

2050年ゼロカーボン社会を目指した都市計画の基礎検討

[研究代表者] 羽田 裕 (経営学部経営学科)
 [共同研究者] 雪田和人 (工学部電気学科)
 河路友也 (工学部建築学科)
 武田美恵 (工学部建築学科)
 後藤時政 (経営学部経営学科)
 野中尋史 (経営学部経営学科)
 福澤和久 (経営学部経営学科)

研究成果の概要

カーボンニュートラルの実現には様々な要因が絡み合っており、それぞれを独立した課題として捉えるのではなく、有機的なつながりを有した一つのシステムとして捉えることが重要となる。このような問題解決に向けて、住宅、自動車、再エネ、まちづくりといった工学的視点、「経済」と「環境」を両立する環境配慮型への人々の行動変容に関して行動経済学および経営学的視点、現状を解析するためのデータサイエンスからのアプローチが必要となってきた。

本研究は、2050年に向けたゼロカーボン社会のモデル化を行う。また本モデルと実態社会とのギャップを明らかにし、このギャップを埋めるための解決方法を工学および経営学的視点から検討を行う。

地下都市空間における直流給配電の可能性についての検討、EVと公共交通機関との連携を軸としたシステム構築に関する研究では、ある地下街における駐車場を対象にし、郊外からのEVが都市部において放電した場合について基礎的な検討を実施した。その結果、2030年において検討対象とした地下街の電力量を10%程度負担できる可能性、また、2050年において約40%の需要電力を賄うことが期待できる可能性が示唆された。

地下都市空間及び郊外に関する空間的評価に関する研究では、CPの冷暖房エネルギーについて検討を実施した。地域冷暖房からの供給熱量を冷暖房負荷として、数種類の熱源システムを想定してエネルギー消費量を試算した。

ウォークアブルなまちづくりに関する研究では、アンケート調査によって、都市居住環境の充実及び地下街利用者の満足度向上につながるニーズを明らかにした。店舗の探しやすさ、他店舗利用との空間連続性が地下街の強みと考えていたが、現在はカフェのみの利用者が多いことが予想される。

人流、消費行動および環境配慮型行動の分析および動機づけに関する研究では、機械学習の一つであるSVMとYolo-Strongsortを組み合わせることで人流の方向や特定の店舗への人の出入りを推定したうえで、特定した人物のファッションを特定する手法を開発した。これにより精緻な人流解析ができるため、最適な人流の誘導方向やナッジの選択が可能となる。また価格.comのデータベースをもとに、個人の省エネ型製品の選択に対する態度と行動について検討を行った。その結果、次世代自動車の市場普及において、「環境配慮」以外の要因が重要であることがみえてきた。

研究分野：電力工学、建築学、環境学、経営学、行動経済学、データサイエンス

キーワード：ゼロカーボン社会、エネルギーマネジメント、まちづくり、ナッジ

1. 研究開始当初の背景

近年、地球規模の課題である気候変動リスクの解決に向けた取り組みの一つとして、カーボン・ニュートラル(CN)

の実現に注目が集まっている。この背景には2020年10月に、政府が2050年までに温室効果ガスの排出を全体として実質ゼロにすると宣言したことにある。政府は、「グリ

ーン成長戦略」の中でCNの実現に向けて多面的な取り組みを提案してきている。具体的な計画は、住宅に関して2030年までに新築平均で排出量をゼロに、再生可能エネルギー（再エネ）に関して2040年までに最大4500万kWの洋上風力を導入、自動車に関して2030年代半ばまでに新車販売をすべて電気自動車（EV）にして排出量を削減するとしている。また具体的な実施として、「地域脱炭素」という形で地域単位での取り組みに期待が集まっている。つまり地域レベルでCNを実現するための再エネを起点としたシステムの構築が求められている。

上記のとおり、CNの実現には様々な要因が絡み合っており、それぞれを独立した課題として捉えるのではなく、有機的なつながりを有した一つのシステムとして捉えることが重要となる。そこで学術的、実践的な側面から再エネを軸としたゼロカーボン（ZC）社会のモデル化が急務となっている。このような問題解決に向けて、住宅、自動車、再エネ、まちづくりといった工学的視点、「経済」と「環境」を両立する環境配慮型への人々の行動変容に関して行動経済学および経営学的視点と現状を解析するためのデータサイエンスからのアプローチが必要となってきた。

2. 研究の目的

本研究は、2050年のCNを実現する社会を築き上げるため、現在からの社会変容における技術的課題および経済的影響などに関する基礎的な検討を実施していく。具体的には2050年に向けたZC社会のモデル化を行う。また本モデルと実態社会とのギャップを明らかにし、このギャップを埋めるための解決方法を工学および経営学的視点から検討を行う。

本研究の役割は次のとおりである。エネルギーマネジメント、地下都市空間における直流給配電の可能性についての検討、EVと公共交通機関との連携を軸としたシステム構築に関する研究を雪田教授が、地下都市空間及び郊外に関する空間的評価に関する研究を河路教授が、まちづくりに関する研究を武田教授が、人流、消費行動および環境配慮型行動の分析及び動機づけに関する研究を後藤教授、野中准教授、福澤講師、羽田が担当している。

3. 研究の方法

本研究は、「学術」と「実証」のサイクルを回しながら進めていく。まず学術的側面では、工学系、情報系、社会科学系それぞれの知見を活かし、各論として研究を積み上げていく。そしてこの各論を総合的に体系化し、2050年に実現すべきZC社会のモデル化を行い、社会実装に向けた道筋を立てていく。

実証的側面では、地下都市空間の対象を名古屋市中区に位置する栄地下街セントラルパーク（CP）、住宅を中心とした郊外を瀬戸市等、再エネを中心とした郊外を田原市等とし、実証実験を実施する。

本研究において具体的に明らかにしていくことは、次のとおりである。第1は、都市部におけるエネルギーマネジメントのための電力需要を検討し、省エネを目指した直流給配電の可能性の検討、再エネの活用を目指し、EVを用いた都市部と郊外との連携の検討である。第2は地下街の温熱・空気質環境に及ぼす影響評価、郊外のZEH達成状況の把握と太陽光発電余剰量の都市放電の可能性検討、第3は、都市居住空間の充実化に向けた研究、第4は、人流解析およびナッジによる環境配慮型への行動変容に向けた基礎検討である。

4. 研究成果

本研究は、最終年度であるため、これまでの研究成果を統合し、2050年に向けたZC社会のモデルに関する総合的な検証、そして次のステージへとつなげるための体系的な整理が中心となる。各研究に関する成果は以下のとおりである。

第1は、エネルギーマネジメント、地下都市空間における直流給配電の可能性についての検討、EVと公共交通機関との連携を軸としたシステム構築に関する研究である。

その中でも本検討では、再エネとEVの都市部における利活用について検討したので報告する。特にEVは移動する蓄電池としても注目されている。このEVの増加について、いくつかの予想がなされており、2030年にはEVは現在の車の台数の20%から30%になるもの報告されている。そこで、これらEVを蓄電池として用いるものと想定すると、小型の蓄電池が都市部内に点在するものと予想される。一方、再エネの主力である太陽光発電、風力発電の導入においては、地域脱炭素化促進事業制度などで促進されている。このような制度によると、都市部や郊外において太陽

光発電が設置されるものと予想されている。しかし都市部への導入においては、限定された小容量のみであり、都市部で消費するエネルギーを賄うことが困難である。郊外においては大規模太陽光発電などの導入が計画されている。

本検討では、郊外における再エネによる発電電力を都市部で使用することを目指した EV 運用方法について検討した。この運用方法は、郊外に設置された再エネによる発電によって充電した EV を都市部に移動し、その移動先において電力を放電する。この放電により、郊外の再エネによる発電電力を、都市部において使用できることになる。

この運用法により、ある地下街における駐車場を対象にし、郊外からの EV が都市部において放電した場合について、基礎的な検討を実施した。表 1 には、2030 年、2038 年、2050 年の EV の普及台数の推定、ある地下街の駐車場の台数から、EV の駐車台数の推定、この EV から 5kWh 放電した場合と 10kWh 放電した場合について検討した。対象とした地下街における 24 時間の電力総需要量は 7,335kWh とした場合、2030 年において駐車した各 EV 1 台から 10kWh 放電することにより、地下街の電力量を 10%程度負担できる可能性がある。また、2050 年の EV 普及台数を全車両の 90%と仮定し、駐車した各 EV から 10kWh 放電すると、約 40%の需要電力を賄うことが期待できる結果となった。

表 1 駐車場における EV の台数と放電効果

	1日の電力量(想定:2019年時)	7,335	
5kW	2030年:EV放電量(27%)	435	5.93%
	2038年:EV放電量(50%)	805	10.97%
	2050年:EV放電量(90%)	1,449	19.75%
10kW	2030年:EV放電量(27%)	870	11.86%
	2038年:EV放電量(50%)	1610	21.95%
	2050年:EV放電量(90%)	2898	39.51%

第 2 は、地下都市空間及び郊外に関する空間的評価に関する研究である。CN の実現には、省エネルギーが不可欠であるため、CP の冷暖房エネルギーに関する検討を実施した。現在は、地域冷暖房から冷水と蒸気を受入れて冷房、暖房に使用しているため、受入熱量を冷暖房負荷として分析を行った。図 1 に夏期、中間期、冬期の特別外気温と冷暖房負荷の関係、図 2 に特別の人流と冷暖房負荷の関係を示す。外気温とは明確な関係がみられ、外気温の上昇によ

り冷房負荷が増加している。また、冷房負荷に対して暖房負荷は非常に小さいことも確認できた。一方、人流と冷暖房負荷の関係性は、夏期において若干みられたものの、中間期や冬期では、関係性は確認できなかった。夏期においても顕著な関係性ではないため、地下街の冷暖房負荷は、外気温との関係性が強いことが示された。地下街の場合は、壁は地中に面しており一般建物と比べると貫流冷房負荷は小さいが、通路が外気に開放されているため、換気(外気侵入)による冷房負荷が増大していると考えられる。この冷暖房負荷を用いて、数種類の熱源システム(ターボ冷凍機+ボイラ、空冷 HP、ビルマルチエアコン)を想定してエネルギー消費量を試算した。現状の地域冷暖房の一次エネルギー換算の COP を 1.1 (二次エネルギー換算 COP3) として算出している。

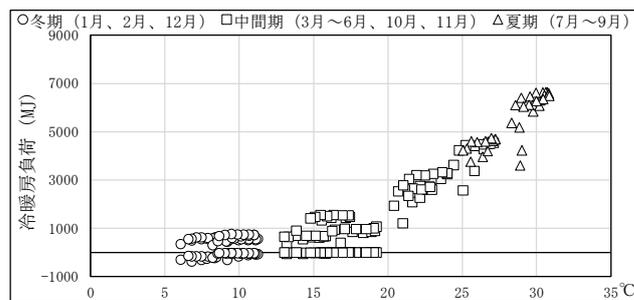


図 1 CP の各月別特別外気温と冷暖房負荷

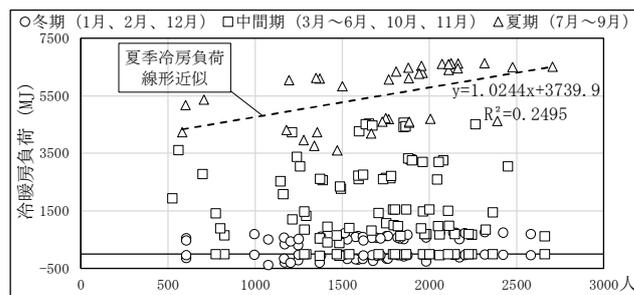


図 2 CP の各月別特別人流と冷暖房負荷

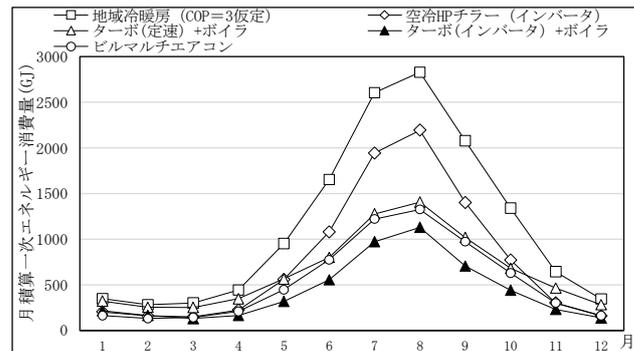


図 3 熱源別一次エネルギー消費量比較

計算結果を図3に示す。冷房負荷の大きい夏期においては、大幅な省エネルギーを実現できる可能性が示されている。但し、地域冷暖房はコージェネレーションシステムであるため、単純に空調に関するエネルギー消費量のみでの比較は困難であるため、総合的な評価は別途必要になる。

郊外の検討については、瀬戸市においてアンケートを実施し、800人以上の回答者を得ることができた。主な内容を表2に示す。太陽光発電の設置理由は再エネよりは省エネとの認識で設置しているが、蓄電池は再エネ利用との認識が高い。電気自動車も、CNよりも家計や省エネのために購入している人が多い結果であり、住宅の断熱化も快適性向上が最も多く、省エネのためとの回答は少なかった。CNに対する意識はまだ低いと思われる。

表2 CNに関する意識調査（瀬戸市）

太陽光発電設備の設置理由	19歳以上 29歳以下	30歳以上 39歳以下	40歳以上 49歳以下	50歳以上 59歳以下	60歳以上
①家計のため	34	15	31	5	2
②省エネのため	42	10	21	7	7
③再エネに関心があつたため	3	6	16	6	3
蓄電池設備の設置理由	19歳以上 29歳以下	30歳以上 39歳以下	40歳以上 49歳以下	50歳以上 59歳以下	60歳以上
①家計のため	17	4	12	2	1
②省エネのため	20	3	11	2	5
③再エネに関心があつたため	10	6	22	7	1
電気自動車の購入理由	19歳以上 29歳以下	30歳以上 39歳以下	40歳以上 49歳以下	50歳以上 59歳以下	60歳以上
①家計のため	9	2	2	3	1
②省エネのため	11	2	4	1	1
③蓄電設備を兼ねて	2	0	6	0	0
④カーボンニュートラル推進のため	2	0	0	1	2
⑤その他	2	0	1	1	1
住宅を断熱化した理由	19歳以上 29歳以下	30歳以上 39歳以下	40歳以上 49歳以下	50歳以上 59歳以下	60歳以上
①家計のため	7	2	2	0	0
②省エネのため	9	1	7	2	3
③住宅の快適性向上のため	11	7	27	3	3
④その他	0	0	3	0	0

第3は、ゼロカーボン社会の実現に向けたウォーカブルなまちづくりに関する研究である。リニア中央新幹線開業に向けて名古屋駅を中心に再開発が進む中、地上と地下の一体的な発展を目指し、地下街のメリットを活かした地下空間機能の充実化が重要であると考えている。名古屋市都心部である中区栄には、地上にヒサヤオドリパーク（南北全長約1.8km、幅員約70mの公園）、地下にCPがあり、出入口で結ばれ、連続性があるため地上と地下を往来しやすい。写真1に示す地下通路は地下鉄の2駅、私鉄の1駅と直結しているため、天候や地上交通に左右されず目的地近くまで快適に移動できる。



a)店舗が立ち並ぶ（中央通り） b)市道でもある通路

写真1 セントラルパーク地下通路の様子

本研究は、地下街のカフェ利用行動実態を把握することにより、レンタルシェアオフィスやワークスペース等の店舗空間導入設置の検討及び店舗間の相互利用向上を活かし、利用者の満足度向上に向けた都市居住空間の充実化を目的としたものである。CP地下街は、昭和53（1978）年に開業し、延べ面積56,624㎡、店舗部分は10,369㎡と名古屋地下街最大規模である。CP地下街のカフェ3店舗の利用者を対象にしたアンケート調査によって、都市居住環境の充実及び地下街利用者の満足度向上につながるワークスペースとして利用したいカフェの空間要素、ワークスペース専用空間及び生活利便施設のニーズを明らかにした。調査項目の一部を挙げると、「地下街のカフェを利用する理由として、お客様自身が重要視する要素を選択して下さい。（複数回答可）」と質問した結果（回答者数247人）、地下街のカフェを利用する際に最も重要視する要素は「地上の気象要因（暑さ、寒さ、湿度）からの回避」、次に「地下鉄改札と地上目的地との移動動線上（利便性）」である。回答に地上の気象要因のどちらか、或いはどちらも選んだ人は66.5%（155/233人）であり、地下街のカフェを利用する人は、地上の天候の影響を受けないことを利点と考えている人が多い。ワークスペースとして利用したいと思うカフェ要素に「利便性（立ち寄りやすさ）」を求める人々がいることから、「地下鉄改札と地上目的地との移動動線上（利便性）」という利点を活かし、必要とされるワークスペースの充実が地下街の満足度向上につながると考える。次に「生活施設のコンパクト化が可能であることを地下街の強みとした場合、都市居住環境への満足度に繋がる地下都市空間の充実化に向けて必要だと思う要素を選択して下さい。（複数回答可）」と質問した（回答者数161人）。その結果、現役世代の20代～50代の単身及び家族世帯の5割以上に生活用品を買い揃えられる店舗や生鮮食料品店のニーズがあり、地下街にも日常生活を支える生活利便

施設の充実が望まれていることが明らかになった。店舗の探しやすさ、他店舗利用との空間連続性が地下街の強みだと考えていたが、現在はカフェのみの利用者が多いことが予想される。公共交通機関及び地上と地下の一体的整備を図り、居住者が増加傾向にある都心部における居住空間として、居心地がよく、歩き回りたくなるウォークアブルなまちづくりが期待される。

第4は、人流、消費行動および環境配慮型行動の分析および動機づけに関する研究である。本研究では機械学習の一つであるSVMとYolo-Strongsortを組み合わせて人流の方向や特定の店舗への人の出入りを推定したうえで、特定した人物のファッションを特定する手法を開発した。これにより精緻な人流解析ができるため、最適な人流の誘導方向やナッジの選択が可能となる。開発した手法は以下のステップからなる。

Step1は、名古屋市栄駅の地下街のカメラのデータを用いてYolo-Strongsortで人物の検知とその座標の算出した。本プロセスにおいて、人物検知と座標検出モデルを確立した。Step2は、SVMで人の流れを特定した。評価実験におけるモデルの精度は表2が示すとおりである。Step3は、セマンティックセグメンテーションモデルで人物のファッションの特定を行った。ファッション特定モデルの性能は正解率93.9%と高い数値を示した。

また価格.comのデータベースをもとに、個人の省エネ型製品の選択に対する態度と行動について検討を行った。その結果、次世代自動車の市場普及において、「環境配慮」以外の要因が重要であることがみえてきた。

上記のとおり、本研究は、ZC社会のモデル化に向けて各分野から基礎検討を行ってきた。今後、これらで得られた結果を統合していくことによって、ZC社会としての1つのモデルを提示していく。

表3 SVMの学習結果(F値、単位%)

x、y、yの差分	y、yの差分	yの差分
63.6%	63.6%	81.8%

5. 本研究に関する発表

(1) 武田美恵、“地下街におけるワークスペースと生活利便施設のニーズに関する研究—名古屋市中区栄セントラルパーク地下街を対象として—”、日本インテリア学会論文報告集、34号、pp.15-22、2024年3月1日。

(2) 羽田裕、野中尋史、“ゼロ・カーボン社会に向けた環境配慮商品の選択に関する意思決定とは”、日本商業学会第73回全国研究大会(沖縄国際大学)、2023年。

(3) 雪田和人、河路友也、武田美恵、後藤時政、“再生可能エネルギーとEVの都市部における利活用の一検討”、電気関係学会東海支部大会(豊橋科学技術大学)、2023年。

(4) Kazuto Yukita, Tomoya Kawaji, Mie Takeda, Tokimasa Goto, Kazuhisa Fukuzawa, Yutaka Hada: A Study of Renewable Energy and EV Utilization in Urban Areas, A5-P-9, ICMAS2023.