

バッテリーインピーダンスメータ BT4560

成沢 明洋^{*1}

要 旨

バッテリーインピーダンスメータ BT4560は、0.1 Hz～1050 Hzの交流で電池の内部インピーダンスを測定できるインピーダンスメータである。低インピーダンス化する大型電池を高精度で測定できることを特長とする。ここに、製品の機能、特長、構成などについて解説する。

1. はじめに

リチウムイオン電池(図 1)は、電気自動車、ハイブリッド自動車、携帯電話、携帯音楽プレーヤーなどの幅広い製品に搭載されることから、その市場は年々拡大している。なかでも、電気自動車やハイブリッド自動車に搭載されるリチウムイオン電池については、最高水準の性能と品質が要求される。リチウムイオン電池の性能・品質の評価方法として内部抵抗測定があるが、電池の化学反応に由来する抵抗は DC-IR 測定という方法で測定されてきた。この方法は、予備充電したリチウムイオン電池を大電流で放電させて内部抵抗を測定する。しかし、この方法では予備充電に数分から数十分の時間が必要であり、最終的に内部抵抗測定を終えるのに、数十分から1時間程度かかるため、測定時間の高速化が強く要望されている。この課題を解決するのが低周波による内部抵抗測定(低周波 AC-IR 測定)であり、測定時間を10秒以下に短縮できる。

今回、リチウムイオン電池の新たな検査方法である低周波 AC-IR 測定が可能なバッテリーインピーダンスメータ BT4560 を開発した。

2. 設計コンセプト

DC-IR 測定に代わる測定を提案する BT4560 は、「リチウムイオン電池の信頼性をわずか10秒で」というコンセプトのもと開発された。測定対象に関しても、近年市場の拡大が目覚ましい大型リチウムイオン電池をメインターゲットとして据えた。



BT4560 の外観

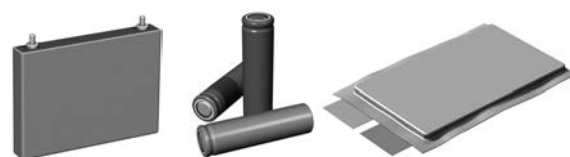


図1 リチウムイオン電池

3. 機能・特長

BT4560 の機能・特長は次のとおりである。

(1) 周波数可変

周波数 0.1 Hz～1050 Hz のインピーダンス測定が可能である。従来の 1 kHz 固定のバッテリーテスタで測定できる電解液抵抗(図 2 の R_1)に加え、1 Hz 以下の低周波により反応抵抗(図 2 の R_2)を測定できる。反応抵抗は電解液と電極間のイオン移動に起因する抵抗で、電池の特性評価に重要な指標である。

また、PC アプリケーションソフトウェアによる周波数スイープが可能で、電池評価に用いられるコール・コールプロットを描画できる。

(2) 高精度測定

測定電流を最大 1.5 A にすることで、S/N 比を改善した。これにより耐ノイズ性が向上し、内部抵抗が 1 mΩ を下回る車載用電池も高精度で測定できる。直流電圧測定に関しても 10 μV 分解能で、従来確度を上回る ±0.0035% rdg. を実現した。

*1 技術部 技術2課

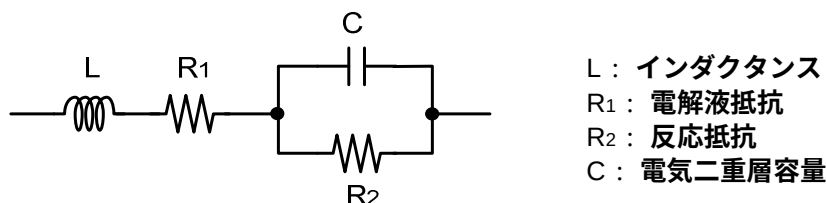


図2 電池の等価回路

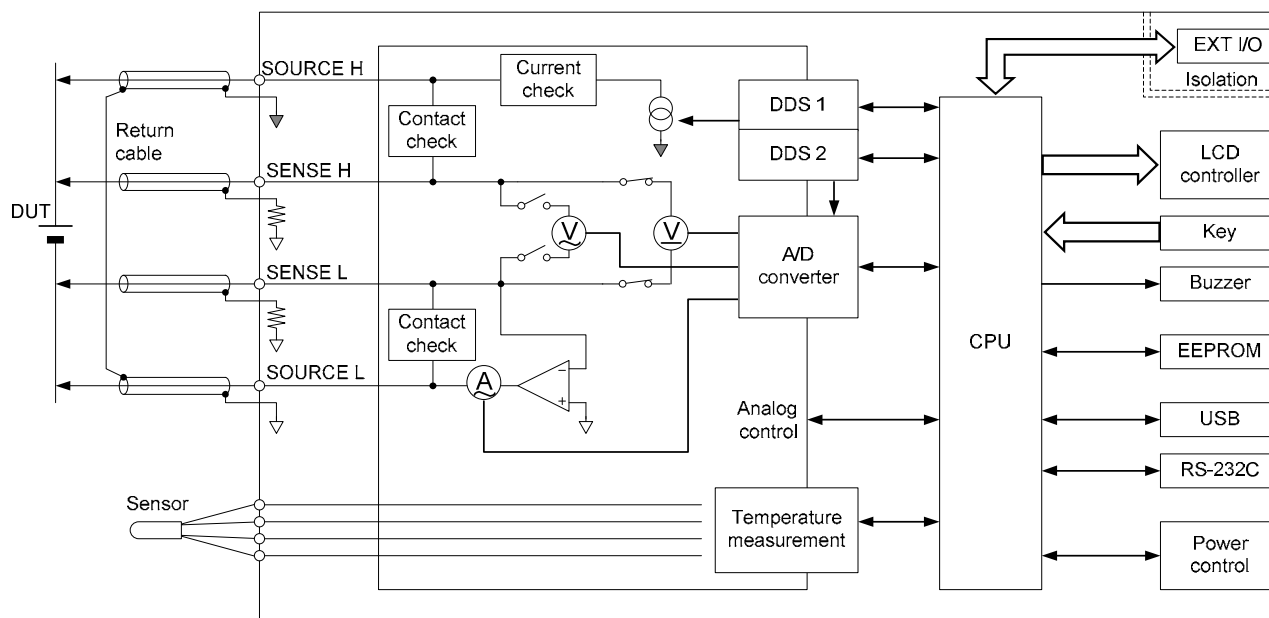


図3 ブロック図

(3) サイズの小型化

従来のバッテリーインピーダンス測定装置はFRA(Frequency Response Analyzer), ポテンショガルバノスタット, およびPCを組み合わせたシステムであった. BT4560は計測器1台で測定できる, シンプルでコンパクトな構成になっている.

(4) 測定ケーブル長

接触抵抗や配線抵抗の影響を受けにくい回路構成とゼロアジャスト機能により, 測定ケーブル4mまで確度を保証している.

(5) 温度測定機能

電池の反応抵抗は温度に敏感という特徴がある. 抵抗測定時の雰囲気温度を管理するために, 白金センサによる温度測定機能を有している.

(6) コンタクトチェック

測定前後に接触抵抗を監視することで, 測定対象に測定プローブが接触していない状態での測定を防ぐことができる.

(7) サンプルディレイ

電池は交流印加直後, 応答波形が歪む性質がある. そのため, インピーダンス測定時に, 交流印加からサンプリング開始までの遅延時間を設定できる.

(8) 電位勾配補正

電池の特性やBT4560の入力インピーダンスによる測定信号の直線的なドリフトを補正できる.

(9) 交流印加時の充放電防止

測定交流信号について, 印加開始と終了の位相を0°に制御することで, 測定対象の電池が充放電されるのを防止している.

4. 構成

全体ブロック図を図3に示す.

4.1 アナログ回路

(1) インピーダンス測定回路

定電流源でサイン波の測定電流を生成し, 測定対象に印加する. その際に測定電流と測定対象両

端の電圧を測定し、インピーダンス値を求めている。測定電流は電流検出部で測定される。また、測定対象両端に発生した電圧は、SENSE H 端子と SENSE L 端子間の電圧として電圧検出部で測定される。測定電流は、従来の最大 100 mA に対し最大 1.5 A まで増加している。これにより耐ノイズ性の向上と、1 mΩ 以下の超低インピーダンスの安定した測定を実現している。

また、4 端子対法を採用することにより、測定電流による電磁誘導の影響を低減してインピーダンス測定値の安定性を向上している。測定電流により生じる磁束は、電磁誘導の影響により検出電圧に影響を及ぼし、測定するインピーダンス値の安定性を損なう要因となる。定電流源をフローティングすることで、測定対象に流れた測定電流はリターンケーブルを介して定電流源に戻る。これにより、測定電流により生じる磁束を抑制している。

(2) 直流電圧測定回路

インピーダンス測定用とは別に電池電圧測定用に直流電圧検出部を持つ。直流電圧測定確度は、従来の 0.01% rdg. から 0.0035% rdg. に向上している。測定精度を維持するために、セルフキャリブレーションを実施している。これにより、直流電圧測定回路のオフセット電圧、ゲインのドリフトを補正している。

(3) 測定異常検出

測定異常検出は、コンタクトチェック回路、定電流異常検出回路、過電圧検出機能、およびリターンケーブル未接続検出機能の 4 種類がある。

コンタクトチェック回路は、接触状態の不良、測定プローブの断線など測定に影響を及ぼす接触不良を検出する回路である。SOURCE H 端子－SENSE H 端子間および、SOURCE L 端子－SENSE L 端子間の抵抗値を検出している。

定電流異常検出回路は、SOURCE H 端子－SOURCE L 端子間の抵抗が増加することにより、規定の定電流を流せない場合に異常を検出する回路である。

過電圧検出機能は、定格電圧以上の電池が接続されていないかを検出するものである。BT4560 では、最大 5.1 V までの電池の測定が可能である。定格電圧以上の電池が接続された場合には、測定前に異常を検出する。

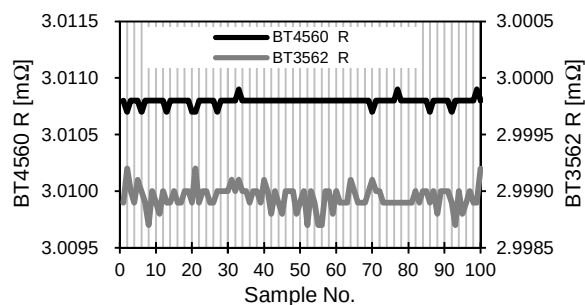


図 4 3 mΩ抵抗測定 R 繰り返し精度

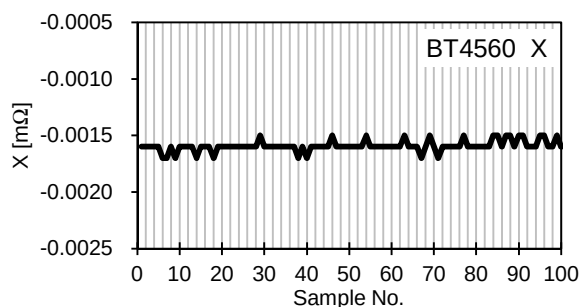


図 5 3 mΩ抵抗測定 X 繰り返し精度

リターンケーブル未接続検出機能は、測定電流の演算値をもとに CPU が未接続を検出するものである。

4.2 デジタル回路

演算性能、消費電力などを考慮し ROM/RAM 内蔵 32 ビット RISC CPU を採用した。CPU は、キー、表示、外部 I/O、および通信の制御のほか、DDS、A/D コンバータ、D/A コンバータ、エラー信号処理などのアナログ制御を行っている。

測定波形出力用に DDS1 と A/D コンバータのサンプリングクロック用に DDS2 を使用している。DDS2 は、出力波形の周波数に関係なくサンプリング数が一定になるように、クロックを生成している。

電流・電圧波形測定用として、A/D コンバータを 2 系統使用しており、CPU により電流と電圧の同時サンプリングを制御している。同時サンプリングにあたり、CPU と A/D コンバータ間のフォトカプラ制御や、CPU ポートでの取り込みなど各種遅延を考慮したタイミング設計を行っている。

5. 性能

5.1 繰り返し精度

100 回繰り返してインピーダンスを測定したときのばらつきを図 4、図 5 に示す。

バッテリーインピーダンスメータ BT4560

測定条件は、測定物:抵抗素子 $3\text{ m}\Omega$ 、測定レンジ: $3\text{ m}\Omega$ 、サンプリング速度:SLOW(測定時間 128 ms)である。R 値(実数部)、X 値(虚数部)ともに $\pm 1\text{ dgt.}(0.1\text{ }\mu\Omega)$ のばらつき幅に収まり、繰り返し精度の高い測定ができています。図 4 には従来機種のパッテリハイトスタ BT3562 で測定したときのばらつきも併記する。測定物の校正値を除き、同一条件での測定である。電池の出荷検査において、繰り返し精度は重要なファクタであり、従来機種以上の安定性を実現している。

また、図 6 に直流電圧測定時のばらつきを示す。直流電圧測定についても、ばらつき幅 $\pm 1\text{ dgt.}(10\text{ }\mu\text{V})$ の安定性を実現している。測定電圧は 4.99 V 、サンプリング速度 SLOW(測定時間 1.0 s)である。

5.2 接触抵抗の影響

測定対象に測定プローブをコンタクトするときに生じる接触抵抗は変化する可能性がある。再現性のある安定した測定値を得るためには、接触抵抗に対する安定度が求められる。

測定端子の接触抵抗に対するインピーダンス測定値の変動量を図 7、図 8 に示す。測定条件は、測定物:抵抗素子 $3\text{ m}\Omega$ 、測定レンジ: $3\text{ m}\Omega$ 、サンプリング速度:SLOW である。従来機種 BT3562 の接触抵抗の影響と比較すると、SENSE 端子については大幅に改善されている。SOURCE 端子については BT3562 と同等の性能で、 $2.0\text{ }\Omega$ まで影響を受けない。

また、図 9 に直流電圧測定時の接触抵抗の影響を示す。測定電圧は 5 V である。接触抵抗 $55\text{ }\Omega$ まで影響を受けずに測定できている。

BT4560 は接触抵抗に強い点でも、再現性のある安定した測定が可能である。

SENSE 端子—SOURCE 端子間でコンタクトチェックを行っており、 $3\text{ m}\Omega$ レンジでは $10\text{ }\Omega$ 以上で測定異常として検出する。直流電圧測定に関しては $50\text{ }\Omega$ 以上で測定異常として検出する。

5.3 ケーブル長の影響

図 10 にインピーダンス測定時の測定ケーブルの長さに対する影響量を示す。データは、ケーブル長 0 m 時の測定値に対する変動量を示している。測定条件は、測定物:抵抗素子 $3\text{ m}\Omega$ 、測定レンジ: $3\text{ m}\Omega$ 、サンプリング速度:SLOW である。各ケーブル長にて、ゼロアジャスト後の結果である。

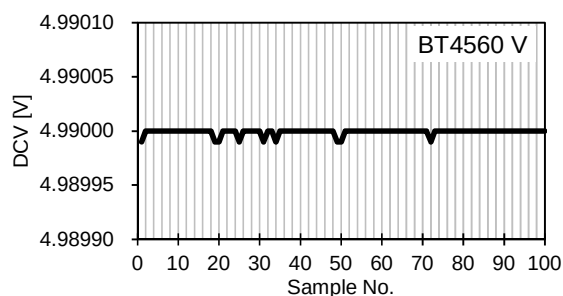


図 6 4.99 V 電圧測定 V 繰り返し精度

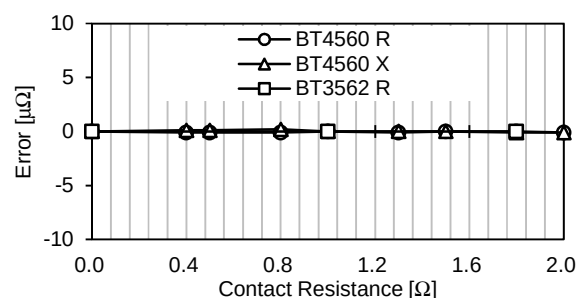


図 7 SOURCE H 端子 接触抵抗の影響

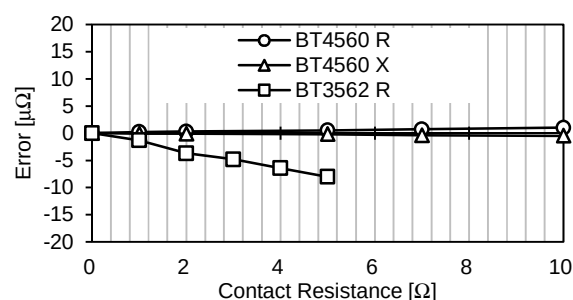


図 8 SENSE H 端子 接触抵抗の影響

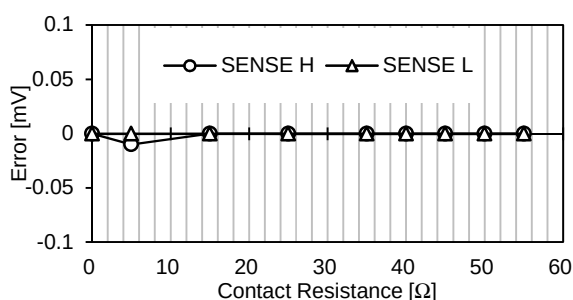


図 9 電圧測定接触抵抗の影響

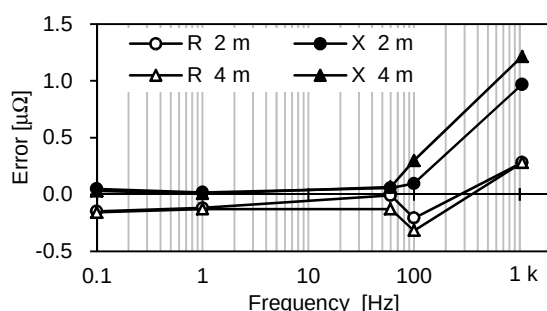


図 10 ケーブル長の影響

ケーブル長の影響は、R 値で最大 $0.3 \mu\Omega$ (3 dgt.)、X 値で最大 $1.2 \mu\Omega$ (12 dgt.)であり、測定ケーブル 4 m まで確度を保証している。

5.4 温度・周波数特性

図 11、図 12 に温度をパラメータとした周波数特性を示す。どちらも $3 \text{ m}\Omega$ 純抵抗を測定したときの特性である。抵抗測定、リアクタンス測定ともに温度による影響量は $1 \mu\Omega$ (10 dgt.)以下である。周波数特性に関してもリアクタンスの高周波域で最大 $2 \mu\Omega$ 程度となっているが、これも製品仕様 Z: $\pm 0.4\%$ rdg., θ : $\pm 0.3^\circ$ に対して 10 倍近く余裕があるものとなっている。

5.5 直流電圧測定のリニア特性

図 13 に電圧測定のリニア特性を示す。電圧測定確度 0.0035% rdg. ± 5 dgt.に対し十分に余裕がある実力となっている。誤差が最大となっている -3 V 測定に関してもその誤差は $50 \mu\text{V}$ (5 dgt.)程度である。

6. 測定プローブ

測定対象の電池に合わせクリップ形プローブ L2002(図 14)とピン形プローブ L2003(図 15)の 2 種類を用意した。測定用プローブは測定電流と逆方向の電流を流すためのリターンケーブルを設けた 4 端子対構造になっている。4 端子対構造にすることで、環境ノイズや引き回しの影響を受けにくい安定した測定が可能となっている。また、コンタクトによる誤差低減のために、電流端子と電圧端子の間の距離が一定になる構造とした。

6.1 クリップ形プローブ L2002

ラミネート電池専用のプローブである。コンタクト位置が一定になるように位置決めストップが設けられている(図 14 の右)。ストップは電極の長さに合わせ、位置を調整できる。また、先ピンの故障や形状の要望に応じて、先ピンの交換が可能な構造となっている。

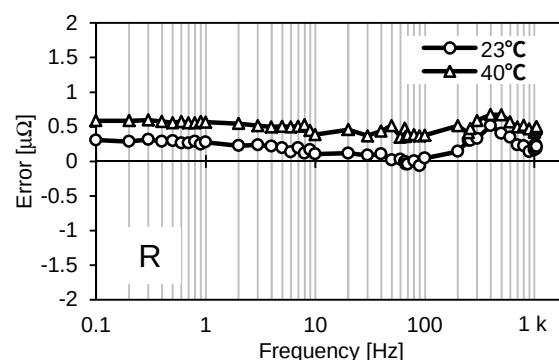


図 11 抵抗測定 周波数特性

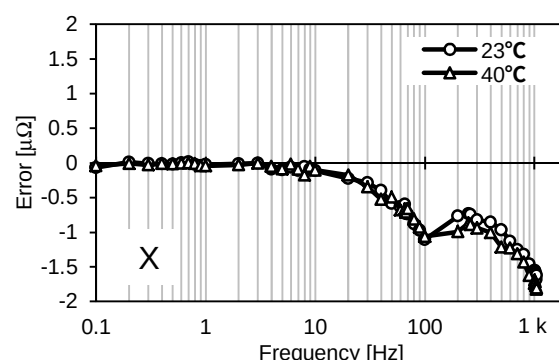


図 12 リアクタンス測定 周波数特性

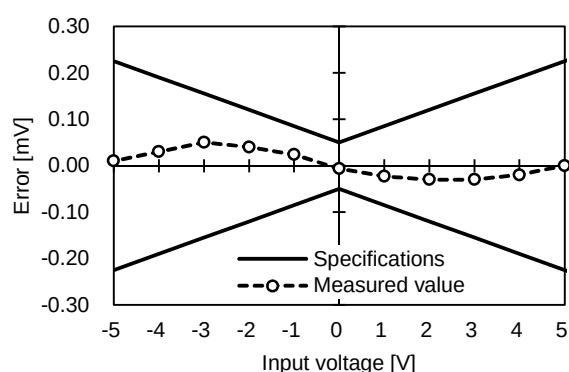


図 13 直流電圧測定確度 リニア特性



図 14 L2002

6.2 ピン形プローブ L2003

さまざまなタイプの電池の測定が可能なプローブである。ネジ穴を設け、検査設備などにプローブを固定できる(図 15 の右)。また、L2002 と同様に先ピンの故障や形状の要望に応じて、先ピンの交換が可能な構造となっている。

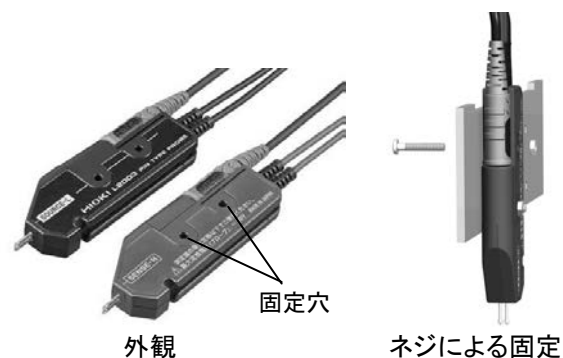


図 15 L2003

7. 使用例

7.1 DC-IR の代替測定

従来行われていた DC-IR 測定法と低周波 AC-IR 測定法による内部抵抗の測定値の相関関係を調査した。図 16 がその結果である。近似線を引くと $R^2 = 0.99$ (R:相関係数)となり、低周波 AC-IR と DC-IR の抵抗値は良く相関が取れていることがわかる。測定値も近い値となっている。これにより低周波 AC-IR 測定が DC-IR 測定の代替測定として有効であることがわかる。

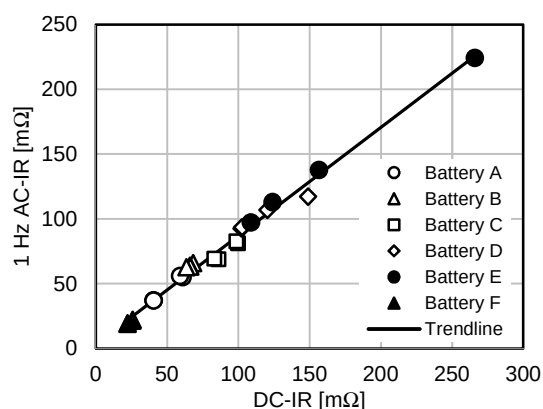


図 16 低周波 AC-IR と DC-IR の相関

7.2 劣化診断

実際のリチウムイオン電池を測定して、その劣化とコール・コールプロットの関係性を調査したものが、図 17 である。一般的に鉛電池の劣化判定として 1 kHz の内部抵抗が用いられるが、リチウムイオン電池では低周波の内部抵抗の方が劣化の度合いがより顕著に表れているのがわかる。1 kHz の抵抗変化は 1 mΩ 程度であるのに対し、1 Hz の抵抗変化は 3 mΩ 程度である。これは、低周波測定は電池の電解液の劣化に加え電極界面の化学反応の劣化も見ることができ、ためである。低周波測定による劣化診断も今後期待される分野である。

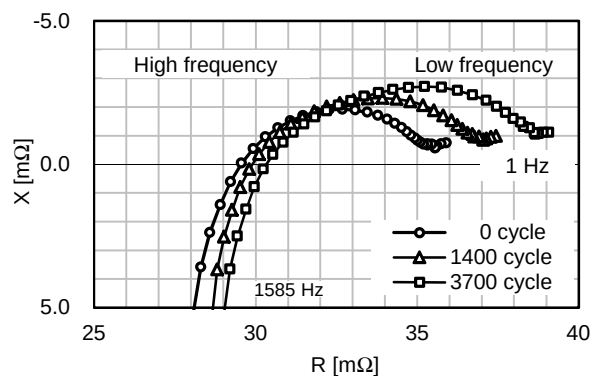


図 17 劣化とコール・コールプロットの関係 (リチウムイオン電池)

8. おわりに

BT4560 は低周波 AC-IR 測定の提案により、生産現場における課題解決を目的とした測定器である。広くリチウムイオン電池の評価や検査の場を使用され、世の中の発展に寄与できることを期待する。

鳴沢 知弘^{*3}, 飯島 淳司^{*2}, 田中 秀明^{*2},
長井 秀行^{*2}, ムハメド ムサディック^{*4}

*2 技術部 技術2課
*3 技術部 技術3課
*4 技術部 技術10課