

運動負荷が胃腸活動および胃電図に及ぼす 影響に関する研究

富山県立大学	木下史也
(共同研究者) 福井大学	高田宗樹
名古屋大学	藤掛和広
岐阜医療科学大学	杉浦明弘
中部学院大学	高田真澄

The Effect of Acute Exercise on the Electrogastrogram

by

Fumiya Kinoshita
Toyama Prefectural University
Hiroki Takada
University of Fukui
Kazuhiro Fujikake
Nagoya University
Akihiro Sugiura
Gifu University of Medical Science
Masumi Takada
Chubu Gakuin University

ABSTRACT

The electrical activity of the gastrointestinal is measured using an electrogastrogram (EGG). The EGG is a noninvasive procedure to evaluate gastrointestinal motility and autonomic nervous system activity. However, EGG do not have been applied to clinical fields as electrocardiogram and electromyogram because EGGs are often

contaminated by electro activity in the myocardia and muscles of diaphragm with respiration. Furthermore, analytical methods of the EGG do not have been established yet. Therefore, we examined the influence of the change on electric activity of the stomach after each exercise load of which the number is set to be two intensities in this paper. As a result, regardless of exercise intensity, the spectral density at the normal frequency band (2.4-3.7 cpm) of electrical activity in the stomach tended to decrease after the load. This may indicate a decrease in the gastric activity due to the exercise load. In addition, the translation error increased significantly only after strong exercise loading. Differences in exercise intensity are thought to affect not only the pacemaker of the stomach but also the electrical activity emitted from other organs.

要 旨

胃腸の電気活動を低拘束・簡便に測定できるひとつの方法として経皮的胃電図がある。胃電図検査は消化管運動や自律神経活動を評価する非侵襲な方法として知られている。しかし、胃電図の記録は呼吸に伴う横隔膜や心筋による電気活動の影響を受けやすく、また胃の運動機能との関連性や得られたデータの解析法が確立されていなかったことから、心電図や脳波のように広く臨床応用されるに至らなかった。そこで、本論文では、胃電図の基本的な生体応答の確認として、異なる2種類の運動強度を用いて運動負荷後の胃の電気活動の影響について検討した。その結果、運動負荷後では運動強度に関わらず、胃の正常周波数帯域(2.4-3.7cpm)でのスペクトル密度は減少した。これは、運動負荷による胃の活動低下を示している可能性がある。また、運動強度が高い負荷後では並進誤差の値が有意に増加した。運動強度の違いは、胃腸だけでなく他臓器から発せられる電気活動にも影響を及ぼしていると考えられる。

緒 言

消化管の一部である腸は「第2の脳」といわれ、自律神経やホルモン、サイトカインなどの情報伝

達物質を介して脳と関連し合っている¹⁾。過度なストレスがかかることで腹痛、下痢、便秘などの消化器症状が生じるのは、自律神経のバランスが乱れることに起因しており、腸は摂取した食物の消化吸収機能だけでなく免疫機能も有し、がんや糖尿病にも関係している²⁾。また、身体を整えるだけでなく、心の安定に関与するセロトニンの前駆物質が産生される器官でもある³⁾。このように、腸の健康を維持することは心身の健康にもつながる。最近、腸内フローラブームによって腸内環境と健康について注目されるようになった。腸内には善玉菌、悪玉菌、日和見菌が混在しており、これらの菌が腸内環境を保っている。腸内環境を整えるために食生活に気を付けることは言うまでもなく、加えて運動、休養があげられる。適度な運動は全身の血行を促進し自律神経を整える。このように、自律神経が整えられることによって腸の蠕動運動が促進されるなどの効果が期待できる⁴⁾。一方で、過度な運動負荷は交感神経優位となり消化管機能を抑制するため、適度な運動負荷強度を明確にしておくことは意義がある。

消化管障害運動機能検査のひとつに、胃腸運動を制御する電気活動を体表面から非侵襲・低拘束に測定できる経皮的胃電図(Electrogastrogram, EGG)がある^{6,7)}。胃や腸にも心臓のように規則

的な電気活動がみられ、電気的に脱分極と再分極を繰り返す。胃の電気活動のペースメーカーは胃体上部 1/3 大彎側に存在し、ここから人では 1 分間に約 3 回の波 (3 cycles per minute, cpm) が幽門部に向かって電気活動を伝播している。このペースメーカーは副交感神経活動の支配を受けているが、自発的に周期的電気活動を起こしている。これは Cajal の介在細胞 (Interstitial cells of Cajal, ICCs) と呼ばれる細胞群のネットワークによるものである⁸⁻¹¹⁾。ICCs から発せられる電気活動だけでは、蠕動運動は起こらず、脱分極時に収縮閾値を超えたときに活動電位が発生し、蠕動運動が起こる。この電気活動は、蠕動運動を伴う反応性電気活動 (Electrical Response Activity, ERA) と、蠕動運動を伴わない調律性電気活動 (Electrical Control Activity, ECA) とに分けられるが¹²⁾、胃電図ではこれらを区別することはできないため、蠕動運動を直接記録するものではない¹³⁾。しかし、胃電図が胃の電気活動であることは違いなく¹⁴⁾、応答確認実験による蠕動運動異常の発見は可能であると考えられる。

本論文では、胃電図を用いて運動負荷に伴う胃の電気活動を計測し、運動負荷の強度が胃の電気活動に及ぼす影響について検討した。

1. 実験方法

被験者は消化器疾患の既往および消化器症状を有しない 22-27 歳の若年男性 19 名 (平均 ± 標準偏差: 22.8 ± 1.4 歳) を対象とした。被験者には事前に実験の説明を十分に行い、研究の目的と意義、プライバシーの保護、データの取り扱い、中断の保証を記載した記入用紙の回答を持って実験参加への同意を得た。また、実験で得られた電子データは、連結不可能匿名化して記録を残しており、本実験は福井大学大学院工学研究科倫理委員会の承認 (H2017002) を得ている。

実験は、運動負荷前後における安静仰臥位 60

分間の胃電図と心電図を記録した。運動負荷には、ルームランナー (DK-822E, DAIKOU) を使用し、被験者は時速 10km での走行 (高強度運動) および時速 5km での歩行 (中強度運動) を各 15 分間行った。また、運動の代わりとして 15 分間の立位安静状態 (低強度運動) を用いた対照実験も行った。本実験で用いた運動負荷の METs スコアは、高強度運動の場合は 9-10 程度であり、中強度運動の場合では 3-4 程度とされている¹⁵⁾。また、低強度運動での METs スコアは 1.0-1.5 程度とされており、いずれも日常的な運動の範囲である。同一被験者での各測定は別日に行い、順序による効果を考慮し、測定順はランダムとした。

胃電図の測定には、心電図用ディスプレイ電極 (ブルーセンサー、メッツ) を使用し、図 1 に示すように貼付した。電極の貼付は消毒用エタノールにより皮膚抵抗を十分に低下させた後に行った。胃電図の記録は双極誘導で行い、生体アンプ (Biotop mini, イーストメディック) で増幅し、アナログ入出力カード (ADA16-32/2 (CB) F, CONTEC) を用いて PC 上に記録した。生体アンプの測定条件は感度 100 μ V, 低域遮断フィルタ 0.02Hz, 高域遮断フィルタ 0.5Hz とした。また、すべての被験者で食物の胃内停滞時間を揃えるた

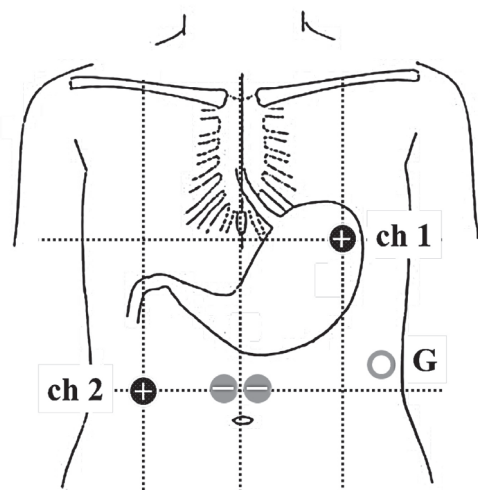


図1 Electrode position

めに、被験者には実験開始2時間前に400kcalの携行食（カロリーメイト、大塚製薬）を経口摂取してもらい、それ以降の飲食は禁止とした。

2. 解析方法

本論文では記録した胃電図と心電図を1kHzにてA/D変換を行い、時系列データを得た。胃電図時系列は、混入筋電図や電子機器からの電氣的雑音の除去のために、得られた時系列データに遮断周波数0.015-0.15Hzのバンドパスフィルタを適用した。また、胃電図の正常周期が1分間に約3回という比較的遅い変動のため、1kHzの胃電図時系列はさらに10Hzで再サンプリングを行った。本論文では、得られた時系列にランニングスペクトル解析を用いて解析を行う。胃電図時系列は、8192点（約13分）の時間窓を600点（1分）間隔で移動させて分割し、それぞれ解析を行った。なお、本論文では、解析区間（測定開始後 t 秒から $t+8192$ ）のうち分割開始時分をその解析区間の代表値として以下では記載する。

分割した胃電図時系列は周波数解析の他にWaylandアルゴリズムによって統計的に推定される並進誤差を用いた^{16,17)}。ここで、Waylandアルゴリズムによって推定される並進誤差（Etrans）は位相空間に埋め込まれたアトラクタの軌道の滑らかさを定量的に評価する指標である。埋め込み空間で再構成されたアトラクタの軌道が滑らかであれば、時系列に決定論性があるといえる。並進誤差は正の値をとり、0に近ければ時系列を生成する数値モデルが決定論的、大きければ確率論的とみなすことができる。特に、対象がブラウン運動であるときは並進誤差の値は1と推定される。

胃電図時系列の周波数解析では、分割された各時系列に高速フーリエ変換を行い、bradygastria（1.1-2.4cpm）、正常周波数帯域（2.4-3.7cpm）、tachygastria（3.7-5.0cpm）に着目し、これらの周波数帯域のパワースペクトル密度（power spectral

density, PSD）を算出した¹⁸⁾。また、胃電図における7cpm近傍の変動は結腸の電気活動を反映するという報告があることから¹⁹⁾、6.0-8.0cpmの帯域についてもPSDを算出した。

胃電図と同時計測した心電図について、心拍変動解析（Heart Rate Variability, HRV）にて解析を行った²⁰⁾。HRVでは心臓の拍動であるRR間隔を時間領域・周波数領域から解析することにより、交感神経系および副交感神経系の指標を定量化することができる。抽出したRR間隔時系列は512点の時間窓を60秒間隔で移動させて分割し、それぞれ解析を行うことで胃電図時系列の分割時間に対応させた。本論文では、低周波成分LFを0.04-0.15HzのPSD、高周波成分HFを0.15-0.4HzのPSDとして、交感神経の活動指標とされるLF/HF及び心拍数（HR）を算出した。

算出した各解析指標は、運動負荷前に記録されたすべての時刻での平均値と負荷後の各時刻について比較を行った。本論文では、Shapiro-Wilk検定によって正規性を判断し、正規分布に従う場合は対応のある t 検定、従わない場合にはWilcoxonの符号付き順位和検定を用いて効果量を算出し、有意水準は0.05とした。また、本論文では周波数解析に着目して、非線形解析の詳細な結果を除いて報告を行う。

3. 結 果

高強度運動時における測定開始後10分から20分の胃電図波形を図2に示す。負荷前のch1波形では、約3cpmの変動が大きく確認できる。また、負荷前のch1波形に比べ負荷前のch2波形は振幅が低下しており、約3cpmの変動より高い周波成分が重畳している。負荷後のch1波形では、負荷前のch1波形に比べ振幅が低下し、約3cpmの変動も小さくなった。負荷後のch2波形では、負荷前のch2波形に比べ、重畳する高い周波成分が増加した。

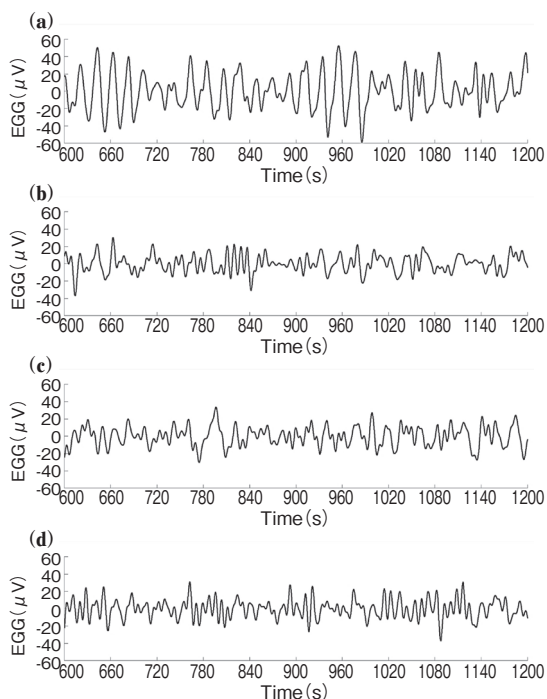


図2 Typical EGGs in same subject

- (a) ch1 at before acute exercise, (b) ch2 at before acute exercise,
(c) ch1 at after acute exercise, (d) ch2 at after acute exercise

分割した胃電図時系列に対し、高速フーリエ変換を行い、bradYGastria (1.1-2.4cpm), 正常周波数 (2.4-3.7cpm), tachyGastria (3.7-5.0cpm), 結腸 (6.0-8.0cpm) の各帯域における PSD を算出した。ch1 での結果を図 3-5, ch2 での結果を図 6-8 に示す。低強度運動時では, ch1 の tachyGastria 帯域で, 負荷前に比べ負荷後の 40 分以降で断続的に値が有意に増加したが (図 3c), 低強度運動時の周波数解析では, それ以外の帯域に有意差はみられなかった。中強度運動時では, ch1 の正常周波数帯域で負荷前に比べ負荷後の 35 分時から計測終了時まで値が有意に減少した (図 4b)。また, ch1 の tachyGastria 帯域では負荷前に比べ負荷後 15-20 分時点で断続的に値が増加した (図 4c)。ch2 では, bradYGastria 帯域と tachyGastria 帯域で負荷前に比べ負荷後の 1-5 分時点で値が有意に増加し (図 7a,c), 正常周波数帯域では負荷前に比べ負荷後の 25 分時から計測終了時まで

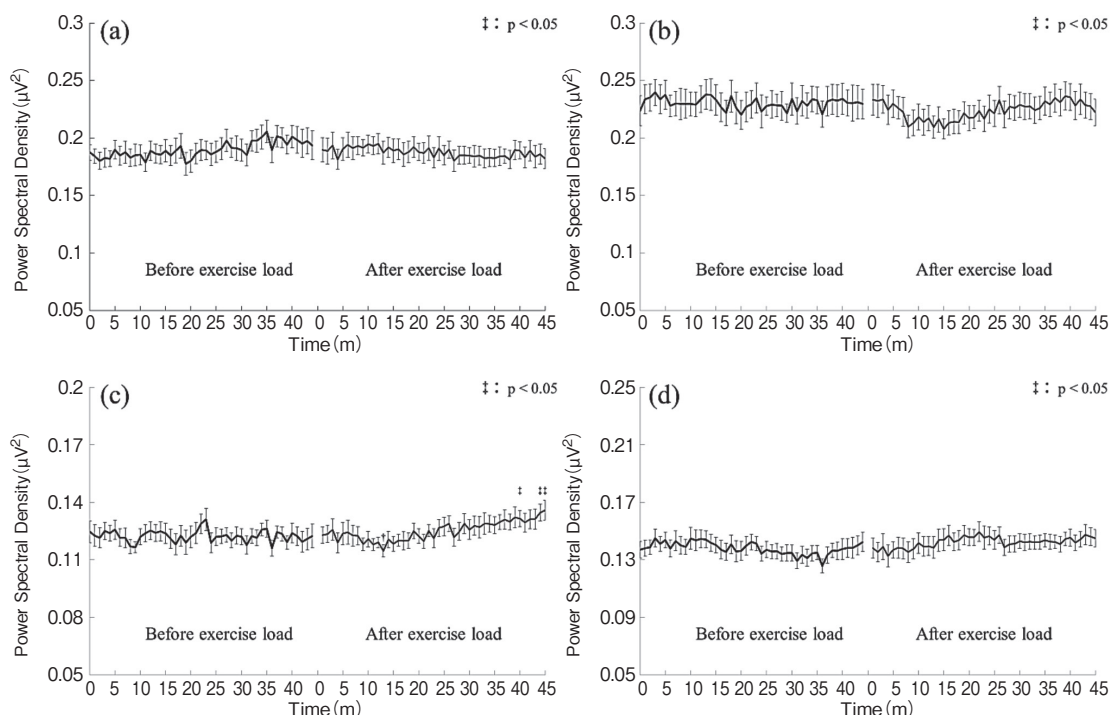


図3 Average value of PSD in ch1 at control (mean $\pm$ SE)

- (a) 1.1-2.4 cpm, (b) 2.4-3.7 cpm, (c) 3.7-5.0 cpm, (d) 6.0-8.0 cpm

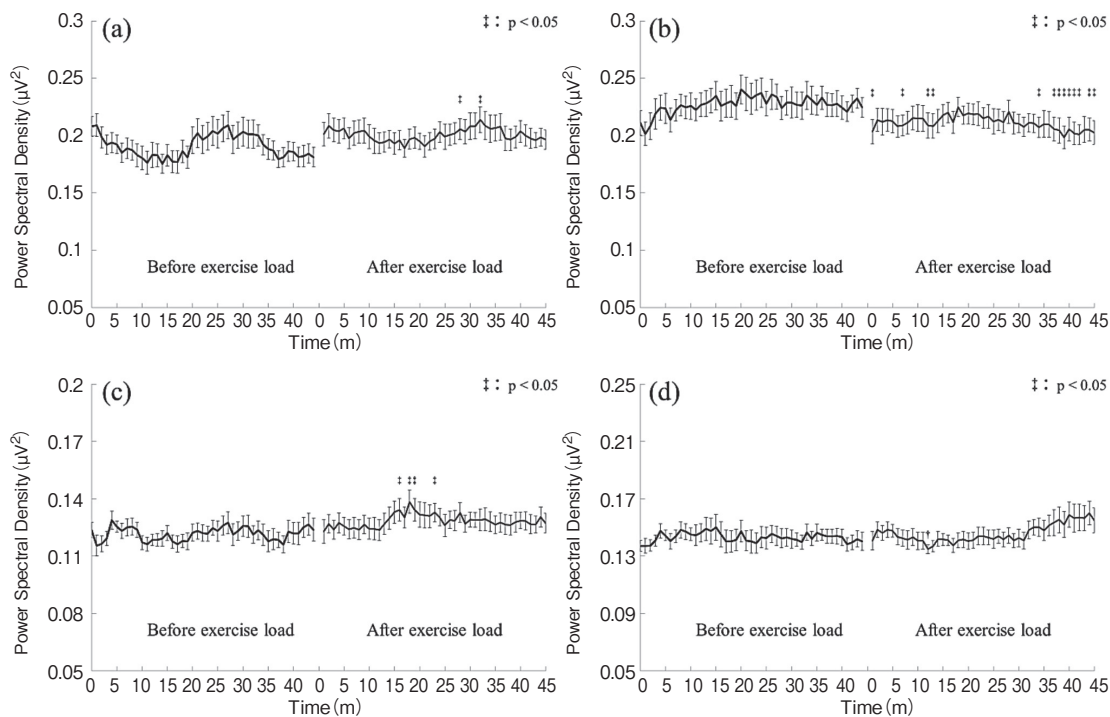


図4 Average value of PSD in ch1 at 5 km/h (mean $\pm$ SE)

(a) 1.1-2.4 cpm, (b) 2.4-3.7 cpm, (c) 3.7-5.0 cpm, (d) 6.0-8.0 cpm

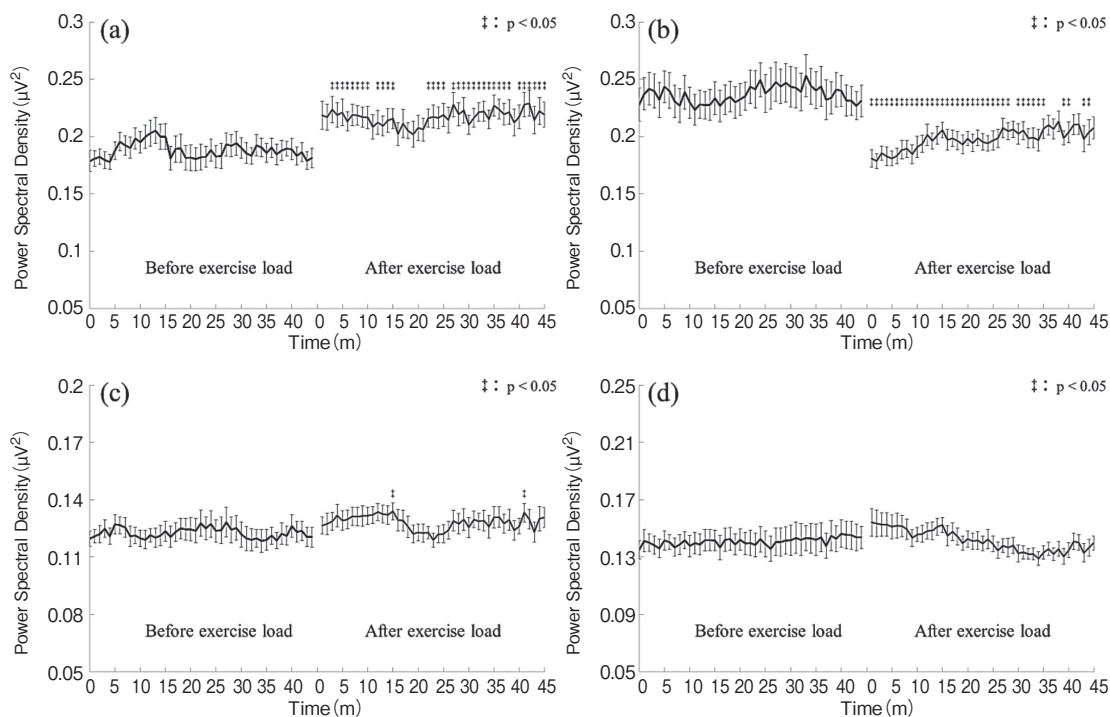


図5 Average value of PSD in ch1 at 10 km/h (mean $\pm$ SE)

(a) 1.1-2.4 cpm, (b) 2.4-3.7 cpm, (c) 3.7-5.0 cpm, (d) 6.0-8.0 cpm

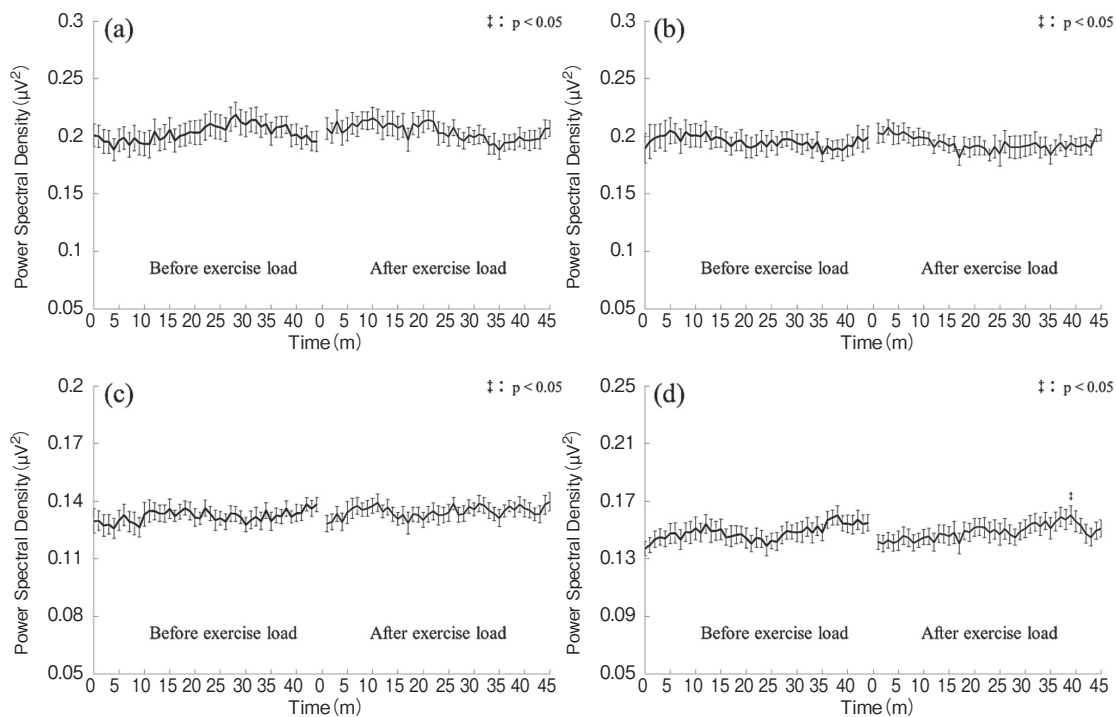


図6 Average value of PSD in ch2 at control (mean $\pm$ SE)

(a) 1.1-2.4 cpm, (b) 2.4-3.7 cpm, (c) 3.7-5.0 cpm, (d) 6.0-8.0 cpm

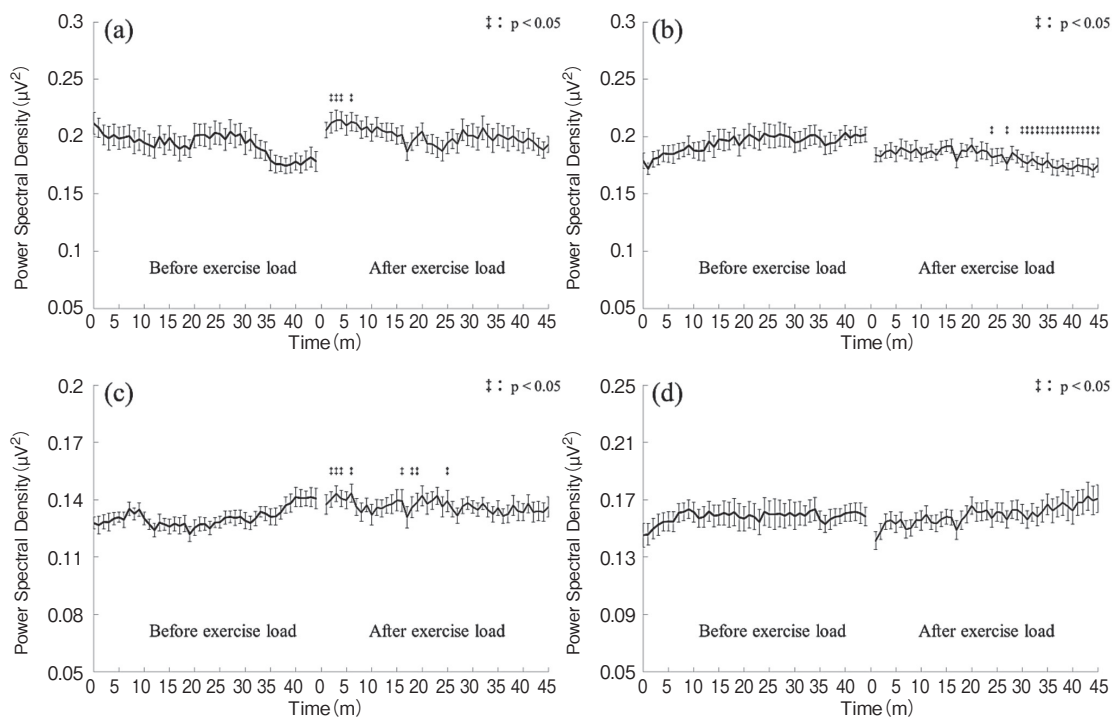


図7 Average value of PSD in ch2 at 5 km/h (mean $\pm$ SE)

(a) 1.1-2.4 cpm, (b) 2.4-3.7 cpm, (c) 3.7-5.0 cpm, (d) 6.0-8.0 cpm

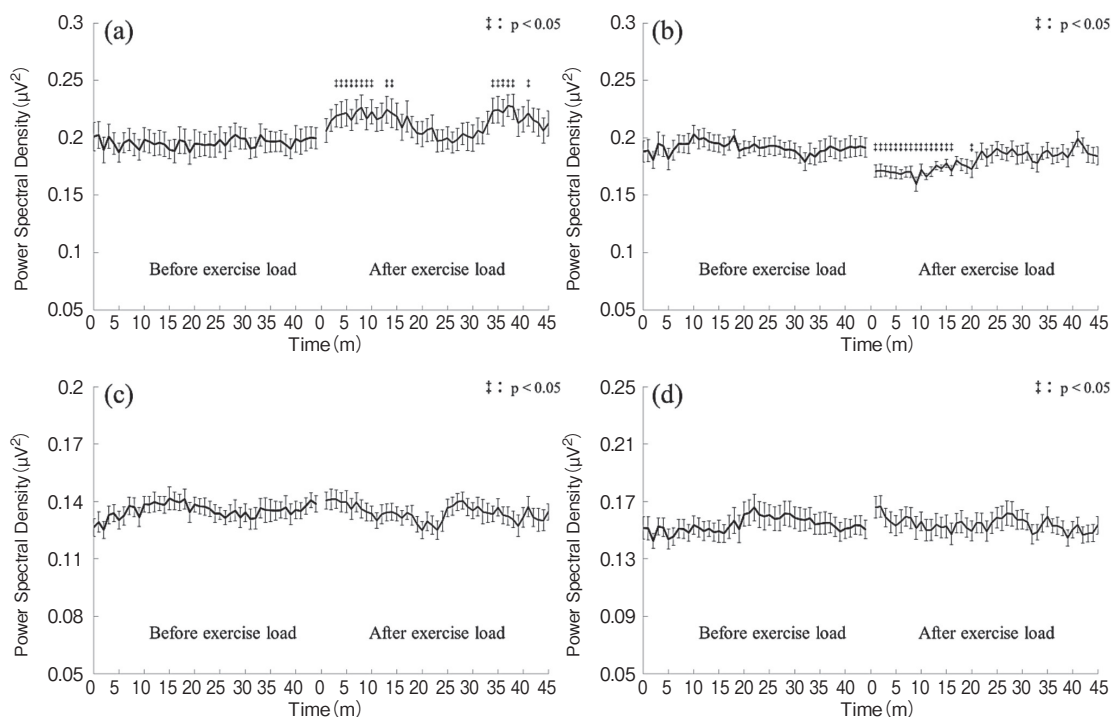


図8 Average value of PSD in ch2 at 10 km/h (mean $\pm$ SE)
 (a) 1.1-2.4 cpm, (b) 2.4-3.7 cpm, (c) 3.7-5.0 cpm, (d) 6.0-8.0 cpm

値が有意に減少した (図 7b)。高強度運動時では、ch1 の bradycastria 帯域で負荷前に比べ負荷後に値が有意に増加し (図 5a)、正常周波数帯域では負荷前に比べ負荷後に値が有意に減少した (図 5b)。ch1 でみられた有意傾向は、負荷後の計測開始から計測終了時まで持続した。ch2 では、bradycastria 帯域で負荷前に比べ負荷後 3-10 分時および 33-38 分時で値が有意に増加した (図 8a)。正常周波数帯域では負荷前に比べ負荷後の 0-16 分時で値が有意に減少した (図 8b)。

次に、胃電図と同時に記録した心電図解析を行った。低強度運動時では、心拍数において負荷前に比べ負荷後の 0-8 分時で値が有意に増加した (図 9a)。中強度運動時では、心拍数は負荷前に比べ負荷後の 0-30 分時および 41-44 分時で値が有意に増加し (図 9c)、LF/HF では、負荷前に比べ負荷後の 0 分時および 29-39 分時で値が有意に増加した (図 9d)。高強度運動時では、心拍数と

LF/HF とともに負荷前に比べ負荷後の 0 分時から計測終了時まで値が有意に増加した (図 9e,f)。

4. 考 察

本論文では、胃電図を用いて運動負荷に伴う胃の電気活動を計測し、運動負荷の強度が胃の電気活動に及ぼす影響について検討した。その結果、中・高強度運動時では、胃の正常周波数帯域の PSD が減少する傾向を示し、運動による一時的な胃腸活動の低下を示していると考えられる。また、この傾向は中強度運動時に比べ高強度運動時に顕著にみられ、高強度運動後には食物の消化活動に適さない状態が誘発される可能性が示された。

低強度運動時での負荷前後における有意差については ch1 の tachyastria 帯域で断続的に有意に増加したが (図 3c)、それ以外の帯域ではみられなかった (図 3a,b,d)。このことから、METs ス

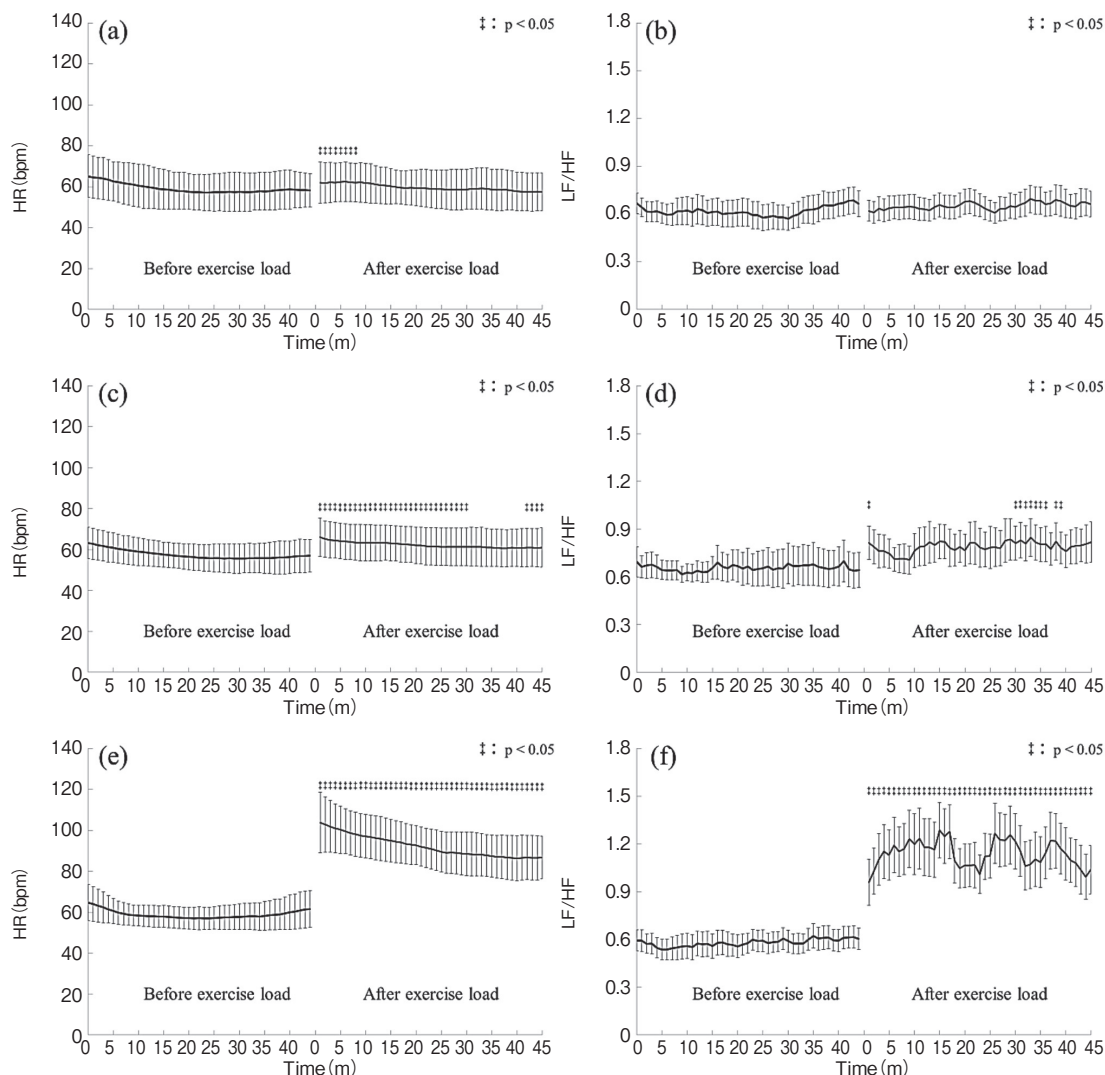


図9 Average value of HR and LF/HF (mean $\pm$ SE)

(a) HR at control, (b) LF/HF at control, (c) HR at 5 km/h, (d) LF/HF at 5 km/h, (e) HR at 10 km/h, (f) LF/HF at 10 km/h

コアが1.0-1.5程度の低強度運動では、胃電図の各周波数帯域へ及ぼす影響は少なく、このとき胃の電気活動には定常性がみられることが確認された。また、運動負荷として歩行・走行を用いた中・高強度運動時では、胃の正常周波数帯域のPSDが減少した(図4b,5b)。これは、運動による一時的な胃腸活動の低下を示している可能性がある。この傾向は、中強度運動時に比べ高強度運動時に顕著にみられた。また、高強度運動時では運動負荷後のbradYGastria帯域でPSDの増加が顕著

にみられた(図5a)。bradYGastriaはパワースペクトルの徐波領域の積算パワーを表していることから、走行後には胃排出能の遅延や低下を引き起こしている可能性がある。

一般的に自律神経バランスによって、副交感神経活動が優位になると消化管運動は亢進し、交感神経活動が優位になると消化管運動は抑制される。本研究でみられた現象は、運動によって交感神経活動が優位になり、消化管活動が抑制されたことに起因するものであると考えられる。この副

交感神経活動および消化管運動の一時的な抑制がどれだけ継続して、その後の消化管活動にどのように影響するかを解明することは衛生学的な視点から大変、意義深い。一方、サーカディアンリズムを無視した社会環境や不規則な生活、環境の変化や過剰なストレスなどが自律神経バランスを崩して、自律神経失調をきたすとされる。これにより機能的胃腸症などを引き起こすことが知られている。本論文における中・高強度運動により、自律神経バランスに関する調整能を活性化させることが期待される。

一方で本論文では詳細に報告していないが、胃電図時系列に対し非線形解析指標である Etrans を用いて解析を行っている。胃電図時系列の Etrans の値はいずれの時系列も 0.5 近傍で変動しており、胃電図時系列が決定論と確率論の境界に位置していることが確認された。特に、高強度運動時では ch1 において負荷前に比べ負荷後の計測終了時まで値が有意に増加した。走行による運動負荷は胃の電気活動を記述する数理モデルが変化させる可能性がある。

5. 結 語

本論文では、胃電図を用いて運動負荷に伴う胃の電気活動を計測し、運動負荷の強度が胃の電気活動に及ぼす影響について検討した。その結果、高強度運動後には一時的に食物の消化活動に適さない状態が誘発される可能性が示された。今後は胃電図の生成子における複雑性を多角的に議論した上で、ウェアラブルデバイスを用いて胃腸の電気活動を計測し、そのライフログ化に関しても検討を行う。

謝 辞

本研究に対し助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) S. Fukudo, T. Nomura, M. Hongo, Impact of corticotropin-releasing hormone on gastrointestinal motility and adrenocorticotrophic hormone in normal controls and patients with irritable bowel syndrome, *Gut*, **42**(6) 845-849(1998)
- 2) 宮村実晴, 新運動生理学〈下巻〉, 真興交易医書出版部(2001)
- 3) 谷莉, 福土審, 過敏性腸症候群とセロトニン, 心身医学, **50**(1) 11-17(2010)
- 4) H. Peters, de W. R. Vries, G. P., Vanberge-Henegouwen, et al., Potential benefits and hazards of physical activity and exercise on the gastrointestinal tract, *Gut*, **48**(3) 435-439(2001)
- 5) P. Verger, M. T. Lanteaume, J. Louis-Sylvestre, Human intake and choice of foods at intervals after exercise, *Appetite*, **18**(2) (1992)
- 6) W.C. Alvarez, The electrogastrogram and what it shows, *Journal of the American Medical Association*, **78**, 1116-1119(1922)
- 7) L.K. Kenneth, M. Robert, Handbook of Electrogastrography, *Oxford University Press*, Oxford (2004)
- 8) 中村江里, 鬼頭佳彦, 福田 裕康ら, 胃平滑筋の自発活動発生機序, 日本薬理学雑誌, **123**(3) 141-148(2002)
- 9) 鳥橋茂子, Cajal細胞の構造と機能, 小児外科, **37**(4) 467-472(2005)
- 10) I. Takayama, K. Horiguchi, Y. Daigo, et al., The Interstitial Cells of Cajal and a Gastroenteric Pacemaker System, *Arch. Histol. Cytol.*, **65**(1) 1-26 (2002)
- 11) L. Thomsen, T.L. Robinson, J.C.F Lee, et al., Interstitial cells of Cajal generate a rhythmic pacemaker current, *Nature Medicine*, **4**, 848-851, (1998)
- 12) A.J.P.M. Smout, E.J. Van Der Schee, J.L. Grashuis, What Is Measured in Electrogastrography?, *Digestive Diseases and Sciences*, **25**(3) 179-187 (1980)
- 13) J.Z. Chen, R.W. McCallum, Electrogastrography: Principles and Applications, *Raven Press*, (1994)
- 14) F. Pezzolla, G. Riezzo, M.A. Maselli, Electrical activity recorded from abdominal surface after gastrectomy or colectomy in humans, *Gastroenterology*, **97**(2) 313-320(1989)

- 15) B.E. Ainsworth, W.L. Haskell, S.D. Herrmann, et al., 2011 compendium of physical activities: A second update of codes and MET values, *Medicine & Science in Sports & Exercise*, **43**(8) 1575-1581 (2011)
- 16) R. Wayland, D. Bromley, D. Pickett, et al., Recognizing determinism in a time series, *Physical Review Letters*, **70**(5) 580-582(1993)
- 17) H.Takada, Y.Simizu, H.Hoshita, et al., Wayland tests for differenced time series could evaluate degrees of visible determinism, *Bulletin of Society for Science on From*, **19**(3) 301-310(2005)
- 18) 日本自律神経学会, 自律神経機能検査第 5版, 文光堂(2007)
- 19) S. Homma, Isopower mapping of the electrogastrogram (EGG), *Journal of the Autonomic Nervous System*, **62**(3) 163-166(1997)
- 20) B. Pomeranz, R.J. Macaulay, M.A. Caudill, et al., Assessment of autonomic function in humans by heart rate spectral analysis., *American Journal of Physiology*, **248**, 151-153(1985)