

バイオ・ヘルスケア分野の技術的動向について

大阪大学 大学院医学系研究科 器官システム創生学
東京科学大学 総合研究院 ヒト生物学研究ユニット
横浜市立大学 コミュニケーション・デザイン・センター
シンシナティ小児病院 幹細胞・オルガノイド医療研究センター

武部貴則 MD PhD

謝辞：谷内江望氏、川上英良氏にも個人的にご意見をいただきました。

人口・資源の縮小時代：日本の“科学技術資源”を駆使した魅力的なサイエンスが必要

日本の強み・特色	具体データ (例)	主な価値・意義
海洋生物資源 (生物多様性)	日本近海確認種 ~33,600種 (世界 海洋種の14.6%) 未記載種含め推定 ~155,000種	学術・産業: 新種発見、比較ゲノム研究、 創薬素材 (天然化合物) 環境: 生態系サービス、 観光資源 (ダイビング等) 文化: 水産物利用、食文化の基盤
海洋鉱物資源 (レアアース等)	南鳥島沖レアアース泥: Dy約57年分, Eu47年分, 他合計 1,600万トン超	経済: ハイテク産業の必須素材、 自給による供給安定 安全保障: 輸入依存脱却、中国リスク低減 技術: 深海探査・採掘技術開発の牽引
森林資源 (緑の資源)	森林率 ~66% 森林面積2500万ha 樹種数1000種以上 人工林の64%が樹 齢50年以上	環境: CO ₂ 吸収源、土砂災害防止、 水源涵養 経済: 木材供給 (国産材活用余地大)、 林業振興 健康福祉: 森林浴によるストレス低減、 都市緑化による快適性向上

◆ 社会課題

- 人口減少：労働力・消費市場の縮小、イノベーション担い手不足
- 資源制約：化石燃料・レアアース等、海外依存度が高く脆弱な供給
- 経済縮小リスク：国際競争力低下、税収減による社会保障の圧

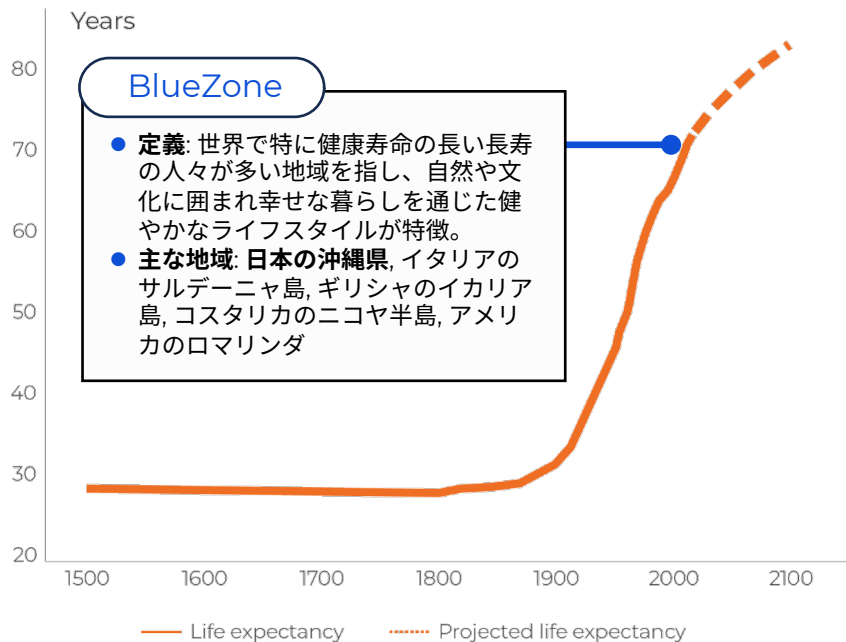
◆ 生き残りの方向性

- 科学技術資源やその活用法の開拓 (**発見**)
 - ・ 海洋・森林・微生物資源の探索
 - ・ 比較ゲノム・天然物化学ライブラリによる新知見創出
 - ・ 量子半導体、デジタル通信、環境エネルギーなど基盤技術の開拓
- 知的財産の確保 (**発明**)
 - ・ 発見した知見を国際的に保護・標準化
 - ・ 技術シーズを特許・ライセンスで囲い込み、国家資産化
 - ・ データ (生物多様性・環境・医療) を戦略的に保護し活用
- 若手科学者を刺激 (**育成**)
 - ・ 感動やワクワクを生む科学テーマ (例 自然への畏怖や好奇, Awe)

未開拓の天然資源を駆使したリソースの開拓と
人々を魅了する科学を体系化

→ 誰もが自分ごと化できる「社会課題」との紐づけが重要

人生100年時代：日本は、戦後急激に寿命延伸を達成し、世界が現在追従！



<https://humanprogress.org/trends/life-expectancy-is-rising/>

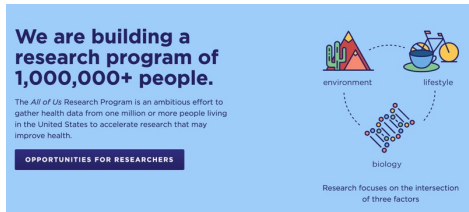
- **超高齢社会という現実**：我が国の高齢化率は令和5年時点で29.1%に達しており、すでに国民の約3.4人に1人が65歳以上。この傾向は加速し、2070年には高齢化率が38.7%に達し、国民の2.6人に1人が65歳以上、約4人に1人が75歳以上という、人類が経験したことのない社会構造が到来すると推計。
- **持続不可能な社会保障コスト**：令和4年度の国民医療費はすでに46.7兆円に達し、このままでは2040年度には約79兆円にまで膨張すると予測。特に、医療・介護給付費の伸びは著しく、現在の制度の延長線上では、国家財政の持続可能性そのものが脅かされることは明白。
- **失われる「健康な時間」**：平均寿命の延伸は達成されたものの、健康寿命との間には、依然として大きな乖離が存在。2022年のデータでは、この「不健康な期間」は男性で8.49年、女性で11.63年にも及ぶ。

社会レベル（“個の集合体”）で、
健康な老化を実現する戦略が必須かつ必然

From Traditional Medicine, to My Medicine — 平均化から個別化へ

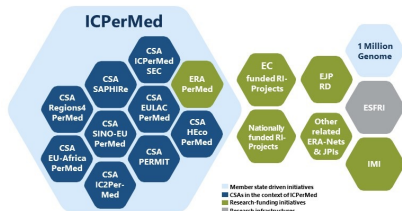
2015 オバマ大統領
Precision Medicine Initiative

All of US（アメリカ）、その後ARPA-H



UKBiobank (UK)

ICPerMed (EU)



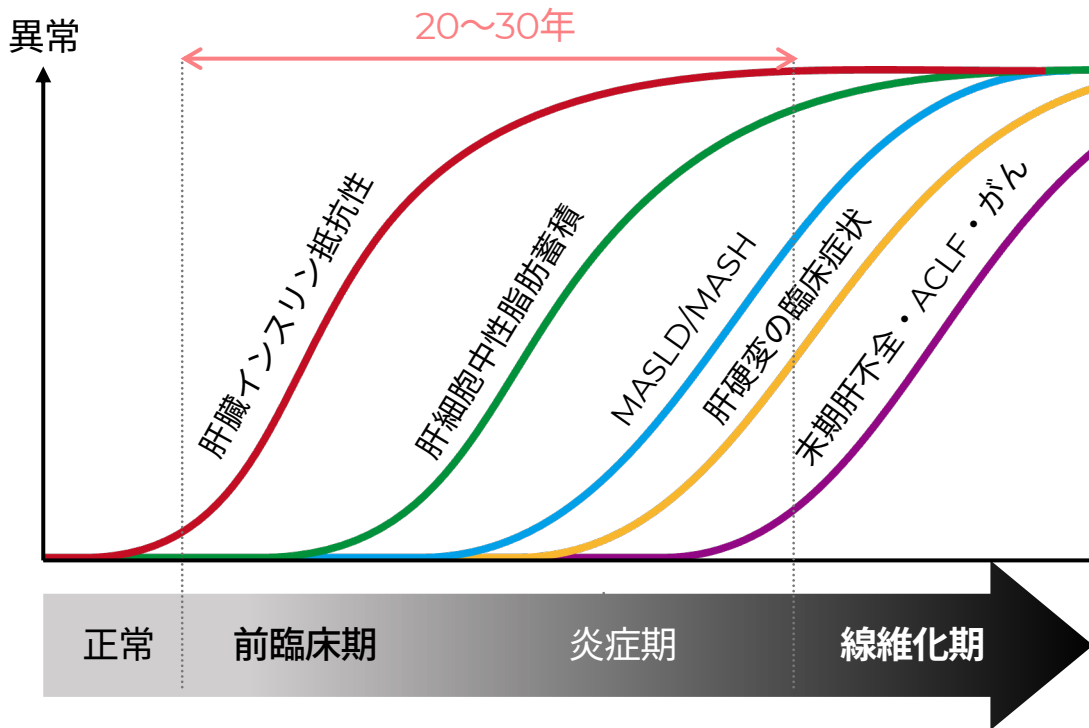
	Traditional Medicine	My Medicine/ Precision Medicine
Core question	What disease does this patient have?	What is this person's life trajectory and how can we prevent disease?
Focus	Pathology & symptoms	Mechanisms & predictive markers
Intervention timing	After symptoms appear	Before onset (proactive)
Data model	Population averages	Individual (N-of-1) data
Goal	Cure or manage disease	Optimize health & well-being

- 例
- ・ 同じBMIでも、アジア人は欧米人よりもインスリン抵抗性が強く、糖尿病発症リスクが高い。
 - ・ CYP2C19遺伝子多型の頻度がアジア人で高く、クロピドグレル（抗血小板薬）の効果が弱まりやすい。
 - ・ 欧米人中心に学習した皮膚画像診断AIは、色素沈着が強いアジア人や黒人の皮膚病変を見逃しやすい。

人種や文化的な背景に合わせた（日本人固有）のデータ取得が不可欠

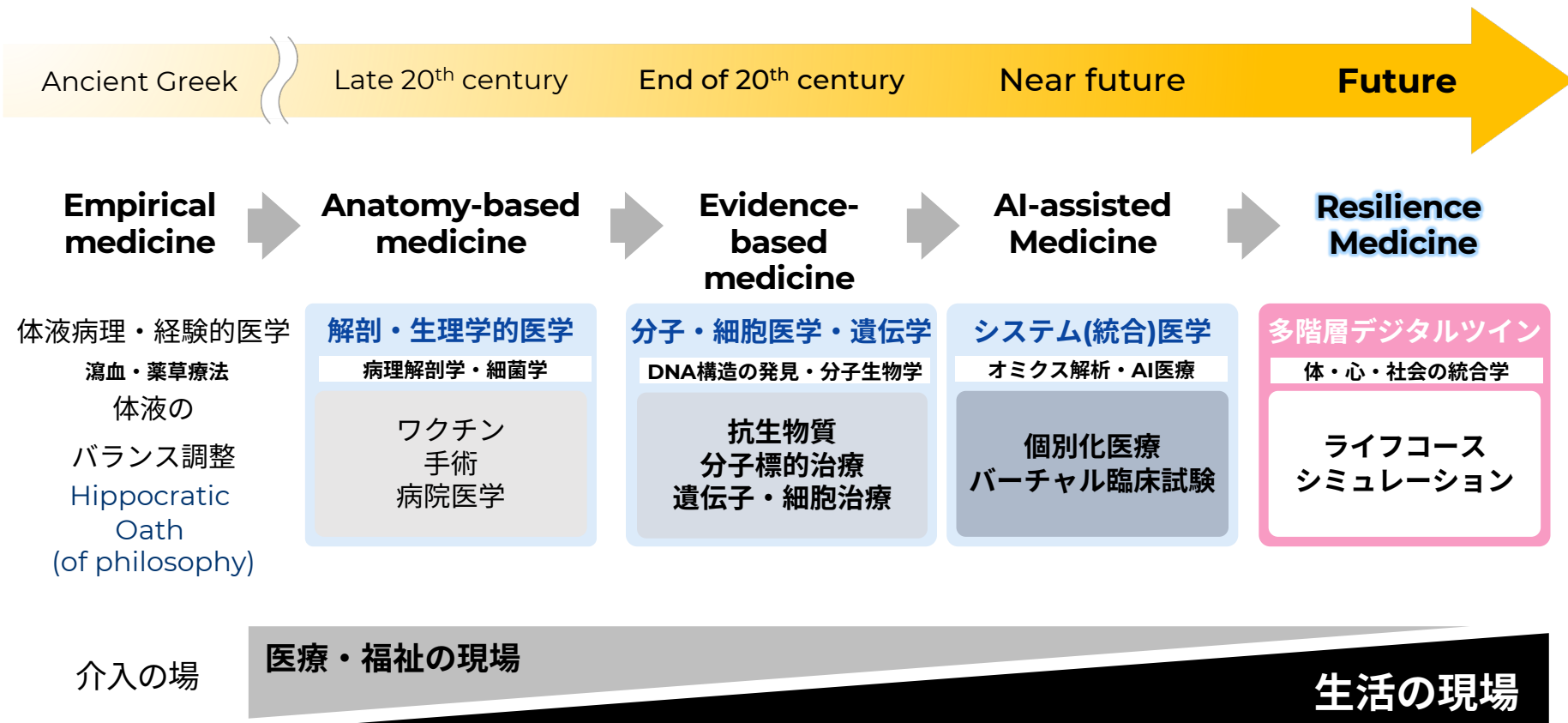
命に関わる肝疾患は、**発症の20年以上前からインスリン抵抗性や中性脂肪などの蓄積**が始まっており、早期にそれらを検知できればQOLの維持が可能になる可能性があるが、個人毎に**原因が多様**である上、対処法が確立されていない。

現在問題となっている Common diseases は（認知症、心不全、COPD、生活習慣病、精神疾患など）も同様。



**一般生活のなかでのシグナルの検出・介入アウトカムを検証可能な
ライフコース・モデリングが有益**

対応した健康医療分野におけるコア学問・技術の変遷が不可避！

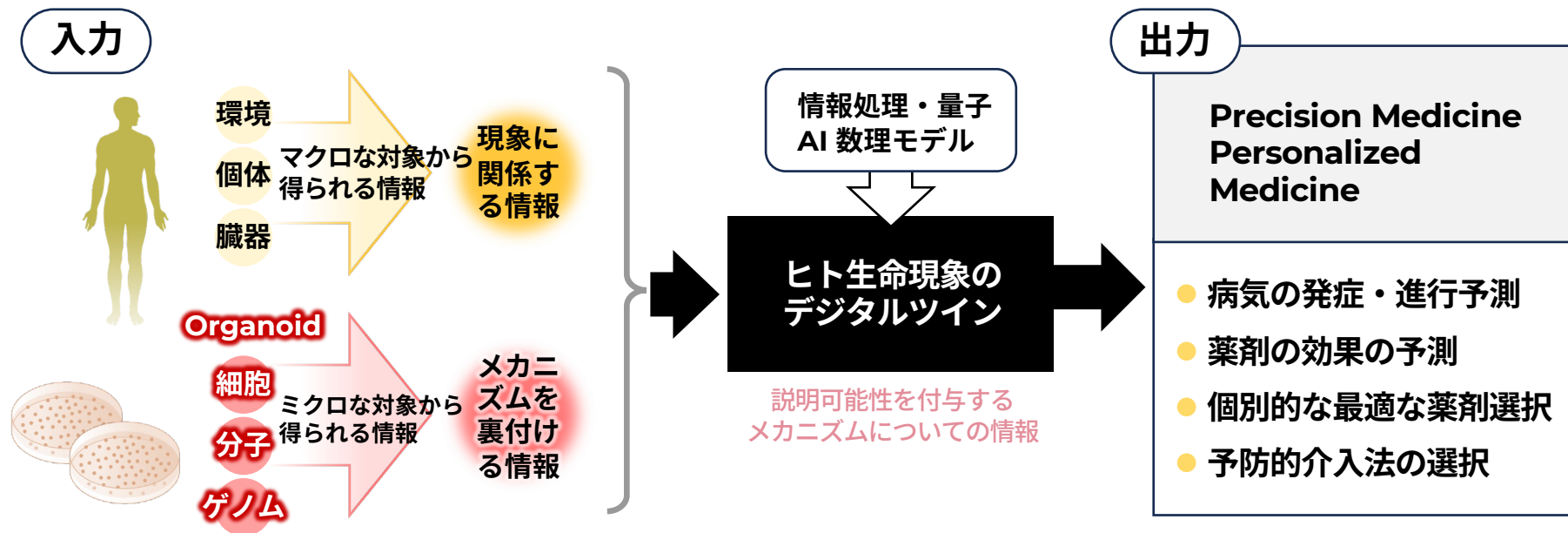


要素別 多階層デジタルツインの国内・国外動向 一要素間の統合が必要！

デジタルツインの対象領域		日本における動向・事例	海外における動向・事例
細胞レベル (細胞のデジタルツイン)		AIを用いた バーチャル細胞 モデルの研究。例：理研などで細胞シミュレーションや創薬支援に活用。	AI仮想細胞モデル による生命現象シミュレーションが加速。米国Chan Zuckerberg Initiativeが Virtual Cells プロジェクトで健康・疾患時の細胞挙動を予測するモデルとプラットフォームを構築中。
	組織・臓器レベル (臓器・組織のデジタルツイン)	心臓デジタルツイン 等の実用化が目前。日本発の「ped UT-Heart」では患者心臓を分子レベルからシミュレートし、術式選択や術後予測に活用（2024年より臨床試験）。 阪大・PRIME WPI拠点のオルガノイドデジタルツイン 研究では慢性疾患の個別発症・治療予測モデルに取り組む。	バーチャル臓器 による精密医療。英インペリアル・カレッジ等では患者ごとの臓器モデルで外科手術シミュレーションや薬剤効果試験を実施。今後5～10年で臓器デジタルツインが診断や手術支援に組み込まれると予想。米国ではDassault Systèmesの「Living Heart」プロジェクトなど心臓模型で治療効果予測を行う試み。
外骨格系 (ウェアラブルロボット等のDT)		パワードスーツのデジタルツイン 。例：筑波大発ベンチャーCYBERDYNEのHALスーツでは人の生体信号をセンシングしフィードバック制御するが、その制御系にデジタルツイン技術を応用する研究も検討中（リハビリ効果の事前検証等）。産総研などが義手・義足のDT開発。	エクソスケレトン 開発へのDT活用。米Sarcos社のGuardian XO等ではセンサーから取得する人間の動作データをデジタルモデルで解析し、ロボットアシスト動作を最適化。軍事分野でも兵士支援用外骨格スーツのシミュレーション評価にDTを導入する動き。
個体レベル (や、こころのデジタルツイン)		患者統合モデル の研究開始。医療版Society5.0を目指すSIP第3期「統合型ヘルスケア」では、生体情報と医療データを統合した 患者デジタルツイン で病態予測・治療最適化を図る。花王／Preferredのデジタルツインこころのデジタルツインを目指す試みも、Moonshotや、共創の場より提案がある。	バーチャルヒューマン （合成患者）の構想。研究者らは約10～15年後には個々人の全身を再現するデジタルツイン（ シンセティック・ペイシェント ）による新薬の臨床試験が可能になると指摘。欧州ではEU「Virtual Human Twin」構想として全身の生理機能統合モデル研究が進行中。
群集・社会レベル (集団行動のデジタルツイン)		人流・交通のデジタルツイン による都市課題解決。理化学研究所は富岳を用いた大規模都市デジタルツイン基盤を開発中。センサーやスマホから人や車の流れデータを集約し、リアルタイムに人流・物流を最適制御する実証を行っている（スマートシティ実現に向け交通・防災・環境など複合課題に適用）。内閣府SIPでは デジタルツイン防災シミュレーション も検討。	社会全体を写すソーシャルDT 。米カーネギーメロン大学と富士通の共同研究では、人・モノ・経済の関係性まで含む「社会デジタルツイン」を開発中。都市の人出や交通流をリアルタイムに再現し、渋滞緩和策や パンデミック時の行動制限効果 を事前検証するなど、複雑な社会現象の予測・最適化に活用。イギリスでもNational Digital Twinプログラムでインフラ・経済を包括する社会シミュレーション基盤を構築。

- 日本はIT、AI分野においてプラットフォームづくりで出遅れ、デジタル赤字の原因。
- バイオデジタルツインは**医療・ヘルスケア分野における基盤**になると考えられ、海外に握られると経済的にも安全保障的にもリスク。

我が国のPatient Biodigital Twin研究の優位性



- 免疫学や幹細胞研究における世界的にも先駆的立場が再生医学研究への開花に展開
- ものづくりに長けた日本人の特性が後押しし、オルガノイド創出技術の基盤を確立したのは、ほぼ全て邦人研究者。
- 幹細胞・オルガノイド・免疫分野をコアとした生理現象に経系・横系をつなぐ情報基盤を取得可能！

我が国が強みを持つウェットコア技術群 × イネーブラー技術

我が国が強みを持つウェットコア技術群

論文	特許	バイオ・ヘルスケア	
		1-2位	3-5位
1-2位		■内視鏡 ←	
3-5位		■ノンコーディングRNA ← ■エピジェネティクス ← ■ゲノム編集 ← ■オルガノイド ← ■再生医学 ← ■医用画像処理（計測、取得） ←	■DNA修復 ← ■遺伝子制御ネットワーク ← ■がん治療 ← ■バイオ医薬品開発 ←
6-10位		■バイオマテリアル ← ■出生前診断 ← ■ニューラルインターフェイス ← ■ブレインコンピューター ←	■ナノメディシン ← ■腸内細菌学（マイクロバイオーム等） ← ■がん遺伝子診断 ← ■医用画像処理（解析、診断） ←



CiRA財団

世界最大規模のMy iPS
細胞自動製造装置
@中之島Qross

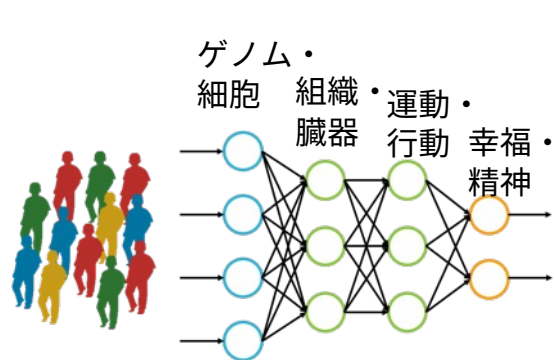
イネーブラー技術

量子・
半導体デジタル・
情報通信環境・
エネルギー

論文	特許	量子・半導体	
		1-2位	3-5位
1-2位			
3-5位		■量子センシング ■半導体パッケージング（3次元集積回路等） ■シリコンフォトニクス ■液晶配向膜用フォトリソ ■固体電解コンデンサ	■量子計算、量子コンピューティング
6-10位		■量子鍵配送 ■シリコン半導体薄膜成形技術 ■半導体基板処理 ■積層セラミックコンデンサ（MLCC）	■量子暗号、量子通信 ■暗号理論（耐量子暗号等）
論文	特許	デジタル・情報通信	
		1-2位	3-5位
1-2位			
3-5位		■光通信用変調・増幅デバイス ■CNC工作機械 ■光学計測	■自然言語処理（機械翻訳等）
6-10位			■深層学習（モデル、学習法） ■画像生成（超解像等）
論文	特許	環境・エネルギー	
		1-2位	3-5位
1-2位			
3-5位		■レーザープラズマ物理学（トカマク等） ■リチウムイオン電池（固体電解質等） ■レドックスフロー電池 ■固体酸化燃料電池 ■水素燃料貯蔵供給システム ■光触媒（水素製造等）	■人工光合成
6-10位		■太陽電池（ペロブスカイト等） ■波力発電 ■リチウムイオン電池（電極材料等） ■水素貯蔵・利用 ■バイオ燃料工学	■核融合反応器・原子炉

統合型デジタルツイン構築のためには、各階層へのスケーラブルな摂動介入が必須！

統合型（多階層） デジタルツインの構築



Critical
Translational Gap

フィジカル実験区が必須！

未来予測と相関検証



- 発症前の人々へのタッチポイントを確保可能な、魅力的で豊かな場での介入環境整備。
- 合成生物学実験（バイオセーフティを確保した上での遺伝子操作やオルガノイド培養）を超大量かつ並列的に操作可能な自律AIロボット群を含めた実験環境の構築。
- プライバシー情報を大量に保存したローカルデータセンターを構築、安全保障が担保された状態において、量子コンピュータによるリアルタイム最適化計算を実現。

各要素へのフィジカルな摂動介入によって、デジタルツイン間の相互作用へのインパクトを解析、現実空間でシミュレーションと超大量の実試験を繰り返すことで技術開発サイクルを飛躍的に短縮

実際に稼働している超大量並列実験を可能とする実験区

並列実行環境の要素	日本の取り組み・事例	海外の取り組み・事例
ロボット実証フィールド	福島ロボットテストフィールド: インフラ災害現場や飛行空域を再現した50haの大規模施設でドローン・陸海空ロボを試験。震災復興地域を活用し世界最大級のR&D拠点に。	NEOM・The LINE (サウジ): 都市全体がロボット・AI実証の場。無人輸送や警備ロボットを常時稼働させる計画。Mcity (米): ミシガン大敷地内の模擬都市で自動運転車の走行テストを実施。
量子計算インフラ	量子技術拠点: 文科省Q-LEAPにより産総研や京大等に量子計算機導入。将来は実証区内に小型量子計算機を設置しリアルタイム制御に活用も構想。	量子ハイブリッド実験: IBMやGoogleがクラウド経由で研究者に量子計算を提供。例えば米製薬企業はラボ実験の解析に量子コンピューティングを試行。
合成生物学・バイオ実験	バイオfoundry計画: 経産省が自動細胞工場の研究（ロボティクスによる実験自動化）を支援。産総研などにハイスループット実験設備を整備中。	自律実験室 (SDL): イリノイ大の例ではAI+ロボットで酵素改良を自動化し性能を大幅向上。英政府も合成生物学用オートメーションラボを設置し、新物質開発を加速。
環境・生態系実験	沖縄OISTのマリンステーション: 無人島で海洋生物やサンゴ礁の継続観測と環境シミュレーション実験を実施。孤立環境を活かし外来種や病原体封じ込め実験も検討。	Biosphere 2 (米): 密閉ドーム内に多様な生態系を再現した実験施設。火星移住模擬や生態モデル研究に利用。Living Lab (EU): 都市部に屋外実験区を設けIoT環境データと生態系への影響をモニタリング。
包括的スマート実験都市	スーパージンシティ型特区: 内閣府主導で複数自治体が住民同意の下、医療・モビリティ・行政手続を一体実証。例：会津若松市（遠隔医療＋自動運転＋教育ICT）など。これを発展させ孤島等で規制砂漠の実験市構想も。	Masdar City (UAE): 再エネ100%・無人運転バス等を導入した実験都市。Sidewalk Toronto (加): センサーフル活用の次世代都市モデル（途中で中止）。NEOMは先述の通り世界最大級の実験都市。

プロジェクトキメラ： 無人島（豊富な天然資源）や極限環境（宇宙）などを利用した デジタルツイン x 大規模実験区を活用したフラッグシップ・プロジェクト



- プロジェクトキメラが志向するのは、**独自の自然資源豊かな場を核とする総合テストゾーン**。多階層デジタルツインとリアル実験の相互強化を図る。
- 人が訪問する無人島など隔離環境であればバイオセーフティやセキュリティ面の不安も低減でき、失敗しても社会に影響を及ぼしにくい利点。
- **日本のブルー&グリーン資源や、宇宙の未開拓環境**を統合したデジタルツインは、摂動実験を通じて持続可能な資源利用と環境保全を両立させる不可欠な基盤技術
- 経済安全保障の観点からも、国産技術で「**島国特有の実験インフラ**」を保持することは、他国に依存しない技術自立性につながり、リスク低減に有効。
- 未知のリソースを開拓し、**科学技術資源の発見と健康寿命延伸につながる知的財産群**を確保

多階層デジタルツインと大規模実験区構想が生み出す知と産業創造

- **優位性・自律性（日本特異的課題への最適化）**：デジタルツインと実験区を組み合わせることで、身体機能の拡張や、慢性疾患の進行、激甚災害・極限環境での適応過程、などを精密にシミュレートし、日本人固有の遺伝的・文化的・環境的背景を考慮した、真に個別化された予防・介入策を開発することが可能。自然界や宇宙に学ぶことで、一器多様の法則など適応進化の可能性を広げ、人類の可能性を更に押し広げる知の体系を創出。
- **不可欠性（経済安全保障上のリスク低減）**：近年の国際情勢は、医薬品の原薬 や食料 といった重要物資のサプライチェーンがいかに脆弱であるかを露呈させた。「プロジェクトキメラ」が構築するデータおよび、その検証プラットフォームは、この国家的脆弱性に対する強力な防衛策となりうる。宇宙などの極限環境でのデジタルツインと無人実験技術は、独自の視点から国際競争性を高めるデータや、知、材料創出に貢献。
- **創薬・医療基盤の国内確立**：統合デジタルツインは、創薬プロセスや、ヘルスケア産業の革新製品の上梓効率を飛躍的に高め、海外に依存している医薬品の国内開発・生産基盤を強化する。
- **次世代有用物質生産**：地方実験区における合成生物学や植物学、海洋生物学の研究は、気候変動や地政学的リスクに左右されない、持続可能な次世代の食料や生物由来材料生産技術の確立に繋がる。
- **人材育成**：誰もが一度は感じる自然への畏怖や好奇（Biophilia）を一つのテーマとすることで、人々（特に次世代の科学者たち）の感動や探求を引き出し、科学への関心度を高め持続可能な科学人材を排出する。
- **規制のサンドボックス**：無人島などを活用した地方実験区は、AIロボットやドローン物流、量子コンピューティングといった未来技術の社会実装を加速させるための、規制のサンドボックスとしても機能しうる。これにより、技術開発と社会制度設計を一体で進め、国際標準を先導することが可能。

多階層デジタルツインと実験区構想が生み出す知と産業創造

- **時間軸と社会実装：**オルガノイド・デジタルツインやAIロボット実験環境は2020年代後半から段階的に実証が進んでおり、2030年前後に実用化が本格化すると見込まれる。がん患者由来オルガノイドとAIを組み合わせた臨床試験や自律的な細胞培養ロボットの実証が進展しており、2030年は基盤技術の確立・標準化の節目である。無人島、宇宙実験も本格化。
- **経済成長と社会課題解決：**統合デジタルツインは医療・製造などで巨大市場を形成し、ヘルスケア市場は2025年45億ドルから2030年600億ドルへ急成長すると予測される。生命科学実験の自動化により研究再現性や人材不足の課題を克服し、難病研究・創薬の加速、医療費削減、副作用軽減などに資する。天変地異下における研究継続など社会レジリエンス強化にも寄与。
- **革新性：** デジタルツインにより個別化医療や予防医療が進展し、創薬プロセスも大幅に効率化する。AI駆動型科学の台頭により研究速度が飛躍的に向上し、分散型実証基盤の活用でオープンイノベーションが促進。
- **我が国の優位性・潜在性：** 日本はiPS細胞やオルガノイド技術、ロボティクス、精密加工技術で強みを持つ。患者由来iPSバンクや医療データ蓄積力を活かし、世界に先駆けた人体デジタルツイン構築が可能である。宇宙実験実績も活かせる点で独自性。
- **国家安全保障上の不可欠性：** 統合デジタルツインは感染症や災害対応に不可欠であることはもちろん、慢性疾患時代に入り日本独自のデータから構築した基盤を持つことで、革新的な医薬品開発に資する。また主要国が巨額投資を行う中、日本のデータが立ち遅れれば技術主権を失いかねない。国際標準化や知財戦略の観点からも政府支援は不可欠である。AI・ロボット・バイオの融合技術は防衛や災害対応にも転用可能であり、国家競争力に直結。
- **人材と教育：** AI、ロボット、生命科学の複合領域は高度人材が不足している。2040年には最大326万人の不足が懸念され、導入環境があっても操作人材が不足する逆転現象が生じかねない。政府・大学は融合教育プログラムやリスキリングを推進しており、国際連携や各種拠点事業も人材育成に寄与する。人材確保が成功の鍵。
- **投資：** 代表的な企業約24社（オルガノイド、ロボティックバイオ、AI創薬、実験インフラ、バイオ素材など）の資金調達額合計は下限で約30億ドル、上限で約40億ドル規模と推定（非公開の調達額しかない企業は集計から除外）。日本円では約4,350億～5,800億円に相当します（1ドル=145円換算）。さらに、同領域で未掲載の有望スタートアップや直近創業の研究機関スピンアウト等を加味すると、資金調達総額は約60～80億ドル（約8,700億～1兆1,600億円）に達する可能性。