

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月31日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2011～2012

課題番号：23681008

研究課題名（和文）太陽電池産業におけるグローバルサプライチェーンの最適化に関する研究

研究課題名（英文）Optimization of Global Supply Chain of Photovoltaic Industry

研究代表者

河尻 耕太郎（KAWAJIRI KOTARO）

独立行政法人産業技術総合研究所・安全科学研究部門・社会とLCAグループ

研究者番号：00415663

研究成果の概要（和文）：

本研究において、経済と環境の両側面から、最適な太陽電池産業のグローバルなサプライチェーンを明らかにし、それを実現するための政策について定量的に検討した。具体的に、コスト分析用データベースの開発、サプライチェーン最適化シミュレーターの開発、政策によるCO₂排出量削減効果の評価を行った。成果は、学会発表、論文投稿を行うとともに、世界の太陽電池発電量、電気代削減金額、CO₂削減量を計算できるソフトを開発した。

研究成果の概要（英文）：

The objective of this research is to clarify the optimum global supply chain of photovoltaic (PV) from economic and environmental points of views, and also to investigate and propose the effective policy to realize the optimum supply chain. In detail, we completed the following three research targets for our objective; 1) development of the databases to analyze the life cycle cost of PVs, 2) development of simulators to optimize the supply chain of PVs, and 3) analysis on the impact by the policy. The obtained results were presented at the conferences and published on the journals. In addition, we developed the software for consumers to estimate the PV energy generation, CO₂ reduction, and cost payback for all over the world.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2012年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
総計	8,300,000	2,490,000	10,790,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学

キーワード：ライフサイクルアセスメント

1. 研究開始当初の背景

近年、太陽電池は、機能向上や価格低下、政策等により、急速に社会に普及しつつあり、持続可能な社会を構築するための有力な選択肢となりつつある。一方、その産業の動向

に目を向けると、先進国を中心とした太陽電池の需要増加と、新興国からの太陽電池や部材の供給増加という方向でグローバル化が進みつつある。ドイツや日本等の先進国は、日射量や電力あたりのCO₂排出量が小さく、

太陽電池導入によるCO₂削減効果が小さい。逆に、中国をはじめとする新興国は、電力あたりのCO₂排出量が大きく、部材や太陽電池の製造に伴うCO₂排出量は大きい。つまり、現在のグローバル化の方向は、世界全体のCO₂排出量を増加させる方向に作用している。したがって、より効率的に低炭素な社会を構築するためには、太陽電池産業の需要と供給の両側面、つまりライフサイクル全体で最適なサプライチェーンの在り方について明らかし、それを実現するための施策について検討することが必要である。

2. 研究の目的

本研究は、経済と環境の両側面から、最適な太陽電池産業のグローバルなサプライチェーンについて明らかにするとともに、それを実現するための政策の在り方について、定量的に検討することを目的とする。本研究では、ライフサイクル思考に基づいて、太陽電池のサプライチェーン全体で生じるライフサイクルコストとライフサイクルCO₂排出量を評価する。また、政策による、サプライチェーン構造の変化と、CO₂排出量の削減量について定量的に評価し、太陽電池のサプライチェーン全体で低コスト化、低炭素化を促進する政策の在り方について提言する。

3. 研究の方法

本研究では、1) コスト分析用データベースの開発、2) サプライチェーン最適化シミュレーターの開発、3) 政策によるCO₂排出量削減効果の評価、を開発課題として研究を行う。下記においてそれぞれの課題についての方法を述べる。

1) コスト分析用データベースの開発：

太陽電池や部材の製造に関するインベントリデータと、各インベントリデータに対応した国別物価情報データを収集し、各プロセスのコストを国別に算出可能なデータベースを構築する。

また、JIS8907の太陽電池の発電電力量の推計手法と、NASAの気象データを組合せ、世界全体の太陽電池の発電電力量のポテンシャルマップを作成した[雑誌論文②]。得られたポテンシャルマップと、各国の平均的な電力あたりのCO₂排出量と、電力コストから、太陽電池の導入によるCO₂削減量[雑誌論文①]、コストペイバックを推計した[学会発表④⑥]。ただし、コストペイバックの分析においては、家庭用電力料金を用いて計算を行い、フィードインタリフなどの政策による影響を考慮しないものとする。

2) サプライチェーン最適化シミュレーターの開発：

ネットワーク計画法のアルゴリズムをベ

ースに、無数の国の組み合わせの中から、コストを最小化するサプライチェーンを自動的に算出するシミュレーターを開発する。併せて、モンテカルロ・シミュレーションを用いて、サプライチェーンを構成する国による不確実性の分析を行う。

3) 政策によるCO₂排出量削減効果の評価：

前記のデータベースとシミュレーターを用いて、政策によってCO₂排出量をコストに転嫁した時のサプライチェーン構造の変化と、ライフサイクルCO₂の削減量を評価する。政策のケース・スタディとして、電力買取価格へのCO₂プレミアムの加算について取り上げ、その政策の影響について定量的に評価する。

4. 研究成果

下記において、上記3つの研究課題に対する成果を述べる。

1) コスト分析用データベースの開発

グローバルなサプライチェーンによって生じるコストを分析するために、太陽電池のインベントリデータベース、材料コストデータベースと、国別コストデータベースを開発した。

太陽電池の製造プロセスのインベントリデータベースについては、主に、コロンビア大学のFthenakis教授が作成したインベントリデータを引用したが、本インベントリには、人件費や製造装置、建物などについて、投入量が不明な部分がある。それら不明な部分については、企業などのレポートや発表資料などから推計し、太陽電池の製造にかかる全てのコストがデータに反映されるよう、インベントリデータの補完を行った。材料コストデータベースは、上記インベントリの項目に対応させ、太陽電池の製造プロセスにおいて投入される全ての材料に対して、インターネット、文献情報、既存ソフトウェアなどからコストデータを収集した。また、人件費、電気代、土地代、建設費など、国によって大きく変動するコストについては、国別にコストデータを収集した。データの情報源としては、JETROなどのデータベース、文献情報を利用した。

上記のインベントリデータベースとコストデータベースを利用し、世界の各国で太陽電池が生産された際の太陽電池のモジュール製造コストを分析するためのシステムを開発した。

図1に、上記分析システムを用いて、仮に一連の製造プロセスが日本で行われた場合の太陽電池のコストを示す[学会発表①②]。図より、太陽電池の製造プロセスにおいて、材料費と製造装置が大きな割合を占めることが分かる。また、多結晶シリコンとセルの製造のステージのコストの割合が大きいこ

とが分かる。本データベースによって推計された太陽電池モジュールの製造コストは、1200ドル程度であり、現在の太陽電池モジュールの小売価格の平均に近いことから、推計結果が妥当な数値を示していることを確認した。

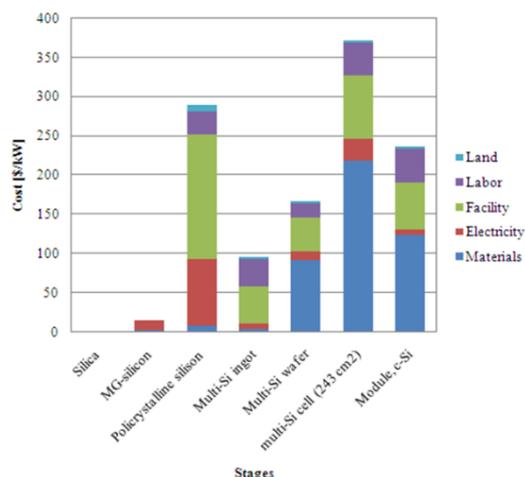


図1. 太陽電池の製造コスト

また、JIS8907の太陽電池の発電電力量の推計手法と、NASAの気象データを組合せ、世界全体の太陽電池の発電電力量のポテンシャルマップを作成した[雑誌論文①]。本研究により、温度の効果を考慮すると、チベットやチリにおいて最も太陽電池の発電電力量が大きくなることを明らかにした。本研究結果については、世界中のメディアに取り上げられた[その他 ニュース①②③]。

上記で得られたマップデータと、各国の電力あたりのCO2排出量とコストから、世界のCO2排出量削減のポテンシャルマップ[雑誌論文①]と、コストペイバックのポテンシャルマップを作成した[学会発表④⑥]。本研究により、CO2削減量の観点では、モンゴルやボツワナが最も太陽電池の導入に適していること、コストペイバックの観点では、フィードインタリフなどの政策の効果を考慮しなければ、イタリアなどが適していることを明らかにした。

2) サプライチェーン最適化シミュレーターの開発

本研究では、ネットワーク計画法とモンテカルロ・シミュレーションの2つの分析手法を用いて、最適なサプライチェーンについて分析した[学会発表①③⑤⑧]。

ネットワーク計画法における、Dijkstra法を用いることで、CO2とコストを最小化するサプライチェーンを、一意に求めることができる。本手法により、太陽電池モジュール製造におけるCO2排出量を1600kg/kW程度、製造コストを700\$/kW程度までそれぞれ削減可能

であることを明らかにした。

一方で、モンテカルロ・シミュレーションを用いて、既存のサプライチェーンの各国のシェアを元に、コストとCO2の変動の幅と、確率について明らかにした。

既存のサプライチェーンにおいては、太陽電池モジュールの製造コストは約700\$/kW-1200\$/kW、CO2排出量は約1600kg/kW-2400kg/kWの範囲であり、最も確率が高いのは、コストが約1100\$/kW、CO2排出量が約2300kg/kWの場合であることが明らかになった。これは、サプライチェーンの各ステージにおいて、中国のシェアが大きいため、中国でほとんどの製造プロセスが行われた場合を示している。本研究では、材料の価格は一定であると仮定しているため、中国で製造した場合、事業用の電気代が高く、人件費の安さを相殺する結果となった。もし材料価格も全て国別に变化した場合は、また異なる結果が生じる可能性があるが、現在の仮定においては、必ずしも中国での製造がコストを最小化するわけではないことが明らかになった。一方で、中国では、電力あたりのCO2排出量が大きいため、製造によって生じるCO2排出量は大きくなる。

以上の結果から、既存のサプライチェーンにおいても、製造に伴うコストとCO2排出量をより削減できる余地があることが示された。

また、使用段階のステージにおいても、モンテカルロ・シミュレーションを用いて、太陽電池の使用によるCO2削減量と、コストペイバックについて、分析を行った。使用時の年間のCO2削減量は、約0kg/kW-1200kg/kWhの範囲であり、年間のコストペイバックは約50\$/kW-190\$/kWの範囲であることが明らかになった。現状最も高い確率で生じるのは、ドイツに太陽電池が導入される場合で、CO2削減量は約500kg/kW、コストペイバックは約150\$/kWのケースである。したがって、使用段階においても、CO2削減量、コストペイバックともにより増加できる余地があることが明らかになった。

以上の結果から、Dijkstra法は、CO2やコストの単一のアウトプットに対して、一意かつ簡便に最適解を得ることができ、その結果が最適であることが保証されている点で優れている。ただし、コストとCO2排出量の両者の同時最適解を検討したり、結果が生じる確率を分析したりするには、モンテカルロ・シミュレーションを用いた方が、分析しやすいことが明らかになった。また、製造段階のコストやCO2排出量と比較して、使用段階のコストペイバックやCO2削減量のほうが大きいことが明らかになった。特に、CO2排出量については、使用段階のCO2削減量のほうが、製造時のCO2排出量よりもずっと大きいこと

が明らかになった。

3) 政策によるCO₂排出量削減効果の評価

上記2)における研究結果より、使用時のCO₂削減量を増加させることで、効率的に世界全体のCO₂排出量を削減できることが明らかになった。そこで本研究では、世界において最適な太陽電池の導入場所を検討するとともに、太陽電池を導入する場所を最適化するための政策について検討を行った。

雑誌論文①②において、世界で太陽電池の導入に適した国は、発電電力量の観点ではチベットやチリが[雑誌論文②]、CO₂削減量の観点ではモンゴルやボツワナが[雑誌論文①]、コストペイバックの観点ではイタリアなどが[学会発表④⑥]適していることが明らかになった。また、電力需要という観点では、アメリカや中国が最も適した国である。これらの結果より、それぞれの目的とするアウトプットによって、最適な導入場所が大きく地理的に異なることが明らかになった。

今後政策などにより、CO₂削減を促すためには、CO₂削減量の大きな場所に太陽電池を導入するインセンティブが必要である。そこで、本研究では、太陽電池によって生じた電力を買い取る際に、CO₂削減量に応じたプレミアムを上乗せし、CO₂削減に適した場所に太陽電池を導入するインセンティブを生じさせる政策について検討を行った。

図2に、CO₂プレミアムによる、各国のコストペイバックの変化について示す。図より、CO₂削減量1kgあたり0.1ドルあたりから、徐々にCO₂削減量の大きな場所に導入するメリットが生じ、CO₂削減量1kgあたり1ドルのプレミアムを加算すると、CO₂削減量の大きな場所に導入するほうが、単純にコストペイバックの大きな土地に導入するよりも、明らかにメリットが生じる。しかしながら、現在のカーボントレードの枠組みでは、1kgのCO₂排出量あたり、約0.003ドルで売買されており、現在の市場メカニズムのみでは、CO₂削減に適した場所に太陽電池を導入させるほどの効果を生むことはできないことが明らかになった。したがって、今後、CO₂削減に最も適した場所に太陽電池を導入し、世界全体でCO₂排出量を効率的に削減するためには、なんらかの政策的なメカニズムを用いて、望ましいCO₂プレミアムの価格と、市場メカニズムでのCO₂の価格のギャップを埋める必要があることが明らかになった。

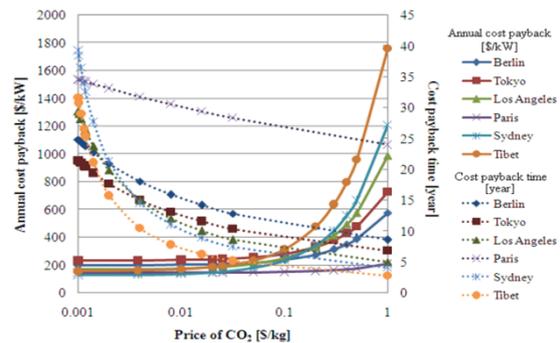


図2. CO₂ プレミアムによる各国のコストペイバックの変化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① K. Kawajiri, Y. Genchi, The Right Place for the Right Job in the Photovoltaic Life Cycle, Environmental Science and Technology, 2012, 46 (13), pp 7415-7421
DOI: 10.1021/es204704y
- ② K. Kawajiri, T. Oozeki, Y. Genchi, Effect of Temperature on PV Potential in the World, ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY, 2011, 45 (20), pp 9030-9035
DOI: 10.1021/es200635x

[学会発表] (計10件)

- ① 河尻 耕太郎, 野々山 洗, T. G. Gutowski, コストとCO₂を最小化する太陽電池のサプライチェーンとその政策への示唆, 2012年度日本LCA学会研究発表大会, 草津, 2013/03/07
- ② K. Kawajiri, S. B. Gershwin, T. Bounassisi, T. G. Gutowski, Outcome of Rapid Growth of Renewable Energy in a Case Study of Photovoltaic, EcoBalance 2012, Yokohama, 2012/11/22
- ③ K. Kawajiri, T. G. Gutowski, Numerical Approaches to Optimize the Global Photovoltaic Supply Chain, EcoBalance 2012, Yokohama, 2012/11/22
- ④ K. Kawajiri, T. G. Gutowski, Geological Analysis on Photovoltaic Potential, CO₂ reduction, and Cost Payback for Photovoltaic Deployment, EcoBalance 2012, Yokohama, 2012/11/22
- ⑤ K. Kawajiri, T. G. Gutowski, Application of Network Modeling for the Low Carbon Global Photovoltaic Supply Chain, LCAXII, Tacoma, 2012/09/26

- ⑥ K. Kawajiri, T. G. Gutowski, Payback of Energy, CO₂, and Cost by Photovoltaic Deployment in the World, LCAXII, Tacoma, 2012/09/25
- ⑦ K. Kawajiri, S. B. Gershwin, T. Bounassisi, T. G. Gutowski, Impact of PV Growth on CO₂ emission in the world , ISSST 2012, Boston, 2012/05/16
- ⑧ K. Kawajiri, T. G. Gutowski, Application of Numerical Methods to Optimize the Global Photovoltaic Supply Chain, 日本 LCA 学会, 横浜、2012/03/08
- ⑨ K. Kawajiri, S. B. Gershwin, T. Bounassisi, T. G. Gutowski, CO₂ Emissions from World PV from 1992 to 2009, 日本 LCA 学会, 横浜、2012/03/07
- ⑩ K. Kawajiri, Y. Genchi, Global Optimum of Supply Chain of PV Industry to Reduce CO₂ Emission in the World, LCAXI, Chicago, 2011/10/05

[図書] (計1件)

- ① K. Kawajiri, Optimum Locations for Photovoltaic Life Cycle, Materials and processes for energy: communicating current research and technological developments, Formatex Research Center (in print)

[その他]

依頼講演 (計1件) :

- ② K. Kawajiri, Photovoltaic in The Right Place for The Right Job, University of Delaware, 2/24, 2012

ニュース (計多数、代表的なもの3件を下記に列記) :

- ① Discovery News, Mountains May Be Best Solar Hot Spots, 2011/10/18.
- ② New Scientist, Himalayas could become the Saudi Arabia of solar, 2011/10/18.
- ③ American Chemical Society, New Saudi Arabias of solar energy: Himalaya Mountains, Andes, Antarctica, 2011/10/12.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河尻 耕太郎 (KAWAJIRI KOTARO)
 産業技術総合研究所・安全科学研究部門・
 社会と LCA グループ・主任研究員
 研究者番号 : 0 0 4 1 5 6 6 3

(2) 研究分担者 ()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

Timothy G. Gutowski
 Massachusetts Institute of Technology・
 Laboratory for Manufacturing and
 Productivity・Professor

研究者番号 :