

# CREST 研究領域「脳を創る」追跡評価報告書

## 総合所見

「脳を創る」研究は、「構成論的手法」により脳の理解を進めるものであり、方法論の一つとして有効であり必要であることは当然である。本領域においてもこの方法論によって多大の成果を収めていることは疑いない。

しかしながら、本領域の研究が今後ますます進展していくためには、ここで「構成論的手法」をいまま少し厳密に見ることが役立つと考えられる。「脳を構成論的に研究する」とは、脳の一部または複数の機能を実現することができる「仕組」を理論的または実験的に作ることでありといわれている。研究ターゲットとしての機能が完全に定義できれば、それを実現する「仕組」を作るのは工学として分かり易い。

複雑系の代表である脳は「一部の機能」でさえ完全に分かることはない。まして人間の脳については観測がマクロなイメージングに頼らざるを得ないので、ターゲット機能を記述することは至難である。実験動物の実験から類推できるものはよいが、言語は人間特有の機能であるので、そうもいかない課題である。それにもかかわらず「研究対象の機能」を明確にしなければならないという困難な問題を抱えている。「構成論的脳研究」においては機能を完全には知れなくても「本質的と考えられる機能のサブセットとその条件」を研究者が決定しなければならない。それが「脳を創る研究」の大切な部分である。そして、それを満足する「仕掛け」を我々の知っているダイナミクスとハードウェアの中から工学的手法で「作る」のである。

このように考えると、当然のことであるが「研究企画」の中に研究対象とする「脳機能のサブセット」が明確に書かれていることと「研究成果」の中に「作った仕組み」がいかに「サブセット」を満たしているかが評価の対象となる。この2点がしっかりしていないと研究が工学的のみになったり、脳研究の重要な問題から外れてしまうこともありうるからである。

このような困難な問題を抱えながらも、本研究領域のすべての研究代表者の研究成果については、その研究の歴史の新しさを考えると CREST 期間終了後の研究展開においても極めて質の高いものであると評価できる。また、領域総括はこの領域に優秀な人材を集め、新しく困難な研究を総括されてきたことに深い敬意を表したい。

## 1. 研究成果の発展状況や活用状況

論文に関するデータから見ると CREST 期間後の論文数も多いし、その質も高いことが分かる。CREST 期間中より減少しているが、これも組織の問題、テーマの絞り込み、研究費による研究代表と研究チームの結びつきの変化など考えると当然であるが、研究代表者は全員が非常にアクティブで CREST 終了後も期間中の研究を継続・発展させ追跡評価としても高く評価できる。評価基準として「脳を創る」ことに集中するか、そこから派生または

発展したもので「脳を創る」ことから拡散した研究もあり、それはそれとして評価すべきか、どうかについては議論のあるところである。

各研究代表者のアクティビティは非常に高いことを評価した上で、総合所見に述べた「脳を創る」研究という側面から見た時の問題点を5名の研究代表者について指摘したい。

(合原氏) カオス CNN (カオスニューラルネットワーク) の機能解明とハードウェア実装に多くの成果を上げたことは高く評価できる。しかし、脳機能のどの現象、観測データがカオスなのか明確に示されていない。また、作製した「仕組」がどの「脳機能」を表現しているのか明示されていない。工学的な貢献の将来性は期待したいが、デジタル計算機に比して CNN がどのように優れているかを定量的に示されていない。これらの点を明らかにすれば更に説得力のある研究プロジェクトになるであろう。

(小柳氏) 研究対象である「機能サブセット」はすでに機能研究が進んでいる視覚情報処理領域の働きであり、明確に記されている。これを実現するための3次元 LSI チップを開発した工学成果は高く評価される。しかしこれで超並列計算機の結線問題と過熱問題が解決したとは言えず、うまく行っても  $N^3$  ではなく  $nN^2$  ( $n < 50$ ) のニューラルネットワークであるが、半導体技術の応用範囲は大きくその後のスーパーチップへ継続・発展している研究成果は高く評価される。

(酒井氏) 脳内に文法中枢を同定したことは高く評価される。しかし言語は人間特有の機能なので、ミクロな測定が行えず「機能サブセット」を決めることが困難な課題であり、鳥の歌学習との関連などを参考にして「脳を創る」ためのアプローチを模索してほしい。

(中村氏) ヒトの運動機能のサブセットを決め、ヒューマノイドロボットで実現した。

更にロボットが人間の行動を認識して自身の行動を生成する知能の構成にアプローチしている。「脳を創る」研究領域に合致した成果を挙げており高く評価できる。

(銅谷氏) 研究対象としての「機能サブセット」が明確に記述されていて、本研究において4種類の神経修飾物質の役割を明らかにし「機能サブセット」を満足する「仕組」を「創る」可能性が見えるようになった点高く評価できる。

## 2. 研究成果の科学技術的および社会・経済的な波及効果

### 2.1 科学技術の進歩への貢献

全ての研究代表者は CREST 期間後も多くの研究組織を立ち上げ、国内外の科学技術に与えつつある影響は大きく、研究人材の育成・強化にも貢献している。

合原の研究は、カオスから複雑系へと発展し、広範囲の応用可能性を有していることから科学技術への貢献は大である。デュアルコーディング仮説は大変意義深い。また多くの若手研究者の育成にも貢献した。

小柳は自己組織的にチップを重ね合わせるスーパーチップ技術を実現した。これは 3D-LSI の歩留まりを下げないために不可欠の技術であり、半導体技術への貢献が大である。また 10 層積層メモリ、38 層積層スーパーチップなど多くの世界初の 3D-LSI デバイスを開

発し、半導体基盤技術の進展に大きく貢献した。

酒井は言語学と脳科学を結びつけた「言語脳科学」という新しい分野を創出し、当該分野の研究のパイオニアと言える。脳内の文法中枢の位置を同定し、失文法の原因を解明した。また第二言語の学習の効果や適性を脳科学により定量的に計測することに成功した。さらに神経線維束の方向と太さを計測することにも成功した。これらの科学技術への貢献は大である。

中村は統計的情報処理により、言語を通じた人とロボットのコミュニケーションを可能とした。ロボットを動かすという出発点から発展し、人のモデル化と行動解析に利用するロボット研究の新しい潮流の先駆けとなり、このような動きが世界的に広がってきた。また多くの若手研究者の育成にも貢献した。

銅谷は、セロトニンの働きと強化学習の関係についての仮説を実験により検証した。このようにロボットで発見した課題に対して仮説を立てて実験し、モデルに基づいて脳信号の解析を行うというアプローチは、銅谷がパイオニア的に打ち出した新しいパラダイムであり、高く評価できる。また自己保存と自己複製を併せ持つサイバーロードメント群で強化学習の機構を進化させるという提案は秀逸である。銅谷の研究は、最近大きな注目を浴びている神経経済学や意思決定研究のさきがけでもある。

人材育成については、各課題から有為な人材を輩出しており、その人材を通して研究者ネットワークの形成がなされていると思われるが、しかし各課題間の人材交流については特別な記述はなく不明であり、脳科学と情報科学技術を融合し、異なる方法論と手法とを融合させるとの領域総括理念の観点からも今後の活発な交流が望まれる。

## 2.2 社会的・経済的な効果・波及効果

合原は複雑系数理モデル学の基礎理論を構築したが、数理的アプローチが分野横断性を持つことから、広範囲の製造業、電力、通信、交通などの複雑系への応用が可能であり、社会・経済的波及効果が期待される。

小柳の開発した技術により、日本発の技術が世界の技術をリードでき、世界の産業と社会に対して重要な役割を果たせそうな局面であり、実現を期待する。

酒井は毎日出版文化賞を受賞した「言語の脳科学」を執筆し、世の中の脳科学に対する理解を深めるのに大きく貢献した。また客観的データの裏付けがなかった語学教育の方法論及び、言語障害部位の診断やリハビリテーションに対し、言語脳科学という新しい分野を創出したことは、大きな社会的貢献が期待される。

中村の研究の延長上に、人とコミュニケーションができるヒューマノイドロボットがあり、これは少子高齢化社会における重要な基盤技術である。また筋肉の動きをリアルタイムで計算できるマジックミラーは、スポーツやリハビリテーションにおける画期的ツールとなることが期待できる。

ロボット集団を用いた銅谷の研究は、学習の仕方を自律的に進化させることが可能であ

ることを実証したものであり、多数のロボットが人と共存し、分散的に進化するという近未来社会での重要な基盤技術である。また精神疾患を学習系の暴走と捉える視点は本研究の提案であり、メンタルヘルスの重要性から今後の研究の広がりが期待される。

以上のように社会的価値や産業界に及ぼす影響、企業における実用化の展望もあり、経済的価値の創出のための基盤構築が行われたと考えられる。これらが直接的に「脳を創る」脳型情報処理システムの構築による社会・経済的な波及効果であるかという点に関しては今後を期待すべきである。

一般論としては、この効果を加速するためには、企業の参加とその支援機構を CREST 内に創り、研究会のときの討論に参加させる仕掛けを JST が作る方法は考えられるが、この領域研究は他の領域研究に比して非常に若いので、この点について急ぐのは良くないと考える。

### 3. その他

#### CREST のチームの構成の問題

研究代表者は、自分の研究チーム以外に数組の研究チームをもっている。それらの研究者は、関連してはいるが他のプロジェクトが主である場合も多い。したがって研究代表者の研究成果にはこれらもふくまれるので論文数は多くなるが、本研究領域の中には代表者の研究狙いがやや散漫になっている場合もある。上記の「実現したい機能サブセット」を代表者が明確に定義し、チームの分担が明確になっていない可能性がある。CREST 期間の終了とともに研究代表者の研究成果が減衰するのは、研究代表者以外のチームが実質上離れるからであると同時に代表者のもとに参加している研究チームの研究課題が広すぎることも原因と考える。

これらのことを考えると、研究代表者を増やし、その中のチーム人数を減らす必要がある。その上で研究代表者間での討論会の回数を多くして横断性を持たす方がよい。「さきがけ」に近いやり方になるが、研究テーマの絞り込みを強くしても CREST の特徴は出せると考える。