

咀嚼運動時における中脳路核神経活動のスペクトル解析

牛腸哲也, 木竜徹, 山田好秋*, 齊藤義明**

新潟大学大学院自然科学研究科

*新潟大学歯学部口腔生理学教室

**新潟大学工学部情報工学科

〔受付: 平成7年10月4日〕

Spectrum Analysis of Trigeminal Mesencephalic Neuron Activities During Chewing

Tetsuya Gocho, Tohru Kiryu, Yoshiaki Yamada*, Yoshiaki Saitoh**

**Graduate School of Science and Technology, Niigata University*

***Department of Oral Physiology, School of Dentistry, Niigata University*

****Department of Information Engineering, Faculty of Engineering, Niigata University*

〔Received: October 4, 1995.〕

Key Words: nucleus tractus mesencephalicus nervi trigemini, muscle spindle, chewing, bispectrum

Abstract: Various aspects of physical function of living beings have been solved because of recent advances in physiology. Many studies of living beings have been made in the engineering field as well. In this study, we analyzed the relation between the muscle activities and the information from the sensory receptors during chewing by the spectrum analysis. Trigeminal mesencephalic nucleus activities, myoelectric signals of masticatory muscle and jaw movements were recorded in freely moving rabbits during chewing, and analyzed by the bispectrum method. Taking the time-varying behavior of masseter muscle activity into account, there is a difference of spectrum between an opening stroke and a closing stroke. It seemed that the results were reflected in the functional differences of muscle spindle activity.

抄録 近年生体の様々な生理的機能が解明され、工学分野においても盛んに生体に関する研究が進められている。本研究では、咀嚼運動中の筋活動と筋の伸張受容器から伝えられる情報との間に存在している関係を、周波数領域で解析してみた。咀嚼運動時の三叉神経中脳路核の活動電位を開閉口筋の筋電図及び下顎運動と同時に計測し、伸張受容器を支配する神経活動電位をスペクトル解析することによって、筋活動様式と感覚神経の活動状態が周波数領域においてどのような関係を持っているのかを調べた。今回は、バイスペクトルによる解析を試みた。

1. 緒 言

運動時には、視覚や体性感覚に加え、筋紡錘が筋の活動状態を運動中枢に伝え、それに基づいて適切な制御が行われている。近年の生理学の進歩によって生体の様々な生理的機能が解明され、工学分野においても、運動制御に関する研究¹⁾や感覚運動統合に関する研究²⁾など、多くの研究が進められている。

本研究では、咀嚼運動中の筋活動と筋の感覚受容器から伝えられる情報との間に存在している関係を、周波数領域で解析してみる。咀嚼運動で特徴的な点は、感覚受容器である筋紡錘に分布する求心神経の細胞体が、脳幹にある三叉神経中脳路核に存在していることである。従って、三叉神経中脳路核から信号を計測することによって筋紡錘の活動を間接的に調べることができる。そこで、咀嚼運動時の三叉神経中脳路核の活動電位を開閉口筋の筋電図及び下顎運動軌跡と同時に計測し、その神経活動電位をスペクトル解析することによって、筋活動様式と感覚神経の活動状態が周波数領域においてどのような関係を持っているのかを調べた。この際、計測された神経活動電位には雑音が多く含まれているため、バイスペクトルによる解析方法を用いた。また、筋活動と筋紡錘活動との周波数領域での関係は、システム関数によって推定した。

II. 顎運動における筋活動と筋紡錘

筋活動の様式図を図1に示す。筋が伸張するとそれに付随する筋紡錘が伸張され、求心性Ia群線維に向けてインパルスを発射する。Ia群線維はそれと同名の筋の α 運動ニューロンに対して興奮性シナプスを形成しており、そのため筋紡錘の興奮は筋の収縮を促進する働きをする。筋が収縮すると筋紡錘が短縮し、Ia群線維への発射頻度は減少する。つまり、筋紡錘は筋の長さを測定する受容器である。この他に筋紡錘が興奮する様式として、 γ 運動ニューロンの活動によって引き起こされる錘内筋線維の収縮がある。このことにより、筋の伸張に反応する伸張受容器の閾値が低下して筋紡錘の感度は高くなり、筋の収縮が促進される。この二種類の方法を組み合わせると錘内筋線維を適度に収縮させることによって、任意の筋活動状態に調節できる³⁾。

咀嚼運動は閉口筋と開口筋とに大別され、四肢の筋と異なり、閉口筋には筋紡錘が豊富に分布しているが、開口筋にはほとんど認められないという特徴を持つ。咀嚼運動では、脳幹にある咀嚼中枢 (Central Pattern

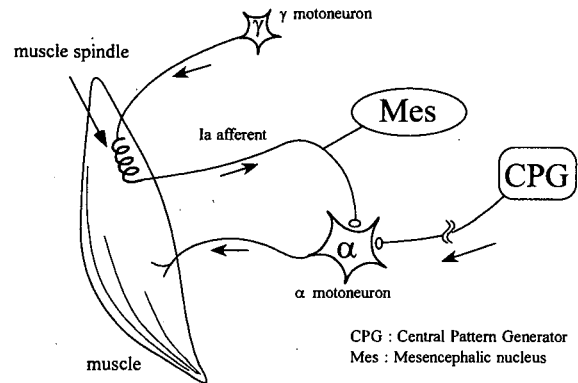


図1 筋活動の様式図

Fig. 1 Model of muscle activities

Generator) がその基本的な運動パターンを形成している。しかし、咀嚼の進行につれ食物は粉碎され、運動負荷は大きく変化する。これらの変化は末梢の感覚受容器により逐次中枢に送られ、適切な制御が行われている。特徴的な点は、三叉神経中脳路核が筋紡錘の発射する求心性情報の通過点となっていることである。従って、三叉神経中脳路核から信号を計測することによって、筋紡錘の活動の様子を知ることができる。筋紡錘の発射するインパルスを直接計測することは困難であるため、ここでは三叉神経中脳路核の活動を計測し、それを筋紡錘活動とみなす。

III. 研究方法

1. 解析方法

1) バイスペクトル

信号 $X(n)$ のバイスペクトル $\Phi_{xxx}(f_1, f_2)$ は信号の三次キュムラント関数 $\phi_{xxx}(\tau_1, \tau_2)$ の二次元フーリエ変換で以下のように定義される^{4) 5)}。

$$\phi_{xxx}(\tau_1, \tau_2) = E[x(n)x(n+\tau_1)x(n+\tau_2)] \quad (1)$$

$$\Phi_{xxx}(f_1, f_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{xxx}(\tau_1, \tau_2) e^{j2\pi(f_1\tau_1 + f_2\tau_2)} d\tau_1 d\tau_2$$

ここで、 $E[\cdot]$ は標本領域での期待値操作、 τ_1, τ_2 は信号の時間ずれ、 f_1, f_2 は周波数を表す。このとき、計測信号 $y(n)$ を原信号 $y_0(n)$ とガウス性雑音 $e(n)$ の和と考えた時、 $y(n)$ のバイスペクトル $\Phi_{yyy}(f_1, f_2)$ は、

$$\Phi_{yyy}(f_1, f_2) = \Phi_{y_0 y_0 y_0}(f_1, f_2) + \Phi_{eee}(f_1, f_2) \quad (2)$$

となる。ガウス性雑音のバイスペクトルは0であるため、信号に混入したガウス性雑音に対しては、影響を受けず

に解析を行うことができる。また、バイスペクトルは位相関係を持つ周波数成分（例えば $f_3 = f_1 + f_2$ ）しか現れないという性質を持っている

2) システム関数

食物を粉砕している時は筋紡錘の感度に変化して、より強い咬合力を発生させようとする。従って、咬筋活動によって筋紡錘活動の周波数成分が変化することが期待される。そこで、咬合時の咬筋活動と筋紡錘活動との周波数関係を調べるために、咬筋筋電図を入力 $x(n)$ 、三叉神経中脳路核活動電位を出力 $y(n)$ とするシステムを考え、そのシステム関数 $H(f)$ を推定した。推定方法として、出力側に雑音が多い時に有効な相関法³⁾を用いた。

$$\phi_{xy}(n) = \sum_{m=1}^{M-1} h(m) \phi_{xx}(m-n)$$

$$\therefore H(f) = \frac{\Phi_{xy}(f)}{\Phi_{xx}(f)} \tag{3}$$

ここで、 M は解析区間幅、 $\phi_{xx}(n)$ は $x(n)$ の自己相関関数、 $\phi_{xy}(n)$ は $x(n)$ と $y(n)$ の相互相関関数、 $h(m)$ はシステムのインパルス応答を表し、 $\Phi_{xx}(f)$ 、 $\Phi_{xy}(f)$ 、 $H(f)$ はそれぞれのフーリエ変換である。

2. 実験方法

1) 計測方法⁶⁾

計測の様子を図2に示す。実験には兎を用いた。咀嚼物として、今回は柔らかい食物としてパンを、また硬い食物として生米を選択した。兎に右側の歯列で咀嚼運動を行わせ、三叉神経中脳路核、咬筋、顎二腹筋の左右それぞれから信号を同時に計測した。神経活動電位はガラス被覆したエルジロイ電極を用いて、筋電図は直径2mmの銀製の小リングを筋に縫い付けてそれぞれ計測した。また、磁界センサにより切歯点の前頭面における運

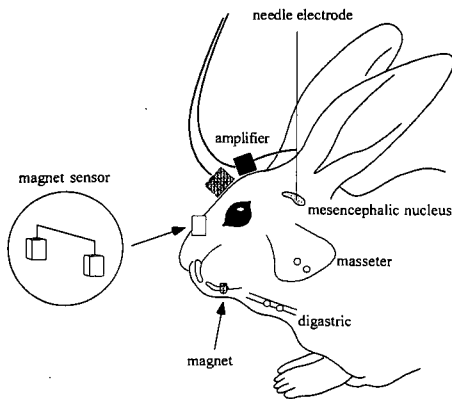


図2 計測の様子
Fig. 2 Experimental setup

動軌跡を同時に計測した。従って、計測チャンネル数は合計8チャンネルである。サンプリング周波数は10kHz、量子化ビット数は12bitとした。なお、エルジロイ電極の位置は、麻酔下において電極を少しずつ侵入させ、咬筋を圧迫又は伸張させた時、すなわち、咬筋の筋紡錘を活動させた時に電位が計測されるように決定した。咀嚼実験は麻酔が覚めてから行った。

2) 信号処理

計測された各信号を、顎運動の様式の違いによって分割した。すなわち、閉口相初期のFast Closing (FC期)、閉口相後期のSlow Closing (SC期)、最大閉口時のMaximum Closing (MC期)、開口相初期のSlow Opening (SO期)、開口相後期のFast Opening (FO期)の5区間にそれぞれ分割した(図3)。その後、各区間毎に三叉神経中脳路核電位 $y(n)$ のバイスペクトルを式(1)により、また、パワースペクトルをFFTにより推定した。次に、咬筋活動時について咬筋筋電図 $x(n)$ を入力、三叉神経中脳路核電位 $y(n)$ を出力とするシステムのシステム関数を推定し、咬筋の整流化平均値 (Average of Rectified Value : ARV) とシステム関数の平均周波数 (Mean Power Frequency : MPF) を比較した。ARV, MPFはそれぞれ次式によって求めた

$$ARV = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x(n)| \tag{4}$$

$$MPF = \frac{\int_{f_1}^{f_2} f \cdot P_x(f) df}{\int_{f_1}^{f_2} P_x(f) df} \tag{5}$$

ここで、 N は解析区間幅、 $x(n)$ は筋電図を表す。今回は $N=100$ としてARVを求めた。また、 $P_x(f)$ は $x(n)$ のパワー

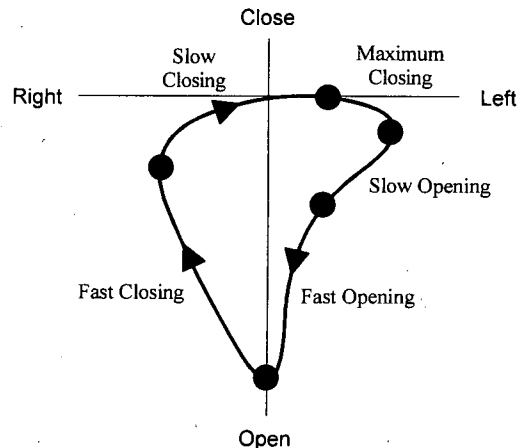


図3 各区間への分割
Fig. 3 Schematic representation of the 5 segments

スペクトル, f_l, f_h はそれぞれ最低周波数, 最高周波数を表す. 今回は $f_l=0\text{kHz}, f_h=2.5\text{kHz}$ としてMPFを求めた. 最後に, 動的運動に対する筋紡錘活動を調べるため, MC期からSO期に至る区間で, 顎運動の速度, 加速度と三叉神経中脳路核電位のバイスペクトルとの時間関係を追って比較した. 但し, 評価指標として, バイスペクトルの対角成分のMPFを用いた.

なお, ここでは咀嚼運動を対象としているが, 咀嚼運動は繰り返し運動の一種と考えることができる. 従って, 一回の咀嚼運動を一標本とみなして, 時間領域ではなく標本領域でバイスペクトル, 及びパワースペクトルを推定した.

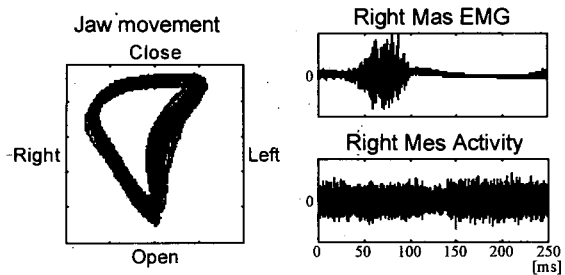


図4 パン咀嚼時の計測データ
Fig. 4 Measured data in chewing bread

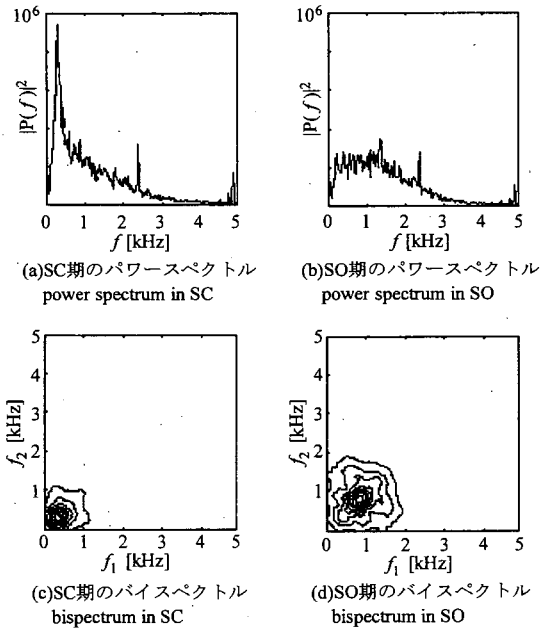


図5 スペクトル推定結果
Fig. 5 Result of spectrum estimation

IV. 結果

今回はパンを咀嚼している時の解析結果のみを示す. パンを咀嚼している時の計測データを図4に, スペクトル推定結果を図5に示す. バイスペクトルは, その振幅の二乗を等間隔の等高線により表示した. パワースペクトルでは, 閉口相 (FC期, SC期) において500Hz付近にピークがあったが, 開口相 (SO期, FO期) においてその成分が見られなくなっている. バイスペクトルでは, 閉口相では低域にあったピークが, 開口相ではより高域へ移動していた.

システム関数の推定結果を図6に示す. これより, 咬筋のARVが大きくなるにつれてシステム関数のMPFも高くなるという傾向があることがわかった.

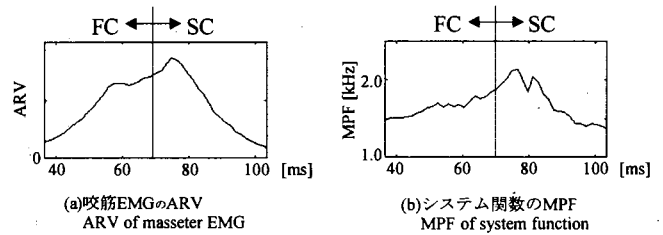


図6 システム関数の推定結果
Fig. 6 Result of system function estimation

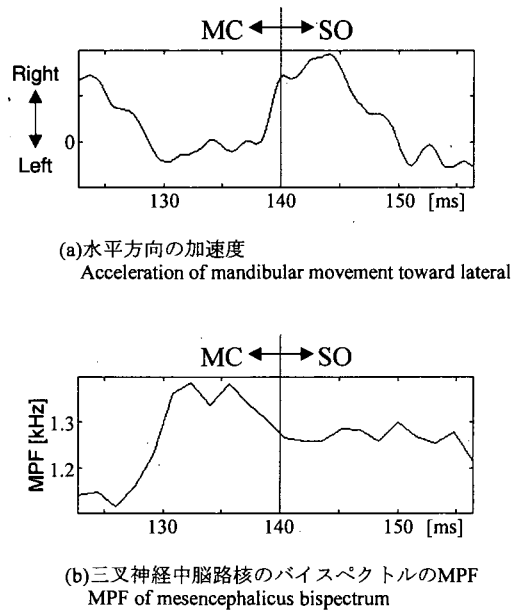


図7 下顎運動と三叉神経中脳路核のバイスペクトルの時間変化
Fig. 7 Time behavior of mandibular movements and mesencephalic nucleus bispectrum

下顎運動の水平方向の加速度と三叉神経中脳路核のバイスペクトルの時間変化を図7に示す。これより、下顎の水平方向の加速度は開口時、すなわち、約140msのところで右方向へ大きく変化していた。また、三叉神経中脳路核のバイスペクトルのMPFは、約130msのところで、1.15kHz付近から1.4kHz付近へと増加し、その後1.3kHz付近まで低下していることがわかった。

V. 考 察

1. 信号処理に関して

図5で、パワースペクトルとバイスペクトルの推定結果を比較すると、パワースペクトルでは2.5kHzと5kHz付近に鋭いピークが存在しているが、バイスペクトルではそれは見られない。バイスペクトルにはその性質上、相関の無い周波数成分は現れないため、2.5kHzと5kHz付近の鋭いピークは、計測された神経活動電位とは無相関の成分であると判断できた。これは測定装置に用いられているスイッチの影響によって生じた成分であると思われる。また、パワースペクトルには雑音の影響と思われる成分が全域にわたって現れているが、バイスペクトルにはそのような成分はほとんど見られなかった。

神経活動電位には雑音が多く混入しているため、その影響を抑えた解析が望ましい。バイスペクトルによれば雑音の影響を抑えた解析をすることができるので、神経活動の解析には有効であると思われる。また、神経活動は非線形系であることが予想されるが、このような場合にもバイスペクトルを用いることが有効である⁹⁾。

2. 生理的考察

図5より、閉口相と開口相とではスペクトルに違いが見られた。これは、SC期では咬筋は等尺性収縮を主体として活動しており、より強い咬合力を発生させるために筋紡錘は γ -driveにより活性化されて活動しているが、SO期では筋長の変化に应答した活動をしているためと考えられる。

実際に、図6で、咬筋のARVとシステム関数のMPFが同様な変化の傾向を示しているということは、より強い咬合力を出す際に筋紡錘活動がより活発になるときの様子を表しているものと思われる。また、図7で、三叉神経中脳路核のバイスペクトルが大きく変化する時には下顎は左方向に移動中であり、右側の咬筋は伸張されて

いる。従って、MC期からSO期へと移る時に三叉神経中脳路核のバイスペクトルが変化しているのは、筋の伸張により筋紡錘の発火頻度が増加していることを表していると思われる。

以上のように、閉口相と開口相とでスペクトル推定結果に違いが現れた理由は、このような筋紡錘活動の機能的な違いを表しているからであると思われる。

VI. 結 論

咀嚼運動時の三叉神経中脳路核活動電位を計測し、バイスペクトルの推定を行った。閉口筋活動に着目したところ、閉口相と開口相とではバイスペクトルに違いが見られ、筋紡錘活動の機能的な違いが現れたものと考えられた。また、システム関数の推定結果より、筋活動の時間変化につれてシステム関数が変化していく様子が見られた。今後、個体数を増やして解析を行うこと、解析結果に基づいたシミュレーションモデルの検討などを予定している。

文 献

- 1) 田口英郎, 宗像浩一, 桐山公一ほか: 脳による随意性筋活動制御, 信学論(D) J70-D Vol. 1: 2762-2772, 1987.
- 2) 赤松幹之, Hasbroucp, T., Mouret, I. et al: 感覚運動統合における大脳皮質部位間の活動の解析, 第8回生体・生理工学シンポジウム: 379-382, 1993.
- 3) Schmidt, R. F., Dudel, J., Jänig, W. et al (内園耕二, 佐藤昭夫, 金彪): Fundamentals of neurophysiology (神経生理学, 110-115, 金芳堂, 京都, 1988), 1985.
- 4) Nikias, C. L., Mendel, J. M.: Signal processing with higher-order spectra, IEEE SP Magazine, 10-37, 1993.
- 5) 森下巖, 小畑秀文: 信号処理, 174-192, 計測自動制御学会, 東京, 1990.
- 6) Yamada, Y., Haraguchi, N., Uchida, K. et al: Jaw movements and EMG activities of limb-licking behavior during grooming in rabbits, Physiology & Behavior Vol. 53: 301-307, 1993.