

TOSHIBA

MATLAB EXPO JAPAN 2020 パワーエレクトロニクス

Simscape™を活用したSCiB™伝熱シミュレーション

東芝インフラシステムズ株式会社

インフラシステム技術開発センター

電機応用・パワーエレクトロニクス開発部

機械要素・メカトロニクス技術担当

近藤敦美

2020.10.1

SCiB™



Contents

- 01 SCiB™の紹介、担当業務
- 02 背景と開発課題
- 03 熱回路を用いた電池の伝熱モデリング
- 04 自然放熱、液冷
- 05 まとめと今後の課題

01

SCiB™の紹介、担当業務

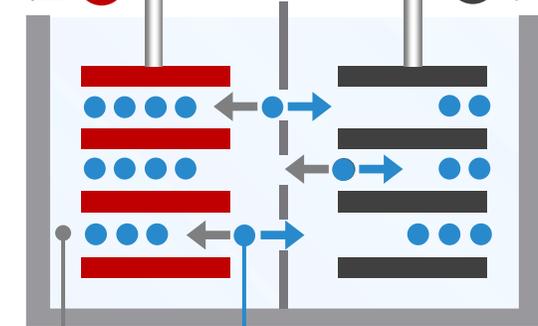
負極にチタン酸リチウム(LTO)を採用することで多くのメリットを実現

一般的な
リチウムイオン二次電池 **SCiB™**

炭素系材料

チタン酸リチウム
LTO

正極 ⊕ セパレータ ⊖ 負極



電解液 リチウムイオン

主な特長



SCiB™ セルラインアップ

容量型、入出力型 合計4種類のセルを量産中

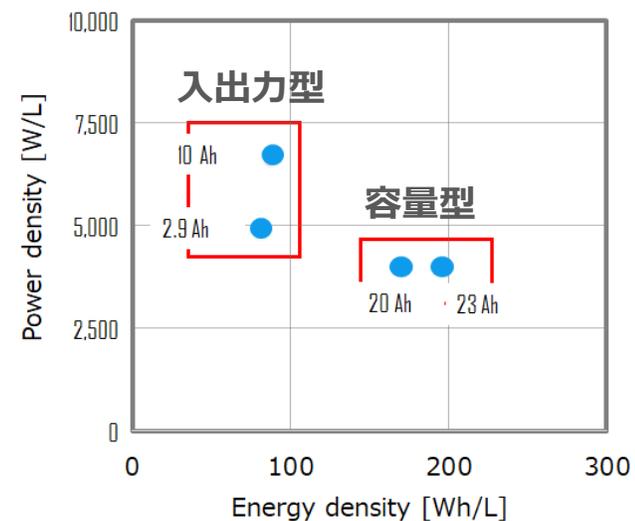
容量型

入出力型

	20Ah cell	23Ah cell	2.9Ah cell	10Ah cell
Photo				
Category	High Energy	High Energy	High Power	High Power
Dimension	116 x 106 x 22 mm	116 x 106 x 22mm	63 x 97 x 14 mm	116 x 106 x 22mm
Weight	515 g	550g	150 g	510g
Nominal Capacity	20 Ah	23 Ah	2.9 Ah	10Ah
Voltage	2.3 V	2.3 V	2.4 V	2.4V

For EV, ESS,
Industry

For Hybrid
Vehicle



バッテリー管理システム(BMS)

温度、電圧、電流検出

状態推定

- SOC(充電率)
- SOH(劣化、健全度)
- SOP(充放電可能電力)

保護制御

- 電圧、電流
- 温度

バッテリー温度管理システム (BTMS)

- 冷却
- 加温

- 保護制御の商品開発、システム設計
- BTMS(Battery Thermal Management System)⁽¹⁾の先行開発

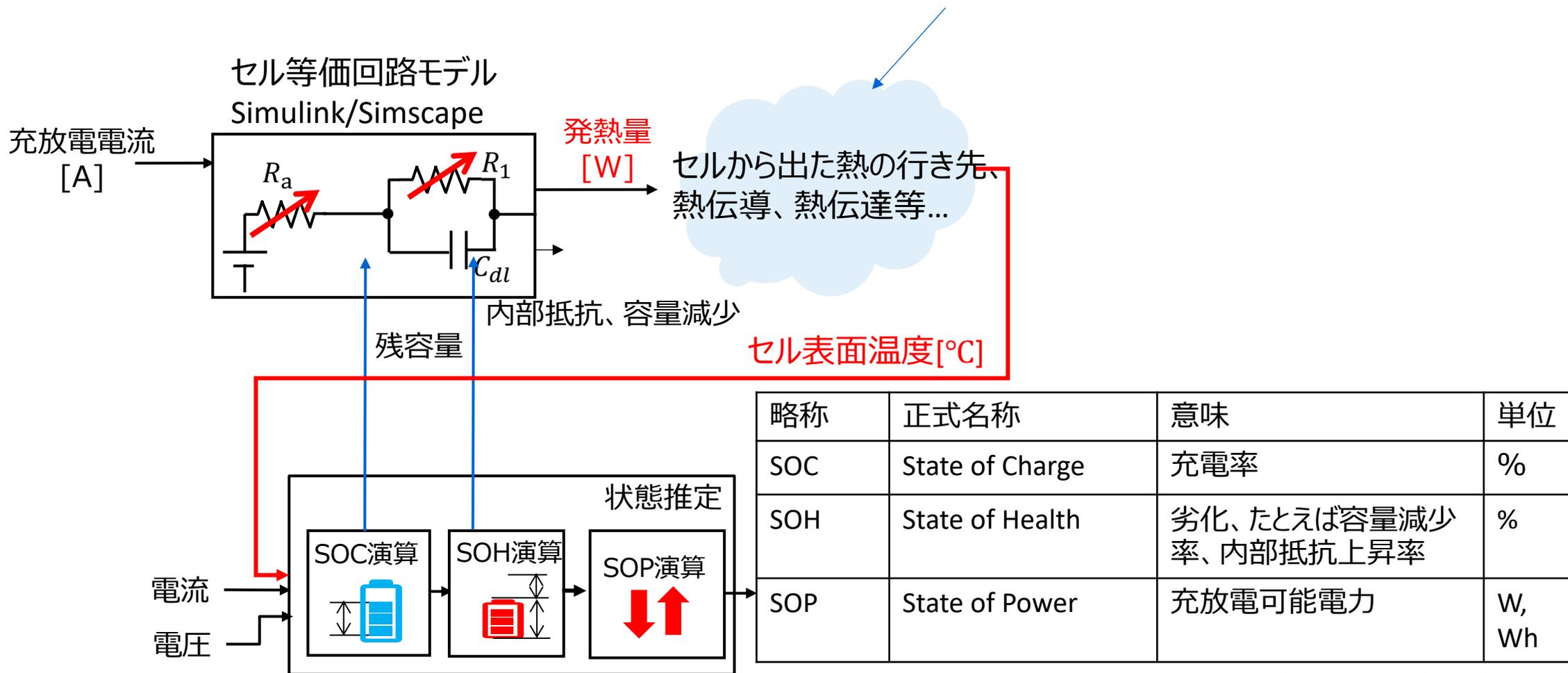
電池の熱全般について、平常時から異常時まで全てカバー

02

背景と開発課題

状態推定と温度の関係

- 電池は充放電パターン、周囲環境温度、電池自身の辿る熱履歴によって劣化速度、発熱量が異なる
- 後段のSOC、SOH、SOP精度に影響するので、伝熱モデルの高精度化も必須



開発課題と解決方法

電池の電気等価回路モデルと3D熱流体解析モデルの接続は可能、
ただし規模と演算量が膨大



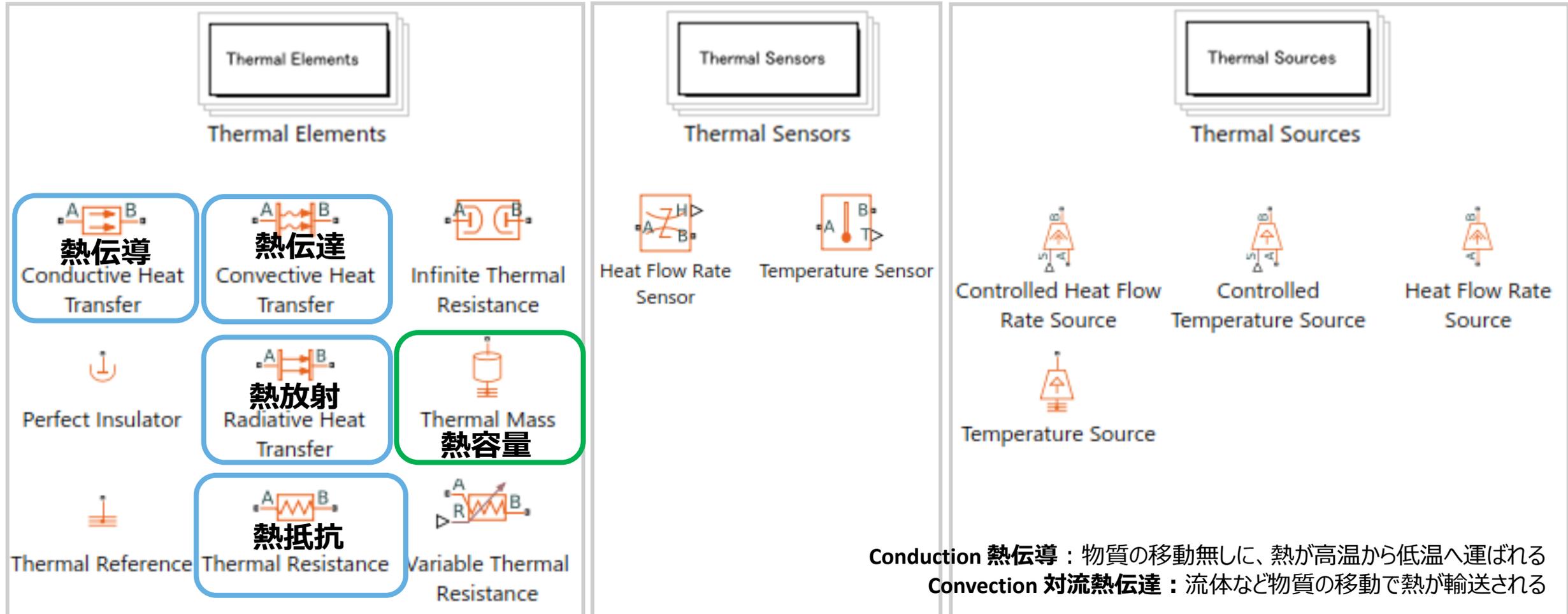
1. 状態空間上で温度と発熱量を介して電気回路と熱回路を接続(4)
2. 機種に因らない共通可能な伝熱モデルを熱回路で提案、ライブラリ化



Simulinkとの親和性からSimscapeを選択

Simscape Thermal(熱)ライブラリ

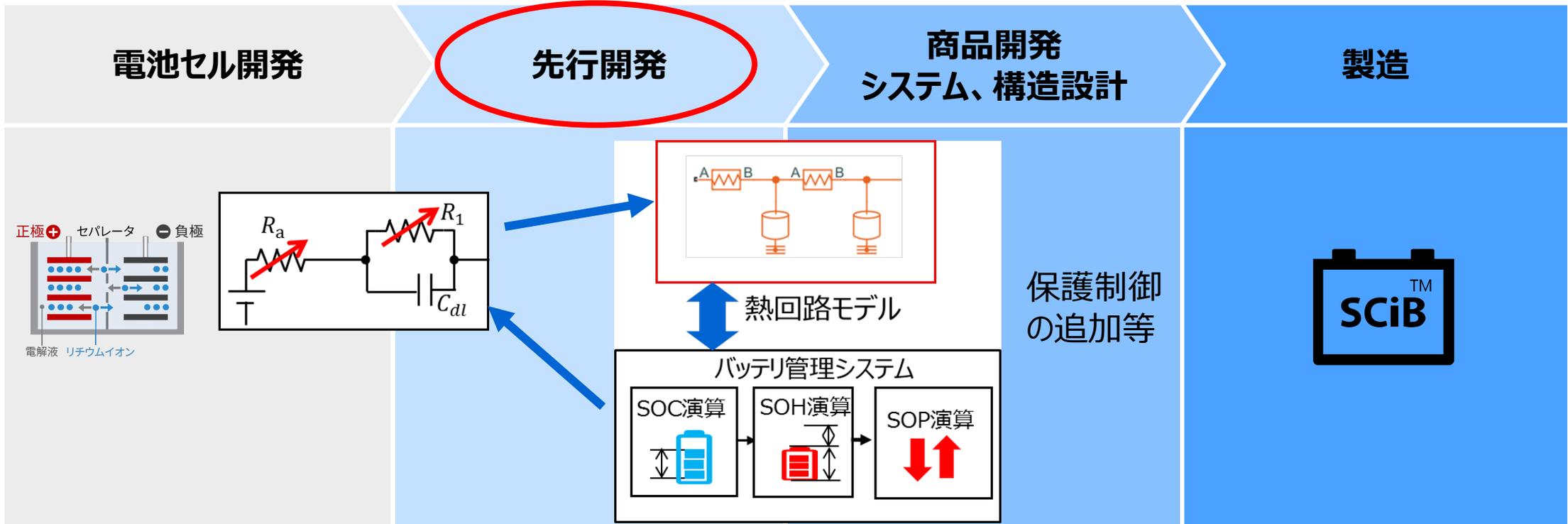
- 伝熱の3形態：熱伝導、熱伝達、熱放射をすべて熱抵抗として統一
- 熱容量と熱抵抗を組み合わせると熱回路を構成



伝熱モデルをSimscapeで組むご利益

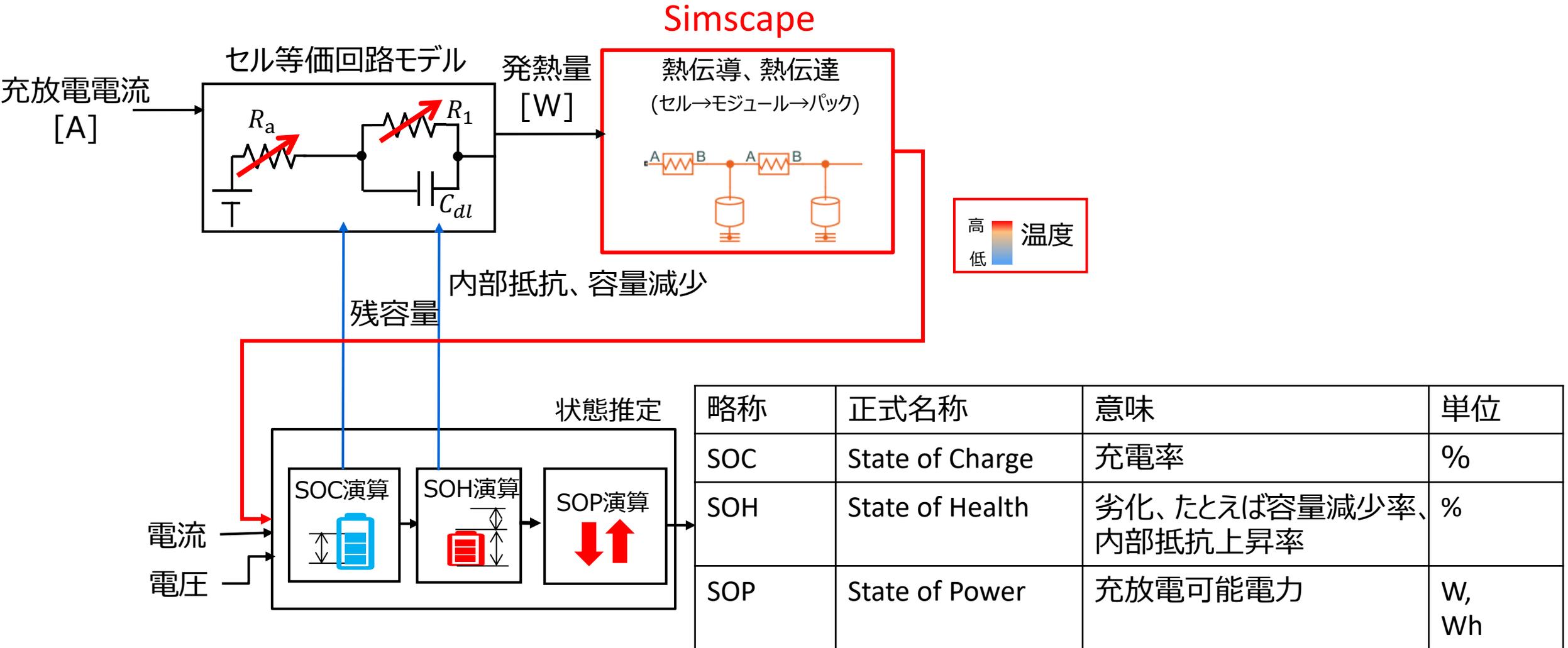
- 一社でセルからシステムまで提供できる強みを生かして、各部門のSimulink/MATLAB®ユーザがモデル開発、モデルを共有
- モデルベース開発でフロントローディングして、手戻りを減らしたい
- 商品開発部門へモデル規模を簡素化して渡せるのが熱回路の強み

近藤の所属部門



目指す姿

共通プラットフォーム上でセル電気回路と熱回路を統合



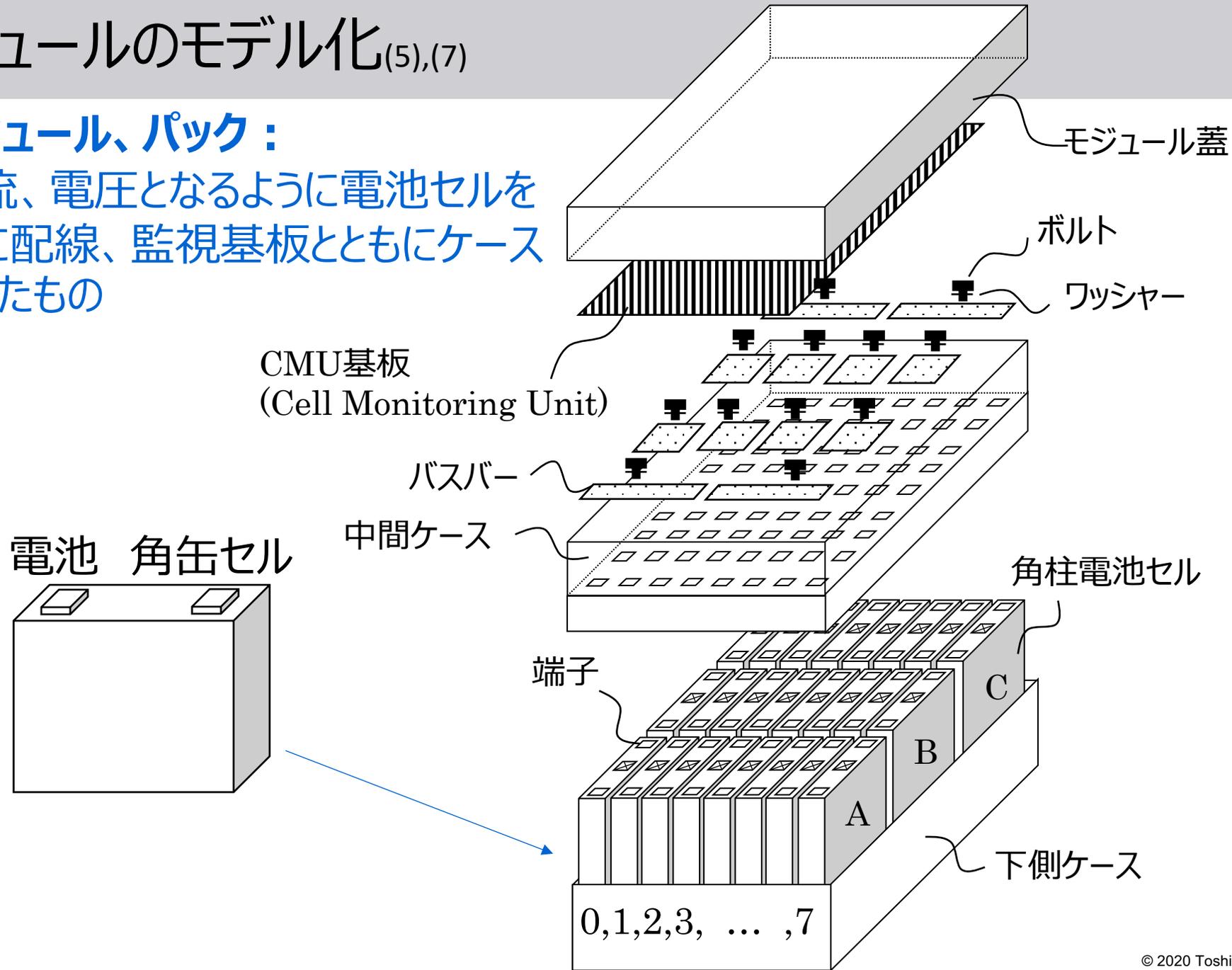
03

熱回路を用いた電池の伝熱モデリング

モジュールのモデル化^{(5),(7)}

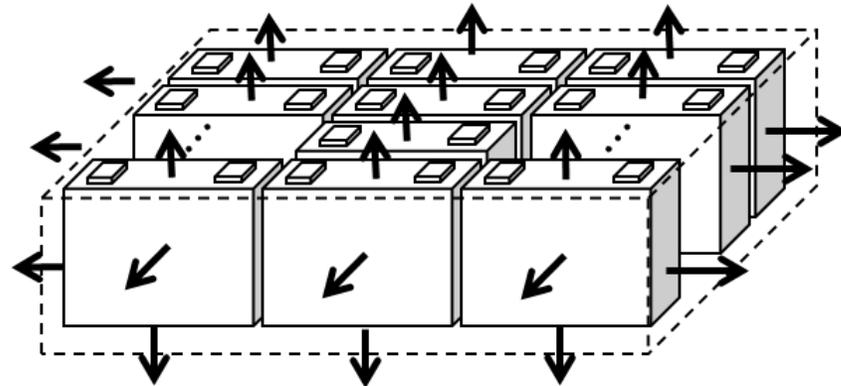
電池モジュール、パック：

所望電流、電圧となるように電池セルを直並列に配線、監視基板とともにケースに収納したもの



モデル化のコツ

- モジュールの中にセルが収納されていて、セルの位置によって伝熱形態が異なる。セル内部は一様な比熱と異方性熱伝導率を持つ
- 熱回路網では、熱伝導と熱伝達は熱抵抗として統一して扱う(6)



熱伝達



Convective Heat Transfer : 対流熱伝達率 h と伝熱面積 A から熱抵抗に換算

$$R_h = \frac{1}{A \cdot h} [K/W]$$

熱伝導



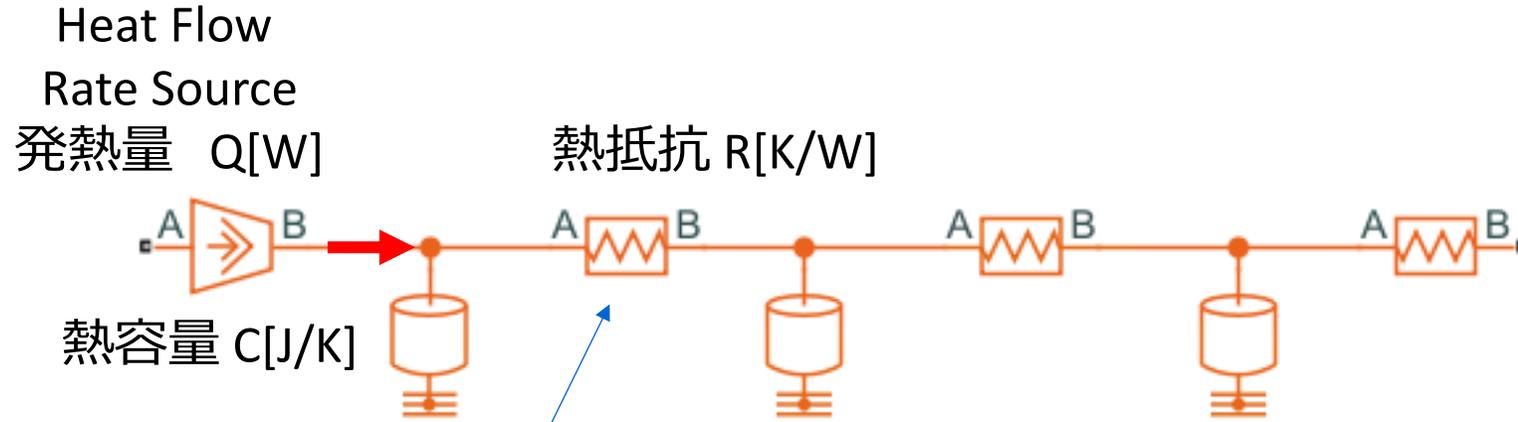
Conductive Heat Transfer : 熱伝導率 b 、厚み L 、伝熱面積 A から熱抵抗に換算

$$R = \frac{L}{A \cdot b} [K/W]$$

本研究ではCauer(カウエル)型を使用

Cauer型の特徴

- ・時定数RCが比較的長い
- ・寸法、物性値から熱容量と熱抵抗を定義するホワイトボックスモデル
- ・3次元回路に対応



Convective Heat Transfer : 対流熱伝達率と伝熱面積から熱抵抗に換算
あるいは



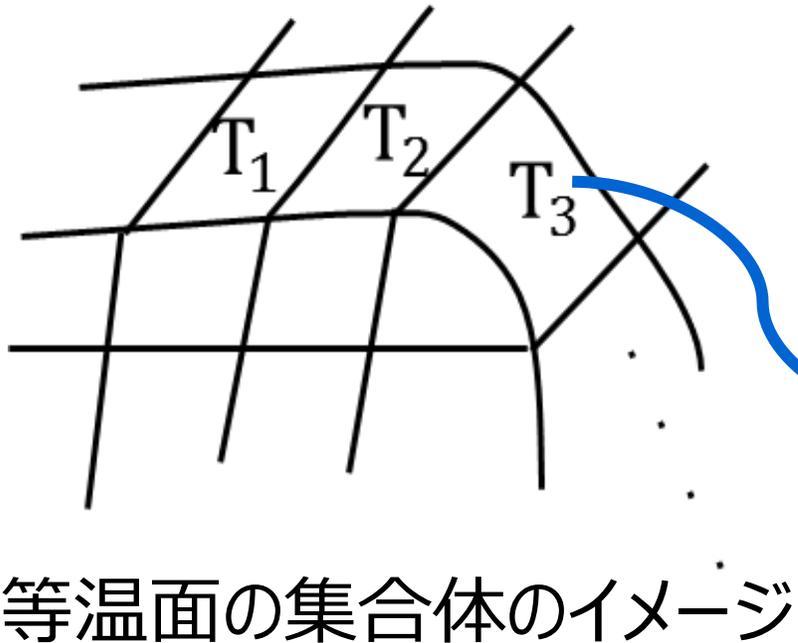
Conductive Heat Transfer : 熱伝導率、厚み、伝熱面積から熱抵抗に換算

※放射(radiation)は本モデルでは対象外

熱の流れを直交座標上で整理

直交座標系の2次元かつ、熱伝導率 k [W/m·K]が定数で与えられる面に発生する熱の流れは、下の式で表される。

「あらゆる方向に熱が逃げる」熱流が実世界で発生しても、直交座標系の熱回路上でx軸とy軸上に分解可能(7)



y方向の熱流

$$q_y = -kA_y \frac{\partial T}{\partial y}$$

$$q = q_x + q_y$$

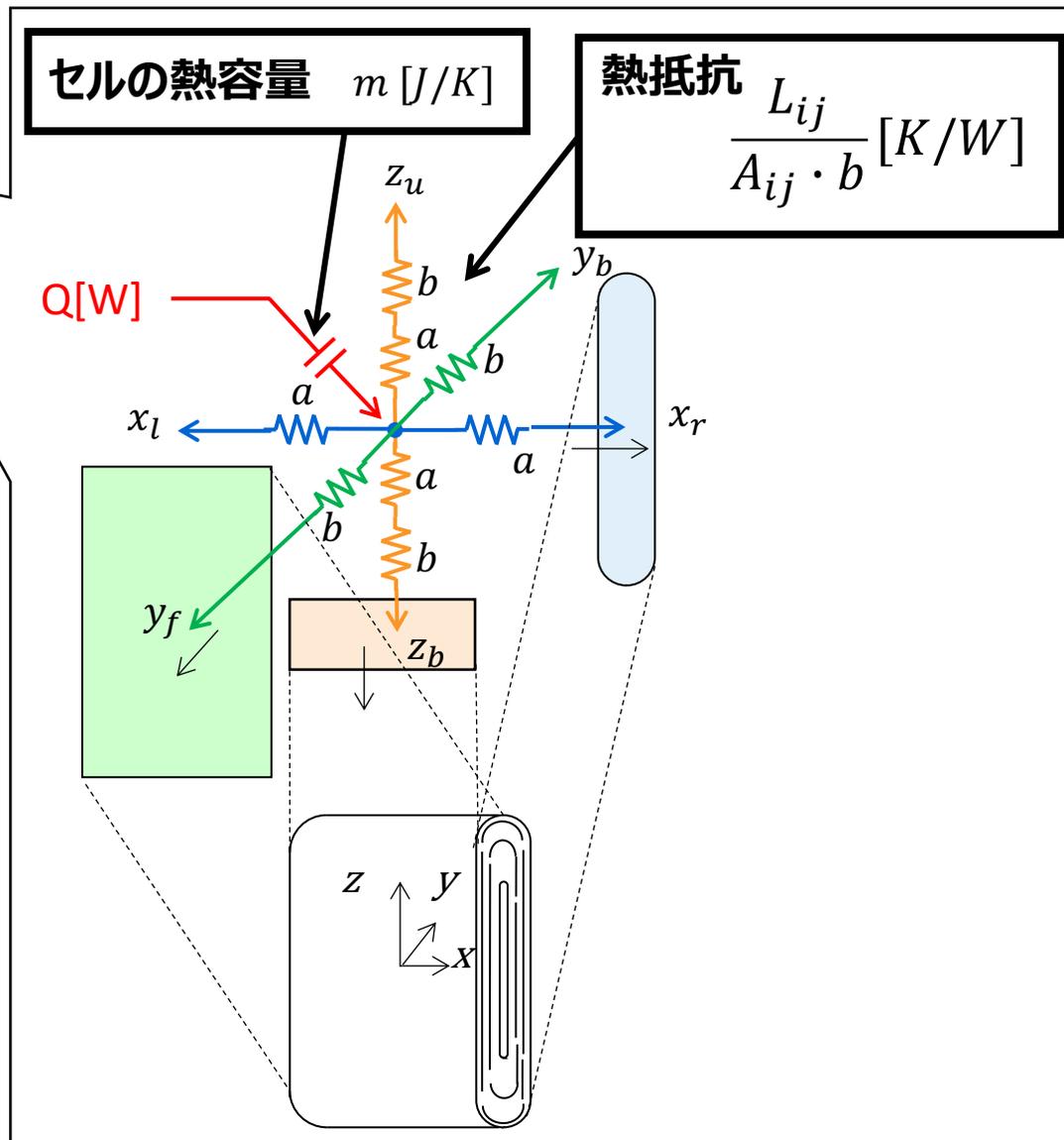
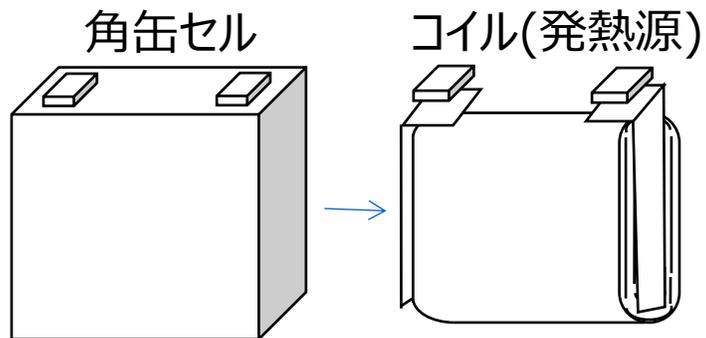
x方向の熱流

$$q_x = -kA_x \frac{\partial T}{\partial x}$$

等温面

Isotherm

セル中心から発生する発熱量 Q がセルの6方向を通る伝熱パスを表現



熱伝導率の異方性(1)(6)

- 面内方向 $a [W/m \cdot K] \gg$ 積層方向 $b [W/m \cdot K]$

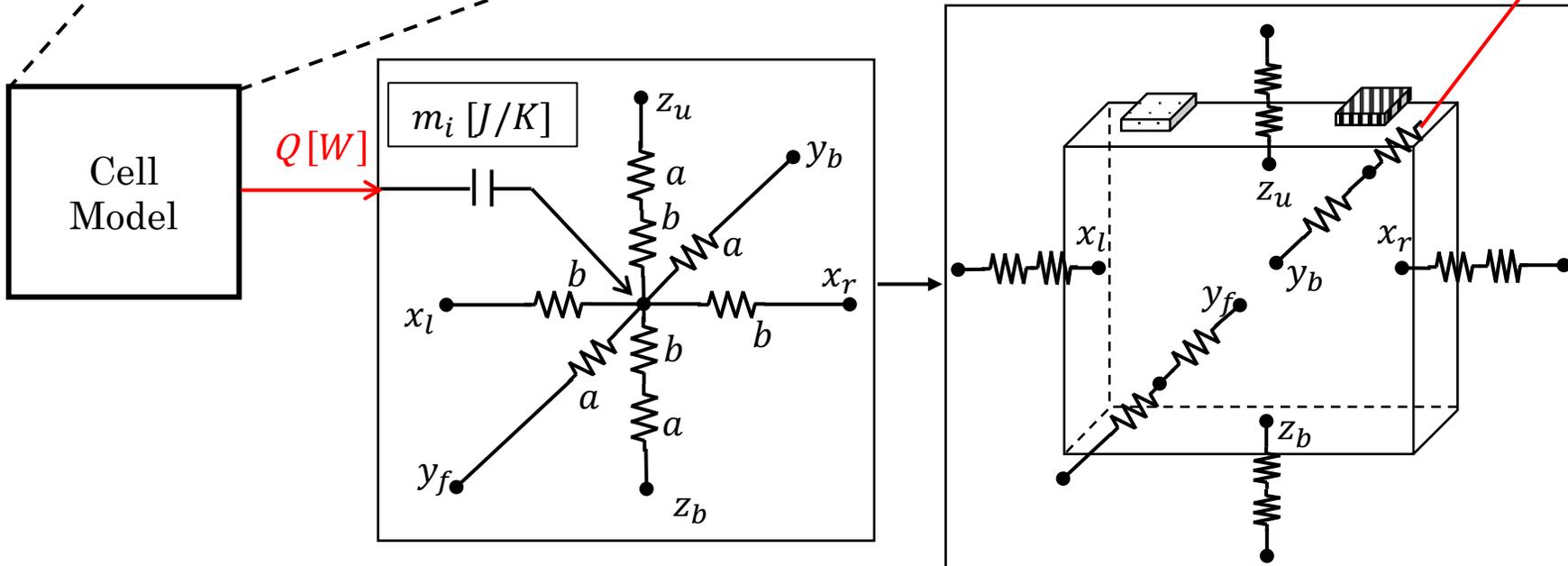
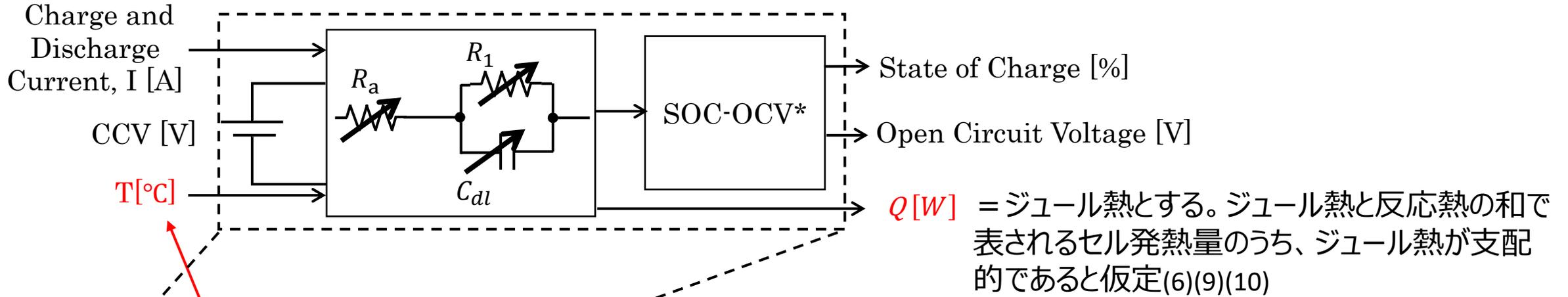
熱容量

- 比熱は一樣(2)、熱容量は1個/セル

熱パス

- 各面を垂直に通る熱抵抗を設定

セル表面温度と発熱量を介して接続(6)



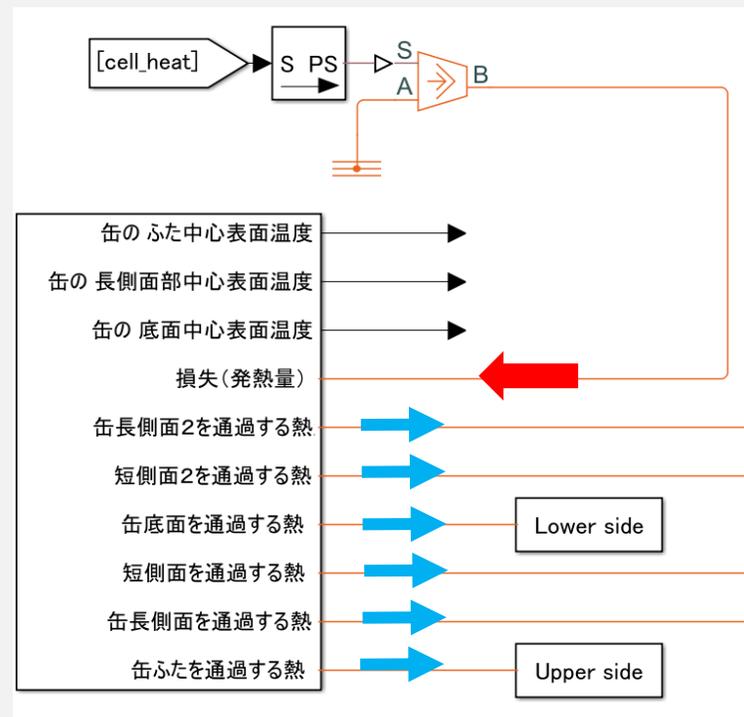
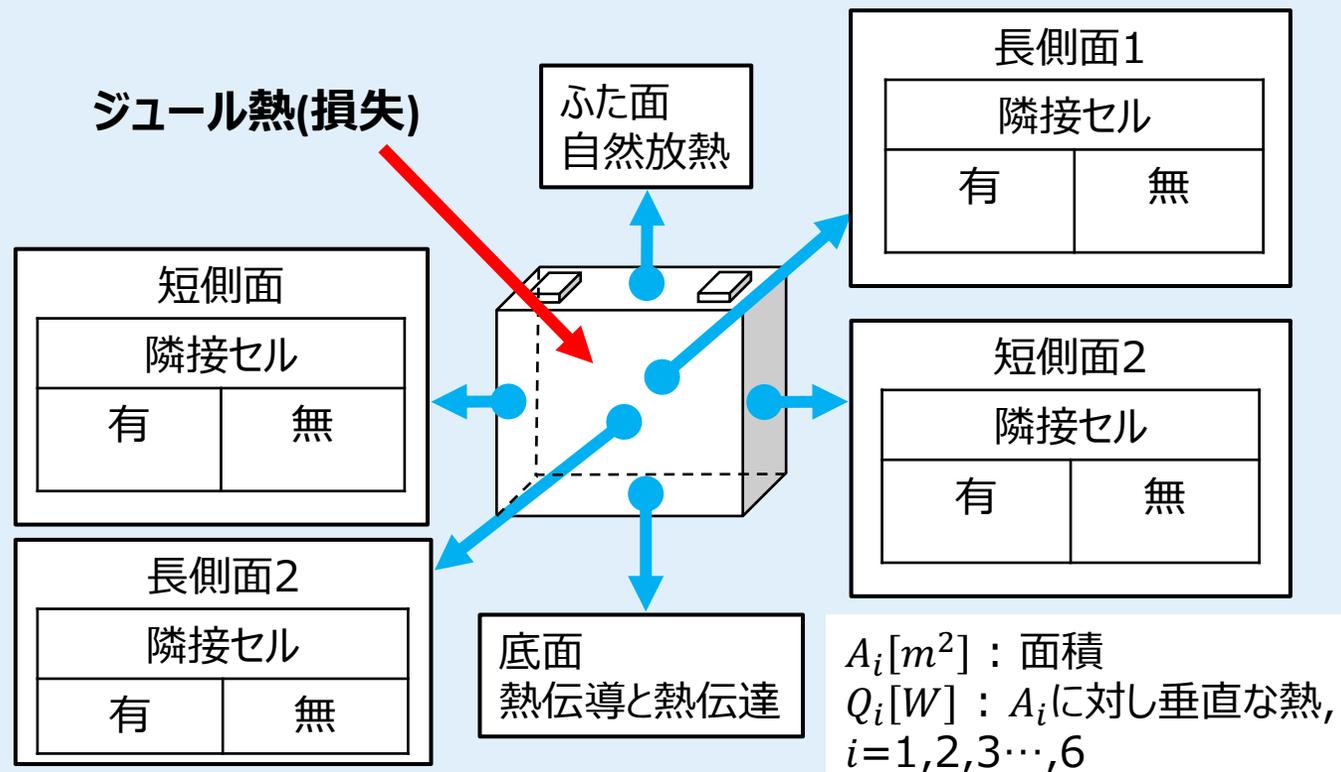
角缶の6面の伝熱形態を整理、セル伝熱ブロック化

提案
モデル

1入力、6出力のSimulinkブロック化

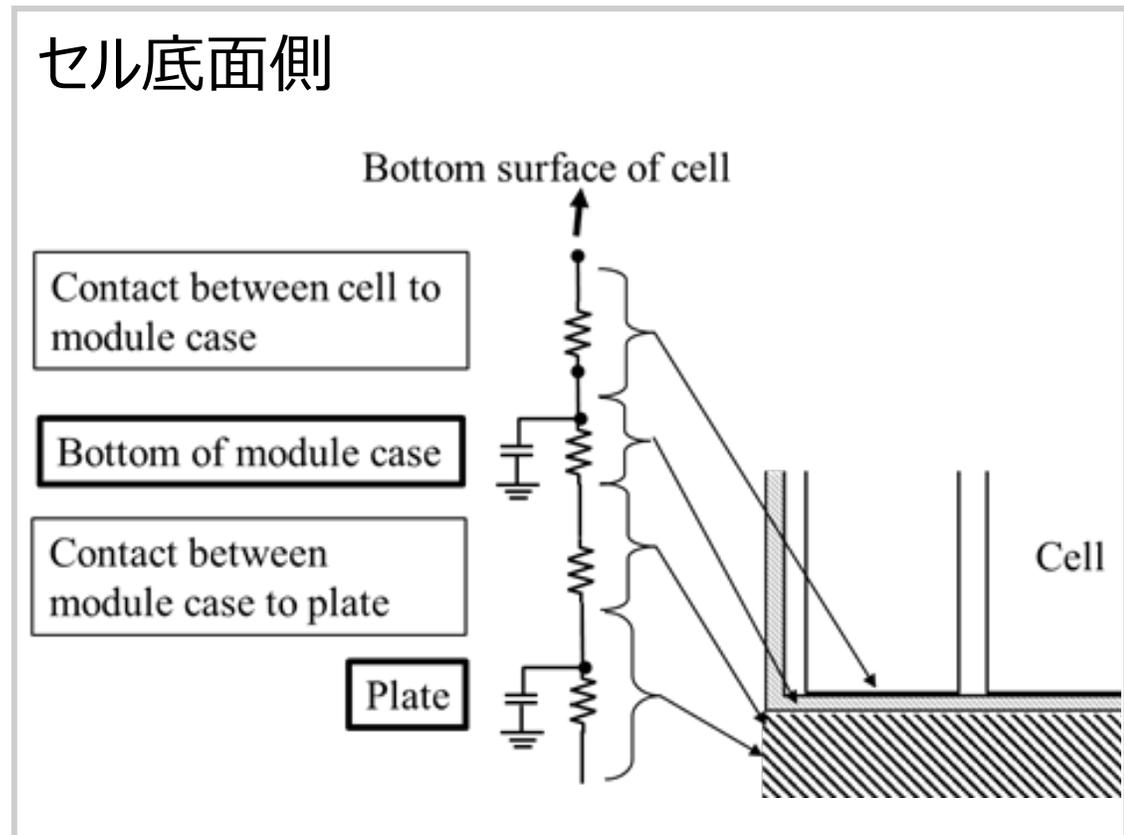
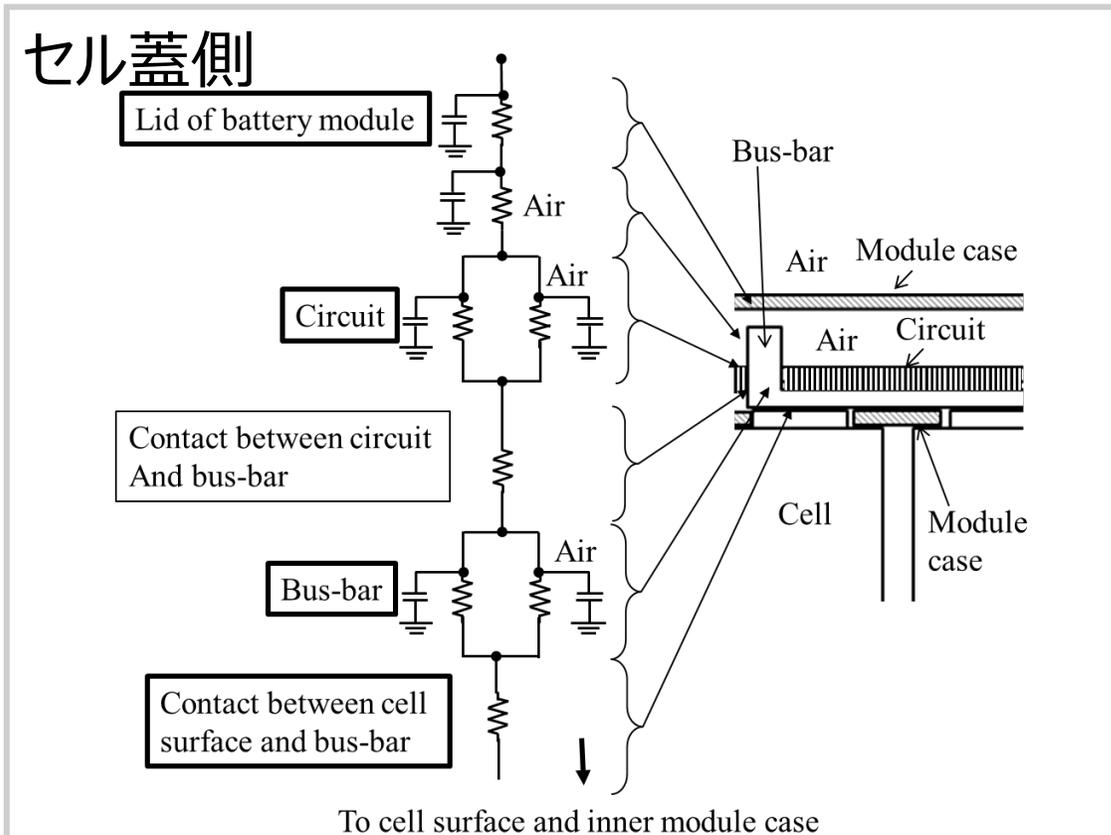
効果

内部抵抗の変更で様々なセルに対応
並べてモジュール、パックを構成



モジュール内用品の熱回路の作成 (5)

- 熱容量は代表寸法、物性、比熱から算出
- 太枠で囲んだ部位の熱抵抗は寸法、物性から算出
- 細枠で囲んだ接触熱抵抗は試験あるいは解析から求める
- モジュール内の空気は自然対流を仮定し熱伝達率と代表面積の逆数から熱抵抗を算出

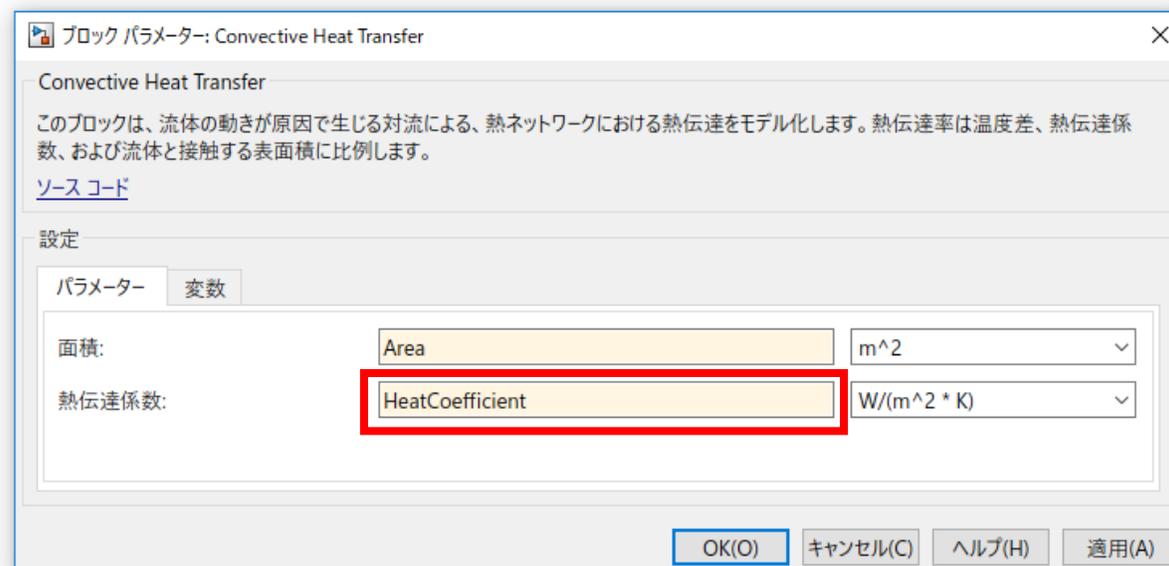
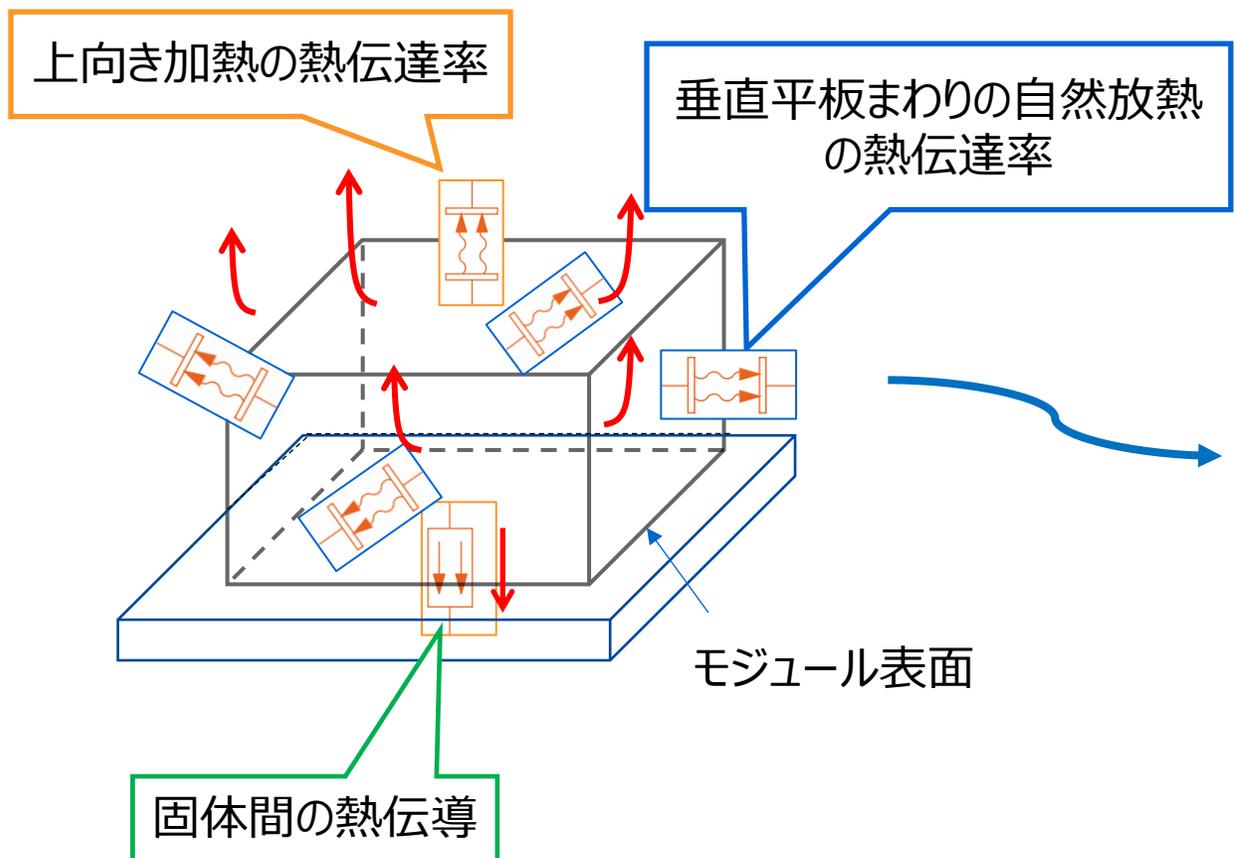


04

自然放熱、液冷

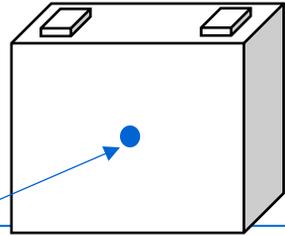
自然放熱のモデル化

モジュールの表面に働く自然対流と対応する熱伝達率を文献(8)の経験式から求め、Convective Heat Transferブロックに代入

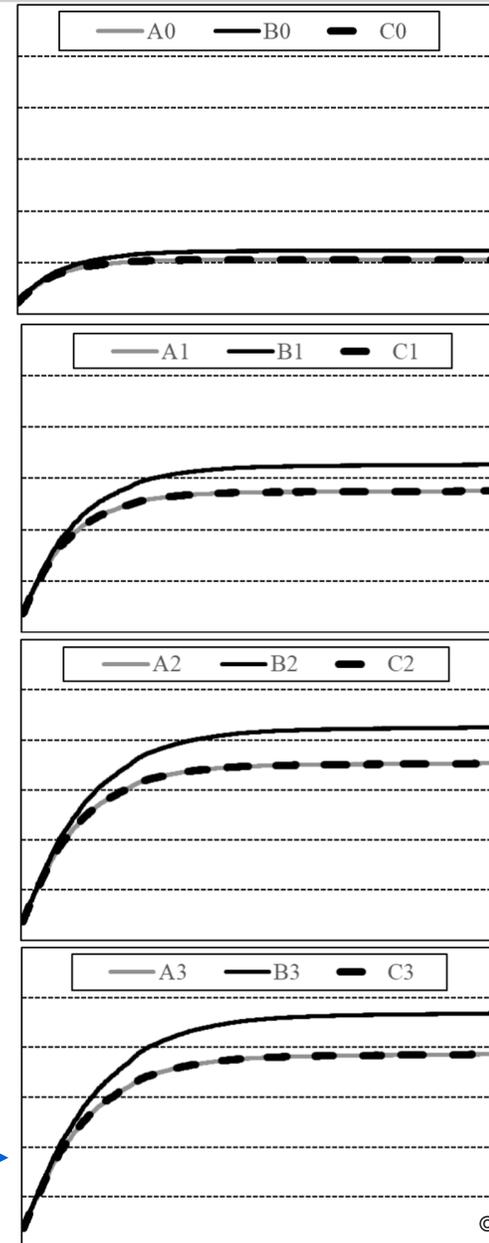
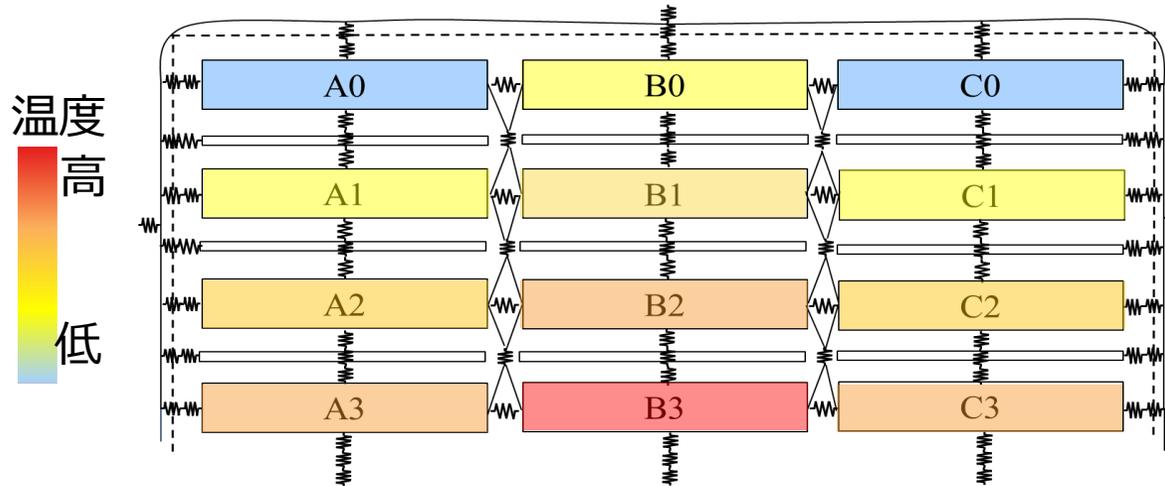


モジュール内温度分布の再現 (5)

モジュール中心部が最も温度が高く、モジュールケースの壁に近づくにつれ温度が低下する分布、傾向を再現

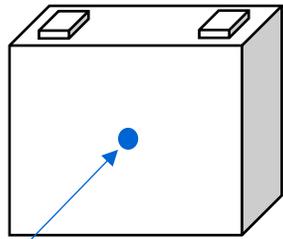


セル缶の長側面の表面、中心の温度を熱回路上から抽出、プロット



充放電電流を変えた場合の温度分布 (7)

充放電電流 (cレート) を変えてセル腹表面温度を観察

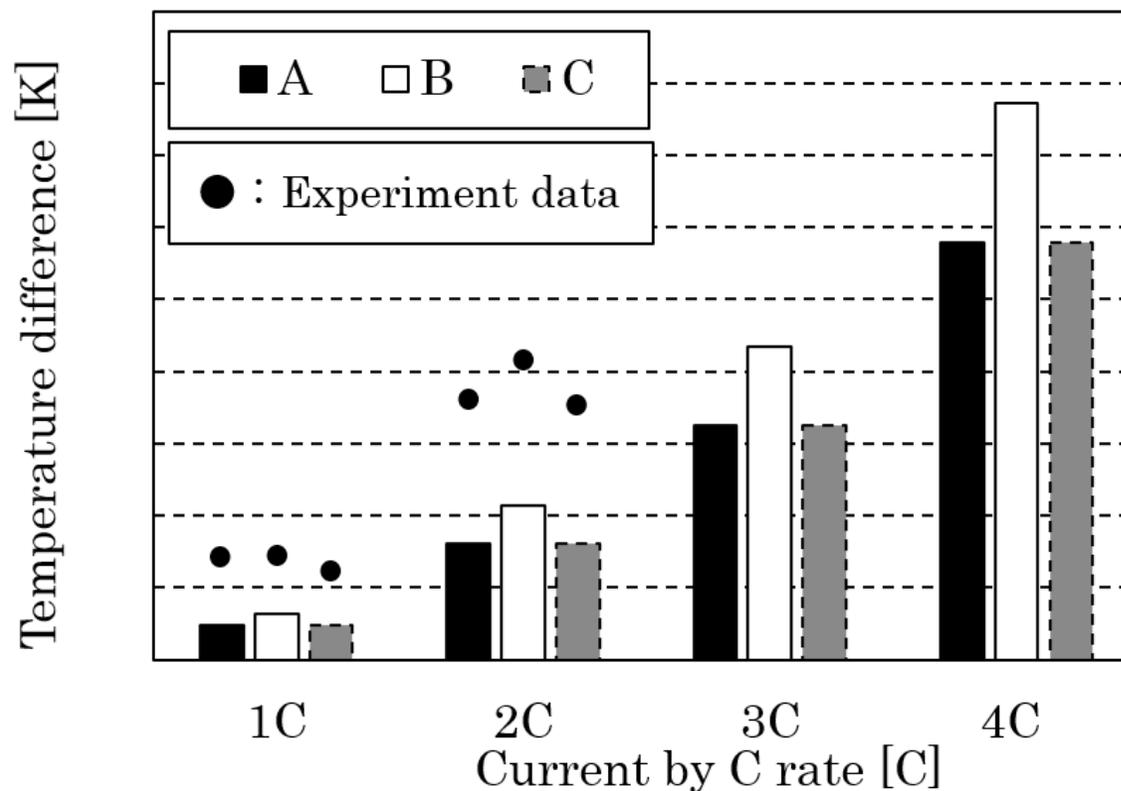
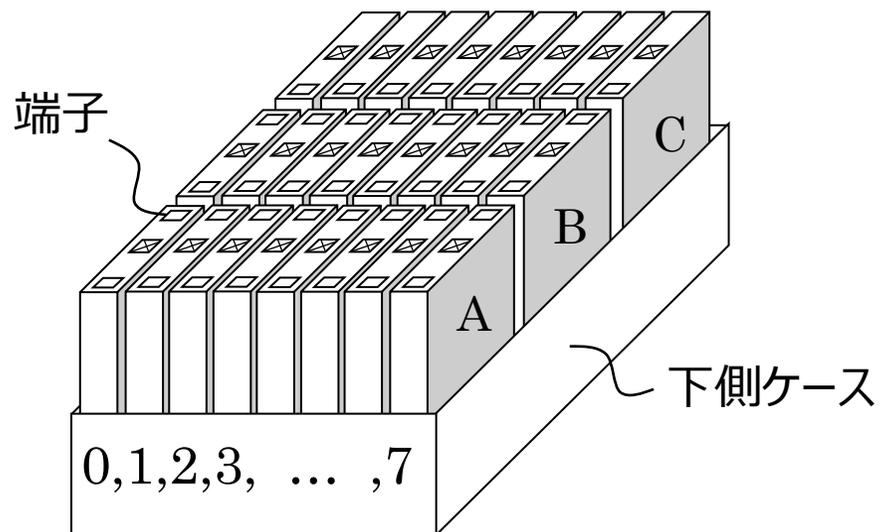


セル缶の長側面の表面、中心の温度 (セル腹温度)

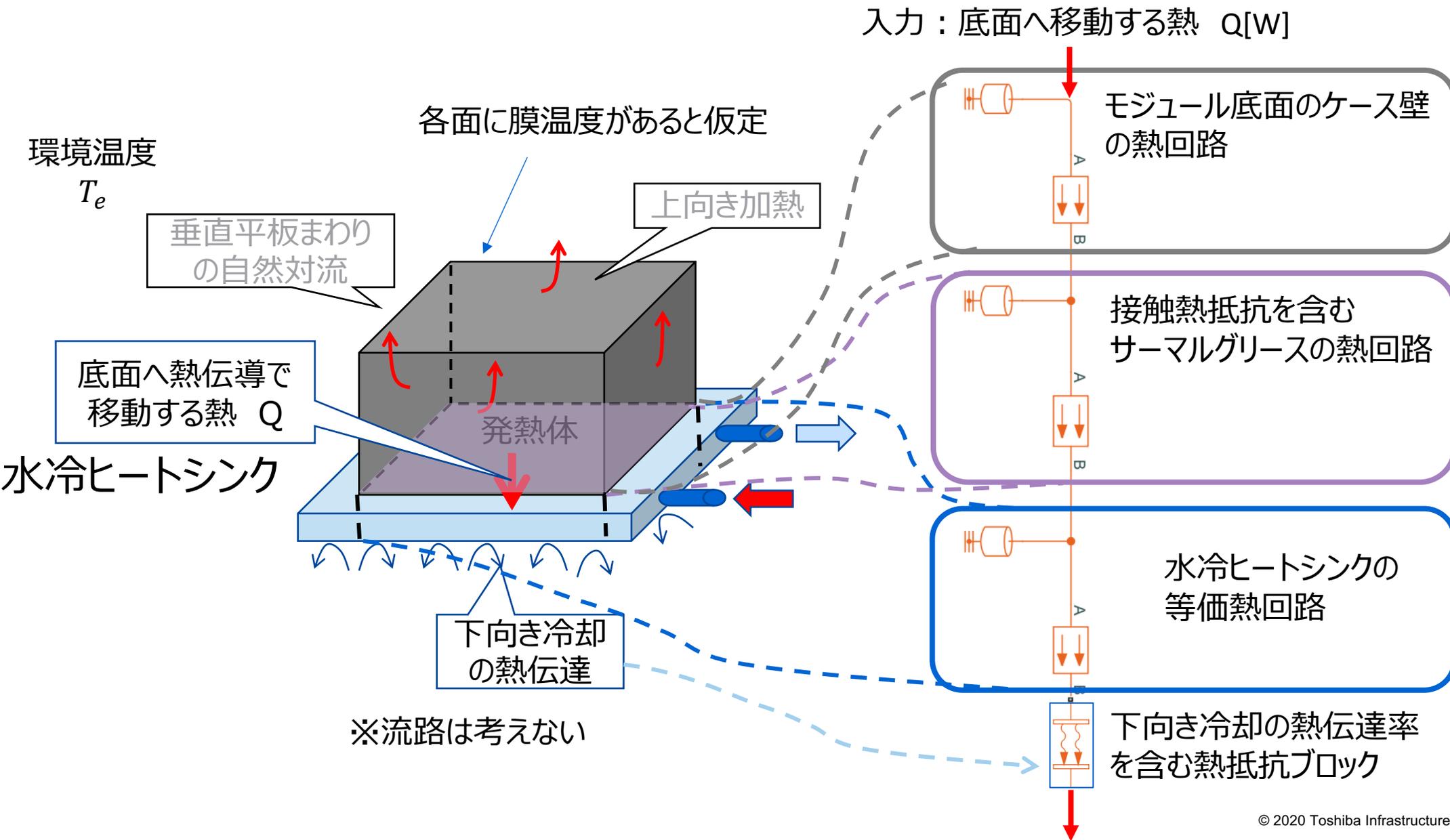
Items	Conditions or values
Ambient surrounding	Natural heat convection
Start cells and ambient temperature [°C]	25
Started SOC [%]	50
C rate	1C, 2C, 3C, 4C
Iterated load pattern	Charge and discharge cycles with constant time
Measured point	Center on cell long sided surface

充放電電流を変えた場合の温度分布 (7)

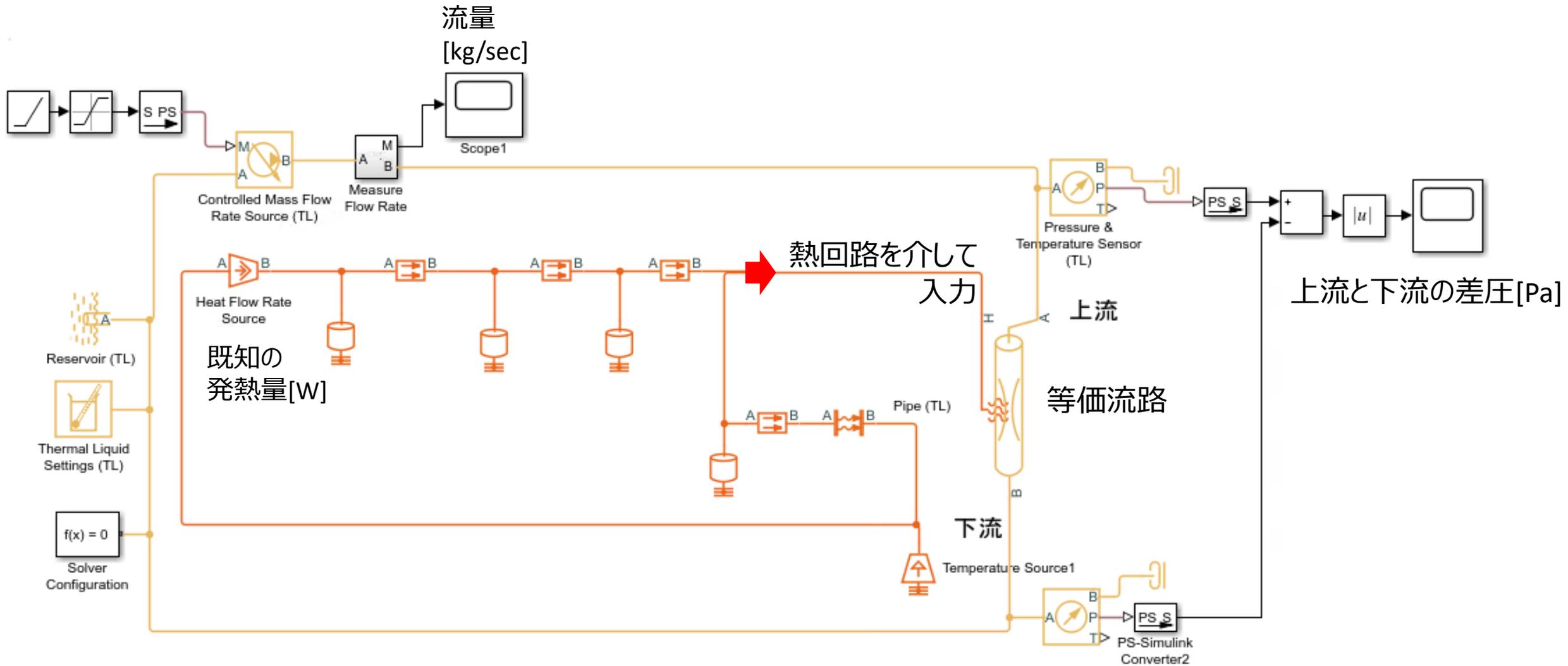
- ✓ A列、B列、C列の0番セルと3番セルの温度差をプロット
- ✓ 充放電電流の増加に伴う温度勾配の拡大を確認
- ✓ 試験結果とほぼ同様の温度分布の傾向を再現



液冷のごく簡素化したモデル例 1



液冷のごく簡素化したモデル例2



05

まとめと今後の課題

まとめと今後の課題

1 電気／伝熱統合 モデルの実現

Simulink/Simscapeを活用した電池モジュールの伝熱モデル、水冷システムモデルを紹介

2 コンポーネント化

コンポーネント、共通化を図ることで、機種、構造に因らない電池伝熱モデルを実現

共通モデルの活用によって、様々なパック、モジュール機種開発に迅速に対応

3 今後の課題

モデルベース開発で他モデルと接続時の動作高速化

モデル規模、粒度の統一

安心、安全、長寿命な電池システムを今後も提供してまいります。



参考文献

- (1) Shuting Yang et al, A Review of Lithium-Ion Battery Thermal Management Strategies and the evaluate Criteria, International Journal of EELCTROCHEMICAL SCIENCE, 14(2019) 6077-6107
- (2) Nicolas Damay et al, Thermal modeling of large prismatic LiFePO4/graphite battery. Coupled thermal and heat generation models for characterization and simulation, Journal of Power Source Vol 283, (2015) 37-35
- (3) K W E Cheng, Battery-Management System(BMS) and SOC Development for Electrical Vehicles, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 60, No.1, 2011
- (4) 奥山博康, 建築物の熱回路網モデルに関する理論的研究, 博士論文, 1987
- (5) 近藤敦美他, リチウムイオン電池モジュールの伝熱経路の分析, 日本機械学会 熱工学コンファレンス2019
- (6) 近藤敦美 他, 角柱型電池の電気/異方性発熱体モデル検討, 平成31年電気学会全国大会口頭発表, 2019
- (7) 近藤敦美他, 充放電電流を変化させた場合の電池モジュール温度分布の分析, 令和2年電気学会全国大会口頭発表, 2020
- (8) J.P Holman, Heat Transfer Tenth Edition, McGraw-Hill Editions, 2010
- (9) 大島孝昌他, 小型リチウムイオン二次電池の急速充放電時の発熱挙動, 電学論B, 124 巻,12号, 2004年
- (10) 足立修一 他, バッテリマネジメント工学 電池の仕組みから状態推定まで, 東京電機大学出版局, 2015

TOSHIBA