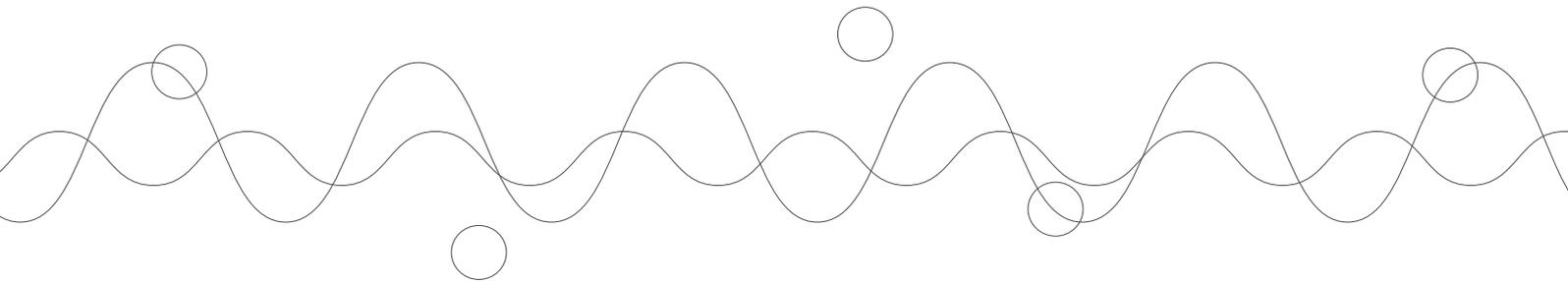


CRDS-FY2011-WR-09

科学技術未来戦略ワークショップ報告書

細胞ICT



独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy Japan Science and Technology Agency

エグゼクティブサマリー

本報告書は、(独) 科学技術振興機構 (JST) 研究開発戦略センター (CRDS) が平成 23 年 11 月 16 日に開催した科学技術未来戦略ワークショップ「細胞 ICT」に関するものである。

CRDS では、情報通信技術 (ICT) およびナノバイオの今後 10 年から 20 年の進展を見据えた上で、これらを融合した診断・治療統合技術の可能性を探るとともに、そのような技術を実現するために必要な基礎研究領域とそこで取り組まれるべき研究課題を明らかにすることを目的に検討を開始した。

ICT の分野では、2025 年には 8 ビットマイコンを $10 \mu\text{m}^3$ (細胞サイズ) で技術的に実現できると言われており、医療、ヘルスケアへの応用に向けた研究が活発化している。ナノバイオの分野では、診断を「生体内」化、外部信号制御型ナノマシンのように制御性・自律性を付与したデバイス、さらには診断治療を統合的に実施できるデバイスの開発が今後の重要課題として取り上げられている。

このような開発動向や今後の課題は、センシング、プロセッシング、オペレーションという工学的機能を生体内で実現しようとする試みとみることができる。CRDS ではこのような分野融合的な研究開発の方向性を「細胞 ICT」と仮称し、その内容を次のように定義した。

細胞 ICT

一定の自律性をもって体内で動作し、疾病診断および (または) 治療の機能を有するデバイスと、そのデバイスを制御する技術とのセットからなる新しい診断治療技術基盤の構築

ワークショップでは、医学、医工学、脳科学、MEMS、エレクトロニクス、生体機能化学、分子ロボティクスなど幅広い分野から 12 名の有識者の参画を得て、細胞 ICT から想定される医療を描いた上で、そこで必要とされるデバイスやその制御等を実現するために必要な研究開発課題の抽出を試みた。

細胞 ICT から想定される医療としては、以下のものが挙げられた。

- 人工細胞を利用した診断治療
- ナノ・マイクロデバイスを活用した血管修復
- 神経活動のモニタリングや神経刺激を通じた生体機能の維持、精神状態制御
- マイクロデバイスによる生体情報モニタリングと健康管理
- *in vivo* マイクロマッサージャーによる体液循環改善
- 臓器代替デバイスによる人体機能の復元

このような医療では、生体の治癒力や調整機能を細胞レベルで制御する機能をもったデバイス、体内に多数留置することができ、長期間にわたり動作する物理化学量のモニタリングデバイスが必要とされる。また、異なる機能をもった複数のデバイスを統合的に制御

する技術、多数のモニタリングデバイスから得られた生体情報を診断治療に活用するための技術が必要になる。

これらのデバイス、技術の実現に向けて必要な研究開発課題としては、以下のものが挙げられた。

(1) 安定なデバイス機能を支える材料

体内という制約条件下でデバイス機能を安定に発現させるためには材料、とくに血液や組織と接する材料表面の設計・加工技術の開発が重要な課題となる。

(2) デバイスへのエネルギー供給

デバイスのサイズが小さくなった場合、無線給電や蓄電池によるエネルギー供給効率は著しく低下する。体内に偏在する化学物質を電気エネルギーに変換する酵素バイオ電池は、寿命、変換効率も含め改善できる可能性があり、学際的アプローチで取り組む必要がある。

(3) 情報伝達

モニタリングデバイスから情報を送るには、情報量に応じたエネルギーが必要になるが、エネルギー供給の制約に応じた情報伝達方法の設計理論が必要である。

(4) 高分子、分子システムを利用したセンシング、プロセッシング

高分子の協同効果、相転移を利用して、一分子レベルの入力を高分子のマクロな状態変化で検出するセンシング方法を検討する必要がある。

(5) 核酸を利用したセンシング、プロセッシング

核酸アプタマーを利用したセンシングは汎用性が高く、ハイブリダイゼーションチェーンリアクションなど DNA コンピューティングの手法と結びつけることにより、センシング情報の増幅や変換といったプロセッシングも可能になると考えられる。体内でこれらの機能を動作させていくためには、種々の検討が必要である。

以上のほかに、多数のモニタリングデバイスから得られた生体情報に基づく治療プログラムの自動生成技術、デバイスの開発や開発されたデバイスの有効性、安全性の評価に利用できる人体モデルの構築技術を開発する必要性が指摘された。

目次

エグゼクティブサマリー	i
1. ワークショップ開催趣旨	1
2. ワークショップの構成	2
3. 第一セッション — 細胞 ICT が拓く新しい医療の姿 —	4
4. 第二セッション — 細胞 ICT 実現に向けた主要研究課題 —	10
5. まとめ	17
付録	
付録1 プログラム	19
付録2 参加者一覧 (敬称略、順不同)	20
付録3 ワークショップ開催趣旨説明資料	21

1. ワークショップ開催趣旨

ロボティクス、情報通信技術（ICT）の活用による手術支援システム、ナノテクノロジーの活用による薬物送達システム（DDS）や生体物質のセンシングシステムなどの技術はすでに実用に供され、さらなる高度化に向けた研究開発が進められている。一方、医療ニーズにはさまざまなものがあり、これに応えていくためには、現在の医療技術の延長線上にはない診断治療技術の可能性も追求していく必要がある。

JST 研究開発戦略センター（CRDS）では、ICT およびナノバイオの今後 10 年から 20 年の進展を見据えた上で、これらを融合した診断・治療統合技術の可能性を探るとともに、そのような技術を実現するために必要な基礎研究領域とそこで取り組まれるべき研究課題を明らかにすることを目的に検討を開始した。

ICT の分野では、2025 年には技術的には 8 ビットマイコンを $10 \mu \text{m}^3$ （細胞サイズ）で実現できると言われており、医療、ヘルスケアへの応用に向けた研究が活発化している。眼圧測定デバイス、薬物放出デバイス、血圧測定デバイスなど体内埋め込みを前提としたデバイスの開発も進められてきている。

一方、ナノバイオの分野では、バイオマーカー生体内診断、インプラント型疾患診断デバイスなど、診断を「生体内」化、外部信号制御型ナノマシンのように制御性・自律性を付与したデバイス、さらには診断治療を統合的に実施できるデバイスの開発が今後の重要課題として取り上げられている。

このような開発動向や今後の課題は、センシング、プロセッシング、オペレーションという工学的機能を生体内で実現しようとする試みとみることができる。CRDS ではこのような分野融合的な研究開発の方向性を「細胞 ICT」と仮称し、その内容を次のように定義した。

細胞 ICT

一定の自律性をもって体内で動作し、疾病診断および（または）治療の機能を有するデバイスと、そのデバイスを制御する技術とのセットからなる新しい診断治療技術基盤の構築

本ワークショップは、医学、医工学、脳科学、MEMS、エレクトロニクス、生体機能科学、分子ロボティクスなど幅広い分野から有識者の参画を得て、細胞 ICT から想定される医療の姿を描くとともに、その実現に向けて必要な基礎研究領域のデザイン、取り組むべき研究課題を示すことを目標に開催した。

2. ワークショップの構成

ワークショップは、2セッションで構成し、各セッションとも4～6人のグループに分かれて討議を行い、各グループ討議の結果を全体討議で共有、確認するという形式で進めた。

参加有識者には事前アンケートにご回答いただき、各セッションはアンケート回答を起点に討議を行った。

細胞 ICT 検討ワークショップ 事前アンケート

(細胞 ICT で定義された研究開発の方向性を念頭に、以下の設問への回答を参加有識者に依頼)

1. これまでにない新しい医療の姿（獣医学分野も含む）を描いて下さい。私たちが提案しようとする研究開発の成果により、日本が世界に先駆けて、これまでにない全く新しい医療を開拓し、社会に巨大な価値を提供する未来を考えてください。皆さまが現時点でお持ちの科学的見識に基づいて、既存技術の延長上には無い、独創的な医療をいろいろと想起してください。（不確実な要素を含んでいても構いません。大胆なイメージを描いて下さい。）
2. 骨太で息の長い"基礎研究領域"と"研究課題"の具体案を描いて下さい。上記新しい医療を実現するために、あなたの所属する研究者コミュニティの研究者が「それはかなり興味深い」と思えるような、骨太で息の長い基礎研究領域を考えてください。そこで取り組まれる研究課題はどのような課題になりますか？（他分野との融合を歓迎。）

第一セッションでは、細胞 ICT から想定される医療の姿について、以下の3グループに分かれて討議を行った。セッションは2ラウンドで構成し、ラウンド間で2名のグループメンバーの入れ替えを行なった。

A グループ

三木則尚（慶應義塾大学）
村田智（東北大学）
角五彰（北海道大学）
興津輝（東京大学）
関谷毅（東京大学）
篠田裕之（東京大学）
嶋田一義（CRDS）

B グループ

西澤松彦（東北大学）
芳賀洋一（東北大学）
関谷剛（東京大学）
角五彰（北海道大学）
加納健司（京都大学）
岡田英史（慶應義塾大学）
中本信也（CRDS）
鈴木響子（CRDS）

C グループ

吉田明（自然科学研究機構）
竹内昌治（東京大学）
加納健司（京都大学）
岡田英史（慶應義塾大学）
村田智（東北大学）
篠田裕之（東京大学）
川口哲（CRDS）
的場正憲（CRDS）

第二セッションでは、第一セッションで描出された医療の姿を実現するために必要な基礎研究領域のデザイン、取り組むべき研究課題を示すことを目的として、以下の2グループに分かれて討議を行った。

A グループ

篠田裕之（東京大学）
芳賀洋一（東北大学）
興津輝（東京大学）
吉田明（自然科学研究機構）
岡田英史（慶應義塾大学）
嶋田一義（CRDS）
川口哲（CRDS）
的場正憲（CRDS）

B グループ

竹内昌治（東京大学）
西澤松彦（東北大学）
三木則尚（慶應義塾大学）
角五彰（北海道大学）
村田智（東北大学）
加納健司（京都大学）
中本信也（CRDS）
鈴木響子（CRDS）

3. 第一セッション — 細胞 ICT が拓く新しい医療の姿 —

第一セッションでは、参加有識者が3グループに分かれ、「細胞 ICT が拓く新しい医療の姿」について、事前アンケートを各自紹介する形式で議論を開始し、意見交換を通じてお互いの意見のブラッシュアップ、新しいアイデアの発案を行った。

以下、討議結果をグループごとに報告する

3-1. A グループ

新しい医療の姿として、(1) 核酸による体内反応制御医療、(2) 人工細胞による疾患治療、(3) ニューロン活動観測による治療や予防、(4) 臓器代替デバイスによる人体機能の復元、(5) 神経機能支援による生体機能の維持、(6) 自己モニタリングによる精神状態制御、が挙げられた。

治療の観点から、生体のもつ治癒力をデバイスにより補助・活性化するというアプローチが展望された。予防の観点からは、体内に多数留置されたセンサからの同時に取得された情報で体内の異常を見つけていく、細胞の出すシグナルを増幅する仕掛けを材料設計で実現する、遺伝子診断でわかったハイリスク部位を集中的にモニタリングする、といったモニタリングを通じた予防医療の姿が展望された。

体内の情報を蓄積することは、ライフログの体内版とも言え、こうしたモニタリングによって得られる情報は膨大になるため、情報管理やデータマイニング技術に対する要請は大きくなっていくと考えられる。また、こうしたモニタリングからのフィードバックによって日常生活が管理されるようになると、生活習慣に大きな変化を起こすことも可能になるかもしれない。

以下、議論で挙げられた医療の姿の具体的な内容を記す。

(1) 核酸による体内反応制御医療

設計された核酸分子を使い、特定の条件で特定のタンパク質を発現させ、体内の生化学的反応を制御して、病気を治療する。核酸ごとの相互作用を利用して、生物の中で新しい反応を生み出したり、有害な反応を抑制したりする。

手段としては、核酸化学を利用する。核酸塩基の相互作用を利用して、人工的な反応系を設計しやすいからである。核酸を入力とし、核酸出力とするようなものや、メッセンジャーRNA入力とし、新しいタンパク質を出力とするようなものが考えられる。溶液の濃度や含まれる分子で反応系を制御して、体内で演算、アクチュエーション、センシング等を実現する。

(2) 人工細胞による疾病治療

人工細胞を体内に導入し、体が本来持っている機能を補助または活性化することによって、疾病を治療する。

人工細胞は、ソフトマテリアルで作られ、エレクトロニクスによって駆動される。人工細胞に付与される機能は、さまざまなものが考えられる。例えば、細胞破壊機能補助、細胞の不死化、細胞修復、繊維芽細胞の排除（例：内因性コラゲナーゼを出す細胞を集めることによるケロイド状態の修復）、炎症の沈静化などが挙げられる。

人工細胞が取得した生体の情報を通信で体外に取り出して、情報処理技術を活用して治療計画が立案できれば、医療を高度化する可能性が大きく広がる。人工細胞では、従来と同じ計測でも、微小領域で実現すると、細かな時間変化が追えるようになる。また、体外からでは十分感度がとれない情報もセンシングが可能になる。さらに、患者が日常生活を送る中で情報の取得が可能になる。複数のデバイスを使って、体内の複数個所で、複数種類のネットワークを構築してセンシングにあたるような方式も考えられる。

さらに、マイクロアクチュエーター（磁場で動くものではなく、分子モーター）を備えて自走できる人工細胞、外部情報に対して自律的に自分の形を変えていく人工細胞などが考えられる。人工細胞に求められる機能は、治療対象に大きく依存するため、これらに応じて機能が制御できることが望ましい。

人工細胞は移植医療への適用も可能である。例えば、移植対象となる臓器に人工細胞を導入し、状態維持やモニタリングを行う。

(3) ニューロン活動観測による治療や予防

ニューロンの活動を観測し、脳神経疾患の治療や予防を行う。

手段としては、脳に1 μ m厚さのセンシングシートを張りめぐらし、人工的な神経系を形成する。また、カテーテルにこうしたセンシングシートを形成して血管内の温度分布等を読みだすこともできる。こうしたデバイスで読みだされる膨大なセンシングデータの管理は、医療クラウドを利用する必要がある。常時観測が可能になる半面、個人情報の管理をより堅牢にする必要がある。

この医療に使われるデバイスは、生体を傷つけない柔らかいエレクトロニクスデバイスになる。

(4) 臓器代替デバイスによる人体機能の復元

本来備わっていた人体機能に支障が生じている状態（疾患）を、臓器代替デバイスを体内に組み込むことで、復元する（臓器移植より侵襲が少ない）。

手段としては、患者の体内にセンサを埋め込み、血糖値等体内の信号をセンシングできるようにするとともに、センシングした情報を増幅し、体に回帰させるメカニズムを設計する。

血糖値の変化に依存して精密にインスリンを投与する高度人工膵臓や、人工心臓、人工肺、パワースーツの体内化など、さまざまな医療形態が考えられる。

(5) 神経機能支援による生体機能の維持

マイクロデバイスで神経機能を復活、活性化することにより、ぼけを防止したり、神経を介して筋肉を賦活する。

神経系の働きが人間の生命活動に与える影響は計り知れないほど大きい。たとえば、患者の生への執着は、予後に大きく影響する。また、夫婦仲がよい人は心臓病になりにくい。マイクロデバイスで個別に神経に働きかける手段により、病気の進行を抑えたり、回復させたりする。

(6) 自己モニタリングによる精神状態制御

マイクロデバイスを使って個別に神経に働きかけ、知能を創っていく根元（精神の安定、やる気づくり、休む、忘れるなど）を支援する。

手段としては、非侵襲的にデバイスを体内で機能させ、自己の状態を詳細にモニタリングし、自己にフィードバックする。fMRI は非侵襲的だが、とれる情報はわずかである。一方で、脳に電極を埋め込むと体を傷つけてしまう。埋め込むという考え方だけでなく、飲んで何日かで無くなる、あるいは回収できるデバイスも考えられる。体内から安全に回収できる技術を作るところに、新しい研究のフロンティアがあるかもしれない。

現在、情報技術を活用した人間へのフィードバックの多くはテキスト形式か画像形式の文書である。しかし、文章で伝わることは極めて限られる。神経に直接働きかける方法の潜在力は大きい。自分の努力以外の方法で自分の観察を可能にすることで、医学的な成果を自らの精神状態制御に効果的に活用する。不快・快はおそらく非常に単純なメカニズムであると考えられるが、こうした情動の制御に対しては、倫理的な側面からの検討も並行して行っていかなければならない。

モニタの対象は、脳だけでなく、汗、唾液、筋電位、瞳孔の大きさもセンシングの対象となりうる。

この医療に使われるデバイスは、脊髄腔を通して脳に入れるデバイスが考えられる。血液脳関門を超える必要があるかもしれない。このデバイスからの情報を集積すると、生体情報のライフログを録ることができ、膨大な情報になることから、データマイニング技術への要請は高まる。

3-2. B グループ

新しい医療の姿として、(1) *in vivo* マイクロマッサージャーによる体液循環改善、(2) ハイリスク群、治療のエンドポイント、予後管理のためのモニタ、(3) 人工細胞による診断、が挙げられた。

体内にデバイスを留置する際に検討が必要な項目として、リスク、コスト、煩わしさ、疾病の深刻さ、治療の緊急性、モニタリングの連続性が挙げられ、体内留置デバイスの用途として、超早期診断や、特定の腫瘍マーカーの予後検査での利用が考えられた。体内への埋め込みだけでなく、緑内障のモニタとしてコンタクトレンズに圧力計を組み込むことが実例として示された。

また、他に考えるべきキーワードとして、アンビエント、ユビキタス、個人情報保護も挙げられた。

アメリカでは、体外から計測可能な健康関連データを集めて、データバンク化し、それ

を元にしたビジネスを企業が検討している、といったことも話題となった。

以下に挙げられた医療の姿の具体的な内容を記す。

(1) *in vivo* マイクロマッサージャーによる体液循環改善

マッサージ代替技術として、マッサージ用アクチュエータを生体内に埋込む。施術対象部位の状態をトータルに測り、アクチュエータにより体液循環の改善を行う。患者は不調になる度に施療に通う煩わしさから解放される。

(2) ハイリスク群、治療のエンドポイント、予後管理のためのモニタ

慢性疾患の増悪チェックを体内留置センサにより常時実施する。各種センサにより、血圧、体温、酸素型ヘモグロビン、血液成分等の検出を行うことで、迅速に疾患の進行状況を把握して治療を行う。

遺伝子診断でハイリスクと指摘された疾患の発症チェック、治療中の疾患の治療エンドポイントの検出、治療後や術後の予後管理が挙げられる。

生体内埋込みで効果があるのは、迅速性、早急性、常時性を必要とする診断であり、利用例として血糖量、血圧、脳室内圧の測定等が挙げられる。ハイリスク群の対象は、個人の遺伝子診断や疫学的なデータベースのデータの充実、利用の普及に伴って特定が精緻になり、細胞 ICT による常時モニタで、予防や早期診断に道を拓く。

血管等の管腔に適用するデバイスとしては、カテーテルのような紐状のデバイスやステントの高機能化が想定される。無索（紐無し）で自走するタイプのデバイスは、血流を考えると困難で、デバイスを回収するためにも有索（紐付き）が現実的である。

近い将来に開発できる可能性を考えれば、先端に信号切り替え集積回路のついた血管内超音波内視鏡のような装置が考えられる。

受動的に周囲の計測を行うだけでなく、能動的に生体に刺激を与えて反応を見る刺激デバイスとセンサの組み合わせもあり得る。とくに、*in vivo* で効果のある利用方法の検討や、刺激デバイスのアクチュエータ部分の位置制御や変形といった事項の検討も必要である。

デバイスを小さくすることができれば、複数部位での検出や操作が可能になり、複数部位（分布型）によるメリットが生かせる診療も想定し得る。

(3) 人工細胞による診断

ソフトロボットとしての人工細胞を医療に応用する場合、個々の人工細胞が集合として一定の機能を発現させるといった使い方を考える必要がある。性質の異なる人工細胞の離合集散や人工細胞間の相互作用により、人工細胞群による「体内捜査」で体内情報を取得し、統合することでより精緻な診断情報を得ることができる。

3-3. C グループ

議論の結果、医療の姿を3つにまとめた。これらは、(1) 長期埋込型マイクロデバイスによる健康管理、(2) ナノ・マイクロデバイスを活用した血管修復、(3) 人工細胞による組織等の高速再生・新生、である。

- (1) 長期埋込型マイクロデバイスによる健康管理は、マイクロデバイスを全身に配置し、リアルタイムで生体情報を解析することにより、特定の部位の定期観察だけで行われている診断のデメリットを克服する。
- (2) ナノ・マイクロデバイスを活用した血管修復は、マイクロデバイスの自己組織化機能に着眼し、この機能による血管の拡張・充填などの治療を行うものである。
- (3) 人工細胞による組織等の高速再生・新生は、人工細胞が神経系に働きかけて機能を回復する。

以下に3つの医療の姿の具体的な内容を記す。

(1) 長期埋込型マイクロデバイスによる健康管理

リアルタイムに生体情報をモニタするマイクロデバイスを用いて、健康管理を行う。

具体的な手段としては、生体の物理化学的な情報をリアルタイムで計測するマイクロデバイスを用いる。このマイクロデバイスには、血圧や血液などの物理化学量を高感度で計測できるセンサが搭載されている。このようなマイクロデバイスを体の中に埋め込み（数千個を想定）、組み込まれたセンサによって全身の状態を計測する。計測された情報は、リアルタイムで体外に送信される。得られた情報は統合的に解析され、リファレンス情報と比較される。これにより異常が検知されるとこの情報は瞬時に被験者へフィードバックされる。

マイクロデバイスは、長期埋込型を想定している。このため、デバイスの要素技術には生体親和性材料、電力生産技術、体外への情報送信技術などが考えられる。

従来の健康管理は、血圧の測定や血液検査に代表されるように部位特異的、しかも年に1～2度程度の検査が主流である。生体の物理化学量は時々刻々と変化している。また、測定部位によって検査値は異なる。さらに、一般的には急性期疾患の多くが短時間の変化により異常が表出する。このため、現在行われている健康診断は特に急性期の疾患の予防に効果があるとは言い難い。上記に示した長期埋込型のデバイスはこれらの課題に対応している。すなわち本技術により定期的かつリアルタイムで全身の状態把握が可能となるため、従来より格段に早く確定診断を行うことができる。またこれに基づく早期の治療介入も可能となる。

(2) ナノ・マイクロデバイスを活用した血管修復

血管内を遊走するマイクロデバイスを用いて異常血管を非侵襲で修復する。マイクロデバイスはセンサや自己組織化の機能を有する。

具体的には、梗塞等の血管内異常をデバイスが検知し、その情報を他のデバイスへ伝送する。この情報を受信したデバイスが血管内の指定された異常部位へ移動を始める。複数のデバイスが集積するとそれらの全てのデバイスが自己組織化を開始する。この組織化は例えば梗塞部位の拡張を促すステントの形状や、動脈瘤をそのサイズに応じて塞栓する粒形状などが考えられる。

本デバイスには主に4つの機能が内包される。すなわち、血管内の異常を検知するセンサ機能、異常を他のデバイスに知らせる情報伝達機能、特定の血管部位への集積機能、

そして自己組織化機能である。

血管の梗塞や狭窄、または動脈瘤等の発生は、時間をかけてゆっくりと進行する。しかし、発症するまでの自覚症状に乏しく、発見が遅れると死に至る場合が多い。前述の埋込型マイクロデバイスによる常時モニタリングにより血管異常を初期の段階で検知することが可能である。また、自己組織化の機能により非侵襲・無痛的治療が可能である。

(3) 人工細胞による組織等の高速再生・新生

特殊な機能を組込んだインテリジェント細胞を用いて細胞や組織の修復や再構築を行う。これにより機能不全または機能低下に至った各種機能の回復が可能となる。

具体的な手段としては、外部からの刺激によって自己組織化し、特定の細胞・組織に分化・誘導するインテリジェント細胞を用いる。

インテリジェント細胞を活用したパーキンソン病の治療例を記す。パーキンソン病は脳内のドーパミン神経細胞の減少によって発症する。ここでは、神経細胞に分化するようにプログラムされた人工細胞を脳表面に人為的に調整する。この細胞には細胞減少を検知するセンサが内臓されている。よって異常を感知すると細胞は神経細胞に分化し、脳の深部へ伸長する。またこの細胞には光チャネルが搭載されている。これによって外部からの光刺激が可能となり、ドーパミン等の放出制御が可能となる。

インテリジェント細胞の構成要素は、センサ、自己増殖、分化制御、そして外部コントロール機能である。

脳機能の回復を目的とした治療は先鋭な電極を活用した電気刺激など侵襲を伴うものが多い。痛みを伴う、感染の危険が高まるなどのデメリットがある。インテリジェント細胞は生体内への導入ができれば、目的に応じて自己増殖し、外部刺激等によって容易に体の機能を回復することができる。侵襲も少なく痛みをとまなうこともない。

4. 第二セッション — 細胞 ICT 実現に向けた主要研究課題 —

第二セッションでは、参加有識者が2グループに分かれ、第一セッションで提出された医療の姿を念頭に、それらを実現するために必要な基礎研究領域のデザイン、取り組むべき研究課題を示すことを目的として討議を行った。

グループワークに入る前に、CRDS から細胞 ICT の実現に必要と考えられる項目と、項目に沿って事前アンケート回答に挙げられた研究課題を整理したものを議論の視点として提示した（図1、2）。

以下、各グループの検討結果を報告する。

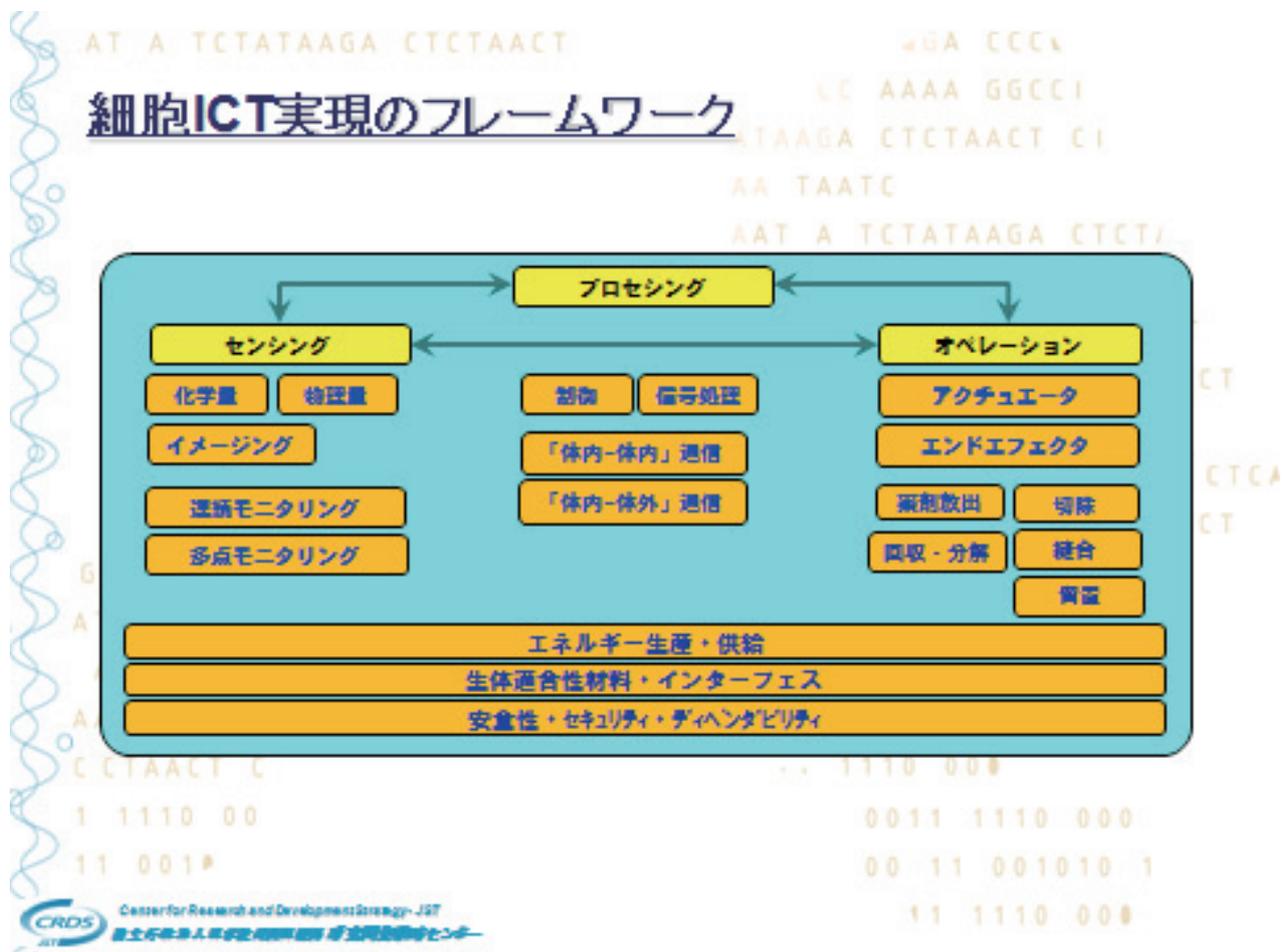


図 1

- センシング
 - 酵素／電極界面の直接電子移動の解明と応用
 - 脂質二分子膜を用いた知覚バイオセンサ
 - 超高感度生体情報検出技術
 - 移植組織を非侵襲的に可視化し、局在箇所の認識と定量化を可能とする技術
 - 個別神経の活動を計測し、身体状態との関係性を解明する研究
 - センシング部の生体適合性：いつもフレッシュに保たれなくてはいけない。

- プロセッシング
 - 低消費電力で安定した出力が得られる信号源（電気，光，電磁波）の開発
 - 遠隔した状態，または自己完結的に計測機器のキャリブレーションを行うためのデバイスおよび信号処理の開発
 - 超低消費電力無線技術
 - 莫大な個数のマイクロデバイスから個別に信号を読み出す技術

- オペレーション
 - バイオ・電気・機械エネルギーの相互変換をデバイス機能に直結させる " マイクロエネルギー循環 " の研究領域
 - 体積や形状を温度や電場で可逆にコントロールできる材料
 - 筋組織の運動をデバイス駆動にリンクする仕組み

- エネルギー生産・供給
 - バイオ・電気・機械エネルギーの相互変換をデバイス機能に直結させる " マイクロエネルギー循環 " の研究領域・酵素／電極界面の直接電子移動の解明と応用
 - 多段階酸化還元反応に電極触媒としての、特定代謝系を組み込んだ人工細胞としてのリポゾーム
 - 酵素の安定性に関する科学と安定化技術開発
 - (莫大な個数のマイクロデバイの) 動作エネルギーを供給する技術
 - パワーゼネレーションやトランスミッション」
デバイスへのエネルギー供給：エネルギーハーベスティング、蓄電システム、
超高エネルギー密度電池

図 2

- 生体適合性材料・インターフェース
 - 組織内への分散留置、さらに所定期間後の分解機能などは、有機材料、特にハイドロゲルを基本素材として駆使する " ウェットデバイス技術 " の研究領域
 - 生体組織と融合し、接触インピーダンスや屈折率差が経年変化しない材料の開発
 - 人工の移植用組織の生体適合性（炎症反応、免疫反応を制御する）
 - 体積や形状を温度や電場で可逆にコントロールできる材料
 - 分解して壊せる材料と構造
 - デバイス材料／表面処理およびその材料に対応したプロセス
 - センシング部の生体適合性：いつもフレッシュに保たれなくてはならない。
 - デバイス全体の生体適合性：癒着しても良い／悪い。体外へ出されてしまう？
 - エレクトロニクスが生体適合性

- システム
 - マイクロデバイスの長を最大限に生かすためには、体内または体外にある装置と階層的にシステムを構築することで役割分担を明確にし、マイクロデバイスそのものの機能は必要最小限にとどめることが重要である。
 - 全身からの網羅的リアルタイム情報から、生体の状況を判断し制御する技術の研究は、" 生体の統合的制御システム " という、従来は絵に描いた餅であった研究領域を実現できる可能性がある。
 - 全身性の生体フィードバック応答（副作用を含む）の予測と制御
 - 局所的なものであれ全身性のものであれ、今回の WS テーマのマイクロデバイスの活用を考える際、生体に備わっているマイクロデバイスとの相互作用を含めた活用技術（ハイブリッド技術）についても、検討を深めることが重要
 - 個別神経活動の計測制御技術
 - 個別神経の活動を計測し、身体状態との関係性を解明する研究
 - 神経の直接刺激による人間状態の制御
 - 自律運動、自己修復、自己複製する医療用人工細胞（半合成）
 - 生命機能への物質化学的アプローチ（分子間の協同性発現、階層構造の構築創発機能発現）

図 2 (続き)

4-1. A グループ

討議で示された技術課題は、(1) 情報・エネルギー工学、(2) 持続的化学計測、(3) 微少デバイスへのエネルギー供給、(4) 治療のプログラミング、(5) 人体モデル構築、の領域に大別された。

以下、各領域ごとに技術課題について記す。

(1) 情報・エネルギー工学

多くの情報を送るには、それなりにエネルギーが必要になる。例えば、リアルタイムで行動している人の情報をとる必要があれば、送信する情報の量は膨大になる。一方で、長い時定数で離散的な情報をとるのであれば、送信する情報の量も抑えられる。デバイスがムーアの法則で微細化されても、電源のエネルギー密度はその速度で上がってはいかない。つまり、デバイスが微細化することにより、設計におけるエネルギーの制約はすさまじく大きくなっていく。細胞 ICT の設計者は、体内で生成できるエネルギー量と、体外から供給できるエネルギー量を設計段階において、達成性能とつきあわせながら調節する必要が出てくる。つまり、送れる情報量とそれに必要なエネルギーの制約とを一体的に扱えるような設計理論が求められる。こうした問題は、細胞 ICT という枠組みを越えて、家電を駆動するワイアレスエネルギー伝送システムとも、将来的には密接な関係性を持つことになるだろう。

これは、細胞 ICT という制約条件の大きな枠組みで情報とエネルギーの関係をとらえたことによって生み出される「情報・エネルギー工学」という新しい領域の創造ともいえる。

(2) 持続的化学計測

体内に埋め込まれたデバイスは、頻繁にメンテナンスができないため、長期間、正しく動作するという信頼性が大変重要である。化学計測、生化学計測、電気刺激の長期的な劣化防止、エネルギー供給の長期的な劣化防止は、大きな課題である。

通常、生体内に異物を持ち込むと、体内の様々な生体機構が、プローブ等の周囲に被膜や蛋白質の沈着を引き起こし、持続的な化学計測を妨げてしまう問題が付きまとう。こうした問題を克服するための様々な手段が研究対象となる。

具体的には、自己修復機能を持つ材料の開発などを通じて、針先にフィルタがついた計測装置や、アレイ化して冗長性を持たせた装置、表面洗浄機能がついた装置、リニューアル（再コーティング、再生・自己組織化・増殖など）機能がついたエネルギー源、材料、酵素等の研究開発が考えられる。センサのキャリブレーションも重要な課題の一つ。体内に埋め込まれたデバイスのキャリブレーションを自動的に行えるようにする機構の研究が必要。カテーテルや内視鏡の先端部分への適用が直近の応用先として見えている。

三次元のハイブリッド材料なども重要な研究対象となる。形状や表面加工で細胞の反応、付着力、成長の仕方がかわる。

本質的には、材料設計の研究となるが、すでに使われている材料を使う場合と比べて、治験などにかかる大きな手間を克服しなければならない。

(3) 微少デバイスへのエネルギー供給

体内の深部に留置した微小デバイスへのエネルギー供給は、供給効率が著しく低下して困難になることが大きな問題である。デバイスが微小であるがゆえに、蓄積する容量も微小にならざるをえない。小さいと、エネルギーを電磁波で受信する際のアンテナの設計にも困難を伴う。

こうした、微小なデバイスへのエネルギー供給は、デバイスの低消費電力化と並行して取り組むべき大きな課題となる。

(4) 治療のプログラミング

体内の情報の継続的なモニタを可能にし、センシングした生体情報に基づき、どういう治療薬をどういうタイミングでどのくらいの分量を投入したらよいかをプログラミングする技術のプラットフォームを構築する。

個別の対象に合わせた治療プログラムをソフトウェアが自動的に行えるような医療が実現する。個別の対象に合わせて治療方法をくみ上げる、新しい治療が生まれる。医者への個別判断は最終的には必要であるが、治療行為のカスタムメイドが格段に容易になる。

(5) 人体モデル構築

医薬や医療機器の安全性認証において、人体を使った実験が不要になることが望ましいことは論をまたない。細胞 ICT が機能していることを検証するという観点でも、治験において人体を代替する手段が生み出されることの社会的価値は大きい。

医療機器を開発するためのモデル（物理モデルの再現）と、生体治療を開発するためのモデル（循環動態モデルの再現）など、さまざまな階層で、人体実験を代替するための人体モデル構築技術が求められている。

なお、理想状態（正常域）が一意に決まらない問題点がある。健康を扱う学問も作っていかなければならない。

4-2. B グループ

討議で示された技術課題は、(1) 酵素バイオ電池によるエネルギー供給、(2) センシングにおける共通課題、(3) 高分子の協同効果、相転移を利用したセンシング、(4) 核酸を利用したセンシング、プロセッシング、(5) ケーシング材料、の領域に大別された。

以下、各領域ごとに技術課題について記す。

(1) 酵素バイオ電池によるエネルギー供給

血糖値を計測し、その結果を体外に通信していく、といった機能を考えた場合、マイクロワットオーダの電力が供給できればよく、薬剤投与に必要なエネルギーもマイクロワットオーダである。このレベルの電力であれば、酵素を使った化学エネルギーの変換系（酵素バイオ電池）で十分にまかなうことができる。

バイオ電池では、電極面積 1 cm^2 あたり数ミリワットの電力が供給可能であり、 1 mm^2 程度の電極面積をもった酵素バイオ電池で外部との通信や薬物の放出に必要なエ

エネルギーをまかなえると考えられる。大きな課題の一つは寿命であり、動物体内に埋め込んだ場合、1週間から20日程度しか保たない。このような寿命でも対応できる用途も想定できるが（例えば、大きな手術後の連続血糖値モニタ）、1年程度に寿命を延長するためにブレークスルーが必要である。

酵素バイオ電池の寿命を決定する主要な要因である酵素の安定性向上に向けては、酵素失活のメカニズム解明という大きな研究課題が存在する。

また、炭素系材料のメソ孔のような微小空間に酵素を閉じこめると、酵素失活が抑制されることが知られており、電極上への酵素固定化方法にも改善の余地がある。酵素のサイズにあわせてナノ構造が自動調節できるような酵素電極の作製方法のように、自己組織化を利用した方法の検討が必要である。

酵素バイオ電池の場合、有機物から2電子を利用するものが多い。しかし、グルコースを基質とした場合、理論的には24電子を利用することができる。これを実現するためには、電極の表面に脂質膜のような膜を作り、必要な酵素系を閉じこめ、基質や中性分子だけを通すようにする必要がある。また、反応に関与する酵素を微小空間に配置する技術も必要となる。酵素にDNAをつけて、DNAの相補的塩基対形成の性質を利用し、酵素を自己集積する、といった方法が考えられる。いずれも、研究開発には学際的アプローチが必要であるが、酵素バイオ電池の寿命、出力に大きな改善をもたらすものと期待される。

(2) センシングにおける共通課題

体内で長期間安定にセンシング機能を維持するためには、センシング表面がタンパク質などによって覆われないような界面形成技術（脂質・ハイドロゲルの利用、分子インプリティンクによる表面加工）が必要である。

センシングには酵素反応を利用するものが多いが、酵素の寿命という観点では、酵素バイオ電池と課題が共通している。

(3) 高分子の協同効果、相転移を利用したセンシング

センシングの方法については、高分子の協同効果、相転移の利用が新たな方向性として考えられる。高分子では物理量や化学量の変化に対して非線形な応答を示すものが多く、一分子レベルの入力がマクロな変化として表れる場合がある。このような変化を超音波などで検出するといった方法が研究対象として挙げられる。分子インプリティンクとハイドロゲルを組み合わせ、センシング対象がハイドロゲルと結合すると、ゲルの性質が変わるといった、材料自体にセンシング機能を持たせるといった方向性が考えられる。

(4) 核酸を利用したセンシング、プロセッシング

疾病診断の観点からはマーカーの選定が大きな課題であるが、センシングの立場からみると、どのようなマーカーでもセンシング機能の一部を変えると検出できる、といったプラットフォームを考えておくことも重要であろう。アプタマーを利用し、センシング対象に応じてアプタマー部分だけを変えていく、といった方向も考えられる。

核酸アプタマーを利用したセンシングは、ハイブリダイゼーションチェーンリアクションなどDNAコンピューティングの手法と結びつけることにより、センシング情報の増幅

や変換といったプロセンシングも可能になると考えられる。

DNA コンピューティングはコントロールされた系であれば、機能を設計できる段階にきている。DNA だけであれば、塩基配列の種類が数百種一つの容器にあっても問題ない。しかし、DNA と結合性をもつような他の分子があったときに演算がうまくいくか、など検討課題は多い。どういう歩留まりで、どういう収率で、どういうノイズの中でシステムが機能するか、というシステム論的アプローチが今後必要である。さらに設計に使用する熱力学的パラメータの信頼性、シミュレーションの方法なども改善していく必要がある。

リポソームなどを利用して外界との境界を設け、その中に DNA コンピューティング系などを入れて機能的な一種のリアクターを構成するという方向も、反応を単純化できることから検討する必要がある。この際、膜の選択透過性を制御できるようにすることも重要になる。このような研究領域は人工細胞の構築にもつながる。最初から細胞のような複雑な機能をねらうのではなく、機能要素を一個一個加えていくようなアプローチが有効であると考えられる。

炭素と水素から成る合成高分子で DNA のような機能を付与し、さらに、生体適合性や生分解の制御ができるようになれば、大きなブレイクスルーとなる。

(5) ケーシング材料

デバイスとしての機能を考えた場合、センシング、プロセシングは分子レベルで構成することが可能になると考えられるが、これらの機能を体内で発現させるためには、機能を発現しやすいような環境を確保できるようなケーシングが必要となる。

体内への留置を想定した場合、ケーシング材料は細胞やタンパク質などの生体物質との相互作用が制御できる必要がある。そのためには材料自体の開発に加え、材料表面をナノレベルで加工する技術の開発などが重要となる。このような開発を支える上で、細胞や生体物質と材料との界面で起きている現象の解明が必要となる。さらに選択透過性の付与などが課題となる。

5. まとめ

本ワークショップでは、「一定の自律性をもって体内で動作し、疾病診断および（または）治療の機能を有するデバイスと、そのデバイスを制御する技術とのセットからなる新しい診断治療技術基盤」を細胞 ICT と仮称し、有識者による自由討議を通じて、細胞 ICT から想定される医療を描いた上で、そこで必要とされるデバイスやその制御等を実現するために必要な研究開発課題の抽出を試みた。

細胞 ICT から想定される医療としては、以下のものが挙げられた。

- 人工細胞を利用した診断治療
- ナノ・マイクロデバイスを活用した血管修復
- 神経活動のモニタリングや神経刺激を通じた生体機能の維持、精神状態制御
- マイクロデバイスによる生体情報モニタリングと健康管理
- *in vivo* マイクロマッサージャーによる体液循環改善
- 臓器代替デバイスによる人体機能の復元

このような医療では、生体の治癒力や調整機能を細胞レベルで制御する機能をもったデバイス、体内に多数留置することができ、長期間にわたり動作する物理化学量のモニタリングデバイスが必要とされる。また、異なる機能をもった複数のデバイスを統合的に制御する技術、多数のモニタリングデバイスから得られた生体情報を診断治療に活用するための技術が必要になる。

これらのデバイス、技術の実現に向けて必要な研究開発課題としては、以下のものが挙げられた。

(1) 安定なデバイス機能を支える材料

体内という制約条件下でデバイス機能を安定に発現させるためには材料、とくに血液や組織と接する材料表面の設計・加工技術の開発が重要な課題となる。

(2) デバイスへのエネルギー供給

デバイスのサイズが小さくなった場合、無線給電や蓄電池によるエネルギー供給効率は著しく低下する。体内に偏在する化学物質を電気エネルギーに変換する酵素バイオ電池は、寿命、変換効率も含め改善できる可能性があり、学際的アプローチで取り組む必要がある。

(3) 情報伝達

モニタリングデバイスから情報を送るには、情報量に応じたエネルギーが必要になるが、エネルギー供給の制約に応じた情報伝達方法の設計理論が必要である。

(4) 高分子、分子システムを利用したセンシング、プロセッシング

高分子の協同効果、相転移を利用して、一分子レベルの入力を高分子のマクロな状態変化で検出するセンシング方法を検討する必要がある。

(5) 核酸を利用したセンシング、プロセッシング

核酸アプタマーを利用したセンシングは汎用性が高く、ハイブリダイゼーションチェイ

ンリアクションなど DNA コンピューティングの手法と結びつけることにより、センシング情報の増幅や変換といったプロセンシングも可能になると考えられる。体内でこれらの機能を動作させていくためには、種々の検討が必要である。

炭素と水素から成る合成高分子で DNA のような機能を付与し、さらに、生体適合性や生分解の制御ができるようになれば、大きなブレークスルーとなる。

(6) ケーシング材料

デバイスとしての機能を考えた場合、センシング、プロセッシングは分子レベルで構成することが可能になると考えられるが、これらの機能を体内で発現させるためには、機能を発現しやすいような環境を確保できるようなケーシングが必要となる。

体内への留置を想定した場合、ケーシング材料は細胞やタンパク質などの生体物質との相互作用が制御できる必要がある。そのためには材料自体の開発に加え、材料表面をナノレベルで加工する技術の開発などが重要となる。このような開発を支える上で、細胞や生体物質と材料との界面で起きている現象の解明が必要となる。さらに選択透過性の付与などが課題となる。

以上のほかに、多数のモニタリングデバイスから得られた生体情報に基づく治療プログラムの自動生成技術、デバイスの開発や開発されたデバイスの有効性、安全性に利用できる人体モデルの構築技術を開発する必要性が指摘された。

付録1 プログラム

開催日時：2011年11月16日（水） 10:00～17:00

開催場所：JST 研究開発戦略センター 麹町スクエアビル2F 中会議室

10:00～10:20 はじめに

- ・開催挨拶：丹羽邦彦（JST/CRDS）
- ・趣旨およびワークショップ進行について説明：中本信也（JST/CRDS）

10:20～12:00 グループ討議 第一セッション

- ・細胞 ICT から想定される新しい医療の姿の描出

12:00～13:00 昼食

- ・自己紹介

13:00～13:50 全体討議

- ・第一セッション結果報告、質疑

13:50～15:50 グループ討議 第二セッション

- ・新しい医療の実現に必要な研究課題の抽出

15:50～16:00 休憩

16:00～17:00 全体討議

- ・第二セッション結果報告、質疑
- ・まとめ
- ・閉会挨拶：田中一宜（JST/CRDS）

付録2 参加者一覧（敬称略、順不同）

外部有識者		
氏名	所属機関	役職
興津 輝	東京大学 生産技術研究所 機械・生体系部門	特任准教授
岡田 英史	慶應義塾大学 理工学部 電子工学科	教授
角五 彰	北海道大学 大学院理学研究科 化学部門	准教授
加納 健司	京都大学 大学院農学研究科 応用生命科学専攻	教授
篠田 裕之	東京大学 大学院情報理工学系研究科 システム情報学専攻	准教授
関谷 毅	東京大学 大学院工学系研究科 電子工学系専攻	准教授
竹内 昌治	東京大学 生産技術研究所 / バイオナノ融合プロセス連携 研究センター	准教授 / センター長
西澤 松彦	東北大学 大学院工学研究科 バイオリボティクス専攻	教授
芳賀 洋一	東北大学 大学院工学研究科 医工学専攻	教授
三木 則尚	慶應義塾大学 理工学部 機械工学科	准教授
村田 智	東北大学 大学院工学研究科 バイオリボティクス専攻	教授
吉田 明	自然科学研究機構 生理学研究所 多次元共同脳科学推進センター	特任教授
JST/ 研究開発戦略センター (CRDS)		
氏名	所属ユニット	役職
丹羽 邦彦	電子情報通信ユニット	上席フェロー
田中 一宣	ナノテクノロジー・材料ユニット	上席フェロー
中本 信也	ナノテクノロジー・材料ユニット	フェロー
嶋田 一義	電子情報通信ユニット	フェロー
川口 哲	ライフサイエンス・臨床医学ユニット	フェロー
鈴木 響子	ライフサイエンス・臨床医学ユニット	フェロー
的場 正憲	電子情報通信ユニット	フェロー

付録3 ワークショップ開催趣旨説明資料

細胞ICTワークショップ

2011年11月16日

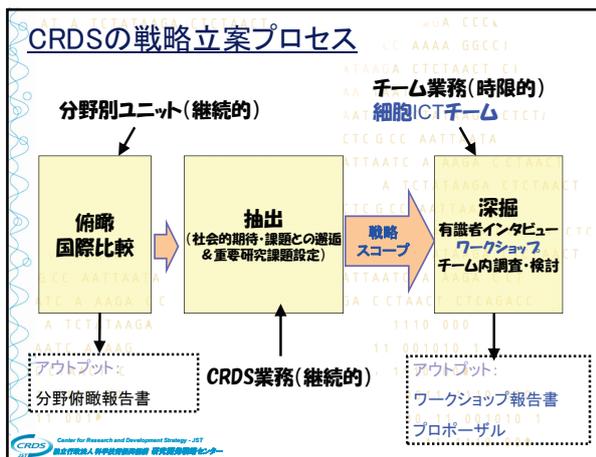
JST研究開発戦略センター
細胞ICTチーム

[総括責任者: 丹羽邦彦、田中一宜]
中本信也、島津博基、嶋田一義、的場正憲、川口哲、鈴木響子

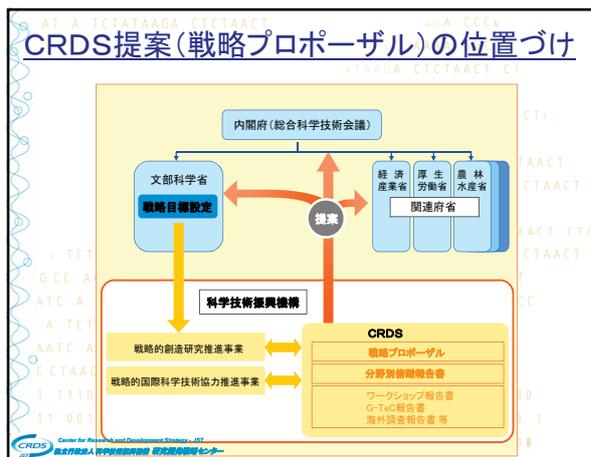
1

1. JST研究開発戦略センター(CRDS)の概要
2. ワークショップ開催趣旨
3. ワークショップの進め方

2



3



4

1. JST研究開発戦略センター(CRDS)の概要
2. ワークショップ開催趣旨
3. ワークショップの進め方

5

戦略スコープ

ナノバイオのターゲット

(図8に拡大図を掲載しています)

細胞サイズICT

2025年には8ビットマイコンを10μm立方(細胞サイズ)で実現できると言われており、このようなIT技術を医療・ヘルスケア分野に適用する研究が進行

ナノバイオと細胞サイズICTの融合による
診断・治療統合技術

6

細胞サイズICT

National Taiwan University
ISCC 2009
薬物送達

University of Michigan
ISCC 2011
眼圧測定

Case Western Reserve University
ISCC 2009
血圧測定

Center for Research and Development Strategy - JST
独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター

7

ナノバイオ

ナノバイオ分野の公的資金投入が必要な重要研究施策・課題

米国で盛んだが、日本のナノ強い。制度、システムには差があるが、材料技術、および材料加工技術は日本の強み

ナノ材料の医学応用ガイドライン 化学的・生物学的なナノ材料の生体への影響の情報収集とそれに基づいた合理的な製薬への認可基準作り	ナノテク利用検査・治療薬の臨床治療開始	新開発ナノテク利用検査・治療薬の普及。個別医療対応の診断・治療を実現
外部信号制御型ナノマシン	マルチプレクスイメージング	ナノテク治療技術の医療へのインテグレーションを目的とした新しい医療システム
ナノテク利用バイオセンサー	ナノテク利用バイオマーカー生体内診断	生体/デバイス情報交換システム
ウェアラブル型の疾患診断ナノデバイス	がん、認知症、糖尿病等の発症・進展を予測するデバイス	臓器・腎臓の再生治療
ナノ材料とバイオシステムとのインターフェース・日本版NCL	Quantitative Biologyを計測するデバイス	ヒトモデルデバイス
マイクロ構造とナノ表面(および生体材料との)膜和材料創製技術	Theranosticsデバイス(Multi-functional)	システムバイオロジーデバイス
新規ナノ材料	ナノデバイスフクテン	テーラーメイド疾患予防デバイス
インテリジェントナノ表面を用いたグリーンケミストリー	生体機能の経時的制御が可能(生体処理方法、および)無機生体材料	細胞内ナノサージー
ナノデバイスによる標的治療	細胞内ナノサージー	ナノボット・治療用ナノロボット

5年先 10年先 20年先

Center for Research and Development Strategy - JST
独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター

8

細胞ICT

診断の「生体内」化

- ナノテク利用バイオマーカー生体内診断
- インプラント型疾患診断デバイス
- がん、認知症、糖尿病等の発症・進展を予測するデバイス

制御性・自律性の賦与

- 外部信号制御型ナノマシン
- 生体/デバイス情報交換システム

治療へのアプローチ、診断治療統合

- Theranosticsデバイス(Multi-functional)
- ナノデバイスフクテン
- ナノボット・治療用ナノロボット

Theranostics, Therapeutics + Diagnostics

一定の自律性をもって体内で動作し、疾病診断および(または)治療の機能を有するデバイスと、そのデバイスを制御する技術とのセットからなる新しい診断治療技術基盤の構築

生体内

センシング

プロセッシング

細胞サイズICT

オペレーション

細胞ICT

9

細胞ICTワークショップ

社会ビジョン(健康寿命の延伸、新市場・産業の創出)

1. 病気の早期克服	2. いきいき生活の実現			
(1) 診断と治療の一体化	(2) 生体負担の少ない治療	(3) 再生医療の実現	(4) 生活支援ロボット	(5) ITヘルスケア

社会ニーズの充足に資する未来の医療技術

「未来の医療技術」の方向性: 細胞ICT

一定の自律性をもって体内で動作し、疾病診断および(または)治療の機能を有するデバイスと、そのデバイスを制御する技術とのセットからなる新しい診断治療技術

細胞ICTから想定される新しい医療の姿

新しい医療を実現するために必要な「基礎研究領域」、「研究課題」

10

関連国内ファンディング(主要なもの)

2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
【内閣府】 最先端研究開発支援プログラム(FIRST)											
【文部科学省】 ナノテクノロジー材料を中心とした融合新興分野 突飛的<研究拠点形成型> ナノバイオ・インテグレーション研究拠点											
【JST/ERATO】 竹内バイオ融合											
【JST/CREST】 戦略目標: 非侵襲性医療システムの実現のためのナノバイオテクノロジーを活用した機能性材料・システムの創製【3領域】 関連8領域、17課題											
【厚生労働科学研究費】 薬学的先端医療技術推進研究【ナノメディシン分野】 医療機器開発推進研究(ナノメディシン研究)											
【NEDO】 マイクロマシン技術 1991-2000 医療機器開発推進研究(低侵襲・非侵襲医療機器(ナノテクノロジー)研究) 遠隔治療に対応した次世代DDS型治療システム インテリジェント手術機器 高集積・複合MEMS製造(ファインMEMS) 異分野融合型次世代デバイス製造技術(BEANS)											

Center for Research and Development Strategy - JST
独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター

11

■ワークショップ企画メンバー■

中本 信也	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
島津 博基	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
嶋田 一義	フェロー	(電子情報通信ユニット)
的場 正憲	フェロー	(電子情報通信ユニット)
川口 哲	フェロー	(ライフサイエンス・臨床医学ユニット)
鈴木 響子	フェロー	(ライフサイエンス・臨床医学ユニット)
丹羽 邦彦	上席フェロー	(電子情報通信ユニット)
田中 一宜	上席フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2011-WR-09

科学技術未来戦略ワークショップ

「細胞 ICT」報告書

平成 23 年 11 月 16 日 (水) 開催

平成 24 年 1 月

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター 電子情報通信ユニット
Center for Research and Development Strategy
Japan Science and Technology Agency

〒 102-0084 東京都千代田区二番町 3 番地

電 話 03-5214-7486

ファックス 03-5214-7385

<http://crds.jst.go.jp/>

©2012 JST/CRDS

許可無く複写/複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission. Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

