

医療技術フォーサイト



Medical Technology Foresight 2050

■ 本書の読み方

この医療技術フォーサイト 2050 は、読者の皆さまと共に 2050 年の医療技術のあり方を考える契機となることを願って作成したホワイトペーパーです。

本書の内容を読み進めていただく前に、以下の点をご一読ください。

● 本書のスタンス

本書は、2050 年という長期的な時間軸のもと、医療技術の未来像を構想するための視座を提示することを目的としています。そのため、社会構造や人口動態、知識体系の進化といった、より普遍的かつ構造的な変化に焦点を当てています。これにより、多様な国や地域においても共有可能な視点や問いを描き出すことを重視しています。

● 地政学的リスクの範囲外での議論

一方で、特定の国や地域の制度設計、医療政策、経済情勢、さらには地政学的リスクなど、国際関係に強く依存する変動要素については、詳細な言及をあえて行っておりません。これらの要素も医療技術の未来に影響を及ぼす重要な要素ではありますが、本書ではそれらを超えて共有し得る構想の提示に主眼を置いています。

● データの特性について

本書では、経済・社会・人口統計・医療制度に関する各種指標を引用していますが、これらのデータには、それぞれ統計的な前提条件や作成上の限界が伴っており、一定の不確かさが含まれる点にご注意ください。

● 画像の性質について

本書に掲載されている一部の画像は、生成系 AI（ChatGPT 等）を活用して作成しています。これらの画像は、2050 年の医療のあり方を共に想像する「きっかけ」として提示したもので、医学的・工学的に正確な再現を意図したものではありません。

● 記載された意見の位置づけ

本書に記載されている意見・見解は、ワーキンググループ間の議論を経て作成されたものでありますが、公益財団法人医療機器センターおよび附属医療機器産業研究所の公式な見解ではありません。

● 研究討論を目的とした資料であること

本ホワイトペーパーは、政策・研究上の討論を喚起することを目的として配布しており、その引用・参照・利用は自由ですが、それにより発生したいかなる損害についても、ワーキンググループメンバーおよび公益財団法人医療機器センター、附属医療機器産業研究所は責任を負いかねます。

< 事務局 >

公益財団法人医療機器センター附属医療機器産業研究所

〒113-0033 東京都文京区本郷 1-28-34 本郷 MK ビル 2 階

E-mail : mdsi@jaame.or.jp



EXECUTIVE SUMMARY

本ホワイトペーパーは、2050年という将来を見据え、医療技術が果たすべき役割とその設計思想を描き出すものである。医療現場に立つ7名の医師との共創を通じて、現場から生まれる実感と社会構造の変化を重ね合わせながら、医療技術の未来像とその実現に向けた方向性と考え方を提示した。

急速な高齢化、人口減少、医療従事者の偏在・不足、そして都市構造や生活様式の変化に直面する中で、医療技術にはこれまで以上に多様な機能と社会的な意味づけが求められている。同時に、AIやセンサー技術の進化、知識の分散化と統合といった技術的背景が、医療の現場や制度に新たな可能性と課題を投げかけている。

こうした背景のもと、本書では、未来の医療技術を構想するための3層構造のフレームワークを提示する。まず、社会・技術環境の変化を「6つのFactor」として捉え、そこから導かれる医療の未来像を「3つのVision」として提示。そして、その実現に向けた「6つのAction」を具体的な技術・制度の方向性として描いている。

本ホワイトペーパーは、医療技術の開発・実装・制度設計に関わるすべてのステークホルダーにとって、共通の問いを共有し、協働の起点となることを目指している。

◆ 医療技術フォーサイト 2050 ◆

6 つの Factor（未来を形づくる変化）

- 都市構造の変化
- 新たな医療格差
- 人口構造の変化
- 知識構造の進化
- 疾患数の増加
- 人とモノの比重の変化

3 つの Vision（医療の未来像）

1. 常態を再現する医療技術（質の向上）
2. 現場対応型の医療技術（量の拡大）
3. 動的・双方向の医療技術（時間・空間の拡張）

6 つの Action（技術の方向性）

- 常態再現にむけた診断機器 / 治療機器
- プラットフォーム医療技術
- 現場に応じた適応型医療技術
- 持続可能な簡素で低負荷な医療技術
- 専門知を統合する医療技術
- 地域・生活圏へ展開する医療技術

メンバー紹介

MEMBER PROFILES



ワーキンググループリーダー

田村 雄一 YUICHI TAMURA

国際医療福祉大学 医学部 循環器内科学 教授

< 主なご略歴 >

2004 年 慶應義塾大学医学部卒、医学博士

社会福祉法人三井記念病院（臨床研修）

2010 年 慶應義塾大学医学部 先進肺高血圧治療学講座・特任助教

2014 年 仏パリ大学フランス国立肺高血圧症センター研究員

2019 年 株式会社カルディオインテリジェンス 代表取締役社長 CEO



加藤 浩晃 HIROAKI KATO

デジタルハリウッド大学大学院 特任教授 /

アイリス株式会社 共同創業者・取締役副社長

< 主なご略歴 >

2007 年 浜松医科大学 医学部医学科 卒業

2009 年 京都府立医科大学 眼科学教室 医員

2016 年 厚生労働省 医政局 研究開発振興課 治験推進室 室長補佐

2017 年 アイリス株式会社 共同創業者・取締役副社長

2022 年 東京科学大学 医学部 臨床教授



隈丸 加奈子 KANAKO KUMAMARU

順天堂大学大学院健康データサイエンス研究科 教授

< 主なご略歴 >

2005 年 東京大学 医学部医学科 卒業

2010 年 Harvard Medical School & Brigham and Women's Hospital

放射線科リサーチフェロー

2020 年 厚生労働省医政局総務課 医療国際展開推進室 室長補佐

2022 年 順天堂大学医学部 放射線診断学講座 准教授



朔 啓太 KEITA SAKU

国立循環器病研究センター研究所循環動態制御部 室長

< 主なご略歴 >

2007 年 熊本大学医学部医学科 卒業

2007 年 九州医療センター 臨床研修医

2019 年 九州大学大学院医学研究院 循環器内科 特任講師

2020 年 国立循環器病研究センター 循環動態制御部 室長

2023 年 国立循環器病研究センター バイオデジタルツイン研究部 特任部長（併任）



園生 智弘 TOMOHIRO SONO

TXP Medical 株式会社 代表取締役

< 主なご略歴 >

2010 年 東京大学 医学部医学科 卒業

2011 年 東京通信病院 臨床研修医

2013 年 東京大学医学部附属病院 救急集中治療科

2017 年 TXP Medical 株式会社 設立



三澤 将史 MASASHI MISAWA

昭和医科大学 横浜市北部病院消化器センター 講師

< 主なご略歴 >

2005 年 新潟大学医学部 卒業

2005 年 厚生連長岡中央総合病院 臨床研修医

2007 年 昭和大学横浜市北部病院消化器センター 助教

2017 年 昭和大学横浜市北部病院消化器センター 講師（－現在）

2023 年 昭和大学内科学講座消化器内科学部門 講師



森田 康平 KOHEI MORITA

東京慈恵会医科大学脳神経外科 訪問研究員

< 主なご略歴 >

2012 年 京都大学医学部卒

2014 年 - 大津赤十字病院など京都大学脳神経外科の関連病院にて勤務

2016 年 外資系コンサルティングファーム ローランド・ベルガー勤務

2019 年 外資系コンサルティングファーム ボストン・コンサルティング・グループ勤務

2021 年 東京慈恵会医科大学大学院博士課程修了

2019 年 - 東京慈恵会医科大学脳神経外科にて大学発ベンチャー運営中



< 事務局 >

松橋 祐輝 YUKI MATSUHASHI

公益財団法人医療機器センター附属医療機器産業研究所 主任研究員

< 主なご略歴 >

2015 年 早稲田大学先進理工学研究科生命理工学専攻 助手

2018 年 早稲田大学先進理工学研究科共同先端生命医科学専攻 助教

挿絵製作協力（部分）：株式会社 Livetoon CTO/ 医師 長嶋 大地 氏



目次

CONTENTS

エグゼクティブサマリー
メンバー紹介

1

はじめに
INTRODUCTION

2

2050 年の医療技術の指針
BLUEPRINTS FOR MEDICAL
TECHNOLOGY IN 2050

3

7 つの視座から読み解く医療技術
EXPLORING THE MEDICAL
TECHNOLOGY THROUGH SEVEN
PERSPECTIVES

4

医療技術の未来に向けて
TOWARD THE FUTURE OF MEDICAL
TECHNOLOGY

1

はじめに INTRODUCTION



1.1 医療技術フォーサイト 2050 のコンテクスト

私たちは、感染症の克服と救命、検査機器や手術衛生管理の充実、低侵襲化や精密化といった多様な進化を経て、現在の医療技術へたどり着いた。

次の医療技術は医療にどのように届くのだろうか。日進月歩の研究開発によって生み出される新たな医療技術を、いかに社会に届け、現場に根付かせていけるのだろうか。

医療技術フォーサイト 2050 は、今から 25 年後の 2050 年を焦点とし、これからの医療技術の歩みを 7 名の医師の視点と共に考える挑戦的な試みである。

この 25 年間で「人」という視点から捉えてみる。2050 年までの 25 年間は、現在「現役世代」とされる 40 歳が 65 歳に達する期間にあたる。25 年という時間は、現在の「現役世代」が医療を受ける当事者となることを見据えて、未来の医療技術を自分ごととして考え、備えることができる時間とも言える。

また、この 25 年間で「医療技術の研究開発」という視点から見ると、別の側面を有する。今までにない医療技術の基礎となるコアテクノロジーの研究開発は 10 年から 15 年を要する。さらに、実際の医療機器の研究開発にも、同様に 10 年から 15 年の時間を要する。このように考えると、2025 年からの 25 年間でどのように歩むかは、「医療技術の未来」を左右する大きな鍵となる。

2050 年に求められる医療技術にたどり着くためには、逆算すると 20 年から 30 年という時間軸を前提としなければならず、それは図らずも現在そのものである。

この時間軸を長いと見るか、短いと見るかは人それぞれであるが、いずれにしても、「今この瞬間こそが 2050 年の医療技術を形づくる始点」である。25 年後の医療をどう描くかによって、今からの選択と判断・決断が異なるものとなる。結果として、「未来の医療技術」を変えることになる。



「今この瞬間こそが 2050 年の医療を形づくる始点」

しかしながら、私たちは、2050 年を「予測」したいわけではない。ましてや非現実的な SF 的な創造でもない。推測でもなければ、画一的な道筋を示したり、唯一の正解を導き出したりすることが目的ではない。未来を正確に予測することは誰にもできない。

それでも、未来は描かなければ、議論しなければ、表現しなければ実現しない。だからこそ私たちは、「いま、どんな問いを持ち、どこに向かうべきか」を考えるために、共に未来を見つめ、2050 年を描こうとしている。

本書は、そのための「たたき台」として執筆したものである。

1.2 課題先進国としてのリーダーシップ

日本は公衆衛生の均てん化を実現した、世界でも数少ない国の一つである。国民皆保険制度や地域保健の制度整備を背景に、戦後の困難な時期を乗り越え、世界的に類を見ない健康水準を達成した。しかしその一方で、急速な少子高齢社会の到来により、医療における需要と供給のバランスが崩れつつあり、いままでの医療の在り方をアップデートする時期に来ている。

高齢者の医療需要が増大する一方で、医療人材や財政資源の確保は困難さを増し、「質の高い医療を、いかに持続可能なかたちで提供し続けるか」という課題に直面している。

世界のすべての国々は、まだこのような医療と社会の構造的な不均衡のなかでの「医療のかたち」を経験していない。だからこそ、課題先進国である日本がこの厳しい状況のなかでも医療水準の維持を図りながら、アンメット・メディカル・ニーズに応える努力を重ねていくことは、世界中から注目を集めるものであり、すなわち日本のリーダーシップを示し、世界に大きな示唆を与える機会となる。

1.3 2050 が直面する問いと医療技術の呼応

本プロジェクトでは、2050 年の医療技術の未来像を描くにあたり、「どんな技術を開発するか」というテクノロジー起点ではなく、「2050 年の社会がどのような問いを突きつけてくるのか」という「問い」の探索から出発した。

これは、医療技術が単にテクノロジーの進化や融合の先にあるものではなく、社会の構造や制度、そして人々の価値観の変化をふまえた社会や現場からの要請に応じて設計されていくべき側面があると考えからである。

また、この「問い」の起点は統計データや既存のレポートのみに依存することなく、課題先進国・日本の現場で医療の可能性と限界の両方を日々経験している医師たちのまなざしとした。

このまなざしを通じて見えてきた課題や現場からの要請を言語化することで、2050 年が私たちに突きつけてくる問いを先取りし、そこから応答する医療技術のあり方を構想した。

そしてこの取り組みは、医療技術が人と社会の変化に対して「ともに変化しうる関係」でありつづけること、制度や現場、ケアの文脈と相互に呼応しながら発展していくこと、そして、技術そのものが未来との関係性を問い返す力をもつことを目指した。

こうした視点の重なりを通じて、「問いに呼応する医療技術」の実現に向けた一步を踏み出そうとしている。

1.4 未来の責任から描き出された現場のまなざし

私たちが描こうとしているのは、目の前の「現場の課題に応える技術」ではない。これは大事な視点であるが、本書の主眼はそこにはない。

医療現場における将来の課題を解決する医療技術は、それ自体が固定的なものではなく、どのように形成され、どのように医療に位置づけられ、そしてどのような未来像と結びつけられていくのかという文脈の中で捉え直す必要がある。

このような視点をふまえ、医療技術フォーサイト 2050 が目指すのは、「現場に応えるための道具」を提示することではなく、「なぜそれが社会に存在すべき技術なのか」という問いを、技術・医療・社会構造の交差点から描くことである。

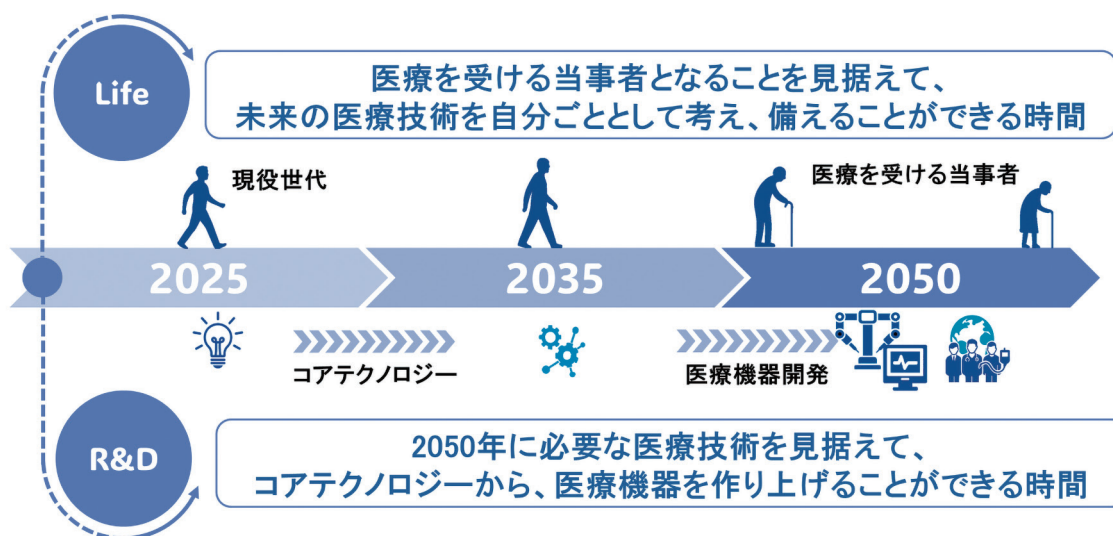
すなわち本書は、次の世代に向けた「未来への責任」としての問いかけであり、産業・医療・社会に対する共創的な応答のかたちを模索する試みでもある。

1.5 医療技術フォーサイト 2050 の構成

『医療技術フォーサイト 2050』は、7 名の医師によるワーキンググループ（WG）を 2025 年 2 月に組成し、同年 3 月より月 1 回のペースで開催した会合と、それに並行した執筆作業を通じて構想・編纂されたものである。WG メンバーは、それぞれ異なる専門領域の現場での診療に携わる中で、日常の臨床と未来の構想を往来しながら、各自の視点を持ち寄り、WG での対話とともに内容を練り上げた。

本書は、以下の4章構成となっている。第1章「はじめに」では、この取り組みの背景と視座を記した。続く、第2章「2050年の医療技術の指針」では、医師から提示された多様なキーワードを6つの変化要因（Factor）に整理し、そこから導き出された3つのVisionと6つのActionをもとに、2050年に向けた医療技術のあり方を構想する土台を形成した。そして、第3章「7つの視座から読み解く医療技術」では、医師がそれぞれの専門領域の観点から、前章のVisionとActionをふまえ、2050年の医療技術の姿を具体的に描き出している。最後に、第4章「医療技術の未来に向けて」では、この取り組みのまとめとこれからの発展の方向性を示した。

医療技術フォーサイト2050のコンテキスト



「今この瞬間こそが2050年の医療技術を形づくる始点」

Let's Thinking 2050, Together!!

2

2050 年の医療技術の指針 BLUEPRINTS FOR MEDICAL TECHNOLOGY IN 2050



2050 年を展望する 6 つの Factor

人口構造の変化	10
新たな医療格差	12
都市構造の変化	14
医療の知識構造の進化	16
疾患数の増加	18
人（技術）とモノ（機器）の比重の変化	20

3 つの Vision

Vision1：常態を再現する医療技術	24
Vision2：現場適応型の医療技術	24
Vision3：動的・双方向の医療技術	25

6 つの Action

Action1：常態再現に向けた診断機器 / 治療機器	26
Action2：プラットフォーム医療技術	26
Action3：現場に応じた適応型医療技術	27
Action4：持続可能な簡素で低負荷な医療技術	27
Action5：専門知を統合する医療技術	28
Action6：地域・生活圏へ展開する医療技術	28

2. 2050 を展望する 6 つの Factor

2050 年の医療技術を構想するためには、まず医療を取り巻く環境やその社会的背景を可能な限りの確に捉える必要がある。

本章では、2050 年の医療を取り巻く環境を展望した 11 の文献¹⁻¹¹ と、7 名の医師から寄せられた多様なキーワードをもとに、未来をかたちづくる 6 つの変化要因を抽出した。

これらの Factor は、大きく二つの視点に分類される。ひとつは、社会の変化に関する 3 つの視点、①人口構造の変化、②新たな医療格差、③都市構造の変化である。そして、もうひとつは、医療そのものの変化に関する 3 つの視点、④疾患数の増加、⑤医療の知識構造の進化、⑥人（技術・知識）とモノ（機器）の比重の変化、である。

これら 6 つの変化要因は、現段階において想定し得る 2050 年の環境や課題を示す起点、即ち 6 つの Factor として設定した。

私たちはこの 6 つの Factor をもとに、医療技術が応答すべき方向性として 3 つの Vision を構想し、さらにその実現に向けた具体的な方策として 6 つの Action を導出した。

以下では、まずこれら 6 つの Factor を概説し、その後、Vision と Action を通じて医療技術の未来像を構想するための基盤を示していく。

利益 医療機器 ニューロモデュレーション 病 具現化 罹患
 コスト 医療 デジタル 後ろ向き 僻地 データ 急性 統合 10倍
 精緻 効果 医師 監視 支援 型 患者 麻酔
 本格化 国 数 法 ロボット 自動化 自立 プラットフォーム 看護 者
 手術 ガン 研究 後 AI 診療 治療 予防 リハビリ 期 差分 AIML てん
 適正化 普及 判定 意思決定 疾病 前向き 標準 双方 中 早期発見 新興国 保険
 実現 介護 主導 コモディティー テクノロジー 個別化医療 市場 損失
 活用 アクセス



7名の医師から寄せられた多様なキーワードから抽出した6つのFactor

2.1 人口構造の変化

1 はじめに

2050 年の医療技術を展望するにあたり、人口構造の変化は、医療需要の変化に直結し、またそれに応じた医療提供体制や技術開発の在り方にも強い影響を与えるという点で、極めて重要な要素である。

例えば、人口と年齢バランスが一定である地域では、需要と供給のバランスを調整することが比較的容易であり、医療資源の配分計画や医療機器の導入戦略も、安定した前提のもとで構築されやすいであろう。しかし、現実には多くの国と地域で人口構造の大きな転換期が到来しつつある。2050 年の医療技術を考える上では、こうした変動する人口動態に適応し、需要に応じた医療が柔軟に提供できる医療技術の構想が求められる。

そこで本節では、世界における人口動態の主要な傾向について概観し、こうした人口動態の変化に対応するために 2050 年に求められる医療技術の方向性を考察する。

2 世界の地域別動向¹²

2.1 全世界の人口の推移

国連の推計によれば、2023 年時点での世界の総人口は約 83 億人であり、2050 年には約 97 億人に達すると見込まれている。このように、世界人口は 2050 年まで増加を続けると予測されているが、各国の状況に目を向けると事情は一様ではない。既に人口のピークを迎えた国がある一方で、今後 25 年以内に人口のピークを迎えると予測される国、さらに今後 100 年にわたって人口が増加し続けると見られる国々も存在する。

2.2 既に人口のピークを迎え、人口減少フェーズに入っている国々 (グループ A)

中国、ドイツ、日本、ロシア連邦などの 63 カ国・地域 (世界人口の約 28%) では既に人口増加のピークを迎えており、これら国々の人口は 2050 年には 20% 減少し、今後 30 年間で 14% 減少すると推計されている。グループ A の国々に共通するのは、出生率の低下と高齢化の進行という少子高齢の同時進行現象である。特に日本やドイツでは、生産年齢人口 (15 ~ 64 歳) が急減し、65 歳以上の高齢者比率が急上昇しており、2040 ~ 2050 年代には高齢者が全人口の 35 ~ 40% 近くを占めるとされる。

2.3 人口がまもなくピークに達する国々 (グループ B)

ブラジル、イラン・イスラム共和国、トルコ、ベトナムなどの 48 カ国・地域 (世界人口の約 10%) では、今後 30 年間で 5.3% の人口増加が見込まれているものの、2025 年から 2054 年の間にピークに達すると予測されている。これらの国々では現在、人口ボーナス期 (若年労働力が豊富で経済成長が可能な時期) を活かした社会開発が進められているが、出生率はすでに人口置き換え水準 (2.1 前後) を下回る水準にあり、ピーク後には急速な少子高齢化が進むことが確実視されている。

2.4 人口増加が続く国々 (グループ C)

インド、インドネシア、ナイジェリア、パキスタン、アメリカ合衆国など、残りの 126 カ国・地域では、2050 年以降あるいは 2100 年以降まで人口増加が続くと予想されている。

特に、アンゴラ、中央アフリカ共和国、コンゴ民主共和国、ニジェール、ソマリアなどの9カ国・地域では、2024年から2054年にかけて人口が2倍になるとの予測もある。これらの国々では、出生率が依然として高く、若年層が人口の多数を占めている。このことは、教育、母子保健、公衆衛生の拡充とともに、将来的な医療需要の爆発的拡大への備えが求められることを意味する。

人口減少社会での医療技術は将来的に世界中に波及していく基盤となる

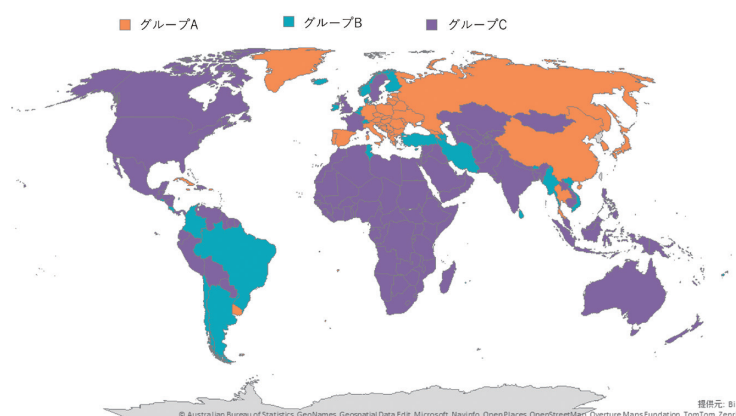
3 人口構造の変化が要請する医療技術 2050 のかたち

世界の人口はその総量だけでなく、年齢構成や地域分布において大きな転換期を迎えつつある。なかでも注目すべきは、単に「医療を必要とする人が増える」という量的な問題ではなく、医療を受ける人口と支える人口のバランスの変化である。

例えば、人口がすでにピークを迎えた国々では、若年層（20歳未満）の割合が2024年の21%から2054年には14%へと減少し、その後も21世紀末まで低水準が続くと予測されている。一方で、65歳以上の高齢者は同期間に17%から33%へと倍増し、年齢構成は大きく転換する見込みである。このような変化は、医療・介護・教育といった社会的支援を要する人口層の構造的拡大をもたらす。実際に、2024年時点では生産年齢人口1人あたりが担う支援対象人口（子ども＋高齢者）は約0.61人であったが、2054年には約0.89人に増加すると推計されている。これは比率にして約46%の増加となり、担い手一人ひとりにかかる社会的ケア負担が増大することを意味する。

また、人口構造の変化が医療機器産業の市場規模に与える影響を検討する際には、単に世界人口に占める割合だけでなく、「1か国あたりの人口規模」や「技術適用単位としての国家と個人」という視点から多角的に捉える必要がある。たとえば、グループC（人口増加傾向）の世界人口に占める割合は、2024年の62%から2050年には70%へと拡大が見込まれており、量的には市場の中心になっていく。一方で、グループA（人口減少傾向）は同期間に28%から20%へと縮小が予測されている。しかし、1か国あたりの世界人口に占める割合（＝世界人口に占める割合÷国数）に注目すると、2024年時点ではグループAは0.44ポイント、グループCは0.49ポイントであり、2050年においてもそれぞれ0.32ポイントと0.56ポイントと一定の規模を維持している。両グループを比較すると、グループCに対するグループAの比率は、全体人口においては3.50倍（2024年は2.21倍）と開いていくが、1か国あたりの人口では1.75倍（2024年は1.11倍）にとどまる。

医療技術は、薬事規制や保険償還制度と密接に関係するものであるため、現在のところ各国において法対応を行うという構造を持つ。そのため、1か国単位での市場の厚みや成熟度は依然として重要な判断軸となる。すなわち、グループAのような人口減少国は、総量としての市場規模は縮小傾向にあるものの、依然として国別には密度の高い市場を維持するため、先進的な医療課題を解決する場としての価値が高い。つまり、グループAの市場向けに開発される医療技術は、将来的に他の地域に波及していく基盤となる。



文献 12 を参考に事務局作成

2.2 新たな医療格差

1 はじめに

医療技術は飛躍的な進歩を遂げたが、その恩恵はすべての人々に平等に届いているわけではない。現代の世界には、人口が減少し高齢化が進む国もあれば、若年層が急増する国もある。こうした人口構造の多様性は、医療へのアクセスと供給体制に大きなばらつきをもたらし、技術の進展だけでは埋めがたい「新たな医療格差」を生み出しつつある。

本節では、医療格差の現状と構造的な背景を明らかにし、2050年の視点からその是正に必要な医療技術のあり方を展望する。

2 医療格差の現状¹³

(1) 医療格差の構造的要因¹⁴

医療格差は、教育、所得、ジェンダー、制度の有無、社会インフラなど、さまざまな構造的要因が複雑に絡み合う中で形成されている。例えば、教育水準が低い場合、自身の健康状態の把握や予防行動の実践が難しく、保健医療制度の利用方法についても十分な知識を得る機会も限られているため、結果として医療へのアクセスが遅れがちになる。また、居住地においても都市部と農村部では、医療機関の分布、交通手段、そして遠隔診療を支える通信インフラの整備状況が大きく異なり移動距離そのものが医療格差の要因となる。さらに、経済的要因として、公的医療保障の有無や保険適用の範囲が医療アクセスに及ぼす影響も指摘している。あるいは、医療のように公共性が高く、労働集約型の産業では、他産業の賃金上昇に合わせた人件費の上昇を図ることも難しく、産業間の格差を生む可能性も指摘されている。

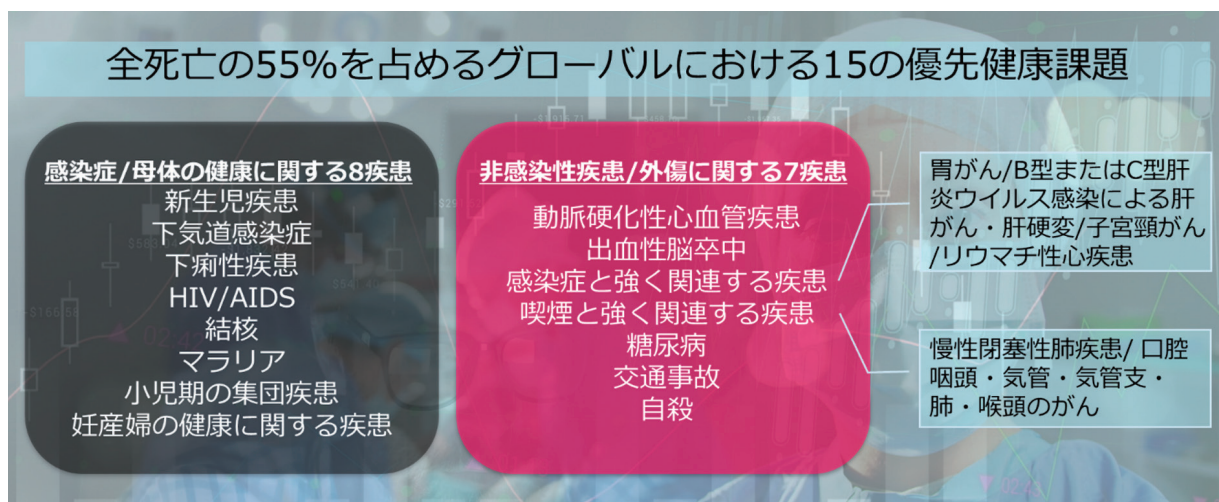
既存技術の普遍化と技術の到達可能性の視点

(2) 医療格差を是正するために注視すべき 15 の優先疾患

Lancet に掲載されている Global health 2050¹⁴ では、2050 年までに世界の健康格差を是正するために、優先的に取り組むべき 15 の健康課題を提示している。これらの疾患は、2000 年から 2019 年の間に世界的な平均余命の変化と関係したものであり、Lancet の分析によれば全死亡の約 55% を占めている。この 15 の優先疾患は 8 つの感染症および妊産婦の健康状態と 7 つの非感染性疾患および外傷に関連する病態として分類されている。

感染症および妊産婦の健康状態については、WHO の世界保健予測（Global Health Estimates）を基にしており、これらは予防可能であるにもかかわらず、医療アクセスの限界やワクチンの普及不全により、依然として低中所得国で高い死亡率をもたらしている。

また、非感染性疾患である心血管疾患、糖尿病、悪性腫瘍、慢性閉塞性肺疾患などは、生活習慣と強く結びついており、2050 年においても主要な疾患とされている。なお認知症は特に高齢化が急速に進む国々では 2019 年には世界第 7 位の死因であり公衆衛生上の問題ともなっているが、有病率は 2050 年まで大きくは変わらないと予想されている。



患者の状態、生活環境などに応答する医療技術

3 医療格差が要請する医療技術 2050 のかたち

このような 15 疾患の中には、すでに有効な予防・治療手段が確立しているにもかかわらず、技術が一部の国・地域に届いていないことが問題となっているものが多く含まれる。そのため、2050 年においては全世界的に「是正可能な医療格差」に取り組むために、「既存技術の普遍化」という視点の考え方が積極的に進められるだろう。この既存技術の普遍化においては、「技術の到達可能性 (Reachability)」も設計指針の主軸になると考えられる。例えば、導入・運用・維持にかかるコストへの適応性 (Cost Adaptability)、地域の医療制度・診療体制への適合性 (Health System Compatibility)、通信・電力・人材等のインフラ依存度の低さ (Infrastructure Dependency)、生活文化や価値観といった文化的文脈への適応 (Cultural Embeddability) や非医療者・市民による代替的運用の可能性 (Task-shifting Capacity) などが軸となるだろう。また、精神疾患、認知症、慢性疾患といった分野は、単なる医療技術の提供だけでは対応が困難であり、文化的スティグマ、長期的支援体制の構築、地域社会との連携が不可欠であるともされている。長生きすることの意味や、医療のゴール設定といった倫理的・哲学的問いを伴う点でも技術中心の対策のみでは不十分な側面があるとも指摘されている。このような未対応疾患には患者の状態、生活環境などに応じた技術 (Situational Responsive Technology) の考え方も重要になるだろう。優先疾患の影響は国や地域によって異なるため、「既存の技術が届いていない疾患」と「対応そのものが困難な疾患」への異なる戦略が求められる。これらの課題に応えるには、制度、文化、教育、社会資源といった複数レイヤーを支える／結びつける設計として、単なる「導入する技術」ではなく「共に育ち、根づく技術」への再定義が重要となる。



2.3 都市構造の変化

1 はじめに

都市は経済成長と人口増加を前提として発展してきた。都市構造はインフラ（道路・公共交通・ICT通信）の整備、居住形態（単身高齢者／多世代同居）の多様化と密接に関係するため、医療の物理的アクセス（例：病院・クリニックへの距離）に大きな影響を与える。すなわち、このような環境の中に配置される医療機器にも都市のあり方は直接的な影響を与える。

一方、医療技術の発展も歴史的にみれば「感染症克服・救命」→「精密・低侵襲化／質の向上」→「ハイテク化／多様化」→「在宅・低侵襲／コストと質の見直し」→「組み合わせ・応用」→「分子レベルでの層別化・再生・予防」といった発展がなされてきた。

現在、世界の多くの国と地域では、都市構造が大きな転換点を迎つつある。日本も少子高齢社会の到来という大きな転換点に対応するため、地域医療構想の推進と医療従事者の確保、さらにICTの活用や医療のデジタル化による質の向上と効率化が重要で、令和6年度からの第8次医療計画が策定されている。都市構造はこの医療技術が実装される基盤ともいえるため、実装のあり方も必然的に変化が求められる。そこで本節では都市構造の変化の現状を概観し、こうした変化に対応するために2050年に求められる医療技術の方向性を考察する。

2 都市構造の変化の状況

(1) 人口が縮小フェーズに入った国における都市構造の変化が医療に及ぼす影響¹⁵

前述の通り日本、ドイツや中国などの先進国では、人口がすでにピークを過ぎ、縮小フェーズに入った都市が増えている。都市間だけではなく都市内でも人口密度に格差が生じ、医療ニーズが増大する地域と、供給体制の維持が困難になる地域が併存するようになっている。人口減少と高齢化が進む中で、医療への「需要」が局地的に変化する一方、医療の「供給」も人材不足や施設老朽化によって制約を受ける。

例えば、日本国内においては2025年から2040年にかけて都市構造は急速な人口変動と地域間格差の拡大に直面するという指摘がある¹⁵。厚生労働省の将来推計によれば、生産年齢人口はほぼすべての地域で減少傾向にある一方で、高齢人口の動向には地域差が大きくなることが指摘されている。とりわけ「大都市型」では、生産年齢人口がマイナス11.9%と減少する一方、高齢人口はプラス17.2%と大幅に増加することが見込まれており、都市中心部での高齢者医療に関する需給ギャップの急速な拡大が予測されている。他方、「過疎地域型」では生産年齢人口がマイナス28.4%、高齢人口もマイナス12.2%と需要と供給の双方が減退する均衡縮小が見込まれ、「地方都市型」では高齢人口が微増（プラス2.4%）しているが、地域によって増減のばらつきがあるため対応の難しさが際立っている。このような都市の構造的変化は単に「人口が減る・増える」という単線的な問題ではなく、地域ごとの「人口構造のばらつき」とそれが医療にもたらす影響を踏まえる必要がある。

(2) 新興国等における都市構造の変化について

新興国に目を向けると、インドやナイジェリアといった人口増加が続く国々では、これから都市化が進み、医療インフラの整備が急務となる。こうした地域では、過去の多くの国と同様に、医療の発展が「感染症対策・母子保健の充実」から段階を踏むことが想定される。もっとも国連の「持続可能な都市開

発に関する戦略（2019年）」では、都市は保健・教育・移動性・レジリエンスといった複数の社会機能を統合する空間であり、発展途上国においては2030年までに必要とされる建築環境の約60%が未整備であると推定されている¹⁶。とりわけ、こうした国々では都市構造の整備がそのまま医療へのアクセス・アウトカムに直結するため、医療システムは都市設計と一体的に構想される必要がある。また、UN-Habitatは「包摂的かつレジリエントな都市づくり」が医療格差の是正と健康権保障に資すると繰り返し強調されている¹⁷ことから、都市構造や医療インフラに合致した医療技術が求められる。

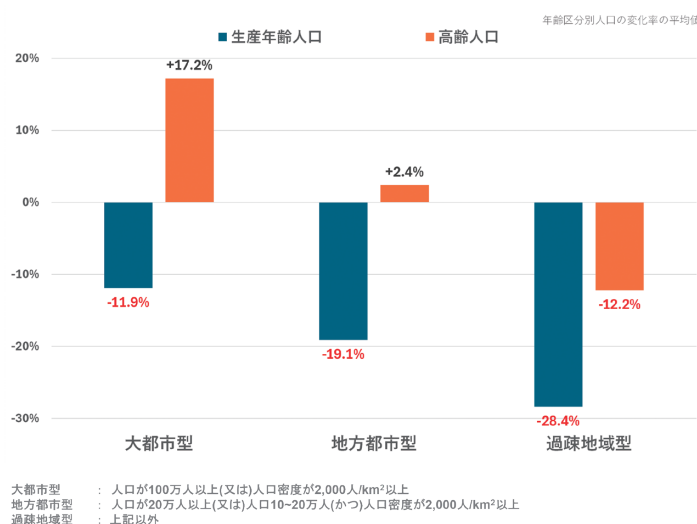
3 都市構造が要請する医療技術 2050 のかたち

2050年の都市は、均質な成長を前提とせず、それぞれが異なる速度と方向性で変化する「不均質な構造」へと移行していく。そのような構造変化において、医療技術もまた均一な提供モデルから脱却し、環境や資源、人口動態に応じて適応する構造的柔軟性を備えることが求められる。つまり「すべてに同じものを」ではなく、「それぞれの構造に適応する技術」をいかに設計・実装するかが、2050年の医療技術に求められるであろう。この不均質さがもたらす最大の課題は、各地域の医療ニーズが多様化するのみならず、それぞれの市場単位が縮小し、従来の大規模市場を前提としたスケール戦略が成立しづらくなる点にある。このような環境下では、既存の製品や技術を組み替え、多品種少量生産として複数の用途に展開する「ロングテールモデル的なアプローチ」も踏まえた設計思想がより適切になる可能性がある。また同一の医療技術であっても、地域ごとの条件に応じて異なる役割を担えるように、『共通設計を基盤としつつ、モジュールを柔軟に構成できる「スケーラビリティ×ローカライズ性」』を統合した設計思想も併せて重要になる。さらに長期的な視点では、『資源循環（サーキュラーエコノミー¹⁸）』の考え方も重要になるだろう。製品・部品・素材の価値をできる限り長く維持・活用し、特に部品単位でのリユース・再設計が可能な構造が、都市構造や医療提供体制の変化に持続的に対応する基盤となる。

あえて挑戦的に言えば、同一設計の診断補助AIが、都市部では病院内の診療支援ツール（人材を補完）として、地方では家庭向けセルフチェック機能（人材を部分的に代替）として展開されるといった利用形態の拡張も、AI実装の際の市場確保という視点から設計段階から重要になるかもしれない。

「すべてに同じものを」から「それぞれに適応する技術」へ

2025年→2040年の年齢区分別人口の変化の状況



「厚生労働省(2024)『新たな地域医療構想を通じて目指すべき医療について』、p.25, p.26, p.94をもとに事務局作成

2.4 医療の知識構造の進化

1 はじめに

近代史以前の医療は、医師や看護師など「人」による経験則の伝達に強く依存していた。こうした個々の経験則は、長らく属人的な経験知として蓄積され、一部には儀式的・暗黙的なかたちで受け継がれてきた。しかし近代以降、教育研究活動や医療制度の整備を通じて、徐々に知識として一般化・体系化され、今日では広範囲にわたって構築されてきた知識が共有・普及されるようになった。しかし膨大な情報となってしまった医療知識は個人の脳内で処理するだけでは足りない状況になっており、人類が積み上げた知識の活用を最適化するためにも、急速な発展を遂げている情報技術基盤や生成 AI 等の人工知能をはじめとする知識支援技術を活用した「知の構造」そのものの再編が必要となっている。この変化は 2050 年の医療技術を展望するうえで不可欠な視点である。本章では、医療の知識構造の歴史的進化を概観し、2050 年に向けて、こうした変化に応答する医療技術のあり方を考察する。

2 医療の知識構造の進化

かつて医療知識は、個々の医師や医療従事者の経験則に強く依存し、暗黙的・内在的な「個人の知」として町単位の地域医療の実践を支えていた。これはギルド的な「伝承を前提とした知」としての性格が強いものであり、地域を支える医療の実践において典型的であった。

しかし 20 世紀中頃、大学病院や中核病院の制度的整備と専門教育の拡充により、かつての経験則は学問的枠組みの中で再編され、「体系化された知識」として医学領域に流通し始めた。また日本はあらゆる医療用語を漢字文化に置き換えて用語化し、自国語での知識体系化を成し遂げた世界的にも数少ない実例である。このことは国民皆保険制度が目指した全国同じレベルでの医療技術やサービスが提供される医療提供システムの実現に大きく寄与してきた。

21 世紀初頭の現在、科学技術の高度化とも相まって、医療知識はさらに臓器別・病態別・分子レベルでの精緻化が進み、専門分化とともに深く高度化した。同時に、専門医制度や診療ガイドライン、エビデンスに基づく医療（EBM）などにより、医療の標準化と精度をより一層飛躍的に高めたが、情報の絶対量が急激に膨張し、言語的にも英語での知識の共有がグローバルで進んでいることから、知識が一部の高度専門家に限定され、閉じた構造になるという課題も内包した。

こうしたなか、AI や ICT、データベース連携などの情報技術が導入されることで、医療に関する知識は「属人的な暗黙知」から「構造的・共有可能な形式知」への転換が加速度をもって進行しつつある。診断支援 AI、臨床意思決定支援ツール、予測アルゴリズムを含む知識支援環境は、知識の接続性と再利用性を飛躍的に高めている。

2050 年の医療の知識のあり方は、単に専門性の深化にとどまらない変化を迎え可能性がある。たとえば、これまで臓器別・疾患別に細分化されてきた医学知識は、今後、患者中心の医療や多疾患併存患者の増加といった現実に対応するため、診療領域を横断する形で再構成される必要性が高まるだろう。また AI の活用による言語の壁は急激に解消されつつある。これらの変化は個々の専門領域内に閉じていた知識の普及と相互接続を促し、医療職種間や学際領域との連携を通じてさらに発展することで、医療界における知の統合と普及が急速に進行することも期待される。

そのうえで、かつて体温や血圧といった指標が医療従事者のみが解釈できる情報だったものが、今では市民によっても理解・活用されるようになったように、医療知識やデータはより広い社会的接点を持つようになるだろう。

多疾患併存と患者中心医療に応答する医療技術

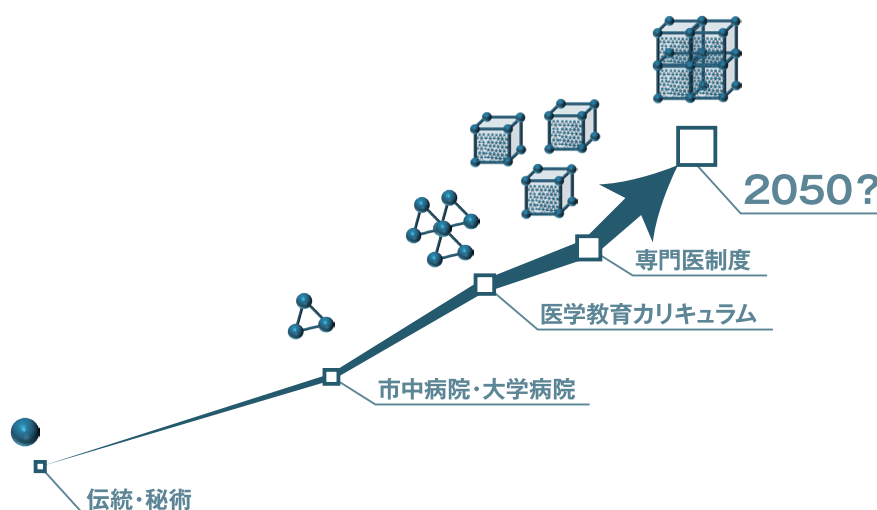
3 医療知識の民主化から見てくる 2050 年の医療技術

医療知識が社会性を帯びる変化は「医療の専門知が社会的にアクセス可能となる設計」、あるいは「生活文脈においても活用可能なかたちで設計された医療の知」を基盤とする考え方といえよう。こうした知のあり方は、知識体系がその本質を保持しながらも、他職種や市民と共有・活用できる構造へと変化していく可能性を期待させる。

すなわち医療知識の進化は、単なる「学術の深化」に留まらず、「誰が、どこで、どのように活用できるか」というアクセス構造の変化を伴うものになる。2050 年に求められるのは、専門知の本質を保ちながら、診療領域を越えて知を接続する「知の接続性 (Connectivity)」と、行為や関係をつなぐ「連関性 (Relationality)」の視点を備えることである。また、このような知の接続は、「縦の変化 (専門知の再編)」と「横の拡張 (知識の社会的接続)」という 2 つの方向に広がっていく。縦の変化は、医療従事者間の連携や判断の効率化を促し、一人ひとりの“社会的ケア負担”を軽減する。また、細分化された専門知がチーム医療や学際的实践に接続されることで、臓器別から疾患横断的診断・治療マネジメントへの転換を支えることが期待される。他方、横の拡張では専門知の一部が生活者の手に届く設計となり、民主化した医療知識が社会的文脈において新たな意味を持ち再接続されていくことを意味する。

すでに血圧・血糖・気分変動といった指標はウェアラブルデバイスによって取得・活用され始めており、これらの身近なデータと医療知識が結びつくことで、医療はより生活に近づいていくだろう。より良い活用のためには利用者のヘルスリテラシーの向上とセルフマネジメントの支援が不可欠であり、効率性と個別化の両立が今後の課題となる。こうした動きは診療支援にとどまらず、意思決定、自己管理、予防行動へと広がりを見せる。2050 年の医療技術は「知を伝える」「知を結ぶ」「知をひらく」ことで民主化された医療知識が一般市民にも直接効果をもたらすものとして、そのかたちを進化させていくことが期待される。そ

の文脈において 2050 年の医療技術は、単に医療行為を支えるツールを超え、「知識のかたち」そのものをつなぐネットワークのリンケージとなる。技術は知を運び、知は社会と医療をつなぐ。こうした設計思想が、未来の医療の姿を根底から変えていくだろう。



2.5 疾患数の増加

1 はじめに

疾患数は時代とともに変化してきた。感染症の流行と終息、慢性疾患の増加、生活習慣病や環境起因疾患など、医療の進歩と社会の変化に伴い、人類が向き合うべき疾患の種類と定義は常に更新されている。2050 年に向けて、私たちは疾患の「数」の増加という新たな挑戦に直面するであろう。そこで、本節では疾患数の変化を概観することで 2050 年に求められる医療技術の方向性を考察する。

2 疾患分類の細分化に伴う疾患数の増加

(1) ICD（国際疾病分類）から捉える疾患数の増加¹⁹

ICD（国際疾病分類）などの疾病分類は、医療技術や研究の深化とともに再編・細分化されてきた。従来ひとくくりにされていた疾患も、検査技術や診断技術の進展によって新たに定義され、疾患数は着実に増加してきた。1948 年の第 6 版で 953 項目だった分類項目数は、1990 年の第 10 版で 2,036 項目、2019 年の第 11 版では 17,528 項目にまで拡張されている。こうした傾向の背景には、新しい疾患概念の確立や既存疾患の見直しといった知の再構成の動きがあり、それを支える基盤として、デジタル技術の普及と臨床現場での活用なども挙げられている。

疾患数の増加は、新たな診療ガイドラインや専門医制度の策定、また新たなエビデンスに基づく医療（EBM）の推進をもたらす。その結果、臨床現場においてより精緻な診断が実現されることに結実する。その精緻な診断結果は、より高度な治療技術の開発の道を指し示すことに寄与する。2050 年という時間軸を考慮しなければ、究極的には一人一人固有の疾患名という未来も想像を必ずしも否定できない可能性すらある。



(2) 今後の疾患数の増加

疾患数は医療現場の不断の研究成果に伴う疾患理解の進展が反映されるものである。膨大な情報のデータ化とそれを分析可能とする AI のような技術の進展は我々の疾患理解を深めることになるであろう。ゲノム解析だけではなく、プロテオミクス解析、エピジェネティクス解析、メタボロミクス解析やマイクロバイオーーム解析といった高度の情報は、従来は処理するだけでも大変であったが、AI の進化と共に情報処理技術が飛躍的に進化することで、生物学的理解が進む解釈モデルの提供が容易になる。そして 2050 に向けては、これらに加えてデジタル病理、MRI や CT 画像、そしてウェアラブルデバイス×ライフログデータといったデジタルミクスも加わることで、さらに個人の病態に関する情報が加速度的に増加する。

例えば大規模なプロテオミクス解析と AI 技術の統合は、疾患の分子サブタイプを識別し、既存の診断枠組みを再構成しつつある。Nature Medicine 誌に掲載された最新の研究では、イギリス・バイオバンクの血漿タンパク質データを用いて、67 の疾患について高精度の予測モデルが構築されており、最大 20 種類のタンパク質から構成される疾患特異的サブタイプが同定されている²⁰。また英国バイオバンクと 14 の製薬企業が共同で進めるプロテオミクスプロジェクトでも、AI を活用して疾患のサブタイプを特定し、個別化医療の実現を目指している。この取り組みは、疾患分類のさらなる細分化と新たな疾患概念の創出が期待される動きでもある²¹。こうした動きは「同一疾患＝均一な存在」と

いうこれまでの前提を覆し、従来の疾患の詳細な層別化だけでも 2050 年までに疾患数が数倍～10 倍規模で増加する可能性を示唆している。また医療現場における様々な情報が集積され、膨大なデータセットを AI により解析することで新たな疾患パターンが明らかになる可能性も期待される。

さらにウェアラブルデバイスやスマートフォンを通じた生体信号・行動ログの収集と解析により、デジタルバイオマーカーが疾患定義に与える影響も大きくなっている。こうした情報を活用することで、認知症や慢性疼痛疾患、生活習慣病など、従来は主観評価や静的検査に依存していた疾患群に対して、時間軸に沿ったダイナミックな“状態の連続性”としての病態把握を可能にすることも期待される。例えば Insel らはスマートフォンから得られるセンサー、キーボード、音声・音響データを用いて、行動、認知、気分を測定する「デジタルフェノタイピング」の概念を提唱し、精神医学における診断と治療の精度向上に寄与する可能性を示している²²。また、Schiavo らはデジタルバイオマーカーの概念と特性を、従来の生物学的マーカーと対比しながら、モバイルセンシング、パッシブセンシング、コンテキストデータなどの観点から再定義し、疾患の診断・モニタリング・分類におけるデジタルデータの役割が、今後の疾患分類学を再構築する可能性を秘めていると指摘している²³。このような動きは、「従来はまだ疾患とされていない状態」であったものが新たに疾患概念として確立される可能性も高めており、疾患数は質的にも量的にも拡大することが見込まれる。

医療技術の質的転換を迫る疾患数の増加

3 疾患数の増加から見えてくる 2050 年の医療技術

疾患数の増加は、単なる分類項目の変化にとどまらず、医療の提供体制や技術設計に質的転換を迫る現象である。とりわけ疾患の定義が細分化・個別化されることで、2050 年には一人ひとりに応じたカスタマイズ医療の実現が現実味を帯びてくる。これは早期診断や精密治療の可能性を広げる点では、ゲノム医療でもたらされたテーラーメイド医療があらゆる疾病と治療方法に拡張し、個別化の推進とアウトカムの改善が期待される。一方で診療の複雑化や医療格差の拡大といった課題も伴う。例えば個々人からどのような粒度で情報を取得できるか、取得できる環境にあるかどうか、従来よりも医療介入の方法やアウトカムに影響を与える可能性が出てくる。こうした変化に対応するには、「発見の技術」だけでなく、個別性を保ちつつ運用できる「汎用的診療基盤」と、限られた資源を活かす「分類と統合の技術」が重要となる。たとえば共通基盤に基づくモジュール型の診断機器や、複数疾患に対応する横断的アルゴリズム設計などが挙げられる。

また、新たな疾患が「発見」されることは、状態に新たな意味やラベルが与えられることを意味するため、QOL や社会生活への影響も慎重に検討されねばならない。つまり疾患数の増加は「医学の進歩」であると同時に、「社会と医療の線引きを変化させる営み」となることを意味するのである。したがって技術開発と併せて、医療倫理・制度・情報ガバナンスとの統合設計もより丁寧さが必要になるだろう。疾患の増加とは、医療が扱う「人間の状態」のスペクトラムが拡張することであり、それに応える医療技術も、より動的で文脈依存的な構造を持つものへと進化していくことが期待される。



2.6 人（技術・知識）とモノ（機器）の比重の変化

1 はじめに

かつて医療現場は、人間（医師・看護師など）による技能と判断が中心に据えられ、医療機器は医師の技能とともに動く非能動的な存在であり、医師の単なる道具（代表的にはメス、ハサミなど）であった。1960年代から2000年代初頭は、機械工学、電子工学、制御工学、材料工学、工業化学、情報工学、光工学、生体医工学が発展したことで、エネルギーを有した医療機器が登場し、患者QOLの向上に資する能動的な存在となり、医療においては補助的機能という位置づけとなった。近年、診断・治療支援AIやロボティクス、自動化技術のさらなる進展により、医療機器が果たす役割は補助的機能から「意思決定の一端を担う主体」へと変わりつつある。本節では、人とモノの関係性の変化を辿りながら、2050年の医療技術の姿を展望する。

2 人（技術・知識）とモノ（機器）の比重の変化

20世紀初頭の医療現場では、診察・手術・看護の多くが医師や看護師の熟練した手技と経験に依存していた。診断機器や画像技術はまだ発展途上であり、病状の把握は視診・触診・問診が中心であった。都市部の病院では電灯の導入が進んでいた一方、地方ではなお自然光に頼る施設も存在した。20世紀半ばには無菌技術の普及や麻酔法の進化とともに、手術器具や診断機器の専用設計と標準化が急速に進展した。こうした医療機器の進化は、医学的ニーズの高まりに加え、他産業の技術革新（たとえば照明、材料工学、精密加工技術、光学機器など）を積極的に取り入れた結果である。

現代においても、ハサミのような普遍的な道具設計は受け継がれている。一方で、たとえば柔軟性を備えたカテーテルのように、低侵襲で体内に挿入可能な機器が登場しており、医療技術は着実に高度化している。近年では、ロボット技術や情報テクノロジーの進化により、手術支援ロボット、遠隔モニタリング、AI診断補助、臨床意思決定支援システムなど、医療機器が単なる「道具」にとどまらず、「実行」や「判断（支援）」としての役割を果たす場面が増加している。特に集中治療や画像診断の分野では、これらの機器が人間の注意力や認知能力を補完・拡張する存在として、もはや不可欠な要素となりつつある。

こうした変化をより大胆に考察すると、単なるツールの増加という側面よりも、医療行為における人とモノの構成要素の比重が変わりつつあるという捉え方が今後の方向性を示唆しているという解釈ができる。つまり医療機器が診療上のツールであることはかわらないものの、単一機能の道具から、複数・複合的な機能を備える道具として、モノ（機器）の占める役割は変容してきており、かつて人がすべてを担っていた医療行為は、人とモノの“共演”によって成立していくともいえる。

Ramptonら²⁴によれば、「人間的な医療」という概念は技術と無関係に存在するのではなく、常に環境や道具との関係の中で形成されてきた。したがって、医療技術はケアの“外側”にあるのではなく、むしろその構成要素の一部であり、医療実践や専門職のあり方に影響を与える存在であるともいえる。すなわち、技術は単に医療を補完する存在ではなく、医療行為の意味や方法論そのものに関わる存在である。この視点に立てば、医療実践における「人とモノ」の関係は、すでにさまざまな場面で再構成されている。たとえば、診療記録（recording）・診察（examining）・治療（treating）といった基本的な医療行為の一つひとつが、使用される道具や技術の変化によって、その性質や遂行方法を変容させてきた歴史があると述べている。診療記録においては、手書きから電子カルテ（EMR）への移行

により、医師が患者と向き合う身体的・時間的な関係性そのものが変わり、診療中の視線や発話の配分にまで影響を及ぼすようになった。診察行為においても、聴診器の登場が医師の身体感覚（触れる、聴く）に新たな知覚の手順を加えた。あるいは現在の画像診断技術（超音波やMRIやCT）は、医師が患者の「中」を視る能力を飛躍的に拡張しているが、その一方で、直接的な身体接触による診察の比重を相対的に低下させた。「診る」とは何か、という問いそのものが、技術によって書き換えられてきたのである。さらに治療においても、薬剤投与や手術といった行為が、機器の自動化・精密化によって再構成されつつもある。手術支援ロボットは医師の動作を再現するだけでなく、しばしば人間の手を超えた正確性を提供し、人が「操作する存在」から「監督し判断する存在」へと役割を変化させることも想定される。

このように、技術の進展は単に効率性や精度の向上をもたらすだけでなく、医療行為の内容や、そこにおける人間の専門性を向上させる可能性もあるだろう。

人との「共演」によって前進する医療技術

3 人（技術・知識）とモノ（機器）の比重の変化から見てくる 2050年の医療技術

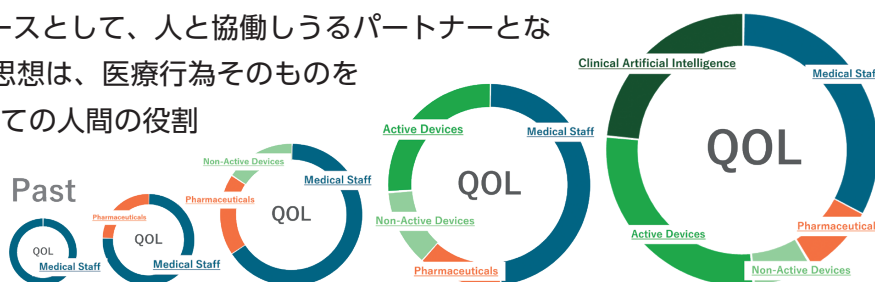
このような比重の変化は、単なる技術革新の延長線上にあるものではなく、少子高齢の社会、人材不足、地域格差、そして医療の持続可能性といった社会構造的課題への応答として捉えるべきであろう。2050年の医療においては、「人」と「モノ」がそれぞれ独立した役割を果たすのではなく、相補的かつ動的に役割を分担していく関係性がより一層求められるだろう。たとえば、ある場面ではAIが一次的判断を行い、人間がその妥当性を判断する「監督型モデル」が主流となるかもしれない。他方で、患者との対話や倫理的判断といった深く人間的な行為、いわゆる「手当て」と呼ぶべき行為などについては、機器の役割はあくまで補助にとどまり、人が中心的な意味付けを担う状況となる。

未来の医療技術の設計思想は「誰が、何を、どこまで担うのか」をより柔軟に捉え、環境や状況に応じて動的に最適化されるような構造を目指す必要がある。たとえば、医療資源が限られる地域では、意思決定支援機器の活用によって、専門職が常駐しなくとも一定レベルの医療サービスが提供できる体制を整えることも想定される。一方、高度な治療が可能な都市部では、人と機器が協働しながら高次元の判断や手技を実現するようなフレームワークが構築されていくだろう。場面毎に必要される要件を丁寧に実現する医療機器設計が重要となり、さらに、「モノ」が単に人の代替ではなく、人の専門性を拡張し、新たな医療行為の可能性を切り拓く存在として位置づけられるようにな

る場面が生じることも想定される。2050年の医療機器は、操作対象ではなく、学習し、**Future**

適応し、対話するインターフェースとして、人と協働しうるパートナーとなる可能性がある。こうした設計思想は、医療行為そのものを

再定義し、「行為の担い手」としての人間の役割を、より創造的かつ判断的な領域へと進化させることにつながる。



6つのFactor

都市構造の変化



新たな医療格差



人口構造の変化



知識構造の進化



疾患数の増加



人とモノの比重の変化



3つのVision

質の向上

Improvement in quality

Vision1

医療技術の発展

Advances in medical technology

常態を再現する医療技術

Medical technology that reproduces normal conditions

量の拡大

Expansion in quantity

Vision2

パブリックヘルスの推進

Promotion of public health

現場適応型の医療技術

Medical technology that strengthens the provision system

時間・空間の拡張

Expansion in time and space

Vision3

シームレス・メディスンの出現

The emergence of seamless medicine

動的・双方向の医療技術

Dynamic, interactive medical technology

6つのFactor、3つのVisionと6つのAction

6 Factors, 3 Visions and 6 Actions

6つのAction



常態再現にむけた
診断機器 / 治療機器
全体最適と制御設計



プラットフォーム
医療技術
汎用化と連携基盤



現場に応じた
適応型医療技術
現場適応と柔軟性



持続可能な簡素で
低負荷な医療技術
簡素化と再設計



専門知を統合する
医療技術
創発的知識と共創の仕組み



地域・生活圏へ
展開する医療技術
日常と医療の接続

2.7 3つのVision

2050年の医療を取り巻く環境から抽出されたキーワードを起点にこれまで述べてきた「6つのFactor」をふまえ、それらが2050年の医療技術にどのような方向性をもたらすのかを「3つのVision」として構造化した。各Factorが個別に示す変化の兆しを、より大きな構造的潮流として捉え直すことで、医療技術の今後を方向づける3つの視座としてとりまとめた。これらは、それぞれ「質の向上」「量の拡大」「時間・空間の拡張」という、医療技術の根幹に関わる方向性とも整合される。

Vision1：常態を再現する医療技術

1つ目のVisionは「常態を再現する医療技術」である。2050年には、診断・分析技術の発展や大規模に分析可能なエビデンスの蓄積に伴い疾患の細分化・分類が加速し、疾患数そのものが爆発的に増加していることも予想される。この変化は疾患単位での理解を深化させると同時に、患者がなぜ今その状態にあるのかというダイナミズムを、患者の生活スタイル、病態の背景や個別要因を含めてより包括的に捉える基礎を構築する。その結果、患者自身が自分らしく生きる「常態」へと導く道筋が描けるようになる。ここでは、医療知識のあり方の変化・民主化も基盤となり得るだろう。

一方これまでの医療技術は、特定の臓器単位の機能不全に対して、その形態や機能を模倣・代替する方向で設計され進展してきた。こうした技術的蓄積により、身体機能の一部補完は一定の水準に達しつつある。次なる課題は、身体全体を一つの統合システムとして捉え、臓器単位の機能改善を超えた医療技術を実現することである。すなわち、複数の医療機器が連動し、リアルタイムの生体情報をもとに個別に最適な介入を行うような統合的なアプローチを実現するようになるだろう。

このような視点は、現時点では治療が困難な疾患に対する新たな介入の糸口となり、いわゆるアンメット・メディカルニーズの充足にもつながることが期待される。

すなわち、「常態を再現する医療技術」は「医療技術の発展」により「医療の質の向上」を図るVisionである。

Vision2：現場適応型の医療技術

2つ目のVisionは「現場適応型の医療技術」である。多様化する医療現場の状況に応じて、柔軟かつ最適に適応することが求められるという方向性である。2050年には、人口構造や地域社会のあり様が大きく変容し、医療の提供現場も一様ではなくなることが予想される。高齢化がさらに進む一方で、医療従事者の地域偏在やリソース不足は続き、また患者ニーズも文化的・生活的背景によって多様化していく。こうした中で、医療技術が置かれる環境は一層流動的になり、「どこでも・誰でも・その場で」求められる機能が異なる状況が増加していく。そのため「すべてに同じものを」から「それぞれに適応する技術」という方向性での医療技術提供の柔軟性が求められる。

これまでの医療技術は、標準化された前提条件のもとで設計され、安定した医療資源が確保されることを想定していた。しかし今後は、限られた資源や多様な条件・環境の中で、各医療現場の文脈に応じて使いこなされる柔軟性や簡便性を備えた設計が求められる。例えば、都市部と過疎地、病院と在宅、専門職と非専門職といった多様な場面に応じて適応する技術である。

この視点は地域格差やアクセス格差の是正といった社会課題の解決に直結する。医療技術が特定の前提に依存するのではなく、現場に即して状況適応型として展開されることにより、制度やインフラの制約を超えて医療の持続可能性を高めることができる。このような限られた資源の中でも機能する簡素で柔軟な設計や、医療従事者以外の手によっても扱えるような構造への転換は、今後の医療の幅と深さの両立を可能にする鍵となる。

すなわち「現場適応型の医療技術」は「パブリックヘルスの推進」により「医療の量の拡大」を図る Vision である。

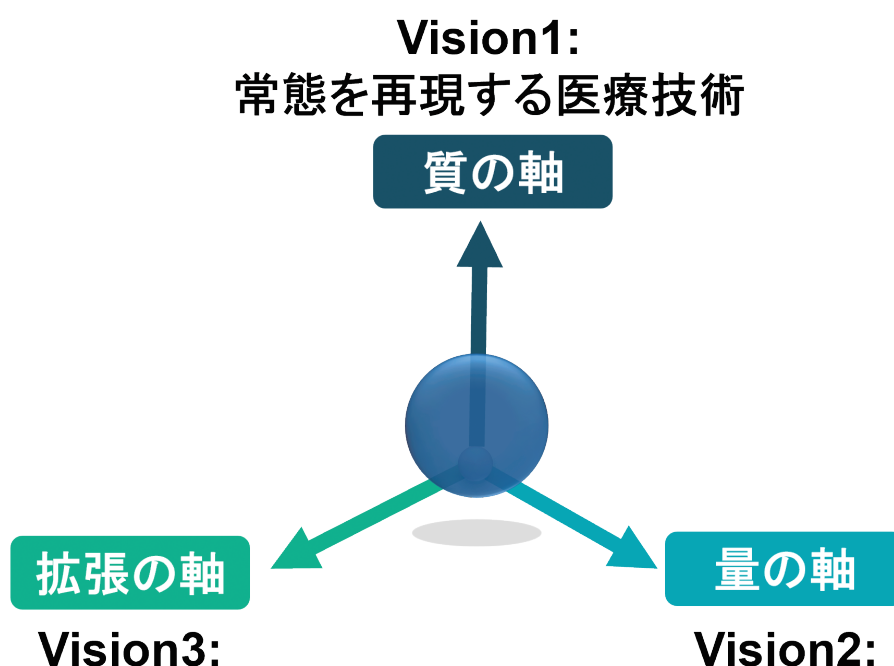
Vision3：動的・双方向の医療技術

3つ目の Vision は、人と医療技術がリアルタイムに応答し合うような、「動的・双方向性の医療技術」である。2050年には、医療の時間的・空間的な制約が大きく変化し、病院という特定の場所や医療従事者という特定の存在に依存しない、「生活の中に医療が寄り添う」という新たな関係性（シームレス・メディスン）も生まれていると想定される。

現在の医療は、患者が医療機関に赴き限られた時間内に診療行為を受けるといふ、患者も含めた時間・空間集約的な形態で提供される。この時に医療従事者は限られた情報から患者の状態を把握することが求められる。医療技術の提供も医療現場に限定されてしまい、診断時のみならず経過観察時も通院時の状態から把握することが求められる。

しかし今後は、診療の場や時間の境界を越えて、遠隔・在宅・予防的支援・自己管理といった形で、継続的かつ双方向的な医療技術の介入が可能になるだろう。あるいは、センサー、AI、ネットワーク技術などの進展により、医療技術は静的な装置ではなく、状況に応じて振る舞いを変える動的な一面も獲得していくだろう。こうした動的関係は、医療従事者と患者、さらには市民やケア提供者との情報共有・意思決定の仕組みに変化をもたらす。この進展は、Vision1 と相まって、未対応疾患に対応するための患者の状態、生活環境などに応じた技術 (Situating Responsive Technology) にもつながるであろう。

すなわち、「動的・双方向の医療技術」は「シームレス・メディスンの出現」により「医療の時間的・空間的な拡張」を図る Vision である。



2.8 3つの Vision を実現する 6つの Action

2050年の医療技術を展望するうえで、これまで検討してきた社会課題と未来像（3つの Vision）を実現するためには、構想にとどまらず、具体的な実装方針と方向性を描き出すことが求められる。本節では、これまでの議論を踏まえて設定した「6つの Action」を提示する。

Action1：常態再現に向けた診断機器 / 治療機器 全体最適と制御設計

本 Action は、Vision1 で示した「常態の再現」と、Vision3 で描かれた「動的・双方向の医療技術」という設計思想の交差点に位置づけられる。医療技術は今後、臓器や疾患ごとの補完を超えて、循環、代謝、神経、免疫など、複数の生体システムから得られる情報をリアルタイムかつ統合的に扱い、生体の状態変化に応じて柔軟に反応・制御する構造へと進化する必要がある。ここで着眼すべきターゲットは「疾患」ではなく、個々人の「QOL が維持される状態（常態）」である。ウェアラブルデバイスや在宅モニタリング機器によって生活文脈におけるセンシングが可能となり、これらの情報を AI 等が連続的に解析することで、異常の早期予兆を察知しつつも、過剰な医療介入を抑制することが期待される。鍵となるのは、「外部からの介入を、いつ・どの程度行うべきか」という問いである。生体が本来備える“回復しようとする力”を妨げることなく、それを尊重し引き出すことも含め、患者が望む常態であり続けることを支援する医療技術となることを期待する Action である。

Action2：プラットフォーム医療技術 汎用化と連携基盤

本 Action は、医療技術がさまざまな文脈や課題に対応するための「共通基盤」として機能するプラットフォーム化として位置づけられる。個別の機器やソリューションを単体で開発・導入する従来型のアプローチに対し、今後は医療現場や患者ニーズの多様性に柔軟に応答し得る“拡張性のある共通設計”が求められる。このとき核となるのは、「異なる機器・システム・データ」を接続・統合可能とする構造である。臓器別・疾患別に細分化された医療の知識や技術を、場面や組織を越えて活用可能にするには、診療記録・バイタルデータ・画像・生活情報といった異種情報の連携が前提となる。たとえば、電子カルテや画像システム、ウェアラブルデバイスが共通の仕様で連携できるよう、インタフェース設計の標準化や通信プロトコルの整備が不可欠である。さらに共通基盤を持ちながらも、現場の文脈に応じて柔軟に構成要素を組み替えられるモジュール型設計がより有効になる。都市部の高度医療機関ではフルセットの機能を、地域のクリニックでは必要なモジュールのみを導入するといった、可変性とスケーラビリティを備えた構造が、医療技術の社会実装を加速する。また、プラットフォーム設計は現場の医療者間の連携を支援するだけでなく、医療と日常生活、医療従事者と患者、制度と技術といった、従来分断されてきた関係性をつなぎ直すハブとしても機能する。これは単なる情報共有に留まらず、診療・ケア・モニタリング・意思決定といった多層的な医療活動をシームレスに接続し、「常態を再現する医療技術」や「現場適応型の医療技術」といった 2つの Vision の交点を支える技術基盤ともなることが期待される Action である。

Action3：現場に応じた適応型医療技術 現場適応と柔軟性

本 Action は Vision2 で示した「現場適応型の医療技術」について、現場に届かない / 届きにくい医療技術の提供機会を拡大するものである。すなわち多様な場面に適応するようにデザインされることにより従来のデリバリーの限界を打破し、医療資源が乏しい中でも医療技術の提供機会をもたらすことを目的としている。

医療現場は、都市部の高度医療機関から在宅診療、過疎地域の拠点施設、さらには低資源環境に至るまで、地理的・制度的・資源的に多様である。このような現場において、医療機器や診療技術は一律の設計では十分に機能しない。高精度な CT 装置が求められる場面がある一方で、ポータブル CT で十分な対応が可能な状況も存在する。必要とされるのは、医療技術そのものが「その場に応じて構造を変化させる力」を持つこと、すなわち柔軟な適応性である。この適応性は、操作方法やインターフェースが現場のスキルや文化に即して調整されることも含む。あるいは利用者の経験値やインフラの整備状況、さらには言語や教育の水準に至るまで、周囲の条件と呼応するように構成されることでも実現できる。

これは「必要十分であることの価値」を問い直す技術思想でもある。たとえば、高度な専門的管理を要する装置を、タスクシフティング可能な構成へと設計し直すこと、または検査・診断・治療の複数機能を集約・統合したコンパクトな機器を開発することは、医療資源が限られた現場にとって大きな意味を持つだろう。すなわち固定的な仕様ではなく、状況に応じた機能の変更が可能な設計が重要となる。この Action は、医療技術を単なる「高機能化」に向かわせるのではなく、「状況に応じて機能する」ことを目指す Action である。

Action4：持続可能な簡素で低負荷な医療技術 簡素化と再設計

本 Action は、Vision2 で示した「現場適応型の医療技術」について、エネルギーや経済性の観点から生じる届かなくなる医療技術を簡素で低負荷な持続的医療技術として生み出すものである。

高度化・精緻化する医療技術の一方で、実際には人手や設備、コスト、インフラといった制約により、「必要な技術がそこに存在しているにもかかわらず、適切に活用されていない」「そもそも到達できていない」医療の空白が各地に残されている。またアイソトープ技術のように効果は高いもののコストや環境負荷の大きい技術も存在する。こうしたギャップに向き合うためには、既存の技術そのものを「簡素化」することや「低負荷化」することが鍵となる。重要なのは単なる低スペック化ではなく、医療の質や安全性を保ちながらも、導入・運用・保守の各フェーズにおいてコストや人的負担・環境負荷を抑え、より広範な地域・施設での展開を可能にする医療技術である。また電源やネットワークなどの基盤インフラが不安定な環境でも運用可能な設計や、保守性・操作性に優れたユーザーインターフェースの工夫も重要となるだろう。このような低負荷な医療技術の開発は、単に途上国や離島・へき地への対応にとどまらない。都市部であっても外来診療や在宅ケア、リハビリ、緩和ケアといった多様な文脈での「持続可能な選択肢」として機能し得る。

すなわちこの Action は、医療技術を単なる「高機能化」に向かわせるのではなく、「持続的に使用できる」ことを期待するものである。

Action5：専門知を統合する医療技術 創発的知識と共創の仕組み

本 Action は、専門領域に蓄積されてきた医療知識を、診療科・職種・分野の枠を越えて結び直し、共創的に活用していくための医療技術のあり方を示すものである。

これまでの医療は、臓器別や疾患別の専門性を深めることで高度化してきた一方、知識は年々膨大となり、現場では複数疾患への対応や職種間連携が日常となり、専門知を統合的に運用する必要性が高まっている。たとえば、診療ガイドラインや診断支援ツールが各領域に存在しているなかで、それらを“つなぐ技術”が生み出されることで、多疾患併存の患者や複数職種が関わるケア現場に貢献できる。今後求められるのは、専門知ごとの独立性を尊重しながらも、それらを翻訳・統合し、現場の実践へと橋渡しすることで、患者一人ひとりへの還元を最大化する仕組みである。

こうした知識の統合を可能にする医療技術は、個別の医師や知識の専門性を前提としつつも、患者の状態を総合的に捉えるため、現場ニーズと集合知的なものから新たに見出された“創発的な知識”を提供するものであり、複雑化する医療現場において共通の目線を提供して実践を支える共創基盤の一つとなっていくことが期待される Action である。

Action6：地域・生活圏へ展開する医療技術 日常と医療の接続と民主化

本 Action は、医療の知識と技術が、専門家や医療機関のみに閉じるのではなく、市民の生活文脈に浸透され、誰もが日常のなかで利活用できる医療技術を描くものである。これまで医療機器は、診断・治療といった専門的行為のために設計されてきたが、2050 年に向けて健康管理、疾患予防、自己管理、術後ケアなど、より広範な生活支援の場面にも活用され、専門的機器と家庭用機器がシームレスにつながっていくことが期待される。すでに血圧、心拍、血糖、酸素飽和度といった指標は、ウェアラブルデバイス等で日常的に取得・可視化されるようになりつつある。今後は、こうした身近なデータが医療機関とのコミュニケーション情報として機能し、生活と医療をつなぐ「インターフェース」となるだろう。技術の役割は、単なるデータ収集にとどまらず、市民の意思決定を支援し、タイミングよく介入や相談につなげる“動的な伴走支援”へと進化していくことも期待される。また、医療技術のユーザーが「医療従事者」から「生活者」へと拡張していくことも並行して起こってくる。つまり医療機器のデータ取得や活用が、誰にでも理解・操作できるインターフェース設計、自己判断を支える簡便なフィードバック機能、地域や家庭の中でも活用できる設置・維持性の高い設計を前提にすることが広く求められる。これは医療を“日常で活かせる知識と技術”へと再編し、民主化していく営みである。生活文脈に寄り添う医療技術の展開は、ヘルスリテラシーの向上とともに、医療の効率化や予防的介入の可能性も広げる。市民一人ひとりが、自己の身体や健康に対する理解を深め、それに応じて適切な Action を取れるよう支援することは、社会全体の健康維持にもつながるだろう。

2050 年に向けては、医療の知識やデータを「採集する」「伝える」ところから、「暮らしのなかで使える」かたちへと転換し、医療技術が日常に根を張るしくみとして設計されていくことを期待する Action である。

3

7つの視座から読み解く医療技術 EXPLORING THE MEDICAL TECHNOLOGY THROUGH SEVEN PERSPECTIVES



循環器内科の視点

田村 雄一 YUICHI TAMURA 32

循環生理 / 神経制御の視点

朔 啓太 KEITA SAKU 40

脳神経外科 / 脊椎 / 脳外科の視点

森田 康平 KOHEI MORITA 48

救急 / 麻酔 / 医療システムの視点

園生 智弘 TOMOHIRO SONO 56

消化器内科の視点

三澤 将史 MASASHI MISAWA 64

眼科の視点

加藤 浩晃 HIROAKI KATO 72

画像診断の視点

隈丸 加奈子 KANAKO KUMAMARU 80

7つの視座から読み解く医療技術フォーサイト2050

医療技術フォーサイト



質の向上 Improvement in quality

Vision1

医療技術の発展
Advances in medical
technology

常態を再現する医療技術
Medical technology that
reproduces normal conditions

質の向上の軸

Action1

常態再現に向けた診断機器/
治療機器
全体最適と制御設計



Action2

プラットフォーム医療技術
汎用化と連携基盤



Action6

地域・生活圏へ展開する
医療技術
日常と医療の接続



Action4

持続可能な簡素で
低負荷な医療技術
簡素化と再設計



Action5

専門知を統合する医療技術
創発的知識と共創の仕組み



Action3

現場に応じた適応型医療技術
現場適応と柔軟性



拡張の軸

時間・空間の拡張 Expansion in time and space

Vision3

シームレス・メディシンの出現
The emergence of seamless
medicine

動的・双方向の医療技術
Dynamic, interactive medical
technology

量の拡大の軸

量の拡大 Expansion in quantity

Vision2

パブリックヘルスの推進
Promotion of public health

現場適応型の医療技術
Medical technology that
strengthens the provision
system

3.1 はじめに

本章では、「医療技術フォーサイト 2050 の構築に向けた指針」で整理した 6 つの要因、3 つの Vision、6 つの Action を踏まえ、異なる専門性を持つ現場の医師の目線から、2050 年における医療技術の未来像を示す。

各未来像は、「1. 対象とする疾患領域の 2050 年の状況」、「2. 2050 年に求められる当該疾患領域の医療技術」、そして「3. 2035 年(10 年後)に確立しておきたいコアテクノロジー」で構成している。

「1. 対象とする疾患領域の 2050 年の状況」では、2050 年の疾患領域における将来予測を記載している。対象とする疾患領域の中でも、特に注目すべきターゲット疾患を選定した根拠（例：アンメットメディカルニーズ、患者数の爆発的増加、社会的インパクト、医療資源への負荷など）と合わせて示した。なお、各ターゲット疾患に関しては、3 つの Vision のうち、最も該当する Vision を記載している。

「2. 2050 年に求められる当該疾患領域の医療技術」では、専門家の知見から必要な医療技術を前述の 6 つの Action に対応する形で記載をしている。

最後に、「3. 2035 年(10 年後)に確立しておきたいコアテクノロジー」では、2050 年の医療技術を実現するためのコアテクノロジー（核となる基盤技術・要素技術）を医師の視点から示した。

2035 年は今までにない医療技術の基礎となるコアテクノロジーの研究開発は 10 年から 15 年を要する。さらに、実際の医療機器の研究開発にも、同様に 10 年から 15 年の時間を要するという前提を踏まえて設定している。なお、本文書ではあくまで「こういう機能・特性が必要になるはず」という直感や洞察を重視しており、工学的な議論は本文書を受けたエンジニアとの議論に委ねる。

これらのコアテクノロジーは、2035 年までに研究開発と実証を進めておくことで、2050 年に求められる医療技術の実装を可能にする基盤となる。言い換えれば、未来の医療技術を支えるイノベーションは今後 10 年余りが勝負の時期であり、産学官の連携による戦略的な投資と研究推進が不可欠である。科学的根拠に基づいた現実的なロードマップの下、以上の技術群を着実に育成・統合することで、2050 年に訪れるであろう各疾患の課題に的確に備えることができると考えている。

1. 対象とする疾患領域の 2050 年の状況

世界全体の動向：21 世紀半ばまでに心血管疾患（CVD）は患者数・死亡者数ともに大幅な増加が予測されている。グローバルには 2025 年から 2050 年の間に心血管疾患の有病者数が約 90% 増加し、年間死亡者数も約 73% 増加して 3,560 万人に達すると推定されている²⁵。これは人口高齢化による影響が大きく、年齢構成調整前の粗死亡率は上昇するが、一方で年齢調整死亡率は世界平均で約 30% 低下すると予測されている。すなわち、医療の進歩と予防策により個々人のリスクは低減するものの、高齢人口の増大で絶対的な患者数・死亡数は急増することから、2050 年時点でも心血管死亡の主要原因は虚血性心疾患（冠動脈疾患）です。特に高血圧は依然として最大の危険因子で、2050 年に約 1,890 万件の心血管死亡に関与するだけではなく脳卒中への関与も大きい。

日本の動向：日本は世界で最も心疾患死亡率が低い国の一つであるが、超高齢社会の進行に伴う疾患負荷の変化が予測されている。日本では近年、高血圧管理の普及や喫煙率低下などの結果、心筋梗塞の発症年齢は上昇傾向にあり、急性心筋梗塞による死亡率も過去数十年で大幅に低下している。一方で平均寿命の延伸により心不全など慢性的な心疾患の有病率は増加している。日本における慢性心不全の有病者は人口の約 1% と推測されているが、高齢化を背景に今後さらに増加すると見込まれている。実際、2005 年に約 97.9 万人だった心不全患者数（左室機能不全患者数）は 2030 年までに約 130 万人に達すると予測されており²⁶、2050 年前後にはその水準を上回る規模で推移する可能性があり、超高齢社会である日本は「心不全パンデミック」とも称される状況を迎えると警鐘が鳴らされている。

**2050 年までに心血管疾患の有病者数は約 90% 増加し、
年間死亡者数も約 73% 増加して 3,560 万人に達する**

●予測される医療需要や診療ニーズの推移

日本では心不全患者の増加により入院や在宅医療の需要が著しく拡大する。日本循環器学会のデータによれば、2012 年から 2016 年のわずか 4 年間で心不全による入院患者数がすでに 22% 増加し、同期間の急性心筋梗塞入院の増加率（+6%）を大きく上回った²⁷。心不全入院の需要は 2040 年頃にピークに達するとされ、現行の医療提供体制では対応困難となる恐れがある。医療資源の制約も課題であり、

超高齢社会である日本は「心不全パンデミック」 とも称される状況を迎える

総人口減少に伴う医療従事者の減少や地域偏在、高齢患者の増加によるマンパワー不足が起こり、特に高度な循環器治療（心臓手術、カテーテルインターベンション、デバイス植込みなど）の需要増に対し、専門医・スタッフや設備の確保が課題になっている。また心不全は平均入院日数の長さで医療費も課題になっており、病床資源を逼迫させる要因となっている。2050 年に向けては急性期治療だけでなく在宅医療・遠隔モニタリングの活用等による入院回避や在院日数短縮が重要である。

2050 年に向けた循環器領域では、高齢化に伴って HFpEF による心不全や心房細動など高齢化と生活習慣病を背景に爆発的に増える「大量発生型の慢性疾患」への医療需給バランスの対策 (Vision2/3) が最重要課題となる一方、画像診断・バイオマーカー・ゲノム解析の進歩と新薬の上市によって、たとえば心アミロイドーシスやファブリー病などの稀少変性型心筋疾患が系統的にスクリーニングされ、新たな疾患が治療対象として浮上し、そのスクリーニングにおける質の均てん化もイノベーションによって実現すると予測される (Vision1/3)。心不全の診断フローや左室肥大の精査過程にバイオマーカーや遺伝子検査が組み込まれ、疾患概念が明確でなかった潜在患者が“掘り起こし”されることで、これまで「診断されずに終末期を迎えていた少数例」が「早期診断・介入により長期生存を目指す集団」へと転換することが期待される。つまり、循環器医療は大量慢性疾患の管理最適化と希少疾患の早期拾い上げ—この二極戦略を同時に遂行する時代に入る。

循環器医療は慢性疾患の管理最適化と稀少疾患早期診断 —この二極戦略を同時に遂行する時代に入る

2. 2050 年に求められる当該疾患領域の医療技術

技術①：クローズドループ自律型心不全管理システム

心不全患者の水分バランスはわずかな逸脱で息切れや急性増悪に直結し、一方で利尿剤が過剰になると腎障害を招くため、臨床では“さじ加減”の判断が必要になるが、その評価は採血など侵襲的な検査が必要になるため常に遅れがちである。そこで植込み型センサやマイク・サーモグラフィ・皮膚の湿度などの非侵襲的モニタリングにより心電・心音・インピーダンス・末梢浮腫を連続的に取得し、AI が個別化した至適ボリュームバランスをリアルタイム学習・更新、その推定値と 24 時間先の過負

荷リスクを基に皮下留置型マイクロポンプへ指令を送り適切な量の薬剤を提供するクローズドループ型心不全制御システムである硬貨大のスキンポンプにより 0.1 μ L 単位で利尿薬や心保護薬を精密投与し、投与後のデータを再フィードバックして薬量を即時最適化するため、患者は症状を意識しない段階から悪化を回避できる。ポンプには電子ロック・AI 異常検知などのフェイルセーフを組み込むことで安全性を担保し、また医師にも情報を提供して薬量上限設定などを在宅で調整が可能となる。期待される効果は心不全の再入院率の減少や入院期間の減少である。CGM + インスリンポンプが糖尿病治療を変えたように、“症状発現前に自動介入する心不全治療”という新たなパラダイムを確立し、心不全パンデミックに備えて心不全医療の質と効率を同時に押し上げる鍵技術となる。(Action1：常態再現にむけた診断機器 / 治療機器)。

技術②：稀少疾患診断を効率化する AI システム

心アミロイドーシスやファブリー病などの稀少変性型心筋疾患は、近年疾患概念が確立して治療薬ができるともに診断者数が増加しているが、画像・遺伝子・バイオマーカーが医療機関ごとに分断されているため診断まで長い期間を要するケースや、地域によっては生涯未診断のまま進行してしまう。こうした課題を解決するために「稀少疾患診断プラットフォーム」が重要となる。このようなシステムは病院 EMR、検査会社データ、在宅ウェアラブルのデータを標準化 API でクラウドへ集約し、AI が画像パターン認識・遺伝子変異レポート・血液バイオマーカーを統合解析して「稀少疾患疑いスコア」を算出することで、受診している医療機関によらず閾値を超えた患者さんが循環器稀少疾患センターのオンライン外来にリファーされる。そこで遠隔での心エコー再解析や追加検査のオーダー、さらには治験適格性の即時評価までワンストップで行うことが可能になる。HL7-FHIR など既存の規格であってもプラットフォーム化は可能であり、さらに医師用ダッシュボードではフラグ理由や過去類似症例の介入効果を可視化し、患者アプリ側では検査予約、遺伝カウンセリング、専門医とのビデオ面談を一括管理することで、治療可能な疾患の早期発見が可能になる。こういったプラットフォームはデータ連携と AI を核に「どこにいても稀少疾患を取り残さない」社会を実現し、2050 年の循環器診療を底上げする基盤技術になる。(Action2：プラットフォーム医療技術)



技術③：モバイル型心臓カテーテル治療

急性心筋梗塞では診断から治療までの期間「Door to Balloon Time」を 90 分以内に収めることが予後を左右するが、カテーテル室を備えた施設は都市部に偏在し、救急搬送の長時間化が治療遅延の大きな要因となっている。カテーテル室に依存しないモバイル型経皮的冠動脈インターベンション (Mobile-PCI) を実現化することで、医療アクセス環境に依存せずに質の高い救命医療が実施できる。システムでは可搬ケース内に、①超音波＋電磁位置計測を組み合わせた放射線フリーの三次元血管ナビゲーションシステム、② AI 画像解析チップ、③小口径のマイクロロボティックカテーテル（先端に超小型 OCT・プレプログラム済みステント一体型バルーンを搭載）、④ポータブル X 線無散乱照射ユニット（局所透視用）の四つを統合し、オペレーターはヘリコプターなどで到着後に橈骨動脈アクセスを確保し、手首と頸部に装着する磁気センサブレスレットと胸部を覆うパッドを装着するだけで、リアルタイムに冠動脈を 3D 再構築する。AI は心電図上の ST 上昇部位や血管マッピングの情報をもとに病変部医にアクセスし、OCT を活用して狭窄長を自動推定し、最適ステント径・長を提案、カテーテル先端の微細アクチュエータが自律的に病変中央へ到達、OCT による内腔確認後にバルーン拡張と薬剤溶出ステント留置を行い、同一デバイスで最終術後像を再撮影して完結する。システム全体は車載バッテリーまたは 100 V 家庭用電源で駆動し、ディスプレイ部材はカテーテルとステント一体型バルーンのみで、コストの低減も図ることができる。術中 AI は合併症である不整脈や穿孔リスクを常時監視し、異常検知時は自動停止・アラートを発報するフェイルセーフ構造を採用することで、遠距離での救急搬送をすることなく治療可能で、カテーテル室建設・維持費を不要にすることで、人口数万人規模の地方圏でも STEMI に対し迅速かつ標準化された一次 PCI を提供することで、2050 年の冠動脈救急医療を根底から刷新する。(Action3：現場に応じた適応型医療技術)



技術④：自己充電・メンテナンス型ペースメーカー

これは、従来電池交換が必要であったペースメーカーの充電を不要にするデバイスである。カプセル状（長さ 20 mm、直径 5 mm、質量 10 g 以下）で経カテーテル的に右室心尖部へ植込み、内部に埋め込まれた圧電素子とエレクトリック薄膜が心拍による機械振動を電気エネルギーへ変換し、マイクロスーパーキャパシタに蓄電することで 24 時間途切れないペーシングを実現する。これにより従来型

ペースメーカーで不可避だった電池交換手術を理論上不要にし、人材・財政が限られた地域でも一度の手技で終生作動させることができる。加えて AI アルゴリズムが自己学習的に必要最小限のパルス幅へ漸減制御し、エネルギー需要そのものを低減することで、バッテリー切れのリスクも減少させる。保守は遠隔ファームウェア更新とセルフテスト機能で完結し、現場技術者の常駐を必要とせず、電池交換を要因とする再入院がゼロ化し、長期的には低中所得国やへき地医療でも心拍数維持療法が持続的に提供される。(Action4：持続可能な簡素で低負荷な医療技術)



技術⑤：心疾患加療を包括化するチーム医療デジタルツイン：Cardio-Twin

” Cardio-Twin” は、循環器・腎臓・呼吸・代謝の各専門家の膨大な診療データと、画像・生化学データ・ゲノム情報・ウェアラブルバイタルを統合して生成する心不全患者のマルチモーダル AI デジタルツインである。患者さん一人ひとりの心臓、腎臓、肺、代謝系を仮想空間に再構築し、薬剤変更、塩分・たんぱく制限、運動負荷などをワンクリックでシミュレーションする。ガイドラインとリアルワールドエビデンスはもちろんのこと、各分野の医師が持つ「経験的カットオフ」や「失敗回避の勘所」といった暗黙知をルールベースで埋め込むだけでなく、薬剤介入による治療反応を見て次の介入を決定する専門医の暗黙知までも連続的なモデル構築により再現するエキスパートレイヤを配置し、数値化しにくい臨床勘もアルゴリズムに反映する。これにより、循環器医 AI が提案した薬剤調整を例えば腎臓内科医 AI が腎機能悪化シミュレーションで再検証し、管理栄養士 AI が食事プランを最適化し、理学療法士 AI が運動処方を上書きする—このような多職種が仮想カルテ上で協働できる仕組みを実現し、それを実際の患者さんに適応していく。さらに治療経過も AI 学習して個別モデルを更新し、外来・在宅・リハビリの各場面で一貫した意思決定を支



クローズドループ療法、搬送を要さないモバイル治療、究極の個別化医療を実現するデジタルツインなどの医療技術が 2050 年の循環器医療を牽引する

援する。これにより複雑化する高齢・多臓器合併の心不全管理を効率化し、症状悪化のイベントを劇的に減らすことで、2050年の医療現場で求められる真のチーム医療を後押しする。(Action5：専門知を統合する医療技術)

3. 2035年(10年後)に確立しておきたいコアテクノロジー



生体センシング&データ取得

- ・マルチモーダル・ナノセンサ
心電・心音・心筋インピーダンス・末梢浮腫を同時取得できる貼付／植込み型デバイス
ドライ電極・数週間以上交換不要で肌への負荷が弱い
- ・放射線フリー 3D 血管イメージング
超音波＋磁気／電磁ハイブリッドで冠動脈をリアルタイム再構築
0.1 mm 精度、携帯型装置でも撮像可能
- ・低コストウェアラブル化学センサ
汗・涙から血中の Na^+ , K^+ , BNP 等を 5 分周期で測定
使い捨てパッチ 1 枚あたり月 100 円以下のコスト



低エネルギー & ハーベスティング管理

- 超低消費電力・エネルギーハーベスティング
- ・圧電エレクトリック薄膜の量産化
心拍・呼吸・動脈拍動から 10 μW 級を安定発電
 - ・マイクロスーパーキャパシタ
10 万回以上の急速充放電に耐え、完全無線給電対応
 - ・1 μW 以下動作の医療 ASIC
AI 推論・通信を SoC 1 チップで処理し、熱発生を最小化



マイクロロボティクス&アクチュエータ

- ・5 Fr 以下の自律ナビゲーション・カテーテル
先端 OCT／レーザー／PFA ユニット一体化、曲率半径 5 mm で自動追従
- ・皮下留置型マイクロポンプ

1 μL 刻みで 24 h 連続投与、薬剤カートリッジ交換は年 1 回

- ・ 一体型ステント+薬剤デリバリーバルーン

治療後はステント素材が可溶化し残留部材を最小化



AI・デジタルツイン／XAI

- ・ リアルタイムエッジ AI エンジン

1 秒単位で心不全悪化や STEMI をリスク推定、オフラインでも動作

- ・ 患者レベル・臓器レベルのデジタルツイン自動生成基盤

心臓・腎・肺・代謝パスを時系列で結合し、薬剤／栄養／運動を数秒でシミュレーション

- ・ 暗黙知インジェクション層

専門家の膨大な診療記録をもとに経験的ルールを生成 AI が探索的にモデル化

実臨床応用での結果をもとに自律的更新プログラムも整備



データ基盤・相互運用テクノロジー

- ・ グローバル FHIR + ブロックチェーン患者台帳

検査画像・ゲノム・ウェアラブルの時系列を改ざん不可で一元管理

ゼロトラスト・エッジクラウドでデータを施設外に出さず AI コードのみ移動させる「モデル to Data」方式を採用する

- ・ OpenAPI 準拠ヘルス IoT バスにより医療機器であればメーカーを問わずに“つなげば即同期”のプラグ&プレイ



低コスト&サステナビリティテクノロジー

- ・ 再生ポリマー&生分解性金属材料

10 年耐久の医療グレード循環素材、リサイクル率の高い素材の開発 70%以上

- ・ モジュラー回収・再滅菌プロトコル

ディスプレイ部材を部品単位で選択的再利用し、環境負荷を低減

- ・ ライセンスフリー基本特許プール

低中所得国への技術移転を促進するオープンイノベーション枠組み



※本挿絵は長嶋氏の協力を得て制作しました。

1. 対象とする疾患領域の 2050 年の状況

循環生理 / 神経制御に関する本稿は、循環器系疾患を対象としている。そのため、循環器系疾患の 2050 年の状況については、前章「循環器内科の視点」を参照されたい。本稿では、それらの疾患に対する、ニューロモジュレーションを用いる技術について述べている。

機械やシステムは、センサー、コントローラーおよびアクチュエータが連携することで、安定的な動作の制御が可能となる。人体に置き換えてもこの仕組みは同様であり、制御系への介入を実現する医療技術の開発は、常態再現そのものであり（Vision 1）、その技術の先には、自動化や環境適応などの展望が見えてくる（Vision 2）。さらに、制御を実現するためには、人と医療技術とのリアルタイムな相互応答が不可欠である（Vision 3）。

ニューロモジュレーションとは電気刺激などにより神経活動を人為的に調節する治療であり、薬物と比べ可逆的かつ精密な介入が可能な点が特徴である。アクチュエータへの介入がほとんどである現代医療において、センサー、コントローラーおよびアクチュエータ間の通信や、コントローラーそのものを担う神経を介して制御系へ直接介入するニューロモジュレーションは、本書で示した” Vision” 全てを含む重要な方向性と言える。



ニューロモジュレーションにより真の常態再現が可能となる

循環器系臓器は自律神経の緻密かつ強力な制御を受けてその機能を決定している。例えば、安静から運動、仰臥位から立位、覚醒から睡眠など、生活で当たり前に行う活動の全ては重力の影響や末梢臓器の酸素要求を大きく変える活動であり、循環器系は秒単位でその要求に答える必要がある。よって、循環器疾患における病態の本質は、その調節機能が失われ、全身が不全状態になることである。高血圧や心不全では、交感神経の過剰活性が持続し、心血管リモデリングや臓器機能悪化の悪循環を引き起こす。心房細動などの不整脈も、自律神経バランスの乱れが発症・維持に関与する²⁸。

多くの循環器疾患で自律神経調節異常が病態進展の一因となることはわかっているものの、現在の

自律神経調節破綻への介入こそが次世代型循環器病医療の突破口

治療法は薬剤による心血管の保護か、デバイスによる機能の補助・置換に留まっている。特に、難治性もしくは治療抵抗性循環器疾患において、介入不十分であった病態生理に切り込み、より高いレベルでの常態再現を可能とするニューロモデュレーションは、増悪予防や患者 QOL および予後改善をもたらす次世代型医療テクノロジーとして期待されている。

循環器領域におけるニューロモデュレーションの最初のターゲットは難治性・治療抵抗性症例である。超高齢社会を背景に、循環器疾患患者の数は増加し、それに伴って重症例や治療抵抗症例も急増する予測がある。各代表疾患における現状と近未来予測、ニューロモデュレーションによる介入余地について列挙する。

治療抵抗性高血圧

標準的な薬物療法で血圧目標を達成できない治療抵抗性高血圧（resistant hypertension）は全高血圧患者の約 10 ～ 20% に上ると言われており、米国では約 1000 万人が治療抵抗性高血圧とする報告もある。日本においては、降圧薬内服中にもかかわらず目標未達の治療抵抗性症例は全体の 1 割程度と考えられている²⁹。これらの患者における脳卒中や心筋梗塞などの発症率は高く、高齢化に伴い今後増加する可能性もあることから、新規治療法の開発は重要である。交感神経活性化は高血圧維持に関わっていることは多くの基礎・臨床研究で明らかであり、腎動脈アブレーションをはじめとしたニューロモデュレーション治療の臨床応用が同疾患分野で始まっている。（Vision 1）

重症心不全

心不全患者の増加は心不全パンデミックとも表現されており、先進諸国での増加が表面化している（日本では 2030 年までに 130 万人）。その中でも、高度先進医療が必要な終末期心不全（Stage D）は急増が予想されている³⁰。根本治療はなく、既存治療では、心不全患者はほぼ確実に重症化する。高血圧と同様に、重症心不全における自律神経調節異常は現行治療では介入が十分でない病態生理であり、さまざまなニューロモデュレーションが治療選択肢として期待されている。（Vision 1）

重症急性心不全、心原性ショック

循環不全の最重症形である心原性ショックも心不全とともに増加する見込みである。米国では、年間およそ 4～5 万例が心原性ショックを発症しており、日本でもおよそ年 1 万人の患者数である。入院中の死亡率は約 30% と非常に高く、特に高齢者や重症患者では、より厳しい予後が示されている³¹。主に心筋梗塞を代表とする虚血性心疾患が原因であり、急性期における虚血ダメージの低減は本疾患の最重要課題であり続けている。現状は、基礎研究レベルではあるが、迷走神経刺激などのニューロモデュレーションの効果が期待される領域である。(Vision 1)

心房細動

心房細動の多くは抗不整脈薬やアブレーションで制御可能であるが、再発を繰り返す難治性患者も一定数存在し、より根本的な対策として自律神経に着目した治療が検討されている。例えば、心臓周囲の自律神経節アブレーションや腎交感神経デナベーション、経耳的迷走神経刺激などがすでに臨床でも検証されている。患者規模としては、AF 患者全体（2050 年までに日本で 100 万人以上、アメリカで 1000 万人以上になる見込み）のうち薬剤抵抗性でアブレーションも困難な層は数%程度であるが、絶対数では今後も増加が見込まれている³²。(Vision 1)

起立性低血圧や神経調節性失神などの調節不良疾患

起立性低血圧（orthostatic hypotension: OH）は高齢者で頻度が高く、一般成人での有病率は約 6-7% であるが、80 歳以上では 18-20% 近くに達する。したがって、高齢者人口の多い 2050 年の日本や米国では OH 患者数が増大し、転倒や失神に伴う外傷・骨折リスクが重要な健康課題となる。神経調節性失神（特に血管迷走神経性失神, VVS）は若年～中年に好発し、生涯有病率は 22～35% 程度とも言われている。多くは良性で予後良好であるも、稀に重傷事故に繋がる。大半の神経調節性失神や起立性低血圧は生活指導や薬物療法で管理可能であるも、一部に難治性の患者層が存在する³³。現状では対症療法が中心であるが、将来的にリスクベネフィットの向上が確立すれば、脊髄刺激や心臓神経節アブレーション、頸動脈圧反射刺激治療（Baroreflex stimulation）などが選択肢となる可能性もある。(Vision 1)

2. 2050年に求められる当該疾患領域の医療技術

技術①：焼灼によるニューロモデュレーション技術の標準化と精密化

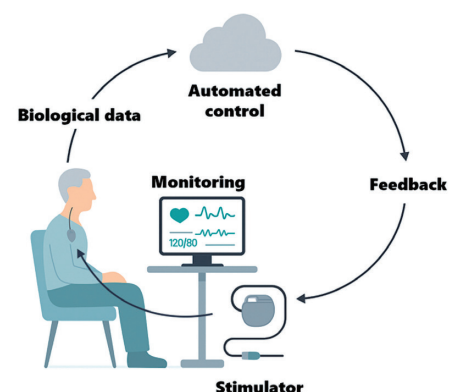
交感神経回路の焼灼は、さまざまなニューロモデュレーション治療として臨床応用化されており、腎動脈デナベーションや大内臓神経デナベーション、肺動脈デナベーションなどですでに検証が始まっている。特に、腎動脈デナベーションは生活習慣改善や降圧薬の服用にもかかわらず血圧が高い患者に対してFDA承認（2023年）を取得した³⁴。これは非薬物療法として初の中樞－末梢交感神経介入型高血圧治療であり、医療機器開発としても大きな意義を持つ。

一方で、アブレーション手技のさらなる低侵襲化と照射精度の向上が求められており、とくに副作用を最小限に抑えつつ標的神経を選択的に遮断するための技術革新が必要である。また、自律神経の活動状態や交感神経優位の程度を定量的に評価し、治療反応性の高い患者群（＝反応良好群）を予測・層別化する診断技術の確立が、治療成績の向上と無効症例の回避に不可欠である。これらの課題を克服し、適切な症例選択と標準化された治療アルゴリズムが確立されれば、腎動脈アブレーションにとどまらず、他部位への応用も加速することが期待され、巨大な医療需要・市場規模も予想される（Action1：常態再現にむけた診断機器／治療機器）。一方、焼灼というアプローチは、神経を介した制御系の向上とは異なるものであり、本来備わっているべき自律神経制御を物理的に切除することの長期的な妥当性があるのか？という問いも内包していることから、治療効果と長期的影響、患者QOLに与えるメリット・デメリットを科学的に検証することが必須である。

技術②：自律神経閉ループ制御を可能とする植え込み型ニューロモデュレーション機器

現状で開発されているニューロモデュレーション技術のほとんどは、開ループ的な自律神経の遮断や刺激である。一方、そもそも自律神経系は閉ループ制御系であり、その再現や機能強化こそが本来的なニューロモデュレーションの強みでもある。生体における交感神経の閉ループ制御系の中心は動脈圧反射（baroreflex）であり、頸動脈洞や大動脈弓に存在する圧センサー（伸展受容器）からの信号が中枢（延髄）に伝達され、主に交感神経系を介して心拍出量や末梢血管抵抗を調節することで血圧恒常性が維持されている。

この生理的機構を再現するためのニューロモデュレーション



ン技術として、Baroreflex stimulation は、頸動脈洞付近に電極を植え込み、一定の周波数で電気刺激を加えることで中枢性に交感神経活動を抑制し、持続的な血圧低下をもたらすことが報告されている³⁵。ただし、現行の装置はあくまで開ループ状態で一定の刺激出力にとどまっており、実際の血圧変動や神経活動に応じた動的な制御には至っていない。

頸動脈 reshaping ステンントは、頸動脈の形状を物理的に再構築することで、伸展受容器の刺激感受性を高め、自然な baroreflex 機能の増強を図る新たなアプローチである。これは機械的介入による感覚入力の強化を通じて、自律神経制御の再調律を試みるという点で、従来の電気刺激とは異なるアプローチとして注目されている³⁶。

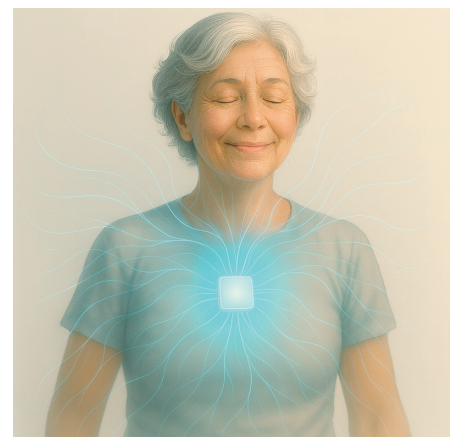
さらに、BackBeat Cardiac Neuromodulation Therapy™ は、心臓植込み型ペースメーカーを応用した新しい閉ループニューロモデュレーション技術であり、心房ペーシングのタイミングを制御することで心室充満圧や血圧変動を間接的に操作し、baroreflex を介した交感神経抑制を引き出すことを目的としている。特筆すべきは、従来の開ループ刺激と異なり、血圧や拍動パターンの変化に応じて刺激タイミングを適応的に調整できる点であり、事実上 baroreflex 経路の一部を人工的に置換・補強する閉ループニューロモデュレーション技術である。近年の臨床試験では、BackBeat Therapy が降圧効果を有し、薬剤との併用により心血管イベントリスクの低減にも寄与する可能性が示されている³⁷。

このように、自律神経系の閉ループ制御を理解し、それを模倣・増強する形で設計されたニューロモデュレーション技術は、単なる神経遮断や一方向刺激にとどまらず、より生理的かつ持続的、自動的な血圧・循環調節を可能とする将来性を有しており、今後の進化に大きな期待が寄せられている。
(Action1：常態再現にむけた診断機器 / 治療機器 / Action3：現場に応じた適応型医療技術)

技術③：循環調節以外の機序を主眼としたニューロモデュレーション機器

ニューロモデュレーションは、循環調節にとどまらず、抗炎症効果をはじめとする多面的な生理活性を有することが知られている³⁸。特に、直接的な循環動態の変化を伴わないような低強度刺激であっても、病態改善に寄与し得ることが、動物モデルを用いた基礎研究により示唆されている。

例えば、ラットや犬の重症心不全モデルにおいては、植え込み型迷走神経刺激によって左室機能の改善が認められており、徐脈な



どの典型的な循環応答を伴わない刺激レベルであっても有意な効果を示すことが報告されている。同様に、心筋梗塞モデル動物においても、迷走神経刺激により心筋保護効果が得られることが示されており、これらの背景には、抗炎症作用や活性酸素種（ROS）の抑制といった非循環性機序が関与していると考えられている。

このような基礎的知見にもかかわらず、現時点では、これら非循環効果を介した臨床的有用性については十分に実証されておらず、臨床応用に向けた明確なエビデンスの確立が求められる。今後、刺激による自律神経調節において循環応答だけでなく、抗炎症・代謝調整などの非循環的効果を最適化することは、ニューロモデュレーション治療の適応拡大と精密化に向けて不可欠であり、より系統的かつ機序解明に基づいた基礎研究の蓄積が必要である。（Action1:常態再現にむけた診断機器/治療機器）

技術④：低侵襲ニューロモデュレーション機器

低侵襲的ニューロモデュレーション機器の中でも、頸部（cervical transcutaneous VNS: ctVNS）や耳介（transcutaneous auricular vagus nerve stimulation: taVNS）から非侵襲的に迷走神経刺激を行う手法が注目を集めている。例えば、taVNSは、耳介に分布する迷走神経耳介枝（ABVN）に対して表面電極を用いて電気刺激を加える技術で、植込みやカテーテルなどの侵襲的手技を伴わず、外来や在宅環境でも使用可能な点が大きな特徴である。もともと中枢疾患に対する非侵襲的介入法として開発されたが、近年では、心不全、心房細動、うつ病、炎症性疾患など、さまざまな領域への応用が試みられている。皮膚表面からのアプローチでありながら、脳幹の孤束核などに至る迷走神経ネットワークを間接的に刺激することができ、心拍変動（HRV）の改善や炎症性サイトカインの抑制といった自律神経系の調節効果が報告されている³⁹。また、非侵襲的であるため反復使用が可能であり、薬剤との併用や生活習慣介入との組み合わせによる相乗効果も期待される。すでに欧米を中心に市販機器が複数存在し、一部は片頭痛やうつ病などに対する医療機器として承認されている。



一方で、低侵襲的ニューロモデュレーション機器には解決すべきいくつかの技術的課題も存在する。第一に、刺激部位である頸部や耳介の解剖学的構造や神経分布には個人差があり、電極の位置や装着方法によって刺激の効率や効果が大きく変動する。現行の多くのデバイスは画一的な電極配置を前提としているが、個々の神経応答に基づく最適化が求められている。第二に、他の刺激装置と同様に、

刺激パラメータ（強度、周波数、パルス幅など）の最適条件は依然として確立されておらず、エビデンスに基づいた個別化プロトコルの開発が必要である。また、現行の低侵襲的迷走神経刺激は「一時的な神経調節」を目的とした治療であるため、持続的な治療効果を得るためには、一定期間の継続使用が必要な可能性もある。そのためには、長時間の装着に耐えうる快適性と携帯性を備えたデバイス設計が重要であり、使用者のアドヒアランス向上を図るためのユーザーインターフェースの工夫も必要である。一方、これらを解決した先には、3つの Vision の達成を可能にする多面的な Action（1, 2, 3, 4, 6）につながる医療機器に発展し得る。

3. 2035 年(10年後)に確立しておきたいコアテクノロジー



生体センシング&データ取得

- ・理想的なニューロモデュレーションデバイスには、グルコース濃度、pH、温度、圧力、脳波、心電図など多様な生体信号をリアルタイムで検出・監視する機能が求められる。
- ・本分野の最大の課題は、臨床で安定的に神経活動を記録する手法が未確立である点にあり、客観的かつ連続的な神経活動の測定技術の確立が不可欠である。
- ・特に埋め込み型センサーでは、周囲組織の反応や表面汚染により信号の特異性や SN 比が低下するため、長期間高精度な測定を維持できるセンサーの開発が求められる。
- ・ドーパミンなど神経活動に関連する分子をリアルタイムでモニタできるバイオセンサーや、生体適合性に優れた柔軟素材によるワイヤレス埋込センサーの研究が進んでおり、将来的な閉ループ制御の基盤となる高精度データ取得が期待される。



AI・デジタルツイン／XAI（人工知能）

- ・閉ループ制御の実現には、リアルタイム信号処理と高機能なアルゴリズムの統合が不可欠である。特に、埋込デバイス上での長期安定動作には、限られた電力・演算資源を考慮した設計が求められ、一部処理を外部機器に委ねる構成も検討されている。
- ・最近では、脳深部刺激（DBS）における適応型制御や、個別脳解剖学情報を反映したデジタルツインによる刺激最適化の研究が進展しており、患者ごとのパラメータ自動調整を実現する技術が求められている。

マイクロロボティクス&アクチュエータ

- ・侵襲的デバイスでは、外科手術のリスクや長期使用時の電極周囲組織反応（瘢痕化）による刺激効率低下、電池寿命といった課題があり、小型・高性能化、無線給電や体内充電技術による電池交換頻度の低減が望まれる。
- ・一方で、非侵襲的刺激は焦点性や到達深度に限界があり、効果が不十分となる場合もある。これを克服するため、集束超音波による精密刺激や、光遺伝学的技術を用いた特異的細胞刺激など、新規アクチュエーターの開発が求められている。

低エネルギー & ハーベスティング

- ・機器の長期留置や高機能化に伴い計算負荷が増大する中、限られた電力・演算資源下での効率的な動作設計は、継続的なシステム運用における重要な技術的要件である。



※本挿絵は長嶋氏の協力を得て制作しました。

1. 対象とする疾患領域の 2050 年の状況

2025 年現在、脳・神経の領域では、医療現場では脳卒中に関連する治療や予防が多く行われている現況である一方、研究や発展が期待されている領域としては脳に対する未知の機能の解明や促進も注目されている。話題になる例としては認知症の治療薬の開発やイーロン・マスクによる脳へのチップ埋め込みがその顕著な類であろう。では、2050 年の時点で、脳・神経領域の治療や研究の状況を考えてみる。

<人口・年齢構成の変化と脳・神経の疾患の状況>

治療・予防の対象では、脳卒中（脳出血や脳梗塞）のように、高齢化・生活習慣に起因する疾患はさらに増加傾向になると考えられる。2020 年では世界での死者数は 600 万人であったものが、2050 年には 50% 増の 800 ～ 1,000 万人になると推計されている⁴⁰。これは心臓血管や糖尿病などの病気と同じような傾向である。ただしこれはグローバルや所得観点で見るとセグメント毎の差が一層進行すると思われる。途上国や非富裕層では今後も劇的な増加が見込まれる一方、喫煙率の低下や予防医学の啓発が進行した、日本を含む先進国では人口当たりの発症率は低下傾向になり、発症年齢も高齢化すると考えられる⁴¹(Vision2)。

**脳卒中（脳出血や脳梗塞）は、高齢化・生活習慣に起因して、
2050 年には 50% 増の 800 ～ 1,000 万人に到達**

<最先端の治療技術>

カテーテルや内視鏡の手術技術はさらに進歩し、ロボット化および自動手術が遠隔で受けられる世界がやってきている可能性は高い。自動車の自動運転のように、手術中に医師は監視をするが手を出さず場面が劇的に減少し、安全に手術を施行しうる世界になっていると考えられる。しかし、治療アクセスの観点では、経済的に恵まれたセグメントでは、多少の地理的ハードル等があってもこれらの疾患は予防・治療早期介入が可能で機能予後も改善しやすい一方、経済的な余裕が限られたセグメントでは先端医療の恩恵の享受が限定的であり、格差の進行が進んでいることが予想される。例えば、脳神経外科領域における急性期脳梗塞の血管内治療等は、2050 年では発症時も遠隔でのロボットカテー

テル手術で施術後、症状に応じたりハビリテーションが行われるように、先端医療は高度に発達していると想定されるが (Vision1)、最先端・高価格の治療が世界中で全ての人々が受けられるわけではない。重症脳梗塞発症後も基本的な内服加療しか享受出来ない層・地域が存在し続け、地域間の格差解決が課題になり続けていると思われる (Vision2)。もちろん 2025 年現在では高価な治療方法や医療機器も、先進国以外でも販売・適応され普及、市場における数量シェアとしてはむしろ先進国メーカー以外の企業群の比重は高まるであろう。

脳卒中以外の疾患としては、高齢化による脊椎変性およびそれに起因する脊髄神経の疾患は増加が予想される。先進国では 2025 年に既にかかなりの発症数であるが、2050 年では途上国で治療数が激増すると考えられる。これらは予防・早期の治療介入も行いやすく、ロボットや先端材料を用いた医療機器などとも相性が良いことから、関連市場の膨張も想像に難くない。

最先端・高価格治療に対する地域間の格差が未解決の課題として残存

<神経領域の解明と介入>

脳・神経の機能は未知の領域や個人差が非常に大きく、2050 年で全容を解明出来ている可能性は少ない。むしろ、他の広く深い学問領域と同じように、研究が進行するほど研究対象となりうる謎や疑問は増えているかもしれない。ただし、非侵襲的な評価方法や外部刺激による疾患コントロールは非常に発達すると考えられる。電極や針を脳に直接差し込み破壊するような危険な行為が無くても、電極を置くだけや特殊な MRI のような画像診断で脳の状態をモニタリングする技術は発展しつつある。つまり、2050 年では頭皮や脳血管内の電極で脳の機能をモニタリングし、てんかん疑いなど要治療の場合にはさらに治療をも一貫して行う、という治療が実用化されていることは十分に考え得る。特にこれらの神経機能に起因する事象は、細かな作用機序が解明できなくても経験的に効果が明らかである治療法が積み重なり、増えていくことが予想される。(Vision1)

神経機能に起因する事象は細かな作用機序が解明できなくとも経験則による効果が明らかである治療法が積み重なり、増えていく

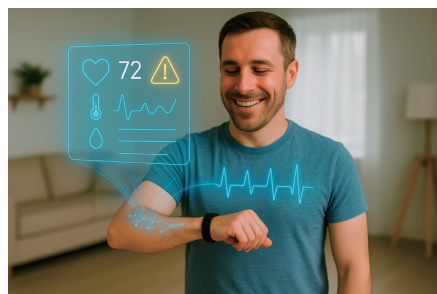
<神経組織の再生や機能回復>

神経系も他疾患と同様、再生医療が発達することが予想されるが、医療機器と組み合わせた治療法も存在する。再生医療用の細胞を梱包した注射剤、インプラントやステントと細胞成分の混合などは出現が考え得る。記憶の再生が2050年でどこまで可能かは不透明な面があるが、運動神経や感覚神経の再生、疾患領域としてはパーキンソン病や神経細胞の脱落による機能障害など、神経細胞の構造に起因する機能は再生医療により大きく予後が改善していると考えられる。

2. 2050年に求められる当該疾患領域の医療技術

技術①：バイタルサイン自動取得・判別・アラートシステム

脳卒中は、基本的には高血圧や糖尿病などの生活習慣病の要素、そして高齢化という年齢要素で発症する。逆に言えば、これらの生活習慣が適切に維持され、予防介入が為されていれば発症しにくく、かつ軽症化しやすい。しかしこれら生活習慣病は無自覚なものも多く、患者自身による自主的な活動（例えば、定期的な運動や食事管理など）に依らざるを得ない場合が多い。健診で



異常を指摘されていたが放置していた、結果脳卒中になってしまったという例は非常に多い。つまり、まず発症させないこと、モニタリングし異常を早期にアラートすること、そしてその重要性を社会全体として啓蒙活動を徹底することが求められる。既にこうしたシステムは健診では一部実用化されているが、本人への通知や医療機関へのアクセスを軽減したシステム（遠隔でデータを共有し受診を促すなど）が一般的となっていることが望まれる。こうしたシステムが普及することで、重篤化を防ぎ、脳卒中患者の罹患率改善・社会復帰率向上に大きく寄与することが期待される。(Action1：常態再現にむけた診断機器／治療機器)。先進国では健康意識や予防の高まり、喫煙率の低下から普及しやすいと考えられる。また、各種画像診断などの結果より、AIでどのような疾患がどのような確率で発症するかの予測も（2050年時点でも難しい疾患も当然存在はするであろう）精密に行えるようになっていくと考えられる。

技術②：一部自動化の手術・カテーテル用ロボット

予防を行っていたものの不幸にして脳卒中を発症する患者はどうしても存在する。特に脳卒中のうち脳梗塞は、発症後の適切な治療内容によっては重症度や予後の改善を図ることが出来る。2025年現



在、カテーテル手術による対処が脳梗塞（特に塞栓症中心）に対して行われるようになってきた。2050 年ではこれがさらに発症早期にロボット・遠隔で行われるようになっていであろう。また、AI を用いて手術操作の一部において術者はモニタリングするだけで、直接手を出さない状況も考えられる。（Action2：プラットフォーム医療技術、Action6：地域・生活圏へ展開する医療技術）

技術③：遠隔手術システム

脳卒中については、現在では救急搬送と治療する専門医の局在から、どうしても地域毎に差が出ざるを得ない状況である。我が国においても例外ではなく、過疎化および医師が少ない地域では脳卒中治療が充足しているとは言い難い。2050 年では前述の通り、手術操作で会っても一部は遠隔で行うことが可能となっていると考えられる。少なくとも初期診療・治療介入については地理的・距離的ハードルはかなり下がっているはずだ。保険医療内での必要な遠隔“治療”が地域格差の削減につながる事が期待される。（Action3：現場に応じた適応型医療技術、Action5：専門知を統合する医療技術）。

技術④：非侵襲的モニタリング・判別・治療システム

SF や漫画では、脳に電極を刺して人間の感情や運動をコントロールするような描写はよく見かける。実際には電極や針を刺すとどうしても脳組織を損傷するため、治療の有用性が損傷による不利益を上回らない限り避けるべき手法ではある。ただし、脳の組織を損傷しないような非侵襲のスクリーニング、現在では functional MRI や各種の核医学検査などは当然の如く使用され、発達傾向である。脳血管内の電極留置なども同様に侵襲性が低いながらも有効な手法として考え得る。さらに、脳の組織についてはその仕組みは 2025 年現在でも未知の領域が非常に広く、2050 年でも完全解明は困難と考えられる。とはいえ、迷走神経刺激に見られるような電気刺激のように、その治療効果の仕組みが完全に解明されていなくても経験則的に効果が証明されている方法は発達傾向である。2050 年ではこのような経験・エビデンスがさらに蓄積され、てんかんなどの疾患に対してはスクリーニングからの非侵襲的な治療介入がスムーズに行われているであろうことが期待される。さらにはこのような診断から治療に至るまでの流れが AI で一貫してアルゴリズム化され、自動化していることも望ましい。（Action1：常態再現にむけた診断機器 / 治療機器）

技術⑤：ほぼ完全な遠隔・自動手術システム（内視鏡・脊椎領域）

脊髄神経関係の疾患・治療としては、高齢化により先進国・途上国の双方で今後も相当数の患者が罹患、特に後者は手術の対象層も爆発的に増加すると考えられる。脊椎の手術は除圧や固定手術が主な術式であるが、これらはロボット手術と非常に相性が良い。カテーテル手術と比較しても3次元的にアプローチや操作が行いやすく、関節数や構造が簡易なシステムで行いやすいと考えられるからである。すなわち、診断～手術までのプロセスのうち多くが遠隔・ロボットで行うことが可能になると考えられる。手術においても術前プランニング・機器の留置・位置確認を遠隔・ロボットで行う世界になっていることが予想される。さらに、近年ではAIのレベルも飛躍的に向上していることから、自動車の自動運転のように術者の介入が非常に少ない手術が可能になることも期待される。(Action2：プラットフォーム医療技術、Action5：専門知を統合する医療技術、Action6：地域・生活圏へ展開する医療技術)

技術⑥：リハビリ・介護の補助動力システム

発症後の治療のうち、リハビリテーションは経験値の蓄積およびリハビリ専門家以外へのノウハウ共有により、効果的かつ短期間で行えるようになっていくことが考えられる。また、この際にはロボットなどの補助的機器が、患者個人個人の症状や重症度を確認しつつサポートをしていることが予想される。移動や生活動作の介助を行うロボットアームや補助動的システム、危険行動をモニタリングし事故を防止するシステムが考え得る。ただし神経系の再生については再生医療の発達や補助もありえる



が、記憶や高次脳機能障害などの神経障害は2050年でも物理的に完全治癒が難しく、時間も要することが考えられる。(Action5：専門知を統合する医療技術) 特に日本においては高齢化が今後も世界で最も進行するうえに、移民が増加する可能性も低いことから介護やリハビリの労働力人口不足は深刻化すると考えられ、このような技術の発達はニーズが高いと考える。また、脳卒中のみならず認知症についても同様のシステムは有効である。2050年でも認知症が根本的に治療可能となっている可能性は低く、“いかに社会でケア

するか”が課題となり続けていると考えられることから、介助・ケアを行うこのようなシステムは重要であらう。

技術⑦：準・再生医療：人工組織

再生医療は iPS 細胞を含む研究がようやく実臨床で応用可能なレベルとなってくることが予想される。その場合、再生医療と医療機器を組み合わせることも考え得る。たとえば、過去には薬剤溶出ステントが存在したように、脳血管内デバイスなどに脳・神経の再生を促す細胞成分などを塗布するように、再生医療に向けた医療機器が発展しうるのではないかと考える。パーキンソン病や中等度までの脳梗塞で運動機能障害や感覚機能障害については、神経の性質と構造に起因する疾患のため、細胞成分の再生により治療が進みうると考える。また、再生医療の細胞成分でなくても、人工筋肉や人工神経などで機能を代替する手段も発達するのではないか。神経組織の再生や機能回復においては複数の方法が存在し、状況に応じて選択・治療が為されている状況が望まれる。(Action1：常態再現にむけた診断機器 / 治療機器)

3. 2035年(10年後)に確立しておきたいコアテクノロジー



AI・デジタルツイン／XAI（人工知能）

- ・感覚フィードバックと筋肉の運動へと繋げる神経電位等の情報を統合出来る（自律型手術ロボットをコントロールできる）AI



マイクロロボティクス&アクチュエータテクノロジー

- ・ヒトの両上肢の動きを忠実に再現しうるロボットアーム
- ・移乗や立ち上がり補助を行う、リハビリや介護に関わるロボットやパワースーツ
- ・深部にまで非侵襲的に電気その他の刺激を加える機器



生体センシング&データ取得

- ・指先の振動覚や関節の深部覚をモニタリングし、再現しうるセンサー
- ・センサーでなくても、映像からでも動きや状態をデータとして活用しうる技術
- ・血管内や頭皮でも脳波が詳細に拾える電極
- ・非侵襲的に脳の活動や状態をリアルタイムで把握することが出来る検査方法と装置



材料・デバイス技術

- ・細胞成分を塗り込んでも長期間生存しうる生体吸着材料
- ・一般材料や動物生体材料から作った人工筋肉や人工神経



データ基盤・相互運用テクノロジー

- ・現在の 5G を超越する完全リアルタイムに近い通信網



※本挿絵は長嶋氏の協力を得て制作しました。

1. 対象とする疾患領域の 2050 年の状況

<人口・年齢構成の変化と急性期医療の変化>

救急・麻酔・ICUなどの急性期領域の2050年の将来像についてまず重要なのは、人口や年齢構成の今後の変化が挙げられる。日本においては、世界各国にさきがけて、現在から2050年にかけてますます高齢化と生産年齢人口の相対的減少が進行し、急性期疾患（外傷、感染症、脳卒中や心疾患など）の負担は増大する。2050年にかけて増加することが予測される高齢者の急性期疾患は下記のような特徴を有する。まず、併存疾患や常用薬の情報が複雑で、治療や処置の選択も結果として複雑になりやすいこと。治療や処置の実施により得られるメリットよりも、その合併症がもたらす不利益が大きいケースもあり、併存疾患や常用薬の情報を踏まえた臨床意思決定が重要になること。また、高齢者の場合、治療反応性や予後の個人差が大きくなることも知られている。麻酔やICU領域で重要な「人体の恒常性」の維持機能も年齢とともに緩やかに低下する。侵襲的治療と緩和的治療のバランス、治療による費用対効果も、医療機器をはじめとした医学の発展に伴い常に変化するが、高齢患者では特にその影響が大きい。

高齢者の急性期疾患では、併存疾患や常用薬を踏まえ、処置の有益性が合併症により相殺されない意思決定が不可欠

<地理的・時間的に不利な状況での疾患の発生>

疾患の年齢分布は変わるものの、急性期疾患、その中でも救急医療領域において変わらないものもある。それは、人間が居住・活動する限りそこで常に急性期疾患は生じるということである。グローバルレベルで見た場合に、日本は国土が比較的狭く人口が密集しているが、それでも離島やへき地で発生する急性期疾患へのドクターヘリ等を用いた緊急対応はもちろん、スポーツや山林など人里離れたところで突如発生した外傷等への対応も必要となる。世界各地で、それぞれの地域事情により異なる地理的・時間的リソースの中での急性期医療の最適化が求められ、これは2050年になっても変わることはない。

<高度医療機器の人材教育や合併症予防>

急性期医療においては、様々な高度医療機器が利用される。高度医療機器の開発とともに、合併症

それぞれの地域事情により異なる地理的・時間的リソースに応じた急性期医療の最適化

を起こさずに適切に活用できる医療従事者の人材教育は重要事項である。

一例として ECMO（体外式膜型人工肺）を取り上げる。コロナ禍で話題になった ECMO は、従来は心臓血管外科の手術前後での利用が主であったが、循環の恒常性が破綻する心肺停止での利用により飛躍的な予後改善のエビデンスが出ている。一方、出血や感染、脈管損傷などの合併症は多く、急性期領域では合併症を軽減できる医療技術が求められている。(Vision1)

また、ECMO のような高度医療機器の場合、機器自体の入手可能性以上に適切に使用・管理ができる人材育成が重要になる。同じ ECMO 治療を行った COVID-19 患者でも、救命率は日本では 60% 程度だが、インドネシアでは 11%⁴²、アフリカの一部の国家ではほぼ 0% であったというデータがある。急性期領域の医療機器の国内外での展開には、人材教育が必須要素になる。(Vision2)

<急性期医療の各種処置の自動化>

救急処置では熟練したスタッフの業務を AI や機械により代行するのは難しい部類とされている。国内外で様々な研究が行われているが、静脈ライン確保のようなベーシックな手技でさえ、これまで機械化できてこなかった。これは、処置コストが安く技術開発が割に合わないという理由と、手術室や ICU のような「整った環境」以外で実施されることが圧倒的に多い処置であり、機器開発の難度が高いのだと考えられる。一方、重症患者の ICU 管理や麻酔科の手術室管理においては、「異常検知」「高度に個別化した治療方針の短時間での策定と実行」が求められる。具体的には、集中治療室での持続カテコラミンを用いた適正な血圧管理や、インスリンを用いた血糖管理などで、ICU の AI 管理に関しては複数の論文が出版されている⁴³。このような「異常検知」と「個別化医療の実施」において AI 医療機器は本質的に人間よりも高度な機能を果たす可能性が高いものの、現段階ではその多くが後ろ向きデータによる机上検証にとどまっており、患者介入を伴う研究は極めて限られている⁴⁴。今後、遠隔 ICU 管理や、人的介入をほぼ要さない自動麻酔管理⁴⁵などの、より少ない医療スタッフで十分な急性期医療が提供できるよう、医療システムを通じた効率化・自動化を実現する AI 医療機器への期待は大きい。(Vision3)

手術室や ICU では、AI による異常検知・個別化医療が実現され、「医療行為の自動運転化」が進む

2. 2050年に求められる当該疾患領域の医療技術

技術①：合併症予防を高度に実現する、安全性を高めた高侵襲医療機器

急性期医療領域で重要な手技はいずれも、救命や手術の実施のために必須ではあるものの、合併症は不可避免的に発生している。特に患者の高齢化が進む2050年にかけて、高侵襲医療機器による合併症予防は極めて重要な意味を持つ。

具体的な処置としては、気管内挿管、中心静脈ライン挿入、ECMOやImpellaの挿入、IABOやIABPの挿入、などが挙げられる。救命医療のシーンではX線利用環境や術者の準備や技術熟練度が不十分であっても当該処置をせざるを得ないことも多く、脈管損傷や食道挿管などを代表とする合併症が特に起こりやすい。

合併症予防のためには、熟練した術者の手の感覚に頼っている要素が現在のところ大きい。一方、合併症予防のために、医療機器の進化に期待するところは大いにあると考えられる。例えば、体内挿入するカテーテルやガイドワイヤー等の先端に圧センサーをつけることにより、血管損傷のリスクをリアルタイムに術者がわかるようにするようなアイデアは役立つことだろう。イメージは、最近の自動車の、近づくといくほど音が大きくなる接触防止センサーである。(Action1：常態再現にむけた診断機器 / 治療機器)



技術②：急性期医療の統合データ基盤

急性期医療における「異常検知」と「個別化医療の実施」がAI医療機器により実現できる可能性は先述した通りである。先行研究として、「手術室やICUでのバイタルサインによるAI患者管理」に関



わるものは複数ある(2),(4)が、現時点では臨床現場での利用性は不十分である。その理由の一つとして、先述したような高齢化による急性期疾患の状態の複雑化が挙げられる。例えば、同じ「収縮期血圧100」であっても、「20代の健康な女性」の場合と、「降圧剤を2剤内服していて普段の血圧は150程度の80代の男性」の場合ではその解釈は大きく異なる。

このような複雑な病態を扱う、急性期医療における「異常検知」と「個別化医療の実施」のためのAI医療機器は、その基盤部分

に統合されたデータ基盤を持つことが必須要件となる。ICU や手術で使用中の薬剤等はもちろん、基礎疾患や常用薬、ADL（日常生活動作）や生活歴に至るまで、適切に統一化されたデータ規格で管理されていることが、急性期医療の AI 化の前提条件となる。（Action2：プラットフォーム医療技術）

技術③：自動運転の ICU・手術室

②で示したデータ規格の整備とともに、遠隔 ICU 支援や、ICU・手術室管理の AI による自動化は、生産年齢人口が減少する 2050 年に向けて重要な技術である。ICU や手術室では、実施すべき基本的な Action は、2 つしかなく、遠隔支援や AI による自動化とはこの二つの Action をモニタリングデバイスを通じたモニタリングと closed loop で繋げて実行することである。一つは、人工呼吸器、持続血液浄化、ECMO などの医療機器の設定変更。もう一つは、鎮静鎮痛薬、昇圧剤、抗菌薬、などの流量・投与変更である。

ICU や手術室では一般に患者自身は意思表示が難しいことが多く、また input の情報量が極めて多いため人による情報整理や異常検知に向いていないということも言える。したがって、臨床検査値やバイタルサインはもちろん、②で示した患者背景情報や主疾患情報など、膨大な情報を input サイドに持ち、最適な Action を自動化することは、手術室や ICU でこそ大きな価値がある。現段階では実際に患者介入を伴う研究は極めて限られている (3) が、あらゆる医療領域で最も早く ICU・手術室領域での自動化が実現される可能性が高いと考える。（Action3：現場に応じた適応型医療技術）



技術④：検査・診断・治療の医療機器の小型化・可搬化

急性期医療においては地理的・時間的に不利な状況で患者が発生することは極めて多い。そのような場面でも、リソースが十分ある急性期病院の救急外来や手術室等で行う検査・診断・処置の中で、特に治療選択・患者予後に大きな影響が出るものを、へき地や離島あるいはドクターカー・ドクターヘリの中などで実施できるように小型化・可搬化することの意義は大きい。

代表的な医療機器として、スマートフォンですぐ映像が見ることができる小型の超音波検査機器が挙げられる。このような機器は、ドクターカーやヘリの中で利用できて、外傷初期蘇生に大いに寄与し、

派生して、へき地離島や在宅診療でも広く利用されるようになっている。超音波検査では、気胸や骨折、食道挿管の識別などもできるが、術者の一定以上の技術を要する。

病院の救急外来や手術室で安全に処置や治療を行える最も大きな理由は X 線（C アームと言われる透視装置なら手術室や初療室に持ってくることができる）や CT（ハイブリッド ER と呼ばれる一体型の初療室では患者を移動させずに CT 撮影ができる）が直ちに利用できるからである。現時点では技術的に難度が高いかもしれないが、2050 年に向けて、X 線や CT 装置のような機器をより小型化・可搬化することができれば、地理的に不利な状況で発生した急性期疾患に対して極めて有効なソリューションとなるだろう。

一つ注意点として、各メーカー側としては、「小型化・可搬化が容易に可能な」医療機器や検査機器を、提唱しがちであるが、このアプローチは注意が必要である。切迫した臨床意思決定や、1 分を争う急性期処置の実施、合併症予防に必要な機器は小型化・可搬化すべきであるが、そうでない機器の場合はむしろ医療コストを無駄に上げるリスクが高まる。技術オリエンテッドではなくあくまで急性期医療の現場側視点の元で、小型化・可搬化すべき機器を選定する必要がある。（Action4：持続可能な簡素で低負荷な医療技術）



技術⑤：救急医療現場での致死的疾患の自動判定技術

急性期医療においては、「患者の診断を確定すること」以上に、「その時点での人的・物的リソースを駆使して致死的病態や後遺症を残す病態を、除外あるいは確定診断をすること」が重視される。いわゆる総合診療外来やクリニックで重宝されがちな「疾患確率に基づいた可能性の高い疾患を列挙する AI 問診」を、診断当てゲーム的に感じて多くの急性期領域の医師があまり好まないのはここに由来する。

しかしながら 2025 年時点ではいまだに、急性期医療の代表である当直・時間外診療、またその手前の救急搬送時点で多くの致死的疾患の見逃しや誤診が起きているのは事実である。また、救急搬送時点では救急隊員による診断行為は行われないことになっているが、実際にはそれに類した診断の予測行為の結果、不適切なリソースの病院に搬送が決定することもしばしば起こっている。

ここには人間の各種の思考バイアスが大きく関わっており、「頻度が高い疾患や病態を初期想起するとそれに都合の良い情報を中心に収集しがちである」ことに起因する。熟練した救急医は、逆に、頻

度が低くても致命的となりうる疾患を常に数個想起して情報収集を行うよう強く意識している。このような人間の思考バイアスを考慮した上で、患者の言葉、顔色、バイタルサイン、基礎疾患等を input として、「致命的病態の可能性」が一定以上に上昇した際に、医師等に通知をする診断支援技術は救急領域で役立つと考えられる。(Action5：専門知を統合する医療技術)

3. 2035年(10年後)に確立しておきたいコアテクノロジー



生体センシング&データ取得

- ・人体内で安全に使用でき、かつ十分小型化された圧センサー等のセンサー技術
- ・診断音声等から、医師の患者状態解釈と同様にリアルタイムで患者状態をデータ化する急性期医療のデータ入力技術



データ基盤・相互運用テクノロジー

- ・急性期医療における標準的なデータ規格の確定：検査値のみならず、バイタルサイン、基礎疾患、医療機器の各種設定情報、行われた処置等も含めたデータ規格の規定が必要。
- ・上記の標準的なデータ規格に対する電子カルテや医療情報システムでの準拠の開始。
- ・バイタルサインだけにとどまらない包括的な急性期医療の、規格の揃ったビッグデータ。モニタリング結果のデータと、行われた介入の構造化データの双方が必要。
- ・救急医療における、上記の患者状態データと最終診断やアウトカムデータを双方含む、規格の揃ったビッグデータ。



イメージング技術

- ・画像検査装置小型化の可能性、小型化可能な新しい画像診断モジュール



AI・デジタルツイン／XAI（人工知能）

- ・集中治療室や手術室におけるモニタリング結果情報と処置介入の closed loop を成立させる AI アルゴリズム
- ・問診や身体所見、検査所見等から各種疾病診断（特に緊急性の高い診断）を実施する AI アルゴリズム



※本挿絵は長嶋氏の協力を得て制作しました。

1. 対象とする疾患領域の 2050 年の状況

消化器悪性腫瘍、とくに大腸癌は全世界的に増回傾向であり、2040 年には、2020 年と比較して死亡例が 1.7 倍にまで増加すると予測される（2020 年 93 万例 vs 2040 年 160 万例）⁴⁶。本邦においてもその傾向は同様で、2050 年頃には大腸癌治療に全癌腫中最多の医療費を投入せざるを得ないと推測される¹。つまり、『大腸癌を制さずして、癌は克服できない』と言っても過言ではない。さらに、高齢化社会を背景に超高齢者大腸癌の割合が増加し、併存疾患を持つ複雑な症例が増えると予測される。また、世界的に若年発症の大腸癌も増加傾向であり⁴⁷、若年層も効率的に取り込む検診プログラムも必要になる。消化器癌の診断・治療は専門性が高く、高度な技術と設備を要するが、2050 年にかけて全世界的に高齢化と医療者不足が進むと予測される。そのため、専門医の診断・治療能力を拡張し、地理的・人的制約を超えた医療提供を可能にする医療機器開発が期待される。(Vision 2)

大腸癌を制さずして、癌は克服できない

難病である炎症性腸疾患（Inflammatory Bowel Disease: IBD）の患者数は継続的に増加し、グローバル規模で 2050 年には現在の 1.3-1.5 倍になると予測される⁴⁸。当該疾患は難治性・慢性疾患であるが生命予後が良いという特徴があり、患者の高齢化により、長期罹患による大腸癌リスク増加や他疾患との併存症例も増加するだろう。しかし、IBD は炎症による腸管粘膜の破壊と機能障害を生じさせ、現在の治療では「治癒」は困難である。そこで鍵になるのが、『再燃の抑制ではなく、腸の本来の姿を取り戻す』という発想である。炎症発症前の「常態」を再現する再生医療技術により、単なる再燃抑制を超えた組織構造と機能の回復を期待したい。(Vision 1)

再燃の抑制ではなく、腸の本来の姿を取り戻す

そして、代謝機能障害関連脂肪性肝疾患（MASLD/MASH）の患者数も急激に増加する。世界的には 2045 年の MASLD 罹患率は 2021 年と比較すると 56% 増加し（593/10 万人 2021 年 vs 928/10 万人 2045 年）⁴⁹、本邦では 2040 年には人口の約半数が MASLD に罹患するという予想も

ある⁵⁰。日常生活における継続的な管理が重要であるにもかかわらず、進行するまで発見されない例も多く早期の発見・介入が必要である。MASLD/MASH は日常生活習慣と強く関連し、継続的な管理が重要である。そこで、「いつでもどこでも“肝”ドック」を合言葉に、ウェアラブルデバイスと生成 AI などを活用した常時モニタリングと介入が可能な医療機器開発を期待する。単なるモニタリングだけでなく、生体内で機能する医療機器の開発により、医療機関での断片的な介入から、日常生活における継続的なケアへと移行し、時間的・空間的制約を超えた双方向の医療を期待する。(Vision 3)

いつでもどこでも“肝”ドック

2. 2050 年に求められる当該疾患領域の医療技術

技術①：消化器がん早期診断・精密治療統合プラットフォーム

消化器癌では早期発見が予後を決する重要因子であるが、現状の内視鏡検査ではヒューマンエラーがあり病変の見落としや、誤診による過剰な手術治療を行っているケースもある。例えば大腸ポリープの 26% が見逃され⁵¹、約 61% の早期癌が癌として認識されず、良性腫瘍と誤診されている⁵²。これらの課題を克服すべく、2050 年に向けて、AI 画像解析だけでなく、分子イメージング技術などを統合した超高精度診断システムの開発が必要である。例えば、がん特異的分子プローブを用いた蛍光内視鏡により超早期発見を可能にし、同時に AI がリアルタイムで画像解析を行い、癌・非癌の診断、浸潤深度、転移リスクを瞬時に評価するシステムの開発が望まれる。さらに、診断と同時に光線力学療法などの非侵襲的治療を自動制御により実施することで、診断から治療まで一連の過程を統合的に管理するような低侵襲かつ高度に管理された診断治療プラットフォームを構築する。(Action2: プラットフォーム医療技術)

技術②：消化器内視鏡ロボット汎用プラットフォーム

内視鏡検査・治療や腹腔鏡手術、ロボット支援下手術は消化器疾患診療の中核技術であるが、術者のトレーニングが必要で、地域格差や医師不足の影響を受けやすい。2050 年の高齢社会、途上国を含めた医療の地域格差などの課題を解決するため、軟性内視鏡、硬性内視鏡を統合した汎用ロボット治療プラットフォームの開発が必要である。このシステムでは、柔軟性と操作性を両立したロボットアームが内視鏡を制御し、精密な検査・治療を可能にする。例えば上部・大腸内視鏡では AI による画像認

識技術により病変の自動検出と生検を実行する。さらに、5G/6G 通信技術を活用した遠隔操作機能により、現地に修練医がいる状況下で専門医が遠隔地から高度な内視鏡治療を提供する。(Action2:プラットフォーム医療技術)

技術③：現場適応型大腸癌スクリーニングシステム

大腸癌は 2050 年の本邦において、最多の癌種となることが見込まれる¹。『大腸癌を制さずして、癌は克服できない』といっても過言ではない。一方大腸癌はスクリーニングによる罹患抑制効果は確実であり、便潜血による大腸癌スクリーニングは 33%の大腸癌死亡を抑制し⁵³、大腸内視鏡は 53%の死亡を減らすとされる⁵⁴。本邦では便潜血検査が標準であるが、その受検率は先進国の中でも低く⁵⁵、受検率向上が切望されている。検診の受診を促す、受診率向上アプリケーションの開発・普及が必要である。一方でより非侵襲的な検診技術の開発普及により、受検率向上を図ることも重要である。唾液や尿中のマイクロ RNA 解析による非侵襲的ながん検出技術と、AI によるリスク層別化アルゴリズムを組み合わせた次世代のスクリーニングプログラムの確立・有効性の検証が必要である。また低侵襲検査であるカプセル内視鏡の機能拡張も期待される。具体的には、生検機能や微小病変のポリープ切除機能である。AI が病変を検出した場合、体外からの磁力コントロールによりその場に自動的に停滞し⁵⁶、生検、治療を行う。生検検体については、カプセル内視鏡内で蛍光分光法によるスペクトル解析を行い腫瘍・非腫瘍の鑑別を行いその場で病理診断に迫る診断を得られる⁵⁷。病理診断が不要な低悪性度の微小な大腸ポリープについては、カプセル内視鏡下に切除を行いスクリーニングから治療までを一つのプラットフォームで完遂することにより、患者受容性を高める。患者の年齢、既往歴、家族歴、生活習慣データから個別リスクを算出し、高リスク群には精密検査を、低リスク群には経過観察を推奨する個別化スクリーニング戦略を提示することによって、医療資源を効率よく活用する。(Action3：現場に応じた適応型医療技術)



技術④：光源内蔵使い捨て生分解性内視鏡システム

内視鏡検査では高額な機器と複雑な洗浄・消毒工程が必要であり、感染対策の観点からも課題がある。使い捨て型の内視鏡は、これらの問題を解決することが期待されており、既に製品化されたものもある⁵⁸。しかしながら、これらの内視鏡システムは一定程度のサイズの光源装置を必要とすることが課

題である。2050年にはさらに一歩進み、生分解性プラスチックとマイクロエレクトロニクス技術を組み合わせ、十分な画質を確保しながら使い捨て可能な超低コスト内視鏡を実現したい。光源装置を内視鏡そのものに内蔵し、画像データは無線通信でタブレット端末に送信され、さらにAIによる診断支援機能により、専門医でなくても基本的なスクリーニング検査が実施可能となる。発展途上国や災害医療現場での消化器疾患スクリーニングを大幅に普及させることができる。(Action4：持続可能な簡素で低負荷な医療技術)

技術⑤：消化器疾患横断的 AI 診断支援システム

消化器疾患の診断には、内科、外科、病理、放射線科など複数の専門領域の知識統合が必要であるが、現状では各科が独立して診療を行い、情報共有や連携に課題がある。2050年に向けて、すべての消化器関連専門科の知識を統合したマルチモーダル AI 診断支援システムの開発が求められる。このシステムでは、各専門領域のガイドラインや論文知識、症例データベースを大規模言語モデル (LLM) に学習させ、患者の症状、検査所見、画像診断結果を入力するだけで、内科的・外科的・病理学的観点から包括的な診断と治療戦略を提示する。従来の専門医一人一人では獲得することが難しかった、越境知の獲得を助ける。(Action5：専門知を統合する医療技術)

技術⑥：IBD 患者の常態を再現する組織工学技術と持続的高精度疾患活動モニタリング

IBD（炎症性腸疾患）は原因不明の慢性炎症疾患であり、腸管粘膜の破壊と機能障害が生じる。長期間の罹患により、腸管切除を要する例や慢性炎症をベースとした発癌をきたすこともあり根治的な治療が望まれている。2025年現在では各種の生物学的製剤や免疫調整剤により、疾患活動性のコントロールが可能になってきているが、治癒することはなく、絶えず疾患の再燃リスクにさらされる疾患である。オルガノイドなどの再生医療研究の発展も著しいが、発癌リスクもある。そこで、『再燃の抑制ではなく、腸の本来の姿を取り戻す』と発想から、治療薬の発展に加え幹細胞治療や人工的上皮シートなどの組織工学を応用した発癌リスクを排した腸管再生医療の開発を期待したい。(Action1：常態再現に向けた診断機器 / 治療機器)

また腸管内に持続的に滞留あるいは内視鏡的手術により植え込むことができる、微小モニターの開発も望まれる。これによって、内視鏡検査を行わずとも持続的に炎



症活動性が可能となりきめ細やかな疾患活動性モニタリングと迅速な治療介入が可能となる。さらには、腸内フローラの経時的な変化などをモニタリングすることにより、疾患の細分化、根治的な治療法の確立が期待される。(Action2：プラットフォーム医療技術)

技術⑦：MASLD 生活習慣統合管理システム Action6

MASLD/MASH では食事療法と運動療法が治療の中心であり、日常生活における継続的な管理が疾患の進行を左右する。しかし、現状では医療機関での定期的な診察のみでは十分な管理ができておらず、患者の自己管理に依存している部分が多い。この課題を解決する、「いつでもどこでも“肝”ドック」を実現する、日常生活に溶け込んだ管理システムの開発が必要である。皮膚埋込型



バイオセンサーチップやスマートコンタクトレンズが眼房水中の代謝産物測定により血糖値、インスリン抵抗性⁵⁹をリアルタイムで連続監視し代謝状態を評価する。さらに、呼気分析デバイスが呼気中のアンモニア濃度から肝機能を非侵襲的に測定し⁶⁰、スマートミラーが毎朝の身体スキャンで内臓脂肪分布と肝脂肪蓄積を3D画像化することにより、持続的なモニタリングを可能とする。2050年には専門医並みのChat型AIが医療においても導入されていると考えられ、患者は医療施設に受診することなくAIが日常の生活習慣指導を行う。患者あるいは未病の段階にあっても常時生活習慣をモニタリング是正し、MASLDの発症を低減させる。(Action6：地域・生活圏へ展開する医療技術)

3. 2035年(10年後)に確立しておきたいコアテクノロジー

AI・デジタルツイン／XAI（人工知能）

- ・医療特化型大規模言語モデル（LLM）の確立
- ・マルチモーダル医療データ統合 AI
- ・連合学習による医療データ共有技術

材料・デバイス技術

- ・体内埋込型マイクロセンサーチップ
- ・分子特異的蛍光プローブ

マイクロロボティクス&アクチュエータテクノロジー

- ・体内埋込型マイクロセンサーチップ
- ・軟性内視鏡自動制御技術
- ・自動生検実行システム
- ・3次元空間認識・ナビゲーション技術
- ・体外磁力制御による精密位置制御
- ・微小生検機能の実装
- ・カプセル内蛍光分光分析システム
- ・微小手術器具の格納・展開機構

低コスト&サステナビリティテクノロジー

- ・自然環境で分解するポリマー合成技術

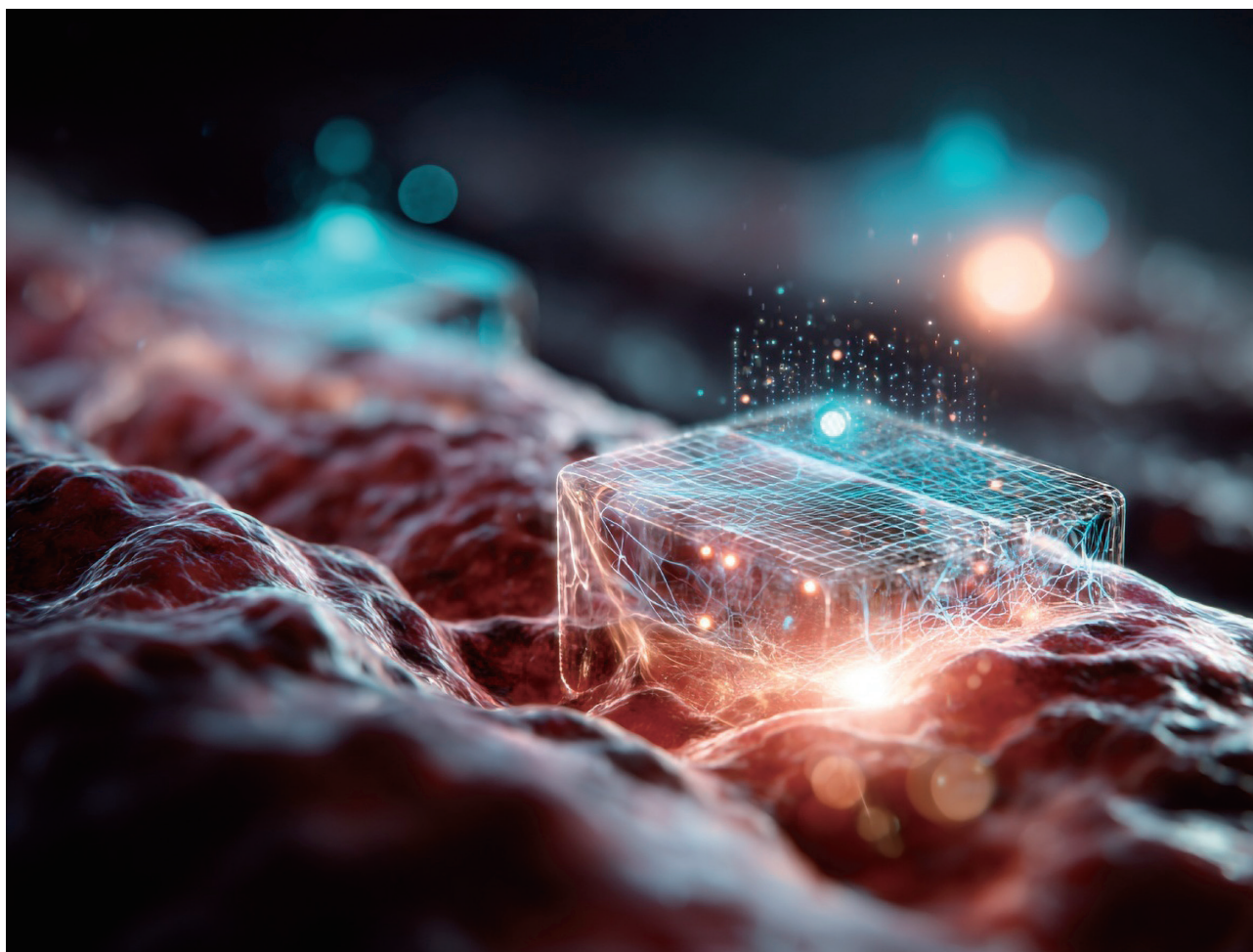
生体センシング&データ取得

- ・スマートコンタクトレンズ
- ・皮膚貼付型センサー
- ・スマートミラー
- ・持続的腸内細菌叢モニタリング技術
- ・炎症マーカー（サイトカイン、カルプロテクチン）の連続測定技術

- ・腸内 pH、酸素濃度、温度の多項目同時測定
- ・体外通信用アンテナの小型化技術

再生医療・治療技術

- ・人工上皮作製技術
- ・血管網付き腸管組織の作製
- ・生体適合性マトリックス材料の開発



※本挿絵は長嶋氏の協力を得て制作しました。

1. 対象とする疾患領域の 2050 年の状況

世界規模で見ると、人口増加と高齢化、生活習慣の変化により眼疾患による医療需要が今後急増することが予測されている⁶¹。WHO の報告によれば、現在少なくとも 22 億人が何らかの視覚障害を抱えており、そのうち 10 億人以上は予防可能または未治療の状態にある⁶¹。とりわけ高齢者と低中所得国で負担が大きく、2050 年には失明者が約 6,100 万人、視覚障害を有する人は約 8 億 9,500 万人に達するとの推計もある⁶²。高齢人口の増大に伴い、主要な加齢性眼疾患の患者数は軒並み増加し、加齢黄斑変性症（AMD）は世界人口の約 8.7% が罹患する極めて重要な疾患となり、2040 年には患者数が約 2 億 8800 万人に達すると推計されている⁶³。同様に、緑内障は依然として不可逆的失明の主要原因であり、40 歳以上の患者数が 2020 年の約 7,600 万人から 2040 年には 1 億 1,180 万人に増加する見通しである⁶⁴。さらに、糖尿病網膜症は成人の失明原因として増加が懸念され、2020 年時点で全世界に 1 億 300 万人の患者が存在し、2045 年には 1 億 6,050 万人に増加すると予測されている⁶⁵。これは糖尿病患者の爆発的増加によるもので、2050 年には世界の成人の 8 人に 1 人（約 8 億 5300 万人）が糖尿病を患う見通しである⁶⁶。加えて、近年問題視されている近視の蔓延も深刻であり、電子機器の多用や屋外活動不足など生活環境の影響で 2050 年には世界人口の約 50%（約 48 億人）が近視に、約 10%（9 億人超）が強度近視になると推定されている⁶⁷。強度近視に伴う網膜変性や黄斑変性（近視性黄斑変性）は今後新たな主要眼疾患として浮上し、高齢化と相まって中高年での失明リスク要因となることが懸念される。

日本に目を向けても、少子高齢化が進む 2050 年には総人口に占める高齢者の割合が約 4 割に達し、高齢者の白内障、緑内障、AMD など加齢関連疾患の患者層がさらに厚くなると考えられる。視力低下は高齢者の生活自立度に直結するため、視機能維持へのニーズは一層高まる。また糖尿病有病率の上昇に伴い中高年のみならず働き盛り世代での糖尿病網膜症も増加し、就労への影響や社会的損失が問題となる可能性がある。若年層では、生活環境のデジタル化により小児から青年期の近視発症率が上昇し、その結果将来的に強度近視者が増えることで中年期以降の網膜剥離や近視性網膜症のリスクが

2050 年には失明者が約 6,100 万人、視覚障害を有する人は約 8 億 9,500 万人に達するとの推計あり

近視がもたらす世代を超えた眼科疾患の新たなリスク

高まると予想される。これらにより、2050年の眼科医療需要は質・量ともに大幅な拡大が避けられない。例えば、白内障手術件数は2019年に世界で約2,900万件行われたが、2050年には毎年5,000万件に達すると推定されており⁶⁸、手術提供体制の拡充や術者の確保といった量的課題が顕在化する。

以上の背景から、2050年の眼科領域で特に注目すべきターゲット疾患としては、失明や重度視機能障害の主要因となる加齢黄斑変性症（AMD）、緑内障、糖尿病網膜症、そして新興する近視性網膜疾患が挙げられる。

まずAMDは高齢社会で患者数が大幅増加し社会的負担が大きいにも関わらず、萎縮型AMDなどアンメットメディカルニーズが残る疾患である。中心視力の不可逆的喪失をきたす萎縮型AMDに対する治療法開発や、病状が進行した患者の視機能を回復する再生医療技術の必要性は極めて高く、これは失明状態からの視力回復する技術が必要となる（Vision1）。また滲出型AMDに関しても、現行の抗VEGF療法は頻回の眼内注射と高額な医療費負担を伴い、医療資源への負荷が大きい。治療は存在するものの適切な頻度で届かないケースもある現状を踏まえると、より持続効果が高く費用対効果に優れた治療技術や、専門医が少ない地域でも治療を提供可能とするシステムが求められる（Vision2）。

次に緑内障は自覚症状なく進行する慢性疾患であり、患者数の多さに比して受診・治療率が低い問題がある。失明予防には早期発見と長期にわたる経過管理が要となるが、約半数の患者は適切な定期検査を受けられていないとの指摘もある。このような現状から、広範な住民へのスクリーニング網の構築や自宅・地域での継続的な眼圧・視野モニタリング技術が重要となる。（Vision2・Vision3）緑内障は薬物・手術による進行抑制は可能なものの、障害された視神経の機能回復は現在不可能であるため、将来的には視神経再生や保護を目指した技術、例えば神経再生治療や遺伝子治療による根治も求められる。（Vision1）

2050年の眼科医療需要は質・量ともに大幅な拡大が必要不可欠

糖尿病網膜症は上述の通り患者数が爆発的に増える疾患であり、成人期の失明原因第1位となって社会的・経済的インパクトが大きい。レーザー光凝固や硝子体手術、抗VEGF薬により多くの症例で失明を防げるにも関わらず、発展途上国や医療過疎地域では治療どころか検診すら行き届かず「ある

のに届かない医療」の典型となっている。したがって、安価で大量の患者をカバーできる網膜症スクリーニング技術（例：AI による自動診断）や遠隔診療ネットワークの整備が求められる（Vision2）。実際、近年ではプライマリケア診療所で眼科医不在でも網膜写真から網膜症を自動検出できる AI システムが実用化されており、今後さらなる普及が期待される。また、進行した増殖網膜症に対しても将来的には硝子体手術ロボットや薬物療法の進歩により低侵襲化・視力維持が図られる可能性がある。（Vision1）

最後に近視性網膜疾患（強度近視に伴う網膜変性や黄斑変性）は、2050 年にかけての強度近視者増加により新たな失明原因として無視できなくなる。現在、有効な治療法に限られる領域であり、網膜の萎縮・変性そのものを予防・修復する再生医療や、進行抑制のためのライフスタイル介入技術（例えば小児期からの屋外活動促進や低濃度アトロピン点眼の普及など）が求められる（Vision1）。同時に、強度近視はアジアを中心に患者急増が予測されるため、眼鏡・コンタクトレンズによる矯正や定期検診を含め地域レベルでのケア体制拡充も求められる（Vision2・Vision3）。

2. 2050 年に求められる当該疾患領域の医療技術

技術①：超早期網膜変性リアルタイム診断・治療統合システム

萎縮型加齢黄斑変性（AMD）や網膜色素変性症は、ごく初期の分子レベル異常から数年単位でゆっくり進行し、気付いた時には視機能の回復が難しい段階に至ることが多い。2050 年には、このタイムラグを“限りなくゼロ”に縮める統合デバイスが登場していると考えられる。装置は網膜の分子の様子を色ごとに瞬時に写し出す高性能カメラが組み込まれて、網膜細胞の代謝ストレスや酸化ダメージをリアルタイムに可視化する。取得した 4D 画像は即時解析され、異常シグナルが検出されると同時に、直径 20 μm 級のナノロボット群が硝子体腔の患部へ、薬剤や遺伝子ベクター、iPS 由来視細胞を精密投与するというような、診断から治療までを一続きのワークフローにまとめた「イメージング一体型治療システム」である。眼科医は遠隔で治療強度や投薬量を微調整する。こうしたシステムが普及すれば、失明リスクの高い患者も視機能を維持したまま社会生活を続けられる可能性が高まる。（Action1：常態再現にむけた診断機器 / 治療機器）

技術②：グローバル統合眼科クラウドプラットフォーム

世界各地の診療所・病院・在宅ケア端末・患者スマートデバイスをつなぎ、眼科に関するあらゆるデータを“ひとつのクラウド”に集約する汎用連携基盤である。診療現場で撮影された眼底 OCT や視野データ、さらにはスマートコンタクトから送信される眼圧・涙液バイオマーカーといった生活デー

タまで、秒単位でプラットフォームにアップロードされる。AI は数億件規模の症例を並行解析し、鑑別診断、重症度スコア、最適治療プロトコルを即座に返す。メーカーや医療機関が異なってもデータ互換性が保たれるオープン API 仕様を採用し、糖尿病管理や神経内科領域のプラットフォームとも相互連携することで、全身疾患の早期発見にも寄与する。グローバル統合眼科プラットフォームが標準インフラになれば、地理的・経済的格差による診療品質の違いはほぼ消失し、患者は居場所を問わず世界最高水準の眼科医療にアクセスできる。(Action2：プラットフォーム医療技術)



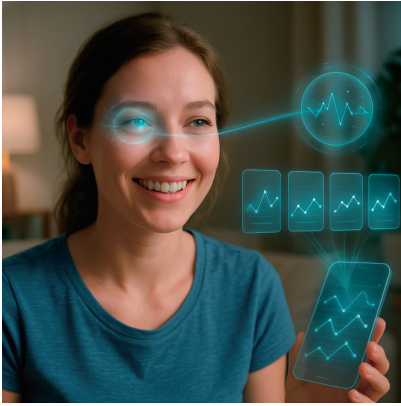
技術③：ポータブル統合眼科デバイス（診断＋レーザー初期治療）

開発途上国の農村や離島・被災地など、眼科専門医が常駐しない地域では“その場での初期治療”が失明防止としてとても大切である。ポータブル統合眼科デバイスは、手持ちサイズの大きさで広視野 OCT、眼底 AI 解析モジュール、選択的レーザー線維柱帯形成術 (SLT) ユニット、網膜光凝固レーザーなどを一体化した“診断＋治療”デバイスである。電源や通信も確保されている。救急隊員や看護師が患者の眼に装置をかざすだけで、AI が病変の有無と推奨レーザー設定を提示し、遠隔地の専門医がライブ映像を確認しながらレーザー治療を許可する。緑内障急性発作や糖尿病網膜症の増殖期変化といった失明リスクの高い状態を、都市部と同等のタイミングで治療できるため、地域格差由来の視覚障害を半減させる。(Action3：現場に応じた適応型医療技術)



技術④：機能特化型スマートコンタクト（眼圧・血糖センサー）

機能特化型スマートコンタクトはハイエンド OCT や高性能眼圧計を導入できない医療資源下でも要所を押さえたデータ取得を可能にするものである。1 枚数百円程度で量産できるレンズにセンサーと電極を埋め込み、24 時間装用中に眼圧と涙液血糖を 5 分毎に測定してスマートフォンへ転送する。



患者の端末は異常閾値を超える変動を検知すると自動で主治医とグローバル統合眼科プラットフォームにアラートを送信し、緑内障の薬剤追加や糖尿病コントロールの再評価を促す仕組みである。高度画像解析や通信機能をそぎ落とし“必要最低限”に特化することで、デバイス価格と消耗品コストを 1/10 に抑制する。世界中の一次医療現場や学校検診、企業健診まで適用範囲を広げ、早期介入の裾野を劇的に拡大する。(Action4：持続可能な簡素で低負荷な医療技術)

技術⑤：マルチオミクス× AI 臨床意思決定プラットフォーム

遺伝子変異、トランスクリプトーム、プロテオーム、メタボロームといった多層オミクス情報を、患者の生活データ・画像データと統合し、秒単位で治療方針を提示するものである。AI は最新論文・臨床試験レジストリ・薬剤安全性データベースを常時クロールし、ある患者の遺伝子型や薬物代謝プロファイルを入力すると、「最適薬剤リスト」「投与量」「予測有効率」「想定副作用」をエビデンス付きで可視化するもの。超早期の個別化治療が可能になる。(Action5：専門知を統合する医療技術)

技術⑥：日常浸透型眼科 IoT エコシステム

2050 年の眼科医療は病院の外で行われる。家庭、オフィス、道、車などの移動中にまで拡張している。家庭ではスマートミラーが毎朝の洗顔時に視力と瞳孔反応をチェックし、眼圧や涙液血糖を測るスマートコンタクト、視野変化を自動検出する AR グラスなどがある。これら眼科 IoT が取得したデータは、Edge AI で予備判定されたうえでグローバル統合眼科クラウドプラットフォームに同期される。地域薬局や学校・職場にはタブレット型検査端末が常設され、検査結果は本人の同意のもとクラウドに上がる。異常シグナルが重なればオンライン診療予約が自動発行され、ドローン配送で点眼薬が届く、あるいは自動運転モビリティが患者をクリニックへ迎えに行くなど、医療と生活が途切れなく接続された世界である。こうした仕組みにより、通院困難者や独居高齢者でも“意識しなくても眼科ケアを受ける”環境が整い、視覚障害による QOL 低下を大幅に防止できると期待される。(Action6：地域・生活圏へ展開する医療技術)

3. 2035年(10年後)に確立しておきたいコアテクノロジー

イメージング技術

- ・次世代高解像度イメージング技術(超高精細OCT、適応光学を用いた網膜細胞レベルのライブイメージングなど)

AI・デジタルツイン／XAI（人工知能）

- ・AI（人工知能）アルゴリズムとビッグデータ解析基盤（眼底画像・OCT・視野データ等の自動診断、リスク予測AI。エッジAIによるリアルタイム解析）

再生医療・治療技術

- ・再生医療・細胞治療技術（iPS細胞由来網膜色素上皮シート移植、網膜神経節細胞の再生、角膜内皮培養移植の確立など）
- ・遺伝子治療・ゲノム編集技術（網膜変性疾患に対するウイルスベクター／遺伝子編集治療。患者ごとのオーダーメイド遺伝子治療設計）
- ・低侵襲治療法とドラッグデリバリーシステム（長期間薬剤放出デバイス、経鼻・経眼投与による網膜薬物送達技術）

生体センシング&データ取得

- ・スマートデバイス・IoT技術（スマートコンタクトレンズやウェアラブルセンサーによる眼圧・生体情報モニタリング、家庭用検査デバイス）

マイクロロボティクス&アクチュエータテクノロジー

- ・ロボティクスと遠隔操作技術（手術用ロボットアームと遠隔制御プラットフォーム。遠隔診療のためのロボットアバター）

データ基盤・相互運用テクノロジー

- ・データ連携標準とセキュアな情報共有基盤（医療機器間インターフェースの標準化、ブロックチェーン等による安全な医療データ共有技術）

教育・シミュレーション技術

- ・教育・シミュレーション技術（VR/AR を活用した術者トレーニングシステム、デジタル患者モデルによる治療シミュレーション）

感覚器補助技術

- ・視覚補助・代替デバイス（網膜プロテーゼの高性能化、脳皮質インプラントなど視覚情報を代替経路で提供する技術）



※本挿絵は長嶋氏の協力を得て制作しました。

1. 対象とする疾患領域の 2050 年の状況

2050 年には世界人口は 100 億人に達すると予測されており⁶⁹、先進国における高齢化の進行に加え、インドやアフリカにおける人口増加が顕著となる。グローバルな疾病負荷（Burden of Disease）の様相も変化し⁷⁰、発展途上国においては公衆衛生の改善により感染症や新生児期の疾患の割合が減少し、代わって腰痛、アルツハイマー型認知症、慢性腎臓病など、発症後に長期にわたり共存が必要となる疾患の負荷が世界的に上昇することが予想されている。また、虚血性心疾患、脳卒中、糖尿病、慢性閉塞性肺疾患など、従来から高い疾病負荷を示している疾患も引き続き主要な課題であり続け、多くの人が、複数の疾病や死に至らない機能異常を抱え、共存して生きていく時代となる。これはますます高齢社会となる日本も同様である。

先進諸国においては生産年齢人口比率のさらなる低下が不可避となる。医療資源の効率的な活用のため疾病の予防と早期発見により重点が置かれるようになることに加えて、限られた医療専門人材リソースを「治療」へシフトさせる傾向が予想されることから、診断領域においては自動化に加えて、患者自身の日常との融合した診断形式が進むことが考えられる。都市構造の変化としては、過疎地域と人口集中地域の二分化が進み、多くの国において設置型の診断機器を過疎地域に投資しない・できない状況が訪れる。

このような人口構造や都市構造等の変化により、画像診断領域（もはや「画像」「診断」ではないかもしれないが）においては以下のような技術的・社会的ニーズが顕在化する。

複数の疾病や死に至らない機能異常を抱え、共存して生きていく時代

◆統合的患者モデリング

- ・個々の病名を患者に当てはめる手法ではなく、臓器横断的に、患者を一つの統合システムとして捉え、状態を解析する技術（Vision1：質の向上）
- ・「未病」（機能不全には至らないが健康状態から逸脱しつつある段階）をより早期かつ正確に捉え、発症や重症化を未然に防ぐ技術の確立（Vision1：質の向上）
- ・「後病」（機能不全と共に生活する段階）において、生産性損失を最小化するための状態診断およびモ

「治療」ヘシフトする限られた医療専門人材リソースと自動化され、患者自身の日常と融合する「診断」

ニタリング技術（Vision1：質の向上、Vision3：時間・空間の拡張）

- ・患者が自身の価値観等に基づき、身体機能状態の解釈（疾病の診断）と介入方法の選択を行うことをサポートする環境（Vision3：時間・空間の拡張）

◆効率化・自動化・均てん化

- ・診断機器へのアクセスが、地域の人口密度や患者の身体能力等の不均一性に影響されない環境の構築（Vision2：量の拡大、Vision3：時間・空間の拡張）
- ・異常の検出から介入までのTurn around timeの短縮（Vision2：量の拡大、Vision3：時間・空間の拡張）
- ・診断提供者の技能、知識、経験のばらつきが、地理的制約を超えたサポートにより均てん化され、グローバルに高精度な診断が提供される環境の構築（Vision1：質の向上、Vision2：量の拡大）

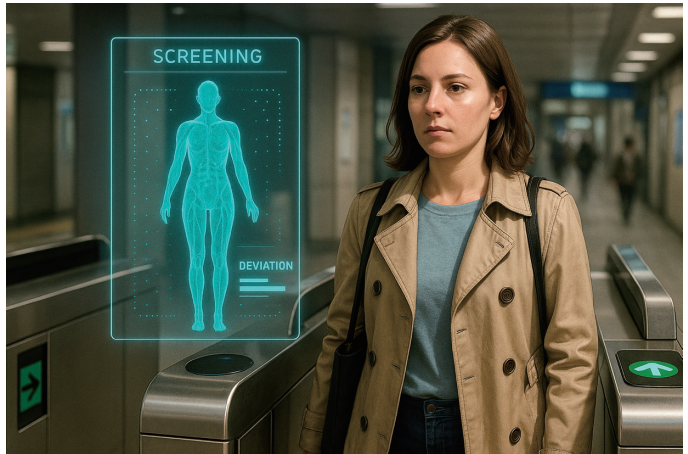
多くの国において設置型の診断機器を過疎地域に投資しない・できない状況を打破する「届ける技術」

2. 2050年に求められる当該疾患領域の医療技術

技術①：全身特徴量解析による理想身体状態からの逸脱定量化

CTやMRIといった画像診断機器は、これまで臓器の形態や血流、運動機能などの可視化を通じて診断や治療計画に貢献してきた。近年では、画像1ピクセル単位の組織情報から原子番号や組成を推定する技術、AIも活用したRadiomics解析が発展し、従来では困難であった数百～数千種類の特徴量（texture、形状、signal intensityなど）の統計的解析が可能となった。これにより、抽出した数値データの平均値に濃淡をつけて可視化した「画像の目視」ではなく、「数値による異常の定量化」に基づいた早期診断・重症化予測・治療反応評価が進んでいる。並行して、大量の正常画像情報を基に国際的な標準値としての臓器輪郭や人体モデルを定義する試みも進んでいる。現時点では静的な画像情報を対象とすることが多いが、今後は同一個体の経時変化や、歩行・バランス・握力などの運動機能測定データ、QOLと密接に関わる身体機能、職業活動や趣味の継続性といった生産性指標などの表出パターン等のような動的・統合的データが解析対象となると考えられる。

これらを踏まえて 2050 年には、全身の身体組織の組成や特徴量を統合的に解析し「理想的な身体状態（例：その人にとっての最適な運動能力・感覚能力等）」と、「現状とのズレ（逸脱）」を個別に定量化できるようになることが期待される。一部の核医学検査や Diffusion-weighted Whole body Imaging with Background body signal (DWIBS) では、



全身の代謝状態や炎症分布の可視化を既に実現しているが、今後は空間分解能・時間分解の向上によるより微細な組織異常の検出に加えて、何となく体調が悪いといった未病状態からの発症や機能低下の予測、後病状態における機能回復状況の個別評価と予後予測、各人のライフスタイルや価値観に基づいた「望ましい身体像」への最適介入ルートの提案に向けた拡張が期待される。(Action1：常態再現にむけた診断機器 / 治療機器)

技術②：統合型診断 AI プラットフォーム

高齢化が進む先進国では、限られた医療人材で診断精度と提供量を両立させる体制整備が急務となる。一方、専門医の育成が追いついていない発展途上国では、人口増加に伴う診断需要をいかにカバーするかが課題となる。これらを解決する鍵として、2050 年に向けては、一連の診断プロセスが標準化・集中化・自動化・遠隔化できる統合型 AI プラットフォームの整備が必須となる。

2025 年現在、AI による画像読影支援や遠隔診断の実用化はすでに進んでいるが、今後はその適用範囲が画像解析のみならず、診断の前段階から後段階までを一貫して支援・自動化する構造へと拡張される。たとえば CT 検査においては、緊急性や適切性の評価した上での機器アクセスの優先順位付け、機器パラメータ設定、プロトコルの選択、撮影の実施のための装置操作、病変の検出と分類、診断結果に基づく次段階医療へのナビゲーション提案まで、統合型 AI プラットフォームで実施され、医師はその機能を監視し、承認する役割に移行する。国や地域を超えた連携も常態化し、アフリカの地方都市で取得された CT 画像情報が、即座にプラットフォーム上で処理され、日本や欧州等の専門家の遠隔監修ののち、標準化された診断と処方提案等が現地の医療者または患者自身に提示されるといった使い方が期待される。

このような統合型診断 AI プラットフォームは、医療の質とアクセスを同時に向上させる基盤技術であ

り、医療資源の少ない地域への高度医療の展開、ならびに先進国における医療従事者負担の軽減に貢献するものと位置付けられる。(Action2：プラットフォーム医療技術 /Action5：専門知を統合する医療技術)

技術③：脱・据え置き型の診断モダリティ

従来の MRI 装置は超電導磁石を用いるため極低温環境を維持する必要があり、設置にはインフラ整備が前提となる。このため、医療機関内に固定設置する据え置き型の大型機器が主流であり、都市部の大規模医療機関に偏在してきた。日本は例外的に CT・MRI 装置の台数が人口当たりで世界最多クラスであるためアクセス性は高いが⁷¹、他の多くの国では装置の絶対数が少なく、地方部では検査待機期間の長期化や、長距離の患者搬送、移動が困難な患者に対してはそもそも検査が実施できない状況も発生しており、急性期疾患の迅速な対応や悪性腫瘍の早期発見の妨げとなっている。2050 年は人口の地理的集中化が進み、過疎地域に据え置き型の大型機器を設置するインセンティブがさらに下がる。

現在すでに、Portable CT や低磁場 Portable MRI⁷² など小型の可搬型装置が救急現場や在宅等で用いられ、AI による画像再構成技術の恩恵もあり、診断精度と可搬性の両立が現実のものとなりつつある。今後は既存医療機器の発展によるか、あるいは新たな革新的モダリティが出現するのかわからないが、社会的ニーズに対応するために、2050 年にはますます小型・移動型の全身診断機器の開発が進むことが予想される。

さらに、住民の生活圏において簡便に利用でき、建物や居住空間と一体化した「脱・病院」型のスクリーニング装置の登場も期待される。たとえば、空港に導入されているミリ波全身スキャナーにおいて体内の深部構造の可視化が可能になれば、「病院に行って検査を受ける」という従来の診断概念は再定義されることになる。将来的には、駅の改札など日常的な動線上で身体データを経時的に取得し、生活圏内で診断が完結するような新たな医療の姿も展望される。(Action3：現場に応じた適応型医療技術 /Action6：地域・生活圏へ展開する医療技術)



技術④：無侵襲診断

医療の本質は治療であり、診断行為については、身体への侵襲は限りなくゼロにするべきである。現在、

CT・MRI 検査いずれも病変の視認性を高めるために造影剤の静脈内注入を行っている。これは他の診療状況では類を見ない流速で薬液を注入するものであり、アレルギー反応、腎機能障害、まれに致死副反応も発生する⁷³。また、放射線感受性の高い小児においては X 線被ばくが発癌等のリスクが懸念され、また長時間静止状態を必要とする MRI 検査では、小児は鎮静を行うこととなり、鎮静行為にもまたリスクが伴う。

CT 装置は従来、X 線を可視光に変換し、その可視光をフォトダイオードによって電気信号に変換して画像化してきたが、近年、X 線のフォトンを直接電気信号に変換した画像を撮影する技術も発達し⁷⁴、これにより線量利用効率が高まり、被ばくの低減と診断精度向上、また造影剤減量につながっている。また、AI による再構成技術により MRI の撮影時間も短縮している。無侵襲性は、診断精度の確保と並び、2050 年医療の技術的倫理性を象徴する中心的要素となると考えられ、新たな造影剤の開発、超音波や赤外線、ミリ波など非電離放射線モダリティの高機能化など、無侵襲性を目指した多層的アプローチがさらに進むことが期待される。

(Action3：現場に応じた適応型医療技術 /Action4：持続可能な簡素で低負荷な医療技術)

技術⑤：持続可能で低環境負荷な診断技術

医療機器、とりわけ大型診断装置は、製造・輸送・設置・運用・廃棄の各段階で多大なエネルギーと資源を消費しており、病院の CO₂ 排出量の中でも画像診断部門の割合は極めて高い。加えて、検査関連資材（ディスポーザブルのシリンジやチューブ等）のプラスチック廃棄物の課題も大きい。さらに医療用資源も無限に存在するわけではなく、CT 造影剤に使われるヨードは一部の国でしか産出されず、2022 年には世界的な供給不足が生じ⁷⁵、診断業務に支障を来した。こうした背景から、2050 年には医療機器の持続可能性、資源制約への対応力、脱炭素化対



応は医療機器の持続可能性、資源制約への対応力、脱炭素化対応は避けて通れない。再生可能エネルギーでの駆動性、リユース・リサイクル可能なパーツモジュール化、省エネルギー構造、脱炭素製造プロセスなど、環境・資源への配慮を統合した診断機器設計・運用思想が求められる。

(Action3：現場に応じた適応型医療技術 /Action4：持続可能な簡素で低負荷な医療技術)

3. 2035年(10年後)に確立しておきたいコアテクノロジー

AI・デジタルツイン／XAI（人工知能）

- ・年齢・性別・生活背景等に応じた「理想的な身体状態」のモデルを構築するための大規模健常者データ解析技術（多変量バイオマーカー、統計的ベースライン）
- ・マルチモーダル医療データ統合（画像・テキスト・波形・検査値の統合処理）と病的状態進行への予測モデル
- ・緊急度や撮影優先度の判定→適切な検査選択→画像解析→診断→リスク分類→介入推奨までのシームレスな AI ワークフロープラットフォーム

生体センシング&データ取得

- ・微細な身体パターン変化（例：局所的な信号のゆらぎ、歩行周期の乱れ）を継続的かつ高精度に検出するセンシング技術と解析アルゴリズム
- ・常時モニタリング可能な非接触・無拘束型の計測技術とそれを地域や在宅で広く使える通信インフラ

データ基盤・相互運用テクノロジー

- ・多様な疾患における治療と診断の統合（Theranostics）
- ・海外拠点からのクラウドベース診断支援プラットフォーム

イメージング技術

- ・患者の状態に応じた自動でスキャンパラメータ最適化（線量、撮影角度、造影タイミング）および遠隔監視技術
- ・より小型で移動性の高い MRI 技術
- ・低電力・軽量・可搬型 MRI ／ CT の撮像ハードウェア
- ・小型画像機器用のノイズ抑制・高画質再構成アルゴリズム
- ・造影剤非使用での血流・代謝可視化技術
- ・自由運動下での撮影を可能とする高速スキャン技術
- ・生体組成・代謝解析が可能な診断技術
- ・X 線に代替する透視技術

- ・造影剤低減撮像技術
- ・代替造影剤（生分解性・天然由来）の開発と実用化

低エネルギー & ハーベスティング

- ・バッテリー駆動と長時間稼働のための電源技術

低コスト&サステナビリティテクノロジー

- ・建物に依存しないキャリブレーションや磁気遮蔽
- ・医療機器用リユース／リサイクル可能素材の標準化
- ・消費電力を抑えた画像処理技術とデバイス設計
- ・CO₂ 排出量の少ない機器製造プロセス開発



※本挿絵は長嶋氏の協力を得て制作しました。

4

医療技術の未来に向けて TOWARD THE FUTURE OF MEDICAL TECHNOLOGY



4.1 未来世代が描き出す 2050 年の医療技術

医療技術フォーサイトでは、2050 年の世界の状況を踏まえた医療、そしてその医療に応えるための医療技術とは何かという視点から、未来像を描き出すことを目指した。

2050 年には、人口構造の変化、新たな医療格差、都市構造の変化といった社会からの要請に加え、医療の知識構造の進化、疾患数の増加、人（技術・知識）とモノ（機器）の比重の変化など、医療そのものの前進も予想される。こうした大きな変化の流れの中には、数多くの「問い」が存在している。

私たちは本書を通じて、単なる技術の進化を描くのではなく、どのような課題が存在しているのかを正面から捉え、正しく恐れながらも、未来を明るく形づくるための取り組みとなるように努めた。

私たちは医療の現場で働く医師たちとの対話を起点とし、変化の兆しを読み解き、構想すべき未来像を問いとして抽出してきた。そうしたプロセスを経て浮かび上がってきたのが、3 つの Vision と 6 つの Action である。

3 つの Vision は、医療の質を向上させるための「質の軸」、医療の量を拡大するための「量の軸」、そして医療の時間・空間を拡張するための「拡張の軸」として位置づけられ、それぞれが異なる方向から未来の医療技術を照らし出している。そして、それらを支える 6 つの Action はいずれかの軸上に配置されるわけではなく、複数の Vision をまたぐ形で横断的に配置されることとなる。すなわち、2050 年の医療技術は単線的な進化ではなく、多様な状況と課題が複雑に交差する中での進化を求められているといえる。

すなわち、2050 年の医療技術は三軸で構成された立体構造の中において、単線的な進化ではなく、様は状況と課題が複雑に交差する中での進化を求められていることを示している。ここで描かれた 2050 年の医療技術は、単一の方角に進むものではなく、質・量・関係性を同時に問う重層的な Vision のもとで構想されている。こうした複雑で多様な世界に挑んでいくためには、単線的な未来予測は役に立たないばかりか、そもそも未来を正確に予測することは誰にもできないという認識のもと、多元的な問いを束ねる構想力と、それらを時代や社会の変容とともに変化させていく柔軟な適応力、現場とともに形づくっていく共創の姿勢が求められる。私たちはこの立体図「医療技術フォーサイト 2050」を、未来の医療をともに設計するための出発点として提示した。

すなわち、未来に対する「備え」として、個々人自らが考えるためのテンプレートとなりうるものである。

4.2 医療技術フォーサイト 2050 の将来

言い換えれば、本書に記した Vision や Action は、完成された未来像ではない。むしろ、読者一人ひとりとともに思考し、議論し、試行するための「開かれた問い」として提案するものである。

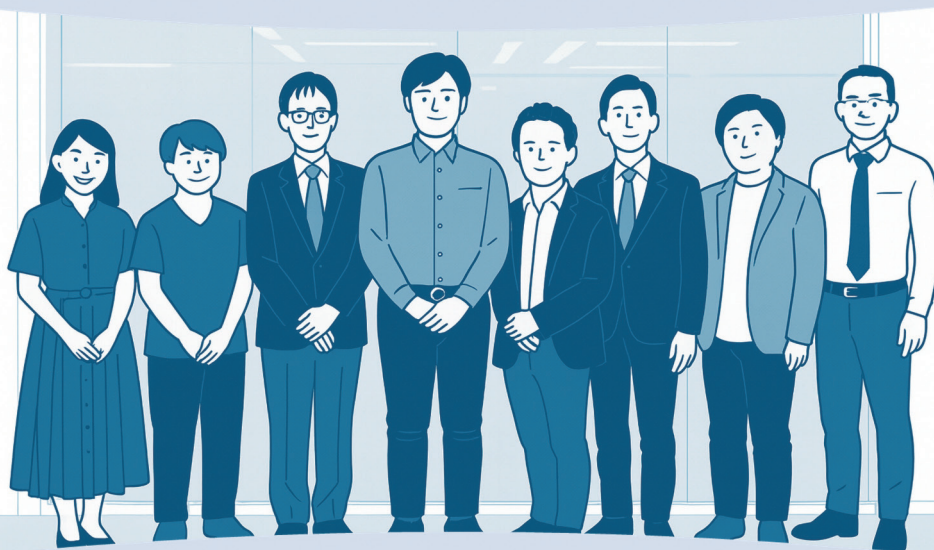
なお、本書にはまだ描き切れていない視点も多い。診療科の網羅性には限界があり、たとえば整形外科、形成外科、皮膚科、感染症、精神疾患などの領域は十分に検討できていない。また、プラネタリー

ヘルス（Planetary Health）といった新たな課題にも踏み込めていない。そして技術については、今後エンジニアとの対話によってさらに深められる論点が多く残されている。これらを社会実装につなげていくためには、行政との協働も不可欠である。

こうした背景を踏まえ、私たちは本書をひとつの出発点として、多様な疾患領域や立場から 2050 年に向けた医療技術の姿について、より広く積極的な議論が各所で展開されることを期待している。

「医療技術フォーサイト 2050」の取り組みを一過性のレポートで終わらせるのではなく、継続的な議論と共創の場として育てていきたいと考えている。未来の医療は、単独の専門家や組織だけでは描けない。医療者、研究者、技術者、行政、市民といった多様な立場が自分事として交わることでこそ、新たな視点が生まれ、社会に根ざした医療技術が形づくられていくはずである。

未来の医療技術を、ともに問い、ともに構想し、 ともに動いていく



今この瞬間こそが2050年の医療技術を形づくる始点
「医療技術フォーサイト2050」が、その一歩目となることを心から願っている



〈参考文献〉

第2章

1. Chen S, Cao Z, Prettnner K, Kuhn M, Yang J, Jiao L, et al. Estimates and projections of the global economic cost of 29 cancers in 204 countries and territories from 2020 to 2050. *JAMA Oncol.* 2023;9(4):465–472. doi:10.1001/jamaoncol.2022.7826
2. Zhang S, Ren J, Chai R, Yuan S, Hao Y. Global burden of low vision and blindness due to age-related macular degeneration from 1990 to 2021 and projections for 2050. *BMC Public Health.* 2024;24(1):3510. doi:10.1186/s12889-024-21047-x
3. Kazi DS, Elkind MSV, Deutsch A, Dowd WN, Heidenreich P, Khavjou O, et al. Forecasting the economic burden of cardiovascular disease and stroke in the United States through 2050: a presidential advisory from the American Heart Association. *Circulation.* 2024;150(4):e89–e101. doi:10.1161/CIR.0000000000001258
4. Joynt Maddox KE, Elkind MSV, Aparicio HJ, Commodore-Mensah Y, de Ferranti SD, Dowd WN, et al. Forecasting the burden of cardiovascular disease and stroke in the United States through 2050—prevalence of risk factors and disease: a presidential advisory from the American Heart Association. *Circulation.* 2024;150(4):e65–e88. doi:10.1161/CIR.0000000000001256
5. GBD 2021 Antimicrobial Resistance Collaborators. Global burden of bacterial antimicrobial resistance 1990–2021: a systematic analysis with forecasts to 2050. *Lancet.* 2024;404(10459):1199–1226. doi:10.1016/S0140-6736(24)01867-1
6. Feigin VL, Owolabi MO; World Stroke Organization–Lancet Neurology Commission Stroke Collaboration Group. Pragmatic solutions to reduce the global burden of stroke: a World Stroke Organization–Lancet Neurology Commission. *Lancet Neurol.* 2023;22(12):1160–1206. doi:10.1016/S1474-4422(23)00277-6
7. Cheng Y, Lin Y, Shi H, Cheng M, Zhang B, Liu X, et al. Projections of the stroke burden at the global, regional, and national levels up to 2050 based on the Global Burden of Disease Study 2021. *J Am Heart Assoc.* 2024;13(23):e036142. doi:10.1161/JAHA.124.036142
8. Pandit JJ. “The future ain’t what it used to be” : anesthesia research, practice, and management in 2050. *Anesth Analg.* 2024;138(2):233–235. doi:10.1213/ANE.0000000000006844
9. Kuo FH, Tudor BH, Gray GM, Ahumada LM, Rehman MA, Watkins SC. Precision anesthesia in 2050. *Anesth Analg.* 2024;138(2):326–336. doi:10.1213/ANE.0000000000006688
10. Hemmerling TM, Jeffries SD. Robotic anesthesia: a vision for 2050. *Anesth Analg.* 2024;138(2):239–251. doi:10.1213/ANE.0000000000006835
11. Hu JX, Zhao CF, Chen WB, Liu QC, Li QW, Lin YY, et al. Pancreatic cancer: a review of epidemiology, trend, and risk factors. *World J Gastroenterol.* 2021;27(27):4298–4321. doi:10.3748/wjg.v27.i27.4298
12. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World population prospects 2024: summary of results – ten key messages. https://population.un.org/wpp/assets/Files/WPP2024_Key-Messages.pdf. Accessed July 11, 2025.
13. World Health Organization. World report on social determinants of health equity. <https://www.who.int/teams/social-determinants-of-health/equity-and-health/world-report-on-social-determinants-of-health-equity>. Accessed July 11, 2025.
14. Jamison DT, Summers LH, Chang AY, Karlsson O, Mao W, Norheim OF, et al. Global health 2050: the path to halving premature death by mid-century. *Lancet.* 2024;404(10462):1561–1614. doi:10.1016/S0140-6736(24)01439-9
15. 厚生労働省. 新たな地域医療構想を通じて目指すべき医療について. 第7回新たな地域医療構想等に関する検討会. 2024;25,26,94.
16. United Nations. System-wide strategy on sustainable urban development (CEB/2019/1/Add.5). New York: United Nations; 2019.
17. United Nations General Assembly. Resolution A/RES/79/214. New York: United Nations; 2024.

18. Guzzo D, Carvalho MM, Balkenende AR. Circular business models in the medical device industry: paths towards sustainable healthcare. *Resour Conserv Recycl.* 2021;168:105253. doi:10.1016/j.resconrec.2020.105253
19. 厚生労働省政策統括官(統計・情報システム管理、労使関係担当). 令和7年度版 ICD の ABC, 2025.
20. Joshi A, Zhang L, Pedersen HK, et al. Proteomic signatures improve risk prediction for common and rare diseases. *Nat Med.* 2024;30(4):868–878. doi:10.1038/s41591-024-02828-y
21. Peel M. Protein project uses AI to boost disease treatment. *Financial Times*. Published June 23, 2024. Accessed July 11, 2025. <https://www.ft.com/content/cc2ec1ae-f514-427b-94af-b865a28df7c3>
22. Insel TR. Digital phenotyping: technology for a new science of behavior. *JAMA.* 2017;318(13):1215–1216. doi:10.1001/jama.2017.11295
23. Vasudevan S, Saha A, Tarver ME, et al. Digital biomarkers: convergence of digital health technologies and biomarkers. *NPJ Digit Med.* 2022;5:36. doi:10.1038/s41746-022-00583-z
24. Rampton V, Böhmer M, Winkler A. Medical technologies past and present: how history helps to understand the digital era. *J Med Humanit.* 2022;43(2):343–364. doi:10.1007/s10912-021-09699-x

第3章

25. Kazi DS, Elkind MSV, Deutsch A, et al. Forecasting the economic burden of cardiovascular disease and stroke in the United States through 2050: a presidential advisory from the American Heart Association. *Circulation.* 2024;150(4):e89–e101. doi:10.1161/CIR.0000000000001258
26. Okura Y, Ramadan MM, Ohno Y, et al. Impending epidemic: future projection of heart failure in Japan to the year 2055. *Circ J.* 2008;72(3):489–491. doi:10.1253/circj.72.489
27. Yasuda S, Miyamoto Y, Ogawa H. Current status of cardiovascular medicine in the aging society of Japan. *Circulation.* 2018;138(10):965–967. doi:10.1161/CIRCULATIONAHA.118.035858
28. Floras JS, Ponikowski P. The sympathetic/parasympathetic imbalance in heart failure with reduced ejection fraction. *Eur Heart J.* 2015;36:1974–1982b.
29. Carey RM, Sakhuja S, Calhoun DA, et al. Prevalence of apparent treatment-resistant hypertension in the United States. *Hypertension.* 2019;73:424–431.
30. Shimokawa H, Miura M, Nochioka K, Sakata Y. Heart failure as a general pandemic in Asia. *Eur J Heart Fail.* 2015;17:884–892.
31. Nakata J, Yamamoto T, Saku K, et al. Mechanical circulatory support in cardiogenic shock. *J Intensive Care.* 2023;11:64.
32. Lippi G, Sanchis-Gomar F, Cervellin G. Global epidemiology of atrial fibrillation: An increasing epidemic and public health challenge. *Int J Stroke.* 2021;16:217–221.
33. Gibbons CH, Schmidt P, Biaggioni I, et al. The recommendations of a consensus panel for the screening, diagnosis, and treatment of neurogenic orthostatic hypotension and associated supine hypertension. *J Neurol.* 2017;264:1567–1582.
34. Cluett JL, Blazek O, Brown AL, et al. Renal denervation for the treatment of hypertension: a scientific statement from the American Heart Association. *Hypertension.* 2024;81:e135–e148.
35. Schmidt R, Rodrigues GC. Safety and efficacy of baroreflex activation therapy for heart failure with reduced ejection fraction: a rapid systematic review. *ESC Heart Fail.* 2020;7:3–14.
36. Spiering W, Williams B, Van der Heyden J, et al. Endovascular baroreflex amplification for resistant hypertension: a safety and proof-of-principle clinical study. *Lancet.* 2017;390:2655–2661.
37. Neuzil P, Merkely B, Erglis A, et al. Pacemaker-mediated programmable hypertension control therapy. *J Am Heart Assoc.* 2017;6:e006974. doi:10.1161/JAHA.117.006974
38. Ardell JL, Andresen MC, Armour JA, et al. Translational neurocardiology: preclinical models and cardioneural integrative aspects. *J Physiol.* 2016;594:3877–3909.
39. Gentile F, Giannoni A, Navari A, et al. Acute right-sided transcutaneous vagus nerve stimulation improves cardio-vagal baroreflex gain in patients with chronic heart failure. *Clin Auton Res.* 2025;35:75–85.
40. Feigin VL, Owolabi MO. Pragmatic solutions to reduce the global burden of stroke: a World Stroke Organization-Lancet Neurology Commission. *Lancet Neurol.* 2023;22(12):1160–1206. doi:10.1016/

S1474-4422(23)00277-6

41. Cheng Y, Lin Y, Shi H, et al. Projections of the stroke burden at the global, regional, and national levels up to 2050 based on the Global Burden of Disease Study 2021. *J Am Heart Assoc.* 2024;13(23):e036142. doi:10.1161/JAHA.124.036142
42. Burhan E, Liu K, Marwali EM, Kartasasmita CB, Reniarti L, Yudhawati R, et al. Characteristics and outcomes of patients with severe COVID-19 in Indonesia: lessons from the first wave. *PLoS One.* 2023;18(9):e0290964. doi:10.1371/journal.pone.0290964
43. Michard F, Mulder MP, Gonzalez F, Slama M, Monnet X. AI for the hemodynamic assessment of critically ill and surgical patients: focus on clinical applications. *Ann Intensive Care.* 2025;15:26. doi:10.1186/s13613-025-01448-w
44. van de Sande D, van Genderen ME, Huiskens J, Gommers D, van Bommel J. Moving from bytes to bedside: a systematic review on the use of artificial intelligence in the intensive care unit. *Intensive Care Med.* 2021;47(7):750–760. doi:10.1007/s00134-021-06446-7
45. Wijnberge M, Geerts BF, Hol L, et al. Effect of a machine learning-derived early warning system for intraoperative hypotension vs standard care on depth and duration of intraoperative hypotension during elective noncardiac surgery: the HYPE randomized clinical trial. *JAMA.* 2020;323(11):1052–1060. doi:10.1001/jama.2020.0592
46. Morgan E, Arnold M, Gini A, et al. Global burden of colorectal cancer in 2020 and 2040: incidence and mortality estimates from GLOBOCAN. *Gut.* 2023;72(2):338–344. doi:10.1136/gutjnl-2022-327736
47. Sung H, Siegel RL, Rosenberg PS, Jemal A. Emerging cancer trends among young adults in the USA: analysis of a population-based cancer registry. *Lancet Public Health.* 2019;4(3):e137–e147. doi:10.1016/S2468-2667(18)30267-6
48. Zhou JL, Bao JC, Liao XY, et al. Trends and projections of inflammatory bowel disease at the global, regional and national levels, 1990–2050: a Bayesian age-period-cohort modeling study. *BMC Public Health.* 2023;23(1):2507. doi:10.1186/s12889-023-17431-8
49. Kan C, Zhang K, Wang Y, et al. Global burden and future trends of metabolic dysfunction-associated steatotic liver disease: 1990–2021 to 2045. *Ann Hepatol.* 2025;30(2):101898. doi:10.1016/j.aohep.2025.101898
50. Ito T, Ishigami M, Zou B, et al. The epidemiology of NAFLD and lean NAFLD in Japan: a meta-analysis with individual and forecasting analysis, 1995–2040. *Hepatol Int.* 2021;15(2):366–379. doi:10.1007/s12072-021-10143-4
51. van Rijn JC, Reitsma JB, Stoker J, et al. Polyp miss rate determined by tandem colonoscopy: a systematic review. *Am J Gastroenterol.* 2006;101(2):343–350. doi:10.1111/j.1572-0241.2006.00390.x
52. Vleugels JLA, Koens L, Dijkgraaf MGW, et al; DISCOUNT study group. Suboptimal endoscopic cancer recognition in colorectal lesions in a national bowel screening programme. *Gut.* 2020;69(6):977–980. doi:10.1136/gutjnl-2018-316882
53. Mandel JS, Bond JH, Church TR, et al. Reducing mortality from colorectal cancer by screening for fecal occult blood. Minnesota Colon Cancer Control Study. *N Engl J Med.* 1993;328(19):1365–1371. doi:10.1056/NEJM199305133281901
54. Zauber AG, Winawer SJ, O'Brien MJ, et al. Colonoscopic polypectomy and long-term prevention of colorectal-cancer deaths. *N Engl J Med.* 2012;366(8):687–696. doi:10.1056/NEJMoa1100370
55. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). OECD.Stat. Accessed July 10, 2025. <https://stats.oecd.org/>
56. Jiang X, Qian YY, Liu X, et al. Impact of magnetic steering on gastric transit time of a capsule endoscopy (with video). *Gastrointest Endosc.* 2018;88(4):746–754. doi:10.1016/j.gie.2018.06.031
57. Rath T, Tontini GE, Vieth M, Nägel A, Neurath MF, Neumann H. In vivo real-time assessment of colorectal polyp histology using an optical biopsy forceps system based on laser-induced fluorescence spectroscopy. *Endoscopy.* 2016;48(6):557–562. doi:10.1055/s-0042-102251
58. Zanganeh M, Jiang Y, Brown A, et al; SUMU-Endo project group. Single-use versus multiple-use

- accessories in gastrointestinal endoscopy: a systematic review of economic evaluations. *BMJ Open Gastroenterol.* 2025;12(1):e001712. doi:10.1136/bmjgast-2024-001712
59. Liu S, Shen Z, Deng L, Liu G. Smartphone assisted portable biochip for non-invasive simultaneous monitoring of glucose and insulin towards precise diagnosis of prediabetes/diabetes. *Biosens Bioelectron.* 2022;209:114251. doi:10.1016/j.bios.2022.114251
 60. Rath RJ, Herrington JO, Adeel M, et al. Ammonia detection: a pathway towards potential point-of-care diagnostics. *Biosens Bioelectron.* 2024;251:116100. doi:10.1016/j.bios.2024.116100
 61. World Health Organization. World Report on Vision. Geneva: World Health Organization; 2019. Accessed July 11, 2025. <https://www.who.int/docs/default-source/documents/publications/world-vision-report-accessible.pdf>
 62. Burton MJ, Ramke J, Marques AP, et al. The Lancet Global Health Commission on Global Eye Health: vision beyond 2020. *Lancet Glob Health.* 2021;9(4):e489–e551. doi:10.1016/S2214-109X(20)30488-5
 63. Wang P, Wang J, Ma J, Jin G, Guan X. The association between age-related macular degeneration and the risk of mortality. *Biomed Res Int.* 2017;2017:3489603. doi:10.1155/2017/3489603
 64. Tham YC, Li X, Wong TY, Quigley HA, Aung T, Cheng CY. Global prevalence of glaucoma and projections of glaucoma burden through 2040: a systematic review and meta-analysis. *Ophthalmology.* 2014;121(11):2081–2090. doi:10.1016/j.ophtha.2014.05.013
 65. Teo ZL, Tham YC, Yu M, et al. Global prevalence of diabetic retinopathy and projection of burden through 2045: systematic review and meta-analysis. *Ophthalmology.* 2021;128(11):1580–1591. doi:10.1016/j.ophtha.2021.04.027
 66. International Diabetes Federation. Diabetes facts & figures. Accessed July 11, 2025. <https://idf.org/about-diabetes/diabetes-facts-figures/>
 67. Holden BA, Fricke TR, Wilson DA, et al. Global prevalence of myopia and high myopia and temporal trends from 2000 through 2050. *Ophthalmology.* 2016;123(5):1036–1042. doi:10.1016/j.ophtha.2016.01.006
 68. American Academy of Ophthalmology. The environmental sustainability of cataract surgery. EyeWiki. Accessed July 11, 2025. https://eyewiki.org/The_Environmental_Sustainability_of_Cataract_Surgery
 69. United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Population Prospects. Accessed July 11, 2025. <https://population.un.org/wpp/>
 70. Institute for Health Metrics and Evaluation. Forecasts of disease burden through 2050. Accessed July 11, 2025. <https://www.healthdata.org/research-analysis/library/forecasts-disease-burden-through-2050>
 71. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). OECD Data Explorer. Accessed July 11, 2025. <https://data-explorer.oecd.org/>
 72. Mazurek MH, Cahn BA, Yuen MM, et al. Portable, bedside, low-field magnetic resonance imaging for evaluation of intracerebral hemorrhage. *Nat Commun.* 2021;12(1):5119. doi:10.1038/s41467-021-25441-6
 73. Andreucci M, Solomon R, Tasanarong A. Side effects of radiographic contrast media: pathogenesis, risk factors, and prevention. *Biomed Res Int.* 2014;2014:741018. doi:10.1155/2014/741018
 74. Rajendran K, Petersilka M, Henning A, Shanblatt ER, Schmidt B, Flohr TG, et al. First clinical photon-counting detector CT system: technical evaluation. *Radiology.* 2022;303(1):130–138. doi:10.1148/radiol.212579
 75. Wang CL, Asch D, Cavallo J, Dillman JR, Ellis JH, Forbes-Amrhein MM, et al. Statement from the ACR Committee on Drugs and Contrast Media on the intravenous iodinated contrast media shortage. *J Am Coll Radiol.* 2022;19(7):834–835. doi:10.1016/j.jacr.2022.05.006

