

MBDはじめての第一歩！
システムシミュレーションセミナー
-熱回路網法やモデル低次元化(ROM)機能の例題付き-

サイバネットシステム株式会社



本日のアジェンダ

- セミナー内容
 - はじめに ~Ansysが提唱するMBDとは~
 - 1D /システムシミュレーション/ROMとは ~MBDの重要ファクター~
 - 1D /システムシミュレーション/ROMによる事例紹介
 - 製品紹介 : Ansys Twin Builder

- 体験実習
 - 例題1 : Ansys Twin Builder の基本操作
 - 例題2 : 熱回路の等価回路例題
 - 例題3 : 伝熱解析のROM例題
 - 例題4 : 流体解析のROM例題
 - 例題5 : 構造解析のROM例題

はじめに

~Ansysが提唱するMBDとは~

サイバネットシステム株式会社



Ansysisが提唱するMBDとは

(1)MBD(モデルベース開発)の課題

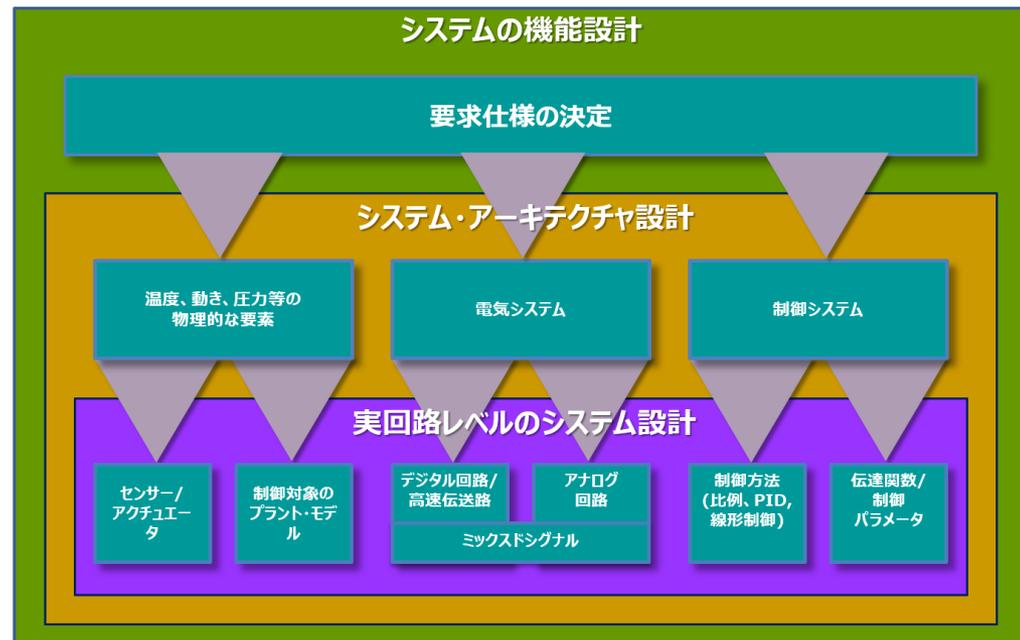
特に、複雑な物理現象やシステムを扱う場合、
MBDで活用するモデルの構築や運用に大きなハードルがある。

Multi-Domain(多数の技術分野)
電気工学、制御工学、機械工学、
熱力学、電気化学

Multi-Level(多数の設計階層)
システム、等価回路、機械、材料

Multi-Organization(多数の組織)
完成品メーカー、制御システムメーカー、
構成部品・材料サプライヤ

例) トップダウン 電子機器製品開発フロー

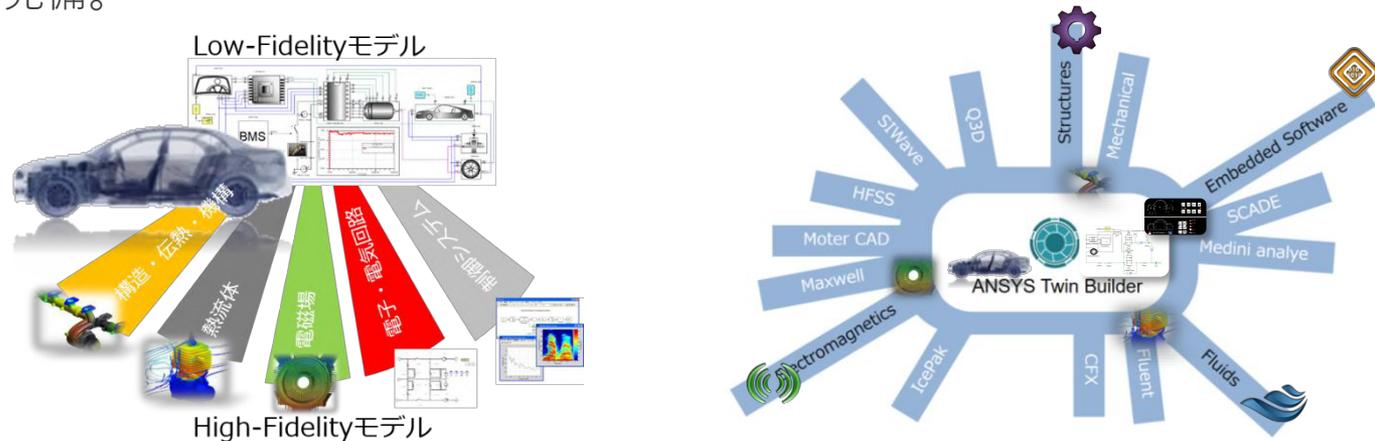


Ansysが提唱するMBDとは

(2)Ansysのアプローチ

主要分野（構造、流体、電磁場）でハイエンドソルバーを保有し各種連成解析を得意とすることで、複雑な物理現象を扱うことが可能。

強力なモデル低次元化（ROM）機能を有し3D-MultiPhysicsモデルの精度を維持したまま1Dモデルを構築可能。さらに1D Multi-language（Modelica,VHDL-AMS,SPICEなど）機能も完備。



ROM化されたHigh-Fidelity物理モデルをシステムアーキテクチャ全体（メカ、電気、制御）のMulti-Fidelityモデルとして構成でき完全なシステムモデリング環境を実現。

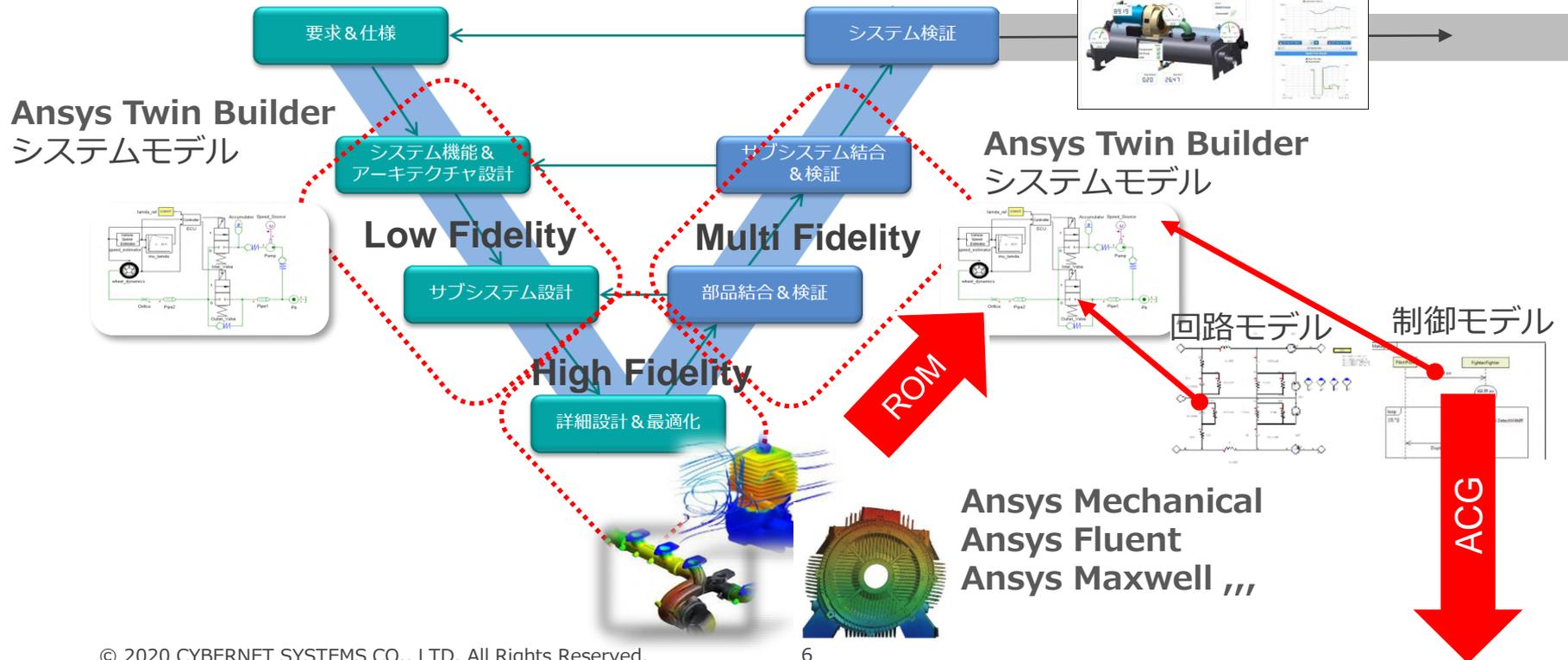
Ansysが提唱するMBDとは

(3)Ansysのソリューション

ROMによりMBDのV字プロセスのあらゆるところでMulti-Fidelity（忠実度）モデルを活用することが可能

※ROM：モデル低次元化（3D解析モデルを1Dに縮退化すること）

**Ansys Twin Builder&Iot
Digital Twin**



1D/システムシミュレーション/ROMとは

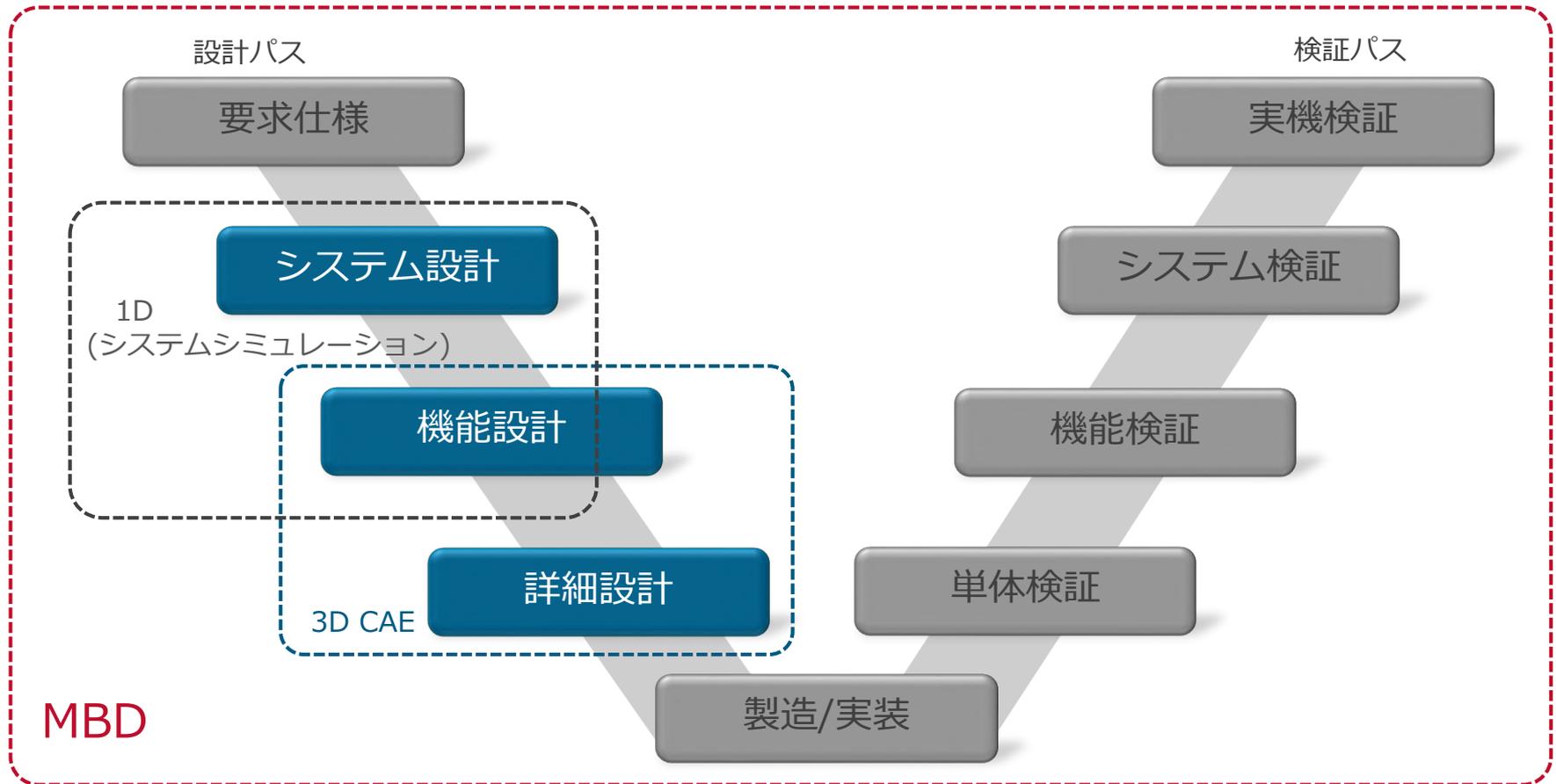
~MBDの重要ファクター~

サイバネットシステム株式会社



MBDにおける1D CAE/システムシミュレーション

■ VプロセスにおけるMBDの活用状況

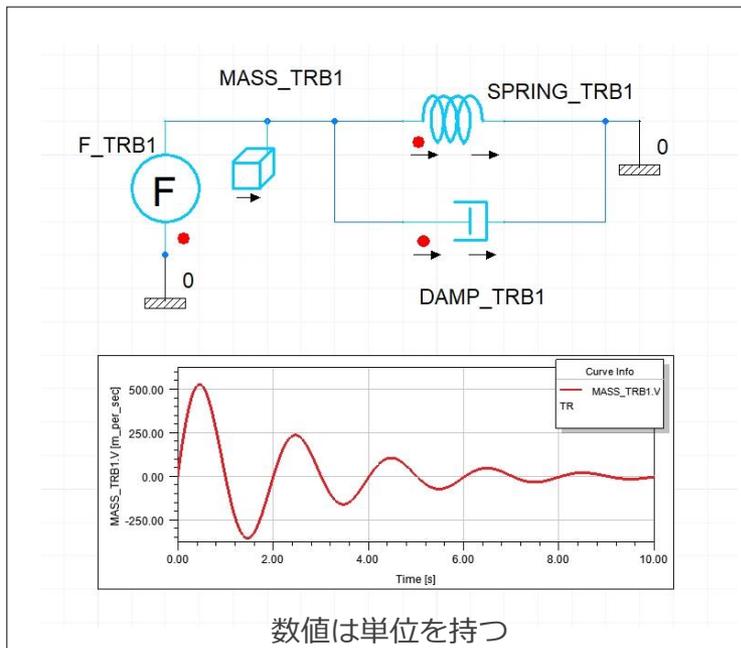


1Dの世界

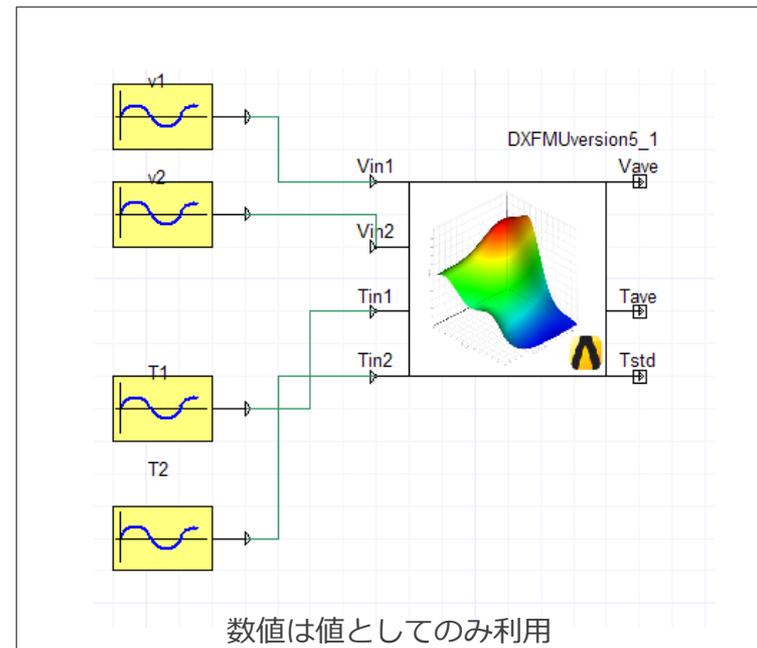
■ 1Dは大きく2つ、考え方がある

- 物理モデル（等価モデル）⇒非因果モデル
- システム（ブロック線図モデルを含む）⇒因果モデル

物理モデル



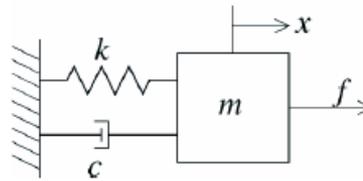
システム



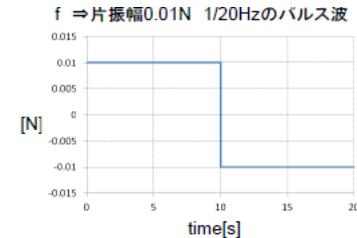
1Dの世界

- 同じ方程式（例：運動方程式）を2つの方法で表現

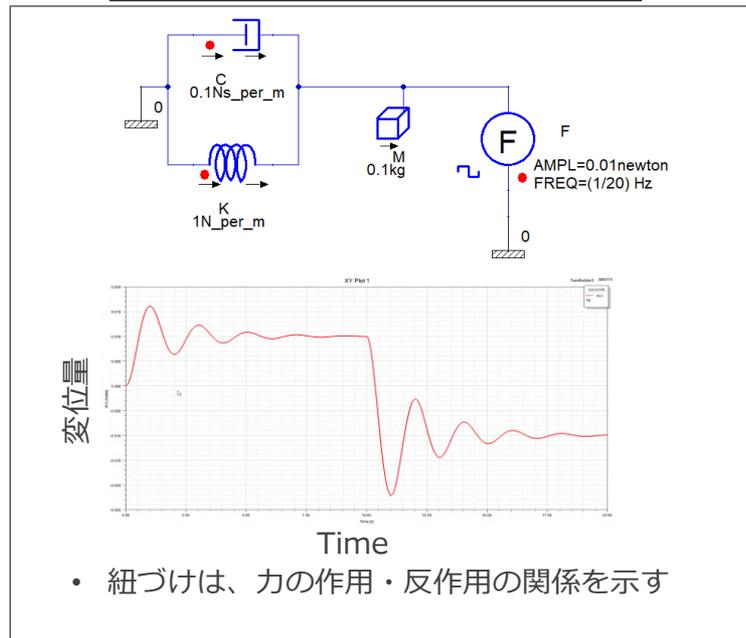
$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f$$



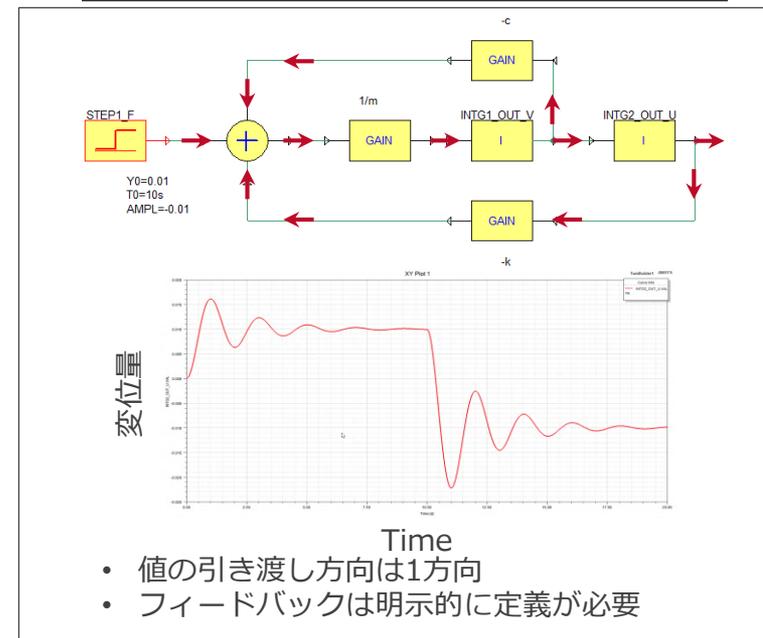
$m=0.1\text{kg}$ $c=0.1\text{Ns/m}$ $k=1.0\text{N/m}$



非因果モデル（物理モデル）



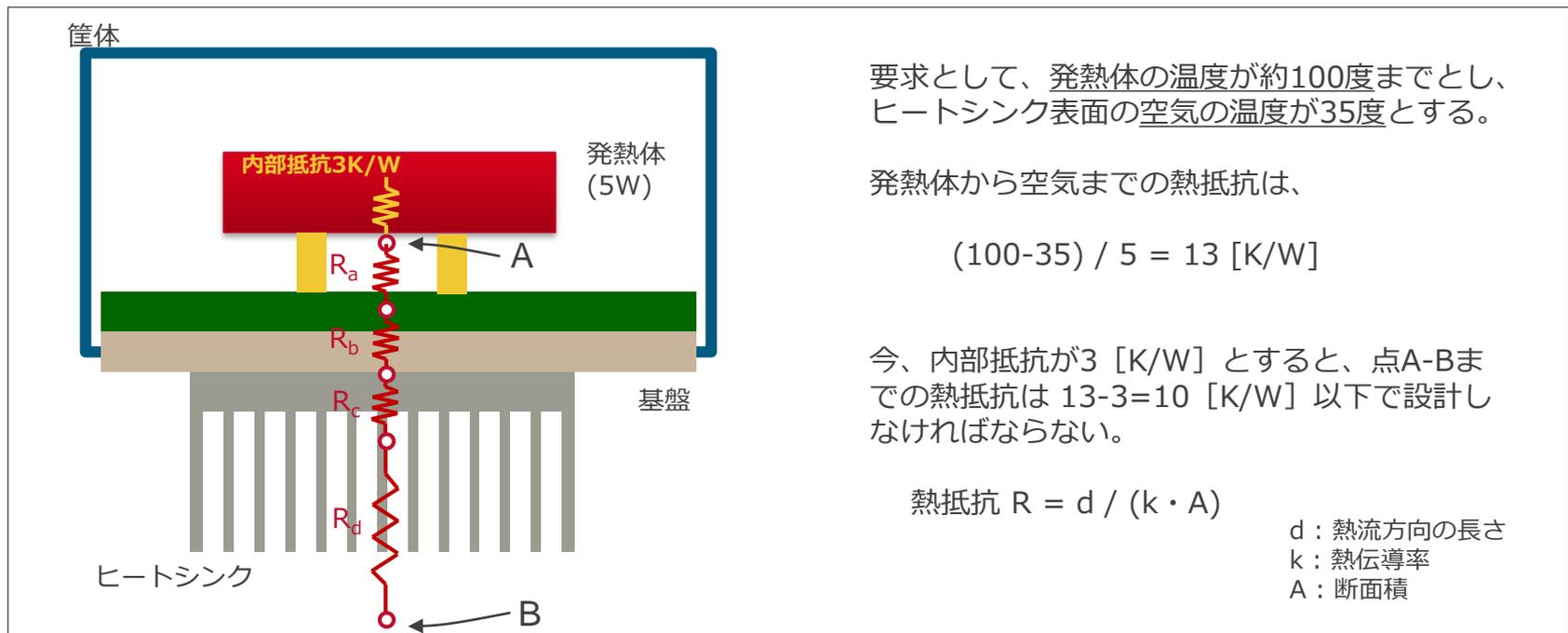
因果モデル（ブロック線図モデル）



1Dの世界

■ 物理モデル（等価モデル）

- 一般に設計で要求された性能を満たすよう、概算で材料の選定や設計仕様を決める際の簡易計算に用いる。
- 例えば、
 - 基盤の熱設計を考えた場合、熱抵抗を基準に材質や寸法など、仕様をある程度計算可能



要求として、発熱体の温度が約100度までとし、ヒートシンク表面の空気の温度が35度とする。

発熱体から空気までの熱抵抗は、

$$(100-35) / 5 = 13 \text{ [K/W]}$$

今、内部抵抗が3 [K/W] とすると、点A-Bまでの熱抵抗は $13-3=10$ [K/W] 以下で設計しなければならない。

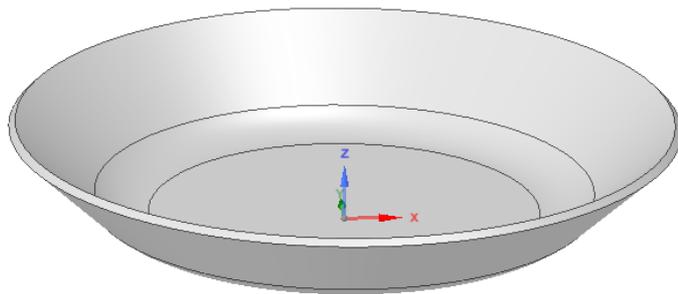
$$\text{熱抵抗 } R = d / (k \cdot A)$$

d : 熱流方向の長さ
k : 熱伝導率
A : 断面積

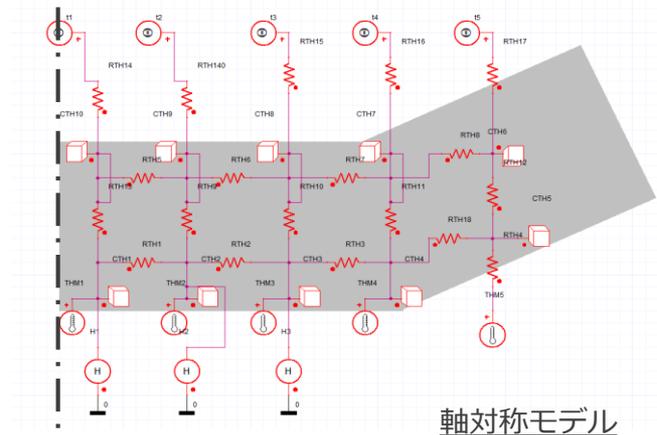
1Dの世界

■ 物理モデル（等価モデル）

- 一般に構想設計で活用するが、より物理モデルを細分化していくことで精度を上げることができる。
- 細分化するほどモデル作成に手間がかかり、物理現象を正確にモデルするスキルが必要になる。

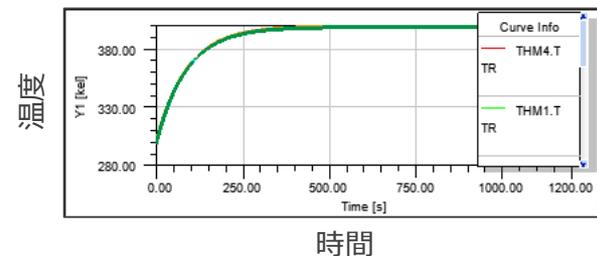


1Dでやってみる



1Dで物理モデルを描き、より詳細に熱容量や熱伝導、熱伝達をモデル化することで、熱量を与えたときの時間に対する温度の応答を数秒で得られる。
物理現象を正確にモデルに落とし込む必要があるため、割と手間がかかる。

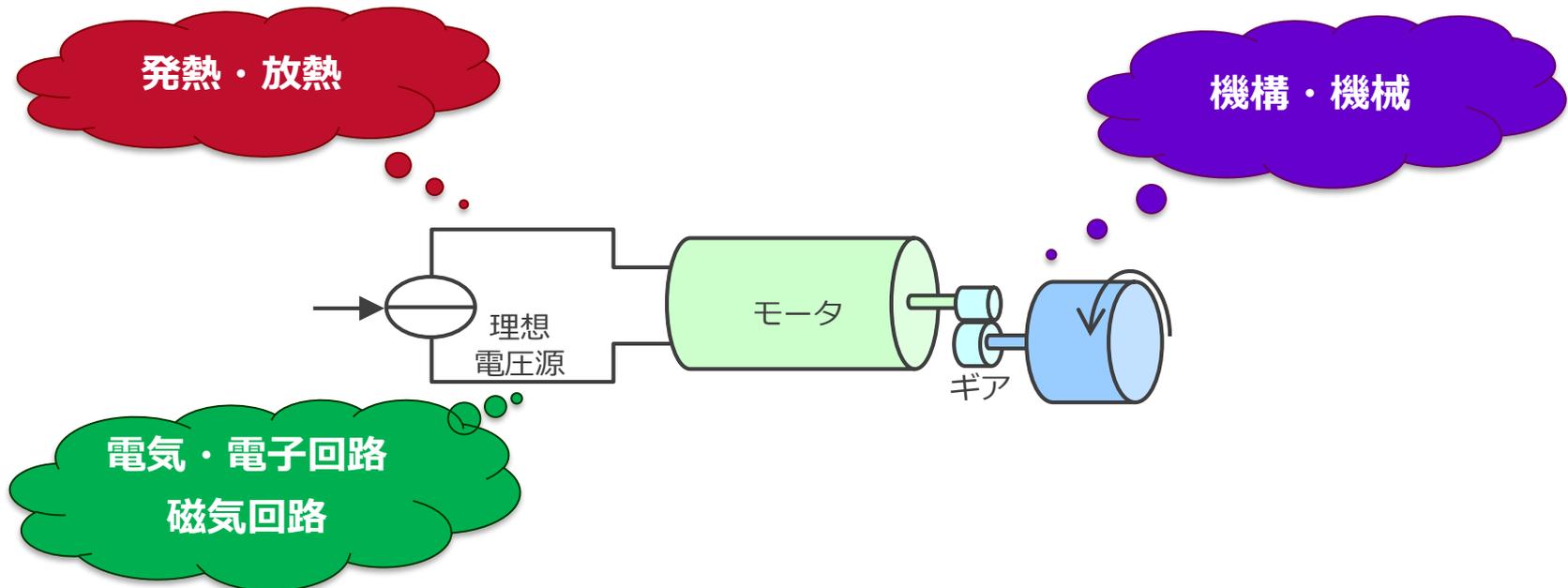
⇒ 計算速度が上がった今日では、FEMで計算したほうが早い。



1Dの世界

■ 物理モデル（等価モデル）

- 各物理場をつなぐことで、アプリケーションとしての成立するか確認する。

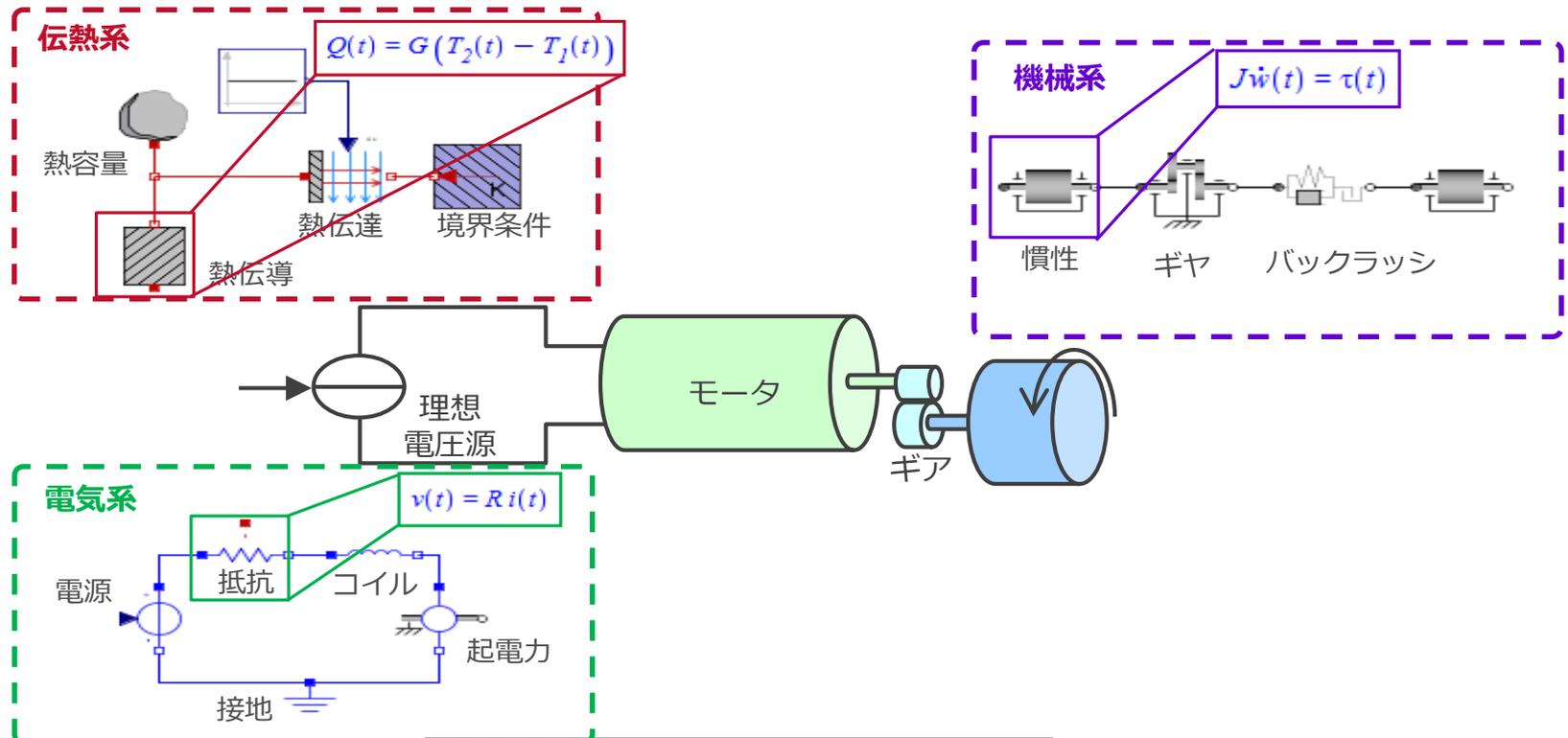


システムの実現性の確認する

1Dの世界

■ 物理モデル（等価モデル）

- 各分野で物理法則を用いて、システムを構築することでより具体的にアプリケーションをシステムとして動作させて時の挙動を確認する。

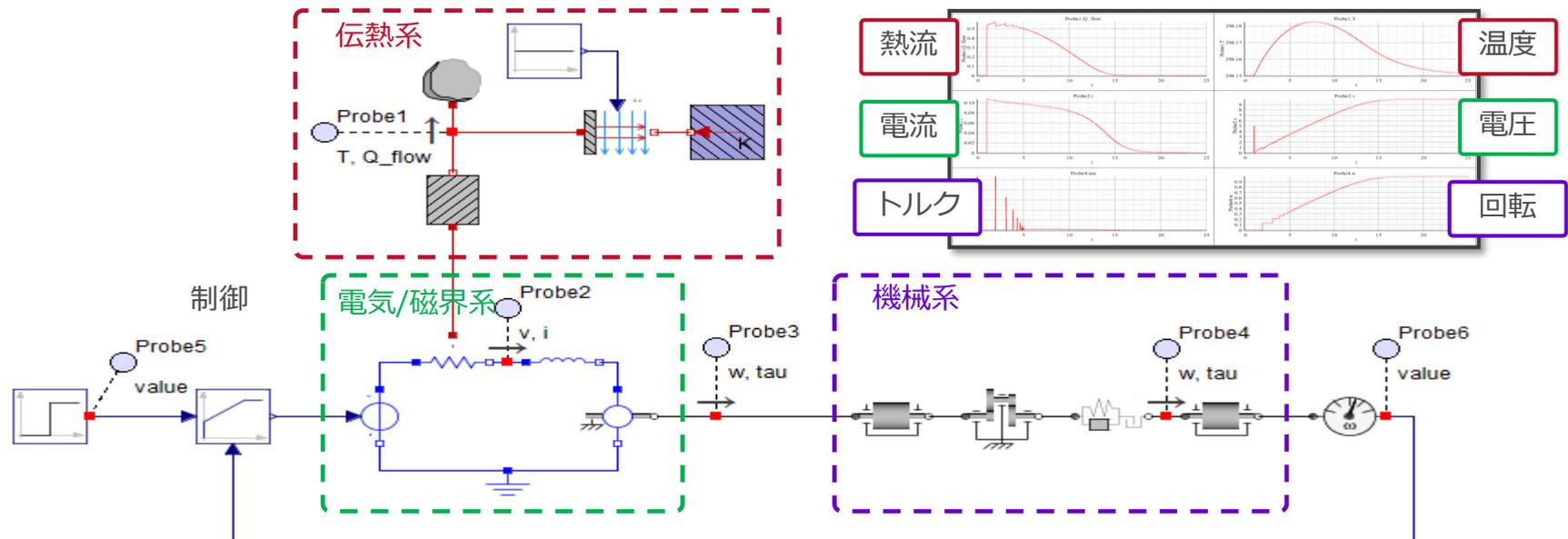


要求仕様を満足できるかを確認

1Dの世界

■ 物理モデル（等価モデル）

- 各分野で物理法則を用いることで、システムの応答の計算は早い。
- 実現象を正確に理論式で模擬するため、現象と理論をつなぐ物理的な理解が非常に重要。



要求仕様(消費電力・効率・回転速度・トルク・温度, etc)を満たす
 パラメータ要件(重さ・バネ定数・抵抗・インダクタンス・熱抵抗, etc)を1Dですばやく把握

1Dの世界

■ システム

- 極端に言うと、値を入れるとシステムの仕様に従って別の値が返される
- 一般的にこのシステムを利用して、アプリケーションを構築していく



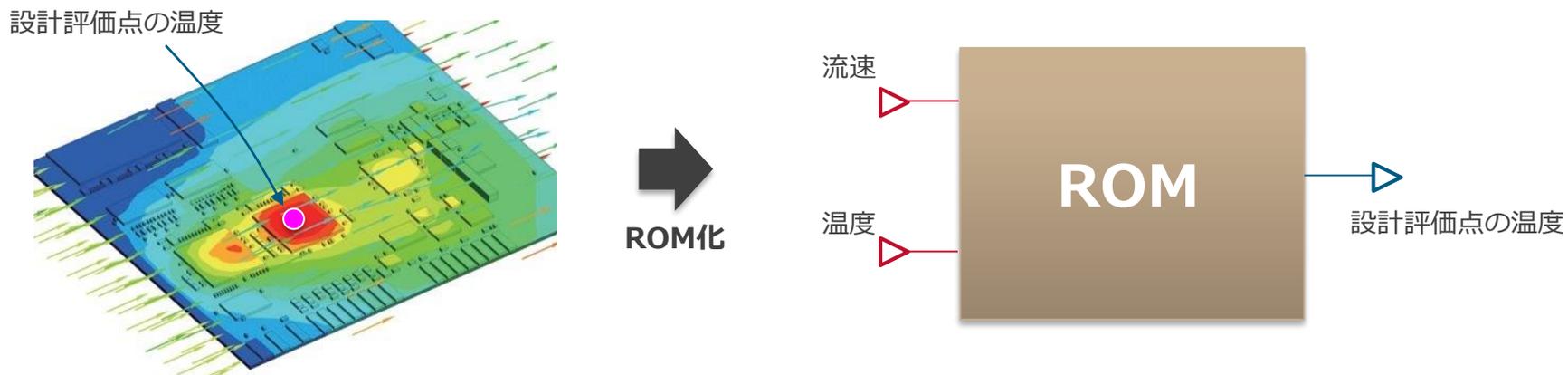
- 物理モデルもシステムの種類



システムシミュレーションとは

■ ROMとは

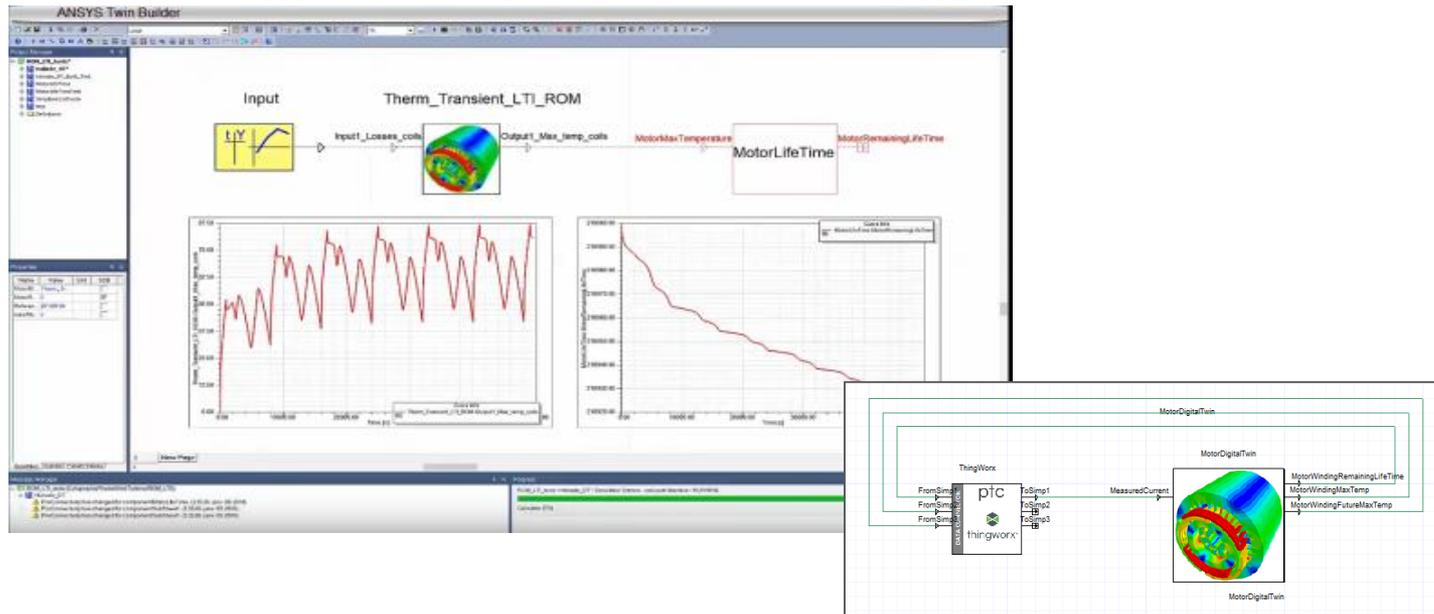
- FEM（有限要素法）や CFD（数値流体解析）などのシミュレーションの計算量を減らす手法のことを総称して**ROM** という。
 - 低次元モデル（ROMモデル）は**本質的な動作と支配的な効果を保持される**。
 - ROM化されたモデルでのシミュレーションは**計算時間と記憶容量の大幅な削減が可能**。
- ✓ Reduced Order Modeling（ROM）またはModel Order Reduction(MOR)



システムシミュレーションとは

■ システムを3つの角度から見る

- 制御としてのシステム
- 可視化について
- ROMの種類について

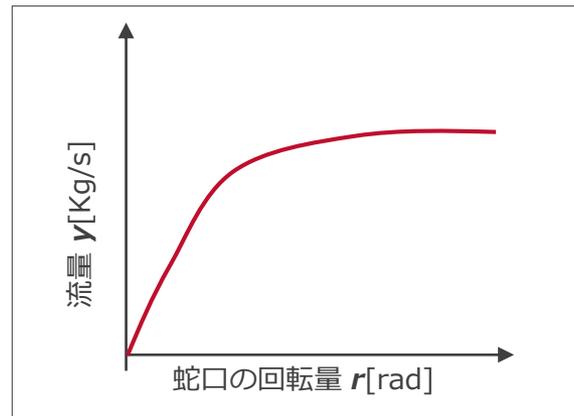
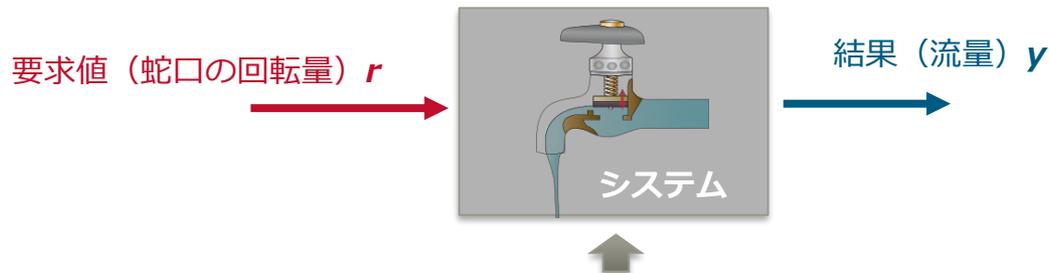


システムシミュレーションとは

■ 制御としてのシステム

- 古典制御の種類：フィードフォワード制御 / フィードバック制御

フィードフォワード制御（蛇口の水量）



極めて単純な例だが、この関係をFEMやCFDで求めておけば、図のようなシステムを作成できる。

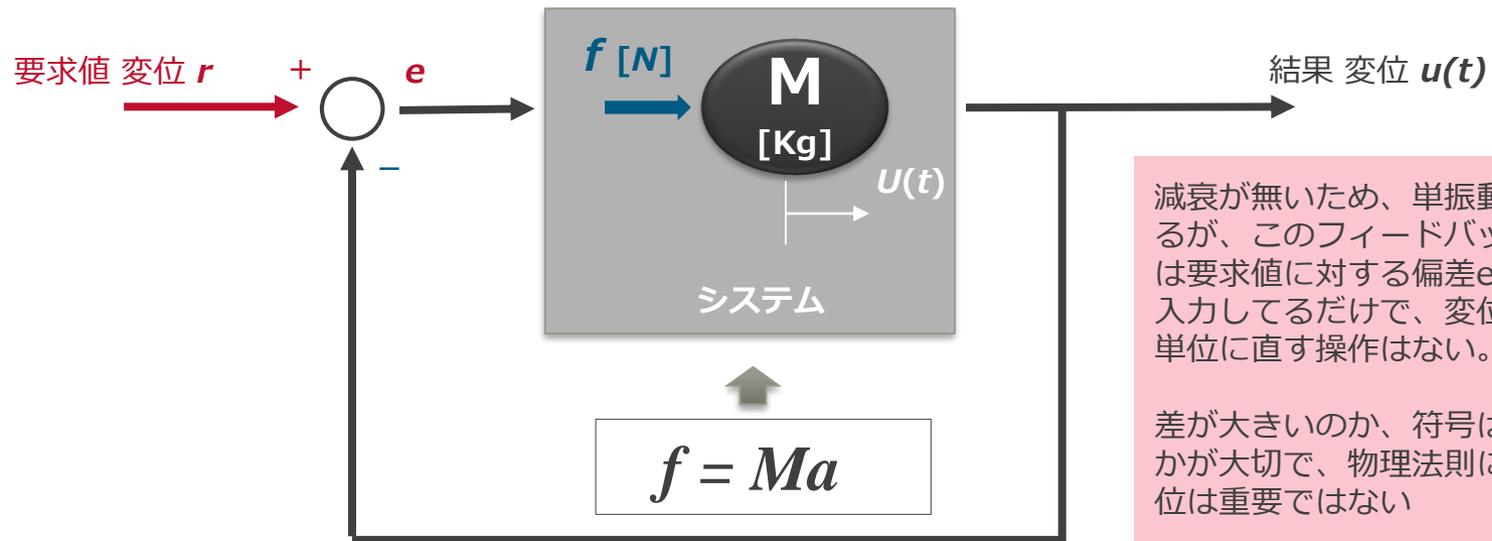
入力値が左図の関係性を経て、結果値を導くため、物理法則に基づく単位は重要ではない

システムシミュレーションとは

■ 制御としてのシステム

- 古典制御の種類：フィードフォワード制御 / フィードバック制御

フィードバック制御（ニュートンの運動方程式）



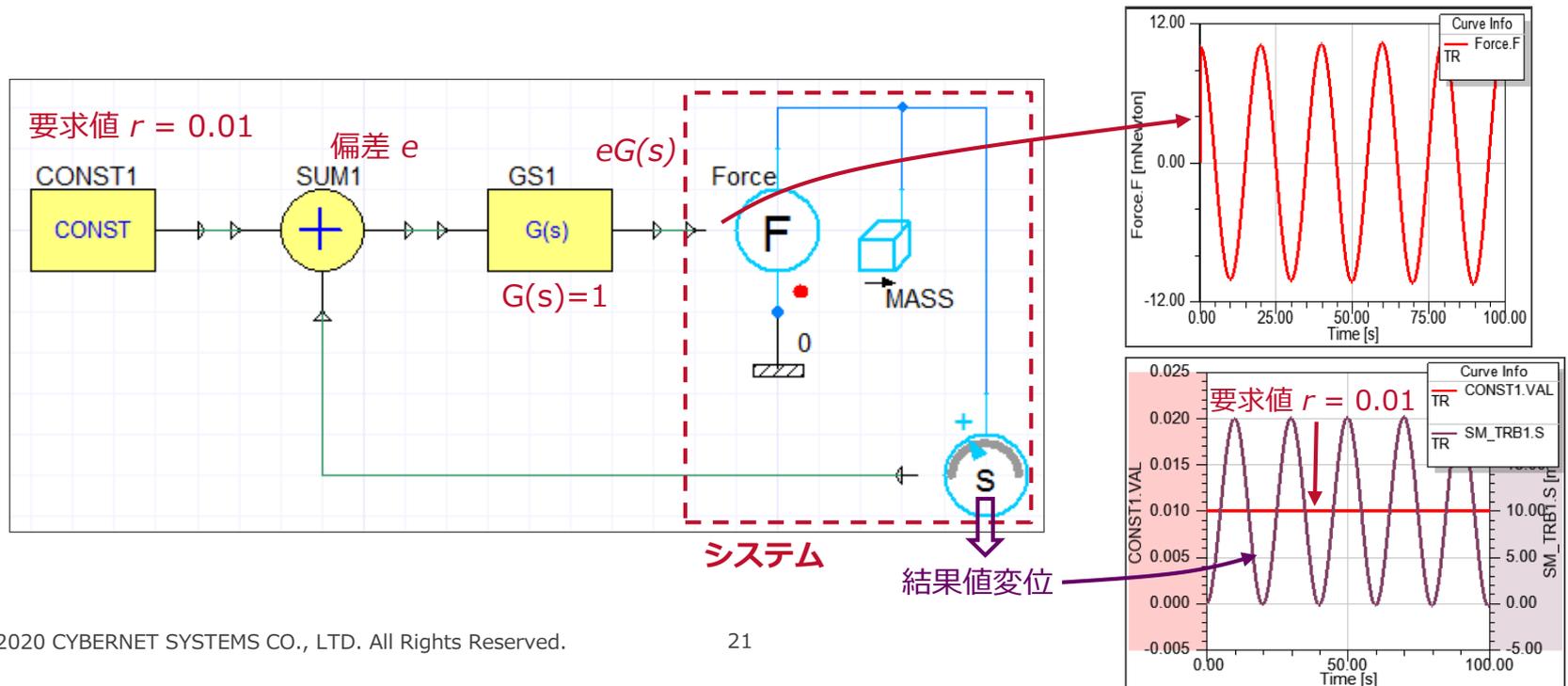
システムシミュレーションとは

■ 制御としてのシステム

- 古典制御の種類：フィードフォワード制御 / フィードバック制御

フィードバック制御（ニュートンの運動方程式）

質量 $m = 10$ 、要求値 $y = 0.01$ で実際にシミュレーションしてみると、



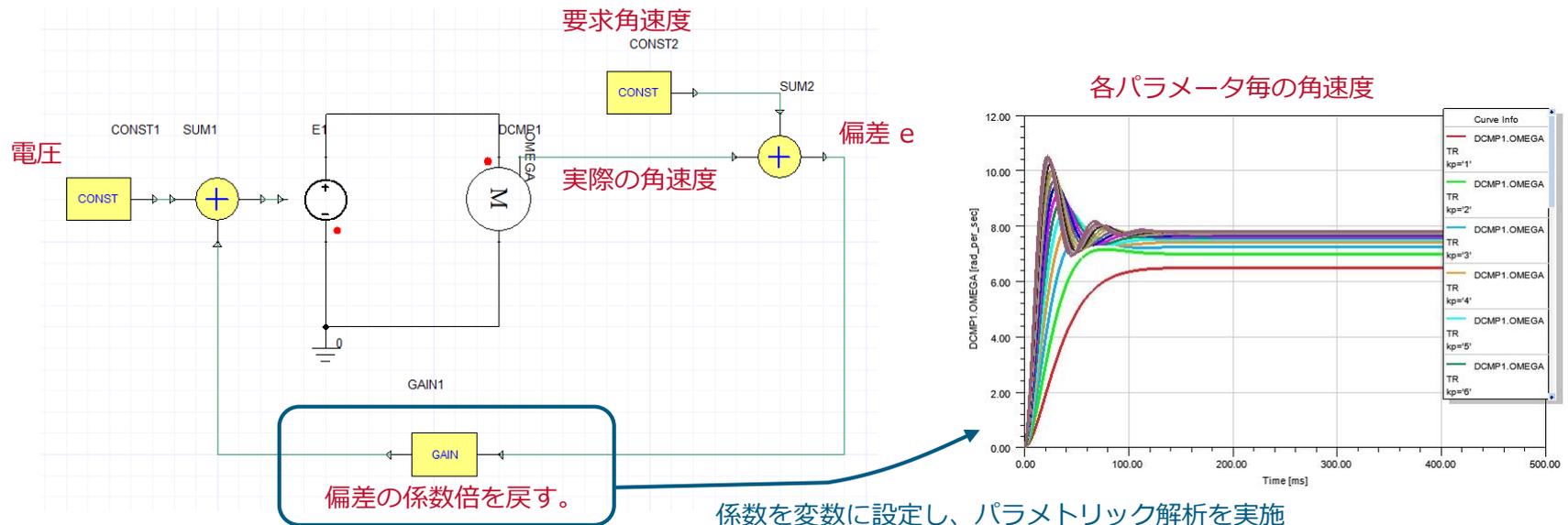
システムシミュレーションとは

■ 制御としてのシステム

- アプリケーションを構成する、個々のパーツで最適設計を実施した場合、実際のシステムで動作させると最適でない場合が出てくる。



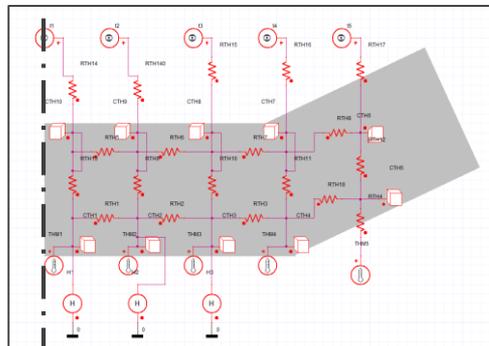
すべての応答の性質により、制御で使用するパラメータの最適値が決まる。



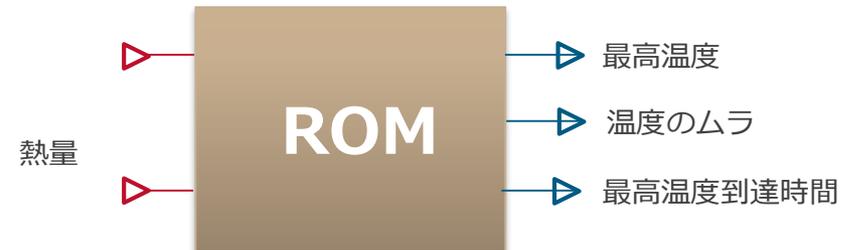
システムシミュレーションとは

■ 制御としてのシステム

- 何らかの値をインプットすると、そのシステムの仕様に沿ってアウトプットされる。逆に、システムの仕様がないデータについては出力できない。
- システムはテーブルデータ / 関数 / 応答曲面など、入力と出力の関係性をつなぐものであれば、基本的に構築可能。一般的な手法については、ROMの種類で説明
- 前述した以下のプライパンの1Dモデルもシステムの仕様を決めることで、ROM化できる。
- 要求値を決めれば制御も可能、また、最適な制御の値も導ける。



材質（熱伝導/密度/比熱）

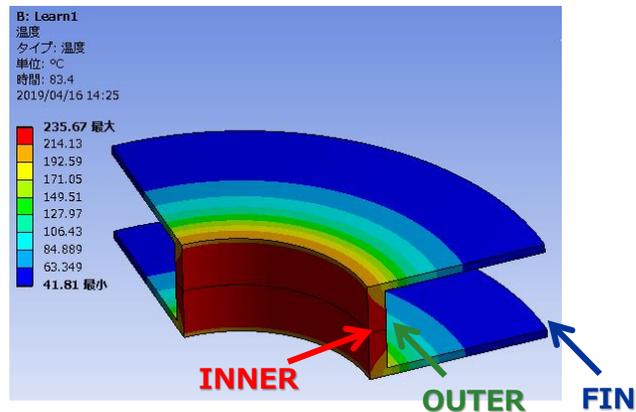


システムシミュレーションとは

■ 可視化について

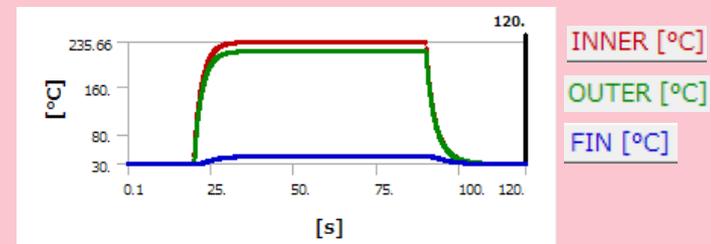
- CAEのメリットとして可視化がある。これは実験では確認できない内部の応力や、流体の流れ、電磁場の様子など多岐に渡る。
- シミュレーションの高速化という点ではメリットと同時に無駄な結果がおおく、デメリットにもなる。**システムシミュレーションでは必要な部分の関連性さへ、システム化できれば良い。**

例えば、次のヒートシンクを例に見てみる



全部の分布をみれるのは良いが、結局以下の内容があれば、設計で利用できる。設計に不要な位置の温度情報は無駄。

- 熱流を与えた時に、左図に示す3点の温度の応答



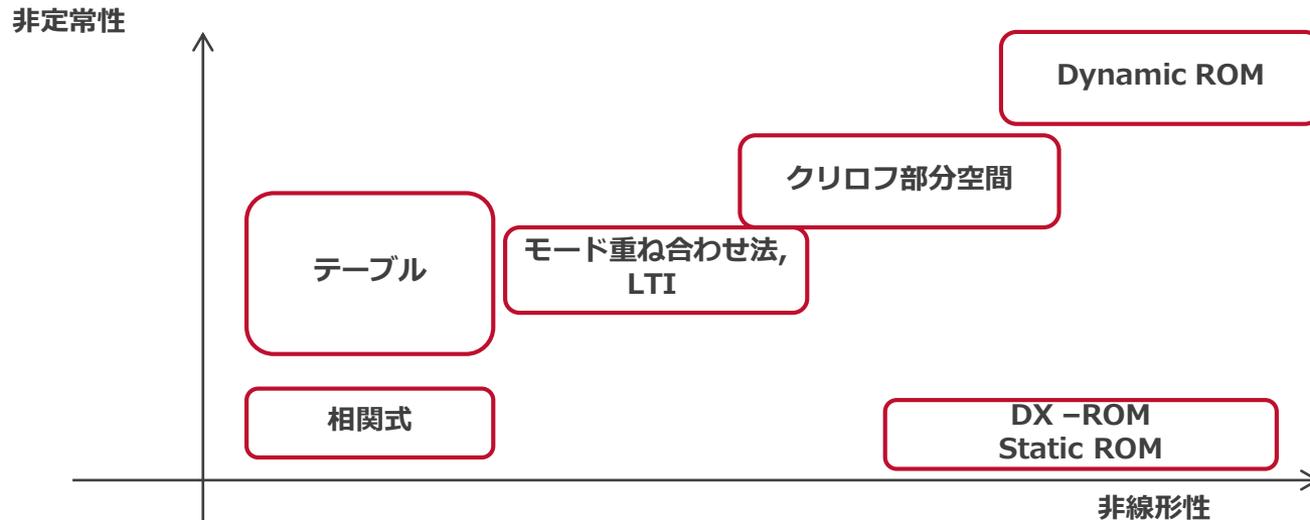
※ 1パターンだけでなく、複数荷重パターンの応答が必要

システムシミュレーションとは

ROMの種類について

- 実際のイメージは各例題を参照

	Linear	Non-Linear
Stationary	<ul style="list-style-type: none"> •テーブル •様々な相関式(HTC等) 	<ul style="list-style-type: none"> •DX-ROM •Static ROM
Transient	<ul style="list-style-type: none"> •LTI •モード重ね合わせ法 •クリロフ部分空間法 	<ul style="list-style-type: none"> •Dynamic ROM •(クリロフ部分空間法)



なぜ、ROMが必要なのか

■ 近年ニーズが高まっているのは・・・

- ・ シミュレーションベースのデザイン
- ・ 大規模な設計探査、システム挙動解析・コントロール、デジタルツイン、故障モード影響解析、・・・
- ・ 膨大なパラメーター計算やリアルタイムでの挙動の確認が鍵

■ この30年、発達したのは・・・

- ・ 複雑な現象を、より忠実に、正確に解く方法
- ・ アルゴリズム、ソルバー、非線形、過渡、詳細モデル、並列計算、マルチフィジックス・・・
- ・ パラメーターが変わると逐次重い計算を実行する必要がある

鍵になるのは計算速度を劇的に向上させる方法!

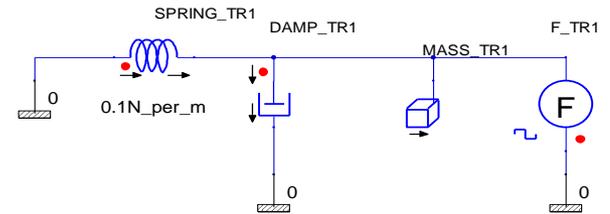
特に連成解析を3D CAEですべて解こうとするには時間が膨大にかかる! また限界もある!

ROMは1D CAE/システムシミュレーション(MBD)における重要技術!

つなぐ技術

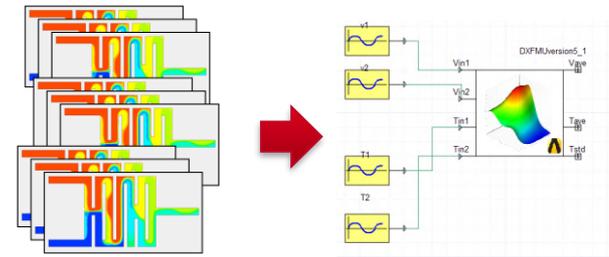
■ 基本：等価モデルで表現

- 理論式（分野を超えて）
- 実験式



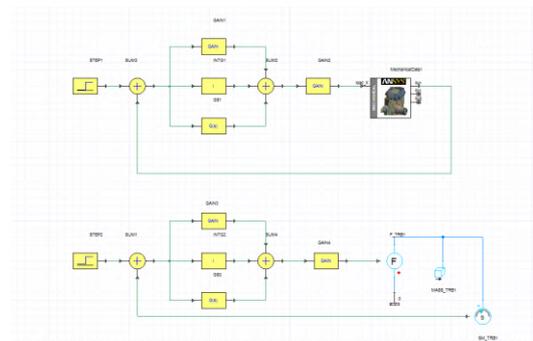
■ 応用：ROM化

- 3D/2Dの解析モデルをシステムに（1D）
- 実測データを1Dに



■ その先へ：幅広いシステムシミュレーション

- 制御等との連携
- 現実との連携
- IoT



1D/システムシミュレーション/ROM による事例紹介

サイバネットシステム株式会社

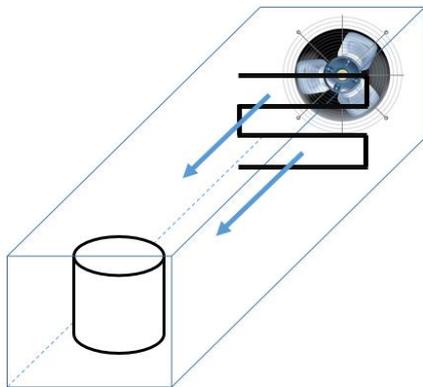


熱回路網法(1D)の事例

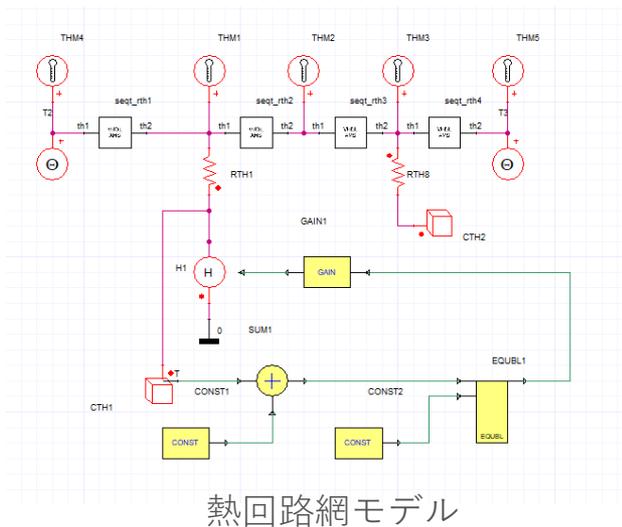
■ 輸送効果を含む熱回路網モデルの事例

▶ 熱風ダクト内に置かれた円筒缶の過熱

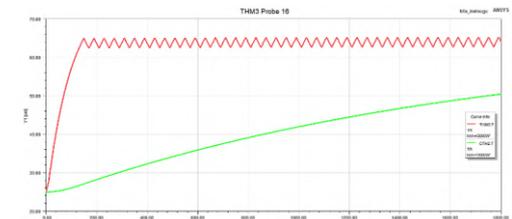
- ヒータ温度が1000°Cを超えると発熱量をOFFにする制御ロジックを入れている
 - 参考資料:熱設計と数値シミュレーション(国峰尚樹+中村篤) オーム社より



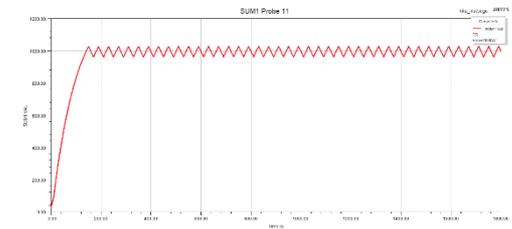
3次元物理モデル



熱回路網モデル



缶と空気の温度結果



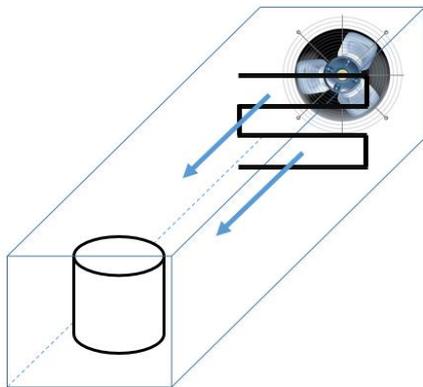
ヒータの温度結果

熱回路網法(1D)の事例

輸送効果を含む熱回路網モデルの事例

▶ 熱風ダクト内に置かれた円筒缶の過熱

- 熱輸送の効果を含んだ熱回路網モデルに組み込む場合の注意点
 - 熱輸送による熱抵抗を考慮する場合に非対称性を入れる



3次元物理モデル



非対称性を
入れた場合には
温度が高くなる

熱伝導の非対称性を考慮しないと
温度が低くなってしまふ

PCボードの基盤の熱分布

ROMの種類

- クリロフ部分空間法
- 伝熱解析のスパースマトリクスから、状態空間モデルを作成

解析モデル/条件

<モデル>

PCボードの基板モデル

<解析条件>

非定常伝熱解析(マトリクス作成)

発熱条件,熱伝達境界条件

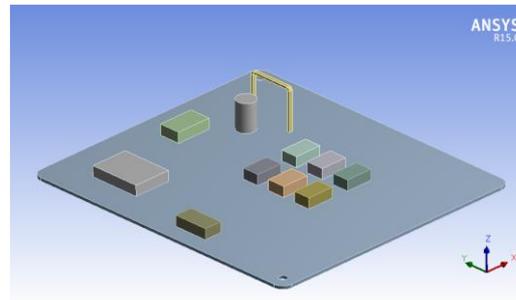
状態空間マトリクス設定

入力点：発熱節点

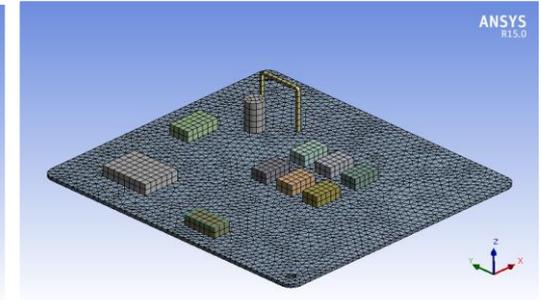
：熱伝達境界節点

出力点：発熱体評価点

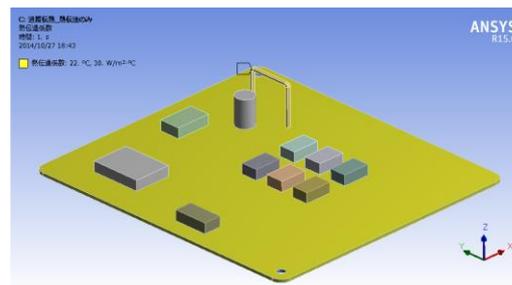
モデル形状



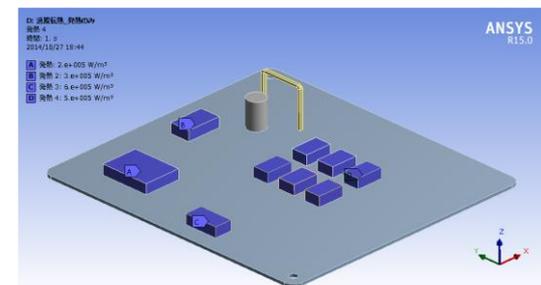
有限要素モデル



熱伝達境界条件

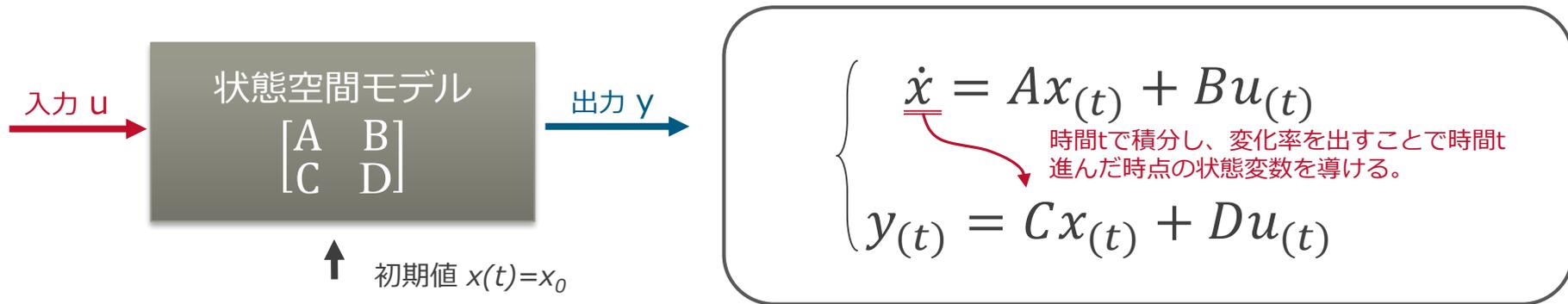


発熱条件



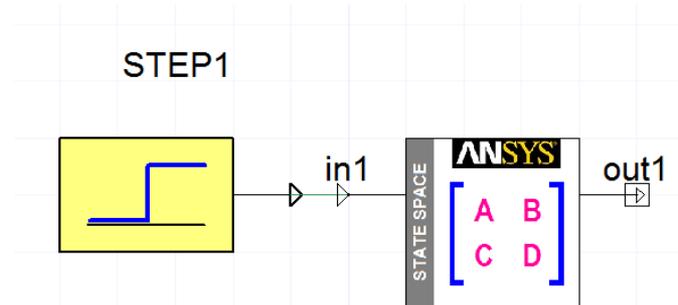
PCボードの基盤の熱分布

■ 状態空間モデルのイメージ



状態空間モデルを作成するツールを利用する。

例えば、Ansysでは APDL Mathからクリロフ部分空間法により、状態空間モデルを出力できる。



PCボードの基盤の熱分布

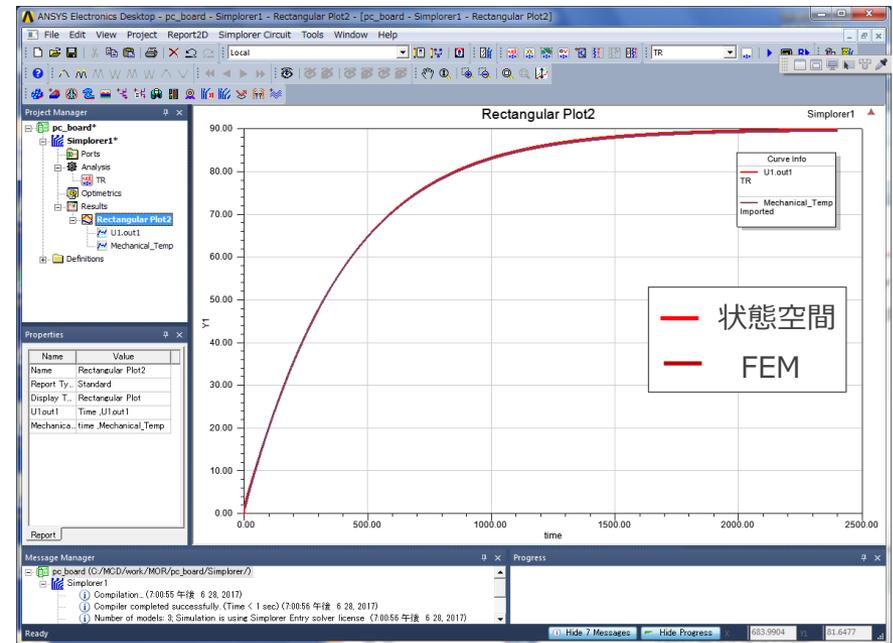
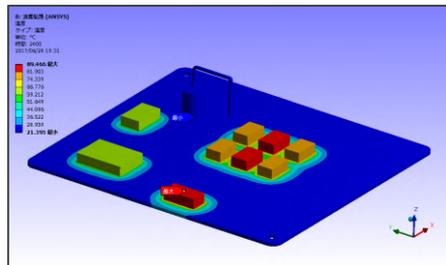
■ FEMとROMの結果比較

- Ansys Mechanical(FEM)とAnsys Twin Builder(1D)の結果比較

- 節点数 :28,944
- 要素数 :13,411
- 自由度数 :28,944
- シミュレーション時間

縮退モデル自由度(6自由度)
解析終了時間：2400秒間(5秒刻み)

MORモデル:0.13sec
FEM Fullモデル:133sec



IPMモーターのROM化

ROMの種類

- ECE (Equivalent Circuit Extraction 等価回路抽出法)
 - FEMの電磁界解析を等価回路モデル (磁気回路モデル) として表現
 - 等価回路モデルのパラメータを解析から抽出

解析モデル/条件

<モデル>

IPMモーター

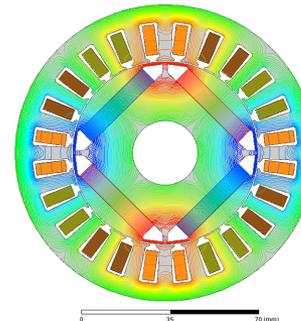
<解析条件>

非線形性を持った、準静的な解析

位置と電流をパラメータにとり、データを抽出



- 位置情報 (角度情報)
- 電流



- インダクタンス (鎖交磁束)
- トルク

メリット / デメリット

- 制御設計やHILSに活用可能
- ヒステリシス効果などは考慮不可
- 現象を細かく (精度をよくする) にはパラメータ抽出用の3D 電磁界解析を多く実施する必要がある

等価回路モデル
磁気回路(二相電圧方程式)

$$\begin{Bmatrix} v_d \\ v_q \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_d \\ i_q \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ \omega\phi_a \end{Bmatrix}$$

モータトルク

$$T = \frac{3}{2} p(\psi_d i_q - \psi_q i_d)$$

回転一自由度系の運動方程式

$$J \frac{d\omega}{dt} = T$$

$$\psi_q = \text{map}_1(i_q \ i_d \ \theta_m)$$

$$\psi_d = \text{map}_2(i_q \ i_d \ \theta_m)$$

$$\text{Torque} = \text{map}_3(i_q \ i_d \ \theta_m)$$

ソレノイドアクチュエーターのシステム

ROMの種類

- ECE (Equivalent Circuit Extraction 等価回路抽出法)
 - FEMの電磁界解析を等価回路モデル (磁気回路モデル) として表現
 - 等価回路モデルのパラメータを解析から抽出

解析モデル/条件

〈モデル〉

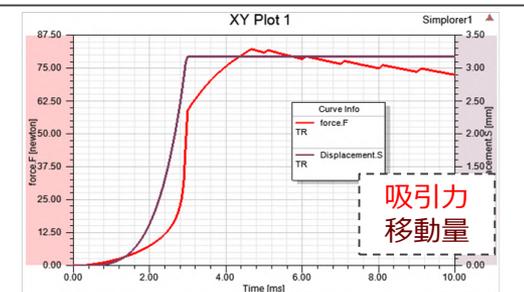
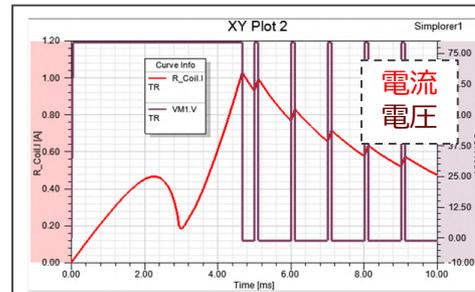
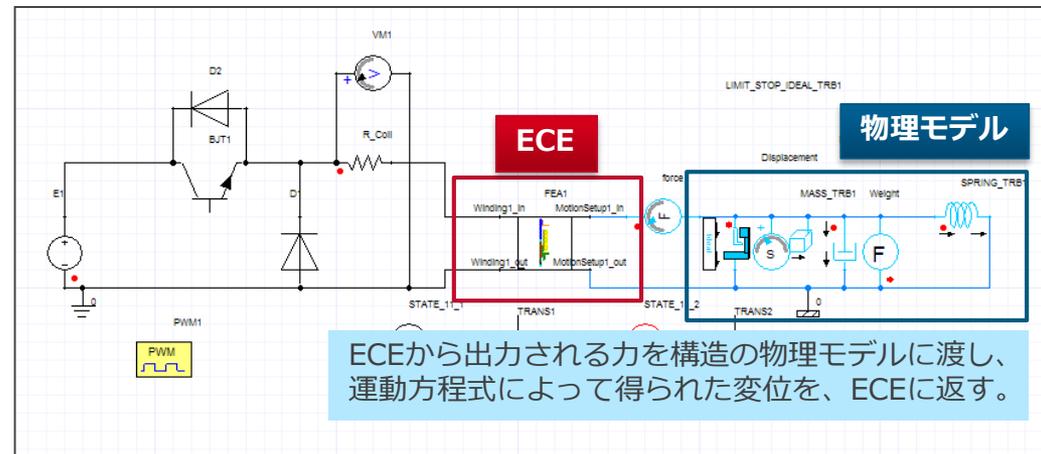
ソレノイドアクチュエータ (2D軸対称)

〈解析条件〉

非線形性を持った、準静的な解析
位置と電流を入力パラメータにとり、
力と逆起電力を出力パラメータにとる

メリット / デメリット

- 制御設計やHILSに活用可能
- ヒステリシス効果などは考慮不可
- 現象を細かく(精度をよくする)にはパラメータ抽出用の3D電磁界解析を多く実施する必要がある

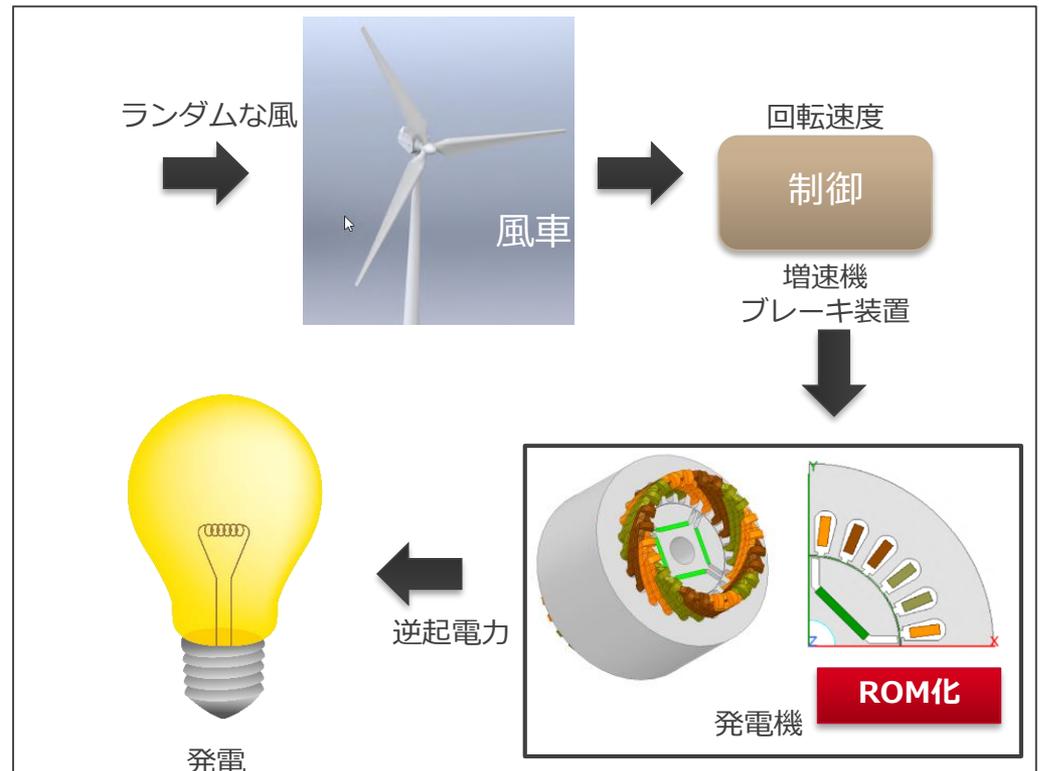
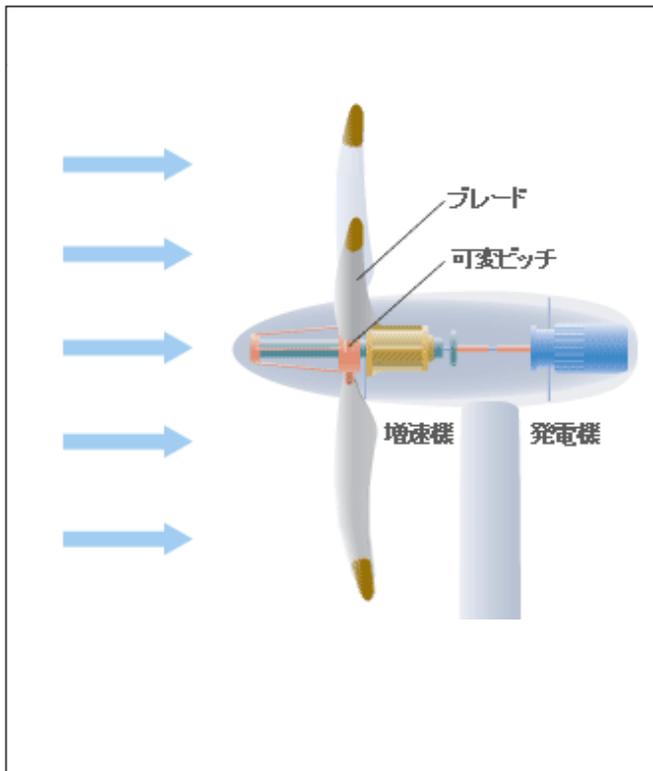


発電機のシステム

■ ROMの種類

- Dynamic ROM(ECE利用不可)

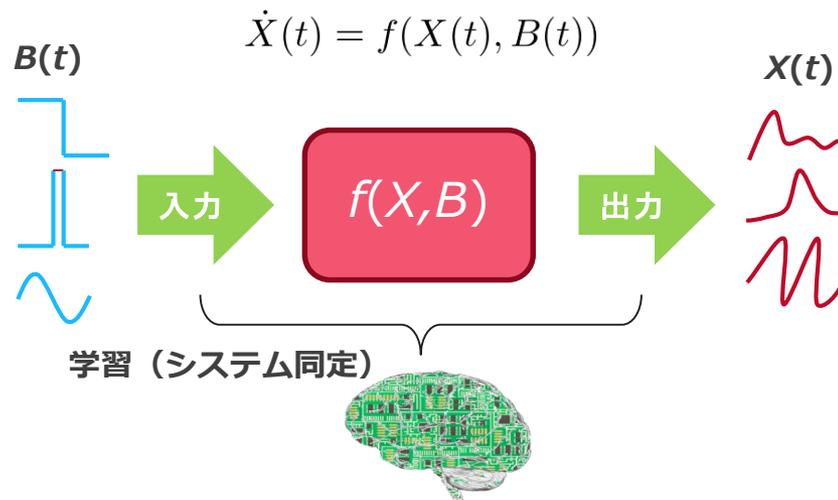
■ 概要



発電機のシステム

■ Dynamic ROM

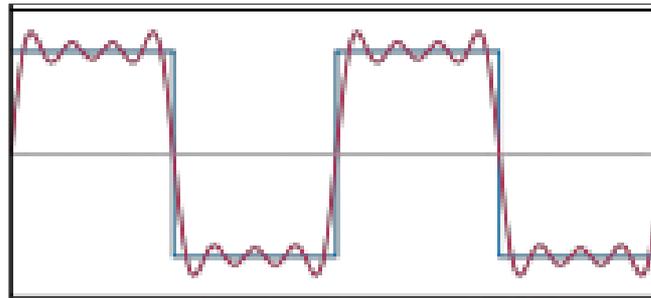
- システムへの様々な入力に対する応答をディープラーニングによって学習し、元のシステムと同じ挙動を再現するモデルを作成します。
- 入出力関係が線形なシステムだけでなく、非線形なシステムでも学習可能です。
- 例題3のStatic ROMと異なり、解析のデータだけでなく実際の実測のデータを使用してROM化させることも可能です。



発電機のシステム

■ Dynamic ROMをROM化するイメージ

- 現象を前述したとおり、Dynamic ROMはディープラーニングによって、重ね合わせ係数を導きます。そのため、複数の異なる入力パターンで解析を実施します。実際と同じ入力である必要はない。
 - 例えば、以下のように、ステップ上の入力値を解析する。



矩形波には数多くの周波数の成分が含まれているため

- 実際の現象に含まれてる応答を入力し、ディープラーニングによってROMを作成する。

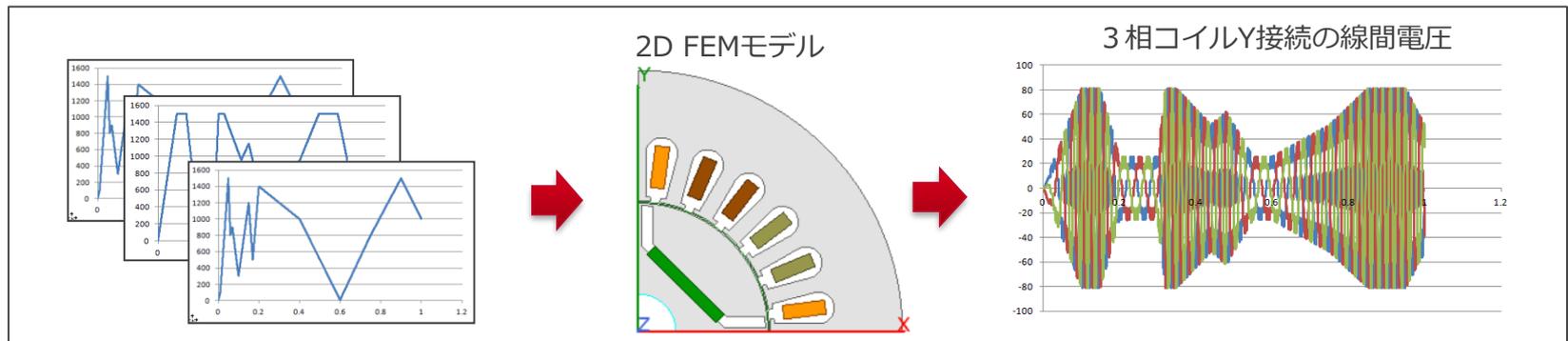


※ 最大のメリットは、時間vs入力のテーブルを複数学習させるため、実験等のデータを学習させてもROM化可能

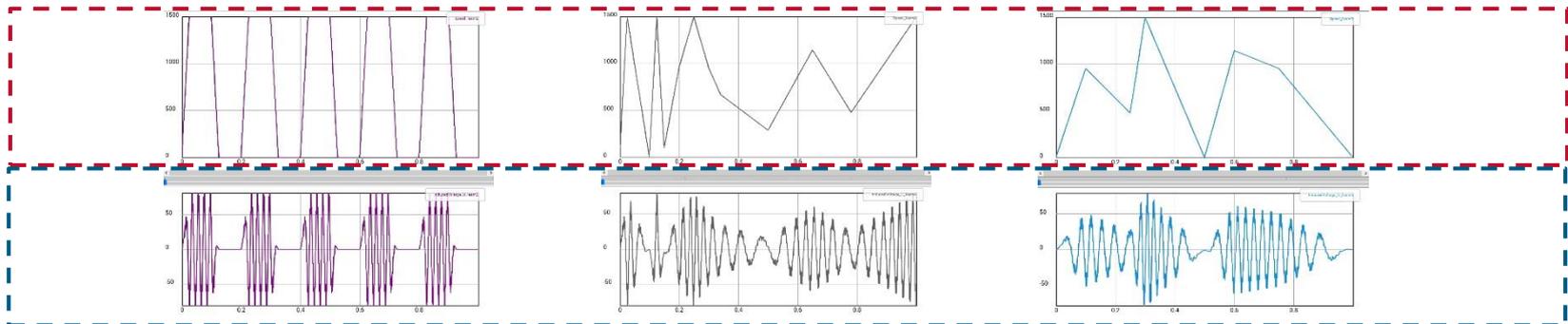
発電機のシステム

■ 発電機のROM化

- 複数パターンの回転数の変化を解析する。
- 解析時間 1 ケース、解析終了時間1sec、約1.5時間



入力：回転速度

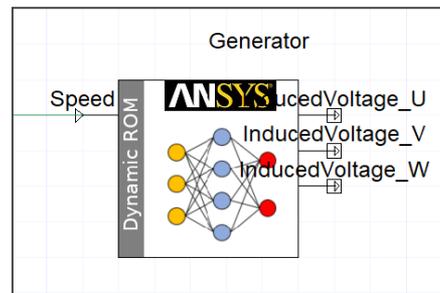


出力：Y接続の1つの線間電圧

発電機のシステム

■ 発電機のROM化

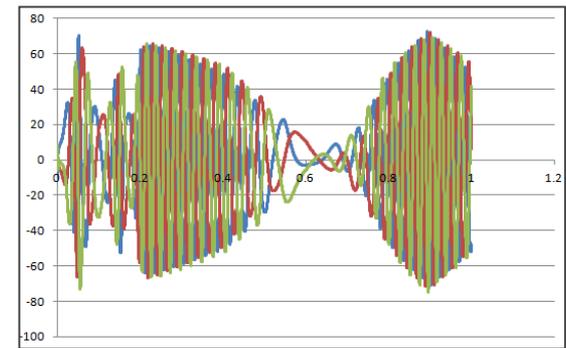
- 複数パターンのディープラーニングにより次のROMが作成される。



- ROMでFEMと同様の解析を実施すると、

Time=1[s]までの解析時間 4sec

3相コイルY接続の線間電圧



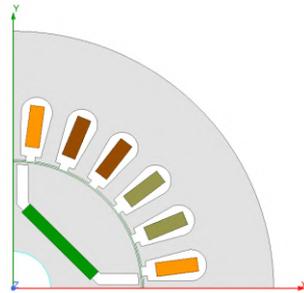
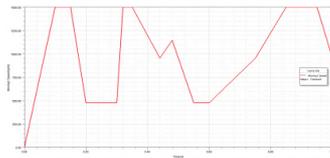
発電機のシステム

■ 発電機のROM化

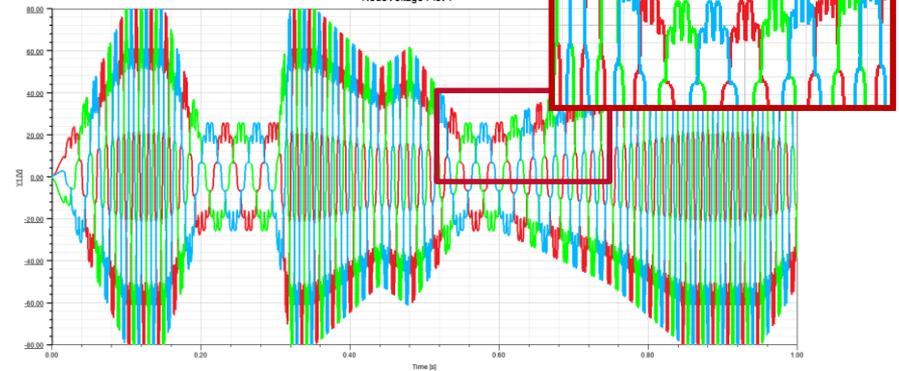
- FEMとROMの結果比較

FEM

回転速度

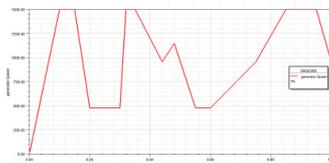


3相コイルY接続の線間電圧

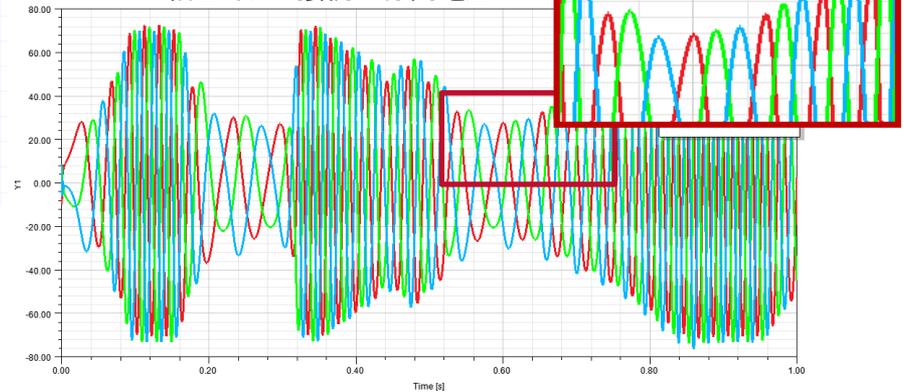


ROM

回転速度



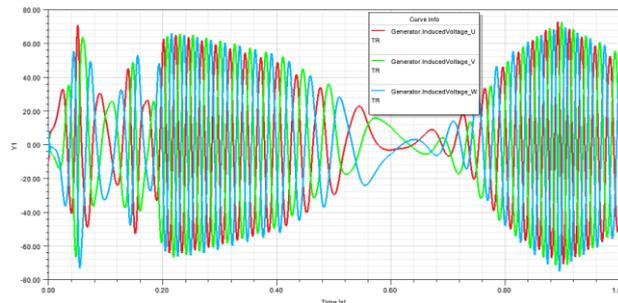
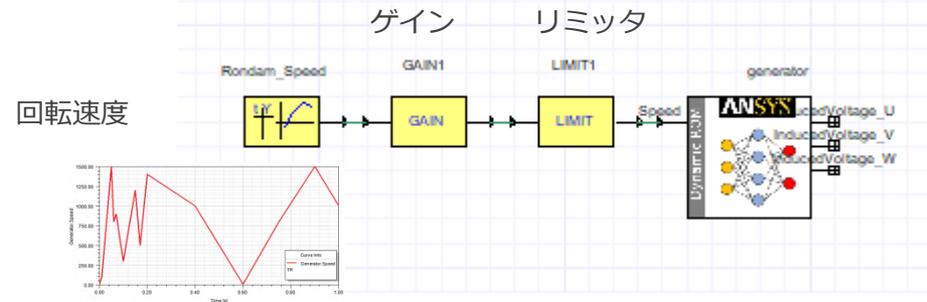
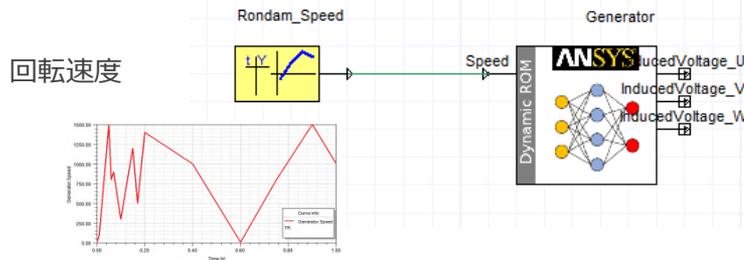
3相コイルY接続の線間電圧



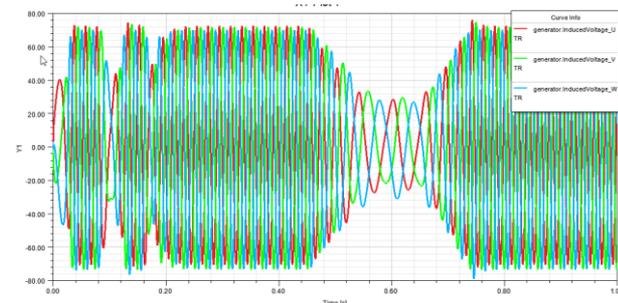
発電機のシステム

Dynamic ROMのメリット

- 非線形特性（BHカーブ）を考慮可能
- 一旦学習させたROMを使用すれば、最速の解析時間
- 制御を含む解析が可能



3相コイルY接続の線間電圧



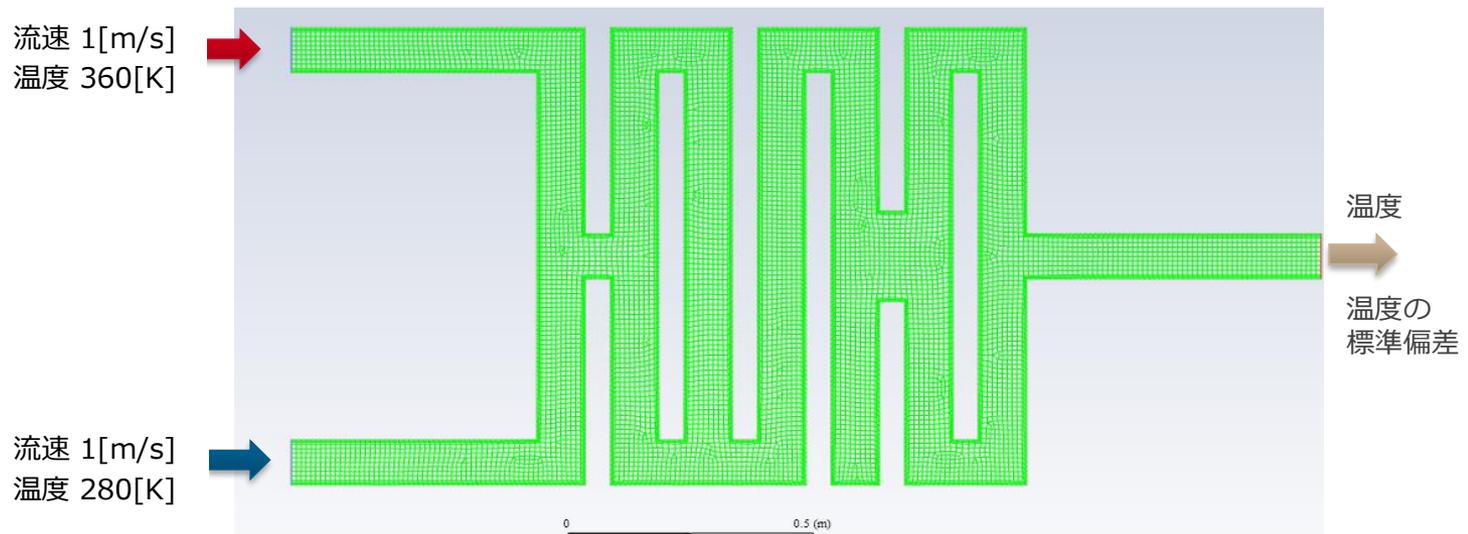
3相コイルY接続の線間電圧

ミキサーのシステム

■ ROMの種類：Static ROM or DX ROM

■ 概要

- 2つの入口から異なる温度の流体(水)を流す
 - ✓ 入口の温度・速度を変化させながら出口での温度と温度の分散を見る
 - ✓ input parameter : 各入り口の速度、温度(計4つ)
 - ✓ output parameter : 出口温度、出口温度の標準偏差



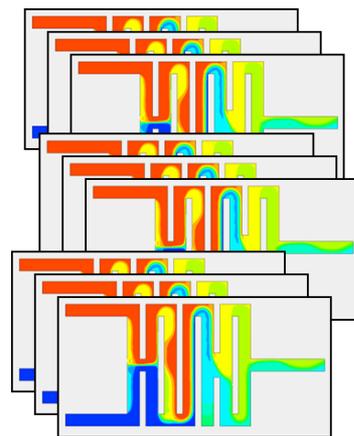
ミキサーのシステム

■ Static ROM / DX ROMのイメージ

- 時間に依存することなく、解析の変数をパラメトリック解析し、そこで得られた応答曲面を利用して、ROM化する。

■ Static ROM (DX ROM) の流れ

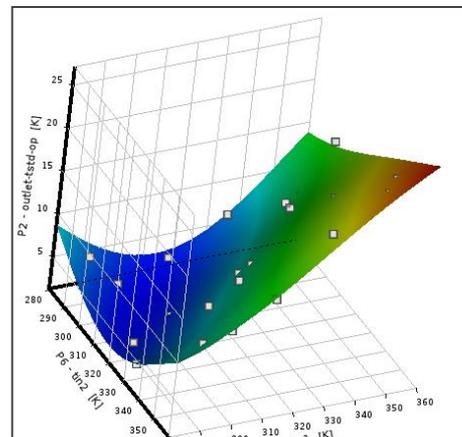
DXによるパラメトリック解析



応答曲面化



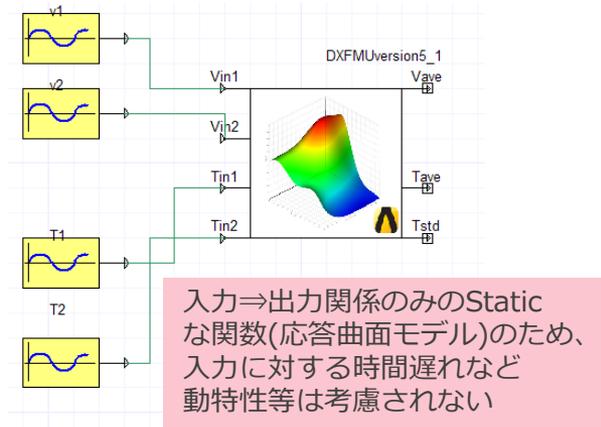
応答曲面モデル



1D化



システムシミュレーションに使用



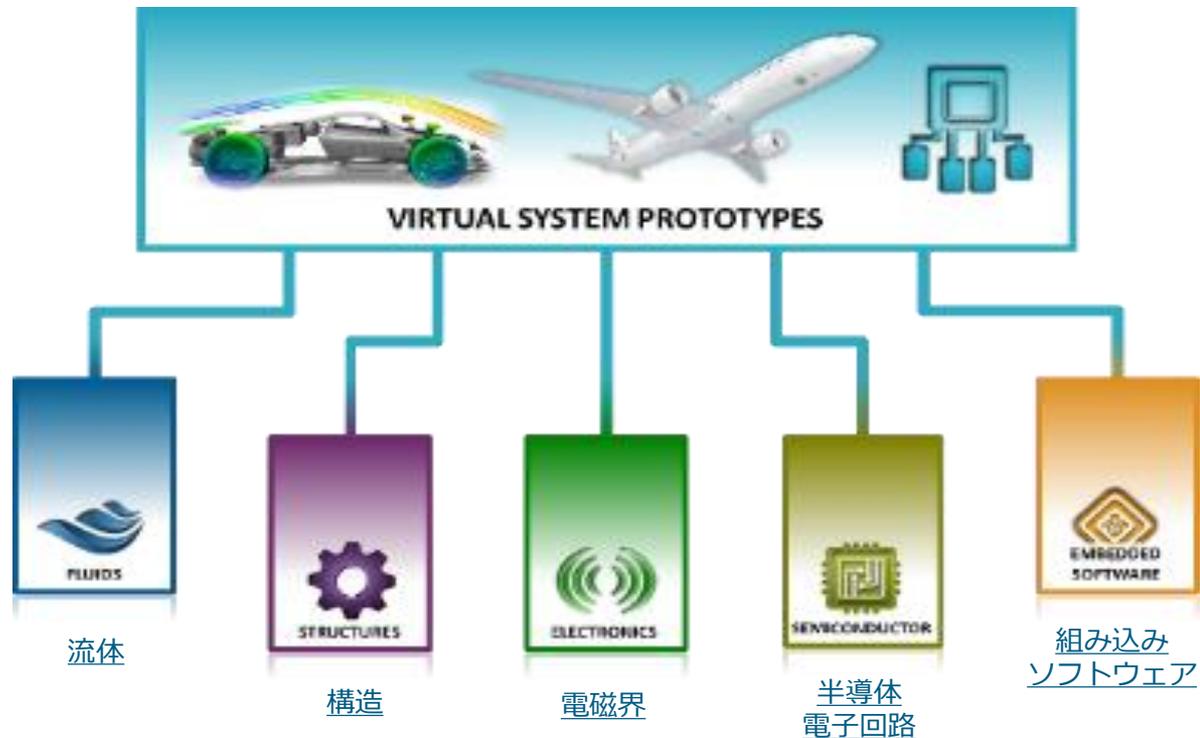
製品紹介：Ansys Twin Builder

サイバネットシステム株式会社



製品紹介 : Ansys Twin Builder

- 回路、制御、電磁界、構造、流体、熱のマルチドメインシミュレータ
- Ansys システムシミュレーション統合環境(仮想プロトタイプ開発環境)



製品紹介 : Ansys Twin Builder

システムシミュレーション環境 ANSYS Twin Builder

ANSYS Simplorerの進化形

Multi modeling Language

Digital Twin



- 制御/流体/電気・電磁界/構造など様々なANSYS CAEツール群のデータを直接利用可
- 1Dの速度と3Dの精度を両立するROM(縮退モデル)技術により、高精度&高速シミュレーションを実現
- プラントモデルとの因果系 / 非因果系接続の両方に対応 (エネルギー保存則を考慮)

- IoTプラットフォームとの接続やRuntimeモデルの生成(エクスポート機能)

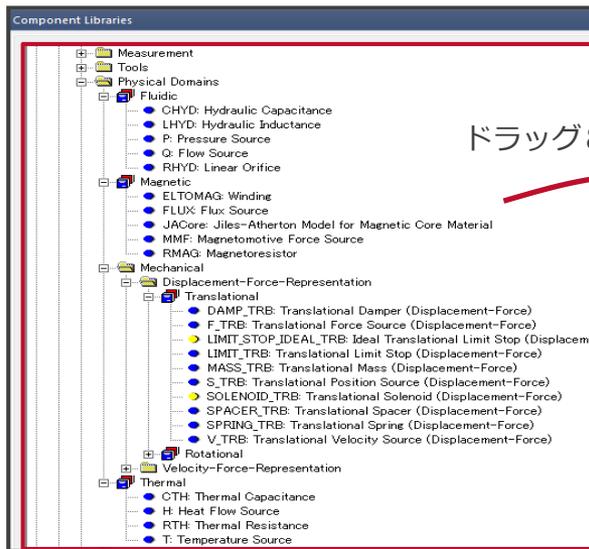
Reduced Order Modeling(ROM)



製品紹介：Ansys Twin Builder

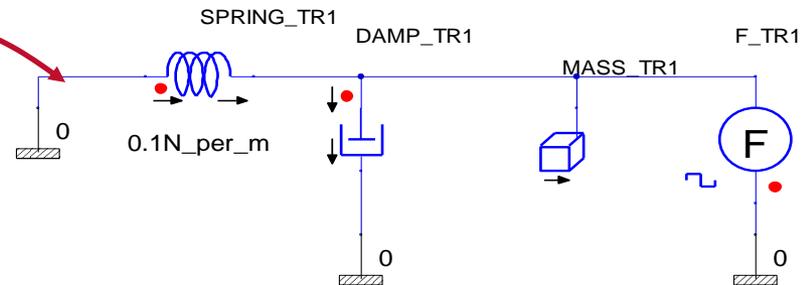
- 電磁界・構造・流体・熱解析に必要な要素を1Dコンポーネントとして扱うことが可能

コンポーネント一覧



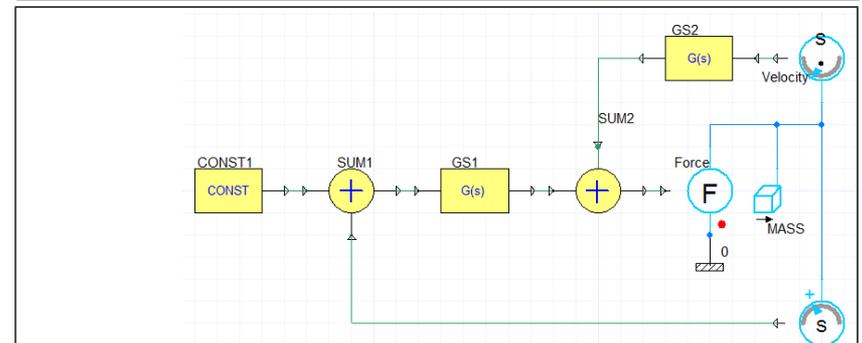
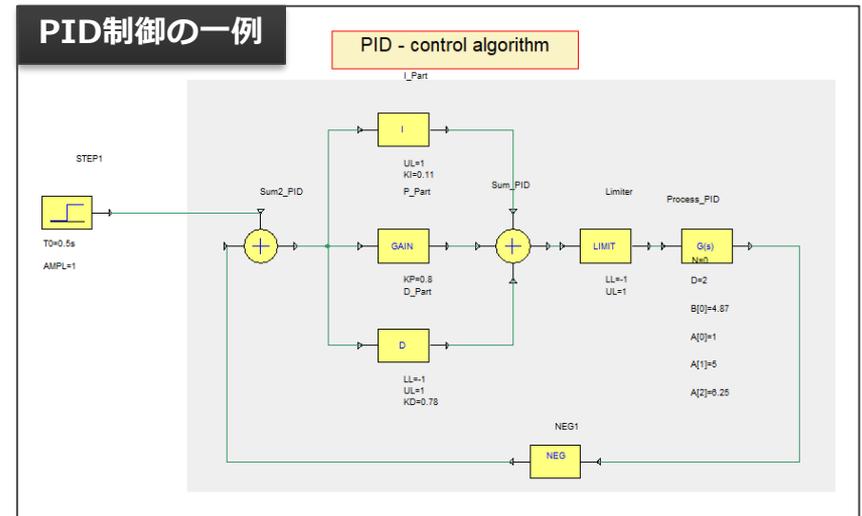
ドラッグ&ドロップ

バネ・マス系モデル一例



製品紹介 : Ansys Twin Builder

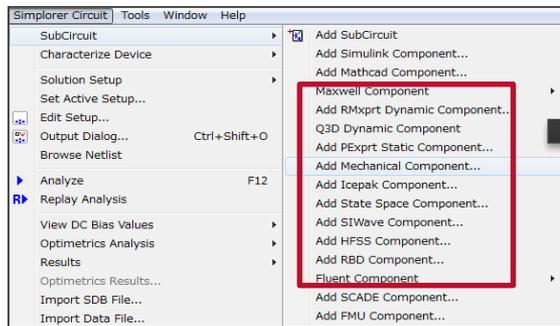
- 制御系のコントローラーも一般的なものは取り扱い可能
- 物理モデルとの連携も容易



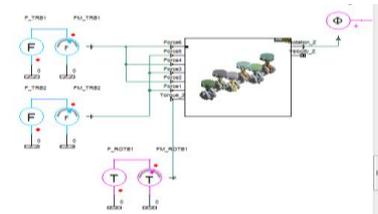
製品紹介：Ansys Twin Builder

■ Ansys 電磁界・構造・流体・熱ツールとの連成解析が可能

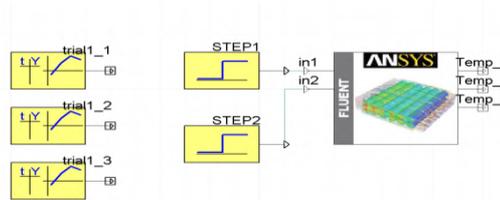
インポートモデル一覧



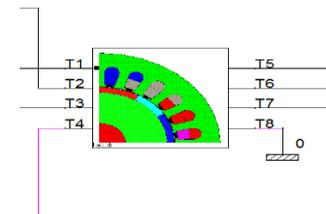
機構解析連成(Rigid Dynamics)



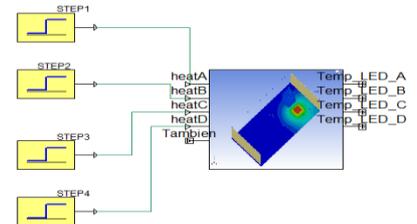
流体解析連成(Fluent)



電磁場解析連成(Maxwell)



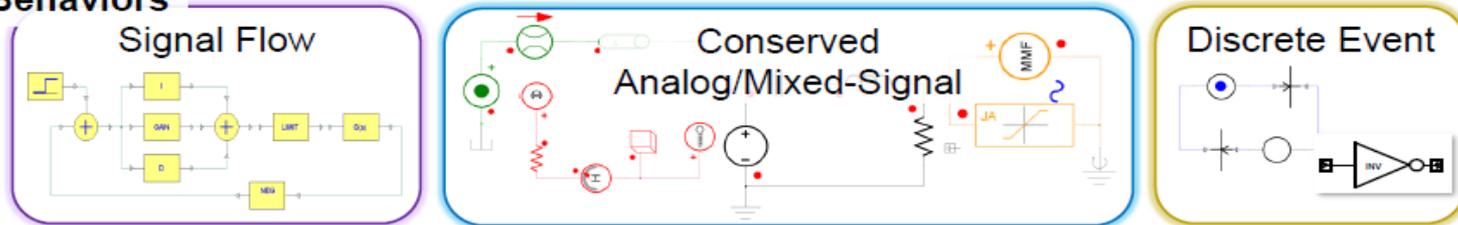
流体解析連成(Icepak)



製品紹介 : Ansys Twin Builder

■ 各種言語に対応

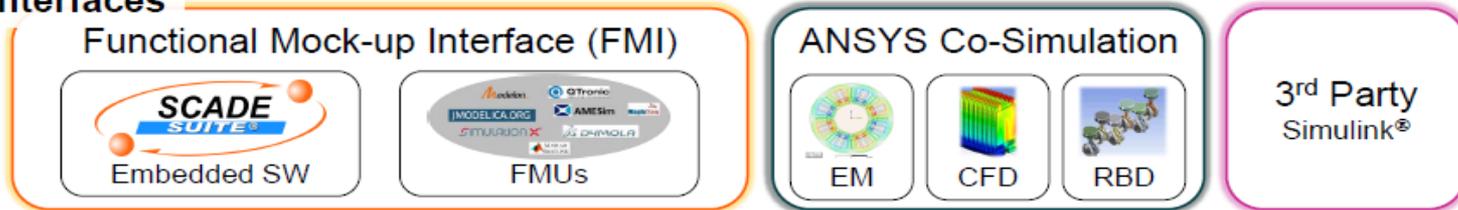
Behaviors



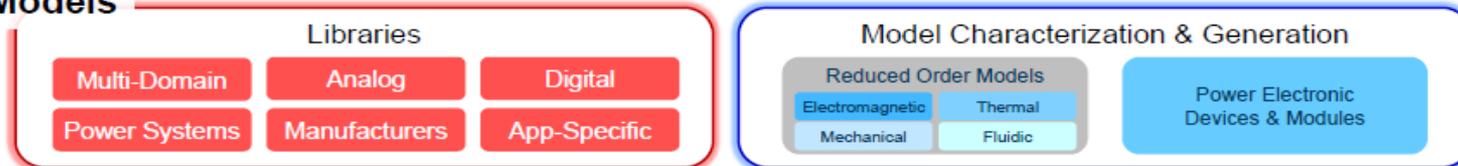
Languages



Interfaces



Models



製品紹介：Ansys Twin Builder

■ Twin Builderの主な機能

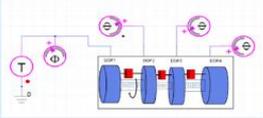
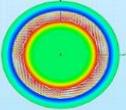
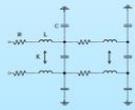
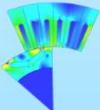
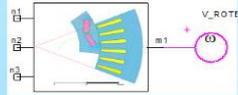
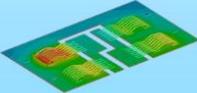
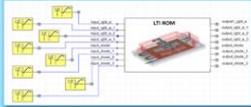
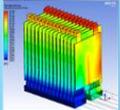
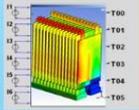
- 電磁界・構造・流体・熱解析系の1Dコンポーネント
- 多彩なモデル表現(モデリング言語による表現機能)
- パワーエレクトロニクス向け回路シミュレータ
 - 電気回路の設計
 - 制御システムの設計
 - 物理モデルの設計

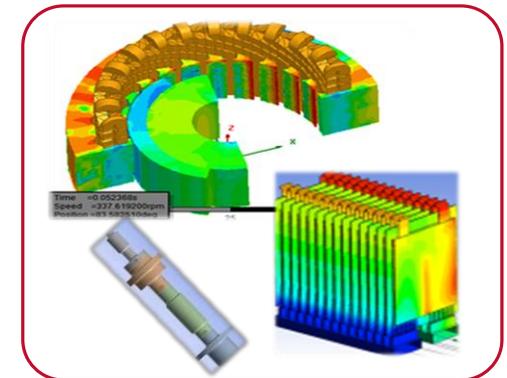
- **1D-3D 連携機能Co-Sim/ROM機能**
 - Co-Sim/ROM機能
- **IoTプラットフォーム対応(Digital Twin用機能)**
 - Runtime Model Generator

従来機能から
差別化される機能

製品紹介 : Ansys Twin Builder

■ モデル縮退技術 (ROM化)

Mechanical		→	
Electrical		→	
Electromagnetic		→	
Thermal		→	
Fluid		→	



3D 物理モデルを
システムシミュレーション
に変換

Ansys のROM(Reduced Order Modeling)技術

- 3Dシミュレーション結果をシステムレベルで使用可能なモデルに変換
- 特性に重要な精度は維持
- 3D CAEのモデルを用いるより短時間でシミュレーションを完了
- モデルをシステム統合して検証に活用する際に効果を発揮

CYBERNET

サイバネットシステム株式会社

e-mail : anssales@cybernet.co.jp

web : <http://www.cybernet.co.jp/ansys/>

東 京 : (03) 5297-3081

名古屋 : (052) 219-5190

大 阪 : (06) 6267-2640