

電流を可視化する磁気イメージングシステム

神戸大学 理学研究科

美馬勇輝

[研究背景、目的]

二酸化炭素削減のため、自動車の動力源を内燃機関から電気モータに変えることで、4倍以上のエネルギー利用効率が期待される。さらに、そのエネルギーを太陽光や風力、地熱などの自然エネルギーで充電することを想定すれば、二酸化炭素排出量は内燃機関の10分の1以下になることが見込まれている。しかしながら、電気自動車の普及のためには、現状のリチウム2次電池の性能では十分でなく、現状の容量約140 Wh/kg、出力密度約1700 W/kgを、将来的には容量500 Wh/kg以上、出力密度3000 W/kgに向上させる必要がある。この性能を早期に達成するため、これまで電池市場において先導的であった日本企業のみならず、IBM、サムソン、LGなど世界の大企業を巻き込んだ競争が激化している。蓄電池の高エネルギー密度化は、リチウムの含有量増加によって達成されるが、その際に発生が懸念されている針状結晶(デンドライト)が大きな課題となっている。これまで、デンドライト成長が原因と思われる蓄電池の爆発事故が数多く報道されており、安全性の確保が急務となっている。そこで、私は、近年、蓄電池の充放電時に、蓄電池内から外部に漏洩した磁場を計測し、蓄電池内の電荷移動状態を非破壊で診断可能な装置を開発し、商品化することに成功し¹、現在自動車会社の生産ラインへ装置を投入し、高度な品質管理体制を構築する準備を進めている。世界的にも前例のない本技術の強みは、“磁場から電流分布を導くアルゴリズム”、“室温にて100 pTを計測可能であり、小型が容易な世界最高水準の薄膜磁気センサ”、これらを組み込み、高精度な計測システムとして仕上げた装置技術”である。また、開発したシステムの応用範囲は、電流経路を直接的に映像化可能であるため、蓄電池のみならず半導体デバイス等の電子デバイス全般を想定している。

[映像化アルゴリズム]

磁場分布を検出する場合に課題となるのが、発生源である電流からの距離に依存した磁場の”広がり”である。計測によって得られた”広がり”のある磁場分布のみでは、有益な情報を得ることが困難である場合が多いため、解析的な計算によって、広がりを集束させるような処理により、電流経路の鮮明な映像化を実現する。これは、カメラのピントを合わせるようなイメージに近い。磁場の場合は、光とは異なり物理的に光を収束させるようなレンズが存在しないために、様々な計算によって同様の処理を実現する。我々の方法では、場の方程式を解析的に解くことで、電流経路の近接の場の分布を再構成する^{2,3}。特徴としては、フィッティング等の膨大な処理が必要な演算とは異なり、解析的に導いている事から、処理時間が1秒未満であることが挙げられる。

【開発システムの概要】

開発したシステムの外観写真を図 1 に示した。装置構成の主要部は高感度薄膜磁気センサ、走査用の自動 XYZ-ステージ、接触検知用のフォースセンサ、傾斜補正用の自動ゴニオステージ、制御用 PC である。磁気センサは、高感度薄膜磁気センサであるトンネル磁気抵抗効果素子を用いており、室温にて $100 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 10kHz の検出能を持つ。磁気センサ部は、単一の磁気センサを用いるシングルセンサヘッドタイプと磁気センサを 54ch マルチアレイ化したマルチセンサヘッドタイプがある。ステップモータステージを制御 PC により測定対象直上で走査させ、二次元磁場分布を取得する。マルチアレイヘッドの場合、数秒程度で磁場分布の取得を完了することが可能である⁴。



図 1: これまで商品化してきた電流経路映像化システム

【実測例】

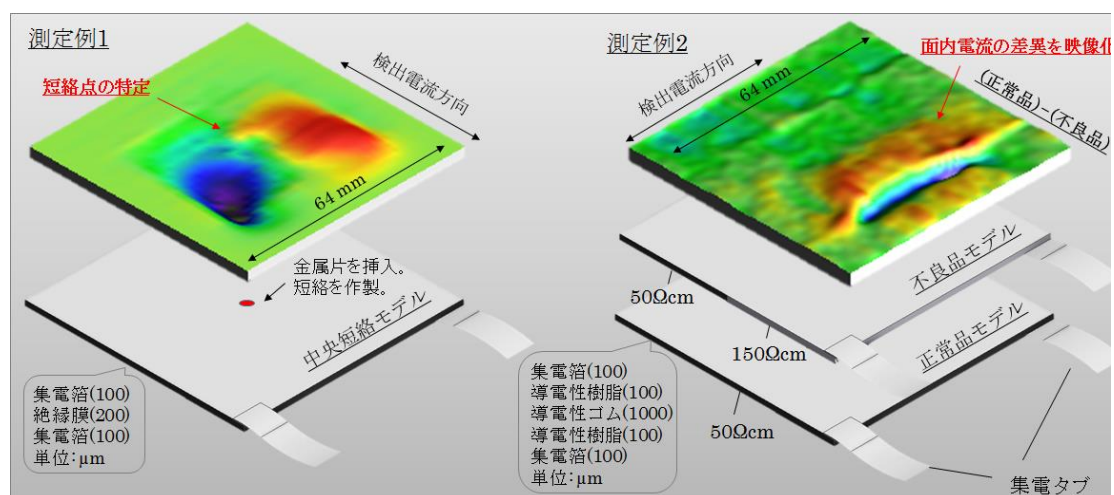


図 2: 測定試料模式図と映像化結果

短絡蓄電池モデル(図 2,測定例 1)および充放電ムラ蓄電池モデル(図 2,測定例 2)にて電流映像化を行った結果について図 2 にて示す。短絡蓄電池モデルは、集電箔に囲まれたセパレータ中に金属片を挿入して中央部位に短絡を形成した。充放電ムラ蓄電池モデルは、カ

一ボンの含有量で導電率を制御できる導電性ゴムを用いることで、良品と不良品モデル(図2のようにタブ側の導電率が小さい)を作製した。電流値はそれぞれ 200mA に設定し、一次元にアレイ化した磁気センサヘッドを用いて磁場分布計測を行った。測定時間は、それぞれ 6.4 秒と 17 秒である。図2の映像化結果で示されるように、測定例1に関しては、短絡部位に電流が集中する様子が観測され、測定例2では、良品と不良品の差分をとることで、導電率の差異が構成材料の形状を反映する形で明瞭に映像化されている。

[市場規模]

2017年には、自動車会社のインライン検査設備として投入を計画している。以下では、車載用にターゲットを絞った世界市場の分析を行う。

2015年1月19日発表 2012年比 約8倍

	2012年度	2013年度	2014年度	2015年度	2020年度
二次電池 (車載専用)	1862億円	3789億円	4309億円	5213億円	14949億円
容量ベース (MWh)	3115	6187	7698	12493	59543

矢野経済研究所データ 2012年比 約19倍

車載用リチウムイオン電池の価格は2015年度は1kWh当りで約42,000円、2020年度1kWh当りで約25,000円と予測されているが⁵、実際は2015年度は1kWh当りで約10万円程度で、日産のリーフ1台(24kWh)のバッテリーコストが240万円となる。ゆえに、検査機としても早い段階で市場への参入が出来れば、利益率も高い物となる。また、現在のインライン検査機の価格帯としては2億円/台である。

以下では、インライン検査装置投入予定の2020年での市場規模を分析した結果を示す。2018年には、電池用3次元電流経路映像化システム - 抜き取り検査用 - が完成するが、本分析では、インライン検査にターゲットを絞って議論する。

- 2020年度 Li-ion2次電池販売数量 ○1セルあたりの容量と検査時間
 - 容量ベース、59,543 MWh 容量 10 Wh/セル、検査時間 1分/セル
 - インライン検査に必要な検査機台数 100%稼働させた場合
- $$59,543,000,000 \text{ [Wh]} \div 10 \text{ [Wh/セル]} \div (365 \times 24 \times 60) \text{ [分]} = 11,330 \text{ [セル/分]} = 11,330 \text{ [ライン]}$$

ラインでの検査装置は2億円/ラインで、5年の装置寿命として計算すると、
 $11,330 \text{ [ライン]} \times 2 \text{ [億円/ライン]} \div 5 \text{ [年]} = 4,532 \text{ [億円/年]}$
年間4,532億円の市場規模である。

メーカー・拠点が異なる事も考慮すると、稼働率は下がるので、必要な検査機台数は、この数値より増加。車検での検査を義務化し、ディーラーごとに装置

を設置するようになれば、さらに増える。 自販連会員数: 1,534 社 (2013 年末)

他の市場・技術の拡大による縮小のリスクとしては、仮にリチウムイオン蓄電池の生産量が伸びない場合、本検査装置の販売台数が減少することが挙げられるが、自然エネルギーの備蓄と活用において、高性能の蓄電池の需要が減少することは考えにくい。水素燃料としての、エネルギー備蓄も想定されるが、ポータビリティを考慮すると、次の 10 年間で、水素燃料タンクが蓄電池を上回ることは考えにくい。

[波及効果]

本機器の実用化により、車載用リチウムイオン蓄電池の品質評価、安全性評価がインラインにて精密に行われ、高エネルギー密度リチウムイオン蓄電池の EV カー、PHV カー、HV カーの搭載が促進される。その結果、大きな CO₂ 削減の効果が期待される。例えば、96km 電気走行可能な PHEV96 が約 8000 万台普及した場合、必要となる電力量年間 793 億 kWh を、全て CO₂ 排出の少ない LNG 火力で供給した場合、0.6 億トンの CO₂ 削減が可能となり、2000 年の自動車排出 CO₂ の 23% に相当する。さらに、この台数が普及した場合、4240 万 kL のガソリン削減効果があり、2003 年度の自動車によるガソリン消費量の約 70% に相当する。ガソリンを使わないで済むということは、原料の石油の依存度を下げることにつながる⁶。これらの実現には、高性能蓄電池の開発が最も重要で、本装置の成功は、それを支える重要な基盤技術になることが期待できる。

[今後の課題]

市場導入に向けて様々な事例を想定した基礎実験および実工程で生じた不良蓄電池に対して、当手法を適用したデータベースの構築に努める。また、電気化学的考察を与えることで、蓄電池内部の各種イオンの拡散係数等のパラメータを抽出する方法について検討する。

[参考文献]

- (1) 美馬勇輝; 木村憲明; 木村建次郎. サブサーフェス磁気イメージングシステムの開発と半導体チップ内部の電流経路映像化への応用. ケミカルエンジニアリング 2015 60, 7.
- (2) 美馬勇輝; 大藪範昭; 稲男健; 木村憲明; 木村建次郎: 電流経路の非破壊映像化装置の実用化 - 電子部品、プリント基板、電池の不良解析への応用 -. In 第 43 回国際電子回路産業展アカデミックプラザ: 東京, 2013; Vol. AP-34.
- (3) Mima, Y.; Oyabu, N.; Inao, T.; Kimura, N.; Kimura, K.: Failure analysis of electric circuit board by high resolution magnetic field microscopy. In Proceedings of IEEE CPMT Symposium Japan, 2013; pp 4.
- (4) 美馬勇輝; 野本和誠; 大藪範昭; 木村憲明; 木村建次郎: リアルタイム磁気イメージング装置の開発と蓄電池内電流の高速映像化への応用. In 電気化学会第 82 回大会: 横浜国立大学, 2015.
- (5) 矢野経済研究所. 「車載用電池市場 2020 年展望—HEV/PHEV・EV 向け—」 2014.
- (6) 日渡良爾. 電気自動車社会はどのような効果をもたらすか. 電中研ニュース 2006, 433.