車両IoTデータを活用した車上蓄電池劣化診断クラウドシステム

Cloud-Based Onboard Battery Degradation Diagnosis System Using Rolling Stock Data from IoT Devices

高橋　功 TAKAHASHI Isao　井出　誠 IDE Makoto　水谷　麻美 MIZUTANI Mami　西川　浩行 NISHIKAWA Hiroyuki

鉄道車両に搭載される蓄電池（以下，車上蓄電池と呼ぶ）は，運用条件によって，劣化の進行度合いが異なるため，状態に応じた状態基準保全（CBM：Condition-Based Maintenance）が求められている。しかし，蓄電池を車両に搭載した状態で劣化状態を直接測定することは困難であるため，車両データを用いた劣化状態推定が必要である。

そこで東芝は，車両IoT(Internet of Things)を活用し，車上蓄電池の劣化状態をクラウド上で診断するシステムを開発した。このシステムは，通信負荷を抑制するため，劣化診断に必要な車両IoTデータだけを抽出することで通信量を全データ量の約7 %に削減するとともに，車上蓄電池の容量及び内部抵抗を推定することで車上蓄電池の劣化状態を診断できる。この結果，推定誤差±5 %以内で劣化状態を把握でき，適切な交換時期の判断に有効であることを確認した。

As the performance degradation of storage batteries on rolling stock varies depending on the conditions of use, condition-based maintenance (CBM) is required to guarantee the soundness of these onboard batteries. However, it is difficult to directly measure the degradation state of onboard batteries. There is therefore growing demand for battery degradation estimation methods using rolling stock data.

Toshiba Corporation has developed a cloud-based onboard battery degradation diagnosis system using data from Internet of Things (IoT) devices on rolling stock. The system is able to reduce data traffic volumes to the cloud service to approximately 7% of the total data volume by extracting only data required for degradation diagnosis, and to diagnose the degradation status of onboard batteries by estimating the capacity and internal resistance from these data. The results of verification tests using actual data have confirmed that it achieves an estimation error within approximately ±5%, thereby making it possible to determine the appropriate timing for replacement of onboard batteries.

1. まえがき

鉄道分野では，車上蓄電池は列車の減速時に発生する回生電力の吸収や，力行（加速）アシストのほか，停電時や架線異常時に必要な非常走行用電源，空調や照明などに用いる補機電源などに利用され，車両運行を支える重要なコンポーネントである。車上蓄電池は，使用環境や運用条件に依存して劣化が進行し，最終的に容量低下や内部抵抗増加などにより交換が必要になる。このため，劣化状態を把握して適切な保守を行う技術が重要である。従来は時間基準保全（TBM：Time-Based Maintenance）により，車上蓄電池の定期交換が行われているが，車上蓄電池の劣化は使用条件に大きく依存するため，交換時期の最適化が求められる。また，車両搭載状態では，蓄電池単体の場合と同様の方法で，劣化状態の把握に必要なデータを取得することは困難であり，稼働データから劣化を推定する手法が必要である。近年はIoT機器により車上蓄電池のデータを収集できるようになった。そこで，車両IoTデータを活用したCBMの実現に向けて，車上蓄電池劣化診断クラウドシステムを開発した。

ここでは，車上蓄電池の電圧，電流，温度などの車両IoTデータをクラウド上で解析し，車両搭載のまま劣化診断を行うシステムについて述べる。

2. 車上蓄電池劣化診断クラウドシステムの開発

2.1　車上蓄電池劣化診断クラウドシステムの構成

車両IoTデータ収集から劣化診断までのシステム構成を**図1**に示す。車上蓄電池にはBMU（Battery Management Unit）が搭載され，車上蓄電池のデータを取得するとともに，上位装置へ情報を送信する。上位制御ユニットは取得データから，劣化診断に必要なデータを抽出する。

抽出されたデータは，データ送信モジュールによりクラウド上へ送信される。このシステムは東芝のIoTクラウド基盤サービス HABANEROTS上に構築され，車上蓄電池のデータ保存及び劣化診断を実施する。蓄電池容量及び内部抵抗の推定精度は真値に対して±5 %以内を目標とする。

2.2　車上蓄電池の劣化診断用車両IoTデータ取得方法

車両IoTデータには多くの情報が含まれるため，通信コスト低減の観点から，必要データだけ抽出して送信する。

図2に示すように，まず，車両IoTデータの中から劣化診断に必要なデータ項目を抽出する。次に，各劣化診断手法の

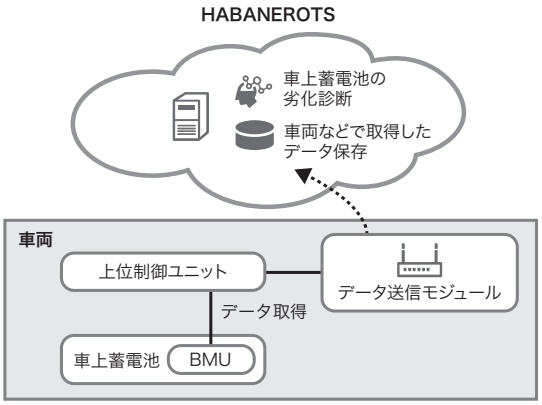


図1. 車上蓄電池劣化診断クラウドシステムの全体構成

車両から転送された蓄電池データを東芝IoTクラウド基盤サービスに保存し蓄電池の劣化診断を行う。

Outline of onboard battery degradation diagnosis system using HABANEROTS industrial IoT platform service

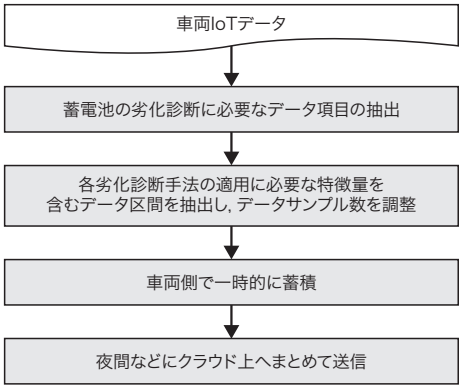


図2. 劣化診断データ取得フロー

車両IoTデータから項目及び特徴量を抽出し，夜間などにまとめてクラウド上へ送信する。

Process flow for acquisition of battery degradation diagnosis data

適用に必要な特徴量を含むデータ区間を抽出し，データサンプル数を調整することで，データ量を削減する。

車上蓄電池の劣化は短期間で急激に進行しないため，常にデータを送る必要はなく，通信トラフィックが比較的少ない夜間から早朝にまとめて送信しても診断精度は確保できる。

3. 車上蓄電池の劣化診断手法の開発

車上蓄電池の劣化状態を適切に把握するために，車上蓄電池劣化診断クラウドシステムの中で，劣化診断手法が重要な役割を持つ。劣化指標として蓄電池容量と内部抵抗があり，劣化に伴い蓄電池容量は減少し，内部抵抗は増加する。これらを踏まえ，このシステムでは3種類の劣化診断手法を選択して適用する（**図3**）。

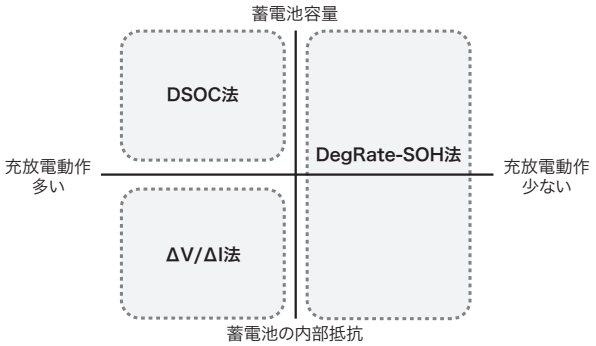
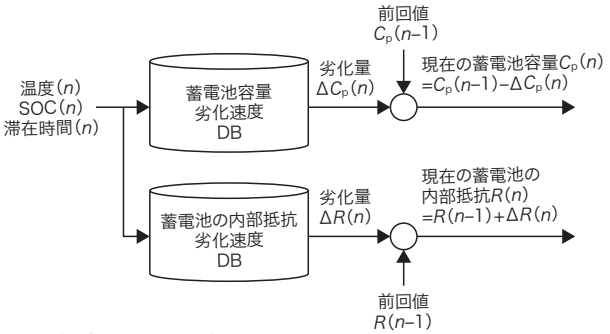


図3. 劣化診断手法の四象限分類

三つある劣化診断手法を，対象指標と動作パターンによって四つの象限に分類することができる。

Four-quadrant classification of battery degradation diagnosis methods



n：サンプル番号　DB：データベース

図4. DegRate-SOH法

充放電動作が少ない車上蓄電池の運用に適している。

Battery state of health (SOH) estimation using DegRate-SOH method

3.1 DegRate-SOH法

DegRate-SOH法は，架線からの電力供給が停止した際に使用する非常走行用電源における待機期間（充放電がほとんど発生しない期間）など，充放電動作が少ない運用に対して適した劣化診断手法である（**図4**）。ここでは，温度及びSOC（State of Charge）に応じた車上蓄電池の劣化速度を事前にモデル化し，車両IoTデータに基づいて車上蓄電池の劣化量を逐次更新する。蓄電池容量は減少量として，内部抵抗は増加量として評価する。車上蓄電池の劣化は，その状態が継続した時間（滞在時間）の影響を大きく受けるため，一定周期で取得したデータを用いる。

3.2 DSOC法

DSOC法[(1)]は，複数の動力源を備えたハイブリッド車両の力行アシスト動作など，充放電に伴うSOC変化が多い運用で取得されたデータを用いて，車上蓄電池の劣化状態を推定する手法である（**図5**）。充放電により変化するSOCの差分

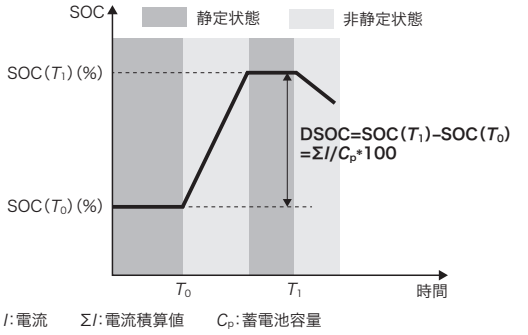


図5. DSOC法

DSOC法は，充放電に伴うSOCの変化が多い車上蓄電池の運用に適している。

Changes in state of charge (SOC) over time obtained by deviation of SOC (DSOC) method

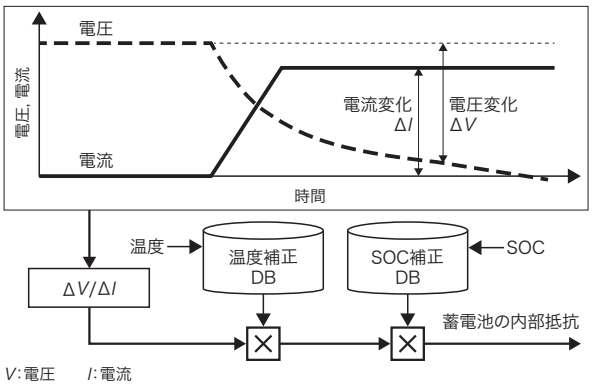


図6. ΔV/ΔI法

ΔV/ΔI法は，静定状態から急峻な充放電動作へ移行する運用に適している。

Internal resistance estimation flow using ΔV/ΔI method

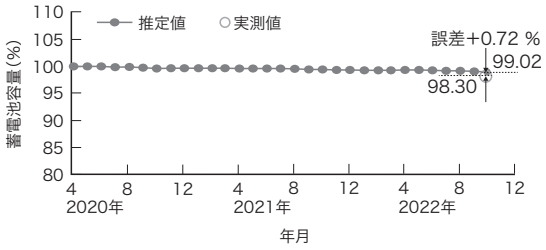


図7. 蓄電池容量の推定結果（DegRate-SOH法）

運用開始2年経過後の蓄電池容量を，実測値との差+0.72 %で推定できた。

Comparison of long-term capacity measurement data and capacity estimated by DegRate-SOH method

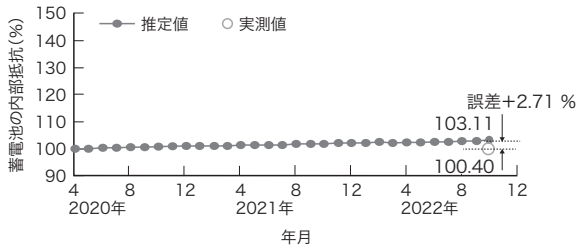


図8. 蓄電池の内部抵抗推定結果（DegRate-SOH法）

運用開始2年経過後の蓄電池の内部抵抗を，実測値との差+2.71 %で推定できた。

Comparison of long-term internal resistance measurement data and internal resistance estimated by DegRate-SOH method

（DSOC）と電流積算値の関係から車上蓄電池の容量を算出する。蓄電池容量を精度良く算出するためには，電圧やSOCの変化が十分に小さい静定状態の検出が重要であり，静定状態が確認された時点でデータを取得する。

3.3　ΔV/ΔI法

ΔV/ΔI法は，停車中や惰行（駆動力を発生しない走行）中の静定状態から急峻（きゅうしゅん）な充放電動作へ移行する際のデータを用いて内部抵抗を推定する手法である（**図6**）。

電流変化に対する電圧変化（ΔV/ΔI）から内部抵抗を算出する。温度及びSOCの影響を補正データベースで補償することで，劣化に起因する抵抗変化を評価する。

4. 車上蓄電池劣化診断クラウドシステムの機能確認

4.1　車両IoTデータ通信機能

各診断手法に必要なデータ抽出を行い，通信回線を介してクラウド上へ送信可能であることを確認した。劣化診断に必要なデータ量は109 kBであり，全データ量 1,472 kBに対して約7 %に削減できた。

4.2　車上蓄電池の劣化診断手法

実運用データ（約2.5年分）から代表データ（最大・最小セル電圧，最高・平均・最低セル温度）を用いて車上蓄電池の劣化診断を実施した。対象データは非常走行用電源の運用データであるため，DegRate-SOH法を適用した。車上蓄電池容量は低下し，内部抵抗は増加する傾向が確認された（**図7**，**図8**）。実測値との比較では誤差はどちらも±5 %以内に収まり，劣化診断手法の有効性を確認した。

5. 蓄電池セルばらつきを考慮した劣化診断

車上蓄電池は，最小単位となる蓄電池セルを直列及び並列に組み合わせて大規模化する。車上蓄電池では，多数の蓄電池セルをモジュール化し，更に複数のモジュールを組み合わせるため，1車上蓄電池当たり数百個規模の蓄電池セルが搭載される。各蓄電池セルの劣化速度はSOCや温度の影響を受けるため，蓄電池セル個体差や搭載位置の違いによって劣化進行にばらつきが生じる。

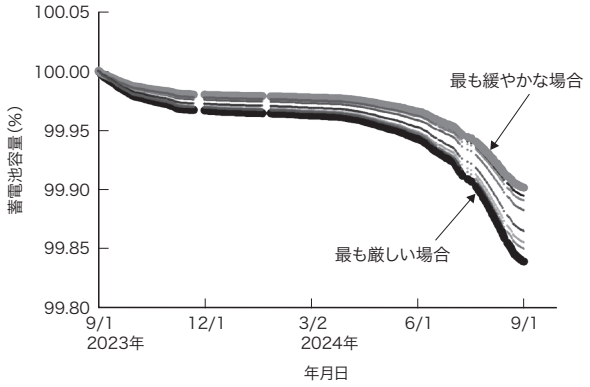


図9. 蓄電池の容量範囲の推定（DegRate-SOH法）

劣化が最も緩やかな条件と最も厳しい条件で蓄電池容量を推定した結果，その他の条件で推定した蓄電池容量の推移が両者の範囲内に収まることが確認できた。

Range of capacity estimated by DegRate-SOH method

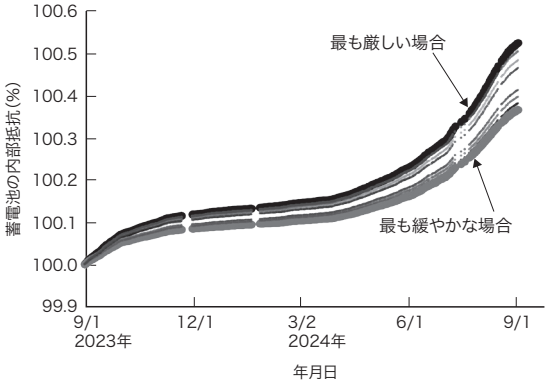


図10. 蓄電池の内部抵抗範囲の推定（DegRate-SOH法）

劣化が最も緩やかな条件と最も厳しい条件で内部抵抗を推定した結果，その他の条件で推定した内部抵抗の推移が両者の範囲内に収まることが確認できた。

Range of internal resistance estimated by DegRate-SOH method

一方，多数の蓄電池セルを対象として個々のセンサー情報をクラウド上へ送信し続けることは，通信量やデータ管理の面で現実的ではない。そこでこのシステムでは，BMUが収集する蓄電池セル電圧及び蓄電池セル温度の情報から，最大値及び最小値を抽出して活用する方式を採用した。これにより，少ないデータ量（7 %に圧縮削減（109 kB））で蓄電池セルの状態のばらつきを把握できる。

図9及び**図10**に，SOC及び温度条件が最も厳しい場合と最も緩やかな場合について推定した劣化診断結果を示す。SOCの差異は主として蓄電池セル個体差に起因し，温度差は主として搭載位置に起因するため，これらの条件差は長期間にわたり継続する傾向がある。この手法では，最大値と最小値に基づく劣化推定範囲を算出することで，実際の蓄電池セル群の劣化状態が存在すると考えられる範囲を評価できる。その結果，多数セルで構成される車上蓄電池においても，全セルの詳細データを収集することなく，車上蓄電池の劣化状態を効率的に把握できることを確認した。

6. あとがき

車両IoTデータを用いる車上蓄電池の劣化を診断するクラウドシステムを開発した。このシステムにより，通信データ量を削減しながらクラウド上での車上蓄電池の劣化診断が可能となり，通信コストの低減と適切な保守計画の実現に寄与する。また，実運用データを用いた検証により，この手法の有効性を確認した。更に，多数の蓄電池セルの組み合わせによる車上蓄電池構成からくる条件ばらつきに対して，センサー情報を効率的に集約しつつ，車上蓄電池の劣化進行度を適切に推定できる判定手法を確立することができた。

この結果，車上蓄電池劣化診断クラウドシステムにより，車上蓄電池の劣化状態把握が可能であることを示した。

今後は，今回提唱した車上蓄電池劣化診断クラウドシステムの使用とともに，用途に応じたほかの適切な手法のラインアップ化を目指していく。

謝　辞

この開発に際し，ご協力賜った東海旅客鉄道（株）の関係各位に深く感謝の意を表します。

文　献

(1) 水谷麻美，ほか．運用稼働中の蓄電池システムに適用可能なSOC差を用いた電池容量推定手法．電気学会論文誌B．2020，**140**，5，p.415–422.



高橋　功　TAKAHASHI Isao
モビリティ・インフラソリューション事業部
鉄道システム技術第一部
Railway Systems Engineering Dept.1



井出　誠　IDE Makoto
総合研究所 インフラシステムR&Dセンター
電機応用・パワエレシステム技術開発部
電気学会会員
Electrical/Mechanical Systems and Power Electronics R&D Dept.



水谷　麻美　MIZUTANI Mami, Ph.D.
総合研究所 インフラシステムR&Dセンター
博士（工学）　電気学会・IEEE会員
Infrastructure Systems R&D Center



西川　浩行　NISHIKAWA Hiroyuki
総合研究所 インフラシステムR&Dセンター
システム制御・ネットワーク技術開発部
電気学会会員
System Control and Network R&D Dept.