

携帯型胃電図の開発と栄養生理学への応用

第1報 多チャンネル生理情報解析システムの開発

市丸 雄平, 沈 惠芳, 小林 美佳子

(平成11年9月30日受理)

Development of Ambulatory EGG Monitoring System and It's Application for Nutritional Physiology

Part 1 Development of Analysis System of Multichannel Physiological Signal including EGG

Yuhei ICHIMARU, Hui Fang SHEN and Mikako KOBAYASHI

(Received on September 30, 1999)

はじめに

1922年に胃および小腸に周期的な電気活動が存在することが報告された^{1,2)}。その後、腹壁表面より電気現象が記録されたが、この電気現象が胃由来のものであるか否かについては議論が多く、積極的な胃電図の記録と解析は行なわれていなかった。しかし、腹壁よりの電気現象と胃粘膜よりの電気現象との比較、腹壁よりの電気と胃X腺透視を同時記録等詳細に分析した結果、腹壁よりの電気現象は、電極を適切に配置することにより、胃の電気現象を反映していることが明らかにされた³⁻⁵⁾。今日、胃電図は胃の電気現象を経皮的に測定する有用な手段と認められ、臨床分野でも用いられるようになってきた⁶⁻⁹⁾。しかし、その記録時間は、短時間の記録にとどまっている。今日では、多くの生理現象にはサーカディアンリズムあるいはウルトラディアンリズムが存在し、臨床生理学的情報は少なくとも、24時間を単位として記録および解析する必要があることが示されている。そのため、胃電図でも長時間にわたって記録(長時間胃電図記録)する試みもなされるようになってきた。今後は、その生理学的に有用なパラメータ抽出が重要な課題

と考えられる。われわれは、さらに、胃電図のみの解析では、その背景となる生理現象を把握し客観化するのに十分でなく、少なくとも脳波、心電図を同時にしかも長時間記録および解析することが重要であると考え、その定量化を試みている。今回、胃電図、心電図、および脳波を連続記録し、同時に解析するシステムを構築したので報告する。

方法と対象

1. 対象と方法

1.1 対象

健康女子大学生28名を対象とした。平均年齢は22.0歳(19-36歳)である。身長および体重の平均値(標準偏差)は158.1cm(5.1), 50.7kg(5.1)である。このなかより、8名に対して精神的ストレス負荷をおこなった。また、周期的な胃の電気活動の存在頻度を調べるため、食前30分間の胃電図を記録した。

1.2 ストレス負荷試験

胃電図と脳波の関連性を検討するために、精神的ストレス負荷を行なった。具体的には、胃電図、脳波、心電図を10:00AMより装着し、10:30AMより記録を開始した。昼食前30分間連続記録し、11:00AMから11:15AM

まで昼食を摂取させた。その後、ストレス負荷を行なった。負荷終了後、仰臥位で12:30PMまで胃電図・心電図・脳波を記録した。ストレス負荷として、内田式クレペリン検査を行った。はじめに、3分間の練習時間を設け、その後、15分間の精神ストレス負荷試験を2回を行った。1回目と2回目の間に5分間休憩時間を設定した。食事内容はおにぎり2つとした。

1.3. 胃電図, 心電図, および脳波の記録と解析

1.3.1. 胃電図, 心電図, および脳波電極部位

胃電図電極は銀-塩化銀皿電極を用いた。電極の装着部位は、陰極を臍部から剣状突起に向かって2cmの点とした。陽極部は、左中鎖骨線と臍部より左上がり45度の線の交点とした。不関電極は臍部より右2cmの部位とした。電極は3M社製 Red Dot 2245を用いた。心電図はCM5誘導とした。脳波の電極部位は10-20脳波誘導法のC4-A1誘導とした。

1.3.2. データ記録

電気信号は、ヘッドアンプ(生体用アンプ, 日本光電社製AM-601G)を用いて増幅した。胃電図(EGG)記録に際して、生体アンプの時定数を3.0秒, 高周波フィルターを3Hzに設定した。胃電図, 心電図および脳波のアナログ信号はセルクス社製AD変換器(Data Acquisition Unit: CM2301)にデータ送信し256Hzでデジタル化し, NEC(PC-9801)コンピュータを介して光磁気ディスクに記録した。光磁気ディスクに記録したデータは, 光磁気読み取り装置を用いて, ワークステーション(SUN-microsystems)で読み取り, ハードディスクに書き込んだ。ハードディスクよりデータを呼び込み, 独自に開発したプログラムで解析した。

1.3.2. 解析プログラムの開発

プログラムはC言語とB-shellを用いて作成した。デジタル変換されたデータは時系列データとheaderファイルにわけてファイル化した。headerファイルには, データチャンネル数, デジタル変換時間, デジタル変換のビット数, 原波形のオフセット値, ゲインをそれぞれ波形校正用プログラムを用いて書き込んだ。胃電図, 脳波および心電図の図形表示にはWave(マサチューセツ工科大学: G. Moody)を用いた。まず, 波形が正しくデジタル化されているか, CRT画面に表示する

とともに, プリンター(HP: Laser Jet III)に出力した。胃電図は, 定常的に存在するとは限らないので, その存在を定量化するために, 最小自乗余弦スペクトル法を用いて, 胃電図波形の解析を行った。余弦曲線は次式を用いた。

$$Y = M + A \cos(2\pi t / \omega - \theta) + e \quad \dots (1)$$

ここで, Yは推測された余弦曲線であり, Mはメーサー, Aは振幅, ω は周期, tは経過時間, θ は位相, およびeは残差を示す。本研究では, ω を2秒より60秒まで1秒毎に増加させることにより振幅のスペクトル変化を演算処理した。残差の平方和が最小となる余弦曲線を最適余弦曲線とみなし, その周期をその波形の周期変化と設定した。つぎに, 最小自乗余弦スペクトル解析を2分間毎に行なった。胃電図の存在についてのアルゴリズムとして, 今回は, 最適余弦曲線の周期が15-25秒の範囲で, 振幅が $5\mu\text{v}$ 以上である場合を胃の周期的電気現象による波形とみなした。このアルゴリズムにより測定時間に対する胃電気現象の出現時間を求め, 次式(2)に示されるGastric Motility Index (GMIと略す)を求めた。

$$\text{GMI} = \frac{\text{周期性胃電気現象出現時間}}{\text{全測定時間}} \quad \dots (2)$$

また, 周期的胃電気現象の出現時間における, 振幅の平均値をGastric Amplitude Index (GAIと略す)とし, 1分間毎にデータ記録時間全体について連続して演算処理した。

脳波は3秒間の信号についてフーリエ解析を行なった。0.5-4Hz帯域, 4-8Hz, 8-13Hz, 13Hz以上をそれぞれ, デルタ, シータ, アルファ, およびベータ波とし, それぞれの帯域の面積を求め, 脳波の平均周波数を求めた。この演算を3秒毎に連続的に行なった。

心電図はQRS波を自動検出(Aristotle: MIT)したのち, Wave画面でQRS波の誤認識をマニュアルで訂正した。心電図情報より, とくに心電図の自律神経に関するパラメータを抽出するため, 心拍変動解析を行なった。心電図のQRS波を時系列的に配列し, 1次補間法により等時間間隔(300msec)に再度サンプリングを行なった。この等時間間隔データに対してハミングフィルター処理を行ない, フーリエ解析を行った。フーリエ解析は5分毎におこなった。フーリエ解析されたパワースペクトルにより低周波成分(LFA: Low frequency

area), 中周波成分 (MFL: Middle frequency area) および高周波成分 (High frequency area) のパワーの総計をもとめた。

胃電図, 脳波および心電図よりえられたパラメータを連続表示した。

結 果

第1図は胃電図, 心電図および脳波の実波形を表示したものである。シェルプログラムとして, つぎのコマンドを作成した。

```
dspfullegg file from_time to_time
```

file は波形のバイナリーファイル名, from_time は表示開始時間, to_time は表示終了時間である。この図で, 脳波はミリ秒の, 心電図は秒単位の胃電図は10秒単位の変化をしている。このような, データを同じ記録紙に同時に表示して観察することは困難である。この図では胃電図 (EGG) 以外の波形データは判読困難である。胃電図は, 上段は規則的で周期的な運動を行っているが, 次第に高周波成分が混在している。

第2図の左端は胃電図を2分毎に連続表示を示したものである。この表示は次に示すシェルプログラムを用いて行った。

```
dspogg file condition from_time to_time
```

ここで, dspogg は波形データおよび最小自乗スペクトル表示用のシェルプログラムである。file はA/D変換器より得られたバイナリーファイル名である。condition はデータを取得した条件, from_time, to_time はデータ記録開始時間よりの経過時間である。これらの変数を指定することにより, 任意の時間のデータ処理が可能となった。第2図の最上段右図に振幅スペクトル表示を行ったが, ピーク振幅の周波数は21.5秒であり, 振幅は41.6 μV であった。左図は胃電図の波形と余弦曲線を示したものである。第2図の最下段では約10秒の周期が低下し, 11秒の周期成分が増加していたが残差が最小になる周期は19.5秒であった。第3図に心拍変動を30分にわたって示した。右図には心拍トレンドグラムを, 左図は右図に対応する部分のスペクトル解析を行なったものである。この表示は次のシェルプログラムを実行することにより可能となる。

```
dsphtrendspectrum file from_time to_time
```

このプログラムは, 心拍スペクトル解析サブプログラムと, 心拍トレンド表示サブプログラムより構成され, 心

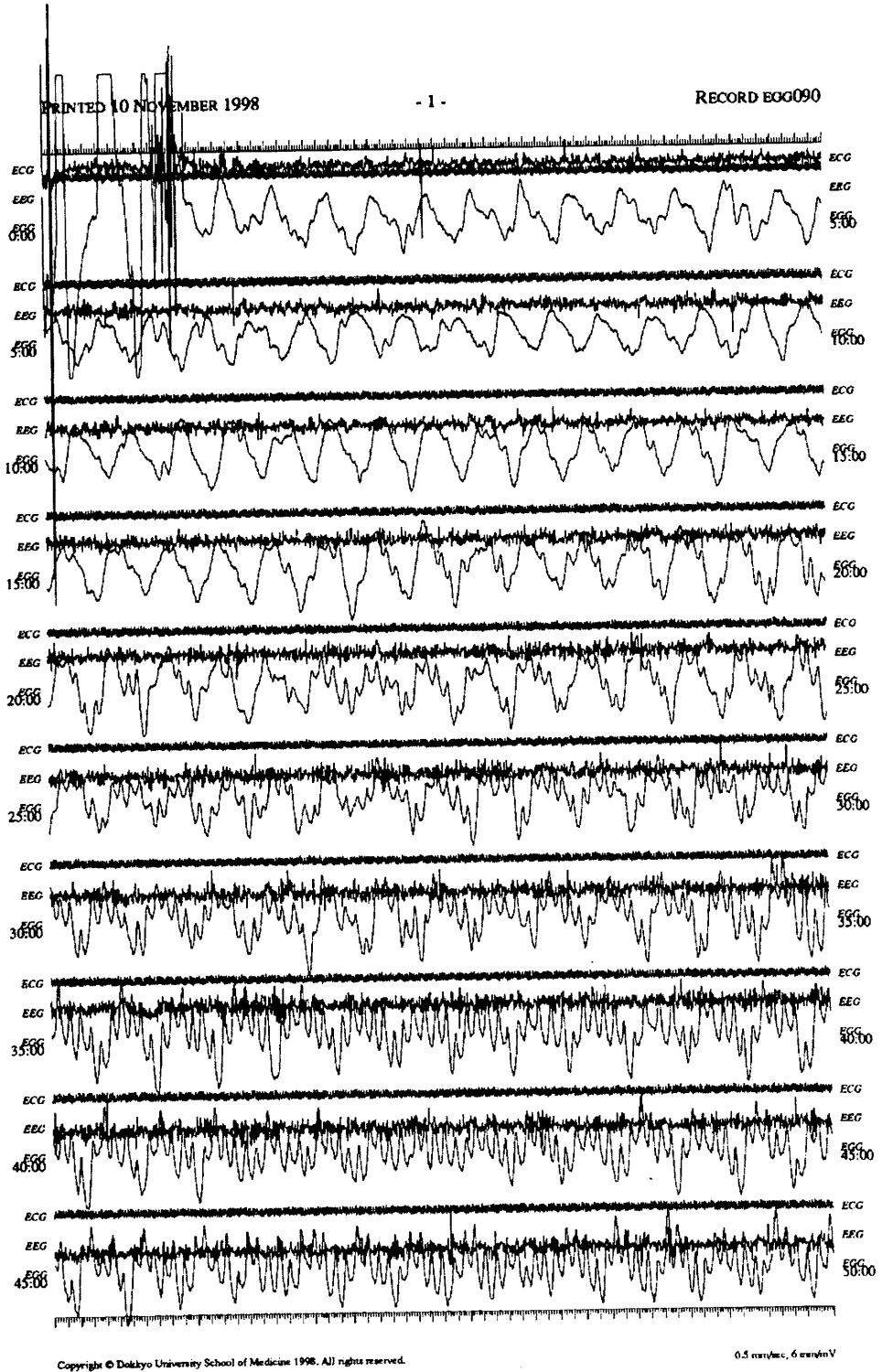
拍スペクトル表示プログラムには, フーリエ解析プログラムを含んでいる。このサブルーチンにより, 低周波帯域, 中周波帯域, および高周波帯域の面積, ピーク値, およびピーク周波数を求めることができる。心拍トレンドプログラムでは心拍トレンドグラムの平均値, 標準偏差, 瞬時最大心拍数, および瞬時最小心拍数が自動的に求められる。最上段の心拍トレンドグラムにおいて, 平均心拍数は86.5bpmであり, 瞬時最大心拍数は99bpm, 最低心拍数は60bpmであった。平均心拍は時間経過とともに, 86.5bpmより67.9bpmと低下していることがわかる。左図はこの心拍トレンドに対するスペクトル表示を行ったものである。最上段の心拍の低周波, 中周波および高周波帯域の面積はそれぞれ, 33.77, 6.24, および5.09bpm \times bpm/Hzであった。最下段では高周波のピークスペクトルが高値を示し, 呼吸が規則的になり, 安定した状態であることが示されている。すなわち, 最上段に示された時間帯より副交感神経機能がより優位になっていることが推測された。

第4図は, 上段より胃電図より得られた胃電図の周期, 振幅, 3段目には脳波の平均周波数, 4段目には心拍変動性の特に出高周波成分, 最下段には心拍数をそれぞれ表示したものである。食前の胃電図は低振幅 (25.7 μV) であり, GMIは55%であった。脳波所見で, 記録開始より10分で周波数の低下が認められた。心拍変動性も記録開始より次第に増加し, 心拍数は減少していた。

食事中には胃電図の振幅が増加し, 一時的に40-60 μV に増加し, その平均値は27.4 μV であった。周期は延長傾向にあったが, 基本的には20秒であった。脳波の平均周波数は食事中に低下していた。また, 心拍数は増加し, 心拍変動性の高周波成分も食事中に増加傾向にあった。

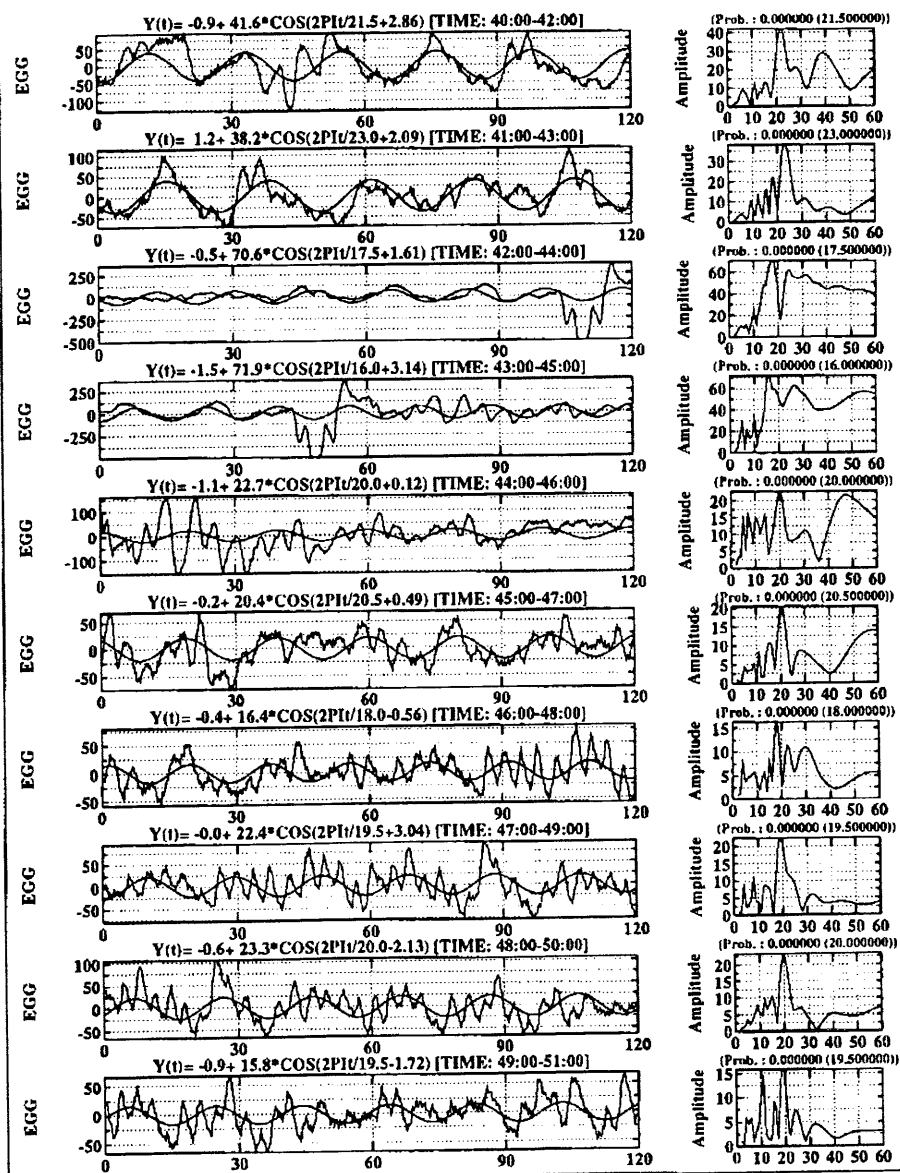
計算ストレス時には胃電図の周期は20秒であったが, 振幅は13.1 μV と, 食事中よりも低下した。脳波は精神ストレス負荷時には増加していた。一方, 心拍変動性はさらに増加していた。2回の計算ストレスの間に休息の時間を設けたが, この時には胃電図の振幅が増加し, 脳波の平均周波数は低下していた。計算ストレス後には胃電図周期は22秒程度で動きが遅くなった。脳波所見では, ストレス時に比べ, 食後に平均周波数が低下し, 心拍も低下傾向にあった。

このような, 表示を参考にし, 対象例の食事前30分の胃電図についてGMIとGAIを計測した。GMI平均

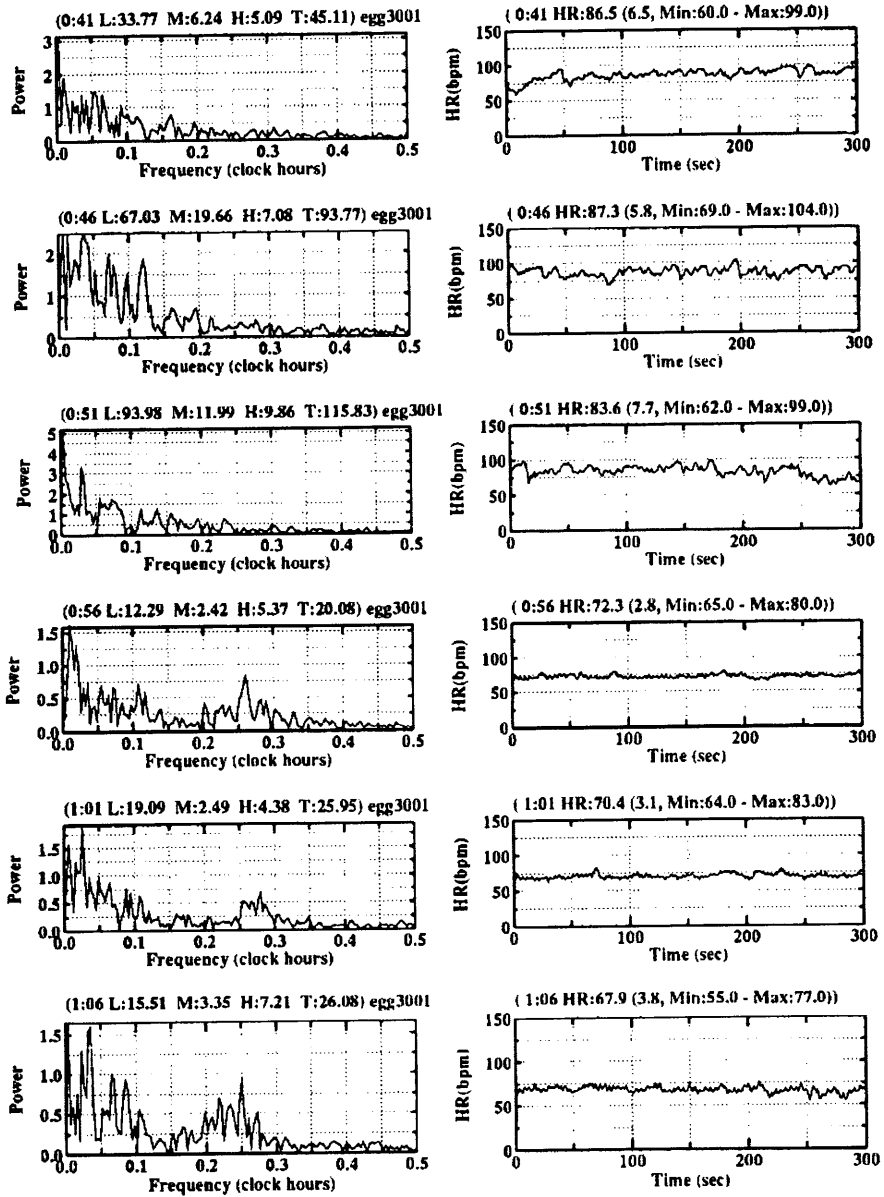


第1図 心電図, 脳波, および胃電図の同時記録と全波形表示 (説明本文中).

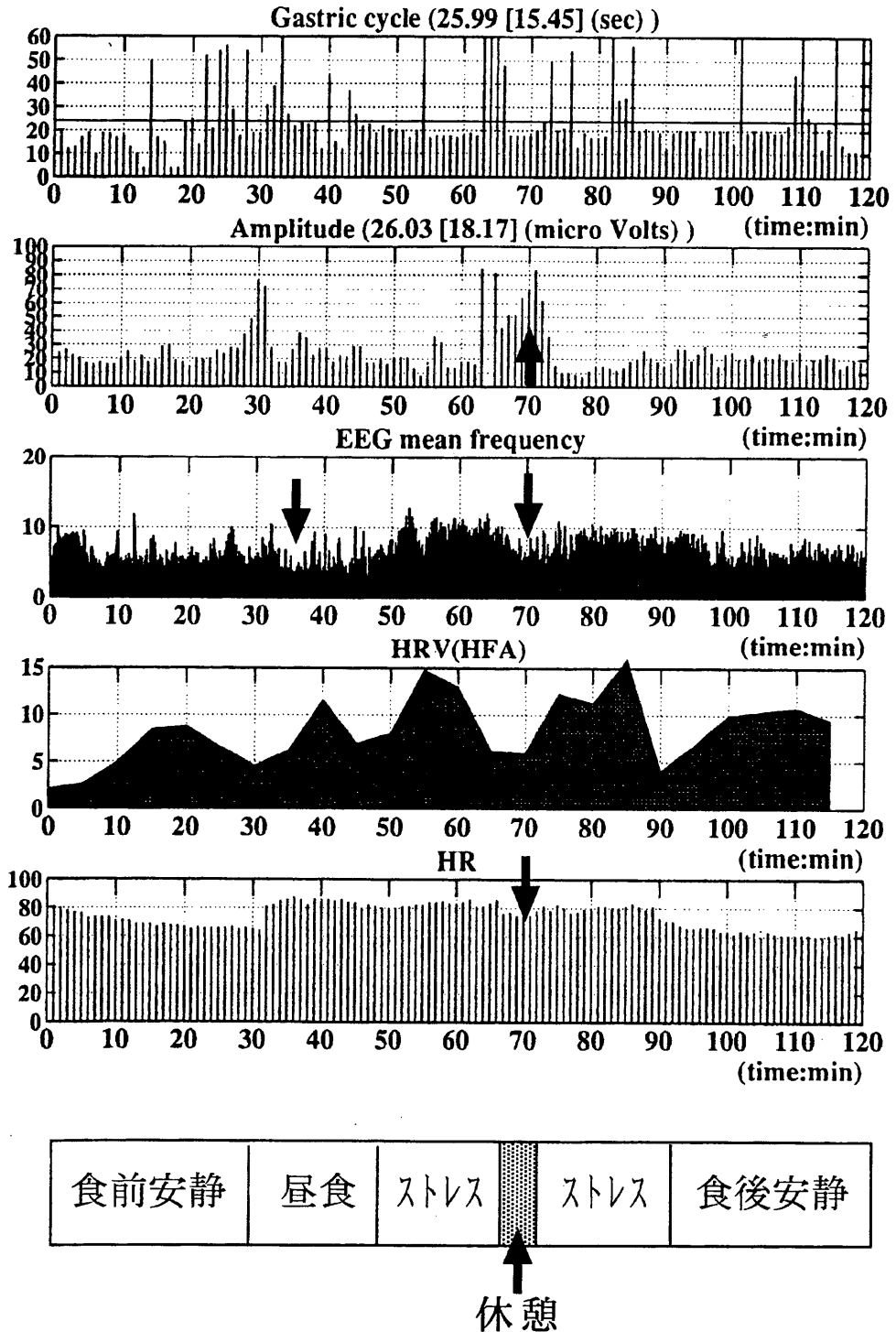
/home/users/yuhei/bin/bin1/dspegg (egg3001 time : 40:00-50:00 : stress)



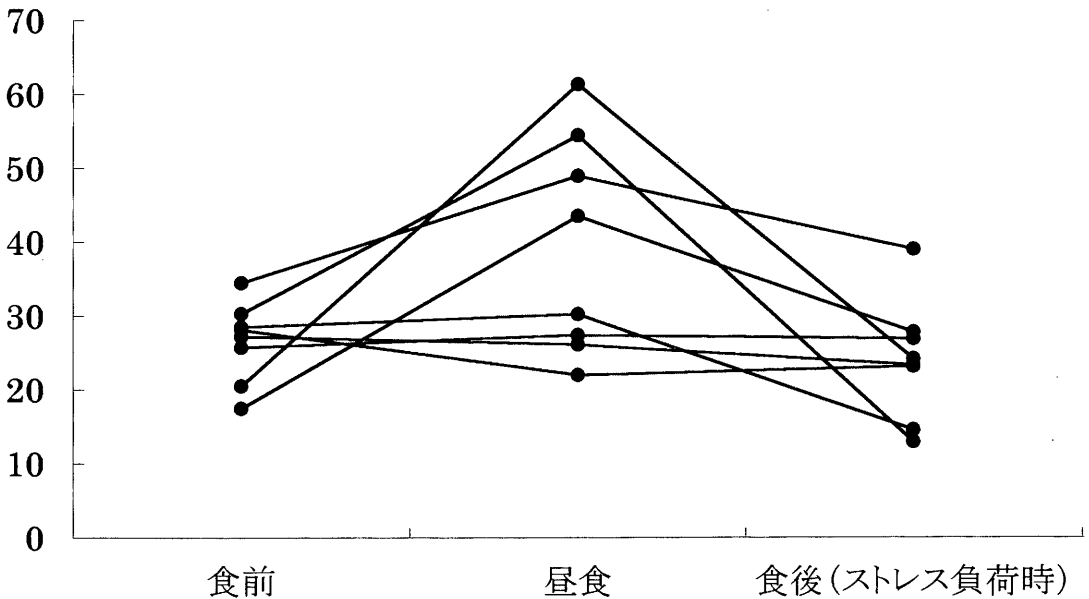
第2図 最小自乗余弦スペクトル法による胃電図周期と振幅の推定



第3図 心拍変動性の自動演算処理(説明は本文中)



第4図 上段より、胃電図周期、胃電図振幅、脳波平均周波数、心拍変動高周波成分、および心拍数の同時時系列表示

GAI(μV)

第5図 食事とストレスによるGAIの変化

(標準偏差)は61.6(26.6)%であり、GAIは30.5(17.7) μV であり、周期は20.7(1.3)秒であった。振幅と身長、体重、肥満度(BMI)には直線関係は認められなかった。

第5図は計算ストレス時(8名)の胃電図の振幅を観察したものである。食事中にGAIは増加傾向を示し、ストレス負荷時には振幅が低下していた。

考 察

今回、胃電図・脳波・心電図の同時解析システムを開発し、胃電図の動態を健康人28名について検討した。このなかで、とくに8名に対しては計算ストレス反応に対する胃電図の動態について検討した。その結果、胃電図は分単位で動的に変化していることが示され、胃電図変化と脳波および心電図には関連性が存在することが示唆された。

従来まで、胃電図・脳波・心電図を同時に解析したシステムの開発は試みられていない。すなわち、胃電図の解析は胃電図現象のみに限られていた^{10,11)}。胃電図は今回の結果を見ても、食事、ストレス状態およびその間の休息時に著しく変化し、胃電図のみの解析では、その動

態を正しくとらえることができないことが示された。また、原波形のみを観察すると、胃電図は20秒の周期、脳波は0.1-1Hzの周期、心電図は1Hz(心拍変動は5-10分)の単位であるため、全体を1枚の記録紙を観察しても、脳波のみ、あるいは胃電図のみを観察の対象として限定しなければならない。そのため、今回は、各生理データを個別にパラメータ化し、第4図のように時系列表示することにより、はじめて全体像が把握できるように設計した。これにより、周期性の胃電図現象と他の生理学的パラメータの関連性を明確にすることが可能になった。

全体のプログラムの設計にあたっては、UNIXシステム管理下でシェルを使用し、波形解析用にはC-言語を使用した。このプログラミング環境は、融通性にとみ、変数値を変更することにより、コンピュータの解析能力を高くした。しかし、UNIXシステムの欠点としては、システムが高価であること、今日の多くの研究所では、DOS/VあるいはMacintoshが多く使用されていることより、今後は、システムの変更が必要であると考えられた。

腹壁よりの電気現象は胃電図、呼吸、心電図、腸雑音成分が混在したものである。高周波成分(電源ノイズ)

を除くためには、電極と皮膚のインピーダンスを低くする必要があるので、電極装着するまえに、皮膚をアルコールおよびゲルで摩擦した。次に、呼吸あるいは心電図・筋電図成分の混入を抑制するため、今回のシステムでは生体アンプの時定数を3秒に、および高周波フィルターで3 Hz以上の周波数成分を除くようにそれぞれ設定した。さらに、胃電図を分析するときには、デジタル波形をサンプリングした後に、さらに300msecで再サンプリングした。しかしながら、雑音成分を完全に除去することは困難であり、呼吸および低周波の体動成分は残存した。このため、最小自乗余弦スペクトル法を用いて、胃電図の周期と振幅を定量化した。この結果、図1においては全ての胃電図において、約20秒の周期現象があることが、統計的に明かとなった。従来より、周期解析には、フーリエ解析、最大エントロピー法が用いられ、それらの長所、問題点については、詳細に解析されている。最小自乗余弦スペクトル法は振幅をより正しく推定する点において、フーリエ解析法あるいは最大エントロピー法よりも優れている。今回、推測周波数は1秒単位で2-60秒まで連続的に周波数解析するように設計した。より細かな解析には周波数のきざみ幅を0.5秒以下に設定することが望まれるが、設定時間を多くすると、その解析に要する時間が長くなる。しかし、胃電図において、もっとも重要なパラメータは、後述するように周波数であるため、周波数のきざみ幅の設定について再検討の必要がある。

胃電図は種々の因子で様々に変化する。また、脳波、心電図とは異なり、実際に、胃電図で1) 定量化すべきパラメータは何であるか、2) 正常の胃電図はどのようなものかという点については研究者によっても異なる。今日までの研究では、周期成分は信頼性が高く、生理的情報も多いと考えられている。胃電図は、主な周波数により bradycastria (0.5-2cpm), normal rhythm (2-4 cpm), tachycastria (4-9 cpm), duodenal/respiratory range (9-15cpm) に分類されている。食後には胃の周波数が増加することが多い¹²⁾。胃周期は性ホルモンの影響も受け、Estradiol, Progesterone の投与により、bradycastria の成分が増加する¹³⁾。また、胃周期は日内変動し、夜間に周期が長くなる¹⁴⁾。しかし、健常人では、胃の周波数は2-4 cpm の範囲にある。このため、今回、胃電図の存在としては、胃の周期性に重きをおき、胃電図存在のアルゴリズムとして、胃の周期が15-25秒

の範囲と設定した。このアルゴリズムを用いて、食前30分の胃電図活動を、健常人28名について、GMIを測定すると61.6%であった。この値に再現性があるのか、各種年齢でどのように変化するのか、いわゆる正常胃電図の定量化について、今後とも対象を増やし、検討する必要があると考えた。また、異常の胃電図周期についての生理学意義、病態については、各種臨床検討により明らかにされるものと考えられる。

胃電図のパラメータとして、周波数の次に重要な因子は振幅である。しかし、その生理学的意味について検討した報告は少ない。胃電図は立体的であるため、胃電図のベクトル変化、胃と腹壁の近接効果により振幅は変化するものと推測されている。この意味で電極と胃の位置の相対関係は大切で、検査のときには一定の体位に限らなければならない。つぎに、食事後に振幅が増加することが多く報告されている。この現象は胃内容の増加により胃の拡張し、その結果として、腹壁表面の振幅増加をもたらしたものと推測されている¹⁵⁾。また、Parkman¹²⁾は、高齢になると、食時前後の主な胃電図パワー比が低下すると報告している。今回は、ストレスと食事の負荷を同時におこなったため、食事前後の振幅はほとんど変化していなかった。

このシステムは、胃電図のみならず、その背景となる心電図および脳波を同時記録しているため、胃電図変化・動態についての基礎研究および臨床に応用することが可能であることが示唆された。したがって、このようなシステムを用いて、多くの胃腸症状の解明と中枢との関連性を明らかにできるものと推測した。

謝 辞

本稿は法政大学八名和夫教授との共同研究であり、ここに謝意を捧げます。本研究は、私学共同研究推進費の援助を受けた。

文 献

- 1) Alvarez, W.C. & Mahoney, L.J.: Action currents in stomach and intestine. *Am. J. Physiol.*, 58 : 476-493, 1922.
- 2) Alvarez, W.C. : The electrogastragram and what it shows. *J.A.M.A.*, 78 : 1116-1119, 1922.
- 3) Bauer, A. J.: Publicover, N.G. & Sanders, K. M.: Origin and spread of slow waves in c nine

- gastric antral circular muscle.
Am. J. Physiol., 249:G800-G806, 1985.
- 4) 小山茂樹, 細田四郎: 胃電図ベクトル解析による胃運動評価. 日本平滑筋誌, 30:21-34, 1994,
 - 5) Hinder, R. A. & Kelly, K. A.: Human gastric pacesetter potential. Site of origin, spread and response to gastric transection and proximal gastric vagotomy. Am. J. Surg., 133:29-33, 1977
 - 6) You, C. H., Lee, K. Y., Chey, W. Y. & Menguy. ,: Electrogastrographic study of patient with unexplained nausea, bloating and vomiting. Gastroenterology, 79:311-314, 1980.
 - 7) 奥野 洋, 本郷道夫, 氏家祐明, 山田昌彦, 西村成夫, 上野正道, 豊田隆謙: 糖尿病性自律神経障害患者の Electrogastrography:(EGG). 自律神経, 27:534-540, 1990.
 - 8) 金桶吉起, 吉池保雄, 桜井信夫, 鷺見辛彦, 平山王昭, 宝珠山稔, 高橋 昭: Electrogastroenterography II 神経変性疾患への応用. 自律神経, 29:3843, 1992.
 - 9) 本郷道夫, 川上人志: NUD と消化管運動機能異常胃電図異常について: 東北大医, 14:2985-2990,1993.
 - 10) Mintchev, M. P., Bowes, K. L.: Extracting quantitative information from digital eletrogastrograms. Med. & Biol. Eng. & Comput. 34:244-248. 1996.
 - 11) Chen, J. McCallum, R. W.: electrogastrography :measurement, analysis and prospective applications. Me d. & Biol. Eng. & Comput. 29:339-350. July, 1991
 - 12) Parkman, H. P, Harris, A. D, Miller, M. A, & Fisher, R.S.: Influence of Age, Gender, and Menstrual Cycle on the Normal Electrogastrogram. Am. J. Gastroenterology., 91 (1):127-33, 1996.
 - 13) Walsh, J. W, Hasler, W. L, Nugent, C. E, & Owyang. : Progesterone and estrogen are potential mediators of gastric slow-wave dysrhythmias in nausea of pregnancy. Am. J. Physiol., 270 (3Pt1):G506-14, 1996.
 - 14) 北守 茂, 並木 正義. 胃運動の基本過程. 消化器科, 18(1):1-10, 1994.
 - 15) Mintchev M.P., Kingma Y.J., and Bowes K.L. Accuracy of cutaneous recordings of gastric electric activity. Gastroenterology. 104:1273-1280, 1993.