

卒業論文

メロディーから ギターのタブ譜を作成する リアルタイムシステム

Data Fusion through Web-GIS Visualization
Using Open Data for Evidence-Based Policy Making

富山県立大学 工学部 情報システム工学科

2020043 山内拓海

指導教員 Antonio Oliveria Nzinga Rene 教授

提出年月: 2023年2月

目次

図一覧	ii
表一覧	iii
記号一覧	iv
第1章 はじめに	1
§ 1.1 本研究の背景	1
§ 1.2 本研究の目的	1
§ 1.3 本論文の概要	2
第2章 従来の研究	3
§ 2.1 メロディーを表現する既存のシステム	3
§ 2.2 ギターに関する専門知識	6
§ 2.3 リアルタイムでのタブ譜作成の必要性	9
第3章 データ間の因果性と改善値の導出	12
§ 3.1 2つの楽譜の数値化による比較	12
§ 3.2 メロディーから音階のリアルタイム抽出	15
§ 3.3 コードの違いによる印象の変化	18
第4章 提案手法	21
§ 4.1 歌 (楽譜 A 付き) から楽譜作成 (B)	21
§ 4.2 楽譜からタブ譜作成のプログラム	24
§ 4.3 楽曲からタブ譜作成システムの開発	27
第5章 数値実験並びに考察	31
§ 5.1 数値実験の概要	31
§ 5.2 実験結果と考察	33
第6章 おわりに	35
謝辞	36
参考文献	37

図一覧

2.1	EBPM のロジックモデル [7]	4
2.2	GIS における 4 つの特徴	7
2.3	GIS を用いることの 3 つの利点	7
2.4	ポテンシャルマップの重ね合わせ	10
2.5	身体地図情報システムの構成	10
3.1	因果グラフのパス図	14
3.2	誤差同士の因果関係	14
3.3	適用例における CCR モデルのグラフ [17]	17
3.4	Folium による Web-GIS 実装例	20
4.1	csv のフォーマット	23
4.2	システムのフロントページ	23
4.3	因果探索の結果とアウトプットの例	24
4.4	DEA 部分のフロー	25
4.5	DEA のアウトプットの例	27
4.6	EBPM-GIS の実装	29
4.7	提案システム	29
5.1	射水市の推計人口 [23]	32
5.2	年少・老年人口割合推移 [23]	32
5.3	入力データと出力データ	34

表一覧

3.1	各病院におけるパラメータ	17
3.2	代表的な GIS ソフトウェア	18
4.1	地理情報を持たない数値データ	22
4.2	地理情報を持つ数値データ	22
4.3	位置データ	22
4.4	各都道府県の DMU 内訳	25
5.1	「年少人口 [割合]」に対する Direct-LiNGAM の結果	33
5.2	DEA の入力・出力一覧	34
5.3	元データと改善案の比較	34
5.4	参照の市区町村とウェイト	34

記号一覧

以下に本論文において用いられる用語と記号の対応表を示す.

用語	記号
LiNGAM における i 番目の観測変数	x_i
LiNGAM における j 番目の観測変数から i 番目の観測変数へのパス係数	b_{ij}
LiNGAM における i 番目の観測変数に対する誤差 (非観測変数)	e_i
主問題における各入力に対する重み	v^T
主問題における各出力に対する重み	u^T
主問題における対象 DMU の評価値	z
CCR モデルにおける DMU _o の入力	x_o
CCR モデルにおける DMU _o の出力	y_o
CCR モデルにおける DMU の入力	X
CCR モデルにおける DMU の出力	Y
双対問題における対象 DMU の評価値	w
入力指向モデルにおける対象 DMU の評価値	θ
入力指向モデルにおける各 DMU に対する重み	λ
出力指向モデルにおける対象 DMU の評価値	η
出力指向モデルにおける各 DMU に対する重み	μ
入力指向モデルにおける対象 DMU の i 番目の入力に対する改善案	\hat{x}_i
入力指向モデルにおける参照集合内の k 番目の DMU の i 番目の入力	x_{ik}
入力指向モデルにおける参照集合内の k 番目の DMU に対する重み	λ
出力指向モデルにおける対象 DMU の j 番目の出力に対する改善案	\hat{y}_j
出力指向モデルにおける参照集合内の k 番目の DMU の j 番目の出力	y_j
出力指向モデルにおける参照集合内の k 番目の DMU に対する重み	μ
提案手法における d 番目の市区町村の i 番目の入力	x_{id}
提案手法における d 番目の市区町村の i 番目の出力	y_{id}
提案手法における d 番目の市区町村に対する重み	λ_d
<i>robust Z-score</i> における正規化後の値	ι
<i>robust Z-score</i> を用いて正規化するデータ集合内の値	x
<i>robust Z-score</i> を用いて正規化するデータ集合	X
<i>robust Z-score</i> を用いて正規化するデータ集合の中央値	$median(x)$
<i>robust Z-score</i> を用いて正規化するデータ集合の正規四分位範囲	$NIQR$
0~1 変換の結果の値	ι'
0~1 変換を行うデータ集合内の値の最大値	$max \iota $

はじめに

§ 1.1 本研究の背景

ギターは音楽の世界において広く愛されており、その多彩な音色や奏法によって様々な音楽ジャンルで重要な役割を果たしています。しかし、ギターは弦楽器として比較的入門しやすい一方で、奥深い演奏技術や和音の構造、リズムの複雑さなども併せ持っています。これにより、初めてギターに触れるユーザーが演奏を始める際には、演奏方法や音楽理論に対する理解が必要とされ、学習のハードルが高くなる傾向があります。

一方で、直感的に楽器を演奏できるシステムがあれば、ユーザーは初めてでも容易にギターを演奏し、音楽を奏でる喜びを感じることができるようでしょう。このようなシステムの開発は、音楽の普及や楽器演奏の敷居を下げる点で重要であり、多くの人々が音楽を楽しむきっかけとなる可能性があります。

また、近年の技術の進化により、音楽教育や音楽体験の分野での新たなアプローチが可能となっています。コンピュータやデジタル技術を活用したインタラクティブなシステムやアプリケーションを開発することで、従来の学習方法に比べて効果的に演奏技術や音楽理解を身につけられる可能性があります。このような技術を活用し、ギターを直感的に演奏できるシステムを提案することで、多くの人々にとって音楽とギター演奏の魅力を身近に感じられる環境を創出することが目指されています。

総括すると、本研究はギターに関心を持つがほぼ未経験のユーザーを対象に、ギターを直感的に演奏できるシステムを提案することで、演奏の楽しさを広め、音楽体験の新たな可能性を探求するものと言えます。

§ 1.2 本研究の目的

多くの人々が楽器演奏を始める際に抱くハードルを低くすることです。ギターは美しい音色と幅広い音楽ジャンルでの使用が可能であり、多くの音楽愛好者にとって魅力的な楽器です。しかし、ギターは奏法やコード、リズムなどの複雑さから入門者にとっては演奏が難しいと感じられることがあります。そこで、直感的にギターを演奏できるシステムを提案することで、演奏へのアプローチをより手軽にし、初心者でも楽しさを感じながらギターを演奏できる環境を整備することを目指します。

FFT (Fast Fourier Transform) は信号処理や音響分析において広く利用されるアルゴリズムであり、波形データを周波数成分に変換する際に有用です。ギターの音を直感的に理解

し演奏するためには、演奏中の音の周波数成分や強度を把握することが重要です。FFT を利用することで、ギターの演奏音を周波数スペクトルに変換し、その情報を利用してユーザーが演奏する際のフィードバックを提供することが可能になります。

具体的には、ギターの弦をブラック（弾く）した際の音をマイクで拾い、FFT を用いてその音の周波数スペクトルを計算します。この周波数スペクトルから、どの弦が弾かれたかやその弦の周波数成分を解析し、ユーザーが意図する音を判別する手助けを行います。また、演奏中の音の周波数成分や強度の変化をリアルタイムで分析することで、演奏の正確性や音の質に関するフィードバックを提供することが可能となります。

§ 1.3 本論文の概要

本論文は次のように構成される。

第1章 本研究の背景と目的について説明する。音楽分野における即興演奏や耳コピの重要性について述べる。目的は背景で挙げた課題に対して、リアルタイムでの音高推定を用いて演奏支援システムの提案について述べる。

第2章 音楽分野における従来研究についてまとめ、リアルタイムでの tab 譜のについて述べる。また、ギターについての名称や専門知識についての説明を行う。

第3章 本研究の提案手法に用いる音楽理論の一部について解説する。また、提案手法のシステム部分に用いる音階の抽出方法について解説する。

第4章 提案手法中のシステムのプログラムとそれらに用いるデータベースの作成方法を理論の区切りごとに説明する。その後、それらのプログラム間における関係性についてデータの送受信などを示しながら説明することで本研究の提案手法全体の流れについて述べる。

第5章 地方自治体における政策決定について仮想的なケースを1つ取り上げてその問題に対して本研究の提案手法を適用することで提案手法における各分析の結果を示し、そこから得られる知見について考察することで本研究の有効性を示す。

第6章 本論文における前章までの内容をまとめつつ、本研究で実現できたことと今後の展望について述べる。

従来の研究

§ 2.1 メロディーを表現する既存のシステム

音楽の生成と合成

Python プログラムを使用して音楽を生成し、合成することができます。音声処理ライブラリ（例: librosa）を活用して波形データを操作し、異なる楽器の音色やエフェクトを再現することができます。また、音階やコード進行の理論をプログラムに組み込んで、自動的にメロディやハーモニーを生成することも可能です。

MIDI 制御

Python は MIDI（Musical Instrument Digital Interface）データを操作するためのライブラリを提供しています。MIDI データは楽器や楽曲の演奏情報を表すため、Python を使用して MIDI ファイルを読み込んだり、作成したりすることで、楽曲の演奏や編集を行うことができます。

音楽解析と可視化

Python を使用して音楽データを解析し、波形、スペクトログラム、テンポ、音高などの情報を可視化することができます。これによって、楽曲の構造や特徴を理解し、音楽理論やアレンジの向上に役立てることが可能です。

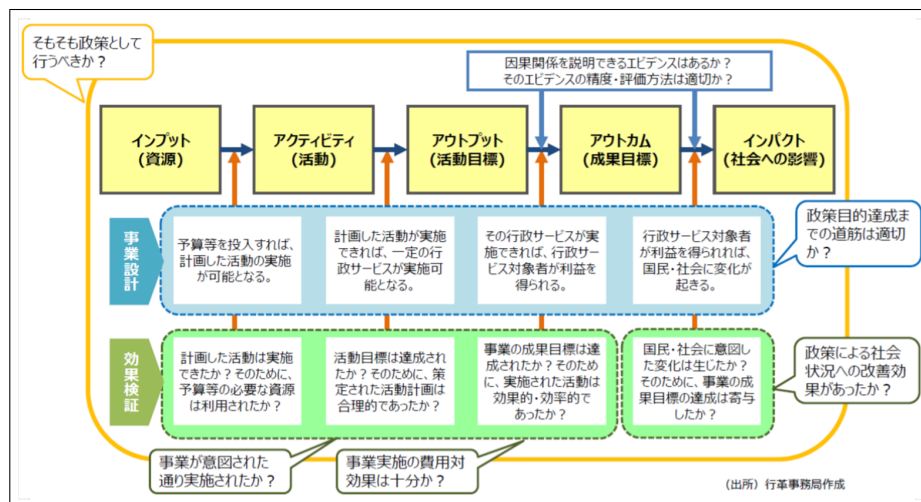
音楽ゲームやアプリ開発

Python を用いて音楽関連のゲームやアプリケーションを開発することができます。例えば、リズムゲームや音楽合成アプリなどをプログラミングすることで、ユーザーが音楽を楽しむための新しい体験を提供することができます。

機械学習と音楽

Python は機械学習やディープラーニングの分野でも活用されており、音楽分析や生成にも応用されています。音楽のジャンル分類やメロディ生成、音楽推薦システムの開発など、機械学習を用いた音楽関連の研究やプロジェクトが行われています。

音楽情報検索とデジタル音楽ワークステーション



音楽のメロディー分析は、音楽理論や楽曲制作、音楽情報検索など、音楽研究のさまざまな分野で重要な役割を果たしている。これに関連して、多くの既存のシステムが開発および研究されている。既存のシステムの一例として、音楽情報検索分野におけるシステムが挙げられる。これらのシステムは、楽曲のメロディーラインを自動的に抽出し、音楽データベース内で楽曲を検索したり、ジャンルを分類したりするのに使用されている。

さらに、音楽制作の分野では、デジタル音楽ワークステーションソフトウェアや楽譜ソフトウェアがメロディー分析のために使用されている。これらのシステムは楽曲制作プロセスにおいてメロディーの作成、編集、アレンジに必要な機能を提供し、ミュージシャンや作曲家に創造的なツールを提供している。また、音楽教育の分野でもメロディー分析が重要である [2]。

最後に、音楽制作プロセスにおいてメロディー分析は、アーティストやプロデューサーにとっても重要である。メロディーラインの解析は、楽曲の構造や楽器アレンジに関する洞察を提供し、音楽の創造的なプロセスを向上させる。

メロディーを分析する既存のシステムは、音楽研究、制作、教育の各分野で多くの利点をもたらし、これらのシステムの進化は、音楽の理解や制作プロセスの向上に寄与しており、今後の音楽技術の発展に期待が寄せられている。

ICT を用いた EBPM

各自治体における EBPM の推進に向けて、内閣府では各部局によって様々な取り組みがなされている。ここでは、EBPM の推進を目的にしたデータの共有や分析に ICT を活用した事例をいくつか取り上げ、管轄する部局やシステムの目的、システムの概要等を解説する [8]。

内閣府エビデンスシステム (e-CSTI)

e-CSTI とは、科学技術・イノベーション推進事務局が提供するシステムで、特に大学等の研究機関における「研究力」、「教育力」、「資金獲得力」を分析することに特化したものである。

e-CSTIでは、研究機関におけるデータを収集し、インプットとアウトプットに分類することでそれらの関係性を分析・「見える化」する各種機能を提供する。エビデンスに基づいた研究機関の運営を支援するという目的のもと、2020年3月から運用が開始している。

地域経済分析システム（RESAS）

RESASとは、地域創生の実現に向けて、内閣府地方創生推進室ビッグデータチーム、内閣官房まち・ひと・しごと創生本部事務局と経済産業省地域経済産業調査室が提供しているWEBアプリケーションである。日本全国の各自治体区分における人口、産業、観光、まちづくり、医療・福祉、財政など幅広い分野のビッグデータを官民より集約し、表、グラフ、マップなどのフォーマットを用いてデータを可視化するシステムとして提供されている。

また、データを可視化するだけでなく、集積されたデータをもとに各テーマに沿った分析を行うことや、APIを利用することによってシステムにデータを直接取り込むことも可能である。これらの機能は地方自治体をはじめ、その他地域の活性化に関心を持つ人々に対して一般に公開されており、地方自治体における地域課題の抽出、地域版総合戦略の立案といった活用法に加えて、地方創生に関心のある民間の団体・個人による活用も期待される。

V-RESAS

V-RESASとは、前述のRESASを提供する内閣府地方創生推進室と内閣官房まち・ひと・しごと創生本部事務局が提供しているWEBアプリケーションであるが、2020年頃から現在まで世界各地で爆発的な感染拡大を引き起こしているCOVID-19と関連する情報のみに焦点を当てているという点で前述のRESASとは異なる。

V-RESASでは、各自治体区分における人流、消費、飲食、宿泊、イベント、雇用などの情報をグラフ等を用いてリアルタイムに発信し、前年比、週平均など過去のデータとの比較をフィードバックすることによって、COVID-19が地域経済に与える影響を可視化することで地方創生の様々な取組を情報面から支援することを目的としている。

内閣府経済社会総合研究所（Economic and Social Research Institute: ESRI）

経済社会総合研究所は2001年の省庁再編に伴って設立され、それ以来、内閣府の活動における理論と政策の橋渡しを行うためのシンクタンクとして機能している。具体的には、経済政策・社会政策に関する理論の研究を行うことに加え、政策研究を担う人材の育成・研修に取り組むことで現状のみならず将来的な観点でも政府に貢献している。また、国民経済計算、景気動向指数や機械受注などの統計使用を作成・公表するなどの役割も担っている。

ESRIのホームページでは、主に経済に関するデータに焦点を当てて統計データ、研究結果やそれらをまとめた論文などが公開されており、経済・財政分野におけるより詳細なデータ収集・分析に活用されることが期待される。

以上の事例に代表されるように、昨今、内閣府によってEBPMが積極的に推進されている。そのため、EBPMは研究機関においても積極的に扱われ、議論されるべき対象である

と考える。また、その具体的な取り組みの多くに ICT が活用されていることから、EBPM の効率的な実施には、ICT の活用が必要不可欠であり、情報工学との親和性は高いものと思われる。これらのことから、本研究は情報技術を用いた EBPM の支援を目的とする。

§ 2.2 ギターに関する専門知識

ギターに関する専門知識において、弦とフレットについての基本的な理解は非常に重要です。ギターを演奏するためには、これらの要素について正確に理解しておく必要があります。

ギターは、その特有の音色と多彩な奏法で知られる楽器です。ギターの演奏を始める際に最初に覚えるべき重要な要素の一つが、弦（げん）とフレット（ふれっと）の呼び方です。これらの用語を理解することは、ギター演奏の基礎知識として不可欠です。

まず、ギターの弦について説明しましょう。ギターは通常、6本の弦を持っています。これらの弦は、ギターのボディからネック（指板を含む部分）に伸び、ヘッド（ギターの先端）に取り付けられています。一番細い弦から順に1弦、2弦、3弦、4弦、5弦、6弦と呼ばれます。1弦は通常、高音域の音を担当し、6弦は低音域の音を奏でます。これらの弦は異なる太さと音程を持っており、演奏時にそれぞれ異なる音を出します。

次に、フレットについて説明しましょう。フレットは、ギターのネック（指板）に打ち込まれている金属のバーで、弦を押さえて異なる音を出すために使用します。フレットは、ヘッド（ギターの先端）に近いものから順に1フレット、2フレット、3フレット、と数えられます。この数え方により、どのフレットを押さえるかを簡単に指定できます。例えば、「1フレットを押さえる」という指示は、1番近いフレットを押さえることを意味します。

これらの基本的な用語を理解すると、ギターの演奏においてコードや音符を指示するための「TAB譜」も理解しやすくなります。TAB譜は、6本の弦の上にフレット数を書いた図で表現されます。例えば、TAB譜で「6弦3フレットと5弦5フレットを押さえる」という指示を見た場合、これは6番目の弦を3フレット目で押さえ、5番目の弦を5フレット目で押さえることを意味します。これにより、特定のコードやメロディを演奏する際にどのフレットを押さえ、どの弦を鳴らすかが明確に示されます。

ギターはその多彩な奏法と音楽の表現力において魅力的な楽器であり、弦とフレットの理解はその才能を開花させるために欠かせない要素です。ギターを学び始めると、これらの基本的な概念が演奏技術の向上に貢献し、新たな音楽の世界を探求する手助けとなることでしょう。

GISを用いることの3つの利点

- 業務効率化によるコスト削減

GISは日常の業務を最適化するために幅広く利用されている。紙地図からGISを利用したデジタルな地図へ移行することで、現地調査や設備管理、統計分析などを行う際の物質的な制約が減少し、より簡単かつ効率的な作業の実現が可能になる。これにより作業時間や人員など業務にかかるコストを大幅に削減することができるという利点を持つ。

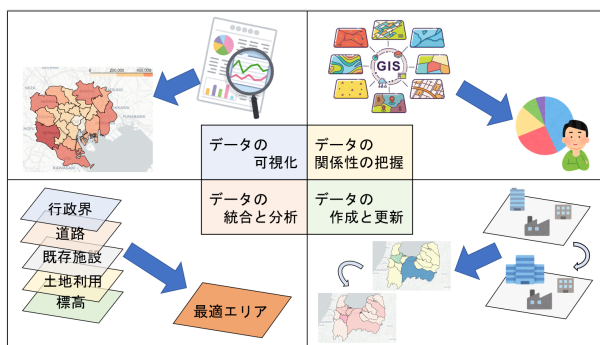


図 2.2: GIS における 4 つの特徴

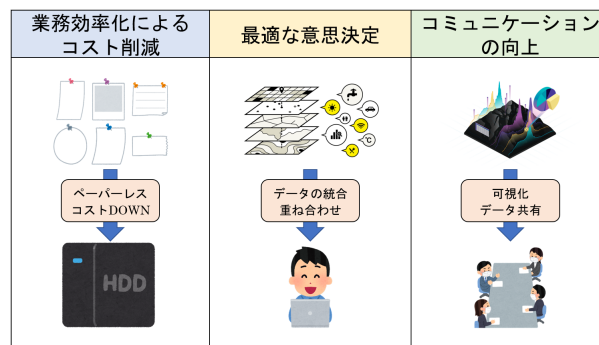


図 2.3: GIS を用いることの 3 つの利点

- 最適な意思決定

組織における活動において、場所に関する意思決定を正しく行うことは成功のための重要な要素の 1 つといえる。場所に関する決定に視覚を用いることができるという利点を持つ GIS は店舗の出店場所や配送ルート、避難地域・経路、天然資源の採取地点など多様な分野で最適な場所を策定するために使用されている。

- コミュニケーションの向上

GIS を使用することでさまざまな表現方法を用いて位置情報を地図上に可視化することができる。可視化された位置情報は状況を効果的に伝え、的確な理解を促すことができ、グループや組織間、社会におけるコミュニケーションの向上を図ることが可能になるという利点を持つ。

本節では、以上のような特徴・利点を持つ GIS によってデータが分析・加工されることによって、政策における意思決定の支援に用いられた事例 [10] を挙げることで、政策決定に GIS を利用することの有効性を提示するとともに、本研究における GIS の位置づけを示す。

東日本大震災における福島県相馬市

太平洋沿岸部に位置する福島県相馬市は、平成 23 年に発生した東日本大震災によって甚大な被害を受けた地区の一つである。相馬市では、震災発生前の平成 21 年より情報政策課を中心に GIS の利用環境が整備されており、震災発生初期から現在も続く復興活動にわたって GIS が活用されている。相馬市が震災発生から被災の各段階においてどのような用途について、いかにして GIS を活用してきたかを時系列順に解説する [11]。

被災初期

GIS を利用して航空写真判読による家屋被害の状況把握や人的被害の全容把握のための全住民位置情報の作成が行われ、罹災証明発行業務の円滑化など業務の効率化を可能にした。大規模震災による被災という非常時において人手不足の解消に役立てられた。

復興活動

地盤高情報を用いて津波被害の特徴を明確化したうえで、津波のリスクを織り込んだ今後の土地利用に関する資料が作成された。また、放射線量マップを作成し、当該地図や全住民位置情報、土地利用地図、地形図等と重ね合わせることによって、放射線対策、及び、今後予見される被害状況の広がり対策に関する意思決定に用いられた。

相馬市では、以上に挙げたように震災という非常事態における意思決定に GIS が有効活用された。また、これらの活動に際して、使用された GIS のメーカーから資料や技術力の提供、新潟大学の学生ボランティアから人員の供給が行われ、実際の運用や意思決定を相馬市が行ったことから、産学官の連携による活動の例でもある。

奈良県橿原市の庁内における情報共有

橿原市で用いられている行政基本 GIS は、行政基本図データを共通基盤にして各課で個別に運用している都市計画、道路管理、下水道管理、上水道管理などの業務 GIS の中から全庁における利用頻度の高い情報を共用主題データとして、庁内すべての職員が参照できるシステムで、各課の垣根を超えた情報共有を可能にしている。

また、共用主題データの中から一般に公開する必要があると考えられるデータに関しては国土地理院が提供する電子国土 Web システムを用いて大きな手を加えることなくスムーズに一般公開がなされている。一般に公開されるデータ例として、選挙期間中には投票所 MAP などが随時公開されている。

各課における GIS の導入をバックアップするために共有データは庁内で共通した製品仕様書を定めることで作成・運用方法の統一が図られている。全庁において統一したフォーマットで GIS を運用することで庁内の情報流通の促進、行政事務の効率化・高度化、市民サービスの向上などの利点も期待することができる。

各課における GIS に対する知識の醸成と実際の利用によって生まれる好循環の確立により更新される基盤地図情報を使って、これまで以上に行政事務の効率化・高度化や住民サービスの向上を図ることが可能となる。

また、市域・県域をまたいだ広範囲の多くの機関で情報共有が必要となる防災分野においては橿原市のみに限らず全国を均質に扱う基盤地図情報が共通基盤として活用されることと望まれる。

新潟県魚沼市の業務効率化とコスト削減

魚沼市には平成 16 年に 6 つの町村が合併することによって誕生したという経緯があり、合併前には GIS を導入している町村と紙図面で管理する町村がどちらも存在するという状況だった。そのため、合併を機に県の交付金を活用するなどして全市域に対応した GIS を導入することでデータの電子化がなされた。

庁内共有のデータとして、市保有の地図情報レベル 2500 の地形図をベースに道路縁を地図情報レベル 1000 で作成したハイブリッド地形図があり、都市計画分野や道路管理等の庁内業務には、この大縮尺地形図データを用いた管理が用いられている。

一方、庁内業務では施設の配置情報などで広域の管理を行う業務があり、従来は縮尺 1/25,000 の紙の地形図を使って管理がなされてきた。これに対して、合併を契機に導入することになった庁内共用 GIS でも広域での施設管理が行えるようにするためには地図情報

レベル 25000 程度の地形図データも必要となるが、庁内には地図情報レベル 25000 程度の地形図データは存在しなかった。

そのため、国土地理院から提供され、無料で利用できる縮尺レベル 25000 基盤地図情報を採用した。無料のため初期投資はかからず、更新費用もなく適時更新され、新しい背景地形図データを利用することが可能となった。

以上に挙げた事例からもわかるように、近年、GIS は地方自治体における業務に積極的に活用されており、先述のような特徴と利点を持って多くの業務の効率化、意思決定の補助としての役割をはたしている。これらのことから、GIS は本研究の提案手法において分析結果を感覚的に理解することや非常に多様なデータを 1 つのプラットフォーム上にまとめ、新たな発見を生み出すことに有効であると考えられる。よって、本研究の提案手法では最終的なユーザへのフィードバックとして GIS を採用する。

§ 2.3 リアルタイムでのタブ譜作成の必要性

リアルタイムでのタブ譜作成は、音楽制作、演奏、学習、および共有において重要なツールである。このアプローチの必要性は多岐にわたり、ミュージシャンは演奏中に楽譜を作成し、アイデアを瞬時に記録でき、これにより、創造的なプロセスが向上し、楽曲制作が効率的に進行する。

また、学習者にとってもタブ譜は貴重なツールである。楽譜を見ながら演奏することで、正確なフレットと弦の指示が得られ、スキルの向上が可能である。リアルタイムでのタブ譜は、音楽の学習を助け、演奏の正確性を高めると考えられる。リアルタイムでのタブ譜作成は音楽制作、演奏、学習、共有において重要なツールであり、ミュージシャンと音楽愛好者に多くの利点をもたらすと考えられる。

都市計画と生態学

1992 年 6 月にブラジルで開催された国連環境開発会議で条約加盟のための署名が開始され、1993 年 12 月 29 日に発行された「生物多様性条約」に代表されるように 20 世紀後半から現在にかけて自然環境や生物多様性の保護に関する機運は世界中で高まっている。

その動きはわが国においても例外ではなく、2008 年には「生物多様性基本法」が成立するなどしている。そのような状況の中で大学等の研究機関においても生物多様性の保護に向けた様々な研究がなされている。

そのうちの一つに、生態学・ランドスケープ分野における植物の生育環境と農村計画分野における将来的に都市化の可能性がある地帯の分析とを重ね合わせることで新たな知見を得ようとする研究がある [12]。

同研究の具体的な内容は福島県旧原町市域を対象として今後都市化する可能性のある地域を可視化したマップ（都市化ポテンシャルマップ）と二次草原（人為的な干渉によって維持されている草原）が生育する可能性のある地域を可視化したマップ（二次草原の潜在生育地マップ）とを GIS 上で重ね合わせることで今後の都市化によって人知れず損なわれる可能性のある二次草原の生育地を分析するというものである。都市化ポテンシャルマップと二次草原生育地マップを重ね合わせた様子を図 2.4 に示す。

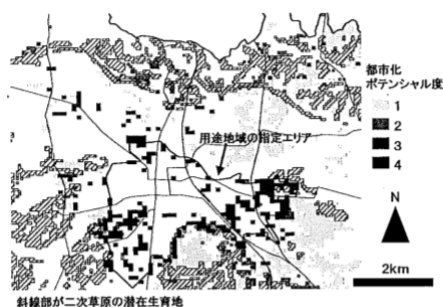


図 2.4: ポテンシャルマップの重ね合わせ

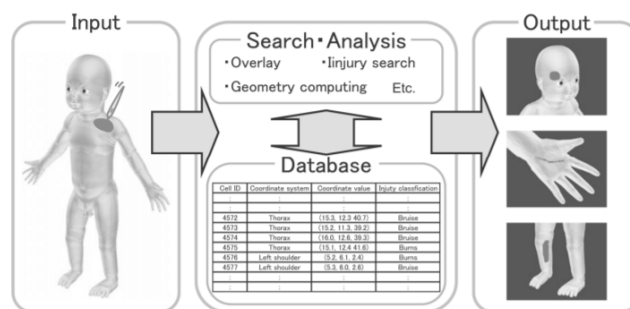


図 2.5: 身体地図情報システムの構成

同研究内では従来別々の分野で進められてきた研究の成果を GIS を用いて巧みにオーバーレイし、普段の研究では同一プラットフォーム上に並べられることのないデータをかけ合わせることで、新たな知見として、都市化ポテンシャルの高い場所と二次草原の潜在生育地が重なる場所の環境特性を明らかにした。

また、研究を通じて多くの学術知見を統合するというケースにおける GIS の有意性が言及されており、1つのプラットフォーム上で様々な情報を共有できることの効率性が取り上げられている。

身体情報に対する GIS の応用

GIS を用いるうえでの利点であるデータの可視化および重ね合わせを地理情報以外に応用した研究の中で非常に興味深いものとして GIS における地理的な位置関係という特徴を人体における各部位の位置関係に置き換えることで身体情報をモデル化した研究であるを挙げることができる [13]。

この研究では、現在、一般に研究がなされている分野の中で医学、工学、産業など人間にかかわるものは数多く存在するにもかかわらず、身体情報に関してそれぞれが収集した情報や分析結果などが異分野もしくは同分野においても効率的に共有されていないことを問題として取り上げている。

また、これらの問題が発生することによって分野間にまたがった研究の連携を阻害すると考え、原因として人間に関する情報の表現方法が統一されていないことを挙げてその解決方法を模索・提案している。

人体におけるデータを蓄積共有するシステムは論文内で「身体地図情報システム」と名付けられている。有効性を示すための適用事例として対象を子どもとし、14 歳以下の子どもの死因として最も割合の高い不慮の事故を予防するために傷害情報を統合的に管理、収集、分析を行うようなシステムとして実装されている。身体地図情報システムの構成を図 2.5 に示す。

身体地図情報システムは解剖学の知見に基づいた 38 箇所的主要体節に座標系を設定し、その座標系を参考に傷害情報を登録するものとなっている。また、傷害情報は位置・形状・属性の 3つの要素を持ち 3次元人体モデルにおける体表面上を隙間なくセルで区切ることで作成されたラスタモデルによって記述される。

身体地図情報システムには、入出力機能・検索機能・解析機能の 3つの機能が搭載されており、3次元人体モデル上をマウスでペイントとすることによって傷害情報が正規化、デー

データベースに登録され、データベース内のデータを検索またはそれらを用いた解析を行うことができる。データ解析には3つの機能があり、それぞれ以下のようにになっている。

1. オーバーレイ解析

複数の傷害情報をラスタレイヤとして重ね合わせることで同じ位置にあるセルの値同士に四則演算を実行し、新たなセルを作成する。この機能を用いて傷害レイヤ同士を重ね合わせることで各セルにおける傷害の頻度をもとめることができる。

2. 受傷面積算出機能

ラスタレイヤにおいて傷害として塗りつぶされた範囲の面積を自動的に算出し、その値が体表全体の何%にあたるかを表示する。この機能は実際の医療現場において熱傷の患者の重症度を概算するために用いられる患部が体表の何%にあたるかという判断基準をもとに実装された。

3. ICD-10 コード変換機能

ICD-10 コードは世界保健機関によって定められた傷害の種類および受傷した部位に基づく傷害の分類コードである。身体地図情報システムでは頭部、頸部、胸部など全部で10の領域を用いて部位を分類した身体部位定義レイヤに対して傷害情報および受傷位置情報を持つレイヤを重ね合わせることで入力された傷害情報をICD-10 コードに変換する。

これらの機能の中でも、オーバーレイ機能は異なるデータ同士を重ね合わせて位置情報に基づいた判定を行ったのち、位置が等しいデータのみに対して演算を行うことで新たなデータレイヤを作成する点、ICD-10 コード変換機能は異なるデータの重ね合わせによって新たに生まれる領域を用いて別のデータに変換するという点でGISによる重ね合わせを用いたデータフュージョンの有効性が示されている。

以上のようなGISによる複数の研究分野での研究結果の統合を扱った先行研究やGISによる重ね合わせの有用性を示した先行研究からも読み取れるとおり、GISにおける同一プラットフォーム上でのデータの重ね合わせは問題を引き起こす原因が1つのみに限らないような複雑な問題における新知見の発見に対して大いに役立つものと考えられる。

よって、本研究で目指すデータフュージョンによる政策決定支援を行う上でもGISは大いに有効なものであると考える。そのため、本研究ではデータを用いた分析の結果と地理空間データをGISによって同一プラットフォーム上にオーバーレイするという形でデータフュージョンを行うこととする。

データ間の因果性と改善値の導出

§ 3.1 2つの楽譜の数値化による比較

因果探索とは、観測データを用いて、そのデータ群の因果グラフ（複数の観測データにおいて、それぞれの値がお互いに及ぼしあっている影響の度合いを構造的に示したもの）を導出するための教師なし学習のことである。

また、類似する手法として因果推論が挙げられるが、因果推論では因果関係の向きが既知である場合にその因果関係が本当に有意であるのかをデータから分析する手法であるのに対し、因果探索は因果関係が不明かつ因果関係の向きも不明であるデータ群に対して、それらの間に因果関係が成立するかを導く手法である。

例えば、「ある小売店 A でアイスクリームの安売りを行った際にアイスクリームの売り上げが向上した。また、同日の小売店 A の来客数は前日より 100 人多かった」というケースがあったとする。このとき、アイスクリームの安売りを行ったことが売り上げの向上につながったかどうかを調べるのが因果推論である。これに対して、アイスクリームが安かったから来客数が増加したのか、来客数が多かったためにアイスクリームの売り上げが向上したのかという因果の方向性も含めて分析を行うのが因果探索である。

このような特徴を持つため、因果探索は適用されるデータの分野に対しての制約が少なく、様々な分野のデータに適用することができる。それゆえ、因果探索を用いた応用研究も盛んにおこなわれており、疫学、経済学、神経科学、化学、医学をはじめとした幅広い分野のほか土木計画学 [14] の研究でも用いられている。

LiNGAM

近年、因果探索の手法における研究が活発化したことで、因果探索における様々なモデルが提唱されている。代表的なものとしては独立主成分分析の手法を用いたセミパラメトリックなもので、非時系列データに対しても適用可能な LiNGAM が挙げられる。LiNGAM とは、一般的に以下の式 (3.1) のように定式化され、

$$x_i = \sum_{i \neq j} b_{ij} x_j + e_i \quad i, j = 1, \dots, p \quad (3.1)$$

以下のような仮定を用いることで因果グラフを導出する手法である [15]。

1. 外生変数と内生変数をつなぐ関数は線形関数とする。（内生変数とは実際に観測されている変数、外生変数とは内生変数以外の変数で内生変数のそれぞれに関する未知の値である。）

2. 外生変数の分布は非ガウス連続分布とする.
3. 因果グラフは非巡回とする.
4. 外生変数は互いに独立とする.

ここで、図 3.1 のような内生変数が 4 つの因果グラフがあると考える. このとき、仮定 3 があることによって 4 つの内生変数のうち、どの変数からも因果的影響を受けない変数が少なくとも 1 つ必ず同定される.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_4 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_4 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_4 \\ e_3 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

つまり、式 (3.2) のように因果的影響を受ける場合にその値、受けない場合には 0 を入れたパス係数行列を考えると必ず右肩が逆三角形に全て 0 になる行列となる. そのため、式 (3.2) における x_1 のように全てのパスに対する係数が 0 となる内生変数を因果グラフから除外し、再度パス係数行列を求めるという操作を繰り返すことによって未知である因果グラフを同定することが可能になる.

また、上記の同定法を成立させるにあたって、仮定 4 がなくてはならない. 前述のとおり、LiNGAM における因果関係の同定では内生変数同士の因果関係のみに着目して因果グラフの最も外側に位置する内生変数を順に除外する方法をとるため、内生変数同士の間に成立する因果関係以外の因果関係が内生変数間に発生してはならない.

ここで、もし外生変数同士が独立ではなければ外生変数同士の間に因果関係が生じてしまい、図 3.2 の例に見られるように内生変数同士がそれぞれの内生変数に関わる外生変数同士の因果関係を介在として内生変数間に存在しない新たな因果関係を持ってしまう. このような場合には前述のような因果関係の同定法が成り立たなくなるため、LiNGAM における仮説 4 は必ず必要となる.

Direct-LiNGAM

前述のようなアルゴリズムによって内生変数間の因果関係を推定する LiNGAM であるが、推定時の計算方法の違いによって現在までにいくつかのアプローチが提唱されている. 代表的な例として、独立成分分析によるアプローチである ICA-LiNGAM や回帰分析と独立性評価によるアプローチである Direct-LiNGAM などが挙げられる. その中でも、本研究で取り扱う Direct-LiNGAM に関する解説を行う. Direct-LiNGAM によるアプローチの基本的な考え方は

- 観測変数群から 2 変数を取り出しそれらの変数間に成り立つ因果関係を同定することを繰り返して観測変数群全体における因果の始まりとなる変数を探す.
- その変数を観測変数群から除外し、残った変数のみで再度、観測変数群を形成する.

という 2 つの操作を観測変数群に属する変数が存在しなくなるまで繰り返すことによって元の観測変数群の因果グラフを同定するというものである. 例として、観測変数群から 2 変数 x_1, x_2 を取り出し、以下の構造方程式モデルが背後にあるものと想定する.

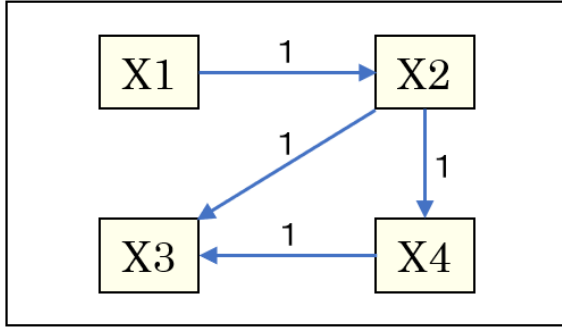


図 3.1: 因果グラフのパス図

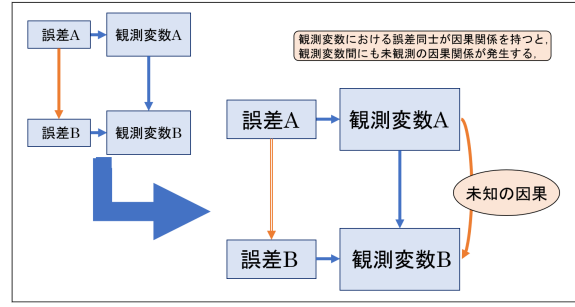


図 3.2: 誤差同士の因果関係

$$\begin{cases} x_1 = e_1 \\ x_2 = b_{21}x_1 + e_2 \end{cases} \quad (3.3)$$

ここで e_1, e_2 は互いに独立かつ非ガウス分布に従い、 $b_{21} \neq 0$ とする。これについて単回帰分析を行うことによって、因果順序の同定を行う。まず x_2 を目的変数、 x_1 を説明変数として回帰する場合を考える。この場合元の構造方程式モデルの第 2 式がそのまま成り立つことになる。そのため、回帰残差は e_2 となりこれは $x_1 = e_1$ と独立となる。一方、 x_1 を目的変数、 x_2 を説明変数とした場合、回帰残差 r_1 は

$$r_1 = \left\{ 1 - \frac{b_{21} \text{cov}(x_1, x_2)}{\text{var}(x_2)} \right\} e_1 - \frac{b_{21} \text{var}(x_1)}{\text{var}(x_2)} e_2 \quad (3.4)$$

となり e_2 の項が出てくる。一方冒頭の構造方程式に戻ると、 x_2 は式として e_2 を含むので、この回帰残差と説明変数 x_2 とは従属する。この従属性の成立に関しては前述の仮定 2 にて示した「外生変数が非ガウス分布とする」というきまりに基づいており、以下に示すダルモア・スキットビッチの定理を用いている。

ダルモア・スキットビッチの定理

2つの確率変数 y_1, y_2 が、互いに独立な確率変数 $s_i (i = 1, \dots, q)$ の線形和で下記のように表されているとする。この時、もし y_1, y_2 が独立なら、 $\alpha_j \beta_j \neq 0$ となるような変数 s_j はガウス分布に従う

$$y_1 = \sum_{i=1}^q \alpha_i s_i \quad (3.5)$$

$$y_2 = \sum_{i=1}^q \beta_i s_i \quad (3.6)$$

上記の考察から、両方のパターンで回帰分析を行い残差と説明変数の独立性を判定することで因果の向きを推定することが可能となる。なお独立性の評価には相互情報量という量を用いる。この量が 0 となるときに独立であると判定するが、実際には推定誤差があり正確には 0 にはならないため、相互情報量が 0 に近い方を独立とみなして因果の順序を決定する。

§ 3.2 メロディーから音階のリアルタイム抽出

魔王魂のピアノ 2-6 ラ, ガレージバンドのピアノのラ, 人の声のの音源を用意し, FFT を用いたピーク検出により音高推定を行った. ピーク検出の様子と周波数, 推定した音高を出力し, これを図 2 に示す. それぞれのデータについて考察を行った. 魔王魂のピアノ 2-6 ラ, ガレージバンドのピアノのラの音源に対してはどちらも周波数が 879Hz を示し, 音階では A5 と推定した. これは周波数一覧に示されているように妥当であると言える [5].

また, 人の声の音源では周波数がおよそ 214Hz を示し, 音階では A3 と推定した. 3 つの音源に対しても同じくラの音として推定できていることがわかる. 同じラの音でも A3 と A5 と表示されているが, これは 2 オクターブの差があることを示していると考えられる. これらの判定をリアルタイムで演奏者に的確な情報を提供することを目的とする.

CCR モデル

DEA における DMU の評価法の基本的な考え方は「どれだけ少ない入力を用いてどれだけ多くの出力を生み出しているか」である. そのため, DEA における評価値は対象の DMU における各入出力に対して重みをつけたうえで出力の総和を入力の総和で割ることによってもとめられる.

また, 評価値を算出する際に各入出力に対して付与される重みには他の DMU の入出力に基づく制約式が設けられており, それらに基づいて入力・出力の重みを最適化する線形計画問題を解くことによって DEA における評価値を算出することができる. CCR モデルにおける制約条件は以下の二つである.

- すべての DMU に対する評価値はいずれも 1 を超えない.
- 入力・出力に対する重みはいずれも 0 以上である.

これらをもとに CCR モデルを線形計画問題として定式化すると以下のようなになる [18].

<CCR モデルの主問題>

$$\begin{array}{ll} \text{maximize} & \frac{u^T y_o}{v^T x_o} = z \end{array} \quad (3.7)$$

$$\begin{array}{ll} \text{subject to} & -v^T X + u^T Y \leq 0 \end{array} \quad (3.8)$$

$$u \geq 0 \quad (3.9)$$

$$v \geq 0 \quad (3.10)$$

ここで, DEA における分析が持つもう一つの利点を考える. それは, 算出された各入力・出力に対するウェイトを用いることで, 対象の DMU の入力・出力をどのように増減させれば評価値がより優れたものになるかを数学的に示すことができることである. この DMU における評価値をより良くするための入力・出力の値 (本論文では以後, 改善案と呼ぶ) を算出するためには, 評価値における入力 (分母) もしくは出力 (分子) を 1 と仮定し, 前述の線形計画問題を主問題とする双対問題を考える必要がある.

これらをもとに、入力に対する改善値を算出することを目的とした入力指向モデルと出力に対する改善値を算出することを目的とした出力指向モデルを定式化すると以下のようになる。

< 入力指向モデル >

$$\text{minimize} \quad w = \theta \quad (3.11)$$

$$\text{subject to} \quad Y\lambda \geq y_o \quad (3.12)$$

$$-X\lambda + x_o\theta \geq 0 \quad (3.13)$$

$$\lambda \geq 0 \quad (3.14)$$

< 出力指向モデル >

$$\text{maximize} \quad w = \eta \quad (3.15)$$

$$\text{subject to} \quad X\mu \leq x_o \quad (3.16)$$

$$-Y\mu + y_o\eta \leq 0 \quad (3.17)$$

$$\mu \geq 0 \quad (3.18)$$

ここで、入力指向モデルを取り上げて解説を行うと、その線形計画問題は対象の DMU における出力の大きさを維持しつつ、最小の入力を達成することができる DMU の集合（参照集合）をすべての DMU の中から探すという操作ととることができる。つまり、線形計画問題の解においてその重みが正の数となる DMU が参照集合に属し、その場合における効率的な DMU ととらえることができる。

これらのことから、参照集合とは対象の DMU が見本とすべき DMU の集合であり、参照番号に属する DMU におけるそれぞれの要素の値とその重みの大きさを用いることによって、対象の DMU に対する入力および出力の改善案を算出することができる。

参照集合における DMU の数を K 、入力・出力の項目数をそれぞれ m 、 n とすると対象の DMU のある項目 i, j における入力・出力における改善案はそれぞれ次のようにしてもとめることができる。

< 入力改善案 >

$$\hat{x}_i = \sum_{k=1}^K x_{ik}\lambda_k \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3.19)$$

< 出力改善案 >

$$\hat{y}_j = \sum_{k=1}^K y_{jk}\mu_k \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.20)$$

医療機関における DEA の例

DEA の一般的な適用例として病院における医師数と患者数という 1 入力-1 出力の場合を挙げる??。本例では医師数を入力、患者数を出力として各病院の運営効率を CCR モデルで

表 3.1: 各病院におけるパラメータ

病院	A	B	C	D	E	F	G
医師数	17	58	72	19	11	54	8
患者数	266	661	1,695	514	543	1,447	390
医師一人当たり患者数	15.6	11.4	23.5	27.1	49.4	26.8	48.8

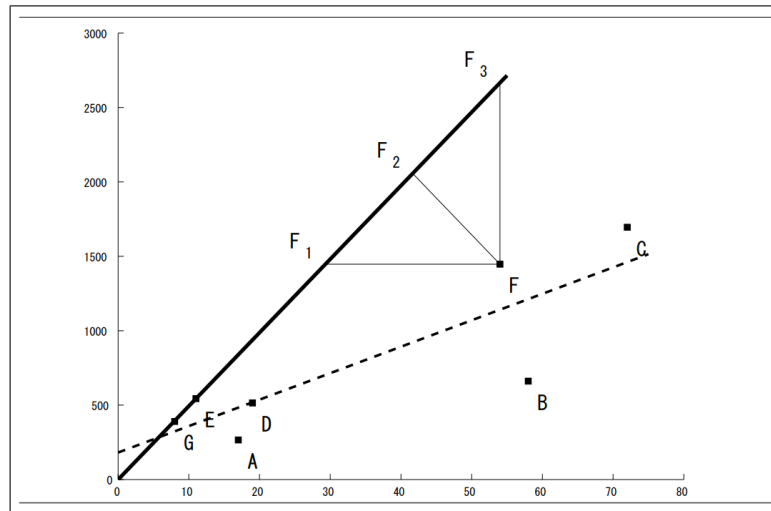


図 3.3: 適用例における CCR モデルのグラフ [17]

評価する．また，単純化のために本例では少ない医師でより多くの患者を治療する病院こそが運営において効率的であるとする．

各病院における医師数，一日の平均患者数，医師一人が一日に治療する平均患者数を表 3.1，図 3.3 に示す．グラフにおける横軸が入力，縦軸が出力であり，太い実線が効率フロンティア，破線は回帰直線を表す．表 3.1 における医師一人当たりの患者数が多くなっている，つまり，効率的な運営を行っている病院 E，G がグラフにおいても効率フロンティア上に存在していることが分かる．

また，細い実線の様子から病院 F がより効率的に運営を行うためには医師数を減らす，患者数を増やす，またはその両方を同時に行うことが必要であることが分かり，詳細な値についてはグラフ上における点 F と参照集合の直線の距離で求められる．

太い直線と破線の差からも分かるように最も評価の高い組織を基準に各組織の評価を行うという点が組織の集合全体における平均像から各組織の評価を行う統計学における回帰分析を用いるアプローチと大きく異なる DEA の特徴である．

本研究における提案手法において，入力指向モデルおよび出力指向モデルによって算出された対象の市区町村における評価値と式 (3.19)，式 (3.20) によって算出された入力および出力の改善案を提示することを政策に対する意思決定を支援する手法の 1 つとして用いることとする．

表 3.2: 代表的な GIS ソフトウェア

GIS ソフトウェア	無料	オープン ソース	Windows	MacOS	Linux	BSD	Unix	Web
Microsoft MapPoint	×	×	○	×	×	×	×	○
ArcGIS	×	×	○	○	×	×	○	○
GRASS GIS	○	○	○	○	○	○	○	○
QGIS	○	○	○	○	○	○	○	○
MapInfo	×	×	○	×	×	×	×	○
TNTmips	×	×	○	○	○	×	○	×

§ 3.3 コードの違いによる印象の変化

和音とは 3 音以上の異なる高さの音が合成されたもので，構成音と構成音の間隔によって和音の種類が定まる．和音を聴取すると，「明るい-暗い」，「安定-不安定」などの感覚を催すとされる．この感覚は，多少の地域・文化差はあり，例えば地中海沿岸では，短調の曲においてマイナー・メジャー・セブンスを主音とする感覚があるなど，地域により異なる場合があるとされている．

ヒトはおおむね共通した感性を持っている．これらの感覚は音楽理論として体系化がなされており，「明るい-暗い」は構成音間の半音の数とその並びにより，半音メジャーコードやマイナーコードなどと定義される．「安定-不安定」は不安定な順に，ドミナント，サブドミナント，トニックの 3 種類のファンクションに分類されており，ドミナントがトニックに解決する，ドミナントモーションは楽曲が進行する原動力として用いられている [6]．

Web-GIS の実装方法

Python を用いた Web-GIS の開発には「Folium」という Python 用のライブラリを用いる．Folium を用いてメソッドに対して初期位置，ベーススタイル，初期縮尺などを引数として与えてプログラムを実行することで Web-GIS のベースとなるマップを表示する html が自動的に生成される．ベーススタイルとして指定することの出来るマップタイトルには代表的な例として以下のようなものがある [20]．

- CartoDB (positron and dark_matter)
- OpenStreetMap
- Mapbox Bright
- Cloudmade
- Mapbox

Folium による Web-GIS の開発はこのベースマップに対して Folium のライブラリ内に含まれる様々なメソッドを用いることで Web-GIS における各種機能や実際に表示した情報を追加するという形で行われる．ここからは，Folium によって実装することの出来る各種機能とその内容について代表的なものを取り上げる．

ベースマップの切り替えとレイヤの重ね合わせ

2.3で言及したようなGISによるデータの重ね合わせはFeatureGroup関数によるレイヤの作成とそれらを制御するLayerControlメソッドによって実現される。また、レイヤとはWeb-GIS上でマップの重ね合わせを行う際のそれぞれの層のことを表す。

まず、FeatureGroup関数によってベースマップとは別のマップ（レイヤ）を任意の個数作成する。次に、後述する様々なメソッドを用いてベースマップや各レイヤに対して各種機能や情報を追加する。

この時、常に表示され、レイヤの切り替えに左右されないようにする必要のある情報に関してはベースマップに、それ以外の情報に関しては切り替えによって表示したい各レイヤに追加するようにする。最後に、LayerControlメソッドを用いてレイヤを管理する機能をWeb-GISに付与することによって、htmlを生成した際に自由にレイヤを切り替える機能を持ったものが生成される。

マーカーを置く

folium.Markerメソッドに対して引数としてマーカーを置く位置の座標を与えることで地図上の任意の位置にマーカーを立てることができる。なお、マーカーはFolium内に組み込まれているものの中から色やアイコンのマークを自由に切り替えて使用することができるほか、CustomIcon関数によってアイコンのマークを自作し、独自のマーカーとして使用することもできる。また、任意のマーカーに対してpopup機能を追加し、テキストを付与しておくことでマーカーをクリックした際にポップアップとしてテキストが表示されるようになる。

ヒートマップを描く

ヒートマップとは、二次元データの数値を色やその濃淡で表したものである。広義におけるヒートマップは「マップ」と付いてはいるが必ずしも地図で表現する訳ではなく、テーブルを値で色分けしたものなど数値データを色分けによって可視化したものすべてがこれにあたる。ただ、Web-GISにおけるヒートマップは地図上にプロットされた色の濃淡で数値の大小を示すものである。

また、地図の色分けによって数値の大小を表現する方法として、ヒートマップとは様式が異なるものとして、コロプレス図(階級区分図)がある。コロプレス図とは、例えば地図を都道府県ごとに境界線で分けて、各都道府県における統計データの大きさによって色分けするなどのものがある。具体的な実例としては、アメリカ大統領選の際の州ごとに赤と青で色分けされた地図などが挙げられる。

folium.plugin.HeatMapメソッドを用いることで地図上の任意の位置を中心としたヒートマップを作成することができる。引数として値を与えることで半径や色の透明度、グラデーション、ぼかしの程度が設定できるほか、前述のLayerControlと組み合わせることで表示の切り替えも行うことができる。

大量のマーカーをまとめて表示

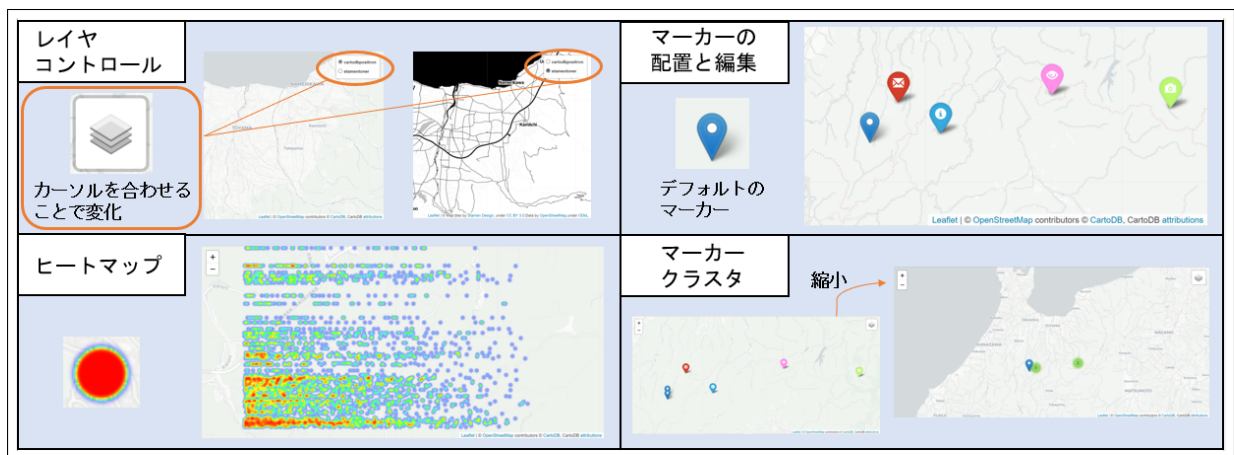


図 3.4: Folium による Web-GIS 実装例

前述の `folium.Marker` メソッドでは、1つのマーカーに対して多くの情報を付与する方法について解説したが、`Plugins.MarkerCluster` メソッドでは、大量のマーカーを点として地図上にプロットし、一定の閾値を定めることで地図の縮尺によってその付近にあるマーカーを1つのマーカーとして表示することができる。これによって、大量のマーカーを一度にプロットした際でも見やすく情報を提供することができる。また、このような機能はマーカーの密度という観点でヒートマップのような表し方と考えることもできる。

以上で解説した各種機能の実装例については図3.4にて示す。また、以上のような機能のほかにも、Folium によって実現可能な Web-GIS の機能は多くあるが、本研究では特にマーカーによる情報のフィードバックおよび重ね合わせを中心に行っていく。システムの詳細については4章にて示す。

提案手法

§ 4.1 歌 (楽譜 A 付き) から楽譜作成 (B)

本研究の提案手法は、大別すると以下のような4つの工程からなる。

1. Web 上からあらかじめ収集し、サーバ上のデータベースに保存されたデータの中から利用者が任意のデータを選択する。
2. 選択されたデータとの間に因果関係が成立するデータを LiNGAM によってデータベース上から抜き出し、DEA の入力と出力に振り分ける。
3. 振り分けられたデータを用いて DEA を解き、評価値および、改善値を算出する。
4. DEA の結果を Web-GIS 上に可視化し、対象のデータと因果関係があり、地理的要素を持つデータについてはレイヤーを作成して重ね合わせが行えるようにする。

そのため、提案手法は以下のような4つのプログラムに分けることができる。

1. 対象のデータの受け取り
2. LiNGAM による因果分析およびデータの振り分け
3. DEA によるデータ分析
4. 結果の表示および重ね合わせ

本節では、ユーザが対象データを指定するにあたって前段階として必要なデータベースの作成方法とデータベースに保存されているデータの種類、対象の指定から LiNGAM による因果探索でのデータの選定、DEA の入力・出力に対するデータの振り分けまでの提案手法のしくみを解説する。

データベースに用いた統計データ

データベースに用いたデータの項目については表??に示す。データの属性としては位置データか数値データか、地理的情報を持つか否かで大きく3つに分けることができる。地理的情報を持たない数値データの例には人口、製造品出荷額などが挙げられ、数年に1回、全国統一でデータの収集が行われるものである。地理的情報を持つ数値データとしては、公園や医療機関の数が挙げられ、これらのデータに関してはどこにその施設が存在するかの位置データが紐づけられている。

本研究に用いるデータベースを作成するにあたって、政策の対象となる事柄について、その原因となるものを探すという目的を達成するために、ある程度広い分野の情報がそろっ

表 4.1: 地理情報を持たない数値データ

データ項目	単位	データ項目	単位
耕作放棄地率	%	経営耕地面積	1 畝 / 経営体
農業産出額	千万円	労働生産性	なし
企業数	社	従業員数	人
歳出決算額 [総務費]	%	農地平均取引価格	円 / m^2
歳出決算額 [民生費]	%	商業用地平均取引価格	円 / m^2
歳出決算額 [衛生費]	%	住宅用地平均取引価格	円 / m^2
歳出決算額 [農林水産業費]	%	林地平均取引価格	円 / m^2
歳出決算額 [商工費]	%	マンション等平均取引価格	円 / m^2
歳出決算額 [土木費]	%	1 人あたりの地方税	千円
歳出決算額 [警察費・消防費]	%	製造品出荷額	万円
歳出決算額 [教育費]	%	事業所数	事業所
歳出決算額 [公債費]	%	総人口	人
歳出決算額 [労務費]	%	老年人口	%
歳出決算額 [その他 (雑費)]	%	生産年齢	%
農業就業人口平均年齢	歳	年少人口	%
農業経営者平均年齢	歳	年間商品販売額	百万円
林作業請負収入	万円	海面漁獲物等販売額	万円
林産物販売金額	万円	付加価値額	万円
一人当たりの法人住民税	千円	1 人あたりの固定資産税	千円

表 4.2: 地理情報を持つ数値データ

データ項目	単位
施設数 [空港]	箇所
施設数 [工業団地]	箇所
施設数 [都市公園]	箇所
施設数 [道の駅]	箇所
施設数 [学校]	箇所

表 4.3: 位置データ

データ項目	単位
施設位置 [空港]	経度・緯度
施設位置 [工業団地]	経度・緯度
施設位置 [都市公園]	経度・緯度
施設位置 [道の駅]	経度・緯度
施設位置 [学校]	経度・緯度

ていること、日本全国に対応しており市区町村単位の粒度のデータであること、各地方や都道府県などでデータにおいて大きな欠損がないことなどの条件を満たす必要があった。

これらの条件から、地理的情報を持たないデータに関しては 2.1 節で挙げた RESAS の API を用いてデータの収集を行った。また、地理的情報を持つデータに関しては国土交通省の国土数値情報ダウンロードにおけるデータを収集し、それらに基づいて各市区町村ごとの施設数を自動的に数え上げることで施設数のデータとした。

全てのデータは csv 形式でサーバに保存し、各処理ごとに取り出して参照、編集、加工できるようにした。データベースとして用いた csv のフォーマットについて、各市区町村における人口および公園の数、位置のデータを例に挙げて図 4.1 に示す。RESAS によって収集したデータと施設の数を表すデータに関しては、1 列目に総務省から各市区町村に対して割り当てられている全国地方公共団体コードをキーとして格納し、2 列目に対象のデータを格納するという形をとった。施設の位置データについては

システムのフロントページおよび対象の選択

提案手法においてユーザサイドに提示されるフロントページを図 4.2 に示す。図 4.2 に示

人口		公園の数		公園の位置	
city_Code	総人口	city_Code	park_num	lon	lat
1100	1952356	1100	2661	143.3149	42.93257
1202	265979	1202	307	141.3449	42.99603
1203	121924	1203	92	141.9418	43.52811
1204	339605	1204	361	141.5346	43.06934
1205	88564	1205	112	144.2413	43.9901
...
47381	3998	47381	0	127.8759	26.69031
47382	1843	47382	0	127.7192	26.217

図 4.1: csv のフォーマット

市区町村を選択し 市区町村を選択 市区町村を選択してください

北海道 (1) 札幌市 (1100) 北海道札幌市 (1100) 1952356

北海道 (1) 札幌市 (1100) 北海道札幌市 (1100) 1952356

対象を選択してください

人口

総人口

年少人口割合

生後年齢人口割合

生後年齢人口割合

老年人口割合

施設数

図 4.2: システムのフロントページ

した通り、システムのはじめにユーザには前述のデータベース内に格納されている全てのデータの項目名が提示される。また、データの項目名をクリックすることによってデータの中身を参照することができる。このページにおいてユーザは自身が対象としたい市区町村およびデータ項目を選択する。

データの前処理

表 4.1 にあるように本研究で分析に用いるデータは単位が異なり、値の大きさも広範囲にわたるため、分析を行う前にデータの正規化を行う。まず、本研究で用いるデータは正規分布に従わないため、そのようなデータに対しても適用することが可能な robust Z-score を用いる [[21]]。robust Z-score について以下に示す。

<robust Z-score>

$$\iota = \frac{x - \text{median}(x)}{NIQR} \quad (4.1)$$

robust Z-score では、式 (4.1) に示すように各データとデータ集合の中央値との差をとり、その値とデータ集合の正規四分位範囲との商を求めることによって値を正規化する。正規四分位範囲とは、四分位範囲と 1.3489 の商である。また、robust Z-score の結果では各値が 0 を中心に正規化されるため負の値となるという場合が発生する。しかし、CCR モデルによる分析では負の値を持つデータを扱うことが出来ないため、さらに値がすべて 0～1 の範囲に収まるように正規化を行う。用いる処理を以下の式に示す。

< 正規化 >

$$\iota' = \frac{\iota + \max |\iota|}{2 \max |\iota|} \quad (4.2)$$

因果探索によるデータの選定

本研究では、1.1 節で挙げた政策の対象における要因の複雑性という課題の解決を支援する手法として 3.1 節で挙げた LiNGAM による因果探索を提案する。具体的には、多量かつ幅広い分野のデータに対して LiNGAM による因果探索を適用することによって、政策の対象としたいターゲットと因果関係のあるデータのみを抜き出すという手法である。

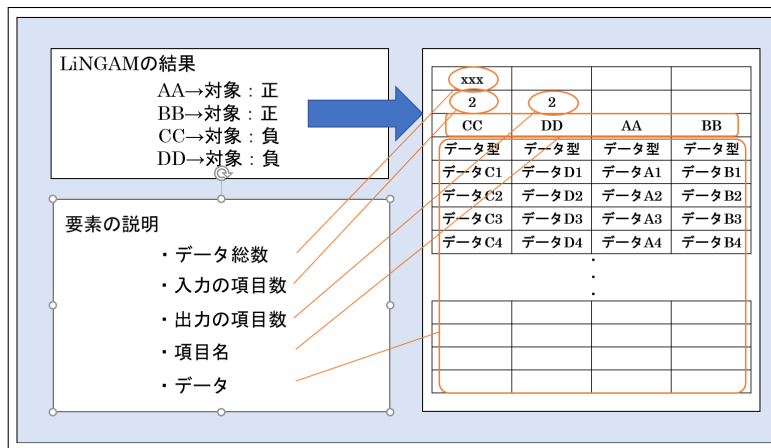


図 4.3: 因果探索の結果とアウトプットの例

因果探索における数学的なアルゴリズムに関しては 3.1 節で示した Direct-LiNGAM に従う。システムのアルゴリズムとしては、前述のフロントページにてユーザーが選択した政策の対象に関するデータを Direct-LiNGAM を解くコードに送信することで、そのデータをターゲットとして因果探索を行う。

この際、因果探索に用いられるデータは表 4.1 および 4.2 に示したすべてのデータであり、これらすべてのデータを用いて一度に因果探索を行うことで政策の対象と潜在的に因果関係を持つデータのみを自動的に絞り込む。

また、これらの処理の結果を用いて 4.2 節にて後述する DEA を用いた分析を行うために、因果探索を解いた結果、対象のデータとの因果関係が示されたデータのみを結合した新たな csv ファイルを作成する。この際に DEA における入力・出力の振り分けも同時に行う。

本研究の提案手法では因果探索によって同定された因果グラフのうち、対象のデータに向く矢印を持つデータのみを分析の対象として扱うこととする。これは、本研究における因果探索の役割が DEA の入力・出力となるデータを絞り込むことにあるためである。因果探索の結果のうち、矢印の始点にあるデータが増減すると矢印の終点にあるデータにも影響がおよびその値が増減するため、政策の対象について考える場合はそのデータに影響を与えるデータのみを考慮することが妥当と考えた。

また、因果グラフにおけるパスの重みが正のときデータ同士も正の相関、負のときに負の相関をとるため、正の場合の始点側のデータを DEA の出力、負の場合の始点側のデータを DEA の入力とすることが妥当と考えた。以上のことから、それらを一つにまとめた csv ファイルを因果探索部分のプログラムのアウトプットとする。因果探索の結果と出力ファイル内のデータの例を図 4.3 に示す。

§ 4.2 楽譜からタブ譜作成のプログラム

本節では、本研究での提案システムにおける DEA 部分の具体的なしくみ、システムの仕様、システムにおいてインプットおよびアウトプットされるデータの形式などを解説する。提案手法における DEA の役割は因果探索によって導かれた政策の対象に対する要因につい

表 4.4: 各都道府県の DMU 内訳

都道府県	市	区	町	村	都道府県	市	区	町	村	都道府県	市	区	町	村	都道府県	市	区	町	村
北海道	35	0	130	20	石川県	11	0	8	0	岡山県	14	4	10	2	愛媛県	11	0	9	0
青森県	10	0	22	8	福井県	9	0	8	0	広島県	13	8	0	9	高知県	11	0	17	6
岩手県	14	0	15	4	山梨県	13	0	8	6	山口県	13	0	0	6	福岡県	27	14	29	2
宮城県	13	5	18	1	長野県	19	0	23	35	徳島県	8	0	15	1	佐賀県	10	0	10	0
秋田県	13	0	9	3	岐阜県	21	0	19	2	香川県	8	0	9	0	長崎県	13	0	8	0
山形県	13	0	19	3	静岡県	21	10	12	0	愛媛県	11	0	9	0	熊本県	13	5	23	8
福島県	13	0	31	15	愛知県	37	16	14	2	高知県	11	0	17	6	大分県	14	0	3	1
茨城県	32	0	10	2	三重県	14	0	15	0	福岡県	27	14	29	2	宮崎県	9	0	14	3
栃木県	14	0	11	0	滋賀県	13	0	6	0	佐賀県	10	0	10	0	鹿児島県	19	0	20	4
群馬県	12	0	15	8	京都府	14	11	10	1	熊本県	13	5	23	8	沖縄県	11	0	11	19
埼玉県	39	10	22	1	大阪府	31	31	9	1	長崎県	13	0	8	0	合計	733	188	727	203
千葉県	36	6	16	1	兵庫県	28	9	12	0	大分県	14	0	3	1					
東京都	26	23	5	8	奈良県	12	0	15	1	宮崎県	9	0	14	3					
神奈川県	16	28	13	1	和歌山県	9	0	20	1	鹿児島県	19	0	20	4					
新潟県	19	8	6	4	鳥取県	4	0	14	1	沖縄県	11	0	11	19					
富山県	10	0	4	1	島根県	8	0	10	1										

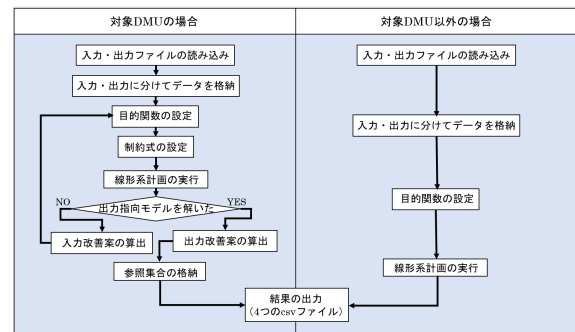


図 4.4: DEA 部分のフロー

て、それらの数値をもとに対象としている自治体の現状を理論的に評価し、その評価を一層高めるために取り組むべき課題を明確にすることによって政策における意思決定の支援をするというものである。

DEA 部分における全体のながれ

DEA 部分では、はじめに 4.1 節での因果探索のアウトプットデータ（図 4.3 参照）を用いて全市区町村を対象に 3.2 節に示した入力指向モデルを解くことによって、各市区町村の評価値を算出する。次に、フロントページにて指定された対象の市区町村に対して、式 (3.19) および式 (3.20) を解くことによって、その結果から対象の市区町村における入力・出力の改善案を算出する。

改善案の算出を対象の市区町村のみに限定したのは、全国の市区町村という膨大な DMU を扱う問題において計算量を軽減するためであり、単純な評価値と比較して改善案は対象市区町村以外のものを参考にすることが少ないと考えたからである。

各市区町村に対する評価値の算出

本研究では、47 都道府県に存在する市区町村のうち 773 個の市、188 個の区、727 個の町、203 個の村の合計 1891 個を DMU の集合として、CCR モデルによる DEA 分析を行うことによってそれぞれの DMU における評価値を算出する。各都道府県における DMU の内訳を表 4.4 に示す。因果探索によって対象と因果関係が示された出力データの数を m とすると評価値は以下の線形計画問題を解くことによってもとめられる。

< 評価値の算出式 >

$$\text{minimize} \quad \theta \quad (4.3)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{d=1} y_{id} \lambda_d \geq y_{io} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4.4)$$

$$- \sum_{d=1} x_{id} \lambda_d + x_{io} \theta \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4.5)$$

$$\lambda \geq 0 \quad (4.6)$$

対象の市区町村に対する入力・出力改善案の算出

フロントページにて対象の市区町村に指定された DMU に対してはすべての入力および出力に対して参照集合のデータをもとにした値の改善案を算出する．参照集合は前述の評価値の算出式において λ_d の値が正の数をとった DMU のみで形成され，参照集合内の DMU の数を A 個，入力の項目数を i 個，出力の項目数を j 個とすると入力および出力の改善案は式 (3.19) および式 (3.20) に対して $K = A$ と置くことによってもとめられる．また，4.1 節で述べた通り本研究ではデータに対して前処理を行っているため入力・出力の改善案に関しては逆変換を行い元のデータと同じ単位に戻してから結果を保存している．逆変換の式は以下のようになる．

< 正規化の逆変換 >

$$\iota = \iota' \times 2 \max |\iota| - \max |\iota| \quad (4.7)$$

< robust Z-score の逆変換 >

$$x = \iota \times NIQR + median(x) \quad (4.8)$$

提案手法を実現するプログラム

本研究の提案手法では，DEA の計算に PuLP による線形計画問題のプログラムを使用している．PuLP とは，Python で数理最適化のモデルを記述するためのモジュールであり，PuLP を用いてモデルを記述することによって，混合整数最適化問題を解くことができる．混合整数最適化問題とは，以下のような特徴を持つ数理最適化問題の一種である．

- 連続（実数）変数と整数変数を使って表現される．
- 目的関数と制約条件が 1 次式である．

よって，線形計画問題を用いて定式化することが可能な DEA においても PuLP によるモデルの記述が可能で，PuLP を用いて記述したモデルは同梱される COIN プロジェクトのソルバーである CBC を用いて自動的に解くことができる．問題の定式化を行う回数や算出し，格納するデータの種類の扱う DMU がフロントページで指定された対象の市区町村であるか否かで異なるが，PuLP を用いて最適化問題を解く部分の仕組みは共通である．提案手法の DEA 部分におけるシステムの一連のながれを図 4.4 に示す．

入力・出力のデータは図 4.3 の csv ファイルのように 1 つにまとめられた状態で読み込み，ファイル内の 2 行目に格納されている入力・出力の項目数をもとに 3 行目以降のデータを入力・出力に切り分けることによってそれぞれのデータフレームに格納する．

次に前述の PuLP を用いて入力指向モデルの目的関数，制約式を設定し実行することによって線形計画問題を解き，DMU の評価値を算出する．また，対象 DMU の場合には実行結果をもとに入力改善案を算出する．

その後，同様に PuLP を用いることで出力指向モデルの目的関数，制約式を設定し実行することによって線形計画問題を解く．こちらも対象 DMU の際には実行結果をもとに出力改善案を算出する．

評価値	入力・出力改善案	参照集合・重み（入力）	参照集合・重み（出力）																																																												
<table><tr><th>city_code</th><th>effic_value</th></tr><tr><td>1100</td><td>0.55679</td></tr><tr><td>1202</td><td>0.70558</td></tr><tr><td>1203</td><td>0.83029</td></tr><tr><td>⋮</td><td></td></tr><tr><td>⋮</td><td></td></tr><tr><td>⋮</td><td></td></tr><tr><td>47381</td><td>0.30172</td></tr><tr><td>47382</td><td>0.35638</td></tr></table>	city_code	effic_value	1100	0.55679	1202	0.70558	1203	0.83029	⋮		⋮		⋮		47381	0.30172	47382	0.35638	<table><tr><th>imp_item</th><th>imp_value</th></tr><tr><td>AAA</td><td>0</td></tr><tr><td>BBB</td><td>13.244</td></tr><tr><td>CCC</td><td>0.86798</td></tr><tr><td>DDD</td><td>5.68598</td></tr><tr><td>EEE</td><td>3.69084</td></tr><tr><td>FFF</td><td>26.6893</td></tr><tr><td>GGG</td><td>6.20473</td></tr><tr><td>HHH</td><td>42026.3</td></tr></table>	imp_item	imp_value	AAA	0	BBB	13.244	CCC	0.86798	DDD	5.68598	EEE	3.69084	FFF	26.6893	GGG	6.20473	HHH	42026.3	<table><tr><th>city_code</th><th>weight_in</th></tr><tr><td>24303</td><td>0.0611</td></tr><tr><td>33663</td><td>0.17123</td></tr><tr><td>34203</td><td>0.01215</td></tr><tr><td>39424</td><td>0.02395</td></tr><tr><td>44462</td><td>0.32172</td></tr></table>	city_code	weight_in	24303	0.0611	33663	0.17123	34203	0.01215	39424	0.02395	44462	0.32172	<table><tr><th>city_code</th><th>weight_out</th></tr><tr><td>24303</td><td>0.13164</td></tr><tr><td>33663</td><td>0.3689</td></tr><tr><td>34203</td><td>0.02617</td></tr><tr><td>39424</td><td>0.05159</td></tr><tr><td>44462</td><td>0.69311</td></tr></table>	city_code	weight_out	24303	0.13164	33663	0.3689	34203	0.02617	39424	0.05159	44462	0.69311
city_code	effic_value																																																														
1100	0.55679																																																														
1202	0.70558																																																														
1203	0.83029																																																														
⋮																																																															
⋮																																																															
⋮																																																															
47381	0.30172																																																														
47382	0.35638																																																														
imp_item	imp_value																																																														
AAA	0																																																														
BBB	13.244																																																														
CCC	0.86798																																																														
DDD	5.68598																																																														
EEE	3.69084																																																														
FFF	26.6893																																																														
GGG	6.20473																																																														
HHH	42026.3																																																														
city_code	weight_in																																																														
24303	0.0611																																																														
33663	0.17123																																																														
34203	0.01215																																																														
39424	0.02395																																																														
44462	0.32172																																																														
city_code	weight_out																																																														
24303	0.13164																																																														
33663	0.3689																																																														
34203	0.02617																																																														
39424	0.05159																																																														
44462	0.69311																																																														

図 4.5: DEA のアウトプットの例

加えて、入力・出力の改善案を算出する際に用いた参照集合内の市区町村名およびそれらの市区町村にかかるウェイトに関してもリストを作成して格納する。最後にこれらの結果をもとに以下に示す 4 つの csv ファイルをアウトプットする。アウトプットする 4 つの csv ファイルの例を図 4.5 に示す。

- 全市区町村を対象にしたそれぞれの市区町村に対する評価値
- 対象の市区町村における入力・出力の各項目に対する改善案
- 対象の市区町村における入力の改善案を算出した際の参照集合とそれぞれのウェイト
- 対象の市区町村における出力の改善案を算出した際の参照集合とそれぞれのウェイト

DEA による分析結果を以上のような 4 つの csv ファイルに分割したのはそれぞれのデータにおける対象の適用範囲や役割が異なり、4.3 節で後述する結果の提示の際に別の提示方法によってユーザにフィードバックされるためである。具体的には、1 つ目の csv ファイルが全ての市区町村に対してそれぞれにもとめられる評価値であり、各行に市区町村ごとの値が格納されているのに対して、その他の csv ファイルのデータはフロントページで指定された 1 つの市区町村に対する各項目のデータが格納されているという違いがある。ゆえに、システムにおけるデータの読み込みおよび取り扱いの簡便化のために個別のファイルでアウトプットすることとした。

§ 4.3 楽曲からタブ譜作成システムの開発

本節では、4.1 節、4.2 節で述べたデータの選別・分析手法による結果に基づいて 3.3 節で解説した Folium による Web-GIS 作成を行うことで分析結果をユーザに提示する提案手法における結果のフィードバック部分について解説する。

また、これまでに 4 章の中で提示した技術のそれぞれがどの部分に組み込まれているかについて再度整理しながら、提案手法を組み込んだシステムの全体の流れを解説する。加

えて、本研究の提案手法における WebGIS を用いたデータフュージョンの方法をシステム内の実際の仕様に言及しながら示す。

Web-GIS アプリケーションの作成

図 4.5 に示した 4 つ csv 内のデータをもとに Web-GIS による結果のフィードバックを行うアプリケーションである EBPM-GIS を作成した。各 csv ファイルが EBPM-GIS のどの部分の実装に使用されているかを図 4.6 に示す。

EBPM-GIS におけるベースマップは cartodbpositron および地理院タイルの 2 種類であり、cartodbpositron は白色でマーカーが視認しやすいという理由、地理院タイルは等高線や色分けによって地形が表されており、土地の地理的状況が視覚的に理解できるという理由で採用した。

各市区町村における評価値は矢印のアイコンを用いたマーカーで表示し、矢印の向きと色は三種類に分けて実装した。基準は評価値の大きさで、0.33 未満を青の下向き、0.33 以上 0.66 未満を黄の横向き、0.66 以上を赤の上向きとした。また、対象の市区町村および参照集合の市区町村に関してはアイコンの色も変更し、対象を赤、参照集合を青とした。

EBPM-GIS では、データ分析に用いた市区町村すべてに対してマーカーを立てるため、非常に多くのマーカーが画面上に表示される。そのため、視認性および処理速度の向上を目的として前述の矢印の種類ごとに別のレイヤに分けて実装した。各レイヤの切り替えは画面右上のレイヤコントロールで行うことができる。初期画面では全ての矢印が表示された状態となっている。

EBPM-GIS 上でマーカーをクリックするとポップアップが出現し、DEA における結果がテキストで表示される。対象の市区町村に関しては市区町村名、評価値、入力・出力の改善案、参照集合とその重みがポップアップ上に表示される。その他の市区町村においては市区町村名および評価値の表示のみである。

また、因果探索によって対象のデータと地理情報データの間に関係が示された場合、全国に分布するその施設の位置全てをマーカークラスタによって表示する。このマーカークラスタも評価値のマーカーと同様にベースマップから切り離された別のレイヤ上にプロットされており、レイヤコントロールを用いて表示・非表示の切り替えが可能である。

提案手法全体の流れ

1 章で示した政策の対象となる問題に関する要因の複雑性という課題に対して、4 章で示した各手法を統合した課題解決のための提案手法全体の流れの説明を行う。また、提案システム全体のフローを図 4.7 に示す。

Step 1: 政策の対象決定・データ選択

フロントページにてサーバ上に存在する統計データ全ての項目名を公開し、全国の市区町村に対する項目ごとのデータを参照できるようにする。政策に関係した問題を抱えるユーザはその問題に関係のあるデータの項目名および自身が取り扱いたい市区町村名を各 1 つずつ選択形式でシステムに入力する。選択されたデータは次のフローへ送信される。4.1 節の前半にて解説した部分がこれにあたる。

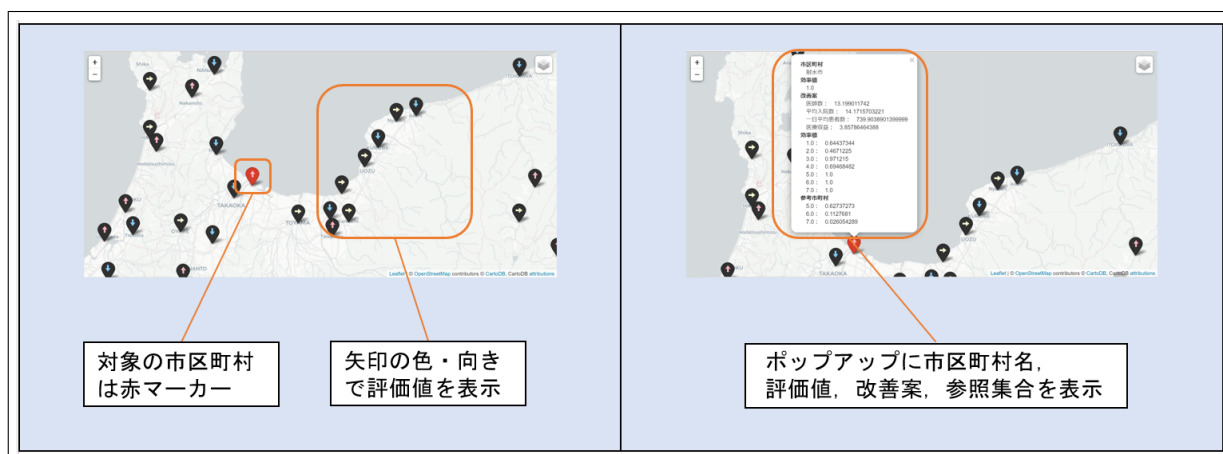


図 4.6: EBPM-GIS の実装

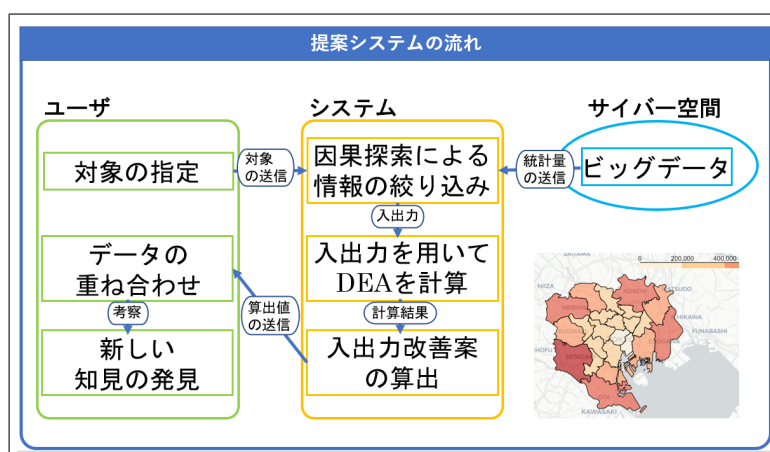


図 4.7: 提案システム

Step 2: 統計データの選別・入出力への振り分け

Step1 で選択されたデータを受信し、受信したデータに含まれる対象のデータ項目名をターゲットとしてサーバ上に存在する全ての統計データを用いた Direct-LiNGAM による因果探索を行い、対象のデータ項目と関係のあるデータのみを選別する。

また、選別されたデータのうち、対象のデータ項目に対して因果関係が向いているデータを入力、対象のデータ項目から因果関係が向いているデータを出力とすることで選別されたデータを DEA における入力・出力データに振り分ける。選別されたデータは入力・出力の項目数とともに 1 つの csv ファイルにまとめて排出する。4.1 節の後半にて解説した部分がこれにあたる。

Step 3: DEA による評価値と入力・出力改善案の算出

Step2 にて作成された csv ファイル内の入力・出力の項目数をもとに入力・出力データを参照し、それらを対象とした DEA (CCR モデル) を解くことによって全市区町村を対象にそれぞれの評価値を算出する。

また、Step1 のフロントページにて選択された市区町村に対して DEA の入力指向モデルおよび出力指向モデルを用いた入力・出力改善案の式を適用することによって対象の市区町村における入力および出力それぞれに対する改善案を算出する。

以上の操作の結果もとめられた全市区町村に対する評価値、対象の市区町村に対する入力・出力の改善案に加えて改善案を算出する際に用いた参照集合とその重み（入力指向モデル、出力指向モデルでもとめられるそれぞれの値）をデータの種類ごとに4つの csv ファイルにして排出する。4.2 節のにて解説した部分がこれにあたる。

Step 4: EBPM-GIS の作成・データの重ね合わせ

Step3 にて作成された4つ csv ファイルをもとに結果の表示および地理情報データとの重ね合わせによるデータフュージョンによって政策決定を支援することを目的とした EBPM-GIS を作成・表示する。

4つの csv ファイルのデータのうち、全市区町村に対する評価値のデータは GIS 上にマーカーとして表示し、その値の大小によって3つのレイヤに分ける。その他のデータはマーカーのポップアップ内にテキストとして表示する。

また、Step2 にて対象のデータ項目と因果関係が示されたデータのうち、施設の場所など地理的な特徴を持つデータに関してはそれらのデータ単体でマーカークラスタとして表示し、Step3 での分析結果と重ね合わせることによってデータフュージョンを行う。4.3 節の前半にて解説した部分がこれにあたる。

システム上でこれら4つの Step の処理が行われることによって出力装置には最終的に EBPM-GIS が出力されることになる。つまり、ユーザサイドから見た場合、フロントページにて対象のデータ項目および市区町村を入力し実行すると EBPM-GIS が表示されるという画面遷移だけが提示される。

また、ユーザは出力装置に提示される EBPM-GIS を通して自身が対象としたいデータ項目に因果関係のあるデータにはどのようなものがあるか、それらを用いて DEA を行った結果の評価値や入出力の改善案、改善のために参考とすべき市区町村とその重みはどのようなであるか、対象としたいデータと因果関係を持つ施設はどのように分布しているかを受け取ることができる。

ユーザは、これらのデータに対して切り替えや重ね合わせを用いることで考察を行い、政策における意思決定を行う。どのように考察するかはユーザの自由であるが、現段階では評価値によって自身の市区町村の現状を知り、周辺の市区町村との差などを「感覚的に理解する。改善案や優れた市区町村をもとに目標を明確化する。そのうえで、重ね合わせ等によって政策決定における新たな知見を得る」という方法を想定している。

数値実験並びに考察

§ 5.1 数値実験の概要

本研究における提案手法は、ユーザサイドでシステムを見た場合、フロントページで対象のデータおよび市区町村を指定すると DEA の結果や地理情報が含まれた EBPM-GIS が表示されるという形になるが、サーバサイドでは 4.3 節で述べたように 4 つの段階を踏み、その各段階でデータの編集や分析を行うことによってユーザに分析結果を提示するというしくみになっている。

5 章では、本研究における提案手法の有効性を示すために現在とある市区町村が抱えると思われる問題を例として取り上げ、その問題に対して提案手法を適用する。そのうえで 4 つの段階それぞれにおいてどのようなデータの編集・分析が行われたのかを各段階の操作後に排出される結果を用いて示し、各結果に対する考察を行う。最後に、それらの結果および最終的な EBPM-GIS の表示内容をもとに取り上げた問題に対する解決策を考察することによって提案手法の有効性の検証とする。

取り上げるモデルケース

本実験では、問題を抱える地方自治体のモデルケースとして、富山県立大学工学キャンパスの所在である富山県射水市を取り上げる。当市は富山県の沿岸部中央付近に位置し、土地面積 109.43km^2 、人口約 90,000 人を有する市である。

また、現在の市域に至ったのは 2005 年 11 月で当時の新湊市、小杉町、大門町、大島町、下村の 1 市 3 町 1 村が合併することで射水市となった。そのため、富山県に占める土地面積は比較的広大で前述の人口は富山市、高岡市に次ぐ県内 3 位の値となっている。

以上のような特徴を持つ当市であるが、当市が抱える問題として最も深刻なものに人口減少問題が挙げられる [22]。当市の人口は 2005 年にピークを迎えて以来、年々減少しており、特に老年人口の増加に反比例して若年人口が減少することで少子高齢化に歯止めが利かない状況となっている。20 歳から 24 歳までの若い世代の人口が他市町村へ流出、とりわけ女性の転出の増加が原因の 1 つと考えられる。2010 年の国勢調査に基づく当市の推計人口の推移を図 5.1、年少（15 歳未満）・老年（65 歳以上）人口割合の推移を図 5.2 に示す。

国立社会保障・人口問題研究所が作成した当市における 2025 年の推計人口は 86,535 人であり、統計上最多である 2005 年の 94,209 人から約 10% 減少した値となっている。また、1995 年から 2010 年にかけて老年人口割合が約 8% 増加し、年少人口が約 3% 減少していることから前述の少子高齢化が統計からも読み取れる。

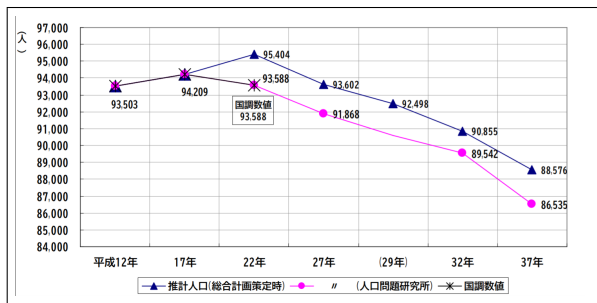


図 5.1: 射水市の推計人口 [23]

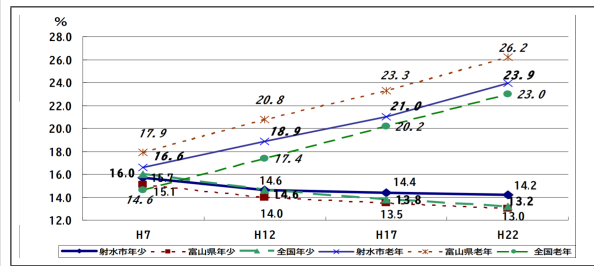


図 5.2: 年少・老年人口割合推移 [23]

以上の問題のうち、少子化に対して2005年に「射水市次世代育成支援行動計画」を策定、2007年には「射水市子ども条例」を制定した。また、これらの理念に基づき、子ども医療費助成の中学校3年生までの拡大や第3子以降保育料の無料化、様々なニーズに応じた保育サービスの実施、放課後児童クラブの拡充といった福祉、保健サービスを始め、子どもの学び・育ちを支えるための学校教育の充実、子どもに関する相談体制の整備などの取り組みを行った。

これらの取り組みは2005年から2022年現在も継続して行われており2021年末における人口が91,783人と発表されていることから推計と比較して人口減少のペースは緩やかになっていると考えられる。ただ、いまだ人口が減少傾向であることは変わらず、2020年3月に策定され、2021年3月に改訂された「第2期射水市まち・ひと・しごと創生総合戦略」[]においても戦略全体の方向性として人口減少に対する対策が言及されている。このことから、本研究における提案手法の有効性評価として、「今後、射水市の人口減少を食い止めるためにはこういった政策を行うべきか」を対象とした数値実験を行うこととする。

数値実験のながれ

前述の問題に対してデータベース内のデータ項目のうち、最も関係があると考えられる「年少人口[割合]」をターゲットとして提案手法による分析を行う。また、対象とする市区町村には射水市を選択する。

はじめに、これらの情報をフロントページを用いてシステムに送信し、「年少人口[割合]」をターゲット、観測変数をデータベース上に存在する全てのデータとしてDirect-LiNGAMによる因果探索を行う。因果探索の結果は図4.3のようなcsv形式で示す。

次に、そのcsvに格納されているデータを入力・出力とし、対象DMUを射水市、DMUの集合をデータベース上に存在する全ての市区町村とするDEAを行う。分析結果については評価値、入力・出力の改善案、入力指向モデルおよび出力指向モデルにおける参照集合に属する市区町村名とそれらに対する重みを項目ごとに分けて4つのcsvで示す。

最後に、それらのcsvファイルをもとに作成されたEBPM-GISにおける射水市のポップアップおよび参照集合に属する市区町村、射水市周辺の市区町村のポップアップを示し、それらの結果を比較する。また、射水市と前述の市区町村の政策、特に因果探索によって因果関係が示されたデータに関するものを比べることで射水市が年少人口を増大させ、少子高齢化を食い止めていくためには今後どのような政策に取り組んでいくべきなのかを考察することとする。

表 5.1: 「年少人口 [割合]」に対する Direct-LiNGAM の結果

データ項目	パス係数	データ項目	パス係数
施設数 [空港]	0.059	企業数	-0.006
衛生費	-0.019	商工費	-0.024
警察・消防費	-0.038	教育費	0.017
住宅用地平均取引価格	-0.043	生産年齢人口	0.249
老年人口	-0.559		

§ 5.2 実験結果と考察

5.1 節で述べた通り、富山県射水市が抱える少子高齢化問題に対して今後どのような政策に取り組んでいけばよいかを模索するというモデルケースを想定して本研究の提案手法を用いた意思決定の支援を行うという数値実験を行った。その結果を 4.3 節で述べた 4 つの Step のうち、Step2 から Step4 における実行結果に基づいて示す。

統計データの選別・入出力への振り分け

因果探索の部分では、少子高齢化問題を解決するにあたってその値の増加が必要であると考えられるデータ項目である「年少人口 [割合]」をターゲットとしてデータベース内のデータ間における因果関係を Direct-LiNGAM を用いてもとめる。「年少人口 [割合]」とは、各市区町村における人口全体のうち、年少（15 歳未満）の人口が占める割合のことである。

Direct-LiNGAM によってもとめられたパス係数行列の中で「年少人口 [割合]」に対するパス係数が 0 ではないものの項目名とそのパス係数を表 5.1 に示す。また、結果に基づく DEA の入力・出力の項目を表 5.2 に示す。

入力・出力の項目数はパス係数の大きいものから老年人口、住宅用地平均取引価格、警察費・消防費を含む 6 つの入力と生産年齢人口、施設数 [空港]、教育費の 3 つの出力となった。本実験で用いたデータベースには老年人口、生産年齢人口、年少人口と 3 つの区分における人口割合が含まれる。これらのデータは割合のためお互いに作用しあうということから老年人口、生産年齢人口から因果関係が示されたのは妥当と考えることができる。

そのうえで、老年人口が入力、生産年齢人口が出力に振り分けられたのは年少人口の親世代が生産年齢人口にあたるためと考えられる。また、生産年齢人口を増やそうと考えた際に住宅用の土地の取引価格が低いほうがよいというのは容易に想像できる。教育費が出力に振り分けられたのも同様の理由が考えられ、安心して育児・教育に取り組める環境がある場合に年少人口が増加すると考えられる。

逆に空港の施設数や警察費・消防費から因果関係が示されたこと、企業数が入力に振り分けられたことなどは直接的な要因が想像しづらく、こういった項目が分析によって導き出されることで新たな発見につながるこれが本研究における有意性の 1 つといえる。

DEA による評価値と入力・出力改善案の算出

DEA の部分では、前述の因果探索における結果を入力・出力として DEA を行い、射水市における評価値、入力・出力改善案、参照集合に属する市区町村名とそれらにかかるウェ

おわりに

本研究では、市区町村単位の自治体における EBPM の支援を目的として、政策に関する意思決定のためのデータ収集および分析を行う手法を提案した。まず、不特定多数のオープンデータを用いることで、政策の対象によって収集するデータが偏ることを防ぎ、その中から LiNGAM によって対象と因果関係があるデータを選別した。

次に、因果関係が示されたデータのうち、対象のデータに対してパスを持つデータをパスの正負に着目しながら二つのグループに分けることによって、DEA の入力・出力とした。そして、DEA の CCR モデルを用いて各自治体における評価値および入力・出力の改善案を算出することによって、対象の自治体における現状を評価し、現状以上に優れた運営を行うためには入力・出力をどのように変化させればよいかを分析した。また、参照集合に属する市区町村とそれらにかかるウェイトを提示することで入力・出力を改善するうえで参考とすべき自治体を示した。

最後に、それらの結果に基づいてデータのフィードバックを行う EBPM-GIS を作成し、各自治体における評価値と対象の自治体に関しては、入力・出力の改善値、参照集合に属する市区町村名とそれぞれに対する重みを地図上にプロットした。また、LiNGAM によって因果関係が示されたデータのうち、位置情報に紐づくものに関してはマーカークラスターを用いて位置情報をプロットしたレイヤーを作成することで DEA による分析結果との重ね合わせを可能にし、データフュージョンによるさらなる知見の発見を可能にした。

今後の課題としては、データベース内のデータの拡充、因果探索および DEA におけるモデルや分析手法の深化などが挙げられる。本研究で取り上げた課題である政策決定における問題の複雑性の性質上、分析に用いるデータの集合は多種多様かつ多量であるほど課題解決に有意義な結果が得られることが考えられる。そのため、実際の政策決定で用いる際には本研究で扱ったデータベースからデータ量を大幅に増加させる必要があると考える。

また、本研究で用いた分析手法は因果探索や DEA における基本的なモデルであるため、多様な問題やデータに対応するためにはそれらによりフィットした分析手法やモデルについての議論が必要であると考え。特に、因果探索においてはどの程度のパス係数までを有意として因果関係を認めるかなど今後発展の余地が残されている。

今後の展望としては、本研究で扱ったような自治体における政策決定への適用だけでなく、社会活動を行う上で頻繁に遭遇する対象が複雑な問題やデータ分析に際してデータ群の全容が確定していない問題に対して本研究における提案手法を応用していくことも考えられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり，多大なご指導と終始懇切丁寧なご鞭撻を賜った富山県立大学工学部電子・情報工学科情報基盤工学講座の奥原浩之教授，António Oliveira Nzinga René 講師に深甚な謝意を表します．また，システム開発および数値実験にあたり，ご助力いただいた富山県立大学電子・情報工学科3年生の島部達哉氏に感謝の意を表します．最後になりましたが，多大な協力をしていただいた研究室の同輩諸氏に感謝致します．

2022 年 2 月

長瀬 永遠

参考文献

- [1] 杉谷和哉, ”行政事業レビューにおける EBPM の実践についての考察”, 日本評価学会, Japanese journal of evaluation studies, Vol. 21, No. 1, pp. 99-111, 2021.
- [2] 中泉拓也, ”英国の EBPM (Evidence Based Policy Making) の動向と我が国への EBPM 導入の課題”, 関東学院大学経済経営研究所年報, Vol. 41, pp. 3-9, 2019.
- [3] 井伊雅子, 五十嵐中, ”新医療の経済学: 医療の費用と効果を考える”, 日本評論社, 2019.
- [4] Shohei Shimizu, Takanori Inazumi, Yasuhiro Sogawa, ”DirectLiNGAM: A Direct Method for Learning a Linear Non-Gaussian Structural Equation Model”, Journal of Machine Learning Research, Vol. 12, pp. 1225-1248, 2011.
- [5] 末吉俊幸, ”DEA-経営効率分析法-”, 朝倉書店, 2001.
- [6] 国土交通省国土地理院, ”GIS とは”, 閲覧日 2022-02-08, <https://www.gsi.go.jp/GIS/whatisgis.html>.
- [7] 佐藤主光, ”税財政分野における EBPM の基礎と活用”, 閲覧日 2022-02-08, https://www.ipp.hit-u.ac.jp/satom/lecture/localfinance/2019_local_note07.
- [8] 内閣府, ”内閣府における EBPM への取組”, 閲覧日 2022-02-08, <https://www.cao.go.jp/others/kichou/ebpm/ebpm.html>.
- [9] esri ジャパン, ”GIS (地理情報システム) とは”, 閲覧日 2022-02-08, <https://www.esri.com/getting-started/what-is-gis/>.
- [10] 国土交通省国土地理院, ”基盤地図情報の利活用事例集”, 閲覧日 2022-02-08, <https://www.gsi.go.jp/common/000062939>.
- [11] esri ジャパン, ”東日本大震災対応における政策形成支援に GIS を活用”, 閲覧日 2022-02-08, <https://www.esri.com/industries/case-studies/35859/>.
- [12] 田中貴宏, 佐土原聡, ”都市化ポテンシャルマップと二次草原潜在生育地マップの重ね合わせによる二次草原消失の危険性の評価: 一福島県旧原町市域を対象として”, 環境情報科学論文集, Vol. 23, pp. 191-196, 2009.
- [13] 坪井利樹, 西田佳史, 持丸正明, 河内まき子, 山中龍宏, 溝口博, ”身体地図情報システム”, 日本知能情報ファジィ学会誌, Vol. 20, No. 2, pp. 155-163, 2008.
- [14] 杉原豪, 塚井誠人, ”統計的因果探索による社会基盤整備のストック効果の検証”, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 75, no.6, pp. 583-589, 2020.
- [15] Dentsu Digital Tech Blog, ”Google Colab で統計的因果探索手法 LiNGAM を動かしてみた”, 閲覧日 2022-02-08, <https://note.com/dd.techblog/n/nc8302f55c775>.

- [16] 藤井秀幸, 傅靖, 小林里佳子, ”データ包絡分析を用いたふるさと納税の戦略提案-K市のふるさと納税への適用事例-”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 71, No. 4, pp. 149-172, 2021.
- [17] 刀根薫, ”包絡分析法 DEA”, 日本ファジィ学会誌, Vol. 8, No. 1, pp. 11-14, 1996.
- [18] 金成賢作, 篠原正明, ”DEA における入力指向と出力指向の比較 (その 1) ”, 日本大学生産工学部第 42 回学術講演会, 2009.
- [19] 日本オペレーション・リサーチ, ”第 4 章 包絡分析-入力と出力と”, 閲覧日 2022-02-08, <http://www2.econ.tohoku.ac.jp/~ksuzuki/teaching/2006/ch4>.
- [20] pork_steak, ”folium 事始め”, 閲覧日 2022-02-08, https://qiita.com/pork_steak/items/f551fa09794831100faa.
- [21] 保母敏行ほか, ”日本分析学会における標準物質の開発”, 日本分析化学会誌, vol. 57, No. 6, pp. 363-392, 2008.
- [22] 射水市役所, ”総合戦略-射水市”, 閲覧日 2022-02-08, <https://www.city.imizu.toyama.jp/appupload/EDIT/054/054185>.
- [23] 射水市役所, ”共通課題-射水市”, 閲覧日 2022-02-08, <https://www.city.imizu.toyama.jp/appupload/EDIT/024/024383>.

