

レーザ乾燥装置の開発動向

外山達志

1. はじめに

近年、レーザは目覚ましい進歩を遂げ、多岐にわたる分野で産業の発展に寄与している。主な動向として以下のような点があげられる。

- ・高出力化と小型化、低コスト化
- ・短波長化と短パルス化
- ・半導体レーザの進化と市場拡大
- ・応用分野の多様化

特に、応用分野の多様化として、加工分野においては、切断、溶接から、電子基板のスルーホール加工、3D プリンティングに加え複雑な微細形状加工の実現など今までにない製造技術が出現している。

武蔵ワイヤードは、レーザ技術を駆使して、リチウムイオン二次電池 (LiB: Lithium-ion Battery) 製造技術において、電池の高出力化、高寿命化、製造技術の DX 化に大いに貢献してきた。

一方、環境改善に大きく貢献する LiB であっても、その製造工程では、まだ多くのエネルギーを消費している現状がある。特に塗工乾燥の工程においては、LiB 製造工程に使用する総エネルギーの 30% 弱を消費しているとも言われている。

このためレーザ照射によって塗工乾燥工程でのエネルギー消費量の削減を実現するべく技術開発に取り組んだ。LiB 電極の製造方法は、電極スラリー (活物質、導電材、バインダーを溶剤に分散させたもの) を集電体 (金属箔) に塗布する手法である。粉体のままでは集電体上に均一な薄膜を形成することが困難なため、このような手法を取っている。塗布後、スラリーに含まれる溶剤を除去する必要があり、そのため乾燥工程が必要となる (図 1)。LiB 製造における電極への塗工工程と乾燥工程をレーザ及び対流式熱風乾燥で対応可能とした Roll to Roll で搬送する試作機 (図 2)、並びにシートでの基礎実験が可能な環境試作機「WiDRY3 (Cube)」を完成させた (図 3)。試作実験受託の体制を整えたラボを燕三条駅前のリサーチコアに設立している。

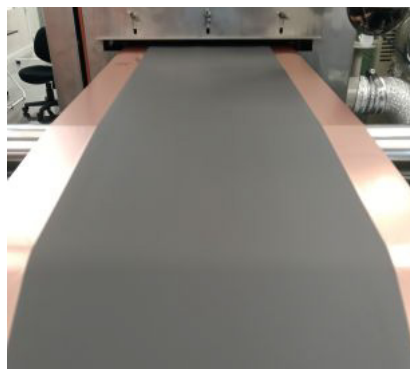


図 1 レーザ乾燥後の LiB 電極



図2 RtoR レーザ乾燥試作機「WiDRY」



図3 レーザ環境試作機「WiDRY3 (Cube)」

2. レーザ乾燥の開発動向

2.1 レーザ乾燥とは

(ア) 従来の熱風乾燥での課題

乾燥工程は、印刷、塗装、セラミック製造など多くの製造工程に不可欠な技術であるが、この工程は、まさしく、品質を決定する重要な工程であることは言を俟たない。

塗工乾燥工程は、熱をコントロールすることでエネルギー消費量は著しく改善されてきた。しかし、高度の技術を集積してきたにも拘わらず、化石資源への依存を解決するには至っていないのが現実である。塗工乾燥工程における課題は、例えば、

- ・大きなスペースを必要とする
- ・エネルギー効率が低い
- ・場所により熱の不均一性が生じる
- ・制御においては追従が遅く難しい
- ・材料に最適化された熱の調整が困難
- ・生産の立ち上がりが遅い
- ・周囲の生産エリアへの熱放射

などが考えられる。

(イ) 課題を解決するレーザー乾燥

武蔵ワイヤードが提供するこれらの課題に対するソリューションは、レーザーを使った画期的乾燥法である。レーザーの大きな特徴は、「高精度なエネルギーを他工法と比べて高速でオン・オフ制御ができ、常に予め設定されたエネルギーを電極に供給できる」ことである。すなわち、従来の乾燥方法と比較し乾燥速度が格段に速くなる。さらにはレーザー出力は瞬時に立ち上がるため生産性向上にも寄与できる。レーザー乾燥の導入は、前述した現在の塗工乾燥工程の課題を解決できるだけでなく、例えば、インラインセンサやサーモグラフィカメラと、レーザーの同期により最適なプロセスウインドウを得ることができる。加えて、熱風乾燥の赤外線ランプと比較した場合、1000 nm 近傍の近赤外線レーザーの照射は、発生する溶媒蒸気にもほとんど妨げられ

ずに透過し電極に到達する利点もある。

次に、レーザ乾燥の原理を紹介する。レーザ光の照射によって乾燥を促すもので、原理は、図4に示すように集電箔（図中キャリアフォイル）に塗布されたスラリー状の活物質に含まれるグラファイト、カーボンブラックへの吸収率の高い近赤外線レーザを照射し、その熱伝導効果でスラリーに含まれる溶剤を蒸散させ、乾燥に導くもので、とにかく高速かつ設定どおりに制御された環境下での乾燥が可能になることが明らかになっている。

ドイツのアーヘン工科大学の研究によると、スラリー乾燥後の電極粒子層の微細構造が電気伝導性、イオン伝導性に重要な役割を果たしており、乾燥方法が電池の性能に大きく影響していることが報告されている。

図4における乾燥の経過は、5つの過程に分けて考えることができる。第1、第2の段階では、熱による溶剤の蒸散と考えられるが、第3段階においては、溶剤がほとんど蒸散してしまった結果として、より小さな粒子が毛細管現象により電極表面に移動するマイグレーション現象が発生する恐れがある。この小さな粒子には、結合剤であるバインダー、導電材であるカーボンブラックが含まれていると考えられ、電極の機械的強度、電気特性の低下を引き起こす要因となる。電極の性能を向上させるためには、すべての活物質成分を均一に分散させることが不可欠であることは当然であるが、特に第3段階の過程では、毛細管現象による急激な乾燥（マイグレーション現象）が悪影響を及ぼす恐れがあるため工夫が必要である。

武蔵ワイヤードでは、実験の結果からレーザだけでの乾燥でも、電極の過乾燥を防ぎ、電極の割れなどが生じない乾燥方法を見出そうとしている。

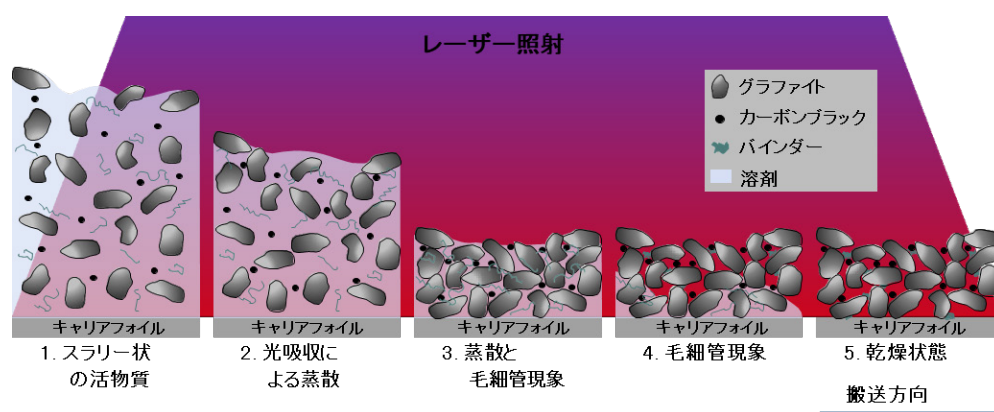


図4 レーザ乾燥プロセス材料速度論メカニズム（アーヘン工科大学）[1]

2.2 レーザ乾燥装置の特徴

（ア）乾燥プロセスの可視化

レーザ乾燥炉と対流式乾燥炉の大きな違いは、炉内温度を低温に保つことができ、炉の構造が簡略化できることである。そのため、炉内観察用に各種センサなどを設置することが容易である。パイロット機にはサーモカメラと放射温度計を設置し、塗工面の乾燥状態をつぶさに観察できるようにしている。金属箔に塗工された活物質にレーザ照射した際の温度を放射温度計にて測定した。図5(a)にスラリーAのレーザ乾燥時の昇温プロファイルを示す。昇温期間で徐々に温度が上昇して行き、定率乾燥期間にスラリー状の活物質中のバインダーに含まれる水分は蒸散する。そして減率乾燥期間に入ると、活物質自体の温度が上昇し始める。レーザ乾燥が対流式乾燥と大きく異なるのが「減率乾燥期間」である。対流式乾燥では熱風の温度以上に上がる

ことはないが、レーザ乾燥ではレーザ出力によりどこまでも温度を上げることができる。言い換えれば、レーザ出力を調整することで減率乾燥期間の温度コントロールも容易に行うことができる。レーザ乾燥プロセスでは、この点が一つのポイントであり、過乾燥にならないプロセス構築が重要であるが、それを可能とすべく研究を進めている。また、ある別の活物質スラリーBにレーザ照射した際の昇温プロファイルが図5(b)である。グラフを見てわかるように、この活物質は定率乾燥時に2段階の温度変化を持っている。おそらく対流式乾燥ではこのような繊細な温度変化をとらえることはできないであろうと考える。

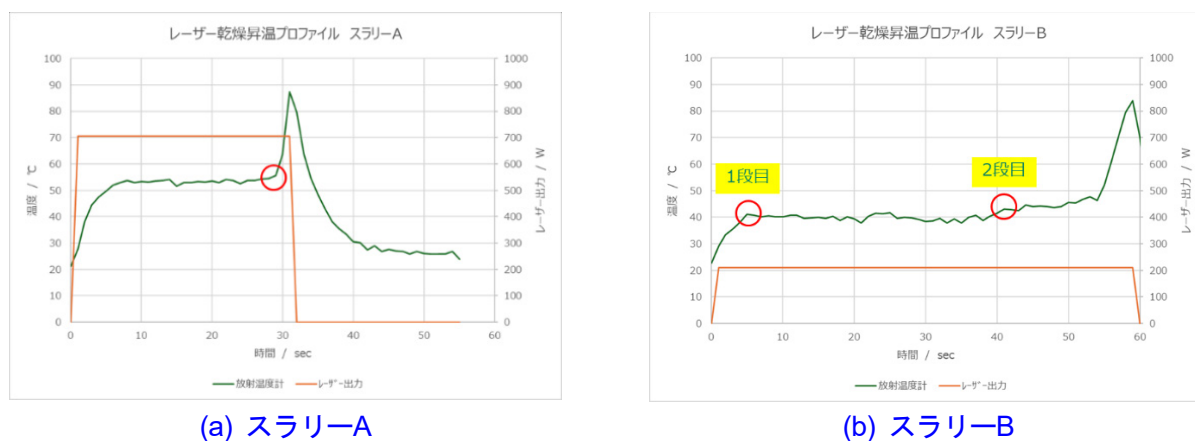


図5 レーザ乾燥の昇温プロファイル

(イ) レーザの操作性

金属箔に塗工された活物質を Roll to Roll 搬送しながら、レーザ照射したサーモグラフィ分析を図6、図7に示す。レーザを2台装備し、乾燥炉上流側がレーザ1、下流側がレーザ2である。乾燥出口温度が85°Cを目標にレーザ出力を調整した。図6が調整前、図7が調整後である。図6では、乾燥出口温度が120°Cまで上昇しているが、レーザ1の出力のみを調整※した図7では84.3°Cとなり、目標の出口温度に調整ができています。これは、乾燥炉常設のサーモカメラ画像を見ながらレーザ出力の調整を行っており、レーザの特徴である「高速かつ高精度に加熱対象物にエネルギー供給が可能」であることにより、上述のようなプロセス調整が可能となっている。このようにレーザ乾燥では、対流式乾燥では見えなかったことを詳細に観察でき、手軽にプロセス調整可能としている。

※乾燥は、乾燥に必要な総熱量のコントロールにより完了するため、複数の温調ゾーンがある場合は温度の組み合わせにより乾燥状態を調整することが可能である。

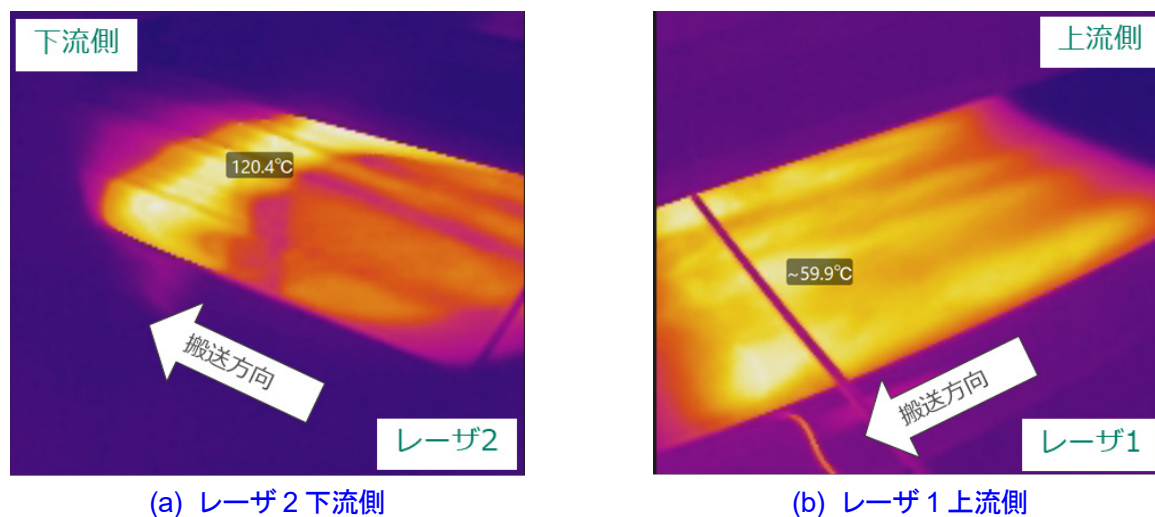


図 6 サーマグラフィ分析 調整前

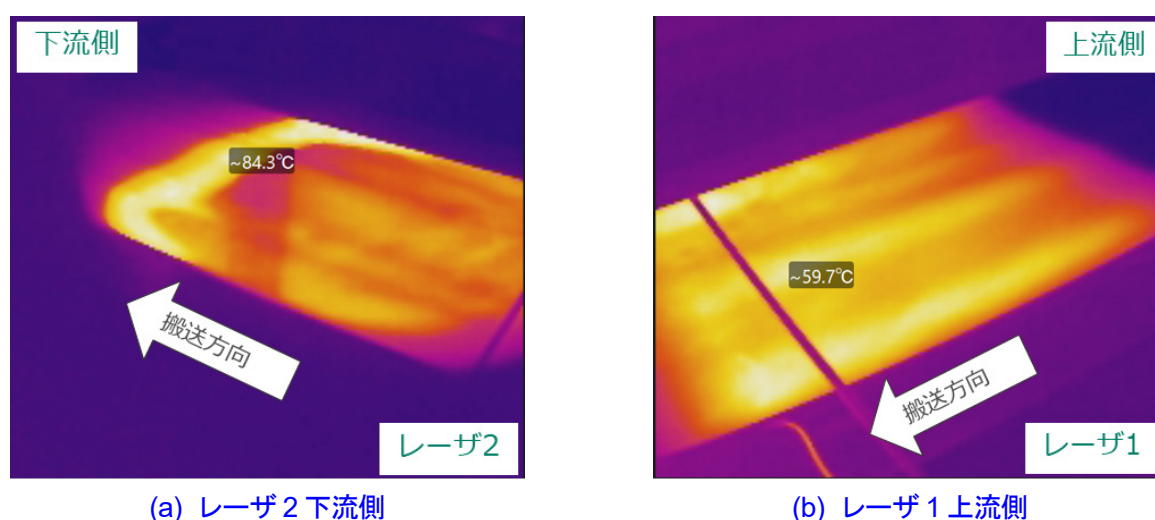


図 7 サーマグラフィ分析 調整後

(ウ) 温度フィードバック制御

上述のプロセスの可視化とレーザーの操作性を組み合わせることで、レーザーの温度フィードバック制御が可能となる。ここでいう温度とは、照射対象物の温度であり、対流式乾燥の熱風温度のような間接的な温度ではない。したがって、この温度フィードバック制御を行うことで、照射対象物を直接温度管理することが可能となる。すなわち過乾燥を引き起こすであろう、減率乾燥時の温度の急上昇を抑えることが可能である。また、レーザーを複数台使用する場合など段階的に温度を変えていくことも容易に可能となる。温度フィードバック時の表面温度とレーザー出力を図 8 に示す。表面温度が 95℃になるようにレーザーのフィードバック制御を行っている。本方式ではレーザー出力を変更している。600 秒が経過したところでフィードバック制御をオフにし、レーザー出力を一定にした。グラフを見ての通り、出力一定にした瞬間から表面温度が上昇し始めている。このことより、それまでは問題なくフィードバック制御が行えている証でありレーザーのレスポンスがいかに良いかを表している。

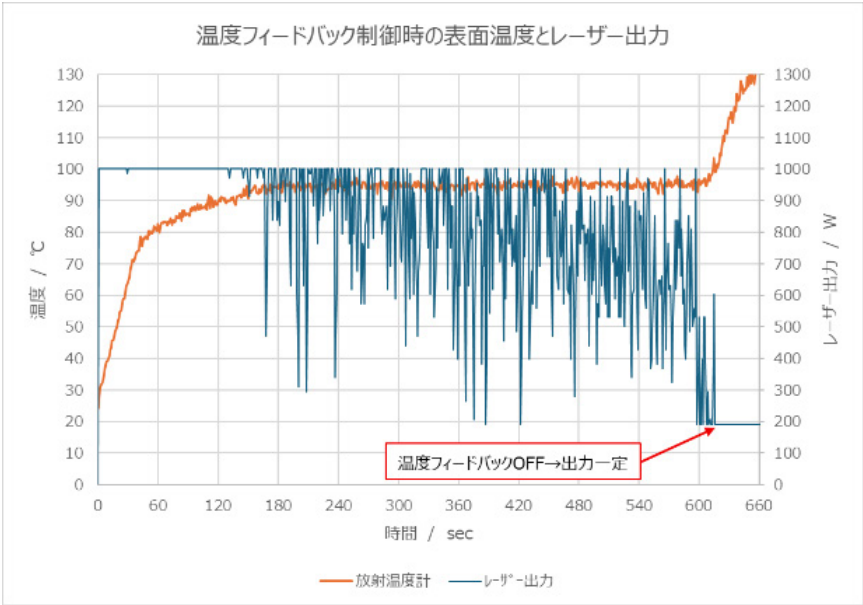
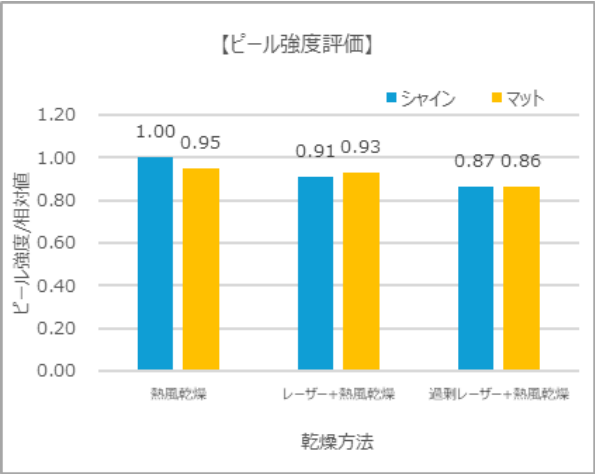


図8 温度フィードバック時の温度プロファイル

(エ) レーザ乾燥電極の評価

ここまでレーザ乾燥について説明してきたが、レーザ乾燥にて製作した電極の評価も始めている。一例ではあるが、ピール強度及び可撓性について評価した結果を図9(a)、(b)に示す。ピール強度、可撓性ともにまだ課題は残るが継続して条件を出す作業に取り組んでいる。さらに、電極単体の電気抵抗などの電気特性、さらには電池評価サンプルを作製し電池性能評価に取り組み始めているところである。



(a) ピール強度

可撓性評価

乾燥方法	塗工	測定面	可撓性
熱風乾燥	両面	シャイン	5B
		マット	8B
レーザー+熱風乾燥	両面	シャイン	5B
		マット	6B
過剰レーザー+熱風乾燥	両面	シャイン	5B
		マット	8B

可撓性：数値が小さいほうが良

(b) 可撓性

図9 レーザ乾燥電極評価

3. おわりに

日本のLiB市場規模は調査機関によるが、いずれも今後数年で大幅な成長が見込まれており、市場拡大の要因としては以下の3点があげられる。

- ・EVの普及により車載用LiBの需要が大きく伸長
- ・再生可能エネルギーの利用拡大による定置型蓄電池の需要増加
- ・AIやクラウドサービスの普及によるデータセンターの電力供給安定化のための蓄電池需要の急速な伸び

EV普及の伸び悩みや供給能力の過多という調査結果もあるが、再生可能エネルギー、AIサーバ向けの定置型の需要は旺盛である。レーザ乾燥の技術は、取り組みを始めたばかりで市場としては立ち上がっていないが、今後、従来の熱風乾燥から置き換わる技術として大きな市場の可能性を秘めている。本稿では、LiB乾燥について技術紹介を行ったが、加熱・乾燥工程は、農業、食品産業から自動車産業、半導体産業など様々な産業にかかわる裾野の広い工程であり、そのすべてにおいて前述した課題を抱えているものと推察する。

これまで武蔵ワイヤードは Roll to Roll 搬送技術とレーザ加工技術を組み合わせた革新的な技術を提供してきた。新たに、レーザ加熱・乾燥技術開発に取り組み、新しいソリューションを提案し各産業の抱える課題解決に貢献するべく進めていく所存である。

【外山達志（武蔵ワイヤード株式会社）／レーザ・光加工分野】

参考文献

- [1] Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker, Prof. Dr.-Ing. Heiner Heimes, Benjamin Dorn, M. Sc., Daniel Neb, M. Sc. Sebastian Wolf, M. Sc., Dr.-Ing. Alexander Arndt, Dr.-Ing. Simon Britten, Dipl.-Ing. Richard Hendel, "Diode Laser Drying of Electrodes for Lithium-Ion Batteries", PEM RWTH Aachen University, Laserline GmbH: https://www.pem.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaabzkmfxo (2025.9.4 現在)