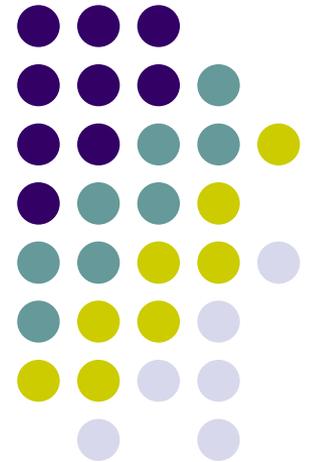
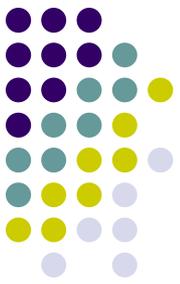


最終講義

単結晶シリコンを対象とした マイクロ機械工学研究

名古屋大学工学研究科
マイクロ・ナノシステム工学専攻
佐藤一雄



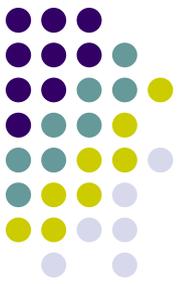


目次

- はじめに(職歴:日立で24年、名古屋で18年)
- 単結晶シリコンのマイクロ機械工学
 - 結晶異方性エッチング
 - シリコン薄膜の機械的性質
- 教育、ものづくり・実習教育
- 大学に求められる変化
- 後進へのメッセージ

はじめに

(佐藤の職歴: 日立で24年、名古屋で18年)



1970 横浜国立大学 工学部機械工学科卒業

1970 (株)日立製作所入社 (中央研究所、機械研究所)

1982 博士号 (東大) 金属塑性加工、材料特性と加工性

1983 マイクロ機械の研究

- MEMSデバイス、システムの研究
- 結晶異方性エッチング、シリコンの加工技術

1994 名古屋大学 マイクロシステム工学専攻 教授

- シリコン単結晶の機械特性評価

2012 名古屋大学退職

職業経歴, 研究テーマ, 学会活動年表

(22才)
1970

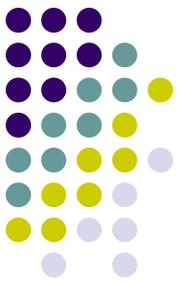
(34才)
1982

(46才)
1994

(58才)
2006

(70才)
2018

所属	産業界 (日立製作所)		大学	
金属塑性加工 (研究対象: 純銅、純鉄)	金属の材料特性、異方性を利用した加工技術開発		博士号取得	
マイクロ機械 MEMS (研究対象: 単結晶シリコン など)			名古屋大学	
	MEMS開発, シリコン結晶異方性エッチングの研究			
	細胞融合装置 精密工学会技術賞		データベース開発・販売	
			マイクロ材料 (薄膜) の強度評価	
学会活動	日本塑性加工学会 日本機械学会	精密工学会	電気学会 IEEE	日本機械学会にマイクロナノ部門設立 船井特別賞 文科大臣表彰



目次

- はじめに(職歴:日立で24年、名古屋で18年)
- 単結晶シリコンのマイクロ機械工学
 - 結晶異方性エッチング
 - シリコン薄膜の機械的性質
- 教育、ものづくり・実習教育
- 大学に求められる変化
- 後進へのメッセージ

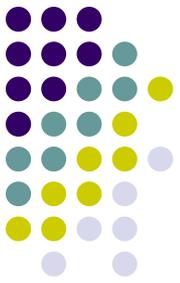


マイクロマシン(MEMS)

MEMS : **M**icro-**E**lectro-**M**echanical **S**ystems
(微小電気機械システム)

- マイクロマシンは生活文化を変える
- マイクロマシン技術を支えるマイクロ・ナノ理工学

すでに使われている マイクロマシン (MEMS) 技術



- マイクロセンサ
圧力・加速度・回転角速度, マイクロフォン
(血圧計) (管内流速計)
(自動車: 空燃比, 衝突検出, 車体制御)
(ゲーム機端末) (携帯電話)
- インクジェットプリンタヘッド
リザーバ、吐出機構 (プリンタ)
- 画像機器
反射型ディスプレイデバイス (プロジェクタ)
- 科学計測機器
プローブ顕微鏡の針先 (プローブ顕微鏡)
微量の化学物質分析システム



オムロン HPより



BMW HPより

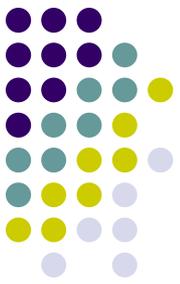


任天堂 HPより

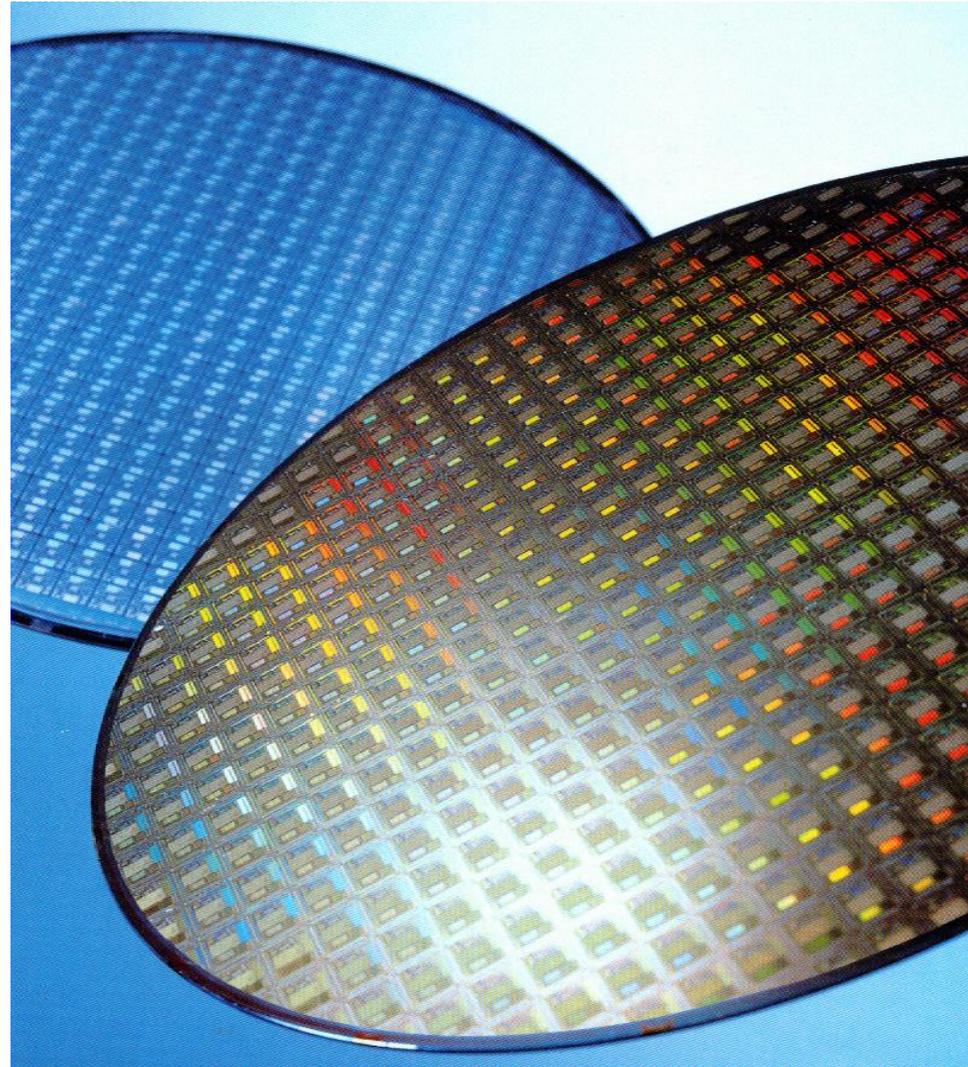


apple HPより

ウエハ上に一括生産される自動車用マイクロ センサチップ



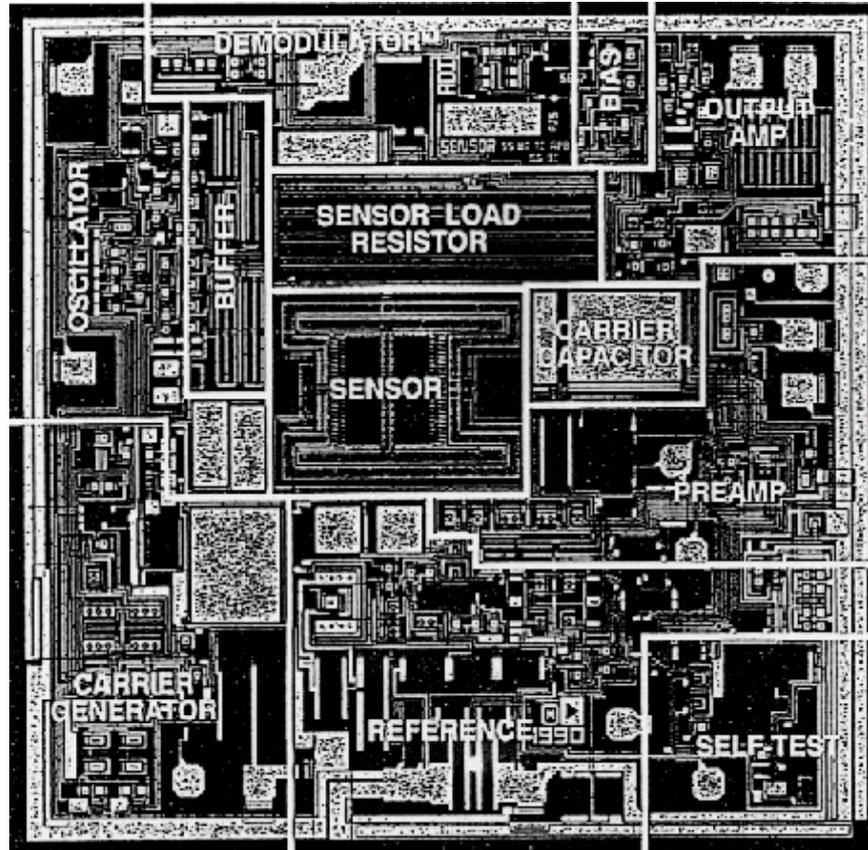
デンソーカタログから
2005



ゲーム機端末に使われる
サーフェスマイクロマシニング型加速度センサ
(Analog Devices Ltd.)



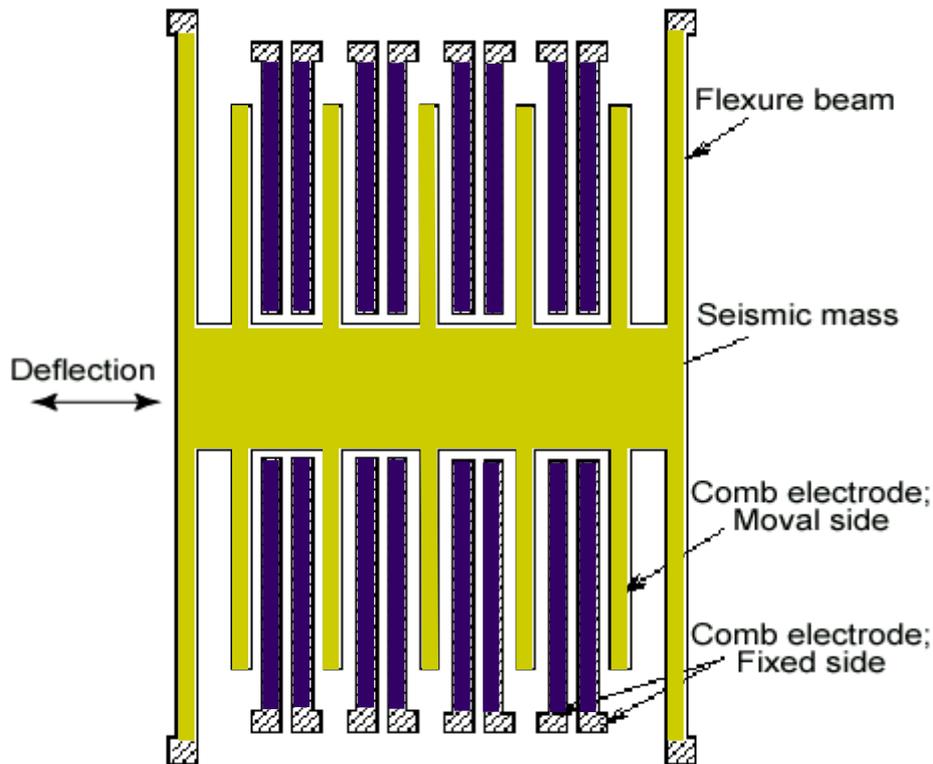
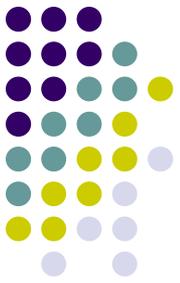
任天堂HPより



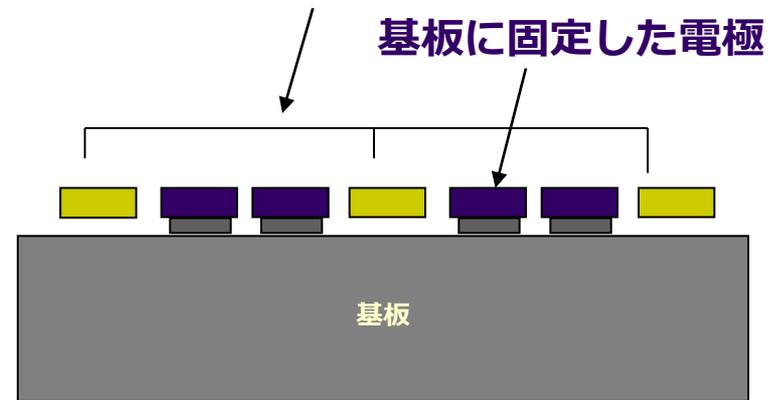
ADXL50 specifications

Temperature Range	-55 to +125 C
Power Supply	+5 V
Measurement Range	+/- 50 G
Pre-Amp Zero-g Output Level	+1.8 V
Pre-Amp Output Span	+1.8 V at +/-50 G
Overall Accuracy	5% Full Scale
Linearity	0.5% of Full Scale
Bandwidth	dc to 1 kHz
Transverse Sensitivity	2%
Unpowered Shock Survival	2000 G

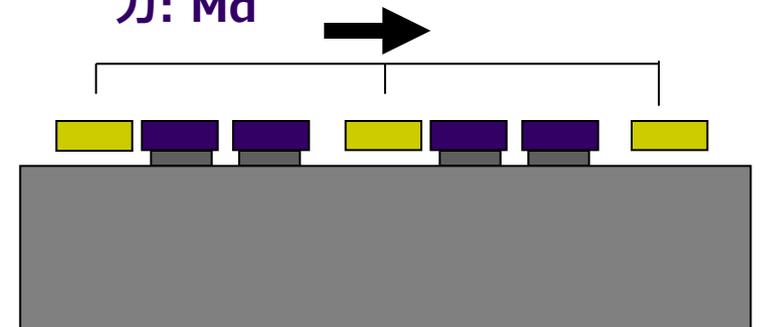
サーフェスマイクロマシニング型 加速度センサの加速度検出構造 (Analog Devices Co.)



くし歯型可動電極



加速度が加わると・・・
力: Ma



携帯電話用のMEMSマイクロフォン (T. Kasai et al. OMRON, Transducers-07, Lyon 2007)

OMRONウェブサイト
(2010~2011年頃掲載)
より

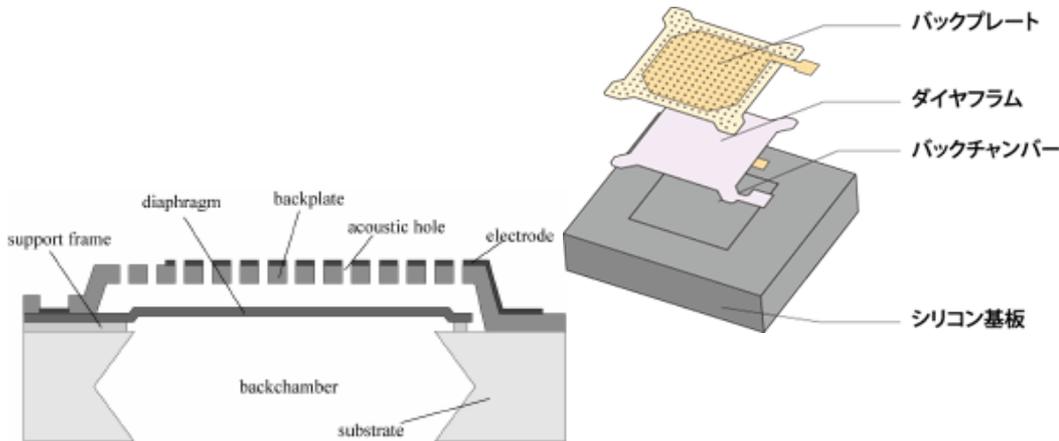


Fig. 2 Schematic cross-section of the microphone.

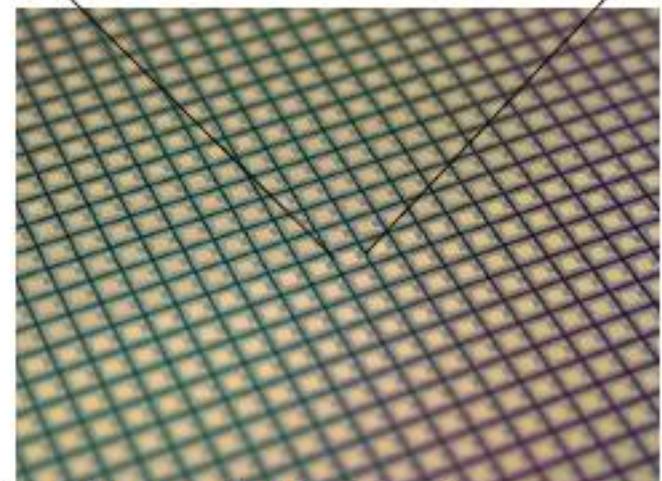
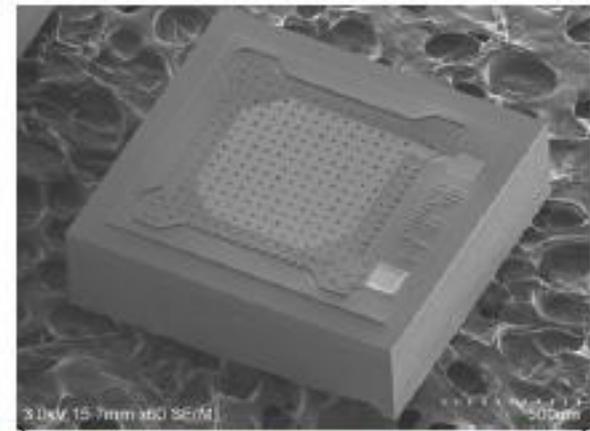
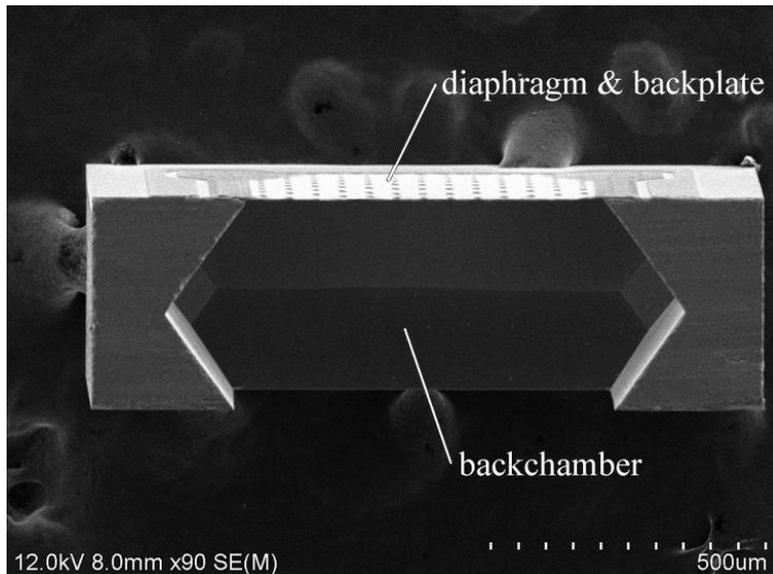


Fig. 8 Photograph of the microphone.



すでに使われている マイクロマシン (MEMS) 技術

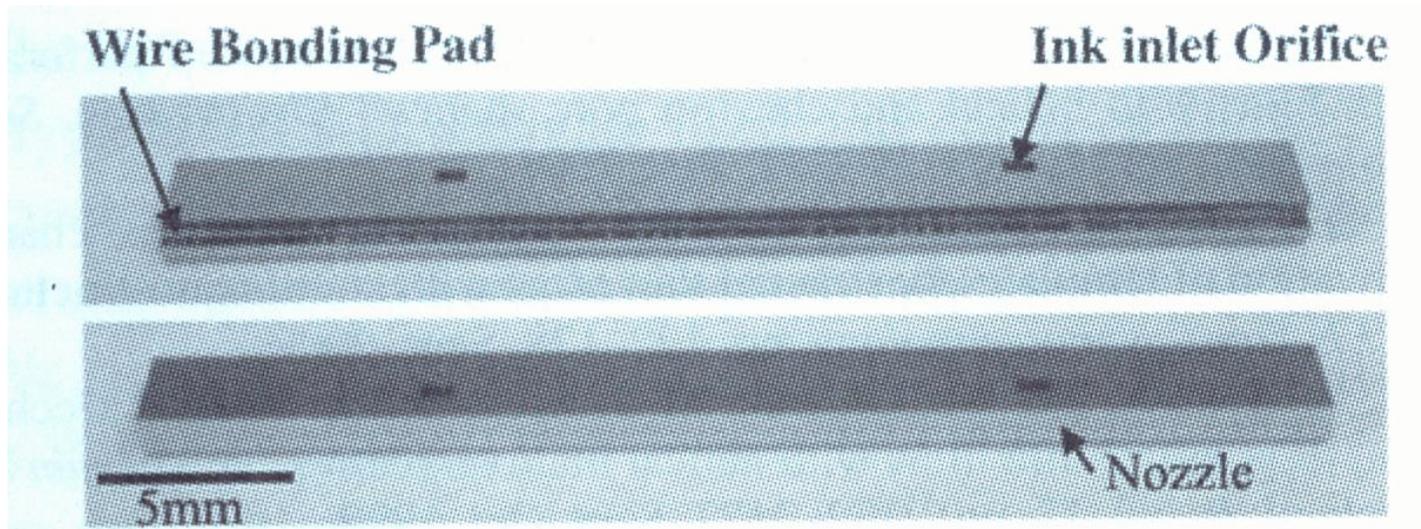


- マイクロセンサ
圧力・加速度・回転角速度, マイクロフォン
(血圧計) (管内流速計)
(自動車: 空燃比, 衝突検出, 車体制御)
(ゲーム機端末) (携帯電話)
- インクジェットプリンタヘッド
リザーバ、吐出機構 (プリンタ)
- 画像機器
反射型ディスプレイデバイス (プロジェクタ)
- 科学計測機器
プローブ顕微鏡の針先 (プローブ顕微鏡)
微量の化学物質分析システム



ゼロックス社のバブル方式インクジェットヘッド 2枚(チャネル基板・ヒータ素子基板)の貼り合わせ

ノズル数: 832 個, 800 dpi (ノズル間隔 : 30 ミクロン)



R. Nayve et al.: JMEMS, 13-5 (2004) 814-821

シリコンノズル列 (30ミクロン間隔) からの インクの噴射

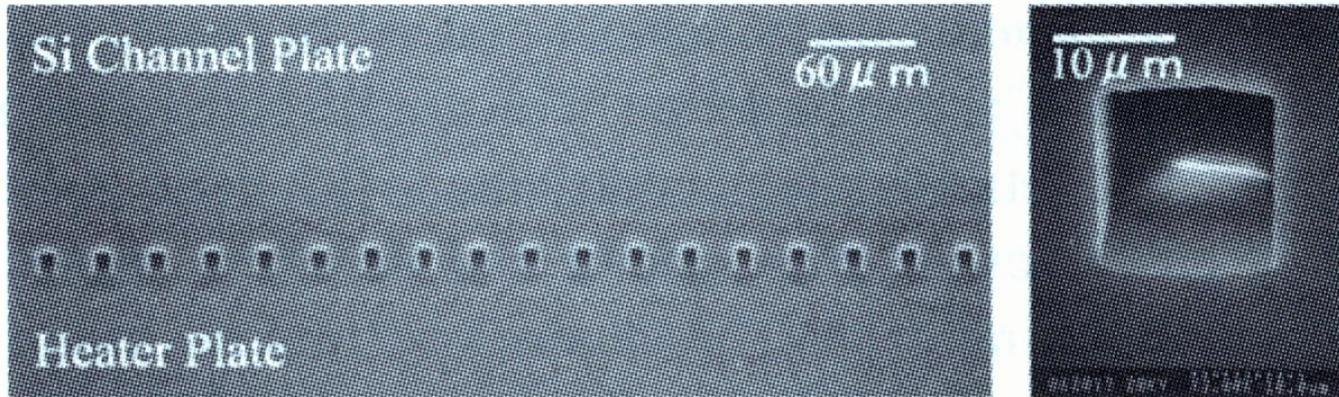
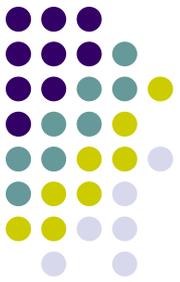
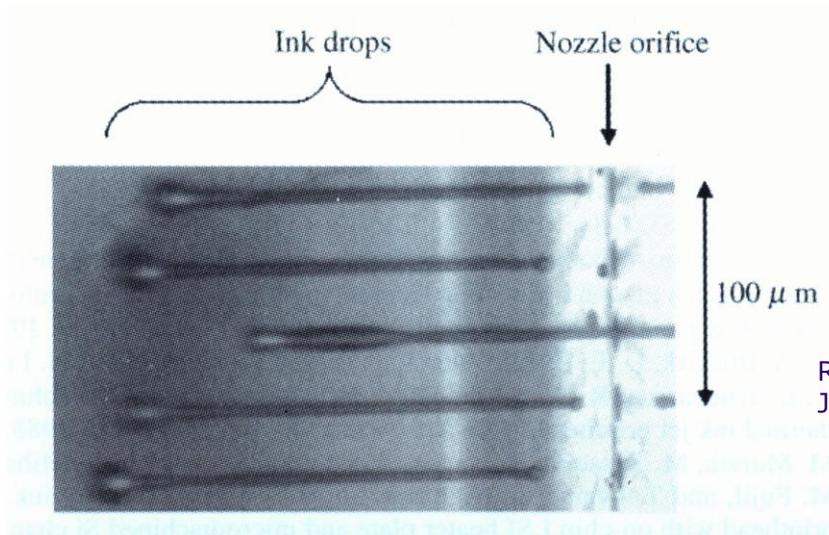


Fig. 15. Nozzle orifice subjected to nozzle surface coating.



R. Nayve et al.:
JMEMS, 13-5 (2004) 814-821

すでに使われている マイクロマシン (MEMS) 技術



- マイクロセンサ
 - 圧力・加速度・回転角速度, マイクロフォン
(血圧計) (管内流速計)
(自動車: 空燃比, 衝突検出, 車体制御)
(ゲーム機端末) (携帯電話)
- インクジェットプリンタヘッド
 - リザーバ、吐出機構 (プリンタ)
- 画像機器
 - 反射型ディスプレイデバイス (プロジェクタ)
- 科学計測機器
 - プローブ顕微鏡の針先 (プローブ顕微鏡)
 - 微量の化学物質分析システム



PLUS

これからのプロジェクタは、
マルチユース・モバイル。



U2-1110 NEW S-XGA 約 1,100 ANSI Lumens
2.5kg 58mm High

U2-1130 NEW S-XGA 約 1,300 ANSI Lumens
2.6kg 58mm High



デジタルプロジェクタ **U2** シリーズ

PLUSカタログより

DMD (DLP) 方式の ビデオプロジェクタ

Texas Instrumentsウェブサイトより

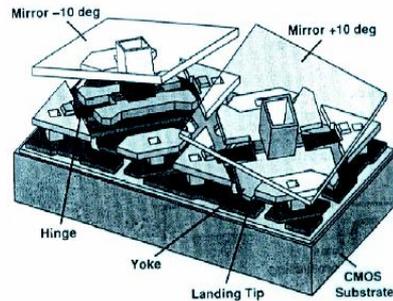
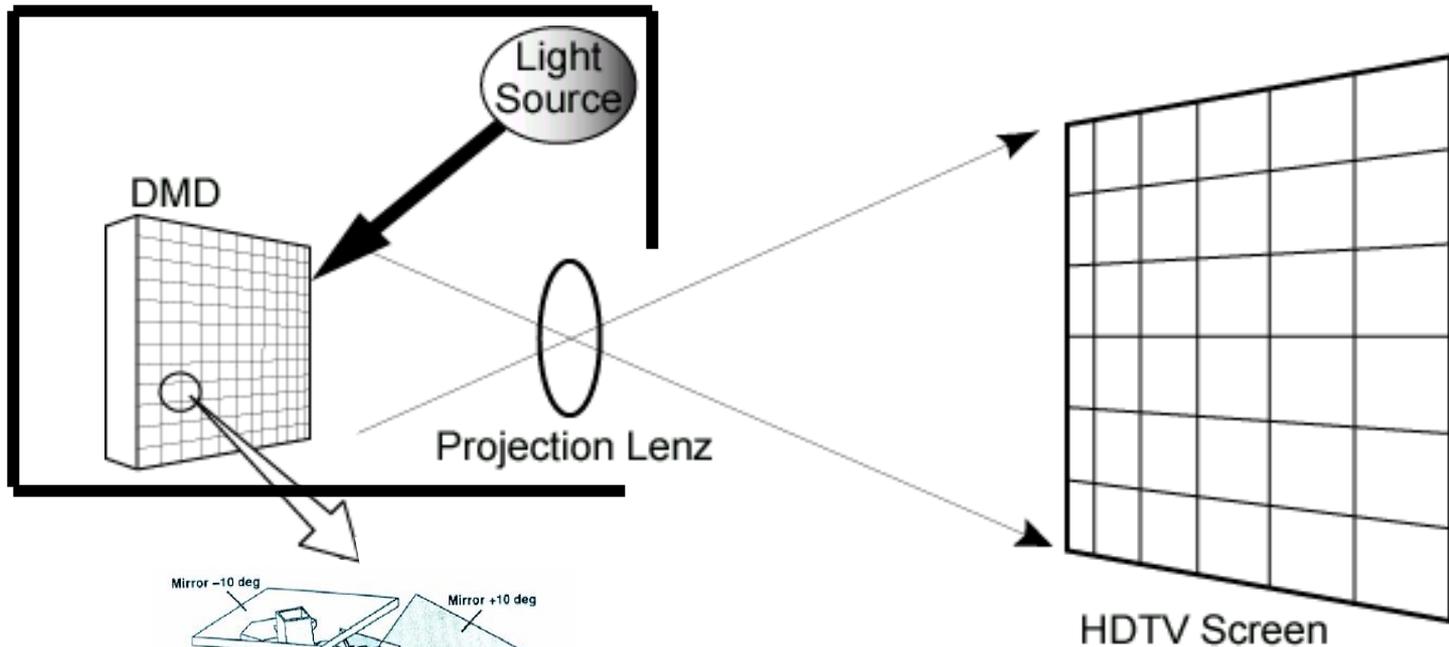
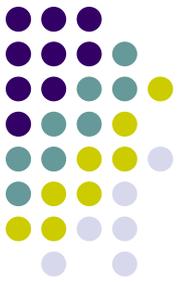


You think
that's **cool?**

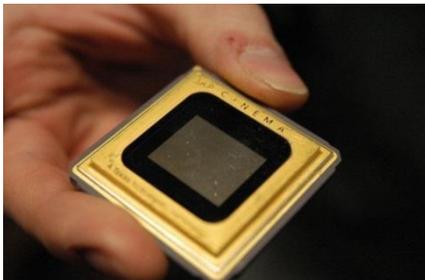
Just wait till you learn more!

DMD (DLP) プロジェクタの原理

(Texas Instruments Co.)



Scanning Mirror
16 μ m Square



Texas Instrumentsウェブサイトより

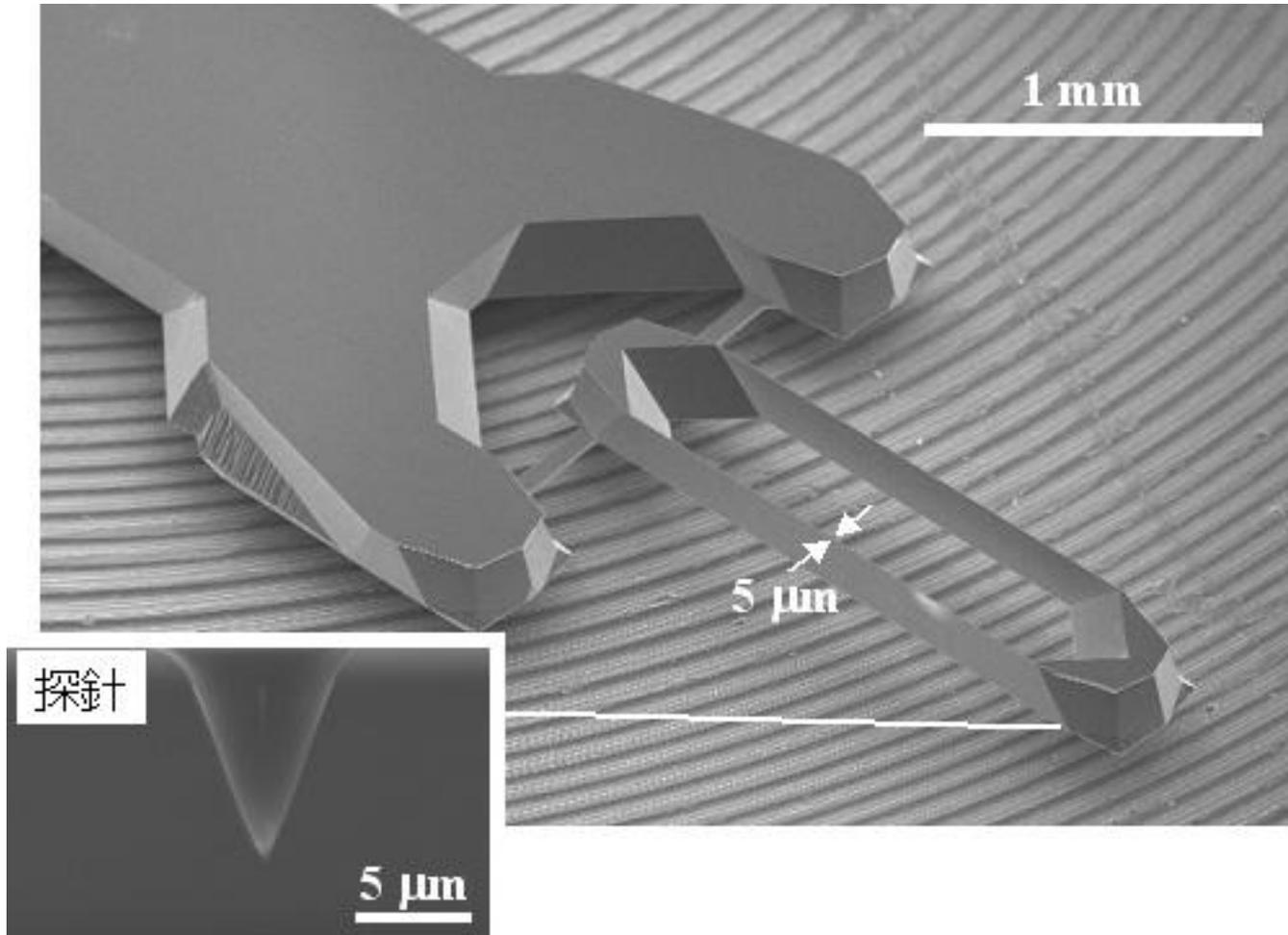
すでに使われている マイクロマシン (MEMS) 技術

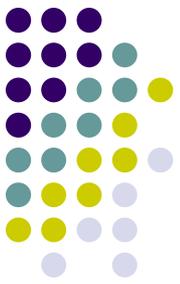


- マイクロセンサ
圧力・加速度・回転角速度, マイクロフォン
(血圧計) (管内流速計)
(自動車: 空燃比, 衝突検出, 車体制御)
(ゲーム機端末) (携帯電話)
- インクジェットプリンタヘッド
リザーバ、吐出機構 (プリンタ)
- 画像機器
反射型ディスプレイデバイス (プロジェクタ)
- 科学計測機器
プローブ顕微鏡の針先 (プローブ顕微鏡)
微量の化学物質分析システム



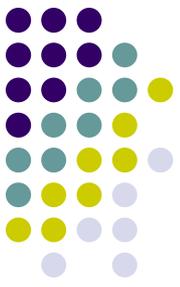
プローブ顕微鏡への応用例： 摩擦力・垂直抗力を分離して計測できる MEMSプローブ (K. Fukuzawa, 2007)





MEMS製品の共通点・キーワード

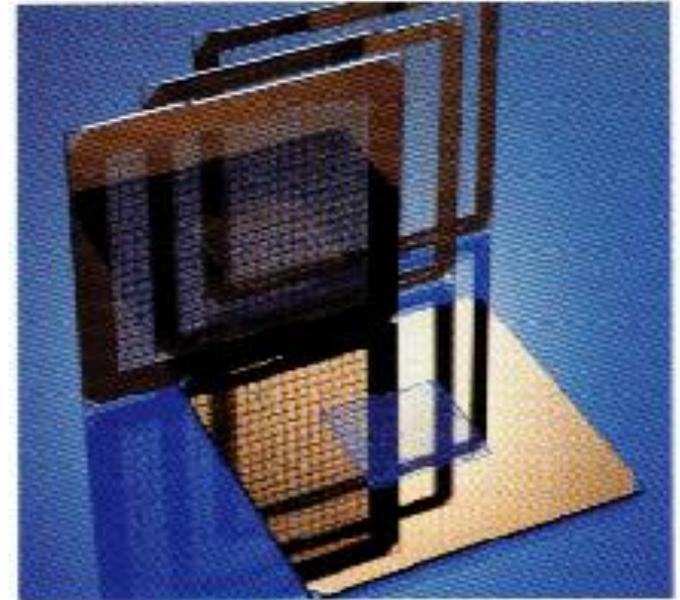
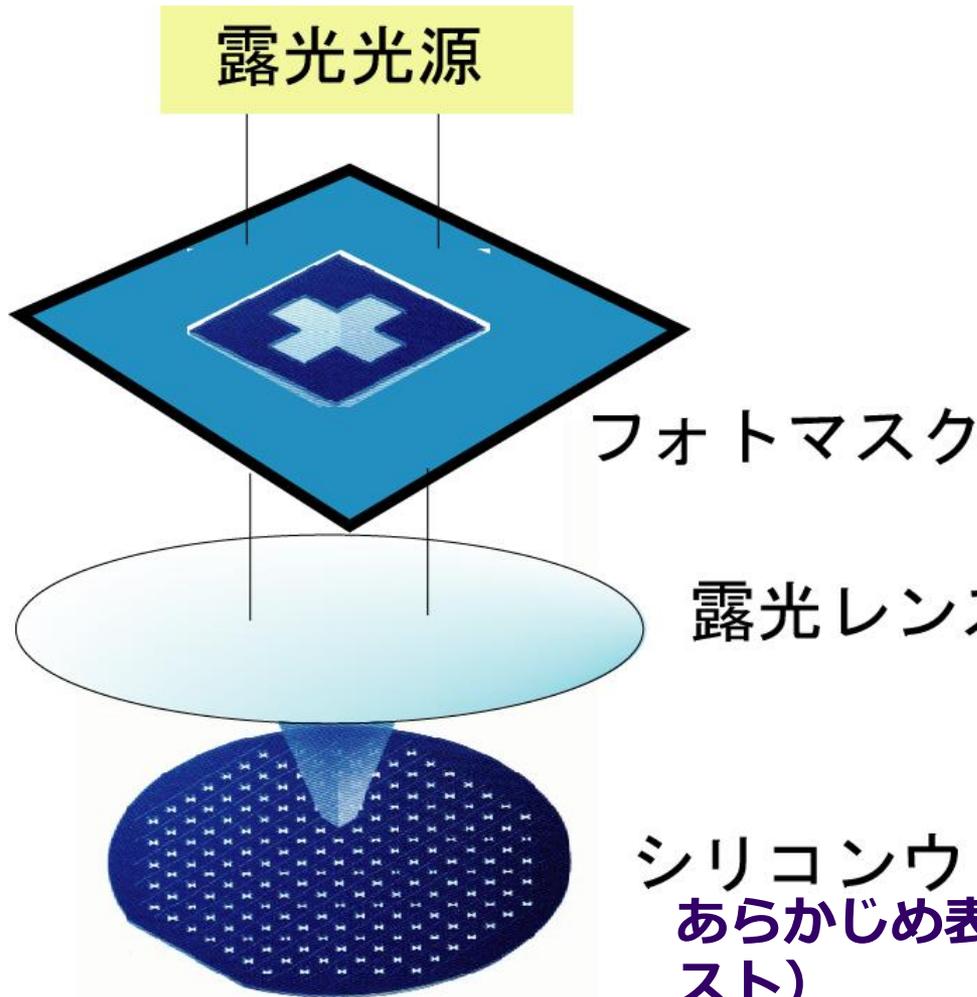
- 小さい, 薄い (寸法・形)
- シリコン基板上に作る (材料)
- 光リソグラフィ, エッチング (製作方法)
- 一度に多くの製品を大量に作れる
(量産・低価格)
- 電子回路と機械構造が一緒にできる
(高機能・低価格)
- 今まで使われてこなかった新しい機械構造
(静電駆動、微細梁、薄膜などの往復運動系)



MEMS製品の共通点・キーワード

- 小さい, 薄い (寸法・形)
- シリコン基板上に作る (材料)
- 光リソグラフィ, エッチング (製作方法)
- 一度に多くの製品を大量に作れる
(量産・低価格)
- 電子回路と機械構造が一緒にできる
(高機能・低価格)
- 今まで使われてこなかった新しい機械構造
(静電駆動、微細梁、薄膜などの往復運動系)

光リソグラフィ(写真製版)の仕組み

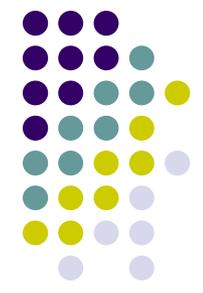


実際のフォトマスク

日本フィルコン(株)カタログ
「PHOTO FABRICATION」より

シリコンウェハ
あらかじめ表面に感光樹脂（フォトレジスト）
を塗布したもの





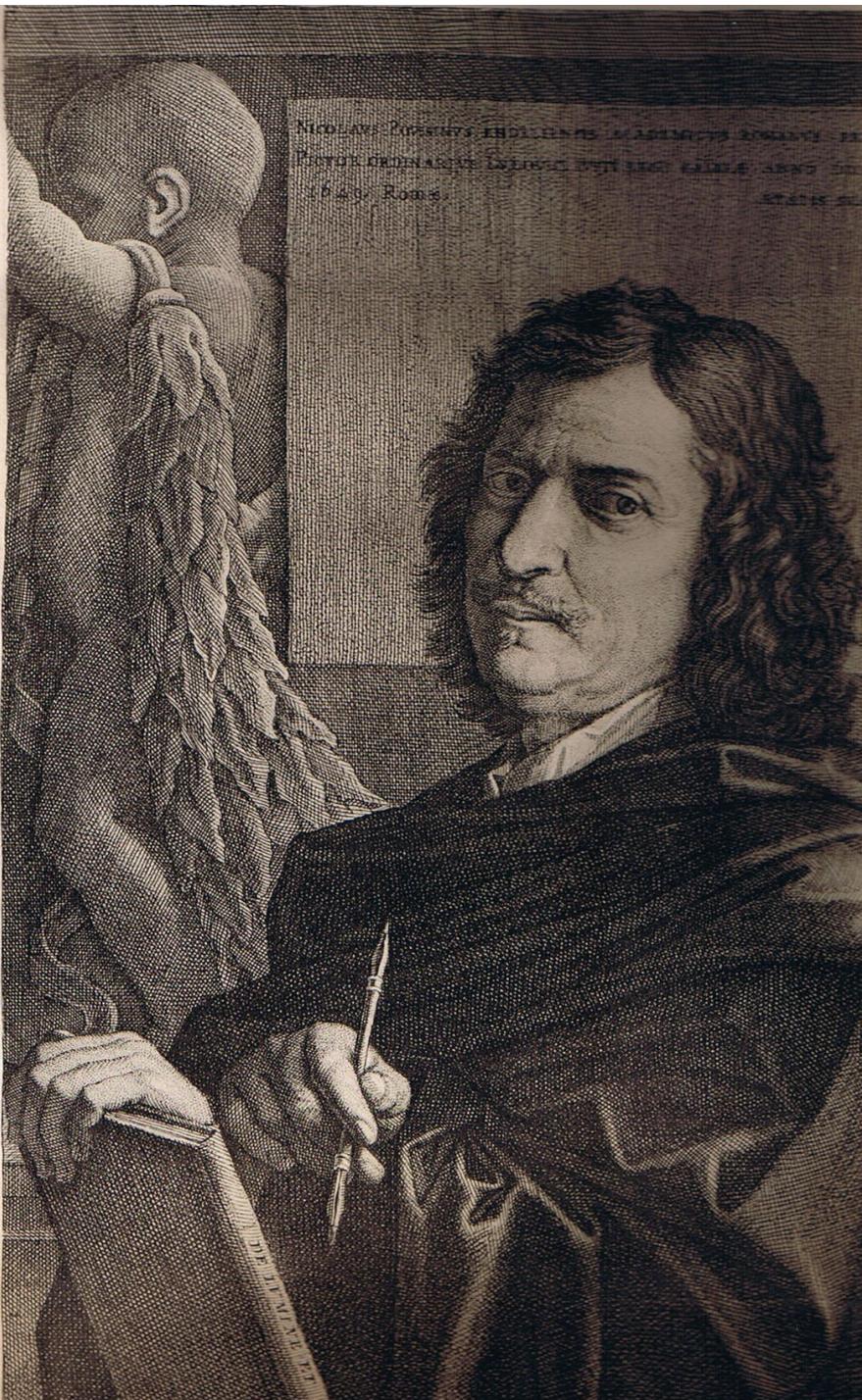
リソグラフィで形成した微細なマスクパターンにしたがってエッチングで基板を加工する



レジスト膜 (パターン現像後)







版画：ニコラプッサンの自画像
ジャンペヌ（17世紀）

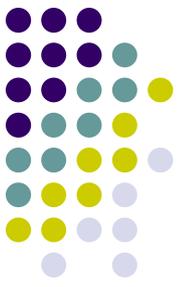
製作方法

リトグラフ, エッチング

版を起こす：精密な描画（手作業）
何か月もかかる作業

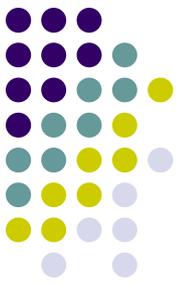
印刷技術：インク塗布、紙に転写
大量の印刷物が安価に流布

一般大衆が安価に手に入れる
ことができる画像
出版文化の繁栄、知的な刺激
社会の変化



マイクロマシン(MEMS)

- MEMS: **M**icro-**E**lectro-**M**echanical **S**ystems
(微小電気機械システム)
は生活文化を変える
- マイクロマシン技術を支えるマイクロ・ナノ科学
ex. シリコン結晶の物理化学



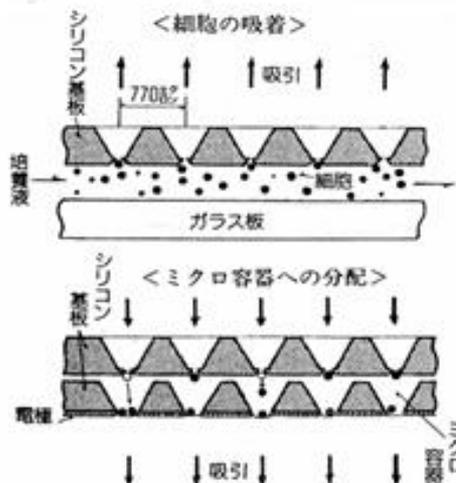
目次

- はじめに(職歴:日立で24年、名古屋で18年)
- 単結晶シリコンのマイクロ機械工学
 - 結晶異方性エッチング
 - シリコン薄膜の機械的性質
- 教育、ものづくり・実習教育
- 大学に求められる変化
- 後進へのメッセージ

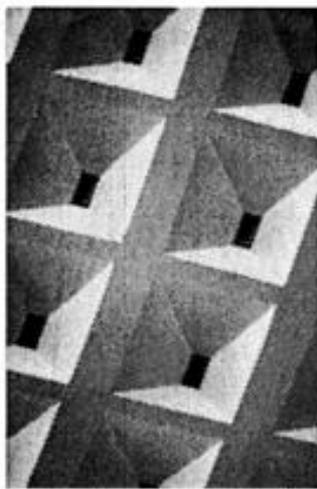


シリコン単結晶基板に加工された細胞融合容器

精密工学会技術賞受賞 (Hitachi 1989)



細胞融合の効率化へ新容器
グループ立 2種類を1個ずつ分配

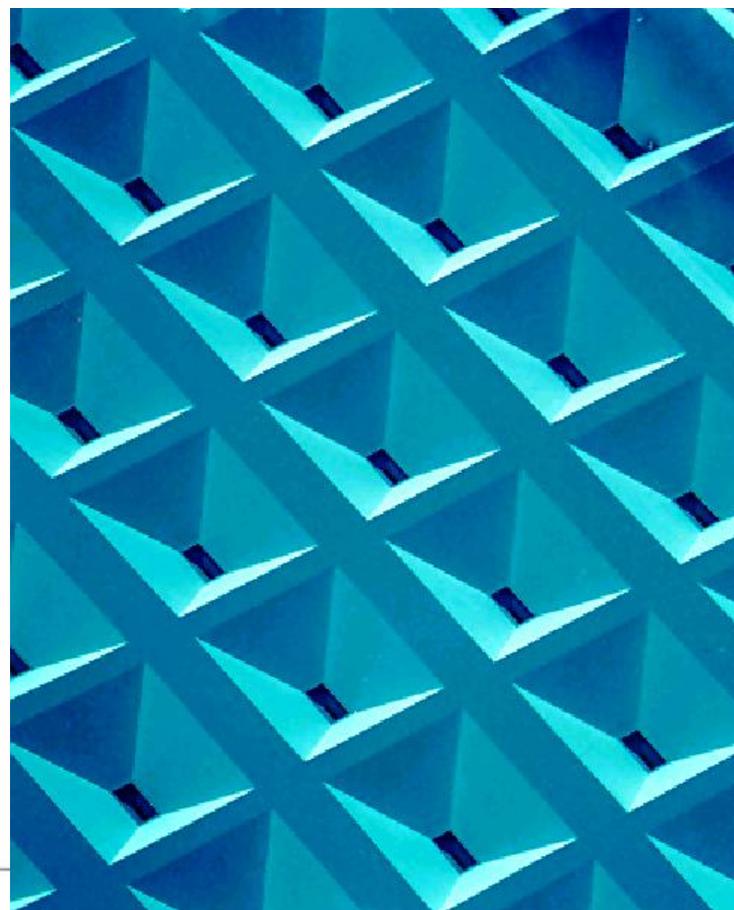


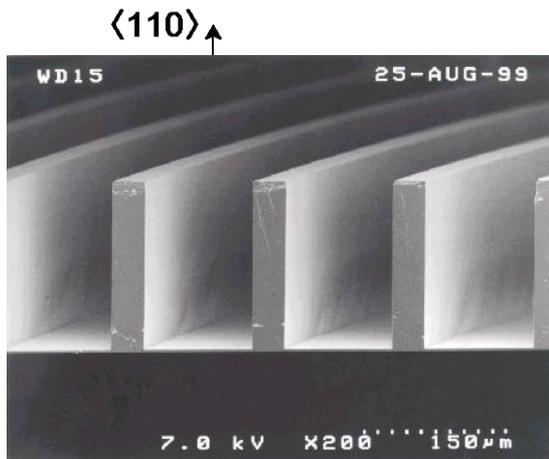
細胞融合の効率を大幅に向上させるため、融合したい二種類の細胞を一個ずつ入れられるマイクロの容器を日立製作所のグループが開発した。植物の育種などに役立つと期待。

これまでの細胞融合は、二種類の細胞を一度に大層に混合するため、同じ種類の細胞が融合したり、融合の比率が二対一になつたりして、目的とする二対一の融合細胞を作る効率が悪く、その細胞だけを選抜するのも手間がかかる。

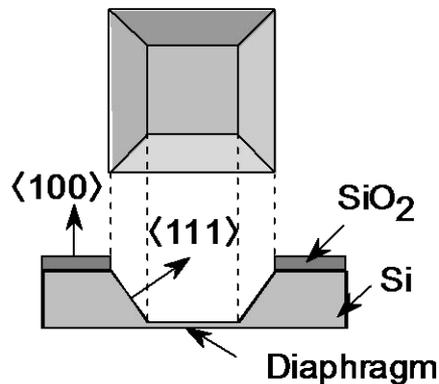
そこで同製作所中央研究所の佐藤一雄主任研究員と基礎研究所の高辻正基主任研究員らは、半導体の加工技術を応用して、シリコンの基板に細胞が二個入

朝日新聞
'89.5.6 夕刊

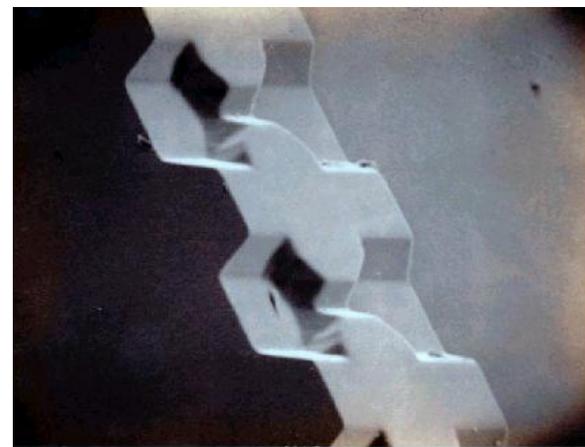




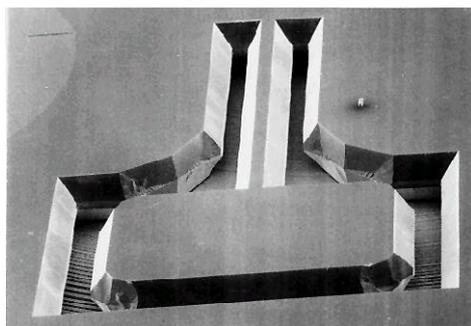
Ink reservoir for printing head (EPSON)



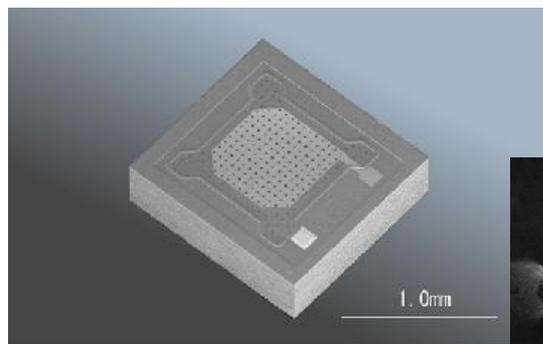
Pressure sensor (Automotive, Human health care)



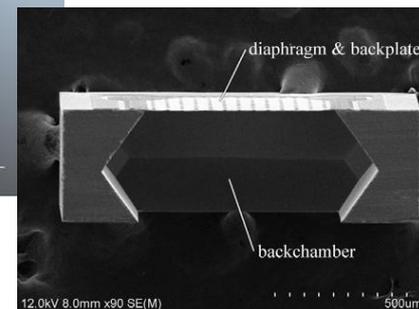
Blood health monitor (HITACHI)



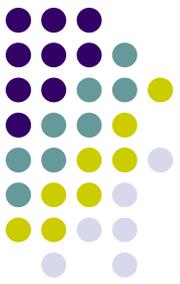
Acceleration sensor (Automotive, Game machines)



Microphone for mobile set (OMRON)



シリコンの結晶異方性エッチングで実用化した MEMS 構造体



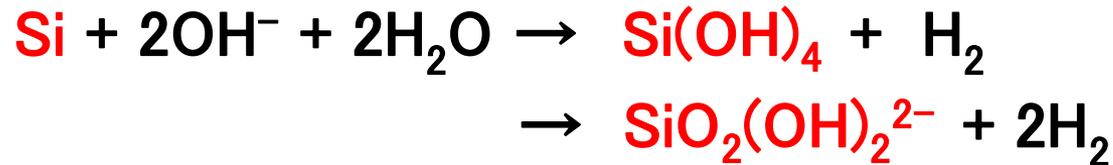
結晶異方性エッチング;これまでの知見

- エッチャント

KOH, “**TMAH**”, “EDP”, N_2H_4 , NaOH, CsOH

いずれも水溶液

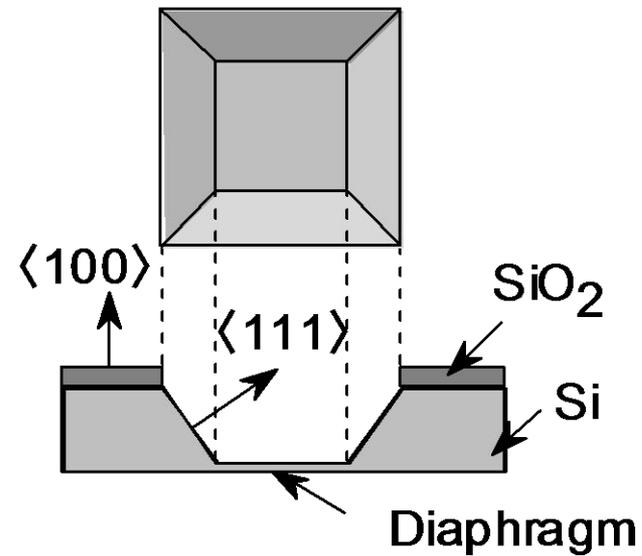
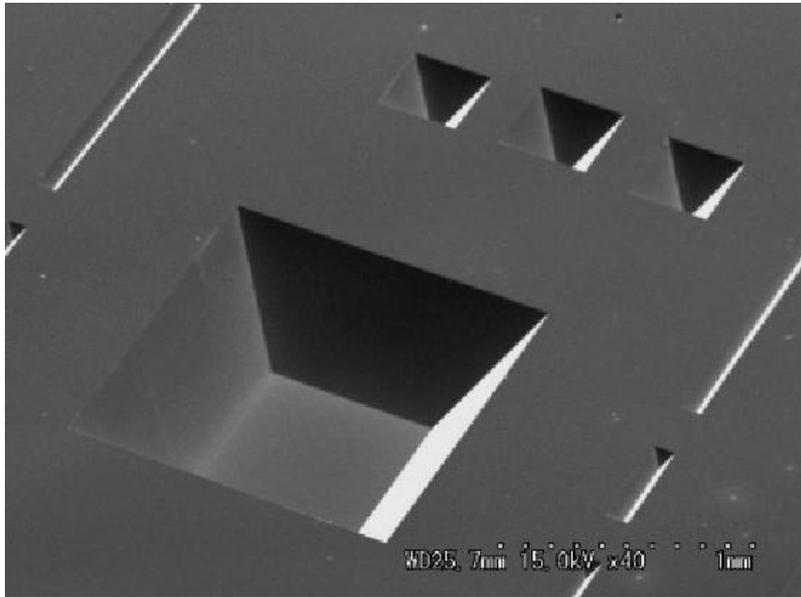
- 反応



- 結晶の方位によってエッチング速度が100倍も異なる:
「異方性」を利用する



圧力センサダイヤフラムのエッチング形状はシリコン結晶の幾何学で決まる



Diaphragm on a (100) wafer

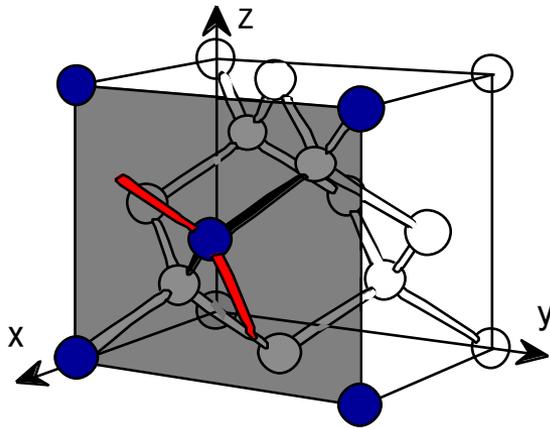
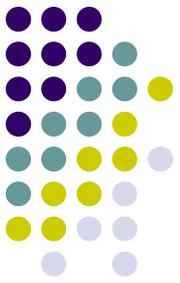
ダイヤモンド構造：
構成原子がそれぞれ4個の結合肢で互いに結合している結晶構造



「ダイヤモンド構造」 後藤良二 (美ヶ原高原美術館)

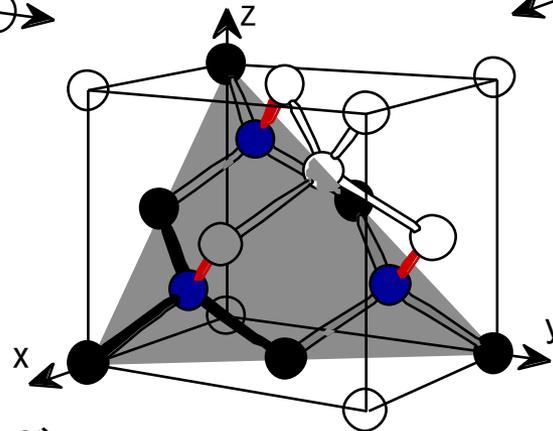
異方性の由来

単結晶シリコンの表面にある原子の安定性の違い



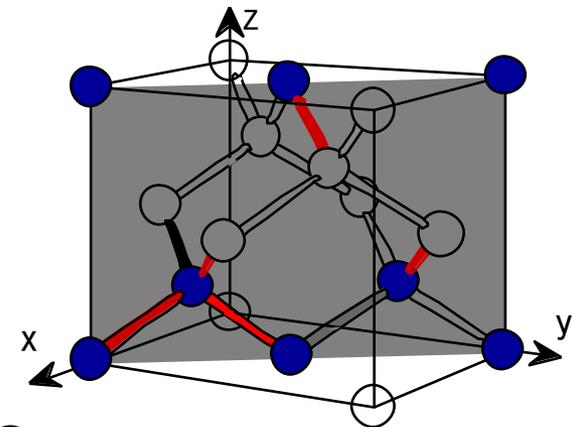
(100)面

ダングリングボンド:2
バックボンド:2



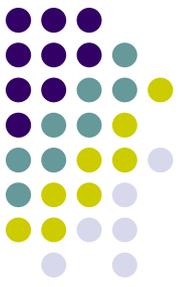
ダングリングボンド:1
バックボンド:3

(111)面



(110)面

ダングリングボンド:1
バックボンド:3
(ただし表面に露出:2)



結晶異方性エッチング;これまでの知見

- エッチャント

KOH, “TMAH”, “EDP”, N_2H_4 , NaOH, CsOH

いずれも水溶液

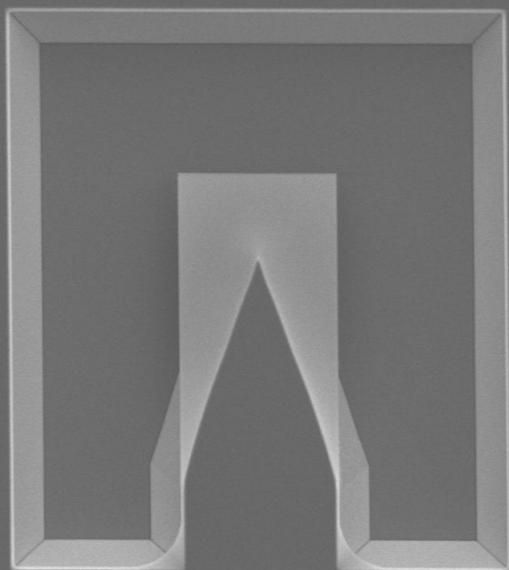
- 反応



- 結晶の方位によってエッチング速度が100倍も異なる:
「異方性」を利用する
- 液の組成・濃度・添加物によってエッチングの異方性が
激変する: 結晶構造だけでは異方性は決まらない

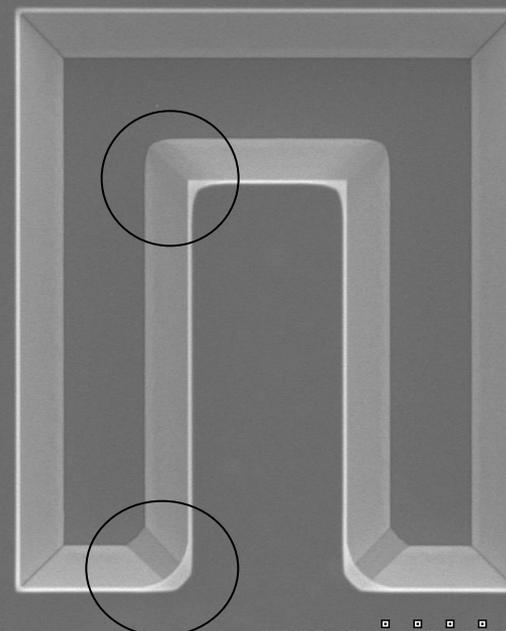
アルカリ(TMAH)水溶液に界面活性剤を加えるとエッチング形状が変わる (1999, 東芝:関村)

- 凸型のマスク輪郭では, アンダカットが低減
- 凹型の曲線マスクコーナーでは曲面が現れる



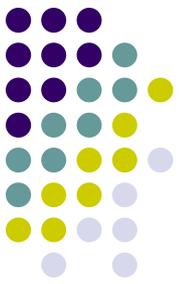
WD23.2mm 15.0kV x200 200um

25% TMAH



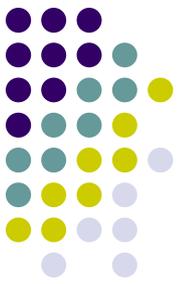
WD23.2mm 15.0kV x200 200um

25% TMAH + 界面活性剤 NC-200



エッチング現象の本質を探る道筋

- 観察する
 - どの方位がどれだけ速くエッチングされるのか
- モデルをたてる
 - 原子間の結合
 - 結晶とエッチング液の相互作用
- 解析する, 実験する
 - 原子1個ずつが脱落するシミュレーション
 - 実験結果と比較する
- モデルを検証する
 - 固液界面その場観察
- 現象を理解する



エッチング現象の本質を探る道筋

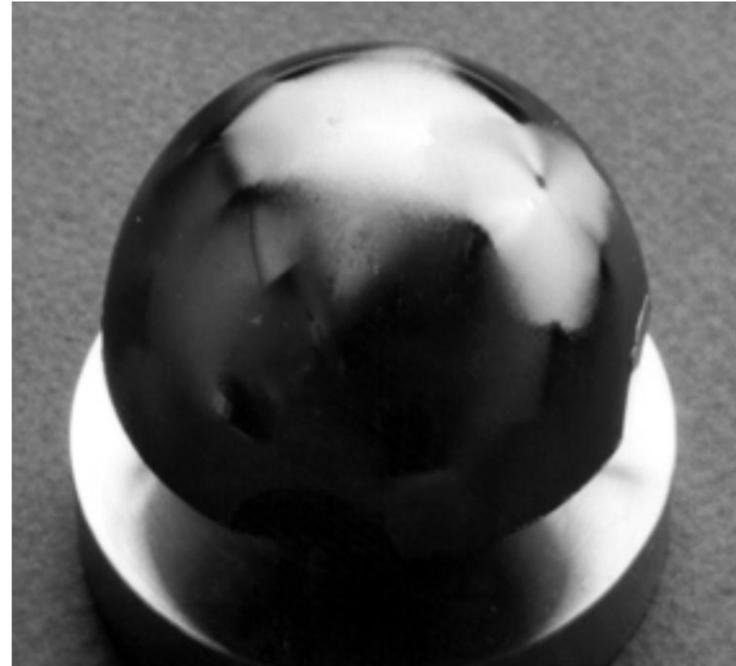
- 観察する
 - どの方位がどれだけ速くエッチングされるのか
- モデルをたてる
 - 原子間の結合
 - 結晶とエッチング液の相互作用
- 解析する, 実験する
 - 原子1個ずつが脱落するシミュレーション
 - 実験結果と比較する
- モデルを検証する
 - 固液界面その場観察
- 現象を理解する



観察する： シリコン単結晶の結晶方位による エッチング速度の違いを可視化する



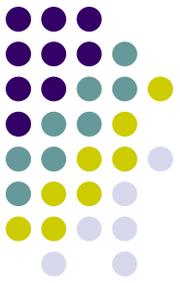
Before



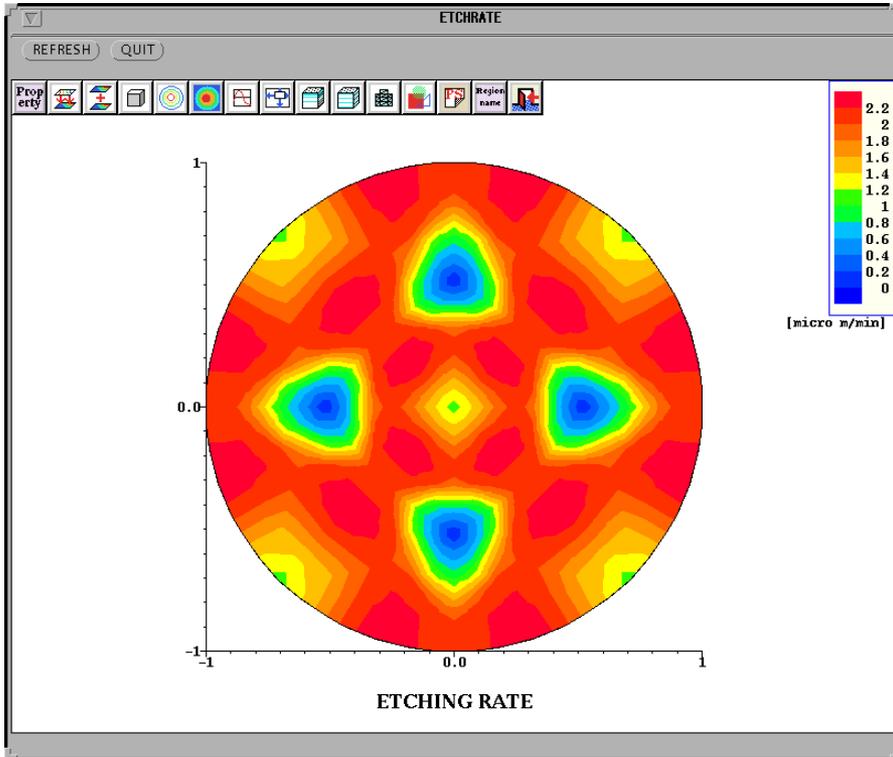
After

- Sphere Diameter: 44 mm
- Maximum etching depth: 100 - 150 μm

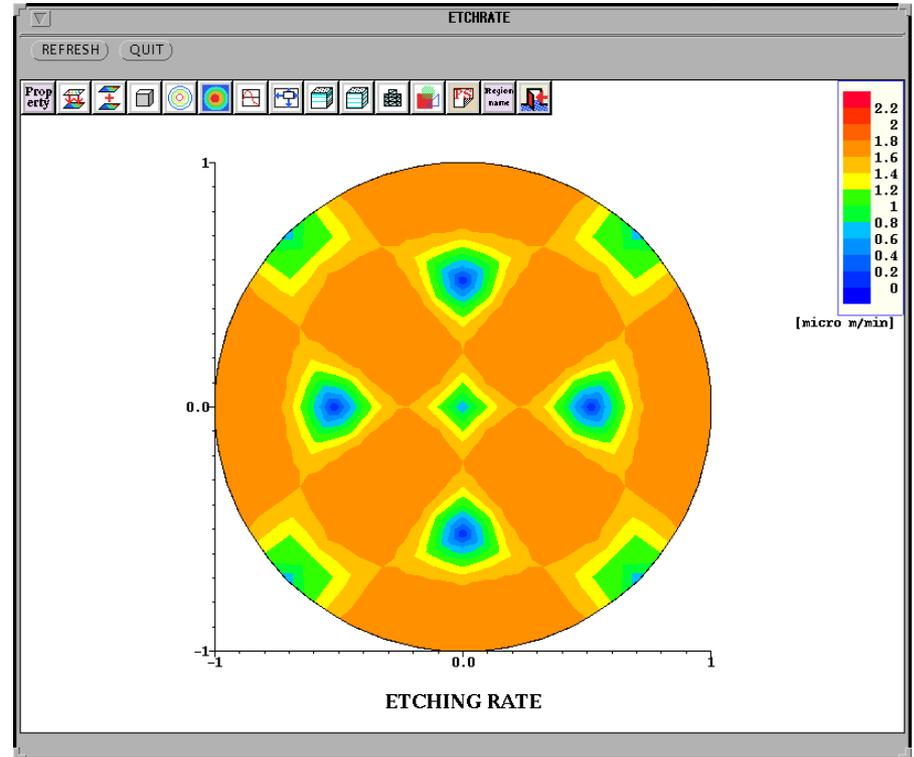




エッチレートデータベース ODETTE (製品化 1996)

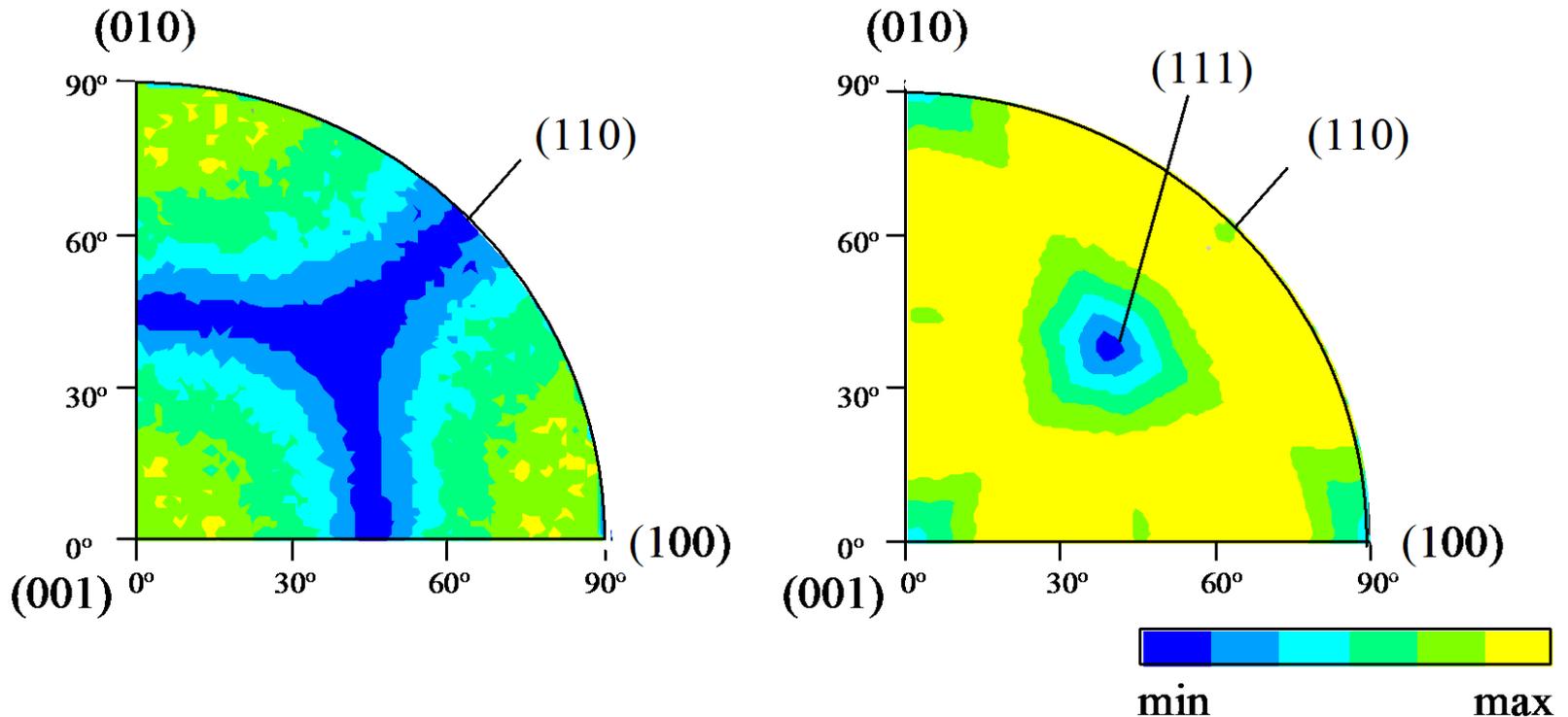
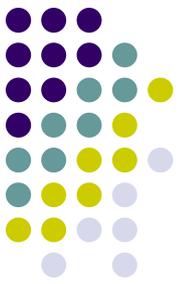


KOH80°C40%



TMAH85°C25%

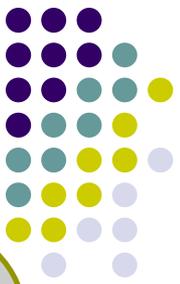
微量の界面活性剤添加で激変する エッチング速度の異方性 (TMAH)



25%TMAH + 界面活性剤NCW

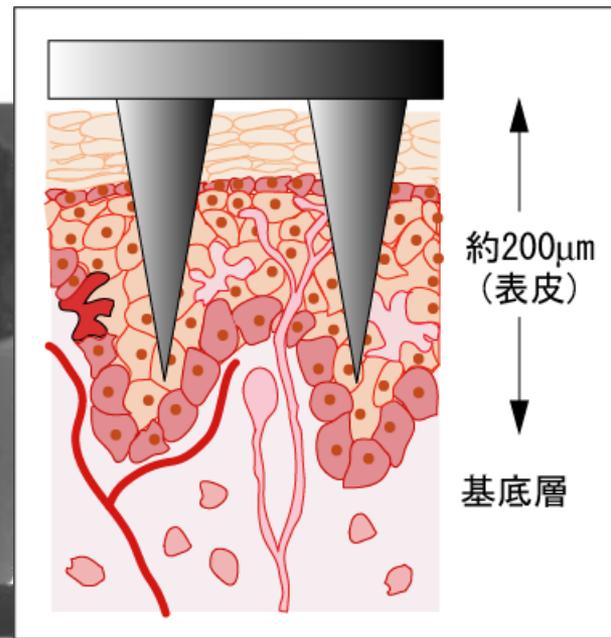
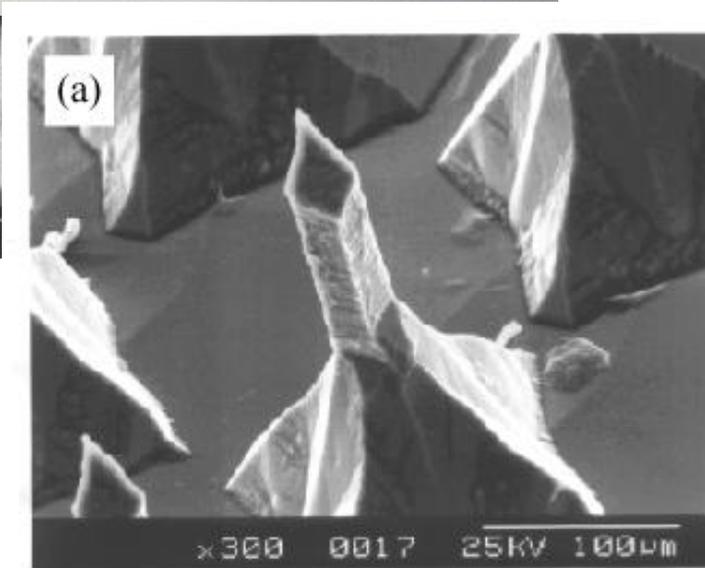
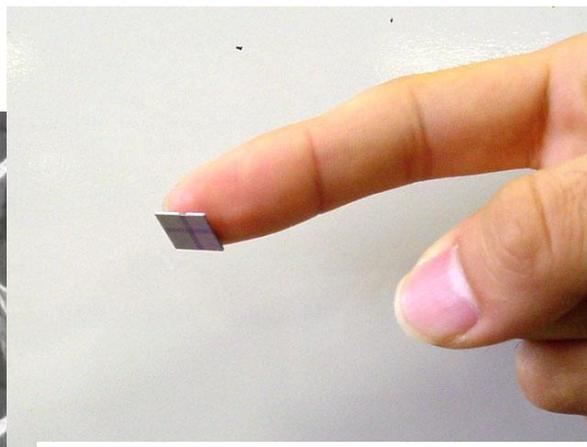
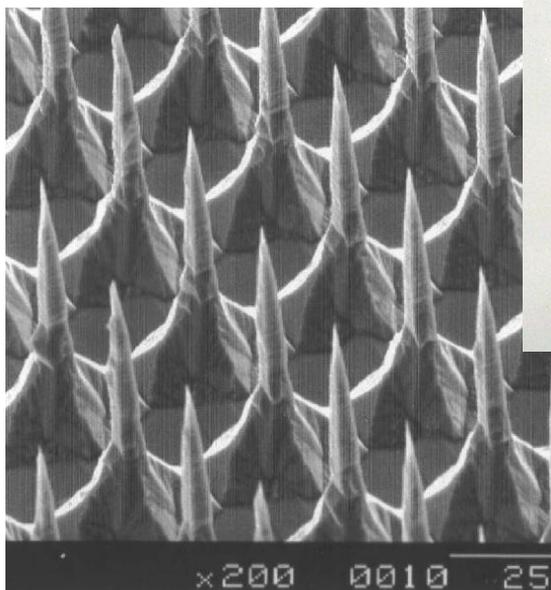
25%TMAH

エッチング異方性データベースが市販シミュレータを支える



- Etch rate database “**ODETTE**”
 - Etching Solution:
KOH(30, 40, 50%), TMAH(10, 20, 25%) for **Si**
NH₄HF₂(saturated) for **Quartz**
 - Temperature: 40, 60_{KOH}, 70, 80, 85 °C
- Etch profile simulation system
 - “**FabMeister ES®**” (Mizuho Information&Research Institute)
Wulff-Jaccodine’s graphical method
 - “**IntelliEtch®**” (IntelliSense) Cellular Automaton

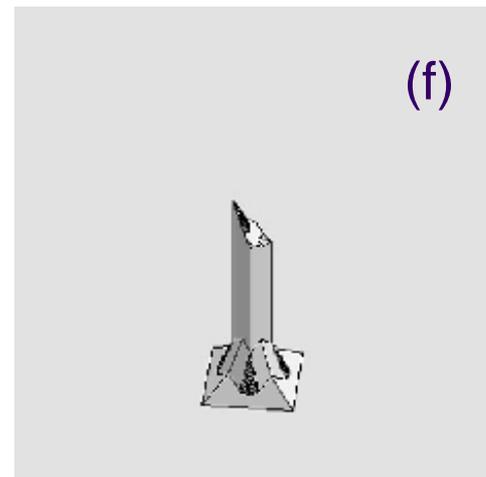
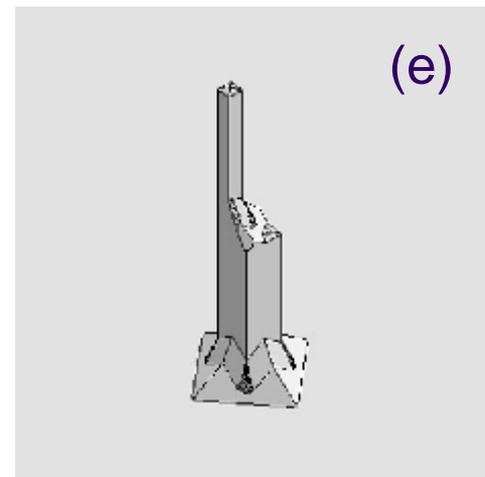
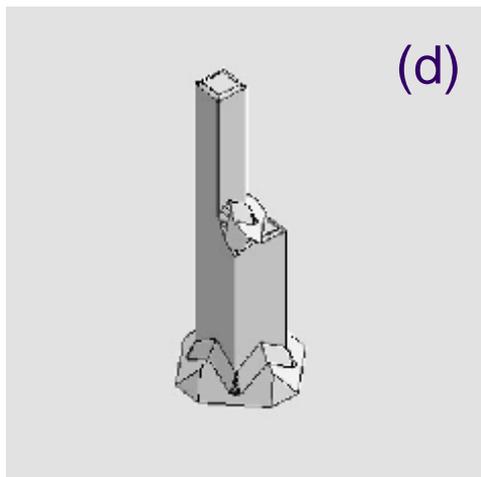
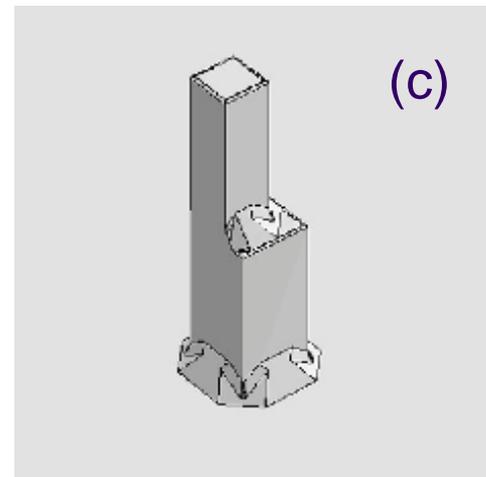
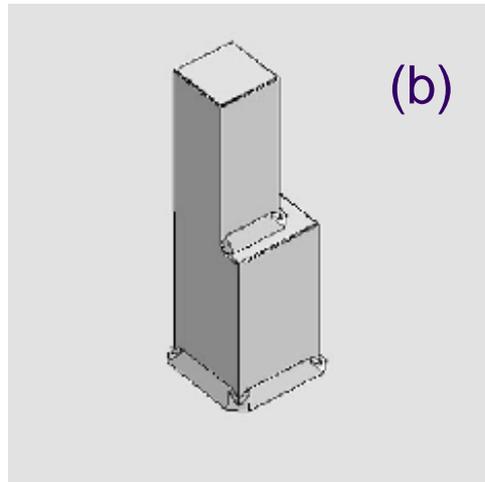
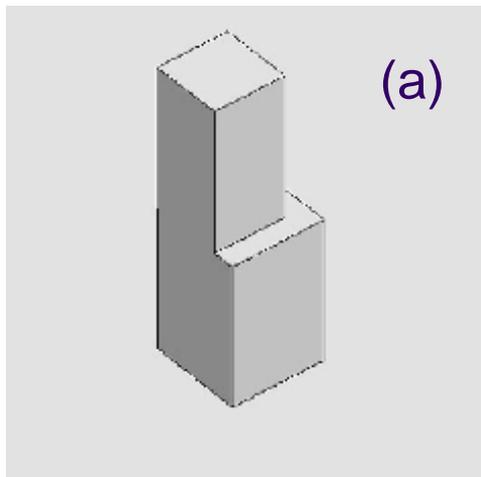
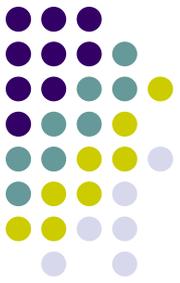
機械加工とウェットエッチングで製作された 経皮薬剤投与用Siマイクロニードルアレイ (M. Shikida)



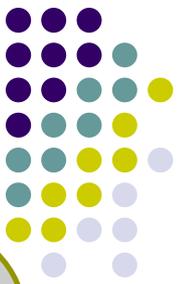
FabMeister Simulation Results.

Etching time: (a) 0 min., (b) 5 min., (c) 10 min.,
(d) 15 min., (e) 20 min., (f) 25 min.

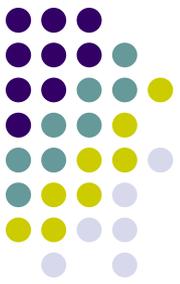
Etching conditions: 34.0 wt.% KOH, 80oC



エッチング異方性データベースが市販シミュレータを支える



- Etch rate database “**ODETTE**”
 - Etching Solution:
KOH(30, 40, 50%), TMAH(10, 20, 25%) for **Si**
NH₄HF₂(saturated) for **Quartz**
 - Temperature: 40, 60_{KOH}, 70, 80, 85 °C
- Etch profile simulation system
 - “**FabMeister ES®**” (Mizuho Information&Research Institute)
Wulff-Jaccodine’s graphical method
 - “**IntelliEtch®**” (IntelliSense) Cellular Automaton



エッチング現象の本質を探る道筋

- 観察する
 - どの方位がどれだけ速くエッチングされるのか
- モデルをたてる
 - 原子間の結合
 - 結晶とエッチング液の相互作用
- 解析する, 実験する
 - 原子1個ずつが脱落するシミュレーション
 - 実験結果と比較する
- モデルを検証する
 - 固液界面その場観察
- 現象を理解する

ダイヤモンド構造：
構成原子がそれぞれ4個の結合肢で互いに結合している結晶構造



「ダイヤモンド構造」 後藤良二 （美ヶ原高原美術館）

表面のSi原子にOHが付いて溶け出す
表面原子にはブラブラな結合肢(ダングリングボンド)

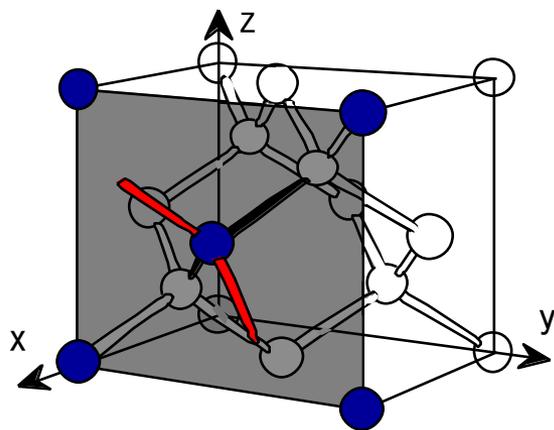




異方性の由来

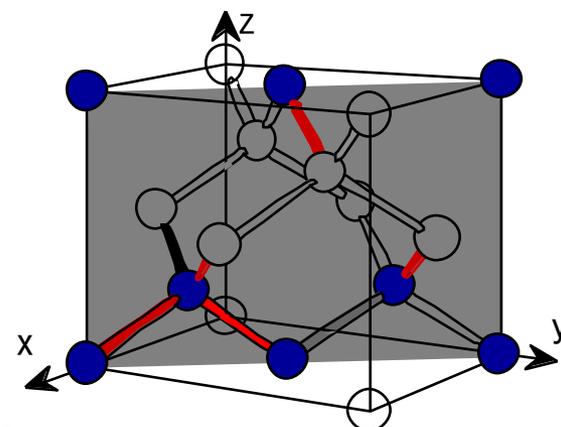
単結晶シリコンの表面にある原子の安定性の違い

ダングリングボンドの数で議論……通説(俗説)



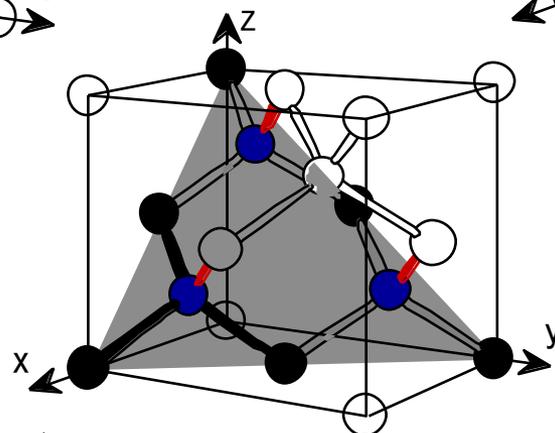
(100)面

ダングリングボンド:2
バックボンド:2



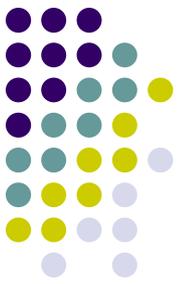
(110)面

ダングリングボンド:1
バックボンド:3
(ただし表面に露出:2)



(111)面

ダングリングボンド:1
バックボンド:3



エッチング現象の本質を探る道筋

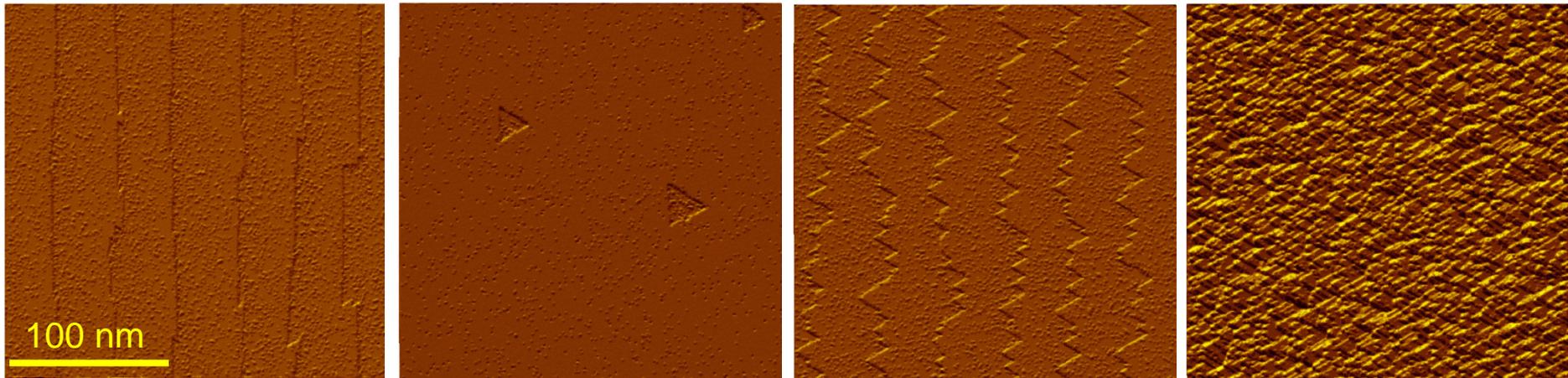
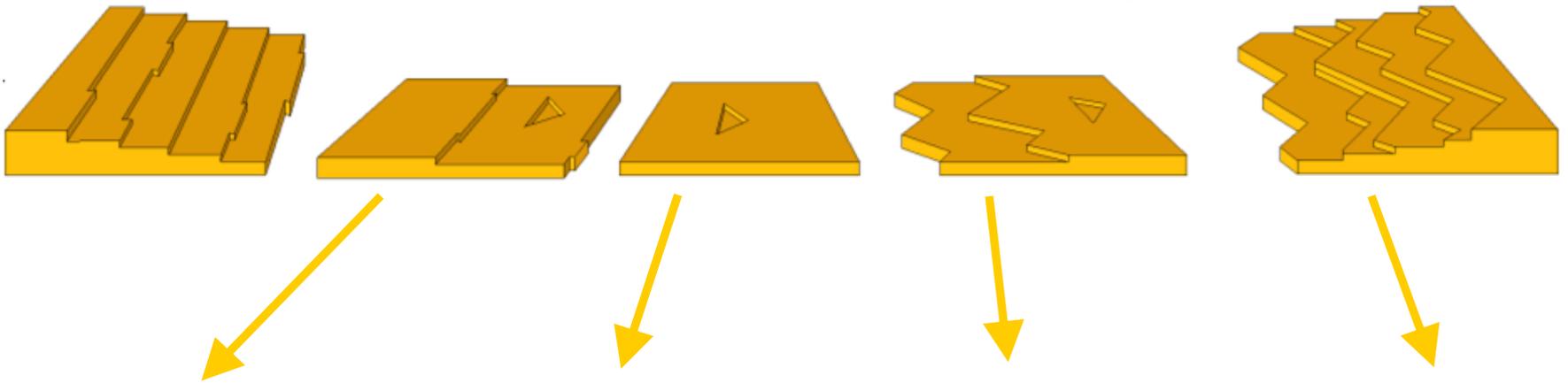
- 観察する
 - どの方位がどれだけ速くエッチングされるのか
- モデルをたてる
 - 原子間の結合
 - 結晶とエッチング液の相互作用
- 解析する, 実験する
 - 原子1個ずつが脱落するシミュレーション
 - 実験結果と比較する
- モデルを検証する
 - 固液界面その場観察
- 現象を理解する

シリコンのエッチング現象の原子レベルの エッチングシミュレーション (M. Gosálvez)



Si(111)ならびにそれと角度をなす表面の模式図

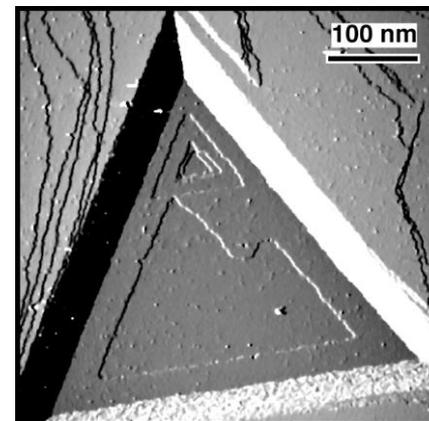
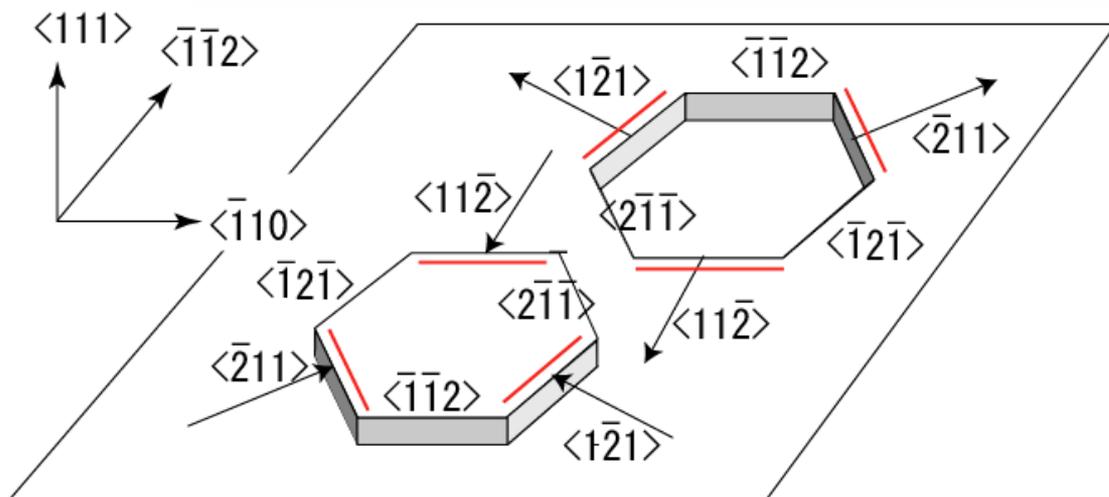
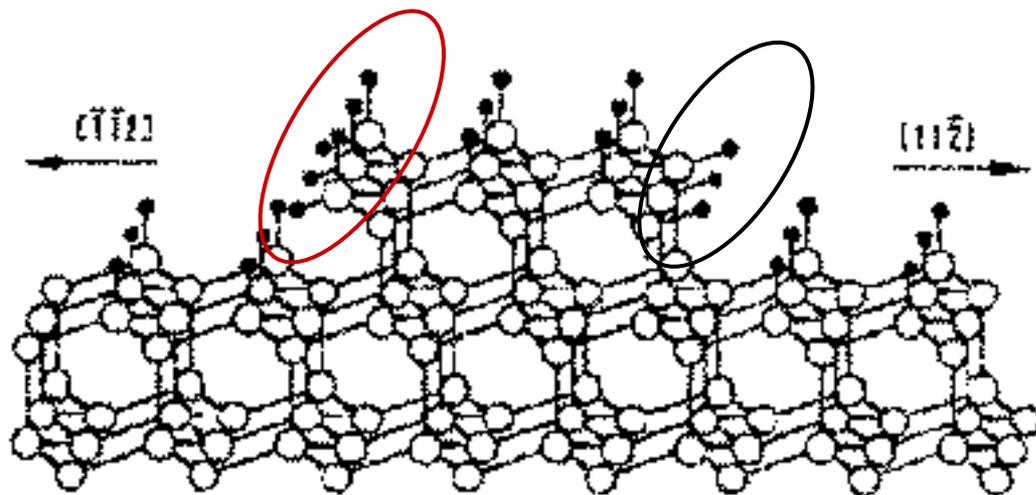
(110) ← (111) → (001)

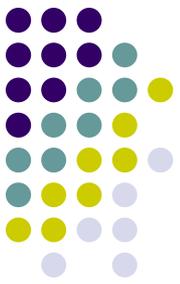


Si (111) 面上の原子ステップの移動速度の大小がエッチング速度を決める

Step-terrace model, 1993, M. Elwenspoek

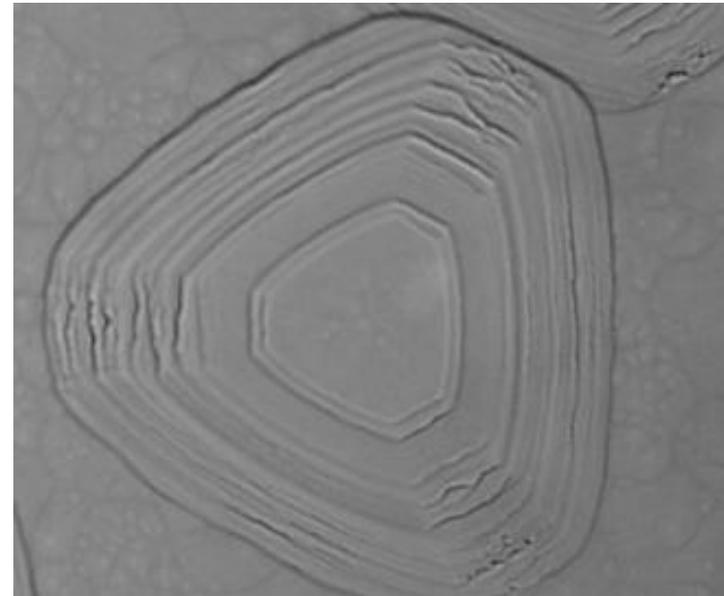
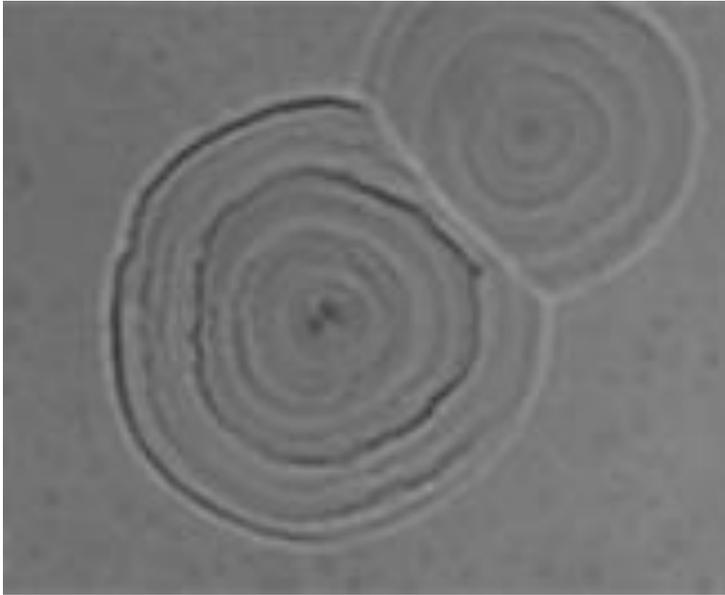
理想的な完全表面の結合の強さが本質でないことがわかる





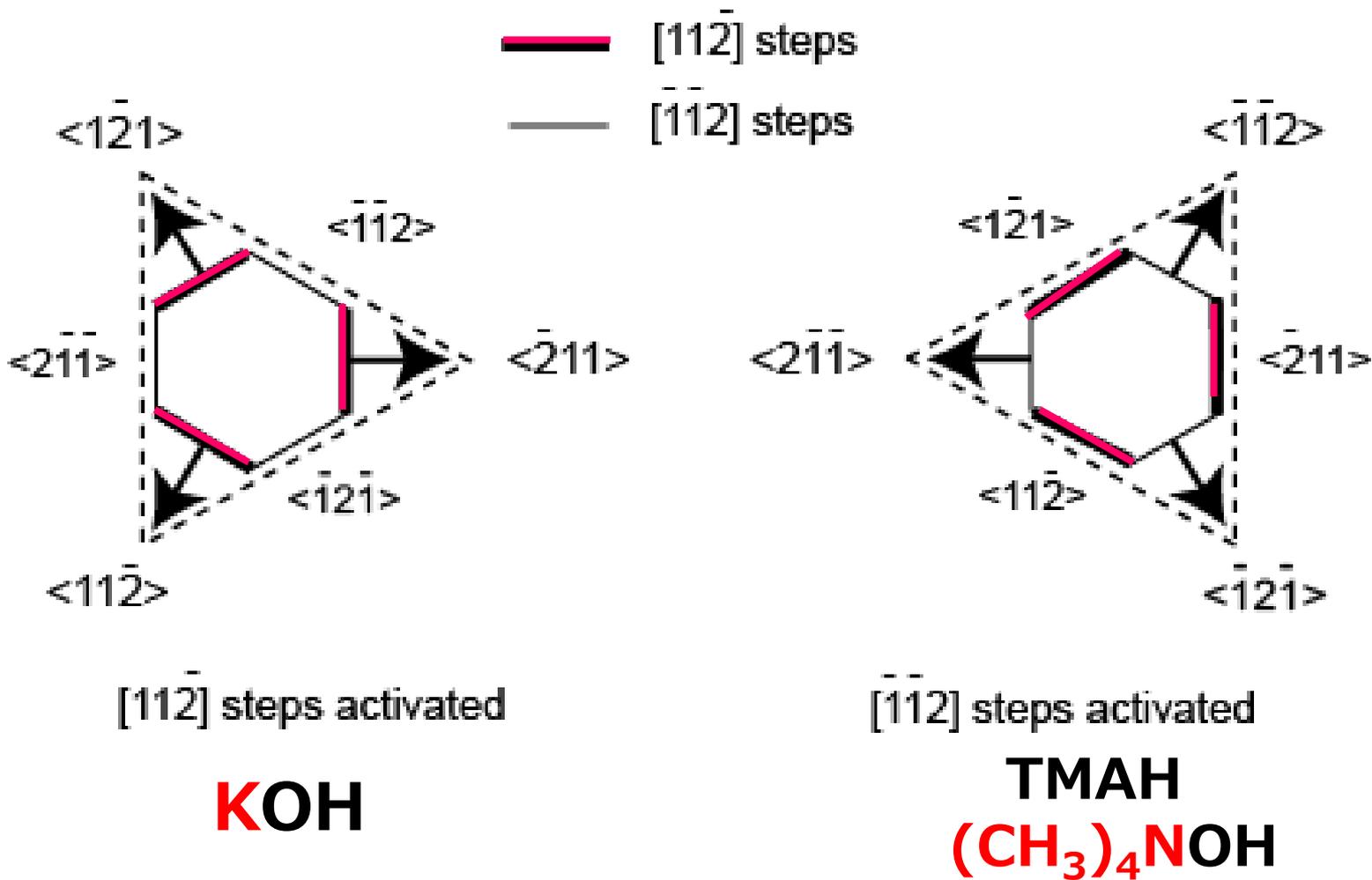
Si(111)面上の3角形エッチピットの成長. Step-and-Terrace model がマクロ的にも妥当

K. Sato, Sens. and Mat. vol.15, no.2 (2003)

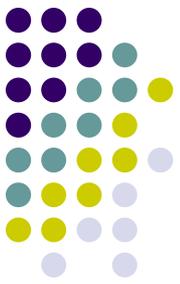


KOH solution (34wt%) TMAH solution (25wt%)
ピットの向きが逆転: 異なるタイプの異方性が出現
ステップのエッチング速度比がKOHとTMAHで逆転する

ピットの向き逆転の理由： KOH と TMAH
では原子ステップのエッチ速度比が逆転するから。



Siのウェットエッチングの 古い常識を書き換える

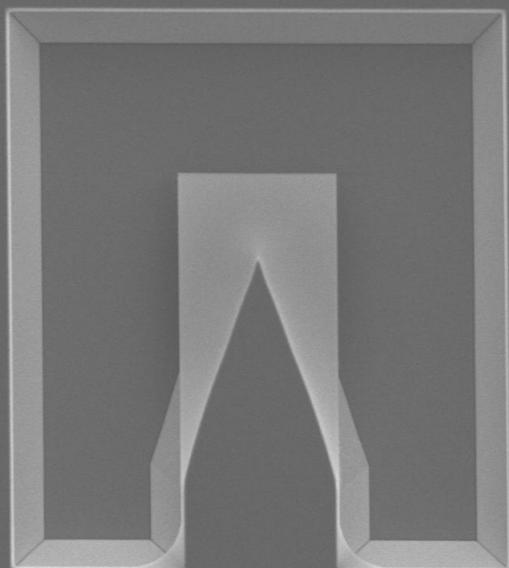


— 古い常識 —

- エッチング速度の異方性は、結晶方位が異なるそれぞれのカット面に存在する表面原子のダングリグボンド数の違いで説明できる
 - ★ 「原子ステップ・テラスモデル」を使うべき
 - ★ 原子ステップと液中イオンとの相互作用が異方性に影響

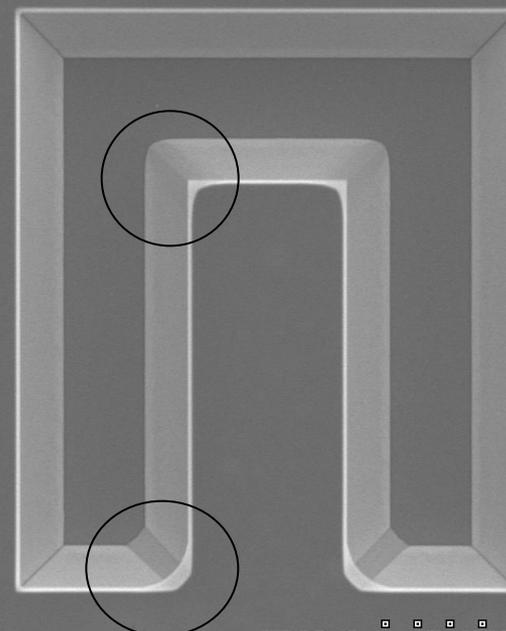
アルカリ(TMAH)水溶液に界面活性剤を加えるとエッチング形状が変わる (1999, 東芝:関村)

- 凸型のマスク輪郭では, アンダカットが低減
- 凹型の曲線マスクコーナーでは曲面が現れる



WD23.2mm 15.0kV x200 200um

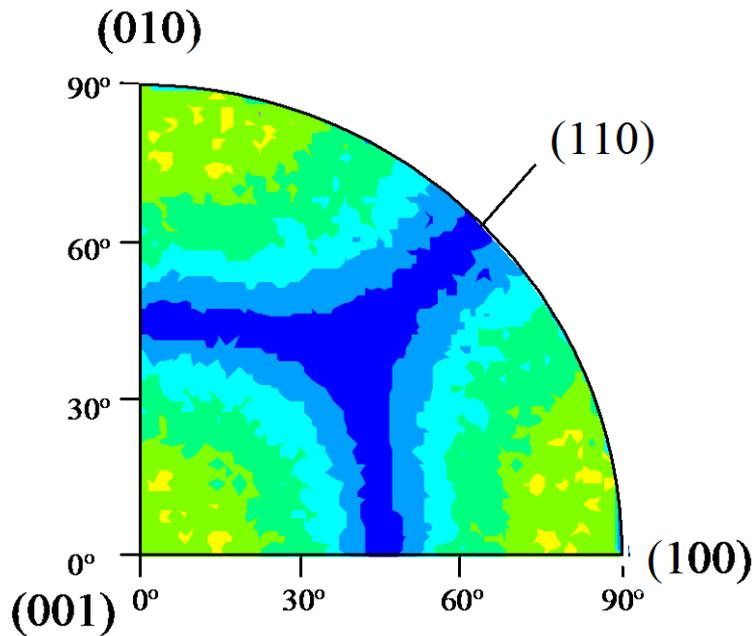
25% TMAH



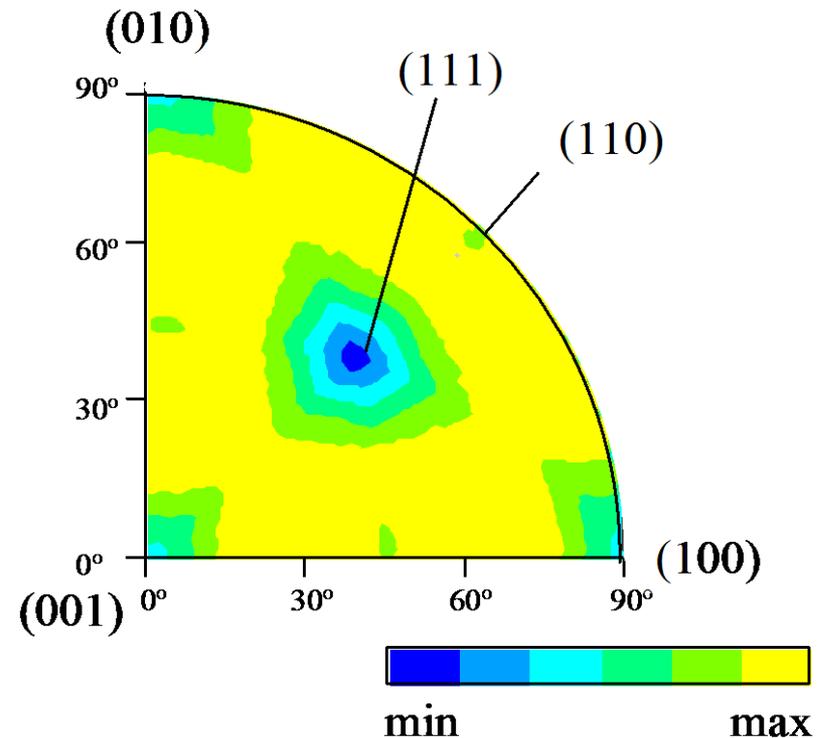
WD23.2mm 15.0kV x200 200um

25% TMAH + 界面活性剤 NC-200

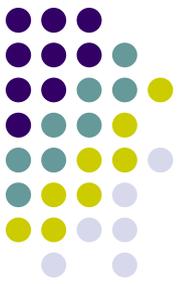
微量の界面活性剤添加で激変する エッチング速度の異方性 (TMAH)



25%TMAH + **NCW**

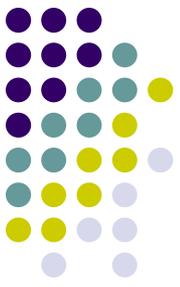


25%TMAH



エッチング現象の本質を探る道筋

- 観察する
 - どの方位がどれだけ速くエッチングされるのか
- モデルをたてる
 - 原子間の結合
 - 結晶とエッチング液の相互作用
- 解析する, 実験する
 - 原子1個ずつが脱落するシミュレーション
 - 実験結果と比較する
- モデルを検証する
 - 固液界面その場観察
- 現象を理解する



エッチング現象の本質を探る道筋

- 観察する
 - どの方位がどれだけ速くエッチングされるのか
- モデルをたてる
 - 原子間の結合
 - 結晶とエッチング液の相互作用
- 解析する, 実験する
 - 原子1個ずつが脱落するシミュレーション
 - 実験結果と比較する
- **モデルを検証する**
 - **固液界面その場観察**
- 現象を理解する

Effective Surfactants Added in TMAH Etching Solution



hydrophobic chain
(head)

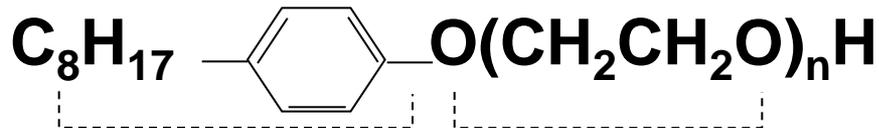
hydrophilic chain
(tail)

NC-200



(100%
polyoxyethylene-
alkyl-phenyl-ether)

Triton X-100



(iso-octylphenoxy
polyethoxyethanol)

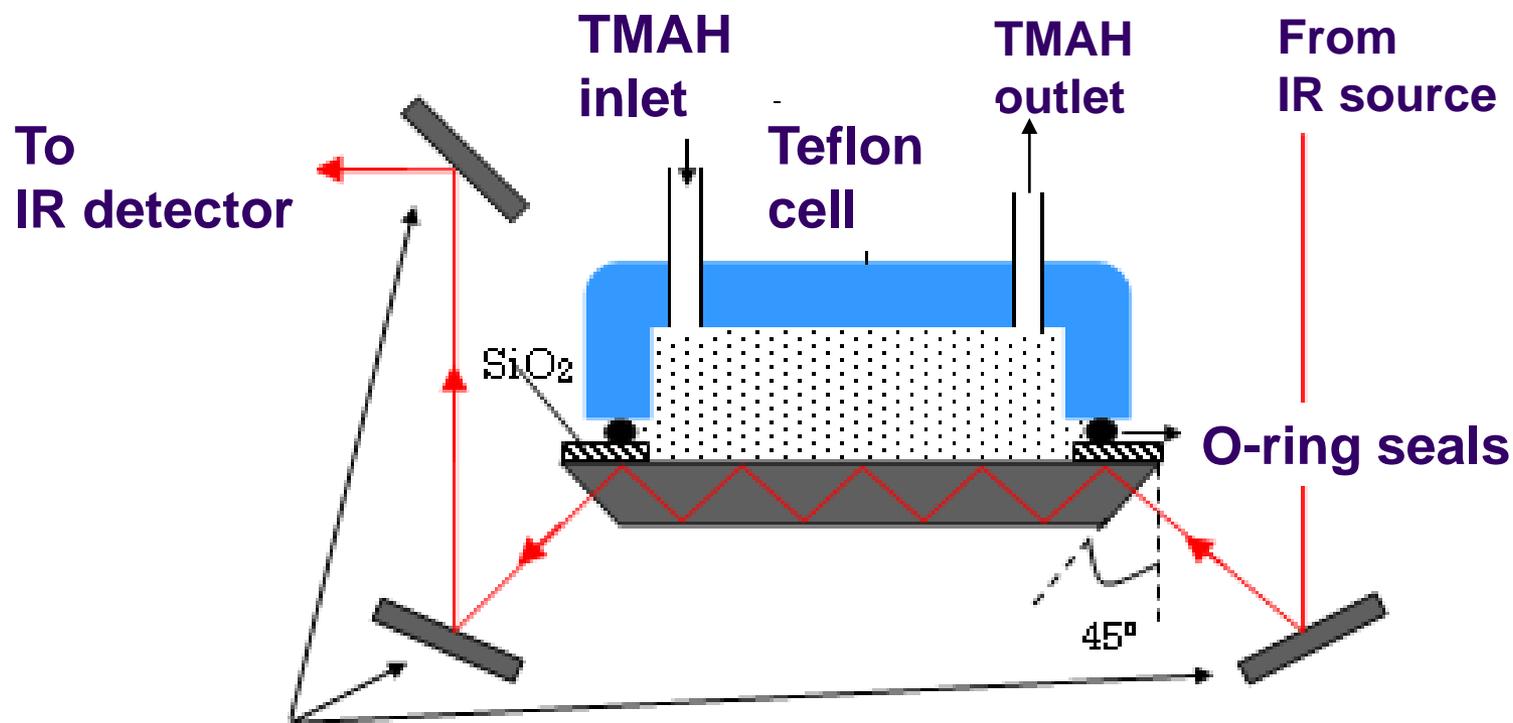
n=9 - 10

PEG (Polyethylene glycol)



in-situ FTIR によるエッチング中の Si表面とエッチング液界面の観測

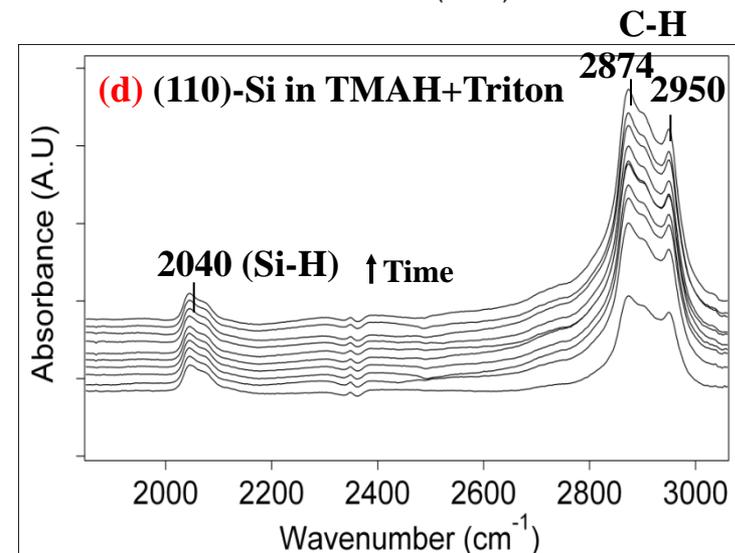
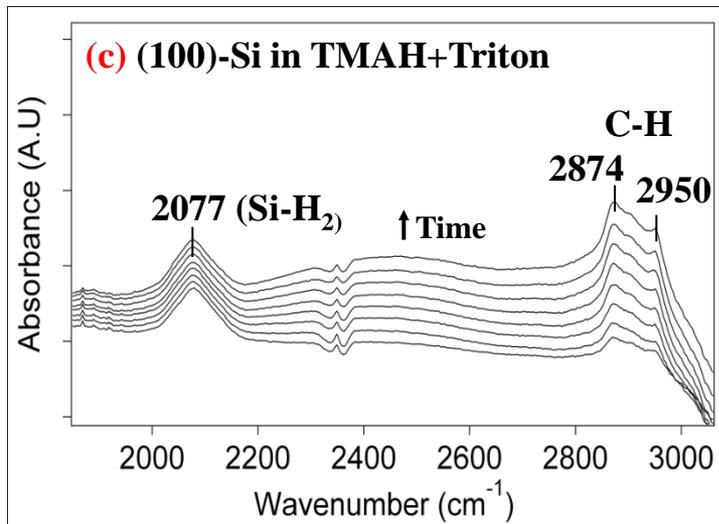
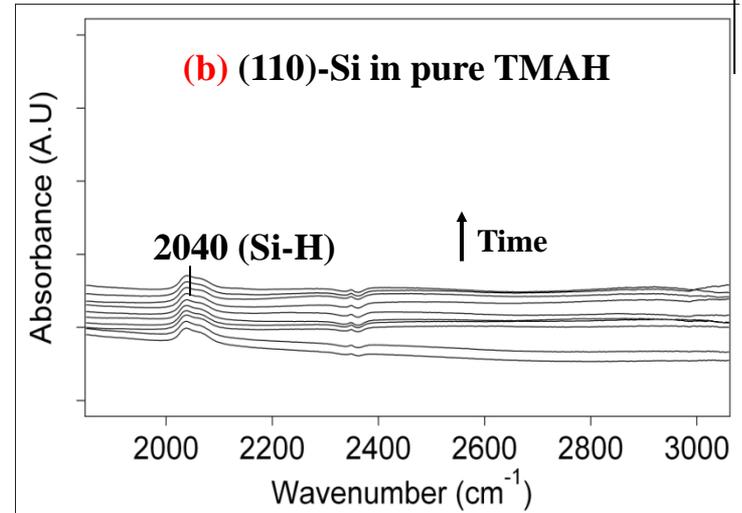
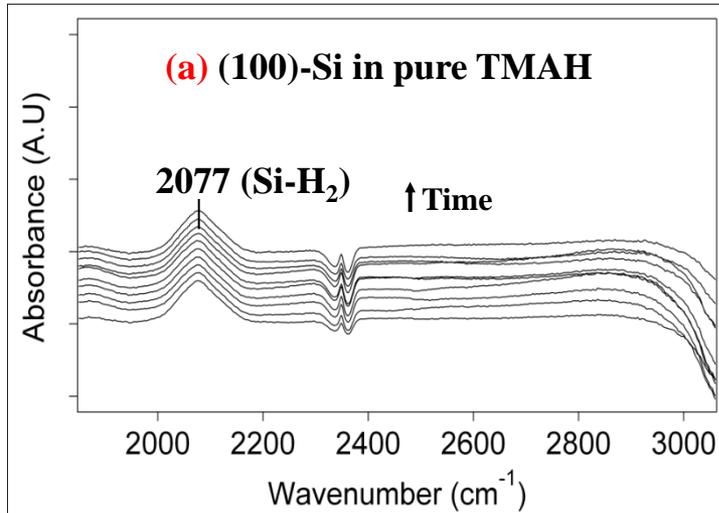
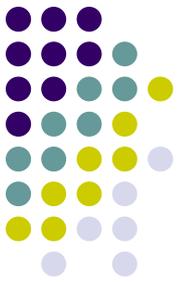
in collaboration with Niwano-lab, Tohoku Univ.



Alignment mirrors

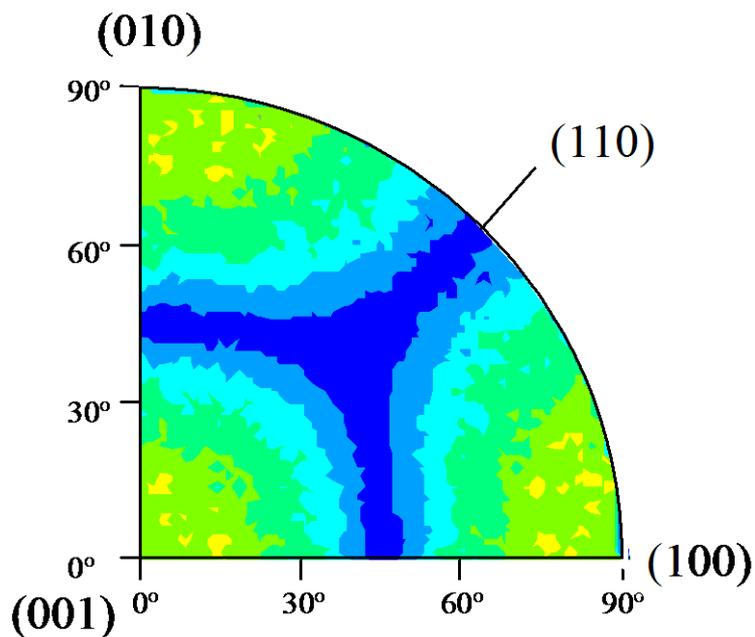
Prism Surface Orientations;
(100), (110), (111)

界面活性剤がSi (110) に選択的に吸着する *in-situ* IR Absorption Spectra

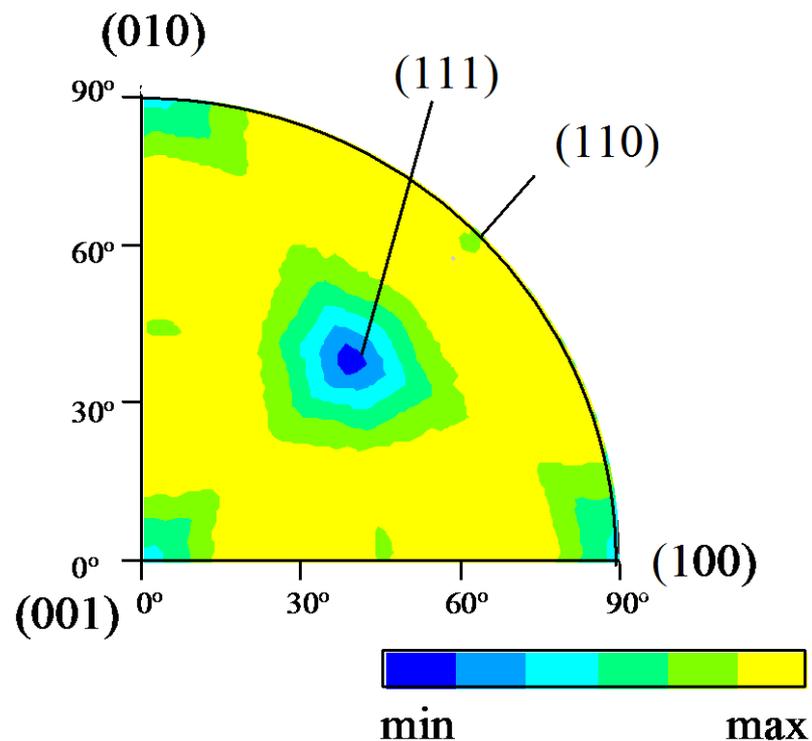


The strong adsorption of Triton molecules on (110)-silicon planes in comparison to (100)-silicon is clearly visible.

微量の界面活性剤添加で激変する エッチング速度の異方性 (TMAH)

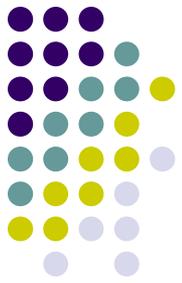


25%TMAH + NCW

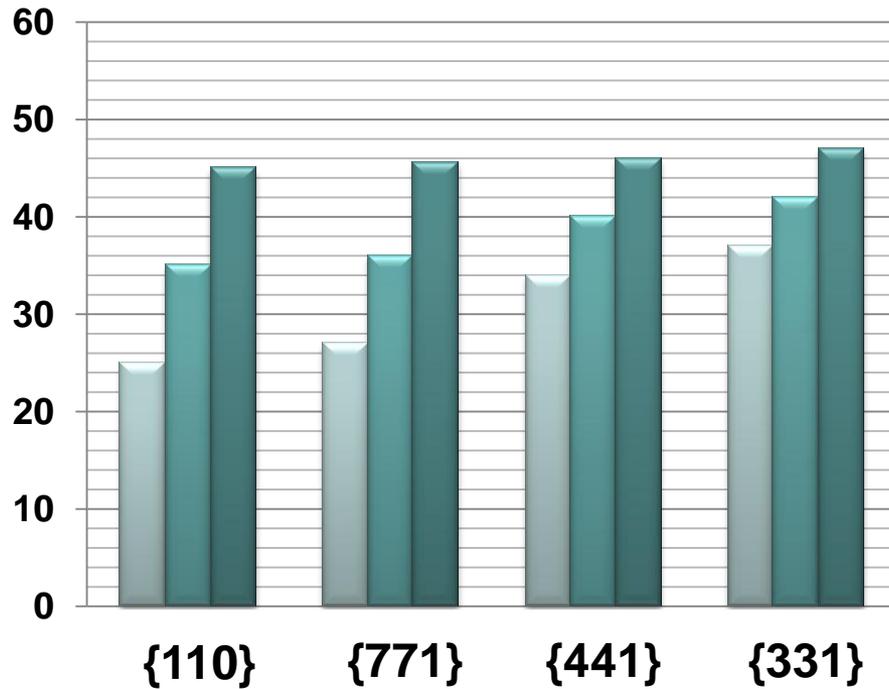


25%TMAH

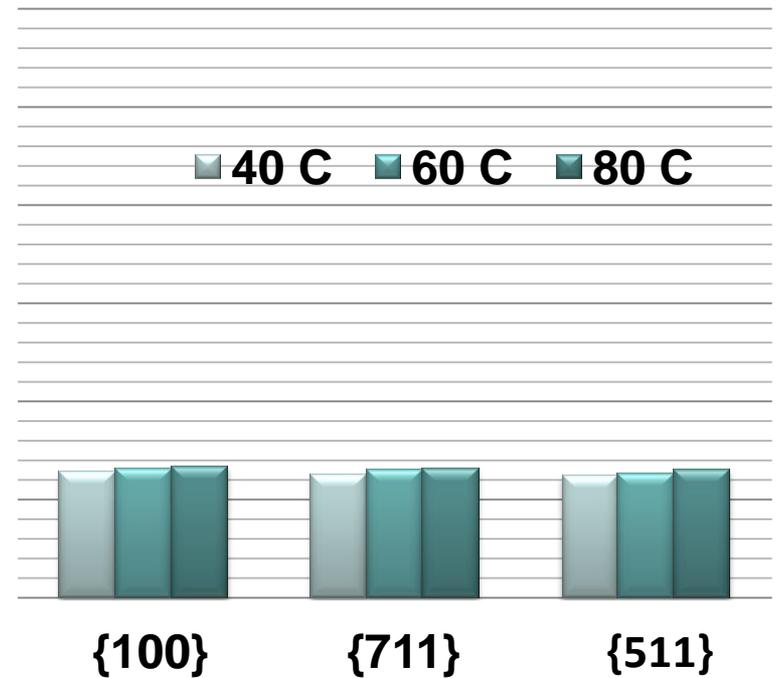
結晶方位による界面活性剤吸着膜厚の違い (Trion 水溶液浸漬後、純水で3回リンス、乾燥 →エリプソメータで膜厚評価)



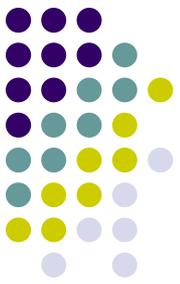
Thickness of adsorbed surfactant layer (Å)



{110} and vicinal planes



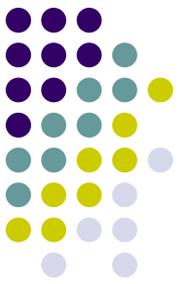
{100} and vicinal planes



エッチング現象の本質を探る道筋

- 観察する
 - どの方位がどれだけ速くエッチングされるのか
- モデルをたてる
 - 原子間の結合
 - 結晶とエッチング液の相互作用
- 解析する, 実験する
 - 原子1個ずつが脱落するシミュレーション
 - 実験結果と比較する
- モデルを検証する
 - 固液界面その場観察
- 現象を理解する

Siのウェットエッチングの 古い常識を書き換える

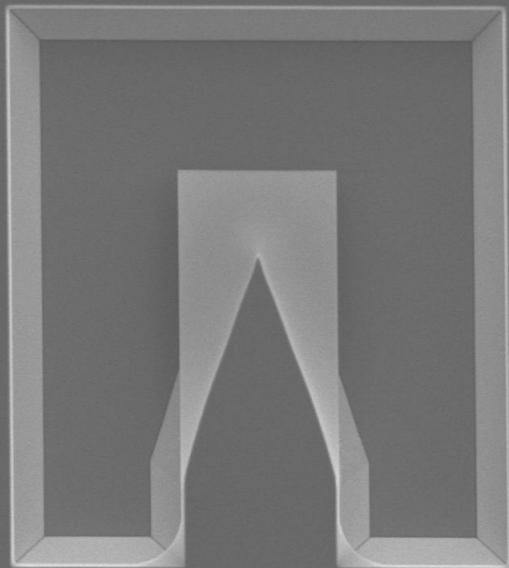
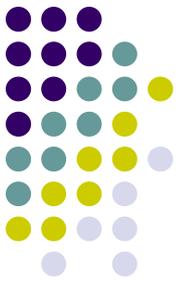


— 古い常識 —

- エッチング速度の異方性は、結晶方位が異なるそれぞれのカット面に存在する表面原子のダングリングボンド数の違いで説明できる
 - ★ 「原子ステップ・テラスモデル」を使うべき
 - ★ 原子ステップと液中プラスイオン、さらに原子ステップと界面活性剤分子との相互作用が異方性に影響
- Si(100) 基板に加工できるエッチング形状は最もエッチング速度の小さい {111} からなる矩形の輪郭を持つ
 - ★ どのようなマスク輪郭にも忠実にエッチング可能

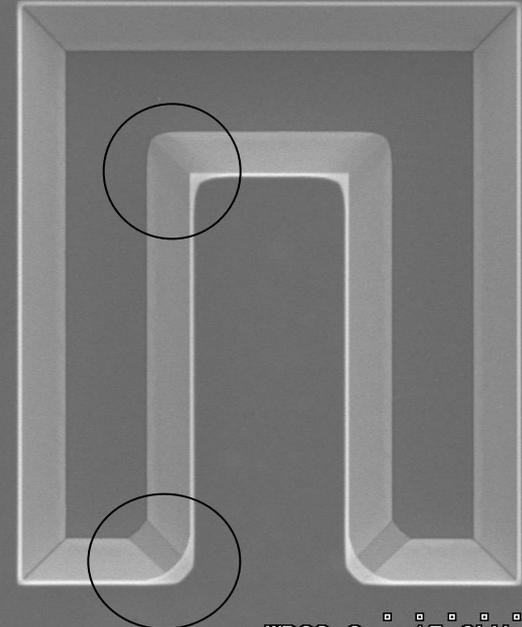
アルカリ(TMAH)水溶液に界面活性剤を加えるとエッチング形状が変わる

- 凸型のマスク輪郭では, アンダカットが低減
- 凹型の曲線マスクコーナーでは曲面が現れる



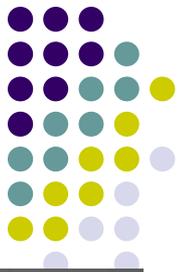
WD23.2mm 15.0kV x200 200um

25% TMAH

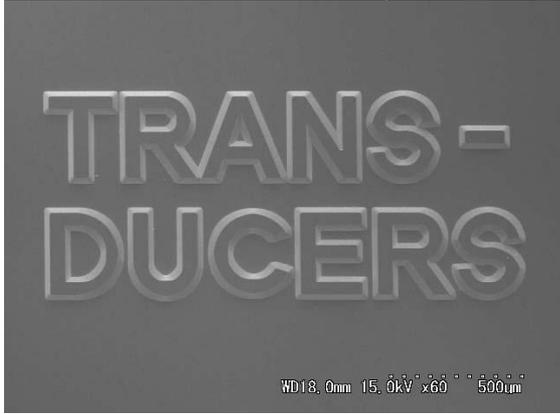


WD23.2mm 15.0kV x200 200um

25% TMAH + 界面活性剤 NC-200



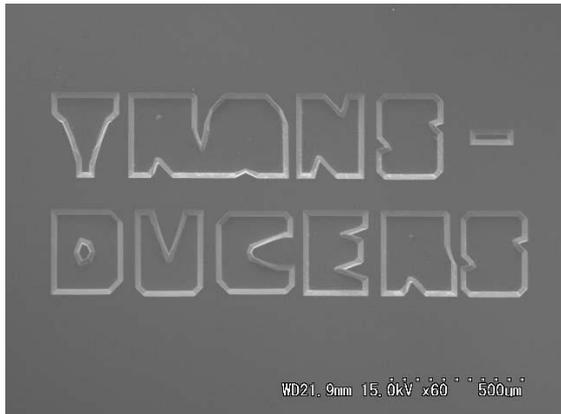
マスクの輪郭が保たれるか崩れるか、 エッチング液によって結果が違う



Island mask pattern

Pure 25 wt% TMAH

25 wt% TMAH+Triton



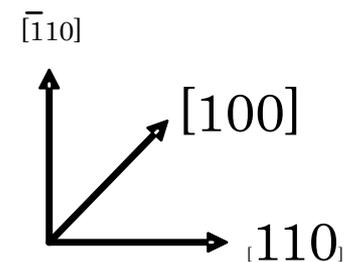
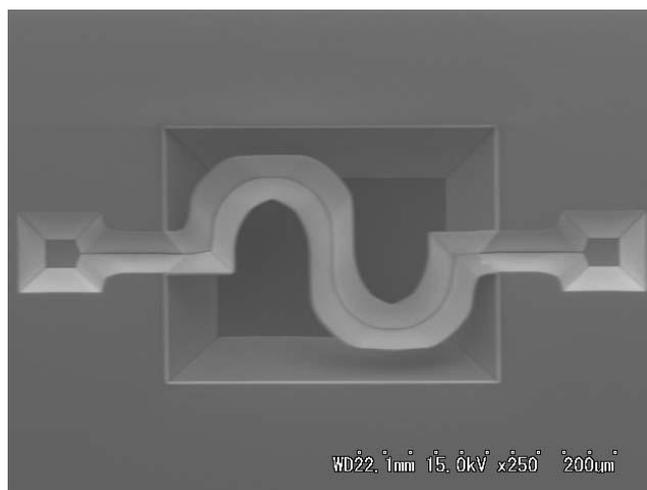
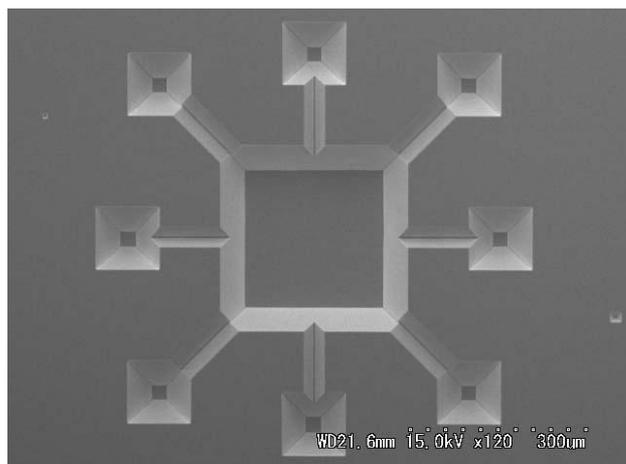
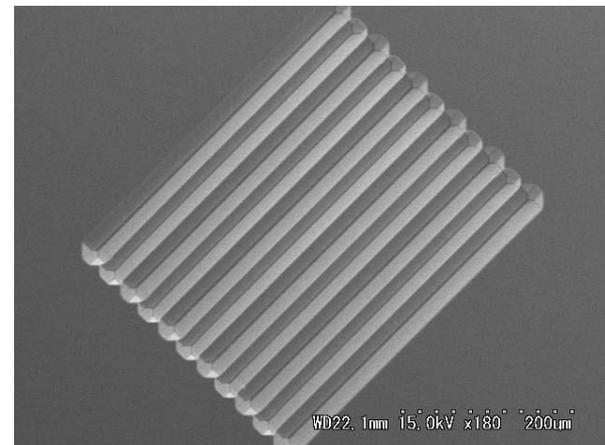
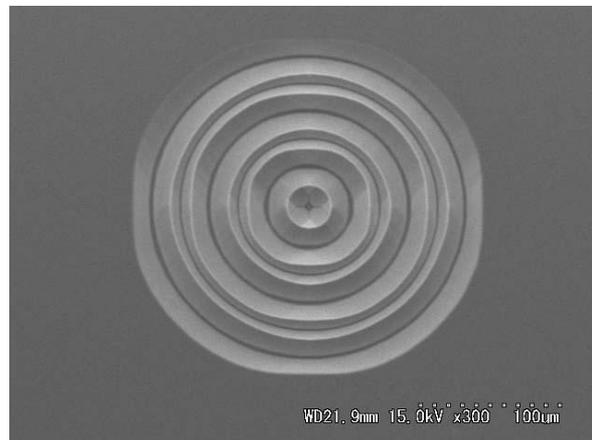
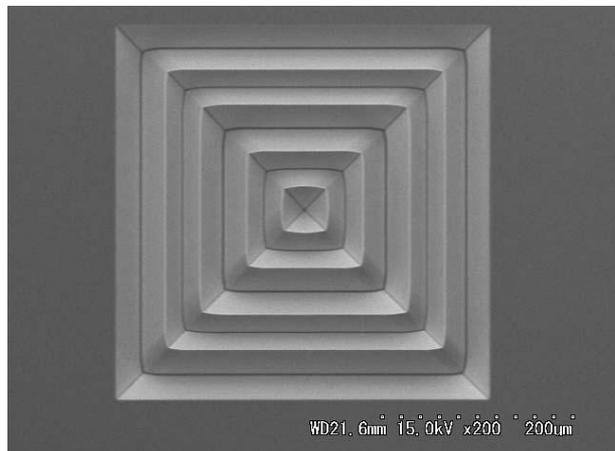
Groove mask pattern

Pure 25 wt% TMAH

25 wt% TMAH+Triton

Si (100) 表面にウェットエッチングで加工できる形状のバリエーション

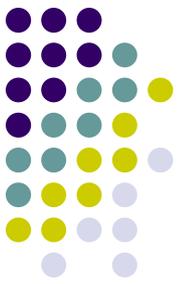
(PremPal: JJAP (2010))





結晶異方性エッチング液に界面活性剤を添加して新たに可能になった3次元形状加工

- 直角のコーナーをきちんと加工する
- 円弧状のV溝を作る
- 45° 傾いた反射ミラーができる
- 針の先端をとがらせる

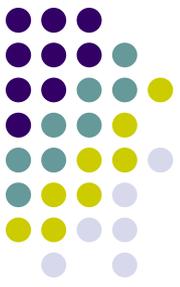


目次

- はじめに(職歴:日立で24年、名古屋で18年)
- 単結晶シリコンのマイクロ機械工学
結晶異方性エッチング
シリコン薄膜の機械的性質
- 教育、ものづくり・実習教育
- 大学に求められる変化
- 後進へのメッセージ



後藤良二氏の作品 「ねじれたダイヤモンド構造」 (千葉)

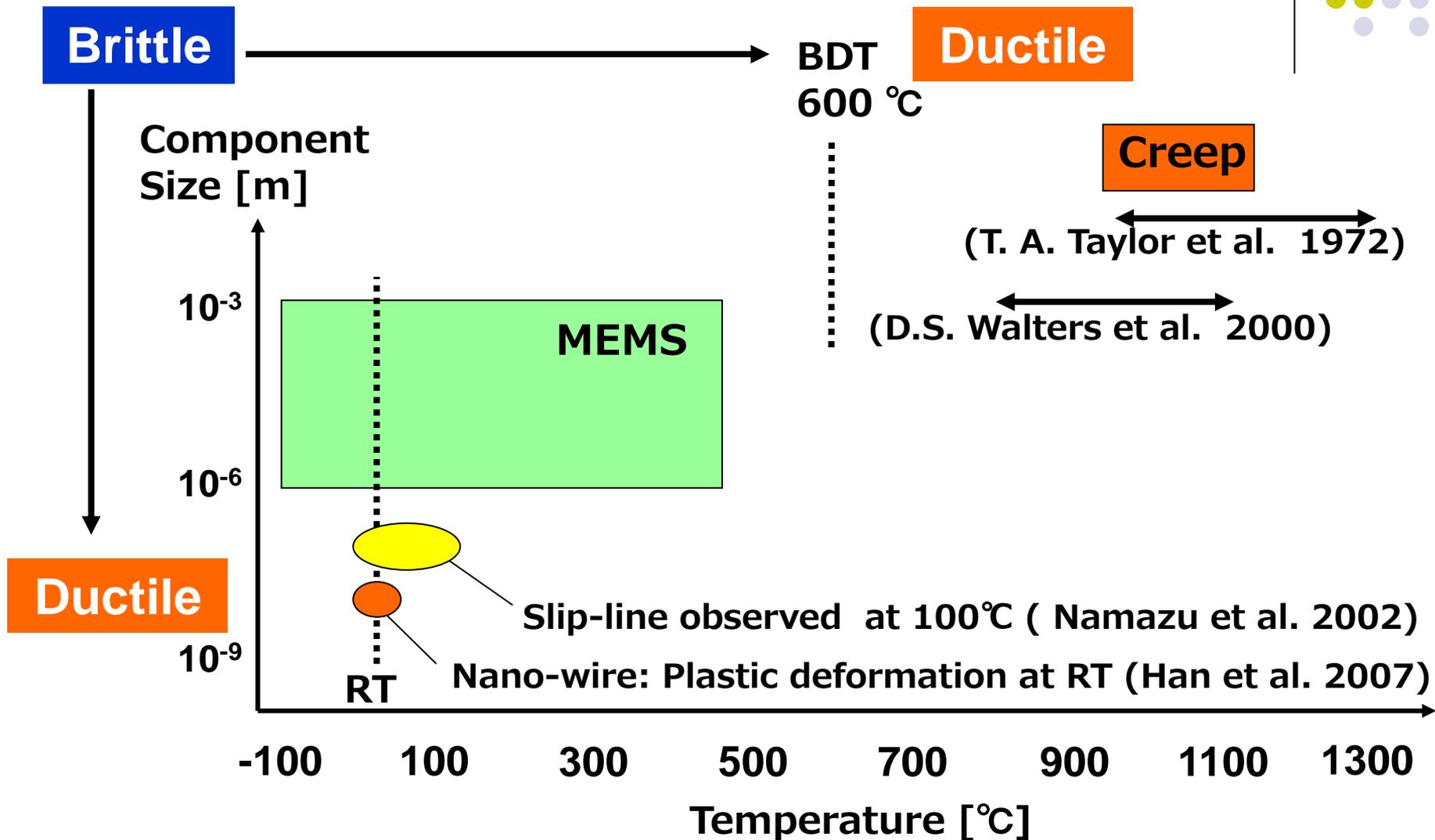


基礎研究

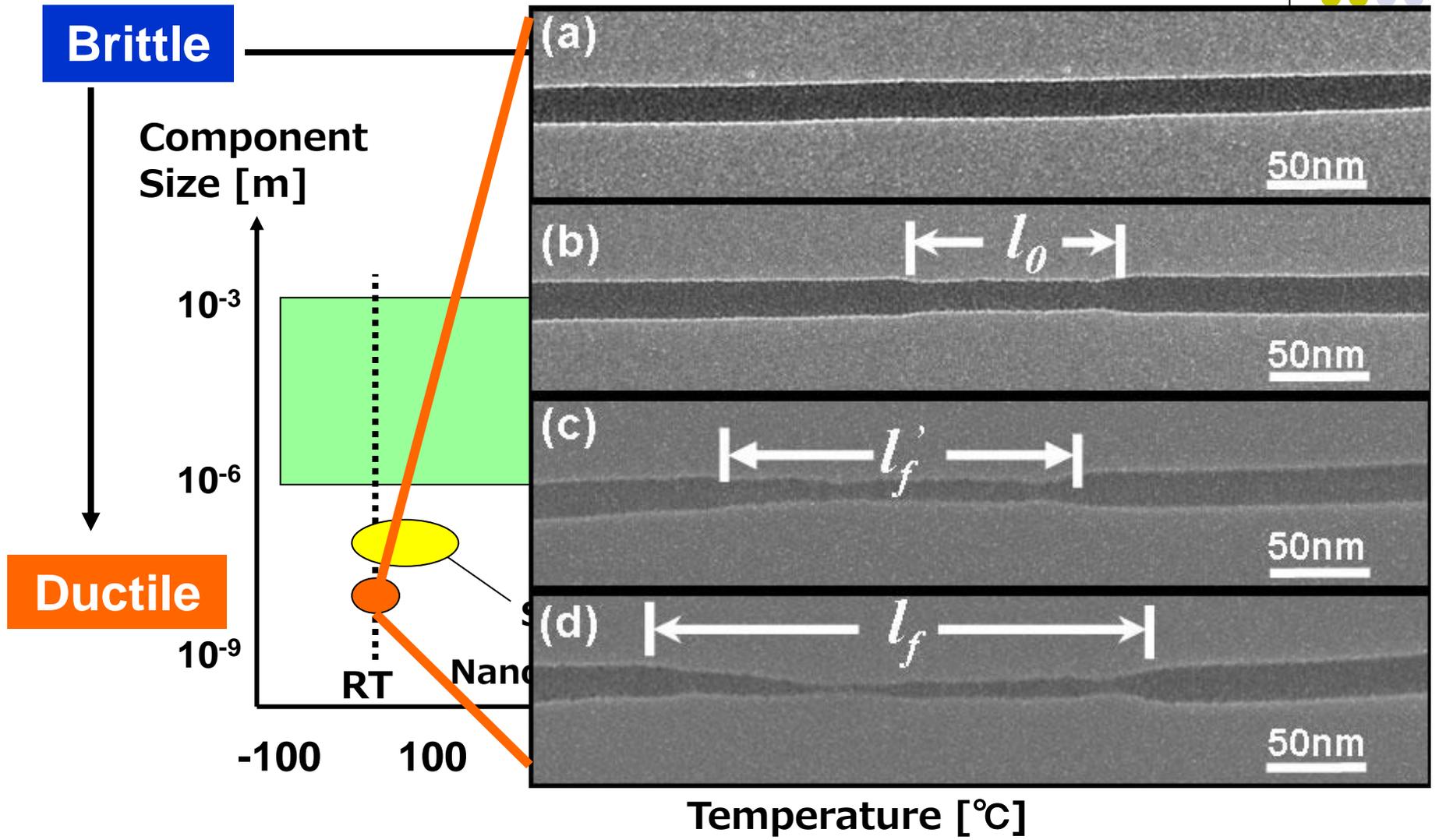
Si単結晶の破壊の寸法効果

- Siは室温でも脆性とはいえない
- 脆性・非脆性破壊遷移温度は，構造の代表寸法に依存する.
 - 4 μm 厚さの引張り試験では500 $^{\circ}\text{C}$ で延性破断
- 非脆性破壊が始まる(転位が動く)温度
 - 4 μm 厚さの構造で80 $^{\circ}\text{C}$
 - 1 μm 厚さの構造で-40 $^{\circ}\text{C}$

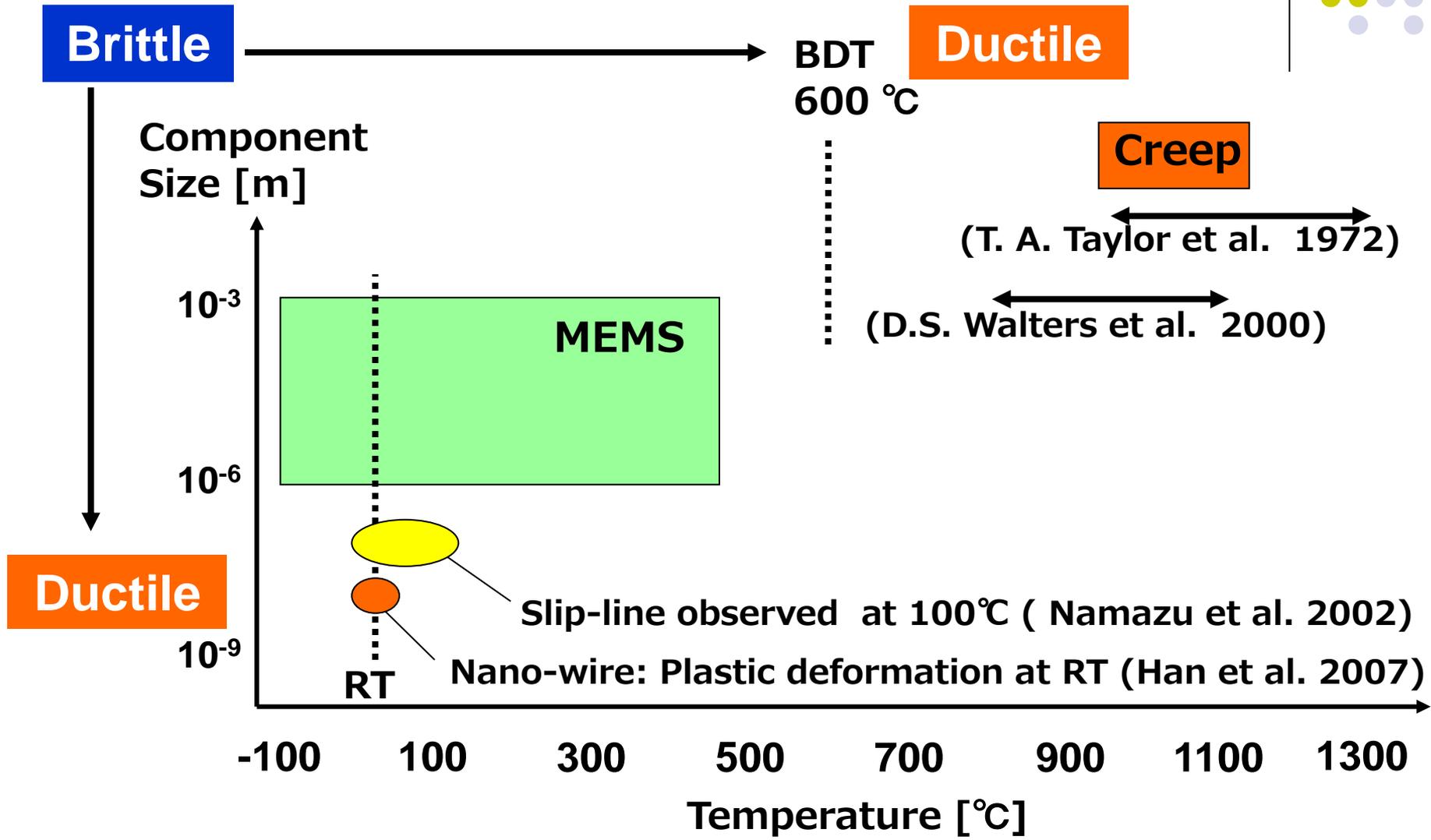
単結晶Siの破壊挙動の温度・寸法依存性

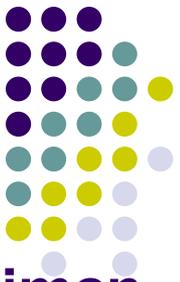


単結晶Siの破壊挙動の温度・寸法依存性



単結晶Siの破壊挙動の温度・寸法依存性

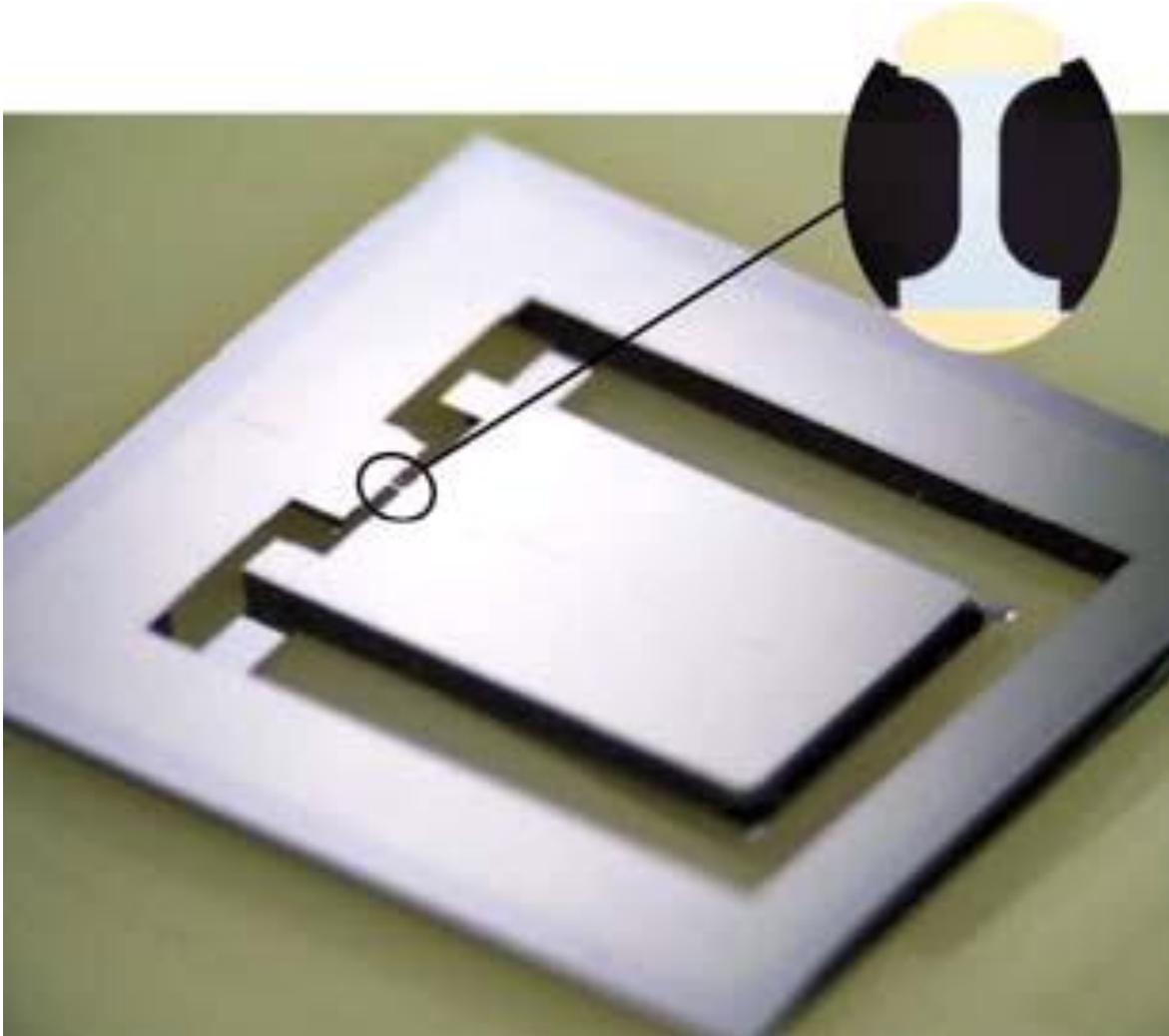




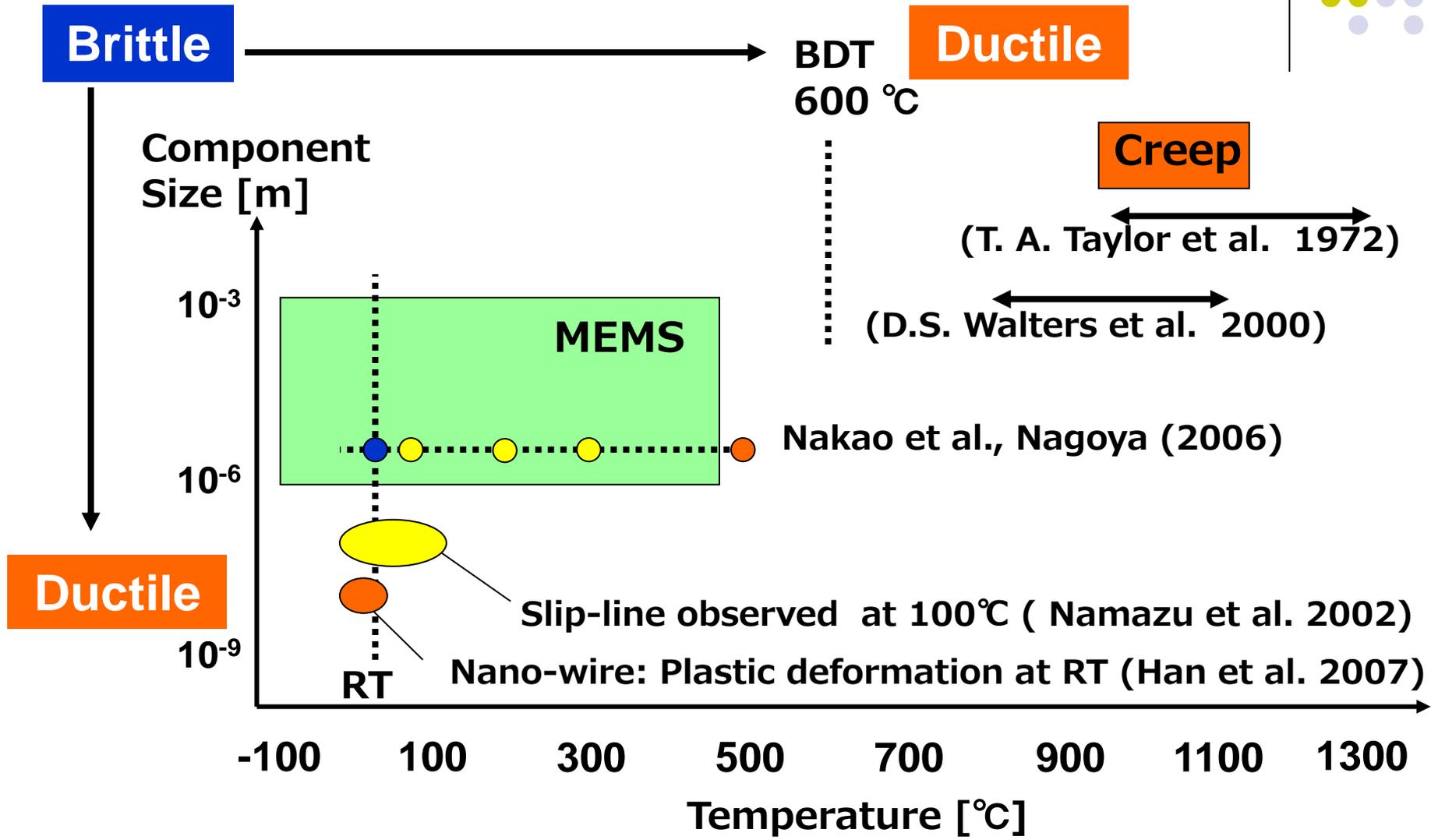
On-chip tensile test device

(Specimen: Si_3N_4 , 0.1 microns thick)

Thin film specimen

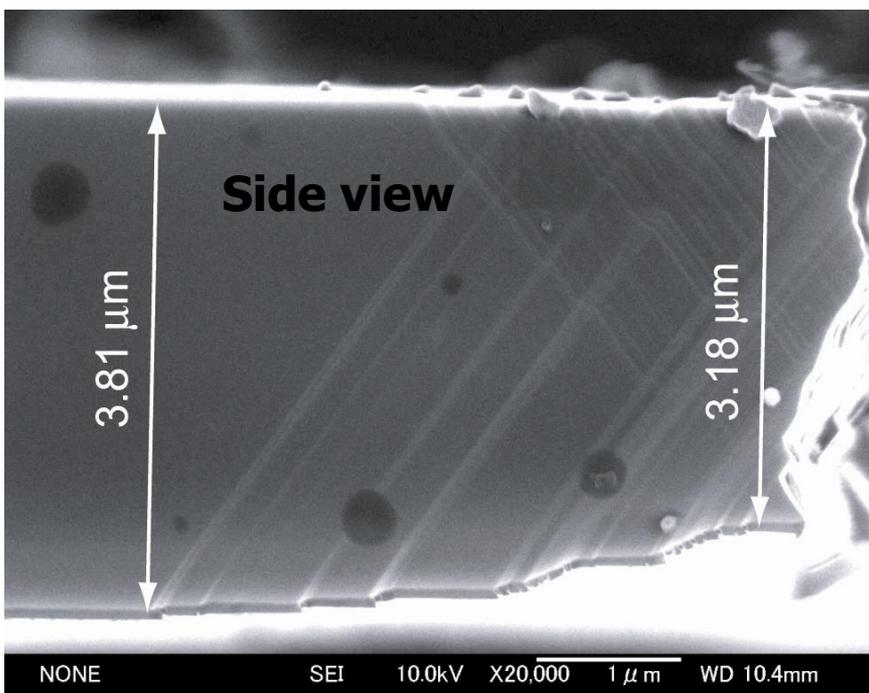


単結晶Siの破壊挙動の温度・寸法依存性





温度・寸法依存性



BDT **Ductile**

600 °C

Creep

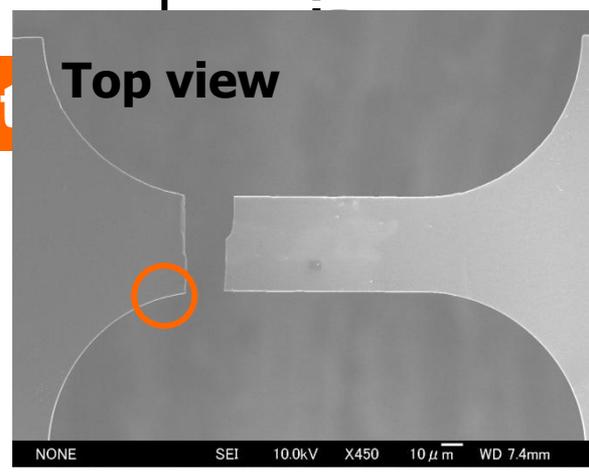
(T. A. Taylor et al. 1972)

(D.S. Walters et al. 2000)

Nakao et al., Nagoya (2006)

10⁻⁶

Duct



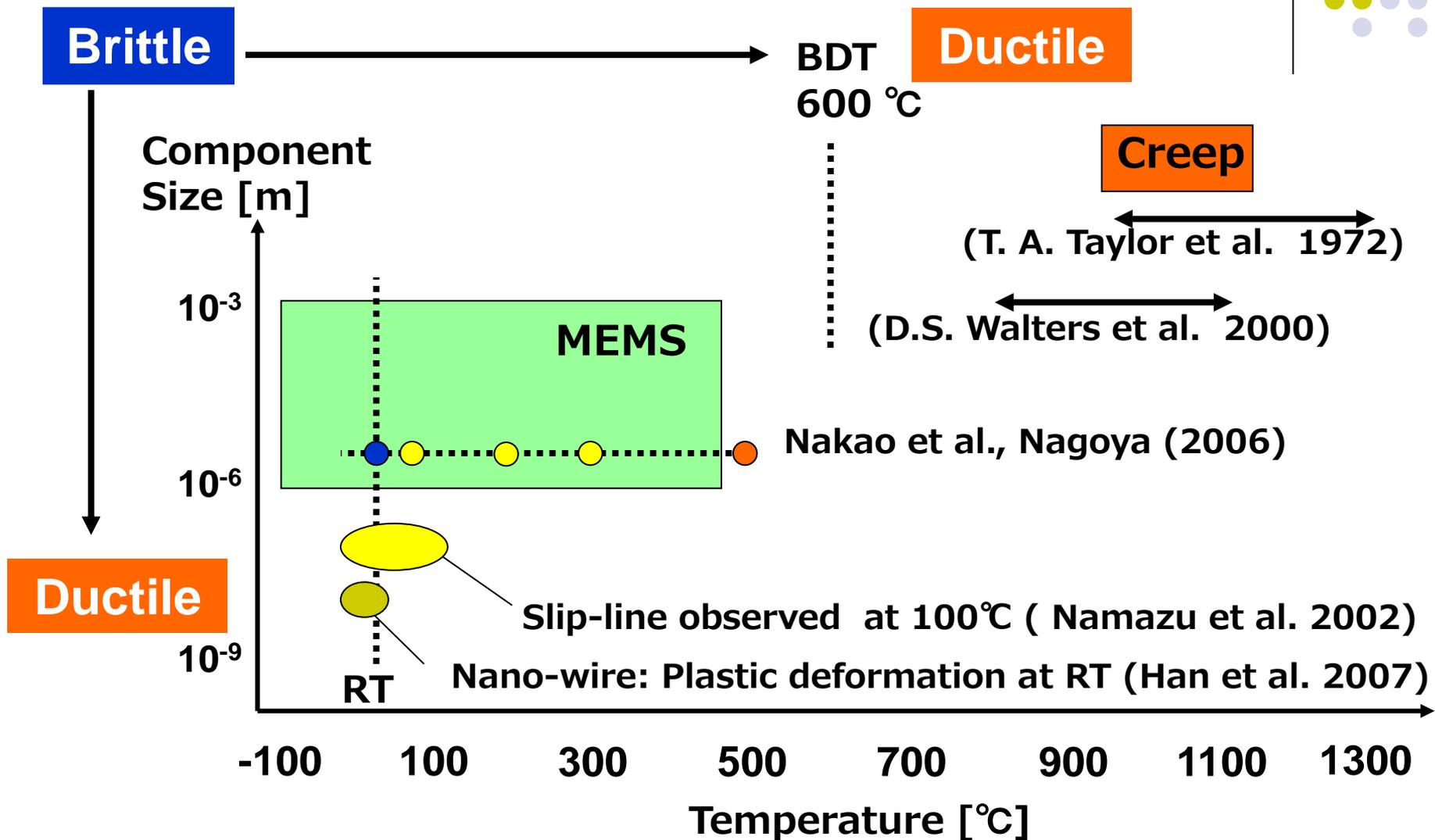
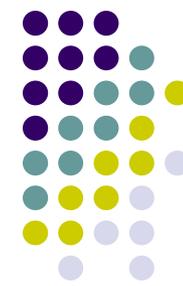
-line observed at 100°C (Namazu et al. 2002)

ire: Plastic deformation at RT (Han et al. 2007)

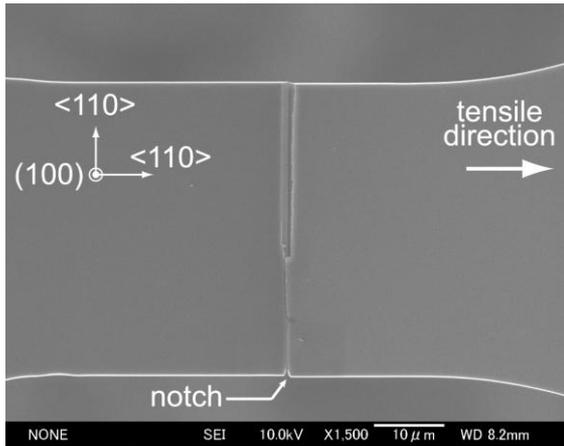
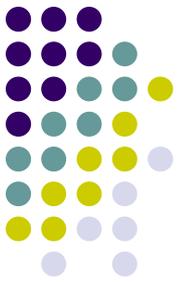
00 500 700 900 1100 1300

Temperature [°C]

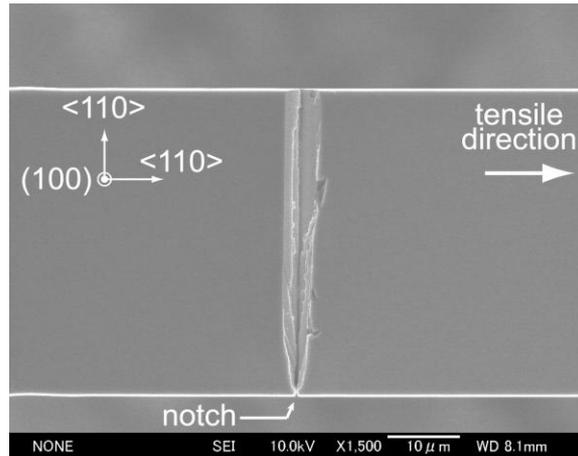
単結晶Siの破壊挙動の温度・寸法依存性



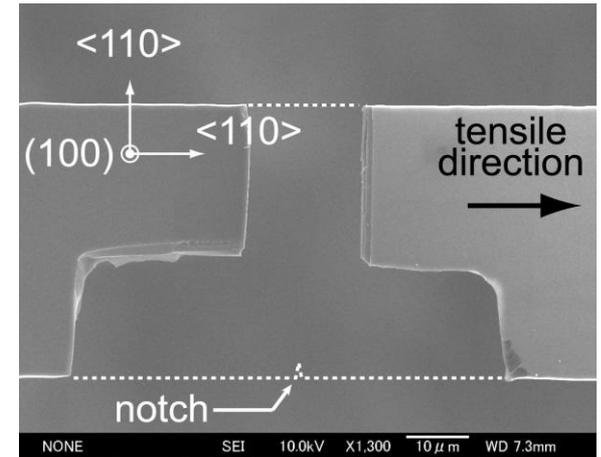
Fracture mode change observed in a temperature range RT~300°C (for 4 micron thick specimen)



60°C



80°C



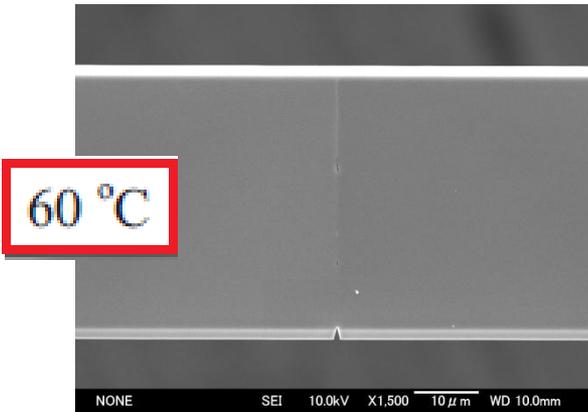
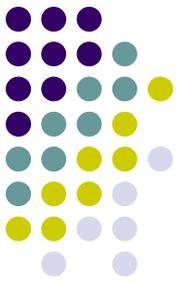
300°C

Brittle Mode

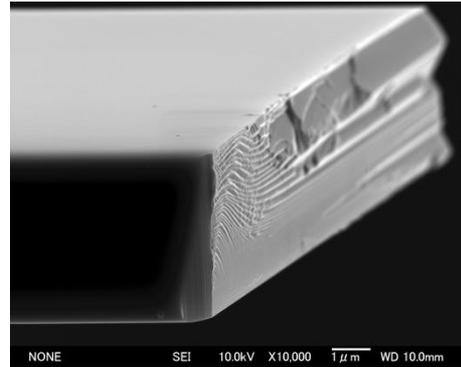


Non Brittle Mode

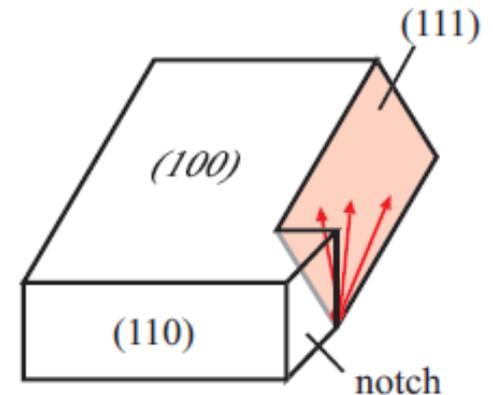
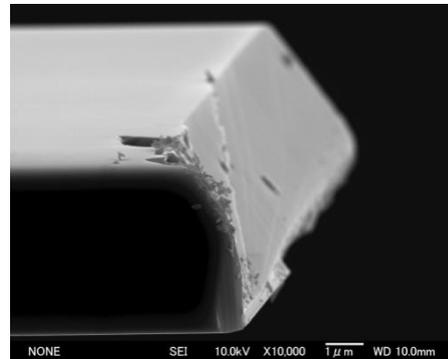
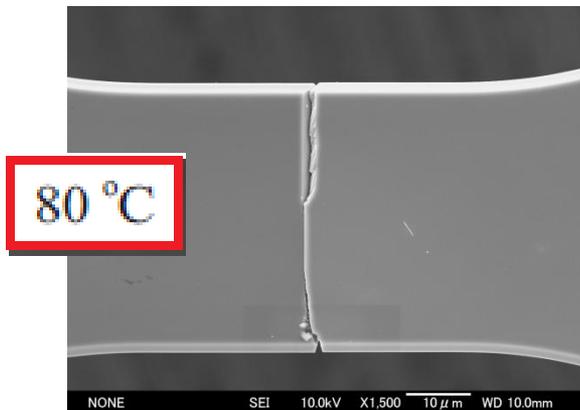
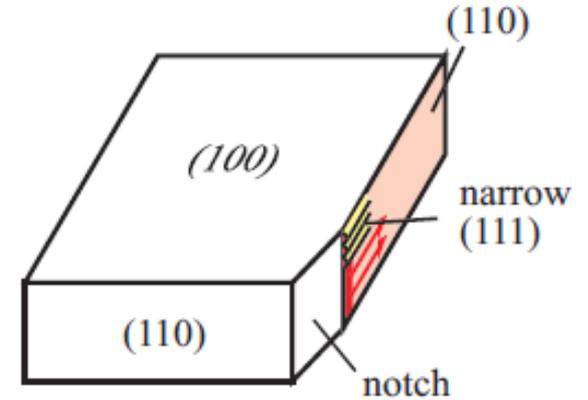
Difference in fracture mode of Si film 4 um thick below/above transition temperature



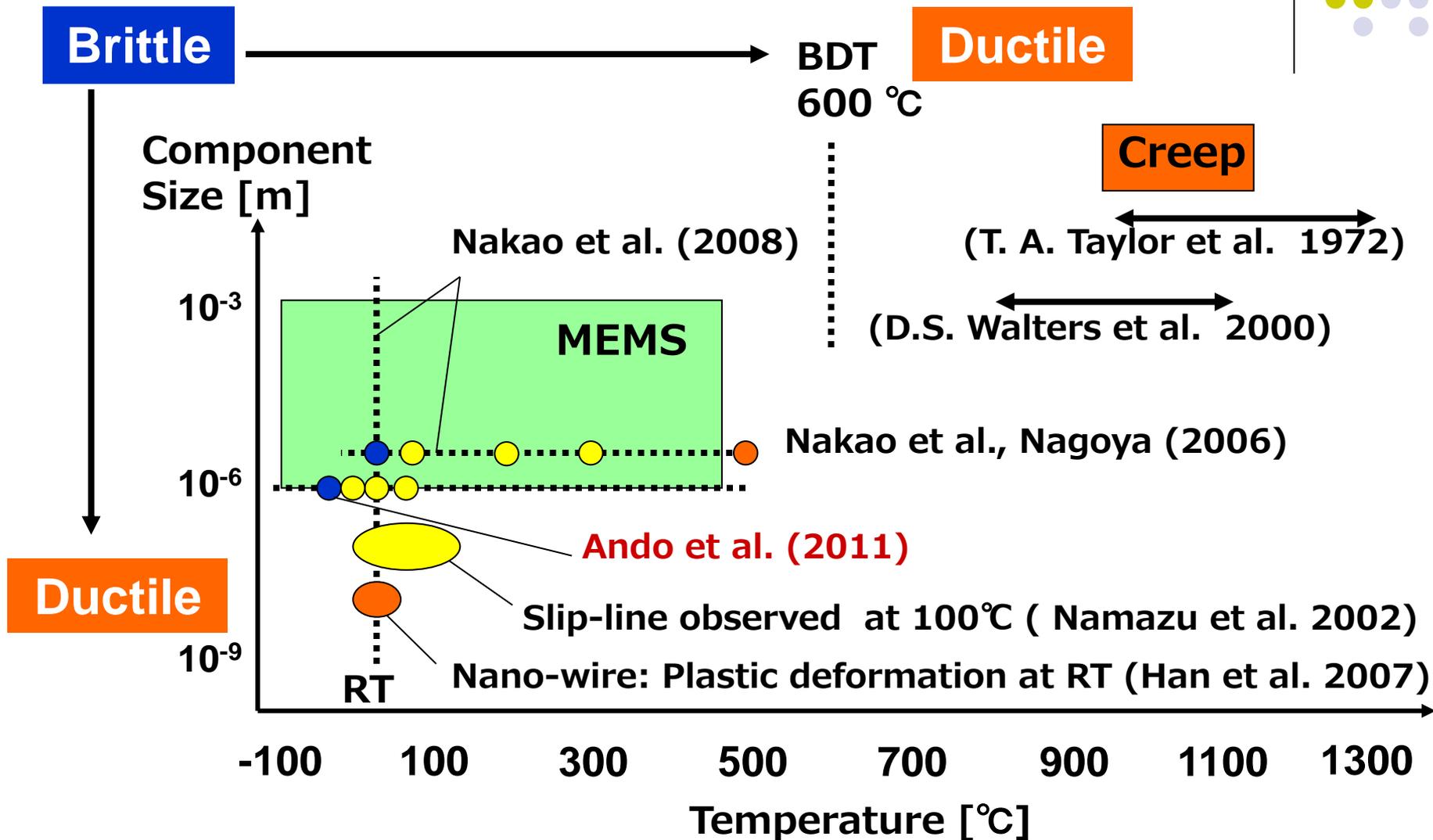
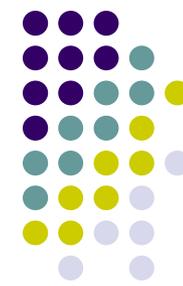
Top view



Fractured surface



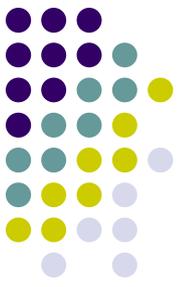
単結晶Siの破壊挙動の温度・寸法依存性



職業経歴, 研究テーマ, 学会活動年表

(22才) 1970 (34才) 1982 (46才) 1994 (58才) 2006 (70才) 2018

所属	産業界 (日立製作所)		大学		
金属塑性加工 (研究対象: 純銅、純鉄)	金属の材料特性、異方性を利用した加工技術開発		博士号取得		
マイクロ機械 MEMS (研究対象: 単結晶シリコン など)			名古屋大学		
	MEMS開発、シリコンの結晶異方性エッチングの研究				
	細胞融合装置 精密工学会技術賞		データベース開発・販売		
			マイクロ材料 (薄膜) の強度評価		
学会活動	日本塑性加工学会 日本機械学会	精密工学会	電気学会 IEEE	日本機械学会にマイクロナノ部門設立 船井特別賞 文科大臣表彰	

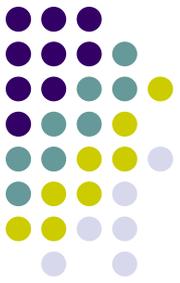


マイクロ・ナノ機械工学のすすめ

- ❖ 異分野が融合する複合領域の刺激
- ❖ 研究者にとって新しい研究対象の宝庫
- ❖ 海外の研究者と仕事で協力しあう場

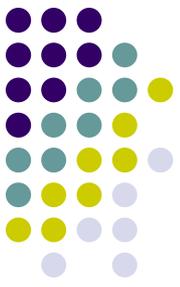


日本機械学会に21番目の新部門
マイクロナノ工学部門を設置(2012から)



目次

- はじめに(職歴:日立で24年、名古屋で18年)
- 単結晶シリコンのマイクロ機械工学
 - 結晶異方性エッチング
 - シリコン薄膜の機械的性質
- 教育、ものづくり・実習教育
- 大学に求められる変化
- 後進へのメッセージ

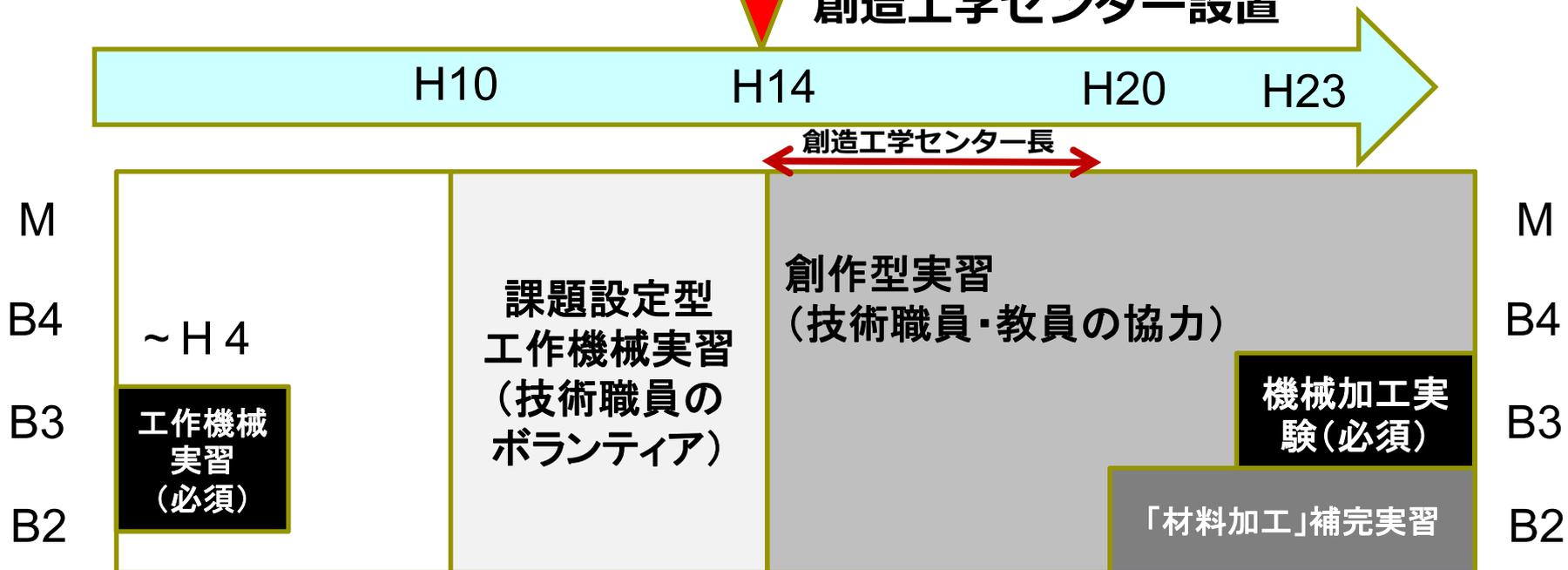


どんな教育をしたか

- 材料加工学(学部2年)、超精密工学(学部3年)、マイクロマシニング特論(修士1年)
- 授業毎回の内容質問・討論票(A5用紙1枚)
次回の授業冒頭で質問・討論票に応える
質問・討論票の内容で採点、無試験で単位付与
授業への集中度向上・理解度評価に効果
- 技術職員の協力で授業補完実習(材料加工学)
日本工学教育協会賞受賞(業績賞、著述賞)

名古屋大機械系の工作実習形態の変遷

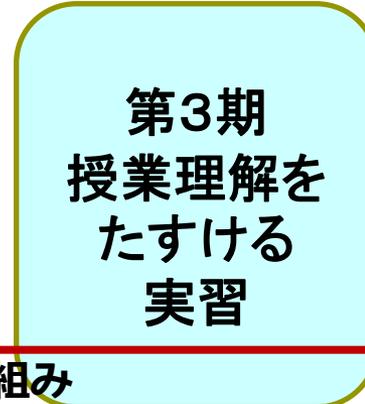
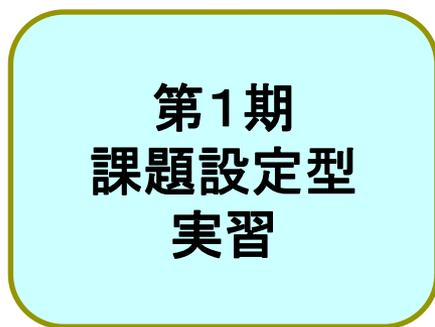
▼ 創造工学センター設置



授業科目



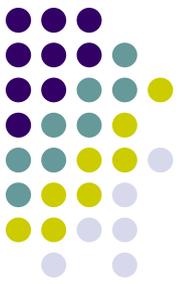
課外活動



佐藤の取り組み

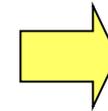
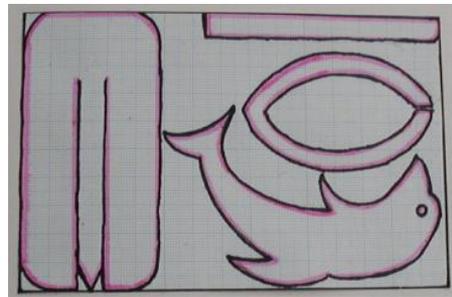
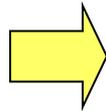
第2期 創作型実習の例

(学部2年生 メタルクラフト)



手作業を中心とする金属加工 (松浦技術職員発案)

一枚の金属板から 自由にデザインして モビールを作る



素材: Cu 2mm厚、
はがき大

デザイン画

完成品

導入コース (B2対象)

メタルクラフト: やじろべ

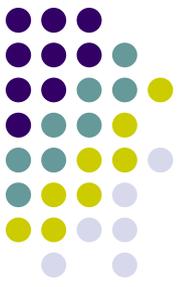


学生の作品



松浦技術職員の作品

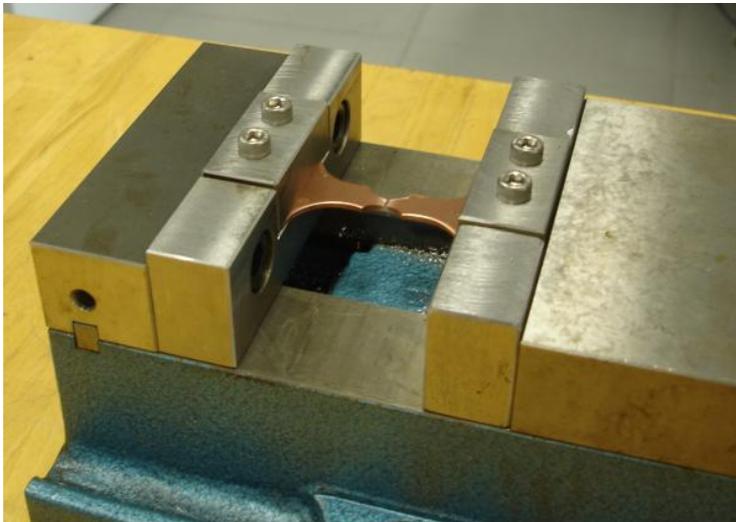
- ・はがき大の銅板を素材に与える
- ・切断、やすり掛け、曲げ、接合
- ・自由なデザイン
- ・出来映えを競う
- ・表彰



第3期 「材料加工学」講義の補完実習

塑性変形を体験、応力ひずみ関係を学ぶ

純アルミニウムの引張試験： 応力・ひずみの関係をグラフにプロットして、加工硬化指数を求める。一様伸び、破断伸びを測る



バイスを利用した簡易引張試験機
(千田技術職員の発案)



純アルミニウム (AL99.5%以上)

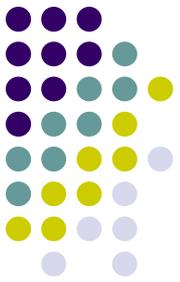
左: 引張り前の試験片

中: 焼鈍した試験片 引張り後

右: 圧延材の試験片 引張り後

第3期 「材料加工学」講義の補完実習

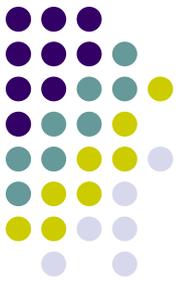
圧縮試験を体験、「真ひずみ」の概念を学ぶ



試験片の加工硬化指数を計算する



圧縮試験のようす



第3期 「材料加工学」講義の補完実習

SUS板材の繰返し曲げで塑性仕事が増えることを**体感**、
仕事量から温度上昇を**計算**し比較する



加工熱測定実験の段取り説明のようす



試験片



デジタル温度計

お世話になった方々 (ものづくり・実習教育)

- 梅原徳次 創造工学センター長
- 千田進幸 技術職員
- 松浦英雄 元技術職員
- 福森 勉 技術職員
- 山本浩治 技術職員
- 中木村雅史 技術職員
- 皆川 清 技術職員
- 白木尚康 技術職員
- 兼子一重 助教
- 松室昭仁 愛工大教授

日本工学教育協会賞
業績賞→技術職員
著述賞→佐藤

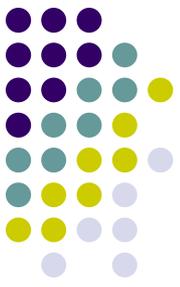


市民公開講座
一般市民・中高生対象の実習



目次

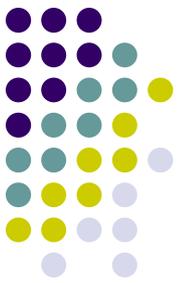
- はじめに(職歴:日立で24年、名古屋で18年)
- 単結晶シリコンのマイクロ機械工学
 - 結晶異方性エッチング
 - シリコン薄膜の機械的性質
- 教育、ものづくり・実習教育
- 大学に求められる変化
- 後進へのメッセージ



この20年で起きた大学の環境変化

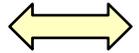
- ❖ Internet: 授業・教科書外から膨大な知識
異分野の情報・知識を学び、取入れるのが容易になった
手に入る情報の量は膨大 授業で何を教えるのか？
教員が「知識の体系」を語ること
- ❖ International: 世界のフラット化
研究論文は英語で、世界で瞬時にみられる
評価指標(インパクトファクタ、引用数)で横並び評価
個人・地域の「におい」がする情報を発信
- ❖ Interdisciplinary: 元気の源
多国籍の組織の強さ、異文化の融合 **異分野の融合**

研究メンバーの国際化は 研究を活発化するのに貢献する



学術振興会
国際共同研究

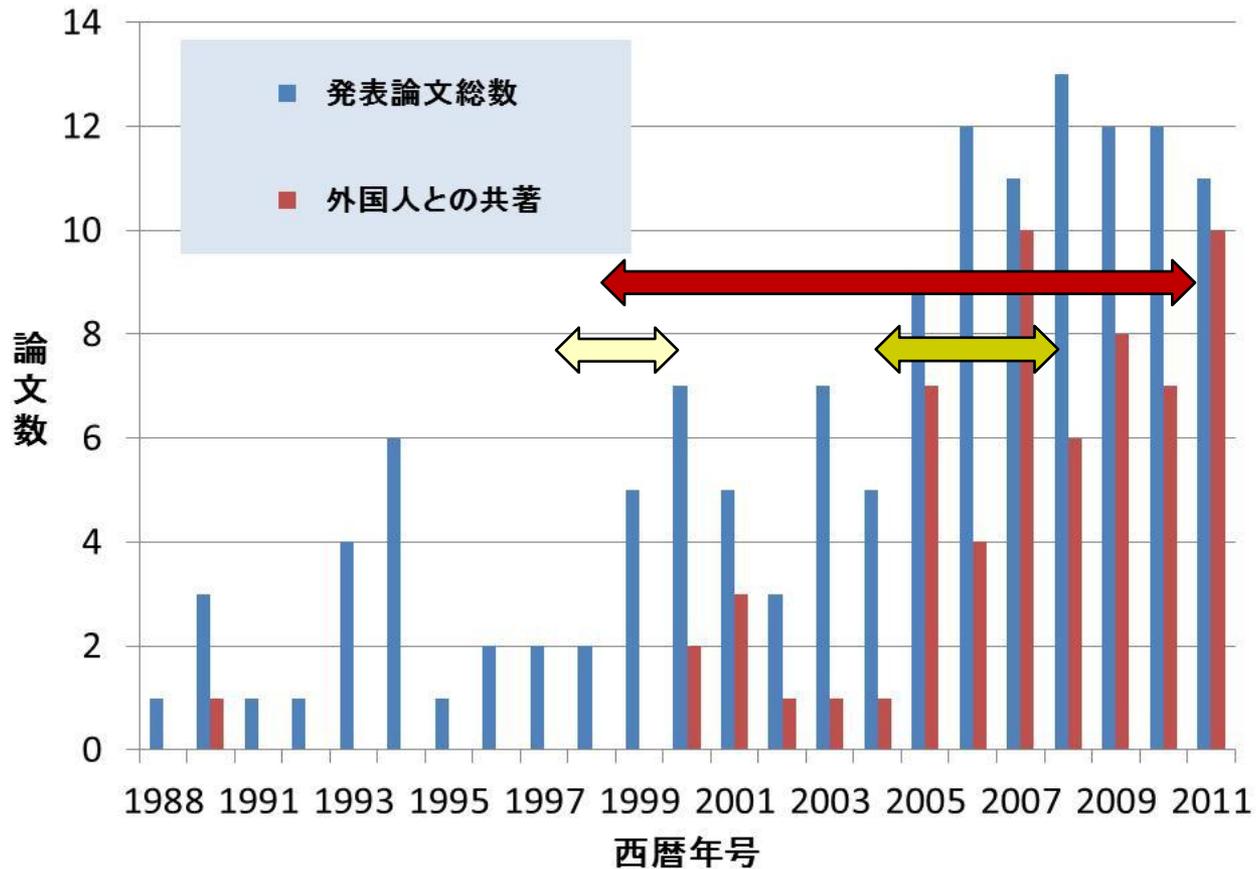
オランダ
・フランス



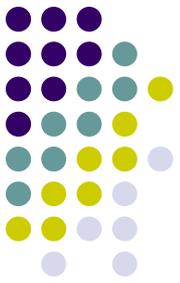
フィンランド



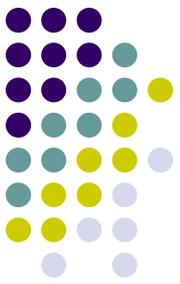
外国人ポストドク
クの雇用



研究室の貢献者、成果



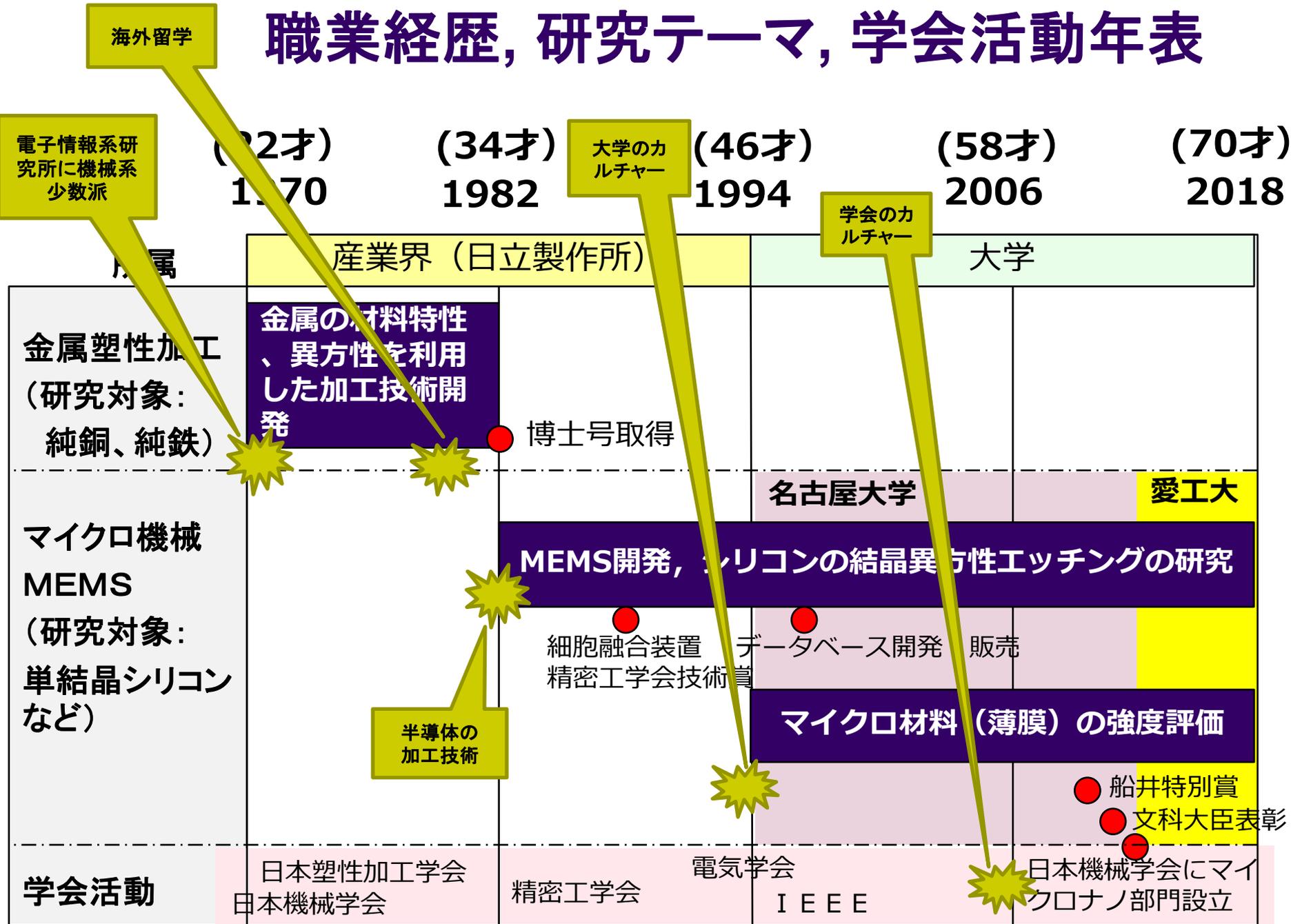
- **研究スタッフ:**
松室昭仁、式田光宏、安藤妙子、肥田博隆
- **ポスドク研究員:** Z. Muktadir, J. Han, K. Yazdandoost, M.A. Gosalvez, Prem Pal, Z. Tan, H. Sasaki, H. Tanaka, B. Tang
- **共同研究員:** M. Elwenspoek, J. van Suchtelen, H. Camon, Y. Xing, J. Jiao, E. van Veenendaal, A. Foster, T. Hynninen, Q. D. Nguyen, N. Ferrando,
- **秘書:** 加藤智子
- **研究成果**
博士号取得者: 課程博士 19名、論文博士指導 4名
学術雑誌論文: 136件
講演発表: 199件、 書籍: 17件



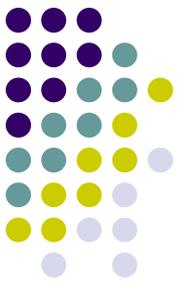
目次

- はじめに(職歴:日立で24年、名古屋で18年)
- 単結晶シリコンのマイクロ機械工学
 - 結晶異方性エッチング
 - シリコン薄膜の機械的性質
- 教育、ものづくり・実習教育
- 大学に求められる変化
- 後進へのメッセージ

職業経歴, 研究テーマ, 学会活動年表



若い研究者への助言



キャリア設計のために

- 学部卒業後、30才までに良い指導者を得る
- 博士号をとったら、自らの道を自分で考える
- 10-12年単位で岐路を真面目に考える勇気

研究をおおきく育てるのに、いま必要なこと

- ❖ 異分野の発展を自分の仕事に取り込む
I n t e r d i s c i p l i n a r y
- ❖ 海外の研究者と仕事で協力しあう
I n t e r n a t i o n a l



Acknowledgements

- 名古屋大学と機械系教室
- 研究室スタッフ
- 卒業・修了・在学学生
- 事務職員、非常勤職員
- 産業界・企業
- 国内外の共同研究者
- 国内外の他大学、学会
- 本日も聴講のみなさま

