

車載用モータの熱設計に関する MATLAB/Simscapeの適用事例

三菱電機株式会社

三菱電機株式会社
先端技術総合研究所
熱流体システム技術部
冷却技術グループ
木本 裕輔
2021.6.11

目 次

01 会社紹介

02 背景と課題

03 取り組み内容

- ・熱モデル

- ・その他解析事例

04 まとめ

01 会社紹介

02 背景と課題

03 取り組み内容

- ・熱モデル
- ・その他解析事例

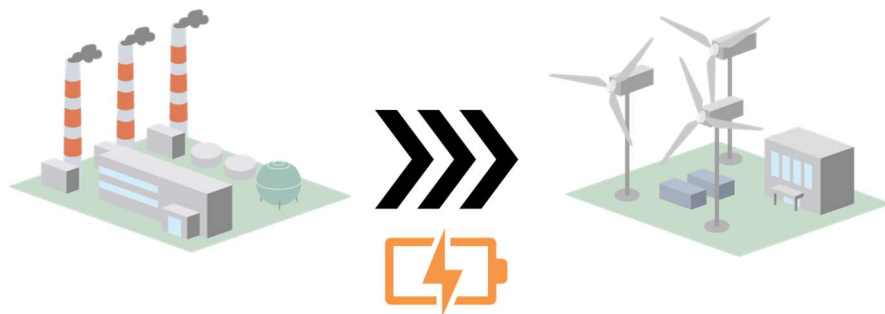
04 まとめ

社会情勢

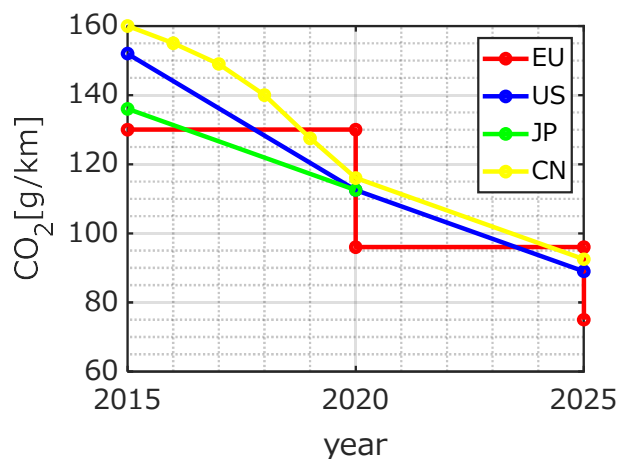
- 世界的なカーボンニュートラルの動きによりCO₂排出規制の更なる強化も予測、各社電動化での対応が必須
- コロナにより一時的に新車販売台数は低下するも電動車両の比率は、今後、加速度的な増加を予測

脱炭素化に向けた各国の取り組み

-  欧州：2050年カーボンニュートラル
予算規模220兆円のうち37%を
気候変動関連で執行予定
-  中国：2060年カーボンニュートラル
世界最大の新エネルギー車(NEV)市場
-  米国：電気自動車市場への11兆円規模の
インフラ投資を表明
-  日本：2050年カーボンニュートラル宣言

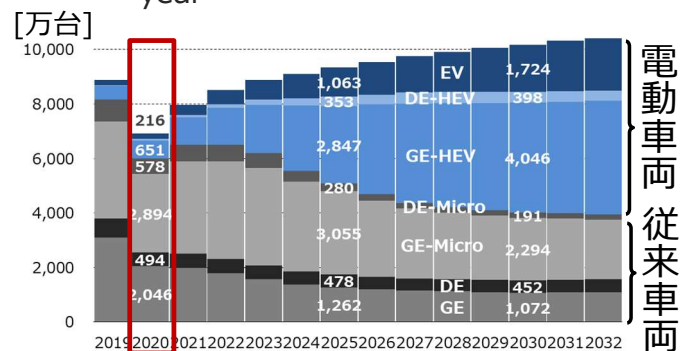


主要国CO₂排出規制推移



燃費・排出規制一覧

欧州	95g/km(2021年)
中国	1L/20kg(2020年)
米国	90g/km(2025年)



出典: 2020/4 IHS Markit



車載用駆動モータの概況

- 従来よりも機器構成が複雑化し、冷却方式も各人各様(空冷、水冷、油冷)
- 多様な駆動方式(P0～P4)に対して柔軟かつ迅速に対応できる設計能力が必須
⇒品質作り込みのため上流工程で熱を含めた問題点(課題)を顕在化させる事が重要

駆動方式(P0～P4)

P0	エンジンベルト駆動(BSG)
P1	モータ機能付き発電機(ISG)
P2	エンジン出力軸直直結(CMG)
P2.5	変速機内モータ
P3	変速機下流側モータ
P4、EV	エンジン独立モータ

Mild HV

Strong HV

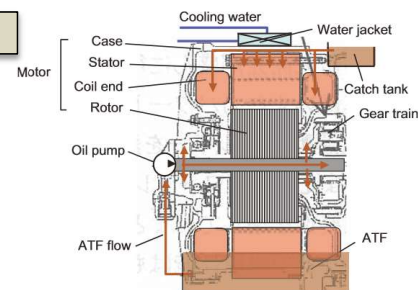
各種の冷却方式



空冷モータ



水冷モータ



油冷モータ

<https://newsroom.porsche.com/en/products/taycan/powertrain-18555.html>

「ハイブリッド電気自動車(HEV)のATFを用いたモータ冷却構造の熱解析」
デンソーテクニカルレビュー-Vo.13

エンジン排熱の影響

ギアからの入熱の影響

駆動方式の概要図

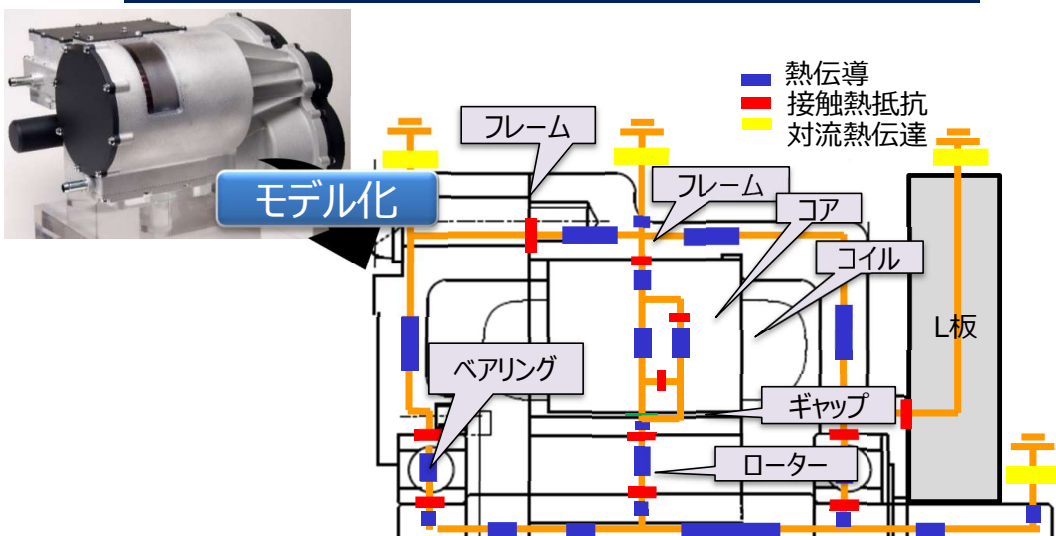
出典: https://electrification.magna.com/wp-content/uploads/2017/11/A_MPT_eDrive_Brochure_EN_221117.pdf

© Mitsubishi Electric Corporation

従来のモータ熱設計の課題

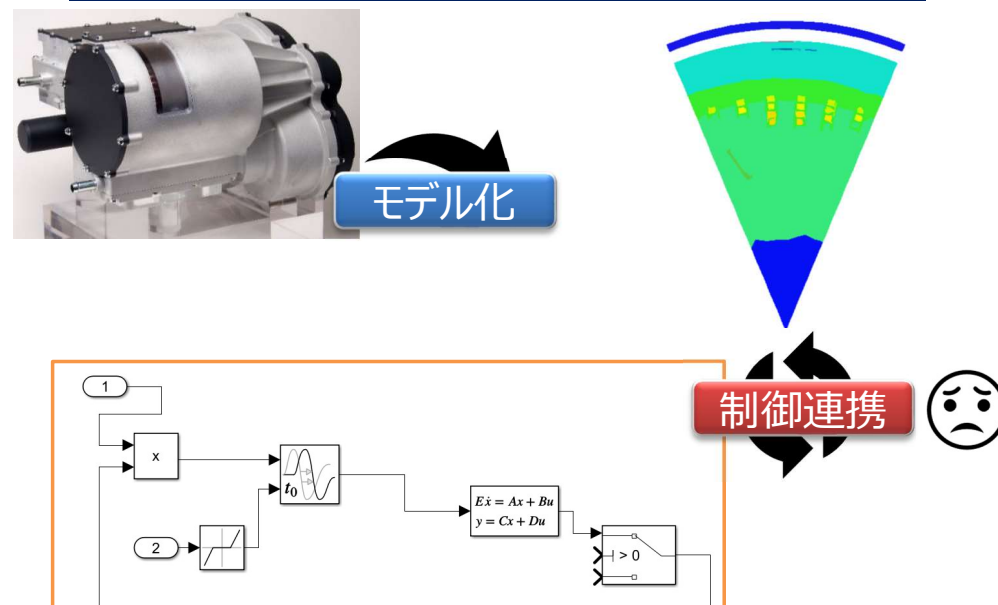
- 従来、Excelによる熱回路計算と3D熱解析による熱設計を実施
- 形状や仕様変更が生じた際にモデルの再構築に時間を要し、迅速な仕様回答が困難
- 汎用性に欠け制御や電磁気との連携が困難

Excelによる熱回路計算



- ✓ モデル変更に柔軟に対応不可
- ✓ 汎用性・可読性が欠如

3D熱解析による熱設計

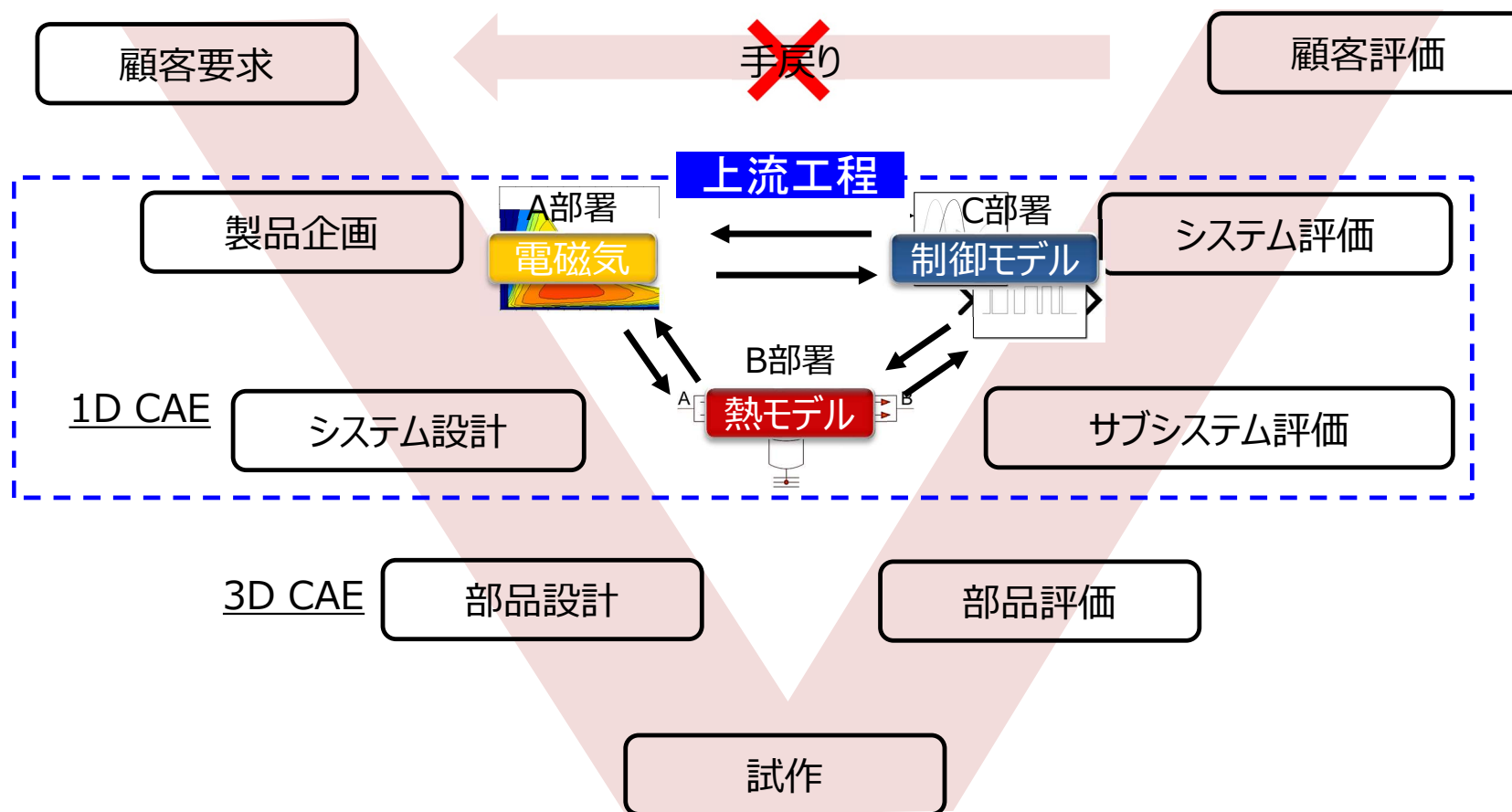


- ✓ 複数条件の結果を短時間で得られない。
- ✓ 技術資産(制御モデル)を活かし切れない

汎用性高/可読性高/制御連携可能なSimscapeを選択

目指すべき理想形

- 上流工程のサイクルを充実化させることで手戻りによる開発遅延を抑制
- 上流工程のほとんどをMatlab/Simulink、Simscapeで評価でき、関連部署とシームレスに連携した開発の遂行が可能



01 会社紹介

02 背景と課題

03 取り組み内容

・**熱モデル**

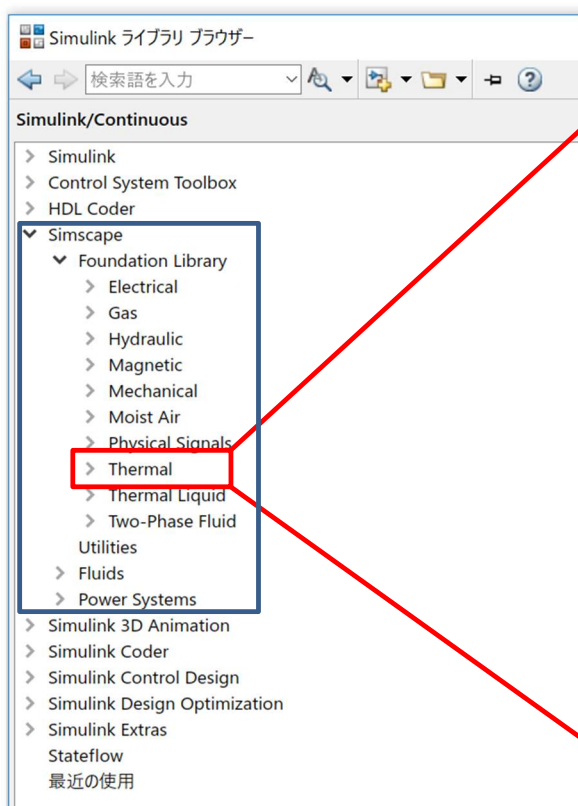
・その他解析事例

04 まとめ

Simscapeの熱ブロック

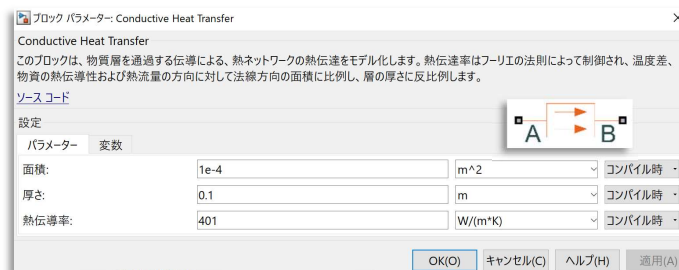
- 目的に応じた物理量を記述するブロックが標準で用意
- ブロックを接続するだけで物理量(熱量)を熱抵抗に応じて双方向にやりとりし温度計算が可能

Simscapeブロックライブラリ

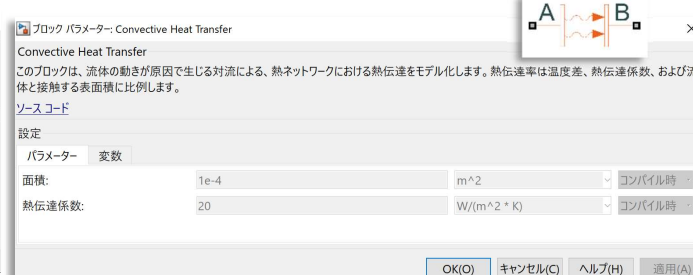


代表的な熱ブロック

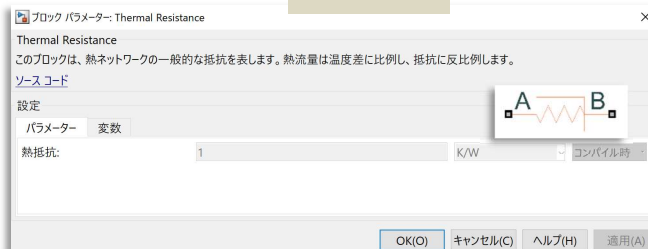
直行座標系熱伝導



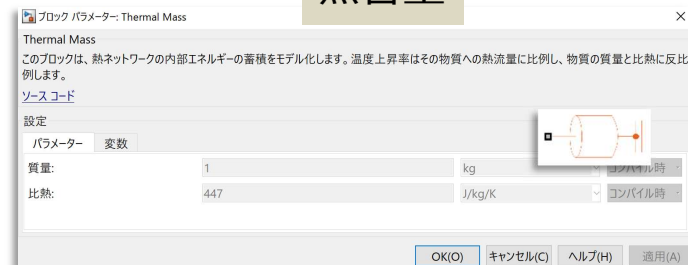
対流熱伝達



熱抵抗



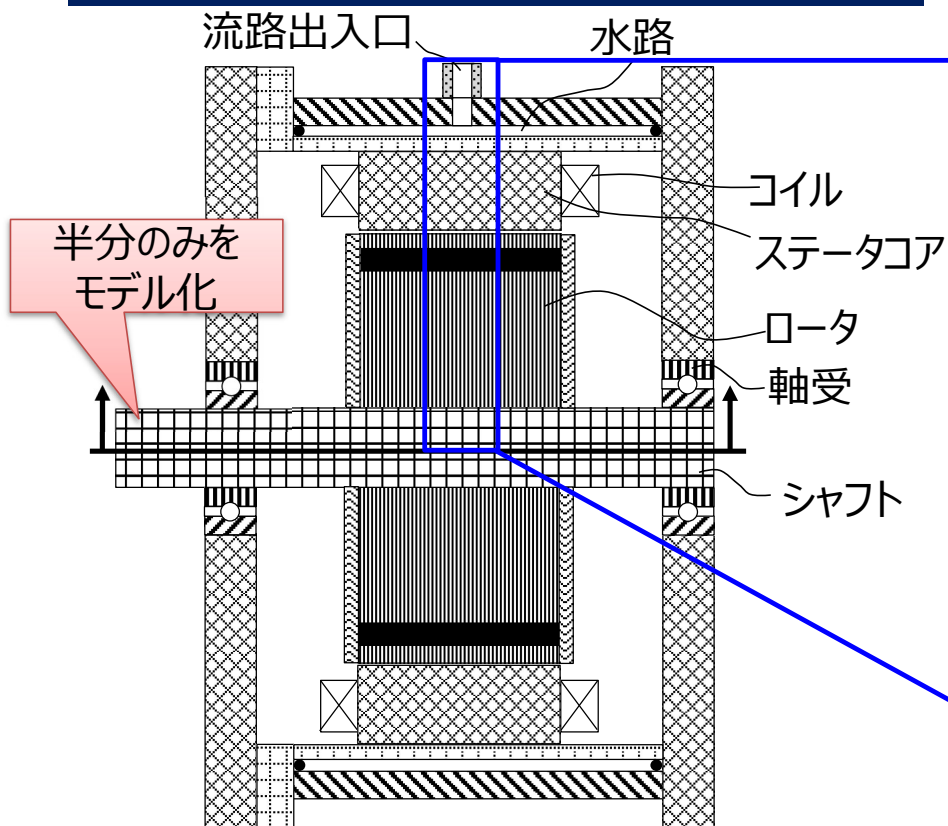
熱容量



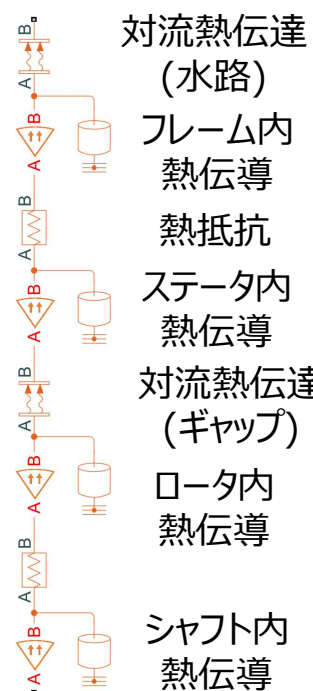
水冷モータの熱モデル

- モータは軸対称のため半分のみを熱モデル化
- カスタムコンポーネント機能を活用し、円筒座標系の熱伝導モジュールを作成
⇒ライブラリにブロックが無くて必要に応じてオリジナルのブロックを作成可能

水冷モータ



熱モデルの一例

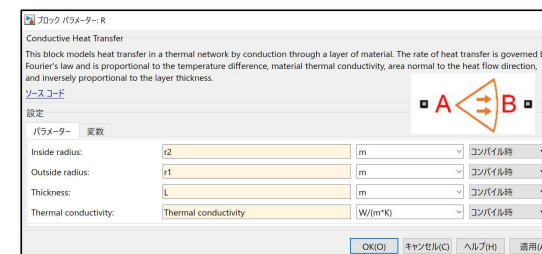


円筒座標系が都合が良い...

円筒座標系熱抵抗

$$R = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L \lambda}$$

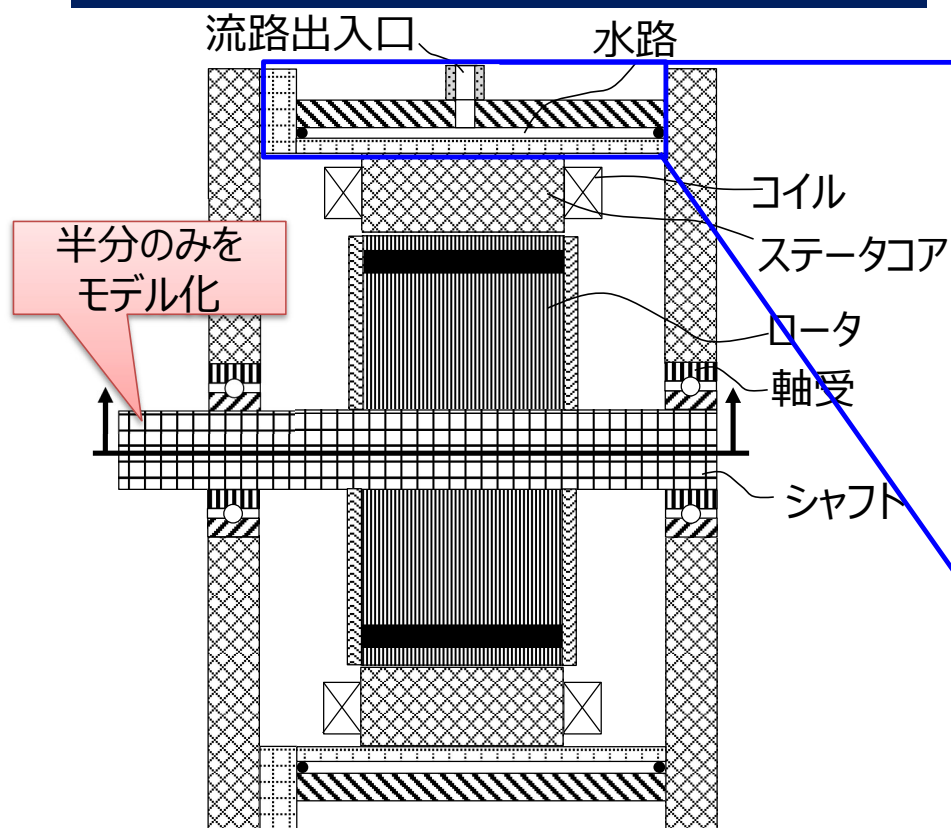
カスタムコンポーネント機能



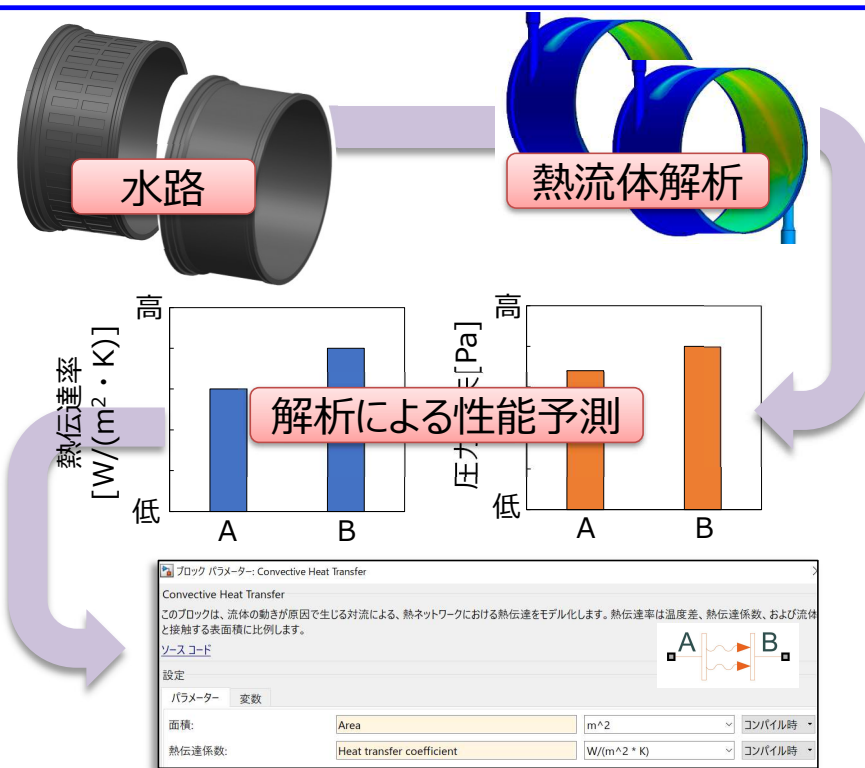
水冷モータの熱モデル

- 水路のみの3D解析であれば、解析負荷が小さく容易に事前評価が可能
- 水路の性能(熱伝達率、圧力損失)を予め評価し、Simscapeの熱モデルにおける境界条件として使用

水冷モータ



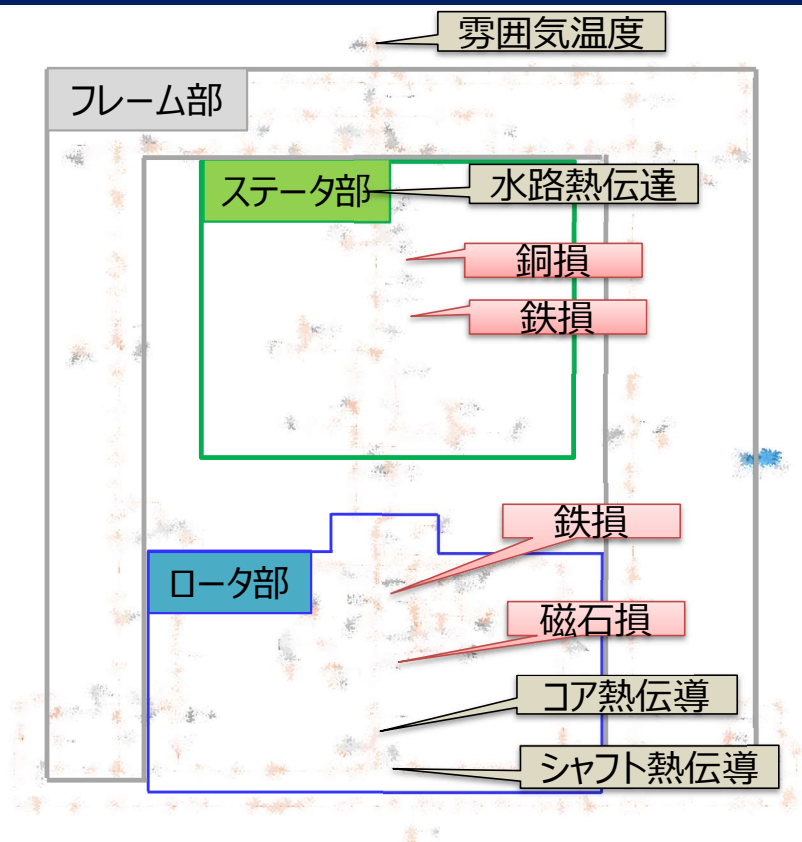
対流熱伝達の予測



熱モデルと実測値の比較(評価条件)

- 構成要素毎に発熱(銅損、ステータ/ロータ鉄損、磁石損etc)を分布として付与
- 連続定格(中回転)時の飽和温度と過渡運転(高回転)時を条件として選定
- 発熱量割合が変化する条件を評価対象とすることでモデルの妥当性を検証

熱モデル



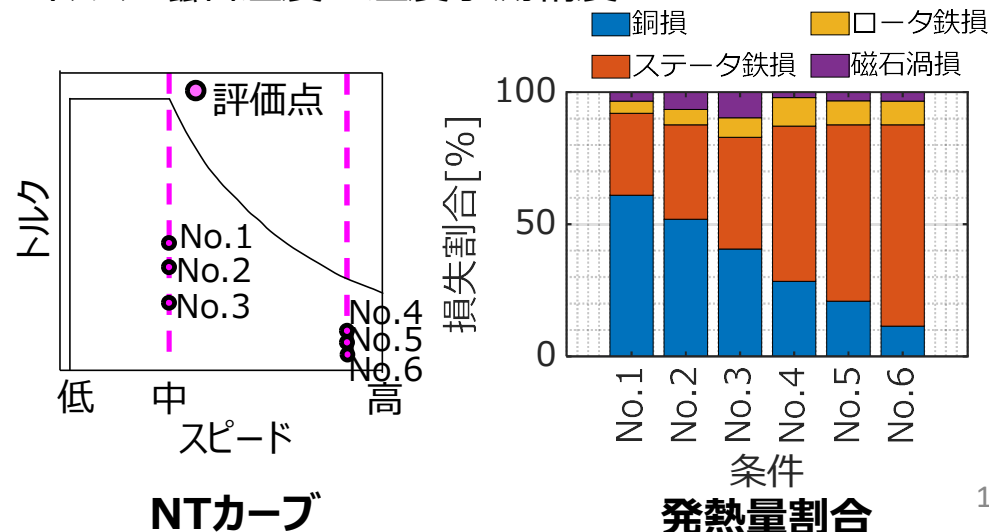
評価条件および目標値

<熱評価項目>

- ①連続定格(中回転) No.1~No.3
- ②過渡運転(高回転) No.3~No.6

<目標値>

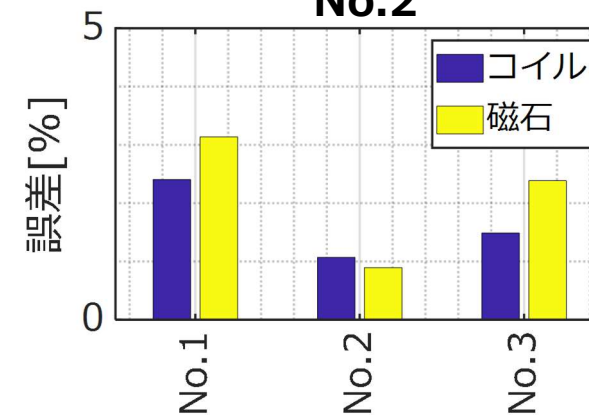
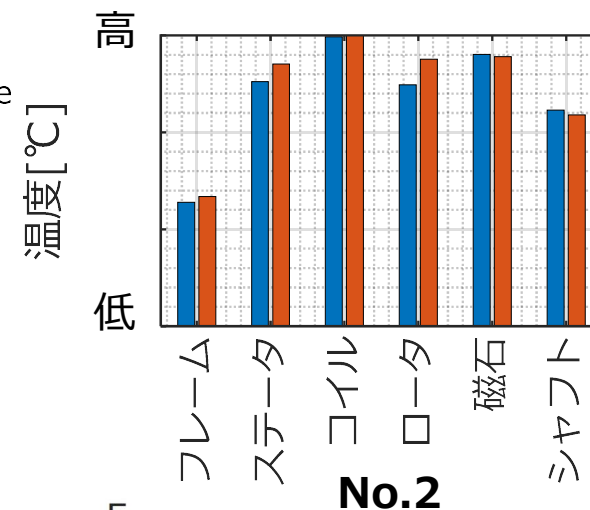
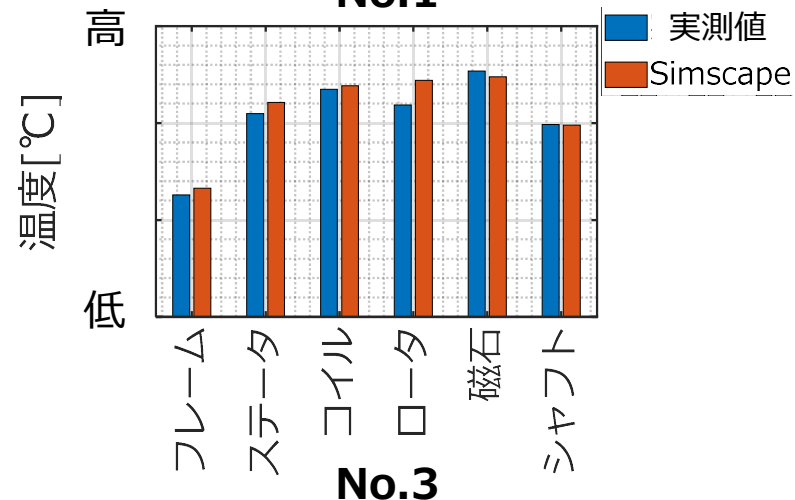
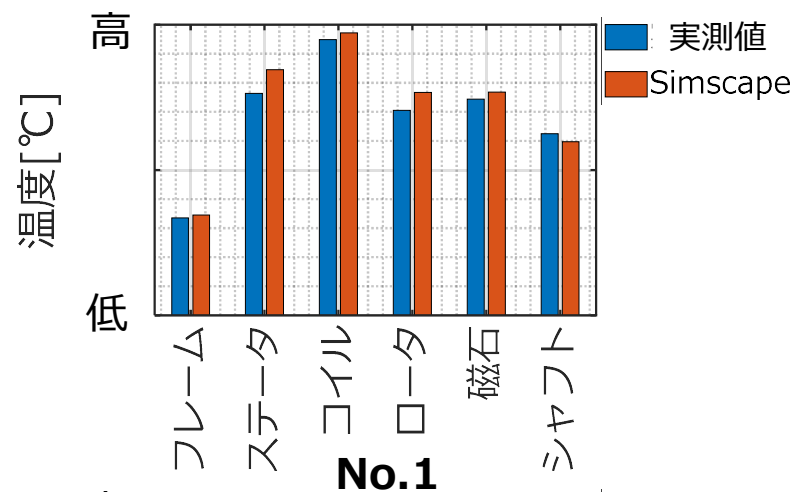
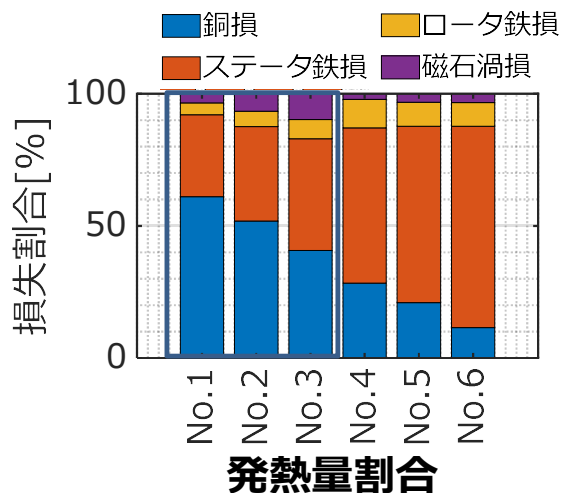
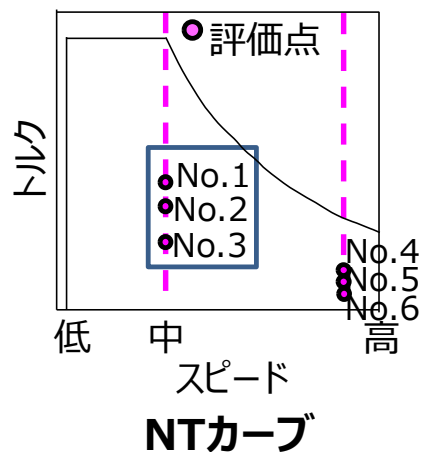
コイル、磁石温度の温度予測精度15%



発熱量割合

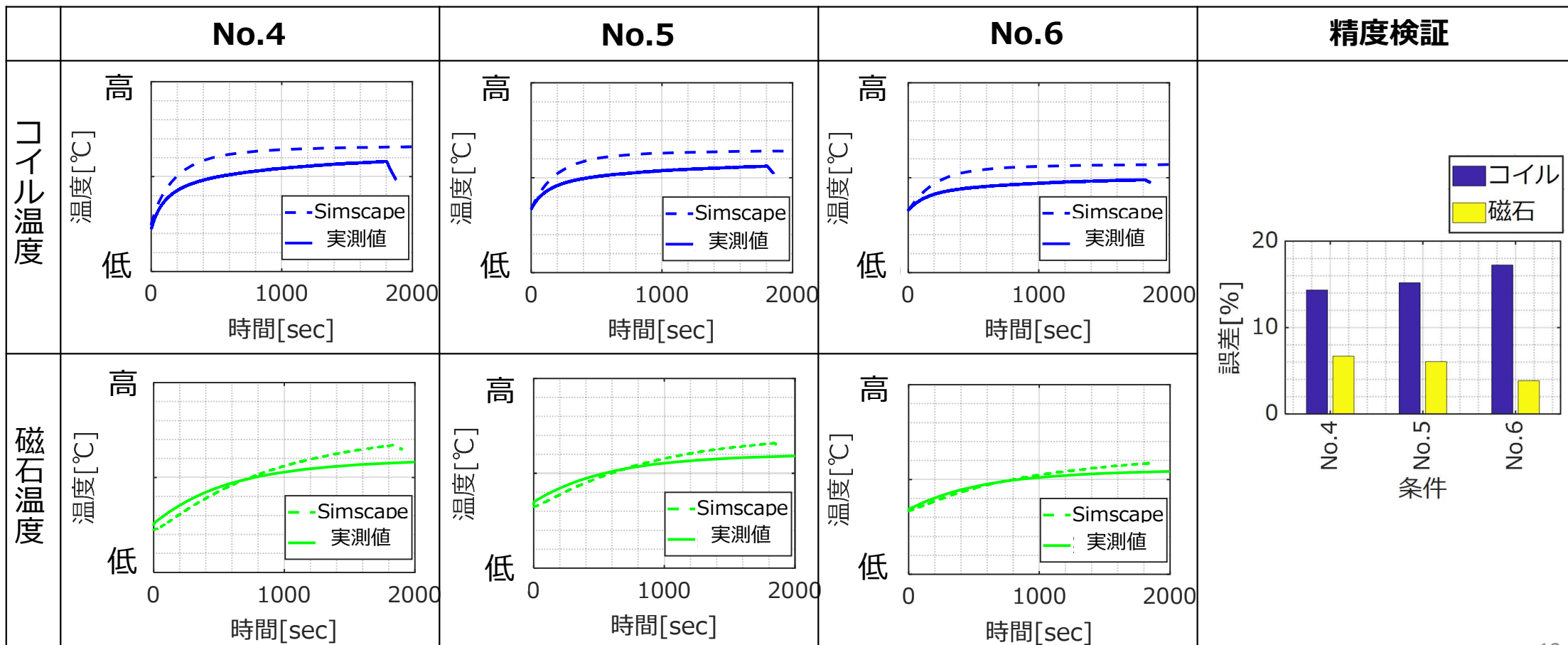
熱モデルと実測値の比較 連続定格 (中回転)

- 発熱量および発熱量割合が変化する条件でも概ね実測値を再現することを確認
- コイル、磁石温度共に5%未満の誤差精度で温度予測可能



熱モデルと実測値の比較 過渡運転(高回転)

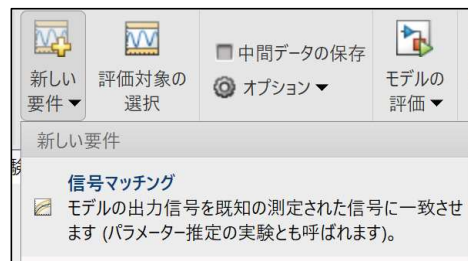
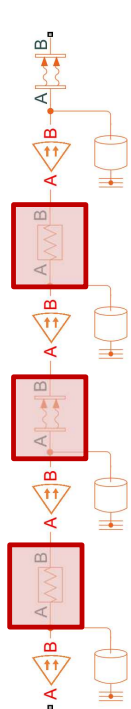
- 温度の立ち上がり時には、実測値を再現
- 時間経過とともにコイル温度、磁石温度共に予測精度が低下するも目標精度以内を実現(飽和温度時の比較)



熱モデルパラメータの感度解析

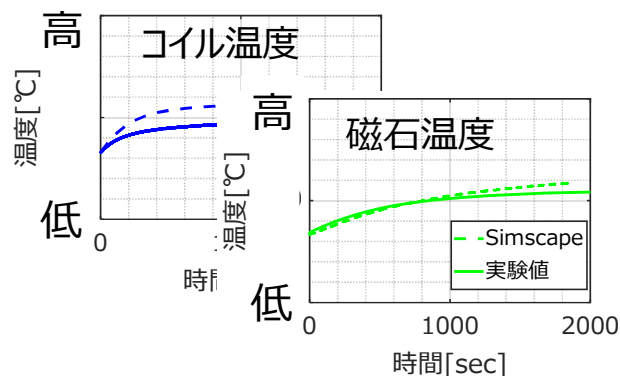
- Simulink Design Optimizationによる感度解析にて温度予測に大きく影響するパラメータを探索
- コイル温度、磁石温度共にパラメータ①が結果に強い影響を与えている事が判明
- 熱モデルの修正箇所を抽出可能

感度解析の設定



信号マッチング

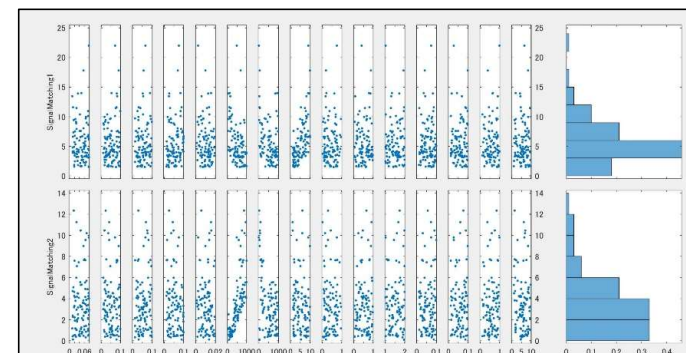
一例として...



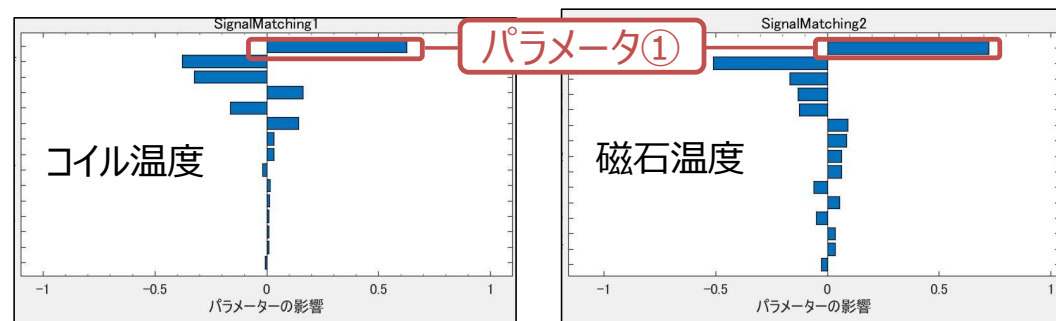
パラメータを設定

No.6の条件

感度解析の結果



散布図



統計解析結果

01 会社紹介

02 背景と課題

03 取り組み内容

・熱モデル

・その他解析事例

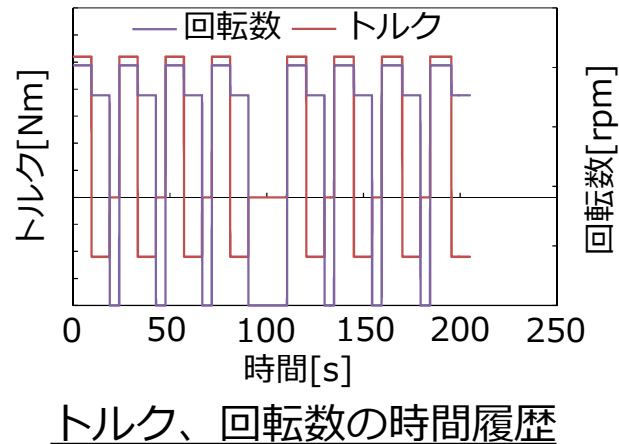
04 まとめ

特殊な運転条件

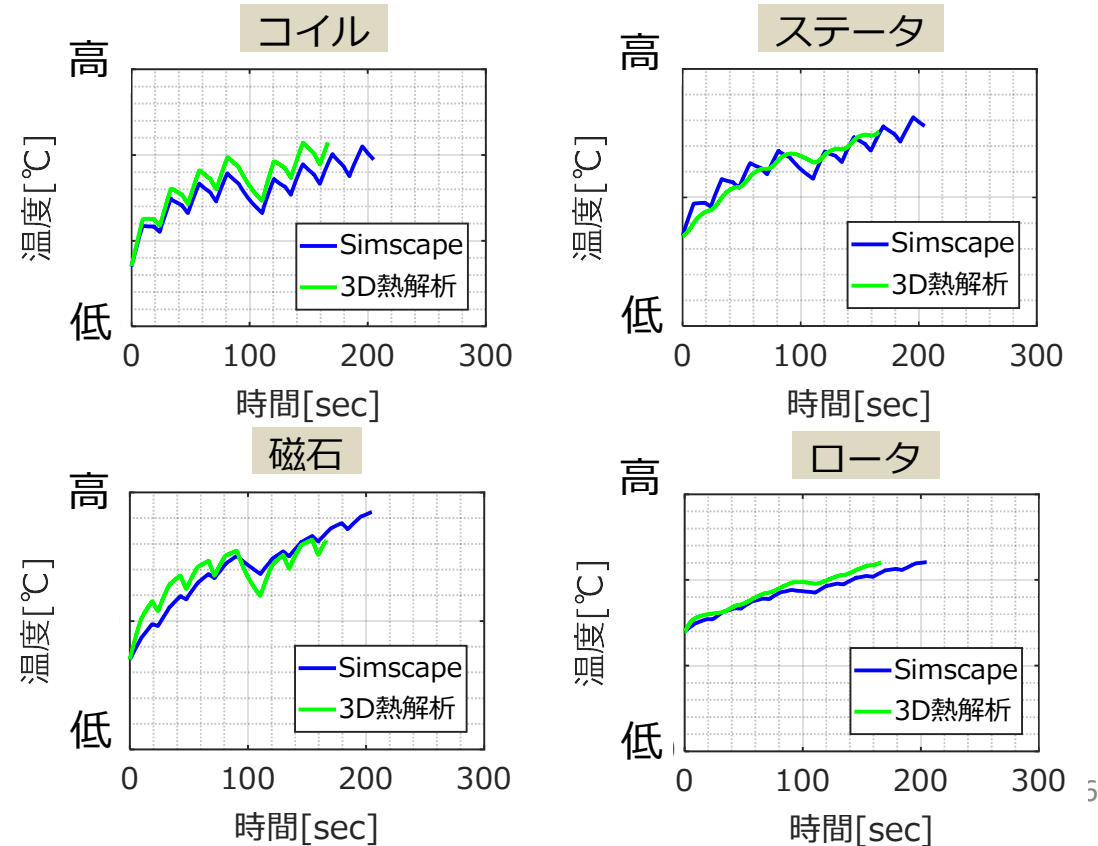
- 複雑な損失入力であってもSimscapeなら簡単かつ短時間で過渡の温度変化を評価可能
- 過渡解析に時間を要す3D熱解析よりも高速に計算が可能

加減速試験

加減速試験：
最大トルク近辺で駆動と回生を連続的に繰り返し、各部の温度変化を評価する試験



3Dと1Dの計算結果比較

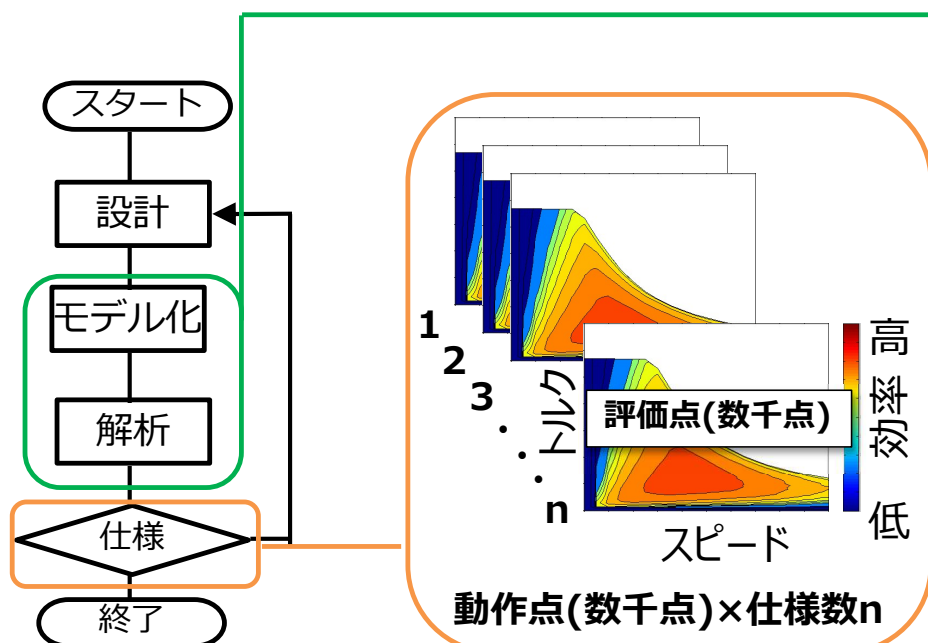


電磁気解析との連携

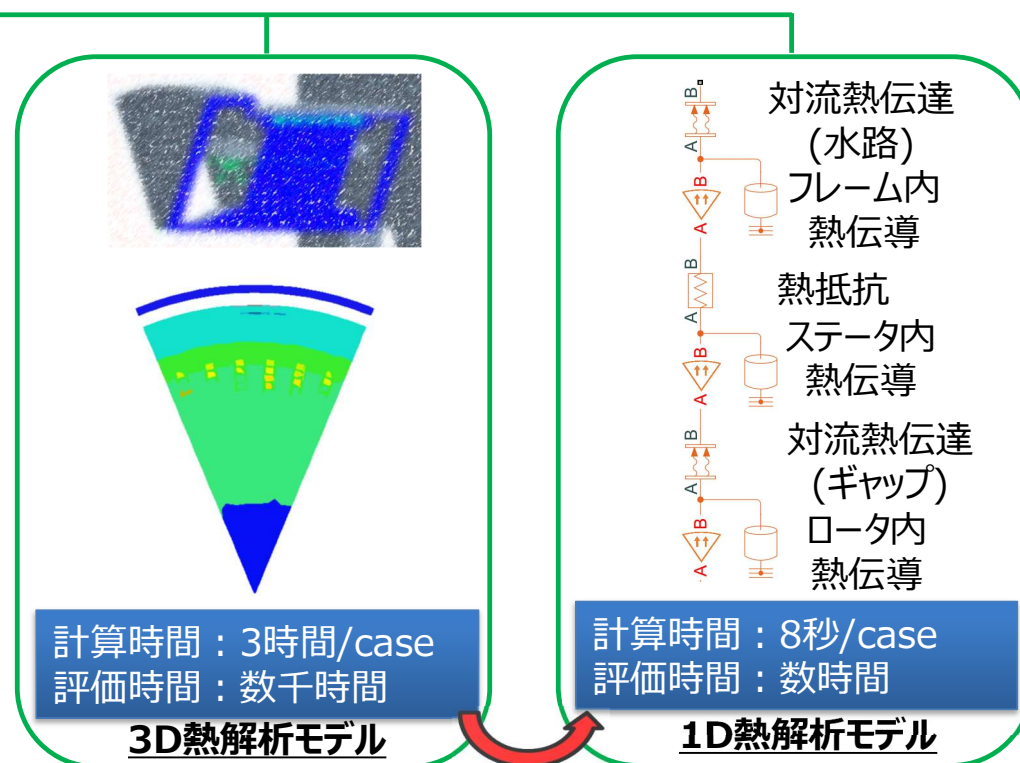
- NTカーブでは数千点にも及ぶ電磁気解析によって構築
⇒全てを3D熱解析で現実的な時間内で評価することは困難
- 短時間で評価可能なSimscapeと組み合わせる事で設計時間の短縮が可能(同一性能PCで比較)

設計フロー

3D熱解析と1D熱解析(熱回路)モデル



熱設計フロー

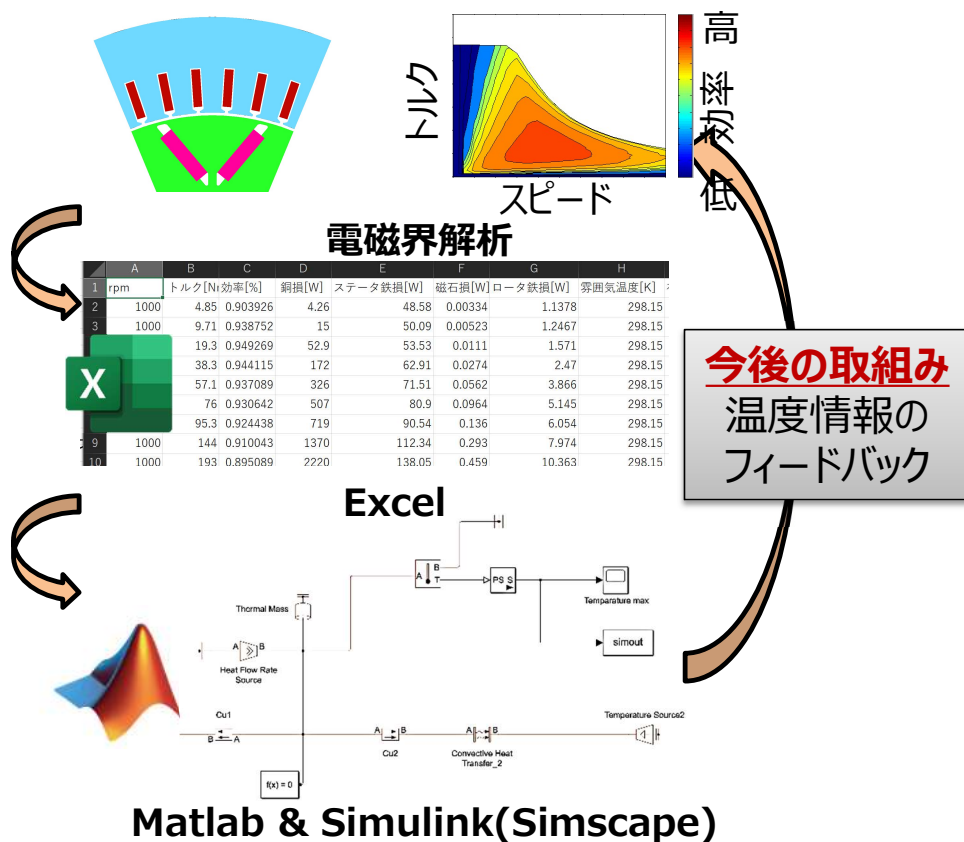


大幅な時間の短縮を実現

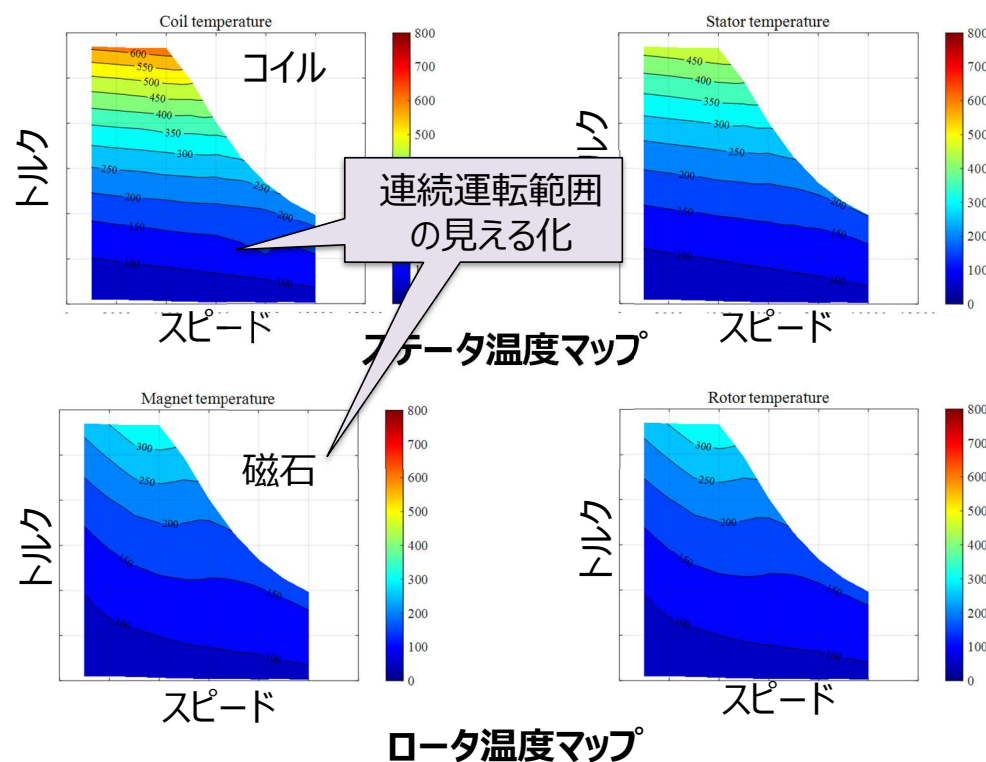
電磁気との連携

- 電磁気解析より得た損失データ(Excel)をMatlab&Simulinkと連携し、全動作点の温度解析を実行
- 動作点に対応した各部の温度マップをシームレスに作成、事前に熱が問題となる運転領域の見える化を実現
- 温度解析結果の電磁界解析へのフィードバックは、今後の取組み事項

電磁気解析との一方向連携



評価結果例



コイル、磁石の許容温度に応じて運転範囲を明確化

01 会社紹介

02 背景と課題

03 取り組み内容

- ・熱モデル

- ・連携解析事例

04 まとめ

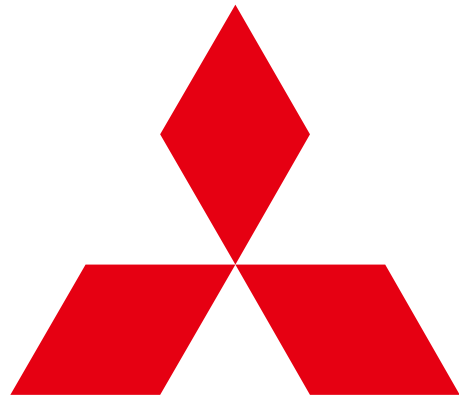
まとめ

- 水冷モータを対象としたSimulink/ Simscapeによる熱モデルの紹介
- Simulink/Simscapeは3D熱解析よりも高速に仕様を検討可能
- 電磁気を含めた連携解析の検証
- 連携解析の結果をMatlab内でシームレスに視覚可能

今後の課題

- 熱-電磁気-制御を含めた双方向連携解析
⇒ 温度解析結果を制御や電磁界解析へフィードバック
- 他製品へ展開するための仕組みづくり

これまで世界の誰も成し得なかった技術と価値を創出して参ります



**MITSUBISHI
ELECTRIC**

Changes for the Better