

# 科学技術動向

2003

8

No.29

## 科学技術トピックス

### ▶ ライフサイエンス分野

- ①組換え作物をめぐる欧州の動向（英国を中心として）
- ②アポトーシス（細胞自殺）完結の仕組み

### ▶ 情報通信分野

- ①次世代半導体微細加工装置に向けたリソグラフィ技術の提案目白押し  
— NGL '03 (Next Generation Lithography) /Work Shop) の  
トピックスから—

### ▶ 環境分野

- ①薬品を使わないバイオフィルム除去技術

### ▶ ナノテク・材料分野

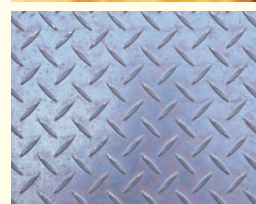
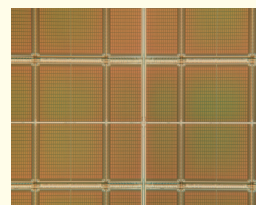
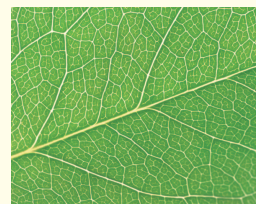
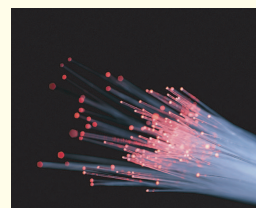
- ①ナノサイズの析出物を金属組織中に微細分散させ  
耐熱鋼の強度・寿命を向上

### ▶ 製造技術分野

- ①単層カーボンナノチューブ製造技術が進展

## 特集 1 ゲノム構造解析技術の研究開発の必要性

## 特集 2 外科手術支援ロボットの導入と開発の動向



## 科学技術トピックス

### ライフサイエンス分野

4

#### ①組換え作物をめぐる欧州の動向（英国を中心として）

今年6月、英国において、遺伝子組換え（GM）作物について一般市民や、関心を持つ団体の意見を聞くための討論会が、英国政府の支援のもとに行われた。この討論会は英国政府が今年 GM 作物の作付けを認可するか否かの判断材料とするために計画されたものである。英国は GM 作物の商業的作付けの認可を欧州連合（EU）の諸国と同様に 1998 年より停止している。英国の農業大臣は討論の結果に対する英国政府の考え方を文書で公表する約束をしている。同時に首相の戦略グループは GM 作物に関する経済的評価の研究結果をまとめ今夏に提出する予定である。欧州の GM 作物に関する動向は日本の政策、消費者動向等にも影響を及ぼす可能性があり、注目の必要がある。

#### ②アポトーシス（細胞自殺）完結の仕組み

生体内でアポトーシス（細胞自殺）を起こした細胞は、食細胞（マクロファージ、好中球など）に貪食されて速やかに消失する。アポトーシス細胞の近くに常に食細胞がいるとは限らず、体液中の食細胞がアポトーシス細胞の部位へすばやく集積する仕組みの存在が予想されていた。今回、食細胞の集積を促す物質がアポトーシス細胞自身から放出されることが明らかにされた。以前にもアポトーシス細胞が別のマクロファージ集積因子を放出することが報告されていたが、アポトーシス実行因子（カスパーゼ）との関係が示されたのはこれが初めてである。この事実はアポトーシス細胞が自分を始末するための反応にも関与していることを意味しており、アポトーシスの「生理的細胞死」としての立場が一段と固まったと考えられる。

### 情報通信分野

5

#### ①次世代半導体微細加工装置に向けたリソグラフィ技術の提案目白押し

—NGL'03 (Next Generation Lithography) / Work Shop のトピックスから—

去る7月11日より2日間、応用物理学会主催のワークショップ NGL'03 が開かれ、次世代半導体微細加工装置すなわち、現状の解像度 90nm の次の段階として 2005 年以降の実用化に向けた最新のリソグラフィ技術の提案が相次いだ。しかし、次世代での本命技術がこれらのどれになるか混沌としており、いくつかは淘汰される運命にある。このため今後の技術開発競争は熾烈である。これまで、日本のメーカは、この分野で技術・ビジネス両面で世界をリードして来たが、ビジネス面では最近顧客サービスを重点化した欧州の ASML 社に追い越される局面もあり苦慮している。日本の国際競争力を今後も保持し向上して行くためには、これまでの「本命技術を見抜く力」に加え、サービスソフトの改善など「顧客満足度」の一層の改善が期待される。

## 環境分野

6

## ①薬品を使わないバイオフィーム除去技術

バイオフィーム（水中で貝や微生物などの集合体が形成する層）は金属の腐敗や各種の汚染の原因となる。従来、薬品及び人力による除去が主な方法であったが、近年、水中でパルス放電を発生させ、この付着を防止するパルス・アーク技術が注目を集めている。これは、水中のターゲットの近くに設置した電極間に高エネルギーを印加することで発生する衝撃波がバイオフィームを刺激し、形成を抑制するものである。またアークの発生は高電界、紫外線なども同時に発生させ水質浄化の効果があり、さらに従来の方法と比べコストの低減が期待できる。これの応用として、塩素では効果のない水道水中のクリプトスポリジウム（下痢などを引き起こす原虫）の不活性化、廃棄物リサイクル、光触媒を併用した有害物質の分解などが検討されている。

## ナノテク・材料分野

6

①ナノサイズの析出物を金属組織中に微細分散させ  
耐熱鋼の強度・寿命を向上

物質・材料研究機構超鉄鋼研究センターの種池正樹特別研究員らのグループは、ナノメートルレベルの大きさの金属窒化物粒子を合金組織中に分散させ、火力発電所などの高温プラントで必要とされる 650℃、10 万時間で 100MPa（メガパスカル）以上のクリープ破断強度を有し、靱性が良好な超高強度フェライト系耐熱鋼を開発した。今後さらに実用化研究を進め、大きな CO<sub>2</sub> 発生源の一つである火力発電の効率アップにより地球温暖化ガス排出量の削減に貢献することが期待される。

## 製造技術分野

7

## ①単層カーボンナノチューブ製造技術が進展

東大大学院工学系研究科の丸山茂夫助教授らのグループは、従来の炭化水素の代わりにアルコールを原料として用い、従来法に比べ高純度・低温で単層カーボンナノチューブを合成できることを見出しているが、7 月 23 日～25 日に開催された第 25 回フラーレン・ナノチューブシンポジウムで最近の研究成果が報告された。シリコン基板上に触媒（モリブデン／コバルト）を分散し、温度を上昇させた後、アルコールと接触させたところ、650℃という低温でも高純度の単層カーボンナノチューブがシリコン基板上に生成することが分かった。また、単層カーボンナノチューブについて、金属性と半導体性の含有比率を評価する方法の検討を行い、可視近赤外蛍光スペクトルが有力な評価法であることを確認した。

## 特集－1

## ゲノム構造解析技術の研究開発の必要性

— 8

ヒトゲノムプロジェクトでは、当初予定より約 2 年早く 2003 年 4 月に完全配列解読が終了したが、解析技術の急速な進展が、その遂行にあたって大きく寄与した。

ポストゲノム研究に突入し、DNA 配列を明らかにするゲノム構造解析を中心とした研究から、DNA 配列情報をもとに、遺伝子の位置や機能を同定するゲノム機能解析、医療・医薬分野などにおける応用等へと進展してきている。このような研究においてもゲノム構造解析を行うことは必要である。また、ヒトゲノムプロジェクトでは、単なる塩基配列が明らかにされたに過ぎなく、疾患や医薬品の作用と関連するゲノム配列を特定するためには、さらに多くのヒトゲノム配列を統計的に解析する必要がある。したがって、今後求め



られている技術は、より速く低コストで解析できるものである。

ゲノム構造解析技術としては、DNA を端から読みとっていく方法（DNA シークエンサーによる DNA 塩基配列決定）と、既知配列との結合性を利用して検出する方法（マイクロアレイや DNA チップを用いる方法）がある。DNA シークエンサーは、1977 年に開発されたサンガー法に基づいた技術革新が進み、この間に解析能力が飛躍的に向上したが、この方法の延長線上だけでは上記の要望に応えるには限界があると言われており、新たな技術の導入が期待されている。

こういった状況の中、従来法をさらに発展させた技術の研究開発や、新たな原理を導入した技術の研究開発も進んでいる。まだ研究段階ではあるが、これらの研究開発成果から実用化段階までつながるものも生まれるであろう。

過去の施策においても、ゲノム解析技術の重要性は認識されていたが、最近改めて、ゲノム構造解析技術の研究開発を推進する取り組みが始まりつつある。今後の推進にあたっては、新たな原理を生み出す基礎的研究と、その成果を育てる応用研究へのサポートを継続的に行うことが重要である。また、その成果を研究現場や応用の場面で実際に使われる装置にまで育て上げることが大きな課題である。

## 特集－2

## 外科手術支援ロボットの導入と開発の動向 — 15

近年、医療用のロボット工学、特に、外科手術支援ロボット技術が実用段階に入り、注目を集めている。従来から内視鏡下で行われてきたすべての領域の外科手術で、外科手術支援ロボットの有用性が実証され、すでに海外では 2002 年から 2003 年にかけて数千例以上の手術実績が報告されている。手術支援ロボットは、低侵襲治療による患者の負担軽減、遠隔地での手術も可能にする遠隔操作性、シミュレーションによる研修医の教育など、医療現場の新たな質的变化を生み出す可能性をもつ技術として期待がかけられている。

日本の外科医の多くも、手術支援ロボットの腕前が、器用さの点で最も優れた外科医のレベルにすでに達していることを認識し始めている。さらに、臓器のリアル情報を臓器上に画像表示する機能など新たな付加価値が加わりつつあり、日本でもそれらの要素技術開発が熱心に行われている。しかし、日本の医療現場には種々の規制が存在するため、手術支援ロボットの導入はこれからという段階にある。

この手術支援ロボット技術は、要素技術として目と手の機能を重要視しており、高精度作業を追及した産業用ロボット開発の延長上にあると言えるが、あくまで術者の意思のもとに操作され、医師の代替を目指すものではない。この点において、日本で盛んな自立移動型のヒューマノイドロボット研究と比べると、やや地味な存在である。日本国内における関連プロジェクトや科研費研究も数多いが、小規模分散の研究傾向にあり、多くの成果は要素技術のみにとどまって、実際に医師が使いたいと望むような医療機器システムの形まで達していない。このため、手術支援ロボットは、海外から輸入しなければならない治療系医療機器のひとつとなっている。

今後、ロボット技術に代表されるような新しい医療機器技術が日本から生まれていくためには、まず、医工連携の研究体制として、各要素技術を医療機器システムとして組み上げ、実際の医療現場に持ち込むという工学的トランスレーショナルリサーチまで責任をもった目標設定が不可欠である。環境整備としては、多少のリスクは負っても新しい医療を試みるという患者の選択の余地を認め、医師や製造者および患者に対して保障を用意する体制が必要である。また、現在進行中の医療関連の認可制度や知的財産権の見直しも大きな影響力をもつため、より積極的に進める必要があろう。

# 科学技術 トピックス

以下は科学技術専門家ネットワークにおける専門調査員の投稿（8月号は2003年7月5日より2003年8月7日まで）を中心に「科学技術トピックス」としてまとめたものです。センターにおいて、関連する複数の投稿をまとめ、また必要な情報を付加する等独自に編集するため、原則として投稿者の氏名は掲載いたしません。ただし、投稿をそのまま掲載する場合は、投稿者のご了解を得て、記名により掲載しています。

## ライフサイエンス分野

### ① 組換え作物をめぐる 欧州の動向 (英国を中心として)

今年6月、英国において、遺伝子組換え（GM）作物について一般市民や、関心を持つ団体の意見を聞くための討論会が英国政府の支援のもとに、6回にわたって行われた（Science, Vol.300, 1637-1638, 2003）。

この討論会は英国政府が今年GM作物の作付けを認可するか否かの判断材料とするために計画されたものであり、組織委員長にはケンブリッジ大学の前副学長のMalcolm Grantが就任している。英国はGM作物の商業的作付けの認可を欧州連合（EU）の諸国と同様に1998年より停止している。

英国の農業大臣Margaret Beckettは討論の結果に対する英国政府の考え方を文書で公表する約束をしている。同時に首相の戦略グループはGM作物に関する経済的評価の研究結果をまとめ今夏に提出する予定である。英国政府はこれらの評価結果がGM作物を推進する方向に都合の良い結果となる事を期待しているが、バーミンガムにおいて昨週行なわれた討論会では、一般市民および環境団体などからの拒絶反応がかなり強かった。

英国にはGM作物推進農家も居るが、周囲の農家などからの反対運動に困惑している。

一方、米国政府は自由貿易の観点からEUに対してGM作物の猶予（モラトリアム）の解除を要求しつつあり、今年5月にWTOに対して提訴している。

現在のところEU加盟国の政府に公式の動きは無いが、GM拒否の合意は崩壊するかもしれない。というのは、スペインの農家は既に殺虫成分をもつトウモロコシを栽培し、またイタリア政府はEU委員会に対してGM作物の貿易の再開を要求している。これらの動きは英国政府の考え方をサポートするものとなる。

他方、欧州議会は6月上旬、加盟国がGM作物の安全性について信頼に足る証拠が無い場合には輸入を拒否できるという内容を盛り込んだ議定書案を承認し、今年7月にはGM作物について厳格な表示の義務化と、製品の経歴を追求する事を要求できる法案の議決を予定している。

今年の夏、EUではGM作物に関して熱い論戦が展開されるだろう。

欧州のGM作物に関する動向は日本の政策、消費者動向等にも影響を及ぼす可能性があり、注目の必要がある。

（味の素㈱ 都河 龍一郎氏）

### ② アポトーシス（細胞自殺） 完結の仕組み

生体内でアポトーシス（細胞自殺）を起こした細胞は、食細胞（マクロファージ、好中球など）に貪食されて速やかに消失する。これにより、死細胞内容物による周辺組織の汚染が起らず、炎症や自己抗体生産が防止されている。けれども、アポトーシス細胞の近くに常に食細胞がいるとは限らず、体液中の食細胞がアポトーシス細胞の部位へすばやく集積する仕組みの存在が予想されていた。

ドイツ・テュービンゲン大学のK.Lauberらの報告（Cell, Vol.113, 717-730, 2003）によると、食細胞の集積を促す物質がアポトーシス細胞自身から放出されることが明らかにされた。アポトーシスを起こした細胞では、アポトーシス実行因子（カスパーゼ3）が活性化されて細胞死につながるさまざまな反応を起こす。その一方同じカスパーゼ3がある種の酵素（ホスホリパーゼ）を活性化することにより、膜リン脂質のひとつであるホスファチジルコリンが部分分解されてアラキドン酸とリゾホスファチジルコリンが生じる。このリゾホスファチジルコリンがマクロファージを呼び寄せる働きを担

うことが判明したのである。

以前にもアポトーシス細胞が別のマクロファージ集積因子を放出することが報告されていたが、アポトーシス実行因子であるカス

パーゼとの関係が示されたのはこれが初めてである。この事実はアポトーシス細胞が自分を始末するための反応にも関与していることを意味しており、アポトーシスの「生

理的細胞死」としての立場が一段と固まったと考えられる。

(金沢大学大学院医学系研究科  
中西 義信氏)

## 情報通信分野

### ①次世代半導体微細加工装置に向けたリソグラフィ技術の提案 目白押し—NGL'03 (Next Generation Lithography)/Work Shop) のトピックスから—

去る7月11日より2日間、東京お台場の日本科学未来館において、日本半導体産業の復興へ向けてNGL'03が開かれ、次世代半導体微細加工装置をターゲットとする最新のリソグラフィ技術の提案が相次いでなされた。半導体微細加工技術を光源の短波長化に伴って世代付けすれば、第1世代は、水銀ランプを光源とする露光装置。第2世代は、光源により短い波長の248nmのKrFレーザや193nmのArFレーザを使った露光装置であり、これらが現状の解像度90nmを下る半導体量産技術を支えている。

今回のNGL'03で議論が沸騰したのは解像度が65nmを下る2005年以降の次世代のリソグラフィ技術である。

第1には、既に量産に使用されている上記ArFレーザを光源とする露光装置の延命をはかる技術で、対物レンズの先端とウエハの間の空間を純水で浸し、実効的なNA(解像度)を屈折率1.4分だけ向上する技術である。液浸レンズ

はオイルを用いた超高解像の顕微鏡として古くから実用されているが、量産用露光装置への適用は初めてであり、解像度60nmが部分実験で実証された。

第2は、波長157nmのF<sub>2</sub>レーザを光源とする露光装置であり、光源、CaF(フッ化カルシウム)レンズ光学系、そして感光材料であるフォトレジストまでの要素技術が完成し、解像度65nmが確認された。今後、量産機へむけての技術開発に入る。因みにこの露光装置でも液浸系が可能であり45nm以下を狙える。しかし、純水がこの波長を通さないため、新たに液体を探索する必要がある。

第3は、EPL(Electron Projection Lithography)である。これは、マスクパターンをウエハ上に縮小投影し、電子ビーム(波長0.1nm以下)露光する技術であり、スループットは不利であるが解像度、焦点深度いずれも有利なため、前述の露光装置では解像困難なコンタクトホールなどの孤立パターンの露光用として併用される。

そして、第4が、マスクをウエハに近接し、電子ビームでそのまま転写するLEEPL(Low-energy electron-beam proximity-projection lithography)である。現在65nmの解像度が実験的に得られており、45nmへ向けて挑戦されている。以上のように次世代への技術開発は続くが、本命技術

がこのうちのどれになるか混沌としており、何年か後には多くは淘汰される。これに伴うコストの回収の問題もあり各社の競争は熾烈である。

以上の次世代技術に対して、次々世代とでも言うべき技術として、高真空中でノズルから噴出する水に超高出力レーザ光を照射して生じる高温プラズマから発生する波長13.5nmの極紫外光を用いたリソグラフィーの進展も発表された。この分野でも、日米欧の競争は激化している。日本では経産省主導のEUVA(Extreme Ultra Violet lithography Association)という産官学連携組織に、(株)ニコン、(株)キヤノンなどの半導体製造装置メーカーや(株)東芝、(株)ルネサステクノロジなどの半導体製造メーカーが共同参加しており、国際競争力向上に向けて装置コスト削減を含む将来技術の開発が鋭意進められている。

これまで、半導体製造装置の分野で日本のメーカーは、技術・ビジネス両面で世界をリードして来た。しかし、ビジネス面では最近顧客サービスを重点化した欧州のASML社に追い越される局面もあり苦慮している。日本の国際競争力を今後も保持し向上して行く上で、これまでの「本命技術を見抜く力」に加え、サービスソフトの活用など「顧客満足度」の一層の改善が期待される。



## 環境分野

### ①薬品を使わないバイオフィルム除去技術

水中で微生物や貝などによって形成されたフィルム状のものをバイオフィルムと言ひ、金属の腐敗、受入水パイプの目詰まり、海洋構造物の生物汚損、食品の汚染等の問題を引き起こすため除去する必要がある。現状では、薬品の使用や確実かつ環境への負荷が少ない人の手による除去が行われているが、より安価で簡便な技術が求められている。こうした背景から、近年、水中で放電を発生させることにより、バイオフィルムの形成を防止するパルス・アーク法という新技術の開発が進められて

いる。

この技術は、水中のターゲットの近くに設置した電極間に、高エネルギーを印加し、立ち上がり時間が非常に短いパルスを一定間隔で発生させ、電極間のアークで発生する衝撃波がバイオフィルムを刺激し、その形成を抑制するものである。またアークの発生と同時に高電界、紫外線やヒドロキシラジカルなども発生するため水質浄化の効果があること、薬品を使用しないことから生態系への負荷が軽減され、従来の方法と比較してコスト的にも安価となるといった利点が期待される。

日本、アメリカ、カナダでは実際のプラントの一部を用いて実証実験を行っており、ヨーロッパで

## 用語説明

### ①クリプトスポリジウム

人やその他の哺乳動物の小腸に寄生して、下痢症、腹痛、発熱、嘔吐などの症状を引き起こす原因となる原虫。塩素殺菌では効果がないため水道水への混入が問題となる。

も実験室レベルで研究されている。

また、このパルス・アーク法の応用として、バイオフィルムの形成防止のほかに、塩素では効果のないクリプトスポリジウム①の不活性化や、廃棄物リサイクル、光触媒を併用した有害物質の分解なども検討されており、従来の方法に代わる有効な手段として今後が期待できる技術である。

## ナノテク・材料分野

### ①ナノサイズの析出物を金属組織中に微細分散させ耐熱鋼の強度・寿命を向上

地球温暖化対策としてのCO<sub>2</sub>排出量抑制と資源節約の観点から、火力発電プラントのさらなる発電効率の向上が強く求められており、タービン入口の蒸気条件が650℃、350気圧の超々臨界圧発電プラントの実現が望まれている。650℃級プラント1基で従来プラントに比べ、年間自動車16万台分のCO<sub>2</sub>削減効果が見込まれている。このため各国で耐熱鋼開発プロジェクトがスタートしており、高温で実用化の条件である10万時間使用可能な高強度耐熱鋼の実現が切望されていた。

物質・材料研究機構超鉄鋼研究

センターの種池正樹特別研究員らのグループは、ナノメートルレベルの大きさの金属窒化物粒子を合金組織中に分散させ、650℃、10万時間のクリープ破断強度が目標値の100MPaを越え、靱性が良好な超高強度フェライト系耐熱鋼を開発した(Nature 424, 294-296, 17 July 2003)。

金属や合金は高温にさらされると、比較的低い応力下でも時間が経つにつれて変形することがあるが、これをクリープという。フェライト鋼は最も一般的な耐熱鋼で、火力発電所のボイラ系大口厚肉鋼管など各種プラントに幅広く用いられている。しかし従来材の耐熱性の限界は620℃程度で発電効率は42%程度であり、発電効率アップを目指して計画されているタービン入り口の蒸気温度650℃になると耐熱性が著しく低下する点が問題であった。

今回開発された新鋼材では、鉄鋼組織中の炭素量をできるだけ削減することで粗大になりがちなクロム炭化物の析出を抑制するとともに、粒径数ナノメートルサイズの微細で高温安定なバナジウム窒化物を金属組成中に分散析出させることにより、靱性を確保しながらクリープ破断強度を飛躍的に強化させ、650℃において現時点で最強のクリープ強度を有する鋼より2桁大きいクリープ寿命を示した。

新しい鋼は従来の製造技術を使って経済的に製造できる。今後は実用化する上でさらに必要となる高温水蒸気中耐酸化性や溶接性等の諸特性の向上を進め、実用化への道筋を早急に確立し、大きなCO<sub>2</sub>発生源の一つである火力発電の効率アップにより地球温暖化ガス排出量の削減に貢献することが期待される。

## 製造分野

### ① 単層カーボンナノチューブ製造技術が進展

カーボンナノチューブは単層カーボンナノチューブと多層カーボンナノチューブに大別されるが、単層カーボンナノチューブには半導体性を示すものと金属性を示すものが存在することから、トランジスタのような電子デバイス等への応用が期待されている。ところが、単層カーボンナノチューブは製造が難しいこともあり、実験室レベルでは種々の検討がなされているものの、大量合成が可能となっているのは一酸化炭素原料を触媒の存在下に高温（800～1000℃）・高圧（30～100気圧）の条件で反応させる方法のみであり、より簡便な方法が求められている。更に、従来の単層カーボンナノチューブの製造法では、金属性を示すものと半導体性を示すものが混在して生成するために、電

子デバイス等へ応用するためにはこれらを作り分けることが重要な課題となっている。

東大大学院工学系研究科の丸山茂夫助教授らのグループは、従来の炭化水素の代わりにアルコールを原料として用い、多孔性無機材料であるゼオライトおよび金属（鉄／コバルト）からなる触媒に接触させることにより、従来法に比べ高純度・低温で単層カーボンナノチューブを合成できることを見出しているが、2003年7月23～25日に開催された第25回フラーレン・ナノチューブシンポジウムで最近の研究成果が報告された。

シリコン等の基板上に単層カーボンナノチューブを直接合成することは、単層カーボンナノチューブを電子デバイス等に利用する際の実用的な手法の一つであるが、その際、合成温度を出来るだけ低くすることが要求される。シリコン基板上に触媒（モリブデン／コバルト）を分散し、温度を上昇させ

た後、アルコールと接触させたところ、650℃という低温でも高純度の単層カーボンナノチューブがシリコン基板上に生成することが分かった。石英基板上でも同様の結果が得られた。

また、アルコールを原料として合成した単層カーボンナノチューブについて、金属性と半導体性の含有比率を評価する方法の検討を行い、可視近赤外蛍光スペクトルが有力な評価法であることを確認した。今後、金属性単層カーボンナノチューブと半導体性単層カーボンナノチューブの作り分けを目指し、合成条件との関連を調べていくとの事である。

アルコールを原料とする単層カーボンナノチューブ合成法は最近になって見出された方法であり、合成条件の最適化などにより更に発展する可能性があると考えられる。今後の展開に期待したい。

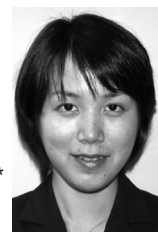
.....



## 特集①

## ゲノム構造解析技術の研究開発の必要性

ライフサイエンス・医療ユニット 島田 純子\*  
茂木 伸一



## 1. はじめに

2003 年 4 月 14 日にヒトゲノムの完全配列を解読したとしてヒトゲノムプロジェクトの終了が宣言された。ヒトゲノムプロジェクトは、ヒトゲノムの全配列解読を目標とするもので、1980 年代半ばに提唱されたが、その当時の解析技術では全配列解読には膨大な時間を要することなどから、実現性は乏しいと考えられていた。しかし、その後、ヒトゲノム研究に対する動きが次第に活発となり、1990 年に国際ヒトゲノムプロジェクトが米国主導で本格的に開始されることとなった。プロジェクト開始当

初の計画では、ヒトゲノムの全配列（約 30 億塩基対）を解読することや全遺伝子（約 3 万個）を同定すること等を 2005 年までに終了する予定であったが、この 4 月に全配列の完全解読が終了したとの宣言がなされたのである。その主たる要因として、解析装置の能力が急速に向上したことがあげられている<sup>1)</sup>。

このヒトゲノムプロジェクトを経て、ゲノム構造解析技術がここ数年間で急速に進展したことや、配列解析装置が研究に用いる機器として一般に普及したことなどか

ら、ゲノム構造解析技術は、すでに成熟した技術であるとの認識もある。しかしながら、これからのポストゲノム研究の時代においては、「より速く低コストで解析する」ことが、さらに求められるようになってきている。従来の技術の延長線上だけではこういった要望に応えるには限界があるといわれており、新たな技術の導入が期待されているところである。

本稿では、このような状況にあるゲノム構造解析技術の研究開発の現状と、研究開発の推進の必要性について述べる。

## 2. ゲノム構造解析と機能解析

ゲノムの解析には、ゲノム構造解析とゲノム機能解析がある。

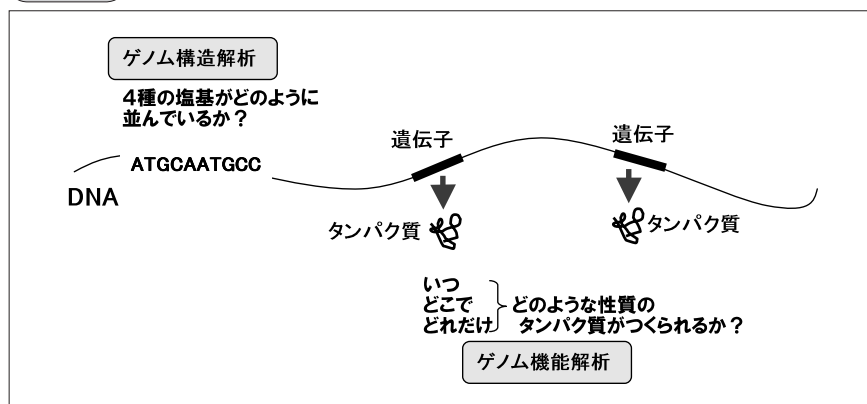
ゲノム構造解析とは、デオキシリボ核酸（DNA）の 4 種の塩基の配列を明らかにすることである。ゲノムとは、遺伝情報の全体像のことであり、ヒトの場合、24 種類の染色体（22 種類の常染色体と X・Y の 2 種類の性染色体）に含まれている。遺伝情報を担っているのは、DNA であり、アデニン（A）、グアニン（G）、シトシン（C）、チミン（T）の 4 種類の塩基がその構成要素であり、全配列を合計すると約 30 億塩基対ある。DNA の配列には個人差があり、遺伝的多型と呼ばれている。ゲノム構造の解析には、DNA 配列を端から読

みとっていく方法と、ある既知の DNA 配列と比較してその違いを見る方法がある。

ゲノム機能解析とは、ゲノムの配列情報とその表現型 (phenotype)

との対応を明らかにすることである。すなわち、タンパク質をつくる情報を保持している遺伝子やそれを調節する領域の位置を探索し、その機能を同定することなどである。

図表 1 ゲノム構造解析と機能解析



科学技術動向センターにて作成

### 3. ゲノム構造解析技術の進展

ゲノム構造解析技術としては、DNA を端から読みとっていく方法 (DNA 塩基配列決定技術) と、基盤上に固定化した DNA 配列との結合性を利用して、固定化した配列との差異を検出する方法がある。

一本鎖 DNA の塩基配列を決定する原理は、1977 年に、Frederick Sanger によるサンガー法<sup>①</sup>と、Allan Maxam、Walter Gilbert によるマキサム・ギルバート法の 2 つの方法がほぼ同時に発表された。この当時は、手作業と放射線検出により DNA 塩基配列決定が行われていたため、1 人の実験者が 1 年で 1,000 塩基程度を決定するのが限界だった<sup>2)</sup>。自動化するにはマキサム・ギルバート法に比べてサンガー法の方がより簡単であったことなどから、次第にサンガー法がよく使われるようになっていった。

その後、1982 年に、東京大学の和田昭允が自動塩基配列決定装置の開発を提唱し、このための要素技術の開発が開始された。1986 年に、Leroy Hood および Lloyd Smith らが最初の自動塩基配列決定装置を発表、1987 年に Hood の原理に基づく最初の自動塩基配列解析装置が Applied Biosystems inc. から販売され始めた。さらに、1990 年に、Lloyd Smith、Barry Karger、Norman Dovichi の 3 グ

図表 2 ゲノム関連技術の開発史

1953	二重らせん構造の発見	J. Watson and F. Crick
1972	DNA の組換え技術の開発	P. Berg and S. Cohen
1977	DNA シークエンシング法の開発 (サンガー法、マキサム・ギルバート法)	F. Sanger, A. Maxam, and W. Gilbert
1980	RFLP によるマッピング提唱	D. Botstein, R. Davis, M. Skolnick, R. White
1982	塩基配列決定自動化システム提唱	A. Wada
1984	パルスフィールドゲル電気泳動法の開発	C. Cantor, D. Schvartz
1985	PCR 法の開発	K. Mullis
1986	自動シークエンサーの開発 PCR のための耐熱性酵素	L. Hood, L. Smith Mullis, K. Saiki
1987	YAC (人工酵母染色体) 自動シークエンサー市販	D. Burke, M. Olson, G. Carle Applied Biosystems inc.
1989	STS を使ったマッピング	Olson, Hood, Botstein, Cantor
1990	キャピラリー電気泳動の開発	Karger, Smith, N. Dovichi
1992	BAC (人工バクテリア染色体) の開発	M. Simon
1993	キャピラリーアレイ電気泳動	H. Kambara
1995	DNA マイクロアレイ	P. Brown
1996	DNA チップ市販	Affimetrix
1997	キャピラリー DNA シークエンサー市販	Molecular Dynamics
1998	キャピラリー DNA シークエンサー市販	PE Biosystems Inc.

徳島大学薬学部馬場嘉信教授提供資料および参考文献<sup>3)</sup> をもとに科学技術動向研究センターにて作成

ループがキャピラリー電気泳動に基づくシークエンサーを、1992～3 年に Richard Mathies および日立製作所の神原秀記らのグループがキャピラリーアレイ電気泳動に基づくシークエンサーを開発した。この装置は、1997 年に Molecular Dynamics から、1998 年に PE Biosystems Inc. から市販され始めた<sup>3)</sup>。この装置が、現在、最も一般的に用いられているもので

ある。

キャピラリー DNA シークエンサーでは、サンプルの分析・検出・解析が自動化されている。サンプル分析過程である電気泳動をキャピラリー (毛細管) 中で行うことにより、高速性と分解能向上を実現したものである。現在の装置は、1 日あたり 748,800 塩基 (Applied Biosystems 3730 DNA Analyzer は 48 本のキャピラリーを装備している。解析プロトコル Standard を用いた場合キャピラリー 1 本による解析で約 650 塩基の長さの配列を一度に解読することができるが、この操作に約 1 時間かかる) も解読できるまでになっている<sup>4)</sup>。以上のように、塩基配列解析技術はサンガー法に基づいた技術革新が進み、この間に解析能力が飛躍的に向上した。

一方、SNP (一塩基多型、single

#### 用語説明

##### ①サンガー法

一本鎖 DNA の塩基配列を決定する方法。一本鎖 DNA に相補的な配列のポリヌクレオチド鎖を、酵素を用いて合成する時に、特定のヌクレオチドの位置で反応を停止させることができることを利用する。相補的な配列を合成するための基質はデオキシリボヌクレオチド (dNTP) だが、そこに少量のジデオキシリボヌクレオチド (ddNTP) を加えておく。酵素は、dNTP と ddNTP を区別せずに伸長中の DNA 鎖に取り込むが、ddNTP が取り込まれた位置で反応が停止する。合成されたポリヌクレオチド鎖を、電気泳動し、その分子量により分離し、検出する。

## 用語説明

②マイクロアレイと DNA チップ<sup>6)</sup>

マイクロアレイ、DNA チップは、ガラスやポリマーの基盤上に特定の DNA を高密度に並べたものである。マイクロアレイは DNA を基盤上に滴下するものである。DNA チップはチップの表面でオリゴヌクレオチドを合成するもので、より高密度に DNA を並べることができる。検査用の DNA 試料を蛍光標識し、基盤上の DNA と反応させると、お互いが相補的であれば二本鎖を形成（ハイブリダイゼーション）する。チップ上のどの DNA に、検査用の DNA 試料が相補的に結合したかは、蛍光検出器とコンピュータ解析により判別する。

nucleotide polymorphism) のような多型の検出や、遺伝子発現のスクリーニングを行うためには、マイクロアレイや DNA チップ<sup>②</sup>といった、基盤上に固定した DNA 配列と相補的に結合するかによ

り、固定した配列との差異を検出して配列を調べる方法が用いられている。SNP のような遺伝的な個人差については、時間をかけて配列を端から読みとり、それを既知配列と比較することにより直接調

べることもできる。しかし、マイクロアレイや DNA チップを用いて調べる方がより簡便である。並行して多数の SNP を同時に解析できるという利点があるが、まだ完成された技術ではなく、基盤上への非特異的吸着がノイズになるといった改善すべき問題が残っている。

この技術については、1995 年に、Patrick Brown らが、cDNA プロブをガラス板に貼り付けたマイクロアレイの最初の論文を発表し、1996 年に Affimetrix が商用の DNA チップを作成した<sup>3)</sup>。

## 4. ポストゲノム研究におけるゲノム構造解析技術

ヒトゲノムプロジェクトが終了して、ポストゲノム研究に突入し、ゲノム構造解析を中心とした研究から、生命現象全般の解明といった研究や、医療・医薬などの分野への応用に進展してきている。

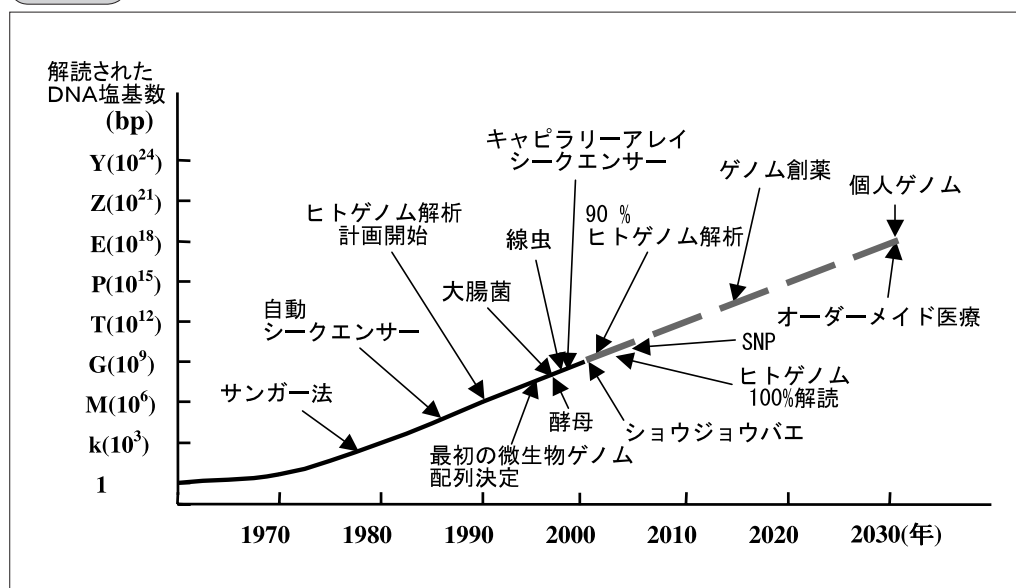
ゲノム構造解析の次のステップとして、DNA 配列情報をもとに、遺伝子の位置や機能を同定するゲノム機能解析、タンパク質の構造や機能の同定、糖鎖研究などの生体分子の研究や、細胞・組織・

個体レベルの研究などが進められている。このような研究においても、関係する部位のゲノムの構造を解析することは必要である。さらに、個々の分子を対象とした研究とは別に、ある時点に細胞に存在する全 mRNA の組成を解析するトランスクリプトーム解析、細胞内の全タンパク質の発現情報解析を行うプロテオーム解析等の網羅的研究の方向性もある。このためには、高効率で解析でき

る技術が要望される。

また、解読されたゲノム配列をもとに機能解析を進め、さらに、その結果を活用するための研究開発も進んでいる。例えば、ゲノム塩基配列には個人差があり、その差異は、疾患のなりやすさや薬剤感受性の遺伝的な素因に対応すると言われている。がんや生活習慣病などの複雑なヒトの疾患に関連した遺伝子群の情報を蓄積して疾患のメカニズム解明を進めて、疾

図表 3 DNA 配列決定ロードマップ



徳島大学薬学部馬場嘉信教授提供資料



患の新しい診断、治療、予防法の開発が目指されている。また、薬剤感受性遺伝子などの特徴を明らかにし、これを利用した医薬品の開発が目指されている。

この基盤として、個人のゲノム塩基配列を統計的に比較し、関連遺伝子の探索を行うことが必要である。疾患や医薬品の作用と関連するゲノム配列を特定するためには、多数のヒトのゲノム配列を統計的に解析する必要がある。ヒトゲノムプロジェクトでは、一通りの塩基配列が明らかにされたに過ぎない。図表 3 に示したように、国際的な塩基配列データベース DDBJ（日本 DNA データバンク、DNA Data Bank of Japan）に登録されている全塩基数は 1970 年代から現在まで指数的に増加しているが、2003 年 3 月現在、約 30 ギガ（ $10^9$ ）塩基対（ただし、これはヒトだけでなく、これまで解析さ

れた大腸菌や線虫などをすべて合わせた数）である<sup>5)</sup>。ヒト 1 人分の塩基数は 3 ギガ（30 億）塩基であることを考えると、統計的解析のためにはこれまでの実績に比して大量の解析が必要であることがわかる。そのためには、大量のゲノム構造を現在より高い効率で解析できる技術が要望される。

将来的に、ゲノム情報を用いた医療が実現され、臨床応用や個人治療の場面で、例えば検査ツールとして実用化されるためには、さらに解析コストが安いことが求められる。

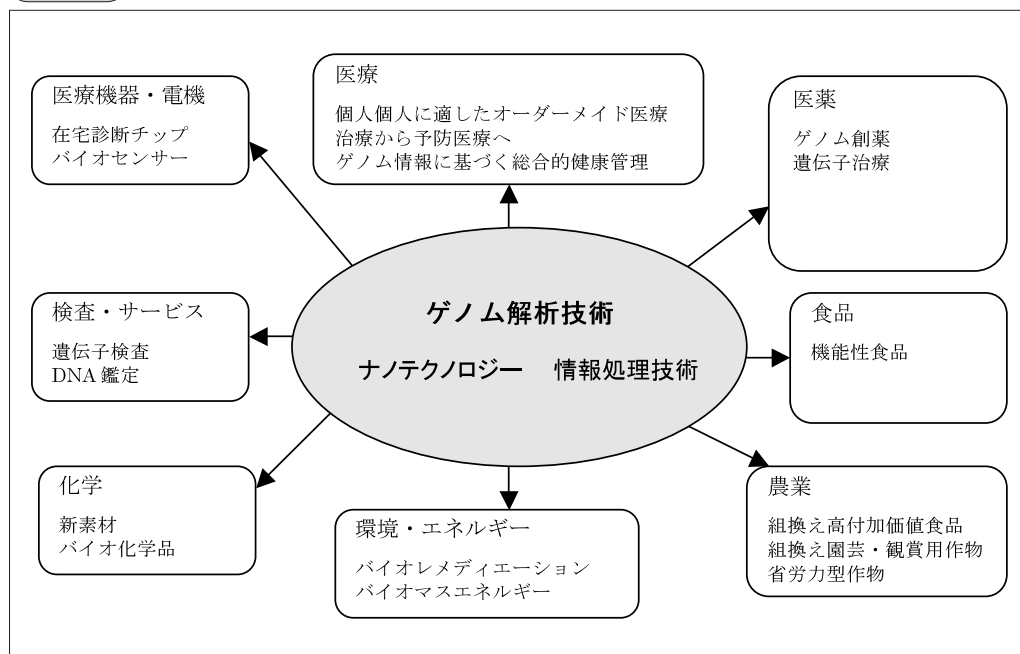
医薬・医療分野以外にも、ゲノム構造解析の必要となる分野は、非常に幅広い。

農業・食品分野では、ゲノム情報に基づいた動植物の品種改良、機能性食品の開発などが進められている。現在までに普及している遺伝子組み換え作物は、除草剤耐

性、害虫抵抗性等の形質を賦与されて、農薬使用の低減や農作業の軽減、収穫量の増加というメリットをもたらしている。現在、より生産効率の良いもの、土壌ストレスに強いもの、栄養価を高めた作物の開発に向けて研究開発が行われている。微生物ゲノムは、バイオ技術の用途として、医薬・医療分野、化成品・化学プロセスや環境分野への適用が考えられている。これを化成品・化学プロセスに活用するとか、微生物を用いて環境汚染を除去して修復する過程（バイオレメディエーション）に用いるなどといったことを考えて、ゲノム情報から新たに微生物の機能を解明する研究が進められている。

従来のものより高効率なゲノム構造解析技術があれば、こういった場面でも研究開発の進展にもたらされる効果は大きい。

図表 4 ゲノム解析技術の応用分野



徳島大学薬学部馬場嘉信教授提供資料をもとに科学技術動向研究センターにて一部改変

## 5. DNA 塩基配列決定技術に関する最近の研究

DNA 塩基配列決定法の技術改革は、サンガー法の原理に基づいて進み、現在のキャピラリー DNA シークエンサーが生まれてきた。しかし、現在、サンガー法以外の原理を導入した技術の研究開発も進んでいる。これらの技術はまだ研究段階であるが、こういった研究の成果から実用化段階へつながるものも生まれるであろう。以下にこれらについていくつか紹介する。

### 5 - 1

#### サンガー法をさらに進めた技術の例

基本的な配列解析技術としてサンガー法を用いて、解析機器を工夫することにより、より高い効率を目指した技術として、質量分析シークエンシングやマイクロチップ・シークエンシングなどが報告されている。

#### ●質量分析シークエンシング

質量分析計は、分子の質量を精密かつ迅速に決定できる装置である。電磁場をもつ真空中にイオン化した分子を導入し、イオン化分子の飛行時間から質量を測定 (TOF/MS) する。1980 年代に、エレクトロスプレーイオン化法 (ESI 法) やマトリックス支援レーザー脱イオン化法 (MALDI 法) が開発され、タンパク質や DNA 分子のイオン化が可能となり、これらを質量分析できるようになった。DNA の配列決定には、MALDI - TOF/MS 法がよく用いられている。配列決定の原理は、従来から用いられているサンガー法だが、生じた DNA 断片の分離を質量分析計で行うものである。この方法では、DNA 断片の分離と検出・解析が秒単位で終了する

上、サンプルも数 100nl 以下で良い。しかし、現在は 1 回の解析で 100 塩基程度の長さの DNA しか解析できない<sup>2)</sup>。

#### ●マイクロチップ・シークエンシング

ガラスやプラスチック基盤上に微小な溝を作成したマイクロチップ電気泳動デバイスを用いるものである。技術的にはキャピラリー電気泳動と同じ原理である。微小流路は、熱容量が極めて小さいなどの利点から、より高電圧をかけることが可能で、高分解能・高速解析が可能な他、極少量のサンプルで解析することができる。また、チップの作成には半導体技術を用いており、集積化を行って並列化したり、試料調製や検出を 1 チップ上に載せたりすることもできるという利点がある。この概念は、マイクロタス ( $\mu$  TAS; Micro Total Analysis Systems) またはラブオンチップ (Lab-on-a-chip) と言われている<sup>2)</sup>。現在のところ、DNA を PCR (Polymerase Chain Reaction) 法で増幅し、その生成物を電気泳動で分子量により分離することが、1 チップ上で数サンプル並列に処理できるようになっている。しかし、DNA 配列解析が可能なチップはまだできていない。

### 5 - 2

#### サンガー法によらない技術の例

サンガー法によらない技術として、顕微鏡直読シークエンシングやナノポアシークエンシングなどのように DNA を直接測定することが試みられている。また、DNA チップを用いて DNA の配列を決定する技術も提案されている。

#### ●顕微鏡直読シークエンシング

電子顕微鏡や走査型プローブ顕微鏡 (SPM) がめざましく進歩したことにより、DNA を直接観察することもできるようになってきた。そのため、DNA 鎖上の塩基を直接観察して解読する方法も試みられている。いくつかのグループで推進されており、DNA 二重らせんの観察、アデニンとチミンの単一塩基の識別といった報告がある<sup>2)</sup>。

#### ●ナノポアシークエンシング

DNA をその分子直径よりわずかに大きなナノポア (ナノサイズの細孔) を通過させる際にシークエンスを行う方法である。DNA が、ナノポアを通過する際にナノポアを流れる電流の塩基依存性からシークエンスを試みている。DNA 分子は、ナノポアをミリ秒で通過するため、実現されれば高速シークエンスが可能になる。現在までに、ポリアデニンとポリシトシンとの間で、電流変化の違いを見いだしているといった報告がある<sup>2)</sup>。

#### ●DNA チップを用いる方法

DNA チップに、ある長さのオリゴヌクレオチドを全て整列して固定し、調べる DNA を蛍光標識して、チップに加える。二本鎖を形成したオリゴヌクレオチド配列は、試料 DNA 中に存在することを示しており、二本鎖形成した全てのオリゴヌクレオチドを比較して、その重なりから配列を推測するものである。問題点は、基盤に並べたオリゴヌクレオチド数の平方根に相当する長さの分子までしか配列が決められないことである。例えば、長さ 8 塩基のオリゴヌクレオチドは 65,536 種類になり、これをすべて含むチップでも

読める最大長は256塩基に過ぎない。より長い配列を決めるためには、さらに多種類の配列をチップに搭載していなければならない。チップにより多種類の配列が載せられるようになり、ハイブリダイゼーション反応の検出を電子的に行えるようになれば、将来的に実用化される可能性があるだろうと報告されている<sup>6)</sup>。

### 5 - 3

#### DNA 解析技術を支える手法

現在のシーケンサーには、解読塩基長に限界があるため、ゲノ

ムのような長大なDNAを解析する際には、解析できる長さに切断する必要がある。しかし、この切断は試験管内で行われ、順番がわからなくなるので、各断片の塩基配列を解析した後に、断片間の重複する部分をコンピュータ解析により探しだし、断片を並べ直さなければならない。この作業には時間がかかる上にミスも生じやすいなどの問題がある。この点を改善するものとしてDNA1分子(DNA1本鎖)シーケンシングに結びつく技術が報告されている。

#### ● DNA 1分子シーケンシング

DNA 1分子(DNA 1本鎖)を物理的に直線状に固定して、末端から順番に切断し、この断片を取り出してPCR増幅し、サンガー法により配列を決定する方法が試みられている。この方法では、DNA断片を取り出した順に並べることで全塩基配列が決定できるので、塩基配列を決定した後に断片を並べ直さなくて良いという利点がある。すでに、1分子の伸長固定後、切断しそれを取り出す操作がなされたとの報告があり、また別に1分子からのPCR増幅がなされたとの報告もあるが、それぞれ単独の成果である<sup>2)</sup>。

## 6. おわりに

ゲノム解析技術は、ヒトゲノムプロジェクトがはじまった頃から、常に推進すべき課題の1つとして意識され続けてきた。米国におけるヒトゲノムプロジェクトでは、ゲノム配列解読能力の向上が、解析効率や解析コスト等に対する具体的な数値目標をもって、最終目標の1つとして挙げられていた。日本においても、1987年以降のヒトゲノム解析研究に関する種々の答申や建議において、「DNA解析技術開発を推進すべきである」等と記述されている。

実際の研究開発も、科学技術庁科学技術振興調整費において、1981～1983年に「DNAの抽出・解析・合成技術の開発に関する研究」、1984～1989年に「がん研究を支える共通基盤技術の開発に関する研究」、さらには、理化学研究所において1987～1994年に「HUGA(Human Genome Analyzer)の開発」などが行われた。

我が国において、「自動塩基配列決定装置」という概念の提唱が行われたことは画期的なことであり、また、その後、要素技術の研究開発などでも一定の成果が得ら

れ、それが実際に活用されている。しかし、現実としては、我が国の研究現場で購入されているゲノム構造解析装置は、そのほとんどが外国製である。ちなみに、外国製機器の販売シェアは、キャピラリーDNAシーケンサーで99%(2001年度、金額ベース)である<sup>7)</sup>。

最先端研究は装置開発から始まり、革新的な測定技術が新しい学問を発展させていく。つまり、自ら最新鋭の解析装置を開発する基盤を国内に持つことができれば、研究開発自体をさらに高める効果を期待できるであろう。ゲノム構造解析技術は、医薬・医療、農業・食品、化学、環境など、多岐にわたる分野に波及効果をもたらすため、この技術の進展は、広い分野の研究開発のレベルを高めることにつながるであろう。

最近、改めて解析機器の開発を推進するための取り組みが始まりつつある。バイオテクノロジーの成果を実用化・産業化し、国民生活の向上と産業競争力の強化を図ることを目的として出された、「バイオテクノロジー戦略大綱(BT戦略会議、2002年12月6日)」に

おいては、研究開発のターゲットの1つとして、「情報技術やナノテクノロジーとの連携の推進」や、「バイオツールへの重点投資」があげられている。さらに、「平成16年度の科学技術に関する予算、人材等の資源配分の方針(総合科学技術会議、2003年6月19日)」において、ライフサイエンス分野の重点事項の1つとして、「遺伝子・タンパク質の分析・計測のための先端的技術・機器」があげられている。また、文部科学省では、2003年6月より、「先端計測・分析技術開発に関する検討会」を組織し、今後推進すべき機器研究開発における実際の進め方の検討を行っているところである。

これらを受けて、今後の研究開発は、具体的に、以下の点に留意して進めるべきである。

ポストゲノム時代となり、ゲノム構造解析を中心とした研究から、ゲノム機能解析や、さらには、疾患との関連を解明して新たな医療に生かしていくといった応用研究への展開が想定されていることから、この技術には、新たな展開が期待されている。こういった状



況を踏まえると、まず、新たな原理を生み出す基礎的研究と、その成果を育てる応用研究へのサポートを継続的に行うことが重要である。

また、さらに開発段階へと進む技術に対しては、研究現場や医療現場などの応用の場面において、実際に使われる装置にまで育てあげることが大きな課題である。実際に使われる装置とするためには、研究における試薬、解析ソフト等を含めたシステムとして開発することが重要である。

## 謝 辞

本稿は、科学技術政策研究所において、2003 年 5 月 12 日に行われた、徳島大学薬学部教授・産業

技術総合研究所単一分子生体ナノ計測研究ラボ長、馬場嘉信氏による講演会「次世代ナノバイオデバイス研究の最前線と今後の展開」をもとに、我々の調査を加えてまとめたものである。本稿をまとめるにあたって、馬場教授には、ご指導いただくとともに、関連資料を快くご提供いただきました。文末にはなりますが、ここに深甚な感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) DOE のヒトゲノムプロジェクトのホームページ  
[http://www.ornl.gov/TechResources/Human\\_Genome/home.html](http://www.ornl.gov/TechResources/Human_Genome/home.html)
- 2) 平野研、馬場嘉信「次世代 DNA

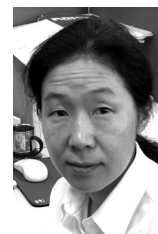
シーケンサー」、Bio ベンチャー 2002, 2(3): 38 - 44.

- 3) Roberts et al. A History of the Human Genome Project, Science 2001, 291 (5507): 1195.
- 4) アプライドバイオシステムズジャパン株式会社のホームページ  
[http://www.appliedbiosystems.co.jp/website/jp/home/index\\_gjsp](http://www.appliedbiosystems.co.jp/website/jp/home/index_gjsp)
- 5) DDBJ ホームページ  
<http://www.ddbj.nig.ac.jp/Welcome-j.html>
- 6) T. A. Brown 「ゲノム 第 2 版 新しい生命情報システムへのアプローチ」メディカル・サイエンス・インターナショナル、2003
- 7) 「科学機器年鑑 2002 年版」株式会社アール アンド デイ、2002

.....

## 特集②

## 外科手術支援ロボットの導入と開発の動向



材料・製造技術ユニット 奥和田久美

## 1. はじめに

医療にまつわる諸問題は人類にとって永遠の課題のひとつと言えるが、特に日本では急速に高齢化社会を迎えるにあたって、今までにもまして重要な問題としてクローズアップされている。日本で生まれ育った人の多くは、医療において、日本は必ずしも先進国とは言えないことに気づかないのだが、在日欧米人は、日本の医療がその技術もサービスも日本の経済力にはまったく見合っていないと指摘している<sup>1)</sup>。一般的に日本人は、医療を水と同じように「あって当然のもの」で<sup>2)</sup>、品質も良好と信じており、多少の不満はあっても、そこには選択の余地など無いと考えている。

また、ここ10年は、日本の医療機器は輸入超過傾向が続いており、特に治療系機器では輸入が輸出の2倍にも達している<sup>3, 34, 42)</sup>。従来は日本が優位であった診断系機器においても、どこまで優位が保ちきれぬのか懸念する声が出始めている。

一方、今年は鉄腕アトムの誕生年に当たるとして、各地でロボット関連のイベントが盛んである<sup>4)</sup>。日本は世界一の産業用ロボット保有国であり、二足歩行技術やヒューマノイドロボット開発にも極めて熱心、という自他ともに認めるロボット先進国である<sup>5)</sup>。このため、多くの工学研究者は、日本のロボット技術開発にまさか死角

があろうとは思っていない。

医療用のロボット技術は、日本においては上記のような状況下にある。特に本報告で紹介する外科手術支援ロボットは、治療機器のひとつにはすぎないのだが、明確に医療技術を変化させ得るという点で医療用ロボットの中でも最近特に注目されているものである。ここでは、ロボット技術導入によって大きく変わりつつある世界の治療技術の現状を直視し、ロボット先進国のはずの日本が導入も開発も出遅れてしまった理由を議論し、医工連携にふさわしい課題のひとつである医用機器の研究開発を今後どう考えていくべきかについての参考としたい。

## 2. 外科手術支援ロボットの進展

## 2-1

## 技術発展の全体像

現在、日本の医療現場において、診断や治療に、すでに多くの内視鏡的手段が用いられている。身近な例で言えば、胃カメラは先端にカメラを取り付けた通信ファイバーであり、内視鏡的診断の代表的なものである。内視鏡的手法は、初期には、胃カメラのように体内にカメラを持ち込んで画像を得るという「診断」が主体であったが、次第にマニピュレータ（鉗子）も

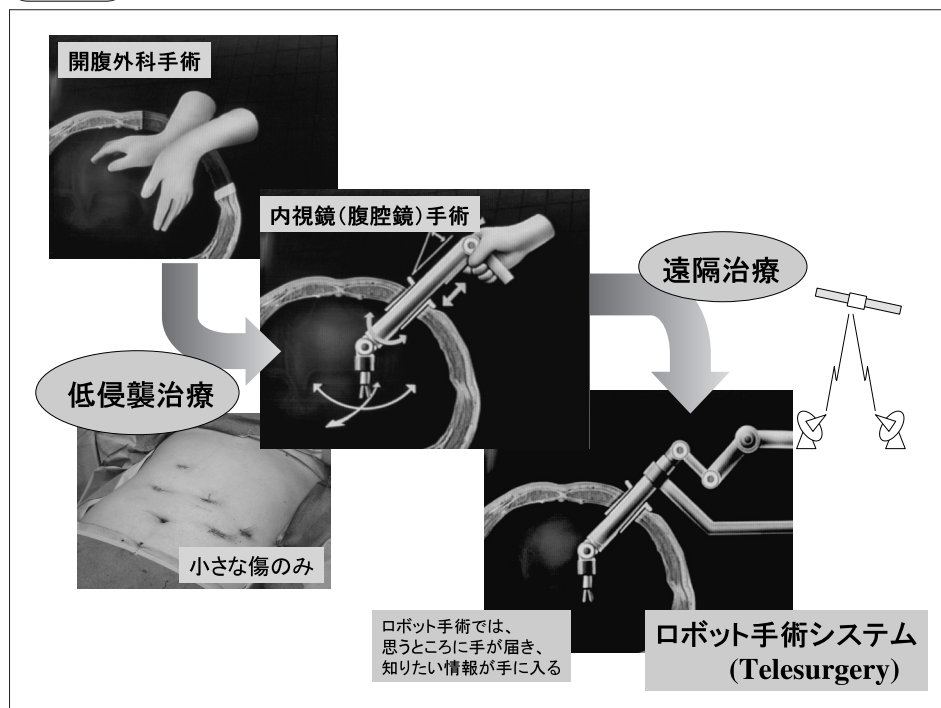
体内に持ち込んで行なう「治療」へと発展してきた。外科手術では、1990年頃から内視鏡的な治療（あるいは腹腔鏡手術と言う）が急速に普及し、これが過去10年間で医学界最大の変化であったとも言われている。現在、全外科手術の約30%には、なんらかの内視鏡的手法が用いられている。

図表1に、主にマニピュレータ技術に注目して、現在までの手術支援用のロボティクス発展を模式的に示す。

第1段階では、術者の手による手術から内視鏡手術への変化が

あり、内視鏡という画像技術とマニピュレータを体内に持ち込む技術が大きく発展した。この第1段階が、過去10年間に日本の外科手術を大きく変えた技術に相当する。ところが、世界的に見ると、1997年頃から第2段階、すなわちコンピュータを使った遠隔操作可能な総合的ロボット技術への発展が注目されてきた<sup>6)</sup>。この代表例が、米国のベンチャー企業で開発されたダビンチ<sup>7)</sup>あるいはゼウス<sup>8)</sup>という名前のロボットシステムである。日本では、これらのロボットシステムは従来の内視鏡

図表 1 外科手術における 2 段階の進展



九州大学橋爪誠教授の提供資料を基に、科学技術動向センターで作成

手術の延長にあると見なされているが、欧米ではロボット工学を用いた Telesurgery（遠隔外科手術）と呼ばれて、これまでとは別の概念として捉えられているようである。この第 2 段階では、術者の手や目が患者から完全に離れることが可能になった点が最大の発展である。図表 2 は、外科手術において術者である外科医師が、これらのロボットシステムに期待している各機能である。

図表 2 外科手術においてロボットシステムに期待する機能

ロボットの目に期待する機能	ロボットの手に期待する機能
<p>眼前のすべてが見える（広角）</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 意識するものと意識しないもの</li> <li>● 眼前の見えないものまでが見える</li> <li>● すべての情報の可視化</li> <li>● 情報のリアルタイムのアップデート</li> <li>● 必要とする情報のオンデマンド取得</li> <li>● 透視機能・臓器の構造と機能</li> <li>● オーグメンタリリアリティ（拡張現実感）</li> </ul>	<p>人間の手のように自由自在に動く 人間の手ではできないことができる 手術の基本操作を見直す</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 剥離 新たなアプローチ</li> <li>● 切離 無侵襲</li> <li>● 結紮 自動縫合器</li> <li>● 凝固 超音波凝固切開装置</li> <li>● 縫合 単一簡単な操作</li> <li>● 切除 病巣のみを切除</li> </ul>

九州大学橋爪誠教授の提供資料による

## 2 - 2

### 第 1 段階の発展の意味—手による手術から内視鏡手術へ—

第 1 段階の外科手術の進展は、カメラとマニピュレータを患者の体内に持ち込んだことにあった。1987 年のフランスでの胆嚢摘出手術が、世界で初めての内視鏡手術であったと言われている。手による手術から内視鏡手術に移ったこの第 1 の段階で、外科手術には低侵襲性という大きな特徴が備わった。患者の傷口は数 cm 以下と極めて小さくなり、基本的に開腹手術

術が不要となった。この結果、輸血がほとんど必要なくなり、患者の手術後の痛みが減少、入院期間は短縮、社会復帰までの日数も激減した。例えば脾臓摘出手術例では、以前の 30cm 以上の開腹手術が、現在では 0.5 ～ 1cm の 3 箇所

の傷口ですむ。現在は日本の胆嚢摘出手術の約 95% は内視鏡下の手術で行なわれている。また、日本の内視鏡手術後の入院期間は、平均で 4 日程度までに短縮されており、内視鏡手術の保険点数は一般治療とほぼ同じになっている。このような低侵襲治療は、合併症を減少させ、より高年齢での手術も可能とし、寝たきりの患者の減少にもつながると期待されてい

る。すでに一部では、低侵襲治療のできない病院からは患者が逃げるとい現象が起きはじめていると言う。

内視鏡的な確定診断と治療とを組み合わせれば、入院を必要とせず、当日あるいは翌日にも自宅に帰ることも可能になる。このような短期間治療を Day Surgery（日帰り手術）と呼んでおり<sup>9)</sup>、日本でも大学病院<sup>10)</sup>や民間病院<sup>11)</sup>で Day Surgery の手術室が開設中である。Day Surgery のような短期間治療は、入院患者の回転率の速さから病院経営へのメリットもあると報告されている<sup>12)</sup>。

もしロボット技術の発展を、単に内視鏡カメラの進歩とマニピュ



レータの高精度化と考えるならば、この第1段階において、その意図はほとんど達成されたとも言える。内視鏡手術は日本の医師の多くに、また患者にも好意的に受け入れられている。大学と企業との要素技術の共同開発例もみられ、日本企業もこの分野の技術開発に賛同している。しかし、トータルシステムとしての内視鏡手術支援装置が医療器具として認められた時期を考えると、米国では初のFDA認可(米国Food and Drug Administration)を受けたのが1994年のイソップ1000というシステム(Computer Motion社)であるのに対して、日本国内では2002年の(株)日立製作所MTLP-1システムが初めてのケースであった<sup>13)</sup>。

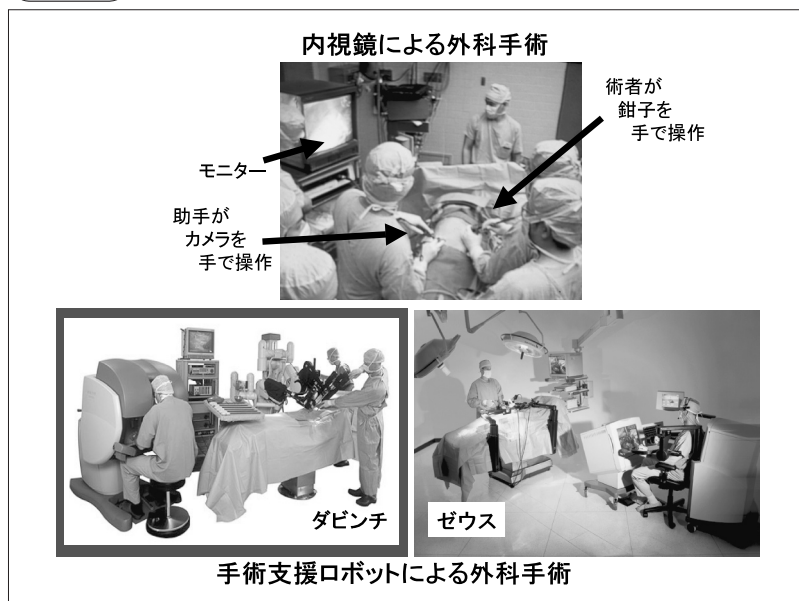
## 2 - 3

### 第2段階の発展の意味—内視鏡手術から遠隔手術へ—

第2段階の発展の重要点は、各内視鏡技術が道具の領域を超えて、ロボット手術システムとして統合されたことにある。これは術者である外科医師の時間的あるいは肉体的負担を大きく軽減するだけでなく、遠隔治療を可能とするものである。2000年代に入り、欧米ではこれらのシステムへの移行が大きく注目されている。

1990年代後半に、手術器具と内視鏡から成る複数のロボットアームを持ち、コンピュータによって制御される総合的治療ロボットシステムによる外科手術が登場した<sup>14)</sup>。これらのロボットは手術支援器具のメインフレームであり、各パーツには自由にヴァリエーションを持たせることができる。代表的なロボット手術システムであるダビンチ(Intuitive Surgical社:2000年FDA認可)<sup>7)</sup>およびゼウス(Computer Motion社:2001年FDA認可)<sup>8)</sup>による手術と、これまでの内視鏡手術との様子の違

図表3 内視鏡による外科手術と手術支援ロボットによる外科手術



九州大学橋爪誠教授の提供資料を基に、科学技術動向センターで作成

いを図表3に示す。ロボット手術システムでは、術者は患者の居る手術台とは別の場所で手術を行っており、手術台の傍らには麻酔科の医師と手術助手とが居るのみである。術者は、コンソールあるいは偏光めがねを通して患者を診ている。

図表4には、現在までにダビンチあるいはゼウスを用いて行なわれた手術の例を示す。基本的に、内視鏡下での外科手術が可能領域の手術はすべて可能であることが実証されている。海外では2002年までにすでに7,000件以上の手術例が報告され、2003年に入ってからには正確に件数を把握

することが困難なほどまでに普及しつつある。全世界ではダビンチだけでもすでに160台以上が稼動している。

これらの手術支援ロボットは、毎日のように世界で行なわれている手術を容易にし、患者の負担もより軽く、かつ遠隔でも治療を行なえることに意味があり、これは医療体制全体を大きく前進させる可能性がある。特に、心臓外科手術では、胸部を開ける必要もなく、血流も心臓も停止させる必要がなくなったことによる回復の早さなどメリットが大きいことが注目されている。慶應大学の例では手術後約2～3週間で大工の仕事

図表4 ロボット手術システムを用いた外科手術例

心臓外科手術	内胸動脈剥離、冠動脈バイパス手術(閉胸下)、僧房弁形成術
胸部外科手術	肺切除術、気胸手術、縦隔腫瘍摘出術、乳腺腫瘍切除術、胸部交感神経節切除術(多汗症)
消化器外科手術	逆流性食道炎根治術、食道切除術(食道癌)、胃切除術(胃癌)、胃粘膜切除術、幽門輪狭窄切開術、大腸切除術(大腸癌)
腹部外科手術	脾臓切除術、脾臓切除術、胃上部血行遮断術、肝臓切除術、胆嚢摘出術(胆石症)、総胆管切開術、腰部交感神経節切除術、鼠径ヘルニア根治術、卵管結紮術、子宮切除術、卵巣切除術、卵巣嚢腫切除術、腎臓切除術(腎癌)、前立腺全摘出術
血管外科手術	大動脈切除再建術(閉塞性動脈硬化症)
移植手術(ドナー手術)	腎移植術

九州大学橋爪誠教授の提供資料による

に復帰したという患者の例が報告されている。ドイツのライブツイヒでは心臓外科手術だけで2002年の1年間に約4,000件の手術が行なわれたとのことである。このようなロボットシステムは、現場の医師の要望を次々と実現させることにより、現在もその技術が日々進歩している最中である。

## 2 - 4

### 第2段階の発展における要素技術と波及効果

これらのロボットに用いられている要素技術の進展を、従来の内視鏡技術のそれと比較してみると(図5)、まず、目の部分にあたる画像技術の発達として、三次元的なリアルな映像が得られるようになった。術者が手術用ロボットのコンソールに座って内部を覗くと、まるで自分が小さくなって患者の体内で作業しているような感覚で手術を行なえる。これは、従来の内視鏡手術で、術者が患者の傍らのモニター画面を見て手術していた感覚とは明らかに異なるものであり、従来は見えなかった細かい部分までがリアルに見えるようになってきている。また、手に関し

ては、人間の手よりはるかに小さく、かつ器用に360度回るマニピュレータによって、精度的にも人間の手の動作の数倍も細かい作業を思い通りに行なうことができ、最も細い血管まで容易に縫合することが可能である。すでに日本の外科医の多くが、器用さの点で、手術用ロボットの腕前は最も優れた外科医のレベルに達していることを認めている。これは、経験の浅い医師でも最高レベルの手術が可能であることを意味する。また、術者の手の震えをマニピュレータで排除することができ、手術時間も開腹手術の1/2以下に短縮されるため、体力的にピークを過ぎた高齢の医師でも高いレベルの手術を維持し続けることが可能である。これは、外科医の腕前というバラツキが存在する現実を改善するものである。

もちろん、このようなロボットシステムにも未だ不十分な点はある。しかし現在、さらに人間の能力以上の支援も行なえるようにしようという要素技術の研究が盛んに進められている。日本における研究例を挙げると、開腹手術の感覚に近づける工夫として、高感度圧力センサを使い、触

感を術者の手にフィードバックする技術、臓器の動きを検知し、マニピュレータにフィードバックして同期させ、術者に、まるで臓器が動いていないように見せながら手術をさせる画像技術(仮想静止化技術)、内部診断装置と組み合わせて、手術中に変化しつつある血管等の臓器内部のアップデート情報をその臓器上に映し出す技術(Augmented Reality)、さらに接触によって変形する臓器情報をフィードバックさせる機能などが開発中である。術前の血管造影や腫瘍の位置確認は、術中の合併症の併発や腫瘍の残存などを最小限に食い止める手段であり、これまで医師の勘に頼っていた情報を確信に変えるものである。つまり、今後のロボット手術システムには、術者には見えないはずの像を見せるナビゲーション機能も備わっていく。このような要素技術を進展させるため、国際的な学会活動も行なわれており、国内にも日本コンピュータ外科学会という研究領域が新設されている<sup>15)</sup>。

将来的には、臓器の移植手術や再建手術といった手術にも、このような支援ロボットの適用が期待されている。また、米国では1980年代から母体内の胎児治療という分野の研究が開始されてきた<sup>16)</sup>が、このような特殊外科分野にも適用可能であると考えられている。

しかし、なんと言っても、これらのロボットシステムの最大の利点は遠隔操作性にあるだろう。術者は隣の部屋で通常の衣服のまま手術することも可能であり、インターネットや衛星通信によって海外にいる患者の手術を行なうことも可能である。専門医のいない地域での僻地医療に関しては、かなり以前から通信手段を介した遠隔操作による診断や治療が期待されており<sup>17)</sup>、2003年7月に明確化されたIT戦略本部e-Japan戦略Ⅱの中でも先導的取り組みによ

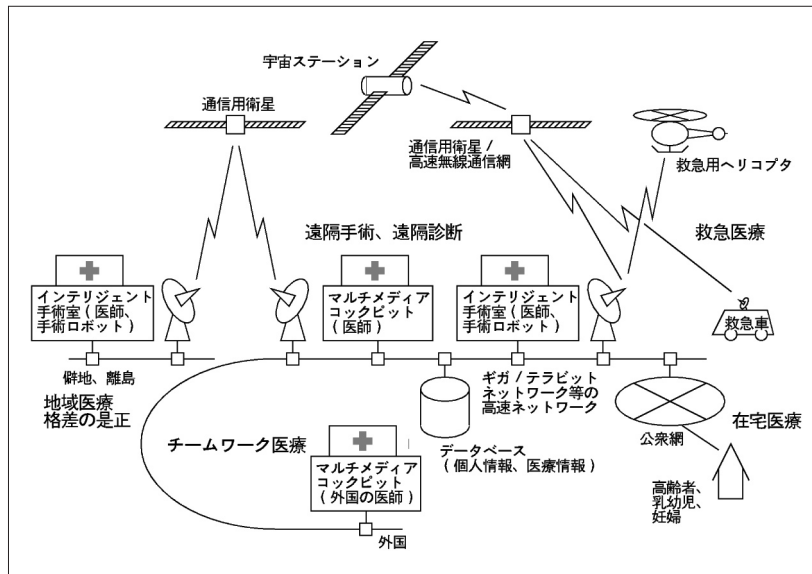
図表5 手術支援ロボットの現状レベルと今後の進展



九州大学橋爪誠教授の提供資料を基に、科学技術動向センターで作成



図表6 遠隔医療を取り入れた今後の医療システムの全体像



東京大学光石衛教授の提供資料

るIT利活用推進項目のひとつとして挙げられている<sup>18)</sup>。なお、日本では、従来は対面診療が基本とされてきた（医師法第20条）が、1997年に情報通信機器を用いた遠隔診療が認められ、すでに規制緩和がなされている<sup>19)</sup>。また、僻地医療のみならず、救急災害時の手術や、別の場所に居る複数の医師によるチームワーク手術、また、手術中の感染症の恐れを防ぐ必要性からも、遠隔治療には大きな期待がかけられている<sup>20)</sup>。大陸間の遠隔手術の第1号は、2001年の9月に米国の外科医がフランスの68歳の女性患者を、光ファイバーを介してゼウスを用いて手術した例であり、リンドバーグ手術と呼ばれている。課題であったのは通信品質の確保のみであり、それ以外は隣の部屋で手術をしているのとなんら変わりはない。なお、脳外科手術には、より微細な特殊マニピュレータが必要であるため、現時点では前記のロボットシステムでは手術できないが、もともとテレビ会議のような形で遠隔で行なわれている手術に対して専門医がアドバイスをするようなシステムも開発されており、これらと内視鏡手術とを組み合わせで行なわれた脳外科手術例が報告されている<sup>21)</sup>。

将来的には、脳外科手術の遠隔手術システムを完成させようという研究もすでに始まっている<sup>22)</sup>。

また、コンピュータによる制御は、高速シミュレータを発達させ、研修の場で十分な臨床訓練を行なうことを可能とした。日本でも内視鏡手術の発達とともにすでに開腹手術を経験したことのない研修医が出てきているが、前記のようなロボット技術を導入することにより、パイロットと同じようにシミュレーションで研修医をトレーニングすることができる。九州大学では先端医工学診療部が新設され、ロボット手術のトレーニングセンターが設けられた<sup>23)</sup>。いずれは動物による教育実験も不要になるであろう。現在はリアルな触覚再現を含む遠隔教育も可能になりつつある。2002年10月には、太平洋を越えてオーストラリア—カナダ間のヴァーチャル手術デモンストレーションが行なわれ<sup>24)</sup>、近い将来、国際的な医学のe-ラーニングが開始される可能性が示唆されている。手術の腕前の良さが国際的に高く評価されている日本の外科医は数多く、これらのシステムを取り入れた遠隔手術や遠隔教育は、近い将来の日本の大きな国際貢献のひとつにもなりうるで

あろう。

図表6は、日本のロボット研究者が描く21世紀の医療体制の理想図である<sup>20)</sup>。

## 2-5

### 手術支援ロボットの 日本での受け入れられ方

第2段階のロボットへの技術発展は、多くの日本の医師にとっては想像以上のものであったらしい。現時点では日本の臨床医の間では、まだ十分に認知されておらず、一部には拒絶反応さえあるように見受けられる。

ダビンチは日本では、2000年から2つの大学病院に導入されたが、臨床試験が2002年6月に終わったものの、まだ医療機器としての認可申請が出せない状態にある。日本では、このような新しい医療器具は、薬事法の中に当てはまる記載がない場合には認可までに長期間を要するのが常となっている。この結果、日本での導入実績はダビンチが2台とゼウスが5台で、100例程度の試験的手術のみに留まっている。

次項に述べるように、海外での開発経緯を振り返ってみれば、1990年代には機器としての改良が着々と進められていた。これらの結果がダビンチやゼウスといったかなり完成度の高いロボットシステムであって、これらは決して突然現れたわけではない。日本に多く聞かれる誤解は、ロボット技術の発展がマニピュレータの精度向上のみであり、所詮医師の手による手術にはかなわないと思われている点、あるいは、ロボットが勝手に手術を行なうようになるのではないかという恐れである。

全体的に、1990年代の日本では、医療工学技術の世界の流れを見逃したか、あるいは軽視したふしが見られる。科学技術政策研究所が2000年に行なった第7回技術



予測調査<sup>25)</sup>では、医療・保健分野、製造技術分野などの設問設定において、この分野のキーワードは完全に抜け落ちていた。ライフサイエンスの分野では「マイクロマシンやロボットを応用した低侵襲外科手術が外科手術の大半を占めるようになる」という設問が1件設定されていたが、その結果を見ると、全回答者の平均的な実現予測時期は2016～2017年、専門家平均でも2014年というように、全体的に遅めの時期を予測している。つまり、日本で専門家と言われる人々も、この分野に関しては、2000年時点において、海外の動きを十分には把握できていなかったか、あるいは把握していたとしても、日本の特殊事情からして日本への導入はかなり先のことになると思われていた。

日本国内では、医療機器としては上記の手術支援ロボットが認可されていないことから、現時点では、これらを用いた手術は臨床試験に留まり、その費用は入院に係わる通常費用も含めて全額が医師の研究費負担に頼っている。その結果、国内の手術例はまだ約100例にしかすぎない。しかしながら、日本でのこのような閉塞状況に風穴を開ける第一歩が、2003年の構造改革特区で実現されようとしている<sup>43)</sup>。福岡市と北九州市が共同提案中の「ロボット開発・実証実験特区」構想に、2003年6月末、ロボット手術の実証実験が追加申請された。これが認められれば、

健康保険法上の特例として特定療養費としての負担分配ができることとなり、特区内ではロボット手術が数多く行なわれるようになる可能性がある。

## 2 - 6

### 手術支援ロボットを開発したベンチャー企業

前記の2つの代表的な手術支援用ロボットシステムを開発した米国のベンチャー企業は、大学の研究開発と深いつながりがある。

ゼウスを作り出した Computer Motion 社は、米国カリフォルニア大学サンタバーバラ校電気工学科の研究者によって1989年に設立された。同社のこれまでの開発経緯は、プロジェクト研究の進め方に対して参考になる点が多い<sup>26)</sup>。同社は、まず、イソップ1000という内視鏡手術システムで1994年に最初のFDA認可を受けた。1991～1994年には音声認識機能をプロジェクトとして研究開発し、医師の声による操作を実現するヘルメスというシステムが開発された。この成果に立脚して音声認識機能の伴ったイソップ2000が1996年にFDA認可され、続いて、ロボットアーム軸の自由度を増したイソップ3000が1998年に認可された。さらに、ソクラテスという遠隔の医師への手術アドバイスシステムを考案し、イソップと遠隔操作とを統合した姿が2001年に認可されたゼウスである。

一方、ダビンチを作り出した Intuitive Surgical 社は、米国スタンフォード大学の関与する Stanford Research Institute (現在の SRI International) で培われた技術を元に1995年に設立されている。後発ということもあり、こちらは最初から完成度の高い大掛かりなロボットシステムを目指しており、起業からFDA認可までわずか5年というスピーディーな開発が達成された。計約200億円の開発投資と延べ100名以上の工学系 PhD の能力が投入されたと伝えられている。

いずれのベンチャーの手術支援ロボットも、必ずしも最初から外科医の満足に足るものではなかったが、現場の医師のニーズを徹底的に取り入れ、非常に早いレスポンスで次々と改善していくことで、今では各国の医師の支持を得つつある。これらが比較的早い段階で認可された大きな要因は、手術支援ロボットの全体コンセプトとフレームを作り上げたことにありと思われる。個々の細部の要素技術は、後からでも向上可能であり、ここには、日本発の要素技術や特許も数多く使われている。

なお、これまで2社は特許の点などで競争関係にあったが、2003年6月末に合併した。今後は、両社の技術は統合されて、さらに新たなシステムを生み出していく可能性がある。また、両社の技術提携先は、日本企業も含めて<sup>27)</sup>数社にわたっている。

## 3. 日本のロボット研究における医療用ロボット

### 3 - 1

#### 日本のロボット研究の経緯

日本のロボット研究の基本は、1960年代からの産業用ロボットの隆盛にあり、現在も世界で稼働中の産業用ロボットの約60%は日本

にある。また一方で、1960年代から早稲田大学加藤一郎研究室で始められた WABOT に代表されるようなヒューマノイドロボット研究があり、これがもうひとつの研究の流れと考えられる<sup>5)</sup>。高等専門学校を中心に学生によるロボットコンテスト<sup>28)</sup>が始まり、これ

が世界的に広まりつつある現在では、日本の工学系学生にとってもロボット工学は魅力的な研究課題のひとつである。しかし、(社)日本ロボット学会の発足は意外にもかなり遅く1983年であり、今年がやっと20年目にあたる。

生体機能の代替は世界的にも普遍

の研究テーマであり、日本の工学研究者も医療応用を考えてきた<sup>17)</sup>が、ロボット研究をヒューマノイドの形をフルボディの人間型の方向へ進める研究は日本以外ではほとんど行なわれていない。海外ではむしろ心理的に敬遠される傾向にあるヒューマノイドロボット研究が、日本ではかくも盛んである理由としては、宗教的なロボットアレルギーがほとんど無い国民性とともに、1960年代に日本初のテレビアニメとなった鉄腕アトム等による「ロボットは人間にとって頼もしい味方」というイメージの影響が大きいと言われている。ここではロボットを厳密に定義することは避けるが、諸外国のロボット研究との比較という観点から日本のロボット研究を見てみると、二足歩行技術に代表される自立した移動、理解・学習といった知性へのこだわりが特徴的である。

しかし、2000年代の今語られているロボット研究の未来像は、当初から期待されていたそれらの姿と実はそれほど大きくは変わってはいない。1980年代のロボット開発の各プロジェクトの命題は、産業ロボット技術を、原子炉・宇宙・海底などの極限作業ロボットや、家事、介護・介助、救急、警備を行なうロボットに応用する、というものであった。しかし、現在でも日本のロボット研究の多くは依然として未来の技術であり、現実のものではない<sup>5)</sup>。1980年代の価値観から見て、現在予想外に注目されているように見えるのは、ペットロボット・エンターテインメントロボット・癒し系ロボットなどと呼ばれる系統で、これらには今後、一人暮らしの老人や少子化によって増加する一人っ子に対する癒しや健康管理など、単なる玩具以上の発展の期待がかけられている<sup>3)</sup>。日本では、おもちゃのロボットにさえも、自立的な移動機能や知性らしきものを強く求める傾

向がある。

### 3 - 2

## 日本のロボット研究の経緯から見た手術支援ロボット

2 - 1で述べたように、欧米では、手術支援ロボットによる手術を、ロボット工学を用いた Telesurgery という概念でとらえており、これを単純に日本のロボット工学の中に当てはめて考えることは難しいかもしれない。しかし、現在の日本では、現在のような姿の手術支援用医療機器を「ロボット」と呼んでおり、ロボット工学の領域の研究者が開発していることは間違いない。そこで、ここではあえて、日本の一般的なロボット工学の観点から手術支援ロボットの特徴を見てみたい。

図表2に示したように、手術支援ロボットシステムは、要素技術としては、特に目と手の機能を重要視しており、足の機能(移動)をほとんど意識していない。この点では、従来から日本に蓄積されている産業用ロボット技術の延長上にあると言うことができ、移動や歩行を重要視する今日の日本のロボット研究の流れとは相違する。人工関節を入れる手術の際に用いられる整形外科用のロボットとして、米国のスピノフ型ベンチャー企業(Integrated Surgical Systems 社)<sup>29)</sup>で開発されたロボドックという手術支援ロボットも日本に数台輸入されているが、これなどはさらに産業用ロボットに近いものである。ロボドックは精密に再現性良く安全に骨の掘削を行なえる医療機器であり、輸血も不要で、患者は術後2～3日目には痛みなく起立訓練を行える。

また、手術支援ロボットに対して、国内外を問わず、外科医が特にこだわっている最大のポイントは、自立したロボットに手術をさせることは決してない、という点

である。すなわち、医師にとっては、ロボット手術においても、その動作のひとつひとつが必ず術者の判断の結果であることが重要である。どんなに遠隔の地で手術が行なわれようとも、医師の立会いのもとで医師の判断によって手術が行なわれることが最後まで守られるべき鉄則である。この結果、ロボットの自立性よりも遠隔操作が選ばれた。つまり、手術支援ロボットの研究は、人間の代替を目指すことはなく、ロボットに自立した知性も求めていない。この点が、自立型ロボットを嗜好する日本のロボット研究との最大の相違点であろうと思われる。

また、日本人はロボット研究に対するアレルギーが少ないとは言われるものの、実際に自分の身にふりかかる医療や介護といった分野にロボットを導入することへの抵抗感は、諸外国よりむしろ強いかもしれない。介護や看護に関して言えば、ロボットどころか、介護者や看護者が他人よりも身内、男性よりも女性であることを好む傾向が依然として存在する。この点で、対面型の内視鏡手術や診断系技術は、日本人のもつロボット技術のイメージとはかなり異なっており、どちらかというところ他の技術の発展にロボット研究の要素技術を持ち込んだと見なすこともできる。したがって、これらに対しては日本人の抵抗感は少なく、医療機器としての認可の問題がクリアできれば、今後もさらに数多く医療現場に取り入れられていくと考えられる。

つまり、手術支援ロボットは、日本で盛んなロボット研究とは異なる進化をたどっており、日本人のもつロボットへの一般的イメージとはかなり異なった、やや地味な存在と言える。自立的な移動や知性を求めないのならば、それはロボット技術ではなく、単なる機械的作業ではないか、と考える日



本人も存在する。このようなイメージ上のミスマッチも、日本のロボット研究開発において、この分野があまり重要視されなかった大きな理由のひとつと考えられる。

### 3 - 3

## 日本における手術支援ロボット研究

ロボット工学のアウトプットとして、医療福祉分野は、人類の役に立つという意味で社会的なインパクトがあり、得られる経済効果も大きい分野である。日本ロボット学会は、ここ数年になって医療福祉分野にも本格的に目を向け始めた、という段階ではあるが、2002 年 11 月にロボット工学セミナー「実用段階に入った医療ロボティックス」を開催し、すでにこれらの技術が未来のものではなく、実用段階にあるという認識を示した。

医療用のロボット技術を研究題目に挙げている日本の大学や研究機関は数多く、現在までに国内で行われた関連プロジェクトも決して少なくはない(図表 7)。ただし、図表 7 のすべての研究予算を足し合わせても 30 億円にも満たない。前述のダビンチやゼウスの開発投

図表 7 これまでの国内の関連プロジェクト

大・中規模	日本学術振興会	未来開拓学術推進事業 「外科領域を中心とするロボティックシステムの開発」 <sup>30)</sup>
	経済産業省	新エネルギー・産業技術総合開発機構 「内視鏡等における低侵襲高度手術支援システム」 <sup>26)</sup> (「脳腫瘍等手術支援システム」の継続プロジェクト)
小規模	文部科学省	科研費補助による医療支援ロボティック関連研究 (1984 ～ 2000 年で 15 件)
	厚生労働省	研究費補助による低侵襲手術支援システム関連研究 (1997 ～ 2001 年で 9 件)

この他、2003 年度より「身体機能解析・補助・代替機器開発」(厚生労働省)が開始

資と比較すると 1 桁小さく、日本の医療用ロボティックス研究は小規模なうえに、分散しすぎており、アウトプットが要素技術にとどまっていることは否めない事実である。しかも、日本では、産業ロボティックス分野の研究者の一部が医療福祉分野にも目を向け始めたのは比較的最近のことで、例えば、図表 7 の「外科領域を中心とするロボティックシステムの開発」の研究成果を使って日本で初めての遠隔手術実験(動物実験)が行なわれたのは、やっと 2002 年のことである<sup>30)</sup>。

日本では、残念ながら当分は、分散した研究が行なわれていく体制に大きな変化は無さそうである。重要なことは、これらのプロジェクトを単に研究発表のみで終わらせずに、より確実な成果、す

なわち医師が使用できる装置の姿に結び付けることである。日本で行なわれているような分散型の研究でも可能なアウトプットとしては、小規模病院用の比較的低価格なシステムの構築がありうる。また、既存の手術支援ロボットでは対応できない手術として、より細かい作業を必要とする脳神経外科手術や整形外科などの領域が残されている。また、MEMS やマイクロマシン技術のように日本が得意としてきた精密機械分野と無線技術を用いて、体内マイクロサージャリーを狙うことにも意味があると思われる。もし、今後、プロジェクトが強化され、国内でも比較的大きなロボットシステムを狙う機会があるとすれば、治療と診断を統合した医療システムの構築<sup>30)</sup>も有意義と考えられる。

## 4. 今後の日本における医工学研究

### 4 - 1

## 医工学研究を取り巻く環境の変化

日本の医療福祉体制には数多くの複雑な問題が指摘されており、現在、行政にも方向転換を求める声が強<sup>2, 31, 32)</sup>。ここではこれらについては深く述べないが、目の最も大きな環境変化は、人口構成比、すなわち極めて高い高齢化率(例: 2000 年度の高齢化率は 17.4%)である。今後の日本は、

この大きな量的変化に対応するだけの質的变化を積極的に取り入れていかなければ立ち行かない。さらに量的な問題を深刻にするのは、日本人の求める医療への要望の多様化である。乳幼児医療や難病治療では世界の最先端の技術を求め、成人医療では日帰り手術や医療費負担削減を求め、一方、高齢者は先進医療より人的な医療サービス向上を求める傾向がある。このような多様化に対して従来どおりの医療体制で対応しようとするれば、医療従事者の不足や医療介

護ミスの増加は必至である。今後はいかしの合理性による質の向上を取り入れて、これらの多様性に対応することも必要である。

一方、見方を変えれば、高齢化の進む日本では、医療ビジネスは特に将来性が大きい分野であると予想されており、このことがバイオテクノロジーへ大きな期待をかけることのバックグラウンドにもなっている。

しかし、冒頭に述べたようにあまり認識されていないのだが、世界の中で日本は、次第に、必ずし



も先進の医療を受けられる国とは言えなくなりつつある。現在の日本では、医療の公平性および規制が過度であり、先端医療の発展という意味で、これらが足かせになっているという指摘が強くなりつつある<sup>2, 31, 32)</sup>。新しい機器が医療現場に採用されるグレードに達するまでには必ずいくつかの問題点があり、これを見出し改めるには治験（薬事法第二条第七号）を進めるしか方法がない。そこでは、多少のリスクは負っても新しい医療を試みるという「患者の選択の余地」を認め、医師や製造者および患者に対して十分な保障を用意する、という体制がぜひとも必要である。民間保険等の適用も考慮の中に入れるべきであろう。もちろん医学には慎重さが重要ではあることはいうまでもないが、それは審査体制が弱い結果であってではなく、明確な基準作りは早急に必要である。PL法等の製造者責任と医療行為に対する医師の責任のみが大きく取り上げられ、問題点の本質が曖昧なままでは、日本発の新しい研究開発を世に送り出すことは不可能である。日本が先端的な医療を受け入れられる社会にならない限り、日本で先端医療機器の開発を行なっても、その成果は研究の段階で終わってしまう。

なお、海外では先端的な医薬品や医療機器に関する特許などの知的財産権が比較的広く解釈されており、このことがベンチャー企業を起こす大きなインセンティブのひとつになっている。日本でも、現在、先端的な医療関連行為に関して特許権を認めるかどうかについての議論が行なわれている最中である<sup>44)</sup>。一部には医師が医療行為を行なう際の制約を懸念する声もあるが、海外では医療行為自体は特許侵害の適用外とされているところも多い。今後の日本での議論の行方が注目される。

#### 4 - 2

### 医療分野への 工学的アプローチ

#### (1)工学的トランスレーショナル リサーチ

すでに医療は、医学のみによっては成り立たないものになっている<sup>33)</sup>。日本において医工学という研究分野は、医用センサの研究などが1940年代から始められている<sup>17)</sup>。(社)日本エム・イー学会は1962年に発足し、すでに40年もの歴史がある。事実、日本のマニピュレーション技術や医用センサ技術は、海外でも質的に高い評価を受けている。問題は、日本の研究の多くに、それらの要素技術を使って医療システムとして組み上げ、医療現場に持ち込むという、言わば工学的トランスレーショナルリサーチが欠けている点である。科学が進歩しても技術は自然に進歩するものではなく<sup>33)</sup>、一人の科学者の成果を社会に還元するまでには、さらに多くの工学者の努力を必要とする。再生医療等のバイオテクノロジーを具体化するためにも、医療機器の研究開発を通らないわけにはいかない。

医療機器産業界が中心となって創設された医療技術産業戦略コンソーシアム(METIS: Medical-Engineering Technology Industrial Strategy Consortium)が2001年3月に設立され<sup>34)</sup>、ここでも「有力な方法は、医療におけるトランスレーショナルリサーチに工学系研究者が参画することである」という提言がなされている。しかし、バイオテクノロジー戦略大綱<sup>35)</sup>やその具体策のひとつである全国治験活性化3ヵ年計画<sup>36)</sup>の記載、21世紀COEプログラム(Center of Excellence)<sup>37)</sup>のテーマなどを見ても、具体的な工学的トランスレーショナルリサーチ案はほとんど取り上げられて

いないのが実態である。

なお、現在の日本に比べれば、医療において先進的と思える米国においてさえ、「過去の科学的発見の多くを、人類に恩恵をもたらす具体的利益へ移行させることができなかった」という問題意識があり、これを解決するには利害関係者の誰が何をすべきかという参加型討論がなされている<sup>38)</sup>。

#### (2)医工連携

医工連携というキーワードは、21世紀COEプログラム<sup>37)</sup>等で大きく取り上げられ、特に研究者の人材交流が重要であると認識されている。医療に関わる研究はすべて、実際に医療現場を知ろうとしなければ始まらないことを考えると、今後の医工連携では、研究の最初の段階から工学系研究者が医系キャンパスに日常的に入っていけるような研究の場を用意することが必要であり、学生の異動のみならず教員ポストの確保などの具体策が求められる。医工連携を、単に研究室の交流会などで終わらせてはならない。最近、医学部にもコンピュータ外科領域が取り入れられ<sup>39)</sup>、また、先端工学診療部<sup>29)</sup>等が設立され始めた。これらは工学研究者が最も容易に入っていくことができる窓口であろう。

工学研究者が実際の手術の場に立ち会うことの意義を示す一例を挙げたい。血管の切断に際して、血管を挟み、超音波エネルギーを利用して止血凝固し、閉じてから切り離すという合理的な技術が開発されている。もし、開発者が現場を知らずに動作を伝え聞いただけでロボットを開発しようとすれば、従来から医師が行なっている血管を縛って止血する方法を正確にロボットに行なわせようという努力のみに邁進したであろう。研究開発にあたって重要なことは、ロボットが果たすべき目的を的確に掴むことであり、単に術者の動

作を模倣することではない。工学分野の研究者が医療現場に立ち会わなければならない理由はここにあり、立ち会った工学者から生まれる具現化のアイデアが勝負の分かれ目である。このような発想の余地がまだ非常に多く残されていることを、医師たちは指摘している。例えば、現在の手術支援ロボットは、医師自身がミクロになって患者の体内に入り患部を治療するという「ミクロの決死圏（原題：Fantastic Voyage、1966年）」という夢物語を、医師がミクロにならずに別の手段によって感覚的に実現したものであると言える。

また、これまで新規医療機器の多くは、主に企業の工学系開発者が開発し、それが病院に持ち込まれるという形をとってきた。しかし、そのような医療関係企業の開発品でさえも、医師が実際に臨床で使うには不適切な場合がしばしば見られる。例えば、医療機器としては清潔さが不十分であったり、免疫応答など生体に及ぼす影響を無視したり、ユーザーである医師の操作性が考慮されていない、などの問題点が指摘されてきた。また、高度先端医療機器導入は医療費用の増大を招く場合も多い。いくら技術的には先進なものであっても、それが医療現場でプラス要因とならなければ、現場で使われるようにはならない。これ

らは、医学部や工学部のみならず、経済学部なども協調し、共に考えていかなければならない問題であり、今後、介護用機器などを研究開発する上でも重要な事項である。

### (3)日本の医療機器産業と医工学研究の関連

今後、医療機関の評価は、インターネットを通じて国民に広く情報提供されるようになり<sup>41)</sup>、医療福祉サービスに競争原理が持ち込まれることは必至である。これまでの日本の先進的医療機器は、導入実績が臨床研究用の数台にとどまるために、潜在的な市場は大きいが実質的な国内市場がいつまでも小さいことを理由に企業における開発も力が入らず、その結果として国産装置はいつまでも研究段階から脱却できず実用的なレベルも上がらない、という悪循環が生じていた。現在でも、すでに医療機器は完全に輸入超過であり、優位であった診断系機器さえもシェアを減らしつつある<sup>3)</sup>。この問題は、厚生労働省が中心となる「医療機器産業ビジョンに関する懇談会」<sup>40)</sup>でも大きく取り上げられ、今後、医療機器の認可を容易にすれば、輸入超過傾向はますます加速するのではないかと懸念も起きている。

しかし、グローバル化の進んだ今日では、すでに医療機器市場は

国内だけに閉じている産業ではなく、国際的な競争力を持つことが必要になっており、国内市場だけに目を奪われることは、かえって先行きの見通しを誤らせる。また、医療機器市場に関しては、これまでは、人口が全世界の12%にすぎない米国・日本・欧州のみで全体の83%を占めるという偏在市場であったが、最近では中国等が治験への積極参加や先進医療機器導入に補助金を出すなどの政策を取っており、ここ数年内に世界市場が大きく変動する可能性もある。

日本では大学の共同研究に留まっているプロジェクトも、それぞれの成果が、海外のベンチャー企業の製品と、いずれは医療という市場で競争しなければならない。過保護な科学技術政策を採った場合には、臨床段階での実績作りが進む欧米の医療機器発展との差がますます大きく開いていくとは必至と予想される。新しい医療ビジネスや教育システムの発展性まで含めて考えると、日本国内の装置開発に保護政策をとることはデメリットのほうが大きいであろう。現実を拒否すれば、次のチャンスまでも失う可能性がある。そもそも医療福祉は、その国民的利益の大きさから、本質的には産業分野としての保護政策を取ることはできないはずの分野であろう。

## 5. おわりに

外科手術支援用のロボット技術は、高精度の追及や人間の代替作業を意図した産業分野用のロボット開発と比べると、低侵襲治療と遠隔操作性という医療現場の新たな質的効果を生み出しており、日本の医療体制全体を大きく前進させる可能性を有している。人口構成比の高齢化とともに医療論議は今後いっそう激しくなり、情報化の進展も手伝って、日本の医療現

場と諸外国の差異は、早晚日本人の多くが知るところとなる。日本の誇るロボット技術が日本の医療現場には登場せず、また最も成長すると予想される今後の医療福祉産業にも寄与しないとすれば、それは極めて残念なことである。

今後、新しい医療機器技術が日本から生まれるためには、医工連携の研究体制の場で、各要素技術を医療システムとして組み上げ、

医療現場に持ち込むという工学的トランスレーショナルリサーチまで責任をもった目標設定が不可欠である。また、環境整備としては、新技術を率先して試してみるといった患者の選択の余地を残すことが必要であり、それをバックアップする保障などを用意することが必要である。さらに、現在進行中の医療関連の認可制度や知的財産権の見直しも大き



な影響力をもつと考えられ、今後の行方が注目される。

## 謝 辞

本稿をまとめるにあたり、特に九州大学大学院医学研究院橋爪誠教授に多大なご協力をいただきました。また、東京大学大学院医学系研究科小山博史教授、同工学系研究科光石衛教授、信州大学医学部本郷一博教授、同後藤哲哉助手、東京慈恵会医科大学山崎洋次教授、医療法人財団河北総合病院河北博文理事長にも各種資料のご提供あるいは貴重なご意見をいただきました。ここに深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) テリー・ロイド、在京外国人、大病の治療は本国で、Nippon ビジネス戦記、日本経済新聞夕刊、2002年12月3日
- 2) 河北博文、「外圧」なき医療構造改革は不可能、論争東洋経済、2002年5月号
- 3) 例えば、厚生労働省、医療機器産業ビジョン骨子（案）資料集 <http://www.mhlw.go.jp/shingi/2003/01/dl/s0131-2c.pdf>
- 4) 例えば、ROBODEX 2003 : <http://www.robodex.org/>
- 5) 北野宏明他、ヒューマノイドロボットはどこまで進化するか、Science & Technology Journal, 2003年3月号
- 6) 北島政樹、注目されるロボット手術 <http://www.nhk.or.jp/kenkotoday/2001/20011129/index.htm>
- 7) Intuitive Surgical Inc. : <http://www.intuitivesurgical.com/>
- 8) Computer Motion Inc. : <http://www.computermotion.com/>
- 9) 武田純三、広がる日帰り手術 <http://cgi2.nhk.or.jp/kenkotoday/2001/20010228/index.html>
- 10) 例えば、京都大学医学部附属病院デイ・サージャリー診療部 : <http://www.kuhp.kyoto-u.ac.jp/~dsu/DSU-index.html>、など
- 11) 例えば、マツダ病院日帰り手術センター : <http://hospital.mazda.co.jp/1day/> 医誠会病院日帰り手術センター : <http://www.i-dscenter.org/dsc.htm> 多根総合病院日帰り手術センター : [http://www.tane.or.jp/body1/DS\\_IN.htm](http://www.tane.or.jp/body1/DS_IN.htm) 湘南鎌倉病院日帰り手術センター : <http://www.shonankamakura.or.jp/informationforall/daysurgery.html> など
- 12) 篠崎伸明、患者に好ましい技術革新は病院にもメリット大 <http://www.shonankamakura.or.jp/informationforall/lapachore.html>
- 13) (株)日立製作所、内視鏡下手術支援ロボット MTLP - 1 <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/2002/0522a/0522a.pdf>
- 14) 東嶋和子、情報技術がもたらす医療革命 身体が電子情報化する、イリュウム、28号（2002）
- 15) 例えば、CARS (Computer Assisted Radiology and Surgery) : <http://www.cars-int.de/> 日本コンピュータ外科学会 : <http://www.atl.b.dendai.ac.jp/jscas/>、など
- 16) 例えば、植田美津江、大きく前進する胎児外科治療 <http://www.mitsueueda.co.jp/kokusai/001.htm>、など
- 17) 吉本千禎、医工学入門 技術革新への挑戦、東海大学出版会（1983）
- 18) 首相官邸、IT戦略本部、e-Japan 戦略Ⅱ <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/030702ejapan.pdf>
- 19) (財)医療情報システム開発センター、情報通信機器を用いた診療（いわゆる「遠隔診療」）について : <http://square.umin.ac.jp/enkaku/DEL-NoticeMhw971224.html>
- 20) 光石衛、「21世紀のロボティック医療への期待」、日本ロボット学会誌、Vol.18, No.1, p.2（2000）
- 21) "World's first robotic brain telesurgery performed here", DALHOUSIE News, vol.33, No.4（2002.11）, <http://www.dal.ca/~dalnews/dalnews/2002-12/telesurgery.shtml>
- 22) K.Hongo et al., NeuRobot : Telecontrolled Micromanipulator System for Minimally Invasive Microneurosurgery -Preliminary Results, Neurosurgery, vol.51（4）, p.985（2002）
- 23) 九州大学高度先端医療開発センター [http://www.camit.org/tip\\_abstract.html](http://www.camit.org/tip_abstract.html)
- 24) MPB Communications Inc., "Live Simulated Surgery a "touching" Success", [http://www.mpbc.ca/main\\_pages/news/2002/6dof.html](http://www.mpbc.ca/main_pages/news/2002/6dof.html)
- 25) 第7回技術予測調査—我が国の技術発展の方向性に関する調査—、NISTER REPORT No.71, 科学技術政策研究所（2001）
- 26) 新エネルギー・産業技術総合開発機構、「内視鏡等における低侵襲高度手術支援システム」中間評価報告書（2002.8） <http://www.nedo.go.jp/iinkai/hyouka/houkoku/14h/11.pdf>
- 27) 例えば、オリンパス光学工業(株) <http://www.olympus.co.jp/LineUp/Endoscope/Info/n011005.html>
- 28) 横尾淑子他、科学技術関連コンテストに見る我が国の現状、科学技術動向、2002年8月号
- 29) Integrated Surgical Systems Inc. : <http://www.robodoc.com/eng/>、(L.Joskowicz et al., "Computer Integrated Revision Total Hip Replacement Surgery : Preliminary Report", MRCAS'95, p.193, Baltimore（1995））
- 30) 日本学術振興会、未来開拓学術



- 推進事業「外科領域を中心とするロボティックシステムの開発」  
[http://www.jsps.go.jp/j-rftf/integrated\\_i.htm](http://www.jsps.go.jp/j-rftf/integrated_i.htm)
- 31) 鵜田忠彦、「日本の医療改革の方向—世代間の公平性の視点から—」、一橋大学経済研究所ディスカッションペーパー、No.18 (2001 年 3 月)
- 32) 鵜田忠彦他、「日本の医療と公的規制」、一橋大学経済研究所ディスカッションペーパー、No.26 (2001 年 3 月)
- 33) 小宮山宏、二つの視点:「医療技術」と「健康のための社会システム」、ME フォーラム 2002「発展する医用生体工学」(2002.1)
- 34) 金井務、医療技術産業戦略コンソーシアムの役割、ME フォーラム 2003「未来医療を拓く医工連携」(2003.1)
- 35) 首相官邸、バイオテクノロジー戦略大綱、  
<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/bt/kettei/021206/taikou.pdf>
- 36) 文部科学省、厚生労働省、全国治験活性化 3 ヶ年計画 (2003.4)、  
<http://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/isei/chiken/kasseika.html>
- 37) 平成 14 年度および平成 15 年度「21 世紀 COE プログラム」  
[http://www.mext.go.jp/a\\_menu/koutou/coe/021001.htm](http://www.mext.go.jp/a_menu/koutou/coe/021001.htm)  
 および [http://www.mext.go.jp/a\\_menu/koutou/coe/03071701.htm](http://www.mext.go.jp/a_menu/koutou/coe/03071701.htm)
- 38) N.S.Sung et al., "Central Challenges Facing the National Clinical Research Enterprises", J.Amer.Med.Assoc., vol.289, No.10, p.1278 (2003)
- 39) コンピュータ外科関連ホームページ:  
<http://homepage2.nifty.com/cas/index-j.html>
- 40) 厚生労働省、医療機器産業ビジョンに関する懇談会  
<http://www.mhlw.go.jp/houdou/2003/01/h0117-1.html>
- 41) 厚生労働省、医療に関する広告規制の緩和について  
<http://www.mhlw.go.jp/topics/2002/04/tp0401-1.html>
- 42) 特許庁、医療機器に関する技術動向調査  
[http://www.jpo.go.jp/shiryou/toushin/chousa/pdf/kiki\\_med.pdf](http://www.jpo.go.jp/shiryou/toushin/chousa/pdf/kiki_med.pdf)
- 43) 福岡市、構造改革特区第 3 次提案 (ロボット開発・実証実験特区) について、  
[http://www.city.fukuoka.jp/cgi-bin/odb-get.exe?wit\\_template=AC02022&WIT\\_oid=cj3wdI0Y5aYeNwY0j1PexddsqI4o](http://www.city.fukuoka.jp/cgi-bin/odb-get.exe?wit_template=AC02022&WIT_oid=cj3wdI0Y5aYeNwY0j1PexddsqI4o)
- 44) 特許庁、産業構造審議会知的財産政策部会特許制度小委員会、医療関連行為に関する特許法上の取り扱いについて  
[http://www.jpo.go.jp/shiryou/toushin/toushintou/pdf/iryou\\_report.pdf](http://www.jpo.go.jp/shiryou/toushin/toushintou/pdf/iryou_report.pdf)

.....

## 科学技術動向研究センターとは

平成 13 年 1 月より内閣府総合科学技術会議が設置され、従来以上に戦略性を重視する政策立案が検討されています。科学技術政策研究所では、戦略策定に不可欠な重要科学技術分野の動向に関する調査・分析機能を充実・強化するため 1 月より新たに「科学技術動向研究センター」を設立いたしました。本センターでは、第 2 期「科学技術基本計画」に示されたライフサイエンス、情報通信等の重点分野の最新動向に係る情報の収集や今後の方向性についての調査・研究に、下図に示すような体制で取り組んでいます。

センターがとりまとめた成果は、適宜、総合科学技術会議、文部科学省へ政策立案に資する資料として提供いたします。

センターの具体的な活動は以下の 3 つです。

### 1

#### 「科学技術専門家ネットワーク」による科学技術動向分析

わが国の産学官の研究者を「専門調査員」に委嘱して（2002 年度実績約 2800 人）、インターネットを利用して科学技術動向に関する幅広い情報を収集・分析する体制「科学技術専門家ネットワーク」を運営しています。このネットワークを通じ、専門調査員より国内外の学会会合、学術雑誌などで発表される研究成果、注目すべき動向や今後の科学技術の方向性等に関する意見等を広く収集いたします。

これらの情報に、センターが独自に行う調査・研究の結果を加え、

毎月 1 回、「科学技術動向」としてまとめ、総合科学技術会議、文部科学省を始めとした科学技術関係機関等に配布いたします。なお、この資料は <http://www.nistep.go.jp> において公開します。

### 2

#### 重要科学技術分野・領域の動向の調査研究

今後、国として取り組むべき重点事項、具体的な研究開発課題等を明確にすることを目的とし、重要な科学技術分野・領域に関するキーテクノロジー等を調査・分析します。

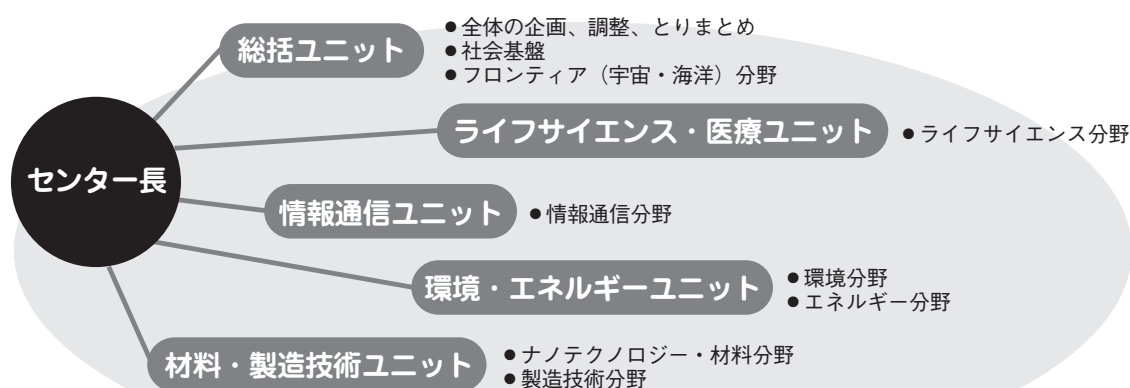
さらに、重要な科学技術分野・

領域ごとの科学技術水準を欧米先進国と比較し、わが国の科学技術がどのような位置にあるのかについての調査・分析も行います。

### 3

#### 技術予測に関する調査研究

当研究所では、科学技術の長期的将来動向を総合的に把握するため、デルファイ法による技術予測調査をほぼ 5 年ごとに実施しています。これは、今後 30 年間の重要技術を抽出して、重要技術の重要性評価や実現予測時期を分析するものであり、センターは、多くの専門家の協力により本調査を引き続き実施いたします。



\*それぞれのユニットには、職員その他、客員研究官（非常勤職員）を配置。

\*センターの組織、担当分野などは適宜見直しを行う。

---

# SCIENCE & TECHNOLOGY TRENDS

August 2003  
(NO.29)

## Science & Technology Foresight Center

National Institute of Science and  
Technology Policy (NISTEP)  
Ministry of Education, Culture, Sports,  
Science and Technology

※このレポートについてのご意見、お問い合わせは、下記のメールアドレスまたは電話番号までお願いいたします

なお、科学技術動向のバックナンバーは、下記の URL にアクセスいただき「報告書一覧 科学技術動向・月報」でご覧いただけます。

## 文部科学省科学技術政策研究所 科学技術動向研究センター

---

連絡先：〒 100 - 0013 東京都千代田区霞が関 1 - 3 - 2

電話 03 - 3581 - 0605 FAX 03 - 3503 - 3996

URL <http://www.nistep.go.jp>

Email [stfc@nistep.go.jp](mailto:stfc@nistep.go.jp)



- ▶ Life Sciences
- ▶ Information & Communication Technologies
- ▶ Environmental Sciences
- ▶ Nanotechnology & Materials
- ▶ Energy
- ▶ Manufacturing Technology
- ▶ Infrastructure
- ▶ Frontier