

MATLAB®/Simulink®による予知保全・故障予測

MathWorks Japan
アプリケーションエンジニアリング部
アプリケーションエンジニア
井上道雄

何ができれば予知保全なのか？



オイル & ガス
採掘



風力タービン



半導体製造機



産業機械



重機



航空機エンジン

- 機械の状態は？
- 効率よく稼働しているか？
- 故障が発生するまであと何日？



故障の事前検知の自動化
機器の稼働率アップ
メンテナンスコスト削減

従来のメンテナンス手法 vs 予知保全

■ Reactive – 問題が起こった時に（事後保全）

- 例：車のバッテリーに問題が発生した時に交換
- 欠点：予期しない故障には危険が伴い、高コスト、稼働率低下の課題も。

30%

■ Preventive – 一定期間経過した時に（予防保全）

- 例：走行距離3,000 km または 3ヶ月毎のオイル交換
- 欠点：故障の有無に関係なく実施。故障をすべて防げるわけではない。

46%

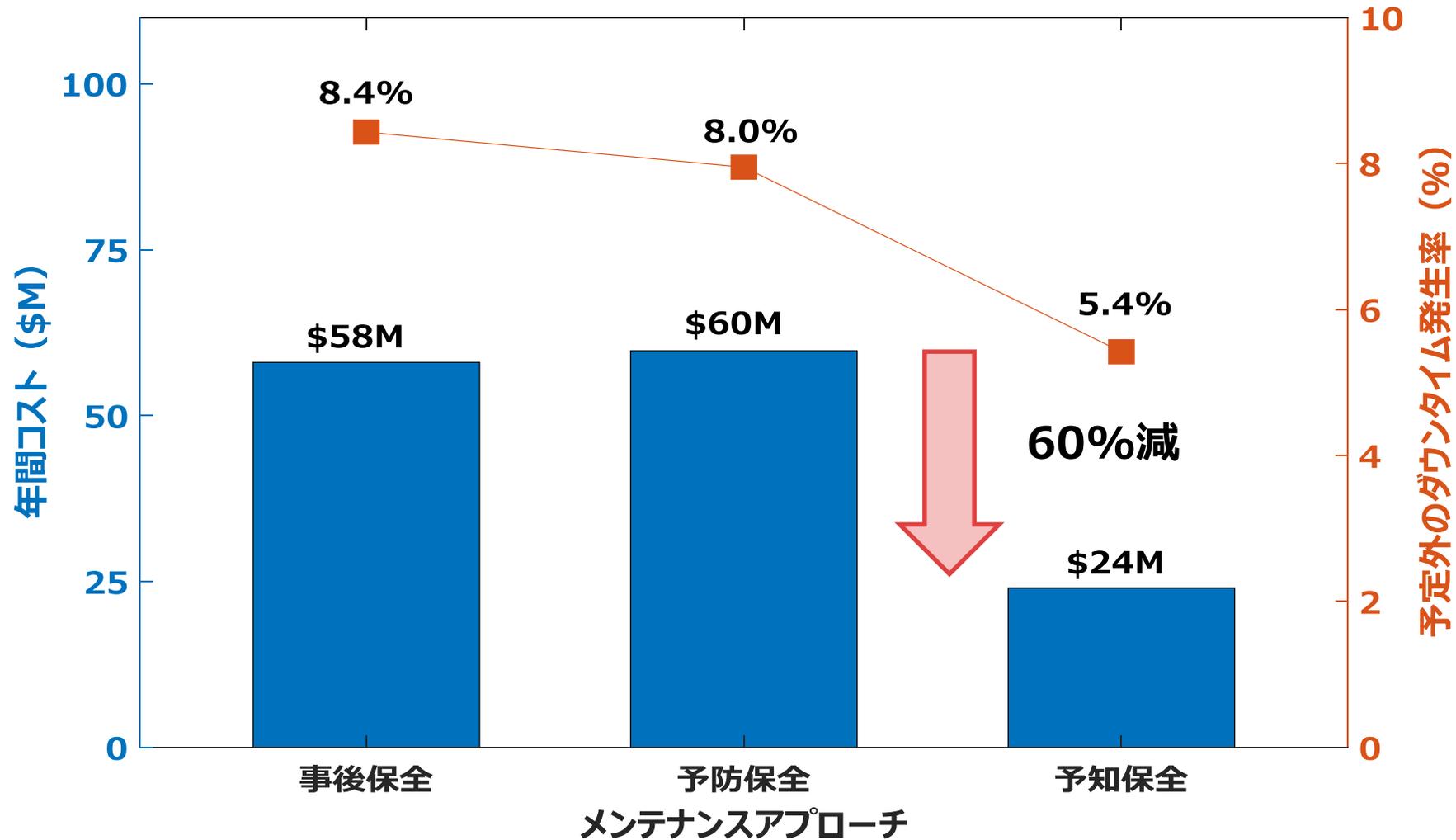
■ Predictive – 問題が発生すると予測される時に（予知保全）

- 例：バッテリー・燃料ポンプやセルモーターの問題を事前に予測する車両モデル
- 欠点：正確な予測は困難

24%

参照：[GE Oil & Gas](#)

想定外の故障発生・メンテナンスコストの削減



参照 : [GE Oil & Gas](#)

予知保全・故障予測：成功事例とお客様の声

製造機械の故障警告システム

- MATLAB で構築したシステムの事前通知によりダウンタイムの削減
- 年間20万ユーロ以上のコスト削減



“プロトタイプ作成までたった6ヶ月。
MATLABコードはプログラムし易い。”

– Dr. Michael Kohlert, MONDI

ポンプのヘルスマニタリングシステム構築

- センサーデータのフィルタリング・スペクトル解析 + ニューラルネットワークによる予測
- 推定1000万ドル以上のコスト削減



“MATLABを使って、以前は読み込めなかったデータを活用できるように。”

– Gulshan Singh, Baker Hughes

オンラインのエンジンヘルスマニタリング

- 企業システムに組み込まれたリアルタイムでの解析
- オイル・燃料・制御・構造などサブシステムのパフォーマンスを予測



“コードを書き直す作業なくMATLABアルゴリズムをサーバーに実装。”

– Jérôme Lacaille, Safran

故障警告システムの開発事例

包装・製紙メーカー：Mondi Gronau社 (ドイツ)

課題

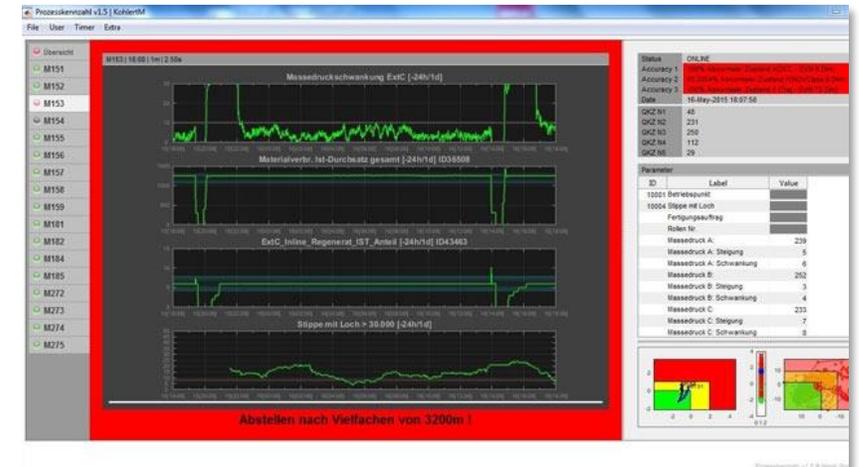
プラスチックフィルム製造工場で廃棄と機械ダウンタイムを減らしたい

ソリューション

機械学習に基づいた機械の故障を予測する監視ソフトウェアの開発・実装

結果

- ✓ 潜在的異常の警告を発信するソフトウェア
- ✓ 6か月でプロトタイプが完成
- ✓ 年間50,000ユーロを超えるコスト削減を実現



“中断のない安定した運用が可能に”
- Dr. Kohlert (Mondi)

予知保全・異常検知を実現するワークフロー



ビジネスデータ

センサーデータ

データの次元削減

特徴量抽出

**モデル作成
機械学習**

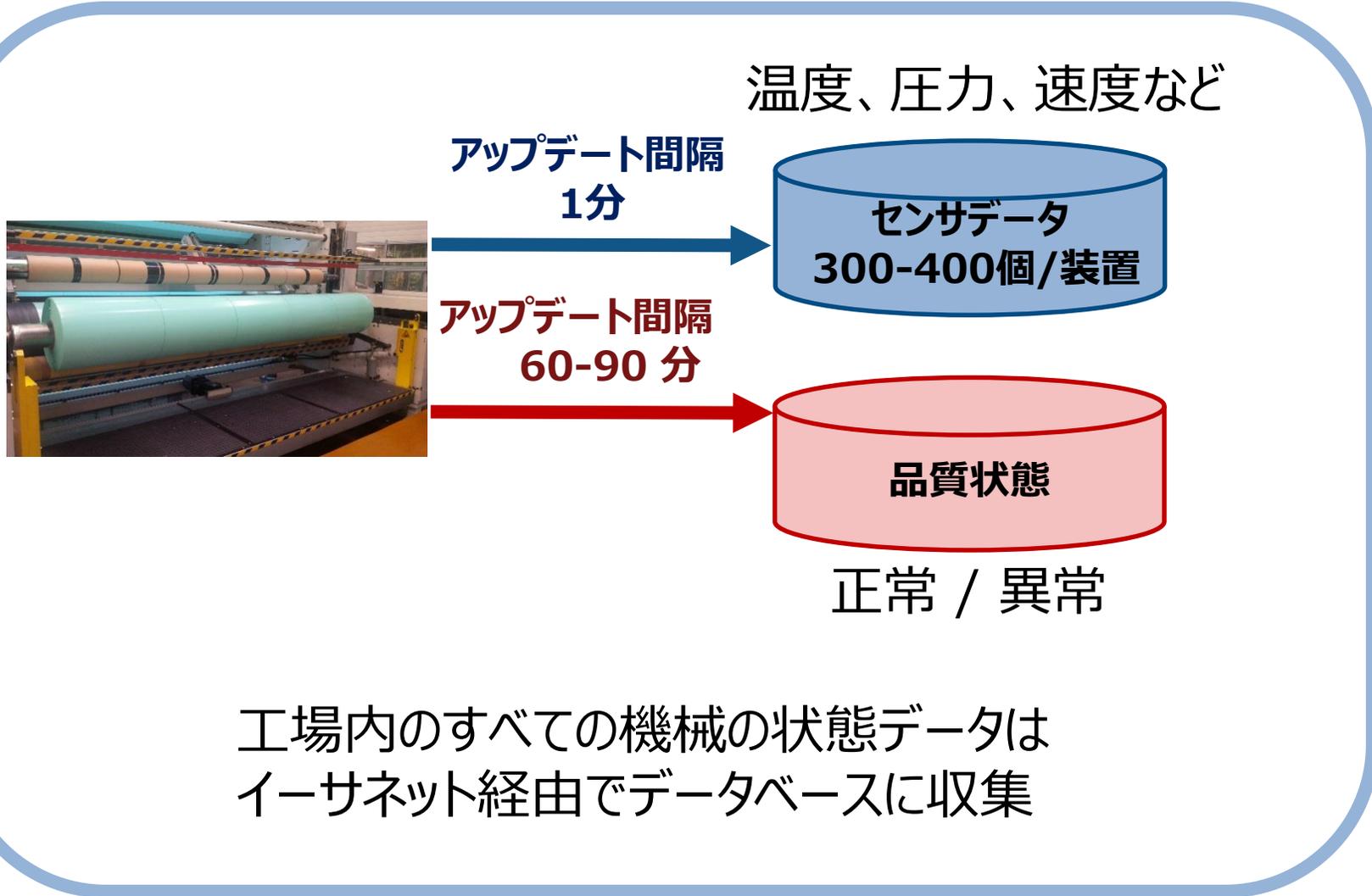
モデル検証

**エンタープライズ
システム**

MATLAB Excel
.NET C/C++
.exe Java .dll

組み込みデバイス

性能パラメータ及び品質状態を記録 (7GB/day)



潜在的な故障箇所について
機器オペレーターに警告発信

工場内のすべての機械の状態データは
イーサネット経由でデータベースに収集

データへのアクセス・前処理



温度、圧力、速度など

アップデート間隔
1分



アップデート間隔
60-90分



正常 / 異常

1 TIMESTAMP	2 PARAMETER										3 STATE
'2015-07-14 00:49:12.0'	160	160	160	160	1000	7	1000	9	33	32	1
'2015-07-14 00:50:12.0'	160	160	160	160	1000	8	1000	10	33	32	1
'2015-07-14 00:51:13.0'	160	160	160	160	1000	8	1000	10	33	32	1
'2015-07-14 00:52:12.0'	160	160	160	160	1000	8	1000	10	33	32	1
'2015-07-14 00:53:12.0'	160	160	160	160	1000	8	1000	11	33	32	2
'2015-07-14 00:54:12.0'	160	160	160	160	1000	8	1000	12	33	32	2
'2015-07-14 00:55:12.0'	160	160	160	160	1000	8	1000	10	33	32	2

- データベースから取得
- 関連の無い変数・異常値削除
- 時系列データの同期
- 次元削減 (PCA)



過去のデータから予測モデルを学習



温度、圧力、速度など



アップデート間隔
1分

アップデート間隔
60-90分



1 TIMESTAMP	2 PARAMETER										3 STATE
'2015-07-14 00:49:12.0'	160	160	160	160	1000	7	1000	9	33	32	1
'2015-07-14 00:50:12.0'	160	160	160	160	1000	8	1000	10	33	32	1
'2015-07-14 00:51:13.0'	160	160	160	160	1000	8	1000	10	33	32	1
'2015-07-14 00:52:12.0'	160	160	160	160	1000	8	1000	10	33	32	1
'2015-07-14 00:53:12.0'	160	160	160	160	1000	8	1000	11	33	32	2
'2015-07-14 00:54:12.0'	160	160	160	160	1000	8	1000	12	33	32	2
'2015-07-14 00:55:12.0'	160	160	160	160	1000	8	1000	10	33	32	2



予測モデル学習
(過去のデータ)

機械学習アルゴリズムの選定・検証



トレードオフを探る

学習速度



メモリ使用量



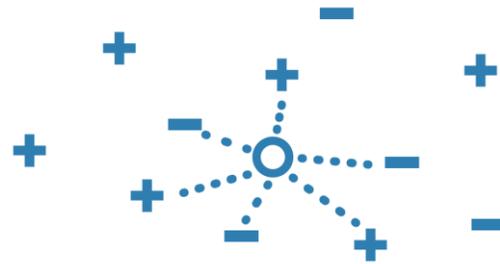
予測精度



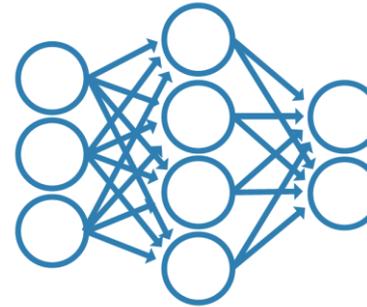
解釈のしやすさ



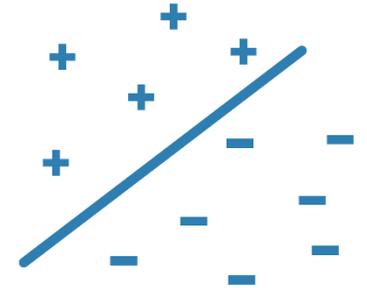
k 近傍法



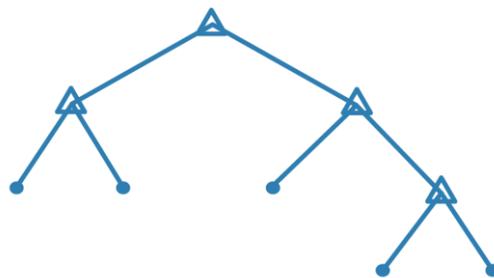
ニューラルネットワーク



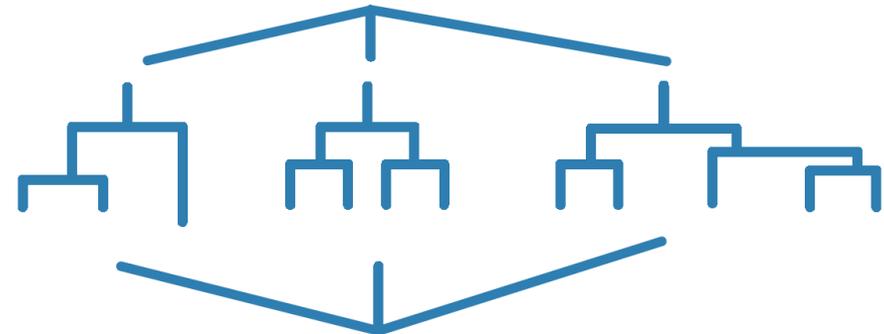
SVM



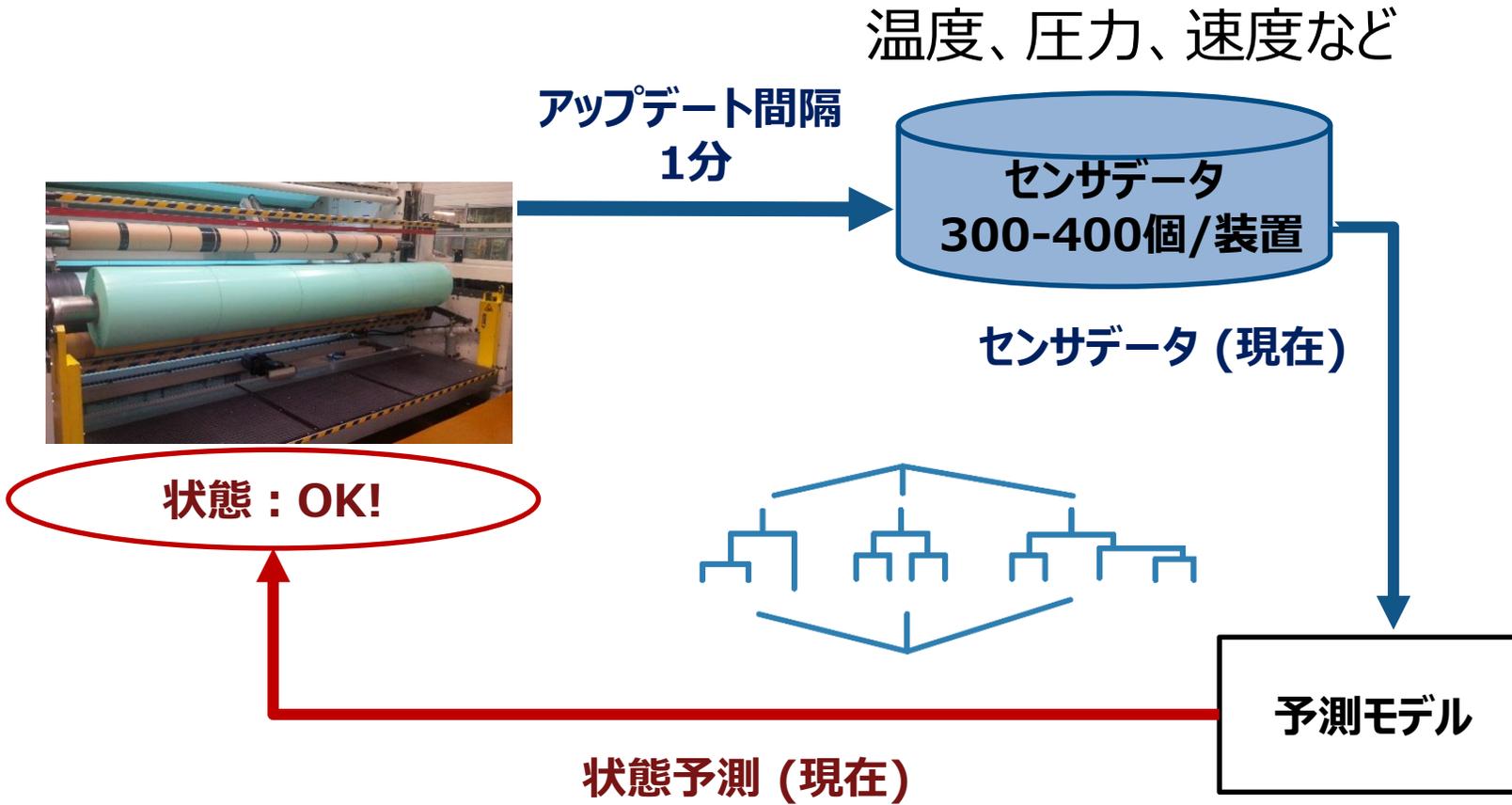
決定木



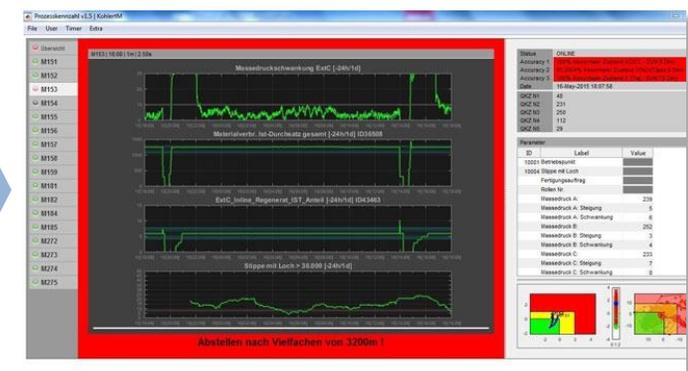
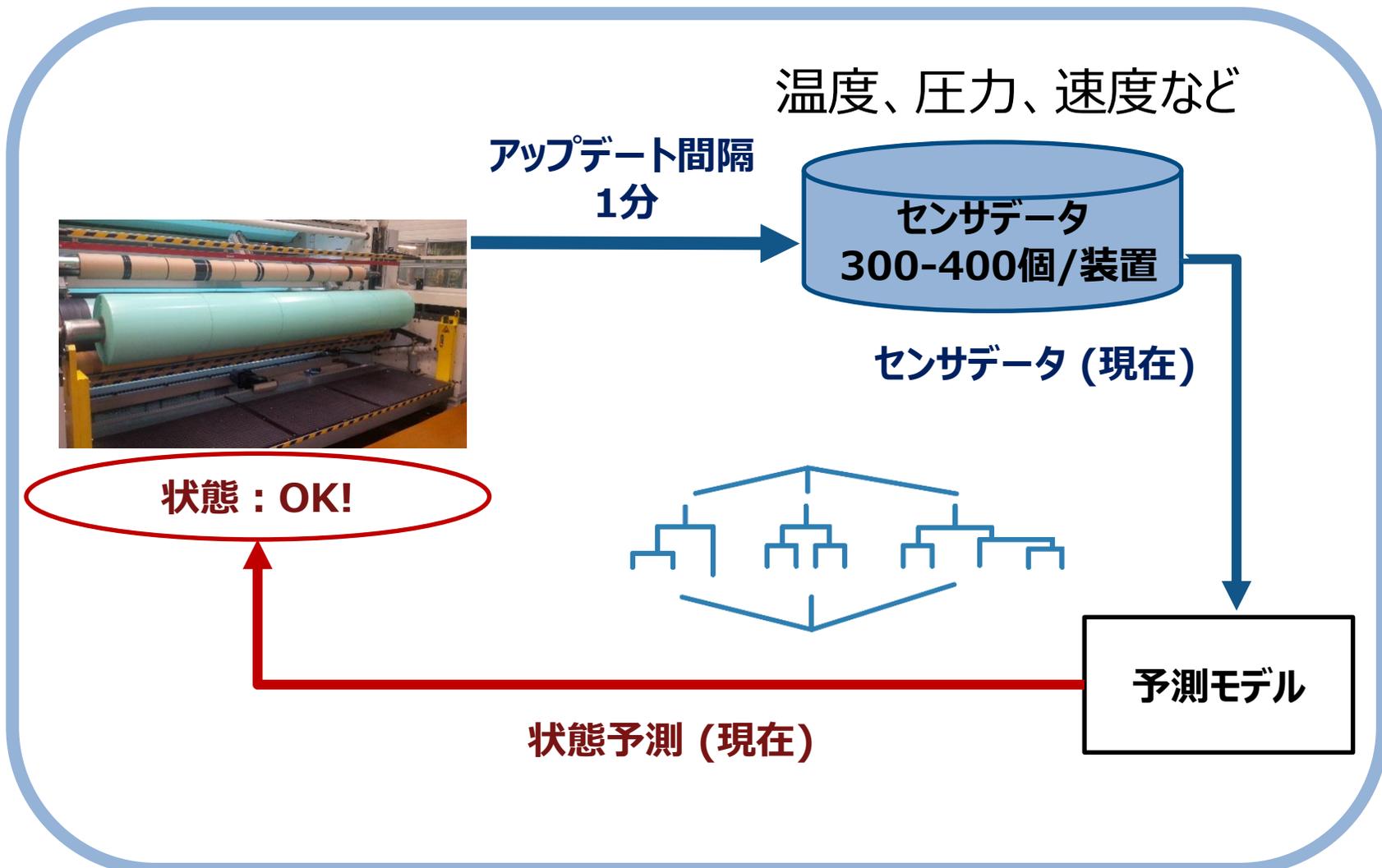
バギング決定木 ★



リアルタイムで機器の状態を予測



アプリケーション化し工場に展開



潜在的な故障箇所について
機器オペレーターに警告発信

故障警告システムの開発事例

ワークフローと各機能を提供するオプション製品

データへのアクセス

データベースへのアクセス

- 工場内のすべての機械のログはデータベースに収集

[Database Toolbox™](#)

データの前処理

前処理

- 異常値削除・変数選定・時刻の同期処理

予測モデルの構築

複数の機械学習手法を適用・評価

- ニューラルネットワーク、k最近傍法
- バギングされた決定木、サポートベクターマシン (SVM) など

[Statistics and Machine Learning Toolbox™](#)
[Neural Network Toolbox™](#)

システムへの統合

アプリ化して工場に展開

- MATLABがない環境での実行

[MATLAB Compiler™](#)

予知保全・異常検知を実現するワークフロー



ビジネスデータ

センサーデータ

データの次元削減

特徴量抽出

**モデル作成
機械学習**

モデル検証

**エンタープライズ
システム**

MATLAB Excel
.NET C/C++
.exe Java .dll

組み込みデバイス

データのアクセスから前処理



データへのアクセス

データの前処理

予測モデルの構築

システムへの統合

ビジネスデータ

センサーデータ

1

データの次元削減

特徴量抽出

**モデル作成
機械学習**

モデル検証

**エンタープライズ
システム**

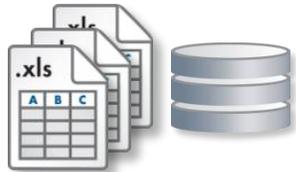
MATLAB Excel
.NET C/C++
.exe Java .dll

組み込みデバイス

データのアクセスから前処理

データへのアクセス

ビジネスデータ



センサーデータ

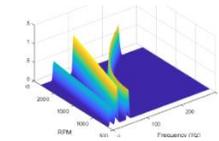


課題

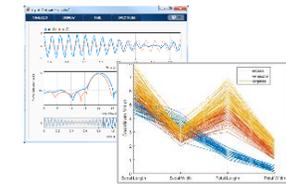
- データが無い・十分でない
- データ量が大きすぎる
- 様々なデータを使いたい
- データ同期が取れていない
- フォーマットが不規則

データの前処理

データの次元削減



特徴量抽出



データのアクセスから前処理

前処理

データへのアクセス



サンプリング周期が異なるデータの結合

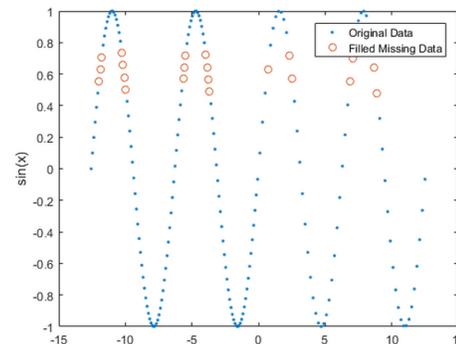
[synchronize](#)

異常値・外れ値処理

[isoutlier](#), [filloutliers](#) : 外れ値の検出と置換
[smoothdata](#) : データの平滑化

欠損値の検索、補完、除去

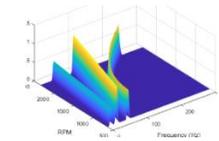
[ismissing](#) / [rmmissing](#) / [fillmissing](#)



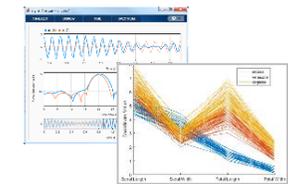
欠損値を `fillmissing` で
置換した例

データの前処理

データの次元削減



特徴量抽出



データのアクセスから前処理

ビッグデータ対応

データへのアクセス



ビッグデータに対する **tall 配列**

- メモリに入り切らないデータの分割処理を自動化
- プログラム変更は最小限にビッグデータ処理へとスケールアップ

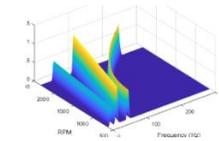
k-means クラスタリング
 主成分分析
 線形回帰
 一般化線形回帰
 判別分析
 など・

[tall 配列対応関数リスト](#)

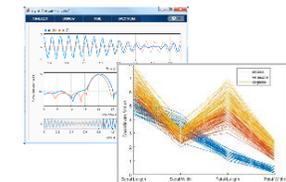
PCの
メモリ量

データの前処理

データの次元削減



特徴量抽出

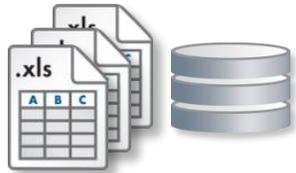


データのアクセスから前処理

データへのアクセス

データの前処理

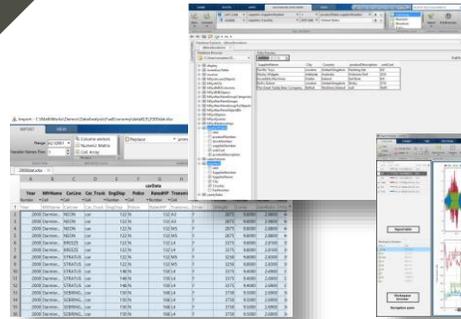
ビジネスデータ



センサーデータ

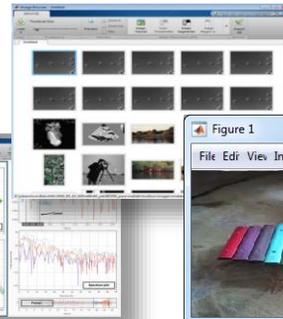


データベース



ファイル

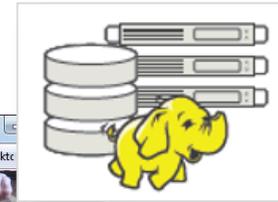
画像



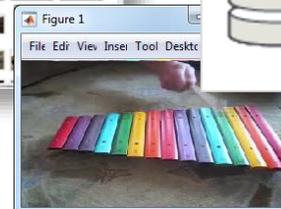
信号



HDFS

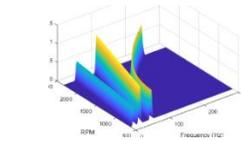


動画

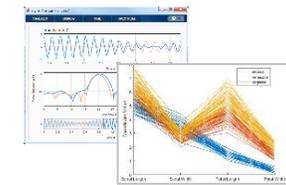


- 様々なデータソースにアクセスするためのアプリ
- ビッグデータのためのハイパフォーマンス環境
- 前処理のためのビルトインアルゴリズム

データの次元削減



特徴量抽出



データのアクセスから前処理

1 多様なデータの活用

データへのアクセス

データの前処理

ビジネスデータ

センサーデータ

データベース **画像** **HDFS**

ファイル **信号** **動画**

データの次元削減

特徴量抽出

“MATLABを使って、以前は読み込めなかったデータを活用できるように。”

– Gulshan Singh, Baker Hughes



予測モデルの開発



ビジネスデータ

センサーデータ

1

データの次元削減

特徴量抽出

2

**モデル作成
機械学習**

モデル検証

**エンタープライズ
システム**

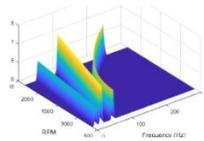
MATLAB Excel
.NET C/C++
.exe Java .dll

組み込みデバイス

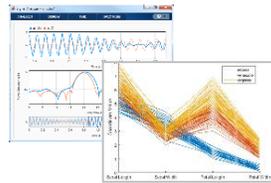
予測モデルの開発

データの前処理

データの次元削減



特徴量抽出



課題

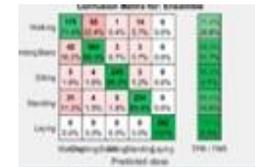
- 高い専門性
 - 監視対象の機器
 - 統計・機械学習
- 試行錯誤の繰り返し
 - アルゴリズム選択
 - 特徴量抽出・選択
- 解析結果のタイムリーな提供

予測モデルの構築

モデル作成 機械学習



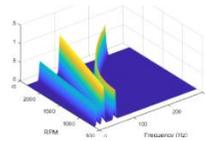
モデル検証



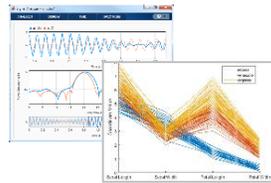
予測モデルの開発

データの事前処理

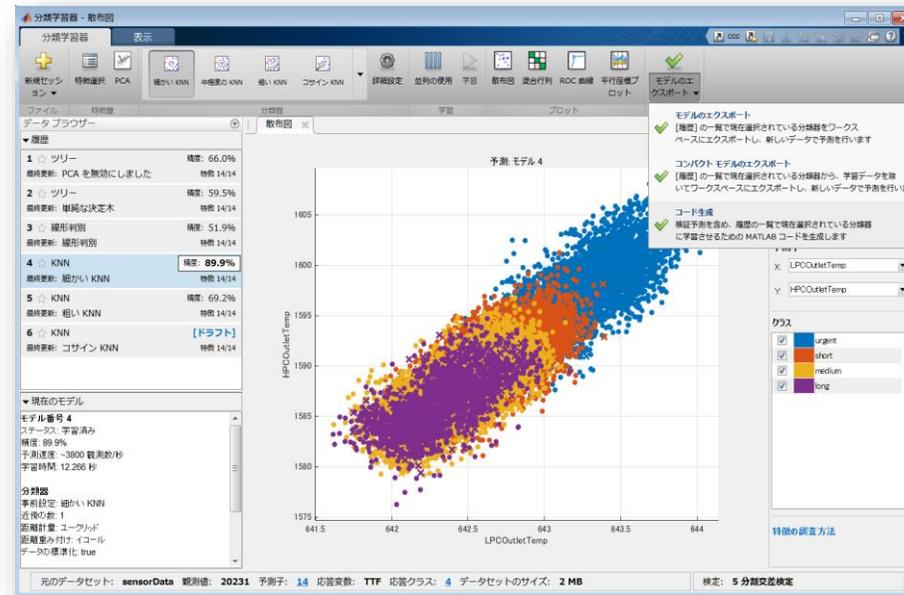
データの次元削減



特徴量抽出



機械学習アルゴリズムの実行・検証を簡単に



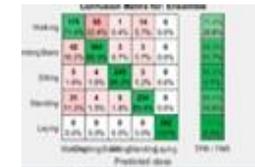
分類学習器アプリ

予測モデルの構築

モデル作成
機械学習



モデル検証

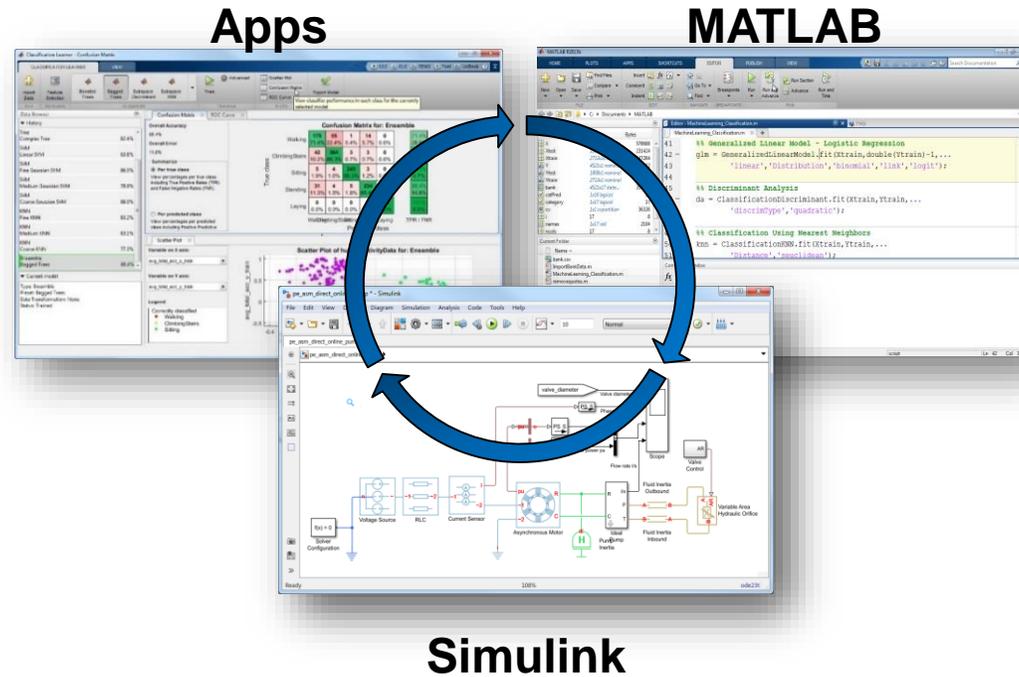


予測モデルの開発

データの前処理

データの次元削減

特徴量抽出



予測モデルの構築

**モデル作成
機械学習**

モデル検証

- 試行錯誤が容易にできる様々なアプリ
- MATLABコード生成機能
- ドキュメンテーション、サンプルコード、解説ビデオ等

予測モデルの開発

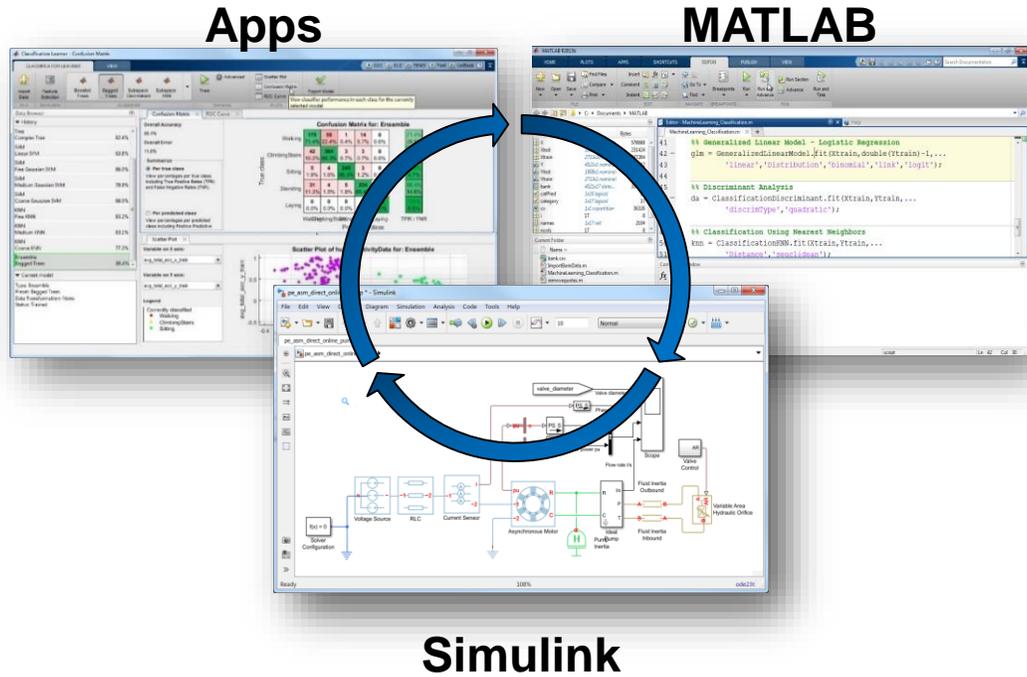
2
ドメインエキスパートが
データサイエンス

データの前処理

予測モデルの構築

データの次元削減

特徴量抽出



**モデル作成
機械学習**

モデル検証

“プロトタイプ作成までたった
6ヶ月。MATLABコードはわ
かりやすく、プログラムし易い。”

- Dr. Michael Kohlert, MONDI



システムへの実装・統合



ビジネスデータ

センサーデータ

1

データの次元削減

特徴量抽出

2

**モデル作成
機械学習**

モデル検証

3

**エンタープライズ
システム**

MATLAB Excel
.NET C/C++
.exe Java .dll

組み込みデバイス

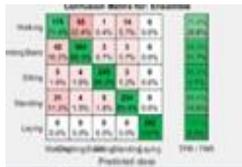
システムへの実装・統合

予測モデルの構築

モデル作成
機械学習



モデル検証



課題

- 整備スタッフ、オペレーターなど、多様なユーザーが利用
- 実装デバイスも様々
- 異なるインターフェース対応
C++、Java、Python、.NETなど
- 運用規模の拡大が可能な実装

システムへの統合

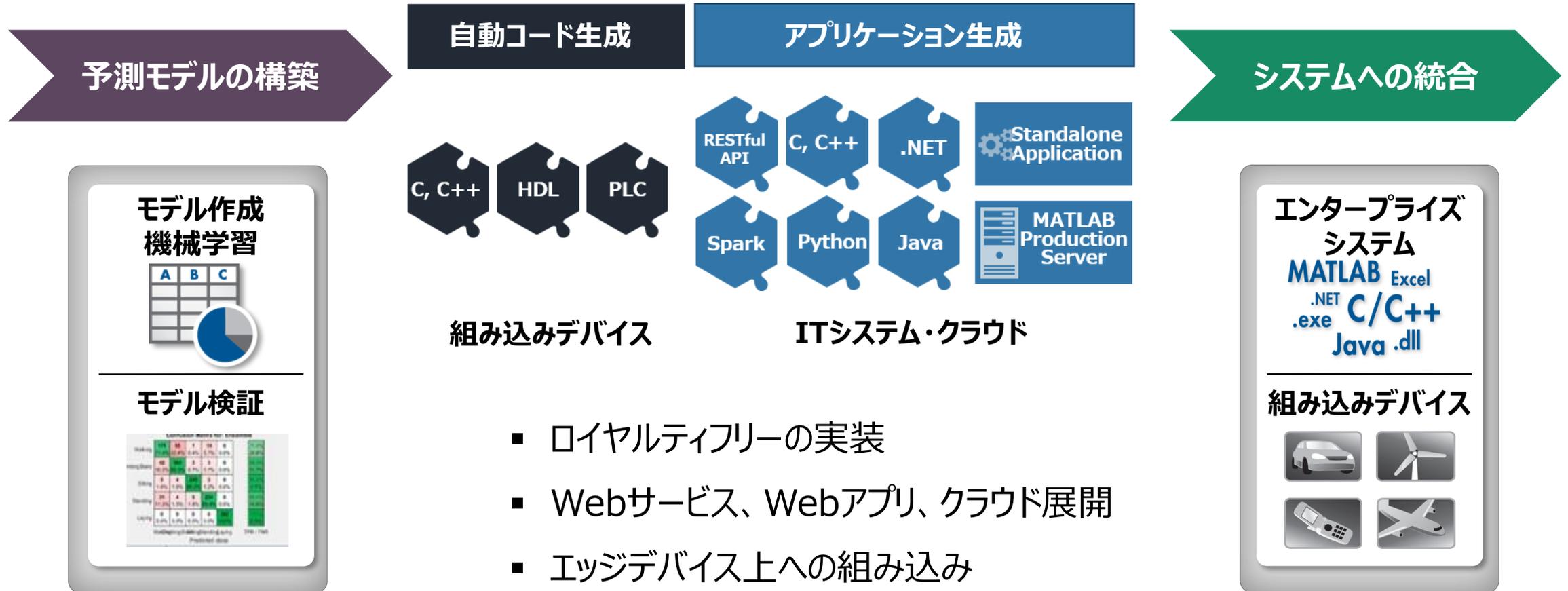
エンタープライズ
システム

MATLAB Excel
.NET C/C++
.exe Java .dll

組み込みデバイス



システムへの実装・統合



システムへの実装・統合

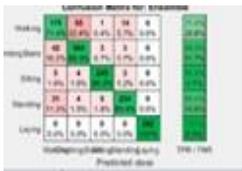
3
 どこでも動く
 アルゴリズムの開発

予測モデルの構築

**モデル作成
機械学習**



モデル検証

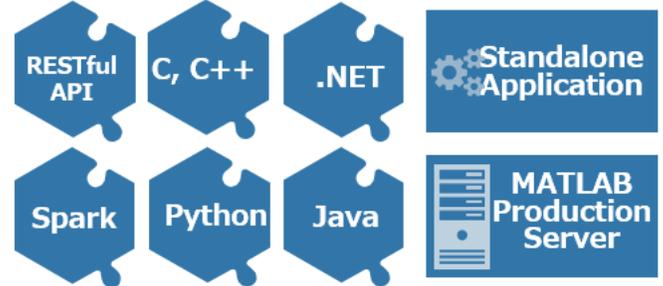


自動コード生成



組み込みデバイス

アプリケーション生成



ITシステム・クラウド

システムへの統合

**エンタープライズ
システム**

MATLAB Excel
.NET C/C++
.exe Java .dll

組み込みデバイス



“コードを書き直す作業なく
MATLABアルゴリズムを
サーバーに実装。”

– Jérôme Lacaille, Safran



まとめ



- 予知保全における課題
 - 「故障の前触れ」となる現象は何なのか
 - アルゴリズム選択をはじめ、多くの試行錯誤が求められる
- 予知保全の仕組みを手軽に構築できるMATLABプラットフォーム
 - 分類学習器などのアプリによる容易なアルゴリズム検証
 - 特徴抽出に必要な数多くのbuilt-in関数群
 - 故障モードを再現する物理モデル構築機能
 - コードを書き直すことなく実装・スケールアップ



異常検知・予知保全についてもっと知るには？

Discovery page



予知保全

サイト内検索



予知保全とは

機器に取り付けたセンサーから取得したデータを基に故障や劣化を検知し、故障が発生する前の適切なタイミングでメンテナンスを行うことを、予知保全 (Predictive Maintenance) と呼びます。

機器のメンテナンスといえば、故障が発生した後に実施する事後保全 (Reactive Maintenance) や、一定期間経過した時にメンテナンスを行う予防保全 (Preventive Maintenance) が一般的です。予防保全では走行距離 3000km または 3 ヶ月毎に実施する自動車のオイル交換など、状態に関わらずメンテナンスが行われる一方、予知保全は状態監視保全や状態基準保全 (Condition Based Maintenance) と呼ばれ、機器の状態に応じてメンテナンス時期を判断します。余計なメンテナンスを避ける事によるコスト削減だけでなく、予期しない突発的な故障を避けられ安全性の向上にも繋がると期待されています。

「予知保全」で検索



MATLABを使っ
全・故障予測

異常検知

サイト内検索



機械学習を用い
セスのヘルスマ
モマ知保へ

異常検知とは

異常検知 (Anomaly detection) とは、データの中から異常な状態、すなわち通常のパターンとは異なる挙動を検出することをいいます。「異常」はアプリケーションや状況によって、外れ値 (Outlier)、変化点 (Change point)、逸脱 (Deviation)、誤作動 (Fault)、侵入 (Intrusion)、詐欺 (Fraud) などと呼ばれます。

異常検知には専門家の目視による古典的な方法も有効ですが、ここでは多くの変数からなる複雑なデータからでも、自動でかつ早期に異常を見つけ出すことが期待できる機械学習を用いた統計的手法をご紹介します。

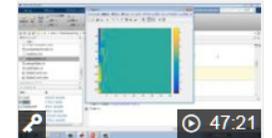
データ解析を応用した異常検知の代表的な利点

- 診断 (Diagnostic) : 異常を自動で診断することにより人的工数を削減。

<https://jp.mathworks.com/discovery/predictive-maintenance.html>

<https://jp.mathworks.com/discovery/anomaly-detection.html>

「異常検知」で検索



センサーデータ解析と機械
学習 ~ 振動データからの
異常検出 ~



機械学習アルゴリズムの特徴について知るには？ eBook



[MATLABによる機械学習](#)
基礎から高度な手法やアルゴリズムまで

1: 機械学習のご紹介

教師あり学習・教師なし学習、適切なアルゴリズムの選択、実際の事例など、機械学習の基礎を紹介します。

2: はじめての機械学習

データへのアクセスと読み込み、データの前処理、特徴抽出モデルのトレーニングと調整について説明します。

3: 教師なし学習の適用

クラスタリングについて説明します。モデルのパフォーマンスを向上させるための一般的な次元削減の手法について紹介します。

4: 教師あり学習の応用

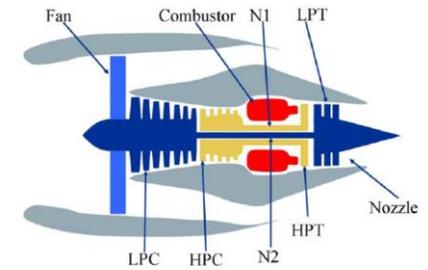
分類と回帰について説明し、特徴選択や特徴変換、ハイパーパラメータのチューニングといった、モデルを改善する手法を紹介します。

具体的な使い方について知るには？

関連Webセミナー

MATLABを使った予知保全・故障予測

ターボファンエンジンのデータを使って
故障時期を予測する簡単なフローを紹介



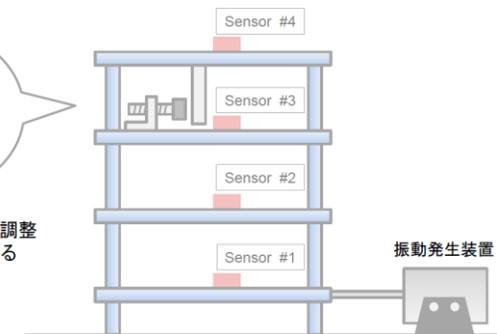
センサーデータ解析と機械学習

構造ヘルスマニタリングで利用される振動データを題材に

- 時系列信号からの特徴抽出、PCAによる次元削減
- 分類木によるデータの分類、1-クラス SVM による異常検出

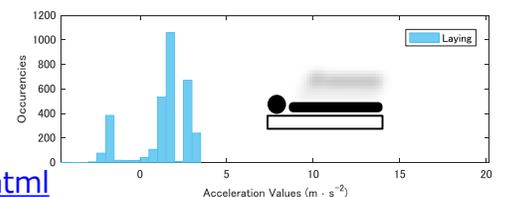
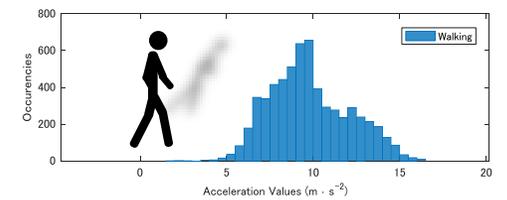


柱と留め具の隙間を調整
できるようになっている



機械学習のための信号処理

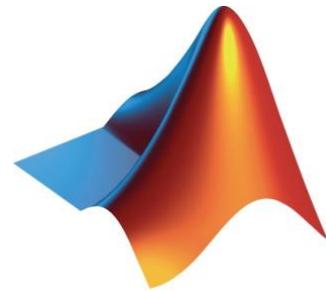
「センサーデータ解析による人の行動認識」を題材として、
特徴量の抽出方法を、各種信号処理機能と合わせて紹介



[1] <http://jp.mathworks.com/videos/predictive-maintenance-with-matlab-a-prognostics-case-study-121138.html>

[2] <http://jp.mathworks.com/videos/sensor-data-analysis-and-machine-learning-anomaly-detection-using-vibration-data-100241.html>

[3] <http://jp.mathworks.com/videos/signal-processing-for-machine-learning-119299.html>



MathWorks®

Accelerating the pace of engineering and science

© 2017 The MathWorks, Inc. MATLAB and Simulink are registered trademarks of The MathWorks, Inc. See www.mathworks.com/trademarks for a list of additional trademarks. Other product or brand names may be trademarks or registered trademarks of their respective holders.