

セル積層方向過渡伝熱シミュレーションによる 燃料電池スタック温度推定技術

Technology for Estimation of Fuel Cell Stack Temperature
Using Transient Heat Transfer Simulation in Cell Stacking Direction

梅 澤 健 輔¹
Kensuke UMEZAWA

松 井 康 佑¹
Kosuke MATSUI

池 田 佑 太¹
Yuta IKEDA

要 旨

ABSTRACT

車両環境で想定されるあらゆる運転条件下で、きょう体部品および端部セルを含む、スタック内の積層位置の異なる任意の位置の MEA 温度を高い精度で推定できる、セル積層方向過渡伝熱シミュレーションを構築した。MEA 温度への影響度が大きい計算量の多い因子については、発電中のスタックで実測した基礎データを基にした補正項を導入することにより、計算を簡略化した。また、従来のシミュレーションに対して、MEA 温度への影響度が少ない因子を特定して省略した。これらの対応により、温度推定精度を低下させることなく、スタック構成部品の連成計算ができるようになった。定常時スタック発電条件および、過渡を含むスタック起動モードにおける、セル積層方向過渡伝熱シミュレーションの温度推定精度は、目標値である実測比±5%以内を達成できることを確認した。

A simulation of transient heat transfer in the cell stacking direction was developed that makes it possible to estimate the temperature of the MEA at different arbitrary stacking positions within the stack, including the case components and the end cells, at a high level of accuracy under all operating conditions that can be assumed for the vehicle environment. With regard to factors that have a considerable effect on the temperature of the MEA but necessitate a high volume of calculations, the introduction of a correction term based on fundamental data measured in a stack while generating power simplified the calculations. In addition, by contrast with conventional simulation technology, factors that have little effect on the temperature of the MEA were identified and omitted. These initiatives have made it possible to conduct coupled calculations for the constituent components of the stack without any decline in the accuracy of temperature estimations. It was verified that the simulation of transient heat transfer in the cell stacking direction was able to realize the target figure for temperature estimation accuracy of within ±5% against actual measurements for both steady-state stack generation conditions and stack warm-up mode, including transient states.

1. まえがき

CO₂による地球温暖化、化石燃料資源の枯渇によるエネルギー確保という両方の課題に対応できる技術として、Honda は燃料電池自動車 (FCV) の開発を進めてきた⁽¹⁾。

2016 年モデル CLARITY FUEL CELL に搭載した燃料電池スタック (以下、スタック) の構成を Fig. 1 に示す。スタックは燃料電池セル (以下、セル) の積層体とスタックきょう体部品 (以下、きょう体部品) で構成される。セル内の膜電極接合体 (membrane electrode assembly: MEA) は、

燃料電池反応のエネルギー損失等により発熱するが、セル間に流れる冷媒で冷却することにより、適正な温度に制御されている。

きょう体部品と接するセル (以下、端部セル) は、Fig. 2 に示すように、セルからきょう体部品および大気への放熱の影響を受けやすい。きょう体部品の温度が低い状態からのスタック起動時における、スタック積層方向の中央に位置するセル (以下、中央セル) および端部セルの温度分布を Fig. 3 に示す。

端部周辺セルの温度は、中央セルに対して温度が低い。

¹ オートモービルセンター

中央セルと端部セルのMEA温度差(ΔT_{MEA})が大きくなると、端部セル内の結露水は、中央セルに対して多くなる。この事象は、セル電圧挙動を不安定にさせる要因の一つである⁽²⁾。

スタック起動時の ΔT_{MEA} を減少させるためには、きょう体部品の断熱性を向上させると共に、冷媒による熱交換や通電部品の発熱により、適切な熱をセルに供給する必要がある。つまり、スタックの熱設計では、冷媒による各セ

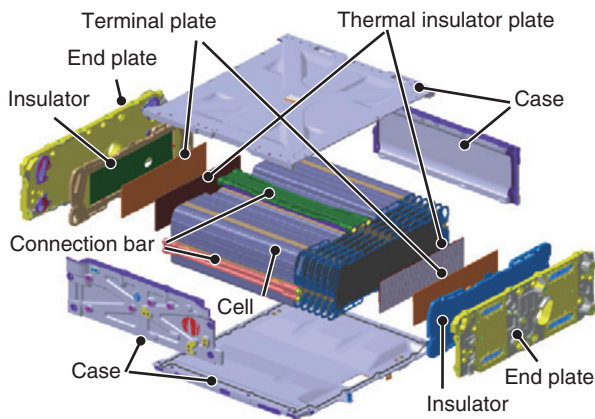


Fig. 1 Structure of fuel cell stack

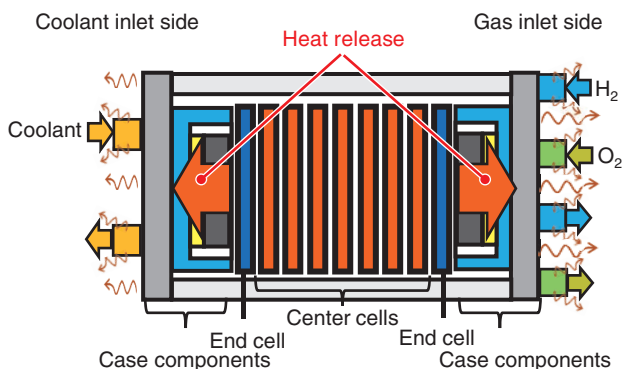


Fig. 2 Schematic image of heat release from case components

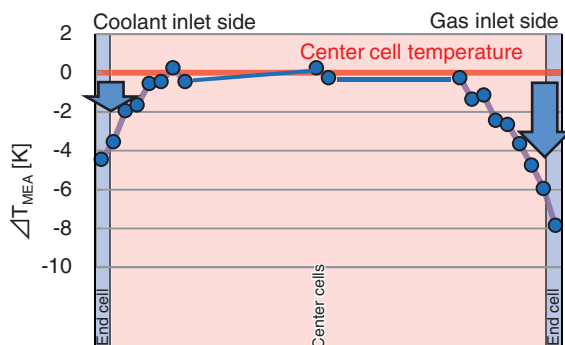


Fig. 3 Relationship between ΔT_{MEA} and position in stacking direction

ルの冷却だけではなく、あらゆる運転条件で、端部セルの温度が適切にコントロールされることが重要となる。

Hondaでは市販のソフトウェア⁽³⁾に独自の改良を加えることで、発電時のセル内部環境を推定するシミュレーション技術に取り組んできた⁽⁴⁾。しかし、このシミュレーション技術は、一般的な燃料電池シミュレーション技術と同様に⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾、圧力、温度、MEA含水量などの中央セル面内環境推定を目的とするため、温度以外の計算量が多いという課題がある。

従来のシミュレーション技術を用いた ΔT_{MEA} 推定は、以下の二つの手法が考えられる。一つ目は、単セルの計算に対して、セル積層方向への入力パラメータに放熱項を追加することで、対象セルを端部セルに見立てる手法である。二つ目は、スタックを構成する全セルときょう体部品を連成計算する手法(以下、スタック連成計算)である。前者は、隣接セルの温度低下が考慮できないため、精度の高い推定には向かない。後者は、端部セルの温度低下を高い精度で推定できるが、大規模計算が必要となっていた。

本稿で検討するシミュレーション技術は、スタック内の積層位置の異なる任意の位置のMEA温度を、大規模計算することなく、高精度で推定することを開発の目的とした。

2. 計算手法の検討

2.1. MEA温度に対するセル内の各熱交換因子の影響度

CLARITY FUEL CELLに搭載したスタックにおける、各流体の流れ方向をFig. 4に示す。空気と冷媒の流れ方向は同一方向だが、H₂は反対方向に流れる構造になっている。

発電時にMEAから発生する熱に対して、セル内で熱交換に利用できる因子はアノードガス(H₂)、カソードガス(空気)、冷媒が想定される。そこで、車両環境において想定される発電条件である、電流密度0.03 A/cm²、0.1 A/cm²、0.3 A/cm²、0.7 A/cm²、1.5 A/cm²各発電中にお

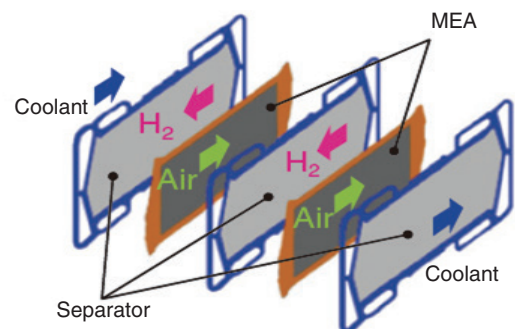


Fig. 4 Flow directions of anode gas, cathode gas, and coolant

る、各因子の出入口温度変化量と物性値（熱容量、流量）から熱交換量を算出することで、支配的な熱交換因子を特定した。冷媒の熱交換量を基準としたときの、各流体の熱交換量の比率を Fig. 5 に示す。この結果からガス（ H_2 と空気）の熱交換量は、冷媒の熱交換量に対して $\pm 3\%$ 以下であることがわかった。単位面積当たりのスタック電流により、冷媒とガスの熱交換量の比率が異なるのは、冷媒と各ガスのスタック入口温度と流量が異なるためである。また、 H_2 の熱交換が放熱側となるのは、支配的な熱交換因子である冷媒の流れ方向に対して、 H_2 は逆方向に流れる構造となるためである。

2.2. MEA 温度に対する MEA 面内の熱伝導の影響度

MEA の熱の移動は、熱伝導とそれに直交するセル積層方向の熱伝達が生じる。面内の熱伝導が支配的な場合と、セル積層方向の熱伝達が生じる場合のイメージ図を Fig. 6 に示す。MEA 面内方向の熱伝導の影響が大きい場合、スタック入口から出口に至る冷媒の温度勾配によらず、MEA 面内温度分布は均一になることが想定される。逆に、セル積層方向の熱伝達が生じる場合、MEA 面内温度分布は、スタック入口から出口に至る冷媒の温度勾配に追従することが想定される。

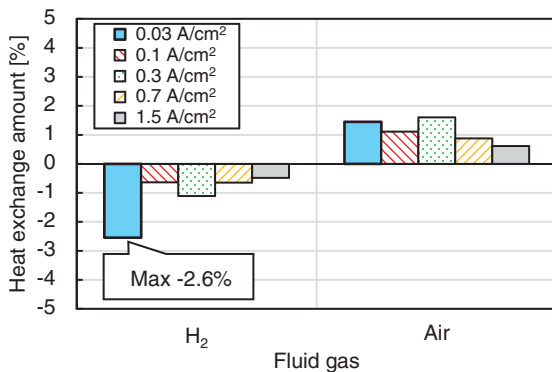


Fig. 5 Heat exchange amount for each fluid with coolant as benchmark

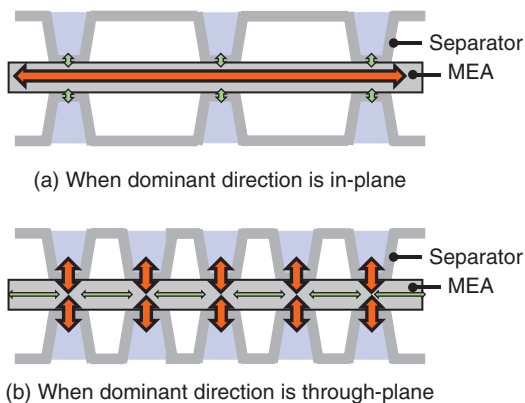


Fig. 6 Schematic image of heat exchange in cell in in-plane direction and through-plane direction

そこで、暖機時の代表的な発電条件である 0.1 A/cm^2 発電中において、中央セル MEA 面内の温度測定位置を Fig. 7 に示す、冷媒入口側、中央、冷媒出口側の 3 点としておこなった。冷媒入口温度を基準にした温度差 ($\Delta T_{\text{cool in-out}}$) で整理したグラフを Fig. 8 に示す。この結果より、MEA 面内方向の温度分布は冷媒の温度分布と同等であることがわかった。つまり、MEA 面内方向の熱伝導よりも、冷媒と MEA 間の熱交換の方が MEA 温度に対して強い相関があると考えられる。

2.3. 計算手法の考え方

前述の結果から、 H_2 と空気による熱交換と、MEA 面内の熱伝導の計算は、MEA 温度に対して影響度が小さいため、省略できると考えた。また、MEA 面内の熱伝導の影響が少ないことに着目して、各部品における計算部位を、セル面内の一点に限定した。従来のシミュレーション技術はセル面内の温度分布を推定するツールであるのに対して、本稿で検討のシミュレーション技術は、Fig. 9 に示すように、きょう体部品を含めたセル積層方向の温度分布を推定できることが特徴である。セル面内の計算部位は任意で設定することが可能であり、面内複数点を計算することで、スタック全体の温度分布を精度良く推定することができる。

セル積層方向シミュレーション化にあたり、例えば乱流の度合いを表す指標であるレイノルズ数のように、セルの

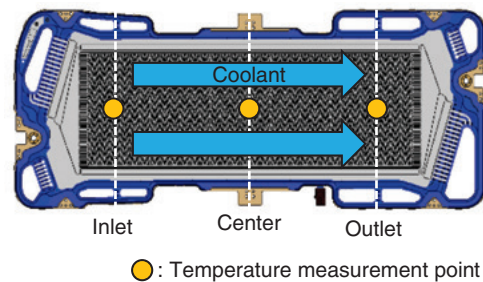


Fig. 7 Temperature measurement points for inlet, outlet, and center cell

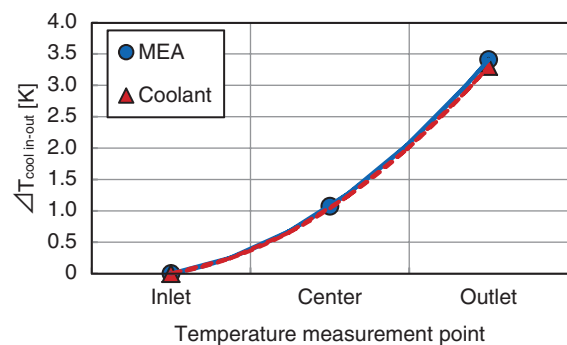


Fig. 8 Temperatures of MEA and coolant

三次元構造が大きく影響する因子も存在する。そのため、単純にセル積層方向シミュレーション化をするだけでは、推定精度が不足してしまう。しかし、セルの三次元構造が影響するような因子の詳細計算をおこなうと、計算量が膨大になってしまう。そこで、一般的な理論式と物性値に加えて、発電中のスタックで実測した基礎データを基にした補正項(コリレーション係数)を導入することにした。この対応により、本稿で提示するシミュレーション技術は、推定精度を低下させることなく計算量を減らすことができた。

温度推定精度の目標値は、センサ誤差と部品ごとのばらつきを考慮した実測ばらつき範囲から、実測比±5%以内に設定した。この目標値は、従来のセル面内シミュレーション技術と同等の推定誤差である。

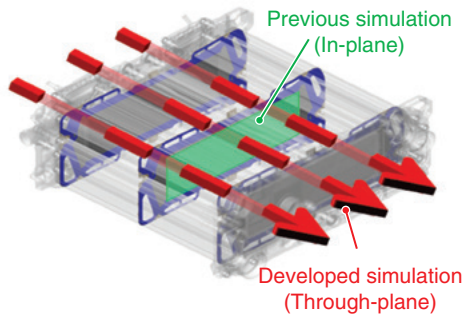


Fig. 9 Roles of developed simulation and conventional simulation

3. セル積層方向過渡伝熱シミュレーションの構築

3.1. 部品内部の伝熱

Fig. 10 (a) に示すような、部品 A の内部において、セル積層方向過渡伝熱シミュレーションで考慮する熱の移動は、Fig. 10 (a), (b), (c) および式 (1) で示すように熱伝導、熱伝達(外気への放熱、冷媒による熱交換)、内部発熱とした。また、式中の略称の意味は、略称一覧として末尾に記載する。

$$mC \frac{dT_n}{dt} = Q_c - Q_t + Q_h \quad (1)$$

式 (1) の熱伝導に関する項は式 (2) から式 (4) で表現される。

$$Q_c = Q_{n-1} - Q_n \quad (2)$$

$$Q_{n-1} = \frac{\lambda}{l} (T_{n-1} - T_n) A_c \quad (3)$$

$$Q_n = \frac{\lambda}{l} (T_n - T_{n+1}) A_c \quad (4)$$

式 (1) の熱伝達に関する項は式 (5) から式 (8) で表現される。ここで、式 (7) で表現される冷媒による熱交換において、冷媒の熱伝達係数 (h_{cool}) は、冷媒の流速、またセル流路形状のような三次元構造の影響を受けて変動する値である。そのため、 h_{cool} の理論式による表現は容易ではない。そこで、セル積層方向過渡伝熱シミュレーションでは、Fig. 11 に示す実際のセルを用いて実験的に求めたコリレーション係数 α と冷媒流量の関係式を、 h_{cool} の補正項として用いた。これより、一定のセル形状時における冷媒流量の変動による h_{cool} の変動を、計算量を増やすことなく表現できる。

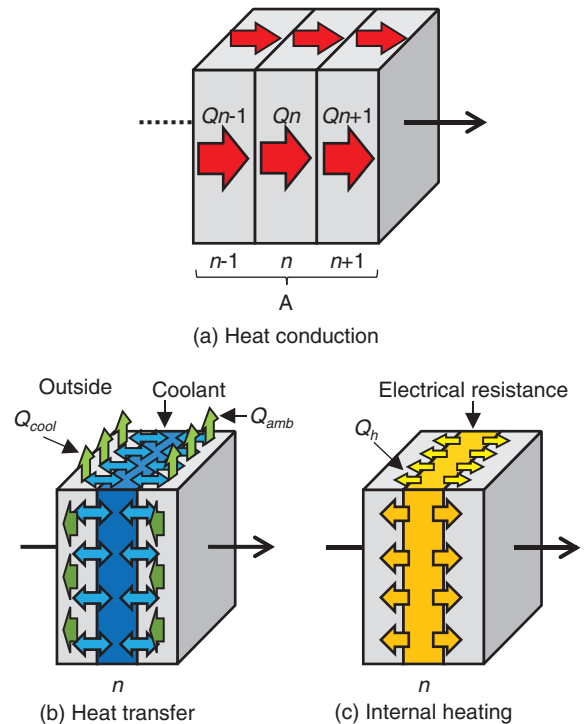


Fig. 10 Schematic image of heat flux in components

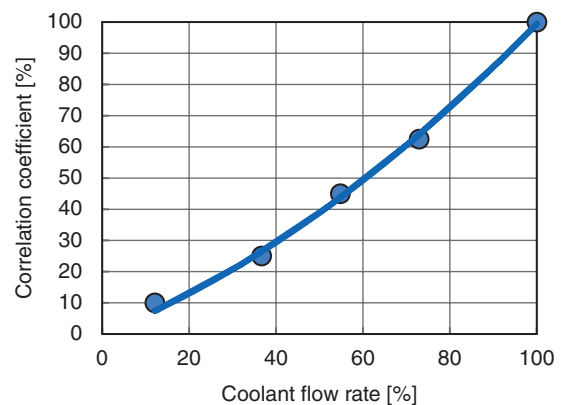


Fig. 11 Relationship between correlation coefficient and coolant flow rate

$$Q_t = Q_{amb} + Q_{cool} \quad (5)$$

$$Q_{amb} = h_{amb} A_{amb} (T_n - T_{amb}) \quad (6)$$

$$Q_{cool} = \alpha h_{cool} A_{cool} (T_n - T_{cool}) \quad (7)$$

$$\alpha = f(v_{cool}) \quad (8)$$

式(1)の内部発熱は、一般部品とMEAで使用する式が異なる。一般部品はジュール熱を考慮した式(9)、MEAは燃料電池の化学反応における熱損失を考慮した式(10)で表現される。

$$Q_{h\ parts} = I^2 R \quad (9)$$

$$Q_{h\ MEA} = I \Delta E \quad (10)$$

3.2. 部品間の伝熱

Fig. 12に示すような、部品Aと部品Bの界面において、セル積層方向過渡伝熱シミュレーションで考慮する熱の移動は、式(11)から式(13)で示すように部品間の熱伝達と界面抵抗による発熱と設定した。

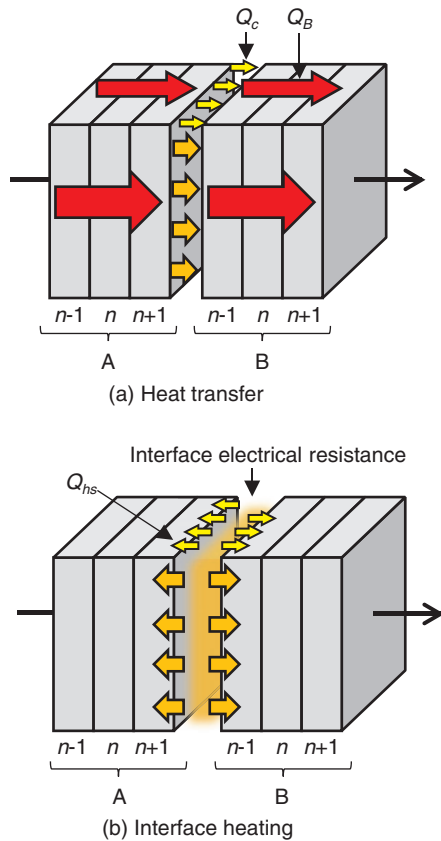


Fig. 12 Schematic image of heat flux between components A and B

$$Q_B = Q_{A-B} + Q_{hs} \quad (11)$$

$$Q_{A-B} = h_{A-B} A_c (T_A - T_B) \quad (12)$$

$$Q_{hs} = I^2 R_s \quad (13)$$

スタック構成部品ごとに上記の計算式を適用し、それぞれの物性値および寸法をパラメータとして入力することで、スタック部品モデルを構築した。

4. シミュレーションの結果とその精度確認

4.1. 発電モード違いの温度推定精度の確認

車両環境において想定される発電条件である、電流密度 0.03 A/cm^2 , 0.3 A/cm^2 , 0.7 A/cm^2 , 1.5 A/cm^2 各発電時の計算をおこなった。中央セル、端部セル、きょう体部品の最外部部品であるエンドプレートを評価対象として、実測と計算結果の比較をおこなった (Fig. 13)。各運転条件における、定常時の温度推定誤差は最大で実測比3.7%であり、目標値を達成した。この結果から、セル積層方向過渡伝熱シミュレーションは、特定のモードに限定することなく、低負荷から高負荷まで、幅広い発電モードのスタック温度推定に適用できることが確認できた。

4.2. スタック起動モードにおける温度推定精度の確認

車両環境において、中央セルと端部セルのMEA温度差 ΔT_{MEA} が最も大きくなることが想定される、スタック起動モードのイメージ図を Fig. 14に示す。本モードは、長時間のソークにより、セルの温度が外気温と同等まで低下した状態でスタックを起動し、アイドル発電によりセル温度が上昇しはじめ(過渡時)、セル温度が一定になるまで(定常時)の一連のモードである。本モードにおいて、熱容量が大きく温度追従性の低いきょう体部品は、端部セルに対し

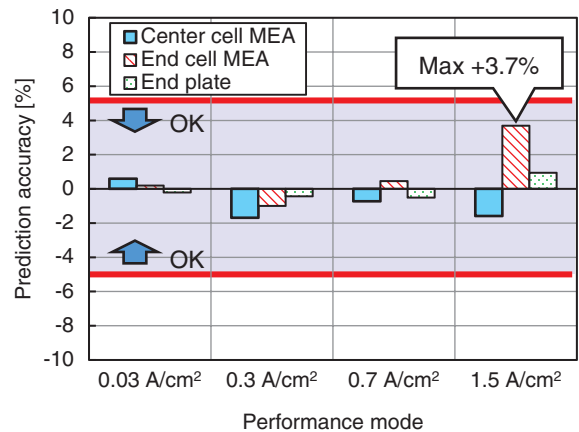


Fig. 13 Simulation and measurement results for fuel cell stack part temperatures during steady-state operation

て温度差が付きやすい。そのため端部セルからきょう体部品への放熱量が大きくなり、 ΔT_{MEA} が大きくなる。本モードにおける実測データと計算結果を比較することにより、過渡時における温度推定の精度確認をおこなった。

スタック起動モード中の過渡時における中央セル、端部

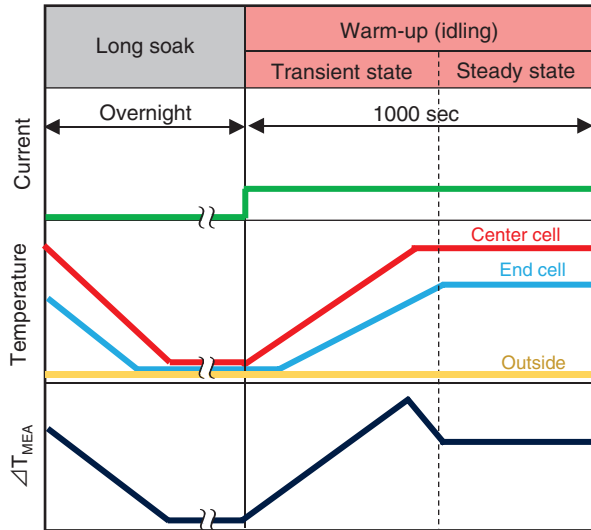


Fig. 14 Schematic image of warm-up mode

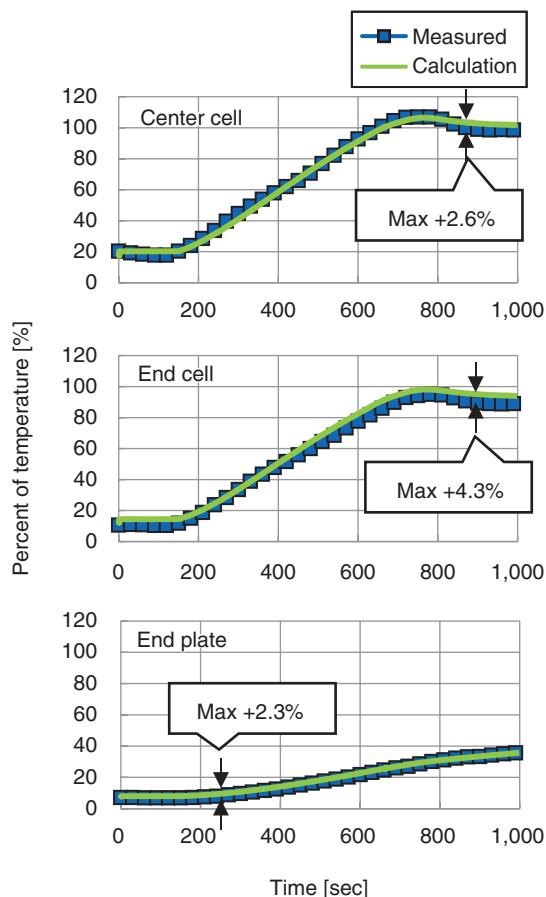


Fig. 15 Simulation and measurement results for fuel cell stack part temperatures in transient state during warm-up mode

セル、エンドプレートの実測と計算の温度推移を Fig. 15 に示す。このグラフの温度は、外気温を基準として、1000 sec 経過時の中央セル温度を最大温度としたときの割合で表している。長期ソークにより、セル温度が外気温と同等まで低下した状態から、各部品温度が上昇する過程を、シミュレーション技術で再現できることを確認した。また、温度推定誤差は最大で実測比 4.3% であり、過渡時を含むスタック起動モードにおいても目標値を達成した。この結果から、セル積層方向過渡伝熱シミュレーションは、過渡時を含めたスタック温度推定にも適用できることが確認できた。

4.3. 計算速度の確認

従来のシミュレーション技術では、ワークステーションレベルの計算リソースを用いたときの、スタック起動モードの計算時間は、中央セル 1 セルだけで数日以上かかっていた。これに対して、本稿で検討のシミュレーション技術では、ノート PC レベルの計算リソースを用いたときの、スタック起動モードの計算時間は 60 sec であり、面内数点の計算をおこなっても数分程度で計算可能である。このことから、セル積層方向過渡伝熱シミュレーションの構築により、一般的な計算リソースであっても、実用的な計算時間で、スタックの全体の温度分布を推定できるようになった。

5. まとめ

スタック内の積層位置の異なる任意の位置の MEA 温度を、大規模計算することなく、高精度で推定できる、セル積層方向過渡伝熱シミュレーションを構築した。MEA 温度への影響度が大きい計算量の多い因子については、発電中のスタックで実測した基礎データを基にした補正項を導入することにより計算量を削減した。同時に従来のシミュレーション技術に対して、MEA 温度への影響度が少ない因子を特定して省略する手法を確立した。定常時のスタック発電条件における温度推定誤差は、最大で実測比 3.7% であった。また、過渡時を含むスタック起動モードにおける温度推定誤差は、最大で実測比 4.3% であった。これらの結果から、セル積層方向過渡伝熱シミュレーションの温度推定精度は、目標値である実測比 $\pm 5\%$ 以内を達成できた。

参考文献

- (1) 木村顕一郎, 河崎輝明, 大村孝之, 渥美淑弘, 清水潔: 新型燃料電池自動車 CLARITY FUEL CELL の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 28, No. 1, p. 1-7
- (2) 千葉裕人, 岩澤力: 中性子ラジオグラフィを用いた水観察による燃料電池の発電環境最適化, Honda R&D

- Technical Review, Vol. 25, No. 1, p. 119-127
- (3) Yoneda, M., Tago, Y., Suzuki, K., Takimoto, M., Ejiri, E.: Macroscopic Modeling and Simulation for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, ECS Transactions, Vol. 3, Issue 1, p. 1105-1114, (2006)
- (4) 南雲健司, 井ノ上雅次郎: シミュレーションによる燃料電池スタックセル面内 CCM 含水量分布予測, Honda R&D Technical Review, Vol. 28, No. 1, p. 24-30
- (5) 米田雅一, 吉村英人, 高山務, 茂木春樹, 高山糧, 仮屋夏樹: 固体高分子形燃料電池シミュレーション技術の展望, みずほ情報総研 技報, Vol. 6, No. 1, p. 51-58, (2014)
- (6) Nonoyama, N., Ikogi, Y.: PEMFC model development for designing MEA: Model Validation and a Parameter Study for Low Humidity Operations, ECS Transactions, Vol. 16, Issue 2, PART 1, p. 13-21, (2008)
- (7) 山本恵一, 藤田悠介, 安本栄一, 菅原靖: 燃料電池マルチスケールシミュレーション, パナソニック技報, Vol. 63, No. 1, p. 72-77, (2017)
- (8) 高山務, 吉村英人, 塚本貴志, 茂木春樹, 高山糧, 米田雅一: 固体高分子形燃料電池シミュレータ「P-Stack4.0」フルスタック性能解析を実現する専用ソフトウェア, クリーンエネルギー, Vol. 26, No. 1, p. 1-8, (2017)

Q_{cool}	Amount of heat exchange with coolant [W]
Q_c	Amount of heat conduction [W]
Q_h	Amount of internal heat generation [W]
$Q_{h\ parts}$	Amount of internal heat generation for general components [W]
$Q_{h\ MEA}$	Amount of internal heat generation for MEA [W]
Q_{hs}	Amount of heat generation at interface [W]
Q_{n-1}	Amount of heat conduction for $n-1$ [W]
Q_n	Amount of heat conduction for n [W]
Q_i	Amount of heat transfer [W]
R	Specific electrical resistance [Ω]
R_s	Interface electrical resistance [Ω]
v_{cool}	Coolant flow rate [L/min]
α	Correlation coefficient [-]
λ	Thermal conductivity [W/(m·K)]
ΔE	Voltage drop [V]

List of Symbols

A_{amb}	Heat transfer area of external air [m^2]
A_c	Heat conduction area [m^2]
A_{cool}	Coolant heat transfer area [m^2]
C	Heat capacity [J/(kg·K)]
h_{A-B}	Coefficient of heat transfer between A and B [W/(K·m ²)]
h_{amb}	Heat transfer coefficient of external air [W/(K·m ²)]
h_{cool}	Heat transfer coefficient of coolant [W/(K·m ²)]
I	Current [A]
l	Length [m]
m	Mass [kg]
t	Time [sec]
T_A	Surface temperature of A [$^{\circ}C$]
T_B	Surface temperature of B [$^{\circ}C$]
T_{amb}	External air temperature [$^{\circ}C$]
T_{cool}	Coolant temperature [$^{\circ}C$]
T_n	Temperature of n components [$^{\circ}C$]
T_{n+1}	Temperature of $n+1$ components [$^{\circ}C$]
Q_{A-B}	Amount of heat transfer between A and B [W]
Q_B	Amount of heat conduction in B [W]
Q_{amb}	Amount of heat release to external air [W]

■ 著 者 ■



梅澤 健輔



松井 康佑



池田 佑太