

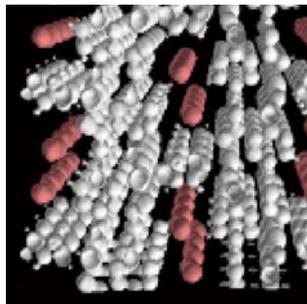
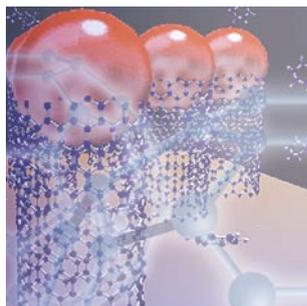
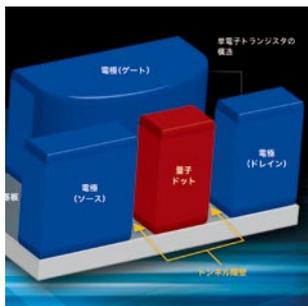


劇的進化! 変わる未来はすぐそこに

# True Nano

True Nano… ナノの特性を生かし、従来の科学技術の限界を突破!  
新たな産業を創造し、夢の未来を現実の未来に変える。

日本のナノテクノロジー・材料分野



「ナノ」とは?

「ナノ」とは非常に小さい単位のことです。

1mと1nmを比べると、地球に対してビー玉くらいの大きさになります。

1nm=10億分の1m

この「True Nano ナノテクノロジー・材料分野」冊子に関するお問合せは  
03-5253-2111 (内閣府代表)  
「True Nano ナノテクノロジー・材料分野」WEB サイト  
<http://www8.cao.go.jp/cstp/s&tmain.html>

企画・制作 文部科学省 科学技術政策研究所  
監修 内閣府

## INTRODUCTION

### はじめに

総合科学技術会議では、国の科学技術の方向を示すための基本計画を5年ごとに定めていますが、2001年からの第2期科学技術基本計画では初めて、基礎研究とともに国が重点的に取り組むべき科学技術の分野を定め、そのひとつにナノテクノロジーと材料の分野が取り上げられました。

ナノテクノロジーは日本を発祥の地とする新しい技術であるといってもよいと思いますが、2000年当時、米国や欧州各国でも急速にナノテクノロジーへの期待が高まり、様々な領域で大きな潮流となりました。一方、材料は本来日本が最も得意な分野であるとされ、研究水準の高さと数多くの発見・発明が、産業の世界においても我が国の国際競争力の源泉となってきました。

このように、どちらも元来日本が強いとされるナノテクノロジーと材料の分野の研究開発ですが、第2期科学技術基本計画での取り組みによりさらに進歩・向上し、この5年間に花開き、実を結んだ日本発の研究成果が少なくありません。しかし、治りにくいと言われる病気の治療や人々の健康の維持・増進を目指すライフサイエンス分野や、暮らしの利便性向上に役立つ情報通信技術分野などと比較すると、ナノテクノロジー・材料分野は、国が大切な予算を使って取り組むことの必要性、重要性や、国がこの分野で目指すものが少しわかりにくいと言われます。

2006年からスタートした第3期科学技術基本計画も、引き続きナノテクノロジーと材料の分野に重点的に取り組んでいくことが決定されましたが、この方針に沿って国の施策を進めていくためには、まず国民の皆様に対してこの分野への取り組みの重要性を説明し、広く理解が得られるよう努めること、そして科学を志す若い人たちにこの分野の重要性を十分に理解してもらい、将来にわたる研究開発への取り組みの意欲を持った人が数多く出てきていただく必要があります。

こうした視点や必要性から、このたび、その一助となることを期待して、本冊子が編纂されました。編纂に当たっては、第3期科学技術基本計画のなかでこの分野の国の取り組み方針を定める『ナノテクノロジー・材料分野推進戦略』の策定に携わっていただいた方々のご意見を伺いました。紙数は限られており、ご説明したいことのごく一部しかお伝えできないとは思いますが、この冊子を手にとられた方が、以上の主旨を理解していただき、国が取り組むナノテクノロジー・材料分野の研究開発推進について更なるご理解とご支援をいただけることを願ひまして、筆を置くこととします。



奥村 直樹議員  
内閣府 総合科学技術会議

### 第3期 科学技術基本計画の概要 1

\*政策目標の設定

| 1. 基本姿勢           | ① 社会・国民に支持され、成果を還元する科学技術  | ② 人材育成と競争的環境の重視…モノから人へ、機関における個人の重視  |
|-------------------|---|---|
| 【理念1】<br>人類の英知を生む | <b>目標 ① 飛躍知の発見・発明</b><br>●未来を切り拓く多様な知識の蓄積・創造<br>(1) 新しい原理・現象の発見・解明<br>(2) 非連続な技術革新の源泉となる知識の創造 | <b>目標 ② 科学技術の限界突破</b><br>●人類の夢への挑戦と実現<br>(3) 世界最高水準のプロジェクトによる科学技術の牽引  |
| 【理念2】<br>国力の源泉を創る | <b>目標 ③ 環境と経済の両立</b><br>●環境と経済を両立し持続可能な発展を実現<br>(4) 地球温暖化・エネルギー問題の克服<br>(5) 環境と調和する循環型社会の実現   | <b>目標 ④ イノベーター日本</b><br>●革新を続ける強靱な経済・産業を実現<br>(6) 世界を魅了するユビキタスネットワーク社会の実現<br>(7) ものづくりナンバーワン国家の実現<br>(8) 科学技術により世界を勝ち抜く産業競争力の強化 |
| 【理念3】<br>健康と安全を守る | <b>目標 ⑤ 生涯はつつつ生活</b><br>●子供から高齢者まで健康な日本を実現<br>(9) 国民を悩ます病の克服<br>(10) 誰もが元気に暮らせる社会の実現          | <b>目標 ⑥ 安全が誇りとなる国</b><br>●世界一安全な国・日本を実現<br>(11) 国土と社会の安全確保<br>(12) 暮らしの安全確保   |

\*詳しくは <http://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index3.html>

## 第3期 科学技術基本計画の概要 2

|                    |  |
|--------------------|--|
| 2. 科学技術の戦略的重点化     | (1) 基礎研究の推進<br>(2) 政策課題対応型研究開発における重点化<br>・「重点推進 4 分野」⇒ ライフサイエンス、情報通信、環境、 <b>ナノテクノロジー・材料</b><br>・「推進 4 分野」⇒ エネルギー、ものづくり技術、社会基盤、フロンティア<br>(3) 研究開発の効果的な実施～「活きた戦略」の実現 |
| 3. 科学技術システム改革の推進   | (1) 人材の育成、確保、活躍の促進 (2) 科学の発展と絶えざるイノベーションの創出<br>(3) 科学技術振興のための基盤の強化 (4) 国際活動の戦略的推進  |
| 4. 社会・国民に支持される科学技術 | (1) 科学技術が及ぼす倫理的・法的・社会的課題への責任ある取組 (2) 説明責任と情報発信の強化<br>(3) 科学技術に関する国民意識の醸成 (4) 国民の科学技術への主体的な参加の促進  |
| 5. 総合科学技術会議の役割     | 政策推進の司令塔/人文・社会科学とも融合した「知恵の場」/社会・国民に支持される科学技術を目指す   |

\*詳しくは <http://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index3.html>

## CONTENTS ナノテクノロジー・材料分野・・・劇的進化! 変わる未来への索引

|                  |  |
|------------------|--|
| P3               | 「はじめに」【内閣府 総合科学技術会議 奥村直樹 議員】<br>第3期科学技術基本計画概要 1  |
| P4-5             | 第3期科学技術基本計画概要 2 ナノテク・材料分野の重要な研究開発課題の体系   |
| P6-7             | ナノテクノロジー・材料の歴史   |
| P8-9<br>P10-11   | 極小のテクノロジーで新 IT 革命! …ナノエレクトロニクス領域の進化<br>技術の緒についた半導体ナノテクノロジー。新 IT 革命はすぐそこ!<br>【インタビュー: (株)半導体テクノロジーズ・渡辺久恒氏】  |
| P12-13           | 小さな箱の大きなパワー! 量子ドットが実現する超高速・超低価格・超省エネルギーの世界。<br>【インタビュー: 東京大学・荒川泰彦氏】  |
| P14-15<br>P16-17 | ナノテク・材料が実現する新エネルギーとクリーンで安心な未来社会…材料領域の進化<br>革新的な材料が加速させる夢の実現。ー大きな期待が寄せられる カーボンナノチューブとフララーレンー<br>【インタビュー: 産業技術総合研究所・飯島澄男氏】<br>【インタビュー: 信州大学・遠藤守信氏】 |
| P18-19           | 日本独自の光触媒技術で世界の環境浄化へ。<br>【インタビュー: 神奈川科学技術アカデミー・藤嶋昭氏】  |
| P20-21           | 世界をリードする技術で大容量・超軽量の電子材料を!<br>【インタビュー: 京都大学・平尾一之氏】  |
| P22-23<br>P24-25 | 予防医療と最先端医療が難病を克服する日…ナノバイオ・生体材料領域の進化<br>ナノと自己細胞の融合で臓器を再生! ~再生医療<br>【インタビュー: 東京女子医科大学・岡野光夫氏】   |
| P26-27           | 未来を切り拓く夢の光「X線自由電子レーザー」…ナノサイエンス・物質科学領域の進化   |
| P28-29           | 超微細マシンが切り拓く未知の世界。<br>【インタビュー: 東北大学・江刺正喜氏】  |
| P30-31           | 原子を観る。電子の波を観る。最先端の観測技術が明かすナノの世界。<br>【インタビュー: (株)日立製作所・外村彰氏】  |
| P32-33<br>P34-35 | 人材育成～豊かな社会を創る。未来の科学者を育てる。<br>責任ある研究開発と国際協力の推進。<br>【インタビュー: 産業技術総合研究所・中西準子氏】  |
| P36-37           | 2035年 未来予想図「西暦 2035年 こんな未来が待っているかもしれませんね…。」  |
| P38-39           | 対談 あらゆる科学技術の基盤を成すナノテク・材料分野 合い言葉は「True Nano」<br>前内閣府総合科学技術会議議員 阿部博之氏&公立はこだて未来大学教授 美馬のゆり氏  |
| P40-41           | 21世紀に花開くナノテクノロジー・材料の芽 数字でみる研究・開発・産業動向  |
| P42-43           | 出典・参考文献  |

劇的進化! 変わる未来はすぐそこに

# True Nano

科学技術の限界突破! 新たな産業を創造し、夢の未来を現実の未来に変える  
日本のナノテクノロジー・材料分野

ナノテクノロジー・材料分野における  
目標達成のための重要な研究開発課題 5 領域

## 材料領域

### 【エネルギー問題の克服】

- 未普及なエネルギー利用を具現化する材料技術
- 高効率なエネルギー利用のための革新的材料技術

### 【環境と調和する循環型社会の実現】

- 有害物質・材料対策に資する材料技術
- 希少資源・不足資源代替並びに効率的利用技術
- 環境改善・保全のための材料技術

### 【安全・安心社会の構築】

- 安全・安心社会を実現する材料・利用技術

### 【産業競争力の維持・強化】

- 世界をリードする電子機器のための材料技術
- 国際競争力のある輸送機器のための材料技術
- 次世代を担う革新的材料・部材の創製技術

## ナノエレクトロニクス領域

- 従来のシリコン半導体を超える次世代シリコンベースナノエレクトロニクス技術
- 電子・光制御ナノエレクトロニクス技術
- ナノスケールに対応したエレクトロニクス製造技術
- ナノエレクトロニクス部材の低価格化技術
- 環境と経済を両立する省エネルギー環境調和ナノエレクトロニクス技術
- セキュリティエレクトロニクス技術

## ナノバイオテクノロジー・生体材料領域

- 生体の構造・機能などを解明する分子イメージング技術
- 生体内の分子を操作する技術
- DDS・イメージング技術を核とした診断・治療法
- 超微細加工技術を利用した機器
- 極微量物質を検出する技術
- 生体に優しい高安全・高機能性生体デバイス
- 再生誘導用材料
- ナノバイオテクノロジーを応用した食品

# True Nano

## ナノサイエンス・物質科学領域

- 「量子計算技術」  
「界面の機能解明・制御」  
「生体ナノシステムの機構解明」  
「強相関エレクトロニクス」  
の戦略的推進

## ナノテクノロジー・材料分野推進基盤領域

### 【技術基盤】

- 革新的ナノ計測・加工技術
- 量子ビーム高度利用計測・加工・創製技術
- 物性・機能発現指向のシミュレーション・デザイン技術

### 【推進基盤】

- ナノテクノロジーの責任ある研究開発
- ナノテクノロジー・材料分野の人材育成と研究開発の環境整備

# ナノテクノロジー・材料の歴史

## 20世紀 → 21世紀

# The history of nanotechnology

1911 1918 1932 1932 1935 1948 1955 1957 1958 1959 1962 1966 1967 1969 1974 1976 1980 1981

### STMの発明

スイス・IBMチューリヒ研究所のビニツヒ、ローラーがSTM(走査トンネル顕微鏡)を発明しました。

### HEMTの開発

HEMT(高電子移動度トランジスタ)が開発されました。衛星放送などで使われる高速電子デバイスとして実用化されています。

### 導電性ポリマーの発見

東京工業大学の白川英樹が電気を通すプラスチックである導電性ポリマーを発見しました。

### 「ナノテクノロジー」の概念を提唱

東京理科大学の谷口紀男が初めて「ナノテクノロジー」という言葉を用い、その概念を提唱しました。

### 超格子の提案

アメリカ・IBM研究所の江崎玲於奈が超格子の提案をしました。

### 光触媒の発見

東京大学の藤嶋昭が電極の実験中に光触媒効果を発見しました。

### 10nm級の超薄膜における量子閉じこめ効果の発見

IBM研究所のファウラーが、MOSトランジスタを低温で動作させると量子効果が観察されると発表しました。

### 久保効果の提唱

東京大学の久保亮五がナノサイズの金属の性質がエネルギー準位統計で決まるといふ考え方を導入しました。

### ファイマンの講演

### 「There's Plenty of Room at the Bottom」

アメリカのファイマンが、米国物理学会講演で、原子レベルの原理・現象を取り扱う科学の到来と拡がりの可能性を示唆しました。

### ICの発明

アメリカのキルビー、フェアチャイルドのノイスが、独立にICを発明しました。

### 超伝導BCS理論の成立

アメリカのバーテン、クーバー、シュリーファーが、金属系超伝導のメカニズムを説明する理論を発表しました。

### ダイヤモンドの高圧合成

アメリカ、G.E.のバンデラーらが、高温高圧合成により人類初のダイヤモンド合成に成功しました。

### トランジスタの発明

アメリカ・AT&Tベル研究所のショックレー、バーティン、ブラッテンが、半導体を用いて電気信号を増幅させるトランジスタを発明しました。

### ナイロンの発明

アメリカデュポン社のカローザスが、ポリアミド系合成繊維であるナイロンを発明しました。

### フェライトの発見

東京工業大学の加藤与五郎と武井武が、亜鉛フェライトの冷却で磁力が生まれることを発見しました。

### 電子顕微鏡の発明

ドイツのルスカが電子顕微鏡を発明しました。

### 永久磁石K<sub>2</sub>S鋼の発明

東北帝国大学の本多光太郎が、当時最強の永久磁石を発明しました。

### 超伝導の発見

オランダのオンネスが、4K近傍で水銀の電気抵抗がゼロになる超伝導現象を発見しました。



本多光太郎 6-1



加藤与五郎 6-2



武井武 6-3



久保亮五 6-4



STM 7-1

## 日本のナノテクノロジー・材料分野の成果目標

2018

ビーム技術、装置の制御技術およびセンサ技術の高度化によるオングストロームオーダーの超精密プロセス技術

2018

大部分のモバイル機器の電源が燃料電池に置換

2019

ナノメートル分解能で定量組成分析及び物性値計測が可能  
な走査プローブ分析法

2019

寸法、形状が1nm級の精度で制御できる産業加工技術

2020

誘電率1.3以下の超LSI用絶縁材料

2020

ナノメートルスケールの3次元集積加工技術

2020

がんや難病の発病リスクを的確に診断し、治療指針をごく短時間に示すバイオチップ診断システム

# Technology / materials



**第3期科学技術基本計画策定** — ナノテクノロジー：材料分野は第2期の計画から引き続き重点分野に指定されました。

**米国「21世紀ナノテクノロジー」研究開発法」成立** — 米国は総額37億ドルの研究開発予算を盛り込みました。

**EUがナノテクを重点化** — EUが研究技術枠組み計画「フレームワークプログラム6 (FP6)」で、ナノテクを重点項目として取り上げました。

**文部科学省ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンター発足** — わが国のナノテクに関わる産学官すべての研究者を強力に支援するプロジェクトとしてスタートしました。

**Mg<sub>2</sub>B<sub>2</sub>超伝導体の発見** — 青山学院大学の秋光純がMg<sub>2</sub>B<sub>2</sub>の超伝導現象を発見、非銅酸化物系では最高の39 Kという高い転移温度が認められました。

**第2期科学技術基本計画策定(ナノテクノロジー)：材料分野を重点分野の一つに指定)** — 米国のナノテク戦略に危機感を覚えた経団連が提言を発表、これを受け政府はナノテクを国家戦略に据えました。

**米国がNNIを策定** — 米国はナノテクノロジー国家戦略「ナショナル・ナノテクノロジー・イニシアティブ(NNI)」を発表し、産学官連携で「ナノテクノロジー」を国家の戦略的研究分野に定めました。

**「アトムテクノロジー」プロジェクト「スタート** — 原子レベルで物質の組成・特性を研究する日本の国家プロジェクトがスタートしました。アメリカをはじめ海外に多大なインパクトを与えたとされています。

**カーボンナノチューブの発見** — NECの飯島澄男がカーボンナノチューブを発見しました。

**STMによる原子操作** — アイブラーがSTMでの原子操作に成功しました。35個の原子を並べてIBMの文字を作りました。

**高温超伝導体の発見** — スイス・IBMチューリヒ研究所のペドノルツ・ミュラーが、ペロフスカイト型銅酸化物が高い転移温度で電気抵抗がゼロになる現象を発見しました。

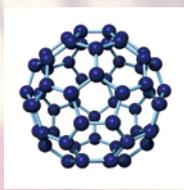
**ドレクスラーの「Engine of Creations」** — アメリカのドレクスラーが著書「創造する機械」を発表、原子レベルから望みの物質を合成する「ナノサイズのロボット」を想定しました。

**AFMの発明** — スイス・IBMチューリヒ研究所のビニツヒがAFM原子間力顕微鏡を発明しました。

**ネオジム磁石の発見** — 住友特殊金属の佐川眞人が発見しました。以来、世界最強の磁石として現在に至っています。

**フラーレンの発見** — クロト(イギリス)、スモーリー、カール(アメリカ)が発見しました。

**量子ドットの提唱** — 東京大学の榎裕之と荒川泰彦が電子の3次元閉じこめ(量子点)の概念を提唱しました。



フラーレン 7-2



カーボンナノチューブ 7-3

— 日本  
— 海外

※敬称略



常温以上に転移点をもつ超伝導体

変換効率20%以上の大面積アモルファスシリコン太陽電池

シリコンやガリウムヒ素(GaS)を用いた太陽電池を凌駕するエネルギー変換効率の新材料

ゲート長3nmのトランジスタを集積したLSI

変換効率20%以上の大面積薄膜太陽電池

固体酸化物形定置用燃料電池

1チップ当たり256ギガビット(Gb)以上の記憶容量をもつLSI

体内の標的細胞内部の任意部位に薬、遺伝子等を運ぶ外部信号により誘導されるナノキャリアシステム

太陽光で水を分解する水素生産プロセス

クロック周波数50ギガヘルツ(GHz)以上のマイクロプロセッサLSI

自己組織化により特定のナノスケール構造・特性を示す材料の製造

固体高分子形自動車用燃料電池

従来の石油化学プロセスに代わる、再生可能な資源を用いた高分子合成プロセス

出典:科学技術政策研究所 NISTEP Report No.99  
参照:文部科学省 ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンター  
<http://www.nanonet.go.jp/japanese/nano/history.html>

# 極小のテクノロジーで 新IT革命！……ナノエレクトロニクス領域の進化

## 半導体微細化の歴史～半導体チップの技術はナノ領域へ

携帯電話やゲーム機は、ますます小型化すると同時に高機能になっています。それを可能にしているのが半導体の微細化技術です。かつては数10センチ四方のプリント基板に数10程度の電子回路を載せるのがやっとでしたが、それが現在ではわずか数ミリ四方の小さなチップに取って代わり、しかもチップ内には何万個という半導体素子が組み込まれているのです。

しかし21世紀を迎え、半導体の微細化技術は限界に達していると言われています。微細化の指標であるチップ内の回路の幅はすでに50nmを切っていますが、これほど小さくなると従来では考えられなかったような問題が多発するのです。これらの困難を、従来とは全く異なるアプローチによって克服するのが、ナノテクノロジーです。ナノテクノロジーを使って困難を克服する半導体微細化技術の例を紹介しましょう。



International Technology Roadmap for Semiconductors 2004 Edition



### ナノエレクトロニクス領域 重要な研究開発課題

- 従来のシリコン半導体を超える次世代シリコンベースナノエレクトロニクス技術
- 電子・光制御ナノエレクトロニクス技術
- ナノスケールに対応したエレクトロニクス製造技術
- ナノエレクトロニクス部材の低価格化技術
- 環境と経済を両立する省エネルギー環境調和ナノエレクトロニクス技術
- セキュリティエレクトロニクス技術

## 微細化の壁～ナノテクがムーアの法則を克服する

「半導体の集積密度はほぼ2年毎に倍増する」これは世界最大の半導体メーカー Intel 社の創設者ムーア氏が1965年に発表した経験則です。当時から現代に至るまで、たしかに半導体の微細化はこのムーアの法則に沿って発展してきました。しかし、従来のやり方での半導体微細化の技術はすでに限界にきています。その理由は、微細化がナノの領域に入ると、ナノ特有の問題が起こるからです。例えばナノレベルの領域特有の現象であるトンネル電流。電気を流さない絶縁体の壁があっても、その厚さが5nm以下だと電子はこれを潜り抜けてしまうのです。そうなると回路の信頼性が低くなり、消費電力もアップしてしまいます。

ナノテクノロジーはこれらの問題を解決できる大きな可能性を秘めています。例えば超微細の

加工技術、これまでの方法では考えられなかったほど極細の導線、超低消費電力回路の実現などが挙げられます。先人の築いてきた半導体技術にナノテクノロジーを適用させてムーアの法則を克服する。そのことにより、あらゆる産業の壁が克服できるのです。



未来型サイドテーブルPC 8-1

## 微細化で広がる半導体の応用領域 携帯・PC・ゲーム機・自動車

20年前のパソコンの動作速度はせいぜい10MHzでした。現在、普及しているパソコンでも3GHzです。20年でなんと約3000倍以上に増えた計算になります。記憶容量も格段に増えています。20年前の記憶媒体は、容量はわずかに1MBのフロッピーディスクのみ。それが今やハードディスクの容量は100GB以上。なんと10万倍という驚異的な増加です。これらの技術革新は、全て半導体の微細化によってもたらされたものです。この先、ナノテクノロジーの適用によって半導体の微細化がさらに進むと、どのような製品が期待できるのでしょうか。



半導体技術を応用した燃料電池軽自動車「IONIS」 9-1



未来の携帯電話 9-2



未来の携帯電話 9-3

第4世代と呼ばれる携帯電話の開発が進んでいます。これは単なる「電話」ではなく、映画やテレビ番組などの動画もハイビジョン並みの高画質で受信できるのはもちろん、駅の構内などの高速無線LANや、デジタル地上波放送などのメディアとも自由に通信できるモバイルマルチメディアとして期待されています。



未来のコンピュータ

例えば携帯電話。テレビ番組の視聴や録画はもちろん、健康チェックを行う機能なども付加されてマルチメディア化し、形状もカード型、腕時計型などが実現するでしょう。さらには、一度充電したら何年も使える電池、世界中に広がる通話圏、本人しか使えない生体認証などのほか、現時点では考えもつかない機能をもった携帯電話が出現するに違いありません。パソコンはさらなる軽量化が進み、従来とは全く異なる形状のパソコンが登場することでしょう。例えば、ディスプレイやキーボードはバーチャルな画像でパソコンは本体のみ、本体にしても薄い紙やペン型になってしまうかもしれません。



バッテリーで走る未来の乗り物 i-swing 9-4

ナノエレクトロ  
ニクス領域



True Nano

### TOPICS!

#### ●国家をかけた “産業のコメ”開発

半導体は1950年代に米国で開発された技術で、その後も長きに渡って半導体産業の主導権は米国が握っていました。これに危機した日本政府は、米IBMなどの超LSI技術への対抗策として、1976年から4年間の「超LSI技術研究開発プロジェクト」(通産省(当時))を始動しました。最終的に官民併せて総額およそ700億円が投じられたこのプロジェクトが目覚ましい成果を挙げ、1980年代における日本の半導体産業の飛躍へと繋がったことは誰もが認めるところであるといえます。



スーパークリーンルーム 9-5

その後、日米半導体摩擦といった国際問題も生じたことで政府による半導体産業に対する集中的支援の動きが少なくなりました。ところがその間に、米国政府による90年代の国家プロジェクト「スーパー情報ハイウェイ構想」や、韓国・台湾メーカーの台頭などにより、日本半導体産業は大きく後退するに至りました。これに危機した日本政府は大型プロジェクトの立ち上げを検討し、「超LSI技術研究開発プロジェクト」以来実に20年を経た1995年、半導体・磁気ディスク・液晶3分野の国家プロジェクト「超先端電子技術開発促進事業」が開始されました。

# 技術の緒について半導体ナノテクノロジー。 新IT革命はすぐそこ。

## TOPICS!

### ナノテクノロジーで開発が期待されるポストシリコン 5つのコンピュータ候補

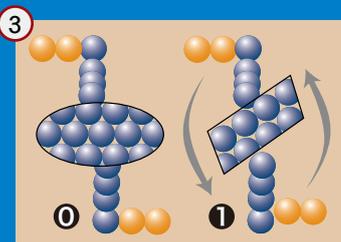
全てが、現在のコンピューターに比べ、消費電力の大幅低減が可能になると期待されています。



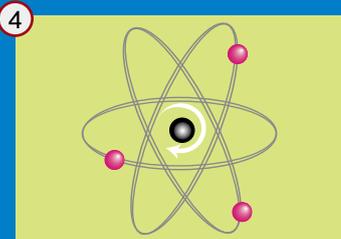
① 光コンピュータ



② DNAコンピュータ



③ 分子コンピュータ



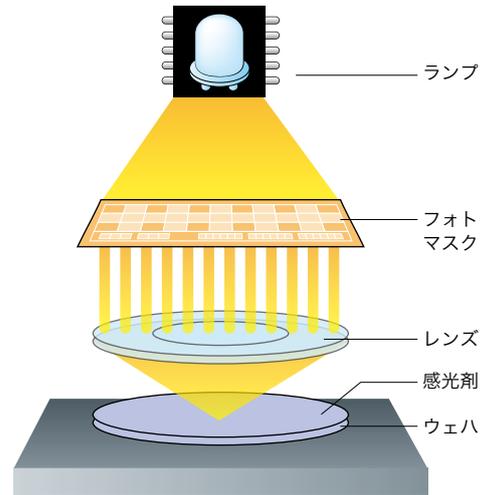
④ 量子コンピュータ



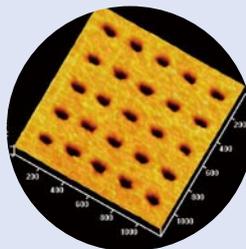
⑤ 超電導コンピュータ

## 半導体チップ回路の“現像” エッチングの限界

半導体チップの回路は、写真製版の技術を応用して製造されています。半導体素子のための微細パターン(マスク)をウェハに転写し、エッチング(腐食)という技術を利用し、光や電子ビームを使ってウェハのシリコン面にパターンを描くのです。用いられる光の波長は、以前は可視光を用いていましたが、半導体の微細化が進み、紫外線領域の光、X線、電子線などより短い波長の光源が用いられるようになりました。しかしこれらの性能も限界に達しつつあります。



## ナノテクで突破!



SPM  
リングラフィ 10-1  
走査型プローブ顕微鏡 (SPM) の直接リングラフィにより作製した、ナノレベルの穴の画像

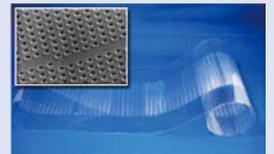
## SPMで削る、微細加工 SPMリングラフィ

走査型プローブ顕微鏡 (SPM) は、1980年代に開発された高分解能の新型顕微鏡で、きわめて微細な探針により、物質の原子・分子まで見分けられます。これを、回路の微細パターンをウェハ上に露光・転写する微細加工技術 (リソグラフィ) に利用する研究が行われています。まさに分子レベルの微細加工をすることによって、例えば電子1つでON/OFFを制御する単電子のトランジスタの実現も可能となるのです。

## ナノテクの“ハンコ” ナノインプリントで安価な量産

リソグラフィが写真製版の原理を応用するのに対し、“ハンコ”の原理を応用するのがナノインプリントです。1995年にプリンストン大学のチュー教授により提案されました。やわらかい樹脂に型を押して微細パターンを作る技術で、型さえできてしまえば、従来のリソグラフィのような高価な光源や電子銃などは不要で、安価かつ簡便にパターンの量産が可能です。

大画面・高スループット  
ナノインプリントシート  
10-2



### ナノインプリントによる転写

転写する樹脂材料を熱くしてプレスする“熱ナノインプリント”によって、様々な素材への転写が可能となります。



ナノインプリントによる転写例  
10-3



いったいコンピュータはどこまで発展するのか？  
 技術の発展によって、わずか10年前のスーパーコンピュータの性能が、  
 持ち歩けるほどコンパクトなノートパソコンで  
 実現できるほどまでになっています。  
 コンピュータの小型化、高性能化はどこまで進むのでしょうか。

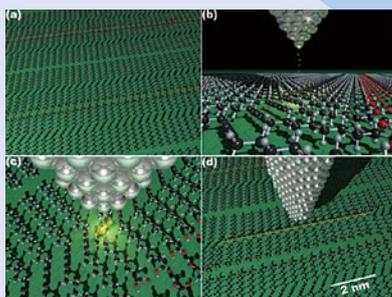
## 半導体材料代表格シリコン 微細化の限界

半導体として利用できる元素としては、電子的な性質や加工のしやすさからシリコンが多く用いられています。純粋なシリコンは原子間の結合が強いため電流が流れにくいのですが、これにボロン(ホウ素) やリンといった不純物をごく微量添加すると、性質が劇的に変化して導体に近い半導体になるのです。これを利用してダイオード、トランジスタが作られています。しかし半導体の微細化が進んで数 10nm 以下になると、不純物を添加しても性質を変えることができなくなるといわれています。



単結晶シリコンインゴット 11-1

ナノテクで  
 突破!



ナノワイヤの作成 11-2  
 分子膜にSPM探針を近づけて分子を励起することで、わずか1分子幅のワイヤを作ることができる

## 原子をつなげて成長させる ナノ導線ナノワイヤ

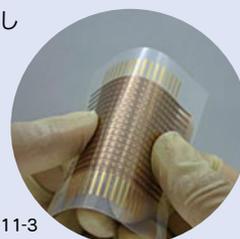
半導体の微細化に伴い、ナノレベルの導線でも動作が可能な素子が求められています。そこで期待されているのが、直径わずか数 10nm という単電子素子の導線ナノワイヤです。ナノワイヤの作成には、金属微粒子を核と特定方向に成長させる方法や、走査トンネル顕微鏡 (STM) を用いて分子の鎖を成長させる方法などがあります。

## シリコンに変わる まったく新しい素材で半導体を!

シリコンと比較して発光性、高速動作性、形状柔軟性などに優れた代替材料として有機・化合物半導体が注目されています。なかでも有機半導体を応用してできる有機トランジスタは、形状に自由度が高く薄膜化も可能で、次世代薄膜ディスプレイや IC タグなどに応用できそうです。ほかに、カーボンナノチューブもトランジスタへの応用が期待されています。カーボンナノチューブには半導体の性質を持つものがあり、電子移動度と熱伝導率の高さにより、次世代半導体の配線材料として有望なのです。

フレキシブル圧力センサー  
 有機トランジスタの大面积性と可とう性に注目し、作成された大面积センサー。

有機トランジスタ 11-3



### Special Interview

Hisatsune Watanabe



(株)半導体先端テクノロジーズ 社長

渡辺 久恒さん

ニッポン半導体の産業界リーダー

### ナノテクで半導体の限界突破

#### 日本の IT 産業の今

日本はエレクトロニクス大国だと言われてますが、何といてもモバイル大国。携帯電話やそれに伴うサービス、それからブロードバンド大国、光通信が家まで来ています。あとデジタルホーム大国。デジタルテレビ、デジタル家電、カメラやアラームなどの運転支援によるデジタルカー、いろんなものがデジタル化しています。それにスーパーコンピュータ大国、今はランクで言うと 10 位になってしまいましたが、一番は材料大国でしょうね。日本はものすごく材料技術が進んでいます。

#### 半導体へのナノテク応用

最近世界で使っている言葉が「モアムア」。今の延長線をもっとナノ領域でも頑張るという意味ですが、私の仕事は正にモアムアです。ナノテクを応用し、どんどん小さくして数を増やし、その上で音声処理、画像処理などを 30 ~ 10nm でやろうとしています。

#### 半導体の材料の変化は?

9 割はシリコンですが、ついに我々のところでもカーボンナノチューブを配線材として入れ始めました。今は銅ですが、限界が見えている。カーボンナノチューブの何がいいかというとそれ自体が非常に丈夫。それから自己組織化で太さが揃っていて、細く加工しなくていい。そういうものにどんどん切り替えようとしています。

# 小さな箱の大きなパワー！ 量子ドットが実現する、 超高速・超低価格・超省エネルギーの世界。

最早、社会に欠かせないものとなったコンピュータ。その技術革新はすさまじい速さで進んでいます。しかし、従来と同じ路線で実現できる革新には必ずと限界があります。全く新しいタイプのコンピュータを可能にする技術、それが量子ドットです。

## TOPICS!

### 量子コンピュータ

量子ドットの利用で最も期待されるのが、量子コンピュータでしょう。量子コンピュータは量子ドットを基本素子として、既存のコンピュータでは到底考えられなかった超高速計算が可能となります。例えば素因数分解。巨大な数の素因数分解を行うには一般に全ての素数で割ってみるしかありません。これが数百桁にもなると、既存のコンピュータでは数千年以上の莫大な時間がかかってしまいます。量子コンピュータは、その超並列機能により、このような大規模な計算を僅か数秒〜数10秒でやってしまうのです。このような夢のようなコンピュータの実現はまだ遠い未来のような気がしますが、実は既に国内外の複数のメーカーが、大学などと共同研究を始めています。決して、遠い未来の技術ではないのです。

### 高温超伝導体が、 量子コンピュータを 実現する

超伝導現象とは、ある温度（転移温度）以下で電気抵抗がゼロになる特殊な現象で、20世紀初頭に水銀（転移温度は4.2K）で確かめられました。1986年には、ミュラー、ベドノルツによってセラミック系の物質が35Kで超伝導になることが発見され、その後様々な物質が発見され転移温度は一気に100K近くまで上昇、いわゆる高温超伝導フィーバーが起きました。また、2001年には、非セラミックであるMgB<sub>2</sub>が高温超伝導現象を示すことが、青山学院大学・秋光研究室の学生によって発見されています。この高温超伝導体、量子コンピュータの部品として極めて有用であるといわれています。現在、国内外でこの高温超伝導体をつかった量子コンピュータの研究が進められています。

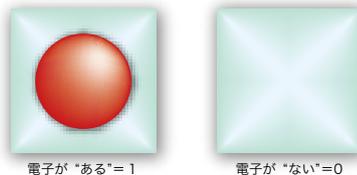
### 現在のコンピュータの限界 突き当たる量子力学の壁

コンピュータの改良は、半導体の微細化技術の発展によって加速されてきました。しかし、半導体の微細化が進むと、いずれ大きな壁に突き当たるといわれています。いわゆる量子力学の壁です。現在のコンピュータの原理は、全ての情報をトランジスタのON/OFFなどによって0か1の2進数で記憶し、これを順次読み込んで実行するもので、原理発案者の名前をとってフォン・ノイマン型と呼ばれています。しかし微細化が進むと、トランジスタを流れる電子に“粒子”としての振る舞いに加え、“波”としての振る舞いが現れてきます。このような世界では、電子の存在はもはや確率でしか示せなくなり、情報の0、1を区別する機能が失われてしまいます。これが量子力学の壁です。

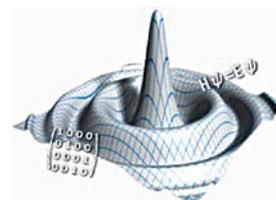
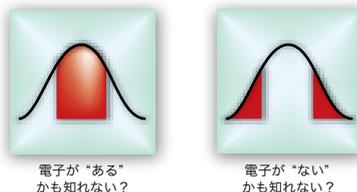
### 電子の波を制御!! 壁を突破する量子ドット

量子力学の壁を突破し、“波”として振る舞うようになってしまった電子を制御するナノエレクトロニクス技術が量子ドットです。それは、大きさわずか数10nm程度の導電性の結晶（小さな箱）に電子を閉じこめ、電子を制御する技術です。この小さな箱の形状を変えることで、閉じ込められた電子のエネルギーの性質を変えることができるのです。量子ドットの世界では、電子が通常とは違う飛び飛びの値を示すなど、量子力学特有の未知の性質を示します。量子ドットは、1982年に東京大学の榊氏と荒川氏によってはじめて提唱され、現在では半導体ナノ構造の基本として重要な役割を果たしています。

従来の記憶素子における演算の単位

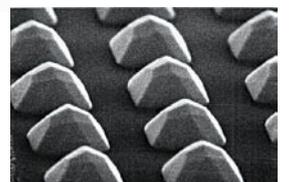


量子領域の記憶素子における演算の単位



物理学者シュレーディンガーによって確立された、量子力学の基本的式： $H\psi = E\psi$ 。これにより粒子の波動性を示すことができます。

12-1



InGaAs 量子ドットの構造

12-2

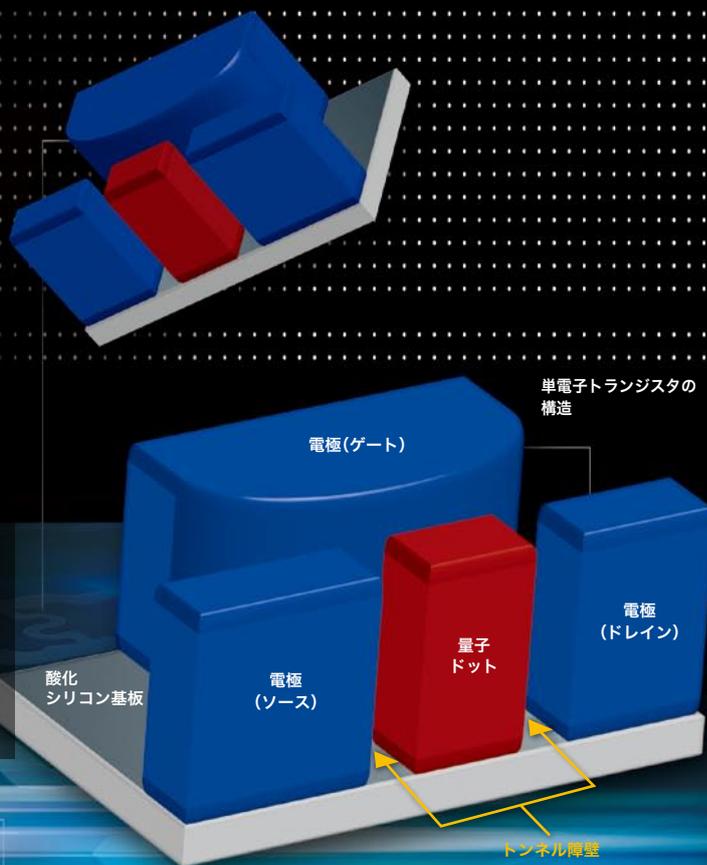
選択成長および自己組織化成長により形成された InGaAs 量子ドットにより、量子力学特有の未知の性質を示すことができるようになります。

## 量子ドットが実現する 夢のエレクトロニクス

量子ドットの応用例はたくさん提案されており、エレクトロニクス分野の将来を担う重要な技術となっています。

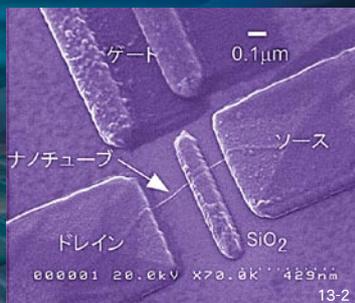
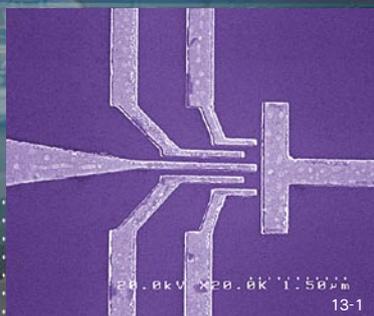
最も実現性の高いのが量子ドットレーザーです。従来の半導体レーザー（LED）に比べ、温度に依存せず、省電力、高速・長距離伝送などにおいて格段に優れた性質を持っています。すでに国内でも産学連携により研究開発が進められています。

単電子トランジスタは、たった1つの電子の移動でON / OFFを制御する究極のトランジスタです。従来のトランジスタでは数万以上の電子が必要でした。単電子トランジスタは量子ドットの左右にトンネル障壁をつくり、ソース電極とドレイン電極をつなげたものです。ナノテクノロジーの技術革新により、カーボンナノチューブなどでこの回路を作ることが可能になりました。



単電子トランジスタの基本構造です。構造自体は通常のトランジスタのようにソース、ドレイン、ゲート電極の3端子からなりますが、その中心に量子ドットを置きます。この量子ドットの中の電子の数が、ゲート電圧を変えることで、トンネル障壁を介し1個単位で増減させることができます。これを実現するにはソースとドレイン間の距離を数10nm程度にする必要があります。

2重結合量子ドットは電荷量子ビットの基本形です。1個の電子がどちらのドットにいるかによって、ビットの1か0を表します。電子はドット間をトンネルすることができるので、1と0の重ね合わせ状態も可能です。このタイプの量子ビットでは半導体量子ドットを用いた研究が盛んでしたが、CNTで実現できれば、更なる性能の向上が期待できます。



### Special Interview

Yasuhiko Arakawa



東京大学教授  
荒川 泰彦さん  
量子ドットの世界初の提唱者

### 科学を学ぶことに誇りを

#### 研究の概要は？

量子ドットの形状や配列など、ナノテクによる電子や光子の量子力学的な振る舞いを完全に制御することを目的としています。ユビキタス情報社会を実現するためには、次世代ナノデバイスの開発が不可欠。さらなる量子ドットの物性探求のほか、新型レーザーや量子情報デバイスの実現に向けた先端研究も推進しています。

#### 研究を始めたきっかけは？

大学院時代は情報通信理論を研究していましたが、27歳で東大講師になった時点で、半導体物理・デバイスの研究分野に転向しました。選択肢としていわゆる光学分野もありましたが、どうせゼロからのスタートならば、新しいものを作って革新的な貢献をしたいと思いました。幸い当時は、今のように短期で成果を求められる時代ではありませんでしたし、量子効果は自分でも面白いと感じていたので、挑戦してみたいと思いました。

#### 量子ドットの社会への応用は？

ナノエレクトロニクスの出口を作るためには、産学連携が欠かせません。現在、キャンパス内に企業ラボを4つ作り、緊密な連携で10年後のイノベーション創出に向けて研究開発を進めています。アカデミアと産業界のビジョンの共有が重要です。数年後には、高速で安価、省エネ、高性能の量子ドットレーザーが市場に出るでしょう。量子ドット増幅器、高セキュリティの量子暗号用素子の開発も行っています。

# ナノテク・材料が実現する新エネルギーと クリーンで安心な未来社会……材料領域の進化

エネルギー資源の消費を最小限に抑えた高効率な発電や、今まで普及していない新しいエネルギーを開発すること。そして人にも地球にも優しいクリーンな環境と豊かで安心な社会を実現することを目的に、革新的なナノテク材料の開発が行われています



## 材料領域

重要な研究開発課題

### 【エネルギー問題の克服】

- 未普及なエネルギー利用を具現化する材料技術
- 高効率なエネルギー利用のための革新的材料技術

### 【環境と調和する循環型社会の実現】

- 有害物質・材料対策に資する材料技術
- 希少資源・不足資源代替並びに効率的利用技術
- 環境改善・保全のための材料技術

### 【安全・安心社会の構築】

- 安全・安心社会を実現する材料・利用技術

### 【産業競争力の維持・強化】

- 世界をリードする電子機器のための材料技術
- 国際競争力のある輸送機器のための材料技術
- 次世代を担う革新的材料・部材の創製技術

## 枯渇する石油に替わる クリーンエネルギーの創造

私たちは、エネルギー源として石油などの化石燃料に大きく依存しています。しかし、地球が生物の働きも借りてゆっくりと3億年近くかけて蓄積した化石燃料の半分を、人類はたったの100年で消費してしまいました。化石燃料は、あと30年から50年で枯渇するとも言われています。この残された時間のなかで、私たちは化石燃料に替わる新しいエネルギー源（＝新エネルギー）を探さねばなりません。新エネルギーとしては、太陽光、風力、バイオマス、水素エネルギーなど様々な候補があげられていますが、これらのエネルギーを本当に使えるもの



にするために大きな威力を発揮するのが、ナノテクノロジー・材料技術です。

現在の技術で採掘可能な化石燃料は30～50年分。電気も車もない社会では暮らせない現代人にとって、残り少ない石油に替わる環境にやさしい新たなクリーンエネルギーの開発が急務となる。

## 新エネルギーである水素を 利用した燃料電池の量産化

中学校の理科で、水の電気分解によって水素と酸素が発生する実験を習ったと思います。この反応を逆転させ、水素と酸素を反応させて水を作ればエネルギーが発生するはず。この原理を応用したのが燃料電池です。水素と酸素（空気）さえあれば電気と熱が作れて、排出されるのは水だけ。そう、燃料電池は究極のクリーンエネルギーなのです。ただし、原理は簡単でも普及にはいくつもの壁があります。水素は爆発の危険がありますし、触媒に使われる白金は高価で希少です。こうした壁の突破にも、ナノテクノロジー・材料技術が登場します。カーボンナノチューブを水素貯蔵材料として利用し爆発を避ける技術、白金の代替材料として、鉄のように安価でありふれた材料を用いる技術などがそれです。



水素ステーション 14-1



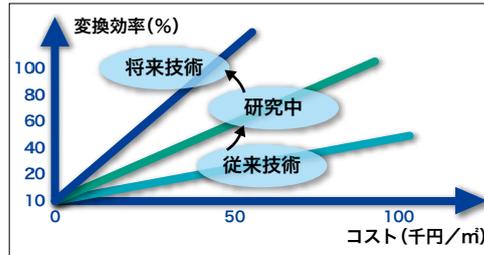
## 太陽の恵みがもたらす エネルギー、太陽光発電

地球上に惜しみなく降り注ぐ天の恵み、太陽光。地球全体に降り注ぐ太陽光を全てエネルギーに変換できるとしたら、たった1時間の日射で全世界の年間の消費エネルギーが得られます。まさに無尽蔵のエネルギー源なのです。太陽光発電はその夢の実現を目指しています。日本は太陽光発電普及率は世界一、製品シェアは世界の50%を占めています。ただし、太陽光をエネルギーに変換するのは容易ではなく、光を電気に替える効率（変換効率）は現在の技術ではせいぜい数%と言われています。また、主に利用されているシリコン単結晶材料は黒くて硬く、貼れる場所が限られてしまいます。そこで期待されるのがナノテクノロジー・材料技術。例えば、ナノレベルの微細粒子と色素を混ぜてつくる色素増感型太陽電池が実現すれば、どこにでも太陽電池が塗れます。また、太陽電池材料の薄膜化・ナノ粒子・量子ナノ構造化によって変換効率を極限まで上げる試みもなされています。

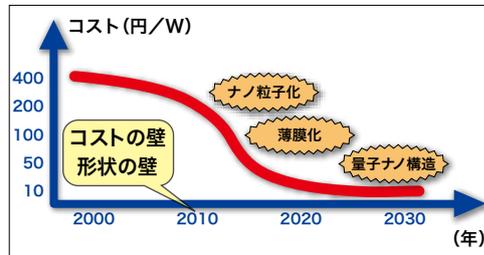


太陽光発電 15-1

グラフ1 太陽光発電の変換効率とコスト



グラフ2 ナノテックによるコスト削減予測



## TOPICS!

### ●既に実用化に向かっている 燃料電池

世界をリードする日本の燃料電池の研究開発。この成果は社会へ続々と還元されています。例えば燃料電池を動力源とした燃料電池自動車。2002年、燃料電池自動車の納車第一号として、首相官邸に登場しました。 15-2



燃料電池ハイブリッド車 Fine-X 15-3

小型燃料電池を搭載したノートPC、携帯電話などは、小型であることから普及しやすいとされており、既に複数のメーカーから試作品が発表されています。



燃料電池搭載のノートPC 15-4

**新エネルギー源**

太陽電池→太陽  
燃料電池→水、家畜糞尿、生ゴミ、  
木質バイオマス、都市ガス

↓

**社会での応用例**

自動車・船・飛行機・自転車・列車  
(架線がいらない)、  
携帯・PC・自販機(電線がいらない)、  
ビル・住宅など

# 革新的な材料が加速させる夢の実現。 —大きな期待が寄せられる カーボンナノチューブとフラーレン—

## 革新的な材料が加速させる夢の実現

あらゆる産業から注目される材料、カーボンナノチューブとフラーレンは、夢の材料と呼ばれています。強く軽い上に、電気や熱もよく通す。まさに良いことづくめで1日でも早い実用化が待たれます。

### Special Interview

Sumio Iijima



産業技術総合研究所

飯島 澄男さん

カーボンナノチューブの世界的発見者

## 医療・化粧品、多くの分野が 注目するフラーレン

炭素原子だけで形成されたカゴ状分子がフラーレン、筒状分子がカーボンナノチューブ (CNT)。それぞれナノテクノロジーを代表する炭素分子ですが、産業への応用もいよいよ実用化段階に近づいています。フラーレンは1985年、イギリスのクロトー、アメリカのスモーリー、カールによって発見され、3人はこの業績により1996年にノーベル賞を受賞しました。このフラーレン、単

に美しい形状を持つだけでなく、高強度、超伝導性、光吸収性、低熱・電気伝導性などの性質から、各種触媒、磁性体、電子部品などへの応用が期待されています。人類を悩ます難病エイズ。エイズの原因となるウイルス、HIVの増殖阻止薬として次世代材料フラーレンが注目されています。HIVは自分では増殖できません。HIVプロテアーゼという酵素を使い、他人(宿主)のDNAの増殖能力を利用して自身を複製増殖させるのです。水溶性フラーレンはこのHIVプロテアーゼの分子構造に入り込み、その働きをストップさせます。その際、フラーレンがターゲットとするのはHIVのみです。ほかにもフラーレンは、化粧品、超伝導材料などとしても注目されています。

に美しい形状を持つだけでなく、高強度、超伝導性、光吸収性、低熱・電気伝導性などの性質から、各種触

### まずは動くことがいい

#### 研究者としての喜びは？

長くやっていると「これはいける」ってニヤッとする瞬間があって、人には見せませんが(笑)そんな瞬間が3回ありました。1つ目は70年代に、幸運にも世界で最初に原子を見た時。2つ目は電子顕微鏡で見る原子を動画で撮影する方法を開発して、金の微粒子がコロコロ動くのを撮った時です。そして3つ目がCNTの発見。でも飯島っていうとナノチューブって言われるけど、私は非常に心外でね(笑)。CNT発見はこうした仕事を、一つ一つ積み重ねて電子顕微鏡のプロになったから。プロじゃなければ発見のチャンスはゼロですね。

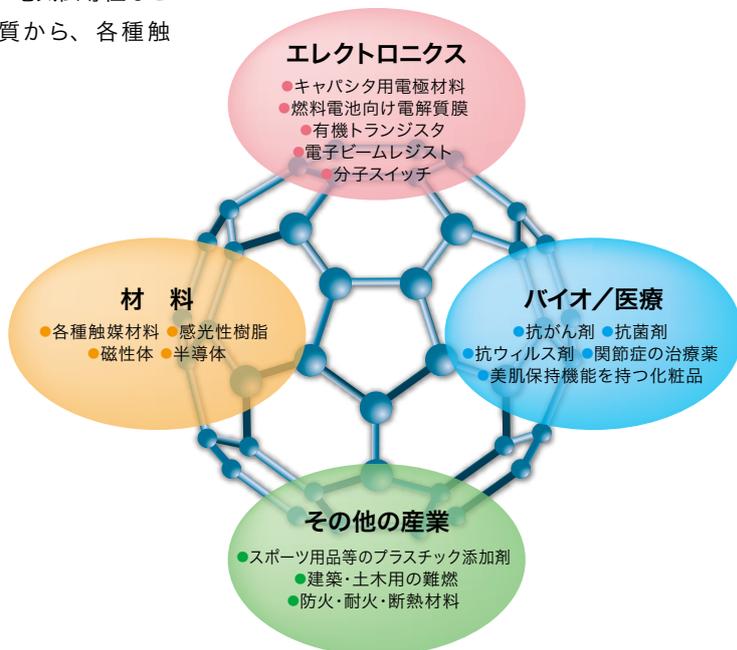
#### 現在の研究開発は？

今、CNTを使ったスーパーキャパシタ開発の真っ最中です。これは電気を蓄えるコンデンサですけど、小さくて表面積が多いCNTの特性を生かして、パワー密度が高く、長寿命で安全で高性能なスーパーキャパシタを是非でも開発したいと思っています。

#### 若者へのメッセージを

まずは動いたほうがいい。やりたいものは何でもやる。ダメだったら撤退する。動くたびに出会いがあり、本物に巡り会うチャンスを増やす。

### フラーレンの現状用途



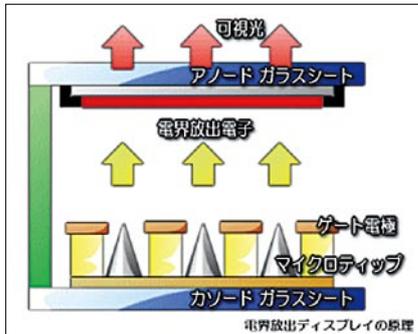
<http://www8.cao.go.jp/cstp/s&tmain.html> にログインインタビューを掲載予定。



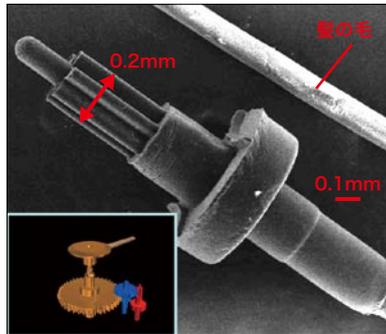
True Nano

カーボンナノチューブ(CNT)の想定用途 17-1

| 用途                   | CNTを用いる利点              | 開発状況   |
|----------------------|------------------------|--------|
| 走査型プローブ顕微鏡(SPM)探針    | 構造の観察が可能など多くの利点        | 実用化段階  |
| 電界放出ディスプレイ(FED)用エミッタ | 発光ディスプレイ低消費電力化が可能      | 試作段階   |
| 水素吸蔵材料               | 高い水素吸蔵能力を示す燃料電池用水素吸蔵材料 | 基礎検討段階 |
| リチウムイオン二次電池負極添加剤     | 大容量、高出力の電極材料           | 実用     |
| 電界効果トランジスタ           | 集積回路の高密度化などが可能         | 基礎検討段階 |
| 先進複合材料               | 樹脂等の強化、電導性付与材料         | 実用段階   |



電界放出ディスプレイの原理 17-2



CNT 複合材の精密歯車への応用 17-3

カソード(陰極)から真空中に放出された電子はアノード(陽極)の方に向かって進み、途中で蛍光体に衝突して光を放つ。この電子放出材としてCNTが目ざされている。

日本発の夢の革新材料、  
カーボンナノチューブが実現する未来社会

カーボンナノチューブ(CNT)は炭素の六員環ネットワークが筒状になったもので、1991年にNECの研究員(当時)だった飯島氏によって発見されました。また、信州大学の遠藤氏が成長プロセスの解明と量産化技術を開拓するなど、日本が研究開発の主導権を握っています。CNTの特徴として真先に挙げられるのが、その強度と軽さと高い電気・熱伝導性、化学的安定性です。強度は鉄鋼の数10倍なのにアルミニウムよりも軽く、曲げや熱などにも強いので、様々な分野での応用が期待されています。

最も実用化が期待されているのが、その高い電気伝導性を利用した電界電子放出ディスプレイFEDです。FEDは陽極・陰極2枚のガラス基板の間に電圧をかけて電子を放出し、蛍光体に電子を当てて発光させます。電子放出材料としてCNTを用いると、低い消費電力での放出が可能となるのです。しかも耐久性も高く、長時間の動作も可能です。ほかにも、リチウムイオン電池や複合材料、スーパーキャパシタ、透明導電フィルム、走査型プローブ顕微鏡の探針、次世代超微細半導体の導線、医療、バイオ応用など、あらゆる分野の革新材料として注目されています。

Morinobu Endo



信州大学教授  
遠藤 守信さん

カーボンナノチューブの量産化革命を実現

発見には幸運が、  
発明には知性が不可欠 (ゲータ)

**CNT 量産化のエピソードを**  
1973年、私は信州大学で炭化水素の熱分解で作る炭素繊維の研究をしていました。く日もくる日も実験で使ったスダラけの基板を洗い、空焼きして使っていました。なんとか手抜きをしようと思って、基板をサンドペーパーでこすってススを落として使ってみたら、その日は反応管が詰まるほど炭素繊維ができたんです。それで、まじないのように使い続けるうちにサンドペーパーがなくなり、新しいのを買ってもらいました。そうしたら急に炭素繊維ができなくなりました。全ての条件を精査してやり直してもダメで2~3ヶ月落ち込みんですが、冷静になって考えると前は茶色のペーパー、新しいのは黒いペーパーということに気がきました。そこで残っていた茶色のサンドペーパーの切れ端でこすったら、なんとたくさんできるんです。これをきっかけに渡仏して研究を続け、炭素繊維の中心にチューブを発見。その先端に鉄の微粒子を見つけました。でも、いったいコレはどこから来たのかと...そこで気付いたのがサンドペーパー。黒いペーパーは酸化ケイ素、そして茶色のは酸化鉄が主成分だったのです。これで鉄がチューブを成長させる触媒であることが明らかになりました。量産化のきっかけは、新聞のインフルエンザの記事。くしゃみでウイルスが15mも飛ぶと。ウイルスの大きさは100nmと書いてあり、私が基板上に群いている触媒の鉄粒子はその30分の1。それならウイルスのように、空中に浮かしてやってみてはどうかと思いつき、浮遊させて実験してみたら連続生産ができ、商業化に至りました。

**研究のモットーは？**  
大学の基礎研究と企業の応用技術の連携をしっかりとって社会貢献を果たしたいと思っています。国際的視野を持って。

<http://www6.cao.go.jp/cstp/s&tmain.html> にログインインタビューを掲載予定。

## 日本独自の光触媒技術で 世界の環境浄化へ。

最近 耳にする機会が多くなった“光触媒”。「防汚」、「抗菌」、「脱臭」などの性能が光に当てるだけで得られ、かつその機能が半永久的に得られる夢のような性質をもつとして脚光を浴びている素材です。光触媒とはどのような物質で作られ、なぜ素晴らしい機能を発現できるのかといった点に焦点を当てて説明したいと思います。

### TOPICS!

#### 酸化チタンしか 光触媒にならないの？

これまでになされてきた研究により、酸化チタンや、本編で触れた窒素や白金錯体を加えたもの以外にも、チタン酸ストロンチウム (SrTiO<sub>3</sub>) や層状のニオブ酸カリウム (KNbO<sub>3</sub>) などが光活性を示す物質として見出されています。しかし、これらの物質は酸化チタンに勝るとはいえないため、より安価に大量生産が可能な酸化チタンが実用化されているのが現状です。

#### 市販されている 光触媒商品の効果は どれくらいあるの？

最近多数の光触媒を謳った商品が市販されています。その中には、実際に効果がある商品もあるのですが、本編でも述べたように酸化チタン光触媒はタングステン電球や蛍光灯の弱い光ではあまり効果を発揮できません。そのため、中にはあまり効果の期待できない商品もあります。では、室内でも効果が得られる商品はどのようなのでしょうか。酸化チタンに加え、殺菌作用のある銀イオンや銅イオンを加えた抗菌タイルや、ブラックライトを内蔵した空気清浄機などは、光触媒効果が期待できる商品例です。

### 光触媒は何でできている？

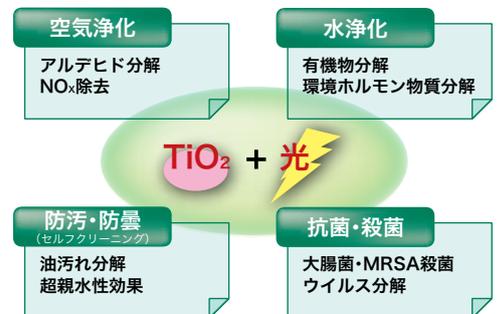
光触媒としては主に酸化チタン (TiO<sub>2</sub>) という物質が用いられています。酸化チタンはありふれた物質で、食品、化粧品、塗料、繊維、ゴム、紙など、身近な様々な製品で大量に使われています。ただし、同じ酸化チタンでも、光触媒として使われるものと化粧品などとして使われるものは、特性や表面構造が異なります。こうしないと、化粧品や塗料の中で光触媒作用が起こってしまうと、きれいな化粧や塗料が光に当たると剥げてしまいます。

### 光触媒の機能はなぜ発現するか？

光触媒の「防汚」「抗菌」「脱臭」といった様々な性質は、強力な酸化分解力と超親水性効果という、2種類の光活性反応によりもたらされます。この2つの性質が組み合わせられることで、様々な機能が発現するのです。

#### 光触媒の機能

18-2



光触媒フィルター使用の脱臭装置が設置された  
東海道新幹線N700系の喫煙ブース 18-1



酸化分解力では、様々な有機物が分解されます。雑菌や細菌を無くしたり、汚れのこびりつきや臭いの発生を防げるのです。

超親水効果というのは、酸化チタン表面上で水が水滴にはならず、一様に広がる現象です。これにより、水が汚れの下に入り込んで浮き上がらせることになり、汚れが落ちるのです。



# True Nano

## Special Interview

Akira Fujishima



神奈川科学技術アカデミー理事長

藤嶋 昭さん

光触媒の世界的発見と普及の立役者

### 天寿を全うするための科学技術

#### 光触媒発見のエピソードを

東大大学院生の時に複写機の研究で、酸化チタンが使えるのではないかと思い単結晶を入手しました。これと白金を電極に用い水の電気分解の実験中、水の中で酸化チタンの表面に光を当ててみました。そうしたらガスが出た。これを分析したら酸素と水素だと分りました。感動の一瞬です。だって植物の光合成と同じような事を、こんな簡単な方法で真似できたんですから。ところが結果を「Nature」に発表すると、脚光を浴びたのは水素の方で水素博士とか呼ばれたんですよ。

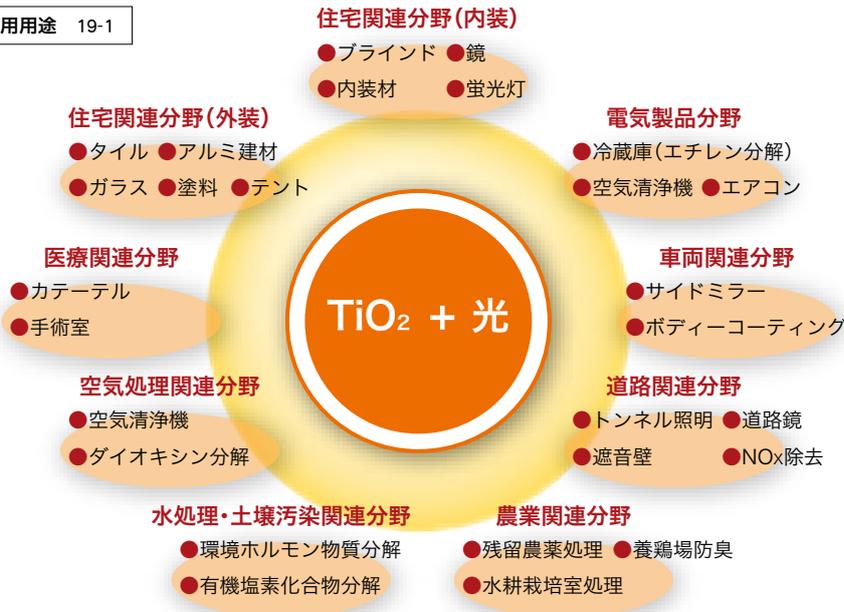
#### 環境への応用に転換したのは？

注目された水素は、商業化するほどは取れませんでした。そこで強い分解力を生かして、殺菌や消臭などの環境問題に応用しようと考えました。TOTOの基礎研におられた渡部俊也さんと共同研究で、トイレや手術室のタイルに酸化チタンをコーティングしてみると、驚くことに自動殺菌・消臭した。高速道路の照明器具では、セルフクリーニング効果を発揮しました。そこで微量で困っているものをきれいにするテーマに転換しました。

#### 光触媒の社会での応用は？

建物の屋外・屋内セルフクリーニング、空気清浄機、鏡が曇らない事も発見され、車のサイドミラーの曇り防止にも使用されています。光触媒は今、600億円の市場になっています。

### 光触媒の応用用途 19-1



## 光触媒を応用した技術

光触媒の機能を住宅、電気製品、車両、道路、農業、水処理・土壌汚染、空気処理、医療などの分野で応用され、徐々に実用化が進められています。光触媒の魅力は何と言っても、手間を掛けずに様々な浄化作用を得られることです。例えば家屋の外壁に光触媒を用いた場合を考えてみましょう。家屋の外壁は雨風に晒されたり排気ガス等の汚染物質などによって、すぐに汚れてしまいます。個人住宅でも外壁の清掃は大変ですが、マンションなどの集合住宅の外壁の清掃はさらに大掛かりであり、こまめに行うためにはコストがかかっていました。しかし、光触媒を塗布した外壁では、太陽光により付着した埃や排気ガス（主にNOx）などの汚れを

酸化分解します。さらに、雨が降れば超親水性効果により、雨水が汚れと外壁の間に均一に広がり、汚れを浮かして洗い流します。つまり自然の力を利用して、外壁のセルフクリーニングを行うことができるのです。また、最先端の研究例としては、光触媒で癌を退治しようという研究が行われています。この研究が成功すれば、副作用を心配することのない癌治療が実現するかもしれません。

光触媒を塗布した外壁は防汚性に優れ、時間が経っても美しさを保っています。

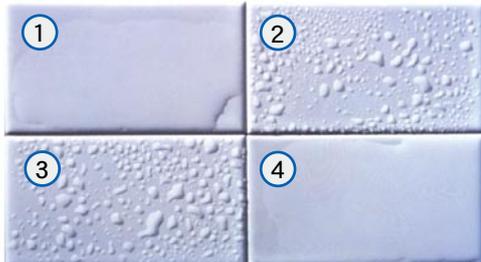


光触媒の防汚性 19-2

## 光触媒の今後の課題

光触媒は非常に優れた素材ですが、弱点もあります。それは、光を選ぶということです。例えば、酸化チタン光触媒がその機能を発揮するためには、波長が380nm以下の光でなければなりません。いわゆる紫外線です。ですから、紫外線をほとんど含まないタグステン電球や紫外線が弱い蛍光灯では効果を発揮しません。今後の大きな課題は、室内の光源でも十分な光触媒機能を発揮する素材の開発です。酸化チタンに少量の窒素や白金錯体を加えるなどの改良が進んでいますが、今後ともさらに高機能を持つ光触媒の開発が待たれます。

### タイルの濡れ方の比較



①④は超親水性光触媒をコーティングしたタイルで水滴が着きません。②③は通常のタイル。表面にたくさん水滴が着いています。 19-3

### 車の窓・ミラーも視界良好



いずれも左が通常、右が超親水性光触媒をコーティングしたもの 19-4

## 世界をリードする技術で 大容量・超軽量の電子材料を！



### 曲がるガラス 20-1

ナノガラス技術によって、非常に薄いガラスが実現可能になります。これによって、簡単に曲がるガラスを作ることができます。現在でも光ファイバーでガラスは利用されていますが、さらに高強度のファイバー、超大型ディスプレイなどに利用できます。

## TOPICS!

### まだまだある、 ナノテクノロジーに よる革新材料

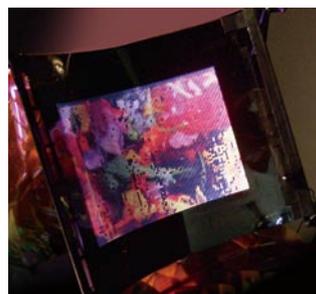
ナノテクノロジーを利用した革新材料は多くの種類におよんでいます。これらは、ナノテクによって性能がずっと向上したものです。これからは、高価な希少元素に依存していた有用な機能を、鉄のようなありふれた原料で、実現することも目指しています。

例えば石灰と酸化アルミニウムからできたセメント原料が、ナノテクによって透明な半導体や金属に変えられることがわかり、電極材料や触媒への利用が検討されています。ナノダイヤモンドは、人工的に合成した直径 5nm 以下のダイヤモンド超微粒子で、半導体材料、研磨剤などに用いられています。また近年、ナノスケールで金属の構造を制御したナノメタルの合成の研究も進んでいます。これが実現すれば超高強度で長寿命の構造材などが実現可能で、自動車や航空機、建物、橋などに、強度はそのままですが飛躍的に軽くなった材料を提供できます。金属磁性体をナノレベルで制御したナノ磁性体は、巨大磁気抵抗という現象が見られ、高密度の磁気記憶媒体としての利用が期待されています。

### 世界をリードする技術で実現、 驚異の電子材料

第2次世界大戦後、日本は欧米の産業技術を追いかけ、製品をより安く大量に生産する技術を身につけることで、歴史上稀に見る発展を遂げました。しかし、21世紀を迎えた今、この役割は中国などのアジア諸国に取って代わられ、日本は研究開発のフロントランナーに立たされています。日本独自の技術を創造して製品化を図ることで産業を振興する総合力が試されているのです。

ナノテクノロジー・材料分野では、このような日本独自の技術による材料が次々と生まれています。ここではその代表例として、ナノレベルの構造制御によって生まれた新材料“ナノガラス”その他の有力な材料を紹介します。



フィルム液晶  
ディスプレイ  
20-2

紙のように薄くて丸めることもできる未来のディスプレイの研究も進んでいる。



有機 EL  
フレキシブル  
ディスプレイ  
20-3



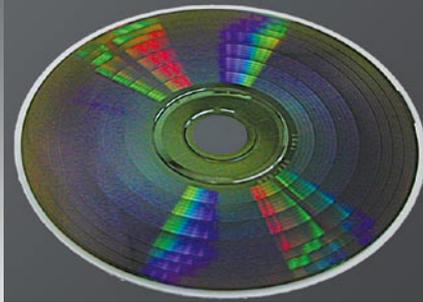
Chest-type PC 20-4

ディスプレイ部の開閉が可能で次世代型 PC。ローテーブルやスツールとしても利用が可能。



次世代型薄型ディスプレイ SED 21-1

ナノギャップという微細加工技術から生まれた大画面・薄型の SED ディスプレイ。



超大容量光ディスク 21-2

ナノレベルでの構造制御により、高密度・高強度のガラスが実現でき、これにより、約 300 GB の大容量の光ディスクの実現が可能になりました。現在の DVD ディスクの容量は約 5 GB です。将来は実にこの 60 倍、映画 20 本が 1 枚のディスクに収まります。

## ナノテクノロジーの力で ガラスがシリコンに代わる！

人類がガラスを発見し、利用するようになったのはメソポタミア文明の時代と言われています。ガラスは熱による加工が容易で、薬品などに強いといった特徴を持っています。そのため、窓ガラスなどのほかにも光ファイバーなど幅広い分野で利用されています。しかしガラスには、割れやすい、重い、磁気を帯びないなどの欠点があり、電子材料など微小な領域での利用には適さないと言われてきました。そんなガラスの潜在能力を飛躍的に高める研究が、ナノテクノロジーによって行われています。ガラスは原子の配列がばらばらな非晶質という構造を持ちますが、これにフェムト秒（1000 兆分の 1 秒）レーザーという、非常に短いパルスのレーザーを当てることで、ガラスを結晶化したり、屈折率を変えたりする構造変化を起こせることがわかりました。超軽量・高強度のガラスを作ることが可能となり、電子材料など従来は考えられなかった応用ができるようになったのです。



未来型  
ターンテーブル PC 21-3

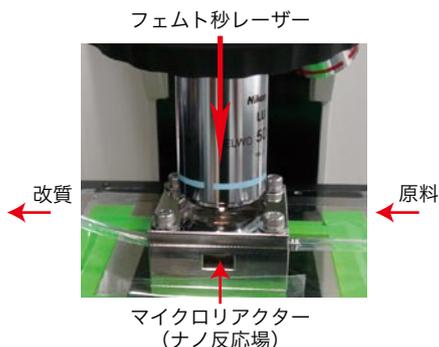


ウルトラ  
モバイル PC 21-4

## 一瞬で 3 次元回路を形成 サイズは千分の 1, 速度は千倍

現在でもガラスは光デバイス（光受動部品）として利用されていますが、光の制御が難しいことから 2 次元形状に限られる上に精密な温度制御が必要です。フェムト秒レーザーを利用したナノガラス加工技術では、ガラス材料の中に一瞬にして 3 次元の回路を形成することが可能です。これによって現行の光デバイスよりも重量と価格は 1000 分の 1、速度は 1000 倍の超高機能光デバイスの実現が可能となります。

フェムト秒レーザーを用いた実験装置 21-5



フェムト秒レーザーを利用し、ナノガラスに加工された色とりどりの 3 次元の花。 21-6



### Special Interview

Kazuyuki Hirao



京都大学教授

平尾一之さん

ナノガラスの日本キャプテン

### 共に咲く喜び

#### ナノガラスとは？

昔はガラスといえば窓でしたが、今ではプラズマ・液晶 TV、DVD、デジカメのレンズなど、高度な技術のガラスが使われています。ナノガラスは、これをさらに高機能化したもので、薄くて割れない、曲がる、熱にも強いなどの特性があります。例えば 80 インチのモニターなら、強度は 2 倍、重さは約半分くらいです。

#### 研究の概要は？

ナノテックとフェムト秒（1000 兆分の 1 秒）レーザーを融合させた技術の研究開発を中心にやっています。この融合技術でレーザー照射で作れる 3 次元光集積回路や光部品の開発を行い、すでに販売されている部品もあります。

#### 先生の夢は？

現在、京大桂キャンパス内にベンチャープラザや研究成果活用プラザなど、産学連携拠点を作って、多くのベンチャー企業に参加してもらっています。大学には装置も扱える人材もいるので、それらを産業と結合させるのは、私の役目だと思っています。このプロジェクトから、大きく花開く製品や会社ができたらいいな、と願っています。産学官、そして地域がアメンバーのように増殖しながら広がっていくことに、貢献していきたいです。

対処医療から予防医療へ、従来医療から個別化医療へ

# 予防医療と最先端医療が 難病を克服する日……ナノバイオ・生体材料領域の進化

人類 200 万年の歴史において医療は欠かせないもの。特にこの 100 年間における現代医療の発展は目覚ましいものがあります。バイオテクノロジーによるウィルス、ワクチンの研究、CT、超音波機器など診断機器の進化など、その成果を挙げればきりがありません。しかし一方で、高齢化に伴うがんによる死亡の増加、難病であるエイズ、生活習慣病である脳卒中、心筋梗塞、糖尿病などにおいて、解決すべき課題も増えてきています。これらの病気は、従来の医学においては、病巣を発見してからそれを直す、“対処医療”によって治療がされてきました。しかしこのような考え方は、病巣を根絶できないなど、どうしても解決できない壁が多くありました。そこで、考え方を変えて、病巣をきわめて初期の段階で発見する“超早期診断”の技術を発展させ、将来には医療を病気にならないための“予防医療”へとシフトさせることを目指しています。



## ナノバイオ・生体材料領域 重要な研究開発課題

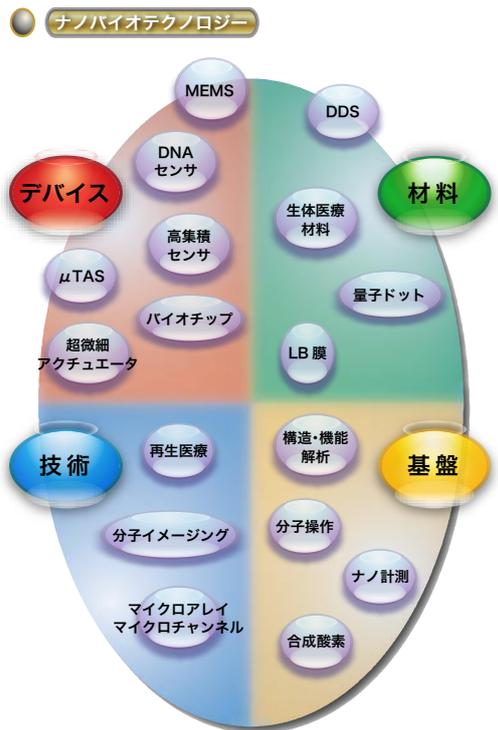
- 生体の構造・機能などを解明する  
分子イメージング技術
- 生体内の分子を操作する技術
- DDS・イメージング技術を核とした  
診断・治療法
- 超微細加工技術を利用した機器
- 極微量物質を検出する技術
- 生体に優しい高安全・高機能性  
生体デバイス
- 再生誘導用材料
- ナノバイオテクノロジーを  
応用した食品

## 最先端医療に欠かせない 異分野の融合のナノテクノロジー

近年、先端医療の研究におけるナノテクノロジーの重要性が高くなってきています。ナノサイズの生体分子を研究する基礎科学である“ナノバイオロジー”と、その応用技術である“ナノバイオテクノロジー”、さらにはそれらの融合領域において、ナノテクノロジーは欠かせないものになっているのです。異分野の融合による相乗効果はナノテクノロジーの得意とするところで、例えば超小型分析システムμTASによる血液などの生体分子の検査、ナノレベルのサイズ制御を行うDDS、さらには次項で取り上げる再生医療などが挙げられます。

**ナノテクノロジー**

超微細加工 ナノ材料 ナノ計測  
ナノイメージング 自己組織化  
量子材料 量子ビーム  
ナノシミュレーション

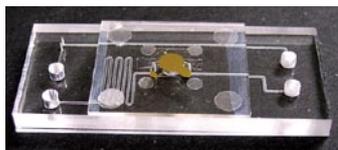


## 難病の病巣を細胞レベルでの発現時にキャッチ

μ TAS (Micro Total Analysis System) ・ MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) が実現するのが病巣の超早期発見です。

μ TAS は超小型の化学分析システムのごとで、誰でも簡単に携帯でき、血液・尿などで、ガンや生活習慣病等の疾病の検査を行うことができます。この技術の高度化・低コストが進めば、例えば毎日簡単に“健康診断”を行うことができ、超早期に病巣を発見することが可能になります。さらに、マイクロニードル（超微小な注射針を施したシート）の技術などにより、肌に貼るだけで瞬時に健康状態をチェックすることも可能になります。

機械制御機能を持つ MEMS は、さらに病巣の超早期撃退をも可能にします。現在のカプセル型薬剤程度の超小型マイクロマシンを口から飲み、体内の健康状態をチェック、病気を発見すればその場で薬を病巣に噴射、撃退します。



マイクロリアクター 23-1

手のひらにのるような小型チップ内に検査対象を流す流路やセンサー、バルブ、化学反応部等を集積化し、この小型チップ内部に流れる流体の分析を行う技術、マイクロリアクター。この技術を用いると、液体ならば一滴以下のごく微量の試料でも、高速に分析することができ、血液検査などの医療分野においても応用が期待されています。



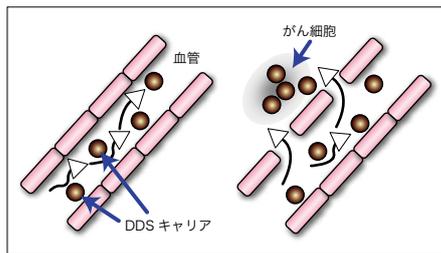
次世代カプセル内視鏡 23-2

## 分子イメージングと DDS の組み合わせで副作用のない治療

分子イメージングは、体内の様々な分子の姿を生きたまま観測する技術で、個別化医療、DDS に大変有効な技術です。現在すでに実用化されている分子イメージング技術に、PET（ポジトロン放射断層撮影法）があります。これは、患者がポジトロン（プラスの電荷を帯びた電子）を放出する薬剤を飲み込むと、これにより体内の断層撮影ができ、ガンの全身検索や、脳や心臓などの疾患を発見する技術です。将来はさらに、量子ドット（P12 参照）と呼ばれる、従来の蛍光剤に比べ蛍光性が高く安定した粒子を用いた分子イメージングが実現するといわれています。この分子イメージングと DDS を組み合

## 病気の部位だけに投薬 副作用のない新治療：DDS

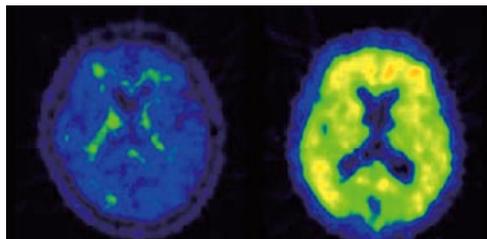
Drug Delivery System : DDS とは、薬を病変部位だけに選択的に運搬する仕組みのことです。DDS 技術の確立は、癌治療などに大きく役立つことが期待されています。がん治療の例について見てみましょう。がん細胞は盛んに細胞分裂を行うことが知られています。そのため、一般的な抗がん剤治療は、がん細胞の分裂を阻害する薬を点滴や経口により体内に取り入れ行われています。しかし、この方法だと薬は体全体に行き渡り、健康でかつ活発に分裂をしている正常細胞の分裂まで阻害してしまいます。そこで、がん細胞と正常細胞を区別してがん細胞にのみ有効な薬の運搬方法が必要となります。がん細胞は正常細胞に比べて血管に対して粗く大きな穴が開いています。この血管に対する穴の大きさの違いを利用し、がん細胞にだけ届く大きさのカプセルに薬を封じ込めようという研究がなされています。そして、ガンに対するカプセルの標的性の向上や材質の改善、サイズの制御などにナノテクノロジーが用いられています。



DDS によるがん治療

DDS キャリアは通常の血管の膜は通れないが、がん細胞近くの血管の膜には大きな穴が開いているため通ることができ、がん細胞だけに薬剤が到達する。

わせると、まさに夢の治療が実現します。分子イメージングにより患部を特定し、さらに DDS を薬物と結合させて体内の特定の臓器や細胞で薬物を放出したり、DDS を病巣と結合した後紫外線を照射し病巣を死滅させたりすることで、副作用のない治療が可能になるのです。



PET による分子イメージング 23-3

脳の断面図。左図は健康者、右図はアルツハイマー症患者。神経細胞を損傷させる“タンパク質ベータアミロイド”という物質の増加を見ることで判定できる。アルツハイマー症患者の脳はこの物質が多いため光って見える。

ナノバイオ・  
生体材料領域

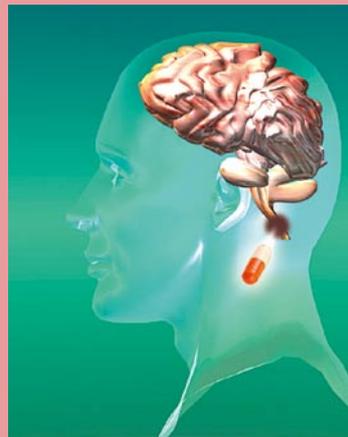


True Nano

## TOPICS!

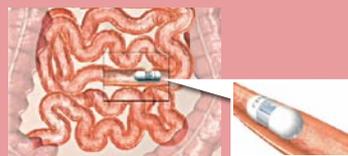
### DDS とは？

DDS (Drug Delivery System) は、癌などの病気に冒された部位だけに薬を効率良く到達させる新しい治療方法のことです。薬による身体全体への副作用の減少が期待できます。



### MEMS とは？

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) とは、極めて微小なサイズで作られた自走エンジンやセンサーなどの電子機械の総称です。カプセルサイズの超早期診断マイクロマシンなど、今後の医療分野でも欠かせないナノテクノロジーです。→詳細は P28・29



23-4

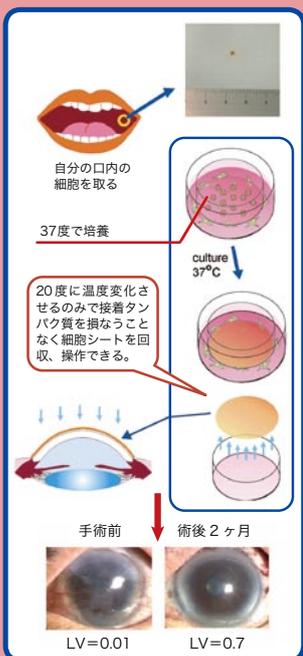
## ナノと自己細胞の融合で 臓器を再生！～再生医療



再生医療の発展には、バイオテクノロジーの進歩はもとより、ナノテクノロジーの進歩が不可欠でした。以下では、最新の再生医療技術と其中でナノテクノロジーが果たしている役割を解説します。

### TOPICS!

自分の口の中の細胞から作った細胞シートで角膜を再生。狭い視野で0.01だった視力が、術後2ヶ月で広い視野で0.7まで視力が回復しました。



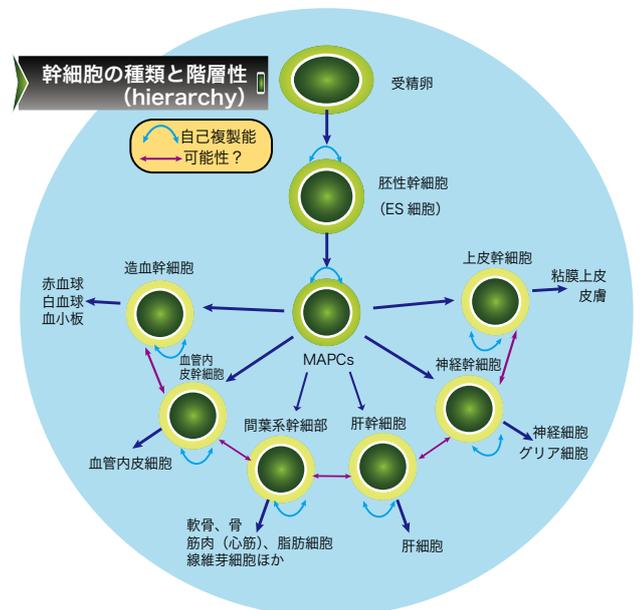
24-1

### 新たな細胞で失われた機能を取り戻す！ 究極の臓器移植技術

近年海外などで臓器移植の臨床例が相次ぎ、失われた臓器の機能を蘇らせる技術として注目されています。しかし臓器移植には、ドナーの不足、生体適合性、さらには倫理問題など多くの課題を含んでいます。これに対し、まったく新しい考え方として、“自分の細胞で自分を治す”技術である、再生医療が重要視されています。再生医療で注目されているのが、「幹細胞」とよばれる、生物の全ての細胞のもととなる細胞です。幹細胞からは、生物を司る様々な臓器や、皮膚、歯、などがつくられますが、これを人工的に行う試みが、再生医療です。例えば、心臓に重大な欠陥を持つ患者は、現代の医療では人工心臓などの人工物か、他人の臓器の移

植などにより治す以外にないですが、再生医療技術が進めば、患者自身から僅かな細胞を採取し、これを培養することで心臓が作られ、欠陥のある心臓の代替として移植することが可能になるわけです。現在のところ再生医療により、皮膚、血管、軟骨、骨髄、角膜などは再生可能などところまで臨床的に示されています。また遠くない将来、複雑な機能を持つ臓器などの再生も可能になるといわれています。

24-2





ナノバイオ・  
生体材料領域

# True Nano

Special Interview

Mitsuo Okano



東京女子医科大学教授  
**岡野 光夫**さん  
細胞シートの世界的権威

イノベーションの鍵は分野融合

研究の概要は？

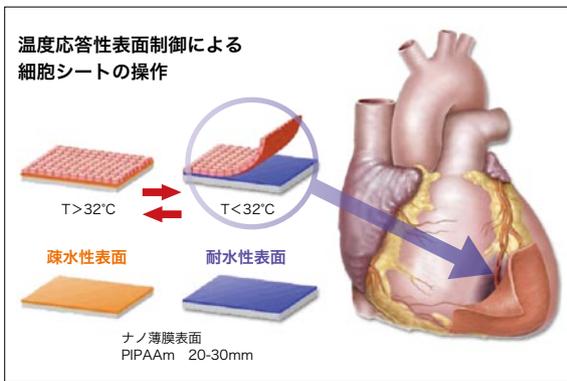
再生医療本格化プロジェクトを進行中でして、細胞シート工学などの再生医療の普及に向けて走っている所です。我々の細胞シートは、温度変化によって細胞間の接着を維持したままシートを操作できるようにしたものです。すでに角膜や心筋、歯周組織の再生に成功しました。

再生医療の普及のポイントは？

イノベーションを創出するためには、医療以外の他の分野との融合が絶対必要です。各科の医師はもちろん、工学、電気、材料、半導体など、いろいろなフィールドの人が統合しなければ、今まで治せない患者を治すことはできません。日本の場合はタテ割りのシステムが完成していますが、このような従来のままのやり方には、再生医療やナノテクなどの新しい世界は当てはまりません。そこで今、東京女子医大（先端医学）と早稲田大学（医・理工・人文科学）が融合した新しい大学院を建設中で、2008年スタートの予定です。

先生の夢は？

大規模細胞工場をつくり、細胞シートを製造して世界中の患者さんを治したいです。それから、新しいことに挑戦する人をどんどん応援していきたいですね。



細胞シートの作成および応用例 25-1  
温度応答性のナノ薄膜表面を用いることにより、培養後 32°Cまで温度を下げるとナノ薄膜表面は親水性になって、細胞をシートのままきれいに剥がすことができる。

なりつつあります。細胞シートは片面が糊となる接着たんぱく質を有しているため、移植部に直接貼って体と一体化でき、角膜上皮移植では、数分程度で接着できるため手術時間の大幅な短縮が可能となります。もう一つのメリットとしては、細胞シートは患者本人の細胞から培養できるため、拒否反応もなくドナー不足に悩まされることもありません。この技術の更なる発展により、未来の手術はより安全により迅速に変化するでしょう。

き渡らせることが困難であるという問題があります。そこで、注目されているのが、どんな細胞にもなれる全能性をもった胚性幹細胞（ES細胞）です。ES細胞は受精後間もない発生初期の幹細胞であり、胚盤胞から採取されます。そして、試験管内で無限に増やすことができます。つまり、ES細胞が実用化されれば、ドナー不足問題の解決だけでなく、全ての組織が修復可能になる可能性を秘めているのです。ただ、このES細胞に関わる技術は、ヒトのクローン作成技術にも繋がるため、研究の進め方については議論もあります。とはいえ、きわめて有望な技術であることは間違いのないでしょう。

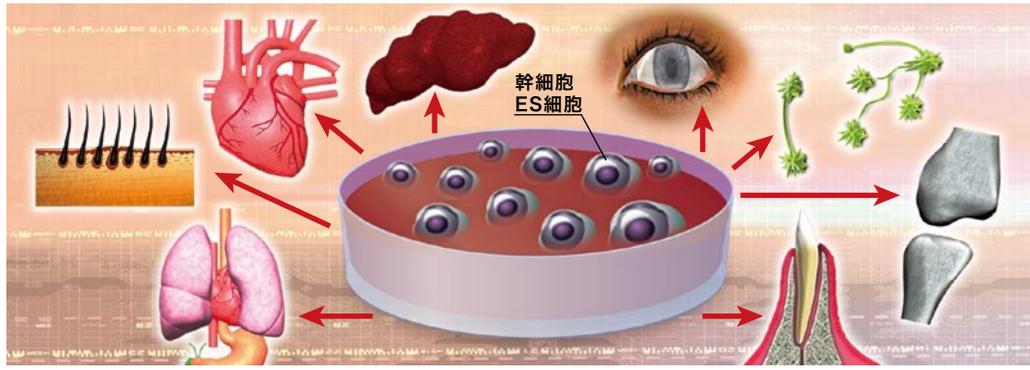
## 移植部にのせるだけで治療完了 ナノ薄膜の上で作られる細胞シート

再生医療の魅力は、自然治癒力では再生の利かない組織を再生させることにあります。細胞シートは、東京女子医科大学先端生命医学研究所長の岡野光夫氏により考案された、細胞のシートを培養で作成し、それを培養皿から剥離し、動かし、疾患組織に重ねることで治療を行う技術です。なぜシート状で作成するのかというと、人間の体の組織や臓器はシート状の細胞からできている構造が基本であり、いろいろな形状に折り重なって血管や臓器などの立体的な組織ができています。現在では、温度により変化するナノ薄膜上で細胞シートを作成することにより、皮膚や角膜、歯根膜や、心臓の筋肉などの細胞シートを作ることができます。この培養表面上に作られた温度応答性ナノ薄膜にナノテクノロジーが活かされています。さらに、性質の違う細胞シートを組み合わせると肝臓や腎臓といった複雑な組織を再生することも可能に

## 臓器再生を一般化する切り札 ES細胞

骨髄や臍帯血が医学的に重要だということは、テレビのコマーシャルでご存知の方も多いことでしょう。それは、骨髄や臍帯血の中には、体の様々な細胞を新しく生み出す“幹細胞”あるいは“前駆細胞”が含まれているためです。骨髄や臍帯血を疾患組織に注射することで、“幹細胞”あるいは“前駆細胞”が作用し、疾患組織の回復を促す治療が始まっています。しかし、骨髄採取は患者やドナーの体に負担を掛けることになり、臍帯血は希少性が高く患者全員に行

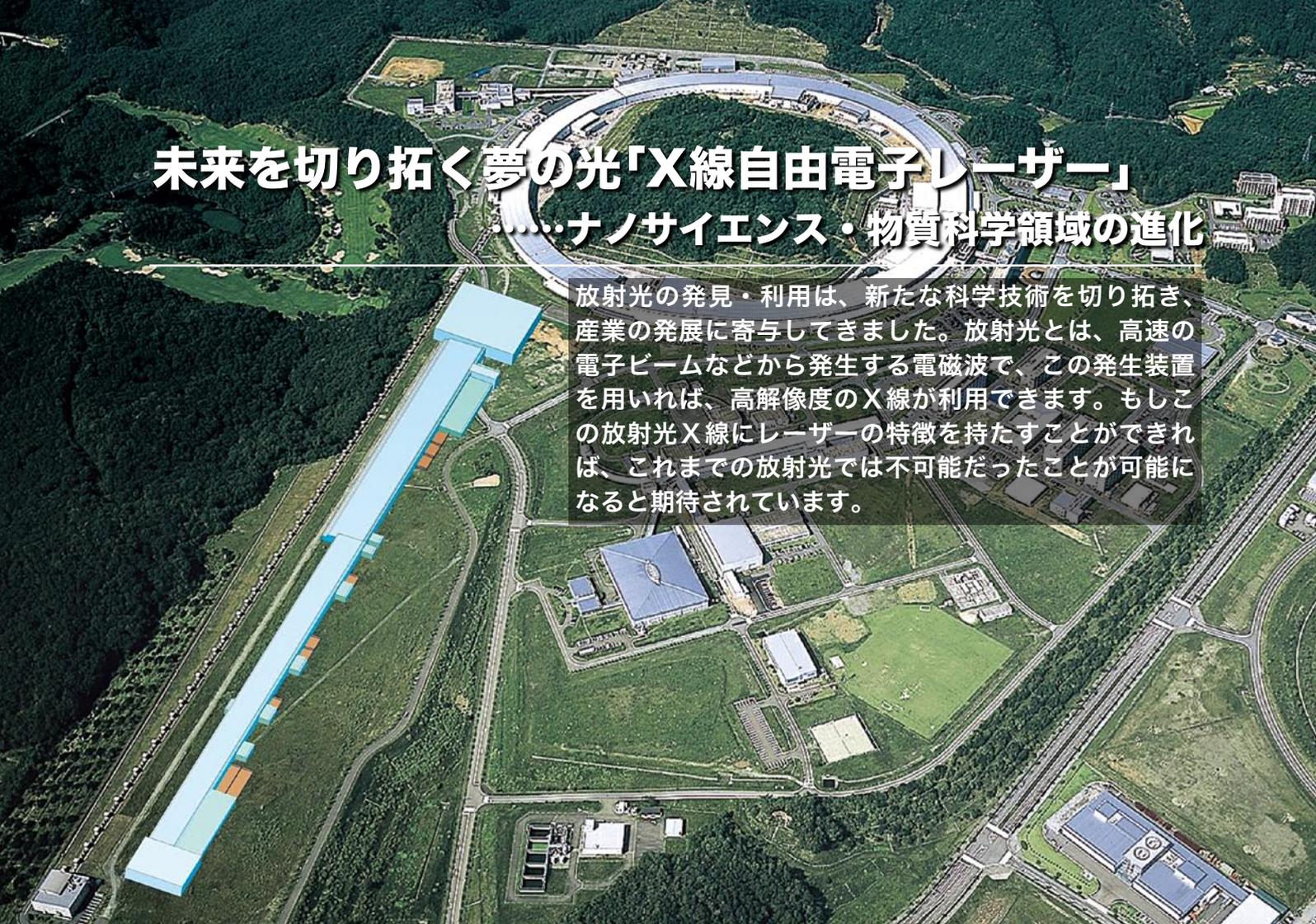
幹細胞とES細胞の応用例 25-2



# 未来を切り拓く夢の光「X線自由電子レーザー」

## ……ナノサイエンス・物質科学領域の進化

放射光の発見・利用は、新たな科学技術を切り拓き、産業の発展に寄与してきました。放射光とは、高速の電子ビームなどから発生する電磁波で、この発生装置を用いれば、高解像度のX線が利用できます。もしこの放射光X線にレーザーの特徴を持たすことができれば、これまでの放射光では不可能だったことが可能になると期待されています。



X線自由電子レーザー装置の外観予想図 26-1

(左の縦長の建屋がX線自由電子レーザー装置。円形状の建屋は大型放射光施設 SPring-8。)



ナノサイエンス・  
物質科学領域

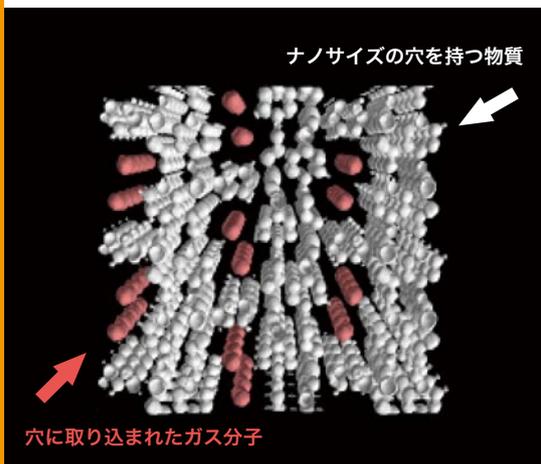
重要な研究開発課題

- 「量子計算技術」「界面の機能解明・制御」「生体ナノシステムの機構解明」「強相関エレクトロニクス」の戦略的推進

### 今までの不可能を可能にする 夢の光、XFEL

X線の発見は、医学だけでなく物理学や化学、工学などでさまざまな可能性を開きました。体の中が透視でできるようになっただけでなく、機械や物質の構造を調べたりすることが可能となったからです。X線は、電波、赤外線、可視光、紫外線などと同じ電磁波の1種で、波長の

長さによって区別されます。X線は分子・原子レベルでの物質の観察にも利用できます。一方、レーザーは単一波長であり、特定の波長において放射光よりもさらに明るく、光の波がそろった光が得られます。その性質を利用して、物質を分析するためにも幅広く利用されています。X線自由電子レーザー (XFEL: X-ray Free Electron Laser) は、放射光X線とレーザー光の優れた性質を併せ持つ「夢の光」です。XFELは短いパルス光であるという特徴も備えているため、一原子レベルで物質が変化する瞬間をとらえることまでできるのです。



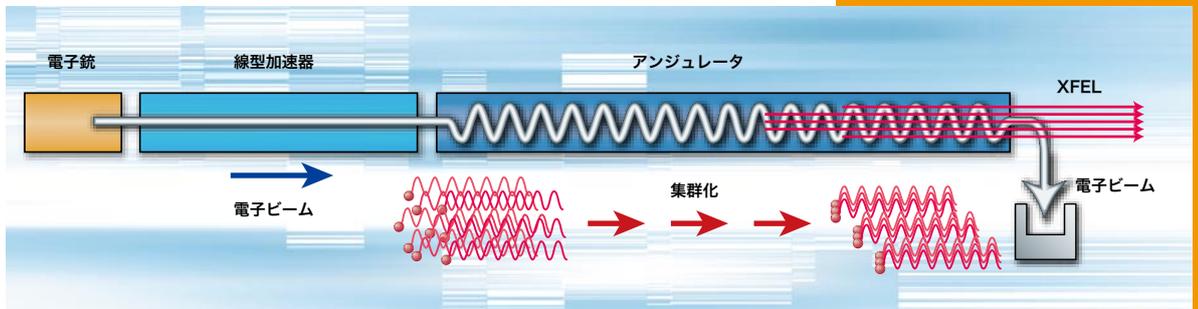
XFELにより、ガス分子を取り込む様子を解析すれば、特定のガス分子を選んで取り込む新しい素材の開発が可能に!



## 日本独自の科学技術で 世界初のXFELを目指す

XFELを利用すれば、全く新しい材料、技術が多数生まれることが期待できます。そのようにして生み出される材料や技術は、私たちの生活を大きく改善することでしょう。たとえば、XFELは、その波長及びパルス幅の短さという特長を活かして、物質をありのまま、原子レベルの細かさで見ることができます。そうした特長により、ナノレベルの細孔に気体分子が吸着される際の相互作用をリアルタイムに直接観察できることから、ナノ細孔への気体吸着を利用した新機能性材料の創成が可能となります。あるいは、細胞内外の重要な物質・情報伝達を担う細胞膜の「膜タンパク質」

の構造を原子レベルで解析することも可能となります。そうなれば、医学研究への恩恵は量り知れません。X線自由電子レーザーの発生装置は、3つの要素で構成されます。電子ビームを産み出す「電子銃」、電子ビームを加速する「加速器」、その電子ビームからX線領域のレーザー光を取り出すための「アンジュレータ」です。理化学研究所では、わが国独自の科学技術を駆使し、欧米の計画よりも短波長のX線レーザーを欧米の計画よりも効率的に発生させる、世界初、世界最小の施設を実現させるための5カ年計画を2006年度より実施しています。



自己増幅 (SASE) 方式自由電子レーザー模式図 27-1

## 「X線自由電子レーザーの応用分野」

非常に素速い原子や分子の動きを直接観察  
有害物質除去触媒など、  
役立つ機能を持つ新素材の開発に貢献！

### 応用分野-1

アセチレンなどの燃料ガスの  
吸着現象の解明

爆発性を持つ各種燃料ガスを安全かつ大量に運搬し、またコンパクトに貯蔵するための吸着材料に応用可能！

### 応用分野-2

シックハウス原因物質  
の吸着現象の解明

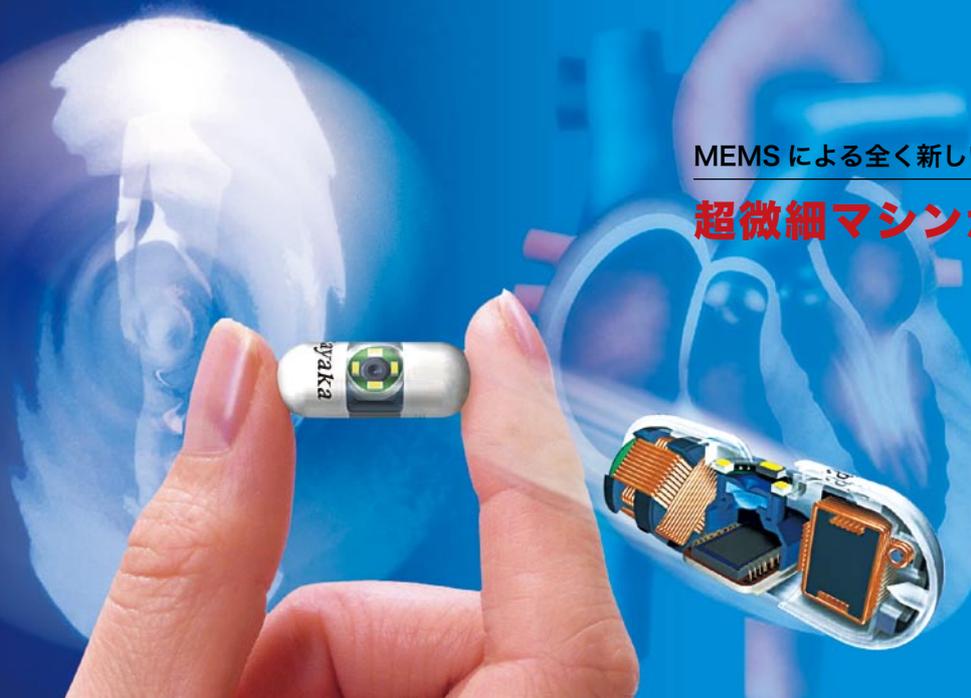
安心して暮らせる家作り。  
シックハウスの原因となる物質を選択的に吸着する対策壁に応用可能！

### 応用分野-3

フロンガスなどの環境汚染物質  
の吸着現象の解明

環境汚染物質を吸着し清浄化するフィルター素材の開発により、環境と経済を両立する社会の構築に貢献！

## 超微細マシンが切り拓く未知の世界。



消化管全体を回転しながら超接写で撮影するカプセル内視鏡がすでに発売されています。取得された映像は一枚につながった長い壁面映像で記録され体内MAPができあがります。

カプセル内視鏡 28-1



ナノテクノロジー・  
材料分野推進基盤領域

重要な研究開発課題

## 【技術基盤】

- 革新的ナノ計測・加工技術
- 量子ビーム高度利用計測・加工・創製技術
- 物性・機能発現指向のシミュレーション・デザイン技術

## 【推進基盤】

- ナノテクノロジーの責任ある研究開発
- ナノテクノロジー・材料分野の人材育成と研究開発の環境整備

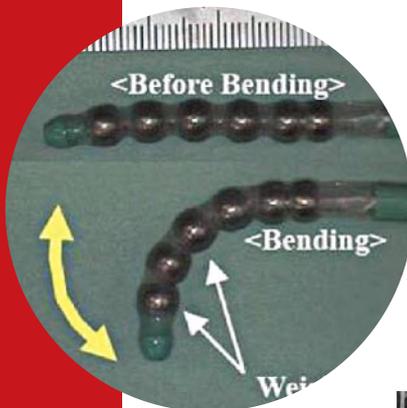
MEMSが広げるトランスディ  
シプリナリな技術発展

分野横断的な技術の典型が、ここで紹介するMEMS（メムス Micro Electro Mechanical Systems）です。MEMSとは、きわめて微小な部品で作られた電子機械の総称で、例えば、携帯電話の落下を感知する微小なセンサーや、小型チップ上で血液検査や薬剤調合を瞬時にを行うマイクロ分析システムなどです。身の回りの多くの製品ですでに使われている技術ですが、ナノテクノロジーの発展によって、より小型化、高性能化が図られています。応用範囲が広がれば、私たちの生活はもっと便利になります。

髪の毛より細かいカテーテル、  
体内で診断・投薬マイクロマシン

バイオテクノロジー・医療分野でもMEMS技術の応用が進められています。例えば、髪の毛より細かいカテーテル。現在の医療現場で使われているカテーテルは、消化管や血管などに挿入し、検査や治療を行う直径1～3mmの細長い管です。カテーテルには高度なMEMS技術が使われていますが、今後ナノテクノロジーの発展により、髪の毛よりも細い、直径0.1mmの超微細カテーテルが実現できます。そうなれば、従来では対応できなかった脳などの毛細血管への挿入も可能になります。またマイクロニードルは、超微細の注射針からなるシートで、従来の注射針にくらべ針が細いため神経への影響が少ないので、痛みを感じることなく医薬の注入や体液の採取が可能になります。さらには、自走エンジン、センサー、医薬などをカプセルに組み込んだマイクロマシンが作られれば、体内でガンなどの病巣を超早期に発見し治療・投薬することも可能になります。

将来は、自走マイクロマシンによる定期健康診断で病気を超早期に発見し、無痛のマイクロニードルによる投薬、超微細カテーテルによる治療などにより、難病が“いつの間にか”治ってしまうような医療が実現することも決して夢ではありません。

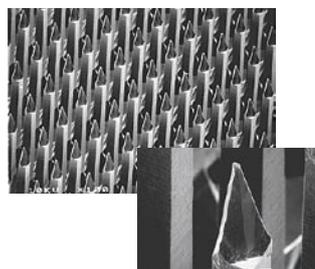


能動カテーテル 28-2

カテーテルと呼ばれる医療用のチューブやガイドワイヤーを用いた血管内治療が盛んに行われるようになりました。低侵襲の診断治療のため、アクチュエーター機能を持つカテーテルの開発が行われています。

マイクロニードル 28-3

指先ほどの大きさのプレートに見える十字のラインには、たくさんのニードルが付いています。そして、このマイクロニードルの表面に薬液を塗りこれを皮膚に突き刺して薬液を体内に導入する研究が行われています。ニードルが小さいために痛みを感じることはありません。





Special Interview

Masayoshi Esashi



東北大学教授  
**江刺 正喜**さん  
MEMS研究開発の第一人者

学内から産業モデルを展開

MEMS技術とは？

例えば普通の集積回路に別の付加価値を入れていくという技術だと私は思う。半導体の微細化を追求していくムーアの法則の流れ以外に、別の付加価値を入れて行く、そういう方向ですね。

日頃の研究と成果は？

私は大学の中でかなり産業界に近いことをやっていて、常に企業の人々が来ていますし、設備もみんなが共同で使っています。今まで100社位の企業から人が派遣されてきて、ライバル企業も一緒なんて事もあります。そうした中から自動車の安全装置やインクジェットプリンタ、ビデオプロジェクタなどの見えない所で大事な働きをしている技術が生まれ、色々な分野で使われています。

研究者になったきっかけは？

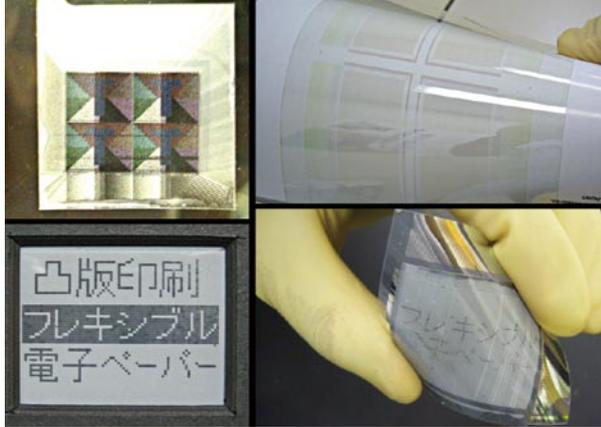
まあ国語が苦手な物理が得意だったということかな。でも学生には人生は成り行きだって言ってるんですよ。自分で将来こういうのやりたいっていてもね、実はその時持っている情報ってのはたかが知れて、どうせ変わっていくもんだとね。だから我々自身も常に勉強をして、できるだけ多くの情報を学生に与えなきゃいけない。そして、やる気のある人を引き上げていかなきゃね。

エレクトロニクス分野の  
発展のボトルネック

人間の五感の代行をする各種ヒューマンインターフェースの分野は、MEMS技術の発展によって飛躍的に前進しています。例えば嗅覚や味覚を代行するセンサー、電子ペーパー・3Dディスプレイなどが実現しそうです。

また、最先端の情報通信技術を導入することで道路交通問題の解決を図る高度道路交通システムITSの開発（国土交通省）においても、MEMSは注目されています。

フレキシブル電子ペーパー 29-1



マイクロ・ナノマシニング



ガラスの深掘反応性イオンエッチングと金属めっきで作られた高密度貫通配線ガラスで、プローバやマルチプローブ記録装置などのアレイ構造のデバイスに用い、制御用の別チップをガラス裏面に取り付ける。



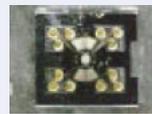
30nmの微小発熱体を先端部に形成したマルチマイクロプローブ。微小発熱体を多数配置することにより、高密度かつ高速なデータ記憶装置への応用を目指す。



直径20nmほどの開口部を形成した近接場光プローブを光ファイバー先端に形成したものの。走査型近接場顕微鏡(SNOM)に用いる。



超音波振動子に加える高電圧をスイッチングするために開発したマイクロリレーに用いるマイクロスプリング。接点として成長させた金めっき下部のレジストを取り除くことでスプリング構造を製作した。



静電浮上マイクロモータによるナビゲーション用高精度慣性センサ（回転ジャイロ）で、2軸の回転と3方向の加速度を検出できる。パイレックスガラスの容器に入った直径5mmのシリコン円板（ロータ）が毎分20000回転する。



マルチプローブを用いGeSbTeの相変化記録媒体に高密度に情報を記録した例。記録媒体の書込部は導電率が約一桁変化するため、これによって画像化したもの。

集積化システム



微小間隙を持つシリコンブリッジ間の空間にカーボンナノチューブを成長させて形成したもの。カーボンナノチューブの電気的特性の測定などに用いる。



Si基板上に製作されたマイクロ燃料電池。携帯機器の電源としての応用が期待されている。そのほか、マイクロ燃料改質器などのマイクロ電源を開発している。



超小型人工衛星の姿勢制御用のマイクロラスタ。マイクロヒータ、固体燃料、電気配線などからなる直径1mmの使い切り固体ロケットが、多数基板上に配置された構造を有しており、ラスタをデジタル制御できる。

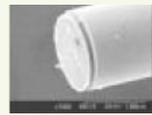
エネルギー型



グリッドワイヤー偏向子を集積化したシリコンマイクロエアタービン。赤外を利用した表面分析に用いることができる。エアベアリングを用いて、10,000rpm以上の回転速度が得られている。



シリコンロストモールドイングによって加工した直径5mmのSiC製マイクロタービン。超小型ガスタービンへの応用が期待されている。同様の方法で、Bi-Sb-Teの微細加工なども可能である。



血管内計測に使用する目的で開発された直径125μmの光ファイバー圧力センサー。光ファイバー先端に形成したダイヤフラムの変位と圧力の関係を光の干渉現象を用いて検出する。

医療応用



血管内部を自由自在に動き患部に到達する目的で開発された能動カテーテル。形状記憶合金コイルを用いた分布型アクチュエーターにより自由度の動きが可能となっている。



通信制御用CMOS集積回路を内蔵した集積化能動カテーテル。配線数を減らすためにCMOS回路を各接続部（リンク部に配置し、3本の通信制御用配線をポリイミドベースのフレキシブル配線により製作した。



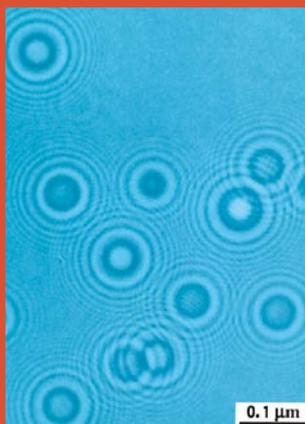
血管内前方視用超音波プローブ。カテーテル前方の超音波画像を得るために製作した8素子の圧電材料からなる超音波プローブ。遅延回路を用いたフェーズドアレイにより、3次元画像を構成する。

# 原子を観る。電子の波を観る。 最先端の観測技術が明かすナノの世界。

見えることで初めて物理学になる。ナノテクノロジーの進化には、高度な電子顕微鏡の存在が欠かせません。電子顕微鏡は日本が誇る世界トップレベルの分野です。世界中がナノの世界に突入した今、より分解能の高い電子顕微鏡の開発が行われています。

## TOPICS!

世界に誇る日本のお家芸  
電子顕微鏡の研究レベル



30-1

外村博士は、従来は観測できなかったような現象を電子顕微鏡によって次々に見出し、世界的な評価を得るに至っていますが、日本の誇る成果はこれだけではありません。日本の電子顕微鏡研究は世界的にも高い評価を得ており、例えばカーボンナノチューブを発見した飯島澄男氏（産総研、名城大）、表面ナノ物理の高柳邦夫氏（東工大）など、世界に誇る研究者も多数活躍しています。

新しい現象や物質を発見するには、何はともあれ“観測する”ことから始まります。日本の誇る電子顕微鏡の研究によって、今後もどんどん新しい成果が生み出されるに違いありません

## 物質の本当の姿の 美しさに魅せられて

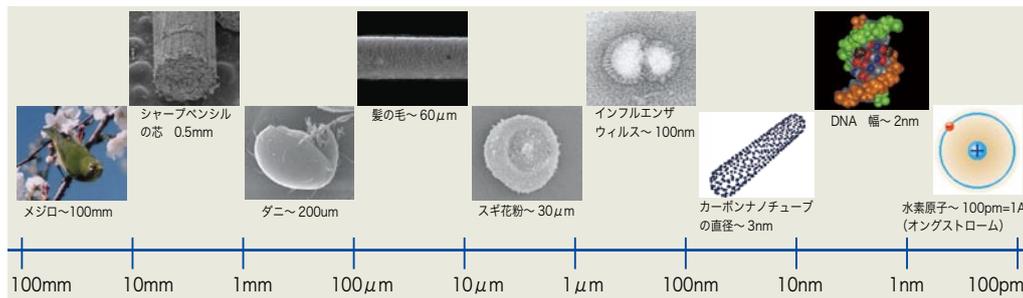
理科などの実験で使う顕微鏡は光学顕微鏡です。光学顕微鏡の分解能は、光の波長に依存し、200nm程度の大きさのものしか見られません。この光学顕微鏡の限界を打破した新しい原理の顕微鏡が、電子顕微鏡です。観測手段を光ではなく、波長が0.002nmほどの電子線にしたものが電子顕微鏡です。したがって理論上は、0.002nmの分解能まで上げることができます。そのおかげで、観測できるものの範囲もぐっと広がります。生物の細胞はもちろん、ウイルス、DNA、ひいては物質の構成要素である分子、原子までもが観測対象となります。ついには量子力学特有の現象も、電子顕微鏡で捉えることができるようになりました。20世紀中



1 MV ホログラフィ顕微鏡 30-2  
50pm以下の金の微細構造も観測できる  
最新型電子顕微鏡。

盤、ナノテクノロジーの可能性を予言した偉大な物理学者ファインマンでも「量子力学の振る舞いを実際に見ることは不可能」と言っていたほどですから、技術の進歩には驚愕すべきものがあります。

## ナノメートルってどれくらい？ 30-3





Akira Tonomura



日立製作所フェロー

外村 彰さん

電子顕微鏡で量子力学の世界を観測

ミクロの美しい世界に魅せられて

研究者になったきっかけは？

ミクロの世界を支配する“量子力学”という法則を大学で習った時、なんと不思議な世界があるのだらうと思ったのが、最初のきっかけです。1965年日立に入って電子顕微鏡の研究をしているうちに、ミクロの世界が非常に美しい世界であることを知って、さらに、のめり込んでいきました。

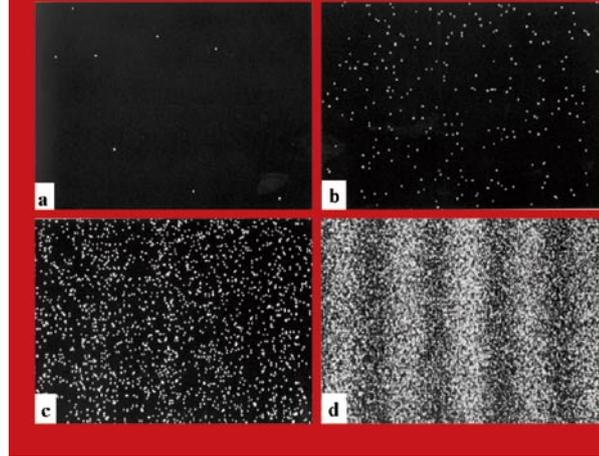
研究の概要・成果は？

電子線ホログラフィー研究を始めたのは1968年、電子の“波としての性質”を使い、ちょうどレーザー光のような“干渉性の良い電子線”を開発し、電子顕微鏡でも見えなかったミクロの物体や量子現象を観察できるようにしました。ファインマンが、実行は不可能だといった二重スリットの実験、ファラデーが実在すると考えた磁力線の観察、量子力学の基礎現象であるAB効果などが実証もできる様になりました。さらに、電子の波動性（位相情報）を使って磁力線や超伝導体中の磁束量子の動く様子が見えるようになりました。

若者へのメッセージを

研究というのは、今まで分っていないことを明らかにしたり、予測しなかったようなことを発見したりすることです。でも、それは簡単ではありません。宝探しの様な所もあり、偶然が左右します。それを見逃さないためには、子供の時の素直さと好奇心と無駄な遊びもしてみる、という気持ちをいつまでも大切にします。これが“研究”だと思います。

<http://www6.cao.go.jp/cstp/s&tmain.html> にログインインタビューを掲載予定。



電子は、1個1個送られ、二重スリットを通った後、検出される((a)と(b))。電子はどちらかのスリットを通るに違いないと考えられるが、電子が汎山積算されると、二重スリットの両側を同時に通って干渉した時に生じる干渉縞が観測される。電子は、2つのスリットを同時に通っていると考えられる。

電子が粒子であり波であることを示す検証実験 31-1

「電子は粒子であり波である」  
量子力学の摩訶不思議な世界

量子力学の世界を現す有名な実験に“二重スリットの実験”があります。これは、2つのスリット（隙間）のある壁を用意して、物質を一方から投射して壁の先で観察する実験です。投射する物質が波の場合、右下図左のように、2つのスリットで波が分かれ、壁の先では2つの波による干渉縞が観測されます。粒子だと、どちらか一方のスリットを通過した粒子の到達が観測されます（右下図中）。

では、微小空間における電子の場合はどうでしょう。電子が1個投射されたただけとしたら、粒子のようにどちらかのスリットしか通れず、干渉はないはずですが。しかし実際には、電子を1個ずつ投射していくと、やがて干渉縞が形成されます(上の写真d)。つまり、1個の電子が、2つの波に分かれてスリットを通過して干渉縞

を生じるのです。これこそ、ミクロの世界で電子が粒子であり波であることを示す、量子力学の摩訶不思議な世界なのです。

このような現象は、理論的にはありうるということがわかっていましたが、実験による証明は技術的に困難であると言われてきました。しかし外村彰氏（日立製作所フェロー）は、電子顕微鏡を用いた実証実験に成功したのです（上の写真）。

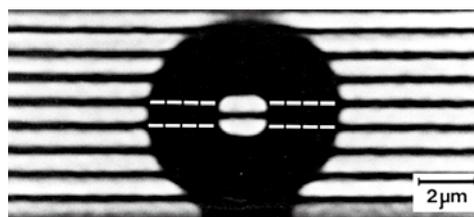


電子の二重スリットの“思考”実験

日本の電子顕微鏡が証明した  
“ベクトル・ポテンシャル”

電子は電場や磁場の中を通ると曲がります。逆に、電子の軌道が曲がらない場合、そこには電場も磁場も存在しないと言えます。ところが20世紀半ばに、物理学者のアハラノフとポアが、「電子は電場も磁場もないところを通っても、“ベクトル・ポテンシャル”という物理的な影響を受ける」という現象（2人のインシナルをとって“AB効果”と呼ばれる）を理論的に証明し、議論となりました。ところがこの理論は実験によって証明するのが難しく、長らく賛否両論がありました。この論争を決着させたのが、外村氏による電子顕微鏡を用いた実験です。外村氏は微細なドーナツ状のコイルを

作り、その外部には磁場が存在しない状態にした上で、ドーナツの穴の中と外側に電子の波を通してみました。すると、磁場も電場もない所を通ったにもかかわらず、波の干渉縞がずれていました（下の写真）。AB効果が実際に観測されたのです。



AB効果の検証実験 31-2

リング状の磁石の中と外部に電子線を通過させると、ベクトル・ポテンシャルによって位相差が生じる(図)。電子の波は、全く電場・磁場のない領域を通過しているので、全く力を受けていないにもかかわらず、観測可能な影響を受ける。

豊かな人材育成と確かな社会基盤の確立

ナノテク・材料分野  
推進基盤領域の進化

## 人材育成～豊かな社会を創る。 未来の科学者を育てる。

日本がナノテク・材料分野で世界のリーダーシップを発揮するためには、若手の人材を育成するための環境整備が不可欠です。次代を担う研究者の育成を支援するさまざまな取組を紹介します。

### ナノテク製造中核人材の 養成プログラム

(経済産業省、産業技術総合研究所)

#### 開発者カリキュラム



ナノテク製造中核人材の養成プログラム  
<http://www.seed-nt.jp/>

製造中核人材育成ポータル  
<http://www.monobiz.jp/>

### 経済産業省 産学連携製造中核人材育成事業

#### 「ナノテク製造中核人材の養成プログラム」(経済産業省、産業技術総合研究所)

我が国が優位性を有する情報家電、燃料電池、ロボット、医療機器、バイオ等の応用分野において、その産業の基盤と創出を支える中小・中堅企業を対象に、「基礎加工技能・技術特殊な要素技能・技術に習熟し、製造技術の高度化を図る人材」及び「豊富なナノ加工プロセスの知識や先端機器を使いこなすノウハウ等を習熟

し、製造現場の技能・技術を統括できる人材」の育成を行います。

本カリキュラムは、産総研での講義および実習と、支援企業5社におけるインターンシップにより構成されます。既に60名余の方が参加しました。

#### 参加者インタビュー

立山科学工業株式会社 寺山 智久さん

半導体の製造プロセス分野におけるフォトリソグラフィは基本プロセスです。電子線リソグラフィのキャリアを積むことで、MEMS分野にも幅広く応用を利かせられると思っています。

サンヨー電子(株)  
営業部  
営業推進グループ長 福田 一さん

当社は、抵抗加熱、スパッタリングなどの簡易型薄膜製造装置メーカーで、FIBのパターン発生装置なども開発・販売担当しています。集束イオンビーム加工観察装置の講義と実習に参加したことで、社内では得られない情報を学べました。実際に装置を自分で扱わせていただいたことで、今後は、パターン発生装置の取り付け方や活用方法について、より説得力を持ってお客様にご説明できると思っています。

立山科学グループ  
先進技術開発センター 五十島 一興さん

精密計測装置の開発を行っているので、電子線リソグラフィのカリキュラムで学んだ知識が試料の精密計測に役立ちます。今後に活かしていきたいと考えています。

立山科学グループ  
先進技術開発センター 田中 清勝さん

当社で担当しているエッチングの前工程としてフォトリソグラフィがあり、このマスクを作るためには電子線リソグラフィが必要不可欠です。そのため、基礎から学ぼうとプログラムに参加しました。プログラムで学んだ内容を元に、電子線を使ってエッチングした際の加工精度を追求していきたいと考えています。

# ナノテクノロジー総合支援プロジェクトの ナノテク人材育成事業 (文部科学省、物質・材料研究機構)

ナノテク・  
材料推進基盤領域



# True Nano

## ナノテクノロジーサマースクール

ナノテクノロジー研究の発展には、現状技術の種々の限界を打破し、まったく新しい概念や論理の技術体系を構築する優秀な若手研究者の人材育成が非常に重要です。ナノテクノロジーサマースクールは、これから我が国および世界をリードする大学院の修士・博士課程の学生を対象として、第一線の研究者に基礎から最先端の研究までを系統立てて講義してもらう事で思考を深め視野を広め、我が国や、世界をリードする研究者集団に育ててもらふことを目的としたものです。本サマースクールでは、少しずつ研究分野の異なる約30名の学生と講師が約2週間、寝・食・学を共にする事によって、講師および学生同士の親密な人的ネットワークを構築し、研究に必要な専門知識を深めています。



平成17年度サマースクール修了式



講義風景 (生命現象を知る)

食事風景

## ナノテクノロジー若手研究者 交流プログラム

ナノテクノロジー分野の優秀な若手研究者を、外国の先進的な研究機関に派遣し、相手国の研究者と議論し、共同研究や研究施設の見学をすることによって知見を深め、親密な研究者ネットワークを構築することにより独創的・先導的研究を遂行し得る若手研究者を育成する事業を実施しています。

### 日英、日瑞 (スウェーデン) ナノテクノロジー若手研究者国際交流プログラム



シンポジウム

ラボツアー

研究者が希望する研究機関を訪問し、約1ヶ月間滞在し、じっくり腰を落ち着けて研究交流を深める個人交流型プログラムです。

### 日米ナノテクノロジー若手研究者 国際交流プログラム

同一のテーマの下、研究分野の異なる10余名の若手研究者が相手国を訪問し、合同シンポジウムを開催して研究交流を図った後、大学・研究施設を1~2週間に渡って訪問し、交流を深める、集団交流型プログラムです。



ラボツアー

シンポジウム

## 物質・材料研究機構 若手 国際研究拠点 (ICYS)

物質・材料研究機構では人材育成と国際化を実現するための新しい研究運営の試みとして、「若手国際研究拠点」(International Center for Young Scientists, ICYS)を設置しています。約15カ国以上の多国籍の若手研究者が一同に会し、英語を公用語としたグローバルな運営体制のもと、自分の研究アイデアで自立的に研究に没頭できる魅力的な環境 (Melting Pot) を作ることで、各自が最大限にその能力を発揮し、異分野や異文化の融合によって独創的な研究成果を生み出すことに取り組んでいます。

ティーブレーク: 自由な交流を進めるため、研究者が決まった場所に毎日集まる機会を提供している。



Krato 教授 (フロリダ州立大学教授、1996年ノーベル化学賞受賞、ICYS エグゼクティブアドバイザー) が ICYS リサーチフェローとの個別面談でアドバイスをしている。



Krato 教授を囲んでティーブレーク



最近のティーブレーク風景

## 参加者インタビュー



横浜国立大学大学院  
一柳 優子さん

日米ナノテクノロジー  
若手研究者  
交流プログラムに参加

物理とバイオという異分野の領域をつなげるきっかけになればという目的で参加しました。アメリカの大学では、大学毎にセミナーを開催していただき、通常のセミナーと比べても活気があり質問も絶え間なかったですね。参加したメンバー同士も意気投合し現在も共同研究を進めるなどの交流が続いています。若い方にはこういったオープンな交流の場には是非積極的に参加してもらいたいです。



東京大学物性研究所  
稲田 智志さん

ナノテクノロジー・  
サマースクール  
(量子分野) に参加

2週間という短い期間でしたが、講義から得られたものは知識だけでなく研究者としての心構え、新しいアイデア、アドバイスなど、価値のあるものばかりでした。夜には皆で1つの部屋に集まり、普段は忙しい先生ともじっくり討論。先生だけではなく、ほかの若手研究者同士の交流があったのも、良き「ライバル」と「共同研究者」を同時に得たようなものですね。



東京医科歯科大学  
山根 説子さん

ナノテクノロジー・  
サマースクール  
(バイオ分野) に参加

普段はDDSの材料研究に従事しています。サマースクールでは、「生命現象を知る」という観点から、普段の忙しい研究活動のなかでは得られないような、貴重なお話をさせていただきました。これから研究を行ううえでも、もう1歩深い考察ができると思います。後輩には、いろいろなことにチャレンジして視野を広げてもらいたいです。

# 責任ある研究開発と国際協力の推進。



## 研究開発の初期段階から 社会影響に取り組む

ナノテクノロジー分野の研究開発においては、革新的な新物質・新機能の発見・発明が期待できますが、一方で、予想できないリスクをもたらす可能性も配慮する必要があります。20世紀までの先端科学技術の研究開発では、この配慮が不足しており、環境汚染や人体影響の課題がおざなりにされ、後になって大きな問題となった例が少なくありません。

21世紀の先端科学技術の研究開発では、もはやこのような過ちを繰り返すことは賢明ではありません。研究開発の初期の段階でこういった問題に対する研究を推進し、また国民に分かりやすい形でこれらの活動を報告することが重要です。さらに、こういった責任ある研究開発を進めるうえでは、競合関係にある海外諸国とも協力しあい、地球レベルでの取り組みが必要となります。

ナノテクノロジー分野では、20世紀の研究開発推進で不足していたところを鑑みて、国内外において研究開発の初期の段階からの社会影響の研究と標準化活動が行われています。以下では、これらの取り組みについて説明します。

## ナノテクノロジーの 社会影響の研究

アメリカでは、ナノテクノロジーの国家戦略を敷いた2000年の「National Nanotechnology Initiative」(国家ナノテクノロジー・イニシアティブ)発足当時から既に社会影響の研究が進められ、ナノテクノロジー研究開発戦略の重要テーマとなっています。具体的には各種ナノ物質の環境や人体への影響についての研究開発を進めるとともに、科学者・政府・民間企業・消費者団体などによる意見交換も行われています。

ヨーロッパでも、ナノ粒子の健康影響に関するプロジェクトとして、NANOSAFE、NANODERMが2003年にスタートしました。

日本も、これら海外諸国と協調しながら、ナノテクノロジーの社会影響に関する調査研究が国家プロジェクトで進められています。その先駆けが平成17年度の文部科学省科学技術振興調整費調査研究「ナノテクノロジーの社会受容促進に関する調査研究」で、管轄省が異なる4国立研究所が中心になり、産学官からナノテクノロジー、安全衛生、社会科学など多領域の専門家を集めて討論を行い、施策提言を作成しました。

科学技術振興調整費 国際シンポジウム  
Exploring the Small World: Role of  
Public Research Institutes  
(2006年2月1日)  
主催:  
(独)産業技術総合研究所  
(独)物質・材料研究機構  
(独)国立環境研究所  
厚生労働省国立医薬品食品衛生研究所





Special Interview

Jyunko Nakanishi



産業技術総合研究所  
化学物質リスク管理研究センター

中西 準子さん

リスク評価研究の第一人者

ナノテクのリスク評価に取り組む

新しい技術の健全な普及のために産総研はナノテクノロジーの分野では世界的に進んだ研究所です。であれば、そのリスク評価も進んで研究すべきではないかと考えてはじめました。ナノテクノロジーは素晴らしい新しい技術ですが、新しい技術には新しいリスクがある可能性も高いのです。かと言って、こればかり恐れていますと、新しい技術は何も生まれなくなってしまう、人類が抱える環境や資源の問題も解決できません。そこで必要なのはしっかりとリスク評価です。リスク評価結果を新しい技術の1つのスペック(性能)として示すことが必要なのです。

ナノテクのリスク評価プロジェクト

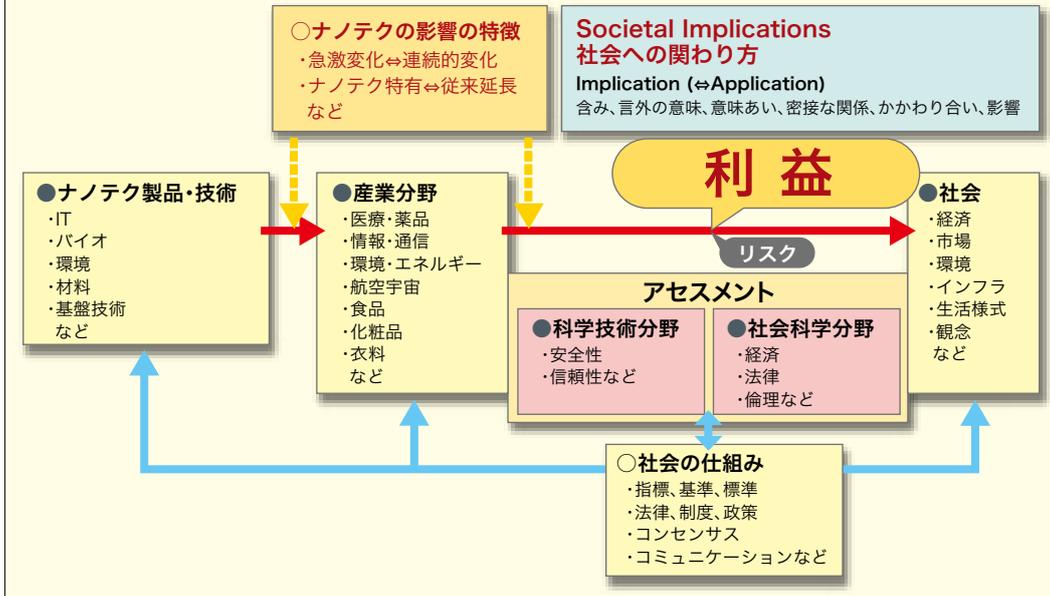
今までの環境研究は、製造現場とは異なる立場の人によって行われてきました。しかしこれからは、環境やリスクの専門家に加え、ものづくりの現場の専門家、計測の専門家と一緒に取り組む必要があります。平成18年度からはじまったナノ粒子のリスク評価プロジェクト(NEDO)はひとつのモデルです。これは世界的にも大規模なもので、欧米にも引けをとらないものです。

先端技術開発を目指す方へ

先端技術のいいところはどんどん研究してもらいたいです、その一方でリスク評価はきちんと行う時代です。その意味でも技術者が広い視野と知識を持つことが大切です。但し、まずは1つの分野をしっかりとやるのが大事ですね。

<http://www6.cao.go.jp/cstp/s&main.html> にログインインタビューを掲載予定。

ナノテクノロジーが社会にもたらす諸影響  
Societal Implications of Nanotechnology



ナノテクノロジーが社会にもたらす諸影響 35-1

国際標準化基準の  
確立が不可欠となる

ナノテクノロジーについては、“どのような物質が” “どの程度の量で” “どのくらいの環境・人体影響があるか” を具体的に検証し、一般に対して公表していくことが重要です。これらの検証を行うにあたっては、国内外の研究者が同じ基準で研究を進めることが前提となります。このために必要なのが、ナノテクノロジーの様々な用語分類、計測、安全性などの標準化です。日本では既に、ナノテク標準化調査委員会が組成されこれらの項目についての標準化が議論されています。また ISO (国際標準化機構)、CEN (ヨーロッパ標準委員会)、ANSI (全米標準化協会) などの海外の主要な標準化機関との連携も図られています。これらの活動は華々しい研究開発と違い地味なものです、ナノテクノロジーという21世紀の人類の発展に不可欠な先端技術の実用化にあたっては必要なので、この活動を通してはじめて、国民の皆さんが安心して利用できる技術が確立されるのです。





# 「西暦 2035 年、こんな未来が待

今、日本が重点的に推進している「ナノテク・材料」分野。この冊子で紹介したのは、なかでも代表的な科学技術で、このほかにも多くの研究開発が行われています。こうした研究が実を結び、ナノテク・材料技術がどんどん応用されたら、私たちの社会や生活はどんな風になるのでしょうか。

例えば西暦2035年、こんな未来が私たちを待っているかもしれませんね。

## 太陽電池ディスプレイ (P.15)

高性能太陽電池の実現で、小面積でもどこでも貼れるディスプレイが実現。

## 和傘太陽光発電 (P.15)

様々な色の色素増感型太陽電池を、複雑な表面に塗布した和傘。

## 透明金属、超高密度ナノガラス (P.20-21)

小型で薄いディスプレイの未来のコンピュータ。

## 新触媒・水素貯蔵技術 (P.14)

ナノテクノロジーによる全く新しい触媒・水素貯蔵技術で燃料電池は普及段階に。

## 多くの分野が注目する革新材料、フラーレン (P.16)

IT、バイオ・医療、環境、エネルギーなど、あらゆる分野に革新材料フラーレンが応用される

## 高温超伝導リニアモーターカー (P.12)

高温超伝導体の実用化・量産化が進み、速くて静かなリニアモーターカーが実現。

## 量子コンピュータ (P.12-13)

天気予報は、量子コンピュータにより予報精度が大幅に向上。

## 半導体技術を応用した

## 燃料電池自動車や自転車が普及 (P.9)

燃料電池の商品化が実現し、燃料電池自動車や自転車が普及。

## 未来型コンピュータ (P.9)

超高速・小型化・キーボードレスの未来型コンピュータ。

## MEMS (P.28-29)

自走式マイクロマシンで超早期診断が実現、メタボリックシンドロームも激減。

## MEMSが実現する

## 超微小センサー (P.28-29)

超微細マシンであるMEMSにより、米粒大以下の超微小センサーが実現する。例えば、あらゆる携帯電話に“温度湿度センサー”を取り付ければ、ものすごく精度の高い天気予報が実現するかも。

## 電子顕微鏡技術により見ることが できるナノの世界 (P.30-31)

日本の誇る電子顕微鏡技術。ついに量子効果を捉えることにも成功。これからは信じられない世界を見せてくれることは間違いない。

## 未来への希望は人がつくる。政府による人材育成事業。(P.32-33)

いい技術はいい研究者によって創造される。いい研究者を育てるための環境づくりは、明るい未来を切り開く。ナノテクノロジー・材料分野でも、政府によって様々な人材育成事業が行われている。

## これからの研究開発に 必要な責任 (P.34-35)

新技術は多くの恩恵をもたらすが、一方で予測できない問題が起こることもある。これからは、新技術の利益はもとよりリスクもしっかり管理し、責任ある研究開発活動を行う必要がある。



# っているかもしれませんね…。」



KEY WORD INDEX…図版に示した応用が  
予測されるナノテク・材料技術の掲載ページ



#### 新エネルギー普及でキレイな空(P.14)

石油に代わる太陽光・風力・バイオマス・水素エネルギーなどの新エネルギーにより、大気汚染のないキレイな空が実現。

#### CNTを用いた飛行機(P.16)

超軽量・高強度材料であるカーボンナノチューブを用いた、超軽量飛行機。

#### CNTを用いた宇宙エレベータ(P.16)

鉄鋼の数10倍の強度を持つカーボンナノチューブにより実現する、静止軌道に到達するエレベータ。

#### 光触媒をコーティングしたビル(P.18-19)

既に実現化している光触媒も2035年には急速に普及。高機能化も進み、超高層ビルの壁もメンテナンスフリーに。

#### X線自由電子レーザーで

#### 環境汚染物質吸収材の開発(P.27)

X線自由電子レーザーによる環境汚染物質の吸収材の開発で、大気汚染のない環境が実現。ぜんそく、気管支炎とも無縁に。

#### いつまでも元気な高齢者

#### $\mu$ TAS・DDS(P.23)・MEMS(P.23)

超早期診断・予防医療・先端医療で、いつまでも元気な高齢者が日本の産業を支える。

#### 再生医療で視力回復(P.24)

再生医療による未来の眼科治療で、眼の病気や視力低下も無縁。

#### 病気の超早期診断を実現する

#### $\mu$ TAS(P.23)

超小型化学分析システム $\mu$ TASが、超早期の病気発見を実現、健康にほとんど影響のないうちに病巣を取り除く。

#### 分子イメージングとDDSが

#### 実現する、副作用のない癌治療(P.23)

病巣発見にはレントゲンに代わり分子イメージング技術が普及。ほんの数ミリの癌も発見する。これに癌細胞だけに作用する未来の薬運搬システムDDSを投与すれば、副作用のない癌治療が実現する。

#### 次世代薄膜ディスプレイ(P.11)

有機トランジスタが実現する、電子ペーパー新聞。

#### 超高性能半導体(P.10-11)

ナノテクノロジーにより半導体の微細化・高性能化は極限に。

# 合い言葉は「True Nano」

## 対談

阿部博之氏  
&  
美馬のゆり氏

科学技術基本計画の中で重点的に推進されているナノテクノロジー・材料分野。今、なぜナノテクノロジーが必要なのか。また、ナノテクノロジーによって日本は、そして私たちの未来はどう変わっていくのでしょうか。

世界にインパクトを与える研究開発を

### 日本が重点的に推進する ナノテクノロジー・材料分野

**美馬** 先生は総合科学技術会議という国の科学技術政策の中心で議員をしていらしたんですが、そこではどういう活動がなされているのでしょうか？

**阿部** 日本をはじめ各国とも大競争時代なんですが、科学技術は国の未来に非常に大きな影響を与えます。総合科学技術会議というのは、総理と関係閣僚と私どものような有識者議員で構成されていて、毎月一回、総理が議長を務め議論をして科学技術の基本政策を決めるという仕事をしております。そして、そこで決めたことを各省で具体化を図って行くというスタイルです。

**美馬** その政策の中にナノテクノロジー・材料分野があるわけですが、これは日本が強い分野ですね？

**阿部** はい。科学技術を推進していく場合、5年ごとに基本計画を作っていくのですが、今はその第3期に当たります。ナノテク・材料は、平成13年～17年の第2期から重点分野となり、今期も継続して重点的に推進する分野で、今世界のトップレベルです。

**美馬** 先生はこの分野にかなりの思い入れがあるとうかがいましたが（笑）

**阿部** いや（笑）、決してこの分野だけが大事だと言うわけでは。ナノテク・材料というのは、ある意味であらゆる科学技術の基盤的な部分を受け持っていると思う。これまでの科学技術の流れを振り返ると、小さいものの特性を活かす方向で設計をしたり、新しい製品を開発しています。一番の例はコンピュータですね。どんど

ん小さくなって、高機能になっている。それ1つとっても、ナノテク・材料はあらゆる科学技術の基盤をなしているといえます。

### ナノの特性を生かし新しい世界を 開拓することが「True Nano」

**美馬** 最近、化粧品などで、もう、世の中ではナノという言葉が広く使われ始めていますが、実際にはよくわかっていない人が多いと思います。今後、生活に直接関係してくるものもどんどん現れてくる気がするのですが…

**阿部** ナノテクノロジーというキーワードが社会に浸透するのは良いことですが、反面、何でもナノと名前を付けているのでは、という反省点も指摘されています。そういう議論から生まれたのが「True Nano」という言葉です。

**美馬** 「True Nano」は、この冊子のタイトルにもなっていますね。

**阿部** ええ。ナノというのは単位であって、最高水準の電子顕微鏡を使えば、今は何でもナノサイズまで見られます。でも、見えることと、その特性を本当に利用しているかは別物ですね。本当にナノの特性を活かしてまったく新しい産業分野を作り上げるとか、新しい科学技術を開拓するとか、そういうものを「True Nano」と呼ぼうと提唱しています。

**美馬** 非常に面白いですね。つまりナノという単位そのものは私たちの生活の中に以前からある、ただそのことと、ナノの特殊な性質を本当の意味で活かし、実際に社会や産業に役立っているかは別である。そういう共通意識を研究開発するときに皆が持ち、その合い



前内閣府総合科学技術会議議員  
阿部博之

### Profile

1936年生まれ。東北大学教授、工学部長・工学研究科長、同大総長を歴任し、2003年～2006年の間、総合科学技術会議議員に就任、ナノテクノロジー・材料分野の分野別推進戦略を策定する。

言葉が「True Nano」ということですね。

**阿部** ええ、世界に大きいインパクトを与えるような、従来の延長線上にない研究開発や、新しい産業を興すこと。それが「True Nano」なんです。

**美馬** 日本のナノテク・材料は、現在、実際の産業でどのように利用されているんでしょうか？将来的な成果も含めてお聞きしたいです。

**阿部** この冊子でも取り上げていますが、光触媒やカーボンナノチューブなど、この分野には日本独自の技術がたくさんあります。例えば、今日本で世界一のコンピュータを作ろうというプロジェクトが動いていますけど、これもナノテク・材料なしにはできません。もう一つは、ジェット旅客機の胴体や翼を、従来の金属ではなくナノテクによる新しいカーボンで作ることが、1年後には実現するところまで来ているんですよ。

### ナノテク・材料は横断的な学問 色々な分野を融合して進化する

**美馬** 中高校生の中には、理数系に興味があって、これから研究者、技術者になりたい人も多いと思うんですね。例えばこの冊子を読んでナノに興味を持って大学に進もうと思った時には、どういう学科に進めばいいんでしょうか。

**阿部** ナノテク・材料は、あらゆる科学技術の基盤をなしていると言いましたが、そういう意味でも横断的に考えていいと思います。ある人は物理から入ってくる、ある人は化学や生物から入ってくる、どこから来てもまったく新しい

ものを作り上げる世界にチャレンジできる。これは若い人の特権ですね（笑）

**美馬** 新しい分野、学問が興ってくる時ってどういう時かなって考えてみると、今まで信じていたものではどうしても説明がつかない時、解決できない時に、ちょっと横の分野や同時代で起こっている全体を見渡してみることで解決の糸口が見つかってくることがあります。違う分野であるけれども、そこでも行き詰まりがあって、融合したら何かがつつと道が見えてくる。それがブレイクスルーとなる。今のお話ですと、ナノテク・材料の今までなかった新しい世界というのは、そこを探っていくことによって色々な分野全体に影響が出る、そんな感じがします。

**阿部** その通りだと思います。世の中に新しい学問や科学分野が出てくるというのは、断定的に言えばすべて融合分野なんですね。志を持つ若い人たちが、いろんな分野を勉強するわけですが、従来の教科書に載っていることを勉強しただけでは、飛躍的に新しいものは出てこない。他の分野にどんどん触れて切磋琢磨する。その中から新しいものが生まれてくる。そうした意味でも、ナノテクはすごく夢のある分野といえますね。

**美馬** そうですね。今まで先人たちが拓けなかった新しい分野に踏み込むには、分野をまたがった研究が必要ですね。今日お話を伺っていて、私が高校生のときにこういう情報を知っていたら道が変わっていたかもしれないと思いました。

先生、今日はありがとうございました。



公立ほこだて未来大学教授  
美馬のゆり



### Profile

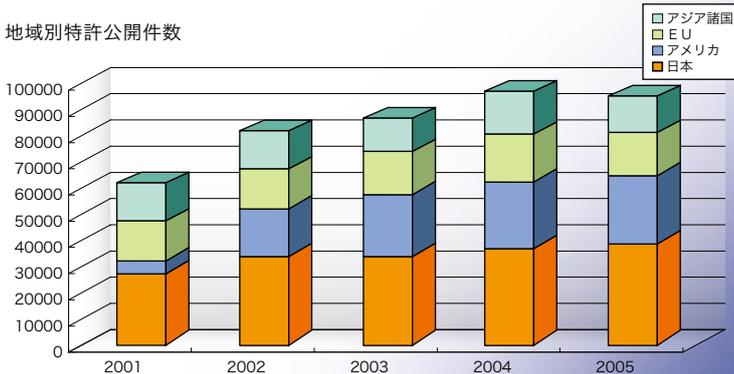
1960年生まれ。公立ほこだて未来大学教授。専門は認知科学。元日本科学未来館副館長。文部科学省等の委員を歴任。科学技術の理解増進、人材育成に尽力している。

# 21世紀に花開くナノテクノロジー

## 数字でみる研究・開発

### ナノテクノロジー関連特許

地域別特許公開件数



特許は研究開発成果の事業化を示す最も分かりやすい指標です。今世紀に入りナノテクノロジー関連の特許は世界的に増加傾向にあり、そのなかでも日本はトップの数量を誇っています。

文部科学省 ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンター

航空・輸送機器分野  
**1,500億円**  
航空機用材料、燃料電池

燃料電池・エネルギー分野  
**4兆4,300億円**  
燃料電池自動車、家庭用燃料電池  
コジェネレーションシステム、  
民生用/業務用燃料電池  
コジェネレーションシステム

**2030年: 26兆**  
**ナノテク搭載製品**

エレクトロニクス分野  
**18兆135億円**

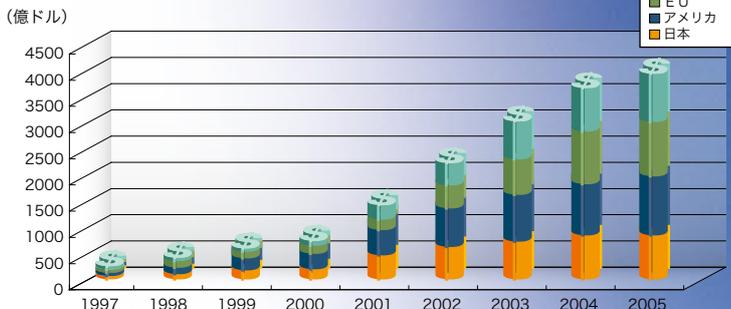
FED/SED、有機/無機EL、  
データプロジェクター、  
インクジェットプリンタ、ユビキタス端末、  
量子/分子コンピュータ

計測評価装置分野  
**2,456億円**

SPM、FIB、SEM、TEM、SIMS、  
粒子径測定装置、TOF-SIMS、光電子分光装置、  
Auger装置、ラマン分光測定装置、近接場光学顕微鏡、  
フェムト秒レーザー、エネルギー分散型X線分析装置  
ナノテク製造(加工)サービス、  
ナノテク分析サービス

### 予算推移

地域別 R&D 予算推移



2000年のアメリカ・クリントン大統領「国家ナノテク構想」以来、各国はナノテク関連予算を大幅に増やし今日に至っています。特に日本とアメリカはそれぞれ毎年10億ドル規模の予算を計上しています。

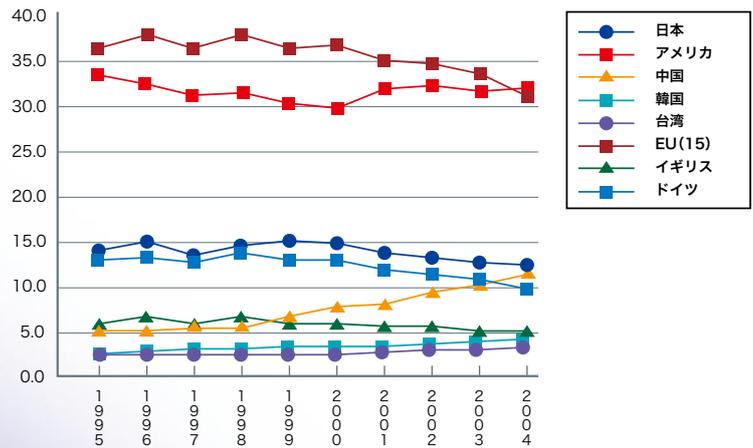
文部科学省 ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンター

**2020年: 13**  
2000~2005年の研  
FED/SED、ナノガ

**2005年: 2**  
ナノテク先行  
携帯電話、フ  
リチウムイオ

# ジー・材料の芽 発・産業動向

## ナノテクノロジー論文数シェア



ナノテクノロジーに関する基礎研究の成果の指標となる論文数の国際比較では、圧倒的にアメリカとEUが多く、日本は引き離される傾向にあります。

(独) 科学技術振興機構

### 環境分野 800億円

ナノフィルタ、メンブレンリアクター、  
極微量分析センサ

### 超精密製造・加工分野 6,792億円

ナノ成膜用CVD、ナノ成膜用PVD、  
インクジェットプリンタ(産業用)、エッチング装置、  
ナノインプリント装置、次世代ステッパ、EB装置、  
マイクロ流体デバイス、ナノ金型、  
微粒化装置、超臨界装置

### バイオ・医療・化粧品分野 1兆1,400億円

DDS、診断検査薬、人工生体材料、  
内視鏡、ポイントオブケアシステム、  
ナノ化粧品、ナノ食品

### 触媒・塗装・材料分野 1兆5,262億円

カーボンナノチューブ、フラーレン、  
ナノ繊維、ナノコンポジット、ハイテンション鋼板、  
光触媒材料、ナノ磁性材料、ナノ金属、電波吸収体、  
ナノセラミックス、ナノガラス、分離膜材料、  
フォトニック結晶、ナノ粒子、  
ナノ標準粒子

### 兆4,369億円

研究成果が市場を形成  
ラス、燃料電池...

### 兆8,085億円

商品が次々に登場  
ラッシュメモリ、  
ン電池、化粧品...

経済産業省調べ

## 国際競争力評価

| 技術領域 | 合成とアセンブリ | バイオテクノロジーからのアプローチによる応用 | 分散とコーティング  | 触媒、高表面材料 | 機能的ナノデバイス | 高密度の新素材の創製 |
|------|----------|------------------------|------------|----------|-----------|------------|
| 1位   | アメリカ     | ヨーロッパ・アメリカ             | ヨーロッパ・アメリカ | アメリカ     | 日本        | 日本         |
| 2位   | ヨーロッパ    | 日本                     | 日本         | ヨーロッパ    | ヨーロッパ     | ヨーロッパ・アメリカ |
| 3位   | 日本       |                        |            | 日本       | アメリカ      |            |

アメリカの世界技術評価センターによる、ナノテクノロジーの技術領域別の国際競争力評価によると、日本は「機能的ナノデバイス」「高密度の新素材の創製」で1位となっています。日本のエレクトロニクス産業と材料産業が認められた格好です。今後はこの分野の強みを引き続き維持するとともに、海外に比べ弱いといわれる分野の強化も必要です。

世界技術評価センター

# 出典・参考文献

## P6 ~ P7

- 6-1 「本多光太郎」(財)本多記念会
- 6-2 「加藤与五郎」(財)加藤科学振興会
- 6-3 「武井武」(財)加藤科学振興会
- 6-4 「久保亮五」久保千鶴子氏ご提供
- 7-1 「STM」東京大学 荒川・岩本研究室
- 7-2 「フラーレン」名古屋大学 斉藤研究室
- 7-3 「カーボンナノチューブ」名古屋大学 斉藤研究室

## P8 ~ P9

- 8-1 「未来型サイドテーブル PC」富士通株式会社
- 9-1 「燃料電池自動車 (IONIS)」スズキ株式会社
- 9-2・9-3 「第4世代携帯電話」株式会社エヌ・ティ・ティ・ドコモ
- 9-4 「i-swing」トヨタ自動車株式会社
- 9-5 「スーパークリーンルーム」  
産業技術総合研究所 次世代半導体研究センター(あすかプロジェクト)

## P10 ~ P11

- 10-1 「SPM リソグラフィ」東京工業大学 小長井・山田研究室
- 10-2 「大画面・高スループットナノインプリントシート」  
株式会社日立製作所
- 10-3 「ナノインプリントによる転写例」日立研究所
- 11-1 「単結晶シリコンインゴット」株式会社 SUMCO
- 11-2 「ナノワイヤの作成」  
独立行政法人 物質・材料研究機構 ナノシステム機能センター  
原子エレクトロニクスグループ
- 11-3 「有機トランジスタ」東京大学 染谷研究室

## P12 ~ P13

- 12-1 「量子力学の基本の式:  $H\psi = E\psi$ 」  
サイエンス・グラフィックス(有)
- 12-2 「InGaAs 量子ドットの構造」東京大学 荒川・岩本研究室
- 13-1 「単電子トランジスタ」独立行政法人 理化学研究所
- 13-2 「単電子トランジスタ」独立行政法人 理化学研究所

## P14 ~ P15

- 14-1 「水素ステーション」財団法人 日本自動車研究所
- 15-1 「太陽光発電」京セラ株式会社
- 15-2 「燃料電池車」本田技研工業株式会社
- 15-3 「燃料電池ハイブリッド車 Fine-X」トヨタ自動車株式会社
- 15-4 「燃料電池搭載ノート PC」株式会社日立製作所

## P16 ~ P17

- 17-1 「カーボンナノチューブの想定用途」  
文部科学省 科学技術動向研究センター
- 17-2 「電解放出ディスプレイの原理」  
サイエンス・グラフィックス有限公司
- 17-3 「CNT 複合材の精密歯車への応用」  
信州大学 遠藤研究室

## P.18 ~ P19

- 18-1 「東海道新幹線 N700 系の喫煙ブース」東海旅客鉄道株式会社
- 18-2 「光触媒の機能」財団法人 神奈川科学技術アカデミー
- 19-1 「光触媒の応用用途」財団法人 神奈川科学技術アカデミー
- 19-2 「光触媒の防汚性」株式会社 光触媒研究所
- 19-3・19-4 「光触媒の超親水性」東陶機器株式会社

## P20 ~ P21

- 20-1 「曲がるガラス」京都大学 平尾研究室
- 20-2 「フィルム液晶ディスプレイ」NHK 放送技術研究所
- 20-3 「有機 EL フレキシブルディスプレイ」NHK 放送技術研究所
- 20-4 「Chest-type PC」富士通株式会社
- 21-1 「次世代型薄型ディスプレイ SED」キヤノン株式会社
- 21-2 「超大容量光ディスク」京都大学 平尾研究室
- 21-3 「未来型ターンテーブル PC」富士通株式会社
- 21-4 「ウルトラモバイル PC」富士通株式会社
- 21-5 「フェムト秒レーザーを用いた実験装置」京都大学 平尾研究室
- 21-6 「フェムト秒レーザー加工 (3次元の花)」  
京都大学 平尾研究室

## P22 ~ P23

- 23-1 「マイクロリアクター」セイコーインスツル株式会社
- 23-2 「次世代カプセル内視鏡」株式会社アールエフ
- 23-3 「PET による分子イメージング」  
独立行政法人 科学技術振興機構
- 23-4 「次世代カプセル内視鏡の使用例」株式会社アールエフ

## P24 ~ P25

- 24-1 「細胞シートの作成および応用例」  
東京女子医科大学 岡野研究室
- 24-2 「幹細胞の種類と階層性」細胞工学  
(著者 / 中畑龍俊 2003 年発行 /Vol22.No.5/P512-515)
- 25-1 「細胞シートの作成および応用例」  
東京女子医科大学 岡野研究室
- 25-2 「幹細胞と ES 細胞の応用例」  
東京女子医科大学 岡野研究室

## P26 ~ P27

- 26-1 「X 線自由電子レーザー装置の外観予想図」  
文部科学省 量子放射線研究推進室
- 26-2 「XFEL」文部科学省 量子放射線研究推進室
- 27-1 「自己増幅 (SASE) 方式自由電子レーザー模式図」  
文部科学省 量子放射線研究推進室

## P28 ~ P29

- 28-1 「次世代カプセル内視鏡」株式会社アールエフ
- 28-2 「能動カテーテル」東北大学 江刺研究室
- 28-3 「マイクロニードル」名古屋大学 佐藤研究室
- 29-1 「フレキシブル電子ペーパー」東京工業大学 細野研究室
- 29-2 「MEMS の応用例」東北大学 江刺研究室

## P30 ~ P31

- 30-1 「薄い膜にいた小さな穴から出た電子の波紋」  
株式会社日立製作所
- 30-2 「ホログラフィ顕微鏡」株式会社日立製作所
- 30-3 「ナノメートルってどのくらい？」  
文部科学省 ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンター
- 31-1 「電子が粒子であり波あることを示す検証実験結果」  
株式会社日立製作所
- 31-2 「AB 効果の検証実験結果」株式会社日立製作所

## P34 ~ P35

- 35-1 「ナノテクノロジーが社会にもたらす諸影響」  
独立行政法人 物質・材料研究機構 ナノテクノロジー  
総合支援プロジェクトセンター 竹村誠洋氏

劇的進化! 変わる未来はすぐそこに

# True Nano



## 編集委員

(編集委員長)

中村 道治

株式会社日立製作所 執行役員副社長

(編集委員(五十音順))

安宅 龍明

オリンパス株式会社 未来創造研究所 テーマコーディネーター

岡田 益男

東北大学 大学院工学研究科 教授

梶谷 文彦

岡山大学 特命教授/川崎医療福祉大学 教授

坂井 滋和

早稲田大学大学院 国際情報通信研究科 教授

田中 一宜

(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 上席フェロー/

(独)産業技術総合研究所 フェロー

中村 雅美

株式会社 日本経済新聞社 編集委員

兵藤 知明

(独)物質・材料研究機構 企画調査室 次長

細野 秀雄

東京工業大学 フロンティア創造共同研究センター 教授

美馬 のゆり

公立はこだて未来大学 システム情報科学部 教授

企画・制作

文部科学省 科学技術政策研究所

監 修

内閣府