

令和元年6月7日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00673

研究課題名(和文) 持続可能な再生エネルギー利用総合評価法の構築とその太陽光発電技術への応用

研究課題名(英文) An Integrated Assessment Scheme of Renewable Energy and Its Application to PV Systems

研究代表者

眞弓 浩三 (MAYUMI, Kozo)

徳島大学・大学院社会産業理工学研究部(社会総合科学域)・教授

研究者番号：40253182

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：一次エネルギー(Primary Energy)の太陽光などの再生可能エネルギーを変換し、燃料や熱、電気などの最終エネルギー(Energy Carrier)として経済システムで利用し廃棄するすべてのプロセスのエネルギーと物質収支を総合的に分析評価する方法論を提案し、太陽電池による発電システム(PV Systems)に応用できるように改変した。さらに、第一世代PVシステムに適用し、現在の電力生産量の30%だけを生産するときにさえ、現在の銀の生産量の6倍以上の銀が必要になることを実証した。銀の必要量を減少させるかあるいは代替金属を利用する技術を開発することが急務となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

バルセロナ自治大学ジャンビエートロ教授と共同開発した多階層エネルギー分析スキーム(Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism)を利用して、再生エネルギー源の採掘・変換・輸送・利用・廃棄にわたる全てのプロセスの総合評価を実施できる総合評価法を構築することが可能になった。また第一世代PVシステムにその評価法を適用し、大規模な電力生産をPVシステムで行う場合には、銀の使用量の増大が最大の制約条件になるということも実証できた。

研究成果の概要(英文)：An integrated assessment scheme of any type of renewable primary energy sources is proposed. The scheme is an application of the multi-scale integrated analysis of societal and ecosystem metabolism. This scheme can be adjusted to make a general assessment of all energy and material transformation process utilizing renewable primary energy sources and discarding waste heat into the environment. The adjusted scheme is then applied to an integrated assessment of the first generation of PV systems and shows that if 30% of the current world electricity consumption is generated by the PV systems, the silver requirement amounts to more than six times as much as the current world silver production. Unless serious effort to reduce silver use or to identify possible alternative metals is attempted, the large scale electricity production by the PV systems causes a serious problem.

研究分野：エネルギー分析

キーワード：環境経済 再生エネルギー 循環型社会 PVシステム 銀

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 2011年3月11日に勃発した東北地方太平洋沖地震と津波による福島第一原子力発電所事故後、再生可能なエネルギー源開発の必要性が叫ばれ、再生可能エネルギー特別措置法案と再生可能エネルギー買い取り法案が2011年8月に成立した。2012年7月からは再生エネルギーの固定価格買い取り制度が導入され、再生可能エネルギー促進賦課金も付け加えられた。1973年から2008年までの25年間で日本の総最終エネルギー消費量は約1.5倍に増加したが、電力依存はこれ以上に増加し、同じ期間において電力設備容量は8,039万kWから2億3,890万kWと約3倍になった。IT産業の拡大や電化設備のさらなる増加に対応する電力の長期的安定供給の必要性から、太陽光を利用する電力生産の可能性が再び注目されるようになった。

(2) 太陽エネルギーを代表とする一次エネルギー(Primary Energy Sources, PES)のエネルギー源としての性能を評価する指標としては、C. Hallによって1981年に提唱されたEROI(Energy Return on Investment)が良く知られている。また、ライフサイクルアセスメント(LCA)の一環として、エネルギーペイバックタイム(EPT)やエネルギー収支比(EPR)が指標として用いられてきた。しかしながら、これらの指標はエネルギー収支のみに注目するものであり、投入する水・鉱物資源や廃物、さらにファンド要素(土地・労働時間・資本)の必要量を考慮していない。この不備を補う目的で、経済学者のジョージ・ジェスクレーゲンは、彼独自のフロー・ファンドモデルを利用して、太陽光の実行可能性について理論的に研究した(1979年)。

(3) 申請者眞弓は、研究協力者の一人ジアンピエートロ教授(バルセロナ大学環境科学技術研究所)とジョージ・ジェスクレーゲンの理論を発展させ、化石燃料の大量消費による社会メタボリズムの動態分析を研究し、一次エネルギーの一つの形態であるバイオマス(とうもろこしとさとうきび)をエタノール(液体燃料)というエネルギーキャリア(EC)に大規模変換する際の自立性について2009年に*The Biofuel Delusion: The Fallacy of Large Scale Agro-Biofuel Production*を出版した。本研究はその延長線上に位置するものである。

### 2. 研究の目的

(1) 研究協力者(ジアンピエートロ教授とロピアノ博士)との最近の共同研究を進展させて、再生エネルギー源の採掘・変換・輸送・利用・廃棄にわたる全てのプロセスの総合評価を実施できる総合評価法を構築する。つまり、一次エネルギー(PES)を変換してエネルギーキャリア(EC)を作成し、社会経済システムで利用(End Use, EU)して廃棄するまでに関係するプロセスを詳細にアカウントできる方法論を考案する。主要なファンド要素の製造と維持、並びにフロー要素の必要量に着目して記述できるようにする。

(2) さらに、総合評価をするために、再生エネルギーの自立性の3側面を導入し、それらの相互依存性を量的に表現する。まず、技術的自立性(Technological Viability)とは、現行の科学技術体系のもとで、与えられたPESからどれだけECが生産できるのかを記述するものである。資源制約・環境負荷的自立性(Biophysical Viability)とは、再生エネルギー源の採掘(集光)・変換・輸送・利用・廃棄にわたる全てのプロセスにおいて、その他のECや鉱物資源・水などの必要量や廃棄量ならびに生態系の環境容量変動を数量的にとらえたものである。さらに、社会経済的自立性(Socioeconomic Viability)とは、与えられた人口構造と産業構造・制度のもとで、生産されるECとファンド要素である土地や労働時間を確保するとともに、現在のECの生産を前提にした生活水準の維持をどの程度実現できるのかということである。これらの3つの自立性に属する一群の指標を作成するとともに、それらの相互依存性を明らかにし、持続性を考慮した経済政策を実現する手段にする。

### 3. 研究の方法

(1) 研究協力者 Giampietro と眞弓は G. K. Zipf や A. Lotka の先駆的な考察に加えて、Georgescu-Roegen のフロー・ファンドモデルと理論生態学における階層理論(Hierarchy Theory)を取り入れた「多階層エネルギー分析スキーム」(Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism, MuSIASEM)を用いて社会メタボリズムの問題を考察してきた。MuSIASEMは、多階層レベルのシステムに属するフローとファンドの配分の時系列分析に適用するスキームである。フローとは、エネルギーや鉱物資源その他の原材料・生産物・廃棄物のように生産過程に投入されたり、あるいは生産過程から質的变化を遂げて産みだされるものであり、ファンドとはフロー要素の変換に必要な土地や労働時間も含めた人間時間、資本設備である。

(2) MuSIASEMによる多階層メタボリズムの行列表現形式によれば、産業組織・家計におけるメタボリズムパターンに応じて一群の指標が作成される。MuSIASEMのこの特性を利用してPESの採掘(PVでは基盤製造・モジュール化・集光)・変換・輸送・配分・利用・廃棄にわたる全てのプロセスに関連する指標を作成することが可能となる。具体的には、次のような特徴を有する：1 多階層のシステムの入れ子構造(nested hierarchy)として産業部門・家計をとらえることにより、多階層レベルで同時に発生する多種の変化を、MuSIASEMの表現形式に利用され

る行列要素の変化で表現することができる；2 単一の指標を構築するのではなく、3つのマクロ的側面（技術的自立性と資源制約・環境負荷的自立性、社会経済的自立性）に属する指標間の有機的な関連（トレードオフあるいは補完）を明示的に取り扱うことが可能であり、3 側面に属する指標群の相互依存関係、さらに3 側面それぞれの内部の指標間の相互依存関係を並行して数量化することが可能である；3 MuSIASEM では1時間当たりのメタボリズムスピードを考察するために、人口構造と産業構造の変化、並びに時間や土地の使用パターンの変化という現代社会メタボリズムの特性を直接考察することができる。

#### 4 . 研究成果

( 1 ) 2017年春に専門誌 *Applied Energy* に掲載された学術論文 " Toward an integrated assessment of the performance of photovoltaic power stations for electricity generation " において、研究課題の主たる目的であった持続可能な再生エネルギー利用総合評価法の構築とその太陽光発電技術への応用というテーマがほとんど達成されたので、2017年4月からは、再生エネルギー利用の3つの中心的側面である 1 技術的自立性；2 資源制約・環境負荷的自立性；3 社会経済的自立性）に密接に関係するエネルギー効率性の逆説である「ジューボンスパラドックス」について考察を進めた。ジューボンスパラドックスとはエネルギー利用の効率性を上げると、結果としてエネルギー消費の総量は増加するというものであり、経済学者のジューボンスが1865年に「石炭問題」の中で初めて指摘したのである。標準経済学分野ではリバウンド効果としてよく知られている。このジューボンスパラドックス現象を、アルフレッドロトカのエネルギー流量最大化原理（生物の適応進化はエネルギーを最大限体内に取り込もうとする方向に進む）とプリゴジンの最小エントロピー発生原理（開放系散逸構造の挙動を支配する原理）から説明することができることを示した。その際に、ケスラーが導入し、理論生態学でさらに発展されたホロンやホラキー、さらにホリングの適応サイクルなどの概念を利用した。この成果が、*Frontiers in Energy Research* に2018年4月4日付けで掲載された。

( 2 ) インジウムやテルル、カドミウムを利用する第2世代のPVシステムへのスムーズなシフトは予想外に難航し、例えば2013年において世界のPVシステムの約20%を生産してきた日本のメーカーの多くは価格競争の点で困難を極めるとの観点から、第2世代PVシステムから撤退することを宣言した。現在世界の商業第1世代PVシステムの90%以上を占める結晶シリコン系太陽電池(Crystalline Silicon Wafer-based Solar Photovoltaics)による大規模な電力生産に頼らざるを得ない状態がかなり長期にわたって継続すると予想されている。このような状況下で、結晶シリコン系太陽電池の自立可能性の総合評価、特に大規模電力生産を試みる場合において銀の必要量をいくつかのシナリオを仮定して推定した。さらに、銀の需要・供給量の展望ならびに銀リサイクルの規模の可能性、またインジウム・テルル・銅・アルミニウムへの代替技術についても検討した。具体的には、結晶シリコン系太陽電池による大規模電力生産を試みるシナリオ(2017年世界電力需要の5%・10%・15%・20%・30%)を6通りの技術革新のシナリオと組み合わせ検討し、銀の必要量を次の地理的・技術的・経済的パラメータを利用して推定した。その際のパラメータは1 総電力消費に占めるPVシステムによる電力消費の割合；2 PVで供給される電力の割合；3 電力需要；4 送電ロスなどを除いて最終的に利用できる電力の割合；5 PVパネル単位面積当たりのワット数；6 土地の年平均日射照度；7 PVパネルの平均電力変換効率；8 インストールPVパネルの1ワット当たりの銀の必要量。

特筆すべきは、世界電力需要の30%をPVだけで供給する場合でさえ、世界の全生産量の6倍以上の銀が必要になることである。これらの成果は、2020年にSpringerから眞弓浩三の単著として出版される(Springerと出版確定契約済み) *Sustainable Energy and Economics in an Aging Population: Lessons from Japan* のChapter 3 Assessment of PV Systems and Biofuel Production, and Credibility of Scientific Analysisの中で利用する。

#### 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 2 件)

1 Giampietro, M. and Mayumi, K. 2018. "Unraveling the Complexity of the Jevons Paradox: The Link Between Innovation, Efficiency and Sustainability", *Frontiers in Energy Research* Vol.6 (article26). DOI: [10.3389/fenrg.2018.00026](https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00026) 査読あり

2 Lo Piano, S and Mayumi, K. 2017. "Toward an integrated assessment of the performance of photovoltaic power stations for electricity generation", *Applied Energy*, Vol. 186, pp. 167-174. DOI: [10.1016/j.apenergy.2016.05.102](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.102) 査読あり

[図書](計 1 件)

1 Mayumi, K. 2020 (出版確定でSpringerと契約済み) *Sustainable Energy and Economics in an Aging Population: Lessons from Japan*. Springer, Lecture Notes in Energy

#### 6 . 研究組織

(2)研究協力者

研究協力者氏名：ジアンピエートロ マリオ

ローマ字氏名：(GIAMPIETRO, mario)

研究協力者氏名：ロピアノ サムエレ

ローマ字氏名：(LO PIANO, samuele)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。