

JNNS創立20周年記念優秀論文

実世界における脳の数理モデルの貢献^{*1}

— 情報工学・ロボット工学との融合を考える —

我 妻 広 明

理化学研究所 脳科学総合研究センター^{*2}

Toward a Reality of the Brain Theory — Integration with Information Technology and Realtime Robotics

Hiroaki Wagatsuma

RIKEN BSI^{*2}

この二十年に進展した科学技術を概観し、脳理論研究において掲げられてきた「脳を知り、脳を創る」課題の再考を試みる。特に、急速に発展しつつある IT やロボット工学との融合を通して脳科学の基盤技術創出を提案する。脳を細分化し研究対象にするだけでなく、脳機能の相補性、統合性を踏まえた認知/行動から神経可塑性に至る時間単位の複合性に正面から向かうことが求められている。ゆえに、脳を再構成して実空間実時間で実験解析を可能とする構成論的アプローチは自然な潮流であり、今後の工学的応用への具体的方策としても期待できる。その流れを確かなものにするため、既存の研究資産の共有と再利用を促進し、脳と身体をトータルデザインできる技術基盤の確立が急務である。脳科学の現代的な課題は、万能な自律知能システムを漠然と考えることではなく、日常に浸透する基盤技術、いわばユビキタス技術を創出し続けることである。そうして脳科学がより緊密に様々な技術分野に対して貢献していくことが我々の使命と考える。また脳の自律性や社会的適応性が身近な技術へ応用される過程で、人間の「自我」、「個性」、「自由意志」へと向かって脳の理解が進むことを夢としたい。

1. はじめに

1989年に創立された日本神経回路学会が本年20周年を迎え大変感慨深い。学生時分から毎年の研究を総括する場合は会の全国大会であり、発表に集まる研究者との議論を楽しみにまた励みにして来た。若輩の私が語るのは憚られるが、未来に向けた学会発展のベクトルを論じるにあたり自分自身の体験やいくつかの他分野の時系列と重ねて概観させていただきたい。

HopfieldモデルやBack Propagation学習法などを花形にして始まった第二次ニューロブームは1990年頃には研究者の機運の高まりとして、また社会一般の関心として現れた。科学・工学の一般誌にも「ニューロコンピューティング」の特集が数多く生まれ、科学技術革新の芽生えとして紹介されたと覚えている¹⁾。多大な期待は学問としての新規性や普遍性だけでなく、工学的再構成で「脳」という謎が解明されるのではないかという期待、新技術への希望があったと考えている。

当時、コンピュータ開発エンジニアであった私にとっては興味深いことに、90年前後にはコンピュータ開発現場やその市場でも大きな変化があった。80年後半から順調に売り上げを伸ばしていたパーソナルコンピュータは出荷台数が減衰し、市場は徐々に閉塞感に落ち入る。当時のパソコンは十分高価なもので、価格帯と利便性に釣り合う業務用途での需要が飽和したためである。メーカー各社はその事態を予期しており、突破口としてノートブック型パソコンの開発を急いだ。新たな市場を開拓するためである。幸いにもVLSI技術は米国に続き日本でも技術基盤が成熟しており小型パソコン開発を助けた。斯くして90年を越えると「ノートパソコン」の開発は成功し、各社競って出荷を始める。しかし開発に携わったエンジニアの気持ちで言えば、達成感とは裏腹に「これは単に小さくしただけではないのか」と疑問の種を残したことになる。予測可能な発展は、LSI高集積度による処理速度の向上とメモリ容量の飛躍的拡大であり、計算方式の変革ではなかった。一方、ソフトウェア分野では80年代から推論演繹可能なプログラム、いわゆる人工知能が「エキ

^{*1} 2009年7月2日受付, 9月14日受理

^{*2} 〒 351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

スパートシステム」を筆頭に商業的実用が試みられる。専門知識のノウハウや経験則を明示的に記述しデータベース化することで、起こりうる結果や現状分析が、人の代わりに計算できることが大きな利点であった。国内でも産官学の取組みとして「第5世代コンピュータ」開発が巨費を投じて推進された。米国製コンピュータの互換機製造に甘んじていた産業界からの強い期待もあったが、1992年に終結した同プロジェクトはその学問的評価とは別に様々な議論と批判がある²⁾。こうした背景もあり、従来から堅実な研究活動があったとはいえ、90年を越え「脳を知り、脳を創る」という神経回路網研究の試みはとてつなく、多くの研究者や技術者を惹き付けた。私も企業技術者を辞し脳型情報処理研究を目指して方向転換した一人である。

脳の神経回路とその機能的側面を明らかにしようとする神経回路網理論は従来から考察されてきた確率的特質、研究手法としての統計科学、学習理論としての普遍性や汎化性の探求へ進んだ。一方で、それらの理論が果たして生理的に妥当なのか、脳の多種多様な構造はむしろ単純化しないところに機能があるのではないかと、現実の脳（人）が個別的であるのは高次認知機能に未知の原理が潜んでいるのではないかと、など新たな問いを生み出す下地を作っていった。そして、この十年の理論脳科学はその問いに答えるべく、モデルを実験知見に照合しようとする、あるいは知見から生理学的に妥当なモデルを提案するという、実験脳科学に接近するベクトルを理論研究者に積極的に付与したように見える。

2. 実験脳科学から学ぶこと

脳科学の実験研究全般の成果を述べるのは私の知識不足と紙面の制限からここではご容赦頂き、むしろ方法論に注目したい。「脳を知りたい」という強い欲求は「我々自身が何者であるか」を知りたいという根源的な問いから来ている。それを科学で扱おうとする脳科学は古い歴史を持つが、医学、特に解剖学を基礎としてモノとしての脳を細密に調べることから始まったと理解している。脳の「機能」を調べる試みは、薬理を始めとする医学的な種々の方法論があるものの、実世界で他の存在と相互作用して存続するという情報処理の観点、そして数理的定式化を基礎とする理論脳科学の出現を切に必要とした。開放系として、情報の入出力の流れが絶え間なく維持され、我々の知能が形成される。その情報処理機能を中心課題に据え、取り組むのが理論脳科学であろう。そのために、細胞膜から、シナプス可塑性、脳の高次機能ネットワーク形成まで

様々なレベルの数値モデルが提案され、機能が議論され、生理学的知見と照合されてきた。

一方、その理論が指針とした実験脳科学において注目すべきことは、科学的発見の切望と方法論革新への飽くなき努力である。特に、この十年の *in vitro* から *in vivo* へ向かう潮流は見逃すことができない。神経可塑性の研究では、従来から脳切片を使った薬理、電気生理実験はよく知られているが、80年から技術的に安定してきた行動中の生体内細胞活動計測技術の進歩は顕著である。事実、ラット、サルの実験研究を超えて今やヒト（重度癲癇患者計測、パーキンソン病患者治療など）へと実用化してきている。また、近年の遺伝子研究と脳科学の接近も著しく、神経可塑性を脳の特定領域に限定して機能不全にするノックアウト技術や、深部脳組織の可視化を実現する多光子顕微鏡技術など、脳の定常的特質の探求から変化の富んだ非定常的特性の解明へ着実に向かっている。

いわば「静」の脳科学から「動」の脳科学への潮流は必然とはいうものの、多大な努力を要してきた。理論脳科学は果たしてその努力に応じて進化する能力を持つのだろうか。日々新たな実験知見を得る中で現象を説明するモデルを提案することに追われ、その先の何かを提示できるのであろうか。これが現在科せられた重要な課題であり、技術基盤を含めて再考が必要とされている事実である。

3. IT分野における「動」の技術

ここで視点を替えて、基礎科学が産業へ繋がった好例としてIT、特にインターネット技術について触れたい。国内では、電子メールの先駆けとしてJUNET (Japan University Network) が東京大学、慶應義塾大学、東京工業大学を結んだ実験ネットワークとして1984年に運用開始されたことは有名である。その後、多くの大学や企業の研究機関が参加し91年に実験ネットワークとしての役目を終えるが、TCP/IP方式の現在の標準のインターネットの日本での重要な礎を築く。World Wide Web (WWW) の提案書が欧州原子核研究機構 (CERN) の研究者によって、提出されたのが前年の90年である。そして米国立スーパーコンピュータ応用研究所 (NCSA) からMosaicと呼ばれる閲覧ソフトウェアによって、インターネット上でテキスト・画像が複合表示されることが可能となり、利用者を爆発的に増加させる。その起爆力はMosaic設計者がソースコードを無償公開し、改変を許したからと言われる。我々の日常業務あるいは生活において、電子メールやウェブ閲覧は今や欠かせない。ウェブブラウザが社会

一般へと浸透させた次の分岐点は、Google に代表される実用性の高いウェブ検索サービスである。従来の検索サービスが検索量と送受信即応性など技術開発に力が注がれていたことに対し、「どう役に立つ情報を集められるか」と利用者視点に立って設計を見直したからである。事実、世界中のウェブページは個々自由に改変され、その総量も内容も日々変化していく。刻々変化する状況に対応するための基本技術が提案され、可能な限り最新の情報をユーザに提供できるようにシステム構築された。情報を安定供給する技術以上に、変化に対応して情報を更新する機敏性、リアルタイム性に重心が置かれた。これが私の考える IT 分野の「動」の技術である。

理論脳科学が果たして「動」の側面を持っているかが、工学利用を含めた発展、産業界へのメッセージとして不可欠な要素と考えている。脳科学は総合学問領域であり、複雑な脳の細部にわたる研究が日々行われている。その活動を支える礎として、研究資産は埃を被った文献としてではなく、すぐに比較検討あるいは再利用できる生きた知識として存続するものでなくてはならない。

4. 時間というキーワード

4.1 時間性についての神経科学

私は大脳海馬の神経活動に注目し、動物が行動中にどのように記憶を形成し、集積された記憶は総体としてその個体にどういう情報を与えるのかについて、数理モデルを使って研究を進めてきた^{3,4)}。モデルはラット海馬で得られた電気生理実験の結果に基づき、環境中の行動の時系列を連想記憶回路の非対称結合の分布として記録する。それら体験の記憶は走行中の数分間で統合され、環境空間全体の認知地図を形成することを振動神経回路の立場から示した。特に行動中の空間認知の時間単位、つまり数秒単位で様々な場所に移動することと、神経可塑性が有効な数十ミリの時間幅とのギャップを埋めるためには、神経集団の協調によるリズム活動の出現とリズム中での個々の発火のタイミングが異なること、つまり発火位相が数十ミリ程度で整列する過程が重要であることがわかった。この情報処理様式を発火率コードと対比して、位相コードと呼んでいる⁵⁾。

大脳海馬はヒトでは意識的に想起できる個体（個人）の体験の記憶（エピソード記憶）を形成するために不可欠な神経回路として知られる。たった一度の体験が一生を左右することがあること、体験の蓄積が人格形成に大きな影響を与えることを考えれば、ヒトの記憶

が大量のサンプルデータを平均化し多数決するだけの機械とは考えにくい。実際、脳には多種の記憶回路と形式があることが神経科学の知見からわかっている。意識的に想起できる顕在記憶（explicit memory）と潜在記憶（implicit memory）とが大別されていることは、ヒト高次認知機能の観点から興味深い。前者には意味記憶やエピソード記憶が含まれ、後者には訓練や習慣性の記憶が含まれる。

私は海馬が動物脳切片において神経可塑性の電気生理実験が比較的容易であること以上に、将来的にヒトの高次認知を支える記憶、あるいは変化する状況に応じて知識を再編・応用する直感的知性の核心に迫りうる可能性に魅せられて研究を進めている。アルツハイマー病として知られる認知障害では、見当識障害から始まり、注意欠陥や空間失認へ進行し、やがては問題解決能力を広範に失っていく。脳内の変化としては早期に海馬において萎縮が見られることが知られている。このような病状を知るたび、長年培った運動能力、習慣性の記憶に遜色のない段階でも、自分が何者で今どういう立場か認知困難になっていくことが、知的な人間としての何かを喪失していく様子に胸が詰まる。

つまり、外部から「知能」として観測される現象も、顕在記憶回路や潜在記憶回路が協力し合うことで達成されている。多種の記憶回路が個々独立の機能を持ちながら、統合性を保持する不思議こそ今後脳科学で解明が期待される特性である。特にエピソード記憶において注目すべきことは、体験の記憶想起の時間表現の柔軟性である。我々は数十年間もの体験を、主要素を時系列に列挙することで短時間に思い出すことができる。このような時間表現の圧縮が高次認知における表象の一つとすれば、情報表現は過去の神経活動の忠実な再現ではなく、少なくとも時間について伸縮可能な形で、操作できることを意味し、またその表現が現実との乖離性を持っていることを示唆する。関連する実験研究では、ラットでは睡眠時に最大で二十倍速で記憶想起されることが報告されている⁶⁾。この時間の伸縮は何を意味するのか。我々が意識せずとも物を丁寧に運んだり、思索しながら自転車や車両を運転できたりするのは、外界変化に合わせてミリ秒単位で正確に調整する実時間を基軸とする潜在記憶の回路の存在による。一方で、柔軟とされる高次認知においては時間単位の基準は数秒程度との指摘もあり⁷⁾、時間表現の複合性と現実との密着性/乖離性の特性は今後解明が期待される。

ここ数年の意思決定の神経機構の研究進展も興味深い。特に前述の観点からは、前頭前野と海馬の連携を

示唆するラットの分岐迷路課題⁸⁾,サル前頭前野で観測された操作手順の先読みの前頭野活動⁹⁾がある。これらの報告は、状況に合わせて計画を立て、つまり事前に想像し、遂行するという知識の再編集と応用という直感的知性の神経基盤を意味している。また、即時的、状況依存の知能を解明するには、閉じられた実験環境で繰り返しデータを集積するという従来の手法では限界があるとして、サルの複数個体の社会性において実験を行う試みも野心的で目を離すことができない¹⁰⁾。

4.2 相補性と統合性についての神経科学

近年、身体機能補助あるいは認知機能支援につながる医療や基礎研究を目的として、機械装置と脳の接合が試みられている。思考実験に留まらず、今や神経の再組織化の適応性や信号解析の処理能力の向上で、BMI (Brain Machine Interface) と呼ばれる研究分野として急速に発展している。技術が先行する一方で、脳に接続された機械装置が単に入出力手段の末端として機能しているのか、高次認知や人格形成へ少なからず影響しているのかなど、根源的な問題はよくわかっていない。機械との接合で脳が総体としてどうなるのかは、今後脳科学が解くべき必須の課題である。機械接合が成功したかに見えて、本来の性質や機能が変質してしまっているかもしれない。そういった懐疑的視点も必要不可欠であろう。脳と機械の接合は器質性障害への革新的治療方法としての期待も十分にあるものの、個々の人間の精神を変性させる可能性も避けることができない。人工回路の挿入や慢性刺激付加によって精神的疾患を治療する方法は、脳本来の回路のいったい何を補完するのだろうか。

私にとって「機械と脳は接合可能か？」という問いかけは、これまで脳の回路を数理モデル化し計算機実験を繰り返してきたことが、果たして脳を再構成する、つまり人工脳を創出する試みであったか、という疑問から生まれた。数理モデルが果たして人工脳として機能するか確かめるためには、そのモデルが仮想世界から現実の世界へと接続される必要がある。刻々変化する環境における検証と実験、他者が活動する現実世界での機知、環境に動きかけうる主体とその変化など、身体性と高次認知機能を同時に議論するための研究基盤を構築するために、現在私はリアルタイム脳型ロボット研究を進めている¹¹⁾。脳というシステムを固定した箱に見立て入力 出力関係のみに終止するのではなく、内外の変化を伴うシステムにおいて恒常性を保つ機能性を見るということ、刻々変化する環境において制約を持つ上で、内部情報表現がどのように適応的であり得るのか、複合的要素を持つ脳の相補性と統合性につ

いて焦点を当てて行きたい。

従来の分析的手法を支援するもう一つのベクトルとしても、このように計算論を複合的に扱う構成論的アプローチを実環境、実時間で検証する方法論を改めて提案したい。システムの内外でどのような変位が現れ、どの程度の時間単位で整合性を持つようになるのかなど、統合性、恒常性、発展性を持つ情報の流入と流出について注目することは、期待されつつも形骸化しつつある「脳を創る」鋭意の再考として、また生体の動的特性を明示する試みとして展開すべき方法論であると思う。

5. ロボット工学、情報工学との融合

5.1 ASIMO の衝撃と脳科学の課題

さて数理モデルについては広く提案され、解析的あるいは計算論的十分に調べられるにも関わらず、なぜ「作って」検証することが必要なのだろうか。装置に実装するリスクに見合う成果が期待されるのだろうか。

私は、ホンダの開発した自律二足歩行ロボット ASIMO が公開されたときに衝撃を受けた。二足歩行についてはこれまで学術的研究も長く、関節や機構など各部分機能について、詳細に研究されていたと理解している。それらの理論はいつか統合され、実現に向かうとはいいつつも、既存の研究成果を接合するだけの仕事は独自性の点で評価はされにくく、統合化や実用的検証は先送りにされる。このような研究者としてのいわば「常識」は、企業エンジニアであった私には少々違和感がある。装置は現実に動き、耐久試験を経てこそ、実用に堪えるものと認識される。脳は均一系でなく、複雑系であることは既に述べた。脳内で異種の系が相互作用し総体として機能達成しているとするれば、どんな現象がそこから出てくるかは作ってみるまではわからないだろう。それは個別機能の足し算を超えたところの「機能」である。

脳の部分回路は個々のモデルで精査すれば回路特性をより厳密に検証可能である。しかし、実際の脳内で個々の特性がどの程度発現し、どの割合で機能するかは、他の回路との連携によって決定される。用意された人工的な入出力対では不明である。環境において、脳が全体機能としてどう反応するか、どういった時間応答が要求されるのか。私は一例として、視覚認識し物を掴むというロボットハンドの課題に取り組んでいる¹²⁾。自律型認知ロボットを作るためには、身体設計、感覚 運動入出力系、認知判断系とトータルデザインが必要となる¹³⁾。重要な基点はいくつかある。視覚認識モデルの学習はオンラインかオフラインか。身体の

適応性と学習による獲得性の境界をどこに置くか（許容時間の問題でもある）、把持に失敗したら再試行させるか（それは反射系の問題か、高次認知の問題か）など。一般の学習モデルでは、システムの目的とは独立に性能評価されるだろう。しかし、個々の回路に万能性を求めるのではなく、必要な特性に焦点を当てて問えるのが構成論的アプローチの意義である。脳は現実の知として、物体が視覚認知できなければ、触覚を頼ってそれを掴むかもしれない。そこで初めて機能要素間の相補性の問題が扱える。環境の変化に応答して、機能群が協働体制を再構成する過程や部分機能不全が他によって補完されることが観測されるなら、脳の統合性が真に議論できる。脳の数理モデルが現実に自律型ロボットに実装され、身体設計から認知判断系へとトータルで実験解析できることは、脳科学が博物学的知見の収集を超え、新たな研究展開するための大きな一歩と考える。実験の遺伝子ノックアウト技術でも、部分機能不全と全体機能との関係を明らかにしつつあるが、大量のノックアウト動物の生産と一様な実験環境で得られたデータで得た知見では限界がある。それを超える脳の真実を「脳を創る」工学的アプローチが明らかにすると考えている。環境と相互作用するリアリティと「情報生成」という観点から工学への橋渡しが具体化し、開発されたシステムが実際に運用可能であることを示す歩みとして、ASIMOの衝撃を脳科学の発展につなげて行きたい。

5.2 情報基盤整備による脳数理モデルの統合

では複雑系である脳の理論をどうやって統合的に実装できるのだろうか。脳の理論モデルは様々な分野で再利用可能となっているのだろうか。ITを活用することで研究資産を統合的に取り扱うことに成功した例はゲノムプロジェクトである。特に米国の主導で1990年に公式発足し2003年に完了したヒトゲノム計画は、集積された研究資産はコンソーシアムと呼ばれる組織を構成し、利害対立を超え共同研究として成果発表する枠組みもできた。

IT時代の脳科学展開として、神経科学の研究資産を集約し再利用可能とする枠組みとして国際ニューロインフォマティクス統合機構（INCF）が2005年に発足した。日本の拠点は神経情報基盤センター（NIJC）である¹⁴⁾。ゲノムプロジェクトとの大きな違いは研究資産の性質にある。データベース化しやすい塩基配列の組み合わせに対して、脳科学における実験データ、解析ツール、理論モデルは実験条件や記述様式も研究対象、目的によって多岐にわたり、単純にはデータベース資産として扱いにくい。NIJCでは、第一にデータベース

開発、データ間の連携、情報流通に関する技術の独自開発、第二にデータベース資産は著作権を保護しながらも再利用性、発展性を高めるCC（Creative Commons）ライセンス形式の採用、そして第三に共同研究を含め研究発展を支援する分野別のプラットフォーム委員会の組織化（以下PF委員会）を推進した。NIJCで開発されたXooNIPSと呼ばれるデータベース基盤システムは、インターネットを通して容易にデータ登録でき、多種の形式に合わせることができる。また採用されたCCライセンス形式は、基本ソフトウェアLinux、組版システムTeXでよく知られるGPLライセンスのようにオープンソースを厳密に維持するレベルから、より緩和したレベルまで選択が可能である。このような著作権保護を明確にしたデータ登録の枠組みは、日本が世界に先駆けて行ったと聞いている。今後の脳科学発展のために、脳の数理モデルも共有資産として広く利用されるよう我々が心の壁を取り払わなければならない。

現在、NIJCでは、各PF委員会によって、視覚神経系や無脊椎動物脳、小脳、統合脳、脳とロボット、ニューロイメージングなど研究成果を分野別に蓄積することが着実に進められている。残念ながらまだ再利用可能な脳の数理モデルは、統合的実験を行うためには十分でない。今後理論研究者には、自らのモデルを著作権者としての権利を保有しつつ、モデルの派生、改変を広く容認するという姿勢が求められている。

私は現在ダイナミックブレインPF委員会に所属しており¹⁵⁾、脳の動的特性に注目した研究資産蓄積に努めている。本PF委員会では、数理モデルの再利用性の向上のため、数理モデル用マークアップ言語insilicoMLで記述することも推奨している¹⁶⁾。従来の多岐にわたるモデルの記述方式と並行して、標準化の努力もまた今後の脳科学発展を支える力になる。脳の理論モデルが個々の回路記述に留まることなく、統合的に脳を再構成して実験が可能となるような、メタモデル記述、大規模回路化への展開が進むことを期待する。

6. 「脳を創る」再考 万能機械からコピキタス技術へ

本論では、「脳科学の夢と使命」を考える上で、実世界における脳の数理モデルの貢献としてIT・ロボット工学との融合を提案し、今後の脳科学発展に理論的研究が主軸としての役割を果たしていくことを述べた。

ITやロボット工学を取り込んだ基盤技術創出は必須である。分子、細胞、個体など生体には様々な階層性があるが、最終的に脳を知り、脳を創りたいと切に求めるものは、単なる自律知能システムではなく、我々

の持つ「自我」「個性」「自由意志」といったものがどこから来ているのかという究極の謎を解く努力にほかならない。人工知能問題では「フレーム問題」と呼ばれる複雑な状況での問題解決能力がしばしば議論となる。生物的（脳型）知能としてのフレーム問題の解決はどうだろうか。生存本能という一意的な解答ではなく、脳から次々のアイデアが創出される情報生成の過程を調べ、個性を持つ現実的な知能システムというものが見えてくることを期待したい。

脳を創るという試みは、現在米国ではNAEプロジェクト（US National Academy of Engineering 21st Century Grand Challenge to Reverse-Engineer the Brain）、EUではFP7の枠組み（Framework Programme for Cognitive Systems, Interaction and Robotics）でも取り組まれている¹⁷⁾。今日本ではどう進めるべきかが問われている。

日本では将棋プロ棋士を被験者として「熟練者の脳」を調べることも始まっている。脳の使い方、思考方法など「個の知」に注目する興味深い取り組みである。その場で瞬時に浮かぶ知恵は時間的制約と大きな関係があるようである。問題に内包された複雑性だけでなく、どう解くかという時間的/空間的スケールの内観が重要な鍵となる。そのような脳型知能を創ることができたならば、現実の社会において我々と共存し理解を共有し支援する技術が創出できると信じる。万能な機械を作るのではなく、日常に浸透する基盤技術、いわばユビキタス技術として脳科学が社会貢献する方向へ進展することを心から願って止まない。

謝辞

本研究遂行は、科学研究費補助金「空間性文脈認知の神経機構に基づくロボットの創発的行動決定の実験」（H19-21）の補助を受けた。脳型ロボット研究開発を支援して下さった山口陽子氏（理化学研究所脳科学総合研究センター）に謝意を表す。またニューロインフォマティクスについての重要な意義について教示して下さった臼井支朗氏（理化学研究所 BSI 神経情報基盤センター）に深謝します。

参考文献

- 1) 甘利俊一 (1987): 脳-並列原理の解明をめぐる。数理科学 (特集:ニューラル・ネット)。東京:サイエンス社
- 2) 村上国男, 内田俊一 (1985): 第五世代コンピュータ。相磯秀夫 (編) 国産コンピュータはこうして作られた, p225 - 240。東京: 共立出版
- 3) Wagatsuma, H., Yamaguchi, Y. (2004): Cognitive map formation through sequence encoding by theta phase precession. *Neural Computation*, Vol. 16 No. 12, pp. 2665 - 2697
- 4) Wagatsuma, H., Yamaguchi, Y. (2007): Neural dynamics of the cognitive map in the hippocampus, *Cognitive Neurodynamics*, Vol.1, No.2, pp.119-141
- 5) Yamaguchi, Y., Sato, N., Wagatsuma, H., Wu, Z., Molter, C., Aota, Y. (2007): A unified view of theta-phase coding in the entorhinal-hippocampal system, *Current Opinion in Neurobiology*, Vol.17, pp.1-8
- 6) 龍野正美 (2007): メモリーリプレイと記憶の固定化, *生物物理*, Vol.47, No.6, pp.368-377
- 7) Benjamin Libet (著), 下條信輔 (訳) (2005): *マインド・タイム 脳と意識の時間*。東京: 岩波書店
- 8) Jones, M.W., Wilson, M.A. (2005): Theta rhythms coordinate hippocampal-prefrontal interactions in a spatial memory task, *PLoS Biology*, Vol.3, No.12, pp.e402
- 9) Mushiake H, Saito N, Sakamoto K, Itoyama Y, Tanji J. (2006): Activity in the lateral prefrontal cortex reflects multiple steps of future events in action plans, *Neuron*, Vol.50, pp.631-641
- 10) 藤井直敬 (2009): つながる脳。東京: NTT 出版
- 11) Wagatsuma, H., Yamaguchi, Y. (2008): Context-dependent adaptive behavior generated in the theta phase coding network, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.4985, pp. 177-184
- 12) Wagatsuma, H. (2009): A noise-induced stability in the real-time robotic system for object handling, *Proceedings of the IEEE 8th International Conference on Development and Learning (ICDL 2009)*, No.49, pp.1-6
- 13) 我妻広明 (2009): 脳型ロボット開発における神経振動力学の応用, *ブレイン・パイオコミュニケーション研究会「ロボット制御・脳インタフェース技術の最新トピック」*, pp.1-11
- 14) 理化学研究所 BSI 神経情報基盤センター。[Online]. Available: <http://www.neuroinf.jp/>
- 15) ダイナミックブレイン PF 委員会。[Online]. Available: <http://platform.dynamicbrain.neuroinf.jp/>
- 16) グローバル COE 予測医学基盤。[Online]. Available: <http://www.mei.osaka-u.ac.jp/gCOE/>
- 17) Browne, W., Kawamura, K., Krichmar, J., Harwin, W., Wagatsuma, H. (2009): Cognitive robotics: new insights into robot and human intelligence by reverse engineering brain functions, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol.16, No.3, pp. 17-18