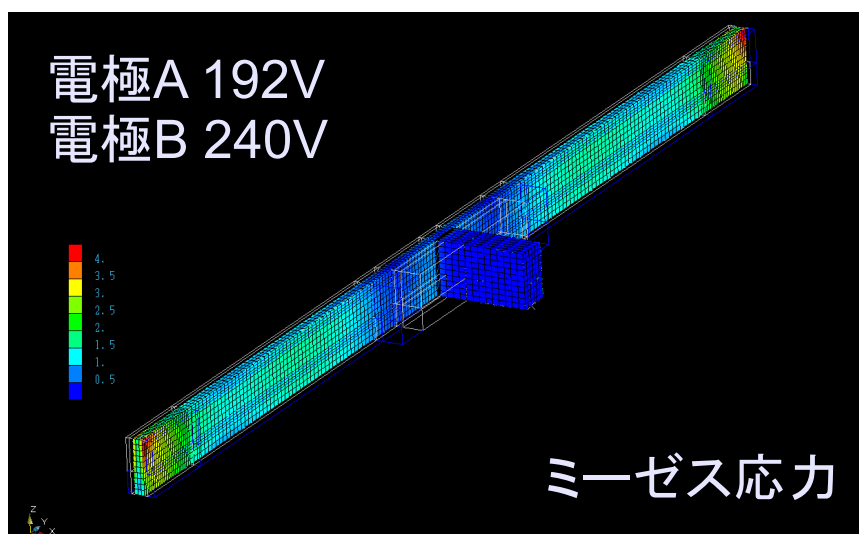
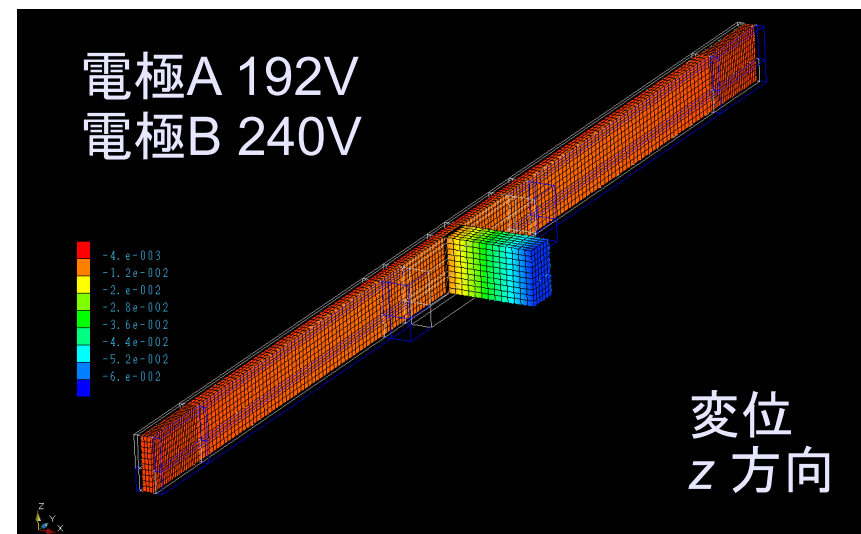
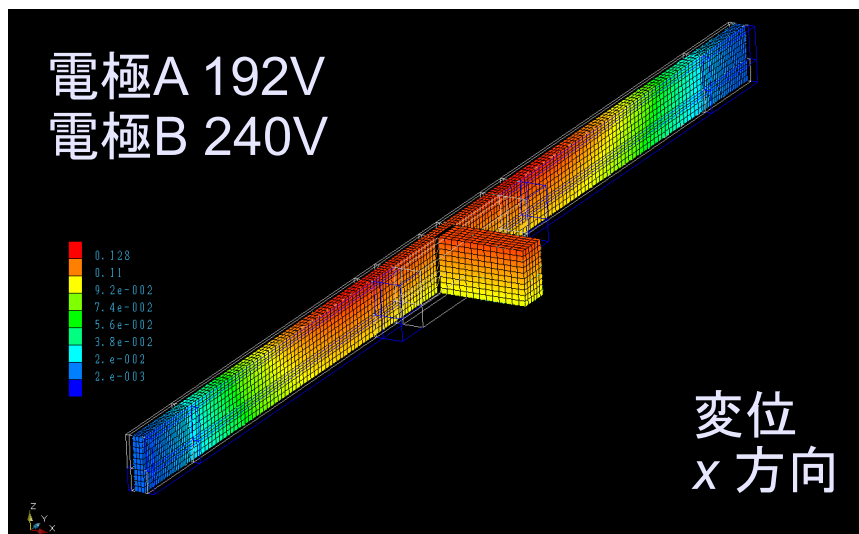
さまざまに変化させる



モデル全体の
節点数 : 33330

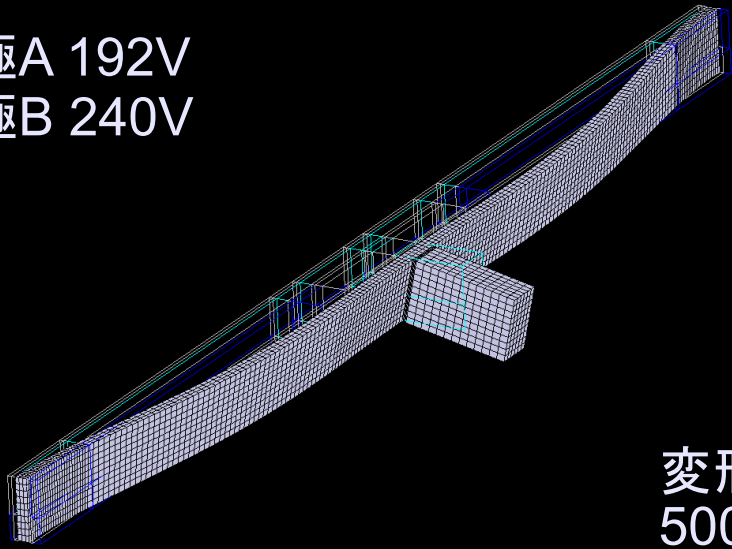
Δx が 300 - 500nm 程度、
 $|\Delta z|$ が 30 - 50nm か
それ以上 を目標とする

連成解析の結果 画面 変位と応力



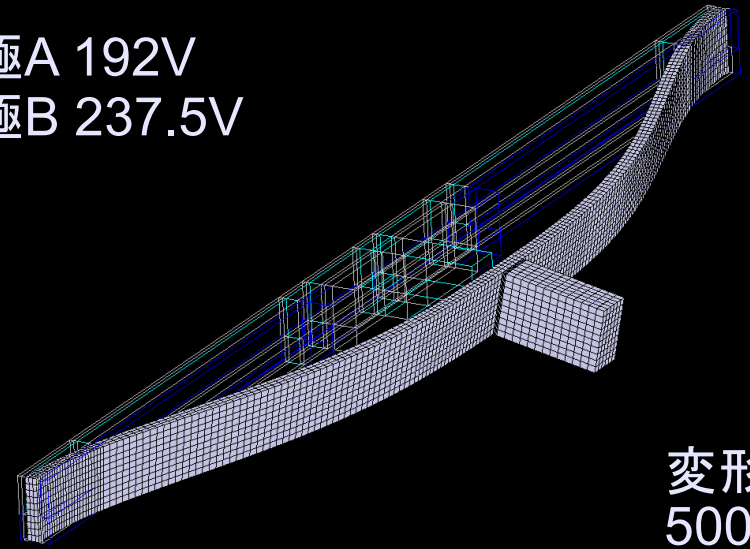
連成解析の結果 変形図

電極A 192V
電極B 240V



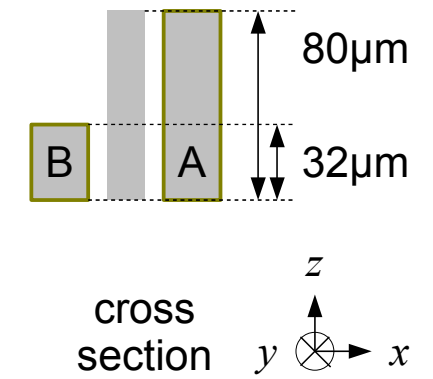
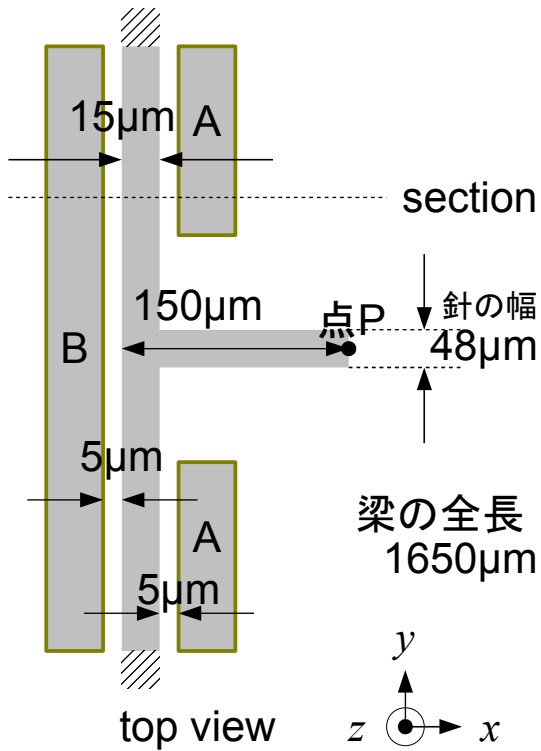
変形図
500倍

電極A 192V
電極B 237.5V



変形図
500倍

連成解析の結果



駆動電圧 [V]		点Pの変位 [nm]	
電極A	電極B	Δx	$ \Delta z = -\Delta z$
180	225	69.9	58.1
180	220	301	52.1
180	215	494	47.3
192	240	137	65.0
192	237.5	352	60.0
200	252	-0.0003	74.4
200	251	140	71.0
200	250	360	66.3

シミュレーションで得られた成果

作製しようとするデバイスについて
所望する動作が得られることが分かった

実際にTEMで材料を観察するときに
駆動電圧をどう変化させるかの
指針を立てるにあたり参考になった

現在、デバイスの作製と動作確認を行っている
今後の材料の観察に実用化を目指している

以上で終了です。

ありがとうございました。