

車両通行が可能な太陽光発電舗装の実証実験と次世代モビリティとの繋がり

吉 中 保・鍛 治 哲 理

筆者らは太陽光発電舗装の研究開発に取り組み、これまでに発電特性など路面に展開した場合の電氣的基礎データの把握や、舗装用太陽電池モジュールの開発、車両供用にとまなう技術的課題等を見だし、解決を図ってきた。構内試験施工で当該舗装を具現化して以降、国内各方面から数多くの見学を受け入れ、外部から寄せられる期待感から、当該舗装の将来性や発展性などを概観できる状況になってきた。本稿では、これまでの検討状況の一部を紹介し、研究開発から見える次世代モビリティとの繋がりについてもコメントした。

キーワード：太陽光発電舗装、舗装用モジュール、再生可能エネルギー、次世代モビリティ

1. はじめに

世界の動向を俯瞰すると、SDGsなどを基盤とする次世代イノベーション戦略が社会の潮流となっている。世界の投融資も、国連責任銀行原則の発足やESG投資¹⁾(企業評価手法の一つでEnvironment Social Governanceの略)など非化石エネルギーへのビジネスモデル転換が急速に進んでいて、企業等の事業戦略に大きな影響を与えている。再生可能エネルギーへの注目が集まる中、道路舗装の分野では、欧州を筆頭に太陽光発電舗装の研究開発が取り組まれ、世界道路協会会報誌「ROUTES/ROADS」にフランスの開発技術が紹介された²⁾。しかし、世界的に完成域に達した技術はまだ無く、水面下で開発競争が繰り広げられている。

筆者らは2017年9月に太陽光発電舗装の第1回試験施工を実施して以降³⁾、車両通行が可能な舗装用太陽電池モジュールの開発を推し進め、2018年11月に第2回試験施工を実施して構内舗装に展開した(写真-1)。第2回の箇所も既に1年以上経過し、様々な技術的課題を見だし解決を図ってきた⁴⁾。

当該舗装を具現化して以降、国内各方面から数多くの見学を受け入れており、外部から寄せられる期待感や将来性を概観できる状況になってきた。そこで本稿では、これまでの検討状況の一部を紹介するとともに、将来性など当該舗装が持つポテンシャルについてもコメントしたい。



写真-1 開発した太陽光発電舗装

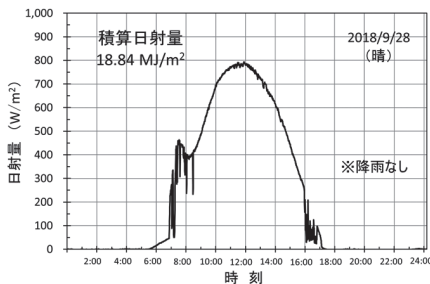
2. 第1回実証実験(電氣的基礎データ把握)

(1) 検討概要

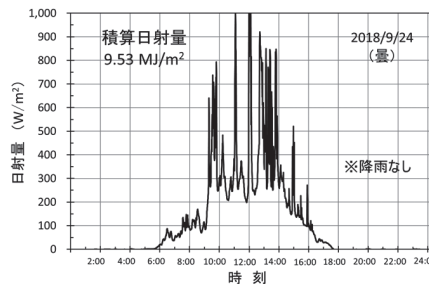
第1回試験施工は、主に次のことを検討することを目的に、当社構内(埼玉県さいたま市)で2017年9月に実施した。

- ①道路発電のコンセプト設定、運用イメージ構想
- ②舗装技術と太陽光発電技術の両立
- ③舗装用としての素材検討
- ④通年での発電特性の把握

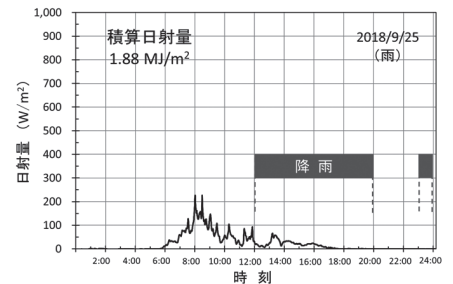
第1回用として試作した舗装用太陽電池モジュールは、従来の太陽電池に使用されている発電素子やカバーガラス、バックシート等の部材の中から舗装に適用できると想定された物を選択し、パッキングしたも



図一 日射量と発電量の例 (晴天日)



図二 日射量と発電量の例 (曇天日)



図三 日射量と発電量の例 (降雨日)

のである。試作した 40 cm 角のモジュールを、不陸調整したアスファルト舗装路面に 35 枚敷設して固定し、電圧変換のための充放電制御装置を介してディープサイクルバッテリーに蓄電させ、電力負荷として夜間に LED ポールライトを点灯させた。なお、一連の電気回路は独立電源とし、商用電源には接続していない。

(2) 検討結果

(a) 天候による日射量変動とモジュール出力

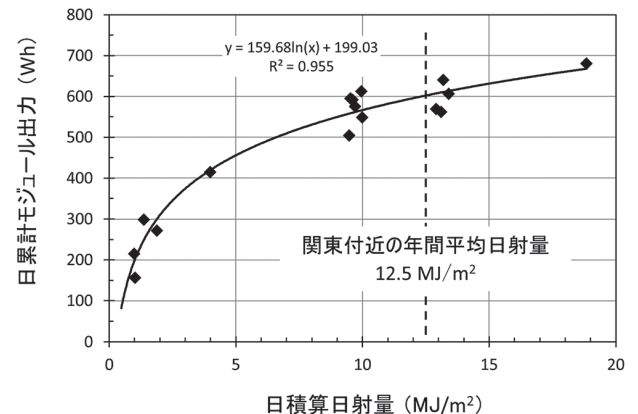
モジュール 35 枚による天候と発電量の状況について、晴天日を図一 1、曇天日を図二 2、降雨日を図三 3 に示す。図より、発電量は日射量の変動の影響を受けていて、晴天日の傾向を基本に比較すると、曇天日の午前 9 時頃までと、降雨日終日の日射量が少ない時間帯は、発電が不安定に変動している様子が見られる。これは、ある程度の日射量が確保できないとモジュールの出力が不安定になることや、受電側（充放電制御装置）の制御プログラムの影響を受けているためと考えられる。

(b) 日射量とモジュール出力の関係

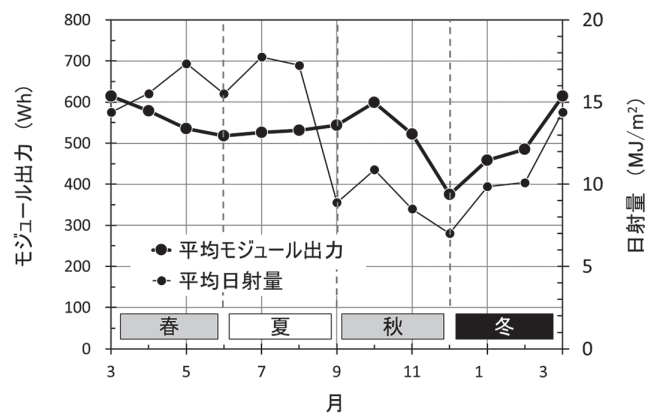
図一 4 は、日々の積算日射量とモジュール出力累計値との関係を示したもので、日積算日射量 8 MJ/m² 付近を境に、それ以上で緩やかに出力が上がり、それ以下では出力が急速に低下する傾向が見られた。これは制御プログラムの影響を含めた太陽電池の出力特性を示しており、曇天時の日射量変動に対して出力変動の少ないものが望ましい。

(c) 通年での発電傾向

図一 5 は、月ごとの日射量と発電量の傾向を整理したもので、日射量が凸型に増える 3~8 月にかけて、



図一 4 日積算日射量とモジュール出力の関係



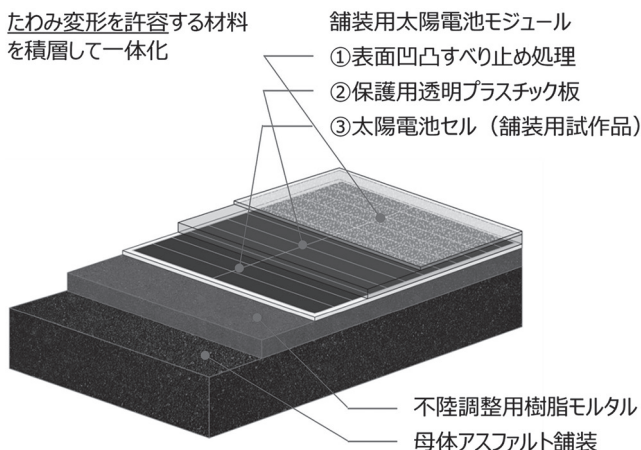
図一 5 年間を通しての日射量と発電量

発電量は逆に凹型に減る傾向が見られた。これは、モジュール温度が高くなりやすい時期に太陽電池の変換効率が低下した可能性や⁵⁾、発電量が多く満充電に近い状態に伴い制御プログラムの影響を受けた可能性も考えられる。よって、舗装用に適した太陽電池素子の選定や制御のあり方が重要となる。

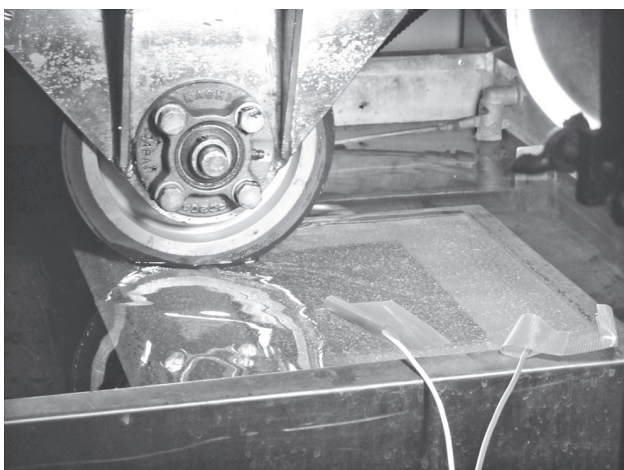
3. 車両通行が可能な舗装用モジュールの開発

屋根など通常の太陽電池は、強化ガラスを基材に結晶系など発電素子を封止するのが一般的で、上に物が載る前提で作られていない。これに対し舗装用としては、人や車が直接載っても割れるなど破損せず、すべり抵抗など安全性を確保する必要がある。第1回試験施工の状況から、筆者らは舗装用太陽電池モジュールの材質を大幅に見直し、より現実的なモジュールを構築することとした。

開発した舗装用太陽電池モジュールは、たわみ変形を許容する材料を積層してモジュール化したもので、平たんなアスファルト舗装に接着固定するイメージとしている(図一6)。開発では、大型車相当の荷重(道路想定)を与え、60℃の雰囲気温度(夏季路面温度)で水浸(降雨想定)しながら発電実験するという、実道を模した評価実験を実施した。写真一2に示すように照明を当てながらホイールトラッキング(WT)試験機を用いて載荷させ、発電状態での確認を行っ



図一6 車両通行が可能な太陽光発電舗装の断面図



写真一2 発電させながらの室内評価試験の例
(大型車輪荷重相当+水浸+60℃)

た。試験時間は通常の道路舗装用よりも大幅に拡大して、発電状況を見ながら太陽電池の破断・短絡や、積層したモジュール構造の剥がれなど損傷有無を確認した。また、道路舗装は安全性の観点から所要のすべり抵抗が必要であり、発電性能的には不利になるがモジュール表面に透明骨材を固着させた凹凸処理を施しており、前述のWT試験のほか、タイヤチェーンによるラベリング試験でも問題無いことを確認している。

室内レベルでクリアするモジュール構成を見いだせたことから、車両通行を前提に第2回試験施工を実施することとした。

4. 第2回実証実験(実路想定)

(1) 検討概要

第3章で開発した舗装用太陽電池モジュールを用いて、第2回試験施工を当社構内(埼玉県さいたま市)で2018年11月に実施した。主に次のような観点で、性能検討や応用展開の試行を行った。

- ①車両通行を想定(強度的耐久性)
- ②部分的な日陰が混在する想定(電氣的耐久性)
- ③独立電源運用(商用電源には接続しない)
- ④電気の利用用途の試行

(2) 検討結果

(a) 車両通行に対する強度的耐久性

総重量約6t程度の車両を日々通行させ(写真一3)、舗装としての耐久性を検討している。現在までに1年以上経過していて、モジュールに反り等は無く供用性が確保されている。

(b) 部分的な日陰混在に対する電氣的耐久性

太陽電池が電氣的に損傷しやすいとされる「日向と



写真一3 車両走行による強度的耐久性確認



写真一4 日陰混在による電氣的耐久性確認



写真一5 充放電システムの可搬式小型バッテリー

日陰の混在」について、発電素子の選択や電気回路を工夫して対処している。道路は屋根と異なり、日陰が生じやすい環境にあるため、試験施工では建物の北側に意図的に配置して検証を進めている。毎日、部分的に日陰が生じているが（写真一4）、発電素子の損傷も無く良好に発電を継続している。

図一7は、試験施工箇所の1週間の発電量（2019年4月）と翌5月の例を示したものである。太陽電池は一部に日陰ができると発電素子が損傷しやすいといわれる⁶⁾。第2回試験施工を実施してから本稿執筆時点（2020年2月）で1年3ヶ月が経過したが、図一7の例に示すように、太陽高度が高い時間帯に日陰が日々発生する状況下（発電量が急速に低下している正午頃）でも、発電素子の損傷は発生せず順調に発電を続けていることを確認している。



写真一6 LEDによる区画線の路面発光表示

(c) 独立電源のための充放電システム

発電特性に最適化した充放電システムを開発した。独立電源を基本とし、内蔵した複数の小型Li-ionバッテリーに効率良く充放電を行う制御をしている。

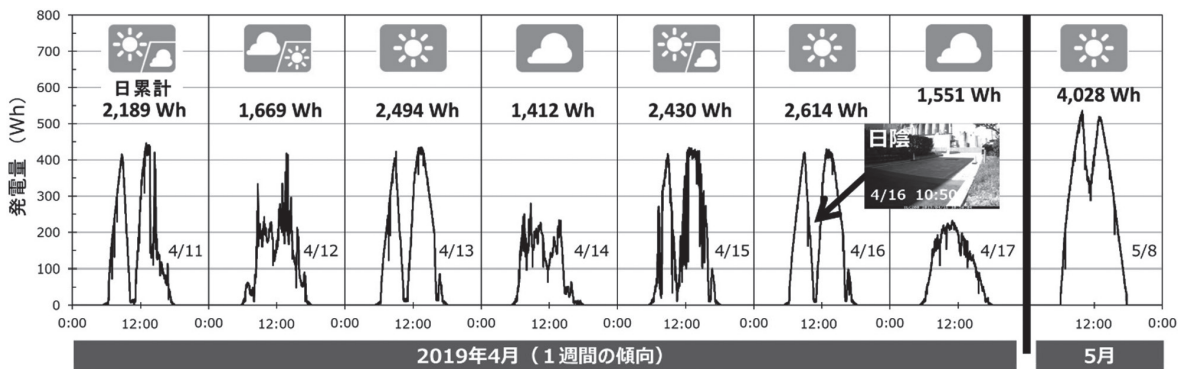
(d) 電気の利用用途の試行

充放電システムに利用するバッテリーは可搬式としていて、災害時には避難場所等に運んで非常用電源と

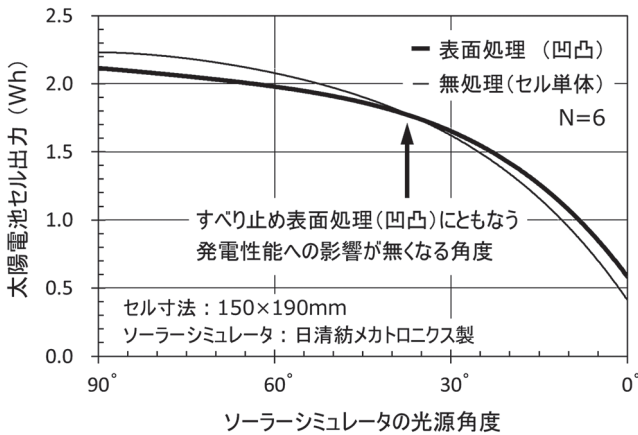
しても活用できるようにした（写真一5）。また、停止線や区画線をLEDで路面発光する方法を試行し（写真一6）、明滅発光も可能であり、横断歩道など夜間の視認性や安全性向上の一手法として期待している。

(e) 表面凹凸処理と発電出力への影響

モジュール表面は、すべり抵抗を付与するために凹凸処理しており、平滑な電池単体に比べて発電性能が低下する懸念がある。図一8は太陽電池への光の入射角度と発電量との関係を示したもので、透明骨材を用いて凹凸処理することで、入射角度が低くなるにつ



図一7 第2回試験施工箇所の発電量測定例（面積 20 m²）



図一8 入射光角度と太陽電池セル出力

れて光を捕捉しやすくなる（発電量が増加する）傾向を示している。太陽高度は刻々と変化するため、国立天文台が提供するデータから毎月1日の太陽高度と日照時間の関係（表一1）を算出して図一8と関連付けると、表一1の太陽電池出力試算値に示すように、表面処理した方が太陽高度が高くなる5～8月を除いて1日当たりの発電量が多く、年間平均値も増えることが分かった。これより、直上に太陽がある状況では発電量が若干低下するが、表面凹凸処理による入射光の増幅で年間の発電量は低下せず、同等以上を確保できる。

5. 道路舗装ならではの課題

舗装技術者にとって、太陽電池などの電気的特性にはなじみがないが、日射量や発電量、夜間を中心とする電力消費などの観測を継続することで、天候との関係や1年を通しての最適な充放電バランスが見えてくる。また、道路は屋根やメガソーラーと違い、地表面にあるため、周辺建物などの日陰が生じやすい環境にあり、発電素子の電氣的損傷を防ぐ必要がある。これ

ら以外にも、前述した耐荷重性や耐久性、すべり抵抗性、冬季のタイヤチェーン装着など打撃や衝撃に対して壊れないこと、地表面に配置する上での感電防止策なども考慮する必要がある。

太陽電池に係わる素材は、これまで舗装用材料として用いられたことが無いため、室内検討や試験施工等を通じて十分に検討されるべきで、例えば通行車両の条件が変わることで損傷モードが違ってくるなど、筆者らの検討でもすべてを解決できたわけではないことを付記しておく。

6. 開発から見えてくる次世代モビリティとの繋がり

自動車は排ガス規制予測を基に、内燃機関から電動化（EV）への移行が語られ、自動車の使われ方もCASE（Connected, Autonomous, Shared/Service, Electric）という方向性が見いだされている。将来のモビリティ環境を俯瞰すると、EVの走行性能を飛躍的に向上させる非接触給電や、レベル5を視野にした完全自動運転など、次世代交通に向けて重要性が増す電気通信と道路舗装との係わりが現実味を増してきている。

道路舗装には従来の移動空間としての役割のほか、電気通信をサポートする役割も期待されるのが自然で、センシング機能を備えて次世代モビリティと連携する時代⁷⁾が来るかもしれない。舗装用太陽電池モジュール（図一6）に各種センサを組み込むのは比較的容易と考えていて、電源の心配も要らないため、単なる発電装置で終わらない発展性が見込まれる。

なお、EVへの移行に伴い、走行用の車載高性能バッテリーのリユース品（再生二次利用）を充放電システムの蓄電用に有効活用することも期待できることから、筆者らは予備検討に着手している⁸⁾。ここでも、

表一1 毎月1日の太陽高度分布と、表面凹凸処理の有無による太陽電池出力の比較

抽出年月日		2018年												平均値	計	
		1月1日	2月1日	3月1日	4月1日	5月1日	6月1日	7月1日	8月1日	9月1日	10月1日	11月1日	12月1日			
日中の太陽高度 [※] と日照時間 (h : min)	太陽高度 70° ~						2:15	2:15	1:15						0:29	4:08
	" 60 ~ 69°					3:15	1:45	2:00	2:30	1:45					0:56	
	" 50 ~ 59°				3:45	1:45	2:00	1:30	1:45	2:30	1:15				1:12	
	" 40 ~ 49°			3:30	2:00	2:00	1:30	2:00	1:45	2:00	3:15				1:30	
	" 30 ~ 39°	1:45	4:00	2:30	1:30	1:30	1:30	1:30	1:15	1:30	2:00	4:30	2:15		2:09	
	" 20 ~ 29°	3:30	2:30	2:00	2:00	1:30	1:45	1:30	1:45	1:45	1:45	2:30	3:30		2:10	
	" 10 ~ 19°	2:30	2:00	1:30	1:30	2:00	1:45	2:00	1:45	1:45	2:00	1:45	2:00		1:52	
" 0 ~ 9°	2:00	2:00	2:00	1:45	1:45	2:00	1:45	1:45	1:45	1:30	2:00	2:00		1:50		
太陽電池セル [※] 出力試算値 (Wh)	表面処理 (凹凸)	13.14	14.86	17.26	19.85	22.18	23.83	24.00	22.62	20.89	18.20	15.42	13.38		18.80	18.56
	無処理 (セル単体)	12.38	14.19	16.85	19.78	22.32	23.98	24.19	22.78	20.89	17.94	14.75	12.66			

※太陽高度の試算方法：国立天文台「こよみの計算」 <https://eco.mtk.nao.ac.jp/cgi-bin/koyomi/koyomix.cgi> (2020年2月時点)

※太陽高度の試算箇所：埼玉県さいたま市西区三橋 6-70 (東経 139.5867 度、北緯 35.9113 度)

※太陽電池セルの出力試算値は「太陽高度と日照時間」および「入射光角度と太陽電池セル出力」(図-8)の関係から求めた。(セル寸法：150×190mm)

次世代モビリティの発展との繋がりが見えてくる。

7. おわりに

以上の試験施工で現実的な太陽光発電舗装を具現化して以降、石油などエネルギーインフラや自動車メーカー、複数の研究機関など各方面から見学を受け入れてきた。研究開発中にもかかわらず、予想を超える反響を目の当たりにして、当該舗装の将来性への期待を受け止めるとともに、早期完成への重責を実感している。

筆者らは、次世代モビリティの実現に道路舗装が関与し貢献できる部分があり、重要性が増してくるものと予想しており、道路舗装と電気通信を融合する開発コンセプトネーム「e-Smart ROAD」を設定して研究開発に取り組んでいる。今回ご紹介した太陽光発電舗装は、最初のモデルケースとなる。

道路舗装と電気通信の融合は、道路空間への新たな機能の付加（例えば、発電や非常用電源、LED路面発光表示による安全性向上）、あるいは完全自動運転や非接触給電など情報通信の社会実装への連携という、道路空間の次世代の姿に繋がる可能性がある。

最後に、本技術は国土交通省「スマートシティのシーズ・ニーズに関する提案募集」に提案しており、地方公共団体や民間企業からの問い合わせをいただいている。

J C M A

《参考文献》

- 1) 三菱 UFJ 信託銀行：グローバルな ESG 投資の潮流と日本の展望、2016.1
- 2) PIARC：Routes/Roads 374, 3rd quarter 2017
- 3) 吉中保, 鍛冶哲理, 吉田弘樹, 大橋史隆：太陽光発電舗装の試験施工と通年での発電特性検討, 土木学会第 74 回年次学術講演会 (2019)
- 4) 吉中保, 鍛冶哲理, 平塚利男, 佐藤重宣：車両通行が可能な太陽光発電舗装の開発検討, 第 33 回日本道路会議 (2019)
- 5) (公社) 日本セラミックス協会：太陽電池材料, 2006.1
- 6) (一社) 太陽光発電協会：太陽光発電システムの設計と施工, 2015.9
- 7) 日経コンストラクション, 特集「未来の道路」, 2019.9.23
- 8) 鍛冶哲理, 吉中保, 平塚利男：実用的な太陽光発電舗装システムと応用に関する検討, 第 33 回日本道路会議 (2019)

【筆者紹介】

吉中 保 (よしなか たもつ)
 (株) NIPPO
 総合技術部 技術研究所
 研究第一課長 博士 (工学)



鍛冶 哲理 (かじ てつり)
 (株) NIPPO
 総合技術部 技術研究所 研究第一グループ
 副主任研究員

