

令和元年5月24日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2014～2018

課題番号：26220004

研究課題名(和文) ヒト脳の形態形成から行動生成に至る発達のダイナミクス

研究課題名(英文) Developmental dynamics of human brain from pattern formation to generation of behaviors

研究代表者

多賀 徹太郎 (Taga, Gentaro)

東京大学・大学院教育学研究科(教育学部)・教授

研究者番号：00272477

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 153,100,000円

研究成果の概要(和文)：ヒトの脳の形態形成から行動生成に至る初期発達のダイナミクスの解明を目指した。胚子・胎児標本のMR顕微鏡画像、CT画像、連続組織切片画像等から、脳の三次元情報を抽出し、形態形成の基本的な現象を明らかにした。新生児期のfNIRS計測で、血液酸素化動態と脳の自発活動の発達を鋭敏に示す指標を発見した。乳児期のfNIRSや脳波の計測より、睡眠覚醒によって変化する機能的ネットワークや感覚処理の基本的性質を明らかにした。脳の自発活動の起源、皮質の折れ畳みと神経活動の共依存的発達、反応拡散系と神経回路網を包含する理論的枠組みを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

世界的にも貴重な胎児標本群を用い、脳構造の三次元情報を抽出することで、脳の初期の形態形成の基本的な理解に大きく寄与した。新生児・乳児のfNIRS計測を行い、自発活動に関連する新たな指標や現象の発見により、脳の生理学的発達、睡眠や知覚処理の発達の理解に貢献した。脳の構造や活動の発達機構のダイナミクスを理論的に理解するモデルを提案し、ヒトの脳の発達を理解するための理論的枠組みを提示し、これまで交流の少なかった研究領域を融合して新たな研究領域を開拓した。

研究成果の概要(英文)：We aimed to elucidate the dynamics of early development from morphogenesis of human brain to action generation. Three-dimensional information of the brain was extracted from MR microscopic images, CT images and serial tissue section images of embryos and fetal specimens to clarify basic phenomena of morphogenesis. We found an index named hPod that shows the development of blood oxygenation dynamics and the spontaneous activity of the brain in the fNIRS measurements of newborns and infants. fNIRS and EEG measurements with infants also revealed the basic properties of functional networks and sensory processing that change with sleep or awakening states. We proposed theoretical frameworks and models to understand the origin of spontaneous brain activity, co-dependent development of neural activity and cortical folding, and hybrid dynamics of reaction-diffusion systems and neural networks.

研究分野：発達脳科学

キーワード：生命情報 ダイナミクス 脳 発達 胚発生 乳児 fNIRS MRI

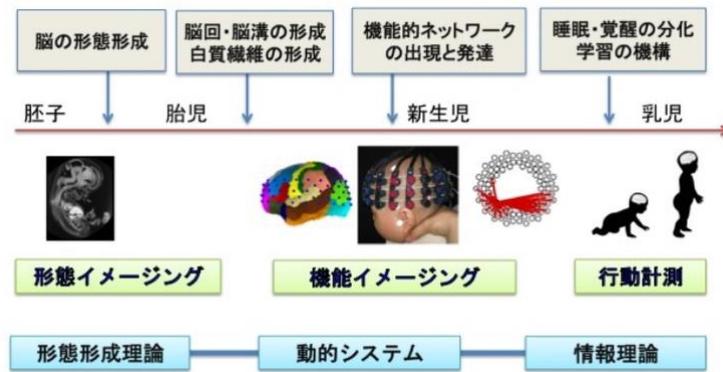
## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ヒトの脳の構造的及び機能的ネットワークの全体像が、イメージング研究によって捉えられるようになってきた。しかし、個体発生において、脳の複雑な形態やネットワークが構築され、機能が出現する現象の詳細とその原理については未解明な点が多い。特に、ヒトの胚子・胎児期の脳の形態形成から、新生児・乳児期の行動生成に至る初期発達のダイナミクスを明らかにすることは、極めて重要な課題である。

### 2. 研究の目的

本研究では、発達の諸段階での現象の解明、及び、それらのメカニズムを明らかにする理論の構築を目的とし、以下の4つの研究テーマを掲げる。(1)ヒトの胚子・胎児期における脳の構造的ネットワークに関する形態形成の機構の解明：胚子・胎児の標本を用いて、CT・MRI・DTI等の画像を取得する。特に、胚子期の脳の自発活動の場であるサブプレートと白質線維の形成の相関や、胎児期の皮質の折り畳みと白質線維形成の相互作用に焦点を当てる。(2)新生児期における脳の機能的発達の初期状態の解明：特に非侵襲脳機能計測手法であるNIRSを用いて、NICU(新生児集中治療室)等の周産期医療の現場における満期産児・早産児・病的児の脳の自発活動を計測する。機能的ネットワークの出現機構を明らかにする。(3)乳児期における行動の発現と環境への適応機構の解明：特に脳の機能的ネットワークの動的発達の観点から明らかにする。NIRSや脳波等の脳機能計測や行動計測を行い、発達期に特有の脳の自発活動と刺激誘発活動との相互作用や、睡眠と学習の関係性に焦点を当てる。(4)ヒトの脳のマクロな形態形成と機能的ネットワークの生成に関する包括的動力学モデルの構築と計算機シミュレーション：発生過程における形態形成の理論と、情報生成を担う神経回路網理論とを統合する新たな枠組みの構築を目指す。



### 3. 研究の方法

(1)ヒトの胚子・胎児期における脳の構造発達の仕組みを明らかにするため、京都大学附属先天異常標本解析センターの所有する世界的に貴重なヒト胎児標本群(京都コレクション)を用い、そのMR顕微鏡画像、位相CT画像、連続組織切片等を出発材料として、コンピュータ上で脳組織等の再構成と分析を行った。山田重人(研究分担者)らは、終脳・間脳・中脳・橋・小脳・延髄の6つの脳のエリアが発生初期からどのように分化するのかを明らかにするために、カーネギー発生段階(CS)の各段階で代表的な19標本を選出した上でエリアのセグメンテーションを試みた。また、脳の発達と関連すると考えられる頭蓋骨の発達を探るため、脳と接し複雑な構造を持つ中顔面に焦点を当て、ランドマークを用いた幾何学的形態測定法を導入した解析を行った。高桑徹也(研究分担者)らは、脳、感覚器(視覚器、聴覚器)、血管系の形態形成を発生段階ごとに三次元可視化、定量化を行った。脳ではMR顕微鏡(2.34T)で撮像された101個体、CS13-CS23のヒト胚子画像を用いて、脳実質と脳室の三次元立体化像を作成し、形態形成の観察と定量的な検討を加えるとともに大脳基底核、視床の半定量的解析を行った。大脳の層構造形成に重要なサブプレート層の形成についてCS21-23の連続組織切片を用いて、大脳半球における広がり立体化を行った。さらに、22標本、16~30週齢の胎児の大脳について、脳回形成過程を調べるため、2次元MRIスライスより脳回指数を求めた。小藪大輔(研究分担者)らは、脳に伴って頭蓋骨が発達する機構を明らかにするため、51標本、約13~30週齢のCT画像及びマイクロCT画像を用いて各骨要素の三次元再構成を行った。

(2)新生児期の脳の機能的な発達を明らかにするために、東京大学医学部附属病院の高橋尚人(研究分担者)らは、渡辺はま(本研究で雇用された専任研究者)や多賀巖太郎(研究代表者)らと、新生児集中治療室(NICU・GCU)在院中の児(満期産児・早産児・病的児)を対象として、多チャンネルfNIRS(10または43チャンネル)による脳の自発活動計測を行った。これまでに、229名の満期産児および早産児から、のべ343回のデータを取得し、脳組織中の酸素化・脱酸素化ヘモグロビン(oxy-Hb, deoxy-Hb)の変動の時系列より、機能的ネットワークや血流動態、代謝、神経活動のカップリングの発達を示す指標の開発と分析を行った。また、fNIRSの計測位置と脳構造の対応を明らかにするため、保前文高(研究分担者)らは、東京大学医学部附属病院で撮像された早産児20名のMRI構造画像を用いて、抽出された白質から灰白質を再構成し、頭表の特徴点と脳表の主要な脳回との相対的位置関係を調べた。

(3)乳児期の脳の機能的な発達の仕組みを明らかにするために、東京大学教育学研究科発達脳科学研究室において、多賀、渡辺、保前、佐治量哉(連携研究者)らは、生後2~12ヶ月の乳児を対象とした脳機能計測および行動研究を行なった。本研究開始時より、969名のボランティア

が、のべ 1020 回、研究へ参加した。計測手法としては、多チャンネル fNIRS (94 チャンネル)、脳波、筋電図、眼電図、心電図、呼吸、体温などの生体信号を単独あるいは組み合わせて計測した。fNIRS のデータに関しては、睡眠時の脳の自発活動、音声刺激提示時の活動等に焦点を当て、本研究開始時以前に取得したデータも含め解析を行った。特に、脳の刺激応答、自発活動における機能的結合、動的機能的結合、位相同期等の解析を行った。脳波に関しては、睡眠状態の判定に用いた他、周波数解析、脳波の特徴量抽出などの解析を行った。

(4) 胚子・胎児期から新生児・乳児期に至る脳の発達の機構を明らかにするため、動力学モデルを構築し計算機シミュレーションを行なった。脳の自発活動の起源を理解するために、多賀は、神経活動、血流、代謝の相互作用によって生じる時間的ダイナミクスに焦点を当てた 57 変数の微分方程式モデルを構築した。胚子・胎児期において、大脳皮質の神経活動と形態が共依存的に発達する理論構築を目的として、藤本仰一(研究分担者)らは、局面をもった空間上での神経活動の反応拡散系モデルと組織の成長と折り畳みに関わる連続体力学モデルの構築を行った。前者を胚子・胎児期の神経活動に支配的であると考えられているサブプレート層、後者を胎児期の大脳皮質における脳溝と脳回の形成のモデルとみなし、それらを統合した脳の発達理論を提案した。佐藤譲(研究分担者)は、非局所的結合を持つ興奮-抑制系である甘利神経場モデルを拡張し、胚子の脳から胎児の脳への発達を、連続的なパターンダイナミクスと離散的なネットワークダイナミクスのハイブリッド系によって理解する枠組みを提案した。研究進捗評価では、脳発達の数理的な理論研究について一層の成果が求められていたが、本研究で明らかにされた現象の背後の機構を明らかにするだけでなく、数理としても新しい研究領域を拓く可能性を目指した取り組みを行った。

#### 4. 研究成果

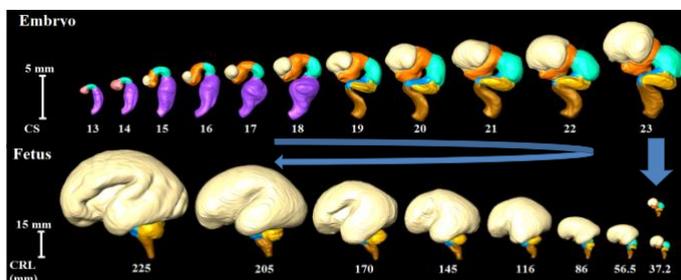
##### (1) 胚子・胎児期の脳の構造形成

ヒトの胚子・胎児の標本を MR 顕微鏡で撮像した画像より、発生段階ごとに 19 のヒト脳 3D モデルを作成した。カーネギー発生段階 (CS) 13, 14 で前脳、中脳、菱脳の 3 領域、CS15-18 では前脳が終脳と間脳に分かれ、中脳、菱脳と合わせた 4 領域、CS19 以降では菱脳を小脳・橋・延髄に分けることができ、終脳・間脳・中脳と合わせて 6 領域にセグメンテーションできた。また、CS と連続した形で、胎児の脳の 3D モデルを作成することができた (Yamaguchi et al. 2018)。顔面の骨形成については、従来から骨の成長中心であるとされていた鼻中隔、蝶形篩骨結合が、中顔面の前方への成長に深く関わっていることを初めて証明した (Katsube et al. 2019)。

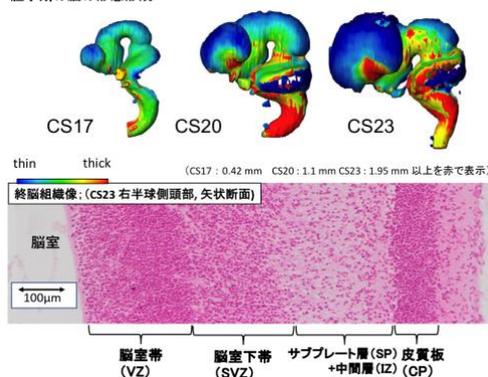
胚子の発生段階ごとに、脳実質と脳室の三次元立体化像を作成した結果、前脳、中脳、菱脳の実質、脳室の特徴的な変化が明らかになるとともに、CS16 以降には神経核などが発達し、脳の厚さが不均一になっていくことがわかった。(Shiraishi et al. 2015)。胚子期後期におけるサブプレート層等の終脳層構造の三次元再構成により、終脳層構造の発達は側頭部から徐々に広がるように進むこと、側頭部は皮質が最も厚く、それに伴い層構造の発達がよく観察されることがわかった(高桑ら)。また、胎児期の脳溝の発達を定量化した(Yoshida et al. 2017)。脳の血流にとって重要な Willis 輪の形成について、CS22, 23 で輪は完成するが、成人でみられるのと同様のばらつきが Pcom, Acom 領域にすでにみられた(Takakuwa 2018)。聴覚器では、耳小骨の形成、骨迷路が膜迷路を追うように形成され、鼓室形成へ進む形成過程が明らかにされた。視覚器では、胚子期末から胎児期において眼球の位置が脳頭蓋から顔面頭蓋に移動し位置が決まる過程を 3 次元的に追うことができた(Takakuwa 2018)。

胎児の頭蓋骨の発達の分析により、前頭骨、頭頂骨、側頭骨に対し、上後頭骨、下顎骨、蝶形骨の体積の成長速度は顕著に遅いことが判明した(小藪ら)。これは、胎児期においては神経頭蓋のサイズ成長が顔面頭蓋に対し優勢するという従来の理解を改訂する必要性を示すと同時に、脳成長のパターンを反映して脳に隣接する骨要素の成長が連動することを支持する結果である。

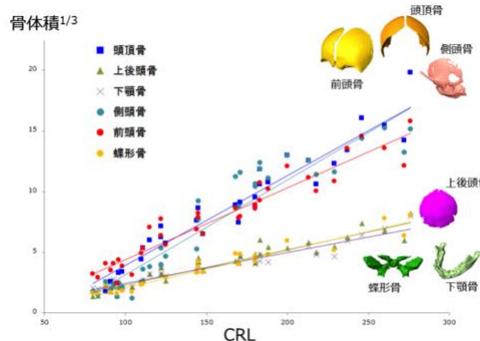
このように、世界的に貴重な胚子・胎児期の標



胚子期の脳の形態形成



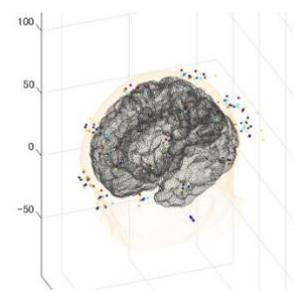
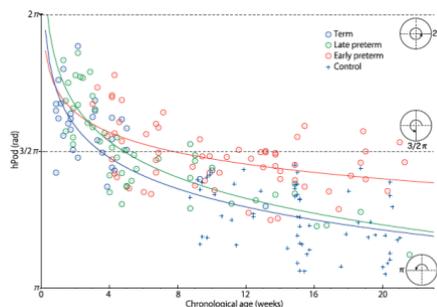
骨体積<sup>1/3</sup>



本から、脳および頭蓋等の構造発達に関わる三次元情報を抽出することで、脳の初期の形態形成の基本的な理解に大きく寄与した。一方、神経繊維のネットワークの発達を胚子期から画像として捉え、三次元再構成を行うことは、将来の課題として残っている。

### (2) 新生児期の脳の機能発達

脳血流と代謝は脳の形態形成と脳の活動生成を支える基盤である。脳の自発活動にともなう脳血流と酸素代謝は、乳児期初期に劇的に変化すると考えられる。そこで、NICUに在院中の満期産児・後期早産児・前期早産児、満期産児で在院歴のない2-6ヶ月児を対象とし、fNIRSによる脳の自発活動の計測を行った。oxy-Hbとdeoxy-Hbの自発的変動の位相差をhemoglobin Phase of oxygenation and deoxygenation (hPod)と名付け、個人ごとに値を求めた。在胎週数によらず生後hPodは同位相から逆位相の方向に急激に変化し、前期早産児では、生後2ヶ月以降のhPodの変化が緩やかであった(Watanabe et al. 2017)。動脈・毛細血管・静脈での異なる酸素動態を考慮したモデルにより、hPodの逆位相への変化は、酸素分圧のゆらぎ、ヘモグロビンの胎児型から成人型への変化、神経系のシナプス形成と関連した毛細血管の発達等を反映すると考えられた。

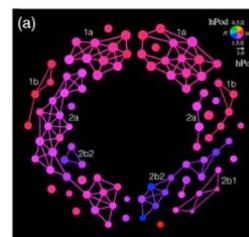


早産児において、fNIRSによる頭表の計測点とMRIから再構成された脳表の特徴点の対応付けが可能になった。成人と早産児の頭部の形状の違いにより、成人のモデルを用いた推定を早産児に適用すると、特徴点の対応に誤差が生じる可能性が明らかになった。

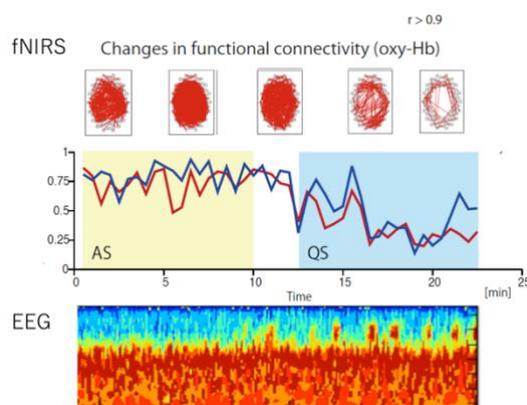
このように、神経活動、代謝、血流動態とそれらの相互作用が、生後急激に発達する現象を、脳組織中のヘモグロビン動態の新たな指標の導入により鋭敏に捉えられることに成功した。今後、在胎20週代で出生した超低体重出生児への本手法の導入が新たな課題として挙げられる。

### (3) 乳児期の脳の機能発達

安静睡眠時の新生児、3ヶ月児、6ヶ月児において、94チャンネルのfNIRSで計測した自発活動のデータを用いて、酸素化及び脱酸素化ヘモグロビンの変動の位相差を示すhPodに加え、位相同期の強度の指標を加えた分析を行った結果、脳領域に応じた違いのあることが明らかになった。特に前頭葉が他の領域と異なる発達を示すことは、領域に依存した機能発達の違いを示唆する(Taga et al. 2017)。



2-3ヶ月児において、昼寝の時、fNIRSと脳波・眼電の同時測定を行った。多くの児で入眠時に動睡眠から始まり、静睡眠に遷移すること、脳全体として自発活動における脳領域間の相関で定義される機能的結合の低下と位相同期性の低下を伴うこと、脳波の周波数特性の変化を伴うこと等が明らかになった(多賀と渡辺)。脳波は、動睡眠時に非同期的、静睡眠時に同期的な神経活動を反映していると考えられてきたが、20-30秒周期の時間スケールで変動する酸素化動態は、動睡眠時に脳全体で同期的、静睡眠時に非同期的という逆の性質を示すという新規な現象を発見した。また、脳波の解析から、連続性や紡錘波の出現頻度等が、この時期の睡眠ステートの遷移や個人差を特徴付けることが明らかになった(佐治ら)。



fNIRSで計測される睡眠時の自発活動と刺激誘発活動は、いずれも頭表組織よりも神経組織に由来することが、3ヶ月児のデータで明らかにされた(Funane et al. 2014)。さらに、睡眠安静時と音声提示時のfNIRS信号を比較し、前頭葉・側頭葉・頭頂葉の間で観測される基幹となる自発活動のネットワークが情報処理依存的に修飾される仕組みが示唆された(保前ら)。

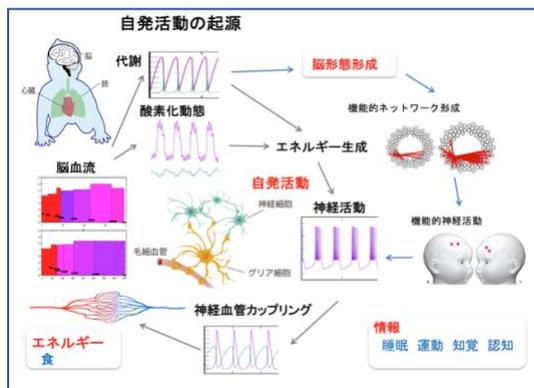
視覚刺激または聴覚刺激に対する応答が、覚醒・睡眠によって、あるいは、生後の月齢によって変わるかどうかを、生後2-10ヶ月児を対象とし、前頭葉、左右側頭葉、後頭葉それぞれ12チャンネルのfNIRS計測を行ったデータに対し、刺激応答、機能的結合、hPodの解析を行った。覚醒時には、聴覚刺激に対し、覚醒時には、左右側頭葉の局所的な応答が見られる一方、睡眠時には、前頭葉と後頭葉を含む脳の広い領域が応答した。視覚刺激に対し、覚醒時には後頭葉の局所的な応答が見られる一方、睡眠時には、月齢とともに、後頭葉の正の応答から負の応答へと変化した(Taga et al. 2018)。

このように、睡眠や覚醒のステートは、脳組織の酸素化動態や脳波の劇的に異なる時空間パターンによって生成され、刺激応答は、感覚モダリティの違いに応じて質的に異なる発達を示すことが明らかになった。本研究は、脳の機能的ネットワークや感覚処理の発達機構の基本的な理解に寄与した。当初の計画では、睡眠時の学習を課題として設定したが、睡眠ステート、

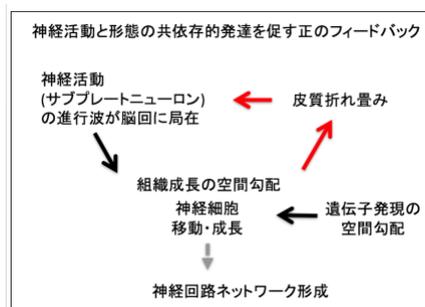
感覚モダリティーに応じた応答等が発達に伴って変化する複雑な現象に直面し、それらの解明を集中的に行った。本研究の成果は、今後、学習機構の解明の基礎となると期待される。

#### (4) 脳発達の理論

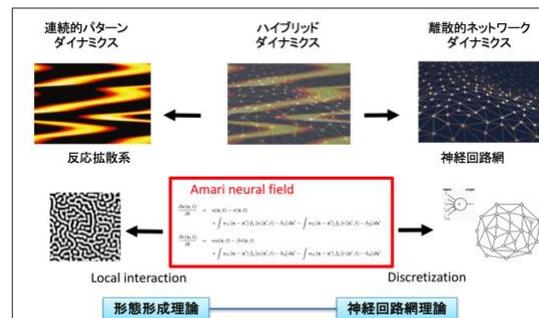
発達期における血流、エネルギー代謝の動態が、脳の自発活動と形態形成の両側面の拘束条件となる枠組みを構築した。特に、自発活動の起源を理解するために、その時間的な側面に焦点を当て、神経系の自発活動がエネルギー代謝に必要な酸素を供給する血管系のダイナミクスを調節する機構（神経血管カップリング）、血流や代謝が神経活動を変化させる機構を仮定し、モデルを構築し、計算機実験を行った。その結果、乳児の fNIRS 計測により大脳皮質で観察された hPod の基本的な特徴が再現された（多賀）。



大脳皮質の神経活動と形態が共依存的に発達する理論構築を目的として、それぞれの時空間動態の数理モデルを構築し、計算機実験を行った。胎児期の神経活動は、主にサブプレート層で自発的に生じ、空間的伝搬が示唆されている。そこで、皮質表面のような曲面の幾何学的性質が神経活動の進行波に与える影響を理論的に調べた。その結果、曲面形状に応じて興奮性の進行波の方向変化や分裂が誘起されること、進行方向が曲面の最短経路に従うことを明らかにした（藤本ら）。一方、胎児期に現れる大脳皮質折れ畳み形成には、場所特異的な遺伝子の発現と、神経細胞の増殖、分化、法線方向の移動などに伴う物理的性質が寄与していると考えられる。そこで、厚みのある組織の力学的変形を連続体力学に基づき新たに定式化した。計算機実験の結果、成長が活発な部位が回に、不活発な部位が溝となることが明らかになった（藤本ら）。これらを統合し、大脳皮質折れ畳みの幾何学形状が神経活動の空間的な伝搬方向をバイアスし、神経活動が皮質折れ畳みを駆動する成長を促進する正のフィードバック仮説を提案した。



胎児期の脳の発達を、連続的なパターンダイナミクスと離散的なネットワークダイナミクスが混在する系の発展として捉え、Turingの反応拡散系に始まる形態形成理論と McCulloch-Pitts のニューロンモデルに始まる神経回路網理論を橋渡しする理論を提案した（Sato et al. 2016）。



本研究では、これまでほとんど理論的な研究が行われてこなかったヒトの胎児期の脳の発達に関する多数の萌芽的なアイデアが生まれた。そして、解剖学や神経科学の専門家との密な議論を通じて、具体的な現象を理解するために有効であるモデルが提案された。ここで扱った課題は、今後、情報や数理研究の領域にも新たな展開をもたらすことが期待される。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 28 件）

- ① [Taga G](#), [Watanabe H](#), [Homaie F](#), 2018, Developmental changes in cortical sensory processing during wakefulness and sleep. *Neuroimage*, 178, 519–530, DOI: 10.1016/j.neuroimage.2018.05.075, 査読有
- ② [Taga G](#), [Watanabe H](#), [Homaie F](#), 2017, Spatial variation in the hemoglobin phase of oxygenation and deoxygenation (hPod) in the developing cortex of infants. *Neurophotonics*, 4(5), 11017, DOI: 10.1117/1.NPh.5.1.011017, 査読有
- ③ [Watanabe H](#), [Shitara Y](#), [Aoki Y](#), [Inoue T](#), [Tsuchida S](#), [Takahashi N](#), [Taga G](#), 2017, Hemoglobin phase of oxygenation and deoxygenation in early brain development measured using fNIRS. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* E1737–E1744, DOI:10.1073/pnas.1616866114, 査読有
- ④ [Sato Y](#), [Shimaoka D](#), [Fujimoto K](#), [Taga G](#), 2016, Neural field dynamics for growing brains. *Nonlinear Theory and Its Applications* 7, 226–233, DOI:10.1587/nolta.7.226, 査読有
- ⑤ [Funane T](#), [Homaie F](#), [Watanabe H](#), [Kiguchi M](#), [Taga G](#), 2014, Greater contribution of cerebral than extracerebral hemodynamics to near-infrared spectroscopy signals for functional activation and resting-state connectivity in infants. *Neurophotonics* 1, 025003, DOI: 10.3389/fnhum.2014.01022, 査読有

⑥ Katsube M, Yamada S, Yamaguchi Y, Takakuwa T, Yamamoto A, Imai H, Saito A, Shimizu A, Suzuki S, (in press), Critical growth processes for the midfacial morphogenesis in the early prenatal period. The Cleft Palate-Craniofacial Journal, DOI: 10.1177/1055665619827189, 査読有

⑦ Takakuwa T, 2018, 3D analysis of human embryos and fetuses using digitized datasets from the Kyoto Collection. Anat Rec, 4-301, 960-969, DOI:10.1002/ar.23784, 査読有

⑧ Yamaguchi Y, Miyazaki R, Kamatani M, Uwabe C, Makishima H, Nagai M, Katsube M, Yamamoto A, Imai H, Kose K, Togashi K, Yamada S, 2018, Three-dimensional models of the segmented human fetal brain generated by magnetic resonance imaging. Congenital Anomalies (Kyoto), 4(58), 48-55, DOI:10.1111/cga.1229, 査読有

⑨ Yoshida R, Yamada S, Takakuwa T, 2017, Dynamics of gyrification in the human cerebral cortex during development, Congenit Anom, 57 (1) 8-14, DOI:10.1111/cga.12179, 査読有

⑩ Shiraishi N, Katayama A, Nakashima T, Yamada S, Uwabe C, Kose K, Takakuwa T, 2015, Morphology and morphometry of the human embryonic brain. A three-dimensional analysis. Neuroimage 115 96-103, DOI:10.1016/j.neuroimage.2015.04.044, 査読有

[学会発表] (計 100 件)

① Taga G, Watanabe H, Saji R, Homae F, Transition of phase synchrony of fNIRS signals depending on sleep states in infants. fNIRS2018, 2018

② Horibe K, Hironaka K, Matsushita K, Fujimoto K, Restriction of cerebral cortical surface size by geometry-induced splitting of traveling wave front, 日本神経回路学会第 28 回大会 JNNS2018, 2018

③ Matsushita K, Horibe K, Kamamoto N, Hironaka K, Fujimoto K, Winkling simulation of differential growth of brain, 第 56 回生物物理学学会, 2018

④ Taga G, A dynamical systems model for neuro-glio-vascular system towards understanding human brain development, 45th Annual Meeting of the International Society on Oxygen Transport to Tissue, 2017

⑤ 多賀巖太郎, ヒト脳の形態と機能の発達, 第 17 回南部コロキウム, 2016  
[図書] (計 7 件)

① 多賀巖太郎, ミネルヴァ書房, ヒトの発達における自発性と主体性 ([発達 155 脳・身体からみる心の育ち]), 2018, 121(35-41).

② Nakano S, Makishima H, Yamada S, Intech Publisher, Congenital Anomalies in Human Embryo (Congenital Anomalies), 2017, 21-42  
[その他]

① 発達脳科学研究室のホームページ: <http://dbsl.p.u-tokyo.ac.jp>

② 2018 年 10 月に東京大学本郷キャンパスで Society for functional near-infrared spectroscopy の国際会議の大会長を務めた。世界 29 カ国から 450 名の参加者があった会議の様子を記した記事: Lisa Kobayashi Frisk, Gentaro Taga, & Turgut Durduran, Looking back at fNIRS 2018, Neurophotonics 6(2), 020401 (2019), doi: 10.1117/1.NPh.6.2.020401

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

山田 重人 (YAMADA, shigeto)	京都大学 医学研究科 教授	80432384
藤本 仰一 (FUJIMOTO, Koichi)	大阪大学 理学研究科 准教授	60334306
佐藤 譲 (SATO, yuzuru)	北海道大学 電子科学研究所 准教授	30342794
高橋 尚人 (TAKAHASHI, naoto)	東京大学 医学部附属病院 教授	50197159
高桑 徹也 (TAKAKUWA, tetsuya)	京都大学 医学研究科 教授	40244933
保前 文高 (HOMAE, fumitaka)	首都大学東京 人文科学研究科 准教授	20533417
小薮 大輔 (KOYABU, daisuke)	武蔵野美術大学 造形学部 准教授	60712510

### (2) 研究協力者

渡辺 はま (WATANABE, hama)	東京大学 教育学研究科 特任准教授	00512120
佐治 量哉 (SAJI, ryoya)	玉川大学 農学部 准教授	96453670

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。