

第5章

TiO₂膜の評価

5-1. はじめに

ディップコート法でTiO₂膜の作製を行い、その膜の評価を行う。また、スピコート法のゾル溶液にポリエチレングリコールを添加したことによる変化について述べる。

5-2. 測定方法

5-2-1. X線回折¹⁾

結晶は原子が規則正しく配列し格子を形成しているのので、原子間隔の程度、すなわちÅ(10⁻¹⁰m)程度の波長の波を照射すると回折が起こる。したがって、回折を調べることにより、結晶の構造を調べることができる。この目的にはX線が最も広く用いられている。

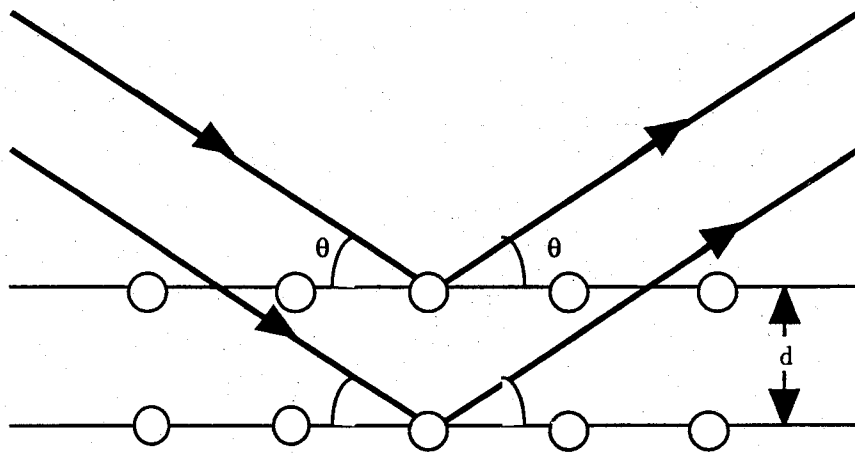


図5.1 結晶格子によるX線の回折

いま、図5.1のように面間隔を d 、X線の波長を θ とすると、回折によってX線の強度が大になる条件は

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

(5.1)

である。これをブラッグの条件あるいはブラッグの式とよび、 n を回折の次数と呼ぶ。回折線の強度は結晶の単位セル(単位格子)内の原子の種類、数、その占める位置によって決まる。したがって、回折線の位置と強度の解析によって、目的の結晶の構造を調べることができる。

λ が既知の X 線を用いれば観測された回折線と入射線とのなす角度 2θ からそれぞれの d を求めることができる。X 線源としては、元素の輝線スペクトル、すなわち特性 X 線が利用され、主なものに $\text{CuK}\alpha$ 線($\lambda=1.54\text{\AA}$)がある。

本測定では理学電気社製、RINT-2000 型を使用した。

5-2-2. 走査型電子顕微鏡 (SEM)²⁾

SEM の構成は、図 5.2 に示すような構成になっている。電子銃から出た電子ビームを幾つかのレンズにより細く絞って試料に照射する。電子ビームを試料に照射すると、図 5.3 の示すように色々な信号を得ることができるが、一般に呼ばれている SEM 像とは、試料から出てくる主に 2 次電子を映像信号として検出する。この検出信号をブラウン管(CRT)の輝度変調信号とし、試料面上の電子ビームの走査と同期して CRT 上に表示するのが SEM である。

2 次電子とは 50eV 以下の放出電子のことを指している。この 2 次電子信号の強度は主に試料の凹凸を反映しているので、試料面の形態像が CRT 上に表示されることになる。したがって、電子ビームを細く絞れば絞るほど試料上の微細部の信号を得ることができるので、照射する電子ビームをいかに細く絞るかが SEM の高分解能化に最も大きな要因となる。

SEM に用いられている電子銃は、熱電子放射型(TE:Thermal Emission) と電解放射型(FE:Field Emission)とに大きく分けられる。前者は陰極を高温に加熱して放出された熱電子を利用するものであり、放出された熱電子を引き出し、収束制御するウェネルト、電子ビームを加速するアノードから構成されている。後者は金属の表面に極めて強い電界($\sim 10^8\text{V/cm}$)を印加するとトンネル効果で金属中の自由電子が真空中に飛び出してくると言う原理を用いたものである。したがって、室温で用いることができる。TE は加熱して用いるため放射電子ビームのエネルギー幅は大きく、FE ほど SEM の高分解能には適していない。

本測定で用いた日立 S-5000 は FE 型である。

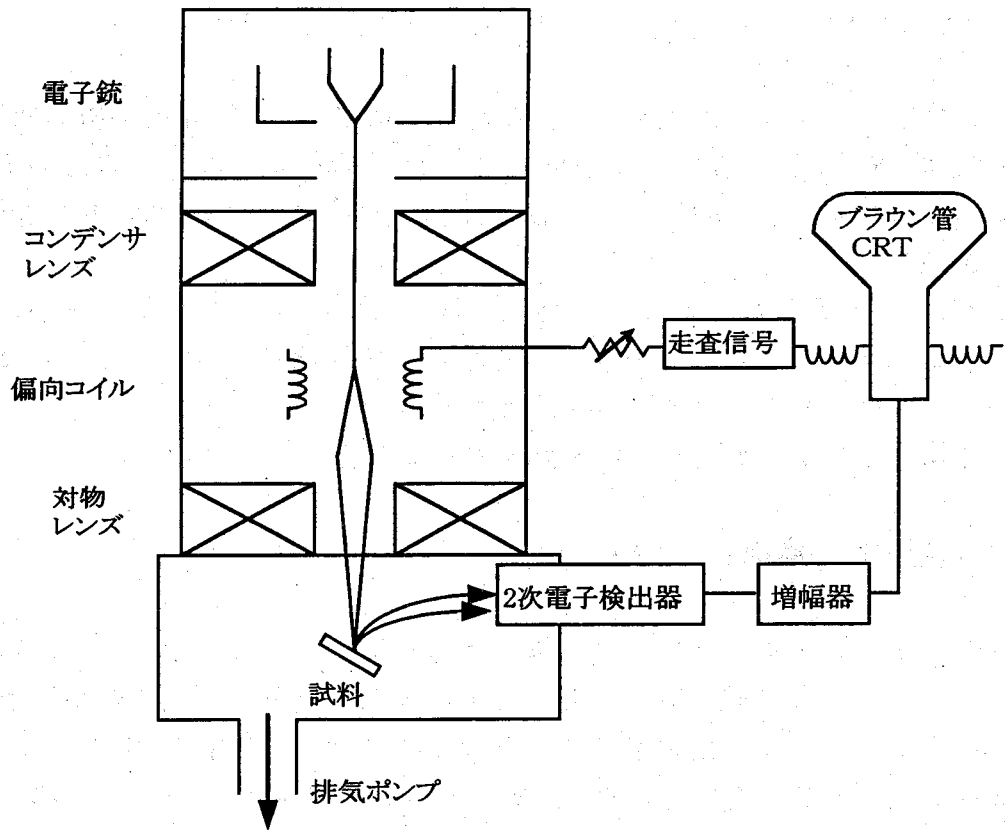


図5.2 SEMの基本構成図

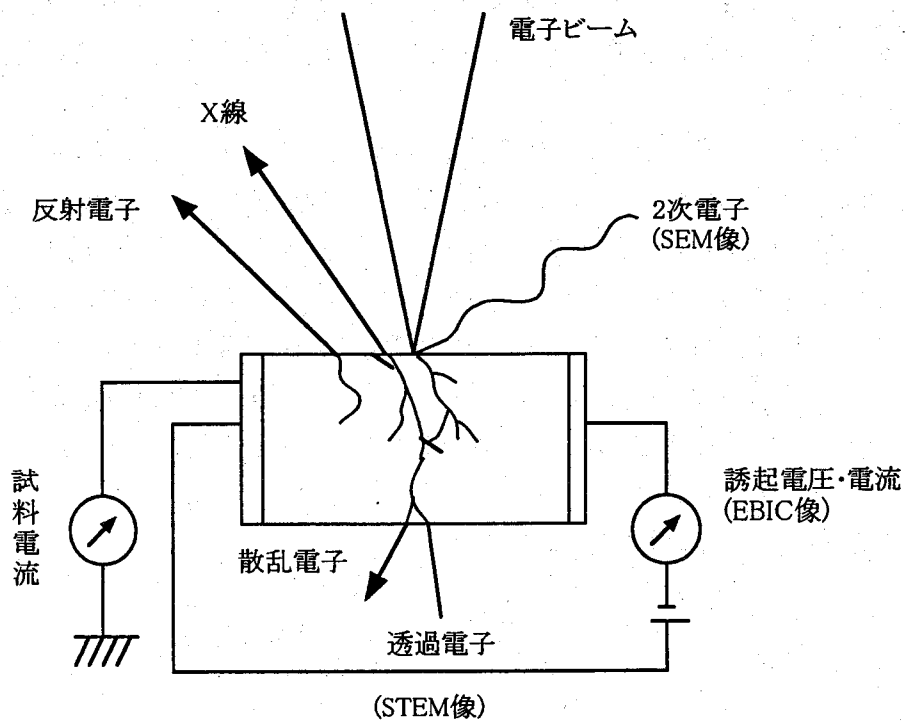


図5.3 試料からの各種信号

5-2-3. 紫外、可視光吸収³⁾

物体が透光性を有するという事は、光がその物体を透過することである。物体に入射した光は、物体の表面での反射及び内部での吸収と散乱によりエネルギーの一部を失う。一般に半導体は、価電子帯から伝導帯への電子遷移に基づくエネルギー吸収のため、紫外、可視光領域での透過性が低下する。そのバンドギャップが大きい材料ほど、短波長側の紫外域まで良好な透光性を示す。

光強度の絶対値測定はきわめて難しいため、紫外、可視光吸収スペクトルの測定では、そのような光の絶対量を測ることはなく、試料に入射した光と試料から出てきた光の強さの比を測定するのが普通である。絶対値の測定と違って、このような比は測定系の感度などとは無関係な値であるので、信頼性の高い値が得られる。

厚さ d の試料層にある波長の光が強度 I で直角に入射すると、その内部でのエネルギーでの吸収に伴い、光は試料中を通過するに従って減少する。薄い試料 dx での吸収を $-dI$ とすると、 α を吸収の強さに対応する比例定数(吸収係数)として、

$$-dI = \alpha I dx \quad (5.2)$$

の関係(Lambert または Bouguer の法則)が成立する。この式を積分すると、

$$\ln I = -\alpha x + C \quad (5.3)$$

となる。 $x=0$ での光強度、すなわち入射光の強度を I_0 とすれば積分定数 C は $\ln I_0$ に等しく、 $x=d$ の透過光の強度を I_t とすれば、

$$\ln(I_0/I_t) = \alpha d \quad (5.4)$$

$$I_t = I_0 \exp(-\alpha d) \quad (5.5)$$

の関係が得られ、透過率は I_t/I_0 で与えられる。

$$T = I_t/I_0 = (1-R)^2 \exp(-\alpha d) \quad (5.6)$$

ここで、 R は反射率である。これより試料厚さ d_1 、 d_2 の 2 枚の試料の透過率 T_1 、 T_2 を測定すれば吸収係数は反射率 R に無関係に求めることができる。すなわち(5.6)式より

$$T_1/T_2 = \exp\{\alpha(d_2 - d_1)\} \quad (5.7)$$

となり、

吸収係数は

$$\alpha = \frac{1}{X_2 - X_1} \ln(T_1/T_2) \quad (5.8)$$

になる。

本測定では、日本分光社製 V-570 型紫外可視分光光度計を使用した。

5-3. ディップコーティング法による TiO₂ 膜の評価

5-3-1. 結果と考察

図 5.4 に引き上げ速度と膜厚の関係を示す。引き上げ速度を速くするにつれて膜厚が上がっていることが分かる。0.1~0.6mm/sec では徐々に膜厚が増加しているが、0.7、0.8mm/sec では減少している。一般的に、ディップコーティングにより得られる膜の厚さ t と引き上げ速度 v との間には、垂直に引き上げた場合、次のような関係がある [4]。

$$T=K \cdot (\eta v / \rho g)^{1/2} \quad (5.9)$$

ここで、 η はゾルの粘度、 ρ はゾルの密度、 K は定数、 g は重力加速度である。

引き上げ速度が遅いとゾル溶液が基板の下のほうから流れていき、基板に残らずに膜厚が薄くなり、逆に引き上げ速度が速いと溶液が基板に多く残った状態でゲル化が始まり膜厚が厚くなるためである。

X 線回折により、それぞれのサンプルの結晶型を確認したところ Anatase(101)面のピークが見られ文献[5]の値と一致する。膜厚の増加によりピーク強度も増加している。また、SnO₂ 基板のピークも現れており、膜の増加に伴いピーク強度も弱くなっている。TiO₂ のピークがブロードなのはナノ結晶だからである。図 5.5 に X 線回折の結果を示す。

ディップコーティングにおいてゾル溶液から引き上げる際、既に溶液中の溶媒(水、アルコール)は蒸発し始めており、ゲル化が進行する。引き上げ速度を上げる程、一時的に厚く堆積したゾルが表面に均一に分散するまでにゲル化してしまい、表面の凹凸も顕著に現れるようになる。また、それに準じてゾル溶液が局所的に固まりそのまま乾燥されると、均一性、密着性の悪いゲルが堆積することになり、所々でクラックや剥離などが生じる。引き上げ速度を変えて作製した膜の表面モフォロジーを図 5.6 に示す。これを見てみると、0.2mm/sec で引き上げたサンプルは表面は均一な状態である。しかし、引き上げ速度を上げるにつれて、膜の状態は荒くなっていき、クラックが確認される。

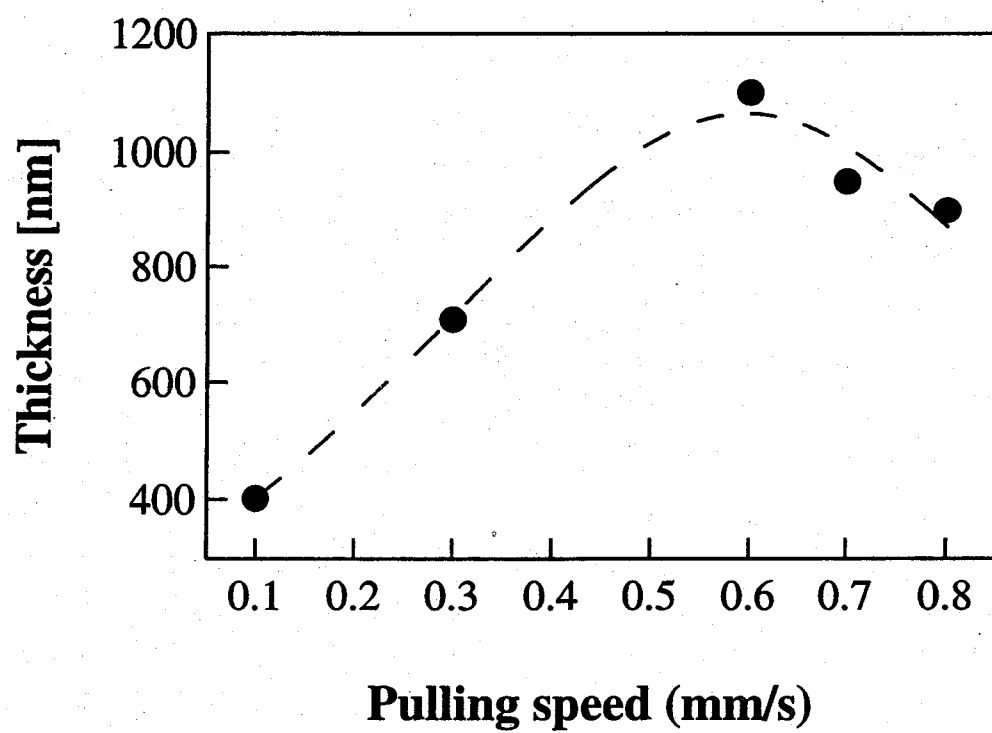


図5.4 引き上げ速度の違いによるTiO₂薄膜の膜厚

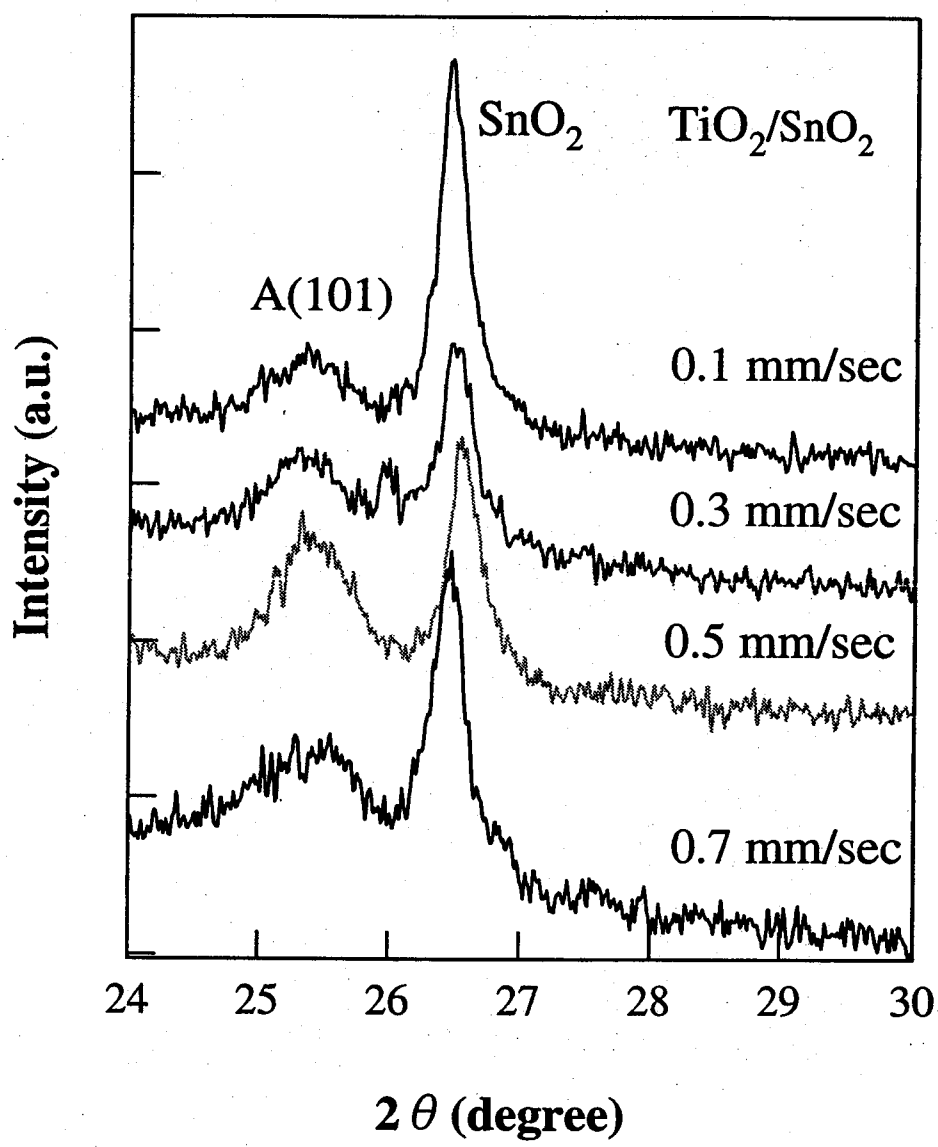
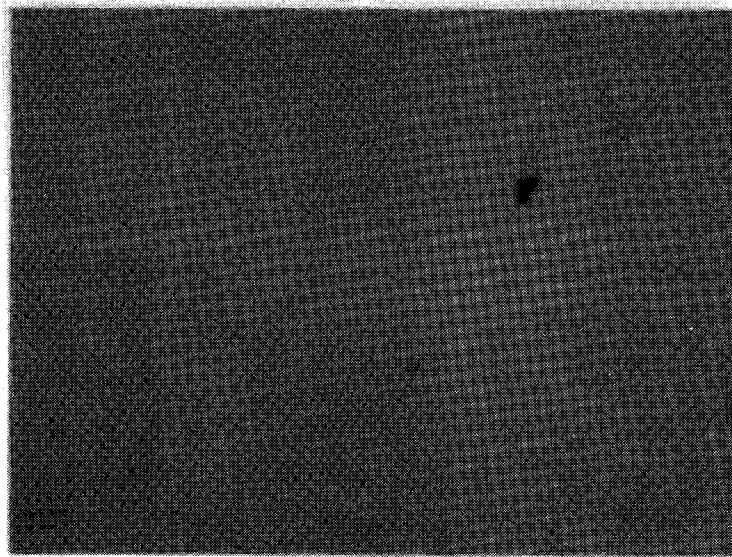
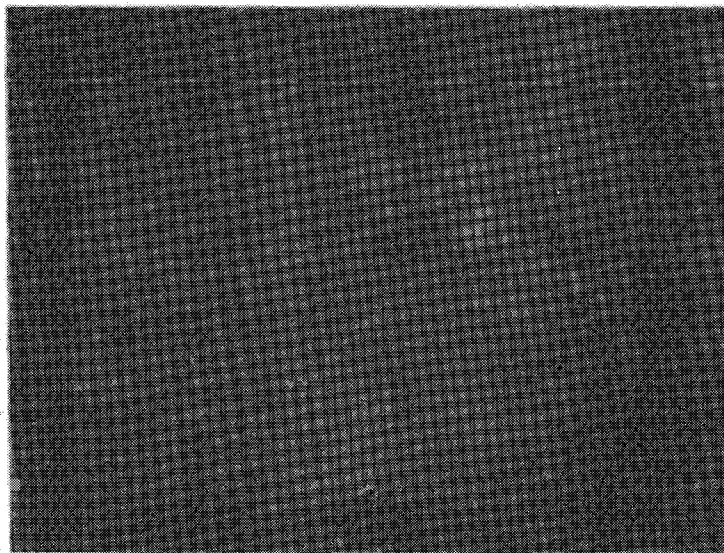


図5.5 引き上げ速度の違いによるTiO₂/SnO₂基板のX線回折



(a) 0.2 mm/sec

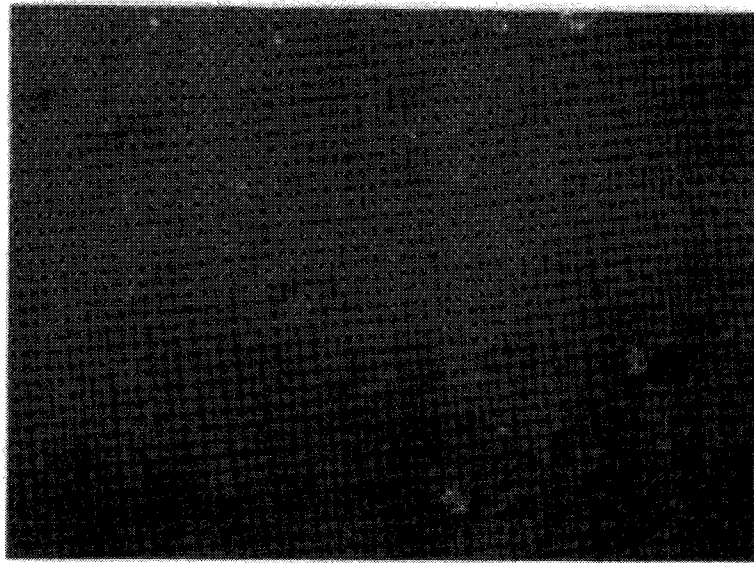
20 μm



(b) 0.4 mm/sec

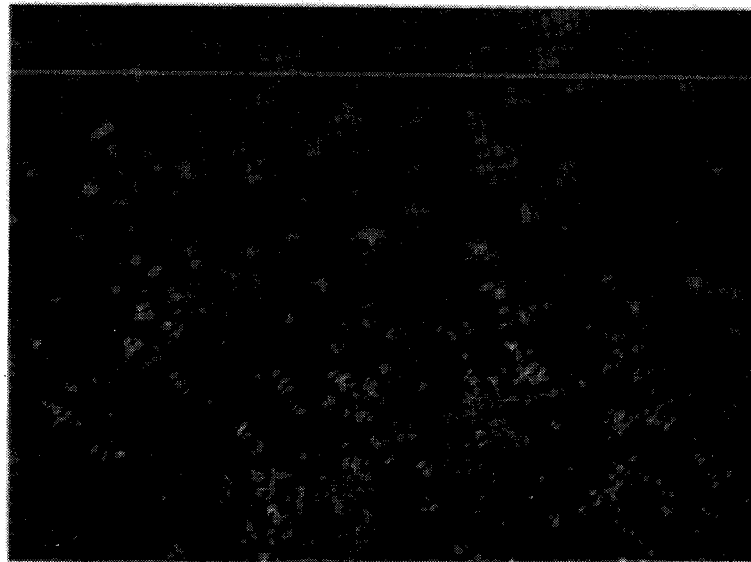
20 μm

図 5.6 引き上げ速度の違いによる TiO_2 膜の表面モフォロジー



20 μm

(c) 0.5 mm/sec



20 μm

(d) 0.6 mm/sec

図 5.6 引き上げ速度の違いによる TiO_2 膜の表面モフォロジー

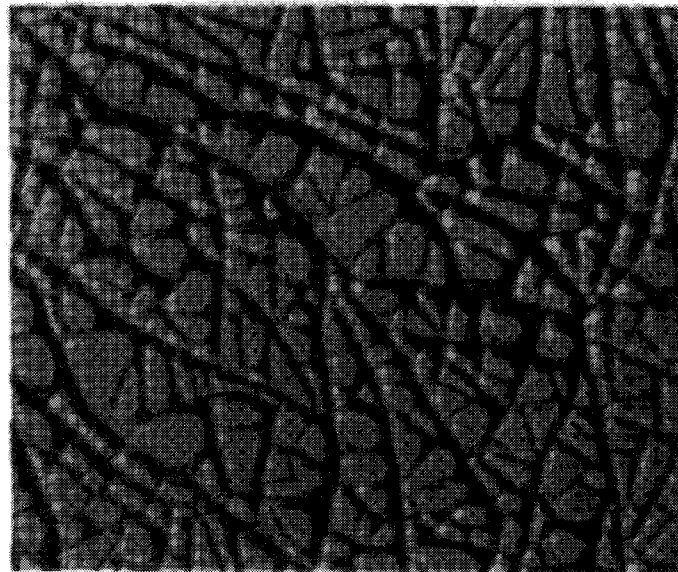
5-4. スピンコート法による TiO_2 膜の評価

5-4-1. 結果と考察

図 5.7 にポリエチレングリコールを添加していない TiO_2 溶液と添加した溶液を用いて SnO_2 基板にスピンコーティングを行った TiO_2 膜の表面モフォロジーを示す。これらを見てもと添加していない状態に比べ膜の状態は明らかに良くなっており、添加していないときはクツラックが入っている。これはポリエチレングリコールの添加した溶液を基板にコーティングして、焼成を行うとその加熱中にポリエチレングリコールが消失してできた、表面に均一な細孔を有する膜ができたことが考えられる。しかし、添加量を 60%、80% と増やすにつれて、表面状態は悪くなりクラックが入るようになる。また、スピンコートの回数を重ねて膜を厚くしていくと徐々に膜にクラックが入る。厚さ $2.6\mu\text{m}$ では一部亀裂が入っており、 $3.6\mu\text{m}$ では全体にわたっている。これは、ゲル膜が基板に接着してから大きく収縮しようとし、膜と基板の間に応力が生じて膜が基板から剥離するためである。膜が薄ければ、膜が平面方向に収縮しようとする膜内の力よりも接着力が大きく剥離は起こらない。 TiO_2 膜の表面モフォロジーを図 5.8 に示す。SEM によりポリエチレングリコールを添加した膜の表面の観察を行った。これより、この膜は多孔質であり、粒径約 8~10nm になっていることが確認され、ポリエチレングリコールの消失によりできた細孔が確認できる。SEM による表面観察を図 5.9 に示す。

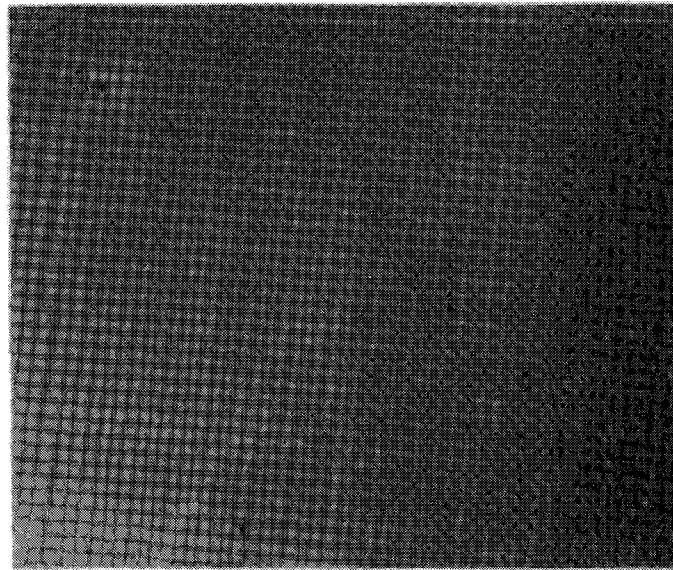
X 線回折で結晶型を確かめた結果を図 5.10 に示す。 25° 付近に Anatase (101)面のピークが現れて折り、結晶性の良い膜が確認された。また、Anatase (200)面のピーク 48° 、Anatase (211) 面のピーク 55° も現れており、この膜が Anatase 型の TiO_2 であることが確認された。

また、透過率の測定においては TiO_2 膜と SnO_2 基板の透過率を比較してみると膜がコーティングされている方は 400nm 付近から急激に透過率が下がっており、 TiO_2 膜において吸収が起きていることがわかる。これは光学バンドギャップの測定から分かるようにバンドギャップが 3.2eV であり波長で言い換えると約 412nm であるから、 $400[\text{nm}]$ 以下の波長を吸収する。 TiO_2 のバンドギャップの 3.2eV は文献[5]の値と一致する。図 5.11 に透過率の結果を示す。また、図 5.12 に光学バンドギャップを示す。



(a) 0%

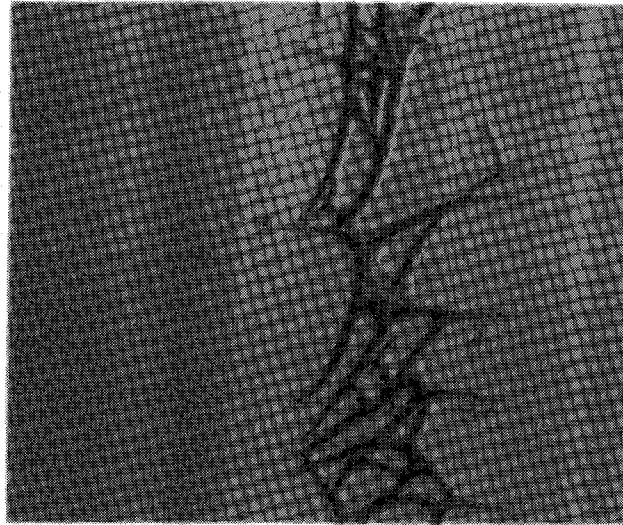
┌───┐
20 μm



(b) 40%

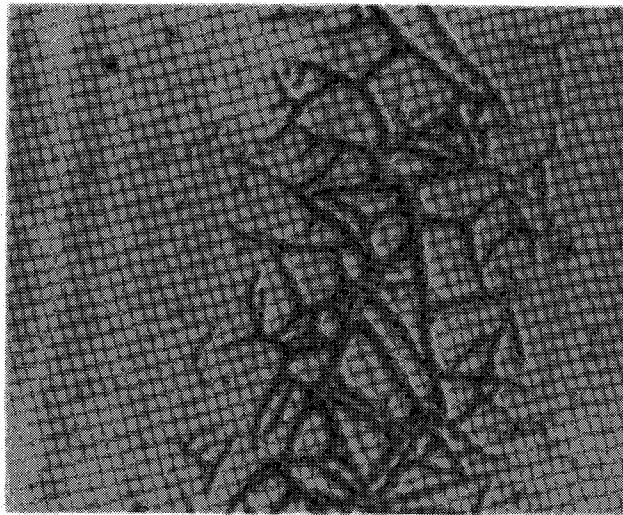
┌───┐
20 μm

図 5.7 ポリエチレングリコールの添加量による表面モフォロジー



(C) 60%

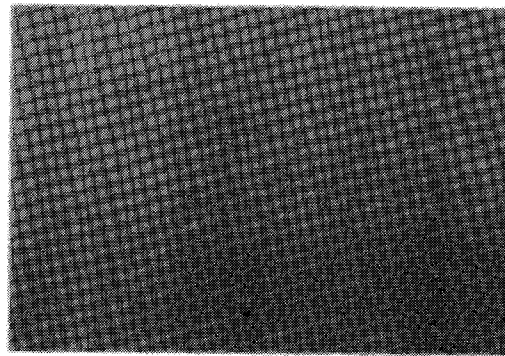
┌───┐
20 μm



(d) 80%

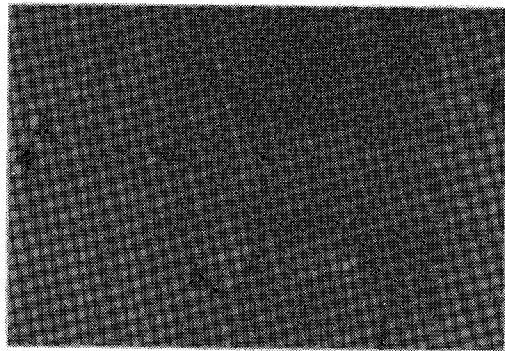
┌───┐
20 μm

図 5.7 ポリエチレングリコールの添加量による表面モフォロジー



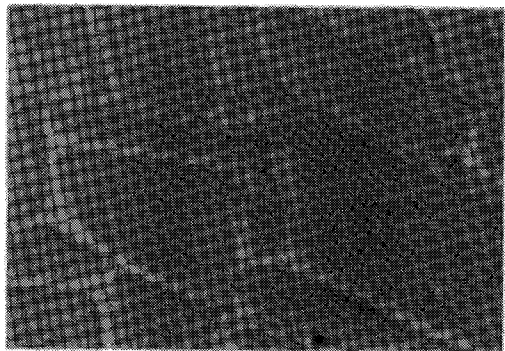
(a) 1 μm

20 μm



(b) 2.6 μm

20 μm



(c) 3.6 μm

20 μm

図 5.8 膜厚の違いによる表面モフォロジー

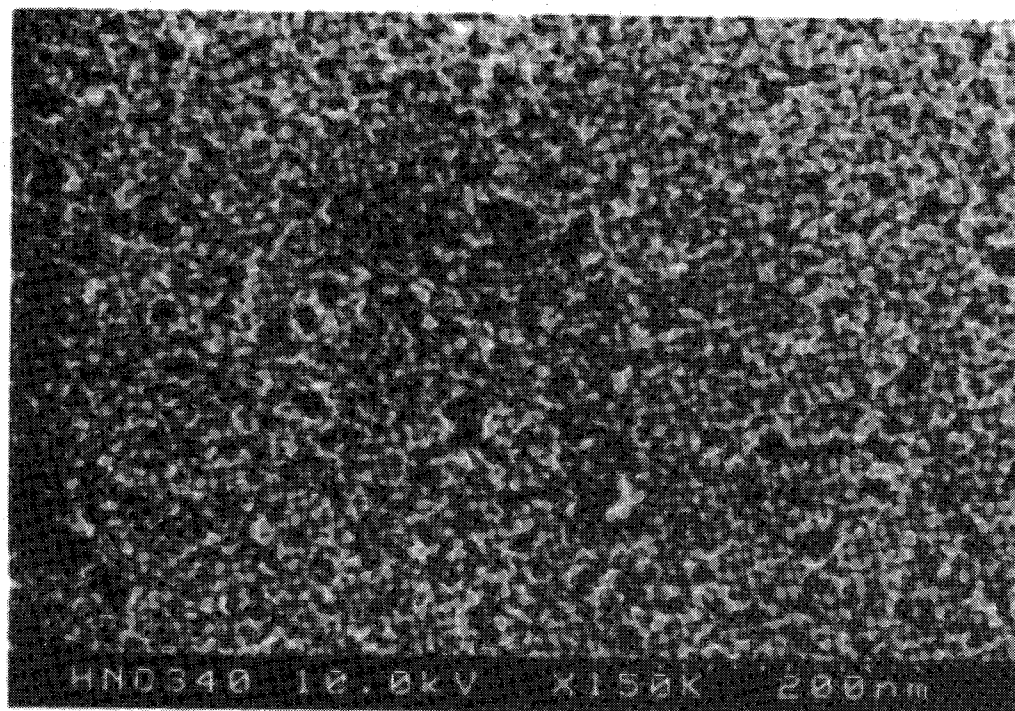


図 5.9 ポリエチレングリコール添加量 40% の TiO₂ 膜の SEM 像

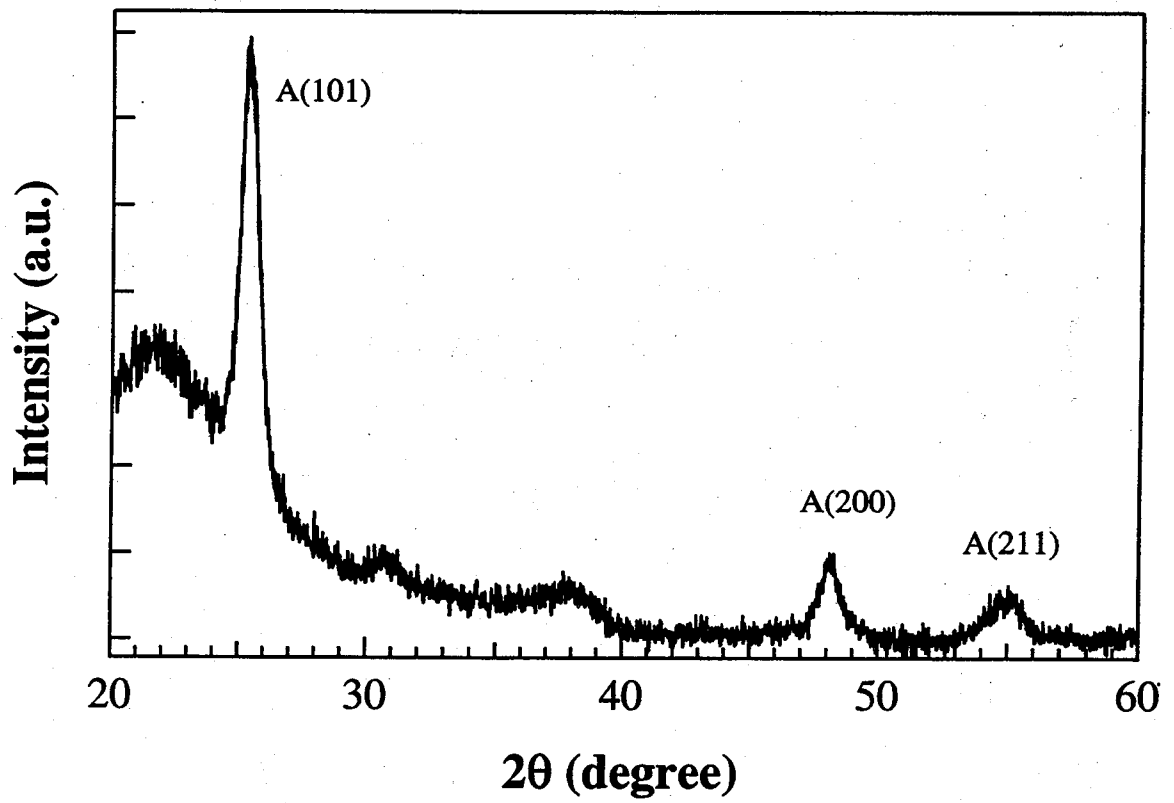


図5.10 TiO_2 膜のX線回折 (膜厚 $2\mu\text{m}$)

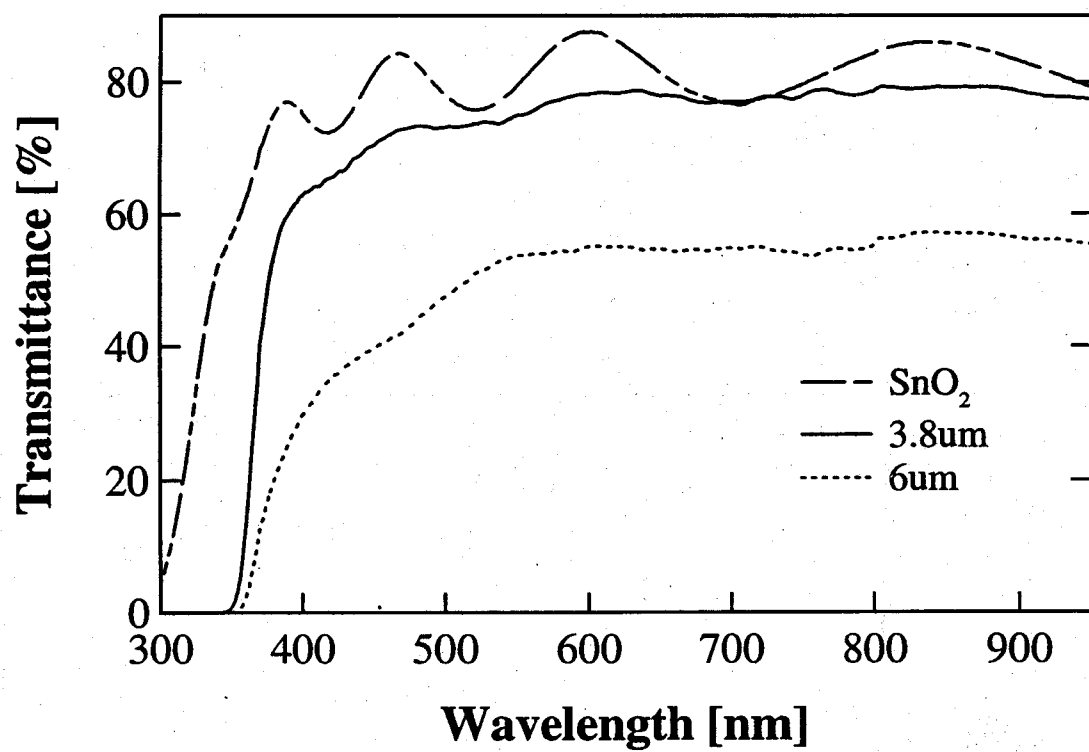


図5.11 TiO₂膜の透過率特性

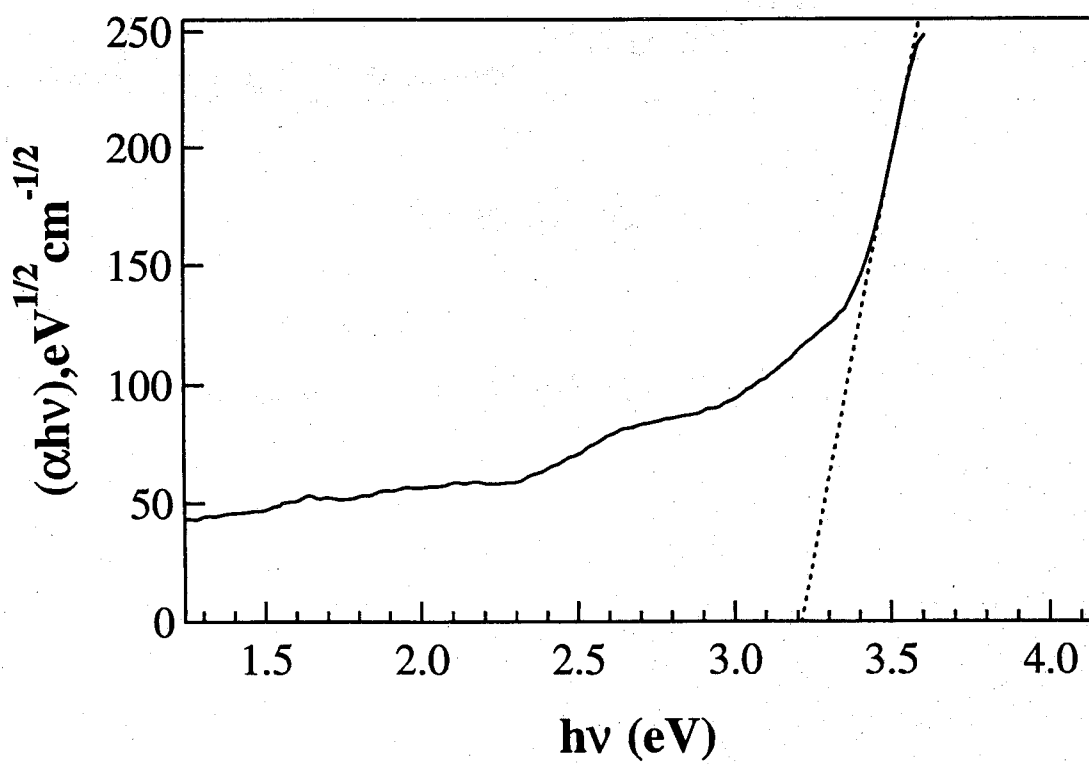


図5.12 光学的バンドギャップ

5-5. まとめ

ディップコーティング法、スピコーティング法により TiO_2 膜を製膜し、その評価を行った。以下に、得られた結果を示す。

・ディップコーティング法

引き上げ速度を変えてディップコーティングを行い、0.1~0.6mm/sec では徐々に膜厚が増加して、0.6mm/sec で最大 1.1 μm になるがその後は減少していく傾向にあった。

・スピコーティング法

ゾル溶液にポリエチレングリコールを添加することにより表面に均一な細孔を有する膜ができ、添加量を 60%、80% と増やすにつれて所々にクラックが入りやすくなる。また、膜厚を厚くするにつれてクラックが入ることが確認できた。

参考文献

- | | | |
|---------------------|-------|----------|
| [1] X線回折分析 | 加藤誠軌 | 内田老鶴圃 |
| [2] 電子顕微鏡技術 | 外村 彰 | 丸善 |
| [3] 分光測定入門 | 山田 猛 | 学会出版センター |
| [4] ゴルージュル法の化学 | 作花 濟夫 | アグネ承風社 |
| [5] 酸化チタン —物性と応用技術— | | 清野 学 |

第6章

色素増感 TiO₂ 太陽電池の評価

6-1. はじめに

色素増感太陽電池を作製するにあたり、まず、ディップコーティングにおいて太陽電池を作製し、この電池の特性を調べる。次に、スピコート法においてこの電池においての特性の向上を図ることを行う。

6-2. 測定方法

6-2-1. 変換効率

本測定では WACOM 社製 WXS-105H のソーラーシュミレータを用い、疑似太陽光として Xe ショートアークランプを光源として使用した。Air Mass は AM1.5(放射強度 100mW/cm²)とする。この時、セル温度を 27°C に一定にした。電流-電圧特性を半導体パラメータアナライザ(HP4145B)に読みとり、次式より曲線因子 FF 、変換効率 Eff を算出する[1]。

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (6.1)$$

$$Eff = \frac{P_{\max}}{100 \times S} \quad (6.2)$$

ここで、短絡電流 I_{sc} (A)、開放電圧 V_{oc} (V)、最大電力 P_{\max} (W)、セル面積 S (cm²)である。

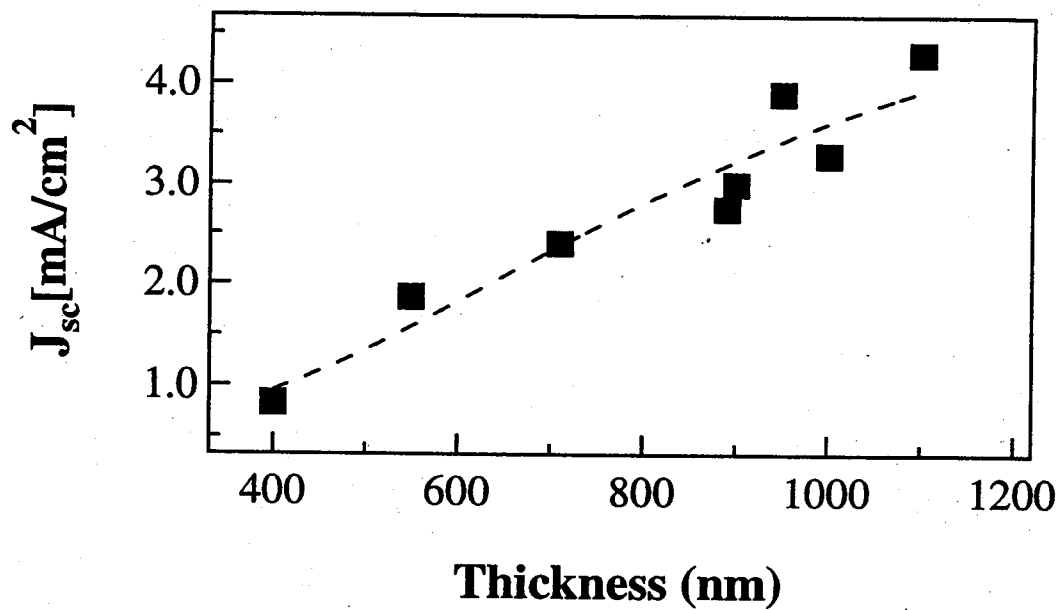
6-3. ディップコーティング法による太陽電池の評価

6-3-1. 結果と考察

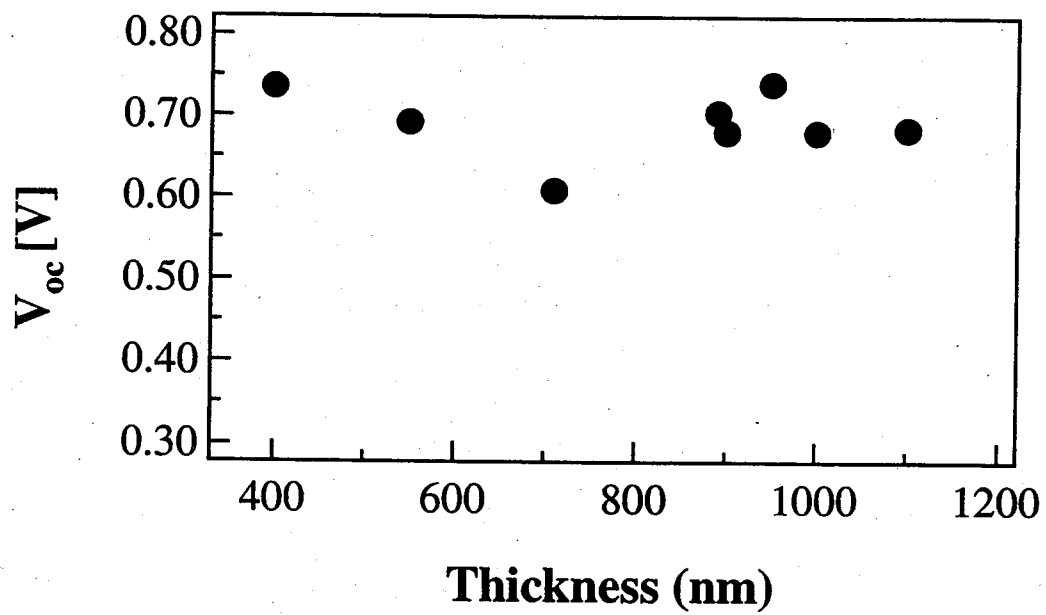
図 6.1 に膜厚の違いによる太陽電池の諸特性を示す。これらを見ると膜厚の増加に伴い短絡電流密度、変換効率が比例的に上昇しているのが確認できる。開放電圧は膜厚によつての差はあまり現れておらず、短絡電流の増加が変換効率の上昇を招いた要因である。膜厚が厚くなったことにより、膜の色素の吸着量が増えている。この太陽電池の電荷分離はすでに述べたように TiO_2 と色素の界面で起こるので、色素の吸着量が増えたことにより電荷分離が多くなり、電流が増えることが考えられる。この太陽電池においては膜厚が重要なことである。

そこで、膜厚の増加により電流が増加したので、膜厚を増加させるためにゾル溶液の濃度を 2 倍に上げ、粘度を上げたゾルを使用し引き上げ速度 0.5mm/sec で膜のコーティングを行い太陽電池の作製を試みた。粘度を上げることにより膜厚が増加し、膜厚は $2\mu\text{m}$ になった。この太陽電池の諸特性を図 6.2 に示す。この太陽電池は $J_{sc}=9.3[\text{mA/cm}^2]$ 、 $\text{Eff}=2.43\%$ という結果が得られた。

しかし、この太陽電池の膜厚は $10\mu\text{m}$ が必要とされており、ディップコートにおいては厚い膜が得られないため、コーティング方法を考える必要がある。

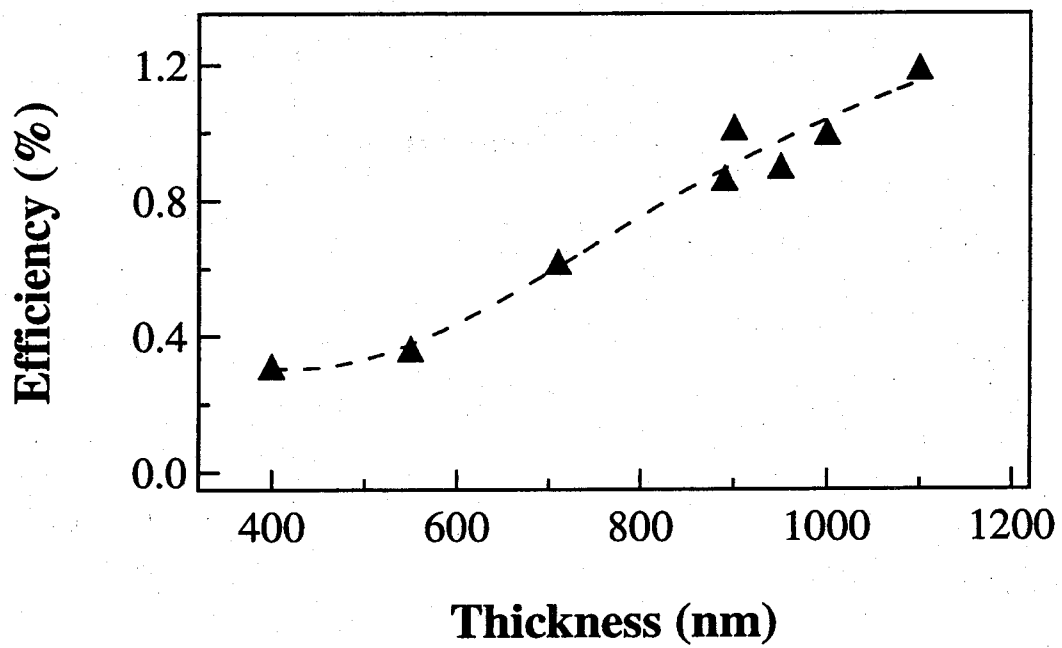


(a) 短絡電流



(b) 開放電圧

図6.1 膜厚の違いによる太陽電池の諸特性



(c) 変換効率

図6.1 膜厚の違いによる太陽電池の諸特性

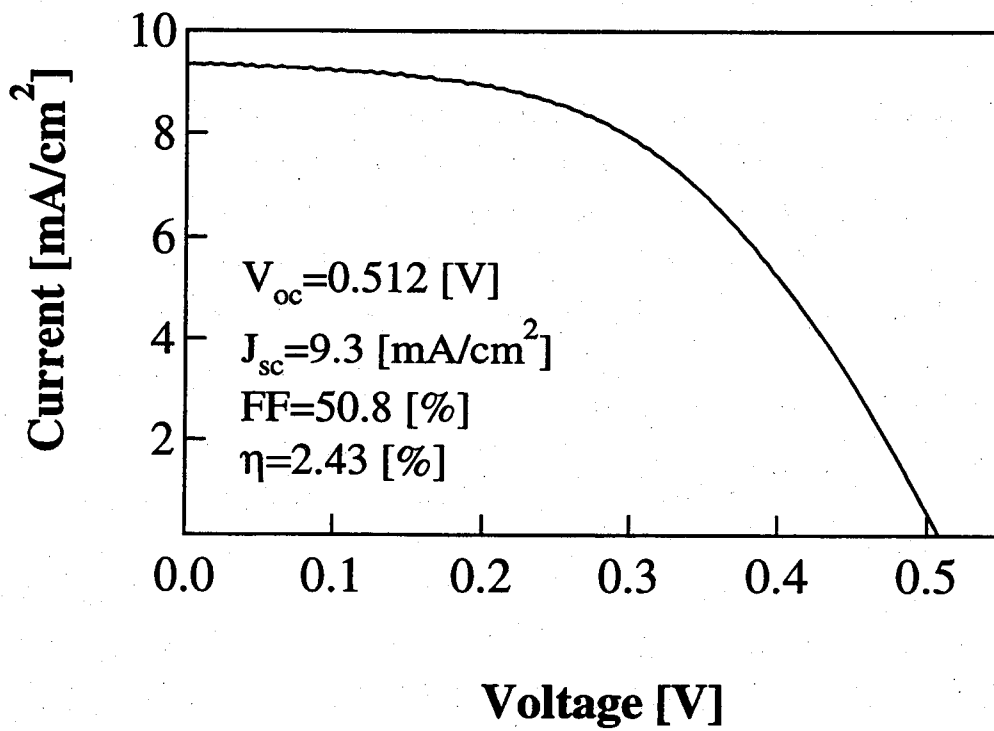


図6.2 TiO₂溶液の濃度を2倍にした太陽電池のI-V特性
(引き上げ速度 0.5mm/sec)

6-4. スピンコート法による太陽電池の評価

6-4-1. 電解液による違い

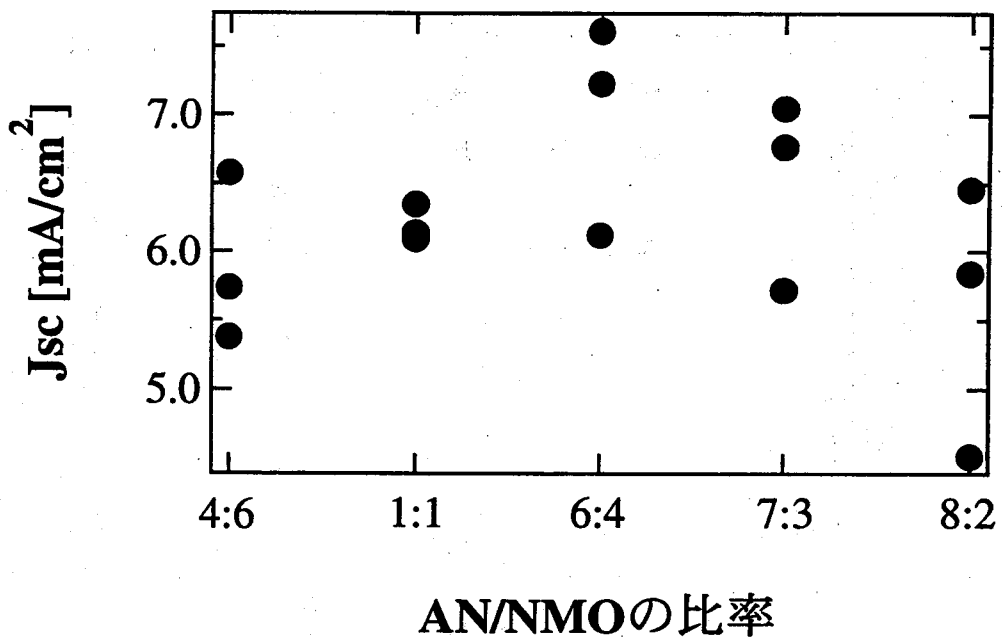
色素増感湿式太陽電池において変換効率の向上のためには短絡電流を増加させる必要がある。短絡電流を増加させる要因として膜厚の増加、電解液の電導度の向上などがあげられる。そこで、電解液の電導度の向上を図るために AN(アセトニトリル) と NMO (3-Methyl-2-oxazolidinone) の比を変えて太陽電池の作製を試みた。TiO₂ の膜厚は約 1.8 μ m である。

電解液として以下のものを用意した

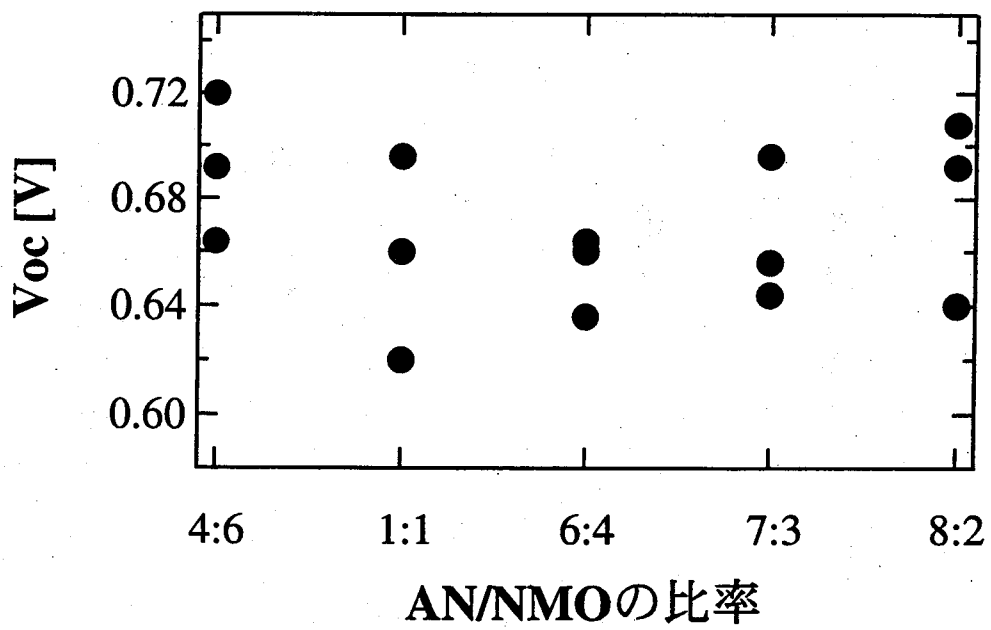
- i) 0.3M LiI, 0.03M I₂, AN 40%, NMO (3-Methyl-2-oxazolidinone) 60%
- ii) 0.3M LiI, 0.03M I₂, AN 50%, NMO (3-Methyl-2-oxazolidinone) 50%
- iii) 0.3M LiI, 0.03M I₂, AN 60%, NMO (3-Methyl-2-oxazolidinone) 40%
- iv) 0.3M LiI, 0.03M I₂, AN 70%, NMO (3-Methyl-2-oxazolidinone) 30%
- v) 0.3M LiI, 0.03M I₂, AN 80%, NMO (3-Methyl-2-oxazolidinone) 20%

これらの電解液を用いて太陽電池の諸特性を測定した。

太陽電池の諸特性を図 6.3 に示す。NMO の濃度を減らすにつれて、短絡電流が増加している傾向があり、6/4 の電解液を用いた太陽電池の短絡電流が最大になっており、その後、NMO の比率を減らしていくと下がる傾向になっており、8/2 の電解液を用いたサンプルが一番低くなっている。NMO の比率を減らしていくと電解液の粘度が下がり、電解液が多孔質の膜中を拡散しやすくなる。そのため、膜の細部に行き渡りやすくなり、電流が増加する傾向がある。NMO の濃度が高いと、電流が流れにくく、低くなっている。このことは、暗電流特性を見ると分かる。抵抗が一番低いのは 8/2 の電解液を用いたサンプルであり、その後抵抗が高くなり、1/1 や 4/6 が一番抵抗が高くなっている。暗電流特性を図 6.4 に示す。AN/NMO が 7/3、8/2 の電解液を用いた太陽電池の短絡電流が低下しているのは測定中に粘度が薄いために膜を通り抜けて蒸発したことが原因ではないかと考えられる。

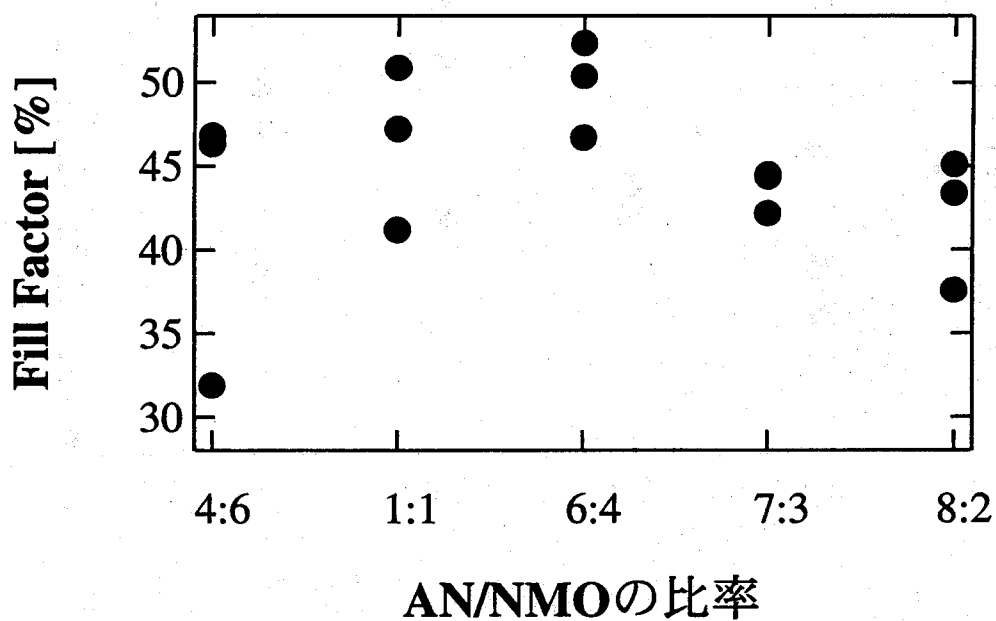


(a) 短絡電流

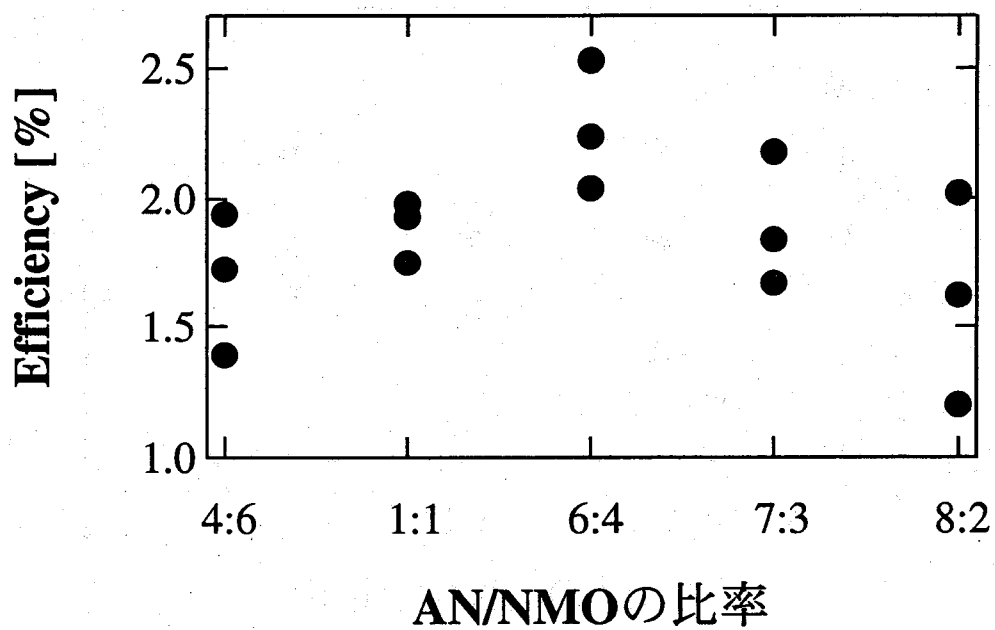


(b) 開放電圧

図6.3 AN/NMOの比率を変えたことによる太陽電池の諸特性



(c) Fill Factor



(d) 変換効率

図6.3 AN/NMOの比率を変えたことによる太陽電池の諸特性

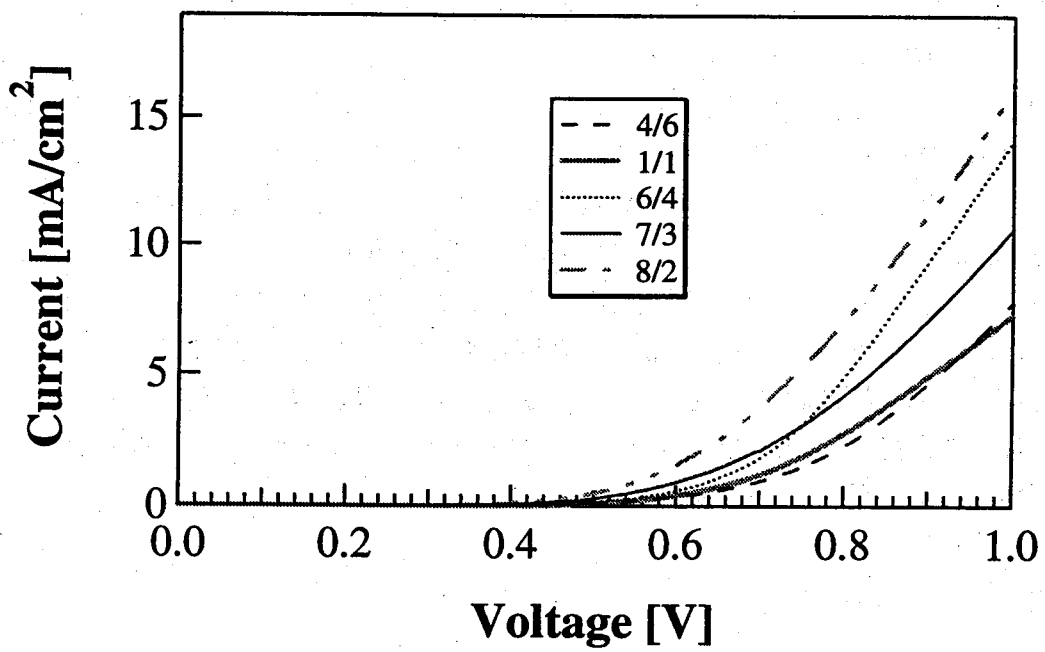


図6.4 AN/NMOの比率による電流特性

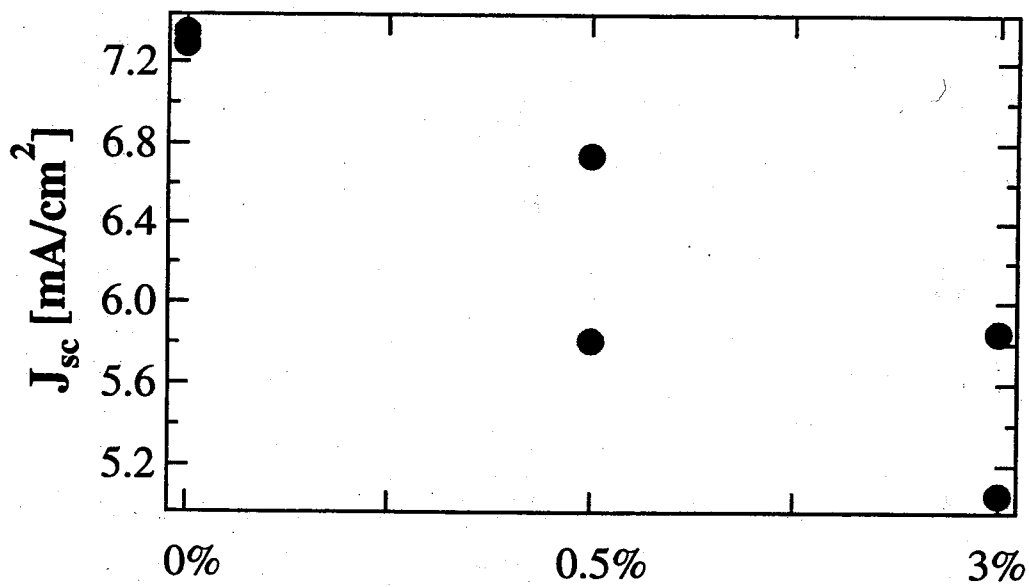
6-4-2. 4-tert-butylpyridine (TBP)の添加による違い

色素増感太陽電池において変換効率を低下させる要因として考えられる原因に、色素で覆われていないTiO₂表面での電解質への逆電子移動があるが、色素に比べて十分小さい分子を用い、TiO₂の色素が結合していない表面を覆うことで逆電子移動を抑えられ、TBPで吸着膜を処理することにより、開放電圧が向上することは既に報告されている[2]。そこで、今回は電解液に直接TBPを添加して太陽電池の測定を行った。このようにすることにより、太陽電池作成行程の簡略化につながり、時間も短縮できる利点がある。TiO₂の膜厚は約1.8μmである。

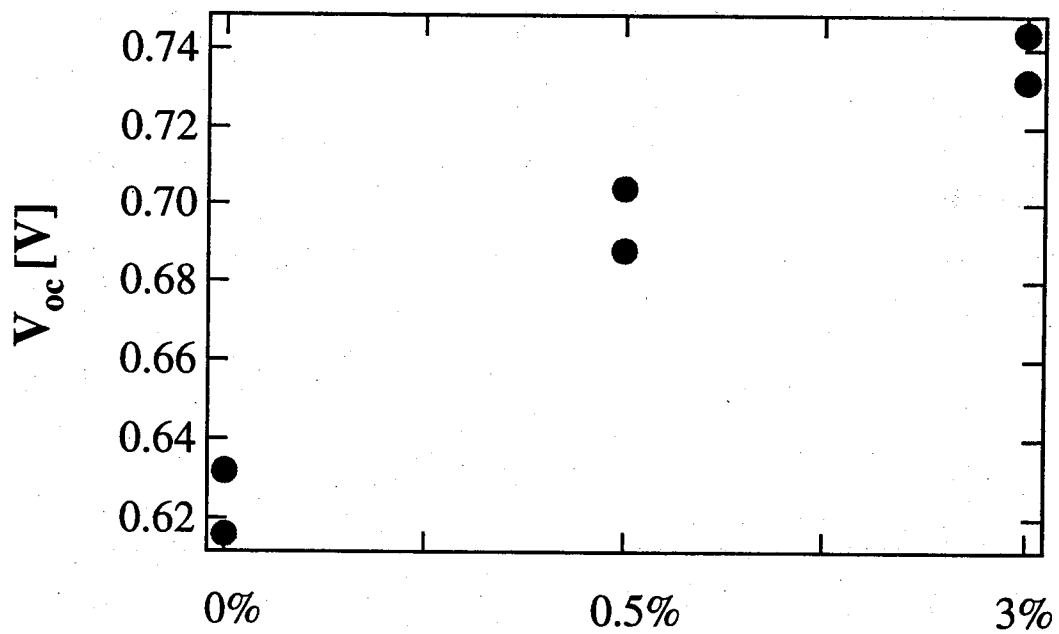
iii)の電解液にTBPを0.5%、3%添加して、太陽電池の諸特性の測定を試みた。図6.5に太陽電池の諸特性結果を示す。図6.5(b)を見てみると0.5%TBPを添加した太陽電池はTBPを添加していないものに比べ開放電圧が約0.08V向上している。また、図6.5(c)から0.5%TBPはFFが約9%向上していたのがわかる。同様に3%TBPでは開放電圧は約0.11V、FFは12%以上向上している。これらの結果より、TBPで吸着膜を処理したものと同様に、電解液にTBPを添加したことによるTiO₂表面からの逆電子移動が抑えられたことにより電池の漏れ電流が少なくなり、太陽電池の並列抵抗が低下し、開放電圧が上昇した。しかし、図6.5(a)の短絡電流特性ではTBPの添加量を増やすにつれて電流が減少していく傾向がある。これは電解液中を通過しようとする電子がTBP中の分子にぶつかって電子の流れが阻害されているのが原因ではないかと思われる。これにより、太陽電池の直列抵抗が高くなり、短絡電流の低下を招いている。このことは暗電流特性を見ると明らかなおりであり、0.5%、3%と抵抗が高くなっているのがわかる。図6.6に暗電流特性を示す。

6-4-3. 膜厚による違い

膜厚の違いによる太陽電池の短絡電流、変換効率を図6.7に示す。膜厚増加により色素の吸着量が増加し、短絡電流が増えており、膜厚3.8μmの太陽電池において $E_f=4.4$ [%]という結果が得られた。膜厚の違いによる量子効率の測定では300nm~800nm間でのフォトンの吸収があり、色素での吸収が見られる。膜厚が上がるにつれて吸収も増えているが、TiO₂の吸収ピークの波長約410nmでは膜厚が上がるにつれて吸収ピークが強く現れている。これは電池の特性にはあまり良くない。というのは、TiO₂で電子が励起し、そこで色素からの電子が再結合する可能性があるかもしれないからである。図6.8に量子効率の結果を示す。

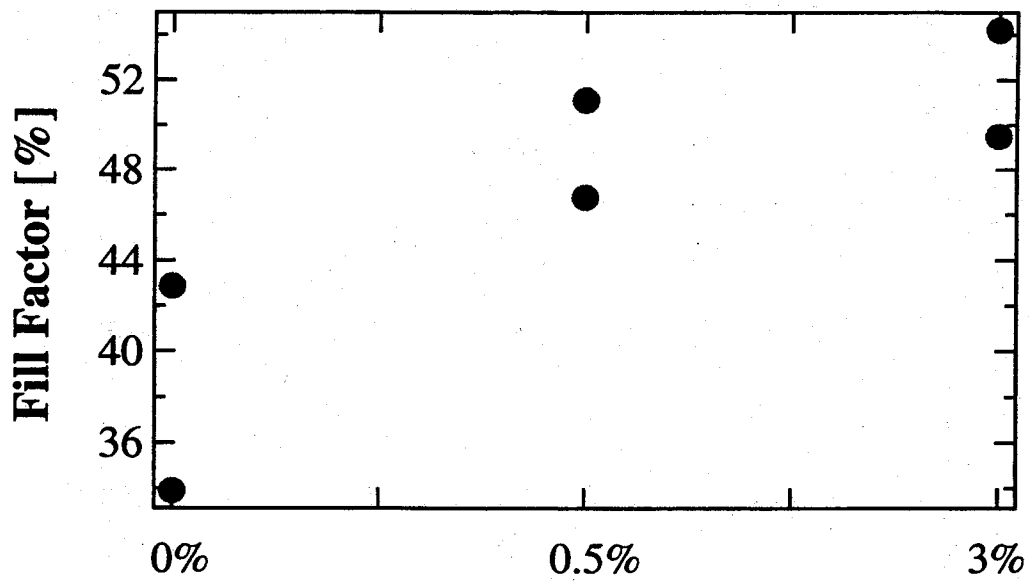


(a) 短絡電流

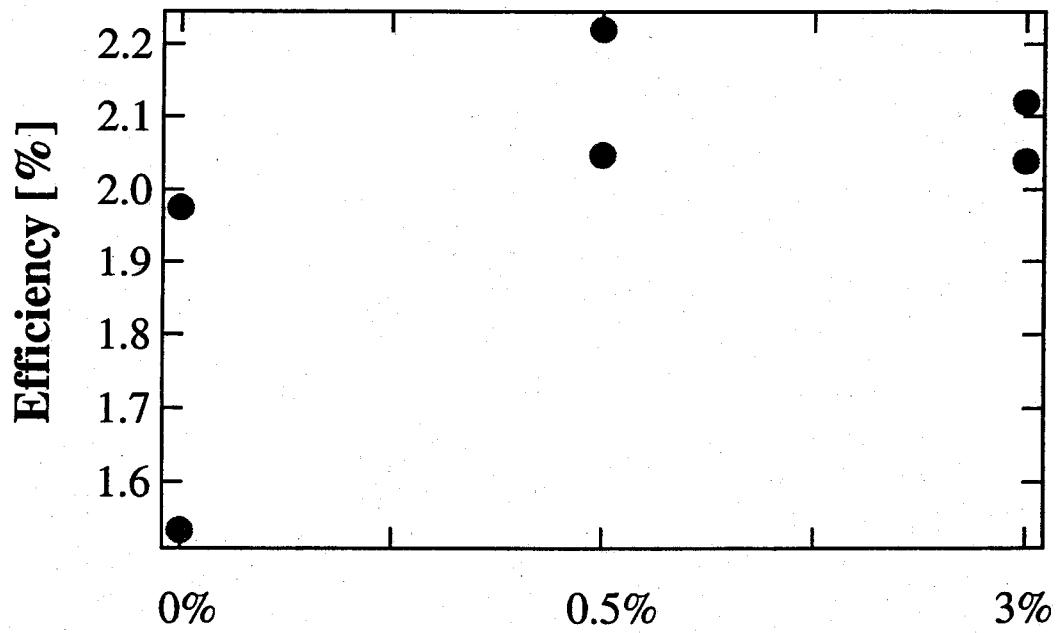


(b) 開放電圧

図6.5 TBPの添加量の違いによる太陽電池の諸特性



(c) Fill Factor



(d) Efficiency

図6.5 TBPの添加量の違いによる太陽電池の諸特性

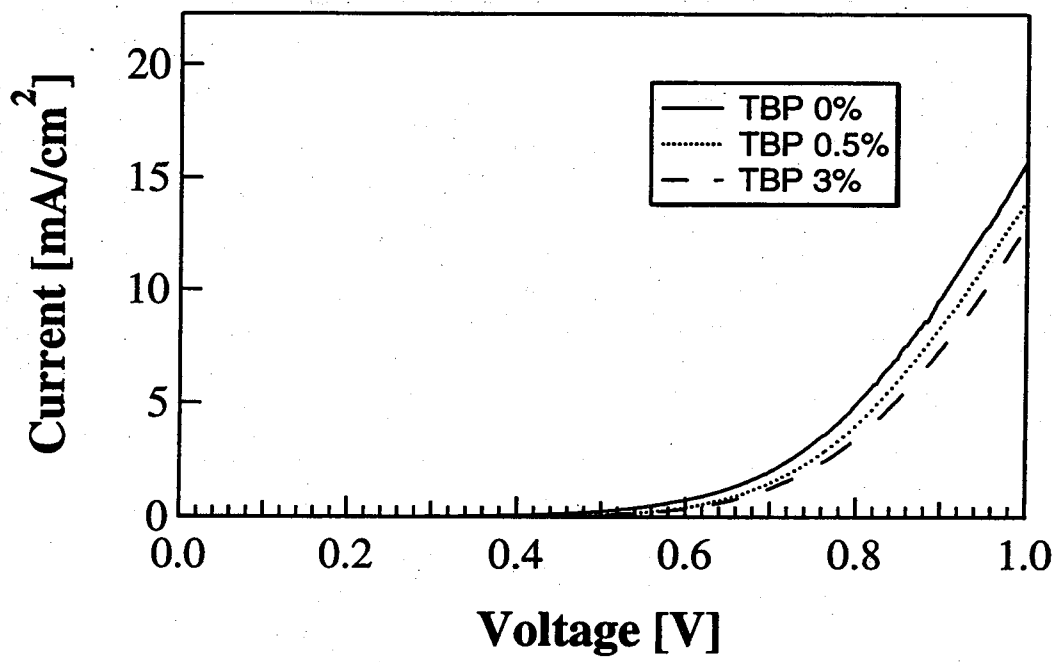


図6.6 TBPの添加量による電流特性

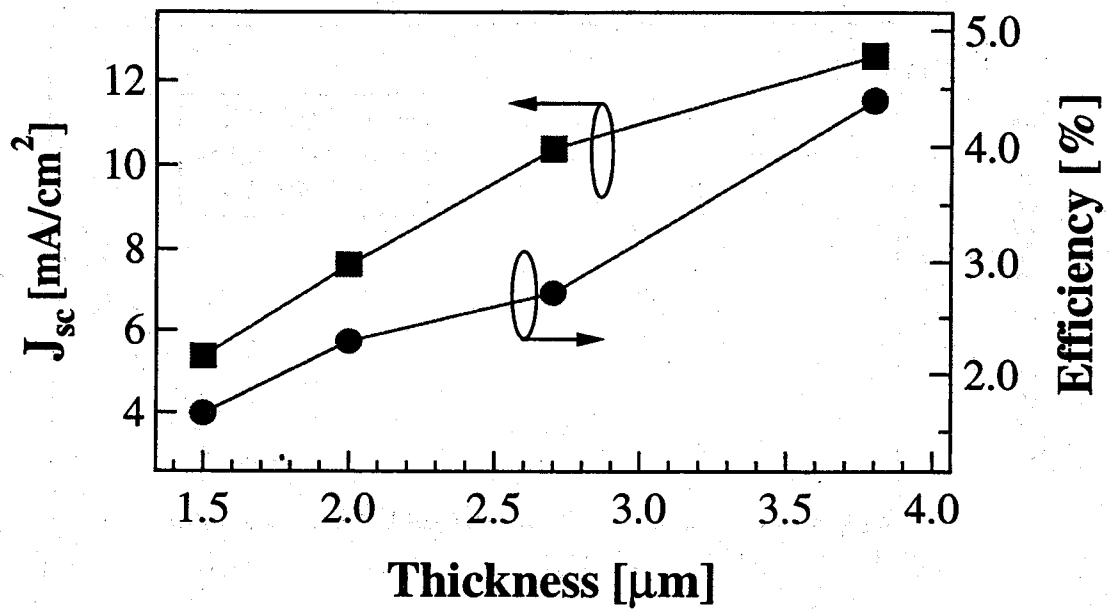


図6.7 膜厚による太陽電池の特性
(電解液 AN/NMO=1/1)

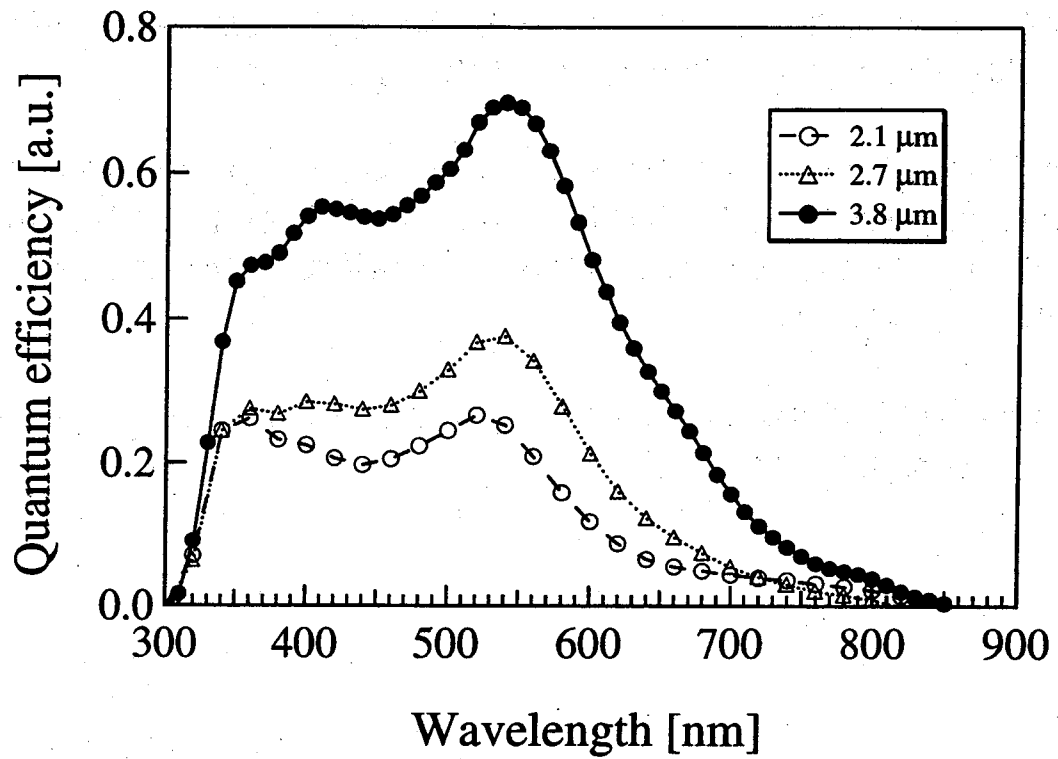


図6.8 膜厚の違いによる太陽電池の量子効率
(電解液 AN/NMO=1/1)

6-5. まとめ

・ディップコーティング

引き上げ速度 0.5 mm/sec で膜厚 $2\mu\text{m}$ の TiO_2 膜において $J_{sc}=9.3$ [mA]、 $V_{oc}=0.512$ [V]、 $FF=50.8$ [%]、 $E_f=2.43$ [%]の結果が得られた。

・スピコーティング法

1. 電解液において0.3M LiI, 0.03M I_2 , AN, NMO のAN/NMOの比率を変えることによる太陽電池の諸特性ではNMOの濃度を低くすると短絡電流は良くなっていく傾向があるが少なすぎると安定性を欠く結果になってしまう。
2. TiO_2 からの逆電子移動を抑制するために4-tert-butylpyridine (TBP)を電解液に0.5%、3%添加し太陽電池の諸特性を評価した。0.5%添加した電解液では開放電圧が約0.08V向上し、 FF も約9%向上した。3%添加した電解液では開放電圧は約0.11V、 FF は12%以上向上した。
2. 膜厚 $3.8\mu\text{m}$ の太陽電池において $J_{sc}=12.6$ [mA/cm^2]、 $V_{oc}=0.644$ [V]、 $FF=53$ [%]、 $Eff=4.4$ [%]と言う結果が得られた。

参考文献

- [1] 太陽エネルギー工学 浜川 圭弘 培風館
- [2] S.Y.Haung, G.Schlichthorl, A.Jnozic, M.Grätzel, and A.J.Frank,
J. phys. Chem. B1997, 101, 2576-2582

第7章

総括

1991年に、スイス、ローザンヌ工科大学 Grätzel 教授らによって発表された色素増感太陽電池は安価なチタンを利用した新しいタイプの太陽電池であり、変換効率も10%程度と高く、世界的に注目を集めている。本研究では膜作成法として、ゾル-ゲル法を用い溶液を作製しディップコーティング法、スピンコーティング法によりTiO₂膜の作製を行い、太陽電池を構成した。以下に本論文で得られた結果をまとめた。

・ディップコーティング

1. 引き上げ速度を上げるにつれて厚い膜が得られ、また、膜の表面状態は悪くなりクラックが入るようになった。
2. 引き上げ速度 0.5 mm/sec で膜厚2 μ m のTiO₂膜において $J_{sc}=9.3$ [mA]、 $V_{oc}=0.512$ [V]、 $FF=50.8$ [%]、 $E_{ff}=2.43$ [%]の結果が得られた。

・スピンコーティング法

1. ポリエチレングリコールを添加すると添加していないときに比べ表面に均一な膜が得られた。ポリエチレングリコールの添加量は40%が最適な条件であることが確認された。
2. 電解液において0.3M LiI, 0.03M I₂, AN, NMO のAN/NMOの比率を変えることによる太陽電池の諸特性ではNMOの濃度を低くすると短絡電流は良くなっていく傾向があるが少なすぎると安定性を欠く結果になってしまう。
3. TiO₂からの逆電子移動を抑制するために4-tert-butylpyridine (TBP)を電解液に0.5%、3%添加し太陽電池の諸特性を評価した。0.5%添加した電解液では開放電圧が約0.08V向上し、 FF も約9%向上した。3%添加した電解液では開放電圧は約0.11V、 FF は12%以上向上した。
4. 膜厚3.8 μ mの太陽電池において $J_{sc}=12.6$ [mA/cm²]、 $V_{oc}=0.644$ [V]、 $FF=53$ [%]、 $E_{ff}=4.4$ [%]という結果が得られた。

以上のように、ディップコーティング法は薄膜作製には適しているが厚い膜には不向きであり、スピンコート法では厚い膜が得られ、変換効率が向上した。