

風力発電設備の「異常」の早期検出と 「発電性能」の総合評価

－ 新 技 術 の 紹 介 －



W:T



WIT・WIN法のねらい – 風力発電設備の性能劣化の状態監視と異常早期検出 –	3
風力発電システム 異常診断技術 – WIT・WIN法 の紹介	4
多変量解析技術の利点	5
多変量空間の密度分布を用いた状態監視	6
計測パラメータの密度分布を用いた異常検知の判別例	7
データ取得から分析結果までの流れ	8
パワーカーブによる風車全体の性能評価	9
風速 x 振動の関係性による局所の精密診断	10
WIT・WINによる保全のフローチャート	11
実機風車 評価事例1	12
実機風車 評価事例2	16
実機風車+模擬不具合 評価事例3	19
実機風車 評価事例まとめ	22
風車模擬試験装置を用いた異常模擬試験	23
風車模擬試験装置の分析結果	26
風車模擬試験装置 評価事例まとめ	28
WIT・IIUの風力発電システムデータ診断サービス	29

1. WITWINで何ができるか

- (1) 風力発電設備の発電性能の経年劣化を定量的に評価できる。
- (2) 弱点部位（ベアリング、歯車、ブレード、発電機など）に生じる異常の早期検出が可能。これを局部診断という。
- (3) 風車全体の異常に繋がる健全性の状態監視ができる。これをグローバル診断という。

風車に関してこれだけの情報を常時入手していれば、故障の早期検出と早期対応（効果的な保全対応）、発電性能の経年劣化の診断と対応策の手当てが可能となる。WITとIIUは技術協力してこれを可能とする新手法を開発した。前者は手法を、後者は実験データの取得を通して、WIT・WIN法の適用可能性を実証した。

IIUは従来から、風力発電設備の正常状態における各部位の力学的状態（回転状況、偏心荷重、変位、応力）を測定と解析により手法について研究してきた。また、割れ、破損、などの異常を検出する検査手法も経験を有している。芯ズレ、ヘタリ、偏心荷重などの不具合の程度と対策、などについても長年にわたって検討してきた。

2. 分析方法と得られる情報

- (1) 多変量解析手法に依拠し確率密度に着目した分析手法である。
- (2) 過去から現在に至るデータを集積していれば、現在の状況における異常と健全の診断が可能となる。
- (3) 評価はグローバル診断と局部診断に別けられる。
- (4) グローバル診断は例えば、（風速、回転数、電気出力）の3つのパラメーターを使用して行われる。発電設備の発電性能の経年劣化が逐次評価される。劣化が許容される域を超えると、劣化要因を特定して、保全業務に情報を提供する。
- (5) 局部診断は、弱点部位の診断に供されている各種パラメータ（振動計、ひずみ計、温度計、音響、油など）を使用して行われる。キズやゆがみや変形といった不具合が検出される。ベアリングの傷等が検出されるとIIUの欠陥評価技術を駆使して、欠陥サイズ、いわゆるサイジングが行われる。
- (6) 欠陥評価：破壊力学に基づいて、部品の寿命予測が行われ、保全業務に反映される。

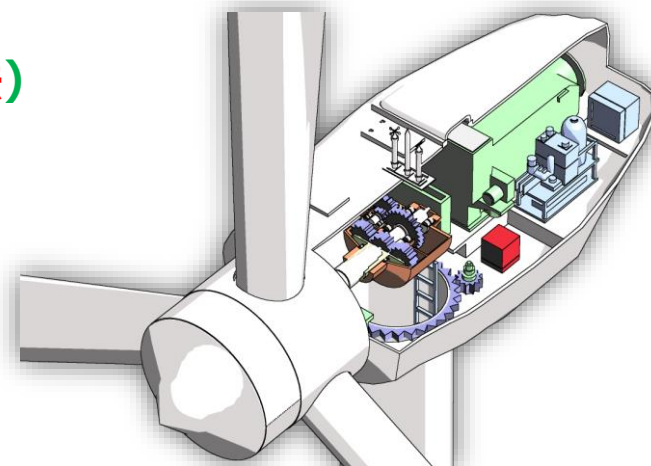
3. 保全適用と稼働率の維持

- (1) 上記の分析作業を通して得られた情報は保全業務に役立てられる。
- (2) 保全業務を最適化するニーズからくる要件に合わせて、情報提供する。
- (3) 保全最適化と経済性との関係は、メンテ計画に依るが、分析業務と保全業務の連携が老朽化の進展と共に重要となってくる。

風力発電システムー新しい状態監視技術（WIT・WIN法）

- 風向・風速は常に変動し、回転速度も常に変動。
- トレンド監視や判定基準の設定がむずかしい。
- 普通のトレンド監視では異常の早期検知が困難。

今般、WITとIIUは異常を早期に検知する**技術（WIT・WIN）**を共同開発しました。**WIT・WIN**による実機データの解析例を紹介します。



WIT・WINは多変量解析技術に基づく異常検知技術 (off-line 分析が可能)

- 近年、異常の早期発見や診断に**ビッグデータ**と**多変量解析技術**を利用した研究が盛んになっています。
- 多点分析に基づく**関係性分析**は閾値分析に勝っており、複数の機器から構成される「系統」や「プラント」等の異常兆候を「**より早期に**」にかつ「**より正確に**」検出できます。
- **WIT・WIN**による複雑な実機データの分析により、異常の早期発見が可能です。



WIT・WINは風力発電システムの「**安全性**」と「**経済性（稼働率）**」の向上に貢献します。

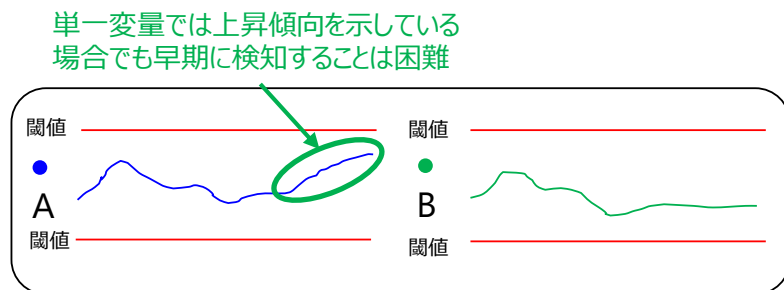
1) 大きな故障の防止 2) メンテナンスの効率化 3) ダウンタイムの低減等

WIT・WINの利点 - 運転条件の変動に応じた off line 分析

各種パラメータ（風速・風向、発電量等）の多くは起動時、停止時、出力制御、季節変動等により、運転条件が大きく変動するため、それらの変動に応じた解析技術が必要です。

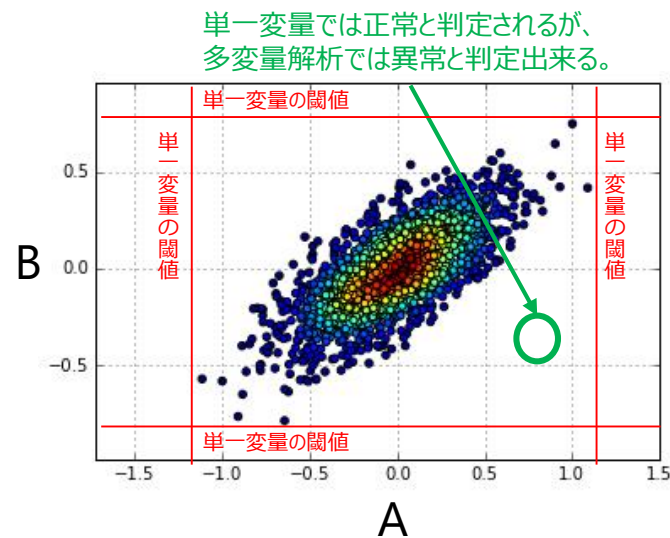
単一変量の閾値監視（従来手法）

運転条件の変動に対応して、各パラメータの値も大きく変動するため閾値を狭くすることは困難。異常を認識するまでに異常がかなり進展する恐れあり。



多変量解析技術による状態監視

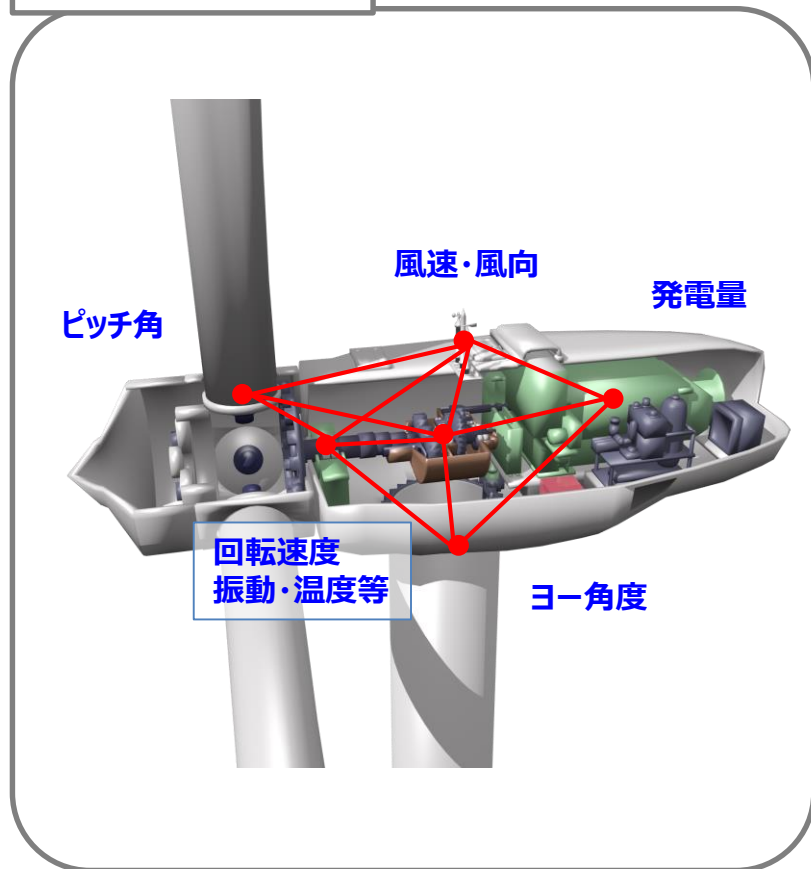
複数点間の関係性に着目することで、単一変量の閾値監視より、異常を早期に検出することが可能。



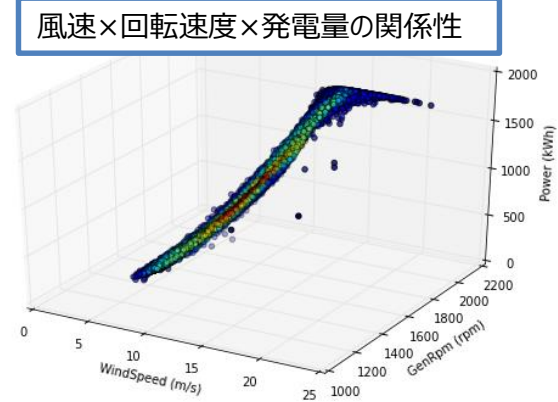
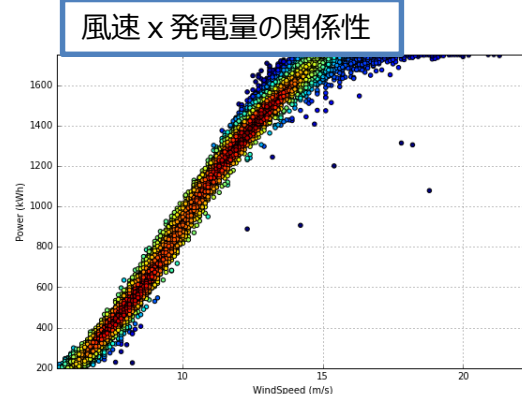
多変量空間の密度分布を用いた状態監視

風力発電システムにおいて、WIT・WINは各種パラメータ（風速・風向、発電量等）のそれぞれの関係性を**多変量空間の密度分布**として学習し、新たに取得したデータがその空間分布に入る**確率**を算出することで評価を行います。

各種パラメータの取得



多変量空間の密度分布として学習



計測パラメータの密度分布を用いた異常検知の判別例

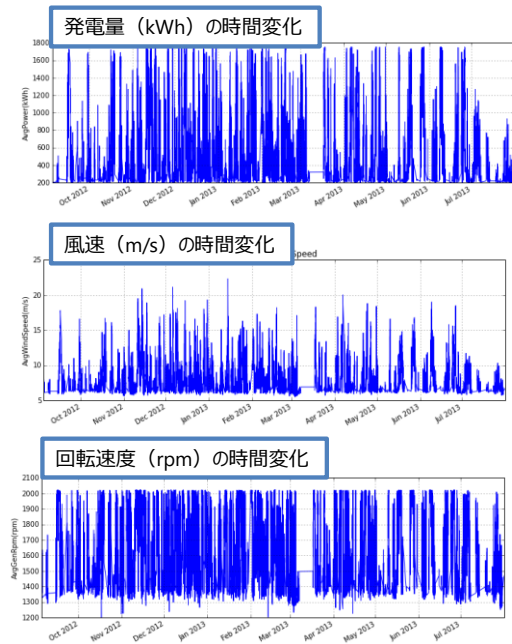
○異常の検知

正常時の各種パラメータ（風速・風向、発電量等）のそれぞれの関係性を学習し、新たに取得したデータ（目前データ）が正常時の空間分布に入る確率を評価します。

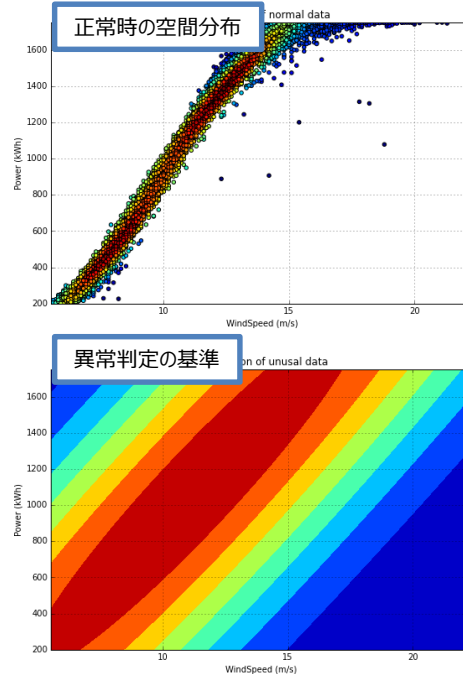
○異常事象の判別

さらに、トラブル発生時の空間分布を学習し、そのトラブルの空間分布確率を算出することで、異常の位置および異常の種類の判別が可能となります。 * データベースの蓄積

各種パラメータの実測データ

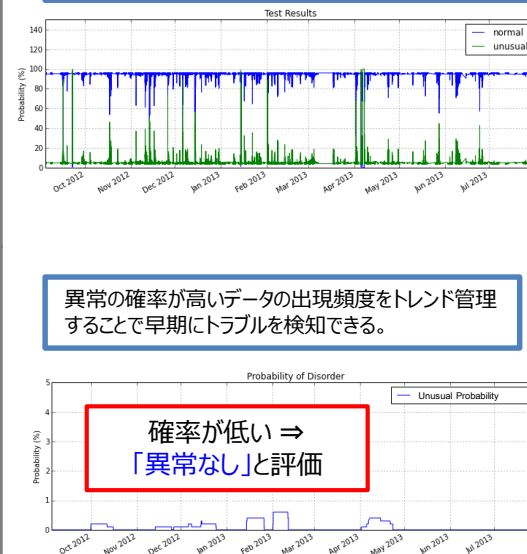


空間分布の学習

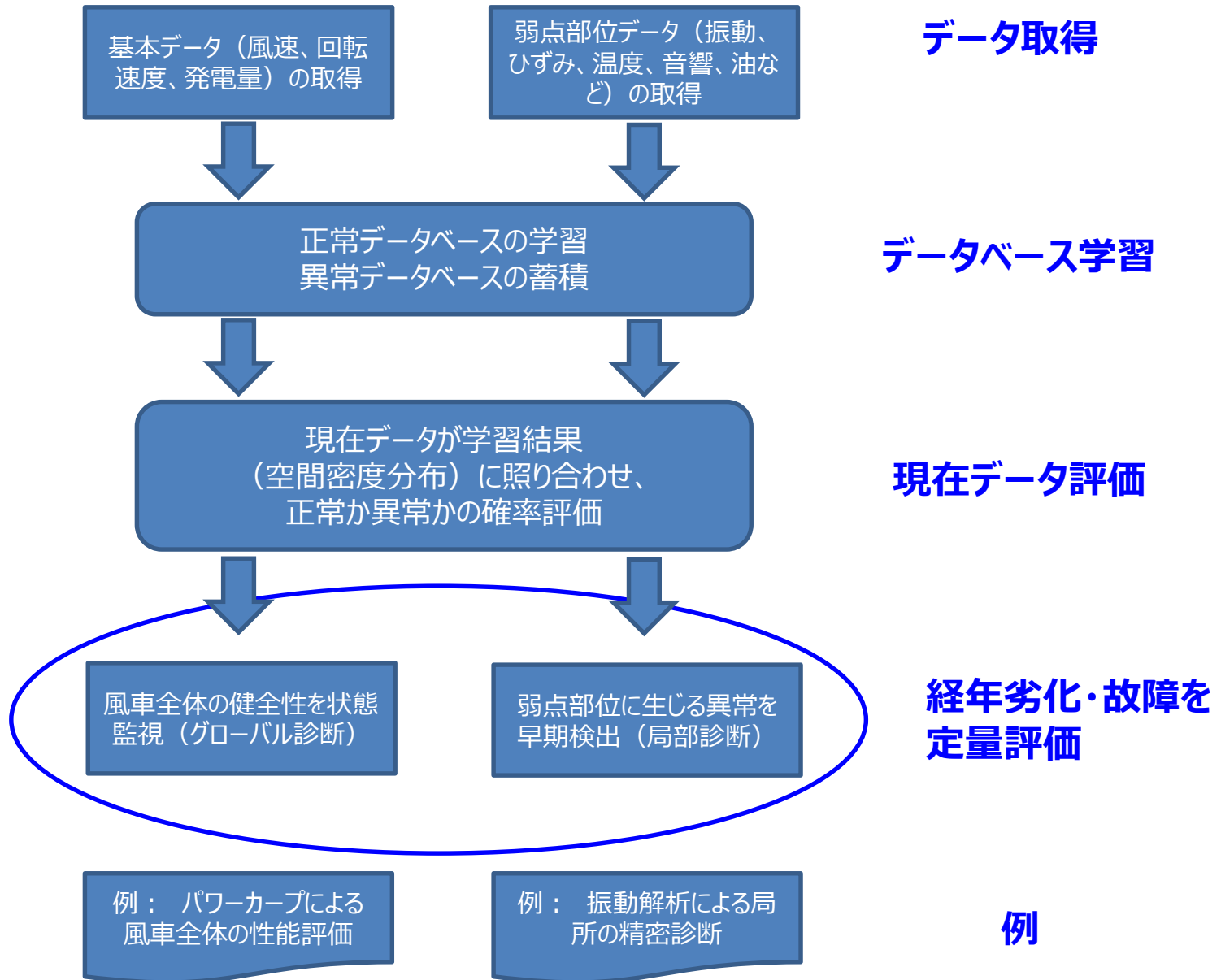


確率的評価

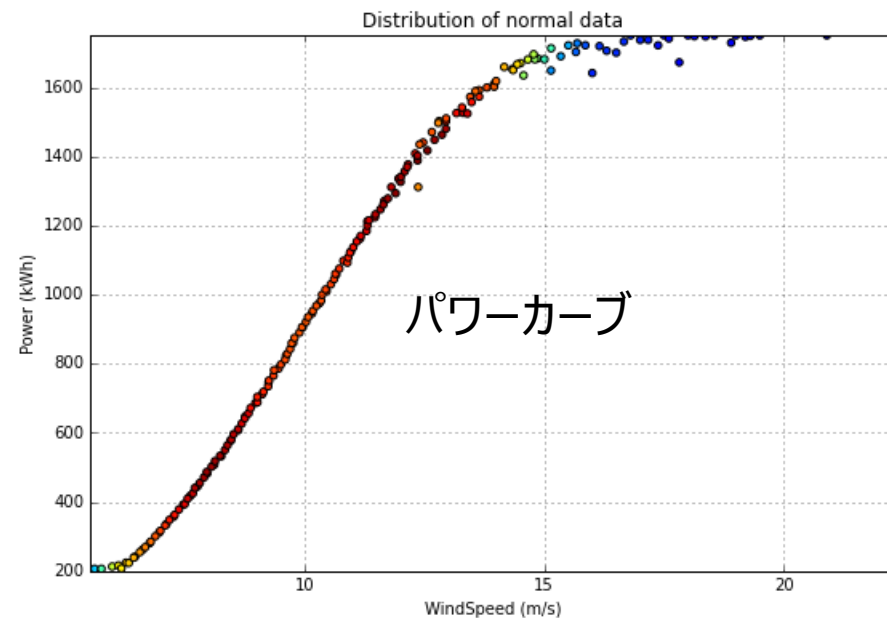
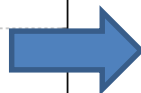
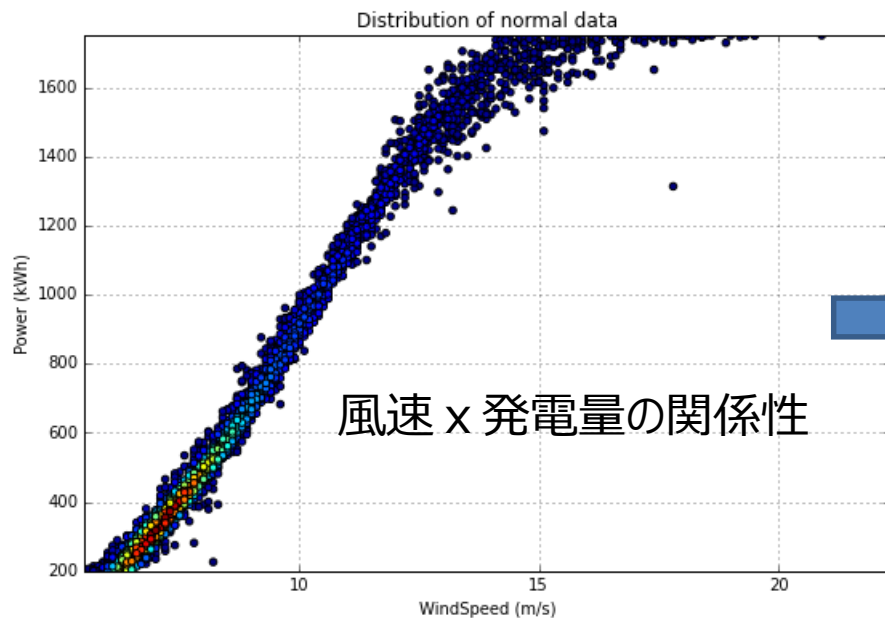
新たに取得したデータが正常時、異常時の空間分布に入る確率をそれぞれ算出し評価する。



データ取得から分析結果までの流れ



パワーカーブによる風車全体の性能評価



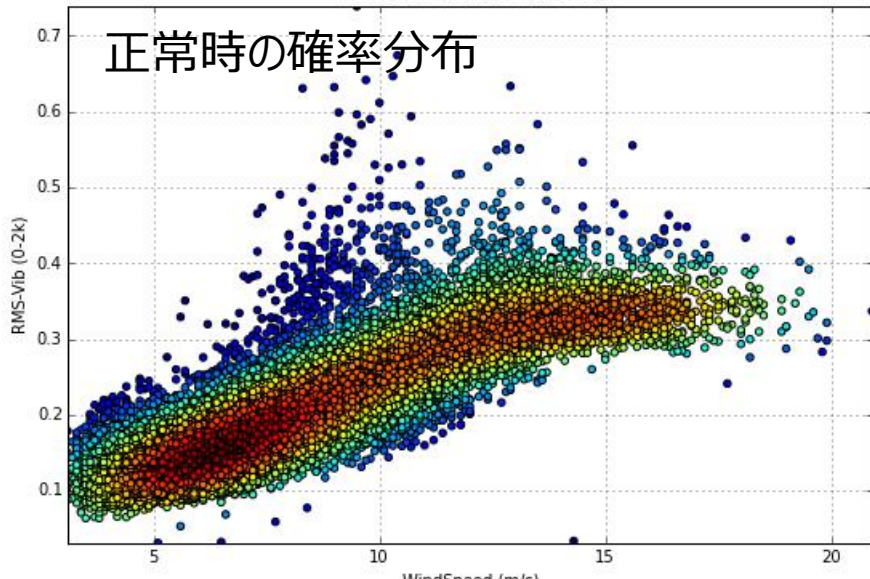
パワーカーブはその風力発電システムの特有なもので、性能が変わらなければ不変なものです。長期に渡ってこのパワーカーブを監視すれば、**風車全体の性能**を評価することが出来ます。

風速 x 発電量：	全体発電効率の低下
風速 x 回転速度：	機械的・構造的損傷
回転速度 x 発電量：	発電機の効率の低下

風速 x 振動の関係性による局所の精密診断

Distribution of normal data

正常時の確率分布



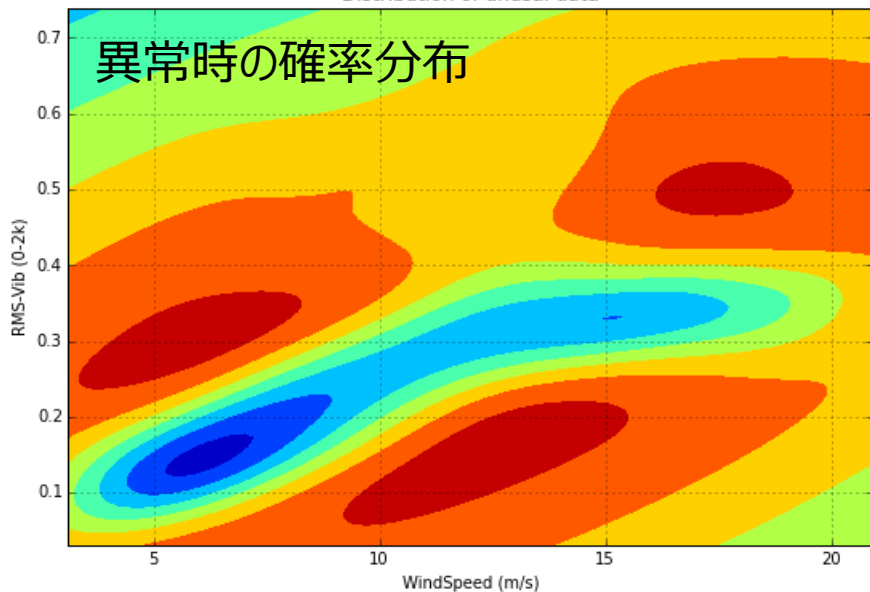
異常 > 正常（異常判定基準）：
赤は異常、ブルーは正常

引き算

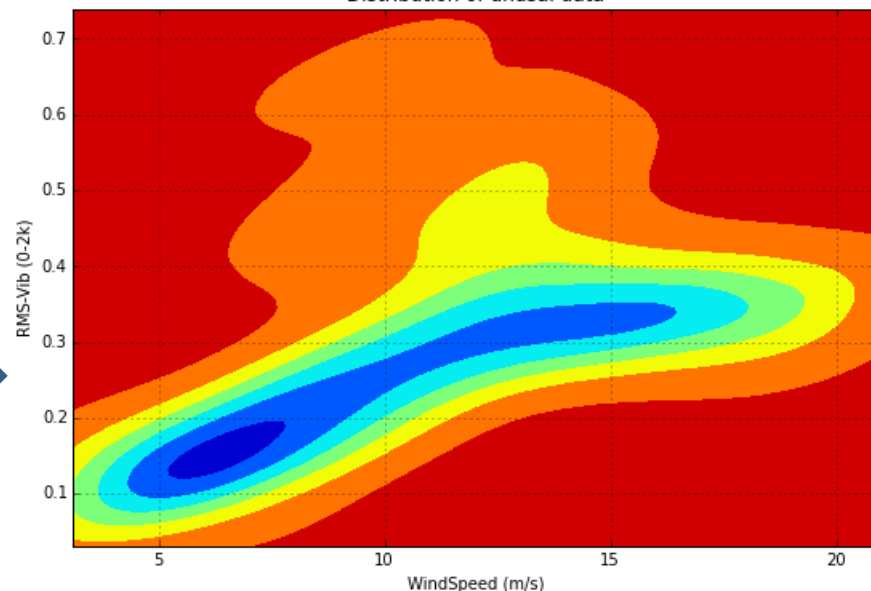


Distribution of unusal data

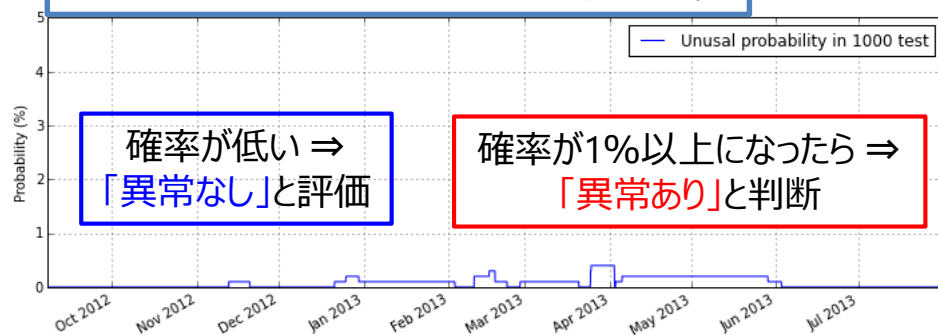
異常時の確率分布



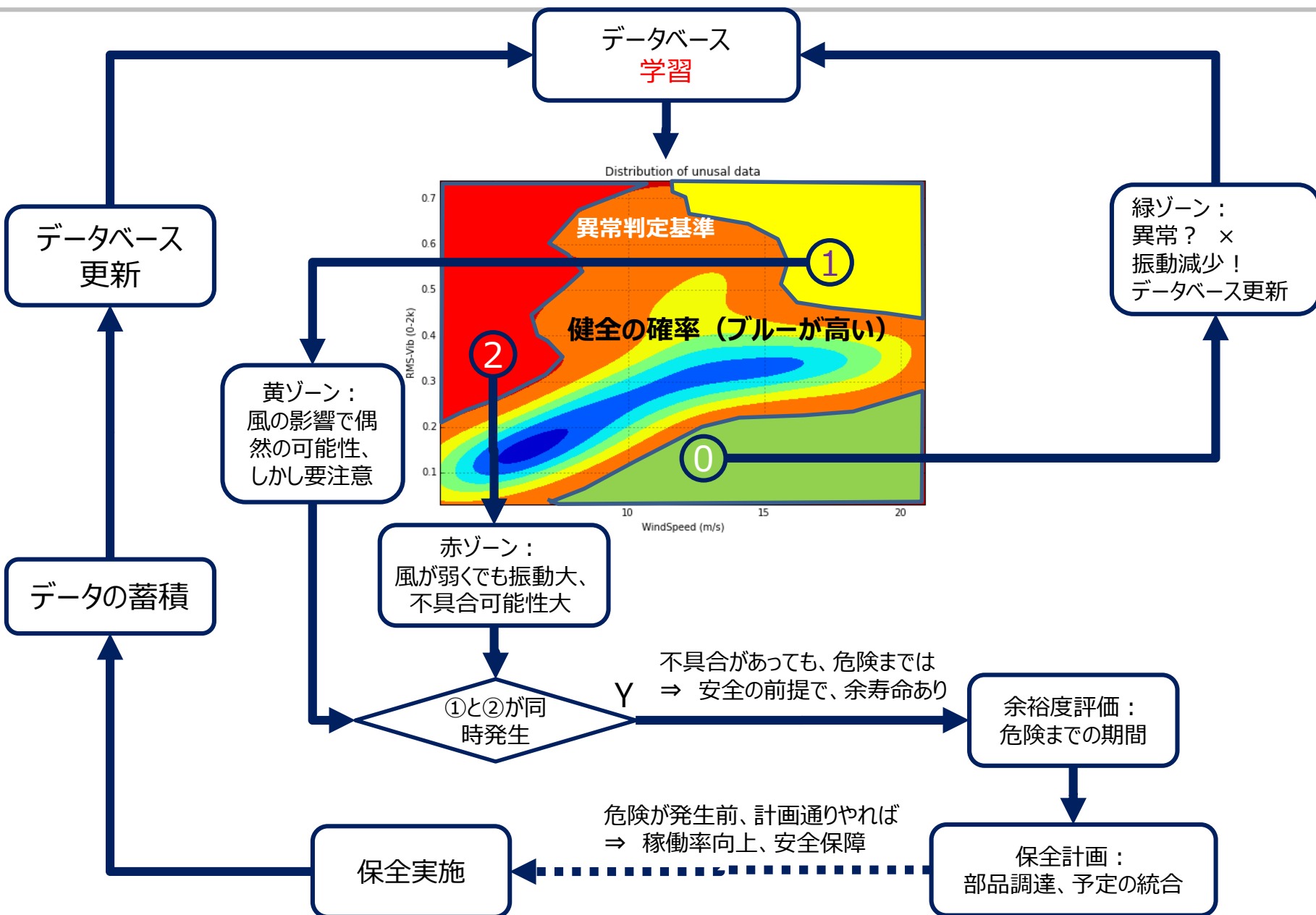
Distribution of unusal data



異常の確率が高いデータの出現頻度（1000点毎、%）



WIT・WINによる保全のフローチャート



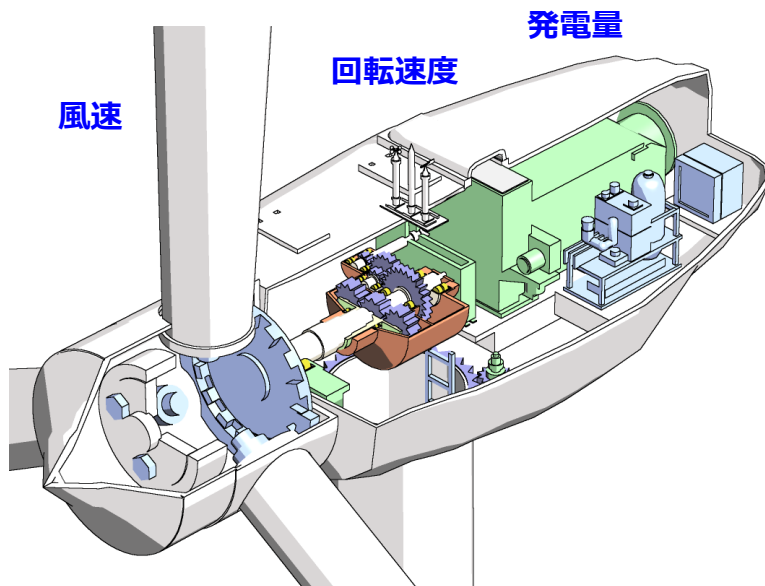
測定条件など

対象設備 → 1.6MW風車

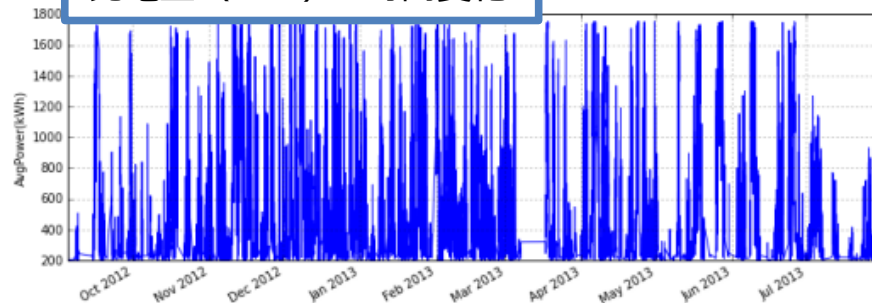
測定期間 → 2012年9月～2013年7月

評価用パラメータ → ・風速 (m/s)
・発電機回転速度 (rpm)
・発電量 (kWh)
・測定間隔 10分毎

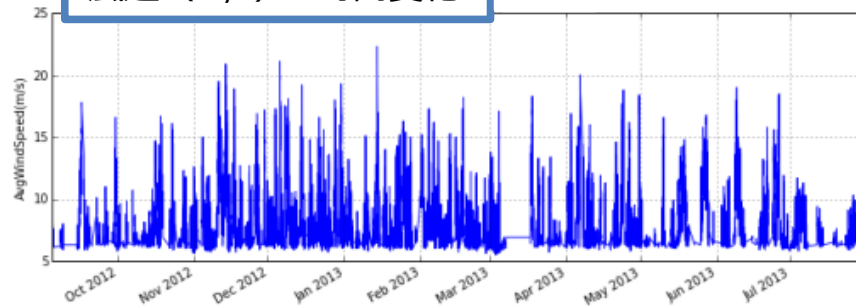
評価 → 学習データ (5000点から選定)
評価対象データ (21500点)



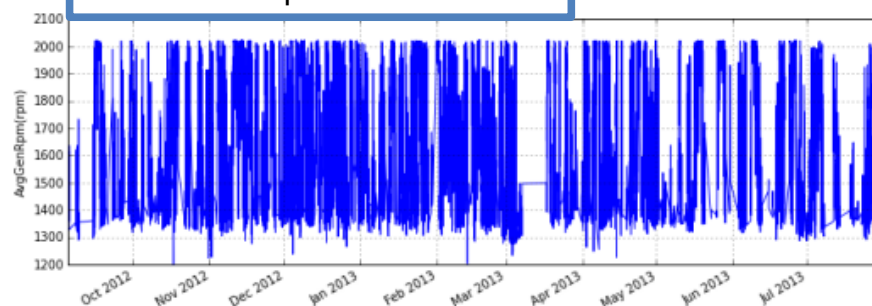
発電量 (kWh) の時間変化



風速 (m/s) の時間変化



回転速度 (rpm) の時間変化

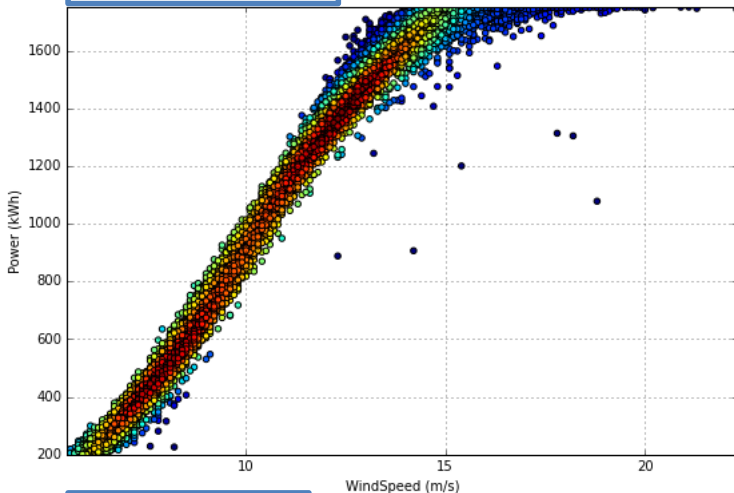


実機風車 評価事例1-1（風速VS.発電量）

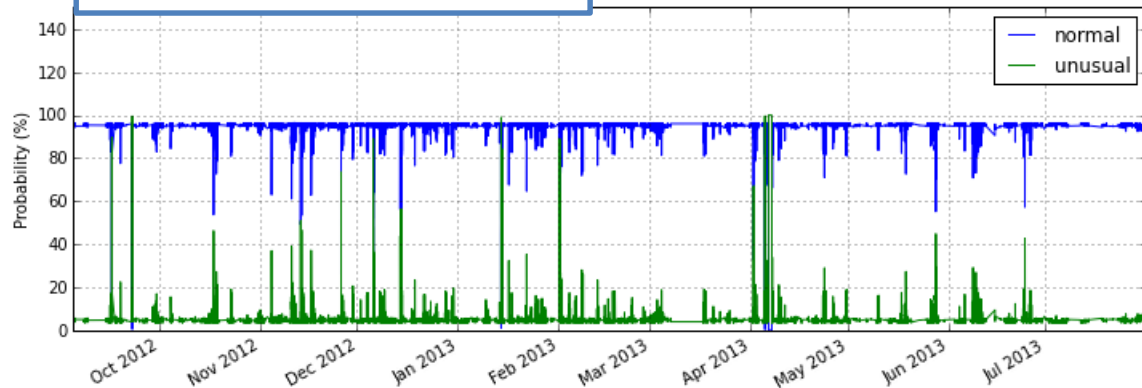
対象パラメータ：風速と発電量の関係性評価（例：風速に対して発電量が少ないまたは多い場合など）

評価結果：測定期間内では、正常である確率が高く、異常の確率が高いデータの出現頻度も低いことから、正常な運転状態であると評価

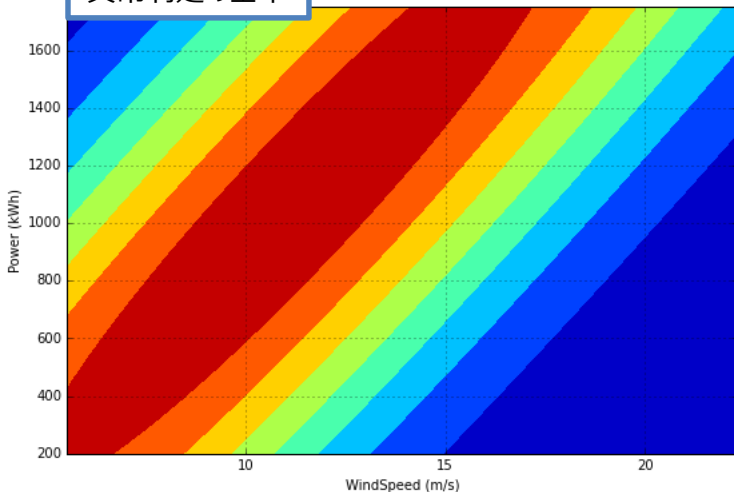
正常時の空間分布



正常時、異常時の空間分布に入る確率



異常判定の基準



異常の確率が高いデータの出現頻度（1000点毎、%）

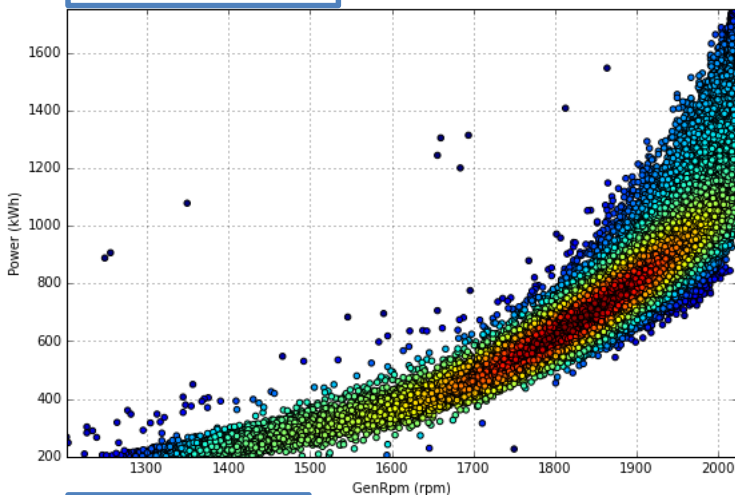


実機風車 評価事例1-2（回転速度VS.発電量）

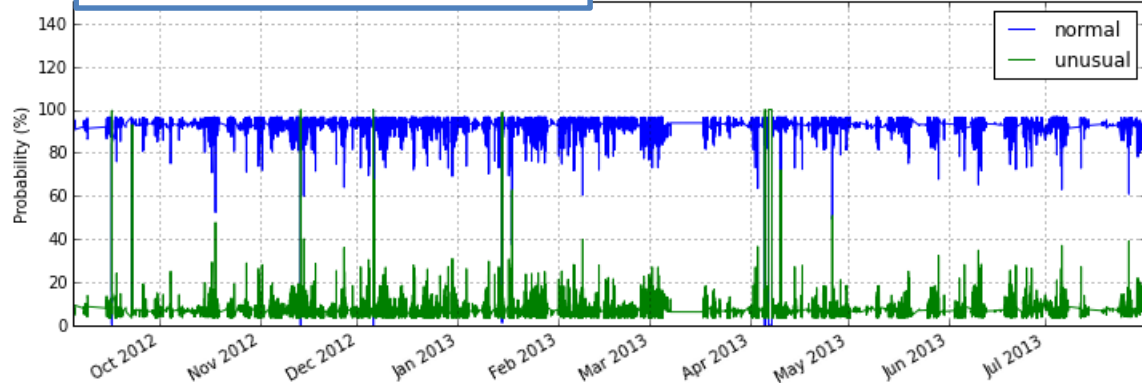
対象パラメータ： 発電機回転速度と発電量の関係性評価（例：発電機回転速度に対して発電量が少ない又は多い場合等）

評価結果： 測定期間内においては、正常である確率が高く、異常の確率が高いデータの出現頻度も低いことから、
正常な運転状態であると評価

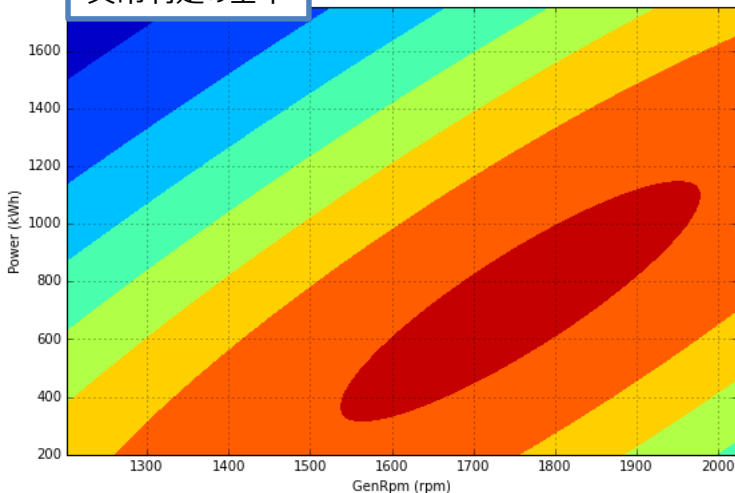
正常時の空間分布



正常時、異常時の空間分布に入る確率



異常判定の基準



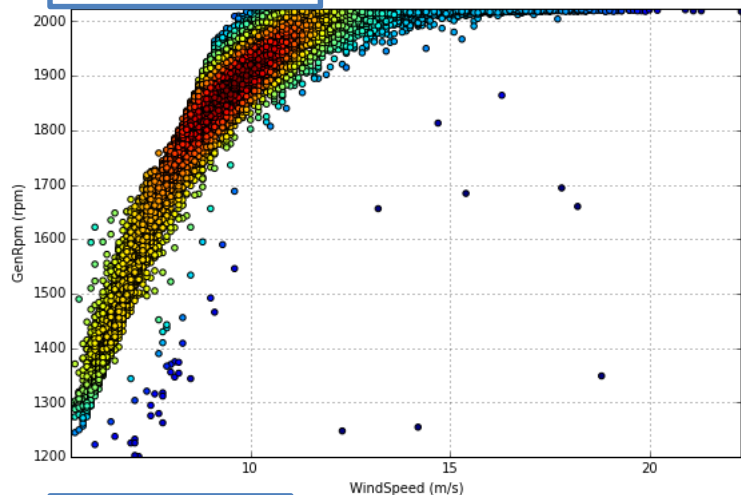
異常の確率が高いデータの出現頻度（1000点毎、%）



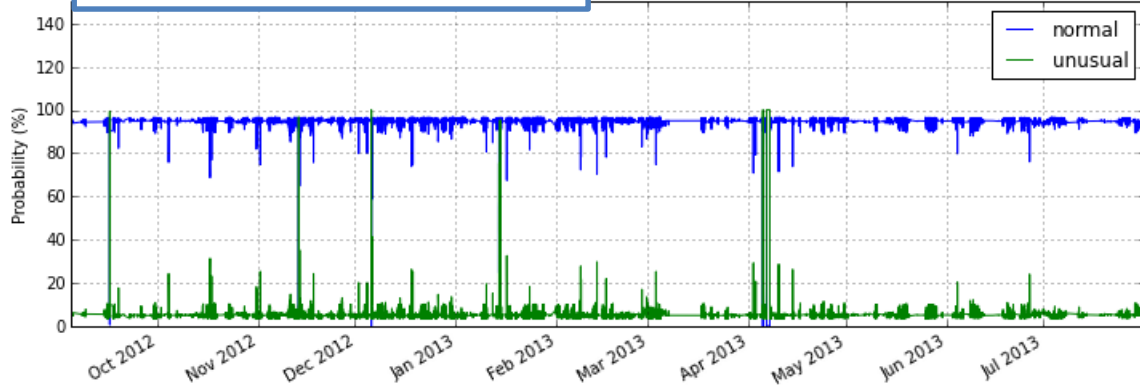
実機風車 評価事例1-3（風速VS.回転数）

対象パラメータ：風速と発電機回転速度の関係性評価（例：風速に対して発電機回転速度が小さい又は大きい場合等）
評価結果：測定期間内においては、正常である確率が高く、異常の確率が高いデータの出現頻度も低いことから、正常な運転状態であると評価

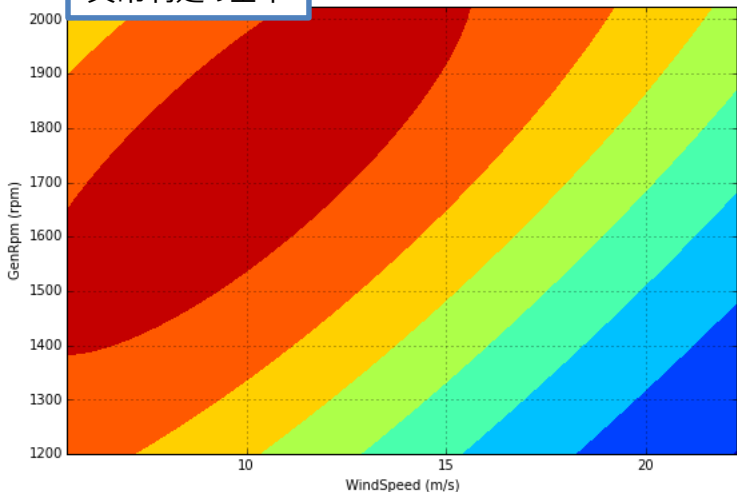
正常時の空間分布



正常時、異常時の空間分布に入る確率



異常判定の基準



異常の確率が高いデータの出現頻度（1000点毎、%）



確率が低い ⇒
「異常なし」と評価

測定条件など

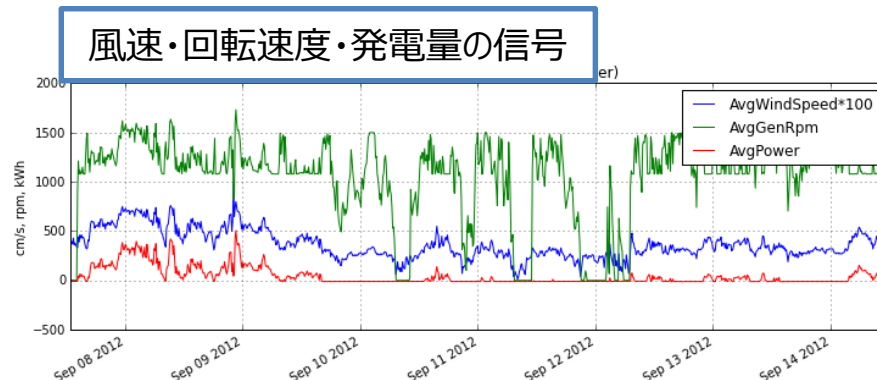
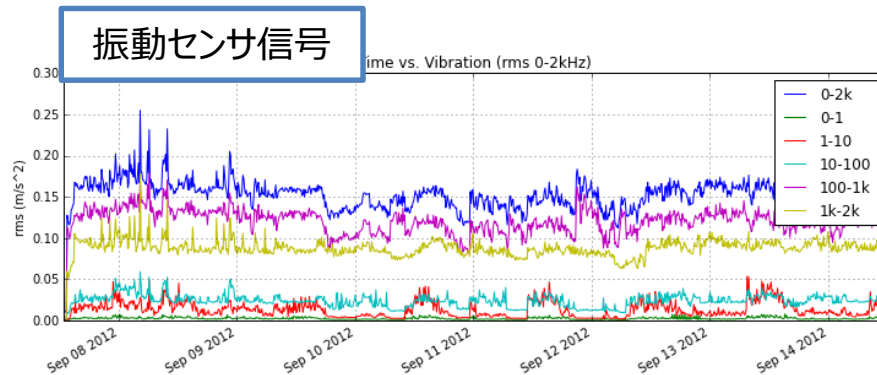
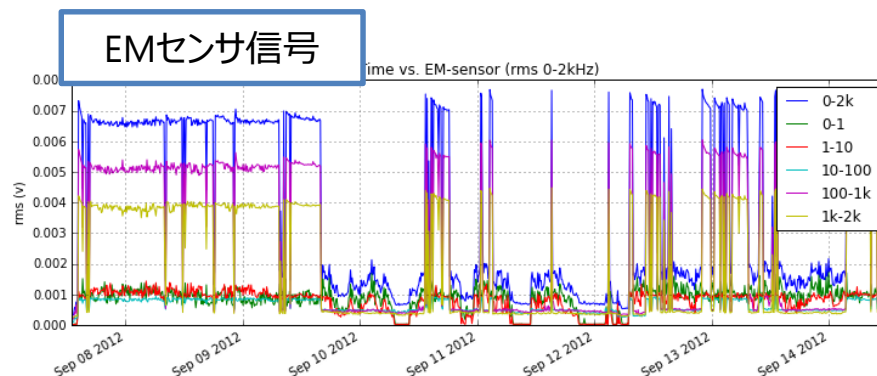
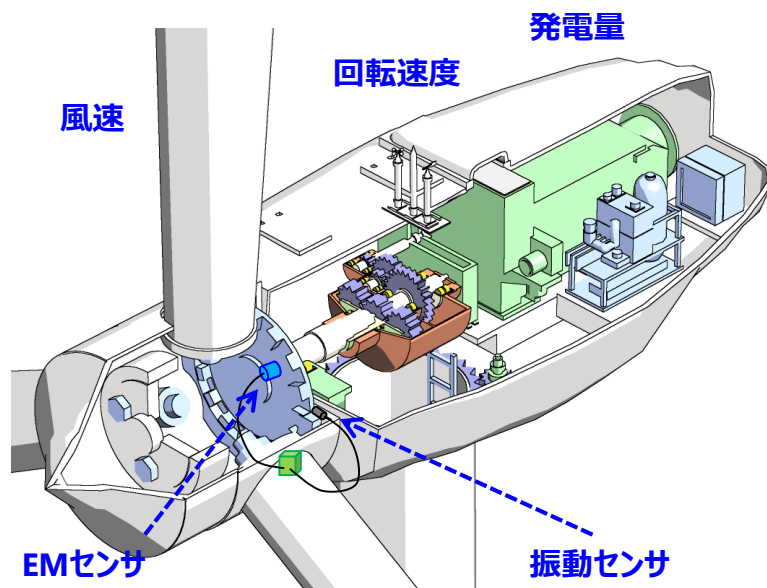
対象設備 → 1.6MW風車

測定期間 → 2012年9月～2013年7月

評価用パラメータ →

- ・EMセンサ（主軸軸受 軸方向に設置）
- ・振動センサ（主軸軸受 径方向に設置）
※サンプリングレート 4kHz、測定時間50秒
測定間隔 10分毎
- ・風速（m/s）
- ・発電機回転速度（rpm）
- ・発電量（kWh）
※測定間隔 10分毎

評価 → 学習データ（5000点から選定）
評価対象データ（21600点以上）

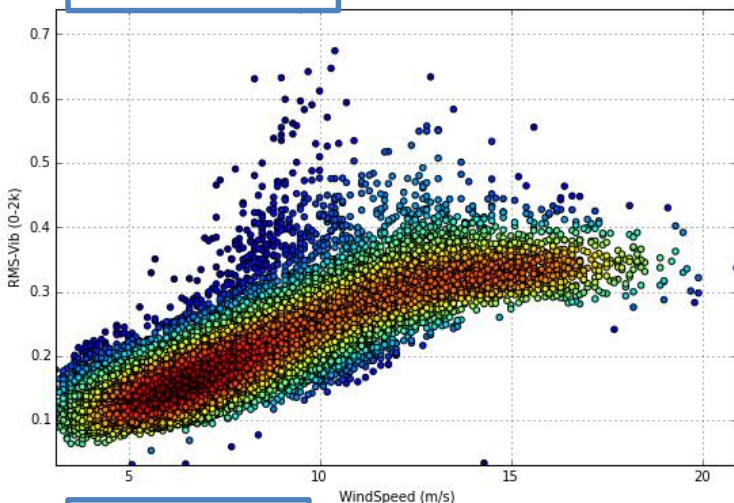


実機風車 評価事例2-1（風速VS.振動）

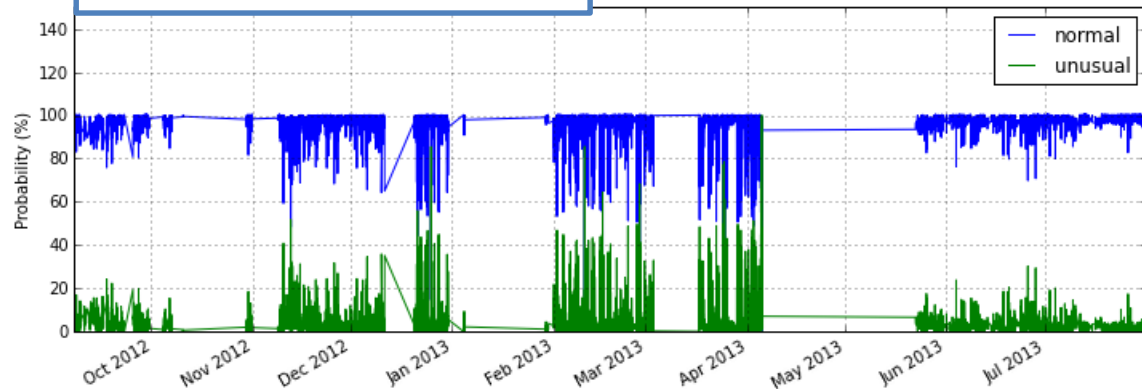
対象パラメータ：風速と振動の関係性評価（例：風速に対して振動が小さいまたは大きい場合など）

評価結果：測定期間内では、正常である確率が高く、異常の確率が高いデータの出現頻度も低いことから、正常な運転状態であると評価

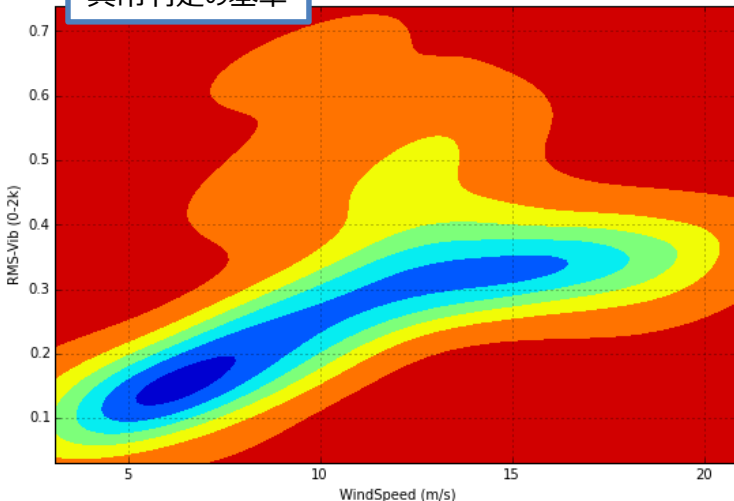
正常時の空間分布



正常時、異常時の空間分布に入る確率



異常判定の基準



異常の確率が高いデータの出現頻度（1000点毎、%）

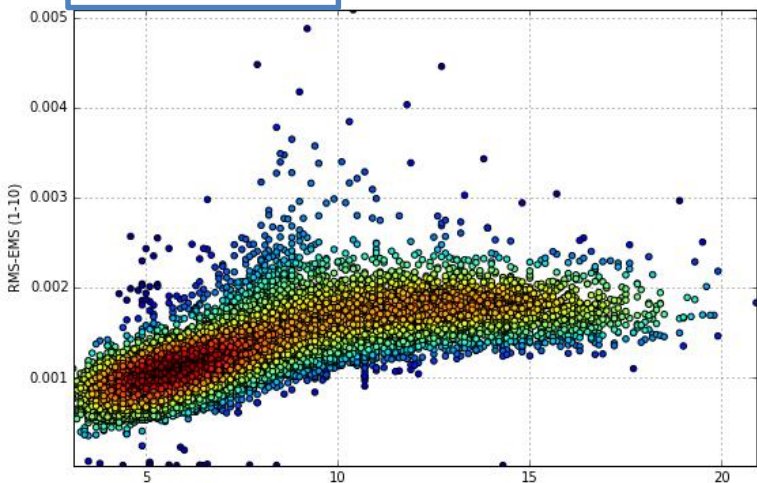


実機風車 評価事例2-2（風速VS.EMセンサ）

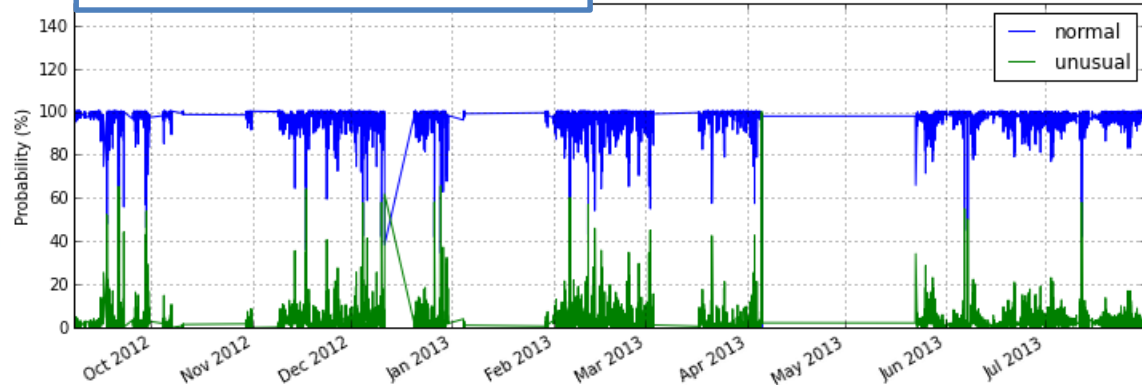
対象パラメータ：風速とEMセンサの関係性評価（例：風速に対してEMセンサ測定値が小さいまたは大きい場合など）

評価結果：測定期間内では、正常である確率が高く、異常の確率が高いデータの出現頻度も低いことから、
正常な運転状態であると評価

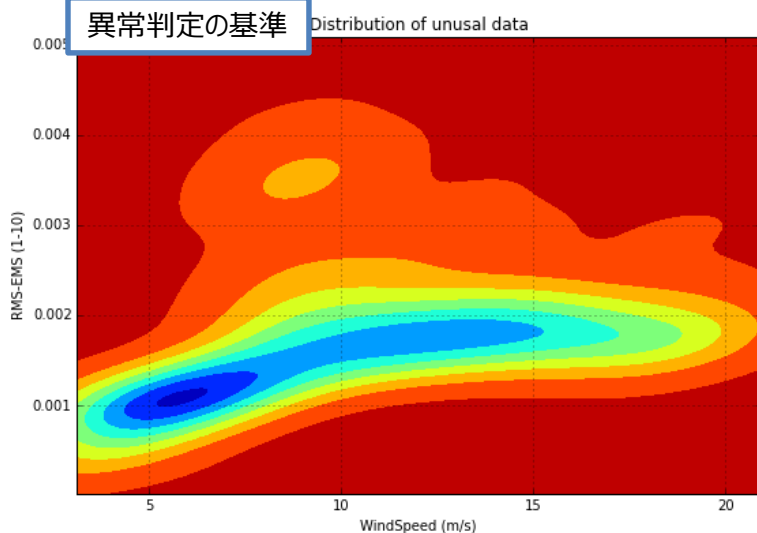
正常時の空間分布



正常時、異常時の空間分布に入る確率



異常判定の基準



異常の確率が高いデータの出現頻度（1000点毎、%）



確率が低い ⇒
「異常なし」と評価

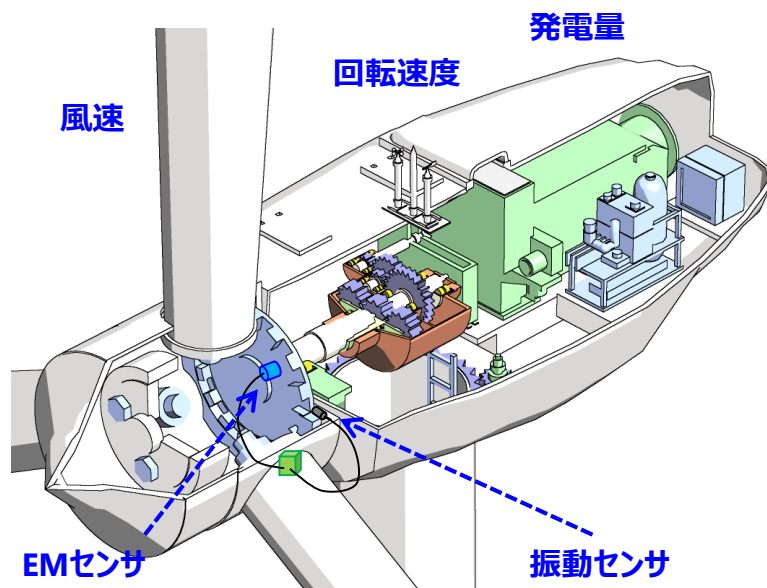
測定条件など

対象設備 → 1.6MW風車

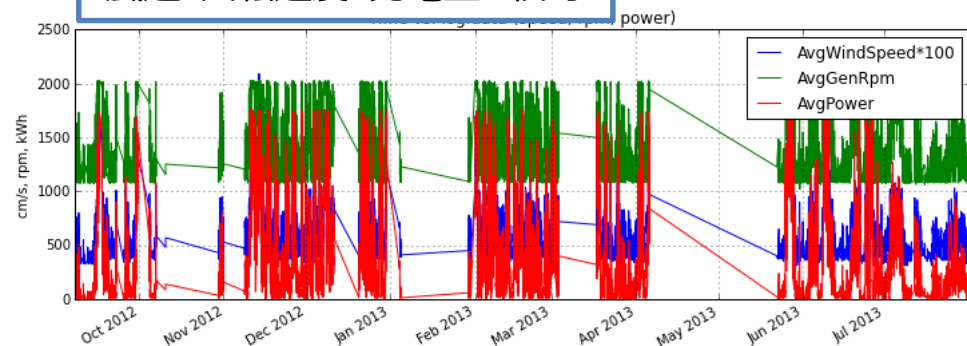
測定期間 → 2012年9月～2013年7月

評価用パラメータ → ・振動センサ（主軸軸受 径方向に設置）
 ※模擬不具合を加え、10分毎
 ・風速（m/s）
 ・発電機回転速度（rpm）
 ・発電量（kWh）
 ※測定間隔 10分毎

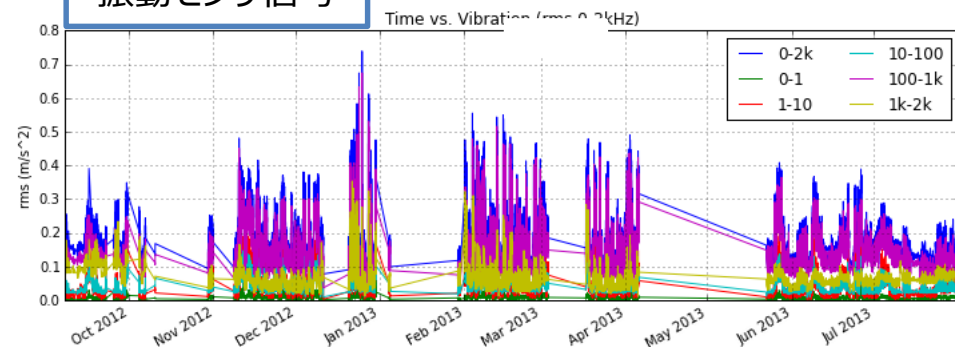
評価 → 学習データ（5000点から選定）
 評価対象データ（21600点以上）



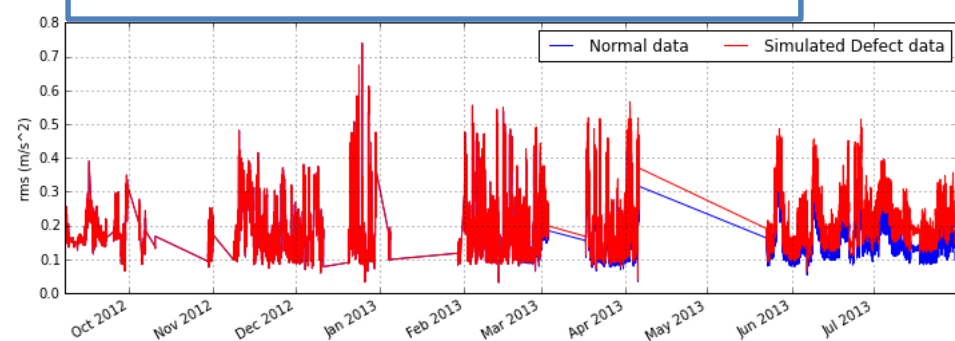
風速・回転速度・発電量の信号



振動センサ信号



模擬不具合の有無による振動信号の比較例

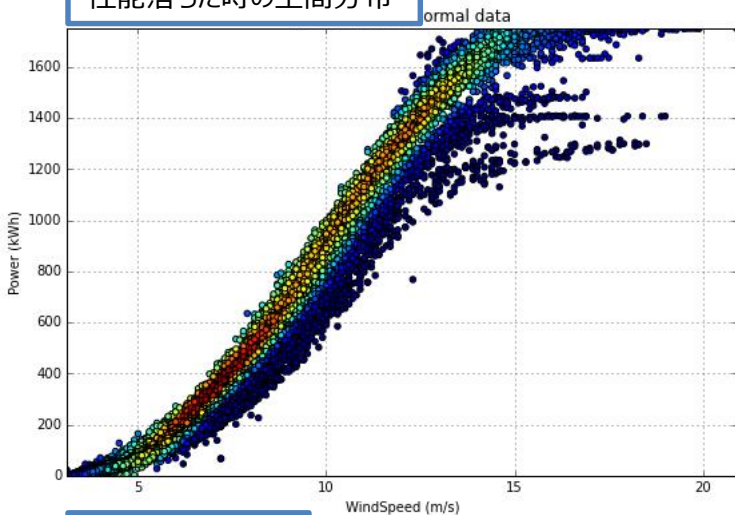


実機風車+模擬不具合 評価事例3-1 (風速VS.発電量)

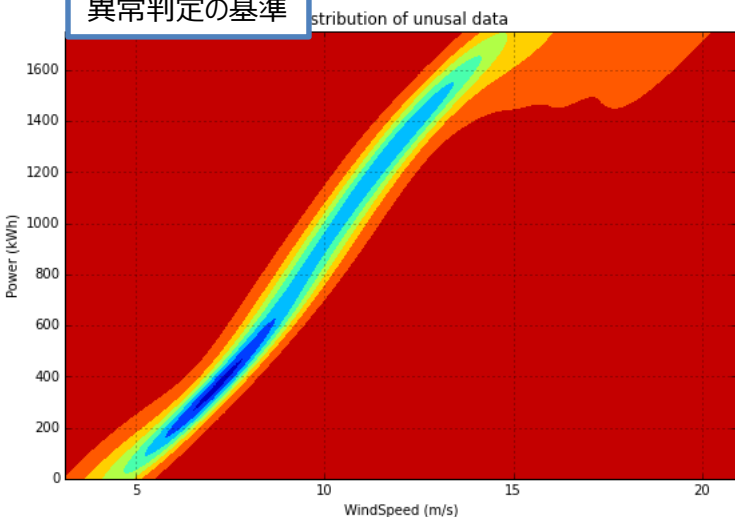
対象パラメータ : 風速と発電量の関係性評価 (例: 風速に対して発電量が少ないまたは多い場合など)

評価結果 : 発電量が落ちると言う模擬不具合が発生してから、約15%発電効率が落ちた時点で検出した。
正常な運転状態から性能落ちたと評価。

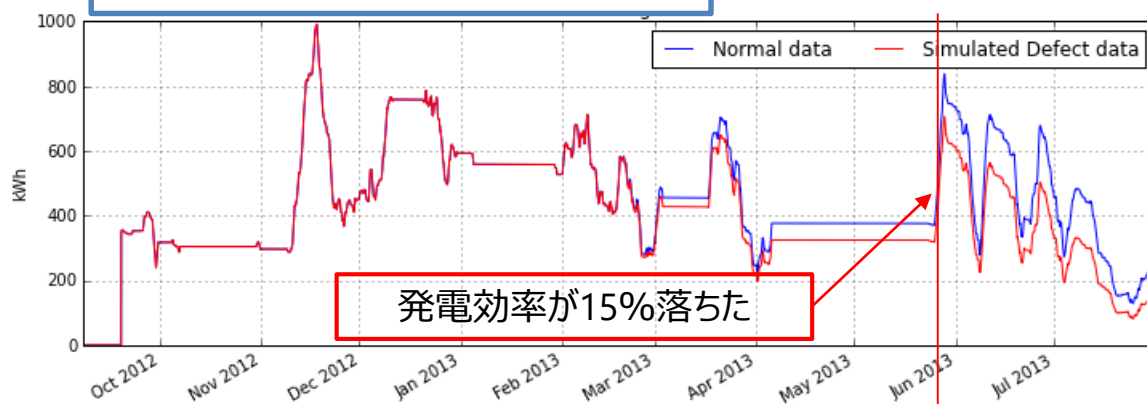
性能落ちた時の空間分布



異常判定の基準



発電効率最大で40%の落ちた時の発電量信号
比較のため下図と同様1000点平均



異常の確率が高いデータの出現頻度 (1000点毎、%)



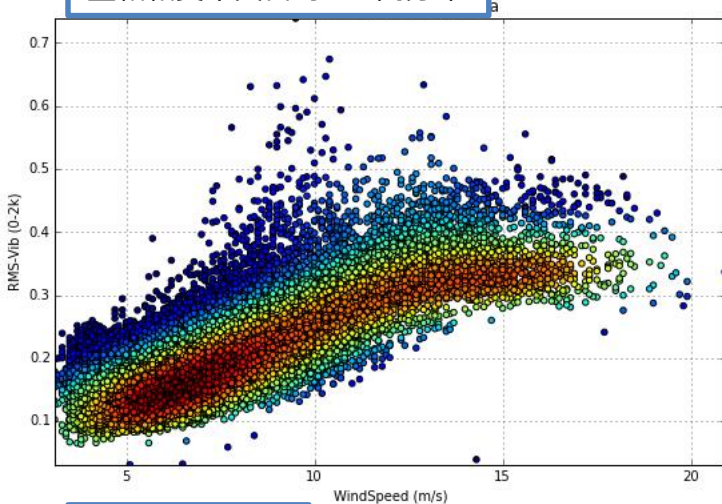
実機風車+模擬不具合 評価事例3-2 (風速VS.振動)

対象パラメータ : 風速と振動の関係性評価 (例: 風速に対して振動が小さいまたは大きい場合など)

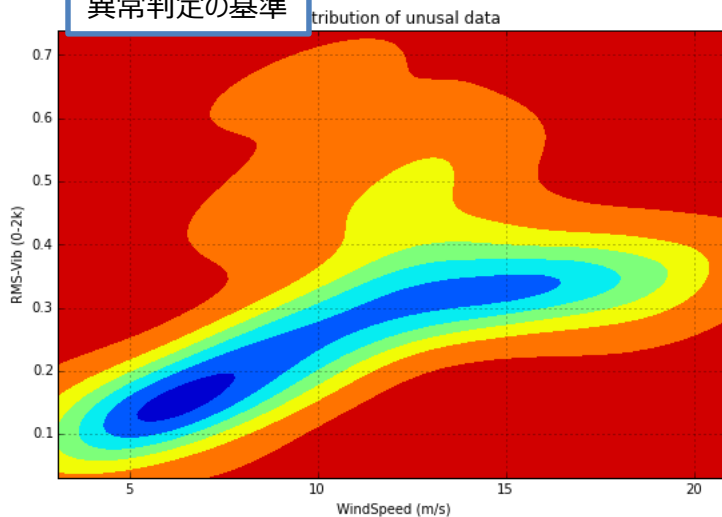
評価結果 : 主軸軸受の模擬不具合が発生してから、約11%振動値が増大した時点で検出した。

主軸軸受に不具合が発生したと評価。

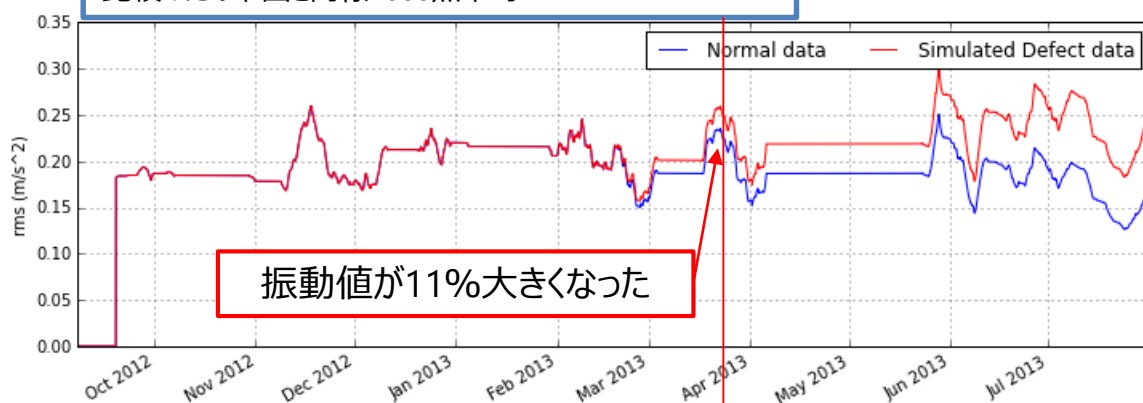
主軸軸受不具合時の空間分布



異常判定の基準



主軸軸受の振動最大で50%大きくなった時の振動信号比較のため下図と同様1000点平均



振動値が11%大きくなった

異常の確率が高いデータの出現頻度 (1000点毎、%)



確率が1%以上になった ⇒
「異常あり」と判断

実機風車について、以下の測定データを対象にWIT・WINで評価しました。

評価事例1：「風速」「回転速度」「発電量」を使用した評価

評価事例2：「風速」+「振動」「EMセンサ測定値」を使用した評価

評価事例3：「風速」「発電量・不具合の模擬」+「振動・不具合の模擬」を仮定した評価

その結果、異なる測定データを用いて評価した「評価事例1・2」では、双方とも測定期間内では正常である確率が高く、異常の確率が高いデータの出現頻度も低いことから、『風車は正常な運転状態』であると評価されました。

模擬不具合がある「評価事例3」では、発電効率の低下を検出でき、風車全体の性能評価が可能であることを示しました。また、主軸軸受の不具合を模擬した振動値の上昇では、その不具合を早期検出ができ、不具合の特定が可能であることを示しました。

評価事例1： 風速に対して回転速度・発電量は正常に得られていると評価
回転速度に対して発電量は正常に得られていると評価

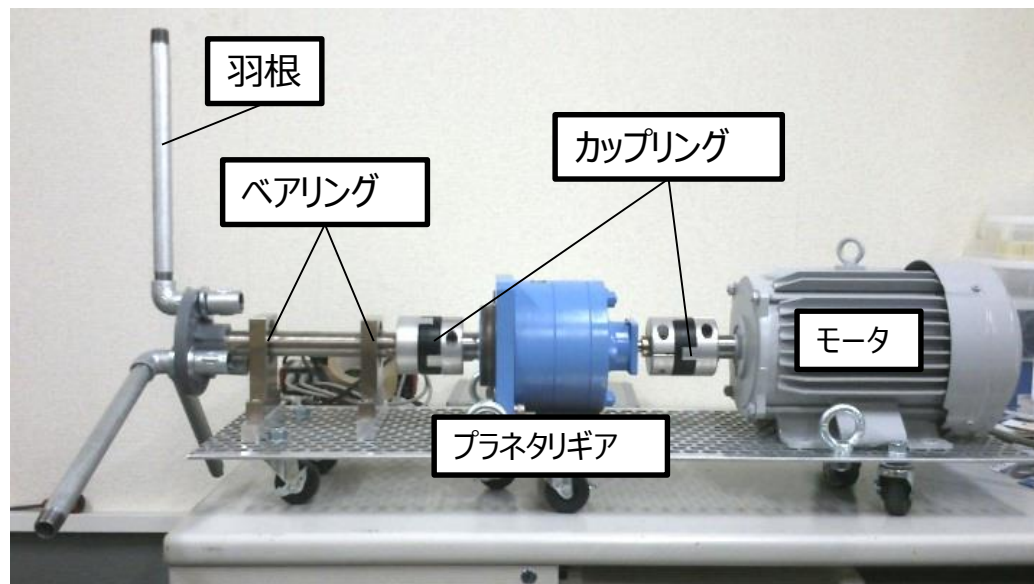
評価事例2： 風速に対して主軸軸受の振動値は正常な範囲内と評価
風速に対して主軸軸受のEMセンサ測定値は正常な範囲内と評価

評価事例3： 風速に対して発電量は異常な範囲内に入ったと評価
風速に対して主軸軸受の振動値は異常な範囲内に入ったと評価

⇒風車で測定しているデータを多変量解析技術「WIT・WIN」で分析することによって、重要な情報が豊富に得られ、風車から得られる便益を保全業務の最適化と稼働率の向上を通して最大化できる。

風車模擬試験装置構成

- ・モータ（インバータ制御）
- ・プラネタリギア（ギア比 81:1）
- ・カップリング（プラネタリギア前後）
- ・主軸
- ・主軸ベアリング（深溝玉軸受6006）
- ・架台
- ・羽根3枚



主軸軸受 深溝玉軸受6006仕様



・測定箇所

- ch1 振動加速度 (gain x1) (主軸羽根側軸受)
- ch2 振動加速度 (gain x1) (主軸モータ側軸受)
- ch3 振動加速度 (gain x1) (プラネタリギア)
- ch4 振動加速度 (gain x1) (モータ)
- ch5 電磁センサ (gain x100) (主軸羽根側軸受)
- ch6 電磁センサ (gain x100) (主軸モータ側軸受)

試験条件

人工的に内輪損傷を付与した試験軸受を作製し、その軸受を風車模擬試験装置に組み込み試験を行った。

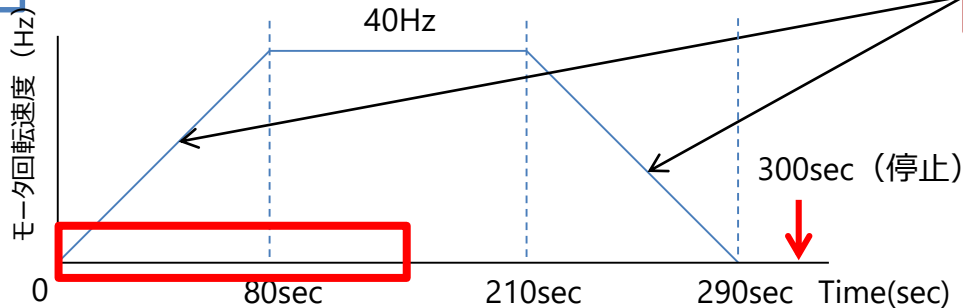
また、モータの回転速度は20Hz、30Hz、40Hzの3条件とした。

	試験条件	
1	正常時	全て正常な状態
2	内輪傷小	主軸モータ側軸受に試験軸受を組み込み運転
3	内輪傷大	主軸モータ側軸受に試験軸受を組み込み運転



分析用データ詳細 (内は学習信号)

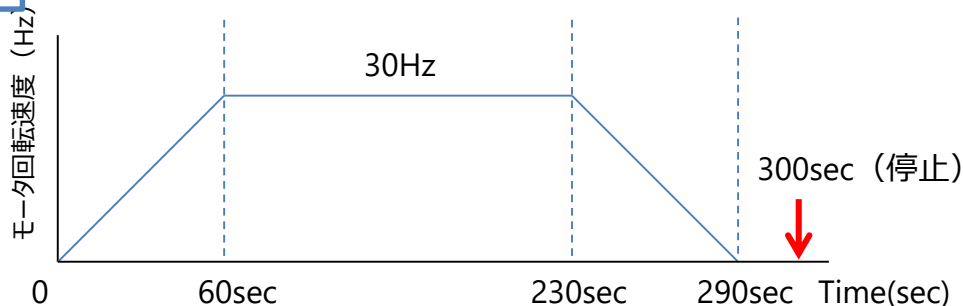
40Hz



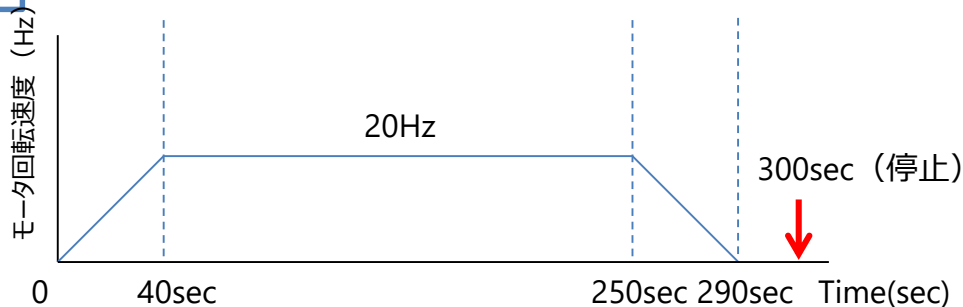
1sec → ±0.5Hz

10s毎に一点信号を取り、
前半15点を学習データとする

30Hz



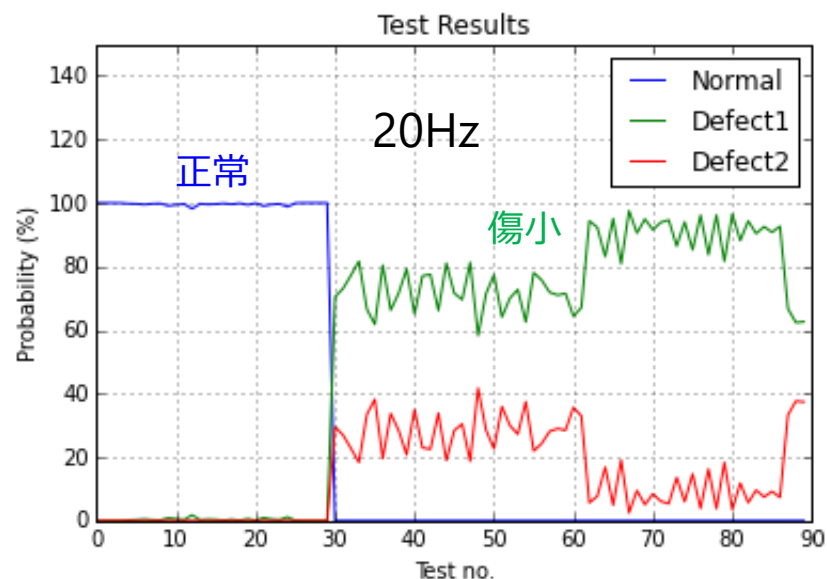
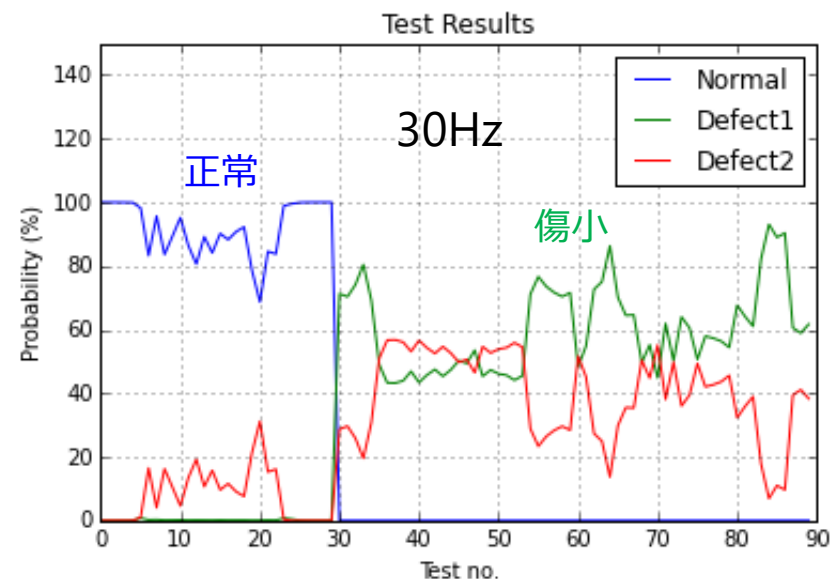
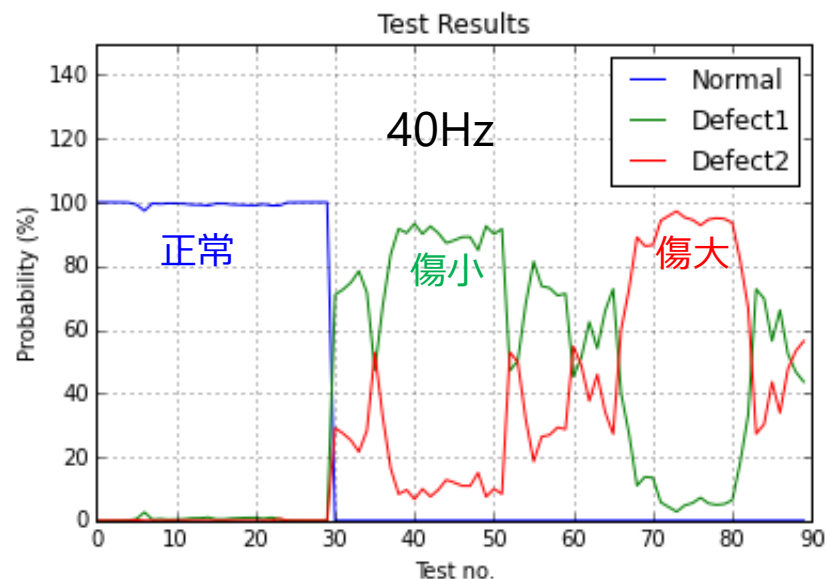
20Hz



分析用データを取得した際の条件を以下に示す。
 サンプリングレート → 100Hz
 測定時間 → 300sec
 ・モータ運転条件
 停止状態→運転→停止
 (全ての試験条件において、停止状態から回転速度が一定になるまでの加速は1秒間に+0.5Hzである。
 また、回転速度一定から停止に至るまでの減速も同様に1秒間に-0.5Hzとなっている。)

Filename	試験軸受	軸回転周波数
acq00	正常軸受	40Hz (2400rpm)
acq01	正常軸受	30Hz (1800rpm)
acq02	正常軸受	20Hz (1200rpm)
acq03	内輪傷 小	40Hz (2400rpm)
acq04	内輪傷 小	30Hz (1800rpm)
acq05	内輪傷 小	20Hz (1200rpm)
acq06	内輪傷 大	40Hz (2400rpm)
acq07	内輪傷 大	30Hz (1800rpm)
acq08	内輪傷 大	20Hz (1200rpm)

風車模擬試験装置の分析結果(CH1とCH2で分析)



Test No.

0-29: 正常のデータ

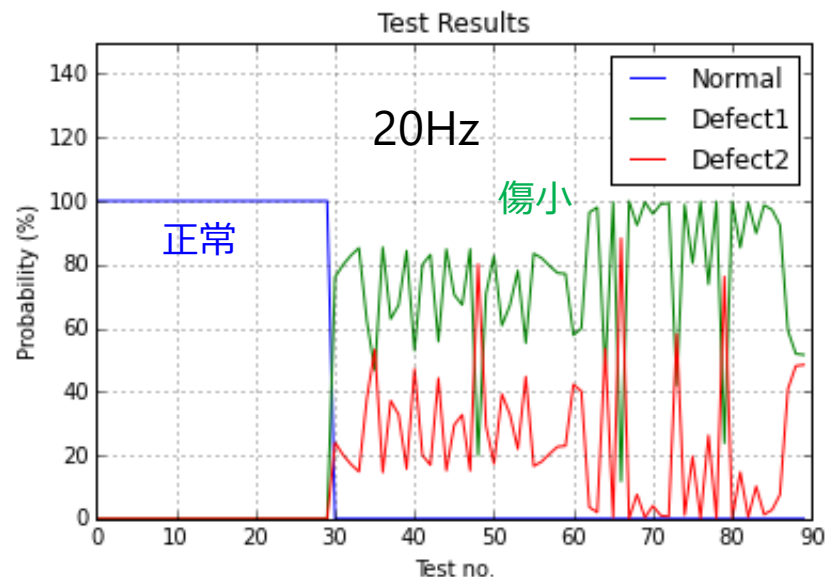
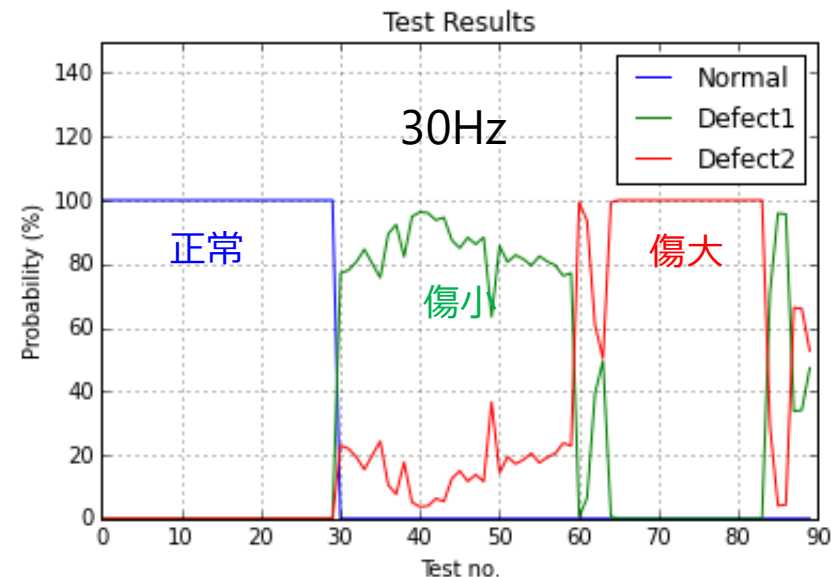
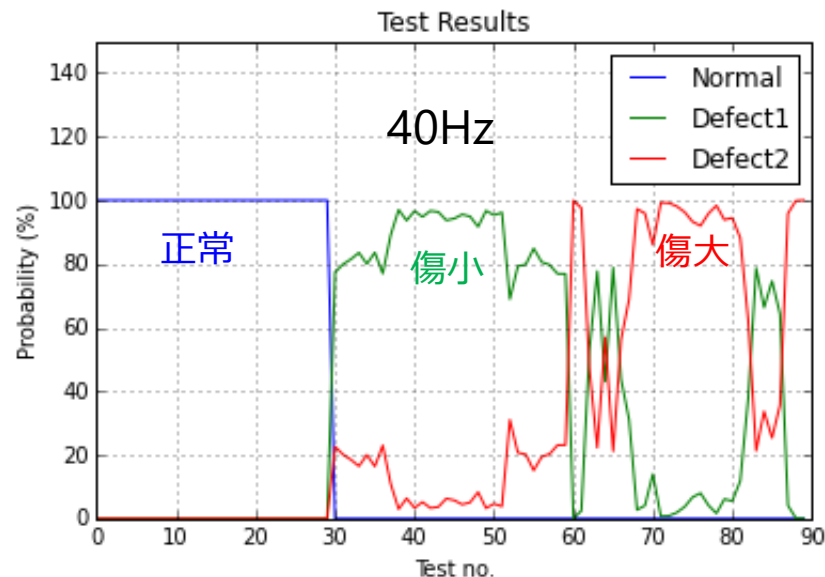
30-59: 内輪傷1 小

60-89: 内輪傷2 大

二次元信号: CH1, CH2

正常軸受は正常と正しく判定され、
傷ある軸受の傷の大きさまである程度推定できる

風車模擬試験装置の分析結果(CH1、CH2とCH3で分析)



Test No.

0-29: 正常のデータ

30-59: 内輪傷1 小

60-89: 内輪傷2 大

三次元信号: CH1, CH2, CH3

正常軸受は正常と正しく判定され、
傷ある軸受の傷の大きさまである程度推定できる

風車模擬試験装置について、以下の軸受を対象にWIT・WINで評価しました。

軸受1：正常

軸受2：傷あり、傷大

軸受3：傷あり、傷小

その結果、回転数の変化に関わらず、正常軸受は正常である確率が高いことから、『軸受は健全』であると評価されました。傷あり軸受では、正常である確率が低いことから、『軸受は傷あり』であると評価されました。ただし、異なる回転数の学習データが少ないため、また傷大小による振動値の変化が小さいため、その傷の大きさまで完全正確に判定することができませんでした。

⇒風車で測定している局所の振動データなどを多変量解析技術「WIT・WIN」で分析することによって、局所の重要な情報が豊富に得られ、保全業務の最適化と稼働率の向上に貢献できると考える。

WIT・IIUでは『風力発電システムに対する多変量解析技術（WIT・WIN）』に興味をお持ちの事業者様に対し、**診断サービスのデモを無料**で行っています。

まずはメールにてお問い合わせください。⇒ お問い合わせ先：info@iiu.co.jp

診断サービスの流れ

