

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289243

研究課題名(和文) 全固体ナトリウム電池を指向したガラス系固体電解質の開発

研究課題名(英文) Development of glass solid electrolytes for all-solid-state sodium batteries

研究代表者

林 晃敏 (Hayashi, Akitoshi)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10364027

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：Na₃PS₄ガラス電解質をベースとして、Pの一部をM (M=Si, Al, Sn)に、Sの一部をOに部分元素置換した際の、電解質の特性や構造について調べた。いずれの系においても、少量置換組成においては、主に立方晶Na₃PS₄が析出した。M=Siの系では導電率が増加し、一方SnやOで部分置換することによって、大気安定性の向上することがわかった。また液相法や気相法を用いて立方晶Na₃PS₄の作製に成功した。成形性に優れた酸化物ガラス電解質を開発した。硫黄正極複合体を作製する際、比表面積の大きな炭素に硫黄を熱含浸することが、全固体Na/S電池を高容量化する上で重要であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：Na₃PS₄-based glass electrolytes with a partial cation (M=Si, Al, Sn) or anion (O) substitution were prepared and characterized. Cubic Na₃PS₄ was mainly precipitated at the compositions with a small amount of the substituent. The partial substitution of Si for P increased the conductivity of the electrolytes, while the substitution of Sn or O for P or S improved chemical stability in air. Cubic Na₃PS₄ was also synthesized via liquid-phase or gas-phase process. Novel oxide glass electrolytes with good formability were developed. The use of carbon conductive additives with larger specific surface doped with sulfur via a melt-diffusion process was effective in increasing capacity of all-solid-state Na/S batteries.

研究分野：無機材料化学

キーワード：固体電解質 全固体電池 ガラス ナトリウム電池

1. 研究開始当初の背景

豊富なナトリウム資源を利用する全固体ナトリウム電池は、安全性、経済性、高エネルギー密度を兼ね備える次世代型蓄電池として、その開発が期待されている。この電池を実現するためには、室温で高いナトリウムイオン伝導性を示す固体電解質材料の開発が必須である。また電解質には、電極活物質との固体界面接合に適した機械的性質も求められる。我々はこれまでに、室温でのプレスによって緻密な成形体を得ることが可能な硫化物系材料に着目して研究を進めたところ、 Na_3PS_4 組成のガラスを結晶化させることによって導電率が増大することを見出し、室温で $10^{-4} \text{ S cm}^{-1}$ 以上の導電率を示すガラスセラミック電解質を開発した。全固体電池へ応用するには、より一層の導電率の増大が求められる。また、活物質粒子上へ電解質をコーティングすることによって、広い電極 - 電解質界面の形成が可能となる。その実現に向けては、従来の固相法だけではなく、気相や液相を介した硫化物電解質の合成が適しているが、これらの作製条件については、ほとんど報告されていない。

2. 研究の目的

本研究では、高いナトリウムイオン伝導性を示す Na_3PS_4 ガラス電解質をベースとして、P や S の部分元素置換が、特性や構造に与える影響について調べた。また電極活物質への電解質コーティングを想定して、気相法や液相法を用いた硫化物電解質の作製方法についても検討した。また、高い導電率を持つ NASICON などの酸化物結晶の低温焼結助剤としての酸化物ガラス材料の開発にも取り組んだ。また作製した硫化物固体電解質を用いて、全固体ナトリウム - 硫黄電池を試作し、電気化学特性について評価した。

3. 研究の方法

Na_3PS_4 ベース電解質は、出発原料として Na_2S および P_2S_5 結晶に加えて、 SiS_2 、 Al_2S_3 、 SnS_2 、 P_2O_5 (もしくは Na_3PO_4) のいずれかを用いて作製した。これらを所定量混合後、遊星型ボールミル装置を用いたメカニカルミリングとそれに続く熱処理を行い、 $\text{Na}_3\text{PS}_4\text{-Na}_x\text{MS}_4$ (M=Si, Al, Sn) 系および $\text{Na}_3\text{PS}_4\text{-Na}_3\text{PO}_4$ 系ガラスセラミックスを作製

した。得られた試料に対して、X線回折測定やラマン分光測定を用いて構造に関する知見を得た。ガラスセラミックスの粉末成形体に対して、交流インピーダンス法により導電率を決定した。

4. 研究成果

Na^+ イオン伝導性硫化物固体電解質の探索

$\text{Na}_3\text{PS}_4\text{-Na}_4\text{SiS}_4$ 系について検討したところ、 Na_4SiS_4 の置換に伴って導電率が増加し、6 mol% の置換組成でガラスセラミックスの室温導電率は最大の $7.4 \times 10^{-4} \text{ S cm}^{-1}$ を示した。この組成においては立方晶 Na_3PS_4 が析出しており、格子定数に大きな変化は見られず、格子間 Na イオンの増大によって導電率が増加したと考えられる。次に P の一部を Al で置換した $\text{Na}_3\text{PS}_4\text{-Na}_3\text{AlS}_3$ 系ガラスセラミック電解質を作製した。 Na_3AlS_3 の置換量が 10 mol% 以下の組成においては、立方晶 Na_3PS_4 が析出しており、Al の置換量の増加に伴って格子定数が減少する傾向が見られた。Al 置換量の増加に伴って導電率が減少したが、室温で $10^{-4} \text{ S cm}^{-1}$ 以上の値を保持した。

次に、 Na_3PS_4 固体電解質の P の一部を Sn に置換した $\text{Na}_3\text{PS}_4\text{-Na}_4\text{SnS}_4$ 系ガラスセラミック電解質を作製した。 Na_4SnS_4 の置換量が 10 mol% 以下の組成においては、メカニカルミリング処理で立方晶 Na_3PS_4 が析出した。さらに熱処理を行ったガラスセラミックスについて、 Na_4SnS_4 置換量を変化させても、立方晶 Na_3PS_4 の格子定数にほとんど変化がみられなかった。一方、置換量が 33.3 ~ 100 mol% の組成範囲においては、ミリング処理によってアモルファスが得られ、それらを熱処理することによって、 $\text{Na}_6\text{Sn}_2\text{S}_7$ や Na_4SnS_4 などの結晶が析出することがわかった。導電率は $x=5$ 組成で $10^{-4} \text{ S cm}^{-1}$ 以上であり、 $x=10 \sim 95$ 組成においては、 $10^{-5} \text{ S cm}^{-1}$ オーダーの値を示した。 $x=100$ 組成では、導電率は $10^{-7} \text{ S cm}^{-1}$ と大きく減少した。大気暴露に伴う硫化水素発生量を測定したところ、 $x=5$ 組成において硫化水素発生量が大幅に減少したことから、少量の Sn 置換が電解質の大気安定性向上に効果的であることが明らかになった。

Na_3PS_4 の一部の S を O に部分置換した $\text{Na}_3\text{PS}_4\text{-Na}_3\text{PO}_4$ 系 ($\text{Na}_3\text{PS}_{4-y}\text{O}_y$) ガラスセラミックスを作製した。280 °C で熱処理して得られた $y = 2$ ガラスセラミックス中には主に立

方晶 Na_3PS_4 が析出しており、 $10^{-5} \text{ S cm}^{-1}$ オーダーの導電率を示した。これは、報告されている $\text{Na}_3\text{PS}_2\text{O}_2$ 結晶の導電率よりも9桁高い。また、 $\text{Na}_3\text{PS}_{4-x}\text{O}_x$ ガラスセラミックスは Na_3PS_4 ガラスセラミックスと比較して大気安定性に優れることがわかった。

○気相法および液相法を用いた Na_3PS_4 電解質の合成

電極活物質との固体界面形成の際に有用な、気相法や液相法による Na_3PS_4 電解質の作製を行った。

液相法では、*N*-メチルホルムアミドや1,2-ジメトキシエタンを反応場を用いることによって、立方晶 Na_3PS_4 の得られることがわかった。 Na_2S と P_2S_5 を *n*-ヘキサンに加え、氷浴中で攪拌しながら *N*-メチルホルムアミドを混合して攪拌した。*n*-ヘキサンを分離後、得られた前駆溶液を 180°C で減圧留去することで前駆体を得た。得られた前駆体を 260°C で熱処理することで、一部 Na_3POS_3 を含むものの、主に立方晶 Na_3PS_4 が析出することがわかった。作製した電解質の粉末成形体の室温における導電率は $2.6 \times 10^{-6} \text{ S cm}^{-1}$ であった。一方、 Na_2S と P_2S_5 の混合物に対して、1,2-ジメトキシエタンを加えて室温で攪拌し、得られた懸濁液を室温で真空乾燥することによって前駆体結晶が得られた(図1)。これを 210°C で熱処理すると、前駆体結晶のピーク強度が低下し、立方晶 Na_3PS_4 のピークがみられた。熱処理温度を 270°C まで高くすると、

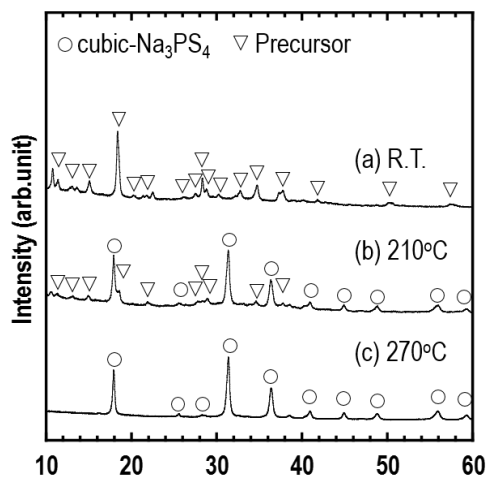


図1 液相法により合成した Na_3PS_4 の XRD パターン。(a)室温乾燥後、(b) 210°C 熱処理後、(c) 270°C 熱処理後。

前駆体のピークは消失し、主に立方晶 Na_3PS_4 の得られることがわかった。この粉末の成形

体は、 $1.1 \times 10^{-5} \text{ S cm}^{-1}$ の室温導電率を示した。

一方、気相法の一つであるパルスレーザー堆積(PLD)法を用いて、 Na_3PS_4 の成膜条件を検討した。 Na_2S と P_2S_5 からなる粉末成形体へ KrF エキシマレーザーを照射した。シリコン基板上に成膜した薄膜は緻密でアモルファス化していることを、X線回折およびSEM観察から確認した。得られた薄膜を 270°C で熱処理すると、立方晶 Na_3PS_4 に加えて未知結晶も同時に析出した。薄膜の室温導電率を測定したところ、アモルファス状態では $4.4 \times 10^{-6} \text{ S cm}^{-1}$ 、結晶化後では $3.0 \times 10^{-5} \text{ S cm}^{-1}$ となった。

液相法および気相法のどちらを用いた場合においても、立方晶 Na_3PS_4 を得ることができたが、現状では、ミリング処理を経て得られた電解質と比べると1~2桁導電率が低いのが現状である。表面構造やモルフォロジーの違いが一因と考えられるが、詳細は明らかになっていない。

○酸化物ガラス電解質の検討

新規なナトリウムイオン伝導性酸化物固体電解質として、 $(100-x)\text{Na}_3\text{BO}_3 \cdot x\text{Na}_2\text{SO}_4$ (mol%) ガラスをメカニカルミリングにより作製した。X線回折の結果より、 $0 < x < 50$ の組成範囲でアモルファス化することがわかった。また、Raman スペクトルにおいて BO_3^{3-} および SO_4^{2-} イオン由来のピークを確認した。粉末成形体の破断面 SEM 観察の結果より、 Na_3BO_3 に Na_2SO_4 を添加することによって、大幅な成形性の向上が見られた。また Na_2SO_4 の添加に伴ってガラス成形体の導電率は増加し $x=50$ の組成で最大の室温導電率 $5.9 \times 10^{-8} \text{ S cm}^{-1}$ を示した。

典型的な酸化物結晶電解質である NASICON ($\text{Na}_{1+x}\text{Zr}_2\text{Si}_x\text{P}_{3-x}\text{O}_{12}$) の焼結助剤として Na_3BO_3 ガラスを適用した。 Na_3BO_3 ガラスを 5 wt.% 添加して 900°C で焼結した NASICON は、相対密度が 95% の緻密体であり、 1220°C での固相焼結体と同程度の $1 \times 10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$ の極めて高い室温導電率を示した。

全固体 Na/S 電池への応用

作製した Na_3PS_4 電解質を全固体電池へ応用した。正極活物質としての硫黄は、無毒で安価であり、 1672 mAh g^{-1} の理論容量を持つことから、廉価で高エネルギー密度を有する

全固体ナトリウム電池の正極としての応用が期待される。本研究では、 Na_3PS_4 ガラスセラミック電解質を用いて、硫黄を正極活物質とした全固体ナトリウム電池を構築し、その充放電特性を評価した。硫黄は絶縁体であるため、硫黄を活物質として利用するためには、硫黄に対して電子およびイオンの伝導経路を形成する必要がある。そこで、155 で硫黄を融液状態にして炭素導電剤の細孔に取り込む熱含浸法によって硫黄-炭素複合体を作製した。さらに、イオン伝導経路として Na_3PS_4 ガラスセラミック電解質を加え、ミリング処理を行うことで正極複合体を作製した。炭素導電剤としては、アセチレンブラック(AB、比表面積： $80 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$)、ケッチェンブラック(KB、比表面積： $1300 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$)、活性炭(AC (MSP-20)、比表面積： $2200 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$)を用いた。正極複合体における硫黄:炭素:電解質の重量比は 40:20:40 であり、硫黄活物質を比較的高含有(40wt%)した正極となっている。正極層として作製した正極複合体を、電解質層に Na_3PS_4 ガラスセラミックスを、負極層にアセチレンブラックを添加した $\text{Na}_{15}\text{Sn}_4$ を用いて全固体ナトリウム電池を構築し、定電流充放電測定により電池特性を評価した。その結果、いずれの硫黄-炭素複合体を正極に用いた全固体 Na/S 電池も室温で二次電池として作動した。図 2 に 0.064 mA cm^{-2} の電流密度における初期充放電曲線を示す。炭素として AC を用いた電池の容量が最も大きく、初期放電容量が 1600 mAh g^{-1} となり、硫黄の理論容量とほぼ同等の値を示した。また、電流密度を 4 倍に増加した場合、電池は 10 サイクルの間、 950 mAh g^{-1} の容量を保持することがわかった。以上の結果から、比表面積の大き

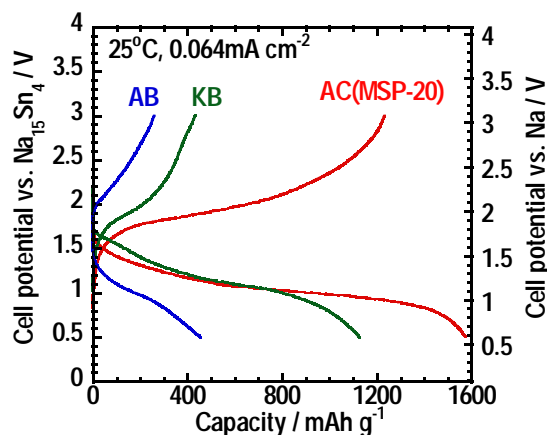


図 2 全固体 Na/S 電池の初期充放電曲線。

い炭素を用いることが電池容量の増大に効果的であることがわかった。また硫黄と炭素をメカニカルミリング処理するだけでは、図 2 に示す容量は得られないことから、熱含浸法を用いて硫黄と炭素を複合化することも、高容量を得る上で重要であることが明らかになった。

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 14 件)

1. A. Hayashi, A. Sakuda, M. Tatsumisago, Development of sulfide solid electrolytes and interface formation process for bulk-type all-solid-state Li and Na batteries, *Front. Energy Res.*, 査読有, Vol. 4, 2016, pp. 1-13. DOI: 10.3389/fenrg.2016.00025.
2. 林晃敏, 辰巳砂昌弘, 硫化物電解質を用いた全固体リチウム二次電池の研究開発, 電池技術, 査読無, Vol. 28, 2016, pp. 66-75.
3. K. Suzuki, Y. Nakamura, N. Tanibata, A. Hayashi, M. Tatsumisago, Preparation and characterization of $\text{Na}_3\text{BO}_3\text{-Na}_2\text{SO}_4$ glass electrolytes with Na; ion conductivity prepared by a mechanical milling technique, *J. Asian Ceram. Soc.*, 査読有, Vol. 4, 2016, pp. 6-10. DOI: 10.1016/j.jascer.2015.10.002.
4. 辰巳砂昌弘, 林晃敏, 全固体電池の研究開発, 電気評論, 査読無, Vol. 101, 2016, pp. 38-41.
5. M. Nose, A. Kato, A. Sakuda, A. Hayashi, M. Tatsumisago, Evaluation of mechanical properties of $\text{Na}_2\text{S-P}_2\text{S}_5$ sulfide glass electrolytes, *J. Mater. Chem. A*, 査読有, Vol. 3, 2015, pp. 22061-22065. DOI: 10.1039/C5TA05590C.
6. S. Yubuchi, A. Hayashi, M. Tatsumisago, Sodium-ion conducting Na_3PS_4 electrolyte synthesized via a liquid-phase process using N-methylformamide, *Chem. Lett.*, 査読有, Vol. 44, 2015, pp. 884-886. DOI: 10.1246/cl.150195.
7. N. Tanibata, A. Hayashi, M. Tatsumisago, Improvement of rate performance for all-solid-state $\text{Na}_{15}\text{Sn}_4$ / amorphous TiS_3 cells using $94\text{Na}_3\text{PS}_4\cdot 6\text{Na}_4\text{SiS}_4$ glass-ceramic electrolytes, *J. Electrochem. Soc.*, 査読有, Vol. 162, 2015, pp. A793-A795. DOI:

- 10.1149/2.0011506jes.
8. N. Tanibata, T. Matsuyama, A. Hayashi, M. Tatsumisago, All-solid-state sodium batteries using amorphous TiS_3 electrode with high capacity, *J. Power Sources*, 査読有, Vol. 275, 2015, pp. 284-287. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.10.193.
 9. Y. Hibi, N. Tanibata, A. Hayashi, M. Tatsumisago, Preparation of Sodium Ion Conducting Na_3PS_4 - NaI Glasses by a Mechanochemical Technique, *Solid State Ionics*, 査読有, Vol. 270, 2014, pp. 6-9. DOI: 10.1016/j.ssi.2014.11.024.
 10. K. Noi, A. Hayashi, M. Tatsumisago, Structure and Properties of the Na_2S - P_2S_5 Glasses and Glass-Ceramics Prepared by Mechanical Milling, *J. Power Sources*, 査読有, Vol. 269, 2014, pp. 260-265. DOI:10.1016/j.jpowsour.2014.06.158.
 11. A. Hayashi, K. Noi, N. Tanibata, M. Nagao, M. Tatsumisago, High Sodium Ion Conductivity of Glass-Ceramic Electrolytes with Cubic Na_3PS_4 , *J. Power Sources*, 査読有, Vol. 258, 2014, pp. 420-423. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.02.054.
 12. M. Tatsumisago, A. Hayashi, Sulfide Glass-Ceramic Electrolytes for All-Solid-State Lithium and Sodium Batteries, *Inter. J. Appl. Glass Sci.*, 査読有, Vol. 5, 2014, pp. 226-235. DOI: 10.1111/ijag.12084.
 13. N. Tanibata, K. Noi, A. Hayashi, N. Kitamura, Y. Idemoto, M. Tatsumisago, X-ray Crystal Structure Analysis of Sodium-Ion Conductivity in $94\text{Na}_3\text{PS}_4 \cdot 6\text{Na}_4\text{Si}_4$ Glass-Ceramic Electrolytes, *ChemElectroChem*, 査読有, Vol. 1, 2014, pp. 1130-1132. DOI: 10.1002/celec.201402016.
 14. N. Tanibata, K. Noi, A. Hayashi, M. Tatsumisago, Preparation and Characterization of Highly Sodium Ion Conducting Na_3PS_4 - Na_4Si_4 Solid Electrolytes, *RSC Adv.*, 査読有, Vol. 4, 2014, pp. 17120-17123. DOI: 10.1039/C4RA00996G.

〔学会発表〕(計 47 件)

1. 林晃敏, 増澤直貴, 辻 史香, 谷端直人, 辰巳砂昌弘, ナトリウムイオン伝導性 Na_4SnS_4 ガラスおよびガラスセラミック電解

質の作製と評価, 日本化学会第 97 春季年会, 2017 年 3 月 16-19 日, 慶応大学(神奈川県横浜市).

2. 植松美和, 由淵想, 林晃敏, 辰巳砂昌弘, エーテル類を用いた Na_3PS_4 固体電解質の作製, 第 55 回セラミックス基礎科学討論会, 2017 年 1 月 12-13 日, 岡山コンベンションセンター(岡山県岡山市).

3. 辻 史香, 谷端直人, 林晃敏, 辰巳砂昌弘, ナトリウムイオン伝導性 Na_3PS_4 - Na_3PO_4 系固体電解質の作製と評価, 第 55 回セラミックス基礎科学討論会, 2017 年 1 月 12-13 日, 岡山コンベンションセンター(岡山県岡山市).

4. 野井浩祐, 鈴木健治, 伊東裕介, 由淵想, 林晃敏, 辰巳砂昌弘, NASICON 電解質と Na_3PS_4 ガラス系電解質の界面抵抗評価, 第 42 回固体イオニクス討論会, 2016 年 12 月 5-7 日, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市).

5. 佐藤優太, 松山拓矢, 林晃敏, 辰巳砂昌弘, 全固体ナトリウム硫黄電池への応用に向けた硫黄-炭素正極複合体の作製, 第 57 回電池討論会, 2016 年 11 月 29 日-12 月 1 日, 幕張メッセ(千葉県千葉市).

6. 林晃敏, 辰巳砂昌弘, 全固体ナトリウム電池にむけたガラス系硫化物固体電解質の開発, 電気化学会第 382 回電池技術委員会, 2016 年 9 月 15 日, 安保ホール(愛知県名古屋市).

7. 辻 史香, 中村雄太, 谷端直人, 林晃敏, 辰巳砂昌弘, Mechanochemical Preparation of Sodium Ion Conductive $\text{Na}_{3+x}\text{PS}_4$ Glass-Ceramic Electrolytes, IUMRS-ICEM2016, 2016 年 7 月 4-8 日, Singapore (Singapore).

8. 佐藤優太, 松山拓矢, 林晃敏, 辰巳砂昌弘, 様々な炭素を用いた硫黄系正極複合体の作製と全固体ナトリウム-硫黄電池への応用, 第 18 回化学電池材料研究会ミーティング, 2016 年 6 月 14-15 日, 日本化学会館(東京都千代田区).

9. 野井浩祐, 鈴木健治, 林晃敏, 辰巳砂昌弘, 酸化物電解質 $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$ と硫化物電解質 Na_3PS_4 ガラスの界面抵抗評価, 電気化学会第 83 回大会, 2016 年 3 月 29-31 日, 大阪大学(大阪府吹田市).

10. 林晃敏, 佐藤優太, 松山拓矢, 辰巳砂昌弘, 硫黄-ケッチェンブラック正極複合体の作製と全固体ナトリウム二次電池への応用, 日本化学会第 96 春季年会, 2016 年 3 月 23-26

日, 同志社大学(京都府京田辺市).

11. 林晃敏, 辻史香, 中村雄太, 谷端直人, 辰巳砂昌弘, メカノケミカル法を用いたナトリウムイオン伝導性 $\text{Na}_{3+x}\text{PS}_4$ ガラスセラミックスの作製, 日本化学会第 96 春季年会, 2016 年 3 月 23-26 日, 同志社大学(京都府京田辺市).

12. 中村雄太, 谷端直人, 林晃敏, 辰巳砂昌弘, ナトリウムイオン伝導性 $\text{Na}_3\text{PS}_4\text{-Na}_4\text{SnS}_4$ 系ガラスセラミックスの作製と特性評価, 日本セラミックス協会 2016 年年会, 2016 年 3 月 14-16 日, 早稲田大学(東京都新宿区).

13. 鈴木健治, 野井浩祐, 林晃敏, 辰巳砂昌弘, 低融性 Na_3BO_3 ガラスを用いた NASICON の低温焼結とナトリウムイオン伝導度, 第 41 回固体イオニクス討論会, 2015 年 11 月 25-27 日, 北海道大学(北海道札幌市).

14. 林晃敏, 辰巳砂昌弘, Sulfide glass-ceramic electrolytes for all-solid-state rechargeable batteries, Crystallization 2015, 2015 年 10 月 11-14 日, 長岡グランドホテル(新潟県長岡市).

15. 林晃敏, 辰巳砂昌弘, Sulfide solid electrolytes for all-solid-state rechargeable Na batteries, ICMAT2015&IUMRS-ICA2015, 2015 年 6 月 28 日-7 月 3 日, Singapore(Singapore).

16. 林晃敏, 鈴木健治, 中村雄太, 谷端直人, 辰巳砂昌弘, メカノケミカル法を用いたナトリウムイオン伝導性 $\text{Na}_3\text{BO}_3\text{-Na}_2\text{SO}_4$ 系ガラスの作製と特性評価, 日本化学会第 95 春季年会, 2015 年 3 月 26-29 日, 日本大学(千葉県船橋市).

17. 林晃敏, 野瀬将史, 加藤敦隆, 作田敦, 辰巳砂昌弘, ナトリウムイオン伝導性 $\text{Na}_2\text{S-P}_2\text{S}_5$ 系ガラス電解質の機械的特性評価, 日本化学会第 95 春季年会, 2015 年 3 月 26-29 日, 日本大学(千葉県船橋市).

18. 中村雄太, 谷端直人, 林晃敏, 辰巳砂昌弘, ナトリウムイオン伝導性 $\text{Na}_2\text{S-P}_2\text{S}_5\text{-P}_2\text{O}_5$ 系ガラスセラミックスの作製とキャラクターゼーション, 日本セラミックス協会 2015 年年会, 2015 年 3 月 18-20 日, 岡山大学(岡山県岡山市).

19. 由淵想, 林晃敏, 辰巳砂昌弘, *N*-メチルホルムアミドを用いた Na_3PS_4 固体電解質の液相合成, 第 55 回電池討論会, 2014 年 11 月 19-21 日, 京都国際会館(京都府京都市).

20. 伊東裕介, 林晃敏, 辰巳砂昌弘, PLD 法を用いた $\text{Na}_2\text{S-P}_2\text{S}_5$ 系固体電解質薄膜の作製と

イオン伝導度, 日本セラミックス協会第 27 回秋季シンポジウム, 2014 年 9 月 9-11 日, 鹿児島大学(鹿児島県鹿児島市).

〔図書〕(計 2 件)

1. 林晃敏, 辰巳砂昌弘, 技術教育出版社, ナトリウムイオン二次電池の開発と最新技術, 2015 年, 240 (124-133).

2. 加藤敦隆, 林晃敏, 辰巳砂昌弘, 技術情報協会, 全固体電池のイオン伝導性向上技術と材料、製造プロセスの開発, 2017 年, 464 (149-156).

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www2.chem.osakafu-u.ac.jp/ohka/ohka2/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 晃敏 (HAYASHI Akitoshi)

大阪府立大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 10364027