

## 講 演



## 認 知 科 学 と コ ン ピ ュ ー タ †

佐 伯 胖†

きょうは認知科学とコンピュータというテーマで最近考えておりますことをお話したいと思います。

認知科学とコンピュータというのは非常に切っても切れない関係で認知科学の始まりのころからの深い付き合いでございますが、きょう特にこのテーマを選びましたのは、最近ある種の革命とでも言いましょうか、いわゆるコネクショニズム（並列分散処理）といわれる新しい考え方が現れてきて、認知科学に新しいパラダイムの転換が生まれつつあると思われ、そういったときにいったいどう考えたらいいんだろうかということを、この機会に私なりに少し考えをまとめてみたいと思ったわけです。

認知科学とコンピュータとの結び付きは、並列分散処理系が導入される以前では、心理学（特に記憶の実験心理学や言語心理学）との結び付きが非常に深かったわけです。ところが今度コネクショニズムということになりますと、心理学よりも、神経科学、脳科学というものとの結び付きが強くなり、実験心理学だとか、学習とか発達に関する心理学、あるいは記憶に関する心理学というようなものとは、なにか縁がうすくなっていくんじゃないかというような懸念を感じます。そこで、いったいどういうふうな形で、いままでの心理学と計算科学との結び付きを保っていくべきかが問題になります。

「あなた方とは絶縁する」というふうなかつこうで、心理学と断絶してしまった形で、今度は新しい神経科学と計算機科学が結び付くのであるといわれると、われわれ心理学者はうら淋しい思いになり、なにかやっかみを感じないわけではない。そういうことにならずに、一つ古い友人である心理学ともおつき合いをつづけてもらいたいという意味で、きょうお話したいと思いました。ただそのおつき合いの仕方は、実験心理学、あるいは記憶とか学習に関する心理学とのいままでのおつき合いの仕方とはちょっと違った形になるだ

ろうということとはたしかです。

すなわち 1955 年から 65 年のころは、認知科学の始まりのころ、心理学と計算機科学のハネムーンの時代で、両者の関係は非常にうまくいったと思うわけです。

1955 年から 65 年というふうに申しましたけれどもこれは正確な年号ではございません。大体そのころということ念頭においたものでございます。一応そのころのスローガンは、やはり行動主義から脱皮することだったわけです。そのころの行動主義心理学では、刺激があって、反応は刺激から誘発されて出てくるにすぎないという考え方が主流でした。つまり、大切なのは、刺激と反応の結び付きですね。S-R の連合というもので、これが学習理論の中心でもあり、学習こそがすべての行動の説明原理だとされていたわけです。初期の認知科学者たちは、それではだめだということを、なんとか言いたかった。心理学の中で 1955 年前後から S-R 理論、すなわち、刺激と反応が単に連合して学習ができるんだという考え方は行き詰まりがあるということがいろいろな点から指摘されていて、その代わりに S-O-R というようなパラダイムが提唱されたわけですね。

この O というのは、オーがニズということなんですが、そう言ってもちょっと分かりにくいかもしれませんが、生体の側がなにかある表象をもっていて、外からの刺激 (S) はその生体の側に用意されてる表象 (O) との関連で反応 (R) というものを形成するんだというわけです。そういう中間段階の O というものを想定するというパラダイムに移りつつあったわけですね。S-O-R 理論というのは、今日のコネクショニストのパラダイムに大変近いのですね。つまり、基本的にはいわば刺激と反応の連合、あるいは連想を中心として、中間層にヒドン・ユニットを想定するわけですから、多層のコネクショニスト・モデルと発想は同じではないかと思われます。このことは大切に考えてしかるべきだと思うんですね。その後私たちが S-O-R のパラ

† 情報処理学会第 37 回 全国大会特別講演 (昭和 63 年 9 月 12 日)  
場所 立命館大学  
† 東京大学

ダイムをどういふふうに展開してきたか、ということをもう1回辿りなおしてみると、これから向かうべき並列処理時代における心理学とのかかわり方というものが示唆されるのではないかというふうに思うわけです。

どういふふうに私たちはその S-R 理論から、S-O-R 理論へと転換していったかということを、ごく大ざっぱに述べます。まず、人間の行動におけるアテンション（注意）とか、仮説とか、生体の側でなにか積極的に作り出してるものがあることをどうしても認めざるを得なくなってきたのです。刺激の特定の次元だとか、特定の範疇に注目をするというふうなこと、あるいはなにか仮説をもつということです。あるいはなにか期待ということがあるから知覚をするんだとか、なにか見たいものがあるから見えるのだとか、聞きたいものがあるから聞こえるのだということがある。あるいは刺激と反応の結合がただ自然に学習されるというものではなくて、人間はなにかコンセプトというものを背後に作り出すんだということ、さらに体制化という名前では呼ばれている現象ですね。つまり学習者のほうで入ってくる刺激をなんらかのまとまりだとか、システムとして構築しなおすところがある。そういう積極的に生体の側でシステム作りというものを行っている。そういう内的プロセスを実験心理学的に明らかにしてきた。

それから 55 年から 65 年の間に起こったこととして、非常に重要なのが、短期記憶というものが発見された。「発見された」といういい方はおかしいんですけども（短期記憶という概念はかなり古くからありましたから）短期記憶のキャパシティが、非常に限られた情報処理しかできないことが明らかになりました。つまり、わずか 5 か 9（すなわち  $7 \pm 2$ ）程度の独立した情報のまとまり（チャンク）しか貯蔵できない、ということが、精密な実験で確認されました。そういう記憶装置が人間にあるんだということ、さらに、チャネル・キャパシティがきわめて制限されてるということが明らかにされてたわけですね。このことは逆に言いますと、記憶というものはものすごくまぐ外界情報を整理したり、統合したり、階層化する、そういう知識の構造化ということをも人間のほうで相当積極的にやってるんだということが必然的に導かれてくるわけです。これが記憶のチャンク化とか、階層化というものです。そういうものにわれわれが注目してきたわけです。つまり、知識は一種のツリー構造になってお

り、いろいろ上位概念が分かれて、それがいくつかの低位概念をもっていて、こういう構造化によって人間は学習したり、判断したり、思考したりしてるということです。

このことから、意味ということを考えなければいけないということが叫ばれるようになってきた。それ以前の記憶の研究のように無意味つづりを暗記するということはあまりやらなくなって、意味を処理するということに関心が向いてきた。そこに強烈なインパクトを当てたのが Logic Theorist というシステムですね。A・ニューウェル、H・A・サイモン、それに C.J. ショーという三人が開発しました、定理を証明する計算機プログラムですね。これが人工知能の始まりでもあるわけですが、そういうものによっていままでのこのような注意とか、仮説とか、期待といったものを計算機モデルでもって表現できるという見とおしがついてきたこと。それから N・チョムスキーによって生成変形文法が提唱されて、認識の背後には、かなり高度に構造化された処理機構が生まれながらにして、あるということ、あるいはなにか経験的には蓄積できないような構造があらかじめワイヤード・インされている（組み込まれている）という発想が生まれてきた。それから動物の習性学のほうからも、単なる経験がたまっていくような学習ではなくて、生態系との関連で、生存に必要な高度の適応行動の学習が少ない試行で形成されること、そういったことが分かってきたわけですね。

さらに 65 年から 75 年にかけて、認知的なパラダイムが非常にはっきりしてきたわけですね。そのときに中心になったのがニューウェルやサイモンたちが提唱した「情報処理心理学」(Information Processing Psychology) と呼ばれていたものです。これは、最初は人間の思考過程、とくに定理を証明するプロセスのモデルを計算機でシミュレーションするだけだったんですが、その後はさまざまなパズルの問題解決だとか、弁別学習とか、概念形成とか、そういったいわゆる古くから実験心理学のほうでやられてきた諸データを情報処理モデルで表現し、計算機シミュレーションしていくという試みが次々と行われました。さらに、心理学的な実験が、そういう情報の処理過程のモデルを特定化するために組まれるようになりました。この方法が一段と押し進められていて、一つ一派をなしてきたということがあるわけです。

それから U・ナイサーという人が認知心理学 Cogni-

tive Psychology という言葉を大々的に提唱し、新しいスローガンを掲げてテキスト「認知心理学概論」を書きましたが、そのときはアナリシス・バイ・シンセシスという言葉に非常に重視いたしました。つまり、人間は知覚のレベルから言語処理に到るまで、外界を分析しながら統合していく、あるいは統合することによってさらに細かいものを分析していくという、いまでいえばトップダウンとボトムアップのインタラクションということが、人間の情報処理機構のもっとも中心的な機構であるというふうなことを述べたわけです。

それからN・チョムスキーにはじまる言語心理学により、言語理解についてのさまざまな実験と、生成変形文法による言語的知識の記述ということが同時平行に進んでいきました。こういうことを背景にしてた時代に、われわれの暗黙の関心ごと、頭の中で研究者たちがなにかそれとなく暗黙のうちに問うていた問いは、「人間とはどういう種類のコンピュータなんだろうか」ということです。これが暗黙の問いだったんですね。この「What Kind of Computer is Man?」というのは、これはE・B・ハントという人の有名な論文のタイトルでもあるわけですけれども、やはりその当時の人たちがなんとなく探究していたことをまとめると、こういう言葉で表現できるんじゃないかと思えます。このことは、人間というのは一種のコンピュータだということはもうすでに前提になってるんですね。すでに前提になった上で、どういう種類のコンピュータなんだろうかという問いになってたわけですね。

そこで、ごく大ざっぱに、こんな感じじゃないかなという提唱がなされたのが、図-1に示すような構造で、この中にいろんな心理学的な実験事実と、神経科学、脳科学からの知見とがとり入れられ、一つの「情報処理システム」としてまとめられたわけです(図-1

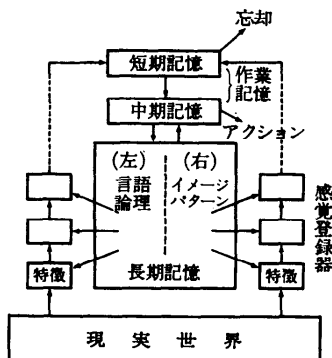


図-1 人間はいかなる種類のコンピュータか  
“what kind of computer is man?”

参照)。それは人間は外界の情報をさまざまな特徴抽出というプロセスを経てだんだん抽象化、一般化という方向に処理していく。それはまったく自動的に進んでいくという、そういう処理系がまずある。それが感覚登録器と呼ばれている処理系なのですが、このときの特徴というのが、たとえばD・N・ヒューベルとT・N・ウィーゼルが猫の脳細胞の中に「斜めの線」を知覚する特徴抽出子を検出したことにはじまる。その他局在論的な脳科学の知見をとり込んだ考え方でした。また、計算機による文字や図形のパターン認識の研究からも、特徴抽出系のモデルが提唱されていたことも背後にはあります。特徴抽出を経た情報は、さらに短期記憶というところに入って、そこでリハーサルとかさまざまなアクティブな情報を加工していく活動が行われる。そこも神経科学のほうで、海馬とよばれているところが、短期記憶と関係があるんじゃないかということがその当時から言われておりましたので、その研究成果が生かされています。海馬を破壊されますと、短期記憶が全然できない。古い昔からの記憶はよく覚えているけれども、いまさっきのことは忘れてしまうというような、そういうことが判明したりして、一時脳科学者が無我夢中になって、海馬の近辺を調べていた。したがって、やはり記憶のモデルとしては短期記憶、中期記憶、長期記憶の三つに分かれるんだという設定が定まってきて、人間をもし計算機だとたとえたならば、こんな構造をもってるはずだという全体構成がうかび上がってきたわけです。さらに、長期記憶における左右脳の違いということも分かっておりまして、特徴抽出子が経験を積み重ねて、長期記憶の中でだんだんでき上がってくるとか、そういったことも分かっていた。一方、中期記憶のところ、当面与えられる課題に応じていろんな作業がなされて、長期記憶から既有知識が呼び出されたり、そこで加工が行われて、そこでアクションが発生したりするんだというわけで、図-1に示すような全体システムが多くの人々の共有するモデルとなっていたように思われます。

75年から80年にはどうなっただろうかと言いますと、計算機科学と認知心理学とが、もっとも密接に結び付いた時代ではないかと思えます。それは人間のマインドを計算機にたとえる「コンピュータ・メタファ」の絶対的な信頼が確立した時代です。つまり人間もやはりある種のコンピュータだということについて、ゆるぎない信頼をもっていた。そこでなにかやら

れてきたかと言いますと、長期記憶の中で、特に意味を司るところというのを、はっきりとコンピュータに表現していこうじゃないかというわけです。それが「意味ネットワーク」の研究、R・ジャンクの「スクリプト」、M・ミンスキーの「フレーム」というような概念を生み出し、実験心理学のほうでも、意味をもった単語や文章の記憶だとか、あるいは日常会話における言語行為（スピーチ・アクト）の研究などが盛んになり、それらが非常に密接なつながりをもってくるようになりました。

それから次に、常識ということに挑戦してみようということになりました。つまり、いままでは人間の常識ということとは、底知れない泥沼みたいなもので、そこにはちょっと科学のメスは入りにくいと思われたものが、案外あっさりと、たとえばジャンクのスクリプトのような形で常識の表現形式というのがなにかありそうだというような見とおしをえて、常識というものを表現したり、その活用過程をモデル化するということが行われてきた。

それから前処理の重要性。前処理というのは、たとえば「チャールズ・ディケンズの電話番号は何番ですか」と聞かれたら、えーと、とずっと考える人はいない、すぐ即座にそんなもの分かるはずないだろうというのが、ほんとに出てくる。これはどうしてかということですね。つまり、われわれは情報処理をする前にどんな方式でどんな方向でその処理をやるべきかという非常に見事な前処理をやる。こういう前処理のところでは人間がさまざまなメタ認知（つまり、どういうことは「分かりえる」が、どういうことは「分かりそうもないか」が分かること）が働く。そういうような、「分かるか分からないかが分かる」という処理が行われる。あるいは人間が長期記憶に情報を送り込むときに処理を行うわけですが、その処理にエラボレーションという処理がある。それはさまざまな他の知識と連合させるとか、話（ストーリー）を作るとか、辻褄を合わせるとかいう処理を行うことです。それがやはり実験心理学的な研究と結びつけられました。たとえば文章理解の研究で、なにかイメージを連想したり、話者の視点を意識すると理解や記憶が確かに深まるというようなことです。ここらは本当に実験心理学と、それから計算機のプログラムのさまざまなシステムの提言とか、非常に足並の揃ってきた時代です。それから特にT・ウィノグラードの提唱しました、宣言的な知識対手続的知識の区別があります。つまり、知識は陳述的

に表現されて貯蔵されてるのか、それとも手続として貯蔵されてるのかというような問題は、これは問題解決過程のフレキシビリティを実験心理学的にいろいろ調べていくことによって、知識の表現がどうなってるかということも分かるんじゃないかということで、希望にもあふれ、また実質的な成果も上がった時代ではないかと思うんですね。

80年から85年になってきますと、もっと大胆になってきたと言えましょう。今まではこわくて扱えないとされていたことを、なんでもコンピュータでシミュレートできるのじゃないかという非常に自信が出てきたこともあって、普通の計算機というメタファではちょっと乗りにくい課題を、むしろ積極的に捜し出してきて、そういう課題に挑戦するようになりました。計算機科学も認知科学も、実験心理学的な問題も、わざと非計算機的なことにチャレンジするというわけですね。だけどそれは別に計算機を否定するということじゃなくて、ひょっとすると、こういうことも処理できるんじゃないかという希望と、さまざまな思い入れが重なったと思うんですね。そのことを一言でまとめると、「文脈の情報処理」ということになると思います。

その第1は、内容のある課題解決、たとえば物理の問題とか、物理は物理学という、知識体系と日常経験の知識の両方をもったものですね。それを学んでいく。パズルなんてのは自分たちで決めたルールですね。それを解くという話じゃなくて、物理学というまさに科学の体系と、日常経験ということがからんでくる。そういうふうな問題、あるいは算数でもそうですが、つまり文化によって蓄積されたり、あるいは実物そのものがある法則に従ってる、そういうもののとのインタラクションの中で知識獲得をしていく、それはどういうことになるんだろうか。それから、特定の知識領域におけるエキスパートとノビスの違い、こういったところを実験心理学的にも解明して、たとえば物理のエキスパート、物理学者というのはどんな発想をするんだろうかということを実験的に調べると同時に、そういうことと計算機シミュレーションをやっていく。そういう研究が盛んになってきたわけですね。それが知識工学というようなものを生み出し、エキスパートの知識を計算機の中に組み込んでいくというふうな方向にも進んでいったわけです。

それからさらに日常性ということが非常に重視されてきた。つまり文理解から談話理解、つまり文脈をもった言語解析というようなこと、それをやはり大切に

考えていこうというわけです。そういったところに言語行為論なんかが非常に大きな役割を果たしてきました。さらに私たちの文化や社会の習慣とか、価値観なんか、われわれの日常の生活のさまざまな情報処理、特に無意識でなんとなく情報の探索を行ったり、あるいは体系を作り直していくことなどに注目した研究が生まれてきました。そういうところを「日常性の中での思考」ということばとして、認知科学のスローガンになりはじめてきました。

それから3番目は、やはり状況主義ですね。状況意味論の提唱、J・パーワイズやJ・ペリーの「状況意味論」の提唱も非常に大きな意味をもってありますが、それは必ずしもただぼっと出てきてる話ではなくて、認知科学の中の生態学主義の復興が背後にあります。つまり、やっぱりわれわれは実在というもののとのインタラクションの中で認知を深めていくのであって、そういう現実世界とのインタラクションの中で絶えざる意味の作り直しを行うんだ。意味というものはそういうふうに、あらかじめなにか定義して組み込んでおくものではなくて、そのインタラクションの中で外界そのものの関係で浮き彫りになってくるものだというような発想が出てきたわけです。

それから「アフォーダンス」という概念。これはもう私はいろいろな機会に話してきましたので、いまさら出しにくいことですが、われわれがさまざまなものに接するとき、ものの形とか、大きさとか、重さも含めた物理的な特性がわれわれにある行為を誘発するということです。行為の誘発性ということがさまざまなものの形などにあるということ、これをもっと注目しなければいけない。最近D・A・ノーマンが『サイコロジ・オブ・エブリディ・シング』という本を出しましたが、これは日常のさまざまな、たとえば、こういうコップだとか、ドアのノブだとか、マイクとか、こういうようなものが、われわれになにか、ぱっと手が出るといいますかね、そういう無意識的な行為を誘発する特性、すなわち、アフォーダンス特性があって、それがうまく設計に取り込まれていないときとか、あるいは逆に間違ったアフォーダンスを触発するような形になってるとき、人間のエラーが生まれる。そういったものを全部拾い出していこうじゃないかというのがノーマンの最近の本の主張なのです。これもすべて一種の状況主義、あるいは生態学的視点というものの重視の動きの中に位置づくことです。

4番目は「アナログ」とか、「メンタル・モデル」と

いうことに挑戦し始めたことです。つまりいままでは言語を中心とした左脳の情報処理系、記号列の処理系ということが非常に重視されていたことに対して、「パターン」とか、頭の中でのモデル形成に注目しはじめました。しかも、そこで行われる推論というのは、計算で答えを出すというよりも、定性的な吟味が行われるのだというわけです。そういう定性的な吟味というものをもう少しきちんと実験心理学的にも押さえる必要があるんじゃないか、という動きが出てきました。それと同時にそういうようなものを表現する論理というのが必要だということで定性的推論が盛んになってきたわけですね。皆さま方情報処理の人たちは定性的推論といいますと、J・デクレアとかD・ボブローとか、そういう人たちの精密な定式化以後の研究をフォローされているようですが、われわれから見ると、あれはもともと非常にばかみたいな物理の実験の心理学的研究から始まってのですね。つまり簡単な電気回路の問題を普通の学生にやらせてみて、どんなふうなことを定性的に考えるだろうかとか、あるいは電気っていったいどんなものだと思うかということのアナログで考えさせるとか、そういう非常に素朴な、日常的でもあり、なにか明確な答えを出すというよりもどんなふうに思うかということについての実験的な研究をもとにして、それが頭の中で、やはりモデルがあるんだということを明らかにしていった上で、そういうようなものを頭の中で操作するということを情報処理的に記述するということで、非単調論理とか、定性的推論というような研究がAIの人たちとのインタラクションの中で生まれていったわけです。こういうわけで、この間とはにかく挑戦する、文脈的な情報処理に挑戦する、われわれは文脈の中で生きながら、さまざまな意味を作り出していこうとする、こういうようなことをなんとか研究していこうという方向が出てきたわけですね。これがノイマン型計算機の限界へ向かっていったのかどうかということは、少し結論を早め過ぎることはありますけれども、実際問題私の感じでは、そういう従来の計算機のアーキテクチャではやりにくそうな問題にあえて挑戦し始めると、実はがたがたと難問にぶつかり始めたことは確かです。できそうできないという問題がどんどん現れてきて、どうも従来のイメージでの、「人間とはいかなるコンピュータか」という問いをもう1回洗い直さなければならぬのではないかとということで現れたのが80年代後半の、いよいよ並列分散処理の時代ではないかと思われ

ます。ですから私の側からみると、かなり強引な見方かもしれませんが、並列分散処理の出現というのは、決して S-R 心理学、つまり単純なる刺激と反応の連合主義の復興ではない、これがまず言いたいことですね。つまりいままでのこうやってみてきましたようなさまざまな問題が、文脈処理というところ、あるいは頭の中でモデルを作り上げるんだというところ、つまりそういったところというのは、手続的な言語、手続的な知識表現というようなものが本質的に行き詰まりそうな課題ですね。本当にそれが原理的に行き詰まるのかどうかは別として、どうも折り合いがよくない。手続的な表現形式ではどうも折り合いのよくない問題というのが、そのメンタル・モデルだとか、あるいは文脈処理というところでどんどんと現れてきていたということが背後にあって、そういうことがなんかやはり新しいパラダイムを求めてきて、そこで現れてきたものであると考えたいわけです。ですから必ずしも神経回路網というところに、いきなり脳科学と突然結び付き始めたんだと考えるのではなくて、脳科学との結び付きは副作用だと言いたいわけですね。つまりもっと大事なことは、人間の情報処理における並列性と分散性に注目したということ。並列性というのは、たとえば逐次的に情報処理をしてるとはどうてい思えない。それは文脈ということ処理するときには当然起こってくることで、つまり逐次的に処理していったんでは文脈の処理はできないんですね。われわれはやはりさまざまな暫定的な処理をしながら、前後をみながらなん回も思い直しをしたり、さまざまな諸関係というものの情報処理をしてると考えざるを得ない。そういったものの並列性、それから一つの意味単位というものを固定して考えるんじゃないで、それがさまざまなところに分散して、その分散したものとの相互関係というものを絶えずモニタしているという、そういう構造で考えていかざるを得ないんだということがはっきりしてる。

それからもう一つ大事にしたいのは、「外界とのインタラクション」というものが重視されてきたということですね。いままでの計算機モデルの場合は、世界というのを最初にプログラマが組み込んでしまうわけですね。徹底的に組み込んでしまったあとは、その世界に組み込まれたいわばサイモン流に言うならば、時間空間の中を動かだけなんです。ところが従来のモデルに対して生態学的な研究だとか、さまざまなものとのことを考えますと、実はインタラクションしな

ら外界からの情報の取込みを絶えず行いながら、中で構造の作り直しを行うんだということですね。これは簡単なようで非常に難しいんですね。何が難しいかというと、「いつ目をあけるか」ということですね。つまり情報処理はみんな目をつぶって、ぼくがしゃべってるときによく目をつぶるって怒られるんですが、大体すべてが頭の中にあるのを吐き出すだけという感じになる。こういうのはいままでのモデルですね。だけどぼくもたまには目をあけるんですよ。皆さんがどんな雰囲気かなとチラチラッと目をあけてますし、それから目をつぶっててもなんとなく耳で聞いているんですね。呼吸を。こういうふうなことはやはりあるんですけれども、そういうことを人間がやっているんですけれども、いままでのモデル化の方向ですとともかく最初に全部設定して、その中で処理するということを大前提にしていますから、そこでフレーム問題なんて非常になんかややこしい問題が出てきて、それは解決不可能であるということ、いろいろ考えたりする方が出てくるわけです。しかしわれわれは常に外界をみながら生きてるわけですね。フレーム問題だって、これが落ちたらどうなるかなんてことまで、全部をすべて知識、外界の知識が分かっているなんて想定するから計算量がパンクするとか、爆発するというようなことをよく言うんですが、そうじゃなくて、ちょっと目をあけて、あきながらちょっと動かしてみても、ああそうかとかやって常にインタラクションしてるんだと思えばなんでもない。

ところがインタラクションをモデル化するときになにが問題になってくるかというと、接面ということが問題になるんですね。つまりいままで分かっていると想定している世界と、それが分かっていることになるということ、その外界というものと、それから内部で構成された世界とが、どこかで接してるわけですね。どこかで接してるというところが、どういうふうに表示しようというふうに、われわれはシステムを組んでいったらいいのかということが、実は非常に大きな問題になってくる。そこで、並列分散処理系を想定していくと、そういう問題が浮き彫りになってくるということを少しお話ししたいと思うんですね。

それが私の「インタフェース」観が浮かび上がってくる一つのきっかけにもなると思います。つまり外界とのインタラクションによって人間の情報処理が絶えず変更されてるということを考えますと、それじゃそのインタラクションがうまくいくというのは、どうい

うことなんだろうという研究に自然になっていくわけですね。そう考えますと私には神経レベルとか、認知レベルが相互に浸透性をもつ、つまり相互のインタラクションをもつこと、神経レベルの話と、認知レベルの話とがつながりをもってくるということが起こってくる。

なんでそんなことになってくるのかということをごく簡単に申しあげますと、大体並列分散処理アーキテクチャというのは、入力系と、潜在ユニットという中間段階があって、それから出力系がある。これがレベルに相互間に結び付き合って、抑制と興奮で相互に結び付き合っていると同時に、レベル間でも相互に結び付き合ってる。こういう構造をもっているわけですが、この並列分散処理を考えていくときの基本的な柱が三つあるように思うんです。それは、それぞれ神経回路網のレベルでも問題ではありますが、それだけじゃなくて認知レベルでもさまざまなところでこういうような三つの柱は関係してくると思います。

第1はバックプロパゲーションということですね。これは経験主義の復興のようなんですが、K・ポッパーが、「経験主義のパケツ理論」つまり、いろんな経験をわっと上からどんどん放り込んでいくと、下に知識というのがたまってくだろうと、いう考え方が—これは悪しき経験主義の悪い性質だったんですが—これを実は乗り越える一つのポイントとしてバックプロパゲーションというのがあると思います。これはボトムアップとトップダウンの両面性をもってる。つまりただ単に下から浮び上がってくるだけでなく、中間段階でできたものが、さらにまた下側に影響を及ぼしていくというサイクリックな構造をもっているという、そういうことによって経験というのが、いわゆる単に黒板に文字を書き込んでいくというかっこうで、人間の知識ができてくるものではなく、かなり積極的に方向付けができたり、仮説ができて上がったりするということも、相互に、上下がインタラクションをもつという構造の中で取り込んでいくということ、これが可能になった。

それから第2がセルフオーガナイズーションということです。自己組織化ということが注目されてきた。これはあとでちょっと説明しますが頭の中に、メンタル・モデルというものができてくることだともいえます。メンタル・モデルというのは外界事物の内面化ですね。外界のモデルが頭の中に作られていくということ、それが自然なフィードバック系の中

で、ある秩序というものを自然に作り出そうとしていく、そういう傾向があるということがみえてくるということですね。

それから第3は非言語系の情報処理、こういったようなものが取り込まれていって、必ずしも記号というかっこうで集約されていない段階での情報処理というのが明らかになっていったわけですね。

これらのことを整理してみますと、並列分散処理というのは、私の感じではあらゆるレベルで存在するんだということを申しあげたい。D・マーという人の三つの水準の分類というのは有名なので皆さまもご存じだと思いますが人間の情報処理のレベルとして、計算論的レベルとアルゴリズムのレベルとインプリメンテーションのレベルという三つのレベルがあるというわけです。その場合、計算論的レベルとマーが言っているのは、いわゆるフォーク・サイコロジのレベルなんですね。つまりわれわれの直感とか、普通の日常の中で行っている、われわれの心的機能、そのものをなるべく現象経験ということを重視しながら明確化していくということ、そういうようなレベルが計算論的レベルだということなんですね。それに対して、アルゴリズムのレベルというのは、それをきちんとした機能構造、ファンクショナルなアーキテクチャでもってきちんと表現していくということ、これがアルゴリズムのレベルであって、それからインプリメンテーション・レベルというのは、その機能構造を支える物理的生理学的な構造、こういったようなものを想定してるんだというふうに読み取れるわけですが、並列分散処理というのは、この三つのレベルのいずれでも存在してるんだということを考えていただきたい。そう考えないと心理学との仲よかった楽しいお付き合いがなくなって、なんか並列分散処理を研究する人は神経科学の人たちと一緒にインプリメンテーション・レベルの研究をやって、実験心理学はついでだというふうになっていくとちょっと困る。そんなものではない。どのレベルでも並列分散処理のパラダイムはちゃんと発展するし、存在してるということを申しあげたい。

計算論的レベルでの並列分散処理のパラダイムってなんだというと、これはやはりJ・J・ギブソンの心理学になると思います。

ギブソンのアフォーダンスという概念、これはさきほど紹介しましたノーマンの『サイコロジ・オブ・エブリディ・シング』という本がギブソンのアフォーダンスの概念を積極的に取り込んだ日常性の心理学を

代表していますが、つまり言語を介しないでわれわれが直感的にある形だとか機能をごく自然に感じるという心現象を明らかにしていくことです。あるいは外界の刺激に対してアクションが誘発されていく、そういうレベルの問題ということを考えてみたい。この場合、必ずしも、知覚とか、モータアクションのレベルのことだけではなくて、かなり認知・思考のレベルでも存在するというふうに考えたいわけで、それはあとでちょっと天秤の例を言いますが、かなり危い表現を言わせてもらいますと「オットット思考」というのがある。つまりつついっオットと考えてしまうということです。要するにわれわれが頭の中で、なんとなく誘い出されるがごとくある思考が誘発されていく。こういうことってあると思うんですね。そういうレベルの計算論的研究というのは、やはり実験心理学を支えにして、大いにやるべきだと。それに対して従来のニューウェルやサイモンの計算論的レベルの研究というと、対象を非常に慎重に吟味したり、論理に穴がないかなということを漏れなくサーチするような思考というのがあって、オットットなんて、そんなあわて者の思考なんていうのは、ほとんど研究されていなかった。しかしこれからは、「あわて者の思考」というのは非常に重要ではないかなというふうに思うわけですね。

アルゴリズム・レベルでの並列処理的な情報処理というのは、大規模なものでないかぎりには必ずしもコネクション・マシンで実現する必要は特にない。それを表現する計算機言語としては別に特殊な言語を使う必要はなく、フォートランでもリズプでもなんでもかまわない。あるいはプロダクション・システムでもかなりの程度は表現できるでしょう。しかしその発想は並列的である。あるいは分散的処理である。そしてバックプロパゲーションを考えていくとか、先ほど申しましたような、あるセルフオーガナイゼーション、全体の状況からパターンがわき上がってくるプロセスを表現するとか、そういうようなことはそれぞれの計算機言語でそれなりに実現していけることです。

それからインプリメンテーション・レベルではもちろんそれは神経回路網のモデル化ですね。視知覚や運動動作のほうの脳科学の知見としっかり結び付いたアーキテクチャというのを考えていかねばならないでしょう。そういう運動関係と認知とのつながりにおいては、まさに脳科学と認知科学の結び付きというのが非常に重視されてくるんじゃないかなと思います。

並列分散処理の考え方というのは、第1には認識と

いうことを流動的な状態とみなすわけです。絶えず自己組織化が行われているという状態なんだというふうに考える。それから第2に認識というのはパターンの構成だと。パターンというのは関係構造ですね。つまりいままでの考え方だととにかく処理というふうに言うと、もう手続になっちゃうんですね。情報の処理というステップにしたがった手続になっちゃうんですが、認識というのは、実は関係構造の抽出なんだというふうに考えてみてはどうだろうかということですね。

そして3番目として、並列分散処理が自己組織化を達成していくときに、言語系と非言語系のインタラクションが行われるということです。そして非言語系の取り込み方にアフォーダンスがあり、そしてその物理的な外界そのものに対するアクションとアフォーダンスとの関係がそこで成り立っている。言語系が神経回路網的な構成の中で、どんな役割を果たすかというのは1番難しい課題なんです。ある種のモニタリング機構をもってるんじゃないかというふうに考えられるわけです。

われわれが考えてるいまのような構造のエグザンプルとして、ものすごい単純な動きの認識を説明したいと思うんです。それは天秤です。天秤が加重をかけたらぶらんと動きますでしょう。この動いているのをなんとなく眺めているうちに「オットット思考」が始まる。つまり、おっ惜しいね、とか、ああダメか、とか、もうちょいもうちょい、ああうまくいった、とか、オットット思考が巧妙に働くわけですね。だけど物理学の原理自身は、モーメントとか言って、公式で表現すると、支点からの距離と重さを掛けたものだという式で表現される物理の法則はありますが、われわれはこういうものを知覚するときは、うまくいった、もうちょいかな、と、こんな感じの思考をするのであって、頭の中で「公式」にしたがって計算するわけじゃない。それはある原理を動きや変化の特徴として取り込んでいるんですね。

その原理の取込みがどういうふうにして行われるかというのをちょっと実験したわけです。天秤の動きをシミュレートするパソコンのゲームなんです。実験者が一方の側にいろいろな重りをぶら下げて、反対側にどんな重りをどこにぶら下げたらいいかなということいろいろな試みさせるわけです。そこに制約がありまして、学習者のほうでは1カ所に三つ以上の重りをぶら下げられませんという制約を与えるわけです。



「これでいいだろう」と判断したら、実行キーを押すと、画面上の天秤がまさしくリアルに揺れ動くわけです。学習者はその揺れ方を観察するわけです。その「ブーン」とゆれ動くさまをみて、学習者はオットットという感じで重りの調整の修正方向を知るわけです。

重りを調整して、もう一度実行キーを押すと、振れがちょっと少なくなる。ああもうちょっとこっちなという感じが生まれて、さらに微妙な調整をする。最後にはびたっと止まるわけですね。このくらいのことは小学校の2～3年でもすぐに学習してしまいます。小学校2～3年の子どもというと、普通は天秤の原理はまったく理解できないとされています。たとえば本当に単純な問題を出すと、支点からの距離と重りだけ、しかも1カ所に重りだけを付けたもの、そういう単純な天秤課題を出しますと、かえってできないんですね。これは小学校4年生か5年生ぐらいで、学校で習って初めてできるんですが、これは何回も間違っているわけですね。だから単純な問題ならば分かりやすいかという、かえってそうじゃなくて、ああいうふうに複雑にざらざらと嫌みたいに付いてるものの方がなんとなくいろんな微妙なことをその中でトライアルしながら、「オットット」という実感をつかむ。それでさまざまなことをトライアルしながら学習してしまうんですね。これはなんと小学校の低学年でも、大人とほとんど同じぐらいにできてしまうんですね。これをどう説明するかというのを、ぼくは非常に関心をもちまして、神経回路の専門の方と会っていろいろ話してるうちに、こういうモデルを作ればまあ、できそうということが分かってきたわけですね(図-2参照)。これ、専門用語では reinforcement learning とかいうパラダイムのようなですね。つまり外界に天秤があったとすると、最初のうちは、この  $\langle l \cdot w | c \rangle$  というのは制約(c)が与えられているときに、支点から

の距離( $l$ )と重さ( $w$ )とを適当に与えてみることで、最初のうちは、あてずっぽうに入力したものが、それが最初のうちは外界そのもののバランスの程度のフィードバックによって調整する行為者モデルのネットワークができてきます。自分はよかったんだとか、この重りの調整はだめだったとか、外界からの直接のフィードバックからのトライ・アンド・エラーでやるわけですね。そうすることによって天秤の調整行動としての  $\langle l \cdot w | c \rangle$  というのが正しいバランスの条件  $\langle L \cdot W | C \rangle$  に近付いていく。つまり  $\langle L \cdot W | C \rangle$  という正しいインタラクションになっていく。これはまったく、単なるめくらめっぽうやりながら分かっていくプロセスですね。ところがそれをやりながら、もう一つ頭の中でメンタル・モデルができるというわけですね。メンタル・モデルはなにをやってるかということ、外界をみながら、外界はどうなるのかなということについて、天秤の身になるわけですね。天秤さんの気持ちになってみたときに、天秤さん自身の挙動( $\Delta b$ )ということ学習していく。天秤の挙動のモデルというのが同時に頭の中に形成されていくわけですね。それは揺れ方( $\Delta b'$ )というものの全体の予測が正しい予測になっていくわけですね。それがもう一つのフィードバック系によって学習されていく。そうしますと、だんだんと外界モデルが頭の中でできてくるわけで、要するに自分でその自分自身の行為を学習できるわけですね。これはだめだろうとか、これはきっともうちょっとだめとか、惜しいだろうとか、いうことが自然に学習できるようになっていくという構造ですね。ここで大事だと思うのは、頭の中で自己参照が形成されてくるということ。そしてそれが自分自身で自分自身を、いわばもう一つの目でみるようになる。つまり心の中にもう一つの目ができて、他人の目だとか、他者の目だとか、あるいは他のものの目で自分をみる。そういうかっこうのことが内部で構成されていくシステムですね。これはもちろんコネクショニストの人たちにとってはごく常識的な、一番基礎的な現象だといえるでしょうが、私はこれを非常に重要なパラダイムと考えて、いろんな認知的な問題をこの構造であてはめていったらどうだろうかと考えているわけです。

そんなことを考えておりましたら、ついでの前シドニーであった国際心理学会総会にカーネギー・メロン大学の E・A・ジェンキンス、Jr. が発表してたんですけれども、まさにこの天秤の学習を並列分散処理モデルで表現して、認知の理論を作ってるんですね。こ

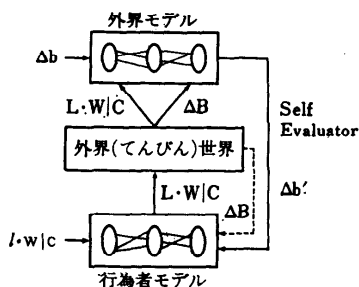


図-2 メンタルモデルの形成による「てんびん」の学習

れにはおどろきました。私たちは一つの実験での行動の変化を一生懸命考えてるときに、彼らはそれをもっと「発達」という観点から捉えて、人間の認知の発達の基本原理として並列分散処理モデルを考えている。そういう発達過程のモデル化ということが並列分散処理モデルで表現していこうということが行われているという事実には、正直いっておどろきました。

その考え方の概略はこういうことです(図-3 参照)。これも膨大なる実験的データをもとにして論じているのですが、最初は左右の加重だけに注目して、バックプロパゲーションをかけていく学習が進行していくわけです。つまり予測が外れるのは相互の重さが違うからだということで、左右の重さを同じにしていけば、すべてうまくいくんじゃないかというようなことに関心をもって、そのことだけにバックプロパゲーションをかけていく、そうしますとある段階まではいっても、それ以上はもう学習は進まなくなる。あとは何回試行を試みても全然向上しない。向上しないという情報をもとにして、今度はフィットと頭の中で発想を変えて、ひょっとするとやっぱり支点からの距離も関係あるかもしれないと思い始める。すると今度は支点からの距離だけにバックプロパゲーションをかけていく。そうすると支点からの距離だけで説明できるものは説明できる。しかしそれでもやっぱりある程度以上は、いくら試行を繰り返しても向上しない。つまり途中で、どうもそれだけでは不十分らしいということになってくる。ここまできた段階で、じゃ両方にバックプロパゲーションをかけてみたらどうだろうかということが思いつかれて、そして左右の加重と、支点からの距離の両方にバックプロパゲーションをかけていくと、ちゃんと天秤のバランスのさせ方の学習が成立する。そのところに規制するのが言語的符号化というものです。つまりそういうような、注意を付けたり、フィードバックのかかる系の向きを変えたり、その範囲を規定するのが言語だというわけです。言葉で聞い

て分かったということがいきなり生じるわけじゃない。別に言葉で聞いただけで本当に分かるわけじゃなくて、あれそういうふうなことも考えてみるとどうかな、と置いていろいろやってみると辻褄が合ってくる。この例の非常にすばらしいのは、最初のうちは、いくら支点からの距離と関係するような事例を示しても、本人が重りにしか注目していないので全然学習に貢献しないんですね。ところがまた、後に支点からの距離に注目するときは、加重関係の事例を示してもその意味が取り込めない。まったくそれは意味不明という感じでやり過ぎてはるわけですね。それが両方がたかまっていたときには、言葉によるルールというもの突然猛烈にきくわけですね。その前の段階では、言葉による符号化だとかアテンションをむげに変えようとしてもムダなのです。それがある段階にきたときに、「あそう言えば」というような思い当たるフシがすでに蓄積されているので、そのときにプロパゲーションの方向が変わる。その前の段階の自己組織化が、かなり上位まで進んでるために、なるほどということかこうで全体が結び付くという、こういうようなことが正しく発達のモデルだというわけですね。

そんなわけで私としましては、並列分散処理の問題というのを単なる神経回路の問題として考えるんじゃないで、そういうような一つのダイナミックな、さまざまな方向付けが言語系からコントロールを受けながら、ある種の自己組織化を達成していくときの認知モデルとしても考えられる。そういうようなところこそわれわれの「人間とはいかなるコンピュータか」への答えではないかと思うわけです。これはちょうど20年前の図-1に示したシステム構成とかなり違っているようにみえますけれども、本質的にはそんなに違ってない。つまり20年前には、特徴が抽出されていくプロセスを系列的に考えていた。しかし実際はそれが長期記憶の中での自己組織化というものを経緯してるんだとも考えられる。さらにそれが言語的な処理と、それから非言語的な処理とが、短期記憶あたりでインタラクションをもっていくんだというふうに考えるならば、この従来モデルと、その並列分散処理系というのは、そんなに大きくは変わっていないんだと。むしろそれをファンクショナル・アーキテクチャのレベルで考えるならば、やはり従来研究されてきたさまざまな実験心理学的な事実と並列分散処理系というのは、大いに結び付くのであって、必ずしも脳の神経細胞の機能とはレベルは異なっているけれども同じようなアー

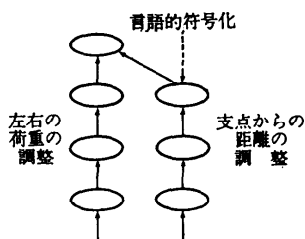


図-3 「てんびん」の認識の発達モデル

キテクチャを認知モデルとして考えていける。もちろん視知覚でのパターンの認識、それからモータアクション、こういったところは、脳科学のほうでの知見というものとは非常に大きな結び付きがある。しかし大脳の特に記憶ですね。短期記憶や長期記憶のインタラクションの部分。特に海馬のあたりのプロセスというふうになりますと非常に膨大な並列処理が行われてるだろうと思います。そこでの言語系と非言語系がどう結び付くかは、これはまったくいま分かっていないというのが現状だと思います。しかし、認知科学というのは、従来は言語系、あるいは記号系というのを中心に認知を考えてきたわけで、昔はその記号系だけ

に焦点を当ててたんですが、今度は言語系と非言語系とが、どういうふうにインタラクションするかがむしろ今後の最大の課題であり、そこにこそ実験心理学という非常に重要な手法が脈々として存在してるということをこの際強調しておきたいというふうに思いました。

いまのコネクショニズムのブームが、なにかちょっと片寄っている、あるいは片寄ったものとして誤解されてるんじゃないかという気がしましたので、お話をさせていただきました。どうもありがとうございました。