

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 30 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360279

研究課題名（和文） リチウムイオン電池材料の表面・界面の電子・原子レベル解析

研究課題名（英文） Atomic and electronic level analysis of surfaces and interfaces of electrode materials for lithium-ion batteries

研究代表者

香山 正憲（KOHYAMA MASANORI）

独立行政法人産業技術総合研究所・首席研究員

研究者番号：60344157

研究成果の概要（和文）：リチウムイオン電池の高性能負極材料として期待されるチタン酸リチウム（ $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ）について、電子顕微鏡観察、走査プローブ顕微鏡観察、第一原理計算を組み合わせて適用することで、第一に、結晶表面の原子配列や組成の詳細、第二に、Li の出入りに伴うバルクや表面、電解質／電極界面の原子・電子構造変化やポテンシャル変化、第三に、電極二次粒子での Li の吸収反応の伝播の様子を詳細に解明し、リチウムイオン電池の電極材料の表面・界面の学理の構築に貢献した。

研究成果の概要（英文）：By applying electron microscopy, scanning probe microscopy and first-principles calculations to surfaces and interfaces of lithium titanate (LTO, $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) as an excellent electrode material for lithium-ion batteries (LIBs), first we have clarified the detailed atomic structure and composition of LTO crystal surfaces. Second, we have investigated the changes in atomic and electronic structures and electrochemical potentials of LTO surfaces and LTO/electrolyte interfaces during the first lithium insertion and extraction. Third, the propagation of Li-inserted phases within a secondary LTO particle during the electrochemical process has been clarified. All these results contribute to the advances in understanding of the surfaces and interfaces of electrode materials for LIBs.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2011 年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2012 年度	3,300,000	990,000	4,290,000
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：無機材料・物性

キーワード：表面・界面物性、電子顕微鏡、走査プローブ顕微鏡、第一原理計算、リチウムイオン電池

1. 研究開始当初の背景

リチウムイオン電池は、従来のニッケル水素電池等と比べ高電圧・高容量で、繰り返し使用できる蓄電池としてモバイル機器で使

用されている。電気自動車への本格的な応用が進めば、排ガスフリー、 CO_2 ガスフリーの自動車社会が実現し、地球環境問題など社会的インパクトは極めて大きい。そのために格段

の高容量化・高出力化に加え、充放電速度や耐久性の飛躍的向上が不可欠である。これらを実現するには、電極材料や電極/電解質界面の微視的な構造や充放電過程の原子・電子の挙動を解明し、確固とした設計指針を構築することが必要である。こうした基礎研究は、まだ始まったばかりである。

2. 研究の目的

リチウムイオン電池の性能を支配する電極材料の表面・界面や電極/電解質界面について、電子顕微鏡観察、走査プローブ顕微鏡 (SPM) 観察、第一原理計算の三つの手法の連携により、構造や諸性質、充放電過程での原子・電子挙動や構造変化を明らかにし、リチウムイオン電池の高性能化のための学理を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

高性能負極材料として期待されるチタン酸リチウム (LTO, $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) を取り上げ、電子顕微鏡観察、走査プローブ顕微鏡観察、第一原理計算を適用し、1) 表面・界面の微視的な構造、2) Li の出入りに伴うバルクや表面、電解質/電極界面の原子・電子構造や電気化学ポテンシャルの変化、3) 電極二次粒子での Li の吸収反応の伝播の様子等を解明する。

電子顕微鏡観察は、TITAN³™ (FEI 製)、JEM-3000F (JEOL 製) を使用し、通常の透過電顕格子像観察に加えて、ADF-STEM 法、STEM-EELS 法等を使用する。これらは、原子コラムレベルに絞った電子ビームを走査しながら、透過波の散乱やエネルギー吸収から局所的な原子配列、元素種、電子状態を探る手法である。EELS は、core や semi-core 軌道から伝導バンドへの電子励起による電子線エネルギー損失スペクトルである。

走査プローブ顕微鏡観察は、原子間力顕微鏡 (AFM, NanoNavi-II, SII)、走査トンネル顕微鏡 (STM, JEOL-4500TX) を用いる。STM 観察は超高真空下で行う。

第一原理計算は、密度汎関数理論に基づく PAW 法 (産総研開発の QMAS コード) を用い、安定な原子・電子構造に加えて EELS のシミュレーションを行う。core hole を持つターゲット原子を含む大きなスーパーセルで自己無撞着計算の後、core 軌道と伝導バンド間で遷移行列を計算し、スペクトルを得る。

4. 研究成果

(1) LTO 結晶の平坦表面試料作製技術の確立

電極材料の表面・界面の微視的構造を SPM 観察により解明するには、原子レベルで平坦な表面試料の作製が必須である。rutile-TiO₂ wafer を LiOH 粒と共に焼成すると、平坦表面を持つ LTO 薄板結晶が wafer 上に成長するこ

とが判明した。LTO は wafer 方位と同じ配向で成長するが、特に (111) wafer 上の成長薄板が配向性・結晶性が高く、SPM 観察が可能である。結晶薄板は、通常の電極活性を持ち、Li の吸収/離脱が電気化学的に行える。

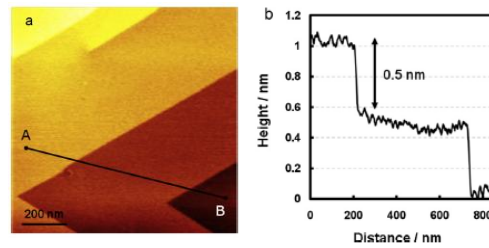


図 1. 作製した LTO(111) 表面試料の AFM 観察。約 0.5nm の step がある (spinel LTO 結晶の (111) 周期に対応)。

(2) LTO(111) 表面の原子構造の詳細観察

LTO(111) 表面の詳細な原子配列を解明するため、超高真空下で STM 観察を行った。その結果、1) 0.35nm と 0.13nm の二種の step が交互に存在し (二種の (111) テラスが存在)、2) 各テラスで原子間隔約 0.6nm の六方原子配列像が得られた。このことから、二種のテラスは、図 2 に矢印で示す二種の Li 原子層の各々が最上端になる表面構造と推定される。Type A として、最上から順に Li 層、Ti-Li 層、Li 層、酸素層と積層した表面、Type B として、Li 層、酸素層、Ti-Li 層、酸素層と積層した表面である。図の原子層間隔は step 高とつじつまが合う。

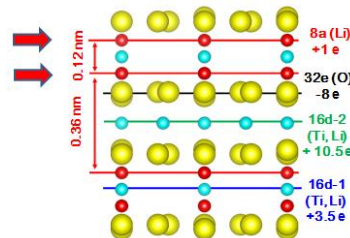


図 2. LTO の (111) 原子層の stacking。横から見た図。黄色が酸素原子層、赤色が Li 原子層、青色が Ti と Li の混合層。

Type A と Type B の表面の stoichiometry を分析すると、前者は酸素不足、後者は酸素 rich である。従って、Type A は超高真空下でのみ安定化し、通常雰囲気では Type B のみが存在すると考えられる。AFM 観察で step 高が一種であることと対応する (図 1)。

Ti 原子の深さ方向分布を探るため、中エネルギーイオン散乱 (MEIS) を適用した。得られたスペクトルは Type B 構造で説明できる。ただし、スペクトルは部分的な Type A 構造の存在も否定しない (MEIS 実験は立命館大学 SR センターの装置を使用した)。

以上から major な表面構造は Type B と言える。酸素 rich であるため表面酸素バンドに正孔が存在すると考えられ、第一原理計算でも裏付けられた。正孔による高い化学反応活性が考えられ、実験的に観察される LTO 電極での CO₂ 生成の起源の候補と言える。

(3) LTO 表面試料への初回 Li 挿入／離脱における表面構造変化

LTO 薄板試料を正極にして電解質を挟んで Li 金属を負極とした電池セルで、Li イオンを電気化学的に挿入／脱離させ、LTO 表面の構造変化とポテンシャル変化を観察した。

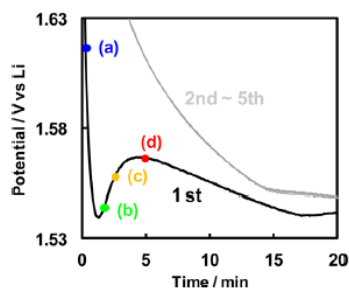


図 3. LTO への Li 挿入時ポテンシャル変化

図 3, 4 のように初回 Li 挿入の初期段階で表面ラフネスが非可逆的に増加する。一方、ポテンシャルは、(b)で低下したのち、(c) (d)と回復する。これは、表面構造変化で電解質／電極界面の電荷移動抵抗が低下していくことを意味する。初回挿入／離脱後は、図 5 のように LTO (Li₄Ti₅O₁₂) 上に Li₂TiO₃ 結晶層がエピ成長していることが判明した。2回目以降の Li 挿入／離脱のサイクル (図 3 の右上の曲線) が安定に行われる理由は、こうした表面層変化に起因すると考えられる。

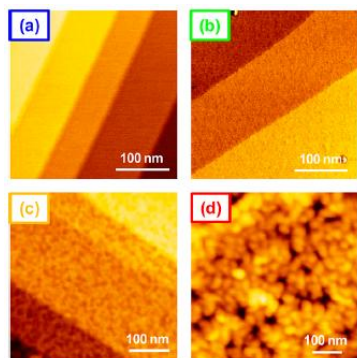


図 4. LTO(111) 表面への初回 Li 挿入時の morphology 変化 (AFM 像)。(a)-(d)は図 3 の各点に対応する。表面ラフネスは各々 0.037nm、0.07nm、0.24nm、0.6nm と増加。

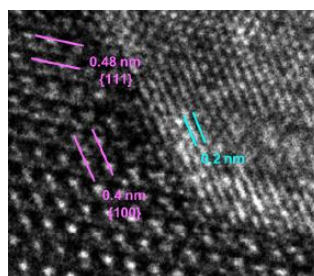


図 5. 初回 Li 挿入／離脱後の LTO 表面の電顕高分解能像。右上が表面エピ成長層。

(4) LTO 二次粒子での Li 吸収相の伝播

実際の電極材料の LTO 紛体は、LTO ナノ粒子の集合体 (二次粒子) である。二次粒子における Li 挿入／離脱の様子を詳細に探ることが重要である。Li 吸収相 (Li₇Ti₅O₁₂) の伝播機構として、図 6 の二種が考えられる。

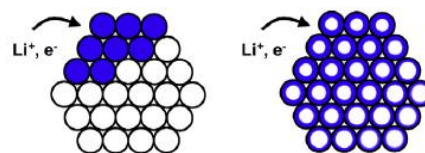


図 6. LTO 二次粒子での Li 吸収相 (青) の伝播機構モデル。左: particle-by-particle モデル、右: uniform reaction モデル。

どちらの機構であるかを決定するため、電気化学的な挿入プロセスの途中で取り出した電極紛体 (二次粒子) に STEM-EELS spectrum imaging 法を適用して Li 吸収相分布を調べた。原子層レベルに絞った電子ビームを走査しながら EELS データを場所ごとに取得し、元素や電子状態分布のマッピングを行う方法である。LTO は Li 吸収でほとんど格子定数が変わらないため、他の方法での吸収相の空間分布の同定は困難である。

まず、EELS により LTO 相 (Li₄Ti₅O₁₂) と Li 吸収相 (Li₇Ti₅O₁₂) が識別できるかを検討した。Li *K*-edge についてピーク比からの Li 空間濃度で識別できること、Ti *L*-edge について、Ti³⁺ の存在 (Li 吸収相) によるピーク形状変化で識別できること、O *K*-edge について、高エネルギー側のスペクトル形状で識別できることが判明した。O *K*-edge は、第一原理によるスペクトル計算でも両者の差が再現できる。図 7 に両相の O *K*-edge の実験と計算結果を示す。高エネルギー側の 3[~]5 のピークは、酸素周囲の対称性を反映し、同様の対称性を持つ Li 吸収相と Li₂TiO₃ 相はスペクトル形状が似ている。第一原理計算で、3[~]5 のピークの相対関係が再現されている。

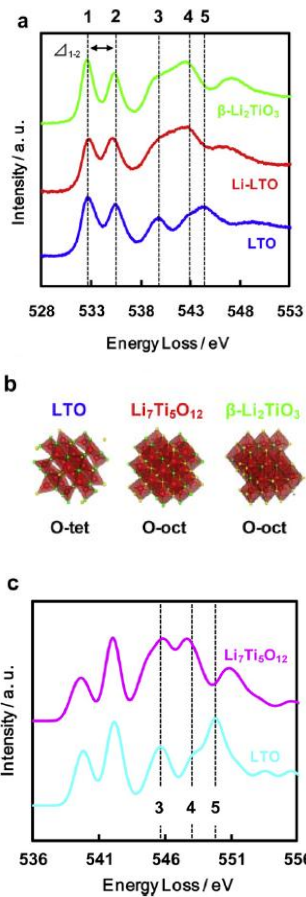


図7. LTO相 ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) と Li 吸収相 (Li-LTO, $\text{Li}_7\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) の 0 *K*-edge EELS. 実験結果 (a) と第一原理計算結果 (c)。 (b) は酸素原子周囲の対称性を示す。

図8に50% Li吸収で取り出した電極粉体の Li *K*-edge と Ti *L*-edge による二相分布を示す (STEM-EELS spectrum imaging 法)。上の方の一次粒子が Li 吸収相で、下部の一次粒子は LTO 相のままである。Li 吸収相伝播は、図6の particle-by-particle 機構であると言える。従って、一次粒子間の界面 (粒界) での Li 移動が Li 吸収相伝播を支配すると言える。

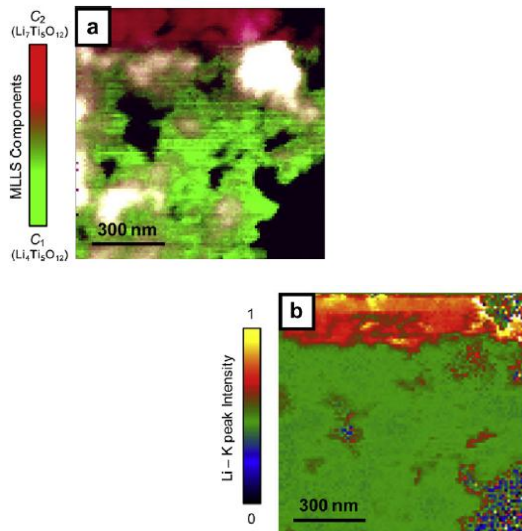


図8. LTO 二次粒子の LTO 相/Li 吸収相分布の STEM-EELS spectrum imaging 法分析。 (a) は Ti *L*-edge、 (b) は Li *K*-edge による分析。

(5) 正極材料の表面・界面研究に向けて

今回は、高性能負極として期待される LTO の表面・界面を扱ったが、今後は同様の手法で正極材料を探ることが重要である。ただし、上述のように SPM 観察を適用するために、原子レベルで平坦な表面試料の作製が必須である。そこで、正極材料として、同様にスピネルの LiMn_2O_4 (LMO) について、MnO wafer を LiOH 粒と共に焼成する方法で表面試料作製を試みた。図9に示すように、LTO の場合と同様に、LMO 単結晶薄板が基盤と同じ配向性で成長することが判明した。(111) 配向試料の表面は原子レベルで平坦である。

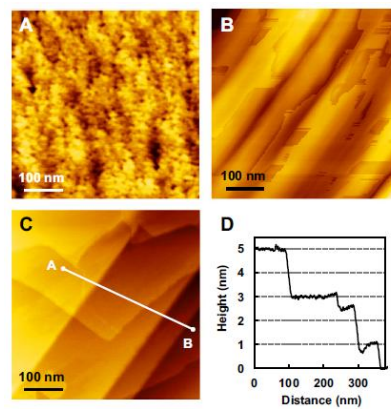


図9. MnO wafer 上に成長した LiMn_2O_4 (LMO) 結晶薄板。A、B、C は各々 MnO(100)、(110)、(111) wafer 上の LMO の AFM 像、D は (111) 試料表面の step。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計9件)

- ① M. Kitta, T. Akita, S. Tanaka, M. Kohyama, “Characterization of Two Phase Distribution in Electrochemically-Lithiated Spinel $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ Secondary Particles by Electron Energy-Loss Spectroscopy”, JOURNAL OF POWER SOURCES, **237**, 26-32 (2013) 査読有
DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.03.022
- ② M. Kitta, T. Akita, M. Kohyama, “Preparation of a Spinel LiMn_2O_4 Single Crystal Film from a MnO Wafer”, JOURNAL OF POWER SOURCES, **232**, 7-11 (2013) 査読有
DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.12.096
- ③ S. Tanaka, M. Kitta, T. Tamura, T. Akita, Y. Maeda, M. Kohyama, “First-Principles Calculations of

- O-K ELNES/XANES of Lithium Titanate”, JOURNAL OF PHYSICS D-APPLIED PHYSICS, **45**, 494004-1-494004-4 (2012) 査読有
DOI: 10.1088/0022-3727/45/49/494004
- ④ 田中真悟, 「第一原理計算によるリチウム電池材料の解析」, 日刊工業新聞 科学技術・大学, 2012/8/6, 20
- ⑤ 橋田晃宜, 「リチウムイオン電池電極材料の表面科学」, 日刊工業新聞 科学技術・大学, 2012/7/26, 25
- ⑥ M. Kitta, T. Akita, Y. Maeda, M. Kohyama, “Study of Surface Reaction of Spinel $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ during the First Lithium Insertion and Extraction Processes by using Atomic Force Microscopy and Analytical Transmission Electron Microscopy”, LANGMUIR, **28**, 12384-12392 (2012) 査読有
DOI: 10.1021/la301946h
- ⑦ S. Tanaka, M. Kitta, T. Akita, Y. Maeda, T. Tamura, M. Kohyama, “First-Principles Calculations of Li-Titanate Surfaces”, AMTC Letters, **3**, 50-51 (2012) 査読有
- ⑧ M. Kitta, T. Akita, S. Tanaka, M. Kohyama, “EELS Characterization of Li-inserted Spinel Lithium Titanate $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ”, AMTC Letters, **3**, 138-139 (2012) 査読有
- ⑨ M. Kitta, T. Akita, Y. Maeda, M. Kohyama, “Preparation of a Spinel $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (111) Surface from a Rutile TiO_2 Single Crystal”, APPLIED SURFACE SCIENCE, **258**, 3147-3151 (2012) 査読有
DOI: 10.1016/j.apsusc.2011.11.052
- [学会発表] (計 31 件)
- ① 橋田晃宜, 「 MnO 単結晶基板からの LiMn_2O_4 結晶膜の作製」, 応用物理学会 学術講演, 2013/3/28, 神奈川工科大学 (神奈川県)
- ② 田中真悟, 「チタン酸リチウム二相界面の ELNES/XANES の第一原理計算」, 日本金属学会 2013 年度春期大会, 2013/3/28, 東京理科大学 (東京都)
- ③ 田中真悟, 「第一原理計算によるチタン酸リチウムの吸蔵/脱離二相界面の原子・電子構造」, 日本物理学会第 68 回 年次大会, 2013/3/27, 広島大学 (広島県)
- ④ 田中真悟, 「第一原理計算による ELNES/XANES の解析」, 表面科学会・関西支部セミナー, 2013/2/19, 産総研関西センター (大阪府)
- ⑤ 田中真悟, “First-principles calculations of $\text{Li}_{4+x}\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ surfaces and $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}/\text{Li}_7\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ interfaces for Li battery electrode”, MRS 2012 Fall Meeting, Boston, 2012/11/29 (USA)
- ⑥ 橋田晃宜, 「チタン酸リチウム $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 充放電機構の STEM-EELS 観察」, 電池討論会, 2012/11/15, ヒルトン福岡シーホーク (福岡県)
- ⑦ 田中真悟, 「ナノ材料の粒界・表面・界面に関する計算科学と構造解析の連携・その応用」, 第 26 期 C AMM フォーラム 本例会, 2012/11/9, 表参道「アイビーホール」(東京都)
- ⑧ 橋田晃宜, “Electron Energy Loss Structures in the Oxygen K-edge Spectra of Li-inserted $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ”, PRIME 2012, 2012/10/10, Honolulu (Hawaii)
- ⑨ 田中真悟, “Stoichiometry of (111) Surfaces of LiTi_2O_4 and $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ”, IUMRS-ICEM 2012, 2012/9/24, パシフィコ横浜 (神奈川県)
- ⑩ 田中真悟, 「第一原理計算によるチタン酸リチウム表面の原子・電子構造」, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012/9/19, 横浜国立大学 (神奈川県)
- ⑪ 田中真悟, 「第一原理計算によるチタン酸リチウム(111)表面の原子・電子構造」, 日本金属学会 2012 年秋期大会, 2012/9/18, 愛媛大学 (愛媛県)
- ⑫ 橋田晃宜, 「EELS スペクトラムイメージング法によるチタン酸リチウム充放電反応機構の可視化」, 応用物理学会, 2012/9/14, 松山大学 (愛媛県)
- ⑬ 田中真悟, 「第一原理計算手法を用いたナノ材料界面の機能特性の研究」, 平成 24 年度 計算材料科学研究拠点 (CMRI) 第一回シンポジウム, 2012/6/18, 東北大学金属材料研究所 (宮城県)
- ⑭ 橋田晃宜, 「電気化学的に Li 挿入したスピネル型チタン酸リチウムの EELS 分析」, 日本顕微鏡学会 第 68 回 学術講演会, 2012/5/16, つくば国際会議場 (茨城県)
- ⑮ 橋田晃宜, “EELS Characterization of Li-inserted Spinel Lithium Titanate $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ”, 3rd International Symposium on Advanced Microscopy and Theoretical Calculations (AMTC3), 2012/5/10, 長良川国際会議場 (岐阜県)
- ⑯ 香山正憲, Development of a First-Principles Code for Materials Science: Local Energy-Density and Stress-Density Calculations and XANES /ELNES Calculations by the PAW Method”, 3rd International Symposium on Advanced Microscopy and Theoretical Calculations (AMTC3),

- 2012/5/9, 長良川国際会議場 (岐阜県)
(招待講演)
- ⑰ 田中真悟, “First-Principles Calculations of Li-Titanate Surfaces”, 3rd International Symposium on Advanced Microscopy and Theoretical Calculations (AMTC3), 2012/5/9, 長良川国際会議場 (岐阜県)
- ⑱ 田中真悟, “First-Principles calculations of $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ - $\text{Li}_7\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ for Li battery electrode”, MRS 2012 Spring Meeting, 2012/4/12, San Francisco (USA)
- ⑲ 田中真悟, 「第一原理計算によるチタン酸リチウム化合物の Li 挿入・脱離時の原子・電子構造」, 日本物理学会 2012 年会, 2011/3/25, 関西学院大学上ヶ原キャンパス (兵庫県)
- ⑳ 田中真悟, “ELNES/XANES calculations of Li intercalated and de-intercalated Li oxides by PAW method”, 日本 MRS 学術シンポジウム, 2011/12/20, 横浜開港記念会館 (神奈川県)
- ㉑ 田中信吾, “First-principles calculations of ELNES/XANES of Lithium Titanat”, International Conference on Thin Films, 2011/11/11, Kyoto Terrsa (Kyoto)
- ㉒ 田中真悟, 「Li イオン二次電池電極酸化物の Li 挿入・脱離に関する ELNES/XANES の第一原理計算」, 日本金属学会 2011 年秋期大会, 2011/11/8, カルチャーリゾートフェストーネ (沖縄県)
- ㉓ 橘田晃宜, 「初回充電における $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (111) 表面構造変化の AFM 観察」, 日本金属学会 2011 年秋期大会, 2011/11/7, 沖縄コンベンションセンター (沖縄県)
- ㉔ 橘田晃宜, 「初回充電における $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (111) 表面構造変化の AFM 観察」, 2011/10/18, タワーホール船堀 (東京都)
- ㉕ 橘田晃宜, 「 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (111) 表面の原子分解能 STM 観察」, 第 72 回 応用物理学会学術講演会, 2011/8/30, 山形大学小白川キャンパス (山形県)
- ㉖ 田中真悟, 「第一原理 PAW 法を用いた Li イオン電池電極酸化物の ELNES/XANES 計算」, ナノ学会第 9 回大会, 2011/6/3, 北海道大学札幌キャンパス (北海道)
- ㉗ 橘田晃宜, 「二酸化チタン単結晶からのスピネル型チタン酸リチウム $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (111) 表面の作成」, 日本顕微鏡学会 第 67 回 学術講演会, 2011/5/16, 福岡国際会議場 (福岡県)
- ㉘ 田中真悟, “ELNES/XANES calculations of Li oxides by first-principles PAW

method”, MRS 2011 Spring meetings, 2011/4/26, Moscone West Convention Center San Francisco (USA)

- ㉙ R. Belkadi, “Spectroscopic and Electronic Properties of LiCoO_2 from a First-Principles View Point”, 1st International Symposium on Advanced Nanostructured Materials for Clean Energy, 2011/3/8, AIST Kansai (Osaka)
- ㉚ 田中真悟, 「PAW 法汎用ソフト QMAS による ELNES 計算コード開発: 手法の概要といくつかの応用例」, 日本顕微鏡学会関西支部特別企画講演会, 2010/12/18, 産総研関西センター (大阪)
- ㉛ 田中真悟, 「第一原理 PAW 法による Li 酸化物の原子・電子構造と ELNES/XANES 計算」, 日本金属学会 2010 年秋期大会, 2010/9/27, 北海道大学 (札幌)

〔図書〕 (計 1 件)

- ① 田中真悟, 「第一原理計算の電池研究への応用 (第 1 編・第 6 章)」, NTS, 104-115 (2013)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

香山 正憲 (KOHYAMA MASANORI)
独立行政法人産業技術総合研究所・ユビキタスエネルギー研究部門・首席研究員
研究者番号: 60344157

(2) 研究分担者

前田 泰 (MAEDA YASUSHI)
独立行政法人産業技術総合研究所・ユビキタスエネルギー研究部門・主任研究員
研究者番号: 30357983

吉川 純 (KIKKWA JUN)
大阪大学・基礎工学研究科・助教
研究者番号: 20435754
(2010~2011)

橘田 晃宜 (KITTA MITSUNORI)
独立行政法人産業技術総合研究所・ユビキタスエネルギー研究部門・研究員
研究者番号: 90586546
(2012~2013)

(3) 連携研究者

田中 孝治 (TANAKA KOJI)
独立行政法人産業技術総合研究所・ユビキタスエネルギー研究部門・主任研究員
研究者番号: 40357439

秋田 知樹 (AKITA TOMOKI)

独立行政法人産業技術総合研究所・ユビキ
タスエネルギー研究部門・主任研究員
研究者番号：80356344

田中 真悟 (TANAKA SHINGO)
独立行政法人産業技術総合研究所・ユビキ
タスエネルギー研究部門・主任研究員
研究者番号：50357448