

マイクロ波反射計による非接触および着衣状態での 心臓拍動の同定：今後の応用と展開

丸山, 徹
九州大学キャンパスライフ・健康支援センター

間瀬, 淳

<https://doi.org/10.15017/2560356>

出版情報：健康科学. 42, pp.1-10, 2020-03-25. 九州大学健康科学編集委員会
バージョン：
権利関係：

— 総 説 —

マイクロ波反射計による非接触および着衣状態での 心臓拍動の同定 —今後の応用と展開—

丸山 徹^{1)*}, 間瀬 淳²⁾

Heart beat detection under the noncontact and clothing condition
by means of microwave reflectometry: Future applications and perspectives

Toru MARUYAMA^{1)*} and Atsushi MASE²⁾

Abstract

Electrocardiogram (ECG) is a routine clinical examination for the cardiovascular disease diagnosis. There have been many alternatives of ECG to detect heart beats and pulse waves. Although noncontact device monitoring heart beats has been attempted so far, signal processing to eliminate motion artifacts is not satisfactory. Recently, our laboratory has developed a microwave reflectometry sensing skin microvibration due to heart beats and pulse waves. Auto-gain control system, signal averaging, template-matching system and signal cross-correlation technique obtained by multiple reflectometric sensors enabled motion artifact elimination, signal peak detection and real-time processing. This microwave reflectometry is useful in many clinical practice and lifestyle. Heart rate variability (HRV) reflects cardiac autonomic nerve functions, and conventional ECG monitoring is a major tool evaluating HRV. However, patients have to be tethered, and skin-electrode interface yields serious artifacts in long-term ECG monitoring. This microwave reflectometry demonstrated frequency domain HRV that was closely correlated with HRV obtained simultaneously by conventional ECG in healthy volunteers under mental arithmetic task. Microwave reflectometry can also detect the heart beats irregularity caused by arrhythmia and cardiac arrest by setting the specific algorithms. Therefore, this microwave reflectometry is useful in the home monitoring of the old persons living alone without invading their personal life and privacy. More sophisticated improvements are warranted for the wide use of this device as a convenient compact module in near future.

Key words: microwave, heart rate variability, autonomic nerve, noncontact monitoring, reflectometry

(Journal of Health Science, Kyushu University, 42: 1-10, 2020)

九州大学キャンパスライフ・健康支援センター, Center for Health Sciences and Counseling, Kyushu University, Japan.

九州大学グローバルイノベーションセンター, Global Innovation Center, Kyushu University, Japan.

*連絡先: 九州大学キャンパスライフ・健康支援センター 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 Tel: 092-802-5113 Fax: 092-802-5113

*Correspondence to: Center for Health Sciences and Counseling, Kyushu University, 744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395, Japan.

Tel: +81-92-802-5113 Fax: +81-92-802-5113 E-mail: maruyama@artsci.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

マイクロ波とは電磁波の一種であり周波数 300 MHz ~ 300 GHz のものを指す。マイクロ波はレーダーや電子レンジ、携帯電話などに広く応用されている。医学的にも患部にマイクロ波を照射して温めることにより関節痛を治療する透熱療法（ジアテルミー）や悪性細胞の温度感受性に着目して悪性腫瘍を非侵襲的に治療する温熱療法（ハイパーサーミア）として利用されている。

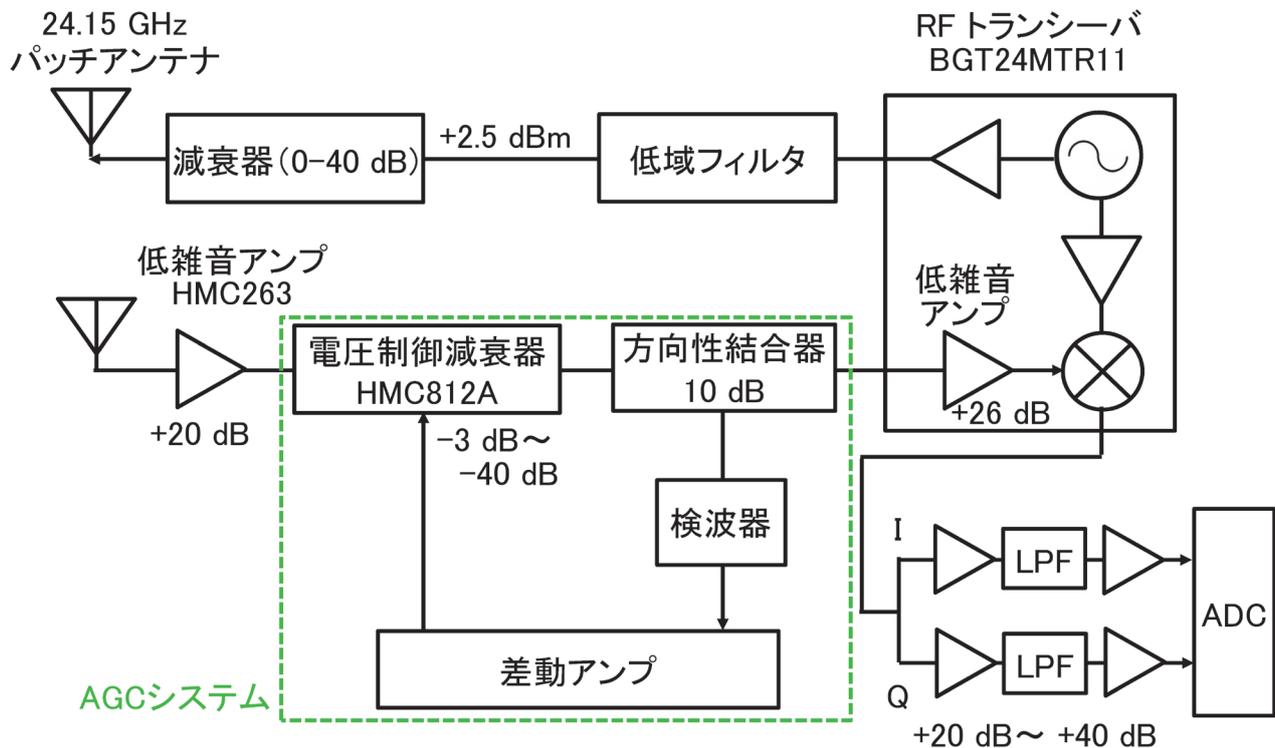
マイクロ波は誘電体である照射物の誘電率に依存して反射、透過または吸収される。また生体では反射面の微細な変動が反射波の位相変化を生じる。したがって固定周波数の照射波と得られる反射波の位相差を解析することで体表面の微動を非接触で検知することが出来る。このマイクロ波の性質を利用してわれわれは心拍や呼吸などの生体信号を非侵襲的にモニタリングす

る研究を続けてきた^{1),2)}。このマイクロ波反射計の利点は、着衣のまま無拘束かつ非接触の状態、ヒトの心拍を感知できる点にある。

心臓の拍動による胸壁の振動やこれにともなう動脈の脈波振動はヒトの生存に欠かせない生体信号である。これらの信号の有無はヒトの生死の判定に必要であり、またそれらの信号のリズムの異常はさまざまな疾患を診断する根拠となる。さらにこれらの信号は自律神経機能の影響で生理的には微妙なレベルで変動しているため、その変動性を評価することで自律神経機能の評価が可能であることから、生理的な心拍変動を評価することは様々な疾患の予後を予測する上で重要である。

以下にわれわれが使用するマイクロ波反射計の原理とその代表的な応用例や今後の展望を述べる。

図1. 反射波レベル制御方式位相検出器を用いたマイクロ波反射計システムの回路



マイクロ波反射計の回路: マイクロ波発振系統、送信アンテナ(上)、受信アンテナ(下)、反射波レベル制御系統(AGCシステム)、信号検知・処理系統からなる。AGC: auto-gain control。

2. マイクロ波反射計のしくみ

心臓の拍動は前胸部の皮膚面に微細な振動を引き起こす。また心臓拍動ともなつて主要な動脈には脈波が生じる。脈波を体表面で感度良く検知できるのは主に顔面、側頭部、頸部、背面、膝窩部、太腿などである。これらの部位の微細な振動はマイクロ波反射計で非侵襲的に検出することができる。

われわれは、当初周波数 10 GHz の反射計システムを用いていたが、電波法では、生体センサー等を目的としたレーダ（移動体検知センサ）に割り当てられた周波数領域があり、屋外使用も可能な 24.05-24.25 GHz において安価なモジュールが製品化されていることから、その帯域の使用を開始した。また、反射計システム改良の一つとして反射波の強度を一定に制御することを可能にしたホモダイン方式マイクロ波反射計を設計・製作した。その構成図を図 1 に示す。

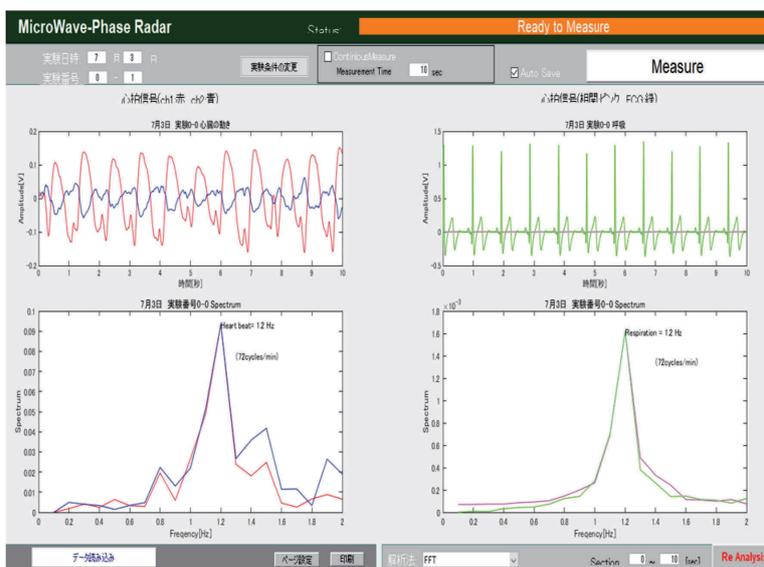
高周波トランスデューサ出力の一方は、パッチアンテナから人体の動脈拍動の大きい胸部および背面、あるいは太腿裏面に照射される。皮膚表面からの反射波はもう一方のアンテナにより受信され、低雑音マイクロ波アンプにより増幅されたのち、電圧制御減衰器を通過後検知器に入力され、トランスデューサからのもの

う一方の出力と混合され、低周波の位相 (I/Q) 成分として高分解デジタルで処理される。本システムにより、被験者が非静止状態においても反射波レベルが安定化すると共に、マイクロ波照射電力が -40 dBm (100 nW) 以下でも良好な信号対雑音比 (SNR) が得られ、電波法で規定される微弱電力の条件を満たしていることが検証された。

SNR 改善の手段として、マイクロ波反射計を二系統設置し、それぞれから得られた測定量を相互相関処理することで、不要成分をキャンセルし、心拍信号の測定精度向上を試みた。図 2 に一例を示す。相互相関処理により心拍信号以外の雑音成分（アーチファクト）が抑制されていることが分かる。

図 2 にも示されているように、マイクロ波反射計信号からピーク成分（ピーク間隔）を精度よく導出することは極めて困難である。図 3 に位相比例成分から心拍に対応するピーク信号を同定する方法を示す。心拍動に起因する繰り返し信号を加算平均することでテンプレート信号を作成し、このテンプレート信号を実際の反射波信号上でスキャンさせながら相互相関係数を算出すると、相互相関係数のピーク値が心臓や動脈の拍動に対応すると考えられる（特許第 5140891 号）。

図 2.二つのマイクロ波反射計システムと心電図信号の比較.



左列は二つの反射計システムで得られた信号波形と周波数スペクトル、右列は心電図 (ECG: 緑) および二つの反射計の相互相関信号 (ピンク) の波形と周波数スペクトル。

3. マイクロ波反射計の安全性と倫理性

現在使用中のマイクロ波反射計をヒトに応用する上で、既にわれわれは環境安全実験を行っている。電磁波の安全性を示す指標に最大電力密度と比吸収率がある。前者は電磁波の強度、後者は電磁波が生体へ及ぼす影響の指標である。われわれのマイクロ波反射計は固定周波数(10 GHz)の発振器を使用し、照射電力が1 mW、最大電力密度が0.045 mW/cm²である。国内の電波防護指針では電力密度が1 mW/cm²以下という規制がある。比吸収率(specific absorption rate: SAR)は0.001-0.002 W/kgであり携帯電話の1/100以下である。さらに吸収電力密度(1.35 W/m³)から算出した組織の温度上昇は一時間の連続照射でも 1.7×10^{-3} °Cであった。これらの計測値や計算結果は、今回のマイクロ波反射計がヒトにおいて極めて安全で、長時間の連続モニタリングを行っても医学的には何ら生体への悪影響がないことを示している。上記のマイクロ波反射計の環境安全性をもとに、本学医学部の倫理審査委員会にヒトにおけるマイクロ波反射計の照射による心拍検知の実証実験を申請して、既に平成23年に承認を得ている。

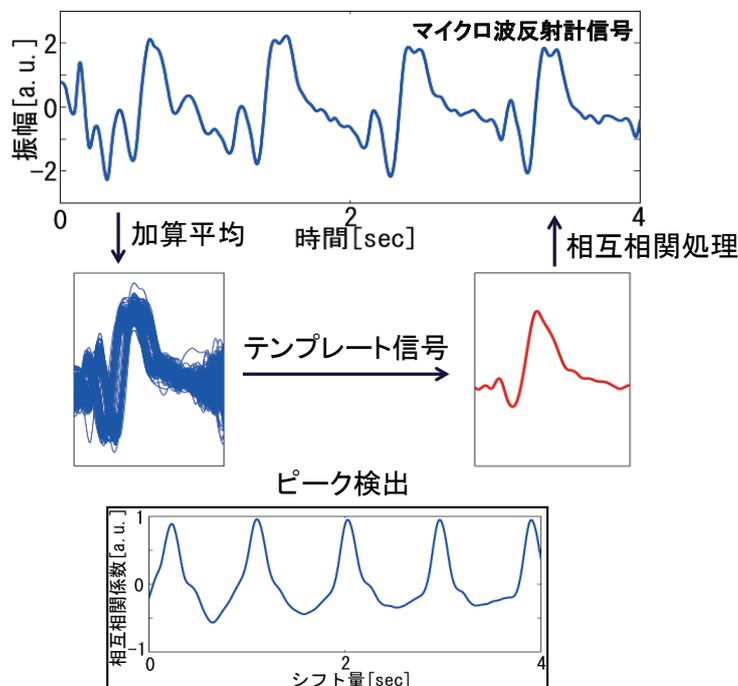
4. マイクロ波反射計による心拍変動の評価

心臓の拍動は正常な状態では自律神経が密に投射している洞結節により支配されている。したがって心臓の拍動調律が正常な状態(正常洞調律)では、心拍変動が交感神経と副交感神経の活動状態を非観血的に評価する方法として以前から心電学の領域で広く用いられている。実際に心拍変動は現在、12誘導心電図、ホルター心電図、携帯型の自己記録型心電図などさまざまな心電計やペースメーカーにより評価が可能である。しかしこれらは接触型電極を用いたり、心電計本体を体表面に接触させて心電図を記録するものであり被験者に拘束感や不快感を与える可能性がある。

著者らはホルター心電計を大学保健室で使用した際、電極を装着した部分よりコードを体表にテープで固定した箇所の方が不快であったという感想が得られた³⁾。以上からも非接触状態で着衣下に心拍信号を長時間記録する技術の開発が従来から望まれていた。

実験は本学医学研究院の倫理委員会での承認を得た。被験者は実験参加に同意の得られた11名の健康者(男性9名、女性2名、年齢範囲23~60才、平均

図3. 心拍に対応するピーク信号の同定法



周期性のある位相比例成分を加算平均してテンプレート信号を作成しこのテンプレート信号を実際の反射波信号上をスキャンさせながら相互相関係数を算出すると相互相関係数のピークが心臓の拍動に対応する(文献4より引用).

年齢 28.4 ± 12.3 才) で、あらかじめ学生健康診断や職員健康診断で心電図上不整脈などの異常がないことを確認した。

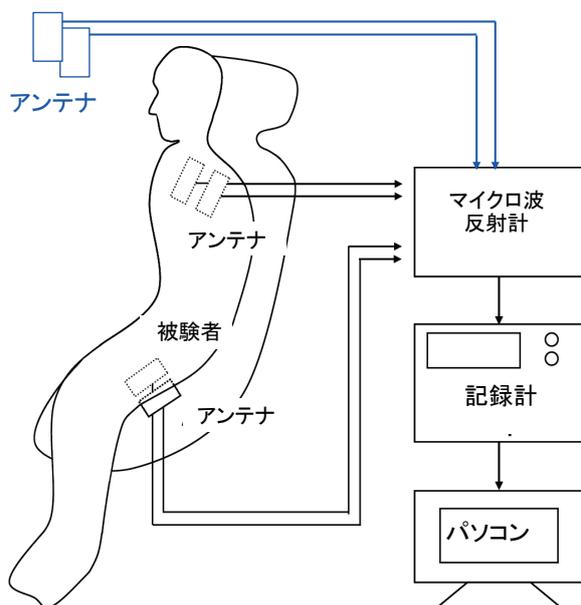
図4に装置の概要を示す。実際のマイクロ波反射計では背中、大腿部、側頭部で動脈拍動が大きく信号処理がしやすいことが経験的に分かっており^{1), 2)}、前胸部は心拍変動と同時に呼吸による胸郭運動も大きく、呼吸成分を除去する信号処理も加わるために実際のマイクロ波の送受信アンテナは、図4の矢印のように椅子の背もたれ部分とシーートの端(大腿裏面が椅子から出る部分)に埋め込み(近接設置)、また部屋の隅にも配置した(遠隔設置)。被験者は十分な照明のある静かな研究室で、3チャンネル用の心電計(DPA-2004 および DPA2004P、ダイヤモンドメディカル社)に接続した電極(ブルーセンサ NF-00-S、GE Medical Systems)を前胸部に装着した状態で、マイクロ波反射計の送受信アンテナが装着された椅子に座ってもらった。6分間のリラックス状態から机上のデスクトップのパソコン画面でのフラッシュ演算を3分間休むことなく行った。この暗算負荷の終了後は再び6分間のリラックス状態をとって15分間で一回の試験を終了した。実験中は被験者に座位の範囲で自由な体位を取らせて体動を許可した。この実験中心拍を従来の心電計とマイクロ波反射計の両方で連続的にモニタリングした。得られた心拍間隔から高速フーリエ変換

法(FFT)により心拍変動の周波数スペクトルを求め、0.04 - 0.15Hz を低周波領域(LF)、0.15 - 0.45Hz を高周波領域(HF)として、LFの振幅に対するHFの振幅の比であるLF/HF値(arbitrary unit: A.U.)を自動算出した。各被験者の暗算負荷前(6分間)、負荷中(3分間)、負荷終了後(6分間)のLF/HF値を一分ごとに心電計とマイクロ波反射計の両方で算出して、両者の相関を解析した。統計解析は相関検定をSPSS(2010)で行い、回帰直線は最小二乗法により求めた。

被験者は全員フラッシュ演算を行って実験を終了し、ドロップアウトした例はなかった。また15分間の座業では体動による大きなアーチファクトは混入せず、実際は殆どの被験者で頭部・背部・大腿裏面と三つの測定ポイントの間での相互相関を取るまでもなく、左右の大腿裏面の相互相関処理でノイズ除去は十分であった。

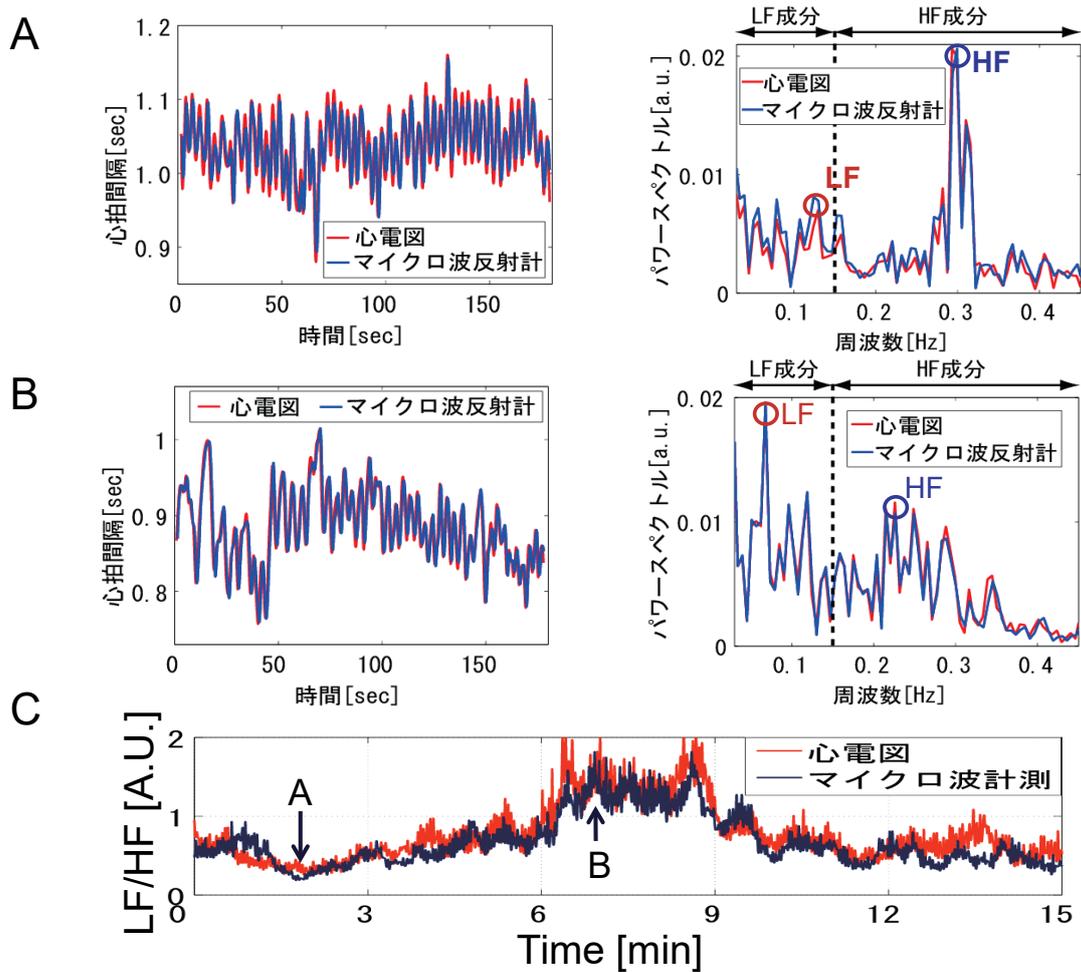
図5Aと図5Bは、従来の心電計と大腿裏面に照射したマイクロ波反射計で同時に評価した心拍間隔のトレンドグラム(左)とこれをFFT解析して得られた心拍変動の周波数スペクトル(右)を示す。図5Aは安静時であり、図5Bは暗算負荷中のものである。どちらの状態においても心拍間隔のトレンドグラムも心拍変動のスペクトログラムもマイクロ波反射計と心電計のデータはほとんどオーバーラップしていた。周波数スペクト

図4. 被験者に対するマイクロ波測定試験の配置



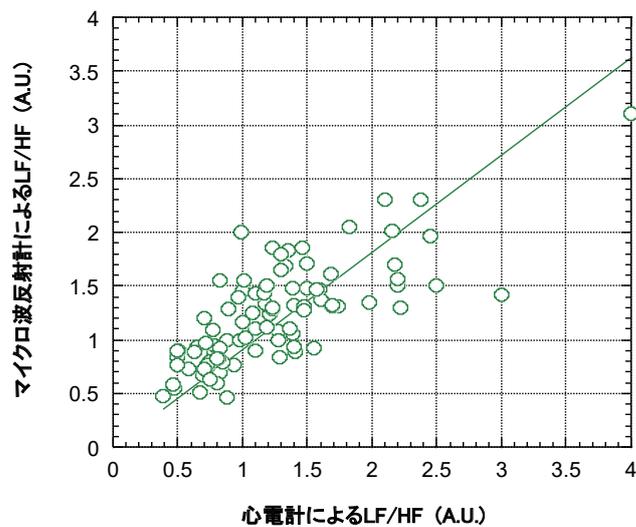
被験者に近接設置(背面および大腿裏面)および遠隔設置(側頭部)した送信アンテナからマイクロ波を照射して得られた反射波信号を相互相関処理すると体動にともなうアーチファクトが除去される。(文献4より引用)。

図5. 暗算負荷印加中の心拍変動解析の結果



実験開始から6分まで安静を保ち、6-9分に暗算負荷を行った。負荷終了後は15分まで安静とした(文献4より引用)。

図6. 種々の精神的・肉体的負荷印加中の心拍変動解析の結果



接触型電極による従来の心電計の心拍変動とマイクロ波反射計による心拍変動の相関が認められる(文献4より引用)。

ルから連続的に得られた LF/HF 値のトレンドグラフが図 5C である。心電計とマイクロ波反射計の双方で得られた LF/HF 値は安静時も暗算負荷中も互いに重なり合っている様子が明らかである。実際に図 5C の矢印 A で示す暗算負荷前の安静時での LF/HF 値はマイクロ波反射計で 0.37、心電計で 0.42 であった。一方暗算負荷中の矢印 B での LF/HF 値は前者で 1.71、後方で 1.65 でありどちらの状態でも両者は互いに近似していた⁴⁾。

図 5 はあくまで代表例である。そこで被験者全員の傾向を検討するために、各被験者の暗算負荷前の安静時、暗算負荷中、暗算負荷終了後の安静時における LF/HF 値を一分ごとに心電計と大腿裏面に照射したマイクロ波反射計で評価し、これらの相関関係を検討した。図 6 にその結果を示す。回帰直線は $y = 0.90504 \cdot x$ でその傾きは 0.9 より、暗算負荷時には心電計から得られた一分ごとの LF/HF 値 (x) はマイクロ波反射計による LF/HF 値 (y) より若干大きい傾向があった。しかし被験者全体でもこれら二つの心拍モニタリング法で評価し得た LF/HF 値は互いに高度な正の相関を示し ($p < 0.001$)、その相関係数は $r = 0.769$ であった。さらに双方の心拍変動評価で得られた LF/HF 値の回帰直線の切片は 0 であった。これは両者の心拍変動解析の過程でアーチファクトの混入などによる DC 成分の発生やドリフトなどがなかったことを意味する。後述するようにこれらの心拍変動は非接触で着衣の状態でも評価可能であるという点が極めて重要である⁴⁾。

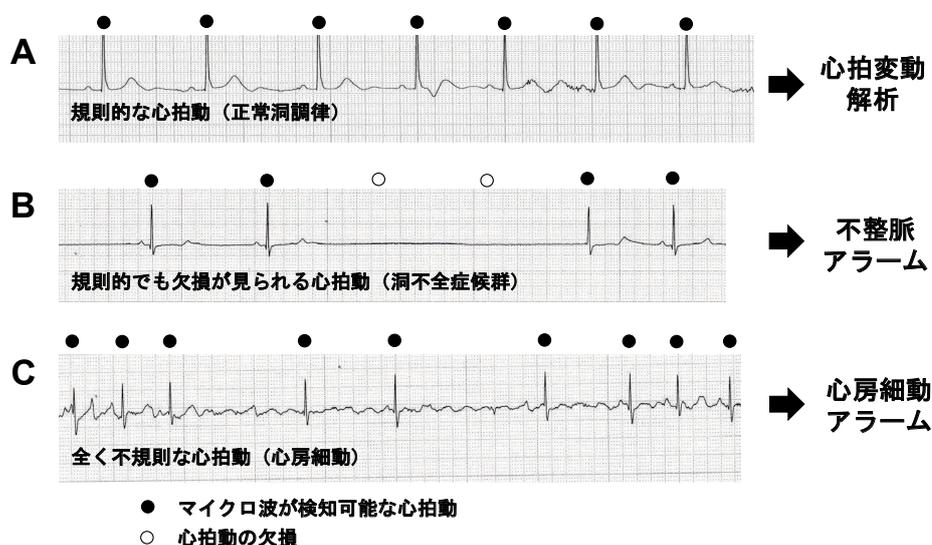
5. マイクロ波反射計による不整脈の検出

心拍変動の線形解析は基本調律が正常洞調律であることを前提としている。先述のように正常では交感神経と副交感神経が密に投射している洞結節により心臓拍動のリズム性が支配されるため洞調律時の心拍変動を解析することによって自律神経の活動状態が非観血的に評価される。心臓が正常洞調律以外の基本調律である場合を一般に不整脈と呼ぶ。不整脈の最中の心拍変動を解析するには非線形解析を用いるため日常臨床ではあまり使用されない。

不整脈にはさまざまな種類があり、その分類法も頻脈性不整脈と徐脈性不整脈、一過性不整脈と持続性不整脈、軽症不整脈と重症 (致死性) 不整脈などさまざまである。症状の有無による分類も可能であるが、無症候性の不整脈が軽症で有症候性の不整脈が重症であるとは限らない。さらに不整脈にともなう症状も胸部不快感、動悸、胸痛、意識消失 (失神) などさまざまであるが、これらは不整脈が起きた時の自覚症状といえる。しかしそれ以外にも不整脈が長く持続した結果、心不全や心原性塞栓症という生命予後にも影響する合併症を引き起こすことがあり、その際の症状は全く別である。

このように極めて病態が多彩な不整脈をまとめて取り扱うことは困難ではあるが、正常洞調律時の心拍変動の許容範囲を超える過剰な心拍変動が見られた場合を何らかの不整脈が生じていると認識するアルゴリズムを組むことは可能である。時系列解析における心拍

図 7. さまざまな心臓の調律とマイクロ波反射計による心拍動の検出.



A は正常洞調律. B は洞不全症候群による心拍動の欠損. C は心房細動.

変動の代表である CVRR (心拍間隔の変動係数) の正常値は年齢によって変わるため、解析前の被験者の情報を入力することが重要となる。図 7 に実際にホルター心電図 (24 時間心電図) で不整脈が記録された例を示す。A は正常洞調律の例である。心電図上段の●は心拍に対応する心電図信号であり、マイクロ波反射計でも機械的な心臓拍動または動脈の脈波として感知される。B は徐脈性不整脈の代表である洞不全症候群の例である。洞調律ではあるが、一過性に心電図信号が欠損している (心電図記録上段の○)。C は心拍動に対応する心電図信号の間隔が全く不規則であり、洞調律ではなく心房細動の例である。心電図上では基線が水平ではなく小刻みに揺れている (細動波)。マイクロ波反射計では不規則な心拍動をとらえることになり、●どうしの間隔が一定な部分は見られない。すなわち●どうしの間隔が肉眼的に一定であれば従来の心拍変動解析を行い (A の場合)、●どうしの間隔がほぼ一定であるが一過性に大きく変わる (延長または短縮する) 場合は不整脈アラームを発信し (B の場合)、●どうしの間隔が全く不規則である場合 (C の場合) は心房細動のアラームを発信するシステムを検討中である。

心房細動は文字通り心臓のプースターポンプの役割を果たす左右の心房が細動状態であるため、心拍出量が洞調律時の 7~8 割となり心房内の血液はうっ滞濃縮しやすい。このため将来的な心不全の遠因となったり、心原性脳塞栓症や全身性塞栓症を引き起こすリスクが高くなる。近年では心房細動と認知症との関連も指摘されている。その罹患者の半数が 75 才以上で、高齢者に多い不整脈である。わが国は高齢化により心房細動が増加の一途をたどり、現在 80 万人という心房細動の患者数は将来的に 100 万人に達すると予測されている。

最近では本人も自覚しない心房細動が重篤な心原性脳塞栓症を引き起こす例が増加している。心房細動が何ら検出されていないにもかかわらず、脳血栓塞栓症を引き起こしてから初めて記録される潜在性心房細動とよばれる病態である。一般に脳梗塞はアテローム血栓性脳梗塞、ラクナ梗塞、心原性脳塞栓に分類され、それ以外は原因不明の脳梗塞とされた。原因不明の脳梗塞すなわち潜性脳卒中 (cryptogenic stroke) には検査が不十分な脳梗塞も従来含まれていたため近年では十分な精査にもかかわらず塞栓源不明な脳梗塞を embolic stroke of undetermined source (ESUS) と称するようになった。ESUS は脳梗塞全体の約 2 割を占めるようになり、その原因の多くが潜在性かつ一過性の

心房細動であることが植え込み型ループレコーダなどの記録により次第に明らかになりつつある。

心房細動は早期に発見すればカテーテル治療で根治可能であり、心房細動のままでも最近の優れた抗凝固剤で心原性脳塞栓の多くは予防できる。しかし心房細動の治療法や脳塞栓症の予防法の進歩に比べて心房細動の検出法は満足すべきものがない。拘束性が強い心電計 (長期間の心電図連続モニタリングなど) や着用型 (ウェアラブル) の心電計、また侵襲的なデバイス (体内への植え込み型のループレコーダ) による診断法が主流である。これらの検出法は心房細動の有病率の高い高齢者では使いにくく、使用に熟練を要し、また医療経済性にも乏しいと言わざるを得ない。

そこで非接触で無拘束かつ着衣下でプライバシーにも配慮した長時間の心拍モニタリングがとりわけ独居状態の高齢者や介護施設の入所者などで望まれてきた。高齢者が心原性脳塞栓により寝たきり状態になるのを防ぐ意味でも社会的なメリットは大きい。本研究はマイクロ波の原理を応用して非接触状態で着衣下に心拍モニタリングを行い、無症候性の心房細動を早期発見・早期治療することで、高齢者を不幸な心原性脳塞栓から予防できる点で医学的なメリットは大きい。

図 8. 深刻化する独居の高齢者の孤独死



(最近の新聞記事より)

6. マイクロ波反射計による生存確認

近年の少子高齢化や核家族化とともにわが国のへき地や遠隔地における独居高齢者の異変検知と生存確認が大きな社会的課題となりつつある。図8は、誰にも見取られずに、死後数日たってから見つかる高齢者の孤独死を取り上げた新聞記事である。高齢者の孤独死は全国的な統計はないが、年間数万件におよぶともいわれる。このような悲惨な高齢者の孤独死を少しでも減らす目的で近年、独居の高齢者を対象としたさまざまな見守り機器が開発されつつある。これらの見守り機器（介護保険適応外）には様々なタイプのものがあるが、高齢者から何らかの生体情報を検出する必要性から、大きく i) センサー型、ii) カメラ型、iii) マイク型、および iv) これらの三種類の複合型に大別される。

センサー型は IT 技術を応用して、設置したセンサーによりトイレや寝室、冷蔵庫などを監視するもので、長時間センサーが感知しなければ確認の連絡を対象者や家族・病院・介護施設に通報するものである。検知シグナルの種類（人やドアの動き、温度、湿度、照度、生体ガス（呼気、皮膚ガス）、消費される電力やガス、水道など）やセンサーの設置台数によりコストが異なる。

カメラ型は CCD カメラなどで対象者を常時監視するため、プライバシーに問題が残る。マイク型は安否確認が確実であるが、対象者に会話能力・移動能力があることが前提である。それぞれに一長一短あり、これらの複合型見守りツールが市場に出ているが、複合型では当然コストは増大する。

何らかの疾患がある高齢者や寝たきりや認知症の高齢者などあらゆる高齢者を対象とした場合、最も受け入れやすい見守り機器はセンサー型である。しかし現行のセンサーは人の動きやそれによる間接情報を検知している。寝たきりの高齢者に対する見守り機能は期待できず、孤独死の発見はできても予防はできない。そこでヒトが生存する基本情報である呼吸と心拍を非接触で検知して、着衣の上ベッドに休む高齢者を布団の上からでもモニタリングすればプライバシーにも十分配慮できる。寝たきりの高齢者の場合は部屋に設置するマイクロ波センサーの台数も1~2台で十分と考えられる。マイクロ波反射計は今後の社会実装を進めることにより医療・介護・福祉の分野で孤独死の予防に貢献できると期待される。そのためにはシステムのモジュール化と高性能化が必須で、通信ネットワークや医療と介護など異なる産業分野の間での密な連携が必要不可欠であると考えられる。

7. 他の研究機関との比較

心臓の拍動をマイクロ波で検知する試みがなされるようになったのは1970年代からである⁵⁾。しかしこれまでは心臓の拍動の個体差や非正常性・非線形性から心臓の拍動に関しては満足すべき検知レベルとは言えなかった⁶⁾。その後カルマンフィルターを実装したり⁷⁾、モニターの至適タイムウィンドウを検出するアルゴリズムを設定したり⁸⁾、複数のモニターチャンネルで最良の記録を示すチャンネルを動的に随時選択するなど⁹⁾、種々のノイズ低減方法の工夫も行われてきた。これらに共通する工夫はたった今取得したマイクロ波信号をもとにリアルタイムで最適なシステム（フィルター条件やタイムウィンドウ、記録状態が異なる複数のチャンネル間）を選択し、その結果をもとに次の最適システムを推測して、常に最適なシステムをアップデートしていく作業を繰り返すものであるが、良好な SNR や心電図信号との一致率を示すとは言い難い現状である^{10),11)}。

8. おわりに

今回、マイクロ波反射計を使用して非接触、無拘束、着衣下の状態で心拍変動を解析し、不整脈を検出し、ヒトの異変察知と生存確認に結びつく技術を紹介した。

今回紹介したマイクロ波反射計は、マイクロ波の反射波信号をオートゲインコントロール下で振幅を揃えた上で位相検出し、テンプレート相関によりピーク信号を同定し、複数のシステムからの信号の相互相関処理を行うことによりアーチファクトを除去し、高速フーリエ変換法にて周波数領域の心拍変動を評価することが可能である。これらの解析アルゴリズムによって従来の接触型電極を用いた心電情報と良好な相関を示す心拍変動の解析結果が得られた。また心拍変動解析の対象になりにくい不整脈も心臓拍動の一過性の欠損や拍動間隔の過度の変動性を検知することで検出が可能となる。さらにヒトの異変察知や生存確認にも応用可能であるマイクロ波反射計はさらなる情報処理の高速化と小型化（モジュール化）が可能になれば深刻化する独居高齢者の孤独死を減少させる高齢者見守りシステムとして社会実装が可能になると考えられる。

ヒトに安全な強度のマイクロ波によりプライバシーに配慮して、無意識・無拘束・着衣下の非静止状態で心臓拍動をほぼリアルタイムで検出できる本装置はこれら以外にも災害現場や遠隔医療など将来的にさまざまな応用が期待される。

謝辞

共同研究者である長江大輔（現九州電力株式会社）、酒井文則（サクラテック株式会社）、白形哲郎、吉田傑（本田技術研究所）、深水哲二（パラマ・テック）の諸氏と秘書の吉村よし子氏に深謝する。本研究の一部は、令和2年度の公益財団法人三井住友海上福祉財団研究助成（高齢者福祉部門）によるものである。なお本稿の要旨は第30回日本心電学会学術集会（青森）、第45回国際心電学会（千葉）において発表した^{12),13)}。

引用文献

- 1) Nagae D, Mase A: Measurement of heart rate variability and stress evaluation by using microwave reflectometric vital signal sensing. *Rev Sci Instruments* 2010; 81: 094301-1 - 094301-10.
- 2) Mase A, Kogi Y, Nagayama Y, Ito N, Maruyama T, Ikezi H, Wang X., Inutake M, Tokuzawa T, Kohagura J, Yoshikawa M, Shinohara S, Suzuki A, Sakai F, Yamashika M, Tobias B, Muscatello C, Ren X, Chen M, Domier C, Luhmann Jr. N: Development and application of radar reflectometer using micro to infrared waves. *Adv. Phys X* 2018; 3: 633-675.
- 3) 丸山徹: 学校保健室や心臓二次検診への利用. 携帯型伝送心電図-その臨床と応用-. 小沢友紀雄(編), 中外医学社(東京) 2011, p213-214.
- 4) 丸山徹, 安田潮人, 間瀬淳: マイクロ波反射計を用いた非接触・無拘束・着衣下での心拍変動解析の試み. *心電図* 2015; 35: 133-142.
- 5) Lin JC, Kiernicki J, Kiernicki M, Wollschlaeger PB: Microwave apex cardiography. *IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques* 1979; 27: 618-620.
- 6) Massagram W, Hafner NM, Park BK, Lubecke VM, Host-Madsen A, Boric-Lubecke O: Feasibility of heart rate variability measurement from quadrature Doppler radar using arctangent demodulation with DC offset compensation. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc* 2007; 2007: 1643-1646.
- 7) Kahn F, Cho SH: A detailed algorithm for vital sign monitoring of a stationary/non-stationary human though IR-UWB radar. *Sensors* 2017; 17: pii: E290. doi: 10.3390/s17020290.
- 8) Shikhsarmast FM, Lyu T, Liang X, Zhang H, Gulliver TA: Random-noise denosing and clutter elimination of human respiration movements based on an improved time window selection algorithm using wavelet transform. *Sensors* 2018; 19: pii: E95. doi: 10.3390/s19010095.
- 9) Hu X, Jin T: Short-range vital signs sensing based on EEMD and CWT using IR-UWB radar. *Sensors* 2016; 16: pii: E2025.
- 10) Vasu V, Fox N, Brabetz T, Wren M, Heneghan C, Sezer S: Detection of cardiac activity using 5.8 GHz radio frequency sensor. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc* 2009, 2009: 4682-4686.
- 11) 香川正幸, 吉田悠鳥, 久保田将之, 栗田明, 松井岳巳: マイクロ波レーダーを用いた就寝中高齢者向け呼吸心拍計測の精度向上-動的ドップラーチャネル選択機能による体位変換への対応-. *医療情報学* 2011; 31: 25-36.
- 12) 丸山徹, 安田潮人, 間瀬淳: マイクロ波反射計を用いた非接触・無拘束下での心拍変動解析の試み(抄録). *心電図* 2013; 33 (Supplement 4) : S-4-171.
- 13) Maruyama T, Mase A, Yasuda S: Heart beat variability estimated by microwave reflectometry in noncontact clothing condition (English abstract). *The 45th International Congress on Electrocardiology (ICE2018)* June 28-30, 2018, Chiba, Japan.