

平成 30 年 5 月 21 日現在

機関番号：32678

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17944

研究課題名(和文) 逆解析を援用した高容量二次電池のマルチフィジックス構造解析システムの開発

研究課題名(英文) Development of multi-physics structural analysis system for high capacitance batteries by inverse analysis

研究代表者

岸本 喜直 (Kishimoto, Yoshinao)

東京都市大学・工学部・講師

研究者番号：20581789

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：逆解析を援用することで、設計仕様の変更に応じて電池の各構成部材の挙動をシミュレートできる構造解析システムの構築を試みた。具体的には、各連成問題に対する解析シミュレータと逆解析コードを製作し、本解析システムの解析精度の検証と逆解析に利用可能な物理量の選定を行うための種々の実験を実施した。その結果、適用範囲は母材と電極材がそれぞれ均質材で、温度分布がほぼ一様であると仮定できる場合に限られるが、各部材の変形をミリメートルオーダーで運用する上では十分な解析システムを構築できた。

研究成果の概要(英文)：This study has developed a structural analysis system to simulate the behaviors of each member in the battery for the decision of the design specification by using the inverse analysis. The analytical simulator and the inverse analysis code were produced and the several experiments were conducted to verify the analysis accuracy of the analysis system and select the utilizable physical quantity for the inverse analysis. From the results, the analysis system is enough to simulate the deformation of the members in the millimeter order in the situation where the base material and the electrode material can be assumed to be homogeneous in each, and the distribution of the temperature is almost uniform.

研究分野：機械材料・材料力学

キーワード：機械材料・材料力学 連続体力学 マルチフィジックス 計算力学 逆問題 積層構造 薄板構造 二次電池

### 1. 研究開始当初の背景

リチウムイオン電池をはじめとするエネルギー密度の高い二次電池は、蓄電容量の増加と充電速度の向上に伴い、スマートフォンなどの携帯機器だけでなく、電気自動車や緊急用の蓄電池、太陽光・風力発電のバックアップ用電源等への応用が期待されている。一方で、急速な充放電は電池の構成部材となる電極板やセパレータに大きな電流が流れることになるため、電極板およびセパレータにはジュール熱に起因する温度上昇とともに熱応力が生じる。したがって、大電流を取り扱う電池の強度設計においては、電場・伝熱・構造の相互作用に着目したマルチフィジックスな解析が必要となる。

従来の研究においても、リチウムイオン電池を代表として、発熱や変形の挙動を解析するために、コンピュータ・シミュレーションが利用されている。しかしながら、従来のシミュレーション手法では電池全体を一種類程度の材料モデルで近似して、ノミナルな応力状態などを解析しており、実際の電池のように、電極板とセパレータを交互に重ね合わせた積層構造を考慮したモデル化がなされていないため、各構成部材の挙動のシミュレートには至っていなかった。

本研究では、電極板およびセパレータの内部に生じる温度などの物理量が熱伝導方程式等の支配方程式を満たし、界面の物理・化学現象が支配方程式の境界条件として与えられる境界値問題に帰着することに着目した。界面以外の境界条件はセパレータに接合されていない電極板表面の物理量で与えられるので、この境界値問題は界面の諸係数と電極板表面の物理量との関係を表す観測方程式に帰着する。この観測方程式を逆解析すれば、電極板表面の物理量から界面の諸係数を同定できる。したがって、各境界値問題を解く計算コードを製作すれば、高容量二次電池に対するマルチフィジックスな解析シミュレータを構築できるとともに、逆解析の結果を援用すれば、設計仕様の変更に応じて電池の各構成部材の挙動をシミュレートできる構造解析システムを構築できると考えた。

### 2. 研究の目的

逆解析を援用したマルチフィジックス構造解析システムを開発することを本研究の目的とする。その実現に向けて、本研究課題の研究期間内で以下を明らかにする。

- (1) 本解析システムを用いたシミュレーションの計算速度および厳密解に対する計算精度
- (2) 本逆解析を用いた諸係数同定の理論上の可否およびその同定精度
- (3) 実際の電極板とセパレータに生じる熱応力などに対する本解析システムの解析精度
- (4) 本解析システムの適用範囲と拡張性、ならびにシステムを拡張する際の課題

### 3. 研究の方法

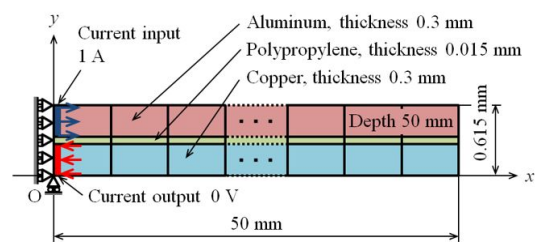
本解析システムの開発に際し、電気-伝熱、伝熱-構造、電気-磁場の各連成問題に対する解析シミュレータと、現実に測定可能な物理量から界面の諸係数を同定する逆解析コードを製作した。並行して、本解析システムの解析精度の検証や、現実に逆解析に利用可能な物理量の選定を行うために、電池電極板や種々の基礎試験片、測定機器を用いた実験を計画・実施した。

### 4. 研究成果

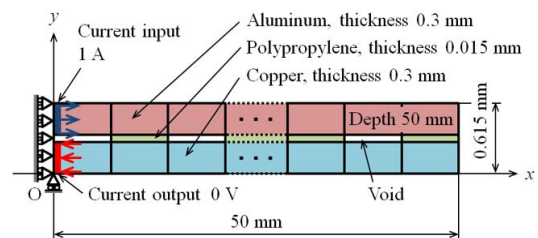
- (1) 本解析システムを用いたシミュレーションの計算速度および厳密解に対する計算精度

図1にシミュレーションを行う際に設定した解析モデルの概略を示す。解析モデルは、リチウムイオン電池の基板材料およびセパレータ材料を参考にして、アルミ板、ポリプロピレンフィルム、銅板からなる三層構造板(50 mm x 50 mm x 0.615 mm)とした。アルミ板の側面から電流1 Aが流入し、銅板から電流が流出するとし、解析モデルから外部への放熱は無いものとしたときの、解析モデルの温度上昇量と熱変形量を本解析システムで見積もった。ポリプロピレンフィルムにボイドを設けた場合も同様に検討した。

シミュレーション結果を図2に示す。図は解析モデルを構成する全節点の温度上昇量と通電から1時間後の熱変形量を表したものである。図より、ボイドの有無にかかわらず、温度は時間に対して一様かつ線形に上昇したことが、熱変形は線膨張係数の低い銅板側にたわんだことがわかる。これらの傾向は厳密解と一致した。また、ボイドの存在によってポリプロピレンフィルム全体の電気抵抗が上昇し、剛性が低下したことから、ボイドが

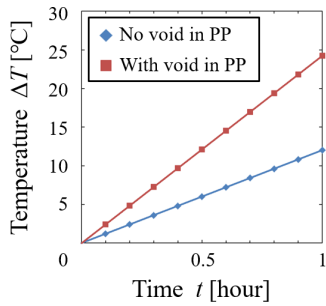


(a) ポリプロピレンフィルムにボイド無し

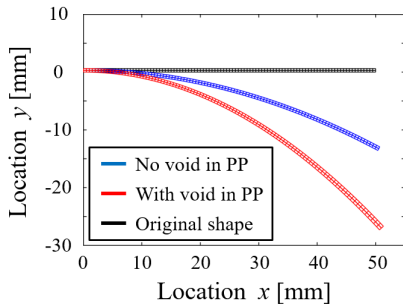


(b) ポリプロピレンフィルムにボイド有り

図1. 電池の構造を模擬した解析モデル



(a) 温度上昇量



(b) 熱変形量 (変形量は 50 倍表示)

図 2 . シミュレーション結果

無いときと比べて、温度上昇量と熱変形量が大きくなった。以上の計算結果を得るのにかかった計算時間は、市販のパソコンを用いて 1 分程度であった。

(2) 本逆解析を用いた諸係数同定の理論上の可否およびその同定精度

図 2 に示したシミュレーションの結果より、試験片表面において温度分布がほぼ一様に上昇したことから、伝熱解析に際しては、熱伝達率を位置によらずほぼ一定値と考えてよいと判断できた。これを踏まえて、本研究では、伝熱解析を除く、電場解析と構造解析に限定して逆解析の理論上の可否とその同定精度を調べた。

電場解析(電極板間の電流密度分布同定)

電極板間の電流密度分布は、電極板内を流れる電流が誘起する磁束密度を逆解析することによって同定することとした。図 3 に本逆解析手法の検証に用いた解析モデルと磁束密度の模擬測定点を示す。解析モデルは 100 mm x 100 mm x 0.3 mm の電極板二枚を 0.015 mm のセパレータをはさんで接合したものを想定した。電極板間の電流密度分布を任意に与えたときの磁束密度分布を順解析計算によって得た。この磁束密度分布を逆解析することで電流密度分布を同定できるか調べた。

図 4 に電流密度分布の同定結果の一例を示す。このときの正解の電流密度分布は、電極板間を流れる総電流量を 1 A とし、(X, Y)=(50, 50) と (75, 75) の二点に微小短絡があるとしたものである。図より、電流密度の同定結果

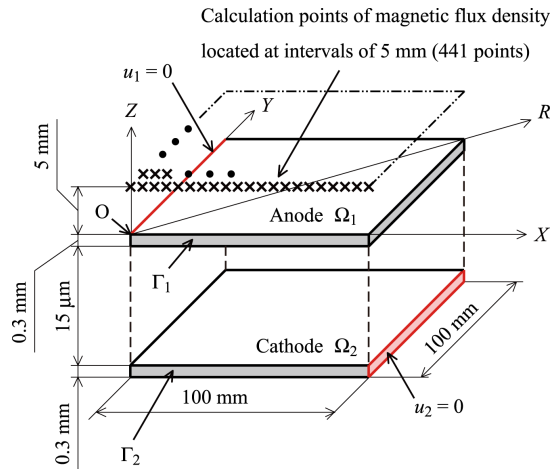


図 3 . 解析モデルと磁束密度の模擬測定点

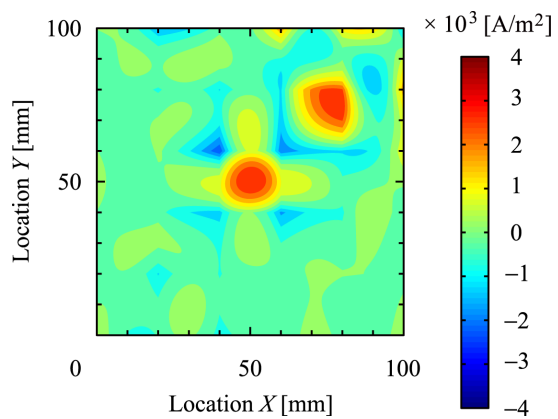


図 4 . 電流密度分布同定結果

は微小短絡を与えた二点に大きな分布をもったことがわかる。このことから、本逆解析によって電極板間の電流密度分布の同定は可能であるといえる。なお、同定精度は磁束密度に含まれる測定ノイズに依存するが、実験室レベルの測定ノイズであれば、許容できる範囲内にあることを確認した。

構造解析(電極板間の支持反力分布同定)

電極板間の支持反力分布は、熱変形によって生じる電極板のたわみを逆解析することによって同定することとした。図 5 に本逆解析の検証に用いた解析モデルを示す。たわみの模擬測定データには前述の図 2 のシミュレーション結果を用いた。解析モデルはアルミ板のみのものとし、ポリプロピレンフィルムおよび銅板から受ける、支持反力分布を本逆解析手法によって同定した。

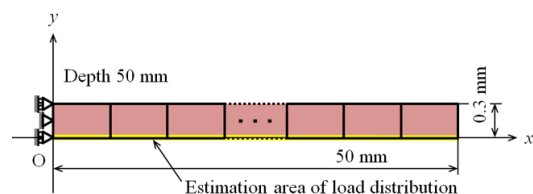
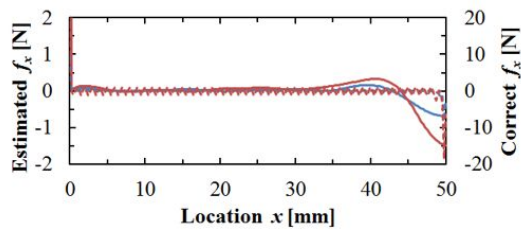


図 5 . 逆解析用の解析モデル



PP film	no void	with void
Estimated	— (blue)	— (red)
Correct	- - - (blue)	- - - (red)

図6. 支持反力分布同定結果

図6に支持反力分布の同定結果の一例として、アルミ板の長手方向に沿った方向の支持反力分布を示す。図より、支持反力の同定結果は右端でピークを持ち、正解値の傾向と一致していることがわかる。このピークの合計値はポイド無しときに-12 N、ポイド有りのときに-21 Nでありこれらは正解値（ポイド無しときに-16 N、ポイド有りときに-29 N）に近い値であった。なお、この結果はアルミ板の厚さ方向の支持反力が長手方向に比べて無視できるとする先験情報に基づいて得られたものである。これは、たとえば、真直はりに同一のたわみ変形を生じさせる力について、はりの圧縮量がたわみに比較して無視できるほど小さいときに、長手方向に与える場合と厚さ方向に与える場合の二通りを考えられることに起因する。すなわち、電極板のたわみから支持反力の同定をする際には、支持反力の方向を既知として与える必要のあることがわかった。

### (3) 実際の電極板とセパレータに生じる熱応力などに対する本解析システムの解析精度

本解析システムに用いる解析モデルの妥当性を検証するため、試験片を加熱しながら、温度および熱変形を測定するための実験装置を製作した。リチウムイオン電池の負極板を参考にして、母材を銅板とし、その表面に電極材となるカーボンを塗布して試験片を製作した。試験片を実験装置に取り付けて加熱し、試験片表面の温度と変形量を、それぞれ試験片近傍に設置した熱電対とレーザー変位計を用いて測定した。

図7に試験片および実験装置を示す。レーザー変位計と目視により、温度上昇に伴って、試験片には母材と電極材の線膨張係数の違いに起因すると推察される熱変形が生じたことを確認した。このときの試験片の熱変形は本解析システムで見積もった傾向とよく一致した。当初研究計画で懸念されていた大変形や塑性変形が生じた場合についても調べたが、微小変形の場合よりも変形の測定が容易であったので、支持反力の推定に支障は生じなかった。なお、同時に銅板にはひずみゲージを貼付し、逆解析等に有用と見込んで

いた試験片の熱ひずみを測定できるか調べたが、ひずみゲージに生じた熱ひずみの影響で、試験片に生じたひずみをひずみゲージで測定することは困難であった。加えて、本実験を通じて以下の知見が新たに得られた。試験片から切り出した電極材を電子顕微鏡（東京都市大学ナノテクノロジーセンター研究推進センター）で観察したところ、カーボンを焼き固める際に使用したバインダーの分布に偏りがあることがわかった。この偏りがカーボン膜の縦弾性係数、引張強度、線膨張係数の実験値のばらつきの原因になっていることが示唆された。

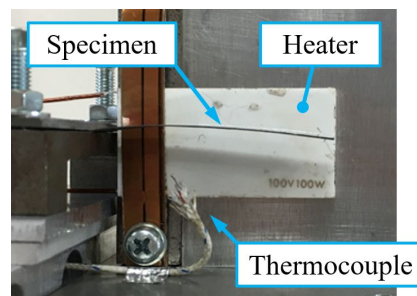


図7. 試験片および実験装置

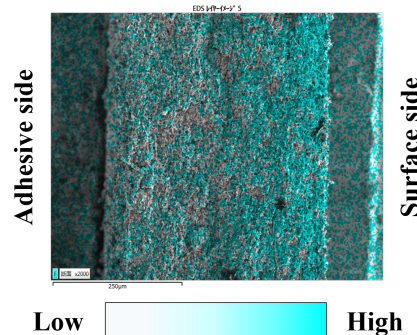


図8. 電極材のバインダー分布(2000倍表示)

### (4) 本解析システムの適用範囲と拡張性、ならびにシステムを拡張する際の課題

本研究で開発した解析システムについてまとめると、適用範囲は母材と電極材がそれぞれ均質材で、温度分布がほぼ一様であると仮定できる場合に限られるが、支持反力の推定精度は、電極板の変形をミリメートルオーダーで運用する上では十分であった。マイクロメートルオーダーのより詳細な解析システムに拡張するには、顕微鏡観察に基づく解析モデルの構築を検討する必要があることがわかった。電流密度分布および支持反力分布の推定については、基礎試験片による検証にとどまったが、実行可能であることが確認できた。実際の電池電極板に適用する場合には、入力データとなる磁場やたわみの測定精度と解析精度の相関を調べる必要があるとわかり、今後継続して研究を進める。

材料力学の視点から、高容量二次電池は異種の材料を交互に積層し、接合した複合構造

をなしている．そこで，本研究では，同様の複合構造をなすサンドイッチ板やボルト締結体にも本解析システムを応用し，これらの主な設計指標である，支持反力分布や接触面剛性を同定できるか調べた．

#### サンドイッチ板の支持反力分布の同定

図9に解析対象であるサンドイッチ板の寸法を示す．表面板はアルミ薄板，コア材にフォームコアとした．解析は外部荷重の負荷点を中心とする軸対称問題として扱い，表面板のたわみから，本解析システムによって，コア材から受ける支持反力を見積もった．図10に支持反力分布の同定結果の一例を示す．図は正解の支持反力分布と表面板のたわみを順解析計算で求め，このうち，表面板のたわみから正解の支持反力分布を同定できるか調べたものである．図より，外部荷重の負荷点である中心近傍を除き，支持反力分布の正解値 (Direct analysis) と同定値 (Inverse analysis) がよく一致していることがわかる．外部荷重の負荷点近傍は，負荷されている外部荷重と支持反力がつりあうため，表面板のたわみだけでは支持反力分布を同定できないことがわかった．しかしながら，力のつりあいより，外部荷重値を追加情報として用いれば，荷重負荷点近傍の支持反力は合力であるが求められることがわかった．

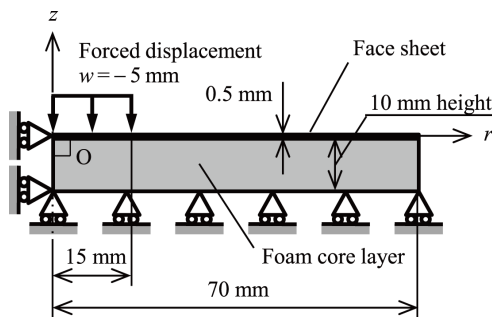


図9．サンドイッチ板の寸法

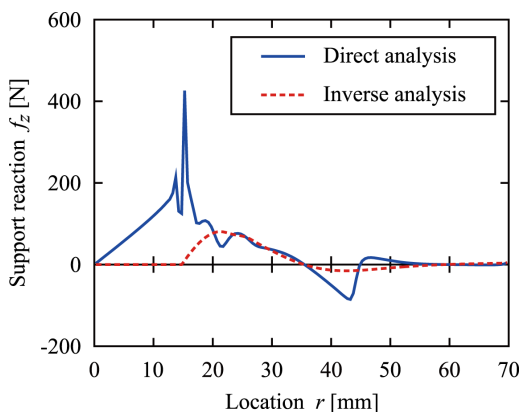


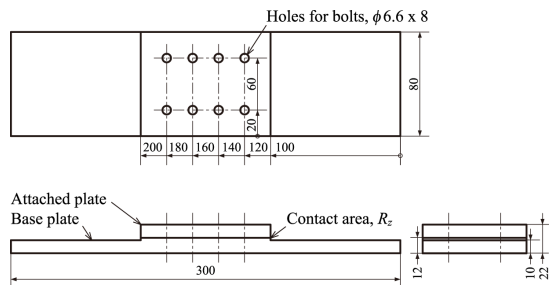
図10．支持反力分布同定結果

#### ボルト締結体の接触面剛性の同定

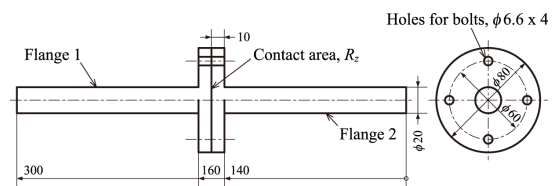
図11に解析対象であるボルト締結体の寸法を示す．二枚の平板を八組のボルト・ナット

トで締結した Plate-type 試験片と，二個のフランジを四組のボルト・ナットで締結した Flange-type 試験片を用いた．材質にはいずれも鋼を用いた．接触面剛性は直接測定できないので，代わりに接触面剛性を決定づける表面性状の同定精度を評価した．表面粗さ計を用いて表面性状を実測し，本解析システムによって，固有振動数から表面性状を見積もった．図12に表面性状の同定結果の一例を示す．図は表面性状を表すパラメータのうち，突起頂点高さの標準偏差を示したものである．図より，表面性状の実測値 ( ) と同定値 ( ) がよく一致していることがわかる．

従来の研究から，接触面剛性は表面性状に加え，ボルト・ナットによる締結力にも依存することが知られている．本研究の成果は近年，課題となっている部材間の締結力の評価にも応用できると考えられる．特に，急速に普及が進んでいる工業製品等のマルチマテリアル化に伴い，その信頼性を向上するために異種材料同士の接合部の評価方法が必須となるが，同様の構造をなす，大容量二次電池を取り扱った本研究の成果が貢献できると考えられる．



(a) Plate-type 試験片



(b) Flange-type 試験片

図11．ボルト締結体の寸法

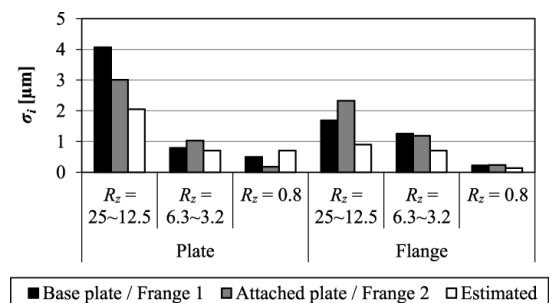


図12．表面性状同定結果

## 5. 主な発表論文等

### [雑誌論文](計5件)

Y. Kishimoto, Y. Kobayashi, T. Ohtsuka, M. Niizuma, Estimation method of surface texture parameters by inverse analysis of dynamic characteristics, *Mechanical Engineering Journal*, 査読有, Vol. 4 (2017), No. 5, p. 16-00717, DOI: <https://doi.org/10.1299/mej.16-00717>.

Y. Kishimoto, Y. Kobayashi, T. Ohtsuka, T. Togo, Limitation of estimation method of current density between battery electrodes by inverse analysis of noisy magnetic field, *Mechanical Engineering Journal*, 査読有, Vol. 4 (2017), No. 5, p. 16-00672, DOI: <https://doi.org/10.1299/mej.16-00672>.

Y. Kishimoto, T. Togo, Y. Kobayashi, T. Ohtsuka, K. Amaya, Estimation method of current density between laminated thin sheets by inverse analysis of magnetic field (Application to short circuit localization), *Mechanical Engineering Journal*, 査読有, Vol. 3 (2016), No. 4, p. 16-00046, DOI: <https://doi.org/10.1299/mej.16-00046>.

Y. Kishimoto, Y. Kobayashi, T. Ohtsuka, S. Yamagata, Estimation method of support reaction on face sheet of sandwich panel by inverse analysis of deformed shape data, *Mechanical Engineering Journal*, 査読有, Vol. 3 (2016), No. 4, p. 15-00597, DOI: <https://doi.org/10.1299/mej.15-00597>.

岸本喜直, 小林志好, 大塚年久, 天谷賢治, 東郷貴仁, 磁気センサを用いたリチウムイオン電池内の電流密度測定法, 日本機械学会論文集, 査読有, 81巻 (2015), 825号, p. 14-00637, DOI: <http://doi.org/10.1299/transjsme.14-00637>.

### [学会発表](計11件)

Y. Kishimoto, Y. Kobayashi, T. Ohtsuka, S. Yamagata, In Situ Estimation of Support Reaction on Thin Sheet Subjected to Local Compression using Data Assimilation, *JSME/ASME 2017 International Conference on Materials and Processing* (2017).

岸本喜直, 小林志好, 大塚年久, 新妻基, 固有振動数を用いた表面性状パラメータの抽出に関する研究, 日本機械学会 第24回機械材料・材料加工技術講演会 (2016).

Y. Kishimoto, Y. Kobayashi, T. Ohtsuka, T. Togo, Limitation of Estimation

Method of Current Density in High Capacitance Battery by Inverse Analysis of Magnetic Field, *Asia-Pacific Conference on Fracture and Strength 2016* (2016).

岸本喜直, 小林志好, 大塚年久, 通電加熱時における電極板の荷重分布推定に関する研究(電極板間の接着強度を考慮した場合の検討), 日本機械学会 2016年度年次大会 (2016).

Y. Kishimoto, Y. Kobayashi, T. Ohtsuka, Preconditioned Inverse Analysis for Estimation of Load Distribution between Thin Sheets under Resistance Heating, *The 10th International Conference on Fracture and Strength of Solids* (2016).

Y. Kishimoto, Y. Kobayashi, T. Ohtsuka, M. Niizuma, A simple method to estimate surface texture parameters by inverse analysis of dynamic characteristics, *2016 M&M International Symposium for Young Researchers* (2016).

Y. Kishimoto, Y. Kobayashi, T. Ohtsuka, Development of estimation method of load distribution between thin films under resistance heating by inverse analysis, *Joint-Symposium on Mechanics of Advanced Materials & Structures 2015* (2015).

岸本喜直, 小林志好, 大塚年久, 荻野真也, 通電加熱時におけるリチウムイオン電池電極板間の荷重分布推定法, 日本機械学会 第23回機械材料・材料加工技術講演会 (2015).

岸本喜直, 小林志好, 大塚年久, 荻野真也, 変形形状データを利用した逆解析によるリチウムイオン電池電極板の支持反力分布推定法, 日本機械学会 第28回計算力学講演会 (2015).

Y. Kishimoto, Y. Kobayashi, T. Ohtsuka, T. Okano, K. Mochizuki, Study on Deformation Characteristics of Honeycomb Core Sandwich Panel Subjected to Local Compression, *International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2015* (2015).

岸本喜直, 小林志好, 大塚年久, 山縣森, 変形形状データを利用した逆解析によるサンドイッチ板の支持反力分布推定法, 日本機械学会 材料力学部門若手シンポジウム 2015 (2015).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岸本 喜直 (KISHIMOTO, Yoshinao)  
東京都市大学・工学部・講師  
研究者番号: 20581789