

高校物理における記述回答を活用した ピア・インストラクションを支援するツールの開発と評価

松田竜弥¹ 加藤直樹²

概要：ピア・インストラクション(PI)型授業では、授業中に概念を問う問題を提示し、生徒同士で議論をさせることで概念理解の深化を促す。本稿では、高校物理における記述回答を活用する手法を検討し、支援ツールの開発と評価を行った。生成 AI を用いて生徒の回答を分類することで、選択式 PI と同様に回答の可視化や授業評価を実現した。さらに、プロトコル分析を通じて議論の詳細な分析を行った。その結果、記述回答形式では生徒が自らの考えを言語化する機会が増え、議論において根拠や推論が積極的に取り入れられるようになった。また、座席表を活用した可視化により議論が効率化し、複数人による活発な議論が促進された。これらの結果から、記述回答を活用した PI と支援ツールの導入は、議論における生徒間の相互作用を向上させる有効な手法である可能性が示された。

キーワード：物理教育、アクティブラーニング、生成 AI

Development and Evaluation of a Peer Instruction Support Tool Utilizing Descriptive Answers in High School Physics

TATSUYA MATSUDA^{†1} NAOKI KATO^{†2}

1. はじめに

1.1 研究背景

従来の物理教育は、教師が黒板で解説し、生徒がノートを取るという伝統的講義型授業が主流であった。しかしこの形態では、日常生活で形成された「素朴概念」が障壁となり、生徒が物理学の科学的概念を十分に理解するのは難しいと指摘されている[1][2][10]。こうした課題を背景に、1980年代以降の米国では相互作用型授業（アクティブラーニング）が注目を集め、講義形式に加えて生徒間や教師との議論、実験などの能動的活動を取り入れることで、伝統的講義型授業よりも高い学習効果が示されている。中でも Mazur の提唱したピアインストラクション（以下 PI）は、概念理解を深めるための多肢選択問題を講義途中で提示し、生徒同士が議論する場を設ける手法として知られ、有効性と実践性を兼ね備えた相互作用型授業の一例として広く研究されてきた[3]。

具体的な PI の手順は次の通りである。

- 1つのトピックについて講義を行った後、その内容に関する図1のような多肢選択問題（PI問題）を提示する。
- 生徒に1人で考えさせて選択肢番号を回答させる（相談は禁止）。
- 付近の生徒同士で議論を行わせる。
- 同じ問題に対して、もう一度回答させる。
- 正解を提示し、解説を行う。

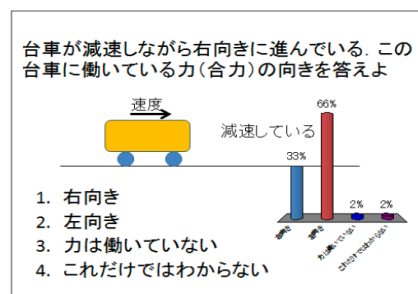


図1 PI問題

また、PIの議論の効果を表す指標として、PI効率がある[4]。これは議論による正答率の伸びを規格化したものである。

$$g_{PI} = \frac{\langle post \rangle_{PI} - \langle pre \rangle_{PI}}{100 - \langle pre \rangle_{PI}}$$

ここで、 $\langle pre \rangle_{PI}$ と $\langle post \rangle_{PI}$ は、それぞれ議論前と議論後の平均正答率[%]である。PI効率が高いと、正答率が伸びているということになり、生徒の理解度を把握するひとつの目安を与える。

しかし、後藤の研究では、生徒の理解度と正答率が必ずしも一致しないことが指摘されている[5]。実際、議論中に正答へと収束しても、参加者全員が深く理解したとは限らず、回答を納得できないまま合わせてしまうケースがあることが報告されている。さらに、リーダーの意見に流れることで一時的な正答率が高まっても、学習者一人ひとり

¹ 東京学芸大学大学院
Graduate School of Education, Tokyo Gakugei University
² 東京学芸大学
Tokyo Gakugei University

の内的理解を測り切れない可能性がある。これより、PI 効率は正答率の向上を測定する有用な指標だが、リーダーに流されたり、議論時間が不足した場合でも高く見えることがあり、理解度を正確に判断するには限界があると考ええる。そのため、単に PI 効率を高めるだけでなく、生徒間の相互作用を促進し、全員が議論に参加できる環境を整備することが重要であると考ええる。

一方で、西村によると、読解力調査 (Reading Skill Test; RST) の結果と物理基礎標準調査 (BP) の間には有意な相関があることが示されている。RST は、生徒が文章を正確に読み取り、その内容を理解する能力を評価するツールであり、一方 BP は、生徒が物理概念をどの程度正確に理解しているかを測定するものである。

RST の中でも、「具体例同定 (INST)」スキルは特に BP との関連が強く、物理学習において重要な役割を果たす。このスキルは、生徒が抽象的な物理概念を具体的な事象に結び付ける能力を評価するものであり、「力」などの物理用語の正確な理解や適用に寄与する。

ここで、これまでの選択肢式 PI では、言葉の定義や意味づけにズレがあった場合、議論の深まりを阻害する恐れが指摘されている。そこで、PI に記述回答を導入することで、生徒が自らの考えを文章化し、それを互いに比較・検討するプロセスを通じて、従来の選択肢式では得られにくかった「言葉の定義」を意識した議論が促され、より深い概念理解につながる可能性がある。

1.2 研究目的

本稿では、記述回答を活用した PI 手法を提案し、これに基づく支援ツールを開発することで、言葉の定義を意識した議論の展開と生徒同士の相互作用の向上を図ることを目的とする。具体的には、従来の選択肢式 PI の長所を活かしつつ、生徒が自由に記述した回答を効率的に分類し、クラス全体の傾向を即時に可視化できる仕組みを設計する。この仕組みを構築するため、生成 AI を活用して記述回答を自動的に分類・可視化する方法を提案する。

さらに、記述式 PI と選択肢式 PI を比較し、それぞれの手法が生徒の学習成果や議論の質、相互作用に与える影響を定量的および定性的な観点から評価する。定量的な評価では、正答率や PI 効率 (議論による正答率の伸び) を指標として生徒の学習効果を測定する。定性的な評価では、プロトコル分析を用いて、生徒同士の議論内容の変容や相互作用を詳細に分析する。このように、記述式 PI の実践と評価を通じて、生徒間の議論内容の変容、相互作用の向上を総合的に検証する。

2. 記述回答を活用した PI 手法の提案

2.1 記述回答式 PI に求められる要件

記述回答を活用したピア・インストラクション (以下、記述式 PI) を実現するためには、従来の選択肢式 PI が持つ

利点を活かしつつ、記述形式特有の課題に対応する設計が求められる。本節では、その必須要件を記す。

2.1.1 生徒の記述回答の即時集計と可視化

従来の選択肢式 PI では、「クリッカー」と呼ばれる ARS を使い、生徒の回答を瞬時に集計して棒グラフで可視化することができる。この即時集計と可視化によって、必要な情報を短時間で共有し、議論を円滑に始められるだけでなく、多数派・少数派の意見比較や極端な偏りなどから議論の方向性を見出しやすい。教師もリアルタイムでクラス全体の状況を把握できるため、議論の進行を的確にサポートできる (図 2)。

ここで回答を記述式にすると、自由に書かれた回答を容易に把握することが難しくなる。そこで、あらかじめ定めた分類基準に沿って回答を分類し、可視化する仕組みが求められる。これにより、選択肢式 PI と同様に回答分布を即時に把握し、活発な議論を促進できる。

2.1.2 評価指標の使用

PI 効率は、生徒同士の議論で正答率がどれほど向上したかを定量化する指標として広く用いられてきた。選択肢式 PI では、教師は PI 効率の数値を参考に問題の難易度や講義内容を調整し、授業改善につなげている。一方、記述式 PI では自由記述を扱うため、正解と判断するための基準をあらかじめ設定し、それを基に正答率や PI 効率を評価する必要がある。しかし、教師が全ての回答を個別にチェックするのは大きな負担となる。

この課題の解決策として、記述回答を事前に定めた分類基準に沿って自動的に分類し、正答率や PI 効率といった指標の計算に反映させる仕組みが挙げられる。こうした仕組みを導入することで、記述式 PI でも従来の選択肢式 PI と同等に定量評価を行えるようになり、授業内での円滑な議論と客観的な学習効果の把握を両立できる (図 3)。



図 2 従来の選択肢式 PI における集計と可視化

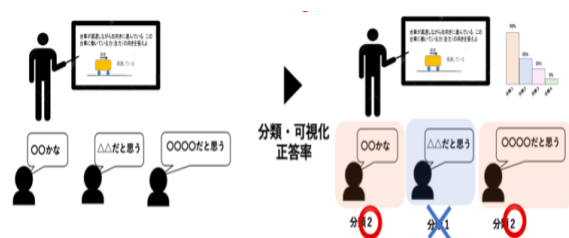


図 3 記述式 PI における分類と可視化

2.2 記述回答を分類するための基盤づくり

前節の要件に従い、記述式 PI でも、回答の可視化や PI 効率を活用するためには、生徒の記述回答をあらかじめ定義した評価基準に基づいて分類する必要がある。本稿では、図 4 のように、その評価基準を「想定される回答選択肢」として教師が事前に作成し、生徒の記述回答をこの基準に基づき、最も近い選択肢に分類する手法を提案する。

また、選択肢式 PI で教師が行っていた「生徒の誤解や躓きを予測して選択肢を設計する」プロセスを取り入れることになるため、単なる回答のクラスタリングではなく、授業の狙いや教師の意図を反映したものとなる。結果として、教師が想定する議論の方向性に沿った効果的な意見交換が進み、正答率や PI 効率の評価もスムーズになる。

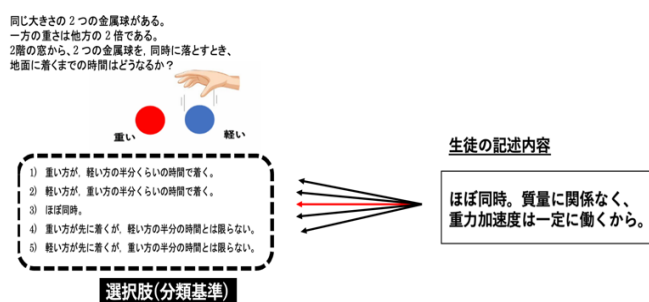


図 4 生徒の記述を選択肢に分類

2.3 記述式 PI 問題の選択肢作成

2.3.1 選択肢作成の基本方針

「想定される回答選択肢」の作成では、従来の選択肢式 PI と同様に、授業の中心テーマを正確に反映した「正答選択肢」を用意するとともに、生徒が抱きやすい誤概念や典型的な誤答を想定して、「誤答選択肢」も設計する必要がある。また、記述式 PI の問題設計では、生徒が問題文や視覚情報(図やグラフなど)をもとに自由に回答することから、従来の選択肢式 PI に比べて作成すべき誤答選択肢のバリエーションが増加する傾向にある。そのため、教師がすべての誤答パターンを想定して選択肢を設計する作業は時間と労力を要し、負担が大きくなりやすい。この課題を軽減する手段として、本稿では選択肢作成の補助として生成 AI の活用を提案する。

なお、生成 AI は選択肢作成の負担を大幅に減らす、その提案をすべて受け入れれば最適解になるわけではない。記述式 PI 問題では、多様な表現や視覚情報を考慮した回答が求められるため、最終的には教師が選択肢を確認し、物理法則の正確な反映、誤概念の十分なカバー、視覚情報への適切な対応を判断して修正することが重要である。正答が授業内容と合致しているか、誤答が過度に混乱を招かないか、図やグラフの解釈が適切かを確認し、知識と経験を活かして調整することで、教育効果の高い選択肢を完成させることができる。

2.3.2 生成 AI による選択肢生成のための入力データ

生成 AI による選択肢生成の際に、生成 AI に渡すデータの種類と、そのデータがどのように選択肢生成に活用されるかについて述べる。

(1) 問題文

問題の意図や背景を正確に伝える中心情報。生成 AI が正答・誤答を判断する基盤となる。

(2) 図やグラフ情報

図・グラフの形状や数値、軸ラベルなどの視覚情報。問題文だけでは表せない要素を補足し、誤答選択肢のバリエーションを広げる。

(3) 物理的条件

摩擦の有無や初期条件など、問題に適用される具体的な制約。選択肢を物理法則に基づいて設計する上で不可欠。

(4) 教材情報

授業の範囲や教科書情報。生徒の学習状況に合わせた選択肢を作り、教育的な一貫性を保つ。

2.3.3 生成 AI による選択肢生成のためのプロンプト

入力データを基に生成 AI への指示(プロンプト)の設計について述べる。プロンプトは、生成 AI が問題の意図を適切に理解し、正答選択肢と誤答選択肢を作成するための具体的な指針を提供するものである。

(1) 役割の明示

高等学校物理教師として、生徒の正統パターン、誤答パターンを考えさせる。

(2) 問題文の意図を明確化

プロンプトには、問題が測定したい物理概念や目標を明確に記述する。

(3) 正統選択肢と誤答選択肢の要件

正答選択肢には物理法則や問題条件を反映させ、誤答選択肢には生徒が抱きやすい誤概念を反映するように明確に指示する。

(4) 視覚情報

図やグラフの特徴を選択肢に適切に反映することを指示する。これにより、生徒が視覚的要素を用いて回答する場合でも対応可能な選択肢が生成される。

2.4 記述回答の分類

2.4.1 生成 AI の活用による記述回答の分類

記述回答の回答選択肢への分類にも生成 AI を使用する。生成 AI を使った分類では、回答を単に選択肢と文字通り照合するのではなく、質問や他の選択肢との文脈を踏まえて総合的に判断する。具体的には、質問が狙う物理的・概念的ポイントとの関連度を見極めつつ、回答全体の文意や構造を分析して誤解を分類する。こうしたアプローチにより、単なる単語やフレーズの一致を超えた柔軟な分類が可能になる。生成 AI に行わせる分類手法を次に示す。

(1) 質問文との関連性の評価

生徒の記述回答が、質問文の意図や主題とどの程度一致しているかを判断する。これにより、生徒の回答が問題設定と適合しているかを考慮した分類が可能となる。

(2) 選択肢間の相対的な比較

生徒の記述回答を各選択肢と個別に比較するだけでなく、選択肢間の関係性や一貫性を考慮する。例えば、正答選択肢と誤答選択肢の微妙な差異を識別し、生徒の誤解や迷いをより正確に把握する。

(3) 補助情報の活用

問題に付随する図やグラフの情報を解析し、それらが回答に与える影響を考慮する。このアプローチにより、視覚情報を活用した回答も適切に分類することが可能となる。

3. 生成 AI による記述回答分類の妥当性評価

記述式 PI を成立させるには、記述回答を正しく分類することが重要である。本章では、生成 AI による分類が生徒の回答意図や教師が設定した基準とどの程度一致するかの検証について述べる。

3.1 評価方法

東京都内の私立高校 5 クラス（合計 166 名）を対象に、生成 AI が生徒の記述回答を既存の選択肢にどの程度正確に分類できるかを検証した。まず、生徒には力学概念を扱う FCI（Force Concept Inventory）の問題（図 5）に自由記述で回答してもらい、次に FCI の選択肢（図 6）の中から自身の記述に最も近いと思うものを選ばせた。こうして、生徒の自由記述と選択肢回答を対応づけるデータを得たうえで、生成 AI による自動分類結果と生徒の選択結果との一致率を算出し、適合率、再現率も合わせて多面的に分析した。

この実験では、生成 AI が記述回答を正しく最も近い、既存の選択肢へ分類できるかに焦点を当てており、選択肢自体の質や作成方法は評価対象に含めていない。実験結果

同じ大きさの 2 つの金属球がある。一方の重さは他方の 2 倍である。
2 階の窓から、2 つの金属球を同時に落とすとき、地面に着くまでの
時間はどうか？

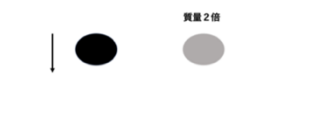


図 5 使用した問題

- ① 重い方が、軽い方の半分くらいの時間で着く。
- ② 軽い方が、重い方の半分くらいの時間で着く。
- ③ ほぼ同時。
- ④ 重い方が先につくが、軽い方の半分とは限らない。
- ⑤ わからない

図 6 記述後に生徒に提示する選択肢

を通じて、生成 AI が記述回答をどの程度正確に分類できるかを明らかにし、記述式 PI における生成 AI の実用性と課題を検証することが目的である。

3.2 結果

生成 AI による分類の評価結果を表 1 に示す。全体として、生成 AI の分類と生徒の実際の選択肢回答との一致率は約 89% に達した。しかし、表 1 からは各選択肢ごとに分類精度にばらつきが見受けられる。たとえば、「選択肢 1」では適合率が低く、生成 AI が本来該当しない回答を誤って割り当てたケースが多かった。一方、「選択肢 4」では再現率が低く、本来この選択肢であるべき回答が他に振り分けられる傾向がある。また、「選択肢 2」と「選択肢 5」は実際に選ばれなかったため、自動分類でもほとんど割り当てがなく、評価指標として適合率および再現率が低い結果となった。これらの結果から、生成 AI による分類は全体的には高精度であるものの、選択肢ごとに分類の難易度や精度に差があることが明らかとなった。

表 1 生成 AI による分類の評価結果

選択肢	件数	TP	FP	FN	TN	一致率	適合率	再現率	F1スコア
全体	166	--	--	--	--	89%	--	--	--
①	47	40	40	7	79	72%	0.5	0.86	0.63
②	0	0	0	0	166	100%	--	--	--
③	69	68	1	1	96	99%	0.99	0.99	0.99
④	50	10	7	40	109	72%	0.6	0.19	0.29
⑤	0	0	0	0	166	100%	--	--	--

3.3 考察

今回の評価では、全体的に高い分類精度が得られた一方、特定の選択肢で精度が落ちることが確認され、生成 AI の有用性と同時にいくつかの課題も明らかになった。とくに、従来の選択肢式を記述式に変換する場合、生徒が「半分の時間」「特定の速度関係」などの定量的要素を明示しないことがあり、そのために AI の分類が難しくなるケースがあった。生徒の記述表現の多様性と選択肢の意図が噛み合わない、適合率や再現率が低下しやすい。

また、一部の選択肢（2 や 5）のようにほとんど選ばれなかったものについては、授業設計上の役割を再検討し、選択肢同士の違いを明確にする必要がある。さらに、本稿では力学概念の FCI 問題を対象としたため、他の物理分野や異なる種類の問題に対して同じ手法が通用するかどうかは未検証である。今後は、電磁気や波動など多様な領域に適用し、生成 AI をファインチューニングすることで、汎用性を高めることが課題となる。

最終的に、記述式 PI を成功させるには、生成 AI の分類精度を上げるだけでなく、問題文や選択肢の設計そのものも慎重に行う必要がある。生徒が自由に表現する回答の多

様性を想定し、授業の意図に沿った選択肢を整備することで、生成 AI が生徒の意図を正確に捉えやすくなり、記述式 PI の教育効果をさらに高められると期待される。

4. 記述回答式 PI 支援ツールの設計

4.1 基本理念

記述回答を活用した PI の支援を目的としたツール設計の基本的な理念について次に示す。

(1) 生徒間の相互作用の増進

記述回答を取り入れることで、生徒は自分の考えを言語化し、他者の記述を読み解く中で新たな視点を得やすくなる。単に選択肢の番号を共有するだけでなく、お互いの考え方や理由に注目するため、「言葉の定義」や物理概念の正確さを意識し、誤解に気づいて修正する機会が増える。こうした対話を通じて、物理概念への理解と定着が深まる環境を構築することが可能となる。

(2) 教師の授業中の介入支援

PI では生徒同士の自主的な議論が基本だが、教師が適切に介入すると議論の質が高まる場合がある。議論の停滞や誤った方向への進行を早期に把握し、必要に応じて修正することで、学習効果の低下を防げる。James と Willoughby の研究に見られるように、多くの議論が外的な内容や誤解を含む場合がある[7]。これを放置すると議論全体の進行に悪影響を及ぼす可能性が示唆されており、教師の介入が重要である。

(3) 授業中および授業後の効果分析

記述回答を分類し、正答率をもとに PI 効率を算出する仕組みを整備することで、議論が正答率向上にどれだけ寄与したかを定量的に評価できるようになる。また、授業後には蓄積されたデータを活用し、より包括的な分析とフィードバックを行うことで、次回以降の授業改善につなげられる。さらに、これらの分析作業をツールで自動化し、教師の負担を軽減することで、より効果的な授業運営に集中できる環境を整えることが目標である。

4.2 主要機能の設計

4.2.1 教師用ツールの機能設計

(1) 座席表によるリアルモニタリング機能

生徒の記述回答を分類結果に基づいて色分けし、クラス全体の理解状況を直感的に把握できる座席表を提供する(図 7)。この機能は、教師が授業中にクラス全体を巡視する際の手助けとなり、議論が停滞している班や理解が進んでいない生徒を迅速に特定するのに役立つ。また、議論後には教師が目をつけた特定の生徒に発表を促す場合にも、座席表をクリックすることで、記述回答の内容を見ることができ、適切な生徒を素早く見つけることが可能となる。

(2) クラス全体の回答分布可視化機能

クラス全体の回答状況を分類ごとに集計し、棒グラフで可視化する(図 7)。この可視化は、議論前後の回答分布を

視覚的に示すことで、教師がクラス全体の理解状況や議論の効果を一目で把握できるようにする。さらに、この機能は議論後の授業展開を考える際にも大いに役立つ。例えば、正答を選んでいる生徒が極端に多い場合は議論後の説明を簡略化でき、逆に正答が極端に少ない場合は議論後の説明を詳細に行う必要があるといった判断を支援する。

4.2.2 生徒用ツールの機能設計

(1) グループの座席表示と記述共有機能

生徒のグループごとの座席配置を色分けで表示する。この色分けは回答の分類結果に基づいており、グループ内の傾向を視覚的に捉えることができるようにする。これによりグループ内での自身の立ち位置を即時に把握できる。

また、座席をクリックすることで、特定のグループメンバーの記述回答内容を詳細に閲覧できる機能を導入する。この設計は、生徒が異なる意見や視点を理解し、議論を深めるきっかけを提供することを目指している。特に、似ている記述回答でも分類が異なる場合には、言葉の使い方の違いなど幅広い議論を活性化させるための基盤となる。(図 8, 9)



図 7 教師用画面



図 8 グループの座席表示

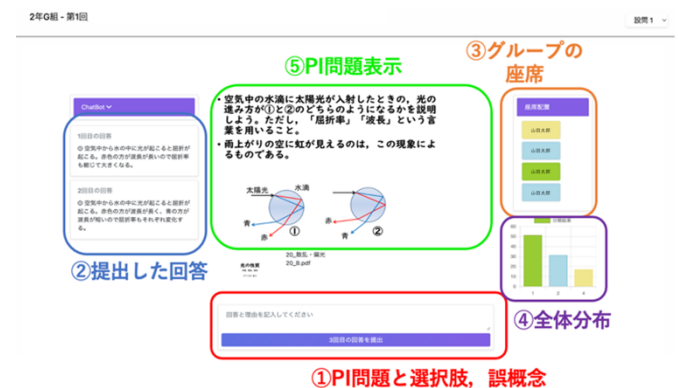


図 9 生徒用画面

5. 支援ツールの評価実験

5.1 目的と概要

支援ツールを活用した PI を実施し、記述式 PI と従来の選択式 PI の学習効果と議論への影響を比較する。5.3 節において、正答率や PI 効率といった定量指標で両形式の学習効果を測定し、続いて 5.5 節においてプロトコル分析を実施し生徒同士の議論内容や相互作用を詳細に検証する。このように定量と定性の両面から評価することで、支援ツールを用いた記述式 PI が学習者の対話や理解にどのような変化をもたらすかを明らかにする。

5.2 授業実践

都内国立大学附属高等学校の2年生「物理基礎」の4クラスを対象に、光の分散と偏光に関する2つのPI問題(図10, 11)を実施した。各PI問題には、選択肢問題と記述問題の両方を用意し、生徒の回答形式による学習効果の違いを検証した。各クラスの構成については、表2に示している。

PI型授業は、まず授業内容の講義を行い、その後PI問題を提示した。生徒は個別に回答を行い、続いて生徒同士で議論を交わした後、正解の提示と解説が行われるという手順で進めた。

表2 クラス構成

クラス	問1(選択)	問1(記述)	問2(選択)	問2(記述)
1	○		○	
2		○		○
3	○			○
4		○	○	

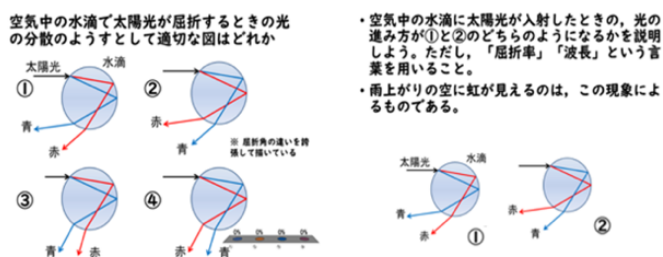


図10 問1「光の分散」

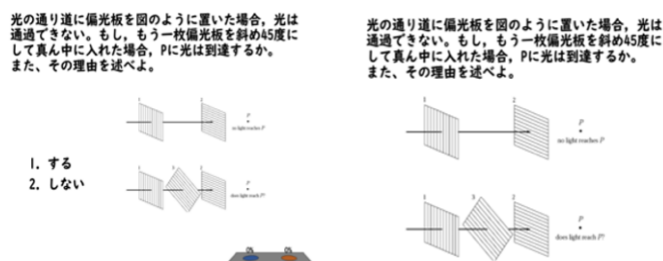


図11 問2「光の偏光」

5.3 正答率・PI 効率の比較

議論前後の正答率とPI効率を指標として用いて、記述式と選択式それぞれについて、どれだけの学習効果があったのかを分析する。

5.3.1 結果

(1) 問題ごとの正答率・PI 効率

はじめに、問題ごとに、全クラスにおける正答率およびPI効率の結果を図12, 13に示す。縦棒は、各クラスの議論前(青)および議論後(赤)の正答率を、折れ線は各クラスのPI効率を示す。すべてのクラスにおいて、議論後の正答率が明らかに向上していることが確認できる。

(2) 回答形式ごとの正答率・PI 効率

次に、先述の問1と問2を統一し、選択式PIと記述式PIの結果を図14に示す。両形式のPI効率や正答率の向上には大きな差は見られず、全体的にはほぼ同じ傾向を示した。これにより、選択式と記述式のいずれの形式においても、PIを通じた学習効果が同程度得られることが確認された。

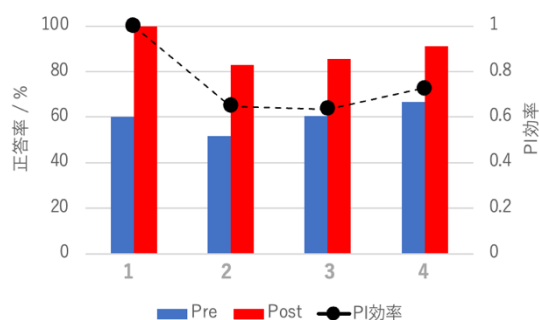


図12 問1の結果

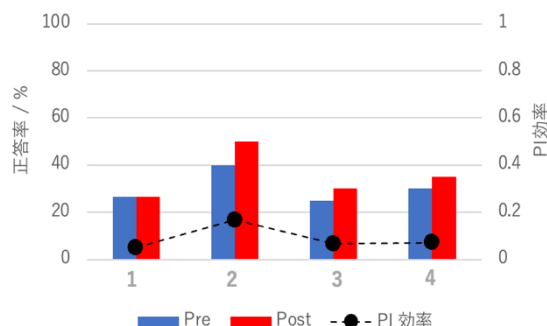


図13 問2の結果

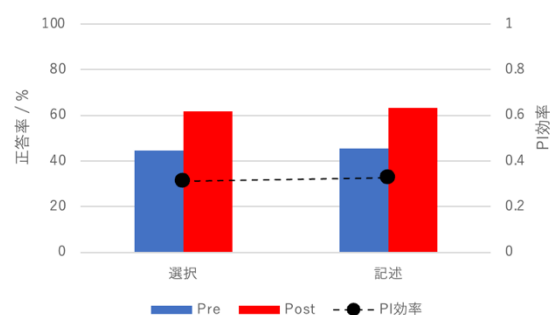


図14 回答形式による比較

5.4 考察

議論前後の正答率と PI 効率に関し、記述式 PI と選択式 PI の間に大きな差は見られず、どちらの形式でも生徒同士の議論が学習効果を高めることが確認された。ツールを活用した記述式 PI も、選択式 PI と同程度の学習効果が得られると考えられる。

ただし、本研究では 2 つの PI 問題のみを扱っており、結果が特定の条件に依存している可能性は否定できない。今後は、より多様な問題を用いた長期的な検証が必要である。記述式 PI の導入には慎重な問題設計が求められるが、ツールの活用により選択式 PI と同等の効果が期待できる点は、新たな授業形態の可能性を示している。

また、選択式 PI は選択肢があることで思考のヒントや議論の方向が定まりやすいという利点がある中で、記述式 PI でも同様の学習効果が得られたことは、ツールの有用性を示唆している。今後は、記述式の特性を活かしながら議論の深まりを促進する具体的な手法やツールの活用方法を検討し、PI 型授業の効果を最大化する実践的な指針を得ることが課題となる。

5.5 プロトコル分析による生徒間議論の分析

プロトコル分析は、生徒の発言を詳しく解析し、議論の深まりや進行を評価する手法である。ここでは、支援ツールを導入した記述式 PI と従来の選択式 PI を比較し、それぞれが生徒の思考や相互作用に与える影響を検証する。

5.5.1 分析手法

(1) データ収集

5.2 節での授業実践時に各グループにミーティングリーダーを設置し、PI 中の生徒同士の議論を録画・録音し、得られたデータに対してプロトコル分析を行なった。

(2) 発言の分類

録画データから抽出したグループの議論を文字起こしし、発言を時系列で整理した表を作成した。プロトコル分析は、2 つの PI 問題に対して延べ 28 グループの議論を対象に実施した。

また、議論における重要な発言を分類するため、後藤の手法に基づき認知負荷理論を用いた発話分類を行った [6][8][9]。具体的には、発言を表 3 の 3 種類に区分し、議論の進行や学習促進の度合いを把握した。ただし、発言の分類は議論の流れや生徒の様子を考慮したものであり、厳密な規則に基づくものではなく、グループ内の相互作用を考察するための指標として用いた。

表 3 生徒の発言の種類と特徴

認知負荷	特徴
intrinsic remark (IR)	問題解決に必要な不可欠な発言
extraneous remark (ER)	問題解決に不必要な、誤った考えなどの発言
germane remark (GR)	問題解決だけでなく、学数をさらに促進するような発言

(3) 議論の分類

そして、プロトコル分析の結果を、議論の流れや生徒の納得度をもとに、議論パターンを 5 つに分類した (表 4)。大きく「PI 成立型」「リーダー主導型」「PI 非成立型」の 3 つに分け、「PI 非成立型」はさらに 3 つのパターンに細分化した。「PI 成立型」は、グループ内の相互作用が機能し、疑問が解決して全員が納得した議論を指す。一方、「リーダー主導型」は、一人の発言に他の生徒が同意するのみで議論が深まらなかったものを指し、それ以外を「PI 非成立型」とした。「PI 非成立型」では、理解がある程度進んでも疑問が解決しなかったケースを含め、さらに 3 つのパターンに分類した。

表 4 議論の分類

議論パターン		分類基準
PI 成立型		生徒同士の相互作用があり、問題点がほぼ解決しているような議論
リーダー主導型		1 人が意見を述べ、周りがそれに同意して終わる議論
PI 非成立型	未解決型	相互作用はあるが、疑問点が解決しなかった議論
	分裂型	相互作用があるとは言えない議論
	PI 失敗型	相互作用が間違った方向に進んでしまった議論

5.6 プロトコル分析の事例

ここでは、図 10 に示した PI 問題のプロトコル分析のうち、「PI 成立型」「リーダー主導型」および、非成立型から「未解決型」の計 3 例を示す。左端の番号は発言の番号を表す。発言している生徒は、B のように、座席位置 (アルファベット) で表した。また、発言の分類については、発言者の左隣の欄に、IR は「I」、ER は「E」、GR は「G」で示し、それらに該当しない発言に対しては空欄とした。

5.6.1 PI 成立型の議論

表 5 に示す議論では、生徒 A が波長と屈折率を確認し、A と B は選択肢①を支持。B は波長の短い光の屈折率が大きいことを根拠に挙げた。一方、C は記述の違いによる分類の差に疑問を持ち、議論は一時的に「記述の正確さ」に焦点が移ったが、C と B の対話を通じて記述の具体性の重要性が認識された。

その後、D が虹の色の配置について疑問を提起し、議論は再び屈折率や波長の物理現象に戻った。A は水滴内での光の屈折と反射に着目し、虹の色の違いを説明。B も虹の外側が赤く見える理由を補足し、最終的に C も選択肢①を支持し、全員が合意に至った。

この議論では、記述の具体性が発話のきっかけとなり、議論が発展した。生徒間の相互作用が活発で、説明や補足

が効果的に機能したため、PI 成立型と判断できる。

5.6.2 リーダー主導型の議論

表 6 に示す議論では、A が発言 1 で議論を開始し、正答の根拠を示したが、他の生徒は主に A の説明に依存して進めた。B は知識を確認し、C は疑問を提示する形で進めたが、いずれも自ら積極的に意見を述べることは少なかった。D の補足説明により全員が理解し、最終的に正答を選択した。

この議論は、A がリーダー格となり、他の生徒がその意見に賛同する形で進めたため、リーダー主導型と判断した。

表 5 PI 成立型（記述式）

番号	分類	生徒	発言内容
1		A	俺は①にした。でもBと分類が違う
2	I	B	私も、青が波長が短い分、屈折率が大きいからよく曲がる。だから図①が正しいんじゃない？
3	I	A	うんうん、青がより曲がる。プリズムに光入れたときでもそうだった。
4		C	あ、屈折率が大きいとよく曲がるってことね。
5	G	D	ただ、虹では外側が赤で内側が青だよ？ それはここでは関係ない？
6		C	確かに気になる。
7	I	A	でも虹は遠いし、1つの水滴での曲がりだけで上下が決まるわけじゃないかも。なんか、少しの差ならほぼ平行になりそうあない？ヤングの実験みたいに笑
8	I	D	うーん、屈折の基本は波長が短いほど屈折率が大きい。で、青が曲がるだよ。
9	I	A	そうそう。図②は赤が大きく曲がってて逆だし、おかしいと思う。
10		B	じゃあ図①が正解か。青のほうが入口で大きく曲がって反射するし。
11		A	うん。
12		C	①に賛成。波長が短い青がよく曲がるのが自然だよ。
13	I	D	プリズムに光入れたときと同じ結果だし、屈折率が大きい光が一番曲がる。
14	G	B	虹の外側が赤なのは、もっとたくさんの水滴とかで分散されて結果的にあなるみたいなの？
15		A	そうかも。ここでは水滴1個の屈折と反射だから、青が強く曲がる方が正しい。
16		C	じゃあ図②は単に逆の例を描いたのかな。
17		D	たぶん比較用かな。実際は①が正しいと考えてOK。

表 6 リーダー主導型（選択肢式）

番号	分類	生徒	発言内容
1	I	A	じゃあ始めよ。自分は①にした。波長が短い青の方が屈折率が大きいって知識あるし、結論出てるでしょ？
2		B	一応確認したいけど、波長が短いと屈折率が大きくなるんだっけ？
3	I	A	そう。プリズムでも青が大きく曲がるのはさっき見たし、だから図①が正解ってなる。
4		C	屈折率が大きいと、屈折するときに大きく曲がるの？
5	I	D	うん、この境界面の接線に法線書くと、わかるよ
6		B	あ、確かに。①の方が青曲がってる
7		C	なるほど、

5.6.3 PI 未解決型の議論

表 7 に示す議論では、A が基本知識を確認し、B が①を支持したが、ツールを使って C の回答を確認し、新たな視点を発見。C は「虹では外側が赤、内側が青」という観察に基づく疑問を提起し、議論の焦点となった。

A, B, C, D はそれぞれの知識や観察をもとに議論を進めたが、虹の色の配置と屈折率の関係に矛盾を感じ、混乱。

C は「赤の曲がり大きいのでは」と推測したが、屈折率の知識と一致しないことが判明し、議論は振り出しに戻った。最終的に A と B は①の妥当性を再確認しつつも、②も正しそうに見える述べ、結論が出ないまま時間切れとなった。

問題点の整理や矛盾の指摘はあったが、結論に至らなかったため、PI 未解決型と分類した。

5.7 議論の分類結果

図 10, 11 に示した PI 問題の議論をプロトコル分析し、その結果を表 8 に従って分類した結果を表 8 に示す。

図 15 より、記述式 PI では、選択肢式 PI に対し、リーダー主導型が減少し、非成立型が増加したことがわかる。

表 7 未解決型（記述式）

番号	分類	生徒	発言内容
1	I	A	一応、波長が短い青い光は屈折率が大きいっていうのは合ってる？
2	I	B	うん、だから青がよく曲がるはずで、図①が正しいって考えてた。
3		C	私も最初はそれで納得してたよ。
4		D	まあ、とりあえず図①は青が大きく曲がる、図②は赤が大きく曲がる形になってるね。
5		B	やっぱり青が大きく曲がる方が正しいと思う。赤は波長が長くて屈折率は小さいはずだし。
6		C	じゃあ結論は図①かな……って思ってたけどな～
7		B	あ、Cの分類俺らと違う
8	E	C	虹って外側が赤、内側が青じゃん。それって曲がり方が赤の方が大きいってことにならない？
9		B	え？確かに
10	G	A	でもプリズムのやつでも、青の方がよく曲がってたじゃん。じゃあなんで虹では赤が外になるの？
11	E	C	うーん、逆に虹の外側に見えるってことは赤が強く曲がったから外側に出るってことかな……？
12		A	それって図②のイメージじゃない？赤が大きくカーブして……
13	I	B	でも最初の知識と矛盾しない？青い光ほど屈折率が大きく曲がりやすいって…… どっちが正解なんだろう。
14		A	なんか①で納得してたのに、虹出てきてわからなくなってきた
15		C	もし虹で赤が外側ってことは赤の曲がり大きい？そうなら図②が正しい？ でもそれは波長短い方が曲がるって逆じゃん……
16		D	こうなるとどっちを信じればいいのか分からなくなってきた。
17		A	プリズムの話と虹の話、両方正しいはずなのに、ここで真逆の結論になっちゃう……
18		B	ほんとだね。最初の知識だけなら図①だけど、虹を考えると図②っぽい見えるし……
19		C	時間も迫ってるし、どっちか断定できないよ……頭がこんがらがった。
20		D	とりあえず保留にしようか。どちらが本当なのか分からないままじゃ結論出せないし……終了にしよう。

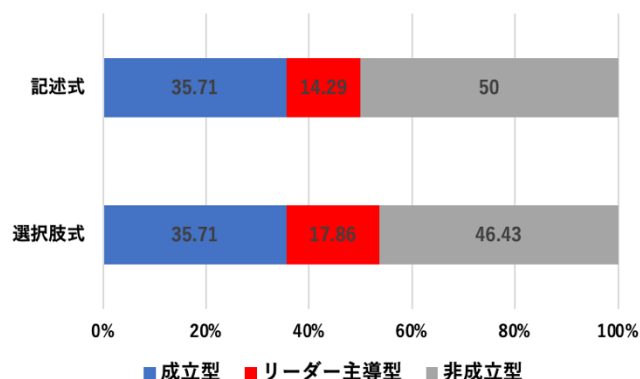


図 14 議論型分類の結果

5.8 考察

記述式 PI を導入した場合、多様な意見が自然に顕在化しやすいたことが見られた。特に、ツールの活用により、生徒同士が互いの記述を閲覧・クリックできるようになり、誤解に相当する意見も議論の材料として取り上げられやすくなった。これにより、誤解をきっかけに他の生徒が修正提案や追加説明を行い、議論が深まる中で、学習促進的な発言 (GR) が生まれる過程が観察された。このような議論の中では「言葉の定義」を意識する場面がしばしば見られ、用語の理解が異なる生徒同士がその違いを明確化しながら合意を形成していく過程が確認された。これにより、単なる答え合わせにとどまらず、深い対話や新たな気づきが促進されている。

さらに、多様な視点が浮上することで、これまで 2 人程度のやり取りで終わっていた議論がグループ全員 (4 人) へと広がりやすくなった。普段あまり発言しない生徒も、他のメンバーの記述を読んで補足的なコメントをつけたり質問を投げかけたりすることで、自然と議論に巻き込まれるようになった。特に、記述内容による分類の色分け機能により、「どの部分の認識が異なるのか」を視覚的に把握しやすくなり、議論の切り口が増えることで、多様な視点を検討する機会が生まれている。

一方、多様な発言が交わされるメリットは、同時に議論の収束を難しくするリスクも伴う。多くの意見が出ること、結論のタイミングや授業時間内での収束が難しくなることがある。実際に、記述式クラスではリーダー主導型の議論が減少する一方で、結論がまとまらずに未解決 (PI 非成立型) のまま終わる事例が増えたことが確認されている。

対して、選択式 PI では、最初から選択肢が与えられているため、クラス全体で短時間に解答を共有できるという利点がある。問題の難易度や授業時間の都合により、迅速な進行が求められる場面では特に有効である。一方で、選択肢を見るだけである程度議論の方向性が見えてしまうことから、理解度の高い生徒やリーダー格の生徒が正答に素早く到達してしまい、他の生徒が十分に発言する機会を得ないまま議論が終了してしまうケースが見られた。

6. おわりに

本稿では、記述回答を活用したピア・インストラクション (PI) の提案と、それに基づく支援ツールの開発と評価について述べた。特に、生成 AI を活用して記述回答を分類し、選択肢式 PI で実現されている可視化や定量評価を記述回答型 PI でも適用可能とする仕組みを構築した。この仕組みにより、生徒が自由に記述した内容を整理し、議論の方向性を共有することが可能となり、選択肢式 PI の利点を記述回答型 PI にも取り入れることができた。

次に、授業実践を通じて記述式 PI と選択肢式 PI の議論型の違いを明らかにした。プロトコル分析の結果、記述式

PI ではリーダー主導型の議論が減少し、生徒全員が議論に参加する環境が促進される一方で、非成立型の議論が増える傾向が見られた。一方、選択肢式 PI では、正解に到達しやすい成立型の議論が多く見られる反面、リーダー的な生徒の意見に議論が偏るケースが一定数確認された。このように、記述式 PI と選択肢式 PI には、それぞれ異なる議論の特徴があり、授業の目的や生徒の状況に応じて手法を選択する必要があることが示唆された。

以上の結果から、提案した記述回答型 PI は従来の選択肢式 PI に匹敵する教育効果を持つだけでなく、生徒間の相互作用を活性化し、多様な議論を促進する新たな手法として有効であることが示された。本研究は、PI 型授業の設計やツール開発において有益な知見を提供し、今後の教育実践に向けた重要な指針となるものである。

参考文献

- [1] R. Hake : Am. J. Phys66, (1998)64-74 Scott Freeman et al. : PNA111-23, (2014)8410-8415
- [2] 新田英雄 : 物理教育 60-1, (2012)17-21
- [3] Eric Mazur : Peer Instruction A User's Manual, Prentice Hall, (1997)
- [4] 兼田真之・新田英雄 : 物理教育 57-2, 2009
- [5] 後藤敬祐 : ピア・インストラクションにおける生徒間相互作用の分析, 東京学芸大学修士論文(2017)
- [6] Scott Freeman et al : PNAS 111-23, (2014)8410-8415
- [7] Mark C. James, Shannon Willoughby : Am. J. Phys. 79, (2011)123-132
- [8] John Sweller : COGNITIVE SCIENCE 12, (1998)257-285
- [9] J. G. van Merriënboer, John Sweller : Educational Psychology Review 17, (2005)147
- [10] E. Redish : Teaching Physics with the Physics Suite, Wiley (2003)