

科学的発見のパラダイムシフト: AIは研究開発をどう変革し、自律型「AI科学者」はどのような未来を描くのか

Gemini 3.1 pro

1. 序論: 予測ツールから自律的な「科学者のパートナー」への進化

人工知能(AI)の歴史は、古代の神話における人工生命の物語から、論理学や形式的推論の探求を経て、1940年代のプログラム可能なデジタルコンピュータの開発へと連なる長い軌跡を持つ¹。1950年代初頭の先見的な数学者や計算機科学者による理論的枠組みを土台として、1956年にダートマス大学で開催されたワークショップにおいて「人工知能」という分野が正式に創設され、アレン・ニューウェルとハーバート・A・サイモンらによる初のAIプログラム「Logic Theorist」が発表された¹。その後、過度な期待とそれに続く「AIの冬(AI winter)」と呼ばれる資金提供の打ち切りや産業界からの敬遠の時期を経験しながらも、2000年代以降、強力なコンピュータハードウェアの普及と膨大なデータセットの蓄積により、機械学習は学术界と産業界の広範な問題に適用されるようになった¹。

特に研究開発(R&D)および科学的発見の分野において、AIの役割は根本的なパラダイムシフトの只中にある。現代のAI進化は、大まかに4つのステージに分類することができる。初期のAIは、機械学習アルゴリズムを用いて特定の問題に対する予測を専門に行う「予測ツール(The Predictor)」としての役割が主であった³。第二段階として、大規模言語モデル(LLM)の爆発的な普及により、論文執筆の補助や文献の要約を行う「汎用ツール(The Generalist)」へと進化した³。第三段階では、ツールを介してプロセスや構造を追加することで、より複雑なタスクをこなす「構造化された実行者(The Structured Executor)」へと成長を遂げた³。

そして現在、AI技術は第四の段階、すなわち「自律型クリエイターおよびオーケストレーター(The Autonomous Creator & Orchestrator)」へと移行しつつある³。人間がプロンプトを入力して応答を待つだけの形態から、AIエージェント自身が科学的アーキテクチャを構築し、仮説の立案、実験計画の策定、コードの記述、データ分析、さらには論文の執筆と査読までを自律的に実施する未来が現実のものとなっている³。本レポートでは、AI技術が研究開発プロセスを加速する実態を、最先端の自律型システムの分析、各科学領域(材料科学、創薬、物理学など)におけるブレイクスルー、生産性へのマクロ経済的インパクト、そしてそれに伴う知的財産権の課題や倫理的パラダイムの変容という多角的な視点から徹底的に解説する。

2. 自律型「AI科学者」のワークフローと6つの段階モデル

近年のAI技術は、事前に定義された手順を支援する「自動化(Automation)」の段階から、AIエージェントが自ら科学的ワークフローを設計・検証・実行する「自律化(Autonomy)」への根本的な移行

を推進している⁴。この概念的なシフトは、単に研究を効率化するという実務的な意味にとどまらず、「AIが探求のための単なる道具から、科学的知識そのものの潜在的な創出者へと進化している」という深遠な認識論的問いを投げかけている⁴。

2022年から2025年にかけて開発された自律型AI科学者(AI Scientist)システムの動向を体系的に分析すると、その進化は3つのフェーズに分けられる。初期のフェーズI(2022–2023年)では特定の基礎的モジュールの開発に留まっていたが、フェーズII(2024年)ではこれらのモジュールが閉ループ(Closed-Loop)として統合された⁴。現在のフェーズIII(2025年以降)は、スケーラビリティ、影響力、そして人間との高度な協働を志向するフロンティア段階にある⁴。現代のAI Scientistのアーキテクチャは、エンドツーエンドの研究プロセスを以下の6つの連続したステージに分解するフレームワークで記述される⁴。

1. 文献レビュー(**Literature Review**): 情報の依存関係を整理し、既存の科学文献を検索・抽出・統合する。
2. アイデア創出(**Idea Generation**): 文献データに基づき、未解決の課題や新規性のある研究仮説を自律的に立案する。
3. 実験準備(**Experimental Preparation**): 仮説を検証するための実験プロトコルや、シミュレーションのためのコード環境(パイプライン)を構築する。
4. 実験実行(**Experimental Execution**): 構築された環境を用いてデータ収集や計算・シミュレーションを実行する。
5. 科学的記述(**Scientific Writing**): 実験結果を解釈し、論理的な文脈に沿って結果をテキスト化する。
6. 論文生成(**Paper Generation**): LaTeXなどのフォーマットを用いて、引用文献や図表を含む完全な査読付き論文の形式に出力し、プロセス全体を閉ループとして完結させる。

エンドツーエンドの自律型科学的発見フレームワーク



自律型AI科学者システムに組み込まれた6つの主要な研究ステージ。システムは実験と執筆を完了した後、その結果を次の文献レビューやアイデア創出にフィードバックし、自己改善を繰り返す。

これらのシステムは、単純に自動化されたツールチェーンではなく、結果を批判的に評価し、次の仮説にフィードバックする能力(自己改善機能)を組み込もうとしている点が特徴である。

3. 完全自律型AI科学者システムの実態とアーキテクチャ

前述の6つのステージを統合し、人間の介入なしに高度な研究プロジェクトを遂行する最先端の「AI科学者」プラットフォームが、複数の研究機関やスタートアップから発表されている。以下に代表的な3つのシステムを比較し、そのアーキテクチャと成果を詳述する。

3.1 Sakana AI「The AI Scientist」

東京に拠点を置くスタートアップSakana AIは、オックスフォード大学などの研究者と共同で、機械学習分野の研究ライフサイクル全体を自動化する完全自動型の科学的発見システム「The AI Scientist」を発表した⁶。このシステムは、nanoGPTの学習ラン、2D Diffusion、Grokkingなどの初期コードテンプレートや大まかな研究方向を与えられると、Semantic Scholarを自律的に操作して関連文献を検索し、新規のアイデアを生成する⁷。アイデアが定まると、LLM駆動のコーディングアシスタント「Aider」を使用して、最大5回の反復修正を行いながら実験コード(experiment.py)を実装し、実験を実行する⁶。数値データと視覚的要約を収集した後、LaTeXで完全な論文を執筆し、視覚機能を持つ基盤モデルからのフィードバックを得て図表などの体裁を整える⁸。

さらに特筆すべきは、同システムが「自動査読システム(The Automated Reviewer)」を内蔵している点である。この査読システムは、トップティアの機械学習カンファレンスの基準に基づいて生成論文を評価し、OpenReviewデータセットを用いたベンチマークテストにおいて均衡正解率69%を達成し、NeurIPS 2021の実験で測定された人間同士の評価の一致度を上回る性能を示した⁸。実際に、ICLR(国際表現学習会議)のワークショップにAIが生成した論文を3本提出したところ、1本が人間の採択基準を上回る「6.33」という平均スコア(個別スコアは6、7、6)を獲得し、採択された⁸。また、基礎となる基盤モデルの能力が向上するにつれて、生成される論文の質も指数関数的に向上するという明確な「科学のスケーリング則(Scaling Laws of Science)」が見出されている⁸。このシステムの経済性は極めて高く、10のアイデア生成、7つの実験実行、論文執筆と査読を含む主要な実験の総コストはわずか約42ドルであり、論文1本あたりの平均コストは6ドルから15ドル、人間の労力は約3.5時間で済む⁶。一方で限界も明らかであり、生成されるアイデアが幼稚であったり、深い方法論的厳密さや複雑なコード実装に苦戦したりすることがある⁸。特に、存在しない文献を引用するハルシネーションや、付録での図の重複といった初歩的なミスに加え、自らの結果を批判的に評価・修正する「自己反省」の側面に根本的な弱点があることが分析されている⁶。

3.2 Google Research「AI Co-Scientist」

Google ResearchがGemini 2.0を基盤として開発した「AI Co-Scientist」は、現代の科学的発見プロセスの未充足ニーズを満たすために設計された、マルチエージェント型AIシステムである¹¹。単一のモデルではなく、科学的方法論を模倣した専門エージェントの連合(Generation, Reflection, Ranking, Evolution, Proximity, Meta-review)で構成され、研究目標を与えられると、これらが自動的なフィードバックループを通じて相互に作用する¹¹。このシステムの最大の特徴は、エージェント間で「科学的なディベート(自己対戦型推論)」を行わせ、ランキングトーナメントを通じて仮説の質を比較・評価するメカニズムにある¹¹。内部トーナメントから導出された「Eloレーティング」を用いて自己評価を行い、計算資源(テスト時計算量)をかければかけるほど推論の質が向上する¹¹。分析によれば、高いEloレーティングはGPQAなどの難解なベンチマークにおける正解率と強い相関を示し、熟練した人間の専門家を上回る推論能力を発揮する¹¹。また、Web検索や外部ツールともシームレスに連携してエビデンスに基づいたグラウンディングを行い、15のオープンな研究目標において、ドメイン専門家から既存のベースラインを凌ぐ新規性と影響力を持つと評価された¹¹。AI Co-Scientistは現在、研究機関向けにTrusted Tester Programとして提供されており、実世界のウェットラボ実験の提案や仮説構築における「仮想の共同研究者」として機能している¹¹。

3.3 FutureHouse「Kosmos」

米国の非営利研究機関FutureHouseが開発した「Kosmos」は、単なるテキスト生成を超え、オープンエンドの目標とデータセットを与えられて最長12時間連続で稼働する、データ駆動型の高度な自律型AI科学者である¹²。前身モデルであるRobinから大幅なアップグレードを遂げたKosmosの中核技術は、データ分析エージェントと文献検索エージェントの間で情報を共有するための「構造化された世界モデル(World Model)」である¹⁴。一般的なAIエージェントが複数回のアクション後に文脈の一貫性を失うのに対し、Kosmosはこの世界モデルにより、200回以上のロールアウトを通じても首尾一貫して目的を追求し続ける¹⁴。1回の実行で平均1,500本の論文を読み込み、42,000行以上のコードを実行するという驚異的な処理能力を持つ¹⁴。独立した科学者による評価では、Kosmosが生成したレポート内の記述の79.4%が正確であると確認された¹⁴。また、Kosmosの1日(20サイク

ル)の稼働は、共同研究者の人間の研究者の約6ヶ月分の作業量に匹敵すると報告されている¹⁴。実際のブレイクスルーとして、Kosmosはメタボロミクス、材料科学、神経科学、統計遺伝学の分野にまたがる7つの重要な発見を行っている¹⁴。例えば、未発表のデータセットから「低体温マウスの脳におけるヌクレオチド代謝の経路変化」を特定したり、アルツハイマー病患者のプロテオミクスデータを用いてタウタンパク質蓄積に至る分子事象のシーケンスを解明する新規の分析アプローチを独自に開発するなど、人間の科学者が時間をかけて到達した結論を自律的に再現し、さらに新規の知見を付け加えている¹²。

AI科学者システム	開発主体	主なアーキテクチャと特徴	達成された成果・評価
The AI Scientist	Sakana AI	Aider連携、自動査読システム	ICLRワークショップ採択(スコア6.33)、1論文あたり約15ドルで生成。
AI Co-Scientist	Google Research	Gemini 2.0マルチエージェント、Eloトーナメント	ディベートによるテスト時計算量スケールリング、GPQAスコアとの相関向上。
Kosmos	FutureHouse	世界モデルによる長期間(12時間)稼働、並列実行	1回の実行で42,000行のコード処理。生物学分野などで7つの科学的発見。

4. 自律駆動型ラボ(Self-Driving Labs)と材料科学の革新

情報処理空間で完結するAIシステムに対し、AIの推論を物理空間の実験・合成に直接結びつける「自律駆動型ラボ(Self-driving laboratories: SDLs)」の開発が急速に進展している¹⁶。これは、AI、ロボティクス、自動化技術を統合し、新材料の発見や化学生成のプロセスを根本から変革する試みである。

4.1 化学反応の完全自動化と加速

カーネギーメロン大学(CMU)の研究チームが開発した「Coscientist」は、GPT-4やClaudeなどのLLMを使用して化学実験の全プロセスを自動化した初の非有機的知的システムである¹⁸。研究者が

自然言語で化合物の探索を命じると、Coscientistはインターネットや文献データから合成情報を抽出し、実験コースを選択する¹⁸。その後、Emerald Cloud Labや加熱・振とうモジュールを備えた Opentrons OT-2などのロボットAPIに指示を送り、複雑な化学合成を自動実行する²⁰。特筆すべきは、このAIが2010年のノーベル化学賞の対象となったパラジウム触媒クロスカップリング反応に関する知識を自律的に学習し、わずか数分で実験手順を設計して初回で合成に成功したことである²¹。

同様に、米国アルゴンヌ国立研究所は自律化学プラットフォームを活用し、化学反応の改善と新素材開発を推進している²²。ローレンス・バークレー国立研究所(LBNL)のAdvanced Light Source(ALS)のビームライン7.3.3では、RADIUS Roboticsプロジェクトのもと、AIとロボットアームを統合して微小角入射広角X線散乱(GIWAXS)測定を自動化し、適応的意志決定による高機能材料の最適化を加速させている²³。

4.2 LBNLのA-LabとDeepMind GNoMEを巡る「新規性」の論争

LBNLが運用する完全自律型プラットフォーム「A-Lab(AutoBot)」は、ロボットアーム3台、ファーンズ8台、約200種類の粉末前駆体を備え、24時間365日無人で稼働する²⁴。AIエージェントによる意思決定とアクティブラーニングを組み合わせ、1日に100から200のサンプルをテストする²⁴。手動の実験であれば1年を要するペロブスカイト材料などの合成パラメータの最適化を、A-Labはわずか数週間に短縮し、次世代電池やクリーンエネルギー技術の開発を加速させている²⁴。

このA-Labの基礎となる候補化合物の予測データを提供したのが、Google DeepMindの「GNoME(Graph Networks for Materials Exploration)」である²⁷。DeepMindは、GNoMEを用いて220万個の新しい結晶構造(人類の知の約800年分に相当)を発見し、そのうち38万個が熱力学的に安定であり実験的合成の有望な候補であると発表した²⁷。この深層学習モデルは、MatBench Discoveryに基づく評価で材料安定性予測の発見率を従来の50%から80%へと大幅に向上させた²⁸。

【学界からの批判と論争】しかし、この「数百万の新規材料発見」というDeepMindとLBNLの発表に対しては、実験材料化学の専門家から厳しい批判が提起されている²⁹。カリフォルニア大学サンタバーバラ校のAnthony Cheetham教授らや、プリンストン大学の研究者グループは、GNoMEやA-Labのデータを詳細に検証し、「新規性(Novelty)、信頼性(Credibility)、有用性(Utility)の3つの条件を満たす化合物はほとんど見当たらない」と反論している³⁰。批判の主な論点は以下の通りである。まず、AIが提示した「新規構造」の多くが、すでに知られている化合物の単純な元素置換(類似体)に過ぎず、ポリマーやガラス、複合材料といった広大な材料クラスを除外している点である³⁰。次に、アクチニウムのような実用性のない希少な放射性元素を用いたり、化学的直感から外れた非現実的な酸化数や構造的特徴を含んでいることである³²。さらに、A-Labが合成に成功したとする43の「新規化合物」についても、分析に4つの一般的なエラーがあり、「実質的に新しい材料は一つも発見されていない」と指摘された³⁴。これに対し、DeepMind側は「これまでの人間の化学的直感を逃れていた未知の安定材料候補の数を桁違いに拡大したことは事実であり、すべての主張を支持する」と反論している³³。この論争は、「計算アルゴリズム上の最適解や熱力学的安定性(MLとしての予測)」が、必ずしも「物理的・化学的に有用かつ新規な材料の発見」とイコールではないという、AIによる科学的発見が直面する根源的な課題を浮き彫りにしている。

5. 生命科学、創薬、物理学におけるAI主導の発見

5.1 バイオテクノロジーと創薬プロセスの抜本的変革

創薬産業において、新薬を市場に投入するには平均して約10年の歳月と16.1億ドルから45.4億ドルという莫大なコストがかかる³⁵。しかし、AIと量子コンピューティングの導入は、この状況を劇的に変化させている。AIは仮想データベースを用いたハイスループットのインシリコ(in silico)仮想スクリーニングにより、標的的同定から薬物動態(MID3モデリング)に至るまで、生体分子の相互作用や毒性を極めて高い精度で予測する³⁵。これにより、効果のない候補化合物を早期に排除し、ウェットラボでの高コストな動物実験や化学実験の必要性を削減している³⁷。臨床試験においても、患者の募集やモニタリングの自動化によって試験期間を15%から30%短縮する成果が上がっている³⁹。

この変革の中核にあるのが、DeepMindの「AlphaFold 2」およびその後継である「AlphaFold 3」である³⁸。AlphaFold 3は、Geminiと同様の基盤モデルを利用し、タンパク質構造予測においてかつてないブレイクスルーをもたらした³⁸。ある独立した分析によれば、AlphaFold 2を使用した研究者は新規タンパク質構造の提出が40%以上増加し、その研究成果が臨床論文や特許で引用される確率は従来の2倍に達している⁴⁰。産業界の動きも加速しており、2024年のAI創薬セクターには33億ドルのベンチャー資金が流入した⁴¹。Ignota LabsはAIを用いて既存薬の再利用(リパーパシグ)期間を2年未満、コストを100万ドル未満に抑える取り組みを進めており、NovartisはGenerate:Biomedicinesと10億ドルの提携を結んでいる⁴¹。また、Evaxion Biotechはデジタルツイン技術と深層学習を用いて患者の不均一性を考慮したトランスレーショナルリサーチを展開し、Pharos iBioやParabilis MedicinesはAI主導で特定した腫瘍学領域の候補薬を臨床第I/II相試験へと進めている⁴²。

5.2 物理学: 自然界の法則の再発見と計測の高度化

物理学の基礎領域においても、AIは複雑なデータから法則を抽出する強力な手段となっている。ニューヨーク大学アブダビ校(NYUAD)の研究チームは、1950年代から60年代の素粒子に関する実験データだけをAIシステムに与え、人間が何十年もかけて構築した「標準模型(Standard Model)」の根底にある対称性(バリオン数、アイソスピン、チャームなど)や「八道説(Eightfold Way)」といった粒子分類スキームを、事前の数学的知識なしにAIが独自に再発見できることを実証した⁴³。また、エモリー大学の研究では、宇宙空間から山火事に至るまで存在するダストプラズマ(第4の物質状態)における粒子の3Dトラッキングデータにカスタムニューラルネットワークを適用し、従来の物理学の前提を覆す「非相対的な力(一方通行の相互作用)」のパターンを99%以上の精度でモデル化することに成功した⁴⁴。これはAIが単なるデータの分析を超えて、全く新しい物理法則を発見する能力を持つことを示している⁴⁴。

応用物理学の分野では、プリンストンプラズマ物理研究所(PPPL)が、核融合炉のプラズマを安定させるための診断AIシステム「Diag2Diag」を開発した⁴⁵。このAIは、高価なハードウェアを追加することなく、プラズマ周辺部(ペDESTAL)の電子の温度や密度の測定精度を劇的に向上させる⁴⁵。これにより、将来の商業用核融合炉に搭載する診断装置の数を減らし、システムの小型化と信頼性の向上、メンテナンスコストの削減に直結する成果をもたらしている⁴⁵。気候モデリングの分野でも、15日先の高精度天候予測の限界をAIが押し広げている⁴⁶。

6. R&D生産性へのマクロ経済的インパクトと国家インフラ

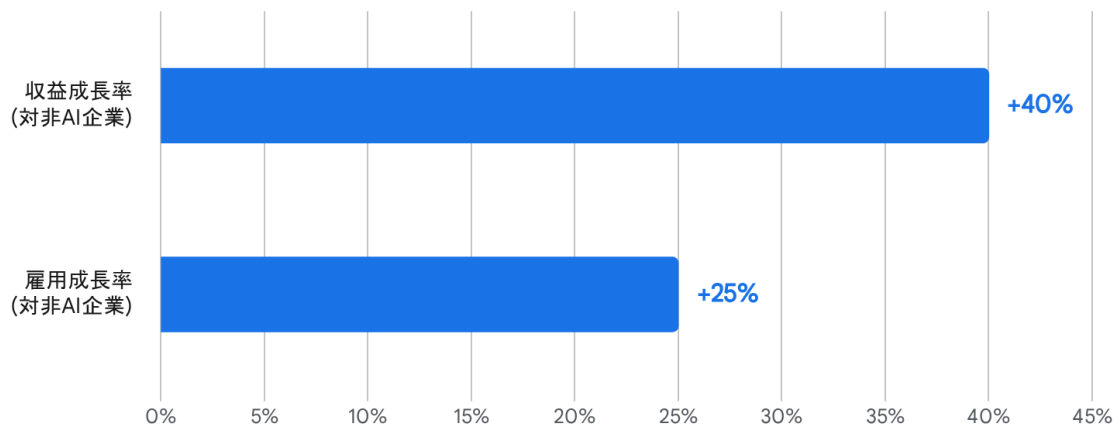
AIが研究開発にもたらす生産性の向上は、一企業の枠を超えてマクロ経済全体に甚大な影響を与える。米国セントルイス連邦準備銀行の調査(2024年11月)によれば、米国労働者の28%が職場で生成AIをある程度利用しており、ユーザーの約31.9%が毎日1時間以上、47.0%が15分から59分にわたってAIを利用しているなど、その普及と利用強度は急速に高まっている⁴⁷。METR(Model Evaluation and Threat Research)が実施したオープンソースリポジトリの経験豊富な開発者を対象とした調査では、AI(Claude 3.5/3.7 Sonnet)を利用できるグループは、リアルワールドのバグ修正や機能追加といった複雑なソフトウェア開発タスクにおいて生産性に有意な影響を与えていることが確認され、AIの研究開発そのものを加速させる自己増殖的な影響が示唆されている⁴⁸。

マッキンゼーの分析によれば、製品が知的財産(IP)で構成される産業や、科学的発見に直結するプロセスを持つ産業において、AIの導入によりイノベーションの速度は最大2倍に加速する可能性がある⁴⁹。複雑な製造業においても、業界によってはR&Dプロセスが20%から80%加速され、グローバル全体で年間約3,600億ドルから5,600億ドルの経済価値が創出されると試算されている⁴⁹。

AIによる研究開発（R&D）の加速と経済的インパクト



AI関連イノベーションによる企業成長の比較 (対非AI企業)



AI駆動型の研究開発がもたらす推定効果。AIを活用するイノベーションは、年間最大5,600億ドルの経済価値を解き放ち、AI関連の特許を持つ企業は同業他社に比べて極めて高い収益と雇用の成長を実現している。

データソース: [McKinsey, U.S. Census Bureau](#)

米国国勢調査局のマイクロデータを用いた詳細な経済分析においても、AI関連の特許イノベーションを持つ企業は、同等の比較企業群に対して、雇用成長率で25%、収益成長率で40%も早いペースで成長しているという結果が示されている⁵⁰。この技術は労働者一人当たりの生産性を高める一方で、企業内での賃金格差を拡大させる傾向も確認されている⁵⁰。ただし、AI導入初期においては「生産性のパラドックス」が存在する。古い企業や既存のプロセスを持つ組織では、AI技術の学習と適応に伴い、短期的に生産性が低下する傾向があるが、この初期の損失を乗り越えた後に長期的な改善と回復が見られるというパターンが実証されている⁵¹。

「AI for Science」を支える国家インフラストラクチャ これらAI主導の科学技術計算の需要爆発に対応するため、国家レベルでの計算インフラの再定義も進んでいる。日本においては、文部科学省の支援のもと、理化学研究所(RIKEN)計算科学研究センター、富士通、そしてNVIDIAの戦略的協業に

より、次世代のフラッグシップスーパーコンピュータ「FugakuNEXT」の開発が進められている⁵²。FugakuNEXTは、従来の「富岳」が得意とした大規模な高パラメーターシミュレーション(台風予測や素材探索)の能力を引き継ぎつつ、FUJITSU-MONAKA-X CPUとNVIDIAのアーキテクチャをNVLink Fusionで接続したハイブリッドAI-HPCシステムとして設計されている⁵³。このシステムは「エクサフロップス級(1秒間に100京回の演算)」の性能を誇り、混合精度計算や物理インフォームドニューラルネットワーク(PINNs)を駆使することで、自動的な仮説生成、コード作成、実験シミュレーションといったAIワークロードと物理シミュレーションを融合した、極めて高度な「AI for Science」の研究基盤を提供することを目指している⁵²。

7. AI生成の科学的発見を巡る知的財産(IP)の法的フレームワーク

AIが「自律的な研究者」として振る舞い、KosmosやA-Labのように未知の分子メカニズムや新たな化合物を設計するようになると、必然的に直面するのが「AIが単独で生成した科学的発見の知的財産権(特許・著作権)は誰に帰属するのか」という法哲学および制度上の問題である⁵⁶。

この議論を国際的な舞台で象徴的に引き起こしたのが、スティーブン・セイラー博士が開発した生成AIシステム「DABUS」を巡る一連の特許出願訴訟(The Artificial Inventor Project)である⁵⁷。セイラー博士は、「AIシステム自身が自然人と同レベルの独自かつ特徴的な技術的アイデアの源泉になり得る」として、DABUSそのものを「発明者(Inventor)」としてリストアップし、米国、欧州特許庁、英国、日本、オーストラリアなどの特許庁に国際特許出願(PCT)を行った⁵⁹。しかし、世界各国の特許庁および司法は一貫してこの主張を退けている。米国特許商標庁(USPTO)の却下決定を支持した連邦巡回控訴裁判所の判決(Thaler v Vidal, 2022)では、米国特許法における「発明者」の定義は自然人(Human / Natural Person)に限定されており、特許要件の中核である「着想(Conception)」は人間の精神的行為にのみ認められると明確に判示された⁵⁷。米国最高裁判所も、2026年3月にこの裁定に対する上訴(Thaler v Perlmutter)の受理を拒否し、AI単独の発明性を否定する姿勢を確定させている⁵⁸。

同様に日本においても、2025年1月30日、知的財産高等裁判所(IPHC)がDABUS事件の控訴審判決を下した⁵⁹。IPHCは東京地方裁判所の判断を支持し、現在の日本の特許法において発明者は「特許を受ける権利を有する者(自然人)」に限定されており、法的能力を持たないAIシステムを発明者とする出願には法的根拠がないとして請求を棄却した⁶⁰。IPHCは同時に、「現行法が導入された時点では近年のAIによる自律的発明は想定されておらず、新たな立法枠組みは国民的な議論のもとに解決されるべき問題だ」と付言している⁶⁰。これを受け、日本の内閣府は「知的財産推進計画2025」において、AIを発明者または出願人とする資格についての議論の要点を示し、迅速な立法対応を提案している⁵⁹。

人間による「重大な貢献(Significant Contribution)」の要請 これらの判決を受け、各国の規制当局は実務的な対応を進めている。USPTOは2025年11月、AIを利用した発明(AI-Assisted Inventions)に関する改訂ガイダンスを発行した⁵⁷。この新フレームワークでは、AIはソフトウェアや実験器具と同様の「道具(Instrument)」として扱われ、人間の自然人がその発明の着想に対して「重大な貢献(Significant Contribution)」を行っている限りにおいて特許保護の対象となると再確認された⁵⁷。また、共同発明におけるPannuファクター分析を緩和し、プロAI型のイノベーション政策シフト

を鮮明にしている⁵⁷。

著作権に関しても同様の原則が適用されている。米国著作権局は、AIが単独で作成したコンテンツ（画像、コード、テキスト）は人間の著作者要件を欠くため登録できないとする一方、人間がAIの生成した要素に対して編集、アレンジ、選択などの「実質的な創造的関与（Significant creative input）」を行った場合には、著作権保護の対象になり得ると明確化している⁵⁶。欧州連合（EU）のAI法（AI Act）も、イノベーションと著作権保護のバランスを取るため、AIのトレーニングデータに関する透明性要件を導入するなど、国際的なルール作りが急ピッチで進められている⁶²。これらの法的スタンスは、製薬企業や材料メーカーのIP戦略に直接的な影響を与える。AIシステムが単独で導き出した最適解をそのまま特許化することはできず、AIの出力を人間がどのように解釈し、検証し、実用化のプロセスに深く関与したかを証明する緻密な記録と人間主導の証拠が求められるのである⁶⁵。

8. 定性的研究におけるAIの影響と「Human in charge of the loop」の倫理的要請

AIが科学的推論やデータ分析に深く浸透するにつれ、研究の客観性と倫理に関するパラダイムが揺らいでいる。全米科学アカデミー（NAS）が提唱するように、生成AIの時代においては、透明性、説明責任、再現性、そして人間の責任という「科学の完全性（Scientific Integrity）」を守るための5つの原則がかつてなく重要になっている⁶⁶。

現在のAIシステムが抱える最大の技術的・倫理的課題は、「不透明性と再現性の危機」である⁶⁸。AI、特に深層学習アルゴリズムは複雑なブラックボックスとして機能するため、研究者自身が「なぜAIがその仮説や結果に至ったのか」を完全に理解できないケースが多い⁶⁸。Sakana AIのThe AI Scientistが示したように、存在しない文献を引用するハルシネーションや、アルゴリズム上の最適化偏重による論理の飛躍は、意図せぬ研究不正や誤導を引き起こすリスクを孕んでいる⁸。さらに、AIは過去のトレーニングデータから人間のバイアスを引き継ぐにもかかわらず、その出力が「AIによる計算結果」としてパッケージ化されることで、客観的であるかのような「偽の科学的権威」を帯びてしまう危険性が社会学者などから指摘されている⁶⁸。

定性的研究（Qualitative Research）における人間性の喪失リスク AIの影響は、大量の数値を扱う自然科学だけでなく、アンケートやインタビューなどの言語データを扱う定性的研究（Qualitative Research）にも波及している。LLMの高度なテキスト生成能力を利用し、人間の被験者の代わりにAIを「模擬被験者」として利用したり、質的データの解釈を完全にAIに代替させたりする試みが増加している⁷¹。しかし、これには解釈主義（Interpretivism）の観点から強い批判が存在する⁷³。フェミニスト新唯物論に基づく分析が示すように、定性的研究の核心は、人間の「感情（Affect）」や「経験の豊かさ」、そして文脈の微細な揺らぎを捉えることにある⁷¹。AIは大量のインタビューデータからパターンの認識やトーンの模倣（例：上昇調の話し方や沈黙のトラッキング）を行うことには極めて優れているが、「認知的共感（ストーリーの理解）」「感情的共感（理由と強度の理解）」「思いやりの共感（洞察に満ちた行動への変換）」といった、物語の背景にある意図を汲み取る真の能力は持ち合わせていない⁷¹。そのため、AIを定性データの「解釈者」として無批判に導入することは、人間の微妙なコミュニケーションを見落とし、研究の質を根本から損なう恐れがある⁷³。

「Human-in-the-loop」から「Human in charge of the loop」へ これらAIの過度な自律化に対抗す

る概念として、AIガバナンスの枠組みは、従来の「Human-in-the-loop(ループの中に人間がいる)」から「Human in charge of the loop(人間がループの主導権を握る)」へと進化している⁷⁵。これまでのHuman-in-the-loopの概念では、人間の役割が「AIが生成した決定の最終承認ボタンを押すだけ」に形骸化しがちであり、人間が思考を放棄してAIの判断を盲目的に受け入れる「自動化バイアス(Automation Bias)」や「ラバースタンプ問題」を引き起こしていた⁷⁰。

対照的に「Human in charge of the loop」は、AIと人間の役割を明確に分断し、最終的な権限と説明責任を人間に帰属させる。このモデルにおいて、AIの役割は、超大規模なパターンの記憶と認識、文献の網羅的検索、そしてテキスト・音声・映像などマルチモーダルな合成を行う「スケーラブルな情報処理」に限定される⁷⁴。一方で人間の研究者は、倫理的判断、仮説の最終的な妥当性検証、そして文脈の深い解釈と共感に基づく意志決定の責任を負う⁷⁴。この協働の在り方を体現するのが、「AbductivAIモデル」や「MIXAI」のようなアプローチである。ここでは、生成AIを単なる処理ツールとしてではなく、「共同研究者(Co-researcher)」として位置づけ、Chain-of-Thought(思考の連鎖)プロンプティングを通じて演繹的・帰納的・アブダクティブな推論をAIに展開させる⁷⁶。しかし、その結果を受け入れ、自動的な推論と文脈的な解釈の間の緊張関係を調停し、最終的な「意味のキュレーター」として機能するのは、他ならぬ人間の研究者なのである⁷⁶。

役割の分類	AI(機械)の得意領域	人間(研究者)の必須領域
データ処理と抽出	大規模なパターン認識、マルチモーダル合成、瞬間的なエビデンス検索	データの持つ意味の文脈的解釈、例外事象の哲学的分析
仮説と推論	オープンエンドなアイデア生成、数万行のコード実行と計算シミュレーション	仮説の現実的妥当性の検証、研究方向性の決定、倫理的判断
定性的理解	言語のパターンマッチング、矛盾の整理	認知的・感情的・思いやりの共感、人間の経験の深さの理解
権限と責任	プロセスの自動実行(Instrument/Co-researcherとしての役割)	最終的な結果の承認、特許権・著作権に基づく法的な説明責任

結論

論文の要約や執筆補助から始まった研究開発におけるAI活用は、いまや限定的な「予測ツール」の枠を超え、データ駆動型の発見を自律的に推進する「自律型クリエイター」へと劇的な飛躍を遂げた。Sakana AIのThe AI ScientistやGoogleのAI Co-Scientist、FutureHouseのKosmosといった最先端の自律型システムは、人間が数ヶ月を要する膨大な文献レビューや複雑なコーディング、仮説検証、そして論文執筆のプロセスを数時間から数日のうちに完了させている。さらに、LBNLのA-LabやCMUのCoscientistに代表される自律駆動型ラボ(SDLs)は、AIの知性を物理的な化学合成空間に持ち込み、実験の大規模な自動化を実現した。AlphaFoldによる創薬の劇的なコスト削減から、AIによる物理学の基本法則の再発見に至るまで、AIはあらゆる科学的プロセスの限界を押し広げている。マクロ経済における数千億ドル規模の価値創出の予測や、FugakuNEXTのようなAI・シミュレーション融合型の国家的インフラ構築の動きは、この技術的パラダイムシフトが不可逆であることを明確に示している。

しかし、DeepMindのGNoMEによる「数百万の新規材料候補」を巡る実験化学者たちとの論争が浮き彫りにしたように、アルゴリズムが導き出す計算上の最適解や熱力学的な予測が、直ちに現実世界における「有用で新規な科学的真理」となるわけではない。AIは、人類がかつてアクセスできなかった規模のデータセットから、前例のない速度で相関や隠れた構造を抽出できる卓越した「探索者」である。だが、そのデータが持つ真の意味を解釈し、アルゴリズムのバイアスやハルシネーションを排除し、実社会での有用性や倫理的妥当性を判断するのは、依然として人間の責務である。各国の特許法や知的財産に関する司法判断が「特許を受ける権利を有する発明者は自然人に限られる」と厳格に定めている事実は、単なる法制度上の制約にとどまらず、科学技術という営みが本質的に人間の創造的・精神的行為、そして法的な説明責任に根ざしていることを象徴している。

自律型「AI科学者」の台頭が描く未来は、人間の研究者を研究室から追放するものではない。むしろ、果てしない試行錯誤やパラメータ調整、膨大な文献の精査といった労働集約的な作業をAIが担うことで、人間の研究者はデータの泥臭い処理から解放される。そして、「次にどの問題を解くべきか」「その結果は人類にとってどのような意義を持つのか」という、最も根源的で高度な哲学的・科学的推論にリソースを集中できるようになるのである。真に革新的な研究開発体制は、AIの自律性を計算インフラの極限まで引き出しつつ、人間が「Human in charge of the loop」として確固たる主導権と責任を握り続ける、強靱なハイブリッド協働パラダイムの先にこそ存在している。

引用文献

1. History of artificial intelligence - Wikipedia, 4月 30, 2026にアクセス、
https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_artificial_intelligence
2. The History of AI: A Timeline of Artificial Intelligence | Coursera, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://www.coursera.org/articles/history-of-ai>
3. The Four Stages of AI Evolution. How To Build an AI We Can Trust - Omer Trajman, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://otrajman.medium.com/the-four-stages-of-ai-evolution-79ace732e157>
4. A Survey of AI Scientists, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://arxiv.org/html/2510.23045v3>

5. A Survey of AI Scientists - arXiv, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://arxiv.org/html/2510.23045v4>
6. An Evaluation of Sakana's AI Scientist for Autonomous Research: Wishful Thinking or an Emerging Reality Towards 'Artificial General Research Intelligence' (AGRI)? - arXiv, 4月 30, 2026にアクセス、<https://arxiv.org/html/2502.14297v1>
7. The AI Scientist: Towards Fully Automated Open-Ended Scientific Discovery - Sakana AI, 4月 30, 2026にアクセス、<https://sakana.ai/ai-scientist/>
8. The AI Scientist: Towards Fully Automated AI Research, Now ..., 4月 30, 2026にアクセス、<https://sakana.ai/ai-scientist-nature/>
9. The AI Scientist: Towards Fully Automated Open-Ended Scientific Discovery - GitHub, 4月 30, 2026にアクセス、<https://github.com/sakanaai/ai-scientist>
10. The AI Scientist Generates its First Peer-Reviewed Scientific Publication, 4月 30, 2026にアクセス、<https://sakana.ai/ai-scientist-first-publication/>
11. Accelerating scientific breakthroughs with an AI co-scientist - Google Research, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://research.google/blog/accelerating-scientific-breakthroughs-with-an-ai-co-scientist/>
12. Kosmos: An AI Scientist for Autonomous Discovery - Edison Scientific, 4月 30, 2026にアクセス、<https://edisonscientific.com/articles/announcing-kosmos>
13. FutureHouse, 4月 30, 2026にアクセス、<https://www.futurehouse.org/>
14. 1 Introduction - arXiv, 4月 30, 2026にアクセス、<https://arxiv.org/html/2511.02824v1>
15. FutureHouse Announces 'Kosmos': An AI Scientist Agent That Users Estimate Can Perform 6 Months Of Work In One Day, Reading 1,500 Papers And Writing 42,000 Lines Of Code Per Run. : r/accelerate - Reddit, 4月 30, 2026にアクセス、
https://www.reddit.com/r/accelerate/comments/1opd5jv/futurehouse_announces_kosmos_an_ai_scientist/
16. Reimagining the Future of Materials Discovery: From Automation to Collaboration | Rafik Hariri Institute for Computing and Computational Science & Engineering - Boston University, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://www.bu.edu/hic/2025/10/14/reimagining-the-future-of-materials-discovery-from-automation-to-collaboration/>
17. Self-Driving Laboratories for Chemistry and Materials Science | Chemical Reviews, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.4c00055>
18. AI Coscientist automates scientific discovery - College of Engineering at Carnegie Mellon University, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://engineering.cmu.edu/news-events/news/2023/12/20-ai-coscientist.html>
19. CMU-Designed Artificially Intelligent Coscientist Automates Scientific Discovery, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://www.cmu.edu/mcs/news-events/2023/1220-ai-coscientist-automates-discovery>
20. Coscientist: Autonomous Chemistry with LLM Agents - Hunter Heidenreich, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://hunterheidenreich.com/notes/computational-chemistry/llms-for-chemistry/autonomous-chemical-research-coscientist/>

21. Meet 'Coscientist,' your AI lab partner | NSF - U.S. National Science Foundation, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://www.nsf.gov/science-matters/meet-coscientist-your-ai-lab-partner>
22. Autonomous Discovery Projects | Argonne National Laboratory, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://www.anl.gov/autonomous-discovery/projects>
23. Robotics Project Pushes Toward Self-Driving Materials Optimization, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://als.lbl.gov/robotics-project-pushes-toward-self-driving-materials-optimization/>
24. Meet the Autonomous Lab of the Future - Berkeley Lab News Center, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://newscenter.lbl.gov/2023/04/17/meet-the-autonomous-lab-of-the-future/>
25. Optimized Materials in a Flash - Berkeley Lab News Center, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://newscenter.lbl.gov/2025/09/18/optimized-materials-in-a-flash/>
26. Autonomous experimentation for accelerated materials discovery – CEDER Group at Berkeley and LBL, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://ceder.berkeley.edu/research-areas/autonomous-experimentation-for-accelerated-materials-discovery/>
27. Millions of new materials discovered with deep learning - UC Berkeley Law, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://www.law.berkeley.edu/wp-content/uploads/2024/02/Millions-of-new-materials-discovered-with-deep-learning-Google-DeepMind.pdf>
28. Millions of new materials discovered with deep learning - Google DeepMind, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://deepmind.google/blog/millions-of-new-materials-discovered-with-deep-learning/>
29. 1月 1, 1970にアクセス、
<https://www.nature.com/articles/d41586-024-01446-w>
30. Study takes issue with DeepMind AI's material discovery claims - Silicon Republic, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://www.siliconrepublic.com/machines/deepmind-ai-study-criticism-materials-discovery>
31. Artificial Intelligence Driving Materials Discovery? Perspective on the Article: Scaling Deep Learning for Materials Discovery | Chemistry of Materials - ACS Publications, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemmater.4c00643>
32. Two studies have now come out that have now dismissed claims by Google Deepmind last year about autonomous discovery of new materials : r/singularity - Reddit, 4月 30, 2026にアクセス、
https://www.reddit.com/r/singularity/comments/1bzl9l/two_studies_have_now_come_out_that_have_now/
33. Boffins deem Google DeepMind's material discoveries rather shallow - The Register, 4月 30, 2026にアクセス、
https://www.theregister.com/2024/04/11/google_deepmind_material_study/
34. Is Google's AI Actually Discovering 'Millions of New Materials?' - 404 Media, 4月 30, 2026にアクセス、

<https://www.404media.co/google-says-it-discovered-millions-of-new-materials-with-ai-human-researchers/>

35. Transforming drug discovery: the impact of AI and molecular simulation on R&D efficiency, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11703525/>
36. Harnessing AI and Quantum Computing for Accelerated Drug Discovery: Regulatory Frameworks for In Silico to In Vivo Validation - MDPI, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://www.mdpi.com/2813-9380/2/3/11>
37. Harnessing AI and Quantum Computing for Revolutionizing Drug Discovery and Approval Processes: Case Example for Collagen Toxicity - JMIR Bioinformatics and Biotechnology, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://bioinform.jmir.org/2025/1/e69800>
38. Review of AlphaFold 3: Transformative Advances in Drug Design and Therapeutics - PMC, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11292590/>
39. Artificial Intelligence (AI) Applications in Drug Discovery and Drug Delivery: Revolutionizing Personalized Medicine - PMC, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11510778/>
40. AlphaFold: Five Years of Impact - Google DeepMind, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://deepmind.google/blog/alphafold-five-years-of-impact/>
41. How AI is transforming drug discovery, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://www.drugdiscoverynews.com/ai-is-transforming-drug-discovery-16706>
42. From Lab to Clinic: How Artificial Intelligence (AI) Is Reshaping Drug Discovery Timelines and Industry Outcomes - PMC, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12298131/>
43. New Study Shows AI Recreates Foundations of Particle Physics, Paving Path Toward Discovering Nature's Laws - NYU Abu Dhabi, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://nyuad.nyu.edu/en/news/latest-news/science-and-technology/2026/march/nyuad-researchers-demonstrate-ai-rediscovered-basics-laws-physics.html>
44. AI just discovered new physics in the fourth state of matter | ScienceDaily, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://www.sciencedaily.com/releases/2026/04/260422044635.htm>
45. New AI enhances the view inside fusion energy systems | Princeton Plasma Physics Laboratory, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://www.pppl.gov/news/2025/new-ai-enhances-view-inside-fusion-energy-systems>
46. AI for Science: The Reach and Limits of AI for Scientific Discovery - NeurIPS 2026, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://neurips.cc/virtual/2025/workshop/109578>
47. The Impact of Generative AI on Work Productivity | St. Louis Fed, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://www.stlouisfed.org/on-the-economy/2025/feb/impact-generative-ai-work-productivity>
48. Measuring the Impact of Early-2025 AI on Experienced Open-Source Developer Productivity, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://metr.org/blog/2025-07-10-early-2025-ai-experienced-os-dev-study/>

49. How AI is driving R&D productivity - McKinsey, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/the-next-innovation-revolution-powered-by-ai>
50. Quantifying the Impact of AI on Productivity and Labor Demand: Evidence from U.S. Census Microdata1 - American Economic Association, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://www.aeaweb.org/conference/2020/preliminary/paper/Tz2HdRna>
51. The 'productivity paradox' of AI adoption in manufacturing firms - MIT Sloan, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/productivity-paradox-ai-adoption-manufacturing-firms>
52. AI for Science Platform Division | RIKEN, 4月 30, 2026にアクセス、
https://www.riken.jp/en/research/labs/r-ccs/ai_sci_plat/index.html
53. Call for proposals for naming RIKEN's new "AI for Science" supercomputer, 4月 30, 2026にアクセス、
https://www.riken.jp/en/news_pubs/news/2025/20251120_1/index.html
54. RIKEN, Japan's Leading Science Institute, Taps Fujitsu and NVIDIA for Next Flagship Supercomputer, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://blogs.nvidia.com/blog/fugakunext/>
55. Supercomputer Fugaku | Fujitsu Global, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://global.fujitsu/en-global/technology/research/fugaku>
56. Intellectual Property Challenges for AI-Generated Content - Super Lawyers, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://www.superlawyers.com/resources/science-and-technology-law/intellectual-property-challenges-for-ai-generated-content/>
57. Revised USPTO guidance on inventorship for AI-assisted inventions: a pro-innovation pivot away from Pannu factors - Oxford Academic, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://academic.oup.com/jiplp/advance-article/doi/10.1093/jiplp/jpag021/8528856>
58. The Artificial Inventor Project, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://artificialinventor.com/>
59. AI as an Inventor of Patents? IP High Court Judgment and the 2025 IP Strategic Program, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://www.aippi.org/news/ai-as-an-inventor-of-patents-ip-high-court-judgment-and-the-2025-ip-strategic-program/>
60. IP High Court Case Regarding Patent Inventorship: Patent Inventor Must Be Human, 4月 30, 2026にアクセス、
https://shigapatent.com/en/topics/iphc_dabus/
61. <AI Update> AI Inventorship: IP High Court in Japan Rules AI Cannot Be Listed as Inventor | Publications | Nagashima Ohno & Tsunematsu, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://www.nagashima.com/en/publications/publication20250214-1/>
62. Generative AI: Navigating intellectual property | Nixon Peabody LLP, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://www.nixonpeabody.com/insights/articles/2025/09/17/generative-ai-navigating-intellectual-property>
63. Copyright and Artificial Intelligence | U.S. Copyright Office, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://www.copyright.gov/ai/>

64. AI, Copyright, and the Law: The Ongoing Battle Over Intellectual Property Rights, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://sites.usc.edu/iptls/2025/02/04/ai-copyright-and-the-law-the-ongoing-battle-over-intellectual-property-rights/>
65. Patenting AI Discoveries in Life Sciences: Overcoming Eligibility, Disclosure, and Inventorship Challenges - Taft Law, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://www.taftlaw.com/news-events/law-bulletins/patenting-ai-discoveries-in-life-sciences-overcoming-eligibility-disclosure-and-inventorship-challenges/>
66. Human Accountability and Responsibility Needed to Protect Scientific Integrity in an Age of AI, Says New Editorial, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://www.nationalacademies.org/news/human-accountability-and-responsibility-needed-to-protect-scientific-integrity-in-an-age-of-ai-says-new-editorial>
67. The ethics of using artificial intelligence in scientific research: new guidance needed for a new tool - PMC, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12057767/>
68. Research integrity in the era of artificial intelligence: Challenges and responses - PMC - NIH, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11224801/>
69. Ethical concerns mount as AI takes bigger decision-making role - Harvard Gazette, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://news.harvard.edu/gazette/story/2020/10/ethical-concerns-mount-as-ai-takes-bigger-decision-making-role/>
70. View of Social Scientists on the Role of AI in Research - AAI Publications, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://ojs.aaai.org/index.php/AIES/article/view/36568/38706>
71. Full article: More or less than human? Evaluating the role of AI-as-participant in online qualitative research, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14780887.2024.2311427>
72. Can Generative AI Replace Humans in Qualitative Research Studies? - CMU School of Computer Science, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://www.cs.cmu.edu/news/2025/lms-study-participants>
73. Paradigm shifts: exploring AI's influence on qualitative inquiry and analysis - PMC - NIH, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11656929/>
74. Human in the Loop: Getting AI Right in Qualitative Research, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://researchworld.com/articles/human-in-the-loop-getting-ai-right-in-qualitative-research>
75. A human in charge of the loop in AI? - ResearchGate, 4月 30, 2026にアクセス、
https://www.researchgate.net/post/A_human_in_charge_of_the_loop_in_AI
76. Human-in-the-Loop: Qualitative Research in the Age of AI - Ludomedia EN, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://en.ludomedia.org/human-in-the-loop-qualitative-research-in-the-age-of-ai/>
77. Human-in-the-loop or AI-in-the-loop? Automate or Collaborate? - arXiv, 4月 30, 2026にアクセス、
<https://arxiv.org/html/2412.14232v1>