

廃太陽光パネルを 骨材とした コンクリートの 環境安全性評価

土手 裕 | Dote Yutaka
宮崎大学 工学部 工学科 教授

1. 研究の背景

太陽光発電はCO₂を排出しない再生可能エネルギーの1つとして注目されており、2012年に固定価格買取制度が開始されたことから太陽光発電の導入量が増加している。また、2022年に改正地球温暖化対策の推進に関する法律が施行され、太陽光発電の果たす役割はますます重要になりつつある。一方、太陽光パネルの耐用年数が20～30年とされており、日本では2030年代後半には年間約50～80万tの廃棄量になると推定されている¹⁾。2039年に予想される廃太陽光パネルを全て埋め立てると仮定すると、2020年度の産業廃棄物最終処分量(909万t)²⁾の約8.8%に相当する。よって、最終処分場の延命化を図るために廃太陽光パネルのリサイクルが重要である。

太陽光パネルには大きく分けてシリコン系と化合物系の2種類がある。シリコン系の太陽光パネルセルの構造は、カバーガラス、封止材(エチレン酢酸ビニル。以後、EVAと表記する)、発電素子部(シリコンセル)、バックシートを層状に組み合わせたものである。化合物系の太陽光パネルセルの構造は、発電素子部(銅・インジウム・セレンなどの化合物を原料としたセル)と基板ガラスをEVAで封じ込めている。シリコン系太陽光パネルセルには有害物質であるPb、Sbが、化合物系太陽光パネルセルにはCd、Pb、Se、Sbが多く含まれている¹⁾。そのため、廃太陽光パネルをリサイクルする場合には有害物質による環境汚染を防止する必要がある。

廃太陽光パネルセルをリサイクルする方法の1つとしてコンクリート用細骨材として利用する方法が考えられる。一例として、シリコン系太陽光パネルセルから加熱処理によりEVAを取り除き粉砕したものや化合物系太陽光パネルセルを粉砕したものを細骨材の20%まで代替して作製したコンクリートの圧縮・曲げ強度について検討した事例において、TCLP試験によるPb、Se溶出濃度が定量限界(50 μg/L)以下との報告があるが³⁾、海外の報告であるため日本の基準に適合するか不明である。一方、汚染土壌等にセメントを混合することで、As、Pb、Cr、Se、B、Fが不溶化することが知られており、廃太陽光パネルセルをコンクリート細骨材として用いた場合も、セメントによる不溶化や希釈効果により環境汚染を防ぐことが期待できる。

今回は、生産量の多いシリコン系太陽光パネルから分離されたカバーガラスと資源回収残渣の混合物をコンクリート用細骨材として利用した場合の環境安全性の評価の結果を報告する。試験としては、骨材試料および暴露環境における状態を模擬した試料(以後、利用模擬試料と呼ぶ)としての溶出量試験・含有量試験を行った。なお、利用模擬試料作製では廃太陽光パネルセルの影響を明確にするために粗骨材は用いなかった。実際に廃太陽光パネルセルを細骨材としてコンクリートを作製する場合は粗骨材も配合されるので、コンクリート中の廃太陽光パネルセルの割合が小さくなることから、ここでは利用模擬試料の結果を安全

側で評価していることになる。

2. 実験方法

(1) 試料

図-1に示すように実験に用いた試料はソーラーフロンティア株式会社国富工場にてTOSHIBA製のシリコン系太陽光パネルからフレームを取り外した後、パネルセパレーターでカバーガラスとEVA・発電素子部・バックシート（以後、EVA、発電素子部とバックシートの混合物を剥離残渣と呼ぶ）とに分離され、それぞれ粉砕された状態で提供されたカバーガラスと剥離残渣を用いた。バックシートの成分はPETであった。さらに、剥離残渣からの資源回収のために、同工場において剥離残渣を乾式比重分離した残渣（軽比重成分）を試料として用いた（以後、比重分離残渣と称する）。カバーガラス、剥離残渣、比重分離残渣は目開き2mmの篩を通過したものを実験に用いた。比重分離残渣とカバーガラスの混合物を利用模擬試料のための骨材として検討した。カバーガラスと比重分離残渣の混合割合をソーラーフロンティア株式会社国富工場の分離フローにおいてカバーガラスに混入する可能性のある比重分離残渣を実績値の最大量として重量比で95：5となるように混合して廃パネル骨材とした。これを利用模擬試料作製のための骨材として使用するとともに、骨材試料として溶出量試験および含有量試験に用いた。カバーガラス、剥離残渣、比重分離残渣、骨材試料については乳鉢で粉砕して溶出量試験・含有量試験のための粒度調整を行った。

(2) 利用模擬試料の作製方法

利用模擬試料のための成形体は、溶出量試験用および含有量試験用にφ5cm×10cmの円柱モールド2本を用意し、普通ポルトランドセメント：306g、廃パネル骨材：607g、水：153gの配合比で混練を行い、モールドに充填し、モールド上面をラップで覆い1週間養生した。この配合は、太陽光パネルのカバーガラスを用いたモルタルの強度を検討した既往の研究におけるプレーンモルタルの細骨材を100%廃パネル骨材に置き換えた条件とした⁴⁾。実際の使用にあたっては、置換率はコンクリートの強度を考慮して決定されるが、置換率を100%とすることで実環境での溶出量が最も高くなる条件を想定した。作製した成形体は、1週間養生後に脱型した後、ジョークラッシャーで粗粉砕し、必要に応じてブラウン横型粉砕

機で粉砕し、さらに乳鉢を用いて微粉砕し、溶出量試験および含有量試験のための粒度調整を行ない、利用模擬試料とした。セメント中の有害物質の影響を評価するために、セメントと水のみを用いたセメントペースト試料用の成形体（配合比 セメント：306g、水：153g）を作製し、同様に粒度調整して溶出量試験・含有量試験に用いた。

(3) 溶出量試験

廃太陽光パネルの骨材としての環境安全性評価に関する試験法がないことから、副産物である高炉スラグの骨材としての試験方法であるJIS A 5011-1付属書Cに準拠して試料の溶出量試験を行った。容量1.7Lの容器に試料100gと蒸留水1,000mLを添加し、200rpmで6時間プロペラ攪拌した後、10分ほど静置してから上澄みを0.45μmのメンブレンフィルターを用いてろ過した。B、T-Cr、Cd、Pb分析用試料は、ろ液に濃硝酸を0.5%、As、Se、Sb分析用試料は、ろ液に濃塩酸をそれぞれ0.5%加え、冷蔵庫で保存した。F分析用試料は、ろ液を冷蔵庫で保存した。溶出量試験終了後の上澄みのpHを測定した。溶出量試験の繰り返し回数は1回とした。

(4) 含有量試験

JIS A 5011-1付属書Cに準拠して試料の含有量試験を行った。Cr以外の物質については、500mLのポリビンに試料6gと1mol/Lの塩酸200mLを取り、200rpmで2時間振とうした後10分ほど静置し、上澄みを0.45μmのメンブレンフィルターを用いてろ過した。T-Crに関しては、六価クロム用溶出溶媒（炭酸ナトリウム0.53g/L、炭酸水素ナトリウム0.84g/L）を用いて試料6gに対して溶媒200

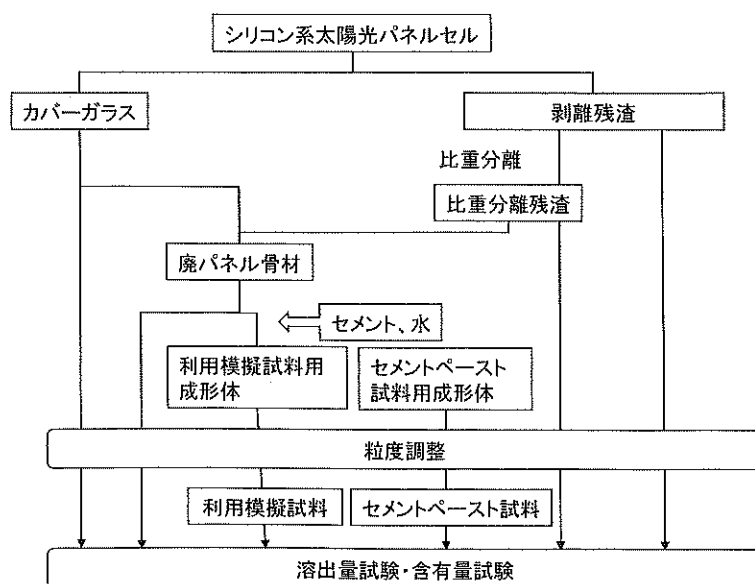


図-1 試料回収フロー

mLを加えて200rpmで2時間振とうし、上記と同様にし
てろ液を得た。B, T-Cr, Cd, Pb分析用試料は、ろ液に
濃硝酸を0.5%加え、それ以外の分析用試料はろ液に何も
加えずに冷蔵庫で保存した。含有量試験の繰り返し回数は
3回とした。

(5) 分析方法

B, T-Cr, Cd, PbはICP発光分光分析法により分析した。
ただし、溶出量試験のCd, Pb, T-Crはフレイムレス原子
吸光分析法により分析した。As, Se, Sbは予備還元した
試料を水素化物発生装置を用いて、5 mol/L塩酸と0.4%
(w/v) 水素化ホウ素ナトリウム水溶液で水素化し、ICP
発光分光分析法により分析した。Fはイオンクロマトグラ
フにより分析した。Fの含有量試験試料に関しては、比色
管に試料を1 mL取り、蒸留水を9 mL、200g/L硝酸銀を
1 mL加え、よく攪拌した後に10分ほど放置して塩素を硝
化銀として除去した後に0.45 μ mのメンブレンフィルターで

ろ過したろ液を分析に用いた。

3. 結果と考察

(1) 粒度調整結果

含有量試験用試料、溶出量試験用試料の粒度調整結果を
表-1, 2に示す。含有量試験用試料のほとんどの試料に
ついてはJIS A 5011-1付属書Cに記載されている質量分率
に調整できたが、比重分離残渣については0.6mm以上の試
料に樹脂であるバックシートが主に含まれており十分細粒
化できなかったため、必要な粒度に調整できなかった。溶
出量試験用試料については、利用模擬試料およびセメント
ペースト試料は粗破碎の段階でほとんどが粒径20mm以下
であった。利用模擬試料については、40-20mmのものがな
い分だけ2.5mm以下の区分の割合が増えた。セメントペ
ースト試料については40-20mmの区分が4%であったが、20-
5mmの区分と合わせると60%となりJISの両区分の合計で
ある70 $\pm$ 10%の範囲に入った。2.5mm以下の区分はJISの
基準内であったが、5-2.5mmの区分はJIS基準の範囲を7
%超過した。

(2) 比重分離試料試験結果

表-3に剥離残渣、比重分離残渣の有害物質含有量試
験結果(3回の平均値)を示す。なお、Sbについては地
下水の水質汚濁に係る環境基準の要監視項目であり、環
境安全品質基準項目には指定されていないが、将来指定
される可能性があるので参考として測定した。Pb以外の
有害物質含有量は、どの試料でも環境安全品質基準(以
後、基準と呼ぶ)を大きく下回った。Pbについては、剥
離残渣中に基準を若干下回る含有量で存在していた。剥
離残渣中のPbは発電素子部に含まれているPb¹⁾に由来
していると考えられる。比重分離残渣のPb含有量は剥離
残渣中の含有量および基準値よりも約1.5倍高くなった。
比重分離残渣のPb含有量が剥離残渣よりも高くなった理
由として、ハンダのような鉛を多く含む成分がEVAに付
着したまま軽比重成分として回収されたことが考えられ
た。

表-4に剥離残渣、および比重分離残渣の有害物質の溶
出量試験結果を溶出pHとともに示す。溶出pHはアルカ
リ側であった。剥離残渣のPb溶出量が基準値の約7.4倍、
要監視項目であるSb溶出量が指針値の約2倍を超えた
が、これらの溶出量は既往の報告と同程度であった¹⁾。そ
れ以外の有害物質については基準値を下回った。

比重分離残渣については、Pbを含めてすべての有害物
質の溶出量は基準を満足した。これは比重分離によりPb

表-1 含有量試験用試料粒度調整結果(重量%)

試料	2~0.6mm	0.6~0.15mm	0.15mm以下
カバーガラス	49	28	22
剥離残渣	49	30	20
比重分離残渣	89	10	1
廃パネル骨材	50	26	24
利用模擬試料	50	29	22
セメントペースト試料	51	25	23
JIS	50 $\pm$ 5	25 $\pm$ 5	25 $\pm$ 5

注: 特定の粒度区分の試料が不足する場合は、より大きい粒度区分の試料を破碎して追加してもよい。

表-2 溶出量試験用試料粒度調整結果(重量%)

試料	40~20mm	20~5mm	5~2.5mm	2.5mm以下
カバーガラス	0	0	0	100
剥離残渣	0	0	0	100
比重分離残渣	0	0	0	100
廃パネル骨材	0	0	0	100
利用模擬試料	0	45	12	43
セメントペースト試料	4	56	22	18
JIS	30 $\pm$ 5	40 $\pm$ 5	10 $\pm$ 5	20 $\pm$ 5

注: 特定の粒度区分の試料が不足する場合は、より大きい粒度区分の試料を破碎して追加してもよい。

を含む発電素子部が比重重物として比重分離選別されたことによる効果と考えられた。

(3) 廃パネル骨材・利用模擬試料の試験結果

表－5に廃パネル骨材の材料であるカバーガラスと、廃パネル骨材、利用模擬試料、セメントペースト試料の有害物質含有量試験結果（3回の平均値）を示す。なお、表中には参考のために廃パネル骨材の材料である比重分離残渣の結果も再掲する。カバーガラスについては全ての有害物質の含有量が基準を大きく下回った。

廃パネル骨材については、Pb含有量は21mg/kgで基準を十分に満たした。廃パネル骨材はカバーガラスと比重分離残渣を95：5の重量比で混合したものであり、カバーガラスと比重分離残渣のそれぞれのPb含有量と混合重量比により求めた廃パネル骨材のPb含有量は20mg/kgであり、実測値とほぼ同じ含有量であった。よって、比重分離残渣のPb含有量は基準を超えるが、比重処理残渣とカバ

ーガラスを混合して作製された廃パネル骨材は、カバーガラスとの希釈効果により基準を満足したと言えた。廃パネル骨材のPb以外の有害物質含有量についても基準を大きく下回った。

利用模擬試料については、Pb含有量が62mg/kgであり基準を満足した。利用模擬試料は廃パネル骨材と『セメント＋水』を1：0.76の重量比で混合しており、『セメント＋水』がそのままセメントペースト試料となったとして、廃パネル骨材とセメントペースト試料のそれぞれのPb含有量に利用模擬試料中での割合（廃パネル骨材：1/1.76、セメントペースト試料：0.76/1.76）を乗じることで計算したPb含有量は53mg/kgであった。この値と利用模擬試料のPb含有量実測値（62mg/kg）がほぼ等しいことから、利用模擬試料のPb含有量が廃パネル骨材のPb含有量より高くなった理由は、セメントペースト試料の含有量が高かったためであると言えた。利用模擬試料のPb以外の有害物質含有量についても基準を満足した。

表－3 剥離残渣および比重分離残渣の含有量試験結果（mg/kg）

試料名	Cd	T-Cr	Se	Pb	As	F	B	Sb
剥離残渣	<0.4	<0.4	<4	147	<4	<200	31	<4
比重分離残渣	<0.4	<0.4	<4	220	<4	310	9	7
環境安全品質基準	45	250*	150	150	150	4000	4000	-

注：灰色の欄は基準値超過を表す。

*：基準値は六価クロムの値。

表－4 剥離残渣および比重分離残渣の溶出量試験結果（mg/L）

試料名	溶出液 pH	Cd	T-Cr	Se	Pb	As	F	B	Sb
剥離残渣	9.51	<0.001	0.01	<0.005	0.074	<0.007	<0.5	0.1	0.041
比重分離残渣	8.11	<0.001	<0.001	<0.005	<0.001	<0.007	0.76	0.4	0.016
環境安全品質基準	-	0.003	0.05*	0.01	0.01	0.01	0.8	1	0.02**

注：灰色の欄は基準値あるいは指針値超過を表す。

*：基準値は六価クロムの値

**：地下水の水質汚濁に係る環境基準の指針値

表－5 カバーガラス、廃パネル骨材、利用模擬試料、セメントペースト試料の含有量試験結果（mg/kg）

試料名	Cd	T-Cr	Se	Pb	As	F	B	Sb
カバーガラス	<0.4	<0.4	<4	10	<4	360	2	<4
比重分離残渣	<0.4	<0.4	<4	220	<4	310	9	7
廃パネル骨材	<0.4	<0.4	<4	21	<4	<200	2	<4
利用模擬試料	1.4	2.5	<4	62	<4	<200	17	<4
セメントペースト試料	2.7	2.7	<4	93	<4	<200	31	<4
環境安全品質基準	45	250*	150	150	150	4000	4000	-

注：灰色の欄は基準値超過を表す。

*：基準値は六価クロムの値。

表－6 カバーガラス、廃パネル骨材、利用模擬試料、セメントペースト試料の溶出量試験結果 (mg/L)

試料名	溶出液 pH	Cd	T-Cr	Se	Pb	As	F	B	Sb
カバーガラス	10.11	<0.001	<0.001	<0.005	<0.001	<0.007	<0.5	<0.01	0.022
比重分離残渣	8.11	<0.001	<0.001	<0.005	<0.001	<0.007	0.76	0.44	0.016
廃パネル骨材	9.58	<0.001	<0.001	<0.005	0.006	<0.007	<0.5	0.02	0.017
利用模擬試料	13.03	<0.001	0.03	<0.005	<0.001	<0.007	<0.5	<0.01	<0.007
セメントペースト試料	13.11	<0.001	0.03	<0.005	<0.001	<0.007	0.62	<0.01	<0.007
環境安全品質基準	-	0.003	0.05*	0.01	0.01	0.01	0.8	1	0.02**

注：灰色の欄は指針値超過を表す。

*：基準値は六価クロムの値

**：地下水の水質汚濁に係る環境基準の指針値

表－6にカバーガラス、廃パネル骨材、利用模擬試料、セメントペースト試料の有害物質の溶出量試験結果をpHとともに示す。pHについてはどの試料もアルカリ側であり、特にセメントを用いて作製した利用模擬試料とセメントペースト試料のpHが13以上と高かった。

カバーガラスでは要監視項目であるSbの溶出量が指針値よりも1.1倍高くなった。Sbはガラスの透明度を上げるために使用される消泡剤に由来する¹⁾。その他の有害物質の溶出量については定量限界以下であった。廃パネル骨材についてはSbの溶出量が0.017mg/Lと指針値を若干下回った。その他の有害物質の溶出量についても基準を満足した。また、利用模擬試料についてはすべての有害物質の溶出量が基準を満足した。廃パネル骨材では指針値に近かったSbの溶出量は定量限界以下に低下した。

以上より、廃パネル骨材の原料となるカバーガラスや比重分離残渣ではPbやSbが含有量基準や溶出量基準を超えたが、廃パネル骨材および利用模擬試料について全ての有害物質が含有量基準、溶出量基準を満足した。このことにより、今回対象とした廃太陽光パネルセルをコンクリート用細骨材として用いた場合、骨材、利用模擬試料どちらで評価しても環境安全上再利用が可能であると言えた。太陽光パネルセルに含まれる有害物質量は太陽光パネルメーカーにより異なることから、太陽光パネルセル一般の環境安全

性を評価するためには、今回用いたメーカー以外の太陽光パネルセルについても環境安全性を評価する必要がある。

4. 今後の展望

シリコン系太陽光パネルセルから分離されたカバーガラスと資源回収残渣の混合物をコンクリート用細骨材として利用した場合の環境安全性評価を行った。今回対象とした廃太陽光パネルセルをコンクリート用細骨材として用いた場合、骨材、利用模擬試料どちらで評価しても環境安全上、利用が可能であると言えた。廃太陽光パネル骨材がどの程度細骨材と置換できるかは、力学的検討を待つ必要があるが、環境安全上は問題がないと考えられる。今後、化合物系太陽光パネルセルを細骨材代替とした場合の環境安全性評価を行っていく予定である。

(本原稿は、「シリコン系太陽光パネルセルのコンクリート用細骨材としての環境安全性評価」、廃棄物資源循環学会論文誌, Vol. 34, pp.23-29, 2023を一部加筆修正したものである)

謝辞

本研究の成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務により得られたものである。

参考文献

- 1) 環境省：太陽光発電設備のリサイクル等の推進に向けたガイドライン（第二版）（2018）
- 2) 環境省：令和4年度事業 産業廃棄物排出・処理状況調査報告書 令和2年度実績（2023）
- 3) Pavlopoulos, C., Kelesi, M., Michopoulos, D., Papadopoulou, K., Lymperopoulou, T., Skaropoulou, A., Tsvilis, S., and

- Lyberatos, G.: Management of end-of-life photovoltaic panels based on stabilization using Portland cement, Sustainable Chemistry and Pharmacy, Vol.27 (2022)
- 4) 川畑勇輝, 李春鶴, 塩盛弘一郎, 原田秀樹：異なる成分の太陽光パネル廃ガラスを用いたモルタルの性能評価に関する研究, 第75回セメント技術大会講演要旨, pp. 96-97 (2021)