

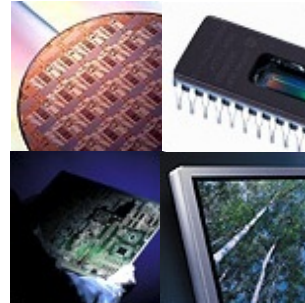
## マテリアルの未来を拓く 半導体材料

熊本大学大学院 先端科学研究部 マテリアル工学講座  
准教授 橋新 剛

- ① 半導体の世界 (目に見えない電子を想像してみよう！)
- ② 半導体の業界 (シリコンアイランド九州)
- ③ 半導体の微細化
- ④ 半導体のバンド理論
- ⑤ 金属酸化物半導体 (MOS) トランジスタ
- ⑥ 集積化技術と半導体チップができるまで
- ⑦ 半導体チップの応用：研究から実用まで
- ⑧ 半導体のデバイスへの応用 (ガスセンサ)

## 半導体の世界

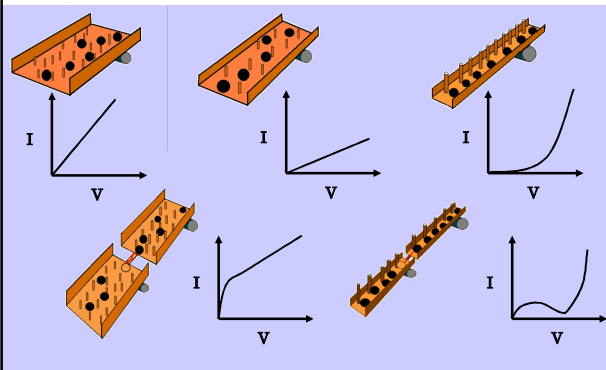
—目に見えない電子が社会を持続的に発展させる—



世界の産業を支え、経済をリードする半導体産業は、日本を中心としたアジアでの生産拠点化を進めている。世界人類の繁栄と持続的発展のためには、微細な半導体チップ中の小さな「目に見えない電子」が決定的な役割を果たす。この電子を扱う半導体エレクトロニクスの発展に熊本大学はこの10年、大きく貢献してきた。日本の半導体産業40周年、日本、そして九州の主力産業として発展する半導体が開く未来像を紹介する。

### 1次元整列電子

目に見えない電子を想像してみよう!



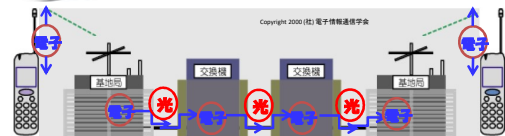
### 主役は、「目に見えない電子」

質量 $\sim 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$

**電子の働き：**(クーロン) 力を近くにも、遠くにも伝える能力あり

**半導体 (電子の働き場所)：**

- ・ 電子の流れを制御するスイッチ (IC, LSI)
- ・ 動いている電子を吸収すると光を発する。(例：青色発光ダイオード)
- ・ 光を吸収すると電子を生む。(例：太陽電池)



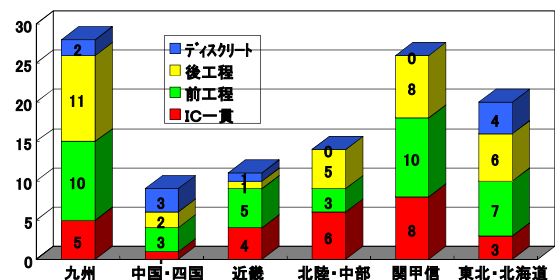
## マテリアルの未来を拓く 半導体材料

熊本大学大学院 先端科学研究部 マテリアル工学講座  
准教授 橋新 剛

- ① 半導体の世界 (目に見えない電子を想像してみよう！)
- ② 半導体の業界 (シリコンアイランド九州)
- ③ 半導体の微細化
- ④ 半導体のバンド理論
- ⑤ 金属酸化物半導体 (MOS) トランジスタ
- ⑥ 集積化技術と半導体チップができるまで
- ⑦ 半導体チップの応用：研究から実用まで
- ⑧ 半導体のデバイスへの応用 (ガスセンサ)

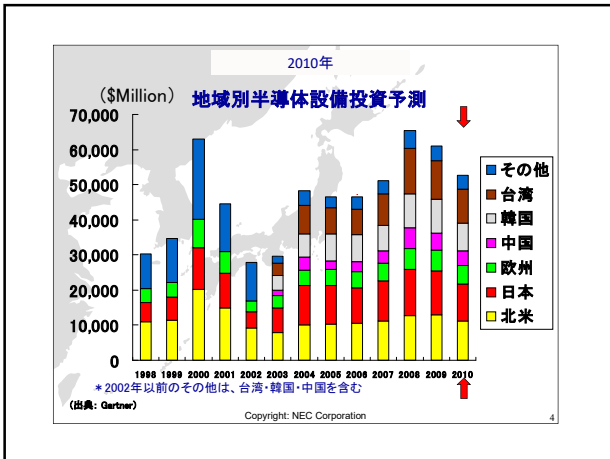
## シリコンアイランド九州

半導体生産： 世界の3割～日本 日本の3割～九州 九州の3割～熊本



地域別国内半導体製造拠点

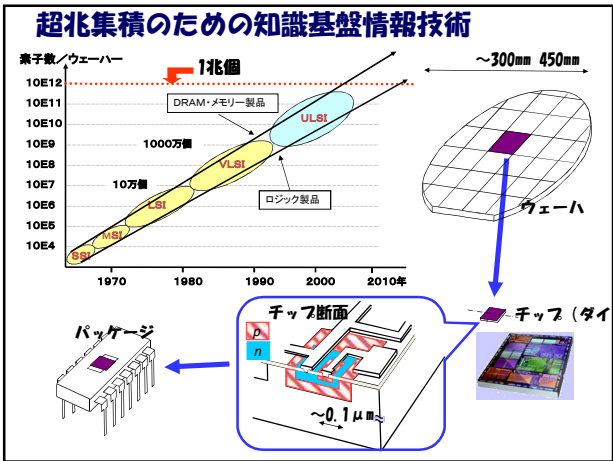
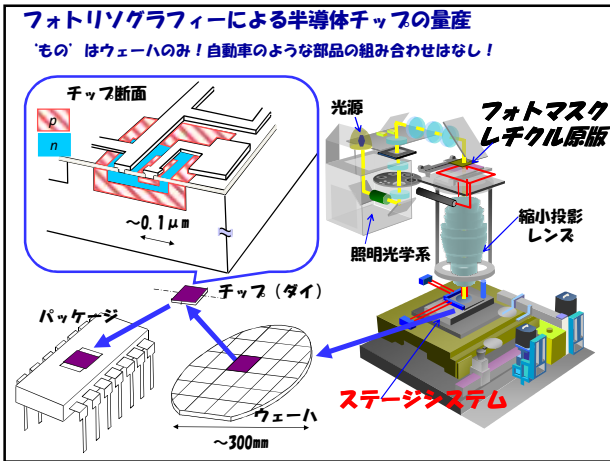
(出典：ICガイドブック)



## マテリアルの未来を拓く 半導体材料

熊本大学大学院 先端科学研究部 マテリアル工学講座  
准教授 橋本 剛

- ① 半導体の世界 (目に見えない電子を想像してみよう！)
- ② 半導体の業界 (シリコンアイランド九州)
- ③ 半導体の微細化
- ④ 半導体のバンド理論
- ⑤ 金属酸化物半導体 (MOS) トランジスタ
- ⑥ 集積化技術と半導体チップができるまで
- ⑦ 半導体チップの応用：研究から実用まで
- ⑧ 半導体のデバイスへの応用 (ガスセンサ)



### 超微細化 (原子・ナノスケール) とウェーハサイズの増大が同時進行

原子・ナノスケールの生産技術

m-order working area  $\times 10^9$  nm-order control resolution

450mm@2014 Si ウェーハ  $\times 10^9$  Atom

Probe

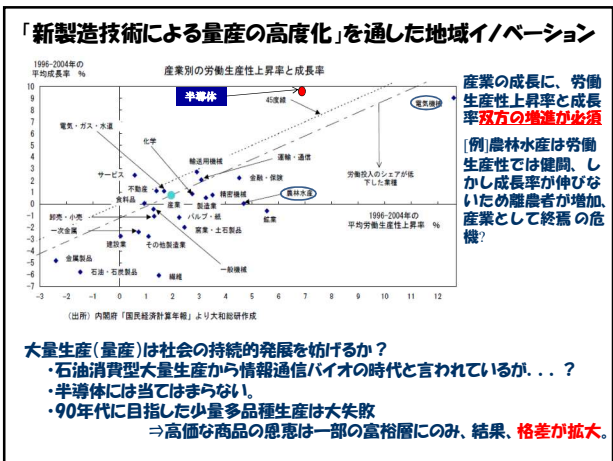
「原子スケール生産」

450mm

200mm 300mm

00mm 150mm

(株) シンソク 株式会社 提供



## マテリアルの未来を拓く 半導体材料

熊本大学大学院 先端科学研究部 マテリアル工学講座  
准教授 橋新 剛

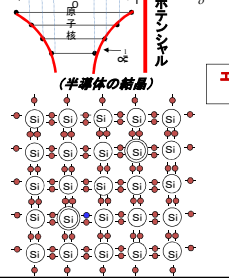
- ① 半導体の世界 (目に見えない電子を想像してみよう！)
- ② 半導体の業界 (シリコンアイランド九州)
- ③ 半導体の微細化
- ④ **半導体のバンド理論**
- ⑤ 金属酸化物半導体 (MOS) トランジスタ
- ⑥ 集積化技術と半導体チップができるまで
- ⑦ 半導体チップの応用：研究から実用まで
- ⑧ 半導体のデバイスへの応用 (ガスセンサ)

## バンド構造 ~半導体結晶中の電子~

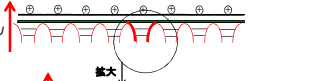
・原子の中の電子のポテンシャルエネルギー

$$F = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze \cdot e}{r^2}$$

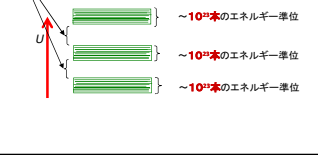
$$U = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze}{r}$$



・結晶中のエネルギー単位 例:原子が8個

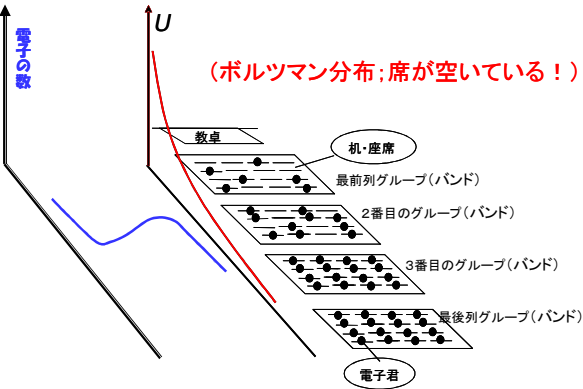


・結晶(原子が約10<sup>20</sup>個)の中のエネルギーバンド構造



## 電子のボルツマン分布=半導体

(ボルツマン分布:席が空いている！)

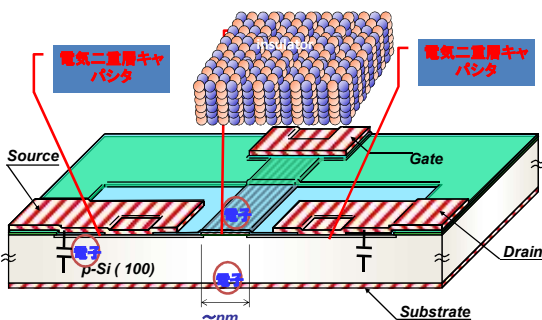


## マテリアルの未来を拓く 半導体材料

熊本大学大学院 先端科学研究部 マテリアル工学講座  
准教授 橋新 剛

- ① 半導体の世界 (目に見えない電子を想像してみよう！)
- ② 半導体の業界 (シリコンアイランド九州)
- ③ 半導体の微細化
- ④ 半導体のバンド理論
- ⑤ **金属酸化物半導体 (MOS) トランジスタ**
- ⑥ 集積化技術と半導体チップができるまで
- ⑦ 半導体チップの応用：研究から実用まで
- ⑧ 半導体のデバイスへの応用 (ガスセンサ)

## [MOSトランジスタ]



~ 7 nano-meter @2006Y (原子20個)  
~ 2 nano-meter @2020Y (原子6個)

## マテリアルの未来を拓く 半導体材料

熊本大学大学院 先端科学研究部 マテリアル工学講座  
准教授 橋新 剛

- ① 半導体の世界 (目に見えない電子を想像してみよう！)
- ② 半導体の業界 (シリコンアイランド九州)
- ③ 半導体の微細化
- ④ 半導体のバンド理論
- ⑤ 金属酸化物半導体 (MOS) トランジスタ
- ⑥ **集積化技術と半導体チップができるまで**
- ⑦ 半導体チップの応用：研究から実用まで
- ⑧ 半導体のデバイスへの応用 (ガスセンサ)

### 半導体集積回路 (LSI)の内部 産総研金山博士より提供

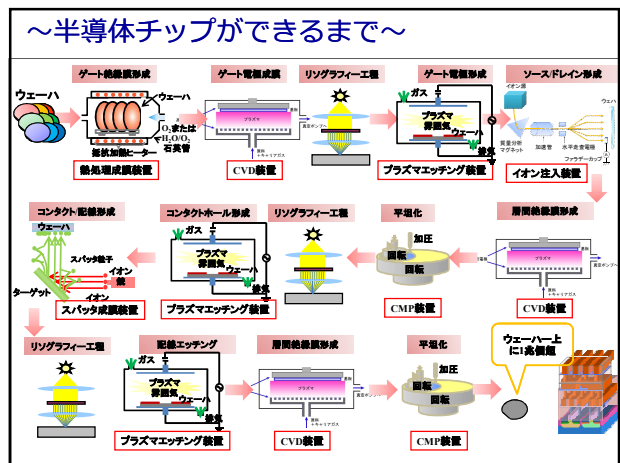
4ギガビットメモリー  
テレビ画像1時間分を記憶

銅配線  
絶縁膜  
トランジスタ  
シリコン基板

層名	厚さ	パターン幅
Metal 6	1.4 μm	0.85 μm x 1.25 μm
Metal 5	1.2 μm	0.75 μm x 1 μm
Metal 4	0.8 μm	0.55 μm x 0.85 μm
Metal 3	0.8 μm	0.55 μm x 0.85 μm
Metal 2	0.8 μm	0.55 μm x 0.85 μm
Metal 1	0.8 μm	0.55 μm x 0.85 μm
Poly	0.57 μm	0.57 μm x 0.7 μm

断面の電子顕微鏡写真 シリコン基板

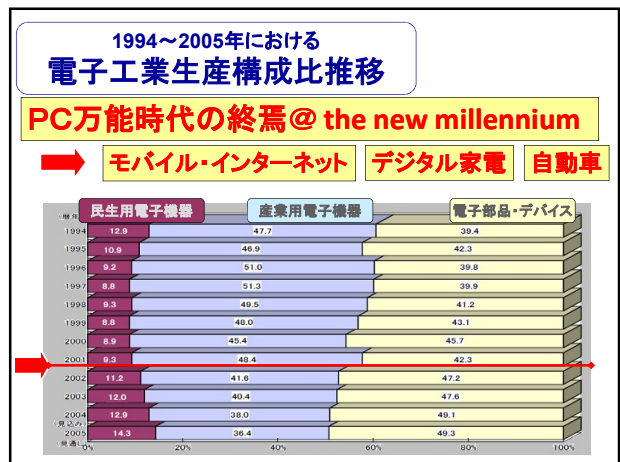
熊本大学 金山 容員 教授 提供



## マテリアルの未来を拓く 半導体材料

熊本大学大学院 先端科学研究部 マテリアル工学講座  
准教授 橋新 剛

- ① 半導体の世界 (目に見えない電子を想像してみよう！)
- ② 半導体の業界 (シリコンアイランド九州)
- ③ 半導体の微細化
- ④ 半導体のバンド理論
- ⑤ 金属酸化物半導体 (MOS) トランジスタ
- ⑥ 集積化技術と半導体チップができるまで
- ⑦ 半導体チップの応用: 研究から実用まで
- ⑧ 半導体のデバイスへの応用 (ガスセンサ)



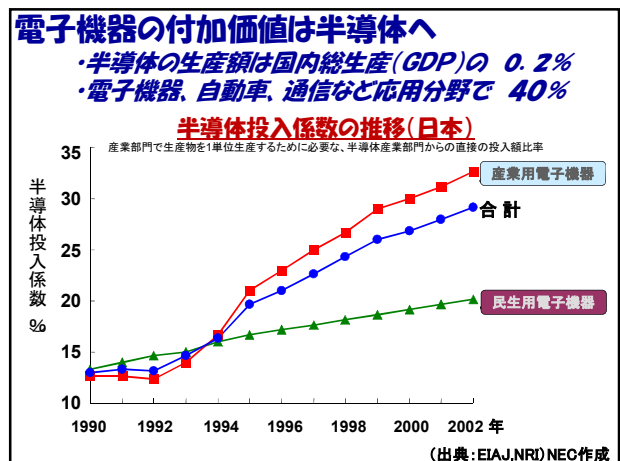
### 電子工業生産構成比推移 '94～06

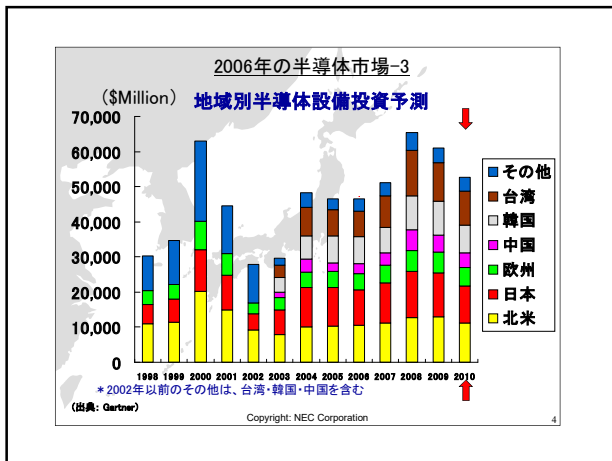
民生用電子機器  
産業用電子機器  
電子部品・デバイス

2010年 30兆円  
2010年 15兆円

PC万能時代の終焉  
モバイル・インターネット  
デジタル家電

項目	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年
民生用電子機器	1,810,000	1,810,000	1,810,000	1,810,000	1,810,000	1,810,000
産業用電子機器	1,810,000	1,810,000	1,810,000	1,810,000	1,810,000	1,810,000
電子部品・デバイス	1,810,000	1,810,000	1,810,000	1,810,000	1,810,000	1,810,000





## 低消費電力 半導体

### 環境保護対応⇒パワー半導体

- 風力発電太陽光発電  
600V 1200V, 50-1000A
- インバータ 白物家電用  
600V, 3-50A
- ハイブリッド電気自動車用  
600V, 600A

Micro Needs

Macro Needs

## 持続可能な発展を促す超集積技術

### エネルギー事情の考察

(1) プロセッサ  
世界のプロセッサ生産量: 50億個/年  
プロセッサあたり2Wの消費電力削減ができると  
プロセッサが同時に1日24時間稼働しているとすれば  
1年間で、880億kWhの電力削減(704万t-CのCO<sub>2</sub>削減\*)

(2) ディスプレイ  
世界のディスプレイ普及量: 80億台  
1年に2億台ずつ置き換えディスプレイあたり100Wの電力削減ができると  
ディスプレイが1日10時間稼働しているとすれば  
1年間で、730億kWhの電力削減(585万t-CのCO<sub>2</sub>削減\*)

【参考】  
関西電力の発電量以上に相当

発電能力 - 日本 約8580億kWh(平成12年度電力10社販売電力)

北海道電力 291億kWh	東北電力 739億kWh	東京電力 2800億kWh
北陸電力 248億kWh	中部電力 1230億kWh	関西電力 1550億kWh
中国電力 545億kWh	四国電力 344億kWh	九州電力 750億kWh
		沖縄電力 65億kWh

東北大学工学部教授 藤田浩二氏提供

## 圧電現象を利用した原子レベルモーター

### 材料・製造方法・原理

焼結  
チタン酸ジルコン酸鉛 (PZT)  
チタン酸バリウム  
ニオブ酸リチウム

加熱 シリコンオイル中 約100°C

高電界 500~1,000V@1mm

### 圧電効果・逆圧電効果

圧電効果  
力

逆圧電効果  
電圧

双極子内結合モデル  
1次元剛体イオンバネモデル

クローンエネルギーと量子論的結合エネルギーの等価的表現 イオン間結合力が非対称であること

## 超精密超音波モーター熊本方式の位置づけ

### <<次世代ステージ駆動=ダイレクトドライブ方式>>

浮上式磁気リニアモーター方式 (N社, Y社, AS社等)

【利点】非接触、高速駆動

【不利な点】  
・制動制御の必要性、  
・磁気シールド等の重量過大

圧電アクチュエーター方式

【利点】高性能な位置決め、非磁性、コンパクト

【不利な点】接触式による摩擦、低速

共振駆動方式(京セラ, ASET等)

【不利な点】共振ストローク以下の位置決め不可能、共振駆動パワーが必要のため非線形制御が必要

摩擦しない圧電アクチュエーター(熊本方式)

圧電素子

Stage feed direction

★超音波モーター熊本方式の特長★

- 【摩擦制御による超低摩擦・超低発熱】
- 【高電圧、高周波数化による高速化】
- 【寿命予測が可能】
- 【マイクロ振動による高剛性化による容易な摩擦制御】
- 0.6nm位置決め 300mm/sec

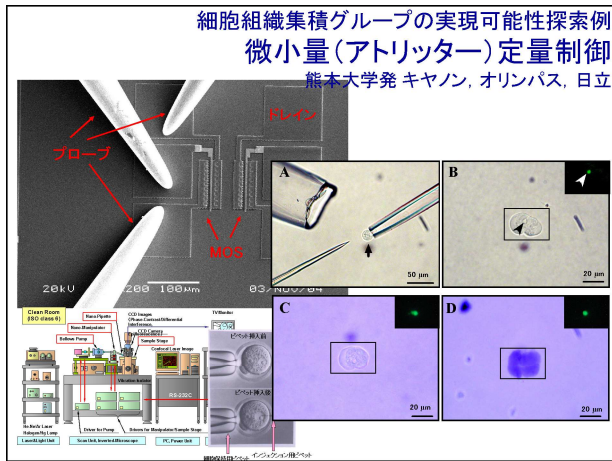
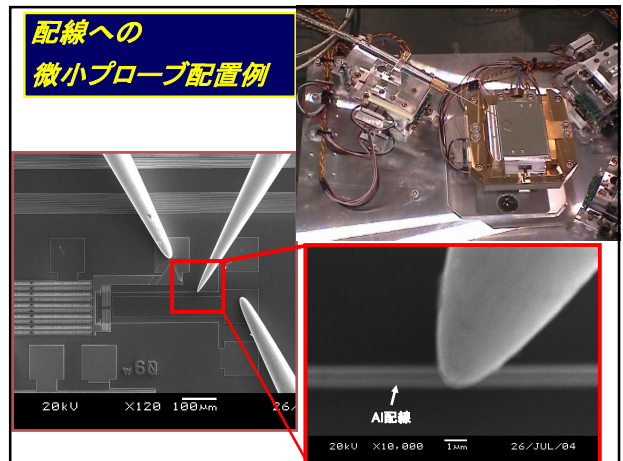
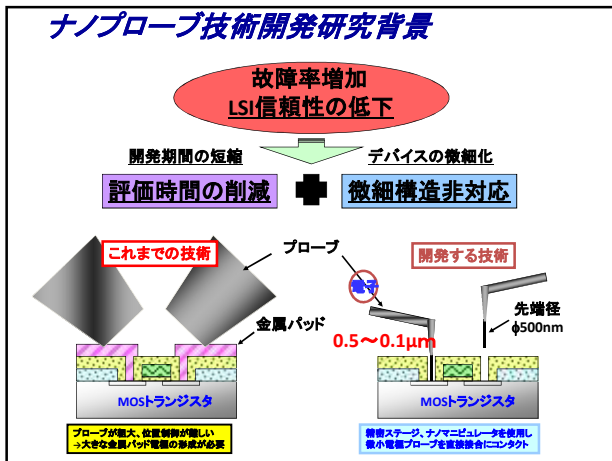
圧電インパクト方式(東大, 福岡工業大)

【不利な点】動摩擦による摩擦大

## 日本最北端から最南端へホールインワンする超精密ステージ技術

3000 km

3cm以内



### 超精密ステップ技術 ナノサージャリーシステムの開発

細胞を生かしたまま細胞内小器官を操作する

国際ナノテク展2002 ナノテック大賞 ベスト部門賞

要求される細胞操作技術

ナノマニピュレータ+チャンセルステージ

ナノパイペット

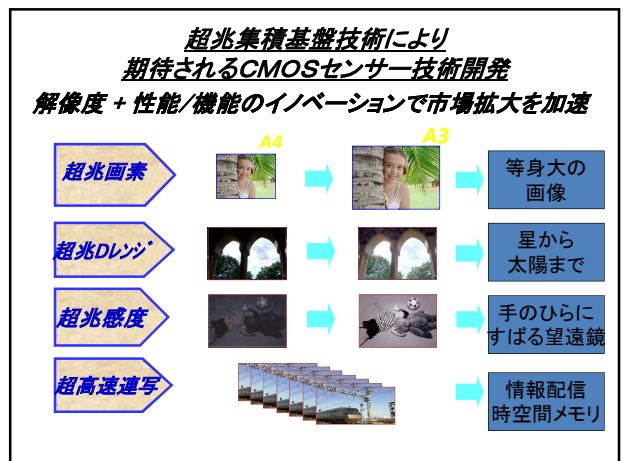
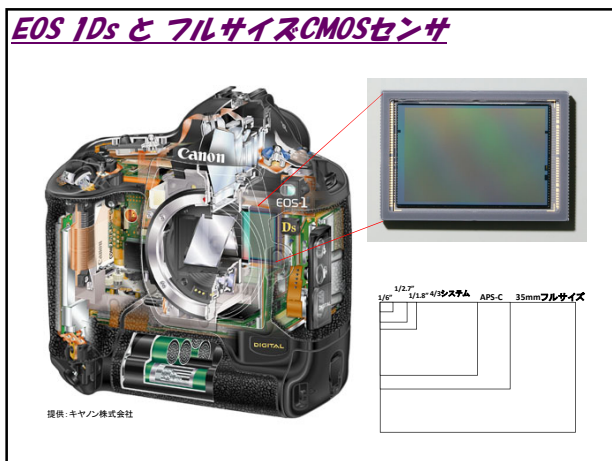
システム構成

細胞操作例

2000-1005 熊本県産業ETI3000号  
熊本大学大学院 自然科学研究科  
〒860-0811 熊本県熊本市東区 熊本大学 自然科学研究科  
TEL: 096-342-3030 FAX: 096-342-3035  
E-mail: ken@ipc.kumamoto-u.ac.jp

〒911-8502 群馬県上野村群馬県立総合研究機構2000号  
群馬県立総合研究機構ナノテクノロジー研究センター 405  
TEL: 0286-237-1031 FAX: 0286-277-2215

熊本大学 (有) 熊本テクノロジー





### 超兆集積最先端産業基盤技術のための研究教育拠点 —産業・サービスのあらゆる用途に半導体電子デバイス・機器が浸透する未来—

<b>農林水産業</b> ・気温・水温の管理 ・日照時間の観測 ・植物工場	<b>自動車産業</b> ・ドライブレコーダー ・快適居住空間	<b>飲食サービス</b> ・品質管理	<b>報道出版サービス</b> ・電子ペーパー
<b>住宅産業</b> ・居住環境制御 ・電子資産	<b>家電産業</b> ・映像ディスプレイ	<b>小売サービス</b> ・商品管理	<b>学校教育サービス</b> ・eラーニング
<b>食品産業</b> ・味覚定量化 ・産材と品質の履歴管理	<b>ロボット産業</b> ・五感認識	<b>物流サービス</b> ・物流管理	<b>気象サービス</b> ・地震・津波・洪水警報 ・火山・地盤変動
<b>エネルギー産業</b> ・高効率発電装置 ・蓄電装置	<b>旅行・旅客サービス</b> ・チケット管理	<b>金融サービス</b> ・電子マネー	<b>セキュリティサービス</b> ・個人情報・画像 ・防犯監視・警備 ・災害検知・検知
		<b>医療・健康サービス</b> ・遠隔診断	<b>行政サービス</b> ・電子政府

2010年代、国民一人当たり30種類以上の電子機器が商品化・販売

- 人手によらず生命体の如く自律動作するための個別環境センシング技術
- 電子機器をラビット/秒の通信速度で地球接続する光ネットワーク通信技術
- センシング機構と情報処理・通信回路を融合するハイブリッド集積化技術

日本を持続可能に発展させる = 約500兆円のGDPのうち100兆円の新技术を創出  
**超兆集積最先端産業基盤技術**

種類: 大葉  
光源: 高圧  
主な生産物: 菜タス・サラダ菜  
所在地: 兵

半導体LEDのみの光源植物工場

光源: LED\* 蛍光灯 etc  
主な生産物: レタス・サラダ菜

## マテリアルの未来を拓く 半導体材料

熊本大学大学院 先端科学研究部 マテリアル工学講座  
准教授 橋新 剛

- ① 半導体の世界 (目に見えない電子を想像してみよう!)
- ② 半導体の業界 (シリコンアイランド九州)
- ③ 半導体の微細化
- ④ 半導体のバンド理論
- ⑤ 金属酸化物半導体 (MOS) トランジスタ
- ⑥ 集積化技術と半導体チップができるまで
- ⑦ 半導体チップの応用: 研究から実用まで
- ⑧ 半導体のデバイスへの応用 (ガスセンサ)

## 半導体ガスセンサ

半導体ガスセンサは空気中で微量の対象ガス (ppb~ppm) を半導体の抵抗変化から検出することができる。

素子の種類  
 $\text{SnO}_2, \text{WO}_3, \text{In}_2\text{O}_3, \text{ZnO}, \text{TiO}_2 \dots$  (n型半導体)  
 $\text{NiO}, \text{Co}_3\text{O}_4, \text{LSMO} \dots$  (p型半導体)

被検ガスの種類  
 可燃性ガス (都市ガス), 毒性ガス (CO), 悪臭ガス ( $\text{H}_2\text{S}$ ), 大気汚染ガス ( $\text{NO}_x$ , VOC), 食物からのガス...

シンプルな構造

特徴 低コスト, コンパクト, 化学的に安定, 長寿命 (半年~1年)

## ガス検知メカニズム

還元性ガス (水素, 炭化水素, ...)

酸化反応のため、吸着酸素が消費される。  
 空間電荷層が減少  
**抵抗減少**

空気中

酸化性ガス ( $\text{NO}_x, \text{Cl}_2, \dots$ )

負電荷吸着  
 空間電荷層が増加  
**抵抗増加**

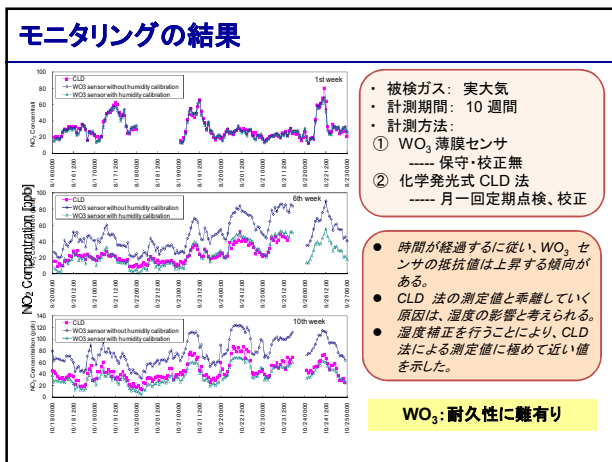
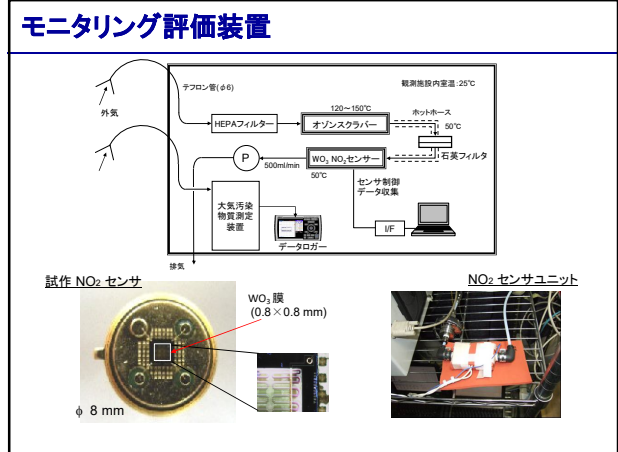
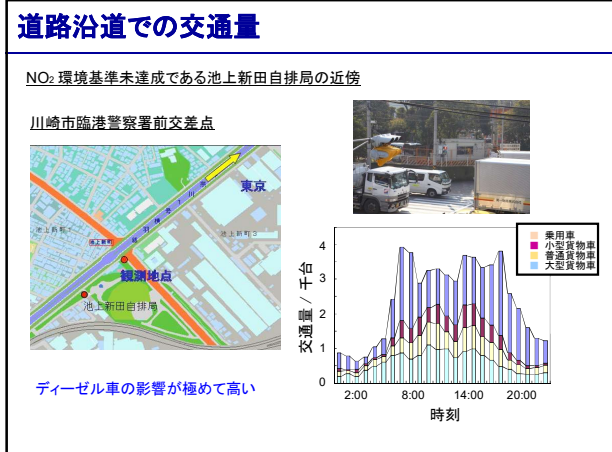
空間電荷層 (電子空乏層)  
 電気抵抗: 高い

## 環境モニタリングの例 ( $\text{NO}_2$ )

半導体酸化物をタングステン (W) ヒーターの上に成膜

ギャップサイズ: 5  $\mu\text{m}$





### マテリアル工学科

Department of Materials Science and Engineering

### すべての産業の基幹技術

身近なものから 宇宙空間に浮かぶ 建造物まで

優れた性質をもつ素材、その可能性を研究しています

金属・セラミックス・半導体・超伝導体などの基盤材料から高機能材料までを幅広く取扱う学問分野

- 環境にやさしい自動車材料
- 高速鉄道車両用材料
- 強く軽い航空機材料
- 電子機器用半導体
- 化学プラント用耐食性材料
- 高効率発光材料
- 巨大吊橋を支える強靱なワイヤ
- 発電用耐熱素材

マテリアル工学科は、KUMADAI マグネシウム合金の開発を支援しています

11/28

### 教育プログラム

新時代のマテリアル開発においてグローバルな視野で先駆的な取り組みができる研究者・技術者を育てています

① 最先端の研究プロジェクトが進行中  
構造・機能材料分野における研究費新規採択累計額 全国トップ10 (平成28年度は全国0位)

② 実験・実習を中心としたカリキュラム  
初学への導入教育、専門知識や応用力のための講義と実験・実習により、新材料の開発力を育成します。

③ 世界で活躍する研究者・エンジニアへ  
世界に先駆けて新しい材料を発見し、その製造方法を開発する研究や、それらを使って飛行機や自動車、電気機器など開発する技術者として社会に貢献します。

1年 前期	マテリアル工学入門
後期	実験ものづくり
2年 前期	機械概論及びCADの演習、機械製作実習
後期	マテリアル工学実験 (基礎編)
3年 前期	マテリアル工学実験 (応用編)
後期	マテリアル工学実験 (創造編)
4年 前期	卒業研究、マテリアル工学演習
後期	卒業研究

「導入教育」授業

レーザーを用いた光学実験の様子

KUMADAI マグネシウム合金の組織観察に用いられる最新鋭の走査型電子顕微鏡

### 卒業後の進路

学部卒業生の6割が大学院に進学  
その後、**素材関連メーカー**に就職する人が多い

平成28年度 卒業・修了

大学・卒業生

進学57% (内4%が他大学)

素材 13%

自動車・機械 17%

電気・情報 4%

その他 9%

大学院博士前期(修士)・修了生

進学 10%

素材 53%

自動車・機械 28%

電気・情報 6%

その他 3%

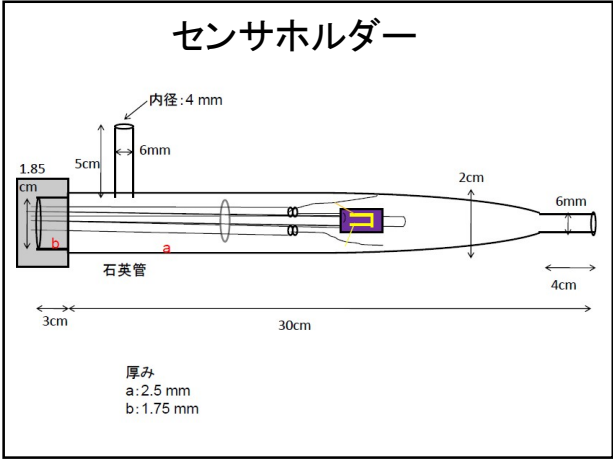
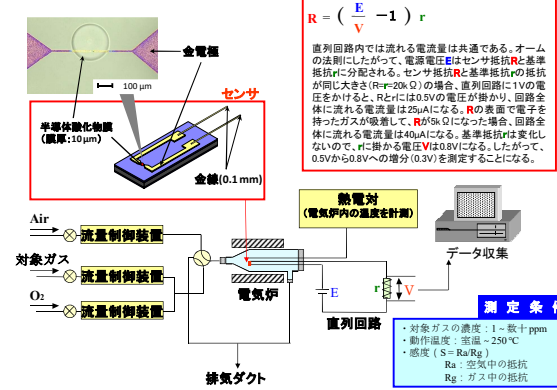
最近の主な就職先

- 素材を作るメーカー: 新日鐵住金、神戸製鋼、愛知製鋼、日立金属、京セラ、山陽特殊鋼、東邦チタニウム、東洋鋼鉄、大和製鐵など
- 素材を活かすメーカー: トヨタ自動車、本田技研、スズキ、ダイハツ、川崎重工、ブリジストン、パナソニック、三菱電機など

詳しくは WEB で! 熊大マテリアル 検索

# 付録

・ガスセンサ測定装置 (模式図)



・ガスセンサ測定装置 (模式図)

