

太陽電池パネル廃棄量の将来推計と 再資源化拠点の最適配置に関する研究

佐藤 太平¹・松本 亨²

¹非会員 北九州市立大学 国際環境工学研究科 博士前期課程（〒808-0135 福岡県北九州市若松区

ひびきの1-1）E-mail:u3mac003@eng.kitakyu-u.ac.jp

²正会員 博(工) 北九州市立大学 教授 国際環境工学部（〒808-0135 福岡県北九州市若松区

ひびきの1-1）E-mail:matsumoto-t@kitakyu-u.ac.jp

2011年3月の東日本大震災以降の原子力発電稼働率の大幅な縮小と、2012年7月に開始された再生可能エネルギー固定価格買取制度の導入を機に、太陽電池（PV）システムの普及が加速している。将来的に大量の廃棄物が生み出されることは必然であり、処理・再資源化の体制を今から検討・整備しておくことは重要である。本研究では、生産時ロス、設置時ロス、製品寿命、建物寿命を廃棄要因としPVパネル廃棄量の将来推計を行った。次いでRPに関する財務分析、輸送・SYの管理費用の総費用の最小化により、全国におけるSY・RPにおける最適輸送計画（最適配置・拠点数）の検討を行った。

Key Words : photovoltaic, future estimation, financial analysis, optimal location, recycle

1. はじめに

日本はエネルギーの大量消費国であるにもかかわらず、エネルギー自給率は約5%と低い値に留まっている。加えて、国内エネルギー資源全体の半分以上を占める石油の大半を政治情勢の不安定な中東地域から輸入しており、供給リスクが問題視されて久しい。さらに、2011年3月の東日本大震災では、原子力発電所の損傷により放射性物質が放出され、甚大な被害をもたらした。それに伴い、エネルギー供給の安定性、経済性、環境保全性に加え、安全性の観点からの評価が一段と厳格に議論されるに至っている。これらの課題に対して、近年太陽光発電を始めとした再生可能エネルギーが注目されている。2012年7月より始まった再生可能エネルギー固定買取制度は、同年8月の「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」が制定されたことにより、2021年までは法的に継続することになっている。それによる普及拡大が予測されるため、将来大量の廃棄物が発生することが蓋然性を持って推測できる。現状では、廃棄物発生時に関わる太陽光発電設備メーカー、設置業者、建物解体業者等から、産業廃棄物として処理・処分されていると考えられる。しかし、太陽電池（PV）システムの回収・再資源化システムは未整備であり、資源の有効利用の他、廃棄される太陽光発電による感電事故のリ

スクも指摘されており、今のうちから回収・再資源化のための体制を検討しておくことは重要であると考えられる。

そこで本研究では、年間導入量の将来推計から、生産時ロス、設置時ロス、製品寿命、建物寿命を廃棄要因として考慮した廃棄量の推計を行う。さらに按分することで市区町村別廃棄量の将来推計を行う。次いで、リサイクルプラント（RP）における建設費用、運転費用、処理費収入を考慮した財務分析、輸送費用・ストックヤード（SY）における管理費用に要する総コストの最小化により、全国におけるSY・RPの最適配置を求めることを目的とする。

2. 既存研究と本論文の特徴

PVパネル廃棄量推計に関する既存研究としては、高石ら¹⁾が住宅用PVシステムを対象として普及率シナリオを用いて廃棄量推計し、CO₂削減量と希少資源であるインジウムの需要量・廃棄の推計を行っている。また廃棄物の最適輸送に関する既存研究としては、岩淵ら²⁾が一般廃棄物の収集運搬・中間処理・最終処分の広域化処理を環境負荷削減効果を指標に評価している。藤原ら³⁾は、東日本大震災による災害廃棄物の発生量予測と収集運搬プロセスにおける輸送適正度評価関数を導入し、適正な

仮置場の配置を考察している。このように廃棄物推計に基づいた最適輸送に関する解析を行った事例は多い。しかし、PVパネル廃棄物を対象とする緻密な廃棄量予測と再資源化のための最適輸送を推計した例はない。著者ら⁴⁾はこれまで、PVパネルを対象に、製造工程からの廃棄量を考慮した生産時ロス、初期不良を考慮した設置時ロス、PVパネルの製品寿命を廃棄要因とした推計を行った。また、重心法を用いて、輸送・管理に要するコスト最小化により、九州地域を対象としたSYの最適配置を検討してきた。より精緻な廃棄量予測のためには、製品寿命に加え、建物寿命を考慮する必要がある。また全国を対象とした最適輸送を検討するためには、SYのおみならずRPの規模と配置についても検討が必要である。そこで本稿では、廃棄要因を設置時ロス、生産時ロス、製品寿命、建築寿命とし、全国を対象とするRPとSYの最適輸送計画を検討した。

3. 太陽電池パネル廃棄量の将来推計

(1) 建物寿命による廃棄量推計

2章で触れたように、今回の推計では、設置する建物の寿命を廃棄要因に加えた。建物寿命による廃棄は、製品、建物のそれぞれの寿命関数を推計し、経過年数毎に残存率を比較することでより小さい方（廃棄率の大きい方）を採用した。製品寿命は、工業製品の寿命・強度を分析する際に使用される統計分布関数であるワイブル分布関数を用いた。平均使用年数を20年と仮定し、形状パラメータである β 値は日本の22品目の電気・電子製品の平均ワイブル分布の形状パラメータである2.4⁹⁾を使用し、導入年の寿命による廃棄は0とした。建物寿命に関しては戸建・集合住宅の構造種・築年数別の寿命関数⁹⁾を使用した。建物構造種は、木造・鉄筋コンクリート造・鉄骨造を考慮した。製品寿命関数と建物寿命関数を重ね合わせて推計した例を図-1に示す。

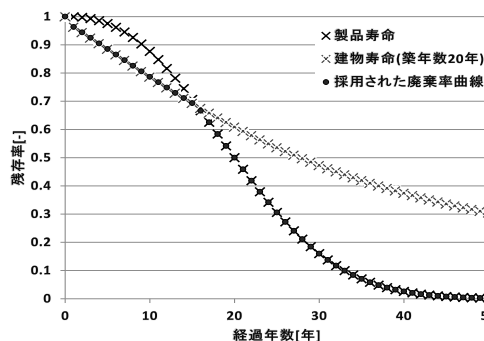


図-1 木造戸建住宅（築20年）の場合のPV残存率の推計結果

製品・建物寿命による廃棄量の算出式を式(1)に示す。

$$D(t) = \sum_{i=1997}^t P(i) \times \alpha_1 \times \alpha_2 \times \alpha_3 \times F(x) + \sum_{i=1997}^t P(i) \times \beta_1 \times \beta_2 \times F(x) \quad (1)$$

ここで、 $D(t)$ は t 年度の廃棄量、 $P(i)$ は i 年の年間導入量、 α_1 は既築建物の割合、 α_2 は既築の構造種別割合、 α_3 は築年数毎の建物数割合、 β_1 は新築建物の割合、 β_2 は新築の構造種別割合を示す。 $P(i)$ は、筆者らの既存研究⁹⁾の年間導入量推計の値を使用した。 α_1 、 β_1 は、経済産業省の太陽光発電システム等の普及動向に関する調査⁷⁾を参照した。 α_2 は総務省統計局の住宅・土地統計調査の実績値⁸⁾を参照し、推計部分は平成10年、平成15年、平成20年の3地点データより近似式を作成し推計した。 β_2 は国土交通省の建築着工統計調査⁹⁾を参照し、推計部分は実績値から近似式を作成し推計した。 α_3 は環境省の使用済再生可能エネルギー設備のリユース・リサイクル基礎調査委託業務報告書¹⁰⁾を参照した。推計した廃棄量の将来予測を図-2に示す。

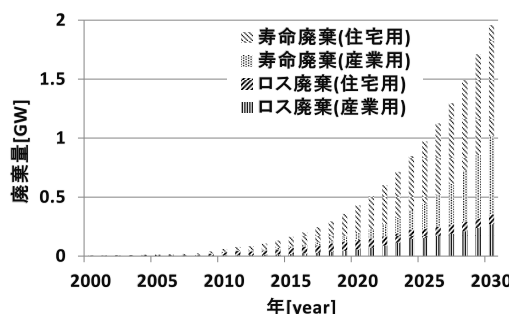


図-2 廃棄要因別廃棄量の推計結果

早い段階では生産時・設置時ロスによる廃棄が多い結果となり、時がたつにつれ建物・製品寿命による廃棄割合が大きくなる結果となった。太陽電池パネルの平均寿命年数を20年と設定していることで、寿命による廃棄の影響が後ろに出ていると考えられる。また2014年の廃棄量は1.4万トンと予測され、2014年と比較して2020年までに3.3倍、2030年までに14.9倍の廃棄量が発生することが推計され、将来的に大量の廃棄物が生じることが明らかになった。

(2) 市区町村別廃棄量の推計結果

(1) の将来推計結果をもとに市区町村別廃棄量の推計を行った。推計方法は、住宅用は都道府県への按分率は、NEFの都道府県別住宅用太陽光発電システム導入状況（1997年～2008年第2四半期）¹¹⁾、太陽光発電普及拡大センター（JPEC）の都道府県別申請件数集計データ（2009年～2012年第3四半期）¹²⁾を参照し都道府県別按分率を算出した。市区町村への按分率は、統計でみる市区町村のすがた2012¹³⁾を参照し市区町村別住宅数を按分指標に用いた。住宅数のデータがない市区町村は、住宅数、人口の両方がそろっている市区町村データをプロットし、算出した近似式より住宅数を算出した。次に産業用については、経済産業省の太陽光発電システム等の普及動向に関する調査より大規模太陽光発電所に関する導入実績⁷⁾を参照した。都道府県別世帯当たりの廃棄量分布を図-3に示す。

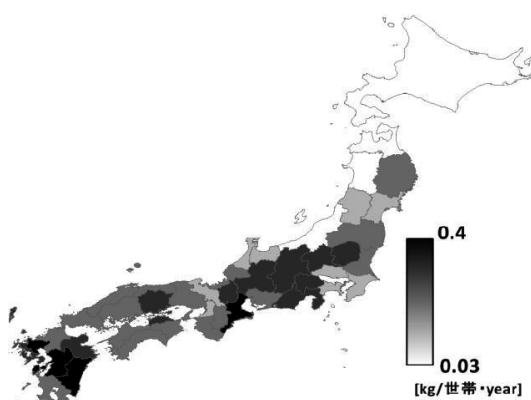


図-3 都道府県別世帯当たりの廃棄量分布(2013年)

北よりも南の地域、日本海側より太平洋側の廃棄量が比較的多い結果を示した。要因として、日本海側より太平洋側の日射量が大きく、年間発電量が大きいいため比較的普及スピードが大きいためと考えられる。

4. 再資源化システムの検討

(1) SYの最適配置

今回の再資源化システムでは、廃棄場所からSY、SYからRPへの輸送を想定している。SYとは、廃棄物を1次的に保管する場所を指す。廃棄場所からSYまでの輸送を1次輸送、SYからRPまでの輸送を2次輸送を行うこととした。今回の推計では、SYとRPの拠点数、配置場所を考えた最適輸送の検討を行う。再資源化システムの推計フローを以下の図-4に示す。

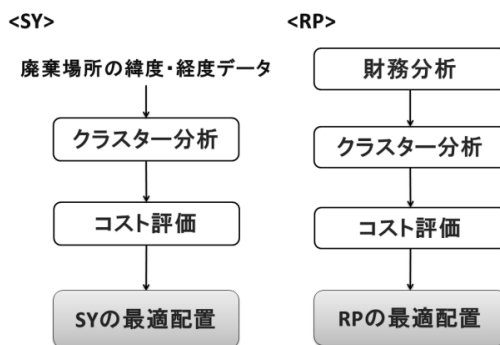


図-4 最適輸送の推計フロー

廃棄場所を各市区町村役所と設定する。まずSYの数によるケース毎に廃棄場所の緯度・経度データをクラスター分析によってグルーピングする。今回の分析では、K平均法（非階層型）を用いた。次にグルーピングしたグループ毎にSYを1つ設置することとし、SYの配置候補場所を各市区町村役所とした。ケース毎に1次輸送費・SY管理費を算出し、合計である総費用が最小となるケースをSYの最適配置とした。ケース毎のコスト算出結果を以下の図-5に示す。

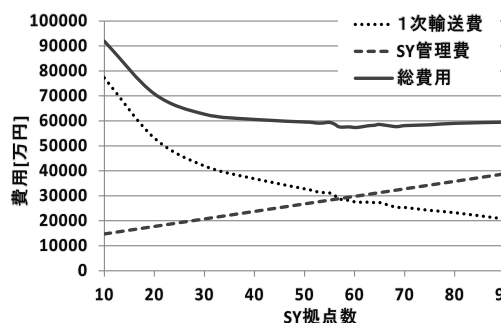


図-5 コスト算出結果

結果を見るとSYの拠点数が多くなるほど、1次輸送費は指数関数的減少、SY管理費は比例増加するという結果が分かった。総費用は全国にSYを60ヶ所設置するケースにおいて最小値57,336万円となることがわかった。

(2) RPの最適配置

次にRPの最適配置の算出を行う。まず建設・運搬費用・処理費収入を考慮した財務分析によりRPの最適配置数を算出する。財務分析で設定した各パラメータを以下の表-6に示す。再資源化売却資源は、多結晶シリコンモジュールを想定し、アルミニウム、ガラス、銅、プラスチック、シリコンの5つとした。PRは2016年から操業開始し、初期投資額を操業してから10年間で回収できる事を条件にRPの最適拠点数を算出した。その結果最適

表-6 財務分析における設定パラメータ

	費用項目	使用データ		単位	備考
イニシャルコスト	建設費	算出式			$y = -0.914x + 2.7333$ (堆肥化施設の既存建設費データから作成)
		処理能力	x	t/日	86.2
		規模当たりの建設費	y	百万円/(t/日)	0.964246
	土地代	算出式			$y = 0.0202x + 3.3102$ (※1)
		リサイクルプラントの面積		m ²	10000
		リサイクルプラントの縦		m	25
ランニングコスト	設備費	リサイクルプラントの横		m	400
					PVリサイクル専門委員会(資料)
					リサイクル料金の透明化について:産業構造審議会環境部会廃棄物・リサイクル委員会よりイニシャルコストの1%と仮定
	メンテナンス費				PVリサイクル専門委員会(資料)
	運転費				厚生労働省 賃金構造基本統計調査(全国) 廃棄物処理業 平成25年度データ
					PVリサイクル専門委員会(資料)
売却益	人件費	人員		人	30
		給与額		万円/ヶ月	29.05
		年間賞与・特別給与額		万円/年	47.49
	アルミニウム ガラス 銅 プラスチック シリコン	処理能力		MW	200
		kW当たりの回収量	アルミニウム		2.5
			ガラス		53.8
			銅	kg/kW	0.1
			プラスチック		2.9
			シリコン		2.7
	再資源売却価格	アルミニウム ガラス			177
					1.2
		銅		円/kg	300
					リサイクル料金の透明化について:産業構造審議会環境部会廃棄物・リサイクル委員会
		プラスチック			25
		シリコン			5770
					津川金屬株式会社
					シリコン系中間製品の輸入価格(財務省貿易統計)

拠点数は、全国に9ヶ所と算出された。なおRPの想定処理量は、2029年までの廃棄量を処理可能となるように設定した。RPの最適配置については、まずクラスター分析で算出したSYを9つにグルーピングする。次にグルーピングしたグループ毎にRPを1つ設置することとし、2次輸送費の最小化により最適配置場所を算出した。SYとRPの最適配置場所を、以下の図-7に示す。

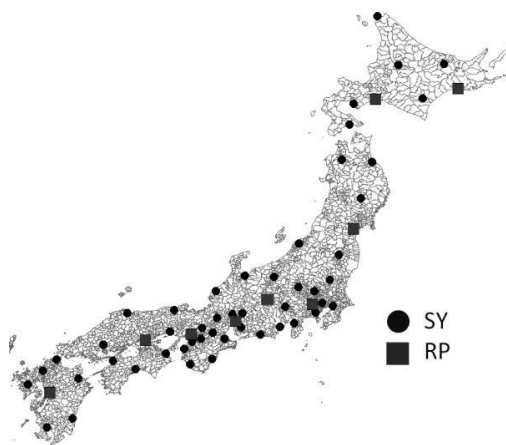


図-7 SY と RP の最適配置場所

5. まとめと今後の課題

本研究では、PVパネルの回収・再資源化におけるRPとSYの必要な整備規模・数を算出し、それらの最適配置と輸送システムを検討することを目的とし、PVパネルの廃棄量推計と全国規模を対象に廃棄PVパネルの最適輸送計画の推計を行った。早い段階では生産時・設置

時ロスによる廃棄量が多い結果となり、時がたつにつれ建物・製品寿命による廃棄割合が大きくなる結果となった。PVパネルの平均寿命年数を20年と設定していることから、製品寿命による廃棄の影響が後の方に出ていると考えられる。2014年の廃棄量は1.4万トンと予測され、2014年と比較して2020年までに3.3倍、2030年までに14.9倍の廃棄量が発生することが推計され、将来的に大量の廃棄物が生じることが確認された。RPにおける財務分析では、稼働から10年で初期投資を回収する設定において、全国に9ヶ所設置することが想定された。またSYのコスト評価では、SY拠点数の増加に伴い、1次輸送は指数的減少、SY管理費は比例増加するという傾向を示した。今回の検討では、全国にRPを9ヶ所、SYを60ヶ所設置するケースがコスト最小となる最適配置という結果が得られた。

今後の課題としては、廃棄物の発生密度の精緻な考慮、PVシステムにおける周辺機器も含めた発生量の将来推計、地形などの実態に即した施設配置と輸送システムの検討が挙げられる。廃棄物の発生密度の考慮とは、発生密度に際した収集領域の設定を行うことでよりコスト最小の輸送計画を考える必要があると考えている。PVシステムにおける周辺機器も含めた輸送計画では、廃棄の発生頻度の異なるパワーコンディショナなどの周辺機器の廃棄量推計が挙げられる。地形などの実態に即した施設配置では、標高データにより標高の高い土地と標高の低い土地における輸送負荷に差異をつける必要があると考えている。

参考文献

- 1) 高石昌幸, 東海明宏, 中久保豊彦, 山本祐吾: 太陽光発電パネルの普及に伴う CO₂排出削減効果と希少資源確保・有害物質管理に関する一考察, 環境科学会年会プログラム, pp68, 2010
- 2) 岩淵善美, 仁井本貴庸, 東野達, 笠原三紀夫: 一般廃棄物の広域化処理に関する環境負荷評価, 空気調和・衛生工学会論文集, No.88, pp13-23, 2003
- 3) 藤原健史, 中村彰太: 地図情報を用いた災害廃棄物の発生量予測と収集輸送計画, 環境システム計測制御学会誌, 17(4), pp58-66, 2013
- 4) 佐藤太平, 松本亨, 藤山淳史: 太陽電池パネル廃棄量の将来推計と再資源化のための輸送計画, 土木学会論文集 G (環境), Vol.69, No.6, ppII_293-II_299, 2013
- 5) 小口正弘, 亀屋隆志, 田崎智宏, 玉井伸明, 谷川昇: 電気・電子製品 23 品目の使用年数分布と使用済み台数の推計, 廃棄物学会論文誌, Vol 7, No1, pp50-60, 2006
- 6) 小松幸夫, 加藤裕久, 吉田倬郎, 野城智也: わが国における各種住宅の寿命分布に関する調査報告 1987年固定資産台帳に基づく推計, 日本建築学会計画系論文報告書, 第 439 号, 1992
- 7) 経済産業省 資源エネルギー庁: 平成 24 年度 新エネルギー等導入促進基礎調査 太陽光発電システム等の普及動向に関する調査, 2013
- 8) 総務省統計局: 住宅・土地統計調査, <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/html/GL02100101.html>
- 9) 国土交通省: 建築着工統計調査 http://www.mlit.go.jp/statistics/details/jutaku_list.html
- 10) 環境省: 平成 24 年度使用済再生可能エネルギー設備のリユース・リサイクル基礎調査委託業務 報告書, pp217, 2013
- 11) 一般財団法人 新エネルギー導入促進協議会: 平成 20 年度住宅用太陽光発電システム導入状況に関する調査, pp22~24, 2010
- 12) 太陽光発電普及拡大センター(IPEC)住宅用太陽光発電補助金交付決定件数・設備容量データ 2012
- 13) 総務省 統計局: e-stat, <http://www.e-stat.go.jp>

(2014. 7. 11 受付)

STUDY ON FUTURE ESTIMATION OF DISCARDED SOLAR CELL PANEL AND OPTIMAL LOCATION OF RECYCLING PLANT AND STOCKYARD

Taihei SATO and Toru MATSUMOTO

The spread of solar panels has been accelerating after the scaledown unclear power by east Japan earthquake and a feed-in-tariff policy for renewable energy was introduced in July 2012. In the near future, large quantities of photovoltaic(PV) systems will likely be discarded because of this rapid diffusion, so it is necessary to investigate and prepare treatment and recycling systems for end-of-life PV systems now. In this paper, the future quantities of discarded solar panels by discarded factor are estimated by region. Furthermore, we estimate the optimal location of stock yards (SY) and recycle plant(RP) according to financial analysis and total costs of transportation and management in Japan.