

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25281060

研究課題名(和文) エネルギーの多様性と技術習熟を考慮したスマートエネルギーシステムの最適設計

研究課題名(英文) Optimum design for a smart energy system considering energy resources and technology learning

研究代表者

中田 俊彦 (Nakata, Toshihiko)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20260416

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、低炭素化とレジリエンスの向上を両立する地域エネルギーシステムを設計した。まず、地理情報システム(GIS)を用いて、対象地域のエネルギー需要量や再生可能エネルギーの賦存量を地図と組み合わせ、エネルギーマップを作成した。地域特性や技術習熟、エネルギーセキュリティ、エネルギーレジリエンス等を考慮した地域エネルギーモデルを開発して、エネルギーマップと組み合わせることで、大規模システムと小規模システムを統合した、最適な地域エネルギーシステムをデザインした。

研究成果の概要(英文)：The regional energy systems have been designed in this study. First, the energy consumption and supply on a prefectural scale are analyzed and visualize. The regional energy demand distribution is compared with the potential of renewable energy. This study indicates that development of local energy systems, especially local heat supply system, is important to introduce local renewable energy, and introduction of renewable energy leads to more balanced regional energy demand-supply distribution. Second, the frameworks that evaluate energy security and energy resilience quantitatively to design a sustainable energy system are established. Further, a two-factor learning curve is employed, and the impact of the learning effect on the dynamic diffusion of major renewable technologies is quantified. Finally, the optimum regional energy system for low carbon and higher resilience is designed. The designed systems are suggested to the municipal government as smart energy plan.

研究分野：エネルギーシステム工学

キーワード：エネルギーシステム スマートシティ 再生可能エネルギー 地域熱供給 バイオマス

### 1. 研究開始当初の背景

オイルショック後の油断対策から開始されたわが国のエネルギー研究の多くは、原油など一次エネルギー源の供給安定性確保と、エネルギー変換機器の省エネルギー技術や、太陽光発電などの再生可能エネルギーの利用機器開発に重点が置かれ、本格的なシステム研究は、大都市のコージェネレーション設計、電力グリッドに情報価値を負荷して制御するスマートシステム等最近である。東北地方の市町村を見ると、先進的なエネルギー供給の社会資本が整備された大都市圏に多く偏在し、エネルギー需給状況の異なる地方部は、LPG や灯油に依存する社会資本整備の後進性ゆえにシステム研究の対象とは見なされてこなかった。地域社会から見ると、必要なのはエネルギー3形態である電力(30パーセント)、熱(45パーセント)、自動車燃料(25パーセント)の利用者サイドからのエネルギーシステムの設計と再構築であるが、大規模かつ集約的なエネルギー供給拠点を国家が整備することによって、地方はその末端に位置する需要ノードに位置づけられてきた。それらの研究の歩みの中で、結果として小スケールな地方部を対象としたエネルギー研究のニーズは、風況調査など異質のエネルギー資源の都市圏への供給可能性としての理解に留まっていた。そのため、小規模分散型エネルギーシステムを基準として大規模システムと連携させるスマートエネルギーシステムの設計研究は、国家規模を基準とする従来の視点とはまったく異なる研究アプローチが必須である。

### 2. 研究の目的

本研究は、日本のエネルギーシステムを対象として、電力、熱、輸送燃料の三要素が地域空間にてシナジー効果を発揮できるシステムデザインの実践を目的とする。具体的には、資源の多様性とイノベーションなど技術習熟を考慮する地域エネルギーモデルを開発して、国家スケールの大規模集約型システムと、市町村スケールの小規模分散型システムを組み合わせ、最適なエネルギーシステムの設計手法を構築する。経済的・合理的な実装に向けた社会科学的アプローチを通して、電力グリッドと熱エネルギー等から構成される最適なスマートエネルギーシステムを設計する。得られた結果を東北地方の対象地域におけるスマートコミュニティ構想に反映させることで、スマートエネルギーシステムを社会実装し、低炭素化とレジリエントを両立した地域社会の構築に資する。

### 3. 研究の方法

第一に、地域データを取得してエネルギーの賦存量及び需要量、大規模システムとの連携等に関するデータベースを作成し、地域特性を考慮した設計手法を構築する。次に、構

築した手法を対象地域に適用し、大規模システムと小規模システムを統合した、最適な地域エネルギーシステムをデザインする。中長期シナリオを解析し、2050年までの地域エネルギーバランスの変遷を示す。さらに、得られた結果を青森県弘前市、岩手県宮古市、宮城県山元町、山形県最上町等のスマートコミュニティ構想の詳細設計に反映し、地域実装に資する。

A) 対象地域の基礎データベースとエネルギーマップの作成

B) 地域を対象としたスマートエネルギーシステムの設計

C) 東北地方の市町村を対象とした社会実装支援

### 4. 研究成果

①エネルギーセキュリティ及びレジリエンスの評価手法の提案と日本のエネルギー需給を対象とするケーススタディ

本研究では、はじめに包括的な先行研究の調査を通じてエネルギーセキュリティとエネルギーレジリエンスの定義を明確に示した。次に、エネルギーセキュリティとエネルギーレジリエンスそれぞれの評価指標や評価プロセスを提案し、その定量評価を通じて得られた知見を示すことで、日本における持続可能なエネルギーシステム設計について考察した。エネルギーレジリエンスはエネルギーセキュリティと同等に重要な概念であると考え、Availability と Acceptability が重なる四項目は、エネルギーレジリエンスの項目と捉え、エネルギーセキュリティの評価には考慮しない (Fig. 1)。

資源の多様性、資源の輸入価格、輸入地域の多様性、環境影響、エネルギー効率の五種の評価指標にもとづいて、エネルギーセキュリティを包括的に評価する新たな手法を提案した。提案手法を用いた多目的解析によって、コスト低減とセキュリティ向上を両立するパレート最適解を得た (Fig. 2)。

レジリエンスの施策は、予防、損害の影響の緩和、迅速な復旧、の三機能に分類して、施策実行に伴う事故発生回数の減少率や、供給能力低下の抑制の度合いを解析し、施策導入前後の供給力(レジリエンス指標)と、産業・民生部門の経済損失の変化を評価した。2011年東日本大震災を対象としたケーススタディを行い、地域資源を活用する施策のレジリエンスを評価した。

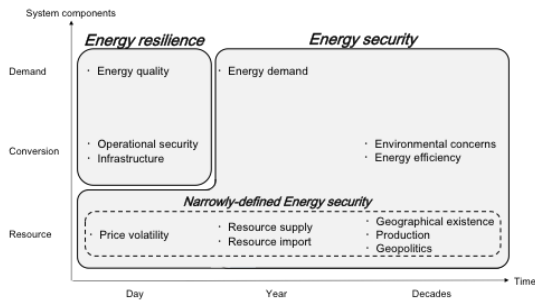


Fig.1 エネルギーセキュリティとエネルギーレジリエンスの分類

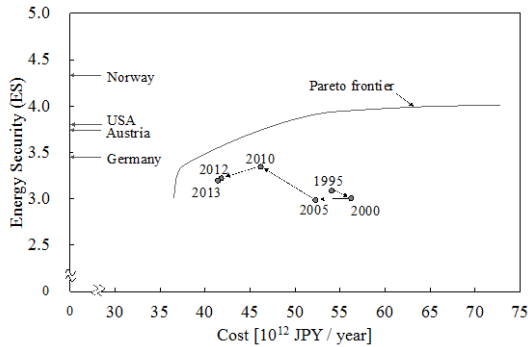


Fig. 2 多目的解析のパレート最適解

② Induced technological change and the timing of public R&D investment in the Japanese electricity sector considering a two-factor learning curve

本研究では、ボトムアップ型のエネルギーシステムモデルを開発し、技術進歩が再生可能エネルギー普及に与える影響を定量的に議論した。Learning-by-doing ベースの部分均衡モデルを基礎として、研究開発投資 (R&D) から派生する Learning-by-searching を考慮した二因子技術習熟を適用するモデルを開発した (Fig. 3)。研究開発投資額は、日本の公的研究開発投資に着目した。

開発したモデルを用いて、日本の電力市場を対象とし、再生可能エネルギー普及を目的とした公的な研究開発投資を、時間軸を考慮したうえで、最適化した。公的な研究開発投資が再生可能エネルギーの発電コストに及ぼす影響を明らかにして、技術進歩がシステムコストの削減に貢献することを示した。

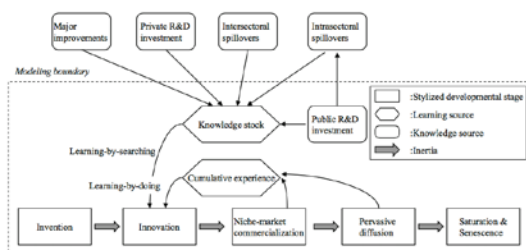


Fig. 3 技術習熟と研究開発投資を考慮した二因子習熟モデルの概要

③ スマートコミュニティの実装に向けた地域エネルギー需給構成の分析とエネルギー空間情報の可視化

本研究は、スマートコミュニティの実装に向けて、地域単位のエネルギー消費量とエネルギー供給量を分析して、エネルギー需給構成の地域偏在を定量的に明示することを目的とする。都道府県を対象としてエネルギー消費及び供給構成を分析して、地理情報システム (GIS: Geographic information system) を用いて図示することによって、地域エネルギー消費・供給の構成を明示した。また、再生可能エネルギーの供給量について、現状の供給実態と導入ポテンシャルとの比較を通じて、さらに詳細な地域のエネルギーマップを作成するための基礎とした。

都道府県ごとの県民総生産あたりのエネルギー消費量を図示した結果から、産業部門の中でも第二次産業の影響が大きく、県民総生産あたりのエネルギー消費量が大きいことが明らかとなった (Fig. 4)。また、都道府県ごとの風力発電と太陽光発電の導入ポテンシャルを図示した結果から、洋上風力発電を考慮した場合には、再生可能エネルギーの発電量の観点からは、火力発電所を代替することは可能であることを示した。

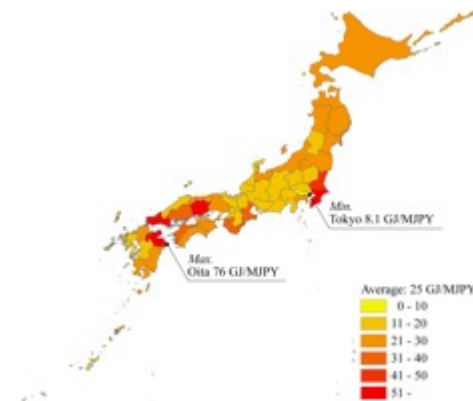


Fig. 4 県民総生産あたりの最終エネルギー消費量 (2012)

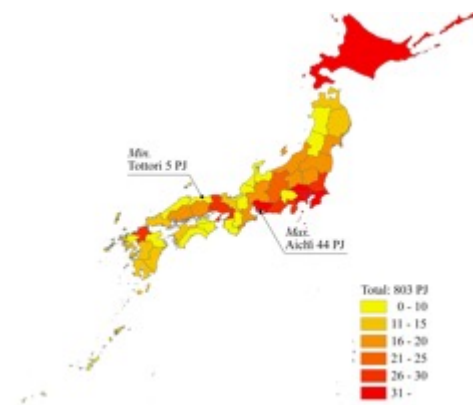


Fig. 5 都道府県ごとの太陽光発電のポテンシャル

#### ④空間情報を考慮したカーボンフリー水素のポテンシャル推計及び経済性評価

本研究では、空間情報を利用して、CO<sub>2</sub>排出量がゼロとなるカーボンフリー水素の国内供給ポテンシャルの地域偏在性を評価すると共に、カーボンフリー水素の製造、輸送、供給を考慮した地域ごとの供給コストを算出した。また、水素の供給ポテンシャル量と供給コストの関係も明らかにして、水素利用社会に必須な水素供給の量とコストの長期将来像を提示した。

対象地域の単位面積ごとの風況データ等を用いて、風力発電による電力を用いて電解装置で製造するカーボンフリー水素の供給ポテンシャルを算出した(Fig. 6)。さらに、カーボンフリー水素を需要家に供給するシステムを設計した(Fig. 7)。東北地方を対象として、カーボンフリー水素を製造する位置の変化が水素製造コストに与える影響を明らかにした。

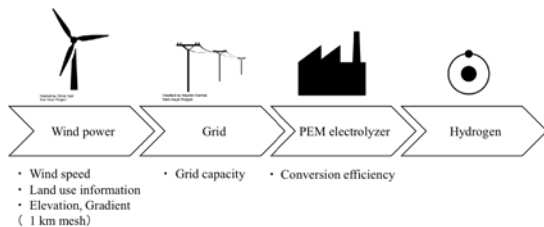


Fig. 6 カーボンフリー水素供給ポテンシャルの推計手順

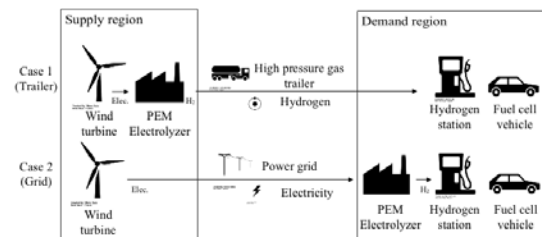


Fig. 7 カーボンフリー水素供給システムの概念

#### ⑤資源有効利用を考慮したバイオマスエネルギーシステムの定量評価

本研究は、マテリアルフロー及びエネルギーフローに基づいて、資源の有効利用を考慮したバイオマスエネルギーシステムの評価指標を構築した。システムの構成要素は、資源の栽培・収集、前処理(バイオ燃料製造)、エネルギー変換、廃棄物処理の4つとして、資源及び燃料はバイオマス資源、バイオ燃料、化石燃料を対象とした。従来の評価指標であるエネルギー収支比(EROI)は、単位量あたりの化石燃料を消費して得られるバイオ燃料のエネルギー量で定義され、バイオ燃料を製造するために消費したバイオマス資源の量を考慮していない。

本研究では、マテリアルフローを考慮して、

バイオマス資源のエネルギー量を基準として、バイオマス資源を加工して得られるバイオ燃料のエネルギー量と、バイオマス利用の過程で消費される化石燃料のエネルギー量の差を、資源有効利用率と定義した(Fig. 8)。また、エネルギー変換の影響を考慮して、バイオマス資源をエネルギー利用することに伴い代替される化石燃料の量を、化石燃料代替係数と定義した。木質バイオマスを対象としたケーススタディを行い、マテリアルフローに基づいて評価、比較した結果、EROIと、資源有効利用率及び化石燃料の削減量は、傾向が異なる場合があることを明らかにした。

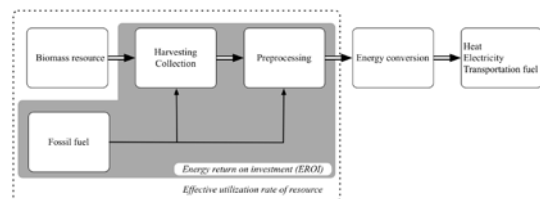


Fig. 8 資源有効利用率及びEROIが対象とするシステム境界

#### 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26件)

① 蔡亮成, 古林敬頭, 中田俊彦, エネルギーセキュリティ及びレジリエンスの評価手法の提案と日本のエネルギー需給を対象とするケーススタディ, 日本機械学会論文集, 査読有, 83, 2017, 1-20  
DOI: 10.1299/transjsme.16-00161

② Takafumi Usui, Takaaki Furubayashi, Toshihiko Nakata, Induced technological change and the timing of public R&D investment in the Japanese electricity sector considering a two-factor learning curve, Clean Technologies and Environmental Policy, 査読有, 2017, 1-14  
DOI: 10.1007/s10098-017-1333-1

③ 瀧田祐樹, 古林敬頭, 中田俊彦, スマートコミュニティの実装に向けた地域エネルギー需給構成の分析とエネルギー空間情報の可視化, 日本機械学会論文集, 査読有, 82, 2016, 1-12  
DOI: 10.1299/transjsme.16-00100

④ 勝又遼太, 古林敬頭, 中田俊彦, 空間情報を考慮したカーボンフリー水素のポテンシャル推計及び経済性評価, 査読有, 日本機械学会論文集, 82, 2016, 1-18  
DOI: 10.1299/transjsme.16-00119

⑤ 古林敬頭, 中田俊彦, 資源有効利用を考慮したバイオマスエネルギーシステムの定量

評価, 日本エネルギー学会誌, 査読有, 95,  
2016, 111-122  
DOI: 10.3775/jie.95.111

[学会発表] (計 59 件)

① Takaaki Furubayashi, Toshihiko Nakata  
Woody Biomass Potential Estimation  
Based on the Wood Flow in Japan, 24th  
European Biomass Conference & Exhibition,  
2016/6/7-2016/6/9, Rai Amsterdam Exhibition  
and Convention Center (Amsterdam,  
Netherlands)

② Ryosei Sai, Takaaki Furubayashi, Toshihiko Nakata, A Multi-objective Analysis for a  
Quantitative Evaluation of National Energy  
Security, 38th IAEE International Conference,  
2015/5/25-27, Gloria Golf Resort (Antalya,  
Turkey)

③ 瀧田祐樹, 古林敬顕, 中田俊彦, エネルギー  
需給分布図の作成と地域エネルギー需給  
構成の比較研究, 第 32 回エネルギーシステ  
ム・経済・環境コンファレンス, 2016 年 2 月  
2-3 日, 砂防会館 (東京都千代田区)

④ 勝又遼太, 古林敬顕, 中田俊彦, 空間情報  
を考慮したカーボンフリー水素のポテンシ  
ャル推計および経済性評価, 第 32 回エネル  
ギーシステム・経済・環境コンファレンス,  
2016 年 2 月 2-3 日, 砂防会館 (東京都千代田  
区)

⑤ 菊池美南, 古林敬顕, 中田俊彦, 地域内の  
経済および資源の循環を考慮したエネルギ  
ーシステムの試設計, 第 43 回環境システム  
研究論文発表会, 2015 年 10 月 17-18 日, 北  
海道大学 (北海道札幌市)

[その他]

ホームページ等

<http://www.eff.most.tohoku.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中田 俊彦 (NAKATA, Toshihiko)  
東北大学・大学院工学研究所・教授  
研究者番号: 20260416

### (2) 研究分担者

古林 敬顕 (FURUBAYASHI, Takaaki)  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 40551528