

I S S N 1 3 4 7 - 5 9 8 3

第 28 回
日本情報ディレクトリ学会全国大会
研究報告予稿集

期 間
2025 年 9 月 6 日 (土)

会 場 関西大学



日本情報ディレクトリ学会

目 次

【大学院生による研究報告】

- ① 日本ヨーグルト市場における健康志向とブランドポジショニングの分析 1
邱 峰 (埼玉工業大学大学院)
村山 要司 (埼玉工業大学)
- ② トンネル照明灯具の腐食判定アプリにおけるGrad-CAMの実務者評価 7
杜 浩平 (日本大学大学院)
行木 靖人 (日本大学大学院)
矢野 耕也 (日本大学)
伊藤 正人 (株式会社ネクスコ東日本エンジニアリング)
高橋 大樹 (株式会社ネクスコ東日本エンジニアリング)
豊谷 純 (日本大学)
- ③ CNNを用いた構造物の損傷度推定と汎用性に関する研究 (木材試験体を用いた検討) 13
大信田 憲進 (日本大学大学院)
高橋 亜佑美 (日本大学)
工藤 博政 (元日本大学大学院)
門 万寿男 (日揮株式会社)
- ④ APIコール情報を用いたマルウェア分類・判別システムの試作 17
甘利 涼 (東京情報大学)
石田 裕貴 (東京情報大学大学院)
花田真樹 (東京情報大学)

【一般公募による研究報告】

- ⑤ 日本語学習者の達成度評価におけるスコアモデリング 21
椋澤 恭子 (開智国際大学)
靱山 泰斗 (開智国際大学)
- ⑥ 地域鉄道利用動態の数理モデリングに関する研究 25
村山 要司 (埼玉工業大学)
鈴木 邦成 (日本大学)

⑦ マルコフ連鎖 による 新宿 駅 南口 を 起点 と する 人流 変化 に 関 す る ー考察地域鉄道利用動態の数理モデリングに関する研究	31
鈴木 邦成 (日本大学) 村山 要司 (埼玉工業大学)	
⑧ 自治体情報システムの標準化・共通化について	35
岡石義和 (株式会社サイネックス) 村田吉優 (株式会社サイネックス)	
⑨ 兵庫県の地域経済循環分析と地方創生	39
福嶋 幸太郎 (大阪経済大学)	

日本ヨーグルト市場における健康志向とブランドポジショニングの分析

邱峰*・村山要司**

1. はじめに

市場の発展に伴い、商品の多様性が増すことで消費者の生活選択も増え、人々の消費観念も変化し、健康への関心が増加している。渡慶次・氏家（2019）によると、消費者の健康志向を背景に、2001年から2016年の発酵乳生産量と家計の食料支出における発酵乳支出割合の推移がともに増加傾向にあるという。[1] 2020年からコロナ禍で高まる免疫需要、健康需要を背景に、ヨーグルト乳酸菌飲料市場は活発な動きが見られている。

日本のヨーグルト市場は競争が非常に激しく、明治、森永、雪印などの大手乳業メーカーや新興ブランドが絶えず新製品を投入し、健康効果、味、機能性などの面で差別化を図っている。

また、消費者の健康意識の高まりに伴い、プロバイオティクス、低糖質、高タンパク質などの機能性ヨーグルトの需要が著しく増加している。

需要が多くなるとともに、市場競争が激しくなり、数多くのヨーグルトから、自社の製品がどのように消費者の目にとまるのかは企業が抱えている一番の課題といえる。

本研究では消費者調査とデータ分析を通じて、日本ヨーグルト市場の競争構造を探り、各ブランドのポジショニングを分析することで、各社の戦略がどう消費者に捉えられているのかを明らかにする。

2. ヨーグルト製品の市場概況

日本の乳製品消費は、過去30年間で、顕著な構造的転換が見られる。牛乳の一人当たり消費量が1994年のピーク時34.3リットルから2024年24.8リットルへ29%減少、加工乳は1996年6.6リットルから2024年2.9リットルへ56%急減している。これらとは対照的に、発酵乳は1991年3.6リットルから2024年10.2リットルへ182%増加している。[2]

この相反する動きは、日本の消費者が乳製品に

求める価値が、基礎的な栄養補給から機能性重視へ移行していることを如実に反映していると考えられる。

近年、日本のヨーグルト市場は多様化・健康志向の進展が顕著である。日常的な健康食品として、ヨーグルト製品は従来の単一形態から、様々な消費ニーズに対応する多品種の製品体系へと発展してきた。

機能性表示食品の国内市場では、乳酸菌が消費者からの認知度が高いことや、脂肪低減や免疫機能維持、睡眠、ストレス緩和など幅広い機能を表示できることから伸長している。請求効能別では、睡眠と腸内環境改善、ストレス緩和など睡眠を組み合わせたものがトレンドであるほか、免疫機能維持を訴求した新商品発売や機能性表示食品へのリニューアルが多くみられ、今後も市場は拡大が予想されている。[3]

3. 日本の主要メーカーと主要商品

日本のヨーグルト市場は高い集中度を示しており、主要メーカー12社の販売実績の合計のうち、明治、雪印メグミルク、森永乳業の三大乳業メーカーが市場の約65%を占めている。明治は40%の市場占有率で業界をリードし、雪印メグミルクは13%でこれに続き、森永乳業は12%で第3位につけている。[4]

明治の主な商品ブランドとして、ブルガリアヨーグルト、プロビオヨーグルトLG21、プロビオヨーグルトR-1などがある。ブルガリアヨーグルトは、特定保健用食品として整腸効果が認められており、LG21は胃の健康、R-1は免疫力向上といった、特定の健康効果をアピールしている。[5]

雪印メグミルクの主な商品ブランドとして、ナチュレ恵、恵 ガセリ菌SP株、恵 ビフィズス菌SP株、牧場の朝などがある。このうち、ナチュレ恵は特定保健用食品である。恵 ガセリ菌SP株は機能

性表示食品である。[6]

森永乳業の主な商品ブランドとして、ビヒダスヨーグルト、ギリシャヨーグルト パルテノ、森永アロエヨーグルトなどがある。森永アロエヨーグルトは1994年に発売されたロングセラー商品であるが、2024年9月にシリーズ初の機能性表示食品「アロエヨーグルトW」が発売された。この新商品は、肌の保湿力と腸内環境の改善という2つの効果を同時に期待できる点が特徴となっている。[7]

表1に、三大メーカーの主要ブランドを示した。

表1 三大メーカーの主要ブランド 出典：各社のHP[5],[6],[7]より著者作成

メーカー	ブランド名	特徴	表示
明治	ブルガリアヨーグルト	日本発のプレーンヨーグルト	特定保健用食品
明治	プロビオヨーグルトLG21	胃の負担をやわらげる	機能性表示食品
明治	プロビオヨーグルトR1	免疫力向上	
雪印メグミルク	ナチュレ恵	腸内環境の改善に役立つ	特定保健用食品
雪印メグミルク	恵 ガセリ菌SP株	内臓脂肪を減らすのを助ける	機能性表示食品
雪印メグミルク	恵 ビフィズス菌SP株	カプセルで生きて腸に届ける	
雪印メグミルク	牧場の朝	なめらかな口当たり	
森永乳業	ビヒダスヨーグルト	大腸まで届くビフィズス菌	特定保健用食品
森永乳業	ギリシャヨーグルト パルテ	たっぷりプロテイン	
森永乳業	森永アロエヨーグルト	素肌とカラダのために	
森永乳業	森永アロエヨーグルトW	肌の保湿力向上、腸内環境改善	機能性表示食品

3. 消費者調査

3.1 調査データ

本研究では、MyVoice社が実施したWebアンケート調査の回答データ（Raw Data）を入手し、そのデータを使用する。なお、Raw Dataに、個人を特定できる情報は含まれていない。

3.2 調査時期と調査対象

2024年1月1日から1月5日までの期間において、MyVoice社が保有するアンケートモニターを対象として実施された。

3.3 調査内容

アンケートは、「あなたは、どのようなときにヨーグルトを飲食していますか。直近1年間についてお聞かせください。」「あなたがヨーグルトを摂取する理由をお聞かせください。」「あなたが市販のヨーグルトを購入する場合、重視するものは何ですか。」など7～9問（自由回答の設問が1問含まれる）で構成されている。また、Raw Dataには約30項目の登録属性情報が付与されている。

4. 消費者分析

4.1 テキストマイニング分析（自由記述欄分析）

「(全員) あなたが、ヨーグルトについてのこだわりや、好きなタイプや味、気に入っている食べ方などがあれば、具体的にお聞かせください。ヨーグルトを飲食しない方は、その理由があれば具体的にお聞かせください。」という設問に対しての自由記述欄の結果についてのテキストマイニングを実施した。テキストマイニングは、大量のテキストデータから有用な情報を抽出する技術である。

結果は、大容量ヨーグルトを食べる人、食べきりサイズのヨーグルトを食べる人に分類し、それぞれ分析を行った。

4.1.1 テキストマイニング結果 大容量

大容量ヨーグルトを食べる人での分析結果について、頻出語リストを表2、共起ネットワークを図1に示した。抽出語リストは、テキスト内の頻出単語やフレーズを一覧にしたものであり、共起ネットワークは、単語間の関係を可視化したものである。共起ネットワークでは、円が大きいほど頻出語であることを表す。

普段、大容量ヨーグルトを食べる人の自由記述欄では、食べ方に関する単語が多く、特に、フルーツを加えた無糖ヨーグルトに対するコメントが多く見られた。フルーツを加えることでヨーグルトの風味や食感を豊かにし、無糖であることが健康志向の消費者のニーズに込えている。味わいの体験と健康は、ヨーグルトが市場で成功するための重要な要素の一つといえる。

一方、「買う」、「多い」、「安い」の関連性を表す

グループがあり、価格志向の傾向が見られた。

表2 頻出語リスト（大容量）

	頻出語	頻度
1	食べる	1233
2	ヨーグルト	709
3	入れる	429
4	好き	385
5	特に	376
6	プレーン	343
7	フルーツ	340
8	無糖	276

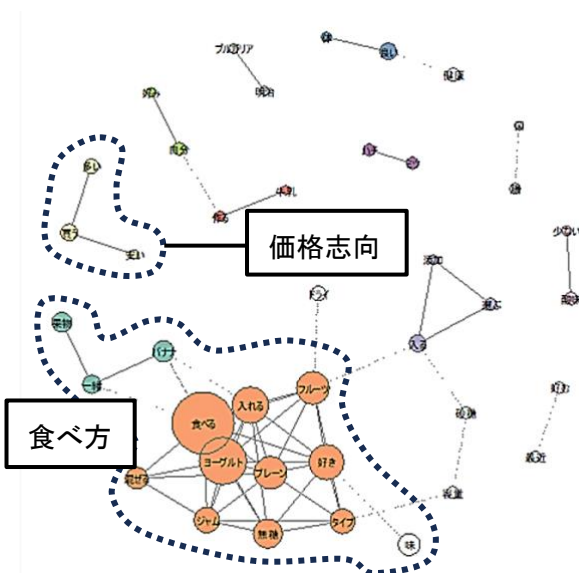


図1 共起ネットワーク（大容量）

4.1.2 テキストマイニング結果 食べきりサイズ

食べきりヨーグルトを食べる人での分析結果について、頻出語リストを表3、共起ネットワークを図2に示した。

普段、食べきりサイズのヨーグルトを食べる人の自由記述欄では、頻出語リストの上位では、大容量ヨーグルトを食べる人では8位だった「無糖」が11位に、同じく12位だった「味」が8位となるなど、若干の違いはあるものの、大容量タイプとの比較で明確な差異は見られない。共起ネットワークを見ると、大容量と同様に食べ方について記述が多いが、それとは別に、「商品」と「機能」のニーズが関連していることがわかる。

表3 頻出語リスト（食べきりサイズ）

	頻出語	頻度
1	食べる	1010
2	ヨーグルト	605
3	特に	500
4	好き	487
5	フルーツ	357
6	プレーン	238
7	入れる	213
8	味	210

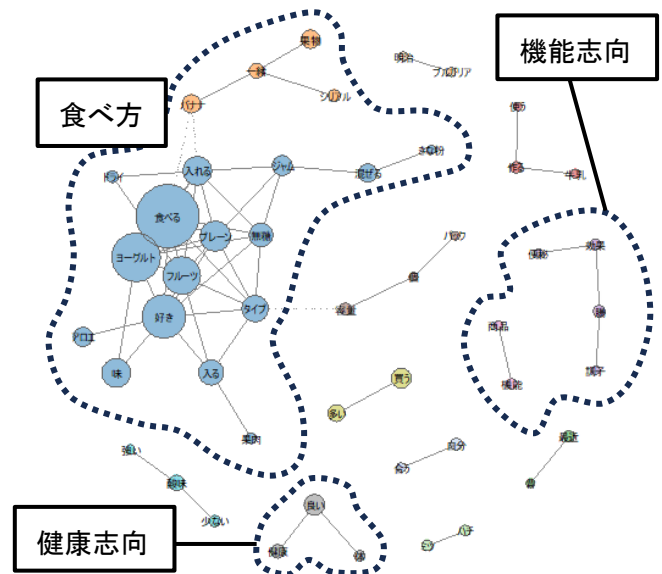


図2 共起ネットワーク（食べきりサイズ）

また、「便秘」、「効果」、「腸」、「調子」や、「健康」、「良い」、「体」なども関連付けられていることから、食べきりサイズのヨーグルトは、消費者の健康ニーズに対応しており、消化器系の健康、身体の状態、さらには、特殊な機能性、免疫力の向上、高タンパク質などの追加的なニーズを満たすことが期待されている。食べきりサイズのヨーグルトに対する消費者の機能的ニーズが、大容量のものよりも高いことがわかる。

4.2 コレスポンデンス分析

「商品－食べる場面」、「商品－食べる理由」、「商品－重視する点」の3種類のクロス集計表を作成し、その集計結果を用いて、コレスポンデンス分析を実施した。コレスポンデンス分析は、クロス集計を散布図の形で表すことができ、項目間の関係性を視覚

的に分かりやすく表現できる技術である。具体的には、行項目と列項目の相関が最大になるように、行と列のカテゴリにスコアを与え、これが、散布図の第1軸の値となる。次に、第1軸と直交する条件で、相関が最大となるスコアを求め、散布図の第2軸の値となる。こうして、「関連性が強い＝似ているもの同士を近く」に、「関連性が弱い＝傾向の異なるものを遠く」にプロットされる。

結果は、大容量ヨーグルトを食べる人、食べきりサイズのヨーグルトを食べる人の2つに分類し、それぞれ分析を行った。

4.2.1 コレスポンデンス分析結果 大容量

大容量ヨーグルトを食べる人での「商品一食べる場面」では、明治の明治ブルガリアヨーグルトLB81、雪印メグミルクのナチュレ 恵、森永乳業のビヒダス プレーンヨーグルトなど11の商品と、「朝食後のデザートとして」、「夕食後のデザートとして」、「朝食のメニューの1つとして」、「おやつとして」など、19の場面とのクロス集計表より、分析を行った。結果を図3に示す。

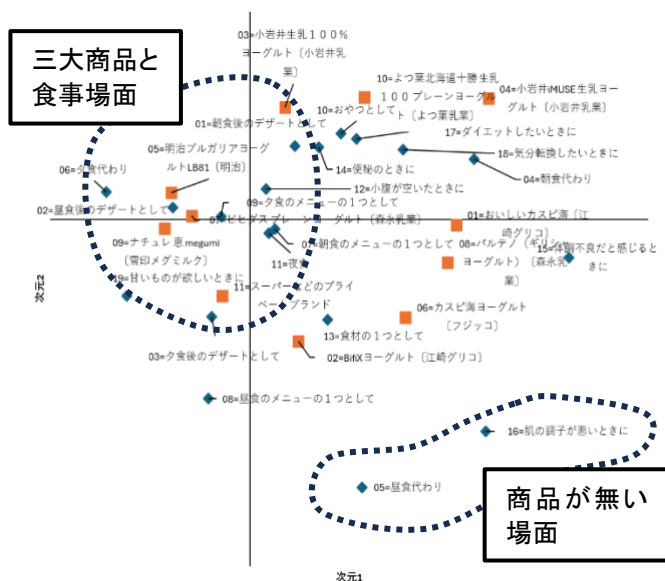


図3 「商品一食べる場面」(大容量)

■が商品であり、◆が場面である。各商品は、ばらけてプロットされており、比較的、同質性は低い。三大メーカーのブランド商品である明治ブルガリアヨーグルトLB81、ビヒダス プレーンヨーグルト、ビヒダス プレーンヨーグルトは、「朝食後のデザートとして」、「昼食後のデザートとし

て」、「夕食のメニューの一部として」、「夕食代わり」など朝食や夕食に関わる項目の近くにプロットされており、商品がこれらの用途をめぐって競合していることが分かる。一方で、「肌の調子が悪いときに」、「昼食代わり」は、各商品と離れていて、スキンケアや代替昼食としての利用場面では、ほとんど消費者に選ばれていない。

「商品一食べる理由」では、「商品一食べる場面」と同じ11の商品と、「おいしい」、「健康によい」、「体の免疫力増強」、「胃腸の調子を整えるため」など、19の理由とのクロス集計表により、分析を行った。結果を図4に示す。

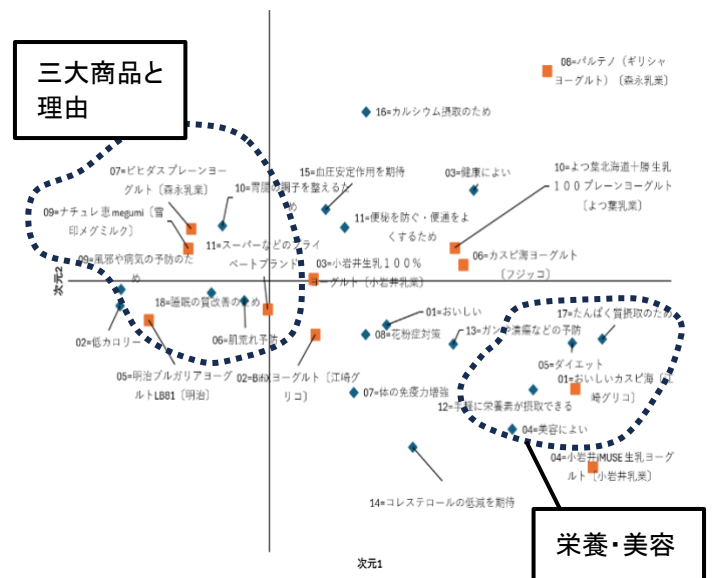


図4 「商品一食べる理由」(大容量)

三大メーカーの商品、明治ブルガリアヨーグルトLB81、ビヒダス プレーンヨーグルト、ビヒダス プレーンヨーグルトは、ここでは、「睡眠改善」、「肌ケア」、「腸内環境調整」といった機能に特化して展開されている。こうした従来の機能と離れて、「タンパク質摂取」、「手軽に栄養素が摂取できる」、「美容によい」といった項目がまとまっており、商品としては、江崎グリコのおいしいカスピ海が近くにプロットされている。

「商品一重視する点」では、「商品一食べる場面」、「商品一食べる理由」と同じ11の商品と、「味」、「無糖」、「価格」、「容量、サイズ」など、22の重視点とのクロス集計表により、分析を行った。結果を図5に示す。

ミルクの恵 ビフィズス菌SP株ヨーグルト、明治の明治プロビオヨーグルトLG21など、三大メーカーの商品が多様な場面对応している。

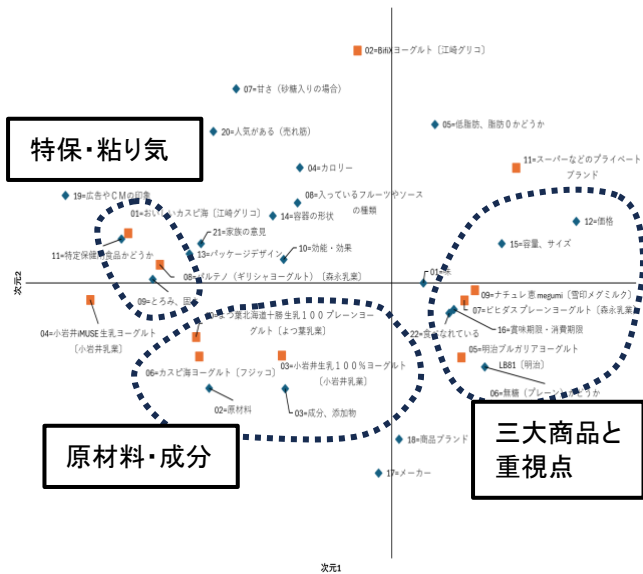


図5 「商品一重視する点」(大容量)

商品と重視点は、主に3つのグループに分かれている。第一のグループは「賞味期限」、「容量・サイズ」、「無糖」、「食べ慣れている」を特徴とする明治ブルガリアヨーグルトLB81、ビヒダス プレーンヨーグルト、ナチュレ恵である。第二のグループは「とろみ、固さ」が特徴の江崎グリコのおいしいカスピ海と森永乳業のパートノである。第三のグループは、「原材料」、「成分、添加物」に重点を置いたフジッコのカスピ海ヨーグルト、よつ葉北海道十勝生乳100%プレーンヨーグルト、小岩井生乳100%ヨーグルトで構成されている。

4.2.2 コレスポンド分析結果 食べきりサイズ

食べきりサイズのヨーグルトを食べる人での「商品一食べる場面」では、明治プロビオヨーグルトR-1、恵ガセリ菌SP株ヨーグルト、森永アロエヨーグルトなど22の商品と、大容量のヨーグルトを食べる人と同じ、19の場面とのクロス集計表より、分析を行った。結果を図6に示す。

主に、朝食・夕食の代替や食後デザートとして消費される傾向があり、「昼食代わり」を除けば、食事のときの場面に近い商品が多い。機能性目的の購入では、「気分転換したいとき」には森永乳業のパートノ、「体調不良を感じたとき」、「肌の調子が悪いとき」は、明治プロビオヨーグルトPA-3、森永乳業のラクトフェリンヨーグルト、「便秘のときに」、「ダイエットしたいときに」は、雪印メグ

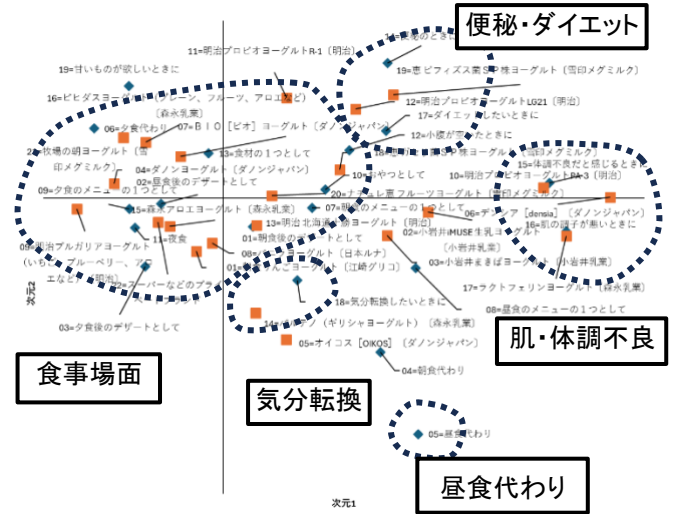


図6 「商品一食べる場面」(食べきりサイズ)

「商品一食べる理由」では、食べきりサイズを食べる人の「商品一食べる場面」と同じ22の商品と、大容量のヨーグルトを食べる人と同じ、19の理由とのクロス集計表により、分析を行った。結果を図7に示す。

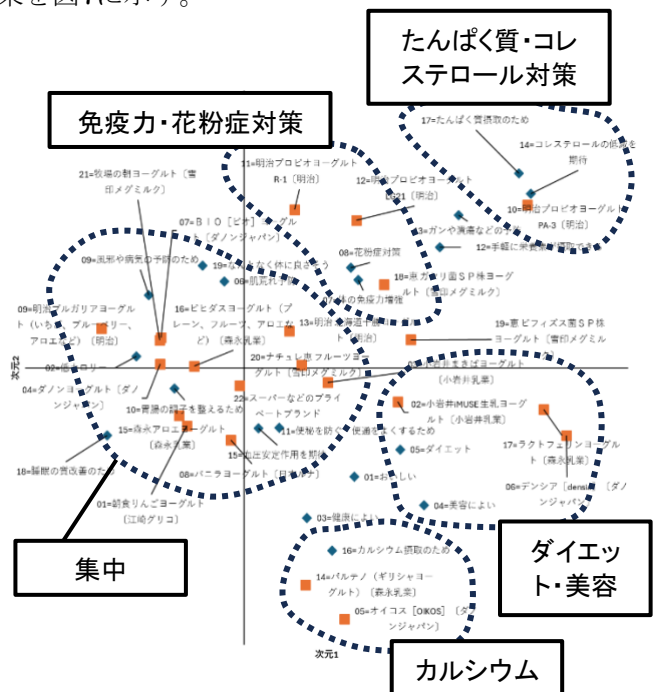


図7 「商品一食べる理由」(食べきりサイズ)

多くの商品が「低カロリー」、「胃腸の調子」、「睡眠改善」、「血圧安定」、「便秘を防ぐ」、「肌荒れ」といった項目とともに、集中している。そん

な中、「花粉症対策」、「免疫力増強」といった理由で、恵ガセリ菌SP株ヨーグルト、明治プロビオヨーグルトR-1、LG21がやや特徴あるポジションを得ている。また、「タンパク質摂取」、「コレステロール低減」の2つの機能は近接しており、商品として、明治プロビオヨーグルトPA-3が位置している。「ダイエット」、「美容によい」では、ダノンジャパンのデンシア、ラクトフェリンヨーグルト、「カルシウム摂取」の近くには、パルテノ、とダノンジャパンのオイコスが位置している。

「商品一重視する点」では、食べきりサイズを食べる人の「商品一食べる場面」「商品一食べる理由」と同じ22の商品と、大容量のヨーグルトを食べる人と同じ、22の重視点とのクロス集計表により、分析を行った。結果を図8に示す。

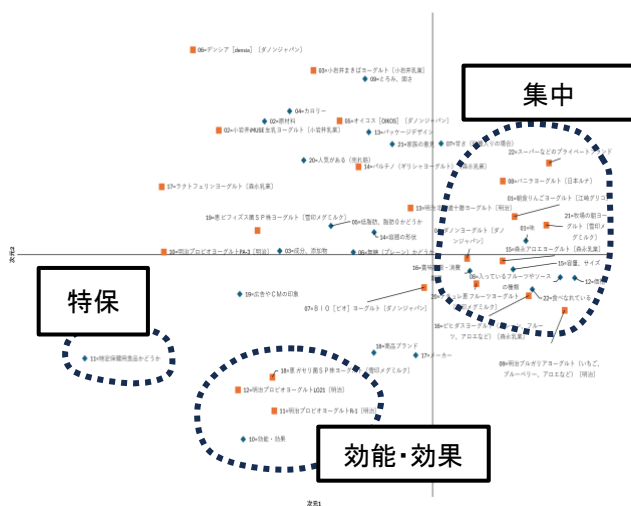


図8 「商品一重視する点」(食べきりサイズ)

重視する点は、主に「価格」、「容量」、「味」、「賞味期限」で、商品が集中しており、消費者がコストパフォーマンスと味のニーズを重視していることを示している。また、一方で、「特定保健用食品」と近い商品はない。機能性を示す「効果・効果」を重視しているのは、明治の明治プロバイオの2つの商品R-1、LG21と、雪印メグミルクの恵ガセリ菌SP株のみであり、比較的特徴的な商品となっている。

5. まとめと今後の課題

本研究では、日本ヨーグルト市場における主要

メーカーの主力商品について調査を行い、消費者調査のテキストマイニングとコレスポンデンス分析を実施した。テキストマイニングからは、消費者が「食べ方」、「フルーツ」、「無糖」に強い関心を示すことが確認された。特に大容量ヨーグルトでは「経済性」が、食べきりサイズでは「機能性」が重視される傾向がある。コレスポンデンス分析においては、大容量ヨーグルトでは、明治、雪印メグミルク、森永乳業、三大メーカーの商品における競争の同質化が見られた。食べきりサイズでは、「低カロリー」、「胃腸調節」などの健康機能に商品が集中する中、雪印メグミルクの恵ガセリ菌SP株ヨーグルト、明治の明治プロバイオヨーグルトR-1、LG21がやや特徴あるポジションを得ている。

今後は、消費者調査について、主成分分析、クラスター分析を行い、日本のヨーグルト商品のポジショニング形成についてグループ分けするなど、さらに詳細に分析を行う。

参考文献

- [1] 渡慶次力生、氏家清和、「ヨーグルト需要に対する消費者の異質性 階層ベイズモデルによるアプローチ」、農業経済研究、91巻2号、p.305-310、(2019)
- [2] 一般社団法人Jミルク、酪農乳業参考データ、https://www.j-milk.jp/gyokai/database/raku_nyusanko.html
- [3] 富士経済グループ、プレスリリース第24019号「機能性表示食品、特定保健用食品などの国内市場を調査」<https://www.fuji-keizai.co.jp/press/detail.html?cid=24019>
- [4] 日本食糧新聞・電子版、ヨーグルト・乳酸菌飲料特集2025 (2025.05.30)、<https://news.nissyoku.co.jp/special/1184887>
- [5] 明治、商品情報、<https://www.meiji.co.jp/products/>
- [6] 雪印メグミルク、商品のご案内、<https://www.meg-snow.com/products/>
- [7] 森永乳業、商品紹介、<https://www.morinagamilk.co.jp/products/>

トンネル照明灯具の腐食判定アプリにおける Grad-CAM の実務者評価

杜 浩平* 行木 靖人* 矢野 耕也** 伊藤 正人*** 高橋 大樹*** 豊谷 純****

1. 本研究の背景

高速道路には、照明、標識、排水設備など多くの道路付帯設備が設置されており、適切な維持管理が求められている。トンネル内に設置された照明灯具もその一つであり、落下事故などの安全性の低下を防ぐため、定期的な点検が実施されている。

このような点検作業の効率化を目的とした研究はいくつか存在しており、特にトンネル照明灯具を壁面に固定する支持金物の腐食判定に対して、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）を用いた画像分類手法の有効性が示されている¹⁾。

しかし、従来の研究にはいくつかの課題が存在する。例えば、照明条件や背景の複雑さといった実環境を十分に想定していない点や、使用されているテストデータが限定的であるためモデルの汎化性能の検証が不十分であることが挙げられる。このような背景から、本研究では、現場で実際に腐食判定を行うことができ、かつ画像データを効率的に収集できるタブレット端末用アプリケーションを開発した。基礎検討として、現場担当者に本システムを試用してもらい、その使用感についてアンケート調査を実施した。また、分類モデルの比較として、従来用いられてきた ResNet18 に加え、より軽量の MobileNetV2 および高精度が期待される EfficientNetV2_S についても評価を行い、それぞれの有用性を検証した。

本研究は、複数モデルの比較と、実務者による使用評価を通じて、腐食分類モデルの現場適用可能性を多角的に検討した点に特徴がある。

2. 手法

2.1 腐食の概要、画像の分類

本研究では、実際の点検で撮影された照明灯具のデジタル画像600枚を用いた。腐食・損傷の分類基準を「クラス0」（腐食・損傷なし）、「クラス1」（局所的に腐食・損傷がある）、「クラス2」（部分

的に広がっている）、「クラス3」（全体に広がっている）の4区分に分けられている（図1参照）。

全体で600枚の画像を用い、そのうち480枚を学習用データ、120枚をテストデータとして分割し学習用データの画像をトリミング処理した。モデルの汎化性能を評価するためにK分割交差検証を実施し、学習用データ480枚を80%の訓練データ384枚と20%の検証データ96枚に分け、5つのグループで検証を行い、スコアが高いモデルを採用する。



図 1 金属錆の分類

2.2 CNNモデルの構築

本研究では、すべてのモデルに対してPyTorchにおける事前学習済みモデルを利用した転移学習を実施する。これは、先行研究において、転移学習が学習性能の向上に有効であることが示されているためである²⁾。既存研究で用いられている ResNet18に加え、本研究ではアプリケーション化への取り組みも踏まえ、軽量のMobileNetV2や高精度なEfficientNetV2_Sを比較対象として採用した。

ResNet18は先行研究^{1) 2)}においても広く採用されており、本研究ではベースラインモデルとして位置づける。ResNetモデルの最大の特徴は、「残差ブロック（Residual Block）」を用いてスキップ接続（Skip Connection）を行うことで、前層の特徴情

報を次層へ直接伝達できる点にある．これにより，ネットワークの深さが増すことで発生する学習困難（勾配消失や精度劣化）の課題を効果的に軽減することができる¹⁾．

次に，MobileNetV2は2018年にGoogleによって提案された軽量CNNモデルである³⁾．本モデルは，モバイル端末などリソースが限られた環境での使用を想定して設計されており，計算コストを抑えつつ高い精度を実現している．その特徴として，線形ボトルネックを持つ倒残差（Inverted Residual）構造およびMBConvブロックを採用しており，情報伝達効率を向上させながらパラメータ数を削減する設計となっている．また，このMBConv技術は，後にEfficientNetシリーズにも応用されており，軽量モデルにおける重要な基盤技術となっている．

最後に，EfficientNetV2_Sは2021年にGoogleによって提案された高性能なCNNモデルであり，EfficientNetシリーズの改良版として位置づけられる．EfficientNetV2_Sは，精度と計算効率のバランスを重視した「Small」サイズのモデルであり，学習および推論速度を維持しつつ高い認識性能を実現している⁴⁾．本モデルは，初期層にFused-MBConvブロックを導入することで計算コストを削減し，データ拡張手法や複合スケールリング（Compound Scaling）を改善したモデルスケールリング手法との組み合わせによって，従来モデルよりも高精度な学習が可能となっている．今回は精度と処理速度の両立が求められるため，EfficientNetV2_Sを最新モデルとして評価対象に選定した．

ResNet18およびMobileNetV2の標準入力サイズは 224×224 ピクセル，EfficientNetV2_Sは 384×384 ピクセルに設定されている．しかし，画像サイズが分類性能に与える影響を検証するため，本研究では全モデルに対して 224×224 ピクセルおよび 384×384 ピクセルの2種類の入力サイズを適用し，その性能差を比較実験する．

2.3 Grad-CAMの運用説明

Grad-CAM（Gradient-weighted Class Activation Mapping）は，AIモデルの説明性を高めるためによ

く用いられる可視化手法の一つである．画像分類モデルにおいて，モデルがどの領域に注目して分類結果を導き出したかをヒートマップとして視覚的に示すことができる⁵⁾．特に幸田らの研究⁶⁾では，Grad-CAMを用いてCNNが注目した領域をヒートマップとして可視化する手法が提案されており，その結果は実際のメンテナンス業務への応用可能性を示している．本研究においても，CNNによる腐食判定に加えて，Grad-CAMを用いた判定根拠の可視化を行い，現場の適用性を図る．

2.4 タブレットへの実装

本研究におけるアプリケーションは，Python言語を用いて構築しており，ユーザーインターフェースの設計には主にKivyライブラリを採用している．Kivyはクロスプラットフォームに対応したGUI開発ツールであり，モバイル端末やタブレット環境への展開にも適している．本アプリの操作画面の構成については，図2に示す．

また，本アプリの特徴の一つとして，Grad-CAM機能を搭載している点が挙げられる．Grad-CAMを有効化すると，撮影した画像に対してCNNモデルによる分類を実行し，認識した領域をヒートマップとして可視化する．処理後の画像は自動的に保存される．図3にGrad-CAMの出力例を示す．

さらに本研究では，対象となるトンネル照明の支持金物が長方形であるという特徴に基づき，16:9および1:1の2種類の撮影比率を選択可能とした．これにより，支持金物に合わせて撮影しやすくなり，それ以外の要素が画像に写り込まないようにすることで，認識の精度向上を求めている．

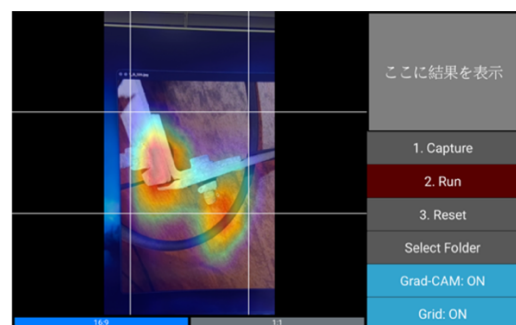


図 2 アプリの操作画面

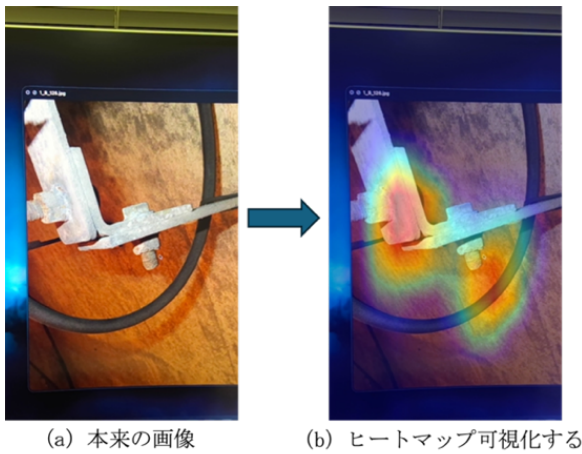


図 3 Grad-CAM 可視化

2.5 アンケートの内容と実施

新機能（Grad-CAM機能および撮影比率選択機能）が現場作業に与える影響を評価するため、実際に現場で業務を行う職員3名を対象にアンケート調査を実施した。

アンケートの構成は二つの部分を構成されている。

1. 操作感について
 1. 文字の見やすさ
 2. ボタンの大きさ
 3. デザインの分かりやすさ
 4. 質問1~3について意見の自由記述
2. 新機能の使用感について
 5. Grad-CAMでAIに認識箇所を赤くなる機能が分かりやすくなったか
 6. 可視化機能は実際の業務でも役に立つか
 7. 質問5, 6について意見の自由記述
 8. 画面サイズを16:9をトリミングで支持金物の撮影がしやすくなったか
 9. 画面サイズを16:9をトリミングで際の業務でも役に立つか
 10. 質問8, 9について意見の自由記述
 11. その他、全体的なご意見

アンケート調査は5段階評価で実施した。操作感は内容に応じた5段階選択肢、新機能は「とてもそう思う」「そう思う」「あまり思わない」「全く思わ

ない」「判断できない」の5段階選択肢を用い、機能追加による作業効率性に関する主観的評価を得ることを目的としている。

3. モデルの学習

3.1 パラメータサーチ

本研究では、ResNet18、MobileNetV2、EfficientNetV2_Sの3種類のCNNモデルを用いて分類性能の比較を行った。各モデルにおける最適なハイパーパラメータの探索には、ハイパーパラメータ最適化フレームワークであるOptuna⁷⁾を採用した。

学習は、各モデルとも200エポックを上限とし、最大75回の試行を行った。さらに、全モデルに対してEarly Stopping⁸⁾を導入し、10エポック連続で性能向上が見られない場合には学習を早期終了することで、過学習の防止と学習時間の効率化を図った。これにより、限られた計算資源の中で効果的に最適パラメータを探索し、モデル性能の最大化を目指した。

表1、2、3は3つモデルのハイパーパラメータの最適化の結果である。

表 1 ResNet 18 の採択パラメータ

パラメータ	設定範囲	224*224	384*384
学習率	0.00001 ~0.01	0.0001229	0.00002302
オプティマイザ	Adam AdamW RMSprop SGD	AdamW	AdamW
バッチサイズ	32,64,128	64	128
weight decay	0.000001 ~0.01	0.0002923	0.0030347
モメンタム	0.5~0.9	0.60894	0.68805

表 2 MobileNetV2 の採択パラメータ

パラメータ	設定範囲	224*224	384*384
学習率	0.00001 ~0.01	0.0000482	0.0001067
オプティマイザ	Adam AdamW RMSprop SGD	Adam	RMSprop

バッチ サイズ	32,64,128	64	64
weight decay	0.000001 ～0.01	0.00011468	0.00000645
モーメ ンタム	0.5～0.9	0.51471	0.50102

表 3 EfficientNetV2_S の採択パラメータ

パラメータ	設定範囲	224*224	384*384
学習率	0.00001 ～0.01	0.0000189	0.0000156
オプティ マイザー	Adam AdamW RMSprop SGD	AdamW	RMSprop
バッチサ イズ	32,64,128	64	64
weight decay	0.000001 ～0.01	0.0000738	0.00112968
モーメン タム	0.5～0.9	0.72074	0.54784

3.2 モデルの学習と検証

図 4 と図 5 は、ResNet18、MobileNetV2、EfficientNetV2_S 三つのモデルにおける、検証精度 (Accuracy) の推移を示している。

図 4 (入力サイズ 224x224) では ResNet18 (赤色の実線)：学習初期から高い精度を達成し、安定して 90%前後の高精度を維持している。MobileNetV2 (青色の破線)：学習初期に精度が上昇し、その後は 80～85%の間で安定した推移を見せている。EfficientNetV2_S (緑色の点線)：学習初期の精度上昇は緩やかであるが、エポック数が 10 以降に急激に向上し、最終的には 75～80%の精度に達している。

図 5 (入力サイズ 384x384) では ResNet18 (赤色の実線)：他のモデルより精度が低く、80～85%の間で推移している。MobileNetV2 (青色の破線)：学習初期から高精度を達成し、85～90%の間で安定した推移を見せている。

EfficientNetV2_S (緑色の点線)：学習初期から MobileNetV2 と同等の高い精度に達し、85～90%の間で安定して推移している。

これらの実験から、入力画像サイズの違いがモデルの転移学習に与える影響が明らかになった。

ResNet18およびEfficientNetV2_Sは、標準的な入力サイズで高い性能を発揮する傾向がある。特に

ResNet18は、この設定で最も高い精度を達成した。しかし、MobileNetV2は、入力画像のピクセル数を増やす (384x384に拡大する) ことで精度が向上し、他のモデルと同等またはそれ以上の性能を示すことがわかった。

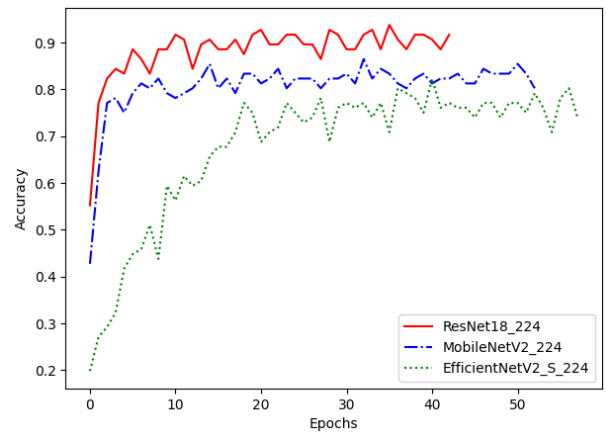


図 4 入力サイズ 224×224

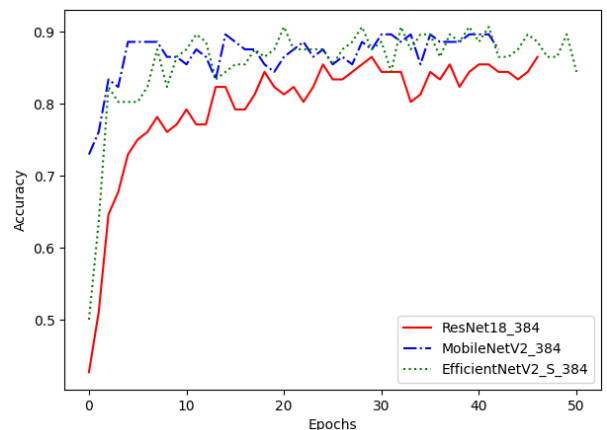


図 5 入力サイズ 384×384

4. 結果と考察

4.1 モデルの性能結果

図6は、ResNet18、MobileNetV2、EfficientNetV2_S の混同行列を示している。この混同行列から、各モデルの分類性能の特徴を読み取ることができる。MobileNetV2とEfficientNetV2_Sは、クラス0とクラス2において0.9を超える非常に高い分類精度を達成しており、ResNet18の性能を上回っている。しかし、クラス1の分類においては、いずれのモデルも精度が低く、特にクラス0と誤分類する傾向が見られる。この点に関して、MobileNetV2はResNet18や

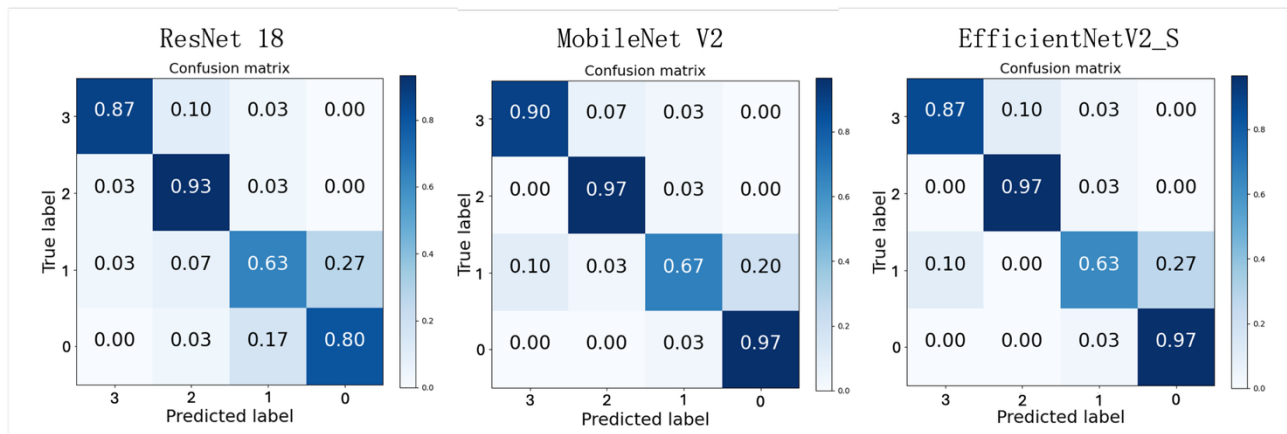


図 6 モデルの混同行列

EfficientNetV2_Sよりも誤分類がやや少ない。このことから、MobileNetV2が総合的に最も優れた分類性能を持つと言える。

表 4 モデルの分類結果

	クラス	適合率	再現率	F 値
ResNet18	0	0.75	0.80	0.77
	1	0.73	0.63	0.68
	2	0.82	0.93	0.88
	3	0.93	0.87	0.90
	平均	0.81	0.81	0.81
MobileNetV2	0	0.83	0.97	0.89
	1	0.87	0.67	0.75
	2	0.91	0.97	0.94
	3	0.90	0.90	0.90
	平均	0.88	0.88	0.88
EfficientNetV2_S	0	0.78	0.97	0.87
	1	0.86	0.63	0.73
	2	0.91	0.97	0.94
	3	0.90	0.87	0.88
	平均	0.86	0.86	0.85

今回研究に用いたモデルの各クラスにおける分類性能評価を表 4 に示す。

なお、表中の F 値 (F-score または F-measure) は、適合率 (Precision) と再現率 (Recall) の調和平均であり、分類器の性能を総合的に評価するための指標である。適合率は「陽性と予測されたもののうち、実際に陽性であった割合」を、再現率は「実際の陽性のうち、陽性と正しく予測された割合」を示す。F 値が高いほど、分類器の性能が優れていることを意味する。

表 4 から、MobileNetV2 が平均 F 値 0.88 と最も高い性能を示していることがわかる。一方、ResNet18 は平均 F 値 0.81 で最も低い結果となった。すべてのモデルに共通して、クラス 1 の再現率と F 値が他のクラスに比べて低い傾向が見られる。

4.2 アンケートの調査結果

アンケートの調査結果である表 5 から、アプリケーションの基本的な操作感および新たに追加された二つの新機能 (Grad-CAM 機能, 16:9 トリミング機能) は、肯定的な評価を得た。

表 5 アンケートの調査結果

アンケートの質問内容	回答者1	回答者2	回答者3
操作感-文字の見やすさ (Q1)	ちょうど良い	ちょうど良い	やや大きい
操作感-ボタンの大きさ (Q2)	ちょうど良い	ちょうど良い	ちょうど良い
操作感-デザインの分かりやすさ (Q3)	分かりやすい	分かりやすい	分かりやすい
新機能-Grad-CAM 分かりやすくなったが (Q5)	とても思う	とても思う	とても思う
新機能-可視化で業務の役に立つ (Q6)	とても思う	とても思う	とても思う
新機能-16:9 撮影がしやすくなったが (Q8)	思う	思う	思う
新機能-16:9 業務でも役に立つが (Q9)	思う	とても思う	思う

Grad-CAM 機能：

全ての回答者が、AI が注目している箇所の可視化機能によって「分かりやすくなった」と回答し、また「業務でも役に立つ」と強く同意している。これは、Grad-CAM 機能が現場での判断を助ける上で非常に効果的であることを示している。

自由記述欄には、「AI がどこに注目しているか表示されることで、現場での判定がしやすくなり、その根拠も明確化されるため、現場で十分に活用できる」といった肯定的な意見が寄せられた。このことから、Grad-CAM 機能が現場での作業品質向上に直結する可能性が示唆された。

16:9 トリミング撮影：

撮影画面サイズの 16:9 トリミング機能については、全員が「撮影がしやすくなった」と肯定的に評価した。また、「実際の業務でも役立つ」という項目に対しても、3 名中 1 名が「とても思う」、残り 2 名が「思う」と回答しており、業務における有用性も高く評価されている。

一方で、自由記述欄には改善点も指摘された。「撮影サイズをさらに増やしてほしい」といった要望や、「現場状況に応じてサイズを選択するのに時間がかかるため、操作に慣れが必要だ」という意見も見受けられた。これらの意見は、撮影作業の柔軟性や操作性のさらなる向上が今後の課題であることを示している。

5. まとめ

本研究では、CNNモデルを用いた支持金物の腐食判定におけるモデル性能の評価を行うとともに、Grad-CAMによる判定根拠の可視化機能および撮影比率選択機能を実装し、現場職員へのアンケート調査を通じてその有用性を検証した。

モデル性能評価の結果、Early Stopping を導入することで過学習を抑制し、判定精度の一定の向上が確認された。特に、MobileNetV2においては、入力サイズの違いが転移学習に与える影響を実験した結果、384×384の条件で精度が向上することが示された。しかし、混同行列の分析から、クラス1にお

ける誤分類が依然として発生していることが確認され、その要因の一つとして現状のデータ量不足が考えられる。

また、現場職員を対象としたアンケート調査では、Grad-CAM機能や16:9トリミング撮影に対して肯定的な評価が得られ、その中にGrad-CAMでAIの判定基準が明確化され作業支援ツールとしての有用性が示唆された。

今後は、様々な環境下での画像データを蓄積することで、モデル精度のさらなる向上が期待される。

参考文献：

1. 行木靖人, et al. "トンネル照明灯具の腐食・損傷分類における CNN と ResNet モデルの比較検討", 日本情報ディレクトリ学会誌, Journal of Japan Society of Directories, 日本情報ディレクトリ学会, Vol. 22, (2024) pp.34-44.
2. 杜浩平, 行木靖人, et al. "機械学習による金属錆画像の自動判定", 日本大学生産工学部第 57 回学術講演会講演概要, 5-28, (2024) pp.584-587
3. Sandler, M., Howard, A., Zhu, M., Zhmoginov, A., & Chen, L. C. Mobilenetv2: Inverted residuals and linear bottlenecks. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, (2018) pp. 4510-4520.
4. Tan, M., & Le, Q. Efficientnetv2: Smaller models and faster training. In International conference on machine learning, PMLR. (2021, July) pp. 10096-10106.
5. 行木靖人, et al. "決定木および Grad-CAM を用いた金属の腐食・損傷検出 AI モデルの解釈性と性能向上." AI・データサイエンス論文集 5.3 (2024) pp.303-315.
6. 幸田雄太, et al. "差分画像と Grad-CAM を利用した大規模天井の損傷領域の特定方法に関する研究." 日本建築学会技術報告集 29.71 (2023) pp.132-137.
7. Akiba, Takuya, et al. "Optuna: A next-generation hyperparameter optimization framework." "Proceedings of the 25th ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery & data mining, (2019) pp.2623-2631.
8. ヤンジャクリン, 上野 勉"ディープラーニング G 検定最強の合格テキスト", SB クリエイティブ株式会社, (2021) pp.164-165

CNN を用いた構造物の損傷度推定と汎用性に関する研究（木材試験体を用いた検討）

大信田 憲進*・高橋 亜佑美**・工藤 博政***・門 万寿男****

1. 本研究の背景と目的

現在我が国では、高度経済成長期に集中的に建設された社会インフラ構造物の老朽化、経年劣化が社会問題となっている。構造物の劣化度を判断する検査方法としては目視検査や打音検査、超音波や放射線を用いた検査など多岐にわたる。この中で打音検査に着目し検討を進める。打音検査は高価な機器を使用せず、短時間で検査できる手法であるが、判断には検査員の技量によるものが大きい。この判断をAIでできるようになればだれでも判断が可能になり、危険な状態の構造物を減らしていくことができると考えた。ICTやAIを活用した評価方法として、道路橋RC床版に設置した光ファイバセンサを用いた劣化度評価手法の提案¹⁾や畳み込みニューラルネットワーク(以下CNNとする)を用いた打音検査²⁾が提案されている。これまで我々は、1種類の木材を対象にその振動波形をCNNで学習させ、損傷の有無を判別するモデルを構築してきた³⁾。本研究では、損傷の度合を3段階に細分化し、さらに複数の木材を対象としてそれぞれ単一に検証を行い、材種ごとにおける損傷度を判別可能か検証する。また構築したCNNのモデルが、同じ種類の木材だけでなく、異なる種類の木材に対しても損傷度を判別可能か検証し、モデルの汎用性についても検討する。

穴3つで「損傷3」(図1中央)、穴5つで「損傷5」(図1右)とする。種別、損傷度の組み合わせに対し、それぞれ3本ずつ試験体を用意し、合計27本(木材3種類×損傷3段階×3本)の試験体を準備した。

2.2. 実験方法

試験体の上面をインパクトハンマによる手動で打撃加振を行い、同じく試験体上面に設置した加速度ピックアップにより加速度波形を計測する。図2に計測時の外観図を示す。加速度ピックアップの設置位置と加振点は図のような穴を挟む形とした。試験体は両端を把持している。



図1 試験体

2. 試験体及び実験方法

2.1. 試験体

実験における試験体は、スギ、ホウソウ、ヒノキの3種類の板材を使用した。寸法は縦500mm、横105mm、厚さ30mmである。損傷状態の模擬として、木材中央を削孔し、穴のサイズは直径10mmで木材の下面まで貫通させた。損傷の状態は穴の数に応じて3段階とし、穴なしで「損傷0」(図1左)、

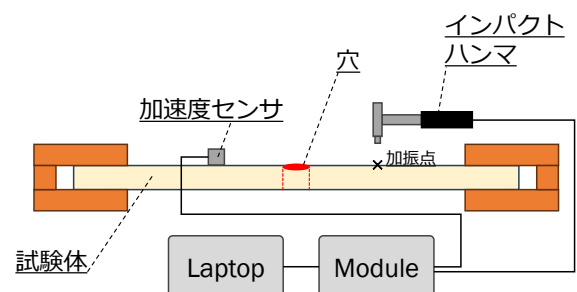


図2 実験時の状態

* 日本大学大学院生産工学研究科

** 日本大学生産工学部数理情報工学科

*** 元日本大学大学院生産工学研究科

**** 日揮株式会社

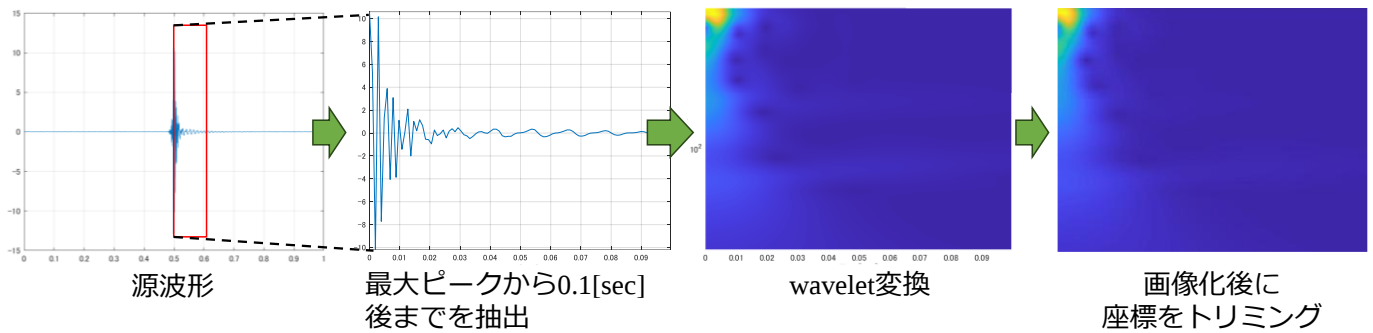


図 3 前処理のフロー

著者らの先行研究では³⁾、加速度のみを測定していたが、本研究では加速度ピックアップとインパクトハンマをモジュールに接続し同時計測を行う。手動による加振で起こる応答加速度のばらつきを少なくするために、加速度をインパクト時の力の最大値で割り、単位入力あたりの加速度を算出した。

加速度ピックアップはBrüel & Kjær製の4513-001、インパクトハンマは小野測器 GK-3100、計測モジュールにはNational InstrumentsのNI-9232、データの収録にはMathworksのData Acquisition Toolboxを用いた。計測したときのサンプリング周波数はToolboxのデフォルト値である10240[Hz]とした。

2.3. 学習前の前処理

計測した波形をCNNに学習させるための画像データを生成するために、次のような前処理を行った。図3に前処理のフローを示す。1打撃ごとに単位入力あたりの加速度を求め、最大加速度のピークから0.1sec間の波形データを抽出した。切り出した波形に対して連続wavelet変換を適用し、スカログラムを(時間-周波数解析結果)求めた。スカログラムは、横軸に時間、縦軸に周波数、色でスペクトルを表現するものである。得られたスカログラムを画像化し、トリミングによって座標を削除した(以下、wavelet画像)。このwavelet画像は、損傷状態(損傷0, 3, 5)ごとにラベル付けされ、CNNの入力データとして用いた。

3. CNNによる損傷度推論モデルの構築

図6にCNNモデルのアルゴリズムを示す。畳み込み層が3層、全結合層が2層の計5層から成るニューラルネットワークである。最大値プーリングは3層のみで構成されており、これにより特徴量を保持しやすくしている。また、畳み込み層の数とチャンネル数を減少させることで、計算量の削減を図っている。最適化手法はSGD、学習率は0.001、バッチサイズは32で300エポック学習する。224*224ピクセルの画像を入力としてそれぞれの層で計算を行い、重みを更新しながら最終的に0, 1, 2(0: 損傷0, 1: 損傷3, 2: 損傷5)が出力される。

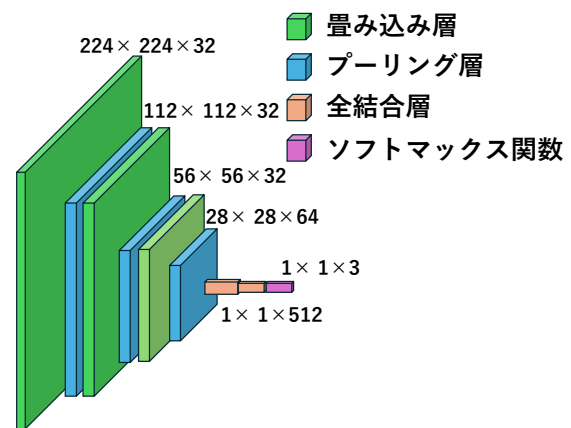


図 3 使用した CNN モデル



図 5 データセットの構成

本研究では、スギ、ヒノキ、ホワイウッドの各種木材毎にデータセットを構築し、それぞれ 486 枚の Wavelet 画像を用いた。486 枚のうち、損傷度の 3 クラス（損傷 0、損傷 3、損傷 5）でそれぞれ 21 枚ずつ画像を用意した。さらに学習用は 360 枚、検証用は 63 枚、テスト用は 63 枚である。図 5 にデータセットの構成図を示す。

分類モデルの検証では、混同行列、精度、損失関数を示す。

4. 推論結果

4.1. 損傷度推論結果

一例として、スギの損傷度を分類した結果を示す。図 6 に分類モデルの混同行列、図 7 に精度、図 8 に損失関数を示す。混同行列では対角成分の値が大きく、正答率も 100%あることがわかる。精度では学習用、検証用ともに 200 エポック付近で 90%以上になり、損失関数もエポックが増えるにつれて・ともに収束していることがわかる。その他にも、ヒノキ、ホワイウッドも同様に精度が高い分類モデルを構築することを確認した。

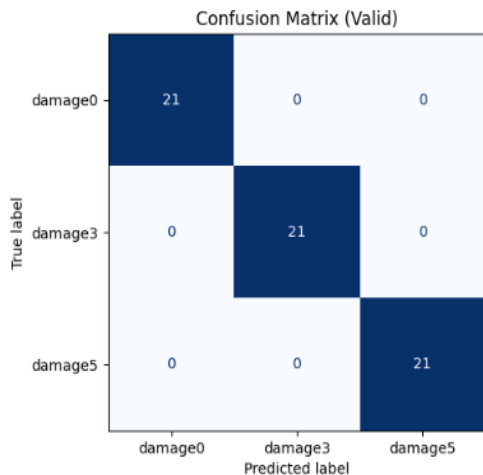


図 6 混同行列（スギ）

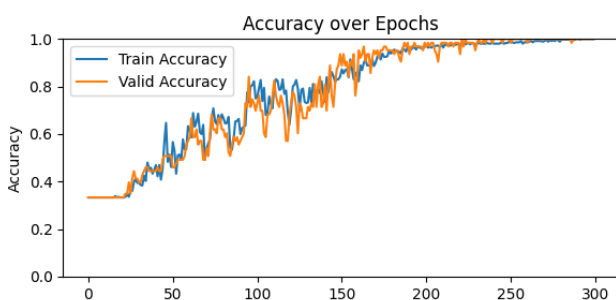


図 7 精度（スギ）

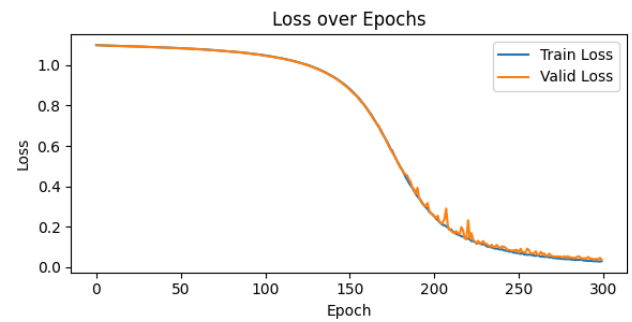


図 8 損失関数（スギ）

4.2. 損傷度分類モデルの汎用性

表 1 は各種構築したモデルの分類精度を示す。同じ種類の木材に対しての分類精度はすべて 90%以上である。一方で異なる木材に対する分類では精度が大幅に低下した。

表 1 学習結果

分類モデル	検証に用いた木材	精度
スギ	スギ	1.00
スギ	ヒノキ	0.35
スギ	ホワイウッド	0.30
ヒノキ	ヒノキ	0.95
ヒノキ	スギ	0.27
ヒノキ	ホワイウッド	0.35
ホワイウッド	ホワイウッド	1.00
ホワイウッド	スギ	0.11
ホワイウッド	ヒノキ	0.37

特徴を可視化するものとして今回はPCAを使用した。PCAは多次元の特徴を圧縮して低次元で表現できる手法で図9、図10ともに横軸のComponent1は第1主成分で一番特徴量が多い部分を示しており、縦軸のComponent2が第2主成分で2番目に特徴量が多いことを示している。そのため、点が存在する座標が特徴を示しており、近い点程同じ特徴量を持っている。図6は、trainとある青い点がCNNの学習をしたスギであり、validとある緑の点もスギであるが、学習には使用していないものである。同じ種類の木材を使用して特徴を見たものだが全体的な分布が似通っている上、表1の精度も1.00と高く特徴量を示していることがわかる。一方で図10は、trainとある青い点は図9の青い点と同一であるが、predとある緑の点が異なり、別の種類の木材となるホワイウッドを使用したものである。緑の点の半分は青

い点に近いものがあるが、他の点はかなり離れているのがわかる。

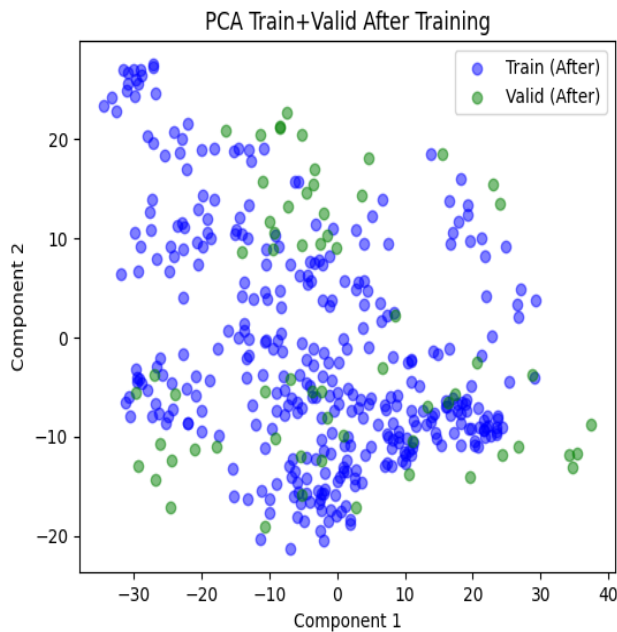


図9 同じ種類の木材での PCA

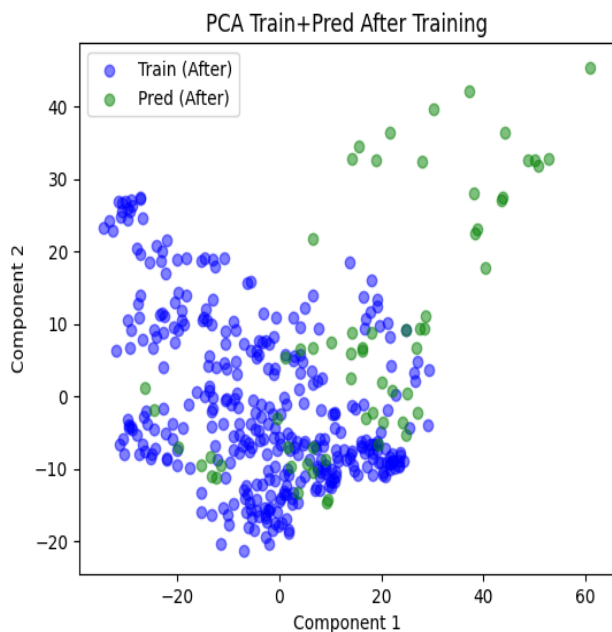


図10 異なる種類の木材での PCA

した結果精度の低下がみられた。これは特徴量分布の距離や分布形状の違いが精度に影響したと考えられる。

今後の展望としては、可視化に使用した PCA は転移学習で使用されることが多いものである。結果として精度が悪いものは距離が大きくことなることが見受けられた。そのため、それぞれの共通の特徴を見つけ出すドメイン適応のような学習を取り入れることで、異なる木材でも損傷判別できるような汎用性の高いモデルを構築する。

文 献

- (1) 門 万寿男, 前島 拓, 子田 康弘, 中野 聡, 藤山 知可子, 岩城 一郎, ” RC 床版の疲労損傷度評価手法に関する研究”, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), 2015 年 71 巻 4 号 p. 323-337
- (2) 新保弘, 溝渕利明, 尾関智子, 野嶋潤一郎, ” 機械学習による打音検査の定量化に関する検討”, AI・データサイエンス論文集, 2020 年 1 巻 J1 号 p. 522-529
- (3) 工藤博政, 門万寿男, 高橋亜佑美, ” 機械学習を用いた振動波形の分類に関する研究”, 日本機械学会関東支部 第 30 期総会・講演会講演論文集 [No. 240-1]

5. 考察

本研究では、損傷度を3段階に拡張し、複数の木材を対象としてそれぞれ単一に CNN で判別モデルを構築した。その結果、いずれの木材においても損傷度を精度高く判別可能であることがわかった。また構築したモデル使用して異なる木材において検証

API コール情報を用いたマルウェア分類・判別システムの試作

甘利 涼* 石田 裕貴** 花田 真樹***

1. はじめに

近年のデジタル化の進展に伴い、マルウェア脅威は急速に増大している。2025年には日本国内の企業の約32%で被害が確認されており、特に中小企業の被害が拡大していることが明らかになっている[1]。2023年における脅威総数は約1610億件に達し、2021年比で約1.7倍と急激な増加を示している[2]。特に中小企業においては、マルウェア攻撃による被害が深刻化しており、ランサムウェアの被害企業の約6割が中小企業であるとされている[3]。したがって、増加するマルウェアへの対応は急務である。

このような状況下において、膨大な数のマルウェアを解析するには多くの時間を要することから、セキュリティ運用の効率化が課題となっている。特に、中小企業では、セキュリティ対策における人材、予算、技術力の制約から、十分なセキュリティ運用体制を確保できず、サイバー攻撃が企業経営に大きな影響を与える可能性がある。

従来の手動による解析プロセスでは、専門のセキュリティアナリストが1つ1つのマルウェアを手動で解析していることから、詳細を把握するのに数時間から数日を要している。そのため、専門業者による解析を待ってから封じ込めや対策を行うことになり、攻撃者に多くの時間を与えてしまう。このような背景から、本研究では、専門業者による解析結果を待たずに、企業が自らマルウェアの判別・分類を短時間で正確に行うことが可能なシステムを提案する。本提案システムにより初期分類を数分以内で実行することが可能となり、特に中小企業においては、自動分類システムの導入により現場でのマルウェアの被害状況の把握が迅速化され、経営に与える影響の最小化が期待される。

2. 関連技術

企業のセキュリティ運用において、マルウェア解析サービスは重要な役割を果たしている。代表的なマルウェア解析サービスとして、VirusTotal[4]と

Triage[5]が知られている。

VirusTotal[4]はGoogle Cloudが提供する世界最大のマルウェア検体共有および解析プラットフォームである。このサービスは広範な検査データと解析結果の蓄積により、インシデント対応時の初動調査で大きな効果を発揮している。また、Triage[5]はオランダのHatching社による高性能オンラインサンドボックスサービスであり、マルウェアの動的解析を主軸に高速かつスケーラブルな解析環境を提供する。解析結果は分かりやすいレポート形式で提供され、ユーザーはリアルタイムで挙動をモニターし、状況把握や対策決定を迅速に行える。

これらのサービスはグローバルに展開し、セキュリティオペレーションセンター(SOC)や大手企業における標準的な脅威分析基盤として位置付けられている。しかし、中小企業がこれらを活用する際には、コスト面だけでなく、専門的知識の不足や解析結果の解釈・運用面の課題が顕著である。まず、高度な解析データを活用するためには、対応可能な人材の確保が必要であるが、中小企業におけるセキュリティ人材は依然不足している。さらに、利用料金や導入コストはスケールの小さな組織にとって負担となり得るため、セキュリティ投資と得られる効果のバランスも重要な検討課題となっている。

3. 関連研究

Catakらはマルウェアの時系列APIコール情報に着目し、その時間的依存関係を学習可能なLSTM(Long Short-Term Memory)[6]を用いたマルウェア分類手法を提案している[7]。評価実験により、時系列APIコールを特徴量としてLSTMを用いたマルウェア分類を行うことにより、分類精度が向上することを示している。また、佐藤らはマルウェアと正規プログラムのAPI呼び出しパターンに加え、API呼び出し間の経過時間およびシステム負荷(メモリ使用量)の違いに着目し、高精度なマルウェア検知手法を提案している[8]。この研究では、CuckooSandbox

*準会員 東京情報大学総合情報学部 **東京情報大学大学院総合情報学研究科博士後期課程 ***東京情報大学総合情報学部 教授

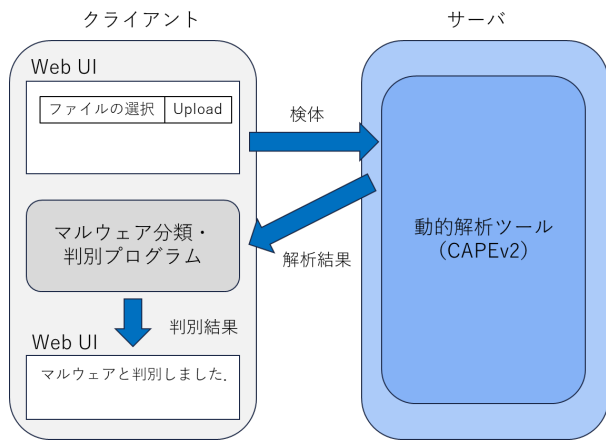


図1 提案システムの概要図

上で取得した API 呼び出しログから、遷移回数、経過時間の統計量、システム負荷の指標を特徴量に抽出し、ナイーブベイズを用いた機械学習により正規・悪性の二値分類を実施した。評価実験により、時間および負荷情報を組み込むことで従来の API 遷移のみを用いた手法に比べ、検知精度が向上することを示している。佐藤らや Catlak らの研究により、API コール情報がマルウェアの検知や分類に有用であることが示されている。本研究でもこれらの関連研究と同様に、API 呼び出し頻度や時系列を特徴量とする機械学習による分類・判別手法を活用する。本研究の特徴は、CAPEv2 による動的解析結果を JSON 形式で取得し、これらの関連研究のマルウェア分類・判別手法を導入可能なシステムの枠組みを提供することにある。

4. 提案概要

本研究では、中小企業におけるセキュリティ運用効率化を目的として、Web ブラウザを用いて利用可能な時系列 API コールを用いたマルウェア分類・判別システムを提案する。提案システムは、中小企業の現場でも簡単に解析作業を行えるよう設計されており、検体を投入するだけで短時間でのマルウェア判別・分類が可能である。システム全体の構成を図1に示す。図1に示すように、提案システムは大きく3つのコンポーネントで実現する。まず、Web ベースのユーザーインターフェースにより、非専門家でも直感的に操作可能な環境を提供する。中小企業においては IT 専門人材が限られているため、技術的知識に依存しない操作性は重要な要件である。次に、検体の実行時挙動を自動で監視・記録するための、動

的解析エンジンである。マルウェアの分類を行うためには、マルウェアの動作を調査する必要があるが、これらは専門人材を必要とするため、本研究ではマルウェアを自動で解析する動的解析エンジンを用いることにより、この調査作業を自動化する。最後に、機械学習ベースの分類エンジンが動的解析エンジンの解析結果から特徴量を抽出し、正規プログラムとマルウェアの判別を行う。

従来の手動によるマルウェア解析では、1 検体の詳細解析に数時間から数日を要していたが、提案システムでは動的解析エンジンと機械学習を組み合わせることで、初期分類を数十分以内で実行することを可能とする。

4.1 管理用 WebUI

WebUI では検体のアップロード、解析進捗の確認、結果の可視化が一元的に管理される。解析結果はマルウェアの判定結果を簡潔に提示することにより、迅速な意思決定を支援する構成となっている。

4.2 動的解析エンジン

動的解析エンジンとして CAPEv2[9] を用いる。CAPEv2[9] とは Cuckoo Sandbox をベースに開発されたオープンソースの自動マルウェア解析システムであり、マルウェアのペイロードや設定情報の抽出機能を持つ。本研究では、解析レポートに含まれる API コール情報を抽出し、活用する。

4.3 マルウェア分類・判別プログラム

マルウェア分類・判別プログラムは、動的解析エンジンの解析結果である JSON ファイルを入力とし、事前に学習したデータを基に正規プログラムかマルウェアかの判別を行う。

本研究で提案するシステムでは、1 つ目として、関連研究 [7] で Catlak らが提案している時系列 API コールを特徴量として LSTM によるマルウェア分類手法の導入を行う。LSTM は、時系列データにおける長期依存関係を学習可能なリカレントニューラルネットワークの一種であり、言語処理や音声認識など幅広い時系列解析タスクで高い性能を発揮する。LSTM で用いる特徴量には、検体で呼び出された時系列 API コールを用いる。この特徴量設計では、API 呼び出しの順序情報をそのまま保持しつつ、たとえば「NtAllocateVirtualMemory → FindResourceW → GetUserNameW → RegOpenKeyExW」のよう

な連続した API コール列を LSTM の入力系列として与える。LSTM は入力された API コールの遷移パターンやその並び方の特徴、さらに部分系列に現れる依存関係を学習することで、単なる頻度分析や静的特徴量抽出では捉えきれないマルウェア固有の動的挙動をモデル化することが可能である。このアプローチにより、難読化や変異によってコード構造が変化する場合でも、振る舞い系列そのものからマルウェアの本質的な特徴を捉えることができ、未知マルウェアやファミリーごとの振る舞いにも柔軟に対応できる高精度な分類を実現する。

次に、2 つ目として、関連研究 [8] で佐藤らの提案している手法のベースになっている API コールの出現回数を特徴量としたナイーブベイズなどによるマルウェア判別手法の導入を行う。検体で呼び出された API コールの N-gram (1 遷移から 4 遷移まで) の出現回数を特徴量とする手法である。1 遷移の例として「HttpSendRequestW:10, GetFileSize:2」のような単一 API 呼び出しの頻度情報を、2 遷移以上では「NtAllocateVirtualMemory → FindResourceW:2」のような連続する API 呼び出しパターンの出現回数を特徴量とする。この手法により、マルウェアに特徴的な API 使用パターンを効果的に捉えることが可能である。また、マルウェア判別使用する機械学習アルゴリズムに関しては、ナイーブベイズに加えて、ランダムフォレスト・サポートベクターマシン (SVM)・決定木・LightGBM も導入する。

4.4 マルウェア判別の流れ

提案システムにおけるマルウェア判別の流れを以下に記す。

1. 調査対象の検体を管理用 WebUI を用いて動的解析エンジンに投入し、動的解析を行う。この動的解析により、マルウェアが用いる API と、呼び出しの順番がログに記録される。
2. 解析結果を動的解析エンジンから取得し、マルウェア分類・判別プログラムで解析結果を判別する。
3. マルウェア分類・判別プログラムで判別を行った結果を管理用 WebUI へ反映する。

5. 評価実験

本研究の評価実験では、マルウェア判別の性能指標として正答率を採用した。これは、特徴量と機械学習に基づくマルウェア検知の有効性を定量的に把握するため、まずは正答率を主たる評価指標とし、基礎性能の確立を重視したためである。

5.1 実験条件

評価実験で用いた特徴量について述べる。

1 つ目の関連研究 [7] に基づく手法では、検体で呼び出された時系列 API コールのうち、先頭 25 個、先頭 50 個、先頭 75 個、先頭 100 個をそれぞれ用いた場合の正答率を評価した。

2 つ目の関連研究 [8] に基づく手法では、検体で呼び出された API コールのうち、検体で呼び出された API コールの出現回数を特徴量とした。例として「HttpSendRequestW:10, GetFileSize:2」のような単一 API 呼び出しの頻度情報を用いる場合は 1-gram とし、「NtAllocateVirtualMemory → FindResourceW:2」のような連続する API 呼び出しパターンの出現回数を記録する場合を N-gram (遷移の深さにより、2-gram から 4-gram まで) として、正答率を評価した。

次に実験に使用したデータについて述べる。評価実験では、まず、正規検体のデータとして、C:\Windows と C:\Windows\System32 に存在する実行ファイル 443 件のうち、400 件を用いた。次に、マルウェア検体として、マルウェア情報共有サイトから収集した実行ファイルのうち、ランダムで抽出した実行ファイル 500 件中 400 件を用いた。最後に、実験データのうち、80% を学習用データとしてランダムに抽出し、残り 20% を評価用データとし、正答率を算出した。正答率は、式 (1) で定義される、機械学習の精度を求める一般的な指標である。

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (1)$$

式 (1) の TP は真陽性を表し、マルウェアの総数のうち、正しくマルウェアとして分類した数を表す。 TN は真陰性を表し、正規プログラムの総数のうち、正しく正規ファイルとした分類した数を表す。 FN は偽陰性を表し、マルウェアの総数のうち、マルウェアを正規プログラムとして分類した数を表す。 FP は偽陽性を表し、正規プログラムの総数のうち、正規プロ

表 1 実験結果 (1 つ目: 時系列 API コール)

機械学習アルゴリズム	ACC (正解率)			
	時系列 API コール数			
	先頭 25 個	先頭 50 個	先頭 75 個	先頭 100 個
LSTM	85.6	90.5	83.8	74.4

表 2 実験結果 (2 つ目: API コールの出現回数)

機械学習アルゴリズム	ACC (正解率)			
	1gram	2gram	3gram	4gram
ランダムフォレスト	91.9	91.3	87.5	71.9
SVM	71.9	75.6	74.4	73.8
ナイーブベイズ	67.5	72.5	73.1	69.4
決定木	90.0	88.8	81.3	81.9
LightGBM	81.4	82.4	75.1	-

グラムをマルウェアとして分類した数を表す。

5.2 実験結果

1 つ目の関連研究 [7] に基づく手法の実験結果を表 1, 2 つ目の関連研究 [8] に基づく手法の実験結果を表 2 にそれぞれ示す。

評価実験の結果, 1 つ目の関連研究 [7] に基づく手法である LSTM を用いた方式では, 時系列 API コールの先頭 50 個を用いるモデルが最も高い精度を示し, 正答率は 90.5% であった。一方, 評価実験全体で最も検知率が高かったのは, 2 つ目の関連研究 [8] に基づく手法のランダムフォレストで 1gram 特徴を用いた場合で, 正答率は 91.9% であった。評価実験全体では, 特徴量と機械学習の組み合わせにおいて, 90% を超える正答率が得られた結果が 3 つ得られており, これはマルウェアの API コールの動的挙動を捉えられていることを示唆していると考えられる。今後は, さらなる特徴量の最適化やモデルの高度化, ならびにより多様なマルウェアサンプルを用いた評価を通じて, 両者の長所を融合させた精度向上と実運用への適用可能性の拡大を目指すことで, セキュリティ現場の効率化とリスク低減に貢献できると期待される。

6. まとめと今後の課題

本稿では, 中小企業のセキュリティ運用効率化を目的に, 動的解析ツール CAPEv2 の出力結果を活用し, 様々な特徴量と機械学習アルゴリズムを組み合わせたマルウェア自動分類・判別システムを提案した。評価実験の結果, 最も高い正答率を示したのは関連

研究 [8] に基づく手法のランダムフォレスト (1gram) であったが, 関連研究 [7] に基づく手法も高い精度を維持し, LSTM の特性から動的挙動の時間的依存性を学習可能であることから, 将来的な精度向上が期待される。さらに, 本システムは中小企業での運用に配慮し, WebUI を通じた簡便な操作性と結果の可視化を実現しており, 専門知識に限られる現場でも利用しやすい点も大きな特徴である。一方で, 実社会に本システムを適用するための課題については十分な検討ができていないことから, 今後は, 精度に加えてモデルの解釈性, 運用コスト, リアルタイム性など複合的な評価指標を導入し, 実運用を見据えた包括的評価の実施を目指す。

参考文献

- [1] 株式会社帝国データバンク, “「サイバー攻撃」企業の 32.0% で経験あり 大企業への攻撃目立つ 直近で中小企業の被害が急拡大,” PR TIMES, <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000001095.000043465.html> (Accessed Aug. 24, 2025).
- [2] トレンドマイクロ株式会社, “データで紐解く、2023 年のサイバー攻撃,” トレンドマイクロ セキュリティトレンド, https://www.trendmicro.com/ja_jp/jp-security/24/d/securitytrend-20240410-01.html (Accessed Aug. 24, 2025).
- [3] 経済産業省, “中小企業の実態判明 サイバー攻撃の 7 割は取引先へも影響,” 経済産業省ニュースリリース, Feb. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.meti.go.jp/press/2024/02/20250219001/20250219001.html> (Accessed Aug. 24, 2025).
- [4] VirusTotal, “VirusTotal - Free online virus, malware and URL scanner,” <https://www.virustotal.com>, (Accessed Aug. 24, 2025).
- [5] Tri.a.ge, “Tri.a.ge - Automated malware analysis tool,” <https://tria.ge> (Accessed Aug. 24, 2025).
- [6] Sepp Hochreiter and Jürgen Schmidhuber, “Long Short-Term Memory,” *Neural Computation*, vol. 9, no. 8, pp. 1735–1780, Nov. 1997.
- [7] Ferhat Ozgur Catak, Ahmet Faruk Yazı, Ogerta Elezaj and Javed Ahmed, “Deep learning based Sequential model for malware analysis using Windows exe API Calls,” *PeerJ Computer Science* 6, 2020.
- [8] 佐藤順子, 花田真樹, 面和成, 山口崇志, 鈴木英男, 布広永示, 折田彰, 関口竜也, “API 呼び出しとそれに伴う経過時間とシステム負荷を用いたマルウェア検知手法,” 情報処理学会, コンピュータセキュリティシンポジウム 2017 論文集, pp.923–927, 2017.
- [9] CAPEv2 Project, “CAPEv2 – Malware Analysis and Threat Intelligence Sandbox,” GitHub repository. <https://github.com/kevoreilly/CAPEv2> (Accessed Aug. 25, 2025).

日本語学習者の達成度評価におけるスコアモデリング

梶澤恭子*・靱山泰斗**

1. 本研究の背景と目的

本学では、海外からの入学生が増えている。留学生対象の講義は、一部を除き、すべて日本語で行われている。そのため、留学生は、外国語として「日本語」の履修が必修となっている。現在、本学の留学生の多くは、卒業後に日本での就職を希望している。就職を希望する留学生の就職率は、2023年には100%となり、卒業後に帰国する学生は0名であったことから明らかである。

就職先企業が求める留学生の日本語能力は、一般的にJLPT[1]でN2以上である。そのため、本学では、入学後から日本語能力試験のサポートや対策授業が行われている。しかし、このJLPTは年2回しか開催していないため、留学生の日本語の実力を測る指標が少ない。そのため、現時点での日本語の能力の把握や以前の自分の実力をリアルタイムに比較する判断方法が必要となってきた。

そこで、本研究では、日本語の能力を測るために実施した課題を用いて、留学生の日本語能力を適正に判断するためのスコアモデルの作成をすることにした。

2. 留学生の実態

本研究の対象は留学生のうちで、講義とは別に成績に関係ない課題提出に協力してくれた者25名とした。本学で調査した入学時のJLPT試験の持ち級は以下表1のとおりである。

表1 JLPT試験持ち級

N2	2名
N3	21名
N4	1名
未受験	1名

3. スコアモデルの作成

スコアモデルの作成に先立ち、対象者に対して日本語での課題を与えた。課題は、留学生が「日本で生活する上で、一番驚いた文化の違いは何か。」という題で作成することとし、作成文字数は、500字以上1000字以内とした。課題作業の際は、辞書やスマートフォンの検索機能、生成AI等の使用を禁じた。

この課題結果について、対象者ごとに自然言語処理を利用し、形態素解析を行った。スコアモデル作成のために使用した指標は以下の通りである。

- a:異なる形態素数
- b:総形態素数
- c:平均語数
- d:総文字数
- w₁:異なり語彙率の重み
- w₂:総形態素数の重み
- w₃:平均語数の重み
- w₄:総文字数の重み

a～dまでの指標に関して、日本語文章難易度判別システムのjReadability[2]を採用した。

(1) 異なり語彙率

語彙の多様性を測るために、異なり語彙率を以下の式1に示す。

$$(a/b) \cdot w_1 \quad \text{式1}$$

文章作成の際の、豊富な語彙の活用は、上級者の特徴となりうる。日本語教育の作文評価[3]でも、語彙の種類の高さは非常に重視されるため、重みづけを考える際には、大きめの重みが必要と考

* 正会員 開智国際大学国際教養学部 准教授

** 開智国際大学国際教養学部 講師

えられる。異なり語彙数をType、総形態素数をTokenとしたときに、 $TTR = Type/Token$ とし、このTTRを日本語学習者の作文に適用して分析した研究では上級者ほどTTRが高くなる傾向が示されている[4][5]。

(2)総形態素数

使用語彙の量を測る指標として、総形態素数をカウントしたものを式2とする。

$$(b/300)*w_2 \quad \text{式2}$$

bを300で割り、標準化している理由として、総形態素数が300語以上で中級レベルと考えられるからである。根拠として、N3～N2向けの課題作文、約600～800文字を形態素解析すると、総形態素数で200～350程度となることが多く、JLPTのN3～N2レベルの読解問題や作文では、形態素で300～500語の使用が一般的と言われているからである[6]。

(3)平均語数

1文の長さについて、長い文は構文力が必要であり、20語前後が自然な長文となる。この平均語数を、1文あたり20語程度とすることを「自然な長文」とする根拠として、池原ら[7]の標本文の分析結果を参照した。

平均語数を式3に示す。

$$(c/20)*w_3 \quad \text{式3}$$

(4)総文字数

総文字数は文全体の長さを考慮している。極端な長文の影響を抑えるためlogでスケールした。課題は500字以上1000字以内と提示したが、範囲外の文字数で書かれることも考慮し、最大2,000文字を想定した。総文字数の式を式4に示す。

$$(\log(d)/\log(2000))*w_4 \quad \text{式4}$$

式1から式4の総和を式5に示す。

$$\begin{aligned} \text{Score} = & (a/b)*w_1 + (b/300)*w_2 + (c/20)*w_3 \\ & + (\log(d)/\log(2000))*w_4 \end{aligned} \quad \text{式5}$$

式5の各項の係数である重みについては、(1)から(4)の中で、(1)異なり語彙率は、語彙力の成熟度を反映する「質」の指標となる。(4)総文字数は、文量・構成力の複合的な指標であり、「量」の土台となるとし、重みづけを(2)および(3)より大きく設定することとした。

また、比較となるスコアモデルのベースラインは、学生本人が申告した10段階の日本語の達成度とした。10点は「日本語において、読み書きは不自由でない」0点は「日本語において、読み書きがほぼできない」とした時、自分のレベルはどの程度かを質問し、回答させた。

スコアモデル作成：パターンⅠ

各重みの総和を1と考えたとき、スコアは最大10点・最小0点に収まり、10段階のスケールへ変換しやすくなると考え以下の重みを付与した。

$$w_1=0.3$$

$$w_2=0.2$$

$$w_3=0.2$$

$$w_4=0.3$$

スコアモデル作成：パターンⅡ

パターンⅠの結果は計算式上スコアが高く出る可能性が高いため、各重みの総和をパターンⅠより小さい0.7に設定した。ただし、10段階スケールを考える際には、最終調整する必要がある。

$$w_1=0.2$$

$$w_2=0.15$$

$$w_3=0.15$$

$$w_4=0.2$$

4. ベースラインとスコアモデルの比較結果

ベースラインとスコアモデルのパターンⅠとパ

ターンⅡの計算の結果とを比較した結果を表2に示す。

表2 スコアモデル比較

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
ベースライン	5	5	7	6	5	5	5	5	5	4	5	6	3	5	8	6	3	8	5	3	3	7	7	7	7
パターンⅠ	8.5	8.1	9.3	6.5	6.6	9.1	6.4	8.4	6.9	7.1	7.5	6.1	8.3	8	8.8	7.2	6.5	6.8	7.1	7.8	5.8	7.5	6.2	8.4	8.5
パターンⅡ	6.1	5.78	6.68	4.6	4.65	6.5	4.51	5.98	4.87	5.02	5.35	4.27	5.88	5.69	6.32	5.09	4.56	4.81	5.04	5.58	4.01	5.35	4.37	5.97	6.09

ベースラインとパターンⅠ、ベースラインとパターンⅡをそれぞれ、一対の標本による平均の検定であるt検定を行った。検定の結果は表3に示す。

表3 t検定の結果

	パターンⅠ	パターンⅡ
平均(差)	7.496	5.323
t 値	6.459	-0.253
両側 p 値	1.12E-06	0.802
分散	1.011	0.568
ピアソン相関	0.208	0.220

パターンⅠを見ると、p値は有意水準の0.05より小さくなっていることから、ベースラインとパターンⅠの間に有意差があることがわかる。また、パターンⅡのt値の絶対値を見ると、非常に小さく、有意水準を0.05とした場合のp値も高くなることから、ベースラインとパターンⅡの平均の差に有意な差はないという結果となった。

これらの結果より、ベースラインを基準としたスコアモデルにはパターンⅡを採用する方針とした。

5. 考察と今後の展開

本研究では、対象者を絞り、スコアモデルの作成が焦点となった。スコアモデルの妥当性については、本年度中に同じ対象者に再度課題を与え、モデル式を当てはめてスコア化した結果をみて検証する。日本語の能力が伸びていると仮定するならば、モデル式での値も上がっていることが想定される。その上で、このスコアモデルの妥当性の検証後に修正すべき点を明確にしていきたい。

また、本研究の課題も浮き彫りとなった。まず、ベースラインとしたスコアを自己申告としたこ

とである。これは、本研究の最終目標が学生の日本語レベルの強化にあるため、他人との相対評価ではなく、自分自身の絶対評価であるために採用した方法だったが、検討の余地があると考えている。また、課題作成時にはスマートフォンの利用を禁止したが、テストではないため、厳密ではなかった。実際に仕上がった課題を見ると、生成AIを使用したかのように見受けられる文章もあったが、確証はないため、本研究ではそのまま採用した。今後は課題作成中の対応も考慮する必要がある。

今後の展開として、スコアモデルの妥当性が証明されたとして、日本語の能力を伸ばす学習課題を別途与えた後に、本課題を与え、スコアの比較から伸び具合を判定し、学習課題に効果があったのか、日本語がどのくらい伸びたかなどの指標に利用するなどが考えられる。

謝辞

本研究では、科研費（課題番号 25370573）の成果物である「日本語文章難易度判別システム」（<http://jreadability.net>）を利用した。

参考資料

- [1] 日本語能力試験JLPT <https://www.jlpt.jp/> (2025年8月6日参照)
- [2] Hasebe, Yoichiro and Lee, Jae-Ho (2015) 'Introducing a Readability Evaluation System for Japanese Language Education' Proceedings of the 6th International Conference on Computer Assisted Systems for Teaching & Learning Japanese (CASTEL/J), pp.19-22.
- [3] JF日本語教育スタンダード CEFR-J Can-do h

<https://www.jfstandard.jpf.go.jp/top/ja/render.do> (2025年8月6日参照)

[4] Lee, Jae-Ho, Hasebe, Yoichiro (2020) Quantitative Analysis of JFL Learners' Writing Abilities and the Development of a Computational System to Estimate Writing Proficiency. Learner Corpus Studies in Asia and the World, 5, pp.105-120.

[5] 小森和子, 伊集院郁子, 李在鎬 (2022) 日本語学習者の作文における 自動評価と教師評価の比較, 明治大学国際日本学研究, Vol.14(1), pp.41-67.

[6] 石川慎一郎(2025) 日本語能力試験(JLPT)の N4～N1 の読解テキストの語彙特徴 : JLPT 読解テキストコーパスの分析, 統計数理研究所共同研究リポート, Vol.481, pp119-138.

[7] 池原悟, 徳久雅人, 竹内(村本)奈央, 村上仁一 (2004) 日本語重文・複文を対象とした文法レベル文型パターンの被覆率特性, 自然言語処理, Vol.11(4), pp. 147-178.

地域鉄道利用動態の数理モデリングに関する研究

村山要司*・鈴木邦成**

1. はじめに

わが国の地方都市における地域鉄道は、長年にわたり、人口減少とモータリゼーションの進行という二重の課題に直面し、その持続可能性が危機に瀕している。特に、1960年代以降の急速な経済成長に伴う都市部への人口流出と、それに続く地方の過疎化は、公共交通の利用者減少を加速させてきた。生産年齢人口は1995年をピークに減少を続けており、それに伴う利用者減少は、長期的かつ急激に公共交通事業者の経営環境を悪化させている[1]。平成20年度から令和5年度にかけて、路線バスは約23,193km、鉄軌道は約632.9kmが廃止され、全国の路線バス事業者の約7割、地域鉄道の8割が赤字経営であり、さらに自動車運転業務の人手不足も深刻化している[1][2]。

この問題の根深い要因は、単なる利用者数の減少にとどまらない。輸送人員の減少は事業者の不採算路線からの撤退や運行回数の削減といったサービス水準の低下を招き、これが公共交通の利便性をさらに損ない、自家用車への依存を一層強めるという負の循環を形成している[3]。

こうした地域鉄道の危機的状況を打開するため、データに基づいた定量的な政策立案の重要性が増している。これまでの交通政策では、人口動態やライフスタイルの変化によって生じる既存のダイヤ・運行体系とのミスマッチへの対応が遅れてきた。この状況を打破するためには、利用者の行動を多角的に捉え、将来的な需要変動や政策導入時の影響を精緻にシミュレート可能な予測モデルの構築が求められる。

本研究は、伝統的な数理モデルに生成AIの柔軟性を融合させることで、従来にない精緻な交通流動のモデリングを実現し、今後の地域交通政策の基盤となるモデルを提供するための理論的基盤、先行研究、および具体的なモデル構築の枠組みを

網羅的にレビューするものである。

2. 基盤技術の概要

2.1 マルコフ連鎖モデルの基礎と特性

交通分野でよく知られる手法として、マルコフ連鎖モデルがある[4][5]。このモデルは、金融、医療など、多くの分野で利用されている[6]。マルコフ連鎖は、未来の挙動が現在の状態のみに依存し、過去の履歴とは無関係であるという「マルコフ性 (memorylessness)」を持つ確率モデルである。この特性により、複雑なシステムを単純化してモデル化することが可能となる。マルコフ連鎖を構築する主要な要素として、「状態」と「遷移」がある。

状態とは、特定の状況や条件を示すもので、システムがとりうる選択肢のことである。天気でいえば「晴れ」「雨」といった状態が考えられる。

遷移は、システムがある状態から次の状態へ移行する過程のことである。遷移は、例えば、「晴れ→雨：20%」といったように、確率的であり、状態間の変化の可能性を示す。各遷移の確率は「遷移確率」として、これを「遷移確率行列」としてまとめる。遷移確率行列は、各状態間の遷移確率を表す $n \times n$ 行列であり、各行の確率の合計は1となる。

$$\text{遷移確率行列 } P = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix}$$

マルコフ連鎖の根幹である「マルコフ性」は、その強みであると同時に、モデルの限界でもある。例えば、鉄道利用者の行動を単純なマルコフ連鎖でモデル化した場合、新宿駅から渋谷駅への移動が、その利用者が通勤客であるか、観光客であるかといった、移動の「目的」という過去の文脈に依存しないと仮定することになる。このよう

* 埼玉工業大学 教授

** 日本大学 特任教授

な単純なモデルは、より複雑で長期的な行動パターンを捉えることが難しい。この限界を克服するために、マルコフ連鎖を拡張した「隠れマルコフモデル (HMM)」が有効な手法として知られている。HMMは、観測されるデータ（例：交通系ICカードの乗降履歴）から、直接観測できない「隠れた状態」（例：通勤、通学、買い物といった移動目的）を推定するモデルである。この手法は、ICカードデータを用いて鉄道利用者の行動変容を長期的に把握するための手法として既に構築されており[7]、本研究の目的と直接的に関連性が高い。

2.2 生成AIモデルの概要と時系列データへの応用

生成AIは、既存のデータから学習し、類似した性質を持つ新たなデータを生成する技術である。この技術は、交通計画の分野に大きな変革をもたらす可能性を秘めている。大規模言語モデル

(LLM: Large Language Models) や生成的敵対ネットワーク (GAN: Generative Adversarial Networks) [8]といったモデルが、交通計画においても、データ合成、シミュレーション、意思決定支援といった高度な能力を発揮することが期待されている。

これらの生成AIは、ライフスタイルの多様化や通勤・通学需要の変化といった、複雑な外部要因や非線形な行動変容をモデル化し、現実世界では観測できない多岐にわたるシナリオを生成する「世界モデル」として機能し得る。

ここで、「世界モデル」と、既に交通分野で実用化されている「デジタルツイン」との関係性を明確にする。デジタルツインは、物理的な対象の

「仮想的な複製」であり、現実世界から収集したデータと同期して、その状態を正確に再現・予測するツールである。JR東日本が開発した

「JEMAPS」はその優れた事例であり、現実の運行状況をリアルタイムで可視化し、災害時のシミュレーションを行うことが可能である[9]。一方、世界モデルは、AIが環境のダイナミクスを内部的に学習し、将来の行動や出来事を予測する人工知能のパラダイムであり、必ずしも物理的な対象の「ツイン」である必要はない。英国のスタートア

ップWayve社が開発した世界モデルであるGAIA-1は、テキストに加えて画像や動画などの複数のデータ形式を扱えるAIモデルである大規模マルチモーダルモデル (LMM : Large Multimodal Model) を用いている。GAIA-1は、自動運転のための新たな生成AIモデルであり、動画、テキスト、そして行動入力を活用して、リアルな運転動画を作成することができる。自車の挙動とシーンの特徴をきめ細かく制御でき、研究、シミュレーション、トレーニングに用いられている[10]。

シミュレーションの「シナリオを生成するエンジン」として世界モデルを活用することにより、物理的な調査や社会調査に莫大なコストと時間がかかるという課題[11]を解決し、現実のデータが不足している場合でも、統計的特徴を保った多様なデータを生成することが可能になる。このことは、本研究の「将来的な需要変動や政策導入時の影響をシミュレートする」という目的に非常に合致する。

2.3 マルコフ連鎖と生成AIの融合可能性

伝統的な数理モデルであるマルコフ連鎖と生成AIは、時系列データのモデリングにおいて、対立する概念ではなく、相互に補完し合う関係にある。マルコフ連鎖は、そのシンプルさと高い解釈性から、個々の状態遷移の確率を理解する上で優れている。しかし、このモデルの精度は、実データが少ない場合や、めったに発生しない希少な事象をモデル化する場合、正確な予測が難しくなる。

一方、生成AIモデルは、より複雑なデータセットを扱い、長期的な依存関係を捉え、現実には存在しないシナリオを生成する能力を持つ。既存のデータセットの統計的特徴を学習し、現実世界には存在しないが、現実と区別がつかないほどリアルな「合成データ」を大量に生成する。この合成データにより、実際の観測データが少ない場合でも、マルコフ連鎖モデルを利用できるようになる。

この両者の融合は、それぞれの弱点を補い合う強力なハイブリッドモデルの構築を可能にする。表 1

にマルコフ連鎖と生成 AI の比較を示した。

表1 マルコフ連鎖と生成AI

特性	マルコフ連鎖	生成 AI モデル
主 要 な 性 質	マルコフ性 (メモリレス)	文脈依存性 (コンテキスト追跡)
長 期 的 な 依 存 関 係	捕捉が困難	強力に捕捉可能
解釈性	高い (状態遷移が明確)	低い (複雑な内部構造)
計 算 コ ス ト	比較的低い	非常に高い
典 型 的 な 応 用	単純なシーケンス 予測、状態遷移の 分析	複雑なシナリオ生 成、非線形なパター ン学習

マルコフ連鎖の持つ「動学的解釈」という強みを活かしつつ、生成AIの「多様なシナリオ生成」能力を付加する、このハイブリッドなアプローチは、モデルの「ブラックボックス」性を避けつつ、複雑な外部要因を考慮した予測を行うことができる。地域鉄道の動態を包括的に理解し、政策立案に資する革新的なツールとなる可能性を持つ。

3. 関連先行研究

3.1 マルコフ連鎖モデルを用いた交通・鉄道動態の分析事例

Spanninger ら (2023) によるスイスの鉄道網における研究では、マルコフ連鎖が列車の遅延を予測する確率モデルとして有効であることが示されている。この研究では、従来のモデルが持つ「静的状態空間」や「絶対遅延」という制約を緩和し、より柔軟な「弾力的な状態空間」と「プロセス時間の偏差」を導入することで、予測精度を大幅に向上させている。また、複雑な機械学習アプローチとは対照的に、遅延伝播のダイナミクスの記述的分析という観点から解釈可能性の強みを維持しており、理解しやすい予測を提供している。[12]

都市交通計画においては、Li (2025) が、マルコ

フ連鎖を交通分野に適用することで、より優れた交通システムの構築につながるとして、歩行者衝突予測、都市鉄道旅客流動予測、バス停留所区間長最適化といった関連分野への応用例を示している。マルコフ連鎖は交通システムのモデル化と改善に効果的であるが、データの質がモデルの精度に影響を与えるため、今後の研究での機械学習との統合への期待について触れている。[13]

近年では GPS プローブデータを活用した交通流の把握・分析手法も用いられるが、プローブデータの疎性と道路リンク間の高次な時空間依存性により、幹線道路網の交通状態推定は計算的・構造的に困難を伴う。Wang ら (2019) は、Twitter から抽出した交通イベント情報を補完的観測値として導入し、GPS データと統合し、これら異種データを並列結合隠れマルコフモデル(PC-HMM)に組み込み、交通状態の推定精度を向上させている。[14]

交通系 IC カードのデータを用いた研究では、乗客が複数の魅力的なルート (ハイパーパス) から状況に応じて柔軟に選択する傾向が示されている。Hassan ら (2011) は、スマートカードデータを用いて公共交通ネットワーク上の乗客の経路選択行動を観察し、ハイパーパス理論との乖離を実証的に分析したものである。通常マルコフ連鎖が「現在の状態が直前の状態にのみ依存する」という性質を持つのに対し、「現在の状態が過去 n 日間の状態に依存する」という拡張的なアプローチを取っている。[15]

しかし、これらの先行研究は、マルコフ連鎖の性質上、既存のデータセットに内在する確率的パターンや長期的な依存関係の「記憶」に依存しているという限界を持つ。本研究は、この限界を克服するため、生成 AI を組み合わせることで、過去のデータには存在しない、人口減少の進行や多様なライフスタイルの変化といった将来的な「what-if」シナリオのデータを生成し、政策評価に利用する点で新規性を有する。これは、単に過去を分析するだけでなく、未来を創造的にシミュレートし、政策的介入の効果を検証する、より動的なアプローチである。

3.2 AI 及び生成 AI モデルを用いた交通計画・シミュレーション事例

AI は既に、様々な業界で活用されているが、特に運送業界では、配送ルート最適化[16]や配送業務量予測および適正配車によるドライバーの業務効率化[17]など、多岐にわたる業務で AI が活用されている。

JR 東日本で開発し、運用しているデジタルツインプラットフォーム JEMAPS は、リアルタイムの鉄道運行データと気象・防災データを統合したものである。このシステムは、列車の在線位置や混雑情報に加え、豪雨や地震発生時の危険度分布をリアルタイムで複合的に表示し、輸送障害発生時の迅速な意思決定を支援する。[9]

英国のスタートアップ Wayve 社が開発した GAIA-1 は、自動運転のための世界モデルである。GAIA-1 は、現実世界では危険すぎて試せないような稀なケースや、ドライバーの誤った操作が引き起こす状況さえもシミュレートできるため、AI 運転モデルの頑健性を安全に評価するための強力なツールとなっている。[10]

これらの先行研究は、生成 AI やデジタルツインの交通分野への有効性を示す一方で、多くはリアルタイムのデータに基づいた現状の最適化や、既存のデータから推測可能なシナリオのシミュレーションに主眼を置いている。本研究の新規性は、単に運行状況を可視化するデジタルツインの「器」に留まらず、生成 AI を「政策シナリオを創出するエンジン」として活用する点にある。これにより、物理的な調査が困難な希少な事象や、未だ実現していない政策が引き起こすであろう複雑な需要変動を、統計的整合性を保った合成データとして生み出し、予測モデルの訓練と検証に利用できる。このアプローチは、従来のシミュレーション手法では対応が難しかった不確実性の高い未来の評価を可能にする点で、新たな価値を創出する。

4. モデルの枠組みと研究手法

本研究で提案する「マルコフ連鎖と生成 AI を融合した鉄道利用動態の数理モデリング」は、単一のモデルではなく、複数の技術が連携するハイブリッ

ドなフレームワークとして構築される。図 1 にフレームワークの概念図を示した。

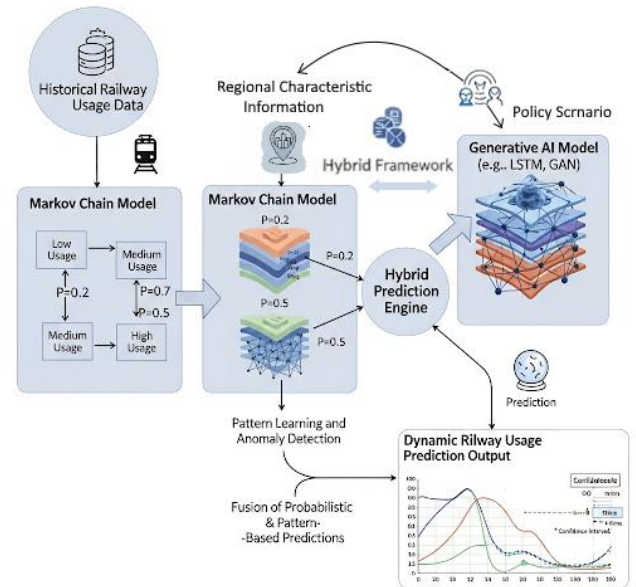


図 1 ハイブリッド・フレームワークの概念図

4.1 鉄道利用動態予測モデルの枠組み

(1) データの統合と前処理

モデルの基盤となるのは、乗降データである。このデータは、利用者の移動経路、時間帯、利用頻度といった基本的な動態を把握できる。さらに、鉄道網外の移動実態を補完するデータを統合することで、より包括的な利用動態を捉えることが可能となる。

(2) 隠れマルコフモデルによる行動パターン推定

統合されたデータを基に、まずは隠れマルコフモデル（HMM）を構築する。この HMM は、乗降履歴という「観測された状態」から、利用者の移動目的（通勤、通学、買い物、観光など）という「隠れた状態」を推定し取り扱うことができる。これにより、個々の利用者の移動が、単なる確率的遷移ではなく、その背景にある意図やライフスタイルに結びついた動的なパターンとして捉えられるようになる。

(3) 生成 AI によるシナリオ生成

生成 AI が「需要変動」や「政策導入」といったシナリオの仮想データを生成する役割を担う。需要変動シナリオでは、人口減少、リモートワーク普及率

の増加、観光客数の変化といった社会経済的要因をパラメーターとして、将来の利用動態データを生成する。また、政策導入シナリオでは、運賃割引、特定の時間帯の増発、新駅の設置といった政策的介入をモデルに組み込み、その影響を反映した仮想の利用履歴データを生成する。このデータは、HMMの持つ「データ疎性」の問題を克服する上でも有効である。

(4) 予測モデルの評価と検証

生成 AI が作り出した仮想データセット上で、HMM の予測精度を評価・検証する。これにより、現実世界での政策導入前に、その効果を定量的にシミュレートし、最適な政策組み合わせを探索することが可能になる。

4.2 具体的な研究手法

(1) 時空間分析の導入と利用動態の状態遷移構造化

交通流動の動態は、時間だけでなく空間にも大きく影響される。本研究では、マルコフ連鎖が持つ時間的な状態遷移の分析に、空間的コンポーネントを統合した時空間分析を導入する。これにより、隣接する駅や地域の状況、鉄道網の構造といった空間的依存関係を考慮することが可能となる。地方都市の鉄道路線における利用動態を、この時空間的な状態遷移として形式化する。各状態は、利用者の乗降駅、時間帯、利用目的（隠れ状態）などを組み合わせたものとして定義され、駅間の空間的な繋がりや影響をモデルに組み込む。

(2) マルチソースデータの活用と欠損データの補完

実証には、乗降データや地域特性情報（人口密度、商業施設の位置など）といったマルチソースの実データを用いる。こうした実データを用いた物理的な調査や社会調査には莫大なコストと時間がかかる。

この課題を解決するため、特に希少事象や危険な状況のデータなど、現実世界で収集が困難なデータを補完する目的で、生成 AI を活用する。生成 AI により、既存のデータから多様なパターンを持つデータを大量に生成することができ、モデルの訓練データが限られている場合でも高い予測精度を達成することが期待できる。さらに、個人情報や機密情報を含まない、統計的特徴を保った合成データを生成

できるため、プライバシー保護にも貢献する。

(3) 政策シミュレーション分析

時差通勤奨励、パーク＆ライド導入、ダイヤ調整といった具体的な交通政策をモデルに組み込み、その影響をシミュレーション分析する。生成 AI が生成したシナリオデータ上でこれらの政策の有効性を定量的に評価することで、政策立案者が客観的な根拠に基づいて意思決定を行えるように支援する。

(4) 政策評価の可視化

シミュレーション結果は、可視化されることで、政策決定者が直感的に理解できるようになる。政策介入が鉄道利用者の流れや駅の混雑にどのような変化をもたらすかを、仮想空間上で動的に再現する。

5. おわりに

本研究では、わが国の地域鉄道が直面する危機的状況を克服するため、マルコフ連鎖と生成 AI を融合した数理モデリングが、非常に有効なアプローチであることを包括的に検証した。

マルコフ連鎖が持つ解釈性の高さと、生成 AI が持つ複雑な非線形性や長期的な依存関係を学習する能力は、相互に補完し合う関係にある。この二つの技術を融合することで、シンプルで分かりやすい状態遷移の分析（マルコフ連鎖）と、現実世界を忠実に再現しうる多様なシナリオ生成（生成 AI）の両方を実現できる。この両者の融合は、それぞれの弱点を補い合う強力なハイブリッドモデルの構築を可能にする。

また、先行研究から、マルコフ連鎖は、隠れマルコフモデル（HMM）や弾性的な状態空間の導入により、交通流の把握・分析に成功していることが示された。また、生成 AI は、JR 東日本の「JEMAPS」に代表されるように、交通計画におけるデジタルツイン技術の基盤として、すでに実用的な価値を示している。これらの成功は、本研究が構築するモデルが、単に需要を予測するだけでなく、政策の「波及効果」をシミュレートする能力を持つべきであることを示唆している。

今後の展望として、本研究で構築されるモデルは、地域鉄道の持続可能性を確保するための強力なツールとなり、地域社会の活力を維持・向上させる

ための基盤技術となり得る。将来的な人口減少やライフスタイルの変化を精緻に予測し、これに対応する交通政策を事前に検証することで、地域はより機動的かつ効果的な戦略を立てることが可能になる。また、このようなデータドリブンなアプローチは、新たな交通プロジェクトへの投資の妥当性を定量的に示す根拠となる重要な役割を果たすことが期待される。

参考文献

- [1] 国土交通省、「地域公共交通の現状」、<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001898150.pdf>
- [2] 国土交通省、「中山間地域等における地域公共交通の状況について」、https://www.chisou.go.jp/sousei/meeting/chiisana_kyoten/rmo_yushikisyakaigi/r01-10-11-shiryoku6.pdf
- [3] 国土交通省、「補足説明資料」、https://www.gender.go.jp/kaigi/senmon/kansi_senmon/28/pdf/shiryoku_09.pdf
- [4] 佐佐木綱、「吸収マルコフ過程による交通量配分理論」、土木学会論文集、1965 (121), pp.28-32, (1965)
- [5] 米谷栄二, 佐佐木綱, 西藤立雄、「マルコフ連鎖によるOD交通量の推定」、土木学会論文集 1966 (129), pp.15-22, (1966)
- [6] 木島正明、「マルコフ連鎖とそのORへの応用」、オペレーションズ・リサーチ、Vol.42, pp.150-154, (1973)
- [7] 日下部貴彦、「交通系パネルデータの融合による行動分析・政策評価手法の研究」、日下部 貴彦 神戸大学 2010 - 2011 日本学術振興会(JSPS) (科学研究費助成事業)、(2025)
- [8] I. Goodfellow, J. Pouget-Abadie, M. Mirza, B. Xu, D. Warde-Farley, S. Ozair, A. Courville and Y. Bengio, "Generative Adversarial Nets", Proc. NIPS 2014, pp. 2672–2680, (2014)
- [9] JR東日本、JR東日本ニュース 2023年10月 「鉄道運行に関わるデジタルツインプラットフォーム JEMAPSの導入」、https://www.jreast.co.jp/press/2023/20231010_ho02.pdf
- [10] Wayve, "Introducing GAIA-1: A Cutting-Edge Generative AI Model for Autonomy", <https://wayve.ai/thinking/introducing-gaia1/>
- [11] 日下部貴彦、「データオリエンテッド交通研究」、土木学会論文集D3 (土木計画学) 71巻5号, pp.I_21-I_31, (2015)
- [12] T. Spanninger, B. Büchel, F. Corman, "Train Delay Predictions Using Markov Chains Based on Process Time Deviations and Elastic State Boundaries", Mathematics 2023, 11(4), p.839, (2023)
- [13] Xiang Li, "Study on the Application of Markov Chains in Transportation", Theoretical and Natural Science 100(1), pp.172-179, (2025)
- [14] S. Wang, X. Zhang, F. Li, Philip S. Yu, Z. Huang, "Efficient traffic estimation with multi-sourced data by parallel coupled hidden Markov model", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 2019 Volume 20 Issue 8 Journal Article, (2019)
- [15] Hassan S.M., Sheng-YU C., "Schmöcker J.-D., Kurauchi F., Fukuda, D., "Passengers' Hyperpath Choice Behavior Observation on Transit Network Using Smartcard Data", 土木計画学研究・講演集 Vol.43, (2011)
- [16] 日本郵便、プレスリリース 2020年6月 「AIによる配達ルート自動作成などを活用した配達業務支援システムの試行導入」、https://www.post.japanpost.jp/notification/pressrelease/2020/00_honsha/0615_02_01.pdf
- [17] ヤマトホールディングス株式会社、ニュースリリース 2021年8月 「ビッグデータ・AIを活用した配送業務量予測および適正配車のシステム導入について」、https://www.yamato-hd.co.jp/news/2021/newsrelease_20210803_1.html

マルコフ連鎖による新宿駅南口を起点とする人流変化に関する一考察

鈴木邦成*・村山要司**

1. 本研究の背景と目的

大都市における人流の動態は、都市構造、交通インフラ、商業施設の整備などに大きく影響される。とりわけ、新宿駅は一日あたりの利用者数が世界最多ともいわれ、複数の鉄道路線が集中するハブとして、周辺エリアの発展において中心的な役割を果たしてきた。

その点を踏まえ、本研究では都市の開発が人の移動や滞在傾向に与える影響を定量的に可視化し、都市計画や交通政策、商業施設の配置戦略などに資する実証的新宿駅周辺の人流がどのように変化してきたかを、1996年の高島屋開業、2016年のバスタ新宿開業、そして2025年以降に予定されている西口再開発という3つの都市変化の節目に着目し、数理的に分析、考察する。

近年の都市データ分析において注目されている時空間的視点を取り入れ、時間帯や施設機能の違いによる人流の変化に着目した。

分析手法としては、都市空間内のエリア間の移動を確率的に表現できるマルコフ連鎖モデルを用い、人々の流れを「状態」として定義した上で、時系列的に遷移させることで人流の再編成過程をシミュレーション行う。マルコフ推移を用いることで多面的な新宿駅の地域性から人流の変化を読み取ることが可能になる

2. 新宿駅の発達過程

新宿駅は、古くから鉄道交通の結節点として機能してきたが、その周辺における人流の構造は、都市開発の進展とともに段階的に変化してきた。特に、1996年10月の高島屋新宿店の開業は、南口エリアの都市構造に大きな転機をもたらし、人の流れの再構成が始まった重要な分岐点であると考えられる。高島屋開業以前、新宿駅周辺の人流は主に西口（小田急・京王・オフィス街）から東口（アルタ・歌舞伎町・伊勢丹）へ向かう動線に集中していた。西口

側の鉄道改札から駅構内を經由して東口方面へ抜ける動きが一般的であり、南口は乗り換え通路としての性格が強く、通行量も限定的であった。南口は新宿駅周辺開発の最後尾に位置していたのである。

しかし、高島屋の開業を契機に、南口エリアに新たな商業核が形成されたことで、西口から東口への直線的な人流に対し、南口を経由する新たな動線が生まれた。これは単なる通行の変化ではなく「南口を目的地とする滞在」が発生したことを意味する。

以上のように、1996年の高島屋開業は、それ以前の人流パターンを大きく転換する契機であり、その後の南口再開発の原点ともいえる。

本研究では、高島屋開業を人流変化の分岐点とする仮説を立て、数理モデルを用いて、その影響の大きさを定量的に検証する。

3. モデルの設計の方針

マルコフ連鎖を使って新宿の人の流れを表現するのに以下のように設定する。

3.1 状態（エリア）の定義

新宿を以下のようなエリアに分け、それぞれを「状態」とする。

西口（例：小田急・京王・新宿西口駅周辺）

東口（例：紀伊国屋書店本店・歌舞伎町・丸井周辺）

南口（例：高島屋・バスタ新宿・NEWoMan）

伊勢丹周辺（例：新宿三丁目エリア）

駅構内（例：新宿駅中央部分、乗り換えエリア）

なお、2025年以降は西口再開発もエリアに加える。

3.2 推移確率の設定

「あるエリアにいる人が、次の時間ステップでどこに移動するか」の確率を表1のように設定する。

表2の示すように高島屋の開業により、南口の魅力が増し、人の流れが変わった。

* 日本大学特任教授

* 埼玉工業大学教授

表 1 1996 年以前の遷移確率 (仮)

起点地	西口 →	東口 →	南口 →	伊勢丹 →	駅構内 →
西口	40%	40%	5%	10%	5%
東口	30%	50%	5%	10%	5%
南口	10%	20%	50%	10%	10%
伊勢丹	10%	50%	5%	30%	5%
駅構内	20%	30%	10%	10%	30%

表 2 1996 年以降の遷移確率 (仮)

起点地	西口 →	東口 →	南口 →	伊勢丹 →	駅構内 →
西口	30%	30%	20%	10%	10%
東口	20%	40%	20%	15%	5%
南口	10%	30%	40%	15%	5%
伊勢丹	10%	40%	20%	25%	5%
駅構内	15%	25%	30%	10%	20%

このように南口の滞在率や南口を起点に伊勢丹などに向かう確率が増加すれば、「南口の発展が人の流れを変えた」という仮説を定量的に示せる。

3.2 モデル式

(1) 状態ベクトルの更新

新宿を歩く人の分布を確率ベクトルとして表し、マルコフ連鎖の行列計算を使って、時間の経過とともにどのエリアに人が多くなるかを算出する。最初に「全体の 40%が西口、30%が東口、10%が南口、伊勢丹周辺、駅構内にそれぞれ 10%いる」と仮定すると、

$$p(t+1) = p(t) \times T \quad (1)$$

という行列計算を繰り返すことで、最終的な定常状態が求まる。

ここで、

$p(t)$: 時刻 t における状態分布 (各エリアにいる人の割合)

T : 遷移確率行列 (エリア間の移動確率を表す行列)

定常状態を比較すれば、「南口の発展によって人の流れがどう変化したか」を客観的に分析できる。

(2) 状態空間の定義

状態空間 S は、新宿の主要なエリアを表し、以下の 6 つの状態を定義した。

$S = \{\text{西口, 東口, 南口, 伊勢丹周辺, 駅構内, 西口再開発}\}$

ここで、各状態 s における確率 p_s を「ある人が状態 s (=エリア) に滞在している確率」とする (ただし $s \in S$)。

このとき、すべての状態における確率の合計は以下の条件を満たす。

$$\sum_{s \in S} p_s = 1 \quad (2)$$

各状態は「そのエリアに滞在する人の割合」を示し、状態の総和は常に 1 (=100%) になる。

以上をもとに交通センサス (国交省資料) をもとに推定値を当てはめる。

4. シミュレーション

前章のモデル設計を踏まえて、シミュレーションを行った。

4.1 前提条件

交通センサスを参考に前提条件は次のように定めた。

6 つの状態 (エリア) を「西口、東口、南口、伊勢丹周辺、駅構内、西口再開発」とし、3 つの時期の遷移確率行列 (T) を用意した。3 つの時期とは、「1996 年以前、2016 年以降、2025 年以降」である。

1996 年は高島屋新宿店が開業した年であり、2016 年はバスタ開業の年である。さらに現時点の 2025 年から西口再開発後を予測する。初期状態については、交通センサス及び新宿駅に関する文献、データをもとに、「西口 50%、東口 30%、南口 10%、伊勢丹 5%、駅構内 5%、再開発 0%」と設定した。

4.2 シミュレーションの結果及び考察

シミュレーションの結果は図1～3のようになった。図1～3は、時間の経過とともに各エリアに滞在する人の割合がどのように変化するかを示している。初期状態（西口 50% など）から始まり、遷移確率行列に従って各エリアに人が分散し、最終的に安定状態（定常状態）に収束している。

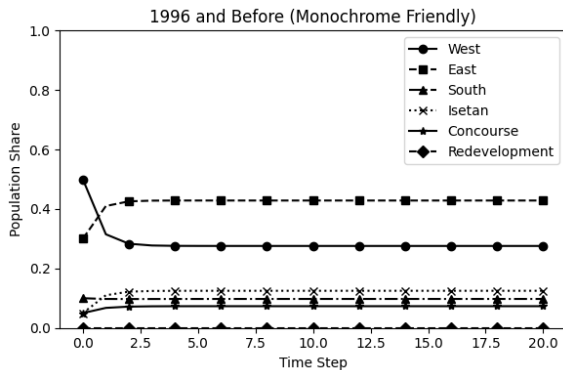


図1 1996年以前の人流

図1は1996年以前、すなわち高島屋開業以前の新宿駅周辺の人流である。

1996年以前の人流に関するシミュレーション結果を見ると、東口が最も高い割合で安定し、最終的に約43%の人が滞在する状態となっている。一方、西口は初期状態で50%と最多であったが、時間の経過とともに減少し、約27%まで低下した。南口は全期間を通じて約10%でほぼ横ばいであり、伊勢丹周辺や駅構内も10%前後で安定している。

また、西口再開発エリアはこの時点では未整備であり、滞在率は0%のままである。これらの結果から、この時期の人流は「西口から駅構内を通して東口へ向かう流れ」が主流であり、南口は主に通過点として扱われていたことが推察される。東口および伊勢丹周辺が、当時の新宿における主な集客エリアであったことが数値的にも裏付けられている。

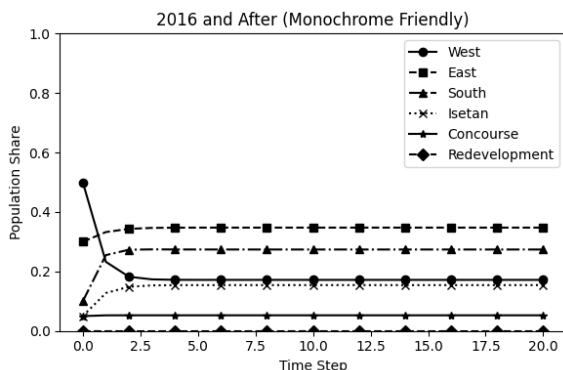


図2 2016年以降における人流

図2による2016年以降のシミュレーション結果では、バスタ新宿の開業を契機として南口の人流が大きく増加し、定常状態では約27%に達している。東口はやや減少傾向を示しつつも約35%で高い水準を維持しており、西口はさらに低下し、最終的には約17%となった。伊勢丹周辺の割合も上昇し、約15%前後で安定している。

一方で西口再開発エリアはこの時点ではまだ未整備であり影響は見られない。これらの結果から、2016年のバスタ新宿開業が南口の滞在率を大きく押し上げ、同エリアが単なる通過点から目的地・拠点へと転換したことが読み取れる。その影響として西口の相対的重要性は低下し、さらに南口を経由して伊勢丹方面へ向かう人流も強化されたと考えられる。

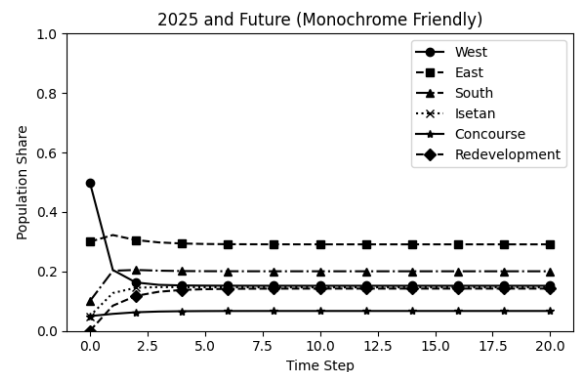


図3 2025年以降の予人流の測

図3は2025年以降の人流を表しているが、西口再開発エリアの人流が急速に増加し、最終的に約15%で安定することが示された。これにより、従来の西口（約15%）と合わせて、西側全体で一定の存在感を回復している。一方、南口は約20%で高水準を維持しているものの、2016年以降のピーク時と比較するとやや分散傾向が見られる。東口は約29%で緩やかに減少し、伊勢丹周辺および駅構内の割合は横ばいで推移している。

これらの傾向から、西口再開発によって西側エリアに人流が戻る動きが生まれつつも、完全な回復には至らず、「西口+再開発エリア」が新たな人流の一極となる可能性が高いと考えられる。また、南口の勢いが続く一方で、全体としては新宿駅周辺が複数の拠点を持つ多中心型の都市構造へと変化して

いくことが予測される。

5. 新宿駅に求められる今後の役割

シミュレーションを通じて、新宿駅周辺の人流は1996年の高島屋開業を起点に大きく変化し、南口の存在感が高まり、2016年のバスタ新宿の開業により南口が一層の成長を遂げたことが明らかになった。一方で、2025年以降に予定される西口再開発により人流の分散が進み、新宿駅全体が多中心型の構造へ

変化している。このような人流の変遷を踏まえ、今後の新宿駅には、エリア間のバランスを意識した都市機能の再編と、利用者の多様化に対応した柔軟な空間設計が求められる。

とりわけ、南口は今後のインバウンド観光の再拡大に伴い、ターミナル機能と商業機能を併せ持つ「都市の迎え口」としての役割がさらに強まることが想定される。高島屋をはじめとする大型商業施設が外国人観光客の関心を引き続ける限り、南口への人流は今後も堅調に推移する可能性が高い。

一方、東口に関しては、歌舞伎町や新宿三丁目といったナイトタイム・エコノミーの中心地へのインバウンドの流れが強まれば、今後再び人流の活性化が見込まれる。特に近年の再開発やホテル誘致がこの流れを後押しするかたちとなれば、東口が持つ娯楽・観光の拠点としての機能はより際立つことになるだろう。それに対して、西口については、2025年以降に予定される大規模再開発によって一定の人流回復が見込まれるものの、その効果には慎重な見方も必要である。新宿西口の「新都心開発」は、高度経済成長期のモータリゼーションへの過剰な期待のもとに計画され、人の動線よりも車の流れを優先した空間構成となっており、結果として歩行者にとっては動きづらく、魅力を感じにくいエリアとなってしまったという経緯もある[1]。

以上を総合すると、新宿駅の将来においては、単に新しい建物を建てるのではなく、エリア間の連携や人の「歩きやすさ」「滞在しやすさ」を中心とした都市設計が求められる。再開発にあたっては、南口・東口・西口が相互補完的に役割を分担できるような立体的かつ柔軟な都市ビジョンの構築が必要

となる。本研究が示す人流の変化は、こうした計画の方向性を再考する上で、重要な実証の手がかりを与えていると確信している。

このような分析に加えて、今後の研究では、マルコフ連鎖に基づく人流モデリングに時空間分析の視点を組み込むことを検討している。

マルコフ連鎖モデルでは、エリア間の人の移動は一定の遷移確率に基づいて表現されるが、実際の都市では、時間帯、曜日、季節、天候、イベント開催などによって人流の傾向が大きく変化する。こうした時間的な変動を捉えるためには、時間帯別や曜日別の動的な遷移行列を設定し、時系列で人流の変化を追える時空間マルコフモデルを構築する必要がある。さらに、セル・オートマトン[2]やパーコレーションモデル[3]などを組み合わせれば、空間のつながりや断絶、人の回遊の可否といった空間構造のダイナミズムも表現可能となる。セル・オートマトンとは格子状の空間で、各セルが周囲の状態に応じて変化するモデルで、土地利用や都市成長など、局所的ルールによる広がりをシミュレーションできる。パーコレーションモデルでは時間の経過とともに都市構造がどう変わるかを再現できる。空間上で「通れる場所」と「通れない場所」が確率で決まり、連結性を分析するモデルである。駅からエリア間のつながりや回遊性を評価できる。

これらを総合的に活用することで、新宿駅周辺の人流と都市構造の相互作用を時空間的に捉え、より実態に即した都市政策や空間設計の方向性を導き出すことが可能になるだろう。

参考文献

- [1] 市川宏雄, 新宿の逆襲, 青春出版社, 2021年
- [2] Anthony G. O. Yeh, Xia Li, and Chang Xia, Cellular Automata Modeling for Urban and Regional Planning, Urban Informatics, pp. 865-883, Springer nature, 2021
- [3] Hern´an A. Makse, Jos´e S. Andrade Jr., Michael Batty, Shlomo Havlin, and H. Eugene Stanley, Modeling Urban Growth Patterns with Correlated Percolation, cond-mat, Cornell University, 1998

自治体情報システムの標準化・共通化について

岡石義和**・村田吉優**

1. はじめに【1】～【5】

21世紀は「超スマート社会」の時代と言われている。ここで「超スマート社会」とは、サイバー空間と現実社会が高度に融合した未来社会を指す。超スマート社会では、AIにより必要な情報が必要な時に提供され、自動運転、ドローンや手術ロボット等の技術で可能性が広がると考えられている。

しかし、今般の新型コロナウイルス感染症拡大に伴い、政府の行政手続の遅れが指摘されている。しかし、日本政府のデジタル・ガバメントに係る取り組みは、20年来その方針が修正されつつ形を変え現在まで踏襲されているのは周知の事実である。

一方、国や地方が抱える大きな課題として経済の停滞、財政の逼迫を挙げることができる。これに人口減少が拍車をかけている。

これらの課題を克服するには、デジタル社会到来に向け社会制度の最適化が求められる。これが、人口減少問題を緩和し、経済の停滞、財政の逼迫を克服する有力な手段となり得ると考える。

2. これまでの研究について

これまでも、政府が中心となってデジタル・ガバメント化に向けての各種の取組が行われてきたが、先進諸国の中で出遅れ感が否めない。これまでの研究でも、自治体業務の棚卸や民間提案制度に代表される自治体業務の標準化・効率化が地方に活力をもたらすと訴えてきた(図1)。自治体間連携の側面からも、民間を含めた取引を考えても各々の自治体が地域の実情を鑑みた独自の方法を採用することは、日本全体で見ると非効率と考えたからである。

最近の研究では、マイナンバーカードやベース・レジストリの対応の遅れに焦点を絞り、デジタル先進国であるデンマークとの比較分析等を行ってきた。デンマーク等で自治体DXが軌道に乗ったのは、政府主導の積極的なかじ取りと住民参加型の運営である。DX推進に関して政府への不信を取り除くことが肝要である。

今回の研究では、自治体DXの今後の方向性を探るため、自治体情報システムの標準化・共通化についての調査結果を紹介したい。

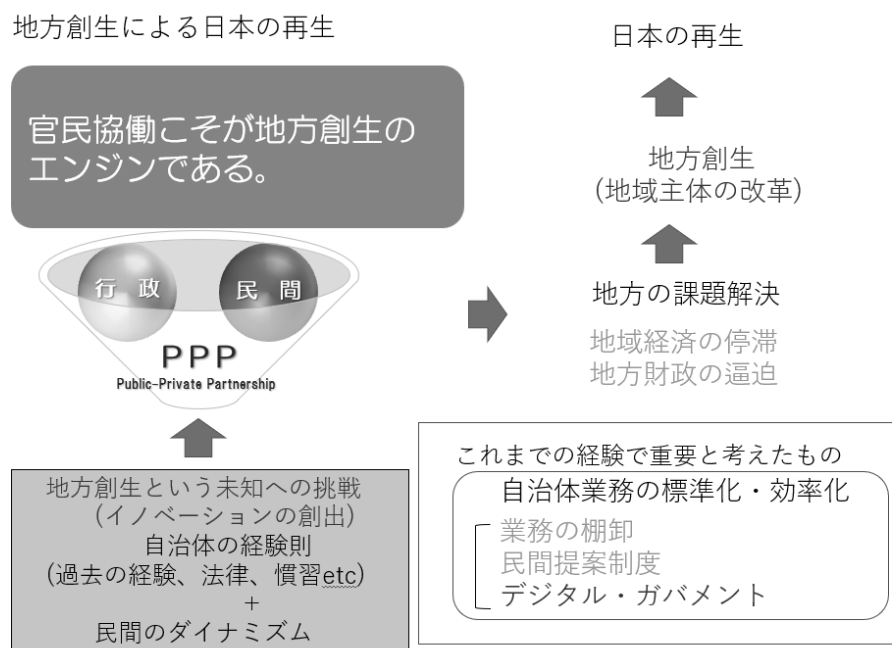


図1. 地方創生による日本の再生

* 特別会員 株式会社サイネックス所属

** 正会員 株式会社サイネックス 代表取締役

3．自治体情報システムの標準化・共通化

2024年12月24日に閣議決定された地方公共団体情報システム標準化基本方針の中でも、地方公共団体の基幹業務システムは地方公共団体が個別に開発しカスタマイズをした結果として、(1)維持管理や制度改正時の改修等において地方公共団体は個別対応を余儀なくされ負担が大きいこと、(2)情報システムの差異の調整が負担となり、クラウド利用が円滑に進まないこと、(3)住民サービスを向上させる最適な取組を迅速に全国に普及させることが難しいことと言った課題があるため、2021年5月に成立した標準化法に基づき、標準化基準に適合する基幹業務システムの統一・標準化を推進するとしている。20業務が対象業務として定められている(図2)。標準準拠システムにはガバメントクラウドを利用することを努力義務として定めている。ここで、ガバメントク

ラウドとは、「デジタル社会の実現に向けた重点計画」等の政府方針に基づき、安全かつ合理的な利用環境としてデジタル庁が選定した複数のパブリッククラウド(IaaS、PaaS、SaaS)のことを言う。

2020年12月25日、IT基本法の見直しの考え方やデジタル庁設置の考え方についての基本的な方針である「デジタル社会の実現に向けた改革の基本方針」が閣議決定された。

2021年9月に発足したデジタル庁主導のもとがガバメントクラウドの運用が開始されている。

自治体情報システムの標準化・共通化

これまでの取組・現状

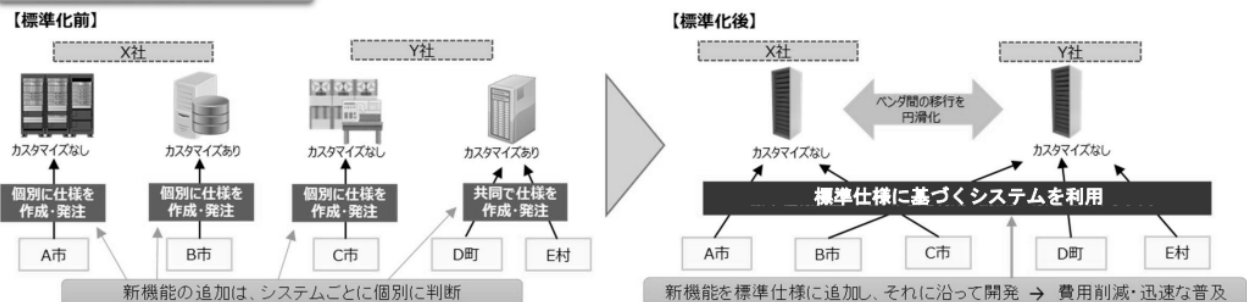
- 自治体ごとにおける情報システムのカスタマイズにより、
 - ・維持管理や制度改正時の改修等において、自治体は個別対応を余儀なくされ負担が大きい
 - ・情報システムの差異の調整が負担となり、クラウド利用が円滑に進まない
 - ・住民サービスを向上させる最適な取組を迅速に全国へ普及させることが難しい
 等の課題が発生。
- このような状況を踏まえ、地方公共団体に対し、標準化対象事務(※)について、標準化基準に適合した情報システム(標準準拠システム)の利用を義務付ける「地方公共団体情報システムの標準化に関する法律」が成立。

※ 20業務 (児童手当、子ども・子育て支援、住民基本台帳、戸籍の附票、印鑑登録、選挙人名簿管理、固定資産税、個人住民税、法人住民税、軽自動車税、戸籍、就学、健康管理、児童扶養手当、生活保護、障害者福祉、介護保険、国民健康保険、後期高齢者医療、国民年金)

目標・成果イメージ

- 標準化・共通化の取組により、人的・財政的な負担の軽減を図り、自治体の職員が住民への直接的なサービス提供や地域の実情を踏まえた企画立案業務などに注力できるようにするとともに、オンライン申請等を全国に普及させるためのデジタル化の基盤を構築。
- 原則、令和7年度(2025年度)までに、標準準拠システムへの円滑かつ安全な移行を目指す。

情報システムの標準化イメージ



(出典)：総務省 HP<https://www.soumu.go.jp/main_content/000971906.pdf>

図2．自治体情報システムの標準化・共通化

4．ガバメントクラウド

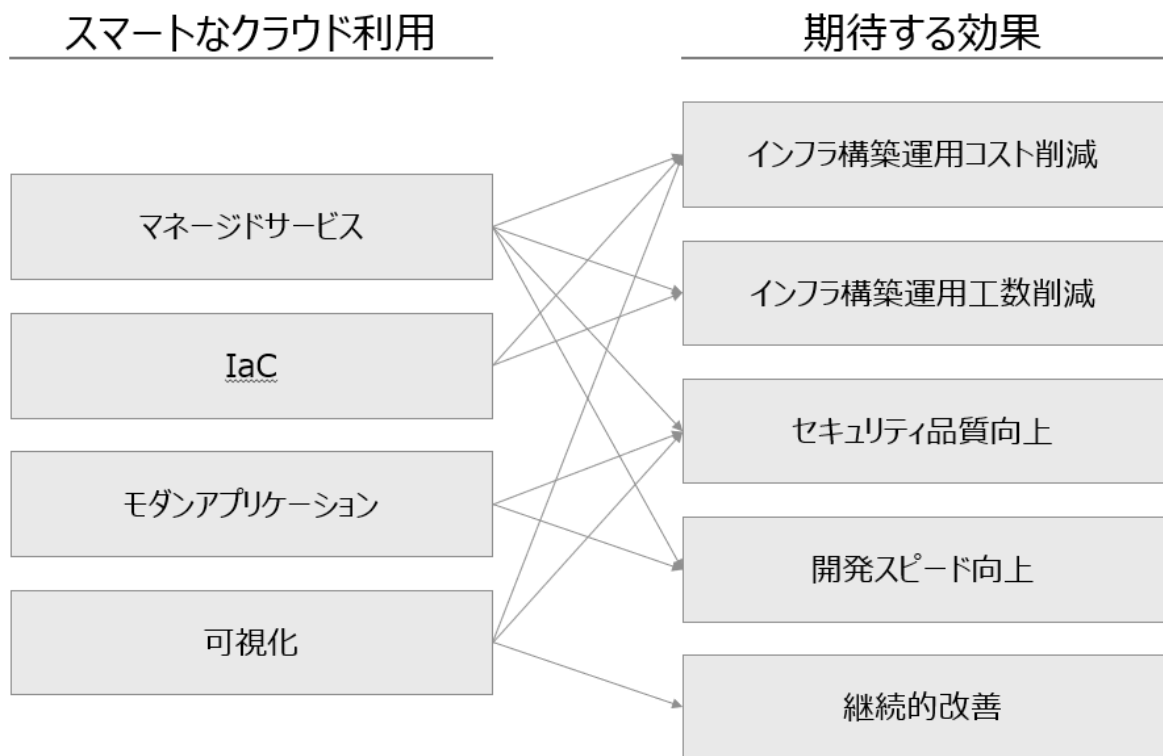
クラウドとは、インターネット経由でデータやサービスを利用できる仕組みをいう。クラウドを利用することで、設備を保有することなくデータのバックアップやアプリの利用等を行うことができる。政府ばかりでなく民間でも利用されているサービスである（図3）。ガバメントクラウドは先ほども述べたが、各府省や自治体が利用する共通のクラウド環境のことである。

デジタル庁主導の基、デジタル社会の目指すビジョンとして、「デジタルの活用により、一人ひとりのニーズに合ったサービスを選ぶことができ、多様な幸せが実現できる社会」が掲げられている。これを実現するための基盤となるのがガバメントクラウドである。国や地方がデータを共有することで国民のニーズに沿ったサービスを適時に提供することがで

き、国民の側から見ても、24時間365日自治体の情報にアクセスできるとともに申請等を行うことも可能になる。情報弱者が犠牲になることなく、国民皆が幸せになる社会を実現する必要がある。

単なるインフラ提供サービスではなく、行政デジタル化を加速させる国家戦略的プログラムとの位置づけである。(株)NTT データ関西のホームページ^{〔6〕}に、標準化対応を成功させる重要なポイントが7つ記載されている。

早期かつ計画的な推進体制の構築 徹底した業務棚卸しとカスタマイズの見直し 計画的な移行スケジュールの策定 業務改革(BPR)と一体化した推進職員の理解促進と効果的な研修実施 データ移行の慎重な計画と検証 将来を見据えた拡張性の確保である（表1）。



（出典）：デジタル庁 GCAS ガイド

<<https://guide.gcas.cloud.go.jp/general/overview-explanation>>

図3．スマートなクラウド利用による効果

表１．標準化対応を成功させる重要なポイント

項目	内容
早期かつ計画的な推進体制の構築	移行プロジェクトの早期立ち上げと全庁的な推進体制の確立が不可欠です。部門横断的なプロジェクトチームの結成と明確な権限付与により、組織的な取り組みを可能にします。
徹底した業務棚卸しとカスタマイズの見直し	現行業務プロセスとカスタマイズ状況の詳細な棚卸しを行い、標準仕様への適合性を評価します。同時に業務プロセス自体の見直しも進め、標準機能への適合を図ります。
計画的な移行スケジュールの策定	既存システムの更新サイクルと標準化移行のタイミングを適切に調整し、段階的な移行計画を策定します。早期の検証環境構築で十分な移行テストと準備期間を確保することが重要です。
業務改革（BPR）と一体化した推進	標準化対応を単なるシステム更新ではなく、業務改革の好機と捉え、行政サービス全体の最適化を目指します。住民視点でのサービス改善を最優先課題として設定しましょう。
職員の理解促進と効果的な研修実施	移行の目的や意義について早期から情報共有を行い、職員の理解と協力を得ることが重要です。体系的な研修プログラムの実施により、新システムの円滑な導入を支援します。
データ移行の慎重な計画と検証	移行前のデータクレンジングの徹底と複数回の移行テストにより、本番移行時のリスクを最小化します。特に文字コードや外字の対応には注意が必要です。
将来を見据えた拡張性の確保	移行後の発展的活用を見据えた設計と準備が重要です。AI 活用やデータ分析基盤など、次のステップを視野に入れた取り組みを計画しましょう。

(出典) <https://www.nttdata-kansai.co.jp/media/107/>

５．まとめ

これまでの研究で明らかにした自治体 DX の取組でも多く見られたが、皆重要であることは分かっているものの色々障害があったり、とまどっているのが実情のようである。しかし、積極的に DX 化を推進している自治体もある。

筆者は、世界でデジタル・ガバメント化が進んできたが、先進国と新興国・発展途上国では成功に向けたロードマップは異なると考える。日本では既存の情報通信のインフラで事が足り、日本人全体の危機感が薄いことがデジタル・ガバメント化が思ったように進まない一番の原因であると考え。ガバメントクラウドに代表される自治体情報システムの標準化・共通化を着実に進めねばならない。自治体間連携や住民サービス向上のためにも、無駄な作業を省きセキュリティの面からも盤石なシステムを構築する必要がある。言うまでもないが、住民サービスでは情報弱者が犠牲になってはならない。

<参考文献>

- 【１】村田吉優「地域再生のエンジンとしての官民協働に関する研究～水平的官民協働による公共の改革と地域活性化～」『三重大学大学院地域イノベーション学研究所 博士論文』, 2014
- 【２】岡石義和「官民協働事業モデルの新領域についての研究」『三重大学大学院地域イノベーション学研究所 博士論文』, 2017
- 【３】一般財団法人教育振興財団調査研究班「政府のデジタル・ガバメントへの取組」, 2021
- 【４】一般財団法人教育振興財団調査研究班「政府の進めるデータ戦略」, 2023
- 【５】一般財団法人教育振興財団調査研究班「デジタル・ガバメントの現在地～デジタル社会の実現と課題～」, 2025
- 【６】株式会社 NTT データ関西「ガバメントクラウドとは？自治体 DX 推進に不可欠な基盤への対応ロードマップ」

<<https://www.nttdata-kansai.co.jp/media/107/>>

兵庫県 の 地域経済循環分析 と 地方創生

福嶋 幸太郎*

1. はじめに

兵庫という県名は、かつて役所が現在の神戸市兵庫区にあったことや兵器庫を意味することに由来すると言われている。また、県章は兵の字を図案化したもので、初代知事は伊藤博文であった。

国土地理院によれば、兵庫県の面積は約8,400km²（都道府県で国内12位）で、西日本では鹿児島県・広島県に次いで3番目に大きい。兵庫県には、日本海側の但馬・内陸部の丹波・大阪湾側の摂津・瀬戸内海側の播磨・国生み神話の淡路の5国が存在する。兵庫県北部は、日本海気候で降水・降雪日数が多く日照時間が短い。一方、兵庫県南部は、瀬戸内海気候で降水日数が少なく、温暖で日照時間が長い。2020年の国勢調査では、兵庫県の総人口は5,465千人（国内7位）、総生産額は21兆7358億円（同6位）である。

兵庫県の北部から中部では、農林水産業が主な産業となっている。一方、南部では阪神工業地帯・播磨臨海工業地帯があり、日本有数の重化学工業集積地であり、過疎と過密を内包している。

兵庫県南東部の居住者は、大阪市及び周辺都市に通勤・通学する割合が比較的高く、神戸市を含む阪神地方の総人口は兵庫県の約6割を占めている。そのため、複数の鉄道（阪急・JR・阪神線）・幹線道路（国道2号・43号・阪神高速）が、大阪市と神戸市の海と山の間を並行して運行されている。

1999年から2010年にかけて実施された平成の市町村合併（以下、「平成の大合併」という）によって、全国の市町村数は3,232から1,821へ約44%減少した。そして、総務省（2014）によれば、1999年3月に3,232存在した市町村数は2014年4月に1,718と約47%減少し、16年間でほぼ半減した。

47都道府県で最も合併が進んだのは長崎県であった。同県は1999年3月には79の市町村があったが、2014年4月には21となり約73%も減少

した。兵庫県は91から41へ約55%減少し、同期間の国内平均より8ポイント市町村合併が進んだ。

地域経済分析には都道府県単位のマクロ分析だけでなく、様々な研究手法による市町村単位のミクロ分析が必要である。本稿では、兵庫県41市町の人口動態分析と地域経済循環分析を行い、それぞれの市町が抱える行政課題について考察を加えることを研究目的とする。

2. 地域経済循環分析

著者が支持する中村（2019）の地域経済循環分析は、地域経済の長所と短所を分析し、地域の資金の流れを生産・分配・支出（消費・投資）の3面から可視化して、地域経済状況を把握するものである。そして、産業間の繋がりを検証し、経済波及効果の高い産業構造を目指すことを提唱している。

地域経済は、地域外を主たる市場とする基盤産業と、地域内を主たる市場とする非基盤産業によって構成されると解されている。基盤産業は、財貨・役務を地域外へ販売し移出を増加させて、その見返りに地域外から資金を獲得する。つまり、基盤産業を拡大することによって生産需要が拡大し、雇用が増大する。一方、非基盤産業は地域外から獲得した資金を高い地域乗数効果を発揮させて財貨・役務を地域内で循環消費し、その資金量総和を拡大させ、雇用を増大させる。

地方創生の目的は、地方での安定した雇用を創出・維持し、地域住民の所得を向上させて地域の消費を促進することにある。良質な雇用を創出できれば、都市部への社会減を抑制して、1人当たりの付加価値額（労働生産性）を高めて就業所得を向上できる可能性がある。そうすれば、地域経済は活性化し、地方人口の社会減や自然減を抑制することが可能となり、地方創生を実現できると考えられる。

* 正会員 大阪経済大学経営学部 教授

本稿では、価値総合研究所が 2015 年に環境省と連携し開発した、地域経済循環分析プログラムを使用する。これは、土居他（2019）に解説されているように、自治体別の産業連関表と地域経済計算を中心とした分析により、地域内の資金の流れを俯瞰的に把握し、主力産業や生産波及効果などの産業の実態、地域外との関係性を可視化する分析手法である。

まず、国勢調査から兵庫県 41 市町の人口動態を明らかにする。次に、人口戦略会議による 9 つの都市区分での評価を分析する。その後、地域経済循環分析を用いて全産業・各産業別の 1 人当たり付加価値額（労働生産性）、投資の流入出状況を明らかにする。

3. 兵庫県 41 市町の人口動態と地域経済課題

3.1 総人口数上位と下位の市町の現状

表 1 総人口 20 万人以上都市の人口動態

順位	単位：人	2000年			2020年			総人口増減率	生産年齢人口減少率
		総人口	生産年齢人口	構成比	総人口	生産年齢人口	構成比		
1	神戸市	1,493,398	1,033,013	69.2%	1,525,152	905,515	59.4%	2.1%	-12.3%
2	姫路市	534,969	363,235	67.9%	530,495	316,502	59.7%	-0.8%	-12.9%
3	西宮市	438,105	310,132	70.8%	485,587	301,238	62.0%	10.8%	-2.9%
4	尼崎市	466,187	326,950	70.1%	459,593	273,961	59.6%	-1.4%	-16.2%
5	明石市	293,117	203,733	69.5%	303,601	180,779	59.5%	3.6%	-11.3%
6	加古川市	266,170	186,220	70.0%	260,878	154,490	59.2%	-2.0%	-17.0%
7	宝塚市	213,037	148,177	69.6%	226,432	132,082	58.3%	6.3%	-10.9%
	小計	3,704,983	2,571,460	69.4%	3,791,738	2,264,567	59.7%	2.3%	-11.9%
	兵庫県	5,550,574	3,776,483	68.0%	5,465,002	3,197,092	58.5%	-1.5%	-15.3%
	全国	126,925,843	86,219,631	67.9%	126,146,099	75,087,865	59.5%	-0.6%	-12.9%

出所）総務省国勢調査に基づき、著者作成。

表 2 総人口 2 万人未満都市の人口動態

順位	単位：人	2000年			2020年			総人口減少率	生産年齢人口減少率
		総人口	生産年齢人口	構成比	総人口	生産年齢人口	構成比		
34	福嶋町	19,582	12,706	64.9%	19,377	11,286	58.2%	-1.0%	-11.2%
35	多可町	25,331	15,417	60.9%	19,261	9,905	51.4%	-24.0%	-35.8%
36	香美町	23,271	13,299	57.1%	16,064	7,873	49.0%	-31.0%	-40.8%
37	佐用町	22,337	12,631	56.5%	15,863	7,540	47.5%	-29.0%	-40.3%
38	上郡町	18,419	11,675	63.4%	13,879	7,047	50.8%	-24.6%	-39.6%
39	新温泉町	18,601	10,662	57.3%	13,318	6,453	48.5%	-28.4%	-39.5%
40	市川町	14,812	9,322	62.9%	11,231	5,908	52.6%	-24.2%	-36.6%
41	神河町	13,500	8,005	59.3%	10,616	5,409	51.0%	-21.4%	-32.4%
	小計	155,853	93,717	60.1%	119,609	61,421	51.4%	-23.3%	-34.5%

出所）表 1 と同じ。

過去の人口動態に着目し、平成の大合併が開始された頃の 2000 年と 20 年後の総人口・生産年齢人口の動態を分析し、兵庫県 41 市町の課題を探索する。

表 1 の通り、2020 年の総人口 20 万人以上（中核市要件）の 7 都市を抽出した。これらの総人口

は、兵庫県の 69.4%を占めている。そして、兵庫県の総人口 1 位の神戸市は政令指定都市で、兵庫県の 27.9%を占めている。総人口の動態は、全国は▲0.6%・兵庫県は▲1.5%・表 1 の 7 都市計は+2.3%となった。一方、生産年齢人口では、全国は▲12.9%・兵庫県は▲15.3%・7 都市計は▲11.9%と、7 都市計はやや減少幅が抑制されている。

総人口が増加したのは、表 1 では西宮市+10.8%・宝塚市+6.3%・明石市+3.6%・神戸市+2.1%であった。7 都市外では芦屋市+12.0%・太子町+4.7%・猪名川町+2.0%となった。そして、表 1 から西宮市が尼崎市を逆転したことが分かる。生産年齢人口では、加古川市▲17.0%・尼崎市▲16.2%・姫路市▲12.9%・神戸市▲12.3%となった。なお、兵庫県では生産年齢人口が増加した市町はなかった。

特に、西宮市の総人口は 10.8%増加し、生産年齢人口は 2.9%減少と抑制されている。西宮市は、阪急神戸線・阪急今津線・JR 神戸線・阪神電車など交通網が充実し、梅田や三宮まで約 15 分と近く、西日本最大級の商業施設である阪急西宮ガーデンズが立地し、9 つの大学をはじめ、学校・図書館などの多くの教育関連施設がある。また、文化・スポーツ・レクリエーション施設が充実し、住みたい自治体ランキング関西版 1 位（大東建託）となっていて、総人口の増加と生産年齢人口の減少抑制が見られる。

表 2 の総人口 2 万人未満の 8 都市計では、総人口は▲23.3%（上位 7 都市計差異▲25.6 ポイント）、生産年齢人口も▲34.5%（同▲22.6 ポイント）となり、表 1 の 7 都市より大きく減少した。福嶋（2025）の大阪府 43 市町村と同様に、小規模都市の総人口・生産年齢人口の減少割合は、大規模都市より大きいことが確認された。

総人口では、香美町は▲31.0%、佐用町は▲29.0%、新温泉町は▲28.4%と大きく減少した。また、生産年齢人口では、香美町は▲40.8%、佐用町は▲40.3%、上郡町は▲39.6%、新温泉町は▲39.5%と、総人口以上に大きく減少した。新温泉町・香美町は鳥取県、佐用町・上郡町は岡山県に

隣接している。また、福崎町・市川町・神河町は姫路市北部に位置している。

このうち、福崎町は20年間で総人口が▲1.0%、生産年齢人口が▲11.2%と抑制されている。そして、総人口で兵庫県2位の姫路市（530千人）に隣接し、JR播但線で約1時間、自動車で約30分の距離に位置し、事業規模の大きい製造業が立地し、製造業就業者が多い。さらに、全産業労働生産性は1490万円・従業地就業所得は708万円で、共に兵庫県2位の高い数値である。そして、2023年の合計特殊出生率は1.59と、全国1.20・兵庫県1.29と比較して高い水準にある。その結果、2018～2022年の5年間の社会減は1.13%に抑制されている。このことから、人口減少抑制には労働生産性の高い製造業の地方経済への貢献が大きいと推測できる。

3.2 兵庫県41市町別の労働生産性

表3 1人当たり付加価値額上位5都市

順位	単位：万円	2018年就業所得		1人当たり付加価値額/労働生産性			
		従業地	居住地	第1次	第2次	第3次	全産業
1	相生市	774	668	116	1392	1637	1523
2	福崎町	708	577	186	2237	873	1490
3	播磨町	641	577	149	2133	949	1489
4	赤穂市	574	582	598	1907	1116	1355
5	高砂市	597	554	156	1547	1043	1270
	兵庫県	519	525	245	1138	933	974
	全国	519	522	285	1011	972	957

出所）環境省2018年度版Ver.6の地域経済循環分析プログラムにより、41市町村別に算出し、著者作成。

表4 1人当たり付加価値額下位5都市

順位	単位：万円	2018年就業所得		1人当たり付加価値額/労働生産性			
		従業地	居住地	第1次	第2次	第3次	全産業
37	多可町	382	430	327	576	876	720
38	淡路市	356	390	251	724	838	717
39	新温泉町	328	351	343	506	895	710
40	南あわじ市	338	356	204	671	905	677
41	佐用町	407	445	261	829	643	661

出所）表3と同じ。

就業所得の源泉となる1人当たりの付加価値額（労働生産性）は、どのような水準なのか。本稿では、前述した地域経済循環分析プログラムに基づき、兵庫県41市町別のデータを分析した。

表3は、全産業の労働生産性の上位5都市を金

額順に抽出し、その産業別内訳と就業所得を示した。労働生産性上位5都市は、第2次・3次産業の労働生産性と就業所得が高い。また、播磨町・高砂市は全国的にも製造品出荷額が高い播磨臨海工業地帯に含まれている。

そして、表3の欄外となったが、全産業労働生産性6位の稲美町・同7位の明石市・同14位の姫路市・同17位の太子町・同24位の加古川市は、ともに播磨臨海工業地帯に含まれており、いずれも高い労働生産性となっている。

そして、従業地就業所得と全産業労働生産性の相関係数は0.9369、居住地就業所得と全産業労働生産性の相関係数は0.8379となり、強い正の相関が認められる。これは労働分配率がある一定幅に留まるとすれば、売上総利益から人件費が支払われるという会計上の理屈と整合性がある。

表4は、全産業労働生産性の下位5都市を金額順に抽出し、その産業別内訳と就業所得を示した。労働生産性下位5都市は、上位5都市と比較して第2次・3次産業の労働生産性と就業所得が低い。一方、新温泉町・多可町の第1次産業は全国平均・兵庫県平均を上回る労働生産性であるが、全産業で見れば第1次産業の労働生産性自体が低いため、従業地・居住地就業所得が低くなっている。

（ ）内は、人口戦略会議による2050年までの若年女性人口の減少割合である。労働生産性が低い新温泉町（▲71.8%）・佐用町（▲70.8%）・多可町（▲70.8%）は、移動仮定（社会減）での消滅可能性都市に区分されている。また、南あわじ市（▲49.4%）・淡路市（▲39.1%）も社会減少率が高く、若年女性の社会減少を留める良質な雇用創出が必要である。

3.3 兵庫県41市町別の投資流入と流出

表5 投資流入比率上位5都市

順位	単位：億円	地域内投資額A	地域企業等投資額B	流入額C=A-B	流入比率D(%)=C/A	同規模都市流入比率E	同規模比較F(%)=C-E
1	相生市	379	235	144	38.0%	1.9%	36.1%
2	福崎町	403	269	134	33.3%	1.9%	31.4%
3	播磨町	405	272	133	32.8%	1.9%	30.9%
4	赤穂市	590	418	172	29.2%	1.9%	27.3%
5	稲美町	340	278	62	18.2%	1.9%	16.3%

出所）表3と同じ。

表 6 投資流入比率下位 5 都市

順位	単位：億円	地域内 投資額A	地域企業等 投資額B	流入額 C=A-B	流入比率 D(%)= C/A	同規模都市 流入比率E	同規模比較 F(%)=C-E
37	豊岡市	566	733	-167	-29.5%	0.3%	-29.8%
38	宍粟市	232	302	-70	-30.2%	1.9%	-32.1%
39	多可町	116	151	-35	-30.2%	1.9%	-32.1%
40	南あわじ市	309	430	-121	-39.2%	1.9%	-41.1%
41	佐用町	89	129	-40	-44.9%	1.9%	-46.8%

出所) 表 3 と同じ。D のマイナスは流出を意味する。

表 5・表 6 では、地域外から資金を獲得する主に第 2 次産業の資金の流れを把握するため、投資流入と流出を明らかにする。地域内投資額 A は、各市町内で実施される投資額である。地域企業等投資額 B は、当該市町に所在する投資主体の投資額である。投資流入額 $C=A-B$ は、当該市町以外からの投資流入額であり、流入比率 D は C を A で除した割合である。そして、流入比率 D の大きい順に並べている。なお、E は三大都市圏の総人口同規模都市の流入比率であり、F はその同規模都市との差異を示している。

表 5 の通り投資流入が高い順に、1 位相生市・2 位福崎町・3 位播磨町・4 位赤穂市・5 位稲美町となった。そして、表 3 の労働生産性と表 5 の投資流入 5 都市と比較すると、上位 4 位までは同一市町が同一順位であった。これらから、労働生産性の高い市町は投資を流入させる能力が高く、さらに一層の投資を流入させて労働生産性を高める正のスパイラル構造となり、その結果就業所得が向上する。

逆に、表 4 の労働生産性下位 5 市町と、表 6 の投資流入下位 5 市町（投資流出）を比較すると、多可町、南あわじ市、佐用町が共に入っている。これは、労働生産性の低い市町は投資を他地域へ流出させてしまい、当該市町の労働生産性を低下させ、さらに負のスパイラル構造に陥り、就業所得は低下する。これらの事実から、第 2 次産業を中心に地域外から投資流入を図り、労働生産性を高めて就業所得を高める地域の基盤産業の育成が、地方創生の鍵となる。

4. おわりに

2000 年から 20 年間で、兵庫県の総人口は▲1.5%・生産年齢人口は▲15.3%となった。しかし、総人口 2 万人未満都市では、総人口は▲23.3%・生産年齢人口は▲34.5%となった。特に、兵庫県北部・西部の小規模都市では投資流出が大きく、労働生産性・就業所得は低く、若年女性の社会減対策が喫緊の課題であった。

生産年齢人口が今後も減少して行く中で、地方創生を実現するには、産業構造の変革や人的資本の蓄積などを通じて労働生産性を高めて、就業所得を向上させることが不可欠である。そのため、地域外から資金を獲得できる産業を誘致・育成し、獲得した資金を地域内循環させる経済構造を確立することが必要である。具体的には、地域外から資金を獲得できる付加価値獲得力の高い製造業（基盤産業）と、地域内の地産地消によって循環させる資金量の総和を向上させるサービス業（非基盤産業）が必要である。

このような地域経済循環構造を確立できれば、労働生産性を高め、就業所得を向上させ、良質な雇用を求めて人口移動する社会減を抑制できる。また、自然減を抑制することにも繋がる。

——— 参考文献 ———

- 齋藤忠光 (2014) 「日本の国郡区域と新しい広域行政区画の展望」『地図』52 巻 2 号
人口戦略会議 (2024) 「令和 6 年地方自治体持続可能性分析レポート」
総務省 (2014) 「都道府県別合併の進捗状況」
土居英二・浅利一郎・中野親徳 (2019) 『はじめよう 地域産業連関分析[改訂版]基礎編』日本評論社
中村良平 (2019) 『まちづくり構造改革Ⅱ』日本加除出版
日本旅館協会 (2024) 「営業状況等統計調査」
兵庫県 (2023) 「兵庫県の人口の動き」
兵庫県 (2024) 「市町村別観光消費額（名目）時系列」
福嶋幸太郎 (2016) 「地方創生に資する地域経済活性化方策」『関西ベンチャー学会誌』8 号, pp.40-51.
福嶋幸太郎 (2024) 「北近畿の経済分析と地方創生の考察」『関西ベンチャー学会誌』16 号, pp.1-12.
福嶋幸太郎 (2025) 「大阪府の地域経済循環分析と地方創生」『日本地域政策研究』34 号, pp.90-99.
福崎町 (2023) 「福崎町人口ビジョン（改訂版）」
富士正博 (2004) 「地域内乗数効果概念の可能性」『生協総合研究所』343 号, pp.205-225.