

最新の心電図自動解析

心電計の8割が自動解析付きのマイコン心電計となり、病、医院の日常診療はもとより、集団検診になくはならない機器となっている。自動解析の精度の信頼性向上が大きな要因である。ここで自動解析の精度を検証し、長短を見極め、特長を把握することはマイコン心電計を使いこなして診療に役立てる上で有意義だと考える。

本紙では自動解析の精度の問題につき、わが国では当初から開発に携わっておられる、岩塚、岡本両先生に歴史的なことも踏まえて詳細に解説頂いた。原先生にはホルターの自動解析の諸問題を論じて頂いている。

心電図自動解析システムの歴史 —マイコン心電計の出現まで

元愛知県総合保健センター 所長 岩塚 徹



現在、自動解析システムを備えた、いわゆるマイコン心電計が心電計市場の8割以上を占め、日常の診療や集団検診に心電図自動解析は利用されている。心電図検査の場で、被験者に電極をつけて心電計をスイッチ・オンすれば、10秒内に解析結果と整理された心電図波形が同一紙に出力されてくる現象は、今日当然とされているが、ここまで達する過程は、関係者にとっては決して平坦ではなかった。時代のコンピュータなどの電子工学技術の急激な進歩の波に揉まれながら、限りなき解析ソフトの改良と次々と新しい機器の開発が続いた。NHK放送の「プロジェクトX」まがいの連続であった。心電図自動解析の実験段階からマイコン心電計の出現までの名古屋大学医学部循環器グループ、フクダ電子、日本電子の共同作業の20年の過程は、わが国の心電図自動解析の歴史の概要に近いので、ここで紹介する。

1. 心電図自動解析の歴史

1) 実験時代

コンピュータによる心電図の自動解析の研究は1959年から米国で始められた。1961年、マサチューセッツ工科大学(MIT)に留学中の岡島先生(名古屋大)がコンピュータによる心電図波形の区分点認識・自動判読のテストを行い、その後、安井先生(名古屋大)がその研究を引き継いだ。帰国した岡島先生、安井先生が1963年からFrank誘導ベクトル心電図X、Y、Zを用いて、心電図の区分点認識から判読過程までを、大型コンピュータを使用してオフラインによる研究を始めた。初期は用手法で心電図波形を実測し、その値をテープに穿孔する作業から始まり、その後、データー・レコーダーとA-Dコンバーターを使用して研究のテンポが早まっ

た。診断論理は一次判別関数法、確率、枝分かれ法を利用した。安井先生たちは1967年にはミニコンピュータ（JRA5、4kw、日本電子）と市販の心電計（福田エレクトロ）を結び、日本電子と共同でオンライン形式の自動解析を試みた。安井グループ（岡本、横井、渡辺、山内、横田）は臨床で使われる主な診断の論理体系を作り上げ、1970年には実験的には使用可能のレベルに成功した。

2) 黎明期

1969年、愛知県総合保健センターの総合健診で、心電図自動解析システムを利用して午前中の3時間以内に100人の健診者、しかも全員マスター負荷試験を行う計画を立てられた。安井グループ、日本電子、フクダ電子の三者の協同作業で、1971年4月、わが国で初の心電図自動解析システムが日常業務で稼動した。器械構成はミニコンピュータJEC-6（8kw）と市販の一般心電計3台（福田エレクトロ）の構成で、結果出力はテレタイプであった。ここで意外に苦労したのは、コンピュータと3台の心電計を連結するインターフェイスのコントロールボックスの製作であった。情報量に比しコンピュータの容量が小さいので、Frank3誘導が採用され、処理時間は1件、1分程度であったが、心電図の入力レンジが狭く、少しのドリフトでも入力キャンセルされ、一回のみの記録で入力可能は半分に過ぎなかった。当時の診断率は、正常95%、左室肥大79%、完全右脚ブロック87%、ST-T異常42%である。特に不整脈診断が未熟であった。心電図をデーター・レコーダーに収集し、常にプログラムの修正に努力したが、ハード、ソフトともに能力に限界があり、Computer Aided Diagnosisに留まった。

3) ミニコンピュータ時代

1974年、前回より機能の高いミニコンピュータJEC-980A（24kw）と専用の心電計端末装置からなるシステムECP-100が開発された。12誘導心電図が入力され、診断精度も向上し、健診施設、一般病院に納入された。端末装置がオンライン/オフライン兼用に作られたので、集団検診や学童検診にも利用された。1977年、さらにバージョンアップしたJEC-980B（65kw）と5Kのマイクロコンピュータを内蔵したインテリジェント端末としての心電計からなるECP-200が開発された。年齢、性別を入力して、適応したプログラムが選択可能で、8誘導（I、II、V1～V6）を同時入力した。さらに不整脈専用誘導を加えたので、その診断精度が大きく向上した。処理時間は30秒以内となり、Versatec装置により波形と診断結果を直接同一紙面上に出力した。ECP-200は完全

ではないが、ほぼ満足なものとして一般臨床にも利用され、ミニコンピュータの最終システムとなった。



ECP-100
コンピュータ本体（中央）、心電図端末装置（右）、テレタイプ（左）

4) 伝送解析時代

1973年頃から米国ではテレメド社を代表とする電話伝送システムの心電図自動解析が普及し、わが国でも1980年、日本光電が広島医師会で初めて実施し、全国に普及させた。1983年、フクダ電子からデジタル方式のFCP-1000が市販された。しかし、伝送システムはマイコン心電計の進歩により急激に減少し、現在殆ど消えてしまった。

5) マイコン心電計時代

1978年、米国でミニコンピュータを内蔵したカート式心電計IBM5880が市販された。今までの大きいミニコンピュータに小さい心電計が付属する形から、小さいコンピュータが心電計の中に入って、外観は一般心電計と同じになった。その結果、心電図自動解析の製作は、コンピュータ関係の会社から、心電計メーカーに移された。1979年、8ビットのCPUを心電計のコントロールに使い、マイクロコンピュータを内蔵した心電計、FCP-300を開発した。解析精度はミニコンシステムより高く、解析結果はA4判のサイズのレポート用紙1枚に各誘導のdominant波形と15秒の不整脈誘導を抽出して印刷された。また、8インチのフロッピーをつけ、記録した心電図をファイルすることが出来、また、負荷前後の心電図の比較プログラムも装備したが、重量が100kgもあり、その小型化が望まれた。そこで、1981年、重量25kgのFCP-200が開発された。ソフト面での改善もあったが、この心電計の特徴は、文字印刷に使用したサーマルヘッドで心電図波形を出力したことである。心電計からペンとガ



FCP-300
マイクロコンピュータを内蔵した世界初のマイ
コン心電計(1979年)



FCP-200
小型、低価格を実現しマイコン心電計普及のき
っかけとなった(1981年)

ルバノメータが消失した革命的現象であった。それにより器械も小型になり、8個の増幅器あれば、サーマルプリンタによって1、3、6、12の誘導のそれぞれ同時記録は選択自由になった。その結果、さらに小型化を目標として、内部は3素子で、出力が1素子のFCP-13(8.2kg)が作られた。解析精度、価格、大きさなど多くの面から見て、FCP-200は心電図自動解析の本当の実用化であり、これがマイコン心電計の原点となって、その後の新しい機器、また、量産体制に発展し、心電図自動解析は急激に普及した。

6) その後の発展

1980年後半は、心電計自身の機能よりコンピュータ技術の応用による多機能が装備され、さらに心電図データマネージメントや複数の心電計のLANシステムなどが開発された。一方、解析プログラムの方はデータのサンプリングが4mmから2mmになって区分点認識が良くなり、診断論理の追加などで精度はかなり向上して、広く日常臨床で使用されているが、解析困難な特定の分野はそのままを残している。最近、P波、Q波、STの認識がかなり改善され、上室期外収縮、WPW、心筋梗塞などの診断率が向上し、ブルガダ症候群の特異的なST偏位の診断も可能といわれている。また、診断論理の方では複数の所見の組み合わせによる診断、臨床所見やエコー所見を参考して基準を修正するなどが試みられている。最近の処理能力が高いコンピュータを利用して、築き上げられた解析プログラムの全面的な見直しを実施すべきであろう。また、従来の教科書的な基準のみでなく、専門医の経験的な診断論理も追加する一方、コンピュータ向けの判別アルゴリズムも考えていく必要がある。また、不整脈診断、U波の確認などの解析の宿題が沢山残っており、それらの解決を期待している。

心突然死の評価・スクリーニングに!

ブルガダ型心電図の評価基準搭載

- 心突然死のスクリーニングに!
- 患者説明に最適な所見解説機能
- PCによる心電図管理に対応(オプション)

多機能心電計(解析機能付)

CardioStar

FCP-7431

医療用具承認番号:21400BZZ00007000

●医用電子機器の総合メーカー

FUKUDA DENSHI 本社/東京都文京区本郷 3-39-4
フクダ電子ホームページ <http://www.fukuda.co.jp>



心電図自動解析精度の向上



愛知三の丸病院 名誉院長 岡本 登

心電図自動解析が臨床に応用されて三十有余年、解析システムのハード・ソフトウェアの進歩は目覚しく、臨床心電図検査の信頼性の向上に役立っている、心電図自動解析は標準12誘導が基本であるが、その他、運動負荷心電図、ホルタ心電図、重症患者監視装置・モニタ心電図、PCI (Percutaneous coronary intervention) やカテーテル焼灼と関係深い心腔内・冠動脈内心電図、体表面電位図、高分解能・微小電位心電図、など適用は広く臨床に応用されている。以下心電図自動解析の中心的役割を果たし発展してきたフクダ電子システムを紹介しつつ、臨床心電図解析の進歩を概説する。

臨床12誘導心電図解析の進歩

心電図自動診断の進歩には心電計や付属品とくに半導体、LSIなど電子部品やコンピュータ関係技術の進歩に負うところが大きい。例えば、IT技術の進歩は心電図解析についても電子メモリやサーマルプリンタの進歩、多彩な出力様式など、キメ細やかな処理や統計・確率的意思決定手法を可能にした。

心電図解析の信頼性を左右する大きな要因は雑音・アーチファクトの存在と波形区分点認識の精度である。雑音処理には、加算平均、移動平均、ドリフト補正、各種フィルタ使用などがあり精度向上に役立っている。さらに重要な問題は、P波、QRS群、ST-Tなど波形の区分点認識と、波高計測・時間幅計測の精度・信頼性である。雑音処理手法の進歩により区分点認識や波形計測の精度が上昇し、心電図波形診断の信頼性が向上した。また、コンピュータの活用により目視ではとかく識別が困難な項目、例えば心室遅延電位やε波などの微小電位や心室内高周波電位の検出、T波alternans解析、心拍変動性 (HRV) 解析などが可能になった。

CSE心電図データベースを用い解析システムの標準化を目指した国際的共同研究が、自動解析装置の標準化や精度向上、システムの客観的評価に大きな役

割を果たしたことは明らかである。最近では心臓超音波検査やアイソトープの画像診断、PCI (Percutaneous coronary intervention) による診断／治療の信頼性向上など心疾患の病態生理的エビデンスが明らかな大規模データベースの構築が容易となった。従って総合健診や臨床でエビデンスが明らかな階層別の心電図データベースを診断根拠 (gold standard) として、自動解析結果と比較することはシステムの精度・信頼性の客観的評価に極めて有意義である。

Panoramic displayの意義

自動心電計は12誘導 (実際は8誘導) 同時入力であっても、その内部では不整脈誘導は別として出力形式は3誘導、6誘導、12誘導の出力が自由に選択できるようになっている。心電図技術や診断精度は向上したが、四肢誘導の配列方法は、Einthoven以来の慣習で行われている。心臓興奮に伴う心起電力変化は空間的・3次元的现象であり、心起電力の時間的・空間的变化をより理解し易い様に心電図配列を考慮することは臨床的に有意義である。最近の自動心電計は12誘導心電図をすべて記憶し、どのような配列の出力も自由であり、目的によって選択が可能である。従って、心空間起電力ベクトルの変化や平均電気軸の方向をより簡単に理解できるように、従来の四肢誘導の並べ方を変えて、隣接する誘導の順序に従って、aVLからI、aVR、II、aVF、III、と1段に配列する。胸部誘導はV₁からV₆まで従来の順序で、右心から中隔・左心へと解剖的所見と対応して配列する方法が合理的と考えられる。

QT間隔計測精度とQT dispersion

QT延長所見は、抗不整脈薬、肥大型・拡張型心筋症、脳出血・くも膜下出血など中枢神経疾患、電解質異常 (低カリウム、低カルシウム)、遺伝的QT延長症候群 (Romano-Ward症候群、Jervell-Lange-Nielsen症候群)、急性期の心筋梗塞などに認める。遺伝性の

QT延長症候群はTorsades des Pointes、心室頻拍による失神発作を起こし易い重要な異常である。一方、QT短縮は高カルシウム血（副甲状腺機能亢進、悪性腫瘍の骨転移、慢性腎疾患、カルシウム代謝異常）、ジギタリス効果、などに認められる。

標準12誘導心電図の誘導別QT間隔のうち最大値と最小値の時間差がQT dispersion (QTd)と定義され、心室筋の部位による再分極過程の不均一性を表わし、心室頻拍や細動など致死性不整脈発生のリスクの指標とされる。T波は緩やかな波でU波との重なりや平低T波の終点は判定困難で計測誤差が大きい。そこでQT間隔の目視計測と自動計測との差および信頼性を比較するため、CSE計測テスト用心電図50例について、専門医2名と4種の自動計測アルゴリズムによる計測結果を比較分析した。従来T波終点を認識する法として用いられた接線法と、T波の頂点およびT波終点の検索範囲を12誘導より定め、きめ細かに検出する新しい方法を比較検討した。新しいアルゴリズム法は、2名の専門医との相関係数が最も大きく誤差も低くQT計測精度の信頼性が高いものと判定され、1999年のME学会で発表し現在の解析ソフトに採用された。なおQT間隔については、心拍数で補正するBazettの式($QTc = QT / \sqrt{RR}$)の式が汎用されているが、徐脈や頻脈時に過補正される傾向があり、QT延長を徐脈時には読み落とし、頻脈時には読みすぎる傾向があり注意を要する。

Brugada型心電図の解析

12誘導心電図で右脚ブロック型を呈し、V₁、V₂ (V₃)誘導でST上昇を認めるのがBrugada型心電図で、失神や心臓突然死のおそれがある症候群である。1992年Brugada兄弟が、心室頻拍／細動など致死性不整脈を繰り返す8例の心電図的特徴を報告して以来、多くの報告が続きBrugada症候群と呼ばれる。明らかな基礎心疾患を認めず、胸部X線写真、心臓超音波検査、冠動脈撮影、心室造影、血清電解質などに異常所見なく、QT間隔やPQ間隔は正常範囲である。家族性発生が報告され、最近では遺伝子解析がすすみ先天性QT延長症候群や右室心筋症など循環器遺伝子病との共通点や結びつきが指摘されている。V₁、V₂誘導のST上昇パターンにはCoved型(弓型)とSaddle back型(鞍型)、その移行型があり、さらに日内・日差変動がみられる。従って心電図的診断にはデジタル12誘導ホルタ心電図(フクダ電子FM-700)によるスーパーインポーズ記録が大変に有用である。現在のフクダ電子解析ソフトではBrugada型心電図の診断、Saddle-

back型とCoved型の識別が可能である。複数の専門医がBrugada型心電図と判読した20例のうち、自動解析では17例(85%)が正しく判定された。昨年の国際心電図研究会(ISCE)で解析結果を発表し好意的に評価された。なお、ST上昇レベルの閾値設定や、異常Q波、ST-T異常、QT延長などの例の除外、心筋梗塞、冠攣縮性狭心症や左室肥大、早期再分極症候群、などととの鑑別が問題となる。

左室肥大の診断精度

心臓超音波検査(UCG)で左室肥大(LVH)の基準を満足した100例について、6名の専門医が各自別々にその12誘導心電図を判読した。すべての医師がLVHと合意し確認されたのは65例であった。自動解析では、100例のうちLVHが58件、ST-T異常のみ22件、正常範囲6件、その他平低T波や左軸偏位、反時計回転などが14件であった。専門医がLVHと認めた65例のうち58例(89.2%)が自動診断でLVHと診断された。LVHを読み落とした例はすべて左側誘導でQRS高電位を認めなかった。見落とし例の多くは、V₁、V₂誘導のrS波とV₅-V₆の平低T波や左軸偏位か僅かなST-T変化がみられ、70歳以上の高齢者女性に比較的多かった。現在の左室肥大の自動診断基準は人種差を考慮したポイントスコア方式を用い、左側QRS群高電位、左軸偏位、ST-T異常などの所見に重みづけして性別に閾値を修正し判定する。従って左室側QRSの高電位を認めずST-Tに異常を認めない女性の症例では、標準的な診断基準では判定困難であった。コーネルの基準「(RaV_L+SV₃) > 2.0mV」やTV₁ > TV₆所見および左側誘導の陰性U波などの所見を参考にすれば高齢者女性のLVH診断感度は上昇するため、U波解析の必要性と加齢によるR波高の補正が示唆された。

急性期心筋梗塞の心電図

心筋梗塞の超急性期にはT波の増高、QT延長(Hyperacute stage心筋梗塞)が特徴的で、その後、異常Q波、ST上昇、冠性T波の誘導部位と経過より診断する。梗塞部位は誘導別に分類され、前壁(中隔)梗塞はV₁~V₄、側壁梗塞はI、aV_L、V₅、V₆下壁梗塞はII、III、aV_F誘導の所見で診断される。後壁梗塞は、12誘導では異常Q波やST上昇を認めず、V₁、V₂誘導波形の鏡像として捉え、V₁~V₂誘導で、①R/S > 1.0以上、②ST低下、③対称性陽性T波、およびV₅、₆のQRS低電位、平低あるいは陰性T波が認められる。右室梗塞は、右冠動脈近位部梗塞、後下壁梗塞に合併

し易く、V_{3R}、V_{4R}、V₁の1mm異常のST上昇とV₂より左方誘導のST低下が特徴的である。しかし、V_{3R}、V_{4R}を記録しない12誘導心電図では診断困難である。

自動診断の信頼性が劣るとされる超急性期心筋梗塞の時系列心電図を解析し精度を検討した。大学病院救急センターで記録した55症例の時系列126心電図を無作為に選び、6名の専門医が読み直した。全例が冠動脈造影検査で狭窄部位を確認しPCI (Percutaneous Coronary Intervention)を施行した症例である。発症以前の心電図と、専門医6名全員が心筋梗塞と判定するに問題があると合意した心電図11件を除く115例の時系列心電図について、専門医診断と自動診断との一致率を比較した。従来の解析ソフトでは、異常Q波がなくST上昇所見のみの例は読みすぎや読み落としが見られたが、改訂ソフトでは急性心筋梗塞の診断精度が有意に向上した。前壁・側壁梗塞(71件/40症例)の診断一致率は63件(88.7%)、下壁・後壁梗塞(44件/15症例)の一致率は36件(81.8%)であった。急性期心筋梗塞全体では115件(55症例)の心電図で99件(86.0%)が自動診断で正しく判定された。一方、PCIで冠動脈再開通が得られた早期回復例では異常Q波が消失し、冠性T波も浅いか消失例があった。このような心電図はV₁-V₃誘導の初期r波増高不良や減高、slurring、“sloping shoulder”徴候などの高周波成分の解析が必須である。また対称性・冠性T波や非対象性T波の鑑別、二相性T波の処理など、異常Q波やST上昇がない陳旧心筋梗塞の判定アルゴリズムの作成が今後の課題である。

心電図自動診断の総合評価

大学病院の心電図検査室で記録された連続1124件の心電図を循環器専門医6名に独立に読み直し、自動解析所見と比較検討した。従来の解析ソフトに比べ心電図診断の感度・特異度の精度がいずれも明らかに向上した。すなわち、波形診断ではマイコンが正常範囲とした295例は専門医も289例(99.0%)と殆ど正常範囲とした。左室肥大やST-T異常、心筋梗塞、その他についても、症例数が少ないWPW波形や右室肥大や前壁梗塞の一部を除けば90%以上の一致率であった。従来は解析精度の信頼性が低かった高位後壁梗塞や右脚/左脚ブロックの診断一致率は高度であった(図1)。不整脈解析では、心房細動と上室期外収縮に読み落としがあり専門医との一致率がやや低かったが、その他は殆ど100%近い精度が認められた(図2)。臨床12誘導で10秒間の短時間入力で不整脈を解析する中で、低電位であるP波の識別やF・f波

の鑑別アルゴリズムをさらに改良する必要性が指摘された。

虚血性心疾患の心電図自動診断

心電図検査の主な適応の一つが虚血性心疾患の診断である。PCIの多数例の調査で、体表面心電図で異常Q波やST上昇・冠性T波を示す心筋梗塞や急性冠症候群の観察から、心筋虚血部位と冠動脈病変部位および心電図誘導部位との関係がより明らかとなった。また梗塞時のST上昇を示す誘導の対側誘導でのST下降は梗塞部位の残存心筋viabilityの有無と密接に関係があるといわれ、誘導別のST-T解析が重要になってきた。

心筋虚血診断に運動負荷心電図の有用性がさらに高まり、ST低下・上昇(水平型、下降型、盆状、J型低下、dome型・saddle型上昇)、陰性U波、QT間隔延長やQT disoersion (QTd)、心拍調整ST (ST/HR比、ST/HR loop)、T波変動解析によるT-wave alternans (TWA)、微小電位を加算して検出・識別する心室遅延電位(LP)解析など有用な所見が求められる。また、虚血性ST-T異常に虚血性U波の所見を加味すれば、心筋虚血の検出率は心筋シンチや負荷エコー所見と同等といわれる。

急性心筋梗塞やスポーツ時の事故その他、突然死の多くは心臓血管死で、その予知・予測に心電図がどう役立つかが議論がある。Brugada症候群や心筋症、心筋炎や心不全、先天性・後天性の重症心疾患に致死性不整脈の発生頻度が高い。心拍変動解析や、時間領域解析・周波数領域解析、非線形解析、Head-up-tilt試験などは自律神経活動をとらえ、その定量的解析が心事故の予知に有用との報告がある。心電図コンピュータ解析のさらなる応用と研究成果が望まれる。

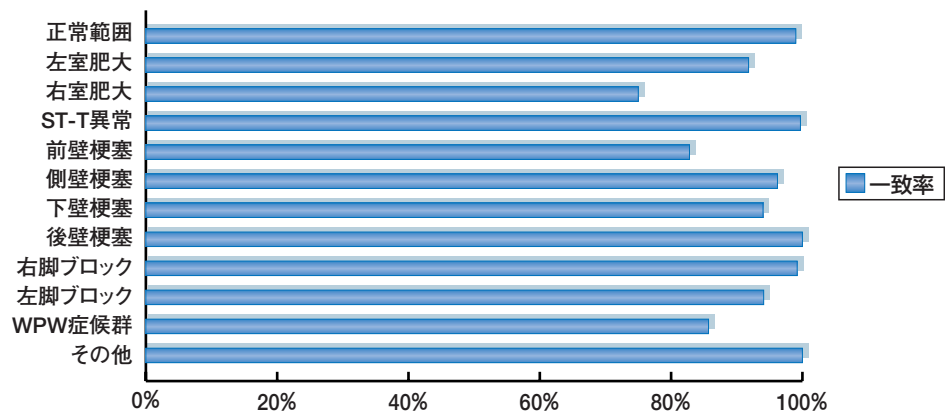
心電図自動診断システム今後の発展

最近のIT技術の進歩に伴い、携帯電話で音声や画像の送受診が簡単になり、心電図伝送装置は万歩計や腕時計並みに小型化し遠隔解析による救急体制も可能になった。心電図解析システムのハードウェア、ソフトウェア技術は向上し、小型軽量化と機器の信頼性が高まり、救急・臨床心電図検査の殆どがマイコン心電計の恩恵を受けている。今後はさらに宇宙、高山、水中、海中など低圧、低温、高温・高圧など遠隔地や過酷な環境下において正確で安全に安定した生体情報の記録と緊急解析が普及するよう期待したい。

■心電図自動解析の精度(専門医診断との一致率)

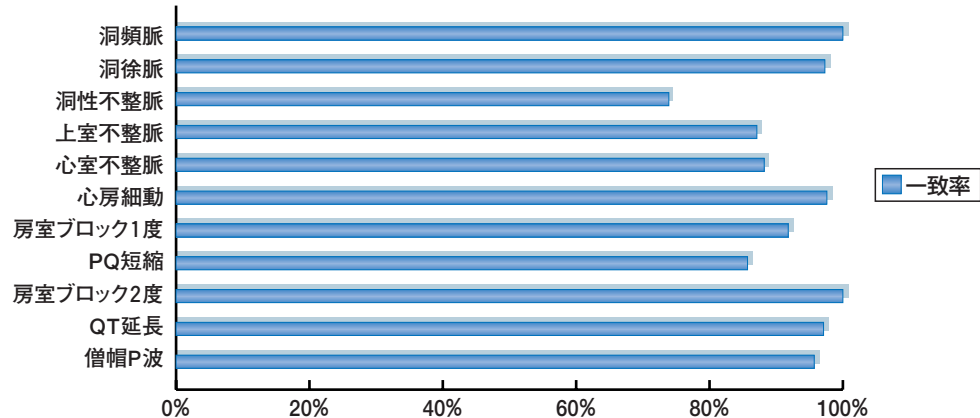
所見名	自動解析	専門医	一致数	一致率
正常範囲	295	292	289	99.0%
左室肥大	179	195	179	91.8%
右室肥大	5	4	3	75.0%
ST-T異常	318	297	296	99.7%
前壁梗塞	49	58	48	82.8%
側壁梗塞	28	26	25	96.2%
下壁梗塞	65	67	63	94.0%
後壁梗塞	11	11	11	100.0%
右脚ブロック	121	118	117	99.2%
左脚ブロック	32	34	32	94.1%
WPW症候群	6	7	6	85.7%
その他	15	15	15	100.0%

一致率



所見名	自動解析	専門医	一致数	一致率
洞頻脈	49	49	49	100.0%
洞徐脈	37	36	36	97.3%
洞性不整脈	46	34	34	73.9%
上室不整脈	31	39	27	87.1%
心室不整脈	34	31	30	88.2%
心房細動	42	47	41	97.6%
房室ブロック1度	49	46	45	91.8%
PQ短縮	14	12	12	85.7%
房室ブロック2度	1	1	1	100.0%
QT延長	68	66	66	97.1%
僧帽P波	23	22	22	95.7%

一致率



ホルターの自動解析



聖マリアンナ医科大学 循環器内科 原 正壽

1 ホルター解析装置の歴史

ホルター心電図の持つ情報量は連続時系列情報であることから、他の検査に比べ膨大となる。この膨大な情報の処理は人間の目だけで処理することが困難であり、それを補助するために数々の技術が考案されてきた。現在はパーソナルコンピュータがいつでも手に入る時代となったが、つい20年前までは自動解析はおろか手動解析の時代であった。当時は、オープンリール型のテープに磁気記録された心電図を、解析者が五感を駆使して解析装置を操り、24時間の心電図データの解析を行っていた。Holter自身が開発に関わった解析装置と対話形式で解析を行うAVSEP (Audiovisual superimposed electrocardiographic presentation) 方式である。この解析手法の1つは心拍を音で聴きながら異常音で不整脈を検出する。解析装置に映し出される不整脈が上室性かあるいは心室性かを判定し、いわば解析装置を教育しながら解析を進める。また同時に目の前に出てくる心電図の重ね合わせ波形の連続的な変化により、解析者がST変化を診断する。当時は画期的な方法であったが1件解析するのに30分以上を要し、不整脈が頻発する場合さらに時間を要し、解析者が長時間拘束されるという欠点があった。

そこで記録用紙に波形を記録する試みが行われた。初期には回転するドラムに熱ペンで記録するタコグラム方式も検討されたが、実用化には至らず、実用となったのは高感度感熱式記録用紙を用いたサーマルレコーダが実用化されてからである。このレコーダにより圧縮波形の記



SCM-270
日本独自の本格的に臨床応用された最初の長時間心電図解析装置

録が可能となった。さらに自動解析の分野ではテンプレートマッチング法により不整脈をパターン化し、心室期外収縮のモホロジー分類ができるようになった。テンプレートとは製図などで使われるお決まりのパターンをさし、記録媒体にカセットテープを使い始めたのもこの時期である。

2 ホルター心電図が抱える諸問題

標準12誘導心電図の自動解析は、日常診療のレベルまで自動診断が可能である。しかしホルター心電図の自動解析では診断にまで至らないことが多い。その理由を〈表1〉に示す。誘導数が限られていること、および体動や体位の変化、ノイズの混入に起因するアーチファクトが多いことが自動診断を不正確にする原因となっている。そのほかテープを用いた記録では、メンテナンス不良による回転ムラ、磁気ヘッドの汚れによる高域周波数特性の劣化、磁気記録特有の位相変化や磁気ヘッドの形状によるコンター効果などによるST波形の変形が磁気記録方式の致命的な問題であった。これらの諸問題のうち、磁気記録に起因する記録不良の改善と小型化を両立させる方法として、近年デジタル記録方式が採用されるようになったが誘導数の制限とアーチファクトの混入は依然としてホルター心電図の自動診断を困難なものとしている。

1. 誘導数の制限
2. 体動や体位変化によるアーチファクト
3. 各種環境ノイズ
4. ワウフラッター (回転ムラ)
5. テープ・ヘッドのアジマス不一致
6. 位相歪み
7. 周波数特性の劣化
8. コンター効果

〈表1〉ホルターの心電図特有の解析条件

最近、半導体記録容量 (メモリ) の増大とA/Dコンバーター (デジタル変換器) の高性能化により12誘導ホルター心電計も開発されているが、CM5などの一般的な

双極誘導に対して中心電極の不安定性からアーチファクトの影響をより多く受ける傾向がある。また電極数の増加により被検者のQOLを障害する可能性がある。さらに12誘導すべてを解析するとは困難であり今後検討の余地を残す。

自動解析可能	自動解析困難・不可能
上室性不整脈および発生数	心房細胞
心室不整脈および発生数	洞房ブロック
心室不整脈のモホロジー	房室ブロックの一部
頻脈、徐脈時の実波形記録	一過性脚ブロック
HR・STトレンドグラム	一過性WPW症候群
最大および最小脈拍数	虚血性ST変化
最大および最小脈STレベル	ペースメーカー心電図
	アーチファクト混入心電図

〈表2〉一般的な自動解析の適応可否(但し機種により異なる)

3 自動解析の2つの方法

自動解析は大別して装着記録時に同時に解析を行い解析結果も保存するリアルタイム解析と取り外した後に記録媒体を解析する一括解析に分類される。

①リアルタイム解析法

リアルタイム解析法は元来メモリが高価で容量が少ない時代に24時間波形を記録できなかったことから、解析結果と数秒間のイベント時の波形を実波形記録し、心拍数トレンドグラムや時間あたりの不整脈数を記録するために開発された。後に高容量メモリが出現することによって容易に24時間の心電図解析が可能となり用途は減少するに見えたが、最近再び注目されている。理由は、デジタル心電計の普及である。最近のデジタル心電計はデジタルホルター記録装置のメモリが挿入可能となっており、各診療施設でホルター心電図の出力が可能となったからである。従来は記録されたテープやメモリを解析センターに送り、専用解析装置やワークステーションで解析を依頼していたが、各医療機関のデジタル心電計で結果を出力できるようになったことから最近、解析センター数は激減している。しかし心電計にはホルター心電図の自動解析機能が無いため、ある程度の基本的な解析を記録器が心電図を記録しながらリアルタイムに行い、記録終了後デジタル心電計で一挙に書き出す必要がある。今後再び注目される解析方法となる可能性がある。またこの技術は致死性不整脈出現時に患者自身に警告を与えることが可能であり、今後のホルター記録装置の新しい利用法となり得ると予想される。このほか心拍数と体動センサーの情報を同時に解析することにより、心筋梗塞後のリハビリテーション時に過度の運動をアラームで禁止するモニター機能が付加することが可能であり、在宅医療ではループメモリ

を利用したイベント型自動記録解析装置も開発されている。



FM-700
12誘導心電図の24時間記録を実現したホルター記録器

②一括解析法

記録時にはデータの解析は行わず、24時間すべての心電図をメモリに記録し、専用解析機で一括して解析を行う。ホルター記録装置からSDカードなどの不揮発メモリを取り出して解析装置にセットする場合と記録器と解析装置をケーブルで接続しデータを転送する場合がある。解析装置にはWindowsなどの汎用パーソナルコンピュータに専用ソフトウェアを導入した比較的手軽な解析装置から、Unixワークステーション、さらに解析専用開発された専用機に分類される。以前はカセットテープを100倍速で再生しデータを転送するのに15分程度を要したが、現在はデジタル転送のため数十秒で転送可能である。

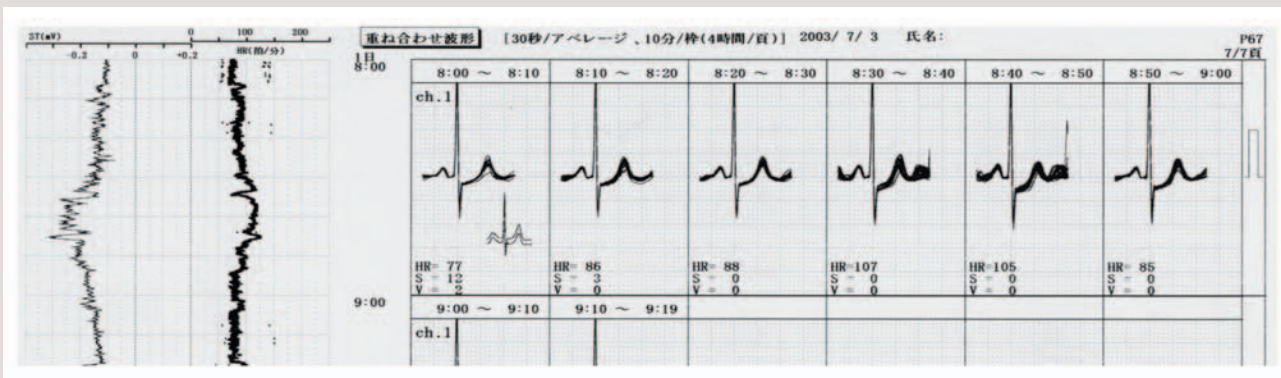


SCM-6000
最初のマルチ処理のできる長時間心電図解析装置
ST自動解析機能がある

4 自動解析のアルゴリズム

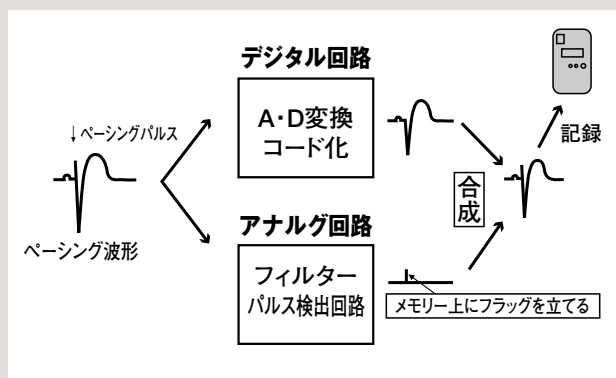
①不整脈の検出

自動解析装置では入力された心電図波形にドリフトフィルター(基線動揺を取り除くデジタルフィルタ)をかけ微分回路でQRSを検出する。これによりRR間隔を測定し期外収縮の検出を行う。一方QRSを中心とした計



〈図1〉スーパインポーズ法によるST変化の表現法

圧縮波形ではST変化の詳細を検討することが難しいが、スーパインポーズ波形を点検することによりST下降を一目で確認することができる。



〈図2〉ハイブリット回路

入力は型をデジタルおよびアナログで同時に解析する。それぞれの利点を生かした記録法である。

測窓を設定しQRS幅、QRS波高、QRS面積を測定し、これらのパラメータをドミナント波形と比較し不整脈を分類する。¹⁾ドミナント波形とは正常波形を把握するために最も頻繁に出現する波形を指し、記録開始時の数分における最も多く出現する波形を初期ドミナント波形とする、またドミナント波形は解析中に常に更新される。

現在のホルター自動解析では、良好な測定環境においては心室および上室性不整脈の検出率は、良好である。発生頻度あるいは連発数はトレンドグラムにより時系列で

表記される。また不整脈の危険度をランキングし、危険な順に実波形を書き出す。

②ST変化の検出

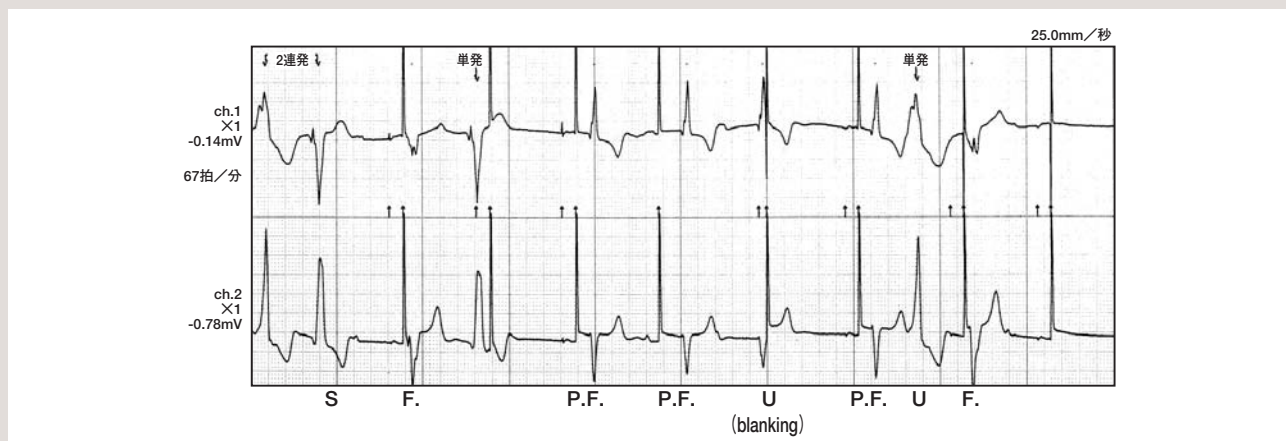
ST評価については未だ虚血性ST変化を自動診断するに至らない。

STレベルは体位により容易に変化するので最大STレベル低下時が必ずしも虚血時の心電図とは限らない。また24時間の圧縮されたSTトレンドグラムでは診断が困難であり、各ページのSTレベルおよびスローブトレンドグラムの点検を行う。

この欠点を克服する技術としてスーパインポーズ法²⁾がある〈図1〉。R波をトリガーとしてP、QRS、T波を切り出し加算平均処理した後、重ね合わせることによりSTの変化を視覚的に把握することが可能である。さらに単位時間のST変動量の積分値をSTarea値として求め心拍数、STレベル、STスローブ値、波高値、STarea値などのパラメータを用い、これらのパラメータにファジー処理を行って、虚血性ST変化を自動診断する装置も開発されている。

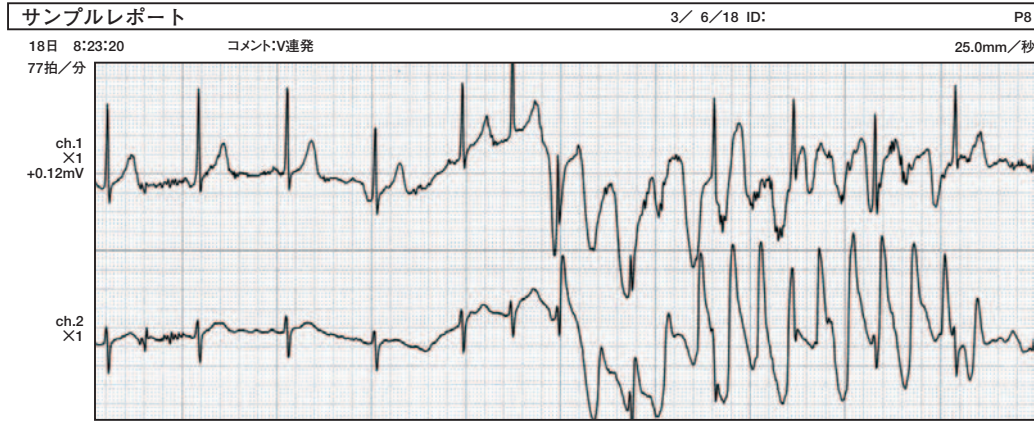
③ペースメーカへの対応

ペースング不全を診断する方法として、ペースングパルスのみを検出するフィルターを用いてペースングパルスを



〈図3〉ペースング不全解析例

検出したペースング位置を中段に矢印で表示する。P、Fの位置でペースング不全をUの位置でアンダーセンシングを起こした。S:正常なセンシング、F:フュージョンビート



〈図4〉体動による誤検出例
後半に体動による基線動揺が加わり、心室頻拍として誤検出した。

記録装置内で検出し、テープ記録の場合はテープの空きトラックである第3チャンネルにパルスを記録する。デジタルホルター記録装置の場合はサンプリング間隔が比較的広いために、0.5ms前後のペースングパルス波を記録することが困難であるため、パルスを検出するアナログ回路を併設し、メモリ内にフラグを立てることによりペースングパルス波を記録するハイブリッド記録方式が使われる〈図2〉。解析時に心電図中にペースングパルスのマーカーを表記することによってペースング不全を解析することが可能である⁴⁾〈図3〉。

5 ホルター自動解析の限界

先にも述べたように最新の解析装置であっても心電図所見を自動診断することは、きわめて困難である。医療機器のイベント検出はモニター心電図の誤報でも経験するようにオーバーセンス傾向であり、ホルター心電図においてもアーチファクトを誤検出する可能性が多い。とくに体動による基線動揺の影響が大きく、〈図4〉で示すような上腕の上下動に起因する基線動揺を心室頻拍と診断することがある。今後も自動解析でスクリーニングし、人間の目で確認する作業がしばらく続くと考えられる。

6 自動診断の今後の展望

今後の目標は、不整脈についてはP波をいかに正確に検出するかということである。現在の解析装置はQRSから前方に一定の解析窓を設けP波をスキャンする方法をとっている。しかしP波の電位が小さい場合には2誘導の差分をとっても検出できないことも多い。今後の研究課題である。またST解析については、医師の経験が最も必要な分野である。開発技術者のみならず医師との連携により、医師の持つ診断プロセスをマルチパラメータで定量的に解析し、解析装置にプログラムしておく必要がある。

〔文献〕

1. 佐藤忠一:MEのあゆみ-ホルター心電図システム-. メディカルエレクトロニクス. 1994
2. 原正寿:スーパーインポーズ処理による虚血性心電図変化の評価法の開発および応用.心電図 11: 396, 1991
3. 森 なるみ:Fuzzy理論を用いたホルター心電図用ST解析装置の開発.心電図 19: 20, 1999
4. Mori N, Hara M, Miyake F : Clinical assessment of a new method for pacing pulse detect

患者さんにやさしい
世界最小サイズ

実物大 ※平成14年11月現在

軽い! 40g 無音! 静か 超小型! 49.5×14.7×44.5mm

デジタルホルター記録器

FM-150

医療用具承認番号:21400BZZ00410000

FUKUDA DENSHI 本 社/東京都文京区本郷 3-39-4
 フクダ電子ホームページ <http://www.fukuda.co.jp>
 お客様窓口… ☎(03)5802-6600

最近の心電図自動解析プログラムの進歩

フクダ電子株式会社 開発本部新技術開発部 次長 金子睦雄

最近のコンピュータ技術の進歩はめざましく、心電図自動解析プログラムもこれまでの様々なハード的な制約（メモリー容量、プログラムサイズ、処理時間等）から解放され、自由な発想で構築できる時代となった。そこで、より人間の思考に近い解析方法を取り入れることにより大幅な精度向上を目指し、ここ数年は解析プログラムの全面的な改良を行ってきた。

解析プログラムには、大きく分けて2つの処理部がある。1つは、心電図の区分点（P、QRS、T）を検出し、計測値（PQ、QRS幅、QT等）を求める計測処理部。もう1つは、その計測値から所見を決定する所見分類処理部である。

前者の計測処理部では、人間的な思考として、『思考錯誤』や『空間的な見方』を取り入れることを試みた。従来区分点の検出は一方向からの検索

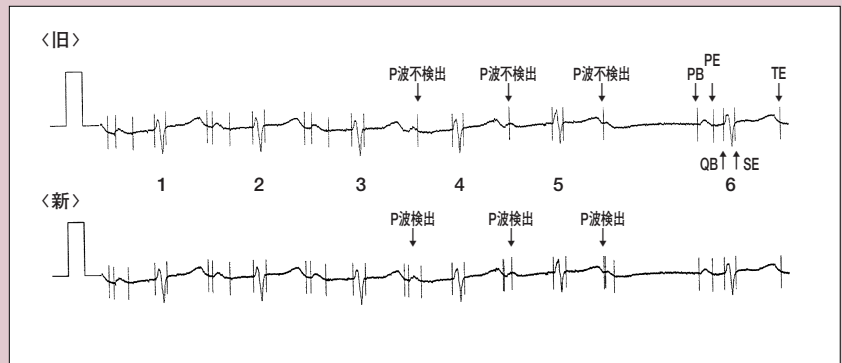
（R波頂点から前方へ向かい→Q波→P波の順に区分点候補を探す）であったが、さらに逆方向（基線部分から→P波→Q波の順）からも検索し、両方向において区分点候補が一致する場合決定した。次に決定した区分点を他の誘導や他の心拍の区分点位置と比較し、大きく外れている場合はノイズの影響などで間違っている可能性があるとして判断し、再度検出を行う。候補点が一致しないあるいは複数あるときにも他の誘導、心拍、あるいはその近辺のノイズの有無等の情報も参考にして最も可能性の高いものを求めたり、場合によっては再検出を試み、より総合的（人間的）な

考え方を用いて区分点の決定を行う。

後者の所見分類処理では、循環器専門医のよりきめの細かい考え方を取り入れることを試みた。例えば、前壁心筋梗塞の場合には、該当誘導であるV1～V4誘導の異常Q波や冠性T波の情報だけではなく、他の誘導にST-Tの異常や低電位、心筋梗塞の所見がないか等の情報も加えて総合的に判断するという方法を用いた。

以上の様なより人間的思考を取り入れることにより、解析精度も従来に比べて大幅に改善することができた。参考までに、区分点の改良例を図に示す。

今後は更に様々な考え方を取り入れて精度向上に努め、いつの日か循環器専門医と同等レベル（あるいはそれ以上の？）の解析プログラムとなることを目指したい。



〈図〉Ⅱ度房室ブロックでのP波の検出改善例

Ⅱ度房室ブロックウェンケバツハ型の症例で、5拍目のT波終了点付近にはQRSを伴わないP波が有る。

心電図自動解析ではT波上に乗ったP波の認識が難しく、従来4～6拍目の先行T波付近にあるP波を検出できなかったが今回の改良により、検出できるようになった。それでも、5拍目のP波はややT波よりに検出しており、今後の課題である。（PB:P波開始点、PE:P波終了点、QB:QRS波開始点、SE:QRS波終了点、TE:T波終了点）

FUKUDA DENSHI

ご存知でしたか？

フクダ電子製 超音波画像診断装置

小型汎用モデルから高機能デジタルまでのラインナップを揃え、ニーズにお応えしております。

フクダ電子ホームページ
<http://www.fukuda.co.jp>
お客様窓口 ☎ (03) 5802-6600

●医用電子機器の総合メーカー
フクダ電子株式会社
本社 東京都文京区本郷3-39-4 (03) 3815-2121 (代) 〒113-8483

発行日 平成16年3月10日
発行人 野口亮造
編集人 小野薫
印刷所 三浦印刷株式会社

株式会社 エム・イー・タイムス
〒113-0033 東京都文京区本郷3-13-6
TEL. 03 (5684) 1285
<http://www.me-times.co.jp/>

(定価250円) [E1140EM] E.No.033528 ㊞