

Title	持続可能な社会・エネルギー利用のための仕組み構築： エネファーム、Jクレジット制度、協力モデルの統合効果
Sub Title	
Author	ウ, セジュン(Woo, Se Jun) 高橋, 大志(Takahashi, Hiroshi)
Publisher	慶應義塾大学大学院経営管理研究科
Publication year	2024
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2024年度経営学 第4218号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40003001-00002024-4218

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

慶應義塾大学大学院経営管理研究科修士課程

学位論文（ 2024 年度）

論文題名

持続可能な社会・エネルギー利用のための仕組み構築
—エネファーム、Jクレジット制度、協力モデルの統合効果—

主 査	高橋 大志
副 査	武田 史子
副 査	林 高樹

氏 名	ウ セジュン
-----	--------

論文要旨

指導教員	高橋 大志	氏名	ウ セジュン
(論文題名) 持続可能な社会・エネルギー利用のための仕組み構築 —エネファーム、J クレジット制度、協力モデルの統合効果—			
(内容の要旨) 近年、地球温暖化やエネルギー資源の有限性が深刻化するなか、化石燃料の使用方法を見直しつつ温室効果ガス（GHG）の削減を進めることが喫緊の課題となっている。本研究では、家庭用燃料電池「エネファーム」、国内の排出削減量をクレジット化して売買可能にする「J クレジット制度」、そしてコミュニティ全体の CO₂ 排出量に基づいて料金割引を行う「コミュニティベース料金プラン」を組み合わせた新たなガスエネルギーモデルを提案・検証した。エネファームはガスを高効率で電力と熱に変換できる分散型エネルギーシステムとして、家庭部門でのエネルギー利用効率向上と CO₂ 排出削減に寄与する。一方、J クレジット制度と組み合わせることにより、エネファーム導入による削減量をクレジット化し、さらなる経済的メリットを享受する仕組みが可能となる。また、コミュニティベース料金プランでは、各家庭が共同で排出量削減を目指すことで、相互監視や社会的規範の醸成による協力行動が促進される。 本研究ではエージェントベースモデル（ABM）を用い、消費者一人ひとりの行動や他者との相互作用を細やかにモデル化することで、コミュニティ全体が協力してエネルギー消費や CO₂ 排出をどの程度抑制できるかをシミュレートした。コミュニティベース料金プラン単独ではガス会社の収益減が懸念されるが、エネファーム導入と J クレジットによる収益補完を組み合わせることで、ガス会社・消費者・環境の三者すべてが利益を得られるモデルを実現できる可能性が示唆された。特に、エネファーム導入が困難な世帯であっても、近隣住民の行動や社会的比較の効果により削減行動が強化されることが確認され、コミュニティ全体の CO₂ 排出を抑制する有効な手段として機能し得ることが明らかとなった。本研究の知見は、持続可能なエネルギー利用モデルの構築と脱炭素社会の実現に向けた制度・ビジネスモデルの設計に貢献するものである。			

目次

第一章	はじめに	1
第二章	背景	3
第一節	エネルギーと持続可能性	3
第二節	エネファームとJ-クレジット制度	5
第三節	協力的モデルとコミュニティベース料金プラン	13
第四節	ABM	14
第三章	研究方法	16
第一節	システムの仕組み	16
第二節	消費者の行動	17
第三節	属性推定およびデータ	19
第四節	消費者のエネファーム導入	32
第五節	消費者のコミュニティへの協力	34
第六節	コンピューター実験	36
第四章	分析	38
第一節	実験設定	38
第二節	結果および考察	40
第三節	限界	43
第五章	まとめ	44
	謝辞	45
	参考文献	45
	付録	51

資料

<図>

図 2-1 エネファームと電力会社からの供給電力 (PEFC)	6
図 2-2 パナソニックの都市ガス用商品試算条件 (PEFC)	7
図 2-3 エネファーム導入前の計算詳細	9
図 2-4 エネファーム導入後の計算詳細	10
図 2-5 エネファーム導入前後の使用量変化	10
図 3-1 消費者の行動ロジック	18
図 3-2 消費者の価格弾力性及び p 値	23
図 3-3 世帯類型別年間エネルギー種別消費量 (y 軸単位 : GJ)	27
図 3-4 世帯類型別年間用途別エネルギー消費量 (y 軸単位 : GJ)	27
図 3-5 シミュレーションの擬似ボード	37
図 4-1 エネファーム導入率変化の例	41
図 4-2 設定ごとのガス会社の利益推移の一部	41

<表>

表 2-1 エネファーム導入前後での電気、ガスへの熱負担 (PEFC)	8
表 2-2 エネファーム導入前のエネルギー使用量	8
表 2-3 エネファーム導入後のエネルギー使用量	9
表 3-1 データセット	20
表 3-2 家族類型・世帯主の年齢別一般世帯数及び割合	25
表 3-3 世帯類型の区分	26
表 3-4 世帯類型の推定割合及びガスと照明・家電製品等のエネルギー消費比率	30
表 3-5 コミュニティごとの世帯類型の分布	32
表 4-1 実験設定のパターン	38
表 4-2 J クレジット値段 (2024 年 12 月 27 日)	40
表 4-3 コミュニティ別のエネファーム導入率の平均と標準偏差	40
表 4-4 コミュニティ別の Co2 排出量削減率の平均と標準偏差	40

第一章 はじめに

地球温暖化やエネルギー資源の有限性は、現代社会が直面する緊急の課題となっている。国際的には再生可能エネルギーの導入やエネルギー利用効率の向上が進められているものの、多くの国・地域では依然として化石燃料への依存度が高い。特に日本においては、温室効果ガス（GHG）削減目標の達成とエネルギーの安定供給という二律背反的な要求を両立させるため、既存のエネルギーシステムに対する抜本的な見直しが求められている。

本研究では、化石燃料の中でも比較的環境負荷が低いとされるガスを活用した家庭用燃料電池「エネファーム」と、国内の温室効果ガス削減量をクレジット化して取引できる「J-クレジット制度」に着目する。エネファームはガスを利用しながら電力と熱を高効率で供給できる分散型エネルギーシステムであり、家庭部門でのCO₂排出削減に寄与する。一方、J-クレジット制度を活用することで、削減したCO₂排出量を売買可能なクレジットとして認証・取引できるため、削減分を経済的価値に変換し、さらなる導入インセンティブを提供する仕組みが期待される。

しかしながら、これらの施策を単独で導入するだけでは、エネルギー消費の最適化やさらなるCO₂削減を実現するには限界がある。そこで本研究は、コミュニティ全体のCO₂排出量を基に従量料金を割引する「コミュニティベース料金プラン」を組み合わせることで、住民間の協力や相互作用を促し、ガス会社と消費者双方が損失を被ることなく排出削減を進める新たなモデルを提案する。本モデルでは、コミュニティベース料金プランの導入により消費者のガス消費削減を促し、エネファームを導入してもらうことでガス会社の収益面を補完しつつ、Jクレジット制度で削減分のクレジットを売却できる仕組みを導入することで、ガス会社・消費者・環境の三者にメリットをもたらす可能性を示す。

さらに、本研究ではエージェントベースモデル（ABM）を用いることにより、消費者間の相互作用や社会的影響力がガス消費やエネファーム導入に及ぼす影響を定量的に評価する。従来の理論モデルでは捉えにくい非線形な協力行動や、他者の行動から受ける影響といった要素をABMに組み込むことで、コミュニティベース料金プランがどのように機能し、どのような条件下で最大限の効果を発揮するかを詳細に検討することが可能となる。

本研究の目的は、エネファーム、J-クレジット制度、そしてコミュニティベース料金プランを統合し、ABMを用いてシミュレートすることで、その総合的な有効性を検証するとともに、持続可能なエネルギー利用モデルとしての実現可能性を提示することである。具体的には、ガス会社と消費者の利益を両立させながらCO₂排出量を削減する方策として、どのような設定や社会的要因が鍵となるのかを考察する。本研究の結果は、脱炭素社会の実現に向けた新たな制度設計やビジネスモデルの構築、そして地域コミュニティにおける協力行動促進の一助となることが期待される。

第二章 背景

第一節 エネルギーと持続可能性

近年、地球温暖化やエネルギー資源の有限性といった問題が深刻化するなかで、「エネルギーと持続可能性」の関係性を見直す動きが強まっている。国際エネルギー機関（IEA）の報告書によると、過去10年間で、エネルギー需要は15%増加したものの、その成長の40%は再生可能エネルギーやCarbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) といったクリーンエネルギー（Clean Energy）によって満たされ、「現在の政策シナリオ（STEPS）」では、エネルギー需要全体の成長ペースが鈍化する中、クリーンエネルギーの導入が加速し、2030年までにすべての化石燃料需要がピークに達すると考えられる[1]。こうした状況を鑑みると、持続可能な社会を構築するためには、再生可能エネルギーへの移行を加速すると同時に、今後数年で需要量がピークには達するものの今後もエネルギーミックスに占める割合は高い水準であると考えられる化石燃料の利用方法を見直していく必要がある。

日本国内に目を向けると、経済産業省の「エネルギー白書2024」によれば、国内の最終エネルギー消費量は1980年代から2000年代初頭にかけて増加傾向が続いたが、2005年度をピークに近年は省エネ技術の普及や産業構造の変化などによって横ばいからやや減少に転じている[2]。しかしながら、温室効果ガス（GHG）削減目標の達成とエネルギーの安定供給を同時に実現することは依然として大きな課題であり、特に二酸化炭素（CO₂）の排出量削減に向けては、産業部門・家庭部門いずれにおいてもさらなる省エネルギー施策やクリーンエネルギーの導入が求められている。

こうした背景のなかで注目されるのが、比較的クリーンな化石燃料とされるガスの役割である。ガスは石炭や石油に比べて燃焼時のCO₂排出や大気汚染物質の排出が少なく、環境負荷が低いとされている。日本では、とりわけ都市ガスが普及しており、経済産業省資源エネルギー庁の統計によると、2024年の都市ガス販売量が季節によるバラツキはあるが、全国で毎月家庭用だけでも100億から500億メガジュール代に達している[3]。一般家庭では、ガスコンロによる調理やガス給湯器による給湯、暖房などへの利用が典型的であり、日本特有の湯船につかる文化との親和性も高い。瞬間湯沸かし機能によって湯切れが少なく、お湯を安定的に供給できる点などがガス給湯器の利点として挙げられる。

一方、ガスはあくまで化石燃料であるため、燃焼時にCO₂を排出するという問題を抱えている。脱炭素社会を目指すうえでは、再生可能エネルギーの導入拡大や省エネルギー技術のさらなる進歩だけでなく、ガス自体の利用効率を高める取り組みが重要となる。たとえばガスコージェネレーションシステム（熱電併給システム）は、燃料のもつエネルギーを電力と熱の両方に無駄なく活用できる点で注目されている。さらに、家庭用燃料電池（エネファームなど）を導入すれば、ガスを利用しながらCO₂排出を相対的に抑えつつ、電力と給湯用の熱を自家発電することが可能となる。経済産業省とコージェネ財団によると、家庭用燃料電池の累計出荷台数は2022年時点では累計45万台以上、2024年時点で累計50万台を超えており、今後もさらなる普及が期待される[4][5]。

また、ガスを取り巻くインフラ面にも課題はある。都市ガスの場合、大規模災害時にはガス管の安全点検や設備の復旧作業が必要となるため、安定供給再開に時間を要することがある。しかし、近年は地震対策として、耐震性の高いガス管や自動遮断システムの導入が進められており、ガス事業者や自治体が連携して防災力を強化する取り組みを行っている。こうした課題を一つひとつ克服しながら、ガスのクリーンな特性を最大限に活かすことが、現実的なエネルギー転換の一つの柱となり得る。

持続可能な社会を実現するには、単に「消費量を減らす」だけではなく、消費者・企業が損失を被らずに省エネルギーへシフトできる仕組みづくりが欠かせない。ガス事業者にとっては、ガスの販売にとどまらず、エネルギーコンサルティングやシステム提案などの新たなビジネスモデルを開拓することで、ユーザーにとって魅力的かつ省エネルギーを促すソリューションを提供する可能性が広がっている。また、行政や研究機関、各種産業との連携を強化し、技術開発や設備投資を進めることが、長期的なCO₂排出削減目標の達成に貢献すると考えられる。

このように、ガスは日本社会の日常生活および産業活動を支える重要なエネルギー源であるとともに、石油や石炭と比べて相対的に環境負荷が低い燃料としての役割も期待されている。しかしながら、脱炭素や持続可能性の観点からは、ガスのさらなる効率利用や水素との混焼など、新たな技術オプションの検討が急務である。エネルギーシステム全体を俯瞰しながら、ガスを含む化石燃料の利用方法を高度化していくとともに、再生可能エネルギーの

拡大や省エネルギー技術への投資を総合的に進めることで、経済成長と環境保全の両立が可能となるだろう。最終的には、行政・企業・市民が一体となって需要構造やインフラを変革していくことで、ガスを含めたエネルギー全体の持続可能性を高める取り組みが求められている。

第二節 エネファームとJ-クレジット制度

エネルギー効率の向上と温室効果ガス（GHG）の削減は、持続可能なエネルギーシステムを構築する上で重要な課題である。日本のガスエネルギーにおいては、「エネファーム（家庭用燃料電池）」と「J-クレジット制度」が、その課題に対する解決策として注目されている。エネファームにより削減したCO₂をJクレジットとして販売して利益が得ることができるため、相乗効果が期待できる。

・エネファーム（家庭用燃料電池）

エネファーム（Ene-Farm）とは、主として都市ガスやLPガスなどから水素を取り出し、空気中の酸素との化学反応によって電気と熱を同時に生み出す家庭用燃料電池コージェネレーションシステムの総称である。燃料電池スタック内部で発生した電気を家庭内の電力として使用し、同時に発生する排熱を給湯や床暖房などに活用できるため、エネルギーを効率的に利用できるのが大きな特徴である。従来の火力発電では大規模施設で一括して電力を生産し、余剰熱は未利用のまま大気中へ排出されることが多い。しかし、エネファームを導入すると、熱と電力を同時利用できるコージェネレーションのしくみにより、エネルギー利用効率が高まり、結果として二酸化炭素（CO₂）の排出削減効果も期待できる。

経済産業省資源エネルギー庁によると、エネファームは2009年に世界初の家庭用燃料電池として本格的な市販化が始まった。その後、燃料電池スタックの高性能化やコンパクト化、コストダウンに伴い普及が徐々に進み、2020年頃には累計出荷台数が30万台を超え、2022年度には40万台を超える規模に拡大したと報告されている。また、再生エネルギーを含む多様な一次エネルギー源から様々な方法で製造可能なこと、発電効率が30～60%と高くコージェネレーションシステム（熱電併給システム）として利用した場合には総合効率が90%以上になりエネルギー効率が非常に高いシステムであること、環境特性に優れるクリーンなエネルギーシステムであることから、エネルギー安定供給の確保の観点のみならず、地球環境問題の観点からも重要なエ

エネルギーシステムであるとされている[6]。

エネファームには主に固体高分子形燃料電池（PEFC）と固体酸化物形燃料電池（SOFC）の2種類があり、前者は低温作動で早期立ち上がりに優れる一方、後者は高温作動によって排熱温度が高く、前者はお湯を多く使う家庭、後者は電気を多く使う家庭に向いており、給湯用途において高い熱効率を発揮するなど、各方式に一長一短の特性がある[7]。家庭用においてエネファームを導入するメリットとしては、(1)電力と熱を同時に自給できることによるエネルギーコストの削減、(2)家庭部門のCO₂排出量削減、(3)非常時における電力供給の確保（機種によっては停電時でも一定の電力供給が可能）などが挙げられる。他方で初期導入コストが依然として高額である点や、設置スペースの確保、ガス管や排気設備の工事が必要となる場合がある点など、普及拡大に向けて解決すべき課題も残されている。いずれにせよ、再生可能エネルギーだけではエネルギー需給の変動を十分にカバーしきれない現状において、エネファームのような分散型エネルギーシステムが果たす役割は大きい。特に家庭部門の省エネルギー化や脱炭素化を進めるうえで、電力と熱を効率的に同時供給できるエネファームは有効な選択肢の一つである。技術革新や制度設計の進展とあわせて、価格面や設置環境のハードルを下げる取り組みが一層進められていくことで、より多くの世帯や施設でエネファームが選択肢となり得るだろう。

・エネファームの導入効果

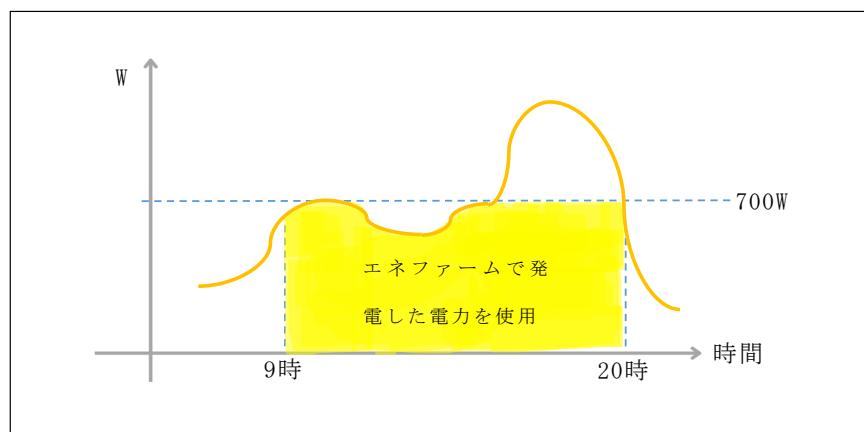


図2-1 エネファームと電力会社からの供給電力（PEFC）

エネファームによる発電の最大出力は700Wであるため、700Wを超える電力は電力会社から供給されるものを利用する必要がある[8]。従来のシステム

では、冷房やエアコン暖房、照明などは電気を使用し、それ以外はガスを利用する。一方、エネファームの場合、エアコンの冷暖房には発電の最大出力の関係で電力会社から供給される電気を使用し、照明などその他の用途（以下、照明他）には、ガスで発電した電気と電力会社から供給される電気を併用する形になる。また、PEFCの場合は、夜間はエネファームの発電が停止するため、夜間に必要な電力はすべて電力会社から供給される電気を購入することになる。図2-1はエネファーム（PEFC）を導入した家庭の1日の運転イメージの例を表したものである。エネファームは20時から発電を停止し翌日の午前9時からまた稼働する。そのため、9時から20時の間で使用する電気（照明他）の中で、700W以下はエネファームで賄い、残りは電力会社から供給される。ここで、エネファームの導入効果を予想するためには、照明他に使う電気の中で、エネファームからの供給量と電力会社からの供給量の比率が必要である。しかし、その比率は各家庭の特性などによって異なるため、一概には言えない。したがって、この節では、パナソニック社のPEFCの環境性能算定における計算条件をもとに、エネファームからの供給量と電力会社からの供給量の比率が未知であると設定し、エネファームの導入効果を計算する[9]。試算条件は図2-2の通りである。

＜パナソニックのエネファームの試算条件（都市ガス）[9]＞

① Co2排出係数

都市ガス：2.29kg-CO₂/m³、電気：0.65kg-CO₂/kWh

② エネルギーの年間負荷（戸建（延床面積 120m²）、4人家族を想定）

給湯：16.2GJ、風呂保温：1.3GJ、冷房：8.7GJ、床暖房：10.8GJ、エアコン暖房：2.9GJ、調理：2.2GJ、照明他：16.1GJ

③ 電力需要

ガス温水床暖房所有のガス・電気併用住宅の電気使用量：5,714kWh/年

④ 使用機器

従来システム：ガス給湯暖房機、ガス温水床暖房（居間）、ガスコンロ、居間以外の暖房および冷房は電気エアコンを使用

エネファーム：エネファーム、ガス温水床暖房（居間）、ガスコンロ、居間以外の暖房および冷房は電気エアコンを使用

⑤ エネファームのエネルギー効率

発電効率：41%、熱回収率57%

図2-2 パナソニックの都市ガス用商品試算条件（PEFC）

照明他に使われる電気の中、エネファームからの供給量と電力会社からの供給量の比率を「エネファームからの供給量：電力会社からの供給量＝a：b」をすると、エネファーム導入前後における電気とガスの熱負荷の分担は表2-1のようになる（a+b=1、aとbは0から1の範囲で存在）。

表2-1 エネファーム導入前後での電気、ガスへの熱負担（PEFC）

		給湯	風呂 保温	冷房	床暖房	エアコン 暖房	調理	照明他	合計
負荷（GJ）		16.2	1.3	8.7	10.8	2.9	2.2	16.1	58.2
従来システム	電気			8.7		2.9		16.1	38.5
	ガス	16.2	1.3		10.8		2.2		19.7
エネファーム	電気			8.7		2.9		16.1b	11.6+ 16.1b
	ガス	16.2	1.3		10.8		2.2	16.1a	30.5+ 16.1a

次に、従来システムとエネファームのエネルギー使用量を計算する。熱効率については、環境省と経済産業省資源エネルギー庁によると給湯器の熱効率は80%、ガスコンロは45%であり、パナソニック社によると床暖房の熱効率は標準施工状態で80%以上である[10][11][12]。そして、照明他の熱効率は1.0、エアコンの熱効率に関しては市販のエアコンでよくみられる成績係数（COP）3.0を採用し、都市ガス熱量は45MJ/m、1kWhの電気の熱量は3.6MJとする¹[13]。

表2-2 エネファーム導入前のエネルギー使用量

負荷の種類	負荷量（GJ）	使用エネルギー	熱効率	エネルギー使用量		単位
給湯	16.2	ガス	80%	450	895	m ³
風呂保温	1.3	ガス	80%	36		
調理	2.2	ガス	45%	109		
床暖房	10.8	ガス	80%	300		
照明他	16.1	電気	1.0	4,472	5547	kWh
冷房	8.7	電気	3.0	806		
エアコン暖房	2.9	電気	3.0	269		
合計	58.2					

¹ この設定のもとでは、従来システムでの電気使用量は5,547kWhとなり、計算条件の「電気使用量：5,714kWh/年」と概ね一致する。したがって、ここでの各エネルギー機器の熱効率は概ね妥当だと言える。

＜従来システムのエネルギー使用量計算＞

（１）ガス使用量

- ・ 給湯： $16.2 \times 1,000 \div 0.8 \div 45 = 450m^3$
- ・ 風呂保温： $1.3 \times 1,000 \div 0.8 \div 45 \approx 36m^3$
- ・ 調理： $2.2 \times 1,000 \div 0.45 \div 45 \approx 109m^3$
- ・ 床暖房： $10.8 \times 1,000 \div 0.8 \div 45 = 300m^3$

（２）電気使用量

- ・ 照明他： $16.1 \times 1,000 \div 1.0 \div 3.6 \approx 4,472kWh$
- ・ エアコン暖房： $8.7 \times 1,000 \div 3.0 \div 3.6 \approx 806kWh$
- ・ 冷房： $2.9 \times 1,000 \div 3.0 \div 3.6 \approx 269kWh$

図2-3 エネファーム導入前の計算詳細

表2-2は従来システムの結果、図2-3は従来システムの計算の詳細である。この結果により、ガス使用量は $895m^3$ 、電気使用量は $5,547kWh$ となった。そして、表2-3はエネファーム導入後の結果、図2-4はエネファーム導入後の計算の詳細である。この結果により、ガス使用量は $(895+375a)m^3$ 、電気使用量は $(1,075+4,472b)kWh$ となった。

表2-3 エネファーム導入後のエネルギー使用量

負荷の種類	負荷量 (GJ)	使用エネルギー	熱効率	エネルギー使用量		単位
給湯	16.2	ガス	80%	450	895+375a	m^3
風呂保温	1.3	ガス	80%	36		
調理	2.2	ガス	45%	109		
床暖房	10.8	ガス	80%	300		
照明他	16.1a	ガス（発電）	41%	873a		
		ガス（熱回収）	57%	-498a		
	16.1b	電気	1.0	4,472b	1,075+4,472b	kWh
冷房	8.7	電気	3.0	806		
エアコン暖房	2.9	電気	3.0	269		
合計	58.2					

＜従来システムのエネルギー使用量計算＞

(1) ガス使用量

- ・ 給湯： $16.2 \times 1,000 \div 0.8 \div 45 = 450m^3$
- ・ 風呂保温： $1.3 \times 1,000 \div 0.8 \div 45 \approx 36m^3$
- ・ 調理： $2.2 \times 1,000 \div 0.45 \div 45 \approx 109m^3$
- ・ 床暖房： $10.8 \times 1,000 \div 0.8 \div 45 = 300m^3$
- ・ 照明他： $16.1a \times 1,000 \div 0.41 \div 45 \approx 873a m^3$
- ・ 熱回収： $873a \times 0.57 \approx 498a m^3$

(2) 電気使用量

- ・ 照明他： $16.1b \times 1,000 \div 1.0 \div 3.6 \approx 4,472b kWh$
- ・ エアコン暖房： $8.7 \times 1,000 \div 3.0 \div 3.6 \approx 806kWh$
- ・ 冷房： $2.9 \times 1,000 \div 3.0 \div 3.6 \approx 269kWh$

図2-4 エネファーム導入後の計算詳細

図2-5は、先述の結果を用いてエネファーム導入後のガスと電気の使用量の変化を比較したものである。導入後の変化率として、ガスは0.42a増加、電気は0.81a減少という結果が得られた。すなわち、aは0から1の間で存在するため、エネファームを導入すると、ガス消費は増加するが、その増加分よりも多く（ほぼ2倍）の電気消費が削減されることが確認される。このように、エネファームの導入は全体エネルギー消費を削減し、より効率的なエネルギー消費に寄与する。

＜ガス使用量(m^3)＞

導入前：895

導入後： $895+375a$

変化率： $(375/895)a \approx 0.42a$

＜電気使用量(kWh)＞

導入前：5,547

導入後： $1,075+4,472b$

変化率： $(4,472/5,547) \times (b-1) = (4,472/5,547) \times (-a) \approx -0.81a$

図2-5 エネファーム導入前後の使用量変化

- ・ Jクレジット制度

Jクレジット制度（J-Credit）とは、国内における温室効果ガスの削減量や吸収量を「クレジット（信用/証書）」として数値化し、売買や活用ができるようにする日本の制度である。これは、地球温暖化対策として国内での排出削減努力を促進することを目的として、環境省・経済産業省・農林水産省が共同で運営している[14]。例えば、省エネルギー設備の導入や再生可能エネルギーの活用、森林管理の改善などにより削減・吸収した温室効果ガスの量が認証されると、その分がクレジットとして発行される仕組みになっている。

このJクレジットは、企業や自治体など排出量取引の対象となる事業者にとって、排出削減義務を果たす際のオフセット手段として利用されることが多い。一方で、削減や吸収の取り組みを行った事業者（プロジェクト実施者）は、排出量を削減するだけでなく、その成果をクレジットとして販売することで追加的な収益を得ることができる。このように、Jクレジット制度は排出削減・吸収に向けた意欲的な取り組みを促進する、いわゆるインセンティブ設計として機能していると言える。

さらに、Jクレジットを活用するメリットは、単に温室効果ガス排出量の帳尻合わせだけではない。クレジットを購入する企業や自治体にとっては、カーボン・ニュートラルを目指すうえでのブランディング効果や、環境経営の推進といった観点からも重要性が増している。特に近年では、ESG投資が盛んに行われるようになり、企業の非財務情報として環境への取り組みが株式市場や消費者からも注目されている。そのため、Jクレジットの導入や活用実績が企業価値の向上につながるケースも増えている。ガス業界においてもこのことについての重要性が高まっている。

また、Jクレジット制度とよく比較される制度として、海外では欧州連合（EU）の排出量取引制度（EU ETS）や、米国の一部州で導入されている排出量取引が挙げられる。一方、日本国内においては、法的拘束力のある全国規模の排出量取引制度はまだ実施されていないが、東京都や埼玉県などが独自の排出量取引制度を運用している[15][16]。こうした地域単位の排出量取引とJクレジットを連携させることで、より広範な排出削減・吸収の取り組みを促すことが期待されている。

今後、脱炭素社会を実現するうえでカーボン・クレジットの果たす役割はますます大きくなると見込まれている。企業・自治体・市民が連携して温室効果ガス削減に取り組み、その成果をクレジット化して評価・活用する仕組みは、日本国内の排出削減ポテンシャルを引き出すと同時に、環境意識や省エネルギー意欲のさらなる高まりを後押しするものと考えられる。

・エネファームとJクレジットの組み合わせ

エネファームとJクレジット制度を組み合わせることは、家庭部門のCO₂排出削減を促すうえで非常に有効なアプローチである。エネファームは都市ガスやLPガスから取り出した水素と空気中の酸素を反応させ、電力と発電時に生じる余熱を同時に供給する家庭用燃料電池コージェネレーションシステムであり、従来型の給湯や暖房と比べてエネルギー利用効率が高く、CO₂排出量の削減が期待できる。一方、Jクレジット制度は国内で削減された温室効果ガス排出量を「クレジット」として認証・取引する仕組みだが、通常は企業や自治体のような大規模事業者が主体となりがちで、一般家庭が直接関わるにはハードルが高いとされる。そこで注目されているのが、ガス会社がエネファーム導入世帯の削減実績を取りまとめてクレジット化し、取引を代行するスキームである。大分県では大分瓦斯株式会社が、都市ガスを利用する家庭にエネファームを普及させつつ、その導入効果によって削減されたCO₂排出量をJクレジットとして認証・取引するプロジェクトを進めている[17]。たとえば、エネファームの発電時に生じる余熱を給湯や暖房に利用することにより従来と比べてガス消費量を抑えられ、その分のCO₂排出量が削減されるという仕組みである。こうした取り組みによって利用者は省エネ・光熱費削減の恩恵を受けるだけでなく、削減分のクレジット化により企業や自治体などの排出オフセット需要とも結びつけることが可能となる。結果的に、ガス会社にとっては新たなビジネスモデルや収益源が生まれ、利用者にとっては環境負荷低減と経済的メリットの両立が図られることから、持続可能なエネルギー利用モデルとして注目が集まっている。しかし、エネファームは、エネルギー消費削減による経済的メリットを与えるものの、初期費用が高いため、現状の初期費用の元では普及に限界があり、CO₂排出量の削減にも限界がある。したがって、ガス会社や消費者の効用を阻害せずに、エネファームを導入しない人からもCO₂を削減してもらい、さらなるCO₂排出の削減を図れる仕組みが必要となってくる。本研究では、その策として次節にてコミュニティベース料金プランを提案する。

第三節 協力的モデルとコミュニティベース料金プラン

本研究では、コミュニティ全体でエネルギー消費を最適化し、住民が協力して消費を削減するための料金体系として、コミュニティベースの料金プランを提案する。このプランの例として、コミュニティ全体のCO₂排出量が設定された基準を下回った際に、従量料金に対する割引が適用されるケースが考えられる。このようなインセンティブにより、各家庭が消費を減らし、ひいてはお互いに削減を促す行動を取るなど、コミュニティ全体のエネルギー効率を高めることが期待される。

この料金モデルは、イギリスのEnergy Localプロジェクトのような協力的エネルギーモデルから着想を得たものである[18]。Energy Localでは、住民が再生可能エネルギーを共同で使用し、消費の最適化を図っている。このプロジェクトでは、時間帯ごとのコミュニティ全体のエネルギー使用量に基づいて料金変動し、ピーク時の消費を減らすためのインセンティブが提供されている。この仕組みは、コミュニティ全体のエネルギー効率を向上させ、料金削減に貢献している。このような協力的なエネルギー利用モデルは、消費者間の相互作用を促進し、料金の節約を実現する可能性があると示されている。まず、消費者に適切な情報や動機を提供することで、環境保護といった共通の利益に基づく協力行動が促進され、最終的にエネルギー消費の削減につながる可能性がある[19]。また、P2P (peer-to-peer) 取引のフレームワークが、消費者のエネルギーコストの大幅な削減と、コミュニティ全体のエネルギー無駄遣いの最小化に寄与することが示されている[20]。このように、消費者間の協力と相互作用は、従来の個別消費モデルに比べ、エネルギー消費の削減やコストの削減に寄与する可能性がある。

一見、コミュニティベース料金プランを導入することで消費量が減少し、ガス会社が利益を失うだけのように思われるかもしれない。確かに、コミュニティベース料金プランのみを導入すればその可能性は高い。しかし、エネファームとJクレジットを組み込んだ仕組みにすることで、そのような懸念は解消される。具体的には、エネファームはガス消費量を増やす効果があり、さらにJクレジットを結合したエネファーム導入促進プロジェクトを進行させることで、ガス消費から得られる利益が増加する。これにより、コミュニティベース料金プランによる利益減少額を十分に賄うことが可能となる。また、エネファームとコミュニティベース料金プランの併用には相乗効果が期待できる。エネファームを導入した家庭は、消費量を減らさなくてもCO₂排

出量を削減できるため、コミュニティベース料金プランによる割引を享受できる。一方で、エネファームを導入していない家庭は、消費量を減らさなければ割引を受けられないため、相対的に不利益を感じることとなり、エネファームの導入インセンティブが働く。このように、エネファームとJクレジットを活用した仕組みは、ガス会社と消費者双方にとって利益をもたらす持続可能なエネルギー利用モデルを実現する上で極めて有効であると言える。

第四節 ABM

エージェントベースモデル（ABM: Agent-Based Model）は、個々のエージェント（消費者や企業など）がどのように行動し、それらの相互作用がシステム全体にどのような影響を与えるかをシミュレーションする手法である。エージェントは、それぞれ特定のルールや意思決定プロセスに基づいて行動し、その結果がシステム全体にどのような影響を及ぼすかをシミュレーションで再現できる。特にABMは、個々の行動が集団全体の結果にどのように影響を与えるかを評価する際に有効であり、さまざまな分野で広く利用されている。ABMにおいては、各エージェントが独自の行動を取り、他のエージェントとの相互作用を通じてシステム全体の動態が形成される。例えば、消費者がガス使用に関する意思決定を行う際、その行動が他の世帯や市場全体の状況にどのような影響を与えるかをモデル化することが可能である。異なるエージェントの行動が、全体のシステムに与える影響を解明することが、ABMの大きな強みである[21]。

経済学等の分野における既存の分析モデル（Analytical Modeling）は一般的な現象の説明には有効だが非線形的な複雑現象の説明は難しい一方、ABMは複雑で創発的な現象の研究に適する。社会システムの研究において（1）複数のエージェントによる複雑な相互作用を持つシステム、（2）創発的な特性を持つシステム（Complex System）、（3）構成員の相互作用が過去の経験に基づき学習や適応を行う場合には、数理モデルでの研究は難しく、ABMは有効である可能性が高い[22]。そして、ABMは演繹的特徴と帰納的特徴、両方を取り入れた中間的な手法であり、演繹的要素としてはエージェントの行動を決定するために従来 of 理論を参考する点がり、帰納的要素としてはデータを用いてパラメータやエージェントの行動関数を調整する点が考えられる[23]。

複雑なシステムでは消費者間の相互作用がシステムや消費者の行動に大き

な影響を与えるため、ABMは有用である。特に、コミュニティベースの料金プランでは、消費者間の協力や影響が重要な要素となるため、これをモデル化するためにABMは非常に適している[24][25]。消費者が自発的にガス消費を抑えたり、他の家庭の行動が影響を与えたりする状況をシミュレートすることができる。これにより、ガス消費の効率化や料金削減の効果を予測することが可能となる。

Peer Influence Theoryによると、人の行動や態度には、情報的影響 (Informational Influence) と規範的影響 (Normative Influence) といった Peer Influence が作用する[26]。すなわち、消費者の行動には、新たな料金仕組みに対しての情報を周りから獲得する点 (情報的影響)、新しい仕組みに対する周りの考えや、自分の行動が周りにどう受け入れられるかを考慮する点 (規範的影響) が影響する。また、Theory of Planned Behavior (TPB) によると、人がある行動をするためには、その行動をしようとする意思 (Intention) が重要であり、その意思には、行為に対する態度 (Attitudes)、周りの考え (Subjective Norms)、行為の履行可能性 (Perceived Behavioral Control) が影響する[27]。つまり、新たな料金仕組みが導入された場合、消費者個人だけでなく、周りの考えといった他の消費者との相互作用が働くのである。しかし、既存の分析モデルでは、上記のような消費者間の相互作用や協力がもたらす動的な変化を十分に捉えるには限界がある。エージェントベースモデルを使用することで、消費者の協力行動や、影響がどのようにシステム全体に波及するかを定量的に評価できる。

第三章 研究方法

第一節 システムの仕組み

本研究で提案するシステムは、コミュニティベースの料金プランとエネファーム、そしてJ-クレジット制度を有機的に組み合わせることで、ガスエネルギーの効率的利用やCO₂排出量の低減、さらには消費者・ガス会社・環境の持続可能性を高めることを目指している。具体的には、まずコミュニティベースプランにおいては、コミュニティ全体のCO₂排出量があらかじめ設定した基準値を下回ると、従量料金の割引が適用される仕組みとする。こうした条件が設けられることで、各世帯が自主的にガス消費の削減に取り組むインセンティブが生まれ、コミュニティ全体としてはエネルギー消費量の効率化が期待できる。一方で、ガス消費が減少すると、ガス会社にとっては収益が減少するリスクがあるため、コミュニティベースプランだけでは事業継続性を危ぶむ声上がる可能性も否定できない。

そこで、エネファームを組み合わせることにより、このリスクを緩和すると同時に、さらなる環境負荷低減を実現することが可能となる。エネファームは、ガスを燃料として電力と熱を同時に生産できる家庭用燃料電池コージェネレーションシステムであり、従来のシステムに比べて高効率でエネルギーを活用できる。その結果、同じレベルのエネルギーを供給しながら、ガス消費自体は増えるものの、電気消費が減少して総合的なCO₂排出量は減らすことができるという特徴がある。つまり、エネファームを導入した世帯は、消費する総エネルギー量を削減しなくても、電気と熱を無駄なく利用できるため、コミュニティ全体のCO₂排出量を減らすことに貢献しつつ、コミュニティベースプランによる割引も享受できる。逆に、エネファームを導入していない世帯は、より積極的にガス消費を抑えなければ割引の恩恵を得られないため、エネファームへの導入意欲が高まる効果も期待できる。

さらに、J-クレジット制度を加えることで、ガス会社はエネファームを導入した世帯の削減分CO₂をまとめてクレジットとして認証し、これを売却することで追加的な収益を得ることができる。加えて、エネファームの販売や導入後のメンテナンス業務を担うことで、ガス会社はコミュニティベースプランによるガス販売量減少分を補完しつつ、環境への貢献も同時に進められるようになる。消費者側にとっては、環境配慮の行動による満足感に加えて、実際に光熱費の削減やJ-クレジットの取引による経済的メリットを得ること

ができるため、消費者・ガス会社双方にとってウィンウィンの関係が成立する。また、コミュニティレベルでのCO₂排出削減を目指すという点が、地域全体の環境意識を高めるとともに、次世代の持続可能なエネルギー利用モデルへと近づく一歩ともなる。

このように、コミュニティベース料金プランが有する「共同で排出量を削減しよう」という動機づけと、エネファームがもたらす「高効率かつガス消費も確保できる」という特性に、さらにJ-クレジット制度を活用した「排出削減量の見える化と収益化」を加えることで、環境配慮・経済効率・事業継続性を同時に高めることが可能になる。結果として、各ステークホルダーが損を被ることなく、むしろ協働しながらCO₂排出量の削減に取り組むインセンティブが働き、社会全体での持続可能なエネルギー利用が促進されると期待できる。

第二節 消費者の行動

・属性

本システムにおいて消費者の行動は、主に「経済ファクター」と「外部環境ファクター」という2つの要素に左右される。前者である経済的ファクターは、費用対効果や経済的利益を重視する傾向を示し、エネルギー料金の削減など金銭的メリットが行動の動機づけとなる。一方の外部環境ファクターは、「社会意識ファクター」「環境意識ファクター」「リスクアバージョン係数」「情報アクセス度合い」の4つに大別できる。社会意識ファクターは、自身の行動が地域社会やコミュニティに与える影響に対してどの程度配慮するかを表し、環境意識ファクターは、地球温暖化や資源保護などの環境課題にどれだけ関心を抱くかを示す。リスクアバージョン係数は、新技術や料金プランの導入に伴う不確実性や失敗リスクを消費者がどの程度嫌うかを測る指標であり、情報アクセス度合いは、そのリスクや利点に関する正確な情報をどれだけ得られているか、あるいは得ようとしているかを表す要素である。

これらの外部環境ファクターは、コミュニティベースのエネルギープランにおける協力度合いや積極的な省エネ行動を後押しする要因として機能するだけでなく、エネファームの導入意欲を左右する要因としても重要性を持つ。環境意識や社会意識が高いほど環境に配慮した行動に対して前向きになり、必要な情報に素早くアクセスできる消費者ほど新技術や新システムへの抵抗感が低くなる。また、リスクアバージョンが小さいほど、導入初期コストや

不確実性に対してチャレンジングな姿勢を示しやすい。こうした複数のファクターが複雑に絡み合うことで、コミュニティベースプランへの参加意欲やエネファーム導入の意思決定が総合的に形成されると言える。

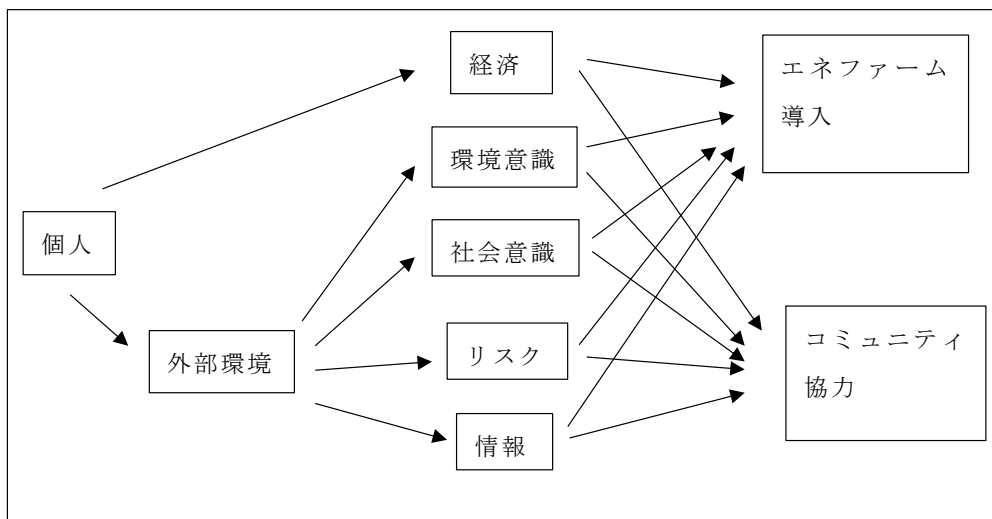


図3-1 消費者の行動ロジック

・行動

消費者の行動には、経済的要因と同様、外部環境要因が大きく影響を及ぼすことが多くの研究から示唆されている。具体的には、経済的な合理性に基づくコスト・ベネフィット分析だけでなく、他者の行動や社会的規範などの外部からの働きかけが、個々の意思決定を大きく左右するという点が指摘されている[28]。たとえば、コミュニティ内で高い省エネルギー意識を共有する住民が増えれば、周囲に合わせて自分も省エネ行動をとる傾向が強まる一方、周囲が積極的に取り組んでいない状況では自らも行動を起こしにくいという現象が観察される。

さらに、人々は経済的合理性だけでなく、感情や認知の歪みといった心理的要素によって行動を決定することが明らかにされており、これらの要素はエネルギー消費や環境配慮行動にも深く関わってくる[27][29][30][31]。実際に、環境保護への意識が高い消費者ほど、高額な導入コストがかかる省エネ設備であっても積極的に採用する傾向が見受けられるが、そこには「環境に貢献したい」「周囲から環境意識が高いと思われたい」といった心理的な動機づけが働いていると考えられる。

また、環境に配慮した行動に影響を与える要因として、社会的規範や個人の価値観（たとえば環境意識）が重要だとする研究も少なくない[30][31][32]。こうした社会的・環境的な要因が組み合わさると、経済的動機だけでなく「コミュニティの一員として貢献したい」「家族や隣人からの評価を気にする」などの気持ちが行動を後押しする場合がある。さらに、社会的比較理論（Theory of Social Comparison Processes）によれば、人々は自らの行動や考え方を他者と比較することを通じて、自身の行動基準を形成する傾向がある[33]。たとえば、近隣住民が大幅な省エネに成功していると聞けば、その水準に追いつきたい、あるいは追い越したいと思う人々が増え、結果としてコミュニティ全体の省エネ行動が加速する可能性もある。

このように、消費者の効用は単に「どの程度おトクか」という経済的指標にのみ基づくわけではなく、他者との比較や社会的評価、環境問題への関心といった外部環境ファクターにも大きく依存している。とりわけ、本研究が扱うコミュニティベースの料金プランやエネファームのような省エネ設備の導入に関しては、「周囲が参加しているから自分も参加しよう」「環境保護に協力している自分を評価してもらいたい」といった動機が、純粋なコスト・ベネフィット分析を超えて強く作用することが想定される。こうした観点を踏まえると、価格や割引などの経済的インセンティブだけでなく、コミュニティ全体の社会的規範の醸成や、個人の環境意識の醸成を促す施策が、効果的な省エネ行動やエネルギープランへの参加意欲を高めるうえで極めて重要であると言える。これは、本研究におけるコミュニティベースの料金プランへの協力度合いやエネファーム導入の意思決定を考察するうえで、欠かすことのできない理論的背景を提供している。

第三節 属性推定およびデータ

・データ

本研究で使用するデータは、岡山県岡山市在住のLPガスを使用する779世帯の2023年11月から2024年10月までの日次ガス消費量データである。消費量と顧客ID以外の情報はない。このデータをもとに、表3-1の通りにデータセットを作成し、ABMを構築する。ガス消費データから集計及び推定された変数は固定値であるが、それ以外のデータは乱数で発生するため、データセットが1つだけだと偶然によるたまたまの結果である可能性が高い。したがって、本研究では、分析結果のロバストネスを保つために、データセットを100個作成し、100回のシミュレーションの平均的な結果をみる。ここで、エー

ジェントは、マンスリーベースで意思決定をする。

表3-1 データセット

ラベル	記号	特性	データ元
顧客 i の m 月 ガス 消費量（初期値）	$MonthlyGas_i(m)$	数値	ガス消費量データより集計
顧客 i の 価格弾力性	$Elasticity_i$	数値	推定
経済ファクター	ω_{econ}	数値	価格弾力性を $[0, 1]$ で正規化
環境意識ファクター	ω_{env}	数値	ベータ分布 ($\alpha = 2, \beta = 2$) より生成
社会意識ファクター	ω_{soc}	数値	ベータ分布 ($\alpha = 2, \beta = 2$) より生成
リスクアバージョン係数	r_i	数値	ベータ分布 ($\alpha = 2, \beta = 2$) より生成
情報アクセス度合い	i_i	数値	ベータ分布 ($\alpha = 2, \beta = 2$) より生成
X座標（位置）	x_i	数値	1から100の一樣分布より生成
Y座標（位置）	y_i	数値	1から100の一樣分布より生成
最大削減可能率	$reducibility_i$	数値	10%から30%の一樣分布より生成
年間照明他消費量	$AnnualGJ_i^{elec}$	数値	推定
世帯類型	$Type_i$	カテゴリー	推定
子供ダミー	$Child_i$	ダミー変数	推定された世帯類型より
高齢ダミー	$Senior_i$	ダミー変数	推定された世帯類型より
初期エネファーム導入有無ダミー	$EF_{installed_i}^0$	ダミー変数	統計データに基づき、ランダム生成
所属コミュニティ	$Community_i$	カテゴリー	クラスタリング

・属性推定の必要性

エネファームの導入効果は、各世帯における電気のエネルギー消費量によって大きく異なるため、エージェント（世帯）ごとに導入効果が異なることが予想される。しかし、本研究ではガス消費データのみが利用可能であり、直接的に電気消費量を把握することが困難である。そこで、エージェントごとの差異をモデルに反映させるために、統計データを用いて世帯類型を推定し、そこから電気エネルギー消費の内訳を推定する方法を採用する。具体的

には、環境省が提供するエネルギー消費統計データを基に、世帯類型（単身、夫婦など）を推定する。これらの世帯類型は、エネファーム導入前後のエネルギー消費パターンを推定する上で重要な指標となる。推定された世帯類型に基づき、ガス消費量から電気消費量を逆算し、エネファーム導入効果を詳細に評価することが可能となる。

さらに、世帯類型の推定は、コミュニティ協力における行動の差異を考慮するためでもある。同じエネルギー削減量であっても、子供や高齢者がいる世帯ではその削減効果の感じ方や行動変容が異なるため、世帯構成の違いが消費者の協力度合いやエネファーム導入意欲に影響を与えることが考えられる。このような家庭内の属性も考慮することで、より精緻なモデル構築が可能となり、コミュニティベースのエネルギープランに対する協力の度合いやエネファーム導入の意思決定プロセスを正確に反映することができる。

以上の推定手法により、本研究ではエネファーム導入効果の多様性を考慮しつつ、ガス消費データのみからでも信頼性の高いエネルギー消費内訳を推定し、エネファーム及びコミュニティベースの料金プランの有効性を詳細に検証することを目指す。このアプローチにより、異質なエージェント特性を反映した上で、持続可能なエネルギー利用モデルの構築に寄与することが期待される。

・経済ファクター推定

経済ファクターは「価格弾力性を推定し、価格弾力性が低ければ低いほど高い経済ファクターを持つように $[0, 1]$ で正規化をする」という作業より生成される。

まず、季節調整を行う。ガスという財は季節性のあるものである。例えば、ガスの場合、冬には消費が増える傾向がある。価格弾力性の推定においてはこのような差を取り除くことがより正確な推定につながる。ここでは、季節変動を取り除くことで、相対的な変動だけに着目できるように季節調整を行う。具体的には、ガス使用量とガス1単位あたりの平均単価について季節調整を行い、これをもとに価格弾力性の推定を行う。

(1) 使用量の季節調整

$$\overline{\ln(q_{\cdot,m})} = \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} \ln(q_{i,m})$$

対数使用量の月別平均を計算する。ここで、 i は顧客を示すインデックス、 m は月インデックス、 N_m は月 m にデータがある全顧客の数、 $q_{i,m}$ は顧客 i の月 m における使用量である。

$$\ln(q_{i,m}) \text{ adj} = \ln(q_{i,m}) - \overline{\ln(q_{\cdot,m})}$$

次に、元の対数値から当該月の平均対数値を差し引くことで、季節調整を行う。

(2) 平均単価の季節調整

$$\overline{\ln(p_{\cdot,m})} = \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} \ln(p_{i,m})$$

対数平均単価の月別平均を計算する。ここで、 $p_{i,m}$ は顧客 i の月 m における「平均単価」（＝ガス料金/使用量）である。

$$\ln(p_{i,m}) \text{ adj} = \ln(p_{i,m}) - \overline{\ln(p_{\cdot,m})}$$

次に、元の対数値から当該月の平均対数値を差し引くことで、季節調整を行う。

(3) 価格弾力性の推定

$$\ln(q_{i,m}) \text{ adj} = \beta_{0,i} + \beta_{1,i} \ln(p_{i,m}) \text{ adj} + \varepsilon_{i,m}$$

季節調整後の対数使用量を被説明変数、季節調整後の対数平均単価を説明変数とする単回帰モデルを、顧客ごとに回帰分析(OLS)をする。ここで、 $\beta_{0,i}$ は顧客 i 固有の定数項、 $\beta_{1,i}$ は顧客 i における「対数平均単価」に対する「対数使用量」の価格弾力性、 $\varepsilon_{i,m}$ は残差項である。

使用量データをもとに、予想される支払い金額を計算し、これらのもとに

推定を行った。エネ研・石油情報センターによると、岡山県のLPガスの基本料金の平均が約2000円、従量料金が700円台であったところから、基本料金が2000円、従量料金が700円であると仮定した[34]。

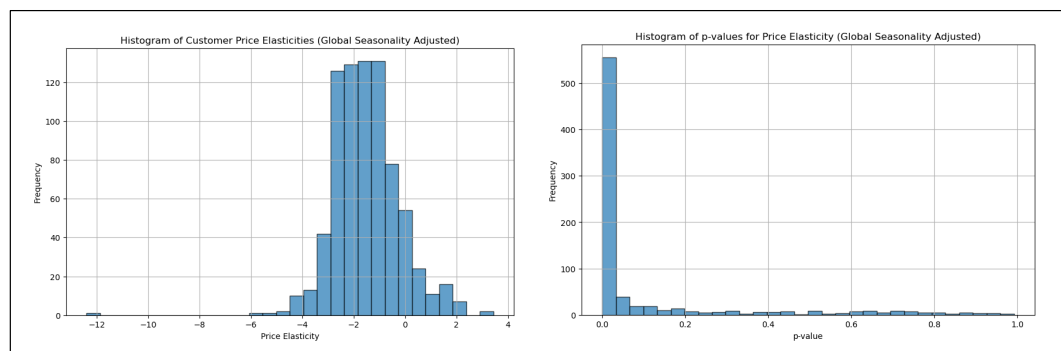


図3-2 消費者の価格弾力性及びp値

図3-2は価格弾力性の推定結果とp値の分布をヒストグラムで表したものである。ここで推定された価格弾力性はABM構築における経済ファクターとして活用する予定である。全体的にはp値が0.05以下の推定値が大部分を占めており、信頼性のある推定が得られている一方で、一部の顧客においてはp値が高く、推定値の信頼性が低いことが確認された。これは、各顧客に対して12ヶ月のデータのみを使用して回帰分析を行ったため、サンプルサイズが小さく統計的検出力が不足していることが主な原因であると考えられる。

本研究では、データの制約を認識しつつも、推定された価格弾力性をABMの経済ファクターとして初期参考値として採用することとした。価格弾力性は消費者の経済行動をモデル化する上で重要な指標であり、ランダムに生成された値を使用するよりも、現実データに基づく推定値を利用することでモデルの現実性と精度が向上すると判断し、Zスコア正規化を用いて価格弾力性を[0, 1]で正規化し経済ファクターに変換した。p値が高い推定値については、データの追加収集やモデルの改良を通じて、将来的に精度を高める予定である。また、ABMにおいては多数のエージェントが相互作用することで全体の動態が形成されるため、個々のエージェントの推定値に一定のばらつきがあっても、モデル全体の挙動には大きな影響を与えないと考えられる。このため、一部の価格弾力性推定値の信頼性が低い点を補完するために、モデル内でのエージェントの行動パターンや他の経済ファクターとの組み合わせを通じて、全体として実務的かつ理論的に有意義なシミュレーション結果を

得ることが可能である。

現時点での価格弾力性推定値は初期参考値として位置付けられ、ABMの基盤として活用される。今後の研究では、より長期間にわたるデータの収集や追加の説明変数の導入を通じて、価格弾力性の推定精度を向上させる計画である。これにより、ABMの信頼性と現実性を一層高め、消費者行動のより正確なモデル化を実現することが期待される。現時点ではデータの制約により一部の推定値の信頼性が低いものの、全体としてはABMの構築において実務的かつ理論的に有意義な経済ファクターとして価格弾力性を組み込むことが合理的であると結論付けることができる。

・世帯類型推定

エネファームの導入効果は、各世帯におけるガスと電気のエネルギー消費量の比率によって大きく異なるため、エージェントごとに導入効果が異なることが予想される。しかし、本研究ではガス消費データのみが利用可能であり、直接的に電気消費量を把握することが困難である。そこで、異質なエージェントの差異をモデルに反映させるために、各世帯の世帯類型を推定する必要がある。

具体的には、統計データを基に世帯類型を推定し、統計データを用いて世帯ごとのエネルギー消費の内訳を推定することで、ガス消費量のみからでも各世帯の総エネルギー消費パターンを推定する。この手法により、エネファーム導入前後のエネルギー消費の変動をより正確に捉えることが可能となり、異質なエージェント特性を考慮した導入効果の評価が実現する。

さらに、ABM構築において、コミュニティ協力におけるCO₂削減の取り組みが家庭内の構成要素、例えば子供や高齢者の有無によってどのように受け取られるかという点を反映させるため、世帯類型の推定は必要となってくる。同じ削減量であっても、子供がいる世帯や高齢者がいる世帯では、その削減効果の感じ方や行動への影響が異なるため、世帯類型ごとの特性を詳細に把握することが重要である。例えば、子供がいる家庭ではエネルギー消費の削減が家計への直接的な影響を強く感じさせる一方、高齢者がいる家庭では快適性の維持が優先し消費削減の経済的メリットを強く感じない傾向などが考えられる。このような家庭内の属性を考慮することで、コミュニティベースの料金プランに対する協力度合いやエネファーム導入の意思決定プロセスを

より正確にモデル化することができる。

以上の理由から、世帯類型を推定し、それぞれのエネルギー消費内訳を明らかにすることは、エネファームの導入効果を多角的に評価し、コミュニティベースの料金プランの設計・運用において重要な前提条件となる。本研究では、統計データを活用した世帯類型の推定を通じて、異質なエージェント特性を反映した上で、持続可能なエネルギー利用モデルの有効性を詳細に検証することを目指す。

エネファームの導入効果を顧客ごとに異質なものとして正確に反映させるために、最大事後確率（MAP）推定を用いて世帯類型を推定する手法を採用する。本研究ではガス消費データのみが利用可能であり、直接的に電気消費量を把握することが困難である。このようなデータ制約の下で、異質なエージェント間の差異をモデルに反映させるためには、統計データを活用して世帯類型を推定し、類型ごとのエネルギー消費内訳をもとに電気消費量を推定する必要がある。

具体的には、表3-2、表3-3、図3-3、図3-4に示す環境省が提供する全国の子帯類型ごとのエネルギー種別消費量（電気、都市ガス、LPガス、灯油）と、厚生労働省および国立社会保障・人口問題研究所が提供する世帯類型ごとの割合データを用いてMAP推定を行う[35][36][37]。環境省ではいくつかの子帯を高齡か若年かで区分するが、厚生労働省のデータだけでは年齢別の割合は得られない。したがって、国立社会保障・人口問題研究所のデータを用いて、単身、夫婦、夫婦と子における65歳以上と未満の割合を計算し、これを厚生労働省のデータと統合することで、環境省で示す世帯類型ごとの割合を推定した（表3-2、表3-3参照）。なお、LPガスと都市ガスはどちらか一方しか使用できないため、統計データにおける平均的なLPガスと都市ガスの

表3-2 家族類型・世帯主の年齢別一般世帯数及び割合[37]

	単身		夫婦		夫婦と子	
	数	割合	数	割合	数	割合
65歳未満	13,980	65%	4,490	40%	10,960	79%
65歳以上	7,533	35%	6,748	60%	2,998	21%

表3-3 世帯類型の区分[35][36][37]

区分	割合	詳細推定	内容
単身・高齢世帯	32.9%	11.5%	1人の世帯員から成る世帯で、かつ世帯員の年齢が65歳以上である世帯
単身・若中年世帯		21.4%	1人の世帯員から成る世帯で、かつ世帯員の年齢が65歳未満である世帯
夫婦・高齢世帯	24.5%	14.75%	世帯主と配偶者の2人の世帯員から成る世帯で、世帯主若しくは配偶者の年齢が65歳以上である世帯
夫婦・若中年世帯		9.75%	世帯主と配偶者の2人の世帯員から成る世帯で、世帯主及び配偶者の年齢が65歳未満である世帯
夫婦と子・高齢世帯	25.8%	5.5%	世帯主と配偶者と1人以上の子から成る世帯で、世帯主若しくは配偶者の年齢が65歳以上である世帯
夫婦と子・若中年世帯		20.3%	世帯主と配偶者と1人以上の子から成る世帯で、世帯主及び配偶者の年齢が65歳未満である世帯
三世代	3.8%	3.8%	世帯主との続柄が「祖父母」、「親」、「世帯主」又は「配偶者」、「子」及び「孫」のうち、三つ以上の世代が同居している世帯（それ以外の世帯員の有無を問わない。）
その他	13%	13%	上記区分のいずれにも当てはまらない世帯

消費量は使用者の割合を考慮した加重平均である。このため、実質的なLPガス使用者および都市ガス使用者の平均消費量は、加重平均よりも大きくなる。本研究では、LPガスを使用する世帯は「LPガス平均消費量＋都市ガス平均消費量」すべてをLPガスで賄うと仮定し、同様に都市ガスを使用する世帯は同合計をすべて都市ガスで賄うと仮定して推定を行う。この仮定により、ガス種別によるガス需要量（GJ）のパターンに差がないと見なすことができ、ガス消費データのみからでも世帯類型ごとのエネルギー消費内訳をより精確に推定することが可能となる。

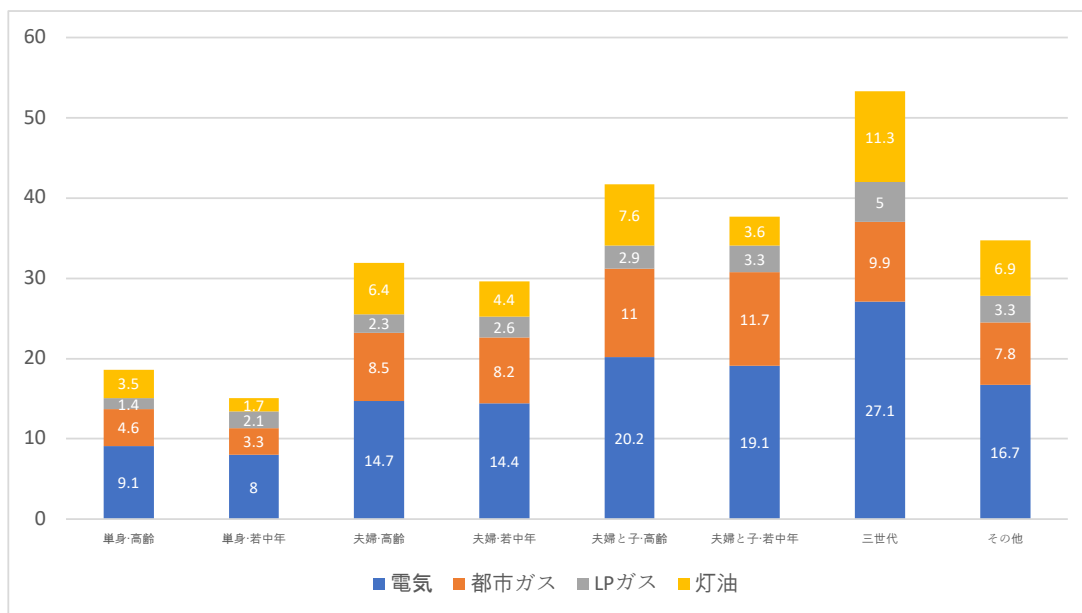


図3-3 世帯類型別年間エネルギー種別消費量 (y軸単位: GJ) [35]

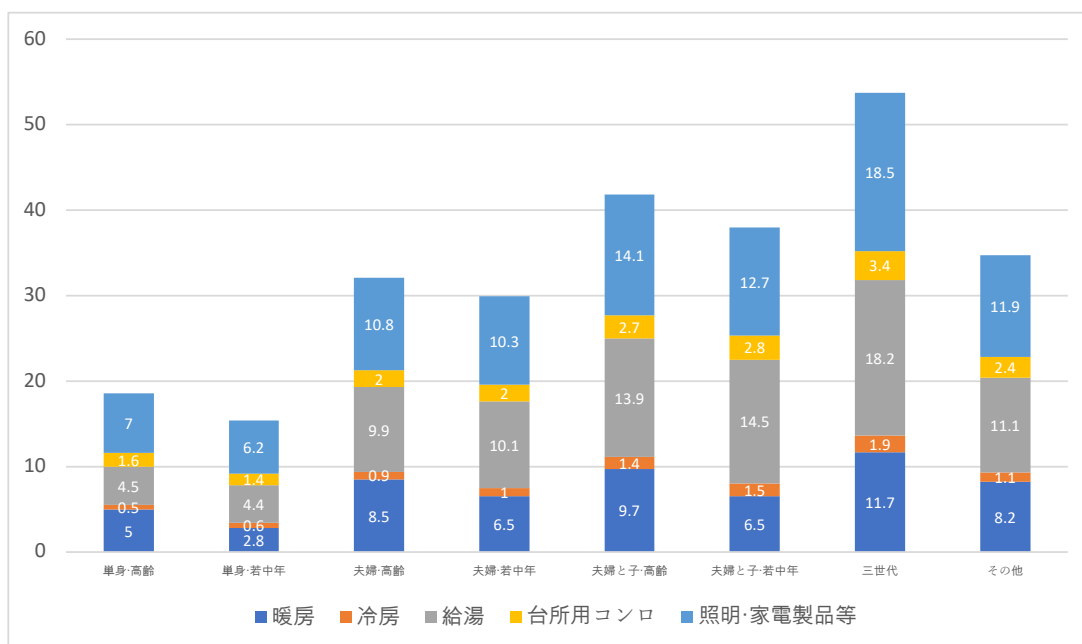


図3-4 世帯類型別年間用途別エネルギー消費量 (y軸単位: GJ) [35]

さらに、統計資料より岡山県が属する中国地方の標準誤差率が2%であることを考慮し、全国平均値と地域固有の標準誤差率を組み合わせることで世帯類型を推定する。推定の必要性は以下の点に集約される。まず、各世帯類型の平均消費量は全国平均値のみが手元に存在し、地域固有の詳細な消費データが欠如しているため、全国データを基に推定を行うことが不可欠である。次に、

標準誤差率は平均値周りのばらつきや不確実性を示す指標であり、地域特性を反映できるため、地域固有の標準誤差率を用いることで、地域実態に即したより精緻なエネルギー消費モデルを構築できる。全国標準誤差率をそのまま適用すると、地域特有の消費パターンや生活環境によるばらつきを無視してしまい、推定の信頼性が低下する可能性が高い。一方、地域標準誤差率を用いることで、地域特有の消費動向や生活環境を反映した分散構造をモデルに組み込むことができ、推定結果の精度と信頼性が向上する。

環境省が提供する全国の世帯類型ごとのエネルギー種別消費量は、全国約5,000万世帯を母集団とする約13,000世帯の大規模サンプルから推定されており、これにより、母集団全体を極力公正に反映した平均消費量が求められる。この全国平均の推定値において、中国地方の標準誤差（SE）は2%存在することがわかっている。ここで重要なのは、標準誤差（SE）と標準偏差（ σ ）の概念的違いである。標準偏差はデータ点のばらつきを表す一方、標準誤差は、推定された平均値が真の母平均からどれだけ逸脱している可能性があるか、つまり「平均値推定の精度」を示す。標準誤差が2%という小さな値は、「中国地方の平均が真の母平均から±2%程度の範囲に極めて高い確度で存在する」ことを示唆する。

この高精度な全国平均および標準誤差は、ベイズ的推定（Bayesian Inference）を用いる際の極めて強力な事前知識として活用できる。ベイズ推定では、事前分布（Prior）と観測データから得られる尤度（Likelihood）を統合し、事後分布（Posterior）を導出する。ここで推定対象となるパラメータは、各世帯が属する世帯類型、ガス種別に対応した「平均的な年間エネルギー消費量」である。言い換えれば、標準誤差2%という事前情報を使えば、「全国平均から極端に外れた推定結果は統計的合理性が低い」という強いバイアスをモデルに組み込むことができる。

具体的なモデル化に先立ち、まずガス消費量をエネルギー（GJ）換算する際の前提を明示しておく。本研究ではLPガスの熱量換算係数として99 MJ/m³を使用し、都市ガスについては45 MJ/m³とする。この換算によって、世帯 i の年間ガス消費量（m³）を M_i とすれば、LPガス利用時の年間GJは $AnnualGJ_{LP,i} = ((M_i \times 99)/1000)GJ$ 、都市ガス利用時は $AnnualGJ_{City,i} = ((M_i \times 45)/1000)GJ$ で算出できる。ここで、各世帯はガス種別 G （LPまたはCity）及び世帯類型 T によって特徴づけられるとする。この2つの潜在パラメータ (G, T) が世帯の年間エネ

ルギー消費量を決定する平均値 $\mu_{T,G}$ を持つと仮定できる。全国統計から得られた情報に基づいて、 $\mu_{T,G}^{(nat)}$ を「理想的な全国平均値」として設定することが可能であり、ここで標準誤差率2%という情報を活用する。

標準誤差率 2%は、 $\mu_{T,G}$ が $\mu_{T,G}^{(nat)}$ のごく近傍にあることを意味するため、 $\mu_{T,G}$ を平均 $\mu_{T,G}^{(nat)}$ 、標準偏差 $\mu_{T,G}^{(nat)} \times 0.02$ を持つ正規分布を従うとする：

$$\mu_{T,G} \sim \mathcal{N}\left(\mu_{T,G}^{(nat)}, (\mu_{T,G}^{(nat)} \times 0.02)^2\right).$$

この数式は「平均パラメータ」が「全国平均 $\pm 2\%$ 」程度に強く束縛されることを意味する。ここで重要なのは、定義した正規分布は母集団個々のデータの分布を直接表しているのではなく、「平均値」という統計量の不確実性を示す分布である点である。標準誤差は平均値推定の不確実性を表すため、これを事前分布の幅として用いることはベイズ推定の文脈で合理的な選択肢となる。

続いて、観測データに関する尤度 (Likelihood) を定義する段階で、さらに数式を提示する。世帯 i の観測された年間ガス消費量を x_i^{gas} とし、それが対応する (G,T) カテゴリ平均 $\mu_{T,G}$ を中心とした正規分布から生成されると仮定する。このとき、尤度は以下の数式で与えられる：

$$p(x_i^{gas} | G, T) = \mathcal{N}(x_i^{gas} | \mu_{T,G}, (\mu_{T,G} \times 0.02)^2).$$

ここで、観測データ x_i^{gas} は事前分布で規定された狭い範囲内でのみバラつくことを許されており、標準誤差率2%に由来する狭い正規分布は、観測値が全国平均から大きく外れることを統計的に困難にする。

さらに、 (G,T) に関する事前確率 $p(G,T) = p(G) \cdot p(T)$ は、全国的な割合（例えば、単身世帯の割合）から求めることができる。今回はすべての世帯がLPを使用するため、 T が都市ガスの場合、 $p(G,T)$ は0となる。ベイズの定理を用いて、事後確率を計算する際に、これらの事前確率と尤度を結合する数式

$$p(G,T|x_i) \propto p(x_i|G,T) \cdot p(G,T)$$

を定義し、Maximum a Posteriori Probability Estimation (MAP推定) により最も確からしい (G,T) を決定する。こうしたモデル化の結果、仮に観測サ

サンプル数が少なくても、全国平均から大きく逸脱する推定結果は事前分布によって抑制され、特定のカテゴリに過度に集中したり、観測誤差によって極端な値が生じる可能性が低下する。また、もし観測データが全国平均からわずかながら逸脱した傾向を示した場合でも、それは強い事前分布によって適度に修正され、全国平均から大きく離れない合理的な推定結果が得られる。

表3-4 世帯類型の推定割合及びガスと照明・家電製品等のエネルギー消費比率

世帯類型	推定された割合	ガス：照明・家電製品等の比率
単身・高齢世帯	0.238768	6:7
単身・若中年世帯	0.292683	5.4:6.2
夫婦・高齢世帯	0.120668	10.8:10.8
夫婦・若中年世帯	0	10.8:10.3
夫婦と子・高齢世帯	0.228498	13.9:14.1
夫婦と子・若中年世帯	0.073171	15.0:12.7
三世帯	0.001284	14.9:18.5
その他	0.044929	11.1:11.9

表 3-4 は MAP 推定より推定された各世帯類型の割合である。夫婦・若中年世帯の割合が 0 になったが、これは、環境省の統計データにより、夫婦・若高齢世帯と夫婦・若中年世帯のガス消費量が同じだったため、事前確率 $p(G, T) = p(G) \cdot p(T)$ において、夫婦・高齢世帯の $p(T) = 0.1475$ が、夫婦・若中年世帯の $p(T) = 0.0975$ より高いことが原因であると考えられており、今後の課題である。図 3-3 と図 3-4 のデータを用いると、世帯類型ごとに平均的なガス消費と照明・家電製品等の比率が分かる。この比率を活用し、各世帯のガス消費量から年間照明・家電製品等が計算できる。例えば、ある単身・高齢世帯のガス消費量が 12GJ だったとすると、ガス消費と照明・家電製品等の比率である 6:7 を利用し、この世帯の年間照明・家電製品等の消費量が 14GJ と計算できる。ここで求められた $AnnualGJ_i^{elec}$ は、照明・家電製品等に使われるため、エアコンなどとは違い季節性が少ないと考え、 $AnnualGJ_i^{elec}$ を

12 で割って月間照明・家電製品等の消費量を算出し、エネファームの導入時の節約効果等の計算に使用する。

- ・コミュニティ分割

本研究で提案するシステムにおいては、コミュニティを構成し、お互いの相互作用することが重要である。そこでコミュニティを構成する際に、価格弾力性を正規化したものと、世帯類型をOne-Hotエンコードしたものを使用した。クラスタリングを行う主な理由は、類似した消費行動を示す世帯を同一グループにまとめることで、本研究で提案するシステムがどのような属性を持つ世帯に対してより効果的であるかを明確にするためである。これにより、ターゲットとなる世帯層を特定し、施策の最適化を図ることが可能となる。また、コミュニティ内で類似したエネルギー消費パターンを持つ世帯を特定することで、効率的なエネルギー管理やCO₂削減施策の策定に有用な情報を提供することができる。

具体的には、価格弾力性の正規化値と各世帯類型のダミー変数を組み合わせた特徴量を用いてクラスタリングを行った（K-means++）。最適なクラスター数を決定するために、シルエットスコアを評価指標として使用し、クラスター数kを2から10まで変化させながら各kにおけるスコアを比較した。その結果、シルエットスコアが最も高く、かつ各クラスターに最低30サンプルが含まれるkの値を選択した。このプロセスにより、エネルギー消費パターンが類似した世帯を効果的にグループ化し、システムの導入効果を詳細に評価するための基盤を構築した。その結果、決定されたコミュニティの世帯類型の分布を表したのが表3-5である。これにより、コミュニティ間を比較する。

表3-5 コミュニティごとの世帯類型の分布

コミュニティ	単身・ 高齢世帯	単身・ 若中年世帯	夫婦・ 高齢世帯	夫婦・ 若中年世帯	夫婦と 子・高 齢世帯	夫婦と 子・若 中年世帯	三世代	その他
0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	0	1	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1	0	0	0
4	0	0	1	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0.98275	0.01724	0

第四節 消費者のエネファーム導入

エネファームの導入可否は每期においてエージェントが下す2つの意思決定中の1つである。以下では、本研究で提案するABMにおいてエージェントがエネファームの導入可否を決めるロジックを説明する。エネファームの導入可否を決めるスコアは、大きく、経済スコア、環境意識スコア、社会意識スコアの3つからなる。それぞれの生スコアを計算した後、全体のエージェントの生スコアをWinsor+MinMax正規化をし、それぞれの生スコアが[0, 1]に収まるように調整する。ここで、Winsor+MinMax正規化というのは Winsor化を適用し、その後MinMax正規化を行うことで外れ値を制御し、データのスケールを統一する方法であり、Winsor化においては下位1%以下および上位1%以上のものは下位1%と上位1%にクリップした。その後、総合スコアを算出し、総合スコアをもとに、ロジスティック関数によりエネファームの導入可否が決まる。

(1) 経済スコア

- ・年間コスト差 (Annual Cost Difference)

$$AnnualDiff_i = Cost_i^{annual,actual} - Cost_i^{annual,hypo}$$

まずは、直近1年間の自分の消費量のもとで、エネファームを導入した場合の年間の経済的メリットを算出する。

- ・15年間分の割引ファクター（15-year Discount Factor）

$$DiscountFactor_{15} = \sum_{t=1}^{15} \frac{1}{(1 + rate_{discount})^t}$$

次に、エネファームの運用できる期間が10～20年であるところから、今後15年運用した場合得られる経済的メリットを計算するため、15年間分の割引ファクターを計算する。

- ・NPV（正味現在価値）の差

$$NPVdiff_i = AnnualDiff_i \times DiscountFactor_{15} - EF_{InitialCost_i}$$

$$when EF_{InitialCost_i} = (EF_{INSTALLCOST} - EF_{SUBSIDY})$$

年間コスト差、15年間分の割引ファクター、エネファームの初期導入費用を考慮し、導入前と導入後のNPVの差を比較する。ここで、エネファームの初期導入費用というのは、購入価格から補助金を引いた値である。

- ・エネファーム生経済スコア

$$S_{econ,i}^{EF} = NPVdiff_i$$

エネファームの生経済スコアは、導入前後のNPVの差より決定する。

（2）環境意識スコア

$$S_{env,i}^{EF} = Co2_i^{actual} - Co2_i^{hypo}$$

生環境意識スコアは、該当月のエネファーム導入有無によるCO₂を比較してスコアを計算する。削減された量が多ければ多いほどスコアは高くなる。

（3）社会意識スコア

$$S_{soc,i}^{EF} = \frac{\sum_{j \in N_i} d_{i,j} \cdot EF_{installed_j}}{\sum_{j \in N_i} d_{i,j}}$$

$d_{i,j}$ は*i*と*j*間の距離、 $EF_{installed_j}$ は*j*がエネファームを導入していれば1を取る変数

エージェントは、周囲のエージェントに合わせて行動しようとする傾向があるため、同じコミュニティにエネファームを導入している人が多ければ多いほど、かつその人との距離が近ければ近いほどスコアが高くなる。

(4) Winsor+MinMax正規化

$$(S_{econ,i}^{EF}, S_{env,i}^{EF}, S_{soc,i}^{EF}) \xrightarrow{Winsor+MinMax} (FS_{econ,i}^{EF}, FS_{env,i}^{EF}, FS_{soc,i}^{EF}) \in [0,1]$$

(5) 総合スコア & 確率

$$U_i^{EF} = (\omega_{econ} \cdot FS_{econ,i}^{EF} + \omega_{env} \cdot FS_{env,i}^{EF} + \omega_{soc} \cdot FS_{soc,i}^{EF}) \times (1 - r_i) \times i_i$$

$$P_i^{EF} = \frac{1}{1 + \exp \{-\lambda_{EF}(U_i^{EF} - \theta)\}}$$

正規化した生スコアに、経済ファクター、環境意識ファクター、社会意識ファクターをかけて足し、リスクアバージョン係数と情報アクセス度合いで人による差を調整することで、最終的な総合スコアが計算される。この総合スコアに基づいて、ロジスティック回帰モデル (Logistic Regression Model) によりエネファームの導入有無が決まる。ロジスティック回帰モデルは、二値結果を予測するために広く利用されており、特に注文が行われるか否かといった購買確率のモデリングに一般的に適用されている[38]。また、ここで、 λ_{EF} と θ はロジスティック関数の形状を決めるものである（具体的には導入確率が急上昇する閾値やグラフの傾きを決定）。

第五節 消費者のコミュニティへの協力

ガス消費削減率は每期エージェントが下すもう1つの重要な意思決定である。以下では、本研究で提案するABMにおいてエージェントがガス消費削減率を決めるロジックを説明する。エネファームの導入可否を決めるスコアは、大きく、経済スコア、環境意識スコア、社会意識スコアの3つからなる。それぞれの生スコアを計算した後、エネファームのスコアと同様に全体のエージェントの生スコアをWinsor+MinMax正規化をし、それぞれの生スコアが[0, 1]に収まるように調整する。その後、総合スコアを算出し、総合スコアをもとに、相互作用を考慮し、ガス消費の削減率を決定する。

(1) 経済スコア

$$S_{econ,i}^C = \text{YearlySaving}_i^{\Delta 1\%} - QOLcost_i$$

$$QOLcost_i = \begin{cases} 0 & \text{if } Child_i = 0 \text{ and } Senior_i = 0 \\ \text{YearlySaving}_i^{\Delta 1\%} \times (1 - 0.9) & \text{if } Child_i = 1 \text{ or } Senior_i = 1 \\ \text{YearlySaving}_i^{\Delta 1\%} \times (1 - 0.9^2) & \text{if } Child_i = 1 \text{ and } Senior_i = 1 \end{cases}$$

エージェントは現在の消費水準から1%追加で削減した場合に得られる経

経済的利益より経済スコアを計算する。しかし、同じ金銭的利益でも、家族構成員によって、感じ方はさまざまである。世帯タイプの推定により、子どもや高齢者がいる世帯は特定した。この情報を利用し、経済的利益から子どもや高齢者がいる場合、生活の質の低下をコストとして感じる。この点をモデルに組み入れるために、QOLコストを定義し引く。

(2) 環境意識スコア

$$S_{env,i}^C = \sum_{m=1}^{12} (0.01 \times MonthlyGas_i(m) \times Gas_{CO2})$$

エージェントは直近12ヵ月にもしも追加で1%消費を削減した場合に、削減されるCO₂の排出量を計算し、生スコアとする。

(3) 社会意識スコア

$$S_{soc,i}^C = \frac{\sum_{j \in N_i} d_{i,j} \cdot reduction_j}{\sum_{j \in N_i} d_{i,j}}$$

同じコミュニティに属する人の削減率を距離で加重平均したものを社会意識スコアとする。これより、周囲のエージェントが積極的に消費削減を行っていれば、自身も協力する社会的プレッシャーを反映できる。

(4) Winsor+MinMax正規化

$$(S_{econ,i}^C, S_{env,i}^C, S_{soc,i}^C) \xrightarrow{Winsor+MinMax} (FS_{econ,i}^C, FS_{env,i}^C, FS_{soc,i}^C) \in [0,1]$$

(5) 総合スコア&相互作用

・ 総合スコア

$$U_i^C = \omega_{econ} \cdot FS_{econ,i}^C + \omega_{env} \cdot FS_{env,i}^C + \omega_{soc} \cdot FS_{soc,i}^C \times (1 - r_i) \times i_i, U_i^C \in [0,3]$$

・ 初期削減率

$$InitReduction_i = \min \left(reducibility_i, \frac{U_i^C}{3} \right)$$

その期における初期削減率は、総合スコアの満点である3点中に自分のスコアがいくらかなのか、そして、リスクアバージョン係数及び情報アクセス度合いを反映して、初期削減率を決める。その際、初期削減率がそれぞれのエ

エージェントの最大削減可能率を超えないように調整する。

- ・最終削減率

$$\begin{aligned} reduction_i^{t+1} = \min & \left[reducibility, reduction_i^t + \alpha(InitReduction_i - reduction_i^t) \right. \\ & \left. + \beta(\overline{reduction_{N_i}}^t - reduction_i^t) \right] \end{aligned}$$

エージェントは初期削減率に相互作用を反映し、最終削減率を決定する。前回の削減率に、今回のスコア計算により決まった初期削減率と前回の削減率の差、前回のコミュニティの平均的な削減水準と自分の削減率の差を反映し、スコアを計算する。その際、最終削減率がそれぞれのエージェントの最大削減可能率を超えないように調整する。ここで、 α と β は「個人的要因による削減率の変化」と「相互作用（他人）に起因する削減率の変化」に対する重みを表すものであり、 $\overline{reduction_{N_i}}^t$ は、t期における同コミュニティの平均削減率である。

第六節 コンピューター実験

図3-5は本研究で構築したABMの疑似コードである。シミュレーションの各月において、まず各エージェントは `calculate_ef_probability()` 関数を用いて前期のエネファームの最終スコアにエネファーム導入の確率を計算し、生成されたランダムな確率と比較することでエネファームの導入を決定する。次に、`calculate_coop_init_reduction()` 関数によって前期のコミュニティ協力に関するスコアをもとにエージェントごとの初期削減率が算出され、その後 `apply_coop_interaction(init_r)` を呼び出すことで、同コミュニティのエージェントの削減率を考慮した最終的な削減率が決定される。その後、各エージェントは月ごとの削減率に基づいてガスおよび電気の消費量を更新する。続いて、エネファームおよびコミュニティ協力に関連する生スコア（経済、環境、社会）が計算され、これらの生スコアはWinsorizationとMin-Max Scalingによって正規化される。正規化後のスコアを基に、再度生スコアが計算され、最終スコアである総合スコアが更新される。最後に、エージェントごとのデータおよびマクロ指標が記録される。このようなシミュレーションを100個のデータセットに対して行い、100個の結果の平均値を出す。ここで、エネファーム導入時に、照明他に使われる電気消費中、エネファームからの供給量と電力会社からの供給量の比率は2対1とした。

```

[Overall Simulation Flow]
for month in 1 to T (e.g., T=120 months):
    // (A) Agent Behavior
    for each agent i:
        // 1) EF Installation Decision
        p_ef = i.calculate_ef_probability()
        if random() < p_ef:
            i.install_ef()
        // 2) Co-op Initial Reduction
        init_r = i.calculate_coop_init_reduction()
        // 3) Apply Co-op Interaction to Determine Final Reduction Rate
        i.apply_coop_interaction(init_r)
    end for
    // (B) Update Energy Consumption Based on Reduction Rates
    for each agent i:
        i.update_energy_consumption(month)
    end for
    // (C) Compute Raw Scores for EF and Co-op
    for each agent i:
        i.compute_all_raw_factors()
    end for
    // (D) Normalize Scores Using Winsorization and Min-Max Scaling
    normalize_all_agents_scores()
    // (E) Recompute Final Scores After Normalization
    for each agent i:
        i.compute_all_raw_factors()
    end for
    // (F) Log Data and Aggregate Macro Results
    record_agent_data()
    record_macro_results()
end for

```

図3-5 シミュレーションの擬似コード

第四章 分析

第一節 実験設定

表4-1 実験設定のパターン

	設定1	設定2	設定3	設定4	設定5	設定6	設定7	設定8	設定9
λ_{EF}	0.9	0.9	0.9	1	1	1	1.1	1.1	1.1
θ	7	8	9	7	8	9	7	8	9
α	1	1	1	1	1	1	1	1	1
β	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$rate_{discount}$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
$EF_{INSTALLCOST}$ (円)	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000
$EF_{SUBSIDY}$ (円)	200,000	200,000	200,000	200,000	200,000	200,000	200,000	200,000	200,000
ガス基本料金 (円)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
ガス従量料金 (円/㎥)	700	700円	700円	700	700円	700円	700	700円	700円
コミュニティベース割引基準 (CO ₂ 削減率)	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
コミュニティベース割引率	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
電気基本料金 (円)	500	500	500	500	500	500	500	500	500
電気従量料金 (円/kWh)	25	25	25	25	25	25	25	25	25
CO ₂ 排出係数 (ガス, kg/㎥)	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29
CO ₂ 排出係数 (電気, kg/kWh)	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
ガス会社利益率	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Jクレジット価格 (円/t-CO ₂)	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
Jクレジット手数料	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
シミュレーション期間	10年	10年	10年	10年	10年	10年	10年	10年	10年

本研究におけるシミュレーションは第三章で示した100個のデータセットを使って行う。100個のデータセットを使うことによりロバストネスを保つ

ことはできるが、本シミュレーションにおいてはデータセット以外にも、シミュレーション自体で設定しなければならないグローバル変数があり、特にエージェントの行動に関わるパラメータ (λ_{EF} 、 θ 、 α 、 β) はシミュレーション結果に影響を与える可能性があるため、多様なパラメータの値を試して結果を観察する、いわゆる感度分析が必要となってくる。したがって、本研究では、表4-1のようにパラメータ λ_{EF} 、 θ の値のパターンを9つ用意しシミュレーションを行った。設定1から3は、 λ_{EF} を0.9で固定し、 θ の値に変化を与え、設定4から6は、 λ_{EF} を1で固定し、 θ の値に変化を与え、設定7から9は、 λ_{EF} を1.1で固定し、 θ の値に変化を与えた。また、全ての設定においてエネファーム導入時に照明・家電製品等の電気使用量中3分の2をエネファームで賄うと想定した（すなわち、照明他に使われる電気消費中、エネファームからの供給量と電力会社からの供給量の比率は2対1）。

設定によって変化を与えるパラメータ以外のグローバル変数を設定した根拠は以下でまとめる。エネファームの導入費用は本体価格が100万～200万円ほどで形成されるが、本研究では安価の100万のものを想定した。エネファーム導入時の補助金は、経済産業省資源エネルギー庁が2024年に実施した給湯省エネ2024事業においてエネファームを導入した場合、1台あたりに18万円が与えられ、加算条件を満たせば追加で2万円が与えられるところから20万円と設定した[39]。ガス基本料金と従量料金に関しては、エネ研・石油情報センターの岡山県の平均LPガス料金により設定した[34]。電気料金は中国電力など、岡山市で利用可能な電力会社の料金プランを参考にして決めた。ガスのCO₂排出係数は、環境省の令和4年度家庭部門のCO₂排出実態統計調査と同じ値で設定し、電気のCO₂排出係数は日本ガス協会によると、CO₂削減効果を算出する際には、対策の影響を受ける電源（マージナル電源）のCO₂排出係数を使用して計算する必要があるとあり、日本においてはマージナル電源を火力発電と見なすことが合理的であるとあったため、火力発電のCO₂排出係数（2013年度実績）を利用した[35][40]。最後にJクレジットの価格に関しては、日本取引所グループ（JPX）のカーボン・クレジット市場日報2024年12月27日の相場表によると、表4-2のような相場である。クレジット価格は、欧州で一時的に100ユーロに達した例もあり、脱炭素社会において同様の水準に達する可能性も考えられる。しかし、今回は現在の市場相場を考慮し、保守的に3000円と仮定した[41]。

表4-2 Jクレジット値段（2024年12月27日）

分類名	基準値段
省エネルギー	2,600
再エネ（電力）	6,100
再エネ（熱）	2,201
再エネ（混合）	1,990
森林	6,000
再エネ（電力：水質バイオマス）	2,550
その他	1,150

第二節 結果および考察

表4-3 コミュニティ別のエネファーム導入率の平均と標準偏差

	設定1		設定2		設定3		設定4		設定5		設定6		設定7		設定8		設定9	
コミュニティ	MN	SD	MN	SD	MN	SD	MN	SD	MN	SD	MN	SD	MN	SD	MN	SD	MN	SD
0	.239	.071	.107	.049	.062	.039	.137	.069	.138	.070	.027	.027	.072	.046	.037	.033	.025	.026
1	.216	.028	.096	.022	.037	.014	.113	.020	.114	.020	.014	.009	.067	.017	.018	.009	.006	.006
2	.224	.037	.092	.022	.039	.017	.119	.023	.109	.021	.016	.010	.068	.018	.020	.011	.007	.006
3	.231	.034	.110	.022	.065	.015	.138	.027	.128	.026	.032	.010	.077	.018	.036	.014	.023	.009
4	.236	.045	.111	.033	.068	.021	.127	.036	.129	.032	.034	.018	.077	.026	.038	.016	.025	.015
5	.230	.049	.112	.042	.061	.030	.132	.061	.129	.043	.031	.020	.076	.040	.037	.026	.023	.019

表4-4 コミュニティ別のCo2排出量削減率の平均と標準偏差

	設定1		設定2		設定3		設定4		設定5		設定6		設定7		設定8		設定9	
コミュニティ	MN	SD	MN	SD	MN	SD	MN	SD	MN	SD	MN	SD	MN	SD	MN	SD	MN	SD
0	.114	.033	.048	.024	.021	.016	.063	.032	.064	.032	.008	.009	.031	.019	.014	.013	.007	.008
1	.110	.016	.049	.012	.019	.007	.058	.011	.059	.011	.008	.005	.029	.009	.010	.006	.004	.003
2	.123	.027	.065	.017	.025	.012	.065	.019	.062	.018	.013	.007	.036	.014	.017	.009	.009	.005
3	.107	.016	.049	.010	.023	.007	.062	.013	.058	.012	.012	.004	.033	.009	.014	.006	.008	.003
4	.109	.021	.047	.015	.022	.010	.065	.016	.057	.015	.010	.006	.031	.011	.012	.007	.006	.004
5	.110	.025	.061	.019	.021	.013	.061	.025	.069	.021	.011	.008	.033	.018	.013	.009	.007	.007

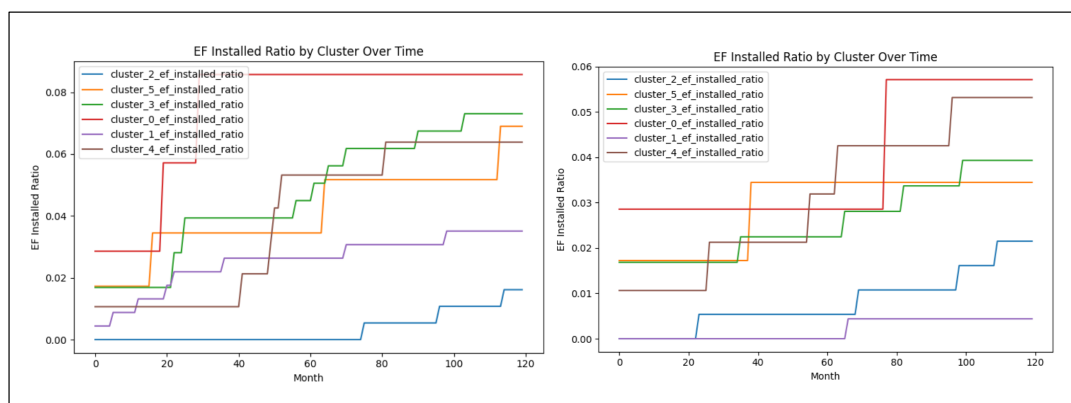


図4-1 エネファーム導入率変化の例（左：設定3・dataset10, 右：設定6・dataset78）

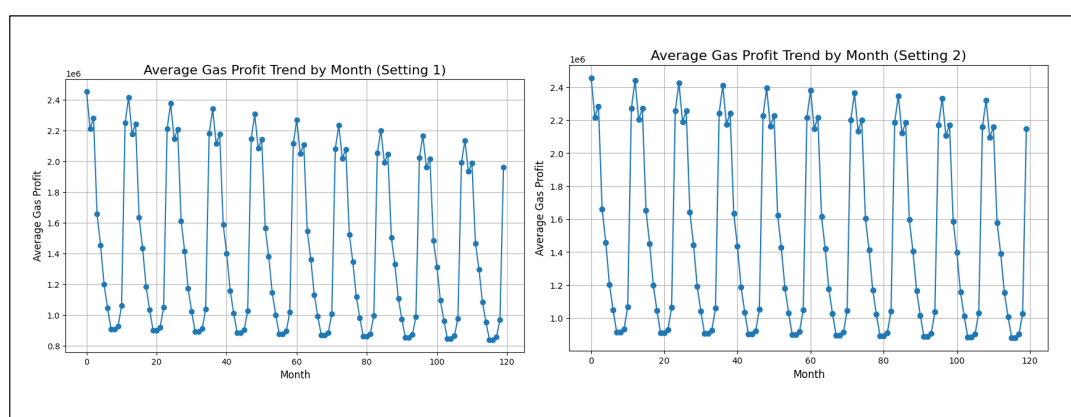


図4-2 設定ごとのガス会社の利益推移の一部（左：設定1, 右：設定2）

本研究では、エネファームの導入率およびCO₂削減率を世帯タイプ別にシミュレーションし、単身・高齢世帯および単身・若中年世帯における特異な結果を観察した（表4-3、表4-4参照）。具体的には、これらの世帯は他の世帯タイプに比べてエネファーム導入率が低かったにもかかわらず、CO₂削減率においては他のコミュニティと比較して低くならなかった。これは、単身世帯においてはコミュニティ協力がより効果的に機能し、エネファームの導入に依存しない形でCO₂削減が達成された可能性を示唆している。

単身・高齢世帯および単身・若中年世帯は、家族構成や世帯規模が小さいため、エネルギー消費のパターンが異なるとともに、エネファームの設備投資や維持管理に対する負担感が比較的大きい可能性があり、自発的な導入が難しい環境にあると考えられる。しかしながら、コミュニティ内での協力行動や情報共有が活発に行われた結果、これらの世帯においてはエネファーム

に依存しない形でのエネルギー消費削減が実現されたと推察される。単身世帯はコミュニティ内での交流や協力行動の影響を受けやすい特性があると言える。

高齢世帯では技術導入に対する抵抗感や固定化された生活スタイルが影響し、エネファームの導入が進みにくい一方で、情報アクセスやリスク回避度が低い場合、近隣からの影響を受けやすくなる可能性がある。若中年世帯では、柔軟なライフスタイルや情報処理能力の高さが、コミュニティ協力を通じた削減行動の促進に寄与したと考えられる。こういった傾向は今回の乱数データには反映されていないが、実証的な根拠に基づき、データセットにこういう傾向を反映させると、より現実に近いシミュレーションにより新たな示唆が得られるかもしれない。

本研究の結果は、エネファームの導入促進だけでなく、コミュニティ協力を促進する施策がCO₂削減に有効であることを示唆している。特に、エネファーム導入が難しい単身世帯に対しては、コミュニティ内での情報共有や協力プログラムの導入が、エネルギー消費の削減を促進する有力な手段となり得る。世帯タイプごとの特性に応じたアプローチが、より効果的な削減策の設計につながる可能性が高いのである。また、コミュニティベース料金プランによりガス会社の利益が減るとしても、エネファームの普及によるガス消費増加が利益減少分を賄ってある程度くれるため、CO₂削減をしつつガス会社の利益減少が抑えられることが確認された（図4-2、付録1参照）。カーボン・ニュートラルを目指すうえでのブランディング効果や、環境経営の推進などがもたらすプラス面を踏まえると、利益を損なわずにCO₂削減ができると言えるのであろう。

一方で、本研究ではコミュニティ協力の効果を世帯タイプ別に明示的に評価したが、実際のコミュニティ内での交流パターンや影響力の度合いについてはさらなる検討が必要である。例えば、コミュニティリーダーの役割や情報伝達の速度、協力行動の持続性など、細かな要因がCO₂削減に与える影響を定量的に分析することが求められる。また、他のエネルギー削減手段や政策との相互作用についても、包括的なモデル化が望まれる。

以上の考察を通じて、エネファームの導入促進と並行して、コミュニティ協力を強化する施策が、エネルギー消費の削減およびCO₂排出量の抑制にお

いて重要な役割を果たす可能性が示された。これにより、持続可能なエネルギー利用の実現に向けた包括的なアプローチの必要性が浮き彫りとなった。

第三節 限界

本研究は、持続可能なエネルギー利用モデルの構築と脱炭素社会の実現に向けた制度・ビジネスモデルの設計に新たな示唆を与えたが、まだ課題は残っている。

まず、価格弾力性の推定において、データが不十分であったこともあり、一部統計的に有意でない結果が得られ、そのようなものに関しては完全なモデルのためのパラメータとはならず、あくまでもモデル構築のための参考値として使用された。今後は追加的なデータ確保あるいは、より高度な推定方法により限られたデータで正確に価格弾力性を推定する必要がある。

そして、属性推定に不足な点があった。今回の推定方法を延長線として、MAP推定で世帯類型だけでなく、所得水準や世帯人数等を一緒に推定するためには、世帯類型や所得水準、世帯人数が独立であるという仮定が必要となるが、世帯類型、所得水準、世帯人数の間で独立の仮定が成立するには一般的に難しく、実際に研究段階で試したところ、一部の世帯類型に偏る分析結果が得られた。したがって、今後は、より多様なエージェントの異質な特性を反映したシミュレーションに発展させるために、より高度な属性の推定方法が求められる。

また、コミュニティへの協力度合いを決めるスコアの設定をより発展させる必要がある。本研究では、前期より1%追加で削減した場合に削減されるCO₂の排出量でスコアを計算する。しかし、この仕組みであると、削減していけば行くほど、スコアが減少するという結果につながる可能性が高い。さらに、そもそも前期より1%追加で削減した場合を想定することが、実際の人間の行動を反映していない可能性がある。具体的には、人は自分がn%削減した場合に得られる経済的メリットと低下する生活の質を総合的に考慮し、最適なnを選ぶ可能性がある。このように、より人間の行動を的確に反映した行動ロジックの設定が必要である。

第五章 まとめ

本研究では、化石燃料のなかでも比較的クリーンとされるガスを活用した家庭用燃料電池「エネファーム」、温室効果ガス削減を売買可能なクレジットとして認証・取引する「J-クレジット制度」、そしてコミュニティ全体のCO₂排出量を基に従量料金を割引する「コミュニティベース料金プラン」を組み合わせた新たなエネルギー利用モデルを提案し、その有効性を検証した。エネファームは、高効率な分散型エネルギー供給システムとして家庭レベルでのCO₂排出削減に寄与するとともに、ガス会社にとってはガス需要の確保という点で経済的メリットをもたらす。一方、J-クレジット制度と組み合わせることで、削減されたCO₂をクレジット化し、追加的な収益を得られるスキームが可能となる。一見コミュニティベース料金プランの導入は、ガス消費が減少しガス会社の収益が損なわれる懸念を生むが、エネファームのガス需要増やJ-クレジット販売に伴う収益補完により、ガス会社の利益減少を十分にカバーできることを示した。

さらに、本研究のエージェントベースモデル（ABM）では、消費者の異質性や消費者間の相互作用、社会的影響を考慮することで、従来の経済的要因のみを前提とした分析では捉えきれない行動変容のメカニズムをシミュレートした。具体的には、各世帯のエネルギー消費の内訳の異質性を考慮、子供や高齢者がいる世帯では快適性や安全性を重視するため省エネ行動が制限される傾向を反映するなど、エージェントの個性を考慮したシミュレートを行いシステムの有効性を示した。また、単身世帯などがエネファーム導入に積極的ではない場合でも、近隣の削減行動に触発されて協力的行動をとる様子が観察され、コミュニティという枠組みでの協力がCO₂削減に大きく寄与することが確認された。

以上の結果から、エネファーム、J-クレジット制度、コミュニティベース料金プランの三要素を有機的に統合することで、ガス会社・消費者・環境がいずれもメリットを享受できる持続可能なエネルギー利用モデルを構築できる可能性が示された。本研究において得られた知見は、今後の施策や制度を設計するに重要な示唆を与え、脱炭素社会実現に向けたエネルギーモデルの検討や、企業・行政・市民が協働する新たなビジネススキームの開発に有用な示唆を与えるものと考えられる。今後は、実際の導入事例におけるデータ収集やより複雑な行動モデルの導入を通じて、研究成果の一層の外部妥当性

向上と実装可能性の検証が期待される。

<謝辞>

本研究の遂行にあたり、多大なご協力をいただきましたアズビル金門株式会社の村上英治様を含め皆様に心より感謝申し上げます。特に、貴社から貴重なデータをご提供いただきましたことは、本研究を進める上で不可欠でありました。また、当研究室の訪問研究員でもある村上英治様には、研究の方向性について多くの貴重なアドバイスをいただきました。さらに、本研究の進捗を学会で発表する際にも、多大なご支援を賜りましたことに深く感謝申し上げます。本研究は、先述した学会で発表した論文に基づくものです[42][43]。

また、本研究では、OpenAIのGPT-4o、o1-Mini、o1モデルを活用し、アイデアの整理、テキスト生成、コード作成を補助しました[44]。具体的には、研究背景として必要となってくるものをAIツールに整理してもらい、筆者のリサーチのもとに資料を集め、資料から得られた記載すべき内容を箇条書き等の形でAIツールに渡して自然で分かりやすい文章を生成しました。コードに対しても同様にコードで実現したいことを箇条書き等で渡し、出力値を確認しながら修正などの作業を加えました。AIツールによって生成された内容およびコードは、筆者によって詳細に確認・修正されており、最終的な論文および実装コードは筆者の意図を反映し、学術基準を満たすよう仕上げられています。

<参考文献>

下記の参考文献リストのなか、オンラインでアクセスが可能なものは、2025年1月4日時点ですべて記載のURLでアクセス可能であった。

[1] IEA, World Energy Outlook 2024. IEA, Paris, 2024. [Online]. Available:

<<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>>

License: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A)

- [2] 経済産業省, エネルギー白書2024. 2024. [Online]. Available:
<<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2024/pdf/>>
- [3] 経済産業省 資源エネルギー庁, “ガス事業生産動態統計調査,” 2024.
[Online]. Available:
<<https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/gas/ga001/>>
- [4] 経済産業省 資源エネルギー庁, 日本のエネルギー 2022年度版 「エネルギーの今を知る10の質問」. 2022. [Online]. Available:
<<https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/energy2022/006/>>
- [5] コージェネ財団, “エネファームメーカー販売台数統計2024年10月発表分,” 2024. [Online]. Available:
<https://www.ace.or.jp/fc/fc_0010.html#LIFE>
- [6] 経済産業省, エネルギー白書2023. 2023. [Online]. Available:
<<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2023/pdf/>>
- [7] コージェネ財団, “エネファームの種類・機種,” 2024. [Online]. Available:
<https://www.ace.or.jp/fc/fc_0010.html#TYPE>
- [8] 日本ガス協会, “エネファーム（家庭用燃料電池）の特長,” [Online]. Available:
<<https://www.gas.or.jp/gas-life/enefarm/tokucho/>>
- [9] パナソニック, “家庭用燃料電池「エネファーム」商品ラインアップ 戸建住宅向け標準モデル,” [Online]. Available:
<<https://panasonic.biz/appliance/FC/lineup/house01.html>>
- [10] 環境省, “温室効果ガス排出削減等指針, コスト・排出量の削減に有効な対策（業務部門（オフィスビル等）、CO2削減効果が高い対策,” [Online]. Available:
<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/gel/ghg-guideline/special/business_office_co2.html>

[11] 経済産業省 資源エネルギー庁, “無理のない省エネ節約, キッチン,” [Online]. Available:

<https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/general/howto/kitchen/index.html>

[12] パナソニック, “よくあるご質問, 熱効率はどうくらいですか。(温水床暖房について), ” [Online]. Available:

<https://jpn.faq.panasonic.com/app/answers/detail/a_id/88991/>

[13] 東京ガス, “都市ガスについて, 都市ガスの種類・熱量・圧力・成分,” [Online]. Available:

<<https://www.tokyo-gas.co.jp/network/gas/shurui/index.html>>

[14] J-クレジット制度, [Online]. Available:

<<https://japancredit.go.jp>>

[15] 東京都環境局, “排出量取引,” [Online]. Available:

<https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/climate/large_scale/trade>

[16] 埼玉県, “排出量取引,” [Online]. Available:

<<https://www.pref.saitama.lg.jp/a0502/haishutu-torihiki.html>>

[17] J-クレジット制度, “大分県における家庭用燃料電池 エネファームの導入促進によるCO2削減事業,” 2023. [Online]. Available:

<https://japancredit.go.jp/pdf/jcrd/P00182_1.pdf>

[18] Energy Local, “Energy Local Community Projects,” Accessed Sep. 29, 2024. [Online]. Available:

<<https://energylocal.org.uk/>>

[19] M. Vert, N. Vert, and P.-O. Pineau, “Choosing to Pay More for Electricity: An Experiment on the Level of Residential Consumer Cooperation,” *Energies*, vol. 17, no. 6, p. 1317, 2024. [Online]. Available: <<https://doi.org/10.3390/en17061317>>

- [20] S. Panda, N. Chakraborty, and A. Jana, "Secured Peer-to-Peer Energy Trading and Demand Response in Transactive Energy Systems," in Proc. 2023 OITS Int. Conf. Information Technology (OCIT), Raipur, India, 2023, pp. 793-798. [Online]. Available: <<https://doi.org/10.1109/OCIT59427.2023.10431320>>
- [21] E. Bonabeau, "Agent-Based Modeling: Methods and Techniques for Simulating Human Systems," Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A., vol. 99, Suppl. 3, pp. 7280-7287, 2002. [Online]. Available: <<https://doi.org/10.1073/pnas.082080899>>
- [22] W. Rand and R. T. Rust, "Agent-Based Modeling in Marketing: Guidelines for Rigor," Int. J. Res. Mark., vol. 28, no. 3, pp. 181-193, 2011. [Online]. Available: <<https://doi.org/10.1016/j.ijresmar.2011.04.002>>
- [23] R. Axelrod and L. Tesfatsion, "Appendix A: A Guide for Newcomers to Agent-Based Modeling in the Social Sciences," in Handbook of Computational Economics, Vol. 2, L. Tesfatsion and K. L. Judd, Eds. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2006, pp. 1647-1659. [Online]. Available: <[https://doi.org/10.1016/S1574-0021\(05\)02044-7](https://doi.org/10.1016/S1574-0021(05)02044-7)>
- [24] J. M. Epstein, Generative Social Science: Studies in Agent-Based and Computational Modeling. Princeton, NJ, USA: Princeton Univ. Press, 2006. [Online]. Available: <<http://www.jstor.org/stable/j.ctt7rxj1>>
- [25] L. Tesfatsion and K. L. Judd, Eds., Handbook of Computational Economics, Vol. 2: Agent-Based Computational Economics. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2006.
- [26] M. Deutsch and H. B. Gerard, "A Study of Normative and Informational Social Influences upon Individual Judgment," J. Abnormal Soc. Psychol., vol. 51, no. 3, pp. 629-636, 1955. [Online]. Available: <<https://doi.org/10.1037/h0046408>>

- [27] I. Ajzen, “The theory of planned behavior: Frequently asked questions,” *Hum. Behav. Emerg. Technol.*, vol. 2, no. 4, pp. 314-324, 2020, [Online]. Available: <<https://doi.org/10.1002/hbe2.195>>
- [28] R. H. Thaler and C. R. Sunstein, *Nudge: Improving Decisions About Health, Wealth, and Happiness*. New Haven, CT, USA: Yale Univ. Press, 2008.
- [29] D. Kahneman and A. Tversky, “Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk,” *Econometrica*, vol. 47, no. 2, pp. 263-292, 1979. [Online]. Available: <<https://doi.org/10.2307/1914185>>
- [30] E. L. Deci and R. M. Ryan, *Intrinsic Motivation and Self-Determination in Human Behavior*. New York, NY, USA: Springer, 1985.
- [31] L. Festinger, *A Theory of Cognitive Dissonance*. Stanford, CA, USA: Stanford Univ. Press, 1957.
- [32] P. C. Stern, “New Environmental Theories: Toward a Coherent Theory of Environmentally Significant Behavior,” *J. Soc. Issues*, vol. 56, no. 3, pp. 407-424, 2002. [Online]. Available: <<https://doi.org/10.1111/0022-4537.00175>>
- [33] L. Festinger, “A Theory of Social Comparison Processes,” *Human Relations*, vol. 7, no. 2, pp. 117-140, 1954, [Online]. Available: <<https://doi.org/10.1177/001872675400700202>>
- [34] エネ研・石油情報センター, “岡山県 平均価格 (2024年10月時点),” [Online]. Available: <https://oil-info.ieej.or.jp/price/price_ippan_lp_gusu.html>
- [35] 環境省, “令和4年度 家庭部門のCO2排出実態統計調査 (家庭CO2統計),” 2024. [Online]. Available: <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/kateiCO2tokei_00004.html>

- [36] 厚生労働省, “2022 (令和4) 年 国民生活基礎調査の概況,” 2022. [Online]. Available: <https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/k-tyosa/k-tyosa22/index.html>
- [37] 国立社会保障・人口問題研究所, “日本の世帯数の将来推計(全国推計),” 2024. [Online]. Available: <https://www.ipss.go.jp/pp-ajsetai/j/HPRJ2024/t-page.asp>
- [38] D. W. Hosmer and S. Lemeshow, Applied Logistic Regression. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2000. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/0471722146>
- [39] 経済産業省 資源エネルギー庁, “給湯省エネ2024事業,” 2024. [Online]. Available: <https://kyutou-shoene2024.meti.go.jp>
- [40] 日本ガス協会, “地球環境CO₂削減対策の効果と電気のCO₂排出係数について,” [Online]. Available: <https://www.gas.or.jp/kankyo/taisaku/denki/>
- [41] 日本取引所グループ (JPX), “カーボン・クレジット市場日報 2024/12/27 相場表,” [Online]. Available: <https://www.jpx.co.jp/equities/carbon-credit/daily/index.html>
- [42] ウセジュン, 村上英治, and 高橋大志, “ABMによるコミュニティベースのガス料金プラン導入の検討,” in 人工知能学会：経営課題にAIを！ ビジネス・インフォマティクス研究会第25回, 2024.
- [43] ウセジュン, 村上英治, and 高橋大志, “ガス使用データを用いた消費行動分析：持続可能なシステム構築に向けた基礎分析,” in 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会2024, 2024.
- [44] OpenAI, “Models,” [Online]. Available: <https://platform.openai.com/docs/models>

< 付録 >

付録1： 設定ごとのガス会社の利益推移（全ての設定）

