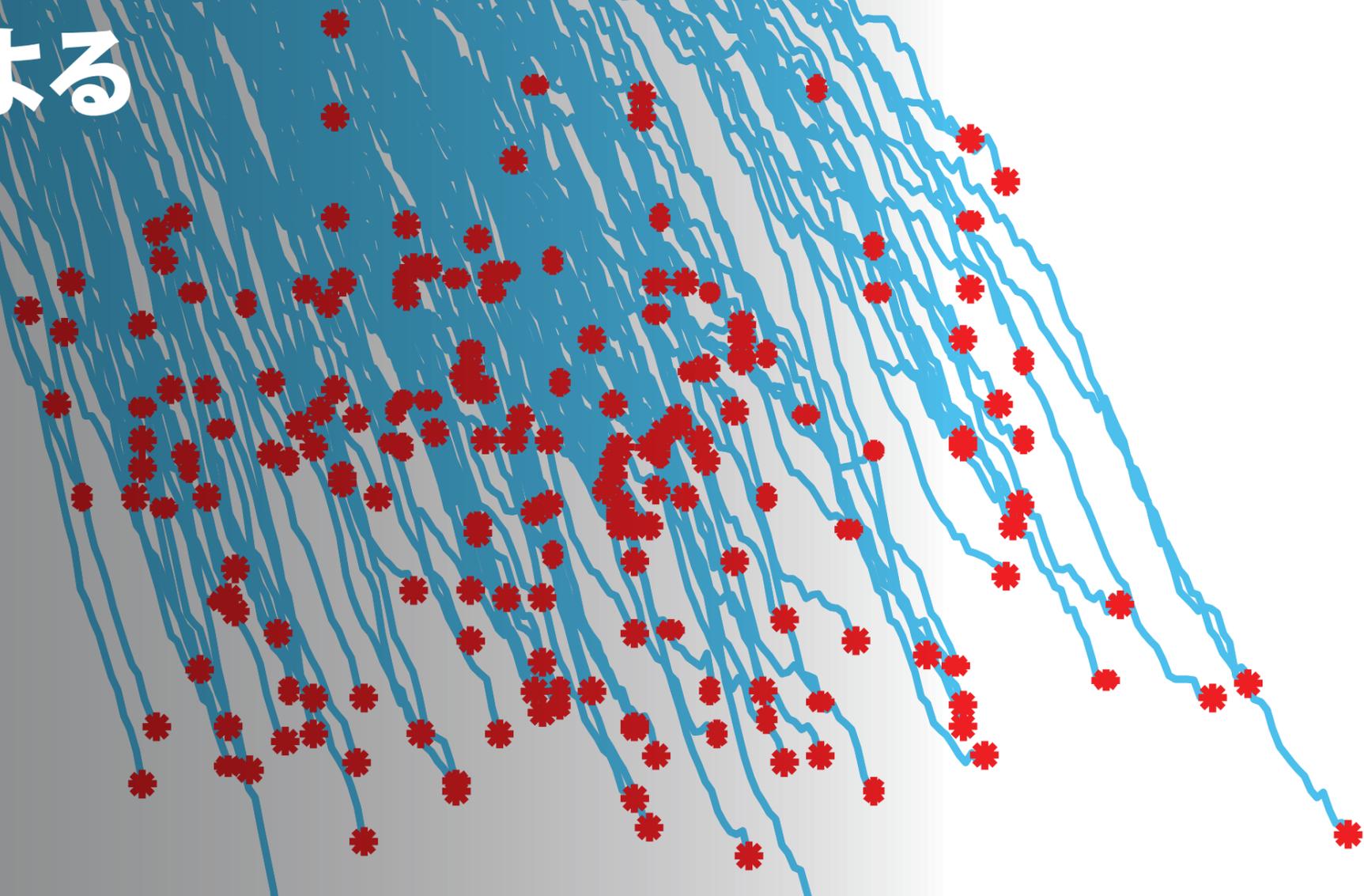


予知保全: MATLAB による 残存耐用時間の推定

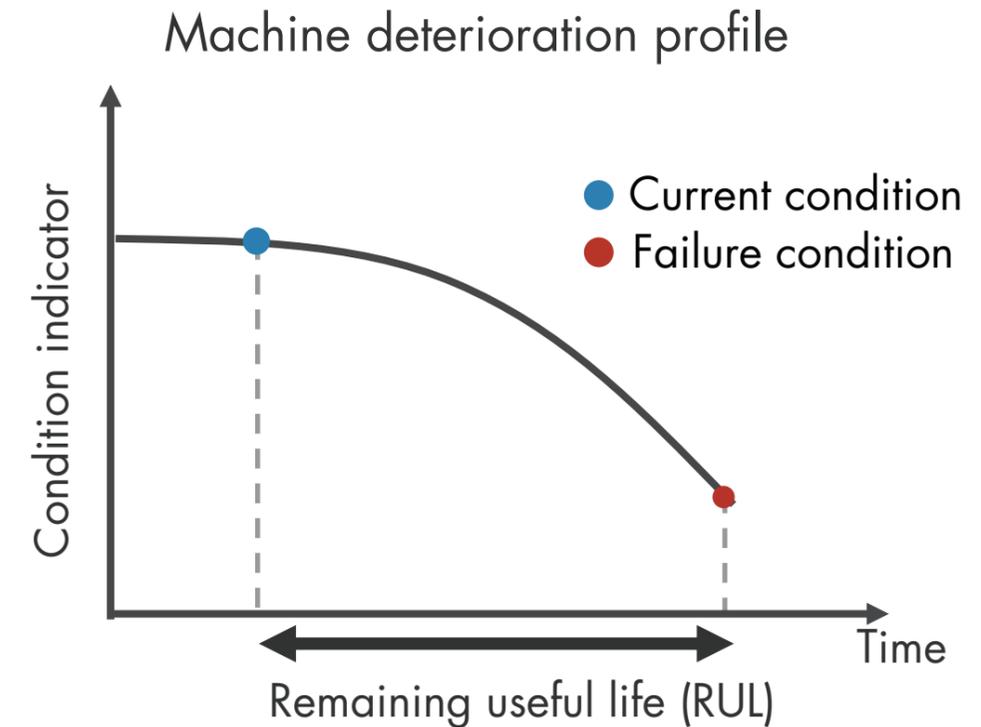


残存耐用時間とは

予知保全の目標の 1 つは、システムの残存耐用時間 (RUL) を推定することです。RUL は、システムの現在の状態から故障までの時間です。システムに応じて、時間が、日数、フライト数、サイクル数、または他の数量の観点で示されます。

プロットには、時間が経つにつれ機械が劣化していく過程が示されます。

この eBook では、RUL の推定に使用される一般的な 3 つのモデル (類似性モデル、生存モデル、および劣化モデル) を取り上げ、類似性モデルを用いた例で RUL のワークフローを確認します。



RUL を推定する 3 つの一般的な方法

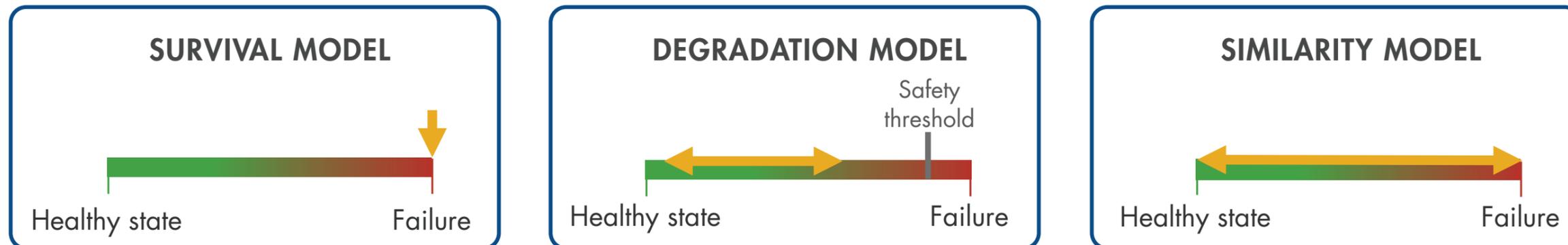
RUL の推定には、類似性モデル、生存モデル、および劣化モデルという 3 つの一般的なモデルが使われます。どのモデルを使用すべきかは、お持ちの情報の量によって変わります。

故障に至るまで実行された完全な履歴データがなく、故障時のみのデータを保持している場合は、*生存モデル*を使用します。

正常な状態から故障までの間でデータがあり、超えてはいけない安全のためのしきい値が分かっている場合は、*劣化モデル*を使用します。

保持するデータが、正常な状態から故障までのシステムの劣化全体を網羅している場合は、*類似性モデル*を使用します。

RUL ESTIMATOR MODELS



より詳細な情報は、予知保全で用いられる *RUL 推定器モデル*を参照してください。

次の航空機エンジンの例で、推定器モデルの動作方法について解説します。

RUL 推定器モデルの動作原理: 生存モデル

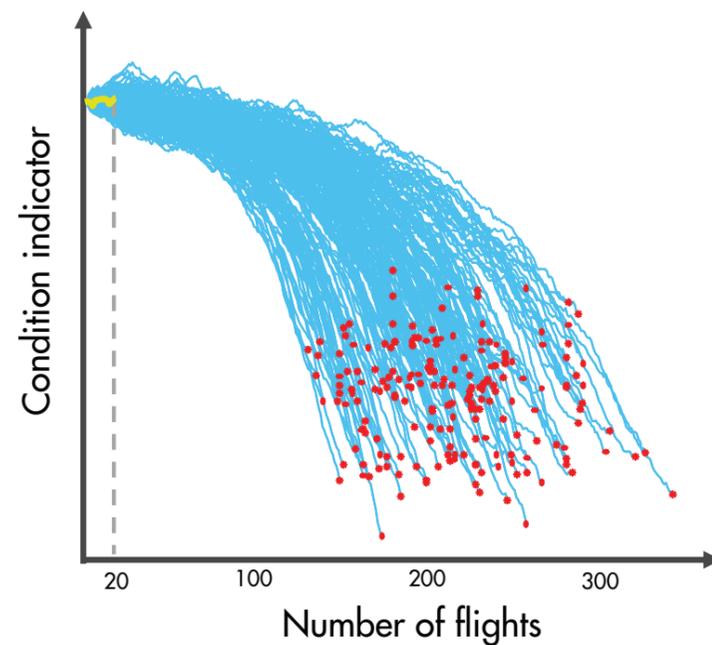
RUL ESTIMATOR MODELS

SURVIVAL MODEL

Use when you have failure data from similar machines

DEGRADATION MODEL

SIMILARITY MODEL



● Engine in operation

●● Historical fleet data

● Engine failures

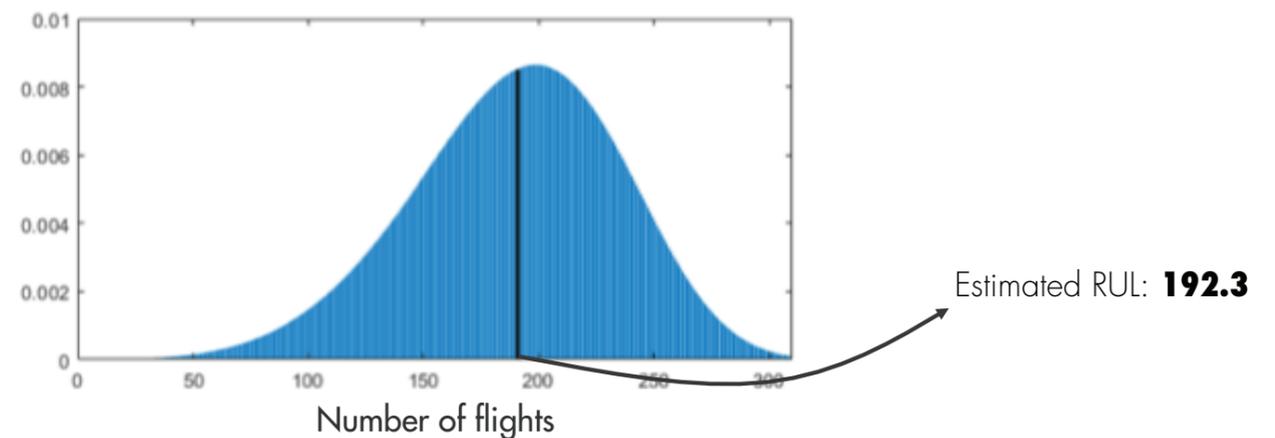
この例では、パーツの修理または交換が必要になるまでに、エンジンが何回フライトを実施できるかを特定することを目標としています。

プロットの黄色の線は、これまで 20 回のフライトを行ったエンジンを表しています。青色の線は、同じタイプのエンジンを持つ航空機からのデータを表しています。赤色のマークがエンジンの故障時を示しています。

航空機からの完全な履歴データがない場合でも、故障データがあれば生存モデルを用いて RUL を推定することができます。

一定回数のサイクル (フライト数) の後に、いくつかのエンジンが故障したかを調べることができます。また、エンジンのそれまでのフライト数も分かります。生存モデルでは、このデータの確率分布を使用して残存耐用時間を推定します。

Probability density function for the RUL estimation after 20 flights



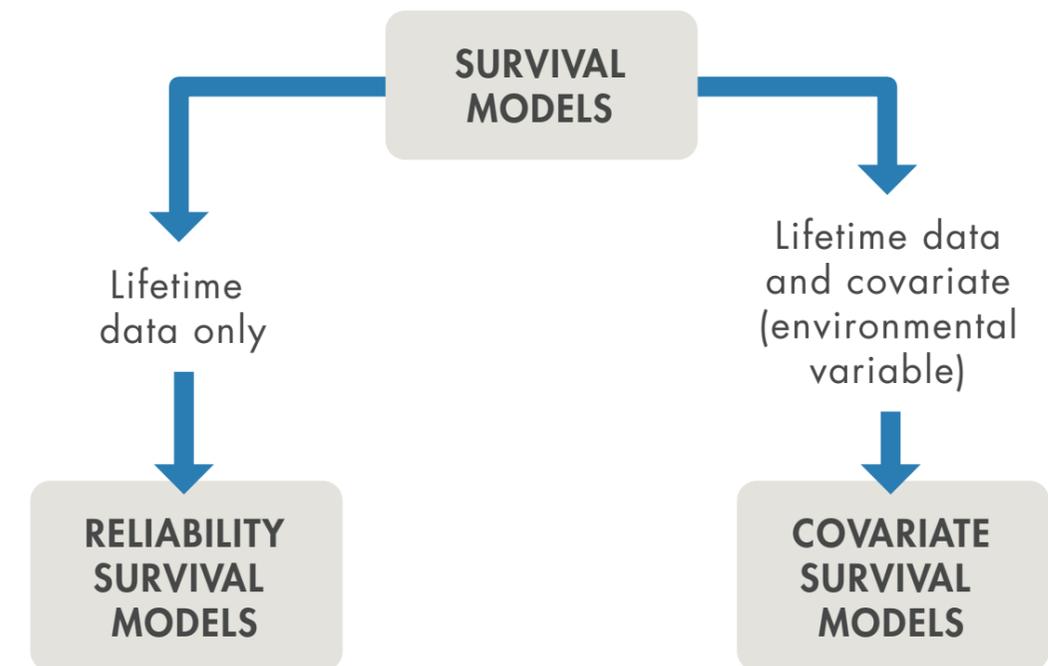
RUL 推定器モデルの動作原理

MATLAB での生存モデル

生存解析は、イベント発生までの時間のデータをモデル化する統計的手法です。故障に至るまで実行された完全な履歴データがなく、次のデータのみがある場合に便利です。

類似したコンポーネントの生存期間に関するデータのみ たとえば、集合の中のそれぞれのエンジンが何マイル走るとメンテナンスが必要かということが分かっているとします。この場合は、**reliabilitySurvivalModel** という MATLAB® モデルを使用します。類似するコンポーネントを持つ航空機における故障時の履歴情報がある場合、このモデルは故障時の確率分布を推定します。テストコンポーネントの RUL を推定するために、分布が使用されます。

生存期間、および RUL と相関するその他の変数データ (共変量) の両方 共変量には、コンポーネント プロバイダー、コンポーネントが使用されている枠組み、または生産バッチなどの情報が含まれます。この場合は、**covariateSurvivalModel** という MATLAB モデルを使用します。このモデルは、生存期間と共変量を用いてテストコンポーネントの生存確率を算出する比例ハザード生存モデルです。



RUL 推定器モデルの動作原理 劣化モデル

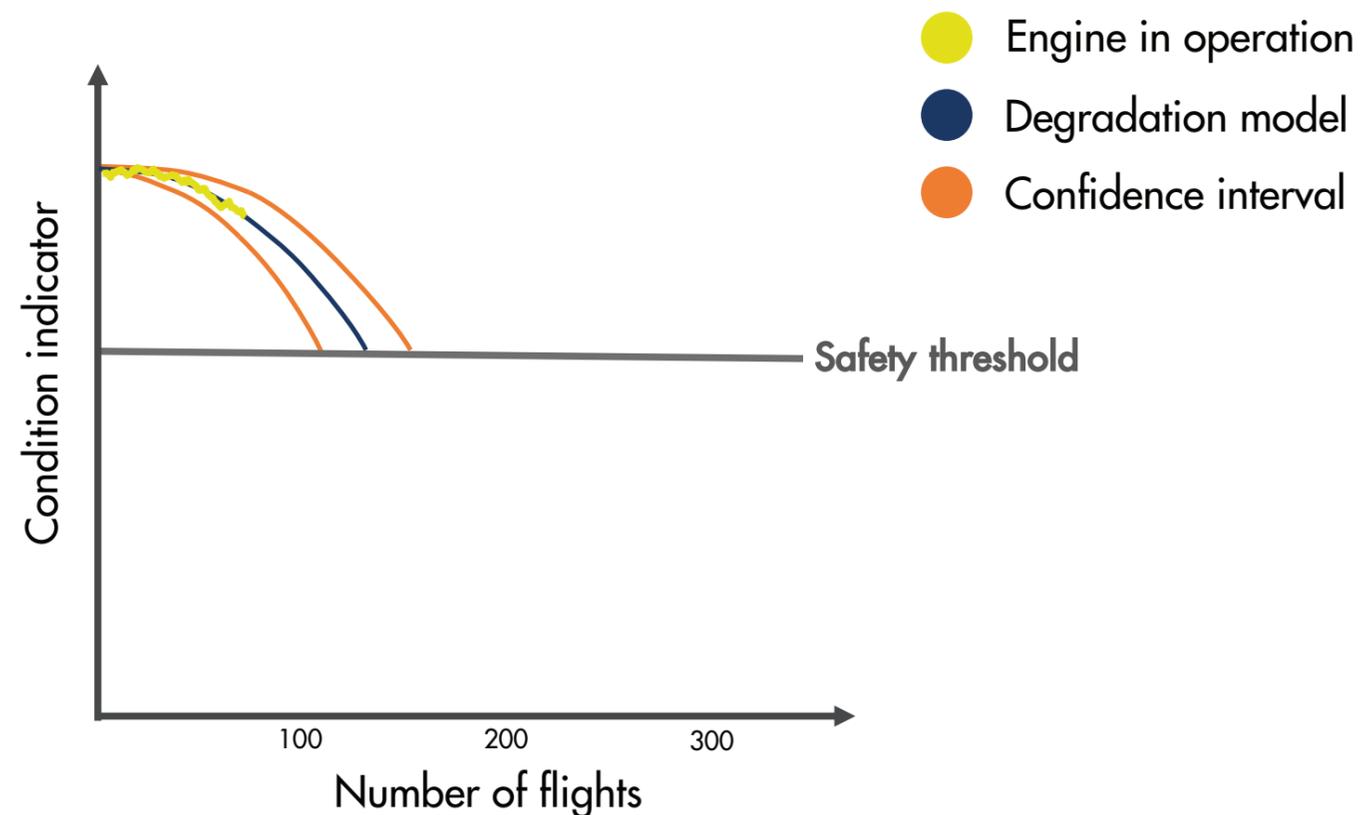
RUL ESTIMATOR MODELS

SURVIVAL MODEL

DEGRADATION MODEL

SIMILARITY MODEL

Use when you know a threshold of some condition indicator that indicates failure



たとえば、類似する機械からの故障データが利用できないものの、故障の原因となりうるため超えてはいけない安全のしきい値が分かっている場合があります。この場合、情報を使用して劣化モデルを状態インジケータに当てはめることができます。状態インジケータはエンジンからの過去の情報を使用して、それが将来どのように変化するかを予測します。この方法により、状態インジケータがしきい値を超えるまでに何回のサイクルがあるかを統計的に推定することができます、それが残存耐用時間の予測に役立ちます。

RUL 推定器モデルの動作原理

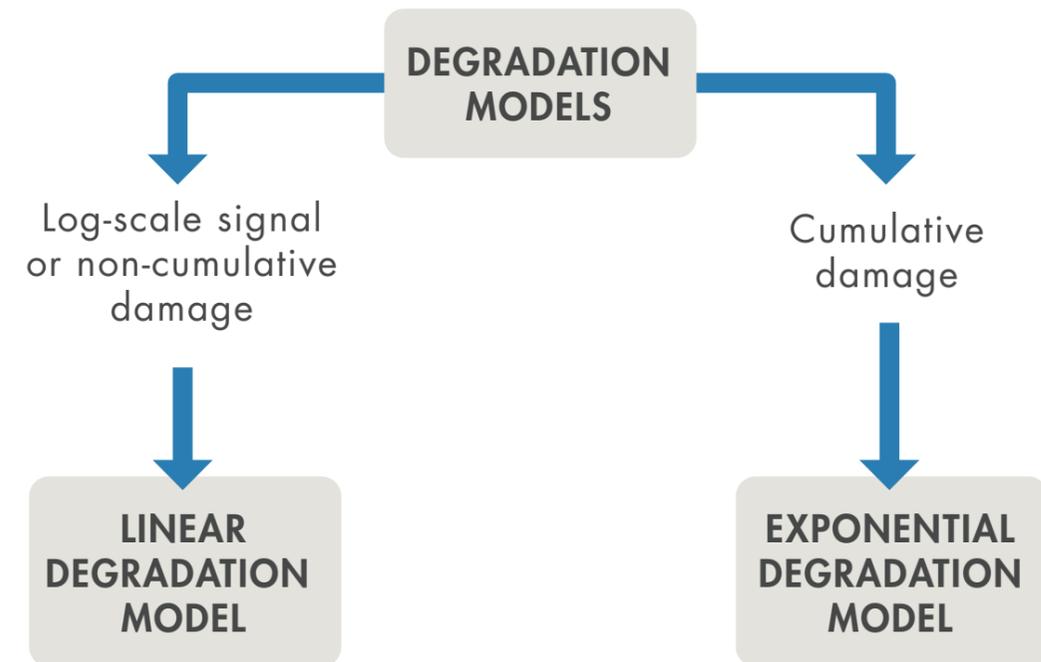
MATLAB の劣化モデル

劣化モデルでは、状態インジケータが事前に設定されたしきい値をいつ超えるかを予測することにより、RUL を推定します。これらのモデルは、故障を示す状態インジケータの値が分かっている場合に便利です。Predictive Maintenance Toolbox™ で利用できる 2 つの劣化モデルは次のとおりです。

線形劣化モデル (linearDegradationModel) は、劣化動作をオフセット項を持つ線形確率プロセスとして示します。線形劣化モデルは、システムに蓄積的な劣化がない場合に便利です。

指数劣化モデル (exponentialDegradationModel) は、劣化動作をオフセット項を持つ指数確率プロセスとして示します。指数劣化モデルは、テストコンポーネントに蓄積的な劣化がある場合に便利です。

劣化モデルは単一の状態インジケータで機能しますが、主成分分析やその他の合成手法を用いて、1 つ以上の状態インジケータからの情報を統合する融合状態インジケータを生成することができます。



RUL 推定器モデルの動作原理

類似性モデル

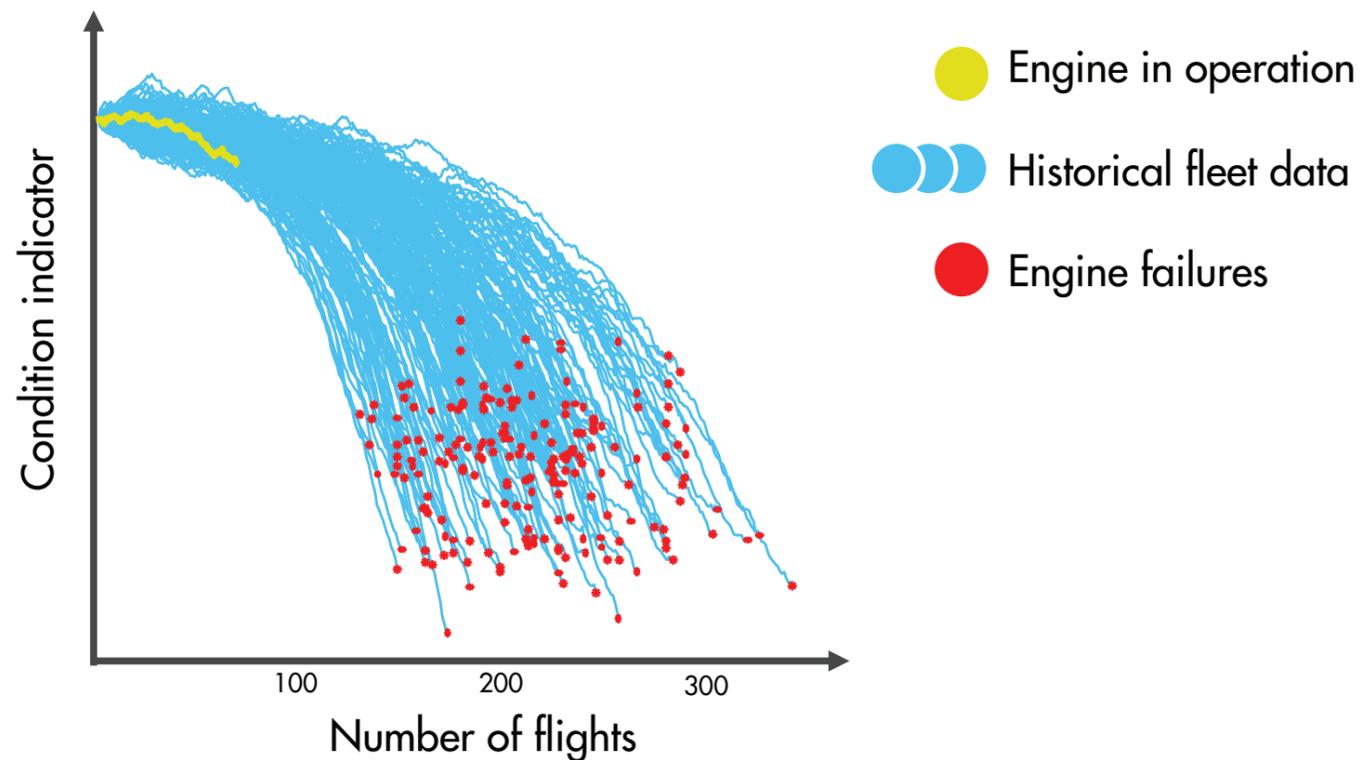
RUL ESTIMATOR MODELS

SURVIVAL MODEL

DEGRADATION MODEL

SIMILARITY MODEL

Use when you have run-to-failure histories from similar machines



類似性モデルは、故障に至るまで実行したデータ (正常な状態から劣化および故障までの、同じタイプのエンジンを持つ航空機からの完全な履歴データ) がある場合に便利です。

RUL 推定器モデルの動作原理

MATLAB での類似性モデル

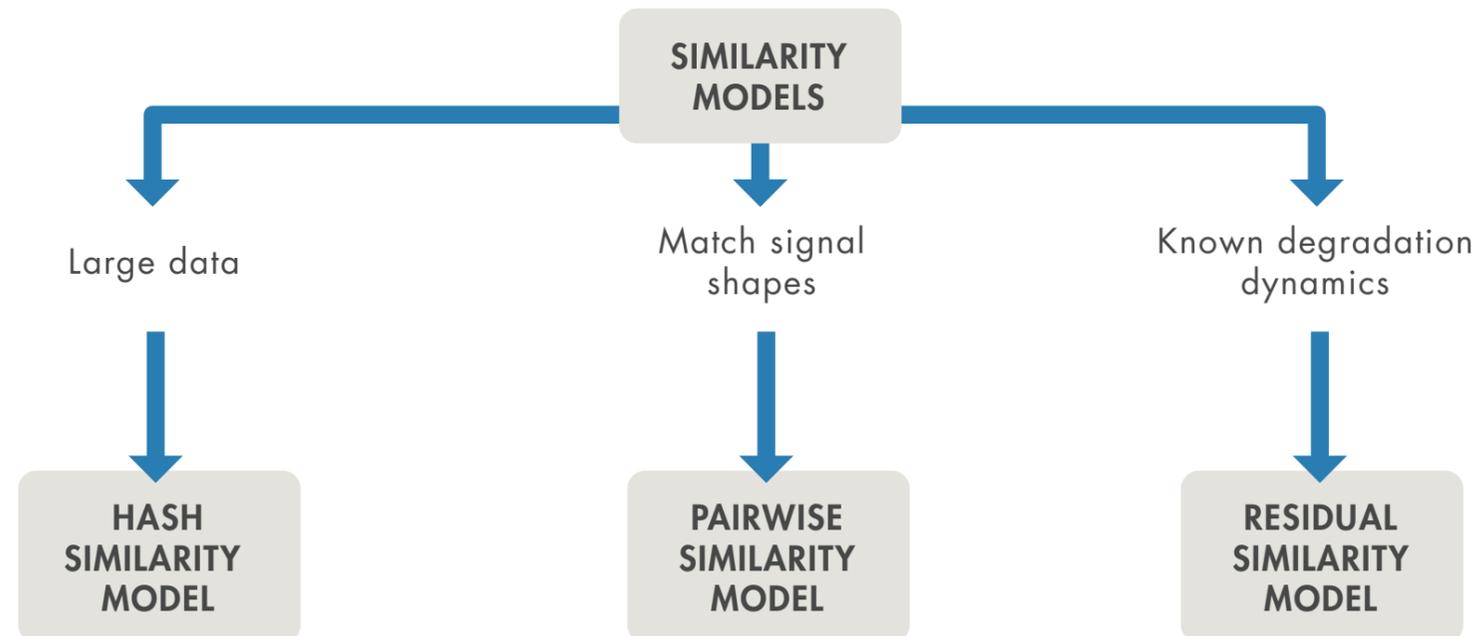
Predictive Maintenance Toolbox には、次の 3 種類の類似性モデルが含まれています。

ハッシュ特徴類似性モデル (hashSimilarityModel) は、集合の中の各メンバーからの劣化履歴データを、平均値、最大値、または最小値などの固定サイズの凝縮された情報に変換します。

ペアワイズ類似性モデル (pairwiseSimilarityModel) では、劣化の過程がテストコンポーネントと最も相関しているコンポーネントを見つけ出します。

残差類似性モデル (residualSimilarityModel) では、以前のデータを ARMA モデルまたは使用時に線形か指数になるモデルを当てはめます。その後、集合モデルから予測されたデータと、テストコンポーネントからのデータの間に残差を算出します。詳細は、「[類似度ベースの残存耐用期間推定](#)」をご覧ください。

次のセクションでは、類似性モデルの詳細を確認しながら、RUL 予測の実行方法について解説します。



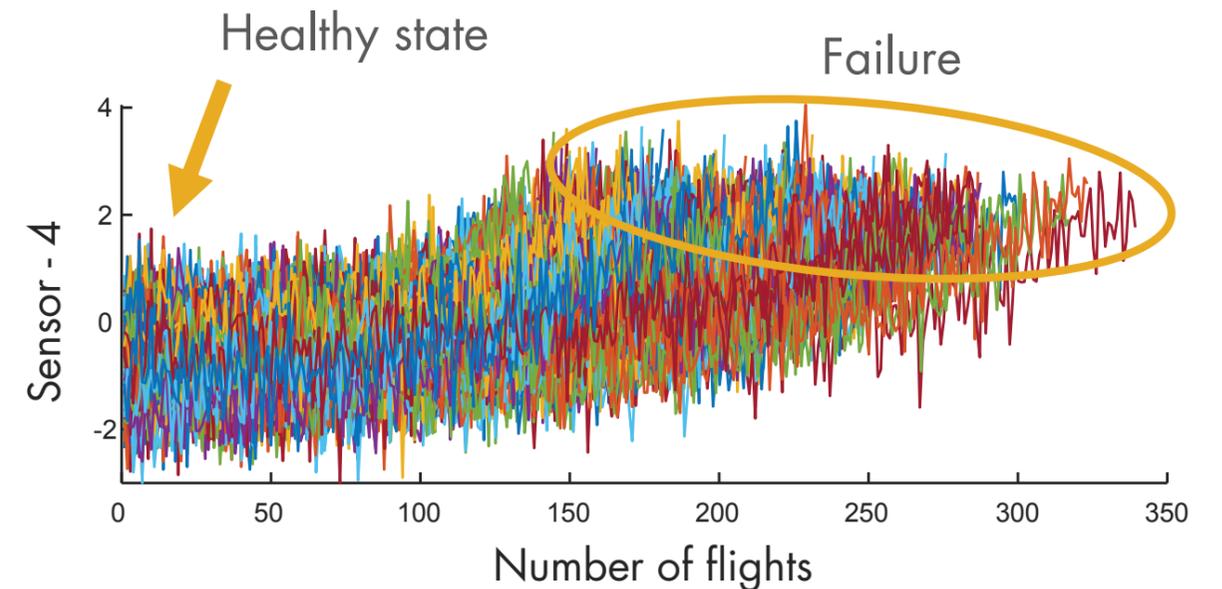
RUL 推定ワークフロー 類似性モデルの使用

データの取得

類似性モデルは、便利な RUL 推定手法です。このモデルの使用方法を具体例で確認し、RUL 予測の実行についての理解を深めましょう。

予知保全モデルを開発するために、まず、データを取得します。この例では、[NASA のデータリポジトリ](#)から一般にも利用可能な Prognostics and Health Management (故障予測と健全性管理、PHM) 課題データセットを使用します。このデータには、故障に至るまでの 218 のエンジンのデータが含まれています。それぞれのエンジンのデータセットには、21 のセンサーからの計測値が含まれています。エンジンのさまざまな箇所に配置されたセンサーから、燃料フロー、温度、および圧力などの計測値を集めて制御システムに送り、エンジンの状態を監視しています。このプロットは、1 つのセンサーの計測値が 218 のすべてのエンジンでどのように変化しているかを示しています。

プロットでは、X 軸がサイクル数 (フライト)、Y 軸が各フライトでのセンサーの平均値を表しています。各エンジンの正常な状態から故障までが示されています。

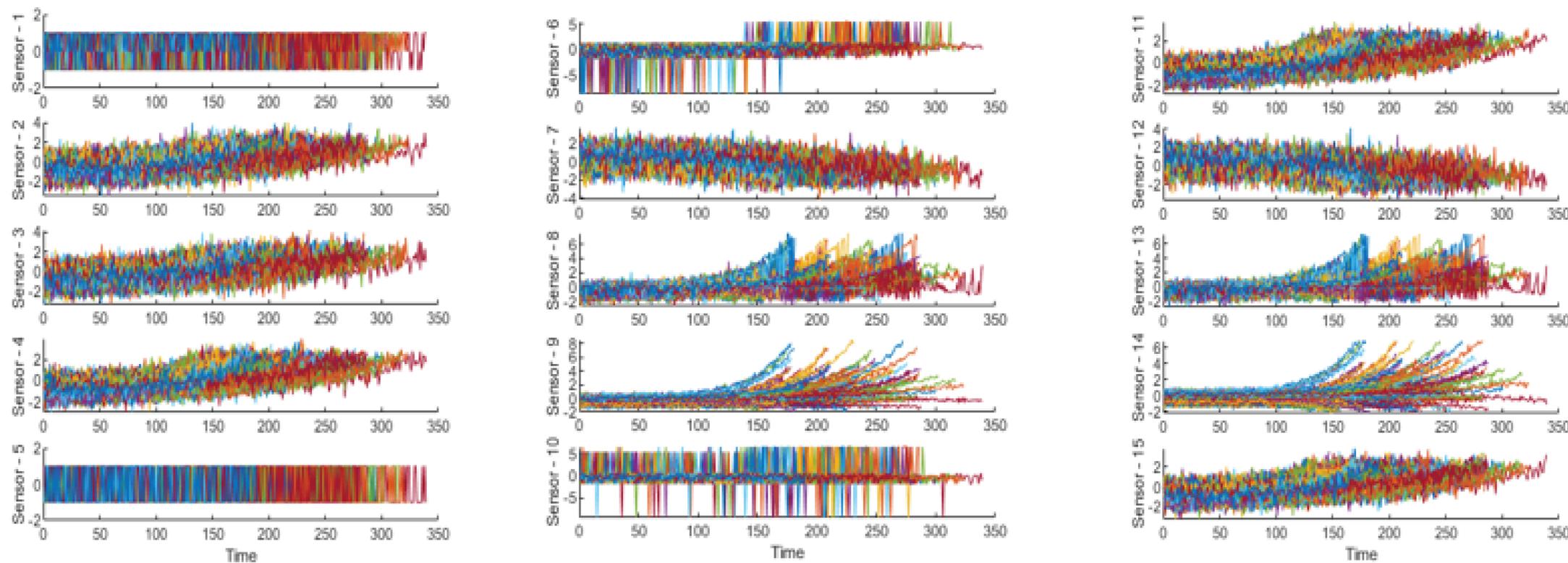


RUL 推定ワークフロー 類似性モデルの使用 続き



データの前処理および状態インジケータの特定

前のページでは、センサー 4 からのデータを示しましたが、データセットには他の 20 のセンサーからのデータも含まれています。他のセンサーの結果を詳しく見ると、いくつかの計測値には、故障に向う明確なトレンドがないことが分かります (センサー 1、5、6、および 10 など)。そのため、これらは類似性モデルの学習に有益な特徴の選択には役立ちません。



RUL 推定ワークフロー：類似性モデルの使用 続き

データの前処理および状態インジケータの特定

すべてのセンサーからの計測値を使用する代わりに、トレンドを最もよく示す 3 つのデータセット (正常状態と故障の間でプロファイルに大きな変化があるもの) を特定します。センサー 2、11、および 15 が、劣化プロファイルを作成するために使用する組み合わせとして適しています。

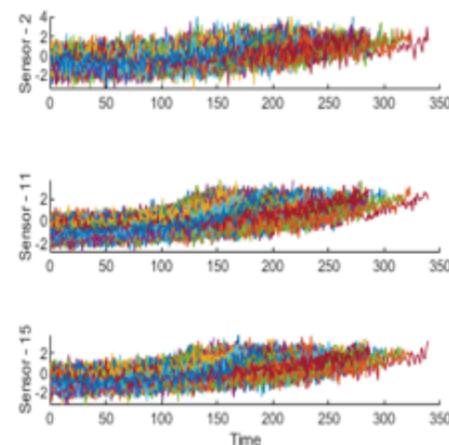
劣化プロファイルは、集合の中の各機械 (各コンポーネント) についての 1 つ以上の状態インジケータが示す、機械の正常状態から故障状態への進展度です。

前処理の手順で、トレンドを最もよく示すセンサー (センサー 2、11、および 15) のみを選択し、それらを組み合わせて状態インジケータ

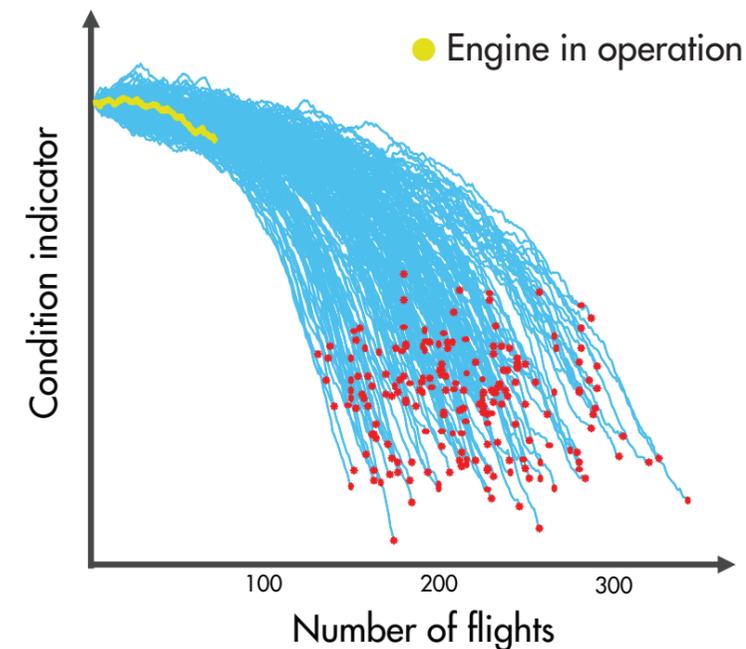
を算出することで、データを削減します。

状態インジケータを選択して適用する方法については、[「予知保全: MATLAB で状態インジケータを抽出」](#)で詳細をご確認ください。

現在のエンジン (黄色) の残存耐用時間を推定するには、センサー 2、11、および 15 を使用して、航空機の劣化プロファイルを示す状態インジケータを算出します。右のグラフでは、エンジンが現時点で 60 回のフライトで使われたということと、赤の時点で類似の航空機エンジンが故障したことが示されています。



Combine the most trendable sensors to compute condition indicators



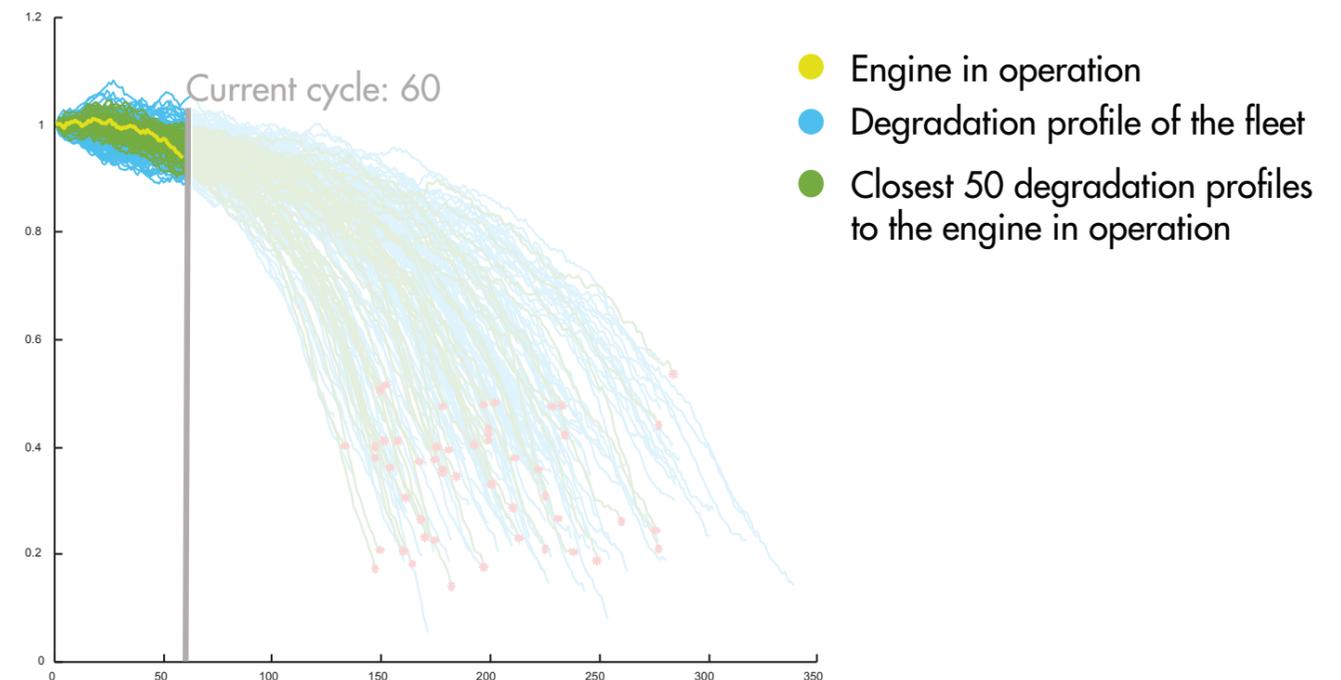
RUL 推定ワークフロー 類似性モデルの使用 続き

類似性モデルの学習

データを 2 つのグループに分け、大部分を類似性モデルの学習に使用し、残りを学習済みモデルのテストに用います。既知の RUL を使用して学習済みモデルの精度を評価します。

類似性モデルは、現在のサイクルまでのエンジンに最も近いエンジンプロファイルを見つけることで機能します。最も類似したエンジンの故障時点の情報が履歴データにあるため、現在のエンジンの予想される故障時期が分かります。下のプロットに示されているように、このデータを確率分布に当てはめることができます。

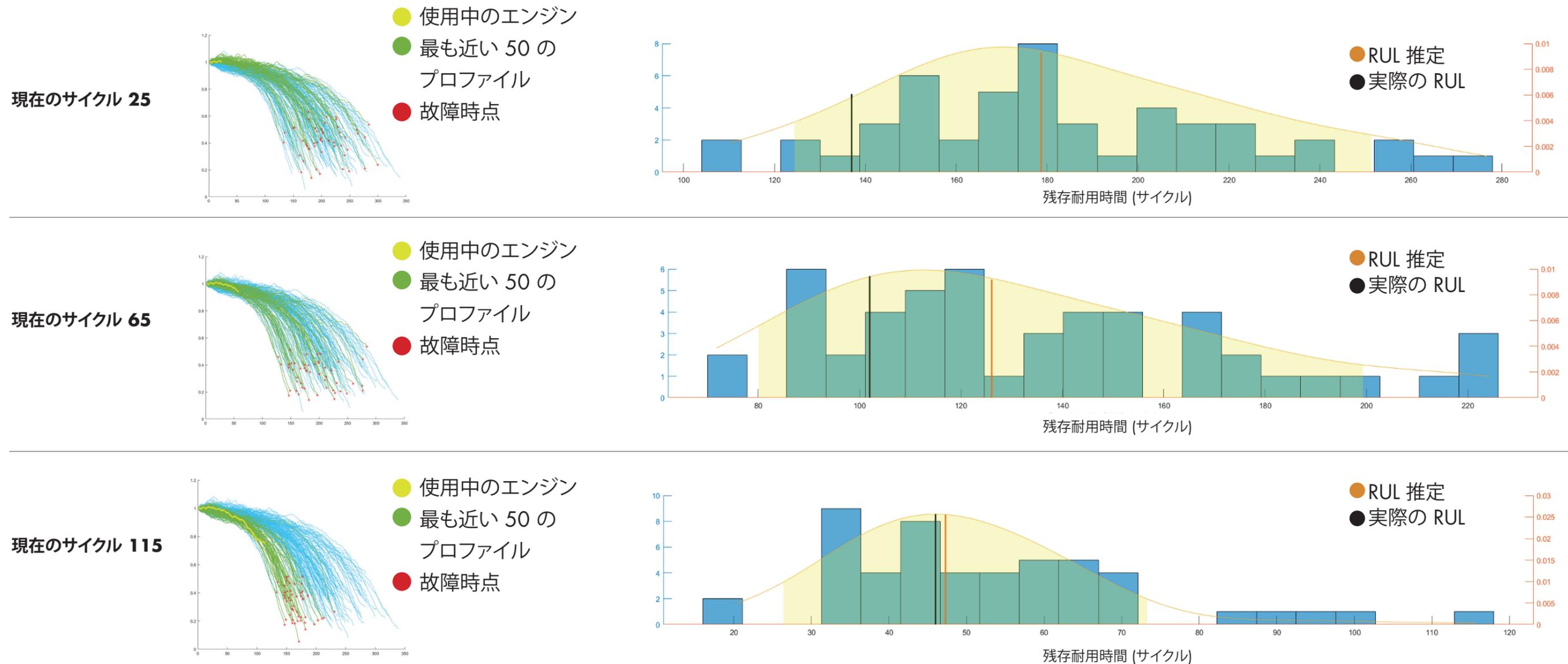
この分布の中央値が、エンジンの残存耐用時間の推定になり、これと実際の RUL を比較して精度を計測することができます。



RUL 推定ワークフロー：類似性モデルの使用 続き

類似性モデルの学習

RUL を算出するたびに、類似性モデルが最も近いエンジンの過程 (緑色で示されます) を探し出し、確率分布プロットを用いて RUL を算出します (右)。下のプロットでは、エンジンプロファイルと次の 3 つのサイクルでの確率分布が示されています：25、65、および 115。



RUL 推定ワークフロー：類似性モデルの使用 続き

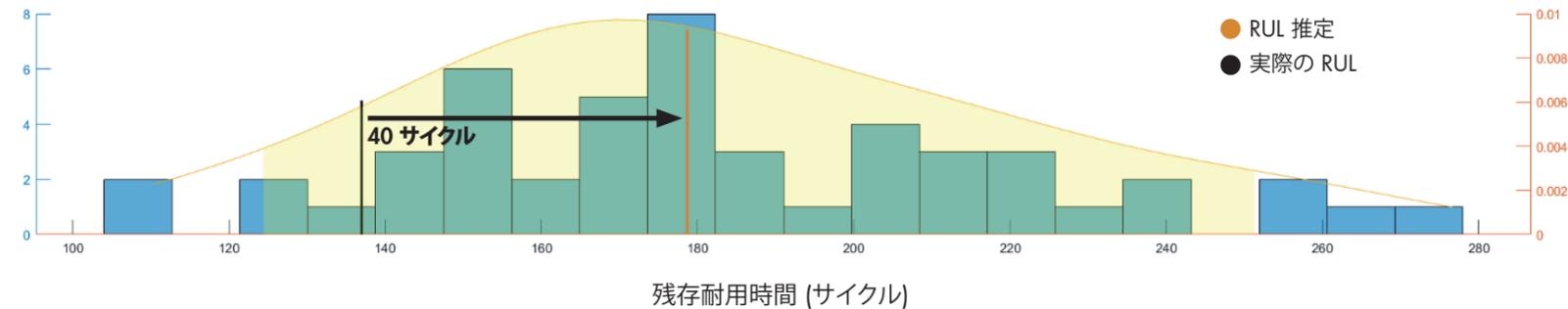
類似性モデルの学習

確率分布プロットでは、オレンジ色の線が予測された RUL を表し、黒色の線が実際の RUL を表しています。

エンジンが 25 サイクル (フライト) 目にあるときは、モデルが学習するデータが少ないため、予測は非常に大きな分布となり、実際の値より 40 サイクル外れています。

時間が経過し、モデルで使用できるデータが増えるにつれて、予測された RUL が実際の RUL に近づいていることがわかります。

現在のサイクル 25

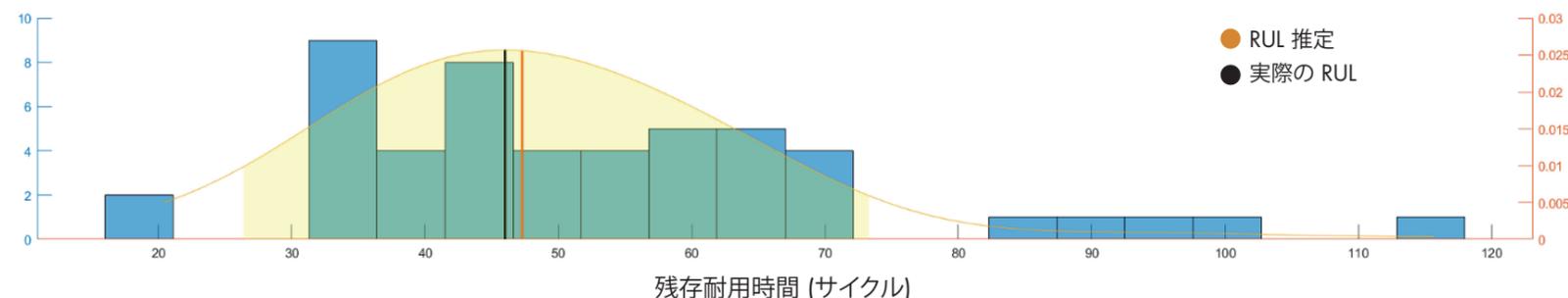


サイクル 65 と 115 で見られるように、モデルがエンジンから新しいデータを取得するにつれ、類似性モデルは、より多くのデータから学習するようになります。その結果、時間の経過とともに、予測精度が改善します。

サイクル 115 の RUL 推定を用いると、エンジンの RUL に関する非常に正確な予測ができ、最良の時期にメンテナンスを予定することができるようになります。

データが増えるにつれ、RUL 予測がより正確になり、分布がより集中します。

現在のサイクル 115



関連情報

予知保全ワークフロー、サンプル、およびツールに関するさらに詳しい情報については、以下をご覧ください。

見る

[Predictive Maintenance Toolbox とは \(2:06\) - ビデオ](#)

[予知保全 Tech Talks - ビデオシリーズ](#)

[MATLAB および Simulink での予知保全 \(35:54\) - ビデオ](#)

[Diagnostic Feature Designer アプリを使用した特徴抽出 \(4:45\) - ビデオ](#)

読む

[予知保全で直面しやすい 4 つの課題とその対処法 - ホワイトペーパー](#)

[予知保全のための MATLAB および Simulink - 概要](#)

[MATLAB での予知保全の例 - コードサンプル](#)