

状態監視振動診断技術者コミュニティ
第4回ミーティング

機器に発生するトラブルの事前予測および 余寿命診断への物理モデルの適用

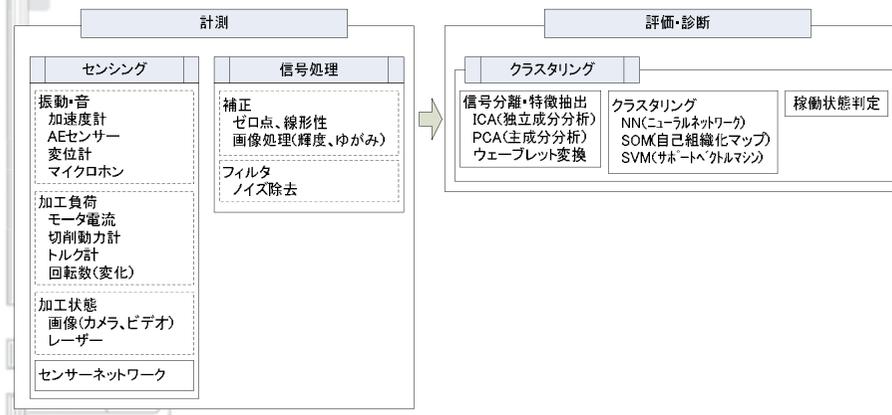
2012.10.12
大阪市立大学
川合忠雄

本日の講演の概要

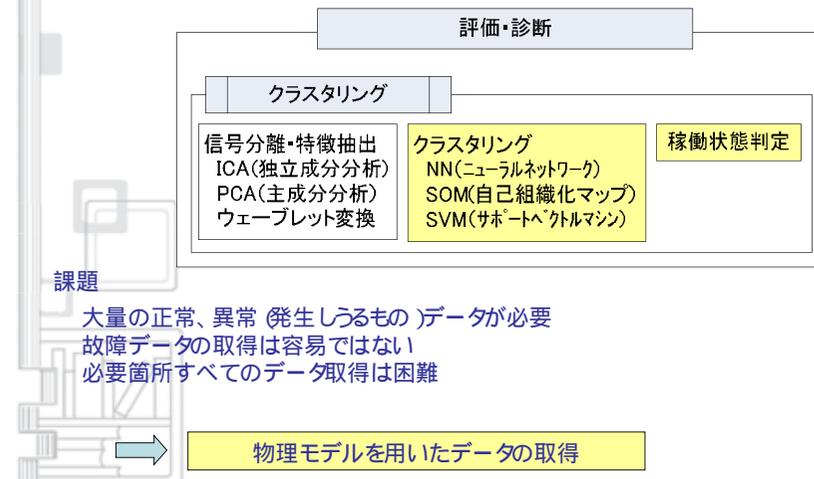
- (0)はじめに
- (1)モデルを用いた損傷予測
- (2)診断支援
- (3)その他 (故障のモデル化の例)
- (4)まとめ

(0)はじめに

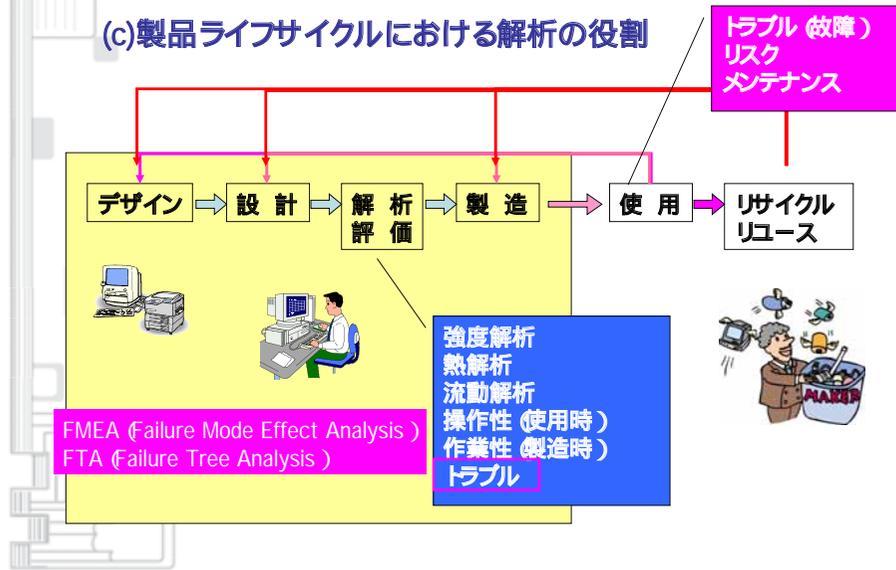
(a)状態監視から診断の流れ



(b)評価診断における物理モデルの利用



(c) 製品ライフサイクルにおける解析の役割



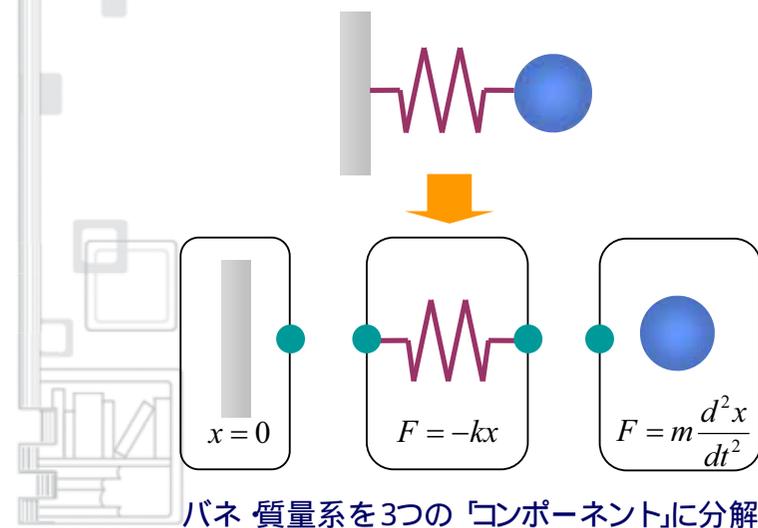
(d) トラブル・リスク回避の手法

- ・ **トップダウン手法** → **モデルを用いた損傷予測**
 - 故障原因を想定し、それが及ぼす影響を評価する
 - Dymolaを用いて対象のシステムおよび発生する故障をモデル化し、故障によって生じる影響を評価する
 - 損傷の時間推移を予測し、機器の余寿命を推定する、メンテナンス時期の予測
- ・ **ボトムアップ手法** → **意味ネットワークを用いた診断支援**
 - 生じた現象から故障原因を推定する
 - Dymolaによって種々の故障によって生じる現象を求め、データベース化する (意味ネットワークの利用)
 - 上記データベースを用いて現象から原因を推定する

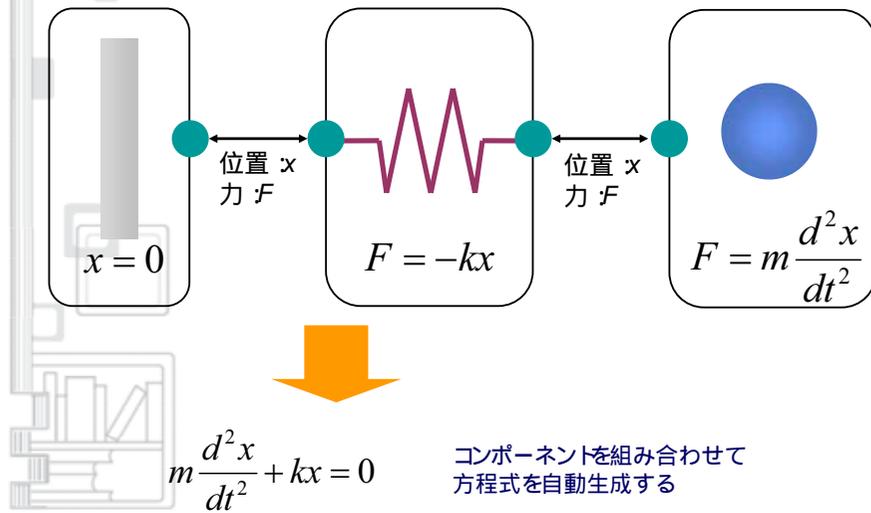
(e) Modelica言語とは

- ・ **マルチドメイン (マルチフィジックス)**
 - 機械、電気、流体、熱
- ・ **部品ベース表現**
 - 非因果律
 - 運動方程式 $F=ma$ で、 m と a から F が決まる、 F によって a が決まる場合もある (双方向の関係が成り立つ)
- ・ **ハイブリッド性**
 - 連続時間系も離散時間系も同時に扱える
- ・ **言語の特徴**
 - オブジェクト指向
 - 部品 (クラス) には特性と振る舞い (動作) が記述され、これらを組み合わせる事でモデルを構築

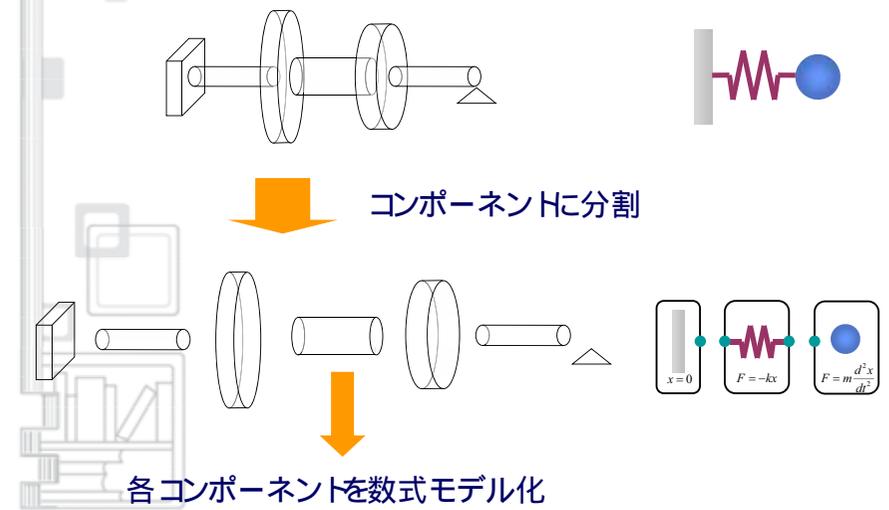
(f) Modelicaによるモデル化



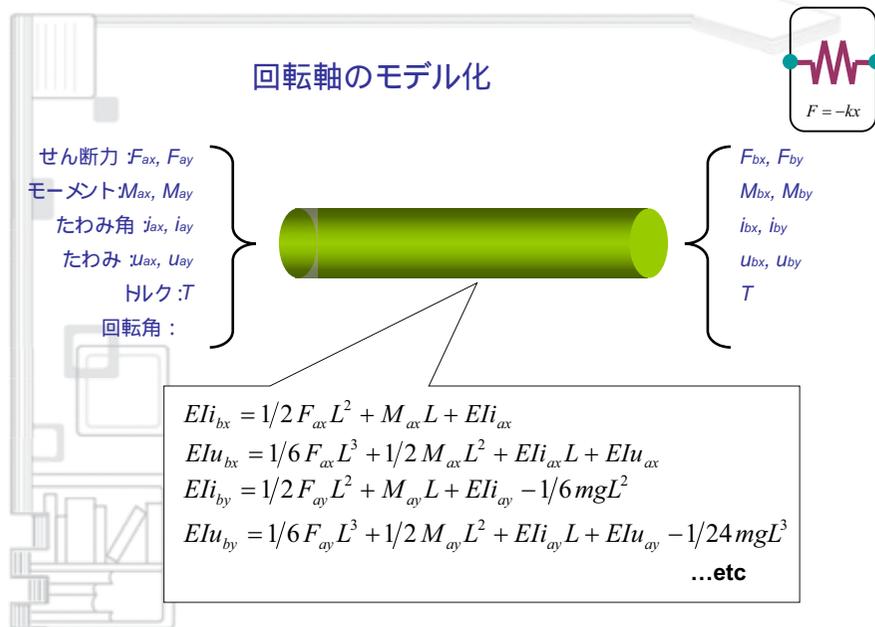
(f Modelicaによるモデル化 (cont.))



モデル化の事例 (回転軸系のモデル化)



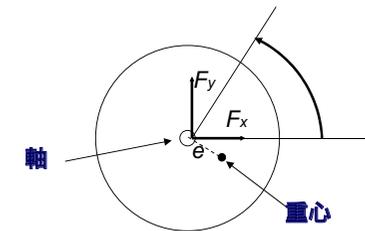
回転軸のモデル化



回転体

静不釣り合い

回転軸が円板の重心を
通っていない状態



$$m\ddot{x} - me\dot{\theta}^2 \cos(\theta + e_0) - me\ddot{\theta} \sin(\theta + e_0) = F_x$$

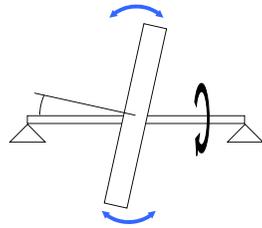
$$m\ddot{y} - me\dot{\theta}^2 \sin(\theta + e_0) + me\ddot{\theta} \cos(\theta + e_0) + mg = F_y$$

静不釣り合いによるふれまわりの項

回転体

動不釣り合い

円板の慣性主軸と
回転軸がずれている状態



$$I_d \ddot{i}_x + I_p \dot{\theta} \dot{i}_y - (I_d - I_p) \tau \dot{\theta}^2 \cos(\theta + \tau_0) = M_x$$

$$I_d \ddot{i}_y - I_p \dot{\theta} \dot{i}_x - (I_d - I_p) \tau \dot{\theta}^2 \sin(\theta + \tau_0) = M_y$$

ジャイロ効果

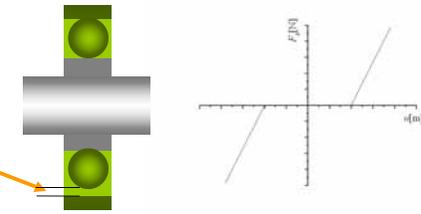
動不釣り合いによる項

I_d : 直径軸周りの慣性モーメント

I_p : 重心周りの極慣性モーメント

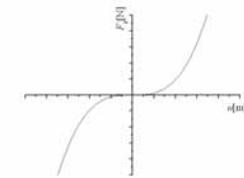
転がり軸受

経年劣化で
ガタが生じる

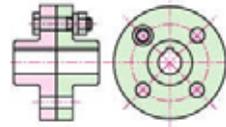


非線形バネ特性を
3次関数で近似

$$F_k = au + bu^2 + cu^3$$



カップリング



芯ずれ 芯ずれ量: e

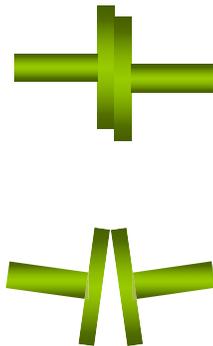
$$u_{bx} - u_{ax} = e \cos(\theta + e_0)$$

$$u_{by} - u_{ay} = e \sin(\theta + e_0)$$

面ずれ 面ずれ量: a

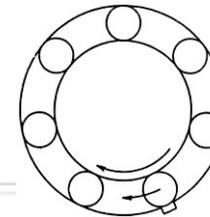
$$i_{bx} - i_{ax} = a \cos(\theta + a_0)$$

$$i_{by} - i_{ay} = a \sin(\theta + a_0)$$



軸受外輪傷

・ 傷面と玉との衝突



$$F_{kx} = k\Delta u_x + c \frac{d}{dt}(\Delta u_x) + F_n \cos(\phi)P$$

傷面と玉との衝突による衝撃力

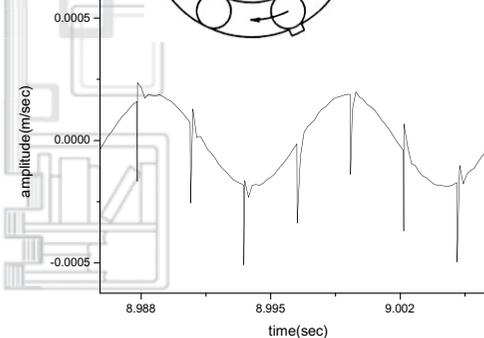
$$f_c = \frac{nD\omega}{4\pi(D+d)}$$

D : 内輪外径

d : 玉直径

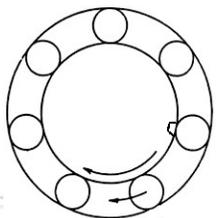
n : 玉数

ω : 軸回転速度



軸受内輪傷

- 傷面と玉との衝突



$$F_{kx} = k\Delta u_x + c \frac{d}{dt}(\Delta u_x) + F_n \cos(\phi)P$$

傷面と玉との衝突による衝撃力

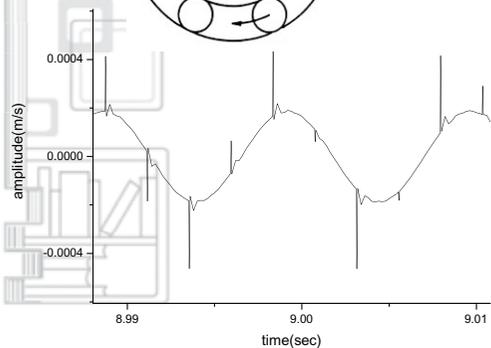
$$f_c = \frac{n(D+2d)\omega}{4\pi(D+d)}$$

D:内輪外径

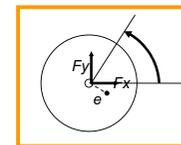
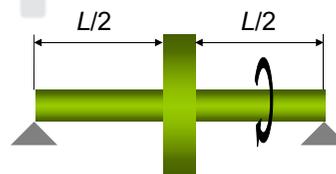
d:玉直径

n:玉数

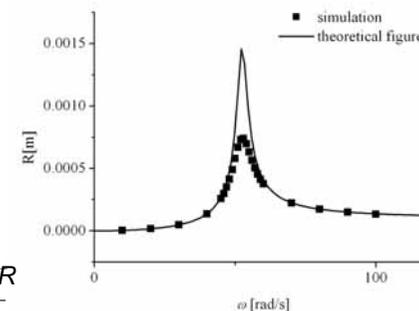
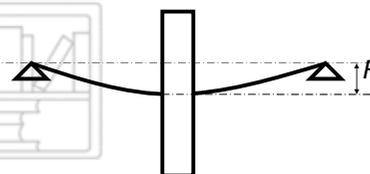
ω :軸回転速度



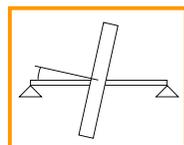
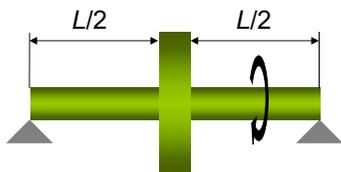
モデルの検証：軸のたわみ振動



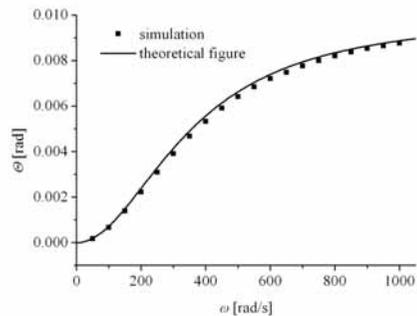
円板に静不釣合いを与えて回転数 ω で回転



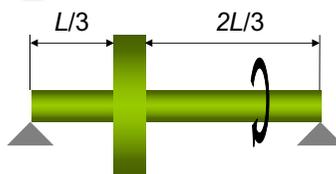
円板の傾き振動



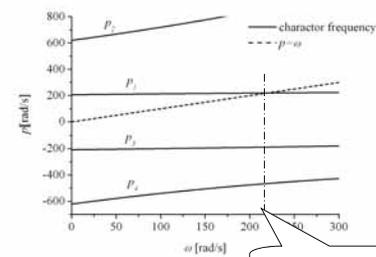
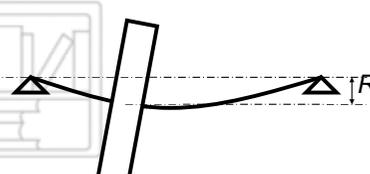
円板に動不釣合いを与えて回転数 ω で回転



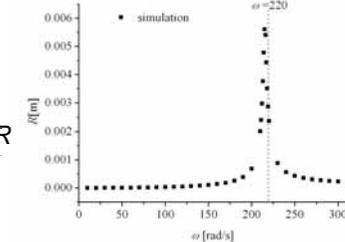
たわみと傾きの連成振動



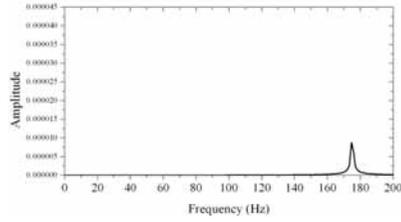
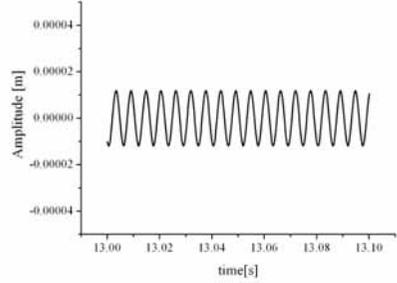
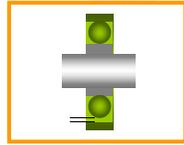
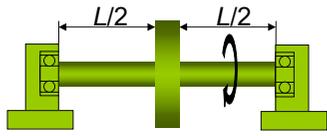
円板に静不釣合いを与えて回転数 ω で回転



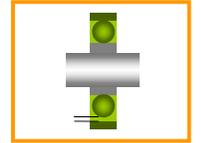
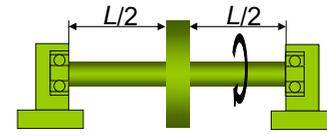
=220.13[rad/s]



転がり軸受のガタ

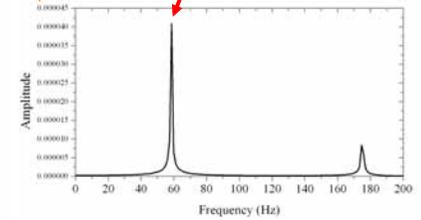
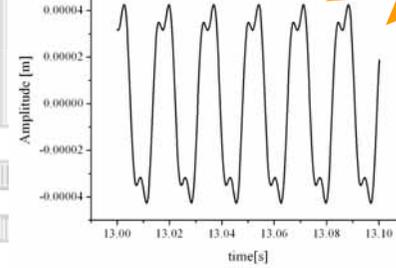


転がり軸受のガタ

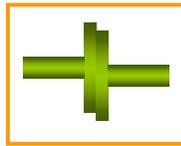
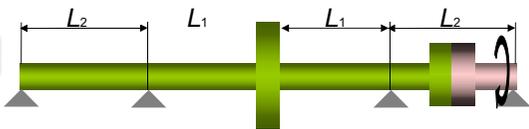


軸受のガタ
1/3分数調波共振発生

ガタ発生!!



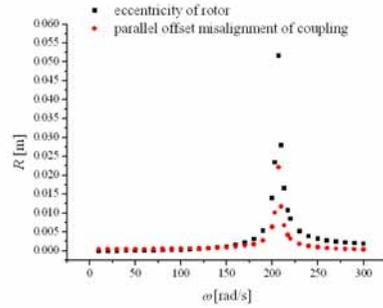
カップリング



円板の静不釣合い

同じ特徴の
振動を引き起こす

軸継ぎ手の芯ずれ



(1) モデルを用いた損傷予測

常時運転する機械



化学プラント
発電所
運行中の船舶エンジン
etc.

トラブル発生時, 安易に設備を停止できない

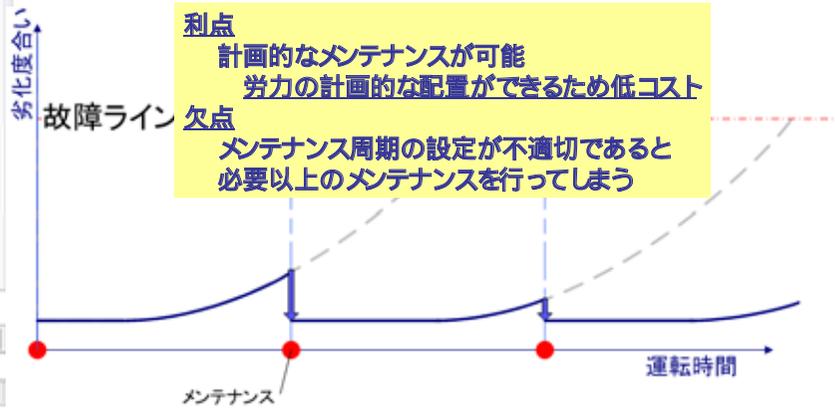
運転状態で異常個所を特定する設備診断技術が進歩

異常のある設備がいつ壊れるのか知りたい = 余寿命予測

設備管理

TBM (時間計画保全)

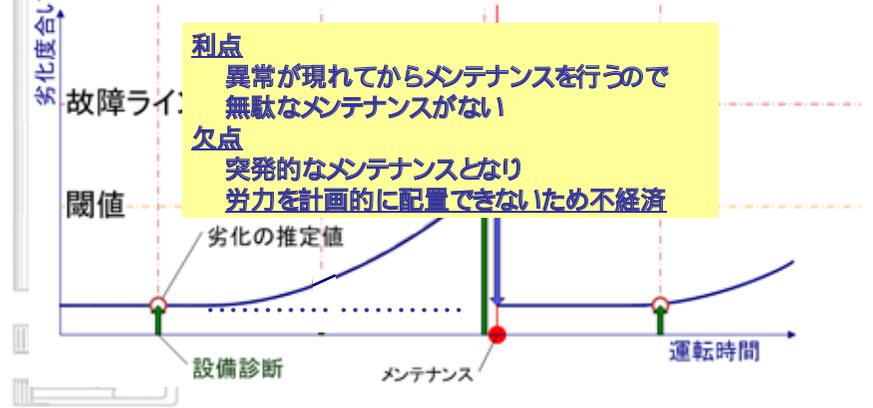
あらかじめメンテナンス周期を設定し定期的にメンテナンスを行う



設備管理

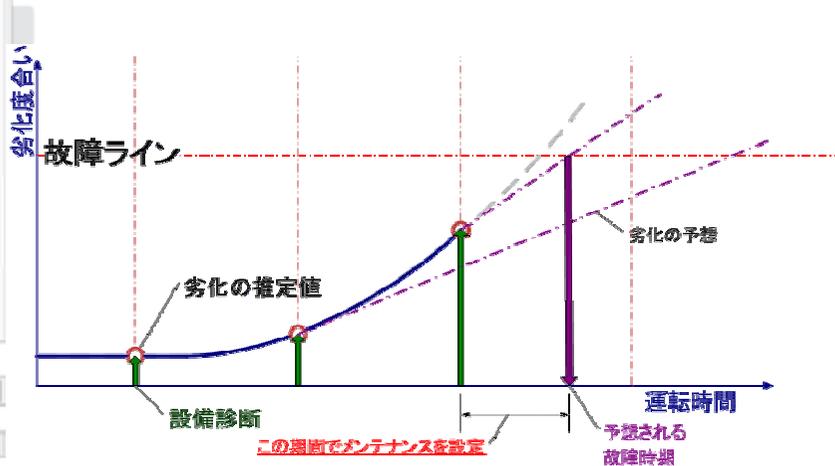
CBM (状態監視保全)

設備の劣化状態を評価する非破壊検査 (設備診断)を行い、あるしきい値を超えたときにメンテナンスを行う



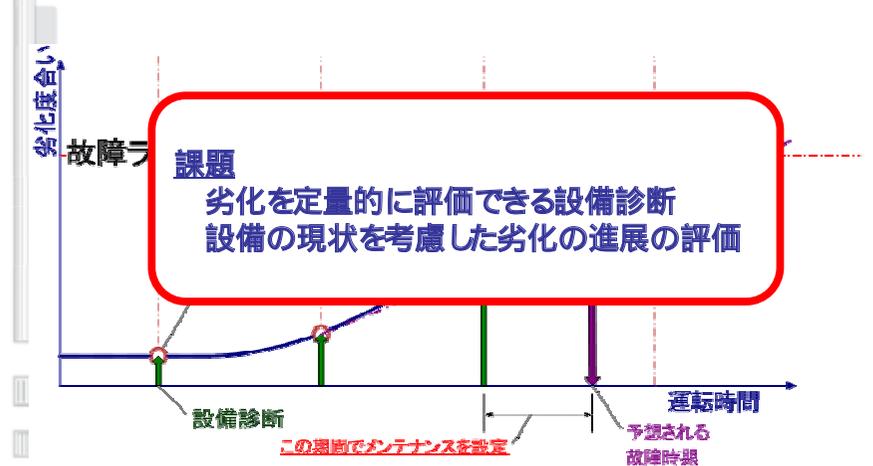
余寿命予測

CBMの欠点を補い計画的なメンテナンスを可能にする



余寿命予測

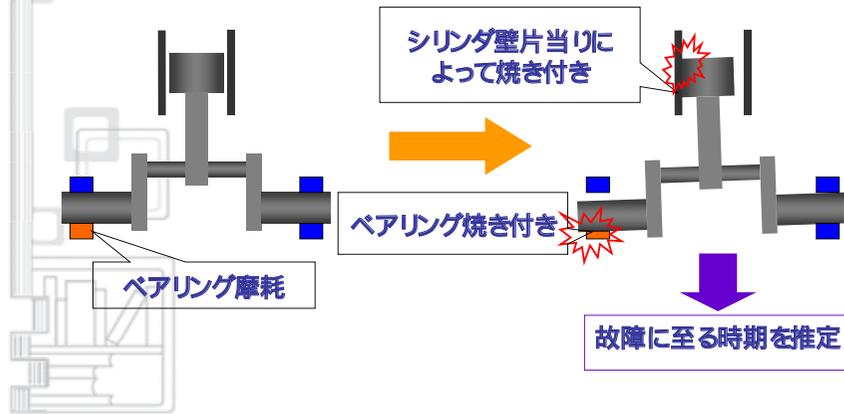
CBMの欠点を補い計画的なメンテナンスを可能にする



具体例 : クランク機構

故障

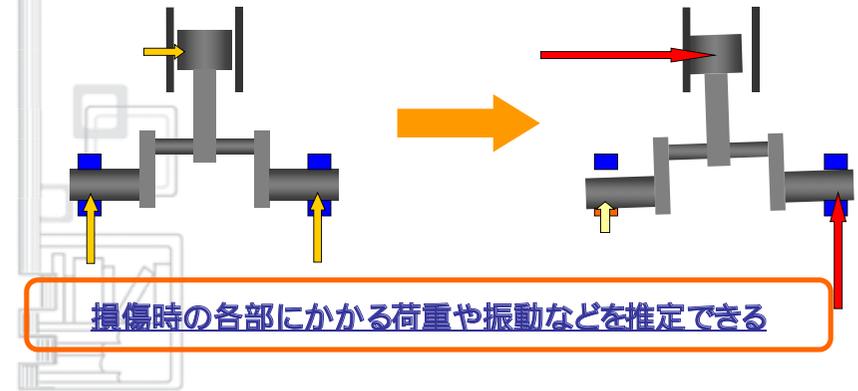
設備に重大な欠陥が発生しその機能を失うこと



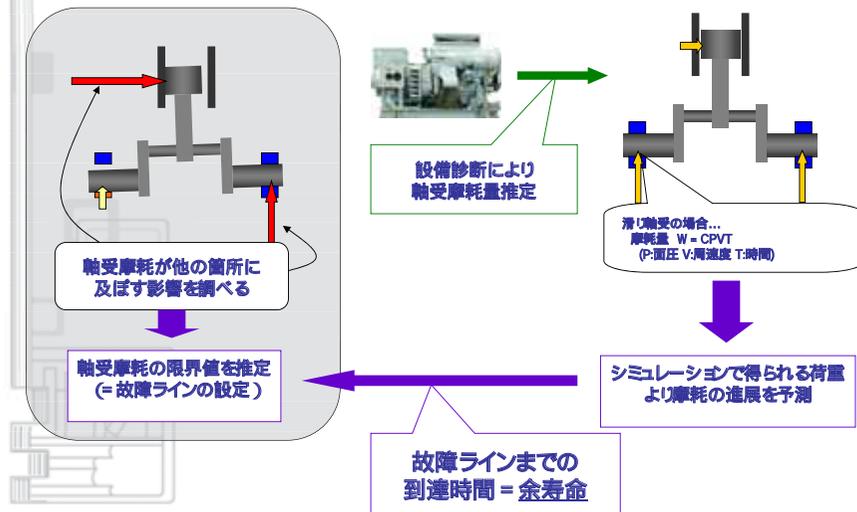
モデルを用いた寿命予測

モデルのメリット

1. 実機では計測が困難な負荷等が分かる
2. 損傷のモデル化をすることで損傷時の挙動が分かる



モデルを用いた寿命予測

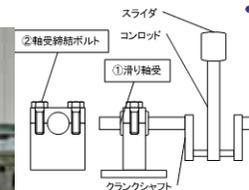


実験での検証 (例)

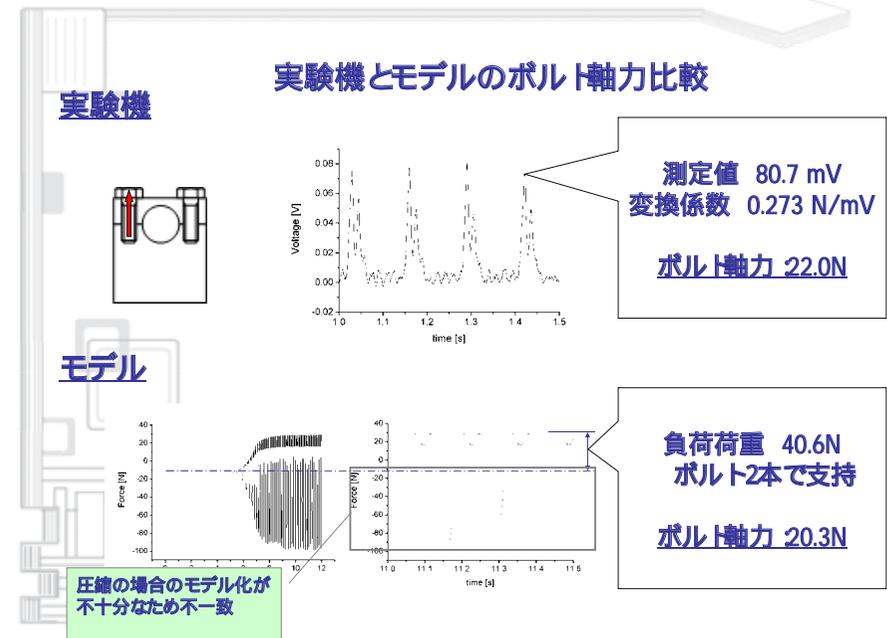
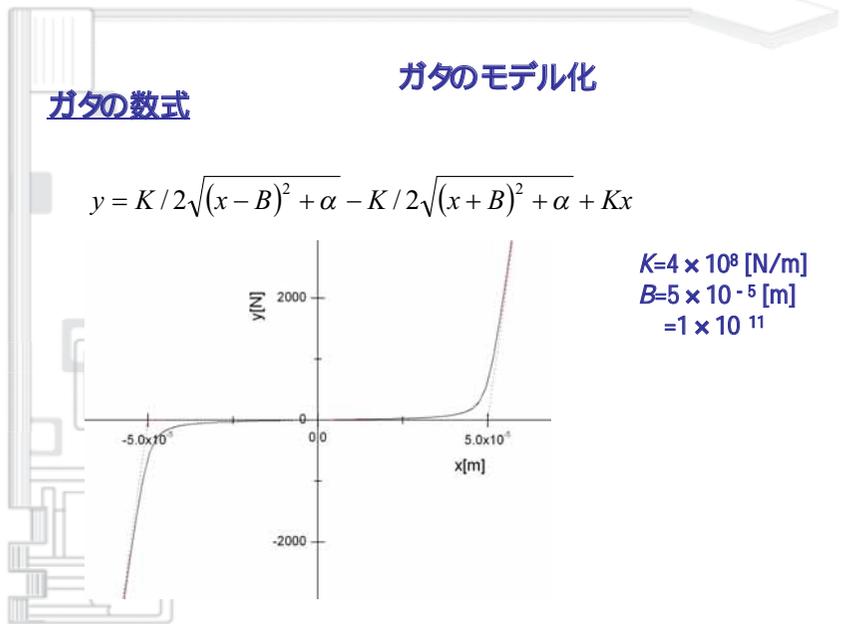
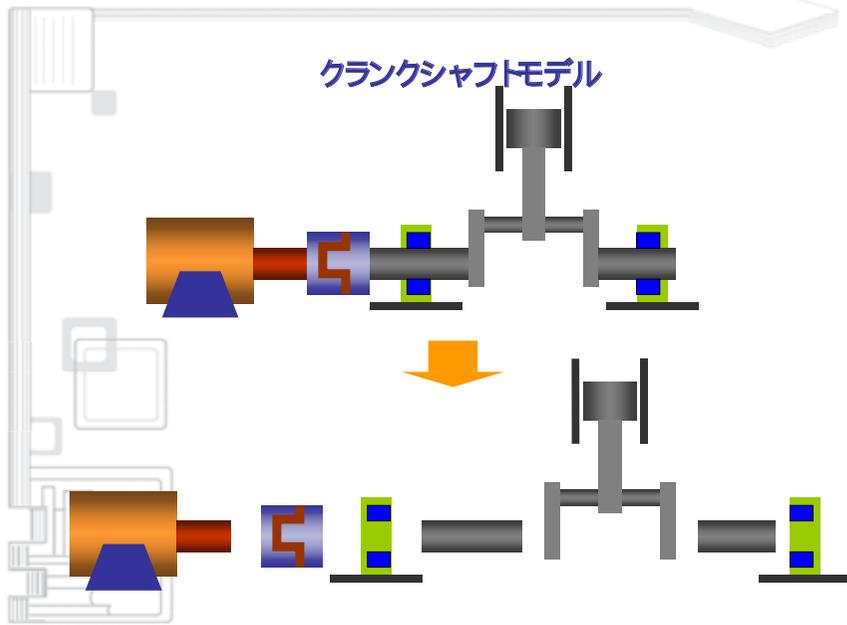
クランクシャフトモデル

モデリング言語Modelicaで作成
クランク機構を数式モデル化
振動や、通常では計測困難な
各箇所の荷重、トルク等の
シミュレーションが可能

実験機

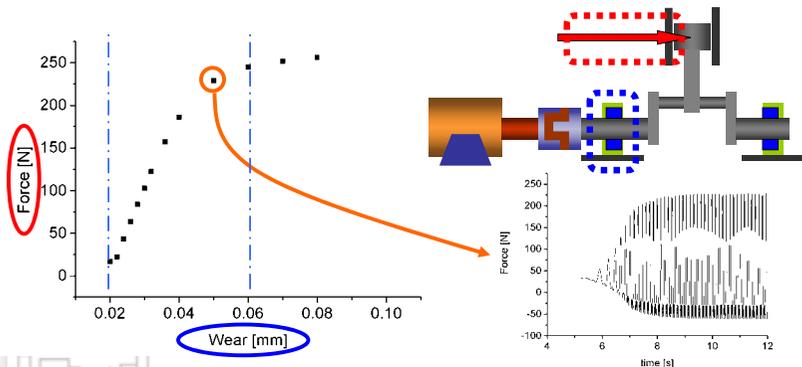


軸受締結ボルト軸力、
振動等が計測可能



劣化とその影響

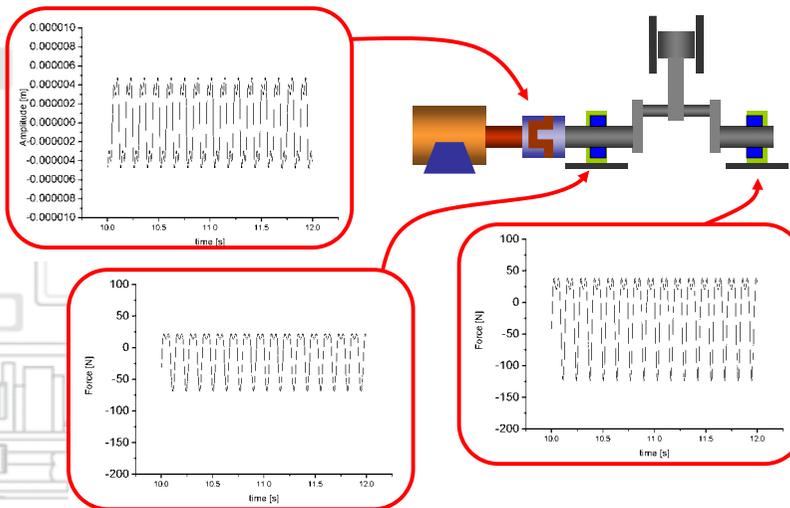
左側軸受摩耗とピストン負荷



軸受摩耗が0.02mmから0.06mmにかけて
ピストンの負荷が大幅に増加していることがわかる

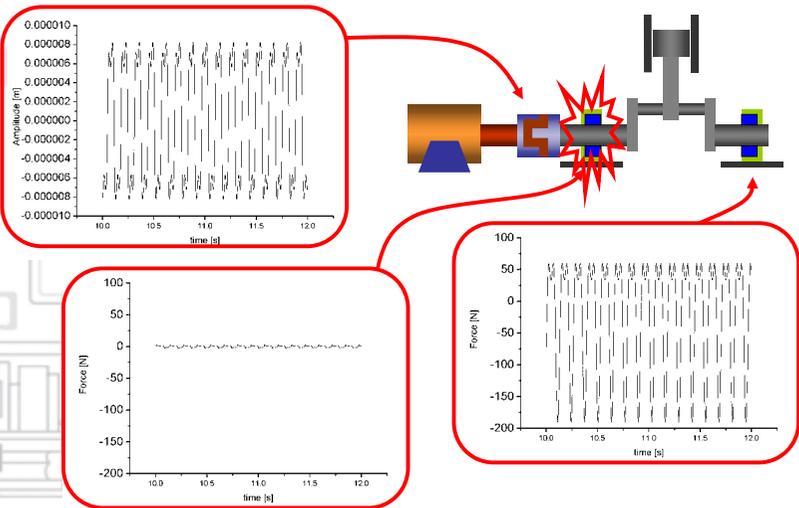
劣化前後のシミュレーション結果の比較

正常状態 左側軸受摩耗増加

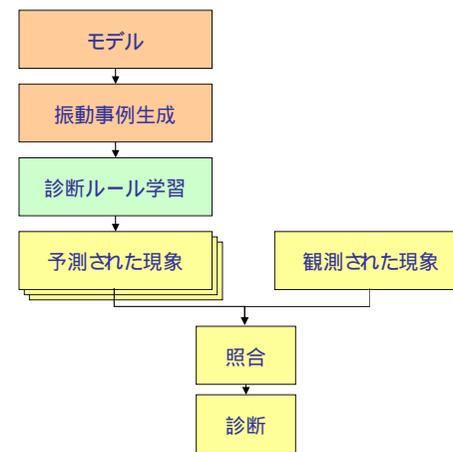


劣化前後のシミュレーション結果の比較

正常状態 左側軸受摩耗増加



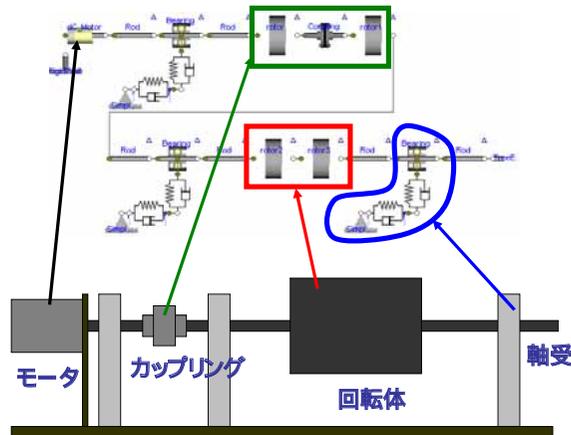
(2) 診断支援



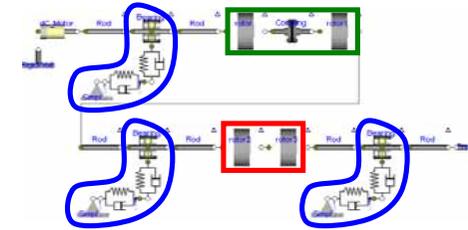
モデルを用いて事例を生成し診断精度を向上

対象機械 (シミュレーションモデル構築)

- 対象は回転軸系の振動診断
- シミュレーションシステム (Qymola) でモデル化



発生現象 (故障モデルの導入)



- 回転体部**
 - 静不釣合と動不釣合
- カップリング部**
 - 偏心とミスアライメント
- 軸受部**
 - 内輪傷と外輪傷

$$m \cdot d^2 u_x = m e \omega^2 \cos(\theta + e_0) + m e \alpha \sin(\theta + e_0) + F_x$$

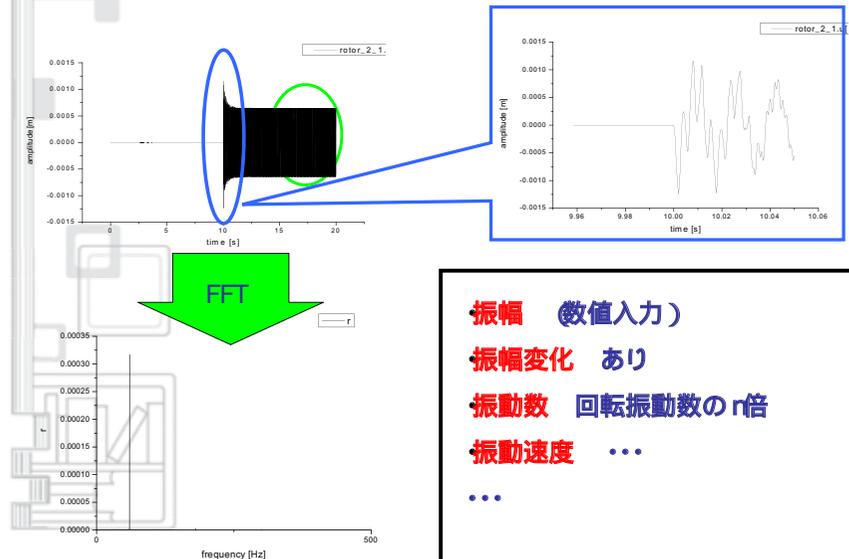
$$u_{bx} = u_{ax} + e \cos(\theta + e_0)$$

$$F_{kx} = k \Delta u_x + c \frac{d}{dt} (\Delta u_x) + F_n \cos(\phi) P$$

シミュレーションの実行

- シミュレーション条件
 - 前記各異常状態に対して
 - 回転数を100(rad/sec)から600(rad/sec)まで
 - 100(rad/sec)ずつ増加させながら
- 測定ポイント
 - 3箇所の軸受け台
- 測定項目
 - 振動数、振動速度、振幅、振幅変化、振幅数成分、加速度周波数

シミュレーション結果の観察



- 振幅** (数値入力)
- 振幅変化** あり
- 振動数** 回転振動数の n 倍
- 振動速度** ...
- ...

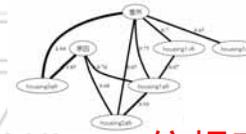
故障データベースの構築

ID	箇所	原因	回転数	housing1振幅	housing1振幅変化	housing1振幅数
1	回転体	磨不的合い	200	小	なし	fr
14	回転体	磨不的合い	300	小	なし	fr
27	カップリング	カップリング部偏心	400	小	なし	fr
40	左軸受	軸受外輪傷	600	大	あり	fr
47	中央軸受	軸受外輪傷	600	小	なし	fr,3fr,5fr
54	右軸受	軸受外輪傷	700	小	なし	fr,3fr,5fr
55	左軸受	軸受内輪傷	200	大	あり	fr
62	中央軸受	軸受内輪傷	300	小	なし	fr
69	右軸受	軸受内輪傷	400	小	なし	fr
76	カップリング	カップリングミスアライメント	600	小	なし	fr

3箇所の軸受けそれぞれの6つの測定項目を観察して記入

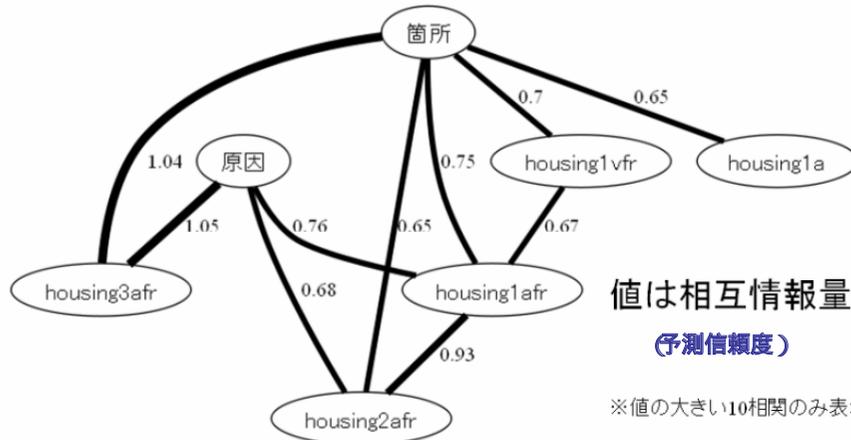
診断ルール学習

- ・ 入力したデータベースから自動で診断ルール学習
- ・ 独自開発の「診断意味ネットワーク」を活用
- ・ 診断意味ネットワーク:2階層から構成
 - 1階層目 相関ネットワーク
 - ・ カラムの相関度を表現・・・予測信頼度を保持
 - 2階層目 因果ネットワーク
 - ・ 測定値が観測された時の原因の確率値を保持



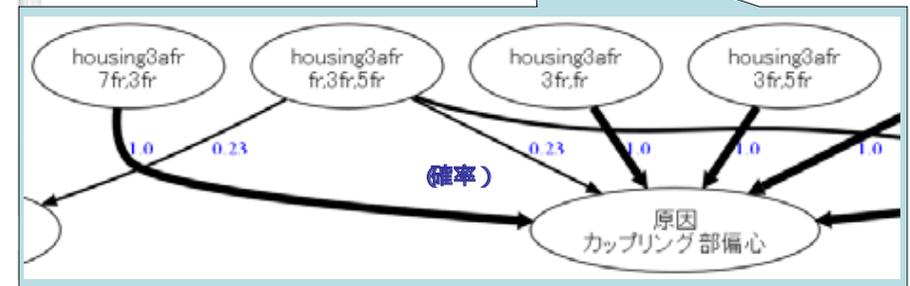
相関ネットワーク 信頼度 × 因果ネットワーク 確率

相関ネットワーク



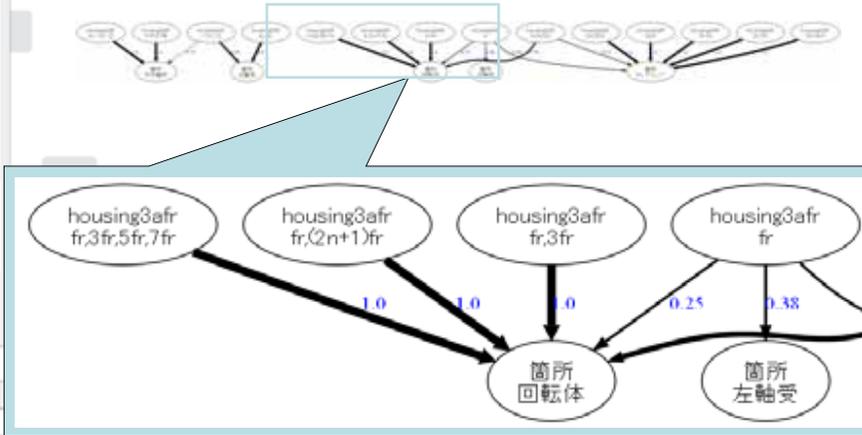
因果ネットワーク (原因)

- ・ housing3加速度周波数原因診断ルール(信頼度 0.38)

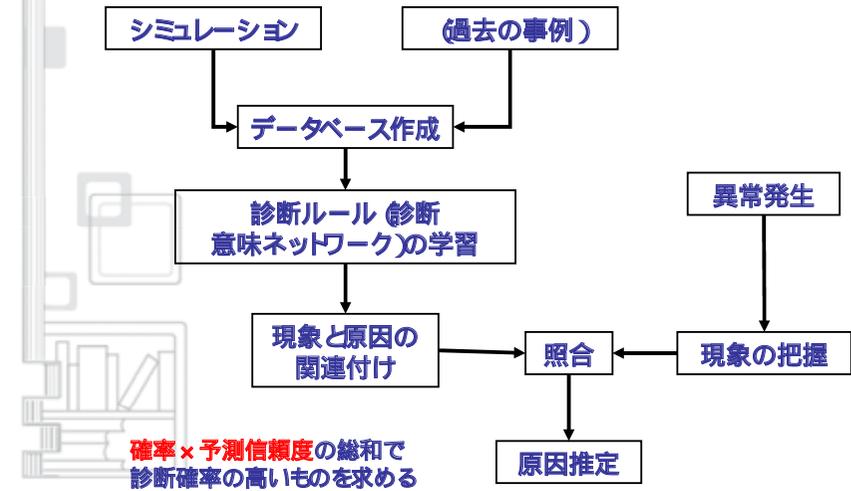


因果ネットワーク (発生箇所)

- housing3加速度周波数箇所診断ルール (信頼度 0.41)

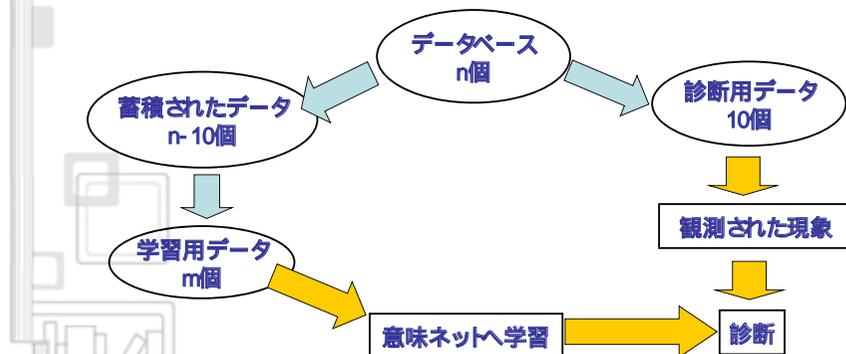


診断意味ネットワークを用いた診断



診断テスト

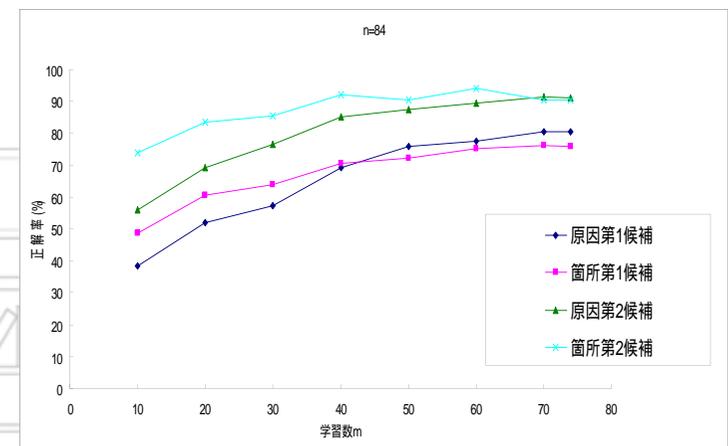
- 作成したデータベースにおいてクロスバリデーションを行い、テストを行った



- 各学習数に対して、 $10 \times 100 = 1000$ 回テストを行い、原因と発生箇所の診断正解率を見る

診断テスト結果

- 学習数増加と正解率向上



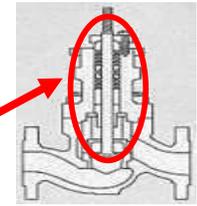
(3)その他 (故障のモデル化の例)

- ・ コントロールバルブ
- ・ コンプレッサー
- ・ エアコン
- ・ コージェネレーションシステム

コントロールバルブ

異常リスト

	箇所	事例
①	ステム	かじり
②	センサ	オフセット
3	パイプ	外部漏洩
4	プラグ・シート	内部漏洩



異常モデル

- 1 ステムのかじり・・・
ステムとパッキンの間にごみなどが
つまり動作不良を起こす
- 2 センサのオフセット・・・
センサの位置のずれにより
停止位置がずれたり、トルクが
発生したりする

複合的な異常
ステムのかじり(途中でストップ)・・・
 ごみなどに引っかかり途中で
 止まるためオフセットが発生したと
 みなしてしまう

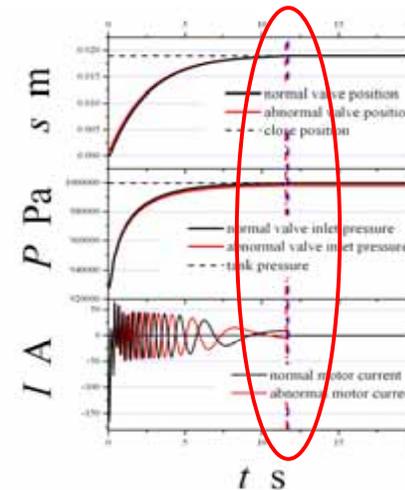
モデル化

→ ステムに**摩擦抵抗**を与える

→ 測定値を一定量**増加**，
あるいは**減少**

→ 稼動域を**短く**する

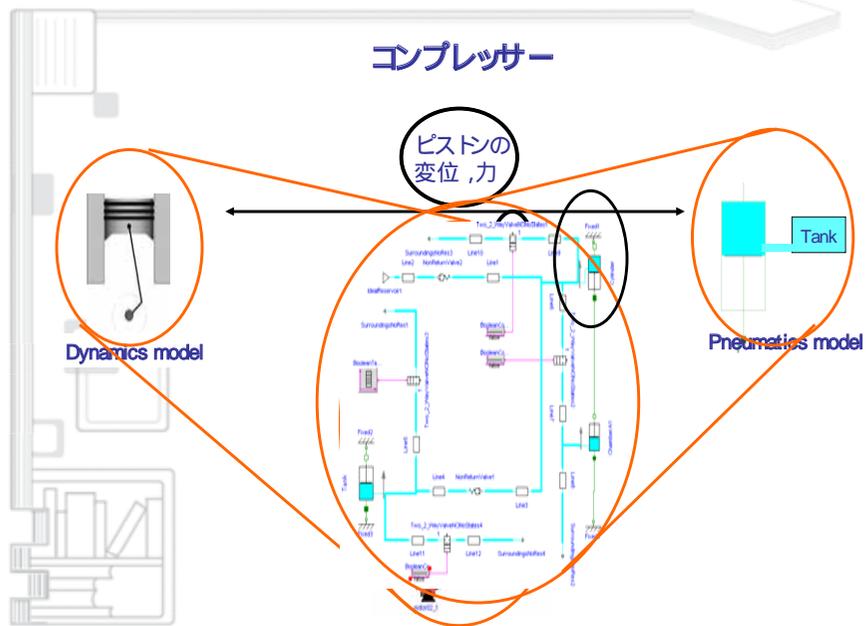
シミュレーション : センサのオフセット(+) 1mmの時



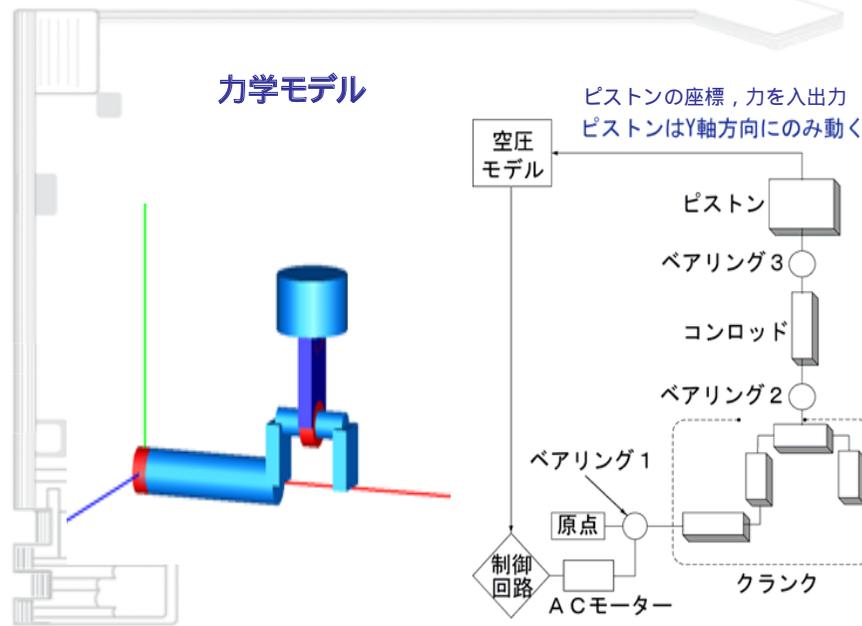
黒線 : 正常時
 (点線) : 正常時の停止時刻

赤線 : 異常時
 (点線) : 異常時の停止時刻

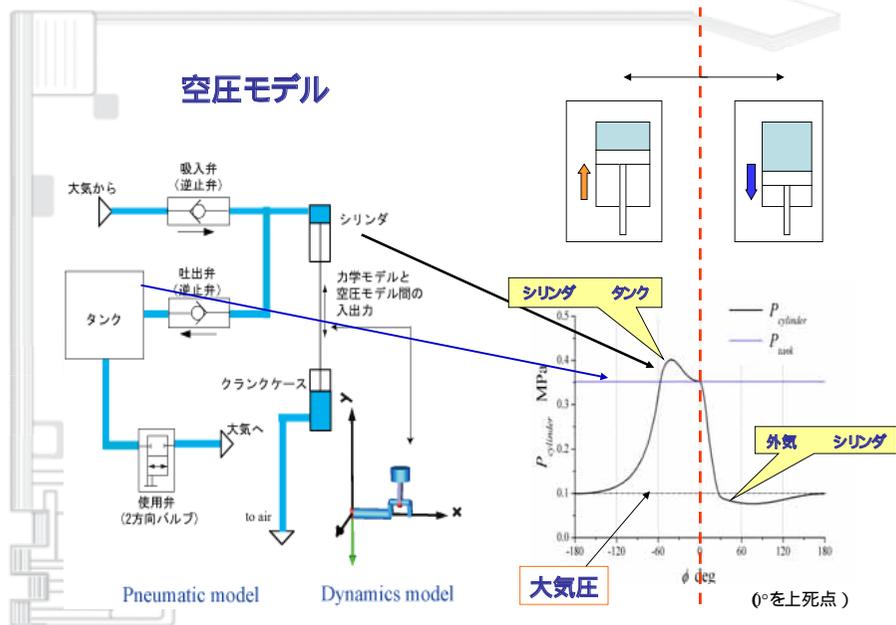
コンプレッサ



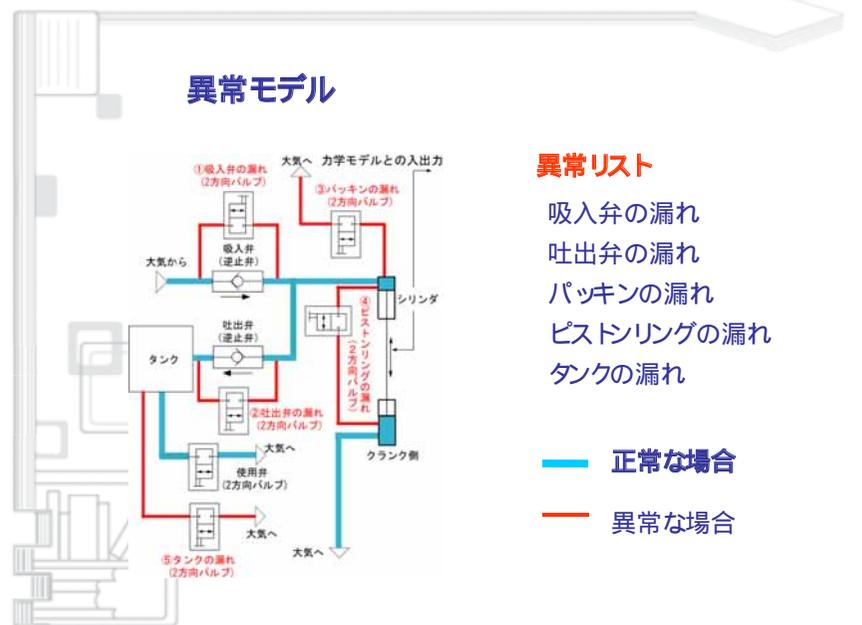
力学モデル



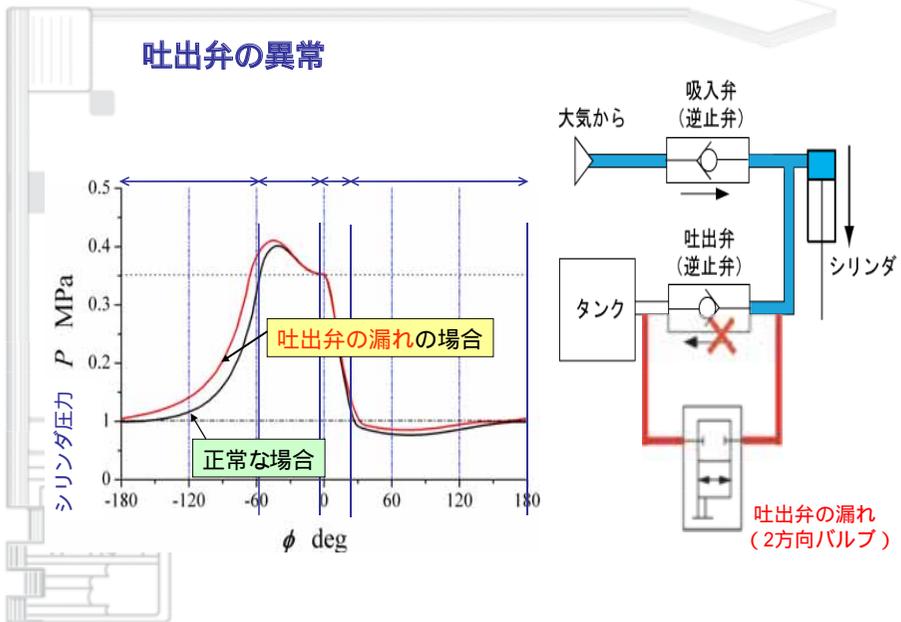
空圧モデル



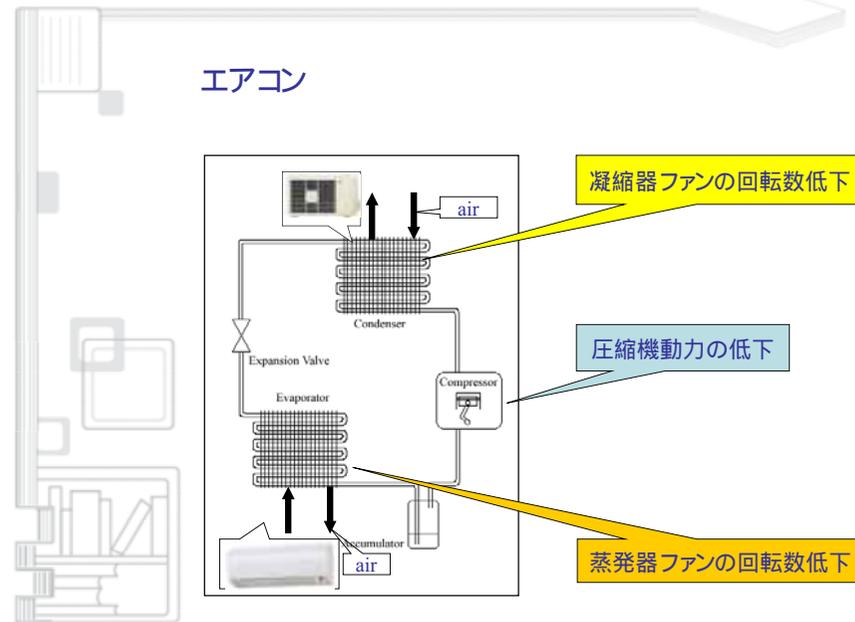
異常モデル



吐出弁の異常

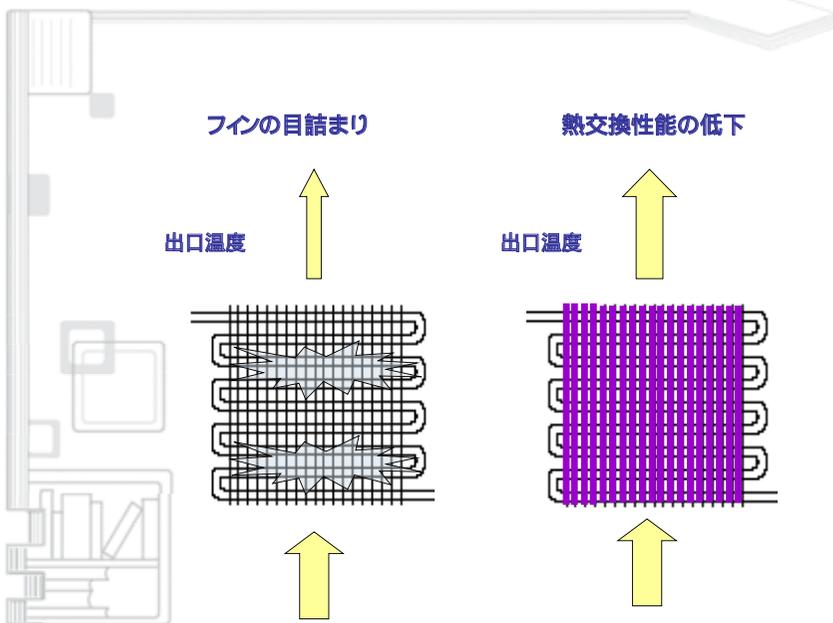


エアコン

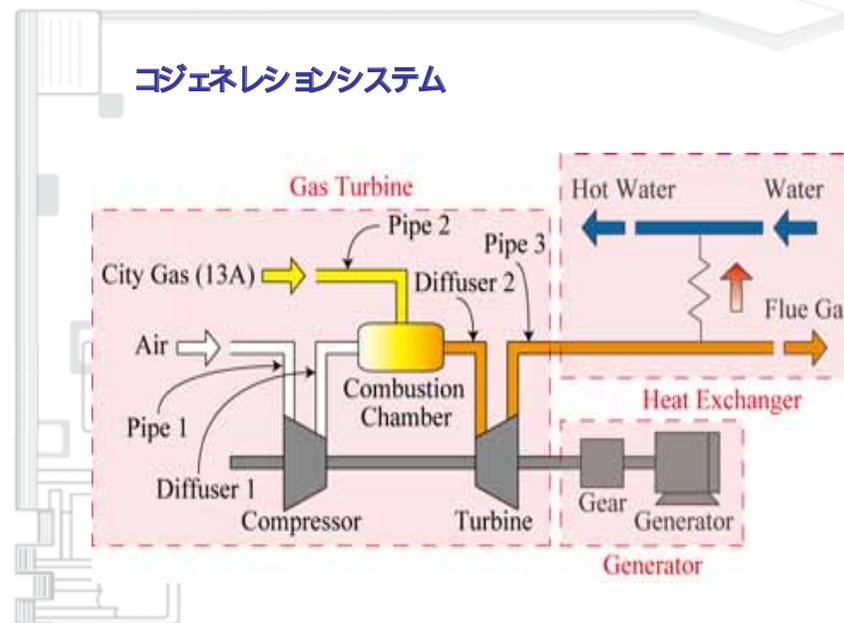


フィンの目詰まり

熱交換性能の低下



コージェネレーションシステム

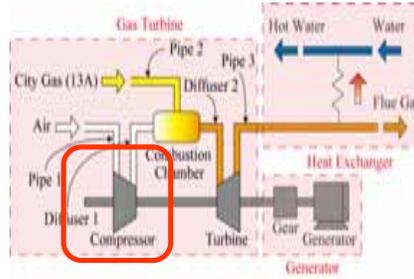


圧縮機モデル

圧縮機において回転数 N , 流量 w を
修正回転数 N_{cor} , 修正流量 w_{cor} で表す

$$\text{修正回転数 } N_{cor} = \frac{N}{\sqrt{\theta}}$$

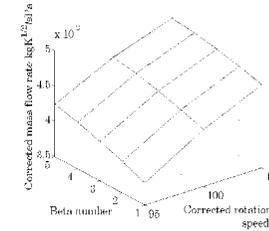
$$\text{修正流量 } w_{cor} = \frac{w\sqrt{\theta}}{\delta}$$



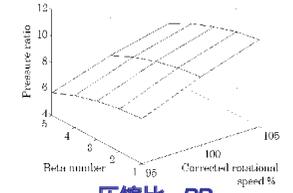
圧縮過程は断熱圧縮
軸受に摩擦トルク

圧縮機特性マップ

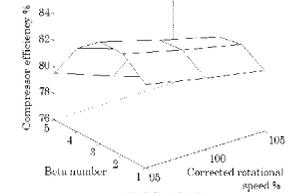
Beta数, 修正回転数から圧縮比,
圧縮機効率を決める二次曲面



修正流量
 w_{cor}



圧縮比 PR_c



圧縮機効率 η_c

異常のリストアップとモデル化

単独の異常、複合的な異常

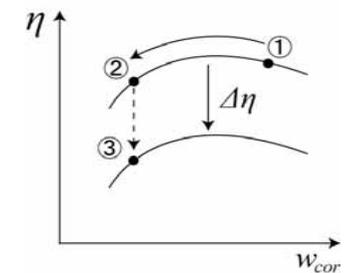
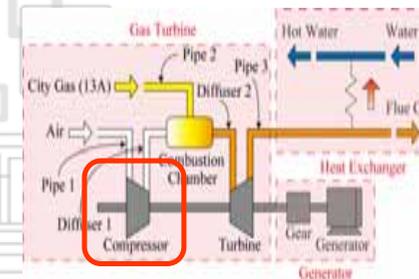
箇所	異常	モデル
配管	フィルタの目詰まり	圧力損失の増大
	吸入空気温度上昇	吸気温度の上昇
圧縮機	効率低下	圧縮機特性マップの下方修正
タービン	効率低下	タービン特性マップの下方修正
熱交換器	熱交換壁の汚れ	汚れ係数の増大

圧縮機の効率低下

異常: 圧縮機効率低下



モデル: 特性マップの下方修正



まとめ

物理モデル → 故障診断、余寿命予測に非常に有効

課題

1. 対象のモデル化ができるかどうか
2. 故障のモデル化ができるかどうか
物理法則が必要
3. 故障・損傷の進展のモデル化ができるかどうか
4. パラメータのチューニングができるかどうか

ご清聴ありがとうございました