

# 前頭葉における言語処理時の非線形ダイナミクスに関する 一考察

## On Nonlinear Dynamics in Language Processing in Front Lobe

○矢野 操\*, 本間経康\*\*, 酒井正夫\*, 田中 明\*, 阿部健一\*

○M. Yano\*, N. Honma\*\*, M. Sakai\*, A. Tanaka\*, K. Abe\*

\*東北大学 大学院 工学研究科, \*\*東北大学 医療技術短期大学部

\*Graduate School of Engineering, Tohoku University,

\*College of Medical Sciences, Tohoku University

キーワード : カオス時系列解析(chaotic time series analysis), 高次脳機能(the higher brain function),  
近赤外分光(near-infrared spectroscopy, NIRS), 言語機能計測(language function measurement),  
リアプノフスペクトル(Lyapunov spectrum)

連絡先 : 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉05 東北大学 大学院 工学研究科 電気・通信工学専攻 阿部研究室  
矢野 操, Tel.: (022)217-7074, Fax.: (022)263-9290, E-mail: [zano@abe.ecei.tohoku.ac.jp](mailto:zano@abe.ecei.tohoku.ac.jp)

## 1. はじめに

ヒトの脳波・脈波などの生体信号や地震の発生間隔などの複雑な現象は時間とともに変化する。このような複雑な挙動を示す現象を時系列データとして観測し、その性質を解析し、さらにはその挙動を予測するという目的に対して、現在では「カオス時系列解析」が適用されるようになってきている。「カオス時系列解析」では、不規則振動の本質を、少数自由度の非線形力学のダイナミクスに求めている。

脳はニューロンといった非線形要素で構成されていることから、その高次機能にはカオスのような非線形ダイナミクスが深く関わっていると考えられている。脳の高次機能を解明するために、脳から計測される生体信号を解析することは有効な

手法の一つである<sup>2)</sup>。本研究では、脳の高次機能の一つである言語処理の解明を目的として、日本語と英語の文章を聞かせた場合の脳の生体信号を、近赤外分光法を測定原理とする装置を用いて測定し、得られた生体信号に対してカオス時系列解析を行う。

## 2. 実験

### 2.1 近赤外分光法

比侵襲的に人の脳機能を計測する方法としては、これまでに脳波や機能的磁気共鳴画像診断装置(fMRI)などの電気または磁気を用いた計測法が主に使われてきたが、これに加えて近年、光を用いた計測法が提案され、実用化されている。この計

測法は、装置の小型化が可能であるため、特別な検査室を必要としない。さらに、機械的に柔軟な光ファイバを被験者へ接触させて、光照射・検出を行うので、計測中被験者は自由に頭を動かすことができる。このため、光を用いた計測法は、従来の計測法と比較して、被験者の拘束性が低く、精神的負担を低減することが可能である。

近赤外分光法とは、生体組織透過性が比較的高い近赤外光を頭皮上から照射し、ヘモグロビンの濃度変化を計測するというものである<sup>3)</sup>。Fig.1に示すように照射された光は生体組織により散乱される。その一部は、頭蓋骨の内側に存在する大脳皮質を経由し、反射光として再び頭皮へ到達する。このとき、近赤外光は血液中のヘモグロビンにより吸収される。この吸収した量から酸素化ヘモグロビン変化量 ( $\Delta O_2Hb$ )、脱酸素化ヘモグロビン変化量 ( $\Delta HHb$ )、総ヘモグロビン量 (総Hb, THI)、酸素濃度比 (TOI) の四つの値が、送受信機を装着した状態での基準値を基に相対値として計測される。

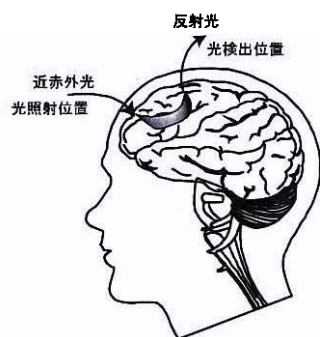


Fig. 1 近赤外光を用いた脳機能計測法の概念図

## 2.2 実験方法

今回の実験では、脳の高次機能の一つである言語処理への前頭葉の関与を近赤外分光法により測定した。具体的には、言語の異なる文章を聞かせたときの前頭葉活性の変化を血中のヘモグロビン

濃度の変化として間接的に計測し、このことから前頭葉機能の働きを推定しようと試みた。聞かせる言語は日本語と英語である。日本語は、被験者の母国語であるが、英語は被験者にとって外国語であり、母国語と同じようには理解できない。つまり、言語処理過程において何らかの機能的な違いが存在すると考えられる。本実験では、実験条件の違い（日本語と英語の違いなど）による活性の差異を計測することにより、得られた実験データをカオスの立場から解析する。実験は被験者（20歳代の男女あわせて3人）に対して、近赤外分光法を測定原理とする（株）浜松ホトニクス製のNIRO300を用いて以下の手順で行った。

- 音楽(30秒)→日本語(約2分)→英語(約2分)  
→日本語(約2分)→無音(30秒)

ここで、日本語と英語の文章は同じ意味の内容であり、文章の内容を被験者は事前に知らされていない。

## 2.3 実験結果

Fig.2にNIROより得られたデータに適切な前処理を施した結果を示す。実験により得られるデータには、インパルスノイズ、高周波ノイズなどが多く含まれる。そこで前処理として、インパルスノイズ除去のために前後の時系列の平均を取ることを行い、さらに高周波ノイズ除去のために、0.5Hzのローパスフィルタ処理を行った。次節では、この時系列データに対する本研究での解析手法について述べる。

## 3. 非線形解析手法

### 3.1 アトラクタの再構成

実験などにより現実の多変数システムを観測する場合、1変数の時系列 $y(t)$ ,  $t = 1, 2, \dots$ が観測できるのみであるということは珍しくない。このと

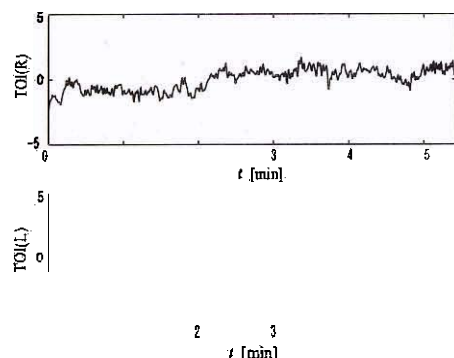


Fig. 2 前処理を施したデータ（遮断周波数 0.5[Hz]）

き得られた時系列データから元のシステムのダイナミクスを解析するには、高次元空間におけるアトラクタ軌道の再構成を行う必要がある。再構成の手法として最も多く用いられているのは、時間遅れ座標系への変換である（Fig3）<sup>1)</sup>。

具体的な時間遅れ座標系への変換は、時間遅れの大きさを $\tau$ として、 $m$ 次元再構成状態空間において、(1) 式のような $m$ 次元ベクトルを構成すればよい。

$$v(t) = (y(t), y(t+\tau), \dots, y(t+(m-1)\tau)) \quad (1)$$



Fig. 3 時間遅れ座標系への変換

ここで、(1) 式のような形式の再構成状態空間への変換が元の決定論的力学系の埋め込みとなるには、元の力学系の状態空間の次元を $n$ としたとき、埋め込み次元 $m$ が、

$$m \geq 2n + 1 \quad (2)$$

であれば十分であることがTakensにより証明され

ている<sup>1)</sup>。

## 3.2 埋め込み次元推定

前節では元の力学系の次元数 $n$ が既知の場合の、埋め込み次元 $m$ の決定法について述べた。しかし、現実のシステムでは元の力学系の次元数 $n$ 自体が未知であることが少なくないため、得られた時系列データから再構成状態空間への埋め込みを行うためには、何らかの方法で、埋め込み次元 $m$ を推定する必要がある。

本研究では以下に述べる2つの手法を用いて、本実験で得られた時系列データより埋め込み次元 $m$ の推定を行った。

- 誤り近傍法<sup>5)</sup>
- Caoの手法

## 3.3 リアプノフスペクトルの推定

### 3.3.1 リアプノフスペクトル

カオス力学系は、初期値のわずかなずれをそれがどんなに小さくあっても、時間とともに、急激に拡大させる性質を有している。これは軌道不安定性などというという言葉で表現され、決定論的カオスの力学的特徴である。この特徴はリアプノフスペクトル解析により定量的に解析できる。

一般にカオス力学系では、不安定方向と安定方向が存在する。たとえば、2次元力学系に初期値の集合として半径 $\delta$ の微小円を与えたと仮定する（Fig.4）。

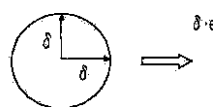


Fig. 4 リアプノフスペクトル

最初は円であったものが、1回写像されることに

よって、たとえば縦方向には引き伸ばされ、横方向には押し潰される結果、楕円となる。このとき各方向の指数的伸び率の組  $\{\lambda_1, \lambda_2\}$  をリアプノフスペクトルと呼ぶ。

今、(3) 式で表される力学系を考える。

$$\mathbf{x}(t+1) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t)) \quad (3)$$

ただし、 $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{R}^n$  は時間  $t$  における力学系の状態変数ベクトル、 $\mathbf{f}$  は  $n$  次元非線形関数、時間  $t$  は離散時間を考えることにする。

まず、(3) 式における  $\mathbf{x}(t)$  からの微小変位を  $\delta\mathbf{x}(t)$  とすると、

$$\mathbf{x}(t+1) + \delta\mathbf{x}(t+1) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t) + \delta\mathbf{x}(t)) \quad (4)$$

となる。テイラー展開して線形近似することにより、

$$\delta\mathbf{x}(t+1) = \mathbf{Df}(\mathbf{x}(t))\delta\mathbf{x}(t) \quad (5)$$

を得る。ここで、 $\mathbf{Df}(\mathbf{x}(t))$  は点  $\mathbf{x}(t)$  における  $\mathbf{f}$  のヤコビアンである。このヤコビアンよりリアプノフスペクトルを求めることができる。

### 3.3.2 時系列からのリアプノフスペクトルの推定方法

時系列データにおいては、そのダイナミクスが未知であるため、前節3.3.1のように直接ヤコビアンを求めることができない。そこで、リアプノフスペクトルを求めるにはヤコビアンを推定する必要がある。これにはいくつかの推定方法が提案されているが、本研究では以下の方法を用いる。

まず、 $m$  次元再構成アトラクタ軌道上の1点を  $\mathbf{v}(t)$  とする。このとき、 $\mathbf{v}(t)$  を中心として微小半径  $\varepsilon$  の  $m$  次元超球（以下  $\varepsilon$  球）に入るアトラクタ上の他の点  $\mathbf{v}(k_i)$  を  $M$  個選び出す。ここで、 $\mathbf{v}(t)$  から見た  $\varepsilon$  球内の  $M$  個の点に対する変位ベクトル  $\mathbf{y}_i \in \mathbf{R}^m$  は、

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{v}(k_i) - \mathbf{v}(t) \quad (6)$$

となり、これが (4) 式の微小変位ベクトル  $\delta\mathbf{x}(t)$  の代わりとなる。

次に、時間が  $s$  だけ経過した後を考えると、 $\varepsilon$  球の中心  $\mathbf{v}(t)$  は  $\mathbf{v}(t+s)$  に、 $\varepsilon$  球の各点  $\mathbf{v}(k_i)$  は  $\mathbf{v}(k_i+s)$  に、各々変化する。従って、時間  $t+s$  での変位ベクトル  $\mathbf{z}_i \in \mathbf{R}^m$  は、

$$\mathbf{z}_i = \mathbf{v}(k_i+s) - \mathbf{v}(t+s) \quad (7)$$

となる。

対象とする系には決定論的ダイナミクスが存在し、 $\varepsilon$  球の半径と時間  $s$  が十分に小さいと仮定すると、(6)、(7) 式の  $\mathbf{y}_i$  と  $\mathbf{z}_i$  の関係は線形近似可能であり、ある行列  $\mathbf{G}(t)$  を用いて、

$$\mathbf{z}_i = \mathbf{G}(t)\mathbf{y}_i \quad (8)$$

と近似的に表すことができる。この  $\mathbf{G}(t)$  は、(5) 式のヤコビアンの近似と考えることができる。ここで、 $\mathbf{G}(t)$  の決定方法の一つとして、次式で表される距離、

$$S_d = \sum_{i=1}^M |\mathbf{z}_i - \mathbf{G}(t)\mathbf{y}_i|^2 \quad (9)$$

を最小にするように、即ち、最小二乗法により  $\mathbf{G}(t)$  を決定する。

実データに対してリアプノフスペクトルを求めるには、上で求めた  $\mathbf{G}(t)$  をヤコビアンとして用いればよい<sup>1)</sup>。

### 3.3.3 局所対常域プロット

3.3.2ではダイナミクスが未知である場合のリアプノフスペクトルの推定方法について述べたが、信頼できる結果を得るためには多くの時系列データ数を必要とする。また、全くランダムな時系列データを対象とした場合でも、ヤコビアン推定方法によりリアプノフスペクトルを推定すると、正のリアプノフスペクトルが推定されてしまう問題が指摘されている<sup>1)</sup>。

そこで、本研究では、誤ったリアプノフスペクトルの推定を防ぐための、以下に述べる局所対大域プロットと呼ばれる手法を導入する。

非線形力学系に対してリアプノフ指数を推定するヤコビアン推定法は、「非線形なデータに対して、非線形モデリングを用いればより良い推定精度が得られる」という考えに基づいている。実際非線形モデリングの手法として、局所的（線形）モデリングを用いることで、精度よくモデル化することが可能となり、その結果リアプノフ指数推定もうまくいく。逆に、非線形なデータに対して、線形なモデリングを用いると、推定精度は極端に低下するということになる。この場合の線形なモデリングとは、大域的（線形）モデリングを考えれば良い。

通常は、解析対象となるデータに対して、局所線形近似法のみでヤコビアンを推定し、リアプノフスペクトルを推定していく。しかし、これだけではなく、大域的線形手法をも用いてリアプノフスペクトルを推定することで、どのような特性を示すか見ることが重要となる。そして、これらの局所的モデリングと大域的モデリングで得られた結果を比較すれば、局所的モデリングで推定されたリアプノフ指数が正しいものであったかどうかを考えることができる。

実際には、局所線形モデリングにおいてヤコビアンを推定する場合に、近傍の数を徐々に増加させ、各近傍値において推定されるリアプノフ指数が、近傍の変化に対してどのように変化をするかを見るために求めるのが局所対大域モデリングの手法である。この手法により得られる近傍対推定リアプノフ指数の関係をプロットした図を局所対大域プロットと呼ぶ(Fig5)<sup>1)</sup>。

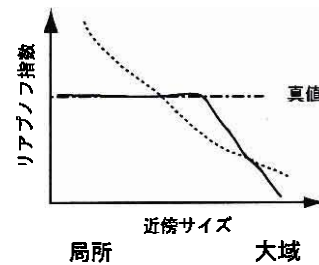


Fig. 5 局所対大域プロットによるリアプノフ指数の推定

## 4. 実験データの解析

### 4.1 アトラクタ解析

ある被験者の右脳のTOIのデータを用いて、埋め込み次元を推定した結果を以下に示す。遅れ時間 $\tau$ は2サンプルとした。

始めに誤り近傍法の適用結果を示す。Fig.6は、埋め込み次元 $m$ を徐々に上げていったときの誤り近傍点の全体に占める割合の変化を示している。誤り近傍法は、誤り近傍点の割合が減ったときに埋め込みであると判定する手法である。Fig.6では $m=4$ で誤り近傍点の割合が大きく減少し、 $m=5$ 以上のときにはほぼ0%に収束していることが分かる。なお、他の被験者のデータを用いた場合にもほぼ同じ傾向が確認できる。よって、誤り近傍法を適用した場合、埋め込み次元は $m=5$ 以上と推定される。

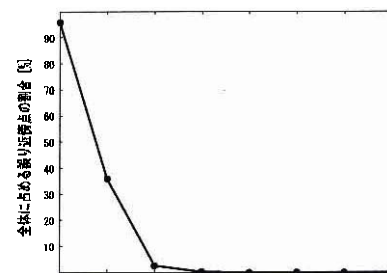


Fig. 6 誤り近傍法適用結果

次にCaoの手法の適用結果を以下に示す(Fig.7). Caoの手法では、2つの指標 $E_1(m)$ ,  $E_2(m)$ が収束

するときの $m$ の値を埋め込み次元とする。図より、 $E_1(m), E_2(m)$ ともに $m=6\sim 8$ 程度で収束していることが分かる。よって、Caoの手法を適用した場合の埋め込み次元は、 $m=6$ 以上と推定される。

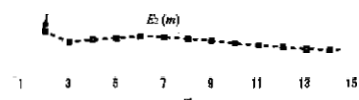


Fig. 7 Caoの手法適用結果

以上の2つの埋め込み次元推定結果より、埋め込み次元 $m=6$ 、遅れ時間 $\tau=2$ として、右脳のTOIデータを時間遅れ座標系へ再構成する。Fig.8は、再構成状態空間の3次元  $y(t), y(t+\tau), y(t+2\tau)$  でプロットしたものである。全体のアトラクタに占める日本語1回目、英語、日本語2回目を区別できるように各部分を強調して表記している。この結果より、1回目の日本語と、2回目の日本語を聞いたときのアトラクタが相対的に似ていることが分かる。なお、他の被験者に関しても多少の個人差はあるもののほぼ同じ傾向が確認できる。

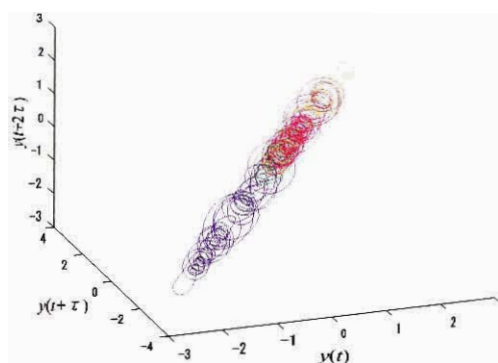


Fig. 8 言語を聞いたときのTOIのアトラクタ

## 4.2 リアプノフスペクトル解析

前節4.1での解析結果より、日本語と英語を聞いたときでアトラクタが変化することが確認された。このことから、言語の違いにより前頭葉の酸素消費活動が変化していることが分かる。この主な原因として以下の2つが考えられる。

- 外部入力バイアスの変化
- ダイナミクスの変化

本研究では、この原因を特定するためにリアプノフスペクトル解析を行った。リアプノフスペクトルは決定論的カオスの力学的特徴である軌道不安定性を定量的に表す指標である。

以下に示すのはある被験者の右脳のTOI値のデータによる局所対大域プロットである。言語の違いによるアトラクタの変化の原因を調べるのが目的なので、1回目の日本語、英語、そして2回目の日本語とそれぞれの部分に分けてプロットしている。

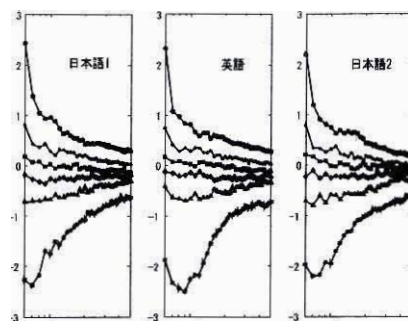


Fig. 9 実験データの局所対大域プロット

Fig.9より、日本語と英語においてリアプノフスペクトルに大きな違いはないように見える。よって、言語によらずダイナミクスが(リアプノフスペクトルの意味で)同じであるということが分かる。

## 5. おわりに

本研究では、脳の高次機能にはカオスのような非線形ダイナミクスが深く関わっているという考えの基に、その高次機能の一つである言語処理の解明を目的として、日本語と英語の文章を聞かせた場合の前頭葉の生体信号を測定し、得られた生体信号に対してカオス時系列解析を行った。

本研究でのアトラクタ解析の結果、聞かされる言語の違いが前頭葉での酸素消費活動に明確な変化を与えることを確認した。さらに、リアプノフスペクトル解析の結果、聞かされる言語の違いによる酸素消費量の変化が、(リアプノフスペクトルの意味で)ダイナミクスの変化によるものではなく、バイアス成分の変化によるものでしかないと分かった。この原因を特定するために、今回行った以外の解析手法を用いて実験データを解析することと、リアプノフスペクトル解析の結果をさまざまな角度から考察することは今後の課題である。

また、本研究では近赤外分光法を測定原理とする新しい装置を用いて生体データを計測した。その装置の精度の問題から、得られるデータは適切な前処理を必要とするほどノイズの影響を受けており、また、サンプリング間隔の問題から、計測されるデータ数はカオス時系列解析を行うには十分ではなかったと思われる。

これらの問題を解決するためには、測定方法を始めとした実験内容全体を見直し、また、少ないデータ数でも信頼のおける解析手法の検討することが必要である。

- 4) 山本剛, 牧敦, 山下優一, 吉澤浩志, 岩田誠, 渡辺英寿, 小泉英明: 近赤外分光法を用いたヒト脳機能の可視化, 計測と制御 39 (4), 279/282 (2000)
- 5) Matthew B. Kennel, Reggie Brown, Henry D. I. Abarbanel: Determining embedding dimension for phase-space reconstruction using a geometrical construction, Physical Review A 45(6), 3403/3411 (1992)
- 6) 篠宮伸和: 神経回路網による言語情報処理に関する研究, 東北大学大学院工学研究科修士学位论文 (2000)

## 参考文献

- 1) 合原一幸: カオス時系列解析の基礎と応用, 産業図書 (2000)
- 2) F. Delcomyn (小倉明彦, 富永恵子訳): ニューロンの生物学, 南江堂 (1999)
- 3) 星 詳子, 田村 守: 脳の働きを光で探る, 科学 69 (5), 449/457 (1999)