

2023年度 3月修了 修士論文

心機能異常の発見を可能とする
ウェアラブルデバイスに求められる要件

Requirements for Wearable Devices That Can
Detect Abnormalities in Cardiac Function

早稲田大学 大学院スポーツ科学研究科

トップスポーツマネジメントコース

5023A317-4

千葉 修一

研究指導教員： 平田 竹男 教授

目次

第1章	序論	1
第1節	背景	1
第1項	ウェアラブルデバイスの台頭	1
第2項	心機能異常による突然死	2
第3項	スポーツとウェアラブルデバイス	2
第4項	ウェアラブルデバイスの技術	3
第5項	研究動機	4
第2節	先行研究	4
第3節	目的	4
第2章	方法	5
第1節	心機能異常の発見に必要な観測項目	5
第1項	対象	5
第2項	調査方法と内容	5
第2節	ウェアラブルデバイスの変遷	5
第1項	対象	5
第2項	調査方法と内容	5
第3節	デマンドサイドの要望調査	6
第1項	対象	6
第2項	調査方法と内容	6
第4節	要素技術の変遷と課題	6
第1項	対象	6
第2項	調査方法と内容	6
第3章	結果	7
第1節	心機能異常の発見に必要な観測項目	7
第2節	ウェアラブルデバイス	8
第1項	ウェアラブルデバイスの遷移	8
第2項	ウェアラブルデバイスの価格	10
第3節	デマンドサイドの要望要件	11
第1項	用途ごとの市場規模の推移と予測	11
第2項	ウェアラブルデバイスの普及に向けた課題	12
第3項	ウェアラブルデバイスへの要望	12
第4項	健康管理で利用する上での懸念点	13

第4節	要素技術の変遷.....	14
第1項	ポータブル技術.....	14
第2項	通信技術.....	17
第3項	センサー技術.....	22
第4項	解析技術.....	25
第5項	UX 技術.....	29
第4章	考察	31
第1節	要素技術の課題.....	31
第1項	心機能異常の兆候を発見する技術について	31
第2項	外部のデバイスと接続する通信技術について	31
第3項	安全に長時間利用するための技術について	31
第4項	各要素技術課題の解決が予想される時期.....	32
第5項	段階的な適用に向けて	33
第2節	スポーツ分野におけるデバイスの普及の重要性.....	34
第3節	研究の限界と今後の展望	35
第5章	結論	36
謝辞		37

図表

図 1	市場の推移と予測 2015 年時点	1
図 2	VECTOR PRO (CATAPULT)	2
図 3	ウェアラブルデバイスを構成する技術	3
図 4	世界の市場規模の推移と予測 (総務省)	11
図 5	ウェアラブルデバイスによる健康管理サービスを利用したくない理由 (みずほ情報総研)	12
図 6	Apple Watch における重量とセンサー数の変遷	14
図 7	半導体技術のスケーリング (Sri Samevadam)	15
図 8	リチウムイオン電池と全固体電池の比較 (日刊工業新聞)	16
図 9	移動通信システムにおける通信速度の変遷	17
図 10	5G 通信の整備状況 (経産省)	18
図 11	次期の移動通信システム (総務省)	18
図 12	6G で目指す無線ネットワーク技術への要求条件 (NTT ドコモ)	19
図 13	Wi-Fi 通信における通信速度の変遷	19
図 14	moerus EC-12S 構成イメージ (Medi-Aid SQ)	20
図 15	hamon CLOUD SERVICE (MITSUFUJI)	21
図 16	センサーの種類 (総務省)	22
図 17	光学心拍センサーの搭載部 (CYBERNET SYSTEMS)	22
図 18	光学式心拍センサーの仕組み (CYBERNET SYSTEMS)	23
図 19	パルスオキシメータの測定原理 (応用物理学会)	23
図 20	Apple Watch のセンサー	24
図 21	不整脈の種類	25
図 22	Apple Watch の臨床試験結果 (厚生労働省)	26
図 23	シミュレータ上に再現された心臓 (国立循環器病研究センター)	27
図 24	シミュレーションにより不整脈リスクを予測するシステム (岡田)	27
図 25	Fitbit の心電図アプリケーション (Fitbit)	29
図 26	心電図をデバイス本体で表示 (日本経済新聞)	30
表 1	心機能異常と観測項目の関係	7
表 2	ウェアラブルデバイスの観測項目	8
表 3	ウェアラブルデバイスの重量	9
表 4	ウェアラブルデバイスの価格	10

表 5	通信技術の特徴	17
表 6	各要素技術課題の解決が予想される時期	32
表 7	適用シーン	33

第1章 序論

第1節 背景

第1項 ウェアラブルデバイスの台頭

2010 年以降、ウェアラブルデバイスが日常生活で活用されるようになった。総務省より 2016 年に報告された「ウェアラブル（デバイス・サービス）市場の推移及び予測」¹⁾の内容（図 1）から市場規模が拡大方向にあった。

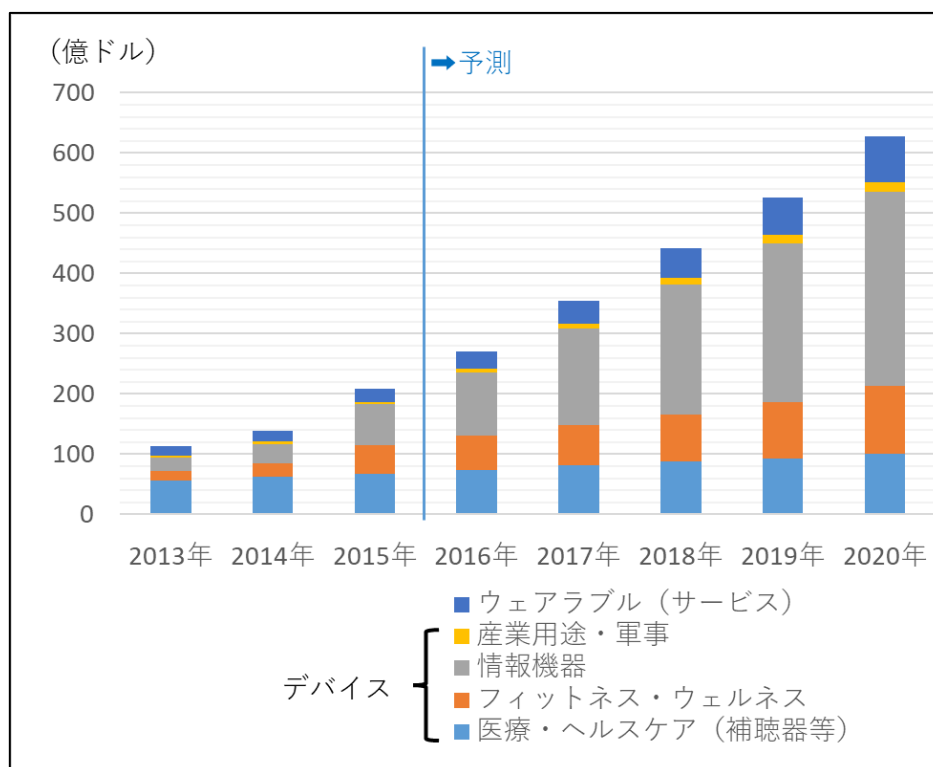


図 1 市場の推移と予測 2015 年時点

総務省：「ウェアラブル（デバイス・サービス）市場の推移及び予測」より改変

活用例の一つは健康支援で、軽量化技術やセンサー技術の発展により、スマートウォッチのようなリストバンド型（腕時計型を含む）のウェアラブルデバイスに心拍数のモニタリング機能が搭載されたことがこの背景にある。情報機器として、個人の生活情報を管理するモニタリングデバイスの目的で使うだけでなく、モニタリングした情報に応じてアドバイスを受け個人の行動に変化を与えるウェルネスや医療の目的でも利用が進んでいった。近年では、スマートウォッチでも心機能異常である心房細動の兆候をアラートとして受け取ることが可能となった。

第2項 心機能異常による突然死

心機能異常に起因した突然死について、JAPAN SPORT COUNCIL（日本スポーツ振興センター）が公開する「学校事故事例検索データベース」を利用し、平成17年から令和3年までの小中高校における心臓系突然死に分類される死亡事故を累計すると、年間平均約17件、令和3年度で8件の突然死が発生していた。

スポーツ現場では、2011年8月にサッカーの練習中に急性心筋梗塞を発症し亡くなった松田直樹選手の事故が取り上げられることが多い。この事故により様々なスポーツ団体でAEDの導入が検討され、AEDの普及につながった。しかしながら、総務省「令和3年版 救急・救助の現況」によると、AEDによる除細動を実施した傷病者の46.8%が1か月以内に亡くなっている。このことから、事故発生時に利用するAEDの普及だけではなく、事故を事前に防ぐ予防措置も必要である。

第3項 スポーツとウェアラブルデバイス

ランニングやトレッキングのような個人スポーツでは、自身のタイムや位置情報の管理を目的にスマートウォッチが活用されている。第7回神戸マラソンでは、アシックス社によるIoT/ICT技術を使用した市民ランナー参加型の実証実験として、腕時計型ウェアラブルデバイスを活用したリアルタイムコーチング実験なども実施された²⁾。

競技スポーツにおいてもスポーツ選手のコンディションを管理するため、CATAPULT社が提供するVECTOR PRO(図2)³⁾などのウェアラブルデバイスを活用し、心拍などの観測データを集計分析している。



図2 VECTOR PRO (CATAPULT)

サッカー界では、ルールなどを評議するIFAB(国際サッカー評議会:International Football Association Board)において2015-16シーズンの公式戦におけるGPUデバイスの使用が規制緩和されたことにより、国際大会でも積極的に導入されてきた。現在では、FIFAが「Electronic Performance and Tracking Systems (EPTS)」⁴⁾⁵⁾として規格化し、FIFAクオリティプログラムとして品質基準が設けられた。JFA(日本サッカー協会: Japan Football Association)でも、公式戦で利用するウェアラブルデバイスがFIFAクオリティプログラム

のウェアラブル EPTS 要件を満たしている必要があることを競技規則で定義した。

第4項 ウェアラブルデバイスの技術

ウェアラブルデバイスは、運動情報や生体情報をセンサーにより観測し、その観測データを解析することで歩数や心拍数などの情報を提供している。これらの技術を大きく 5 つの技術に分類した(図 3)。



図 3 ウェアラブルデバイスを構成する技術

以下、各技術の役割を示す。

1) ポータブル技術

ウェアラブルデバイスの装着を容易にするために小型化や軽量化する技術。または、長時間継続的に利用することを可能とするバッテリー性能を向上する技術として定義する。

2) 通信技術

必要な機能がウェアラブルデバイス外にある場合、Wi-Fi や Bluetooth などの無線通信を利用してデータ交換を行う技術として定義する。

3) センサー技術

ジャイロセンサーや光学式センサーにより運動や生体の状態を観測し、数値化したデータを保存する技術として定義する。

4) 解析技術

数値化されたデータの値や変化を解析し、観測情報としてデータ化する技術として定義する。

5) User eXperience 技術（以降、UX 技術）

データ化された観測情報を利用者に対して可視化、またはアラートとして通知する技術として定義する。

第5項 研究動機

ウェアラブルデバイスは、身体に装着することを目的としたコンピュータデバイスである特徴を活かし、技術の進化とともに様々な機能が追加されてきた。初期の製品では歩数計のような体の動きを観測しカウントアップする機能のみであったが、センサー技術や解析技術の進化により、心拍数や血中酸素濃度などの生体情報のモニタリングが可能となった。ランニングやサッカーなどのスポーツ現場においても、心拍数や血中酸素濃度をモニタリングすることにより個々の選手能力評価や戦術分析に活用される一方で選手の安全管理にも活用される萌芽が見られる。また心電図を解析することで、加齢や生活習慣病により発症しやすいと言われている心房細動の兆候もアラートとして受け取ることが可能となった。しかしながら、世界で死因1位となる虚血性心疾患⁶⁾、国内での超高齢化の進行により2035年まで増加が予測されている心不全⁷⁾、スポーツ現場で発生する心室細動⁸⁾など、突然死につながる緊急性の高い心機能異常の兆候をリアルタイムに通知することまでには至っておらず、強化、安全管理の両面からさらなる開発が期待されている。本問題を解決するためウェアラブルデバイスに求められる要件を明らかにし、製品開発へフィードバックすることは重要な研究課題であるといえる。

第2節 先行研究

坂生ら(2015)は、ウェアラブルデバイスを情報ウェアラブルと環境ウェアラブルの視点で整理し、心拍センサーを活用した事例や近未来の展開として、生体現象のセンシングから得られる人間情報による病気の診断について述べている⁹⁾。またArik Eisenkraftら(2023)は、ウェアラブルデバイスの光学式心拍センサーでモニタリングしたデータから、健康状態のリスクを4段階に分けて予測するツールの開発について述べている¹⁰⁾。

これら心機能のモニタリングの有効性に関する研究は存在するが、心室細動など緊急性の高い心機能に焦点を当て、ウェアラブルデバイスが対応すべき課題を取り上げた研究はない。

第3節 目的

本研究はウェアラブルデバイスで心室細動など緊急性の高い心機能異常の兆候を発見しリアルタイムに通知するための要件を明らかにすることを目的とする。

第2章 方法

第1節 心機能異常の発見に必要な観測項目

第1項 対象

国立高度専門医療研究センターの一つで循環器の専門機関となる「国立循環器病研究センター」、循環器病の診療と研究のプラットフォームとして循環器病の情報を発信する「日本循環器学会」の2つの団体がインターネットで公開しているガイドラインを調査対象とした。

第2項 調査方法と内容

世界最大の死因となっている虚血性心疾患の一つである「心筋梗塞」、その原因となる「心筋虚血」、スポーツ現場における突然死リスクで注目される「心室細動」、および超高齢社会により2035年まで増加が予測されている「心不全」の4つのキーワードについて、これらを確認する観測項目、および心臓リハビリテーションにおいて兆候を判断する観測項目を調査した。

第2節 ウェアラブルデバイスの変遷

第1項 対象

Apple、GARMIN、Fitbit、Samsung、HUAWEI、Xiaomi、オムロン、Catapult、SOLTILO Knows、STATSports、LABTECHの11社がインターネットで公開している情報、ホワイトペーパー、および製品パンフレットを調査対象とした。

第2項 調査方法と内容

“心機能異常の発見に必要な観測項目”で調査した観測項目のいずれかのモニタリングが可能なウェアラブルデバイスを対象に、以下の情報を比較し分析した。

- 年代
製品の初出荷日の年とする。
- デバイス名
製品名とする。
- 種類
以下の4つの状態に分類する。
 - 1) リストバンド
腕時計型を含む腕に装着するデバイスとする。
 - 2) ウェア
衣服にはめ込み装着するデバイスとする。
 - 3) 携行

常時装着せず、必要に応じて装着するデバイスとする。

4) 装置貼付け

粘着パッドなどでセンサーを貼り付け装着するデバイスとする。

➤ 運動時の装着可否

ランニング時に走行の妨げにならずに装着可能か否かを調査する。条件は、体が自由に動かせること、密着して装着すること、重量が 100 グラム以下であることとする。

➤ 重量

本体のみの重量のみを対象とする。

➤ 価格

Amazon による定価とする。Amazon で確認できない場合、公式販売サイトによる価格とする。双方で調査ができない場合は、インターネットの販売サイトを調査し、価格と販売サイト名を併記する。

➤ 観測項目

観測できるか否かを調査する。また観測した結果からリアルタイムにアラートすることが可能か否かも調査する。

第 3 節 デマンドサイドの要望調査

第 1 項 対象

総務省が公開する平成 26 年から令和 5 年発行の年次報告書、およびウェアラブルデバイスを主題とした研究論文について、インターネットで公開している情報を調査対象とした。

第 2 項 調査方法と内容

ウェアラブルデバイスに対して「要件」、「要望」、「課題」、「問題」の 4 つのキーワードを含む情報を収集した。また掲載先のウェブサイト、掲載日、情報の参照日については参考文献内に記載した。

第 4 節 要素技術の変遷と課題

第 1 項 対象

前述した“ウェアラブルデバイスの変遷”、“デマンドサイドの要望調査”で入手した情報を対象とした。

第 2 項 調査方法と内容

「ポータブル技術(軽量化/バッテリー性能)」、「通信技術」、「センサー技術」、「解析技術」、「UX(User eXperience)技術」の 5 つの視点で整理し、ウェアラブルデバイスに求められる技術を分析した。

第3章 結果

第1節 心機能異常の発見に必要な観測項目

心室細動、心不全、心筋虚血、心筋梗塞の発見に必要な観測項目を日本循環器学会が提供する“2021 年改訂版 心血管疾患におけるリハビリテーションに関するガイドライン”¹¹⁾に加え、NPO 法人ジャパンハートクラブが提供する“心不全の心臓リハビリテーション”¹²⁾の情報から抽出した。

表 1 心機能異常と観測項目の関係

心機能異常	心拍	心電図	血圧	血中酸素濃度
心室細動	○	○	○	
心不全	○	○	○	○
心筋虚血		○		
心筋梗塞		○		

またリハビリテーションにおいてモニタリングする観点は以下となった。

① 心拍

頻脈、徐脈、不整脈が発生した場合に警告する。

② 心電図

不整脈、ST 変化が発生した場合に警告する。

③ 血圧

急激な変化があった場合に警告する。

④ 血中酸素濃度

基準値より低下した場合に警告する。

第2節 ウェアラブルデバイス

第1項 ウェアラブルデバイスの遷移

特徴的な17製品を年代別にソートし、運動時の装着可否、観測項目の有無について列挙した(表2)。

表2 ウェアラブルデバイスの観測項目

年代	デバイス名	運動時の装着可否	観測項目			
			心拍	心電図	血圧	血中酸素濃度
2012	オムロン HR-500U	○	○			
2015	CatapultVECTOR	○	○			
2017	Apple Watch Series 3	○	○			
2019	オムロン HCR-6900T	○	○		◎	
	STATSports APEX	○	○			
	Apple Watch Series 6	○	○			◎
2020	SOLTILO Knows	○	○			
	LABTECH Moerus EC-12S		◎	◎	◎	
	Apple Watch Series 7	○	◎	◎		◎
2021	FitBit Charge 5	○	◎	▲		◎
2022	オムロン HCG-8060T		○	○		
	GARMIN Venu 3	○	○			◎
	Apple Watch Series 9	○	◎	◎		◎
2023	FitBit Charge 6	○	◎	▲		◎
	Samsung Galaxy Watch6	○	○			
	Xiaomi Smart Band 8	○	◎			◎
	HUAWEI Band 8	○	◎			◎

◎：異常をリアルタイムに通知可能、○：観測が可能、▲：日本国では機能制限

空欄：観測不可／不明

2020年には、対象とした観測項目をリアルタイムに警告することが可能となっているが、すべての項目を網羅し、運動時に装着することが可能なウェアラブルデバイスは存在しなかった。また定期的に新製品が発売される Apple Watch について観測項目の遷移を確認すると、心拍モニタリングの搭載、機能の向上があったのは Series 3、6、7 の3モデルで、Series 7以降の最新モデルまでは観測項目に変化はなかった。

表 2 と同様の製品に対して、装着方式およびデバイス本体の重量を比較した(表 3)。素材や機能の違いにより重量が変化するのは、最軽量のものを採用した。

表 3 ウェアラブルデバイスの重量

年代	デバイス名	装着方式	重量 (g)
2012	オムロン HR-500U	ウェア	35.0
2015	CatapultVECTOR	ウェア	42.0
2017	Apple Watch Series 3	リストバンド	26.7
2019	オムロン HCR-6900T	リストバンド	115.0
	STATSports APEX	ウェア	45.0
2020	Apple Watch Series 6	リストバンド	30.5
	SOLTILO Knows	ウェア	26.0
	LABTECH Moerus EC-12S	装着貼付け	110.0
2021	Apple Watch Series 7	リストバンド	32.0
	FitBit Charge 5	リストバンド	29.0
2022	オムロン HCG-8060T	携行	24.0
2023	GARMIN Venu 3	リストバンド	47.0
	Apple Watch Series 9	リストバンド	32.1
	FitBit Charge 6	リストバンド	30.0
	Samsung Galaxy Watch6	リストバンド	33.3
	Xiaomi Smart Band 8	リストバンド	27.0
	HUAWEI Band 8	リストバンド	14.0

全体平均の重量は約 42g と一部のデバイスを除いて 50g 以下を維持している。

第2項 ウェアラブルデバイスの価格

2022 年以降に発売された Apple、GARMIN、Fitbit、Samsung、HUAWEI、Xiaomi、オムロンの 7 社の最新製品について、2023 年 12 月 1 日時点の価格を比較した(表 4)。

表 4 ウェアラブルデバイスの価格

年代	デバイス名	装着方式 (製品種別)	価格 (円)
2022	オムロン HCG-8060T	携行 (携帯型心電計)	23,000
	GARMIN Venu 3	リストバンド (スマートウォッチ)	54,208
2023	Apple Watch Series 9	リストバンド (スマートウォッチ)	74,269
	FitBit Charge 6	リストバンド (スマートウォッチ)	23,800
	Samsung Galaxy Watch4	リストバンド (スマートウォッチ)	50,160
	Xiaomi Smart Band 8	リストバンド (スマートバンド)	5,045
	HUAWEI Band 8	リストバンド (スマートバンド)	7,480

機能を絞り込むことで低価格化を実現したスマートバンドが、高機能化されたスマートウォッチの約 1/10 の価格で入手可能であることが分かった。2023 年の販売価格は HUAWEI Band 8 など低価格の製品（定価 5045～7480 円）が発売される一方、Apple Watch はバージョンアップに伴い価格が上がっていた¹³⁾。

第3節 デマンドサイドの要望要件

第1項 用途ごとの市場規模の推移と予測

経産省から報告された”世界のウェアラブルデバイス市場規模に関する推移”¹⁴⁾に関するグラフを図4に示した。

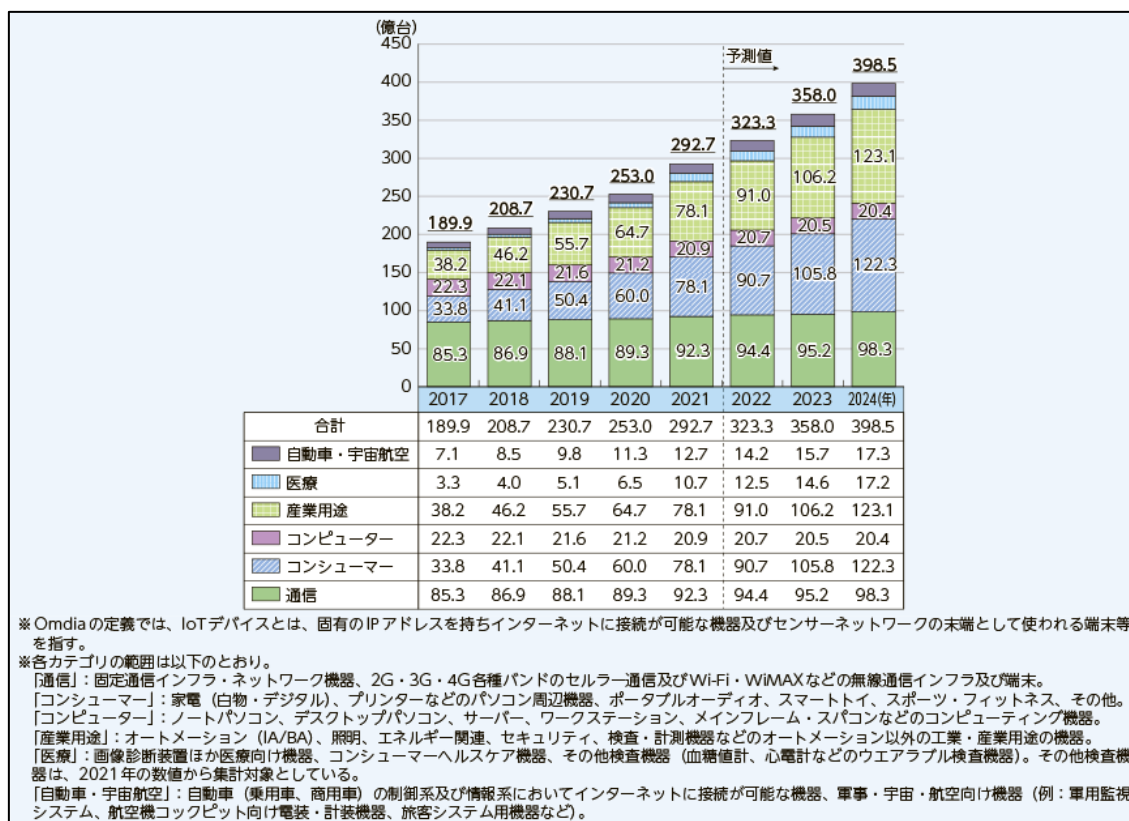


図4 世界の市場規模の推移と予測（総務省）

「医療」の指標については、2021年の数値から心電計などのウェアラブル検査機器も含まれており、市場における台数が増加し続けていることが分かった。

第2項 ウェアラブルデバイスの普及に向けた課題

総務省から報告されたウェアラブルデバイスを活用した健康管理サービスの利用意向¹⁵⁾に対して、「あまり利用したくない」、「利用したくない」と回答した対象者の理由を年齢ごとに分類したグラフを図5に示した。

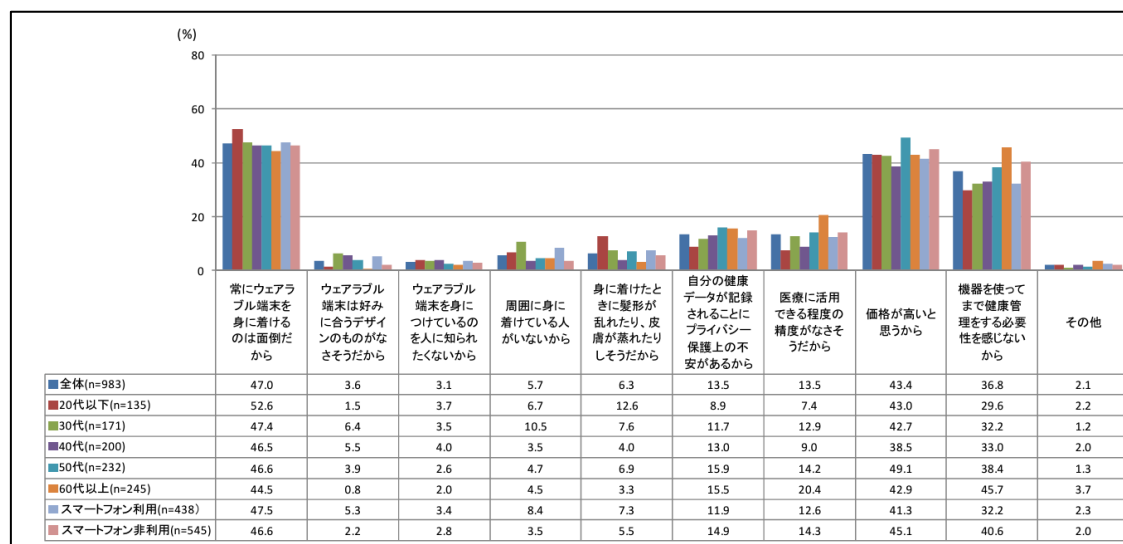


図5 ウェアラブルデバイスによる健康管理サービスを利用したくない理由
(みずほ情報総研)

総合的には「常々ウェアラブル端末を身に着けるのは面倒だから」が47.0%と一番多く、次いで「価格が高いと思うから」、「機器を使ってまで健康管理をする必要性を感じないから」の理由が高い。50代に焦点を当てると、「価格が高いと思うから」が一番多い結果となった。

第3項 ウェアラブルデバイスへの要望

情報通信白書平成26年版ではウェアラブルデバイスに対する要望として、

一つは技術的な側面として前述でも述べたようにバッテリー問題が挙げられ、ウェアラブル端末は小型軽量化が求められることが多いが、高機能化すると消費電力が大きくなり大容量のバッテリーが必要となるため、この両方の要件のバランスが取れるような設計が求められる。特にライフログ等日常常に身に着けていることが求められる端末ではバッテリーの持続時間が長いこと、充電時間が短いことが求められ、腕時計型端末についても、一般の腕時計の電池が1年以上持つのに対して、どこまでウェアラブル端末において求められるのかは今後検証が必要である。

といった内容が報告されており、ウェアラブルデバイスを長時間利用するための要望が強いことが分かった。

第4項 健康管理で利用する上での懸念点

江口ら(2015)による時計型ウェアラブルデバイスの活用法¹⁶⁾において「時計型ウェアラブル端末が、健康管理を容易にし、被介護者、介護者、個人の介護における負担を軽減することに寄与できること」が報告された。この報告の中で、懸念点として「導入コストの高さや故障、充電切れなどのリスクが存在する」と述べられている。導入コストについては、使い方の講習が必要になり、そのための人件費など製品価格以外の点も指摘されている。

第4節 要素技術の変遷

第1項 ポータブル技術

1) Apple Watch の重量の遷移

2015年に発売されたApple Watch Series 1から2023年に発売されたApple Watch Series 9までのシリーズ製品を対象に、センサー機能の数と重量の遷移を辿った。センサー機能については、Apple Watch Series 9において搭載された「GPS」、「血中酸素ウェルネスセンサー」、「電気心拍センサー」、「光学式心拍センサー」、「皮膚温センサー」、「コンパス」、「高度計」、「高重力加速度センサー」、「環境光センサー」の9種類のセンサー機能を対象とし、それらの搭載状況と重量を重ねグラフ化した(図6)。

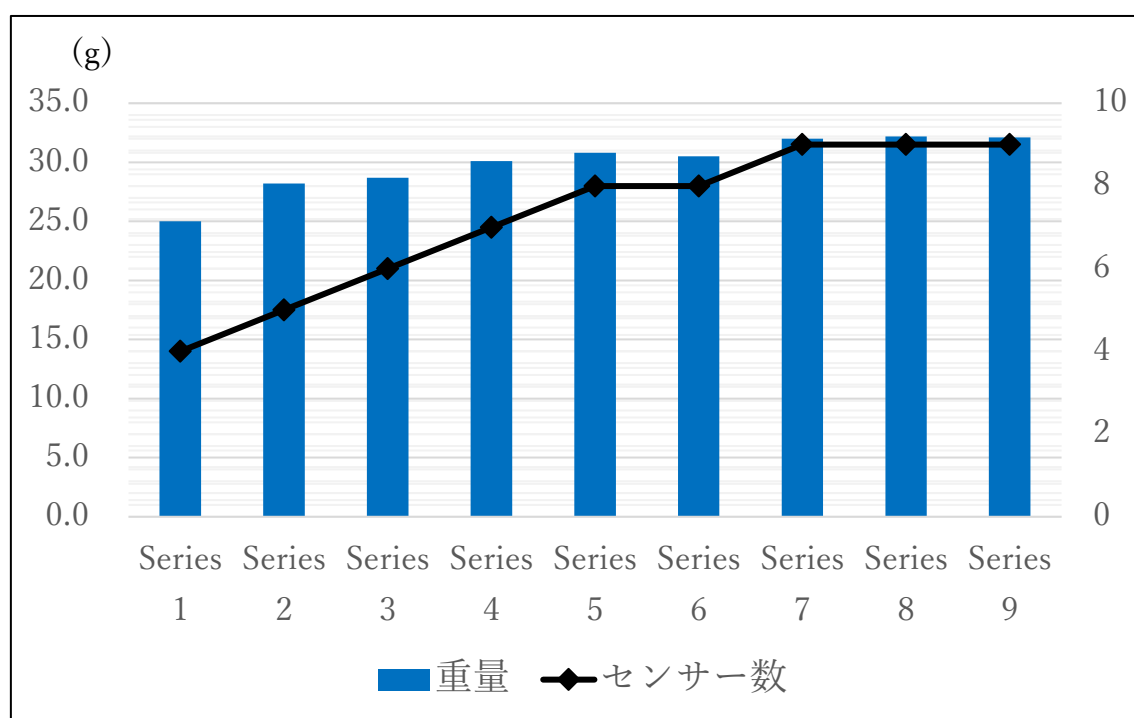


図6 Apple Watchにおける重量とセンサー数の変遷

センサー数は約2倍に増加しているが、大幅に重量が変動することはなかった。

2) 半導体技術の遷移

デバイスの小型化、軽量化には半導体の微細化が影響する。半導体の微細化技術については、第66回電子デバイス国際会議:IEDM 2020(International Electron Device Meeting 2020)の Opening Keynote Session において、Sri Samevadam により半導体技術に関する発表¹⁷⁾があった(図7)。

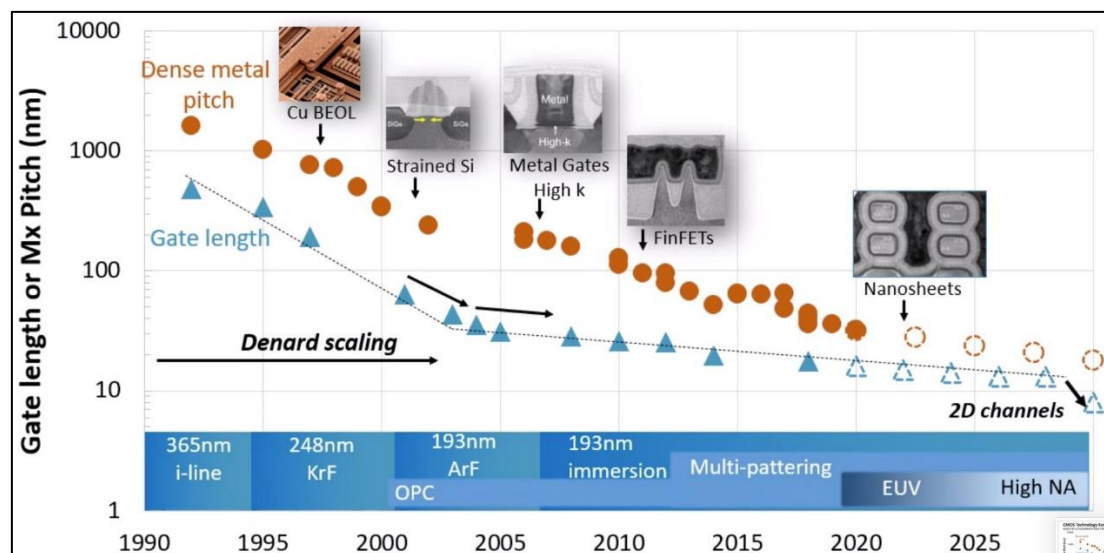


図7 半導体技術のスケーリング (Sri Samevadam)

発表では、2030年まで微細化がスケーリングすることが述べられた。また、微細化を実現するための具体的な施策として、設計手法やツールについても紹介された。

3) 次世代のバッテリーについて

リチウムイオン電池に代わる新たな電池として全固体電池の実用化が進んでいる。トヨタは2027年を目標に電気自動車(EV)で実用化する方針を発表した¹⁸⁾。鈴木(2021)による「人間拡張技術に資するフレキシブル全固体電池」¹⁹⁾などウェアラブルデバイス向けの全固体電池の研究も進んでいる。

日刊工業新聞によるリチウムイオン電池と全固体電池の特徴²⁰⁾に関する比較を図8に示した。

リチウムイオン電池と全固体電池の特徴		
	リチウムイオン	全固体
出力	○	◎
容量	○	◎
寿命	○	◎
急速充電	○	◎
安全性	○	◎
電解質	液体	固体
設計自由度	○	◎
量産化	○	△
コスト	○	?
高温・低温での性能	○	◎
メーカー・団体等の資料を基に作成、全固体は研究開発段階のデータを含む		

図 8 リチウムイオン電池と全固体電池の比較（日刊工業新聞）

性能面では、全ての項目において全固体電池が優位である。しかしながら、コスト面はまだ不透明な部分が残っており今後も継続的な調査が必要となった。

第2項 通信技術

1) 通信技術について

通信技術には大きく2系統が存在する。一つはスマートデバイスなどの周辺機器との近距離の通信手段を目的とした Bluetooth、もう一つはインターネットに接続が可能なアクセスポイントとの通信手法を目的とした移動通信システムや Wi-Fi である。それぞれに特徴²¹⁾²²⁾があり、4つの主要な特徴について比較した(表5)。

表5 通信技術の特徴

接続方法	安定性	通信速度	消費電力	通信距離
Bluetooth	△	△	◎	△
移動通信システム 5G	◎	○	△	◎
Wi-Fi	○	◎	○	○

◎：他より優れている、○：中間、△：他より劣っている

2) 移動通信システム

主に屋外の利用シーンにおいて、ウェアラブルデバイスから直接的にインターネットへ接続する場合に利用する。以下、2010年以降の移動通信システムの実装時期と通信速度を比較しグラフ化した(図9)。

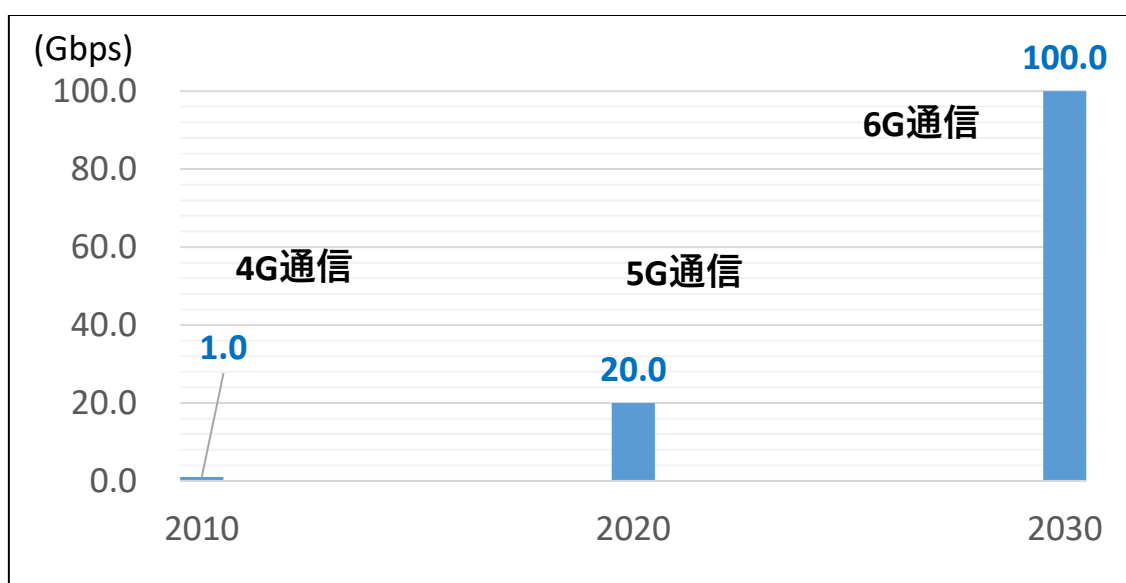


図9 移動通信システムにおける通信速度の変遷

また総務省(2023)の発表²³⁾によると、5Gの人口カバー率は、2023年3月末時点で96.6%となっているが、都道府県別に見ると大きな差があった(図10)。

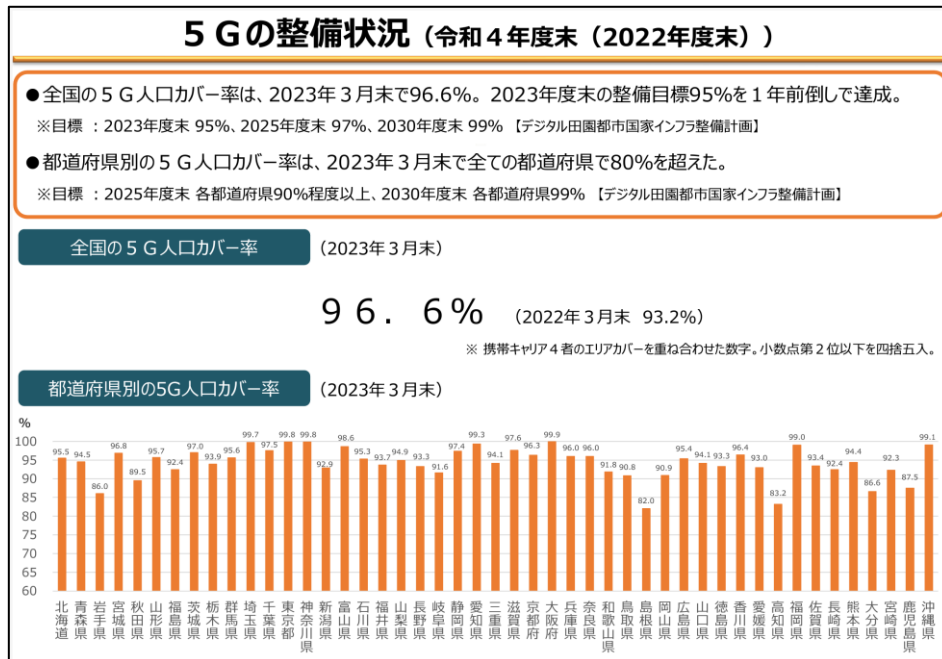


図 10 5G 通信の整備状況（経産省）

総務省(2023)は、Beyond 5G(6G)においてスマートフォンやウェアラブルデバイスの利用に向けて Society 5.0 の世界を実装する計画²⁴⁾を進めている(図 11)。

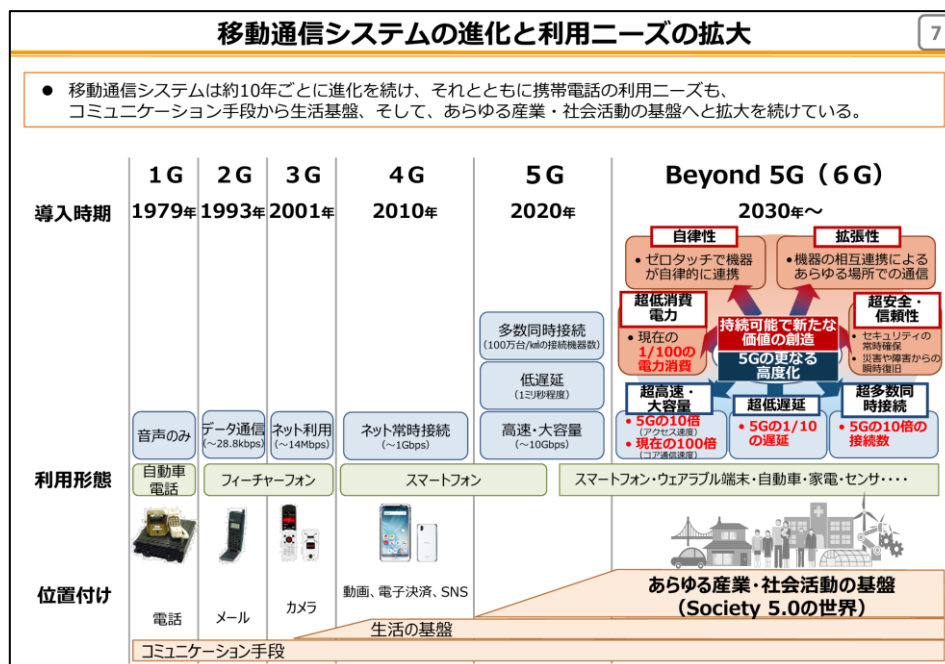


図 11 次期の移動通信システム（総務省）

また、NTT ドコモは、次世代の 6G 通信システムを検討する”ドコモ 6G ホワイトペーパー 5.0 版”²⁵⁾において、面積カバー率 100%を要求条件として設定した(図 12)。

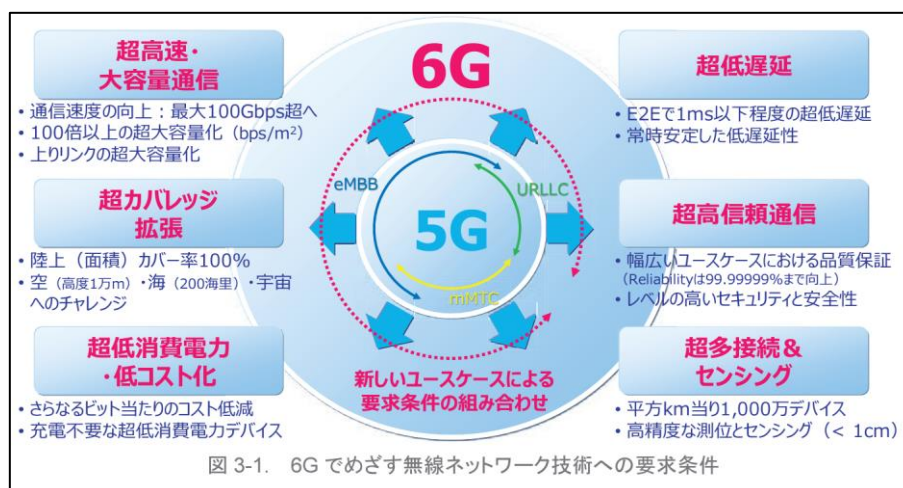


図 12 6G で目指す無線ネットワーク技術への要求条件 (NTT ドコモ)

3) Wi-Fi

限定されたエリア内で高速な通信を行う場合に利用する。以下、2010 年以降の Wi-Fi の実装時期と通信速度を比較しグラフ化した(図 13)。

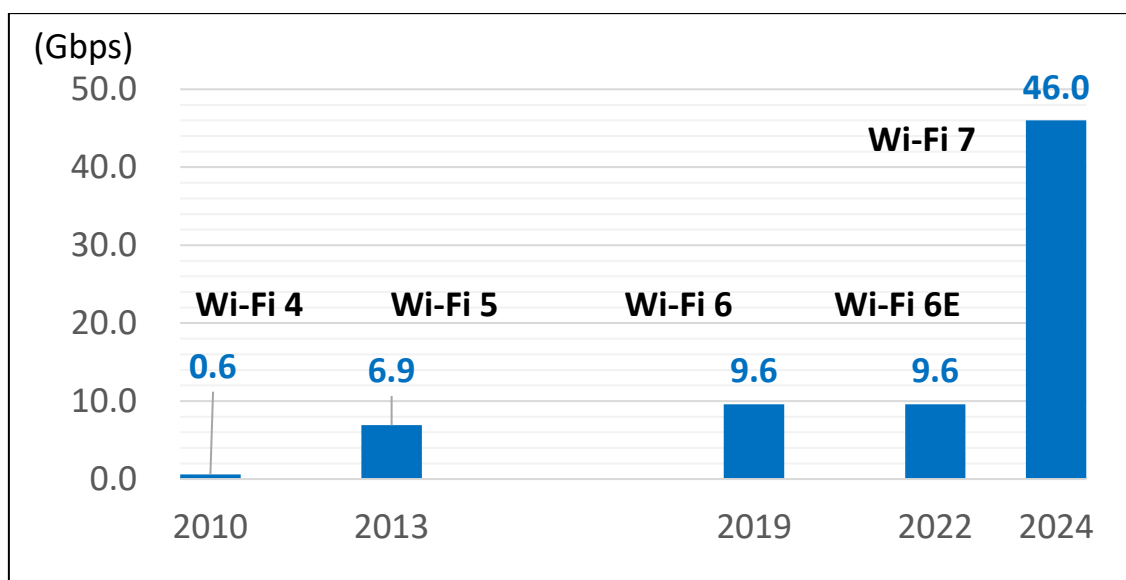


図 13 Wi-Fi 通信における通信速度の変遷

2024 年に社会実装が予定されている Wi-Fi 7 では、通信の遅延や伝送のミスが改善され、不安定な通信環境でも安定した通信品質を確保することが可能となった²⁶⁾。

4) SIM ロック解除

2022 年 10 月 1 日より、総務省は”移動端末設備の円滑な流通・利用の確保に関するガイドライン”²⁷⁾において、

移動端末設備の円滑な流通・利用の確保に関するガイドライン（以下「本ガイドライン」という。）は、移動端末設備の円滑な流通・利用の確保に向けて、電気通信事業法（昭和 59 年法律第 86 号）第 29 条の規定の考え方に照らし、基本的な考え方及び SIM（Subscriber Identity Module）ロックについての考え方を整理して示すものである。

と定義した。

これにより通信事業者の縛りを受けずにデバイスを購入することが可能となった。

5) 通信技術を活用したモニタリング

LabTech moerus EC-12S²⁸⁾は、無線通信を利用することでオペレータが遠隔でモニタリングすることを可能とした(図 14)。また、測定する機能に特化することで携行性も担保している。



図 14 moerus EC-12S 構成イメージ (Medi-Aid SQ)

また、クラウドコンピュータを利用してウェアラブルデバイスで取得した生体情報を管理するサービス hamon CLOUD SERVICE²⁹⁾も提供された(図 15)。



図 15 hamon CLOUD SERVICE (MITSUFUJI)

クラウドコンピュータ上に集められたデータを遠隔モニタリングすることも可能としているが、リアルタイムな通知には至っていない。

第3項 センサー技術

1) センサー技術について

センサーは、心身に関する情報だけでなく、位置や速度に関する情報、身体の動きに関する情報など様々な情報を得る目的で利用³⁰⁾されており、センサーごとの情報を列挙した(図 16)。

ウェアラブルデバイスにおけるセンシング例			
情報	主なセンサー	用途の大分類	代表的な用途
血流・心拍数	光センサー	心身に関する 情報収集	健康管理、ストレス、病気の予兆検知
体温	赤外線センサー		健康管理、病気の予兆検知
脳波	頭部電位センサー		ストレス、睡眠深度の測定
眼球の運動	アイトラッカー		集中力の測定、注目対象の把握
位置情報	電波センサー（電波発信もあり得る）	位置や速度に関 する情報収集	位置の測定
移動情報	加速度・ジャイロセンサー		速度の測定
体の動き	加速度・圧力センサー	入力・運動支援	身振りやクリックによる操作
筋肉の動き	生体電位センサー		動作検知、ロボットスーツ

図 16 センサーの種類（総務省）

2021 年、Apple Watch は光学式心拍センサーと併用する電気式心拍センサーを追加し、高精度に心電図を観測することが可能となった。

2) 光学式心拍センサー³¹⁾³²⁾

ウェアラブルデバイスの背面に設置された LED から皮膚に向かって光を照射し、血管で反射してセンサーに返ってくる光を検出する。血液中の酸素化ヘモグロビンが特定の光に対して強い反応を示す特性を持つため、この原理を利用し光を観測することで脈拍を取得している。

リストバンド型のウェアラブルデバイスでは、ディスプレイ部の裏側にセンサーが搭載された(図 17)³³⁾。

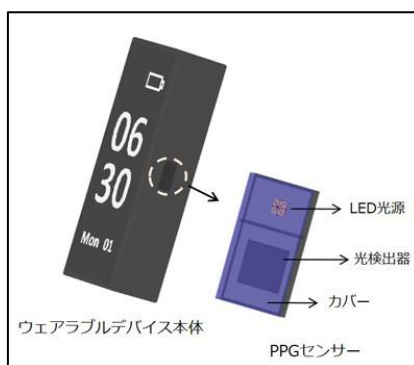


図 17 光学心拍センサーの搭載部（CYBERNET SYSTEMS）

LED より照射された光をフォトダイオード(PD : Photo Diode)で検出し、光を電気に変換することで観測³⁴⁾を行っている(図 18)。

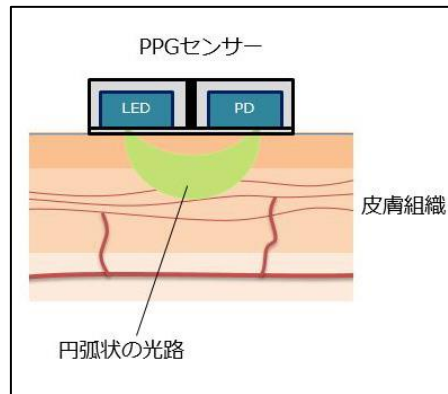


図 18 光学式心拍センサーの仕組み (CYBERNET SYSTEMS)

太陽光など生活環境で発生する「迷光」が検出器に入射すると誤検出に繋がるため、迷光を事前にシミュレーションし迷光の影響を配慮した設計が行われている。これにより、生活環境を問わずウェアラブルデバイスを利用することができる。

3) 血中酸素飽和度センサー³⁵⁾

心拍の観測でも利用する光センサーを利用し実装される。Apple Watch では、光学式心拍センサーを再設計することで、酸素のレベルを測定する機能を追加した。医療機器であるパルスオキシメータと同じ原理が採用されている(図 19)³⁶⁾。

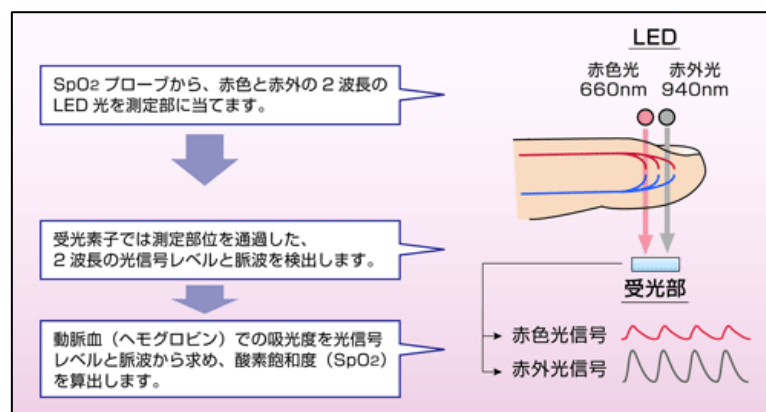


図 19 パルスオキシメータの測定原理 (応用物理学会)

ウェアラブルデバイスでは物理的なセンサーを共有し、ソフトウェアを切り替え解析す

ることで複数の生体情報を観測することを可能にした。これにより、複数のセンサーを搭載する必要がなくなり、小型軽量化にも繋がった。

4) 電気心拍センサー³⁷⁾

Apple Watch で採用された電気心拍センサーを使って心拍を測定する場合、デバイス本体にある”Digital Crown”の電極に指をのせることで心臓から両手を通る回路が閉じ、胸に流れる電子パルスを記録する。これにより、光学式心拍センサーより高精度の計測が可能となるが、指を接触させる行為が必要となる。

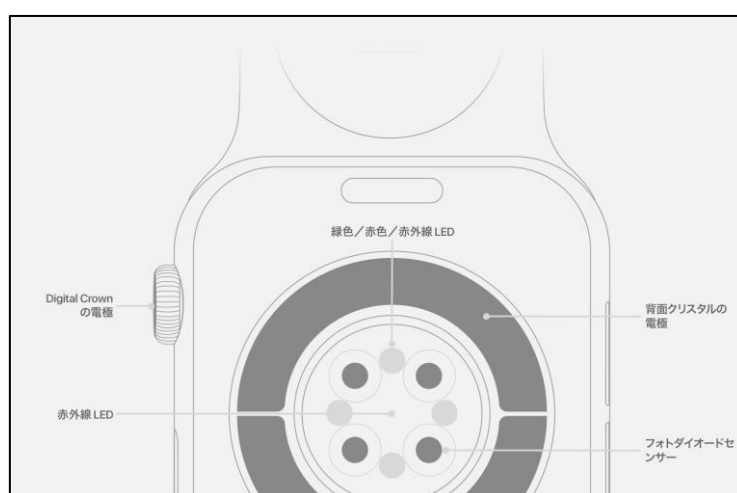


図 20 Apple Watch のセンサー

Apple Watch のように観測項目を増やすためだけでなく、観測の精度を上げるために新しいセンサーを搭載する製品が登場した。

第4項 解析技術

1) 解析技術について

Apple Watch など「心房細動」に関する兆候を解析することが実現できている³⁸⁾。これらの解析技術は、心電図から不整脈を観測することで実現しているが、「心房細動」に特化しているため、不整脈が発生するその他の疾患について判定することはできない。不整脈の種類を以下に分類した(図 21)。

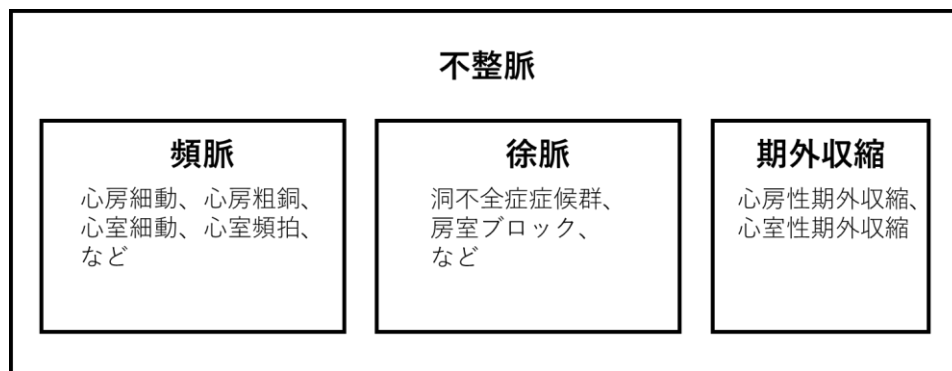


図 21 不整脈の種類

また心拍の解析については、疾患とは関係なく継続的に取得している心拍データを元に上昇、下降を観測して警告している。HUAWEI 製品では、心拍の上昇を警告する閾値を利用者が設定することもできる³⁹⁾。

2023 年モデルの Apple Watch Series 9 が通知できる警告は、「心房細動」、「不規則な心拍」の2点となっている。

2) 心機能異常を発見する仕組みについて

心電図の異常通知などは、厚生労働省が定める「医療機器」に該当する。そのため、ウェアラブルデバイスで利用するアプリケーションも医療機器としての承認を得る必要がある。Apple Watch では、「家庭用心電計プログラム」と「家庭用心拍数モニタプログラム」の2つのアプリケーションが医療機器として 2020 年に医療機器の認可を受けた⁴⁰⁾。

3) 心電図の生成技術

医療現場で利用される 12 誘導心電図は 10 個の電極を体に装着することで実現している。ウェアラブルデバイスの場合、少数のセンサーで観測したデータを利用してソフトウェアで処理することで心電図を生成してる。

Apple は、心電図アプリで心電図をとる手法として、

この十二誘導心電図は、心臓の電気信号をさまざまな角度から記録し、12 個の波形

を生成します。Apple Watch の心電図アプリは、これら 12 個の波形のうち 1 つと似た波形を記録します。単極誘導心電図からは、心拍数と鼓動のリズムに関する情報がわかり、心房細動の分類も可能です。ただし、単極誘導心電図は、心臓発作など、その他の症状の特定には使えません。単極誘導心電図は、基本的な心拍数や心拍リズムをより正確に把握できるよう、医師の指示に基づいて自宅や医療施設内で機器を装着するのが通常ですが、Apple Watch Series 4 以降およびすべての Apple Watch Ultra モデルの心電図アプリは、医師の指示なしに、単極誘導心電図に似た心電図を生成できます。

といった内容を公開している³⁸⁾。

4) Apple Watch の解析能力

厚生労働省(2022)は、”「家庭用心電計プログラム」及び「家庭用心拍数モニタプログラム」の適正使用について”⁴¹⁾において、Apple Watch に搭載された”心電図アプリケーション”、”不規則な心拍の通知プログラム”に関して、”従来の医師による診断に代わるものではない”と留意事項を発表した。さらには、臨床試験の結果として、以下の情報を公開した(図 22)。

＜臨床試験結果＞					
本品がインストールされた Apple Watch を手首に装着して心電図を記録する。同時に 12 誘導心電図を使用して心電図を記録する。本品による分類結果と、12 誘導心電図を医師が読影した結果を比較した。					
12 誘導心電図と本品の測定結果					
		12 誘導心電図を医師が読影した結果			
		洞調律	心房細動	その他の不整脈	判読不能
本品の結果	洞調律	238 例	4 例	4 例	1 例
	心房細動	1 例	236 例	2 例	2 例
	未分類	6 例	7 例	6 例	—
	判定不能	18 例	30 例	1 例	—
	機器の結果報告なし	32 例	13 例	1 例	—
下線：心房細動の感度 98.3% (236/240 例)、特異度 99.6% (238/239 例)					
太枠：心房細動の感度 81.4% (236/290 例)、特異度 80.7% (238/295 例)					

図 22 Apple Watch の臨床試験結果（厚生労働省）

全 602 件について医師の読影と比較する臨床試験を行っている。また、心房細動の陽性的中率は 63.6%と報告された。

5) コンピュータシミュレーションによる心電図の研究

国立循環器病研究センター循環動態制御部による「不整脈・呼吸器異常に関する研究」では心室細動など重症の不整脈の発生機序解明に関する研究が報告されている⁴²⁾。

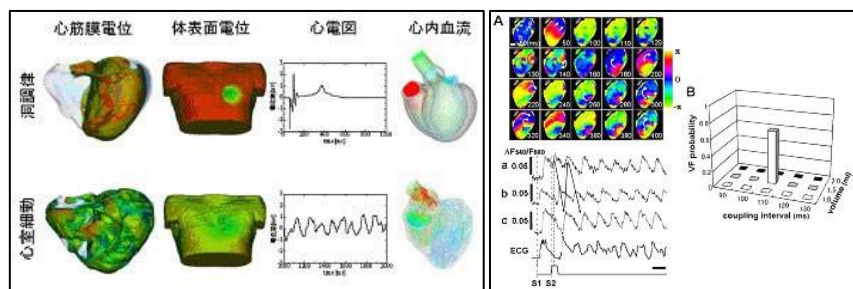


図 23 シミュレータ上に再現された心臓 (国立循環器病研究センター)

本研究では、シミュレーション上で心臓に機械的刺激を加え、心室細動が発生することを確認している。

また岡田(2016)の研究⁴³⁾では、心臓の興奮伝播現象を細胞レベルから再現する研究が報告されている。

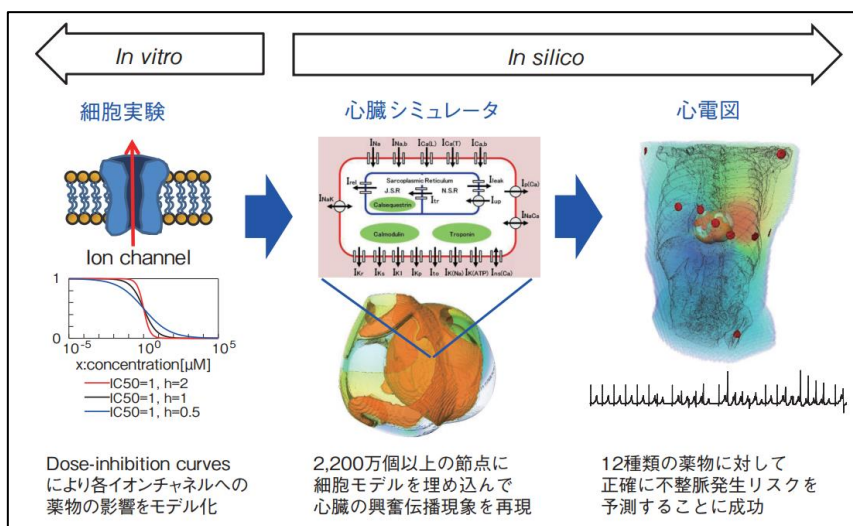


図 24 シミュレーションにより不整脈リスクを予測するシステム (岡田)

本研究では、コンピュータ上で心臓を再現し、それを細胞内の分子のレベルから動かすことで心電図を入手できるシミュレーションが述べられている。これにより、薬物の反応とし

て不整脈の心電図を再現することも可能となっている。

シミュレーションの技術は、スーパーコンピュータの変遷とともに進化しており、心室細動など突然死につながる心機能異常を予測するための要素技術は完成しつつある。

第5項 UX 技術

1) UX 技術について

これまでリストバンド型のウェアラブルデバイスについては、スマートフォンなどの外部デバイスのアプリケーションを利用して詳細な情報を参照していたが、これらのアプリケーションがデバイス本体に実装され、本体のディスプレイを使って可視化できる高機能な製品が増えている。Apple Watch では心電図波形をデバイス本体で表示可能となった。一方、同じ腕に装着するリストバンド型でも小型軽量化を目的としたものは、ディスプレイ部も簡素なものとなっており、詳細な情報の参照はスマートフォンを利用する。利用者の用途に応じて二分されている。

また、ウェア型などスポーツでの装着が前提となるウェアラブルデバイスについては、外部デバイスを利用して情報を可視化することが前提となっている。

2) スマートフォンを利用したによる心電図の可視化

Fitbit は Bluetooth 通信を利用し、スマートフォンを利用して心電図を可視化⁴⁴⁾している(図 25)。

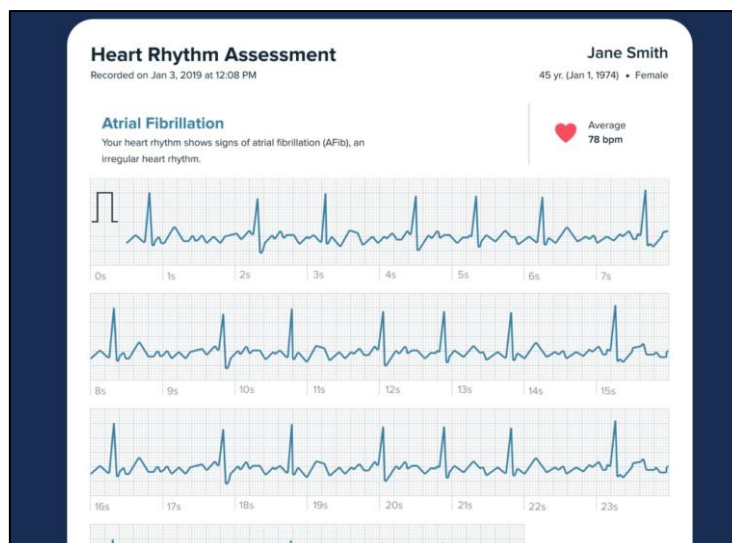


図 25 Fitbit の心電図アプリケーション (Fitbit)

アプリケーションには医師の診察を受けるときに提出できるレポートを作成する機能も搭載された。

3) ウェアラブルデバイス本体による心電図の可視化⁴⁵⁾

Apple Watch では、電気心拍センサーで測定した心電図を本体で表示することが可能である(図 26)。この時、心拍数の状態を「洞調律 (正常)」、「心房細動」などに分類して通知される。



図 26 心電図をデバイス本体で表示 (日本経済新聞)

スマートフォンほどの情報量は表示できないが、ディスプレイの解像度も高く、心電図の波形も表示できるため、必要な情報はすべて確認できる。

第4章 考察

心室細動など緊急性の高い心機能異常の兆候を発見しリアルタイムに通知することが可能になるには、解析技術、ウェアラブルデバイスに搭載する CPU の処理能力、通信手段の確保、そしてバッテリー性能の4つの向上が必要である。加えて、通信技術が向上することでウェアラブルデバイスの適用シーンを拡大させることが可能となる。

第1節 要素技術の課題

第1項 心機能異常の兆候を発見する技術について

重要な「解析技術」については、コンピュータシミュレーションによる心臓および心電図を再現する研究の実用化が見込まれる。その成果として「①コンピュータシミュレーションにより心電図から心機能異常の兆候を予測する技術の実用化」が必要となる。ただしコンピュータシミュレーションには、コンピュータの高い処理能力が必要である。そのため、現状のウェアラブルデバイスに搭載された CPU の処理能力ではリアルタイムに通知するまでには至らない。そこで、解析処理をクラウドコンピュータ上で実装し、ウェアラブルデバイスと通信で接続する手法が考えられるが、通信を用いる場合には通信遅延や伝送ミスなどの品質面に課題があるため、CPU の微細化技術を進みデバイス内で機能を実装するべきである。つまり、「②ウェアラブルデバイスにおける処理能力を高めデバイス内で解析機能の実装」が必要となる。

第2項 外部のデバイスと接続する通信技術について

装着者が疾患者などの観察対象者の場合、装着者だけでなく装着者の健康を守る人々、助けることができる人々（例えばチームドクターや保護者、医療者など）へ通知できることが望まれる。したがって「③異常を関知したデバイスから直接関係者へ診断情報をリアルタイム共有できる高度な通信手段の確保」が必要となる。2024年に計画されている Wi-Fi 7 の社会実装では、通信遅延や伝送ミスなどの問題が改善され、電波の障害となる部屋の壁が多い場所でも安定した通信が確保されるようになる。これにより、無線 LAN が利用可能な屋内外の限定されたエリアで高品質の通信を行うことができ、スタジアムや病院といった施設内で利用が可能となる。さらには、2030年に計画されている 6G 移動通信システムの社会実装では、国内の通信エリアの面積カバー率が 100%に近づく見込みである。これにより、屋外で高品質な通信を行うことが可能となる。たとえば非住居エリアをランニングする場合でも通信を経由した機能が利用可能になる。

第3項 安全に長時間利用するための技術について

長時間利用を実現するためには「バッテリー性能」の改善は必要不可欠である。この課題解決には、実用化が進められている全固体電池の実用化が期待される。全固体電池では現状

のリチウムイオン電池を上回る電池寿命の延長、および急速充電が可能となる。これにより、稼働時間が延長でき、かつウェアラブルデバイスを外す時間を最小限に留められるため、異常の発見を逃す可能性を最小限にできる可能性がある。また、容量や設計自由度も向上するため、デバイス内に予備のバッテリーを搭載し切り替えて利用する仕組みや、充電しながら利用する仕組みなども考えられる。安全面でもリチウムイオン電池のような発熱や発火の危険性が低下するため、医療現場での適用にも向いていると言える。したがって、「④ウェアラブルデバイスを安全に長く動かすための全固体電池の実装」が必要となる。課題としては、材料コストがリチウムイオン電池より高く、製造コストが上がることである。そのため、製造プロセスにおけるコストの削減に期待したい。

第4項 各要素技術課題の解決が予想される時期
要素技術課題の解決が予想される時期を表6に示す。

表6 各要素技術課題の解決が予想される時期

	2024年	2025年	2026年	2030年
解析技術	解析技術の 実用化			
半導体の 微細化技術	高性能CPUの 小型化			
バッテリー技術				全固体電池の 実用化
通信技術	Wi-Fi 7の 社会実装			6G通信の 社会実装

技術の進化が予定通り進めば、2030年まで段階的にウェアラブルデバイスも進化し続ける。まず2024年には限定されたエリア内で安定的にサービスを受けることが可能となる。次に2025年には緊急性の高い心機能異常の兆候を検知する解析技術が完成し、その解析機能を実装可能とする高性能なCPUを搭載したウェアラブルデバイスが2026年に登場する。その後、2030年に屋内外で長時間利用可能なウェアラブルデバイスが完成する。

近い将来、Wi-Fi 7環境下であれば、ランニングなど健康スポーツ時の心機能異常の発見が可能になると予想される。

第5項 段階的な適用に向けて

技術の進化に合わせて想定される適用シーンを以下に示す(表 7)。

表 7 適用シーン

適用 順序	適用シーン	課題解決に必要な技術 (○：必須、△：必要に応じて)				
		解析 技術	通信 技術	センサー 技術	ポータブル 技術	UX 技術
	トレーニング (スポーツジムなど)	○				
	健康スポーツ (ランニングなど)	○	△	○		
	遠隔支援 (家庭生活など)	○	○		○	
	競技スポーツ (マラソンなど)	○	○	○	○	○

スポーツジムなどトレーニングの現場では、屋内の限られたエリアで利用するため、外部デバイスが必要な場合でも通信は利用せず、配線による接続が可能となる。また、リハビリテーションなどの実施時間内の利用に限定されるため、現状のバッテリー性能でも問題ない。そのため、解析技術のみが要求される。

ランニングなど健康スポーツの現場では、運動時でも利用できる小型化されたデバイスに搭載できるセンサー技術を実装することが要求される。また、通信を利用した機能を利用する場合は、通信エリアの拡大など通信技術の課題解決も必要となる。

家庭生活など遠隔で支援を受ける現場では、装着者を支援者が持続的に観測するために通信技術が必要不可欠になる。ただし、屋内での利用が中心となるため、2024年に社会実装が予定されているWi-Fi7で条件は満たされる。また、ウェアラブルデバイスが利用できない時間を最小限にするため、バッテリー性能の課題解決も要求される。

マラソンなどの競技スポーツの現場では、運動を阻害しない携行性を含め、全ての技術が求められる。競技スポーツの場合、ディスプレイを搭載したウェアラブルデバイスの装着が難しいため、UX技術についても配慮が必要である。

第2節 スポーツ分野におけるデバイスの普及の重要性

前述した4点が課題解決できれば心室細動など緊急性の高い心機能異常の兆候を発見しリアルタイムに通知することが可能になると考えられる。しかしこのデバイスを疾患の診断に使用する場合には、医療機器としての承認が必要となる。そのためには一般的には多くのステップがあり、時間を要することが知られている。特に臨床試験については、Apple社が試験した件数を参考に生体データを集める必要があるが、医療機関とのネットワークが必要でありデータ収集にも労力を要する。ただし、後発医療機器として判断されれば試験を実施せずに承認を得られる可能性もある。そのためには、先発医療機器となるApple Watchに対して効果および性能が「同一性を有するもの」、もしくは「実質的に同様であるもの」であることを証明する必要があるが、これを証明するためにも多くのステップが必要となる。普及に向けては、これら医療機器に関する規制緩和なども視野に働き掛ける必要がある。また健康スポーツなど非医療場面での汎用、実証が進めば、やがて医療への取り込みもスムーズになることが考えられる。Apple Watchの例を見てもまずは非医療場面、健常人のスポーツや健康増進の場面での活用が進みその後医療面での活用に及んだ。

ウェアラブルデバイスの形状としては、すでに多くの技術が実装できているリストバンド型であれば早期に実用化が可能である。しかしながらリストバンド型の場合、競技規則によって利用を制限される可能性もある。特に選手同士が接触する競技スポーツで装着するためには、ウェアラブルデバイス本体の素材の選択に加え、ルールやレギュレーションの改定など競技団体への働きかけが必要となる。またスポーツ場面で用いるための小型化、軽量化は医療機器となる場合にも応用できる。したがって健康チェックのためのモニタリングデバイスを開発する際にも診断機器としての実装を視野に入れての両輪で開発を進めるべきである。

普及には価格の課題もある。近年では半導体の価格高騰により、価格は上昇傾向にある。そこで中国系企業のように機能の絞り込みで価格を抑えることも課題の解決策の一つである。普及に向けた価格設定は、市販の時計や電子万歩計と同じ価格帯となる1万円以下を想定したい。そのためには、HUAWEI社やXiaomi社が提供している5000円から8000円の価格を維持した状態で、心機能異常の兆候をリアルタイムに通知する機能が追加されることが期待される。しかしながら、高機能であっても安価な製品が提供されるよう、半導体の安定的供給や技術革新にも目配りする必要がある。

第3節 研究の限界と今後の展望

本研究の対象となる突然死は、心機能異常に起因するものであり、その他の異常に起因する突然死については追加調査が必要である。また調査にあたっては、対象とするウェアラブルデバイスを絞り、かつインターネットで公開された記事を中心に限られた範囲で実施した結果となっている。そのため、本研究で示した以外にウェアラブルデバイスに求められる要件が見つかる可能性もある。また、本研究で導いたウェアラブルデバイスの要件が解消できた場合の具体的な効果について明らかにできていない。今後も実際のウェアラブルデバイスの進展に合わせて継続的に調査を行う必要がある。

第5章 結論

心室細動など緊急性の高い心機能異常の兆候のリアルタイム通知が可能なウェアラブルデバイスに欠かせない要件は①コンピュータシミュレーションにより心電図から心機能異常の兆候を予測する技術の実用化、②ウェアラブルデバイスの処理能力を高めデバイス内での解析機能の実装、③異常を関知したウェアラブルデバイスから直接関係者へ診断情報をリアルタイムに共有できる高度な通信手段の確保④ウェアラブルデバイスを安全に長く動かすための全固体電池の実装である。このウェアラブルデバイスは、今後のスポーツ現場においても大きな普及が期待されるが、それは医療機器としての承認への道程でもある。

これら要件を満たすウェアラブルデバイスによって、スポーツ現場では心室細動などの予兆を事前に検知し、突然死を未然に防ぐ対策を講じることができる。特に身体へ負荷が強いサッカーなどの競技スポーツへの導入を進めたい。最終目標は一般社会に浸透することであり、老若男女が生活の延長でウェアラブルデバイスによる支援を受け、健康支援を受けることができる未来を実現したい。

謝辞

本論文の作成にあたり、多くの方々からご指導と励ましを賜りました。研究指導員である平田竹男先生には、本研究だけでなく、今後の会社経営にも通じる多くの助言をいただきました。先生のご助言は、パズルのピースのように自ら理解し組み立てることで生きてくるメッセージ性の強いものであり、「考えること」の大切さを改めて学びました。ご指導の中で出てくるキーワードも多岐にわたり、常に集中力をもって知識を吸収することを意識する中で、強い「脳」と「心臓」の形成にも繋がったように思います。また、研究の基礎を絶妙なヒントでご指導いただいた中村好男先生、医療面の文献調査を含め論文執筆を昼夜問わずご指導いただいた児玉ゆう子先生、研究データの分析方法についてツールの使い方から丁寧にご指導いただいた畔蒜洋平先生に心より感謝申し上げます。そして同期の皆様、全ての感情を共有し、その上でいつも励まされながら過ごした一年でした。ここに誠意の意を表します。何より皆様との出会いが人生の財産であり、感謝に堪えません。最後に、この一年間、衣食住の生活面だけでなく精神面でも大きく支えてくれた家族に感謝します。ありがとう。

参考文献

- 1) 総務省. 情報通信白書平成 28 年. 参照日: 2023 年 12 月 01 日, 参照先: 総務省の Web サイト: <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h28/pdf/n2200000.pdf>
- 2) アシックス. (2017 年 10 月 23 日). 第 7 回神戸マラソンにおける IoT/ICT 技術を使用した実証実験について. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: アシックスの Web サイト: <https://corp.asics.com/jp/press/article/2017-10-23>
- 3) CATAPULT. SOLUTIONS. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: CATAPULT の Web サイト: <https://www.catapult.com/solutions/vector-pro>
- 4) FIFA. Electronic Performance and Tracking Systems (EPTS). 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: FIFA の Web サイト: <https://www.fifa.com/technical/football-technology/standards/epts>
- 5) 佐藤将史. W 杯大番狂わせの仕掛け人? FIFA が全チームに用意したデータ分析環境の価値とは. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: SB クリエイティブ株式会社の Web サイト: <https://www.sbbit.jp/article/cont1/35172>
- 6) 心臓弁膜症ネットワーク. WHO 世界の死因トップ 10 を発表. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: 心臓弁膜症ネットワークの Web サイト: <https://heartvalvevoice.jp/news/hvvnews-210308/>
- 7) 日本循環器学会. 心不全療養指導士とは. (日本循環器学会の Web サイト) 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: <https://www.j-circ.or.jp/chfej/about/>
- 8) 日本循環器学会. 提言「スポーツ現場における心臓突然死をゼロに」. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: 日本循環器学会の Web サイト: https://www.j-circ.or.jp/old/topics/aed_teigen.htm
- 9) 板生清, & 駒澤真人. (2015). ウェアラブルデバイスの応用と近未来の展開. エレクトロニクス実装学会誌, 18(6), 384-389.
- 10) Eisenkraft, A., Goldstein, N., Merin, R., Fons, M., Ishay, A. B., Nachman, D., & Gepner, Y. (2023). Developing a real-time detection tool and an early warning score using a continuous wearable multi-parameter monitor. *Frontiers in Physiology*, 14, 519.
- 11) 日本循環器学会. 2021 年改訂版 心血管疾患におけるリハビリテーションに関するガイドライン. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: 一般社団法人 日本循環器学会の Web サイト

ト: https://www.j-circ.or.jp/cms/wp-content/uploads/2021/03/JCS2021_Makita.pdf

12) NPO 法人ジャパンハートクラブ. 心不全の心臓リハビリテーション. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: NPO 法人ジャパンハートクラブの Web サイト: <https://npo-jhc.org/image/pdf/shinfuzen.pdf>

13) 【マニアが比較】おすすめ No1 の Apple Watch はどれ? 価格や種類の違いを調査【最新】. (2023 年 12 月 26 日). 参照日: 2024 年 1 月 6 日, 参照先: Rentry の Web サイト: https://rentry.jp/note/apple-watch-matome/#Apple_Watch20239

14) 総務省. データ集 (第 3 章関連データ). (総務省の Web ページ) 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: 総務省の Web サイト: <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r04/html/nf3r1000.html>

15) みずほ情報総研株式会社. (2015 年 3 月). 社会課題解決のための新たな I C T サービス・技術への人々の意識に関する調査研究. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: 総務省の Web サイト: https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/linkdata/h27_06_houkoku.pdf

16) 江口正大, 笠太志朗, 西本稜, 田村昌太郎, 梅原大樹. (2015). 時計型ウェアラブル端末の活用法. 別冊「2015 年度 学生論文集」, 早稲田社会科学総合研究. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: CORE の Web サイト: <https://core.ac.uk/download/pdf/286932329.pdf>

17) McLellanPaul. (2021 年 1 月 12 日). IEDM Opening Keynote. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: Cadence Design Systems の Web サイト: https://community.cadence.com/cadence_blogs_8/b/breakfast-bytes/posts/iedm20-1

18) NHK. (2023 年 6 月 13 日). トヨタ自動車 早ければ 2027 年 EV で「全固体電池」実用化へ. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: NHK の Web サイト: <https://www3.nhk.or.jp/news/html/20230613/k10014097481000.html>

19) 鈴木宗泰. (2021). 人間拡張技術に資するフレキシブル全固体電池. 産業技術総合研究所 人間拡張研究センター. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: 産業技術総合研究所の Web サイト: https://unit.aist.go.jp/harc/symposium/HARCS2021/poster_contents/08_Suzuki.pdf

20) 日刊工業新聞. (2017 年 11 月 22,23 日). 「成長を読み切っている」一. 車載電池シェア首位、パナソニックの死角. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: ニューススイッチの Web サイト: <https://newswitch.jp/p/11150>

21) Skyberry. (2021 年 12 月 20 日). wi-fi と Bluetooth の違いはなに? それぞれの特徴を紹

介！ 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: Skyberry の Web サイト:

<https://jp.skyberry.me/column/2453/>

22) QTnet. (2023 年 6 月 6 日). Wi-Fi と Bluetooth の特徴と違いを徹底比較. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: QTnet の Web サイト:

<https://www.bbiq.jp/hikari/column/wifi/bluetooth-difference/>

23) 総務省. 5 G の整備状況 (令和 4 年度末 (2022 年度末)). 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: 総務省の Web サイト: https://www.soumu.go.jp/main_content/000894733.pdf

24) 総務省 総合通信基盤局 電波部電波政策課. 事務局資料. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: 総務省の Web サイト: https://www.soumu.go.jp/main_content/000857640.pdf

25) NTT ドコモ. (2022 年 11 月). ホワイトペーパー 5G の高度化と 6G. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: NTT ドコモの Web サイト:

https://www.docomo.ne.jp/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_6g/DOCOMO_6G_White_PaperJP_20221116.pdf

26) HYPER VOiCE 編集部. (2023 年 7 月 27 日). 次世代 Wi-Fi 規格「Wi-Fi 7」は何が違う? 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: HYPER の Web サイト:

<https://hypervoice.jp/UKQ8T2s6>

27) 総務省. (2022 年 12 月 23 日). 移動端末設備の円滑な流通・利用の確保に関するガイドライン. 参照日: 2024 年 1 月 6 日, 参照先: 総務省の Web サイト:

https://www.soumu.go.jp/main_content/000853589.pdf

28) Medi-Aid SQ. ワイヤレス運動負荷検査システム メロス. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: メディエイドスクエアの Web サイト: <https://www.medi-aid.jp/products/moerus/>

29) MITSUFUJI. ウェアラブル IoT ソリューション hamon. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: MITSUFUJI の Web サイト: <https://www.mitsufuji.co.jp/service/>

30) 総務省. 総務省 ICT スキル総合習得教材. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: norikoe.net: https://norikoe.net/wp-content/uploads/2020/01/ict_skill_all_set.pdf

31) Analog Devices. 光学センサー (光センサー). 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: Analog Devices の Web サイト: https://www.analog.com/jp/landing-pages/003/sensor_pv_jp/sensor_home_jp/opt.html

32) CYBERNET SYSTEMS. 光学式心拍センサーの設計. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照

先: CYBERNET SYSTEMS の Web サイト:

https://www.cybernet.co.jp/optservice/service/example_heart_rate_sensor.html

33) CYBERNET SYSTEMS. 光学式心拍センサーの設計 図 1. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: CYBERNET SYSTEMS の Web サイト:

<https://www.cybernet.co.jp/optservice/images/service/heartsensor-01.jpg>

34) CYBERNET SYSTEMS. 光学式心拍センサーの設計 図 2. (CYBERNET SYSTEMS の Web サイト) 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先:

<https://www.cybernet.co.jp/optservice/images/service/heartsensor-02.jpg>

35) Apple. Apple Watch Series 6 や Series 7 で血中酸素ウェルネス App を使う方法. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: Apple の Web ページ: <https://support.apple.com/ja-jp/HT211027>

36) 小林直樹. 血中酸素濃度計: パルスオキシメータ. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: 応用物理学会の Web サイト: https://www.jsap.or.jp/columns-covid19/covid19_3-2_abstract

37) Apple. Apple Watch で心拍数を測定する. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: Apple の Web サイト: <https://support.apple.com/ja-jp/HT204666>

38) Apple. Apple Watch の心電図アプリで心電図をとる. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: Apple の Web サイト: <https://support.apple.com/ja-jp/HT208955>

39) HUAWEI. 心拍数上昇の警告. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: HUAWEI の Web サイト: <https://consumer.huawei.com/jp/support/content/ja-jp15502087/>

40) 大下淳一. (2020 年 9 月 14 日). アップルウォッチ、医療機器に 心電計アプリ. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: 日本経済新聞の Web サイト: <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO63827330U0A910C2TJ1000/>

41) 厚生労働省. (2021 年 1 月 27 日). 「家庭用心電計プログラム」及び「家庭用心拍数モニタプログラム」の適正使用について. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: 日本循環器学会の Web サイト: <https://www.j-circ.or.jp/cms/wp-content/uploads/2021/01/academyinfo20210129.pdf>

42) 国立循環器病研究センター 循環動態制御部. (2021 年 10 月 1 日). 不整脈・呼吸異常に関する研究. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: 国立循環器病研究センターの Web サイト: https://www.ncvc.go.jp/res/divisions/cardiovascular_dynamics/12-theme05/

43) 岡田純一. (2016). 1-4 心臓シミュレータ UT-Heart の概要およびパッチクランプ実験と組み合わせた心毒性評価システム. 谷本学校 毒性質問箱, 2016(18), 17-25.

44) fitbit. Fitbit 心電図アプリに対応. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: fitbit の Web サイト: <https://www.fitbit.com/global/jp/technology/ecg>

45) 山本敦. (2021 年 2 月 8 日). 日本でも開始 Apple Watch の心電図機能を使ってみた. 参照日: 2023 年 12 月 1 日, 参照先: 日本経済新聞の Web サイト: <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO68710630R00C21A2000000/>