

高効率太陽熱吸収装置の実用化に向けた研究開発（第2報）

早川亮・宮川和幸・八代浩二

Research and Development for Practical Use of High Efficient Solar Absorbing Device (2nd Report)

Ryo HAYAKAWA, Wako MIYAGAWA and Koji YATSUSHIRO

要 約

高効率太陽熱吸収装置の実用化を目的として、これまでに得られた知見を基に^{1) 2) 3) 4)}陽極酸化法を用いてアルマイト膜を形成すると共に、アルマイト孔中に金属スズを電解析出させることによって皮膜を黒色化した。黒色化したパイプ状試料を用いて、実環境下において太陽光に曝した際の集熱特性を評価した。その結果、試料内部の温度は約 118 °Cまで上昇した。次に人工太陽照明灯を用いて熱媒体（純水）の有無に伴う集熱特性の比較を行った結果、試料内部の温度は熱媒体を用いずに大気を密封した場合には約 108 °C、熱媒体として純水を密封した場合には約 99 °Cまで上昇した。また、選択吸収膜の耐久性を評価するために、色調および日射吸収率の促進耐光性試験に伴う経時変化を測定した。色調においては僅かに変化したものの外観に大きな変化は確認されず、日射吸収率においても変化は見られず高い吸収率を維持した。

1. 緒 言

近年、地球温暖化などグローバルヒーティングの問題が顕在化しており⁵⁾、このような危機的状況から脱するには、現在の化石燃料主体の社会を抜本的に改革する必要がある。そのため太陽エネルギーの利用技術は重要であり、脱化石燃料に向けた再生可能なエネルギー開発という点でも大きな役割が期待されている。実際、アメリカやスペインなどにおいて大規模な太陽熱発電の商業プラントの開発が開始されており、太陽熱発電技術は電力市場に参入できるところにまで近づいて来ている⁶⁾。

しかし、実用化するには、光エネルギーを高効率に吸収すると共に、吸収した熱の放射を高度に抑制することが重要である。このように高効率な太陽熱利用を行うためには、可視～近赤外の波長で高い吸収率を持ち、赤外域の波長で低い放射率を持つ選択吸収膜が必要となる。

これらの特性を備えた選択吸収膜は、これまでに種々の材料で開発されている。しかし、高効率な選択吸収膜の製法は真空技術を応用したスパッタリング法を用いており、きわめて高価な製造設備が必要となる。

そのため選択吸収膜の製法には、より安価な製造プロセスで実現することが課題となっている。

そこで本研究では、これまで陽極酸化法を用いたアルマイト膜形成を中心に、高効率で低コストな選択吸収膜の開発を行ってきた。その際、アルマイト膜の着色方法

には、アルマイト孔中の底部に金属を析出させる電解着色法を用い、析出金属にはスズを選択した。また、着色した試験片について日射吸収率を調べるとともに、人工太陽照明灯を用いた光照射を行い、板状試料の温度変化を測定した。その結果、20 min の光照射によって約 91 °Cまで昇温出来ることが分かった³⁾。

そこで、この選択吸収膜を用いた高効率太陽熱吸収装置の実用化を目的に、パイプ状試料を用いて、実環境下における太陽光照射試験を行った。

更に、人工太陽照明灯を用いて、熱媒体の有無に伴う集熱特性の比較を行った。また、選択吸収膜の耐久性を評価するためにサンシャインカーボン光源とする促進耐光性試験を行い、色調、色差および日射吸収率の経時変化を測定した。

2. 実験方法

2-1 陽極酸化によるアルマイト膜形成

アルマイト膜の形成には、希硫酸中で処理を行う硫酸陽極酸化を用いた。この方法はコストが低く、皮膜が無色透明であり、着色仕上げに向いていることから、現在の陽極酸化の主流になっている⁷⁾。

試料には、φ30×1×120 mm の純アルミニウム系パイプ材 (A1070) および、50×67×0.3 mm の純アルミニウム系板材 (A1080) を用いた。

試料の清浄化のための前処理として、アセトン中で超音波洗浄を行った後、80℃に加熱した15%硫酸中で10 min 保持した。

陽極酸化処理には一般的に用いられている条件を適用し、電解液を15%硫酸水溶液、電解槽電圧を定電圧法でDC 15 V、浴温度を20℃とした。パイプ状試料の場合、陰極には陽極と同質の脱脂処理を施した円筒形アルミニウム(φ150×0.3×200 mm)を用い、電極間距離を60 mmとして30 minの電解時間でアルマイト処理を行った。板状試料の場合、陽極と同質の脱脂処理を施したアルミニウム板(100×50×1 mm)を用い、電極間距離を100 mmとして電解時間30 minで処理を行った。なお、電解処理中は電解液の攪拌を十分に行った。

2-2 電解着色法による皮膜の黒色化

作製したアルマイト膜への着色には、電解着色法を用いた。この方法は、アルマイト孔中に金属を電解析出させ、析出した金属コロイド粒子が光を散乱することにより皮膜が着色されるものである⁸⁾。本研究では、可視から近赤外の波長領域において高い吸収率を得ることを目的としているため、黒色に着色することとした。そのため、アルマイト孔中に析出させる金属として、欧米においてアルマイトのブラック処理として一般的に用いられているスズを選択した⁹⁾。電解溶液には、硫酸スズ、硫酸、酒石酸および硫酸アンモニウムをそれぞれ90 g/L、15 g/L、20 g/Lおよび50 g/Lを溶解させた水溶液を用いた。パイプ状試料における電解析出条件は、電解槽電流を定電流法でAC 0.2 A/dm²、浴温度を20℃、析出時間を30 minとした。その際、対極には脱脂処理を施した円筒形アルミニウム(φ150×0.3×200 mm)を用い、電極間距離を60 mmとした。なお、電解処理中は電解液の攪拌を十分に行った。

また、板状試料における電解析出条件は、電解槽電圧を定電圧法でAC 10 V、浴温度を20℃、析出時間を15 minとした。対極にはカーボン板(100×90×1.0 mm)を用い、電極間距離を100 mmとした。なお、電解処理中は電解液の攪拌を十分に行った。

2-3 光照射に伴う試料内部の温度変化の測定

2-3-1 実環境下における集熱特性評価

実環境下にて太陽光に曝した場合における集熱特性の評価を行った。集熱特性の評価を行う際には、図1に示す評価容器を用いた。この容器は木製であり、試料の下部に対しても光が照射されるように底部に反射パネルが設置された構造を持っている。また、断熱効果を得るために発泡スチロールにより周囲を覆っている。この容器の受光部に厚さ3 mmのソーダ石灰ガラスの板を用いて

蓋をし、集熱特性評価容器とした⁴⁾。

試料には、電解着色法により黒色に着色したパイプ状試料を用いた。この試料の両端をフッ素樹脂製のゴム栓により封止し、集熱特性評価容器内に固定した。実環境下における集熱特性評価容器の設置条件は、図2に示すように地面に対する受光面の傾きを30°、方角を南とした。温度測定には熱電対を用い、パイプ状試料における内部空間の中心部を測定箇所とした。なお外気温は、受光面と同じ高さ(地面から約250 mm)に熱電対を浮かせた状態で設置し、直射日光が当たる状態で測定した。また、太陽光による日射量は全天日射計(DELTA OHM(有)製: LP471 PYRA03)を用いて測定した。



図1 光照射に伴う試料内部の温度変化を測定するための評価容器

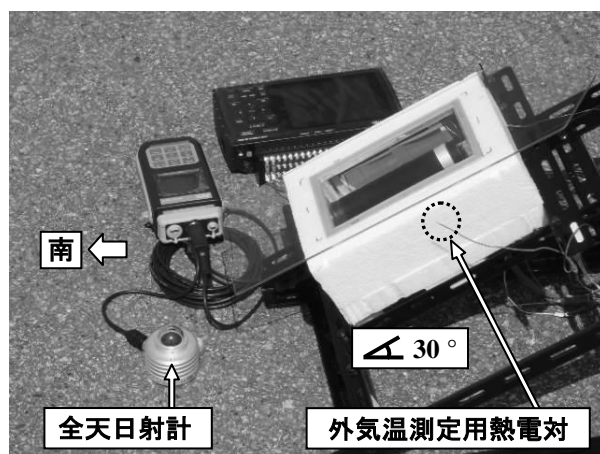


図2 実環境下における集熱特性評価容器の設置状況

2-3-2 集熱特性におよぼす熱媒体の影響

これまで熱媒体を用いずに、大気を密封した状態で集熱特性を評価してきた。しかし、太陽熱吸収装置を実用化する場合、装置内部に熱媒体を循環させる機構を持つことが考えられる。そのため、実際に熱媒体を集熱部に密封した状態において、集熱特性を評価する必要がある。そこで、人工太陽照明灯を用いて熱媒体の有無に伴う集熱特性の比較を行った。

試料には黒色化したパイプ状アルミニウム、熱媒体には純水を用いた。封入量は、この試料の両端をフッ素樹脂製のゴム栓により封止し際の内部空間をほぼ完全に満たす量として、約 50 ml とした。熱媒体を試料内に密封したのち、試料を集熱特性評価容器内に固定した。温度測定には熱電対を用い、パイプ状試料における内部空間の中心部を測定箇所とした。光照射には、人工太陽照明灯（セリック（株）製：XC-500EFSS）を用い、照度は結晶系太陽電池測定用ソーラシミュレータについて規定している JIS C 8912 に準拠し 1000 W/m² とした。なお、照度の測定は太陽光ソーラーパワーメーター（Tenmars Electronics（株）製：TM-207）を用いて行った。光照射は、光源の出力が安定化してから行う必要があるため、人工太陽照明灯の電源を投入してから 10 min 保持したのちに試料への照射を開始した。照射時間は 120 min とした。この時間は、熱媒体を用いない場合の光照射に伴う試料内部の昇温速度が 1 °C/min 以下まで減少し、内部温度が一定状態であると判断できるのに十分な時間として設定した。

なお、照射終了後の温度変化においても、試料内部の温度が室温付近に低下するまで測定を続けた。

2-4 促進耐光性試験に伴う色調・色差および

日射吸収率の経時変化

2-4-1 促進耐光性試験

太陽熱吸収装置を実環境下で実際に使用した際、長期間の日射によって選択吸収膜が変質し、集熱特性の低下が生じる可能性がある。そこで、促進耐光性試験を行い、選択吸収膜の色調・色差および日射吸収率の光照射時間に伴う経時変化を測定した。耐光性試験は、サンシャインウェザーメーター（スガ試験機株式会社製：WEL-SUN-HC）を用いて行った。

試料には、黒色化した板状アルミニウムを用いた、照射光の光源には波長範囲が 300 ~ 700 nm、放射照度が 255 W/m² のサンシャインカーボンアークランプを使用し、72 時間毎にランプの交換を行った。光照射は連続的に行い、合計 1008 時間まで実施した。ブラックパネル温度は 63 ± 3 °C とした。なお、太陽熱吸収装置を実用

化した場合、選択吸収膜が直接降雨に曝される環境に無いことから、降雨を想定した水のスプレー噴霧は行わなかった。

2-4-2 色調および色差の測定

促進耐光試験に伴う選択吸収膜の変質状態を評価するための手法としてし、黒色化した試料の色調変化を測定した。色調変化は、72 時間毎に紫外可視分光光度計（日本分光（株）製：V-570）を用いて測定し、L*a*b*表色系で表した。この表色系における L*は明度、a*および b*は原点を無彩色としたときの色相を表しており、それらの値の絶対値が大きくなるに従って、より鮮やかな色調となることを示している。そのため、この L*、a*、b*の変化および、これらの値から次式で算出される色差 ΔE*ab の変化量が選択吸収膜の変質程度を示すこととなる。

$$\Delta E^*_{ab} = \left((\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right)^{1/2}$$

2-4-2 日射吸収率の測定

促進耐光性試験に伴う選択吸収膜の集熱特性の変化を評価するために、黒色化した試料の日射吸収率 α_eを測定した。まず、紫外可視分光光度計（日本分光（株）製：V-570）を用いて分光反射率 ρ を測定した。測定位置は、着色された領域の中心近傍にける 3ヶ所とし、その際の波長範囲は 300 ~ 2100 nm とした。また、測定領域は 10 × 10 mm とした。次に、得られた反射率 ρ から、JIS R3106 に準拠して日射吸収率 α_eを算出した。

3. 結果および考察

3-1 実環境下における集熱特性評価

試料には実験方法 2-1 および 2-2 に示す手順により黒色化したパイプ状試料を用いて、実環境下にて太陽光を照射した場合における集熱特性の評価を、2013 年 8 月 22 日の 10 時 25 分から 16 時 35 分の間に行った。その際の天候は、晴れであった。図 3 に、太陽光の照射に伴う試料内部の温度変化、外気温の変化および日射量の変化を示す。試験開始時の試料内部温度は約 28 °C、日射量は約 825 W/m²、外気温は約 36 °C であった。照射を開始した直後から試料内部温度は、急激に上昇し始め、30 分後には約 86 °C、1 時間後には約 104 °C に到達した。試料内部温度は更に上昇し続け、試験開始から約 90 分後の 12 時頃には、最高到達温度となる約 118 °C まで上昇した。その後、試料内部温度は日射量の変化に伴い変化するものの、約 100 °C 以上を維持し続けた。試験開始から約 180 分後辺りに試料内部温度の急激な低下がみられるが、これは一時的に雲によって太陽光が遮ら

れることにより、日射量が低下したためである。なおその際の日射量は約 177 W/m^2 、試料内部温度は約 $78 \text{ }^\circ\text{C}$ であった。日射量は約 530 W/m^2 程度まで回復したが太陽光の照射は不十分であり、試料内部温度の上昇は約 $88 \text{ }^\circ\text{C}$ に留まった。その後は太陽光の入射角度の低下に伴い試料内部温度も低下した。集熱特性評価容器内に太陽光が入射しなくなった時点で評価試験を終了した。試験終了時における試料内部温度は約 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 、日射量は約 59 W/m^2 であった。実環境下における評価試験の結果、本研究において作製した選択吸収膜は屋外での使用においても良好な集熱特性を有することが分かった。

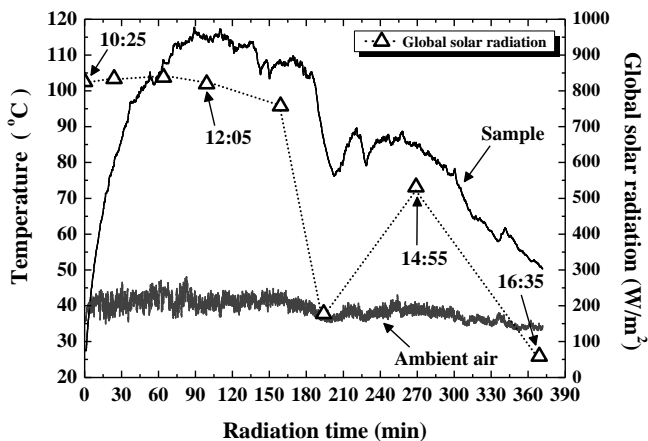


図 3 実環境下における光照射に伴う試料内部の温度変化（熱媒体：大気）

3-2 集熱特性におよぼす熱媒体の影響

人工太陽照明灯を用いた光照射に伴う試料内部の温度変化について、熱媒体を用いず大気のみを密封した状態および熱媒体として純水を用いて試料内部を満たした状態に対して測定した結果を図 4 に示す。なお、試料には実験方法 2-1 および 2-2 に示した手順により黒色化したパイプ状試料を用いた。

熱媒体を用いず大気のみを密封した状態の場合、光照射を開始した直後の温度変化は、急激に上昇した。その後、温度の上昇は徐々に緩やかになり、昇温速度が $1 \text{ }^\circ\text{C/min}$ 以下になった時点で試料温度が平衡状態であると判断し、光照射を終了した。光照射終了までに経過した時間は、約 120 min であった。そのため、この経過時間を照射時間に設定し、照射条件として他方の試料にも適用した。

また、照射時間が終了した時点における試料の温度を最高到達温度とした。大気のみを密封した状態における最高到達温度は約 $108 \text{ }^\circ\text{C}$ であった。なお、光照射の終了後、試料内部の温度は急激に低下し室温に至った。

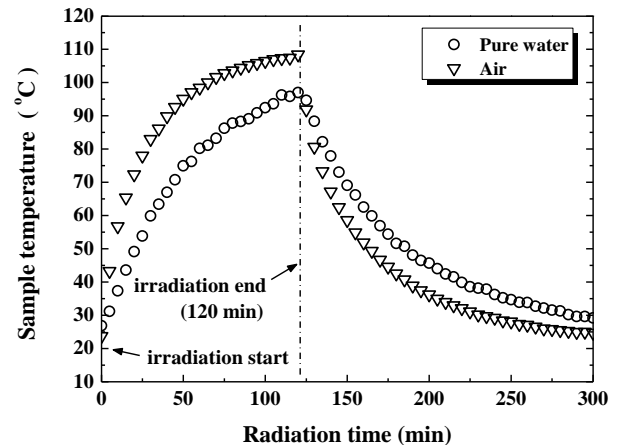


図 4 人工太陽照明灯による光照射に伴う試料内部の温度変化（熱媒体：大気および純水）

熱媒体として純水を用いて試料内部を満たした状態の場合、光照射を開始した直後の温度変化は、大気の場合に比べて緩やかではあるが、急激に上昇した。これは大気に比べ純水の熱容量の方が大きいためであると考えられる。その後、温度の上昇は徐々に緩やかになり、約 $99 \text{ }^\circ\text{C}$ まで上昇した。この温度は純水の沸点に近い値であり、本選択吸収膜は 120 min の光照射で純水を沸騰させる程度の集熱特性を有していることが分かった。光照射の終了後、試料内部の温度は大気の場合に比べて僅かに緩やかに低下し室温に至った。これは大気に比べ純水の熱容量の方が大きいためであると考えられる。

これらの結果から、本研究で作製した選択吸収膜は熱媒体を用いた場合であっても、良好な集熱特性を有していることが分かった。

また、大気のみを密封した状態における最高到達温度は、人工太陽照明灯を用いた場合よりも実環境下で測定を行った結果の方が約 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ほど高温まで到達していた。このことから、熱媒体を用いた場合においても実環境下の方がより高温まで上昇する可能性があると考えられる。

3-3 促進耐光性試験に伴う色調・色差および

日射吸収率の経時変化

3-3-1 色調および色差の経時変化

耐光性試験に伴う選択吸収膜の変質状態を定量的に評価するために、紫外可視分光光度計を用いて色調の経時変化を測定した。試料には、実験方法 2-1 および 2-2 に示した手順により黒色化した板状試料を用いた。色調の測定は 72 時間毎に行い、色調は $L^*a^*b^*$ 表色系を用いて表した。この表色系により求めた色座標値 a^* 、 b^* および明度 L^* の経時変化を図 5 に示す。

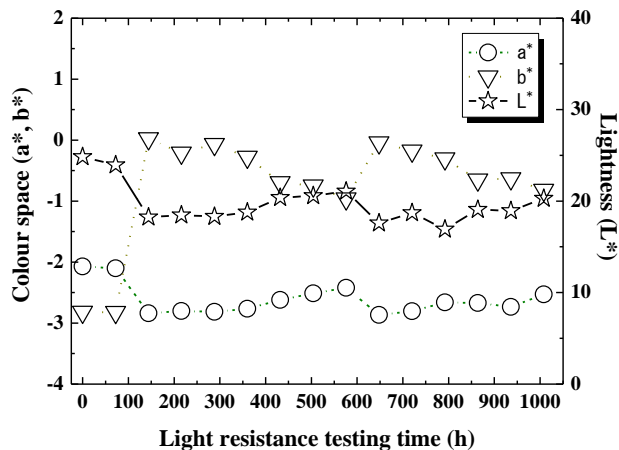


図5 促進耐光性試験に伴う色調の経時変化

耐光性試験前と比べ、72 時間後までは a^* 、 b^* および L^* の値に変化は見られなかった。144 時間経過した際に、 a^* の値の減少と b^* の値の増加が確認された。しかし、明度を表す L^* の値が減少していることから、選択吸収膜の黒色状態に劣化は生じていないと考えられる。耐光性試験を更に続け色調の経時変化を測定した結果、 a^* および b^* の値は僅かに増減するが、外観において大きな変化は確認されなかった。また、 L^* の値においても僅かな増減は見られたが、大きく増加するといった黒色状態の劣化を表す変化は確認されなかった。

次に、紫外可視分光光度計による測定で得られた a^* 、 b^* および L^* の値から、耐光性試験前の試料を基準とした色差 ΔE^*ab の値を求めた。なお、この値が大きくなるに従い黒色状態が変化していると評価できる。求めた色差 ΔE^*ab 値の耐光性試験に伴う経時変化を図6に示す。

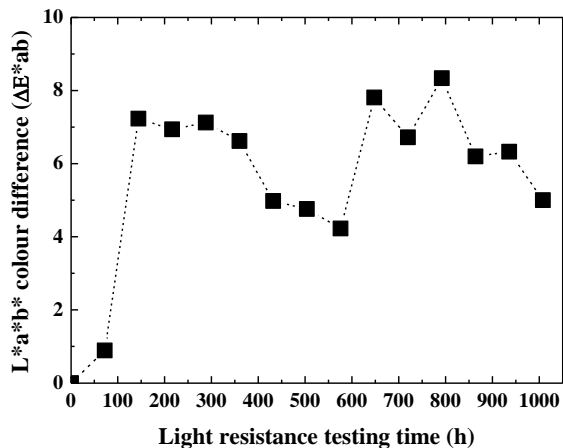


図6 促進耐光性試験に伴う色差の経時変化

耐光性試験前と比べ、72 時間後までは ΔE^*ab の値にほとんど変化は見られなかった。144 時間経過すると、 ΔE^*ab の値は 7 まで増加した。この変化量は、無着色のアルマイト膜から黒色化した際の ΔE^*ab 値の変化量が約 76 であった²⁾ ことと比較すると、約 9 % 程度であり非常に僅かである。その後も ΔE^*ab の値に僅かな増減は見られるが、黒色状態の劣化を示す程の大きな変化は確認されなかった。

耐光性試験に伴う色調および色差の経時変化におけるこれらの結果から、実環境下において長期間使用した場合でも本研究で作製した選択吸収膜の黒色状態は劣化しないことが分かった。

3-3-2 日射吸収率の経時変化

選択吸収膜の集熱特性に対して最も影響を与える因子の一つである日射吸収率 α_e について、耐光性試験に伴う経時変化を測定した。紫外可視分光光度計を用いて測定した分光反射率 ρ の値から、JIS R3106 に準拠して算出した日射吸収率 α_e の耐光性試験に伴う経時変化を図7に示す。

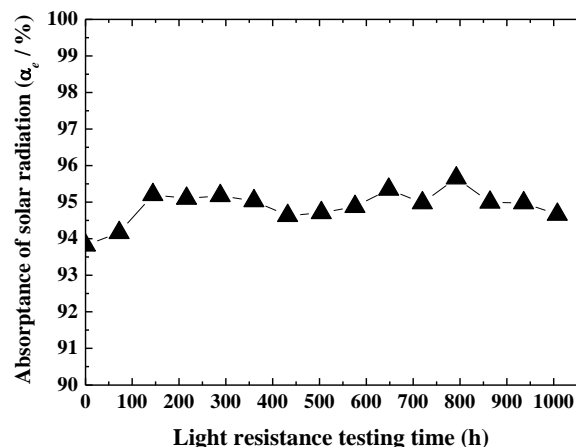


図7 促進耐光性試験に伴う日射吸収率 α_e の経時変化

耐光性試験前の日射吸収率の値が約 94 % であったのに対して、色調および色差に変化が見られた144 時間後の値は約 95 % でありほとんど変化は見られなかった。その後も日射吸収率の値は約 94 ~ 95 % を維持した。このことから、本研究において作製した選択吸収膜の集熱特性は、実環境下にて長期間使用した場合でも低下せず、良好な特性を維持することが分かった。

4. 結言

高効率太陽熱吸収装置の実用化を目的として、各種の評価試験を行った。まず黒色化したパイプ状試料を用い

て、実環境下における太陽光照射試験を行うと共に、人工太陽照明灯を用いて、熱媒体の有無に伴う集熱特性の比較を行った。

また、選択吸収膜の耐久性を評価するために、黒色化した板状試料に対してサンシャインカーボンを光源とする促進耐光性試験を行い、色調、色差および日射吸収率 α_e の経時変化を測定した。

その結果、実環境下において熱媒体を大気とした場合、試料内部の温度は最大約 118 °Cまで上昇した。

また、人工太陽照明灯を用いて熱媒体の有無に伴う集熱特性を比較した結果、熱媒体を用いずに大気を密封した場合には約 108 °C、熱媒体として純水を密封した場合には約 99 °Cまで上昇した。

耐光性試験に伴う色調、色差および日射吸収率の経時変化を測定した結果、黒色状態の劣化および日射吸収率の低下は見られなかった。

以上の結果から、本研究において作製した選択吸収膜は、実環境下において長期間使用した場合でも良好な集熱特性を維持することが分かった。

参考文献

- 1) 早川 亮, 他: 山梨県工業技術センター研究報告, No. 24, P.148 (2010)
- 2) 早川 亮, 他: 山梨県工業技術センター研究報告, No. 25, P.82 (2011)
- 3) 早川 亮, 他: 山梨県工業技術センター研究報告, No. 26, P.57 (2012)
- 4) 早川 亮, 他: 山梨県工業技術センター研究報告, No. 27, P.22 (2013)
- 5) 斉藤 武雄: ヒートアイランド, 講談社, P.417 (1997)
- 6) 玉浦 裕: 太陽エネルギー 有効利用最前線, P.3 (2008)
- 7) 山口 裕: 軽金属, Vol.59, No.4, P.204 (2009)
- 8) 佐藤 敏彦, 神長 京子: 新・アルマイト理論, カルロス出版株式会社, P.148 (1997)
- 9) 川合 慧: Al の機能的アノード処理, 槇書店, P.150 (2005)