

# 生体医工学の研究

立石 哲也

元工業技術院 機械技術研究所

## はじめに

2019 年 1 月 1 日、私はついに満 77 歳になりました。つまり喜寿を迎えたこととなります。日本人の平均寿命は天井知らずで、男女ともに 80 歳をゆうに超えていますのでことさら珍しいことでもありません。はるか昔に学生生活を終えた後、工業技術院機械技術研究所を皮切りに、産業技術融合領域研究所、産業技術総合研究所、東京大学工学部、東京電機大学理工学部、物質材料研究機構と勤め先を変えながら 69 歳で月給生活に別れを告げた後も、東京電機大学理工学部の客員教授や NPO 法人医工連携推進機構理事長などの役職をこなしてきました。しかしながら自分の後期高齢者としての年齢を考えた時、老醜をさらす前に残りの人生を如何に楽しむかと考えること自体ごく自然なことだと考えるようになり、これらの役職から身を引くことにしました。

これまでに経験してきた生業としての研究・教育という労働に対し、いわゆる再生産することの主な手段はなんと酒、ゴルフ、カラオケだったのです。私が 30 歳前半に東大医学部整形外科の宮永先生とお会いし、それ以後バイオメカニクス、医工学の研究と普及に二人で努力して参りました。その宮永先生が晩年のある会合で「立石先生にスポーツ、芸能を教えたのは私です」とユーモアあふれる挨拶をされました。そのスポーツとはゴルフであり、芸能とはカラオケのことです。1975, 6 年頃のカラオケと言えば、レコードのジュークボックスかピアノバーで歌うことくらいだったでしょう。8 トラックのテープが出たのはずっと後のことです。

宮永先生行きつけのピアノバーは確か「繭」という名前で、はっきりした場所は思い出せませんが新宿歌舞伎町界隈にありました。さすが東大病院の先生は気の利いた場所を知っていると妙に感心した次第です。それま

では、酒を飲んだ時「デカンショ、デカンショで半年あ暮らす、後の半年あ寝て暮らす」程度の歌しか経験がなかったのです。

その後、機械研のバイオメカニクス課長になったとき、カラオケとゴルフは課の必須科目という無茶なリーダーシップを発揮しました。今では違うと思いますが、当時の国際会議などでは日本人の講演者の声は小さく、態度も何となく弱々しい、そのことへの反省からもっと内面から鍛えなければと考えたからです。もっとも「健全なる精神は健全なる身体に宿る」というギリシャの詩人ユウエナリスの言葉は誤解されて後世に伝わったとされており、ほんとは「…宿れかし」つまり、宿ったらいいなということの誤訳とも言われています。体だけ鍛えてもダメというのが彼の本心だということです。

それはともかく、ゴルフとカラオケによる珍妙な心身の鍛錬を最後までやり通した者は提唱者の私以外誰もいませんでした。私だけがこれを一心不乱に実行し、喜寿の高齢に至るまで自己流を通し続けてきたのです。現在に至るまでの研究・教育の遂行を思いつくままに辿っていきたいと考えます。

## バイオはスイス留学にはじまる

2013年度の秋の叙勲につきましては、11月12日東京プリンスホテルにおいて経済産業大臣から勲記・勲章の伝達を受け、引き続き皇居に参内し天皇陛下に拝謁の栄を賜り、無事授賞式を終了しました。私の長い研究人生において、その節々で多くの方々からお礼の申しようもないほどの暖かく力強いご支援をいただき今日に至りました。

思いおこせば、生体・医工学の研究者としての研究人生をほぼ全うすることができましたが、その背景には私自身にとっては劇的な決断がいくつかありました。そもそも、1968年当時、私は東大青医連問題に端を発した大学紛争（学生側は大学闘争）が吹き荒れていた東大で、工学系大学院博士課程に在籍しており、地味ではあるが産業界にとっては重要な材料強度問題の基礎研究と格闘していました。当然のことながら、紛争状態の大学では教授連と学生の間にはぎすぎすしたわだかまりがあり、進歩的な若手

講師や学生たちは旧来の大学の研究・教育体制を厳しく批判しており、大学のありようを「文献実証主義」と痛烈に揶揄していました。これは、先進諸国で解明・発展された学術的諸問題を翻訳して、日本的な形態に適したかたちで解釈し直し、我がもの顔で解説・普及させるという明治以来脈々として継続されてきたわが国の大学の研究・教育体制の権威を批判したものです。このこと自体は文句なしに妥当そのもので、明治以降とくに戦後のなりふり構わぬわが国の経済発展を支援してきた大学当局が真摯に受け止めて改革しなければならなかったことです。

その後、大学紛争はあっという間に全国に飛び火し、初期の闘争理念とは徐々に離反して、各大学の特殊事情を取り込んだある意味支離滅裂な「造反有理」が各地で叫ばれ手の付けられない状況に至ったわけです。山手線の東京駅から無謀なデモ行進を線路上で行い、やわなノンポリ学生的大量逮捕から組織衰退に至った東大全共闘の戦術などはなんとなくせつな的な「カミカゼ特攻隊」を思いおこさせます。

私は東大工学部精密機械の材料力学の研究室に在籍していましたが、物質の生々流転を定式化することを第一義とするレオロジーという学問に強くひかれ、研究室のほとんどが金属材料を中心にやっていた中で、唯一高分子材料の変形と破壊を博士論文の課題としたいと指導教官（宮本博教授）に申し出て、孤立無援の中、文字通り文献実証学から始める様な有様でした。紛争当時の東大では通常の講義に対抗できるかどうかはなはだ疑問でしたが、「自主講座」なるものが反抗勢力によって組織されており、私も時々粘弾性学をにわか勉強で、数人の物好きな学生仲間に話したこともありましたが、物体内部の微細構造の確率過程的な変化が現象論的には時間遅れを伴う粘弾性として観測される分けて、高分子物理では良く知られていましたが、当時の材料力学研究者の中では極少数の者しか注目しなかった分野でした。まだ時には催涙弾のガスが漂い目にしみる大学構内を歩きながら、自分の将来像などとても描き切れる状況ではなく、逮捕された仲間の救援活動の手伝いなども細々とやっていたあの当時のことが懐かしく思い出されます。

そんな時、図書室の外国雑誌の中に H. チーグラーが書いた変形の熱力

学という論文を目にし、徹底した現象論的考察により、物体の変形の非可逆過程を記述するという新しい視点に強く心をひかれ、彼の力学教室があるチューリッヒのスイス連邦工科大学(ETH)に留学したいという思いが日に日につのっていった様な次第です。幸運にも 1970 年のスイス政府留学生試験に合格することが出来、7 月に仲間の見送る中、羽田空港(当時唯一の東京国際空港)からジュネーブに向けて飛び立ったのでした。今では考えられませんが、海外渡航がまだ珍しく、親戚や研究室の同僚が飛行場まで見送りに出るような時代でした。もちろん、私にとっても生まれてはじめての海外旅行でした。材料力学の研究室では初の海外留学であり、大体地球の裏側の実感などとても持てない東洋の田舎者としてサイエンス発祥の地、ヨーロッパに旅立ったわけです。当時、スイス航空の路線はボーイング 707 を使った南回りで、バンコクやボンベイ(現ムンバイ)など途中数箇所で燃料補給のため着陸しながら、実に 24 時間の長旅の後、ジュネーブ空港に着陸したのでした。

この年、日本からスイス政府の留学生試験に合格したのはドイツ語の大学講師と経済学の大学院生と私の三人でした。9 月からの新学期に備えて、ベルンに程近いフランス語圏とドイツ語圏の境界のフリブールという小さな町にあった聖ユスチヌス修道院付属寄宿舎に三ヶ月間缶詰になり、ドイツ語を朝から晩までみっちり教え込まれました。そこには、世界各国から 100 名程の留学生が来ており、ドイツ語以外にフランス語、まれにはイタリア語圏の大学で学ぶ学生のために語学の研修を無料サービスで行っており、当時世界で最も恵まれた国費留学生制度であると言われていました。共産圏やアラブ、イスラエル、中南米諸国など当時一触即発の地域からの留学生も一堂に会していたのですから、いろいろなトラブルをまのあたりにしました。語学研修の後、各地の大学にちらばった留学生が定期的に集まり、スキー合宿や観光地めぐりなどを行う企画が組まれていて、留学生の親睦をはかるきめ細かな配慮がなされていました。当時、チューリッヒに唯一の国立工科大学があり、他は州(カントン)立大学でしたが、その後フランス語圏の要望を入れ、ローザンヌにも国立工科大学が開設されました。

## バイオメカニクスとの出会い

さて、チーグラの力学研究室は不思議なことに自然哲学分野に属していました。自然の力学現象の定式化、未知の力学現象の理論的推定などを主目的とする理論力学を本務としており、日本でいう材料力学はヨーロッパでは工業力学に属しています。従って、材料の変形や破壊の数値計算あるいはそれを確かめる実験力学は別の研究室で行っていました。結局チーグラの研究室にいた 2 年間に、私は粘弾塑性体(通常は粘弾性体として挙動するが、ある応力以上で降伏して塑性を示す材料)の降伏理論と、高分子物質を念頭に置いた累積損傷体(外部から荷重を受け、微小な亀裂や空孔などの分布欠陥が発生・成長する物体)の非平衡熱力学の二つのテーマを自分で決め、来る日も来る日も、文字通り紙と鉛筆だけをたよりに理屈をこねくり回すことに時間を費やしていました。

この 2 年間はヨーロッパスタイルの肉とワインで代表される食生活、適度な交友関係と針葉樹の林の中の散策などといったごく普通のスイスの生活の他は、あまり豊かとは言えない知恵を搾り出すような理論研究に没頭するという、その後二度と到来することはなかった純粋研究生生活に終始した毎日をおくっていたのです。

1970 年はチーグラのお弟子さんでその後、渡米してスタンフォード大学に勤務していた M. アンリカーという教授が里帰りしてバイオメカニクスの講義を始めた年でもありました。日本にいた時にもバイオメカニクスという言葉聞いたことはあったのですが、それをなりわいとして食べている大学人はおそらくいなかったのではないかと推察します。後で調べてみると、その当時、日本機械学会の中に早稲田大学の土屋喜一先生が中心になって運営していた、バイオメカニクスに関係した生物機械工学研究会があり、いわば同好会として知的サロンの様なものを形成していたようですが、生体力学の職業人がいたかどうかは不明です。

アンリカー教授はスタンフォード大学からポストドクを沢山連れて来て、ETH に即席のバイオメカニクス研究室をいち早く作り上げて、アメリカンスタイルのバイオメカニクスを定着させることに奮闘していました。もちろんいわゆるビオメハニク (ドイツ語) はスイス・ドイツ語圏でも 19

世紀以来定着し、ヨーロッパスタイルの生体力学としての地位は確固たるものがありました。ドイツ人のウォルフ(1870)の骨の内部構造に関する有名な観察「大腿骨の縦断面に見られる網状組織は、大腿骨頭から骨幹部へ美しい曲線を描いていて、それを構成する骨梁群は互いにほとんど直交している」はそれより先、1866 年スイスの構造力学者クルーマンの発見、すなわち、骨頭断面の骨梁群はクレーン頭部の応力線図ときわめて類似している、の解剖学的言い換えに過ぎません。

中興の祖、アメリカで盛んになったバイオメカニクスは生体力学を医療のツールとして利用することを第一義とし、生体の挙動を記述することの出来る理論式の構築と実験生体力学の確立を急務として 1970 年代にアメリカ機会学会を中心に急速に進展することになりました。その中心にいたのが UC サンディエゴの Y. C. フン教授です。

アンリカー教授の講義は血管中の拍動の伝播を弾性管モデルで説明するもので、ドイツ語で始まった講義が興奮するとしばしば途中で英語に変わってしまうという迫力に満ちたものでした。材料力学の知識はこの様にして医学に応用できるという事を学生に語りかけ、現代生体力学の前衛としての心意気を十分に示していました。アンリカー教授はその後まもなく E T H とチューリッヒ大学医学部との共同利用施設である生体医工学研究所を設立し、初代所長に就任しました。私はバイオメカニクスの講義を聴講する一方で、相変わらず力学理論をいじくり回して一応数編の論文を仕上げることに成功しましたが、具体的なバイオメカニクスの研究の開始は帰国後、工業技術院機械技術研究所に就職してはじめて日の目を見る事になりました。

当時最も熱中して取り組んでいたのは、高分子材料のような外力に対しエネルギー散逸を伴う連続体の降伏曲面の決定と、同じ高分子固体に外力が負荷されたときに、内部に分布して発生した小さなひびや空孔が成長するにつれ、固体の変形挙動がどのように変化するかを統計連続体力学的に定式化することでした。最初の問題は“粘弾塑性理論”として、2 番目の問題は“累積損傷の連続体理論”として、私の博士論文の骨格を形成しました(表 1)。

## 医工学との出会い

材料強度学ではなくバイオメカニクスをライフワークとしたいという淡い憧れに似た気持ちは学位論文を書き上げた後も私の心を支配していました。指導教授に相談しても、また研究発表を介して知り合いになった大学関係者に聞いても、日本のどの大学でもそのようなマイナーな分野で人を採用する計画は皆無でした。バイオメカニクスで公的な予算を獲得することはほとんど不可能だったのです。

1973年当時の機械技術研究所が、バイオニクス（現在ではほとんど使われない用語、1960年代NASAが生体機能の解明とその産業・軍事応用を目的に考え出した）の研究に従事する研究者を探していました。アメリカで誕生間もないこの研究分野を当時の通産省傘下の工業技術院がいち早く取り上げ、予算制度を立ち上げていたのです。

**表1 研究課題の変遷（東大、ETH、機械研、融合研）**

| 材力・強度                                                                               | 生体力学・生体材料                                                                                                             | 細胞・組織工学                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 1970 粘弾塑性理論<br>累積損傷の連続体理論<br>損傷の熱力学<br>一般散逸体の構成式・損傷条件<br>異方性粘弾性体の破壊条件<br>FRPの損傷と粘弾性 | 膝関節のレオロジー<br>軟骨・海綿骨系の力学特性<br>海綿骨の非弾性力学モデル<br>関節のバイオメカニクス<br>海綿骨模擬材料<br>誘電スペクトル関節症診断<br>緻密骨の衝撃圧縮特性<br>骨折の力学<br>電気仮骨評価法 | 細胞培養による生体適合性評価<br>培養細胞の接着強度 |
| 1980 適応性物体の力学<br>卓球ボールの打球感の解析                                                       |                                                                                                                       |                             |

実際、日本にはその道のプロはほとんどいなかったはずですが、猪突猛進的な熱意が通じたのかまったくの素人であった私が採用される事にな

りました。

私がこれまでやってきた粘弾塑性学や累積損傷体の熱力学は、実は生命体の力学的挙動を記述するのに格好のモデルで、若干の手直しで生体に応用可能であった分けです。固体力学の専門家として当然の様に、骨・関節のバイオメカニクスを中心とした医工学を立ち上げるべくプロポーザルを書き、予算と実験室の獲得に乗り出しました。当時の私のボスは複合材料で有名な島村昭治課長（故人）でしたが、それこそどんなものにもでも興味を示す雑食性のマネジャーであったことも幸運に作用しました。今では普通に使われている、インテリジェント材料や法工学も彼が発明した言葉です。かくして 1973 年夏には、工業技術院機械技術研究所材料物性課で待ちに待った「骨・関節のバイオメカニクス」の研究を開始する手はずが整い、その後まもなく最低限の材料試験装置と共同研究者一名（白崎芳夫氏）とで骨・関節のバイオメカニクスの研究に着手することになりました。

1970 年代半ば頃、アメリカ帰りの生物学や医学の若手研究者も若干名ながら東京周辺にいて、ロコミで杉並区井荻にあった機械技術研究所でナマモノの強度試験が出来ることを聞きつけ、材料持参で訪ねてくる人がいました。東大自然人類学の木村賛名誉教授（当時、帝京大法医学）や筑波大学スポーツ医学の宮永豊名誉教授（当時、東大整形外科）などの人々です。当時、大学の材料力学研究室ではヒトや動物のナマモノは機械が錆びるとか、汚いといった理由で素朴に敬遠される時代でした。実際、劇症肝炎で死亡したヒトから採取した冷凍保存の骨・軟骨を大した感染予防処置もせずに力学試験するなど、現在の安全管理や倫理規定など考えも及ばない当時の情勢の中で、手探り状態の研究が続けられていたのです。我々の研究は粘弾性理論に基づく骨・関節を構成する各組織の動力学的挙動と症例、部位、方向および内部構造との関係を解明することでした（表 1）。

国内学会での研究発表は、主として日本機械学会や日本材料学会で行っていましたが、当時生体力学や生体材料を本気でやっている人間は極めてまれで、日本機械学会のセッションに顔を出す者は私の研究室と国立循環器病センターの林研究室関係者の他誰もいないという状況でした。最盛期 4 万数千人の会員を抱える日本機械学会の論文誌に投稿した時、査読者が



いないので返却すると言われたり、こんなことを何の為にやっているのかというコメントをもらったこともありました。

その頃は、現在ほど専門性が峻別されていたわけではなく、バイオメカニクスとバイオマテリアルに同時並行的にかかわっていた研究者も少数ではあるがいたのです。1977年に日本バイオレオロジー学会が、翌年に日本バイオマテリアル学会が設立されたことにもその様な事情が反映されていると考えて良いでしょう。

日本バイオマテリアル学会設立直前にわが国の当分野に関係した研究者のコンセンサスをうる為にバイオマテリアル国際シンポジウムが京都で開催されましたが、その運営に当たられたのが京大工学部機械工学科材料力学教室の平修二教授でした。平教授はその後まもなく惜しくも亡くなりましたが、そのお弟子さんには、林紘三郎教授や佐藤正明教授がおり、同じ京大機械出身の井街宏教授、堤定美教授等と共にその後永きにわたり当分野において多大な貢献をすることになりました。バイオマテリアル学会黎明期を指導された東北大学の横堀武夫教授も高名な材料強度学者であったことも象徴的な事実です。

1970年代後半になると日本でもバイオレオロジー学会やバイオマテリアル学会以外にも学会活動が活発になり、整形外科学会にもバイオメカニクス研究会やセラミックインプラント研究会が生まれる等、研究者のネットワークがようやく出来上がり、それに伴い機械技術研究所は臨床家達の駆け込み寺の様相を呈するようになりました。整形外科、形成外科、歯科はもちろんのこと産婦人科や循環器外科の医師までもが遠くは九州や四国から訪問するという盛況ぶりになりました(表2)。

**表2. 研究課題の変遷 (機械研、産総研、東大、物材機構)**

| 生体力学・生体材料                                                                                                                                                               | 細胞・組織工学                                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>1990 歯の力学異方性<br/>AEによる骨折予知<br/>MRIによる軟骨生体力学<br/>高性能人工関節<br/>医用先進複合材料<br/>人工関節と表面処理</p> <p>2000 セラミック人工骨・関節の開発<br/>形状記憶合金による内固定具<br/>赤外応力画像法による生体力学<br/>新チタン合金の開発</p> | <p>摩耗粉の細胞毒性<br/>高重力の負荷と骨原性細胞<br/>血管壁細胞による組織形成<br/>レオメーターによる血液適合性評価<br/>力学刺激による細胞・組織構築<br/>骨芽細胞・破骨細胞系の情報伝達<br/>多孔質アパタイトによる骨形成<br/>静水圧による軟骨細胞の増殖制御<br/>多孔質ハイブリッド細胞担体の開発<br/>組織工学による生体外軟骨再生<br/>組織工学による生体外骨再生と臨床応用<br/>組織工学による再生靱帯の開発</p> |

人体の機能を代替する生体材料の研究開発においては、材料工学的、生物・医学的な知識、技術はもちろんのこと機械工学的な設計・製造・評価技術の支援なしに満足な医療機器の実現は不可能です。最近の世界的な傾向として生体力学、生体材料と医学分野の融合が進んでいることを強く実感していますが、わが国での専門分野の融合はどうなっているのでしょうか。筆者が当分野と関わった 40 余年間、わが国の病院、大学、研究機関、企業における臨床と理工学の系統的かつ大規模な組織融合があまり進まないことに強い懸念を持っています。相変わらず個人的なコネをよりどころとしていて、組織的な医工連携を構築する土壌はまだ不十分と言えましょう。個人的な友情に根ざした連携は貴重であり、逆境にも強く、ときどき目にも鮮やかな成果を挙げることがありますが、体制を変えてしまうような量的な効果を期待するわけにはいきません。生物・医学産業を振興するためには、組織的な連携を推進することが可能な制度を確立する努力が必要です。

高齢者の機能低下で最も深刻なものは運動機能、特に荷重関節と言われている股・膝・足の各関節の障害です。歩行機能の障害は最終的には体全体の生理機能を損うことに直結しているので何としても救済する必要があります。骨・関節の代替デバイスである人工骨・関節については 1980 年当時、まだステンレス鋼や Co-Cr 合金が主流であり、チタン合金は限定的にしか使われていませんでした。破損した人工関節や骨折固定板などのデバイスの破損原因の分析を持ち込まれる事例も急増してきました。今後デバイス破損に伴う医療訴訟など頻発する時代となるでしょう。その為にも「法医工学」の専門家の養成が必要です。

わが国では現在、年間約 20 万個、2000 億円の人工関節が体内に設置され障害者の根治療法として確固たる地位を築いており、体内埋め込み型医療機器の中で断然一位の実績を誇っていますが、その 80 数%を欧米からの輸入に頼っているのが実情です。欧米ではそれぞれ日本の使用量の 10 倍の実績があると言われています。人工関節は金属、セラミックス、プラスチックなどの部材を巧みに組み合わせた生体軸受で、機械工学者と医師の協力で実現に至った代表的なデバイスですが、長期間の使用によるゆるみ、感染、イオン溶出による全身反応など依然として未解決な問題をかかえています。医療機器としての平均寿命はたかだか 10 数年で、高齢者にとって手術のやり直しといった想像を絶する難問題を避けて通れないというのが実状です。これに対する有力な解決策は軟骨再生であろうとは誰しも考えるところですが、当時の外科的手技では局所再生もままならず、10 数年後の再生医工学の登場を待たなければならなかった次第です。

東京井荻における研究と当時の生体力学の趨勢に関する解説は、宮永先生との共著「最新整形外科バイオメカニクス資料集成」、朝日サイエンス社(1978)、にまとめられています。わが国では最初の当該分野の本格的専門書でかつ高価であったため、当時最もコピーされた本とも揶揄されたりしました。

1980 年、東京とその近郊の工業技術院 9 研究所のつくばへの大移転が始まりました。今では考えられないことですが、職員組合による移転反対のストライキが敢行されるなどして遅れに遅れ、工業技術院研究所のつくば

移転は国立研究所の中の最後となりました。そのため、最初に予定していたとされる広大な地所(現在の宇宙航空研究開発機構所在地)が確保できず工技院は3地域に分散移転となりました。国立研究所のつくばへの強制移転はいろいろな問題を内包していたことは確かですが、その後のバイオ的研究の発展のための一つのきっかけになったことは間違いありません。45の国立研究所、4大学、約200の民間企業研究所のつくば移転完了にともない、研究所クラスターが創出するインテグレーション効果など医工学を取り巻く環境も随分変わり、産・官・学の融合連携が可能な状況が実現できたのです。

私自身、つくば移転に伴う設備整備費で、わが国で2台目という磁場強度2テスラの実験用MRI(当時NMR-CTとよばれていた)を購入しました。研究室同僚の本間一弘氏、牛田多加志氏と共に沢山の生体組織の画像化技術に取り組み、私に関係した分野では、外力による椎間板や関節軟骨中の水の移動を可視化することができる「MRI バイオメカニクス」の端緒を開いたと自負しています(表1)。本間氏によるその後のMRI技術開発への貢献は目覚ましいものがあり、彼はその分野の権威となっています。

1983年に機械技術研究所のバイオメカニクス課長になってからは、生体力学、生体材料の研究をさらに進めると共に診断、治療および生体機能代替技術の総合化を行うなど、医工学の確立に課として取り組む体制ができあがりました(表1, 2)。とくに、人工骨・関節を中心にした生体材料及び医療機器の開発研究に重心を移し、企業や臨床家との共同研究がさらに活発化しました。セラミックやチタン合金に関して企業と行なった先進医用複合材料の開発(官民連帯共同研究)はわが国に於ける政府主導の医用材料開発研究のはしりでもあったと思います。特に、生体硬組織を代替することができるバイオセラミックには各企業が異常な興味を示し、損得無視でプロジェクトに参加する企業が続々と現れ、当時の活気、企業マインドの高さを懐かしく思い出します。

1980年代には、Ti-Ni合金が持つ形状記憶機能を医用デバイスに応用しようとする研究にも精力を傾けました。骨折固定用のプレートや髄内釘をTi-Ni合金で試作し(図1)、その形状記憶性により骨との強固な固定性を

確保しようとするものです。しかしながら、Ni の細胞刺激性が予想以上に高く、巨細胞化をうながすのではとの危惧があり、整形外科学会の意向で結局臨床応用は断念せざるをえなかった分けです。同じ体内埋め込み型デバイスである Ti-Ni 合金製の人工歯根は認可され臨床使用されました。業界の七不思議のひとつです。

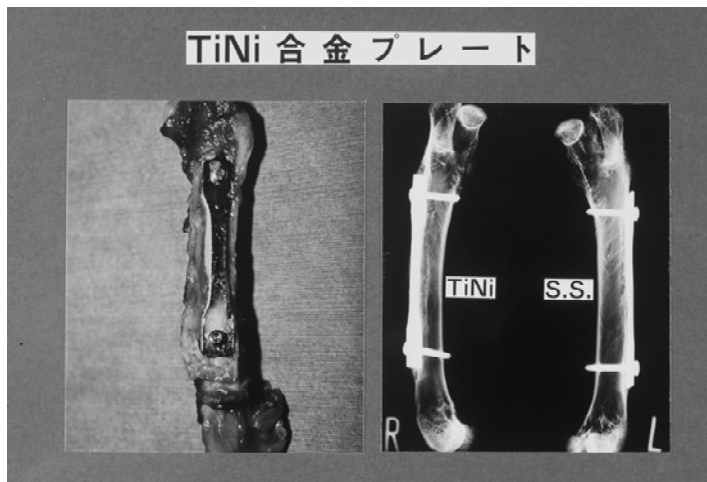


図 1. Ti-Ni 形状記憶合金製骨折固定板

Advanced Bio-Composite material を支援する Design, Evaluation, Fabrication 技術、すなわちその頭文字をとって、ABC を支援する DEF の多角的関係などと得意がっていたことが懐かしく思い出されます（図 2）。この頃、biostable ceramics（生体内安定性セラミック）の代表格はアルミナの京セラ、ジルコニアの日本特殊陶業、神戸製鋼であり、bioactive ceramics（生体活性セラミック）にいたってはその後淘汰されたとはいえ 10 数社が参入するという盛況ぶりでした。京セラの藤沢章氏、オリンパスの袴塚康治氏、歯科用材料の鈴木仁氏（アドバンス）とはその後も永く親交がありました。セラミックの人工骨・関節あるいは歯科応用を指導していたのは、臨床側は整形外科の大西啓靖先生、材料工学側

はアパタイトの青木秀希先生でした。

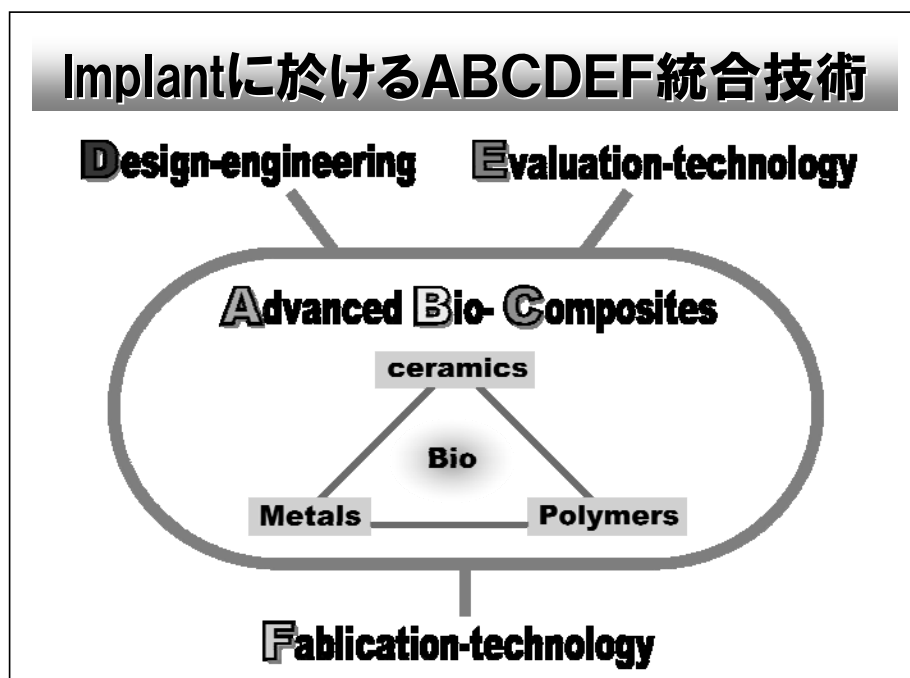


図 2．先端医用複合材料(ABC)を支える 3 つの要素技術(DEF)

1987 年に日本機械学会が部門制に移行すると共にバイオエンジニアリング部門が創設され、私は 1991 年に部門委員長に就任し、1992 年つくばで第 2 回日本機械学会バイオエンジニアリングシンポジウムを開催しました。その 10 年後、東大工学部に在任中の 2002 年、実行委員長として再び本郷で第 14 回バイオエンジニアリングシンポジウムを開催することになります。この頃、日本機械学会に「バイオメカニクスの基礎と応用」出版分科会が設置され、私が主査として編修にあたりバイオメカニクスシリーズ四分冊、すなわちバイオメカニクス概説、生体力学、生体材料学、細胞のバイオメカニクスを刊行しました。

機械技術研究所の首席研究官兼生体機械工学特別研究室長時代（1989－

1993) にバイオメカニクスの研究コンセプトをさらに発展させ、ポリエチレンの表面に水酸アパタイト微粒子を傾斜機能的に配置した人工関節部材の開発やセラミックスと種々の表面処理を施したチタン合金とのくみあわせによる複合化デバイス技術を臨床応用することを目的とする医工学への展開を試みました。

当時、日本人の平均骨格統計データに基づいて人工関節を製造する本格的な医工連携組織は存在していなかったと思いますが、ヤンマーがスポンサーになり、筑波大医、埼玉医大、神戸大医、機械技術研究所が協力して、X線CT画像、MRI画像からの骨格データの収集、データベース化、3次元表面再構成画像、ソリッドモデル、FEM解析、機構・運動解析、CAD/CAM/CATによるデバイスの創製を一貫して行なうシステムを構築するという当時としては画期的な先進人工関節開発チームを組織しました。このプロジェクトの臨床サイドの取りまとめを前出の筑波大学・宮永教授が行い、企業側の担当者は大森健一氏でした。前臨床試験をほぼ終了し、治験体制まで構築しましたが、不運にもバブル崩壊によって製品開発の夢は費え去ったのであります(図3)。この頃、セラミックの伊藤敦夫氏、チタン合金の岡崎義光氏、強度評価の兵藤行志氏の貢献が大きく、機械技術研究所時代に行なった研究の一部は、立石哲也編著「メディカルエンジニアリング」米田出版(2000年)の中に紹介されています。

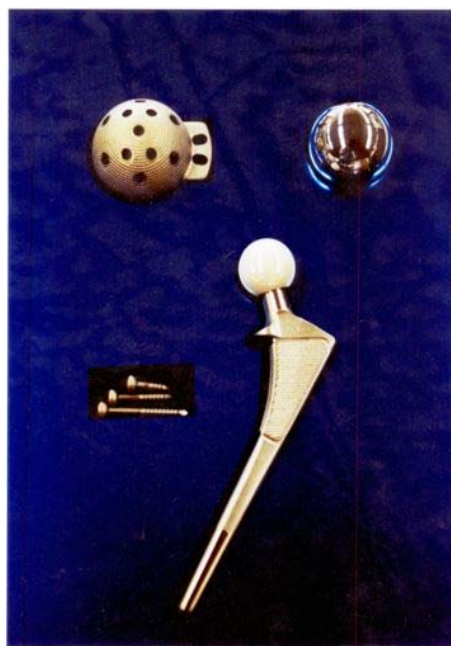


図3．開発した先進人工股関節（ジルコニアボールヘッド、表面多孔質化、窒化Ti合金ステム、アパタイトコーティング）

1989年に、当時の先進7カ国とECの代表で構成された「先端材料の標準化に関するベルサイユプロジェクト（VAMAS）」の中の国際バイオマテリアル作業部会の委員長に就任し、新しい生体材料に関する様々な評価方法の標準化に取り組むこととなりました。それに先立ち、イタリア、カプリ島で行なわれたVAMAS運営会議に当時の京大医用高分子研究センターの筏義人教授と出席し、共通試験内容を提案して運営委員会の了承を得ることになったわけですが、それ以来、筏先生には研究や組織運営で貴重なアドバイスを度々いただく事になりました。VAMASではまず、生体材料の抽出毒性に代わる新しい接触毒性の概念の確立と、材料を世界各国に配布して共通試験（ラウンドロビンテスト）を実施し、評価試験法のプロトコルをまとめたのが最初の成果でしたが、これには当時意気盛んであった日本の生体材料メーカーの協力が絶大でした。



次に、VAMAS として人工関節の緩みと密接な関係がある人工関節摩耗粉毒性の評価法を手がけることになりました。人工関節には自己潤滑性と衝撃吸収性に優れたポリエチレンコンポーネントが用いられていますが、長期間の使用により微小な摩耗粉を生じ、それがデバイスと骨組織の間に侵入・堆積し、これが緩みの原因になると言われていたが、そのメカニズムは不明でした。結果的には、バルクな状態では極めて良好な生体適合性を示すポリエチレンもサブミクロンの微粒子になるとマクロファージなどの細胞の貪食の的となり、その際マクロファージが産生するインターロイキン等の生理活性物質が骨の新生を妨害することが判明しました(図4)。これらの研究に主体的にかかわったのは牛田多加志氏で、後日メインテーマとなった再生医工学の端緒となった研究です。

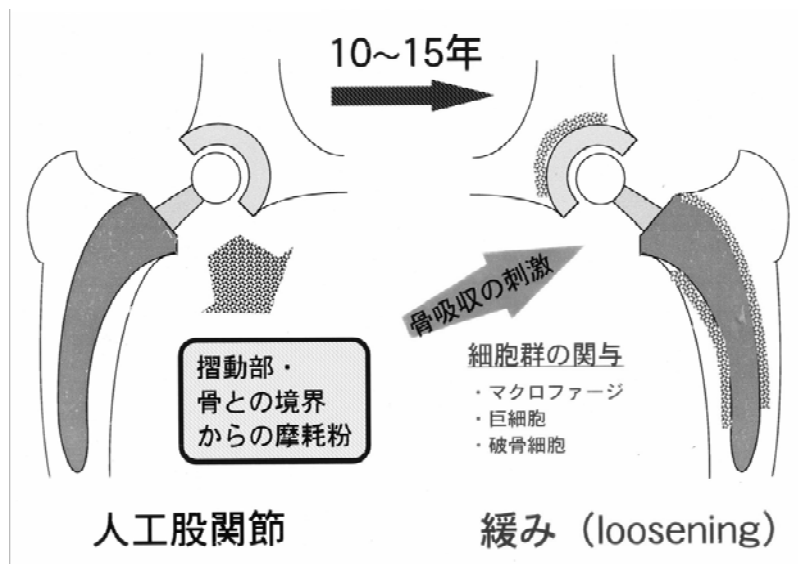


図4. 人工関節の緩みの原因となる摩耗粉毒性の生物学的機序

最近、アスベストの発がん性がクローズアップされていますが、サブミクロンの鋭い先端を持ったアスベストによる細胞への長期刺激が細胞変

異を誘発することも予想されています。ナノテクばやりの昨今ではありますが、超微粒子の細胞への影響はほとんど分っておらず、ナノテク技術の倫理問題の検討を急がなければなりません。つまり、ナノトキシコロジーの確立が急務です。

つくば地区における生体材料研究の実績が認められ、1990年に第12回日本バイオマテリアル学会をこの地で開催できたことは、大会長として大変喜ばしいことでした。この頃、工技院研究所、金属材料技術研究所、無機材質研究所、農林省研究機関、筑波大学等の生体材料研究者の交流と研究発表の場を確保するために、つくばバイオマテリアル研究会が発足し、角田方衛氏や田中順三氏と親交を結ぶこととなりました。12回を数えたこの研究会は2009年より拡大改組され、「つくば医工連携フォーラム」として存続しています。

1992年に日本機械学会編修理事に就任した時、十数年前当学会への投稿論文を返却されたことを思い出し感慨ひとしおでした。学会の中でバイオの市民権を確立するのに二十年近い歳月が必要であったわけです。

## 再生医工学との出会い

1993年には、工技院研究所の統廃合があり、新しい理念のもとに創設された産業技術融合領域研究所（融合研）にバイオ部門のリーダーとして同志と共に移り、生体機能の解明とその産業への応用をてがけ、「バイオニックデザイン」という新領域の確立に尽力しました。融合研創立の動機は、単独の研究分野では対応しにくい横断的で融合的な研究領域への取り組みを積極的に行い、特に開放的・流動的・国際性というキーワードを重要視して管理、運営する組織です。「バイオニックデザイン」研究グループでは生体を多機能な分子機械システムと見立て、それを模倣する組織的な構造や機能などの設計・製造原理を確立することを目標にしていました。その利用技術の将来的な展望としては、人工骨・筋肉・血管などの生体適合性バイオ組織・臓器の開発やナノモーターという微小運動機構の開発を目指しました。生体特有のすぐれた構造と機能として、たとえば生体の自己形成機能、生体が何らかの損傷を受けたとき自己修復し、さらに自己強

化さえする機能があります。これらの機能は、組織レベル、その下の細胞レベル、もっと下の分子集合体のレベルという各階層に於いて、常温・常圧の下で自律的かつ環境にソフトな反応で実現することができます。

内容的には、生体材料、細胞組織工学とアクチン-ミオシン系筋肉動力機構の解明等分子機械関係の研究が中心で、それに当時筑波大教授だった多比良和誠教授の RNA 工学が加わりました。その後これらの成果が新たな展開をみせ、バイオナノテクノロジーやヒトの細胞を用いて人為的に生体組織や臓器を作成するといういわゆる再生医工学の基礎を築くこととなりました。分子機械グループには、人工筋肉の鈴木誠氏（後東北大学教授）、筋肉の分子生物学で活躍した上田太郎氏（後早稲田大学教授）がいました。融合研は集まった人材もさることながら、かなり豊富な研究資金と外部からリベラルな有識者を所長に迎え、霞ヶ関の有能若手行政官が企画室長としてこれを支えるという万全の体制を誇っており、しばしば「優遇研」とのやっかみもあったようです。

融合研バイオニックデザイングループリーダー（1993）、同所総合研究官（1995）時代に、かねてより考えていた患者の細胞を用いて患者自身の組織を体外で再生し、再移植することを可能にするティッシュエンジニアリングあるいは再生医工学の研究に着手することになりました（図 8）。これはそれまでの生体力学、生体材料とはかなりセンスの異なるテーマであるわけですが、けっして唐突に現れたのではなく、時流におもねたわけでもありません。牛田氏が加わってから、京大筏研究室との交流を強めながら、細胞を用いた材料の生体適合性の研究や材料と細胞の接着強度の評価等、細胞工学と生体材料の境界領域の研究へと内容をシフトして再生医工学の到来に備えていました（表 1）。

分子生物学が医学の有力なツールとして登場して以来、マクロ医療からミクロ医療への驚くべき発展をとげ、まだゲノムの機能と構造の完全な解析が行われたとは言えない状況ではあるが、一応ヒトゲノム解読の終了宣言が出されるに及んで生命現象の分子レベルから細胞、組織、器官、器官系、個体レベルに至る階層構造の数理モデル化が残された重要課題となりました。図 5 はゲノム（遺伝子解析）、プロテオーム（たんぱく解析）、フ

ィジオーム（細胞より上位現象の解析）にいたる生命現象解明の階層構造を示します。再生医工学はゲノム、プロテオームを有力な解析ツールとしているものの、その理論的根拠の大部分をフィジオームに依存しているのです。

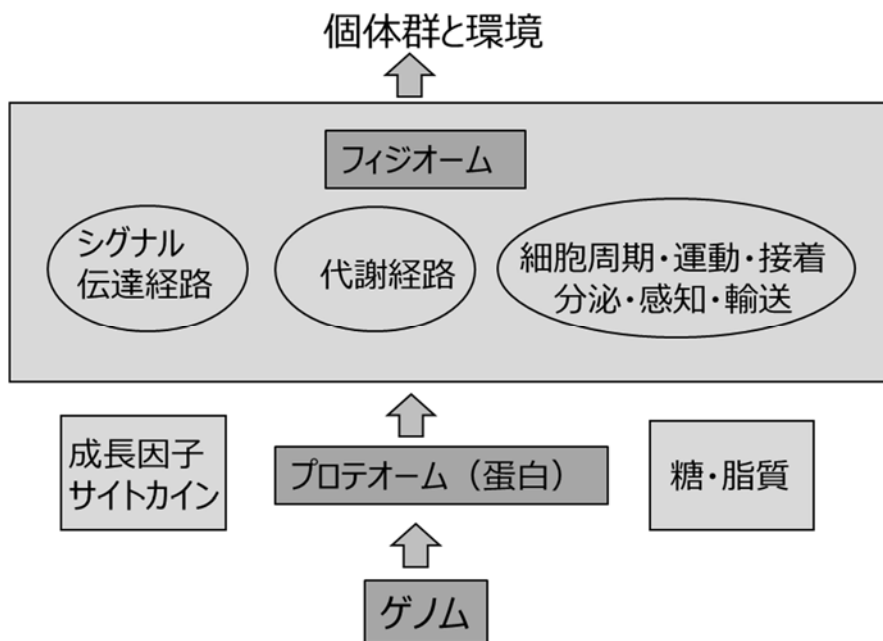


図5 ゲノム、プロテオームからフィジオームに至る生命現象解明の階層構造

機能を喪失した生体組織の代替はこれまで人工材料（バイオマテリアル）によって行われてきました。その典型的な例は金属、プラスチック、セラミックを巧みに組み合わせた人工関節ですが、既に述べたように依然として未解決な問題もあり、将来的には再生医工学製品の占める割合が徐々に増加することが予想されます。10 数年前米国保険会社の調査によると図6に示すように、2020年には整形外科領域で使われる全医療機器180億ドルの中の約45パーセントを細胞や生物由来物質を用いた再生医工学製品が占めると予測されていましたが、まだとてもそのレベルに達していません。

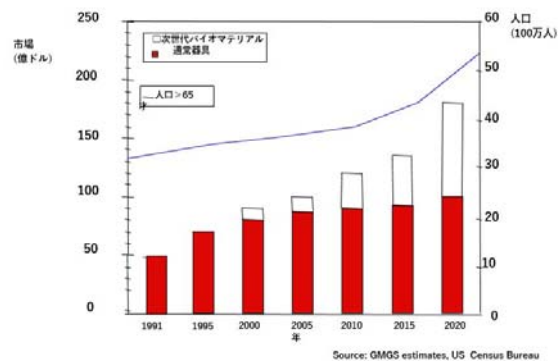


図6 整形外科用インプラントの世界市場と高齢人口の推移

再生医工学において必要不可欠な3要素は、細胞ソース、細胞担体、細胞刺激因子といわれています(図7)。しかしながら、細胞、材料、刺激因子が整ったからといって再生医療が達成できるわけではありません。細胞に基盤をおく医療機器すなわち細胞デバイスをデザインし、安全性が保たれた環境下で無菌的、無人的に製造し、デバイスの活性度を保ちながら輸送する手段を確保するためには工学的設計技術が必要であり、細胞デバイスを大量生産するためには細胞工学の助けが必要です。また目的とする組織、臓器にいたるまで細胞の分化・誘導や増殖を制御するためには、細胞集団の間に存在する遺伝子やたんぱくに関する莫大な量の情報をモニターし、制御するバイオインフォマティクスが必要となります。何よりも、生体外で再生された組織が体内に移植された後、予定した機能を発揮するためには、再生組織が十分な強度、力学的特性や良好な生化学的特性を有するかどうかを予め無侵襲的に評価し、保障しなければなりません。これは理工学が最も得意とする分野です。つまり、サイエンスとテクノロジーおよび医学が融合してはじめて再生医工学が成立するのです。

わが国に於いては、個々には高いレベルにある生物学、基礎・臨床医学と理工学の協力関係が歴史的に不十分な状態が続いてきたことが医療産業の振興にマイナス要因となり、体内埋め込み型の医療機器の極端な輸入超過に見られるように、欧米医療先進国の草刈場の様相を呈することとな

ったのではないかと考えます。

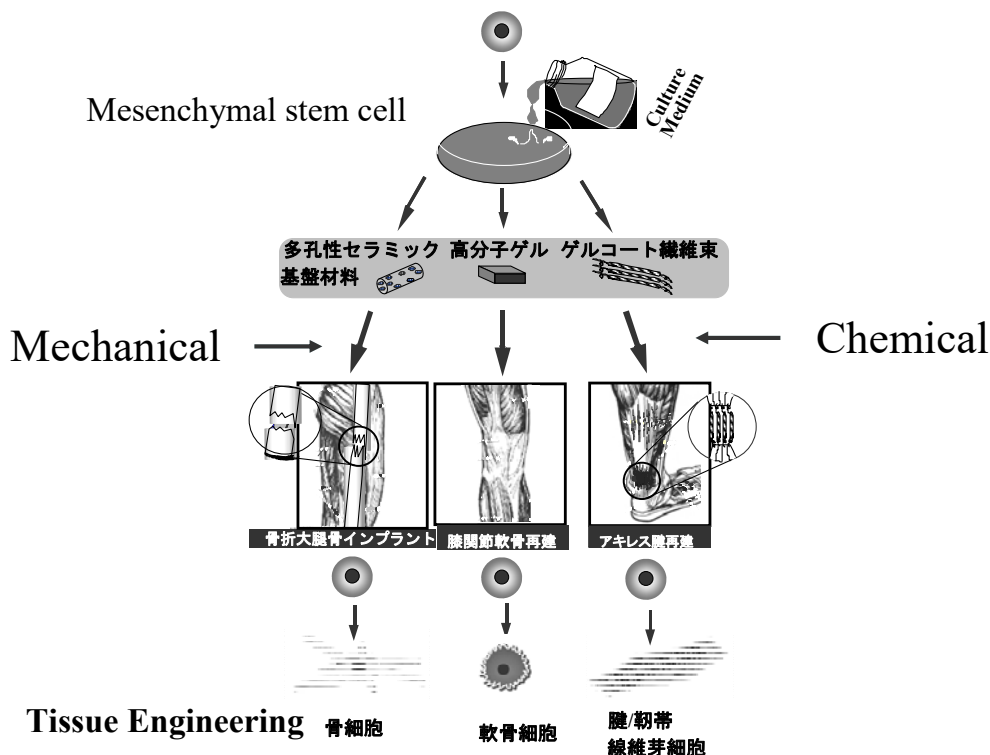


図 7. 幹細胞、刺激因子および足場材料を用いた再生医工学

産業技術融合領域研究所・統括融合研究官を最後に、2000 年 4 月に、私は東京大学大学院工学系研究科・機械工学専攻教授として牛田氏、古川克子氏と共に本郷に移り、再生医工学研究室を立ち上げることとなりました。この年は大変忙しく、第 27 回日本臨床バイオメカニクス学会を宮永豊教授と一緒に大会長としてつくば市で開催し、これまで二人で築いてきた整形外科バイオメカニクスの集大成としました。

また、東京大学における研究・教育のかたわら、2001 年からは、関西に新設された独立行政法人産業技術総合研究所・ティッシュエンジニアリング研究センター長を兼任して、再生医工学による生体組織工学製品の開

発・臨床応用とその産業化に尽力しました。一方、東大再生医工学研究室もまた同研究センターに協力し、臨床現場における細胞・組織の採取、センター内で行われる種々の細胞操作、組織再構築を一貫して行ない、ヒト細胞故の倫理規定の適用を厳しく行う体制を築いてきました。奈良県立医科大学整形外科講師であった大串始先生にセンターの細胞・組織工学研究室長として来て頂いてから、培養骨・軟骨の臨床応用は格段に進み、わが国のリーダーシップをとるまでに発展しました（図8, 9）。これを材料工学面から支えたのは陳国平氏であり、細胞工学の植村壽公氏でした。

産総研では、再生医工学において他に先駆けて、臨床および理工学の権威ある専門家、法律家、元厚生省の倫理担当部長、マスコミなどから成る倫理委員会をいち早く発足させ、ヒト骨髄細胞、神経細胞等個別案件ごとの審査を行い培養組織の実用化を目指しました。その後、私は産総研の医工学臨床応用の倫理委員会委員長としての職務を遂行しました。

これらの努力が認められ、2003年には工学者として初めて第2回日本再生医療学会会長に就任し、総会を運営すると共に、医工連携の実践を推進することになりました。ティッシュエンジニアリング研究センターが尼崎の業務を開始してからは、つくば、本郷、尼崎の間を回遊する魚のような生活が始まり、現住所・新幹線などとぼやきながら老体に鞭打つ毎日が続いたのです。

東大在職は三年間とごく短い期間でしたが、東大工学部機械工学科からは大げさに言えば三顧の礼を持って迎えていただいたと思います。苦しい人事のやりくりの中、教授、助教授、講師、助手のフル講座編成を用意していただいたことに大変感謝しています。

私の研究活動は、工業技術院機械技術研究所を振り出しに、研究者のパラダイスをめざした産業技術融合領域研究所、行政改革により無理やり誕生した産業技術総合研究所を経て、東大工学部さらには物質材料研究機構と研究場所を変える間に、バイオメカニクスの研究を端緒とし、最後には再生医工学に関連した評価技術や大規模かつ高次の再生組織構築をめざす「夢のオルガノイドエンジニアリング」等、次世代ティッシュエンジニアリングの研究にまでたずさわることができました。

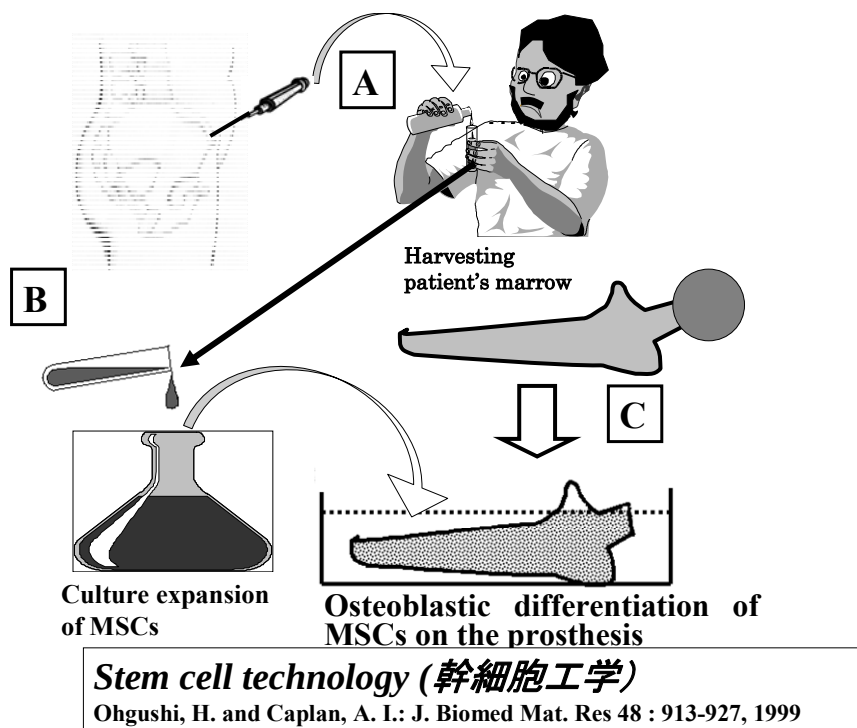


図8．再生医工学による人工関節表面への骨組織再生技術(大串)

工業技術院の研究所に入所して以来、東大工学部を経て物質材料研究機構で二度目の退職をするまでの約 40 数年間にわたって医工学の研究開発に従事してきましたが、その間、痛切に感じたことは、日本の工学者は医療技術の研究開発に部分的には大変良く貢献してきたとはいえ、医療産業の振興という最終目標に至るまで主体的に取り組んできたかと言うとはなはだ疑わしいと言わざるを得ません。

私が関係してきたヒトの体内深部に埋め込むタイプの人工組織、人工臓器に関してはその大部分を欧米からの輸入に依存せざるを得ないのが現状です。医学と工学とがそれぞれ独自の文化を固持し、方法論的、組織



体制的に互いに融合できなかったことにも原因があると考えられます。もちろんリスクの大きい段階をベンチャーが担うという多様で柔軟なアメリカ型の企業進化のメカニズムができていないこと、国の縦割り行政や単年度主義予算の弊害等要因はいくつか考えられます。省庁、医と工、産と学の上に厳然として存在する文化的障壁をなくす努力がまだ必要です。

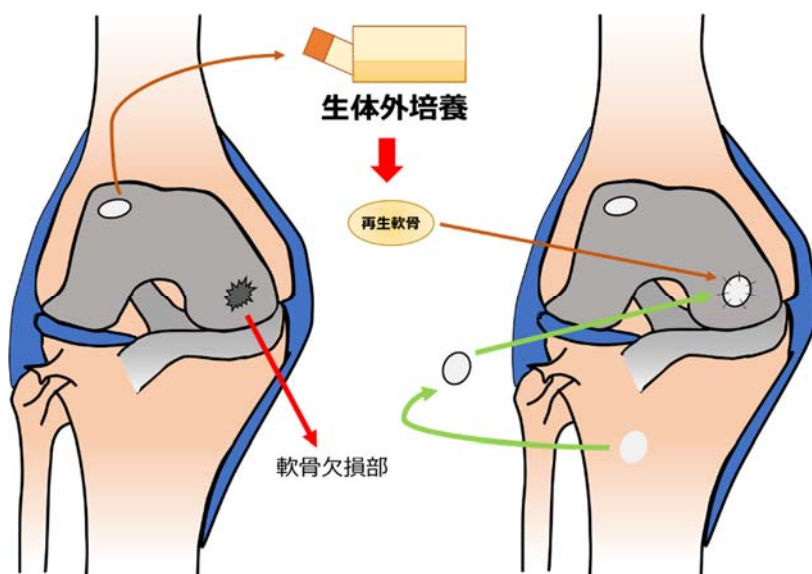


図9．再生医工学による膝軟骨再生技術の概念図

21 世紀の花形医療産業となることが確実な再生医療や遺伝子治療においてこのような失敗は二度と許されません。私が東大に赴任するちょっと前から東大工学部に生体医工学を専門とする人材が集まりはじめ、医工連携を育てる土壌がようやく整備されつつあり、2006 年には生体工学関連の大学院・専攻が東大本郷に誕生しました。

故小淵総理が、情報、環境、高齢化に関係した産業技術を 21 世紀の最重要課題と認め、格段の産業競争力増強を意図した、いわゆるミレニアムプロジェクトを提案して以来、ポストゲノムと再生医療に関係した科学技術に対し、これまでに例をみない国家予算が投入されることになりました。

再生医療に関しては残念なことに国家予算の大部分は当初関西地区に重点配分され、西のフィーバー状態に対し、東の冷え込みを顕在化させましたが、東大における医工学連携の推進や疾患生命工学センターの設立などのイベントが東風をまき起こし、我国の医療産業の中興の祖としての役割を果たすものと期待しています。私が東大機械工学科内に立ち上げた再生医工学研究室では現在でも、再生医療に必要な細胞の足場となる材料作り、細胞の正常な分化・増殖をうながす各種刺激因子の作用機序の解明、三次元細胞組織構築技術の開発といった工学的研究はもちろんのこと、医学部の医師が直接参加した再生医療を実現させるための関節軟骨再生動物実験モデルの確立等、具体的な臨床治験を念頭に置いた前臨床試験段階にまで到達しています。もちろん企業も参加し医療機器としての製品化も企画中であると聞いています。

再生医工学の全体像を理解するためには、立石哲也、田中順三編著「再生医療工学」、工業調査会（2004）、立石哲也編著「ここまできた人工骨・関節」、米田出版（2012）を参考にさせていただきたい。同志として東大に移籍した牛田氏は、現在工学部教授、古川氏は工学部准教授として再生医工学で引き続き活躍中です。

思いおこせば 11 年前、東大工学部教授として最初の定年退職したのを機に、好きなゴルフに専念して将来のエイジシューターの実現をめざしたいと思っていました。その一方で、東京電機大学特任教授として教育に従事するかたわら、産業技術総合研究所や物質・材料研究機構の片隅で再生医工学の完成に何らかの貢献もしたいと欲深くあれこれと考えていたところ、かつて工技院融合研時代の上司（所長）で物質・材料研究機構理事長の岸輝雄先生や同機構生体材料研究センター長、田中順三氏（後東工大教授）のご尽力により、2004 年 4 月に同機構フェローへと転進することとなり、さらに 2006 年 4 月からは田中氏の後任として生体材料センター長に就任し再び現場の指揮をとることになりました。

生体材料センター在任中は、旧科学技術庁傘下の研究所の伝統を引き継いだ学術的な雰囲気の中で多くの有能な研究者と交流することができました。特に、2007 年 12 月 6～8 日、それまでアジアで分裂して開催されて

いた二つの生体材料関係の会議を統合して、The 1<sup>st</sup> Asian Biomaterials Congress をつくばの国際会議場で開催できたことは生体材料センター職員の強力な支援に負うところ大でありました。その間、工技院機械技術研究所時代から物質・材料研究機構生体材料センター時代に至る永い年月、秘書として活躍していただいた塚本世津子氏に感謝しています。

2008 年 4 月に生体材料センター長を最後に二度目の定年退職をし、同機構名誉フェローとして非常勤職を 3 年間務め、その後も医工連携コーディネータ協議会会長や医工連携推進機構理事長として医工学の普及と医療産業の振興に努力したつもりです。

2010 年からは、幸いにも古巣の産総研東事業所（旧機械技術研究所）からやり残した仕事を成し遂げるための便宜を受け、同所名誉リサーチャーとして医工学発展を支援するために微力ながら残りの人生をささげています。特に健康工学研究部門の鎮西清行副部門長や高橋喜久美氏のご支援に感謝しています。

以上述べたように 40 余年の間、材料力学からバイオメカニクス、バイオマテリアル、再生医工学まで波乱の研究人生を送ってきましたが、すべては E T H で出会ったバイオメカニクスに始まります。再生医工学は将来性豊かな発展途上の医工学の一つであり、基礎生物学が臨床医学に直結するという意味で魅力あふれる分野です。その展開と成功をここで明言することは出来ませんが、医工学の先覚者たちが寝食を共にしてその実現を夢見た真の医工連携がわが国ではいまだ十分に達成されたとは言えません。今こそ、医と工の更なる相互理解と献身的な協力が望まれているのです。

## 参考文献

- 1) 立石哲也、宮永豊著「最新整形外科バイオメカニクス資料集成」、朝日サイエンス社(1978 年)
- 2) 立石哲也、白崎芳夫、生体組織の電気・力学的特性に関する研究、機械技術研究所報告第 130 号、1984 年 3 月
- 3) 立石哲也、鈴木誠、兵藤行志、白崎芳夫、生体の機械機能代替材料に関する研究、機械技術研究所報告第 130 号、1987 年 3 月

- 4) 日本機械学会編「バイオメカニクス概説」オーム社（1990）、「生体力学」オーム社（1991）、「生体材料学」オーム社（1993）、「細胞のバイオメカニクス」オーム社（1990）
- 5) 立石哲也編著「メディカルエンジニアリング」、米田出版（2000 年）
- 6) 立石哲也、田中順三編著「再生医療工学」、工業調査会（2004 年）
- 7) T. Tateishi, T. Ushida and K. Furukawa ed., “International Symposium on Cell Biomechanics and Tissue Engineering at University of Tokyo”, Special Issue “MATERIALS SCIENCE & ENGINEERING-C” 24-3(2004)321-456
- 8) T. Tateishi, G. Chen and T. Ushida, “Polyfunctional Scaffolds for Tissue Engineering”, J. Biomechanical Science and Engineering, 1-1(2006)8-15
- 9) T. Tateishi ed., “Biomaterials in Asia”, World Scientific, 2008
- 10) 立石哲也著「バイオメカニクス」オーム社（2010 年）
- 11) 立石哲也著「非弾性体の力学とバイオメカニクス」自費出版（2011 年）
- 12) 立石哲也編著「ここまでの人工骨・関節」米田出版（2012）
- 13) 立石哲也、田中順三、角田方衛編著「生体医工学の軌跡」米田出版（2007）
- 14) 医工連携推進機構編「医料機器への参入のためのガイドブック・第 2 版」薬事日報社（2017）
- 15) 医工連携推進機構編「医料機器への参入のためのスタディブック」薬事日報社（2013）

**略 歴** 氏 名：立石哲也（タテシ テツヤ）

生年月日：昭和 17 年 1 月 1 日

現 住 所：〒305-0042、茨城県つくば市下広岡 670-3、

Tel・Fax. 029-857-5556

最終学歴：東京大学大学院工学系研究科博士課程精密機械工学専攻

学 位：工学博士（東京大学：昭和 48 年 3 月 31 日）

留学経験：チューリッヒ工科大学（スイス政府奨学生として）1970-1972

職 歴：

昭和 48 年 4 月 1 日 工業技術院機械技術研究所入所  
昭和 58 年 4 月 1 日 システム部バイオメカニクス課長  
平成元年 4 月 1 日 首席研究官兼生体機械工学特別研究室長  
平成 3 年 4 月 1 日 筑波大学大学院医学研究科併任教授  
平成 5 年 4 月 1 日 工業技術院産業技術融合領域研究所バイオニックデザイングループリーダー  
平成 7 年 4 月 1 日 工業技術院産業技術融合領域研究所総合研究官  
平成 10 年 4 月 1 日 東京電機大学理工学部併任教授  
平成 11 年 7 月 1 日 工業技術院産業技術融合領域研究所統括融合研究官  
平成 12 年 4 月 1 日 東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻教授  
平成 13 年 4 月 1 日 産業技術総合研究所ティッシュエンジニアリング研究センター長（併任）  
平成 15 年 4 月 1 日 東京電機大学理工学部特別専任教授、物質・材料研究機構 生体材料研究センター 医工連携グループ併任  
平成 16 年 4 月 1 日 物質・材料研究機構フェロー、領域長、生体材料研究センター併任、東京電機大学理工学部知能機械工学科客員教授  
北海道大学大学院情報科学研究科生命人間情報科学専攻客員教授  
慶応義塾大学理工学部生命情報学科客員教授  
平成 17 年 4 月 1 日 医工連携コーディネーター協議会会長  
平成 18 年 4 月 1 日 物質・材料研究機構 生体材料センター長  
平成 20 年 4 月 1 日 物質・材料研究機構 名誉フェロー、医工連携コーディネーター  
平成 22 年 1 月 1 日 NPO 法人医工連携推進機構理事長  
平成 24 年 4 月 1 日 産業技術総合研究所 名誉リサーチャー

## 受賞 等

（栄誉・表彰）

昭和 57 年 4 月 12 日 科学技術庁注目発明（科学技術庁）  
「力学的振動による生体組織の検査方法および装置」  
昭和 58 年 4 月 22 日 科学技術庁長官賞研究業績賞（科学技術庁）

「関節構成体の力学的挙動に関する研究」  
 昭和 61 年 4 月 18 日 科学技術庁注目発明（科学技術庁）  
 「関節しゅう動部材およびその製造方法」  
 昭和 62 年 11 月 5 日 機械技術研究所所長賞（機械技術研究所）  
 「人工関節に関する研究」  
 平成 2 年 6 月 8 日 通産大臣賞研究業績賞（通商産業省）  
 「骨・関節の生体力学と人工関節に関する研究業績」  
 平成 6 年 1 月 20 日 日本機械学会バイオエンジニアリング部門業績賞  
 （日本機械学会）「バイオメカニクスの顕著な業績」  
 平成 9 年 7 月 18 日 日本機械学会功労賞（日本機械学会）  
 「日本機械学会の発展に対する功労」  
 平成 13 年 4 月 1 日 日本機械学会フェロー（日本機械学会）  
 「日本機械学会の発展に対する貢献」  
 平成 14 年 3 月 5 日 日本機械学会バイオエンジニアリング部門  
 「日本機械学会バイオエンジニアリング部門に対する功績」  
 平成 14 年 10 月 1 日 日本バイオマテリアル学会科学功績賞  
 「生体材料の開発と評価に関する功績」  
 平成 16 年 5 月 17 日 国際バイオマテリアル学会連合 (FBSE) フェロー  
 平成 19 年 3 月 14 日 日本再生医療学会名誉会員  
 平成 19 年 12 月 7 日 日本臨床バイオメカニクス学会名誉会員  
 平成 25 年 11 月 12 日 瑞宝小綬章受賞

#### その他の連名受賞

平成 10 年 日本動物実験代替法学会、ゴールドプレゼンテーション賞  
 平成 11 年 日本人工臓器学会オリジナル賞  
 平成 15 年 第 4 回国際関節鏡・膝関節・整形外科スポーツ医学会 (ISAKOS)  
 優秀ポスター賞  
 平成 20 年 日本人工臓器学会オリジナル賞  
 平成 21 年 日本機械学会賞（論文賞）

|                |
|----------------|
| 受理日：2019年3月13日 |
|----------------|