

## 物理ベースサロゲートモデルの構築と政策策定への適用

## ① ビジョンの概要

カーボンニュートラルに資する物理ベースサロゲートモデル(Physic-based surrogate model: PSM)を構築し、市民による環境政策立案における課題設定に役立つ(図1)。具体的には、PINN (Physics-informed neural network: PINN) を実用化するための基盤技術を開発し、次に、PSMを使って、市民などの関係者がWhat-if分析を行い、政策立案(Evidence-based policy making: EBPM)を実現する。

## ② ビジョンの内容

市民によるカーボンニュートラルにおけるEBPMを実現していくうえで、環境データに基づく計算科学シミュレーションモデルとWhat-if分析が重要な役割を果たす。EBPMは、エピソードに頼らずに合理的な根拠に基づいた政策を策定することであり、政策の有効性を高め、市民の信頼を確保する。

例えば、暑熱対策について、計算科学シミュレーションは、重要な役割を果たすが、市民が利用できる状態ではない。この問題を解決するために、計算科学シミュレーションに詳しくない市民向けにPSMを構築する。

PSMを利用する市民は、What-if分析を行うことができる。しかし、SM(Surrogate model: SM)の結果は、物理的な妥当性を担保するわけではないため、物理情報に基づいたニューラルネットワークを利用して物理的妥当性を担保する。PINNでは、環境データから偏微分方程式(Partial differential equation: PDE)を導出し、市民がPDEの求解を対話的に行う。PSMを利用することで、政策のエビデンス作成を支援し、What-if分析に基づく政策設計を行うことができる。政策策定において物理を考慮することは重要であり、PSMはその現場で役立つ。

## ③ 学術研究構想の名称

物理ベースサロゲートモデルの構築と政策策定への適用

## ④ 学術研究構想の概要

カーボンニュートラルに寄与するためのPSMの構築を目指す学術研究構想について説明する。まず、物理的妥当性を担保するために、PINNの実用化に向けた研究開発を行う。次に、物理ベースサロゲートモデリングの拡張性と精度を高めるための研究を行う。さらに、政策策定に利用可能なユーザインタフェースを実装し、その有用性を検証する。PINNの実用化には課題があり、メタパラメータの最適化や適切な可視化手法の開発が必要である。また、PSMは、現場での利用に課題がある。エビデンスとして利用するためには、What-if分析が円滑に行えるだけでなく、さまざまな質問に対して適切に回答できる必要がある。

PSMを市民による環境政策のアジェンダ設定(図2)に活用するためには、まず、市民のニーズを可視化する必要がある。そのために、ユーザインタフェースに関するインタビューを行い、政策策定現場で直感的に利用できるユーザインタフェースの研究開発とプロトタイプ実装を行う。

## ⑤ 学術的な意義

本研究は、PINN (Physics-informed neural network) を使用して物理ベースのサロゲートモデリングを高精度化する技術を開発する世界初の試みである。従来の物理ベースのサロゲートモデリングでは、予測可能な場所が限定されていた。

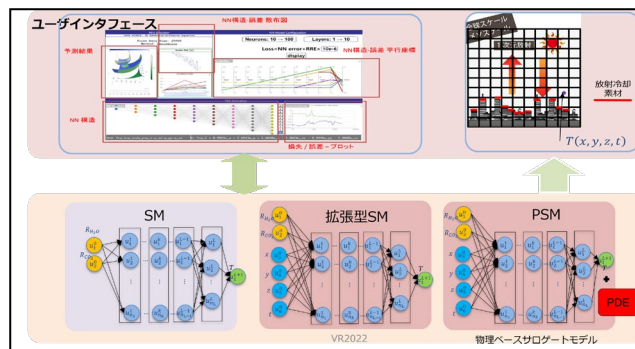


図1 物理ベースサロゲートモデル(PSM)

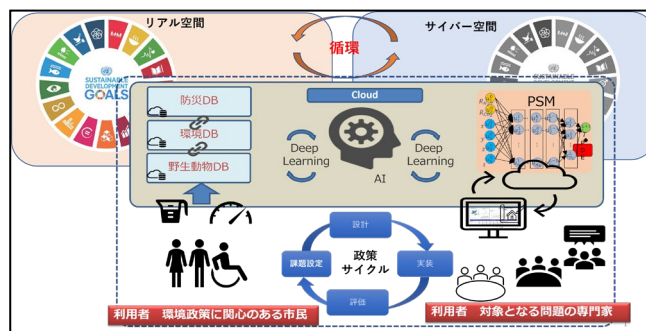


図2 PSMが加速する環境政策のアジェンダ設定

本研究では、PINN を使用した物理ベースのサロゲートモデリング技術の開発が行われる。この技術は世界的に類を見ないものであり、社会への実装に大きな期待が寄せられている。特定の地区の暑熱環境シミュレーションにおいて、膨大な計算時間を必要とせずに有効性が確認できれば、都市や国、全球のスケールでの地球温暖化の緩和策や適応策に貢献する技術へと発展することが期待されている。

## ⑥ 国内外の研究動向と当該構想の位置付け

計算科学シミュレーション結果をパラメータと結びつける SM は、製造装置産業のデジタルツイン実現の基盤となっている。製造装置産業では、統計的な精度だけでなく物理的な妥当性を持つモデル技術が求められており、当該構想はこの要請に応えるものである。市民が政策策定時に PSM を使用した What-if 分析を行うためには、望ましいユーザインタフェースに関するニーズを可視化する必要がある。具体的には、半構造的なインタビューを通じて関係者の声を聞き、認知構造を抽出し、市民の価値判断とユーザインタフェースの機能の関係を明らかにする。この構想は、抽出された認知構造を基に先進的なユーザインタフェースを設計・実装する点で進んだアプローチとなっている。

## ⑦ 社会的価値

物理的に妥当なモデルを使用した What-if 分析により、市民は政策策定に積極的に参加できるよう促進される。感情的な根拠に基づく政策策定に対し、自信を持って参画できると期待される。物理モデルは計測データから導出され、市民の知的財産や教育コンテンツとなる。物理ベース学習基盤を商品化し、国際市場で販売することも可能である。この構想により、SDGs のゴールを実現するための政策策定におけるエビデンスを提供できる。全世界を対象とした物理モデルの導出や求解は重要な役割を果たし、本構想の成果は重要性を持つ。

## ⑧ 実施計画等について

実施計画・スケジュール

【2023-26 年度】～基盤技術整備～

PINN の選点データ生成技術における誤差分布を考慮した手法を開発し、選点数と誤差の関係を明らかにする。

【2026-29 年度】～要素技術開発～

まず、PINN において NN ハイパーパラメータ最適化を支援するための情報可視化技術を開発し、その有効性を利用者のタスクを通じて評価する。次に、前期に構築した深層学習モデルに地球温度シミュレーションで使用された偏微分方程式の残差を加える方法を検討し、その学習時間と予測精度を比較する。さらに、EBPM において、エビデンスへのユーザインタフェースに関するニーズを評価するために、評価グリッド法などを用いて想定されるユーザの要件を可視化する。

【2030-32 年度】～技術適用検証～

まず、PINN 計算結果向けの可視化技術を開発する。学習済み PINN において、ボリュームレンダリング可視化を実現するため、自動積分機構を開発する。また、PINN のハイパーパラメータと画像計算時間の関係を明らかにし、ニーズの可視化結果を基に政策策定で利用されるユーザインタフェースを実装する。

実施機関と実施体制

京都大学を研究統括機関として、3つの研究部門を設置する。

- PINN 実用化研究部門：お茶の水大学が担当し、PINN の実用化に向けて、入力データ生成、メタパラメータ可視化、NF 可視化などの技術開発を行う。(配分予算：8.8 億)
- 高性能サロゲートモデリング研究部門：早稲田大学が中心となり、サロゲートモデリングの高性能化に焦点を当て、拡張性や物理的妥当性に関する研究開発を行う。(配分予算：5.95 億)
- SM 実証研究部門：市民や政策担当者が効果的に What-if 分析を行うためのユーザインタフェースに関する研究開発を行う。中央大学が環境政策における防災や生物多様性の観点から、大阪ガスや積水ハウスの研究者と協力してニーズの可視化を行い、ケニア JKUAT がユーザインタフェースを実装する。(配分予算：6.8 億)

総経費 21.55 億円

## ⑨ 連絡先

小山田 耕二 (大阪成蹊大学データサイエンス学部)