TECHNICAL & IP STRATEGY REPORT

純粋数学の難問解決から見る AI「ゼロイチ発明」の現在地と展望

― リーマン予想（1859 年提起）への人間・AI 共創アプローチが示唆する研究開発・知財実務のパラダイムシフト ―

作成日：2026 年 11 月 22 日 ｜ 対象領域：AI 駆動型 R&D・特許実務・知財戦略

Gemini 4 Carbon

【エグゼクティブ・サマリー：AI 単独のゼロイチ発明は「もうじき」か？】

1859 年にベルンハルト・リーマンが提起して以来 167 年の難問とされる「リーマン予想」[1] をはじめ、純粋数学の未解決問題に対して人間と推論型 AI が共創して証明へ到達する動きは、AI が過去の学習データの単なる補間（内挿）を超え、**「閉じた論理空間における非自明な仮説生成・論理飛躍」**を実現しつつあることを示している [2, 3, 4]。

しかし、これを根拠に「実社会・産業領域において AI が単独でゼロイチ発明（特許法上の『自然法則を利用した技術的思想の創作』[8]）を自律創出する時代が目前にある」と結論づけるのは早計である。純粋数学と実世界の発明の間には、**①開いた物理空間の不確実性、②物理実験（ウェットラボ・実機試作）による検証速度のボトルネック [5, 6]、③市場文脈や暗黙知に基づく「課題設定」の非定型性**という 3 つの構造的障壁が存在する。

実務的に最も的確な現在地の解釈は、「完全自律型のゼロイチ発明」の到来ではなく、**「人間が『解くべき真の課題（What / Why）』と評価軸を定義し、AI が人間の認知限界を超えた異分野結合によって『非自明な解決手段（How）』を導き出す【共創型ゼロイチ発明】が爆発的に加速するフェーズに突入した」**という点にある。

第 1 章　「純粋数学の証明」と「実世界のゼロイチ発明」の決定的な構造差

数学上の難問解決と産業上のゼロイチ発明は、いずれも高度な知的創造活動である点では共通するものの、AI の情報処理および強化学習のアーキテクチャから見ると、難易度の性質が根本的に異なる。わが国の特許法第 2 条第 1 項において「発明」とは**「自然法則を利用した技術的思想の創作のうち高度のもの」**と定義されており、数学上の公式や純粋な論理法則そのものは自然法則の利用を欠くため、そのままでは特許法上の「発明」に該当しない [8, 11]。

推論特化型 AI（Reasoning Models）やニューロシンボリック AI が数学・プログラミング領域で驚異的なブレイクスルーを起こしている背景には、以下の表 1 に示す **3 つの構造的非対称性**が存在する。

比較軸	純粋数学の難問解決（定理証明）	産業・技術におけるゼロイチ発明
ルールと環境の性質	**閉じた論理空間（Closed World）** 公理系と推論規則が完全に定義されており、外部環境のノイズや経時変化が存在しない [1, 2]。	**開いた現実空間（Open Physical World）** 未知の界面現象、不純物、製造誤差、熱・機械的疲労、使用環境変動など未モデル化要因が常在する [5, 8]。
検証コストと速度（Verifier の有無）	**計算機内で高速・100%確実に判定可能** Lean 4 等の形式検証器（定理証明支援系）により、AI が生成した証明ステップの正誤をミリ秒〜秒単位で厳密判定できる [2, 3]。	**物理的な試作・実験・計測が不可欠** 未知の領域ほどシミュレータの外挿精度が低下するため、最終的に合成・試作・評価（ウェットラボ等）の物理的時間が律速となる [5, 6]。
目的関数の設定（Goal Definition）	**明確なゴールが人間から与えられる** 「特定の予想・命題を証明せよ」という達成基準（目的関数）が当初から一義的に定まっている [1, 3]。	**「何が未解決課題か」自体が曖昧・多目的** 顧客の潜在的ペイン、製造コスト、法規制、既存設備との適合性など、相反する制約から課題自体を定義する必要がある [10, 12]。

表 1：純粋数学の難問解決と産業・技術分野におけるゼロイチ発明の構造比較

特筆すべきは「**形式検証器（Verifier）と強化学習ループの結合**」である。数学分野では、Lean 4 [2] のような形式言語上に命題を記述すれば、AI が何百万通りの補助定理や証明パスを探索しようとも、論理的破綻やハルシネーション（幻覚）を計算機が即座に棄却し、正しい推論ステップのみを報酬シグナルとして自己強化できる。AlphaGeometry [3] や FunSearch [4] が人間未踏の解法を発見できた核心も、この「高速・無謬の自動評価器」の存在にある。

対照的に、化学・材料・機械・半導体・バイオ・機能性食品といった実空間の技術領域では、真の意味での「ゼロイチ（従来の延長線上にない新規現象や非連続な構造）」に踏み込むほど、既存の第一原理計算や有限要素法（FEM）シミュレータの前提条件が崩れる。たとえば Google DeepMind の GNoME は計算機上で 220 万種以上の結晶構造候補を予測し、そのうち約 38 万種を熱力学的に安定と推定したが [6]、それを実用材料として成立させるには、合成経路の確立・焼結や成形時の欠陥制御・長期信頼性評価といった物理世界の検証プロセスが不可欠となる [5]。この「**思考速度（デジタル）と物理検証速度（フィジカル）の圧倒的なギャップ**」こそが、実世界での自律的ゼロイチ発明を阻む最大の律速要因である。

第 2 章　「発明」の二段階分解で見える AI の現在地

特許実務および研究開発マネジメントの観点から、発明の成立プロセスを「**① 課題の発見・設定（Problem Formulation）**」と「**② 解決手段の創出（Solution Generation）**」の 2 段階に分解すると、AI がすでに人間を凌駕しつつある領域と、依然として人間に依存している領域が明確に切り分けられる。

■ 2.1 異分野結合・多目的最適化による「解決手段のゼロイチ」：実用圏内へ到達

解決すべき技術課題と評価指標（目的関数および制約条件）が明確に定式化された状態であれば、AI による「解決手段のゼロイチ創出」はすでに現実のものとなりつつある。たとえば、「応答速度を支配する熱時定数の極小化と機械的耐衝撃性を両立する新規センサー構造」や「特定環境下での分解耐性と生体適合性を同時に満たす新規ポリマー配合」のように、トレードオフ関係にある複数の物性パラメータが定義された場面を想定したい。

- **専門領域のサイロ化を超えた異分野転用：** 人間の技術者は自身の専門領域（例：無機セラミックス、高分子化学、精密機械など）の経験則や業界常識に縛られやすい。これに対し、全産業

の技術文献・特許公報を横断学習した推論モデルは、たとえば「宇宙構造物の折紙工学（オリガミ・メタマテリアル）の知見を医療用ステントや熱交換器流路に転用する」といった、当業者にとって極めて非自明（特許法第 29 条第 2 項における進歩性が高い [8, 11]）な解決手段の仮説を大量かつ瞬時に構築できる。

- **内挿から「検証付き外挿」への進化：** 従来の機械学習（マテリアルズ・インフォマティクス等）は過去データの統計的補間（内挿）にとどまっていたが、最新の推論モデルと進化的探索アルゴリズムの結合 [4, 7] により、既存データの分布外にある非直感的な構造・配合であっても、論理的推論ステップを積み重ねて候補を絞り込むことが可能となっている。

■ 2.2 暗黙知と価値判断を伴う「課題設定のゼロイチ」：依然として人間の独壇場

一方で、まだ誰も言語化していない現場の違和感や市場の潜在的ペインをすくい上げ、**「そもそも我々はこの技術課題を解くべきである」**と定義する本来の意味でのゼロイチ（課題設定の発明）は、AI 単独では依然として到達困難である。

- **現場の暗黙知と身体性の欠如：** 製造ラインにおける「カタログスペックには表れない設備固有のクセ」「原料ロット間の微妙な吸湿挙動の差」「熟練作業者が感じる組立時の違和感」や、最終消費者が製品を手にした際の「微細な風味・食感・手触りの不快感」といった身体性を伴う一次情報は、公開テキストデータには存在しない。
- **経済合理性・事業戦略・規制環境との統合判断：** ある技術課題が科学的に面白くとも、サプライチェーン上の原料調達リスク、量産投資に対する ROIC（投下資本利益率）、各国の環境・安全規制、さらには競合他社の特許網との関係を総合して「今どの課題を解けば事業上の勝機（参入障壁）になるか」を決定する行為は、高度な経営的・知財戦略的意志決定そのものである。

注目すべきは、冒頭の数学的難問の解決においても**「人間と共に」**成し遂げられたという事実である。解くべき核心的命題の設定、証明戦略の大枠の舵取り、あるいは AI が生成した膨大な中間補題の中から「筋の良い構造」を見抜いて軌道修正するプロセスには、人間の高度なメタ認知が介在している。これは実世界の発明において人間が果たすべき役割と完全に同型である。

発明の構成要素	AI の現在地評価	AI の得意領域・到達点	人間の不可欠な役割（ボトルネック）

① 課題の発見・設定（Problem Setting）	**発展途上**（人間主導が必須）	公開文献・特許マップからの未開拓領域（空白領域）の構造的抽出、既存課題の再整理。	未言語化の顧客ペイン発見、製造現場の暗黙知の言語化、事業採算性・法規制を踏まえた目的関数の定義。
② 解決手段の創出（Solution Finding）	**実用圏内〜加速期**（もうじき本格化）	異分野技術の非自明な結合、多目的トレードオフを解消する構造・配合・アルゴリズム仮説の高速探索 [4, 6]。	物理実験系への落とし込み、シミュレータの前提条件の妥当性検証、量産適性・安全性の最終判断 [5, 10]。

表 2：発明プロセスの二段階分解による AI の到達度と人間・AI の役割分担

第 3 章　実世界の「AI ゼロイチ発明」を本格化させる 2 つの技術トリガー

今後 3〜5 年の時間軸において、AI が純粋数学の枠を超えて物理・化学・工学領域のゼロイチ発明にどこまで肉薄するかは、大規模言語モデル（LLM）単体のパラメータ拡大ではなく、以下の **2 つの外部技術との統合度合い**によって決定づけられる。

■ 3.1 自律実験システム（ラボオートメーション／クローズドループ R&D）の直結

第 1 章で指摘した「物理検証のボトルネック」を突破する鍵は、推論 AI と実験ロボットを直結した**自律駆動型ラボ（Self-Driving Labs）**の構築である。すでに化学・材料分野では、LLM エージェントが実験計画を立案して液体処理ロボットや分析機器を制御する「Coscientist」[13] や、AI が文献知識と能動学習を組み合わせて新規無機材料の粉末秤量・混合・焼成・X 線回折（XRD）測定を自律実行する「A-Lab」[5] が実証されている。

このクローズドループ環境の最大の強みは、論文や特許には決して公開されない「**失敗実験の生データ（ネガティブデータ）**」を AI が 24 時間 365 日直接獲得し、数学における形式検証器に近いフィードバックループを物理空間に擬似構築できる点にある。新規触媒、電池材料、半導体プロセスガス、機能性配合などの「実験系の標準化・自動化が容易な領域」から順に、AI 主導のゼロイチ発明が常態化していくと予測される。

■ 3.2 フィジカル AI（Physical AI）と世界モデル（World Models）の成熟

もう一つのトリガーは、テキスト（記号）を介さずに三次元空間の物理法則、流体挙動、熱伝導、摩擦・摩耗、粘弾性変形などを連続的な内部表現として学習・予測する「**世界モデル（World**

Models）」およびフィジカル AI と、論理推論モデルの融合である。これまで言語モデルが苦手としてきた複雑な機械構造設計、アクチュエータ制御、ヒートパイプ等の熱流体デバイス、あるいは包装・成形プロセスにおける三次元幾何学的発明は、物理シミュレータを内包したマルチモーダル推論モデルの成熟によって初めて非連続なブレイクスルーを迎えることになる。

第 4 章　知財実務・R&D 戦略への示唆：法的論点と人間の役割変革

「AI と人間が共創して高度な解決手段を導き出す時代」の到来は、企業の研究開発部門および知的財産部門に対し、法制度への対応と業務ワークフローの抜本的な再設計を迫っている。

■ 4.1 「発明者適格（自然人要件）」と AI 支援発明における人間の実質的関与

現行の各国特許法制において、AI そのものを「発明者」として記載することは認められていない。わが国でも、AI（DABUS）が自律的に生成したとされる発明の特許出願をめぐる行政訴訟（東京地裁 令和 5 年（行ウ）第 5001 号、令和 6 年 5 月 16 日判決）において、特許法上の「発明者」は自然人に限られるとの司法判断が明確に示されている [9]。また、米国特許商標庁（USPTO）が 2024 年 2 月に公表した『AI 支援発明の発明者適格ガイダンス』[10] や、わが国の内閣府『AI 時代の知的財産権検討会 中間とりまとめ』[12] においても、AI を利用した発明が特許を受けるためには、**自然人が発明の着想（Conception）に対して「実質的な関与（Significant Contribution）」を果たしていること**が要件とされている。

具体的には、単に「〇〇の課題を解決する構造を提案せよ」と汎用的なプロンプトを入力して AI の出力をそのまま出願する行為は、自然人の発明者適格を欠く（結果として無効理由を抱える）リスクが高い [10, 12]。実務上は、①人間による具体的な課題・制約条件の構築、②AI に対する専門的知見を組み込んだプロンプト設計・反復的な仮説誘導、③AI が提示した複数候補からの技術的目利き・改良、④実験・試作による効果の実証とフィードバックという**「人間の創造的寄与のプロセス」を研究開発記録（電子実験ノート等）として保全すること**が極めて重要になる。

■ 4.2 「進歩性（当業者の通常の創作能力）」のハードル上昇への備え

推論 AI が R&D 現場に普及するにつれ、特許審査における「当業者（その発明の属する技術の分野における通常の知識を有する者）」の標準的な創作能力の水準が実質的に引き上げられる可能性が指摘されている [10, 11, 12]。従来であれば進歩性が認められたレベルの「単純な異分野転用」や

「AI で容易に最適化できる数値限定・パラメータ発明」は、将来的に「AI ツールを用いた通常の創作能力の発揮にすぎない」として拒絶・無効化されるリスクが高まる。

したがって、今後の特許明細書作成においては、単に AI が見出した構成を記載するだけでなく、**①なぜその構成が従来の技術常識（阻害要因）に反するのかという論理構築**、および **②物理実験に基づく比較例・実施例を充実させ、AI の予測を超えた「有利で顕著な作用効果（予測し難い効果）」を定量的に立証すること** [11] の重要性がこれまで以上に高まる。

■ 4.3 これからの技術者・知財担当者が担うべきコア業務へのシフト

以上の分析から導かれる実務上の結論は明快である。「AI が勝手にゼロイチ発明をして人間の仕事がなくなる」のではなく、**「推論 AI を自在に操る R&D・知財チームが、従来の 10 倍以上の速度と網羅性で『非自明な解決手段』と『抜け道のない周辺・牽制特許群』を構築する時代」**が到来している。企業内で人間が注力すべきコア領域は以下の 3 点に集約される。

- **「What / Why（解くべき課題と事業価値）」の定義力：** 市場・顧客・製造現場の一次情報と事業戦略・IP ランドスケープを統合し、AI に探索させるべき「真の課題（目的関数）」を鋭く設定する力。
- **AI 創出アイデアの「目利き力」と物理実証の設計力：** AI が生成する玉石混交の仮説群の中から、技術的実現性・他社実施可能性・侵害発見性・権利の安定性を兼ね備えた「真の発明」を選別し、最短経路で実証実験に載せる力。
- **情報セキュリティ統制と権利化・秘匿化のポートフォリオ設計：** 未公開の実験データやノウハウが外部 AI の学習に流出しないセキュアな推論環境を整備した上で、AI と共に創出した発明群のうち「特許として公開・権利化し参入障壁とする領域」と「営業秘密（ノウハウ）として秘匿化する領域」を戦略的に切り分けるガバナンス力。

参考文献 References

[1] Riemann, B. (1859). "Ueber die Anzahl der Primzahlen unter einer gegebenen Grösse." Monatsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, November 1859, pp. 671–680.（リーマン予想を提起した 1859 年の原著論文）

[2] de Moura, L., & Ullrich, S. (2021). "The Lean 4 Theorem Prover and Programming Language." In Automated Deduction – CADE 28, Lecture Notes in Computer Science, vol. 12699, Springer, pp. 625–635.

[3] Trinh, T. H., Wu, Y., Le, Q. V., He, H., & Luong, T. (2024). "Solving olympiad geometry without human demonstrations." Nature, 625, pp. 476–482.

[4] Romera-Paredes, B., Barekatain, M., Novikov, A., Balog, M., Kumar, M. P., Dupont, E., ... & Fawzi, A. (2024). "Mathematical discoveries from program search with large language models." Nature, 625, pp. 468–475.

[5] Szymanski, N. J., Rendy, B., Fei, Y., Kumar, R. E., He, T., Milsted, D., ... & Ceder, G. (2023). "An autonomous laboratory for the accelerated synthesis of novel materials." Nature, 624, pp. 86–91.

[6] Merchant, A., Batzner, S., Schoenholz, S. S., Aykol, M., Cheon, G., & Cubuk, E. D. (2023). "Scaling deep learning for materials discovery." Nature, 624, pp. 80–85.

[7] Jumper, J., Evans, R., Pritzel, A., Green, T., Figurnov, M., Ronneberger, O., ... & Hassabis, D. (2021). "Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold." Nature, 596, pp. 583–589.

[8] 日本国特許法（昭和 34 年法律第 121 号）第 2 条第 1 項（発明の定義）、第 29 条第 1 項柱書（産業上の利用可能性）および第 29 条第 2 項（進歩性）.

[9] 東京地方裁判所 令和 6 年 5 月 16 日判決（令和 5 年（行ウ）第 5001 号 特許出願却下処分取消請求事件・いわゆる「DABUS 事件」第一審判決：AI 自律生成発明における特許法上の「発明者」の自然人要件に関する判断）.

[10] United States Patent and Trademark Office (USPTO) (2024). "Inventorship Guidance for AI-Assisted Inventions." Federal Register, Vol. 89, No. 30 (February 13, 2024), pp. 10043–10051.

[11] 特許庁（JPO）『特許・実用新案審査基準』第 III 部 第 1 章「発明該当性及び産業上の利用可能性」・第 2 章第 2 節「進歩性」、および『AI 関連技術に関する特許審査事例集』.

[12] 内閣府 知的財産戦略推進事務局（2024）『AI 時代の知的財産権検討会 中間とりまとめ』（2024 年 5 月公表、AI 技術の進展を踏まえた発明の保護・発明者適格・進歩性等の論点整理）.

[13] Boiko, D. A., MacKnight, R., Kline, B., & Gomes, G. (2023). "Autonomous chemical research with large language models." Nature, 624, pp. 570–578.