

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「人間と情報環境の共生インタラクション  
基盤技術の創出と展開」  
研究課題「脳領域／個体／集団間のインタラクシ  
ョン創発原理の解明と適用」

## 研究終了報告書

研究期間 2017年10月～2024年03月

研究代表者：津田 一郎  
(中部大学 創発学術院 教授)

## § 1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

全体目標は、①複雑な環境と相互作用し素早く機能分化することで環境に即時適応するエージェントの原理を数理的に解明し、②この原理を搭載したエージェントを数理モデルとして構築し、③それを実現する共生ロボットとして提案することであり個別医療へも展開することである。

この目標を達成するために、各グループでの研究に加えて、グループ間の共同研究を行ってきた。さらに、拘束条件による自己組織化の社会実装を念頭に塩見チームと開チームとの共同研究を行った。①は**基本原理(動的拘束条件下での変分原理)**を早めに確立してチームの指針とした。②は**進化型リザーコンピュター**(以下 **ERC** と略記)を一つの実効的なモデルとして提案し、また進化的、社会科学的な拘束条件としての新たな**集合知条件**を複数提案した。さらに、ERC の汎用能力、自律能力を高めるための新たな学習則として**相互情報量学習**の導入をはかった。さらに、リザーコンピュターの内部ネットワークを多数の小規模ネットワークモジュールからなるネットワークに置き換えることで、即時適応に適した長時間記憶容量と複雑時系列の高精度予測を達成した。これを **reBASICS** と名付けて当該エージェントモデルとした。このエージェントモデルは従来のリザーコンピュターの性能を格段に高めるブレイクスルーであり、ERC とともに③を実現するものとして提案する。

以上が概略であるが、以下、各グループの主な成果を略記する。

- (1) 拘束条件付き自己組織化理論を動的拘束条件下の変分問題と捉え、ディスカウント付き最適化問題として定式化し、拘束条件によって指定される最終状態に到達する初期値集合が有限測度で存在することを証明した(津田 G)。
- (2) ERC の汎用能力を高めるために、複数の ERC のインタラクション実験、ならびに相互情報量学習器を新たな学習則として追加する実験を行い、能力向上が期待できる結果を得た(津田 G)。
- (3) ERC で最適制御を実現するためのネットワーク構造の解明:スモールワールド構造とモジュール構造、並びにフィードバック回路を含んだフィードフォワード回路構造を発見した(河合 G, 津田 G)。
- (4) スパイクングニューラルネットにおいて興奮性/抑制性ニューロン結合のバランス(E/I バランス)の崩れ、特に抑制性の減弱がシステムの情報伝達能力を低下させるという結果を得た。これは自閉スペクトラム症(ASD)児の脳における E/I バランスの崩れによる機能低下を説明できる可能性を示すものである(河合 G-池田 G)。
- (5) RC, ERC の出力ニューロンの抑制性を低下させると予測能力が落ちることを発見し、ASD 児の能力との対比を考察した(河合 G-池田 G)。
- (6) リザーコンピュターの内部ネットワークを多数の小規模モジュールネットワークで構成することで、各モジュール出力を直交化させることができ、その結果として従来のリザーコンピュターを圧倒する画期的なリザーコンピュター **reBASICS** を構成した(河合 G-津田 G)。
- (7) **reBASICS** の優れた時系列パターン学習能力を利用して、ロボットの近似された逆運動学を補正した制御を行うことで、高精度な位置制御が可能になった。これにより、例えばロボットのリンクの長さや質量が変化したとしても **reBASICS** の学習により運動誤差が抑えられる。これは津田 G が提案した基本原理(動的拘束条件下の変分原理)の直接的実現である。このような身体(環境)の変化に対して即時適応するエージェントのアーキテクチャを提案できた(河合 G)。
- (8) 母子の絵本読み聞かせの時の脳活動は母親とのインタラクションが強いほど子どもの  $\alpha$  波の機能的結合が強化されることを、PLI(位相のずれの平均)を用いて明らかにした(池田 G)。
- (9) 親子を対象とした個体間インタラクション時の脳に共同意識が生まれるかを脳活動から読み取る方法の開発研究を開始した(池田 G-津田 G)。

- (10) ベニガオザルの一列隊列行動データから親近性のネットワーク構造を構築し、親近性によるグルーピングが群れ拡大に進化的に有利であることを明らかにした(松田 G-津田 G)。
- (11) テングザルの鼻の大きさと犬歯の大きさが負相関的な関係であることから、群れサイズ拡大に対しては性選択と自然選択がトレードオフの関係であることを明らかにした(松田 G)。
- (12) ニホンザル集団の閉鎖空間での行動に対して、各個体の位置を他の個体の位置データから深層ニューラルネットを使って決定し、個体間の関係性をグラフネットワークとして表示することで、集団を構成する個体、孤立する個体の動態が明らかになった(松田 G-河合 G)。
- (13) 罰則規定を導入すると、罰則を解除した後の協調行動は導入する前より低下することを明らかにした(亀田 G)。
- (14) 不確定環境を推定するとき、他者が協力的であれば右脳の TPJ が活性化され、協力的な他者の推定を参考にして推定する場合は右脳の TPJ と前頭葉の DMPFC が機能結合されることを fMRI 実験によって明らかにした(亀田 G)。
- (15) 社会における Moral Divide を生み出す心的・構造的要因に関して、計算社会科学の観点から、Twitter から収集した大規模な LGBT (性的少数者) 関連の投稿を分析し、ソーシャルメディアにおけるモラル分断の実態を言語使用および社会的ネットワークの両面から調査した(亀田 G)。
- (16) 規範形成の生物学的根拠の実験としてカラス集団の順位秩序と集団採餌の関係を調べ、一個体が他集団へ移動することで集団の関係ダイナミクスが変化するさまが明らかになった(亀田 G)。
- (17) 環境のルールに含まれるメタパラメーターの推定に伴う集合知が協調行動に有利に働く結果を得た(亀田 G)

環境に応じて機能分化し即時適応するエージェントの実現と創発インタラクションにより個体を超えたハイパーコンシャスの存在を明らかにすることを目標として、1年間研究機関を延長し、主に数理モデルの深化、ロボット実現、親子脳波ハイパー解析実施した。

**【数理モデルの深化】** これまで開発してきた進化したリザーバーコンピューター (ERC) と直交規定に基づくリザーバーコンピューター (reBASICS) を統合することを目的として、研究計画を立て実行中である。これを実現するための一つの方式として相互情報量を拘束条件としたモジュール分化のリザーバーダイナミクスを研究した。理論的基盤になる Donsker-Varadhan 表現は大偏差原理の定理であり、KL ダイバージェンスとも関係する。大偏差の指標であるエントロピー関数がある条件の下で KL ダイバージェンスで表されることが分かった。モジュール分化に関しては、さらに難易度の高いタスクを行い成功した。また、カオス力学系の族に関して一部のパラメーター値でのトランジェント軌道をリザーバーに学習させるだけでほとんどすべてのパラメーター値のアトラクターを予測(再現)する越分岐予測と命名したリザーバーの超拡張機能の機構に関する数学理論とシミュレーションを行った。

**【ロボット実現】** reBASICS を用いた適応的なロボット制御システムを開発し、空気圧駆動の上半身ヒューマノイドロボット Affetto のアームに実装し、その有効性を示した。与えられた参照(ターゲット)軌道に手先を追従させる課題において、不正確な逆運動学と制御器を仮定し、それにより生じる誤差を reBASICS が補正する。reBASICS は手先位置の誤差と制御器の生成するトルクを最小にするように学習し、その出力をシステムに加える。その結果、参照軌道との誤差が小さくなり、より正確な運動が可能になる。シミュレーションおよび実機ロボットによりその性能を評価した。また、reBASICS の計算量を減らし、かつ、その性能を向上させることに成功し、ロボット実装により適した学習器を提案した。

**【親子脳波ハイパー解析】** 親子における個体間インタラクションの結果生じるハイパーコンシャスは、インタラクションに伴って増強される仮想的な脳間同期や情報量によって定量化できると考えられる。まずは、ハイパースキャニング MEG システムを用いて取得した親子同時脳機能計測データ

を周波数解析し、関心周波数帯域の選定を行い、親子間インタラクションの有無による脳律動の違いはアルファ帯域(8-12Hz)を中心とした振幅変動に現れることを突き止めた。特に親の運動前野(上前頭溝後部)では子どもに対するフォロワー性と相関することから、運動前野を中心として社会性と関連の深い脳領域を選定し、脳活動の時系列データを作成した。これをもとに解析を行った。

## (2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

### 1. “拘束条件付き自己組織化理論の構築と機能分化への適用数理モデルの開発”

概要:

拘束条件付き自己組織化理論を構築し、動的拘束条件下での変分原理が可能な数学理論を構成した。この原理をリザバーコンピューター他のニューラルネットに適用し、ニューロンの機能分化、ニューロンモジュールの機能分化を実現した。特に、従来のリザバーコンピューターのメタパラメーターを進化的に変化させることで学習する進化型リザバーコンピューターを開発した。

### 2. “社会性動物の集合知生成を促す多様な進化的拘束条件の解明”

概要:

非ヒト霊長類を対象に、群れサイズ拡大という集合知がどのような拘束条件により生成したのかを研究した。その結果、性選択と自然選択の相互作用により生じる様々な生態学的要因のトレードオフが、集合知生成で重要となる個体間の連合や社会の重層化という社会関係における特殊な機能分化を促していることを明らかにした。本成果は、集合知を生み出す進化的拘束条件の共通原理解明にむけた世界で最初の精密な分析に基づいた研究成果である。

### 3. “多腕バンディッド(MAB)課題における集合知生成条件の研究”

概要:

MAB パラダイムを拡張し、資源分布が空間相関する環境(近傍で資源量が似通うガウス過程モデルによって生成された環境)における集合知の発生過程を行動実験により検討した。個人とペアの遂行を計算モデル(Gaussian Process regression and an Upper Confidence Bound policy model)により比較したところ、①ペアでは生成モデルの理解がセッションの進行につれて進み、②理解の程度はペア内で高い相関をもつことが分かった。個人とペアの違いは、計算モデルの4つの学習・決定パラメーターのうち、ガウス過程モデルの理解に関するパラメーターにおいてのみ認められた。この結果は、環境の生成モデルについての高次の集合知がインタラクションにより生まれた可能性を示している。

### 4. “相互情報量学習における大偏差原理の寄与”

概要:

相互情報量推定器の深層学習に用いられている表現は、ガウス分布の平均値からの大きなずれ(大偏差)の収束速度を表すエントロピー関数(レート関数)に一致することを証明した。これにより、相互情報量の推定器の深層学習がなぜうまくいくのかに関する数理構造を明らかにした。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

### 1. “reBASICS (reservoir of basal dynamics) による RNN 機能のブレークスルー”

概要:

典型的な RNN であるリザバーコンピューターに対して、内部ネットワークを多数の小規模モジュールネットワークで構成することで、既存の機能を革命的に更新することができた。例えば、短期記憶の大幅な長期化、複雑で予測不可能な時系列の学習と精度の良い予測が挙げられる。これにより、速やかに機能分化し環境に即時適応するエージェントのアルゴリズムを提

案することが可能になり、即時適応型ロボットへの搭載のめどが立った。

## 2. “reBASICS を用いた小脳モデルによるロボットの運動誤差修正”

概要:

reBASICS の優れた時系列パターン学習能力を利用して、ロボットの近似された逆運動学を補正した制御を行うことで、高精度な位置制御が可能になった。これにより、例えばロボットのリンクの長さや質量が変化したとしても reBASICS の学習により運動誤差が抑えられる。このような身体(環境)の変化に対して即時適応するエージェントのアーキテクチャを提案できた。

## 3. “医療の個人最適化に向けたバイオマーカーの創出と遠隔医療システムの提案”

概要:

ASD 者における small-world 性の変化・加齢の推定のための Dynamical Phase Synchronization 解析・アルツハイマー型認知症の推定のための位相マイクロステート解析など、疾患の特徴を効果的に描出するための解析法を提案した。高い時空間分解能を持つ MEG は基本原理の探求や詳細なプロファイリングのために活用し、家庭内のモニタリングのために EEG を用いる遠隔医療システムを提案した。

## 4. “reBASICS 駆動リザーバーコンピューティングの開発”

概要:

reBASICS のリードアウトを単純な線形和ではなく、一つのリザーバーにし、すなわち二層のリザーバーを構成することで、オリジナルの reBASICS の学習性能を飛躍的に超えられることを明らかにした。このような reBASICS に駆動された複雑なリザーバーダイナミクスにより、ターゲット軌道を学習できる。タイミング学習課題を用いて提案手法を評価し、提案手法はオリジナルの reBASICS の 2 倍以上の性能を達成することがわかった。

<代表的な論文>

1. Yuji Kawai, Jihoon Park, Ichiro Tsuda, and Minoru Asada, “Learning long-term motor timing/patterns on an orthogonal basis in random neural networks,” *Neural Networks*, in press, 2023.

概要:

reBASICS の発明を報告した論文である。リザーバーネットワークの内部を多数の小サイズのランダムニューラルネットワークにすることで、それらの活動を自励的かつ軌道安定にすることができ、さらに、それらの活動間に直交性があることを示した。それらの活動を用いてリザーバーコンピュータを構成することで、それがタイミング学習課題において従来手法の 20 倍以上の性能を示すことを明らかにした。さらに、ローレンツ系のようなカオス時系列を精度良く学習できることを示した。reBASICS はリザーバーコンピュータ分野におけるブレイクスルーである。

※1年追加支援期間中に出版された:*Neural Networks*, 163, (2023) 298-311.

2. Y. Yamaguchi and I. Tsuda, Functional differentiations in evolutionary reservoir computing networks, *Chaos*, **31**(2021) 013137-1-14.

概要:

ERC の発明を報告した論文である。動的な拘束条件下での変分原理に基づき、リザーバー内部のメタパラメーターを進化的に更新することで内部力学系を課題に応じた拘束条件を満たすように最適化することで学習機能を向上させた。ERC は ARMA-n などの典型的な課題に対して少数のニューロン数によって LSTM と同程度の学習能力を示し、また脳の機能分化に類似のニューロンやモジュールの機能分化能力を示した。さらにリザーバーネットワークの構成において、爬虫類から哺乳類への海馬の進化を彷彿とさせるランダムネットワークからフィードバック回路を含んだフィードフォワードネットワークへと進化したことは ERC が脳の生物進化レベルの機能分化に対する数理 AI モデルとしても画期的なものであることを示している。

3. Kameda, T., Toyokawa, W., & Tindale, R. S. Information aggregation and collective intelligence beyond the wisdom of crowds. *Nature Reviews Psychology*, **1**, (2022)343-357.

*Nature Reviews Psychology*

概要:

創刊号に、集合的意思決定に関する総説の寄稿(審査付き招待)を求められた。集合的意思決定とは、①集会・選挙のように決議や合意が要求される合意型意思決定と、②世論形成のように社会的な相互影響のもとで個人が行動する結果、全体としてのマクロなパターンが生まれる結合型意思決定の2つに分けることができる。この総説では、集合的意思決定はヒト特異的ではなく、霊長類、鳥類、社会性昆虫など、群れ生活を営む動物において広く認められる社会的プロセスであることを論じた。動物種の間で情報伝達の仕組みは異なるが(e.g., 言語, 音声, 動作, フェロモン), 集約を支えるメカニズム自体は、アルゴリズムの観点から見ると、驚くほど似通っている。この総説では、これらのアルゴリズムが集合知を生み出す必要条件・境界条件について論じた。

## §2 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

#### ① 「創発原理」グループ

研究代表者:津田 一郎(中部大学創発学術院 院長・教授)

研究項目

- ・拘束条件付き自己組織化の理論構築
- ・機能分化の数理モデル開発
- ・トポロジカルデータ解析

#### ② 「脳領域間・ロボット」グループ

主たる共同研究者:河合 祐司(大阪大学先導的学際研究機構 特任准教授)

研究項目

- ・脳領域間インタラクションモデルの構築
- ・精神疾患モデルへの拡張
- ・ヒト・ロボットインタラクションシステムの開発

#### ③ 「個体内／個体間」グループ

主たる共同研究者:池田 尊司(金沢大学子どものこころの発達研究センター 准教授)

研究項目

- ・MEGによる個体内脳機能解析
- ・ハイパースキャンMEGによる個体間脳機能解析
- ・触れ合いを伴うインタラクションの神経基盤

#### ④ 「個体間／集団間」グループ

研究代表者:松田 一希(中部大学創発学術院 准教授)

研究項目

- ・集合知発生条件の探索
- ・社会性発現の内部機構の探索
- ・運動パターン分節化に関する研究
- ・認知バイアスに関する研究

#### ④ 「集団内／集団間」グループ

主たる共同研究者:亀田 達也(東京大学大学院人文社会系研究科 教授)

研究項目

- ・規範形成の基礎メカニズムの解明

- ・集団での行動選択における同期・非同期プロセスの解明
- ・社会におけるMoral Divideを生み出す心的・生態学的・構造的要因の理解

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について  
(非公開)