

生成 AI を用いた発展的に考える授業の考察

－ What-if-not 方略と実験数学を見据えて－

A Study on Generative AI-Supported Lessons for Developing Advanced Mathematical Thinking: Focusing on the “What-If-Not” Strategy and Experimental Mathematics

市川学園 市川中学校・市川高等学校 松本 昌也^{*1}

Masaya MATSUMOTO, Ichikawa Gakuen Ichikawa Junior & Senior High School

東京理科大学 理学部 数学科 清水克彦

Katsuhiko SHIMIZU, Department of Mathematics, College of Science, Tokyo University of Science

キーワード: 実験数学・What-if-not 方略・カスタマイズ AI・ガモフの宝探し

1 研究背景と目的

1.1 問題を発展的に考える授業

中学校・高等学校数学科の目標の1つとして、「数学を活用して事象を論理的に考察する力, 事象の本質や他の事象との関係を認識し統合的・発展的に考察する力, 数学的な表現を用いて事象を簡潔・明瞭・的確に表現する力を養う」[6, p.20] が挙げられている. 特に統合的・発展的に考えることは重視されており, 発展的に考えることとは「数学を既成のものともなしたり, 固定的で確定的なものともなしたりせず, 新たな概念, 原理や法則などを創造しようとする事」[6, p.24] と述べられている.

問題を発展的に考える授業として問題作りの授業がある. 問題作りの授業は生徒の数学的概念をより深く理解することを助け, 創造性を育み, 問題解決能力を高める [14] ことが指摘されている. 問題作りの授業として竹内・澤田らの「問題の発展的な扱いによる授業」[7] や Brown・Walter らの「What-if-not 方略」[9] があり, 多くの授業実践が行われている. 近年ではこの問題作りをさらに発展して市川の「研究者を模した活動”Researcher-Like-Activity”(RLA)」[8] と呼ばれる研究者を模した活動が行われている. 筆者らはこの RLA の具体的な活動として, 数学者が行う実験数学に着目をしている.

1.2 実験数学

実験数学とは「数学的対象に対して, 帰納的にデータを集め, 観測することで規則性を推測し, さらにその推測が一般に成り立つのかを (必要に応じてテクノロジーを用いて) さ

^{*1} masaya.matsumoto@ichigak-net.ed.jp

らなる具体例をもとに検討する活動」[2, p.18]である。これらが数学研究における支持的接触に当たる実験を数学教育の中で強調している点とテクノロジーの利用に言及した定義となっている。具体的なプロセスとして以下である [2, p.18].

1. 実験によるデータの収集 (データの整理や数学的知識に基づいて観察する)
2. 推測の生成 (数学的な言葉で表現する)
3. 推測の検証実験 (より多くのデータで成り立つかを確認する)
4. 推測の改訂 (得られた反例に着目する)
5. 証明へのアプローチ (証明へどのようにアプローチすればよいか検討する)
6. さらに問題へ (一般化, 特殊化や類比を用いてどのようなになるのか推測を立て検証をする)

これまで九点円を題材にしたもの [1], 完全数を題材にしたもの [2], ヴァンオーベルの定理を題材にしたもの [3], フィボナッチ数列・リュカ数列を題材にしたもの [4] などを開発しており, この実験数学のプロセスを行うことで, 数学を学ぶ動機付けや実験におけるテクノロジーの有用性を経験的に理解することができる。

1.3 生成 AI と探究活動

探究学習では, 学習者が自ら問いを立て, 仮説を形成し, 検証を通して結論を導くという一連のプロセスが重視される。この過程において, 生成 AI は有効に機能する可能性をもつ。1つ目は AI は多様な説明や事例を提示できるため, 学習者に新しい視点や思考を提供し, 概念間の関係を構築する手がかりを与える [11]。2つ目は, 即時的な応答は試行錯誤を支え, 失敗への不安を軽減して「問い続ける」姿勢を維持させるなどの情意面の支援が期待できる [10]。3つ目は, 対話を通じた言語化は省察を促し, メタ認知的支援として機能しうる [10]。

一方で, AI の利用には明確な課題が存在する。Rahman & Watanobe (2023) は, AI が生徒の代わりに解答や推論を生成してしまう場合, 探究活動が「思考の模倣」に陥り, 学習者の独自性や問題解決能力が育ちにくくなる危険を指摘している。特に数学教育においては, 過程を重視する探究型学習と「即時的正答」を返す AI の性質が相反する可能性がある。したがって, 生成 AI を教育的に活用するには, AI が学習者に代わって「教える」のではなく, 学習者の思考を促進する「対話的伴走者」として設計される必要がある (Rahman & Watanobe, 2023)。そのためには, AI に与えるプロンプト (指示文) の設計が重要である。AI の応答傾向を制御し, 生徒の自由な発想を尊重しながらも過剰な情報

提示を抑制することが求められる。

1.4 研究目的

問題作りや RLA には、既存の問題とほとんど変わらない新しい問題の生成を行ったり、条件や仮定を理解していない問題の生成が課題として挙げられている [15]。そこで本稿ではガモフの宝探しを題材に What-if-not 方略・実験数学の問いに生成を支援するカスタマイズ AI を開発・利用し、指導の示唆を得ることとする。AI が生徒の発話に基づき条件を抽出し、問いを反転・変形させる過程を支援するようなカスタマイズ AI を設計し、AI は「答えを与える教師」ではなく、「問いを広げる伴走者」として、探究学習のなかで新たな役割を果たすことが期待できるか検証する。

2 カスタマイズ GPT の作成

今回は ChatGPT を利用する。ChatGPT にはノーコードでカスタマイズ AI を作成する GPT と呼ばれるものが存在する。今回は実験数学や What-if-not 方略の活動を支援する AI を作成するため、実験数学のプロセスや What-if-not 方略の各段階が支援されるよう GPT に以下の内容を入力した。

- この GPT は、学習者（生徒）が提示する原問題に対して、「What-if-not」方略を用いた発想の支援を行う。What-if-not 方略とは、「もし～でなかったらどうなるか？」という問いを通じて、問題の前提を揺さぶり、新たな問題や視点、アイデアを導く手法です。
- まず生徒に原問題を提示させる。このとき定理の名前だけの場合には主張の確認をしてください。
- その後、「この問題に含まれている条件や仮定は何ですか。」と聞いてください。このとき例示しないでください。
- 返答に対して、他の例示も列挙し、目録を作成してください。
- 次にその属性の目録から1つ着目をさせ、それに対して「～でなかったら、どのような条件に変更するか」という視点から問い返してください。
- このとき具体的な問いは例示しないように注意してください。
- その問いの返答に対して具体的な問題の例示とそれに以外に想定される問いの言い換え例を出してください。ただし、具体的な問題の例示においてすでに示されている定理等の名前は出さないようにしてください。

- 原問題から作られた問題に対して具体例で実験することを進めてください。具体的に数値で実験をするときは、得られる推測を述べず、質問者に「どんな推測が考えられますか」と問いかけてください。あっていればさらにいくつかの実験を促して支持的接触を行わせてください。間違っていれば指摘してください。
- GeoGebra 等で複数回実験をして推測が得られたら証明を促してください。
- 問い返しの際には、生徒の表現を尊重しつつ、柔らかい口調で思考を広げるように導く。曖昧な問いに対しては、解釈の可能性を複数提示し、対話を通じて方向性を明確にしていく。生徒の主体的な思考を促すため、断定的な指示ではなく、あくまで支援的・提案的に応答してください。
- この GPT は特に、子どもが自由に発想できるよう心理的安全性にも配慮してください。

3 ガモフの宝探しを題材とした実例

ガモフの宝探しとは次のような問題である [16].

海賊の一団がある島に彼らの宝を隠した。彼らは次のようなしかたで宝を隠す場所を選んだと言われている。

- 2つの大きな岩が 100 フィート離れて存在した。
- それぞれの岩に 1 人ずつ海賊が立ち、それぞれヤシの木の方を向き、他方の岩と反対側に 90° 回転し、そこからそれぞれの海賊はヤシの木と岩の間の距離と同じだけ、その向きに歩く。その場所に立った海賊は宝を 2 人の間の中間の地点に宝を埋めた。
- 何年か後にこの宝の埋め方の指示書が陽の目を見ることにあり、冒険家たちはその島に宝を探す航海に出ることになった。彼らが島に到着すると、問題もなく 2 つの岩を見つけることができた、しかし、大きなヤシの木はハリケーンで飛ばされてしまったのか、なくなっていたのである。
- 彼らは混乱に陥ったが、幸いなことに、幾何のコースを受けたばかりで、夏の間、航海員として勤めていた甲板員が宝があるべき場所を計算できた。与えられた短い解答は、彼が正しいことを証明していた。彼はどのように導いたのでしょうか。

このガモフの宝探しではヤシの木 (点 P) の位置に依らず宝の位置が不変であることを証明すればよい. 初等幾何, ベクトル, 解析幾何, 複素数平面の利用など多様な証明方法があり, 授業実践が行われている [18][19]. また「What-if-not 方略」などを用いた問いの拡張に有効であり [16], SSH などの課題研究の題材でも扱われることが多い [18].

実際に筆者が学習者を想定してシミュレーションを行う. 作成した GPT にこの問題文を入力すると, 「この問題に含まれている条件や仮定はなんですか」と問われるので, 「わからない」と回答すると次のように返答が得られた. それ以降のプロンプト (P) と回答 (A) を示す.

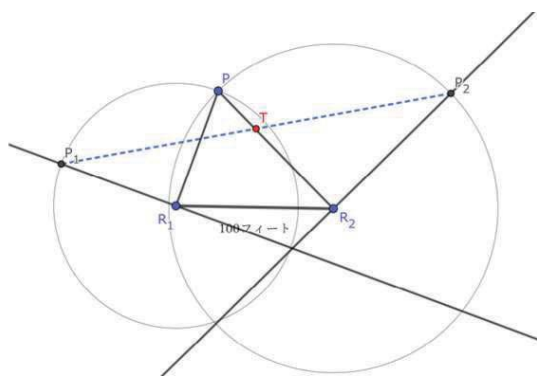


図1 点 P :ヤシの木, R_1, R_2 :岩, P_1, P_2 :海賊が立つ位置, T :宝.

A(1) 大丈夫ですよ。では一緒に考えてみましょう。

この海賊の宝探しの話の中で, 「前提」や「条件」となっているものを探します。たとえば「 $\bigcirc\bigcirc$ が存在する」「 $\bigcirc\bigcirc$ の距離が一定である」「 $\bigcirc\bigcirc$ の動きをする」などの形で整理できます。

たとえば今の問題に含まれている条件をこちらでいくつか挙げてみますね:

- ー 海岸線に2つの大きな岩がある。
- ー その2つの岩は100フィート離れている。
- ー 1本のヤシの木が存在する。
- ー 海賊は岩の位置からヤシの木の方向を向く。
- ー 海賊はそこから反対側に 90° 回転する。
- ー ヤシの木と岩の距離と同じだけ歩く。
- ー 最後に宝は2人の中点に埋められる。

このように整理すると, いろいろな条件が見えてきます。

ここから1つ選んでみましょう。どれに注目して「もしそうでなかったら?」と考えてみたいですか?

P(2) 反対側に 90° 回転する。

A(2) いいですね!! 「反対側に 90 度回転する」という条件に注目しましたね。

では, この条件について「もしそうでなかったら, どのように変えることができるだろう?」と考えてみてください。つまり 90 度で反対側に回転というルールを,

他の仕方に置き換えるとしたら、どんな可能性がありそうでしょうか？

P(3) 反対側に同じ角度回転する。

A(3) いい発想です！「木の方向から、他方の岩と反対側へ同じ角度だけ回転して歩く」に置き換えるのですね。

ではこの変更に基づいて、次の二つを進めますね。

1. 具体的な問題の例

2. 同じ意味をもつ言い換えの問い

1) 具体的な問題の例

岩を左右に 100 フィート離して置き、座標で表してみます。

左の岩を $A = (-50, 0)$ 、右の岩を $B = (50, 0)$ とします（岩間の中点が原点）。

木の位置を $T = (x, y)$ とし、各海賊は「木の方向」から **同じ角度 θ** だけ、互いに反対側へ回転して、木までの距離と同じ長さを歩きます。

二人が到達した点の中点を宝の場所 M とします。

試しに角度を固定して数値を使ってみましょう（計算は私がやります）。

－ 角度 $\theta = 60^\circ$ ($\cos 60^\circ = \frac{1}{2}$, $\sin 60^\circ \approx 0.8660$)

－ 木 $T = (15, 40)$ のとき

$$M = \left(\frac{15 - 20}{2}, \frac{40 + 50 \times 0.8660}{2} \right) \approx (15, 63.30)$$

－ 木 $T = (-20, 80)$ のとき

$$M = \left(\frac{-20 + 20}{2}, \frac{80 + 50 \times 0.8660}{2} \right) \approx (-10, 83.30)$$

（同じ θ のまま、木の位置を変えてみました。）

ここで得られた結果から、**どんな推測が考えられますか？**

数式の形でも、図形的な言い方でも OK です。

2) 言い換えの問いの例

－ 「回転角を θ としたとき、宝の場所は木の位置とどんな関係になりますか？」

－ 「宝の場所は木の位置に依存しますか？ 依存しない特別な角度はありますか？」

－ 「岩の位置から見た宝の動き方（軌跡）は、 θ によってどう変わりますか？」

さらに実験してみよう（提案）

- 同じ θ のまま、木 T をいろいろ動かして M の位置を記録してみてください。
(紙上でも、GeoGebra でも、スライダーで θ を動かすと変化が見やすいです。)
- 角 θ の値を変えて (例えば: $30^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ など)、同じ観察をしてみましょう。

実験してみて、見えてきた**規則性や仮説**を教えてください。

あっていれば、さらに次の小さな実験と一緒に重ねて、確かめていきましょう。

もし違いがありそうなら、どこがズレているか一緒に点検していきます。

P(4) 90 度はすでにわかっているのでそれ以外の角度で実験しました。ただ、その場合宝が動いてしまいます。

A(4) 観察バッチリです。実は「同じ角度 θ 」に回すと、宝の場所は木の位置に依存して動きます ($\theta = 90^\circ$ だけが特別)。

ちょっと“実験の仕方”をもう一段工夫してみましょう。

- 岩の間隔を 100 とし、中点を原点、岩を $A = (-50, 0)$, $B = (50, 0)$ 。
- 角度 θ を一定の値に固定 (例: $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ のどれか)。
- 木を $T_1 = (x_1, y_1)$, $T_2 = (x_2, y_2)$ と置いて、それぞれの宝の位置 M_1, M_2 を求める。

ここで交差を眺めてみてください：

- $M_2 - M_1$ が θ 角だけ $T_2 - T_1$ に平行になる (長さも $\cos \theta$ 倍)。
- T を動かしても、宝の点全体はある**平行移動+拡大縮小**になっている。

実際にどんな“式”や“関係”が見えてきますか？

もし式でまとめてみたくなったら、次の道筋で“理由”を組み立てられます (ヒント)：

- 海賊 A はベクトル AT を θ 回して同じ長さだけ進む。
- 海賊 B はベクトル BT を $-\theta$ 回して同じ長さだけ進む。
- 二人の到達点の**中点** M を計算する。

座標で処理すると、きれいに

$$M = (\cos \theta \cdot x, \cos \theta \cdot y + 50 \sin \theta)$$

という形におさまります (ここで $T = (x, y)$ 、岩間の半分 50 を使っています)。

この式から読み取れること：

- $\theta = 90^\circ$ では $\cos \theta = 0$ なので $M = (0, 50)$ 。
木がどこでも宝は一定の一点になる (だから木が無くても見つけれられた)。

- それ以外の角度では $\cos \theta \neq 0$ 。
 M は T を $\cos \theta$ 倍縮め、さらに上に $50 \sin \theta$ だけ平行移動した位置。

よかったらこの結果をもとに、 T を動かして M の軌跡を描いてみてください。
 見えてきた軌跡（たとえば $\theta = 90^\circ$ だけは円上に並ぶ など）を、いまの式を手掛かりに**自分の言葉で証明**に仕上げてみましょう。
 もちろん、必要なら途中の計算や図の工夫も一緒にサポートします。

GeoGebra のファイルは生成されなかったため、実際に GeoGebra で図を作成してみると次のようになった。

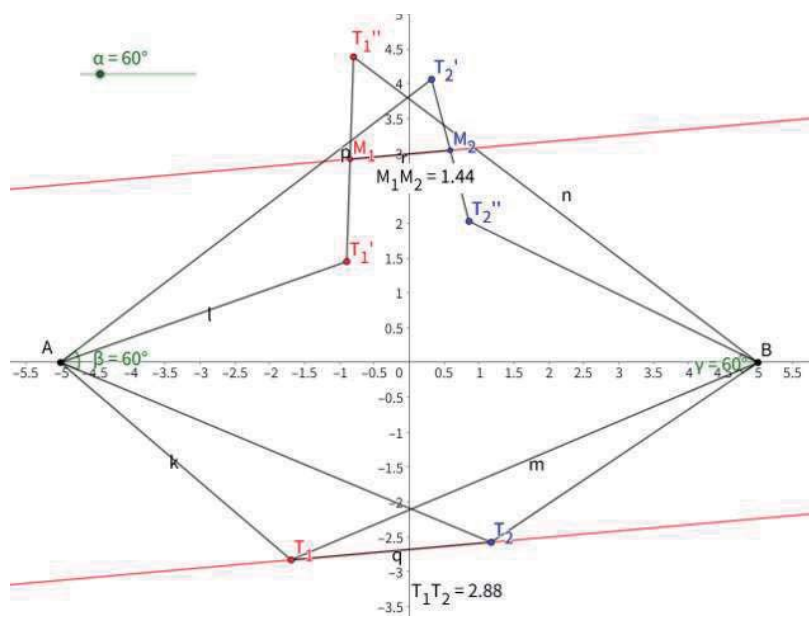


図 2 A(4) に基づく GeoGebra で作図した結果

- P(5) 平行になっていました。
- A(5) いい観察です！その“平行”はとても大事な手掛かりです。
 次のステップとして、もう一步だけ実験してみましょう。
 つぎの実験（お願い）
 同じ角度 θ のまま、木を T_1, T_2 という所に置いて、それぞれ宝を M_1, M_2 とします。
 すでに「 $M_2 - M_1$ は $T_2 - T_1$ に平行」と見えたとのことなので、

- $|M_2 - M_1|$ と $|T_2 - T_1|$ の長さの比をいくつか測ってみてください。
- 複数の T_1, T_2 で試して、その比が一定かどうかを確かめてみてください。

測ってみて、どんな推測が考えられますか？

(例：長さ比がある関数で一定になる、特別な θ ではゼロになる… など)

うまく一定になっていそうなら、さらに 2~3 組データを増やして“支持的接触”を作ってみてください。

ここまでの探究を踏まえると、次のような実験結果と推測が得られたことになる。

ヤシの木の方をみて、他方の岩と反対側に θ 回転してそこからそれぞれの海賊はヤシの木と岩の間の距離と同じだけ、その向きに歩いて 2 人の海賊の中間の地点に宝を埋めたとき、その宝がヤシの木に依存せず不動点となるのは $\theta = 90^\circ$ のみである (ただし、 $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$)。

回転を含むので複素数を用いて、実際に証明を行ってみる。 $T_1(s_1, t_1)$ を $A(-a, 0)$ を中心に θ 回転した点 $T'_1(x_1, y_1)$ は

$$(x_1 + a) + y_1 i = (\cos \theta + i \sin \theta)(s_1 + a + t_1 i)$$

より、

$$x_1 = (s_1 + a) \cos \theta - t_1 \sin \theta - a, \quad y_1 = (s_1 + a) \sin \theta + t_1 \cos \theta$$

$T_1(s_1, t_1)$ を $B(a, 0)$ を中心に $-\theta$ 回転した点 $T''_1(x'_1, y'_1)$ は同様に

$$x'_1 = (s_1 - a) \cos \theta + t_1 \sin \theta + a, \quad y'_1 = -(s_1 - a) \sin \theta + t_1 \cos \theta$$

$T_2(s_2, t_2)$ を $A(-a, 0)$ を中心に θ 回転した点 $T'_2(x_2, y_2)$ は同様に

$$x_2 = (s_2 + a) \cos \theta - t_2 \sin \theta - a, \quad y_2 = (s_2 + a) \sin \theta + t_2 \cos \theta$$

$T_2(s_2, t_2)$ を $B(a, 0)$ を中心に $-\theta$ 回転した点 $T''_2(x'_2, y'_2)$ は同様に

$$x'_2 = -(s_2 - a) \cos \theta + t_2 \sin \theta + a, \quad y'_2 = -(s_2 - a) \sin \theta + t_2 \cos \theta$$

と表せる。ここで、 T'_1 と T''_1 の中点 $M_1(x_{M_1}, y_{M_1})$ は

$$x_{M_1} = s_1 \cos \theta, \quad y_{M_1} = \frac{2a \sin \theta + t_1 \cos \theta}{2}$$

T'_2 と T''_2 の中点 $M_2(x_{M_2}, y_{M_2})$ は

$$x_{M_2} = s_2 \cos \theta, \quad y_{M_2} = \frac{2a \sin \theta + t_2 \cos \theta}{2}$$

より,

$$\overrightarrow{M_1 M_2} = ((s_2 - s_1) \cos \theta, (t_2 - t_1) \cos \theta)$$

である. $\overrightarrow{T_1 T_2} = (s_2 - s_1, t_2 - t_1)$ であるから,

$$\overrightarrow{T_1 T_2} = \cos \theta \overrightarrow{M_1 M_2}$$

$\theta = 90^\circ$ のときのみ M_1 と M_2 は一致し、ヤシの木に依らず $(0, a)$ が不動点となり、
 $\theta \neq 90^\circ$ のとき、 $T_1 T_2$ と $M_1 M_2$ は平行となる.

次に、さらなる探究として会話を続けてみる.

P(6) 不動点になるような場合も見つきたいので別の場合にも実験してみたいです.

A(6) いいね、その探究心! 「不動点 (木に依らず宝が一定)」が出る別のルールをいくつか実験パターンとして提案します。どれも GeoGebra でも紙でも試せます。

実験 A: 左右の回転角を変える (歩く長さは元と同じ)

- 岩の間隔を 100 とし、各海賊は自分の岩→木の方から
- 左の海賊は角度 α 回転、右の海賊は角度 β 回転 (向きは互いに反対側)
- 歩く長さは自分の岩と木の距離と同じ

観察ポイント

- いくつかの α, β を試して、木を動かしたとき宝の点が動くか／動かないかを観察。
 - とくに $\alpha + \beta = 180^\circ$ のときを注目して、**固定されるか**確かめてください。
- まずは $(\alpha, \beta) = (60^\circ, 120^\circ)$ や $(45^\circ, 135^\circ)$ など 2~3 組で試すのがおすすめです。
 どうになりましたか? どんな推測が立ちますか?

実験 B: 歩く長さを同じ倍率に変更 (角は直角のまま)

- 左右とも同じ 90° のまま。
- ただし長さを「自分の岩と木の距離の k 倍」に変更 (左右同じ倍率)。

観察ポイント

- 木 T を動かしても宝 M は**恒置されるか**?
- 固定されるなら、その**位置はどこになるか**? (中点の高さからどれだけ離れる?)

倍率 k を少しずつ変えて観察してみましょう。

見えた結果を式でも言葉でも OK なのでまとめてみましょう。

実験 C：左右の角も倍率も両方変える

- － 左：角 α ，倍率 k
- － 右：角 β ，倍率 k （左右で同じ倍率）
- － 向きは互いに反対側に回転

観察ポイント（コア条件）

- － $\alpha + \beta = 180^\circ$ を満たすとき、木を動かしても宝が固定されるかをチェック。
- － 固定されるなら、固定点の場所は α, β, k のどれに依存して、どれに依存しないか？

*うまく固定されたら……

- － そのときの作図手順（岩の midpoint、垂直二等分線、距離の取り方 など）を自分の言葉で書き出してみてください。
- － さらに 2～3 ケース増やして“支持的接触”を作ると、確信が高まります。

A(6) で提案されている問いはガモフの宝探しの拡張になっており、問いから問いが生まれて活動が広がっていく様子が分かる。

4 考察

対話ログを次の 4 つの視点で分析する。

(1) What-if-not 方略に対する支援に対して

What-if-not 方略の中核である「条件の抽出、条件の選択、条件変更による問いの生成」の一連のプロセスを構造的に支援していた。学習者が「わからない」と回答した段階においても、GPT が問題文から前提条件を体系的に抽出し、選択肢として提示していた。これは What-if-not 方略の実践でしばしば必要とされる教師による条件可視化の足場かけを代替する働きである。さらに GPT は、生徒の発話を補助する際に内容を勝手に具体化したり、意図を過剰に先読みしたりすることなく、生徒が選んだ条件に対して「どのように変更できるか」という抽象的な問い返しを行うよう制御されていた。これはプロンプト設計によって過剰支援が抑制されていたことが実現したことがわかる。従来の問題作り教材における課題である「生徒は条件操作を思いつけず、教師の介入が必須である」に対して、本研究の GPT は支援の個別化が高い精度で実現していると考ええる。

(2) 実験数学のプロセスに対する支援

GPT は What-if-not 方略だけでなく、実験数学のプロセス（観察 → 推測 → 検証 → 支持的接触 → 証明）を段階的に促す役割も果たした。具体的には、探索的に数値実験を提案し、推測の言語化を促し、さらに追加の実験による支持的接触を促すという連鎖的支援が観察された。これは松本・清水 [2] が提示した実験数学の学習プロセスと整合的であり、GPT がこのプロセスを自然に導出することが確認された。

(3) 実験数学と What-if-not 方略の相互作用における役割

What-if-not 方略による条件変更と、実験数学の観察・推測過程が循環的に接続されていた。例えば、回転角を 90° 以外に変更するという条件操作（What-if-not）が、新たに「宝の位置の変動」という現象を生み、その現象を観察することでさらに「不動点となる角度条件は何か」という新しい問い（再度の What-if-not）を形成するという探究循環が生じていた。これは Shriki[16] が指摘した“ガモフ宝探しの教材特性”を生成 AI が能動的に引き出し、生徒の思考を連鎖的に推進する役割を果たしたことを意味する。

(4) 課題

一方で、生成 AI の利用には明確な課題も存在する。Rahman & Watanobe[12] は AI の過剰依存が「思考の模倣」を生み、生徒の主体的推論を阻害する危険を指摘しているが本研究ではプロンプト設計によって一定程度の抑制が見られたものの、対話が AI だけになり、他者の多様な視点に触れる機会が減少する可能性は残る。探究学習における議論や比較検討は不可欠であり、AI を個別支援に用いつつ、協働的学びのデザインとの両立が次の課題である。また、本研究はシミュレーションを中心とした分析であるため、実際の生徒を対象とした実践においてプロンプトの解釈がどのように揺れ、どのような誤反応や停滞が生じるかについては今後の検証が必要である。特に、生徒の数学的知識や表現力の差異によって AI の応答がどのように変わるかは検討すべき重要な論点である。

以上の分析から本研究で開発したカスタマイズ GPT は、What-if-not 方略と実験数学の両面を構造的に支援し、両者を循環的に結び付ける新しい探究モデルを創出する可能性を有することが示された。従来、教師の高度な介入が不可欠とされてきた条件操作や推測生成の初期段階に対して、AI が思考の足場かけを個別最適に提供できることは、数学教育における生成 AI 利用の新しい方向性を示すものである。

5 今後の課題

筆者らは特に幾何分野における探究活動のための DWS の提供に絞って、理数探究を担当する教員が簡便に数学に関する探究活動を導入できる環境を構築し、生徒に探究の場を提供することを行っている [5]。今後の課題として、実践を行い生徒のプロンプトの分析と

得られた問いや探究内容を分析する。

生成 AI を用いる授業はこれまで教員ができたことを行うだけでは利用の価値は低い。これまでできなかったことや授業の目的そのものの自体を検討していく必要がある。個々の探究を深めることができる反面、他者と議論するきっかけが減ることも想定できる。このような教材の位置づけに関しても検討する必要がある。

謝辞

本研究は科学研究費補助金 24H02412 の助成ならびに国際共同利用・共同研究拠点京都大学数理解析研究所の支援を受けた。

参考文献

- [1] 松本昌也・清水克彦 (2025). テクノロジーを用いた実験数学における証明のストーリーに焦点を当てた活動の検討—九点円を題材にして—. 京都数理解析研究所講義録, 2301, 29-38
- [2] 松本昌也・清水克彦 (2023a). Google Colaboratory を用いる実験数学教材の開発—完全数を題材に実験のプロセスに焦点を当てて—. 日本数学教育学会誌数学教育, 105, 11, 16-26.
- [3] 松本昌也・清水克彦 (2023b). ヴァンオーベルの定理を題材にした四角形の性質の探究—図形の対応表を用いた実験数学教材—. 日本科学教育学会研究会報告, 28, 2, 295-300.
- [4] 松本昌也・清水克彦 (2022). テクノロジーを用いた問題作りを行う実験数学教材の開発—フィボナッチ数列とリュカ数列を題材にして—. 日本数学教育学会第 55 回秋期大会発表集録, 293-296.
- [5] 清水克彦・松本昌也 (2025). ChatGPT による支援的対話を用いた理数探究のためのデジタルワークシートの開発. JESiS Research Report, 39(7), 72-79.
- [6] 文部科学省 (2018). 高等学校学習指導要領解説数学編理数編. 実教出版.
- [7] 竹内芳男・澤田利夫 (1984). 問題から問題へ：問題の発展的な扱いによる算数・数学科の授業改善 東洋館出版社.
- [8] 市川伸一 (1998). 開かれた学びへの出発—21 世紀の学校の役割—. 金子書房.
- [9] Brown, S. I. & Walter, M. I. (1983). The Art of Problem Posing. Mahwah, New Jersey : Lawrence Erlbaum.
- [10] Baidoo-Anu, D., & Ansah, L. A. (2023). ChatGPT in education: Applica-

- tions, opportunities, and threats *Education and Information Technologies*, 28, 11345–11362.
- [11] Guo, Y., & Lee, D.(2023). Leveraging ChatGPT for enhancing critical thinking skills. *Journal of Chemical Education*, 100(12), 4876–4883.
 - [12] Rahman, A., & Watanobe, Y. (2023a). Risks of over-reliance on AI in education. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 33(2), 265–280.
 - [13] Rahman, M. M., & Watanobe, Y. (2023b). ChatGPT for education and research: Opportunities, threats, and strategies. *Applied Sciences*, 13(9), 5783.
 - [14] Silver, E. A. (1994). On mathematical problem posing. *For the Learning of Mathematics*, 14(1), 19–28.
 - [15] Cai, J., & Rott, B.(2022). On understanding mathematical problem-posing processes: A review of research. *Educational Studies in Mathematics*, 111(1), 63–94.
 - [16] Atara Shriki (2011). Back to TREASURE ISLAND *The Mathematics Teacher*,104,9,658-664.
 - [17] Contreras, J.(2014). Where is the Treasure? Ask Interactive Geometry Software! *Journal of mathematics education at teacher*, 2014, 5, 35-40.
 - [18] 中村好則 (2020). .「ガモフの宝探し」問題の改題の活用に関する考察ー義務教育段階での学習内容の確実な定着を図るための指導を視野に一 岩手大学教育学部研究年報,79,1-21.
 - [19] 山平亮太 (2021). 新たな問いを生み出す授業づくりー「ガモフの宝探し」問題の証明過程に焦点を当ててー. 山形大学院 教育実践研究科年報,12,124-131.