

マイクロアクチュエータの基礎

佐々木実

mnr-sasaki あつと *toyota-ti.ac.jp*

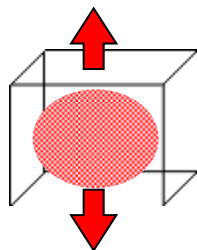
http://www.toyota-ti.ac.jp/mems/index.htm

最新とはいきませんが、基本が何で、無理せず難易度を上げないかのポイントを紹介します。

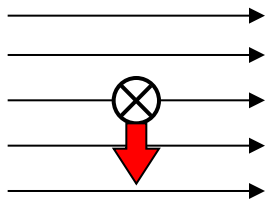


アクチュエータ製作の難易度(個人的意見)

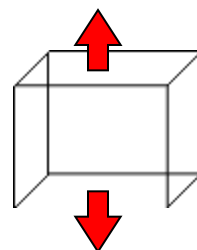
製品レベルではなく、とにかく動くものという意味で



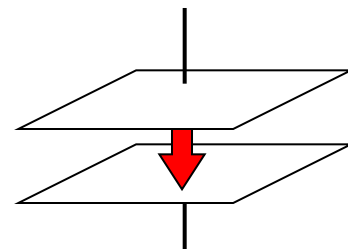
熱
(高い
Energy
密度)



電磁
(コイル作り。
外部磁場は
他で用意。)



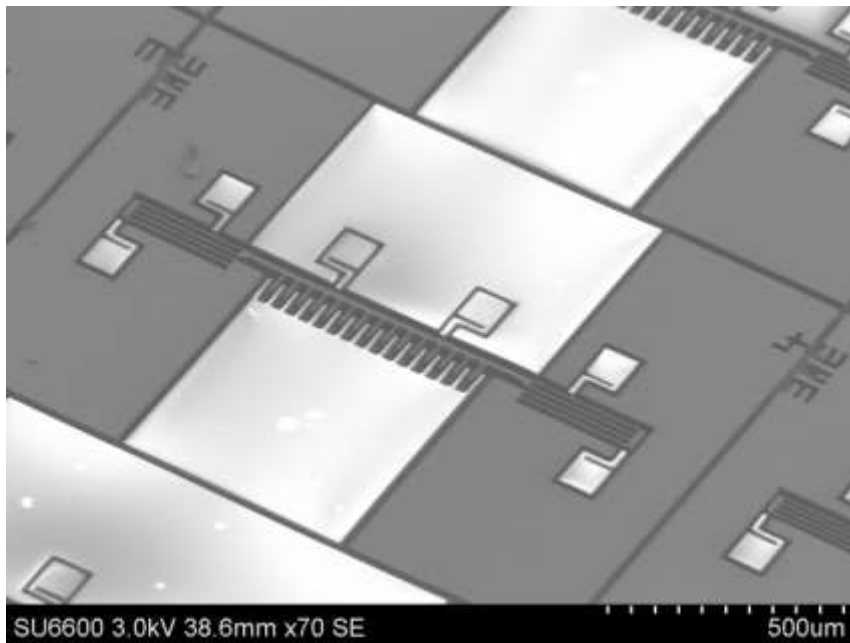
圧電
(材料の用
意が必要)



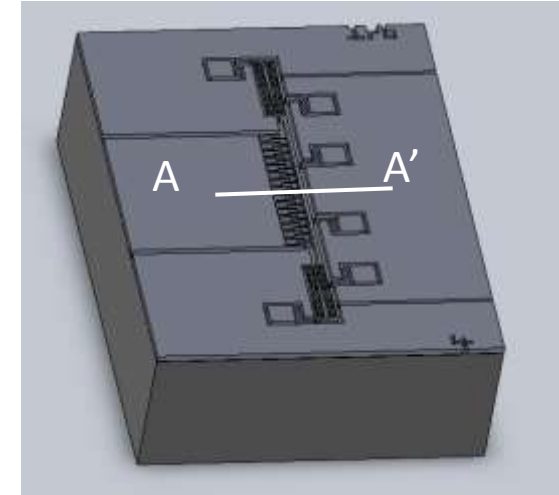
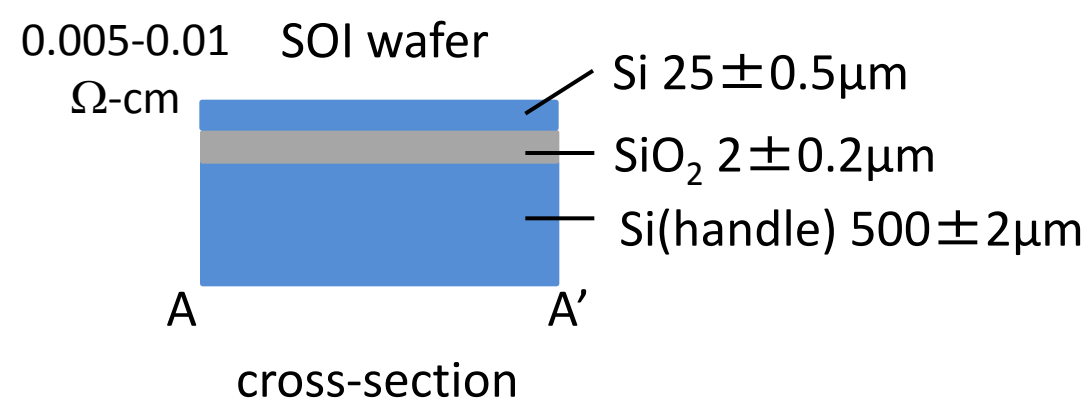
静電
(力が微弱。
不安定
現象もある)

静電アクチュエータから 紹介する

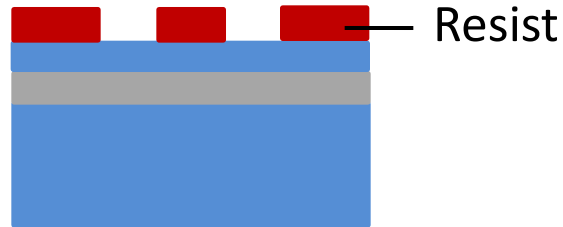
研究ツールとして使うなら
SOI-MEMSがお手頃
(うちの4年生でも
電学論133-E (2013) 354)



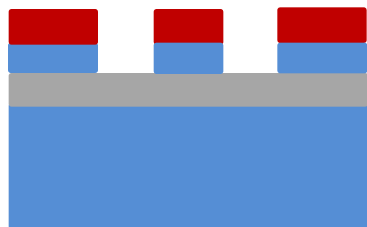
確立し易いSOI-MEMSプロセス: デザイン勝負



① Resist patterning



② Deep-RIE



③ Resist removal



④ HF etching of SiO₂

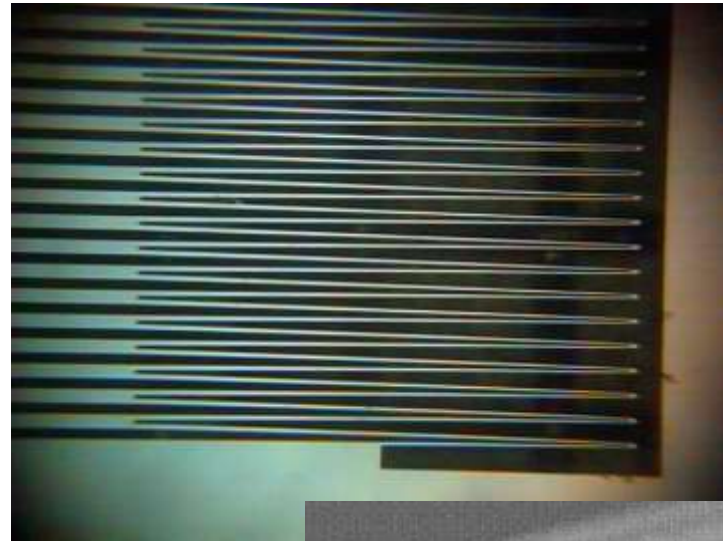
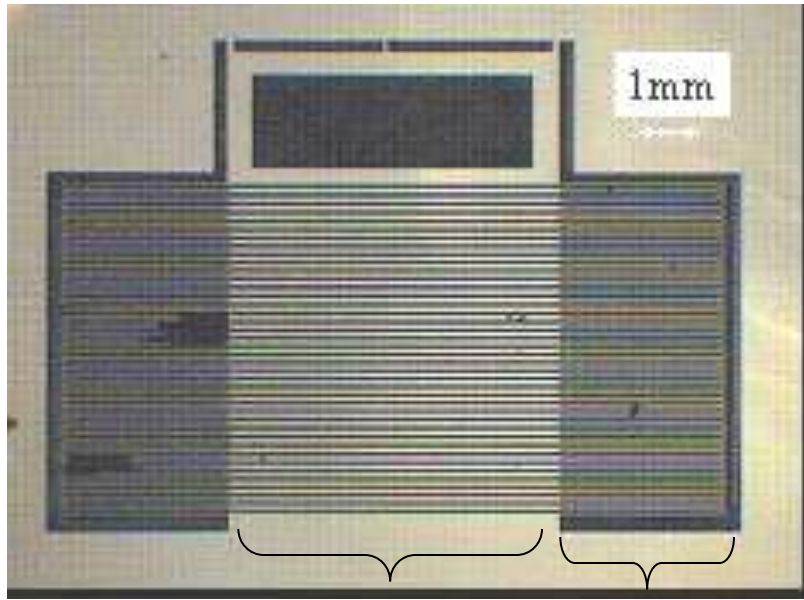


エッチングのばらつきを抑えるため
Aspect Ratio : <10
Etching : <300 μm
が見通し良し

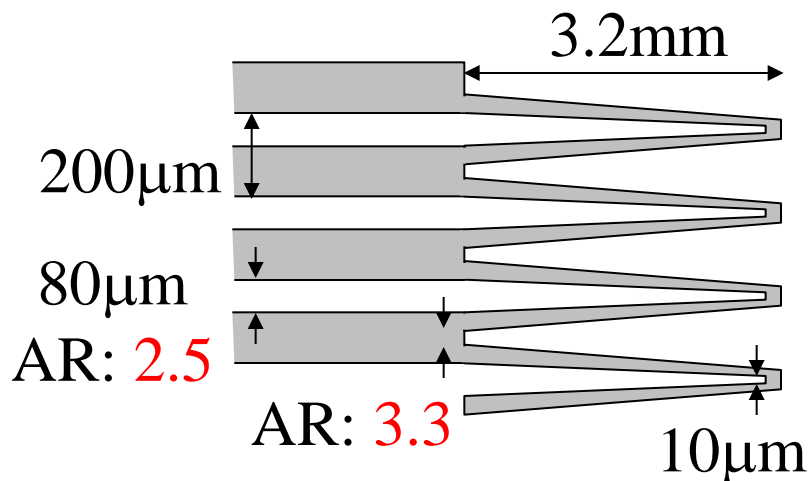
上手くなるコツ: RIE lag を感じることに

普通は開口幅が広い(アスペクト比が低い)程、エッチングが速い
時間をかけても打ち止めで進まなくなる

やっけてしまいがちなバネデザイン



周期可変回折格子 spring



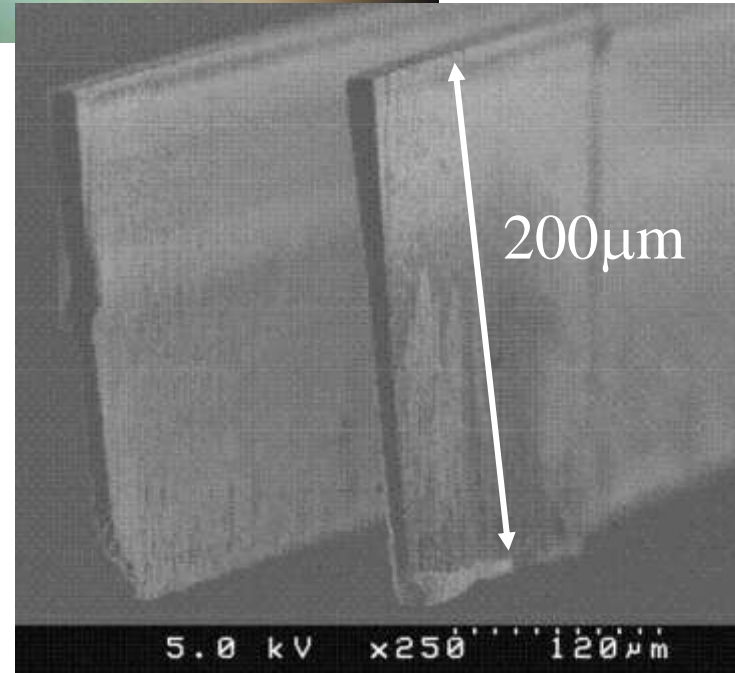
AR: 2.5

AR: 3.3

10μm

AR: 20=200/10

ARが全然違う



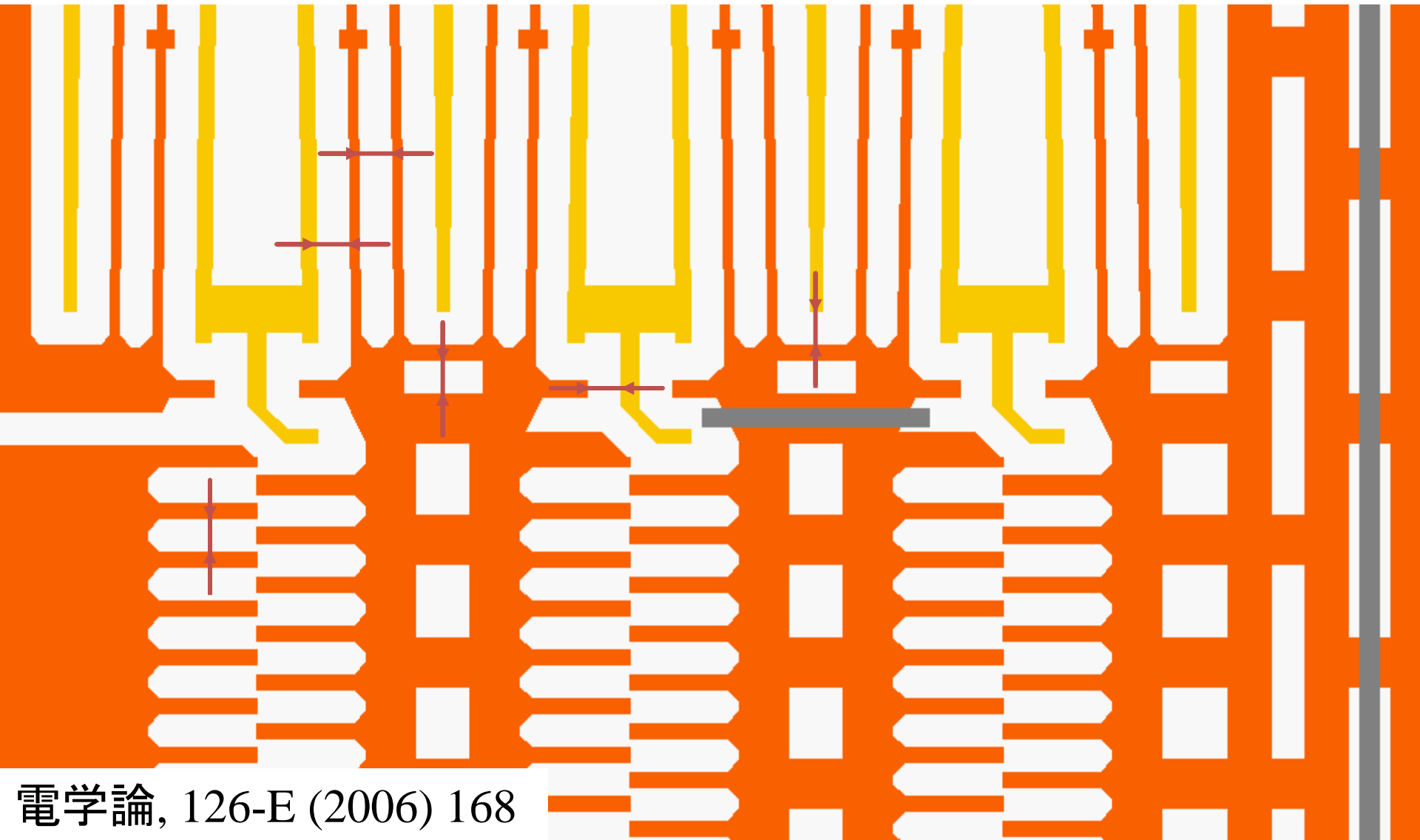
200μm

5.0 kV x250 120μm

電学論 120-E (2000) 503

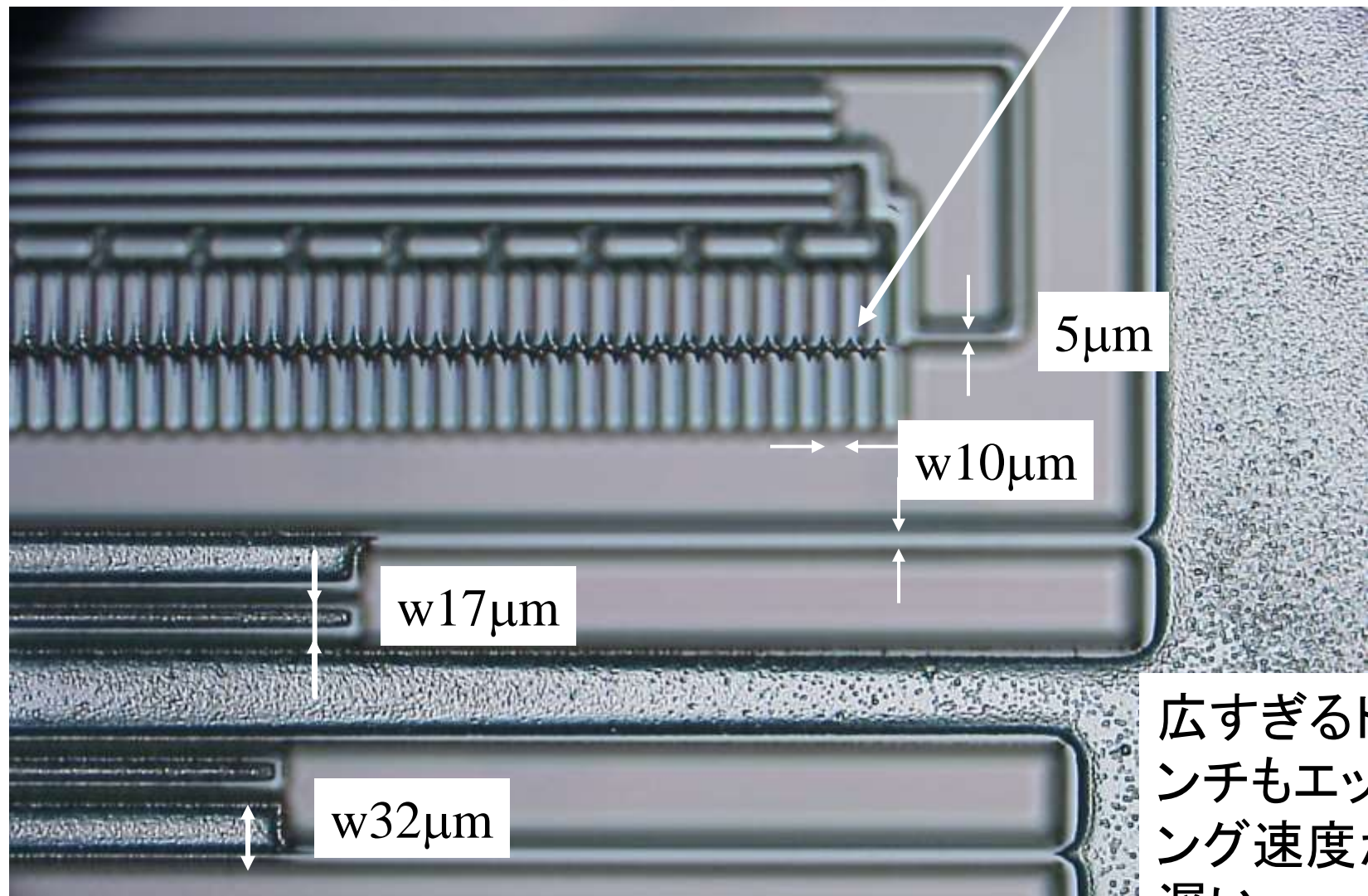
トレンチ幅を揃えるデザイン

重要部分のトレンチ幅は全て $11\mu\text{m}$ オーバエッチングを最小に



BOX層到達直前からの エッチング速度の微妙な違い

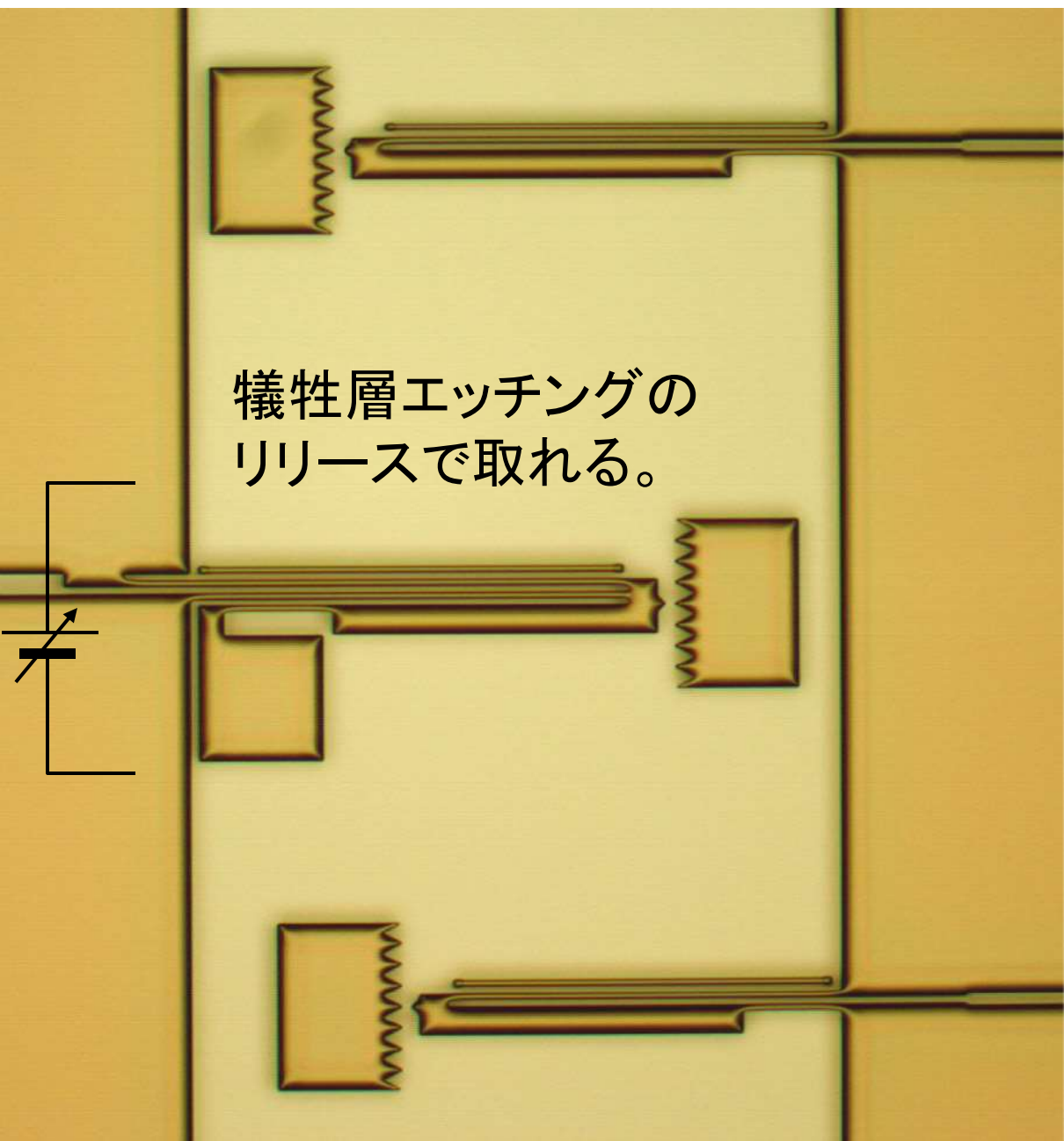
狭い($w3\mu\text{m}$)トレンチ
でエッチングが遅い



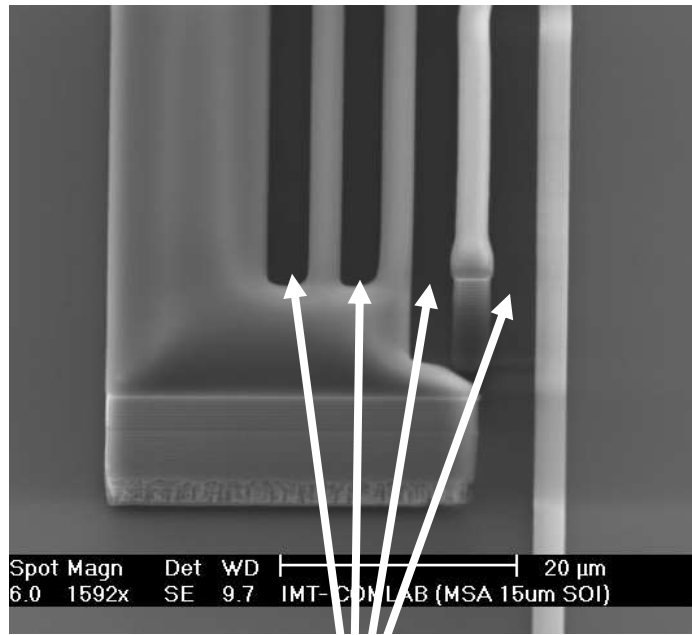
広すぎるトレ
ンチもエッチ
ング速度が
遅い

オーバエッチングは必ず入ると考えるべき

重要な機能部分を守るダミー構造



犠牲層エッチングの
リリースで取れる。

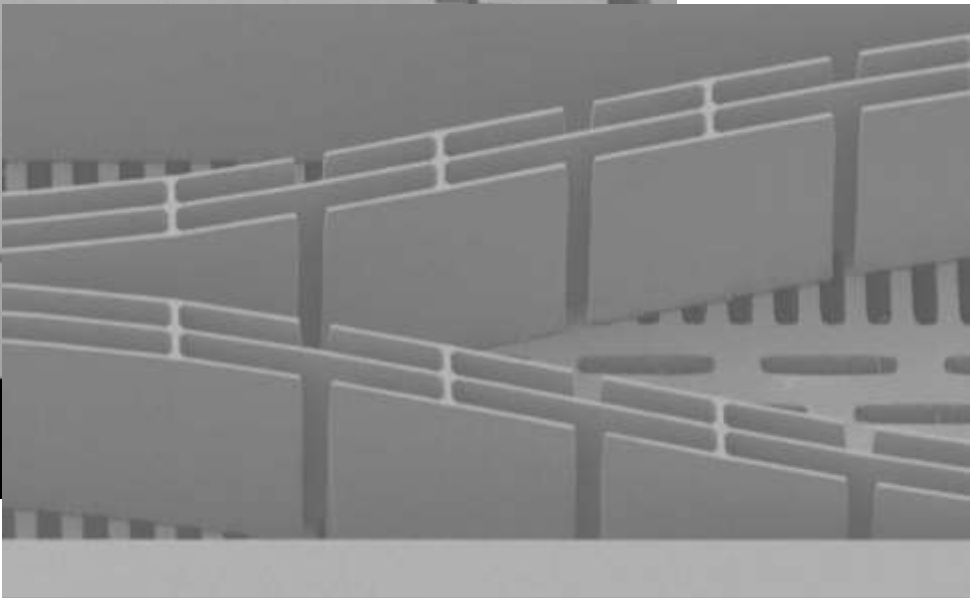
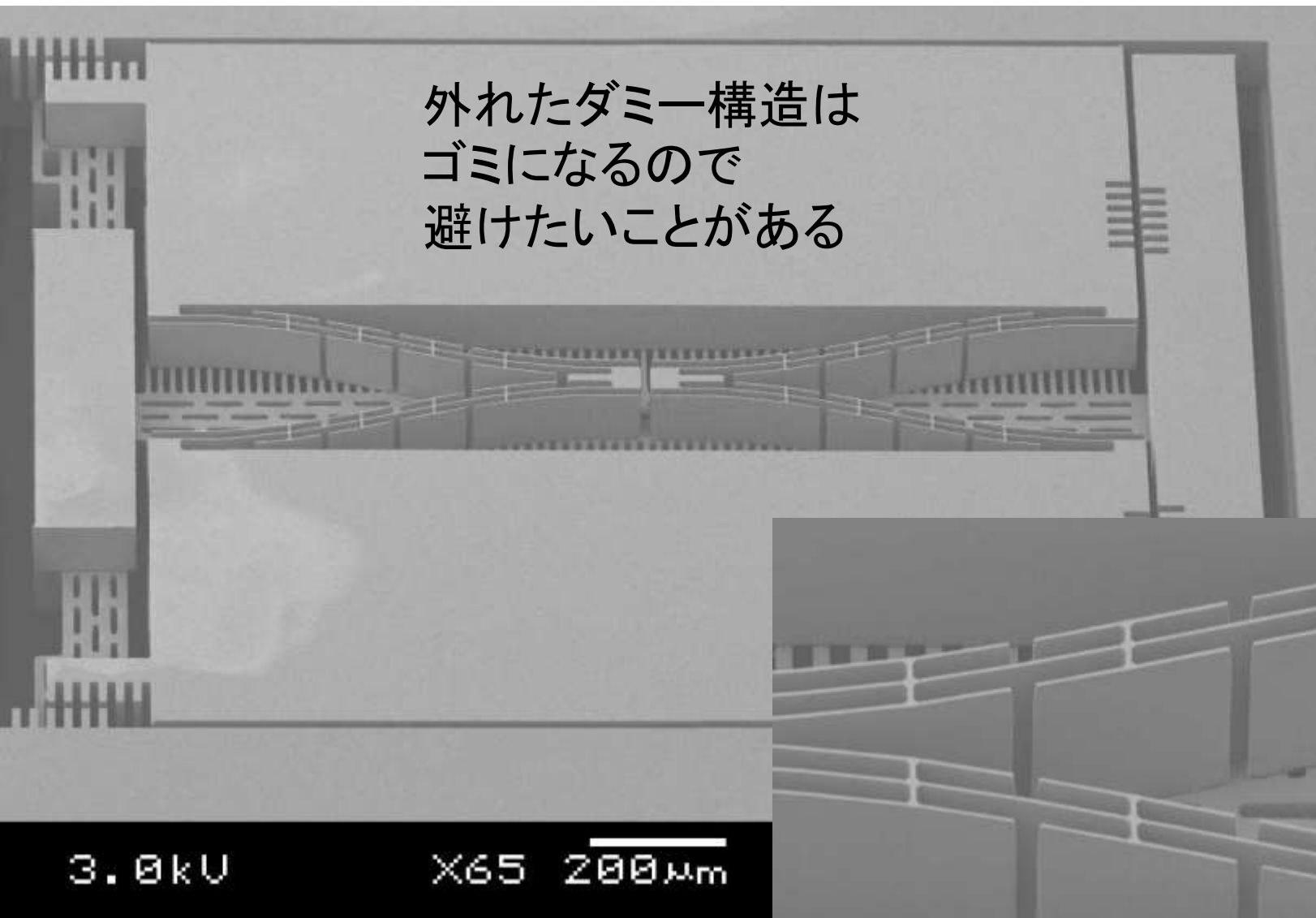


アスペクト比を
ほぼ同じにする

デバイス特性とは
直接関係無く、
RIEのために入れる

構造に付けてしまうダミー構造

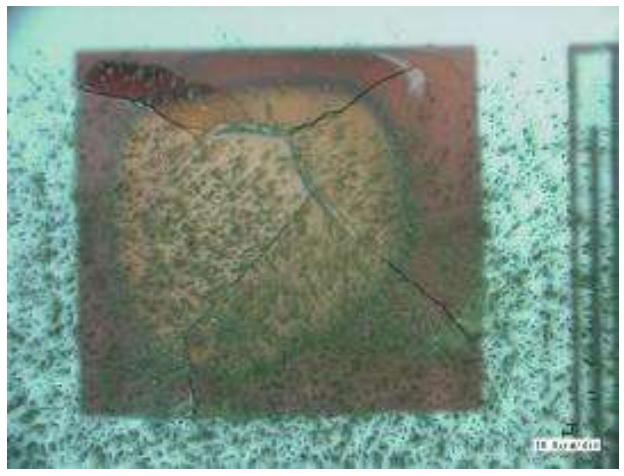
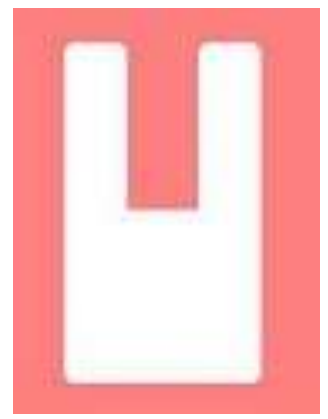
外れたダミー構造は
ゴミになるので
避けたいことがある



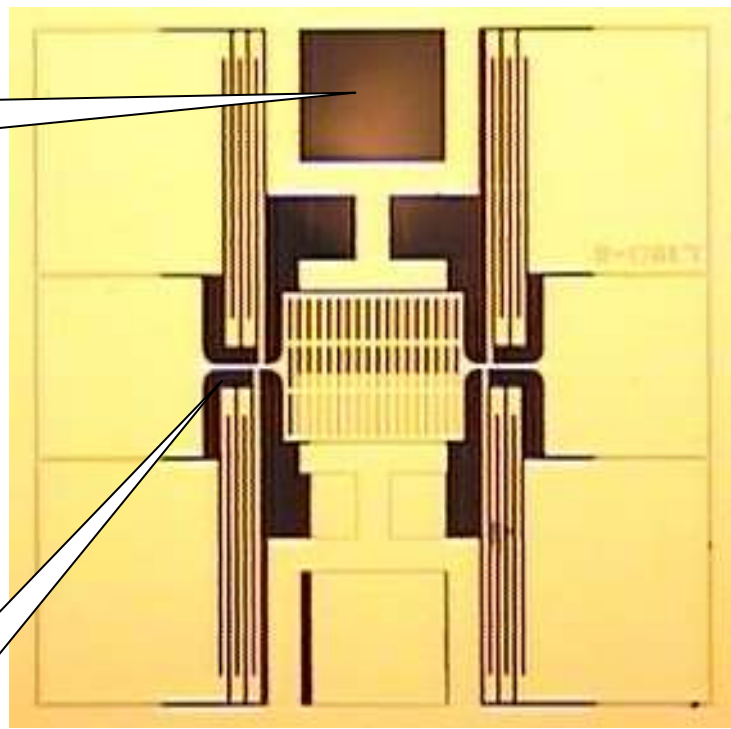
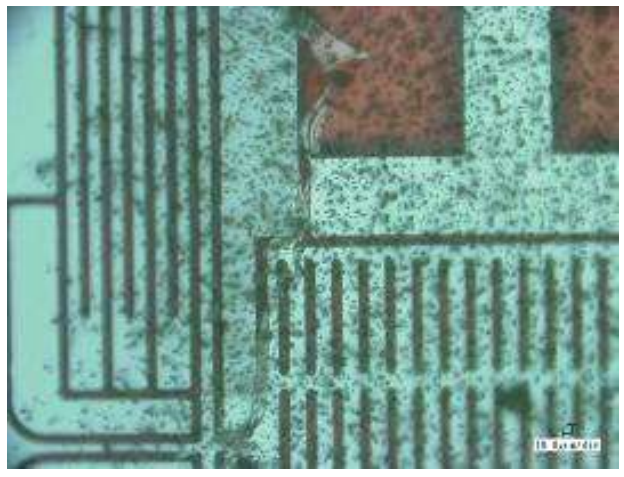
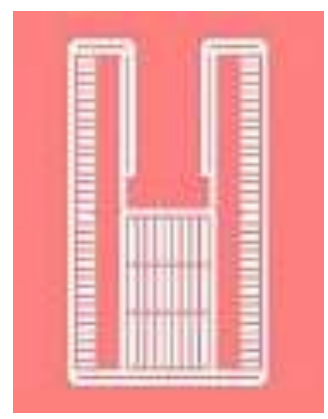
3.0kV X330 50μm 20 50 SEI

埋め込み酸化膜の圧縮応力は侮れない

裏面mask v.1



裏面mask v.2



2050µm

(注) 黒いスス状のものは
貼り付けレジストの残り

基板Si領域を広く取り除くミラー等(左)では、広い穴をあけた領域で、残ったSi構造ごと割れることがある。メッシュ状のフィラーにより、Si構造を保護する。残したフィラーは、犠牲層エッチングで取り除く。

静電アクチュエータ



<http://www.city.kawasaki.jp/820/page/0000037950.html>

長所：省エネ。低発熱。特殊な材料は不要。

短所：高電圧になりがち。

応答性：電場は高速。機械構造で決まる。

パーツの気を使い度 (通常ケース)

移動体 < 電極 < バネ

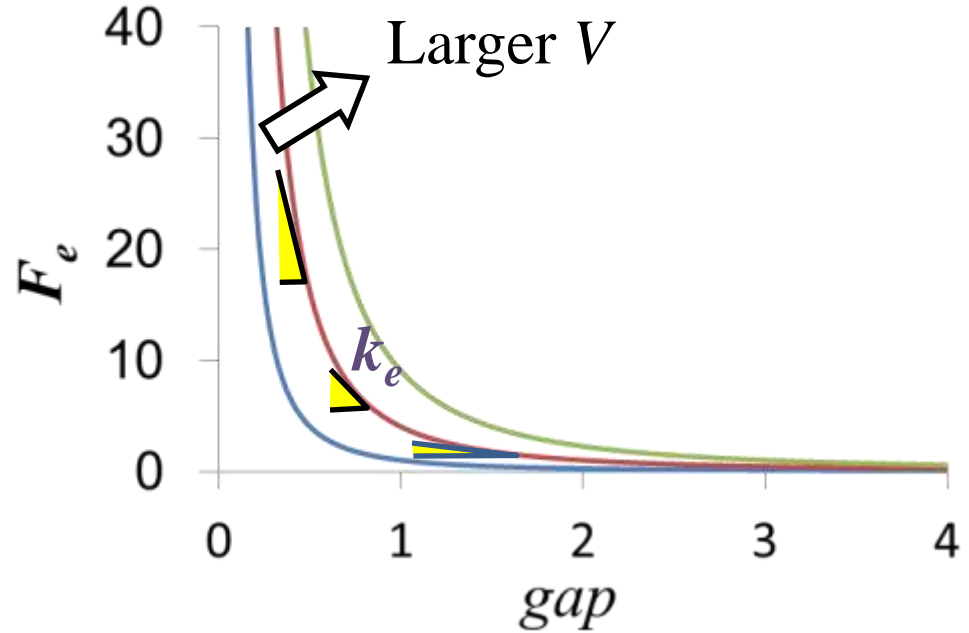
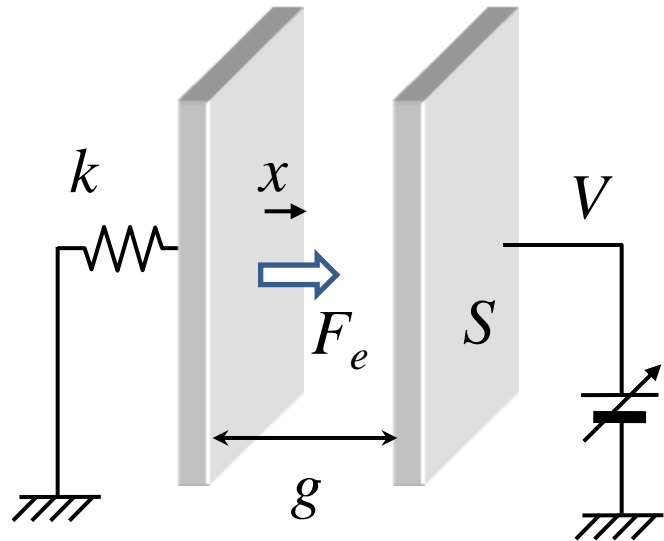
$$k = \frac{Ebt^3}{4L^3}$$

t^3 で効く
寸法にシビア

移動体：用途が許す範囲で穴あき構造にする

f_r up, stickingを防ぐ

電極1: 平行平板 (gap-closing) 型



$$F_e = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 S V^2}{(g-x)^2}$$

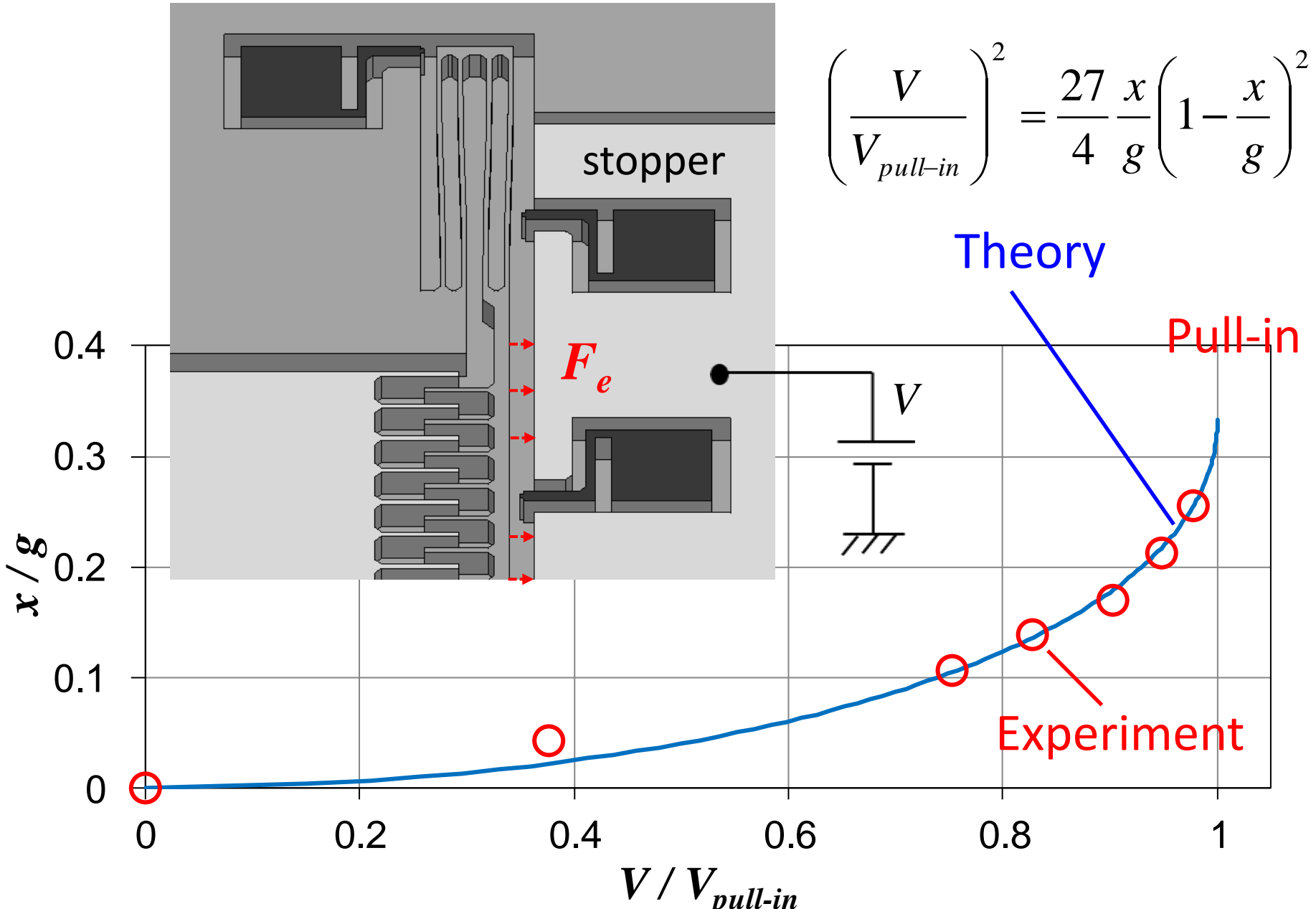
$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx + F_e$$

Slope against $\Delta x =$ spring constant

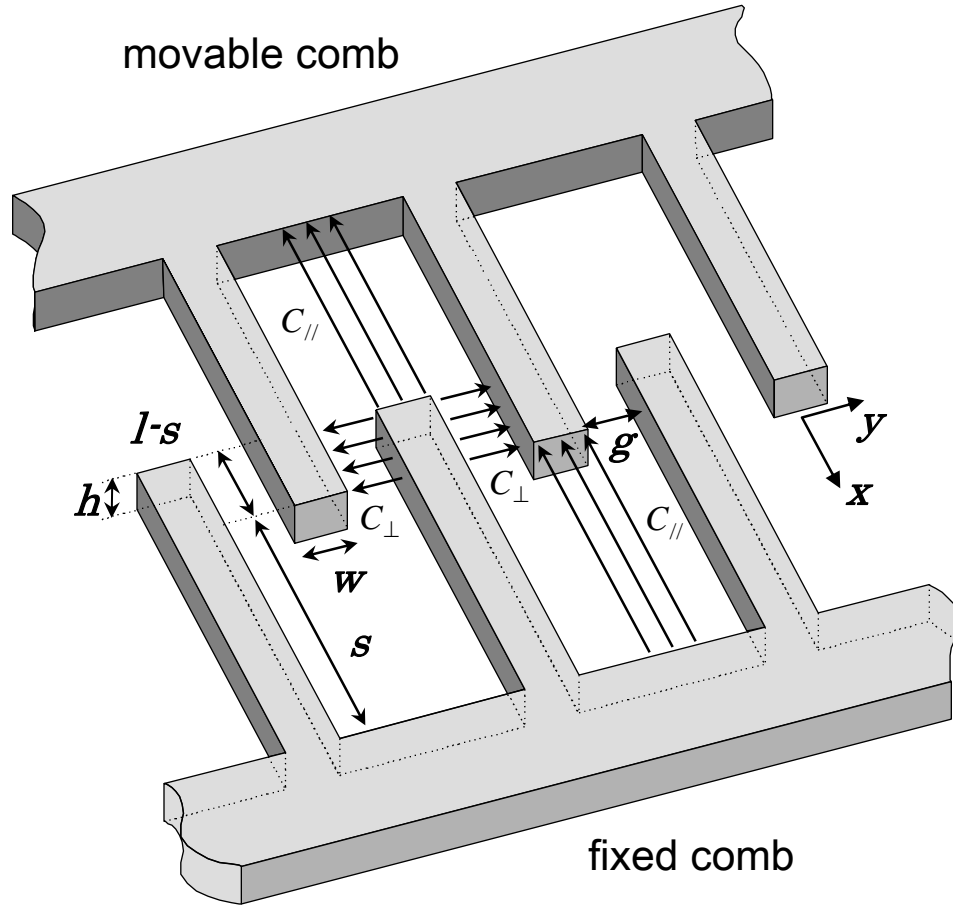
$$\approx F_e(x) + \frac{\epsilon_0 S V^2}{(g-x)^3} \Delta x = F_e(x) + k_e \Delta x$$

k_e が k を超えると不安定。ギャップ依存性が強い。
 (ギャップが初期値 g から、その $1/3$ に減るまでが目安)

Gap-closing型では避けようがないPull-in特性



電極2: 水平櫛歯型アクチュエータ



Paired C_{\perp} cancels force.

F_{\parallel} のギャップ $(s-x)$ 依存性が無くなり
Pull-in 不安定性を回避。

$$C_{unit} = 2C_{\parallel} + 2C_{\perp}$$

$$= 2\epsilon_0 \frac{wh}{s-x} + 2\epsilon_0 \frac{(l-s+x)h}{g}$$

$$C_{total} = NC_{unit}$$

$$= 2\epsilon_0 Nh \left(\frac{w}{s-x} + \frac{l-s+x}{g} \right)$$

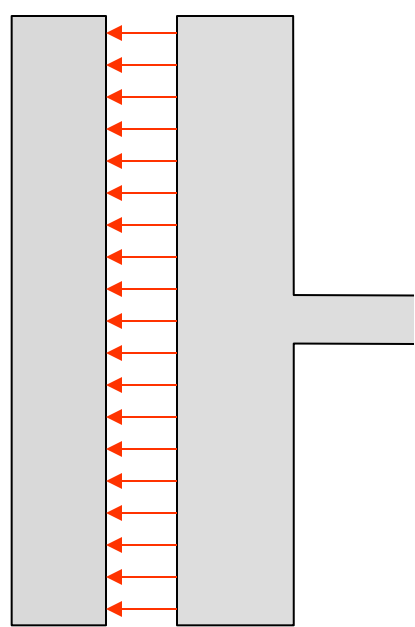
$$F_{\parallel} = \frac{1}{2} \frac{\partial C_{total}}{\partial x} V^2$$

$$= \epsilon_0 Nh \left(\frac{w}{(s-x)^2} + \frac{1}{g} \right) V^2$$

When $\frac{w}{(s-x)^2} \ll \frac{1}{g}$

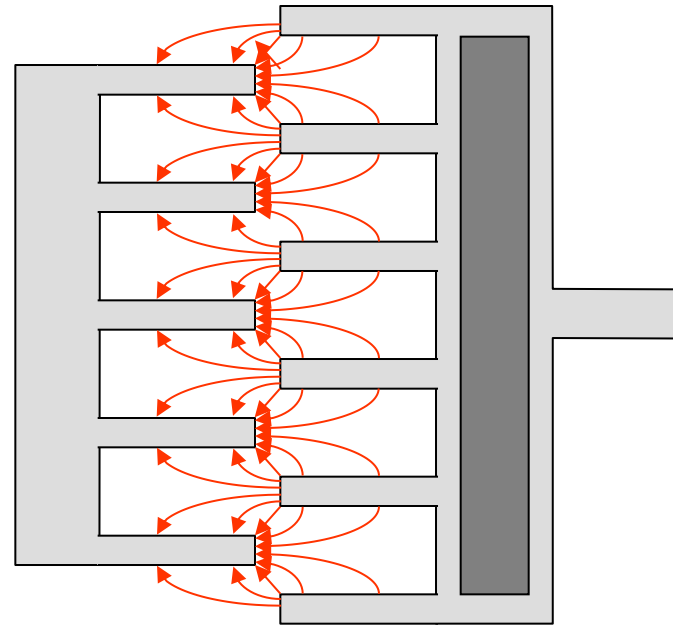
$$F_{\parallel} \approx \frac{\epsilon_0 Nh}{g} V^2$$

櫛歯が重なれば、ギャップ依存性の少ない力となる 重なり幅 d にも依存しない

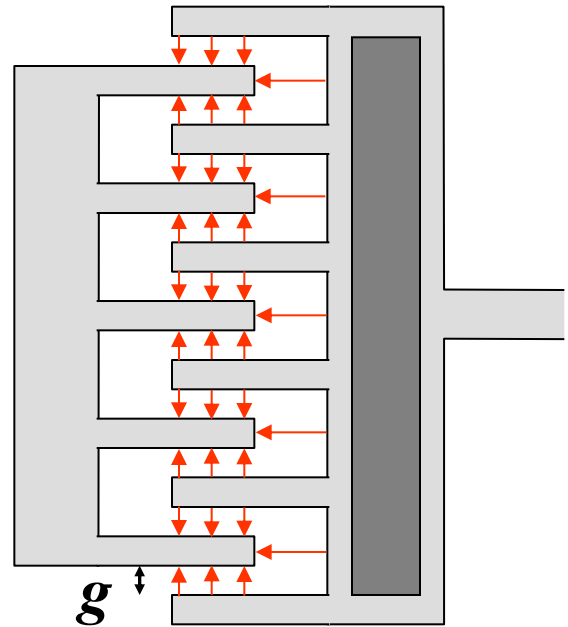
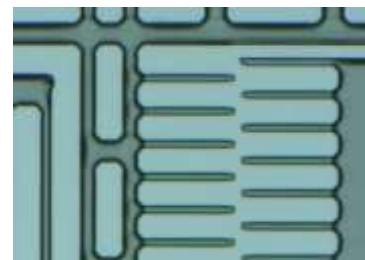


$g-x$

$$F_e = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 S V_m^2}{(g-x)^2}$$



櫛歯が近づくと E が増加
Gap-closingの性質に近い
高電圧が必要となり易い



g

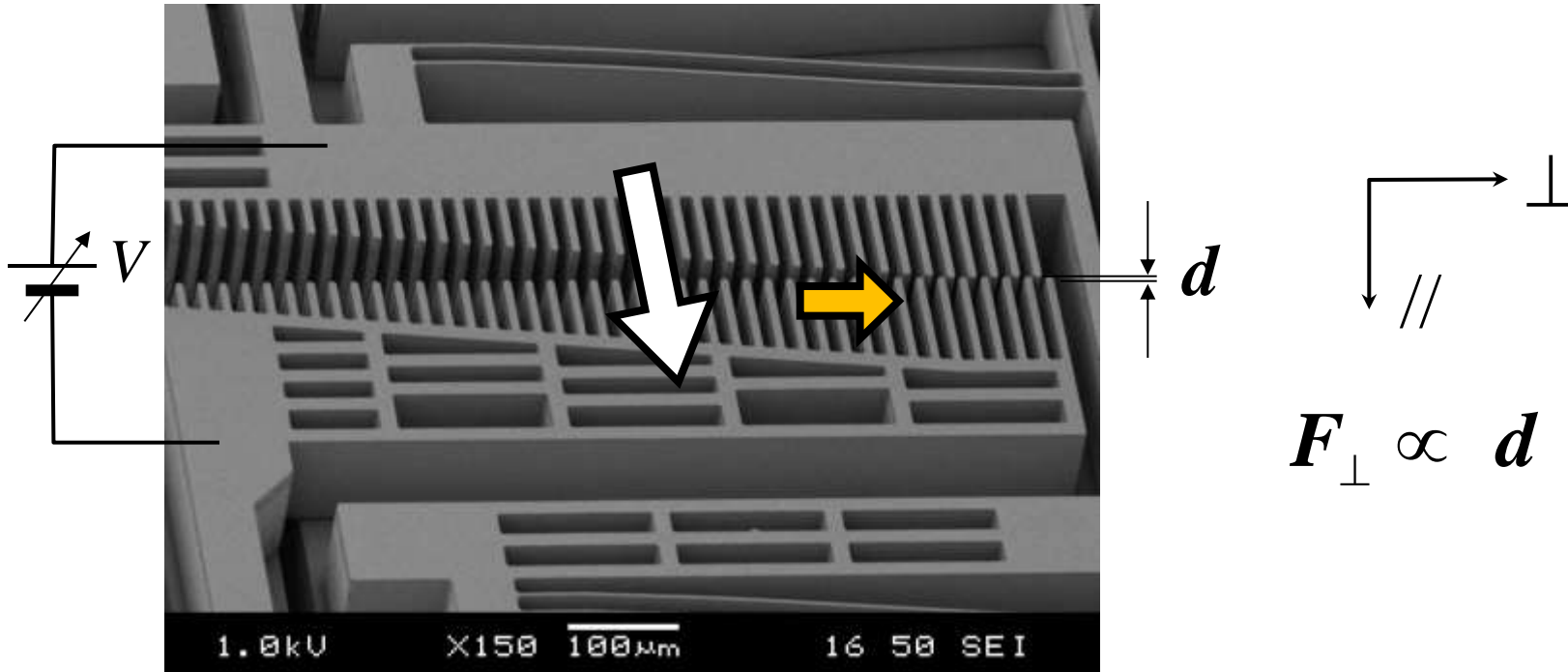
d

$$F_{//} \approx \frac{\epsilon_0 N h}{g} V^2$$



パターンニングを確実に近接露光とし、櫛歯が重なるようにする

linear engaging 型 櫛歯は F_{\perp} を半減できる



$$F_{\perp} \propto d$$

$$F_{//} = \epsilon_0 \frac{N_f h}{g} V^2$$

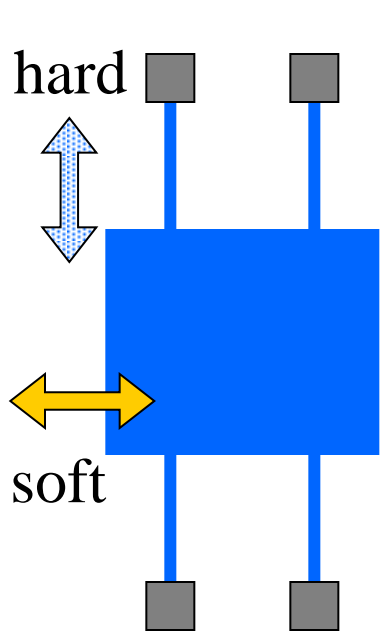
d に無依存

$$F_{\perp} = \frac{N_f \epsilon_0 h d}{2} \left(\frac{1}{(g-x)^2} - \frac{1}{(g+x)^2} \right) V^2$$

d に比例

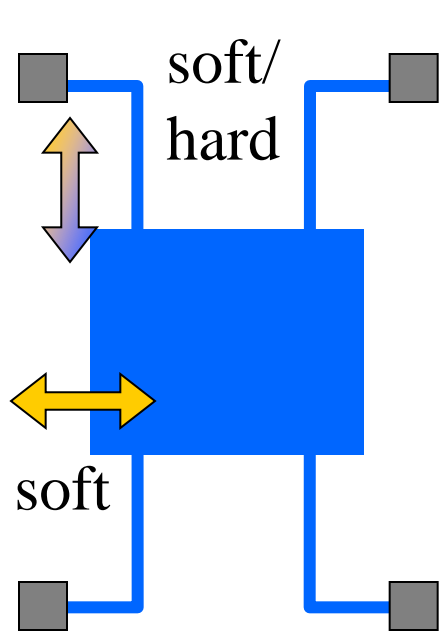
重なり幅 d を減らせるということは、
目的変位//方向に対して⊥方向の力を減らせることになる。

バネの柔らかい / 硬い方向



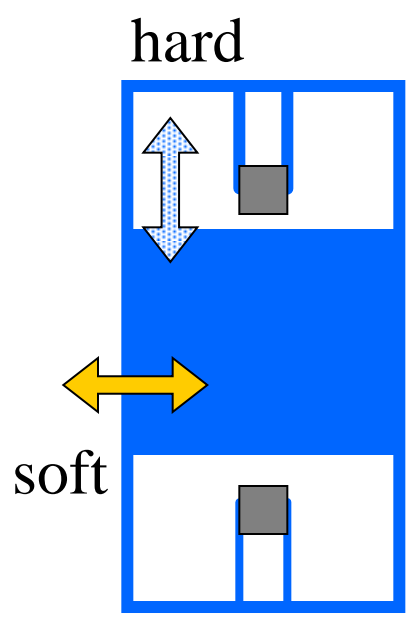
Tether
(牛馬をつなぐロープ)

梁が大変位する際には伸びつつ曲がる。変位は非線型。



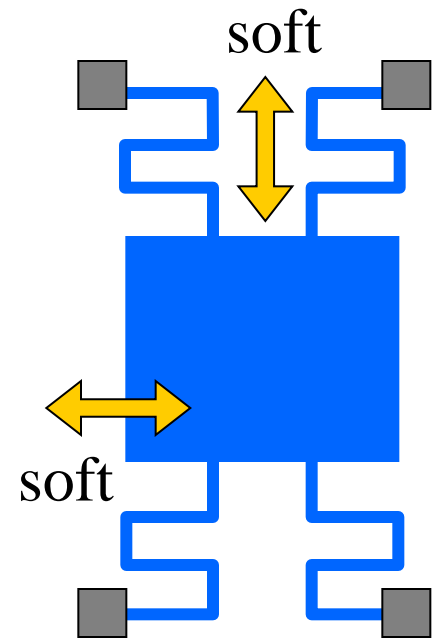
Folded

梁に加わる引張り応力が緩和される。変位は線形より。



Folded-flexure

変位させたい軸方向にだけ動く。

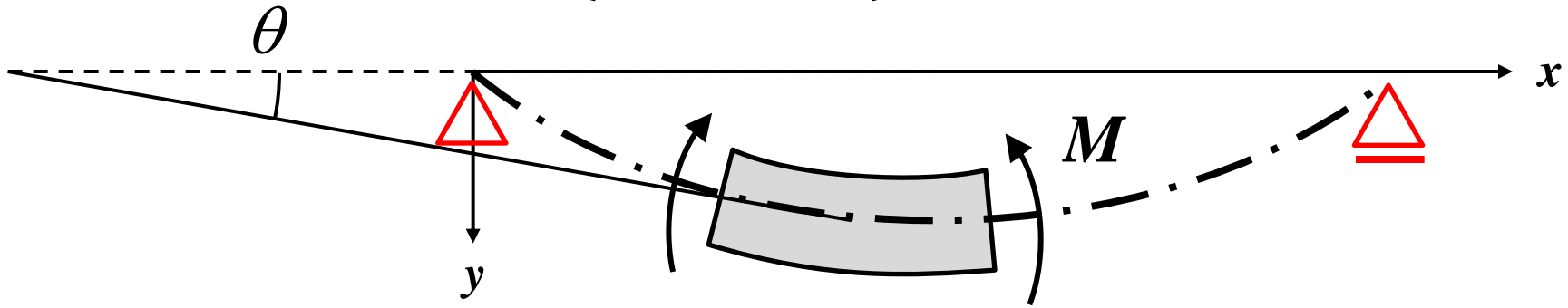


Meander

どの方向にも動いてしまう。電磁駆動のように対称性が良い力なら組合せ良。

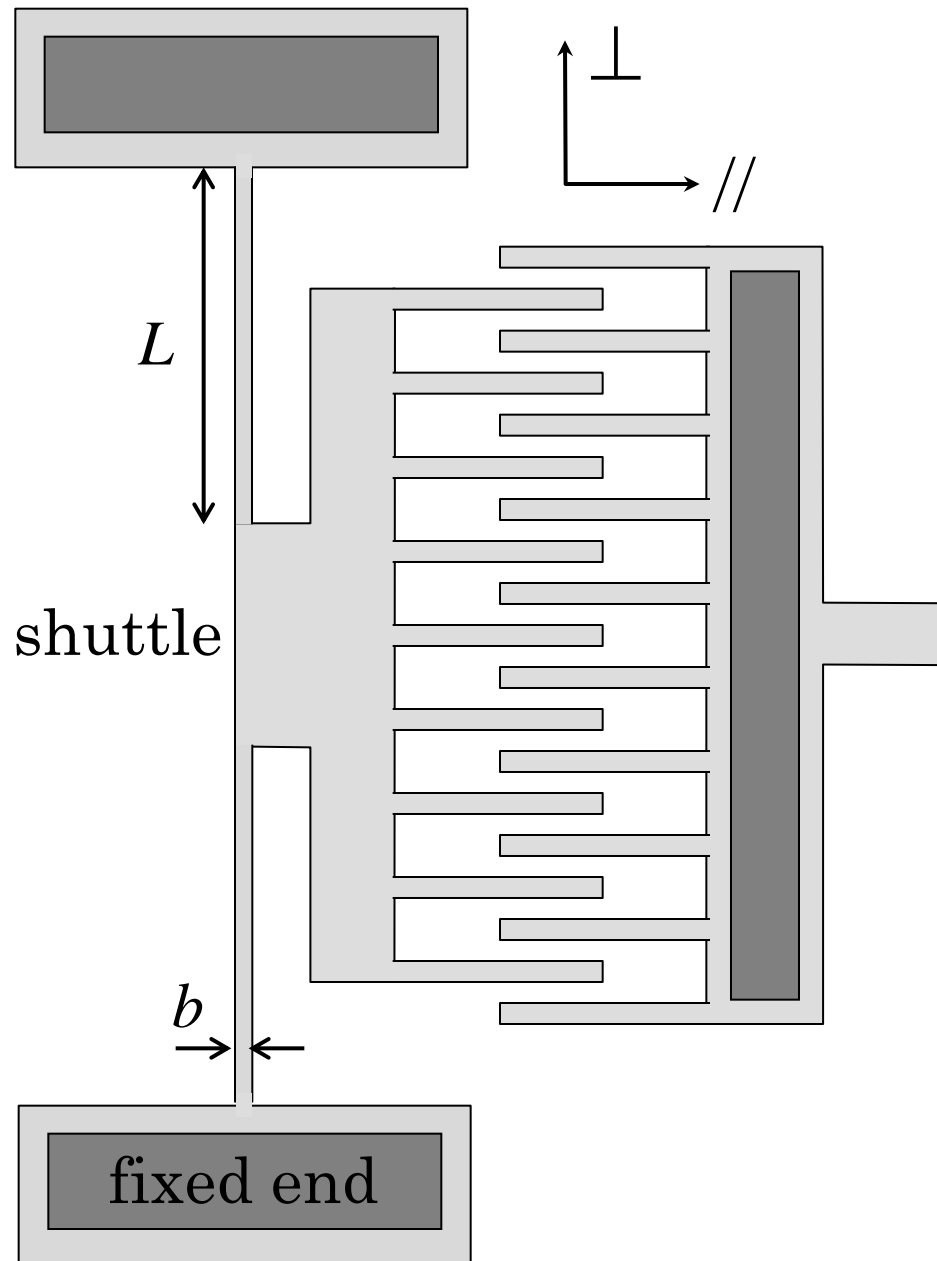
学部の材料力学で習う梁のたわみは

$$\frac{M}{EI} = \frac{1}{R} = \frac{\frac{d^2 y}{dx^2}}{\left\{ 1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right\}^{3/2}} \approx -\frac{d^2 y}{dx^2}$$



曲げモーメント M のみを考慮している
細長い梁を仮定し、せん断力 F は無視している: 許せる
回転支持や移動支持を仮定し、
伸び縮みは通常考慮しない: 注意が必要

Tether型の両端固定バネの異方性



$$\begin{cases} k_{\parallel} = 2Ehb^3 / L^3 & M \text{ で変形} \\ k_{\perp} = 2Ehb / L & \sigma \text{ で変形} \end{cases}$$

$$\frac{k_{\perp}}{k_{\parallel}} = \left(\frac{L}{b} \right)^2$$

例：真直ぐ状態を仮定し

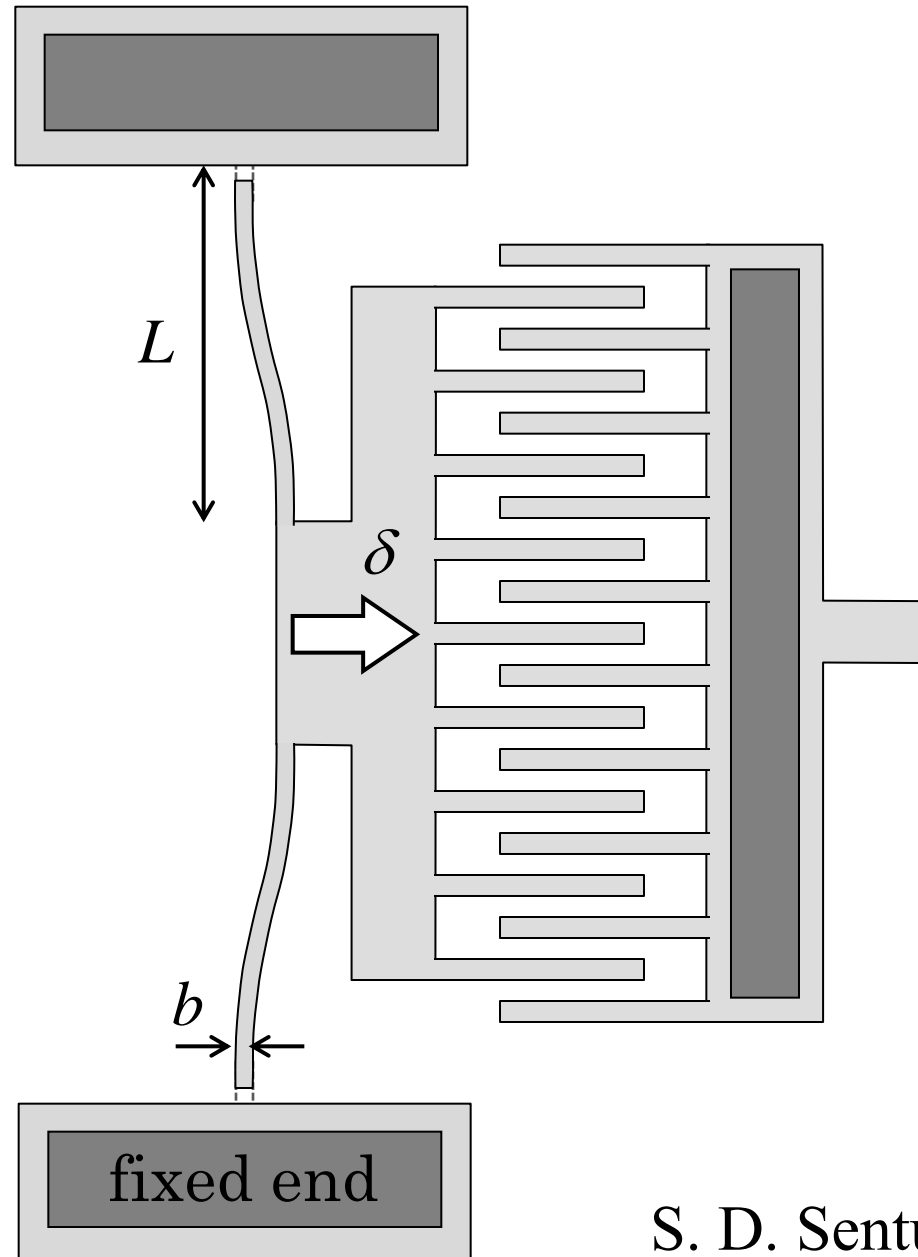
$L=500\mu\text{m}$, $b=2\mu\text{m}$ で

62500倍の異方性

⊥方向の変位を抑制できる

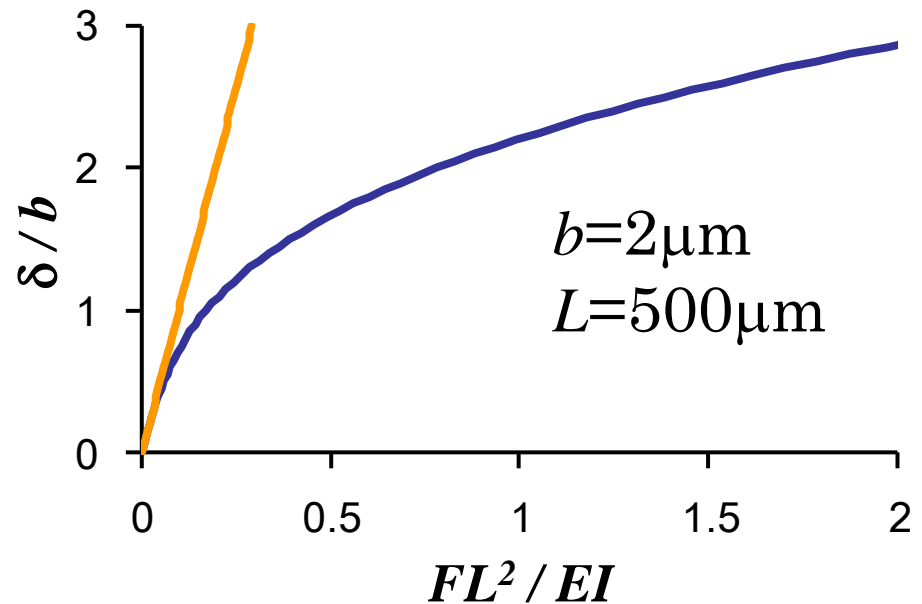
但し、変位 $\delta \sim 0$ のとき

Tether型の両端固定バネの非線形性

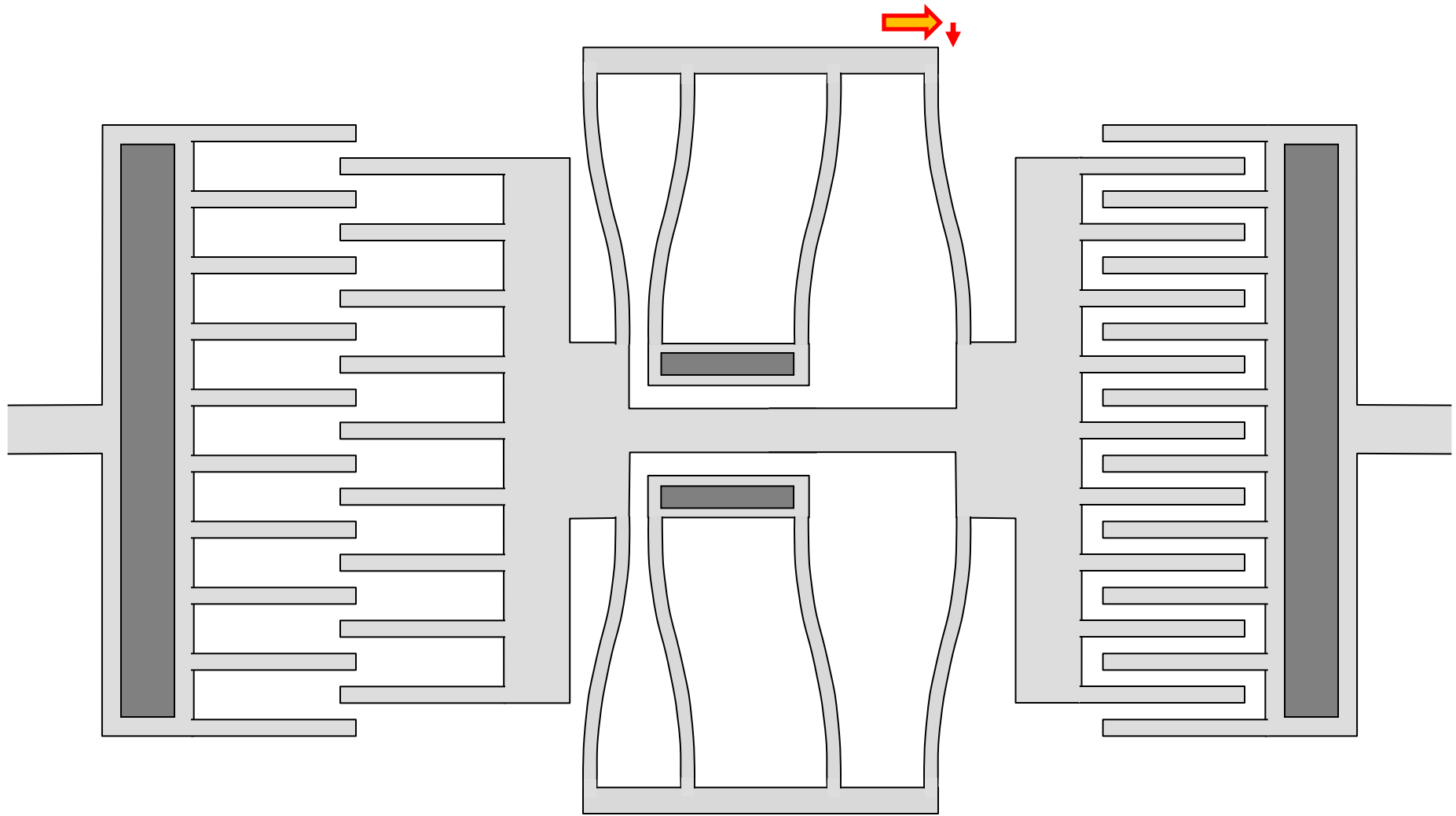


$$\frac{FL^2}{E \frac{hb^3}{12}} = \frac{\pi^4 b}{4L} \left\{ \frac{\delta}{b} + \frac{3}{4} \left(\frac{\delta}{b} \right)^3 \right\}$$

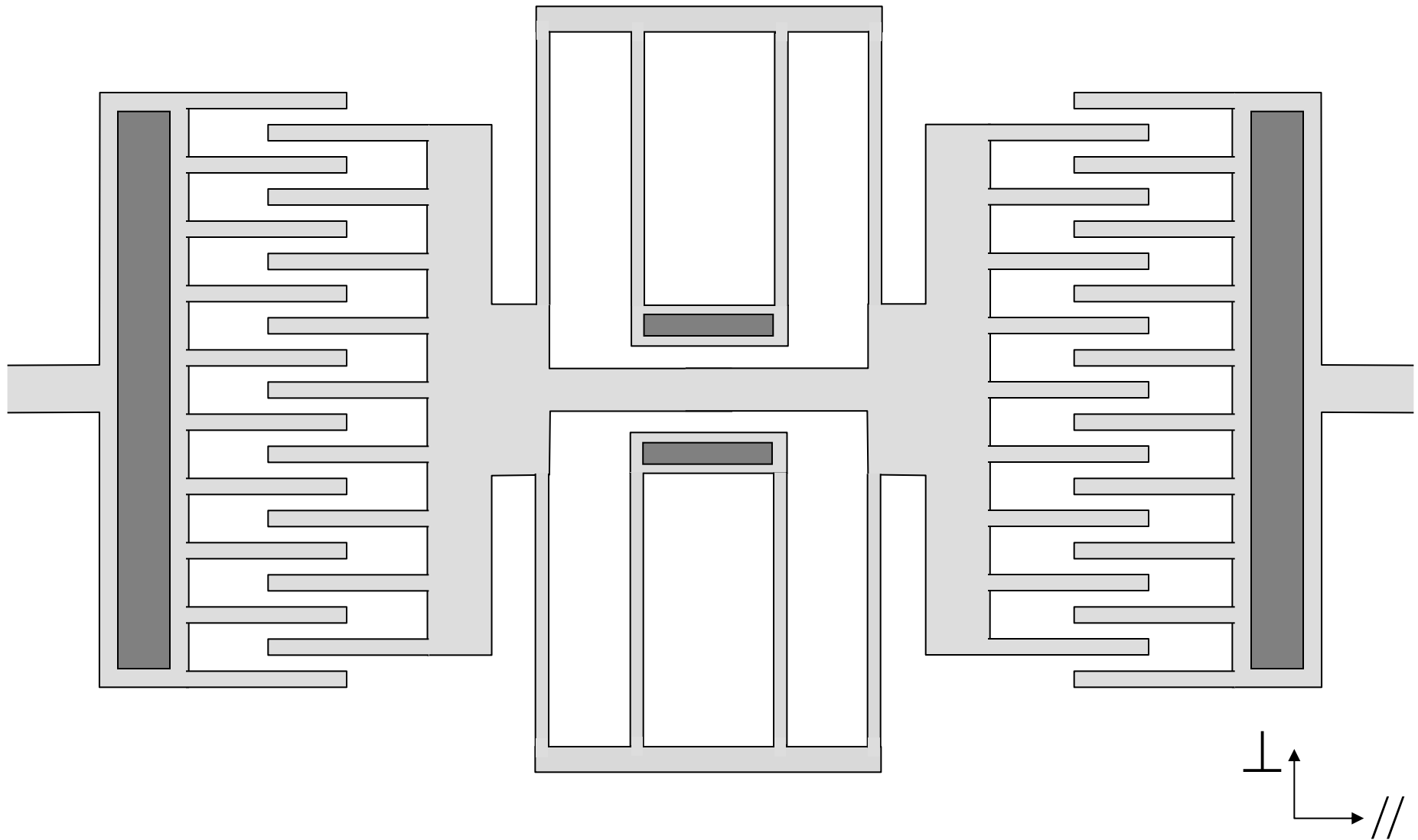
バネが伸びないと変位できない。
線形範囲の目安 $\delta \sim b$ 。



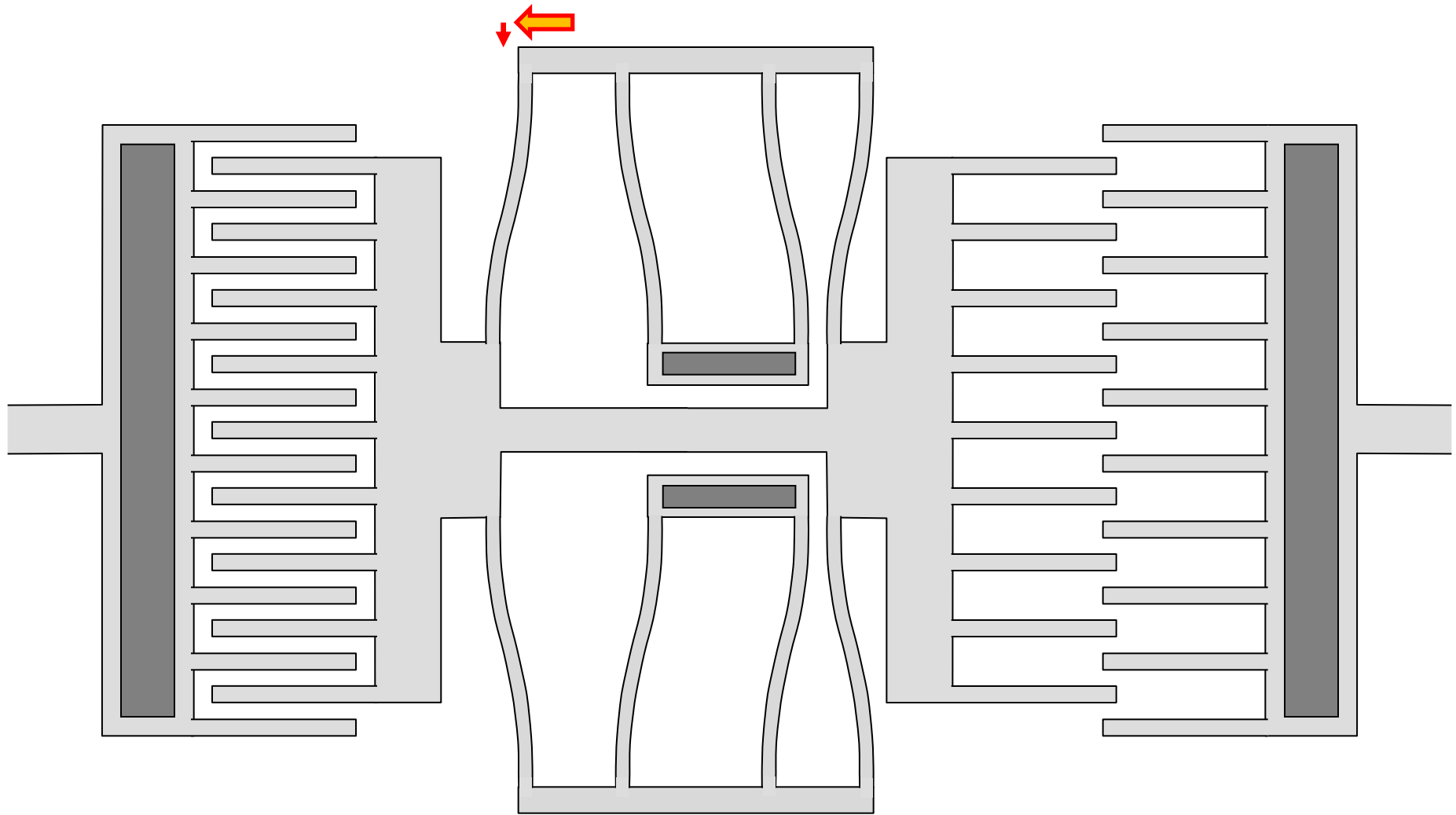
Folded-flexure suspension が基本



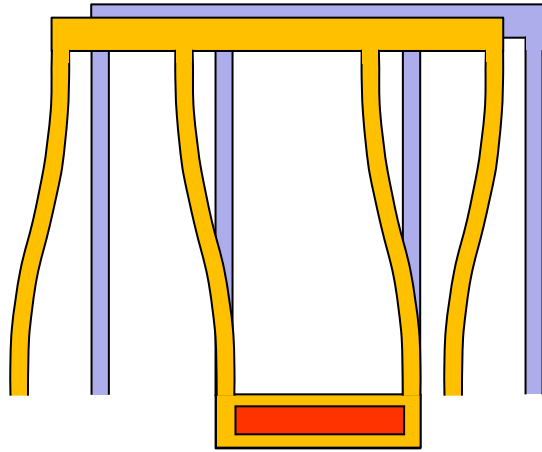
Folded-flexure suspension が基本



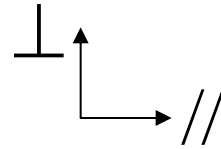
Folded-flexure suspension が基本



Folded-flexure suspension は // 変位は足し、⊥ 変位は打ち消し合う



注: ペアとなるバネ長さは
同一にすること
効果が減ってしまう



バネの異方性

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{//} = 2Ehb^3 / L^3 \\ k_{\perp} = 2Ehb / L \end{array} \right.$$

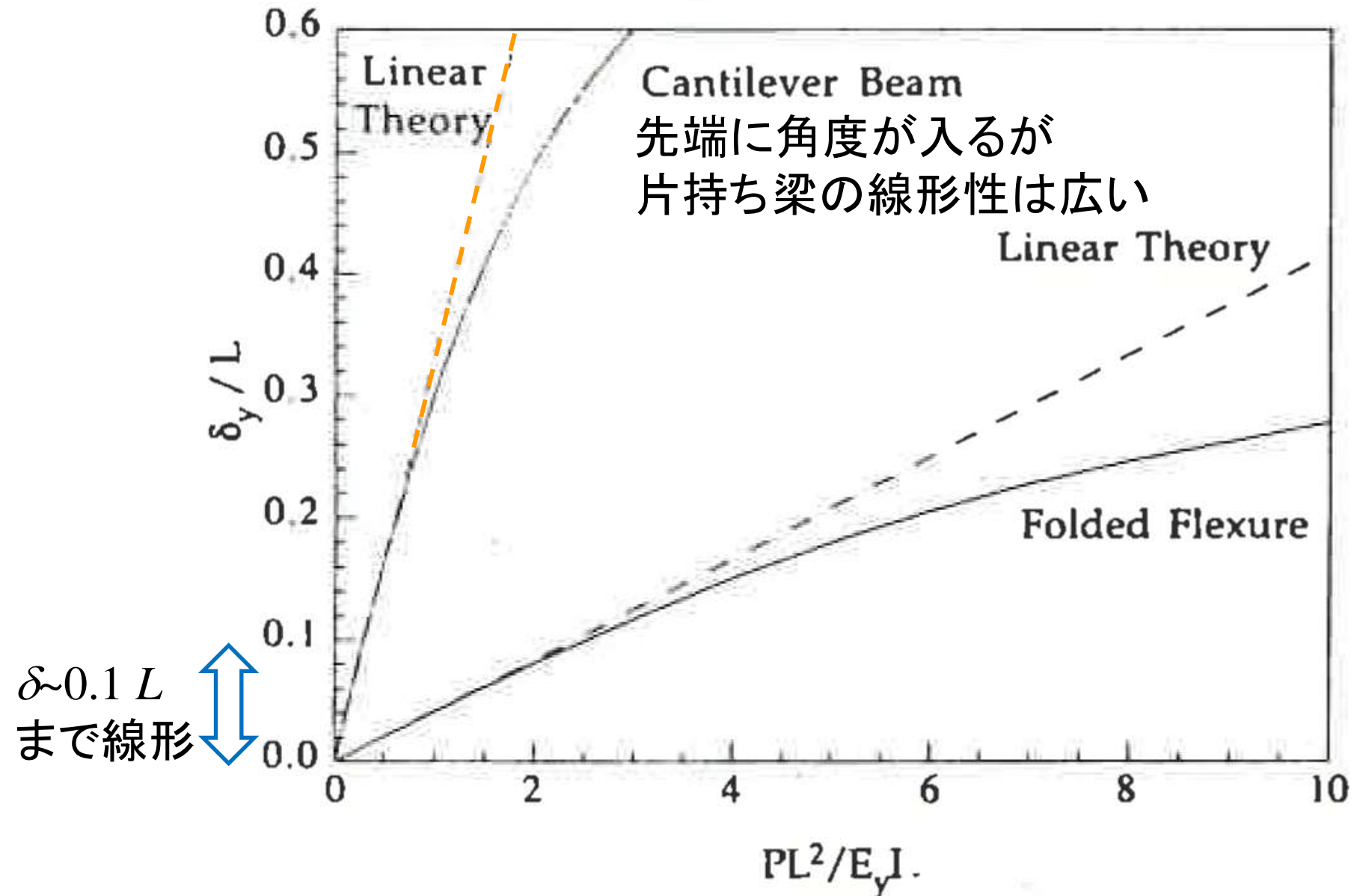
バネの変位は1/2で良いが、4つ

長さ $2L$ の梁が4つ

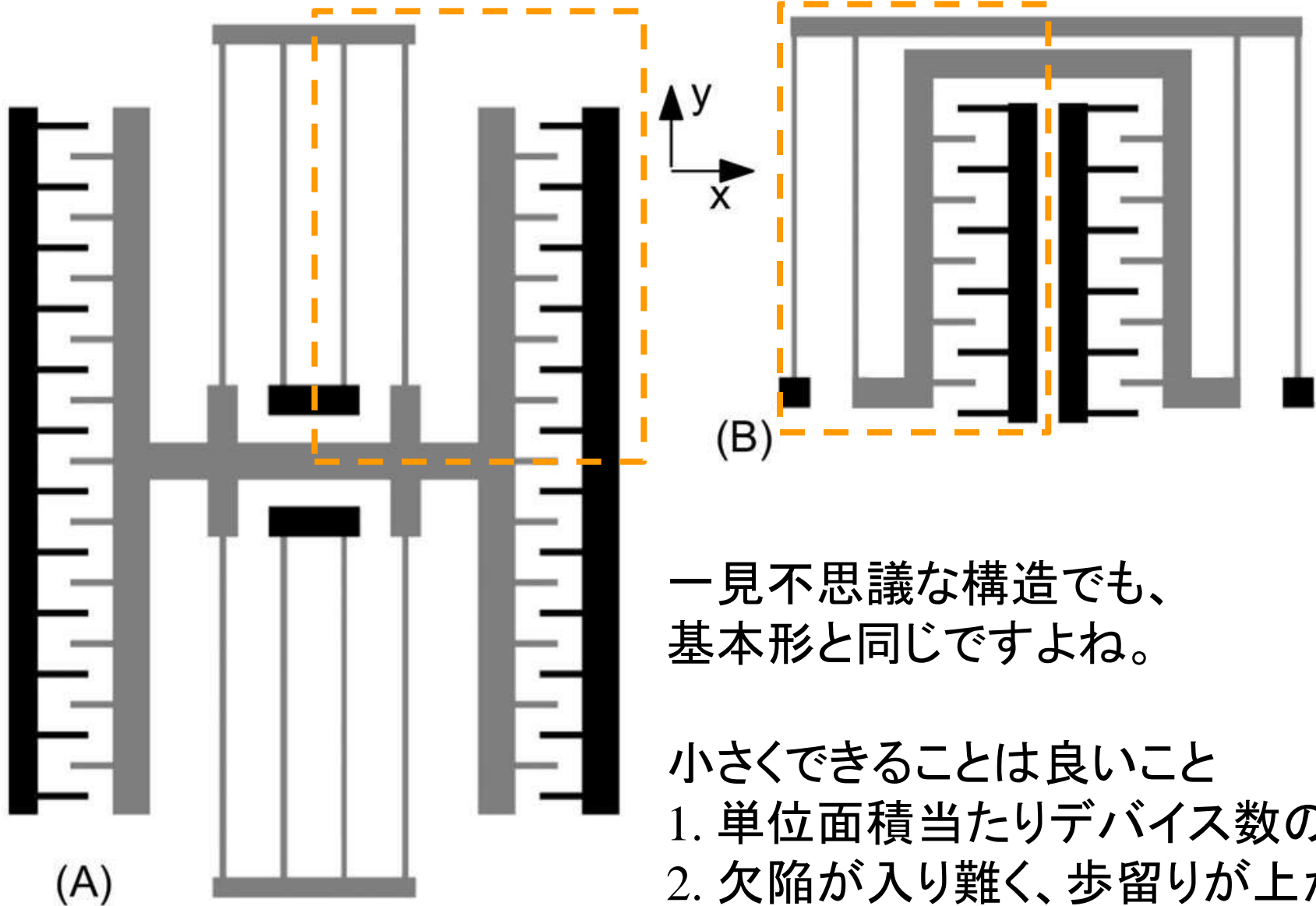
$$\frac{k_{\perp}}{k_{//}} = \left(\frac{L}{b} \right)^2$$

例: 真直ぐ状態を仮定し
異方性はFixed-fixed beamと同じ

Folded-flexure suspension 線形領域



小型化は検討の価値あり

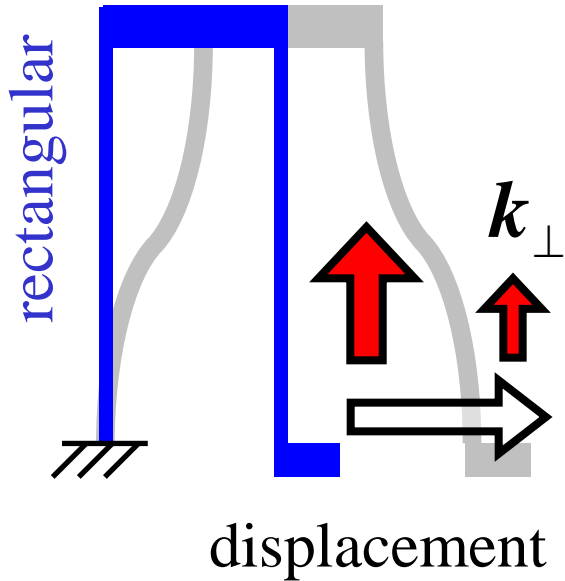


一見不思議な構造でも、
基本形と同じですよね。

小さくできることは良いこと

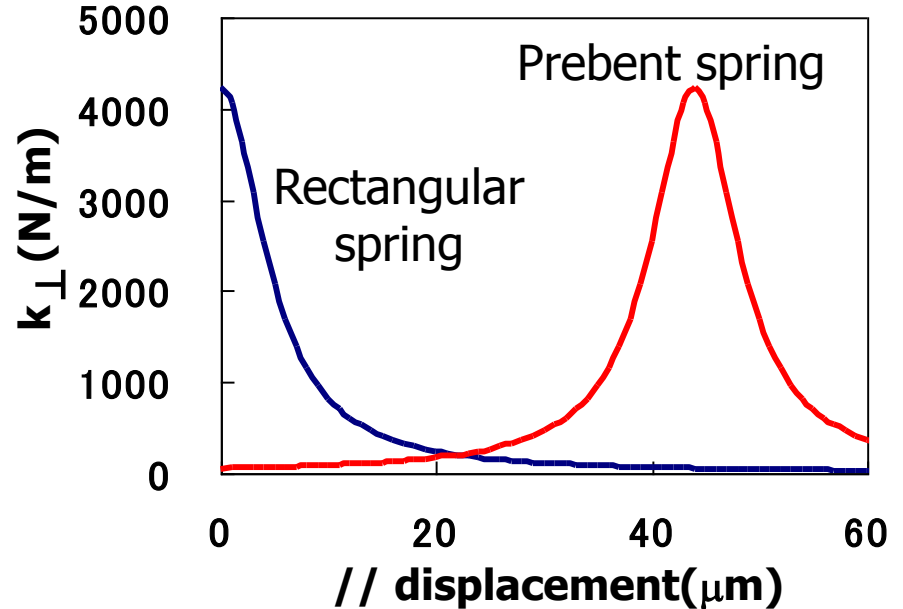
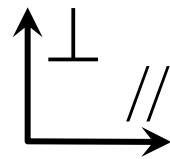
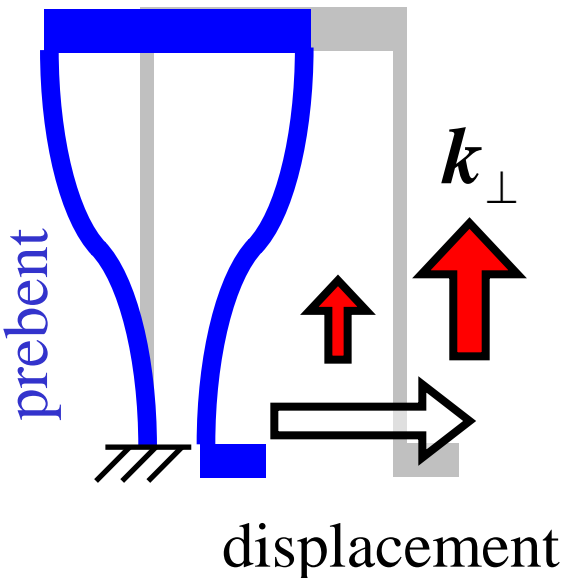
1. 単位面積当たりデバイス数の増加
2. 欠陥が入り難く、歩留りが上がる

Prebentバネの長所 (力増加に合わせて丈夫に)



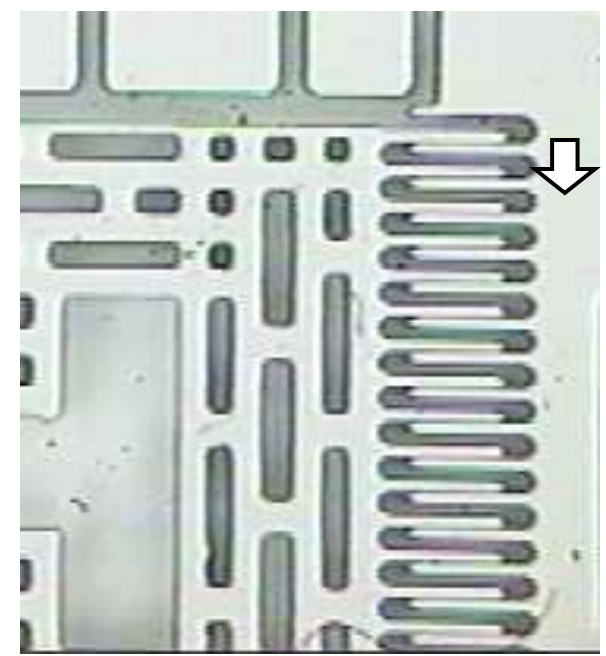
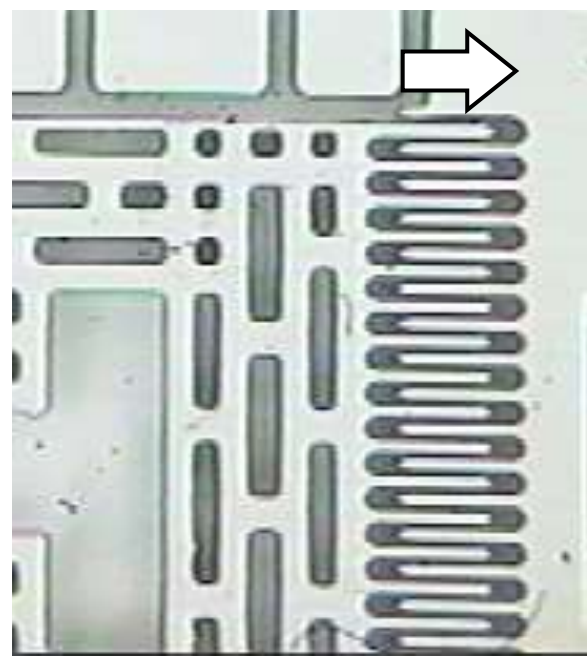
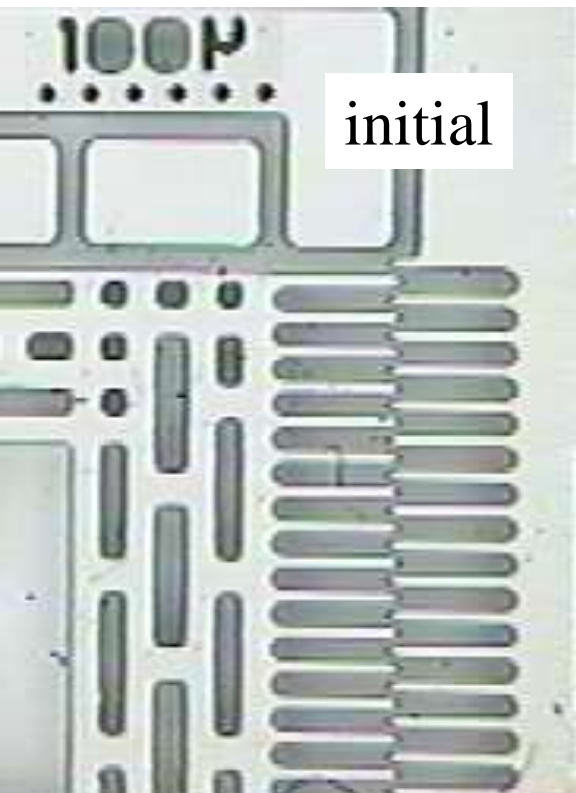
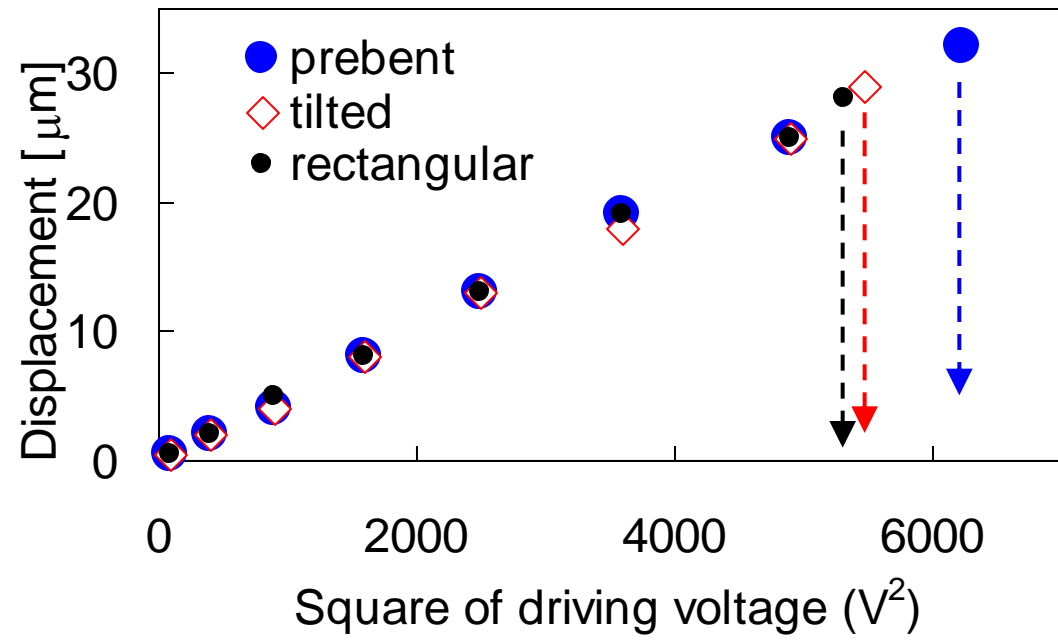
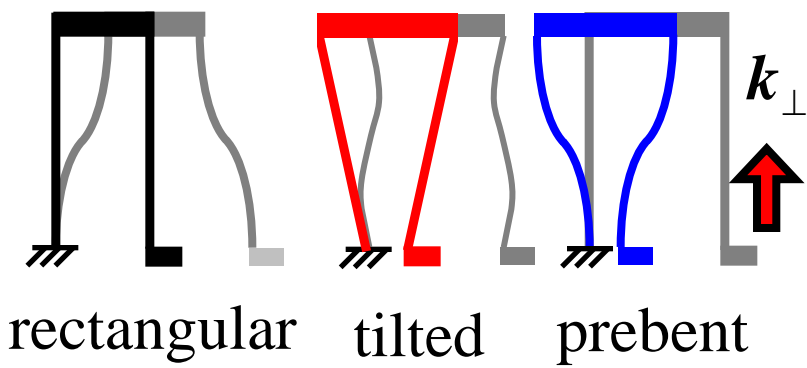
Displaced condition is weak (smaller k_{\perp}) in the direction perpendicular to the displacement.

Risk of buckling



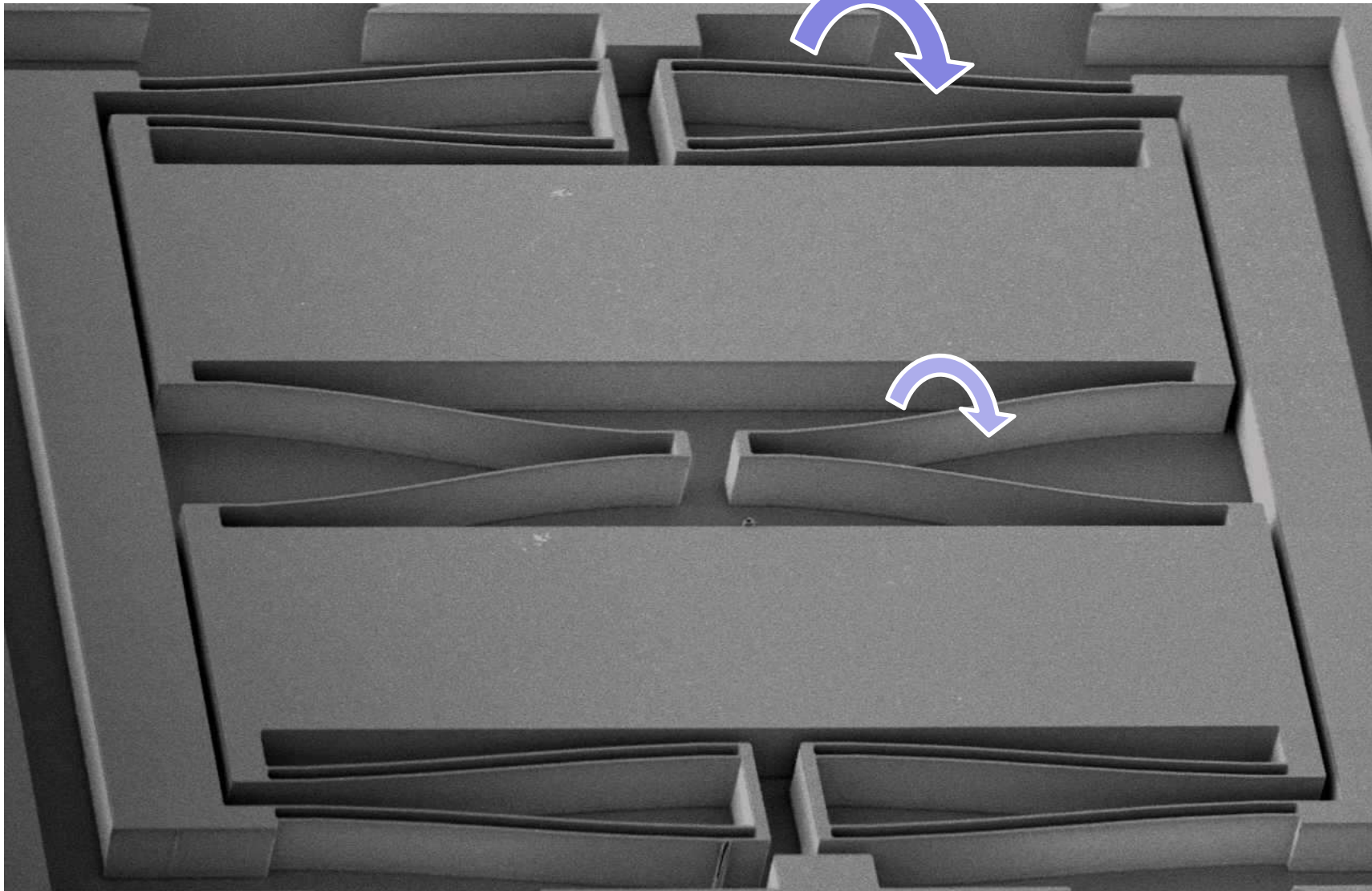
Displaced condition is stiff (larger k_{\perp}) in the direction perpendicular to the displacement.

変位垂直方向の pull-in が最大変位を決める



ねじれ剛性upにはサスペンションの2重化

2本の配置幅で効果



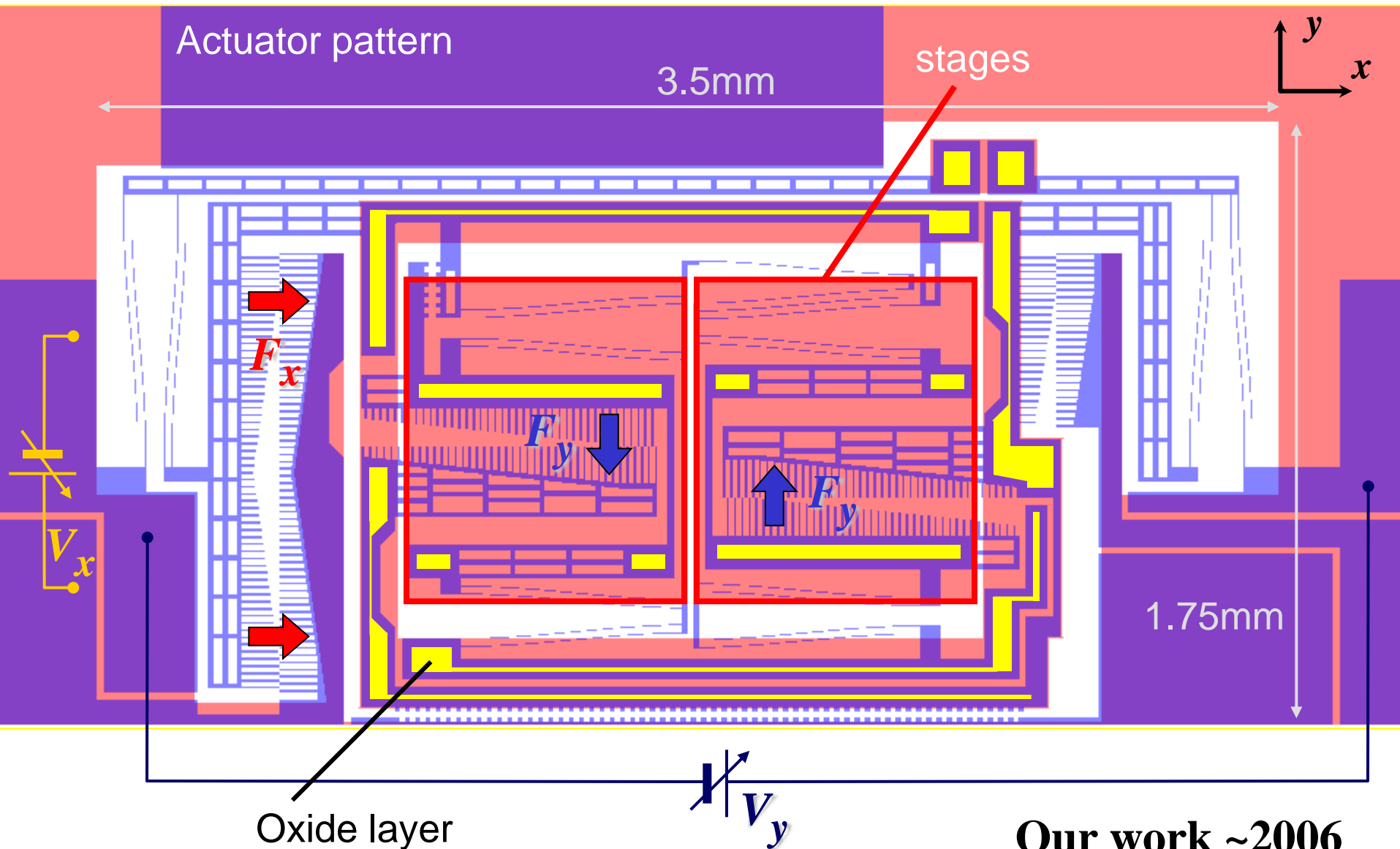
2.0kV

X70 200µm

20 50 SEI

XY ステージの例

デザイン (x :linear, y :counter mass)

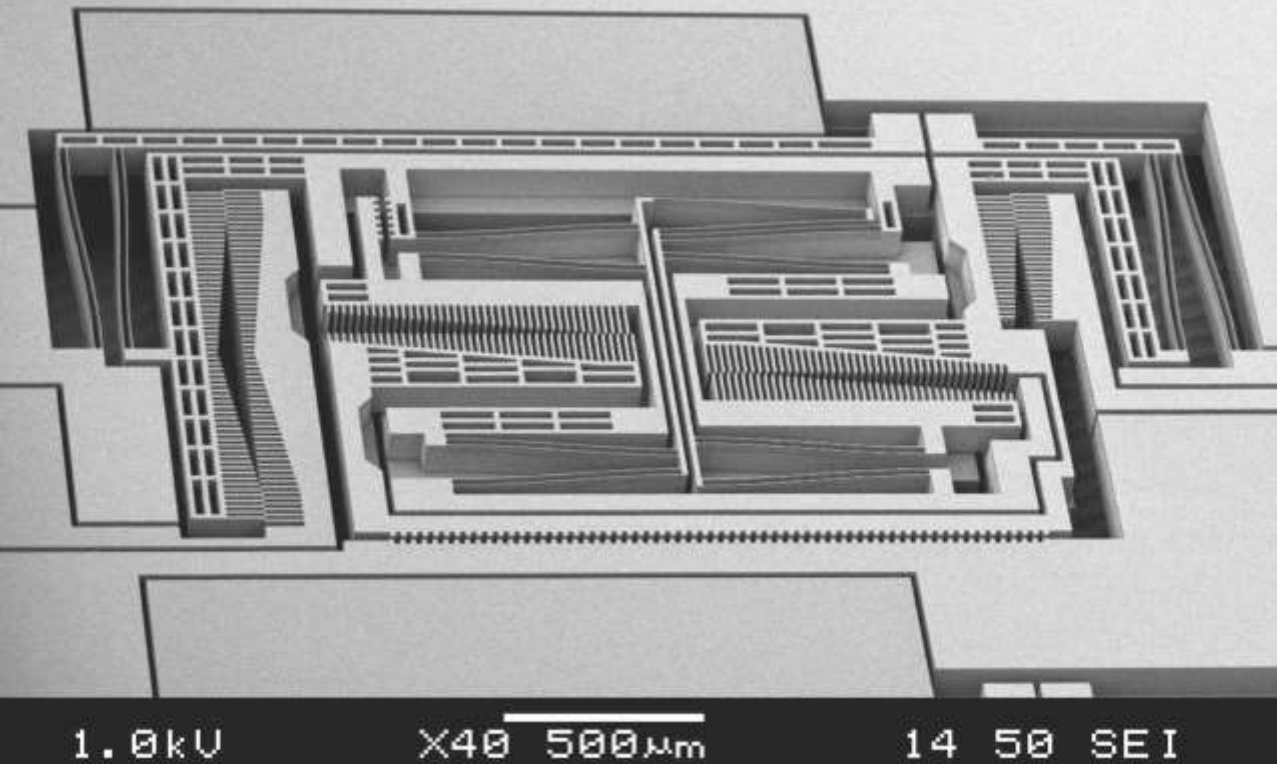


できるだけ同じデザインのパネで支える。

Our work ~2006
JJAP 47 (2008) 3226

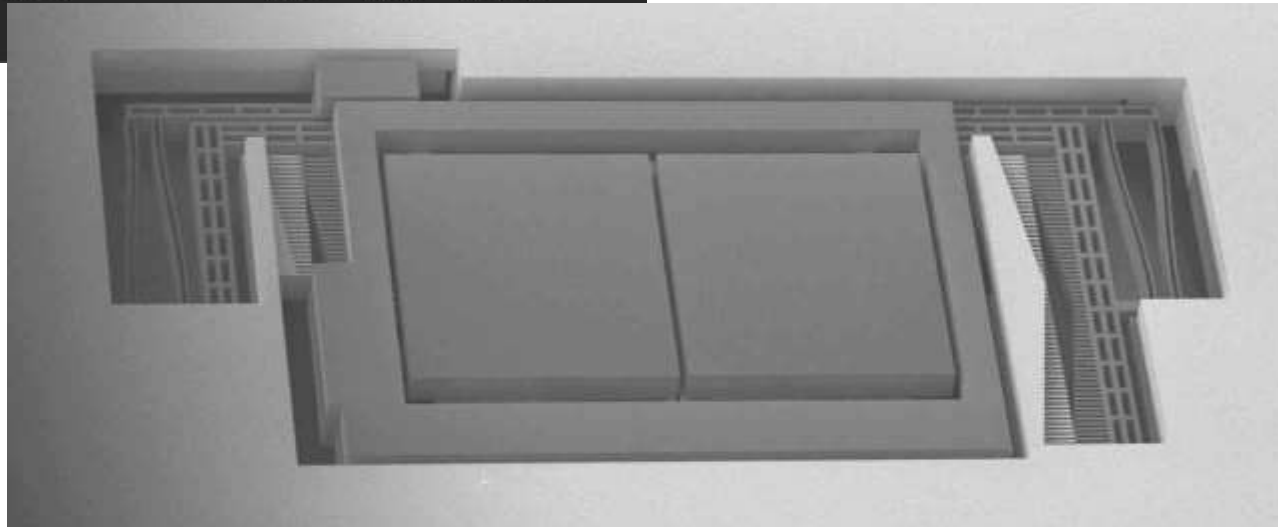
製作デバイス: 基本的に忠実な組み合わせ

Actuator side

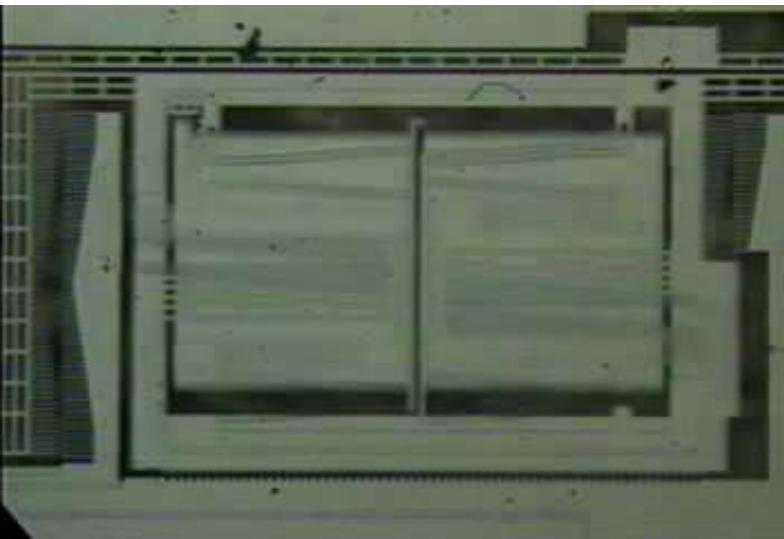
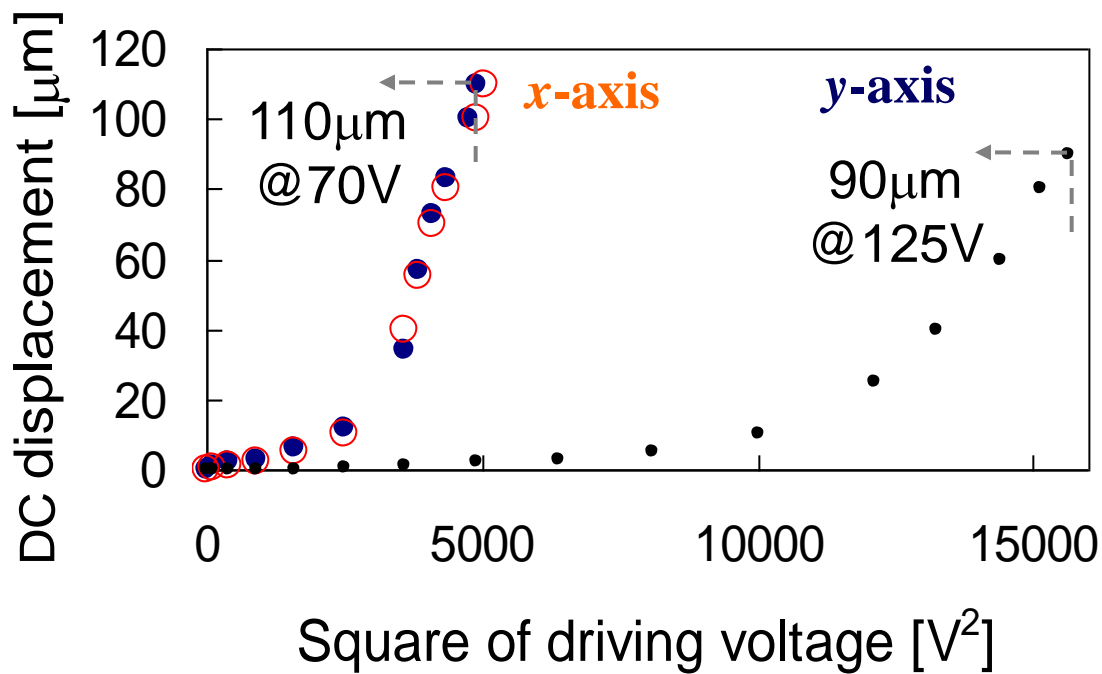
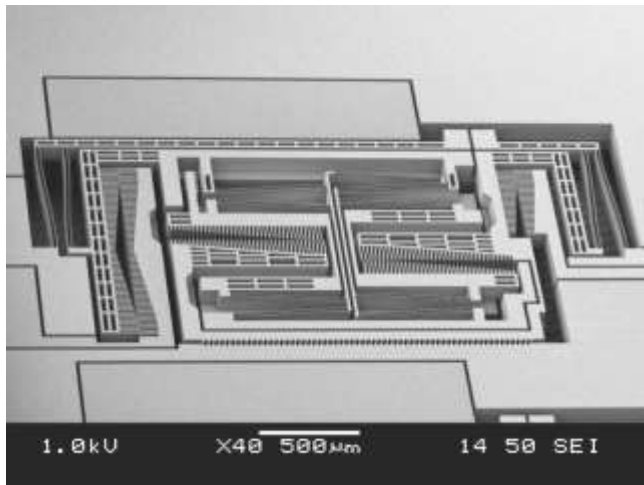


Stage: 1.6mm^2
Fill factor: 30%

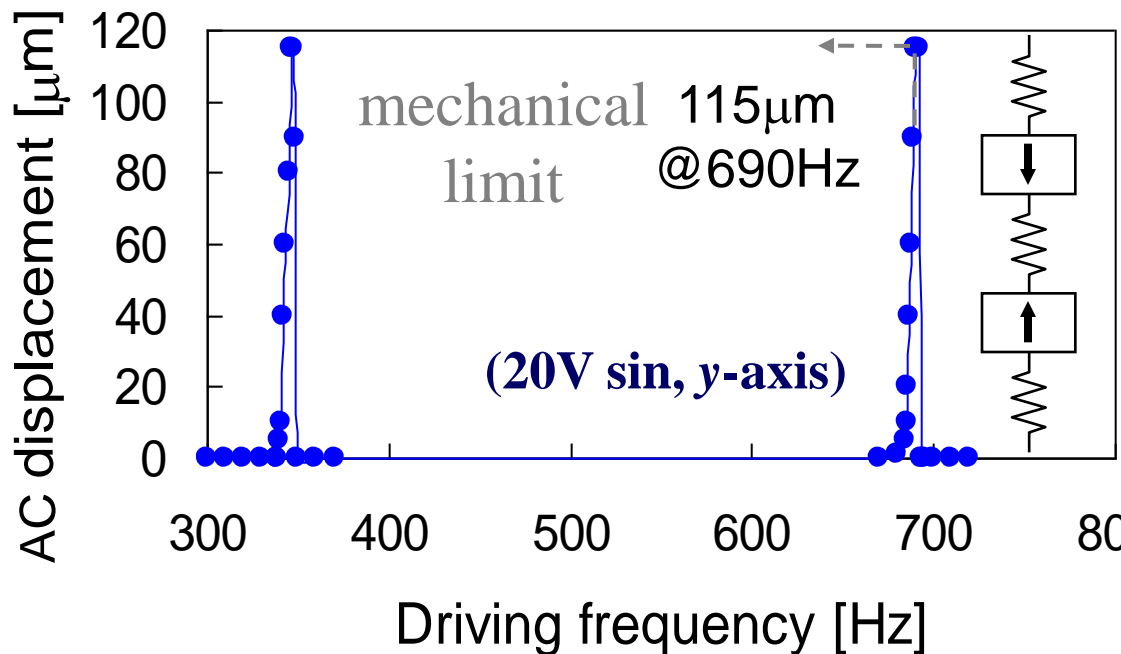
Stage side



変位特性



Y-axis motion does not disturb x-axis motion.



熱アクチュエータ

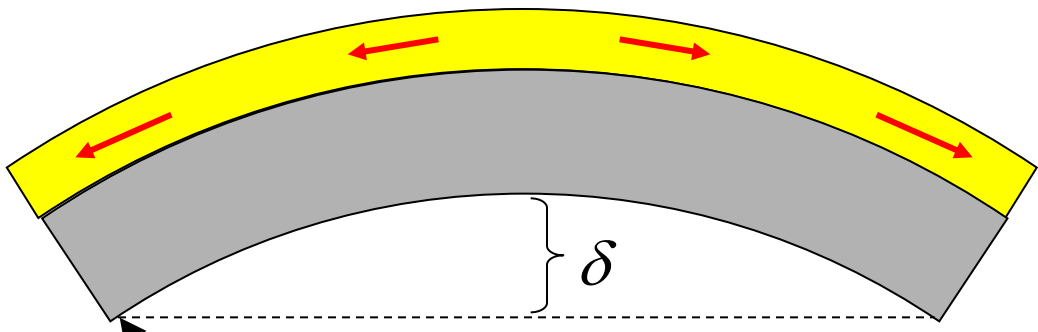
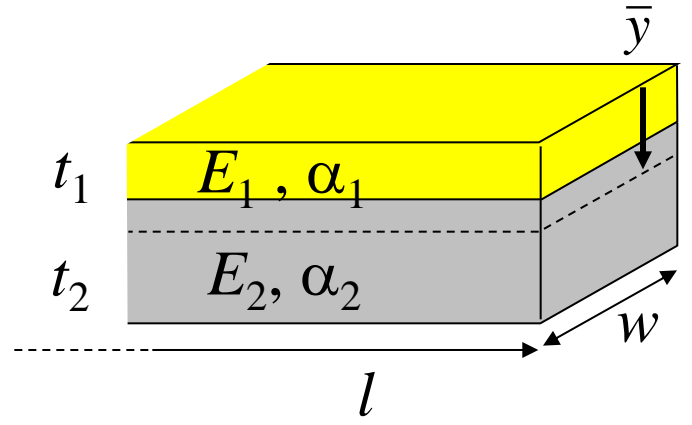
長所: 製作容易。安全な材料。

短所: 信頼性の確保

応答性: 熱容量次第

熱膨張が異なる材料の利用が基本

Relatively large expansion



Bending moment
$$M = \frac{t_1 + t_2}{2} \frac{(\alpha_2 - \alpha_1) \Delta T}{\frac{1}{E_1 w t_1} + \frac{1}{E_2 w t_2}}$$

R Position of neutral plane

$$\bar{y} = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_1 t_1^2 + E_2 \{(t_1 + t_2)^2 - t_1^2\}}{E_1 t_1 + E_2 t_2}$$

Radius of curvature

$$R = \frac{E_1 \frac{w}{3} \{(t_1 - \bar{y})^3 + \bar{y}^3\} + E_2 \frac{w}{3} \{(t_1 + t_2 - \bar{y})^3 - (t_1 - \bar{y})^3\}}{M}$$

Bending displacement

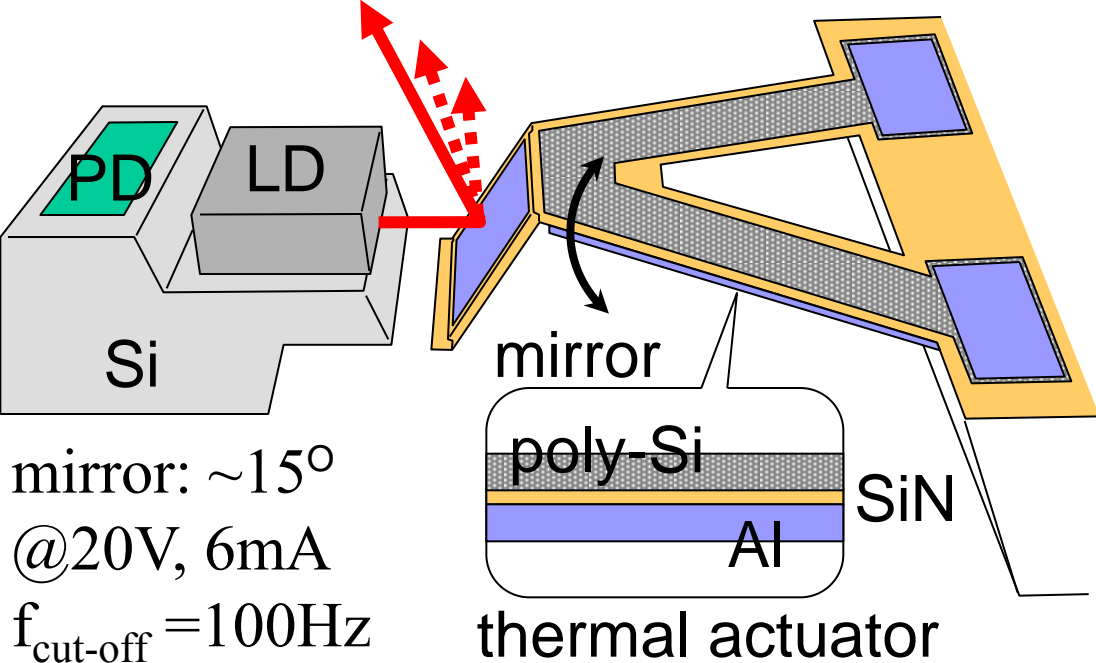
$$\delta = l^2 / 8R$$

V字形カンチレバー熱駆動光スキャナ

片持ち梁を利用できることはバネの広い線形性を活用できて良い

材質	熱膨張率 α [$10^{-6}/K$]	Young 率 [GPa]	熱伝導率 [W/mK]
Si	2.6	162	170
SiO ₂	0.4	74	
Si ₃ N ₄	2.8	155	18.5
Al	23.0	69	235
Au	14.3	8	318

α の選定に加えて、 ΔT を大きくする。熱伝導率と合わせて形状も重要。



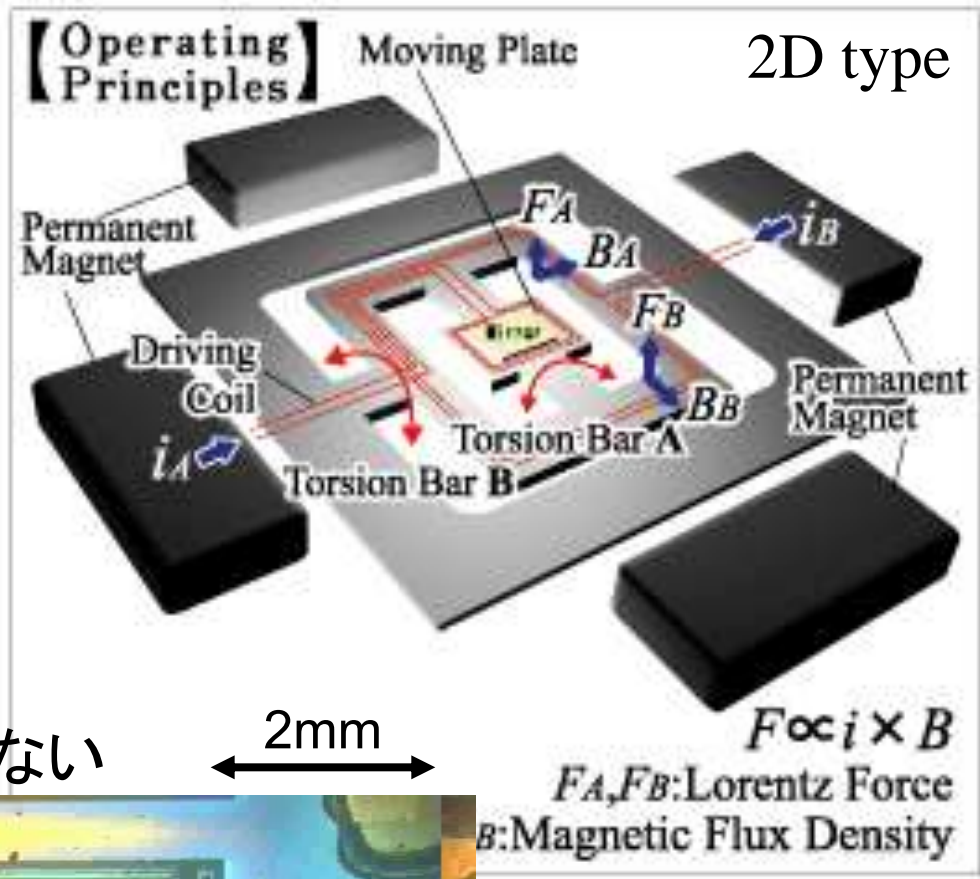
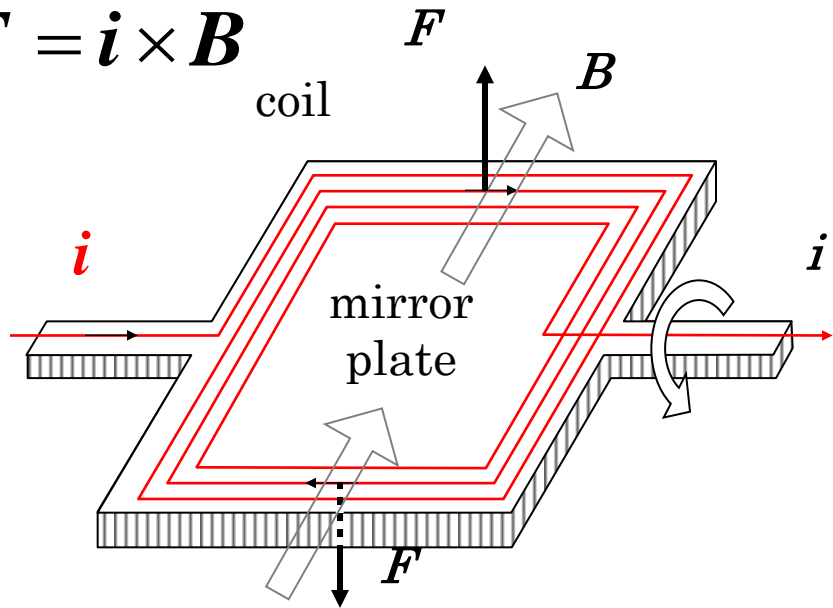
Our work ~ 2001
JLT 21 (2003) 602

電磁アクチュエータ

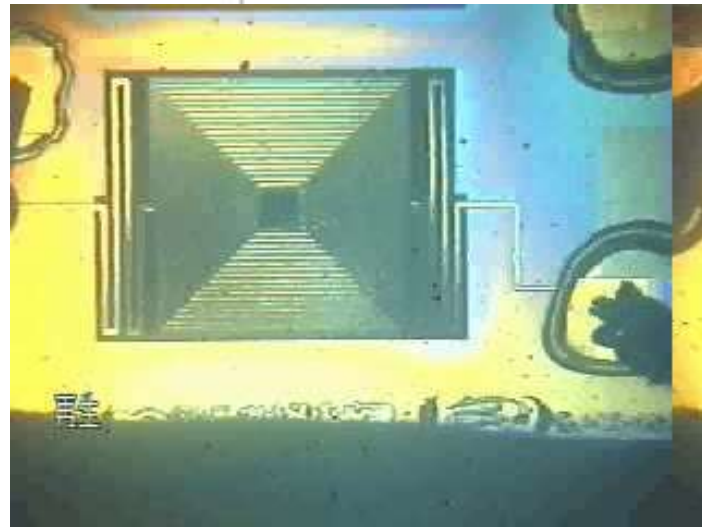
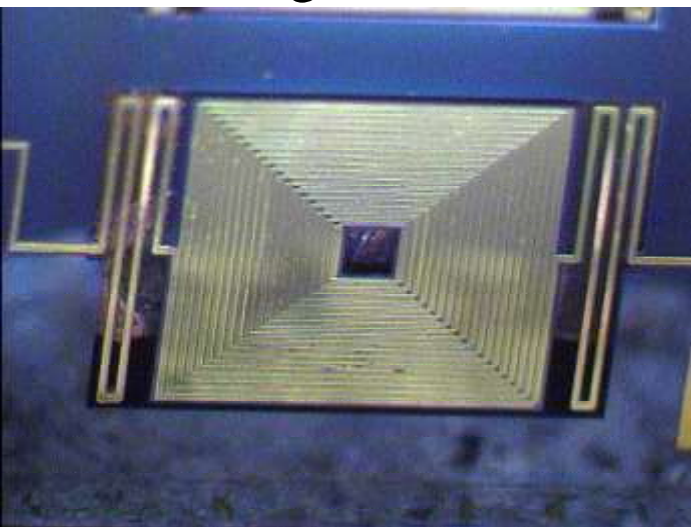
長所: 線形性、広いギャップ、液中でも有効
短所: 外部磁石が必要、結局サイズは大きめ
応答性: H形成は高速だが、I応答は回路次第

電磁駆動型マイクロミラー

$$F = i \times B$$



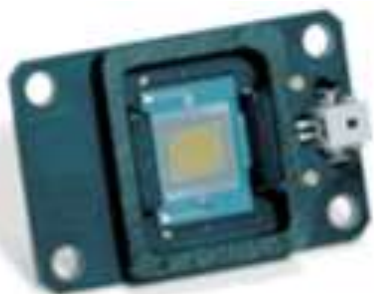
純粋なトルクが得られるため
meanderingばねでも不安定にならない



Our work ~2001,
JJAP 41, 6B
(2002) 4356

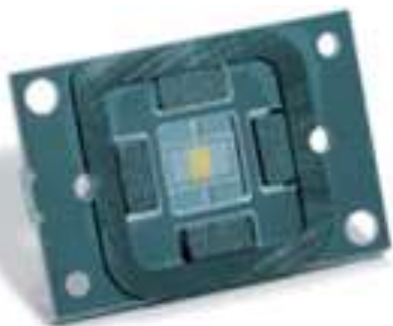
仕様が合えば買っちゃう手もあり

① 1次元



Mirror [mm ²]	<i>f</i> _r [kHz]	θ(mirror) [deg.]
5x6	0.54	+/-17
4x4	2	+/-10
4x4	8	+/-4

② 2次元



Mirror [mm ²]	<i>f</i> _r [kHz]		θ(mirror) [deg.]
【リサーチユスキャン】 7x6	Inner	0.54	+/-17
	Outer	0.24	+/-17
3x4	Inner	1.5	+/-15
	Outer	0.43	+/-15
φ3	Inner	6.3 <i>f</i> _r	+/-7.5
	Outer	0.3 dc	+/-2.25
【ラスタースキャン】 3x3	Inner	0.1 dc	+/-7.5
	Outer	1.5 <i>f</i> _r	+/-7.5



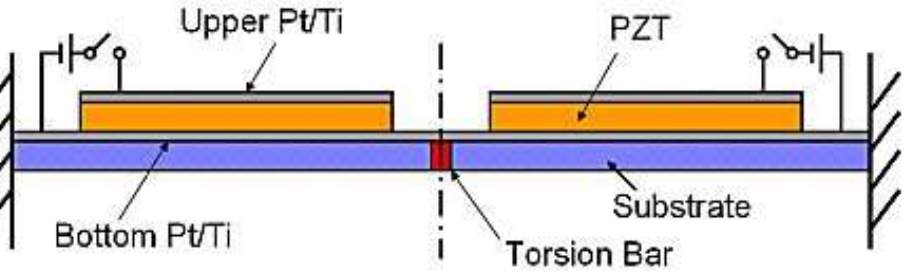
圧電アクチュエータ

長所: 大きな駆動力

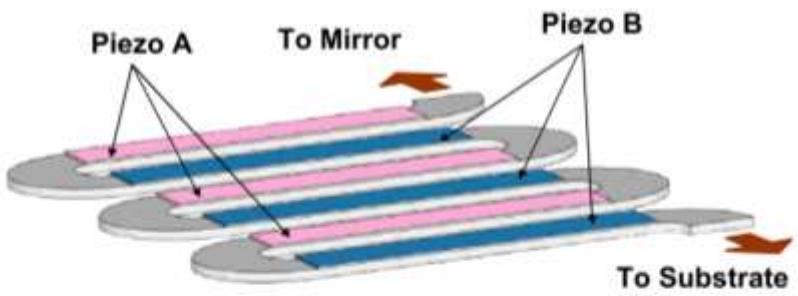
短所: ヒステリシス。材料開発が必要。Pbは避けるべき。

応答性: 材料は高速。機械構造で決まる。

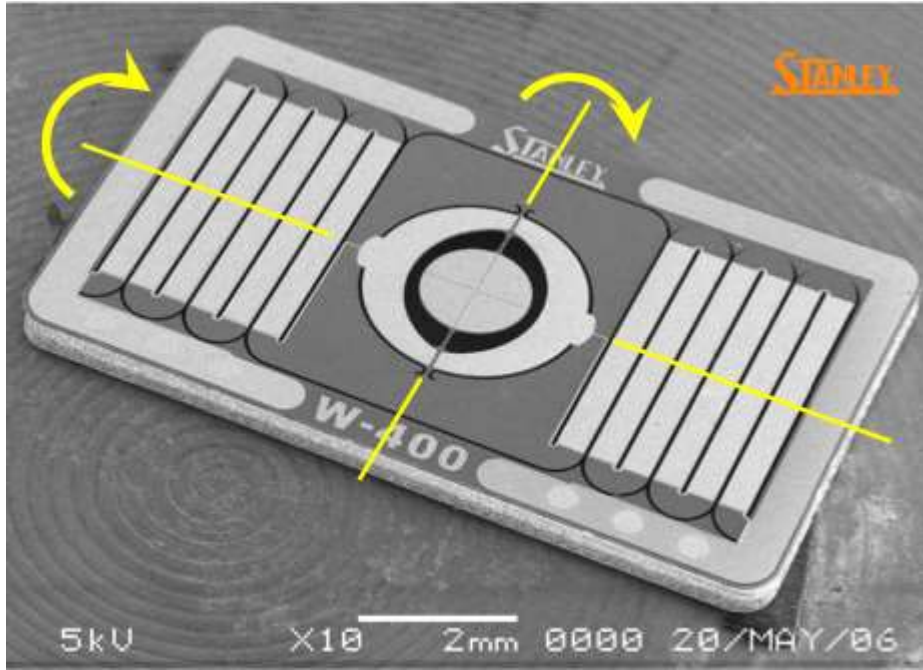
成膜技術があり Si etching できれば



力が出るので、はりのたわみを利用して角度を増倍している



はりのたわみを足し合わせている



Arc Discharged Relative Ion-Plating法
でPZT薄膜を形成

2次元光スキャナ

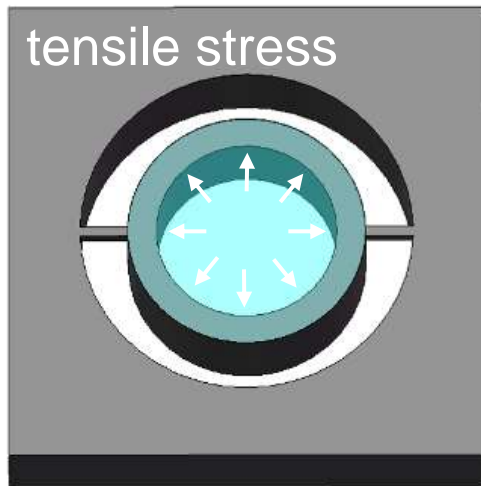
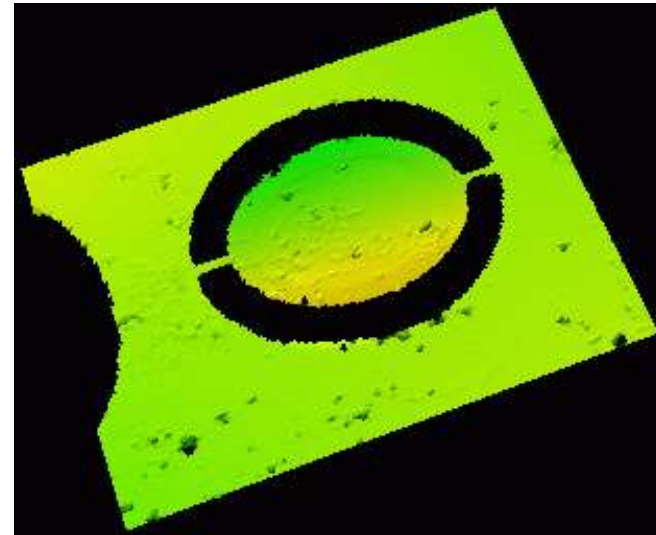
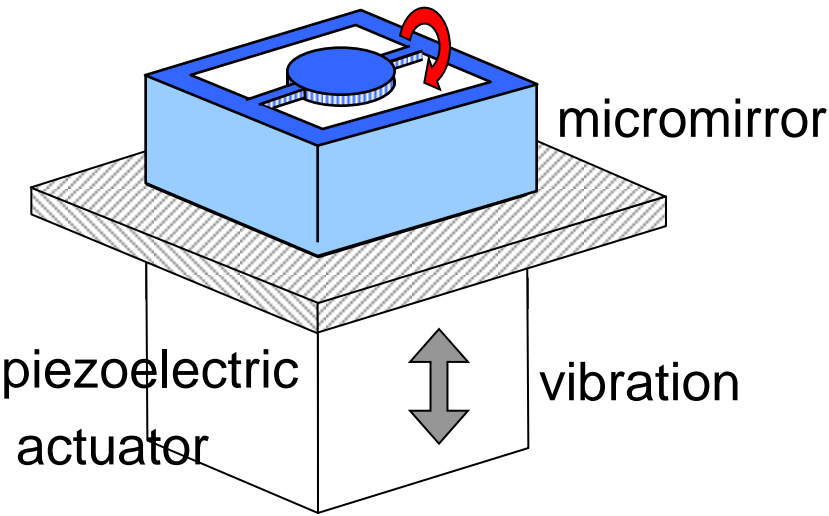
$V_{drive} < 20V$, slow scan 外部 $\theta_{static} \pm 8.6^\circ$

Tani et al., MEMS2007, 699

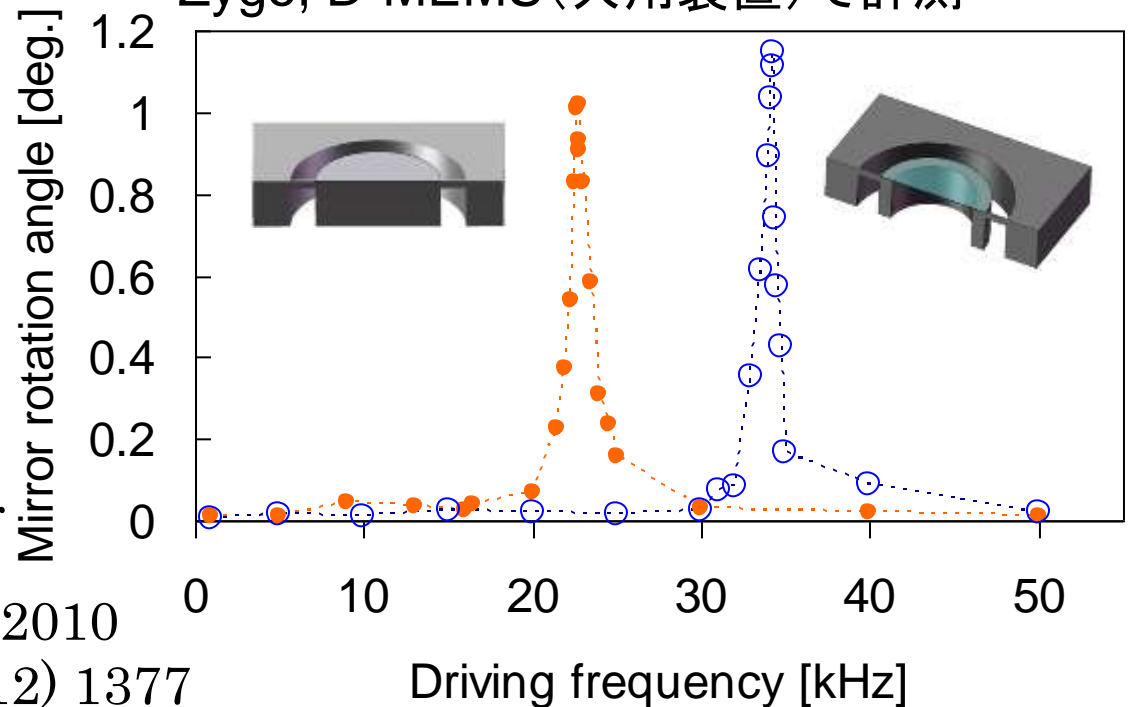


東大 年吉's group ~2004

市販圧電素子 + MEMS素子の手もある



Zygo, D-MEMS (共用装置) で計測



light-weighted & flat mirror

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_\theta}{I}}$$

Our work ~2010
JLT 30 (2012) 1377

まとめ

- ✓ マイクロアクチュエータをツールとして使いたい方向けに、基礎(であろう)部分を紹介した。
- ✓ 静電引力は、必ずしも意図した方向にのみ働く訳ではなく、電気力線がたくさん通る方向に働いてしまう。Pull-in不安定現象もあるのを避けながら利用している。うまく使えれば、消費エネルギーや発熱が少なく、様々なメリットにつながる。
- ✓ 他の駆動方法は、力が大きく、不安定現象も無いので、設計は楽になる。

注: Copyright が気になる部分は削りました。

ナノPlatFormにてマイクロアクチュエータ相談に対応します。