

■本資料のご利用にあたって(詳細は「利用条件」をご覧ください)

本資料には、著作権の制限に応じて次のようなマークを付しています。
本資料をご利用する際には、その定めるところに従ってください。

***** : 著作権が第三者に帰属する著作物であり、利用にあたっては、この第三者より直接承諾を得る必要があります。

CC : 著作権が第三者に帰属する第三者の著作物であるが、クリエイティブ・コモンズのライセンスのもとで利用できます。

 : パブリックドメインであり、著作権の制限なく利用できます。

なし : 上記のマークが付されていない場合は、著作権が東京大学及び東京大学の教員等に帰属します。
無償で、非営利的かつ教育的な目的に限って、次の形で利用することを許諾します。

- I 複製及び複製物の頒布、譲渡、貸与
- II 上映
- III インターネット配信等の公衆送信
- IV 翻訳、編集、その他の変更
- V 本資料をもとに作成された二次的著作物についての I からIV

ご利用にあたっては、次のどちらかのクレジットを明記してください。

東京大学 Todai OCW 学術俯瞰講義
Copyright 2012, 小泉 英明

The University of Tokyo / Todai OCW The Global Focus on Knowledge Lecture Series
Copyright 2012, Hideaki Koizumi

異分野の「知」の架橋・融合が創造する新しい価値

日立製作所 フェロー

小泉 英明



日立製作所の小泉でございます。本日はたいへんお忙しい中、ご足労いただき、本当にありがとうございます。また、このような貴重な機会を賜りまして厚く御礼申し上げます。

ヴェスト先生の後で、たいへん僥越ですが、お話をさせていただきます。本日、頂戴した演題は「異分野の『知』の架橋・融合が創造する新しい価値」、なかなか難しい演題で苦労しましたが、精一杯やらせていただきたいと思います。

今日、私がお話をさせていただく内容は多くの社内の方々、さらには社外の方々にたいへんお世話になってきた結果です。そうした方々にまず感謝申し上げます。

要素還元論から俯瞰統合論の時代へ

最初にこの21世紀がどのような時代なのかということです。20世紀が「要素還元論」が大成功した時代と捉えますと、この21世紀は「俯瞰統合論」の時代だと考えられます。

この中で「知の架橋・融合」というテーマが出てくるわけですが、実はこれは簡単な話ではない。静的なプロセスではなく、ダイナミックなプロセスであるからです。私たちはTrans-disciplinarity（環学性・超分野性）と呼んでいますが、これは多くの異分野を架橋・融合した新科学技術・新産業の創成であり、科学技術と人文学、社会科学を架橋・融合した新分野の創成、またもう一つには研究と実践現場の架橋・融合、演繹・帰納の止揚的なアプローチであります。

そして、このプロセスはInter-disciplinarityやMulti-disciplinarityとは異なり、ダイナミックなプロセスです。図1はそのイメージの一つを表していますが、ここで目標としているのは「人類の安寧とより善き生存へ—Towards Human Security and Well-Being」です。

コンドルセによるフランス革命時の横断分野予想（～1794）

「知の架橋・融合」ということは昨今よく言われているわけですが、実は簡単ではない。今までも繰り返しされてきました。意外なことですが、古いところはフランス革命の時代（1789～

1799）にすでにこういう話は出てきています。

コンドルセ（Marquis de Condorcet, 1743～1794）という人は数学者であり、哲学者であり、そして政治家でありました。フランス革命の最中に命を落としましたが、コンドルセは科学者・人文学者による共和国の構想をもって実現しようとしたのです。

その時のテーマは第一が人口統計表の作成。人口分布と平均寿命に関する統計表をつくらうということです。二番目がリサイクル社会の実現。廃棄された資源の有効な再利用。そして三番目が省エネルギーの工夫。少ない消費量で同じ効果が得られる燃焼法の開発です。これらは今日のわれわれもよく知る内容ですが、200年以上前、フランス革命の頃に提案されていたのです。ただし現実にはたいへん難しいことだった。そしてコンドルセが実践を通じて構造的な欠陥があることに気づいた。それを「無益の連鎖—Cyclic nullity」と名付けたわけです。自分が話す時には遠い異分野の人たちを退屈させ、自分が話を聞く時には遠い異分野の人たちから退屈させられる、これの繰り返しであると、コンドルセは言ったわけです。この後も似たような試みが数々なされていますが、実際に成功したという例を耳にする機会は少ないと思います。

それが成功した例外的なケースが、まさにヴェスト先生のMIT、第二次世界大戦中、Rad-Lab、放射線研究所がきわめて学際的な仕事を打ち出しました。ここがほぼ唯一の成功例ではないかと私は感じています。

① Meeting of Nobel Laureates Lindau 2005

そしてこうした試みは未だに続けられているわけですが、次にこの半年間ほどの、世界の新しい動きの中から、いくつかご紹介させていただきます。

最初にドイツのリンダウで開かれたノーベル賞の受賞者会議。自然科学三賞受賞者47名が結集しました。このリンダウでの会議は既に60年近くにわたって開かれてきました。ずっと、ルードヴィッヒ・ファイネンディーゲン先生が取りまとめてこられました。今回は「知

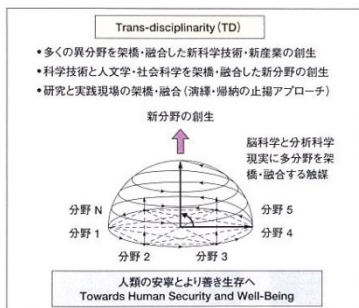


図1 要素還元論から俯瞰統合論の時代へ



図2 世界の動向から
(1) Meeting of Nobel Laureates Lindau 2005 (左上)
(2) Inter Academy Panel 2005 in Stockholm (右上)
(3) The International School in Erice 2005 (下)



図3 キュリー夫妻の学際性

の融合」というテーマで私も招待されました。ところが実際にたいへん優れた先生方の討議を拝聴し、分野間を越える議論がきわめて難しいということ、その認識を改めて新たにしました(図2)。

② Inter Academy Panel 2005 in Stockholm

次にごく最近ですが、Inter Academy Panel という会議に出席しました。これはスウェーデンの王立科学アカデミーがホストとなってストックホルムで開かれました。この会議の中でも、やはり分野を融合させていくというテーマが出ました。米国からブルース・アルバートという米国の科学アカデミー総裁を長らく務めた先生が中心となって活発な議論が行われました。この中で今回のノーベル物理学賞選考委員の一人でもある、スヴェン・オロフ・ホルムグレンという素粒子物理学者は、How Does a Human Conscious and Brain Start to Work? という題名で赤ちゃんの脳に関する講演をされました。途中、「小泉の基調講演と競争するつもりはないが、物理学者の立場でも赤ちゃんには興味があるんだ」と言い、会場を沸かせました。今はこういった状況に立ち至っているわけです。

③ The International School in Erice 2005

そして三番目です。イタリアのシシリにエリスという中世の都市があります。山の上の古代都市で、そこにある研究所から見ると、眼下には地中海が広がり、議論していると雲が下を流れていく、たいへん美しい土地です。このマヨラナ研究所は、ボーレ・ディラックとかエンリコ・フェルミの考え方を継承して、Center for Scientific Culture と呼ばれています。以前から、科学を文化として捉えて研究をしているところで、現在、まさに科学と人文を架橋・融合させる試みに取り組んでいる真っ最中でした。

ここの International School では中心者をまず選び、その中心者が若い教授、若い助教授、あるいはポストドクの中でも非常に優秀な方などを連れてきて、合宿して徹底的に議論をやるわけです。今回はケンブリッジ大学から、言語学のウーシャ・ゴスワミ先生、ハーバード大学が

ら、教育学のカート・フィッシャー先生、哲学はバチカンからマルセロ・ソロンド大司教が見えました。この方は大学の哲学教授も兼務されています。私は自然科学を担当させていただきましたが、こういう形で徹底的な議論を行いました。これは今、実際に知の架橋・融合が起こり始めている会議だと私自身、感じました。

キュリー夫妻の学際性 ラジウム発見は業績全体の一部

「知の架橋・融合」—このような試みは実は非常に難しく、先ほどの「無益の連鎖」とおり、なかなか成功していません。掛け声はかかるが、現実のアウトプットが出てこない。実際に成功した最初の頃の典型として、キュリー夫妻の学際性をあげることができると思います。これは夫婦でありますからうまくいったのかもしれませんが(図3)。

マリイ・キュリーは皆様ご存じのとおり、たいへん有名ですが、夫のビエール・キュリーは、マリイほどは知られていません。マリイ・キュリーは典型的な秀才型の科学者でしかたけれども、逆にビエール・キュリーは天才的な科学者と言えるのではないかと感じています。この二人が本当にいい形で連携したわけですね。短い期間でした。二人が結婚してからビエールが死ぬまで、約10年間というきわめて短期間にさまざまなことが起こったわけです。ラジウムの発見も、実は業績全体のほんの一部と認識できるのではないかと考えています。

ビエール・キュリーの発明・発見

ビエール・キュリーの発明・発見ですが、ビエールは対称性ということにたいへん興味を持っていました。ビエール・キュリーという人は実は落ちこぼれて小学校にも中学校にも行けなかったのです。その代わり自然の中で過ごしました。両親のよい理解を得て自然をしっかりと観察して身につけた。その中で対称性について強い興味を持って、深い洞察を行ったわけです。

そして最初は結晶学の先生になり、生徒に教えていたわけです。マリイ・キュリー、まだ結婚前のマリイ・スクロドフスカにプロポーズ

として贈ったのは対称性に関する彼の論文でした。そして彼は対称性保存則を発見しました。これは「キュリーの原理」と呼ばれています。現在でも、素粒子論、大統一理論への羅針盤として、常にこの対称性が現れてくるのは皆様よくご存じのとおりです。

それから兄弟のジャックと一緒に圧電現象を発見してさまざまな応用へと発展させました。ピエゾ効果と名付けたものです。それは水晶振動子をはじめ、多数の応用があります。

さらに磁性の基本的原理の発見と応用、これは「キュリーの法則」や「キュリー点」等々で、今日の皆様にも非常に身近な新磁性材料、小型モータなどの実現がこれによって起きているわけです。

そしてさらには生体影響になりますが、ラジウムを発見したあと、ラジウムのベレットを自分の腕に貼って実験して様子を調べました。これはビエールが自分でやったのです。するとたいへん火傷をしまして、彼は非常に驚きましたが、火傷の跡がきれいに治りました。そこから癌を治せろと思い、放射線医学や放射線治療、あるいは核医学、これらの学問が興ったのです。

彼が考え出したものは、私たちの身の周りにもたくさんあります。ここから一つ感じ取れるのは、根と幹、根幹を見ることによってビエール・キュリーの発見・発明は時代を超えた、ということです。

ビエール・キュリーの発明した放射能計測装置

図4にその一例として彼の天才的な計測装置を示しました。彼は放射能を測るうえで天秤の分銅を使いました。放射能によって電離して生じた電荷を、圧電効果(ビエールの発見)で水晶板の表面に生じる電荷によって相殺した。水晶板を分銅の重さで引っ張ると、結晶の対称性が崩れて、水晶の表面に電荷が発生するのです。相殺点の確認には、やはりビエールが発明した象限電位計と光楯子を使って非常に精密な零点を得ることができました。これは零点法ですから、分銅によって完全な直線性が保証されています。きわめて天才的な考え方ですね。私の描

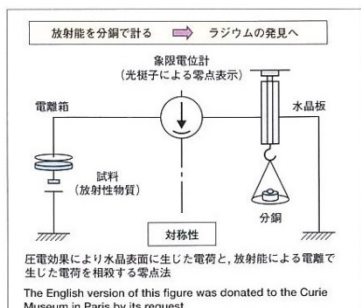


図4 ビエール・キュリーの発明した放射能計測装置

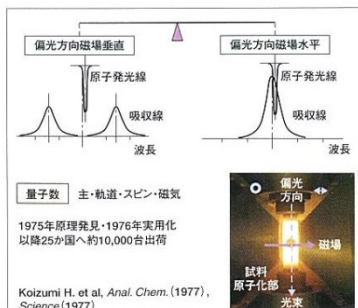


図5 偏光ゼーマン原子吸収法の原理

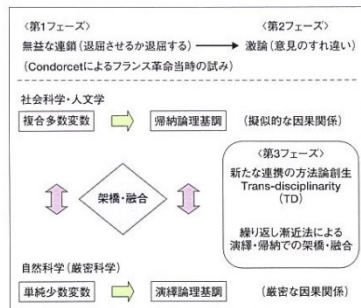


図6 架橋・融合の困難性と実現への試行

いたこの解説図は、現在、パリのキュリー博物館に所蔵されています。

このビエールの装置を、妻のマリー・キュリーは、当時すでに発見されていたあらゆる元素に適用したのです。そして放射線を定量的に計測しました。その結果、当時ウラン線と呼ばれていた放射線を放つ瀝青ウラン鉱（ピッチブレンド）には、発見されていない元素が含まれている、新元素がなければならないということを見つけたわけです。これが本当の意味でのラジウムの発見でした。そのあと大量のピッチブレンドと戦った、いわゆる「英雄の時代」の4年間とは、それを多くの人たちに証明するために、しっかりと結晶化して実物を見せるという、その作業であったわけです。

ビエール・キュリーが発見したり発明したりしたものが今、家庭の中にどれだけあるかを調べてみると、日用電化製品であっても、かなりの部分がビエール・キュリーに関係している。水晶振動子を使っている携帯電話、パソコン、テレビ、クォーツ時計、小型モータを使った腕時計、DVD、CD、MD、それに圧電着火装置。ところがトーマス・エジソンに関係するものは意外とあまりない。時代とともに変わってしまったのです。

偏光ゼーマン原子吸収法の原理

このように、対称性は非常に基本的なことで私も個人的にたいへん興味を持っていました。日立に入って最初に取り組んだのが、偏光ゼーマン原子吸収法の原理発見でした（図5）。

原子の発光線をそのまま使って、今度は試料に磁場をかけて、原子吸収線の対称性を崩してみたのです。実体的なものものの対称性を崩したのですが、それによって原子吸収と散乱・分子吸収の差が零点法で計測可能となる。夾雑物が存在しても影響がないために、非常に精度が高く、前処理をせずにさまざまなものが計測できるので、ずっと使われています。1975年の原理発見以降、1976年に実用化して、現在も最初に書いた図5のままの製品が販売されていて1万台目の出荷が近いところです。今年の分析機器展でトップシェアになったと営業の方か

ら伺い、非常にうれしく思いました。

やはりこの対称性は物事の基本なのです。この場合は四つの量子数のうちの磁気量子数、この磁気量子数によって1点のみ対称を破壊した。それによってきわめて高い選択性が生じたわけです。

技術の変容 工芸品からレプリカへ

そして今度はトーマス・エジソンの発明。エジソンで有名なのはもちろん、白熱電球です。

それまでも電球はあったけれど、エジソンは、それが実用化できるようにたいへんな執念でフィラメントを探したというのは皆様もよくご存じかと思います。最終的には日本の孟宗竹の炭を使ったわけですが、そうすることで白熱電球が実用化された。

一方、エジソンは「エジソン効果」を1883年に発見しました。これは整流効果ですが、エジソン効果という名前まで付いているのに、これを何に活用できるかにエジソンは気づかなかった。ですから特許は出願してなくて、特許が「出願されたのは1904年。20年近く経った後にヨーロッパから特許が出願されてしまいました。そこから、陽極、陰極、そしてグリッドという構造の、まさに工芸品のような真空管が生まれたわけです。

その後に3本足のトランジスタが固体素子として出たわけですが、それが集積回路化され、さらに今日では超LSIへ変わってきました。今から7～8年前、Real-time Parallel Distributing Processor (R-PDP) という集積度の非常に高い脳型チップを日立グループ内でつくりました。これは14mm×14mmの中に450万個のトランジスタが入っています。こういうところまで来たわけですね。しかも、LSIとは基本的にレプリカ技術で、ほとんど無限に複製が可能なのです。真空管は名前や型番が同じでも、メーカーによって全然形が違ったり、まさに工芸品でした。それが固体素子ではレプリカになって大量につくられ、そして量から質への転換が起こったわけです。それが、現実のデジタル処理を可能にしました。

イノベーションの質的変容

真空管、そして固体素子（代表はトランジスタ）、そして高度集積化の超LSIと移ってきたわけです。われわれ人間が扱っている情報を考える時、通信という概念は情報の空間的な移動と解釈できる。また、記憶は情報の時間的な移動と解釈できる。エントロピーの法則がありますから、時間の矢は過去から未来へと一方向でしか、情報を運べないわけですが、この両方が高度集積化によって極端に変化したというのが現在の状況と考えています。すなわち情報が時空を超えた時代へ突入したということです。言い換えれば、地球生命圏が情報技術によって巨大な脳を形成しつつあるとも言えるかもしれません。

架橋・融合の困難性と実現への試行

このような時代背景を考えたうえで、本日のテーマである「知の架橋・融合」に戻りますと、最初から述べているとおり、これはきわめて難しい。簡単ではないわけです。しかし、このテーマに関して、私自身、10年ほど取り組んできた結果、見えてきたことがあります（図6）。

最初のフェーズはまさしくコンドルセが指摘した「無益な連鎖」、退屈させるか退屈するという、異分野研究者が集まっただけの、まったく話にならないすれ違いのフェーズです。それから次のフェーズ、これはごく最近の傾向だと思いますが、今度は激論になります。意見が衝突するわけです。そして空中分解する。これが架橋・融合の難しいところだと感じています。

ではどのように架橋・融合すればいいのか。これは今、工夫している最中で、たいへん頭を悩ませているわけですが、一つには第3フェーズと思われる内容です。社会科学・人文の多くは複合多数変数を扱っていますから、厳密科学である自然科学のように単純少数変数を扱っている場合と違うわけですね。そう簡単に厳密な因果関係を演繹的に導くことができません。ですからこの社会科学・人文の場合はいろいろと現象をマクロに見ながら、その中から法則性を見ていくという帰納的なアプローチがどうしても支配的になります。そうすると相互に連携しようとしても、まず考え方の基本が違って

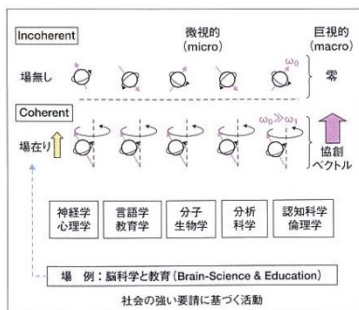


図7 振動部分の架橋・融合
(Trans-Disiplinary Coherence)

いるわけですね。ですからそのところでの架橋・融合はきわめて難しいということになります。

そのために、現在やれそうなことは何かと言えば、繰り返し漸近法による演繹・帰納による架橋・融合ということで、両者を繰り返すこと。もちろんサイエンスの分野でも演繹・帰納は繰り返されてきたわけですが、これを人文・社会科学、それと自然科学の間でイテラティブに繰り返すのです。最初は、空中分解しないぎりぎりのところまで両極端に振ってみる。これはきわめて微妙なプロセスですが、その先の収束点のところに両者が止まった融合点があるのではないかと最近では考えています。

振動部分の架橋・融合(Trans-Disiplinary Coherence)

よく「融合」というと、分野と分野が一緒にするように誤解されますが、もともと分野とは一つの階層構造の中に定義されたものですから、分野が完全に融合してしまうということはありません。ですから分野の一部が融合するわけですね。図7はその模式的な例ですが、スピンというのはちょうど独楽(コマ)の運動を想像してもらえればと思います。

独楽自身は回転している。回転エネルギーは重心の位置に集積されているけれども、角運動量と重力場の相互作用で頭を少しずつ振ります。歳差運動です。その振動部分がお互いに共鳴すればリンクして、コヒーレントな状態では大きなベクトルを生じる。この物理現象と同型のモデルが新しい分野を創成する一つの方法になるのではないかと考えているわけです。

コヒーレントな状態をつくるためには「場」が必要です。この後にお話しします「脳科学と教育」の場合は、「脳科学と教育」という一つの共通の場を設けています。しかもこの場は社会の強い要請が必要で、そういう中で初めて分野間の架橋・融合が起こる。そう考えています。

「脳科学と教育」という概念

1996年に環境問題の国際会議を開いた時に、「脳と環境の相互作用」というセッションを設けました。徹底的にこのテーマを議論していく

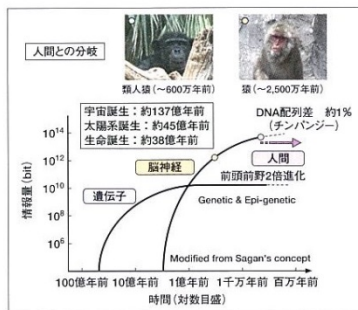


図8 情報の視点からみた生命進化

と、実は脳と環境の相互作用こそ学習なのだということが見えてきました。

そして2000年12月、ちょうど二十世紀の最後、二十一世紀をにらんで、重要なテーマになるのではないかとということで、科学技術振興機構(JST)にご協力いただき開催した国際会議がDeveloping the Brain: The Science of Learning and Education(脳を育む: 学習と教育の科学)でした。

情報の視点からみた生命進化

「脳科学と教育」というテーマを考える時、人間の進化をもう一度見直す必要があります。図8は横軸が今から何年前か、百万年前、1千万年前、1億年前、10億年前、100億年前、縦軸は情報量をbitでプロットしています。

宇宙の誕生は、今から137億年前、ビッグバンで生じたと考えられています。最近の天体物理学がかなり進歩しましたので、プラスマイナス1億年というかなりの精度です。そして太陽系の誕生が約45億年前、生命の誕生が約38億年前です。そして生命が誕生してから環境に適應するために世を繰り返しながら少しずつ進化していったわけです。少しずつ変異したものが自然の中で淘汰され、その情報が遺伝子という形で生命の中に蓄えられていく。ところが数億年前から中枢神経系が急速に発展してきました。そうすると、現在処理している情報量はむしろ中枢神経系、脳の方が遺伝子情報よりも多いと考えられるようになりました。

長い生命の歴史の中で、人間がチンパンジーから分岐したのは今から約600万年前です。生命の誕生から38億年ということと比べるとごく最近のことですね。DNAの塩基配列を見ると、人間とあまり変わらない。1%強というのが最近の定説です。つまりチンパンジーは人間にとって非常に近い親戚のようなものです。

ところがチンパンジーと人間でまったく違う部分があります。それは額の後ろにある前頭前野と言われる部分です。この前頭前野が、チンパンジーの額の後ろ、チンパンジーも額はあまり大きくないですね。「ネコの額」というように、ネコに額はほとんどありませんが、チンパンジーでもまだ小さい。ところが人間はこの額



図9 人間とチンパンジーの相違点

が発達して、その後ろには巨大化した前頭前野があります。これは脳全体の大きさで規格化して比較してもチンパンジーより2倍以上人間は前頭前野が大きい。ですからそこに人間とチンパンジーの最も違うところがあると考えられるわけです。

人間とチンパンジーの相違点

もう一度、人間とチンパンジーとどこが違うのかを見直してみたいと思います。図9を使って中国でお話をした時のことです。事前に中国語に訳してくれたのですが、中国語の方では「人間」の「間」という字が落ちていました。質問しましたら、「人間」という言葉は中国にはない、人は「人」と言われました。「人間(じんかん)」という言葉が意味が全然違うらしいのです。

帰国して調べてみると、「人」と「人間」とは意味が違うんですね。人と人との関係性の中において存在する人を「人間」と呼ぶということです。ですから、独りぼっちでいた時は「人」なのですね。社会の中で初めて「人間」という概念が出てきている。まさにこの人間の「間」という字が表しているように人間の本质はコミュニケーションにあるわけですね。

人間とチンパンジーとの違いですが、まず階層的な意味文法による言語能力を有するということが人間の特徴です。それから道具をつくるための道具までつくるとのこと。複雑な道具を製作することですね。それから積極的な教育を行う。

このところはあまり一般的ではないかもしれませんが、実はこのチンパンジーにすら教育はないのです。チンパンジーの道具を発見したジェーン・グドール先生は、もう40年間もアフリカで野生チンパンジーを観察されていますが、まだ一度も積極的な教育は観察したことがないそうです。京都大学の松沢哲郎先生はアイちゃんの育ての親ですけれども、やはりもう30年近く、一度も積極的な教育は見ただけでなくおっしゃっています。つまり教育は人間特有なのですね。チンパンジーの場合、石器の使い方も親の近くでずっと見ているだけで

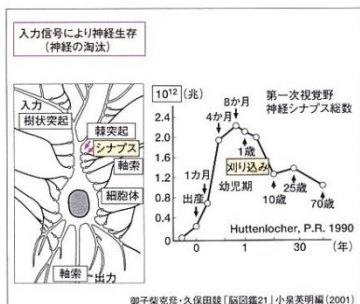


図 10 神経接続部(シナプス)の過剰生成と刈り込み

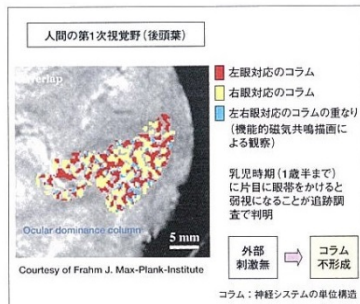


図 11 大脳視覚野の眼球優位性コラム

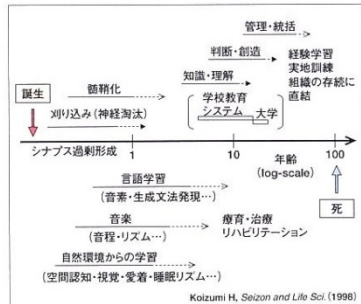


図 12 脳機能発達と学習・教育

す。親は教えません。そして試行錯誤で真似をしながら、時間をかけてやっと使えるように子どもたちがなっていくのです。その教育をさらにシステム化したところが人間の一大発明と考えられるのです。

それから慈愛・憎悪(憎しみ)などの高次の感情を持つのも人間の特徴です。これはやはりこの前頭前野と関係していると考えられます。嫌悪とは、蛇や毛虫を見たら嫌だと思ふ。これは憎しみと違いますよね。嫌悪は心理学でも研究されてきましたし、嫌悪は動物にもあるわけですが、憎しみというのは違います。たとえば自分が本当に大切にしている人が殺された時、最初は悲しいと思う。でも時間が経つにつれて、それは非常に強い憎しみになることが多い。殺した人に対する憎しみですね。これは時間を伴ったものです。心理学でもまだほとんど研究されていません。これは、前頭前野ともう一つ古い皮質、本能的な情動をつかさどる古い皮質、その両方が連合して現れた新しい感情だと思います。慈愛(Compassion)というのも同じような可能性があります。

神経接続部(シナプス)の過剰生成と刈り込み

このような面から脳を研究していくと、われわれ人間の本質が見えてくるわけですが、まず学習のプロセスがどういう形で起こるかをお話したいと思います。

図 10 は神経の模式図です。神経と神経の接続部、シナプスと呼んでいますが、大脳皮質で約 140 億個の神経細胞があります。その神経細胞が 1 個あたり 1 千から 1 万のこの接続箇所を持っています。まさに天文学的な数字ですね。そしてすべてが並列分散処理によって作業を分担し、処理した後で逐次処理によって意識に出してくるわけです。われわれが意識に昇らせてやっていることは脳の働きのごく一部だと、このことを認識する必要があると考えています。

その神経の接続部は最初、遺伝子のごく大雑把につくるのですが、次には置かれた環境によって外から刺激を受けたもの、環境から刺激を受けたものだけを生存させるといふ、個体内、

つまり私たちが生まれて育つ間に神経の淘汰が脳の中で起こります。特に赤ちゃんの時にそれが極端なのです。図 10 の右図の横軸が年齢、縦軸がシナプスの個数で単位は兆です。これはピーター・ホッテンロッカー先生という方が実際に人間でやったデータですが、非常に苦労された仕事です。

第一次視覚野という後頭部のごく一部の部分だけを見ても、生まれてから、何兆という神経間接続が増えてきて、8 か月でピークとなり、それから次第に減っていきます。先ほど話した淘汰のプロセスが働く。まず大雑把につくりますが、置かれた環境にないものにチューニングする必要はないわけです。たとえば日本人の赤ちゃんも生まれたばかりには英語の L と R をほぼ区別できますが、1 歳になる間に区別できなくなってしまいます。つまり日本で暮らす時には L と R を区別する必要はないし、余計な情報を取り込まない方がいい、チューニングのプロセスになるわけです。こういうことがたくさん起こるということがごく最近になってわかってきました。

大脳視覚野の眼球優位性コラム

図 11 に示した大脳視覚野、後頭部にあつて、われわれの視覚をつかさどるところですが、そこには眼球優位性のコラムと呼ばれる神経構造があります。右眼から入った信号と左眼から入った信号は脳の中で、このようなモザイク状の構造を持った別々の部分で処理されます。左眼から来た信号は赤の部分、右眼から来た信号は黄色の部分です。この画像は脳全体で後ろの半分を撮影していますが、最近では、脳が働いている状態を生きたまま高い分解能で見られるようになってきています。これは生きた実際の人間で撮った画像で、マックス・プランク研究所のイェンス・フラム先生が世界で最初に撮影した時に送ってくれたものです。

たとえば、小さい時に片眼に眼帯をかけて塞いでしまうと環境から片一方の眼には情報が入らなくなる。脳はその眼が不要だと判断します。モザイク状に入り組んだバランスが急速に崩れていきます。眼科では常識になっています

が、乳幼児期、安全をとって 1 歳半まで、片眼に眼帯をかけるという弱視になるということが追跡調査で判明しました。今では手術する時でさえ赤ちゃんに眼帯をしません。どうしても片眼を数日間塞がなくてはいけない時には、もう片一方の眼を同じように塞いでバランスをとる、そういう形で手術が行われています。

学習・教育の新たな生物学的定義

このように外から入ってきた情報によって神経回路を組み立てる。これがまさに学習です。今までの学習や教育の定義と違った定義をもう一度つくることが必要になります。学習とは環境(自分以外のすべて)からの外部刺激によって中枢神経回路を構築する過程、そして教育はこの外部刺激を制御・補完する過程。悪いと思う刺激をカットし、足りないと思う刺激をさらにインプットする。それが教育なのです。

こういう概念で捉えると、学習と教育を生から死への一生を通じた包括的な概念として捉え直すことが可能になります。しかも価値の問題を外しますから、自然科学として扱うことができるわけです。

脳機能発達と学習・教育

また、私たちの一生について学習と教育をもう一度別の視点から見直すことができます。図 12 では、1 歳、10 歳、100 歳とプロットしましたが、誕生から死までの総合カリキュラムでもあります。そして生まれた時からシナプスが過剰生成され、やがて刈り込まれて臨界点を迎える。遺伝子の情報によって大雑把につくられ、その後に神経淘汰によって環境に対して最適化される。神経回路が最適化されるということとはまさに赤ちゃんの学習過程です。この学習がまさに脳の土台をつくっていることが最近明確になってきました。「脳科学と教育」ではこういった研究をやらせていただいています。

空間認知もそうです。先ほどの視覚もそうです。それからお母さんに対する信頼、お母さんが好きだという感情、これも実は学習している。それから睡眠リズム、これも学習だということが最近判明してきました。このように、環

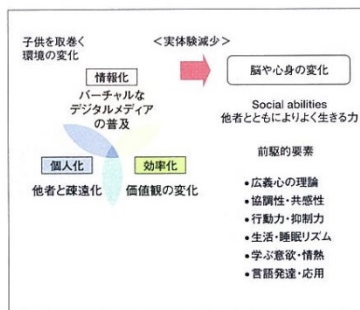


図13 環境変化が脳や心身に与える影響

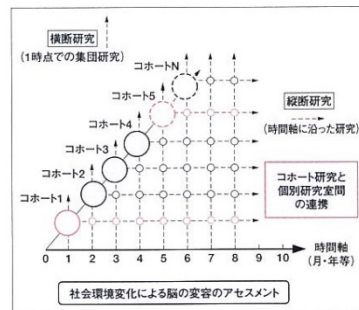


図14 コホート研究（前方視型集団追跡研究）

境から基本的なことを学ぶという事実がわかってきたので、われわれの今日の文化をもう一度見直さないとはいへんことが起こる可能性が生じてきました。さらには高齢化の中で健やかに老いることも重要ですから、たとえばバビリテーション、あるいは認知症にならないために何をすべきか。これらはまさに学習と教育の重要なテーマの一つです。

先ほどのヴェスト先生の講演にもありましたとおり、組織の存続のためには学習が一つのキーになります。組織と広い意味で言いましたが、これは一つに家庭であったり、会社であったり、さらに大きく広げれば国であったりします。この存続には当然ながら学習と教育、その質が問われることになります。

脳科学と架橋・融合による社会技術研究

今、「脳科学と教育」という分野を広げ、JSTの中で社会技術のシステムを研究・開発する部門で、「脳科学と社会研究領域」という総合プログラムを設立させてもらいました。そこではファンディングを主とした提案公募型の研究（ボトムアップ）と、われわれが計画し、そこに先生方が参加する計画型研究（トップダウン）、その二つを車の両輪のごとく施行しています。

提案公募型研究では、「脳科学と教育 (I)」ならびに「脳科学と教育 (II)」という研究プログラムの中で、多くの研究代表者をそれぞれ中心とする研究プロジェクトが進行しています。特に後者は、コホート研究（前方視型集団追跡研究）です。一方、計画型研究は心身や言葉の健やかな発達と脳の成長をテーマにして「日本における子供の認知・行動発達に影響を与える要因の解明」という大型のコホート研究を進めています。これは Japan Children's Study、略して JCS と呼ばれています。ここでは、倫理ということすべての最優先課題にしており、「脳科学と倫理」を旗印に脳神経倫理の研究グループもすでに発足しています。今、ここからも世界的な潮流が生まれそうな気配があります。

また、これらのコホート研究は、環境変化が私たちの脳や心身に与える影響をアセスメントしようとするものです。アセスメントという考

え方は、環境では1980年代にやっと出てきました。オゾンホールが出てきたり、地球が温暖化したり、公害問題という枠から大きく外れて地球全体の問題になった。しかし人的環境の変化の中における脳の変容、あるいは文明の変化による、科学技術の変化による脳の変容についてのアセスメントはまだまったくと言っていいほど行われていません。

環境変化が脳や心身に与える影響

特に子供を取り巻く環境の変化は大きなものがある（図13）。先ほどお話ししたように情報化は、もう世界が一個の脳になるような形で進展しています。実験の場合、すべての信号が脳の中にいったん入って並列分散処理がされますが、バーチャルなものや、人間が考えて与えたものはごく一部しか抽出されていないので、それだけが脳に入っていくことになる。実験とはまったく別物なのです。そういう中で子供たちがどう変化していくか。特に個人化、効率化がそれに伴って急激に進んでくる。

そして一つの課題としては Social Abilities、他者とともによりよく生きる力、これこそわれわれが持たないと企業はもとより国も危うくなる。この Social Abilities には非常に多くの複合的な要素がありますが、その発達の前駆的な要素として、アタッチメント（愛着・信頼）や心の理論（Theory of Mind: TOM）がある。相手の考えていることを感じる、相手の考えていることを読む、そういう能力です。これが器質的障害で欠落すると自閉症という形で現れます。それから行動力・抑制力、生活・睡眠リズム、学ぶ意欲・情熱、言語発達・応用、こうした前駆的な要素のどれが欠けてもやはり問題になりますが、さらにこれらをすべて持っていたとしても、社会能力が備わるとは限らない。その統合過程でも、ダイナミックスをベースにした研究がきわめて重要です。

コホート研究（前方視型集団追跡研究）

そういう中でダイナミックスを見るわけですから、一点だけでたくさんの赤ちゃんを観察してもそれだけでは足りないわけですね。時系列

ですと追っていく必要がある。それでコホート研究、これは前方視型集団追跡研究と言いますが、この中で横断研究と縦断研究両方を進め、さらに脳科学の研究室、発達心理の研究室、教育学の研究室をリンクさせます。そして社会環境変化による脳の変容のアセスメントを進めるといのがわれわれの考え方であり（図14）。

パチカン科学アカデミー 400 周年記念とシンポジウム「心・脳と教育」

こうした取り組みは海外でも少しずつ潮流が現れてきています。数年前、パチカン科学アカデミーの400周年記念のシンポジウムが開かれました（図15）。ガリレオ・ガリレイらが法王の庇護の下、400年前にこのアカデミーを設立し、途中で不幸な関係がありましたが、今では完全に科学者の自由を確保したうえでアカデミーが運営されています。

その400周年の記念テーマとして何が最も相応しいか、今、世界で何を考えるべきかという時に決まったのが、「心・脳と教育（Mind, Brain and Education）」というテーマでした。私は宗教家ではありませんし、あまり縁がなかったもので、カンリックの中でどういう位置づけがなされるのか当初は不安でしたが、実は脳科学にたいへん期待をしてくれていたのです。人間の尊厳、その認識がますます薄くなる中で、これからはサイエンスの力が大切であるというのが、この最近亡くなったヨハネ・パウロ2世のお考えでした。

それを実際に実現するために、2004年、ハーバード大学が中心になって、MITにもご指導いただきながら、ミーティングを行い、International Mind, Brain and Education Society という国際NPOが発足したのです。

完全非侵襲型高次脳機能イメージングの難しさ

お話ししてきた学習と教育に関するサイエンスが現実のものになったのは、実は計測ができるから初めて可能になってきたのです。そのためには機能的磁気共鳴描画（fMRI）、光トポグラフィなどの脳機能計測装置が不可欠です。光



図 15 バチカン科学アカデミー 400 周年記念とシンポジウム「心・脳と教育」(2003 年) (左, 中, 写真はバチカンのご厚意) と International Mind, Brain and Education Society 2004 at Harvard University (右)

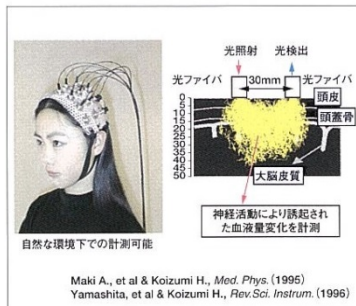


図 16 光トポグラフィ (Optical Topography)

トポグラフィは私どもが原理から取り組んできた装置ですが、こうした手法によって脳が直接計測できるようになってきた。

MRI の発見者・開発者は、もともと物理学に近い人たちのですね。赤ちゃんも測るから被験者に対して影響は皆無にしたい。ところが画像をつくるための情報を取り出すからどうしても相互作用は必要です。その相互作用をできるだけ小さくし、かつ多くの情報量は得る。完全に背反した条件ですが、そのためには極限的な高度先端技術が必要となるのです。MRI の原理を発見したポール・ラウターバー先生とピーター・マンスフィールド先生は、2003 年にノーベル生理学医学賞を受賞された。物理学賞や化学賞ではなかった。ゲノムが全盛の時代に生理学医学賞を物理学者が受賞するというのは深い意味があると感じています。

光トポグラフィ (Optical Topography)

もう一方の光トポグラフィですが、これは日立グループの中で開発したものです (図 16)。毛髪と毛髪の間には、実は頭皮にある程度スペースがある。そこに細い光ファイバをそっと当てると、そこから頭の中へ光を入れることができます。しかもその光の量は冬の曇り空程度の光量で、完全に安全に光を中に入れて、それを外へまた反射して戻す。また皮膚の表面からそれを受光して脳の中の情報を知ることができる。そして神経活動によって誘起された血流量の変化

や血液の酸化状態を測ることができるのです。しかも自然な環境下で計測が可能なのです。他の装置では、たとえば MRI の場合、じっとしていなければいけないし、X 線の場合も同様です。しかし、光トポグラフィは動くことができます。赤ちゃんでも自然な環境で計測できるのです。

そしてもう一つ重要なのは、光を出すレーザーは半導体レーザー、検出するのはアバランシェ・フォトダイオード、半導体検出器です。チップがあればフィルタリング処理ができる。つまり半導体の素子だけで構成される技術だということです。

人体の光のイメージング

しかしながら、当初は脳神経外科の医師から、人間の頭蓋骨は厚くて固くて光が通るはずがないと言われました。それで実際に検証しました。脳神経外科の医師に協力してもらい、実際の人の頭蓋骨を後ろから光を当ててみたのです。白色光でも出てくる。人間の手の場合はもっと簡単に白色光を当てると赤く透き通って見えてくる。この手の平を通過する白色光、これは静脈個人認証として日立グループで実用化がなされています。原理は光トポグラフィの研究の中から生まれてきた。一方、光は実際に人の頭蓋骨も通る。これで光計測のベースが確立した。光トポグラフィという形で、成人から赤ちゃんに至るまで、または高齢者に至るまで、実際

に脳機能を計測できる装置がつけられたわけですね。

活性化する大脳言語領域

脳の働きを計測できると、たとえば今、私がお話ししている時は左半球のプロカ (Broca) という部分が動きます。それから皆様は今、理解される時には左半球の側頭葉にあるウエルニケ (Wernicke) という部分が動きます。こうした現象が光の方法で簡単に計測できるようになってきています。

母国語を聴いた際の新生児脳活動

こうなると、生まれたばかりの赤ちゃんの言葉に関する学習も計測が可能になってきますね。ジャック・メレル先生との共同研究で、フランスとイタリアで行ったものですが (図 17)、生まれて 5 日以内の赤ちゃんに通常の母国語の会話を聴いてもらいます。そうすると左側の聴覚野付近、将来言語野になる部分が非常に強く活性化します。テープを逆回しすると、もう母国語ではないわけですが、音を聴いただけの信号になる、音がなければ信号はほとんど出なくなった。つまり生まれて数日の赤ちゃんでもお腹の中ですにお母さんの声を聴いて母国語のイントネーション、リズム、アクセントといったものを学んでいるというわけです。

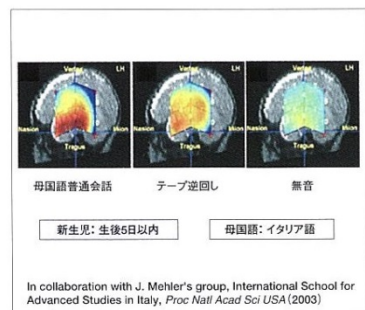


図 17 母国語を聴いた際の新生児脳活動

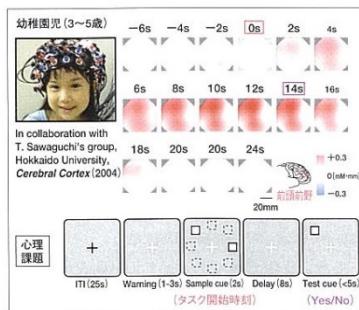


図 18 作業記憶野 (ワーキングメモリ) の発達研究



図 19 大脳作業記憶領域の活性化

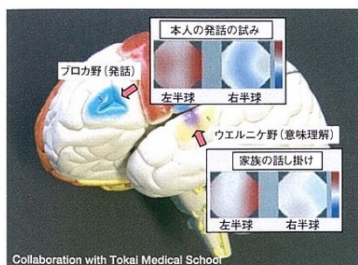


図 20 光トポグラフィによる ALS 患者診断

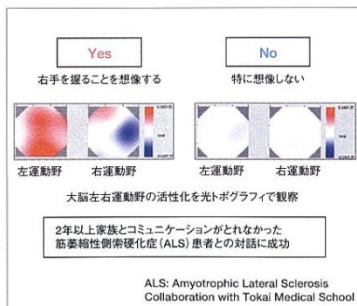


図 21 脳機能計測による新たなコミュニケーション



図 22 生命の持続的発展

作業記憶野(ワーキングメモリ)の発達研究

さらに3歳～5歳の時に、ワーキングメモリ、コンピュータで言えばキャッシュメモリのようなものです。一時だけ途中経過を記憶しておく。これはわれわれ人間にとっては非常に大事な働きをするのですが、これが3歳～5歳の間に発達することも実際に幼稚園の園児たちの協力によって証明できました(図18)。

大脳作業記憶領野の活性化

たとえば、暗算をする時には途中経過を憶えておかないといけないので、ワーキングメモリをかなり使いますが、光トポグラフィで測ってみるとワーキングメモリが活発に働きます(図19)。ところが同じ簡単な暗算を計算機でやってみると全然動いていないのです。つまりわれわれは便利ものを追求していますが、それによって脳が怠けてしまう可能性があるわけです。運動しなければ、たとえば自動車にばかり乗っていると足が萎えてしまう。脳でも同じことが起こります。これからメディアを設計するうえでこうしたことも視点に入れて、お客様にとって、どういうメディアが本当に役に立つのかという視点で研究開発を進めなければならないのです。

脳科学と倫理

この話の中で最初に触れましたが、どんな機器を開発してもいいかというと、簡単にはそうはいかない。本当に人間にとって役立つものを開発する必要がある。その時に脳科学と倫理という問題が表面に浮上します。脳科学は人間の心にどこまで踏み込んでよいか。人の身体はどこまで人工物に替えてもよいのか。これらの問題が差し迫っているのです。

光トポグラフィによる ALS 患者診断

こういうことを強く感じましたのは、実際に ALS (筋萎縮性側索硬化症) の患者さんを、ご主人の強いご依頼によって、神経内科の医師の方と一緒に計測したことがきっかけでした(図20)。皆様ご存じのようにこの ALS はたいへん悲惨な病気で、次第に筋肉が動かなくなる。そ

して外とのコミュニケーションが一切できなくなり、人工呼吸器で命をつなぐ。患者さんもまぶたが動かなくなると、2年半の間、ご家族とまったくコミュニケーションがとれなかった。その患者さんは医師も意識があると思っていなかったのです。

ご家族が話し掛けても、どこも動かない。眼も筋肉が動かないから閉じたまま。ところが実際に測ってみると、その患者さんの左半球にある、言葉の意味を理解するウエルニケ領野が働いたのです。それから耳元で患者さんに今度はご家族に話し掛けてくださいとお願いしました。そうすると発話性の言語野であるプロカ領野が活性化します。右半球は逆に抑えられる形で観測された。そして話し掛けるのをやめてくださいと言うと、赤く活性化した状態がパッとまったく活性化のない状態に戻ります。そういうことから完全に意識があることが判明したわけです。しかし、現在の医学では、長期間療養されている ALS の方たちは人工呼吸で意識があるかどうかは定かではない、と人工呼吸器が外されるケースもあるといわれます。

それからもう一つこの時に感じたのは、このように他人の考えていることを窺い知ってしまったいいのかという問題です。このことから倫理が非常に重要になります。

脳機能計測による新たなコミュニケーション

この場合はご家族が、ご本人に意識があればお話ししたいと考えられて、そのために行った研究です(図21)。

右手を握ることを想像しますと、対側という反対側の左運動野の活性化を観測することが光トポグラフィで可能です。この握ることを想像しなければこのような形で信号は出てきません。患者さんがこちらから質問したことに対して Yes だったら右手を握ることを考えていただく。すると左脳の運動前野を中心に活性化信号が得られます。質問に対して No だったら想像しないでもらおうと活性化信号は出ません。つまり問い掛けに対して Yes なら A、No なら B というように、非常に明確な回答を得ることができるのです。これが脳と直接コミュニケーションを

する新しい手法なのです。

科学技術による選択自由度拡大

このように倫理を考える中で、われわれは本当にこのまま科学技術を発展させてもいいのだろうかということを考える、そういう人もいます。しかし私は、科学技術は人間にとってきわめて貴重なものだと考えています。

環境問題でも同様ですが、より多くの人が生きていくためには有限の資源を消費しなければいけない。しかしいずれは枯渇する。枯渇する前に少しずつ選択の自由度が減ってきます。その中で地球生命圏の持続的な発展、発展とはいくなくても維持を確保するためには選択肢の自由度を上げなくてはならない。これは科学技術の進歩が担うべき仕事だと私は考えています。そこに科学の本質的な価値がある。

生命の持続的発展

生命の持続的発展という問題ですが(図22)、大きく見てみると、物質的な側面はいわゆる環境問題、これは地球生命圏の健康です。それから精神的側面、これはまさに今日お話ししてきた教育問題です。そして生命の多様性、そしてもう一つ大切なのが文化の多様性です。この文化の多様性を受け入れられる心をいかに育むか。これも脳科学と教育の重要な課題なのです。そして目標とするところは最初にもお話しした「人類の安寧とより善き生存(Human Security and Well-Being)」です。

日本の将来ビジョン

日本の特殊事情は、小学校の教科書にもあるとおり、乏しい天然資源、高い人口密度、そしてヨーロッパ言語から遠い特殊な言語にあります。そして少子化・高齢化がもう目の前に迫っていて、深刻な問題になりつつある(図23)。

そういう中で日本はどういう方向でこの先進めるか。本当に真剣に考えるときわめて憂慮すべき点が多々あります。詰まるところ、残されたものは人的資源の最大活用しかないと考えられます。まさに小泉首相が就任時に言った「米百俵の精神」、首相は少々違う意味で使ったと

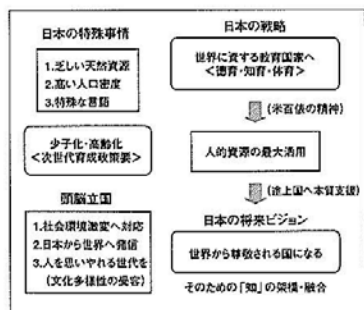


図 23 日本の将来ビジョン

と思いますが、この本当の意味は非常に深いものがあります。この人的資源というのを最大活用するために教育の研究を、まさに米百俵の精神で本当に力を入れてやるべきだと思います。

皆様もよくご存知のように、プラトンが「国家」を論じた「国家」という有名な大著の中は、大半が教育論です。それを考えても教育はますます重要になる。その中で、今お話ししたようにサイエンスとリンクさせて脳から教育を知る。しかも、それで単純に頭のいい子供たちを教育し、頭のいい人間をつくるということ、あるいはエンパワメントということとは全然違うのです。あつたとしてもそれは副産物です。本命は、もっと相手の立場に立て、文化多様性を尊敬の念をもって受け入れられる、そういう人間を育む。さらには憎しみの連鎖を断ち切る。これが脳科学と教育のきわめて重要なテーマと考えています。人を思いやれる世代をつくるということですね。当然ながら社会環境の激変に対応するという重要な点もあります。

このような教育研究はいわゆる先端研究と、かなり違う点があります。私どもはMRIをはじめとして多くの最先端医療機器の開発に関わってきましたが、地球上で先端医療の恩恵にあずかる人々はごく一部です。地球上には、下痢で体力を消耗してしまい、一杯50円で買える砂糖と塩の入った水を生きるために必要としている子供たちも多い。この「脳科学と教育」は先進国にも途上国にも当然役に立つ。役に立つだけではなく必須ですし、これから社会のインフラストラクチャーとしてどうしてもこの広義的教育システムを本気で考えたい。日立の小平浪平創業社長は、企業の第一の目的は社会に役立つことであり、その方策として経営の企業努力が必要であることを明言しています。さらに、社会は今、利便性の先に新たな価値観を求めつつあります。

私たちの目標としては、世界から尊敬される国になるということですね。実際に尊敬される国になることは非常に難しい。お金をいくら儲けても尊敬されないし、軍備をいくら拡充しても尊敬されない。どうしたら尊敬される国になるか、産官学が一体になって真剣に取り組むべ

きだと考えています。

以上です。どうもご清聴ありがとうございました。