

**CRESTプログラム**  
**「プロセスインテグレーションによる機**  
**能発現ナノシステムの創成」**  
**2008年～2015年**

2015年8月18日

研究総括 曾根純一

2008年～ NEC 支配人、2010年～ NIMS 理事、  
2015年～JST CRDS 上席フェロー

# 目次

1. 戦略目標と研究領域の概要
2. 研究発足の背景と以降の環境変化
3. 研究課題の選考について
4. 領域運営について
5. 研究の定量的成果と今後の展開
6. 振り返って

# 戦略目標

## プロセスインテグレーションによる次世代ナノシステムの創製

### ➤ 具体的内容

- ・ナノテクノロジー活用の**トップダウン**と**ボトムアッププロセス**の高度化と統合  
半導体微細化に代表されるトップダウンプロセス(当時45nm)  
自己組織化利用のボトムアッププロセス(サブnmの分子サイズ構造)
- ・上記両プロセスの統合により、**次世代ナノシステムの創製**を目指す  
バイオ・エレクトロニクス融合のナノシステム, ナノ構造による化学反応場  
を利用したシステム, 自律的に機能する分子システム。

### ➤ 政策上の位置付け

ナノ領域における**革新的材料開発**により、**困難な社会的課題の解決**と**国際的な産業競争優位の確保**を目指す。

- ・イノベーションを生む材料・プロセス技術
- ・国民の健康と生活の安全・安心を支えるナノテク材料技術

### ➤ 研究実施にあたり、研究開発目標を達成するための留意点

本戦略目標は、単なるプロセス研究ではなく、**次世代ナノシステムの創製を目指す研究を対象**とするもので、この点を明確に意識した領域運営が求められる。また、**一層の科学的探求を要する基盤技術に対する集中的な投資**や関係機関との**有意義な連携協力体制の構築**なども必須である。

# 研究領域の概要

領域	総括	領域の概要	課題数
プロセスインテグレーションによる機能発現 ナノシステムの創製	曾根	<ul style="list-style-type: none"><li>● フォトリソグラフィ等のトップダウンプロセスと自己組織化に代表されるボトムアッププロセスの高度化と統合化を進め、革新的機能を発現するナノシステムの創製を目指す</li><li>➤ ナノ構造デバイスと、バイオ・有機材料、自己組織化材料等との融合で新機能発現</li><li>➤ 機能を有するボトムアップナノ構造体を工学的に応用可能なシステムとして構築</li><li>➤ 上記を集積・最適化した次世代ナノシステム構築</li></ul>	16
プロセスインテグレーションに向けた高機能ナノ構造体の創出	入江	<ul style="list-style-type: none"><li>● 分子レベルの精緻な構造、機能を、ボトムアッププロセスにより、マクロなreal worldの材料に繋げる道筋をつけ、特異な機能をもった自立した高機能ナノ構造体を創出</li></ul>	16

# 研究発足の背景と以降の環境変化

2000

NNI宣言

ナノテクノロジーバーチャルラボ  
(10領域、2002~2007)

ナノ界面/ナノ製造技術(2006~2013)

次世代エレクトロニクスデバイス(2007~2014)

研究の背景

半導体微細化へトップダウン、ボトムアッププロセス融合の期待と異分野融合の重要性顕在化

ナノ構造体形成、物性解明、機能発現に関わる研究の進展と応用展開の期待

2008

領域発足  
リーマンショック

プロセスインテグレーションによる次世代  
ナノシステムの創製(2008~2015)

2009

オバマ政権  
グリーンエネルギー政策

2011

東日本震災  
福島原発事故

2012

iPS細胞  
N賞

2014

GaN  
LED  
N賞

電子産業の苦境と  
半導体産業再編

環境エネルギー問題  
深刻化(Gイノベーション)

iPS細胞研究活発化と  
医療応用への期待  
(ライフイノベーション)

# 研究課題採択のポイントと選考結果

## 採択判断ポイント

- ボトムアッププロセスとトップダウンプロセスの融合に挑戦しているか
- ナノ構造体の特異な機能を積極的に活用してナノシステム構築を目指しているか
- 新しい学問分野, 新しい市場を切り拓くイノベーションの可能性を秘めているか
- 上記の可能性につながる独創的アイデア, それを具現化する技術, そのエビデンスデータは示されているか

“材料の科学的知識”, “プロセス融合基盤技術”, “ナノシステム応用への意欲”

## 選考結果

採択年度	応募件数	採択件数
平成20年度	32	6
平成21年度	48	6
平成22年度	64	4

- ✓ ナノテクノロジーへの期待 (i.e. 物質科学をベースにして分野融合的な発想で, グリーンイノベーション, ライフイノベーションの牽引役を担う) に合致するものを, 研究採択課題として選んだ。

# 採択研究課題とその分類

## 1. 自己組織化生体材料を用いたエレクトロニクス素子、フォトニック素子の創製

浦岡(08採択): 生体超分子援用フロンティアプロセスによる高機能化ナノシステム

寒川(09採択): バイオテンプレート極限加工による3次元量子構造の制御と新機能発現

## 2. ソフト基板上のエネルギー素子、エレクトロニクス素子応用

畠(08採択): 機能性・複合CNT素子による柔らかいナノMEMSデバイス応用

藤岡(08採択): 自己組織化グラファイトシート上エレクトロニクスの開発

染谷(09採択): 大面積ナノシステムのインターフェース応用

## 3. 新規ナノ材料による応用展開(バッテリー、触媒、表示素子)

辻井(09採択): 濃厚ポリマーブラシの階層化による新規ナノシステムの創成

山元(10採択): 新金属ナノ粒子の創成を目指したメタロシステムの確立

樋口(10採択): エレクトロクロミック型カラー電子ペーパー

## 4. バイオ(単一細胞、単一分子、DNA)計測

宮原(08採択): 機能化ナノ構造ゲートバイオトランジスタの創製

北森(09採択): 拡張ナノ空間特異性を利用した革新的機能デバイスの創成

野地(10採択): 生体分子1分子デジタル計数デバイスの開発

## 5. マイクロ流路による細胞ハンドリング

西澤(08採択): 電気化学的な異種材料ナノ集積化技術の開拓とバイオデバイス応用

藤井(09採択): マイクロ・ナノ統合アプローチによる細胞・組織Showcaseの構築

## 6. 脳神経活動計測

澤田(08採択): イオンイメージセンサ技術を利用した医療生体ナノシステム構築

宇理須(09採択): 光神経電子集積回路開発と機能解析・応用

## 7. スピントロニクスの新分野開拓

齊藤(10採択): スピン流による熱・電気・動カナノインテグレーションの創出

# 領域運営の基本方針と対応

## 1. 多様な専門領域から成る研究課題の指導・助言

### 多様な専門のアドバイザー

スピントロニクス(大橋)、エレクトロニクス(冬木, 松本), MEMS(小野, 出川)

化学(栗原, 坂東, 清水), バイオ(鳥光, 西本, 馬場), \* 青字は産業界

### 採択した研究代表者毎に専門の近いアドバイザー2名配置

## 2. 産業界との連携推奨

### 産業界との連携研究に発展(63件)

### LEAPとの交流会

半導体デバイスに関し, 先端半導体の技術研究組合LEAPと議論

## 3. 成果最大化に向けた研究総括マネジメント

## 4. 各種交流会の積極的実施



# 成果最大化に向けた研究総括マネージメント

## 研究計画見直し・研究費の柔軟な配分

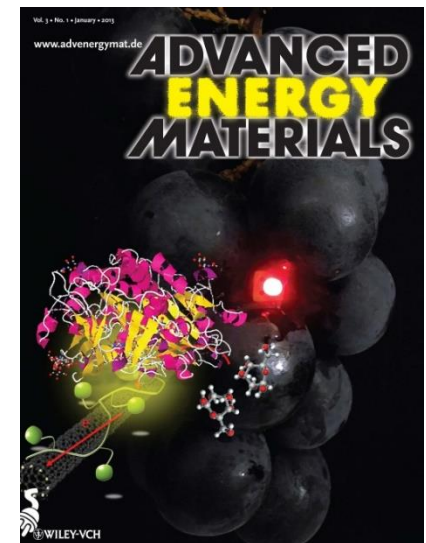
- ・研究過程で無理筋と認識の内容は方向転換
- ・可能性を感じさせる新しい研究の芽は積極支援

## 領域内共同研究の奨励

- ・個々の研究課題に対する補完技術の導入
- ・共通課題であるナノシステム創製への分野融合による挑戦

## 成果例

- ◆ CNTFを電極とするバイオ電池開発(西澤チーム/畠チーム)  
世界最高品質CNTフォレストを用いてバイオ電極フィルムを創出し、バイオ電池の性能を格段に向上。
- ◆ エレクトロ・アクティブ・マイクロチャンバレイ用いた細胞及び分子の解析(野地チーム/藤井チーム)  
誘電泳動法により、マイクロビーズの捕獲率向上(20→90%)、デジタル計測法の感度を大幅改善。マイクロチャンバレイ法でiPS細胞捕獲、未分化マーカー発現量を定量計測
- ◆ 濃厚ブラシによりイオンイメージセンサの参照電極オンチップ化(辻井チーム/澤田チーム)  
濃厚ブラシによりイオン不感応膜を実現、外付け参照電極のオンチップ化、測定システムの小型化を実現



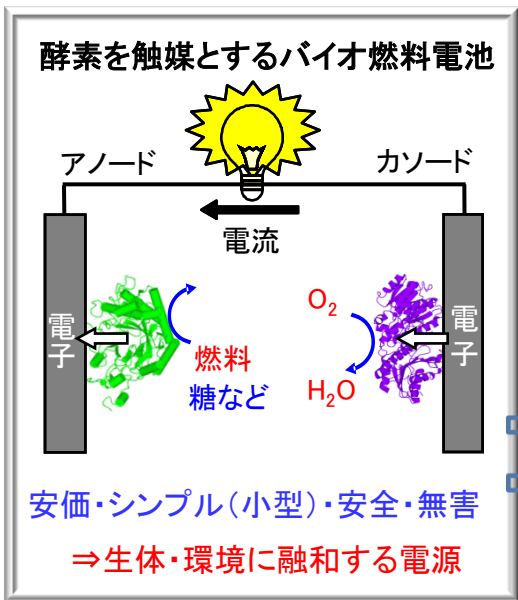
AEM('13年1月号)表紙  
を飾った西澤/畠チーム  
共同研究成果

# 領域内共同研究

	自己組織化 生体材料利用 電子・光素子	ソフト基板上 エネルギー・電子 素子	脳神経活動 計測	バイオ 計測	細胞ハンドリング	新領域開拓
自己組織化生体材料利用 電子・光 デバイス	寒川 - 浦岡 (H22-H23)	寒川 - 藤岡 (H22-H24) 浦岡 - 畠 (H25)				寒川 - 山元 (H23-H26)
ソフト基板上 エネルギー・ 電子素子		西澤 - 畠 (H22-H24)				
脳神経 活動計測			宇理須 - 澤田 (H22-H24)			澤田 - 辻井 (H25)
バイオ計測					宮原 - 藤井 (H22) 野地 - 藤井 (H23-H26)	
細胞 ハンドリング						
新領域 開拓						齊藤 - 北森 (H26) 辻井 - 北森 (H26)

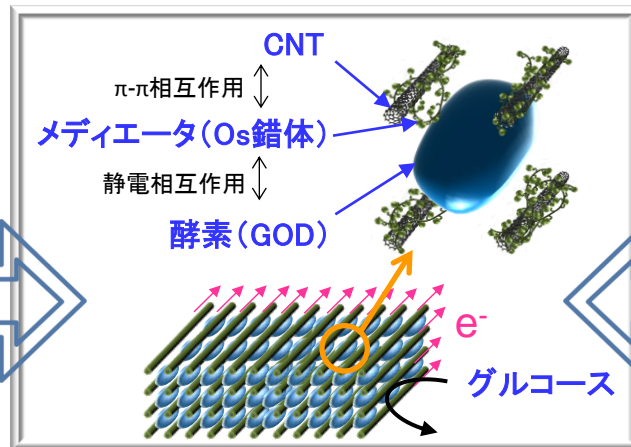
# 高配向CNTで創るバイオ発電シール (西澤・畠連携)

\* 論文2件, 特許2件, 新聞報道4件

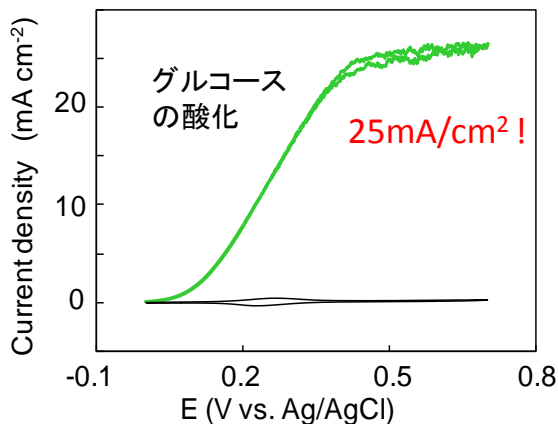


## 複合体の自己集合プロセスを開発

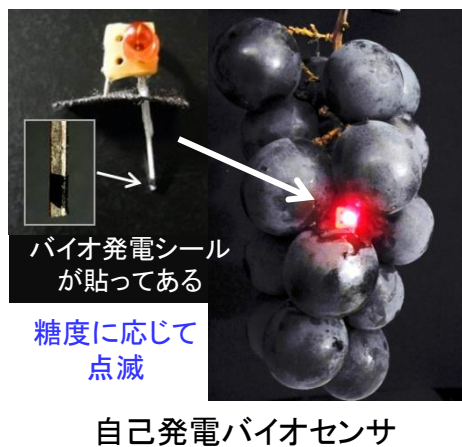
CNTFフィルム内に  
メディエータ&酵素が配列



酵素/メディエータ/CNTの究極複合体  
酵素3兆個/1枚の総てが100%活性

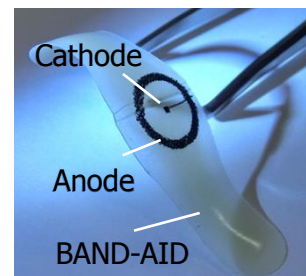


初めての酵素電極シール  
“貼れる”実用性



生体・環境に融和する  
エネルギー自立デバイス創出を目指す

自己発電型  
センサ  
ポンプ  
DDSパッチ  
創傷治癒パッチ



*J. Am. Chem. Soc.*, 133, 5129 (2011);  
*Energy & Environ. Sci.*, 4, 5008 (2011)  
*Adv. Energy Mater.*, 3, 60 (2013)  
特願2010-148068 PCT/JP2011/64594

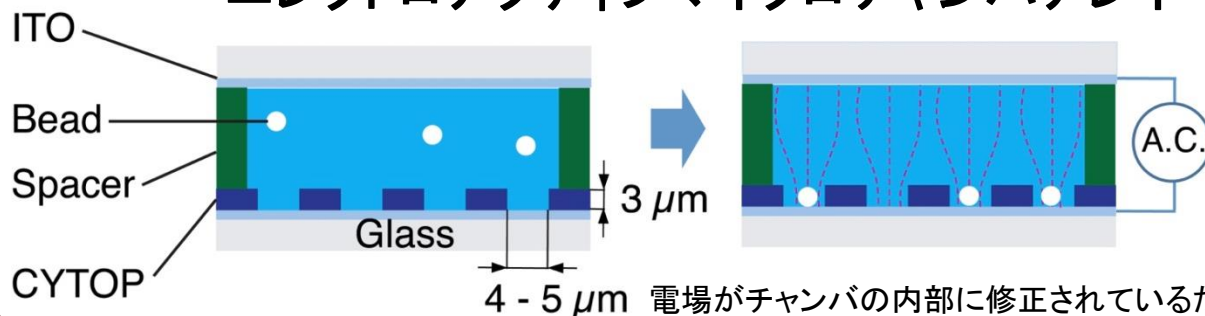
# エレクトロアクティブアレイを用いたマイクロビーストラップ (野地・藤井連携)

\* 論文1本, 新聞報道1件

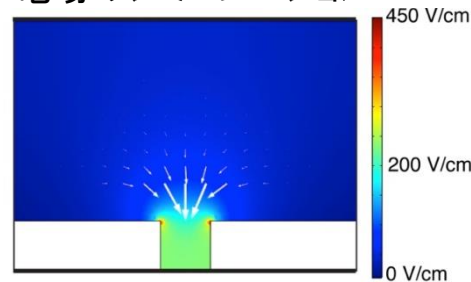
デジタル計数法の検出感度を改善させるため、マイクロビースのトラップ効率の改良が必要。

➔ **誘電泳動によるトラップ効率の最大化**

## エレクトロアクティブマイクロチャンバアレイ

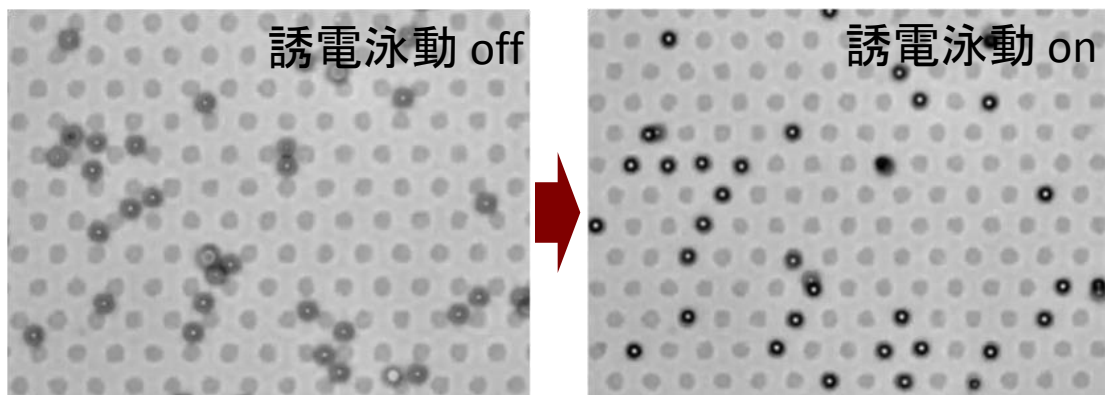


## 電場のシミュレーション



4 - 5  $\mu\text{m}$  電場がチャンバの内部に修正されているため、誘電泳動によってビースのトラップが可能

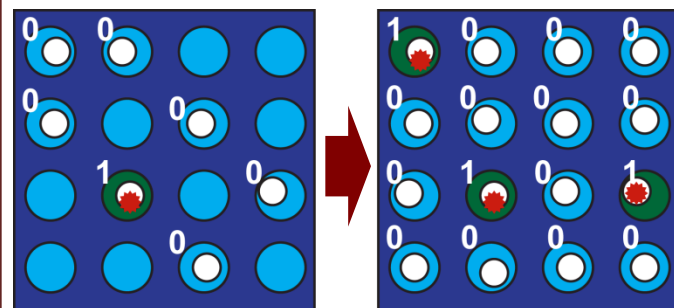
## 誘電泳動を用いてマイクロビースの能動的なトラップ



トラップ効率: 90%以上

## 今後の展開

生体分子1分子デジタル計数  
デバイスへの応用

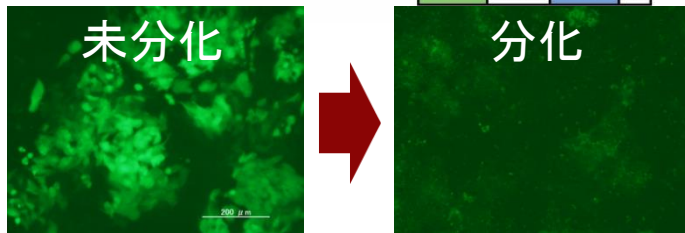
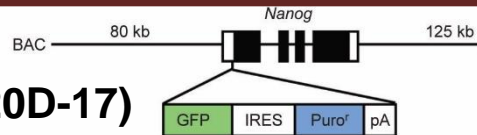


# エレクトロアクティブアレイを用いた単一細胞解析 (野地・藤井連携)

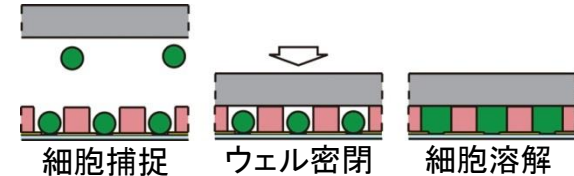
本CRESTの「Cell Showcase」プロジェクトにおいて、ES/iPS細胞の分化誘導を時空間的に制御することが可能であるが、細胞の分化状態を定量的にモニタリングする必要がある。しかし従来の細胞分析は細胞集団が分析対象であるため、分化状態分布の定量的モニタリングは不可能である。

## → 単一細胞解析デバイスの開発

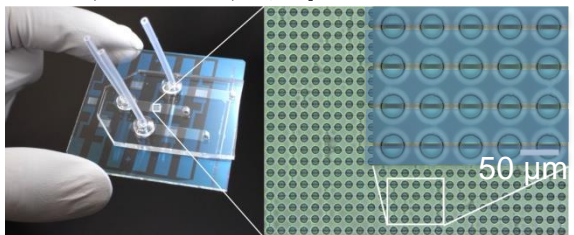
Nanog iPS  
(iPS-MEF-Ng-20D-17)



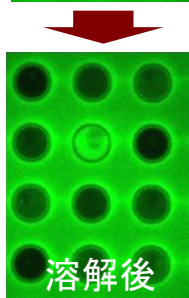
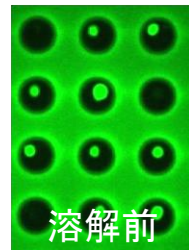
単一細胞解析



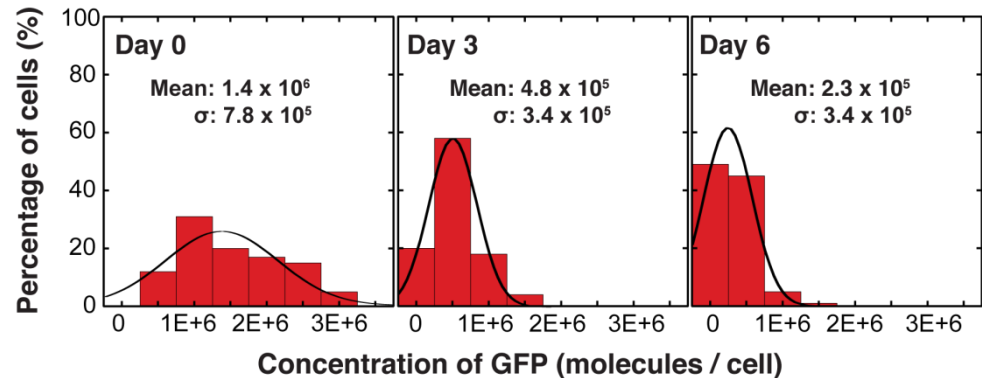
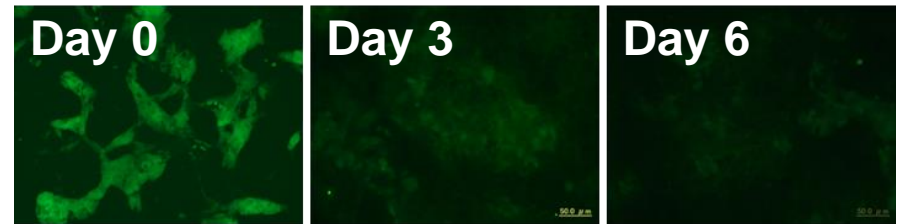
エレクトロアクティブアレイ



細胞溶解



iPS細胞の分化状態によるGFP(未分化マーカーのインジケータ)発現量の分布変化



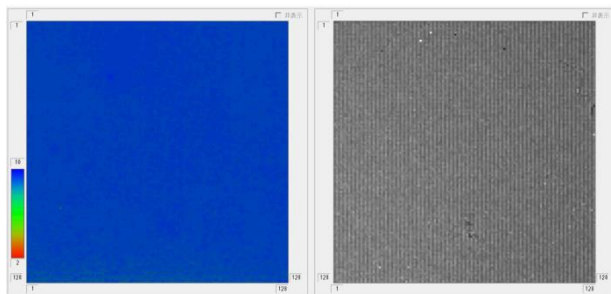
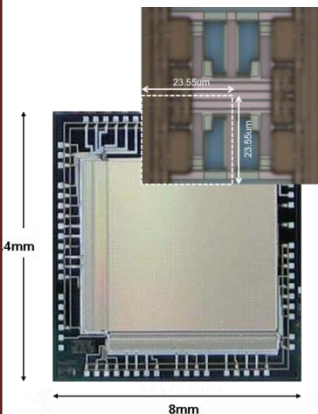
今後の展開

時空間的に分化誘導されたiPS細胞の分化状態を定量的にモニタリングする。

# イオンイメージセンサの参照電極オンチップ化 (澤田・辻井 連携)

電荷転送型pHセンサによる、128x128画素イオンイメージセンサ

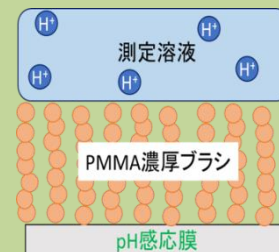
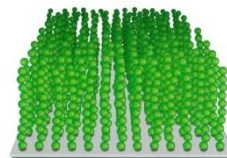
M. Futagawa, D. Suzuki, R. Otake, F. Dasai, M. Ishida, and K. Sawada, Vol. 60, Issue 8, pp. 2634 - 2639, 2013



- ✓ 測定には参照電極によって一定に保つことが必要
- ✓ 測定システムの小型化に課題

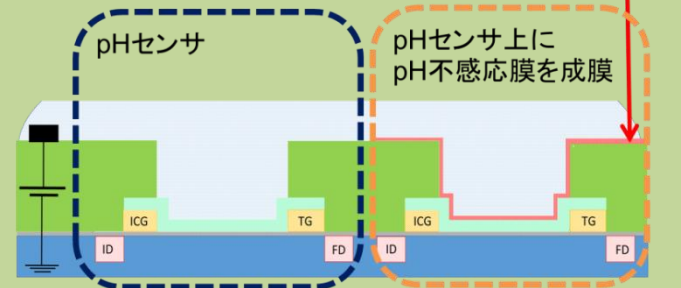
ガラス参照電極

新規分子組織体  
濃厚ブラシ (CPB)

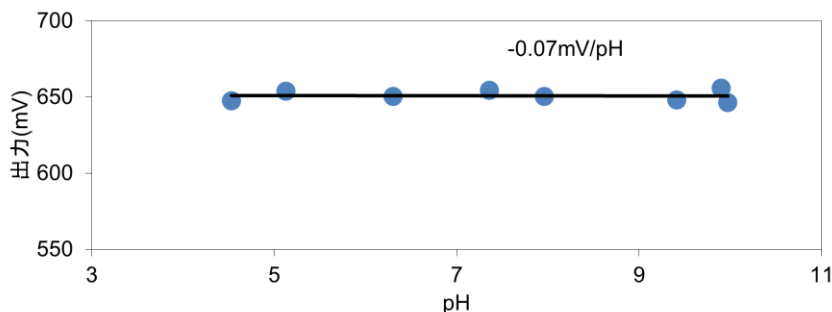


pH不感応膜を用いたpH測定

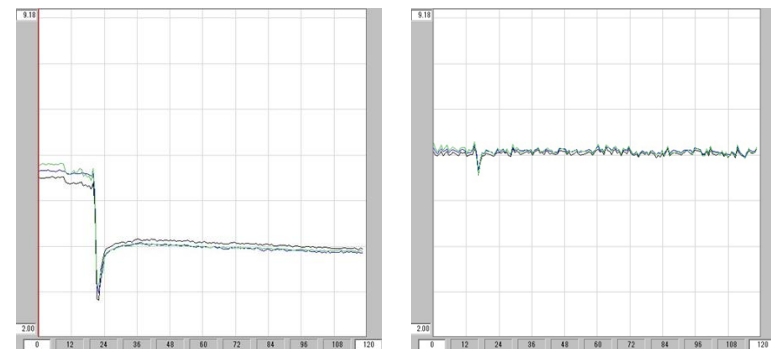
pH不感応膜



カウンター電極 (Pt) だけでは  
NaCl 25mM 滴下 (塩濃度変化により電位が変化)



- ✓ PMMA濃厚ブラシを成膜したセンサはpHに対し応答しない特性を持つという結果を得た



濃厚ブラシ検出プロセス無し  
pHが変化したように見える

検出プロセスあり

# 各種交流会の実施

## ● 領域会議

年一回、全研究課題に関し、進捗状況を議論、研究総括とアドバイザーが助言。

## ● サイトビジット

採択直後と3年目の中間評価と5年目の最終評価前に研究総括とアドバイザーが研究実施場所を訪問。進捗が懸念された研究課題については適宜実施。

## ● 三領域合同会議

同じ戦略目標下の3領域(CREST「ナノ構造体」, 「ナノシステム創製」, さきがけ「ナノシステム」)連携を目的にH24年以降、毎年実施。

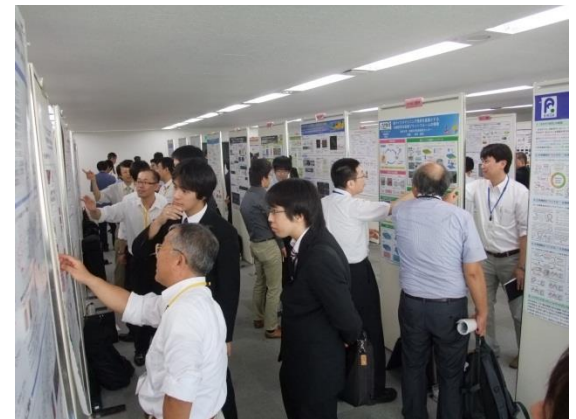
## ● 共通課題に関する領域内ワークショップ

領域内の共通課題に関し、関連研究者で集中議論。第1回目はバイオ系の課題(脳神経, 細胞ハンドリング, バイオ計測)で実施。今後も課題選定して継続。

## ● 各研究代表者の主催する進捗会議



サイトビジットによる研究代表者との集中議論



三領域合同会議でのポスター討論

# 研究の定量的成果(\*)と今後の展開

- 原著論文(\*) : 625件
- 特許出願(\*) : 93件 (外国出願 : 18件)
- 新聞等報道(\*) : 61件 (延98件) ( \* ) 2012年12月25日時点
- 主要な受賞

日本学士院学術奨励賞(2件)、日本IBM科学賞(2件)、日本学振賞(2件)  
文科大臣科学技術賞(4件)、文科大臣若手科学者賞(2件)、その他(15件)

## 採択16課題の今後の展開

- ・産業化に向けACCELへ移行(2課題)
- ・科学技術上のイノベーション創出へImPACTへ移行(1課題)
- ・科学技術上の新分野開拓へERATOへ移行(2課題)
- ・さらなる技術上の発展に向け新規CRESTへ移行(4課題)
- ・企業での実ビジネスとして展開(1課題)
- ・残り6課題も研究継続、企業との連携、国プロ化での研究加速を狙う

## 採択課題の成果を取りまとめ、英文書籍出版予定

タイトル: Intelligent Nanosystem for Energy, Electronics, and Bio Applications  
(今年度中にSpringer社より発刊予定)



# 振り返って：研究目標と実際の研究内容

## 研究目標設定への当時（～2008年）の背景

- ナノテクバーチャルラボ（2002～2007）で要素技術は深化、社会実装に向けシステムとしての発展を期待。当時、ナノシステムとの用語は極めて挑戦的
- 半導体微細化限界を打破するプロセス融合と多様なデバイス機能集積への期待

## その後の状況変化

- 環境・エネルギー・資源問題や高齢化社会の医療・健康問題が重要課題に
  - ✓ グリーン&ライフイノベーションを引き起こすナノテクへの期待
  - ✓ “iPS細胞研究の急速な進展”，“再生可能エネルギーへの期待”
- リーマンショックの影響もあり、日本における半導体産業の様相が激変

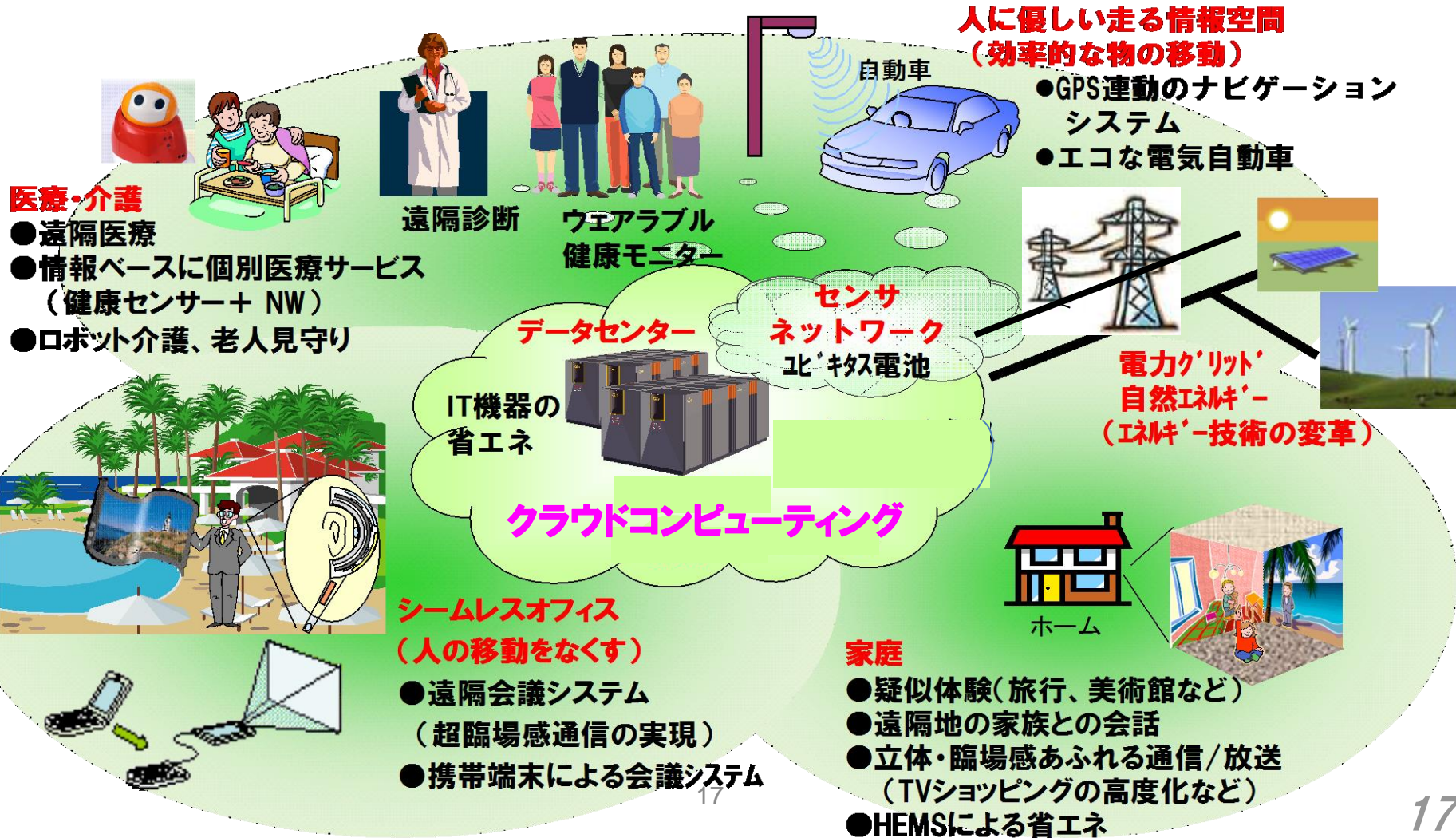
## 振り返って

- ナノシステムという概念のカバーする技術領域は広く、本質的に分野融合領域
- 本研究領域の活動はナノシステム概念の具体的な姿を追求していくプロセス
- ナノのシステム化という技術潮流を先取り⇒終了後も多くのテーマが継続支援
  - “論文，講演，受賞，プレス発表の増加”，“産業界との連携も急速に進展”
- 「プロセス融合によるナノシステム追求」との本筋は外さず、時代の要請に柔軟に対応、途中で無理筋と認識の内容は方向転換、可能性を感じる芽は積極支援
- 領域内共同研究が既存技術のボトルネック解消、新技術創出の面で有効に機能

# 高度情報通信社会を支えるデバイス群

## 発足時(2008年)におけるナノシステムのイメージ

- ✓膨大な情報の処理, 伝送を可能にする高速電子・光デバイス群
- ✓周囲の情報を収集し, 必要な情報を配信する多様なヒューマンIF



# 高度情報通信社会を支えるデバイス群

## 発足時(2008年)におけるナノシステムのイメージ

- ✓膨大な情報の処理, 伝送を可能にする高速電子・光デバイス群
- ✓周囲の情報を収集し, 必要な情報を配信する多様なヒューマンIF

