

文部科学省 基礎研究振興部会

基盤モデル・生成AIに関する基礎研究課題

2023年6月21日

科学技術振興機構(JST)
研究開発戦略センター(CRDS)

福島 俊一

toshikazu.fukushima@jst.go.jp

https://researchmap.jp/toshikazu_fukushima



JST CRDS の活動紹介に代えて

AI分野の俯瞰・戦略提言の報告書リスト

分野俯瞰

- 人工知能研究の新潮流 ～日本の勝ち筋～ (2021年)
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2021-RR-01.html>
- **人工知能研究の潮流と日本の勝ち筋 ～基盤モデル・生成AIのインパクト～** 【公開準備中】
- 俯瞰ワークショップ報告書：エージェント技術 (2022年)
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2021-WR-11.html>
- 俯瞰ワークショップ報告書：ヒューマンインタフェース研究動向 (2023年)
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2022-WR-10.html>
- 研究開発の俯瞰報告書：システム・情報科学技術分野 (2023年)
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2022-FR-04.html>

本日の発表に対応
する詳細報告書



戦略提言(1) AIソフトウェア工学

- 戦略プロポーザル：AI応用システムの安全性・信頼性を確保する新世代ソフトウェア工学の確立 (2018年)
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2018-SP-03.html>
- 科学技術未来戦略ワークショップ報告書：機械学習型システム開発へのパラダイム転換 (2018年)
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2017-WR-11.html>

戦略提言(2) 意思決定・合意形成支援

- 戦略プロポーザル：複雑社会における意思決定・合意形成を支える情報科学技術 (2018年)
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2017-SP-03.html>
- 科学技術未来戦略ワークショップ報告書：複雑社会における意思決定・合意形成を支える情報科学技術 (2017年)
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2017-WR-05.html>
- 公開ワークショップ報告書：意思決定のための情報科学～情報氾濫・フェイク・分断に立ち向かうことは可能か～ (2020年)
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2019-WR-02.html>

戦略提言(3) 第4世代AI

- 戦略プロポーザル：第4世代AIの研究開発—深層学習と知識・記号推論の融合— (2020年)
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2019-SP-08.html>
- 科学技術未来戦略ワークショップ報告書：深層学習と知識・記号推論の融合によるAI基盤技術の発展 (2020年)
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2019-WR-08.html>
- JSAI2020企画セッション報告書：次世代AI研究開発—さらなる進化に向けて— (2020年)
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2020-XR-02.html>

戦略提言(4) AI駆動科学

- 戦略プロポーザル：人工知能と科学 ～AI・データ駆動科学による発見と理解～ (2021年)
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2021-SP-03.html>
- 俯瞰セミナーシリーズ報告書：機械学習と科学 (2021年)
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2020-WR-13.html>
- 科学技術未来戦略ワークショップ報告書：人工知能と科学 (2021年)
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2021-WR-01.html>
- 計測横断チーム調査報告書 計測の俯瞰と新潮流 (2018年)
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2018-RR-03.html>

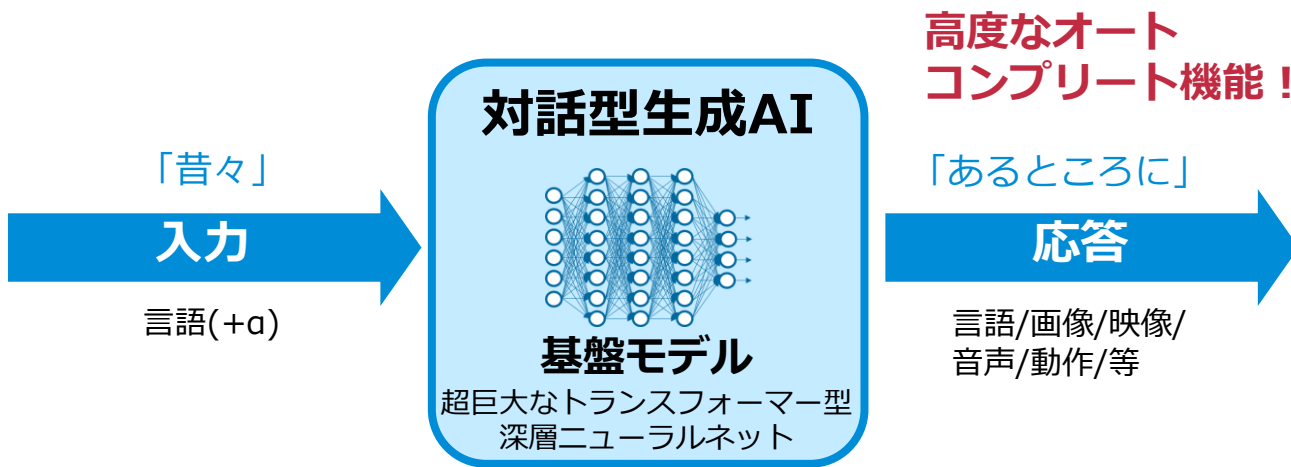
戦略提言(5) デジタル社会のトラスト

- 戦略プロポーザル：デジタル社会における新たなトラスト形成 (2022年)
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2022-SP-03.html>
- 俯瞰セミナー&ワークショップ報告書：トラスト研究の潮流～人文・社会科学から人工知能、医療まで～ (2022年)
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2021-WR-05.html>
- 科学技術未来戦略ワークショップ報告書：トラスト研究戦略～デジタル社会における新たなトラスト形成～ (2022年)
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2022-WR-05.html>
- 公開シンポジウム報告書「デジタル社会における新たなトラスト形成～総合知による取り組みへ～」 (2023年)
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2022-WR-05.html>



基盤モデルと生成AI

- 対話型生成AIは、与えられた入力の続きを統計的に予測することで応答を生成
- 自己教師あり学習を用いて、大量データからつながり関係を事前学習した超巨大な深層ニューラルネット(汎用性の高い基盤モデル)を用いて予測



基盤モデルの代表例

GPT-4 (OpenAI)
PaLM2 (Google)
CLIP (OpenAI)

対話型生成AIの代表例

ChatGPT (OpenAI)
Bard (Google)
DALL-E2 (OpenAI)
Stable Diffusion (Stability AI)

対話型生成AIブームが生まれた3つの要因

(1) 予測精度の飛躍的向上

トランスフォーマー型の深層ニューラルネットは、幅広いコンテキスト情報を参照しつつ、予測のために注目すべき箇所を適切に選択。さらに、スケールアップ、創発的能力(性能が相転移的に急向上)によりモデルを巨大化するほど精度向上。

(2) 対話型ユーザインタフェースの採用

AIコミュニティ内で(1)はGPT-3 (2020年)の時点で大きな話題になっていたが、ChatGPT (2022年)はチャットという一般ユーザに分かりやすく使いやすいインタフェースによって爆発的に利用拡大。

(3) AIアライメント

人間の意図・価値観に合わせてAIを振る舞わせる仕組み(学習データ選別、RLHF:人間のフィードバックを用いた強化学習、Content Moderation)。 ※2016年のMicrosoft Tayのような炎上回避

本発表の要旨

- 人工知能(AI)技術の進化は急速で、ChatGPT等の超大規模深層学習で作られた基盤モデルに基づく生成AIは、極めて自然な対話応答性能や高い汎用性・マルチモーダル性を示すようになった。これが人間の知的作業全般に急速な変革をもたらし、産業、研究開発、教育、創作等、様々な分野に幅広く波及すると、大きな話題となっている。
- 日本の労働人口減少に対する生産性向上、産業・経済の活性化にもつながるという期待が大きいとともに、経済安全保障や科学研究の国際競争力も左右することから、国家戦略・政策の検討も急速に立ち上がっている。
- 特に、米国(OpenAI等)の基盤モデル・生成系AI活用による産業応用や、国産基盤モデル構築については、産業界の取り組みや国の政策検討が動き始めている。
- しかし、基盤モデルの後追い開発や応用開発に留まらず、その先の新しいAIモデルの研究開発で先行したい。深層学習は第3世代AI、それを超大規模化した基盤モデルはいわば第3.5世代であり、第4世代AIに向けた基礎研究として、新たなAIモデルとそのAIアライメント(人間・社会の価値観にAIを整合させること)が、日本の強みを活かす重要な研究開発課題になる。さらに、これがAI駆動科学の変革にもつながる。

基盤モデル・生成AIがもたらす価値、政策的な着眼点

生成AIによって実現されつつある姿		望ましい未来	望ましくない未来
産業	<ul style="list-style-type: none"> 様々な産業において知的作業が効率化・自動化 	<ul style="list-style-type: none"> 生産性が高まり、産業が成長・活性化 	<ul style="list-style-type: none"> 活用できる人材不足で産業低迷 活用が広がっても収益を上げるのは海外企業
科学研究	<ul style="list-style-type: none"> 科学的発見の新しい道具となり、人間の限界を超えた可能性探索、研究開発のスループット加速 	<ul style="list-style-type: none"> 科学的発見の新しい道具として活用先行、研究力・技術開発の国際競争力が向上 	<ul style="list-style-type: none"> 活用に出遅れ、研究力・技術開発の国際競争力が低下 知見やデータが海外サーバに流出
個人生活	<ul style="list-style-type: none"> 個人の創造性や可能性を拡大する道具・アシスタントとして活用が進む 	<ul style="list-style-type: none"> 誰も取り残さず社会参画促進 やりたいことに集中でき、皆が活躍できる機会拡大 	<ul style="list-style-type: none"> プライバシー、個人の行動情報を海外企業が掌握 活用差によって格差が拡大
社会の安全性	<ul style="list-style-type: none"> 犯罪や事故を未然回避 社会的意思決定のために幅広い情報を集約・活用 	<ul style="list-style-type: none"> よりよい社会的意思決定がなされて、社会の安定、安心安全が進む 	<ul style="list-style-type: none"> フェイク生成がサイバー攻撃手段化 真偽不明が招く社会混乱、法の揺らぎ
文化・思想	<ul style="list-style-type: none"> 基盤モデル運営の中に国の文化やノウハウが反映されていく 	<ul style="list-style-type: none"> 日本の文化やノウハウを集積・発展、世界に発信 	<ul style="list-style-type: none"> 海外企業にノウハウが集積 日本が他国の文化に染まる
実現を支える技術発展の方向性 <ul style="list-style-type: none"> AIモデルの扱うタスクの高度化 マルチモーダル化、実世界操作、分散協調 セキュア、高速化、エコ、小型・軽量化 等 		望ましくない未来を回避し、望ましい未来を実現する政策 <ul style="list-style-type: none"> 強い基礎・基盤を生み出す研究開発、人材育成、データ構築・整備体制 活用を促進しながら、リスクを回避するプロアクティブなルール整備 海外巨大企業による独占・寡占ではない、日本のエコシステム作り 	

基盤モデル・生成AIの研究開発課題の全体観

基盤モデル応用開発(API利用)

- チャットボット、仮想アシスタント、問い合わせ自動応答、質問応答
- コンテンツ生成(文章、画像、映像)
- 翻訳、要約、ライティング支援
- 企画支援、発想支援 他

基盤モデル周辺拡張技術

- 基盤モデルが不得手な機能を扱う外部処理連携(最新情報検索、数式処理、物理シミュレーション、論理推論等)
- 問題解決ワークフロー設計の自動化
- プロンプトやワークフローの最適化 他

基盤モデル運用技術

- 継続運用可能なビジネスモデル(ビジネス用途、研究用途)、エコシステム
- データ追加・更新プロセス
- トラストを確保した運営体制 他

分野固有基盤モデル開発・活用

- プログラミング向け基盤モデル
- 個別企業業務向け基盤モデル
- 法業務向け基盤モデル
- 医療・ヘルスケア向け基盤モデル
- 教育向け基盤モデル

- 科学研究向け基盤モデル 他

利活用時の問題対処

- 生成AIの出力が否かの判定技術(フェイク検出技術、電子透かし技術を含む)
- 入出力データの著作権・肖像権関連問題への対処 他

AIアライメント研究

人間・社会の価値観にAIを整合させる

- 基盤モデル自体の倫理性確保(RLHF等)
- 生成AI応用システムの品質管理(プロンプト型開発法のソフトウェア工学等)
- 人間・AI共生社会のリスク低減(エージェント設計論、トラスト形成等) 他

基盤モデル構築技術

- 大規模深層学習モデル(トランスフォーマー、マルチモーダル)の実装
- 学習データの収集・選別・整備
- 大規模計算環境構築
- 高速化アルゴリズム、デバイス 他

次世代AIモデル研究

- 基盤モデル高効率化、生成AI高性能化
- 基盤モデルのメカニズム解明
- 人間知能の理解に基づくモデルの探求、基盤モデルとの融合
- 新モデル向けコンピューティング 他

← 実務

→ 学術

↑ 応用個別

↓ 共通基盤

基盤モデル・生成AIの研究開発課題の全体観

基盤モデル応用開発(API利用)

- チャットボット、仮想アシスタント、問い合わせ自動応答、質問応答
- コンテンツ生成(文章、画像、映像)
- 翻訳、要約、ライティング支援
- 企画支援、発想支援 他

分野固有基盤モデル開発・活用

- プログラミング向け基盤モデル
- 個別企業業務向け基盤モデル
- 法業務向け基盤モデル
- 医療・ヘルスケア向け基盤モデル
- 教育向け基盤モデル

- 科学研究向け基盤モデル 他

③

基盤モデル周辺拡張技術

- 基盤モデルが不得手な機能を扱う外部処理連携(最新情報検索、数式処理、音声認識、シミュレーション、論理推論)
- 問題解決ワークフロー
- プロンプトや

利活用

- 判定技術(フェイク検出、電子透かし技術を含む)
- データの著作権・肖像権関連問題への対処 他

AIアライメント研究

人間・社会の価値観にAIを整合する

- 基盤モデル自体の倫理性(バイアス等)
- 生成AI応用シフト(プロトタイプ開発)
- 人間とAIの協働(エージェント形成等) 他

②
基礎研究として重点的に取り組むべき課題

基盤モデル運用技術

- 継続運用可能なビジネスモデル(ビジネス用途、研究用途)、エコシステム
- データ追加・更新プロセス
- トラストを確保した運営体制 他

基盤モデル構築技術

- 大規模深層学習モデル(トランスフォーマー、マルチモーダル)の実装
- 学習データの収集・選別・整備
- 大規模計算環境構築
- 高速化アルゴリズム、デバイス 他

次世代AIモデル研究

- 基盤モデル高効率化、生成AI高性能化
- 基盤モデルのメカニズム解明
- 人間知能の理解に基づくモデルの探求、基盤モデルとの融合
- 新モデル向けコンピューティング 他

①

既に活発な取り組みが、国際的競争の中で進んでおり、走りながら迅速に手を打っていくべき課題

← 実務 ————— 学術 →

↑ 応用個別
↓ 共通基盤

現在の基盤モデル・生成AIの問題点、重要な基礎研究課題

問題点

1. 極めて大規模な計算資源を必要とする (1回の学習に億円超の計算費用、人間の脳は20ワット)
 2. 論理推論・論理構築や実世界操作に十分対応できていない
 3. ELSI (倫理的・法的・社会的課題)に関わる様々な懸念：Hallucination (もっともらしく嘘をつく)、フェイク生成等の悪用、著作権侵害、情報漏洩、過度の依存等
- なぜ高い性能が出るのか、そのメカニズムは分かっていない

狙う方向性

基盤モデル一択ではなく、基盤モデルのメカニズム理解と人間の知能の理解との融合によって、上記問題に対処し、人間・社会との親和性が高く、高性能で安全・エコな次世代AIモデル(第4世代AI)を生み出す

重要な 基礎研究課題

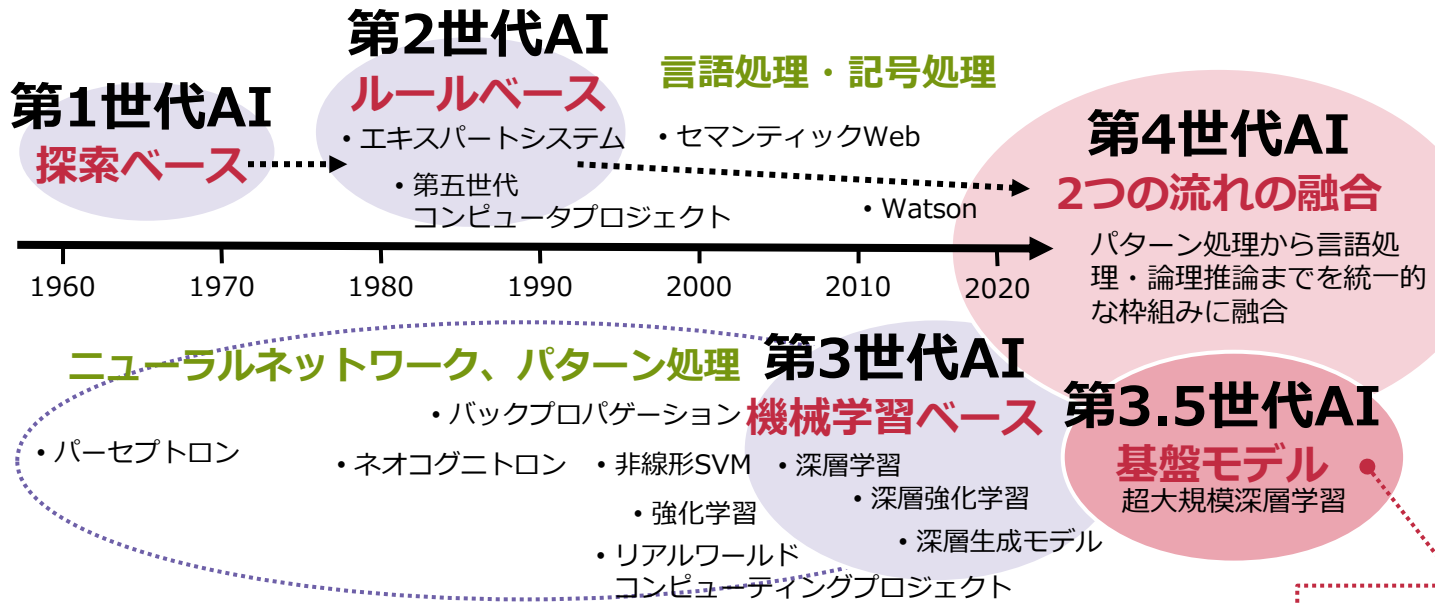
(前頁の赤枠に対応)

- ① 次世代AIモデル研究
 - ② そのAIアライメント研究
 - ③ それらを適用したAI・ロボット駆動科学の变革
- } ①②を福島が説明
- } ③を嶋田が説明

第4世代AIへの発展

現在の基盤モデル(第3.5世代AI) vs. 第4世代AI

■ パターン処理中心の深層学習(第3世代AI)の限界に対して、パターン処理から言語処理・論理推論まで統一的な枠組みで扱う第4世代AIへ、AIの基本原理を発展させる研究が活発化しつつあったところに、深層学習の大規模学習版(第3.5世代AI)である基盤モデルが衝撃的な性能を示した



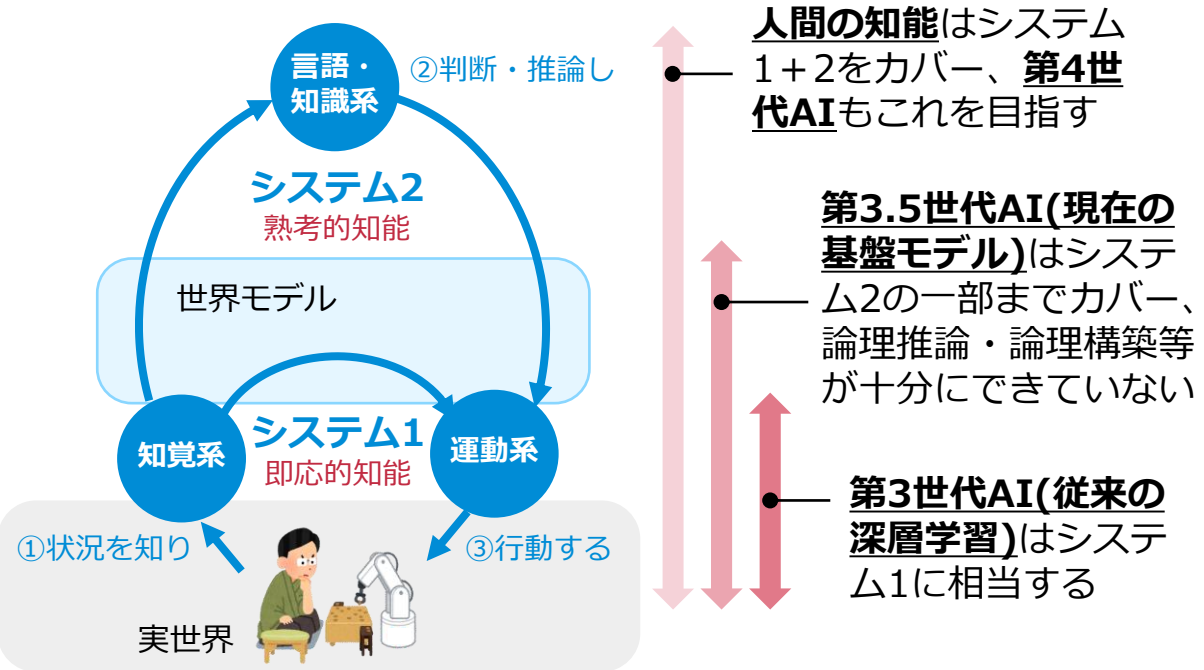
■ 基盤モデルは強力な道具AIとして活用されるのは間違いないが、問題・リスクを抱えており、人間知能の理解から得られる第4世代AIへの示唆に期待大

- 問題点**
1. 極めて大規模な計算資源を必要とする
 2. 論理推論・論理構築や実世界操作に十分対応できていない
 3. ELSIに関わる様々な懸念
 - なぜ高い性能が出るのか、そのメカニズムは分かっていない

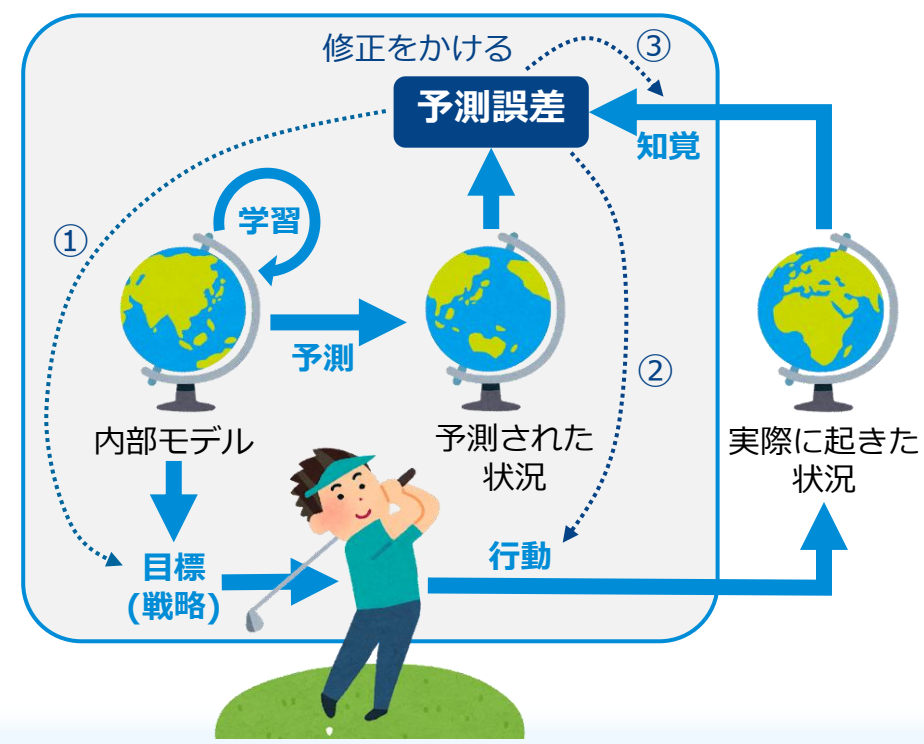
人間知能の理解から示唆されたモデルの例

二重過程モデル：行動経済学や脳科学から示唆される人間の知能の性質であり、即応的思考システム1と熟考的思考システム2から成るという知能のモデル

発達・創発モデル：乳幼児からの成長のように、他者や環境との相互作用を通じて、自己・環境の認知、言語獲得、行動・推論等の認知機能を発達させていく過程のモデル



予測誤差最小化原理(自由エネルギー原理)によって、様々な認知発達を統一的に説明



[応用開発・実装事例]

- 尾形哲也(早大): 深層予測学習によるタオルたたみ等のロボット



<https://ieeexplore.ieee.org/document/7762066>

- 長井志江(東大): 発達障害 ASD視覚体験シミュレータ






[参考] • Daniel Kahneman, "Thinking, Fast and Slow" (Farrar, Straus and Giroux, 2011).
 • Yoshua Bengio, "From System 1 Deep Learning to System 2 Deep Learning" (Invited Talk, NeurIPS 2019).
 • 松尾豊(東大), 「知能の2階建てアーキテクチャ」(認知科学 29巻1号, 2022).

次世代AIモデル研究の方向性

基盤モデルの後追い開発から新モデル開発での先行へ

■ 人間知能の理解からの示唆と基盤モデルのメカニズム理解の相乗効果・融合を推進

	人間離れした強力な道具	人間の知能の理解からの示唆		
	基盤モデル	二重過程モデル	発達・創発モデル	...
中心的アイデア	深層ニューラルネットの大規模学習	即応的システム1と熟考的システム2で構成	外部との相互作用における予測誤差最小化	左記2モデル以外にも、機能モジュール構成、スパイクニューロンベースの全脳シミュレーション等、様々なアプローチがある
関連研究分野	ニューラルネット、機械学習、計算機科学	心理学、行動経済学、脳科学	認知発達・記号創発ロボティクス	
人にあてはめると	人が一生かかっても読めない量の情報を学習 	大人の思考・意思決定のパターン 	乳児・幼児の発達・成長過程 	

脳科学・AI融合基礎研究、日本発の認知発達・記号創発ロボティクス研究、知能ロボット研究(知能×身体性)等で保有する 日本の強み・先行性を活かす

基盤モデルのメカニズム解明の課題

- なぜ過学習にならず スケーリング則 が成立するのか?
- 相転移的な精度向上 (創発的能力) のときに何が起きているのか?
- Chain of Thought (Let's think step by stepによる精度向上) がどのように働いているのか? 等



- 人間の知能のメカニズムから、 基盤モデルの問題点に対処 する仕組みを創出
- 創発メカニズムが解明されれば、 同じ効果を小規模・エコなモデル で実現可能
- 新しいAIモデルに最適な高効率 ソフトウェア・ハードウェア開発につながる

国産基盤モデルの意義

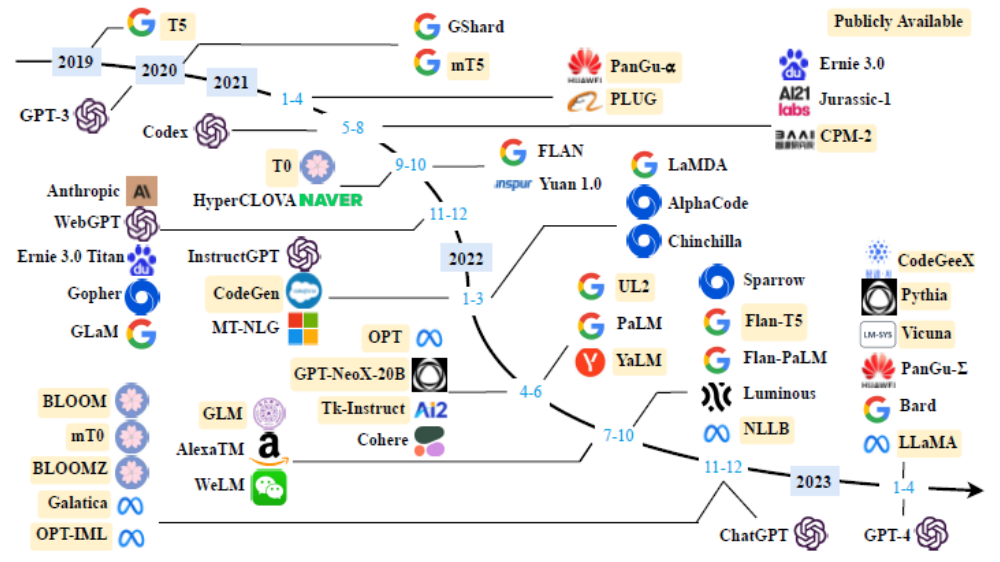
産学連携や共同利用施設を活用した学術基礎研究も一つの方向か

- 経済安全保障、科学研究の国際競争力の確保に加えて、知能モデルの解明・探究という基礎研究のためにも自国保有が望まれる
- さらに、学習させるデータや出力の良否判断は国の価値観・文化を反映するので、海外API依存はその判断の自立性を手放すことにつながる

要件

- **透明性** 海外モデルのAPI利用では何を学習したものか不明
- **データ品質** 規模競争は困難、誤答削減にも有効なはず
- **日本語データ** ChatGPTでも量の少なさが品質低下を招く
- **トラスト** 特定の主義・思想に偏らず公平・公正な運営
- **連携制御系** 海外の大規模モデル、ドメイン知識・外部処理系(検索・数式処理・物理系等)と連携・補完する仕組みも重要
- **ビジネスモデル** 後追いになる中で継続運用していけるようなシナリオや体制・エコシステム

多数の企業・組織が基盤モデル開発に参入、オープンソース化も



[出典] A Survey of Large Language Models <https://arxiv.org/pdf/2303.18223>

国内での基盤モデル開発の動向

- **富岳(東工大/東北大/富士通/理研)**: 政策対応枠における大規模言語モデル分散並列学習手法の開発を発表
- **LINE**: 2020年から日本語に特化したHyperCLOVAを開発、さらに820億パラメータ規模を開発
- **サイバーエージェント**: 68億パラメータ規模のモデルを一般公開
- **XResearch**: 140億パラメータの日本語モデルa版提供
- **ソニー、Turing、NEC、NTT**等も開発表明

AIアライメント研究の方向性

基盤モデル・生成AIのELSI

- ✓ 幻覚(Hallucination)：無意味または誤った内容が真実であるかのように生成される。
- ✓ 有害なコンテンツ生成
- ✓ データの偏りによる社会的バイアス強化
- ✓ 偽情報やプロパガンダ生成
- ✓ 兵器の拡散に使われる可能性
- ✓ プライバシー侵害、個人情報・機密情報の漏洩
- ✓ サイバーセキュリティへの脅威
- ✓ 危険な挙動の創発：システムが予測できない動きをする可能性
- ✓ 他のシステムとの併用による悪用や弊害
- ✓ 経済的影響：労働者の置き換えなど
- ✓ 技術開発競争が加速することのリスク
- ✓ AIへの過度の依存
- ✓ 学習データの不透明性
- ✓ モデル作成時の労働者の搾取：有害データの除去作業で危険な労働
- ✓ 著作権侵害の恐れ
- ✓ 自然環境へのインパクト：訓練・推論時の電力消費量
- ✓ データ汚染：ネット上にAI生成物があふれ区別がつかなくなる恐れ

人間・社会の価値観にAIを整合させることが
生成AIや第4世代AIの利用拡大・社会受容のため不可欠

対策を考えるべき3つの切り口

基盤モデル自体の倫理性確保

- 基盤モデルからの出力が、倫理的に適切なもの、人間の意図・価値観に合ったものになるようにするための技術開発
- 真実性・無害性・有益性等の面から人間によるフィードバックを加える
RLHF、データ選別・結果フィルタ、説明可能性の向上ほか

生成AI応用システムの品質管理

- 対話型生成AIによる自然言語を用いたプログラミング、プロンプトエンジニアリングは、システム開発の新しいパラダイムである
- それによって作られる応用システムの安全性・信頼性・正確性の確保には、ソフトウェア工学の新たな方法論・技術体系の確立が必要

人間・自律AI共生社会のリスク低減

- AIは原理的に100%の精度保証・動作保証はできず、自律性が高まったAIの詳細制御も困難、人間による悪用もあり、マルチエージェント社会で人間・AI相互作用のもとでリスク低減方策が必要になる
- マルチエージェント メカニズムデザイン、HAI設計論、トラスト形成等

OpenAI: "GPT-4 Technical Report", arXiv:2303.08774 (2023).

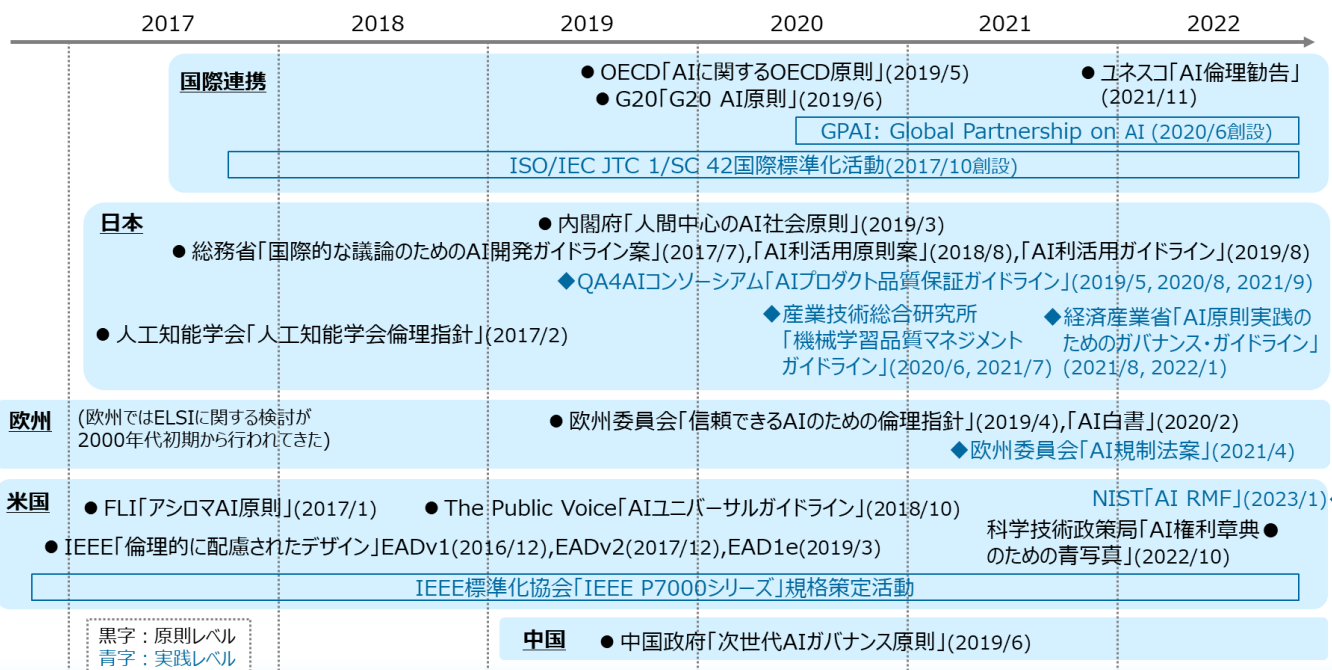
カテライ アメリア・他:「生成AI(Generative AI)の倫理的・法的・社会的課題(ELSI)論点の概観: 2023年3月版」(阪大ELSI NOTE No.26), doi:10.18910/90926等からリストアップ

AIアライメント研究の推進

AI戦略「Trusted Quality AI」の一層の取り組み強化へ

- AIの安全性・信頼性確保は、AI戦略にも掲げ、産業界や標準化とも連携して、日本が国際的にも先行して開発・実践している技術領域
- この強みを維持・強化するため、基盤モデル・生成AIの問題にも取り組める環境・体制作りが肝要

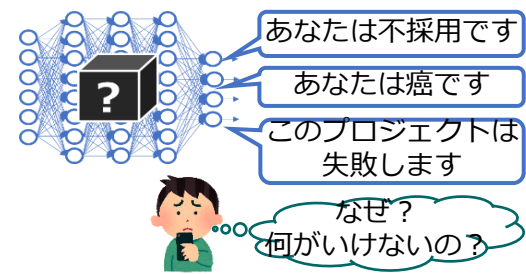
AI関連ガイドライン動向: AI ELSIは原則から実践へ



AIの問題と対策技術開発(AIソフトウェア工学)

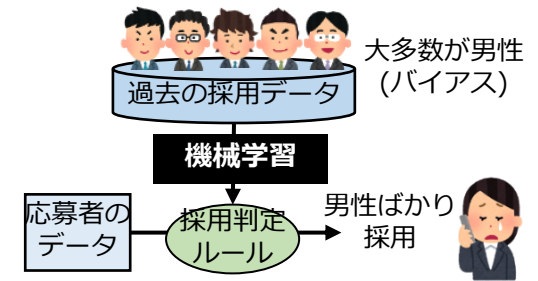
ブラックボックス問題

理由や原因が分からない/説明できない



バイアス問題

偏見助長・差別を引き起こす



説明可能AI(XAI)技術等

脆弱性問題

誤認識を誘発する敵対的サンプル攻撃 (他にもデータ汚染・モデル抽出攻撃等)

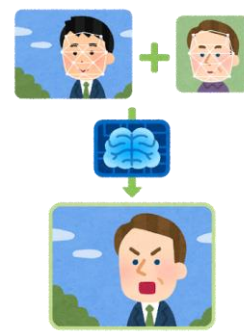


AIセキュリティ技術、機械学習テスト技術等

公平性配慮機械学習技術等

フェイク問題

生成AIによるフェイク画像・動画・音声・文章の生成 (ディープフェイク)



研究コミュニティ/プロジェクト

- 機械学習工学研究会MLSE
- QA4AIコンソーシアム
- JST CREST/さきがけ「信頼されるAI」
- JST MIRAI eAIプロジェクト
- NEDO/産総研 AIQMプロジェクト
- AI Alignment Japan

ここまでのまとめ

基盤モデル/生成AIの問題点

1. 極めて大規模な計算資源を必要とする
2. 論理推論・論理構築や実世界操作に十分対応できていない
3. ELSIに関わる様々な懸念
 - なぜ高い性能が出るのか、そのメカニズムは分かっていない

上記問題に対処し、人間・社会との親和性が高く、高性能で安全・エコな次世代AIモデル(第4世代AI)を生み出す

重要な基礎研究課題

- ① **次世代AIモデル研究** 脳科学AI融合、認知発達、知能ロボット等での強みを活かして先行
- ② **そのAIアライメント研究** AI戦略で推進する「Trusted Quality AI」を一層強化・発展
- ③ **それらを適用したAI・ロボット駆動科学の変革**