



## 人類存続のための技術として

—これからの生物工学が目指す方向性、ビジョンとは—



**語り手** 大嶋泰治先生

(大阪大学名誉教授)

新名惇彦先生

(奈良先端科学技術大学院大学名誉教授)

飯島信司先生

(名古屋大学教授)

〈司会〉木野邦器先生

(早稲田大学教授)

創立90周年を迎えた日本生物工学会は、次の100周年、さらには100年先を見据えて、どのような指針を持って歩みを進めていくべきか——。長年にわたり学会を支えてこられた大嶋先生、また学会長としてもご尽力頂いた新名先生と飯島先生にお集まり願ひ、忌憚のないお考えを和文誌編集委員長の木野が伺った。

### 産業と共に歩み、発展を支えてきた90年

本座談会は2012年10月24日夕刻、神戸ポートピアホテルにて開かれた。

**木野** 本日はお忙しいなかをお集りくださり誠にありがとうございます。この座談会では、我々の日本生物工学会が、今後の10年、20年、そしてさらに100年先を見据えて目指すべきビジョンについて、先生方のお考えを伺って参りたいと思います。

その本題へ入る前に、生物工学の位置づけをあらためて確認させてください。そもそも「生物工学」とは、こういった学問なのでしょうか。

**大嶋** 現代社会を支えるに必要な、「生命科学に基礎を置く生産と環境整備に関わる工学」と定義できるでしょう。しかし、農業・牧畜・水産とは、多分に培養工学系の技術を取り入れているところが異なります。古くは醸造と発酵生産の技術でありましたが、動・植物における細胞工学の進歩と遺伝子組換え技術の導入に伴い、再生医療や創薬、また農業・牧畜に直結する栽培植物と飼育動物の品種改良といった分野も含まれてきました。さらにその歴史から、日本の生物工学が日本独自の酒造りに端を発した、応用微生物学を源流としていることも大きな特徴でしょう。

**新名** 醸造→発酵→生物工学という流れですね。大嶋先生も尚醸会（大阪大学生物工学科同窓会）会報などで詳しく書いておられました<sup>1)</sup>、1896年に大阪工業学校（現大阪

1) <http://www.bio.eng.osaka-u.ac.jp/doso/10.pdf>



2) 大阪工業学校  
出典：『写真集 大阪大学の五十年』

大学)に醸造科が設立されたのが醸造学のはじまりです<sup>2)</sup>。当時は酒税が国税収入の第二位にあり(全体の20~30%を占めていた)、それを安定化し発展させたいという国策でした。続いて広島高等工業学校(現広島大学工学部)と山梨高等工業学校(現山梨大学工学部)に同様な醸造科が設置されてきました。

**大嶋** 酒造の合理化と安定化を目指し、経験的な酒造りに科学的な思考を導入することを図ったわけです。しかし当時の教師陣は大半が化学者で、醸造に深く関わる微生物学については初歩的な状態にありました。しかも、学生達には酒造家の出身者が多く、その子弟教育の要素が強かったですな。

その後、大阪工業学校は1929年の大阪工業大学への昇格を経て、1933年に大阪帝国大学(大阪大学の前身)へ編入されましたが<sup>3)</sup>、それを機に南満州鉄道(株)中央研究所長で、わが国発酵微生物学の開拓者であった斎藤賢道先生<sup>4)</sup>を教授に迎えて、酒類の醸造分野のみならず、当時の先端分野である応用微生物学に大幅にシフトした発酵学が始められました。他大学もそれに追随して、より広い分野を含む応用微生物学に展開し、そこからさらに広く動・植物分野の生命科学を取り込んだ総合生命工学分野が、今日の生物工学といえるでしょう。

**飯島** 昭和10年代半ば頃までがアルコール発酵を中心とした醸造の時代であり、そこから第一次世界大戦時の無煙火薬原料としてのアセトンの需要、第二次世界大戦時の航空機用の高オクタン価燃料の開発がありました。さらに自動車工業の発達による合成ゴム原料としてのブタノールの需要に対し、後に初代イスラエル大統領となったワイズマン(C. A. Weizmann)<sup>5)</sup>が、“アセトン・ブタノール発酵”を開発したのもこの頃ですな。

**大嶋** 昭和18、19年頃、日本は航空燃料に逼迫していましたから、朝鮮や中国、また満州など、当時の進出先のあちこちに施設を置いて、研究から生産に及ぶ活動を意欲的に行っていました。この技術的基盤があったからこそ、戦後の日本が欧米のバイオサイエンスにいち早く追いつけたといえるでしょう。その代表例が1928年にフレミング(A. Fleming)が発見したペニシリンです。彼自身は臨床医で、残念ながらその製剤化にまでは至りませんでした。第二次大戦に突入した英米両政府の要請で、フローリー(H. W. Florey)とチェーン(E. B. Chain)が、戦火の及んだ英国・ロンドンを避けて、1941年より米国において製剤化を図りました。そしてその初めての臨床応用の場が、1944年6月6日のノルマンディー上陸作戦であったようです。日本では、1943年に陸軍軍医学校で碧素研究会を組織して独自の開発が始まり、翌年には少量の生産に成功したようでしたが、大量生産には至りませんでした。終戦を迎えた後、1946年に占領軍が招聘したテキサス大学のフォスター(J. W. Foster)指導の下で製薬各社がその製造法を学び、翌年には一般に市販されました。終戦後まもなくの日本で、習得技術とはいえ大量生産に成功するに至ったのは、古くから日本にあった麴やカビを操る文化と、先述の発酵技術についての研究土壌があったからです。

**木野** ペニシリンの生産は、いわゆるバイオリクターによる発酵生産の始まりの一つといってもよいかもしれませんね。より多くのペニシリンを生産するカビの探索や育種、そして培地成分の検討によって、工業化に耐えうる生産性を達成できたわけです。

このように、生物工学上の重要な発見や発明は、本学会の誕生から今日に至る90年間、さまざまなかたちで社会と産業の発展を支えてきました。そこで、特に印象深いと思われる生物工学上の成果を、ひとつふたつ挙げてみていただだけませんか。たとえば、「アミノ酸発酵」はいかがでしょう。手前味噌で恐縮ですが、以前に私が在籍していた



**大嶋 泰治**

1960年大阪大学大学院工学研究科博士課程修了、サントリー研究所研究員(その間の2年間、米国南イリノイ大学にて博士研究員)、大阪大学教授、関西大学教授、大阪大学名誉教授

### 3) 大阪工業学校醸造科の変遷

1897年 大阪工業学校醸造科  
1901年 大阪高等工業学校醸造科  
1929年 大阪工業大学醸造学科  
1933年 大阪帝国大学工学部醸造学科  
1943年 大阪帝国大学醸酵工学科  
1947年 大阪大学醸酵工学科  
1991年 大阪大学応用生物工学科  
1995年 大阪大学応用自然科学科  
応用生物工学コース

### 4) 斎藤賢道 (1878-1960)



1900年東京帝国大学理科大学卒業、1904年大学院を修了、ドイツへ留学し、ベルリン醸造試験所で醸造学を研修、1911年より南満州鉄道、1933年大阪帝国大学工学部教授に就任、1940年に定年退官後、財団法人長尾研究所の設立に参加し、同研究所の主任研究員および理事を務めた。日本の微生物株保存事業の草分けといえ、1927年に出版された“Catalogue of Cultures of Fungi” (Central Laboratory, South Manchuria Railway Co. 刊) が日本で最初の保存株カタログである。

### 5) Chain Azriel Weizmann (1874-1952)



### 新名 惇彦

1970年大阪大学大学院工学研究科博士課程修了，米国MIT博士研究員，大阪大学教授，奈良先端科学技術大学院大学教授，同大学名誉教授，元同大学副学長，元日本生物工学会会長

6) 加藤 辨三郎 (1899-1983)

7) 木下祝郎 (1915-2011)

8) 鶴高重三 (1930-)

協和発酵工業(株)[現協和発酵バイオ(株)]によるグルタミン酸生産菌(*Corynebacterium glutamicum*)の発見と、それによって世界に先駆けて成功したアミノ酸の発酵技術によるグルタミン酸ソーダの製造は、やはり大きなエポックだと思うのですが。

**大嶋** 1956年頃の成果ですね。これは世界的にもインパクトが大きかった。当時の社長は加藤辨三郎<sup>6)</sup>さんで、「アルコール発酵だけでなくクエン酸発酵もできるようになった。次は“味の素”のグルタミン酸ソーダの発酵生産だ」と、研究課長だった木下祝郎<sup>7)</sup>さんに指示したそうです。しかし木下さんは研究所全般の統括で忙しい。ちょうどそのとき研究員の鶴高重三<sup>8)</sup>さんが米国留学から帰ってきた。「おお、いいところへ帰ってきた」と託された鶴高さんがうまいこと考えて、グルタミン酸生産菌を見つけだしたのです。

その方法はというと、まずシャーレの底にグルタミン酸要求細菌を懸濁した寒天培地を広げる。その上に薄く無菌の寒天培地を重ねる。そして、その上に手に入れた微生物試料の懸濁液を塗抹して任意の温度に放置する。数日後に寒天表面に生じたコロニーの下で、ふわあっと濁ってきたスポットが見られると、そのコロニーには何かあるゾというわけです。また、その頃普及したペーパー・クロマトグラフィーも、その物質の同定に大いに役立ったそうです。

**新名** 自然界から菌を拾ってきて、うまく選別する方法を考えたから成功できたといえるでしょう。これのベースとなる技術はすでに欧米にはありましたが、そこにひとつふたつ、独創的なメソッドを組み入れたのが鍵ですね。今思えば簡単な方法論ですが、それをゼロから発案したのは確かに凄いことです。

その後、このグルタミン酸発酵に端を発して、突然変異操作によって多くのアミノ酸や核酸塩基の発酵生産が始まり、代謝制御発酵〔後に米国でmetabolic engineering(代謝工学)の術語が考えられた〕と呼ばれる日本のお家芸のひとつに成長しましたが、そこには多くの大学や産業界からのアイデアや工夫があったことも事実です。

**木野** グルタミン酸生産菌を、上野動物園で採集してきたある種の鳥の糞から分離したというエピソードも実に楽しい。昨今、「生物工学 = 遺伝子を触ること」と思って研究室に入ってくる学生もいますが、いかにして自分の望む活性体(微生物)を自然界から見つけ出すかということが重要で、知恵と工夫と粘りを総動員して初めて達成されたときの喜びは格別です。若い学生にその重要性をわかってもらえるとよいのですが。

**大嶋** たとえばペニシリン生産菌にしても、その生産性を高めるために、初めに交雑育種法が米国で試みられましたが、いずれも失敗でした。効率のよい生産株が得られたのは、結局は酵素の場合と同じく突然変異からでした。

**飯島** ええ、突然変異技術とともに、ペニシリン生産性の高い菌株の自然界からのスクリーニングも有効だったと聞いております。いずれにせよ、その後の突然変異による生産菌の飛躍的な力価上昇も重要ですね。このスクリーニングと突然変異導入の技術が、その後の発酵工業、そして生物工学を支える基幹技術となったことは間違いないと思います。そういった意味で、1928年のフレミングによるペニシリンの発見から端を発し、1943年の工業生産開始までが、発酵技術におけるひとつのターニング・ポイントだった気もします。何しろこれらの技術は、日本が世界に誇るアミノ酸発酵や核酸塩基の発酵生産へとつながっていくわけですから。さらに終戦直後の日本で、フォスター博士によってペニシリン生産菌のタンク培養、いわゆるバイオリクターの利用が紹介されたのも、生物工学発展の歴史的視点からも重要なできごとといえるのではないのでしょうか。

**大嶋** 微生物の大量培養法の改善については、控えめでしたが清酒業界でもその頃いささかの進展がありました。いわゆる麴の生産（製麴）についての機械化の試みが1950年代の中頃から始められ、続いて蒸米の連続蒸煮など、さまざまな製造工程の機械化による近代化が、清酒業界でも漸次に普及したことを記憶しています。

さて、ここで思い起こして頂きたいのは、酒類の醸造や食酢の生産など、古来の醸造・発酵生産物は主として糖類の異化代謝（エネルギー代謝）によっており、その品質を問わなければ、清酒であれば*Saccharomyces*属の酵母菌、また酢酸製造であれば酢酸菌を使用すれば、何とでも希望の品物が一応は生産することが可能でありました。この解糖系と合成代謝系を結ぶ、両用代謝系（amphibolic pathway）のTCAサイクルに属するクエン酸やコハク酸の発酵生産でも、温暖に過ぎて清酒醸造には不適とされ、焼酎の製造に特化していた熊本・佐賀より以南の地に伝承されてきた焼酎製造用の麴菌に目を向けて、そこから容易に生産菌を選び出すことができました。これに対しペニシリンとかグルタミン酸、またその後発展した多くのアミノ酸や核酸塩基の発酵生産は、いずれも緻密な代謝制御を受ける合成代謝系によっており、その生産には、大なり小なり、その代謝制御系を生産に向けて狂わせる（すなわち変異を入れる）必要があり、代謝制御発酵と呼ばれた所以であります。そのなかで、最初に生産対象となったグルタミン酸とかイノシン酸などは、すべてのアミノ酸合成系でのアミノ基の給源として、またプリン塩基の合成に共通する中間体であるなど、それぞれの合成系の中心的存在であり、細胞内に常にいくらかの量が存在していたからこそ、初期の企業化が成功したように思われます。人々の味覚がそれらを好ましく感ずるのも理解できます。これらの知見から、事の難易はありますが、現在では、各種のタンパク質その他を含めて、微生物細胞の作りうる産物のすべてを、人類の望みによって、生産することが原理的には可能となりました。

## 遺伝子組換えの是非

**木野** 少し話は戻りますが、突然変異を用いた菌株育種は、現在では遺伝子レベルで計画的に精緻な変異を導入する遺伝子工学による育種へと発展したように思いますが、このような技術の変化や高度化について、皆さんはいかが思われますか。

**飯島** 基礎研究の技術としてだけでなく、バイオ産業の発展に大きく貢献していると思います。食品分野では制限はありますが、医薬品としてのタンパク質の製造に遺伝子組換え技術を導入したことによる飛躍的な発展には目覚ましいものがありました。

**新名** 遺伝子組換え技術に関していえば、学生の頃に聞いた、「有用菌を探すときに自然界からスクリーニングするのが普通ですが、大腸菌に徹底的に変異操作を加えることによって有用株とすることが可能です」という、大阪大学産業科学研究所の原田篤也先生<sup>9)</sup>の言葉が印象に残っていますね。黎明期の熱気を感じた一言です。

**大嶋** 先に、微生物細胞が作り出す酵素とか代謝物であれば、どのような物質でも微生物の培養で生産することが可能となったと述べましたが、そこにはやはり生物種の壁があり、植物や動物に特有のタンパク質とか代謝物を微生物で生産することは不可能でした。その不可能の壁を破ったのが遺伝子操作技術です。この技術を推進しようと考え始めたのは、1975年に米国・カリフォルニア州のアシロマで開かれた会議からでした<sup>10)</sup>。この会議に先立つ1972年の年末に、サルウイルスと大腸菌ウイルス（ファージ）に由来するプラスミドを試験管内で結合して、再び大腸菌に導入したジャクソン（D.



**飯島 信司**

1976年東京大学大学院農学系研究科博士課程修了、日本学術振興会奨励研究員、米国立ロックフェラー大学博士研究員、名古屋大学大学院教授、元日本生物工学会会長

9) 原田篤也 (1918-1996)

10) アシロマ会議 (Asilomar Conference) : 1975年に米国カリフォルニア州アシロマで開催され、遺伝子組換えに関するガイドラインが議論された会議。28か国から約150人の専門家が参加した。会議は紛糾したが、そこで提案された「生物学的封じ込め」によって合意を見る。これに基づき各国で「物理学的封じ込め」などのガイドラインが制定され、日本も「組換えDNA実験指針」を取り決めた。ただし現在は、2003年に締結されたカルタヘナ議定書に準拠した国内法「カルタヘナ法」が規制の中心となっている。



### 木野 邦器

1981年早稲田大学大学院理工学研究科博士前期課程修了、協和発酵工業株式会社、早稲田大学教授

11) Jackson, D. A., Symons, R. H., and Berg, P.: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **69**, 2904-2909 (1972).

12) Cohen, S. N., Chang, A. C. Y., Boyer, H. W., and Helling, R. B.: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **70**, 3240-3244 (1973).

13) 米国国立衛生研究所 (NIH)

A. Jackson) らの研究<sup>11)</sup> が発表され、それとほとんど間を置かず1973年にコーエン (S. N. Cohen)<sup>12)</sup> らにより、大腸菌の2種の抗生物質耐性プラスミドとサルモネラ菌の同様なプラスミドの間で、試験管内の操作で雑種プラスミドが作られ、それらが大腸菌に導入したとの報告が、文献に見られる最初の遺伝子組換え実験でしょう。これらの実験が種の壁を越えた交雑となることに研究者自身が気づき、その直後から自発的に実験を停止して、今後の実験を行うことの可否を識者に公開で質問したのです。その質問に対するさまざまな論議の末に開かれたのが前述のアシロマ会議です。そこでは遺伝子組換え実験の意義と重要性から、今後も慎重に研究を進めるべきと結論されました。その経緯の下で、米国ではNational Institute of Health<sup>13)</sup> の主導下で、1976年に最初の「遺伝子組換え実験ガイドライン」が制定され、その規制の下で慎重に実験が再開されました。これに倣って日本でも、欧米に続いて1979年に最初の「大学等における組換えDNA実験指針」が示され、知見の深まりと共に適宜に改訂を加えながら、それを遵守して実験を行うことが求められています。その規制の下で、最初に産業化に向けて動いたのが、1976年に米国で設立されたジェネンティック社 (Genentech Inc.) でしょう。

**飯島** こうして微生物分野で発展し確立された技術が、植物、動物へと展開されてきて、動物細胞の大量培養系の開発が国を挙げてのテーマとなったのが、1980年代の後半だったように記憶します。次にこの問題について焦点を当ててみましょう。

遺伝子組換え実験が導入された頃から、生物工学会でも培養技術に関して多くの研究発表がありました。たとえば、動物細胞の培養に適したさまざまなバイオリクターの形式とか培地の報告です。その後1990年代に入ると、生産研究の主体が徐々に大学などのアカデミーから企業に移り、企業における技術改良の結果、今では治療用抗体が10 g/lという超高濃度で生産されるようになってきました。言い替えると、超高密度の細胞培養による目的タンパク質の超高濃度生産です。ただ、こういった条件では培地などの液体が超高粘度になるため、培養のみならず生産物の精製においても、今まで思いもよらなかった大きな問題に遭遇することとなりました。その解決に取り組んでおられる人々は多いと思いますが、特にタンパク質の物性という観点からの研究が進められつつあります。タンパク質の物性などと言うと、ひと時代前の基礎科学という感じをもたれる方もいらっしゃると思いますが、技術の進歩により埋もれてしまった分野が再度注目されていることに学問の流れの妙を感じます。

**新名** 植物の遺伝子組換え技術が登場したのは、それらからやや遅れて1985年頃ですが、植物分野の場合、それ以前に確立されていた無菌培養、あるいは連続培養の存在なしにはその進歩は語れません。生物工学の歴史を語る上で特に大きいエポックだと感じています。増殖が遅い植物の組織培養では、実用的な生産は前培養から始めて半年間くらいかかるからです。これを無菌的に扱える培養装置と技術が、それ以前にわが国で培われていたことは非常に大きなポイントです。

ちょうど私が博士課程の学生だった1967年頃に、生物工学会の前身である醸酵工学会で“醸酵工学若手の会”が発足し、第3回の夏の若手の会に、当時、京都大学農学部助教授だった山田康之先生<sup>14)</sup> に講演をお願いしたところ、そのお話のなかで、「分化した植物組織から脱分化したカルスができる」、また「植物の細胞を培養できる」とおっしゃいました。私はその話に大いに感化され、大阪大学の助手に任用された頃から植物細胞の培養を手掛けました。そして1985年頃にこの分野での遺伝子組換え技術の登場を迎えたのです。このとき、植物細胞培養でもの作りを成功させるには、有用遺伝子を

やまだやすゆき  
14) 山田康之 (1931-) : 京都大学名誉教授、奈良先端科学技術大学院大学名誉教授、元同大学学長、平成24年文化勲章受章。

外から導入し、かつ発現量を最大に上げ、あるいは最適に制御する技術が必須であることに気づき、奈良先端大に移ってからは、これを研究の主題のひとつにしました。これこそまさに生物工学だと思っています。さらに私の記憶を一言つけ加えますと、ノーベル生理学・医学賞を授賞された山中伸弥先生は、分化したヒトの組織細胞に4種の遺伝子を導入して初期化（脱分化）したiPS細胞を作られました<sup>15,16</sup>、植物の世界では、化学物質の植物ホルモンを加えて初期化することに、40年も前に成功していました<sup>17</sup>。

## 生物工学は人類存続のための技術

**木野** こうして振り返っただけでも、この90年の生物工学に関わる基礎科学と応用技術の進展には驚くべきものがあります。しかし、20世紀の産業の進展は、人類ならびに地球環境の保全と存続において、大きな課題も生み出してきました。そういった課題に対して、生物工学で何ができるでしょうか。

**大嶋** 現状を一言で云うなら、これまでの「生産」でなく「人類存続のための対策」でしょう。生物学を各論でなく総合的に捉え、地球生態系を安定化させる学問なり技術なりを考え出すことが必要な時に至ったように思います。昔のように、自然環境すなわち地球生態系の包容力に余裕のあった時代は、人類は興味の赴くままにその行動を広げることが許されました。具体的に示すならば、18世紀後半の産業革命以来、とみに力をつけた人類は、森林を伐採して農地と牧場を広げ、ダムを築いて河川を堰き止め、化石燃料を燃やして車を駆り、また一方では、便利さと経済的であるとの考えのもとに、生物の代謝に乗らない合成化合物を作ることに何の違和感もありませんでした。しかし地球人口が70億を超えた今、食糧とエネルギーの調達に絡んで、森林の崩壊と化石燃料の消費による地球温暖化、さらには工業の進展による環境汚染物質の放出が全地球的な課題となっています。先進国はまだしも、多くの途上国では、無理解な政府と頑なな宗教、さらに既得権にすぎたる富裕層の下で、収奪的な農業と牧畜に生活を託す貧困層、それに起因する森林の消滅、滔滔たる流れと表現されていた黄河の途絶えと干上がるアラル海に象徴される水資源の枯渇、さらに昨今の新興工業国における深刻な環境汚染など、強力化する人類の行動力の前には、地球生態系の包容力も限界に近づいたとの感が深まってきました。我々はこの事実から目をそらすべきではありません。

**新名** 生物工学は自然界から有用微生物を探索し、社会に役立てることから発展してきましたが、今や対象をすべての生物に広げました。ということは大嶋先生のおっしゃるように、生物工学では、対象とする生物は勿論、それを取り巻く周囲の生態系すなわち地球環境にも関わりを持つことになったわけですね。これまでも生物工学は広い視点で環境、特に人々の住環境と深い関わりを持ってきましたが、この関わりを前提として、今後の学会は具体的にどんな方向に向くことが必要でしょうか。

**大嶋** まずは将来へ向けての生命体の持続的繁栄のために、植物、動物、微生物などの違いにとらわれず、地球生態系を適正に保つことの大切さに気づいた仲間議論の場を立ち上げてはいかがでしょうか。また大学や学会、あるいは社会一般において、人々にこの問題について啓発の場を作る。そこでは、これまでの農業・牧畜あるいは発酵などの生産面のみでなく、地球の成り立ちと生命進化の歴史、たとえば現在の地球生命に好適な環境を与えている大気中の酸素、また石炭や石油の由来などを話題とすべきでしょう。もちろん現在の考えには間違いもあるでしょうが、それでもいい、必ずやそこから

15) Takahashi, K. and Yamanaka, S.: *Cell*, **126**, 663–676 (2006).

16) Takahashi, K., Tanabe, K., Ohnuki, M., Narita, M., Ishisaka, T., Tomoda, K., and Yamanaka, S.: *Cell*, **131**, 861–872 (2007).

17) 植物は種子が発芽し、成長とともに根、茎、花に分化するが、これら分化した組織を切り取り、植物成長ホルモンであるオーキシシンとサイトカイニンを与えると、脱分化したカルスになる。カルスは動物のがん細胞のように、栄養源を与えれば増殖し続けるが、植物成長ホルモンを調節すれば、再び分化した組織を再生する。

新しい事実と原理を探りだすことに興味を持つ若者が出てくるはずです。

**飯島** なるほど、エネルギーも食料も環境も、すべて根っこは一緒という考え方でですね。私も、生物と生態系の進化、また環境について、きちんと考えていかなければいけないと思っています。たとえば、遺伝子組換え技術で病気に対する耐性の家畜や植物などを作った場合、比較的短時間のうちにこれら耐性生物にも感染可能な病原菌の出現が想定されます。これは突然変異によることが多いと思われませんが、我々の科学技術と進化する病原菌のせめぎ合いと言えるでしょう。これに関して身近な例として、今年もインフルエンザウイルスやノロウイルスの突然変異が報告されています。こういった意味から、きわめて多方面の科学技術を総動員し、安全を確保した上で生産効率を向上させる必要が生じてくるわけで、ある意味では、ひとつの学問分野に固執することが許されない時代になってきているのが実情かもしれません。

**新名** 実際、これまでも生体という生命化学装置の解明と人間生活への応用に携わってきたのが生物工学であり、世間が分野横断的だとか産学連携だと声高にいう以前から、いろいろな考えや素養の違う人々が交わってきたきわめて幅の広い学問です。むしろ、そこが生物工学の魅力でしょう。だからこそ楽しい。ましてや昨今、科学の進歩が速くなり、境界領域も刻々と変化しています。そのなかで、一人ですることには限界があります。そんな時代だからこそ若い方々には、この学会をホームグラウンドとして、さまざまな人と縁を作っていただきたい。

それと、私は生物工学のミッションのひとつとして、BOP<sup>18)</sup>にどう対応できるか、があると思います。つまり世界人口70億人の底辺にいる貧困と飢餓、また病気に悩む40億人の人々に、私達は何ができるかという問題です。此処に科学技術をどう生かすかです。たとえば植物の分野では、ワクチンや抗菌性タンパク質を植物に作らせ、患者に経口投与するなどのことを研究する国際組織ができています。すでに先進国ではこのような医用タンパク質の利用が具体化していますが、どうしても高価で途上国の人々には手が出ません。そこで遺伝子組換え技術で植物に医用タンパク質を作らせ、それを精製することなく、直接に食べ物として摂取して貰おうという技術です。コールドチェーンや冷蔵庫もないところでも、近くの畑で栽培して食べることで薬効があるなら、注射器も不要で安価に利用できます。当面の目標は年間5万人の子供が死亡する狂犬病のワクチンです。すでにバングラデシュで臨床試験が計画されています。

**飯島** そうですね。たしかに現在の医薬品開発は莫大な費用がかかるため、その対価が払える先進国の人々に限られたものというきらいは拭えません。高度医療などの研究開発や助成金なども、同様な理由から当面は限られた人にしか恩恵をもたらさないという側面は否定できないと思います。また、患者数がきわめて少ない難病についても研究を進めようという動き<sup>19)</sup>がありますが、その推進も必要と思う一方で、すべての人類に恩恵を与える医療がもっとも重要であることは言うまでもありません。このような医療を実現するためには、バイオテクノロジーの果たす役割がいかに大切であるかを、再認識する必要があると思います。

一方で我々も、日本や世界の医療が現在どうなっているのかを正確に知る必要があるのではないのでしょうか。現在の医療を支える財政負担が限界に来ていることは多くの方々が訴えているのですから……。こういった意味では、医療費の削減につながるバイオテクノロジーもきわめて重要ということになり、これがバイオテクノロジーによって達成できれば、発展途上国でも利用できる70億人のための医療ということになるとも

18) BOP: bottom of pyramidもしくはbase of pyramidの略。国際金融公社(IFC)と世界資源研究所(WRI)が2007年、世界の所得別人口構成のなかでもっとも収入が低い所得層(購買力平価で年間所得が3,000米ドル未満の所得層)をBOPと定義した。2007年現在のBOPは約40億人、当時の世界人口66億6,200万人の約60%。

19) 我が国の難病対策では、症例数が少なく、原因不明で、治療法が確立されておらず、生活面への支障がある疾患について、対策が取られている[難病情報データベースWEBサイト(<http://www.nanbyo.or.jp>)の「難病対策概要」より]。

思います。

**木野** その意味でも学会から世論に発信していかねばならないことは多いと思います。たとえば遺伝子組換え食品と聞いた途端に「すべてダメ」という風潮があります。その雰囲気にも政府も慎重になっています。本当に革新的である技術に対しては、国や世論は非常に臆病で、受け入れることに消極的になっているように思います。今、イノベーションとか革新技術をと盛んに旗が振られていますが、お互いに理解を深め、単なるポーズに終わらせないようにすることが重要だと思います。

**大嶋** そのとおり。この世の中に万能の技術などなく、すべては使いかた次第。それなのに新しく登場した技術を何でもかんでも、根拠もなく怖がってただ反対する。しかし、広く世界に目を向けてごらんください。GM作物<sup>20)</sup>によって救われる命がどれだけ多いことか、温暖化に対応できる可能性がどれだけ高いか、また新兵器の導入でいかに歴史が動いてきたか。たとえば米国での調査結果ですが、農業の生産効率は、虫害、天候不順、また病気などにより、理論量のわずか22%の収量だそうです。日本も同様の数字でしょう。今後も新技術の採用により、これらをいくらかでも向上させることを考えるべきでしょう。

**新名** GM作物の必要性和安全性について、南アジアでも何度か講演したのですが、ここでは、「砂漠を緑化してくれるならGM作物に誰も反対しない」という声が聞かれました。サハラ砂漠のように一面に砂がうねっているところは水がほとんどなく、植物は育ちませんが、ブッシュが生えている砂漠周辺の乾燥地は地球の陸地の27%を占め、しかも耕作地として利用されている全土地面積の約二倍にもなります<sup>21)</sup>。ここで育つ乾燥耐性植物の育種が活発に研究されています。根を深く伸ばして水分を効率よく吸収できる遺伝子が知られていますし、炭酸固定の鍵酵素であるRuBisCoのCO<sub>2</sub>への親和性を高める研究も進んでいます。今の高等植物は1分子のCO<sub>2</sub>を固定するのに500分子の水を葉の気孔から失いますが、CO<sub>2</sub>への親和性が高まれば、気孔をいっぱい広げなくても炭酸固定ができるので、気孔からの水分蒸発も少なくなるという理屈です。

ただ、そのような植物ができれば、少ない水をますます消費して砂漠化が進むのでは、との恐れがあることも事実です。それゆえ、実施するなら大規模に植林をして、蒸発した水が再び雨になって降ってくるほどの大きな規模でやらなければなりません。そのような試みの好例として、日立造船(株)のグループは、遺伝子組換え技術を使わないで、中国の黄土高原に乾燥に強いトチュウ(杜仲)の森を育てて、緑化に見事に成功しています<sup>22)</sup>。

**大嶋** そうですね、もはや植物だけでなく動物や微生物の研究者も、みな一緒になって取り組まなくてはならない課題なのです。たとえばこれまでの地球の歴史で、生態系に生物種の大絶滅が6回ほど起こったとあります<sup>23)</sup>。その最初の大絶滅は、動物種のほとんどが爆発的に出現したと考えられているカンブリア紀(約5億7千万年前)と、それに先行するエディアカラ紀(以前、ベント紀といわれた)からの移行期に起こり、V/C境界絶滅と呼ばれている。第2回目が約4億4千万年前のシルル紀に、それに続いて第3回目の絶滅事件が約3億6千万年前のデボン紀に起こっていますが、それらの原因については、そのいずれもが地球のほぼ全表面が海洋に覆われていた頃の事件で、今も原因不明とされています。第4回目(約2億5千万年前のペルム紀と三疊紀の移行期におけるP/T境界絶滅)と第5回目(約2億年前の三疊紀末)の絶滅は、大陸の大移動をもたらした地殻の変動と、それに伴う火山活動が原因のように考えられています。こうした経過を辿って地球表面上の各大陸の位置もほぼ現状どおりにできあがりました。その

20) GM作物は、遺伝子組換え作物(genetically modified organisms)。日本ではカルタヘナ法(遺伝子組換え生物等の多様性の確保に関する法律)に基づいて環境影響評価が終了し、輸入や国内商業栽培が認められている。2011年12月現在で、71件のGM作物の商業生産が認可されているが、積極的な商業栽培は実施されておらず、試験栽培にとどまっている。しかし、食糧自給率の低い我が国は、年間1,700万トン以上のGM作物を輸入している。これは、日本が輸入する穀物の半分以上、日本国内の玉米の生産量の約2倍に相当する(参考: <http://www.monsanto.co.jp/question/> ならびに <http://www.cbijapan.com/index.html>)。

21) 地球の陸地(水域を除く)面積128億haのうち乾燥地は34.3億ha(26.8%)、耕地は15.2億haであることから、乾燥地が耕地の約2倍であることがわかる。(出典:『世界の統計(2007)』、総務省統計局統計研修所)

22) トチュウによる黄土高原の緑化



23) 丸山茂徳、磯崎行雄: 生命と地球の歴史。岩波書店(1998)。大野照文(監訳)、沼波 信・一田昌宏(訳): 大絶滅-二億五千万年前、終末寸前まで追い詰められた地球生命の物語、共立出版(2009)。[原書 Erwin, D. H.: *Extinction: How Life on Earth Nearly Ended 250 Million Years Ago*, Princeton University Press (2006)]。またその最新情報はインターネット上の情報による。



大陸で恐竜が威勢を誇る白亜紀の末期（6,550万年前）に、最後の第6回目の大絶滅（K/T境界絶滅と呼ばれる）が起きました。その原因はメキシコ・ユカタン半島への直径約10 kmと推定される巨大隕石の落下によるものとはほぼ確定されています。この事件により恐竜が絶滅し、その蔭で控えめな存在であった哺乳類が絶滅環境に耐えて進出したとあり、人類が今日あるのもこの事件のお蔭のように思われます。このように度々の大絶滅を経験した地球生態系ですが、それでも何とか生命が途切れずに済んだのは、その頃すでに生物種に多様化が進んでおり、そのなかで偶々対応性を備えていた種が生き残った訳でしょう。特に多様性と順応性を誇る微生物は強固に生き残って進化を続けてきたでしょう。しかし、18世紀後半からの産業革命に端を発して強化した人類の行動力に加えて、最近の70億人に達する人口増加で、45億5千万年の地球の歴史からすれば瞬時と見られる最近100年間の人類の活動は、地球生態系に対して野放図な圧力を加える状態となりました。これが第7番目の生物大絶滅をもたらすのではと識者の間で危惧されています。

近年、この地質学分野に集積した知見には、大気圏への酸素の出現とオゾン層の形成、石油や天然ガスまた石炭の由来、それにオゾン層に守られた現在の地球生態系の由来を知り、人類が次に打つ手を考えるにおいて必須の情報が蓄えられているように思います。皆さんもそろそろ地質学的規模の生物進化に目を向けるべき時ではないでしょうか。この問題に対しては、最先端の分子生物学あるいは細胞生物学などは基礎の基礎であり、医学も薬学もここではマイナーでしょう。それらの素養の上で農学と生物工学がもっともそれに近接したサイエンスであり、どこよりも生物工学会が先駆けて興味を広げるべき分野でしょう。

**飯島** 確かに我々は、微生物の多様性や多岐にわたる能力、そして適応性は理解していますが、それを可能にするメカニズムと、なんと表現すべきか難しいですが、いわゆる「生命の本質」について、工学など違った角度から考える必要があるのかもしれませんが、将来の人工生命なども、そういった研究から生まれるのかもしれないですね。

**新名** すでに通りの方法論が確立されつつある今日、生物学の知識を工学で実用に供し、どうやって今後の地球を支えていくかが生物工学という学問に与えられた大きな新しいミッションですよ。

**大嶋** すべての人間行動の前には地球環境と生態系があります。それぞれの研究が基礎か応用かなどは馬鹿げた区別ですし、動物学か植物学、また微生物学かなどの区別も時代錯誤的なちっぽけな枠組みのように思えます。この感覚を広く特に若い人達に伝えていかないといけない。また、そこで得られた情報を政治と経済を担う方々に伝えたいですね。

## 若者ではなく人材育成に携わる者から意識改革を

**木野** これまで生物工学会は、常に産と学が寄り添って、「ものづくり」を中心とした実学面で成果をあげてきました。これを大きく展開させるためには、生物工学会は今後どのようなことを考えていけばよいのでしょうか。次世代のこともあり、人材育成という観点から見直すのもひとつの方法と思いますが、大嶋先生の掲げる広い視野を若い人たちに持たせるには、どうしたらよいと思われませんか。

**大嶋** それには先生方が、自分の価値観の範囲内で学生を指導しようとしなないことです。

たとえば日本では数年前から、米国のように大学院への進学は、卒業した学部・研究室とは異なる処へ行かせようという声が聞かれますが、あれは実は建て前で、内心では皆さん優秀な学生は自分の手元に囲っておきたいと思っておられる。そんなことで若者の視野を広げられる訳がない。まったく新しいアイデアを生みだせる若者を育成したいなら、指導教官は自分が大事だと思って研究していることを、決して学生に押しつけないことです。というのも、指導教官が大事にしている研究テーマは、ご自身が30歳前後の若かりしときには新鮮だったでしょうが、大概はもはや古びているでしょう。

**飯島** 今流行しているスマートフォンなども、我々が若かった時代には、完全に映画「スター・トレック」のような空想世界の技術でしたが、知らぬ間にあたりまえの技術になっている。それに自戒の念を込めて申し上げるなら、現代の科学者は、情報化社会のなかで、知らず知らずのうちに頭でっかちになっているように思います。ちょっと油断すると、実際に手を動かす前にわかった気になり、結論を安易に決めつける。コンピュータサイエンス<sup>24)</sup>が進歩した負の側面ともいえますが、我々は、もっと愚直になるべきでしょうね。そして、非現実的な夢を抱いていきたいですね。

スター・トレックにこだわる訳ではないですが、この映画では、医師は注射器ひとつで遺伝病から感染症、さらには毒物中毒まで、すべて治療するんです。手術もやってしまう。そのためには人体や病気などに対する無限のデータの蓄積と、まったく新しい治療法や技術が必要でしょうけれど、ここに私は大きな夢を感じます。そして、この夢の実現の鍵を握るのが、現在の生物工学を発展させた多くの技術だという気がします。

**新名** うん、夢こそが研究の原動力ですよ。目先の課題を解決する研究も必要ですが、そこに研究の醍醐味はないでしょう。夢の実現を目指すことが研究の冥利です。そこではどんな夢を描くか……！ 若者も年配者も、想像を逞しくしてこれを追い求めることが研究者の楽しみなのです。

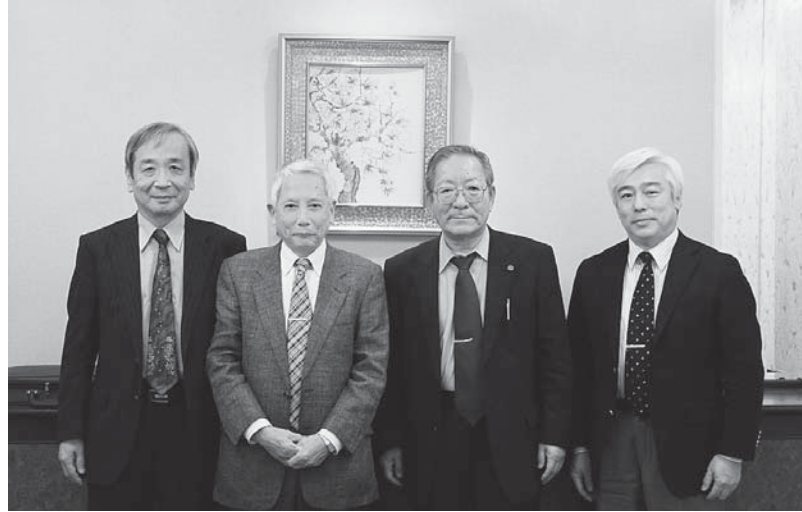
独創的研究とか独創的な発想といいますが、独創なんて誰もができるものじゃない。だから学生などには、まずは常識を疑えと伝えてきました。「朝、顔を洗うとき、手を上下に動かすだろう。ではなぜ顔を横に動かさないのか。まずはそこから疑え」と。

**木野** おっしゃるとおりだと思います。科学は未常識の領域にあるものを常識に変えていく学問です。そういった才能を引き出し伸ばす人材育成を模索するのが、私達の世代に課せられた使命ですね。

さて、まだまだ話は尽きませんが、ひとまず、このあたりで話を閉じたいと思います。若い研究者と学生さんにメッセージをお願いします。まずは飯島先生いかがでしょう。

**飯島** 私は、生物工学の研究には二種類あると思います。第一は目前の問題を解決すること。たとえば、環境とか効率的物質生産とかです。もうひとつは、夢を持った基礎研究から実用化へと進む方向性の研究です。そのためには基礎研究から始めなければなりませんし、それで終わってしまう可能性も高いと思います。これは別の意味で前者とは違った大きなインパクトを与える気がします。いわゆる夢の技術ですね。科学は本来何らかの形で人類に貢献すべきであり、これがなくては科学の進歩など無意味なことになります。ここさえしっかり押さえれば、たとえ基礎研究に終わってもいいじゃないかという気がします。この座談会では、分野を超えた総合的学問領域の重要性が中心テーマとなりましたが、若い方々には、人類への貢献という観点をしっかり持って、自分の好きな分野へ大胆に切り込んでいくような人材になって欲しいと思っています。それによって夢の技術が実現されたら、すばらしいことこの上ないじゃないですか。

24) 生物学へのコンピュータサイエンスの応用は、バイオインフォマティクス(生物情報科学)と呼ばれる。計算機科学の技術を生物に応用しようという比較的新しい学問領域。ゲノムプロジェクトや網羅的解析などで得られた大量の情報からの、遺伝子予測、配列アラインメント、タンパク質構造予測、プロファイリングなどを研究対象とする。また、日本生物工学会においては、代謝工学の研究が盛んであるが、このように遺伝子、タンパク質、生体成分の動態をネットワークとして捉えて生命現象を理解しようというシステム生物学も、重要な研究分野である。



### 座談会を終えて

左から飯島先生、大嶋先生、新名先生、木野、神戸ポートピアホテルにて。

**新名** これまで皆さんが語ってこられた生物工学の対象生物は、目の前の草木、動物、昆虫、藻類、それに目に見えない微生物やウイルスと、無限ともいえるほど広い。それらに知恵を働かせて世の中の役に立てるのが生物工学です。さて、何かに着目して、こういう研究してみようと思ったとき、先人達の成果を知らなければ無駄な研究をすることになるでしょう。若い学生諸君は、まず初めに勉強しなければならない。教科書や過去の論文を読む、また先生の話聴くことにより、何がわかっていて何が未知なのかを知ることから始めなければならない。学会に出席して最新の研究発表を聞くことも大切だし、人に直接会って話を聞くのも楽しいものです。本学会は生物工学の進展を志す大学、企業、また政府機関に属する研究者の大集団です。そこでいろいろな人達に出会って欲しい。

**大嶋** 細かい所からいきますと、新しい装置とか設備を得たら、そのまま使うなど言いたいです。解析したい対象はそれぞれ独自のものですから、その独自性に合わせて独自の工夫を装備に加えることが必要です。宮本武蔵が佐々木小次郎との巖流島の決闘に際して、実力の伯仲するあいつに対するには、彼の持つ“物干し竿”より三寸長い剣が必要だ。それには刀である必要はない、木刀で結構と、櫛の木剣を削って立ち向かったように。

大きな所からいきますと、たとえば微生物学をやるなら、一度は一般微生物学の教科書を何冊か通読して、その全体像を把握することです。そこから自ずと現在のフロンティアについてのイメージが湧き上がり、少なくとも、いま先生から与えられた課題がどんな意味を持っているかが及ばずながら理解され、それならこちらを勉強する方がまだましでは、と論議ができるでしょう。そこから新しい方向が出てくると思います。

**木野** 先生方から次世代を担う若者へのメッセージを頂いたところで、そろそろ本日の座談会を終わりたいと思います。本日は貴重なお話をありがとうございました。科学の進歩は指数関数的に早まっています。これからの10年はこれまでの90年だろうと思います。日本生物工学会が100周年を迎えるとき世界はどうなっているのか。その運命を我々も支えていることを忘れずに研究と教育に励みたいと思います。若い研究者には、大きな夢と熱き想い、そして勇気を持って、さまざまな問題に積極的に挑戦して欲しいと思います。