

平成 21 年 4 月 13 日現在

研究種目：基盤研究(B)(一般)

研究期間：2006～2008

課題番号：18350041

研究課題名(和文) ナノ電極を用いた走査型電気化学顕微鏡

研究課題名(英文) Scanning tunneling electrochemical microscope at nano-electrodes

研究代表者

青木 幸一 (AOKI KOICHI)

福井大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号 80142264

研究成果の概要：

ここで用いたナノ電極は、ナノメートルの電極活性部が溶液中に露出するよう、膜で被覆した電極である。走査型電気化学顕微鏡(SECM)では、測定基盤と端子との間に流れるファラデー電流を測定する。この研究では、2つの特徴を活かす電極作製技術を開発し、電流の測定法およびその解析法に挑戦した。ガラス被覆ナノ電極の作製に成功し、繰り返し使用が可能となり、原子像を測定可能な走査型トンネル顕微鏡にも利用できることを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	11,600,000	3,480,000	15,080,000
2007年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
総計	15,800,000	4,740,000	20,540,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：複合化学・分析化学

キーワード：(1) 走査プローブ顕微鏡、(2) ナノ材料、(3) 表面界面物性、(4) メゾスコピック系、(5) 可視化、(6) 電気化学測定、(7) ボルタンメトリ

1. 研究開始当初の背景

ナノ電極は、ナノメートルの大きさが溶液中に露出するよう、電気化学用電極を高分子膜で被覆したものである。ナノ電極の分析化学的特徴は、(1) ナノ物質の異常性を検出器自身に持たせること、(2) 高い電流密度のために電流分析感度が高いこと、(3) 高い位置分解能、すなわちナノメートルの領域における局所分析が可能であることなどが挙げられる。一方、走査型電気化学顕微鏡(SECM)では、STMが測定基盤と端子との間に流れるトンネル電流を測定する代わりに、両間に流れるファラデー電流を測定する。それゆえSECMはファラデー電流に関与する表面分析の情報を与える。従来のSECMの電極は小さ

くても数マイクロメートル以上あるため、SEMの分解能以下であることはもちろんのこと、半導体耐食技術で要求される空間分解能さえ、満たすことができなかった。この申請研究では、特徴(2)と(3)をSECMに活かせるナノ電極作製技術を開発し、電流の測定法およびその解析法を確立する。具体的には、ボルタンメトリとして用いられてきたナノ電極を、SECM用電極として使い、ナノメートル領域のファラデー電流分析を目差す。その応用として、社会の強い要請である半導体微細加工におけるファラデー電流による腐食に関する位置分析、および神経伝達過程における細胞からの伝達物質の放出に関する位置分析を行う。基礎研究への展開として、量子閉

じ込め効果による離散電流が得られるかどうか、探してみる。

2. 研究の目的

(1) ナノ電極による異常性の発現: ナノ電極は H. White (米)、A. J. Bard (米)、Amatore (仏)、青木 (日) などが主な研究チームであり、電極が小さくなるにつれて測定されるデータに異常性があることを報告している。この異常性こそがナノメートルの世界に見える異常さの本筋であると考えられる。White は電極が 10 nm になると電流値が泳動拡散電流とは異なることを示している。Galceran は金属錯体の安定度定数が測定した電極の大きさに依存することを見出した。Penner は電極半径が 2 nm 以下になるとフェロセンの電極反応速度が 2 桁も大きく測定されることを報告し、ナノ粒子はきわめて活性度が高いことの定量的情報を与えている。これは、電極の大きさを種々変えて White により検証されている。この依存性は酸化でも還元でも同様に起こることが、Chen によって 6 シアノ鉄錯体を用いて確認されている。未だにその理由は解明されていないが、青木は電極の大きさが拡散種の平均自由行程に近づくと、拡散電流が異常に大きくなることを理論的に示している。しかしナノ領域に発展のため、測定法に関する見掛けのことか分子そのものにナノ特異性があるのか、早急に問題を克服する必要性が強調されている。これは分析化学ばかりでなく、ナノ科学全体の大きな、しかも本質的な課題であり、解決を見出すことを目指す。

(2) ナノ電極の作製技術: 学派によっていくつかの作製方法が提案されているが、共通点はマクロの大きさの白金などの電極表面をナノメートルの領域を残して絶縁する方法である。絶縁材料として、高分子膜を電気化学的制御の下に重合するのが比較的成功的である。最近ではガラス膜を被覆することも可能となった。活性点の形状および絶縁形状が不明、さらに位置が不特定であることが問題点である。活性点の形状を TEM で測定した報告はあるが、電極活性点であるかどうかの問題がある。

(3) SECM: SECM の研究は A. J. Bard (米) が基礎研究を行っており、装置の開発、電極の作製、測定法の開発など幅広い研究をしている。電極先端を x-y 方向に走査するとファラデー電流による試料の幾何学が得られるが、z 方向に走査すると電極反応速度に関する詳細な情報が得られる。米分析化学会である Pittscon では毎年、SECM のシンポジウムが開かれ、基礎ばかりでなく新しい応用、特に生体系に向けた応用研究が多数報告されている。SECM は広い分野にわたって用いられているが、nm 領域の研究はない。その理由はとりもなお

さず、SECM に使用できるナノ電極がないからである。本研究が完成できたときには、従来より少なくともオーダーが 2 つ低い領域までの分析が可能となる。この背景のもとで、STM にも利用でき、再現性のあるナノ電極を作製する技術を開発することを目指す。

3. 研究の方法

3 年にわたる研究全体の流れは、(A) 電極作製、(B) 電極単独の性能評価、(C) 電極反応速度測定、(D) 電極活性部の位置の特定、(E) SECM への設置、(F) 大電極基盤での SECM 測定：距離、時間、(G) マイクロメートル電極基盤での SECM、(H) ナノ電極基盤での SECM から成る。ここで (A)-(D) はナノ電極そのものの作製と SECM としての性能の評価である。(E)-(H) はナノ電極を SECM へ応用する技術の確立と測定である。この流れは、ナノ電極を高分子膜によって被覆した場合とガラス膜によって被覆した場合は異なる。高分子膜被覆電極は膜の安定性・耐久性および微小性観点から、ナノ電極 SECM には不相当である。しかし、電極の直径が 100 nm 以上であれば、電極として安定した性能を出すことができ、成功率が高い。大量に作製できるので、微小性を要求しない実験に適している。一方、ガラス膜電極は硬度が高いため、一旦できると安定性が高く、電極露出面積の温度依存性が少ない。それゆえ、ナノメータオーダーの SECM が出来る可能性がある。ただし電極の直径が 50 nm 以下での成功率は低い。この考えの下に、電極作製・測定と SECM の設置・測定の年次計画に従って研究を進めた。個々の課題は次のように細分化した。

[A1] 高分子被覆ナノ電極の作製、[A2] ガラス被覆ナノ電極の作製への挑戦、[B1] 高分子被覆ナノ電極の性能評価、[C1] 高分子被覆ナノ電極の電極反応速度測定、[D1] SECM の仮設置および高分子被覆ナノ電極の電極活性部の位置の特定、[E1] SECM への設置、[F1-a] 壁に向かうナノ電極挙動、[F1-b] mm 電極に向かうナノ電極挙動、[G1] μm 電極に向かうナノ電極挙動、[H1] ナノ基盤に向かうナノ電極挙動、[B2] ガラス被覆電極を用いた拡散限界電流を測定、[C2] ガラス被覆電極における定常的な電流電位曲線、[D2] と [E2] いずれも、高分子被覆電極の場合と同じ方法、[F2] ガラス被覆ナノ電極は高分子被覆に比べて絶縁物による障害、[G2] ガラス被覆電極における金属ナノ粒子を配列した面の観察、

4. 研究成果

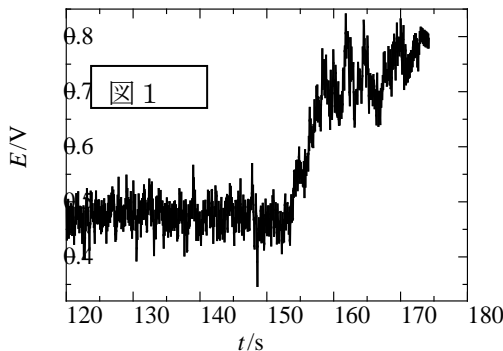
本研究課題は電気化学顕微鏡と微小電極挙動だけにとどまらず、電気化学反応の原理そのものに関連する事項を含んでいる。それ故、本研究期間に得られた電気化学反応の原理の關係する事柄の大部分は、本研究課題の

一部となる。研究成果として、以下の7つに分類して報告する。

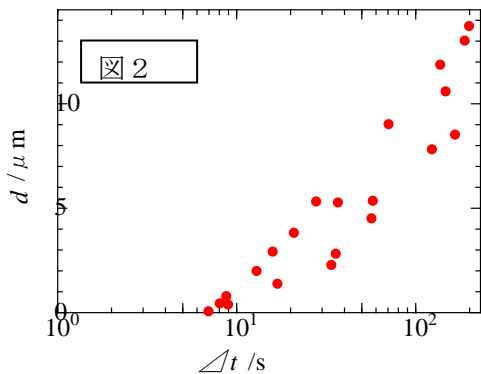
(1) 微小電極作製技術の開発

新たに、白金細線をガラスに封入し、機械研磨によって先端部を露出させる方法、およびガラスをフッ化水素酸によって溶出させる方法を開発した。

① ガラスによる封入電極の機械研磨
研磨度合いをモニターする方法を探ったところ、研磨時に交流インピーダンス電流を測定するのが実際的であることがわかった。研磨のついで測定装置を作製し、電極の研磨中において、ロックイン増幅による電極に流れる交流電流の時間変化を測定した。電流に時



間変化 (図 1) は3部分からなり、研磨に依存しない無変化部分、ガラスの静電容量を表す研磨と共に電流が徐々に増加する部分、電極が溶液に露出してからの変化を示す電流の部分からなる。最後の部分の少し手前で研磨を止める技術を探ったところ、経験的に、電流が上昇し始めてからの研磨時間と電極の露出半径との間に対数的な官憲があるこ



とを見出した (図 2)。その結果、1 μmの程度の電極ならば、本方法により規制された電極ができることが分かった。

② フッ化水素酸によるガラスの溶解

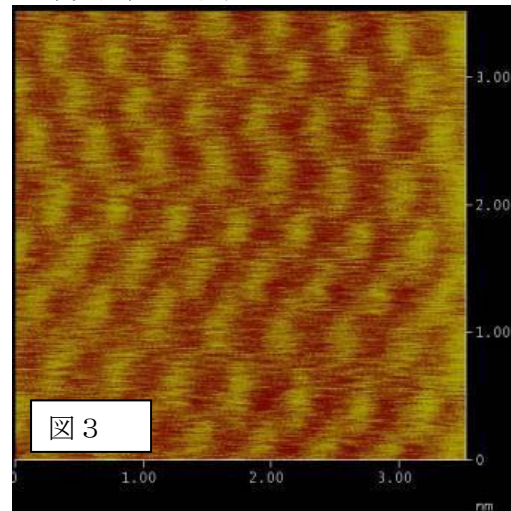
フッ化水素によりガラスを溶解し、白金の先端を露出させたところ、最小 100 nm の直径の電極ができ、そのボルタモグラムは長時間再現性があった。この方法では大きさを制御するまでに至っておらず、今後の課題であ

る。

(2) STM の測定技術

塩溶液中に入れたグラファイト表面上の STM 原子像を測定する技術を習得した。次に高分子膜によって被覆した白金微小電極を用いて、グラファイトの原子像を得る技術を完成した。電極のボルタンモグラムを測定しながら STM 像を記録する方法を編み出す予定で研究を開始した。鉄ポルフィリン錯体を電極に吸着させ、そのボルタモグラムと STM 像

(図 3) を比較した。STM 像はグラファイト表面より濃淡の密度が小さく、その吸着状態の解析をしているところである。ファラデー電流をトンネル電流を分離するのが困難であり、現在、その技術の進展は止まっている。



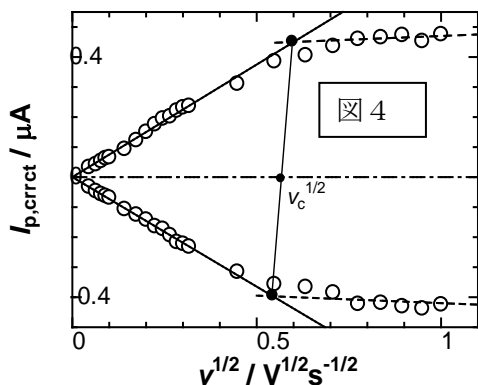
(3) 微小電極による電極反応速度の測定

ガラスで封入した白金ナノ電極を用いて、フェロセンおよび2電子酸化するテトラフェニルエタンのボルタンメトリを行った。いずれのボルタモグラムもS字状の定常状態の電流電位曲線を得た。電極を 100 nm 以下にしても変えても半波電位は大きな電極と同じであった。ボルタンメトリーの掃引速度は、 $8DRT/Fa^2$ に関係によって定常状態法による微小電極半径と結びつくことを考えると、本測定では1メガV/sの掃引速度に相当する。この条件でも反応速度を測定できない結果は、バトラーボルマー式の成立に疑問を投げかける結果になった。

(4) 高粘性溶液におけるボルタンメトリ

粘性液体であるポリエチレングリコール (PEG) を溶媒として、フェロセン誘導体の高速ボルタンメトリを行い、遅れを検討した。FcTMA のボルタモグラムの波は粘度 η が大きくなるほど、また掃引速度 v が大きくなるほど幅広くなった。ピーク電流 (I_p) が大きくなるほどピーク電位は直線的にシフトした。シフトは、溶液の電気抵抗によると考えられ、傾きから抵抗値 r を求めた。ピーク電流は低い掃引速度で $v^{1/2}$ に比例し (図 4)、その傾きから拡散係数 D を求めた。高い速度では、 I_p

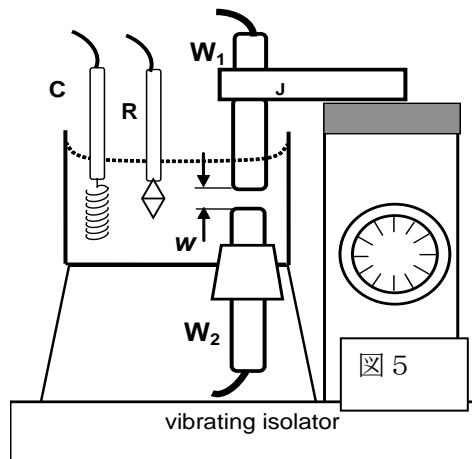
は比例から小さくなるほうにずれ、ずれ始めの掃引速度を v_c と置いた。 $\eta < 0.3 \text{ Pa s}$ のとき、 r と D は粘性中を移動する球にかかる力であるストークスに基づく式に一致した。 $\eta < 0.3 \text{ Pa s}$ のとき、 v_c は η に反比例し、 $v_c \eta = 0.03 \text{ V Pa}$ を得た。この関係を水の粘度に当てはめると $v_c = 30 \text{ V/s}$ となり、水中でも高速測定すると、単純な拡散からの遅れが測定



される可能性がある。

(5) バトラー・ボルマー型の電極反応速度式の疑問

教科書にある電極反応速度式に疑問を投げかける結果が(3)で示されたが、現実の測定には、反応の遅れが測定されることが多い。その説明として、Fickの第一則に疑問を抱いた。 $J = -D(\partial c/\partial x)$ では、濃度 c が与えられると同時に流れ J が生じ、 c と J は同時刻である。濃度勾配が原因、流れが結果であるから、結果は必ず原因の後に生じることを考えると、流れは濃度勾配の後に起こるはずである。この理屈を熱伝導に応用したのが(1963年)第2音波といわれるもので、拡散では $J(t+\tau) = -D\partial c(t)/\partial x$ またはテーラー展開して $\tau(\partial J/\partial t) = -J - D(\partial c/\partial x)$ の形になる。ここで τ は緩和時間である。これを連続の式に代入すると、波動のように伝達速度を含む拡散方程式 $\tau(\partial^2 c/\partial t^2) + \partial c/\partial t = D(\partial^2 c/\partial x^2)$ が得られる。限界電流領域におけるフェロセンの拡散電流の短時間応答から τ を測定して



みた。ただし通常の電位ステップ法では充電電流の寄与があるので、平行に置いた2つの電極間をフェロセンが拡散する時間を測定した。2個の白金円盤電極の距離 w をピエゾXYZ位置決め器で制御し、一方の電極で水溶液中 FcTMA を限界電流まで酸化電位をかけ、他の電極においてその応答電流を還元限界電流電位で測定した(図5)。種々の w に対して拡散による遅れ時間 t_p を求めた。波動拡散方程式を2電極の境界条件の基に解析解を得、 t_p と w の関係を数値的に求め、 $t_p^{1/2} = 0.20 w D^{1/2} + 0.764 \tau^{1/2}$ を得た。 $t_p^{1/2}$ の w に対する一次関係から拡散係数と τ を求めた。 τ は 1 ms のオーダーであり、濃度と共に減少した。波の伝達速度は $(D/\tau)^{1/2} = 0.03 \text{ cm/s}$ であるから電極反応速度定数と拮抗する値となった。

(6) 微小電極と同等な大きさをもつ酸化還元ラテックス粒子とナノ粒子の電極反応

概略は「ナノ粒子の電気化学的性質」に述べられているので参照されたい。

(7) 微小液滴の生成と電極反応

電気二重層は両相の自由エネルギー緩和から生じるイオン分布であり、溶媒による自由エネルギーの差は考慮されていない。それを考慮すれば、相互溶解や微小液滴として他相への分散(エマルジョン)などが起きるであろう。その可能性を調べることを目指して、油水界面を面に対して垂直に覗いてみたところ、界面活性剤を入れなくても水滴が油相に分散した。4級アルキルアンモニウム塩の入っている油相を水相に接すると、界面活性剤がなくても、界面近傍の油側に水滴が生成した(下写真の左側が油相)。油相の水滴の密度は、界面からの距離と共に減少した。水滴の平均密度は、4級アルキルアンモニウム塩の濃度にほぼ比例した。塩が水滴を形成し、界面活性剤の役割を演じている。塩のアルキル長を変えたところ、鎖の短いカチオンのほうが多くの水滴を生成した。



鎖の短いカチオンのほうが多くの水滴を生成した。

油相に電位をかけた。水に対する油の電圧が 0.6 V のとき、水滴は界面から離れて油相バルクへ移動した。逆電圧のときには、水滴は水相に吸い込まれた。水滴は負に荷電している。水滴の移動速度 v と電荷 q をで表すと、電気量は $-3 \times 10^{-15} \text{ C}$ であり、 Cl^- が電荷種とすれば、 $2 \times 10^4 \text{ Cl}^-$ が水滴にあることになる。電荷が表面にあるとすれば、 Cl^- 1個当たり占める面積は $(73 \text{ nm})^2$ となった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 16 件)

- ① Simulation for Memory Effect of Fick's First Law
Koichi Aoki, J. Chem. Sci. in press (2009).
- ② Diffusion-controlled currents in viscous solutions of polyethylene glycols
K. Aoki, Y. Guo, J. Chen, J. Electroanal. Chem, **629** (2009) 73-77.
- ③ Temperature-Dependence of Hydrogen Oxidation Reaction Rates and CO-Tolerance at Carbon-Supported Pt, Pt-Co, and Pt-Ru Catalysts, H. Uchida, K. Izumi, K. Aoki, M. Watanabe, Phys. Chem. Chem. Phys., **11** (2009) 1771-1779.
- ④ Spontaneous emulsification at oil|water interface by tetraalkylammonium chloride, K. Aoki, M. Li, J. Chen, T. Nishiumi, Electrochem. Commun. **11** (2009) 239-241.
- ⑤ Possibility of coalescence of water droplets in W/O emulsions by means of surface processes, J. Fukushima, H. Tatsuta, N. Ishii, J. Chen, T. Nishiumi, K. Aoki, Colloids and Surfaces A, **333** (2009) 53-58.
- ⑥ Electrochemically instantaneous reduction of conducting polyaniline-coated latex particles dispersed in acidic solution, H. Chen, J. Chen, K. Aoki, T. Nishiumi, Electrochim. Acta, **53** (2008) 7100-7106.
- ⑦ Electrically driven motion of an air bubble on hemispherical oil | water interface by three-phase boundary reactions, M. Satoh, K. Aoki, J. Chen, Langmuir, **24** (2008) 4364-4369.
- ⑧ Electrically conducting suspensions formed by polyaniline, K. Aoki, F. Kawaguchi, T. Nishiumi, J. Chen Electrochim. Acta, **53** (2008) 3798-3902.
- ⑨ Voltammetric electrodes coated with carboxyl latex particles
K. Aoki, T. Li, J. Chen, T. Nishiumi J. Electroanal. Chem., **613** (2008) 1-8.
- ⑩ Relaxation time of memorial diffusion by chronoamperometry at a twin-electrode.
K. Aoki, C. Xian J. Phys. Chem. C, **111** (2007) 15433-15439.
- ⑪ Comparison of fast scan voltammetry with microelectrode voltammetry of reduction of 1,4-benzoquinone, K. Aoki, J. Chen, Zhang Hua J. Electroanal. Chem. **610** (2007) 211-217.
- ⑫ ナノ粒子の電気化学的性質, K. Aoki, Review of Polarography **53** (2007) 77-85.

- ⑬ Catalytic generation of chlorine with slight overpotential by micellar ferrocene, K. Aoki, H. Chen, J. Chen Electrochem. Commun. **9** (2007) 2304-2307.
- ⑭ Transition of intercalating current of lithium from in solution to in graphite
Xiaoxia Wang, K. Aoki J. Electroanal. Chem. **604** (2007) 101-108.
- ⑮ Size-dependent efficiency of electron transfer at suspended ferrocenyl jumbo particles, L. Han, J. Chen, K. Aoki J. Electroanal. Chem. **602** (2007) 123-130.
- ⑯ Asymmetric redox reactions of C₃-symmetric starburst compound with six arylamines
M. M. Abdul, T. Nishiumi, K. Aoki J. Electroanal. Chem., **601** (2007) 139-147.

〔学会発表〕(計 30 件)

- ① 青木 幸一, Guo Yi, 陳 競鳶 「PEG高粘性溶液におけるボルタモグラム」電気化学会 76 回学会 2009 年 3 月 28 日 京都大学
- ② 西海 豊彦, 吉川雄一郎, 青木 幸一 「高速 1 段階 2 電子反応有機分子の溶媒効果」電気化学会 76 回学会 2009 年 3 月 28 日 京都大学
- ③ Tianbao Li, 青木 幸一, 陳 競鳶 「Reduction Kinetics of Hydrogen Ion at Films Composed of Carboxyl Latex Particles」第 54 回ポーラログラフイー及び電気分析化学討論会 2008 年 11 月 23 日 熊本大学
- ④ 青木 幸一, Li Mengjuan 「油水界面における塩による自発的なエマルションの生成」第 54 回ポーラログラフイー及び電気分析化学討論会 2008 年 11 月 23 日 熊本大学
- ⑤ 西海 豊彦, 青木 幸一, 吉川雄一郎 「1 段階 2 電子移動反応の置換基による電位逆転制御」第 54 回ポーラログラフイー及び電気分析化学討論会 2008 年 11 月 23 日 熊本大学
- ⑥ Toyohiko Nishiumi, K. Aoki, "Multi-electron Transfer Reactions in Oligoaniline Derivative ", 214th ECS Meeting, 2008/10/15 Honolulu in USA
- ⑦ K. Aoki, "Stability and Motion of Droplets on Water|Oil Interface ", 214th ECS Meeting, 2008/10/15 Honolulu in USA
- ⑧ Han Chen, K. Aoki, J. Chen, "Electrochemically Instantaneous Reduction of Conducting Polyaniline-coated Latex Particles ", 214th ECS Meeting, 2008/10/15 Honolulu in USA
- ⑨ T. Sakata, K. Aoki, J. Chen, "Synthesis and the Electrolyte of the Functional Polystyren-based Latex ", 214th ECS Meeting, 2008/10/15 Honolulu in USA
- ⑩ T. Imamura, K. Aoki, J. Chen, "Motion of

An Air Bubble on Oil|Water Interface ", 214th ECS Meeting, 2008/10/15 Honolulu in USA

①① Y. Yoshikawa, T. Nishiumi, K. Aoki, " 1-Step 2-Electron Transfer Reaction of Tetrakis(4-dimethyl aminophenyl)-ethene ", 214th ECS Meeting, 2008/10/15 Honolulu in USA

①② 陳 競鷺, 陳漢, 青木 幸一「電気伝導性コロイド粒子の合成と電極反応」電気化学会 75 回学会 2008 年 3 月 30 日 山梨大学

①③ 青木 幸一「高速電流応答測定およびMCシミュレーションによるフィックの第一則の遅れの算出」電気化学会 75 回学会 2008 年 3 月 30 日 山梨大学

①④ 青木 幸一「エレクトロケミカルプロセス」日本化学会 2008 年 3 月 29 日 立教大学

①⑤ K. Aoki, " Demonstration of non-BV control of 1,4-benzoquinone by microelectrode voltammetry " Pittcon, 2008/3/6, New Orleans in USA

①⑥ 青木 幸一「電極反応速度の考え方と問題点」第 8 回基礎電気化学セミナー 2008 年 2 月 15 日 京都大学

①⑦ 西海 豊彦, 青木 幸一, 吉川 雄一郎「1 段階 2 電子移動分子の触媒電流」2007 電気化学会秋季大会 2007 年 9 月 19 日東京工業大学

①⑧ 西海豊彦, M. MD Abdul, K. Aoki 「アリアルミン類の多電子移動反応の相互作用解析」第 5 3 回ポーラログラフイー及び電気分析化学討論会 2007 年 11 月 25 日 神戸大学

①⑨ Tianbao Li, K. Aoki, Jingyuan Chen, T. Nishiumi, "Voltammetric electrodes coated withcarboxyl latex particles " 第 5 3 回ポーラログラフイー及び電気分析化学討論会 2007 年 11 月 25 日 神戸大学

①⑩ K. Aoki, Chen Hann, Chen Jingyuan "Catalytic generation of chlorine withslight overpotential by micellarferrocene" 第 5 3 回ポーラログラフイー及び電気分析化学討論会 2007 年 11 月 25 日 神戸大学

①⑪ 陳競鷺, 青木 幸一, 張 華「ベンゾキノンの還元の高速度ボルタンメトリーと微小電極ボルタンメトリーとの比較」第 5 3 回ポーラログラフイー及び電気分析化学討論会 2007 年 11 月 25 日 神戸大学

①⑫ 佐藤正則, Galyna Shul, Ewa Rozniecka, Wojciech Adamiak, FrankMarken, Marcin Opallo, 陳競鷺, 青木 幸一「イオン液体を支持塩とするトルエン滴における電極反応とそれに続くイオン移動」第 5 3 回ポーラログラフイー及び電気分析化学討論会 2007 年 11 月 25 日 神戸大学

①⑬ 青木 幸一「薄層電気化学セルを用いた記憶ある拡散の記憶時間の測定」第 5 3 回ポ

ーラログラフイー及び電気分析化学討論会 2007 年 11 月 25 日 神戸大学

①⑭ 青木 幸一, 張華「ベンゾキノンの還元における高速掃引と微小電極ボルタンメトリーの両方の必要性」2007 年電気化学会秋季大会 2007 年 9 月 19 日 東京工業大学

①⑮ 青木 幸一「ナノ粒子の電気化学的性質」2007 年 7 月 14 日京都大学

①⑯ K. Aoki, Xiaoxia Wang "Intercalating current of Li controlled by diffusion either in solution or graphite" 211th ECS Meeting, Chicago in USA

①⑰ 青木 幸一, 王 曉霞「Li+のインターカレーションにおける溶液か石墨中への排他的拡散」2007 電気化学会春季大会 2007 年 4 月 1 日同志社大学

①⑱ 陳 競鷺, 佐藤 正則, 青木 幸一「三相界面での電極反応による空気泡の運動」2007 電気化学会春季大会 2007 年 4 月 1 日同志社大学

①⑲ 佐藤 正則, 陳 競鷺, 青木 幸一「界面活性剤や麦芽糖による三相界面の膨張と収縮」第 52 回ポーラログラフイーおよび電気分析化学討論会 2006 年 11 月 23 日信州大学

①⑳ 三宅正輝, 陳 競鷺, 西海 豊彦, 青木 幸一「ルテニウム錯体の電気化学発光を利用した一酸化窒素(NO)の検出」第 52 回ポーラログラフイーおよび電気分析化学討論 2006 年 11 月 23 日信州大学

【図書】(計 2 件)

① 青木幸一 電気化学測定／解析テクニック&事例集、第一章 電気化学の測定・解析のための理論、出版社 情報機構 2009 年 2 月 pp. 1 - 27.

② K. Aoki, "Electrochemical Dictionary" edited by A. J. Bard, G. Inzelt, F. Scholz, Springer, 2008.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青木 幸一 (AOKI KOICHI)

福井大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号 80142264

(2) 研究分担者

陳 競鷺 (CHEN JINGYUAN)

福井大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号 50311676

西海 豊彦 (NISHIUMI TOYOHICO)

福井大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号 10377476