



人工脳の礎を築く

中村 清彦 研究室～知能システム科学専攻



中村 清彦 教授

知能のある機械を作りたい。中村先生の行う研究はこんな思いから始まっている。それを実現させるために中村先生は脳のメカニズムを利用しようとしている。脳内では多数の神経細胞が結合し、五感から得た情報を電気的信号として別の神経細胞に伝える。中村研究室ではこれらがどのように情報を処理するのかを解明し、脳の働きをモデルとして再現している。脳の各部位について作られたモデルを、脳の構造と同様に結合してできた機械は、脳と同じ機能を持つはずである。これが脳内メカニズムを再現した「人工脳」である。



思考の脳内メカニズム

中村研究室では、脳の機能を持つ機械を作るための研究を行っている。脳の機能を実現するメカニズムを調べ、それと同じように働く機械を作る。すなわち脳のモデルを作るのだ。脳の構造は非常に複雑であるため、中村先生は脳の機能を分割しそれぞれのモデルを作り、それらを組み合わせることで脳全体のモデルを作り上げることを目指している。

このとき分割される単位は、色の識別、顔の識別や記憶などで、これら一つ一つの脳の機能を中村先生は「知能」とよんでいる。それぞれの知能は、脳内の神経細胞がいくつも結合してできた特定の神経回路により実現されている。

数ある脳の機能の中で中村先生が最も注目しているのが「思考」であり、思考過程で働く神経回路のモデル化に取り組んでいる。思考に関する脳内メカニズムは解明されていないことが多い上に、思考という概念そのものが明確に定義されていない。そこで中村先生は、思考がどのように脳内で処理されるのかを定義することから始めた。中村先生は思考過程を「曖昧さの減少」として脳内で処理されるものであると捉えることにした。

ここからは中村先生の定義した思考がどのようなメカニズムによって脳内で処理されるのかを知るために、思考の具体的な例を見ていこう。

ここでは、友人の好きな料理を推論する過程を考える。友人を食事に招くことにしたが、友人がどんな料理を好きか分からず考える。考え始めた当初は見当が付かず漠然としているだろう。今、友人が「日本食が好きだ」と言っていたことを思い出す。このとき脳内では刺身や天ぷらやそばが好きである確率を上げる処理が行われる。一方で日本食から遠いイタリア料理が好きだという確率は下げられる。次に「生ものは苦手」であることを思い出し、刺身が好きである確率が脳内で大きく下げられほぼ0になる。それだけでなく、生ものと共通して冷たいという特徴を持つざるそばについては、好きである確率を少しだけ下げる。逆に温かい性質を持つ、そばや天ぷらの確率を少し上げる。それでも自分で考えているだけでは分からず友人にそれとなく尋ねるとする。このとき好きな料理ができるだけはっきりする質問を選ぶだろう。例えば「麺類は好き？」などが考えられる。このようにしてすべての料理に関して、好きまた

は好きではないが分かった時、友人がどんな料理を好きか思い描けたことになる。

以上のように思考過程は、脳内での曖昧さが減少していく過程として処理されていると中村先生は考えている。中村先生によるとこの思考過程で働いている2つの機構が、「汎化」と「曖昧さ最小化」である。「汎化」は、1つの料理が好きかどうか決まった時、他の料理についても類似度に従って好きである確率を更新する機構だ。上の例では生ものの確率を下げるのに伴って、生ものに近いざるそばの確率を少し下げ、生ものから遠い天ぷらの確率を少し上げた。また「曖昧さ最小化」は、麺類が好きか質問したように状況ができるだけはっきりする行動を選択する機構である。

「曖昧さの減少」である思考過程において、脳内では「曖昧さを計算する神経回路」が働いているはずだと中村先生は考えている。上の例ではそれぞれの料理と特徴について、好き嫌いがどの程度はっきりしないかを計算している。

この処理過程をモデル化するために、曖昧さを数値として表す必要があった。そこで中村先生は「情報エントロピー」という、情報科学で定義される曖昧さの尺度を導入した(図1)。これは確率の関数として与えられる。確率が0か1に近い時はその料理が好きであるか否かがほぼ確定しており、情報エントロピーは小さい。逆に確率が0.5の時、料理が好きか嫌いかという状況が最も曖昧になり情報エントロピーは最大値をとる。

情報エントロピーの値を使うと「情報量」を導くことができる。情報エントロピーが減る時その

減少分と同じ量の情報量を得る、という定義があるからである。つまり中村先生の定義によれば思考過程で情報量を得るといえる。友人の好きな料理を推論する例においては、友人が日本食が好きである、または生ものが苦手である思い出した時や、麺類が好きかと尋ねて友人から答えを聞いた時に情報量を得る。また思考過程では「曖昧さ最小化」の機構に従って、より大きな情報量を得られるであろう行動が選択されているという。

このように情報量を計算する神経回路は、思考過程における行動選択に直結するような重要な役割を果たす。そのため中村先生は、情報エントロピーを計算する神経回路より先に情報量を計算する神経回路のモデル化に取り組んだ。

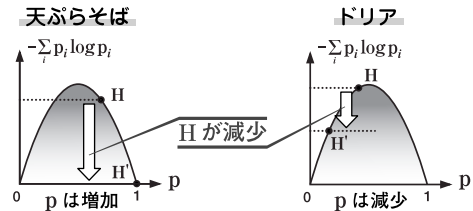
情報エントロピー H

$$H = -\sum_i p_i \log p_i$$

p_i が 0 (嫌い) か 1 (好き) に近い値をとると、 H は小さくなる。

例 あなたは麺類が好きですか? — はい、好きです。

→ 天ぷらそばが好き、ドリアは好きでない。



全ての料理について $-\sum p_i \log p_i$ の減少量(情報量)の期待値が最大になるような質問を行い、より効率良く好みの料理を決める。

図1 情報エントロピーと情報量



情報量を計算する神経細胞

思考過程で友人が日本食が好きだということを出した時、刺身を好きである確率が変化する。このように確率が変化した時脳内で変化後の確率が計算され、これが情報量を計算する神経回路の入力(電気的信号を受け取ること)になる。この変化前後の確率からそれぞれ変化前後の情報エントロピーが計算される。それらの差として計算された情報量が、情報量を計算する神経回路の出力(電気的信号を次の神経細胞に送ること)になるという。

その神経回路の末端にある神経細胞が、情報量

を示す出力をする。中村先生はこれを「情報量を計算する神経細胞」とよんでいる。中村先生は、情報量を計算する神経回路のモデル化に取り組む前にまず、「情報量を計算する神経細胞」が本当に脳内に存在するのかを、サルを用いた実験で確かめることにした。

まずは情報量を計算する神経回路が脳のどこにあるかを、神経解剖学や神経生理学のデータを集めて調べる。これらのデータから「情報量を計算する神経細胞」が大脳前頭葉という部位に存在すると推測された。

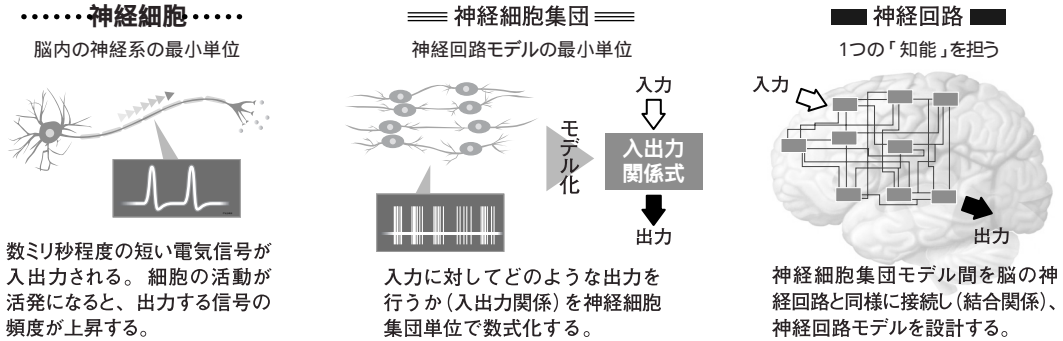


図2 神経回路モデル化

次にその神経細胞を探すために、情報量の計算が必要とされる行動課題をサルに与えた。このサルには予め、「情報量を計算する神経細胞」があると思われる位置に微小電極を挿入しており、その神経細胞の活動が調べられた。この実験での行動課題は、サルにできる程度簡単である必要がある。そのため行動課題を決めるには工夫を加えなければならない、この行動課題の選択は実験の重要なポイントとなった。

中村先生は行動課題をサルに与えて、それに対する出力を脳に挿入した微小電極から測った。すると得られた出力は予想されていた通り、情報量に比例する値であった。さらに微小電極を挿入した部分では、複数の神経細胞が情報量に比例する出力を示した。この結果から、この部分で情報量が計算されていることが分かり、「情報量を計算する神経細胞」の存在を証明することができたのである。

「情報量を計算する神経細胞」があるということが確認されたので、現在中村先生は、情報量を計算する神経回路のモデル化に取り組んでいる。

まずは神経解剖学や神経形態学のデータを用いて、この神経回路に含まれる神経細胞はどのような種類であり、それらがどのような並び方で結合しているかを調べた。

次に神経回路モデルを作成するのだが、一個一個についての神経細胞間の入出力関係の式を立てると、モデルが複雑になりすぎ手に負えなくなってしまう。そこで、複数種類、数百個の神経細胞からなる神経細胞集団というものを設定し、この細胞集団間をスパイクの集団が伝わっていくと捉えて、個々の細胞集団間の関係式を導く。細胞集

団は、モデル化したい知能をうまく再現できる程度の粗さに設定する。この細胞集団の設定の仕方がモデル化成功の鍵を握っていて、研究者としての腕の見せ所なのだ。中村先生は語っていた。細胞集団間の式は、細胞集団同士の結合関係と入出力関係についての2種類それぞれが立てられる(図2)。この数式の変数として用いられるのは、細胞集団中で発火する(電気的信号を発生させる)神経細胞の割合である。これらの数式を用いることで、神経回路全体の入出力関係式、つまり神経回路モデルを作り上げることができると考えられる。このような方法を用いて現在中村先生は、情報量を計算する神経回路のモデルを作成しているそうである。

この神経回路モデルが完成に到ったら、それが本物の脳と同じように働くかを、先程と同様の実験によって確認する。神経細胞を探すための実験では、末端の細胞集団の出力のみを測定したが、このとき行う実験では他の細胞集団についても出力を測定する。複数の細胞集団の出力を対応するモデルの細胞集団の出力と比べた方が、モデルの正確さがより詳細に確かめられるからだ。この実験で得た出力がモデルで予測されたものと一致した場合、そのモデルは脳の一部を再現しているといえることができる。

「情報量を計算する神経細胞」の発見により、中村先生の研究は思考のメカニズムの解明にまた一歩近付いたといえる。これから中村先生は、曖昧さの尺度である情報エントロピーを計算する神経回路のモデル化を行いたいと言っていた。そしてこのモデル化を行い、実証するために、このとき実験でサルに与える行動課題を考えている。

思考の考案者

脳はなぜ思考をできるのか。脳のように考える機械は作れるのか。中村先生の模索は学生時代に始まった。先生は博士論文*1の中で、質問の繰り返しによってユーザーの考えていることを理解するコンピューター・プログラムを作成し、思考のシミュレーションを試みた。この論文にはすでに「汎化」と「情報エントロピー最小化」の原理が取り入れられていた。

ここでは、「好きな料理を知る」過程を例にとり、博士論文で作られたモデルを説明しよう。

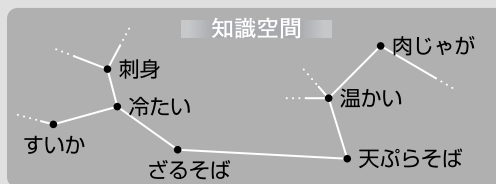
情報理論の空間から

「思考」にはまず、知識が必要である。知識でも、その内容がバラバラなものではいけない。「冷たい」という言葉から、できるだけ多くの言葉を連想してみよう。連想力に長けている人なら、近いイメージの言葉が浮かび、さらにそれと関連するものが次々に連想できるだろう。知識はつながりのあるものらしい。

先生のモデルでも同じである。コンピューターはあらゆる料理とその性質の知識を持つ（料理は「刺身」で、その性質は「冷たい」。つまり「刺身は冷たい」）。知識の一つ一つの要素は互いにリンクでつながって、全体で集合をなす（知識空間）。2つの知識要素をつなげるリンクが少ないほど互いに「近い」知識であり、類似点も多い。

コンピューターは知識空間を使って、ユーザーの好きな料理を突き止めようと、質問を繰り返していく。例えばコンピューターは「刺身は好きですか？」と質問をする。これに「いいえ」と答えた場合はどうなるだろうか。

知識空間を眺めてみると、「刺身」の周囲の「ユーザーが好きな料理である確率」が下がる。例えばざるそばの確率は減少する。逆に温かい料理の確率は上昇して1に近づく。何が好きで何が嫌いなのか、少しははっきりとした。



「刺身が嫌い」という情報

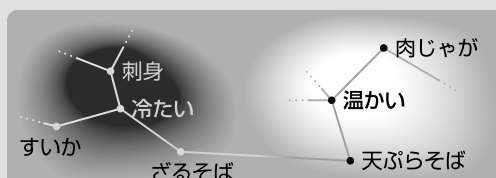


図3 知識空間上の思考

論文では、ユーザーの欲する化学薬品を知るプログラムが取り上げられている。

確率0を黒、1を白として図示すると、一様な知識空間にムラが見えるようになる(図3)。「汎化」と「情報エントロピー最小化」が起こっていることが分かるだろう。ここから、白黒がよりはっきり区別できるように情報を得ていけば、好きな料理を探し当てることができる。このモデルでは「思考」を、知識空間を最も効率よく塗り分けていく過程、と捉えるのである。

生物の脳へ

知識空間は数学的な便宜上設けられた抽象概念である。しかし中村先生は、実際の脳にも適用できる可能性があると考えた。例えば脳で扱う知識と知識の間には本当に距離があるのではないかと。「近い」知識間では神経細胞同士で信号が速く送られ、これによって素早い思考が可能になっているのではないだろうか。

「知識空間や情報量を用いたモデルはあくまで仮説だが、思考を適切に表現できているのではないかと、そう憶測している」と中村先生は話す。実際に1999年に確率、2003年には情報エントロピーを計算する神経細胞が発見され、*2,*3 2004年先生自身が情報量を計算する神経細胞を発見した。

「思考」は確実に、その神秘的なベールを脱ごうとしている。もしかすると思考は、思考が生み出した情報理論に素直なものなのかもしれない。

*1 K. Nakamura: Design of a Question-answering System for Database Interfaces Using Similarity Knowledge Bases (1983)

*2 M. L. Platt, P. W. Glimcher: Nature 400, 233 (1999)

*3 C. D. Fiorillo, P. N. Tobler, W. Schultz: Science 299, 1898 (2003)



ヒトより優れた知能を夢見て

情報量を扱う知能を実現する脳内メカニズムをモデルとして表現するために、情報学や人工知能の分野の学者たちが、知能の研究を始めてからおよそ20年経つ。これまでは、医者や生物学者、一部の心理学者が、脳に微小電極を挿入する実験を行っていた。しかし、人間の情報処理について蓄積を持つ情報学の立場から脳の機能を見る者は少なかった。こういった人々が仮説を立て、脳のメカニズムを調べると、新しい事実が分かってくると中村先生はいう。これから中村先生が取り組む曖昧さを計算する神経回路のモデル化でも、これまでの実験だけでは知ることのできなかつた、思考の脳内メカニズムに関する新たな発見が期待できるだろう。

情報量を計算する神経回路モデルの元となるのが、1983年の中村先生自身の博士論文だ。中村先生はこの論文において、思考過程で利用されるであろう機構のモデル化を行ったが、そのモデルは実際の脳の構造と関係付けられていなかった。今これに改良を加え脳に対応させることで、神経回路のモデル化ができると中村先生は考えている。

このように神経回路に対応するモデルを、いろいろな知能について作る。それらを脳内と同じようにつなぐと、脳の機能を持つ機械「人工脳」が実現できると中村先生は考えている。この「人工脳」を働かせるのに人工の素子を用いることで、電気的信号であるスパイク電位の伝播速度を大きくできる。現在の人工の素子のパルス(*注)は

数十メガヘルツだ。一方、大脳皮質の神経細胞が最も興奮している時でさえ、そのスパイク電位は約100ヘルツである。したがって人工の素子を使うことによって、脳の数十万倍の速さで人工脳を働かせることが可能になるはずである。

このような人工脳が実現されれば、それはヒトよりも賢く見えるだろう。また、人間からの指示の反復により学習をさせて、人間から指図されなくても要求を理解できるような人工脳を設計することが可能だ。これが実現されれば、人間の望むことを叶えてくれるような機械が将来現れるかもしれない。

中村先生は、「知能を持つ機械」である「人工脳」の実現に貢献したいと強く願っているという。中村先生は人工脳をピラミッドにたとえ、一つ一つの神経回路モデルをピラミッドの石で表現した。そして「自分はその石を1つか2つしか置けないかもしれないけど、その石が無かったらピラミッドは絶対にできない。僕はこれを楽しんでいる。神経回路のモデル化を続けていけば人工脳が実現する。自分の中でこう納得しているから」と楽しそうに語ってくれた。

ここ10年程の間、世界中で情報学者が脳科学の研究に携わってきたことで、脳の機能は数式(モデル)として表され理論化されつつある。このような傾向の中で、情報エントロピーや情報量に関する脳のメカニズムを、体系的に説明する人が現れる日も遠くないかもしれない。

今回中村先生の取材に伺い私が興味深く感じたことは、中村先生が未来の研究(人工脳作り)を夢見て、その貢献のために現在の研究(神経回路モデル化)を行っているということです。自分の研究は単に分かって嬉しい、作って嬉しいという研究とは違い、現在の脳科学の研究における発見が人工脳を作ることにつながると知っているから、分かることが嬉しいのだとおっしゃっていました。

中村先生の本当の夢である人工脳の実現は、まだ先のことであり、中村先生自身がそれを見ることはおそらくできないだろうとおっしゃっていました。それでも、ヒトよりも賢く見える人工脳が存在する未来の世界の話は、夢がありとても楽しかったです。

最後になりますが、4度にもわたる取材に親切に分かりやすく応じてくださった中村先生に御礼を申し上げます。(後藤 有加)

*注 極めて短時間だけ継続する電気信号の変化。