

分割端子基板の開発による MEA 短絡検査の高速化

High-speed Inspection Technology for Fuel Cell MEAs Using Split-terminal Resistance Measurement System

川 西 弘 晃¹
Hiroaki KAWANISHI

山 岸 弘 幸²
Hiroyuki YAMAGISHI

難 波 健 介¹
Kensuke NANBA

要 旨

ABSTRACT

新燃料電池スタックは、大量生産に向けて品質同等で生産性の向上を目的とした開発を進めており、特に膜電極接合体の短絡検査時間は生産性を制限する課題であり、これを短縮する開発を実施した。従来の平板基板での短絡検査では膜電極接合体全体の電気的特性値が検出される。局所で発生している短絡のシグナルではチャージによる検出値の変化に対して小さいため、この変化が完了するまで判定ができなかった。本開発では分割端子基板にすることで局所ごとのシグナルの検出感度を向上させ、局所的にはチャージ変化以上の短絡シグナルを検出させることに成功した。この結果、検査判定への影響を最小化させ、チャージに起因する測定待機時間を従来比 87% 短縮した。また分割基板適用課題として端子間隙に短絡が存在する誤判定因子の対応として周辺電流の合成処理アルゴリズムを開発した。結果として検査トータル時間を 10 秒に短縮し、セル生産性の向上に大きく寄与した。

New fuel cell stacks are being developed with the aim of improving productivity while maintaining the same quality for mass production. In particular, the time it takes to perform shorting inspection of the membrane electrode assembly is an issue that limits productivity, so development has been conducted to help reduce this time. Conventional shorting inspection on flat bases detects the electrical characteristic values of the entire membrane electrode assembly. In this approach, signals of local short circuits are small relative to the change in detected value due to the charge, and thus they could not be judged until the change was complete. In the development discussed in this paper, the detection sensitivity for signals in each local area was increased by using a split-terminal base. Shorting signals greater than the charge change were successfully detected locally. This lowered the impact on the inspection judgment, and the measurement waiting time caused by charging was lowered by 87% compared with the conventional method. In addition, the researchers developed an algorithm for synthesizing peripheral currents to deal with the misjudgment factor of a short circuit in the terminal gap, which presented an issue in the use of split bases. As a result, inspection total time was reduced to 10 seconds, thus contributing greatly to increasing cell productivity.

1. 燃料電池スタックについて

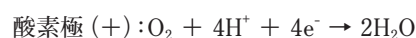
燃料電池はカーボンニュートラル実現に向けた循環型クリーンシステムとして期待されている⁽¹⁾。

Honda は 1980 年代から FC 技術の実用化に取り組み⁽²⁾⁻⁽⁵⁾、2016 年に従来の燃料電池システムを搭載した CLARITY FUEL CELL^{(6),(7)}を発表した。

次のステージとして、商用車や建機、定置電源など多様な市場展開を可能とする高耐久性と低コストを確保した新燃料電池システム⁽⁸⁾をゼネラルモーターズと共同で開発した。

この新構造燃料電池スタックの生産ラインでは電極ロールの投入からセル積層までの全自動組立ラインを実現した⁽⁹⁾。

固体高分子型燃料電池は Fig. 1 に示すように、水素と酸素との電気化学反応によって化学エネルギーを電気エネルギーに直接変換するものである。化学反応式を以下に示す。



水素イオンを伝導する電解質膜 (Polymer Electrolyte Membrane: PEM) を水素極と酸素極 (空気極) の二つの

¹ 先進パワーユニット・エネルギー研究所

E-mail: hiroaki_kawanishi@jp.honda

² 本田技研工業株式会社

電極層 (Catalyst Layer: CL) と拡散層 (Gas Diffusion Layer: GDL) で挟み、膜電極接合体 (Membrane Electrode Assembly: MEA) を形成する。この MEA を二枚のセパレータ (Separator: SEP) で両側から挟んだ構造体をセルと呼ぶ。このセルを積層、締結したものが燃料電池スタックである。

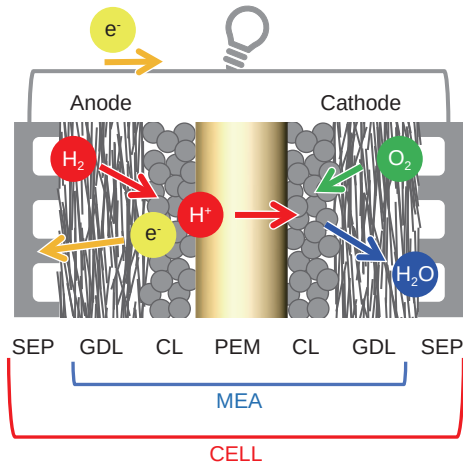


Fig. 1 Mechanism of electricity generation in FC stack

2. 短絡検査課題

2.1. MEA の短絡事象について

燃料電池スタックの性能の重要項目である出力性能と耐久性を維持するための要素として電解質膜の絶縁品質とガスの遮断機能がある。電解質膜の絶縁性を阻害する事象として例えば Fig. 2 に示すような繊維状のコンタミネーションによる電極間の導通事象がある。このような導通により電極間に電気が流れ、起電力が下がる事象や、電極間に高電圧が掛かったときに膜にピンホールが生じ、水素と酸素のクロスリークを発生する事象につながるため、短絡検査を実施している。

2.2. 従来の MEA 短絡検査手法

電解質膜に短絡を生じるとセル電圧の低下や膜の耐久性の劣化が起こりうるため、従来モデルでは Fig. 3 に示すような短絡検査システムにて次の STEP を実施し、一定以上の短絡がないことを確認している。

その検査 STEP は以下の通りである

- 1, 一對の平行平板電極にて一定荷重で挟持する
- 2, 定電圧直流電流を印加する
- 3, 測定値安定まで電荷をチャージさせる
- 4, チャージ後に両極間に流れる電流値を計測する
- 5, しきい値に対して Pass/Fail を判定する

従来の MEA 短絡検査プロセスにかかる時間を Fig. 4 に示す。チャージ工程は検査時間の 80% を要しており、律速工程となっている。この要因として、MEA は絶縁体の PEM を導電体の GDL 及び CL で両側から挟んだコンデンサ構造であり、キャパシタンスを持つからである。キャパシタンスの判定影響について Fig. 5 に検査 Fail 判定となった MEA の電流計測値の変化及び従来の MEA 短絡検査しきい値を示す。電流値の変化がサチュレーションし、判定可能なタイミングまでに 20 秒ほどの時間を要することがわかる。

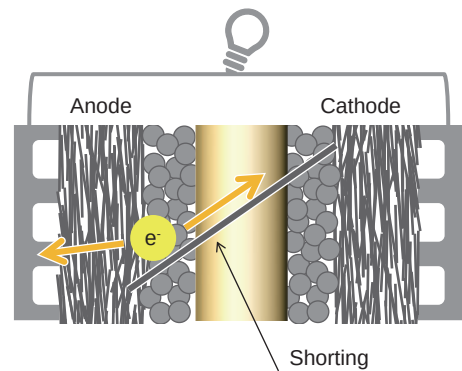


Fig. 2 Imaged figure of MEA shorting

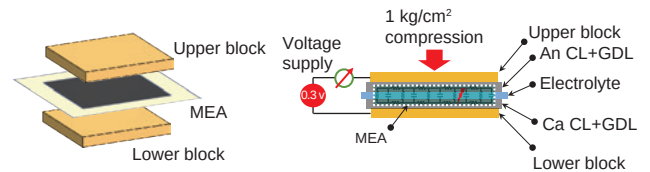


Fig. 3 Shorting inspection system of Honda's previous model

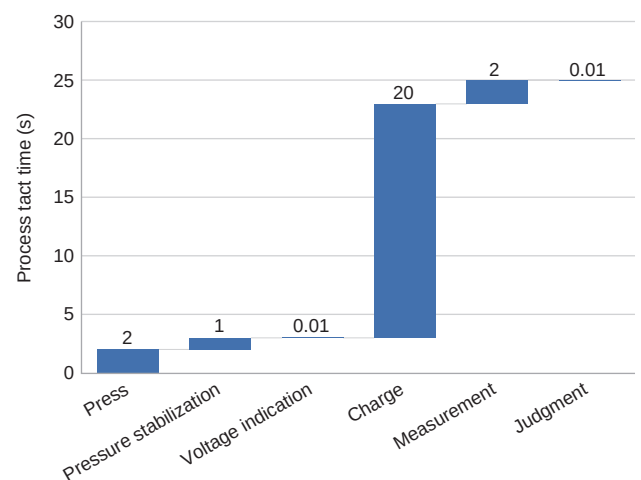


Fig. 4 Takt time of each process in shorting inspection

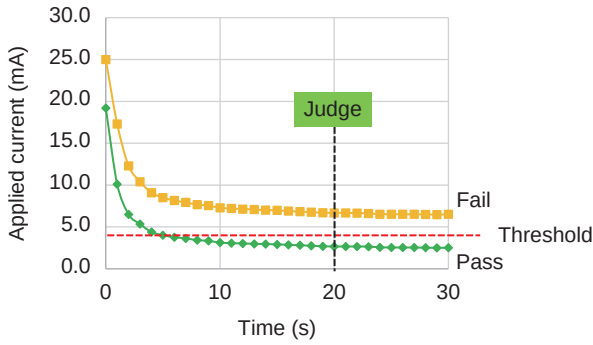


Fig. 5 Variation of measured values due to charging

3. 分割短絡検査装置の考案

本開発では従来の燃料電池スタックに対して生産性を向上させるため、短絡検査プロセスの律速となるチャージにかかる時間を短縮させることに着目し、局所的な短絡シグナルを抽出し、チャージによる影響を最小化する分割端子基板を考案した。

一般的なチャージの時間短縮方法として印加する電流と電圧を上げるという方法がある⁽¹⁰⁾。しかしこの方法はすでに従来手法構築時に適用し、その結果としてチャージにかかる時間は 20 秒となっており、大幅な改善は期待できない。従って MEA 短絡検査の高速化は MEA のキャパシタ成分へのチャージ量を上げる以外の方法にて実現する必要がある。

次に Fig. 3 に示した従来のような平板で計測する場合、局所にある短絡電流に対して大面積のキャパシタへの突入電流が、相対的に大きいことが課題である。解決方針を示すに当たりまず MEA の電気回路図を示す。MEA の電気的性質は、短絡抵抗、コンデンサ容量に加えて、材料由来の内部抵抗を持つと考えられ、この電気回路図を Fig. 6 に示す。図に示すような短絡のある位置とない位置を分割された回路では短絡シグナルは局所的にはその他成分より大きいと想定される。解決の方針として、局所に流れる短絡シグナルを積極的に取り出し、チャージによる変化に対して

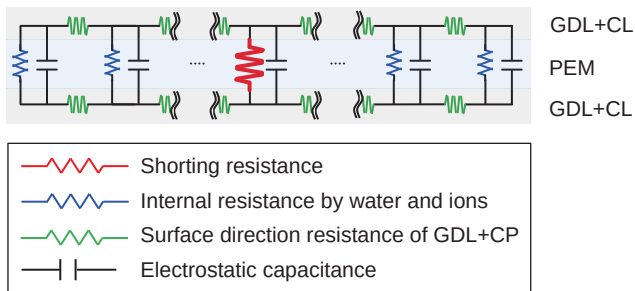


Fig. 6 Electrical schematic of MEA

短絡の検出値を相対的に大きくすることでチャージを起因する測定待機時間の短縮を実現するために以下の技術開発に取り組んだ。

- (1) 短絡シグナルの電圧抽出に向けた分割端子基板の開発⁽¹¹⁾
- (2) 分割端子間隙に発生する短絡電圧の合成処理アルゴリズム開発⁽¹²⁾

次章より、それぞれについて順次述べる。

4. 分割端子基板の開発

4.1. 分割端子基板装置の基本構想

分割端子基板での検査装置回路及び電圧計測機にはニデックアドバンステクノロジー社のマルチチャンネルテスター (R-5800i) を接続した装置の基本構想を Fig. 7 に示す。分割端子下に高精度で既知な抵抗値のシャント抵抗を接続し、各シャント抵抗にかかる電圧を計測し、MEA の抵抗を算出する計測システムとした。

局所 MEA 抵抗の算出として直列接続の抵抗と電圧の比から求める式を以下に示す。

$$\Omega_{MEA} = \frac{\Omega_{shunt} \cdot V}{V_{shunt}} - \Omega_{shunt}$$

Ω_{MEA} : MEA resistance (Ω)

Ω_{shunt} : Shunt resistance (Ω)

V : Voltage supplied from power supply (V)

V_{shunt} : Voltage across shunt resistance (V)

基本構想をベースに短絡シグナルを抽出可能な装置仕様を決定するための検証について以下に述べる。

精度よく短絡シグナルを抽出するためには、まず Fig. 7

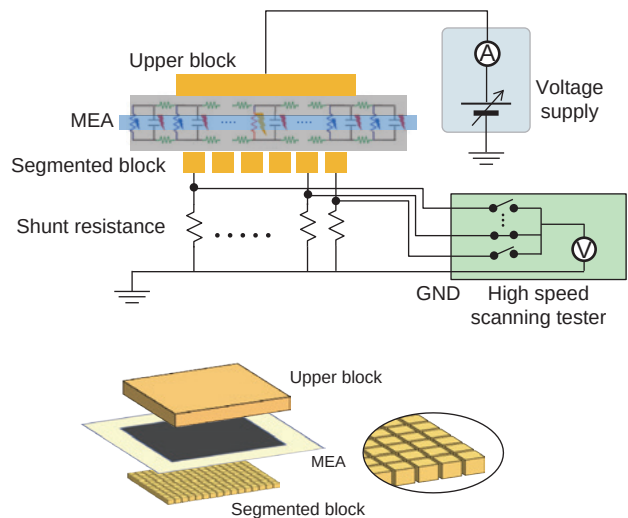


Fig. 7 Circuit diagram of shorting inspection system

で示す回路の短絡部直下のセンサーに短絡電流が多く流れる状態を構築する必要がある。しかし阻害因子として Fig. 6 の MEA 回路図に示したように MEA の GDL 及び CL 部に面方向の導電パスが存在し、これにより短絡電流が面方向に拡散する。これを抑制することが短絡シグナルの電圧を抽出する要件であり、拡散に関わる要素として端子サイズ、シャント抵抗値およびピッチ間隔がある。これらについて諸元の設定を実施した。

4.2. 端子サイズ設定

端子サイズによる電流拡散性評価として端子方向抵抗であるシャント抵抗は固定値 $10\ \Omega$ とし、端子サイズを 3.0 から $10.0\ \text{mm}$ で 4 水準の分割基板にて短絡部位直下の電流量を 100% としたときの周辺端子での検出割合と距離の関係性である電流拡散性を検証した結果を Fig. 8 に示す。端子サイズを小さくすることで電流拡散の抑制が確認でき、入手可能なテスターのチャンネル数による制約から端子サイズ $3.0\ \text{mm}$ を選択した。

4.3. シャント抵抗値設定

シャント抵抗値の設定方針としては面方向拡散の抵抗に対して短絡直下方向のシャント抵抗を小さくすることが基本方針ある。一方で測定ばらつきの抑制にはシャント抵抗で検出される電圧がテスターの測定精度に対して十分に大きい必要がある。このためシャント抵抗値を大きくし、検出電圧を大きくすることが必要である。

検証した結果としてシャント抵抗に対する測定精度と電流拡散のしにくさの評価として短絡中心の端子電圧を 100% としたときの隣接端子電圧の電圧割合を Fig. 9 に示す。電流の拡散が少なく、かつ短絡判定しきい値である $900\ \Omega$ に対して 3σ で $1/10$ と十分に測定精度が高くなるシャント抵抗 $0.5\ \Omega$ をバランス点として選択した。

4.4. ピッチ間隔の設定

理論上はピッチ間隔を狭くすると面方向の距離が短く

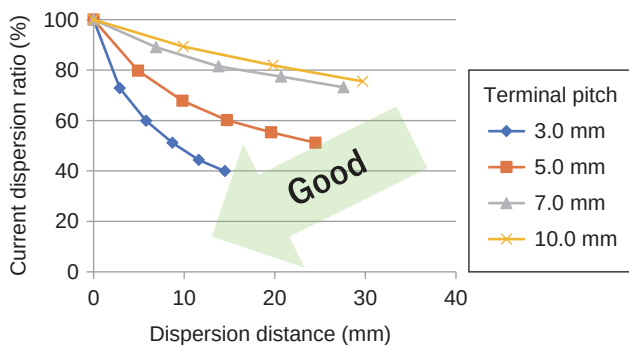


Fig. 8 Relationship between segment size and current dispersion

なるため直下の回路方向への抵抗に対して MEA の面方向の抵抗が相対的に小さくなる。このため隣接端子に電流が流れやすくなり精度は低下する。一方でピッチ間隔を広げると端子間隙に短絡部が掛かりやすくなり、シグナルの分散による精度低下や短絡位置がわかりにくくなることが想定されるため、ピッチ間隔を狭くしたい。このため、ピッチ間隔の電流拡散への影響を実測にて確認した。なお本検証では端子サイズを $3.0\ \text{mm}$ に固定した。検証は短絡直下の電圧値を 100% としたときの距離に対する電流の拡散の程度を評価し、この結果を Fig. 10 に示す。ピッチ間隔は $0.3\ \text{mm}$ と $0.7\ \text{mm}$ で電流拡散について差がないことを確認できた。検証結果よりピッチ間隔を短くできる可能性を確認できたが加工上の端子間隙短絡の発生抑止の観点から $0.3\ \text{mm}$ をピッチ間隔の下限とし、ピッチ間隔は $0.3\ \text{mm}$ と決定した。

4.5. 分割基板効果

最終的な基板仕様として端子サイズ $3.0\ \text{mm}$ 、ピッチ間隔 $0.3\ \text{mm}$ 、シャント抵抗 $0.5\ \Omega$ を選択した。

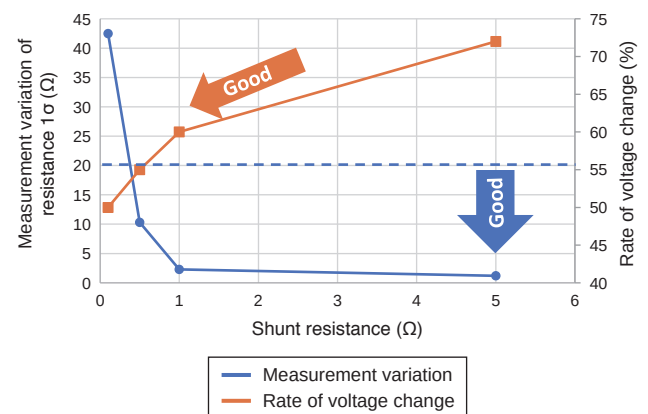


Fig. 9 Measurement variation and detection signal ratio with adjacent terminals due to shunt resistor specification differences

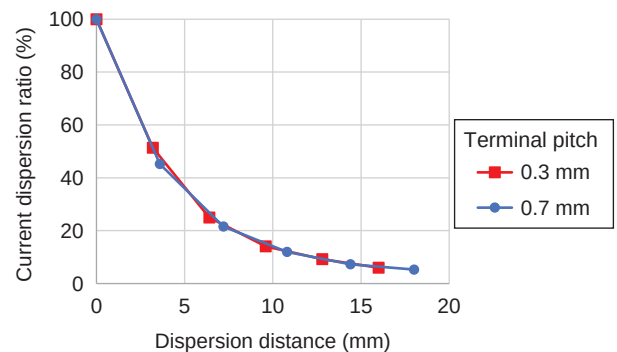


Fig. 10 Distance between terminals and current dispersion

分割基板による計測結果として Fig. 11 に分割基板で取得された XY ポジションに対する電圧値のデータを示す。データ上シグナルが明確に検出されていることを確認できた。次に短絡および非短絡部中心の X 線 CT による断面観察結果を Fig. 12 に示す。断面観察結果から短絡部に繊維状のコンタミネーションによる膜貫通を確認できたことから分割基板は的確に短絡事象を検出できているといえる。

続いて短絡部と非短絡部のチャージに対する抵抗の時間変化を Fig. 13 に示す。非短絡部と比較して短絡部は測定値の変化が十分に小さく、2.0 秒以内に定常状態となる。非短絡部は 15 秒以上の時間変化がみられることから、短絡部においてもチャージ影響はあるものと考えられる。しかしながら短絡のシグナルが大きく、チャージによる変化に対して影響を受けづらくなり、見かけ上定常状態になっていると考えられる。この結果より 2.0 秒程度で十分にサチュレーションし、検査判定できることが確認できた。最終的な検査時間としては生産プロセスの目標である 10 秒を実現するためチャージ時間に割付可能な 2.6 秒と設定した。最終効果としては Fig. 4 に示した従来のシステムのチャージ時間 20 秒から 2.6 秒と 87% 短縮することができた。

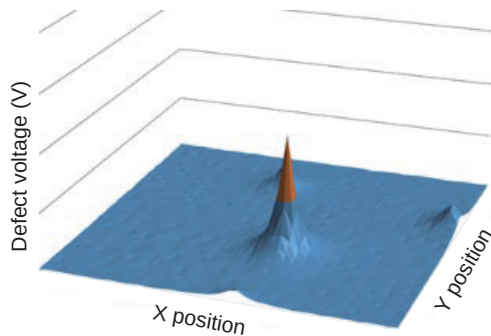


Fig. 11 Voltage measurement data on split-base MEA with short circuit

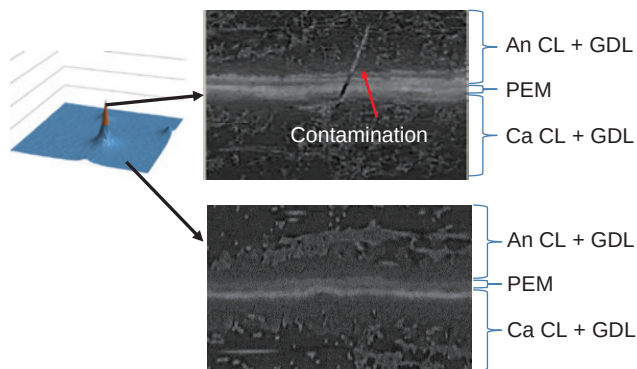


Fig. 12 X-ray CT image of shorting area

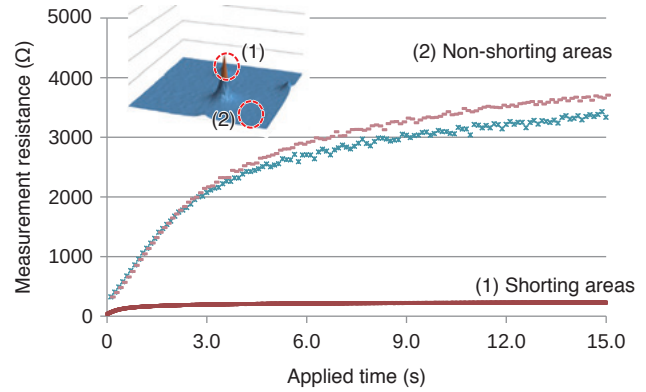


Fig. 13 Charge time variation between shorting and non-shorting areas

5. 分割端子による短絡検出のための合成処理アルゴリズム開発

5.1. 分割基板による検出課題

分割端子基板による特有の事象として Fig. 14 に示すように、端子上に短絡がある場合と端子間隙に短絡がある場合で検出値の結果が異なり、端子間隙にある場合、隣り合う端子に同程度の電流が流れる。Fig. 14 の (1) および (2) の短絡位置における端子 A と端子 B の検出電圧を Fig. 15 に示す。この結果より端子間隙に短絡が発生した場合、1 端子当たりの検出値が低く出る懸念があることがわかる。

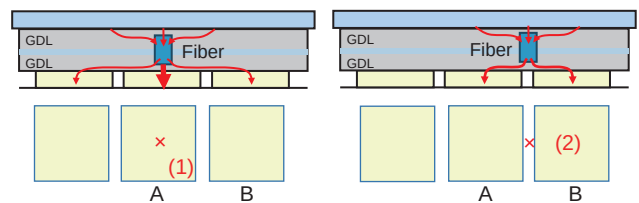


Fig. 14 Image of current bifurcation by segment and short-circuit position

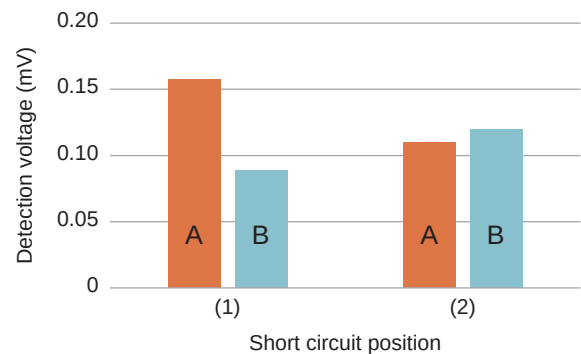


Fig. 15 Detection voltage value according to position of segment and short circuit

この事象の対策として以下の処理技術を開発した。

- (1) 分割された端子にかかった電圧の範囲合成処理
- (2) 範囲合成処理のばらつき因子除去処理

5.2. 合成処理

Fig. 14 のような端子間隙に発生した短絡事象において流れる総電流量は変わらないと考え、拡散電流を合成することで判定精度の低下を抑止させる手法を考案した。適切な合成範囲を決定するため、合成範囲の拡張に対する電圧値について評価した。合成処理範囲の検証として短絡部を中心に正方形に範囲を拡大させた。合成範囲のイメージを Fig. 16 に示す。合成結果として Fig. 17 の横軸は合成端子数、縦軸は合成電圧値を示し、プロットの曲線はそれぞれの短絡箇所データのデータである。合成値の算出は Fig. 6 に示した並列回路としてシャント抵抗にて検出された電圧 V_{shunt} の合成計算を実施した。

短絡電圧の合成を実施した結果、合成範囲に対して結果の大小が入れ替わる事象が確認された。これには二つの要因が考えられ、一つ目として本手法では短絡を中心とした放射状の範囲と合成計算上の中心が完全には一致しないた

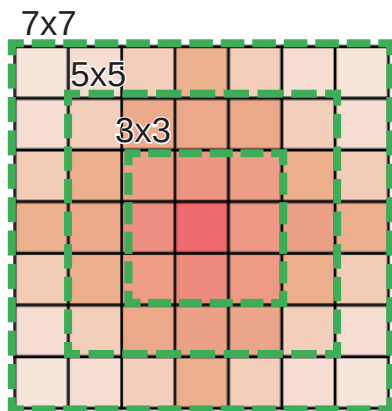


Fig. 16 Image of synthesizing range from the short circuit center

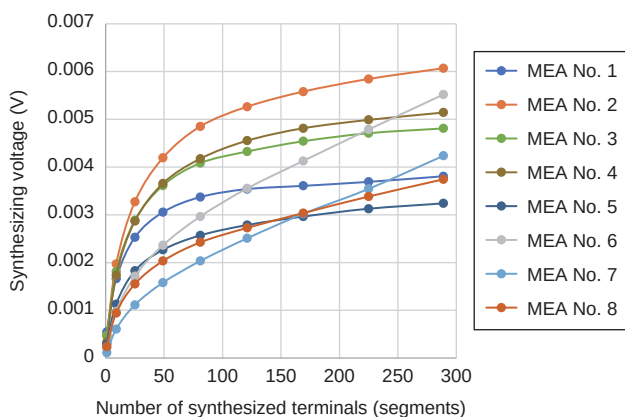


Fig. 17 Change in synthesizing voltage value relative to synthesizing range

め、合成範囲が狭い範囲ではばらつきとして処理されてしまうことである。二つ目は Fig. 6 に示したイオン・水に起因した材料由来の内部抵抗による電圧が MEA ごとにばらついているということである。

後者について MEA ごとの内部抵抗のばらつきを加味した算出が必要であり、次節にて述べる。

5.3. 内部抵抗電圧の除去

内部抵抗電圧のワークごとの差異による判定結果のばらつきに対して合成計算前に内部抵抗電圧分を計算上除去することを検討した。

内部抵抗電圧がばらつく中で適切に内部抵抗電圧の除去をおこなうため内部抵抗電圧の分布を明確にする必要があるため、Fig. 18 に示す短絡抵抗と内部抵抗の抵抗値分布を観測した。

結果より、抵抗値分布がふた山になることがわかる。抵抗値の低い方の分布は、コンタミによる短絡と確認できる。抵抗値の高い方の分布は、短絡ではなく内部抵抗の分布であると考察できる。分布のすそ野である 8000 Ω を内部抵抗の下限と考え、次に示す算術 STEP で説明するように内部抵抗電圧の除去をおこなう。そのイメージを Fig. 19 に示す。

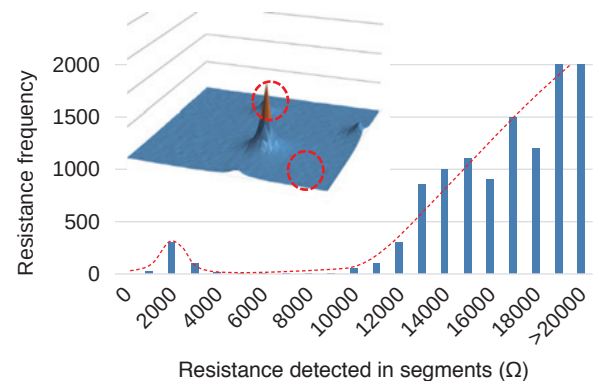


Fig. 18 In-plane resistance distribution of MEA

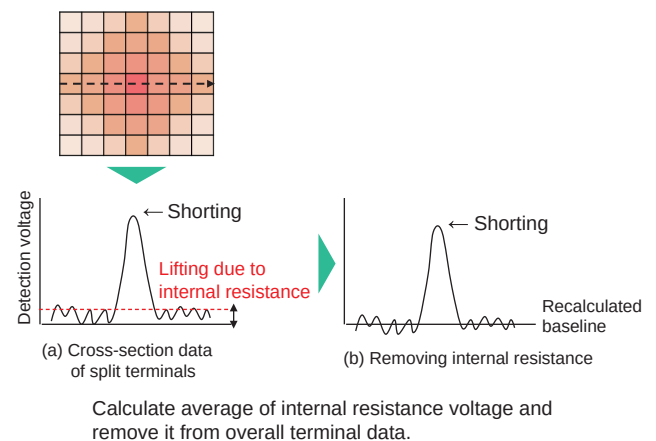


Fig. 19 Image of removal of base voltage lift due to internal resistance

算術 STEP は以下の通り

- 1, 全端子データから 8000 Ω 以上のデータを抽出
- 2, 抽出データ平均をその MEA の内部抵抗電圧の代表値とする
- 3, 全端子データから内部抵抗電圧代表値を除する
- 4, 各端子中心から指定した範囲の端子データを並列回路として合成処理し, 検出値とする
- 5, しきい値に対して Pass/Fail を判定する

除去効果の確認および適切な合成範囲を決定するため, 合成範囲の拡張に対する電圧値について評価した結果を Fig. 20 に示す. 100 端子以上の範囲合成で大小関係の入れ替わりがなく, 内部抵抗変動影響を除去できた. 材料由来での計測値変動に対するロバスト性向上ができた.

合成条件としては大小関係の変化が見られない 11x11 端子である 121 端子の合成範囲と設定した.

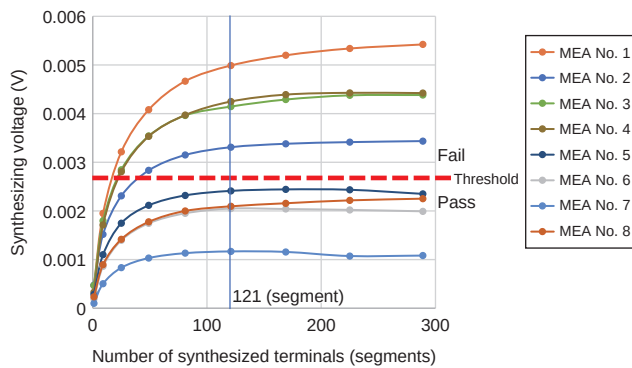


Fig. 20 Synthesizing range and voltage convergence

6. まとめ

燃料電池スタックの生産性向上に向けた燃料電池 MEA の高速短絡検査技術として, 分割端子基板の開発および分割端子特有の判定精度低下の抑止のための合成処理アルゴリズムを開発した.

- (1) 分割端子基板を採用することで, 短絡検査に必要なチャージによる測定待機時間を 87% 短縮した
- (2) 分割端子間隙に発生する短絡の合成処理アルゴリズムにより, 分割基板間隙など, 測定誤差が大きい位置での短絡発生による判定精度低下を防止することができ, 更に検査ロバスト性向上を実現できた.

参考文献

- (1) <https://global.honda.jp/stories/057.html>, (参照 2024/6/7)
- (2) https://global.honda.jp/tech/Hydrogen_Fuel_Cell_System_FC/, (参照 2024/6/7)

- (3) 川崎聡志, 小椋正己, 小野徹, 加美陽三: 世界初の燃料電池乗用車 Honda FCX の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 15, No. 1, p. 1-6
- (4) 小川隆行, 木村顕一郎, 内堀憲治, 藤本幸人, 清水潔: 燃料電池乗用車 Honda FCX 用パワートレインの開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 15, No. 1, p. 7-12
- (5) 川崎聡志, 内堀憲治, 村上義一, 清水潔, 藤本幸人: 次世代燃料電池スタックを搭載した New Honda FCX の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 18, No. 1, p. 45-50
- (6) 松永稔, 福嶋達也, 尾島邦明, 木村顕一郎, 小川隆行: FCX クラリティ用燃料電池パワートレイン, Honda R&D Technical Review, Vol. 21, No. 1, p. 7-14
- (7) 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
- (8) 菊池英明, 加地勇人, 西山隆之, 小此木泰介, 原田仁: CLARITY FUEL CELL 搭載の新型燃料電池スタックの開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 28, No. 2, p. 44-51
- (9) 石川暢一, 岩井田学, 内藤秀晴, 稲井滋, 吉田弘道, 室本信義: 高耐久・低コスト新構造燃料電池スタックの開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 37, p. 19-25
- (10) 成田誠之助, 小林侅史: 電気回路理論, 昭晃堂, 210p., (1978)
- (11) 特開 2018-160371
- (12) 特開 2022-006899

著者



川西 弘晃



山岸 弘幸



難波 健介