

Environment Research and Technology Development Fund

環境省環境研究総合推進費終了研究等成果報告書

社会経済性分析を用いた地域エネルギーシステムの低炭素化シナリオの策定
(1RF-1503)

平成27年度～平成28年度

Development of Low-Carbon Scenarios for Transition of Regional Energy Systems
based on Socio-Economic Analyses

東京大学

東北大学

神戸大学

平成29年5月

環境省

総合環境政策局総務課環境研究技術室
環境保健部環境安全課環境リスク評価室
地球環境局総務課研究調査室

社会経済性分析を用いた地域エネルギーシステムの低炭素化シナリオの策定

(1RF-1503)

I. 成果の概要	.....	i
1. はじめに（研究背景等）		
2. 研究開発目的		
3. 研究開発の方法		
4. 結果及び考察		
5. 本研究により得られた主な成果		
6. 研究成果の主な発表状況		
7. 研究者略歴		
II. 成果の詳細		
(1) シナリオ案の生成と策定手法の構築	.....	1
(東京大学)		
要旨	.....	1
1. はじめに	.....	2
2. 研究開発目的	.....	2
3. 研究開発方法	.....	3
4. 結果及び考察	.....	11
5. 本研究により得られた成果	.....	27
6. 国際共同研究等の状況	.....	28
7. 研究成果の発表状況	.....	28
8. 引用文献	.....	30
(2) エネルギーシステムの低炭素化評価手法の構築	.....	32
(東北大学)		
要旨	.....	32
1. はじめに	.....	32
2. 研究開発目的	.....	33
3. 研究開発方法	.....	33
4. 結果及び考察	.....	39
5. 本研究により得られた成果	.....	45
6. 国際共同研究等の状況	.....	45
7. 研究成果の発表状況	.....	45
8. 引用文献	.....	46
(3) エネルギーシステムの社会経済性評価手法の構築	.....	48
(神戸大学)		
要旨	.....	48
1. はじめに	.....	48
2. 研究開発目的	.....	49
3. 研究開発方法	.....	49
4. 結果及び考察	.....	51
5. 本研究により得られた成果	.....	72
6. 国際共同研究等の状況	.....	72
7. 研究成果の発表状況	.....	73
8. 引用文献	.....	73
III. 英文Abstract	.....	76

課題名 1RF-1503 社会経済性分析を用いた地域エネルギーシステムの低炭素化シナリオの策定

課題代表者名 菊池 康紀（東京大学総括プロジェクト機構「プラチナ社会」総括寄付講座
特任准教授）

研究実施期間 平成27～28年度

累計予算額 11,348千円（うち平成28年度：5,525千円）
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 未利用資源、選択型実験、消費者選好、シナリオ生成、エネルギーリテラシー、
電源構成モデル、下げ代制約、地域産業連関表、地域経済循環

研究体制

- (1) シナリオ案の生成と策定手法の構築（東京大学）
- (2) エネルギーシステムの低炭素化評価手法の構築（東北大学）
- (3) エネルギーシステムの社会経済性評価手法の構築（神戸大学）

研究概要

1. はじめに（研究背景等）

持続可能な低炭素社会の形成のためには、地域で発生する資源を有効に利用できる仕組みが重要といえる。太陽光や風力、中小水力、バイオマスといった、地域で構築するエネルギーシステムにとって既に実装可能性が高いと考えられる技術が開発されてきているが、太陽光発電の偏った大規模導入により出力抑制が起きるなどの課題が顕在化し始めている。太陽光や風力など、人為的な制御が難しい発電技術の割合が増えてくると、電力連系線の容量次第では、島嶼地域に限らず、系統連系において出力抑制や設置拒否といった電力需給のミスマッチに起因する問題が発生しうる。システムにおける技術のベストミックスのためには、導入すべき技術の組合せを地域の特性に合わせて検討できる必要がある。このとき、再生可能な植物資源を最大限に活用することは、太陽光や風力といった制御不能な発電技術に対して、価値があるといえる。例えばマルチジェネレーションの仕組みは、電力や高温・高圧熱といった高品質のエネルギーから低温域の熱まで、燃料の化学ポテンシャルを有効に利用できる技術であり、植物資源を高効率に利用する上で重要な要素技術といえる。植物資源は主に地域に根差した一次産業により産出され、その発生条件や性質は多様である。これを活用する技術も地域の文化的・社会経済的活動と環境の有り様を反映したパッケージ化が必要となる。しかし、その導入に際し、地域内外で、政策決定者・システム導入事業者・影響を受ける事業者等の利害関係者を生むため、合意形成の困難さが実装を阻害する要因となっている。地域固有の条件を考慮しながら、低炭素化効果や社会経済性の分析結果を誤解の無いようにコミュニケーションしながら、シナリオを生成、議論、策定できる場の構築が不可欠である。

2. 研究開発目的

本研究では、具体的な地域における低炭素化をケーススタディとして実施するために必要なデータの整備、手法の開発、ならびに部分的な分析を行う。まず、サブテーマ(1)において、エネルギーフローを可視化するシミュレーション手法を考案し、地域で実行可能なエネルギーシステムのシナリオを生成する。他のサブテーマと連携することで、低炭素化効果の可視化や経済循環の可視化を行い、さらに種子島・佐渡島のプレイヤーに対してアンケート等調査・分析を実施し、低炭素化・社会経済性影響の評価結果の解釈支援手法を考案する。サブテーマ(2)では、各種エネルギー技術を導入するときの低炭素化の度合いを定量化するための方法論を開発する。地域に入力される燃料や資源のライフサイクル評価や流れをマテリアルフロー解析などで可視化するなど、実際のプレイヤーである当該地域の住民と情報を共有するための方法論を考案する。サブテーマ(3)では、地域エネルギーシステムの導入による地域経済への影響を評価するために、対象地域の拡張型産業連関表を作成し、地域におけるキャッシュフローを可視化する手法などを用いて、地域エネルギーシステムの社会経済性を評価する手法を構築する。上記サブテーマ(1～3)の成果を地域のプレイヤーにみせながら、その合理的な解釈の方向性を検討するためのシナリオ策定会議を企画、運営し、実際の意思決定に資する手法を目指す。

3. 研究開発の方法

(1) シナリオ案の生成と策定手法の構築

本テーマでは具体的な地域として種子島と佐渡島を取り上げ、地域エネルギーシステムの低炭素化シナリオの設計と策定を目指す。種子島は実際に太陽光の出力抑制が実施されている地域であるとともに、地域産業の未利用資源の有効利用の可能性のある地域である。他方、佐渡島は、降雪などの天候条件から太陽光発電が、トキの保護の目的から風力発電が、これまでに導入されにくい地域であったが、離島であることからエネルギーコストが高いことと、設備が安価になってきたことから、今後導入を促進していくよう自治体と地域産業が取組をはじめている地域である。このような異なる条件を持つ離島地域2つに対して、シナリオ案の生成を行い、策定会議を実施していく。テーマ(2)、(3)からも低炭素化効果と社会経済性の分析結果を受けただけでなく、それぞれの手法開発における結果の精度や見せ方などのフィードバックをやりとりするなどし、研究課題全体の推進にケーススタディを活用する。当該地域へのケーススタディとして、以下の項目を実施する。

「(1) エネルギーフローシミュレーションを応用した地域で実装可能なシナリオの生成」においては、地域におけるエネルギーの基本的な流れを把握した上で、特に地域で未利用の再生可能資源を有効利用することによるエネルギーシステムのグランドデザインを実施する。得られたグランドデザインから、既存の技術・システムによって実装可能なシナリオを生成する。「(2) 社会受容性を確保したシナリオ生成に向けたアンケート調査」においては、生成できているシナリオが実際に地域に受容されるものとするために、選好性をアンケート調査によって分析する。得られた結果と各シナリオの低炭素化効果や社会経済性を合わせることで、選好されることと実際の効果との共通点や違いを確認できるようにする。ここまで得られてきた結果を「(3) シナリオ策定に向けたプレイヤーとのコミュニケーション」において実際の地域のプレイヤーとなるべき利害関係者に展開し、内容に関するコミュニケーションを行う。低炭素化効果や社会経済性、地域の資源循環とエネルギーフローの高効率化などは、解釈において専門的な知識を必要とする情報も含んでいるため、コミュニケーションにおいては一般のプレイヤーにも理解できる形に情報を加工するなど、工夫を行うことで、低炭素化シナリオが実際に策定できるようにする。これらを通し、地域エネルギーシステムの低炭素化シナリオを生成・策定する手法を開発する。

(2) エネルギーシステムの低炭素化評価手法の構築

本テーマでは、具体的な地域として種子島と佐渡島を取り上げ、未利用資源である廃棄物やバイオマス、廃熱などを利用するようなエネルギー技術を、地域の境界条件を理解した上でシステム化し、その低炭素化評価ができるような基盤環境の要件定義を行い、実際に、具体的な地域における低炭素化効果を分析することを目的とする。基盤環境としては、地域に存在する未利用資源を分類し、整理できる枠組みと、実際にそれら利用できるエネルギー技術をマッチング可能な知識体系を含んでいる。特に、太陽光や風力による発電技術が増えている中、地域のエネルギーシステムにおける需給構造をシミュレーションするために、既存の電源構成モデルを機能拡張し、マイクログリッドにおける需給構造を可視化できるようにする。同時に、木質系バイオマスの発電利用や、廃食用油を用いた新規バイオディーゼル製造法など、地域資源を元にしたエネルギー技術のシミュレーションを行うモデルを開発し、低炭素化効果を解析する。

技術を組み合わせることによって地域資源を利活用できるようになったとき、地域のエネルギーシステムが変化するだけでなく、地域内の資源の流れが変化しうる。このような変化が引き起こす、域内産業への影響は、域内からの調達を増加させることにつながりうるため、資源の循環を促しうる。しかし、実際に資源を循環しうる技術を導入しても、その効果を共有できていなければ、地域のプレイヤーが協働できず、達成できない可能性がある。そこで、地域内で起こりうる変化を可視化し、ビジョンとして共有するために、マテリアルフローの表現形式を、サンキー図を応用して作成する。これにより、地域のエネルギーシステムにおける低炭素化効果だけでなく、実際の資源の流れを可視化し、シナリオ策定会議で利用しやすいものとする。

(3) エネルギーシステムの社会経済性評価手法の構築

本テーマで対象としている種子島地域には産業連関表が存在せず、佐渡島には佐渡市が作成した産業連関表(以下、既存佐渡表)が存在する。地域産業連関表を作成する方法として、アンケート調査や現地調査を基に積み上げ式で作成するサーベイ法と、公開されている統計データと既存の産業連関表から推計するノンサーベイ法が存在する。サーベイ法の方がより詳細で正確な産業連関表を作成することができるが、膨大な時間・労力・コストが必要なため、様々な地域への展開可能な分析フレームワークの構築を目的とする本研究では妥当ではない。しかし、公開されている統計データのみを使用するノンサーベイ法では、地域エネルギーシステムの導入による対象地域への社会経済的な影響を分析するためには不十分である。そこで本研究では、種子島の産業連関表(以下、種子島表)の作成に当たり、ノンサーベイ法を基礎としつつ、統計の個票情報、現地調査などを用いて、種子島表を作成した。さらに、種子島のケーススタディで評価対象とするバイオマス発電、バイオエタノール、バイオディーゼル部門などを新設した拡張型種子島表を作成し、地域エネルギーシステムの社会経済性の

評価を行った。新設部門は、現地調査と他テーマにおけるシミュレーション結果、全国表、鹿児島県表、再生可能エネルギー部門拡張産業連関表（以下、REFIO）などを用いて推計した。

既存佐渡表は、投入産出構造のバランスが取れていないことや、新潟県産業連関表（以下、新潟県表）を基礎としてノンサーベイ法を用いて作成されているため、佐渡市の特徴が十分に反映されていない。例えば、地域エネルギーシステムの社会経済性を評価するために重要な「電力」部門は「電力・ガス・熱供給」部門に統合されており、東北電力の電源構成に基づいて推計されているため、実態とかい離している。そこで本研究では、佐渡表の投入産出構造のバランスの修正を行った上で、「電力・ガス・熱供給」部門を「電力」「ガス・熱供給」部門に分割し、「電力」部門の改良を行った（以下、佐渡表（改良版））。また、佐渡島のケーススタディで評価対象とする太陽光発電、木質バイオマス発電部門を、REFIOや佐渡市地域新エネルギービジョン等を用いて推計・新設した拡張型佐渡表を作成し、地域エネルギーシステムの社会経済性の評価を行った。

作成した各地域の産業連関表と地域エネルギーシステムに対応した拡張型産業連関表を用いて、まず現状の産業構造を明らかにし、地域エネルギーシステム導入による地域の社会経済への影響を、地域への移輸入額（率）、生産額、域内経済波及力の変化などによって評価する。また、構造経路分析法（Structural Path Analysis; SPA）を用いて、地域エネルギーシステム導入前後の地域内の製品から出発するキャッシュフローの変化を可視化し、技術の導入による地域社会経済への影響を解析する。

4. 結果及び考察

(1) シナリオ案の生成と策定手法の構築

消費者選好性、低炭素化効果、社会経済性の各分析結果を開示しながら、種子島と佐渡島におけるプレイヤーとのコミュニケーションを行い、地域において実施可能なシナリオ策定に向けて必要となる要素が明らかになった。消費者選好性については、特に自治体職員とのシナリオ策定会議において、重要な情報となった。そもそも地域住民がエネルギーに対して抱いているイメージを把握することは、一般的には取り組まれていないことが分かった。若年層の無関心や性年代別傾向、最終学歴の傾向などは、大都市との比較も合わせて解釈することにより、各地域の特徴（リテラシーの度合い）を確認することができた。また、シナリオ策定会議において提示する各種シナリオは各地域の地域資源を最大限に利用し、その上で、域外からの入力を減らし、域外への出力を増やすことをコンセプトとすることが重要であることが、ヒアリングや現場調査から明らかとなった。ただし、上述のリテラシーの度合いも関連し、コンセプトとしての地域資源の利活用は、ただそれだけでは受け入れられないことも明らかとなってきた。そこに、環境性や経済性といった一般的な価値に関する論拠だけでなく、その地域において実施したいと思えるかどうか、という情理（Narrative）といった要素が必要であることがわかってきた。

プレイヤーとのコミュニケーションを通じて、技術・システムの社会実装を推進できるシナリオを策定するためには、技術・システム導入のコンセプトや効果の可視化以外に配慮すべきことがあることが分かった。未利用資源の有効利用による低炭素化については、程度の大小はあるものの、効果があることを確認できた。社会経済性についても、既存の産業分類では生じていなかったフローを計上するために、産業連関表の拡張を必要とするが、地域にとって正の経済効果があることがわかった。しかし、実際に技術・システムの導入を担う担い手がいないければ、いくら良いとされるものでも実装は容易には進まない。新しい技術やシステムの導入においては既存のインフラと融和しながら進むシナリオが不可欠といえる。技術や資金、制度も必須であるが、風土/文化にあったシステムの提案とそれを支える人材がなければ技術・システムの社会実装は進みえない。特に人材は技術とシステムを担う主体であり、現在のエネルギー産業をはじめ新しいシステムを支えるロールモデルが必須といえる。地域にとって魅力となるような技術・システムがどのような条件であるかを選好性調査などで調べるとともに、コミュニケーション相手のリテラシーに合わせた情報の提供を、ワークショップやセミナーなど、適切な手段によって実施していくことが望まれる。

(2) エネルギーシステムの低炭素化評価手法の構築

地域の未利用資源から生産できるバイオ燃料や電力について、低炭素化効果を評価するための手法を構築できた。実際に種子島に関しては、製糖工場からの未利用エネルギーの利用、木質チップの利用によるエネルギー生産、バイオディーゼルの新規製造法による生産、に関して低炭素化効果を分析し、いずれも温室効果ガスの排出削減の貢献できることを明らかにした。同時に、特に電力については、太陽光や風力など、人為的には出力の制御ができないような電源の割合と、地域の人口変化などに起因する需要規模の推移を考慮した、需給構造の解析ができる拡張型電源構成モデルを開発した。これにより、実際に起きている種子島での電力需要（日負荷曲線）について、2016年のデータで春季の週末のパターンにおける出力抑制に相当する状況をシミュレート可能となった。さらに現状の太陽光パネルの導入済み発電容量が維持された場合では、将来の人口の減少とともに状況が悪化することなどが示唆された。佐渡島に関しては市が策定した太陽光発電の導入シナリオは種子島と同様接続抑制を引き起こすほど島内グリッドに負荷をかける可能性が高く実行可能性に疑問があることが

判明した。また、技術の導入に付随する地域の資源の循環を可視化するための、マテリアルフローの描画を行うことにより、地域のプレイヤーとより具体的な技術の配置や導入計画の議論ができるようになることを確認できた。低炭素化効果は前提として重要である一方、地域にとっての技術の選択において重要となる、供給安定性や物質の移輸入、各産業への物質的な波及効果などを可視化することで、シナリオ策定に資することを確認できた。

(3) エネルギーシステムの社会経済性評価手法の構築

種子島と佐渡島におけるケーススタディの結果、地域資源を活用したエネルギーシステムの導入には、主に化石資源やそれに伴う輸送・商業マージン等の地域外からの移入額を削減し、地域内産業の域内波及力を高める効果があることがわかった。一方で、既存電力の生産額(発電量)の減少による島内産業の生産額の減少や、割高な自然エネルギーの導入による電力単価の上昇およびそれに伴う各産業の付加価値額の減少、新エネルギー産業の導入による材料移入額の増加なども生じる。そのため、地域エネルギーシステムの導入によって創出される島内生産額の増加分が十分に大きくない場合や、新電力の単価が高い場合は、システム導入による社会経済性が低いもしくは負値になる可能性が示唆された。本研究での評価対象地は、島嶼地域であり、既存電力の発電コストが高いため、今後の電力自由化の状況によっては、高い社会経済性を確保できるポテンシャルがあるが、より効果を高めるためには、安価に利用できる1次産業や2次産業の副産物を燃料として利用する仕組みや、域内波及力もしくは生産額のシェアが高い産業の製品を利用するシステムを選択・構築すべきである。また、地域資源を利用する工学側の技術やシステムだけでなく、資源を提供する1次産業の生産力を向上させるような農工横断型のシステムを導入することにより、社会経済的な効果が飛躍的に上昇することも明らかになった。これは、島嶼地域以外での地域エネルギーシステム導入においても同様のことが言える。本研究で構築された地域産業連関表の作成・拡張手法やそれを用いた評価手法により、地域エネルギーシステム導入の直接的な正の効果と負の効果の両面を定量的に計測し、総合的な社会経済性を評価できる。さらに、結果を可視化し、地域の利害関係者と共有することで、議論を明確化し、意思決定を援助し得るだけでなく、より良い地域エネルギーシステムを構築するための具体的な改善策の提案にも寄与し得ることが確認された。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

技術やシステムを社会に実装するための過程を探求することは、科学技術における課題の一つとして認識されてきた。本研究開発では特定地域における低炭素化シナリオを策定するために、地域システムのシナリオ案を生成するための機構としてシナリオ策定会議を実施し、地域のプレイヤーとコミュニケーションを行ってきた。ここで提示されるべき情報として、低炭素化の効果はもちろん、技術の組合せによって発生しうる需給のミスマッチリスクや社会経済性、地域にとっての魅力、変化する社会条件に合わせたシナリオ分析結果を示す必要があることを明らかにした。実際に、バイオ燃料による低炭素化効果、電源構成モデルによる下げ代制約と将来リスクの定量化、産業連関分析による雇用や地域経済基盤への波及効果などを定量化し、地域のプレイヤーに展開することによってその重要性を確認してきた。また、特定の地域の基幹産業に対して情報を提供することにより、2050年に向けた地域企業とシステムのシナリオ策定ができることを確認した。科学的な手法によって得られた技術・システムの評価結果を地域のプレイヤーと共有することで地域のシナリオを策定していく本研究開発における活動は、日本学術会議でも紹介できるものとなった。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

平成28年度二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金(再生可能エネルギー電気・熱自立的普及促進事業)・日本環境協会へ、本研究に基づいて提案した、製糖工場排熱を利用した地域熱供給に関する実現性調査のための予算申請を中種子町が行い、採択された。組織された中種子町サトウキビ資源を活用した地域(地点)熱供給の実現性調査業務に伴う検討委員会において研究代表者が委員を務め、委員会において本研究の途中成果を示し、実現可能性に向けた議論を行うことに貢献した。また、シナリオ策定会議および国民との科学技術対話の一環として行っていた鹿児島県立種子島高等学校の生徒への情報発信とワークショップが基となり、総務省の地方創生・政策アイデアコンテスト2016へ鹿児島県立種子島高等学校が「サトウキビを利用して持続可能な島に～リノベーションの奥義はオーギにあり～」というタイトルでアイデアを提案し、地方大会を突破して九州・沖縄大会へ進出するという、環境に配慮した地域の活動へ貢献できた。さらに、地域の活動の活性化については、やはり本研究で提案している種子島の未利用資源の有効利用に関し、西之表市、中種子町、南種子町が合同で「産学公連携による学びの島で夢づくり、生きがいづくり～「自然と共生するスマートエコアイランド種子島」構想の実現に向けて～」というタイトルで第4回プラチナ大賞に申

請、優秀賞を獲得した。地域の活動の活発化は環境政策を実施していく上でも重要なものであり、本研究開発による貢献は大きいといえる。

<行政が活用することが見込まれる成果>

様々な技術が開発・提案されていく中で、各地域の特徴、条件に合わせた技術導入シナリオを立てていくにあたり、本研究において実践した、消費者選好性と低炭素化効果、社会経済性の分析を合わせて行うことが有効といえる。特に、定期的な消費者選好性調査や、当該地域における人口等の社会条件の変化と技術の組合せ効果の分析、地域の社会経済性の定量的な把握と技術・システムの導入に関する議論、といった事項は、今後の行政における低炭素化プロジェクトや技術導入支援、補助などにおいて、同様な分析と地域におけるプレイヤーとのシナリオ策定会議を実施することを義務付ける、あるいは推奨するなどしていくことで、地域別の技術評価・導入を普及展開していくことが期待できる。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) K. Ouchida, Y. Fukushima, S. Ohara, A. Sugimoto, M. Hirao, Y. Kikuchi, *AIChE J.*, 63(2), 560-581 (2017), Integrated Design of Agricultural and Industrial Processes: A Case Study of Combined Sugar and Ethanol Production
- 2) Y. Kikuchi, K. Ouchida, Y. Kanematsu, S. Ohara, Y. Fukushima, *J. Chem. Eng. Jpn.*, 50(4), 297-308, (2017), Retrofit Energy Integration for Selective Fermentation in Cane Sugar Mills under Hot/Cold Energy Availability
- 3) Y. Kanematsu, K. Oosawa, T. Okubo, Y. Kikuchi, *Appl. Energ.*, 198, 160-172, (2017) Designing the scale of a woody biomass CHP considering local forestry reformation: a case study of Tanegashima, Japan
- 4) Y. Kikuchi, M. Nakai, K. Oosawa, Y. Kanematsu, K. Ouchida, T. Okubo, *Comput. Aided. Chem. Eng.*, accepted, A computer-aided socio-technical analysis on national and regional energy systems considering local availability of renewable resources

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) 中井美和、大久保達也、菊池康紀:2015年度日本応用経済学会 創立10年記念大会(秋季大会)(2015)「家庭需要家のエネルギー選好に関するコンジョイント分析」
- 2) 中井美和:神戸大学大学院経済学研究科 六甲フォーラム(2016)“A Challenge for socio-technological analysis on energy system”
- 3) 菊池康紀:種子島における里山里海セミナー(2016)
【招待講演】「スマートエコアイランド構想と里山・里海管理」
- 4) 菊池康紀:自然と共生するスマートエコアイランド種子島シンポジウム～動き始めた大学等との連携による新たな可能性～(2016)
【招待講演】「種子島におけるスマートエコアイランドロードマップ」
- 5) 菊池康紀:応用物理学会第63会春季講演会(2016)
【招待講演】「供給制約・需要制約下における地域エネルギーシステム:種子島の事例」
- 6) 菊池康紀, 地域活性化センター人材養成塾, (2016),
「農林水産業を中心としたスマートシステムの構想」
- 7) M. Nakai, T. Okubo, Y. Kikuchi. The 6th Congress of the East Asian Association of Environmental and Resource Economics. Fukuoka, Japan, (2016), “How does energy literacy affect consumer preferences towards electricity?: Evidence from Japan.”
- 8) 菊池康紀, 日本学術会議シンポジウム「市民と科学者で考えるこれからのエネルギー」, (2016),
「種子島の事例に見るエネルギーと地方創生と技術導入の試み」
- 9) 中井美和, 大久保達也, 菊池康紀. 環境経済・政策学会 2016年大会, (2016). 「エネルギーリテラシーが選好性に与える影響に関する実証分析」
- 10) 菊池康紀, 平成28年度 さとうきび・甘蔗糖関係検討会, (2016), 「ライフサイクル思考の社会実装:種

子島の例」

- 11) 福島康裕, 第26回化学工学一関セミナー「技術と化学の融合」(2016)
「地域バイオマス資源の利活用システムで生きる技術とその評価の考え方」
- 12) 福島康裕, 日本学術会議 公開シンポジウム「分散型再生可能エネルギーの可能性と現実」(2017),
「種子島におけるバイオマスエネルギー開発の取り組み」
- 13) 菊池康紀, 尾下優子, 福島康裕, 第12回日本LCA学会研究発表会, C2-13, (2017),
「ライフサイクル思考の社会実装: 種子島の例」
- 14) 大内田弘太郎, 富永華子, 牟田佑樹, 兼松祐一郎, 大久保達也, 菊池康紀, 第12回日本LCA学会研究発表会, C2-14, (2017), 「植物資源利活用に向けた農工横断型プロセスモデリング」
- 15) 福島康裕, 小原聡, 大内田弘太郎, 菊池康紀, 第12回日本LCA学会研究発表会, C2-15, (2017)
「砂糖・バイオエタノール逆転生産プロセスの導入によるGHG排出削減効果」
- 16) 中村遼太郎, 大内田弘太郎, 菊池康紀, 小原聡, 大野肇, 福島康裕, 第12回日本LCA学会研究発表会, C2-16, (2017), 「気象変動を考慮したバイオマス利用システムの製品LCAのあり方」
- 17) 大内田弘太郎, 藤井祥万, 兼松祐一郎, 尾下優子, 中村遼太郎, 陳怡靜, 福島康裕, 中垣隆雄, 大久保達也, 菊池康紀, 化学工学会第82年会, J217, (2017), 「農工横断型プロセスモデリングによる持続可能な植物資源利活用のためのシナリオ計画」
- 18) 菊池康紀, 自然と共生するスマートエコアイランド種子島シンポジウム～持続的な社会へ向け、産学公で広がる連携～, (2016), 「地域のシナリオ分析と大学の役割」

7. 研究者略歴

課題代表者: 菊池 康紀

2009年3月に東京大学大学院工学系研究科化学システム工学専攻博士課程を修了、博士(工学)を取得、同4月に同専攻助教、2012年より東京大学総括プロジェクト機構「プラチナ社会」総括寄付講座特任講師、2015年10月より同講座特任准教授。

研究分担者

1) 福島 康裕

2002年3月に東京大学大学院工学系研究科化学システム工学専攻博士課程を単位取得の上満期退学、同6月に博士(工学)を取得、東京大学助手、国立成功大学(台湾)助理教授、同副教授をへて、現在は東北大学大学院工学研究科准教授。

2) 尾下 優子

2013年3月 九州大学大学院経済学府経済システム専攻 博士課程修了 博士(経済学)、同4月～6月神戸大学大学院海事科学研究科 学術推進研究員、同7月～2015年3月 同研究科 助教をへて、2015年4月～現在 同研究科 講師。

1RF-1503 社会経済性分析を用いた地域エネルギーシステムの低炭素化シナリオの策定**(1) シナリオ案の生成と策定手法の構築**

東京大学

総括プロジェクト機構 「プラチナ社会」総括寄付講座 菊池 康紀

大学院工学系研究科 化学システム工学専攻 上原 恵美（平成27年度のみ）

平成27～28年度累計予算額：6,422千円（うち平成28年度：3,092千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

持続可能な低炭素社会の形成のためには再生可能な植物資源を最大限に利活用できる新技術の導入が必須である。例えばマルチジェネレーションの仕組みは、電力や高温・高圧熱といった高品質のエネルギーから低温域の熱まで、燃料の化学ポテンシャルを有効に利用できる技術であり、植物資源を高効率に利用する上で重要な要素技術といえる。このとき、植物資源は主に地域に根差した一次産業により産出されその発生条件や性質は多様である。これを利活用する技術も地域の文化的・社会経済的活動と環境の有り様を反映したパッケージ化が必要となる。しかし、その導入に際し地域内外で、政策決定者・システム導入事業者・影響を受ける事業者等の利害関係者を生むため、合意形成の困難さが実装を阻害する要因となっている。そこで本研究では、地域別にエネルギーシステムの低炭素化を検討するために、技術の新規導入を促すためのシナリオ策定手法を開発した。シナリオを策定するために、まず、地域の現状をフローによる解析を通して把握し、適用可能な技術・システムのオプションを列挙した。現行からの移行を行うためのシナリオを生成し、低炭素化効果や社会経済への影響を考慮しながら、シナリオを策定できる利害関係者と策定会議を実施した。このとき、地域住民へのアンケート調査を合わせて実施し、地域の選好性を考慮しながら行った。具体的な地域として、種子島と佐渡島において、地方公共団体、地域産業、住民らとのシナリオ策定会議を実施することで、開発手法の妥当性を確認した。本研究により、地域の文化・伝統に近い産業に由来する未利用資源の有効利用が、地域の資源やエネルギーのフローを高効率化しうるとともに、選好性が高いことが確認された。他方、低炭素化効果や社会経済性といった評価項目の結果が良いだけでは、技術・システムの選好性は必ずしも高くないことが確認された。

[キーワード]

未利用資源、選択型実験、消費者選好、シナリオ生成、エネルギーリテラシー

1. はじめに

持続可能な低炭素社会の形成のためには、地域で発生する資源を有効に利用できる仕組みが重要といえる。太陽光や風力、中小水力、バイオマスといった、地域で構築するエネルギーシステムにとって既に実装可能性が高いと考えられる技術が開発されてきているが、太陽光発電の偏った大規模導入により出力抑制が起きるなどの課題が顕在化し始めている¹⁾。太陽光や風力など、人為的な制御が難しい発電技術の割合が増えてくると、電力連系線の容量次第では、島嶼地域に限らず、系統連系において出力抑制や設置拒否といった問題が発生しうる。システムにおける技術のベストミックスのためには、導入すべき技術の組合せを地域の特性に合わせて検討できる必要がある。このとき、再生可能な植物資源を最大限に利活用することは、太陽光や風力といった制御不能な発電技術に対して、価値があるといえる。例えばマルチジェネレーションの仕組みは、電力や高温・高圧熱といった高品質のエネルギーから低温域の熱まで、燃料の化学ポテンシャルを有効に利用できる技術であり、植物資源を高効率に利用する上で重要な要素技術といえる。植物資源は主に地域に根差した一次産業により産出され、その発生条件や性質は多様である。これを利活用する技術も地域の文化的・社会経済的活動と環境の有り様を反映したパッケージ化が必要となる。しかし、その導入に際し地域内外で、政策決定者・システム導入事業者・影響を受ける事業者等の利害関係者を生むため、合意形成の困難さが実装を阻害する要因となっている。本研究では、地域別の条件を考慮しながら、エネルギーシステムの低炭素化シナリオの設計と策定のための手法を開発し、低炭素化効果や社会経済性といった評価指標と選好性との関係を解析する。

2. 研究開発目的

本研究では具体的な地域として種子島と佐渡島を取り上げ、地域エネルギーシステムの低炭素化シナリオの設計と策定を目指す。種子島は実際に太陽光の出力抑制が実施されている地域¹⁾であるとともに、地域産業の未利用資源の有効利用の可能性がある²⁾地域である。他方、佐渡島は、降雪などの天候条件から太陽光発電が、トキの保護の目的から風力発電が、これまでに導入されにくい地域であったが、離島であることからエネルギーコストが高いことと、設備が安価になってきたことから、今後導入を促進していくよう自治体と地域産業が取組をはじめている地域である。このような異なる条件を持つ離島地域2つに対して、シナリオ案の生成を行い、策定会議を実施していく。テーマ(2)、(3)からも低炭素化効果と社会経済性の分析結果を受けるだけでなく、それぞれの手法開発における結果の精度や見せ方などのフィードバックをやりとりするなどし、研究課題全体の推進にケーススタディを活用する。当該地域へのケーススタディとして、以下の項目を実施する。

「(1) エネルギーフローシミュレーションを応用した地域で実装可能なシナリオの生成」においては、地域におけるエネルギーの基本的な流れを把握した上で、特に地域で未利用の再生可能資源を有効利用することによるエネルギーシステムのグラウンドデザインを実施する。得られたグラウンドデザインから、既存の技術・システムによって実装可能なシナリオを生成する。

「(2) 社会受容性を確保したシナリオ生成に向けたアンケート調査」においては、生成できているシナリオが実際に地域に受容されうるものとするために、選好性をアンケート調査によって分析する。得られた結果と各シナリオの低炭素化効果や社会経済性を合わせることにより、選

好されることと実際の効果との共通点や違いを確認できるようにする。ここまでで得られてきた結果を「(3) シナリオ策定に向けたプレイヤーとのコミュニケーション」において実際の地域のプレイヤーとなるべき利害関係者に展開し、内容に関するコミュニケーションを行う。低炭素化効果や社会経済性、地域の資源循環とエネルギーフローの高効率化などは、解釈において専門的な知識を必要とする情報も含んでいるため、コミュニケーションにおいては一般のプレイヤーにも理解できる形に情報を加工するなど、工夫を行うことで、低炭素化シナリオが実際に策定できるようにする。これらを通し、地域エネルギーシステムの低炭素化シナリオを生成・策定する手法を開発する。

3. 研究開発方法

(1) エネルギーフローシミュレーションを応用した地域で実装可能なシナリオの生成

エネルギーフローの可視化は対象領域におけるエネルギーの製造と使用を視覚的にあらわすことで、意思決定に資するものである³⁾。このようなエネルギーフローの可視化は戦略的な意思決定を関係プレイヤーと共有しながら進めるための方法として有効といえる。このとき、ビジョン、ロードマップ、シナリオの違いを認識し、さらに実装可能性について考慮しながら地域のエネルギーシステムのシナリオを生成する必要がある。そこで本研究ではまず、ビジョン：目的とする到達点、ロードマップ：そこにたどり着くための複数の経路を確認することができる“地図”、シナリオ：目的地にたどり着くための時系列的な変化を含んだ経路、と定義する。さらに、実装可能性の考慮を、研究成果や技術を社会課題の解決のために導入するとき存在する技術的、経済的、社会的な障壁に対して、そのManagement（なんとかする）を行うこととし、議論する。

本研究では、種子島と佐渡島を対象地域として、テーマ(2)と連携して、エネルギーフローシミュレーションを行い、地域で実装可能なシナリオを生成する。このとき、各地域の特徴に基づいた可視化を実施する。種子島は人口33,000人、面積444.99 km²、一市二町（西之表市、中種子町、南種子町）で構成されている島である。島の基幹産業としてサトウキビがあり、島に一つある製糖工場はその絞りかす（バガス）を利用した熱電併給の自家動力プラントを稼働させて製糖期間（12月～4月）のエネルギー供給をバガスのみで賄っている。森林資源も豊富に存在するが、A材の搬出は少なく、B材、C材が主体となった林業が行われており、経済的な制約が強く存在している。発電設備はディーゼル発電による40,500 kWの発電設備とリチウムイオン電池

(3,000 kW、1,161 kWh)による短周期周波数調整を行っているが、太陽光の出力抑制（2015年5月5日、2月21日（いずれも9時～16時）など）⁴⁾が行われた島であり、課題が先進して顕在化している離島地域の一つである。一方、佐渡島は、人口62,000人、面積854.76 km²、2004年に佐渡の全市町村（両津市、相川町、佐和田町、金井町、新穂村、畑野町、真野町、小木町、羽茂町、赤泊村）が合併した佐渡市のみで構成されている島である。トキと共生する佐渡の里山は世界重要農業遺産システム（GIAHS: Globally Important Agricultural Heritage Systems）に登録されるなど、文化の中止にトキがあり、トキとの共生がテーマとなっている。ディーゼル発電による80,500 kWの発電設備がある。種子島、佐渡島ともに内地と電力グリッドが接続されていないマイクログリッドである。

シナリオの生成に向けては、種子島、佐渡島それぞれの現状から可変である要素を抜き出し、

その効果を分析する。種子島においては基幹産業であるサトウキビやその他の農林水産業を中心としたシナリオの生成を行う。佐渡島においては、島全体のグリッドから旧市区町村レベルでのシナリオの生成を行う。低炭素化効果や社会経済性の分析結果も考慮しつつ、種子島、佐渡島で達成可能なエネルギーシステムの将来シナリオを生成する。特に、既存の日本全国向けエネルギーフローモデル⁴⁾を応用したマイクログリッドにおけるエネルギーフローの可視化については低炭素化効果、経済的な循環に関しては社会経済性に着目し、シナリオの生成を行う。得られたシナリオを意識しつつ、(2)におけるアンケート項目を考案する。

(2) 社会受容性を確保したシナリオ生成に向けたアンケート調査

実装可能な技術、及び、地域資源を最大限利用したエネルギーシナリオを生成し、それらのシナリオが低炭素化への貢献度や経済波及効果に優れていたとしても、該当地域の消費者がそのシナリオに価値を感じ、従来型のエネルギーシナリオから移行する意向を示さなければ、同システムは成立しない。そこで本研究では社会受容性を確保したシナリオ生成に向け、エネルギーの関心度、電力プランの基本的な属性に対する選好、エネルギーリテラシーの測定および選好に与える影響を把握することを目的として、家庭需要家（以後、消費者）にアンケート調査を実施した。本研究課題の調査対象地域である種子島、佐渡島の住民に加え、三大都市圏（首都圏、大阪圏、名古屋圏）在住の住民、全国47都道府県の住民に対しても類似のアンケート調査を実施することにより、地域特性の違いが選好に与える影響についても解析を行い、他地域での地域資源・技術の利活用を伴うエネルギーシステム設計への知見を与えることを目的とする。また、鹿児島県立種子島高等学校の協力を得て、次世代のエネルギー利用者である高校生にエネルギーリテラシーの調査を実施し、エネルギー問題への関心、知識のレベルを問うた。本研究課題で実施したアンケート調査の日程、調査方法、調査対象地域、サンプル数を表(1)-1に、また、それぞれの調査目的は表(1)-2に示す。

表(1)-1 アンケート調査の概要

調査番号	日程	調査法	対象地域	有効回答数（返信率）
1	2015/12/10～2015/12/22	訪問留置調査	西之表市	729（77.1%）
2	2015/12/24～2015/12/28	Web調査	3大都市圏	3,529
3	2015/12/3～2016/1/31	訪問留置調査	中種子町	231（40.6%）
4	2016/1/8～2016/1/31	郵送調査	南種子町	334（34.7%）
5	2016/3/2～2016/3/31	郵送調査	佐渡市	763（38.2%）
6	2016/3/23～2016/3/25	Web調査	全国	630
7	2016/11/14～2016/11/25	郵送調査	佐渡市	973（36.8%）
8	2016/11/17, 18	集合調査法	種子島高校	72
9	2017/2/1	集合調査法	種子島高校	72
10	2017/2/10～2017/3/31	訪問留置調査	中種子町	2,431（73.3%）
11	2017/3/17～2016/3/21	Web調査	全国	1,452（7%）

表(1)-1に示すように、合計11回の調査を実施した。本研究課題の対象地域である種子島、佐渡島の住民を対象とした調査のうち、調査1、3、10では、訪問留置調査を行うため、回答者の抽出と各校区の連絡委員を通じた調査票の配布、回収作業に関して自治体の協力を得た。調査4、5、7では自治体に回答者の無作為抽出を依頼し、発送・回収は郵送を用いた。調査7～10を除き、いずれも20～69歳までの住民を対象とし、できる限り実際の人口分布に合致するよう、サンプリン

グを行なった。他方、調査2、6、11は調査会社を通じてインターネット上で調査を実施したWeb調査である。

表(1)-2 アンケート調査の主な調査目的

調査番号	主な調査目的
1, 3, 4	種子島におけるエネルギー属性への消費者選好の把握
2	都市部と地方におけるエネルギー属性への消費者選好の共通点と相違点の探索、及び、電力小売全面自由化の認知度の把握
5	佐渡島におけるエネルギー属性への消費者選好の把握、エネルギーへの関心度、及び、電力小売全面自由化の認知度の把握
6	消費者選好へのエネルギーリテラシーの潜在的影響、及び、電力小売全面自由化の認知度の把握
7	佐渡島におけるエネルギー属性への消費者選好の把握
8	高校生のエネルギーリテラシーの測定
9	エネルギーワークショップがリテラシーへ及ぼす影響の把握
10	中種子町（種子島）における熱需要に関する選好の把握
11	エネルギーリテラシーが消費者選好へ与える影響の把握

1) 調査1,3,4：種子島におけるエネルギー属性への消費者選好の把握

回答者の抽出方法について、西之表市では性別比を、中種子町と南種子町では性別比、年代を実際の人口分布に合致させるよう無作為に抽出した。調査票は種子島の住民のエネルギー属性への選好把握を目的として、1.選択型実験、2.エネルギーに関する質問、3.個人属性、という3つのパートで構成した。

選択型実験とは、それぞれ条件が異なる複数の選択肢の中から、回答者に最も好ましい選択肢を選ばせることで各属性が選択肢決定に与える影響を分析する手法である。回答者には平成28年4月より実施される電力小売全面自由化を想定させ、3つ契約プランA、B、Cの選択肢の中から最も好ましい選択肢を8回選択させることで、回答者間における各属性への平均的な選好を明らかにすることを目的とした。既に実施、解析したアンケート調査や先行研究の結果より、選択型実験に含める属性は「発電事業者」、「電源構成」、「電気料金」、「供給安定性」の4つに設定した。「発電事業者」は、いわゆる電力会社を示す一般電気事業者、国内の資源を活用して発電を行う一般電気事業者以外の国内事業者を指す国内企業、地域の資源を調達し発電を行う地域企業、そして外国から資源を調達し発電を行う外資企業、のいずれかが表示される設定とした。「電源構成」は、化石燃料由来の火力発電、原子力発電、再生可能エネルギーのいずれかの組み合わせが表示された。

「電気料金」は日本の一般家庭の平均電力使用量である300 kWhを使った場合の電気料金を示し、1 kWh当たりの価格が異なる数字となるよう設定している。「供給安定性」は、常に安定供給、1年に1回瞬停があるかどうか、1年に1回10分程度の停電があるかどうか、天候による瞬停・停電あり、の4パターンに設定した。この選択型実験により、種子島の住民が電力プラン契約決定の際に重要視する要因を分析することができる。本研究では、地域で実装可能な技術、及び、地域資源を活用したエネルギーシナリオに対して社会受容性があるのかどうか、また、現段階で社会受容性が得られない場合には、経済波及効果や環境影響に関する情報を提示することによって社会受容性獲得につながるのかどうかを検証したい。そこで本調査では、再生可能エネルギーが含まれている電源構成や、地域企業への選好に着目しながら、結果を解釈する必要がある。「エネルギーに関する質問」としては、種子島で得られる自然エネルギーを利用して発電を行う場合、どの資源を使

うのが適当だと思ふかを問うた。種子島の住民に馴染みのあるバガス（サトウキビの絞りかす）を用いた発電に社会受容性が存在するのかどうかを検証するためである。最後に個人属性として、年齢、性別、最終学歴、職業、業種、世帯収入を質問した。

2) 調査2：都市部におけるエネルギー属性への消費者選好の把握

本調査は首都圏（東京都、神奈川県、千葉県、埼玉県）、大阪圏（大阪府、京都府、兵庫県、奈良県）、名古屋圏（愛知県、岐阜県、三重県）の3大都市圏の消費者にアンケート調査を行うことで、都市部と地方におけるエネルギー属性への選好の共通点と相違点の探索することを目的としている。質問内容は、1. 電力小売全面自由化に関する質問、2. 選択型実験、3. エネルギーに関する質問、4. 個人属性の4つのパートから構成されている。電力小売全面自由化に関する質問では、電力自由化の認知度、自由化後の変更意思、またその理由を訊ねた。選択型実験の設計は調査1, 3, 4と同じ設定であるため、詳細な説明は割愛する。エネルギーに関する質問として、調査1, 3, 4と同様に居住地域で得られる自然エネルギーを利用して発電を行う場合、どの資源を使うのが適当だと思ふかを訊ねた。個人属性として、年齢、性別、居住都道府県、家族構成、最終学歴、職業、世帯収入を質問した。

3) 調査5：佐渡島におけるエネルギー属性への消費者選好の把握（関心度・認知度）

佐渡市との協議では、種子島で実施したような高度な調査（選択型実験など）を行うよりも、エネルギーへの関心度やエネルギー使用状況といったより基礎的な情報を収集したい、との意見を佐渡市より受けた。そこで本調査では今後のより発展的な調査に向けた予備調査と位置づけ、市民のエネルギーへの関心や基本的な理解度といった基礎データの構築を行うことを目的とした。目標回答数を500に設定、過去の佐渡市のアンケート調査より、返信率を25%と仮定し、2,000名分の調査票を用意した。佐渡市民の中から無作為に、20代、30代、40代、50代、60代、それぞれ男女200名ずつ、合計2,000名を抽出した。それぞれの世代、性別で均等に抽出したのは、今後の調査に向け、世代の違いによる返信率の差を把握するためである。調査票は、1. エネルギーに関する質問、2. 電力小売全面自由化に関する質問、3. 個人属性、の3つのパートから構成された。エネルギーに関する質問では、エネルギーへの関心度、佐渡市で得られる自然エネルギーを利用して発電を行う場合に利用すべき資源を問う質問が含まれている。電力小売全面自由化に関する質問では、電力自由化の認知度、自由化後の変更意思、またその理由も合わせて訊ねた。最後に個人属性として、年齢、性別、家族構成、職業、最終学歴、世帯収入を質問した。

4) 調査6：消費者選好へのエネルギーリテラシーの潜在的影響

本調査は、消費者選好へのエネルギーリテラシーの潜在的影響の把握を調査目的とした。調査票は、1. エネルギーリテラシーを計測する質問、2. エネルギーに関する質問、3. 選択型実験、4. 個人属性、の4つの構成から成り立っている。エネルギーリテラシーの測定にあたり、調査票を作成する必要がある。本調査では、Clarkson UniversityのEnergy Literacy Assessment Projectが公表している質問票を一部参考にした^{5)~8)}。また、調査期間が電力小売全面自由化の1週間前であったため、自由化に関する質問も加えた。具体的な質問は、「4 結果および考察」に掲載する。また、リテラシーに影響を及ぼしうる、エネルギー関連の資格の有無も合わせて訊いた。エネルギーに関する質問

では、月額電気代、電力使用量、供給安定性の認識、そして電力自由化後の変更意思を訊いた。選択型実験に関しては、調査1,2,3,4とほぼ同じ設計だが、「電源構成」に「不明」という水準を追加した。自由化後、小売電気事業者による電源構成の情報開示を行うことが望ましいとされている⁹⁾だけであり、事業者は必ずしも電源構成を明記する義務はないが、それらを消費者が気にするかどうかを把握する為の質問である。一般的な財においては原産地(国)、原料などに関する情報の透明性が要求されている中で、エネルギーに関しても当てはまるのかどうかを検証する。個人属性は、年齢、性別、居住都道府県、家族構成、世帯収入とした。

5) 調査7：佐渡島におけるエネルギー属性への消費者選好の把握

本調査は佐渡市民のエネルギー属性への選好把握を目的として、1.佐渡市のエネルギー政策に対する認知度、理解度、2.選択型実験、3.個人属性、という3つのパートで構成されている。調査5の結果より、年代の違いによるエネルギーへの関心度は大きく異なり(図(1)-8(a))、直前に迫った電力小売全面自由化への認知度にも年代による違いが存在することが明らかになった(図(1)-8(b))。また、性別によっても関心や理解度に違いがあることもわかった(図(1)-8(c,d))。よって、選択型実験実施に向けた回答者の知識の平準化を行うため、調査票の最初に佐渡市の抱えるエネルギー問題、及び、佐渡市のエネルギー対策に関する説明文を掲載した。同調査内の選択型実験では、発電事業者、電気料金、電源構成、供給安定性といった属性の選好を明らかにすることを目的としているが、本研究では特に「地域企業」と「再生可能エネルギー」への選好に着目している。そこで、域内の再生可能資源を活用したエネルギーシステムについて基礎的な知識を理解させた上で選択型実験の質問に回答させることを目的として、説明文を掲載した。説明文掲載のもう一つの理由は、調査5で明らかになった佐渡市民のエネルギー関心度、理解度について更に詳細に調査を行うためである。説明文の後に2つの質問を問うた。1つ目はアンケートを見る前に説明文に記載している佐渡市が抱えるエネルギー問題の認知度について、2つ目に、説明文を読みその内容を理解できたかどうかを聞いた。本質問は、プレイヤーとのコミュニケーション方法を検討する上で、重要な判断材料となりうる。

本調査の選択型実験の概要について説明する。平成29年3月現在、佐渡市民には東北電力以外の企業から電気を購入することはできないが、将来東北電力以外の企業からも電気を購入できるようになった仮想的な状況を想像させ、3つの「契約プランA」、「契約プランB」、「現在の契約を維持」の選択肢の中から最も好ましい選択肢を8回選択させることで、回答者間における各属性への平均的な選好を明らかにすることを目的とした。選択型実験の設定は調査6と同じであるため、詳細の説明は割愛する。調査票の最後に、回答者の居住地域、性別、年齢、最終学歴、世帯収入を質問した。

6) 調査8,9：高校生のエネルギーリテラシーの測定

これまでの調査が電力プランの意思決定を行う成人を対象としてきたのに対し、本調査は将来のエネルギー消費者である高校生を対象とした。調査目的は①高校生のエネルギーリテラシーの測定、②エネルギー選好性の解明とリテラシーとの関係性の分析、③エネルギーワークショップが①と②に与える効果の分析、の3点である。調査対象者は、本研究課題の調査対象地域、種子島の西之表市にある、鹿児島県立種子島高等学校2年生の普通科1組、普通科2組、電気科の生徒合計72

名である。本調査は「持続可能性に関する理解度・意識調査」として生徒に配布され、持続可能性に関する知識や理解度、行動の実施状況等を把握するための調査である、と説明された。調査票は4つのパートで構成されている。1つ目のパートは、エネルギーリテラシー計測のための質問15問を含む35問で構成されている。パート1は、2015年9月の持続可能な開発サミットで採択された「我々の世界を変革する：持続可能な開発のための2030アジェンダ」の一部である、「持続可能な開発目標（SDGs）」¹⁰が掲げる17の目標を参考として、質問を作成した。また、昨年度に作成したエネルギーリテラシーを計測する7つの質問に加え、原油価格の推移や年間発電電力量のうち再生可能エネルギーが占める割合、エネルギー自給率の質問等、合計14問でエネルギーリテラシーを測った。パート2とパート3はそれぞれ5問ずつ構成され、Clarkson University Energy Literacy Assessment Projectによって開発された質問票のaffective factor（エネルギー問題解決に向けた積極性）およびbehavioral factor（自身の省エネ行動）を計測する質問を参考に作成した⁵。パート4は選択型実験形式の質問8問で構成され、調査7（佐渡市民へのアンケート調査）と同じ内容であるため、詳細は割愛する。

7）調査10：中種子町（種子島）における熱需要に関する選好の把握

製糖工場排熱を利用した地域熱供給は、種子島全体で栽培・収穫したサトウキビを用いるにも関わらず、中種子町が最もアクセスしやすい技術オプションとなる。そのため、そのアクセシビリティとエネルギーの選好性の関係を調べることにより、地域のシナリオ策定に向けた対策を検討する必要がある。ただし、地域熱供給は国内での導入実績が少なく、一般には身近ではない技術である。そのため、まずは現在の熱エネルギーの使い方に関する調査を実施しながら、地域における技術の実現可能性の評価につなげることを目的とした。本調査は、調査票の発送・回収作業に関して中種子町農林水産課の協力を得て実施した。調査対象者は、中種子町全世帯（3,589世帯）である。調査票は、給湯器・ボイラーの使用状況、給湯・冷暖房に関する理解度テスト、給湯器・ボイラーの更新の際に考慮する点（地域への経済効果や環境影響を含む）、発電時に利用すべき居住地域で得られる自然エネルギー源、契約時に重要視する要因、個人属性（性別、年齢、最終学歴、家族構成、職業、職種、世帯年収）など、19問で構成された。

8）調査11：エネルギーリテラシーが消費者選好へ与える影響の把握

本調査はエネルギーリテラシーが選好へ与える影響を目的とし、全国47都道府県の20歳から65歳までの男女の消費者を対象者としたWeb調査を実施した。調査票は、1. エネルギーリテラシーを計測する質問、2. 電力使用に関する質問、3. 選択型実験、4. 個人属性、の4つの構成から成り立っている。前年度に実施したWeb調査では、7問の質問によってエネルギーリテラシーを計測したが、本調査ではそれぞれ6問ずつで構成される「エネルギーに関連する基礎知識」、「エネルギー安全保障」、「経済とエネルギー」、「環境問題とエネルギー」、「安全とエネルギー」の5項目、合計30問でエネルギーリテラシーを評価する質問票を作成した。質問作成にあたり、前述のClarkson University Energy Literacy Assessment Projectによる質問票⁷、エネルギー教育検討評価委員会報告書「これからのエネルギー教育のあり方」¹¹、エネルギー基本計画¹²、平成27年度エネルギー白書¹³を参考とした。本調査の選択型実験は、電気料金、電源構成、発電事業者、二酸化炭素排出量の4つの属性を設定した（表(1)-3）。ここまでする選択型実験では、供給安定性を属性

に含めていた。どの調査においても供給安定性の変数は常に最大の絶対値が推計され、回答者にとって最も重要な属性であることが確認された。そのため、本調査では供給安定性を外し、二酸化炭素排出量を属性に含めた。個人属性としては、性別、年齢、居住都道府県、世帯構成、最終学歴、世帯収入、職業、職種、エネルギーに関連する資格保有の有無を訊いた。

表(1)-3 選択型実験 質問例

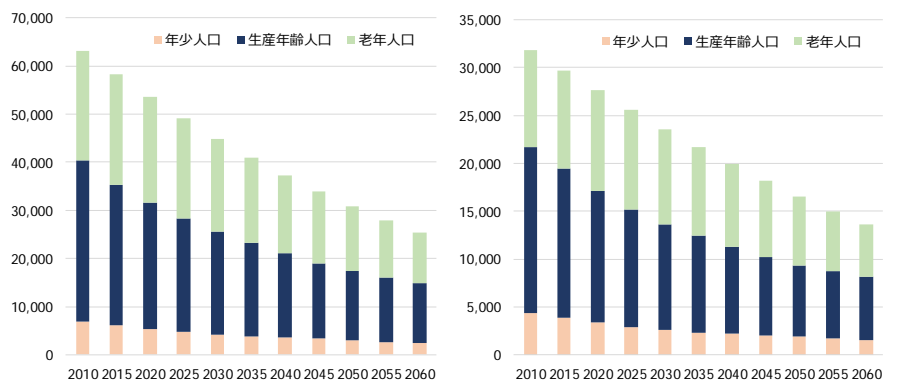
	契約プランA	契約プランB	契約プランC
発電事業者	一般電気事業者	地域企業	一般電気事業者
電源構成	化石火力 80% 原子力 20%	化石火力 80% 再エネ 20%	化石火力 100%
電気料金 (300 kWh/月)	5,700円 (19円/kWh)	6,000円 (20円/kWh)	6,000円 (20円/kWh)
二酸化炭素排出量	170 kg	170 kg	210 kg
どれか1つを 選んでください		✓	

(3) シナリオ策定に向けたプレイヤーとのコミュニケーション

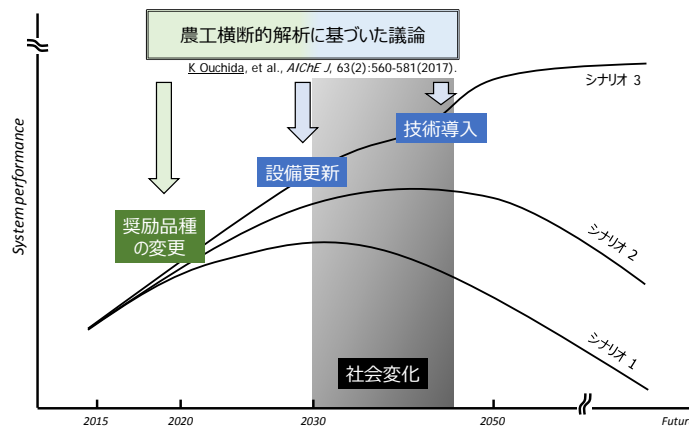
生成されたシナリオとともに、消費者選好性、低炭素化効果、社会経済性の各分析で得られた結果を実際の地域のプレイヤーに伝えるとともに、地域で抱えている不安や心配といった低炭素化技術・システムの導入障壁をヒアリングによって収集、得られた成果による導入障壁の克服につなげられるかどうかを議論する。プレイヤーとしては、種子島においては地域産業、公共団体、高等学校を対象とし、佐渡島においては地域産業、公共団体を対象とした。

コミュニケーションにおいては、特に、社会的な変化に対する不確実性を考慮することを試みる。例えば、種子島におけるサトウキビ産業を例に図(1)-1にシナリオ計画の概念図を示す。図(1)-1(a)にも示されるように、加速する人口減による農家の減少はサトウキビの総量の減少につながり、製糖工場にとっては原料の調達量の減少に直結する。熱を多く用いる工場である製糖工場では、原料の減少は工場そのものの規模の減少につながるだけでなく、保有する設備の稼働率の下限界を下回ってしまうと、工場を稼働できない状態につながってしまう。そのためには、原料確保と小規模でも高効率に稼働するための設備更新、さらには複合的な生産による基盤強化といった、変革を起こしていかなければならない。しかし、この変革には数十年単位の時間が必要となるため、シナリオを事前にシミュレーションするなどして、導入障壁を克服する必要がある。同様に佐渡島においても図(1)-1(b)に示す通り、人口が減少していくことが分かっている。基幹産業としてエネルギーを生産している産業が現在は存在していないが、減少する生産年齢人口を考慮しながら、取りうるシナリオの議論が必須である。

コミュニケーションはシナリオ策定会議の一環として行い、その方法としては、通常の会議形式のものから、ワークショップ形式、セミナー、シンポジウム形式のものなどを、相手に合わせて実施した。表(1)-4に本研究で実施したシナリオ策定会議の一覧を示す。



(a) 種子島の人口推移と予測 (b) 佐渡島の人口推移と予測



(c) シナリオ策定の概念図

図(1)-1 社会変化を考慮した農工横断的解析の応用によるシナリオ策定

表(1)-4 シナリオ策定会議一覧

(複数のプレイヤーとコミュニケーションを行っているため日程に重複がある)

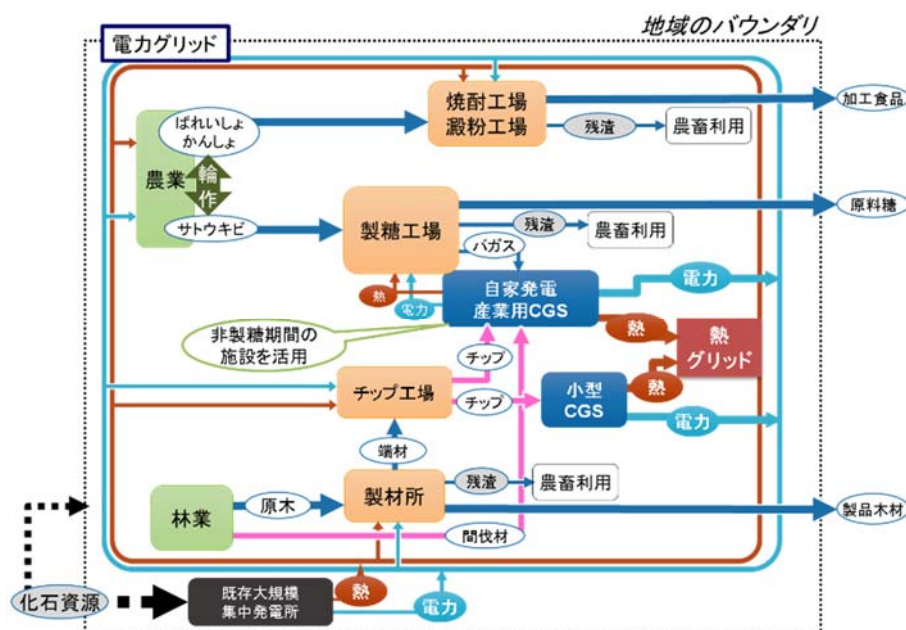
対象	日程等
種子島・ 地域産業	2015年： 2016年：4/26, 5/27, 7/12, 9/21, 10/27, 10/30, 11/9-10, 12/19, 12/26-28, 2017年：1/10, 2/1, 3/9, 3/11-14 (3/11：西之表市シンポジウム)
種子島・ 公共団体	2015年：8/19-21, 8/24-27, 10/1, 11/1, 11/30, 12/22 2016年：1/13-15, 1/26-29, 2/4-6, 2/10-14, 2/17, 2/24-26, 3/5-7, 3/11, 4/13-15, 5/22-24, 6/7, 7/12, 7/20-21, 9/28-29, 10/29-31, 11/9-10, 12/2, 12/27 2017年：1/22-25, 2/10-12, 3/11-14
種子島・ 高等学校	2015年：7/3, 9/30, 12/19 2016年：1/27, 1/30, 7/13, 7/20, 9/29, 12/20-21, 2017年：3/11-14 (3/11：西之表市シンポジウム)
佐渡島・ 地域産業	2016年：6/29-7/1, 11/2-3,
佐渡島・ 公共団体	2016年：6/29-7/1, 10/20-21, 11/7-8, 11/2-3,

4. 結果及び考察

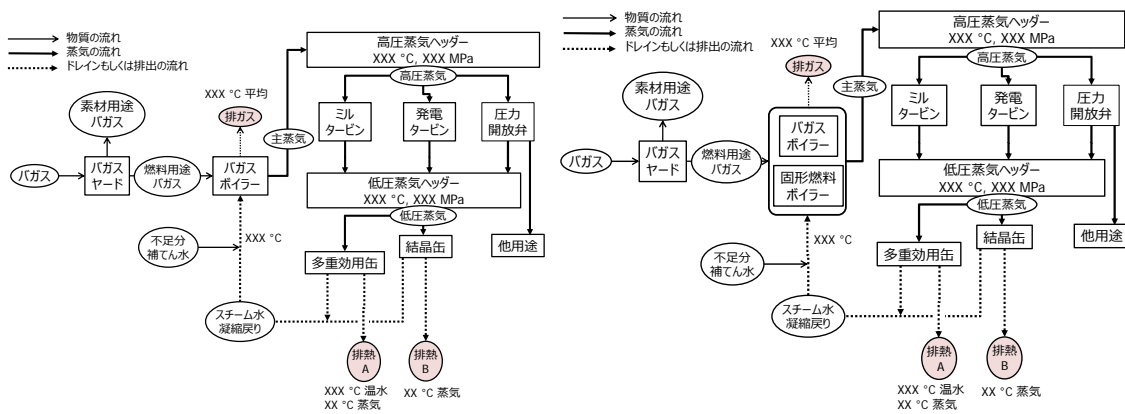
(1) エネルギーフローシミュレーションを応用した地域で実装可能なシナリオの生成

図(1)-2に例として種子島における将来のエネルギーフローとして実装可能なビジョンを示す(図(2)-10を合わせて参照)。自家発電産業用コジェネレーションシステム(CGS)が現在製糖工場で稼働しているバガスボイラー+蒸気タービンの将来の形であり、小型CGSが新たに導入を検討できる設備である。産業用CGSでは従来のバガスはそのまま利用するが、サトウキビを農林18号やKY01-2044のような高バイオマス量サトウキビと選択的発酵プロセス¹⁴⁾を農業および製糖工場にそれぞれ導入することによってバガスの発生量を飛躍的に増大させ、燃料を増やすことができる。同時に、木質チップを燃料として混焼できるようにすることで、さらに燃料を増加させることができるようになる。現在のバガスボイラーはバガス専焼となっており、燃料の投入口もバガス用のものしかない。また、製糖期間中は主蒸気を圧搾タービンにも利用しており、その分ボイラー規模が発電のみを行うためには大きすぎてしまっている。そこで、設備更新時期に合わせて、図(1)-3のようなプロセスの設計思想の変更が提案できる。

図(1)-3(a)には現在のエネルギーフローを示す。ここでバガスボイラーが一基で稼働しているところをデュアル化し、図(1)-3(b)に示すように固形燃料ボイラーとし、製糖期間中は二基稼働してこれまでと同様な主蒸気発生量としてミルトービンと発電タービンを動かし、非製糖期間中は固形燃料ボイラーのみを稼働させて発電タービンを動かすという仕組みがありうる。また、図(1)-3(c)に示すように、主蒸気圧力を上昇させて発電を主体とするエネルギーフローに変えることも検討できる。ここでは発電タービンから抽気蒸気を取り出し、ミルトービンやその他熱需要を満たすために利用することもありうる。ミルトービンを電化することも可能である。このように、産業用CGSのエネルギーフローを変更することで地域の中の資源から取り出せる電力等を増大させることが分かった。

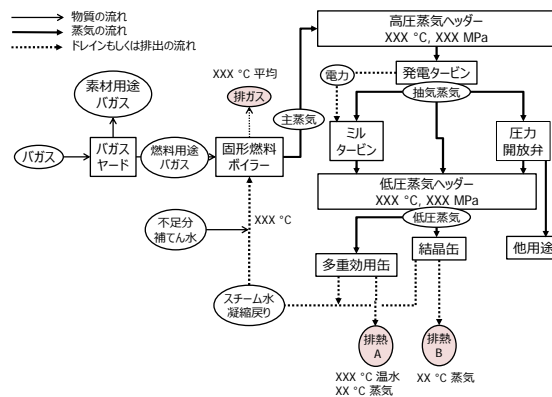


図(1)-2 種子島におけるエネルギーフローのビジョン



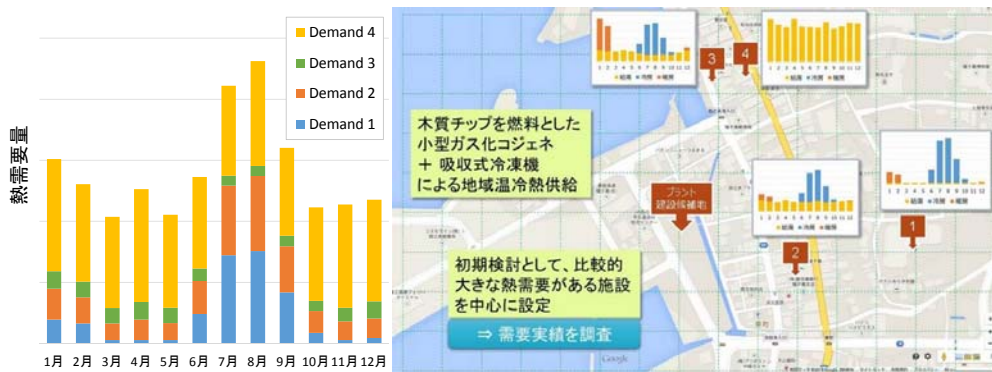
(a) 現行プロセス

(b) ボイラーのデュアル化



(c) 主蒸気圧力の上昇と発電主体のエネルギーフロー

図(1)-3 製糖工場における自家発用CGSの設計思想の変更例



(a) 需要の季節変動

(b) 地域熱システムの概要

図(1)-4 導入が検討されている小型CGSの概要

小型CGSは小型の木質チップのガス化とガスエンジンによるものなどが検討される。小型の場合、必ずしも発電効率は高くないが、分散電源として利用できるため、地域熱等の同時導入により、総合効率を高めることが期待される。このとき、設備は常に一定の稼働率を維持することが全体の効率として望まれるが、熱需要には図(1)-4(a)に示すように季節変動があるため、必ずしもすべての熱需要を満たす形で設備の規模を決定することはできない。実際に地域で導入が検討されている小型CGSの導入計画の例を図(1)-4(b)に示す。小型CGSを設置する場所から熱配管によ

って供給可能な領域を設計し、その中で比較的熱需要が大きいホテルや公共施設などを対象とした設計を行うことができる。当該地域では基本的にLPGガスか重油等を用いた熱供給が行われているため、木質バイオマス由来の小型CGSによる電力と熱の供給は低炭素化に貢献しうるシステムといえる。熱需要の季節変動を平準化するためには、小型CGSの設置場所付近で、他の熱需要先を季節別に取り込んだ形の管理など、対策を取る必要がある。

表(1)-5 種子島、佐渡島における技術・システムの導入に関する情報の体系的整理の例

導入時期	技術・システム	TRL	備考
短	バガスヤードの設置によるバガス保存	8	土地の確保が必要
短	製糖工場の排温水を利用する設備	8	配管等で排温水による施設園芸を導入
短	蓄熱技術の実証	4-5	蓄熱と出熱の両方の実証試験が必要
短	イオン交換法によるバイオディーゼルの工業的製造の開始	6-7	廃食用油の収集量と装置の稼働安定性に依存
短	小型CGS+製糖工場動力プラント向けの地域森林管理計画の策定	8	作業員の確保と経済的な実行可能性の担保が必要
短	中古バッテリーの組み合わせによる電力の安定化実証	7	甕島にて実証試験された技術 (http://www.sumitomocorp.co.jp/news/detail/id=29026) の水平展開として誘致。太陽光の出力抑制等への対応を行う。
短	果樹剪定枝を用いた木質由来熱供給システムの導入	9	化石由来に比べて利便性が低下しうる部分の受容性の分析が必要
中	小型CGSの実証導入	6-7	熱需要のセンシングと規模の設計が必要
中	製糖工場の余剰電力を売電開始	8	場内省エネにより売電量の確保が必要
中	製糖工場の動力プラントの改築	8	バガスと木質チップを混焼させ、かつ製糖期と非製糖期の両方で稼働できる仕組みを導入。既に海外では導入されている技術。
中	原料糖-エタノール-電力複合生産向け高バイオマス量サトウキビの品種登録と奨励品種化	4-8	各種委員会を通過するためのエビデンスデータの収集・蓄積が必須
中	蓄熱技術の実証	5-7	製糖工場からの蓄熱と地域の他の熱需要家への出熱を実証
中	蓄熱による売熱開始	7-8	製糖工場からの売熱を開始
中～長	種子島において屋久島との系統連系により需要規模を増大、水力発電の電源構成への組み込み	8	費用面、社会面での是非を問うために時間をかけた協議が必要
中～長	佐渡島と本州の系統連系により、需要規模の増大、太陽光等によるエネルギーを本州へ売電	8	費用面、社会面での是非を問うために時間をかけた協議が必要
短～長	バッテリー搭載自動車を主軸にした域内交通の確立により、輸送の脱化石を推進	5-8	電気自動車、燃料電池車など、再生可能エネルギーとの親和性を担保した形での導入を地道に続けていく必要がある

産業用CGSからも多くの未利用な再生可能資源由来の熱が発生²⁾しており、小型CGSにおいても季節変動によって熱需要と設備の稼働状況に影響している。このように、熱の需給における空間的・時間的ギャップ（時空間ギャップ）が、エネルギーフローの効率に大きく影響していることがわかっている。ここに、蓄エネ技術に一環として、蓄熱技術がある。蓄熱技術の導入により、これまで有効に利用できなかった排熱を利用し、施設園芸や澱粉工場、焼酎工場といった、必ずしも高い温度の熱を必要としないような工場において化石資源の代わりに蓄熱した熱を利用できるようになる。ただし、まだフィージビリティ評価が必要な技術であるため、すぐに導入できるものとはいえない。

以上のような技術的に分析したエネルギーフローのとりうる形をもとに、地域のプレイヤーとの意見交換を行いながらシナリオを生成・策定する会議を複数回行った。会議において打合せた地域のプレイヤーは、4つの自治体、3つの公共団体、3つの業界団体、2つの社会福祉法人、3つの電力・燃料供給会社、4つのエネルギーを需要する私企業、である。また国民との科学として、域内の高校において物質とエネルギーの循環と低炭素化に関する講義を行い、高校生の視点から地域で実施可能なこれらの会議を通し、表(1)-5に示すようなオプションの達成可能性を体系的に整理し、地域のエネルギーシステムのシナリオ生成を行った。なお、導入可能時期については短期：0～2年、中期：2～10年、長期：10年～30年として整理し、環境省から公表されている技術熟度レベル（TRL：Technology Readiness Level）の定義¹⁵⁾に基づいた。これにより、シナリオを生成することが可能となった。例えば、製糖工場を中心とした産業用CGSとその周辺における排熱利用を促進するためには、短期的にまずバガスヤードを整備し、バガスを保存できるようにする必要がある。その上で、製糖工場の設備更新に合わせたボイラーと発電設備の設計を行い、地域への売電用設備の導入を行う。同時並行して蓄熱技術の実証試験を計画的に行い、売電と売熱をほぼ同時期に開始することができれば理想といえる。このように、長期的に導入可能な技術を見据え、短期的に行わなければならない技術導入を議論することができる。このように、地域のプレイヤーが選択可能な技術・システムのオプションを組み合わせたシナリオを生成することが分かった。

（２） 社会受容性を確保したシナリオ生成に向けたアンケート調査

1) 調査1,3,4：種子島におけるエネルギー属性への消費者選好の把握

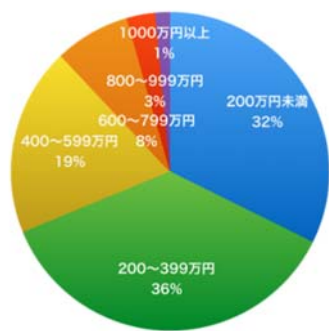
表(1)-6は、年齢構成と男女比について回答者と母集団を比較した表である。回答者の年齢構成は、高齢化が進んでいる種子島を象徴しており、若年世代の回答者が占める割合が少ない。また、本調査では未成年と70歳以上を回答対象者から排除しているため、必然的に母集団の20～69歳よりも割合が多くなってしまふ。表(1)-6をみると、回答者の35歳以上、特に50歳以上の割合が母集団よりも高くなっている。一般的なエネルギー関連の調査では、男性の回答率が高いと言われているが、本調査の回答者の男女比は同程度であることがわかる。世帯収入と最終学歴はそれぞれ、図(1)-5(a,b)に示す。Web調査では、母集団と比較して回答者の収入が高く、大学卒業以上である割合が大きい傾向がよく知られているが、調査1,3,4の回答者は比較的母集団に近い特徴が観察された。総括すると、種子島のアンケート調査における回答者は母集団の特徴から大きく外れていないため、分析結果を種子島住民の平均的意見として解釈可能であると結論付けた。

調査1,3,4より得られたデータを分析した結果を説明する。最初に、種子島で得られる自然エネルギー源を利用して発電を行う場合、どの資源を利用するのが適当であるかを訊ねた質問の結果を示す。回答者一人につき最大3つの資源を選択することができ、1,273人分の回答を得た。図(1)-5(c)に示すように、予想通り太陽光が最も支持が大きい資源ではあるが、特出すべき点はバガス（サトウキビの搾りかす）が3番目に好まれる資源であったことである。また、潮波力も4番目に多く選出されていることから、住民に馴染み深い資源を利用した発電であれば、居住地内での発電への社会受容性が高まること可能性が示唆される。

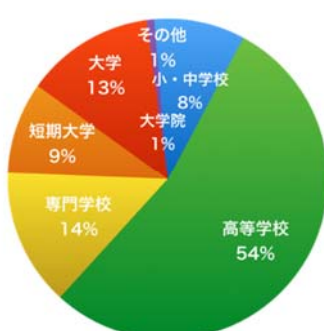
地域で実装可能な技術、及び、地域資源を利活用したエネルギーシナリオに対する社会受容性の有無を確認するためには、地域の資源を調達し発電を行う「地域企業」への選好に特に注目する必要がある。分析の結果、負の選好（負の支払意思額）が推計された。この結果より、現状のままでは地域企業によって発電された電気を購入する住民は少ないと考えられる。また、電気料金、供給安定性、発電事業者、電源構成の4つの性質で捉えることのできなかつた何らかの要因（例えば、ロイヤリティや契約変更の煩わしさなど）が統計的に有意に推計されたことから、多くの人が自由化後も契約を変えない（現状維持バイアスと呼ばれる）可能性が高いことを示唆している。

表(1)-6 サンプルと母集団の年齢構成、男女比比較¹⁶⁾

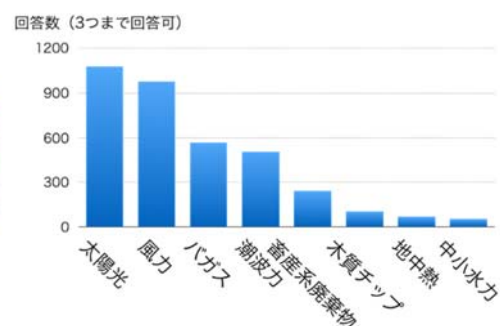
年齢階級	回答者	年齢構成 (%)			男女比 (%)	
		西之表市	中種子町	南種子町	回答者	種子島平均
20～24歳	1.6	2.3	2.3	2.4	111.1	105.4
25～29歳	4.2	3.0	3.4	3.2	96.2	105.9
30～34歳	6.1	4.5	4.4	4.5	68.2	104.2
35～39歳	8.4	5.2	4.9	5.4	88.9	109.4
40～44歳	11.1	5.5	4.9	5.1	82.4	103.7
45～49歳	9.9	5.7	5.8	5.5	93.5	102.5
50～54歳	13.8	6.4	6.7	7.6	143.5	114.1
55～59歳	14.1	7.7	7.8	8.3	97.7	105.5
60～64歳	15.7	8.9	8.1	8.4	112.2	111.9
65～69歳	15.1	7.7	6.7	6.3	76.9	95.0
合計	100	57.0	54.9	56.7	平均 97.1	91.5



(a) 世帯収入



(b) 最終学歴



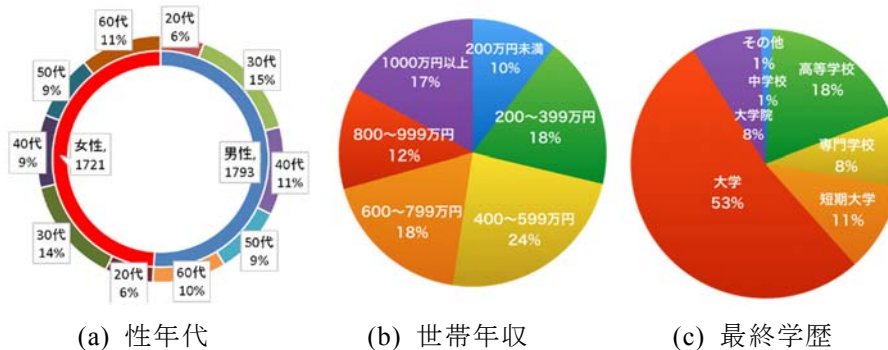
(c) 利用すべき自然エネルギー源

図(1)-5 調査1,3,4（種子島一市二町2015年度実施）の個人属性と結果

2) 調査2：都市部におけるエネルギー属性への消費者選好の把握

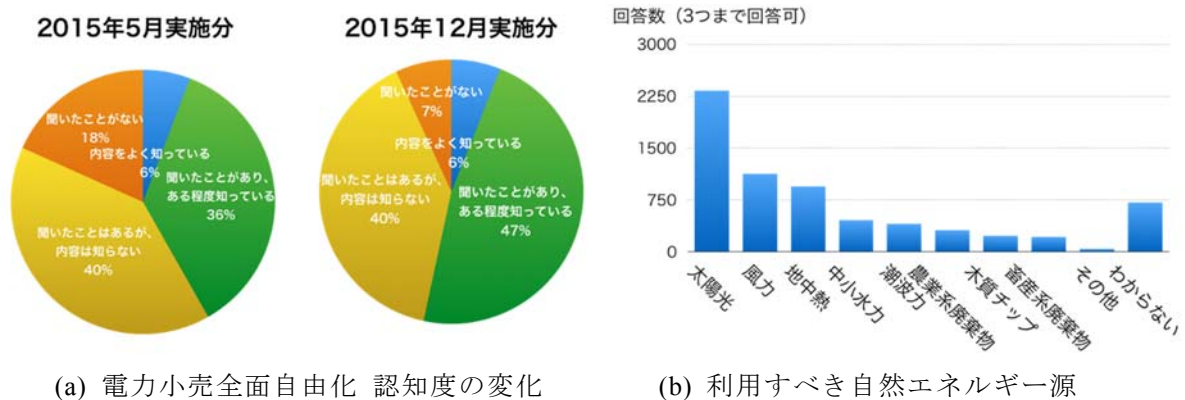
回答者の個人属性を図(1)-6に示す。Web調査では回答対象である母集団に比べ、回答者が高学歴で高収入である人の割合が多くなる傾向があることが知られているが、本調査でもその傾向が

見られた。続いて、3大都市圏住民の電力小売全面自由化の認知度について説明する。2015年5月に実施された調査と比較すると、約7ヶ月間で大幅に認知度が上昇した可能性を示唆している（図(1)-7(a)）。一方で、2015年5月に行った調査のサンプルは首都圏住民に限定していたため、単純比較はできない点には注意すべきである。



図(1)-6 調査2（3大都市圏2015年12月実施）の回答者個人属性

図(1)-7(b)は発電時に利用すべき居住地域で得られる自然エネルギー源を示している。調査1, 3, 4と同様、回答者は最大3つまで選択肢を選ぶことができる。種子島での結果を示している図(1)-5(c)と比較すると、3大都市圏においても太陽光と風力が多くの回答者に選択されている。種子島ではバガスや潮波力が選ばれている一方、3大都市圏において潮波力は多くの回答者に選択されなかった。また、地熱が風力の次に好ましい資源として挙げられている点においても、種子島の調査とは大きく異なる点である。選択型実験の分析結果は、種子島での調査と同様の結果が得られ、電気料金、発電事業者の種類、電源構成、供給安定性の4つの性質全てが契約プランの意思決定に影響を与えることが明らかになった。他方、都市部と種子島で相違点も確認された。1点目として、電源構成への支払意思額の違いが挙げられる。原子力が含まれている電源構成への支払意思額は両地域において負であることが確認され、また、再生可能エネルギーに関しては両地域の住民ともに正の選好が確認された。しかしながら、種子島の回答者の方がそれぞれの支払意思額の絶対値が大きいことが明らかになった。2点目として、両地域で「現状維持バイアス」が確認されたが、その程度が大きく異なることがわかった。現状維持バイアスとして解釈できるコストは、種子島で65円、3大都市圏で308円と推計された。



(a) 電力小売全面自由化 認知度の変化 (b) 利用すべき自然エネルギー源

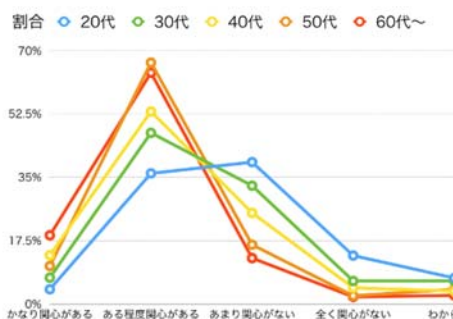
図(1)-7 調査2（3大都市圏2015年12月実施）の結果

3) 調査5：佐渡島におけるエネルギー属性への消費者選好の把握（関心度・認知度）

性年代別返信率を表(1)-7に示す。回答者の家族構成は二世帯が約半数を占め、夫婦のみと三世帯が約20%ずつであった。一人暮らし世帯は10%以下であった。回答者の最終学歴は、高等学校卒業が約半数を占め、専門学校卒業、大学卒業、短期大学卒業と続いた。世帯年収は、200～399万円が最も多く約30%を占め、次に400～599万円、200万円未満、となった。種子島での調査と同様、Web調査でしばしば発生する高学歴、高収入バイアスは発生していないと考えられる。

表(1)-7 調査5（佐渡市2016年3月実施）の性年代別返信率（%）

		年代					平均
性別		20代	30代	40代	50代	60代	
	男性	17.5	18.0	21.0	34.5	48.5	27.9
	女性	30.5	35.5	33.5	50.0	54.5	40.8
平均		24.0	26.8	27.3	42.3	51.5	34.4



(a) 年代別エネルギー関心度



(b) 年代別電力自由化の認知度



(c) 男女別エネルギー関心度

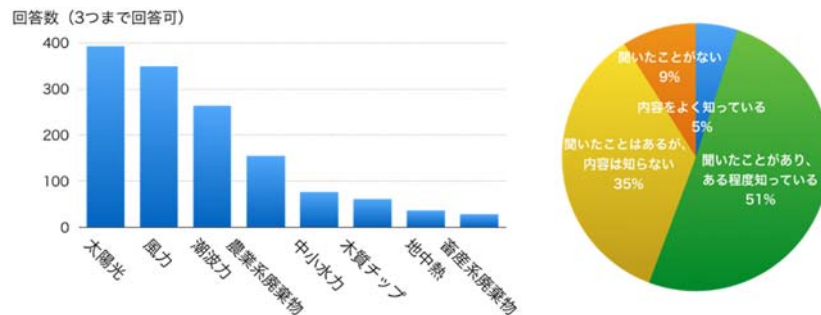


(d) 男女別電力自由化の認知度

図(1)-8 調査5（佐渡市2016年3月実施）の結果（関心・認知度）

エネルギーに関する質問の分析結果を説明する。佐渡市民のエネルギーの関心度は図(1)-8(a,c)に示すように、全体としてはやや関心があるように見受けられるものの、若年層や女性の関心の低さが明らかとなった。電力小売全面自由化への認知度も同様の傾向があることがわかった図(1)-8(b,d)。図(1)-9(a)は、発電時に利用すべき佐渡市で得られる自然エネルギー源を示している。種子島の住民への調査、また、3大都市圏への住民の調査結果と同様、太陽光と風力が最も好まれる資源であることがわかった。また、潮波力、農業系廃棄物（稲わら等）が多く選ばれたことより、種子島での調査結果も合わせて考えると、地域住民に馴染み深い資源が選ばれやすいこと

もわかった。図(1)-9(b)は佐渡市民の電力小売全面自由化の認知度を示したグラフである。約半数の住民が内容をある程度理解していると答えているが、3大都市圏で実施したアンケート調査の結果（図(1)-7(a)）と比較すると、内容をよく知っている住民の割合が非常に少なかった。自由化後に電力プランを変更可能である地域とそうでない地域では、関心や情報収集の積極性に差があるものと考えられる。



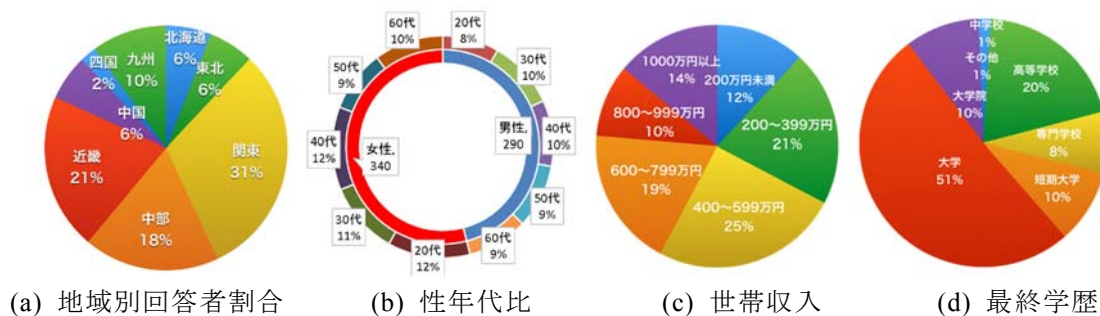
(a) 利用すべき自然エネルギー源（佐渡） (b) 電力小売全面自由化の認知度

図(1)-9 調査5（佐渡市2016年3月実施）の結果（エネルギー源・自由化認知度）

4) 調査6：消費者選好へのエネルギーリテラシーの潜在的影響

回答者はおおよそ都道府県の人口分布に合致するよう抽出を行うことができた（図(1)-10(a)）。図(1)-10(b)は回答者の男女比を示しており、女性の回答者が多い結果となった。世帯収入と最終学歴に関しては、調査2と同様高収入、高学歴の割合が多い傾向が観察された（図(1)-10(c,d)）。

電力小売全面自由化実施の直前である2016年3月23日～2016年3月25日であったこともあり、自由化の認知度は高いものとなった。「内容をよく知っている」と答えた回答者が9.0%、「聞いたことがあり、内容はある程度知っている」は56.2%、「聞いたことはあるが、内容は知らない」が30.2%、そして「聞いたことがない」はわずか4.6%であった。



(a) 地域別回答者割合 (b) 性年代比 (c) 世帯収入 (d) 最終学歴

図(1)-10 調査6（全国2016年3月実施）の回答者個人属性

エネルギーリテラシーの計測を目的とした質問は全部で7問であり、最も正答率が高かったのは、電力小売全面自由化に関して正しい内容を選ばせる質問であり、約80%であった。一方で、日本で馴染みが薄い地域熱システムに関する質問の正答率は10%であった。質問には1時間当たりの電気使用量を表す単位を答えさせる基礎的な質問や、エネルギーと環境の関係性、また、地域熱システムの仕組みを問う質問など、質問数は少ないが幅広く問うた。7問中5問は正答率が50%以上であるのに関わらず、全問正解した回答者は630名中たった7名であり、全体の約1%にとどまった。この結果より、電気に関する知識はある程度保有している傾向が観察されるが、熱に関する知識をもっ

た国民の割合は非常に少ない可能性がある」と推察できる。また、3割程度の回答者しか省エネルギー行動への正しい理解を得ていないことも明らかになった。

また本調査では、半数以上の回答者が電力小売全面自由化後に他の電力会社への契約変更を検討したいと答えた。ロジットモデルによる分析の結果、自由化の認知度や、収入や家族構成などの個人属性が契約変更意思に影響を及ぼしていることも明らかとなった。

最後に、選択型実験の解析結果は、調査1,3,4、及び、調査2とほぼ同様の結果が得られた。どの地域においても、地域企業によって発電された電気を購入したくない、という意味を示している。地域住民によるゴミ処理場建設の反対運動に代表される、NIMBY（Not in my backyard）効果により、発電による環境影響を懸念している可能性がある。また、地域企業による発電、売電が地域経済に及ぼしうる効果を考慮していない可能性もある。従来型の集中型エネルギーシステムから分散型エネルギーシステムへの移行には、環境影響や経済効果を消費者に開示し、正しく認識してもらうことによって地域住民の社会受容性を確保する必要があるといえる。

5) 調査7：佐渡島におけるエネルギー属性への消費者選好の把握

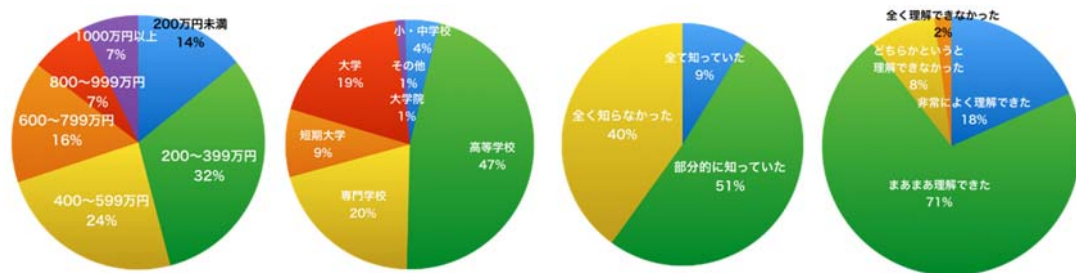
回答者の個人属性は、表(1)-8、図(1)-11(a,b)に示す通りである。Web調査では、母集団と比較して回答者の収入が高く、大学卒業以上である割合が大きい傾向がよく知られているが、調査7の回答者は比較的母集団に近い特徴が観察された。総括すると、佐渡島のアンケート調査における回答者は母集団の特徴から大きく乖離していないため、分析結果を佐渡島住民の平均的意見として解釈可能であると見なすこととした。

表(1)-8 サンプルと母集団の年齢構成、男女比比較

年齢階級	年齢構成 (%)			男女比 (%)	
	回答者	佐渡市 全体 ^a	成人以上 ¹⁷⁾	回答者	佐渡市 ¹⁷⁾
20歳未満	-	14.2	-	-	106.2
20代	5.9	5.7	6.6	83.9	110.5
30代	11.2	8.9	10.4	75.4	107.9
40代	16.5	10.2	11.9	92.7	112.1
50代	24.6	12.9	15.0	98.3	108.3
60代	40.5	16.9	19.7	125.4	107.3
70代	1.3	14.7	17.2	100.0	78.0
80代以上	0	16.3	19.0	-	53.1
不詳	-	0.1	0.2	-	69.4

本調査より得られたデータを分析した結果を説明する。最初に、佐渡市が抱えるエネルギー問題の説明を事前に知っていたかどうか、という質問の結果を図(1)-11(c)に示す。調査5の結果を引用すると（図(1)-8、図(1)-9）、年齢層が高い回答者を中心として、エネルギー問題にはある程度関心があり、電力小売全面自由化についても認知度は高かった。しかしながら、本土への燃料依存に起因する島外への資金流出や火力発電依存、非常時のエネルギー確保に関する問題といった島の性質上起こりうる基本的な課題を多くの島民が「全く」知らなかったのは、やはり佐渡市民のエネルギー問題への関心が決して高くないからである、と推察できる。本来より指摘されてい

る、自己申告による意識調査や行動調査の結果は上昇バイアスを伴う傾向にあるというアンケート調査の欠点¹⁸⁾を、調査5および7の結果より示すことになった。



(a) 世帯収入 (b) 最終学歴 (c) エネルギー問題の認知度 (d) 説明文の理解度
図(1)-11 調査7（佐渡市2016年11月実施）の個人属性と結果

一方で図(1)-11(d)の結果をみると、佐渡市が抱えるエネルギー問題についての説明文を89%の回答者が理解できたと回答した。説明文レベルの容易な内容であれば、もともと知識がなかった個人でも内容を理解できることがわかった。今後、説明文の難易度の変更や工夫（写真等の添付）を加えることにより、どの程度の情報がもっとも市民のエネルギーへの関心を上昇させるのに有効であるか、引き続き調査を行う必要があると考える。

次に、選択型実験の結果を説明する。選択型実験の質問を8回答えたせ、電気料金、電源構成、供給安定性、発電事業者への選好を把握することが目的である。なお推計にあたってはNLOGIT5と呼ばれる統計ソフトを利用した。推計モデルは混合ロジットモデルと呼ばれる回答者間の選好の多様性を考慮可能なモデルを採用した。電気料金のみ固定パラメータ、それ以外の変数はランダムパラメータとして推計した。理論通り、電気料金には負の選好が推計された（1%有意）。発電事業者の結果をみると、現在の発電事業者である東北電力に比べ、国内企業および佐渡市に存在する地域企業を好み、外資系企業は避ける傾向があることがわかった。また、国内企業よりも地域企業の推計値の方が大きいことから、地域企業から買電することをより好む傾向にあるといえる。昨年度に種子島で実施した調査結果では、地域企業には負の選好が推計された結果とは対照的である。本来佐渡市民は地域企業へ正の選好をもっているのか、もしくは調査票の最初に掲載した説明文によって、地域企業からの売電が域内経済へ与える影響を強く意識させ、このような結果になったかどうかは特定できない。社会受容性を誘発する効果的な要素の特定には、今後さらなる調査が必要である。他地域で実施した選択型実験と同様、供給安定性は最も重要な意思決定要因として推計された。4つの属性で捉えることのできなかった何らかの要因（ロイヤリティや契約変更の煩わしさなど）が統計的に有意に推計されたことから、多くの人が自由化後も契約を変えない（現状維持バイアスと呼ばれる）可能性が高いことを示唆している。以上の結果を要約すると、当該地域で域内企業による発電、売電が技術的に可能となった場合、佐渡市民は域内企業から売電する可能性が示唆される。しかしながら、地域企業への選好の多様性も確認されていることから、市民の中には負の選好をもつ者が存在することも確かである。そこで、個人属性が選好に与える影響について詳細な分析を行い、その結果を基に高い社会受容性を確保するための情報提供の在り方などを今後議論する必要があると考えられる。

6) 調査8,9：高校生のエネルギーリテラシーの測定

「持続可能性に関する理解度・意識調査」としてアンケート調査を行っているが、ここではエネルギーに関連する質問の結果についてのみ議論する。特に、エネルギーリテラシーがエネルギーワークショップ前後で変化が生じたのかどうか、分析を行う。ワークショップ前（2016/11/17, 18）に生徒に回答させた調査票とワークショップ後（2017/2/1）に回答させた調査票は全く同じ内容である。ワークショップは、普通科1組（20名）、普通科2組（27名）が体験し、電気科の生徒（25名）は参加していない。エネルギーワークショップとは、本研究とも関連して依頼した日本科学未来館による対話型ワークショップを指す。

表(1)-9に、エネルギーリテラシーを測定するための質問を示す。再生可能エネルギーの性質、我国のエネルギー自給率、エネルギーと環境、原油価格の推移、デカップリングの定義など、基本的な内容15問で構成している。図(1)-12にワークショップ前、前後に実施した調査結果を示す。ワークショップに参加した普通科1組と2組は正答率の差が似た動きをしているのに対し、不参加である電気科はその2クラスとは異なる動きをしていることから、ワークショップはなんらかの影響を及ぼしていることが推察できる。より精緻な分析を行うために、回帰分析を行った。ワークショップに参加した普通科1組と普通科2組のデータをプールし、被説明変数に各質問別のワークショップ前後での正答率の差、説明変数にクラスとワークショップ後ダミーを設定し、分析を行ったところ、ワークショップ後ダミーが正で推計され、10%有意であったことから、ワークショップはエネルギーリテラシーを上昇させたと結論付けた。

表(1)-9 エネルギーリテラシー測定のための質問

	質問
質問9	1時間あたりに使用した電気使用量を表す単位を、以下の中から1つ選んで下さい。
質問10	再生可能エネルギー資源について正しく説明している選択肢を、以下の中から1つ選んで下さい。
質問11	再生可能エネルギーでないものを、以下の中から1つ選んで下さい。
質問12	先進国で使用されているエネルギーの約85%を供給している資源を、以下の中から1つ選んで下さい。
質問13	エネルギーと環境について正しく説明している選択肢を、以下の中から1つ選んで下さい。
質問14	地球温暖化の原因として考えられている要因を、以下の中から1つ選んで下さい。
質問15	原油輸入価格の推移について正しく説明している選択肢を、以下の中から1つ選んで下さい。
質問16	2014年時点で、日本の年間発電電力量のうち、再生可能エネルギーによって発電している割合を、以下の中から1つ選んで下さい。
質問17	2014年時点で、日本国内の再生可能エネルギーの発電設備容量のうち、最も大きな割合を占める発電設備を、以下の中から1つ選んで下さい。
質問18	日本の資源について正しく説明している選択肢を、以下の中から1つ選んで下さい。
質問19	2014年時点で、日本のエネルギー自給率を正しく示している選択肢を、以下の中から1つ選んで下さい。
質問20	エネルギーの節約に最も貢献する行動を、以下の中から1つ選んで下さい。
質問21	小規模な熱と電気を生み出す装置を集落に設置し、温水を流す配管を通じて、各家庭でお風呂などの熱を使う仕組みを地域熱システムと言います。欧州などでは広く使われている仕組みですが、この仕組みについて正しく説明している選択肢を、以下の中から1つ選んで下さい。
質問22	電力小売全面自由化について正しく説明している選択肢を、以下の中から1つ選んで下さい。
質問23	デカップリングを正しく説明している選択肢を、以下の中から1つ選んで下さい。

質問1～8、および質問23以降はエネルギー以外に関する質問のため割愛



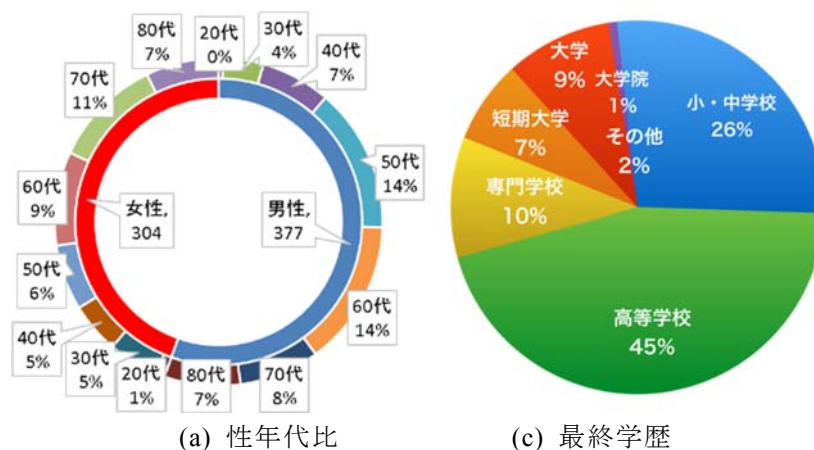
(a) クラス別正答率（ワークショップ前） (b) ワークショップ前後での正答率の変化

図(1)-12 調査8,9（種子島高校2016年度実施）における正答率変化

7) 調査10：中種子町（種子島）における熱需要に関する選好の把握

本来調査期間は2017/2/10～2017/2/24を予定していたが、回収締め切りに間に合わなかった集落が複数存在したため、2017年3月31日に締め切りを延長した。本報告では、755世帯分のデータを用いた解析結果を掲載する。

調査票は大きく分けて、1. 給湯・冷暖房の選択肢に関する認知度および利用状況、2. 効率の良い製品に買い換える条件、3. エネルギー選択に関する質問、4. 個人属性、の4つのパートで構成されている。本調査の回答者の属性は図(1)-13の通りである。平成27年度現在男女比は約88%¹⁹⁾であるが、本調査では男性の回答者の割合がやや多かったことがわかる。また、実際の年代構成と比較して、50代以上の回答者がやや多い傾向にあった。回答者の最終学歴は、Web調査でしばしば観測される高学歴バイアスは発生していないことがわかる。以上の結果より、現在は回答者と全体の男女比、年齢構成、最終学歴は実態と大きく乖離していないことがわかる。次に、給湯・冷暖房の選択肢に関する調査結果について説明する。調査票には、以下の表(1)-10を提示した上で、各給湯・冷暖房の選択肢の導入状況および認知度について質問した。本調査の主目的は社会受容性の観点からの製糖工場排熱を利用した地域熱供給への実現可能性評価であるため、本報告書では地域熱供給に関する認知度、導入意思、および、給湯器の買い替え条件について特に着目して、調査結果を紹介する。

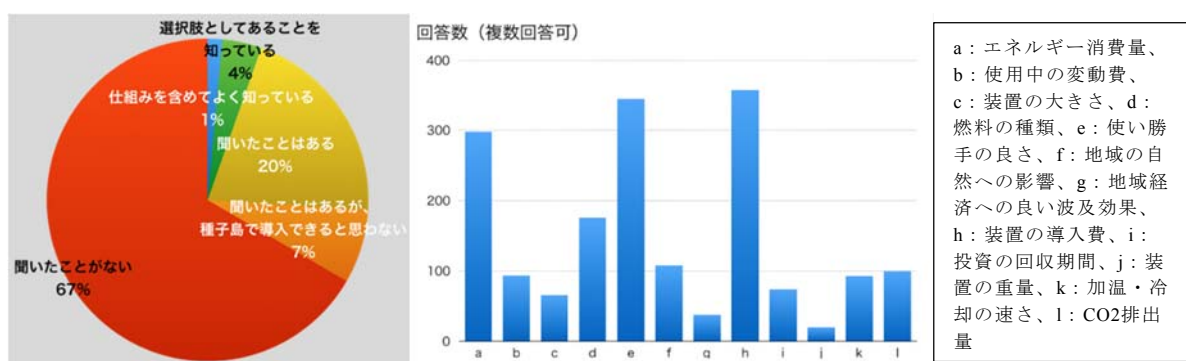


図(1)-13 調査10（中種子町2017年実施）の回答者個人属性

表(1)-10 家庭・事業所における給湯・冷暖房の選択肢

選択肢	説明
従来型装置	ガス炊きの家庭用給湯器や灯油、重油による給湯器、ボイラー、電気エアコン、灯油ストーブのことです。
太陽熱温水器	電気を作り出す太陽光パネルに対し、太陽熱温水器は太陽光で温水を製造し、タンクに貯めておいて利用できるようにする装置です。装置の制御に電力を使うことがありますが、基本的に、燃料は必要ありません。
高効率給湯器	従来の給湯器に比べて燃料の燃焼効率が高く、同じ量のお湯や蒸気を作るのに必要とする燃料が少なくてすみます。潜熱回収型給湯器（例、エコジョーズ®）、自然冷媒ヒートポンプ給湯器（例、エコキュート®）などがあります。燃料は従来のものと同じです。
コージェネレーション装置	熱と電気を両方作り出すことができる装置のことで、ガスエンジン（例、エコウィル®）や燃料電池（例、エネファーム®）などがあります。燃料の投入量が増えるのですが、発電された電気も使えることになり、コスト削減やCO ₂ 排出削減が期待できます。燃料は従来のものと同じです。
地域熱供給 （地域冷暖房）	地域熱供給(地域冷暖房)は、冷水や温水等を一箇所でまとめて製造し、特定の地域に供給して冷暖房・給湯に利用するシステムです。“まとめて”製造・供給することによってコスト削減やCO ₂ 排出削減が期待できます。直接、冷水・温水が供給されるため、その分の燃料は購入しないことになります。エネルギー分野の一体改革により、新しく導入がしやすくなる仕組みです。

図(1)-14(a)は地域熱供給の認知度を表している。約70%の回答者が「聞いたことがない」と回答し、十分に内容を理解していると思われる「仕組みとしてよく知っている」を回答した人は1%であったことから、認知度は非常に低いことがわかる。「聞いたことはあるが、種子島で導入できると思わない」が7%存在した。その理由については本調査では質問していないが、技術・システムの観点から導入が不可能であるのか、もしくは、導入したくないという意思が含まれているのか、さらに詳細に調査する必要がある。図(1)-14(b)は給湯器・ボイラー、冷暖房機器の更新において考慮する点を示している。回答数は装置の導入費、使い勝手の良さ、エネルギー消費量、の三つの選択肢が特に多く選択されており、コスト面が最も重要であることがわかる。地域の自然への影響、および、CO₂排出量もそれぞれ約100ずつ選択されており、環境影響がより少ない機器への選好を表しているといえる。



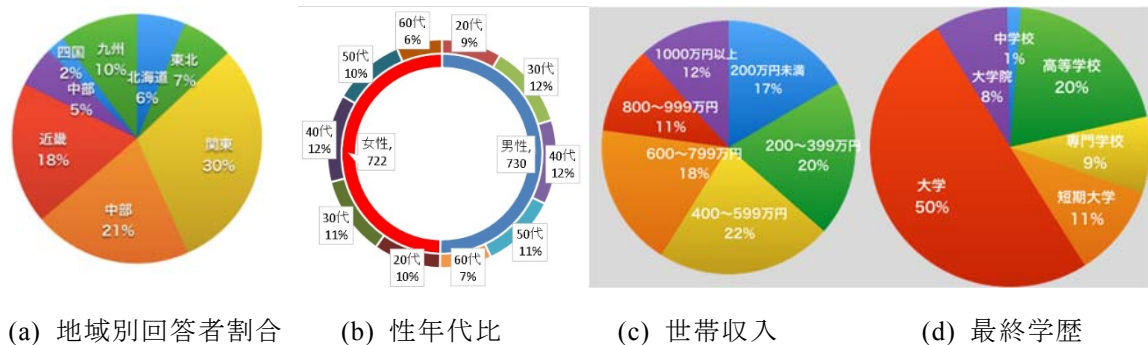
(a) 地域熱供給の認知度

(b) 給湯器・ボイラー、冷暖房機器の更新条件

図(1)-14 調査10（中種子町2017年実施）の結果

8) 調査11：エネルギーリテラシーが消費者選好へ与える影響の把握

おおよそ都道府県の人口分布に合致するよう回答者の抽出を行うことができ（図(1)-15(a)）、ほぼ男女半数ずつとなった（図(1)-15(b)）。世帯収入と最終学歴に関しては、Web調査特有の偏りがみられ、高収入、高学歴の割合が多い傾向が観察された（図(1)-15(c,d)）。



図(1)-15 調査11（全国2017年実施）の回答者個人属性

エネルギーリテラシーの結果を以下で議論する。回答者間の平均正答数は30問中12.63問（正答率42.1%）、最低点、最高点はそれぞれ1点（正答率3.3%）、26点（正答率86.67%）であり、全問正解者はいなかった。また、リテラシーの正答数と女性ダミーは負の相関関係があることがわかった。昨年度から実施している調査結果とも整合性があるため、女性のエネルギーリテラシーが低いという結果には頑健性があるといえる。

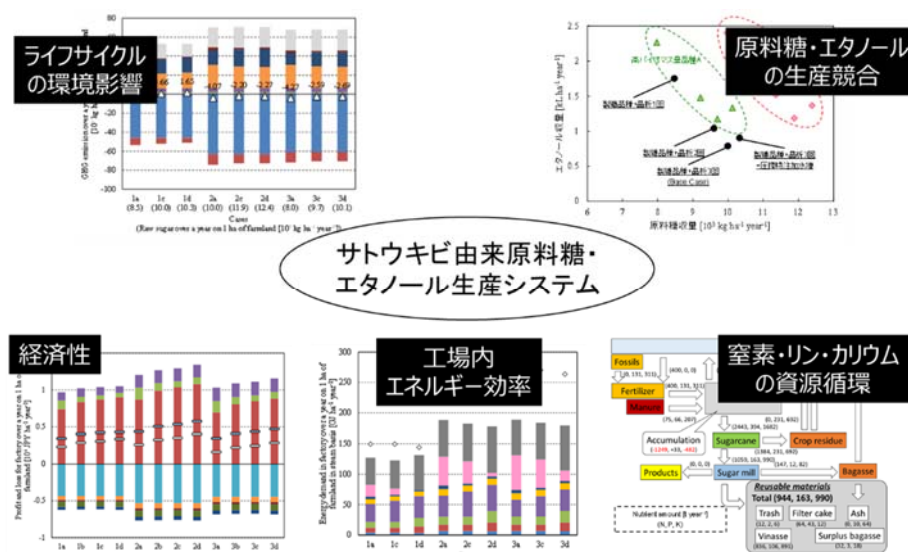
選択型実験の解析結果を示す。調査1と同様、推計モデルは混合ロジットモデルと呼ばれる回答者間の選好の多様性を考慮可能なモデルを採用した。電気料金のみ固定パラメータ、それ以外の変数はランダムパラメータとして推計した。理論通り、電気料金には負の選好が推計された

（1%有意）。発電事業者への選好については、外資系企業へは負の選好が観察されたが（1%有意）、国内企業、地域企業への係数の有意性は得られなかったことから、一般電気事業者への選好と違いはないことを示している。次に、電源構成の結果をみると、原子力発電への負の選好は確認されなかった。一方、2015年に経済産業省から発表された長期エネルギー需給見通しに掲載されている、2030年に類似した電源構成（火力発電、原子力発電、再生可能エネルギー）、および、再生可能エネルギーには正の選好があることがわかった。また、今回の調査で初めて採用した属性である「二酸化炭素排出量」には負の選好が確認された（1%有意）。次に、リテラシーが以上の選好に与える影響についてみると、エネルギーリテラシー（正答数）が低い人に比べて、高い人ほど、以上に述べた選好が強まる傾向が確認された。さらに、地域企業への選好が負であることがわかった。教育や情報発信等によって国民のエネルギーリテラシーが向上した場合、前述したバランスの良い電源構成を選択する可能性が高まりうる。また、発電時に排出される二酸化炭素量が少ない電力を購入する意思が高まり、低炭素エネルギーシステムへの社会受容性は高まる一方で、地域企業によって発電された電気を購入したくない、という結果となった。

（3）シナリオ策定に向けたプレイヤーとのコミュニケーション

消費者選好性、低炭素化効果、社会経済性の各分析結果を開示しながら、種子島と佐渡島におけるプレイヤーとのコミュニケーションを行い、地域において実施可能なシナリオ策定に向けて

必要となる要素が明らかになった。消費者選好性については、特に自治体職員とのシナリオ策定会議において、重要な情報となった。そもそも地域住民がエネルギーに対して抱いているイメージを把握することは、一般的には取り組まれていないことが分かった。若年層の無関心や性年代別傾向、最終学歴の傾向などは、大都市との比較も合わせて解釈することにより、各地域の特徴（リテラシーの度合い）を確認することができた。また、シナリオ策定会議において提示する各種シナリオは各地域の地域資源を最大限に利用し、その上で、域外からの入力を減らし、域外への出力を増やすことをコンセプトとすることが重要であることが、ヒアリングや現場調査から明らかとなった。ただし、上述のリテラシーの度合いも関連し、コンセプトとしての地域資源の利活用は、ただそれだけでは受け入れられないことも明らかとなってきた。そこに、環境性や経済性といった一般的な価値に関する論拠だけでなく、その地域において実施したいと思えるかどうか、という情理(Narrative)といった要素²⁰が必要であることがわかってきた。



図(1)-16 シナリオ策定会議で用いたシミュレータの例：

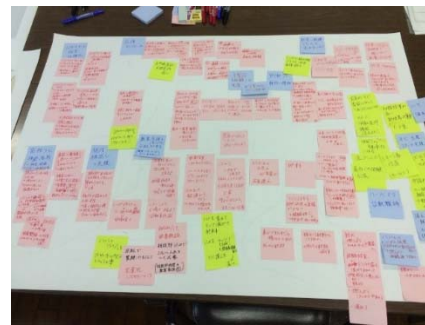
原料糖－エタノール複合生産システムシミュレータ（論文(査読あり)業績¹⁾）

まず、シナリオ策定会議において提示する情報には、各技術・システムの効果を定量的に示すシミュレーションの結果を用いることが有効に働くことを確認した。図(1)-16に、例として、地域産業とのシナリオ策定会議で利用したシミュレーション（業績(査読あり)¹⁾）による計算結果を示す。このシミュレーションにおいては、低炭素化シナリオを実際に導入する場合に、現場のエンジニアや関係する公共団体などのプレイヤーが不安に感じている観点に関する定量的な予測を提示するものである。ここに社会経済的な波及効果（図(3)-6）と、消費者選好性調査で得られた結果を合わせて開示し、シナリオ策定会議を実施した。策定会議における様子を図(1)-17に示す。特定産業の現場エンジニアを中心とした策定会議の例ではあるが、実際には地域全体の課題に対しての問題意識と、当該産業との関係性に関する課題や意見、新規技術・システムの必要性と導入障壁が抽出できた。本研究課題で構築した低炭素化効果や社会経済波及についても強い関心を集め、実際に技術・システムを導入することを前提にした議論を行うことができた。例えば、製糖工場におけるバガスの有効利用においては、売電や売熱による収入の増加と農家への還

元が、人口が減少している種子島における産業規模の維持に不可欠であることが分かった。ここで、社会変化として、2020年に予定されている発送電分離が離島地域における設備投資に対して大きく影響しうることが分かった。元々赤字発電と言われている離島地域において、バガス発電のような地域資源を用いた電力は、低炭素化だけでなく低コスト化に貢献しうるものであり、社会経済への正の波及があることが各分析結果から分かっている。売電や売熱といったエネルギー事業を開始するには、従来の製糖工場の設備では不十分であり、設備投資が必要である。種子島においては製糖工場におけるボイラーやタービンの設備更新が2025年頃を予定している。このときの投資効果の評価において、発送電分離による電力コストと価格の変動が、バガス由来電力の系統連系の事業採算性に大きく影響することが分かった。シナリオ策定会議においても発送電分離と電力コスト・価格の変動が現場の意思決定を変えうるものであることが明らかになっており、不確実性の高い状態での社会実装が困難であることが分かった。

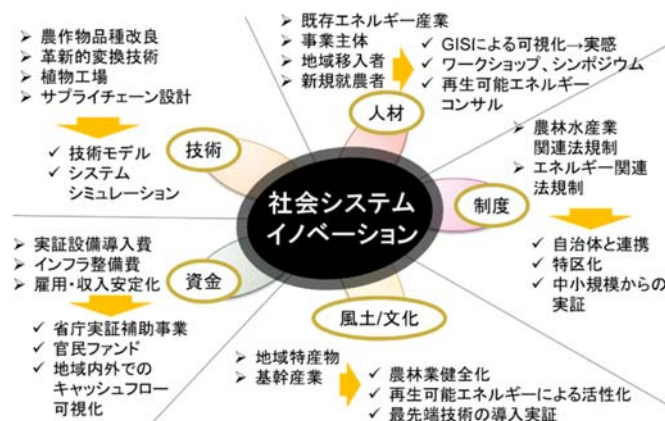


(a) 策定会議の様子



(b) KJ法による課題の抽出

図(1)-17 シナリオ策定会議の例：地域産業における策定会議



図(1)-18 社会実装に必要な要素

プレイヤーとのコミュニケーションを通じて、技術・システムの社会実装を推進できるシナリオを策定するためには、技術・システム導入のコンセプトや効果の可視化以外に配慮すべきことがあることが分かった。未利用資源の有効利用による低炭素化については、程度の大小はあるものの、効果があることを確認できた。社会経済性についても、既存の産業分類では生じていなかったフローを計上するために、産業連関表の拡張を必要とするが、地域にとって正の経済効果があることがわかった。しかし、実際に技術・システムの導入を担う担い手がいなければ、いくら良いとされるものでも実装は容易には進まない。新しい技術やシステムの導入においては既存の

インフラと融和しながら進むシナリオが不可欠といえる。図(1)-18に社会実装に必要な要素と例を示す。技術や資金、制度も必須であるが、風土/文化にあったシステムの提案とそれを支える人材がなければ技術・システムの社会実装は進みえない。特に人材は技術とシステムを担う主体であり、現在のエネルギー産業をはじめ新しいシステムを支えるロールモデルが必須といえる。地域にとって魅力となるような技術・システムがどのような条件であるかを選好性調査などで調べるとともに、コミュニケーション相手のリテラシーに合わせた情報の提供を、ワークショップやセミナーなど、適切な手段によって実施していくことが望まれる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

技術やシステムを社会に実装するための過程を探求することは、科学技術における課題の一つとして認識されてきた²¹⁾。本研究開発では特定地域における低炭素化シナリオを策定するために、地域システムのシナリオ案を生成するための機構としてシナリオ策定会議を実施し、地域のプレイヤーとコミュニケーションを行ってきた。ここで提示されるべき情報として、低炭素化の効果はもちろん、社会経済性、地域にとっての魅力、変化する社会条件に合わせたシナリオ分析結果を示す必要があることを明らかにした。実際に特定の地域産業に対して情報を提供することにより、2050年に向けた地域企業とシステムのシナリオ策定ができることを確認した。このとき、低炭素化効果や社会経済的な波及を定量化するためのシミュレータや手法を開発してきた。科学的な手法によって得られた技術・システムの評価結果を地域のプレイヤーと共有することで地域のシナリオを策定していく本研究開発における活動は、日本学術会議でも紹介できるものとなった。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

平成28年度二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金（再生可能エネルギー電気・熱自立的普及促進事業）・日本環境協会へ、本研究に基づいて提案した、製糖工場排熱を利用した地域熱供給に関する実現性調査のための予算申請を中種子町が行い、採択された。組織された中種子町サトウキビ資源を活用した地域（地点）熱供給の実現性調査業務に伴う検討委員会において研究代表者が委員を務め、委員会において本研究の途中成果を示し、実現可能性に向けた議論を行うことに貢献した。また、シナリオ策定会議の一環として行っていた種子島高等学校の生徒への情報発信とワークショップが基となり、総務省の地方創生・政策アイデアコンテスト2016へ鹿児島県立種子島高等学校が「サトウキビを利用して持続可能な島に～リノベーションの奥義はオーギにあり～」というタイトルでアイデアを提案し、地方大会を突破して九州・沖縄大会へ進出するという、環境に配慮した地域の活動へ貢献できた。地域の活動の活性化については、やはり本研究で提案している種子島の未利用資源の有効利用に関し、西之表市、中種子町、南種子町が合同で「産学公連携による学びの島で夢づくり、生きがいくくり～「自然と共生するスマートエコアイランド種子島」構想の実現に向けて～」というタイトルで第4回プラチナ大賞に申請、優秀賞を獲得した。地域の活動の活発化は環境政策を実施していく上でも重要なものであり、本研究開発による貢献は大きいといえる。

<行政が活用することが見込まれる成果>

様々な技術が開発・提案されていく中で、各地域の特徴、条件に合わせた技術導入シナリオを立てていくにあたり、本研究において実践した、消費者選好性と低炭素化効果、社会経済性の分析を合わせて行うことが有効といえる。今後の行政における低炭素化プロジェクトや技術導入支援、補助などにおいて、同様な分析と地域におけるプレイヤーとのシナリオ策定会議を実施することを義務付ける、あるいは推奨するなどしていくことで、地域別の技術評価・導入を普及展開していくことが期待できる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況（※別添.報告書作成要領参照）

（1）誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) K. Ouchida, Y. Fukushima, S. Ohara, A. Sugimoto, M. Hirao, Y. Kikuchi, *AIChE J.*, 63(2), 560-581 (2017), Integrated Design of Agricultural and Industrial Processes: A Case Study of Combined Sugar and Ethanol Production
- 2) Y. Kikuchi, K. Ouchida, Y. Kanematsu, S. Ohara, Y. Fukushima, *J. Chem. Eng. Jpn.*, 50(4), 297-308, (2017), Retrofit Energy Integration for Selective Fermentation in Cane Sugar Mills under Hot/Cold Energy Availability
- 3) Y. Kanematsu, K. Oosawa, T. Okubo, Y. Kikuchi, *Appl. Energ.*, 198, 160-172, (2017) Designing the scale of a woody biomass CHP considering local forestry reformation: a case study of Tanegashima, Japan
- 4) Y. Kikuchi, M. Nakai, K. Oosawa, Y. Kanematsu, K. Ouchida, T. Okubo, *Comput. Aided. Chem. Eng.*, accepted, A computer-aided socio-technical analysis on national and regional energy systems considering local availability of renewable resources

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 菊池康紀、尾下優子、福島康裕、PETROTECH、39(6)、461-467 (2016)、帰結的ライフサイクル思考に基づく離島地域のエネルギーシステム設計

（2）口頭発表（学会等）

- 1) 中井美和、大久保達也、菊池康紀：2015年度日本応用経済学会 創立10年記念大会（秋季大会）（2015）「家庭需要家のエネルギー選好に関するコンジョイント分析」

- 2) 中井美和：神戸大学大学院経済学研究科 六甲フォーラム（2016）“A Challenge for socio-technological analysis on energy system”
- 3) 菊池康紀：種子島における里山里海セミナー（2016）
【招待講演】「スマートエコアイランド構想と里山・里海管理」
- 4) 菊池康紀：自然と共生するスマートエコアイランド種子島シンポジウム～動き始めた大学等との連携による新たな可能性～（2016）
【招待講演】「種子島におけるスマートエコアイランドロードマップ」
- 5) 菊池康紀：応用物理学会第63会春季講演会（2016）
【招待講演】「供給制約・需要制約下における地域エネルギーシステム:種子島の事例」
- 6) 菊池康紀、地域活性化センター人材養成塾、(2016)、
「農林水産業を中心としたスマートシステムの構想」
- 7) M. Nakai, T. Okubo, Y. Kikuchi. The 6th Congress of the East Asian Association of Environmental and Resource Economics. Fukuoka, Japan, (2016), “How does energy literacy affect consumer preferences towards electricity?: Evidence from Japan.”
- 8) 菊池康紀、日本学術会議シンポジウム「市民と科学者で考えるこれからのエネルギー」、(2016)、
「種子島の事例に見るエネルギーと地方創生と技術導入の試み」
- 9) 中井美和、大久保達也、菊池康紀、環境経済・政策学会 2016年大会、(2016). 「エネルギーリテラシーが選好性に与える影響に関する実証分析」
- 10) 菊池康紀、平成28年度 さとうきび・甘蔗糖関係検討会、(2016)、
「ライフサイクル思考の社会実装:種子島の例」
- 11) 菊池康紀、尾下優子、福島康裕、第12回日本LCA学会研究発表会、C2-13、 (2017)、
「ライフサイクル思考の社会実装:種子島の例」
- 12) 大内田弘太郎、富永華子、牟田佑樹、兼松祐一郎、大久保達也、菊池康紀、第12回日本LCA学会研究発表会、C2-14、 (2017)、
「植物資源利活用に向けた農工横断型プロセスモデリング」
- 13) 大内田弘太郎、藤井祥万、兼松祐一郎、尾下優子、中村遼太郎、陳怡静、福島康裕、中垣隆雄、大久保達也、菊池康紀、化学工学会第82年会、J217、(2017)、
「農工横断型プロセスモデリングによる持続可能な植物資源利活用のためのシナリオ計画」
- 14) 菊池康紀、自然と共生するスマートエコアイランド種子島シンポジウム～持続的な社会へ向け、産学公で広がる連携～、(2016)、
「地域のシナリオ分析と大学の役割」

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 鹿児島県立種子島高校 特別講義「地域の低炭素化シナリオを考える」（2015年7月3日、9月30日、12月19日、2016年1月27日、1月30日、高校2年生 約150名）
- 2) 自然と共生するスマートエコアイランド種子島シンポジウム～動き始めた大学等との連携による新たな可能性～、「種子島におけるスマートエコアイランドロードマップ」（2016）

年3月6日、鹿児島県西之表市、聴講者約130名)

- 3) 環境自治体会議第24回全国大会2016東京会議「企画シンポジウム：スマートエコアイランド種子島構想の実装」(2016年5月29日、芝浦工業大学、参加者約40名)
- 4) 自然と共生するスマートエコアイランド種子島シンポジウム～持続的な社会へ向け、産学公で広がる連携～、「地域のシナリオ分析と大学の役割」(2017年3月11日、鹿児島県西之表市、聴講者約130名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) 九州電力、種子島における再生可能エネルギーの出力制御の指示に関する報告、
<http://www.kyuden.co.jp/9437tanegashima5628.html> (2017年5月8日アクセス)
- 2) Y. Kikuchi, Y. Kanematsu, M. Ugo, Y. Hamada, T. Okubo, J. Ind. Ecol., 20(2) 276-288 (2016),
Industrial Symbiosis Centered on a Regional Cogeneration Power Plant Utilizing Available Local Resources: A Case Study of Tanegashima
- 3) M. Koyama, S. Kimura, Y. Kikuchi, T. Nakagaki, K. Itaoka, J. Chem. Eng. Jpn., 47(7) 499-513 (2014), Present status and points of discussion for future energy systems in Japan from the aspects of technology options
- 4) Y. Kikuchi, S. Kimura, Y. Okamoto, M. Koyama, Appl. Energ., 132 586-601 (2014), A scenario analysis of future energy systems based on an energy flow model represented as functionals of technology options
- 5) J. DeWaters: http://www.clarkson.edu/cses/research/test_form_HS_V3_revised2013.pdf (2009a)
Energy literacy survey: A broad assessment of energy-related knowledge, attributes and behaviors. High School Issue.
- 6) J. DeWaters: http://www.clarkson.edu/cses/research/test_form_MS_V3_revised2013.pdf (2009b)
Energy literacy survey: A broad assessment of energy-related knowledge, attributes and behaviors. Middle School Issue.
- 7) J. DeWaters, S. Powers: The Journal of Environmental Education, 44, 1, 38-55 (2013)
Establishing measurement criteria for an energy literacy questionnaire.
- 8) J. DeWaters, B. Qaqish, M. Graham and S. Powers: The Journal of Environmental Education, 44, 1, 56-78 (2013) Designing an energy literacy questionnaire for middle and high school youth.
- 9) 経済産業省、http://www.emsc.meti.go.jp/activity/emsc_system/pdf/003_05_01.pdf (2016)、電力の小売営業に関する指針(案)。
- 10) The United Nations, <http://www.un.org/sustainabledevelopment/> (2016), Sustainable Development Goals: 17 Goals to transform our world.
- 11) 日本科学技術振興財団、http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2015fy/001105.pdf (2015). 平

- 成26年度エネルギー環境総合戦略調査（エネルギー政策広報のあり方及び評価）報告書
エネルギー教育検討評価委員会報告書「これからのエネルギー教育のあり方」.
- 12) 経済産業省、http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf (2014), エネルギー基本計画.
 - 13) 経済産業省 資源エネルギー庁、<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2016pdf/> (2016)、平成27年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2016）PDF版.
 - 14) S. Ohara, Y. Fukushima, A. Sugimoto, Y. Terajima, T. Ishida, A. Sakoda, *Biomass Bioenerg* 42, 78-85 (2012), Rethinking the cane sugar mill by using selective fermentation of reducing sugars by *Saccharomyces dairenensis*, prior to sugar crystallization
 - 15) 環境省、技術熟度レベル（TRL：Technology Readiness Level）、
https://www.env.go.jp/earth/ondanka/biz_local/26_07/trl_manual.pdf
 - 16) 総務省http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01gyosei02_03000062.html (2015), 住民基本台帳に基づく人口、人口動態及び世帯数（平成27年1月1日現在）参考資料【日本人住民】平成27年住民基本台帳年齢階級別人口（市区町村別）
 - 17) 佐渡市（https://www.city.sado.niigata.jp/admin/stat/m1_kokusei/s_01.shtml#con_dl）平成27年度の年齢（各歳）男女別人口
 - 18) 例えば、Y. Chao, S. Lam: *Environment and Behavior* 43, 1, 53-71 (2011) Measuring responsible environmental behavior: Self-reported and other-reported measures and their differences in testing a behavioral model.
 - 19) 鹿児島県中種子町、<http://town.nakatane.kagoshima.jp/nakatane02/form/toukeiH27.pdf> (2016). 統計なかたね 平成27年度版.
 - 20) 梶川裕矢、日本学術会議公開シンポジウム「市民と科学者で考えるこれからのエネルギー」、(2016)、「エネルギーシステムと社会実装」
 - 21) 茅明子、奥和田久美、社会技術研究論文集、12, 12-22, (2015), 研究成果の類型化による「社会実装」の道筋の検討

(2) エネルギーシステムの低炭素化評価手法の構築

東北大学大学院工学研究科化学工学専攻

福島 康裕

平成27～28年度累計予算額：2,179千円（うち平成28年度：1,129千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

本研究では特に、各種エネルギー技術を導入するときの低炭素化の度合いを定量化するための方法論を開発した。エネルギーシステムの低炭素化を評価するためには、i)今後想定される社会の変化を踏まえた低炭素化の為のシナリオ案を特定し、ii)シナリオで想定する仕組みの変化や技術の導入などによって起きる、電力、熱、液体燃料の供給量・需要量の変化を推算し、iii)この変化が社会の中で発生している温室効果ガス（GHG）の排出にどのように影響するかを計算する。特に本研究では、離島地域における電力の需給構造のシミュレーションと、新規バイオディーゼル製造法のシミュレーションを可能とするモデルを構築し、地域で入手可能な資源からエネルギーを生産・供給したときの低炭素化効果を分析できる手法を構築した。過去の研究で構築済みの電源構成モデルの機能拡張により、例えば、種子島での電力需要（日負荷曲線）について、2016年のデータで春季の週末の需要パターンにおける出力抑制に相当する状況がシミュレート可能となった。現状の太陽光パネルの導入済み発電容量が維持された場合では、将来の人口の減少とともに状況が悪化することなどが示唆された。未利用資源を利用するシナリオの解析を行うと、種子島に関しては、バイオマス発電のポテンシャルが課題になっていて対策を打つ必要があること、佐渡島に関しては、市が策定した太陽光発電の導入シナリオは種子島と同様の接続抑制を引き起こすほど島内グリッドに負荷をかける可能性が高く、実行可能性に疑問があることが判明した。並行して、地域エネルギーシステムにおける地域資源の利用による域内産業への影響を可視化し、ビジョンとして共有するために、表現形式としてサンキー図を応用したマテリアルフロー図を作成した。これにより、低炭素化効果を持ちうる技術をマッピングし、評価結果を共有しやすくできることがわかった。

[キーワード]

低炭素化評価、電源構成モデル、下げ代制約、出力抑制、エネルギー技術

1. はじめに

エネルギーシステムを低炭素化するには、これまで別の目的で実施されてきた省エネルギー、高効率技術の導入などをさらに推進することも有用であるが、これは日本においては既に実施が進んでおり、パリ協定で目標とされているような大幅な削減はこれだけでは達成できない。域内の未利用資源を余すところなく資源化し、利用できるような、革新的な産業体系の構築が必要となっている。そのためには個別の技術の導入だけではなく、資源獲得からエネルギー利用までの統合的なシステムの見直しと、様々なシナリオの検討を可能とすることが必要となる。例えば、地域エネルギーシステムでも様々な特徴があるが、特に離島（種子島、佐渡島）のシステムにお

いて重要な特徴は、本土と送電線が接続されておらず島内でマイクログリッドを形成していることである。この島内マイクログリッドにおいては、電力会社が設置している発電所が大部分の電力を提供している。これら離島の発電所は一般にディーゼルエンジンによるものであり、燃料の運搬コストも高く、発電効率も高くない。また、近年の固定価格買取制度(FIT)によって、太陽光発電や風力発電など、電力会社側ではその出力の制御ができない発電装置の導入が促進され、グリッドの容量に対する割合が増大したことで、電力需給のミスマッチが起きやすい状況である。例えば、種子島においては日本で初めてFITで規定されている「出力抑制」が実施された（2015年5月5日、2016年2月21日）。以降、他の離島においても同様の措置が取られるようになってきている。これらの状況を考慮して低炭素化の評価や技術導入の議論を行うことができるような、技術の統合的なシミュレーション手法が必須といえる。

2. 研究開発目的

本研究では、具体的な地域として種子島と佐渡島を取り上げ、未利用資源である廃棄物やバイオマス、廃熱などを利用するようなエネルギー技術を、地域の境界条件を理解した上でシステム化し、その低炭素化評価ができるような基盤環境の要件定義を行い、実際に、具体的な地域における低炭素化効果を分析することを目的とする。基盤環境としては、地域に存在する未利用資源を分類し、整理できる枠組みと、実際にそれら利用できるエネルギー技術をマッチング可能な知識体系を含んでいる。特に、太陽光や風力による発電技術が増えている中、地域のエネルギーシステムにおける需給構造をシミュレーションするために、既存の電源構成モデル¹⁾を機能拡張し、マイクログリッドにおける需給構造を可視化できるようにする。同時に、木質系バイオマスの発電利用や、廃食用油を用いた新規バイオディーゼル製造法など、地域資源を元にしたエネルギー技術のシミュレーションモデルを開発し、低炭素化効果を解析する。

技術を組み合わせることによって地域資源を利活用できるようになったとき、地域のエネルギーシステムが変化するだけでなく、地域内の資源の流れが変化する。このような変化が域内産業へ引き起こしうる影響は、域内からの調達を増加させうるため、資源の循環を促しうる。しかし、実際に資源を循環しうる技術を導入しても、その効果を共有できなければ、地域のプレイヤーが協働できず、達成できない可能性がある。そこで、地域内で起こりうる変化を可視化し、ビジョンとして共有するために、マテリアルフローの表現形式を、サンキー図を応用して作成する。これにより、地域のエネルギーシステムにおける低炭素化効果だけでなく、実際の資源の流れを可視化し、シナリオ策定会議で利用しやすいものとする。

3. 研究開発方法

本研究を実施する際に、未利用資源にはどのようなものがあるのか、ということを理解する理論的基盤が必要であった。そこで技術や社会の将来的な変化を考慮して、未利用資源の分類を行った。その上で、相互に影響し合うエネルギー技術の低炭素化効果を議論するための基盤ツール（地域マイクログリッド用電源構成モデル）の構築を進めた。電源構成モデルを技術評価に用いる研究は過去にも行われている¹⁾³⁾が、地域マイクログリッドの再生可能エネルギー受け入れの制約条件を反映することができるようなものはまだ開発されていなかった。これを進める上で、具体的な評価事例から汎用のツールを帰納的に見出していくようなアプローチを採用する必要がある。

った。このための対象地域としては、国内の様々な社会的課題とエネルギーに関する課題が山積している離島地域の中から、種子島(鹿児島県・九州電力管内)と佐渡島(新潟県・東北電力管内)を選定した。

(1) 未利用資源の分類

時系列を意識し、技術や社会の変化によって未利用資源が新たに発生する可能性を考慮できるように、下記のような未利用資源の分類を行った。

1.現在の未利用資源

- a) 現状未利用ですぐに利用可能
- b) 既に利用済みだが、利用効率向上によってさらに入手可能となるもの

2.未来の未利用資源

- c) 現状は利用できており未利用ではないが、利用技術の変化により利用できなくなるもの
- d) 現状は発生していなかったが、今後発生するもの

(2) 電源構成モデル

電源構成モデルは、電力グリッドに接続されている複数の発電方式による電力供給に関するスケジューリング問題を解くツールである。既往の研究¹⁾³⁾では、電源構成モデルは発電方式(例:原子力、水力、石油火力、石炭火力、ガスコンバインドサイクル、揚水、太陽光、風力、燃料電池など)ごとの発電量を決定するために用いられ、その出力結果を用いて技術導入の低炭素化効果の評価が行われてきた。

本研究では離島マイクログリッドを対象としているため、現状の発電方式は重油を用いたエンジンによるものが主流であり、構成要素となる発電方式は日本の本土地域ほど多様ではないため、発電燃料および方式ごとの電源構成を求めることは目的とならない。一方で、特に南西諸島地域の離島で全国に先駆けて顕在化しているのが、太陽光や風力発電の導入とこれらを受け入れる能力の不足に起因する出力抑制の実施である。今後同様の問題が佐渡島を始めほかの離島や、本州、九州などの主要電力会社によるグリッドに接続している地域においても発生する可能性がある。日負荷に相応する発電量を供給するときに、各発電機はその定格出力の半分以上の出力を保持することが必要とされている。また、発電機は起動、シャットダウンでエネルギー消費や環境負荷が大きくなるため、一日の中で切り替えを行うことは避けるべきとされている。出力抑制とは、発電機のシャットダウンや定格出力の半分以下の出力での運転を避ける目的で、電力会社による出力制御ができない再生可能エネルギー由来電源からのグリッドへの電力供給を一時的に遮断する措置である。このような措置を取らざるを得ない状況を考慮して技術導入の低炭素化効果の評価を行うためには、前述のような制約条件を加え、再生可能エネルギーの出力抑制の状況を再現し、運転を発電機ごとに分配するような、新たな電源構成モデルが必要であったため、本研究にてこれを開発した。アルゴリズムの概要を以下に示す。

- 1) 発電容量の大きな発電機から順番に並べる、
- 2) 1番目の発電機から n 番目の発電機までの合計発電容量の値が、日負荷曲線の最低需要から水力、小規模水力、波力による発電量を差し引いた値を超えるような n を求める、
- 3) n 番目までの発電機の発電容量合計の半分を、当該日負荷パターンにおける最低出力と定

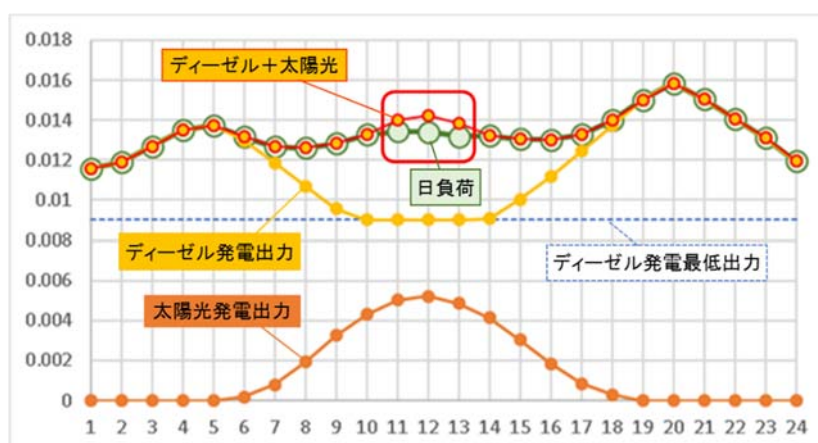
義し、毎時間の重油による発電容量総量に対する制約条件とする

また、同時に既往の研究においては、発電量が需要（負荷）量に等しいという等式制約条件が従来の電源構成モデルでは与えられていたが、これを発電量は需要量以上という不等式制約条件へと変更した。これで、シミュレーション上は需要以上の発電が許されることになる。実際にはこの発電量と需要量との差が出力抑制で接続が遮断されるべき量として、利用されずに捨てられることになる。種子島には周波数調整を目的としてリチウムイオン電池システムが導入され、試験運用が続いているが、数時間単位の蓄電目的には利用されていない。

上述のアルゴリズムを確認するために、表(2)-1にモデルの一部を示す。夏季最大需要時(SPD)の日負荷パターンに対する重油ディーゼルエンジンによる発電の最低出力は12.0 MWとなっている。これは、SPDの最低出力値21.4 MWを超えるためには容量の大きいほうから4つの発電機が必要（ $n = 4, 24.0 \text{ MW}$ ）となり、その半分の発電容量が12.0 MWとなるからである。同様の計算で冬季週末(WWE)の最低出力は9.0 MWと導出される。

表(2)-1 各期における最低出力制約に用いる値の計算例

	Generators	Capacity [MW]	SPD (Min=21.4 MW)	SpWE (Min=14.0 MW)
1	新種子島	6.0		0
2	新種子島	6.0	計 24.0 > 21.4	0
3	新種子島	6.0	$\div 2$	9.0
4	新種子島	6.0	12.0	0
5	種子島第一	4.5		0
6	種子島第一	4.5		0
7	種子島第一	3.0		0
8	種子島第一	3.0		0
9	種子島第一	1.5		0



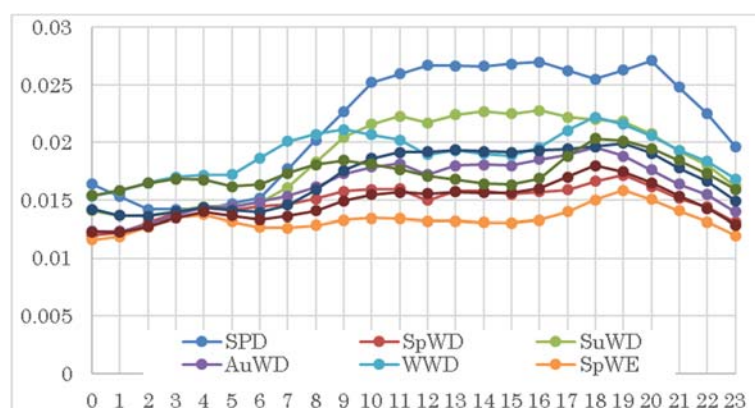
図(2)-1 春季週末（SpWE）における太陽光発電の出力、ディーゼルエンジン発電機の出力と日負荷曲線。青の点線は表(2)-1で計算されたディーゼルエンジン発電機の最低出力。発電機は最低出力まで出力を下げても、太陽光を加えた「ディーゼル+太陽光」は日負荷を超過してしまう。実際には太陽光システムの接続が11-13時は遮断され、需要と供給を一致させる。

実際に2016年のSpWEに関する状況を見てみる(図(2)-1)と、太陽光発電の出力がピークとなる10-13時の間に重油のディーゼルエンジン発電機は最低出力までその出力を落としているが、それでも需要を超えた供給量となってしまうことがわかる。ここで需要を超えた分は太陽光発電の発電分が遮断され、廃棄されてしまう。実際には超過分を正確に把握し廃棄することはできないため、超過量が気象予報などを用いて見積もられ、超過分以上の容量を持つ太陽光発電所が供給を遮断されることとなる。つまり、本モデルで算出される太陽光による発電量の廃棄分の見積もりは、低めの見積もりとなっているといえる。

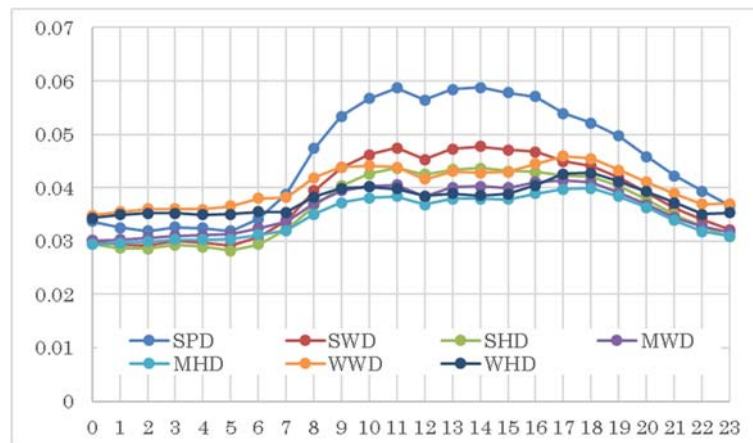
モデルの開発時には評価対象地域の实情に従ってモデルをカスタマイズできるように、年間を構成する日負荷パターン数とその日数、運転を決定する期間やその期間中の時間の刻み幅を変更できるようにモデルの記述に工夫を加えた。表(2)-2に種子島、佐渡島それぞれのモデルにおける基本設定をまとめた。

表(2)-2 電源構成モデルの基本設定

評価対象地域	期間	時刻	年構成日負荷パターン（日数）	発電方式	
				制御対象	制御非対象
種子島	2016-55	2016-20, 2021-25, 2026-30, 2031-35, 2036-40, 2041-45, 2046-50, 2051-55	9パターン 春季平日（62）、春季週末（30）、 夏季最大（1）、夏季平日（63）、 夏季週末（28）、秋季平日（62）、 秋季週末（29）、冬季平日（60）、 冬季週末（30）	重油ディーゼルエンジン	太陽光、バイオマス発電
佐渡島	2011-55	2011-15, 2016-25, 2026-35, 2036-45, 2046-55	7パターン 中間季平日（84）、 中間季週末（38）、 夏季最大（3）、夏季平日（81）、 夏季週末（38）、冬季平日（81）、 冬季週末（40）	重油ディーゼルエンジン	風力、小規模水力、太陽光



図(2)-2 本研究で作成した種子島の日負荷パターン。基準年：2016年、SPD：夏季最大需要日、Sp:春季、Su:夏季、Au:秋季、W:冬季、WD:平日、WE:週末。



図(2)-3 本研究で作成した佐渡島の日負荷パターン。基準年：2011年、SPD：夏季最大需要日、M:中間季、S:夏季、W:冬季、WD:平日、HD:週末。

日負荷パターンについては、種子島については九州電力、佐渡島については東北電力のパターンをもとに分類を行い、それぞれ2016年、2011年のデータを基準として各島の電力消費量に合わせて相似縮小した。それぞれのパターンを図(2)-2、図(2)-3に示す。なお、種子島については、出力抑制日のパターンの画像が公開されており、このパターンと大きな差がないことを確認した。評価期間中の未来の日負荷曲線については、年間の消費電力量をシナリオとして設定し、これに合うように各季節の日負荷曲線を図(2)-2、図(2)-3から縦軸方向に平行移動する方式でモデル化した。

(3) 種子島における技術導入シナリオ

1) 未来の日負荷パターン

まずは国立社会保障・人口問題研究所によるH25.3の人口推計値⁴⁾を基にし、人口当たりの消費電力量を一定と仮定して総需要電力量を算出した。これと2011年の総電力消費量との差を取り、これを年間日数365日で割って、図(2)-2、図(2)-3における日負荷曲線の平行移動量を求めた。

2) 種子島における製糖工場を中心とした導入エネルギー技術

種子島でこれまでに行った調査を元に、基準シナリオと低炭素シナリオを表(2)-3のように設定した。サトウキビ圃場では、現状のNiF8(農林8号)から、高バイオマス品種である農林18号へと移行する。この場合、製糖期間が伸びるため、搾汁は還元糖率が高くショ糖の晶析が困難となるので、これに伴い逆転生産プロセスを導入し、製糖量を最大限確保する。この間、バガスボイラーから供給される蒸気とそれを用いて作られる電力により製糖工場内のエネルギー需要は全て賄われるが、低炭素シナリオにおいては余剰バガスが発生するため、余剰の電力と熱を確保することができる。電力は売電し島内グリッドに供給される。またエタノールは島内でガソリン代替燃料として用いられる。圃場と製糖工場のマテリアルバランス、エネルギーバランスは農工横断型のサトウキビ栽培・製糖工場シミュレータ(業績1)) (図(2)-4)を開発し、これを用いて計算した。

非製糖期間については余剰バガスと森林から伐採・搬出した木材をチップ化したものをバガス

ボイラーに投入することで、発電を継続する。その際に廃熱も発生し続ける。つまり、従来は完全に停止していた非製糖期間のボイラー、発電機を稼働させることになる。ただし、メンテナンス期間1ヶ月は確保する。

表(2)-3 基本シナリオと低炭素シナリオ

		基準シナリオ	低炭素シナリオ
サトウキビ品種		農林8号	農林18号
圃場面積		2500 ha	2500 ha
投入サトウキビ茎重量		198261 t/y	256414 t/y
投入木質チップ量		0 t-dry/y	3000 t-dry/y
粗糖生産量		26861 t/y	33026 t/y
エタノール生産量		0 kL/y	1137 kL/y
製糖工場のタービン・発電機		従来型	高压型
逆転プロセス ⁵⁾⁻⁷⁾ 導入		なし	あり
日数	製糖期	142日	187日
	非製糖期	192日	147日
	定期修繕	31日	31日
余剰電力売電	製糖期	0 kW	3563 kW
	非製糖期(バガスのみ)	0 kW	991 kW
	非製糖期(木質チップも利用)	0 kW	1773 kW

製糖期、非製糖期日数は処理量と処理容量より計算された数値

粗糖生産量、エタノール生産量、余剰電力売電量はシミュレータ（業績1）により計算された数値



図(2)-4 サトウキビ栽培・製糖工場シミュレータ（業績1）の概要

3) 廃熱を利用したバイオディーゼル燃料製造

バイオディーゼル燃料(BDF)製造は、イオン交換樹脂法⁸⁾を用いて島内1箇所(図(2)-4)で行う。この1箇所は製糖工場であり、従来は製糖期間のみ廃熱が利用可能であるが、低炭素シナリオにおいては、非製糖期間も発電は継続するため年間を通じて廃熱の利用が可能となっている。この方法を用いない場合の想定であるが、従来法ではBDFの品質が安定せず、現在主流となってきているコモンレール方式のディーゼル車への給油ができない。このため、標準シナリオについてはBDF生産の事業の停止、低炭素化シナリオは年間を通じた廃熱の利用を行うイオン交換樹脂法によるBDF事業の継続、と設定した。BDF生産量については現状の廃食油年間収集量を元に、31,000 Lとした。なお、製造拠点を分散化し、イオン交換樹脂の再生設備のみ集中化した方式も採用可能であるため、参考までにそのような配置を採用した場合の計算も行った。



図(2)-5 種子島の廃食用油の分布（地図中の点）と、バイオディーゼル製造拠点、配布拠点の地理的分布

4) 木質チップ製造・利用

種子島の森林は近年内に伐採を進め、樹齢分布を適正化することで保水力を改善し、土壌の維持をはかり、炭素固定能力を向上していかなくてはならない。そこで、西之表市にあるチップ工場で木質チップを生産し、輸送（32 km, 帰り便は空）して非製糖期間の製糖工場のボイラーで燃料として利用し、発電を行う。

切り出した木材の輸送の際には積載率40%で10tトラックを用いる。燃費は $0.08 \text{ L t}^{-1} \text{ km}^{-1}$ を用いた。チップの嵩密度は 0.24 t m^{-3} とし、積載率70%（袋詰めして積載）、燃費は $0.049 \text{ L t}^{-1} \text{ km}^{-1}$ と想定した。これらの燃費は、「物流分野のCO₂排出量に関する算定方法ガイドライン」⁹⁾に基づいて算定した。

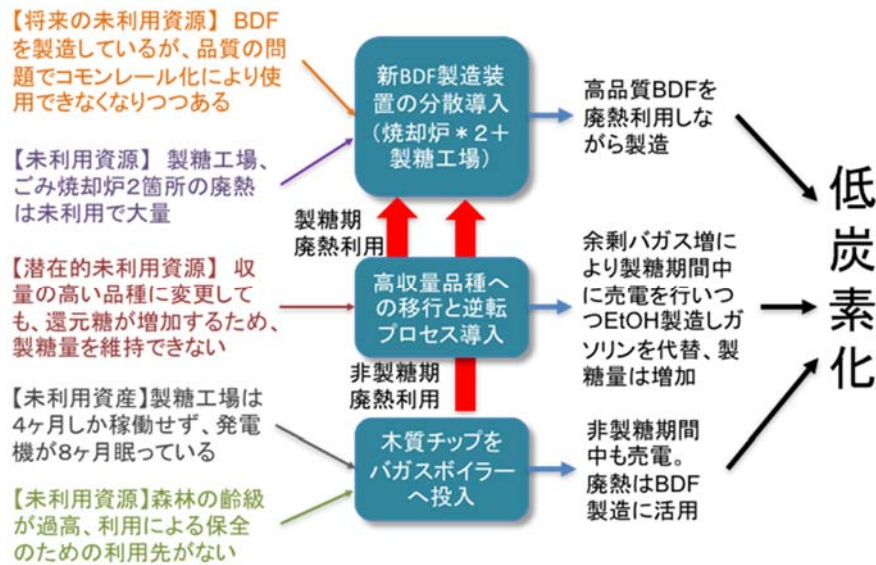
（4）佐渡島での技術導入シナリオ

佐渡島は一市二町の複数の自治体で構成される種子島と違い、平成16年に10市町村が合併して誕生した佐渡市だけで構成されている。その佐渡市はエネルギービジョンを策定し、公開している。そこで本研究では佐渡島用にカスタマイズした電源構成モデルを用いて、このエネルギービジョンの通りに太陽光発電の技術導入が進められた場合、どのような低炭素化効果が得られるかを検討した。

4. 結果及び考察

（1）種子島の低炭素化シナリオの効果

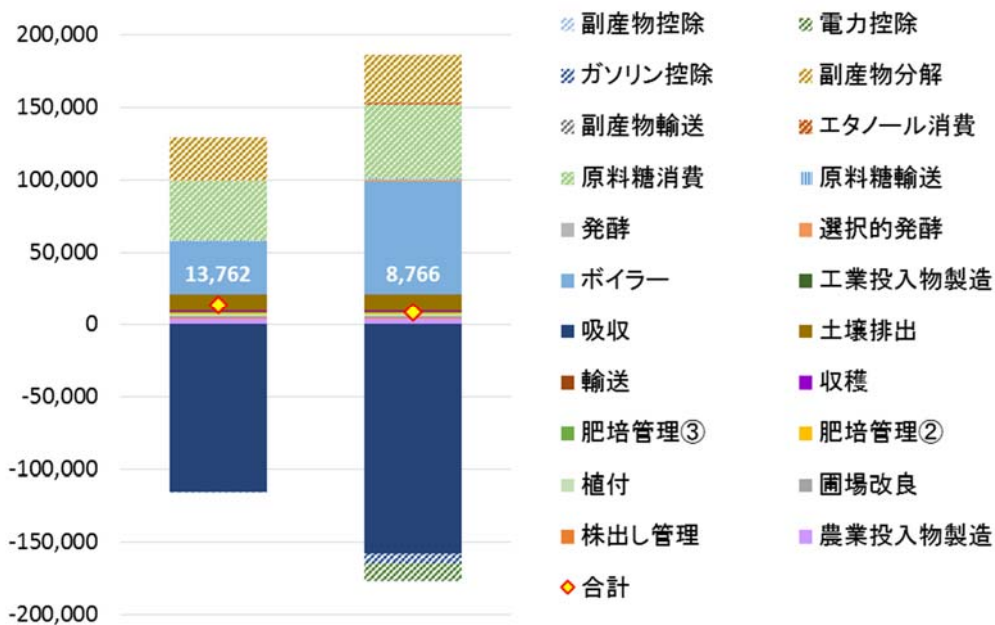
未利用資源の分類を踏まえ、またシナリオ策定会議等を通じて得られた地域の固有の課題やそのほかの事情などの境界条件を考慮して、下図のようなシナリオが得られた。これらの定量的な議論を、開発したモデルを用いた計算により行った。



図(2)-6 未利用資源に着目して策定された低炭素化シナリオ

1) サトウキビ産業

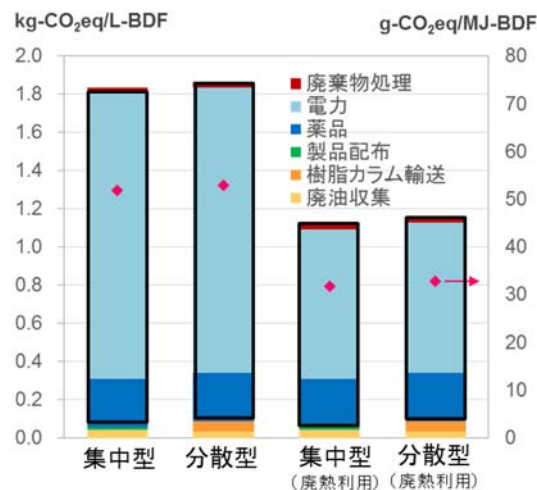
サトウキビの栽培から原料糖生産までを含めたサトウキビ産業由来のGHG排出削減量は、4,996 t-CO₂ eq/yとなった (図(2)-7)。グラフ上では、「吸収」(サトウキビ成長過程でのCO₂吸収)による削減と、「ボイラー」(バガスボイラーでの燃焼によるCO₂排出)による増加分が大きく見えるが、この二つはほぼ相殺される。上記の削減量の多くは、売電による「電力控除」とエタノールのガソリン代替効果(「ガソリン控除」)に起因している。発電システムを更新して高压式に変更した効果が大きく、これがなければこのカテゴリのGHG排出削減は達成されていない。



図(2)-7 基準シナリオ (左) と低炭素シナリオ (右) におけるサトウキビ産業由来のGHG排出量の比較 [t-CO₂ eq/y/2500 ha]

2) バイオディーゼル製造

本研究で構築したモデルでは、軽油の製造、燃焼に伴う累積原単位が82.3 g-CO₂eq./ML、軽油とバイオディーゼルの発熱量がそれぞれ38.5 MJ/Lおよび24.0 MJ/Lであった。このとき、図(2)-8に示す通り、バイオディーゼルの製造原単位がシミュレーション結果として得られた。これを基に試算すると、バイオディーゼルを軽油の代わりに熱量ベースで1 L製造、代替利用した場合、GHG排出削減効果は約27 t-CO₂ eq/yと試算された。集中型と分散型の排出量の差は、種子島を対象とした場合には輸送距離が短いため廃熱利用の効果に比べて小さく、廃熱利用の有無による影響が大きいことがわかった。



図(2)-8 イオン交換樹脂法によるBDF製造のGHG排出量変化

3) チップの輸送

木材のチップ工場までの輸送、およびにチップ工場から製糖工場までの輸送に係る燃料消費から計算されたGHG排出量は約80 t-CO₂/yであった。バイオディーゼル事業による排出削減の3倍程度のGHG排出量増加に相当するが、製糖工場における削減量からは依然2桁低い結果であった。

4) 発電控除分の検討

上記の製糖工場の結果は売電分を重油ディーゼルエンジンの運転を回避したものとして排出回避量を算定していた。しかし、この売電の出力抑制への影響に注意する必要がある。出力抑制は、現在は主に製糖期間に起きている。そこで、低炭素化シナリオにおいて以下のケースを検討した(表(2)-4)。

- 非製糖期間中の24時間にわたって平均的な1,773 kWの出力が出力抑制に影響するかどうか
- 製糖期間中の24時間にわたって平均的な3,563 kWの出力が出力抑制に影響するかどうか

電力広域的運営推進機関(OCCTO)のガイドラインによると、太陽光発電の出力抑制よりも先にバイオマス発電設備の出力抑制指令が出されることになっている。つまり、現在出力抑制指令によって捨てられている太陽光発電による電力を捨てずに、製糖工場からのバガス・チップ混焼ボイラー+蒸気タービンからの電力の出力を下げることになる。

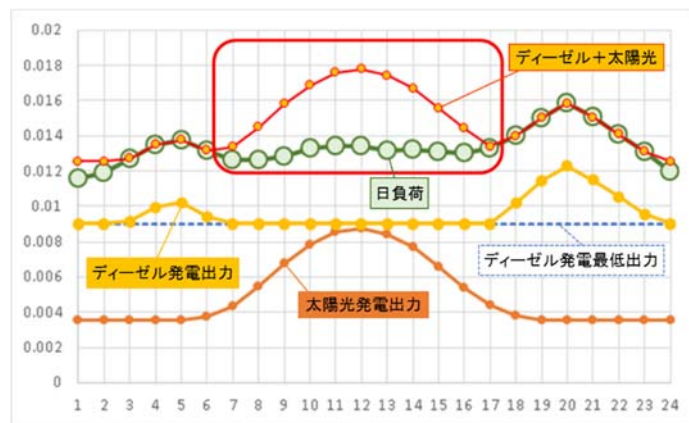
表(2)-4 本報告で設定した低炭素化シナリオでの、製糖工場に設置されたバイオマス発電が各季節においてグリッドに電力供給できない時間数。

	a) 非製糖期間(1,773 kW)	b) 製糖期間(3,563 kW)
2016	SPD(4h), AuWE(2h)	SpWD(5h), WWD(2h), SpWE(10h)
2021	SPD(6h), SuWD(4h), AuWE(5h)	SpWD(7h), WWD(5h), SpWE(12h), WWE(4h)
2026	SPD(7h), AuWD(2h), SuWE(4h), AuWE(7h)	SpWD(9h), SpWE(7h), WWE(6h)
2031	SPD(8h), AuWD(6h), SuWE(7h), AuWE(5h)	SpWD(12h), WWD(3h), SpWE(9h), WWE(7h)
2036	SPD(6h), SuWD(4h), AuWD(7h), SuWE(9h), AuWE(7h)	SpWD(7h), WWD(5h), SpWE(24h), WWE(9h)
2041	SPD(7h), SuWD(6h), AuWD(5h), SuWE(6h), AuWE(7h)	SpWD(9h), WWD(7h), SpWE(24h), WWE(6h)
2046	SPD(9h), SuWD(8h), AuWD(7h), SuWE(7h), AuWE(10h)	SpWD(24h), WWD(9h), SpWE(24h), WWE(8h)
2051	SPD(10), SuWD(4h), AuWD(9h), SuWE(9h), AuWE(24h)	SpWD(24h), WWD(24h), SpWE(24h), WWE(10h)

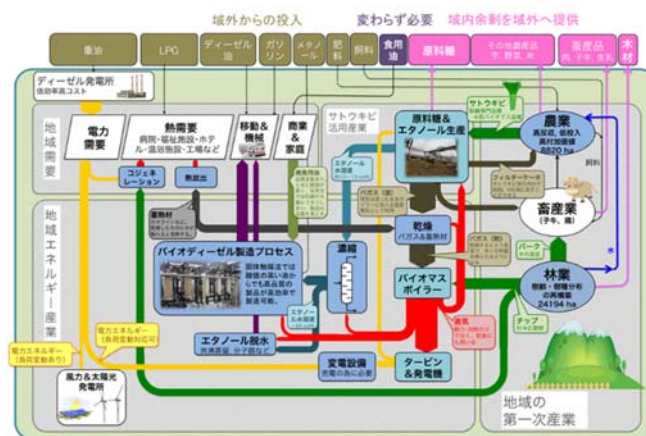
表(2)-4に明らかなように、先に評価した低炭素化ポテンシャルは過大評価であり、実際には発電所における重油の使用量削減効果は評価結果を下回る可能性が高い。例えば2016-20年においては、日負荷パターンとして設定した9期のうち5期において、製糖工場のバイオマス発電所からグリッドへの電力供給ができない時間が数時間発生する。図(2)-9に図(2)-1と対応した状況を示す。図(2)-1とくらべると、下げ代制約による出力抑制が生じてしまう時間帯が増えていることがわかる。これらの時間帯には、バイオマス発電はグリッドに電力を供給することはできないと考えるべきである。ただし、これは製糖工場における発電が電力会社のコントロールを受けず、一定に発電するか完全に停止するかのどちらかで運転をするという前提に立った試算である。電力市場自由化とともに複数の発電業者間での電力融通の制御機構が高度化すれば、接続不可能な時間を短縮できる可能性が高い。

売電による低炭素化効果は、今回検討したシナリオの中でも最も重要な位置を占めるが、そのポテンシャルはマイクログリッドの下げ代制約に大きく依存することが明らかとなった。従って、デマンドレスポンスを導入する、数10MW程度の蓄電システムを導入する、昼間に電力を用いる産業を誘致する、発電所のディーゼル発電機を小型化する、などの対策をとることが、燃料の移入と重油ディーゼルエンジン発電に基づいたエネルギー供給構造への依存を下げ、低炭素化ポテンシャルを最大化していくことにつながる。今回想定したシナリオを強化、改良するうえで重要な示唆が得られた。

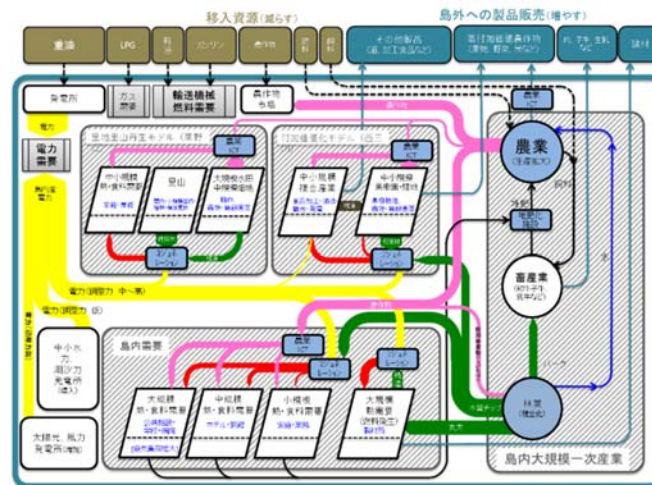
これらの結果を元に、種子島の今後のエネルギービジョンを、サンキー図の表記方法を応用して描いた(図(2)-10)。このような図を用いて地域のステークホルダーにシナリオの意義を紹介していくことで、合意形成を進め、システム全体の革新を行っていくことができると考えている。なお、この図には本報告で示した技術以外のシナリオも含まれており、今後これらも含めた計算を進めていき、図だけでなく数値も提供できるようにしていくことが肝要であろう。



図(2)-9 2016-20の春季週末 (SpWE) における太陽光発電の出力、ディーゼルエンジン発電機の出力と日負荷曲線。青の点線は表(2)-1で計算されたディーゼルエンジン発電機の最低出力。発電機は最低出力までその出力を下げても、太陽光を加えた「ディーゼル+太陽光」は日負荷を超過してしまう。その時間帯が図(2)-1に比して長くなってしまっている。この時間帯には実際にはバイオマス発電は接続をすることができない。



(a) 種子島

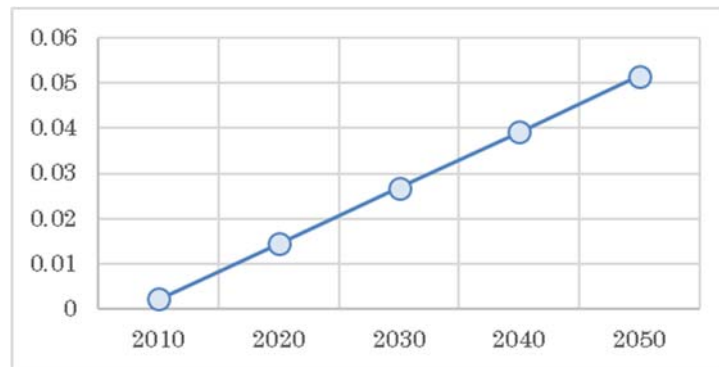


(b) 佐渡島

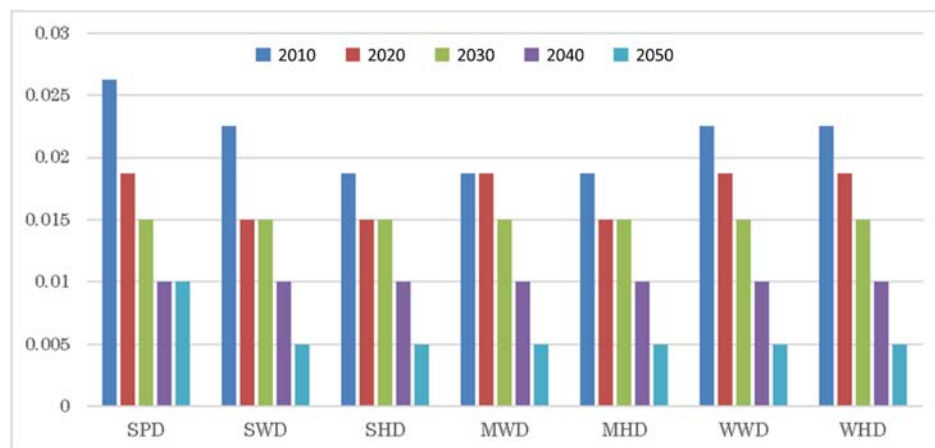
図(2)-10 エネルギービジョンの可視化

(2) 佐渡島の低炭素化シナリオの効果

佐渡島の新エネルギービジョンに則って、太陽光発電を導入するシナリオを、電源構成モデルを用いて検証した。太陽光発電の導入の推移は図(2)-11のようになっている。また、未来の最低出力はどの季節においても下がってきている。



図(2)-11 佐渡のエネルギービジョン¹⁰⁾による太陽光発電の導入見込み.縦軸はGWp



図(2)-12 電源構成モデル（佐渡版）で用いた各季節における最低出力の推移. どの季節においても、最低出力は低下していく見込みであり、需要規模に対して太陽光の割合が大きくなっていくことがわかる

表(2)-5 太陽光発電の出力抑制見込み状況

	出力抑制の発生期間
2010	
2020	
2030	
2040	SPD(4h)
2050	SPD(8h), SuWD(2h), MWD(1h), MWE(2), SuWE(4h), WWE(2h)

電源構成モデルによって明らかになった、将来起こりうる佐渡島における出力抑制の状況の予測値を表(2)-5にまとめる。種子島よりも日照条件が悪いことからこれまでに導入が進みづらかった分、太陽光・風力発電の設置余力としての下げ代の条件は、佐渡島の方がよい。この佐渡島においても、現行のエネルギービジョンは島内電力グリッドの下げ代制約や人口の減少などを考慮して解析すれば、2040年頃から季節によっては出力抑制の必要性が出てくる可能性があることが

わかった。FIT制度で電力が固定価格で買い取られるのは20年間であることから、2020年までにはこの導入シナリオの見直しを進め、蓄電システムを並行して導入することなどが必要である。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

エネルギー関連技術、未利用資源のエネルギー利用技術について、電力の下げ代制約などを考慮してその低炭素化効果を検討することができるようになった。自治体が低炭素化のビジョンを作成する際に、実現不可能なビジョンを描いてしまうことを防ぎ、数ある選択肢の中から有望な組み合わせを検討していくための基盤モデルを構築することができた。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

まだ、モデルの妥当性の精緻な検証を進める必要はあるが、離島地域におけるエネルギーシステムの議論に資する評価システムを構築することができた。ここで定量的かつ現実の制約条件を踏まえて設計された地域エネルギーシステムを元に、課題(3)のツールを用いて社会経済性をより精緻に検討できるようになった。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) K. Ouchida, Y. Fukushima, S. Ohara, A. Sugimoto, M. Hirao, Y. Kikuchi, *AIChE J.*, 63(2), 560-581 (2017), Integrated Design of Agricultural and Industrial Processes: A Case Study of Combined Sugar and Ethanol Production
- 2) Y. Kikuchi, K. Ouchida, Y. Kanemitsu, S. Ohara, Y. Fukushima, *J. Chem. Eng. Jpn.*, 50(4), 297-308, (2017), Retrofit Energy Integration for Selective Fermentation in Cane Sugar Mills under Hot/Cold Energy Availability

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 菊池康紀、尾下優子、福島康裕、*PETROTECH*、39(6)、461-467 (2016)、帰結的ライ

フサイクル思考に基づく離島地域のエネルギーシステム設計

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) 福島康裕、第26回化学工学一関セミナー 「技術と化学の融合」(2016)
「地域バイオマス資源の利活用システムで生きる技術とその評価の考え方」
- 2) 福島康裕、日本学術会議 公開シンポジウム「分散型再生可能エネルギーの可能性と現実」(2017)、 「種子島におけるバイオマスエネルギー開発の取り組み」
- 3) 菊池康紀、尾下優子、福島康裕、第12回日本LCA学会研究発表会、C2-13、 (2017)、
「ライフサイクル思考の社会実装:種子島の例」
- 4) 福島康裕、小原聡、大内田弘太郎、菊池康紀、第12回日本LCA学会研究発表会、C2-15、
(2017)
「砂糖・バイオエタノール逆転生産プロセスの導入によるGHG排出削減効果」
- 5) 中村遼太郎、大内田弘太郎、菊池康紀、小原聡、大野肇、福島康裕、第12回日本LCA学会研究発表会、C2-16、 (2017)、 「気象変動を考慮したバイオマス利用システムの製品LCAのあり方」
- 6) 大内田弘太郎、藤井祥万、兼松祐一郎、尾下優子、中村遼太郎、陳怡靜、福島康裕、中垣隆雄、大久保達也、菊池康紀、化学工学会第82年会、J217、(2017)、 「農工横断型プロセスモデリングによる持続可能な植物資源利活用のためのシナリオ計画」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 鹿児島県立種子島高校 特別講義「地域の低炭素化シナリオを考える」 (2015年7月3日、9月30日、12月19日、2016年1月27日、1月30日、高校2年生 約150名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Y. Fukushima, M. Shimada, S. Kraines, M. Hirao, M. Koyama: Journal of Power Sources 2004 131(1-2), 327-339. Scenarios of solid oxide fuel cell introduction into Japanese society.
- 2) Y. Fukushima, Y.-M. Kuo: Journal of Energy Engineering 2008 134(2), 58-62. Evaluation of GHG emission reduction potentials of PV system considering power mix shifts.
- 3) Y.-M. Kuo, Y. Fukushima: Journal of the Air and Waste Management Association 2009 59(3), 360-372. Greenhouse gas and air pollutant emission reduction potentials of renewable energy - Case studies on photovoltaic and wind power introduction considering interactions among

technologies in Taiwan.

- 4) 国立社会保障・人口問題研究所、<http://www.ipss.go.jp/syoushika/tohkei/Mainmenu.asp>、(2017)、将来推計人口・世帯数
- 5) T. Kato, S. Ohara, Y. Fukushima, A. Sugimoto, T. Masuda, T. Yasuhara, H. Yamagishi: Journal of Biosciences and Bioengineering, 2016, Vol.122(1), 58-63, Development of flocculent *Saccharomyces cerevisiae* strain GYK-10 for the selective fermentation of glucose/fructose in sugar mills.
- 6) S. Ohara, T. Kato, Y. Fukushima, A. Sakoda: Journal of Biosciences and Bioengineering 2013 115 (5), 540-543, Selective ethanol production from a saccharide mixture.
- 7) S. Ohara, Y. Fukushima, A. Sugimoto, Y. Terajima, T. Ishida, A. Sakoda: Biomass and Bioenergy, 42, 78–85 (2012). Rethinking the cane sugar mill by using selective fermentation of reducing sugars by *Saccharomyces dairenensis*, prior to sugar crystallization
- 8) 北川尚美、大柳友克、博吉汗斯琴高娃、中島一紀、丹羽忠夫、南一郎、米本年邦: 化学工学論文集、42(1)、(2016)、30-36、遊離脂肪酸含有量の高い植物油を原料利用できるイオン交換樹脂法を用いたパイロットスケールの高品質バイオディーゼル製造装置の開発。
- 9) 経済産業省・国土交通省: 物流分野のCO₂排出量に関する算定方法ガイドライン、<http://www.greenpartnership.jp/pdf/co2/co2brochure.pdf>
- 10) 佐渡市、https://www.city.sado.niigata.jp/admin/vision/n_ene06/pdf.shtml (2006)、市政概要 佐渡市地域新エネルギービジョン

(3) エネルギーシステムの社会経済性評価手法の構築

神戸大学大学院海事科学研究科 グローバル輸送科学講座 尾下 優子

平成27～28年度累計予算額：2,747千円（うち平成28年度：1,304 千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

地域への低炭素化技術・システムの導入、持続的な運用のためには、地域にとって社会経済性があるシステムの構築が必要である。本研究では、種子島と佐渡市の2つの島嶼地域を対象に、地域資源を利用したエネルギーシステム（以下、地域エネルギーシステム）の社会経済性を評価する手法を構築した。具体的には、地域エネルギーシステム導入シナリオの評価が可能な地域産業関連表を作成・拡張する方法を構築し、分析を行った。太陽光発電、バイオマス発電、バイオエタノール生産、バイオディーゼル生産などの地域エネルギーシステムの社会経済性を分析した結果、主に電力やガソリン代替による化石資源の地域外からの移入額を削減し、地域内産業の域内波及力を高める効果がある一方で、既存電力の生産額の減少による島内産業の生産額の減少や、割高な自然エネルギーの導入による電力単価の上昇に伴う各産業の付加価値額の減少、新エネルギー産業の導入による材料移入額の増加などが生じ、システム導入によって創出される島内生産額の増加が十分に大きくない場合や導入電力の単価が高い場合は、社会経済性が負値になる可能性が示唆された。地域エネルギーシステムの社会経済性を確保するためには、安価に利用できる1次・2次産業の副産物や、域内波及力が高い産業の製品を燃料として利用するシステムを選択・構築すべきである。本研究で構築された手法により、地域エネルギーシステムの直接間接的な正と負の効果を定量的に計測し、総合的な社会経済性を評価できるようになった。さらに、結果を可視化し、地域の利害関係者と共有することで、意思決定を援助し得るだけでなく、より良い地域エネルギーシステムを構築するための具体的な改善策の提案にも寄与し得ることが確認された。

[キーワード]

社会経済性、地域経済循環、地域産業関連表、キャッシュフロー

1. はじめに

持続可能な低炭素社会の実現のためには、再生可能資源を最大限活用できる技術やシステムの構築・導入が不可欠である。しかし、低炭素化効果だけでは、地域の意思決定を変えることは難しく、持続的な運用のためにも、環境と地域への社会経済性がWin-Winのシステムを作る必要がある。また、システムの導入に際し、政策決定者・システム導入事業者・影響を受ける事業者等の利害関係者を生み、その各関係者への影響が不明確なため、合意形成を困難にし、システムの実装を阻害する要因となっている。そこで本研究では、少子高齢化や雇用問題などが先鋭化し、エネルギー価格も割高である一方、バイオマスなどの再生可能資源が豊富な島嶼地域として種子島と佐渡島を対象に、地域エネルギーシステムの社会経済性を評価する手法を構築する。

2. 研究開発目的

当該地域への新技術の導入や政策変換による経済波及効果や雇用創出効果などの社会経済性を評価する方法のひとつに、産業連関表を用いた方法がある。産業連関表とは、1年間に行われた財・サービスの産業間取引を行列形式で示した表であり、列方向に各産業の費用構造（生産技術構造）の情報を、行方向に販売構造の情報を持つ。日本では国内の生産活動をまとめた全国版の産業連関表（以下、全国表）のほか、各都道府県の産業連関表（以下、都道府県表）、一部市町村の表が作成されているが、ほとんどの地域では未整備である。各産業の投入構造・産出構造・消費構造の平均値である全国表や都道府県表では、小地域の経済構造や特殊性を表現することは難しく、地域エネルギーシステムの導入による社会経済性の分析を行い、結果を地域に還元することによって、意思決定にイノベーションを起こすためには不十分である。そのため、市町村レベルの産業連関表（以下、地域産業連関表）の整備や、社会経済性の分析結果を可視化する手法の開発が必要である。本研究の対象地域である種子島は、1市2町からなる島嶼地域であり、産業連関表は整備されていない。一方、佐渡島では佐渡市が整備した佐渡市産業連関表（2000年、55部門）（以下、既存佐渡表）が入手可能であるが、地域エネルギーシステムの評価を行うためには改良・拡張が必要である。本研究の目的は以下の通りである。

- ▶ 統計データや調査を基にした、地域エネルギーシステム導入の社会経済性を評価可能な種子島産業連関表（以下、種子島表）の作成および既存の佐渡表の改良
 - ▶ 地域エネルギーシステムのシナリオに応じた種子島表、佐渡表の拡張
 - ▶ システム導入の社会経済性を評価・可視化するための解析手法の構築および分析
- これらを行うことで、地域エネルギーシステムの社会経済性評価手法の構築を目指す。

3. 研究開発方法

（1）地域産業連関表の作成・拡張方法

1) 種子島表の作成・拡張方法

地域産業連関表を作成する方法として、アンケート調査や現地調査を基に積み上げ式で作成するサーベイ法と、公開されている統計データと既存の産業連関表から推計するノンサーベイ法¹⁾が存在する。サーベイ法の方がより詳細で正確な産業連関表を作成することができるが、膨大な時間・労力・コストが必要なため、様々な地域への展開が可能な分析フレームワークの構築を目的としている本研究では適切ではない。しかし、公開されている統計データのみを使用するノンサーベイ法では、地域エネルギーシステムの導入による社会経済的な影響を分析するためには不十分である。そこで本研究では、ノンサーベイ法を基礎としつつ、統計の個票情報、現地調査などを用いて、地域エネルギーシステムの社会経済性を評価可能な拡張型種子島表を作成する。新設部門は、現地調査とシミュレーション結果（テーマ（1）論文(査読あり)業績¹⁾）、全国表、鹿児島県表、再生可能エネルギー部門拡張産業連関表（REFIO：Renewable Energy-Focused Input-Output Table）^{3), 4)}などを用いて推計した。

2) 佐渡表（改良版）と拡張型佐渡表の作成

既存佐渡表は、投入産出構造のバランスが取れていないことや、上記のノンサーベイ法を用い

て新潟県産業連関表（以下、新潟県表）を基礎として作成されているため、佐渡市の特徴が十分に反映されていないという課題がある。例えば、地域エネルギーシステムの社会経済性を評価するために重要な「電力」部門は「電力・ガス・熱供給」部門に統合されており、東北電力の電源構成に基づいて推計されているため、実態とかい離している。そこで本研究では、まず佐渡表の投入産出構造のバランスの修正を行ったうえで、「電力・ガス・熱供給」部門を「電力」「ガス・熱供給」部門に分割し、改良を行った。また、佐渡島のケーススタディで評価対象とする「太陽光発電」、「木質バイオマス発電」部門を、REFIO等を用いて推計・新設した拡張型佐渡表を作成し、地域エネルギーシステムの社会経済性の評価を行った。

（２）地域産業連関表を用いた社会経済性評価方法

産業連関表は、産業*i*と産業*j*の取引額である中間需要（投入）額を示した行列 $\mathbf{Z} = (Z_{ij})$ 、産業*i*の製品に対する最終需要項目*k*の域内の最終需要額を示した行列 $\mathbf{F} = (F_{ik})$ 、産業*i*の製品の移輸出額を示したベクトル $\mathbf{E} = (E_i)$ 、産業*i*の製品の移輸入額を示したベクトル $\mathbf{M} = (M_i)$ 、産業*i*の生産額を示したベクトル $\mathbf{X} = (X_i)$ 、産業*i*の付加価値項目*l*の額を示した行列 $\mathbf{V} = (V_{lj})$ 、産業*j*の生産額を示したベクトル $\mathbf{Y} = (Y_j)$ から成り立っており、 $i = j$ のとき、 $X_i = Y_j$ である。この産業連関表を用い、産業の連関を明らかにするのが産業連関分析である⁵⁾。産業*i*の製品に対する域内の最終需要額の合計を $\mathbf{FD} = (FD_i) = \sum_k F_{ik}$ 、域内外の最終需要ベクトルを $\mathbf{Y} = (Y_i) = \mathbf{FD}_i + \mathbf{E}_i$ とすると、産業連関表の需要（行）方向から、以下のバランス式を得ることができる。

$$\mathbf{X} = \mathbf{Z} + \mathbf{Y} \quad (3)-1$$

各部門の生産額は、産業に需要された中間需要額と、最終消費者に需要された最終需要額の合計であることを(3)-1式は表している。このとき、各部門が1単位の生産を行うために必要な材料投入を表した投入係数行列 \mathbf{A} を用いて、(3)-1式を整理すると、(3)-2式が得られる。

$$\mathbf{X} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{Y} \quad (3)-2$$

$(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ はレオンチェフ逆行列であり、級数展開すると(3)-2式は以下の(3)-3式で表される。

$$\mathbf{X} = \mathbf{I}\mathbf{Y} + \mathbf{A}\mathbf{Y} + \mathbf{A}^2\mathbf{Y} + \mathbf{A}^3\mathbf{Y} \quad (3)-3$$

\mathbf{I} は各製品への最終需要額（1次波及）、 $\mathbf{A}\mathbf{Y}$ は最終需要された製品の生産に必要な材料製品の需要額（2次波及）、 $\mathbf{A}^2\mathbf{Y}$ はその材料製品の生産に必要な材料製品の需要額（3次波及）を表している。このように、レオンチェフ逆行列は、ある製品が1単位需要された時に、各産業の製品が直接間接的かつ最終波及的にどれだけ必要になるかを示している。この合計値を波及効果と呼ぶ。レオンチェフ逆行列を列方向に足したものは当該部門の影響力を表しており、当該部門に1単位の最終需要が生じた時に、直接間接的に産業全体に生じる派生需要の大きさを示している。

投入係数行列 \mathbf{A} や \mathbf{FD} には、地域外からの移入や国外からの輸入分も含まれているため、製品*i*の域内需要（中間需要＋最終需要）に対する移輸入率を $\mathbf{m} = (m_i)$ 、域内で生産された材料製品の投入係数行列を \mathbf{A}^d 、域内で生産された製品への域内最終需要を \mathbf{FD}^d 、域内で生産された製品への域内外の最終需要を \mathbf{Y}^d とすると、域内の産業の生産額ベクトル \mathbf{X}^d は以下の式で表すことができる。

$$\mathbf{X}^d = \{\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{m}})\mathbf{A}\}^{-1}\{(\mathbf{I} - \hat{\mathbf{m}})\mathbf{FD} + \mathbf{E}\} = (\mathbf{I} - \mathbf{A}^d)^{-1}(\mathbf{FD}^d + \mathbf{E}) = (\mathbf{I} - \mathbf{A}^d)^{-1}\mathbf{Y}^d \quad (3)-4$$

このとき、域内への波及を示す域内レオンチェフ逆行列を $\mathbf{L}^d = (\mathbf{I} - \mathbf{A}^d)^{-1}$ 、域内外への波及を示すレオンチェフ逆行列を $\mathbf{L} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ とする。 $(\mathbf{L}^d - \mathbf{L})$ の値は、製品やサービスの移入・輸入によって、

域外に流出している波及効果である。また、 L^d と L を用いて計算した地域内の産業への影響力と、地域内外の産業への影響力を比較することにより、地域外に流出している各産業の影響力を分析することができる。さらに、地域エネルギーシステムの導入前の地域内の部門からの投入係数、システムの導入後の地域内の投入係数から計算される各部門の影響力や付加価値の変化、地域外への流出波及額の変化などにより、地域エネルギーシステムの社会経済性を評価する。

また、全国表や都道府県表、作成・拡張した地域産業連関表から、対象地域の各産業の特化係数を計算することができる。特化係数は、地域内の産業 i の生産額のシェアが全国平均と比較してどれだけ大きい（特化しているか）を表す指標で、以下の式で求めることができる。

$$\text{部門}i\text{の全国(県)基準特化係数} = \frac{\text{部門}i\text{の地域内生産額/全部門の地域内生産額}}{\text{部門}i\text{の全国(県内)生産額/全部門の全国(県内)生産額}} \quad (3)-5$$

さらに、構造経路分解法(Structural Path Analysis; SPA^{6),7})と、拡張型地域表を用い、地域エネルギーシステム導入前後の地域内の製品から出発するキャッシュフローの変化を可視化する。

4. 結果及び考察

(1) 種子島のケーススタディ

1) 種子島表の作成と種子島の現状の産業構造の分析

a. 種子島表の作成

0. 基本表の選定

ノンサーベイ法の基本表の経済構造は、対象地域の経済構造に近い方が好ましい。この観点から、鹿児島県産業連関表（平成17年、190部門）（以下、鹿児島県表）⁸⁾と、沖縄県産業連関表（平成17年、基本分類（行404×列350部門））（以下、沖縄県表）⁹⁾を基本表として検討した。鹿児島県表は、種子島地域（西之表市、中種子町、南種子町）が内包されており、文化圏が同じ（経済構造が類似）と考えられる。一方の沖縄県表は、離島であるという共通点や、種子島の基幹産業であるサトウキビを栽培、加工している点、細かい基本分類表が存在する点に優位性があり、文化や経済構造、生活様式も大きく乖離していないと考えられる。しかし、沖縄県には米軍基地が位置しているため、電力や上下水道、廃棄物処理、住宅賃貸料などの輸出額が突出して大きいなどの特異性も有する。また、沖縄県表には、種子島では生産が行われていない部門が多く存在し、沖縄県表ほどの部門の細分化は必要ない。しかし、鹿児島県表には、種子島の基幹産業であるサトウキビ生産を表す「砂糖原料作物」やサトウキビから生産される「原料糖」、サトウキビの輪作作物である「いも類」、またそのいも類から生産される「でん粉」などの部門は独立して存在せず、「その他食用作物」、「砂糖・油脂・調味料類」、「いも・豆類」にそれぞれ統合されている。特に、本研究で評価対象とする地域エネルギーシステムにおいて、サトウキビや原料糖生産は主要かつ重要な産業である。また、いも類は種子島の主要産業の1つであるでん粉生産の原料になるだけでなく、全国でも知名度が高い安納芋としてその加工産業とともに重要産業となりつつある。そこで、鹿児島県表を基本表とし、分割が必要な部門に関しては、沖縄県表と全国表を用いて推計した。また、今後の電力自由化などの制度改革にも柔軟に対応するために、「電力」を「発電」と「送配変電販売」に分割し、バイオエタノールとバイオディーゼルの代替製品である「ガソリン」と「軽油」も分割

を行った。作成した種子島表は、198部門表である。部門分割の詳細については、後述する。

1. 種子島の各産業の域内生産額の捕捉、推計

各産業の生産額については、一律に従業員数などで按分するのではなく、できる限り多くの統計データを用いて推計を行った。主に利用したデータは、熊毛地域の概況、経済センサス、工業統計調査、商業統計調査、市町村民所得推計、推計人口である。また、種子島地域の工業統計調査（H24～26）、商業統計調査（H16、19、26）の個票データの二次利用申請を行い、品目別の出荷額・販売額などを整理した¹。その結果、多くの統計データが利用でき、かつ最新年に最も近い平成24年度のデータを基に種子島表を作成した。

➤ 農林水産業

『平成24年度熊毛地域の概況』¹⁰のデータや、『市町村民所得推計 統計表第2表（市町村内総生産）平成24年度推計分』（以後、市町村民所得推計）¹¹の西之表市、中種子町、南種子町の各産業の付加価値額、鹿児島県表の各部門の生産額比率などを基に推計した。

➤ 製造業

『工業統計調査 平成24年確報 市町村編』（以下、工業統計調査）¹²の西之表市、中種子町、南種子町および鹿児島県の出荷額や従業員数、鹿児島県表の各部門の生産額比率を用いて推計した値と、二次利用申請を行った種子島地域の工業統計調査の個票データを基に推計した。「ガソリン」、「軽油」、「その他の石油製品」については後述する。

➤ 電気・ガス・熱供給

「都市ガス」・「熱供給業」については、現地調査によって種子島においては供給されていないことが明らかになったため、生産額は0円/年とした。「電力」については後述する。

➤ 水道・廃棄物処理

「水道」については、上水は鹿児島県の普及率97.5%（H25）に対して、種子島の普及率98.6%（H24）であり、また、種子島の下水処理方法はすべて浄化槽による処理であることを確認した（『H25年度末市町村別汚染水処理人口普及状況』¹³や現地調査）。産業連関表では、浄化槽によるし尿処理・収集は「廃棄物処理」に分類されるため、「水道」部門の生産額はすべて上水道の生産額とし、上水道の生産額は他部門・最終消費者からの需要額の合計とした。また、「廃棄物処理」については、『鹿児島県廃棄物処理計画』¹⁴の熊毛地域の産業廃棄物量と、平成27年の鹿児島県の産業廃棄物に対する一般廃棄物の比率を用いて推計した。

➤ 医療・介護

「医療」については、鹿児島県に対する種子島の人口比率を用いて推定した値と、『医療費の地域差分分析』¹⁵の平成24年度の種子島地域の1人当たり医療費データと人口から計算した医療費の総額から推計した。「介護」は『鹿児島県市町村別高齢化率』（H22）¹⁶の鹿児島県に対する種子島の高齢者人口の比率と、鹿児島県表の「介護」の生産額から推計した。

➤ 建築・建設、土木工事、サービス業

¹ 工業統計調査および商業統計調査の個票データについては、3以上の事業所の合算データとして取り扱えるよう部門分類などを工夫し、2以下の事業所の未加工のデータを結果として開示する場合は、公開データと差し替えるなどの対応を行っている。3以上の事業所に係る数字であっても、個々の事業所の秘密が保護されるよう配慮した。

建設業、サービス業は、市町村民所得推計の生産額と鹿児島県表の生産額の比率を用いて推計した。「不動産仲介及び賃貸」、「住宅賃貸料」などは、他部門と最終消費者からの需要額の合計を生産額とした。鉄道輸送は存在しないため、「鉄道旅客輸送」、「鉄道貨物輸送」はともに生産額を0円/年とした。

2. 各部門の中間投入額、付加価値額、最終需要額、移輸入額の推定

以下で記述する部門以外は、上記で推計した各部門の生産額と鹿児島県表の投入係数を用いて、中間投入額・産出額を推計した。また、鹿児島県表の各部門の最終需要額と平成17年の推定人口から算出した各部門の1人当たり最終需要額と、平成24年の種子島の推定人口から、種子島表の各部門の最終需要額を推計した。移輸出入額は、各部門の状況や地理的環境を考慮し、島嶼地域であるという影響が大きい部門は沖縄の移輸出入率から推計し、沖縄県では生産が行われていない／沖縄県では生産が行われているが種子島では生産されていない部門・前述の米軍基地への輸出がある部門等は、鹿児島県表・全国表から推計した。

次に種子島の特色を反映し、地域エネルギーシステムの社会経済性を分析するために、鹿児島県表から分割した部門（表(3)-1参照）の分類と推計方法を以下で述べる。

▶ 「いも類」、「豆類」、「でん粉」

全国表の「いも類」、「豆類」、「でん粉」の投入・産出構造を用いて推計した。

▶ 「砂糖原料作物」

沖縄県表の「砂糖原料作物」の投入・産出構造を用いて推計した。全国表を用いなかった理由は、全国表の「砂糖原料作物」にはテンサイなどのサトウキビ以外の砂糖原料作物の生産が含まれているためである。

▶ 「原料糖」、「黒糖・その他の糖」

- ・ 「砂糖原料作物」と同様の理由で、沖縄県表の投入・産出構造を使用した。沖縄県表では、「原料糖」は「その他の砂糖・副産物」に含まれているが、種子島表では、原料糖の生産を中心とした新規エネルギーシステムの評価を行うため、「原料糖」と「黒糖・その他の糖」部門として設定した。
- ・ 沖縄県表では、行部門は「精製糖」と「その他の砂糖・副産物」に分かれているが、列部門は「砂糖」に統合されている。現在は、沖縄県で精製糖の生産は行われていないが平成17年当時も行われていたため、「砂糖」の「精製糖」と「原料糖」への分割が必要である。それぞれの製造方法の情報から、以下のような条件で分割した。①「砂糖原料作物」からの投入は全額「原料糖」へ配分、②「原料糖」からの投入は全額「精製糖」へ配分、③付加価値額の「補助金」は全額「原料糖」に配分、④その他の部門からの投入は生産額に応じて配分する。また、種子島の原料糖生産では、生産過程で発生するバガスを燃料としたバガスボイラーを用いた自家発電システムにより、製糖期の工場稼働のための電力はほぼ賄われている。一方で、精製糖生産では、バガスのような燃料となる副産物は十分に発生しないため、工場稼働のために電力を購入している。このような点も考慮して、沖縄県表の「砂糖」から分割した「原料糖」の投入構造から、種子島の「原料糖」を作成した。
- ・ 「黒糖・その他の糖」については、上記の「原料糖」の投入構造、黒糖の生産方法の現地

調査・ヒアリングなどを基に、投入構造の推計を行った。各産業・最終需要への産出額については、全額を家計消費支出に計上した。

▶ 「ガソリン」、「軽油」

① 生産額、投入構造の推計：

種子島島内でガソリン、軽油ともに生産は行われていないため、島内生産額は0円／年とし、需要量はすべて島外からの移輸入とした。

② 島内需要構造の推計：

- ・ 平成 24 年の『自動車燃費消費量調査 年報』¹⁷⁾の「第 1 表 燃料別・車種別 総括表」と「第 4 表 燃料別・地方運輸局別・26 車種別 燃料消費量」の九州運輸局のデータと、『離島統計年報』¹⁸⁾の種子島の車種別車輛保有台数を用い、同用途・同車種の 1 台当たりの走行距離と燃費は同一と仮定し、用途別消費量を推計した。
- ・ 上記推計値と全国表の各部門の投入・産出構造、全国表と全国の人口を用いて算出した 1 人当たり需要額、種子島の人口から島内の需要構造を推計した。
- ・ 詳細は後述するが、現在 NPO 法人こすもで生産されているバイオディーゼル（以下、BDF）は、生産されていないものとし、ヒアリング調査に基づく BDF の使用量、BDF と軽油の燃費差から BDF の代替として必要な軽油の量(kL)を推計し、軽油の平均価格(kL/円)を乗じた額を「自家輸送（旅客）」に計上した。
- ・ 平成 17 年物量表¹⁹⁾を用いて算出した当該製品の平均価格と上記需要額から推計した島内需要量は、ガソリン：9,655 kL/年、軽油：13,966 kL/年である²⁾。

▶ 「その他の石油製品」

- ・ 種子島島内では「その他の石油製品」該当する製品は生産されていないため、島内生産額は0円/年とし、需要量はすべて島外からの移入とした。
- ・ 平成17年物量表の「液化石油ガス」部門と「都市ガス」部門の平均単価に大きな差がないことを確認し、「液化石油ガス」と「都市ガス」の単価は同一と設定した。鹿児島県表の各部門への「都市ガス」部門の投入比率と、種子島表の各部門の生産額から推計した各部門への液化石油ガスの投入額、鹿児島県表、鹿児島県の人口、種子島の人口を用いて算出した需要額を「その他の石油製品」部門に計上した。

▶ 「発電」、「送配電販売」

沖縄電力の有価証券報告書に種子島での発電と同様の離島での内燃力発電の費用情報が掲載されており、沖縄県表に独立して「事業用火力発電」が存在するため、両情報を利用する。

● 推計方法の詳細

① 沖縄電力の汽力発電、内燃力発電、送配変電販売の直接投入費用額の算定

- ・ 平成 18 年度の沖縄電力の有価証券報告書²⁰⁾に記載されている電気事業営業費用明細表の送電費、変電費、配電費、販売費の列を合計し、送配変電販売に必要な費用を作成した。一般管理費の各費用は、汽力発電、内燃力発電、送配変電販売の比率から配分した。

²⁾ 「都市ガス」の代替分として推計した液化石油ガスの消費額と、平成17年物量表の液化天然ガスの平均価格から計算された液化石油ガスの消費量は5,583 t/年であり、「その他の石油製品」部門の年間需要額から軽油と液化石油ガスの需要額を差し引いた分をすべて重油への需要と仮定すると、平成17年物量表の重油の平均価格で除して計算した重油の消費量は51,290 kL/年である。

- ・ 沖縄電力の『経営参考資料集 平成 18 年 5 月 17 日』²¹⁾に記載されている離島での電力事業における経常利益の赤字額(円/年)から、内燃力発電の営業余剰を 0 円/年とし、赤字額を経常補助金の項目に計上した。
 - ・ 有価証券報告書の損益計算書の費用項目、収入項目、税額から、沖縄電力の営業余剰額を計算し、汽力発電、送配変電販売の費用比率から、各部門の営業余剰額(円/年)を推計。
- ② 沖縄電力の内燃力発電、送配変電販売の投入構造の推計
- ・ ①で推計した内燃力発電と送配変電販売の費用の内、内燃力発電の燃料以外の中間投入額に相当する費用の合計と、付加価値額に相当する費用の合計を計算し、沖縄県表の「事業用火力発電」部門の投入係数と付加価値係数を用い、投入構造を推計した。
 - ・ 沖縄県表の投入係数と付加価値係数を用いて推計する理由は、電気事業営業費用明細表の費目内容の詳細が不明であるためである。
- ③ 沖縄電力の内燃力発電、送配変電販売の発電量当たりの投入構造の算定：
- ・ 『経営参考資料集 平成 18 年 5 月 17 日』の販売電力量 (H17) のうち、本島分を汽力発電、離島分を内燃力発電の発電量とし、発電量(GWh)当たりの投入構造を推計した。
 - ・ 送配変電販売に関しては、汽力発電・内燃力発電に関わらず電力を送配変電販売する費用は同じとし、沖縄電力の総発電量で除し、発電量当たりの投入構造を推計した。
- ④ 種子島表の「発電」、「送配変電販売」部門の推計：
- ・ 『熊毛の電力』²²⁾の種子島の発電量(GWh)と、③で求めた発電量(GWh)当たりの投入構造を用い、種子島表の「発電」、「送配変電販売」部門の投入構造と生産額を推計した。
 - ・ 鹿児島県表と種子島の生産額から推計した各部門の「電力」の投入額を、「発電」と「送配変電販売」の生産額比で按分し、各部門・最終消費者への産出額を推計した。

表(3)- 1. 種子島表作成のための鹿児島県表からの分割部門

鹿児島県表での部門名	種子島表での部門名	投入係数の推計方法
いも・豆類	いも類	全国表の「いも類」部門
	豆類	全国表の「豆類」部門
その他の食用作物	砂糖原料作物	沖縄県表の「砂糖原料作物」部門
	その他の食用作物	鹿児島県表の「その他の食用作物」部門
砂糖・油脂・調味料類	原料糖	沖縄県表の「砂糖」部門から、原料糖生産に必要な投入額を推計
	黒糖・その他の糖	上記「原料糖」部門と現地調査
	でん粉	全国表の「でん粉」部門
	精製糖・油脂・調味料類	鹿児島県表の「砂糖・油脂・調味料類」部門
石油製品	ガソリン	『自動車燃費消費量調査』、『離島統計年報』、物量表、全国表、人口比
	軽油	
	その他の石油製品	物量表、鹿児島県表
電力	発電	沖縄電力の『有価証券報告書』、沖縄県表、『H24熊毛地域の概要』
	送配変電販売	

3. 行と列の域内生産額の調整

離島であるという特殊性によって生産額、生産構造、移出入額等が基準地域とは異なる部門を、各種統計データとの比較や現地調査によって推定し、行と列の域内生産額の調整を行った。多段階推計法等を用いた自動的な調整を行わなかった理由は、部門ごとの状況や特殊性を判断

し、考察しながら調整を行うためである。

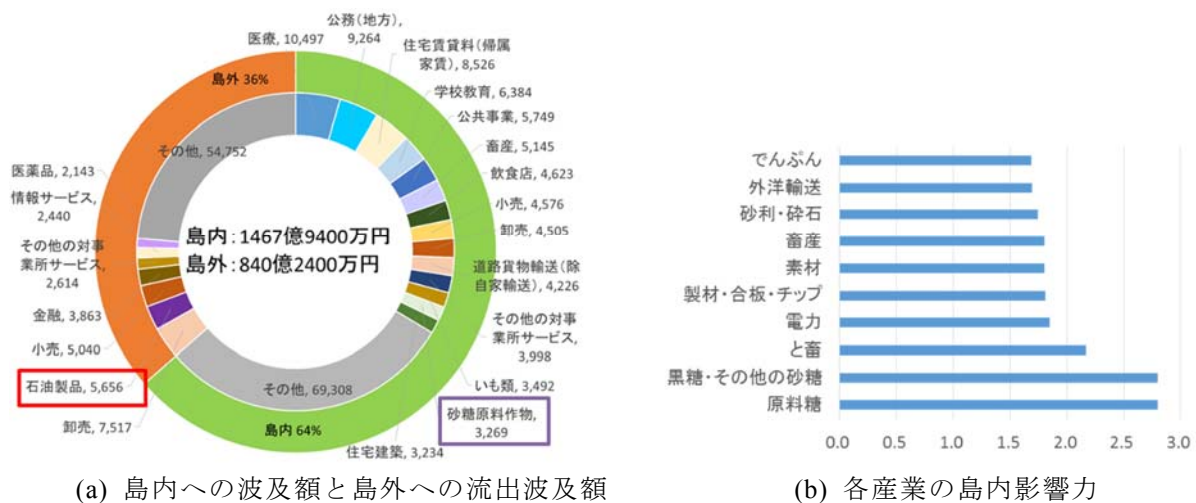
b. 種子島の現状の産業構造の分析結果

本項では種子島表を用いて分析した種子島の現状の産業構造の分析結果について述べる。図(3)-1(a)は、現状の種子島の産業構造を示したものである。種子島の最終需要（移輸出含む）に対する島内外への波及効果の合計は2,308億1,800万円であり、そのうちの島内への波及効果が64%の1,467億9,400万円、島外への流出波及額が36%の840億2,400万円である。この流出波及額は、種子島の産業・消費者が島外の製品・サービスを購入するために支払っている額（以下、島外流出額）の合計ではなく、種子島の需要に対するすべての製品・サービスの材料まで含めた自給率が100%である場合に、種子島に発生する波及効果（生産額）の合計である。島外流出額の合計は年間596億8,100万円である。つまり、596億8,100万円分の島外の製品・サービスの購入により、840億2,400万円分の経済波及効果が島外に流出しているということである。その内訳をみると、「卸売」：75億1,700万円、「石油製品」（ガソリン、軽油を含む）：56億5,600万円、「小売」：50億4,000万円、「金融」：38億6,300万円、「その他の事業所サービス」：26億1,400万円、「情報サービス」：24億4,000万円、「医薬品」：21億4,300万円である。種子島は島嶼地域であるため、移入による卸売や医薬品への波及効果の流出は避けがたい面もあるが、注目すべきは、「石油製品」の流出波及額の大きさである。この「石油製品」部門には、種子島島内の火力発電や工場・施設園芸の熱利用に必要な重油、ガソリン、軽油、灯油などが含まれており、いずれも種子島島内では生産されていないが需要度が高いため、56億5,600万円という大きな波及効果が島外に流出している。種子島が「石油製品」に対する島外流出額は45億900万円である。また、島外から移入している化石資源を利用する既存エネルギーシステムを、地域エネルギーシステムに置き換えることにより、既存エネルギーシステムに必要な島外産の材料や商業・輸送マージンに対する流出額を削減することができる。このように、地域エネルギーシステムを導入することにより、エネルギー需要に起因する多額の島外流出額を削減し、島内への波及効果を増加させることは、島内経済の活性化と好循環化に大きく寄与することが期待される。

島内への波及額（生産額）をみると、医療や公務、教育などの公共サービスや、不動産、飲食店、小売、卸売などの商業、対個人サービスが大きいことがわかるが、「畜産」、「いも類」、「砂糖原料作物」（サトウキビ）などの種子島の特色ある部門の生産額も比較的大きいことがわかる。種子島は、前述のように、サトウキビといも類の生産、さらに良質の子牛の繁殖、生育も盛んであり、ブランド牛を育てる島外の肥育農家などに販売（移出）されている。（2）で説明した特化係数を計算すると、全国平均と比較し、種子島島内での「原料糖」と「砂糖原料作物（サトウキビ）」の生産額シェアが1,891.0倍と884.6倍と突出して高い。鹿児島県では種子島以外の南西諸島でもサトウキビ栽培や原料糖生産が盛んであるため、鹿児島県平均との比較では、それぞれ9.1倍、22.2倍と係数は低くなるものの、両部門の生産額シェアが鹿児島県平均より高く、種子島特有の産業であることがわかる。平成24年のサトウキビ農家戸数は、種子島の農家戸数の60.5%（『平成24年度の熊毛地域の概況』）であり、まさに種子島の基幹産業である。「いも類」（全国基準：108.1、鹿児島県基準：7.5）や、いもを原料とした「でん粉」（全国基準：23.8、鹿児島県基準：6.3）も全国平均、鹿児島県平均と比較し、生産額シェアが高い。「畜産」に関しては、全国平均と比較すると11.1と特化係数は高いが、鹿児島県自体が畜産が盛んなため

鹿児島県基準の特化係数は1.5とそれほど高くない。一方で、島内への波及（生産）額が大きかった公共サービスや他のサービス部門の生産額シェアは平均的であり、多くの製造業では平均を大きく下回っている。これらの特化係数の結果は、全国表と鹿児島県表を用いて評価した場合、結果に大きな差が生まれることを表している。図(3)-1 (b)は島内への影響力を表しており、「原料糖」と「黒糖・その他の糖」が2.80と最も高い。これは、「原料糖」または「黒糖・その他の糖」部門の1億円の生産に伴って、材料需要などで種子島島内に発生する波及生産額の合計が2.80億円（「原料糖」、「黒糖・その他の糖」の1億円分含む）であるということを示している。両部門の島内外への影響力は3.41であり、1億円の生産が生じた場合、6,100万円分が島外に流出していることになる。また、「製材・合板・チップ」と「素材」の影響力も1.81と1.80と比較的高いため、木質バイオマス発電の島内への波及効果も高いと考えられる。現在、種子島では樹齢分布のバランスが崩れ、森林も高齢化している²³⁾ため、森林の健全化のためにも、島内に木材の需要を創出することは重要である。島内の全産業の島内影響力の平均は1.18であり、多くの製品・サービスを移入しているため、低い水準である。産業活動や生活の基盤であるエネルギーの自給率を上げることにより、この影響力を上昇させることが期待できる。

上記の種子島の現状の産業構造の分析結果から、地域エネルギーシステムを導入することにより、島外から移入している燃料とそれに伴う流出額を削減し、エネルギー需要に伴う経済波及効果と付加価値を島内に創出することは、社会経済的に大きな意義があることがわかった。さらに、特化係数が顕著に高く、60.5%の農家が従事しているサトウキビや原料糖生産に関連した地域エネルギーシステムや、種子島の森林を健全化するための地域エネルギーシステムを構築することが、種子島における社会経済性にも大きな意味があると考察される。



図(3)-1 現行の種子島における社会経済性分析結果

2) 地域エネルギーシステムの社会経済性評価

a. 社会経済性評価の分析対象とする地域エネルギーシステムと拡張型種子島表の作成

本研究で分析対象とする種子島地域エネルギーシステムを(3)-2に示す。本研究では、製糖期に製糖工場から排出されるバガス燃料として行われる「バイオマス熱供給業」と「バイオマス発電」、同じく製糖工場から排出される糖蜜を原料とした「バイオエタノール」生産、余剰バガス

を利用して休糖期に行う「バガス発電」と、種子島産の木質チップを燃料とした「木質バイオマス発電」、飲食業等から購入する廃食用油を原料とした「バイオディーゼル」生産を組み合わせた地域エネルギーシステムの社会経済性を評価する。また、I：サトウキビの品種を高バイオマス量の品種（農林18号）に全量変更、II：製糖プロセスに逆転技術²⁴⁾を導入、III：発電用に設計された高圧のボイラーと発電タービンに更新、V：「木質バイオマス発電」は休糖期に行い、余剰バガスと混焼、VII：バイオディーゼルは集中生産かつ廃熱を利用するという前提条件を設定した。図(3)-2は、産業連関表上で表される(a)現状の「原料糖」の生産活動と、(b)地域エネルギーシステム導入後の「原料糖」、「バイオマス熱供給」、「バイオマス発電」、「バイオエタノール」、「バガス発電」、「木質バイオマス発電」の関係を示したものである。現状でも製糖工場内で、バガスを燃料とした工場内への熱供給と電力供給が行われているが、同一産業（工場）内での供給であり、売買されていないため、現状の種子島表では、製糖工場内での熱生産および電力生産は表現されていない（ただし、工場内での自家生産を行っていない場合に必要な電力や燃料を外部から購入していないという意味では、部分的に反映されている）。また、製糖を行っていない期間である休糖期（現状約7か月）において製糖工場は停止しており、ボイラー・発電タービンも使用されていない。一方、地域エネルギーシステムシナリオでは、製糖工場外にも電力や熱を供給するため、甘味資源作物交付金の対象である「原料糖」と、「バイオマス熱供給」、「バイオマス発電」を分割・独立させ、新たに「バイオエタノール」と休糖期のボイラー・発電タービンを活用した「バガス発電」、「木質バイオマス発電」を設定した。主な構造は以下の通りである。

1. 「バイオマス熱供給」は、畜産への供給を除いたバガスを「原料糖」から燃料として購入し、熱を生産する。必要な電力は「バイオマス発電」から購入する（自営線）。
2. 「原料糖」部門は、製糖に必要な熱と電力をそれぞれ「バイオマス熱供給」と「バイオマス発電」から購入する（自営線）。
3. 「バイオマス発電」は、「バイオマス熱供給」から熱を購入し、発電を行う。余剰電力は、島内の既存電力会社（九州電力）に販売され、島内の産業や消費者に供給される。
4. 「バイオエタノール」は、「原料糖」から糖蜜を購入し、エタノール生産に必要な熱と電力をそれぞれ「バイオマス熱供給」と「バイオマス発電」から購入する（自営線）。生産されたバイオエタノールは、ガソリンに混合され販売される。
5. 休糖期は、ボイラー・発電タービンのメンテナンスに必要な1か月を除き、余剰バガスを燃料とした「バガス発電」と、種子島産の木質チップを燃料とした「木質バイオマス発電」を行う。

上記の地域エネルギーシステムに対応した拡張型産業連関表の新設部門の推計方法や需給バランスの調整方法を以下で説明する。新エネルギー部門の想定実施者へのヒアリングに基づき、企業利益ではなく、地域に安価なエネルギーを供給するというシナリオの下、副産物であるバガスやバガスから生産される熱、電力の価格は、最低限の必要経費と雇用者所得等から計算した。

■ 新設部門の推計

サトウキビの品種を農林18号に変更したことにより、茎重量が1.66倍、産糖量が1.77倍、バガス量が2.03倍になる。また、サトウキビの茎重量が増加したことにより、製糖期間が6.2か月になり、定修期間の1か月を除いた休糖期の発電期間は4.8か月となる。

➤ 「バイオマス熱供給業」（基本データ：全国表の「熱供給業）」

① 生産額、電力の投入額の推計：

バイオマス熱供給業の発熱量(GJ/年)、バガスの投入量(t/年)、電力の投入量(kWh/年)はシミュレーション結果を用い、後述の「バイオマス発電」の単価(円/kWh)を乗じて電力の投入額を推計した。熱の販売単価(円/J)はA重油(円/J)の1/3とし、生産額(円/年)（暫定）を推計した。

② 中間投入額の推計：

まず、①で求めた生産額(円/年)と全国表の「熱供給業」の投入係数から、「バイオマス熱供給業」の中間投入額(円/年)（暫定）を推計した。全国表の付帯表である商業マージン表・国内貨物運賃表¹⁹⁾と全国表を用いて、「熱供給業」に投入される燃料・電力にかかる商業マージンと輸送費を推計し、商業や輸送関連部門からの投入額から控除した。燃料の投入額(円/年)は、「原料糖」から購入するバガスのみとし、それ以外の燃料投入に関連する部門からの投入は0円/年とした。①で推定値した「バイオマス発電」からの投入額(円/年)を計上した。

③ 付加価値額の推計：

全国表の「熱供給業」部門の付加価値係数と①で推計した生産額(円/年)を用い、付加価値額（暫定）(円/年)を推計した。上述のヒアリングに基づき、設備更新等で必要となる内部留保を全国表の「熱供給業」から推計した営業余剰の10%とし、付加価値額(円/年)を推計した。

④ 生産額、バガス（燃料）の投入額の推計：

②と③の合計値と、①で推計した「バイオマス熱供給業」の生産額(円/年)の差分をバガスの投入額(円/年)とし、バガスの推定投入量(t)から単価(円/t)を推計した。

⑤ 各部門（中間需要）、最終需要への産出額の推計：

「バイオマス熱供給業」は、「原料糖」、「バイオマス発電」、「バイオエタノール」への熱供給のみを想定しているため、余剰熱の産出額(円/年)はすべて「在庫」へ計上した。

➤ バイオマス発電（基本データ：REFIOの「木質バイオマス発電）」

① 生産額（暫定）と熱の投入額の推計：

バガスは製糖に伴う副産物であるため、固定価格買取制度（以後、FIT²⁵⁾の「一般廃棄物 その他のバイオマス」の買取価格17円+税と発電量(GWh)を用い、暫定の生産額(円/年)を推計した。「バイオマス熱供給業」の熱の販売単価(円/J)と、投入熱量(GJ)を用いて、熱の購入額(円/年)を推計した。発電量(GWh)と投入熱量(GJ)はシミュレーション結果を用いた。

② 中間投入額の推計：

REFIOの「木質バイオマス発電」の投入係数と①で求めた生産額から、「バイオマス発電」の暫定の中間投入額(円/年)を推計した。ただし、ボイラーは「バイオマス熱供給業」に帰属するため、「電動機・ボイラー」からの投入のうちボイラーに関する投入を除外した。「電力」から「木質バイオマス発電」への投入は、起動時等に必要な電力と考え、「発電」（既存電力）からの購入として設定した。燃料投入額(円/年)は、①で推計した「バイオマス熱供給業」から購入する熱のみとし、それ以外の燃料に関する部門からの投入は0円/年とした。木質チップ等を燃料とする場合に必要な輸送は必要でないため、燃料輸送に関する値を0円/年とした。

③ 付加価値額の推計：

REFIOの「バイオマス発電」の付加価値係数と、①で推計した生産額(円/年)を用いて推計した付加価値額(円/年)から、「バイオマス熱供給業」と同様に営業余剰を10%に削減し、付加価

値額（暫定）（円/年）を推計した。後述する「木質バイオマス発電」の赤字分を営業余剰に計上し、営業余剰額（円/年）を決定した。

④ 生産額と単価の推計：

②と③の合計値を「バイオマス発電」の生産額（円/年）とした。「バイオマス発電」で発電した電力から「原料糖」、「バイオエタノール」、「バイオマス熱供給業」への供給分を除いた余剰電力は、熱量換算で既存電力の10.2%である。また、発電量で除した単価は12.4円/kWhである。単価がFITでの買取価格の7割である理由は、燃料である熱が製糖プロセスの副産物であるため、燃料費が通常の木質バイオマス発電より安価である点が大きいためである。

⑤ 各部門（中間需要）、最終需要への産出額の推計：

実際の地域エネルギーシステムでは、余剰電力は島内の既存電力会社に販売され、既存電力会社を通して島内に供給されるが、拡張型種子島表では「バイオマス発電」導入の効果をより明確にするため、余剰電力は「バイオマス発電」部門から直接、各産業や最終消費者に供給されるという形式で計上した。地域エネルギーシステムの導入前後で、島内産業の生産額当たりの電力消費量と最終消費者の電力消費量は一定と仮定し、「バイオマス発電」、「発電」の供給電力量(kWh)の比率と、推定単価（円/kWh）から、各部門・最終需要への産出額（円/年）を推計した。「バイオマス発電」の電力も、電力量に応じて等しく送配変電販売の費用が発生すると仮定し、各部門の生産額に対する「送配変電販売」からの投入額（円/年）の比率は、地域エネルギーシステムの導入前後で一定とする。新エネルギー部門へは自営線での供給のため、「送配変電販売」の費用は0円/年とした。

➤ バイオエタノール（基本データ：全国表の「ウイスキー類」部門）

① 生産額（暫定）、主要原材料の投入額の推計：

バイオエタノールの熱量当たりの暫定単価（円/MJ）はガソリンと同価格とし、生産量(kL)から生産額（暫定）（円/年）を推計した。糖蜜の単価（円/t）はヒアリングにより、発酵原材料として島外の企業に販売している単価に設定し、投入額（円/年）を推計した。化学製品類の単価（円/t）は、平成17年物量表から推定した。電力と熱の投入は、それぞれ「バイオマス発電」と「バイオマス熱供給業」からの投入とし、単価を乗じて投入額（円/年）を推計した。バイオエタノールの生産量(kL)、糖蜜の投入量(t)、生産に必要な化学製品類の投入量(t)、電力の投入量(kWh)、熱の投入量(MJ)は、他テーマで得たシミュレーション結果を用いた。

② 中間投入額の推計：

バイオエタノール部門が設計されている入手可能な産業連関表が存在しないため、生産工程が類似している全国表の「ウイスキー類」の投入構造を用い、中間投入額を推計した。商業マージン表、国内貨物運賃表、全国表を用いて、「ウイスキー類」に投入される主要投入物にかかる商業マージンと輸送費を推計し、商業や輸送関連部門の投入額から控除した。①で推計した糖蜜、化学製品類、熱、電力の投入額を計上し、それ以外の「ウイスキー類」の主要投入物に関連する部門からの投入は0円/年とした。

③ 付加価値額の推計：

全国表の「ウイスキー類」の付加価値係数と①で推計した生産額を用いて推計した付加価値額から営業余剰を10%に削減し、付加価値額（暫定）（円/年）とした。「ウイスキー類」の場合、酒税等により生産額に対する間接税の比率が高いため、全部門の間接税の平均比率を用いた。

④ 生産額と単価、代替量の推計：

②と③の合計値を「バイオエタノール」の生産額とし、生産量(kL)で除した推定単価は46.2円/Lであり、熱量ベースの単価は2.2円/MJ（ガソリン：3.1円/MJ）である。熱量換算でガソリンの島内需要の7.5%を代替する。

⑤ 各部門（中間需要）、最終需要への産出額の推計：

実際の地域エネルギーシステムでは、バイオエタノールはガソリンと混合し、島内の産業や消費者に販売されるが、拡張型種子島表では、導入の効果をより明確にするため、「バイオエタノール」から直接、各産業や最終消費者に供給されるという形式で計上した。地域エネルギーシステムの導入前後で、島内産業や最終消費者の生産額・需要額あたりの燃料（ガソリン該当）消費量は一定とし、各部門・最終消費者の「ガソリン」からの投入額を7.5%差し引き、この7.5%の熱量(J)に相当するバイオエタノールの投入額を「バイオエタノール」に計上した。

▶ バガス発電（基本データ：REFIOの「木質バイオマス発電」）

基本的には「バイオマス発電」の推計方法と同様である。異なる点は以下の通りである。燃料は、余剰バガスであり、投入バガス量(t)は他テーマで得たシミュレーション結果を用いた。バガスの単価(円/t)は、「バイオマス熱供給業」の項で推計した単価である。「電動機・ボイラー」からの投入のうち、ボイラーに関する投入を除外せず、「木質バイオマス発電」の赤字分は「バイオマス発電」で補填されているため、営業余剰に計上しない。供給量は熱量換算で島内需要の2.5%であり、単価は10.9円/kWhである。

▶ 木質バイオマス発電（基本データ：REFIOの「木質バイオマス発電」）

基本的には「バイオマス発電」の推計方法と同様である。異なる点は以下の通りである。燃料は「製材・合板・チップ」部門から投入される種子島産の木質チップであり、チップ量(t)はシミュレーション結果²⁶⁾を用いた。チップの単価は、当該地域の実勢価格から、9,000円/t（水分50%）を用いた。供給量は熱量換算で島内需要の1.5%であり、単価はFITの「一般木質バイオマス・農作物の収穫に伴って生じるバイオマス」の買取価格である25.9円/kWhである。木質チップの輸送が必要なため、輸送に関連する部門の中間投入を控除せず、ボイラーに関する投入も除外しない。上記の販売単価(円/kWh)では、木質チップの単価が高いため、赤字になる。想定実施者へのヒアリング調査から、販売単価(円/kWh)をあげるのではなく、経常補助金の項目に赤字分をマイナス計上し、「バイオマス発電」が赤字分を負担するシナリオとした。

▶ バイオディーゼル

BDFの生産量や投入構造は、実際に種子島内でイオン交換樹脂法²⁷⁾の事業化を行っているNPO法人こすもの中割工場のインベントリデータ²⁸⁾より作成し、島嶼地域でない地域でのイオン交換樹脂法によるBDF生産コストとの差分は輸送費として輸送関連部門に計上した。NPO法人こすもでは、島内の飲食店などから購入した廃食用油を原料にBDFを生産しているため、廃食用油の購入額は「飲食店」からの投入額とし、廃食用油の販売により増加した「飲食店」の収入は、営業余剰に計上した。NPO法人こすもは、障害者支援センターを運営しており、生産されたバイオディーゼルは全量、入所者の送迎に使用されるとし、「自家輸送（旅客）」に計上する。生産されるBDFは、軽油の島内需要の0.2%（燃費比）である。

■ 需給バランスの調整

新設部門の材料投入により、既存の島内産業の供給額（生産額）も変化するため、新設部門を組み入れた拡張型種子島表を完成させるためには、各部門の需給バランスを調整する必要がある。調整方法については、以下で説明する。

▶ 原料糖

- ・ サトウキビの品種の変更による産糖量の増加に応じ、生産額、材料投入額、付加価値額、移出額を変更した。他テーマにおいてシミュレーションにより得られた、生産増加後の原料糖生産に必要な「バイオマス熱供給業」と「バイオマス発電」からの投入額を計上した。
- ・ 「バイオマス熱供給業」、「バイオマス発電」、「バガス発電」、「木質バイオマス発電」の材料投入額のうち、熱供給・発電部分が別会社になることにより、「原料糖」から削減されると想定される費用を控除した。「原料糖」の中間投入額と付加価値額の合計値と、産糖量の増加から推計された生産額の差額を営業余剰の項目に計上（マイナス）した。熱供給・発電部分の別会社化による費用の削減分より、「バイオマス熱供給業」と「バイオマス発電」からの熱と電力の購入額の方が大きいため、生産額あたりの営業余剰額はこの時点では減少する。
- ・ 「バイオマス熱供給業」と「バガス発電」へのバガスの販売額と、「バイオエタノール」への糖蜜の販売額を営業余剰に計上（プラス）する。これにより、システム導入前後の「原料糖」の生産額あたりの営業余剰額はやや増加する。

▶ その他の部門（二次推計以降の「原料糖」部門含む）

各部門の島内生産額と、島内の産業・最終需要に供給される額（以下、島内供給額）を一致させる方法について、以下に述べる。

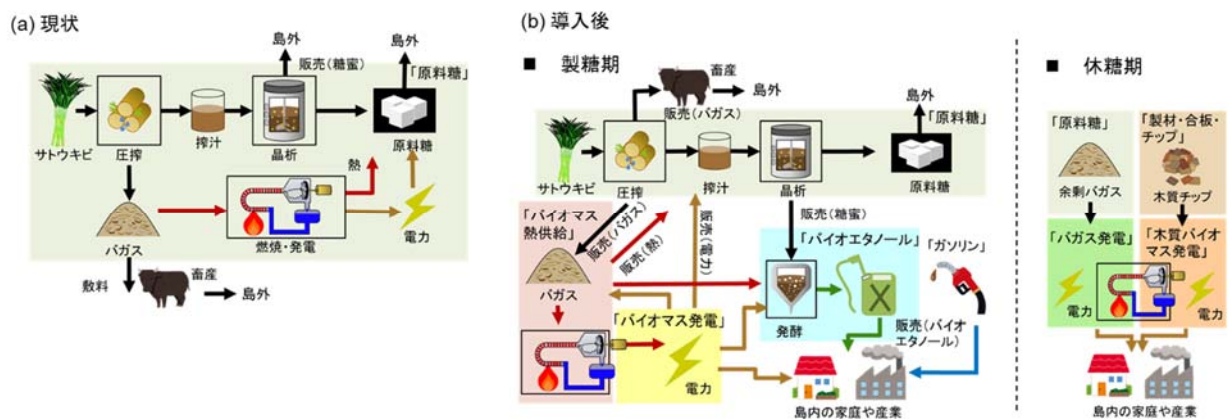
- ・ 新設部門の各部門からの材料投入額（投入ベクトル）を、最終需要額（最終需要ベクトル）として種子島表に与えて推計した、2次、3次の各部門への波及額と、地域エネルギーシステムシナリオをもとに、島内の産業・最終需要に需要される額（以下、島内需要額。移輸入含む）の増減分がすべて島内から供給と想定されるものは、島内需要額の差分を該当部門の生産額に加算した。例えば、増加した「原料糖」生産に必要な「砂糖原料作物」や、「製材・合板・チップ」に必要な「素材」、「素材」に必要な「育林」などである。
- ・ 島内需要額の増減分が全て移輸入と想定されるものは、該当部門の移輸入額に差分を加算した。例えば、「発電」の減少に伴う「その他石油製品」（重油）の減少分などである。
- ・ その他の部門の島内需要額の増減分は、当該部門の移入率、輸入率、自給率からそれぞれ移入、輸入、島内生産額に按分し、各項目に計上した。
- ・ 各部門の島内生産額が増減すると、それに伴い各部門の島内需要額が増減する。そのため、上記方法を、各部門の供給額と需要額の差額が十分に小さくなるまで繰り返し、差額は部門の状況・性質、シナリオによって、移輸入、在庫、最終消費、付加価値などに計上し、調整する。
- ・ 最終需要部門のガソリン消費額の減少に伴う輸送費や商業マージンの減少分は、商業マージン表、国内貨物運賃表、全国表を用いて推計し控除した。
- ・ また、地域エネルギーシステム導入による影響を明確化するために、「バイオマス発電」、「バガス発電」、「木質バイオマス発電」と「発電」部門の単価(円/kWh)の差額や、「ガソリン」と「バイオエタノール」の差額(円/J)により、中間投入額(円/年)が減少した部門は雇用者所得に減少分をプラス計上、増加した部門は営業余剰(営業余剰が発生しない一部サービス部門は雇用者所得)に増加分をマイナス計上することで、新設部門に関連する部門以外からの中間投

入係数を導入前後で一定とした。

以上のような方法で、地域エネルギーシステムに対応した拡張型種子島表を作成した。拡張型種子島表を用いた社会経済性評価の分析結果は、次節で述べる。

表(3)- 2. 評価対象とする地域エネルギーシステムについて

導入システム (新設部門)	燃料 (供給部門)	基本表	生産物の供給
バイオマス熱供給業	バガス (「原料糖」)	全国表「熱供給業」	「原料糖」、「バイオマス発電」、 「バイオエタノール」
バイオマス発電	熱 (「バイオマス熱供給業」)	REFIO「木質バイオマス発電」	「原料糖」、「バイオマス熱供給」、 「バイオエタノール」(自営線)
バガス発電	バガス (「原料糖」)	REFIO「木質バイオマス発電」	<ul style="list-style-type: none"> ・(余剰分は)既存「発電」と代替し、島内産業や消費者に供給 ・(余剰)電力の発電量あたりの「送配変電販売」費用は「発電」と同値
木質バイオマス発電	木質チップ (「製材・合板・チップ」)	REFIO「木質バイオマス発電」	
バイオエタノール	糖蜜 (「原料糖」)	全国表「ウイスキー類」	・熱量ベースでガソリンと代替し、島内産業や消費者に供給
バイオディーゼル	廃食用油 (「飲食店」)	インベントリデータ	・全量「自家輸送」の軽油と燃費ベースで代替



図(3)- 2. 地域エネルギーシステム導入前後の産業連関表上の表現のイメージ図

b. 地域エネルギーシステムの導入による社会経済性評価および意思決定への寄与

本項では、前節で作成した拡張型種子島表を用いて分析した地域エネルギーシステムの導入による社会経済性評価の結果と地域の意思決定への寄与について述べる。システムの導入により、島内の電力需要の14.2%が自然エネルギーに代替され、ガソリンの7.5%、軽油の0.2%が代替される。また、品種の変更による茎重量の増加による「砂糖原料作物」や「原料糖」の生産額の増加が大きく、全体で46.31億円の新たな生産が島内に生まれる。さらに、この新設部門やシステムの導入に伴う材料投入によって派生需要が生じ、種子島の島内生産額は約51.50億円、粗付加価値合計は約20.07億円、雇用者所得は約4.59億円増加すると推計された。この島内生産額の増加分は、システム

導入前の島内生産額の3.5%に当たる。

図(3)-3(a)は、地域エネルギーシステムの導入前後の島内波及額（生産額）の差額が大きな部門とその島内影響力を示したものである。新設部門である「バイオマス発電」、「バイオマス熱供給業」、「バイオエタノール」、「バガス発電」、「木質バイオマス発電」、「バイオディーゼル」の増加生産額は、それぞれ約2.77億円、1.53億円、0.52億円、0.42億円、0.62億円、0.04億円である。サトウキビ品種の変更により産糖量が増加した「原料糖」部門の生産額の増加分は17.17億円、その原料となる「砂糖原料作物」の生産額増加は24.87億円と非常に大きい。つまり、地域エネルギーシステムの導入において、原料を供給する1次産業に対しても新システムに対応した技術を導入することや、既存産業と競合しないシステムを設計することが重要であることが分かる。自然資本を利用する工学（二次産業）側の技術発展・導入だけでなく、主産物の生産力を向上させることにより燃料となる副産物の供給量を増加させ、1次産業の根本的な基盤を強化するような農林学側の技術発展・導入が重要である。また、「バガス発電」の燃料となる木質チップを供給する「製材・合板・チップ」や、サトウキビや木質チップの輸送に必要な「道路貨物輸送（除自家輸送）」の生産額もそれぞれ0.53億円、0.64億円ずつ増加する結果となった。さらに、「砂糖原料作物」の生産に必要な「飼料・有機質肥料」（0.42億円）、「農業サービス」（0.41億円）、様々な製品の供給に必要な「卸売」（0.46億円）も増加し、その他の部門でも合計3.33億円分の生産額が増加する結果となった。一方、「バイオマス発電」、「バガス発電」、「木質バイオマス発電」との代替により「電力」部門の生産額は約2.12億円減少し、その他の部門でも合計0.19億円の生産額が付随して減少するが、減少分に対し、増加分が十分に大きいと、地域資源を利用したエネルギーシステムの導入は、種子島に新たな生産を増やし、経済と雇用を活性化しうる。本分析では、バイオエタノールの単価(円/J)はガソリンと比較して3割ほど安いと、各部門の雇用者所得を押し上げる方向に寄与しているが、電力は既存電力に対して、新設の電力部門の単価(円/kWh)が4割ほど高いと、営業余剰を押し下げる方向に寄与している。しかしこれは、離島での発電事業の赤字分を他地域での黒字で補填しているために実現される単価であり、補填分を除外した単価で計算すると、逆に新設の電力部門の単価の方が5割ほど低くなる。今後の電力自由化の流れにより、種子島島内の既存電力の価格が上昇することがあれば、地域エネルギーシステムの社会経済性はより高くなる。また、既存電力の供給量の減少により、既存電力の赤字分も11.20億円分削減される推計結果となり、既存電力会社にとっても利益があることであると確認された。

新エネルギー部門の島内影響力は、「バイオマス発電」：1.467（24位）、「バイオマス熱供給業」：2.148（4位）、「バイオエタノール」：1.836（9位）、「バガス発電」：1.684（15位）、「木質バイオマス発電」：1.819（8位）、「バイオディーゼル」：1.906（5位）であり（括弧内は全産業中の順位）、どの新エネルギー部門の影響力も全産業平均より高い。特に、「バイオマス熱供給業」は、島内波及力の高い「原料糖」部門の副産物であるバガスを燃料とした点と、そのバガスが島内生産額中で大きなシェアを占めるサトウキビ由来の製品であるため、影響力が大きい。また、「原料糖」の影響力はシステム導入前の2.797から2.852に増加し、「製材・合板・チップ」も1.813から1.836に、全部門の平均影響力も1.182から1.194に増加する。つまり、島内に1億円の需要が発生した場合、120万円分多く島内に波及効果が留まるということである。このように、地域の基幹産業の副産物や森林資源、廃食用油のような廃棄物を燃料としたエネルギーシステムを導入することにより、生活や産業活動の基盤であるエネルギーの自給率を上昇させ、地域の経済を好循環化

することは、地域の基礎体力を向上させることにつながる。例えば、エネルギーを使用する新たな産業が島内に新設される場合や、島内製品のブランド化により島外への移輸出が増加した場合の、種子島島内への経済波及効果は大きくなり、観光客1人あたりが島内で消費する金額のうち、島内に留まる波及効果も大きくなる。

図(3)- 3 (b)は、地域エネルギーシステムの導入により、増減した島外への流出額とその内訳を示している。電力の代替やガソリン代替により、「その他の石油製品」（主に発電に必要な重油）に対する島外流出額が1.68億円、「ガソリン」に対する流出額が0.64億円、全体で2.34億円分の流出額が削減される。一方で、地域エネルギーシステムの導入による新エネルギー部門、「原料糖」、「砂糖原料作物」などの多くの島内産業の生産額の増加に伴い、材料の移入が増加し、島外流出額は7億4700万円増加する。しかし、移輸入率の平均は、システム導入前の0.65から0.63に減少しており、需要額や生産額に対する移輸入率も減少している。島外流出額の増加が大きい部門は、サトウキビの生産に必要な「化学肥料」（2.26億円）と「農薬」（0.96億円）、またサトウキビや木質チップの輸送に必要な「軽油」（0.48億円）である。前者については、島内の有機質肥料の活用や養分（NPK）循環法の活用により流出額の減少が期待され、後者はBDFでの代替により改善される。前述の通り、BDFは島内影響力も高く、地域エネルギーシステムの導入によって増加する島外流出額を抑えることができるため、今後の生産量増加が島内経済にとって非常に重要であることが分かった。

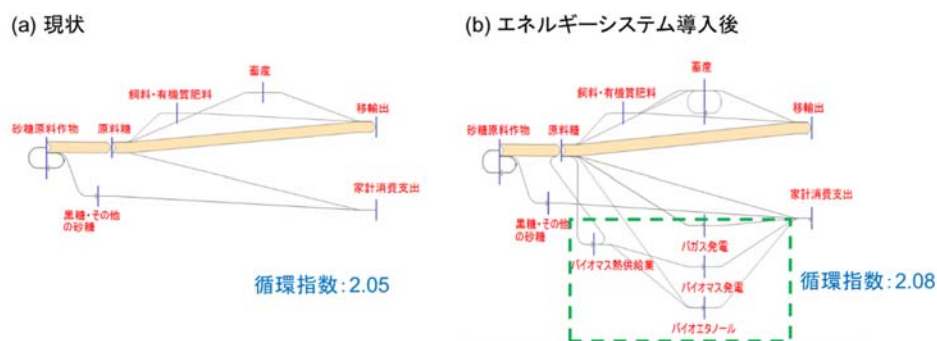
図(3)- 4は、地域エネルギーシステム導入前と後のサトウキビ（砂糖原料作物）由来のキャッシュフローを示したものである。現状では、「原料糖」部門に投入されたサトウキビのキャッシュフローのほとんどは、原料糖として島外の精製糖工場に移出されており、子牛の敷料として「畜産」部門に供給されているバガスから生み出されるキャッシュフローも子牛とともに島外に移出される。循環指数とは、サトウキビ由来のキャッシュフローが島内でどれだけ循環しているかを表しており、現状では2.05である。サトウキビ由来のバガスや糖蜜を利用した地域エネルギーシステムを導入することにより、「バイオマス熱供給業」や「バイオマス発電」、「バイオエタノール」、「バガス発電」部門へのキャッシュフローが新たに構築されるため、循環指数は2.08となり、サトウキビ由来の生産や付加価値を島内に増やすことができる。

このような地域エネルギーシステムの導入による社会経済的影響を定量的かつ視覚的に表すことにより、議論をより明確化し、導入へのモチベーションに変化を与え得る。実際に地域のプレイヤーと評価結果を共有することにより、様々な意見や反応を得ることができた。『平成20年～平成24年人口動態保健所・市区町村別統計の概況』²⁹⁾によると、種子島は、平成20～24年の中種子町の合計特殊出生率が2.0（全市町村中22位）と、多くの市町村の合計特殊出生率が1.3～1.6であることと比較すると、高い水準にあるが、島内に大学が存在せず、就職先も少ないため、若年層の島外流出が問題となっている。このような状況下で、雇用の確保や創出は、島民の大きな関心事であり、島内生産額の多くを占める企業も雇用の創出を重要項目に挙げている。特に、種子島の農家の60%以上が携わっており、種子島を支えてきたサトウキビ産業に対する意識は高く、サトウキビが生み出す付加価値を増加させることにより、サトウキビの経済基盤を強化し、さらに島内の経済波及力を高める地域エネルギーシステムの導入には、将来にわたって種子島に居住するために必要な手段の1つであると、概ね好意的な意見が得られた。ただし、甘味資源作物交付金の制度上、新エネルギー事業での利潤を直接サトウキビ農家に還元することは困難である。

そのため、企業利益を求めるのではなく、地域に安価なエネルギーを供給することで還元する案や、エネルギー産業の利潤を農業サービスの拡充にあてることにより、サトウキビ農家の負担や費用を削減する案などが具体的に提案された。また、種子島の森林が健全に保たれない場合の自然災害や圃場や漁場への影響の可能性を共有し、議論することにより、木質バイオマス発電の実施、購入についても好意的な意見が得られた。このように、地域エネルギーシステムの導入による社会経済的なメリットとデメリットを定量的かつ視覚的に提供し、地域にとって意味のあるメリットを提示・共有することで、現地の意思決定にイノベーションを起こしうることを確認した。本研究で開発した地域エネルギーシステムの社会経済性の評価手法は、他の地域や他の技術に適用可能であり、新規環境技術の導入における地域の意思決定を支援するものである。



(a) 島内波及額（生産額）の差額と島内への波及力 (b) 島外流出額の差額（単位：百万円）
 図(3)- 3 地域エネルギーシステム導入前後の分析比較結果



図(3)- 4. 地域エネルギーシステム導入前と後のサトウキビ由来のキャッシュフロー

(2) 佐渡市のケーススタディ

1) 佐渡表の改良と佐渡市の産業構造の分析

本項では、佐渡市役所から提供を受けた佐渡表を、主にエネルギー部門について改良した改良版の佐渡表（2000年、57部門）（以下、佐渡表（改良版））の推計結果と、同表を用いた佐渡市の産業構造の分析結果について以下で述べる。

まず、「電力・ガス・熱供給」部門を新潟県表の投入比・産出比に基づいて、「電力」部門と「ガス・熱供給」部門に分割した佐渡表を作成した。「ガス・熱供給」部門の熱供給業の生産・産

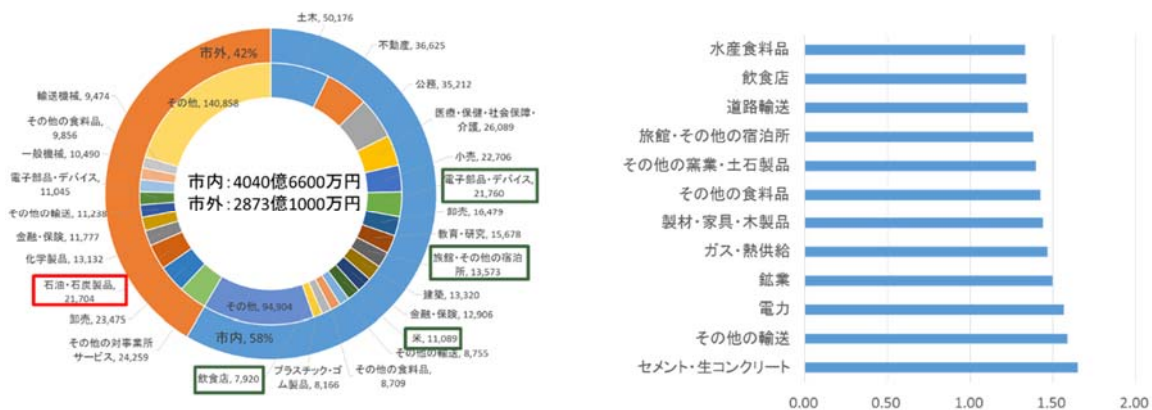
出額は、新潟県表の情報から0円/年とした。佐渡市での都市ガスの普及率は50%前後であり、新潟県表の投入比で推計された各部門・最終需要への「ガス・熱供給」部門の産出額は過大となる。そのため、推計された「ガス・熱供給」部門の島内生産額と、新潟県表の投入比で推計された産出額の合計の差分は、液化石油ガスの使用分であると仮定し、「ガス・熱供給」部門の各部門・最終需要への産出額から差し引き、「石油・石炭製品」部門へ計上した。種子島のケーススタディと同様、都市ガスと液化石油ガスの価格は同値とする。既存佐渡表の「電力」部門は、東北電力の電源構成（火力、水力、原子力発電）に従っているが、佐渡市の電源構成は98%以上が重油を燃料としたディーゼル発電であるため、改良が必要であり、また「発電」部門と「送配変電販売」部門は分割されていないために、両部門の分割が必要である。種子島のケーススタディと同様の方法で「発電」と「送配変電販売」の投入・産出構造を推計し、佐渡表（改良版）を作成した。

図(3)-5(a)は、佐渡表（改良版）を用いて、現状の佐渡市の産業構造を示したものである。佐渡市の最終需要（移輸出含む）に対する市内外への波及効果の合計は6,913億7,600万円であり、そのうちの市内への波及効果が58%の4,040億6,600万円、市外への流出波及額が42%の2,873億1,000万円である。市外流出額の合計は年間1,552億9,400万円である。つまり、年間1,552億9,400万円分の市外の製品・サービスの購入により、経済波及効果の2,873億1,000万円分が市外に流出しているということである。その内訳をみると、「その他の対事業所サービス」：245億5,900万円、「卸売」：234億7,500万円、「石油・石炭製品」：217億400万円、「化学製品」：131億3,200万円、「金融・保険」：117億7,700万円、「その他の輸送」：112億3,800万円などである。種子島同様、佐渡市は島嶼地域であるため、移入による卸売や島内で生産していない化学製品、機械類への波及効果の流出は避けがたい面もあるが、「石油・石炭製品」への流出波及額が大きい。この「石油・石炭製品」部門には、石油製品に該当する市内のディーゼル発電や工場や施設園芸の熱利用に必要な重油、ガソリン、軽油、灯油のほか、石炭製品に該当するコークスや練炭などが含まれているが、その大部分は石油製品に該当するものである。いずれも佐渡市内では生産されていないが需要度が高いため、年間115億2,900万円を島外に支払い、217億400万円という大きな波及効果を島外に流出させている。種子島のケーススタディ同様、佐渡市でも地域資源や自然資源を利用したエネルギーシステムを導入することは、エネルギー需要に起因する市外流出額を削減し、市内への波及効果を増加させることに繋がり、市内経済の活性化と経済循環の改善に大きく寄与することが期待される。市内への波及額（生産額）をみると、「土木」：501億7,600万円、「不動産」：366億2,500万円、「公務」：352億1,200万円、「医療・保険・社会保障・介護」：260億8,900万円、「小売」：227億600万円など、種子島のケーススタディ同様、医療や公務、教育などの公共サービスや、不動産、小売、卸売などの商業、対個人サービスが大きいことがわかる。ただし、「電子部品・デバイス」や「米」の生産額が大きい点は特徴的であり、「旅館・その他の宿泊」、「飲食店」の生産額が大きいことも島嶼地域（架橋されている島嶼地域を除く）で最大の人口を保持し、観光業が盛んな佐渡市の特色である。

図(3)-5(b)は、市内への影響力が大きい部門を示したものである。市内の全産業の平均影響力は1.26と種子島の1.18と比較すると高い水準にあるが、最も影響力が高い部門は、「セメント・生コンクリート」部門の1.65であり、種子島のケーススタディの「原料糖」部門(影響力：2.95)のように特に影響力が大きい部門が存在しないことも特徴である。また、種子島のケーススタディのように、影響力が大きい部門の中に、農業部門や農産物を原料とした二次産業は存在しない

が、水産食料品の影響力が1.33と比較的高い。影響力の面でも「旅館・その他の宿泊所」(1.38)、「飲食店」(1.34)の存在は大きく、産業活動の基盤であるエネルギーの自給率を上昇させることにより、観光に伴う消費の島内波及効果を高めることが期待できる。

上記の佐渡市の産業構造の分析結果から、種子島のケーススタディ同様、地域エネルギーシステムを導入することにより、市外から移入している燃料とそれに伴う流出額を削減し、エネルギー需要に伴う経済波及効果と付加価値を市内に創出することに大きな意義があることがわかった。しかしながら、佐渡市内には、エネルギーシステムの燃料となる副産物を生み出す影響力の高い部門が存在しないため、佐渡市も低炭素化の柱として注目している太陽光発電と木質チップを用いた木質バイオマス発電の社会経済的効果について分析した結果を次項で述べる。



(a) 島内への波及額と島外への流出波及額 (単位：百万円) (b) 各産業の市内産業への影響力
図(3)-5 現行の佐渡市における社会経済性分析結果

2) 佐渡市への地域エネルギーシステムの導入による社会経済性評価

本項では、佐渡市への地域エネルギーシステムの導入による社会経済性を評価するための拡張型佐渡表の推計と、導入による社会経済的効果の分析結果について述べる。

■ 地域エネルギーシナリオの設定

本分析では、「佐渡市地域新エネルギービジョン」³⁰⁾に基づき、太陽光発電、木質バイオマス発電により、佐渡市内の既存電力を代替するシステムの社会経済性を評価する。詳細は後述するが、種子島のケーススタディと同様、太陽光発電と木質バイオマス発電での発電分は、既存電力会社に売電され、既存電力とともに市内の各産業・消費者に供給されるが、拡張型佐渡表では、直接市内の各産業・消費者に供給される形式で計上する。地域エネルギーシステムの導入前後で、各産業・最終需要の生産・需要当たりの電力消費量は変化しないものとする。

■ 新設部門の推計と拡張型佐渡表の作成

① 「太陽光発電」：島内電力需要の17.1%を代替、24円+税/kWh

一般住宅を「住宅用太陽光発電」、その他を「小規模産業用太陽光発電」とし、「佐渡市地域新エネルギービジョン」の各建物へ設置される太陽光パネルの期待可採量(MWh/年)と、FITの太陽光発電の販売価格24円+税/kWh、REFIOの対応する部門の投入係数から投入構造を推計した。佐渡表(改良版)の各部門・最終需要の「発電」からの投入額のうち

17.1%を「太陽光発電」に代替するとし、「発電」と「太陽光発電」の単価比より、各部門・最終需要の「発電」と「太陽光発電」からの産出額と推計した。

② 「木質バイオマス発電」：島内電力需要の1.8%を代替、30.5円/kWh

燃料となる間伐材、土場残材をFITの「間伐材等由来の木質バイオマス」(2,000kW未満、40円+税/kWh)、製材端材を「一般木質バイオマス・農作物の収穫に伴って生じるバイオマス」(24円+税/kWh)、建設廃材、剪定枝等を「一般廃棄物 その他のバイオマス」(17円+税/kWh)とし、「佐渡市地域新エネルギービジョン」より得られたそれぞれの発生量(t/年)と発熱量(kcal/kg)から「木質バイオマス発電」の単価(円/kWh)を求めた。この単価とREFIOの「木質バイオマス発電」の投入係数から、生産額と投入構造を推計した。木質燃料の購入単価を種子島と同じく18,000円/絶乾トンとし、「佐渡市地域新エネルギービジョン」の各木質燃料の含水率から燃料購入額を計算した結果、上記の電力販売単価では赤字となった。そのため、「木質バイオマス発電」は公共団体が運営し、設備投資についても補助金等を活用すると仮定し、営業余剰と資本減耗引当額を0円/年とした。この結果、木質燃料の購入単価は10,472円/絶乾トンとなり、この数値が採算を確保するための目標単価とする。「木質バイオマス発電」の産出構造は、「太陽光発電」と同様の方法で推計した。

③ 拡張型佐渡表の作成

- ・ 佐渡表（改良版）の「発電」部門の生産額のうち、「太陽光発電」と「木質バイオマス発電」に代替される電力量に相当する生産額分を差し引き、新たな「発電」部門の生産額とし、中間投入額、付加価値額を推計した。拡張型種子島表の作成方法と同様に、各部門の島内生産額、島内供給額、移輸入額の推計、調整を行った。
- ・ 「発電」部門の生産額の減少に伴い、「発電」部門へ材料を供給していた部門の生産額が減少する。さらに、この材料投入部門の生産額の減少に伴い電力需要も減少する。この減少分は、全て既存の「発電」部門からの電力供給であるとし、「太陽光発電」、「木質バイオマス発電」部門からの電力供給量は一定とする。そのため、当初の導入値より、わずかであるが島内電力需要における両部門からの電力供給比率は増加する（「太陽光発電」17.11% → 17.24%、「木質バイオマス発電」1.76% → 1.78%）。
- ・ 本分析では、種子島のケーススタディと異なり、地域エネルギーの販売価格はFITが定める販売価格と同値であり、島嶼地域以外の地域の電力事業利益から赤字補填された既存電力の販売価格より高く設定されている。そのために生じた各部門の電力コストの増加分は、営業余剰にマイナス計上した。
- ・ 上記のような仮定の下、多段階推計を行い、拡張型佐渡表を作成した。

拡張型佐渡表を用いて分析した結果、地域エネルギーシステムが導入されることにより、市外への流出額は約6.54億円削減され、域外流出波及額は19.25億円減少する。図(3)-6(a)は、システム導入前後の島外流出額の差額を表したものである。流出額の削減が最も大きいのは「石油・石炭製品」の6.01億円であり、「太陽光発電」や「木質バイオマス発電」導入による既存電力の代替に伴う重油の移入額の削減効果が大きい。これに付随し、ディーゼル発電や重油輸送に必要な「金融・保険」(0.22億円)、「卸売」(0.14億円)や、「その他の対事業所サービス」(0.36億円)、「通信・放送」(0.14億円)などの流出額も減少している。一方、地域エネルギー部門（特に「太陽光発電」）の新設等により、「その他の電気機器」(0.74億円)などの移入額が増加し、全体で

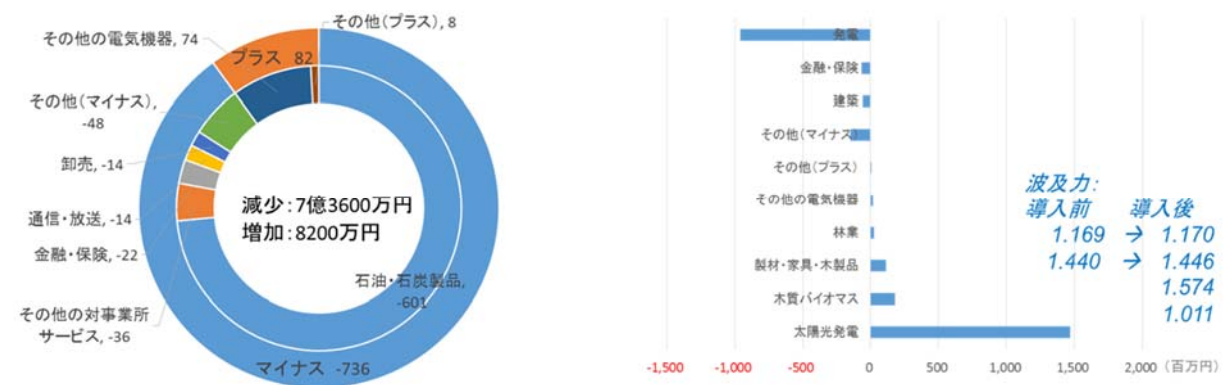
0.82億円増加する。種子島のケーススタディと異なる点は、「原料糖」、「砂糖原料作物」のように生産額が大きく増加する部門が存在せず、それに伴う移輸入材料製品・サービスの移入額が増加しなかった点である。そのため、電力代替による燃料の削減分が、他の製品・サービスの移入増加分に対し大きく、システム導入のネットの効果として、市外からの移入額を削減し、市内資金の市外への流出を抑えることができる。

一方、島内生産額の増加は種子島のケーススタディと比較して小さい。図(3)-6 (b)は、地域エネルギーシステムの導入前後の市内波及額（生産額）の差額が大きな部門とその市内波及力を示したものである。新設部門である「太陽光発電」、「木質バイオマス発電」の増加波及（生産）額は、それぞれ約14.7億円と1.8億円であり、「木質バイオマス発電」に燃料として製品を供給した「製材・家具・木製品」や「林業」部門の生産額の増加は約1.1億円、0.2億円であり、増加額の合計は17.0億円である。一方、「太陽光発電」と「木質バイオマス発電」との代替により「発電」部門の生産額は約9.6億円減少し、「金融・保険」部門が0.7億円、「建築」部門が0.6億円、合計で12.3億円の生産額が減少する。つまり、全産業では5.7億円の生産額の増加であり、これはシステム導入前の市内生産額の0.1%である。種子島のケーススタディでは3.5%の生産額が増加したことと比較すると、経済効果は小さい。これは、「原料糖」、「砂糖原料作物」のように生産額が大きく増加する部門が存在しなかったことと、電力価格が種子島のケーススタディと比較して割高であったため、島内産業の生産額に対する電力購入額が増加し、付加価値と生産額を押し下げる方向に寄与したためである。「太陽光発電」と「木質バイオマス発電」の導入による電力購入額の増加によって失われた付加価値は8.0億円であり、システム導入前の全産業の付加価値合計額の0.3%にあたる。種子島のケーススタディの項でも述べたように、既存電力の赤字の補填分がない場合には、「太陽光発電」や「木質バイオマス発電」の電力単価の方が安価になるが、地域エネルギーシステムの導入による地域内の社会経済効果を高めるためには、種子島のケーススタディのように安価に利用できる1次産業や2次産業の副産物を利用する方策や、同時に島内の基幹産業の生産額を増加させるようなシステムの構築が必要である。

また、新エネルギー産業の島内波及力は、「太陽光発電」：1.011、「木質バイオマス発電」：1.574と、地域資源を燃料として利用しない「太陽光発電」に比べ、地域の木質チップを燃料として利用する「木質バイオマス発電」の市内波及力は1.6倍も大きい。つまり、「太陽光発電」と「木質バイオマス発電」を比較すると、「太陽光発電」は市外資源（重油）の削減に寄与するが、その他の波及効果の増加はそれほど大きくないのに対し、「木質バイオマス発電」の場合、市外資源（重油）の削減に寄与するとともに、市内資源（木材）の活用に伴う経済波及効果が生じ、「太陽光発電」に比べ1.6倍もの波及生産を市内に生み出すことができる。また、「製材・家具・木製品」部門や「林業」部門の市内波及力も上昇し、産業全体の波及力の平均も1.26から1.27に上昇する。システム導入後の「木質バイオマス発電」の波及力は、全産業中4番目に大きい。種子島のケーススタディのバガスを燃料として利用した「バイオマス熱供給業」の波及力2.15と比較すると、小さい。これは、サトウキビが種子島の基幹産業であり、バガスを生み出す「原料糖」部門の波及力が大きいのに対し、佐渡市における「林業」や「製材・家具・木製品」の市内の生産額に占めるシェアが相対的に小さいためであると考察できる。

このように、自然資源や地域資源を利用したエネルギーシステムである「太陽光発電」や「木質バイオマス発電」を導入することにより、種子島のケーススタディ同様、生活や産業活動

の基盤であるエネルギーの自給率を上昇させ、地域外への流出額を削減することができる。しかし、太陽光発電や風力発電などの地域資源を用いない自然エネルギーより、「木質バイオマス発電」のように地域資源を用いる地域資源エネルギーを活用した方が、新エネルギーシステムの導入による地域の社会経済的効果を高められることも定量的に明らかになった。



(a) 市外流出額の差額 (単位：百万円) (b) 市内波及額 (生産額) の差額と市内への波及力
図(3)- 6 地域エネルギーシステム導入前後の分析比較

(3) ケーススタディの結果からの考察

種子島地域と佐渡市における地域エネルギーシステム導入の社会経済評価のケーススタディの結果、地域資源を活用したエネルギーシステムの導入には、主に化石資源やそれに伴う輸送・商業マージン等の地域外からの移入額を削減し、地域内産業の域内波及力を高める効果があることがわかった。一方で、既存電力の生産額（発電量）の減少による島内産業の生産額の減少や、割高な自然エネルギーの導入による電力単価の上昇およびそれに伴う各産業の付加価値額の減少、新エネルギー産業の導入による材料移入額の増加なども生じる。そのため、地域エネルギーシステムの導入によって創出される島内生産額の増加分が十分に大きくない場合や、電力単価が高い場合は、システム導入による社会経済効果が低いもしくは十分に存在しない可能性が示唆された。本研究での2つのケーススタディの対象地は、島嶼地域であり、既存電力の発電コストが高いため、今後の電力自由化の流れを考えると、高い社会経済効果を確保できるポテンシャルはあるが、より効果を高めるためには、安価に利用できる1次産業や2次産業の副産物を燃料として利用する仕組みや、域内波及力もしくは生産額のシェアが高い産業の製品を利用するシステムを選択・構築すべきである。また、地域資源を利用する工学側の技術やシステムだけでなく、資源を提供する1次産業の生産力を向上させるような農工横断型のシステムを導入することにより、社会経済的な効果を飛躍的に上昇させることも明らかになった。これは、島嶼地域以外での地域エネルギーシステム導入においても同様のことが言える。本研究で構築された地域産業連関表の作成・拡張手法やそれを用いた評価手法により、地域エネルギーシステム導入の直接間接的な正の効果と負の効果の両面を定量的に計測し、総合的な社会経済性を評価できる。さらに、結果を可視化し、地域の利害関係者と共有することで、議論を明確化し、意思決定を援助し得るだけでなく、より良い地域エネルギーシステムを構築するための具体的な改善策の提案にも寄与し得ることが確認された。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究は、計量経済学のツールである産業連関分析を応用・拡張し、様々な技術シナリオに柔軟に対応可能な社会経済性の評価手法を構築したことに大きな意義がある。この手法を用いることにより、工学的に確立された環境技術やシステムを地域で実装・運用する場合に、地域にとって重要な観点となる雇用や地域経済基盤の強化などの社会経済性を定量的に分析・可視化することができ、利害関係者や住民の理解や議論、意思決定を援助しうる。また、技術やシステムの導入による直接的な関係者や影響だけでなく、間接的な利害関係者や影響をも定量的かつ視覚的に特定することにより、技術設計の社会経済的な盲点や障壁を事前に予測し、より地域に受容される技術・システムの設計に寄与することができる。また、太陽光発電を例とした地域資源を活用しない環境技術と、バイオマス発電を例とした地域資源を活用した環境技術の社会経済性の定量化は、今後の地域エネルギーシステムの評価の1つの判断材料となり得る。本研究で構築したモデルは、様々な地域での技術・システムの導入評価・設計に応用可能であり、環境技術・システムの社会実装を促進させるための要素を提案する重要な研究である。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

現在、統計分析やデータ解析などの定量的な根拠を基にした地域政策の提案が求められており³¹⁾、地域産業連関表などの統計データの作成・利用への注目が集まっているが、作成主体である地方自治体の職員の多くは産業連関表の作成方法や利用方法を十分に有していない。そのため、地域の特色を十分に反映しておらず、技術やシステム・政策の評価に対応できない、もしくは誤った結果を導出する産業連関表が作成されてしまうことや、作成しても十分に利用できないという問題が生じる可能性がある。この状況を避けるためには、地域産業連関表の作成に向けた手法論の確立やガイドラインの作成などが必要である。本研究の2地域でのケーススタディは、地域の特色を反映した産業連関表を作成する場合には、どのような点に留意し、実際にどのような方法で作成すべきかの例を示すものであり、地域産業連関表を用いて環境技術・システムの導入効果を分析することにより、どのような結果が得られるのかを示すものである。今後、市町村レベルの産業連関表の整備を進め、環境技術・システム導入等の社会経済性評価を行っていく上では重要な1つの指針となる。また、地域産業連関表を整備しない地域に対しても、本研究で対象とした地域エネルギーシステムの社会経済性（地域内の経済波及効果や雇用創出効果など）の目安値を提供することができ、意思決定における判断材料となり得る。このように、変化に伴う影響が“わからない”ことにより進まない意思決定に対し、判断材料を増やすことが期待される。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない。

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 菊池康紀、尾下優子、福島康裕：PETROTECH, 39, 6, 461-467 (2016). 帰結的ライフサイクル思考に基づく離島地域のエネルギーシステム設計

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 菊池康紀、尾下優子、福島康裕、第12回日本LCA学会研究発表会、C2-13、(2017)、
「ライフサイクル思考の社会実装:種子島の例」
- 2) 大内田弘太郎、藤井祥万、兼松祐一郎、尾下優子、中村遼太郎、陳怡静、福島康裕、中垣隆雄、
大久保達也、菊池康紀、化学工学会第82年会、J217、(2017)、「農工横断型プロセスモデリングによる持続可能な植物資源利活用のためのシナリオ計画」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 鹿児島県立種子島高校 特別講義「地域の低炭素化シナリオを考える」(2015年7月3日、
9月30日、12月19日、2016年1月27日、1月30日、高校2年生 約150名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) 長谷川良二、安高優司：京都創成大学紀要、8、 1、 47-60、 (2008). 市町村産業連関表の作成に向けた考察と展望
- 2) 本田豊、中澤純治：立命館経済学、49、 4、 51-76 (2000). 市町村地域産業連関表の作成と応用
- 3) 森泉由恵、本藤祐樹、中野諭：日本エネルギー学会誌、94、 12、 1397-1413 (2015). 再生可

能エネルギー部門拡張産業連関表の開発と応用

- 4) 本藤祐樹、佐土原聡、林清忠、<http://www.hondo.ynu.ac.jp/renewables/result/refio.html> (2016)、
「再生可能エネルギー部門拡張産業連関表」（環境省地球環境研究総合推進費 再生可能エネルギー技術の価値評価と導入戦略のための基盤構築）
- 5) R.E. Miller and P.D. Blair: Cambridge University Press (2009). Input–output analysis: foundations and extensions
- 6) Y. Oshita: Energy Economics, 34, 4, 1041–1050 (2012). Identifying critical supply chain paths that drive changes in CO₂ emissions
- 7) M. Lenzen: Journal of Cleaner Production, 10, 6, 545–572 (2002). A guide for compiling inventories in hybrid life-cycle assessments: some Australian results
- 8) 鹿児島県、<http://www.pref.kagoshima.jp/tokei/bunya/keizai/renkan/index.html> (2016)、産業連関表 過去及び全国の統計表
- 9) 沖縄県、http://www.pref.okinawa.jp/toukeika/io/2005/sanren_top.html、(2005)、平成17年産業連関表
- 10) 鹿児島県、<https://www.pref.kagoshima.jp/ap01/chiiki/kumage/chiiki/h24kumagegaikyoku.html> (2013)、平成24年度熊毛地域の概況
- 11) 鹿児島県、<http://www.pref.kagoshima.jp/tokei/bunya/keizai/syotoku/index.html> (2017)、市町村民所得推計
- 12) 経済産業省、<http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kougyou/result-2/h24/kakuho/sichoson/index.html> (2014)、工業統計調査 平成24年確報 市区町村編
- 13) 国土交通省、http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo13_hh_000255.html (2014)、平成25年度末の汚水処理人口普及状況について
- 14) 鹿児島県、https://www.pref.kagoshima.jp/ad03/kurashi-kankyo/recycle/sanpai/singikai_index.html (2016)、鹿児島県廃棄物処理計画
- 15) 厚生労働省、
http://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryoku/iryohoken/database/iryomap/index.html (2014)、医療費の地域差分析
- 16) 鹿児島県、<https://www.pref.kagoshima.jp/ae05/kenko-fukushi/koreisya/koreika/koureikaritu.html> (2016)、鹿児島県の高齢化率
- 17) 国土交通省、<http://www.mlit.go.jp/k-toukei/search/excelhtml/22/22201200a00000.html>、自動車燃費消費量調査年報 過去の統計資料
- 18) 日本離島センター、日本離島センター (2014)、2012離島統計年報
- 19) 総務省、<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=0,00001019588&cycode=0>、平成17年(2005年)産業連関表(確報)
- 20) 沖縄電力株式会社、<http://www.okiden.co.jp/ir/financials/securities.html> (2007)、有価証券報告書 平成18年度
- 21) 沖縄電力株式会社、<http://www.okiden.co.jp/ir/library/setumeikai.html> (2006)、決算説明資料
- 22) 九州電力 熊毛営業所 (2012)、熊毛の電力
- 23) Y. Kanematsu, K. Oosawa, T. Okubo and Y. Kikuchi: Applied Energy, 198, 160-172 (2017).

- Designing the scale of a woody biomass CHP considering local forestry reformation: A case study of Tanegashima, Japan
- 24) S. Ohara, Y. Fukushima, A. Sugimoto, Y. Terajima, T. Ishida, A. Sakoda: Biomass and Bioenergy, 42, 78–85 (2012). Rethinking the cane sugar mill by using selective fermentation of reducing sugars by *Saccharomyces dairenensis*, prior to sugar crystallization Original Research Article
 - 25) 資源エネルギー庁、
http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/kakaku.html (2016)、なっとく！再生可能エネルギー 買取価格・期間等
 - 26) Kikuchi, Y., Kanematsu, Y., Ugo, M., Hamada, Y. and Okubo, T., Journal of Industrial Ecology, 20, 276-288, (2016). Industrial symbiosis centered on a regional cogeneration power plant utilizing available local resources: A case study of Tanegashima
 - 27) 北川尚美、米本年邦：化学工学、74、4、164-167 (2010). イオン交換樹脂触媒を用いた新規なバイオディーゼル燃料製造技術の開発
 - 28) 福島康裕、北川尚美：化学工学会第82年会（東京）口頭発表 (2017). 次世代エネルギー社会検討委員会活動報告 ～モジュール化した技術でつくる地域密着型バイオディーゼル生産システム～
 - 29) 厚生労働省、<http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/other/hoken14/> (2014)、平成20年～平成24年人口動態保健所・市区町村別統計の概況
 - 30) 佐渡市、https://www.city.sado.niigata.jp/admin/vision/n_ene06/pdf.shtml (2006)、市政概要 佐渡市地域新エネルギービジョン
 - 31) 内閣府、<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/sousei/>、内閣官房・内閣府 総合サイト みんなで育てる地域のチカラ 地方創生

Development of Low-Carbon Scenarios for Transition of Regional Energy Systems based on Socio-Economic Analyses

Principal Investigator: Yasunori KIKUCHI

Institution: The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, JAPAN
Tel: +81-3-5841-1596 / Fax: +81-3-5841-1596
E-mail: kikuchi@platinum.u-tokyo.ac.jp

Cooperated by: Tohoku University, and Kobe University

[Abstract]

Key Words: Scenario development, Consumer preference, Technology dispatching, Regional input output table

The design of energy systems has become a worldwide issue. Although applicable technology options have been proposed such as photovoltaic, wind turbine, small- and medium-size hydroelectric, and biomass power generation, a single optimal system cannot be suggested because the local availability of infrastructure and resources should be considered. In particular, Japan is at a momentous turning point in world history, facing a wide range of social issues such as the control of environmental loads, the countermeasures to deal with a rapidly aging population with a low birthrate, and the establishment of a sustainable energy system. Socio-economic benefits are strongly required for local societies to implement novel technologies or systems, regardless of whether they are profitable and mitigate fossil resource consumption.

In this study, we aim to promote the practical transition of regional energy systems by developing possible transition scenarios based on consumer preferences, greenhouse gas (GHG) emissions, and socio-economic analyses. Tanegashima and Sadogashima, remote islands in Japan, were considered as case studies for scenario development, both of which are facing the severe problems of a high cost of energy and population decline, despite having abundant natural capita.

Technical simulations of the implementation of biomass power, bioethanol, and biodiesel production were conducted to evaluate the GHG emission reduction by constructing mathematical technology-dispatching models. The power load following was successfully simulated by the developed model, which showed the limitation of photovoltaic power generation within microgrids. The simulation also demonstrated that a combination of renewable-derived technologies can reduce GHG emission considering local conditions on remote islands.

Socio-economic aspects are another important factor in technology implementation. Input-output analysis based on expanded input-output tables for Tanegashima and Sadogashima, which were constructed in this study, was performed to quantify the effects of the implementation of bioethanol, biodiesel, and power production from locally available resources. It clarified the possibility of enhancing the importance of local industries by increasing the demand for materials required for technology implementation.

Through multiple surveys of consumers regarding energy use and selection, preferences for protecting local natural capital and low-carbon technologies were observed. The surveys also revealed the correlations between the properties of people and preferences. These findings can be used as supporting information for local governments when deciding activities to promote the transition of energy systems. Information sharing with local stakeholders can help lead to the development of transitional energy systems customized to regional scenarios.