



Tokyo Tech



Press Release

2022年9月6日  
国立大学法人東京工業大学  
矢崎総業株式会社

## 電池の充放電電流を広い電流レンジで高精度に計測する ダイヤモンド量子センサを世界で初めて開発 — 電気自動車搭載電池容量の削減により環境負荷を軽減し、 カーボンニュートラル社会に貢献 —

### 【要点】

- 電気自動車 (EV) の電池のポテンシャルを引き出し、電費を向上させるためには、小電流から大電流まで広範囲な電流を高精度に計測する技術が求められる。
- このたび、±1,000 A の電流計測レンジで 10 mA の精度を有するダイヤモンド量子センサを世界で初めて開発。
- EV 用電池の充放電電流計測に適用し、WLTC 走行モードで想定される電流レンジ・変化パターンを 10 mA の精度で計測できることを確認。
- 電池の高信頼制御につながる、電流と温度の同時計測を実現。
- 本技術により、EV の搭載電池容量削減、軽量化による電費向上等が見込まれ、運輸部門の CO<sub>2</sub> 排出量削減に期待。

### 【概要】

東京工業大学 工学院 電気電子系の波多野睦子教授、岩崎孝之准教授および矢崎総業株式会社 技術研究所の井上敬介部長らの文部科学省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) のグループは、ダイヤモンド中の窒素-空孔 (NV) センタ (用語 1) による量子センサ (用語 2) を開発し、-1,000~+1,000 A の電流を 10 mA の精度で計測できることを世界で初めて実証した。

本研究では、Q-LEAP 内の連携により、NV センタを含有したダイヤモンド材料を作製する技術、蛍光強度変化を高精度に周波数変化に変換する技術、広い電流レンジで NV センタの量子状態を操作するマイクロ波アンテナ技術、環境ノイズを低減する差動型センサ技術等を構築した。また、複数物理量をスピンの共鳴周波数として高精度に検出できるというセンサの特徴を活かし、電池の高信頼制御につながる電流と温度の同時計測を実現した。本センサを電気自動車 (EV (用語 3)) 用電池の充放電電流計測に適用した結果、WLTC (用語 4) 走行モードで想定される電流レンジ (-100~+100 A) ・変化パターンを 10mA の精度で計測できることを実証した。

本技術は、EV 用電池の充電率 (SOC (用語 5)) の推定誤差を 10% から 1% 以下に向上させ、搭載電池容量の削減による EV 製造時の CO<sub>2</sub> 排出量低減、軽量化による電費向上によって、2030 年における運輸部門の CO<sub>2</sub> 排出量を 14 百万トン (総量の 0.2%) 削減できるものと試算され、カーボンニュートラル社会実現への貢献が期待される。

本研究成果は、9月6日付の「Scientific Reports」に掲載される。

## ●背景

2050年のカーボンニュートラル実現を目指すグローバルのクリーンエネルギー戦略において電気自動車（EV）の導入促進が掲げられている。EVの導入促進には、1回充電当たりの走行距離確保とともに搭載電池量の削減による製造時のCO<sub>2</sub>排出削減が重要とされている。

しかしながら、現状のEV用電池（図1(a)）においては、図1(b)に示すように、過充電または過放電による電池の劣化や発火を防止するために、実際の走行距離に寄与しない安全マージンが大きく設けられており、マージンの分だけ電池を余分に搭載しているのが現状である。この安全マージンは、電池の充電率（SOC）の推定誤差に起因し、現状の（ホール式など）電流センサを用いた充放電電流積算によるSOC推定誤差は10%程度と大きい。これは、図1(c)のWLTC走行モードでの充放電電流パターンに見られるように、平均電流は10A程度であるにもかかわらず、最大時には数百Aにも達するため、その広い電流レンジを持ちながら、高精度の充放電電流積算に求められる10mAオーダーの精度を備えた電流センサの実現が難しいためである。広い電流レンジを持ちながらセンサの精度を向上できれば、安全マージンを減らして、図1(d)に示すように、走行距離を増加させることや、同じ走行距離であれば搭載電池容量を削減することができる。

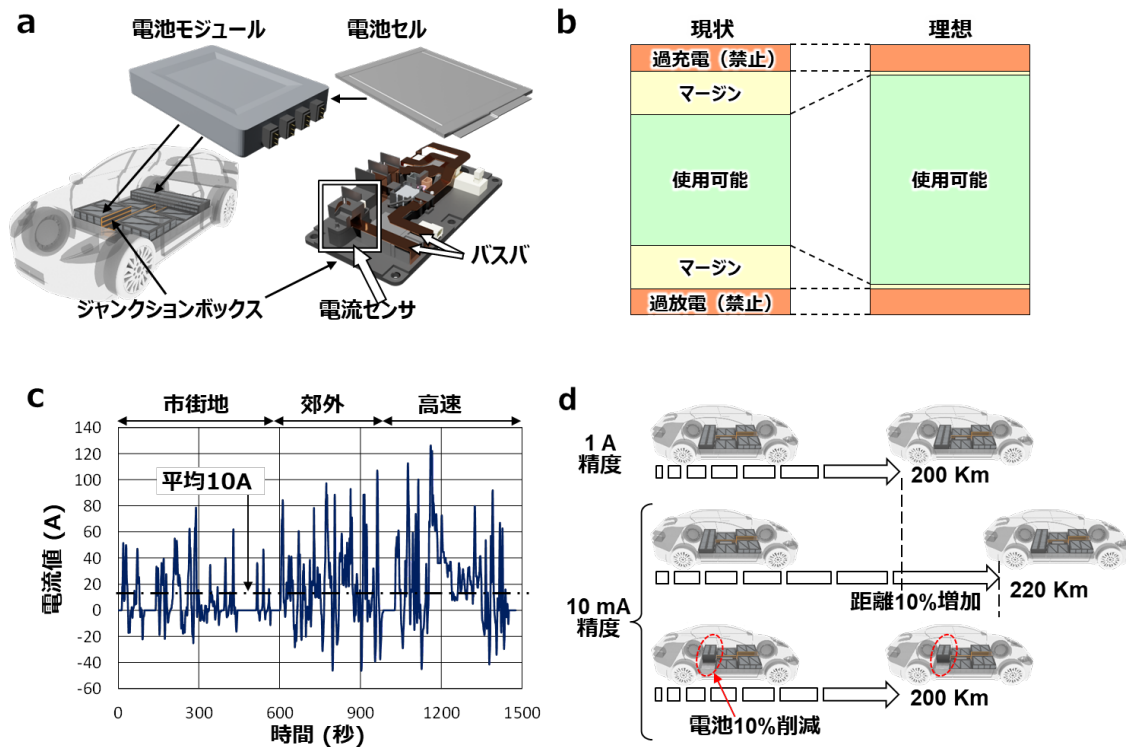


図1 (a) EVにおける電池モジュール及び電流センサ実装イメージ。(b) EVにおける電池充放電マージンの現状と理想。(c) WLTC 走行モードで想定される電流パターン。(d) 電流センサ精度向上による効果。

(Y. Hatano et al. *Scientific Reports*)

加えて、EV の充電規格の将来動向をみると 2030 年頃には全固体電池の導入等により充電電流は 600 A 以上になると見込まれており、将来の EV に向けた電池モニタリングのためには、1,000 A 程度の電流を計測でき、かつ十分な微小電流精度を有するセンサが必要となっている。

以上のような背景を基に、文部科学省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) 量子計測・センシング技術領域 (プログラムディレクター：東京大学 荒川泰彦特任教授) 量子固体 Flagship プロジェクト (2018 年～ 研究代表者：東京工業大学 工学院電気電子系 波多野睦子教授) では、SOC 推定誤差を 1%以下にできる精度 (10 mA<sup>\*</sup>) と 1,000 A までの大電流計測を両立できる EV 用電池モニタリング向けセンサを目標に、ダイヤモンド NV センタを用いた固体量子センサの研究開発を行ってきた。

## ●研究成果

本研究では、スピンの共鳴周波数として複数物理量(本研究では磁場と温度の同時計測)を広い温度範囲で高精度に検出できるダイヤモンド量子センサを実現した。Q-LEAP 参加機関の連携により、NV センタを含有したダイヤモンド材料の作製技術、NV センタの電流(磁場)による蛍光強度変化を高精度に周波数変換する信号処理技術、広い電流レンジで NV センタの量子状態操作を可能にする広周波数帯域マイクロ波アンテナ設計技術、環境ノイズ低減のための差動型センサ技術等を構築した。これらにより、広い温度範囲で、-1,000~+1,000 A の電流を 10 mA の精度で計測できることを世界で初めて実証した。

NV センタ含有ダイヤモンド材料技術においては、人工合成ダイヤモンド単結晶をベースに量子科学技術研究開発機構 (QST) の量子線照射技術を用いて NV センタを形成した。センサの信号処理技術においては、電流に伴う磁場変化による蛍光強度変化(アナログ信号)を周波数変化量としてデジタル信号に変換し、かつフィードバック制御することにより、高精度で広い電流レンジを実現した。NV センタの量子操作に必要なマイクロ波印加用アンテナも電流レンジに対応して広帯域化した。これらの技術を適用したダイヤモンドセンサヘッド(図 2(a))をバスバ(用語 6)の表裏に設置し(図 2(b))、共通の外部磁気ノイズはキャンセルしつつ、バスバ電流による磁気変化だけを捕える差動型センサを構築した(図 2(c))。

開発した電流センサを EV 搭載用電池の充放電試験装置にて評価した結果、10 mA~1,000 A の極めて広いレンジで電流応答出力(周波数変化)が得られ(図 3(a))、かつ全域にわたって 10 mA 以下の誤差範囲に収まることがわかった(図 3(b))。この結果は、WLTC 走行パターンにおける電池の SOC 推定誤差を 1%以下にできることを示している。

---

<sup>\*</sup> SOC 推定誤差は凡そ平均電流と精度の比率程度であるが、多様な走行条件下で SOC 推定誤差 1%を実現するため、精度目標値は 10mA とした。

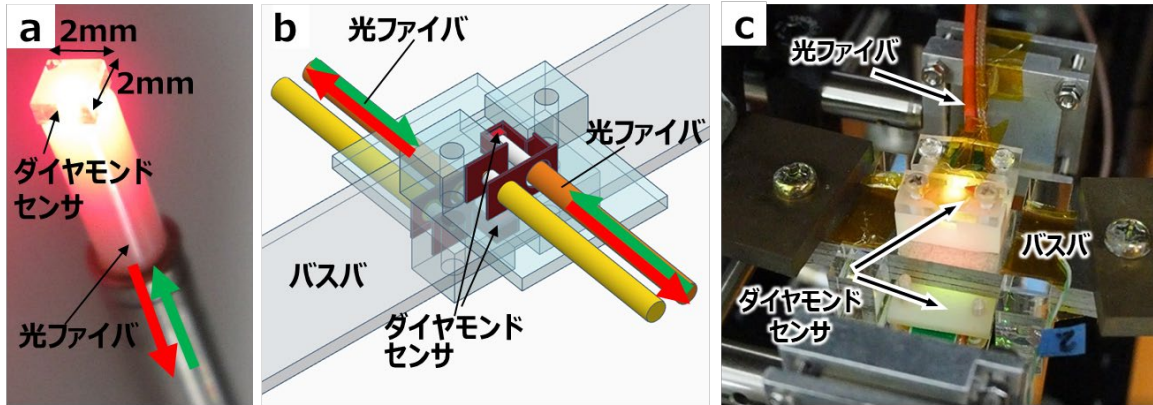


図 2 (a)ダイヤモンドを光ファイバの先端に設けたセンサヘッド構造。光ファイバを通してダイヤモンドに緑色レーザー光が照射され（緑矢印）、NV センタが赤色蛍光発光する。これを光ファイバを通じて検知する（赤矢印）。(b)バスバ（電流経路）の表裏にセンサヘッドを設けた差動型センサの構成図、(c)同写真。

(Y. Hatano et al. *Scientific Reports*)

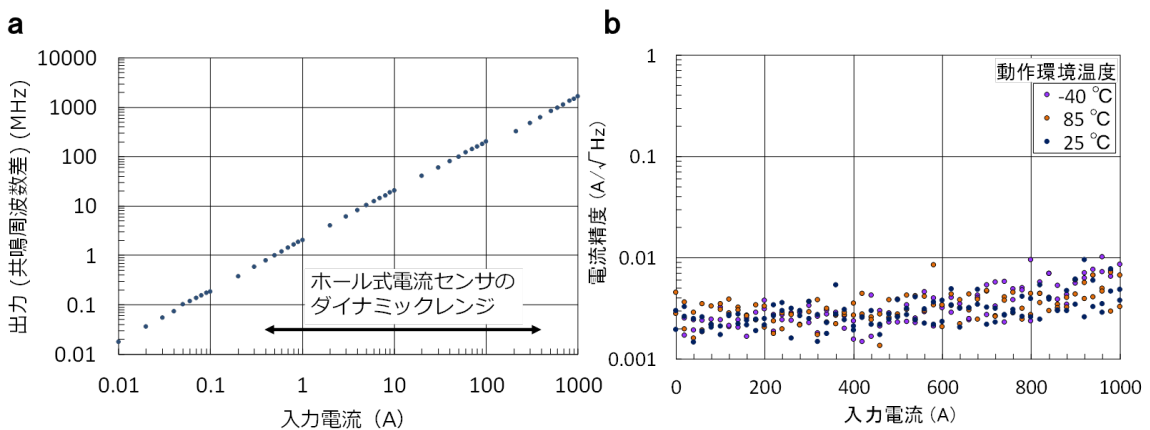


図 3 (a) バスバ充放電電流（入力電流）に対するセンサ出力（周波数）変化の計測結果（計測範囲：10 mA～1,000 A）、(b) バスバ充放電電流（入力電流）に対する電流精度、温度依存性。

(Y. Hatano et al. *Scientific Reports*)

### ●社会的インパクト

本技術を EV 搭載電池のモニタリングに応用すると、現状では 10%に及ぶ充放電の安全マージンを 1 桁低減し、1%まで抑えることができる。これにより、走行距離を維持したうえで搭載電池容量を 10%削減することが可能となり、製造時の CO<sub>2</sub> 削減に加えて、EV 軽量化による電費向上も見込まれる。これらによる CO<sub>2</sub> 削減効果を 2030 年の世界の EV 販売 (2,000 万台と推定) に適用すると、1,400 万トンの CO<sub>2</sub> 削減効果が見込まれる。これは同年の世界の運輸部門の CO<sub>2</sub> 排出量 (80 億トン) の 0.2%に相当し、カーボンニュートラル社会実現への貢献が期待される。

## ●今後の展開

実用化に向けては、ダイヤモンド量子センサの高感度化および小型化技術の開発に取り組み、バッテリーマネジメントシステムに組み込んでいく。さらに、開発したダイヤモンド量子センサで電池内部の電流や温度分布を高い精度で計測し、電池の高信頼化につなげていく。

本研究は電気自動車の電池モニタリングにとどまらず、ダイヤモンド量子センサのパワーデバイス、パワーエレクトロニクス、電池内部の計測への応用や、送配電システムのモニタリング、スマートグリッドへの実装等も視野に入れた研究を展開していく。ダイヤモンド量子センサは、カーボンニュートラルの新たなキーデバイスとなる可能性がある。

## ●付記

本研究は文部科学省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) JPMXS0118067395 の助成を受けたものである。また、今回「*Scientific Reports*」に掲載された論文は、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構との共著論文である。

## 【用語説明】

- (1) **窒素－空孔 (NV) センタ**：炭素原子からなるダイヤモンド結晶において、炭素 1 個が窒素に置き換わり、その窒素に空孔が隣接している構造。
- (2) **量子センサ**：量子力学に基づく物理を利用したセンサ。ダイヤモンド量子センサは、NV センタのスピン状態の操作および読み出しを行うことでセンサとして働く。
- (3) **EV**：Electric Vehicle の略。電気自動車。
- (4) **WLTC**：Worldwide-harmonized Light vehicles Test Cycle の略。「市街地」、「郊外」、「高速道路」といった走行モードで構成された自動車の燃費試験の国際標準。
- (5) **SOC**：State of Charge の略。電池の充電率。
- (6) **バスバ**：Busbar。電池の中に使用される大電流を導電するための導体。

## 【論文情報】

掲載誌：*Scientific Reports*

論文タイトル：High-precision robust monitoring of charge/discharge current over a wide dynamic range for electric vehicle batteries using diamond quantum sensors

著者：Yuji Hatano, Jaewon Shin, Junya Tanigawa, Yuta Shigenobu, Akimichi Nakazono, Takeharu Sekiguchi, Shinobu Onoda, Takeshi Ohshima, Keigo Arai, Takayuki Iwasaki, and Mutsuko Hatano

DOI：10.1038/s41598-022-18106-x

**【問い合わせ先】**

国立大学法人東京工業大学 工学院 電気電子系 教授  
波多野睦子

Email: hatano.m.ab@m.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-3999

FAX: 03-5734-2376

矢崎総業株式会社 技術研究所 先端研究推進部 部長  
井上敬介

Email: keisuke.inoue@jp.yazaki.com

TEL: 055-965-3204

FAX: 055-965-0480

**【取材申し込み先】**

国立大学法人東京工業大学 総務部 広報課

Email: media@jim.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-2975

FAX: 03-5734-3661