

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23300218

研究課題名(和文) 知覚運動連関における脳の出力のコンシステンシー

研究課題名(英文) Consistency of human brain response in perception-action coupling

研究代表者

北城 圭一 (KITAJO, KEIICHI)

独立行政法人理化学研究所・脳科学総合研究センター・副チームリーダー

研究者番号：70302601

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,700,000円、(間接経費) 2,310,000円

研究成果の概要(和文)：同一ノイズ信号の入力の繰り返しにより駆動される非線形力学系の出力は、系の初期状態が違ってもある条件下では全く同一の出力となる。この現象はコンシステンシーと呼ばれている(Uchida et al. 2004)。大自由度の非線形力学系とみなせるヒトの脳の応答にコンシステンシーがあるかはわかっていなかった。そこで我々はノイジーな視覚刺激時の脳波応答はコンシステンシーの特性をもっている実験的証拠を示した。脳の神経情報処理においてコンシステンシーの特性が機能的意義を果たしていると推測される。

研究成果の概要(英文)：Consistency is defined as the reproducibility of response outputs in a nonlinear dynamical system driven repeatedly by an identical noisy input signal, starting from different initial conditions of the system (Uchida et al. 2004). It is not known whether the human brain, which is a high-dimensional nonlinear dynamical system, shows the characteristics of consistency. We therefore demonstrate the first evidence that brain responses to noisy visual inputs, measured by electroencephalography, show the characteristics of consistency. We speculate that the consistency of brain responses plays a functional role in information processing in the human brain.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学 身体教育学

キーワード：脳 神経情報処理 コンシステンシー ノイズ ゆらぎ 脳波 力学系 非線形

1. 研究開始当初の背景

知覚運動連関は脳という大自由度の非線形力学系に外部環境からの多次元の入力があったときに、多次元の運動出力をする過程と考えることができる。多くの場合、同一の入力に対しては同一の最適、機能的な出力をすることができ、多義的、不完全、ノイズにみえる環境下においても生物は感覚情報入力に基づいてロバストで機能的な情報処理を行うことができる。

ところで、一つの非線形力学系に同一の不規則な信号を繰り返し入力したときに、ある条件の下で、出力が過渡的な期間の後に全く同一の時系列パターンを示す現象が近年注目を浴びている。この現象はコンシステンシー (consistency, 一貫性) と呼ばれている。また、系の初期状態が異なる場合や、系の内部にノイズが存在する場合でも観察される現象である。カオス系の場合は初期値鋭敏性があるので同一入力に対する応答は一般には同一にはならないと考えられていたが、過渡的な応答の後にまったく同じ時系列パターンを出力することになり、この点が直感に反している。

Uchidaら (Uchida et al. 2004) はレーザー、カオス力学系等の物理系におけるコンシステンシーを報告している。生物系においても脳、神経系は非線形力学系としてモデル化でき、コンシステンシーが観察されることが予想される。事実、Mainen らは大脳皮質の単一神経細胞にゆらぎのある不規則な同一パターンの電流を入力したときに再現性のある発火パターンが得られることを報告している (Mainen and Sejnowski, 1995)。また、定常電流入力では再現性はみられないことから、ゆらぎ、ノイズ入力からコンシステンシーを得るために本質的に重要であると考えられる。一方、質的に異なる系に対しては同一入力を与えても異なる出力を示すことから、コンシステンシーの概念は系の長時間に渡る非定常的な変化や複数の系の同一性を検証する方法をも与える。

生物の神経系はコンシステンシーを利用した機能的な情報処理を行っていることが予想されるが脳波等の集合電位として計測した神経集団の活動や、運動出力、知覚状態等の時系列でコンシステンシーがみられるかどうかはこれまで報告がない。これはヒトの脳のような大自由度系では神経活動や運動応答は常にゆらいであり、入力に対して一貫した反応は必ずしも得られないであろうという経験的判断に基づくであろう

ところが、最近、ヒトでの両眼視野競争課題を用いた fMRI 実験で脳の応答の空間パターンが意識に登る試行の場合には登らない試行に比べて、試行間をまたいで強いコンシステンシーを示すことが報告された (Schulger et al. 2010)。彼らはこの脳の応答のコンシステンシーは信号/ノイズ比では説明できないとしている。また、同一の映

画を繰り返しみているときのまばたきのタイミングに再現性、同期性があることも示されている (Nakano et al. 2009)。これらの知見から知覚、運動等の高次機能においても神経集団レベルでマクロなコンシステンシーが働いており、機能的な脳情報処理に利用されている可能性が考えられる

かりにコンシステンシーが脳ダイナミクスで働いていることがわかれば、脳神経系の情報処理における自由度縮約やロバストな情報処理のメカニズムの解明につながる。これは運動制御における冗長自由度の制限と制御をどのように実現しているかという問題 (ベルンシュタイン問題)、さらには知覚情報処理においてどのように空間的に分散したモジュールで処理された情報をコヒーレントな意識として統合するかというバインディング問題等の解明につながり、身体教育学的、神経科学的観点からも重要である。一方、文脈に応じて、型どおりではなく適応的、文脈依存的な情報処理を行うことができるのも脳情報処理の特性の一つである。例えば、現在、10秒後、1時間後、3時間後等のどの時間スケールでコンシステンシーが観察されるかは興味深い。脳のマクロな同一性や文脈依存性をコンシステンシーの観点から理解することにより、自己意識、記憶等についての理解も深まる可能性がある。このような観点からの脳機能に対するアプローチは極めて新規である。

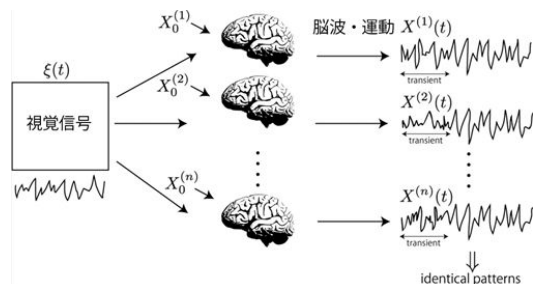


図1 脳のコンシステンシー

繰り返し同一のノイズ視覚信号  $\xi(t)$  を脳に繰り返し入力した時の脳波、運動応答を計測する。異なる初期状態  $X_0^{(m)}$  からスタートしても過渡的な応答の後に出力時系列  $X^{(m)}(t)$  が全く同一になるコンシステンシーがみられるかどうかを計測、解析する。

2. 研究の目的

そこで本研究では、不規則な視覚信号の繰り返し入力に対して脳の応答出力のコンシステンシーを計測、解析する。具体的にはノイズな視覚信号入力時の脳波応答を計測、解析し、脳波信号にコンシステンシーがみられるかを検証し (図1) その機能的意義を解明することを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) ヒト脳波実験

複数のヒト被験者において心理物理脳波実験を行った。不規則な視覚的なノイズ信号に対するヒトの脳波の計測解析を行い、同一実現値のノイズ入力に対して脳波にコンシステンシーがみられるかどうかを検証した。脳波は63chで計測した。

チェッカーボード輝度がガウシアンホワイトノイズあるいはピンクノイズ用に変化する8秒間の視覚刺激をコンピュータディスプレイ上に提示した。ノイズ実現値は2種類用意し、同一ノイズ実現値、ノイズ強度では10回の脳波計測を行った。ノイズ強度は正規分布で5段階とした。

#### 脳波位相時系列解析

脳波時系列に周波数帯域フィルタをかけ、ヒルベルト変換を用いた解析信号化によって瞬時位相信号及び瞬時振幅信号を抽出した。これにより、10試行の同一実現値の視覚ノイズ入力時の位相信号の時系列について試行をまたいだ位相時系列のコンシステンシーを位相同期指標 Phase Locking Factor (PLF)を用いて評価した

#### 脳波正準相関分析

これまで数少ない神経系のコンシステンシーの実験及び理論研究は主に単一ニューロン応答に注目していた。そこで脳の大域的なネットワークレベルの活動にコンシステンシーがあるかどうかを検証した。同一実現値での視覚刺激時の多電極の脳波信号の正準相関分析 (CCA) により試行間をまたいで多次元脳波信号間に共通情報があるかについて検証を行った。また、視覚成分と脳波の共通成分についても CCA を用いて検証した。

#### (2) 数理モデル

これまでのニューロンモデルを用いた数理モデル研究でも主に単一ニューロンモデルを用いてコンシステンシーが検討されている。しかしネットワークレベルの活動のコンシステンシーを調べた研究はほとんどない。そこで結合ニューロン系、具体的には FitzHugh-Nagumo ニューロンを用いたニューラルネットワークでのニューロン集団のスパイクタイミングのコンシステンシーを調べた。

### 4. 研究成果

#### (1) ヒト脳波実験

#### 脳波位相時系列解析

脳波位相信号の試行間でのコンシステンシーの上昇が主に高強度ノイズでシータ波、アルファ波帯域でみられた。特に PLF の上昇が主に視覚野近辺の電極で観察された。脳波の低周波の位相情報にはコンシステンシーの特性があることを示している。

#### 脳波正準相関分析

同一実現値の視覚信号試行間では脳波に高い相関がある成分が見つかった。これに対して、異なる実現値のノイズ視覚信号をみせたときの試行間では相関は低かった。図2に1被験者例を示す。また被験者が異なる場合には、同一実現値視覚信号に対する個人間の相関は低かった。また視覚信号と脳波の相関も低かった。

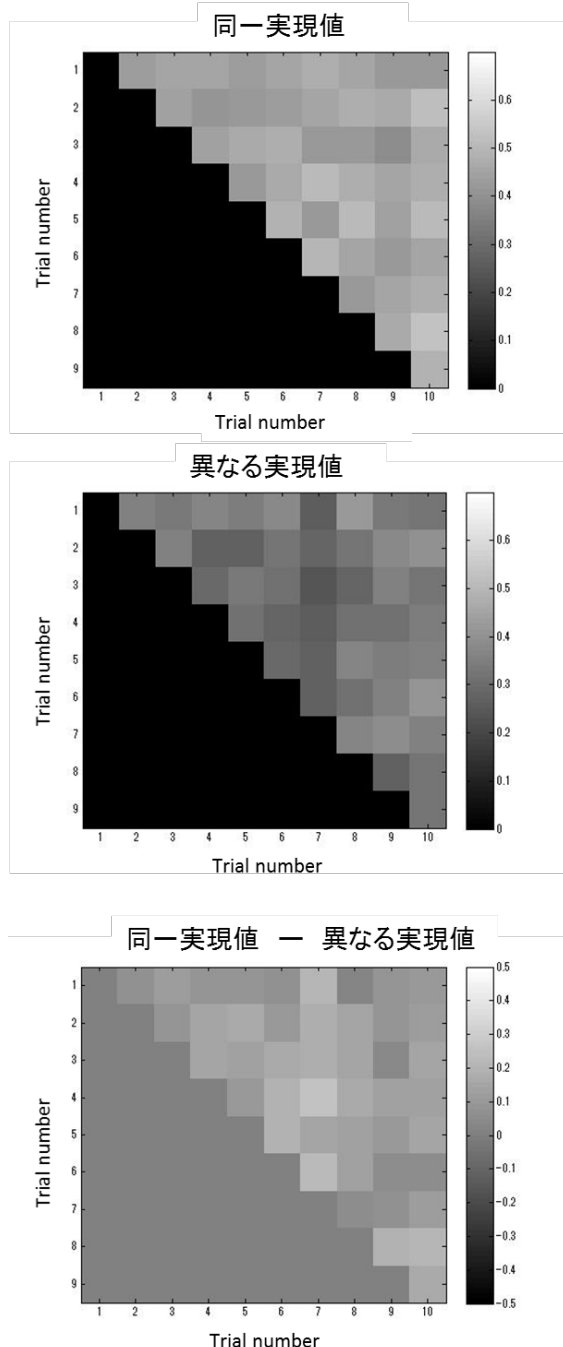


図2 脳波の試行間の正準相関係数

同一実現値と異なる実現値の視覚信号 (ガウシアンホワイトノイズ) をみせたときの異なる試行間の脳波の最大の正準相関係数、およびそれらの差を1被験者の1ノイズ強度条件に関して表示している。同一実現値の視覚信号を見せた場合には異なる実現値の場合に比べて相関が有意に高い。

## (2) 数理モデル

中程度の結合度を持たせた結合ニューロン系ではスパイクタイミングに高いコンシステンシーが観察された。また中程度の結合度では複数のゆらぎ入力のパターンに応じた多様な出力パターンを見せた。結合がない場合にはニューロン集団としてのコンシステンシーはみられず、結合が強すぎる場合には異なるゆらぎ入力を分離、区別することができなかった。コンシステンシーは適度な結合強度をもつニューラルネットワークの特性であることが明らかになった。

我々の結果から、視覚入力に対するヒトの脳波応答はコンシステンシーの特性をもっていることが明らかになった。脳には個人特有の非線形ダイナミクスが存在し、視覚情報処理における情報表現に関してコンシステンシーの特性が機能的意義を果たしていることが推測される。これまでのコンシステンシーの実験、理論研究は単一ニューロンの応答に注目していたが、本研究ではより大域的な集団としての挙動に注目し、ネットワークレベルでのコンシステンシーの存在と機能的な重要性が示唆された。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 7件)

Keiichi Kitajo, Hirromichi Suetani, Consistency of human brain response to noisy visual inputs. 2014 International symposium on nonlinear theory and it's applications, 2014/9.14-18. Luzern, Switzerland

末谷大道、ランダム神経回路による時系列パターンの記憶・生成と汎化能力の獲得について、統計数理研究所研究会 神経科学と統計科学の対話4 2014年3月17日、統計数理研究所(東京都)

北城圭一、ヒトの脳の自発活動ダイナミクスの操作的研究 第5回神経ダイナミクス研究会 2014年3月5日 鹿児島大学(鹿児島県)

Hirromichi Suetani, Emergence of Chaotic Itinerancy for Recalling Reliable and Precise Timing Patterns in Recurrent Neural Networks: A FORCE-learning Approach, Neuroscience 2013, 2013/11/9, San Diego, USA

末谷大道、北城圭一、第35回日本神経科学大会.名古屋国際会議場 (名古屋市) 2012年09月21日~2012年09月21日

北城圭一、ヒトの脳での同期ダイナミクスとノイズ誘起現象。非線形現象のモデル化・解析・制御 2012年3月4日、

鹿児島大学(鹿児島市)

北城圭一、ヒトの脳での確率共振とノイズ誘起現象、京都力学系学際セミナー、2011年7月15日、京都大学(京都市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

北城 圭一 (Kitajo Keiichi)

独立行政法人理化学研究所・脳科学総合研究センター・副チームリーダー

研究者番号：70302601

### (2) 研究分担者

末谷 大道 (Suetani Hirromichi)

鹿児島大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：40507167