

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560631

研究課題名(和文) 熱力学測定、局所構造解析、量子化学的手法を駆使した高機能性酸化物の構造制御

研究課題名(英文) Structure control of highly functional oxides by thermodynamic measurement, local structure analysis and quantum chemical method

研究代表者 井手本 康 (YASUSHI IDEMOTO)

東京理科大学・理工学部工業化学科・教授

研究者番号：20213027

研究成果の概要(和文)：Li 二次電池正極材料、不揮発性メモリ用の強誘電体酸化物などの高機能性酸化物を対象に、重要な熱力学データを測定、構造解析としてバルク材料で pdf 解析を先駆けて適用することで局所構造解析も可能になり、平均構造だけでは明らかにできなかった局所的な構造変化などについて中性子回折を用いて明らかにした。これらの関連を検討することで高性能化の指針を得た。特に、Li 二次電池正極材料の充電過程の構造変化をコインセルサイズで ex-situ の中性子測定により捉えたのは最先端の成果である。

研究成果の概要(英文)：We investigated the important thermodynamic stability and crystal structure for an object of highly functional oxides, such as the cathode active material for lithium ion battery and ferroelectric material for FeRAM, We are also the first to analyze local structure of the bulk sample by Pair Distribution Function (PDF) technique using neutron source. It was found that local structure and thermodynamic stability explained well the observed electrode and ferroelectric properties. Moreover, it is obtained excellent results that is possible to perform a new ex situ analysis of the change in the crystal structure in a coin cell during charge process.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学 無機材料・物性

キーワード：リチウムイオン電池、強誘電体、結晶構造、熱力学データ、第一原理計算、電子構造、機能性酸化物、中性子

1. 研究開始当初の背景

Li 二次電池の材料開発は精力的に研究が

行われており、FeRAM 用の強誘電体酸化物は薄膜を中心に研究が盛んに行われている。

ここで、本研究で扱う強誘電酸化物は合成時に Si の複合酸化物を取り入れて特性の向上を図った我々のグループのオリジナルな物質である。これらは広領域な研究対象であるが、その物質の化学的安定性に係わる熱力学測定に関する重要な研究は我々の研究以外皆無に等しく、これらの熱力学データと物性、特性の関係を検討したもの、それを材料設計の指針にする試みも同様であり、これらの観点からアプローチしているのは本研究だけであり、独創的な手法により、熱力学データを提供することができ意義深いと考えられる。一方、構造解析については、中性子や X 線回折を用いた Rietveld 法による構造解析が材料開発にも用いられるようになってきている。我々はさらにマキシマムエントロピー法 (MEM) を用いて、原子核密度や電子密度の解析を行っており、置換や結合性などと特性の関係について先駆的に研究を行ってきている。さらに、現象を違った観点から、また物質設計を視野に入れると、量子化学計算も必要不可欠である。ここで、量子化学計算も取り入れた研究は我々のグループも含めて電池の分野、強誘電体の分野などで行われ始めているが、量子化学計算の妥当性を、熱力学データ、X 線回折を用いた構造解析および MEM により求めた電子密度分布の両面から実験と理論計算結果を対比させた評価が可能であり、その信頼性を確認できることも本研究の重要な特徴といえる。上記に述べたような観点を様々な高機能性酸化物について検討し、特性向上に結びつく指導原理を探索していく。これまでの研究で、電池特性については、構造安定性、熱力学的安定性が重要であることが明らかになりつつあり、これを活かして、量子化学計算から求められるエネルギー安定性と上記の実験から求められる熱力学的安定性などと相関関係があるかを様々な系に適用して検討する。もし、相関関係がみられれば、これを指導原理として、新しい物質のモデルをたてて、量子化学計算から検討していけば、それが材料設計となり得る。また、構造解析に新たに pdf 法を多結晶材料に適用していくことにより、平均構造では得られなかった局所的な歪 (強誘電特性に重要) や、局所的な秩序・無秩序、置換 (電池特性に重要) の情報が得られ、構造と特性の関係をより詳細に、こ

れまでに明らかでなかった点を解明できると考えられる。

2. 研究の目的

物質を扱うに当たって重要な熱力学データを測定、構造解析においては、バルク材料で pdf 解析を先駆けて適用することで局所構造解析も可能になり、平均構造では明らかにできなかった局所的な構造変化などについて中性子回折を用いて詳細な検討を行った。ここで種々の複合酸化物の合成、キャラクター化、結晶構造、欠陥および特性について測定、解析し、熱力学データと比較することで、総合的にこれらの関連を検討し、高性能化の指針を得た。加えて、これらの検討を加味した構造モデルによる量子化学計算結果と実験結果を比較してその妥当性を検討した上で、結晶および電子構造、熱力学量のシミュレーションも含めて、高性能な物質の構造制御を行い、その設計をしていくことを目的とした。本研究では、高機能性酸化物の中で、高容量化、長寿命化が要求されている Li 二次電池正極材料、不揮発性メモリー (FeRAM) 用の強誘電体酸化物を中心に上げた。

3. 研究の方法

- (1) ① Li イオン電池正極材料として、層状構造を持ち Mn、Ni が最適組成である $\text{Li}_x\text{Mn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_2$ の試料を固相法、溶液法の異なる方法で合成し、さらに熱処理を行った試料において電池特性の評価を行った。また、化学的・電気化学的に脱リチウム処理をすることで充電時に相当する試料を作製した。
- ② $\text{Li}(\text{Mn}, \text{Ni}, \text{Co}, \text{Al})\text{O}_2$ 、固溶系の $z\text{Li}_2\text{MnO}_3 \cdot (1-z)\text{Li}(\text{Mn}, \text{Ni}, \text{Co})\text{O}_2$ を合成し電池特性を評価した。また、粉末中性子・X 線回折測定により結晶構造解析を、マキシマムエントロピー法 (MEM) を用いて原子核、電子密度分布を求めた。また、X 線吸収分光法 (XAFS) を用いて局所・電子構造について検討した。さらに、中性子全散乱測定 (pdf 解析) を行い局所構造について検討した。
- ③ $\text{Li}(\text{Ni}, \text{Co}, \text{M})\text{O}_2$ (M=Cu, Zn) について、合成条件・置換元素の違いによる電池特性の変化、中性子、放射光測定より平均・局所結晶構造、電子構造解析および熱力学的安定性の検討を行った。さらに、TOF 中性子回折測定から充電時の結晶構造変化および化学的脱 Li 処理した試料の熱力学的安定性の検討を行い、充電時の構造変化について検討した。

(2) ① 高疲労耐性, 比較的大きな残留分極という特徴を有し, 非鉛系圧電セラミックス材料として期待されている $(\text{Bi, RE})_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ の Bi サイトに Pr を置換させた $\text{Bi}_{4-x}\text{Pr}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ($x=0.5, 0.6$) および $\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$ を 2.5, 5mol% 添加したバルク体試料を合成し, 物性と強誘電特性の組成, 熱処理依存について検討した。

② $(\text{Bi, RE})_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ の Ti に Mo を置換した試料及び $\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$ (BSO) を添加した試料, さらに O に F を置換した試料に新たに着目し, 希土類, Mo, F 置換, BSO 添加が強誘電特性に与える影響を中性子及び放射光 X 線を用いた結晶・電子構造解析, XAFS による電子構造解析により検討した。

③ $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ は高い疲労特性を有し, 低電圧動作特性に優れており強誘電体メモリ材料として注目されている。本研究では新たに Ta サイトを Nb に置き換えた $\text{SrBi}_2(\text{Ta}_{1-x}\text{Nb}_x)_2\text{O}_9$, また, W と Mo を置換した $\text{SrBi}_2(\text{Ta}_{1-x}\text{Nb}_x)_{1.95}\text{M}_{0.05}\text{O}_9$ ($M=\text{W, Mo}$) に注目し, B サイトの組成変化による強誘電特性の変化を検討し, これらに Bi_2SiO_5 (BSO) を添加した試料を合成し, BSO 添加が強誘電特性に与える影響についても検討した。さらに, 置換による結晶・電子構造の変化を検討するために, 中性子・放射光 X 線回折測定を行った。

4. 研究成果

(1) ① $\text{Li}_x\text{Mn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_2$ において, 固相法で作製した試料の方が高容量であることが分かり, 両合成法共に Li 組成の増加に伴いサイクル特性も向上した。各合成法でサイクル特性の良かった試料は, 特に 3a サイトのカチオンミキシング量が小さく, 特性の劣化に伴い両合成法共に, 3a サイトカチオンミキシング量は増加した。また, 各合成法の試料の 3b-6c 間電子密度は, 特にサイクル特性の良かった試料では増加した。さらに, 固相法, 溶液法共に熱力学的に安定な試料ほど, サイクル特性が良好であった。これらの結果より, 本系においても構造安定性, 熱力学的安定性と電池特性との間に密接な相関関係がみられた。これらの傾向は, 第一原理計算からも確認された。② $\text{Li}(\text{Mn, Ni, Co, Al})\text{O}_2$ では Al 置換による原子核密度分布に変化が見られ, pdf による局所構造解析から Al 置換が遷移金属層内のオーダリングに影響を及ぼすことが明らかになった。 $z\text{Li}_2\text{MnO}_3 \cdot (1-z)\text{Li}(\text{Mn, Ni, Co})\text{O}_2$ では固溶による電子密度分布の変化が見られ, 局所構造解析から遷移金属層及び Li 層と酸素層との層間距離が変化することを見出した。これらより,

様々な解析法を組み合わせることで材料を詳細に評価し, 局所構造と電池特性に相関関係があるという新しい知見が得られた。

③ $\text{Li}(\text{Ni, Co, M})\text{O}_2$ ($M=\text{Cu, Zn}$) について, 固相法の試料は結晶構造の歪みが小さいこと, Li-O, (Ni, Co, M)-O 間の結合性が大きいことが明らかになり, これらが放電容量維持率向上の一因であると考えられる。充電前後の正極について ex-situ 中性子回折測定を行った結果, カチオンミキシングした Li は充放電時に脱離しないこと, 及び充電により M-O₆ 八面体の歪みが増加していることが明らかになった。コインセルサイズで, ex-situ 中性子回折測定により, 構造変化を検討できたのは世界で初めてであり, 大きなインパクトを与え, 今後 in-situ 測定に向かってその道筋をつけた。

(2) ① $\text{Bi}_{4-x}\text{Pr}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ の Pr 置換量 $x=0.5$, $\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$ 添加量 5mol% の試料において強誘電特性が特に向上し, 800°C, O₂ 処理を行うことでさらなる強誘電特性の改善がみられた。これらについて結晶構造解析を行い, この分野では新しいアプローチである中性子全散乱により局所構造についてより厳密な解析ができることを示した。その結果, ペロブスカイト層の両端にある Ti-O₆ 八面体が歪み強誘電特性の向上に関与していた。さらに放射光, MEM により求めた電子密度分布より, Pr 置換および $\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$ を添加することで Ti と O の共有結合性が強くなることが分かった。これらの検討から強誘電特性の向上には, ペロブスカイト層の両端にある Ti-O₆ 八面体の歪みの増加と共有結合性が強くなることが関係していることを明らかにした。

② $(\text{Bi, RE})_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ の Ti に Mo, O に F を置換した試料及び $\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$ (BSO) を添加した試料において, Mo 置換・BSO 添加により, マクロな観点では粒成長と緻密化が起きること, ミクロな観点では特定の酸素サイトが欠損し易いこと, そのサイトは強誘電特性を大きく左右すると考えられる TiO₆ 八面体に含まれていることから, 酸素欠損量が強誘電特性に大きな影響を及ぼしていることを明らかにした。これらの検討から Mo, F 置換・BSO 添加による粒子形態の変化と試料の緻密化, 結晶構造の変化による共有結合性の増加とそれに伴う酸素欠損の減少が強誘電特性向上の要因であることを明らかにした。

③ $\text{SrBi}_2(\text{Ta}_{1-x}\text{Nb}_x)_2\text{O}_9$, $\text{SrBi}_2(\text{Ta}_{1-x}\text{Nb}_x)_{1.95}\text{M}_{0.05}\text{O}_9$ ($M=\text{W, Mo}$) において, Nb 置換, BSO 添加によりペロブスカイト層中の八面体の体積が増加し, ペロブスカイト層への応力が増加し, 格子歪みが増大したことを明らかにした。またペロ

ブスカイト層での格子歪み, 共有結合性の増加が強誘電特性向上に主に影響を及ぼしていることを明らかにした。

今後、これらの手法を組み合わせながら新しい物質も含めて検討を行うことにより、より高性能な物質の設計への指針を提供し、材料設計につながり得る研究と考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

- ① 関澤央輝, 北村尚斗, 井手本 康, 第一原理計算を用いたLiイオン電池用正極活物質 $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_2$ における過剰Li及びカチオンミキシングの電子構造への影響, *Electrochemistry*, 査読有, Vol. 79, No. 2, 2011, pp. 80-85
- ② 井手本 康, 長谷川卓哉, 北村尚斗, 内本喜晴, Liイオン電池用正極活物質 $\text{Li}_x\text{Mn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_2$ の熱力学的安定性, 結晶・電子構造と電池特性の合成条件およびLi組成依存, *Electrochemistry*, 査読有, Vol. 79, No. 2, 2011, pp. 15-23
- ③ Yasushi Idemoto, Yuta Tsukada, Naoto Kitamura, Akinori Hoshikawa, Toru Ishigaki, Change in Crystal Structure of $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.19}\text{Cu}_{0.01}\text{O}_2$ Cathode during Charge of Coin Cell Observed by Ex Situ Time-of-flight Neutron Diffraction, *Chemistry Letters*, 査読有, Vol. 40, No. 2, 2010, pp. 168-170
- ④ Oki Sekizawa, Naoto Kitamura, Yasushi Idemoto, Effect of Li content on electronic structure by first-Principle calculation for $\text{Li}_{1+x}\text{Ni}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_2$ cathode active material of lithium-ion battery, *Electrochemistry*, 査読有, Vol. 78, No. 5, 2010, pp. 367-369
- ⑤ Yasushi Idemoto, Kenichiro Ueki, Naoto Kitamura, Dependence of average and local structure and cathode performance on synthetic condition of $\text{Li}_x(\text{M}_{n1/3}\text{C}_{01/3}\text{N}_{i1/3})\text{O}_2$ as a cathode active material for Li ion-battery, *Electrochemistry*, 査読有 Vol. 78, No. 5, 2010, pp. 475-481
- ⑥ 井手本 康, 高梨優, 北村尚斗, Li二次電池正極活物質 $\text{Li}_{1.04}\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_y$ の物性, 結晶構造と電極特性の熱処理条件依存, *Electrochemistry*, 査読有 Vol. 77, No. 11, 2009, pp. 945-950

- ⑦ Yasushi Idemoto, Satoshi Taniyama, Satoshi Iikubo, Shinichi Shamoto, and James W. Richardson, Jr., Relationship between average and local crystal structure and the ferroelectric properties of a Sr-Bi-Ta-Si-O ferroelectric Material, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 査読有, Vol. 70, 2009, pp. 1156-1165
- ⑧ Yasushi Idemoto, Yu Takanashi, Naoto Kitamura, Dependence of Property, crystal structure and electrode characteristics on Li content for $\text{Li}_x\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ as a cathode active material for Li secondary battery, *Journal of Power Sources*, 査読有, Vol. 189, 2009, pp. 269-278

[学会発表] (計69件)

- ① Y. Idemoto, M. Tashiro, N. Kitamura, Dependence of Crystal Structures and Dielectric and Piezoelectric Properties on Synthetic Process for BaTiO_3 Prepared by Liquid Phase Reactions, 3rd International Congress on Ceramics (ICC-3), 2010年11月17日, Osaka International Convention Center, Osaka
- ② 井手本 康, 遠藤裕章, 北村尚斗, 中性子および放射光X線を用いた $\text{LiMn}_{0.5-x}\text{M}_x\text{Ni}_{0.5-y}\text{M}'_y\text{O}_2$ ($\text{M}=\text{Al}$, Ti , $\text{M}'=\text{Mg}$)の充放電に伴う結晶・電子構造変化と電池特性, 第51回電池討論会, 2010年11月11日, 名古屋市 愛知県産業労働センター
- ③ 井手本 康, 関澤央輝, 北村尚斗, シュウ酸エタノール共沈法を用いたLiイオン電池正極活物質 $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_2$ の平均・局所構造の検討, 第51回電池討論会, 2010年11月11日, 名古屋市 愛知県産業労働センター
- ④ 井手本 康, 塚田裕太, 北村尚斗, Li (Ni, Co, M) O_2 ($\text{M}=\text{Cu}$, Zn)系正極材料における熱力学的安定性, 結晶・電子構造と電池特性の合成条件依存, 第51回電池討論会, 2010年11月11日, 名古屋市 愛知県産業労働センター
- ⑤ Misato Tashiro, Naoto Kitamura, Yasushi Idemoto, Crystal Structures and Dielectric and Piezoelectric Properties of BaTiO_3 Prepared by the Polymerized Complex Method, 218th ECS Meeting, 2010年10月11日, Las Vegas, USA
- ⑥ Hiroaki Endo, Naoto Kitamura, Yasushi Idemoto, Substitution Effect on Crystal, Electronic Structure using Neutron and Synchrotron Sources

- and Cathode Performance of $\text{Li}(\text{Mn}_{0.5-x}\text{M}_x\text{Ni}_{0.5-y}\text{M}'_y)\text{O}_2$ ($\text{M} = \text{Al}, \text{Ti}, \text{M}' = \text{Mg}$), 218th ECS Meeting, 2010年10月11日, Las Vegas, USA
- ⑦ Yasushi Idemoto, Kenichiro Ueki, Naoto Kitamura, Dependence of Local Structure using PDF Analysis and XAFS, Average Crystal Structure, and Cathode Performance on Composition of $z\text{Li}_2\text{MnO}_3-(1-z)\text{Li}(\text{Mn}, \text{Ni}, \text{Co})\text{O}_2$ as a Cathode Active Material for Li Ion Battery, 218th ECS Meeting, 2010年10月11日, Las Vegas, USA
- ⑧ Oki Sekizawa, Naoto Kitamura, Yasushi Idemoto, Study on $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_2$ Cathode Active Material of LiIon Battery Synthesized by Oxalic Acid/Ethanol Coprecipitation Method, 218th ECS Meeting, 2010年10月11日, Las Vegas, USA
- ⑨ 井手本 康, 室井 諒, 北村尚斗, Sr-Bi-(Ta, Nb, M)-Si-O ($\text{M}=\text{W}, \text{Mo}$) 強誘電体の結晶・電子構造と強誘電特性, 2010年秋季第71回応用物理学会学術講演会, 2010年9月14日, 長崎市長崎大学
- ⑩ Yasushi Idemoto, Naoto Kitamura, Kenichiro Ueki Local Structure using PDF Analysis and XAFS, Average Structure and Cathode Performance Depend on Composition of $z\text{Li}_2\text{MnO}_3-(1-z)\text{Li}(\text{Mn}, \text{Ni}, \text{Co})\text{O}_2$ as a Cathode Active Material for Li Ion Battery, The 8th Japan-France Joint Seminar on Lithium Ion Batteries, 2010年9月6日 Morioka, Iwate
- ⑪ Y. Idemoto, K. Ueki, N. Kitamura, Local Structure Using PDF Method and XAFS, Average Crystal Structure and Cathode Performance Depend on Composition of $z\text{Li}_2\text{MnO}_3-\text{Li}(\text{Mn}, \text{Ni}, \text{Co})\text{O}_2$ as a Cathode Active Material for Li-Ion Battery, IMLB2010, 2010年6月29日, Montréal, Canada
- ⑫ 井手本 康, 室井 諒, (Sr, Ce)-Bi-(Ta, W)-Si-O系強誘電体の強誘電特性と結晶・電子構造, 第70回応用物理学会学術講演会, 2009年9月10日, 富山市 富山大学
- ⑬ 井手本 康, 飯山 昂, Mo置換, $\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$ 添加による $(\text{Bi}, \text{RE})_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ($\text{RE} = \text{La}, \text{Nd}$) 強誘電体の物性, 結晶・電子構造と強誘電特性, 日本セラミックス協会第22回秋季シンポジウム, 2009年9月16日, 松山市 愛媛大学
- ⑭ Yasushi Idemoto, Oki Sekizawa, Crystal Structure Analysis and First Principles Calculation on $\text{Li}_x(\text{Ni}, \text{Mn})\text{O}_2$ -Based Cathode Active Material for Li-Ion Battery, 216th ECS Meeting, 2009年10月5日 Vienna, Austria
- ⑮ Yasushi Idemoto, Dependence of Thermodynamic Stability, Crystal and Electronic Structures, and Cathode Performance on Li content of $\text{Li}_x\text{Mn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_2$ as a Cathode Active Material for Li Ion Batteries, 216th ECS Meeting, 2009年10月5日, Vienna, Austria
- ⑯ 井手本 康, 小谷浩隆, $(\text{Bi}, \text{Pr})_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ の平均・局所構造と強誘電特性における Bi_2SiO_5 添加の影響, 第69回応用物理学会学術講演会, 2008年9月2日, 春日井市 中部大学
- ⑰ Yasushi Idemoto, Effects of Li content and heat treatment on crystal and electronic structures and cycle performance of $\text{Li}_x\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ as a cathode active material for Li ion battery, 7th France-Japan Joint Seminar on Lithium Batteries, 2008年9月23日, Le Domaine de Bierville, Bossy la Riviere, Esson, France
- ⑱ Yasushi Idemoto, Kenichiro Ueki, Average and Local Structure Analyses using Neutron Source and Cathode Performance of $\text{LiMn}_{1/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$ as a Cathode Active Material, PRIME 2008, 2008年10月13日, Honolulu, Hawaii, US
- ⑲ Yasushi Idemoto, Takuya Hasegawa, Dependence of Crystal and Electronic Structures, Thermodynamic Stability and Cathode Performance on Synthesis and Heat-Treatment Conditions of $\text{Li}_x\text{Mn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_2$ as a Cathode Active Material for Li Secondary Batteries, PRIME 2008, 2008年10月14日 Honolulu, Hawaii, US
- ⑳ Yasushi Idemoto, Relationship between Local Structure using PDF Method, Thermodynamic Stability, and Cathode Performance Depend on Different Synthetic Process of $\text{LiMn}_{1/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$ as a Cathode Active Material for Li Ion Battery, PRIME 2008, 2008年10月14日 Honolulu, Hawaii, US

[図書] (計1件)

- ① 井手本 康 他100名, オーム社, 電池ハンド

ブック, 2010, 総ページ数 783 ページ, pp.
458-467

[その他]

ホームページ等

[http://www.rs.noda.tus.ac.jp/idemoto1/index.](http://www.rs.noda.tus.ac.jp/idemoto1/index.html)

html

[http://www.tus.ac.jp/ridai/doc/ji/RIJIA01.](http://www.tus.ac.jp/ridai/doc/ji/RIJIA01.php)

php

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井手本 康 (YASUSHI IDEMOTO)

東京理科大学・理工学部工業化学科・教授

研究者番号：20213027

(2) 連携研究者

北村 尚斗 (NAOTO KITAMURA)

東京理科大学・理工学部工業化学科・助教

研究者番号：10453812