

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2013～2017

課題番号：25106009

研究課題名（和文）ナノ構造情報に基づいた新しい固体イオニクス材料の創出

研究課題名（英文）Development of solid state ionics materials based on nano-structure information

研究代表者

菅野 了次 (Kanno, Ryoji)

東京工業大学・科学技術創成研究院・教授

研究者番号：90135426

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 106,200,000円

研究成果の概要（和文）：エネルギーデバイスへ応用可能な新しいイオニクス材料の開発を行った。古典的な材料探索に加え、理論科学、情報科学との連携により、材料探索の新しい指針を検討した。新しいイオン導電種であるヒドリド導電体を開発し、全固体型のデバイス用電解質としての応用可能性を見出すことができた。量子ビームを使ったナノ界面解析では、数nmスケールの電気化学界面構造とデバイス性能との相関と制御指針を見出すことができた。既知構造を利用した探索により、リチウムイオン、酸化物イオンが拡散する固体電解質を開発した。さらに、情報科学の手法を用いて新組成、新構造を有する材料探索にも着手し、その課題と展開可能性を提示することができた。

研究成果の概要（英文）：Novel ion conducting materials that can be applied to energy devices were developed. In addition to classical material search, new direction for material exploration using theoretical science and information science was examined. Hydride ion conductors, which are new ionic conduction species, were developed and demonstrated applicability as an electrolyte for all-solid-state energy devices. For the nano interfacial analysis using the quantum beam, the clear relationship between the nanometer-scale electrochemical interfacial structure and the device performance was revealed. The solid electrolytes in which lithium ions and oxide ions diffuse were developed by exploration based on the known crystal structure. Furthermore, a novel material search method for ion conductors with new composition and new structure using the information science was conducted. The problems to solved and possibility of the novel method were proposed.

研究分野：無機固体化学

キーワード：固体イオニクス ナノ材料 結晶構造 高圧合成 電気化学界面

1. 研究開始当初の背景

固体中をイオンが高速で拡散する固体イオニクス材料はエネルギーデバイスの根幹をなす。しかし、基礎では反応機構の解明、応用では実デバイスの特性開発研究がそれぞれ行われ、デバイスの飛躍的な向上を誘起する新物質開発はほとんど顧みられていない。これは旧態依然とした絨毯爆撃的な物質探索を中心に行われてきたことが主な要因である。一方、計算科学による設計指針の提案は多いが、フラッグシップ材料開発の現場では参考にされていない。合成、理論を主軸とした研究者が物性研究者を挟んで行う共同研究は当該材料において皆無である。

既存の計算科学による物質の理論予測に、物質合成の専門家が感じる違和感が本領域研究新たな物質設計指針を作り出すモチベーションである。申請者は既存の指針に基づく物質開拓で、イオニクス材料で最高のリチウム導電率を持つ $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ を発見する (*Nat. Mater.*, 2011) など、数多くの成果がある。当該材料を基にした、ほぼ同様の物質構築指針が世界中の計算グループにより報告され、計算科学の手法確立が示されている。上記の計算科学は「アナリシス型」であり、当該物質での限定的な予測に基づくものである。周期表の知識の集積に基づく常識と物質や元素・相の多様性を考慮に入れ、理論と合成の研究者が共通の土俵で、物性研究者によるナノ構造情報を基に探索指針を組み上げる領域研究が必須と考えるに至った。

2. 研究の目的

我々 A03(ク)班では、エネルギーデバイスに利用可能な固体イオニクス材料の創出を目的として、以下の項目を中心に研究を進めた。

(1) イオニクス材料の物質開拓指針を構築：理論から予測される物質設計手法と既存の物質開拓手法との擦り合わせにより、新たな物質創出の手法を確立する。

(2) イオニクス材料のナノ構造解明手法を確立：理論と合成実験の橋渡しとなるナノ構造情報の検出方法を A01 と構築する。

(3) イオニクス材料の物性の新たな開拓：イオニクス材料におけるナノ界面領域には、触媒反応場と共通の課題が存在するが、既存の研究領域の枠組みでは相互の交流はない。触媒反応場(A03(ケ))と電気化学反応場との共通項を抽出し、高速イオン拡散と触媒反応の融合した新デバイスへの可能性を提案する。薄膜素子作製手法(A02(カ))を導入し高度化し、新規材料を提案する。

(4) Li^+ から O^{2-} , H, H^+ への展開：A02(エ)との連携で各種イオン伝導体構築の理論的な裏付けを確立する。

合成、理論構築、計測研究者相互の世界でも類を見ない関わり合いによって、新規な次世代イオニクス材料の創成を行うことは他に例のない学術的な特色であり、この連携によってのみ達成出来る、独創的な新規材料の創出およびエネルギーデバイスへの応用を目指した。

3. 研究の方法

各項目の目標達成のため、これまでに構築した様々な物質合成手法を駆使した。バルク材料合成には、古典的な固相反応法やゾルゲル法、水熱合成法に加えて、高压合成法を行った。飛散能の高いリチウムやヒドリドイオンの量を構造中で制御するため、1-3 GPa の極端条件下での合成が有効であった。ナノ薄膜合成には高真空下で製膜を行うパルスレーザー堆積法、マグネトロンスパッタリング法を用いた。緻密かつ結晶性の高い薄膜材料が得られるだけでなく、平滑な固体と固体の界面の形成や、ナノ薄膜積層による新物質開発を実現することが出来た。

得られた材料の同定は X 線回折法を用いた。電気化学特性や物性は、交流インピーダンス法、充放電試験、示差熱分析や分光法によって評価した。詳細な結晶構造、イオン拡散メカニズム、電気化学界面でのナノスケールの反応解明には中性子や放射光といった量子ビームを用いた高精度解析を実施した。マクロスケールからオングストロームスケールまで、最先端の解析手法を駆使することで、平均構造、局所構造を明らかにし、物性との相関解明を試みた。計算および情報科学の手法は、A02(エ)との連携により実施した。

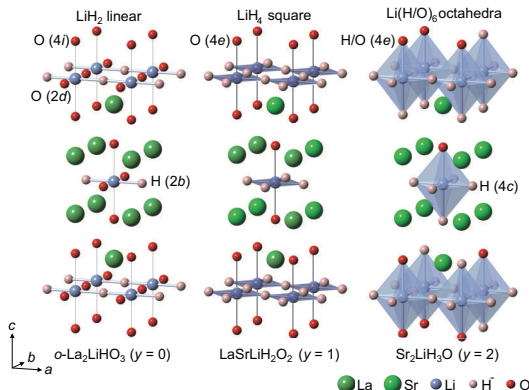
4. 研究成果

本領域研究で得られた主な成果を以下にまとめる。

・ヒドリドイオン導電体の開発

高压合成により、 K_2NiF_4 型構造の新規酸水素化物 $\text{La}_{2-x-y}\text{Sr}_{x+y}\text{LiH}_{1-x+y}\text{O}_{3-y}$ を合成した。 $\text{La}_{2-x-y}\text{Sr}_{x+y}\text{LiH}_{1-x+y}\text{O}_{3-y}$ は La/Sr 比を変えることで結晶格子内の H 含有量を制御することができ、Sr 量の増加に伴い H/O の比が 1/3 (La_2LiHO_3 , $x = y = 0$) から 3/1 ($\text{Sr}_2\text{LiH}_3\text{O}$, $x = 0$, $y = 2$) に変化する。図 1 に $\text{La}_{2-x-y}\text{Sr}_{x+y}\text{LiH}_{1-x+y}\text{O}_{3-y}$ の代表的な組成の結晶構造を示す。H は Li 八面体の axial 位置を優先的に占有する傾向があり、 La_2LiHO_3 では Li は H と 2 配位し、H と O は axial 位置に規則配列する。H/O 比が 1/1 になる $\text{LaSrLiH}_2\text{O}_2$ ($x = 0$, $y = 1$) では、axial 位置と apical 位置が、それぞれ H と O で全て占有され、Li は H と 4 配位し、 LiH_4 平面を形成する。H 量が 2 以上、即ち組成が $y > 1$ になると、H は apical 位置も占有し、 $\text{Sr}_2\text{LiH}_3\text{O}$ では apical 位置を H と O が 1:1 の割合で不規則に占有する。また、

$\text{La}_{2-x-y}\text{Sr}_{x+y}\text{LiH}_{1-x+y}\text{O}_{3-y}$ は酸素量を固定して La/Sr 比を変えることで空孔を導入することができ、組成 $x > 0$ では、Li 八面体の axial 位置に H 空孔 (V_{H}) が導入されることを確認した。各組成における構成元素の価数を第一原理計算から概算し、水素が H として存在していることを確認した。 $\text{La}_{2-x-y}\text{Sr}_{x+y}\text{LiH}_{1-x+y}\text{O}_{3-y}$ のイオン導電率は H 含有量の増加と空孔の導入によって導電率は向上し、組成 $(x, y) = (0.4, 1)$ では、300



°C で $10^{-4} \text{ S cm}^{-1}$ を越える導電率が得られた。
図 1 $\text{La}_{2-x-y}\text{Sr}_{x+y}\text{LiH}_{1-x+y}\text{O}_{3-y}$ の結晶構造

・H 導電現象の実証と固体電解質としての機能検証

$\text{La}_{2-x-y}\text{Sr}_{x+y}\text{LiH}_{1-x+y}\text{O}_{3-y}$ における H のイオン導電現象は、輸率測定、第一原理計算、全固体セル Ti / $\text{La}_{2-x-y}\text{Sr}_{x+y}\text{LiH}_{1-x+y}\text{O}_{3-y}$ / TiH_2 の放電反応によって検証した。水素透過電極に Pd, ブロッキング電極に Mo を用いておこなった Hebb-Wagner 直流分極測定からは、電子とホールの伝導度は認められなかった。また、第一原理計算から、 LiH_4 平面内の H と近傍の空孔 (V_{H}) にホッピングする過程の H の状態密度を比較したところ、両者に有意な差は認められず、H が負の電荷を保ったままイオン導電していることが示唆された (図 2)。さらに、 LiH_4 面内の V_{H} を介して H が拡散する時のエネルギー障壁は、交流インピーダンス測定から求めた活性化エネルギーと同程度の値を示した。これらの実験および計算から得られた結果は、観測された $\text{La}_{2-x-y}\text{Sr}_{x+y}\text{LiH}_{1-x+y}\text{O}_{3-y}$ のイオン導電率が H のイオン拡散に起因することを強く支持するものである。

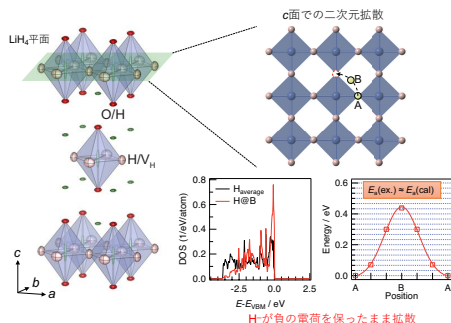


図 2 $\text{La}_{2-x-y}\text{Sr}_{x+y}\text{LiH}_{1-x+y}\text{O}_{3-y}$ のイオン導電機構

$\text{La}_{2-x-y}\text{Sr}_{x+y}\text{LiH}_{1-x+y}\text{O}_{3-y}$ を固体電解質、Ti と TiH_2 を負極と正極にした全固体セルは、正の起電力を示し、定電流放電測定から放電容量を得た。放電反応前後に各構成材料を X 線回折で調べた結果、固体電解質からは格子定数の有意な変化や不純物の生成などは認められず、放電反応の過程で、 $\text{La}_{2-x-y}\text{Sr}_{x+y}\text{LiH}_{1-x+y}\text{O}_{3-y}$ が安定に存在できることが明らかになった。一方、Ti と TiH_2 電極では、それぞれ水素の吸蔵と放出に伴う回折ピークの変化が確認された。このことから、放電時、各電極では、 $\text{Ti} + x\text{H}^+ \rightarrow \text{TiH}_x + x\text{e}^-$ (負極) と $\text{TiH}_2 + x\text{e}^- \rightarrow \text{TiH}_{2-x} + x\text{H}^+$ (正極) の反応が生じ、 TiH_2 から放出された水素が H として $\text{La}_{2-x-y}\text{Sr}_{x+y}\text{LiH}_{1-x+y}\text{O}_{3-y}$ を伝導して Ti 電極に吸蔵されていたと考えられる。以上の結果から、 $\text{La}_{2-x-y}\text{Sr}_{x+y}\text{LiH}_{1-x+y}\text{O}_{3-y}$ が H 導電性の固体電解質として機能することが明らかになった。

・酸化物イオン導電体 $\text{La}_2\text{LiO}_{3.5}$ 系材料のイオン導電機構の解析

$\text{La}_2\text{LiH}_3\text{O}_3$ の類縁物質である $\text{La}_2\text{LiO}_{3.5}$ および Mg 添加した $\text{La}_2\text{Li}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_{3.5+1/2x}$ は優れた酸化物イオン導電特性を有し、特に $x=0.15$ の組成において 400°C で $1.71 \times 10^{-2} \text{ S cm}^{-1}$ のイオン導電率を示す。優れた導電特性発現の起源を明らかにするため、中性子および放射光 X 線回折データを用いて、結晶構造解析と最大エントロピー法による核/電子密度分布の可視化を行った。解析の結果、 K_2NiF_4 型構造を有する本材料において、岩塩相およびペロブスカイト層、どちらに存在する酸素もイオン拡散に関与していることが示唆された。同形構造を有する物質群では、主に岩塩相を酸化物イオンが拡散する機構が報告されているが、 $\text{La}_2\text{LiO}_{3.5}$ 系材料においては全てサイトの酸素が拡散することで、優れた導電特性が発現している可能性がある。

・リチウム電池正極への修飾効果発現メカニズム解析

パルスレーザー堆積法で合成したリチウム電池正極 LiMO_2 ($M = \text{Mn, Co, Ni}$) 薄膜へ金属酸化物表面修飾を行い、各修飾法による電極反応機構を解析した。 ZrO_2 を修飾した場合は電極表面に厚さ数 nm の Zr-O が形成し (図 3)、充放電中の結晶構造変化量を小さくすることで、特性劣化につながる電極構造の不可逆相転移を抑制することが分かった。一方で、 WO_3 を修飾した場合には表面層が形成せず、電極表面 5-10 nm 程度の領域に固溶し、10-15 nm の範囲で格子歪みが生じた。同様に特性の劣化は抑制され、僅か

な元素の添加により格子歪みを制御することで、電極材料の安定性向上が可能であることが明らかになった。

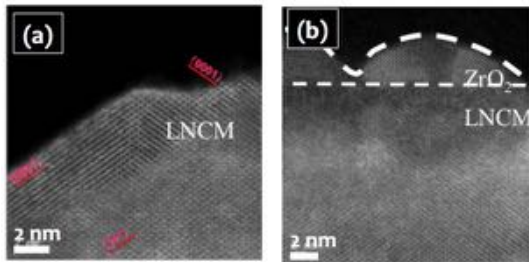


図3 LiMO_2 薄膜断面のSTEM観察像(a)合成時および(b) ZrO_2 修飾後。

・電極電解質界面ナノ構造のその場観察

層状岩塩型構造を有する Li_2RuO_3 正極材料のエピタキシャル薄膜電極を合成し、その結晶配向面を単結晶基板によって作り分けることでイオン拡散現象の結晶面方位依存性を調べた。得られた Li_2RuO_3 薄膜試料は膜厚が 30 nm であり、放射光 X 線表面散乱法により、電極最表面 (<5 nm) の結晶構造変化を充放電中にその場観察した。結晶構造から 010 面においてより速いイオン拡散が予測されるが(図4)、001 面がより優れた電極特性を示した。010 面では充放電中に不可逆な構造相転移が進行し、電気化学反応速度が低下することを見出した。電極最表面の数 nm 領域における結晶構造の安定性が、イオン拡散を伴う充放電反応の可逆性に大きく影響することを明らかになった。

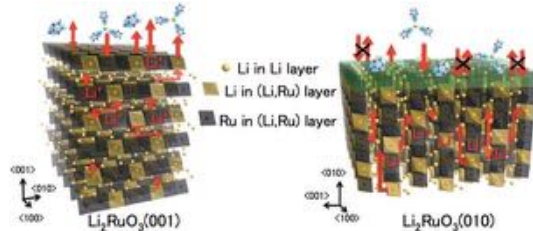


図4 Li_2RuO_3 電極におけるリチウム拡散の結晶方位依存性

・酸化物系リチウムイオン導電体

ペロブスカイト型、パイロクロア型の結晶構造を対象として、酸化物系の新規リチウムイオン導電体探索を行った。パイロクロア構造を有する $\text{LiSrB}_2\text{O}_6\text{F}$ ($B = \text{Nb}^{5+}, \text{Ta}^{5+}$) 系材料の結晶構造を図5に示す。AサイトのSr量を減らした $\text{LiSr}_{1-x}\text{B}_2\text{O}_6\text{F}_{1-2x}$ 組成では、イオン導電率が向上した(300°Cでの導電率 Nb系 $8.21 \times 10^{-6} \text{ S cm}^{-1}$ 、Ta系 $6.38 \times 10^{-6} \text{ S cm}^{-1}$)。リートベルト法による結晶構造解析により、Aサイト欠損の導入による、(i) 格子定数の増加、(ii) AF_4 が存在する六角形サイズの増大、(iii) 拡散経路中の欠損導入と Li-F 相互作用の低下がイオン導電率の向上に寄与することが明らかになった。

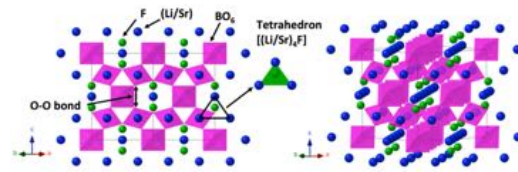


図5 放射光 X 線回折データを用いたリートベルト解析により得られた $\text{LiSrB}_2\text{O}_6\text{F}$ の結晶構造

・情報科学を用いた物質探索

酸化物系リチウムイオン導電体の物質探索指針を開拓するため、無機化学材料データベースの機械学習から提案される化学的に類似した組成材料を合成し、新物質開拓の可能性を検証した。 $\text{Li}_2\text{O-GeO}_2\text{-ZnO}$ 系において予測組成数は 12 であり、多様な合成条件下で合成実験を行った。 $\text{Li}_4\text{ZnGe}_2\text{O}_7$ の組成で X 線回折図形中に既知物質に帰属出来ないピークが観測された。既知相と新規相の混相であったため、組成最適化と合成条件検討を繰り返したが、新規相の単相化を行うことは出来なかった。機械学習を用いた手法は新しい物質探索の方向性として有望であるが、予測組成からの差分補正、合成条件のさらなる多様化が課題として見出された。

新しい電荷担体であるヒドリドイオンを使った新規イオン導電体の開発、既存イオン導電体の開拓と情報科学を使った物質探索の手法検討、さらにはナノ構造と物性の相関解明など、重要な成果を挙げることが出来た。全ての物質系は新しいエネルギーデバイスへの応用が見込めるため、これからのデバイス化研究、フラッグシップ材料創出に貢献することが期待出来る。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 16 件)

- Phraewphiphat, T.; Iqbal, M.; Suzuki, K.; Hirayama, M.; Kanno, R., Synthesis and Lithium-Ion Conductivity of $\text{LiSrB}_2\text{O}_6\text{F}$ ($B = \text{Nb}^{5+}, \text{Ta}^{5+}$) with a Pyrochlore Structure. *J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy*, 査読有, 65 (1), 26-33 (2018), doi: 10.2497/jjspm.65.26.
- Abe, M.; Iba, H.; Suzuki, K.; Minamishima, H.; Hirayama, M.; Tamura, K.; Mizuki, J. i.; Saito, T.; Ikuhara, Y.; Kanno, R., Study on the deterioration mechanism of layered rock-salt electrodes using epitaxial thin films - $\text{Li}(\text{Ni}, \text{Co}, \text{Mn})\text{O}_2$ and their Zr-O surface modified electrodes. *J. Power Sources*, 査読有, 345, 108-119 (2017), doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.01.103.

3. Watanabe, A.; Kobayashi, G.; Matsui, N.; Yonemura, M.; Kubota, A.; Suzuki, K.; Hirayama, M.; Kanno, R., Ambient Pressure Synthesis and H Conductivity of LaSrLiH₂O₂. *Electrochemistry*, 査読有, 85 (2), 88-92 (2017), doi: 10.5796/electrochemistry.85.88.
 4. Iqbal, M.; Suzuki, K.; Kobayashi, G.; Zhao, G.; Hirayama, M.; Kanno, R., Lithium ion conduction in doped LaLiO₂ system. *Solid State Ionics*, 査読有, 285, 33-37 (2016), doi: 10.1016/j.ssi.2015.09.001.
 5. Zhao, G.; Muhammad, I.; Suzuki, K.; Hirayama, M.; Kanno, R., Synthesis, Crystal Structure, and the Ionic Conductivity of New Lithium Ion Conductors, M-Doped LiScO₂ (M = Zr, Nb, Ta). *Mater Trans*, 査読有, 57 (8), 1370-1373 (2016), doi: 10.2320/matertrans.Y-M2016816.
 6. Kobayashi, G.; Hinuma, Y.; Matsuoka, S.; Watanabe, A.; Iqbal, M.; Hirayama, M.; Yonemura, M.; Kamiyama, T.; Tanaka, I.; Kanno, R., Pure H conduction in oxyhydrides. *Science*, 査読有, 351 (6279), 1314-1317 (2016), doi: 10.1126/science.aac9185.
 7. Lim, J.; Lee, S.; Suzuki, K.; Kim, K.; Kim, S.; Taminato, S.; Hirayama, M.; Oshima, Y.; Takayanagi, K.; Kanno, R., Synthesis, structure and electrochemical properties of novel Li-Co-Mn-O epitaxial thin-film electrode using layer-by-layer deposition process. *J. Power Sources*, 査読有, 279 (0), 502-509 (2015), doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.12.152.
 8. Suzuki, K.; Hirayama, M.; Kim, K.; Taminato, S.; Tamura, K.; Son, J.-Y.; Mizuki, J. i.; Kanno, R., Interfacial Analysis of Surface-Coated LiMn₂O₄ Epitaxial Thin Film Electrode for Lithium Batteries. *J. Electrochem. Soc.*, 査読有, 162 (13), A7083-A7090 (2015), doi: 10.1149/2.0111513jes.
 9. Taminato, S.; Hirayama, M.; Suzuki, K.; Kim, K.; Zheng, Y.; Tamura, K.; Mizuki, J. i.; Kanno, R., Mechanistic studies on lithium intercalation in a lithium-rich layered material using Li₂RuO₃ epitaxial film electrodes and in situ surface X-ray analysis. *J. Mater. Chem. A*, 査読有, 2 (42), 17875-17882 (2014), doi: 10.1039/c4ta02795g.
 10. Matsuda, Y.; Yonemura, M.; Koga, H.; Pitteloud, C.; Nagao, M.; Hirayama, M.; Kanno, R., Synthesis, crystal structure, and ionic conductivity of tunnel structure phosphates, RbMg_{1-x}H_{2x}(PO₃)₃ · y(H₂O). *Journal of Materials Chemistry A*, 査読有, 1 (48), 15544-15551 (2013), doi: 10.1039/C3TA13004E
- 〔学会発表〕(計 70 件)
1. 菅野了次, “超イオン導電体の創出と全固体電池の開発”, 日本化学会第 98 春季年会, 2018
 2. Ryoji Kanno, “All-solid-state battery - Developments of Materials and Devices”, International Battery Association, 2018
 3. 小林玄器, “Ba-Li 系酸水素化物の合成と H- 導電特性”, 第 58 回高压討論会, 名古屋大学, 2017
 4. Ryoji Kanno, “Developments of New Ionic Conductors and Their Application to All-Solid-State Batteries”, 232nd ECS Meeting, Maryland, 2017
 5. Iqbal Muhammad, “Synthesis and lithium-ion conductivity of LiSr-B₂O₆F (B=Nb⁵⁺, Ta⁵⁺) with pyrochlore structure”, 電気化学会第 84 回大会, 2017
 6. Genki Kobayashi, “Synthesis and H-Conductivity of Ba₂LiH_{3-2x}O_{1+x}”, PRiME2016, Hawaii, 2016
 7. 菅野了次, “ヒドリドイオンが固体中を動く - 新物質創成と電気化学デバイスへの期待”, 日本化学会第 97 回年会, 2017
 8. 小林玄器, “ヒドリド導電性酸水素化物の合成”, 粉体粉末冶金協会平成 27 年度春季大会, 2015
 9. Kota Suzuki, “Analysis of Coating Effects on LiMn₂O₄ Epitaxial Thin Film Electrode”, LiBD2015 (Lithium Battery Discussions) - Electrode Materials, 2015
 10. 小林玄器, “新規酸水素化物 Ba₂LiH₃O H- の導電特性”, 第 41 回固体イオニクス討論会, 2015
 11. Ryoji Kanno, “In situ X-ray and Neutron Scattering Studies on Electrode-electrolyte Interface in Lithium Battery”, 65th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry, 2014
 12. Masaaki Hirayama, “New Analytical Tool for Electrochemical Interfaces - in Situ Neutron Reflectometry”, the 17th International Meeting on Lithium Batteries (IMLB 2014), 2014

13. 小林玄器、"K₂NiF₄型構造の新規酸水素化物におけるヒドリド導電特性", 第41回固体イオニクス討論会、2013

〔図書〕(計1件)

1. Ryoji Kanno, Genki Koabayashi, Kota Suzuki, Masaaki Hirayama, Daisuke Mori, Kazuhisa Tamura, Springer, Nanoinformatics, 2018, 279-298, Total 298 pages.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.kanno.echem.titech.ac.jp/>
https://www.ims.ac.jp/organization/kobayashi_g/index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菅野 了次 (Kanno, Ryoji)
東京工業大学・科学技術創成研究院・教授
研究者番号：90135426

(2) 研究分担者

田村 和久 (Tamura, Kazuhisa)
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門物質科学研究センター・研究副主幹
研究者番号：10360405

平山 雅章 (Hirayama, Masaaki)
東京工業大学・物質理工学院・准教授
研究者番号：30531165

鈴木 耕太 (Suzuki, Kota)
東京工業大学・物質理工学院・助教
研究者番号：40708492

(3) 連携研究者

小林 玄器 (Kobayashi, Genki)
分子科学研究所・協奏分子システム研究センター・特任准教授
研究者番号：30609847

森 大輔 (Mori, Daisuke)
三重大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：00432021