

## 大学におけるデジタルツイン研究と 教育の取り組み

立川智章	東京理科工学部情報工学科 TUSデジタルツインラボラトリ
松尾裕一	東京理科大学研究推進機構総合研究院 TUSデジタルツインラボラトリ

# アウトライン

---

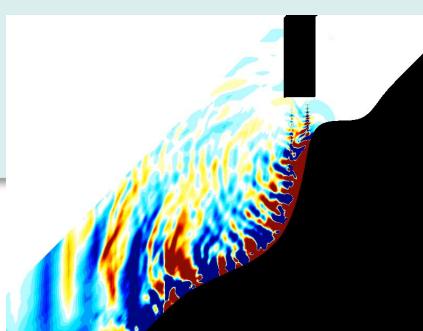
- デジタルツインの概観
- デジタルツインのキー技術
- デジタルツインのものづくり応用
- 東京理科大における研究事例とIT/OT融合教育

# 自己紹介



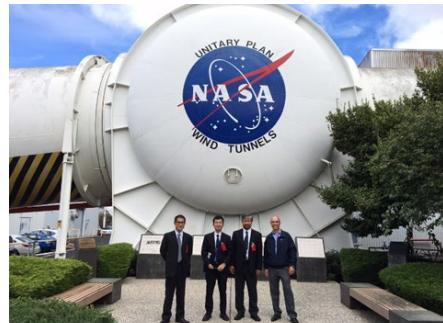
立川智章

- 2004 東京工業大学理工学研究科機械宇宙システム専攻修士修了
- 2004 日本SGI(株)
- 2012 東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻博士修了 博士(工学)
- 2012 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所招聘研究員
- 2015 東京理科大学工学部第一部経営工学科 講師
- 2016 東京理科大学工学部情報工学科 講師
- 2020 東京理科大学工学部情報工学科 准教授
- 2024 東京理科大学工学部情報工学科 教授



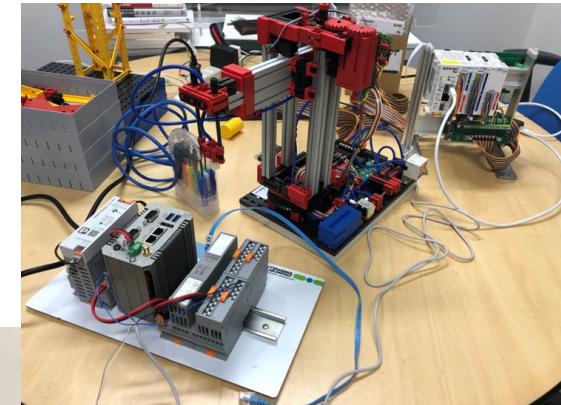
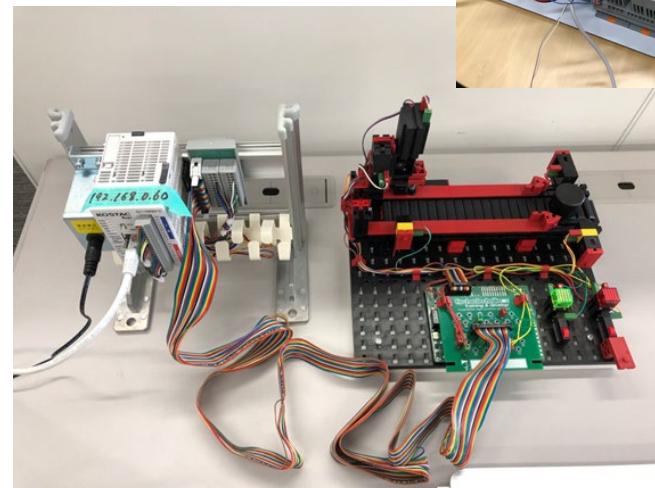
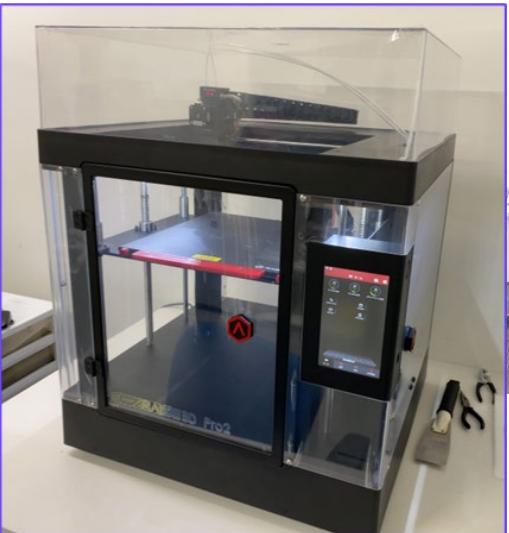
松尾裕一

- 1989 東京大学工学系研究科機械工学博士修了工学博士
- 1989 科学技術庁航空宇宙技術研究所
- 1992 NASA Ames R.C.客員研究員
- 2003 宇宙航空研究開発機構(航空, スパコン, 流体解析)
- 2020 東京理科大学工学部情報工学科(葛飾キャンパス)



# TUSデジタルツインラボ(2020-)※

- 3D計測, IoT, 機械学習, シミュレーション, 最適化等を用いた  
**「ものづくりデジタルツイン」**に関する要素・基盤技術の研究開発・人材育成
  - 目標: ものづくり課題解決(多品種少量生産, 技術継承, 自動化)への貢献
  - 藤井教授(工情, ラボ長), 山本教授(工機), 岡田教授(理工機), 高橋准教授(理工機)  
立川(工情)
  - 教員: 松尾(教授), 浅田(助教)
  - FY2023学生: M2生4名/B4生5名, 受託研究員, 共同研究



# TUSデジタルツインラボラトリ(2024-)

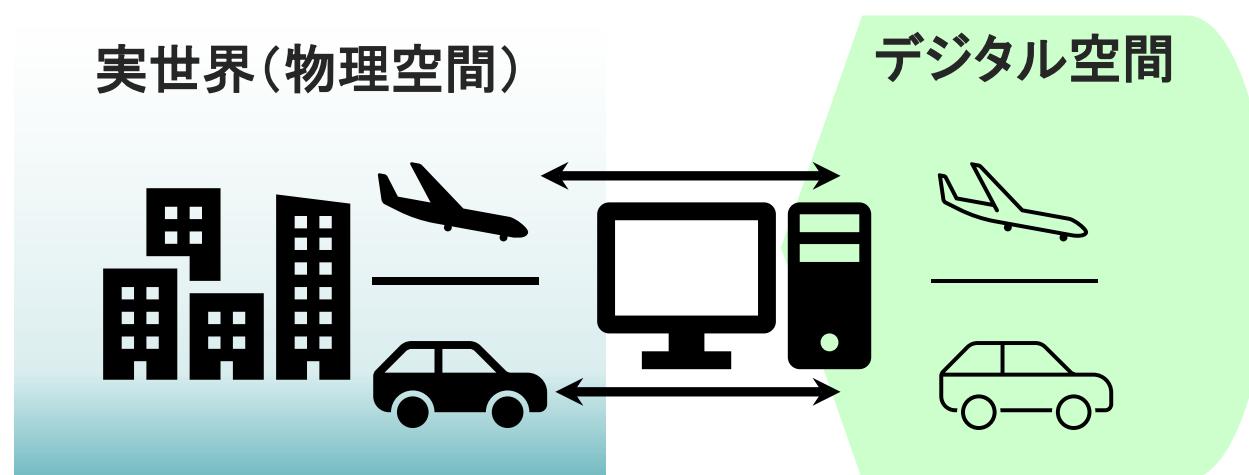
- 東京理工大学研究推進機構総合研究院の懇談会として設置
- 日本機械学会計算力学部門下に「ものづくりデジタルツイン研究会」を設置(2024.10-)
  - ▶ 製造業に係る幅広い関連分野の研究者・技術者が集う場として、デジタルツインに関する情報収集、情報共有、意見交換、情報発信を行う



The screenshot shows the homepage of the JSME Computational Mechanics Division. The top navigation bar includes links for Home, JSME Top, Department Introduction (ABOUT), Committees (COMMITTEE), Awards (AWARD), Newsletter (NEWSLETTER), Research Groups (RESEARCH GROUPS), Mailing List (MAILING LIST), and Links (LINKS). The main content area features a banner for the 'JSME CMD' research group, with a sub-header '研究会' (Research Group) and a link to '研究会一覧' (List of Research Groups). A sidebar on the left lists various research groups with their respective icons and names: 逆問題解析手法研究会, マルチスケール計算固体力学研究会, 電磁流体解析関連技術研究会, 設計と運用に活かすデータ同化研究会, 設計情報駆動研究会, 設計情報駆動研究会, and 解析・設計の代替モデリング研究会.

# デジタルツインの定義・概念

- 最近、随所で「デジタルツイン(Digital Twin)」という言葉を見聞
  - 省略語は特に決まっていないが、記事によっては「DT」「DTw」と略記
  - 「デジタルの双子」と日本語翻訳されることもあった。現在は使われない
- 直感的には、**実体(实物, モノ)**の計算機上へのコピー(レプリカ, ミラー)(狭義)
- 広義には、デジタルツインという**「仕組み」「コンセプト」「手段」**
  - いろいろな捉え方、レベル、実装がある(あって良い)、各種技術の相乗効果が狙い



英語のtwin...双子・対(の片方)  
 I have a twin brother.  
 He has a twin.  
 Tom and John are twins.

# デジタルツインの定義・概念

## ● 物理空間 (Physical space)

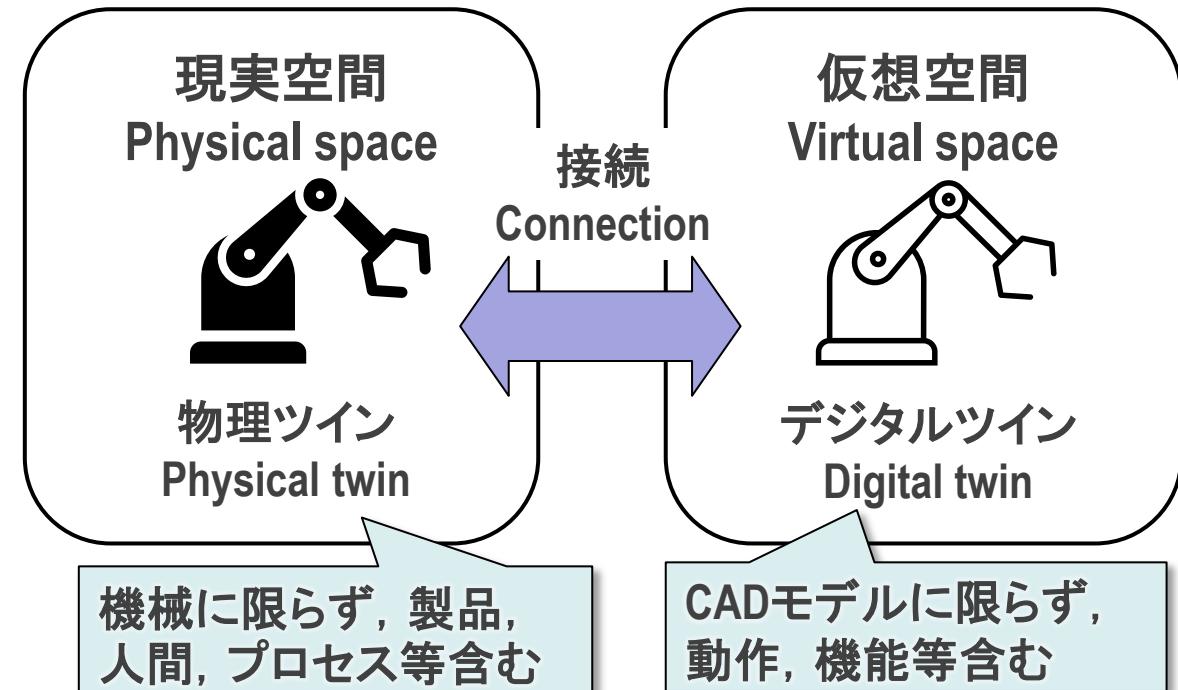
- 現実世界 (Physical world)
- 物理資産 (Physical entity)
  - ◆ 物理ツイン (Physical twin), アセット (Asset)

## ● 仮想空間 (Virtual space)

- サイバー世界 (Cyber world)
- デジタル空間 (Digital space)
- 仮想資産 (Virtual entity)
  - ◆ デジタルツイン (Digital twin), 仮想ツイン (Virtual twin), レプリカ (Replica), ミラー (Mirror)

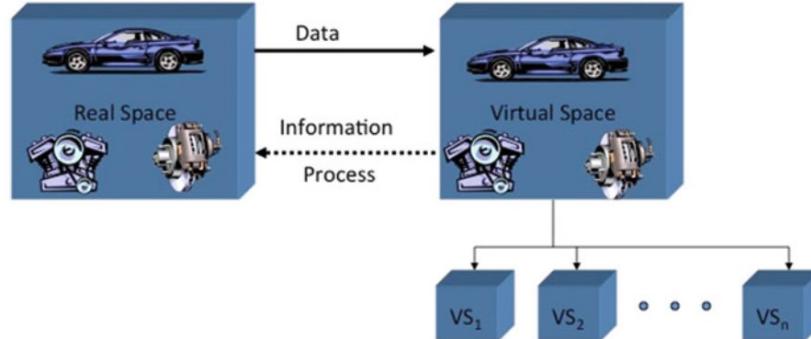
## ● 物理空間と仮想空間の接続 (Connection)

- コミュニケーション (Communication), リンク (Link), ネットワーキング (Networking)

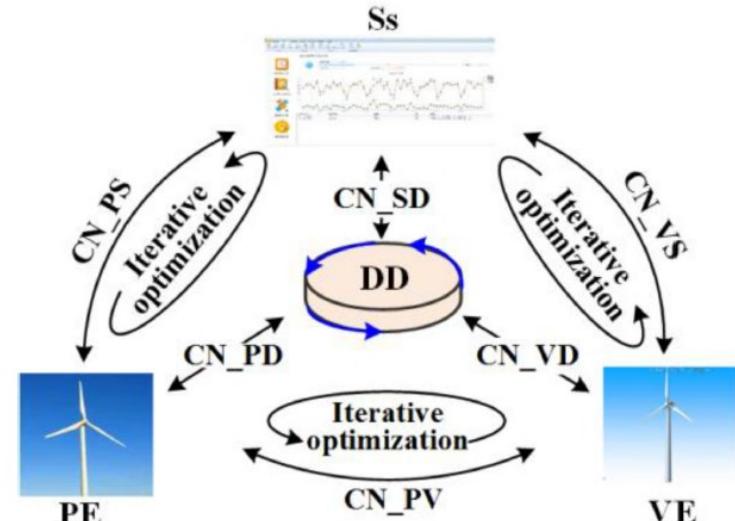


# デジタルツインの定義・概念の変遷

Grieves, 2003	ミクロ原子レベルからマクロ幾何学的レベルまで、潜在的または実際の物理的製造製品を完全に記述する一連の仮想情報構造
Glaessgen, 2012	利用可能な最良の物理モデル、センサーの更新、フリート履歴などを使用する完成時の車両またはシステムのマルチフィジックス、マルチスケール、確率的シミュレーション
Grieves, 2014	3つの主要部分: a) 実空間の物理製品、b) 仮想空間の仮想製品、c) 仮想製品と物理製品を結び付けるデータと情報による接続
Tao, 2019	物理部分、仮想部分、接続、データ、サービスの5つの次元が含まれている必要がある
Rasheed, 2020	リアルタイム予測、最適化、監視、制御および意思決定の改善のため、データとシミュレータによってできるようになる物理資産の仮想表現
AIAA, 2020	個々の物理資産の構造、コンテキスト、動作を模倣する仮想構成要素は、ライフサイクル全体を通じてその物理ツインからのデータで動的に更新される
ISO23247, 2021	観察可能な製造要素(※)のデジタル表現であり、製造要素とそのデジタル表現間の同期機能を備え、(特定の応用)目的に合致したもの ※ 人員、設備、材料、プロセス、環境、製品、サポートドキュメント等



Grieves



Tao

- E. Glaessgen, et al., The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air Force vehicles, AIAA Paper 2012-1818, 2012  
 M. Grieves, Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication, White paper, 2014  
 F. Tao, et al., Digital Twin Driven Smart Manufacturing, Academic Press 2019  
 A. Rasheed, et al., Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective, IEEE Access 2020  
 AIAA, Digital twin: Definition & Value, An AIAA and AIA Position Paper, 2020  
 ISO 23247, Automation systems and integration - Digital twin framework for manufacturing, 2021

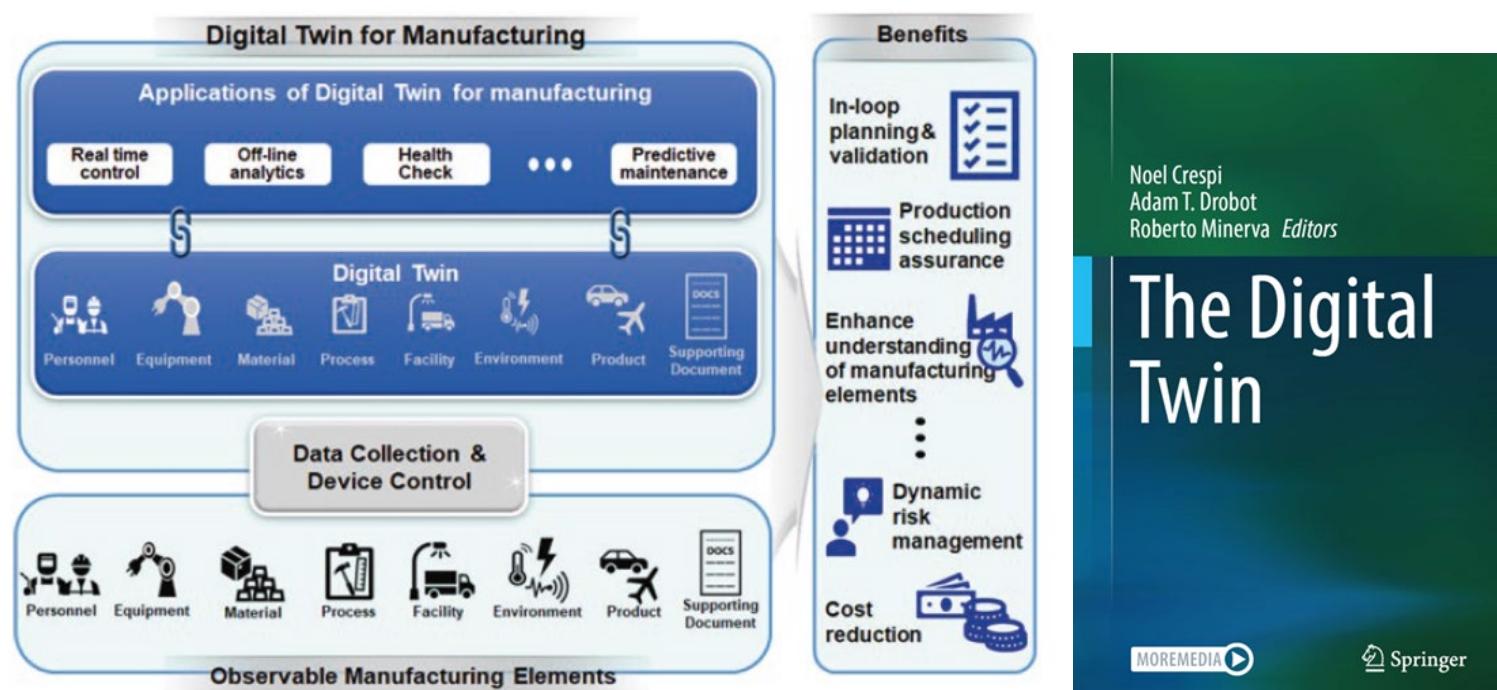
# 國際標準化活動(製造業)

## ● ISO23347, Digital Twin framework for manufacturing, 2021

- Part 1～4の4部構成(1.概要と一般概念, 2.参照アーキテクチャ, 3.要素のデジタル表現, 4.情報交換)
- 観察可能な製造要素(※)のデジタル表現であり, 製造要素とそのデジタル表現間の同期機能を備え, (特定の応用)目的に合致したもの

※ 製造において観察可能な物理的存在または操作を有する項目. 人員, 設備, 材料, プロセス, 環境, 製品, サポートドキュメント等を含む

fit for purpose digital representation of an observable manufacturing element with a means to enable convergence between the element and its digital representation at an appropriate rate of synchronization

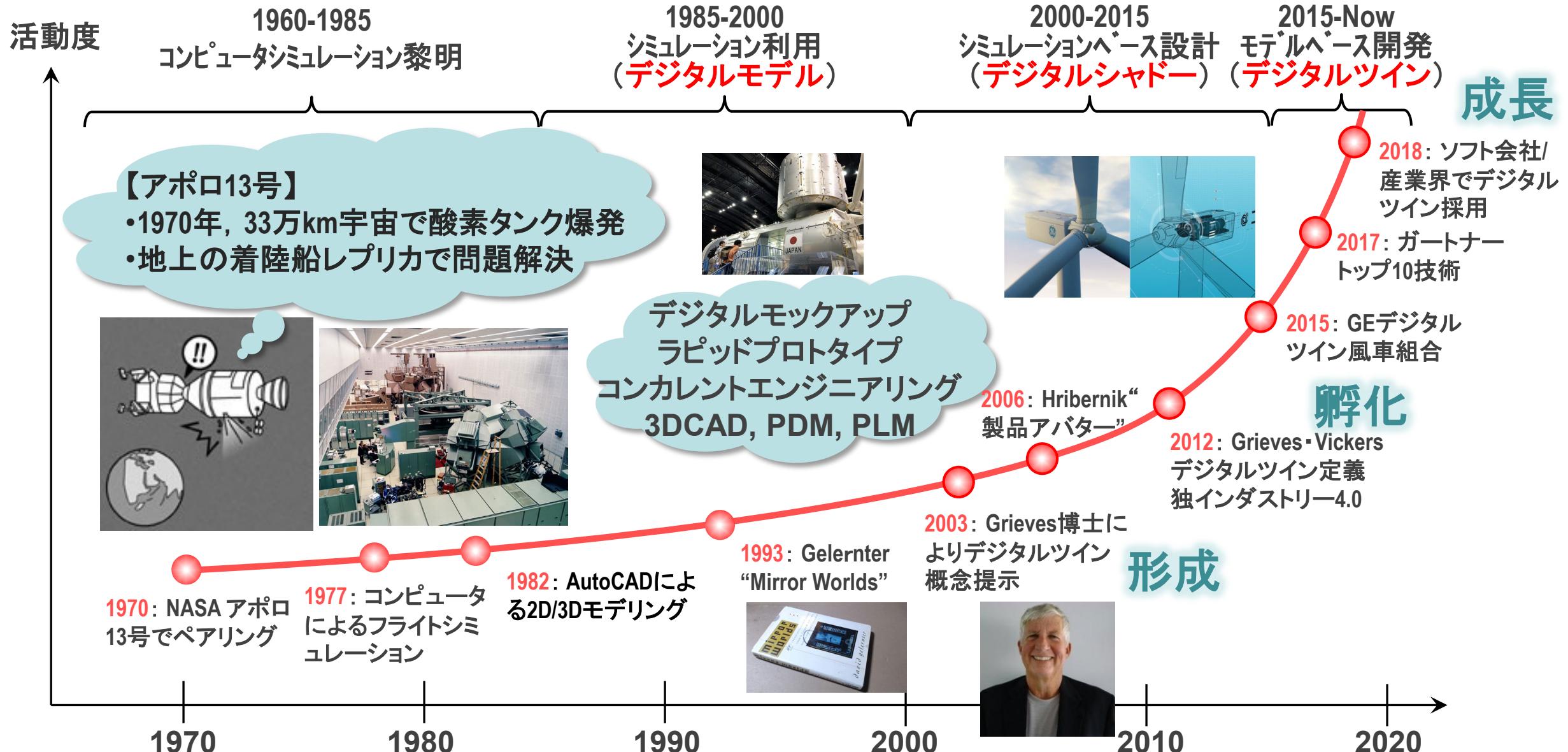


ものづくりデジタルツインのフレームワーク

# デジタルツインの仕組みが有効な場面・状況

- リアルタイムで状態を知りたい(**Digital Shadow**)
  - 状態監視(IoTとほぼ同じ路線)...取説からネット接続へ
- 直接データを取れない, 危険でできない, 仮想試験・リスク評価
  - 表面状態から内部状態を予想(仮想計測, **バーチャルセンサー**, ソフトセンサー)
  - 異常検知(異常データは極少, ただし, DTのモデルに依る)
  - 仮想試験(**what-if分析**), 仮想試運転(**バーチャルコミュニケーション**)
- 現状状態に合わせて将来予測したい(**Predictive Digital Twin**)
  - モノ(対象)の状態は時間とともに変わる
  - オンライン予測・制御, 予知保全

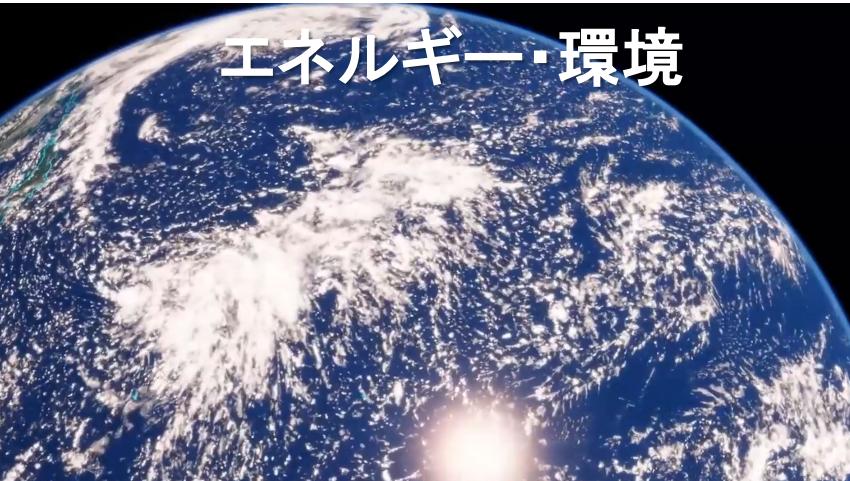
# デジタルツインの発展経緯



# デジタルツインのトレンド



ヘルスケア  
The future of  
**personalized  
healthcare**



エネルギー・環境



製造



輸送



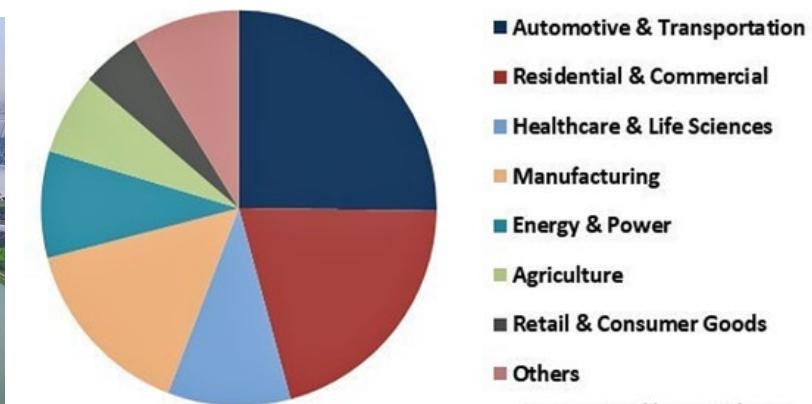
都市・防災

<https://www.youtube.com/watch?v=gE0Z-IQdMtl>

<https://www.youtube.com/watch?v=KikzyHtxRes>

<https://www.kbvresearch.com/digital-twin-market/>

<https://www.youtube.com/watch?v=7yjQKRPeY8E>



\$50-100B(2021) ⇒ > \$600B(2027)

CAGR > 40% (2021-27)

実務導入率: 8-10%

# デジタルツイン発展の背景

## ● IoT, AI, BDA等の基盤技術進歩

- モノのインターネット(IoT), 人工知能(AI), ビッグデータ解析(BDA), 可視化(XR), 3Dプリンタ
- 通信インフラ(5G, LPWA), クラウド(AWS, Azure, GCP, SAP)

## ● デジタル化の流れ・期待

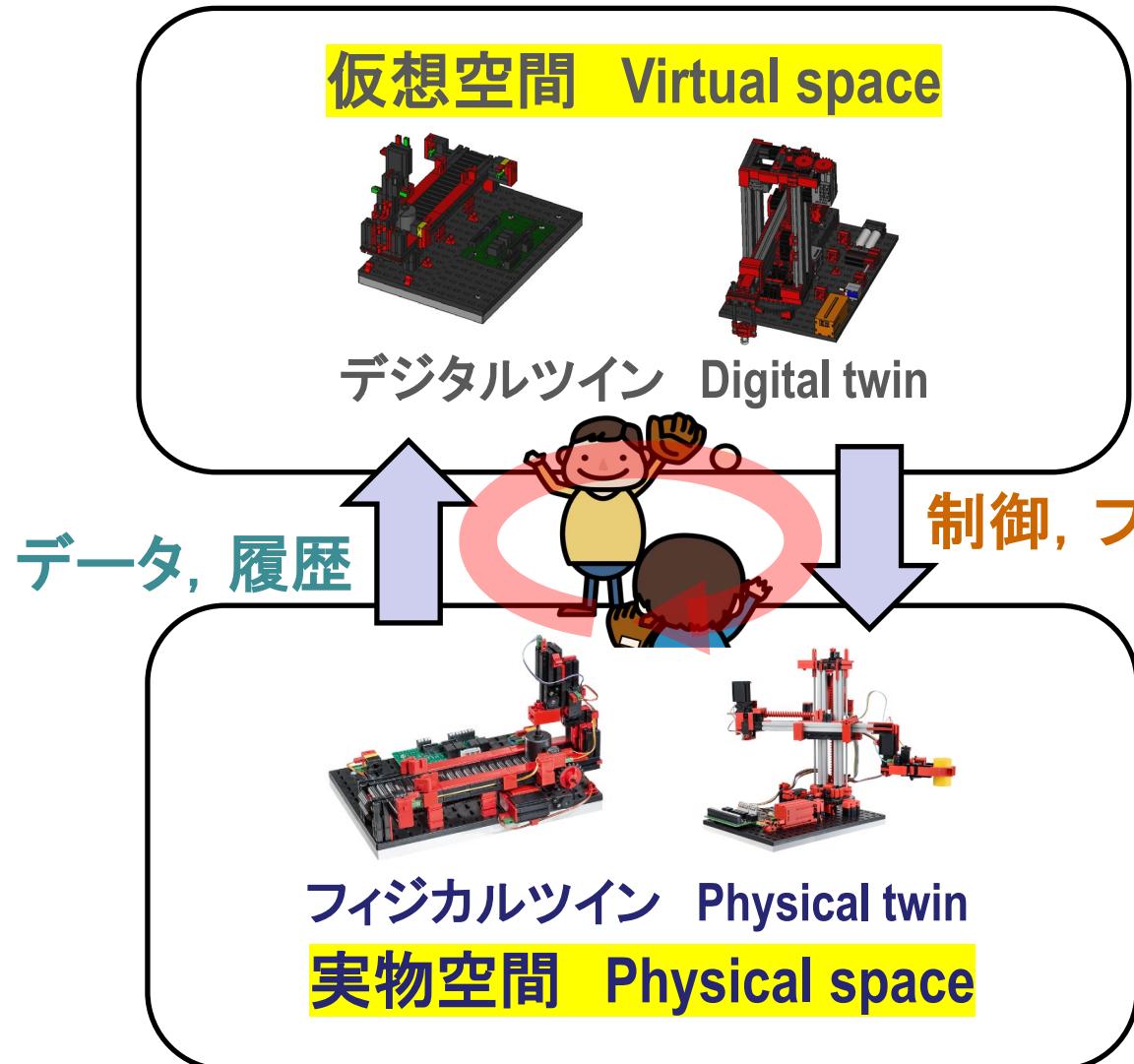
- デジタルトランスフォーメーション(DX)
- 社会インフラ問題(道路・橋梁・トンネル), XaaS化(モノからコト・サービスへ, リサイクル)
- データ科学(第4の科学), データ駆動主義

## ● 情勢

- コロナ禍 → 不確実性への対応, サプライチェーンの強靭化
- 多品種少量生産への対応, 生産効率の向上
- 新興国の圧力(低成本, 品質向上)

# TUS.DTモデル

## ● 学生への説明

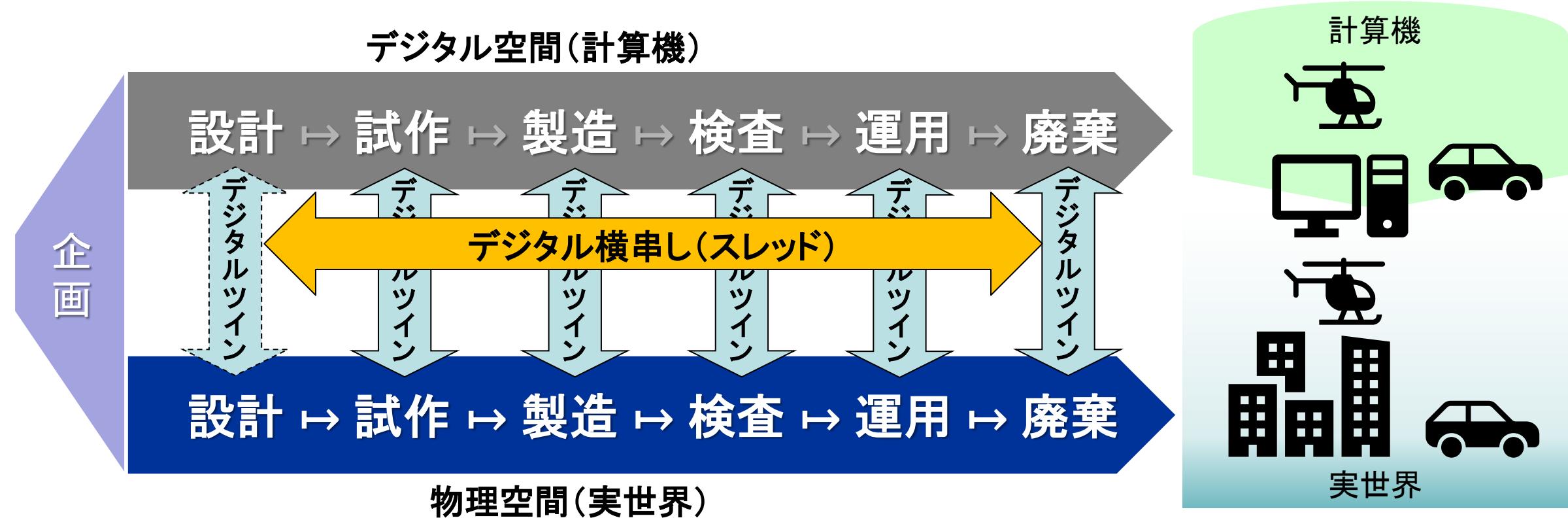


**リアルとデジタルのキャッチボール**  
(リアルからデータ集め分析や予測をし、  
リアルにフィードバック)

仮想空間	コンピュータ内の世界、デジタルの世界 データ分析、機械学習、シミュレーション
実物空間	実世界、現実、工場現場 機械に限らず、人間、システム等含む
実物から仮想へ	センサーラやカメラでデータ・写真を集める、 アンケート等でデータを集める
仮想から実物へ	物事を判断する、警報を鳴らす、機器を 制御する

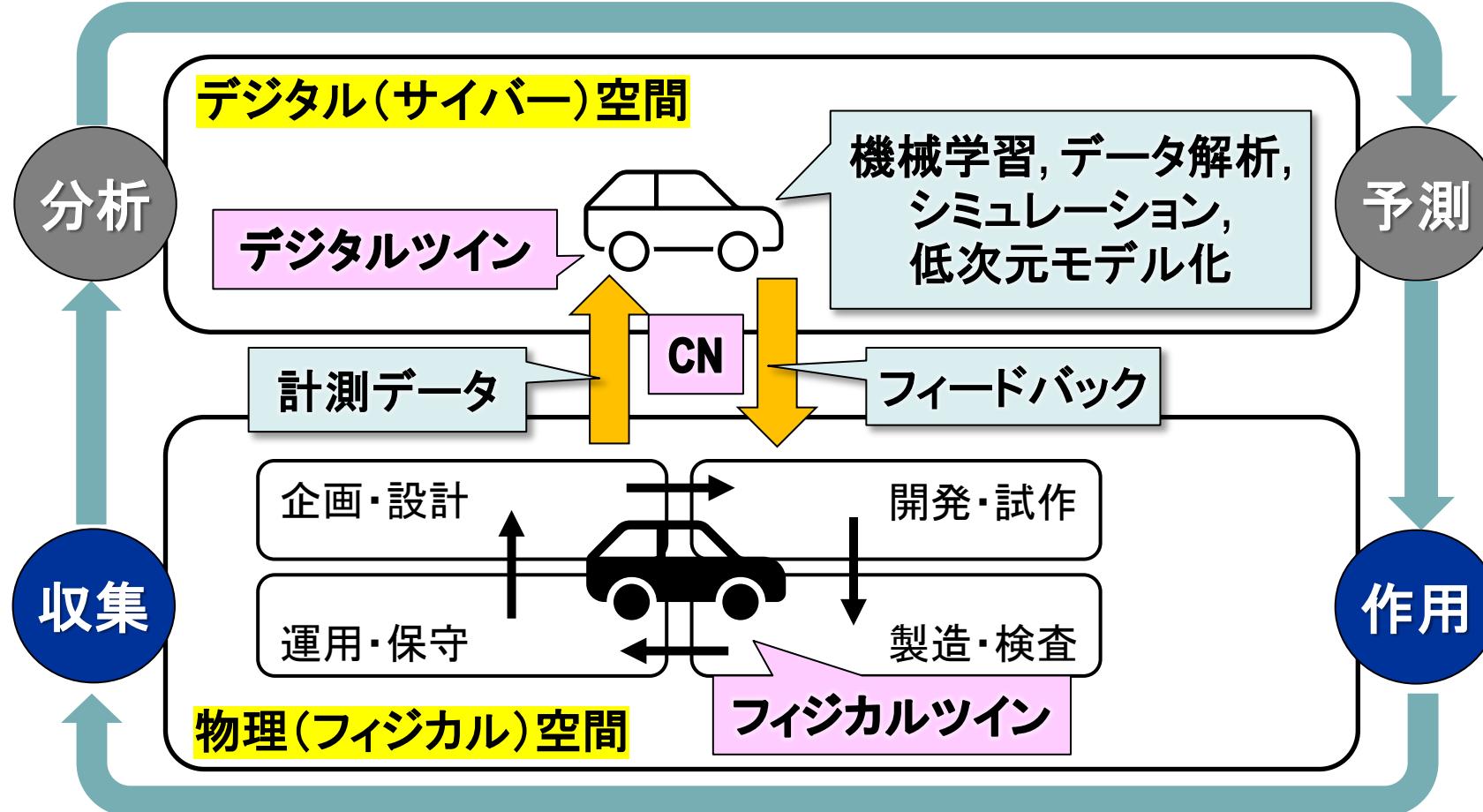
# TUS.DTモデル

- ものづくりにおけるDTプロセス構成イメージ
  - 縦(ツイン, Twin)と横(スレッド, Thread)の連携



# TUS.DTモデル

- 基本3要素(PT, DT, CN)と仕組み(CPS)



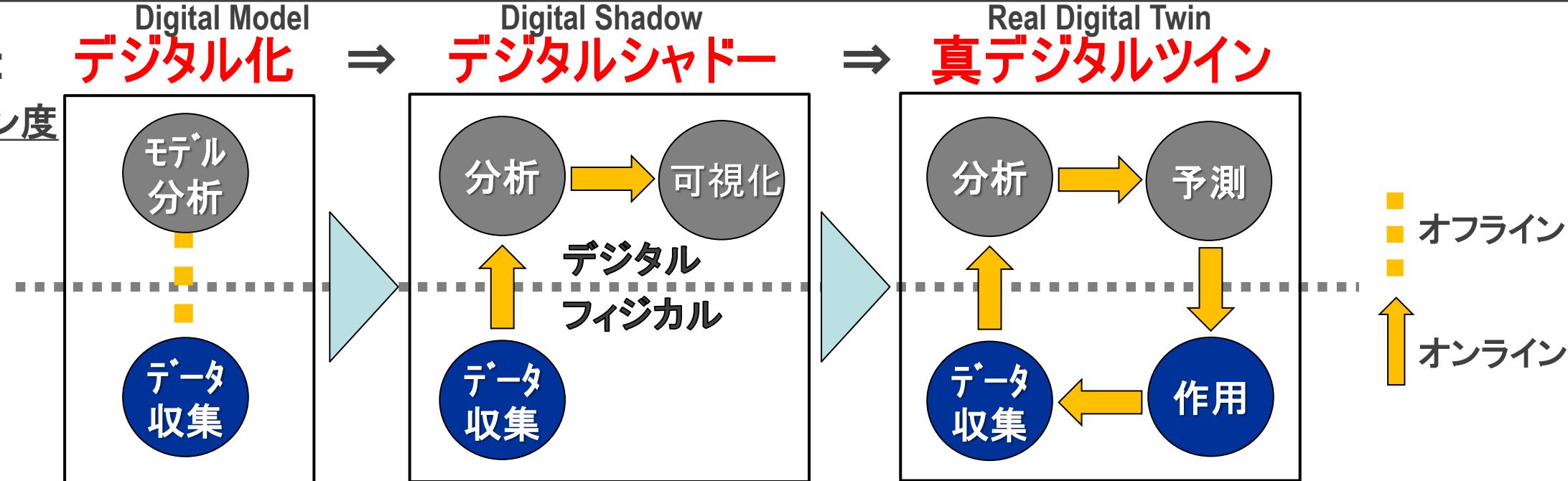
【デジタルツイン特徴づけ】

- ・現実世界との連動
- ・リアルタイム連携
- ・モデルの時間的更新

# いろいろなレベルのDTがあり得る

- 段階: **デジタル化** ⇒ **デジタルシャドー** ⇒ **真デジタルツイン**

デジタルツイン度



- リアルタイム性(レイテンシ):  $\mu \sim m$ 秒 → 秒 → 時間 → 週間  
(工場機器) (自動運転) (気象予測) (設計変更)
- 現実への反映方法: 制御, 警報, 意思決定, 設計変更
- 実装対象: 製品(Product), 生産(Production), **実験的DT**, **組込みDT**  
Experimentable Embedded

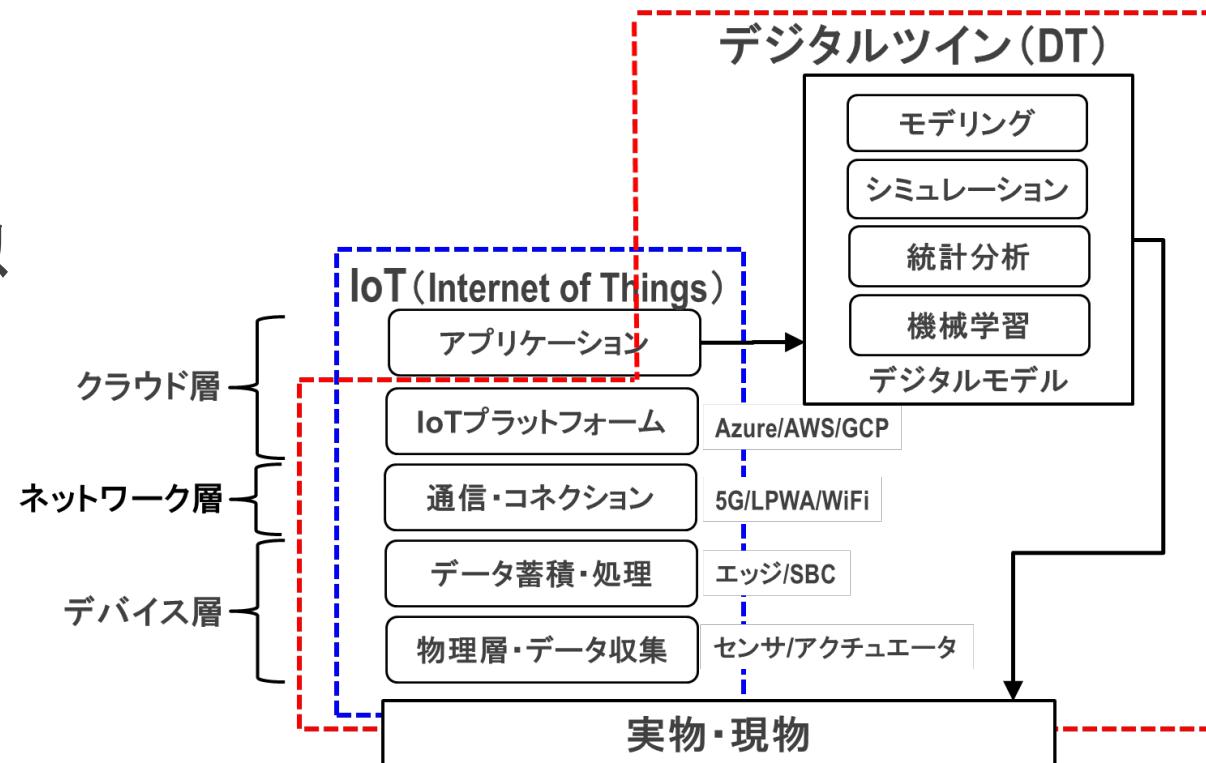
# DTとシミュレーション, IoTとの違い

## ● シミュレーション(Simulation)

- › シミュレーションは、物理的・生態的・社会的システム挙動を、ほぼ同じ法則に支配される他のシステム or コンピューター上で模擬する。一般にはシナリオを想定。オフライン
- › DTは、現実世界と連動(架空ではない)、即時性(リアルタイム、オンライン)

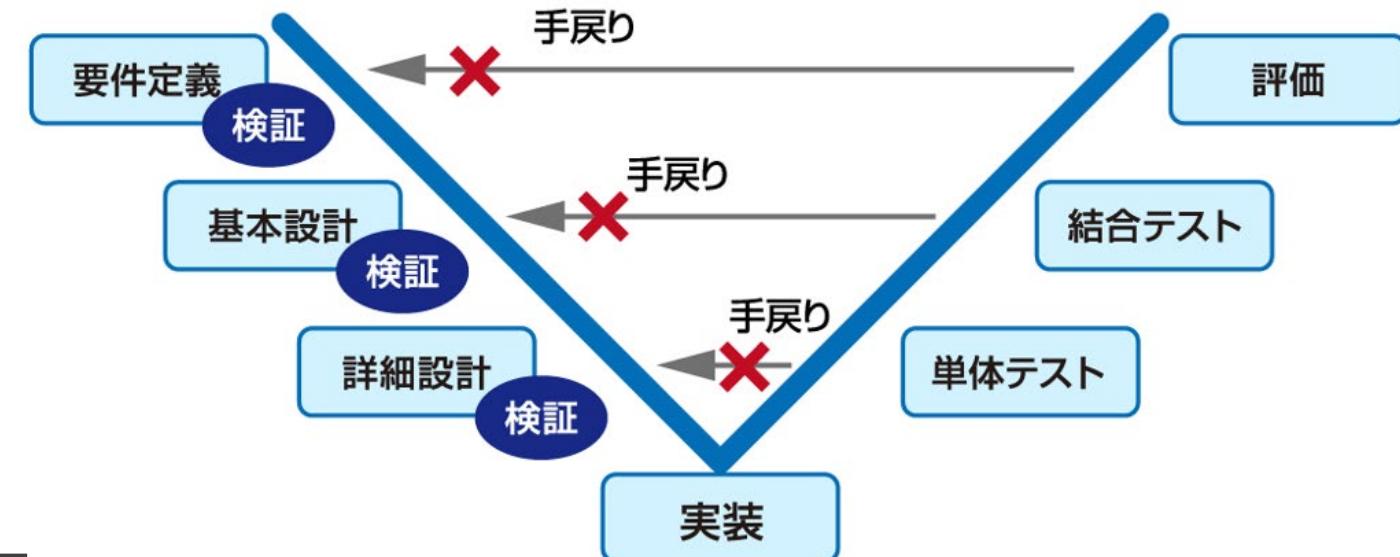
## ● IoT(Internet of Things)

- › IoTは現状把握、DTは将来予測
- › 統計分析と機械学習の関係に類似



# DTとモデルベース開発(MBD)との違い

- MBD, DTともに概念・仕組み
  - Model Base Development/Design/Definition
- モデルベース開発(MBD)とは
  - 開発と検証を同時に進める
  - V字モデル(右図)
- 個人的な認識
  - MBDは製品開発の上流で有効
  - DTは製品開発の下流で有効
  - MBDの検証にDTを使う, ことができる
  - DTのモデル開発にMBDを使う, ができる
  - デジタルスレットの構築にMBDの考え方を取り入れる



# DTとCPS、メタバースとの違い

## ● サイバーフィジカルシステム(Cyber Physical System; CPS)

- › NSFのHelen Gillにより提唱(2006年頃), 独インダストリー4.0(2011)のコア技術の一つ
- › 組込みシステムが高度化したもの, 当初はリアルタイムシステムとセンサネットワークに重点

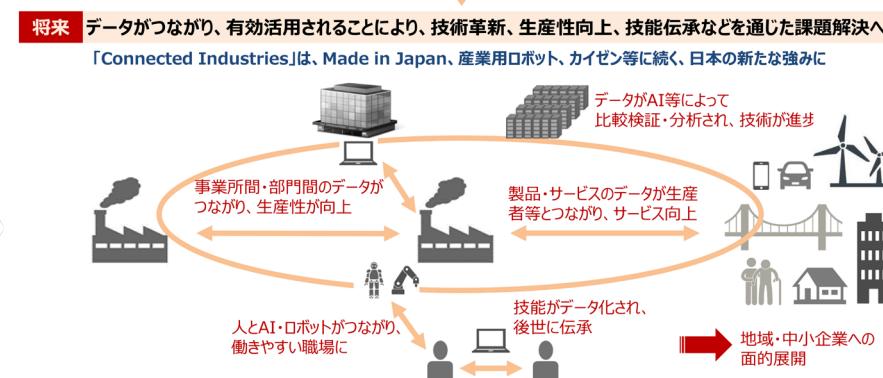
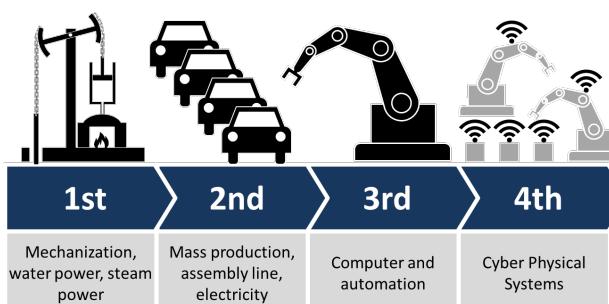
項目	DT	CPS
起源	Michael GrievesのPLMのプレゼンにおいて提唱(2003年)	NSFのHelen Gillにより提唱(2006年)
発展	2012年までは注目されず	インダストリー4.0のコア技術として取り上げ
範囲	工学的	学術的
構成	仮想モデルに焦点	3C(計算・通信・制御)に焦点
D-P対応	1対1対応	1対多対応
要素	モデルとデータを強調	センサーとアクチュエータを強調

## ● メタバース

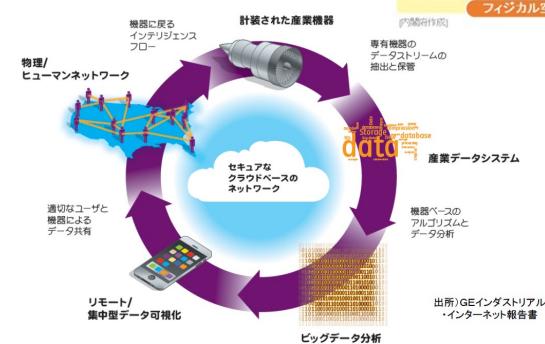
- › 仮想空間で構成されたデジタル世界でアバターを介してユーザ間の交流に重点

# デジタルツイン関連の主な施策

- **インダストリー4.0** (ドイツ, 2011) 
  - 第4次産業革命(蒸気→石油→PC→IoT)により、自動化・生産性向上・最適オペレーション
- **インダストリアル・インターネット** (米GE, 2012) 
  - 産業用IoTの実装により運用の最適化・故障前兆の早期発見
- **中国製造2025** (中国, 2015)
  - 10の重点強化産業、23品目で世界の製造強国の中間入りを目指す
- **コネクテッドインダストリー** (日本, 2017) 
  - 3本柱(協調、協働、人間中心)基軸に、新たな価値創出と社会課題解決



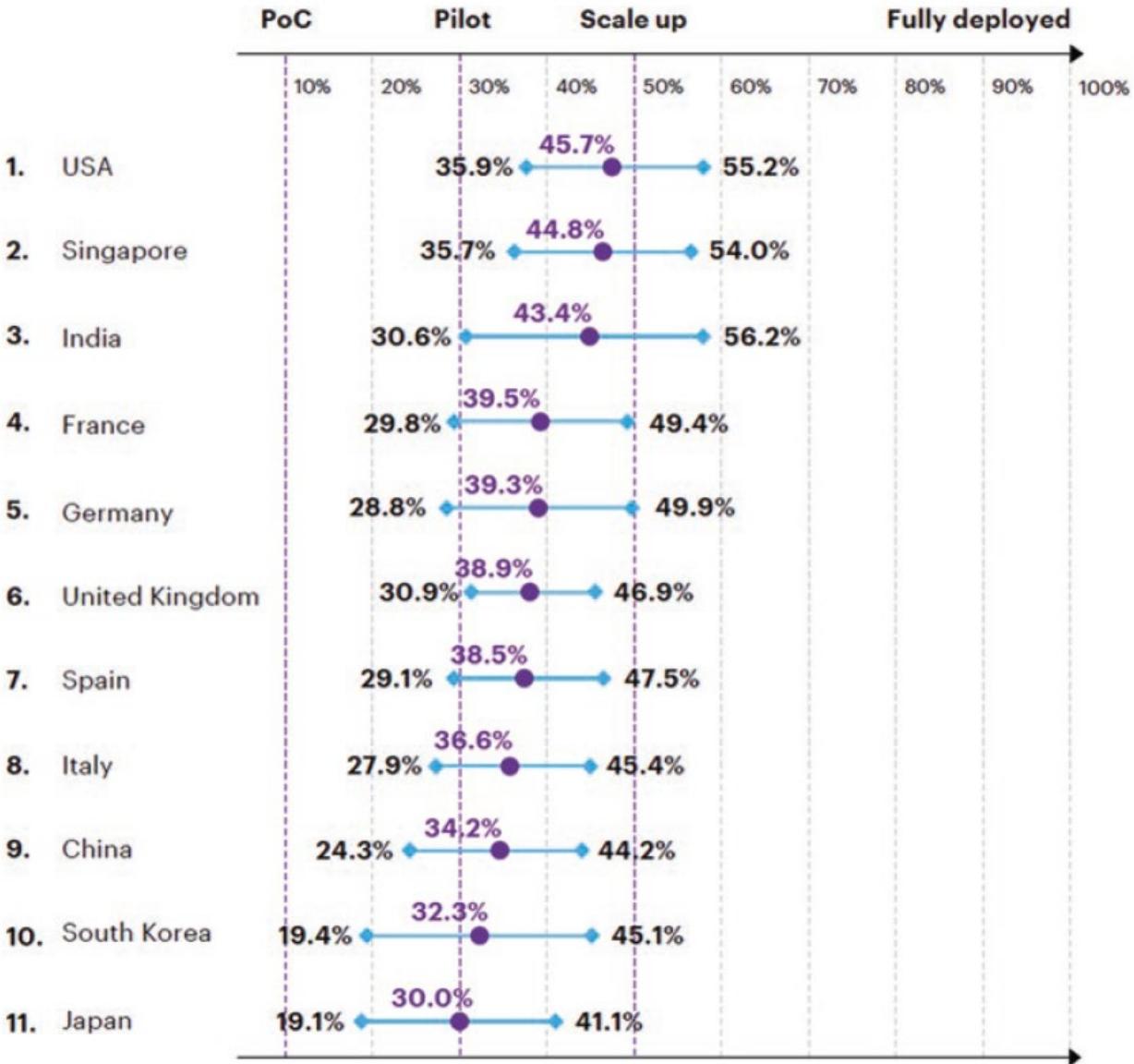
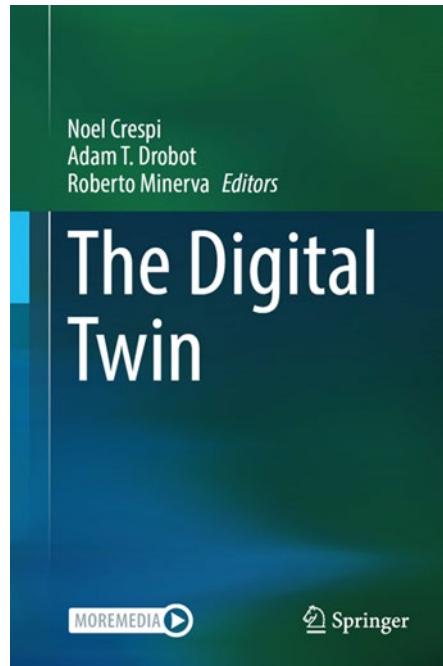
4



# デジタル成熟度分析

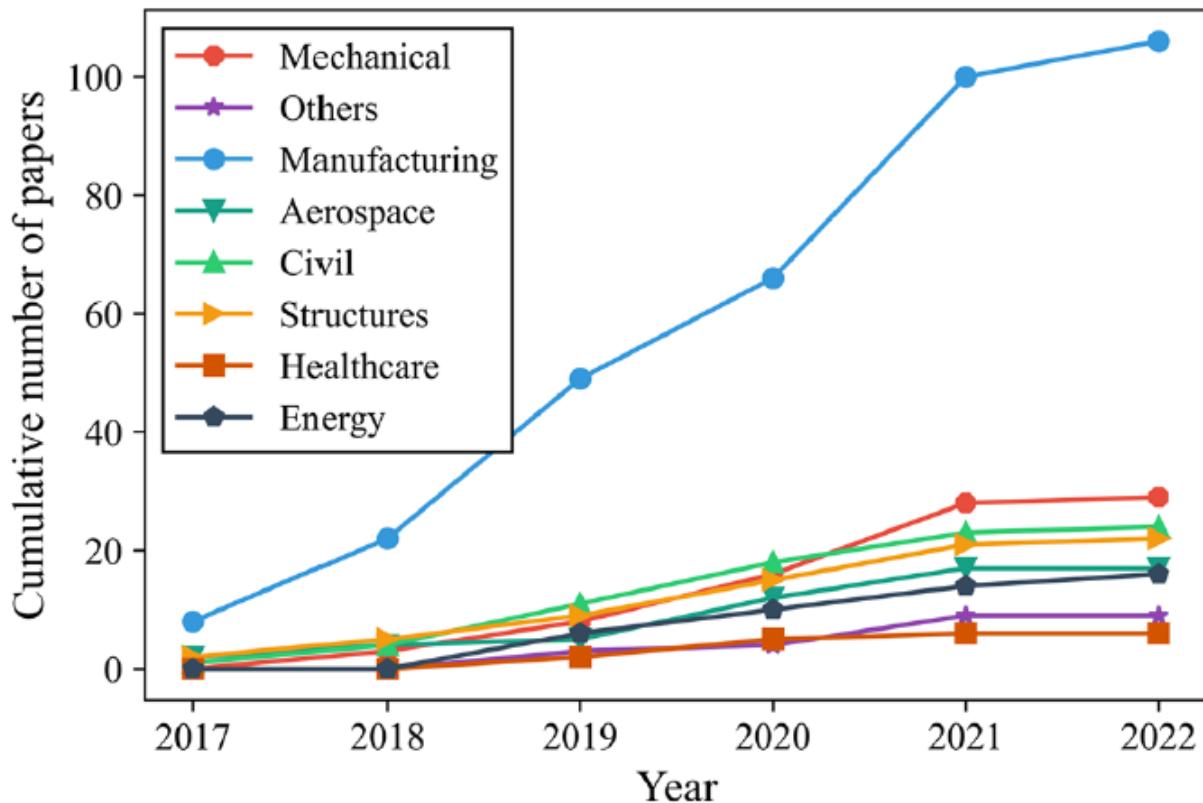
## ● Digital maturity by country

Japan's relative lack of digital maturity may be explained by the entrenched large and automated manufacturing base with excellent practices, which is likely slow to transform. Moreover, Japan's Industry 4.0 program wasn't truly visible until after 2015, which is nearly 5 years later than Germany.

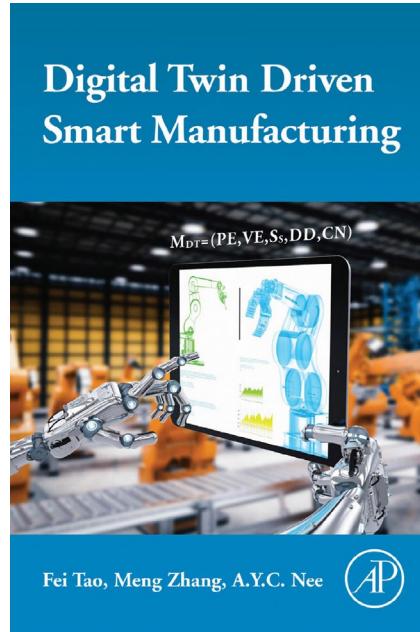


# デジタルツインの研究開発

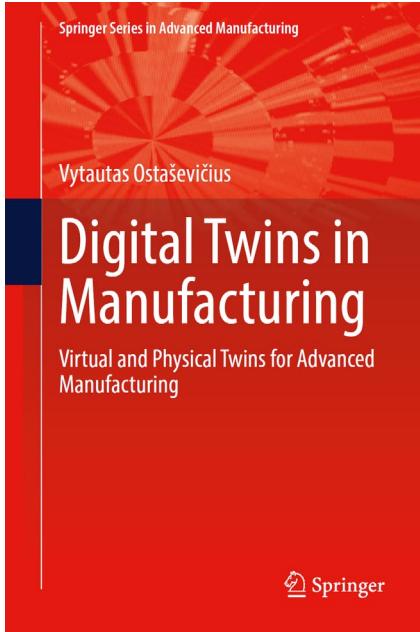
- 2016年頃からレポート数は急増
  - 国別： 中国，米国，ドイツ，途上国… レガシーが少ない，現場の力が弱い
  - 分野別：



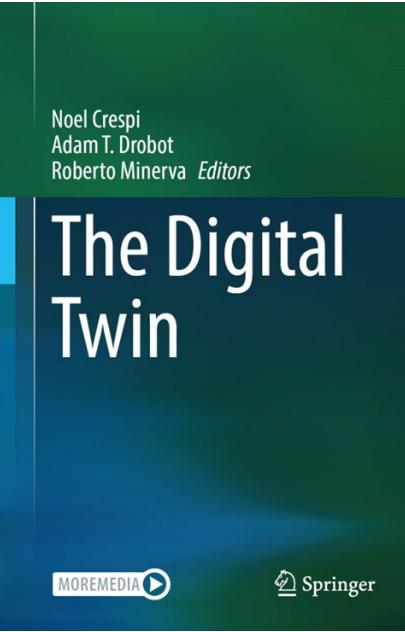
## ● 教科書



2019



2022



2023

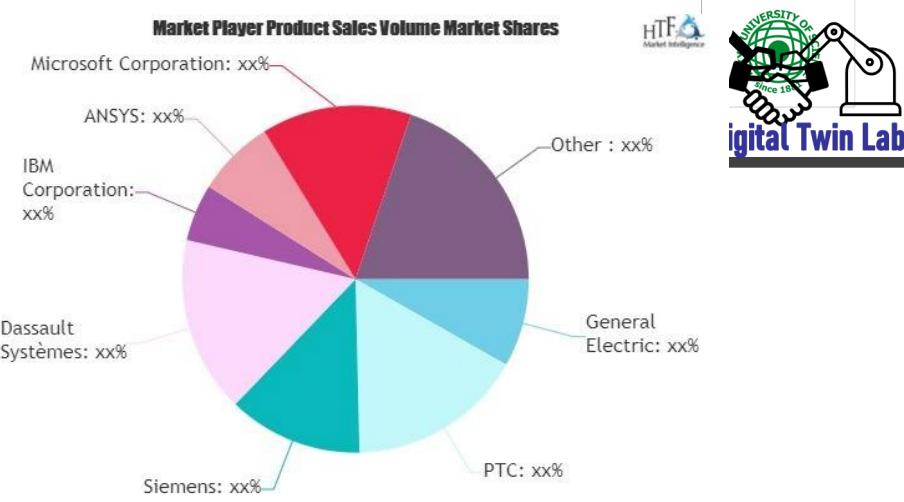
# デジタルツインのプラットフォーム

## ● 商用

➤ IoTプラットフォームやPLMと重なる部分が多い, **DAPSA**

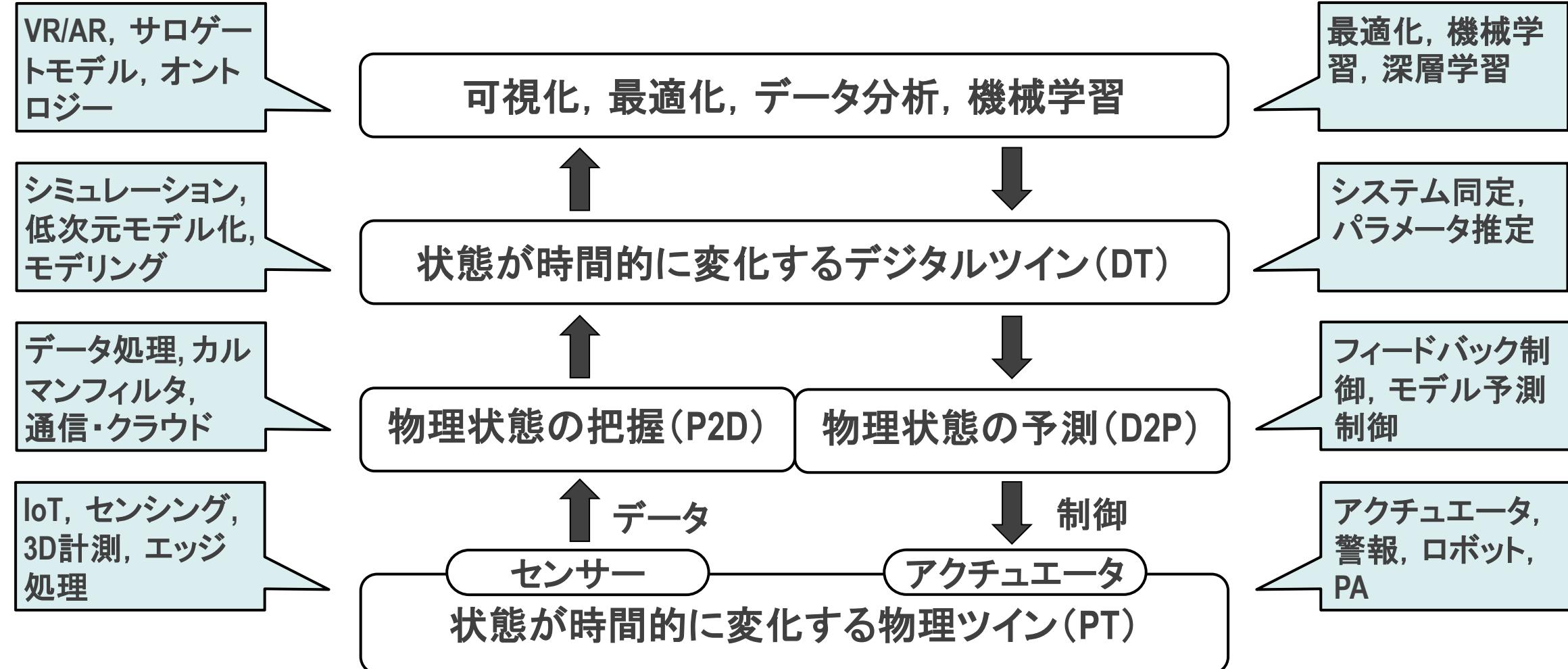
## ● 製造・生産・エンジニアリング(海外)

提供企業	ツール・プラットフォーム	国名	適用先	URL
Dassault	3D EXPERIENCE	フランス	製造, 航空宇宙, 都市	<a href="https://www.3ds.com/ja/3dexperience/virtual-twin-experience">https://www.3ds.com/ja/3dexperience/virtual-twin-experience</a>
ANSYS	TwinBuilder	米国	製造, 電子機器	<a href="https://www.ansys.com/ja-jp/products/digital-twin/ansys-twin-builder">https://www.ansys.com/ja-jp/products/digital-twin/ansys-twin-builder</a>
PTC	ThingWorx	米国	製造	<a href="https://www.ptc.com/ja/industry-insights/digital-twin">https://www.ptc.com/ja/industry-insights/digital-twin</a>
Siemens	Plant Simulation	ドイツ	製造	<a href="https://www.plm.automation.siemens.com/global/ja/our-story/glossary/digital-twin/24465">https://www.plm.automation.siemens.com/global/ja/our-story/glossary/digital-twin/24465</a>
Autodesk	Tandem	米国	AEC	<a href="https://redshift.autodesk.co.jp/what-is-a-digital-twin/">https://redshift.autodesk.co.jp/what-is-a-digital-twin/</a>
MapleSoft	MapleSim	カナダ	工場, バーチャルコミッショニング	<a href="https://www.maplesoft.com/solutions/engineering/App-Areas/Virtual-Commissioning.aspx">https://www.maplesoft.com/solutions/engineering/App-Areas/Virtual-Commissioning.aspx</a>
MathWorks	MATLAB/Simulink	米国	製造, 制御	<a href="https://jp.mathworks.com/campaigns/offers/digital-twins-for-predictive-maintenance.html">https://jp.mathworks.com/campaigns/offers/digital-twins-for-predictive-maintenance.html</a>
NVIDIA	Omniverse	米国	製造, 環境	<a href="https://blogs.nvidia.co.jp/2022/01/05/what-is-a-digital-twin/">https://blogs.nvidia.co.jp/2022/01/05/what-is-a-digital-twin/</a>



# デジタルツインのキー技術

## ● 要素技術の連携



# 製造のデジタルツイン

## ● AR, VRの利活用

- 背景: 工場の人手不足, 技術伝承, デバイスの進歩
  - 目的: 遠隔監視, 作業情報指示, 検査・訓練サポート, 問題の発見や修理
  - デバイス: スマートグラス, HMD, タブレット, スマホ
  - SW: Vuforia(PTC), ARKit(Apple), Sumerian(AWS), ARCore(Google), ARToolKit(OSS)



<https://www.youtube.com/watch?v=UhW12bILH7U>

# 製造のデジタルツイン

## ● 製造プロセスのエミュレーション・最適化・仮想試運転(**Virtual Commissioning**)

- 背景: 工場の人手不足, 多品種少量生産, タイムリー
- 目的: 生産ライン最適化・自動化, 生産スケジューリング, 品質↑, 生産性↑, 設備利用↑
- DT構築 ⇒ パラメータチューニング, レイアウト・工程最適化, 仮想試運転
- SW: Emulate3D, FlexSim



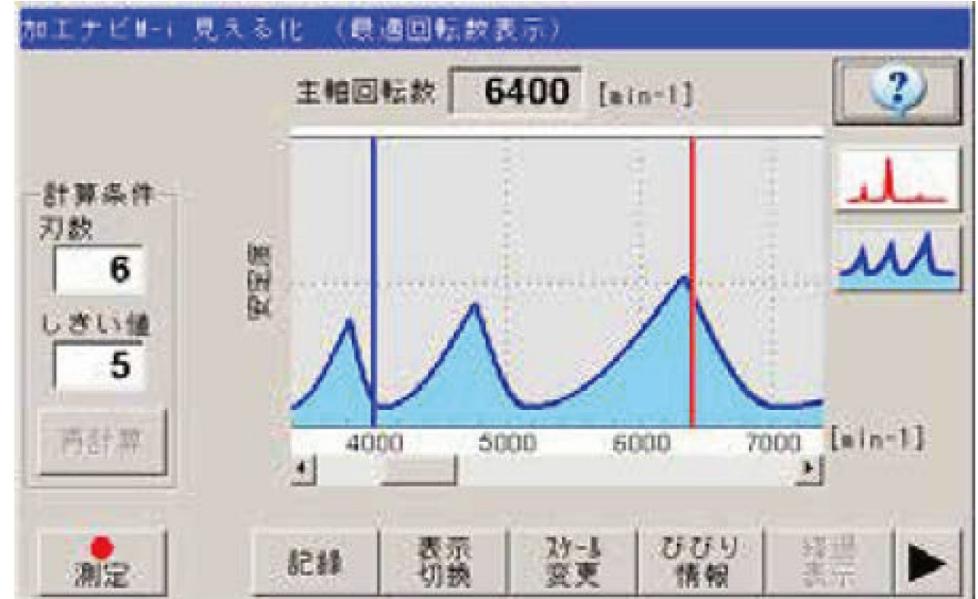
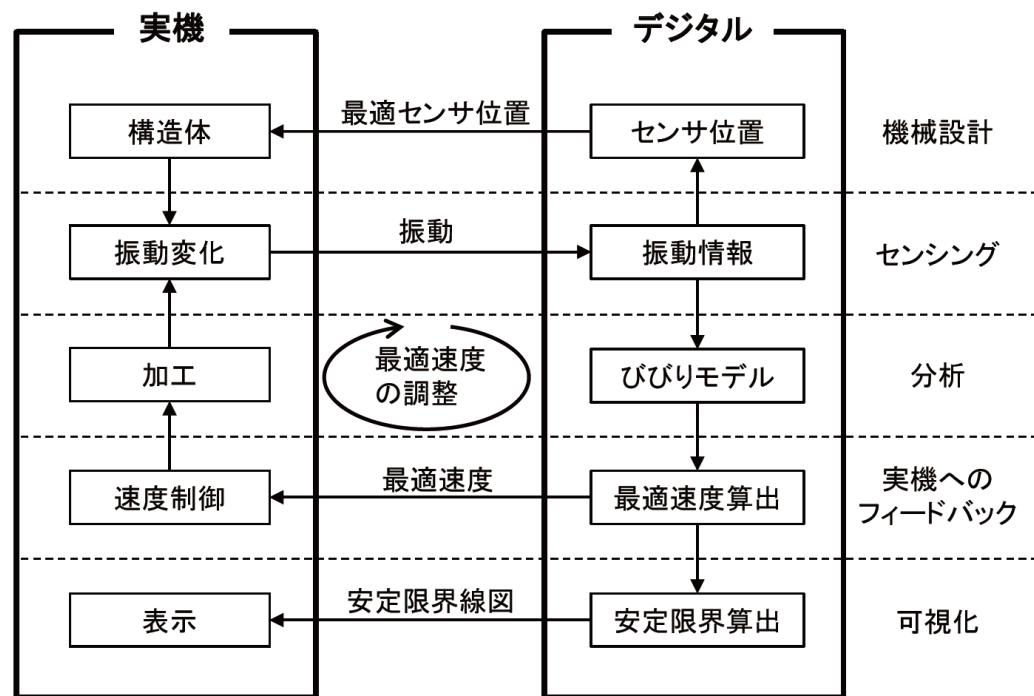
Emulate3D Controls Testing for  
Machine Builders

<https://www.youtube.com/watch?v=FOkAwTX40Fc&list=PLq6AepKoxTAVACHdAGTXNbgtjuLgmi74z>

# 製造のデジタルツイン

## ● 工作機械デジタルツインによる生産の最適化・工程の改善

- ▶ 部品加工の工程設計用NCプログラム事前検証
- ▶ 工作機械の熱変位抑制
- ▶ 最適な加工条件の探索、びびり振動回避



(a) 加工面(びびり)



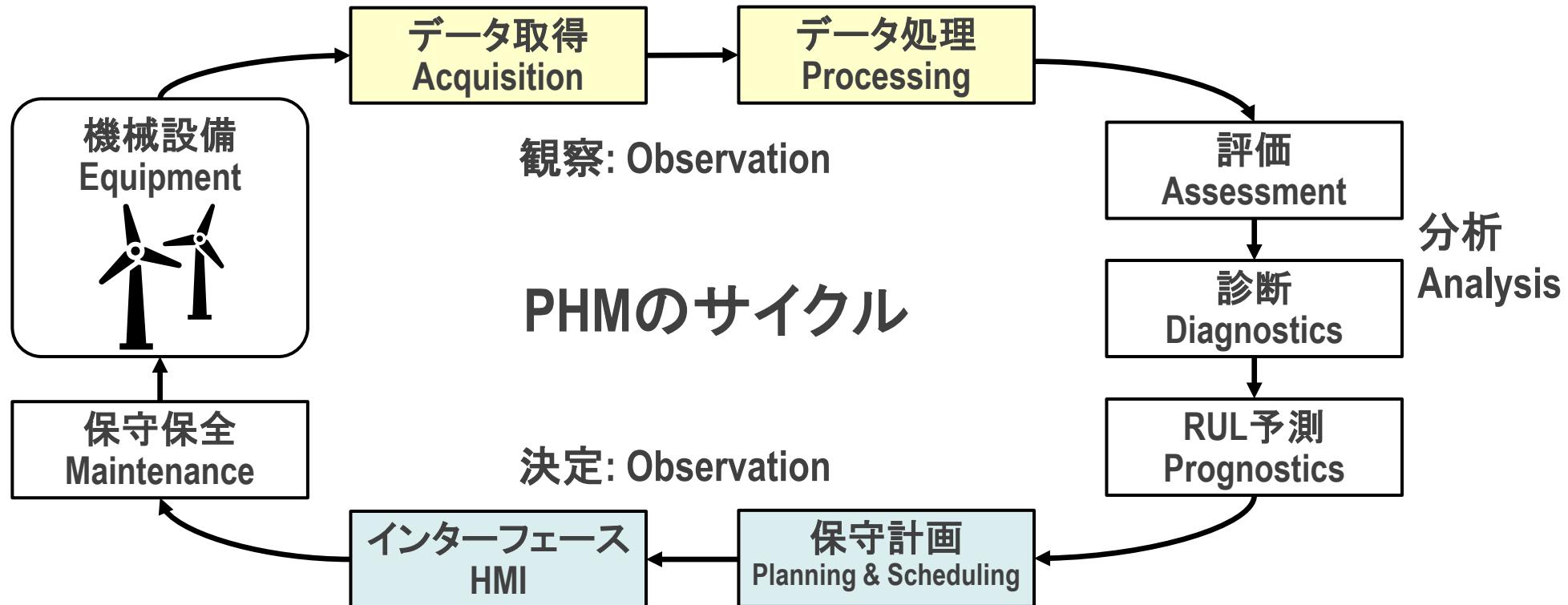
(b) 加工面(びびり抑制後)

# 運用保守(O&M)のデジタルツイン

- 保守保全に関する用語
  - 保守・保全(Maintenance), 異常検知(Anomaly detection), 異常特定(Fault identification)
  - 故障診断(Diagnostics), 予測・予知(Prognostics)
- 設備の保全(故障しないようにする)と保守(故障したら直す)
  - 事後保全(Reactive Maintenance); 故障, 不良品発生などの後に原因究明と対策(修理)
    - エンジンがからなくなったときにバッテリーを交換
  - 予防保守(Preventive Maintenance); 決められた期間で決められた内容の点検(車検)
    - 走行距離3000kmまたは3か月毎のオイル交換
  - **予知保全(Predictive Maintenance)**; 故障の予兆を検知して保守タイミングを判断
    -

# 運用保守(O&M)のデジタルツイン

- **故障予知診断 (Prognostics and Health Management; PHM)** 故障予知と健全性診断
  - 予知保全を含む保全技術の総称、修理コストが高い機器に有効
  - 近年、**余寿命 (Remaining Useful Life; RUL)** の予測に重点化



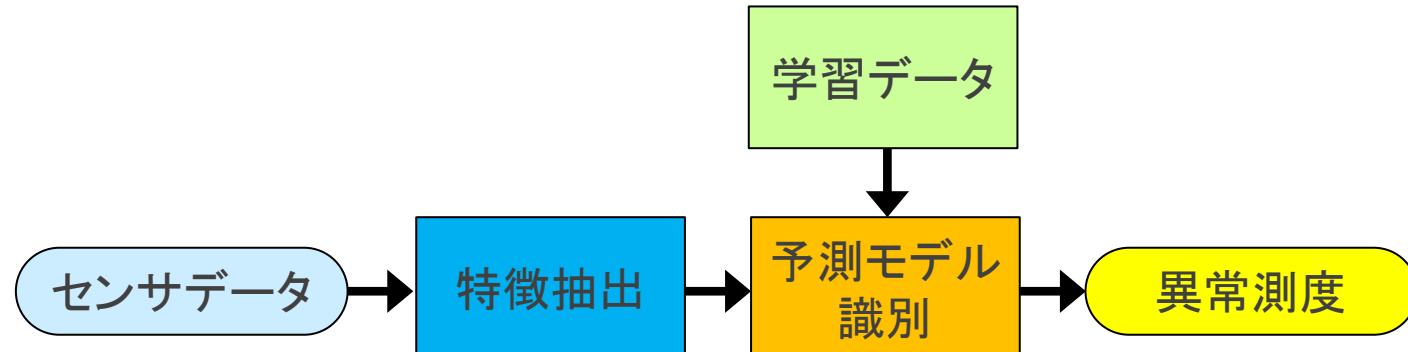
# 余寿命(RUL)予測

## ● 余寿命予測の現状

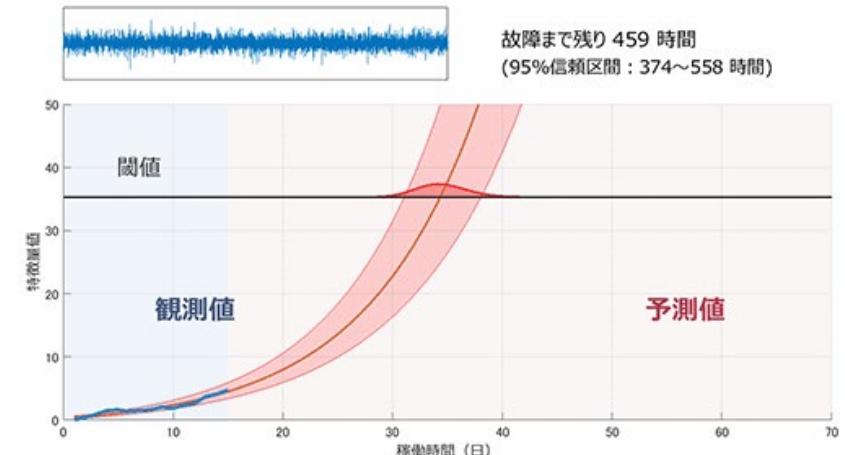
- 機械、設備、インフラ(道路・橋梁)の老朽化により注目
- 従来:類似モデル、劣化モデル等の利用
- 最近:CBM(Condition Based Maintenance)や機械学習利用により精度向上

## ● 機械学習による余寿命(RUL)予測

- 特徴量(e.g. 単調増加度、共通傾向、予測容易性)の抽出(特徴量エンジニアリング)
- 課題: 教師データの品質に依存、学習に使える故障・履歴データが少、説明・解釈性



[https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02\\_01.html](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html)  
 MathWorks, 残存耐用時間 (RUL) を予測する3つの方法  
<https://edn.itmedia.co.jp/edn/articles/1912/17/news001.html>

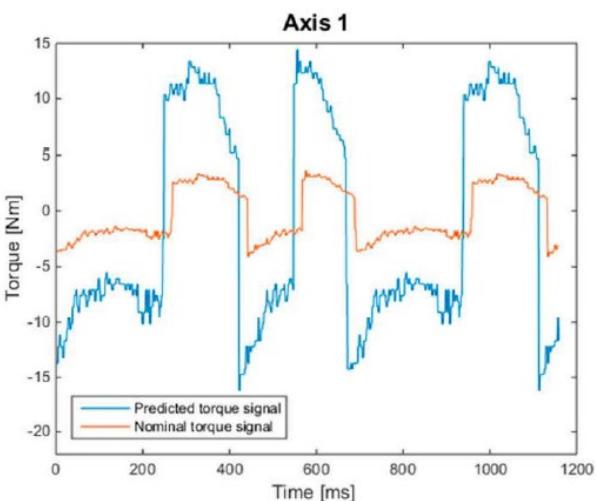
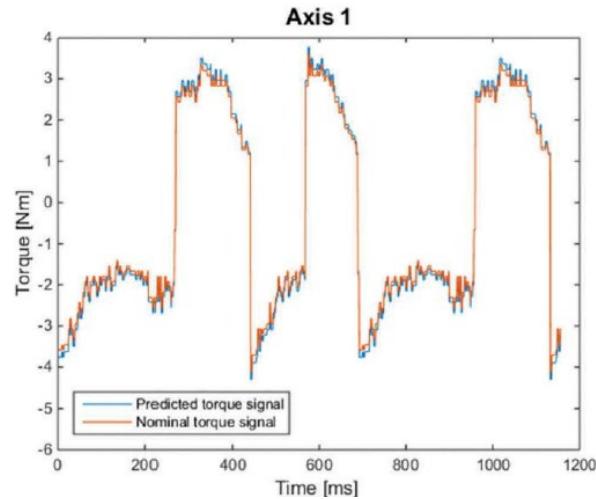
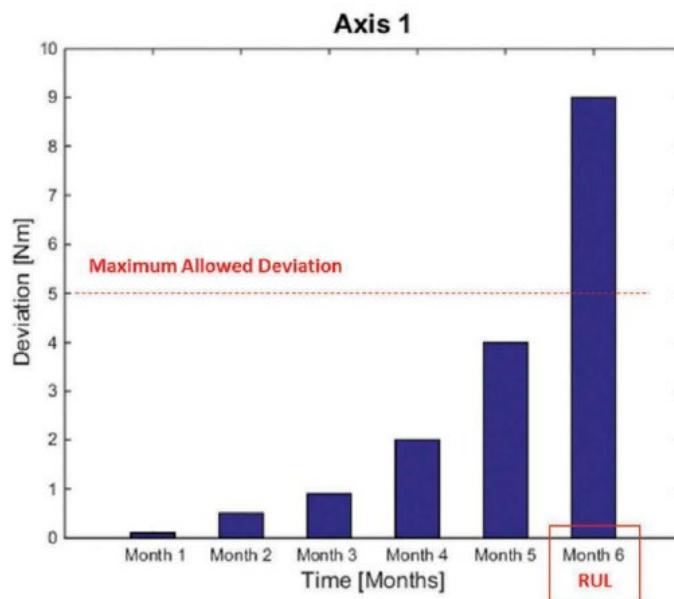
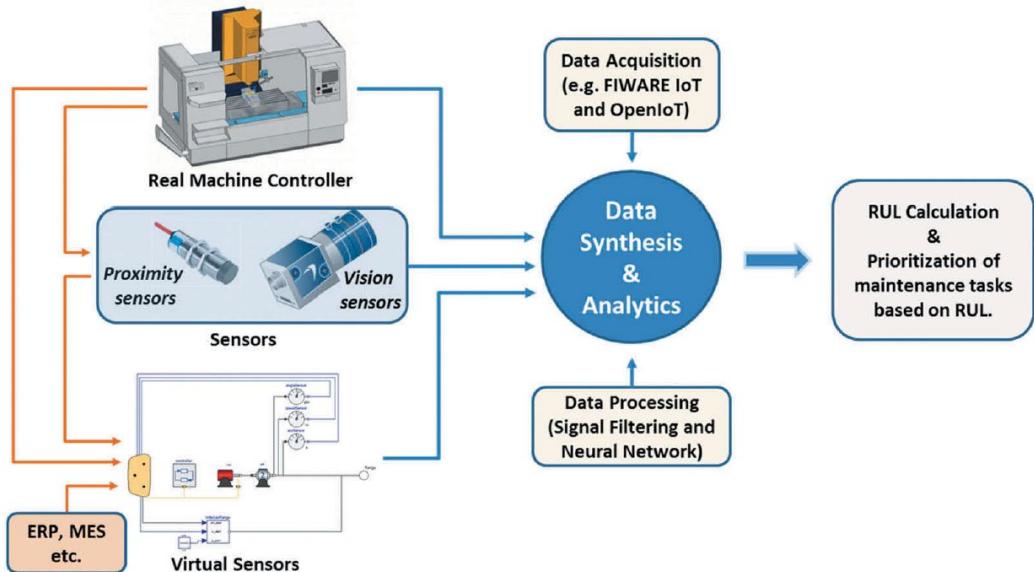


風力タービンベアリング寿命予測

# 余寿命(RUL)予測

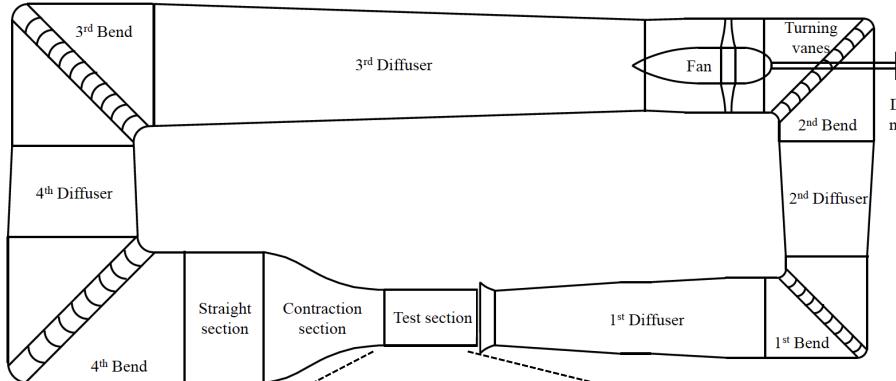
## ● DT活用による故障データ, 履歴データの作成

1. 物理ベースモデルの構築(オフライン)
2. 実データによる物理モデルのパラメータチューニング(オンライン)
3. 故障データ, 故障までの履歴データの作成
4. RUL閾値の設定

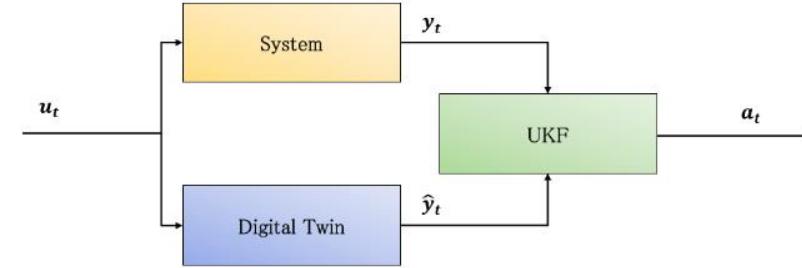


# 異常検知 (Anomaly Detection)

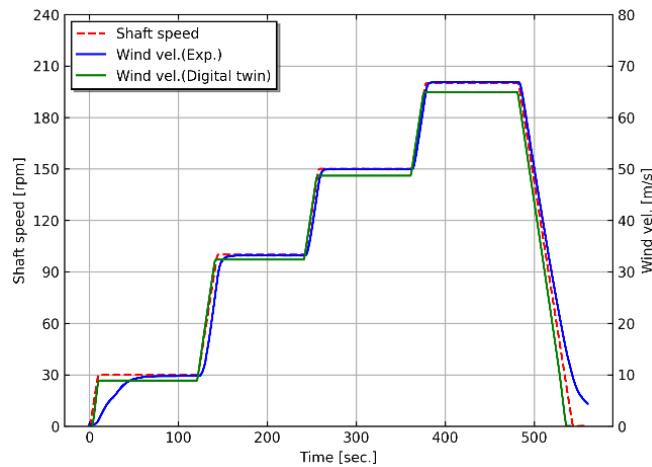
- デジタルツインによる風洞設備のリアルタイム異常検知 (JAXA)
  - 1次元モデルをベースとしたデジタルツインを用いて低速風洞のリアルタイム異常検知を実施



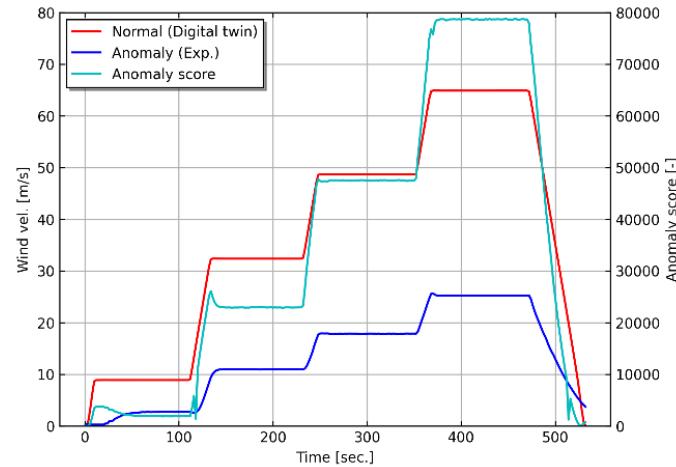
JAXA 6.5m × 5.5m 低速風洞 (LWT1)



デジタルツインを使用した異常検知フレームワーク

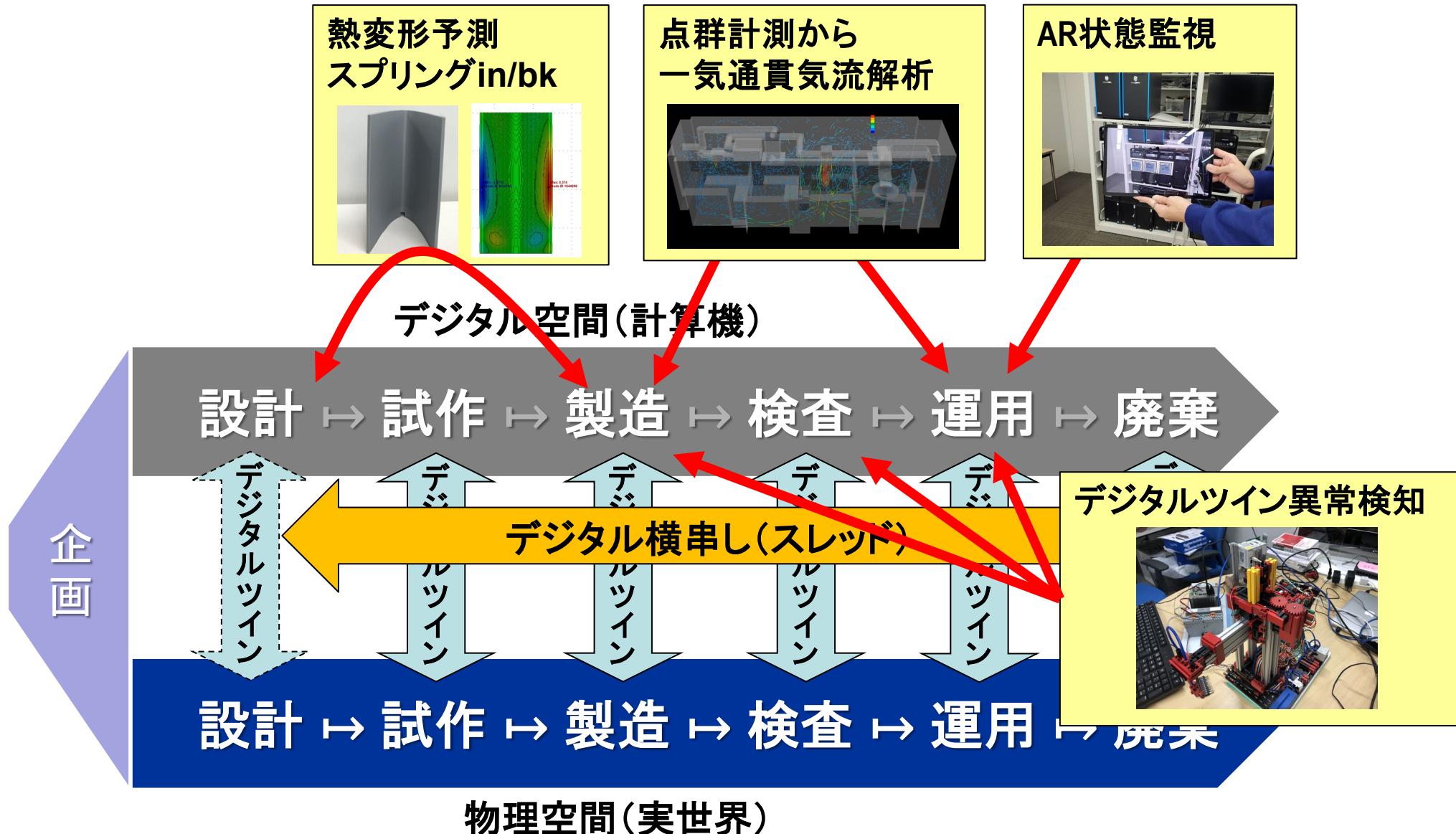


標準運転パターン



異常発生時の計測データと異常度

# TUS.DTラボにおける研究事例

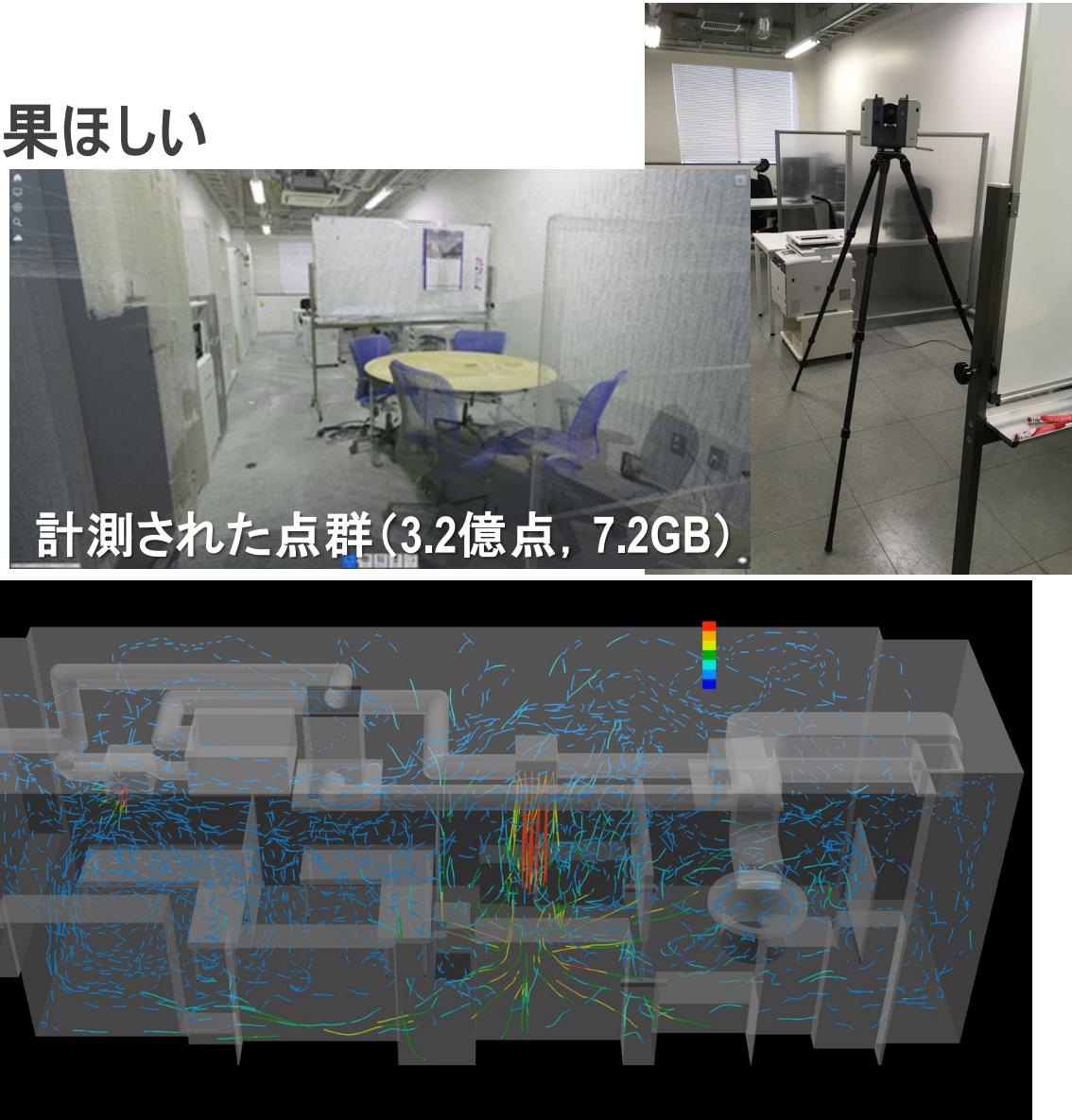
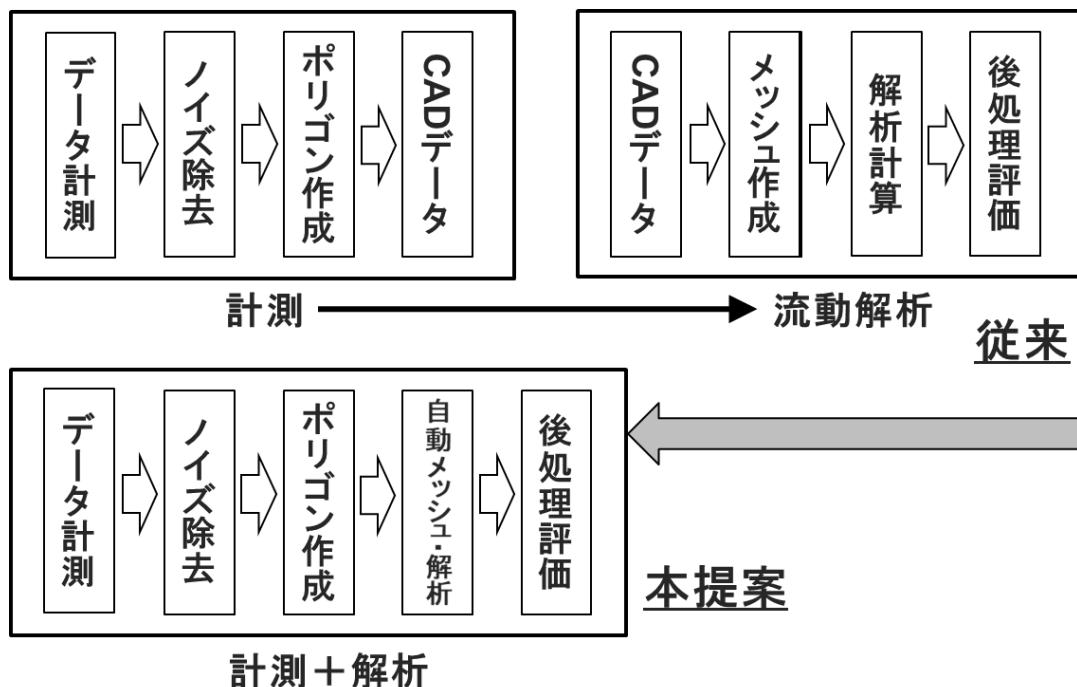


# 点群計測による一気通貫気流解析

## ● 背景

- CADデータがない、図面と現物が異なる、すぐ結果ほしい
- 3D計測(レーザスキャナ等)やHPC-CFDの進歩

## ● 一気通貫CFDの試み

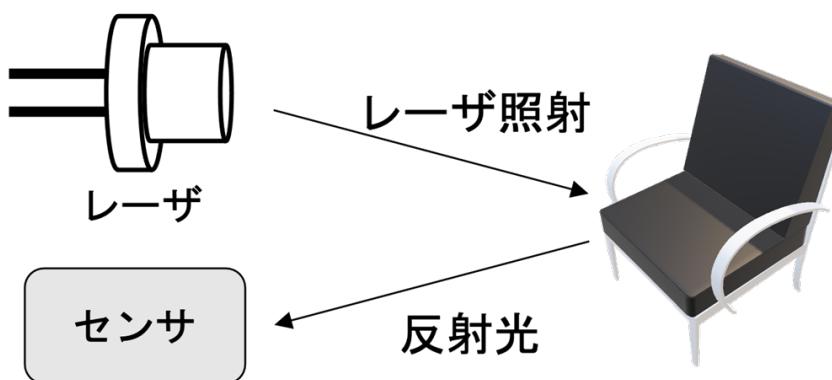


# 点群計測による一気通貫気流解析

- iPadによるラボ形状の計測と3Dモデリング(点群から3Dモデル構築)



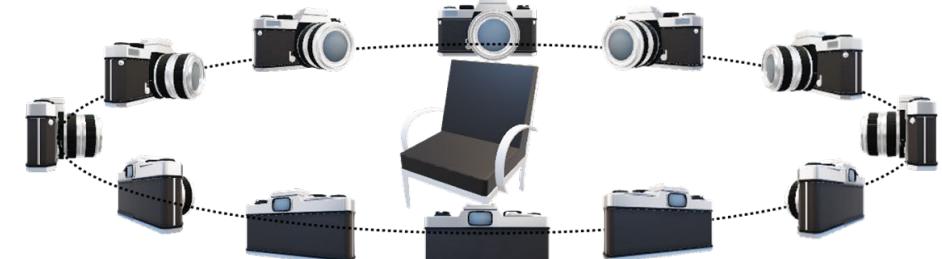
LiDAR



iPad Pro

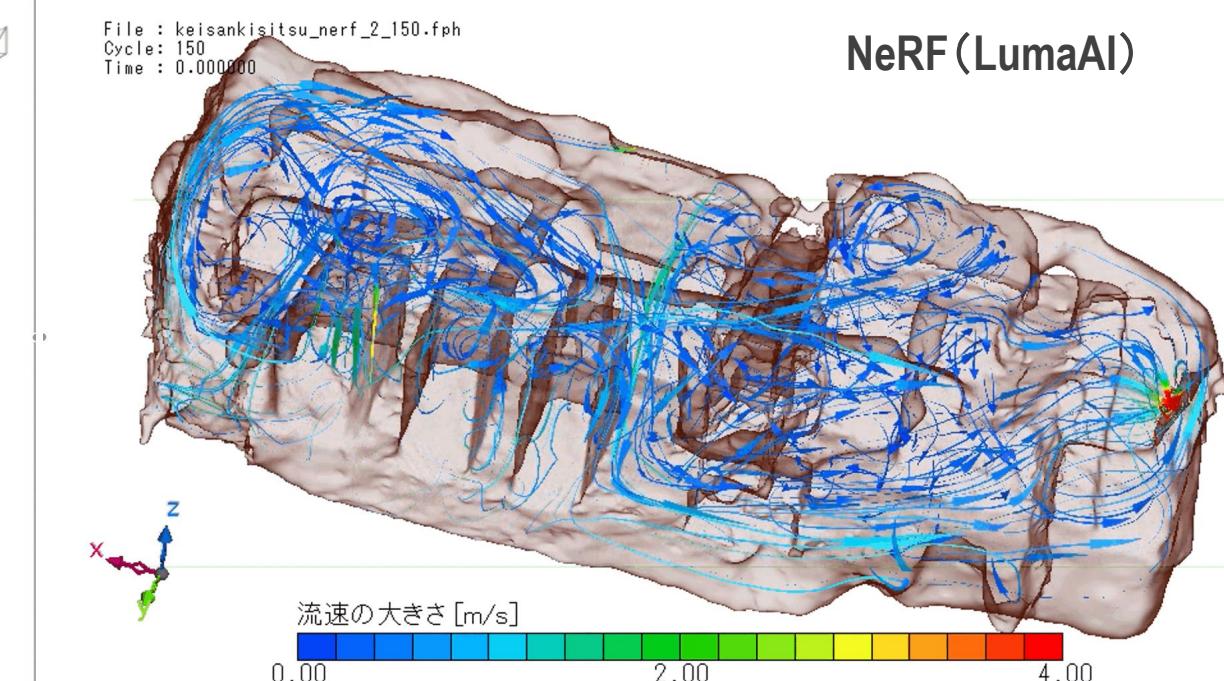
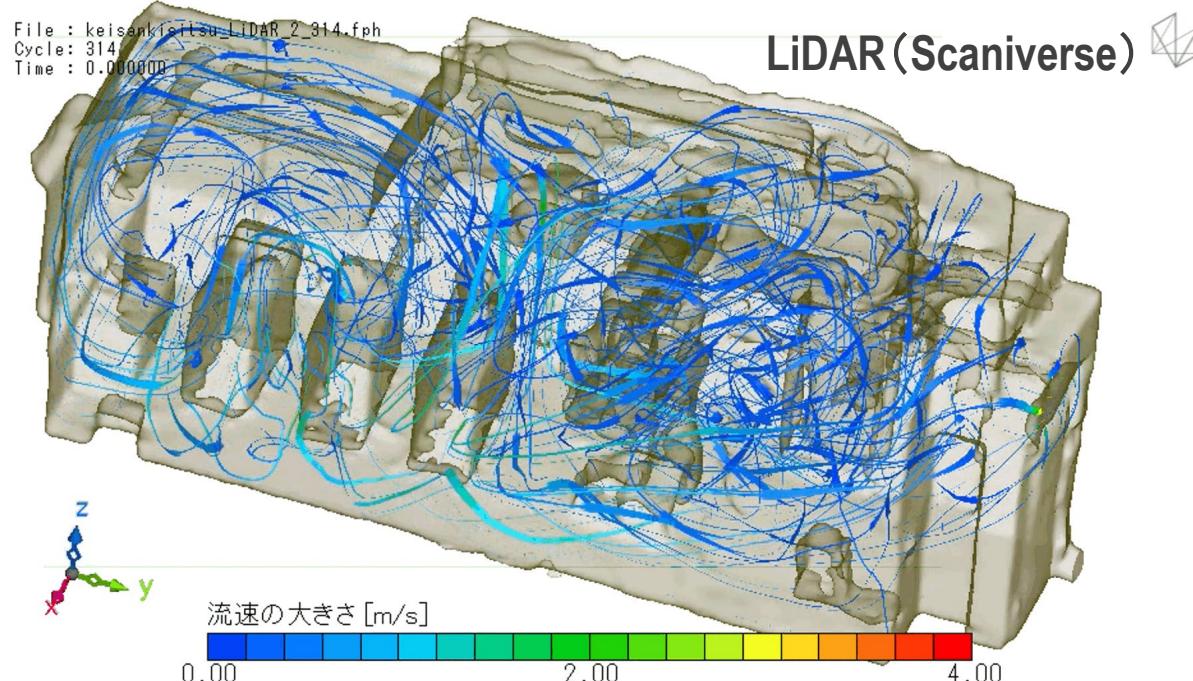


フォトグラメトリ



# 昨年の結果

- 学科計算機室の気流予測



# デジタル横ぐしを目指した製造変形を考慮した解析

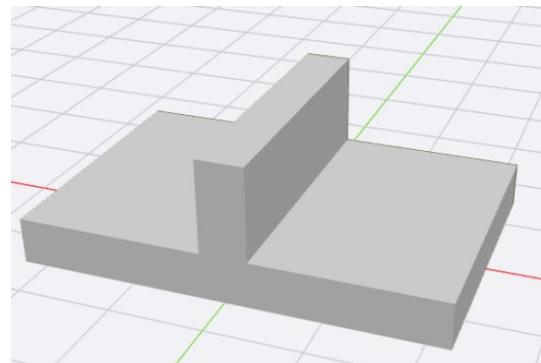
- 3Dプリンタの熱変形(反り)のシミュレーション

- 加工や熱による変形を予測し、試作・製造段階での手戻りを防ぐ

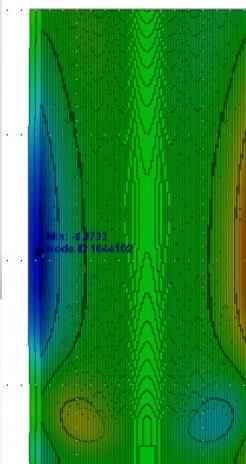
- 材料によって(例:PLA)は反りやすい ⇒ 成形過程の温度計測値を考慮した解析



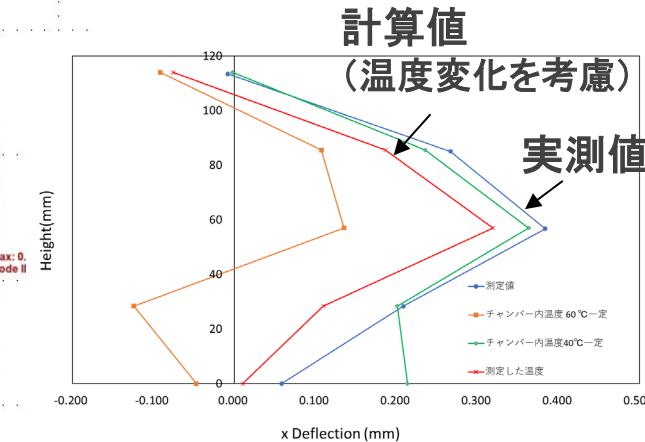
Raise3D Pro2



現物



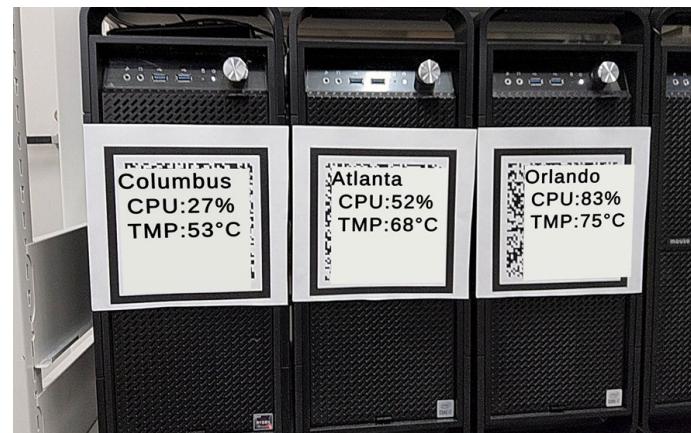
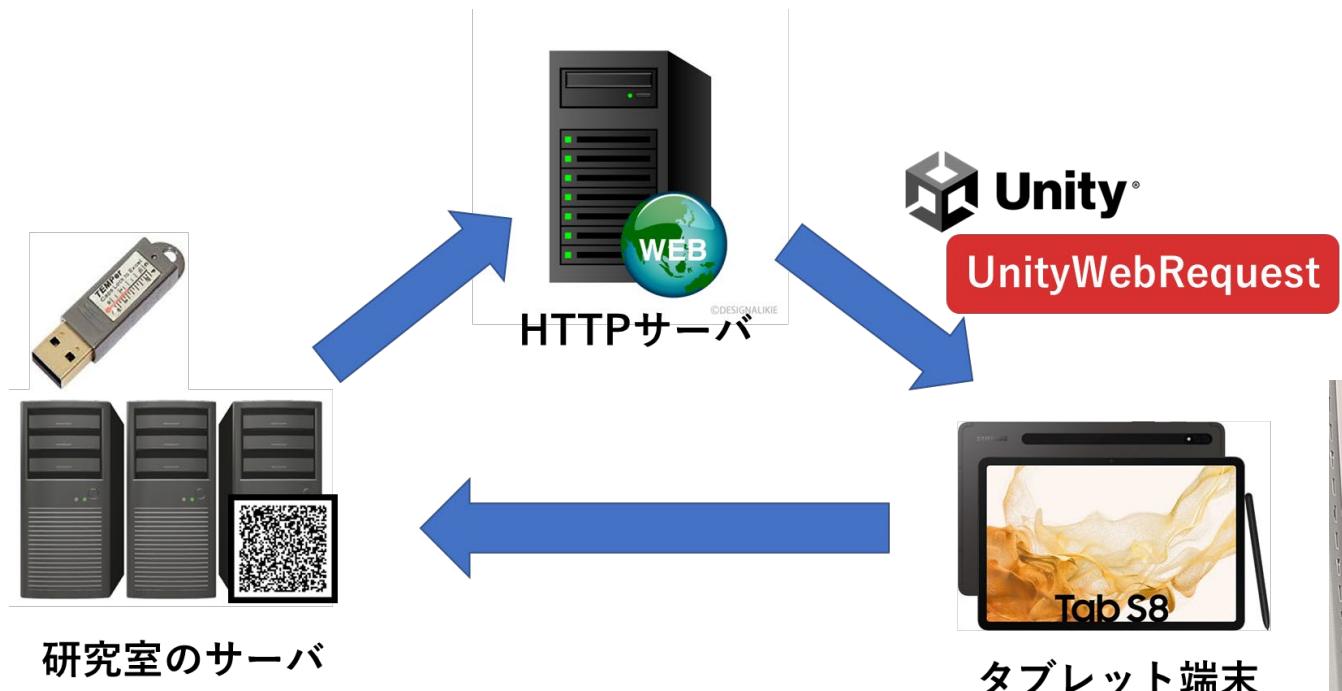
解析



横方向変形量

# AR表示を用いた設備等の状態監視

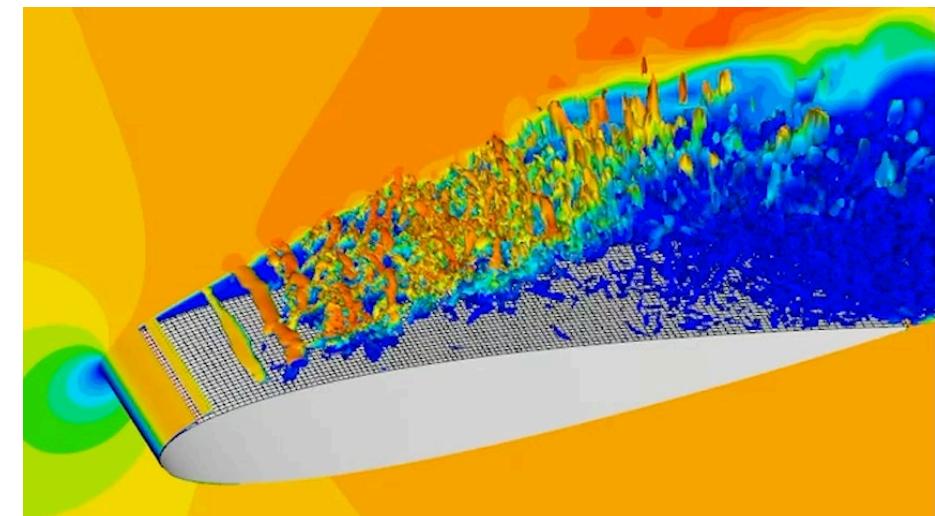
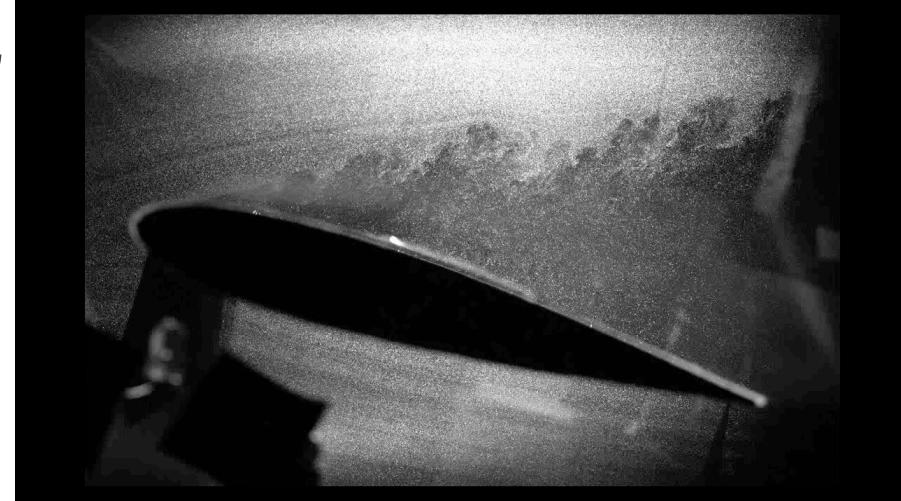
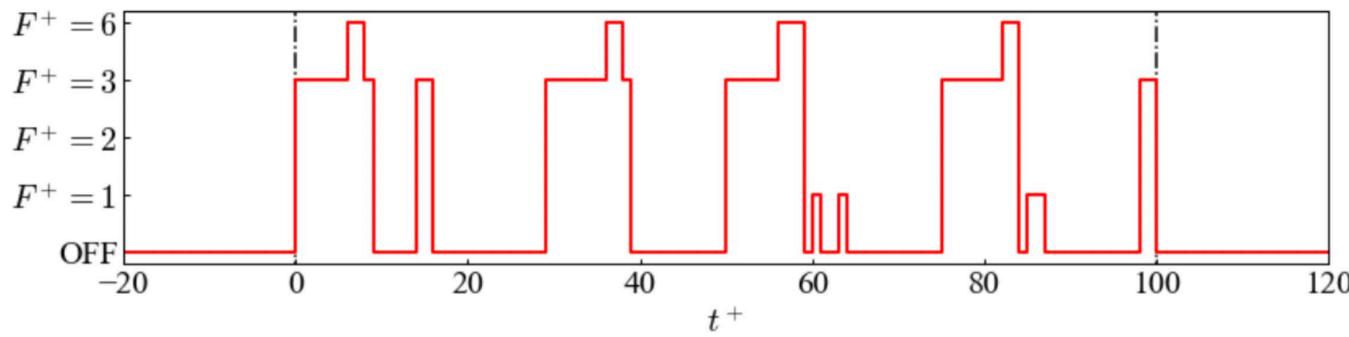
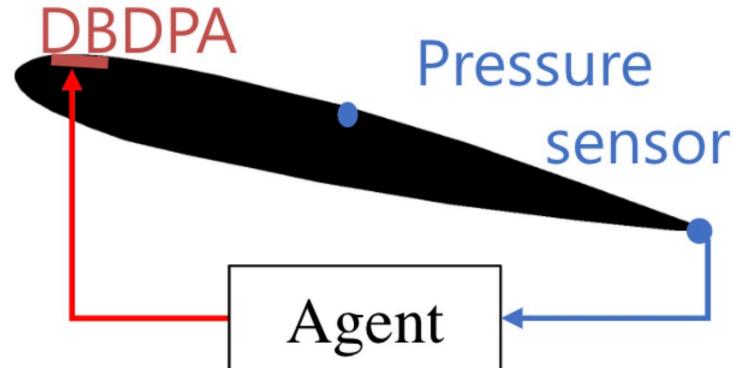
- 汎用ツールUnityによるIoTデータとAR表示のリアルタイム連携
  - IoTは普及したが、計測データの効率的な可視化表示や汎用化に課題
  - ゲームエンジンUnityによるAR表示作成法とインターネットの連携
  - 研究室サーバの稼働状態をリアルタイム表示



# プラズマアクチュエータ(PA)

- DBD-PA駆動方法の強化学習による最適化

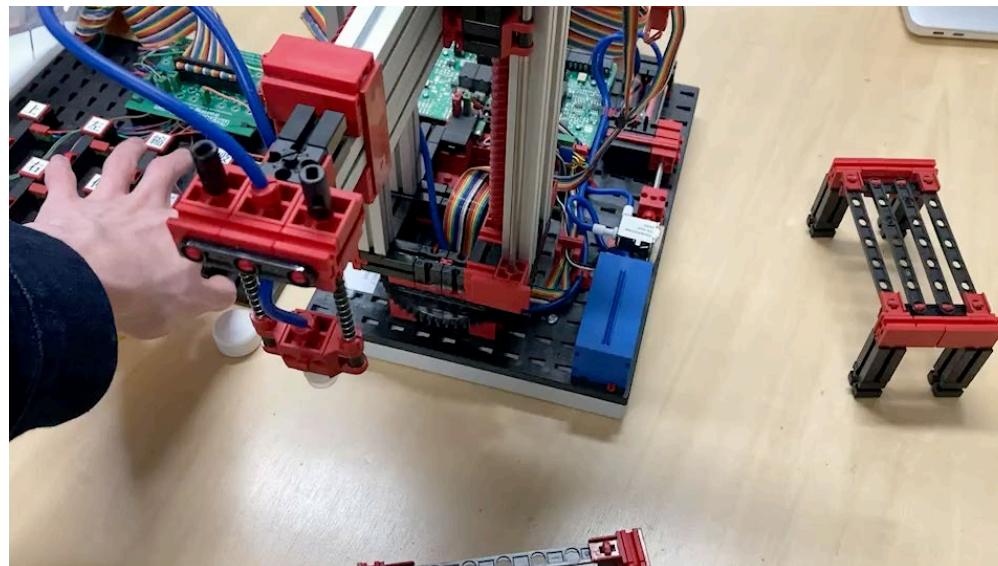
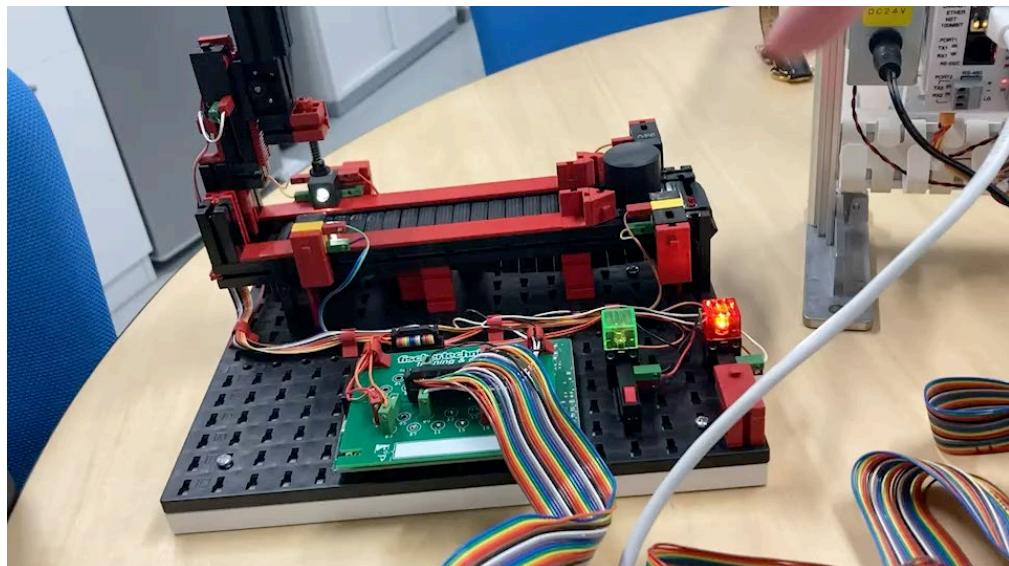
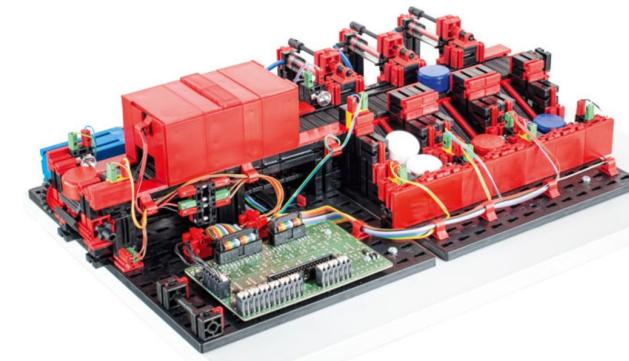
- Deep Q-Network(DQN)を用いてPAの駆動方法を最適化
- 固定周波数による駆動よりも効果的な駆動方法を発見



# デジタルツインによる異常検知

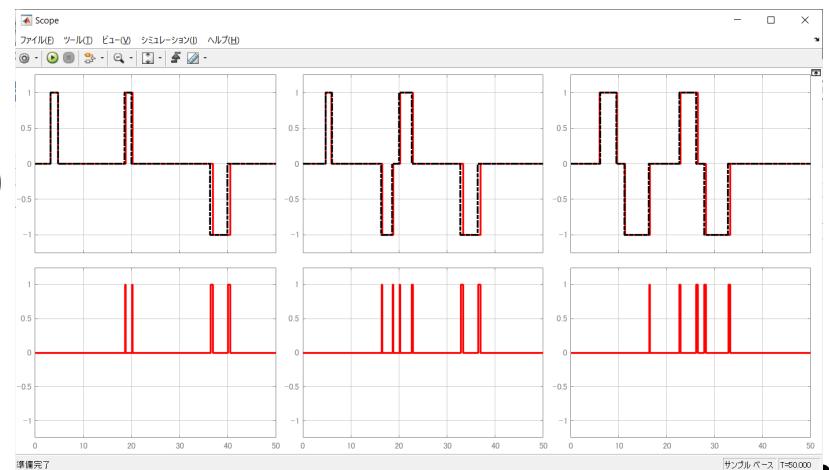
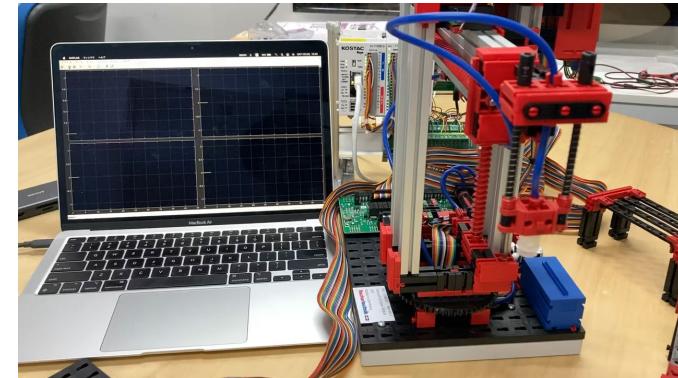
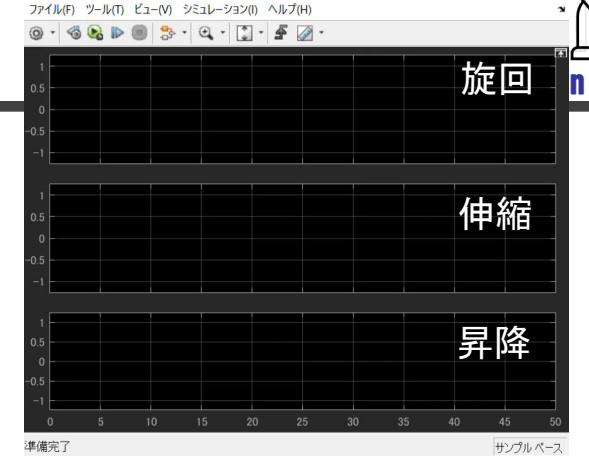
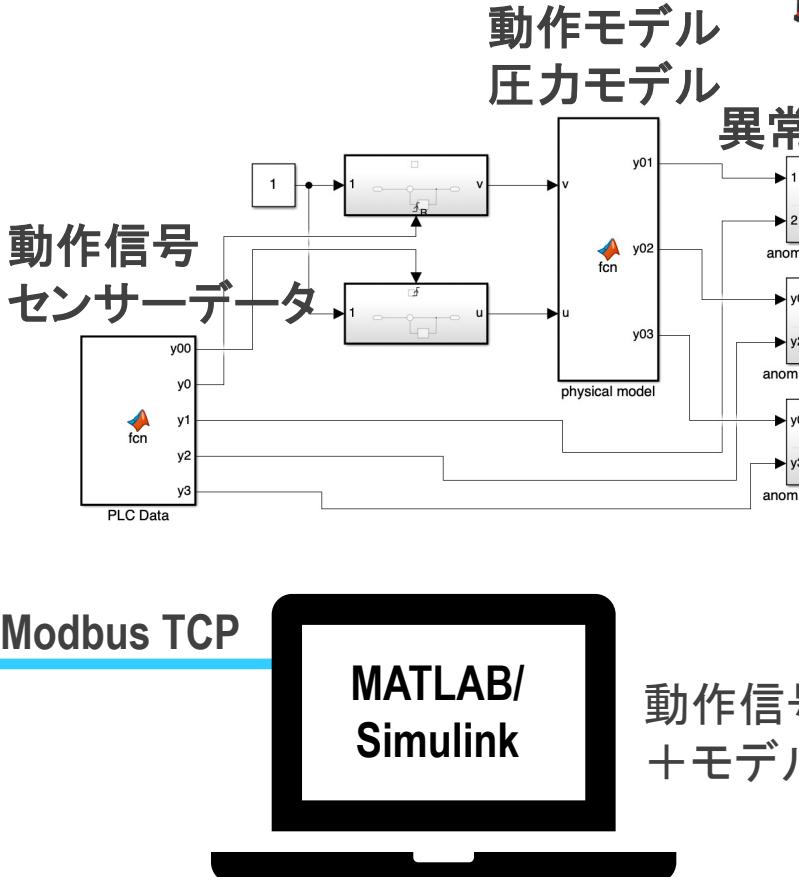
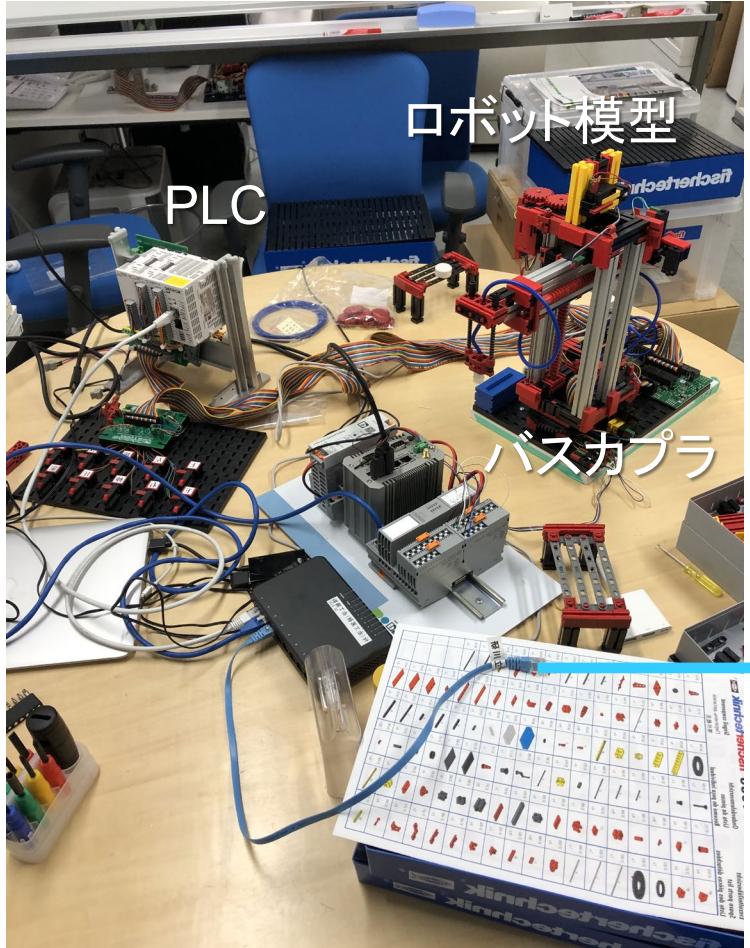
## ● Fishertechnik educationの工場模型

- リアルとバーチャルをつなぐ題材・環境(工場実物は扱えない)
- ドイツ製, 工業系エンジニア育成に利用されている
  - ◆ 工場24V対応, PLC接続可能
- 2021年パンチングマシン, 2022年グリッパー, 2023年ソーティングマシン  
(ベルトコンベア) (ロボット)



# デジタルツインによる異常検知

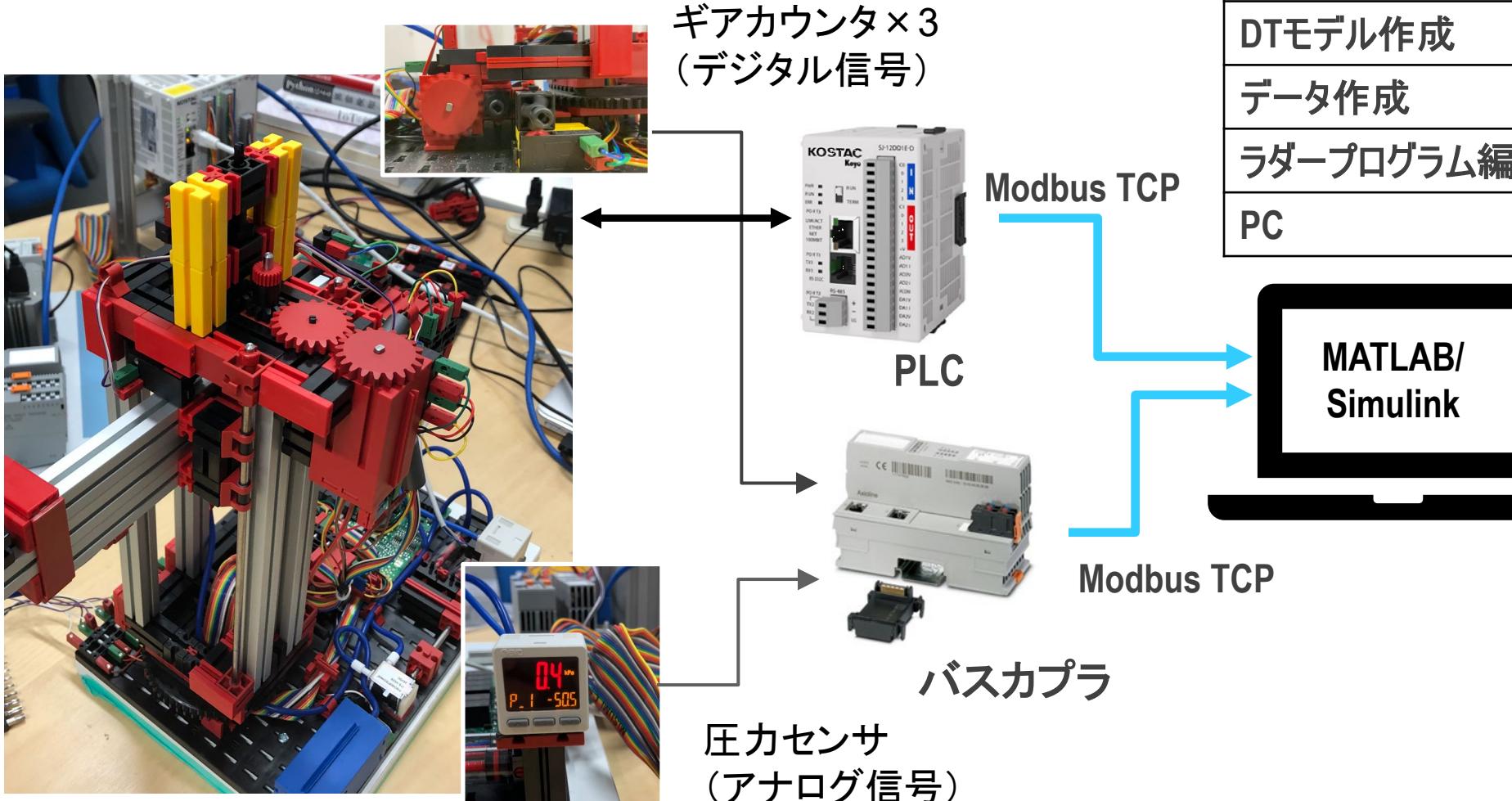
- ロボット模型に対する異常検知システムの構築



# デジタルツインによる異常検知

## ● 構成

- 動作・制御はPLC, センサーデータはバスカプラ, PC接続はModbusTCP



DTモデル作成	Simulink
データ作成	MATLAB
ラダープログラム編集	KPP(無料)
PC	Windows10

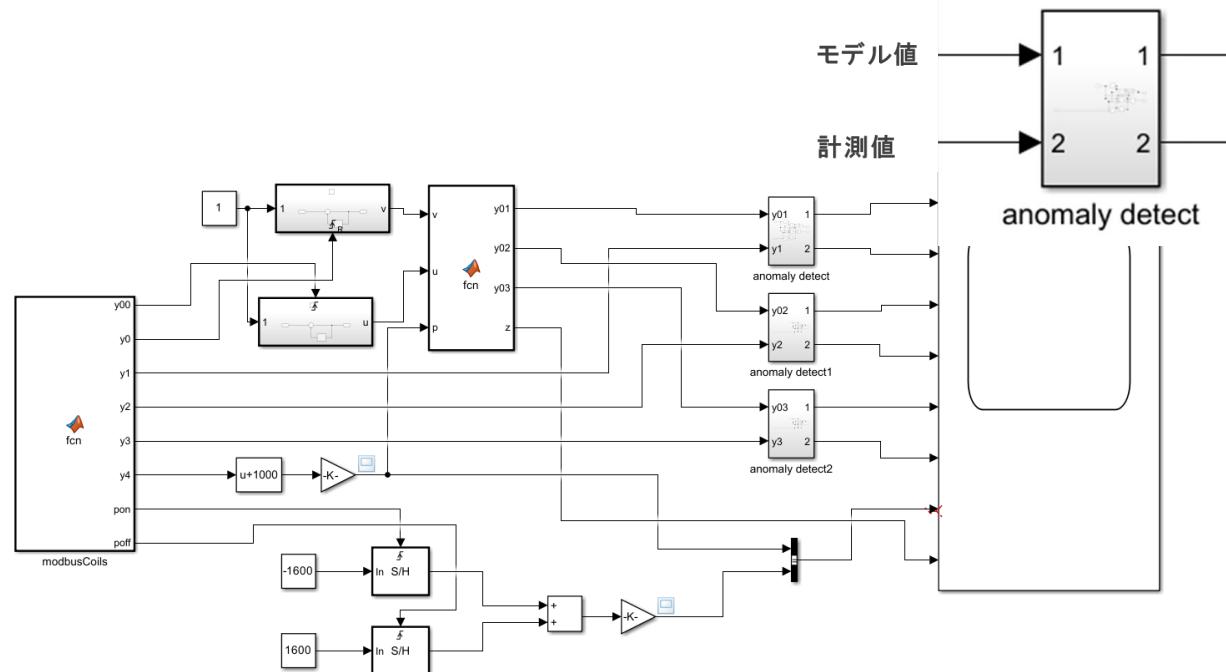
# デジタルツインによる異常検知

## ● 異常検知(Anomaly Detection)

- データの中から通常とは異なるパターンや挙動を特定する
- 統計的手法から機械学習へ

## ● 動作系の異常検知

- モデル値と計測値を異常検知関数により比較し異常度(0/1)を算出

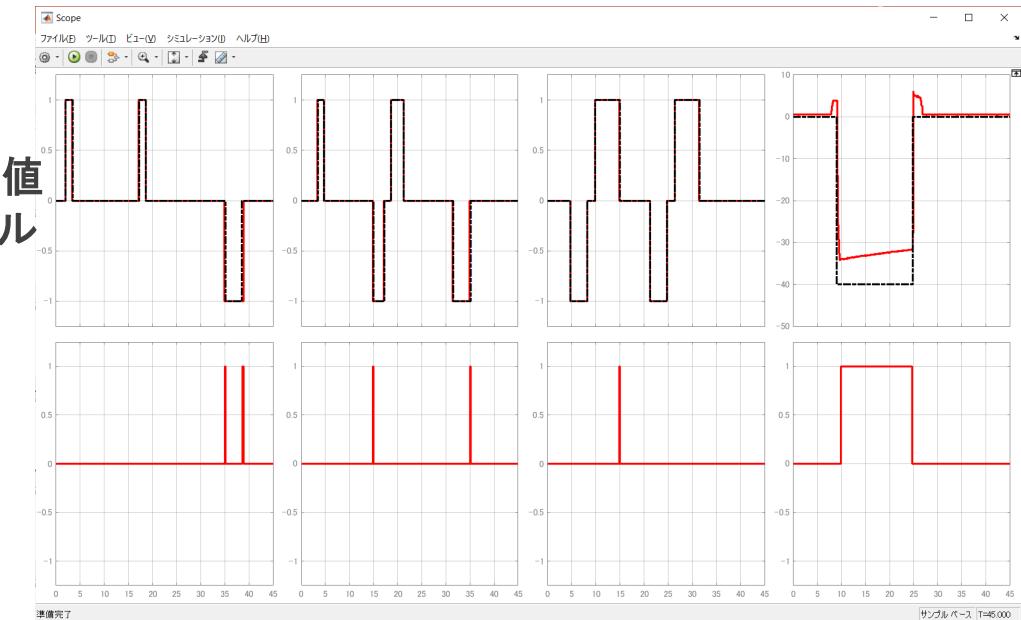


モデル値  
計測値

異常度

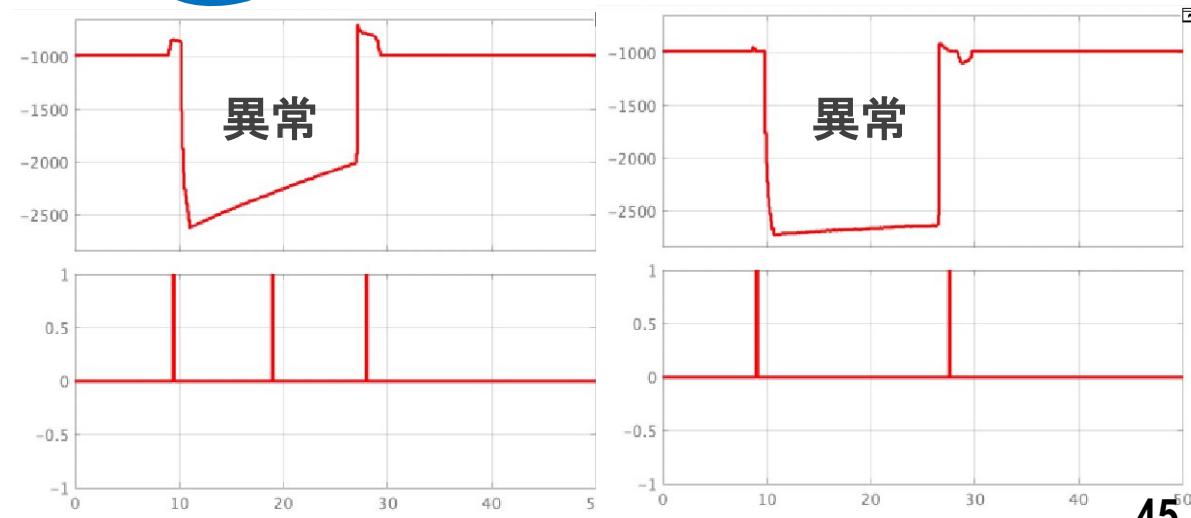
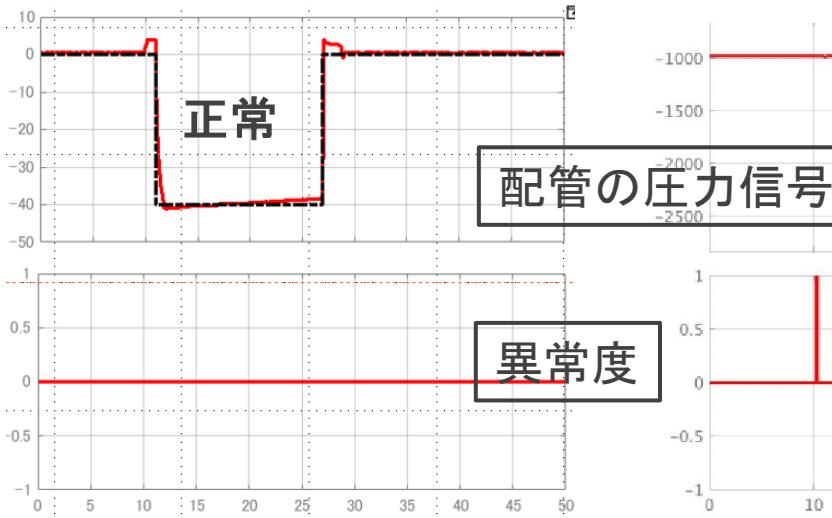
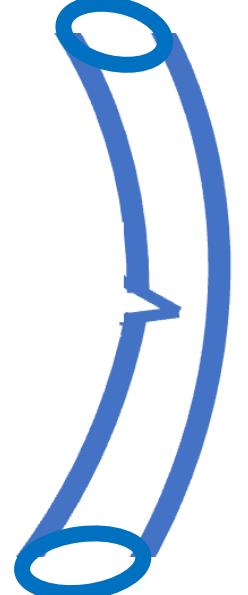
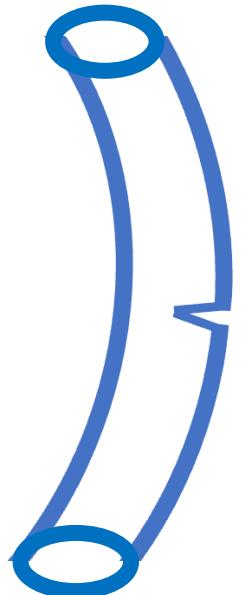
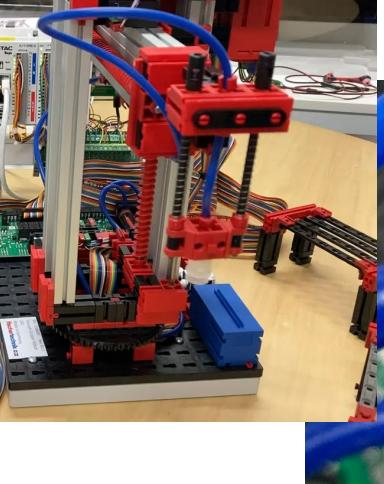
赤: 計測値  
黒: モデル

異常度

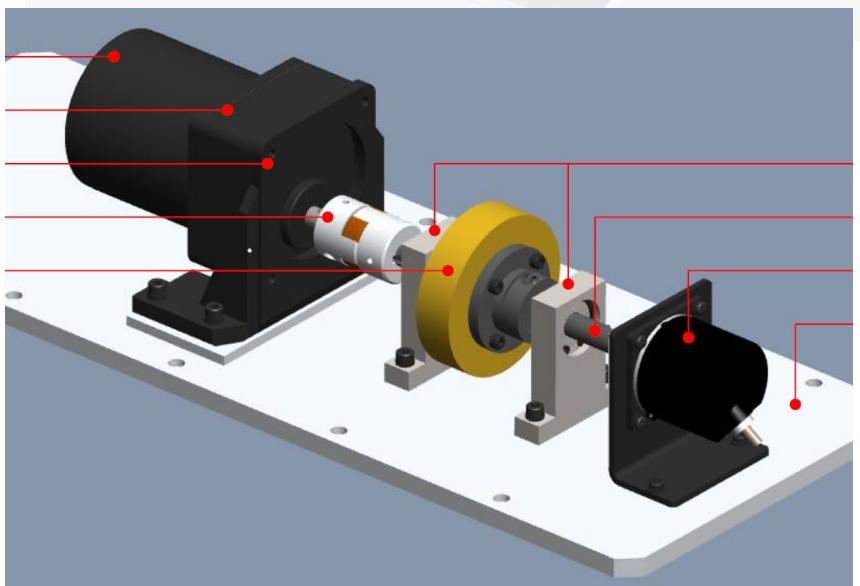
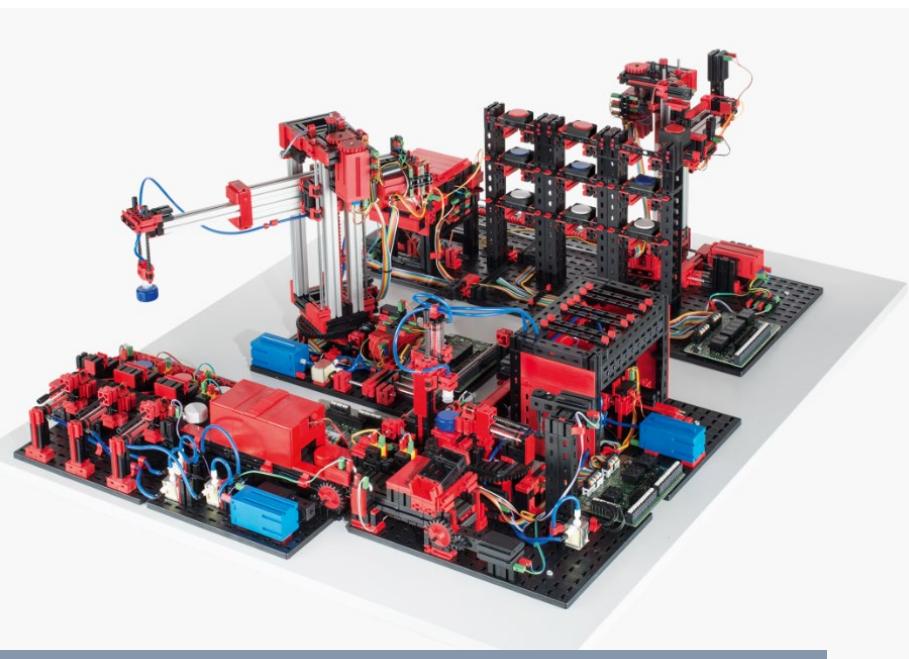
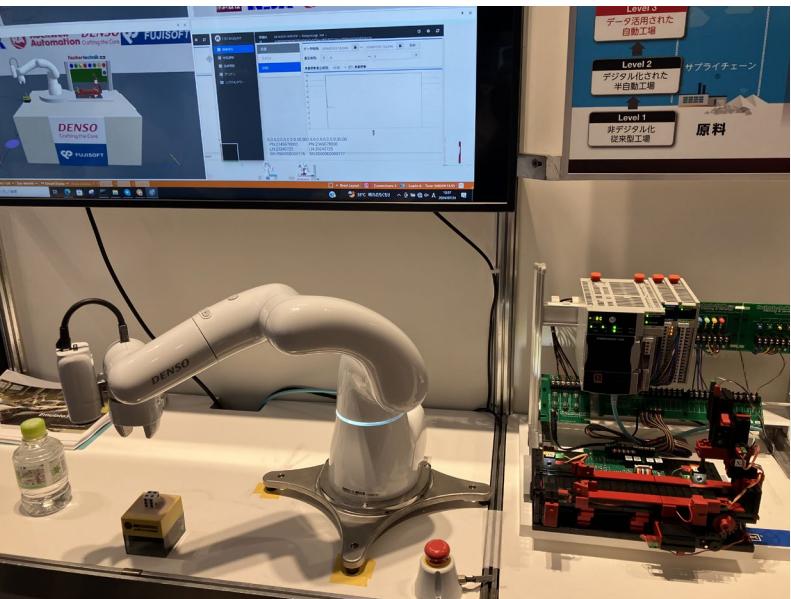
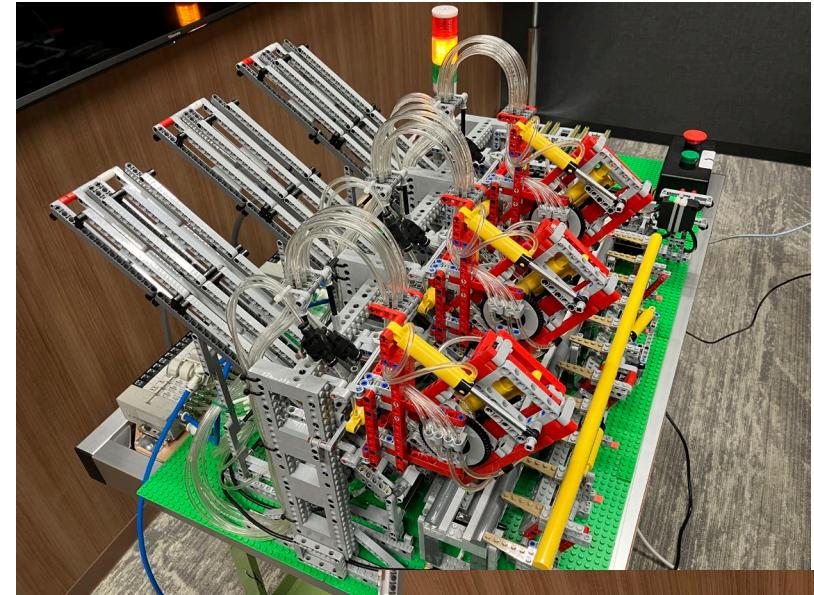


# デジタルツインによる異常検知

- 空気圧系に異常(チューブに切れ込み)が発生した場合の異常検知



# 工場設備模型, ロボット模型



# 教育・人材育成

## ● デジタルツインを駆使できる人材像？ 見えて来たもの

- 工学(**ET**; Engineering Tech) × 情報(**IT**; Information Tech) × 運用(**OT**; Operation Tech)
  - ◆ **ET**(メカ, エレキ) : 構造材料, 熱流体, 力学, 制御, 電気, , ,
  - ◆ **IT**(ソフト寄り) : SW, NW, 統計, ML, , ,
  - ◆ **OT**(ハード寄り) : CNC, PLC, DCS, FA-NW, IoT, , ,
- + 物理モデリング(演繹) × データ駆動(帰納)
- + 専門力・俯瞰力(縦) × 応用力・展開力(横)

## ● 例えば「センサデータの可視化」を考えた時,

- 現場のOT技術者は, FA(PLC, エレキ)は詳しいが, ITや物理は苦手
- Slerは, ITは詳しいが物理メカニズムを十分には理解していない
- 工学部では, OTは教えていない(ロボット, 生産, 通信関係を除く)

# IT/OT融合教育(YouGo)

## ● IT/OT融合とは

- 欧米では「**IT/OT Convergence**」 × Fusion, Integration
- IoT等の技術発達, DX推進, SCリスク対応がIT/OT融合に圧力

## ● TUS情報工学科における授業・演習の実践

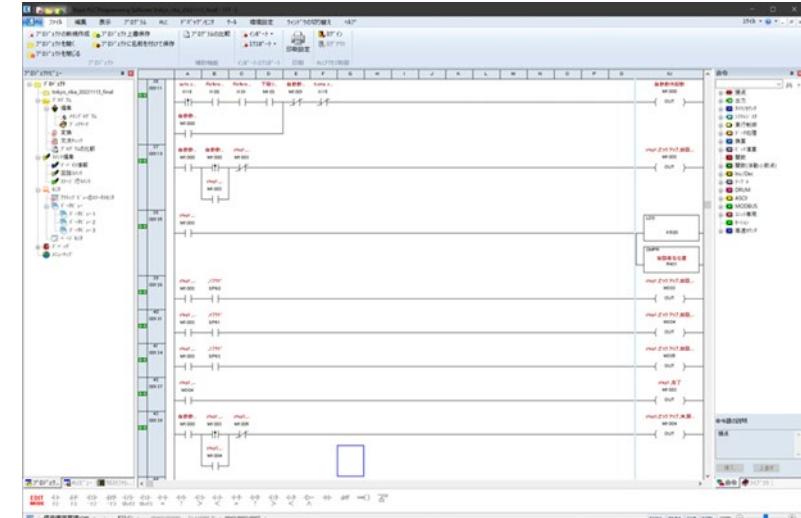
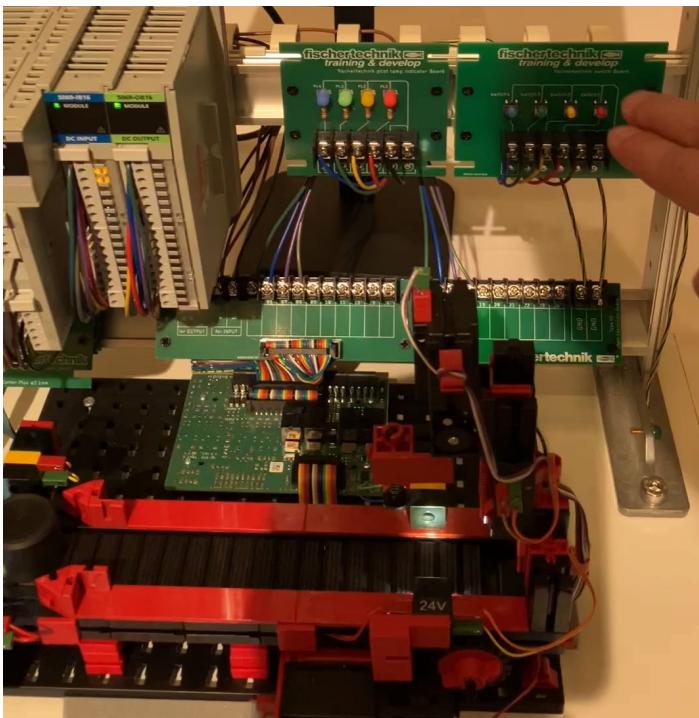
- ラダープログラムを作って工場模型を動かす
- 3Dシミュレーションでデジタル空間を利用したライン構築を体験
- フィジカルとデジタルの動作を同期させる

## ● IT/OT融合教育の勘所

- 大学(IT教育)と企業(OT現場)との連携...共通の目的・共創意識
- 良質の実務データを集める, 現場を知る...as-built/as-usedデータ, ベストプラクティス
- 実習による成功(失敗)体験の共有...('した気になる'を排除)

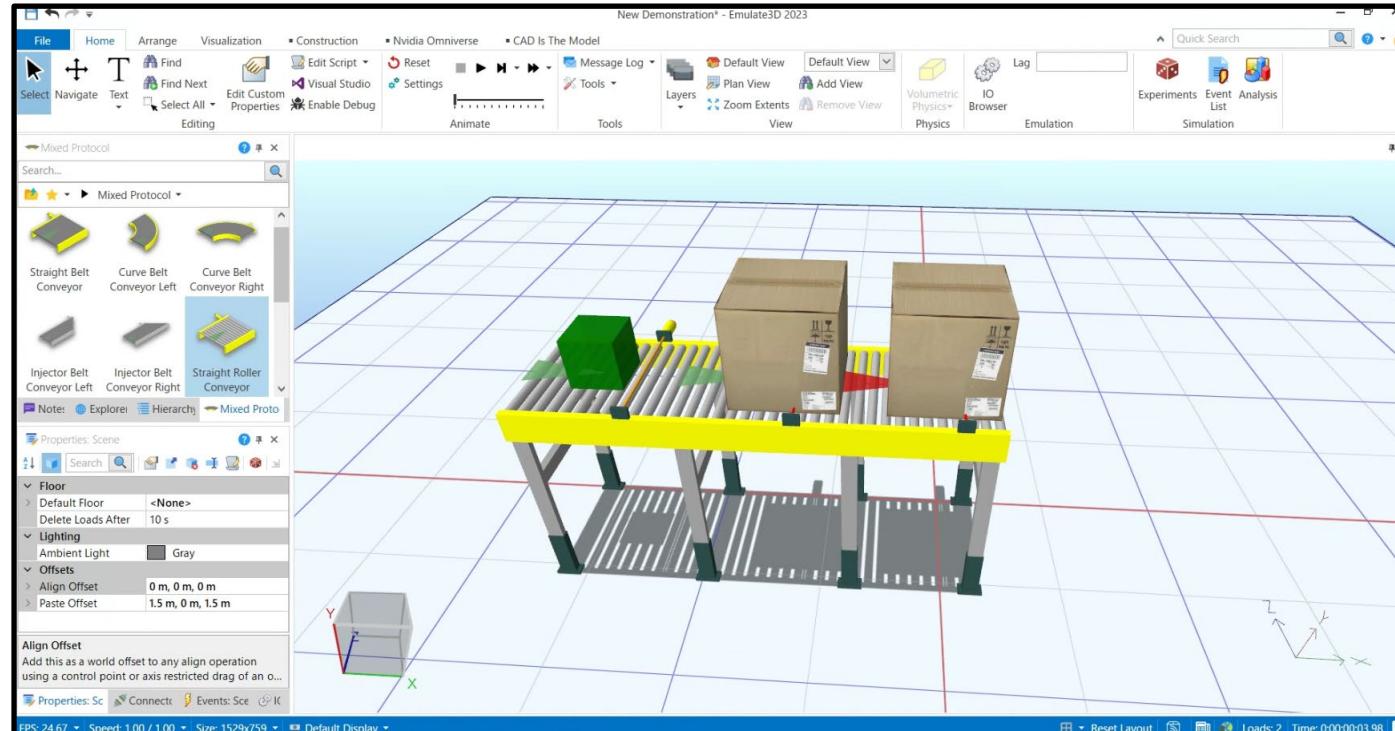


- ベルトコンベア模型を用いたラダーによる動作制御の演習
  - ラダープログラムを学生が自作し, PLCを通じてベルトコンベア模型を動かす
  - OT技術(PLC, FAネットワーク, ラダー制御)を学ぶ
  - IT-OT連携への第一歩



# IT/OT融合教育(YouGo)

- 3Dシミュレーションでデジタル空間を利用した生産ライン構築を体験
  - Emulate3Dを用いて最適な工程や機器の配置を検討する
  - モデリング、デジタル空間の特性・扱いに慣れる



# 生産プロセスとエミュレーション

## ● エミュレーション(Emulation)とは

- 内部構造, 動作まで模倣するのがエミュレーション
  - ◆ シミュレーションは入口出口さえ合っていれば良い
- 生産・製造は, プロセスや同期が重要なためシミュレーションではなくエミュレーション必要

## ● エミュレータ

- 実際のもの(ロボット等)を使わずに制御ソフトウェアを検証する

## ● 利用場面

- ロボットや制御機器の動作検証や最適化
- 生産ラインのプロセスシミュレーションや事前検証

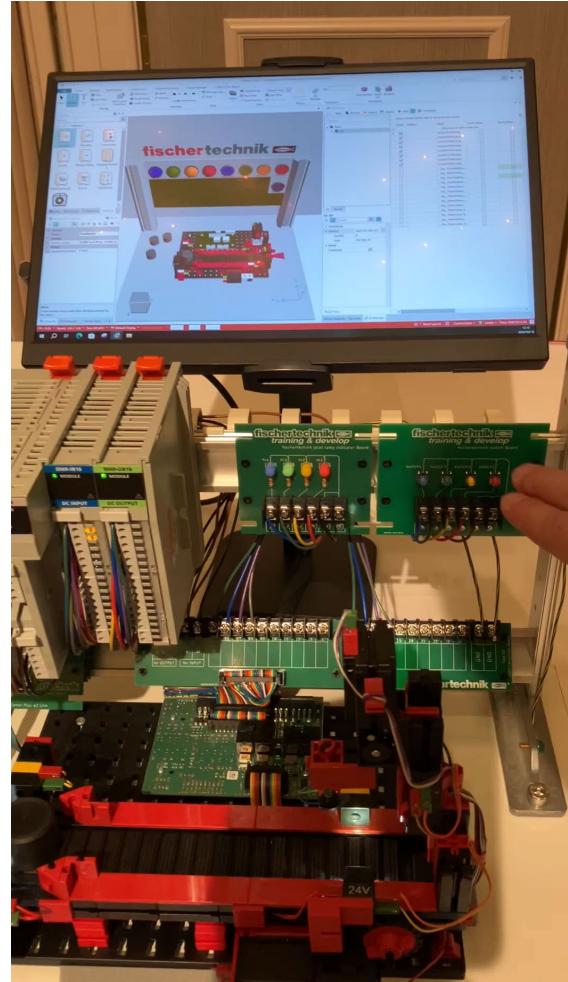
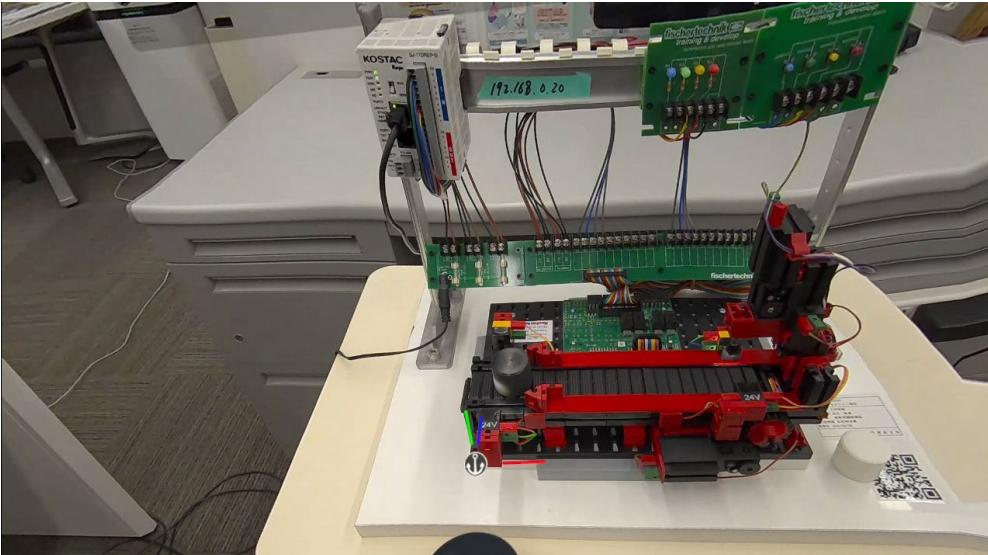


Emulate3D Controls Testing for  
Machine Builders

# IT/OT融合教育(YouGo)

- 模型を使ってフィジカルとデジタルの動作を同期

- Emulate3D or MATLAB/Simulinkにより、実機とデジタルツインの動作を同期させる
- エミュレーションの重要性、IT-OT連携を実感・習熟



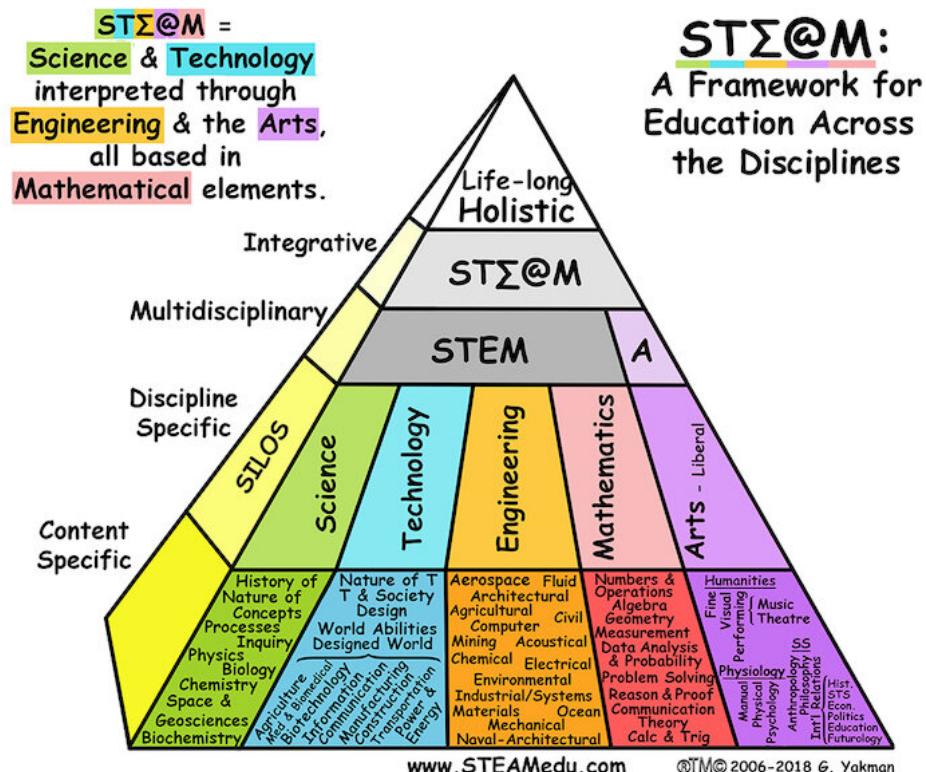
# STEAM教育

## ● STEAM教育とは

- Science(科学), Technology(技術), Engineering(工学), Arts(教養), Mathematics(数学)を総合的・学際的に学ぶ
  - G. Yakman(米国, 2006年)によりSTEMの発展形として提案され, ICTを通じて自発性・創造性・問題解決能力の醸成を企図

## ● 日本では

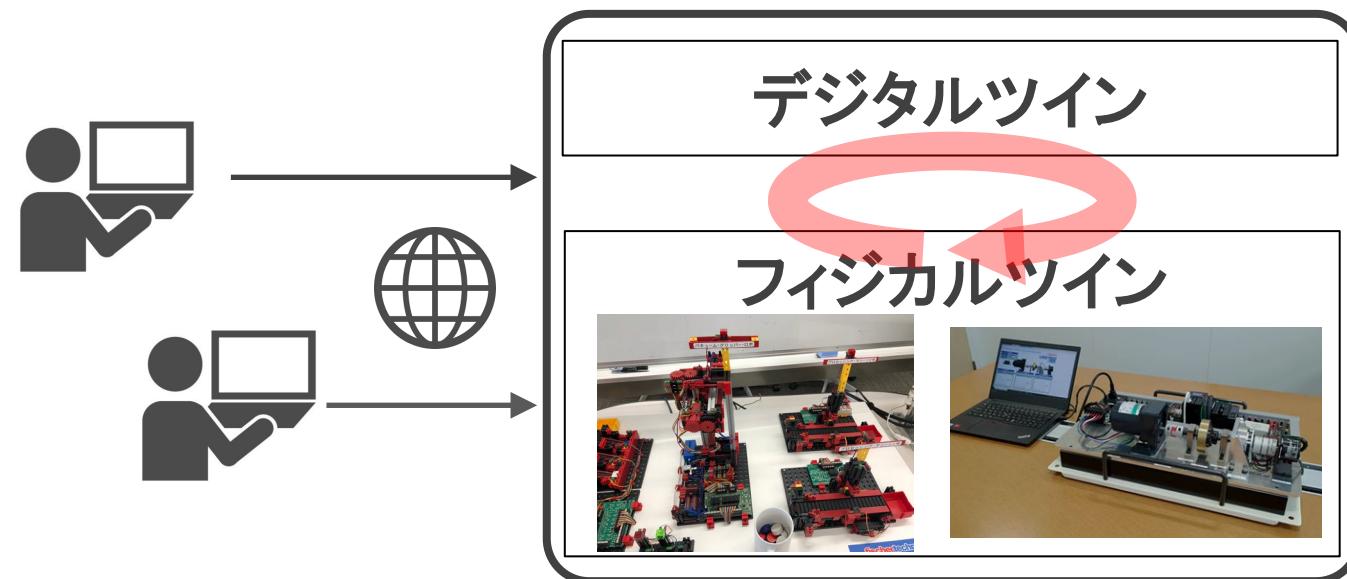
- プログラミング教育(2020~)
  - 「未来の教室」実証事業(経産省)  
<https://www.learning-innovation.go.jp/>
  - 令和の日本型学校教育(文科省)  
[https://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/chukyo/chukyo16/index.html](https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyo16/index.html)
  - 東京理科大学オープンカレッジ  
<https://web.my-class.jp/manabi-tus/asp-webapp/web/WTopPage.do>



# STEAM教育, 今後の展望

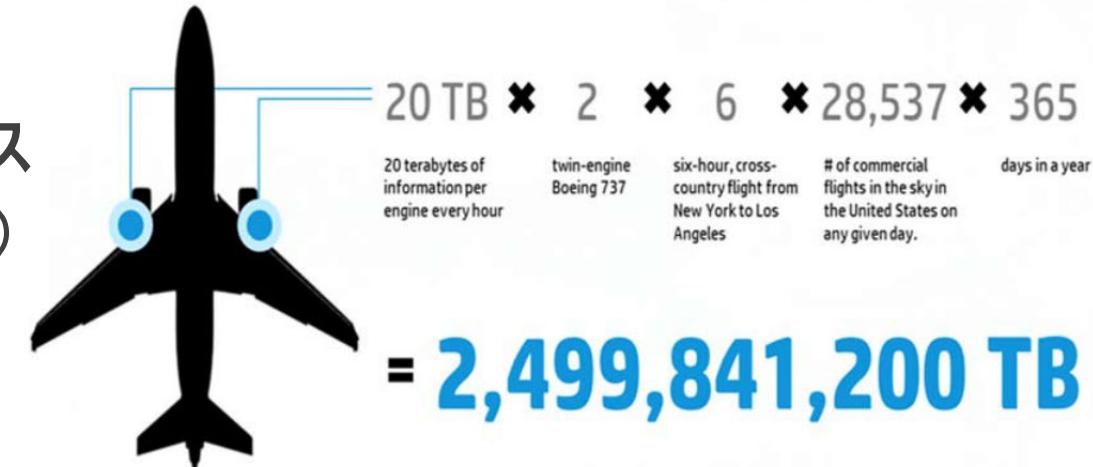
## ● バーチャルラーニングファクトリー(Virtual Learning Factory; VLF)構想

- オンライン環境(Zoom, Teams, WebEX)を用いたバーチャルラーニングファクトリ(VLF)の構築
  - ◆ リモートから、模型とEmulate3Dを使いながらCPSの仕組みや生産ライン構築を学ぶ
  - ◆ その場に行かなくてもできる、セキュリティの確保
- 今後のものづくりや人材育成への貢献
  - ◆ マスカスタマイゼーション、技術継承
  - ◆ IT/OT融合教育を基にSTEAM教育の有効性を検証/拡大



# デジタルツインの諸課題

- 導入の時間とコスト, 人材の確保・育成, セキュリティ(個人情報)
  - **メリットの検証と定量化**が不十分(コストと利益のバランス)
    - ◆ 現状の成功事例は, 大規模で複雑な製品に関わる業界が主(航空機, 鉄道, 海運, 電力等)
  - **スマールスタート**が困難, 初期投資→ROCからの脱却, 明確な説明の困難
- データ, センサー
  - **大量データ**の保存と有効利用, 長期保管リソース
    - ◆ B737の1回のフライトで240TBのデータ(エンジンのみ)
  - **センサーの最適取り付け位置**, それ自体の異常
- 実装時の基準やフレームワーク
  - **日本型ものづくり**(匠の技, 擦り合わせ・現場力)への適応
  - 様々な**基礎知識・ドメイン知識**, モデリング勘所(オントロジー, 忠実度, ROM, サロゲート)



# まとめ

- デジタルツインの概要やキー技術

- 定義, 発展, 動向, 課題
- 通信, データ処理, モデリング(物理駆動, データ駆動)

- デジタルツインのものづくり応用

- 設計, 製造, 運用保守の各場面における事例

- TUSにおける研究・教育の事例紹介

- 工場模型を用いた異常検知
- デジタルツイン人材像, IT/OT融合教育の事例
- バーチャルラーニングファクトリ(VLF)構想