

太陽電池モジュールカバーガラスの曝露特性 (都心地域の場合)

The exposed characteristics of PV module coverglass
(The case of area in downtown Tokyo)

郡 啓 太*¹
Keita KOURI

平 田 陽 一*²
Youichi HIRATA

谷 辰 夫*³
Tatsuo TANI

中 井 日出海*⁴
Hidemi NAKAI

Abstract

The surface deterioration and stuck dust on PV module coverglass reduces the glass transmittance and the module output. In this article an experiment for evaluating such reductions was carried out. Some kinds of glasses were exposed to the sun in the same manner as a PV module, and its transmittance was measured at regular intervals. The exposed position was at the central area of Tokyo. The results of this experiment are as follows: an approximate formula of relation between time and transmittance, the effect of surface electric potential by the stuck dust, the effect of transmittance by cleaning surface, the dust element analysis, and the influence of module output by the dust.

The glass transmittance converged constant level at long-term exposed. The dust constitutions are carbon compounds and grain metal elements (Fe, Ti and so on). Module output reduced about 6% by stuck dust at poly-crystalline Si.

Key words: PV module coverglass, transmittance, surface deterioration, stuck dust, module output

1. はじめに

太陽光発電の実用化のためには太陽電池の高効率化と低コスト化が要請されており、太陽電池セルはもとより太陽電池モジュールの高効率化も極めて重要である。特に太陽電池モジュールについては、カバーガラス表面の浮遊物付着による透過率の低下が年間発電量の減少につながるとされている。しかし、これらの浮遊物は太陽電池モジュールの設置場所によって異なるため、必ずしも定量的に考察されていないのが現状である。

筆者らは、太陽電池モジュールの高効率化のための考察を行うとともに太陽光発電システムの最適設計に資することを目的として、太陽電池モジュールのカバーガラスを模擬した各種ガラスサンプルを約2年間屋外曝露し各種の特性を取得した。測定場所は本学神楽坂校舎屋上(東京都新宿区)である。この地域は人口密度が高く、しかも交通量の多い、いわゆる都心地域であり、太陽光発電を行うには条件の良くない地域である。

取得した特性は、時間経過に対する各種ガラスサン

プルの透過特性、雨量などの気象因子と透過特性の相関性などである。また、ガラス表面の付着物を分析・特定するとともに大気中の浮遊物によるカバーガラスの透過率の低下が年間発電量に与える影響などを考察している^{1) 2)}。

2. 屋外曝露実験

2-1. ガラスサンプル

太陽電池モジュールのカバーガラスを模擬したガラスの大きさは25mm×75mmで厚さは3mmであり、ガラスの種類は表1に示す通りである。GL1はソーダライムシリケートガラス、いわゆるフロートガラスであり、もっとも広く利用されているガラスである。また、GL2は石英ガラスであり、太陽光の透過率が高く、しかも長期曝露により表面が変質することの少ない

原稿受付 平成7年12月21日

*1 東京理科大学工学部(東京都新宿区神楽坂 1-3)元大学院生 *2 同大学大学院生 *3 同大学教授 *4 日本板硝子テクノロジー㈱(茨城県つくば市東光台 5-4)

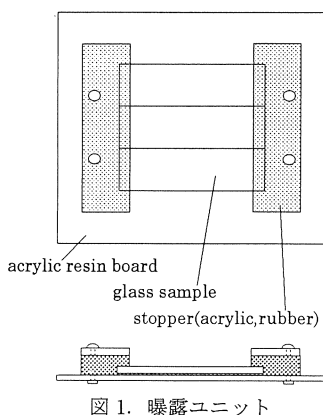
安定した特性を有するガラスである。さらに、GL3はGL1の表面にシリカ膜（厚さ約 $0.1\mu\text{m}$ ）を形成したシリカコートガラスである。これにより、表面反射を約1%抑えて透過率を増大させるとともに、表面の変質防止を目的としたものである。

表1. ガラスサンプル

GL1.	float glass
GL2.	silica glass
GL3.	silica coating glass

2-2. 自然曝露実験

図1はGL1～GL3の3枚を1組とした曝露ユニットである。このユニットはアクリル基板にビニールシートを敷きその上に3枚のガラスサンプルをゴムのブロックで挟み込んで構成した。このユニット30個を地上約30mの本学屋上（東京都新宿区神楽坂校舎）に傾斜角35.5度で真南に向け設置して自然曝露した。



曝露開始後1カ月経過毎に1ユニットずつ取り込み、大気中の浮遊物付着による透過率の低下を計測した。計測は後に述べる分光光度計を用いて行った。ガラスサンプルの透過率の計測は、表面上の異なる2点で行い、それらの平均値を測定値とした。

なお、曝露開始日は1992年11月10日であり、その後約2年間継続して実験を行なった。

2-3. 電界曝露実験

実際の太陽電池モジュールでは、発電時にその起電力に応じてカバーガラスに電界がかかるが、この電界による大気中の浮遊物の集塵効果を調べた。図1の曝露ユニットのガラスサンプル背面に導体板（厚さ1mmのアルミ板）を取り付け電界曝露ユニットを構成した。この電界曝露ユニット4個を前記自然曝露と同様本学屋上に傾斜角35.5度で真南に向け設置した。図2は電

界曝露実験装置の概要図である。電源には定電圧直流電源（高砂製作所製 TM0360-022）を用い各ユニットに架台に対して $0, \pm 100, \pm 200, \pm 300\text{V}$ の正、負の直流電圧をかけた。正電圧をかけた際には、曝露後5週、8週、12週、14週毎に各ガラスサンプルを取り外して、すばやく透過率を測定後、元の位置にサンプルを戻して曝露を続けた。一方、負電圧をかけた際には、曝露後2週、4週、6週、8週、10週、12週毎に取り外して、ガラスサンプルの透過率を測定しすばやく元に戻した。

なお、データは各ガラスサンプル表面の異なる2点の測定値の平均値とした。

曝露開始日は、正電圧については1994年4月20日、負電圧については1994年7月28日であり、その後実験を約100日間行った。

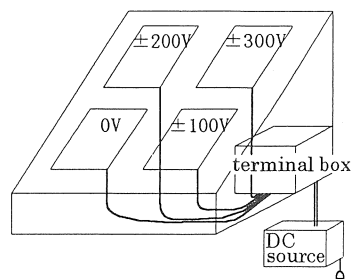


図2. 電界実験装置概観

2-4. 測定とデータの処理方法

大気汚染によるガラスサンプルの透過率の変化は、分光光度計（日立製作所製 U-3210）によって測定した。分光光度計の測定する波長範囲は190～900nmで、間隔は5nmである。

太陽光の透過量を求める際に基準太陽光の分光放射照度を用いた。基準太陽光とは、太陽電池セルやモジュールの電気出力や変換効率を測定する際に基準として用いる、IECで規定されている太陽分光日射分布のことである³⁾。これはエア・マスが1.5で300nmから2600nmまでの波長範囲の全天日射強度の分布であり、その積分値が 1kW/m^2 である。いま波長 λ における基準太陽光の分光放射照度を $\text{Ir}(\lambda) [\text{W/m}^2/\text{nm}]$ 、カバーガラスの分光透過率を $\text{TR}(\lambda)$ とすると、基準太陽光の透過量 $G [\text{W/m}^2]$ は次式で表わされる。

$$G = \int \text{Ir}(\lambda) \cdot \text{TR}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

基準太陽光の分光放射照度の波長範囲は300～2600nmであるが、使用した分光光度計による透過率の測定範囲は190～900nmである。しかし、一般に厚さ3mm程度のガラスでは、波長900～2600nmでの

透過率が一定であることが知られている⁴⁾。したがって、本論文では各ガラスサンプルの波長900~2600nmの透過率は850nmの値を用いた。また、直達光、散乱光による透過特性の違いがないものとした。

3. 測定結果と考察

3-1. 波長に対する透過率、基準太陽光の透過量

3-1-1. 自然曝露

図3~5はガラスサンプルGL1, GL2, GL3の曝露前、曝露後9ヶ月、曝露後18ヶ月の波長に対する透過率の関係である。これらの図より、大気中の浮遊物付着によりガラスサンプルの透過率は低下するが、特定の波長で透過率が極端に低下しないことがわかる。

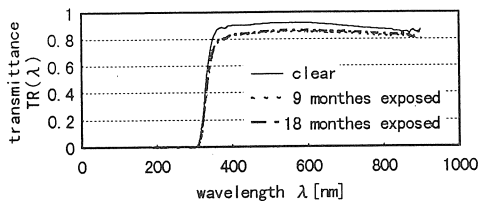


図3. GL1.の分光透過率

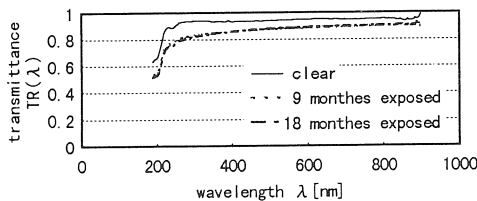


図4. GL2.の分光透過率

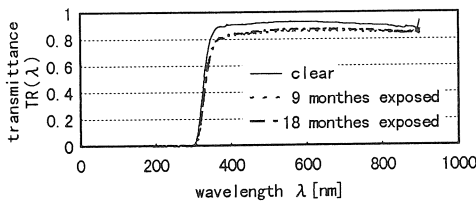


図5. GL3.の分光透過率

図6は3種類のガラスサンプルの経過日数に対する基準太陽光の透過量の関係である。縦軸の基準太陽光の透過量は式(1)で求めたGの値を意味する。図から、透過量の絶対値に差があるものの、いずれのガラスでも減少の傾向は同様であることがわかる。また、透過量のばらつきについては、主に雨量との相関性が強いと考えられる。この点については、後に3-3節で

議論することにする。透過量の絶対値は、それぞれのガラスの透過率や表面反射率に依存する。一方、透過量の減少がいずれのガラスでも同様の傾向を示すことは、その要因がガラス表面の変質よりは、大気中の浮遊物の付着が支配的であることを示すものと考えることができる。

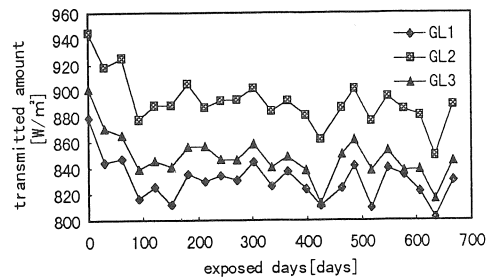


図6. 基準太陽光照射時の透過量

次に、図6より基準太陽光の透過量Gは、曝露初期段階で減少し、やがて一定値となっていることから、これらの特性を最小二乗法を用いて式(2)で近似した。

$$G = G_0(1 - A(1 - \exp(-t/B))) \quad (2)$$

ここでG₀:各ガラスサンプルの曝露前の基準太陽光の透過量[W/m²]、A:減少の程度を表わす定数、B:減少の速度を表わす定数、t:経過日数[日]

表2は各ガラスサンプルの式(2)で求めた各定数G₀, A, B, G_∞であり、G_∞はGの収束値である。石英ガラス(GL2.)は、他のガラスサンプルに比べ太陽光の透過量が多く、透過量の減少速度が最も遅いことがわかる。Bが大きいほど、透過率が減少する速度が小さいことを示すが、その順序は、GL2.>GL3.>GL1.となっている。このことは、透過率の減少の傾向は同様ではあるものの、科学的に安定である石英ガラス GL2.において減少の速度が最も遅く、次いで GL1.に変質防止の表面処理を施した GL3.が遅く、GL1.が最も早いことを示すものである。表面変質が最も少ないと考えられる石英ガラス(GL2.)において、減少の速度が最も遅くなっていることを示すものである。最後に、各サンプルとも収束値は曝露前の値(初期値)より約6%減少した。図7に1例として石英ガラスの経過日数に対する基準太陽光の透過量の関係を示す。

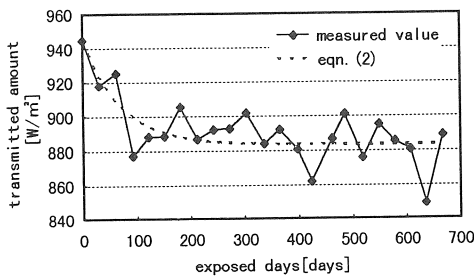


図 7. GL2.の透過量

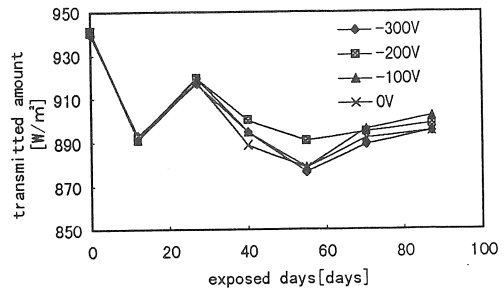


図 9. 負電位による透過率への影響 (GL2.)

表 2. 透過量減少の近似式係数

	G_0 [W/m ²]	A	B	G_∞ [W/m ²]
GL1.	878.8	0.059	31.4	826.9
GL2.	944.9	0.064	65.8	884.4
GL3.	901.2	0.064	43.1	843.6

3-1-2. 電界曝露

図 8, 9 は石英ガラスサンプル (GL2.) に 0~300V の正、負直流電圧をかけて曝露を行った際の経過日数に対する基準太陽光の透過量の関係である。正の電圧の実験は 1994 年 4 月~7 月に、負の電圧の実験は 1994 年 7 月~10 月に行った。両図より電界と透過量との間に明確な相関関係は見られなかった。これは大気中の帯電浮遊物が極めてわずかなこと、ガラスサンプル表面、裏面がなめらかなこと、端部がラバーで覆われていることなどにより電界が弱く集塵を促すには至らなかったためと考えられる。実際の太陽電池モジュールはカバーガラス表面に防水加工が施されておりモジュール端部も十分なめらかに仕上げてあるため、電界による集塵作用は少ないものと思われる。

正、負電圧の違いによる特性の違いは、実験の期間が異なるために主に気象因子に起因していると考えられる。なお、GL1, GL3 についても同様に電界と透過量の間に相関関係は認められなかった。

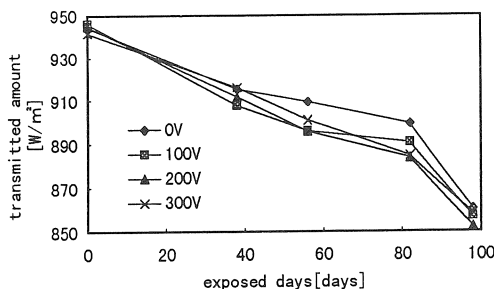


図 8. 正電位による透過率への影響 (GL2.)

3-2. ガラス表面付着物の分析

曝露後 10 カ月のガラスサンプルについて大気汚染による表面付着物の分析を行った。分析を行ったサンプルはフロートガラス (GL1.) と石英ガラス (GL2.) の 2 種類である。蛍光 X 線分析装置 (島津製作所製 VF320) による定性分析では、Fe, Ti がやや検出されたものの、堆積量がわずかで顕著に検出できるレベルではないことが分かった。

また、誘導結合型プラズマ発光分光分析 (ICP) による結果は次のようである。この分析では、ガラスサンプルを適量の純水中で 10 分間超音波洗浄をかけて、溶解した成分を ICP 発光分光分析装置 (セー電子工業製 SPS1200A) で分析した。明らかに検出された元素は Fe (0.4~0.5ppm) であり、その他に検出された元素としては、極めて微量な Mg, Si, Ca, Cu, Zn, Mn であった。

さらに、エネルギー分散型検出器付きの走査電子顕微鏡 (FESEM-EDS: 日立製作所製 S-4000) を用いた半定量分析では、ガラス表面に多数の斑点状変質、無定形堆積物、球状付着物などが観察される (それぞれ、図 10 の写真-1, 2, 3, 4)。斑点状変質は、ガラス表面の変質と考えられるが、GL1. だけでなく、GL2. でも観察された。無定形堆積物からは、ほとんど炭素しか検出されなかったことから、有機化合物と考えられる。球状堆積物は炭素を含有する Ti 化合物 (写真-3) ないしは Fe 化合物 (写真-4) と推定され、周囲は炭素含有物で覆われていることが多い。これらの分析結果に関しては 2 種類のガラスサンプルに大きな違いが認められなかった。

写真-1 石英ガラス上の斑点状変質
($\times 10^2$)

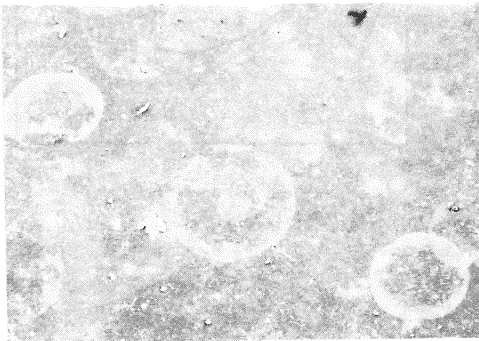


写真-4 フロートガラス上の球状付着物
($\times 1.1 \cdot 10^3$)

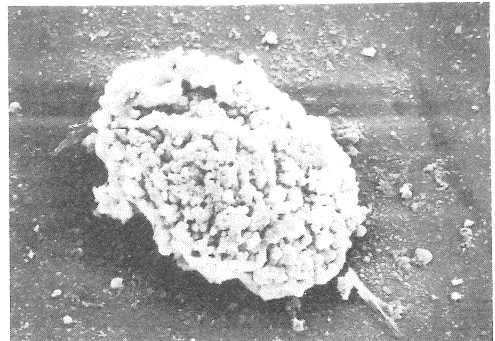


図 10. ガラス表面の付着物

写真-2 フロートガラス上の無定形堆積物
($\times 3 \cdot 10^3$)

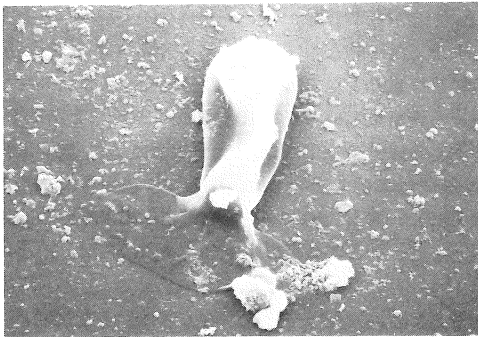
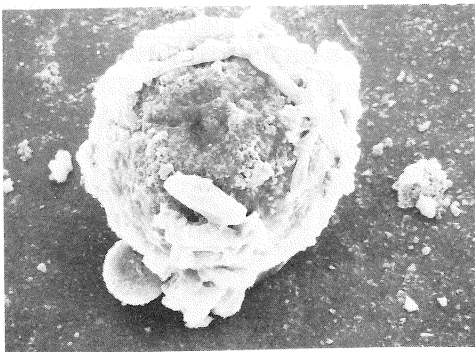


写真-3 フロートガラス上の球状付着物
($\times 1.5 \cdot 10^3$)



以上のように曝露後 10 カ月のガラス表面付着物は炭素化合物が支配的であり、その他に Fe, Ti, 微量の Mg, Si, Ca, Cu, Zn, Mn が認められた。

3-3. 雨量による汚れの影響

図 11 は曝露後の 233 日目(1993 年 7 月 1 日)から約 100 日間の比較的短期間の経過日数に対する基準太陽光の透過量の関係を示したものである。ガラスサンプルは石英ガラス(GL2.)であり、7 日毎に取り外して透過率を測定後すばやく元に戻した。なお、GL1., GL3. についても同様に測定したがその傾向は変わらなかった。曝露後の経過日数 233 日からデータ測定を開始した理由は、(2)式による基準太陽光の透過量が一定値となる程度に十分日数が経過していること、雨の多い梅雨期から湿度の高い夏期、乾燥した秋期をカバーしていることによる。図からガラスサンプル表面の透過率は、収束値を中心にして細かく変化していることが分かる。なお、基準光の透過量では、 884W/m^2 を中心として幅が $\pm 20\text{W/m}^2$ 程度である。

一方、大気中の浮遊物によるサンプル表面の汚れは雨量、日射量、風向・風速などの環境因子に関係すると考えられるが、これらの影響を定量的に解析することは困難である。ここでは、最も影響を受けたと思われる雨量に限定して考察した。

曝露後 n 日目の基準太陽光の透過量を $G(n)$ 、 $(n-1)$ 日目の基準太陽光の透過量と雨量(24 時間の積算量、単位 mm)をそれぞれ $G(n-1)$ 、 R として次の実験式を導いた。

$$G(n) = G(n-1) + 0.104(R-11) \quad (3)$$

ここで、透過量が $884\text{W}/\text{m}^2$ を中心として変化する範囲内では、降雨量と透過量の変化との間には一次の正比例の相関関係が成立していると仮定する。

この式の雨量は（財）日本気象協会産業情報室発行の東京管区気象台（東京都千代田区大手町）の気象月報記載のデータを用いた⁵⁾。地点の降雨量とほぼ同一であると思われる。（3）式を用いた降雨量による透過量の変化を図 11 の実線で示す。同図から、降雨量と基準太陽光の透過量との間には、明らかに相関関係があり、降雨により透過量が増加する傾向は一致する。

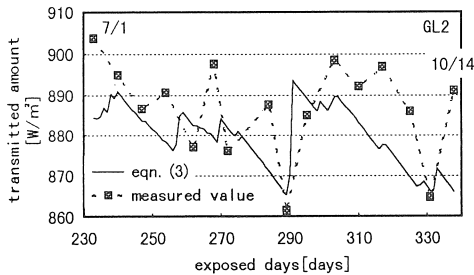


図 11. 雨量による透過量の変化

3-4. 洗浄による透過率の回復

カバーガラスの洗浄による透過率の回復は実質的な太陽電池モジュールの高効率化につながる。ここでは、曝露後の 3 種類のガラスサンプルを次の 4 種類の洗浄方法で洗浄し回復率 Re を次式で求めた。

$$Re = (G - G_w) / (G - G_0) \quad (4)$$

ここで、 G : 洗浄前の基準太陽光の透過量、 G_w : 洗浄後の基準太陽光の透過量

- (a) 水道水での 3～15 分間超音波洗浄
- (b) 架台（傾斜角度 35.5 度）上部からの 2～10 分間水道水注水洗浄
- (c) 濃度 2% 程度の中性洗剤によるスポンジ洗浄
- (d) 純度 98% のエチルアルコールによるガーゼ洗浄

図 12 は上記 4 つの洗浄方法による回復率の関係である。曝露日数、ガラスサンプルの種類、洗浄時間による特性の違いはみられなかったため、すべて同等の扱いとした。（a）、（b）の方法とも大きな回復効果が期待できないことがわかる。これは曝露中にガラス表面に付着した浮遊物はある程度までは減少するが、残りは固着し容易に落ちないことを示している。（c）、（d）の方法によれば、ほぼ初期状態の透過量に回復することが分かる。（a）の方法では、ほぼ初期状態に近い値

にまで回復する。また、（b）の方法ではある程度以上の回復効果があり期待できないことが分かる。これは、曝露したガラス表面に付着した浮遊物のうち、固着し容易に落ちない物があることを示している。

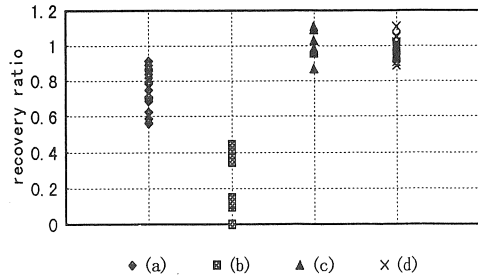


図 12. 洗浄方法と回復率

3-5. 大気中の浮遊物の付着による発電量の減少

各種太陽電池はそれぞれ独自の分光感度特性を有することは良く知られている。図 13 は単結晶シリコン、多結晶シリコン、アモルファスシリコン太陽電池の分光感度特性である。いま、これらの太陽電池の分光感度を $SR(\lambda)$ とすると、次式(5)により短絡電流比 J を求めることができる。なお、この値はまた出力比でもある。

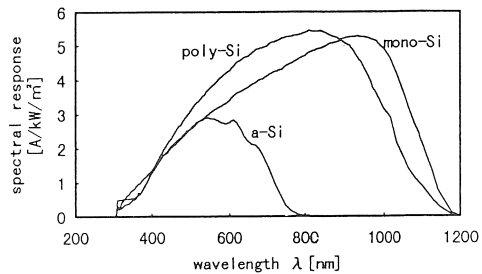


図 13. 太陽電池の分光感度特性

$$J = K \int Ir(\lambda) \cdot TR(\lambda) \cdot SR(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

ここで、 K : 定数

カバーガラスの汚れによる発電量の変化を(5)式を用いて計算した。太陽電池モジュールは単結晶シリコン(m-Si)、多結晶シリコン(p-Si)、アモルファスシリコン(a-Si)太陽電池による種類とし、太陽電池モジュールの動作期間を 10 年とした。表 3 はカバーガラスの汚れによる発電量の減少率である。表から GL2（石英ガラス）を使用したモジュールは他のガラスを使用したモジュールに比べ、減少率がもっとも小さくなっ

た。これは石英ガラスの初期透過量が大きいばかりでなく、表2のA,Bつまり汚れの幅と速度の値に起因する。また、アモルファスシリコン太陽電池モジュールは、最も減少率が大い。これは、分光感度特性が他の太陽電池に比べ短波長領域に寄っていること、図3～5の示す各ガラスの透過特性では短波長領域の減少率が大いことが重なったためである。

表3. 汚れによる損失率(運転期間10年) [%]

	a-Si	p-Si	m-Si
GL1.	7.0	6.0	5.5
GL2.	6.4	5.4	5.4
GL3.	7.0	6.0	5.5

なお、関東地方における個人住宅の負荷を賄う程度の容量 3kW の太陽光発電システムでは、年間約 3MWh の発電量が想定できるが、これに対して年間平均 160～200kWh がカバーガラスへの浮遊物付着により減少することになる。今後洗浄に必要なエネルギーと発電減少量との関係を検討する必要がある。

4. まとめ

本研究では、本学神楽坂校舎屋上においてカバーガラスを曝露し、透過率や様々な特性を測定した。その結果、考察により明らかになった事項は次のようである。

- (1) カバーガラスに付着した浮遊物により透過率は低下した。その波長特性は、ほぼ平坦である。
- (2) 3種類のカバーガラスとも透過量は同様に減少しており、塵埃が主な原因と考えられる。また、透過量の減少速度が異なるのは、ガラス表面が変質しているためと考えられる。
- (3) カバーガラス表面の付着物は、炭素含有物が支配的であり、次いで Fe, Ti が、そして微量の Mg, Si, Ca, Cu, Zn, Mn が検出された。
- (4) カバーガラスの透過量は雨によりある程度まで回復するが、それ以上は期待できない。これは、ガラス表面に固着し容易に落ちない物質があることを示している。
- (5) カバーガラスに付着した塵埃により、太陽電池の発電量は 5～6%減少する。

文献

- 1) 郡・平田・谷・中井：「太陽電池モジュールカバーガラスの透過率」, 平5日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表講演論文集 22(1993. 12)
- 2) 郡・平田・谷・中井：「太陽電池モジュールカバーガラスの透過率」, 平6日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表講演論文集 3(1994. 12)
- 3) 電気学会・太陽電池調査専門委員会編：「太陽電池ハンドブック」コロナ社, P. 220(1985. 7)
- 4) 例えば、作花清夫ら編：「ガラスハンドブック」朝倉書店, P. 30(1975)
- 5) 日本気象協会：気象月報, 1993. 7～10