高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform: FFT) による大腸運動の解析

順天堂大学医学部外科学教室 (第1外科講座)
(指導: 榊原 宣教授)

武 川 悟

ANALYSIS OF COLONIC MOTILITY BY FAST FOURIER TRANSFORM

Satoru TAKEKAWA

*The First Department of Surgery, Juntendo University School of Medicine,
2-1-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113, Japan
(Director: Professor Noboru SAKAKIBARA)*

Colonic motility curve was continuously recorded in dog using a strain gauge force transducer and the curve was analyzed by fast Fourier transform.

(1) The basic pattern of the colonic motility curve was a gradually increasing and decreasing contractile wave.

(2) The frequency components of the basic contractile wave showed a trimodal distribution with peaks at around 1, 20 and 80 mHz.

(3) The 1 mHz component showed a sine curve and represented the slow, big motion in the basic contractile wave.

(4) The 20 mHz component represented the relatively rapid, gradually increasing and decreasing, big motion in the basic contractile wave.

(5) The 80 mHz component represented the rapid, small motion in the basic contractile wave.

(6) The fundamental frequency components of the colonic contractile wave were unchanged before and after defecation.

(7) For the antiperistaltic wave which disappeared during transmission, the peaks of the wavelength components weakened during transmission and the wave progressed to a multi-modal curve.

Our findings indicate that fast Fourier transform is an extremely useful method in elucidating colonic motility.

Key words: Colonic motility curve, Strain gauge force transducer, Fast Fourier transform

緒

言

生体内での大腸運動の日内変動は、古くより X 線法, 筋電図法, 内圧法などさまざまな方法で解析されてきた。とくに伊藤 (1976) によって開発された Strain gauge force transducer (SG) 法は, 無拘束意識下での長時間観察記録

を可能とした点が大きな特徴であり, 大腸運動の解析に適した方法の1つであると考えられる。SG 法を用いた大腸運動の研究は, Sarna ら (1984) や康ら (1984) による食後期・空腹期の分類, 勝浦 (1992) による排便を中心とした解

析など、大腸運動のパターン分類に主眼をおいた報告が大部分を占めている。しかし運動パターンの検討がすすめられている一方で、収縮波そのものに着目して検討を行った報告はほとんどみられない。

岡田ら (1982) は大腸運動を周期性をもつ収縮波成分の和とみなし、麻酔下バルーン法を用いて記録した大腸収縮波形を、高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform: FFT) によって解析した。このときのアナログ・デジタル変換

は Digitizer による用手的数値入力法で行われていたため、実際に入力されたサンプリングポイント数は 64 ないし 128 にすぎなかった。それにもかかわらず精度の高いパワースペクトルを得ることに成功している。

そこで SG 慢性植え込み犬を作成して大腸運動を連続測定し、記録された収縮波形を高速フーリエ変換を用いて解析することによって、大腸運動の特徴を捉えることができるかどうか検討し、新たな知見を得たので報告する。

実 験 方 法

1. SG 慢性植え込み実験

対象は体重 10~15 kg の雑種成犬 5 頭である。Pentobarbital-NA 25 mg/kg を静脈内投与して気管内挿管を行い、正中切開にて開腹した後、大腸輪状筋の収縮波を記録するために、伊藤 (1976) の方法により作成された SG (スターメディカル社製 F-12IS) を大腸の横軸方向に漿膜面に縫着した。縫着部位は結腸起始部 (C1)、結腸括約部 (C2)、遠位結腸 (C3) の計 3 カ所とした。結腸括約部は前腸間膜動脈肛門側末梢枝と後腸間膜動脈口側末梢枝の吻合部位とした (梶田, 1937; 沖, 1986)。縫着に先だって Atropine sulfate 0.1 mg/kg を静脈内に投与し、縫着操作に伴う大腸の収縮運動を抑制した。縫着終了後、導線は皮下を通して後頸部より体外へ誘導し固定した。また導線やコネクターをイヌの咬損より保護するためジャケットを着装し、さらに導線は塩化ビニール製の管の中を通した。大腸運動の記録は、イヌが手術侵襲の影響から完全に回復した術後 2 週間目より開始し、24 時間連続的に無拘束意識下で行った。

イヌの飼育には固形飼料 (DS-2: オリエンタル酵母工業 K.K.) 約 20 g/kg を 1 日 1 回一定時刻に投与し、水分は水道水を自由に摂取させた。

2. 大腸運動の記録

SG の出力ラインをアナログ・デジタル信号

変換装置 (BIOPAC System 社製 MP100) を介して直換コンピュータに接続した。専用ソフトウェア (同社製 AcqKnowledge v3.1) を用いて電気的信号を収縮波情報に変換し、コンピュータのデータベースに取り込んだ。データの取り込みは 1 sample/sec の速度で 24 時間連続的に行った。

3. 収縮波記録の解析

記録した収縮波の解析を次のような順序で行った。

(1) 取り込んだ収縮波の 1 つひとつを検討し、発生頻度が高く典型的波形であると考えられる収縮波を選定した。

(2) 選定した収縮波を高速フーリエ変換により解析し、周波数成分 (スペクトル) 分布の基本形を決定した。

(3) 基本形スペクトルの主成分以外の周波数を原波形から除去し、波形を再構成して、高速フーリエ変換を施行した。その結果得られたスペクトルと基本形スペクトルを比較し、再構成した収縮波形が原波形の特徴を表現しているかどうか検討した。

(4) 排便前後の収縮波を高速フーリエ変換により解析し、その特徴を検討した。

(5) 逆蠕動波を高速フーリエ変換により解析し、その特徴を検討した。

実 験 結 果

(1) 収縮波形の選出

記録した大腸運動曲線の中から、典型的な収縮波形が出現していると考えられる部分を選び、代表例として Fig. 1 に示した。記録部位によって多少の形の違いを認めるものの、漸増漸減する特徴的な収縮運動が大部分を占めていた。それらの中から1つの収縮波 A を選出し

た。

(2) 高速フーリエ変換による解析

選出した収縮波 A を高速フーリエ変換により解析した (Fig. 2-a)。なおサンプリングポイント数は 1024 に設定した。高速フーリエ変換を施行して得られた結果をスペクトル分布のグラフとして表した。グラフは 1.0 mHz, 17.5 mHz,

Fig. 1. A representative colonic motility curve. Most part of the curve is composed of gradually increasing and decreasing characteristic contractile motions. The contractile wave A was chosen as a typical example.

Fig. 2-a. Analysis of the contractile wave A by fast Fourier transform. The spectrum shows a trimodal distribution of three main components with peaks at around 1.0, 17.5 and 83.0 mHz. The number of sampling points was set at 1024.

Fig. 2-b. When the frequencies other than those of the 1.0 mHz component were removed from the contractile wave A, a clean sine curve was obtained. The spectrum of this wave is identical to that of the 1.0 mHz component of the original contractile wave A. The 1.0 mHz component represents the slow, big motion in the original contractile wave.

Fig. 2-c. The 17.5 mHz component represents the relatively rapid, gradually increasing and decreasing, big motion in the original contractile wave.

Fig. 2-d. The 83.0 mHz component represents the rapid, small motion in the original contractile wave.

Fig. 2-e. By preserving only the three main components of contractile wave A and reconstructing the wave, contractile wave A' was produced which has the waveform of contractile wave A without the fine noises. No significance difference was detected between contractile waves A and A' by the paired t-test ($P=0.7611$).

83.0 mHz に主成分をもつ 3 峰性であった。

(3) スペクトル分布の検討

3つの主成分以外の周波数を原波形から取り除き、得られた波形を高速フーリエ変換で解析した。1.0 mHz を中心とする成分から得られた波形は、原波形のゆったりとした大きな動きを表していた (Fig. 2-b)。17.5 mHz を中心とする成分は、原波形の漸増漸減する比較的速く大きな運動を表していた (Fig. 2-c)。また 83.0 mHz を中心とする成分は、原波形の速く細かい運動を表していた (Fig. 2-d)。3つの波形それぞれに高速フーリエ変換を行って得られたスペクトル

は、原波形のスペクトル分布の3つのピークに一致した。

さらに3つの主成分のみを残して、収縮波形を再構成した。再現された収縮波形 A' は、原波形から細かいノイズを除去した収縮波形となった (Fig. 2-e)。収縮波形 A' に高速フーリエ変換を行って、3つの主成分以外の周波数成分が消失していることを確認した。

(4) 排便前後の収縮波の解析

前出の収縮波 A は排便前の収縮波である (Fig. 1)。収縮波 A の約 210 分後に伝播性大収縮波群 (Giant Migrating Contractions :

Fig. 3. A spectrum of the contractile wave B recorded after defecation. It has a trimodal distribution with 3 components centering at 2.0, 20.5 and 74.2 mHz, similar to the spectrum of contractile wave A recorded before defecation.

Fig. 4. Colonic motility curve containing antiperistaltic waves D_1 and D_2 .

Fig. 5. The spectrum of antiperistaltic wave D_1 . It has a trimodal distribution with three main components at 1.0, 14.7 and 84.0 mHz.

Fig. 6. The spectrum of antiperistaltic wave D_2 . It has four peaks around 2.0, 16.6, 78.1 and 138 mHz. The peak at around 138 mHz is not observed in D_1 , and the component at 16.6 mHz is markedly weaker compared to D_1 .

GMC)が出現し、排便を認めた。GMCの約120分後に認められた収縮波Bを、排便後の収縮波形の例として高速フーリエ変換により解析した (Fig. 3)。解析の結果得られたスペクトルは2.0 mHz, 20.5 mHz, 74.2 mHzに主成分をもつ3峰性の分布を示した。

(5) 逆蠕動波の解析

逆蠕動波を含む大腸運動曲線の1例をFig. 4に示す。遠位結腸 (C3) に出現した逆蠕動波 D_1 は結腸括約部 (C2) まで伝播しているが (D_2)、近位結腸 (C1) では捉えられていない。まず D_1 を抜き出し、高速フーリエ変換により解析した

(Fig. 5)。得られたスペクトル分布は1.0 mHz, 14.7 mHz, 84.0 mHzに主成分をもつ3峰性であった。一方 D_2 の解析結果では2.0 mHz, 16.6 mHz, 78.1 mHz, 138 mHzの4つの周波数帯にピークを認めた (Fig. 6)。138 mHz 付近のピークは、 D_1 には存在しなかった。 D_1 に比べて16.6 mHzの成分にいちじるしい減衰を認め、16.6 mHz, 78.1 mHz, 138 mHzの3つの成分がほぼ均等化していた。

以上の解析結果は5頭のイヌすべてに共通して認められた。

考

Fourierによれば、音、光、熱伝導などこの世の中に存在するありとあらゆる波は、たとえばのように複雑な波形であっても、単純な波の足し合わせとして表すことができる。すなわち、波を構成している1つひとつの組成を知ることができれば、それらの和として波の特徴を説明することが可能となる。フーリエ変換とは、いわば太陽光を7色の光の帯に分解するプリズムのような作用をもつ数学的解析法である。

高速フーリエ変換は今日まで医学の分野において脳波、心電図、血管を伝わる脈動の解析などに応用されてきた。しかし腸管運動のように、極めて周期の遅い波形へのオンラインでの応用が困難であったため、高速フーリエ変換による腸管運動の解析報告はほとんどなされていない。

岡田は(1982)は麻酔下バルーン法を用いて記録した大腸収縮波形を、高速フーリエ変換によって解析した。このとき、記録した波形のコンピュータへの入力用手的に行われていた。そのためサンプリングポイント数が64ないし128と少数にとどまったのも、無理からぬことであろう。しかし実際に高速フーリエ変換を行って得られたパワースペクトルは、非常に精度の高いものであった。

一方、生体内での消化管運動の解析方法は、X線造影法 (Cannon, 1898; 1902) な腹窓法 (福

察

原, 1930; 1939)などの形態学的観察法、バルーン法 (Pfungger, 1887) や Open tip 法 (Trotman ら, 1982) などの内圧法、筋電図法 (Szurszewski, 1969; Code ら, 1975)、SG法 (Jacoby ら, 1963; 伊藤, 1976; Itoh ら, 1977) などが用いられてきた。

とくに伊藤 (1976) によって開発・実用化されたSG法は、SGを消化管の漿膜面に縫着するため、内圧法のような内腔占拠の弊害を起こすことなく、消化管平滑筋の収縮力を直接表現することが可能である。さらに耐久性にもすぐれ、生理的状況下での消化管運動を長時間にわたって連続的に測定できる点が大きな特徴である。現在多くの研究者によってさまざまな研究に用いられており、大腸運動の解析に適した方法の1つであると考えられる。

これらのことから、SG法で測定した大腸収縮運動を直接コンピュータに取り込み、高速フーリエ変換を行うことができれば、生理的条件下に近い状態で大腸収縮波形の特徴を捉えること可能であると考えられた。

まず大腸収縮波の基本形を決定するために、記録したすべての波形を観察して、発生頻度が高く典型的波形であると考えられる収縮波を選定した。記録できた収縮波の数はイヌ1頭につき2,000個余りに達した。記録された大腸運動曲線の中から選んだ収縮波Aは、1頭のイヌの

収縮波群から選んだ波形のうちの1つであり、漸増漸減する収縮運動を示している。これは勝浦 (1992) の報告にある大腸運動の基本形と一致した。

高速フーリエ変換を行う際、まず注意すべき点は、解析にかけるサンプリングポイント数を2の n 乗個にしなければならないということである。今回は1,024に統一した。

変換後の結果はスペクトル分布のグラフとして表した。収縮波Aのスペクトル分布において1.0 mHz成分の本来の大きさは、17.5 mHz, 83.0 mHz成分に比べてはるかに大きなものである。1.0 mHzの成分をすべてグラフに収めると他の2つの主成分があまりにも不明瞭となるため、あえて17.5 mHz, 83.0 mHzの成分を拡大する形で図示した。

つぎに、スペクトル分布の3つの主成分が表現している原波形の特徴は何か、ということをも明らかにするための検討を行った。

まず1.0 mHzを中心とする成分を残して、他のすべての周波数を収縮波Aから取り除いた。すると完成した波形は大きなゆったりとした動きを示しており、sineカーブを描いていると考えられた。その波形に高速フーリエ変換を行うと、1.0 mHzを中心とする成分のみのグラフができあがった。このグラフは収縮波Aのスペクトル分布のうち、1.0 mHzのピークに一致した。よって1.0 mHzを中心とする成分は、原波形のゆったりとした大きな動きを表していることがわかった。同じような操作を17.5 mHzおよび83.0 mHzを中心とする成分に対しても行ってみた。その結果、17.5 mHzを中心とする成分は、原波形の漸増漸減する比較的速く大きな動きを表していることがわかった。また83.0 mHzを中心とする成分は、原波形の速く細かい動きを表していた。松島ら (1989) によれば、結腸の収縮運動様式はtonic contractionにphasic contractionがsuperimposeした収縮波群を基本形とする。すなわち、1.0 mHzを中心とする成分はtonic contractionに、17.5 mHzを中心とする成分はphasic contractionに相当すると考えられた。

さらに3つの主成分のみを残して、収縮波形を再構成してみた。完成した収縮波A'は、原波形から細かいノイズを除去してなめらかなような収縮波形となった。収縮波A'に高速フーリエ変換を行うと、確かに3つの主成分以外の周波数成分が消失していた。この操作によって、収縮波A'は収縮波Aの特徴を決して損なうことなく、より視覚的に理解しやすい波形になったようにも思われた。収縮波AおよびA'の差を検定する目的でPaired t-testを行ってみたが、有意差を認めなかった($P=0.7611$)。いずれにせよ収縮波Aの特徴は、比較的単純な3つの収縮波の足し合わせで表現されていると考えられた。

以上の解析結果は5頭のイヌすべてに共通して認められた。基本波形の3つの主成分の値はイヌによっても、あるいは同一個体内においても差を認めたが、基本的に1 mHz付近、20 mHz付近、80 mHz付近にピークをもつ3峰性の分布を示した。

この結果をもとに、排便前後の収縮波と逆蠕動波の解析を行った。

収縮波Aは排便前の波形である。排便後の波形の例として収縮波Bを高速フーリエ変換により解析した。収縮波Bは一見すると収縮波Aとはかなり異なる波形にみえるが、解析の結果得られたスペクトルは2.0 mHz, 20.5 mHz, 74.2 mHzに主成分をもつ3峰性の分布を示した。このように大腸の収縮波の基本形は、排便前後で変化しないことがわかった。

つぎに逆蠕動波の例として収縮波D₁, D₂の解析を行った。ここにあげた逆蠕動波D₁, D₂は近位結腸まで伝播する前に消失していた。D₁のスペクトル分布は1.0 mHz, 14.7 mHz, 84.0 mHzに主成分をもつ3峰性であった。これは基本形のスペクトル分布に準じた形であると判断した。ところがD₂の解析結果では2.0 mHz, 16.6 mHz, 78.1 mHz, 138 mHzの4つの周波数帯にピークを認めた。138 mHz付近のピークはD₁に存在しない成分である。またD₁に比べて16.6 mHzの成分にいちじるしい減衰を認め、16.6 mHz, 78.1 mHz, 138 mHzの3つの成分がほ

ば均等化していた。この結果から、伝播の途中で消失する逆蠕動波は、伝播するにしたがってスペクトル分布のピークの減衰と多峰化を認め、ピークの消失とともに収縮波そのものも消失すると考えられた。逆蠕動波は順蠕動波と同じような形をしていても、実はまったく異なる性格をもつ波であることがわかった。このように、収縮波形を見ただけでは説明不可能であった逆蠕動波の特徴も、高速フーリエ変換による解析で説明可能となった。

以上、排便前後の収縮波と逆蠕動波の解析結

果も、5頭のイヌすべてに共通して認められた。

これまで大腸の収縮波は“漸増漸減する複雑な収縮波形”という認識のもとで分析されてきた。しかし高速フーリエ変換というフィルターを通してみると、実際は複雑な波形ではなく、基本的に3つの比較的単純な収縮波の足し合わせで構成されていることが明らかになった。この基本形をもとに高速フーリエ変換による大腸収縮波の解析をすすめて行けば、大腸運動の新たな側面を解明できるのではないかと期待している。

結

SG法を用いたイヌの大腸運動曲線の連続記録と、高速フーリエ変換による解析によって、以下の知見を得た。

(1) 大腸運動曲線の基本形は漸増漸減する収縮波形を示した。

(2) 基本波形の周波数成分は1 mHz付近、20 mHz付近、80 mHz付近にピークをもつ3峰性の分布を示した。

(3) 1 mHz成分はsineカーブを描き、基本波形のゆったりとした大きな収縮運動を表して

語

いた。

(4) 20 mHz成分は基本波形の漸増漸減する比較的速く大きな運動を表していた。

(5) 80 mHz成分は基本波形の速く細かい運動を表していた。

(6) 大腸収縮波の基本的な周波数成分は、排便の前後で変化を認めなかった。

(7) 伝播の途中で消失する逆蠕動波においては、伝播とともに周波数成分のピークの減衰と多峰性を認めた。

謝

稿を終えるにあたり、御指導と御校閲を賜った榊原宣教授に深甚なる謝意を表す。また終始御指導、御鞭撻を頂いた長濱 徹教授ならびに落合 匠博士に深謝致するとともに、御協力下さった研究室諸兄、ならびに

辞

近藤惺吾主任はじめ動物実験室の皆様へ感謝する。

なお本論文の要旨は、第38回日本平滑筋学会総会(奈良)において発表した。

文

献

Cannon, W.B. (1898). The movement of the stomach studied by means of the röntgen rays. *Am. J. Physiol.* **1**: 359-382.

Cannon, W.B. (1902). The movement of the intestines studied by means by the röntgen rays. *Am. J. Physiol.* **6**: 251-227.

Code, C.F. and Merlett, J.A. (1975). The interdigestive myo-electric complex of the stomach and small bowel of dogs. *J. Physiol.* **246**: 289-309.

福原 武 (1930). 小腸ノ運動. 日新医学 **20**: 640-659.

福原 武 (1939). 福原式腹窓手術法に就いて. 日生理誌 **4**: 30-32.

伊藤 漸 (1976). Extraluminal strain gage force transducer の作成と慢性植込. 日平滑筋会誌 **13**: 33-

43.

- Itoh, Z., Aizawa, I., Takeuchi, S. and Takayanagi, R. (1977). Diurnal changes in gastric motor activity in conscious dogs. *Am. J. Dig. Dis.* **22**: 117-124.
- Jacoby, H.I., Bass, P. and Benett, D.R. (1963). In vivo extraluminal contractile force transducer for gastrointestinal muscle. *J. Appl. Physiol.* **181**: 658-665.
- 勝浦康光 (1992). 排便を中心とした大腸運動の日内変動に関する実験的研究. 日平滑筋会誌 **28**: 15-24.
- 康 謙三, 西山真一, 福原 毅, 安富正幸 (1984). 筋電図, メカノグラムによる conscious dog の 24 時間大腸運動の記録と消化管ホルモンの作用について. 日平滑筋会誌 **20**: 363-365.
- 榎田亀次郎 (1937). 大腸ノ運動. 日生理誌 **2**: 196-212.
- 松島康博, 岡本英三, 豊坂昭弘, 鈴木栄太郎, 能勢勝義, 中村章彦 (1989). 犬結腸運動の日内変動—strain gauge force transducer 法による長期観察—. 日平滑筋会誌 **25**: 47-54.
- 岡田謙司, 今井浩達, 外川芳子, 野崎正勝, 鶴見介登, 藤村 一, 長岡俊治 (1982). Tiemonium iodide のイヌ生体位結腸運動に及ぼす影響. 日薬理誌 **80**: 495-503.
- 沖 真 (1986). 大腸運動における結腸括約部の役割とその壁内自律神経構築に関する実験的研究. 日本大腸肛門病会誌 **39**: 382-392.
- Pfunger, V. (1887). Versuch uber die Bewegungen des Antrum Pyloricum beim Menschen. *Central-bl J. Physiol.* **1**: 220-223.
- Sarna, S.K., Codon, R. and Cowles, V. (1984). Colonic migrating and nonmigrating motor complexes in dogs. *Am. J. Physiol.* **246**: G355-G360.
- Szurszewski, J.H. (1969). A migrating electric complex of the canine small intestine. *Am. J. Physiol.* **217**: 1757-1763.
- Trontman, I. and Misiewicz, G. (1982). Methods in human alimentary motility. *Br. J. Clin. Pharmacol.* **14**: 757-763.

(受付日 平成 8 年 6 月 24 日; 受理日 平成 8 年 8 月 5 日)