

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05649

研究課題名(和文) 微量元素添加による粒界制御とイオニクスデバイスの効率化

研究課題名(英文) Optimum cation doping for grain boundary design and practical applications of oxyapatite ionic conductors

研究代表者

嶺重 温 (MINESHIGE, Atsushi)

兵庫県立大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00285339

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：次世代燃料電池電解質として期待されるランタンシリケートにAlまたはFeをドーブした試料の合成条件を検討し、1973 Kでの焼成により粒内抵抗を大幅に低減できることを見出した。これは格子間酸素キャリアをより多く導入できるためと考えられた。最適なドープレベルのFeドーブ試料では、同レベルのAlドーブ試料よりも粒界抵抗が大幅に低く、さらに化学的安定性も劇的に向上した。放射光マイクロビームを用いた測定から、Alドーブ試料では化学的に不安定な相が粒界に生成するのに対し、Feドーブ試料では粒界が安定化して粒界抵抗が低減できたと考えられた。以上、粒界構造の制御によりイオニクスデバイスの効率化が達成できた。

研究成果の概要(英文)：Effect of small amounts of Al or Fe-doping on conducting properties for La-excess-type lanthanum silicate was investigated. In case of high-temperature (1973 K) sintering for preparation, a grain interior resistance could be minimized. It is probably due to increase in oxygen interstitial concentration as charge carriers. In addition, there is a difference in a grain boundary resistances for Al and Fe-doping specimens, and it is revealed that Fe-doping system with optimum doping level had smaller grain boundary resistance compared with Al-doping one with the same doping level. By using X-ray diffraction measurements with synchrotron radiation microbeam at BL24XU, SPring-8, it was found that large grain boundary resistance in case of Al-doping was due to chemically unstable phase formation. On the other hand, in the case of Fe-doping, disappearance of the phase resulted in stabilization in grain boundary structure with reducing grain boundary resistance.

研究分野：イオン伝導体

キーワード：酸素過剰型酸化物 酸化物イオン伝導体 粒界 燃料電池

1. 研究開始当初の背景

燃料電池は環境低負荷で、災害時対応可能な分散型発電システムであり、中でもセラミックスを電解質に用いる SOFC (Solid oxide fuel cell) は、白金などの貴金属触媒が不要なこと、燃料多様性を有することから注目されている。しかしその大幅普及に向けては材料のイオン伝導度の格段の向上が必要である。図 1 に示す六方晶アパタイト型イオン伝導体であるランタンシリケート (LSO, 組成式; $\text{La}_{0.33+x}\text{Si}_6\text{O}_{26+1.5x}$) は、既存材料を凌駕する酸化イオン (O^{2-}) 伝導度を示すことに加え、伝導度の温度依存性が小さいことが特徴である。即ち作動温度を 600°C 以下に低減した高効率、高信頼性 SOFC の実現を可能とする電解質と我々は位置付けている。

LSO のイオン伝導度は適度な La 導入 (x) および四面体位置の Si へのわずかな置換固溶 (y) によって向上する。しかし、そのような高伝導性の La 過剰型 LSO ($x \sim 0.67$) は化学的には不安定であり、室温、大気中での保存により、緻密体が数日のうちに微粉化 (自己崩壊) する問題がある。一方、我々はこの La 過剰型 LSO へ極微量の Fe を添加することで材料のイオン伝導性を損なうことなく微粉化を完全に抑制できることを既に見出している。このような Fe 添加効果は学術的にも極めて興味深い。しかしながら添加した Fe は微量であり、その存在状態や分布を知ることは困難なため、安定化機構の解明は未だ為されていない。当該技術の確立のためには粒界構造の解析は不可避である。即ち、LSO のイオン伝導性、ならびに安定性向上の観点から、粒界の構造や粒界偏析物の存在を明らかにすることは極めて重要である。

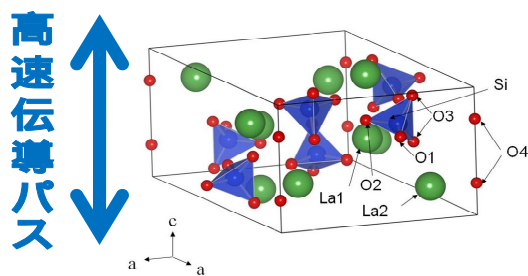


図 1. LSO の結晶構造.

2. 研究の目的

大型放射光施設 SPring-8 の兵庫県ビームライン (兵庫 BL) BL24XU を活用し、マイクロビームによる蛍光 X 線 (XRF) マッピング、X 線吸収端近傍構造 (XANES) 測定、透過 X 線回折 (XRD) 測定を実施し、開発した Fe 添加 LSO において安定性を向上させている Fe の役割解明を目指す。そこで、種々の組成 x (La 量) y (Fe 量) および焼成温度 (T_f) で作製した LSO における Fe の分布状態や粒界偏析相をこれら微小領域分析によって調

べた。また、各 LSO の種々の温度での交流インピーダンス測定を行って、材料の粒内、粒界におけるイオン輸送に伴う抵抗を明らかにする。以上より、LSO における粒内・粒界抵抗の支配因子を解明し、イオニクスデバイス応用に適した材料合成条件の最適化を行う。

3. 研究の方法

(1) 全伝導度並びに粒内・粒界抵抗の評価

当初、極微量の Fe の添加による安定化効果を探るため、極微量 Fe 添加 LSO 試料について放射光を用いた各種測定を行ったが、検出限界のために解析は困難であった。そこで本研究では、Si サイトへの置換 (ドーピング) 元素として Al および Fe を選択し、その比較を行うことで Fe 添加効果を調べることとした。これは、デバイス応用に向けた実用材料としては Si サイトへカチオンドーピングを施した高伝導性試料が必要である、ということに加え、ドーピングで導入した Fe は極微量添加した Fe と同様、粒界構造に何らかの変化をもたらすと期待されること、さらに添加量を多くすることで粒界偏析物の検出確率を向上できるであろうと予測したためである。そこで、組成 $\text{La}_{0.33+x}(\text{Si}_{6-y}\text{M}_y)\text{O}_{26+1.5x-0.5y}$ ($M = \text{Al}, \text{Fe}, 0.17 \leq x \leq 0.67, 0.2 \leq y \leq 1.0$) をもつ LSO 試料を固相反応法によって系統的に合成した。原料は $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 SiO_2 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 Fe_2O_3 とし、空气中 1673 K での煅焼の後、焼成温度 (T_f) を $1873 \sim 2023 \text{ K}$ として本焼し合成した。組成ならびに T_f の異なる試料の伝導度を直流ならびに交流 4 端子法により $573 \sim 1073 \text{ K}$ において評価した。交流法で得られるナイキストプロットを基に、フィッティングにより粒内および粒界抵抗に分離した評価を行った。

(2) 粒界構造解析による Fe の安定化機構解明

SPring-8、BL24XU において、ゾーンプレートを用いて数百 nm ~ $10 \mu\text{m}$ のサイズに集光した放射光を試料に照射し、位置をスキャンしながら透過法による高位置分解能 XRF、XRD 同時計測を行った。これにより粒界における元素分布と偏析相の有無を調べ、相関係の評価を行った。以上により、粒界イオン伝導特性との対応から粒界構造や粒界偏析相について議論し、Fe 添加が構造に与える影響の解明と、あわせて低作動温度で支配的となる粒界抵抗を抑制して機能を発現する材料開発を目指した。なお放射光 X 線を用いる本手法は、通常用いられる TEM (透過型電子顕微鏡) 法と比べ、試料調製が容易であり、同一試料の全体および狙った部分の組成、結晶相を対比しながら粒界偏析物の検出、同定が行えること、さらに大気下での測定が可能である等の利点を有している。

4. 研究成果

(1) 伝導度、安定性と相関係

図 2 に、ドーパント (M)、ドーパ濃度 (y)、焼成温度 (T_f) を異にする LSO ($\text{La}_{10}(\text{Si}_{6-3y}M_y)\text{O}_{27-0.5y}$, $M = \text{Al}, \text{Fe}$, $0.2 \leq y \leq 1.0$, $1773 \text{ K} \leq T_f \leq 2023 \text{ K}$) の直流四端子法で評価した全伝導度を示す。全伝導度はドーパ濃度および焼成温度の増加とともに増加した。まず $M = \text{Fe}$ 、 $T_f = 1973 \text{ K}$ の試料の伝導度を比較すると、ドーパ量 $y \geq 0.5$ では $y = 0.2$ に比べ伝導度が上昇していること、 $y = 0.5$ と $y = 1.0$ ではほぼ同程度の伝導度であるが低温域では $y = 0.5$ の方が高伝導性であることが分かった。 $y = 0.5$ について焼成温度依存性を見ると、 $T_f \geq 1973 \text{ K}$ では $T_f = 1873 \text{ K}$ に比べ伝導度が高く、 $T_f = 1973 \text{ K}$ と $T_f = 2023 \text{ K}$ では大差がないことから、 $y = 0.5$ 、 $T_f = 1973 \text{ K}$ とすることで最適試料が得られることが分かった。この組成では 1073 K において $3.6 \times 10^{-2} \text{ S cm}^{-1}$ 、 873 K において $6.9 \times 10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$ の伝導度を示した。次に $M = \text{Al}$ 試料についての伝導度を比較すると、やはり $T_f = 1973 \text{ K}$ とすることで伝導度の向上が見られ、 873 K 以下の温度領域においては Fe ドープ試料よりも高伝導度を示した。Al、Fe 等によるドーピング効果について我々は、Si サイトへの M^{3+} の置換によって SiO_4 四面体内に弱い結合をもつ酸素が生成し、これが c 軸の高速伝導パスに垂直な方向の伝導を切り拓くための考えを提案している[1]。

一方、試料の化学的安定性に関しては、 $y = 0.5$ の Fe ドープ試料において、 $T_f \leq 1973 \text{ K}$ では安定性に問題がなかったのに対し、 $T_f = 2023 \text{ K}$ の試料は化学的に不安定であった。初期には $T_f = 1973 \text{ K}$ と同等の伝導度を示したこの試料の伝導度は経時劣化し、数日後には試料が崩壊した。また Al ドープ試料においては、 $T_f = 1873 \text{ K}$ では安定性に問題がなかったが、 $T_f = 1973 \text{ K}$ では化学的に不安定であり、伝導度の経時劣化の末、試料崩壊を起こした。以上より、 $y = 0.5$ 、 $T_f = 1973 \text{ K}$ の Fe ドープ試料は伝導度が高く、長期的な化学的安定性も持つことから、デバイスに用いる電解質としては最適であることが分かった。

化学的安定性が焼成温度によって異なった理由を調べるため、相関係の評価を行った。 $M = \text{Fe}$ 、 $y = 0.5$ 試料で T_f を変えた試料の XRD パターンを図 3 に示す。この組成では、 $T_f = 1873 \text{ K}$ では La_2SiO_5 相が、 $T_f = 2023 \text{ K}$ では六方晶 La_2O_3 が共存し、 $T_f = 1973 \text{ K}$ では LSO 単相領域であることが確かめられた。 $M = \text{Fe}$ 、 $T_f = 1873 \text{ K}$ で y を変えた試料の XRD パターンにおいては、 $y = 0.2$ 、 0.5 では不純物相として La_2SiO_5 相が確認されたが、 $y =$

1.0 は LSO の単相領域にあった。 La_2SiO_5 相の XRD ピーク強度は y の増加に伴い減少する傾向にあった。 $M = \text{Fe}$ 、 $T_f = 1973 \text{ K}$ では、 $y = 0.5$ は LSO 単相であったが $y = 0.2$ および 1.0 では不純物相として六方晶 La_2O_3 が確認された

La_2O_3 - SiO_2 二元系状態図によれば La_2SiO_5 相は LSO 相に隣接する La_2O_3 リッチ側の相である [2]。上述のように、LSO の La 組成を可能な限り増加させることが伝導度の向上をもたらすが、La 活量が LSO の許容最大レベルを超えるとこの相の析出が見られる。しかしこの相は LSO 粒間のイオン伝導性を阻害するため、一定量以上の析出は伝導性の面で望ましくない。 $T_f = 1973 \text{ K}$ において伝導度が急激に増加するのは、焼成温度が La_2SiO_5 の融点を上回ったために、 La_2SiO_5 相による伝導阻害が見られなかったためと考えられる。これは LSO が、 La_2SiO_5 よりもより La 活量の高い酸化物である La_2O_3 との平衡関係に移行することにより、結果的により多くの酸化物イオンを取り込むことができる (La 固溶範囲が広がった) ためと考えられる。本系は酸素過剰型酸化物であり、過剰な酸素が格子間酸素として導入さ

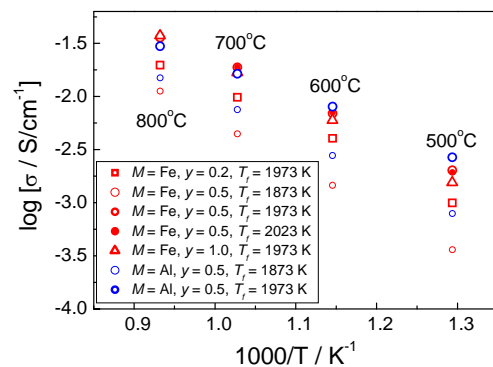


図 2. ドープ LSO の伝導度の温度依存性。

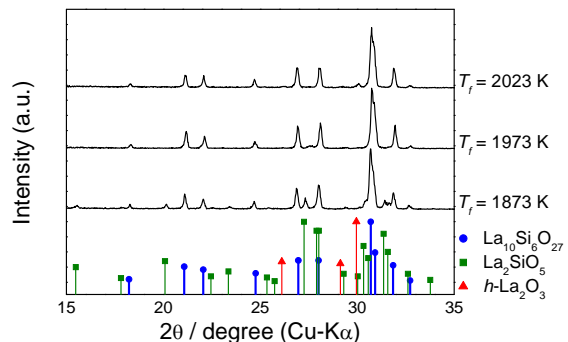


図 3. 焼成温度の異なる Fe ドープ LSO の XRD パターン

れることにより、結晶の c 軸方向の伝導度が向上する。しかし、 La_2O_3 の存在は粒界の化学的不安定性の原因となっており、伝導度の経時劣化と試料崩壊を招いた。一定時間経過後の劣化試料の XRD パターンおよびラマンスペクトルを詳しく見ると、前者では $\text{La}(\text{OH})_3$ 相が、後者では OH 基が観測されることから、六方晶 La_2O_3 が $\text{La}(\text{OH})_3$ に変化し、その過程で試料が自己崩壊することが分かった。従って、自己崩壊の原因は不純物相の六方晶 La_2O_3 が大気中の水分等と反応し、 $\text{La}(\text{OH})_3$ に変化する際の体積膨張による粒界破壊であると考えられた。

一方、 $T_f=1973\text{ K}$ 、 $y=0.5$ 組成では La_2O_3 が存在せず LSO の単相領域にあった。そのため、この条件で作製した試料は高いイオン伝導性と化学的安定性を兼備することが出来た。 $y=0.5$ 組成でのみ、 $T_f=1973\text{ K}$ であっても単相で、化学的に安定であったが、これはこのドーピングレベルにおいて Fe の存在量が最も適切であったためと思われる。以上より、適量の Fe 添加によって安定化効果がもたらされたということが明らかとなった。この効果は Al ドープ試料では見られず、Al ドープ試料では $T_f=1973\text{ K}$ 、 $y=0.5$ であっても六方晶 La_2O_3 が共存した。これが極微量の Fe を添加した際に見られた安定化効果と同じ現象であると推測された。即ち、当初の予測の通り添加 Fe によって何らかの安定化効果が発現したものと考えられた。

(2) Fe の安定化機構解明

図 4 に $T_f=1973\text{ K}$ 、 $M=\text{Fe}$ 、 $y=0.5$ 試料の SEM 像ならびに Fe の EDX マッピングを示す。図から、試料内で Fe はほぼ全体的に均一に存在するが、一部で濃集領域が明確に観察された。このような領域はほぼ 6 回の同様の観測のうち 1 回の割合で観測され、その領域は $4 \times 8\ \mu\text{m}^2$ 程度の大きさであった。

この濃集領域における Fe の存在状態を明らかにするため、 $1\ \mu\text{m}$ の放射光マイクロビームを用いた XRD (SR- μ XRD) 測定を実施した。その際に、まずは XRF マッピングによって Fe 濃集位置を探しながら、少しずつ領域とステップ幅を狭めて SR- μ XRD 測定を行った。図 5 に $T_f=1973\text{ K}$ 、 $M=\text{Fe}$ 、 $y=0.5$ 試料の $75 \times 75\ \mu\text{m}^2$ 領域で観測した回折像を動径方向に円周積算して得られた SR- μ XRD パターンを示す。なお回折角は Cu-K α 線のスケールに変換してある。この図には、Cu 管球を用いたラボ XRD 装置で得られた XRD パターンもあわせて示す。この図より、ラボ XRD では単相に見えたが、SR- μ XRD においては、 $2\theta=29.07^\circ$ をはじめとする LSO に帰属されないいくつかのピークが確認された。これらは La_2O_3 、 $\text{La}(\text{OH})_3$ 、 La_2SiO_5 のピーク位置には該当せず、新たな粒界偏析相のピークであると考えられた。これらの位置に回折ピークを持つ物質をデータベースから探したところ、

La_3FeO_6 が最も確からしいと判断された。さらに XRD 各ピークのマッピング像を表示させたところ、LSO 粒子は約 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 程度の大きさであり、 La_3FeO_6 相は LSO 粒子間に存在することが分かった。以上のことより、ドーピングした Fe の大部分は Si 位置を置換するが、一部は LSO に固溶しきれず濃集した La とともに LSO 粒子間に La_3FeO_6 相を形成することが分かった。 La_3FeO_6 相の生成領域は全体から見るとわずかであり、ラボ XRD では検出できなかったが、Fe 濃集部に絞った

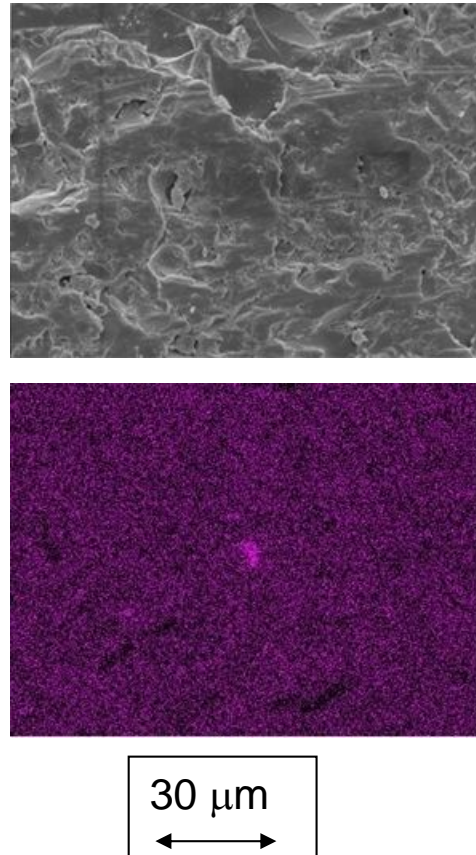


図 4. Fe ドープ LSO の SEM 像(上)と EDX による Fe マッピング(下)の一例。

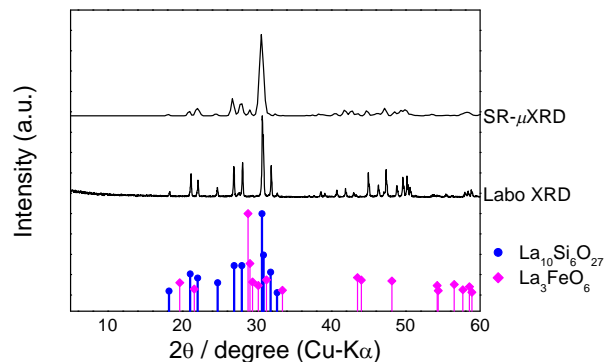


図 5. Fe ドープ LSO のラボ XRD と SR- μ XRD の比較。

SR- μ XRD 測定を行うことで検出と同定が行えた。このように本研究で確立した手法は、微量の第二相の検出に非常に有効であることが示された。一方、 $y=1.0$ で同様の測定を行ったところ、 La_3FeO_6 相は確認されず、不純物として六方晶 La_2O_3 のみが確認された。この組成は、後に自己崩壊を示したことから、試料が安定化するためには六方晶 La_2O_3 の消滅と La_3FeO_6 相の存在が必要であると考えられた。 La_3FeO_6 相の存在は粒界を安定化させ、化学的安定性向上に繋がったと考えられた。よって、イオン伝導性の向上の観点から、LSO の La 活量をなるべく高めることが望ましいが、そのような試料では粒界に六方晶 La_2O_3 相が析出しやすい。 La_2O_3 相は大気中の水分等と反応し、材料の化学的安定性を低下させるが、添加した適切量の Fe がこの相と反応して La_3FeO_6 相を生成することで粒界を安定化していることが本研究によりはじめて明らかとなった。以上のように、適切量の Fe ドーピングにより高いイオン伝導性と化学的安定性を備えた電解質の作製に成功した。

(3) 粒内・粒界抵抗分離評価と支配因子解明

試料の交流インピーダンス測定を行い、得られたナイキストプロットから粒内 (g_i) 抵抗、および粒界 (g_b) 抵抗を分離評価した。粒界抵抗と見なした円弧の容量成分は約 10^{-9} F であった。図 6-8 に $T_f=1873$ K, $M=\text{Fe}$, $y=0.5$ 試料, $T_f=1973$ K, $M=\text{Al}$, $y=0.5$ 試料, $T_f=1973$ K, $M=\text{Fe}$, $y=0.5$ 試料の粒内、粒界及び全伝導度を示す。この図には図 2 に示した直流法で評価した全伝導度も併せて示すが、直流および交流法で得られた全伝導度は良く一致した。粒内伝導度の活性化エネルギーに着目すると、 $0.6\sim 0.7$ eV であった。 $M=\text{Fe}$ における比較では、 $T_f=1873$ K の際は 0.66 ± 0.03 eV、 $T_f=1973$ K の際は 0.632 ± 0.007 eV であった。試料の相対密度はそれぞれ 94.7%、および 95.2%であったため、後者では固溶限拡張によりより多くの格子間酸素が導入できたことが原因と考えられた。

また全ての試料に共通して、およそ 773 K 以下の温度領域では全伝導度が粒界伝導度に支配され、高温領域で成立する直線から外れ、温度低下とともに伝導度は大きく低下する傾向が見られた。粒界伝導度の値は 1073 K においては各試料でほぼ等しかったが、各試料の粒界伝導度の差は温度低下とともに大きくなった。573 K において粒界伝導度は、 $T_f=1873$ K, $M=\text{Fe}$, $y=0.5$ 試料で 5.0×10^{-6} S cm^{-1} であり、 $T_f=1973$ K のそれ (4.5×10^{-5} S cm^{-1}) よりもおよそ一桁低い値であった。前者の粒界伝導度の活性化エネルギーは 1.21 ± 0.05 eV であり、後者 (1.01 ± 0.04 eV) よりも大きかった。これは粒界におけるプロッキング効果の存在を示しており、粒界伝導度

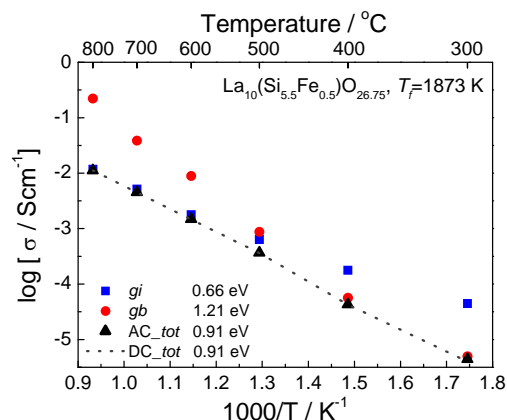


図 6. Fe ドープ LSO ($T_f=1873$ K) の粒内、粒界、全伝導度プロット。

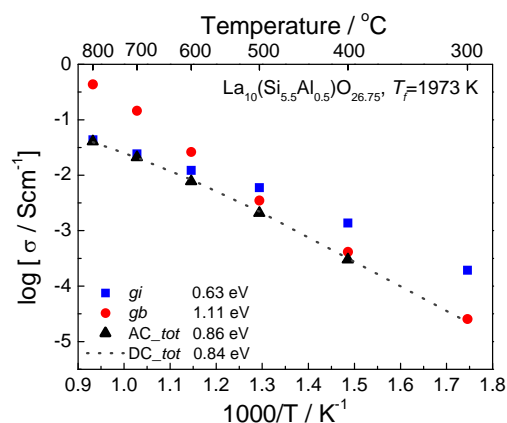


図 7. Al ドープ LSO ($T_f=1973$ K) の粒内、粒界、全伝導度プロット。

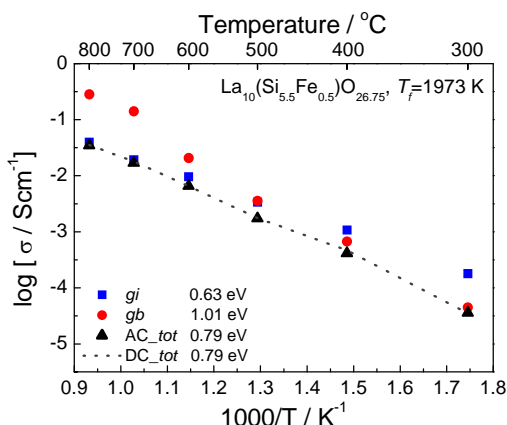


図 8. Fe ドープ LSO ($T_f=1973$ K) の粒内、粒界、全伝導度プロット。

は上述の共存する不純物相の影響を強く受けると考えられた。即ち、中低温領域において粒界偏析相の種類が粒界抵抗値を支配していると考えられた。 $T_f=1873\text{ K}$ 、 $M=\text{Fe}$ 、 $y=0.5$ 試料では La_2SiO_5 相の存在により全伝導度の活性化エネルギーをも増大させ、全伝導度を低下させていると考えられた。 $T_f=1973\text{ K}$ 、 $M=\text{Al}$ 、 $y=0.5$ 試料では、六方晶 La_2O_3 相の存在により、粒界伝導度の活性化エネルギーは $1.11\pm 0.03\text{ eV}$ であった。一方、 $T_f=1973\text{ K}$ 、 $M=\text{Fe}$ 、 $y=0.5$ 試料では、 La_3FeO_6 相がわずかに存在するが、この場合は粒界伝導度の活性化エネルギーは比較的低い値となった。したがって、粒界に存在する不純物相によって、粒界伝導度やその温度依存性が大きく異なることが明らかとなった。 $T_f=1973\text{ K}$ 、 $M=\text{Fe}$ 、 $y=0.5$ 試料では、 873 K において既存電解質の YSZ よりも 1 桁高いイオン伝導度を示すため、中温型 SOFC などのイオニクスデバイスの電解質材料として十分利用可能であると結論付けられた。

<引用文献>

1. T. Funahashi, A. Mineshige, H. Yoshioka, K. Kobayashi, Y. Matsushita, Y. Katsuya, M. Tanaka, O. Sakata, and T. Yazawa, *Solid State Ionics*, 289 (2016) 106.
2. D. Mazza and S. Ronchetti, *Mater. Res. Bull.* 34 [9] (1999) 1375.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

A. Mineshige, H. Hayakawa, T. Nishimoto, A. Heguri, T. Yazawa, Y. Takayama, Y. Kagoshima, H. Takano, S. Takeda, and J. Matsui, "Preparation of Lanthanum Silicate Electrolyte with High Conductivity and High Chemical Stability", *Solid State Ionics* (査読有), **319** (2018) 223.

DOI: 10.1016/j.ssi.2018.02.002

[学会発表] (計 6 件)

H. Hayakawa, A. Mineshige, and T. Yazawa, "Preparation of Highly Conductive Lanthanum Silicate Solid Electrolyte with High Chemical Stability", *International Union of Materials Research Societies - The 15th International Conference on Advanced Materials (IUMRS-ICAM2017)*. 2017 年 8 月 30 日, 京都大学吉田キャンパス (京都府京都市左京区吉田本町)

A. Mineshige, H. Xiao, H. Hayakawa, M. Kobayashi, T. Nishimoto, A. Heguri, A. Saito, T. Yazawa, and H. Yoshioka, "Oxygen-Excess-Type Solid Electrolyte Based on Lanthanum Silicate", *21st International Conference on Solid State Ionics*. 2017 年 6 月 20 日, パドヴァ (イタリア)

H. Hayakawa, A. Mineshige, T. Nishimoto, A.

Heguri, T. Yazawa, Y. Takayama, Y. Kagoshima, H. Takano, S. Takeda, and J. Matsui, "Preparation of Lanthanum Silicate Electrolyte with High Conductivity and High Chemical Stability", *21st International Conference on Solid State Ionics*. 2017 年 6 月 19 日, パドヴァ (イタリア)

嶺重 温, 早川 光, 西本 琢磨, 平郡 章絵, 矢澤 哲夫, "ランタンシリケート固体電解質の伝導特性と化学的安定性", 第 26 回日本 MRS 年次大会. 2016 年 12 月 19 日, 横浜市開港記念会館 (神奈川県横浜市中区日本大通)

早川 光, 嶺重 温, 西本 琢磨, 平郡 章絵, 矢澤 哲夫, 籠島 靖, 高野 秀和, 竹田 晋吾, 吉岡 秀樹, "ランタンシリケート系電解質の粒界構造観察", 電気化学会第 83 回大会. 2016 年 3 月 29 日, 大阪大学吹田キャンパス (大阪府吹田市山田丘)

A. Mineshige, T. Nishimoto, A. Heguri, H. Hayakawa, and T. Yazawa, "Electrical properties of lanthanum silicate-based oxygen-excess-type ionic conductors", *Electronic Materials and Applications 2016 (EMA2016)*, American Ceramic Society (ACerS) Meetings. 2016 年 1 月 21 日, オーランド (アメリカ)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

嶺重 温 (MINESHIGE, Atsushi)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 00285339