

サステナビリティ・デザイン指向の AI 技術応用に関する基礎的分析

A Basic Analysis on Sustainability Design Oriented AI Technology Application

松井孝典

MATSUI Takanori

大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻

Division of Sustainable Energy and Environment, Graduate School of Engineering, Osaka University

AI-related Informatics that can simulate, model and optimize huge and complex systems is expected to be a great contributor in sustainability design field and there are study going on internationally. Under this background, this paper conducted a basic analysis of the world trends of sustainability-domain and AI technology-oriented studies. Firstly the papers that treat of AI technology application in sustainability field on domestic and international workshops and conferences were reviewed in order to share the purpose of this emerging study field. Secondly natural language processing to study's titles was conducted to examine the characteristics of specific sustainability fields and AI technologies. Finally qualitative clustering analysis was conducted to break these studies into sustainability field and AI technology patterns. These results are counted on leading to discuss a knowledge platform and reference model development for promoting application of AI technologies to environmental sustainability design.

1. はじめに

企画セッション「グリーン AI」の主要なテーマとして環境研究領域でのサステナビリティに関する種々の問題群とは何か、またそれらの問題に対する人工知能技術群の応用をいかにして行うかについて議論を深める必要がある。本稿ではこの領域の研究動向の考察や、現在進められている研究群の基礎的な分析を行い、今後グリーン AI 領域が開発をめざす[サステナビリティ×AI]研究の知識プラットフォームや参照モデルの開発の方向性についての支援情報を提供することを目的とする。

以下、2 章ではサステナビリティ領域において AI 技術を活用している研究の国内外の動向を整理して現状のグリーン AI の研究動向を把握し、3 章では、既存の研究群を対象とした基礎的な統計分析や、実際の研究事例を環境のサステナビリティにおいて利用されている概念的枠組みと AI 技術のもつ機能の種類の 2 軸で定性的に分類し、どのような問題・技術分野の研究が進展しているかを分析する。最後に 4 章ではこれらの知見から今後の課題を考察する。

2. サステナビリティ領域における AI 応用の動向

「サステナビリティ(持続可能性)」には様々な考え方があがあるが、国内で行われている議論の一例としては、“気圏・地圏・水圏・生物圏といった人間の生存基盤である「地球システム」、人間が作り出した政治・経済・産業といった仕組みである「社会システム」、人間が健康で安全・安心に生活するためのライフスタイルと価値規範を意味する「人間システム」の 3 つのリンケージを持った階層的システムの総体を持続可能とする”といった定義がなされている [小宮山 2011]。このサステナビリティというテーマに対して AI 技術を応用してソリューションを導いていくのが「グリーン AI」のミッションである。以下、国外・国内の関連研究の動向を順に整理する。

2.1 サステナビリティ×AI の国際動向

連絡先:松井孝典, 大阪大学大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻 大阪府吹田市山田丘 2-1, 06-6879-7407, matsui@see.eng.osaka-u.ac.jp

国際的な動きとしては、現在コーネル大学を中心としたコミュニティにより、“Computational Sustainability”という概念として、計算機科学、情報科学、OR、応用数学や統計学といった AI に関連する技術を環境・経済・社会の持続的発展のために適用する動きが起こっている [www.computational-sustainability.org 2012]。ここではサステナビリティ研究で対象となる領域群に対して特に、学際的なアプローチ、数理モデルの開発やマネジメントの意思決定支援、資源の最適配置などに焦点を当てながら研究が進められている。2008 年頃から継続的に Computational Sustainability に関わるワークショップや会議が開催され(最新は[AAAI-12 CompSust 2012]など)、年々発表件数が増加するなど注目を集めつつある研究領域である。[AAAI-12 CompSust 2012]の CFP ではスコープに入る研究領域として、(1)大気・陸域・海洋、生態系などの「自然資源と環境 (Natural resources and the environment)」, (2)人間の福利や感染症、人口増加、資源取量などの「経済と人間の振る舞い (Economics and human behavior)」, (3)再生可能エネルギー、スマートグリッド、燃料電池技術開発などの「エネルギー資源 (Energy resources)」, (4)交通輸送システムや都市、建設物、データセンター、食糧生産農業システムなどの「人口システムと土地利用 (Human-built systems and land use)」, (5)気候予測と影響、データ同化などの「気象」の 5 つがある。そしてこれらの領域に対して様々な AI 的技術を応用した研究が発表されている。この CFP で設定されている AI 技術クラスの類型とそのインスタンスを表 1 にまとめた。「センシング」、「モデリング」、「シミュレーション」といった動態系技術から、「制御」、「最適化」といった管理系技術、それらを共考により進めるための「参画」や「意思決定支援」などのコミュニケーション系技術を軸に類型化されている。これらの技術の適用先としては、生態系や気候などの地球システム、都市・交通・経済などの社会システム、伝染病や市民参画などの人間システムなど、階層的システム全体が対象となっていることがわかる。

2.2 サステナビリティ×AI の国内動向

一方で、国内におけるサステナビリティ研究に対する AI 技術の応用については、先述の AAAI-CompSust のようなプラットフォーム型の活動は本セッション「グリーン AI」の他にはまだ見

表 1: Computational Sustainability 領域における AI 関連技術クラスとインスタンス (AAAI-12 CompSust [2012])

AI 関連技術クラス	インスタンス
(A) 動的で時空間的な現象やシステムのモデリングおよび予測	例: 鳥類の移住や外来侵入種の拡散, 海洋の気候応答や貧困の地理情報化
(B) 動的で時空間的な現象やシステムの制御や最適化	例: 生態系や自然資源から, 交通やエネルギーネットワーク, コミュニティ, 都市, 社会経済現象にわたる複雑系の最適な管理や制御のための, 制約ベース推論, 最適化, MDPs/POMDPs, 確率的計画, モデルベース推論
(C) ネットワークのモデリング, 予測, 最適化	例: 交通ネットワーク, 送電網, 食糧網, 伝染病あるいは社会ネットワーク
(D) 物理モデル, モデルベース推論, 最適制御, 観測データからの機械学習モデルを組み合わせた高次元複雑システムのモデリングと制御	例: 全球・地域気象モデル, 生態系モデル, オフィスビル・データセンターの操業モデル
(E) 異なる興味が衝突するエージェント間のインタラクションのモデリング	例: マルチエージェントシステム, マルチエージェント均衡モデル, ゲーム理論, 財の交換についての効率的なメカニズムや政策のデザイン
(F) 環境計測のためのセンサーネットワーク	例: データ集積, 分析, 統合, 大規模な自律的センサーネットワークにおける推論
(G) 参画や意思決定支援	例: 有用なインターフェイスによる関連情報の収集, モデリング, 表示, 電力購買における選好の誘出や自動意思決定, クラウドソーシングと市民科学, コンピュータゲームやチュートリングシステム, 持続可能な行動への気付きや宣伝の方法やツール

られないが, 近年情報技術関連に関連する学会等で個別にセッションが企画されている傾向が見られる. それらのセッションでは, 例えば省エネルギーのための家電機器制御アルゴリズムの開発, あるいはライフサイクルでの環境依存・影響の最小化のための最適化設計など, 様々な領域における AI 技術の適用に関する報告が行われている.

こうした中で特に体系的な AI 技術の応用事例としては[農林水産省 2009]による農業への AI 技術の展開(アグリインフォマティクス)の例がある. この研究の目的は, 「マニュアル化が困難な農業生産の技術やノウハウ, 農作物の状態, 生育環境等に係る様々な情報をデータ化し, 複数年次のデータをデータマイニング技術等を用いて解析することにより, コンピュータによる意志決定支援する農業生産技術体系の確立」ものである. 農業従事者の現象と高齢化, 技能伝承の問題を抱える農業のサステナビリティに対して, AI 技術の応用を試みた先進的な事例であり, こうした適用の動きは今後サステナビリティに関連する様々な領域に広がっていくことが予測される.

3. サステナビリティ×AI 研究事例の傾向の分析と類型化

3.1 研究事例の選定

続いて, 上記の研究動向をより定量的に把握することを目的として基礎的な分析を行った. サステナビリティ領域と AI 技術の応用の実事例の傾向を把握するために, 国外の Computational Sustainability に関連するワークショップ・会議([CROCS-09 2009], [CompSust09 2009] [CROCS at CPAIOR-10 2010], [CROCS at CP-10 2010], [CompSust10 2010], [AAAI-11-CompSust 2011])で発表された 157 件の論文のタイトルおよび, 国内の環境貢献を目的とした AI 技術の応用に関するセッション([電子情報通信学会 2010], [人工知能学会 2011])で発表された 11 件の論文のタイトル, 合計 168 件をデータベース化した. これを分析対象のデータセットとして, (1)形態素解析による概念語の出現頻度分析, (2)それらの概念の共起ネットワーク分析, (3)定性的分類による類型化と研究が集中しているテーマの抽出を行った. なお, (1), (2)の分析には自然言語処理ソフトウェア Visual Mining Studio (数理システム)を用いた.

3.2 形態素解析による概念語の出現頻度分析

まず, 表 2 に形態素解析による概念語の出現頻度の結果を示す. 表中の太字はサステナビリティ研究の対象となる領域

表 2: 形態素解析による概念語の出現頻度

word	N	word	N	word	N
system	19	<i>multiple</i>	6	science	5
energy	16	problem	6	species distribution	5
sustainable	15	<i>programming</i>	6	<i>support</i>	5
<i>model</i>	13	smart grid	6	time	5
<i>optimal</i>	13	uncertainty	6	adaptive	4
<i>modeling</i>	12	allocation	5	assessment	4
resource	12	building	5	<i>computing</i>	4
environmental	11	climate	5	consumption	4
<i>optimization</i>	10	complex	5	environment	4
<i>computational</i>	9	conservation	5	future	4
<i>data</i>	9	<i>control</i>	5	<i>linear</i>	4
management	9	<i>decision</i>	5	method	4
network	9	<i>design</i>	5	power	4
sustainability	9	development	5	real	4
dynamic	8	ecological	5	resource	4
challenge	7	electricity	5	<i>sampling</i>	4
global	7	green	5	scale	4
<i>planning</i>	7	large	5	spatial	4
biodiversity	6	<i>monitoring</i>	5	use	4
market	6	policy	5	wind	4

に関する概念, イタリック体は利用された AI 技術に関連する概念を表す. 上位の項目について, サステナビリティ領域ではスマートグリッドなどの「エネルギー」や「資源」, 「生物多様性」, 「市場」といった対象と, 「管理」, 「不確実性」などの課題が出現しており, これらの問題に対する関心の高さが伺える. また AI 技術に関しては, 「モデリング」や「最適化」, 「計画」, 「ネットワーク」に関する概念が上位を占めており, 上記の CFP と同様にこれらの AI 技術の応用が積極的に行われていることが示された.

3.3 概念の共起ネットワーク分析

次に, 図 1 に各論文のタイトル内で共起する概念語のネットワーク構造を示す. ここでの共起ネットワークの生成に関するパラメータは, 最低抽出限界頻度 2, 信頼度 0.05 を用いた. この結果, 解釈が容易となるようなクラスタ数 15 が抽出された. 大きくは(1)図左の生態系の多様性の分布に関するモデリングや, 野生生物のコリドーのネットワーク解析や最適化, (2)図中央下の

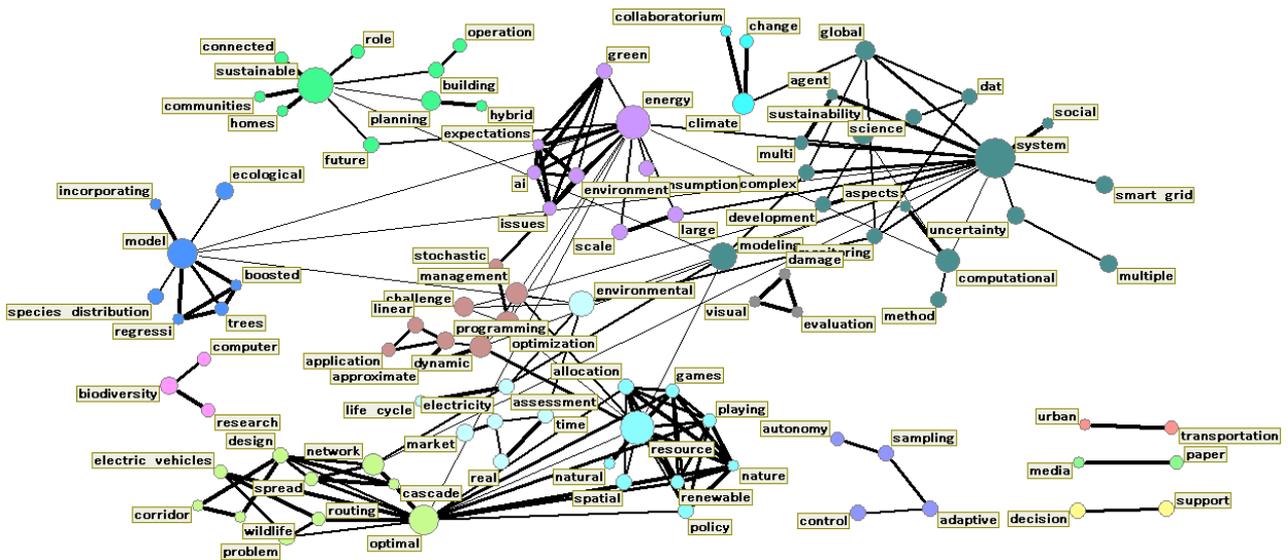


図 1: 共起ネットワーク分析による概念語のクラスタリング

自然資源・再生可能資源の空間的配置の解析や、それらの管理政策を対象とするゲーム理論の応用、(3)図右上の社会ネットワークやスマートグリッド気候変動などの不確実性や複雑性をもった巨大システムの計算や評価のためのモデリングやマルチエージェント分析、(4)その他の都市交通や意思決定支援、各種損害の可視化などを表すクラスタが特徴的に抽出された。

3.4 サステナビリティ×AI 技術による類型化

最後に、環境的なサステナビリティおよび AI 技術の類型化を行った結果を示す。1 章で述べた 3 つの階層的システムのうち、特に環境システムの持続可能性についての如何に AI 技術を適用していくかが本企画セッション「グリーン AI」の主要なテーマである。そこで本稿では、環境システムの持続可能性について[環境省 2010]が示した環境研究・環境技術開発の推進戦略を援用する。この推進戦略は、環境的なサステナビリティの重点課題領域として、(1)地球温暖化の修復および気候変動へ

の適応をめざす「脱温暖化領域」、(2)枯渇性資源の超高効率・循環利用と非枯渇性資源への移行をめざす「循環領域」、(3)生物多様性の保全とその恵みである生態系サービスの持続的利用をめざす「自然共生領域」、(4)人々の安寧で安心・安全な生活環境の形成をめざす「安全領域」の 4 つの領域を設定し、これら 4 つの領域内の問題を個別に解くことに加え、これらの問題間の連関関係を踏まえた解法を求めている。本研究では基礎的な分析として暫定的にこの 4 つの領域をカテゴリにそれらを含む「一般」を加えたカテゴリで類型化を行うこととした。一方、AI 技術の類型を表すカテゴリについては 2 つの考え方があると思われる。第 1 には[経済産業省 2010]が示した技術開発ロードマップの「情報通信:⑥ソフトウェア分野」で示されている「ソフトウェアの品質・信頼性及び生産性の向上」や「共通プラットフォーム」、「セキュリティ」、「インタフェース・ユーザビリティ」といったような「AI 技術が達成する情報環境が持つ機能」をカテゴリとする考え方と、第 2 としては表 1 の Computational

表 3: サステナビリティ領域×AI 技術による類型化

	脱温暖化領域	循環領域	自然共生領域	安全領域	一般
	低炭素・気候変動修復・適応 新エネルギー開発	3R(資源生産性・循環利用・最終処分)	生物多様性保全 持続可能な生態系サービス利用	安全・安心 公害管理 コミュニティ	産業構造・経済活動のあり方の変革
(A) 動的で時空間的な現象やシステムのモデリングおよび予測	16	3	11	4	4
(B) 動的で時空間的な現象やシステムの制御や最適化	10	6	8	1	5
(C) ネットワークのモデリング、予測、最適化	3	0	8	0	2
(D) 物理モデル、モデルベース推論、最適制御、観測データからの機械学習を組み合わせた高次元複雑システムのモデリングと制御	2	2	0	0	2
(E) 異なる興味が衝突するエージェント間のインタラクションのモデリング	3	1	0	0	1
(F) 環境計測のためのセンサーネットワーク	1	1	8	1	2
(G) 参画や意思決定支援	2	2	2	5	5
(H) 未分類	17	4	7	5	14

Sustainability での AI 関連技術クラスで示したような「そうした機能を持つ情報環境を構築するための AI 技術が行うタスク」をカテゴリとする考え方である。本稿ではここではよりプリミティブに AI 技術を取り扱う方がセッションの趣旨に合致すると考え、表 1 の(A)～(G)に未分類の(H)を加えたカテゴリとして類型化を行うこととした。ただし、現段階ではタイトルからの定性的な判読であることや、複数の領域や技術にまたがる論文をどちらかに縮約して計上しているため、誤差を含むことを付記する。

結果の大きな傾向としては、脱温暖化領域におけるモデリング・シミュレーション・最適化に関する研究が主流となっていることが示された。特にスマートグリッドや温室効果ガス排出量取引市場の均衡、新エネルギーの発電量予測、建屋のエネルギーマネジメントにおける最適化、航空オペレーションにおける燃料消費の最適化など、様々なテーマに対して AI 技術が応用されていることが挙げられている。次に多いのは自然共生領域における研究群がある。特に生物のコリドーの解析や生態系サービスのリンケージ評価など、生態系の挙動や生物多様性をもつ重要な特性であるネットワーク性を AI 技術により解析する研究が特徴的であるといえる。また他の温室効果ガス排出量や資源消費量と異なり生態系は計測自体が困難であるため、多種のセンシングデータを統合するようなデータ処理にも特徴がある傾向が示された。

4. まとめと今後の課題

4.1 まとめ

本研究では、サステナビリティ研究領域における AI 技術の応用に関して、国内外の研究動向を示すとともに、これまで行われてきた研究群に対して、形態素解析や共起ネットワーク分析、既存の知見を利用した定性的な類型化を行うことで、今後のサステナビリティ研究領域における AI 技術の応用に関する知識プラットフォームや参照モデルの開発を支援する情報を提供したと考える。

4.2 今後の課題

今後、こうした研究を概念的に統合してサステナビリティ・デザインのための知識プラットフォームを開発することが必要となる。関連した研究として、オントロジー技術を利用したサステナビリティに関連する知識体系の構造化に関するプロジェクトが挙げられる[Kumazawa 2009]。ここではサステナビリティ・デザインを考えていく上で共通して利用する概念群をオントロジー言語により明示的に定義し、かつ概念要素間の連関を記述している。このように、シミュレーション・モデリング・最適化などの数値演算系の技術と、上記のオントロジー言語や推論技術のような意味処理系技術の両面からサステナビリティ研究にアプローチできることは AI 技術を応用する際の強みであり、これらの研究の間では、目的が共有されている、あるいは異なる問題で解決手法が移転可能であるなど、共通のプラットフォームが形成された場合にはシナジー効果が期待できると考えられる。知識プラットフォームの開発は今後のグリーン AI の発展において極めて重要な研究課題であろう。

謝辞: 本稿は大阪大学大学院工学研究科と防衛施設周辺整備協会の共同研究(研究題目: NIMBY 施設の地域共生事例と防衛施設への知識移転に関する研究: http://www.dfeia.or.jp/lab1/project_sustainability/)による支援の成果である。第一調査研究室森長誠氏ならびに関係各位に深く御礼申し上げる。また

論文の査読・校正を行って頂いた富士ゼロックス株式会社研究技術開発本部の柴田博仁氏にも感謝を申し上げる。

参考文献

- [小宮山 2011] 小宮山宏, 武内和彦, 住明正, 花木啓祐, 三村信男[編]: サステナビリティ学 1 サステナビリティ学の創生, 東京大学出版会, 2011.
- [環境省 2010] 環境省, 環境研究・環境技術開発の推進について, <http://www.env.go.jp/policy/tech/kaihatsu.html>, 2010. <2012.4.3 閲覧>
- [AAAI-12 CompSust 2012] AAAI-12 Special Track on Computational Sustainability and Artificial Intelligence, <http://www.aaai.org/Conferences/AAAI/2012/aaai12sustainabilitycall.php>, 2012.
- [農林水産省 2009] 農林水産省: AI農業の展開について -農業分野における情報科学の活用等に係る研究会報告書-, http://www.maff.go.jp/j/kanbo/kihyo03/gityo/g_ai/index.html, 2009. <2012.4.3 閲覧>
- [経済産業省 2010] 経済産業省: 技術戦略マップ 2010 情報通信 ⑥ソフトウェア分野, http://www.meti.go.jp/policy/economy/gijutsu_kakushin/kenkyu_kaihatu/str2010/a1_6.pdf, 2010. <2012.4.3 閲覧>
- [CROCS-09 2009] 1st International Workshop on Constraint Reasoning and Optimization for Computational Sustainability, <http://www.computational-sustainability.org/crocs09>, 2009. <2012.4.16 閲覧>
- [CompSust09 2009] 1st International Conference on Computational Sustainability
- [CROCS at CPAIOR-10 2010] 2nd International Workshop on Constraint Reasoning and Optimization for Computational Sustainability, <http://www.computational-sustainability.org/crocs-at-cpaior10>, 2010. <2012.4.16 閲覧>
- [CROCS at CP-10 2010], 3rd International Workshop on Constraint Reasoning and Optimization for Computational Sustainability, <http://www.computational-sustainability.org/crocs-at-cp10>, 2010. <2012.4.16 閲覧>
- [CompSust10 2010] 2nd International Conference on Computational Sustainability, <http://www.computational-sustainability.org/compsust10>, 2010. <2012.4.16 閲覧>
- [AAAI-11-CompSust 2011] Special Track on Computational Sustainability and Artificial Intelligence during the Twenty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence, <http://www.aaai.org/Conferences/AAAI/2011/aaai11sustainabilitycall.php>, 2011. <2012.4.16 閲覧>
- [電子情報通信学会 2010] 電子情報通信学会技術研究報告. AI, 人工知能と知識処理 109(386), 25-54, 2010.
- [人工知能学会 2011] 人工知能学会 2011 年度全国大会, 3H1-OS6 オーガナイズドセッション「OS-06 環境貢献と AI」, <http://kaigi.org/jsai/webprogram/2011/session-107.html>, 2011. <2012.4.16 閲覧>
- [人工知能学会 2012] 人工知能学会 2011 年度全国大会, 3F1-OS-19 オーガナイズドセッション「OS-19 グリーン AI ～AI による環境貢献～」, http://www.ai-gakkai.or.jp/conf/2012/?page_id=123#os-19, 2012. <2012.4.16 閲覧>
- [Kumazawa 2009] T.Kumazawa, O.Saito, K.Kozaki, T.Matsui, R.Mizoguchi: Toward knowledge structuring of sustainability science based on ontology engineering, Sustainability Science, Vol. 4, No. 1, pp. 99-116 2009.