

題名	みんな我が家族―研究者を指導して
Title	All in the Family: The Human Side of Guiding Academic Research
著者名	ジョージ・マクレランド・ホワイトサイズ
Author(s)	George McClelland Whitesides
言語 Language	日本語・英語 Japanese, English
書名	稲盛財団：京都賞と助成金
Book title	Inamori Foundation: Kyoto Prize & Inamori Grants
受賞回	19
受賞年度	2003
出版者	財団法人 稲盛財団
Publisher	Inamori Foundation
発行日 Issue Date	11/10/2004
開始ページ Start page	102
終了ページ End page	126
ISBN	978-4-900663-19-0

## みんな我が家族 ― 研究者を指導して

ジョージ・マクレランド・ホワイトサイズ

受賞にあたって

本日、私は皆様と共に「研究」という行為の価値を祝福するため、そして一連の研究を成し遂げたことに対するご褒美として、この場にお招きいただきました。また、その研究に貢献した学生、同僚そして共同研究者など数多くの仲間を代表して出席させていただいております。

私たちは、「材料科学」と呼ばれる分野で研究を行ってまいりました。材料科学というのは、様々な分野からその断片を拝借してきて繋ぎ合わせ、個別的アプローチでは解決できない問題に処するというモザイク的な学問です。まさに学際的な分野です。私は化学者ですが、研究グループには私と同じ化学者もいれば、物理学者と電気技術者、生物学者と化学技術者、実験屋と理論屋という組合せも含まれていました。つまり、科学者ではない人々までもが、特に手法面において、私たちの研究に重要な役割を果たしてきたのです。

今回、京都賞受賞の対象となりました研究で、注目していただきたい点が2つあります。研究の中身、そしてその手法です。面白いことに、今考えると手法のほうが重要であったと私には思えてなりません。私たちが成し遂げた研究は、すでに過去のものであり、再び行われることはありません。しかし、その手法は、他の問題解決にも応用可能な教訓を提示しているのではないかと思います。

今回の研究では、様々な分野からのアイデアやテクニックを組み合わせる作業を進める必要がありました。こうしたスタイルは科学技術に突きつけられる問題がより複雑になるにつれて、ますます重要になってくるものと思われます。本日はこの機会を利用して、このようなアプローチでは、「科学知識」のみならず、研究グループの社会的構造やその構成員といった「人間的な」側面にも同様の注意を払うことが肝要である点を指摘させていただきたいと思います。

申し上げたいことは5つあります。1つ目は、研究活動は社会にとって重要な意味を持つということ。2つ目は、大学は発想や研究成果と、将来の教育者を育てるという双方において欠かせない研究機関であるということ。3つ目は、科学者が取り組む問題はますます複雑となり、その解決には「技術」と「人間」の両面において複数のスキルが必要とされること。4つ目として、大学での研究活動は、往々にしてこうしたスタイルを受け入れる準備ができていないこと。最後に、学問的、心理的に異質なメンバーが1つのグループの中で協力しあって作業を進めていくには、特殊な組織運営スキルが必要とされることです。複雑な問題に取り組む研究グループの指導に

## All in the Family: The Human Side of Guiding Academic Research George McClelland Whitesides

Why Am I Here?

We are all here as part of a celebration of the value of research, and for accomplishing a specific body of research; I am also here to represent the many people—my students, colleagues, collaborators—who contributed to that research.

We have worked in a field called “materials science.” Materials science is a mosaic—pieces liberally borrowed from other fields, and stitched together to solve problems that these fields, by themselves, do not; it is a multidisciplinary field. I am a chemist, as are some of my colleagues; but others in the group have been physicists and electrical engineers; biologists and chemical engineers; experimentalists and theoreticians. People who were not scientists have also been important in what we have done, and even more important in how we have done it.

Two aspects of the research honored by this award are interesting: what it is; and how it was done. Curiously, the second now seems to me to be the more important. The particular *research* we have done is history: it will never be done again. The *way* it was done may teach a lesson that can be applied to other problems.

Our research has required us to integrate ideas and techniques from a number of fields. This style will, I believe, become more important as the problems faced by science and technology become more complicated. I propose to take this occasion to suggest that this type of research requires as much attention to its human aspects—to the social structure of the research group and to the people involved—as to the science.

My line of reasoning has five parts. i) Research is important to society. ii) Universities are crucial to research, both for their ideas and results and for their teaching of future teachers. iii) The problems science is addressing are increasingly complicated, and the solution of complicated problems requires multiple skills, both technical and human. iv) University research is often poorly organized to work in this style. v) Organizing and managing an intellectually and psychologically heterogeneous group so that its members cooperate rather than compete requires a skill of its own. Guiding research that solves complicated problems may require as much creativity as solving them.

The conclusion that I would like to suggest is that we, in science, may spend too much time thinking about the destination, and not enough about the road to get there. We should of course think about the solutions to problems, but also about the people who solve them.

To begin my story, and as background, let me first describe our research.



は、問題解決に劣らず、多大な創造力が欠かせません。

つまり、私を含め、科学に携わる者は、「終着点」について思いを巡らすあまり、そこに至る過程を疎かにしているのではないのか、ということです。もちろん、問題解決に頭を悩ますのも大事ですが、実際に問題を解決する「人」についても考えるべきなのです。

それでは、本日の講演の予備知識として、私たちの研究についてご説明申し上げます。

#### 私たちが成し遂げたこと

私たちのグループは、材料の表面を制御し、材料を微細化する手法の開発に成功しました。ここでいう「材料」とは、木材、ガラス、鋼鉄、絹など、私たちの世界を構成しているものです。材料は、まず原子と分子に、次に電子と核、さらにグルーオンとクォークなどに細分化されます。こうした材料を日常的に扱っている人でも、一般人が時計のメカニズムなどには関心がないように、こうした詳細を気にかけることはありません。彼らが知りたがるのは、ガラスの透明度や硬度、鋼鉄の強度、絹の柔らかさなど、測定可能な特性だけです。

私たちの役割は、言うなれば時計工のようなものです。時計の仕掛け部分、すなわち有機材料を構成している、目に見えない、顕微鏡レベルの要素である分子の設計、製造を行い、有機材料の特性を制御するのです。材料科学において特に関心を抱いていることが2つあります。1つは材料の表面。もう1つは、原子数個から100万个分ほどの寸法しかない、きわめて小さな構造です。例えば、私たちは表面で自己組織化して、ちょうど分子1個分の厚さの結晶膜を構成する有機分子の設計に成功しました。現在、一般にSAMと呼ばれているこれらの膜は、材料表面に粘着性、すべり性、濡れ性、耐食性を与えることができます。つまり、分子という微視的世界と材料特性という巨視的世界を合理的に結んでいるのです。私たちのグループはミクロ、ナノ単位で1次元、2次元、3次元体を作ることができる、「ソフト・リソグラフィ法」と呼ばれる技術も完成させました。この技術を用いて、例えば、オフィスの配水システムのようなもので、その大きさが100万分の1程度のパイプシステムを作ることができます。現在、私たちをはじめとする様々なグループが、医薬品の開発を念頭に、生きた哺乳類細胞の操作にこの「マイクロ流体」と呼ばれるシステムを応用しています。

#### What Have We Done?

We have developed methods of controlling the surfaces of materials, and for fabricating materials into shapes having small dimensions. Materials: wood and glass, steel and silk are what the world is made of. Materials are composed of atoms and molecules, and these are made of electrons and nuclei, and those of gluons and quarks, and so on. People who use materials don't care about these details, any more than people who use clocks care about their internal machinery: they care about observable properties—the transparency and hardness of glass, the strength of steel, the softness of silk.

We are clockmakers. We design and make molecules—the clockwork, the invisible, microscopic elements of which organic materials are made—and thus control the properties of these materials. We are especially interested in two aspects of material science: surfaces, and very small structures—structures ranging from only a few atoms in size to about a million atoms. We have, for example, designed organic molecules that assemble themselves on surfaces into crystalline films exactly one molecule thick. These films (now familiarly called self-assembled monolayers, or SAMs) make the surfaces adhesive, or slippery, or wettable, or resistant to corrosion. They provide a rational bridge between the microscopic world of molecules and the macroscopic world of properties. We have also developed a technique called “soft lithography,” a set of methods for making wires, channels, and other structures having dimensions on the micrometer and nanometer scale. Using soft lithography, we can, for example, make systems of pipes, like those that deliver water to an office building but a million times smaller. We, and others, use these so-called “microfluidic” systems to manipulate living mammalian cells in ways that help developers of drugs.

This type of research requires ideas from many fields. The technical success of microfluidic systems, for example, depends on combining ideas from organic chemistry, polymer engineering, electrical engineering, fluid physics, surface science, and cell biology. The *technical problems* in this research are those common in all research; the *art* of the research is that of putting together groups that have the necessary skills to solve these problems, and of getting them to work together collaboratively.

I am surprised to find that I have come, over the course of my career, from a view that all that matters is the *science* to a view that what matters most is the *people* who do the science. If the people are creative, interested, curious, and



この種の研究は多くの分野の知識を必要とします。例えば、有機化学、ポリマー工学、電気工学、流体物理学、表面科学、細胞生物学の知識を集結することなしには、マイクロ流体システムは技術的に成功しません。技術的な課題という面では、この研究は他と何ら変わるところはありませんが、その手法は、問題解決に必要なスキルを持つグループに参加を呼びかけると同時に、彼ら一人ひとりに共同作業を促すことです。

私自身も、以前は、重要なのは「科学知識」のみであると考えていたのですが、今ではそうした科学を实践する「人」こそが大事なのだと思えるようになった自分に驚いています。創造力と知的好奇心を持って気持ちよく仕事をする人さえいれば、優れた研究、科学的成果は後からついてくるのです。

#### 科学と研究活動の重要性

複雑な技術的問題の解決には複雑な研究グループが必要ですが、こうしたグループには特別の配慮が必要です。では、人はなぜこうした問題の解決に関心を寄せるのでしょうか。

社会は、科学技術が世界の仕組みを解明し、問題を取り除いてくれるものと大いに期待しています。なぜだか分からないが私たちの関心を釘付けにしてやまないもの、そして現実問題として解決を必要としている問題は、枚挙にいとまがありません。生命の起源と本質、自己認識の原理、知的機械の発明、地球のモデリングといった命題に対する人類の理解度は皆無、あっても不十分という状態です。一方、こうした問題と同様の関心が寄せられていますが、より緊急度の高い問題としては、水やエネルギーの新たな供給法、地域間経済格差の縮小、グリーンテクノロジー、病気の撲滅などがあります。これらの解決には科学技術が必要不可欠であり、その鍵を研究活動が握っているのです。

研究活動によって解決されうる問題は、生物や数学に関するものもあれば、科学や工学に関するものなど多岐にわたりますが、私は「複雑な問題」と「困難な問題」をはっきりと区別して考えたいと思います。「複雑な問題」とは、多くの部分に分かれていて、様々な学問から拝借した知恵を一つに集めることが必要になります。「困難な問題」の解決は、しばしば一個人の洞察のひらめきによってもたらされます。

日頃の研究活動においては、私たちはそのほとんどの時間を「複雑な問題」と向きあって過ごしてきました。といっても、そうした問題はたいてい困難でもあったの

comfortable in what they do, good research, and good science, will happen.

#### Why Are Science, and Research, Important?

My point is that complicated technical problems require complicated research groups to solve them, and that these groups require special care and feeding. But why do we care about solving these problems?

Society has great hopes for science and technology—for their ability to explain the world, and to solve problems. There is no shortage of things that are transfixingly interesting that we don't understand, and no shortage of practical problems that must be solved. The origin and nature of life, the basis of self-awareness, the invention of intelligent machines, and modeling the earth all are areas where our understanding ranges from inadequate to none. New ideas for supplying water and energy, technologies to reduce economic disparities between regions, green technologies, reducing disease—these are equally engaging, but more immediate and practical. All require science and technology for their solution. All depend on research.

There are, of course, many different flavors of problems that research solves. There are problems in biology, problems in mathematics; there are problems in science, problems in engineering. I want to emphasize the distinction between problems that are *complicated* and problems that are *difficult*. Complicated problems have many parts, and require pulling together ideas from different disciplines; difficult problems are usually solved by individuals with a flash of insight.

We have most often been concerned in our research with complicated problems. We usually also find them difficult.

#### Who Does Research? The Special Role of Universities

Above all, *people* do research. Organizations—universities, companies, governments—house, pay, support, and annoy them. I work in a university. We in universities have our place in the chain connecting problems, ideas, and solutions. We generate fundamental science: science whose applications are in the future, science based on curiosity. We try ideas that are too silly to be tried in a serious place. We generally behave badly: we ignore budgets, refuse to write reports, and we complain. We also educate and train students—the next generations of researchers and teachers. These activities may seem trivial when compared with the serious problem-solving done in industry, but they are not. Many new ideas



ですが。

#### 研究の主体は？ 大学の持つ特別な役割

どのような研究も、人が存在しなければ始まりません。大学、企業、政府などの組織は、研究者に施設を提供し、報酬、支援を与えてくれますが、時にはやっかいな存在にもなります。私自身も大学で働いていますが、大学で働く研究者は、問題の提起、考察、解決といった一連の流れの中でしっかりと役割を果たしています。その役割とは、将来の応用を見据え、好奇心をベースにした基礎科学を行うことです。私たちは、研究に真剣さが求められるようなところでは愚かすぎて見向きもされないであろうアイデアを試します。さらに、その振る舞いは決して誉められたものではありませんが、予算を無視し、レポート作成は拒み、しかも、文句だけは一人前に言います。また、研究者、教員の卵である学生の教育、指導にもあたります。こうして並べてみると、生存を賭けた企業の真剣な問題解決とはとても比べものにはならないように思えますが、実はそうとも言い切れません。幾多の新しいアイデアが大学から生まれ、アイデアを生み出す人々のほとんどすべてが学生として大学での研究を経験しているのです。官民の研究サイクルが短くなる中、大学での研究は長期的に物事を考えることができるため、より多くの新しいアイデアを生み出すことができるのです。

大学での研究は、そのほとんどが家内工業的なものです。一風変わったリーダーに率いられた少人数のグループが、言いようによっては、伝統的とも古臭いとも言える組織の中で研究を行っています。その多くは未だに1850年代ヨーロッパの研究グループに範をとっています。こうしたグループでは、教授は車輪のハブで、学生たちはスポークのようなものでした。教授から学生一人ひとりに研究テーマが与えられ、学生は、研究者として、一学生として、そして時には雑用係として単発的なプロジェクトに取り組んだのです。

ところで、各研究者と産学官による私たちのシステムは、どのように機能しているのでしょうか。企業による研究は、ますますそのテーマが絞られ、費用に敏感になっていますが、その反面で創造力が犠牲となっています。このため、時間のかかる研究は、ますます大学の独壇場となってきています。しかし、現在、多くの大学で採用されている小グループによる研究体制は、科学や社会が抱える大規模かつ複雑な問題を解決してくれるのでしょうか。地球のモデリングや、インテリジェント・マシンの発明を可能にしてくれるのは、こうしたグループなのでしょうか。そうではない

come from universities, and almost all of the people who generate ideas pass through universities as students. As industrial and governmental research becomes more short-term, university research, with its longer view, provides more and more of the new ideas.

Most academic research is a cottage industry—small research groups, with idiosyncratic leaders, operating in departments that are either traditional or archaic, depending on how charitable you feel. Many academic research groups are still modeled on the European research groups of the 1850s. This model had a professor as the hub of the group. The students were spokes. The professor assigned a research problem to each student; the student, acting as researcher, scholar, and sometimes pair of hands, worked on this isolated project.

How well does our entire system—individuals, universities, companies, and governments—work? Industrial research has become very focused and conscious of cost—at the cost of its creativity. The longer-term work is increasingly left to universities. Are the small groups that we now favor in universities the ones that will solve the big, complex problems that science and society are serving up? Are these the groups that can model the earth, or give birth to intelligent machines? Probably not. They are intellectual purebreds, in a world that may need more adaptable mongrels.

I certainly have not always been so concerned with people, nor have I been what I would have described when younger (with scorn) as a “manager.” At the beginning of my career, I was monomaniacal about ideas: people did not come into my thinking. Why has my opinion changed entirely? And how did “I” become “we”: that is, how did our research group reach its present state, where it is a collective entity? It is, I hope, not leaderless, but equally certainly, not a group in which I dictate what is done.

The answer is that we changed because we had to. The problems demanded it. We simply could not, as a small, conventional academic research group, solve the most interesting problems. To solve these complicated problems, we had to use multiple skills, and work collectively. And pulling together such a group required a different structure. (It also required that I learn at least a little about how to manage!) To understand my transformation—from solitary academic scientist to manager (I still cringe at the word) of a multidisciplinary group—I’d like to start at the beginning, to explain how, and why, the butterfly grew up to be a caterpillar.



と思います。彼らは学問的純血を貫き通していますが、今、必要とされているのは、順応性の高い雑種なのです。

かくいう私も、最初から人間中心的な考えの持ち主であったわけではありませんし、自責の念を込めて言うなら、若い頃、「管理職」にあった時は、私が描く理想像とは別の人間でした。研究者としての道を歩み始めた当初、自分の研究にただひたすら没頭していて、周囲の人など、全く眼中にありませんでした。では、なぜ私の考え方が180度変わったのでしょうか。どのようにして「私」が「私たち」に変わったのでしょうか。つまり、私たちの研究グループが、どのようにして現在のような1つの集合体となったのでしょうか。こうした運営形態は、リーダーシップを欠くと指摘されることもあります。確かなのは一から十まで私が指示を出しているのではないということです。

先ほどの問いの答えは、「そうならざるを得なかった」というのが正解です。つまり、目の前の課題がそうすることを私たちに迫ったのです。従来型の小グループでは、学問的に最も関心の高い問題を解決することができなかったのです。これらの複雑な問題を解決していくには、様々なスキルを用い、皆がチームとして研究にあたらなければならませんでした。こうしたグループを編成するには、それまでとは違った枠組みが必要であり、私自身もグループをまとめていく術を少々かじる必要がありました。一匹狼的な科学者から、学際的グループの監督者（私自身は未だにこの言葉に馴染めないのですが）への私の転向をご理解いただくため、振り出しに戻って、なぜ、そしていかにして蝶が毛虫になったのかを説明したいと思います。

三つ子の魂百までと申しますし、まずは子供時代に時計の針を戻します。

## 学歴

私の子供時代は、平々凡々とした退屈なものでした。生まれは1939年。出身地のケンタッキーはアメリカ中西部の、まさに陸の孤島のような州でした。自転車の運転は第2次世界大戦が終わる頃に、自動車の運転は冷戦の緊張が最高潮に達した頃に覚えました。このように、出だしは決して派手なものではありませんでした。

母は大変教養のある人で、言葉の力をもってすれば、世の中のあらゆる事象を系統的に意味付けできるものと固く信じていました。話し方と書き方は母から教わりました。父は化学技術者で、コンクリートの補修用品を製造する小さな企業を起こし、経営していました。父はエジソンよろしく、思いつきの域を出ないものも含めて発明

I'll begin with my childhood. We are, after all, what we grew up to be after we were children.

## My Education

I had a calm, colorless childhood. I was born in 1939, in Kentucky, a state in the Midwest of the U.S. that was far from anywhere. As World War II ended, I was riding bicycles; as the Cold War reached its most dangerous phase, I was learning to drive. I did not have a sophisticated beginning.

My mother was a very literate woman, who believed absolutely in the power of language to hold the world together. She taught me to speak and write. My father was a chemical engineer and small businessman, who founded and ran a company that made products for concrete repair. He loved Edisonian invention and tinkering, had a fine, quiet, Midwestern sense of humor. He believed absolutely that self-sufficiency was the ultimate necessity—a belief learned in the Great Depression. He taught me to compete. I had one brother, Tom, with whom I fought constantly, as brothers do.

I left Kentucky at 13 for school in Massachusetts. High school and college were mostly spent studying and proving that I was never going to be a professional athlete. I went into chemistry because I liked the manual parts of it. As a teenager, I was a technician in my father's laboratory—washing dishes, distilling solvents, measuring the lines of rust that formed around scratches on panels used to measure the durability of paint—and I enjoyed the work: it was satisfying and predictable. Before settling on chemistry in college, I tried mathematics (I did not have the exotic talent required to be a mathematician) and English (I did not have the patience). I was attracted to a university life because I loved following my nose in research, and because I did not want to have a boss.

I went to graduate school at Caltech (by accident—I had intended to go to Berkeley, but their admissions office lost my application). I ended up working with Professor Jack Roberts. Both were fortunate accidents; he and I got along very well. Once I was started in research, he left me largely alone to make mistakes as I chose—a delicious state of affairs!—but he was merciless when he rewrote the papers. I worked in NMR spectroscopy, and spent most of my nights alone with a large machine that had emotional problems. The compounds I studied would cheerfully burst into flame when exposed to air: sinks filled with flaming solvents were a source of much amusement and interest. I played volleyball, worked odd



を愛し、中西部特有の洗練された穏やかなユーモアのセンスを持ち、大恐慌の時代に学んだ、人間が究極状態で必要なのは自給自足であるという教訓を信条にしていた。父から教わったのは、競い合うことです。兄弟はトムという弟が一人いますが、男兄弟の常で、喧嘩ばかりしていました。

13歳になった年に、ケンタッキー州からマサチューセッツ州の学校に転校しました。高校、大学時代は勉強が生活の大半を占めていましたが、同時に、自分はプロの運動選手に向いていないということも思い知りました。好きな科目は化学でした。これは手作業的な部分が気に入ったためです。10代の頃には、父の研究室で実験器具を洗ったり、溶剤を抽出したり、パネルに作った擦り傷の周りにできた線形の錆びの長さを測って、塗料の耐久性評価の手伝いをしたりしていました。私はこうした予測可能な作業を行うことに満足感を覚えていました。大学で本格的に化学を始める前に数学と国語もやってみましたが、数学者に必要な、人と違った才能はなく、国語をやるだけの忍耐もありませんでした。大学生活は快適でした。というのも、研究は自分のやりたいようにできたとし、誰の指図も受けなくて良かったからです。

大学卒業後、私はカリフォルニア大学バークレー校に進むつもりだったのですが、バークレーの入学担当課が私の願書をなくしてしまい、カリフォルニア工科大学の大学院に行くことになりました。そこで、ジャック・ロバーツ教授の研究室に配属されることになったのです。これらはいずれも私にとって「幸運な」偶然でした。教授とは馬が合い、私が冒したミスを特に咎めることもなく、私にとって非常に居心地のよい研究環境でした。しかし、ひとたび論文のリライトとなると、厳しく指導してくださいました。当時、私は核磁気共鳴分光学の研究をしていて、気まぐれで巨大な機械のお守りを夜な夜な一人で行っていました。私が研究していた化合物は、空気に触れると勢いよく発火するものでした。火のついた溶剤で一杯になったシンクは、見た目にも非常に楽しいものでした。私はバレーボールをやり、その合間を縫って研究をし、ラジオで60年代のフォークやロックを聴いていました。

まさに言うことなしで多くの努力を必要とされませんでした。学生はそれぞれのプロジェクトを持ち、たいていは全く異なるプロジェクトであったため、協調して研究をするという能力を必要としませんでした。むしろ反対の能力が必要でした。私の研究スタイルは、自分の思うように器具を使えるようにと、他の学生が寝ている間に作業を行うものでした。当時の大学院生には、自分以外の研究者が何を考えているかに関して想像力を働かせることがないという、ある種、軽い引きこもり状態が当然で

hours, and listened to 60s folk and rock on the radio.

Great fun. Not much effort required. Because we students had our own projects, usually quite different projects, the culture required no ability to work with others: in fact, rather the opposite. My own style was to work while others slept (to have unimpeded access to the instruments). A sort of genial autism—an inability to imagine what others might be thinking—was an honored norm in graduate student behavior.

I loved this period in my life. Jack Roberts allowed us great latitude in what we worked on. He had abandoned the “hub and spoke” model of the classical Germanic research group in favor of what I will call the “air-traffic-controller” model: he gave us some instructions when it was time to take off, and some when it was time to land, and in between we flew on our own. He believed, and I infer that he still does, that science is an individual enterprise.

We graduate students got along more or less well personally, but did not cooperate: in fact, we competed fiercely. We constantly played a game. The game was this: through quickness of wit, to see simple, elegant solutions that no one else had found to our own intellectually vexing experimental problem. Being smart was a good idea; being *very* smart was an even better idea; being first to the result was best. Whether our problems were broadly important, or just academically cute, was irrelevant.

This style of research limited the choice of problems to those small enough to be digested by one student. But bundling a number of related problems could sometimes define a field.

From Caltech I went to M.I.T., where I was a member of the faculty for almost 20 years. The style of research that I used at the beginning, when my research group was young, was essentially the same as the one I had learned in graduate school, except that now I was director, not student.

My reeducation, and the reeducation of the research group, began at M.I.T. The Institute is a wonderful place, and permeated with the engineering spirit. Many instructive events occurred at M.I.T.; let me recount one.

Cambridge was one of the wellsprings of biotechnology. When biotech first began to emerge, the National Science Foundation (NSF)—an agency that supports research in universities in the U.S.—decided that it should have a program in it, whatever it was. Not knowing how to start a program in a field it knew nothing about, NSF called the then-chairman of M.I.T.'s Chemical Engineering department,



あるかのように世間一般では考えられていたのです。

今でも当時のことが懐かしく思い出されます。ロバーツ教授は、私たちの研究にかなりの自由を与えてくださいました。古典ドイツ的な研究グループにありがちな「教授は車輪のハブ、学生はスポーク」的な方法ではなく、「航空管制」式とでも呼べそうな方法を採用していました。つまり、離着陸時には適宜指令を送るものの、それ以外の飛行時には私たちに任せるというやり方です。おそらく、今でもそのようにお考えだと思うのですが、科学というのは一人でやるものと教授は考えておられたのだと思います。

私たち、大学院生は、他の学生とも個人レベルではそれなりにうまくやっていましたが、お互いに協力しあうようなことはなく、むしろ競争は熾烈でした。私たちは、研究者の頭を悩ませる、実験色の濃い問題に対して、シンプルかつエレガントな解決策を自らの知力によって見出した者が勝利を収めるという、終わりのないゲームを繰り返していたのです。このゲームでは、賢ければ賢いほど有利で、周りを出し抜いて第一発見者となるのが最高とされていました。その問題が一般社会でも役に立つものなのか、単に学問的に魅力があるだけなのかはどうでもよかったのです。

こうしたスタイルでは、1人の学生でも消化できるような、小さな単位に分解可能なテーマにしか対応できません。しかし多くの関係する問題を束ねれば、ひとつの学問分野を定義付けることもできます。

カリフォルニア工科大学を修了した後、私は、マサチューセッツ工科大学 (M.I.T.) に教員として採用され、そこで20年近く過ごしました。最初の頃は、基本的に、私が大学院で学んだスタイルを踏襲していました。違っていたのは、私はもはや学生ではなく、指導する立場にあったということです。

私自身の、そして研究グループの再教育は、M.I.T.で始まりました。M.I.T.は研究者には申し分のないところで、キャンパスにはエンジニア魂が満ち満ちていました。M.I.T.ではいろいろな教訓を得ましたが、そのうちの1つについてお話しします。

当時、バイオテクノロジーの分野では、ケンブリッジ大学が先頭集団を走っていました。この新しい学問分野が台頭してきた頃、アメリカの大学の研究を支援する公的機関である米国科学財団 (NSF) は、まだバイオテクノロジーが海のものと山のものとも分からない段階で、財団のプログラムに組み込むべきであると考えました。ところが、右も左も分からないままではプログラムを立ち上げようもないので、当時M.I.T.の化学工学科を率いていたレイ・バドゥアー氏に、「プログラムを立ち上げて

Ray Baddour, and said, "If you'll start a program, we'll pay for it." Ray agreed to do so, but because he also did not know what biotechnology was, he covered his bets: he designed a program that was a celibate Noah's ark—one of every animal, rather than two: one cell biologist, one fermentation engineer, one enzymologist, and so on: perhaps a dozen people. He was clearly betting on interspecies breeding.

For this group, he needed a skilled biochemist, but he simply could not recruit one. Having failed with the experts, he asked me—a very junior member of the chemistry faculty. I knew nothing about the area; I was not qualified to do the work; I had never even worked with a protein. But I was curious, and I always needed money, so I said "yes." And from that came five years of close associations with colleagues at M.I.T. who *were* experts and who were deeply motivated to teach me as much as they could so that I could be helpful to them.

Baddour had no reason to offer me a place in the program other than desperation to finish his proposal to NSF. I had no reason to accept his offer other than curiosity and greed. But he did, and I did. Much of the research in later programs in our group—organic synthesis using enzymes, biocompatible surfaces, microfluidics for cell biology—stems from what I learned in that first, collaborative project. I also developed colleagues in a spectrum of intellectual colors who have provided continuing instruction (not to say amusement) over many years. This program was my first experience in saying "yes" without thinking too carefully, and it whetted my appetite for collaborative research.

### At Harvard

In 1982, I moved to Harvard. There, I joined a group of scientists and engineers that advised a federal agency named DARPA (The Defense Advanced Research Projects Agency—the agency that had, in fact, *invented* materials science as an academic discipline after World War II). DARPA works on a wide range of technologies, and is concerned with solving problems. It is, in that sense, an engineering organization. But it hopes for solutions that are very advanced—technologies that are fundamentally new—and for that it requires new science. The group that I joined was a mixture of materials scientists, electrical and structural engineers, and physicists. Almost no chemists. In a foreign country, one quickly learns a foreign language: I learned to speak "engineering."

In the 1980s, the program managers in DARPA were concerned about perceived limitations to improvements in microprocessors. So, they posed to the U.S.



くれるのなら、資金を出そう」と電話で持ちかけたそうです。ところが、引き受けたのはいいものの、バドゥアー氏自身もバイオテクノロジーが一体どういう学問であるか分かっていなかったのも、彼は安全策を取ることにしました。つまり、すべての動物について2頭よりも1頭ずつを乗せたノアの箱舟のように、細胞生物学、発酵工学、酵素学など、様々な分野から1人ずつ、全部で12人ほどの専門家を集め、プログラムを組んだのです。明らかに彼は異種交配に賭けたのでした。

このグループは、経験豊かな生物化学者を必要としていましたが、そのポストにふさわしい人物を確保することはできませんでした。困ったバドゥアー氏は、化学科でも下っ端だった私に声をかけてきました。私もバイオテクノロジーに関する知識はゼロで、そのポストにふさわしいとは言えませんでした。また、タンパク質を使った研究もそれまでしたことがありませんでした。しかし、持ち前の好奇心と、経済的には絶えず苦しかった私は、その申し出を快諾したのです。思えばこれがM.I.T.の専門家との5年間に及ぶ親密な交流の始まりでした。私が一人前の働きができるよう、この5人は熱心に私を指導してくれました。

バドゥアー氏がこのポストに私に打診したのは、NSFへの提案書をとにかく早くまとめたかったからに他ならないのですが、私は私で、承知した理由は、好奇心とお金だけでした。しかし、とにかく交渉が成立したのです。酵素を用いた有機合成、生体適合性表面、細胞生物学のためのマイクロ流体システムなど、私たちのグループが後のプログラムで手がけることになる研究の多くは、この私にとって初めての協業プロジェクトで学んだことからアイデアを得ています。その後も私は様々な分野の専門家と机を並べ、以来ずっと指導を請いながら、楽しく仕事をさせてもらっています。私が本当に素直に「はい」と言えるようになったのはこの時が初めてで、そのことがさらに共同作業に対する私の意欲を掻き立てました。

### ハーバード時代

1982年、私はハーバード大学に移り、DARPA（米国防総省国防高等研究計画局）という連邦機関に勧告を行っていた科学者、エンジニアのグループに加わりました。実は、DARPAは、第二次世界大戦後、材料科学を学問として確立した機関でした。DARPAは、幅広く科学技術の研究を手がけており、問題解決に重点を置いています。その意味では、工学的組織であると言えますが、彼らは基本的に新しい技術を用いた最先端の解決策を求めており、そのため、新たな次元の科学を必要としていまし

technical community the problem of finding new methods for making microelectronic widgets that might circumvent these limitations. Our group conceived the idea of forming patterns by printing, rather than by photolithography (the technology used then, and now, to make microelectronic systems, a technology loosely analogous to photography). DARPA gave us money to try our ideas, and then more money to improve them. Over about 10 years, we developed these methods to the point where we can replicate dimensions the size of large molecules by molding—dimensions smaller than can be made by photolithography. In fact, these and related methods are only now beginning to be considered seriously for applications in microelectronics—making a circuit is a very demanding technical problem. These methods will probably never compete with current technologies in making high-end microelectronics, but they are very promising for new technologies such as organic electronics. They have, moreover, proved perfect for making the microfluidic systems that are so useful in biotechnology.

When we got the money for this work, we knew *nothing* about microelectronics. But students found the subject interesting, and we taught ourselves microfabrication. To help, we hired postdoctoral fellows who were electrical engineers and physicists. Graduate students—even those in chemistry—threw themselves into the project. The idea of making very small structures (at a time before “nanotechnology” had emerged as a distinct subject) was engaging; the small structures we made provided new tools for biology; it was fun!

We are now a different group, with completely different skills than we had before. I would like to say that the transformation was planned and rational, but it was not: it resulted from saying “yes” to invitations to join groups in areas in which we were unqualified to work, then learning by doing.

### The Group

Throughout, the group has been its own best teacher. I am constantly amazed at what smart, young people can learn if they have an interesting, shared problem to work on. Sometimes not knowing what you are doing can be a great advantage. There is less temptation to develop ideas that others have already invented (since you may be too naive to know that they exist). There is more tendency to go off on your own. It is, however, *very* helpful to have a heterogeneous group—the more different kinds of people, the more likely someone will know a technique that already exists in field “A” that is the perfect solution to a problem in field “B.”



た。私が加わったグループには、主に材料科学者、電気・構造技術者、物理学者が集められており、化学者はほとんどいませんでした。外国に行くとその国の言葉を早く覚えられのように、このグループで、私は工学用語を使えるようになりました。

1980年代、DARPAのプログラム・マネージャーは、マイクロプロセッサには改良の余地が限られていることへの対策として、この限界を打ち破る超小型電子部品を作る新たな手法の開発計画をアメリカの技術者たちに問いかけました。それに応え、私たちは、大雑把に言えば写真と同じ技術を用いた、当時も現在もマイクロエレクトロニクス・システムを作るのに使われている光リソグラフィ法ではなく、印刷によってパターンを形成する技術を考案しました。DARPAからは、このアイデアを試す時に一度、そしてそれを改良する時に再度、資金提供を受けました。私たちはそれから10年ほどかけて、成形技術を用い、大きな分子ほどの物体を継続して作り出せるレベルにまでこの技術を高めることに成功しました。ちなみにこれは、寸法的には光リソグラフィ法でできるものよりも小さなものです。しかし、こうした技術ならびにその関連技術のマイクロエレクトロニクス分野への応用の真剣な検討は、始まったばかりです。回路設計とは、それほど高度な技術を要する技術なのです。高機能のマイクロエレクトロニクス製造という点では、おそらく私たちの技術は既存の技術に対抗することはできないでしょうが、有機エレクトロニクスをはじめとする新技術に対しては非常に有望です。さらに、バイオテクノロジーの研究に欠かせないマイクロ流体システムの製造に最適であることが分かっています。

この研究のために資金を受け取ったのはいいのですが、マイクロエレクトロニクスに関する知識は皆無でした。しかし、学生がこのテーマに興味を示したため、私たちは微細加工について自ら学びました。サポート役として、電気工学や物理学の博士号を持つフェローを何人か雇い入れました。大学院の学生は、化学科の学生も含めて、このプロジェクトに時間を捧げてくれました。その頃、ナノテクノロジーなる分野はまだ確立されていませんでしたが、そもそも微細構造を作るというアイデアが私たちの興味を集めました。しかも、私たちの作った微細構造は生物学者に新しいツールを提供しました。やめられないとはこのことでした。

今では私たちのグループも、以前とは全く異なるスキルを身に付け、当時とは似て非なるものとなっています。私としては、この「転向」は計画的かつ合理的に行われたと申し上げたいのですが、実際はそうではありませんでした。そもそもは、自分とは畑違いの分野のグループへの協力要請に対して首を縦に振ったことから始まった

## Others

I have described the value of self-instruction as a way of starting in a new area—jump into the swimming pool, and hope there is water in it! On the human side of the ledger, a different set of people was very important. They were not necessarily technically trained, nor even members of the group. Interestingly, most were women. Let me mention three, and what they did.

The first and most important was certainly my wife. When I was in college, a roommate introduced me to his sisters (another fortunate accident). I ultimately married the oldest of them. There are not many people who would have had the patience to put up with me for a lifetime, and she (Barbara) has. She guessed I had a sense of humor, and that I could make a living, and that I would make a serviceable father. She also realized that she had major reconstruction to do if the quasi-graduate student she had married was to be reworked into something convincingly human. I hope my graduate students realize how diligently she has labored on their behalf! We have had a wonderful time raising two sons (Ben and George). Children teach—in fact, unambiguously demand—that you pay attention to them rather than to yourself. A very useful lesson to learn in running a research group.

Next came Giselle. In 1982, when I moved to Harvard, I hired a secretary: Giselle Weiss. In my naiveté, I thought that I had hired her to do dictation and slides. She did these things, but she could not sit by and let me proceed with what must have seemed alarmingly incompetent management. Giselle was both luminously intelligent and very kind: she set to work, ever so delicately, to make the group into a coherent social entity, and to teach me to pay attention to the students. She also taught me a lesson that is crucial to success in academic research (and probably to all small organizations). Pay attention to your assistant! She (or he) may be smarter, or wiser, or both, than you.

Jim Tananbaum—a person from a different world altogether—taught a lesson from business. In the 80s, I had become involved in consulting with small, high technology businesses. At one point, I gave a talk on entrepreneurship at M.I.T. After the talk, a total stranger came up to me from the audience and said: “Hello, my name is Jim Tananbaum. I really liked your talk. Let’s start a company.” And we did—ultimately several. What I learned from these companies—which are not so different, in many ways, from academic research groups in scope and size—is that three elements were required for their success: people (especially management),



のであり、後は実地で学んでいったのです。

### 私たちのグループ

こうした取組みを開始した当初から、グループという組織自体がその構成員にとって最高の教師でした。自分に関心のある共有できる研究をしている時の若い才能の成長ぶりには、常に驚かされます。自分が何をやっているのか分かっていないことが有利に働く場合もあります。分からなければ、何がすでに存在し、何が存在していないのかなど知りようがありませんから、安直に他人のアイデアを展開しようという誘惑にかられることも少なくなり、その結果、独自の道を進む傾向が強くなるのです。この点、グループ内に異質のメンバーがいることは大きな意味を持ちます。専門分野の異なる研究者が多ければ多いほど、Aという分野ですでに存在している技術が、Bという別の分野の問題の完璧な解決策であることを誰かが知っている確率が高くなるからです。

### 研究グループ以外の人々

ここまで、未知の分野において、「とりあえずプールに飛び込んで、あとは水が入っていることを祈る」式に研究を開始する際の方法として、自己指導の効用について述べてきました。しかし、人間的な部分では、別の集団が大変重要な役割を果たしてくれました。彼らは必ずしも技術に明るいわけでもなく、また、グループの構成員でさえもありませんでした。面白いことに、そのほとんどが女性でした。彼らの中から3人を選んで、それぞれが果たした貢献についてお話ししたいと思います。

なんといっても最大の功労者は、妻のバーバラです。これも幸運な偶然ですが、在学中にルームメイトが彼の姉妹を紹介してくれ、結局は、その一番年上の姉と私は結婚したのです。私とずっと暮らすことに耐えうる忍耐力を持つ女性はそう多くはいなかったと思うのですが、バーバラは適任者でした。彼女は、私にユーモアのセンスと経済力があり、丈夫で長持ちする父親になるだろうと見抜いたのです。また、当時、気分だけは大学院生だった夫の私をまっとうな人間へと更正させるためには、大がかりな作業が必要だとも思っていたようです。バーバラの熱心な努力の甲斐あって私は生まれ変わることができたのですから、彼女は私の学生たちから感謝されてしかるべきです。私たち夫婦はベン、ジョージという2人の息子に恵まれ、楽しく子育てをすることもできました。子育ては、時には否応なく、自分から他者に注意を向け

money, and technology—and of these three, the technology was probably the least important. Good people, adequately supported, could always make something interesting happen; good technology, without good management, would always fail.

### What Have We Learned about the Construction and operation of a Research Group?

The ideas that we now use in operating the group are, I ruefully admit, all obvious in retrospect. There are six. First, people who have chosen a career in research prefer to work on ideas of their own choosing, rather than to do what they are told. Most people are delighted to have colleagues, but would just as soon not have a boss. Second, it is more fun to work with others on a common, shared problem than to work alone. The work goes faster, and a group can take on problems that are more complicated than can any single person. Third, students are at least as creative as faculty, and are capable of much more autonomy in research than they are given credit for. With autonomy, they develop creativity. Fourth, groups of people—chemists and biologists and physicists, scientists and engineers, men and women, young and old—working together are more interesting, adaptable, and creative in solving complicated problems than individuals working alone. Fifth, the personal priorities and ambitions of one person cannot impede the progress of others. Sixth, whenever an expert in a field asks you to collaborate—and the field is one about which you know nothing, and in which you are entirely unqualified to work—say “yes” immediately.

I believe that the research recognized in this award could not have been done in the classical, disciplinary, academic research group. Our way is not the only way to do research, but it is one way, and it works very well for complicated problems. Its elements are: i) collaboration; ii) no distinction between fundamental and applied research; iii) emphasis on areas that are new; iv) an explicit understanding on the part of the students that they are expected to learn both how to do the research and how to collaborate.

Essentially all research in the group is now cooperative. “Cooperative” does not mean different people working on the same problem (although that sometimes happens, simply because it can be pleasant to work together); it means different people, with different interests and skills, working on different parts of problems too complicated or difficult for any one to do alone.



てくれます。このことは、研究グループを運営していくうえで大変参考になりました。

次は1982年にハーバードへ移った時の秘書、ジゼル・ワイスです。当時世間知らずだった私は、彼女の仕事は私の言うことを書き取ったり、スライドを用意してくれたりすることだけだとばかり思っていました。もちろん、彼女はそうしたこともしてくれましたが、元来、じっとおとなしくしてられないタイプの彼女には、私のグループ運営がじれったくて見ていられなかったようで、いつも後押しをしてくれました。彼女は頭脳明晰であると同時にとても優しい女性で、実に細かく、グループを1つの社会的組織へとまとめあげると同時に、私には学生たちに気を配ることを教えてくれました。さらに、彼女からは、大学での研究のみならず、小さな組織で成功するためには欠かせない教訓を一つ授かりました。それは、自分のアシスタントへの心遣いを忘れないということです。彼らは時に、あなたよりも知識が豊富だったり、賢明だったり、もしくはその両方だったりするのです。

ジム・タナンバウムは、ビジネスという私たちとは全く別の世界から教訓をもたらしてくれました。80年代に、私は小さなハイテク企業のコンサルタントをしていたことがあるのですが、その関係で、起業家精神についてM.I.T.で話をする機会がありました。講演を終えた私に、聴衆の1人が私のところにやってきていきなり自己紹介を始めたかと思うと、私の話が気に入ったので一緒に会社をやろう、と言ってきました。それまで全く面識のなかった彼と、最終的にはいくつもの会社を興すことになったのです。こうした会社は、活動の範囲や規模的には大学の研究グループとさほど変わらないものですが、この経験から、人、特にマネジメント、お金、技術の3つがビジネスの成功には欠かせないこと、そして、この中では、おそらく技術は最も重要なものではないということを学びました。優秀な人材は、適切なサポートがあれば必ず何か面白いことを起こします。いかに優れた技術でも、マネジメントが悪ければ、必ず失敗に終わります。

#### 研究グループの構築と組織運営について学んだこと

現在、私たちがグループ運営で用いている考え方は、なぜ最初から気づかなかったのかと思うような内容ばかりです。6つあります。1つ目は、研究職を選んだ人物は、人から与えられるのではなく、自分で選択した考え方で研究をしたがるということです。また、同僚を歓迎するが、どちらかといえば上司の存在を望まないことです。2

#### The Research Group as Family

Over 40 years, the research group has evolved into something very different from what it was. It started as a “hub and spoke” architecture; it is now closer to a family. In saying “family,” I do not mean to imply the family of sitcoms—all smiles and good humor. Ours I would describe as turbulent and heterogeneous, but adaptive. The organization of the group is flat: things go on that I know nothing about. Students develop collaborations, plan, solve (or don’t solve) problems, often in ways invisible to me. I bring groups together, and help them to talk to one another. I usually make final decisions about strategy, resolve certain kinds of problems, control the quality of the science that we publish. The students know the details of the research and often know how to think about the problem more clearly than I.

And, as in a family, they, the students, all leave.

But while they are in the group, they (or we) all teach one another. As with children learning a foreign language, organic chemists can learn about fluid physics effortlessly, so long as no one has told them that it is difficult. Physicists can learn to purify proteins. Materials scientists can learn to grow cells, and biologists can learn to think about nanofabrication. Collectively, they solve problems that would be insoluble individually. And everyone has fun.

And society ultimately benefits.



つ目は、1人で作業をするより、共通のテーマに皆で取り組むほうが楽しいということ。こうすれば作業も早く進み、個人では手におえない、複雑なテーマに取り組むことができるのです。3つ目は、学生の創造力は、控えめに見積もっても、教授陣のそれに引けをとらないこと。また、自分たちだけでも、私たちが考えるよりもスムーズに研究を進められるということ。自由にやらせれば創造力が開花します。4つ目は、複雑な問題の解決にあたっては、個人よりも、化学者、生物学者、物理学者、科学者、エンジニア、老若男女など、多種多様な人材を揃えたグループのほうが、適応性があり、創造力にも優れ、より興味深い結果が得られること。5つ目に、個人的な優先度や野心が他人の進展を妨げるものではないこと。6つ目に、別の分野の専門家から協力を求められた場合は、自分は専門外であり、その資格はないと思っても即諾すべきだということです。

今回、京都賞の対象となった研究は、古典的な縦割り式のアカデミックな研究グループでは成しえなかったと思います。もちろん、研究の進め方には私たちのアプローチしかない、ということではないのですが、1つのアプローチだったことは確かで、特に複雑な問題に対してはその力を発揮しました。このアプローチには4つの要素がありました。1つは、共同作業であること。2つ目は、基礎研究と応用研究の線引きをしないこと。3つ目として、新しい分野に力を注ぐということ。最後に、学生たちが、自分たちは研究を行うだけでなく、協業を学ぶことも期待されていることをはっきりと認識していることです。

基本的に、グループ内の研究はすべて共同作業です。ここで言う「共同作業」とは、複数の研究者が同時に1つのテーマに取り組むということではありません。この種の「共同作業」が好きでそうするメンバーもいますが、私の言う「共同作業」とは、異なる興味、スキルを持った人々が、一人でやるには複雑もしくは困難すぎる問題に分担して取り組むということです。

#### 「家族」としての研究グループ

この40年あまりで、私たちの研究グループは、最初の頃とは全く違う集団へと変貌を遂げました。最初は「教授は車輪のハブ、学生はスポーク」的構造でしたが、今では家族的集団となりました。この「家族」とは、テレビのホームドラマで見られるような、「いつも笑顔が絶えない明るい家族」という意味ではなく、時には波も高くなりますが、その分適応力も高い、異質の人材で構成された集団です。グループの組



織はフラットなもので、私が全く関知していないようなことも行われています。学生は協力関係を築き、計画を立て、私にもわからない方法で問題解決にあたります。私の仕事は、グループをまとめ、お互いが議論できるようにすること、そして、戦略面で最終決定を下し、ある種の問題を解決し、外に向かって発表する論文の質を管理することです。学生たちは研究の詳細を承知し、私よりも明確に問題の対処法を知っていることもしばしばです。

そして、家族の常で、学生たちは皆、いつかは親元を離れていきます。

しかし、グループの中にいる時は、お互いに教え合います。子供が外国語を学ぶように、有機化学者がいとも簡単に流体物理学を学んでいます。物理学者がタンパク質の精製について学び、材料科学者が細胞の培養について、生物学者がナノ単位の微細加工について考えたりするのです。こうしたことが全部一つになって、個人では解決できなかった問題も楽しみながら解けてしまうのです。

もちろん、最終的には、その成果が社会に還元されていくのです。



稲盛財団 2003——第19回京都賞と助成金

発 行 2004年11月10日

制 作 財団法人稲盛財団

京都市下京区四条通り室町東入ル函谷鉾町88番地 〒600-8009

電話 [075] 255-2688

**ISBN4-900663-19-0 C0000**