

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31日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22245035

研究課題名（和文） 次世代蓄電デバイス開発にむけての基礎研究—全固体蓄電デバイスの開発

研究課題名（英文） Development of all solid-state batteries for new generation energy devices

研究代表者 菅野了次

菅野 了次（KANNO RYOJI）

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授

研究者番号：90135426

研究成果の概要（和文）：

優れた出力特性と安定性を実現する全固体蓄電デバイスの実現に向けて、要素技術となる以下の成果を得た。(1)電極/電解質固固界面に形成される空間電荷層の組成、構造と電池特性の相関を明らかにし、材料種の選択による界面制御で優れた出力特性、安定性を実現できる可能性を実証した。(2)世界最高のリチウムイオン導電率を示す超イオン伝導体 $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ を見だし、固体電解質として優れた特性を得た。

研究成果の概要（英文）：

Control and analysis techniques for electrochemical interfaces have been developed to design all solid state energy storage devices. Structure and electrochemical properties of the interface depend on the difference in their electrochemical potentials. Furthermore, we developed a new super ionic conductor, $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$, with the highest lithium ion conductivity.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	29,900,000	8,970,000	38,870,000
2011年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2012年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
総計	38,100,000	11,430,000	49,530,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：材料化学・無機工業材料

キーワード：イオン交換体・伝導体

1. 研究開始当初の背景

安全性に優れ、高容量、高出力の蓄電池が要望されている。不燃性の固体電解質を全固体電池は究極の安全性を有することから、次世代蓄電デバイスとして期待されている。実現に向けての課題は電極と電解質の界面に

おけるエネルギー変換反応の高出力化である。エネルギー変換反応では、電極界面においてイオンが電子を受け取り還元される電荷移動過程とイオンが電極中に拡散する過程が含まれる。古典的な電池では1つの材料にすべてを負わせるため、2つの機能が発現

すべき界面の設計が重要となる。もし各機能を細かく制御できれば、貯蔵、変換に最適な材料、形態を当てはめることが可能になり、出力、容量いずれも向上させることができる。我々は原子レベルの物質合成手法を利用し、界面の数 nm 領域での精緻な制御を行うプロジェクトを推進し、古典的な電池の世界に原子レベルの物質合成・組成制御法を導入してきた。構築してきた合成手法を基に、固体固体界面の構造解析、反応機構解明に展開し、全固体蓄電デバイス開発の新しいサイエンスを構築することが必要である。

2. 研究の目的

本研究は、次世代蓄電デバイス開発のための新たなサイエンスを創成することを目的として、以下の課題の達成を目標とした。

(1) 電池界面反応解明：エネルギー変換は電気化学界面で進行するが、界面反応はブラックボックスである。放射光、中性子散乱法、分光法などの最先端の物理化学的手法により固体界面反応を解明する。

(2) 新物質創成：新物質創成を行う。新たな物質系の探索は、未来の蓄電デバイス開発の鍵である。界面反応の知見に基づいた新たな設計指針に基づいて新物質を見いだす。

(3) 蓄電池の新たな形態の創出：古典的な蓄電池から脱却したエネルギーデバイス創出を目指し、高密度で集積可能なセル開発に繋げる。

3. 研究の方法

(1) 電池界面反応解明

電極界面の検出手法として、単結晶上に成長させたエピタキシャル薄膜電極を用いた X 線表面散乱測定を開拓し、様々な電極界面挙動を追跡した。この手法の利点を次に挙げる。

①パルスレーザー堆積法を用いた試料合成により、原子レベルで制御した固体固体界面を構築することができる。

②表面散乱測定（回折、反射率）で表面数 nm からの構造変化をその場測定できる。測定は大型放射光施設 SPring-8, 中性子施設 J-Parc で行う。

③配向制御した薄膜電極により反応面を規定でき、結晶面による反応の違いを明らかにできる。

本研究では、代表的な電極材料である層状岩塩型、スピネル型、オリビン型エピタキシャル薄膜電極表面に酸化物を表面修飾した。酸化物としては、 Li_3PO_4 , SrRuO_3 , $(\text{Li}, \text{La})\text{TiO}_3$ を選択した。修飾電極の表面構造を X 線、中性子表面散乱測定でその場観測し、電気化学特性との相関を調べた。

(2) 新物質創成

界面制御材料開発に用いるための基本となる電極、電解質物質の探索を硫化物材料、

酸化物材料それぞれで行った。

(3) 蓄電池の新たな形態の創出

高出力高密度を実現するための電池セル形態を探索した。原子レベルの組成制御を用いたプロトタイプ超格子セル作製の鍵は、原子レベルで連続した電極/固体電解質界面の構築である。本研究では、酸化物イオンが立方最密充填された構造を有するスピネル型 LiMn_2O_4 電極とペロブスカイト型 $(\text{Li}, \text{La})\text{TiO}_3$ 固体電解質を積層することを狙った。

4. 研究成果

(1) 電池界面反応解明

電極と固体電解質界面における構造と反応性をさまざまな材料の組み合わせについて明らかにした。ここでは $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 電極と Li_3PO_4 固体電解質界面について得られた結果を報告する。

1a) 充放電反応特性： $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}/\text{Li}_3\text{PO}_4$ 界面は PLD 法で作製した。 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}(111)$ エピタキシャル膜を作製後、非晶質 Li_3PO_4 を室温で 5 nm 程度堆積させた。充放電評価は Li/有機電解液/ $\text{Li}_3\text{PO}_4/\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ のセル構成で行い、 Li_3PO_4 の有無による違いから、固液界面と固固界面の違いを検討した。図 1 に充放電測定結果を示す。 Li_3PO_4 なしの固液界面では充放電初期サイクルに理論容量(175 mAh/g)以上の大きな容量が観測されるものの、以降のサイクルで急激に容量が劣化した。一方、 $\text{Li}_3\text{PO}_4/\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 固固界面では、容量低下が小さく、50 サイクル後も 250 mAh/g 以上の容量を維持する。これより、固固界面は固液界面に比べて、充放電時の安定性が高いことが分かった。放射光 X 線、中性子線を用いた表面散乱測定で界面構造を解析した結果、 Li_3PO_4 積層時に $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 電極表面にイオン濃度の異なる空間電荷層が形成されることが分かった。形成された空間電荷層は充放電反応中においても安定であった。 Li_3PO_4 なしの固液界面においても空間電荷層は形成されるが、そのイオン濃度分布は固固界面とは異なり、また充放電中に不可逆な相転移を示した。これより、固固界面を構築することで固液系よりも優れた電池特性が発現される可能性を見出した。固固界面の特性は電極や電解質の組成、構造により変化した。本研究で、固固界面の構築手法、観測手法を確立し、固固界面制御の重要性を実験的に提示することに成功した。

(2) 新物質創成

① $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$: 全固体デバイスの界面反応の高効率化を実現するためには、固体電解質材料のリチウムイオン導電率を高めることが最も効果的である。 Li_3PS_4 - Li_4GeS_4 擬二成分系の相図を基に固体電解質材料を探索した結果、世界最高のリチウムイオン導電率を示す超イオン伝導体 $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ (LGPS) を見

いだした【Nature Materials, 10, 682-686 (2011)】. この材料の導電率は室温(27°C)で 12 mS cm^{-1} を示す. この値は有機電解液中に匹敵するものであり, 室温以下の低温域においては有機電解液の導電率を凌駕する (図2).

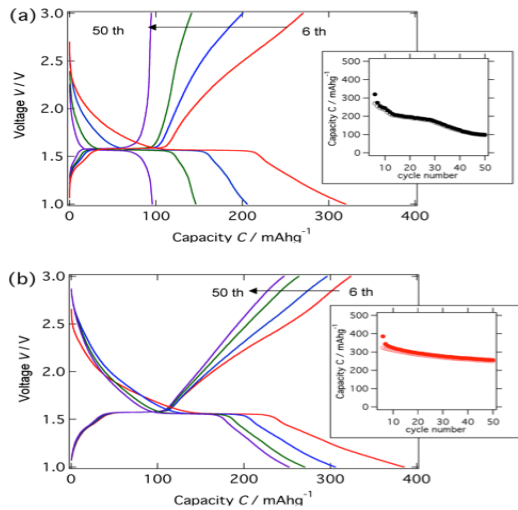


図1. (a)有機電解液/ $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 固液界面, (b) $\text{Li}_3\text{PO}_4/\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 固固界面の充放電測定結果. インセットはサイクル数による容量変化.

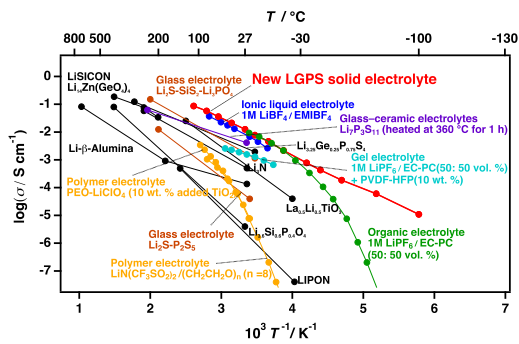


図2. リチウムイオン導電体の導電率比較.

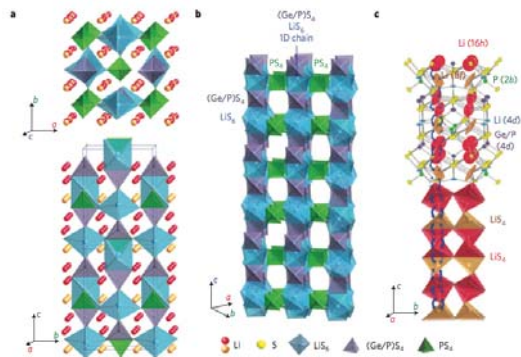


図3. LGPS の結晶構造. (a)骨格構造中のリチウム位置, (b)骨格構造の連結様式, (c)リチウム拡散経路.

構造解析で明らかにした LGPS の結晶構造を図3に示す. LGPS はこれまでの電解質材料とは異なるまったく新しい結晶構造を有しており, 三次元骨格構造中に1次元の超イオン伝導経路を有することを明らかにした. 以上の発見の直後から, 計算科学による検証, 周辺物質探索が世界規模で行われており, 次世代型全固体電池の実現に大きな進捗をもたらしたと考えている.

② $\text{LiMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{PO}_4(\text{OH})$: 新しい正極材料を探索した結果, タボライト型構造を有する $\text{LiMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{PO}_4(\text{OH})$ ($0 \leq x \leq 0.3$) がリチウムインターカレーション活性を示すことを見出した【J. Power Sources, 205, 394-401 (2011); J. Solid State Chem., 187, 124-129 (2011)】. 図4に最も大きな容量を示した $\text{LiMn}_{0.7}\text{Fe}_{0.3}\text{PO}_4(\text{OH})$ の充放電曲線を示す. 4.5 V から 2.0 V (vs. Li^+/Li) の範囲で約 160 mAh/g の放電容量を示した. 初期 10 サイクル中に放電容量の低下はなく, リチウム脱挿入に対する高い安定性を示した. 構造解析の結果, H は構造内酸素と強固な共有結合を形成しており, このことが高い構造安定性に関与することが分かった. これまで OH 基を有する電極材料は不安定とされ, 探索の候補から除外されてきた. 本研究結果は, H を含む物質においても, 強固な結合を有していれば利用可能であることを示すものであり, 電極材料探索に新しい方向性を提示するものである.

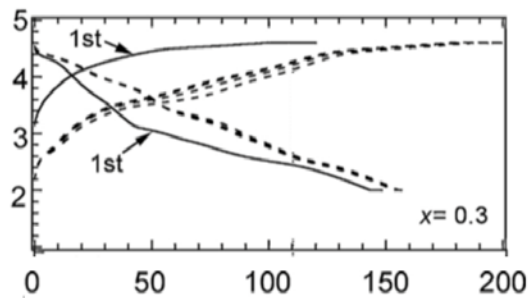


図4. $\text{LiMn}_{0.7}\text{Fe}_{0.3}\text{PO}_4(\text{OH})$ の充放電曲線.

(3) 蓄電池の新たな形態の創出

超格子セルに用いる LiMn_2O_4 電極とペロブスカイト型 $\text{Li}_{0.16}\text{La}_{0.55}\text{TiO}_3$ 固体電解質の積層を検討した. 個々に探索した PLD 蒸着条件で合成した結果, 電極と電解質の化学反応が起こり, 積層することができなかった. 化学反応を抑制するためには, 800°C 以上の高温で蒸着していた $\text{Li}_{0.16}\text{La}_{0.55}\text{TiO}_3$ 固体電解質の低温下合成が必要であった. $\text{Li}_{0.16}\text{La}_{0.55}\text{TiO}_3$ 合成条件の最適化を行った結果, レーザーエネルギーを高め, 蒸着時の酸素圧を低下させることで, $700\text{-}750^\circ\text{C}$ でペロブスカイト相が得られることを見出した. 得られた $\text{Li}_{0.16}\text{La}_{0.55}\text{TiO}_3$ 膜の導電率測定結果を図5に示す. 導電率は室温で $3.76 \times 10^{-4} \text{ S cm}^{-1}$ であり, 多結晶材料と同様の値を示す薄膜を得ることに成功した.

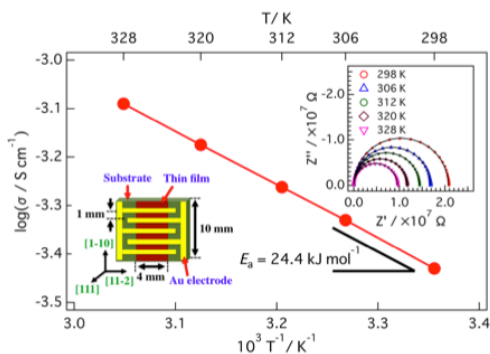


図5. $\text{Li}_{0.16}\text{La}_{0.55}\text{TiO}_3(111)$ エピタキシャル膜(80 nm)の導電率測定結果の Arrhenius プロットと Cole-Cole プロット.

最適化条件を用いて $\text{Li}_{0.16}\text{La}_{0.55}\text{TiO}_3$ 膜を $\text{LiMn}_2\text{O}_4(111)/\text{SrRuO}_3(111)/\text{SrTiO}_3(111)$ 電極膜上に蒸着した. 基板面直方向 X 線回折図形から $\text{Li}_{0.16}\text{La}_{0.55}\text{TiO}_3$, LiMn_2O_4 いずれも(111)反射も観測され, LiMn_2O_4 上に $\text{Li}_{0.16}\text{La}_{0.55}\text{TiO}_3$ が(111)配向して成長した. 反射率測定から, 2つの層の間に顕著なイオン拡散は検出されなかった. 以上より, 低温合成により蒸着中における化学反応を抑制することで, 電極, 電解質のエピタキシャル積層膜の作製に成功した. 得られた積層膜を正極, Li 金属を負極として作製した電池のサイクリックボルタモグラムの図6に示す. LiMn_2O_4 へのリチウム脱挿入に対応する酸化還元ピークが観測された. この結果は, $\text{Li}_{0.16}\text{La}_{0.55}\text{TiO}_3$ 固体電解質を通したリチウム拡散を示すものである. 以上より, 電極/電解質のエピタキシャル積層膜の作製と電気化学特性の発現に初めて成功した. 今後, 対極側の電極/電解質積層条件を検討することにより, エピタキシャル全固体電池を実現する.

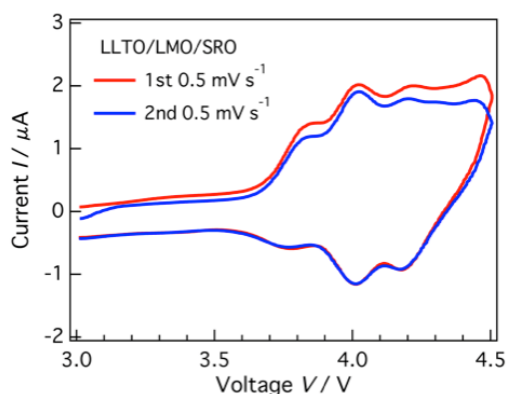


図6. $\text{Li}_{0.16}\text{La}_{0.55}\text{TiO}_3/\text{LiMn}_2\text{O}_4(111)$ のサイクリックボルタモグラム. 対極は Li, 電解液は 1M LiPF_6 が溶解した ethylene carbonate/diethyl carbonate (3:7).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 18 件)

- "Fabrication and electrochemical properties of $\text{LiMn}_2\text{O}_4/\text{SrRuO}_3$ multi-layer epitaxial thin film electrodes", Kota Suzuki, Kyungsu Kim, Sou Taminato, Masaaki Hirayama, Ryoji Kanno, *Journal of Power Sources*, **226**(15), 340-345 (2012). 【査読有】
- "All-solid-state Li-sulfur batteries with mesoporous electrode and thio-LISICON solid electrolyte", Miki Nagao, Yuki Imade, Haruto Narisawa, Takeshi Kobayashi, Ryota Watanabe, Toshiyuki Yokoi, Takashi Tatsumi, Ryoji Kanno, *Journal of Power Sources*, **222**, 237-242 (2012). 【査読有】
- "Oxygen evolution and Reduction Reactions on $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{CoO}_3(001)(110)$, and (111) Surfaces in an Alkaline Solution", Mamoru Komo, Asuna Hagiwara, Sou Taminato, Masaaki Hirayama, Ryoji Kanno, *Electrochemistry*, **80**(10), 834-838 (2012). 【査読有】
- "Characterization of Nano-Sized Epitaxial $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}(110)$ Film Electrode for Lithium Batteries", KyungSu Kim, Takeshi Toujigamori, Kota Suzuki, Sou Taminato, Kazuhisa Tamura, Jun'ichiro Mizuki, Masaaki Hirayama, Ryoji Kanno, *Electrochemistry*, **80**(10), 800-803 (2012). 【査読有】
- "Direct synthesis of oxygen-deficient $\text{Li}_2\text{MnO}_{3-x}$ for high capacity lithium battery electrodes", K.Kubota, T.Kaneko, M.Hirayama, M.Yonemura, Y.Imanari, K.Nakane, R.Kanno, *J. Power Sources*, **216**, 249-255 (2012). 【査読有】
- "Synthesis and Reversible Li-intercalation Behavior of BaFeO_4 films", Hidekazu Ido, Masaaki Hirayama, Ryoji Kanno, *Electrochemistry*, **80**(3), 139-141 (2011). 【査読有】
- "Synthesis and electrode characteristics of solid solution $\text{LiMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{PO}_4(\text{OH})$ ($0 \leq x \leq 0.3$) with tavorite structure for lithium batteries", Yang Yang, Masaaki Hirayama, Kei Kubota, Ryoji Kanno, *Journal of Power Sources*, **205**, 394-401 (2011). 【査読有】
- "Synthesis, crystal structure, and electrode characteristics of $\text{LiMnPO}_4(\text{OH})$ cathode for lithium batteries", Yang Yang, Masaaki Hirayama, Masao Yonemura, Ryoji Kanno, *Journal of Solid State Chemistry*, **187**, 124-129 (2011). 【査読有】
- "Synthesis and electrochemical properties of nanosized LiFeO_2 particles with a layered rocksalt structure for lithium batteries", Masaaki Hirayama, Hiroki Tomita, Kei

- Kubota, Hidekazu Ido, Ryoji Kanno, *Materials Research Bulletin*, **47**, 79-84 (2011). 【査読有】
10. "Epitaxial growth and electrochemical properties of $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ thin-film lithium battery anodes", Masaaki Hirayama, Kyungsu Kim, Takeshi Toujigamori, Woosuk Cho, Ryoji Kanno, *Dalton Transactions*, **40**(12), 2882-2887 (2011). 【査読有】
 11. "Structure and electrode reactions of layered rocksalt LiFeO_2 nanoparticles for lithium battery cathode", Masaaki Hirayama, Hiroki Tomita, Kei Kubota, Ryoji Kanno, *Journal of Power Sources*, **196**(16), 6809-6814 (2011). 【査読有】
 12. "New three-dimensional electrode structure for the lithium battery: Nano-sized $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ in a mesoporous carbon matrix", Miki Nagao, Michiko Otani, Hiroki Tomita, Sho Kanzaki, Atsuo Yamada, Ryoji Kanno, *Journal of Power Sources*, **196**(10), 4741-4746 (2011). 【査読有】
 13. "A lithium superionic conductor", Noriaki Kamaya, Kenji Homma, Yuichiro Yamakawa, Masaaki Hirayama, Ryoji Kanno, Masao Yonemura, Takashi Kamiyama, Yuki Kato, Shigenori Hama, Koji Kawamoto, Akio Mitsui, *Nature Materials*, **10**, 682-686 (2011). 【査読有】
 14. "High-capacity phase formation by surface modification of Li_3PO_4 on nanosized Li_2RuO_3 electrode for lithium batteries", Yueming Zheng, Sou Taminato, Youlong Xu, Kota Suzuki, KyungSu Kim, Masaaki Hirayama, Ryoji Kanno, *Journal of Power Sources*, **208**(15), 447-451 (2011). 【査読有】
 15. "Crystal structure and phase transitions of the lithium ionic conductor Li_3PS_4 ", Kenji Homma, Masao Yonemura, Takeshi Kobayashi, Miki Nagao, Masaaki Hirayama, Ryoji Kanno, *Solid State Ionics*, **182**(1), 53-58 (2011). 【査読有】
 16. "Synthesis of Li_xMnO_2 by chemical lithiation in an aqueous media", Won Il Jung, Miki Nagao, Cédric Pitteloud, Atsuo Yamada, Ryoji Kanno, *Journal of Power Sources*, **195**(10), 3328-3332 (2010). 【査読無】
 17. "Dynamic Structural Changes at LiMn_2O_4 /Electrolyte Interface during Lithium Battery Reaction", Masaaki Hirayama, Hedekazu Ido, Kyungsu Kim, Woosuk Cho, Kazuhisa Tamura, Jun'ichiro Mizuki, Ryoji Kanno, *J. Am. Chem. Soc.*, **132**(43), 15268-15276 (2010). 【査読有】
 18. "New three-dimensional electrode structure for the lithium battery: Nano-sized $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ in a mesoporous carbon matrix", Miki Nagao, Michiko Otani, Hiroki Tomita, Sho Kanzaki, Atsuo Yamada, Ryoji Kanno, *Journal of Power Sources*, **196**(10), 4741-4746 (2010). 【査読有】
- [学会発表] (計 144 件)
1. "蓄電池の全固体化を目指して～その課題と展開～", 菅野了次, 第4回国際二次電池展, 3/1, 2013, 東京ビッグサイト (東京都)
 2. "Studies on Reactions and Structures at Electrode/Electrolyte Interface Using Epitaxial Model Electrodes", R.Kanno, M.Hirayama, K.Tamura, Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid-State Science (PRiME2012), G5-718, 10/8, 2012, Hawaii Convention Center & the Hilton Hawaiian Village(Hawaii, USA)
 3. "New Lithium Superionic Conductor and Its Application to All Solid-State Batteries", R. Kanno, M. Hirayama, M. Yonemura, Y. Kato, K. Kawamoto, Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid-State Science (PRiME2012), B8-1190, 10/8, 2012, Hawaii Convention Center & the Hilton Hawaiian Village(Hawaii, USA)
 4. "Development of Materials for Lithium Batteries", Ryoji Kanno, IUMRS-ICEM2012, A3-K26-005 Keynote, 9/26, 2012, パシフィック横浜 (神奈川県)
 5. "NEW LITHIUM SUPERIONIC CONDUCTOR AND ITS APPLICATION TO ALL SOLID-STATE BATTERIES", Ryoji Kanno, Masaaki Hirayama, Masao Yonemura, Yuki Kato, Koji Kawamoto, Asian conference on solid state ionics 2012, Inv. A3, 7/19, 2012, 東北大学 (宮城県)
 6. "全固体電池実現に向けて一超リチウムイオン伝導体の開発—", 菅野了次, 日本化学会第92春季年会(2012), 3/27, 2012, 慶應義塾大学日吉キャンパス (神奈川県)
 7. "Structural studies on electrode/electrolyte interface", Ryoji Kanno, Gordon Research Conferences, 3/7, 2012, Four Points Sheraton/Holiday Inn Express Ventura (USA)
 8. "Lithium superionic conductor, $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$: the highest lithium ion conductive solid", Ryoji Kanno, Solid State Chemistry Conference 2012, 2/25, 2012, カナリア諸島 (スペイン)
 9. "Reactions and Structure Changes in Electrode/Electrolyte Interface of Lithium Battery", Ryoji Kanno, International Battery Association (IBA) and Pacific Power Source Symposium 2012 Joint Meeting, 1/13,

- 2012,Hilton Waikoloa Village, Hawaii(USA)
10. "高イオン導電体 $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ の合成と構造、物性", 菅野了次, 平山雅章, 釜谷則昭, 本間健司, 山川裕一郎, 加藤裕樹, 濱重規, 川本浩二, 三井昭男, 米村雅雄, 神山崇, 第52回電池討論会, 4C20, 10/20, 2011, タワーホール船堀 (東京)
 11. "Electrochemical Properties of $\text{Li}_2\text{MnO}_{3-x}$ Reduced by Metal Hydrides", Kei Kubota, Masaaki Hirayama, Masao Yonemura, Ryoji Kanno, Yuichiro Imanari, Kenji Nakane, Third International Forum on Multidisciplinary Education and Research for Energy Science, C416, 12/13, 2010, ANA Intercontinental Ishigaki Resort (沖縄県)
 12. " K_2NiF_4 型ヒドリド含有 $\text{La}_{2-x}\text{MLi}_{1+x}\text{O}_3$ の合成とイオン導電特性", 小林玄器, 平山雅章, 米村雅雄, 菅野了次, 第49回セラミックス基礎科学討論会, 1D09, 1/11, 2011, 岡山コンベンションセンター (岡山県)
 13. "硫黄系全固体電池の展開", 菅野了次, 第75回新電池構想部会, 12/2, 2010, 早稲田大学 (東京都)
 14. "Surface Structure Changes in Lithium Battery Electrodes Studied by In Situ X-ray and Neutron Scattering Methods", R. Kanno, M. Hirayama, K. Tamura, H. Ido, 218th ECS Meeting, 502, 10/12, 2010, Riviera Hotel(Las Vegas, USA)
 15. "Interfacial phenomena of the spinel electrodes for lithium battery", Ryoji Kanno, ANL/NEDO workshop on Energy Storage, 10/7, 2010, Argonne National Laboratory (USA)
 16. "Lithium Solid Electrolyte, Thio-LISICON - Structure, Ionic Conductivity and all Solid-state Batteries", Ryoji Kanno, Miki Nagao, Masaaki Hirayama, 2010MRS Spring Meeting, CC1.1, 4/6, 2010, San Francisco (USA)

[その他]

<http://www.kanno.echem.titech.ac.jp/paper.php>

6. 研究組織

(1)研究代表者

菅野 了次 (KANNO RYOJI)
東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授
研究者番号：90135426

(2)研究分担者

平山 雅章 (HIRAYAMA MASAACKI)
東京工業大学・大学院総合理工学研究科・講師
研究者番号：30531165

武田 保雄 (TAKEDA YASUO)
三重大学・事務局・理事
研究者番号：60093051

米村 雅雄 (YONEMURA MASAO)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・准教授
研究者番号：60400602

田村 和久 (TAMURA KAZUHISA)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用開発部門・研究員
研究者番号：10360405

園山 範之 (SONOYAMA NORIYUKI)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：50272696