

# AI 技術を用いた地球科学における定量的・定性的研究の融合について

磯 真一郎

深田地質研究所

## A Consideration of the Integration of Quantitative and Qualitative Research in Geosciences Using AI Technology

ISO Shinichiro

Fukada Geological Institute

要旨：地球システムの包括的理解には、地球物理学分野で代表される数値データや数理モデルを基盤とする定量的研究アプローチと、伝統的な地質学分野で代表される観察記録やフィールドワークに基づく定性的研究アプローチの融合が不可欠である。本論では、AI 技術の発展がこの融合的研究の実現を大きく促進していることについて論じる。特に、生成モデルや大規模言語モデル (LLM) といった AI 技術が、定量データと定性データを融合し、地下モデルの生成から地質解釈に至るまでの過程を支援する可能性を検討する。

本研究では、生成 AI と LLM・自然言語処理を活用した新しい地質解釈ワークフローを提案する。このワークフローでは、物理探査における逆問題の解法過程において、初期地下モデルの生成と最適化されたモデルからの地質画像・説明の生成という 2 つの接点で、定量的研究と定性的研究の融合を図る。特に、数値モデルから生成される地質情報（露頭断面など）とその説明としてのナラティブの合理性を検討することで、地質モデルの最適解への収束を目指す。さらに、アブダクション（仮説推論）AI の将来的な活用により、より高度な解釈と仮説生成が可能となることを示す。

これら AI 技術の統合的活用により、地球科学における融合的研究は属人的なアプローチから客観的な研究技術へと発展し、より深い地球システムの理解に貢献することが期待される。本研究で提案するワークフローは、地質学と地球物理学の知見を効果的に統合し、より信頼性の高い地下構造モデルの構築を可能にする新しいアプローチとなる。

キーワード：人工知能、地球科学、地質学、地球物理学、研究戦略、定性的研究、定量的研究、生成モデル、大規模言語モデル、アブダクション

Abstract: A comprehensive understanding of Earth systems requires integrating quantitative research approaches based on numerical data and mathematical models, as used in geophysics, with qualitative research approaches based on observational records and fieldwork, as traditionally employed in geology. This paper discusses how the advancement in AI technology significantly facilitates this integration of research methodologies.

We propose a new geological interpretation workflow that utilizes generative AI and large language model (LLM) to bridge the gap between quantitative and qualitative approaches. This workflow focuses on two critical integration points in solving geophysical inverse problems: generating initial subsurface models and creating geological images and explanations from optimized models. Specifically, it aims to achieve convergence to optimal geological models by evaluating the rationality of generated geological information (such as outcrop sections) and their narrative explanations derived from numerical models.

Generative AI technology enables the creation of geological visualizations and interpretations, while LLM and natural language processing facilitate the handling of qualitative geological knowledge and contextual understanding. Furthermore, we suggest that future applications of abductive inference AI will

enable more sophisticated interpretation and hypothesis generation in geological sciences.

Through the integrated use of these AI technologies, research in Earth sciences can evolve from a person-dependent approach to a more objective research methodology. The proposed workflow represents a novel approach that effectively combines geological and geophysical insights, enabling the construction of more reliable subsurface structure models. This integration is expected to contribute to a deeper understanding of Earth systems and standardize the fusion of qualitative insights with quantitative analysis.

Key Words: artificial intelligence, earth science, geology, geophysics, research strategy, qualitative research, quantitative research, generative model, large-scale language model, abduction

## 1. はじめに

地球システムの包括的な理解は、地球物理学や地質学、さらには気象学や生態学など、さまざまな分野の知見を総合的に統合することによって可能となる。従来、地球科学では地球物理学分野に代表される数値データや数理モデルを基盤とする定量的研究アプローチと、伝統的な地質学分野に代表される観察記録やフィールドワークに基づく定性的研究アプローチが用いられてきたが、これらを統合し、より多面的な理解を得るための混合研究アプローチ、あるいは融合的な研究が不可欠となっている。

本論では、AI技術の発展がこの融合的な研究の実現を大きく促進していることについて論じる。特に今日日常的に利用され始めている生成モデルや自然言語処理、大規模言語モデルといったAI技術がどのように定量的データと定性的データを融合し、地下モデルの生成とともに生成した画像や言語説明のフィードバックループを通じて、地球科学の理解を深めうるかについて議論を行う。

地球物理学及び地質学にはさまざまな学問体系や各論が含まれるが、本稿ではそれらを端的に一般化して論じる。

## 2. 地球科学における融合的な研究とは何か

定量的アプローチは、データの再現性と予測精度の向上に優れているが、地域特有の変動や長期的な変化の文脈的理解には限界がある。一方、定性的アプローチは、スケッチをはじめとする観察記録や過去の推論資料から得られるナラティブに基づいて多角的な解釈を行うことができるが、客観性や再現性の確保が難しい。したがって、これら二つのアプローチを補完し、複雑な地球システムの全貌を捉えるために、定量・定性データの統合を目指す混合研究アプローチの必要性が高まっている。

この課題の重要性について深田地質研究所(2014)は定款第3条で次のように述べている：

「この法人は、地質学や地球物理学等を基盤とする総合地球科学の研究、及び環境、防災、建設等社会発展に係る科学・技術の研究、ならびにそ

これらの融合的な研究を進めることにより、複合的な地球システムへの理解を増進し、」(後略)。本法人に限らず、地球を複合的なシステムとみなし、そのふるまいや性質を解明しようとする研究活動と組織改編は、特に地球温暖化と人間環境との相互作用等に関して、多くの研究機関や教育機関で進められている(気象庁気象研究所, 2023; 鹿園, 2009; 東京大学, 2023)。

## 2.1 定量的研究アプローチと定性的研究アプローチとは

相容れないものと捉えがちな定量的研究と定性的研究アプローチ、それぞれの長所を固体地球分野を念頭に再確認する。

定量的アプローチは、観測データや実験データを数学的モデルで解析し、物理法則に基づく現象の再現や予測を行う手法である。例えば、地表における地震波の観測や坑井内での比抵抗測定を基にその背後の地下構造を推定する。定量データによるアプローチには特にその再現性と客観性が高いことが特徴である。

- ・ **データ取得**：観測データが標準化された基準に基づいて収集されるため、再現性が高く、結果が客観的である。
- ・ **解釈結果**：物理法則、数理統計モデルに基づいた演繹により解釈結果について再現性が高く、結果が客観的であり、不確実性についても定量的に評価が可能である。

一方、定性的アプローチは、専門による観察スケッチや記述、過去の推論やアナロジーに基づく推論など、数値化では表現できない知見を文脈に沿って柔軟に解釈する利点がある。

- ・ **文脈依存解釈**：長期的、短期的な変動、あるいは広域的、局所的な現象の多様な側面を柔軟に組み合わせ解釈できる。

- ・ **仮説生成**：数値データでは得られない仮説、例えば褶曲生成の地史についてのナラティブを多くの知見から生成することができる。
- ・ **定性的情報の受容**：口伝情報、過去の類似例など定性的な他分野情報を柔軟に取り込むことが可能。

## 2.2 混合研究アプローチ

定性的な研究の定量的手法の導入については、King らの *Designing social inquiry: scientific inference in qualitative research* (邦訳「社会科学のリサーチ・デザイン：定性的研究における科学的推論」) が著名である。定性的研究の分野は主に政治学などの社会学を対象としており、King らは社会科学の定性的研究に統計学の視点から定量的研究との接点を提言している。一方、著者らの頭文字から **KKV** 論争と呼ばれる論争を生み、必ずしも社会学の分野で全面的な賛同を得られてはいない。論点などについては井頭 (2023) らの「質的研究アプローチの再検討：人文・社会科学から EBPs まで」が参考になる。

定性的研究において定量的研究をいかなる形で融合すべきかについては多くの論があり、混合研究法として、その研究設計などが論じられている。混合研究法的设计では、研究戦略のなかでどのようにその観察と論理のバイアスを軽減できるのかが重要な課題である。定量研究の組み入れ方の設計について、Creswell and Plano Clark (2017) 及び八田 (2019) は、1) 収斂あるいはコアダザイン、2) 説明的順次デザイン、3) 探索的順次デザインを挙げている。

これらはいずれも一般に定性的研究とされている分野で定量的研究の手法をいかなる形で取り込むかについて論じられていることが多い。

### 2.3 融合的研究を可能とする AI 技術

地球システムの複雑性を理解するためには、定量的・定性的アプローチの融合が必要であることが認識されていることはすでに述べた。一方その融合方法についてはあまり判然としない。多くのアプローチは個々の専門家を同じ組織に組み入れることで融合的な研究成果を発露することに期待しているようである。筆者は個々の専門家の自発的な努力によらない融合的な研究が必要だと考えている。

地球物理学の定量的観測データと解釈、及び観察記録を組み合わせ、予測精度を向上させる。この融合を支援する AI 技術の発展により、定量データと定性データの統合が一層進展し、複雑な地質・地球物理現象の解析が可能となると考えている。その鍵となる AI 技術は生成モデルと自然言語処理・大規模言語モデルであり、さらに仮説推論を行う AI、アブダクション AI によって完成されると考えている。

#### 2.3.1 生成モデル

生成 AI (Generative AI) は、人工知能の一分野であり、新しいデータやコンテンツを生成する能力を有するモデルである。これらのモデルは、テキスト、画像、音声、音楽など、多様な形式のコンテンツを生成することが可能である。Goodfellow et al. (2014) は画像生成のための敵対的生成ネットワーク (GAN) を提案し、続いて Vaswani et al. (2017) は生成 AI の基盤となるトランスフォーマーモデルを考案した。さらに Brown et al. (2020) はこの技術を大規模言語モデルへと発展させている。現在の生成 AI は、主にこれらのディープラーニング及びニューラルネットワーク技術に基づいており、GAN や BERT, GPT-3 などが代表的な例として挙げられる。



図1 生成 AI の DALL-E を使用して生成された逆断層露頭の画像。非専門家には中央の大きなずれに着目しがちだ。同時に専門家の印象では、中央の断層の形状以上に、岩石の質感などに非現実的であり違和感を覚えるとのことであった。注：磯 (2022) より引用。

生成 AI は、さまざまな分野で実用的なアプリケーションに幅広く応用されつつある。具体的には、テキスト生成、画像生成、音楽生成、自動プログラミングを通じて、文章作成支援、顧客対応 (チャットボット)、新薬開発支援、医療診断支援などが可能となっている。

図1は生成モデルを利用し逆断層の画像を作成したものである。地質の専門家はすぐに違和感に気が付いたが、非専門家には一見不整合面がある露頭だと見過ごしてしまう。断層そのものではなく、周辺を構成する岩石 (のようなもの) が不自然で同定できないといったことが、専門家の違和感につながっているようであった。

#### 2.3.2 自然言語処理・大規模言語モデル

自然言語処理 (NLP: Natural Language Processing) は言語の理解や生成のための技術全般を指し、大規模言語モデル (LLM: Large Language Model)

は、その技術を用いた自然な言語生成のための大量のテキストデータを学習する人工知能 (AI) である。Vaswani et al. (2017) が提案したトランスフォーマーモデルを基盤として、これらのモデルは主にディープラーニング技術を利用して開発されている。Brown et al. (2020) は、LLM が文章生成、翻訳、質疑応答、文章要約など多様な自然言語処理タスクに応用可能であることを示した。さらに Devlin et al. (2019) は、これらの技術を用いてチャットボットや自動応答システムといった高度な対話型アプリケーションの実現可能性を示している。

多くの定性的研究は高度に専門的ではあるが自然言語を介して表現されること、文意が文脈依存であることも多いことから、これらに対応できる大規模言語モデル技術は定性的研究とのインターフェイスとして非常に重要であると考えられる。

### 2.3.3 ナラティブ AI

ナラティブ AI とは、上記の生成 AI、自然言語処理 (NLP)、及び大規模言語モデル (LLM) の技術を駆使して、人間のような文章やストーリーを生成する能力を持つ AI システムである。ナラティブ AI はテキストデータを解析し、文法、文脈、意味を理解した上で、人間の言葉のような自然な文章を生成する (Jurafsky and Martin, 2024)。ナラティブ AI は LLM のモデルを活用して高度な言語理解と生成能力を持ち、人間らしい文章を作成する (Devlin et al., 2019)。これにより、ナラティブ AI は創造性と実用性を兼ね備えた高度な文章生成を実現し、特定のキャラクターやプロットに基づいた物語の生成など、さまざまな応用が可能である。ナラティブ AI はこれらの技術を統合することで、創造的かつ実用的な文章生成を行い、人間との対話や情報提供において非常に有用

なツールとなっている。

## 3. AI 技術を用いた融合的な地質解釈ワークフロー

物理探査を含む地球物理学的解析は本質的に逆問題を解くことであるが、逆問題で得られた結果は地質形成の成因は説明しない。そこで、人工知能の技術利用を前提とした、地質学の知見と地球物理学的解析の融合を図る解釈ワークフローを図 2 に示す。この解釈フローにおいて、地球物理学 (定量的研究) と地質学 (定性的研究) との接点は主に 2 点ある。それは、順解析における初期地下モデルの生成と、最適化された地下モデルから生成される地質イメージおよび説明 (言語) との比較である。初期モデル作成を生成 AI と LLM・NLP で実施し、最適化されたモデルから再度生成 AI により地質情報 (イメージ) の観察と言語による説明を行う。この数値モデルでの最適化されたモデルから生成される地質イメージ (例えば露頭断面) とその説明としてのナラティブの合理性を再検討し、地質モデルを最適解に収束させる。以上のように、現在の AI 技術にナラティブの比較を Human-in-the-loop として適用することで、図 2 のようなワークフローにより、定性的な知見と定量的な解析の融合を標準化できると筆者は考えている。

### 3.1 ナラティブと仮説推論

現在の生成 AI でもナラティブの作成は部分的に可能であるが、その評価と修正には仮説生成が不可欠である。これは本質的にアブダクション (仮説推論)、すなわち不完全な情報から最も説得力のある説明を導出する推論プロセスを必要とする。このような推論を実現する技術として、アブ

ダクシオン AI (Abductive Inference AI) が注目されている。アブダクシオン AI は、与えられた事象や観察結果から最も合理的な説明や仮説を導き出すことを目的とした AI システムであり、理論的基盤は、Aliseda (2006) による包括的な理論的フレームワークの確立で形成された。同研究は、

論理的推論と機械学習の統合可能性を示唆し、後続研究に重要な示唆を与えた。計算モデルの観点からは、Thagard and Shelley (1997) が提案した ECHO モデルが、科学的発見のための計算アプローチとして広く認知されている。

実装技術の発展において、Kakas et al. (1992)

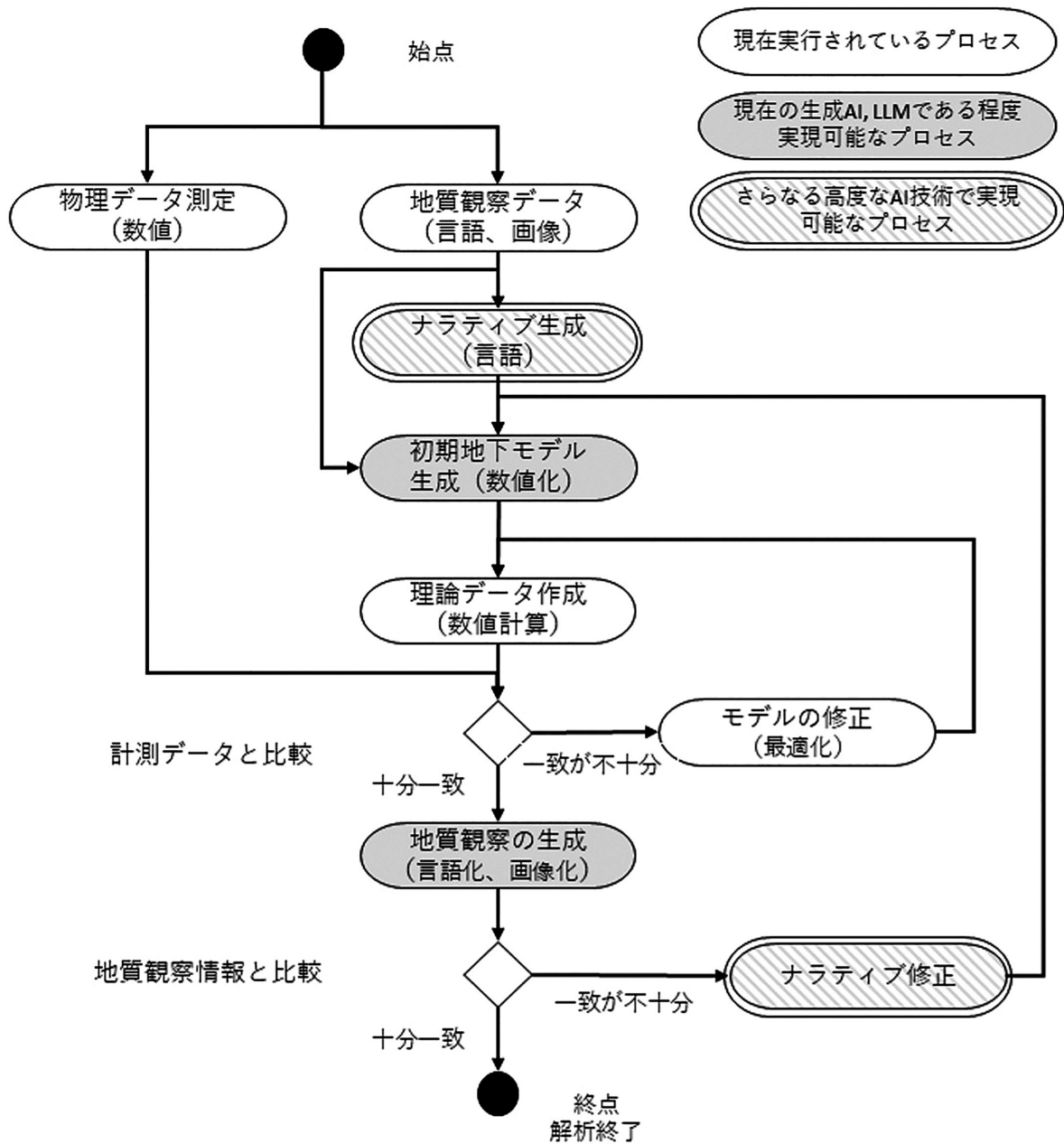


図2 定量的研究と定性的研究の融合を促すワークフローダイアグラム。UML アクティビティ図の表記法に従い、各プロセスを楕円で表現。着色されたプロセスはAI技術による処理を、二重楕円で示されたプロセスは現時点では専門家の補助(Human-in-the-loop)を必要とするが、これらは将来的には仮説推論AIにより実現できると期待される。

による論理プログラミングへの実装方法の提案は、実用的な AI システムの開発を可能にした重要な転換点となった。医療分野では、Miller et al. (1982) が提案した CASNET が、因果ネットワークを用いた診断システムの先駆的研究として評価されている。

近年の研究動向として特筆すべきは、Besold et al. (2021) によるニューラル・シンボリック学習と推論の統合に関する包括的研究である。また、Kersting et al. (2006) によるベイジアン論理プログラミングとアブダクションの統合研究は、行動認識などの実用的応用への道を開いた。

#### 4. まとめ

AI 技術の進展により、地質学と地球物理学の融合的な研究は、属人的なアプローチから客観的な研究技術へと発展しつつある。本研究で示したように、Brown et al. (2020) が開発した大規模言語モデルや、Vaswani et al. (2017) が確立したトランスフォーマーモデルを基盤とする生成 AI は、定量データと定性データの統合を可能にしている。さらに、アブダクション AI による仮説生成と検証は、複雑な地質・地球物理現象の観点からも重要な技術となることが期待される。このような人間と機械の相互作用を促進する技術の発展により、地球科学における知識の深化と社会的意義の向上が実現されると考えられる。

#### 文献

Aliseda, A. (2006): What is Abduction? Overview and Proposal for Investigation. in: *Abductive Reasoning*, Synthese Library, vol 330. Springer, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/1-4020-3907->

7\_2.

Brown, T. B., Mann, B., Ryder, N., Subbiah, M., Kaplan, J., Dhariwal, P., Neelakantan, A., Shyam, P., Sastry, G., Askell, A., Agarwal, S., Herbert-Voss, A., Krueger, G., Henighan, T., Child, R., Ramesh, A., Ziegler, D. M., Wu, J., Winter, C., ... Amodei, D. (2020): Language models are few-shot learners. *arXiv*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.14165>.

Creswell, J. W. and Plano Clark, V. L. (2017): *Designing and conducting mixed methods research*. Sage Publications, California, 3rd edition, 520p.

Besold, T. R., d'Avila Garcez, A., Bader, S., Bowman, H., Domingos, P., Hitzler, P., ... and Zaverucha, G. (2021): Neural-symbolic learning and reasoning: A survey and interpretation 1. In *Neuro-Symbolic Artificial Intelligence: The State of the Art* (pp. 1-51). IOS press. [/doi.org/10.48550/arXiv.1711.03902](https://doi.org/10.48550/arXiv.1711.03902).

Devlin, J., Chang, M. W., Lee, K. and Toutanova, K. (2019): BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. *arXiv*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1810.04805>.

深畑幸俊・高田陽一郎・大橋聖和・田中明子 (2020) : 特集号「地殻ダイナミクス (Part II) —地質学と地球物理学の融合に向けて—」巻頭言. *地学雑誌*, **129** (4), 447–450, <https://doi.org/10.5026/jgeography.129.447>.

Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., Courville, A. and Bengio, Y. (2014): Generative adversarial nets. *Proceedings of the 27th International Conference on Neural Information Processing*

- Systems*, 2672–2680.
- 八田太一 (2019) : 混合研究法の基本型デザインと統合 : 初学者が陥りやすい落とし穴. 立命館人間科学研究, **39**, 49–59.
- 井頭昌彦 (2023) : 質的研究アプローチの再検討 : 人文・社会科学からEBPsまで. 勁草書房, 400p.
- 磯 真一郎 (2022) : 深田地質研究所研究情報交換会 2024年7月27日 (研究所内部資料).
- Joslyn, C. and Rocha, L. M. (2000): Towards semiotic agent-based models of socio-technical organizations. *Proceedings of AI, Simulation and Planning in High Autonomy Systems Conference*, 70–79.
- Jurafsky, D. and Martin, J. H. (2024): Speech and language processing: An introduction to natural language processing, computational linguistics, and speech recognition with language models. 3rd edition, <https://web.stanford.edu/~jurafsky/slp3/>, (2024年11月10日参照).
- Kakas, A. C., Kowalski, R. A. and Toni, F. (1992): Abductive logic programming. *Journal of Logic and Computation*, **2**(6), 719–770.
- Kersting, K., De Raedt, L. and Raiko, T. (2006): Logical hidden Markov models. *Journal of Artificial Intelligence Research*, **25**, 425–456.
- King, G., Keohane, R. O. and Verba, S. (1994): *Designing social inquiry: Scientific inference in qualitative research*. Princeton University Press, Princeton, 300p.
- 気象庁気象研究所 (2023) : 地球システム・海洋モデリングに関する研究. [https://www.mri-jma.go.jp/Research/project/M/M\\_2019-2023\\_2.html](https://www.mri-jma.go.jp/Research/project/M/M_2019-2023_2.html), (2024年11月10日参照).
- 公益財団法人深田地質研究所 (2014) : 公益財団法人深田地質研究所 定款.
- 升本真二・塩野清治・根本達也・野々垣 進 (2013) : 三次元地質モデルの基本要素と地質構造の論理モデル. *地質学雑誌*, **119** (8), 519–526, <https://doi.org/10.5575/geosoc.2012.0068>.
- Miller, R. A., Pople, H. E. Jr. and Myers, J. D. (1982): INTERNIST-1, an experimental computer-based diagnostic consultant for general internal medicine. *The New England Journal of Medicine*, **307**(8), 468–476.
- Peirce, C. S. (1958): *Collected papers of Charles Sanders Peirce (Vols. 1-8)*. Harvard University Press, Cambridge, 798p.
- 鈴木貴之 (2024) : 人工知能の哲学入門. 勁草書房, 256p.
- 鹿園直建 (2009) : 地球惑星システム科学入門. 東京大学出版会, 242p.
- 高木廣文 (2022) : 質的研究を科学的に行うには一量的研究との比較を通して考える一. *医療看護研究*, **19** (1), 1–9.
- Thagard, P. and Shelley, C. (1997): Abductive reasoning: Logic, visual thinking, and coherence. *Logic and scientific methods*, Springer, Dordrecht, 413–427.
- 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻 (2023), 地球惑星システム科学講座 2025年度進学ガイダンスパンフレット, <http://www-sys.eps.s.u-tokyo.ac.jp/guidance.html>, (2024年11月10日参照).
- Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, Ł. and Polosukhin, I. (2017): Attention is all you need. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762>.