固体酸化物形燃料電池における電極微構造の最適化

Development of a Geometrical Model for Optimizing Porous Anode Microstructure of Solid Oxide Fuel Cells

06110

研究代表者 愛知工科大学工学部 教授 森 英 利* Hidetoshi Mori

(*現在 富山大学大学院 理工学研究部 教授)

A geometrical model has been developed to optimize the microstructure of porous composite anode electrodes of solid oxide fuel cells. The model takes into account the coordination number theory applied to a random packing of binary particle mixture, together with the percolation theory introduced to provide percolation paths for electrons and ions. The predictions confirm that the effective triple-phase-boundary (TPB) index deduced from a geometric analysis depends on the pore size as well as the characteristic parameters including particle radius ratio, contact angle and composition ratio. The influence of pore size on the effective TPB index is particularly conspicuous, suggesting that the pore size optimization should improve the effective TPB index significantly. The model has also been applied to estimate polarization performance of Ni/YSZ anode electrode, taking into account the electrochemical reaction according to the Butler-Volmer equation along the TPB active sites as well as electronic, ionic, and gas transport phenomena. The calculations confirm that the polarization distribution along the anode becomes uniform with an increase in the anode thickness when the electric/ionic particle size ratio is unity. When the anode thickness is larger than is required, a large part of the electrode does not supply any electrical current. When the anode thickness is smaller than $20\text{ }\mu\text{m}$, in contrast, the result of partial hydrogen pressure distribution indicates that neglecting the mass transfer phenomena in the anode micro-pores would provide an analytical solution of the Butler-Volmer form.

研究目的

固体酸化物型燃料電池の性能は、三相界面における電荷移動速度、有効伝導度、および電極細孔内でのガス拡散速度に起因する各種の分極特性に支配され、これら分極特性は電極の微細構造に大きく影響される。本研究では、アノード極の分極特性向上に焦点を絞り、その微細構造の最適設計指針を得ることを目的とする。アノード極で起こる現象は、(1) 三相界面への固体電解質からの酸素イオンの移動、および細孔を通し

での燃料ガスの移動、(2) 三相界面での電気化学反応、(3) 反応で生じた電子の外部負荷への移動、および反応生成物の電極外部への排出、に要約される。そのため本研究では、まず電子と酸素イオンの移動を考慮した電子伝導体とイオン伝導体粒子のパーコレーション構造をモデル化し、さらに燃料ガス成分の細孔内拡散および三相界面での反応モデルを構築し、電極特性を理論的に解析する。

研究成果の概要

1. 緒言

固体酸化物形燃料電池のアノード極には、電気化学反応の活性サイト向上の観点よりNi/YSZ多孔質電極が多く使用されている^{1, 2)}。一般に多孔質電極の分極特性は、その内部微構造に大きく依存するため、電子、酸素イオン、燃料H₂と反応生成物H₂Oをそれぞれ輸送する媒体としてのNi, YSZおよび空隙の三相構造を適切に設計することが必要である。これら三相が介する界面は三相界面 (TPB: Triple-Phase-Boundary) と呼ばれ、それぞれが輸送する活性種に対して輸送経路が連続した場合に限り、電気化学反応の活性サイトになりうる (Fig. 1参照)。したがってアノード極で進行する酸化反応の速度はTPB長さに強く依存することとなり、TPB長さの制御が工学上の検討課題となっている^{3, 4)}。

多孔質Ni/YSZ系アノード電極が本質的には二成分系粒子のランダム充填で形成されることを考慮すれば、TPB長さは充填の微構造に依存することになる。したがって適切な微構造モデルによってTPB長さを支配する粒子サイズおよびその比、各成分の体積分率、空隙率、細孔径、接触角などのパラメータを粉体工学的視点より解析する必要があるが、これらに関する研究は極めて少ないといえる⁵⁾。一方TPB長さのみならず、TPB近傍の領域も、H₂分子の吸着や表面拡散などの機構によって反応速度に影響を及ぼすことが実証されており⁶⁾、これらを考慮した微構造モデルの構築が必要となる。そこで本研究では、二成分系粒子のランダム充填を用いた幾何学的微構造モデルを提案し、

Fig. 1 Scheme of solid oxide fuel cell porous anode composed of electronic and ionic conducting particles, and possible path for hydrogen oxidation on the electrochemically active site.

TPB長さに代わる指標として有効TPB indexを導出した。この幾何学的モデルは電子やイオンの浸透経路を確率的に表現する浸透理論および各成分の配位数理論を考慮しており、とくに有効TPB indexに及ぼす粒子サイズやその比、各成分の体積分率、空隙率、細孔径などの幾何学的パラメータの影響を容易に考察することができる。

アノード極内で起こる現象は、(1) 電解質からYSZ粒子を介しての反応サイトまでの酸素イオンの輸送および空隙を経由するアノード表面から反応サイトまでの反応成分H₂の輸送、(2) 反応サイトでの電気化学反応 (酸化反応)、ならびに (3) 反応サイトから集電板までのNi粒子を介しての電子の輸送および反応サイトからアノード表面までの空隙を経由する反応生成物H₂Oの輸送、に集約される。したがって、これらの現象はアノードが本質的に電子伝導体粒子 (ここではNi) とイオン伝導体粒子 (ここではYSZ) およびH₂やH₂Oが適切に輸送される細孔のモデル構成に基づいて定式化することが可能である。本研究では、電子、イオン、ガス成分の輸送およびTPB活性サイトに沿って起こる電気化学反応の機構にButler-Volmerの関係式を適用し、Ni/YSZ系アノードの分極特性を詳細に考察した。

2. 幾何学モデルと有効TPB index

Fig. 1のような二成分系粒子のランダム充填によりアノード極が構成されていると考え、以下ではすべて単位体積あたりのパラメータを使用する。ここでは有効TPB indexを、TPB長さと電解質界面から集電板まで各成分がパーコレートしている浸透クラスターに属する粒子表面積の両者に依存するとして、次式で定義することとする⁷⁾。

$$L_{TPB} \propto (2\pi r_{el} \sin \theta) N_{TPB} A_p \quad (1)$$

ここで r_{el} はel-粒子 (電子伝導体粒子) 径、 θ はel-粒子とio-粒子 (イオン伝導体粒子) との接触角、 A_p は浸透クラスターに属する粒子の表面積、また N_{TPB} は単位体積あたりに存在するTPB数で

$$N_{TPB} = n_t n_{el} n_{io} \frac{z_{el} z_{io}}{z} p_{el} p_{io} \quad (2)$$

で与えられる。式中の n_t は全粒子数、 $z (= 6)$ は平均配位数、 z_{el} (または z_{io}) はel-粒子 (またはio-粒子) の平均配位数、 p_{el} (または p_{io}) はel-粒子 (またはio-

粒子)が浸透クラスターを形成する確率を表している。焼成によって接触点で消失する各粒子の表面積を考慮すれば、 A_p は

$$A_p = 4\pi r_{el}^2 n_t (n_{el} p_{el} + \alpha^2 n_{io} p_{io}) - 2\pi r_{el}^2 n_t \times \left\{ (1 - \cos \theta) n_{el} z_{el} p_{el} + \alpha^2 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\alpha^2}} \right) n_{io} z_{io} p_{io} \right\} \quad (3)$$

で与えられる。ここで $a = r_{io} / r_{el}$ である。

第三の相である空隙に関しては、二成分系粒子と同様にある半径 r_p の球形空隙が充填されていると考え、その総表面積が全粒子の総表面積に等しいと仮定すれば、Eq. (1) は最終的に次式で与えられる^{5, 7)}。

$$\begin{aligned} L_{TPB} &\propto (2\pi r_{el} \sin \theta) N_{TPB} A_p \\ &= \sin \theta \frac{\frac{3(1-\varepsilon)}{r_{el}} \left(\frac{k_1}{k_2} \right) - \frac{3\varepsilon}{r_p}}{k_3 r_{el}} n_{el} n_{io} \frac{z_{el} z_{io}}{z} \\ &\quad \times p_{el} p_{io} \frac{3\varepsilon}{r_p} \left(\frac{2k_4 - k_5}{2k_1 - k_3} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで

$$k_1 = n_{el} + \alpha^2 n_{io}$$

$$k_2 = n_{el} + \alpha^3 n_{io}$$

$$k_3 = (1 - \cos \theta) n_{el} z_{el} + \alpha^2 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\alpha^2}} \right) n_{io} z_{io}$$

$$k_4 = n_{el} p_{el} + \alpha^2 n_{io} p_{io} \quad (5)$$

$$k_5 = (1 - \cos \theta) n_{el} z_{el} p_{el} + \alpha^2 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\alpha^2}} \right) n_{io} z_{io} p_{io}$$

である。

Fig. 2には理論的に算出された浸透限界を、粒径比 a と各成分の体積分率 f_{el} および f_{io} との関係として示した。実線は各成分が浸透クラスターを形成する限界の体積分率を表しており、両実線で囲まれた領域でのみ、両成分が同時に浸透クラスターを形成することが可能となる。図中のデータは限界値を求めた文献値⁸⁾であり、理論値とのよい一致が確認できる。

$r_{el} = 0.1 \mu\text{m}$, $\theta = 5^\circ$, $\varepsilon = 0.4$ の場合の有効TPB index L_{TPB} 、粒径比 a 、 el -粒子体積分率 f_{el} の関係をFig. 3に示す。図より L_{TPB} は a が減少するにつれて大きく増加し、浸透確率 $p = 0$ で $L_{TPB} = 0$ が確認される。また $p = 0$ 以外では各 a 値で最大値が存在しており、例えば $a = 1$ の場合は $f_{el} = f_{io} = 0.5$ で最大となる。

Fig. 2 Composition of the percolation thresholds of el- and io-particles as a function of the particles radius ratio.

Fig. 3 Relationship between the effective TPB index vs. the volume fraction of el-particles and the particle radius ratio when the el-particle radius, porosity, and contact angle are set at $0.1 \mu\text{m}$, 0.4 , and 5° .

有効TPB indexと細孔径 r_p との関係を考察するため、 $r_{el} = 0.1 \mu\text{m}$, $\theta = 5^\circ$, $f_{el} = f_{io} = 0.5$ の場合の計算例をFig. 4に示す。この条件下で両成分が浸透クラスターを形成するのはFig. 2より $a = 0.417 - 2.40$ である。 L_{TPB} は r_p の減少に伴って指数関数的に増加し、最

Fig. 4 Relationship between the effective TPB index vs. pore size and the particle radius ratio when the volume fraction of el- and io-particles are $f_{el} = f_{io} = 0.5$, and the other parameters are the same as shown in Fig. 3.

大値を示したあと急激な減少に転ずる傾向がみられる。図の条件下では $\alpha = 0.722$, $r_p = 0.112 \mu\text{m}$ のとき, L_{TPB} は最大となっている。いくつかの α 値に対して L_{TPB} と r_p の依存性を調べた結果を Fig. 5 に示した。 L_{TPB} を最大にする細孔径は α の増加に伴って少しずつ増加する傾向が確認される。最適な細孔径 r_p^{opt} は

$$\frac{\partial (L_{TPB})}{\partial r_p} = 0 \quad (6)$$

より

$$r_p = \frac{2\varepsilon}{1-\varepsilon} \left(\frac{k_2}{k_1} \right) r_{el} \quad (7)$$

となり, 例えば $\varepsilon = 0.4$, $f_{el} = f_{io} = 0.5$ を代入すれば $r_p^{\text{opt}}/r_{el} = 1.78$ ($\alpha = 2$), 1.33 ($\alpha = 1$), 1.12 ($\alpha = 0.722$), 0.89 ($\alpha = 0.5$) を得ることができる。図より $r_p < r_p^{\text{opt}}$ では急激に L_{TPB} が減少しており, これに比して減少割合が緩やかな $r_p > r_p^{\text{opt}}$ 側に細孔径を制御する方が, 電極の設計上より安全策であるといえる。

Fig. 5 Dependency of the pore size on the effective TPB index, calculated in correspondence to the various α values; the optimal pore size to maximize the effective TPB index exists for each α value.

Eq. (7) を使用すれば, 最適化された $(L_{TPB})_{\text{opt}}$ は

$$(L_{TPB})_{\text{opt}} = \frac{9 \sin \theta}{4k_3} \left(\frac{k_1}{k_2} \right)^2 \frac{(1-\varepsilon)^2}{r_{el}^3} n_{el} n_{io} \frac{z_{el} z_{io}}{z} \times p_{el} p_{io} \left(\frac{2k_4 - k_5}{2k_1 - k_3} \right) \quad (8)$$

で表される。細孔径の制御が有効TPB indexに大きな影響を及ぼすことを確かめるために, Eq. (1) と Eq. (8) の比較を Fig. 6 に示す。細孔径の最適化によって L_{TPB} が大きく改善され, またその増加割合も α 値に大きく依存していることが分かる。

3. Ni/YSZ系アノード電極の分極特性

前項で考察した二成分系粒子のランダム充填に基づく三相界面モデルを用いて電流密度や過電圧などの予測を行い, 電極空隙率や電極構成粒子サイズ比やその

Fig. 6 Dependency of the pore size optimization on the effective TPB index, calculated in correspondence to the various α values.

構成比、粒子接触角度の影響を検討した。有効三相界面における電気化学反応は、単純な一段階での電荷移動反応が律速段階となる場合の電位-電流の関係を表すButler-Volmer式で記述され、また電極細孔内への反応ガス（水素）および反応生成物（水）は等モル相互拡散すると仮定すれば、定常状態における過電圧を解析する式として最終的に

$$\frac{d^2\eta}{dx^2} = (\rho_{el} + \rho_{io}) s_l i_0 \left\{ \frac{p_{H_2}}{p_{H_2}^*} \exp\left(\beta \frac{n_e F \eta}{RT}\right) - \frac{p_a - p_{H_2}}{p_a - p_{H_2}^*} \exp\left(-(1-\beta) \frac{n_e F \eta}{RT}\right) \right\}$$

$$\frac{dp_{H_2}}{dx} = -\frac{RT}{2F} \frac{i_{el}}{\left(1 - \frac{p_{H_2}}{p_a}\right) D_{H_2} + \left(\frac{p_{H_2}}{p_a}\right) D_{H_2O}} \quad (9)$$

$$\frac{di_{el}}{dx} = -s_l i_0 \left\{ \frac{p_{H_2}}{p_{H_2}^*} \exp\left(\beta \frac{n_e F \eta}{RT}\right) - \frac{p_a - p_{H_2}}{p_a - p_{H_2}^*} \exp\left(-(1-\beta) \frac{n_e F \eta}{RT}\right) \right\}$$

が得られる（導出の詳細は文献-9参照）。ここで i_{el} は電子の輸送に起因する電流密度、 s_l は単位体積あたりの有効接触面積、 i_0 は単位面積あたりに移動する電流密度、 i_0 は交換電流密度、 η は過電圧、 F はFaraday定数、 n_e は反応によって移動する電子の数、 D は拡散係数、 $*$ は反応温度における平衡濃度を表し、 β は移動係数で0.5と仮定する。これらの連立方程式を境界条件

$$(L_{TPB})_{opt} = \frac{9 \sin \theta}{4k_3} \left(\frac{k_1}{k_2} \right)^2 \frac{(1-\varepsilon)^2}{r_{el}^3} n_{el} n_{io} \frac{z_{el} z_{io}}{z} \times p_{el} p_{io} \left(\frac{2k_4 - k_5}{2k_1 - k_3} \right) \quad (10)$$

の基で解けば、電極内での過電圧分布や電流密度分布、水素分圧分布などが予測できる。なお拡散係数には、相互拡散とKnudsen拡散に基づく有効拡散係数を使用した^{10, 11)}。

Fig. 7には、電極厚さを变化させた場合の電極内過電圧分布の計算例（ $r_{el} = 0.1 \mu\text{m}$, $\theta = 15^\circ$ ）を示した。

Fig. 7 Distribution of the polarization along the anode (particle size $r_{el}=0.1 \mu\text{m}$, hydrogen humidified at 25°C , i.e. $\text{H}_2 : \text{H}_2\text{O}=96.83:3.17$).

ここで $\zeta = x/l_a$ は集電板からの無次元距離を表し、また雰囲気は大気圧下、 1000°C で、 $\text{H}_2 : \text{H}_2\text{O} = 96.83:3.17$ として計算した。電極厚さが薄いほど η 分布は一樣になる傾向が認められ、逆に厚くなると全体に過電圧分布が低く、YSZ側付近で分布曲線の傾きが大きくなる傾向が確認できる。さらに電極厚みが $150 \mu\text{m}$ の場合には、電極の約6割が電流を供給しないことも確認される。同様な条件下で計算した水素分圧の分布結果をFig. 8に示したが、電極厚さが大きくなるほど圧力低下が大きくなる傾向が確認でき、また粒径比が変化しても圧力分布に与える影響は小さいという結果が得られている。

Fig. 9には電流密度の分布を示した。すべての曲線分布が初期値 $i_{el} = 5000 \text{ A/m}^2$ に始まり、YSZ側で $i_{el} = 0 \text{ A/m}^2$ に収束する様子が確認できる。電極厚さ l_a が小さいときはほぼ直線的に変化して $i_{el} = 0 \text{ A/m}^2$ まで到達するが、 l_a が大きくなるほど ζ の増加に伴って徐々に減少率が大きくなることわかる。 $l_a = 10$ およ

Fig. 8 Distribution of the partial H_2 pressure along the anode (particle size $r_{el}=0.1 \mu\text{m}$, hydrogen humidified at 25°C , i.e. $\text{H}_2 : \text{H}_2\text{O}=96.83:3.17$).

Fig. 9 Distribution of electronic current density along the anode (particle size $r_{el}=0.1 \mu\text{m}$, hydrogen humidified at 25°C , i.e. $\text{H}_2 : \text{H}_2\text{O}=96.83 : 3.17$).

び $150\mu\text{m}$ における $\alpha = 1$ と $1/2$ の曲線形状はほぼ一致しており、粒径比が変わっても電流密度分布に与える影響は小さいといえる。

種々な粒子径および粒径比 α を変化させて計算した結果を、全過電圧 η_t と粒子径の関係として点綴した図をFig. 10に示す。ここで η_t は

$$\eta_t = (V_{\text{el}}^* - V_{\text{io}}^*) - (V_{\text{el}}(x=0) - V_{\text{io}}(x=l_a)) = \eta(l_a) - \eta(0) \quad (11)$$

で与えられ、さらに電極全体としての抵抗も $R = \eta_t / i_t$ より推算できる。図の計算では、接触角 $\theta = 5^\circ$ および 15° とした。図より $\alpha = 1$ の場合、粒子径の減少に伴い η_t が減少する傾向を示しており、過電圧の粒子径依存性が強いことが確認されるが、電極を最適化する、すなわち η_t を最小とするような粒子径は存在しないことがわかる。またFig. 11にはNi/YSZ電極の特性として、電気抵抗の逆数 $1/R$ と電極厚みとの関係を点

Fig. 10 Influence of el-particle radius on the overall electrode polarization in the case of H_2 fuel (hydrogen humidified at 25°C , i. e. H_2 : H_2O =96.83:3.17).

Fig. 11 Reciprocal electrode resistance $1/R$ is plotted as a function of the anode thickness ($r_{\text{el}}=r_{\text{io}}=0.1\mu\text{m}$, $\theta=15^\circ$).

綴した。図より $1/R$ は l_a に対して最大値を示す傾向がみられ、電子伝導体粒子の体積分率 $f_{\text{el}} = 0.37$ 、電極厚み $l_a = 60\mu\text{m}$ のとき、最適特性値として $1/R = 9.4 \times 10^4 \text{S/m}^2$ が得られた。

固体酸化物形燃料電池は高温で操作されることに起因して、他のタイプの燃料電池には無い多くの特徴を有している。その一つに燃料が H_2 に限らず、 CO などの可燃性ガスも利用できることが挙げられる。そこで供給燃料を H_2 から CO に置き換えて同様な計算を行い、過電圧の粒子径依存性について調べた結果をFig. 12に示した。図では粒径比 $\alpha = 1$ の場合には水素とほとんど変わらない傾向を見ることができるが、 $1/2$ の場合には $r_{\text{el}} = 0.1\mu\text{m}$ 近傍で過電圧が最小となる粒子径の存在が明確に確認される。 H_2 燃料と CO 燃料の大きな違いは拡散係数にあるため、細孔径における拡散挙動の違い、細孔径と拡散係数の関係を燃料系に対して適切な細孔径の存在していることが推測される。

4. まとめ

二成分系粒子のランダム充填で構成された多孔質電極で形成する三相界面TPBを適切に評価するため、各成分の浸透クラスターに属するTPB長さおよび粒子表面積の両者に依存する有効TPB indexを定義し、このindexの粒子径や粒子径比、各成分体積分率、接触角などの各種パラメータ依存性を明らかにした。その結果、(1) 粒子径比の減少に伴ってindexは増加し、最大値を与える組成比は接触角に依存して変化する、(2) 最適な細孔径は粒子径比が増加するにつれて大きくなる傾向がみられ、最適径として $r_p^{\text{opt}}/r_{\text{el}} = 1.78$ ($\alpha = 2$), 1.33 ($\alpha = 1$), 1.12 ($\alpha = 0.722$), 0.89 ($\alpha =$

Fig. 12 Influence of el-particle radius on the overall electrode polarization in the case of CO fuel (carbon oxide humidified at 25°C , i. e. CO : H_2O =96.83: 3.17).

0.5) がえられた, (3) 細孔径の最適化が有効TPB indexの向上には重要で, とくに $\alpha = 1$ 近傍で顕著である, ことなどが明らかとなった。

また三相界面での電気化学反応がButler-Volmerの関係式で与えられるとしてNi/YSZ系電極の性能予測を行い, (1) $\alpha = 1$ の場合, 電極厚みが増加するにつれて過電圧分布は一般的な分布に近づく, (2) 必要以上の厚みの電極では, 電流を供給しない部分が増加する, また (3) 電極としての抵抗の逆数は電極厚みに対して最大値を示し, 電子伝導体粒子体積分率 $f_{el} = 0.37$, 電極厚み $l_a = 60 \mu\text{m}$ のとき, 最適特性値として $1/R = 9.4 \times 10^4 \text{ S/m}^2$ が得られる, ことなどが明らかとなった。

今後の研究の見通し

燃料電池の電極微構造を, 粉体工学的考察により理論解析した例はほとんどないため, 本研究で得られた理論解析の手法およびシミュレーション結果は, 分極特性向上を目的とした電極微構造の最適化に, その設計上の重要な指針を与えることができる。また固体酸化物形燃料電池の電極は, 現在, 電子伝導体およびイオン伝導体粒子の粒子径や成分比などの重要な因子を試行錯誤的に求めているが, 本研究の遂行によって, 二成分がパーコレーション構造を形成する条件が理論的に明らかとなり, さらに電極特性も反応機構の理論解析によって明らかとなり, 最適化された電極の設計が可能になったといえる。

燃料系の違いにより最適な粒子径の存在が予測されたため, 今後は各種燃料系における最適化された電極構成粒子サイズ, 細孔径, 電極厚みの予測を行い, 実験によって得られているNi/YSZ系電極特性との比較を行う予定である。

参考文献

- 1) Brown, M., S. Primdahl and M. Mogensen, Structure/performance relations for Ni/yttria-stabilized zirconia anodes for solid oxide fuel cells, *J. Electrochem. Soc.*, **147**, 475-485 (2000).
- 2) Jiang, S.P., P.J. Callus and S.P.S. Badwal, Fabrication and performance of Ni/3 mol % Y_2O_3 - ZrO_2 cermet anodes for solid oxide fuel cells, *Solid State Ionics*, **132**, 1-14 (2000).
- 3) Chan, S.H. and Z.T. Xia, Anode micro model of solid oxide fuel cell, *J. Electrochem. Soc.*, **148**, A388-A394 (2001).
- 4) Xia, Z.T., S.H. Chan and K.A. Khor, An improved anode micro model of SOFC, *Electrochemical and Solid-State Letters*, **7**, A63-A65 (2004).
- 5) Deng, X. and A. Petric, Geometrical modeling of the triple-phase-boundary in solid oxide fuel cells, *J. Power Sources*, **140**, 297-303 (2005).
- 6) Williford, R. E., L. A. Chick, G. D. Maupin, S. P. Simner and J. W. Stevenson, Diffusion Limitations in Porous Anodes of SOFCs, *J. Electrochem. Soc.*, **150**, A1067-A1072 (2003).
- 7) Mori, H., N. Nonaka, M. Mizuno, H. Abe and M. Naito, Development of a Geometrical Model for Optimizing Porous Anode Microstructure of Solid Oxide Fuel Cells, *J. Chem. Eng. Japan*, **41** (4), 246-253 (2008).
- 8) Costamagna, P., M. Panizza, G. Cerisola and A. Barbucci, Effect of Composition on the Performance of Cermet Electrodes -Experimental and Theoretical Approach-, *Electrochim. Acta*, **47**, 1079-1089 (2002).
- 9) Mori, H. and Y. Watanabe, Micro-model and Performance of Ni/YSZ Anodes for Solid Oxide Fuel Cells, *Bull. Aichi Univ. Technol.*, **5**, 1-11 (2008).
- 10) Hines A.L. and R.N. Maddox, *Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ (1985).
- 11) Sahimi, M., *Applications of Percolation Theory*, Taylor and Francis, London (1994).

発表論文

- 1) Mori, H., N. Nonaka, M. Mizuno, H. Abe and M. Naito, Development of a Geometrical Model for Optimizing Porous Anode Microstructure of Solid Oxide Fuel Cells, *J. Chem. Eng. Japan*, **41** (4), 246-253 (2008).
- 2) Mori, H. and Y. Watanabe, Micro-model and Performance of Ni/YSZ Anodes for Solid Oxide Fuel Cells, *Bull. Aichi Univ. Technol.*, **5**, 1-11 (2008).

学会発表

- 1) Abe, J., T. Sano, T. Yamamoto, M. Mizuno, H. Mori and M. Naito, Influence of Porous Anode Microstructure on the Polarization Characteristics of Solid Oxide Fuel Cell, 2nd International Symposium on Smart Processing Technology (Nov. 27-28, 2007 Osaka Japan), Extended paper on "Smart Processing Technology", **2**, 289-292 (2008).