

自然観察を起点としたフラクタル・数列理解のための MR 体験学習

An MR-Based Experiential Learning Approach to Understanding Fractals and Number Sequences Starting from Natural Observation

古市駿¹ 角薫¹

Shun Furuichi¹, Kaoru Sumi¹

¹ 公立はこだて未来大学大学院 システム情報科学研究科

¹ Graduate School of Systems Information Science,
Future University Hakodate

Abstract: This study proposes an experiential learning system using Mixed Reality (MR) with HoloLens 2 to support the understanding of fractal structures and the Fibonacci sequence through nature observation. Although Japanese students maintain high mathematical literacy compared to other countries, international surveys such as TIMSS 2019 and PISA 2022 indicate that they have fewer opportunities to relate mathematics to daily life, resulting in relatively low motivation toward mathematics learning. To address this issue, this study integrates MR technology, which enables spatial visualization and embodied interaction with abstract concepts, with Kolb's experiential learning model. Furthermore, the system incorporates a Large Language Model (LLM) based conversational agent that not only generates explanations of observed objects but also poses reflective questions to learners. These prompts encourage learners to attend to structural features, articulate their observations, and connect concrete experiences with abstract mathematical concepts. A comparative experiment was conducted against traditional text-based learning to evaluate learning effectiveness, intrinsic motivation, and experience satisfaction. The results showed significant differences in intrinsic motivation factors, particularly interest and enjoyment, and perceived pressure, indicating that the MR-based experiential learning environment enhanced learners' voluntary engagement. In addition, qualitative responses suggested that learners in the MR condition more frequently referred to self-similarity and connections between numerical patterns and natural phenomena, indicating deeper conceptual understanding. These findings suggest that the combination of MR-based spatial interaction and LLM-driven reflective questioning supports the experiential learning cycle, especially reflective observation and abstract conceptualization, and promotes meaningful connections between mathematical concepts and real-world contexts. The proposed approach demonstrates the potential of integrating MR and conversational AI to foster intrinsically motivated and conceptually grounded mathematics learning.

1. 序論

近年、日本の学生は数学的リテラシーにおいて高い水準を維持している一方で、数学学習に対する興味・関心は国際的に見て低い水準にあることが報告されている [1]. 特に、TIMSS や PISA の調査結果から、日本の生徒は数学を日常生活と関連付けて学ぶ経験が少なく、数学を「現実世界を理解するための道具」として捉える機会が十分に提供されていないことが指摘されている [2] [3]. このような状況

は、数学学習を手続き的な問題解決に限定し、学習者の内発的動機づけの低下を招く要因となり得る。

一方で、フラクタル構造や数列といった数学的概念の理解には、複数の表象間の変換や空間的理解が必要とされることが知られている。Duval (2006) は、数学理解の困難さの本質が表象間の変換に伴う認知的負荷にあると指摘しており [6], Arcavi (2003) は視覚的表象が概念理解の形成において中心的な役割を果たすことを示している [7]. さらに、空間的思

考力が数学理解の基盤となることも報告されており [8] [9], 抽象概念の理解には身体的・空間的経験を伴う学習環境の重要性が示唆されている。

Mixed Reality (MR) は、現実空間と仮想情報を統合することで、抽象的概念を空間的・身体的に操作可能な形で提示できる技術であり、数学教育における理解支援の手段として注目されている [15] [16]。しかし、既存の MR を用いた教育研究の多くは、可視化や操作支援といった機能的側面に焦点を当てており、学習者が数学概念を日常生活の文脈の中で意味づけるプロセスや、経験学習理論と統合した学習設計については十分に検討されていない。

Kolb の経験学習モデルは、「具体的経験」「内省的観察」「抽象的概念化」「能動的実践」の循環を通して学習が深化することを示す理論的枠組みであり、多様な分野において学習者の内発的動機づけの向上に寄与することが報告されている [10] - [14]。しかし、この経験学習モデルを MR 技術と組み合わせ、数学概念を自然観察から意味づける学習環境として実装し、その教育的効果を検証した研究は限られている。

さらに近年、大規模言語モデル (LLM) は教育分野において対話的学習支援の手段として注目されている。LLM は説明生成に加え、学習者の理解を促す問いかけを行うことが可能であり、学習者の内省や概念化を支援する役割を担い得る。しかし、MR による空間的理解支援と、LLM による対話的問いかけを統合し、経験学習サイクルを支援する学習環境として検討した研究は十分に行われていない。

以上の背景を踏まえ、本研究では、自然観察を起点とし、MR を用いてフラクタル構造およびフィボナッチ数列の理解を支援する体験型学習システムを提案する。本システムは、空間的可視化と身体的操作に加え、LLM による説明生成および問いかけ機能を統合し、学習者の内省的観察と抽象的概念化を支援することを特徴とする。本研究は、抽象的数学概念を日常世界の観察と結びつけ、身体的・空間的操作および対話的支援を通じて理解を促進する学習環境の設計とその効果の検証を目的とする。

本研究では、以下の研究課題を設定する。

RQ1: MR を用いた体験型学習は、テキストベースの学習と比較して学習者の内発的動機づけを向上させるか。

RQ2: MR を用いた体験型学習は、フラクタル構造およびフィボナッチ数列の理解を促進するか。

RQ3: 自然観察を起点とした学習設計は、数学概念の意味づけおよび日常との関連付けを支援するか。

本研究の新規性は以下の点にある。

- 自然観察を起点とした数学学習という設計枠組みの提案
- MR 技術と Kolb の経験学習モデルを統合した学習環境の実装
- LLM による対話的問いかけを通じた内省および概念化支援の導入
- 表象統合および身体的操作を通じた数学概念理解の支援の実証

2. 関連研究

本章では、本研究の理論的背景および位置づけを明確にするため、フラクタル構造の教育的意義、数学概念理解における表象と可視化の問題、空間的思考と数的理解の関係、経験学習モデル、MR の学習効果、および LLM を用いた対話的学習支援に関する研究を整理する。

2.1 複雑系・フラクタル構造の教育的意義

学習システムを構築するにあたり、数学学習のどの分野に焦点を当てるかが問題となった。そこで、Karakus ら (2013) によると、フラクタルに関して多くの年齢層において誤解や知識不足が存在する可能性があり、学年が上がるにつれて成績が低下する傾向があるとされている [4]。彼らは 13 歳から 17 歳の学生を対象に、フラクタルの理解を、定義の理解、識別能力、ルール発見能力、数学的操作能力の 4 側面から調査した。その結果、フラクタルの識別・判定能力において、学年が上がるにつれて成績が低下する傾向が示された。

この知見は、フラクタルの理解が年齢とともに自然に深化するものではなく、適切な学習支援がなければ誤解の固定化や数学的操作への拒否感を生じさせる可能性を示唆している。したがって、フラクタル構造を早期に、かつ意味づけを伴った形で学習する環境の必要性が指摘される。

また、Frame ら (2002) は、フラクタルが数学や自然科学のみならず、金融、美術、音楽、文学など多様な分野に見られる概念であることを示している [5]。このことは、フラクタルの理解が学際的な視点を育成し、数学と実生活との関連性を認識させる契機となり得ることを示唆している。以上より、フラクタルを日常観察と結びつけて学習する環境は、数学の意味づけを促進する可能性を持つと考えられる。

2.2 数学的概念の抽象性と可視化の問題

Duval (2006) は、数学理解の困難さの本質が、数学的対象そのものではなく、それを表す複数の表象(記号, 図, 言語など) の間の変換 (conversion) にあると指摘している[6]. 特に, 異なる表象体系間で意味を保持したまま対応づけることは高い認知的負荷を伴い, 適切に行えない場合, 学習者は表面的な手続き操作に留まり, 統一的理解に到達できない.

このような認知的課題に対して, Mixed Reality (MR) は有効な支援手段となり得る. MR は抽象的概念を三次元空間上に可視化し, 記号表現, 図形表現, 言語的説明を同一の知覚空間内で同時に提示・操作できる環境を提供する. これにより, 従来は内部認知に委ねられていた表象間の対応関係が外在化され, conversion に伴う認知的困難の軽減が期待される.

さらに, MR 環境では身体動作を通じた操作が可能であり, 複数の表象体系が相互に連動するものとして体験的に理解される. これは Duval が指摘する「表象体系の協調」を外在化し支援する学習環境につながる.

また, Arcavi (2003) は, 視覚的表象が概念理解の中心的要素である一方, 学習者がそれを数式や言語表現と結びつけられない場合, 誤解を生む可能性があることを指摘している[7]. MR は複数の表象を空間的・動的に統合することで, 視覚表象と概念理解の乖離を縮小し, 意味構成を支援する媒介となり得る.

2.3 空間的・視覚的思考と数的理解の関係

Atit ら (2020) は, 中学生 1056 名を対象とした調査において, 空間スキルが高いほど数学成績が高い傾向を示した[8]. また, Lowrie ら (2023) は, 小学生を対象とした無作為化比較実験により, 空間スキルの育成が数学成績の向上に因果的に寄与することを実証した[9]. これらの研究は, 空間的思考力が数学理解の基盤であることを示している.

一方で, 空間スキル単独では十分ではなく, 学習への動機づけと組み合わせることで高い学習効果が得られることも指摘されている. したがって, 空間的支援と動機づけ支援を統合した学習環境の設計が重要となる. これらの知見は, 空間的操作を伴う MR 学習環境が数的理解を支援する可能性を示唆している.

2.4 Kolb の経験学習モデル

Kolb の経験学習モデルは, 「具体的経験」「内省的観察」「抽象的概念化」「能動的実践」の循環を通して学習が深化することを示す理論的枠組みである. このモデルは多様な教育分野において有効性が実証されている.

ビジネス教育において, Comer と Nicholls (1996) は, シミュレーション体験が学習者の関与を高め, 内容学習に影響を与えることを示した[10]. また, Herz と Merz (1998) は, シミュレーションゲームが従来の教育方法よりも経験学習の各段階を効果的に支援することを示唆している[11].

工学教育では, Callewaert (2019) が体験学習参加者の成長を分析し, チームワーク, 批判的思考, 専門理解など多方面での能力向上を報告している[12]. 医療教育においても, Meyer ら (2021) は, 経験学習サイクルに基づく反復的シミュレーションが臨床技能の向上に寄与することを示した[13].

これらの研究は, 具体的経験を起点とした学習設計が, 知識理解のみならず技能や態度の形成にも有効であることを示している.

2.5 Mixed Reality (MR) の学習効果

MR は現実空間と仮想情報を統合し, 抽象概念を空間的・身体的に理解可能な形で提示できる技術である. Radu (2014) は AR 研究のレビューを通して, 空間構造の理解支援, 長期記憶の保持, 身体的タスクの向上, 学習者のモチベーション向上などの効果を報告している [15].

Howard と Davis (2023) のメタ分析では, AR は従来型学習手法と比較して中程度から大きな学習効果を持つことが示されている [16]. 特に, 現実環境に近い文脈で実施された学習ほど効果が高いことが報告されており, 現実世界と仮想情報を連続的に統合する MR 環境の有効性を支持する結果となっている.

さらに, AR/MR を用いた学習は, 学習者の主体的関与を高め, アクティブ・ラーニングの促進に寄与することが報告されている. Freeman ら (2014) は, 能動的学習が学習成果の向上に寄与することを示しており [17], Erbas と Demirel (2019) は, AR を用いた学習が学業成績および学習動機の向上に効果を持つことを報告している[18]. これらの知見は, 空間的操作を伴う学習環境が学習者の関与を高め, 理解を促進する可能性を示している.

数学教育においては, 抽象概念の理解が視覚化や操作を通じて支援されることが指摘されており, MR は数式, 図形, 言語説明を同一空間内で統合的に提示できる点で有効な学習環境となり得る. 特に, 動

的可視化や空間的操作を伴う学習は、概念の生成過程や構造的関係の理解を支援する可能性がある。

一方で、既存研究の多くは可視化や操作支援といった機能的側面に焦点を当てており、学習者が日常生活の文脈の中で数学概念を意味づける学習設計や、対話的支援と統合した学習環境としての検討は十分に行われていない。

2.6 LLM を用いた対話的学習支援

近年、大規模言語モデル (Large Language Models, LLM) は教育分野において対話的学習支援の手段として注目されている。LLM は学習内容の説明生成に加え、学習者の理解を促す問いかけやフィードバックを行うことが可能であり、学習者の内省や概念化を支援する役割を担い得る。Kasneci らは、LLM が個別化された説明生成や対話的支援を通じて学習者の理解を支援する可能性を指摘している [27]。

また、対話型学習支援の有効性は、知的チュータリングシステムの研究においても報告されている。Graesser らは、学習者への問いかけやフィードバックを含む対話的インタラクションが理解の深化を促すことを示しており [28]、このような対話的支援は、学習者に自己説明や再構成を促し、受動的な知識受容から能動的な意味構成への転換を支援する要因とされる。

さらに、LLM は高度な自然言語理解能力により、多様な学習者の応答に柔軟に対応し、説明の再構成や追加質問の生成を行うことができる [29]。この特性は、学習者の思考過程に応じた適応的支援を可能にし、経験学習における内省的観察および抽象的概念化の段階を支援する技術的基盤となり得る。

しかし、既存研究の多くはテキストベースの学習支援に焦点を当てており、空間的・身体的経験を伴う MR 学習環境と統合し、経験学習サイクル全体を支援する枠組みとして検討した研究は限られている。本研究では、MR による空間的・身体的経験と LLM による対話的支援を統合することで、学習者が観察、内省、概念化、応用という学習プロセスを循環的に経験できる学習環境の実現を目指す。

2.6 本研究の位置づけ

以上の先行研究から、数学概念の理解には、表象間の変換を支援する可視化、空間的・身体的経験、および学習者の内発的動機づけを高める学習設計が重要であることが示されている。特に、表象統合の困難性 [6]、視覚表象の概念形成における役割 [7]、および空間的思考力と数学理解との関連 [8] [9] は、

抽象概念の理解を支援する学習環境の必要性を示唆している。

また、Kolb の経験学習モデルは、具体的経験を起点とした学習が動機づけと理解の深化に寄与することを示しており [10] – [14]、MR は抽象概念を空間的・身体的に操作可能な形で提示することで、これらの理論的要請を満たす技術的基盤となり得る [15] [16]。

しかし、既存研究の多くは、MR や AR を用いた可視化や操作支援に焦点を当てており、数学概念を日常生活の文脈の中で意味づける学習設計や、学習者の観察対象や理解状況に応じて説明内容を適応的に生成する仕組みについては十分に検討されていない。近年、大規模言語モデル (LLM) は、学習者の文脈に応じた説明生成を可能にする技術として注目されているが、MR 環境において自然観察を起点とした数学学習に LLM を統合し、その教育的効果を検証した研究は限られている。

そこで本研究では、自然観察を起点とした体験型学習を MR 環境上で実現し、LLM による文脈適応的説明生成を統合することで、フラクタル構造およびフィボナッチ数列の理解を支援する学習システムを提案する。本研究は、表象統合、空間的操作、経験学習、および生成的説明支援を統合した学習環境の設計とその教育的効果を検証する点において、既存研究を拡張するものである。

3. 自然観察を起点とした MR 体験型数学学習システム

本章では、自然観察を起点として数学概念の理解を支援する Mixed Reality (MR) 体験型学習システムについて述べる。本システムは、フラクタル構造およびフィボナッチ数列といった抽象的概念を、自然物の観察と MR 空間上の可視化・操作を通じて理解可能な形で提示することを目的として設計された。

さらに、本システムは、事前に設計された説明に加え、学習者が自由に質問できる対話機能を備えている。この対話機能は大規模言語モデル (LLM) を基盤としており、学習者の疑問に回答しながら概念理解を補助する。

以下では、システムの構成、MR による可視化・操作機能、および LLM を用いた対話的学習支援について述べる。

本システムの学習インタフェースおよび可視化機能の概要を図 1～図 9 に示す。

3.1 システム概要

本システムは、自然観察を起点として数学概念を学習する Mixed Reality (MR) 体験学習システムである。特に、フラクタル構造およびフィボナッチ数列の理解を支援することを目的として設計した。学習者は、現実空間に存在する自然物を観察しながら、MR 環境上に重畳表示される仮想オブジェクトや情報を操作することで、数学概念を体験的に理解する。

本システムでは、HoloLens 2 を用いて現実空間を認識し、仮想オブジェクトを重畳表示する。学習者は、視線やジェスチャ操作を用いてメニューを操作し、観察対象に関する情報の提示や可視化機能を利用することができる。

学習者が MR 空間で学習を行う際の基本画面を図 1 に示す。学習時の画面構成を示しており、観察対象の画像表示、操作メニュー、および情報提示領域が統合されたインターフェースとなっている。対象物の画像を認識することで学習が開始される (図 2)。

また、L-System による構造生成を操作では学習者はボタン操作により生成段階を変更し、構造の成長過程を動的に観察することができる。

さらに、本システムでは、大規模言語モデル (LLM) を活用し、学習者の観察対象や学習過程に応じた説明生成および対話的支援を行う。LLM は、学習者が観察した自然物と数学概念との関連を説明し、理解を促進する役割を担う。これにより、従来の固定的な教材説明とは異なり、学習者の発見や疑問に応じた柔軟な説明を提供することが可能となる。

仮想オブジェクトはメニューバー上のボタン操作により表示され、フラクタル構造やフィボナッチ数列の存在箇所の可視化、概念説明、自然界における他の事例の提示などを行う。また、特定の対象物に対してジェネラティブアートを表示することで、構造的特徴を視覚的に理解できるよう支援する。

LLM による対話的説明は、学習者の観察経験を言語化し、概念と結びつける内省的過程を支援する。これは Kolb の経験学習モデルにおける「具体的経験」「内省的観察」「抽象的概念化」「能動的実践」の学習サイクルを支援する設計となっている。

3.2 フラクタル構造の学習機能

フラクタル構造の学習では、自然界に見られる自己相似性の理解を促すため、シダの葉を起点とした観察活動を中心に設計した。シダの葉の生成過程は L-System により可視化され、部分と全体の類似性を確認できる (図 3)。学習者が HoloLens2 のカメラを用いてシダの葉を認識すると、対象物に対応するメニ

ューバー型インターフェースが表示され、解説機能および L-System による構造可視化機能にアクセスできる。フラクタル構造の観察時には、対象物に対して構造情報を重畳表示することが可能である。図 3 は、観察対象上に構造情報を重ねて提示した学習時の画面例であり、実物の観察と可視化情報の統合的理解を支援する。

L-System 可視化機能では、シダの葉の生成過程を段階的に表示することで、部分と全体が相似形を成す構造を視覚的に観察可能とした。学習者は生成段階 (深度) を操作しながら実物のシダと比較することで、自己相似性というフラクタル構造の本質的特徴を体験的に理解できる。このような段階的生成の可視化は、複雑な構造の形成過程を動的に捉えることを可能にし、静的な図表では把握が困難な構造理解を支援する。

観察後、対話型エージェントは学習者に対して、実物のシダと L-System によって生成されたモデルとの類似性に関する判断を促す問いを提示する。この過程により、学習者は観察結果を内省的に整理し、自己相似性という概念の抽出を試みる。エージェントは学習者の回答に応じて補足説明を行い、フラクタル構造の定義および特徴を明示的に整理する。この段階は、Kolb の経験学習モデルにおける「内省的観察」および「抽象的概念化」に対応する。

さらに、理解の定着を目的として、シダの葉と同様の自己相似性を持つ自然物を選択する課題を提示する。学習者は提示された選択肢から該当する対象を選び、その理由を説明することで、フラクタル構造の概念を他の文脈へ適用する経験を得る。この応用的課題は、Kolb モデルの「能動的実践」に相当し、概念理解の転移を促進することを意図している。

以上の一連の学習プロセスにより、学習者は自然物の観察 (具体的経験) から出発し、構造の可視化と比較 (内省的観察)、概念の整理 (抽象的概念化)、および他事例への適用 (能動的実践) へと段階的に学習を進める。本機能は、フラクタル構造の理解において重要とされる視覚的認識と概念的統合を支援することを目的として設計した。

3.3 フィボナッチ数列の学習機能

フィボナッチ数列の学習では、自然界に見られる規則性と数的構造の関係を理解させることを目的として、松かさ起点とした観察活動を中心に設計した。学習者が HoloLens2 のカメラを用いて松かさを認識すると、螺旋構造の観察および可視化機能にアクセスできるメニューバー型インターフェースが表示される。



図1 学習画面の表示

学習対象を認識すると、MR空間上に操作インタフェースおよび学習メニューが表示される。

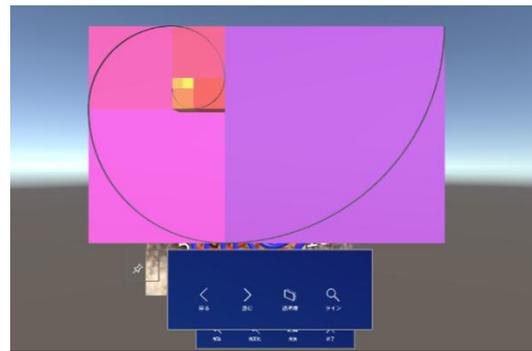


図4 黄金比可視化オブジェクトの重畳表示

黄金比を示す仮想オブジェクトを重畳表示し、自然物における比例関係を探索する。



図2 対象物の認識とシステム起動

シダの画像を読み取り、システムを起動する。エージェントの指示に従い、自然物に含まれるフラクタル構造の有無を観察する。

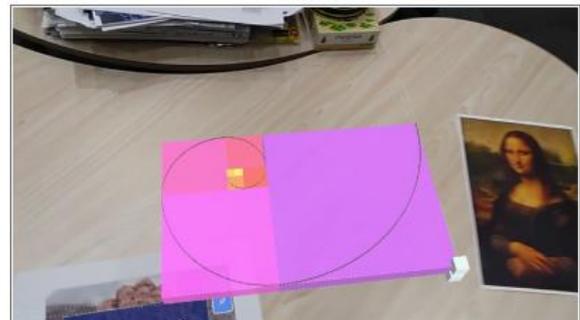


図5 黄金比の探索活動

周囲の物体と黄金比の対応関係を比較し、黄金比が成立する対象を探索する。

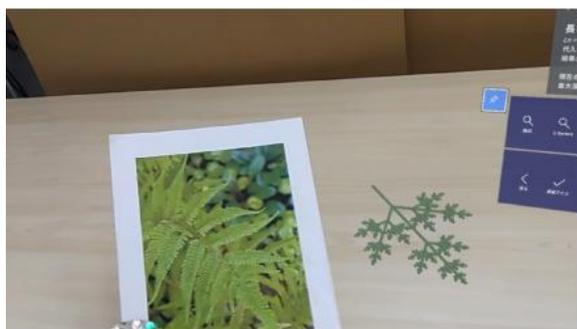


図3 L-Systemによる構造可視化

シダの葉のL-Systemモデルを表示し、生成過程を段階的に確認することで、部分と全体の類似性（自己相似性）を理解する。

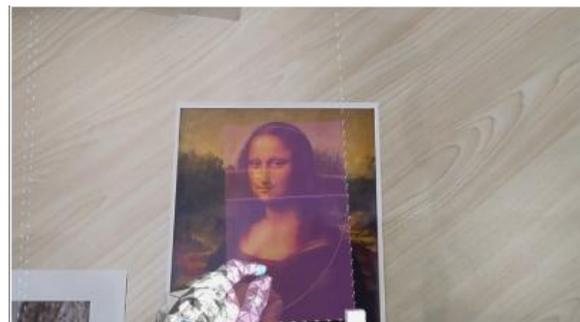


図6 黄金比の確認

対象物に重畳表示された可視化オブジェクトを用いて、黄金比の成立を確認する。



図7 フィボナッチ数列の学習開始
松かさの画像を読み取り、フィボナッチ数列の学習を開始する。



図10 操作インターフェース
可視化表示の切替, 探索機能, および学習メニュー操作を行うインターフェース。



図8 螺旋構造の観察と数列の対応付け
松かさの螺旋構造を可視化し、螺旋数とフィボナッチ数列との対応関係を観察する。

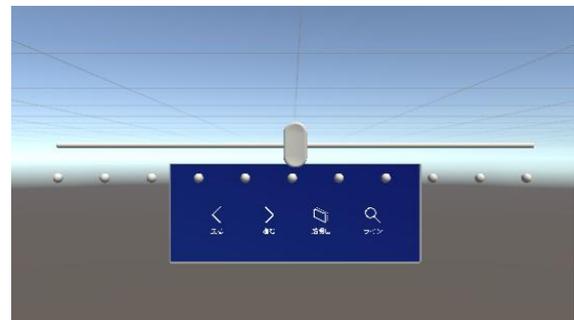


図11 スライダーによる表示調整
スライダー操作により、可視化の深度や表示範囲を調整する。

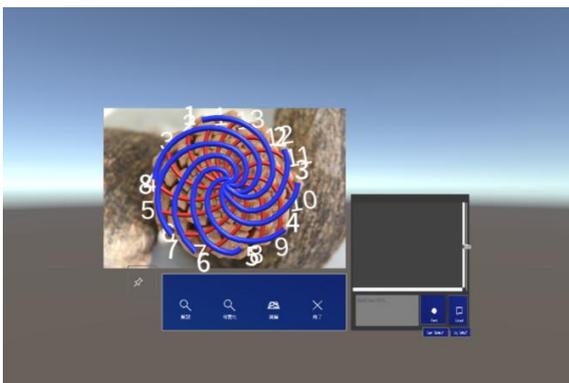


図9 観察対象への構造重畳表示
螺旋構造を対象物上に重畳表示し、数的規則と自然構造の対応を確認する。



図12 周囲の自然物の探索活動
学習者は周囲の自然物を観察し、フラクタル構造やフィボナッチ数列に関連する対象を探索する。

まず、学習者は松かさ表面の螺旋状の模様を観察し、左右方向に異なる数の螺旋が存在することに気づくよう促される。続いて、可視化機能を用いることで松かさ上に螺旋構造を重畳表示し、それぞれの螺旋数を視覚的に確認できる。

この可視化により、自然物に見られる螺旋数がフィボナッチ数列の隣接項に対応することを直感的に理解できるよう設計した。

観察結果の確認後、対話型エージェントはフィボナッチ数列の定義および生成規則を提示し、松かさの螺旋構造との対応関係を説明する。螺旋構造の観察(図7)および可視化表示(図8)を通じて、学習者は自然物の形状と数列の規則との対応関係を確認する。さらに、観察対象に数値情報を重畳表示することで、螺旋数とフィボナッチ数列の対応を具体的に把握できる(図9)。これにより、学習者は視覚的観察と数的規則との対応づけを行い、具体的事象と抽象的概念を統合的に理解する。この過程は、Kolbの経験学習モデルにおける「内省的観察」および「抽象的概念化」に対応する。

黄金比の理解を支援するため、本システムでは黄金比可視化機能を実装した。黄金比を示す可視化オブジェクトを実空間に重畳表示し、比率関係を探索できる(図4)。学習者は周囲の物体と比較しながら黄金比の成立を検討する(図5)。可視化オブジェクトを用いて黄金比の成立を確認する(図6)。学習者は操作インタフェースを通じて表示切替や探索機能を利用できる(図10)。スライダー操作により可視化の範囲や深度を調整できる(図11)。比例関係を探索的に理解できるよう設計した。学習者はフィボナッチ数列の隣接項の比が黄金比に近づく性質について説明を受けた後、黄金比を示す仮想オブジェクトを実空間の物体に重ね合わせながら比較することができる。この探索活動により、学習者は自然界や日常環境に見られる比例関係に気づき、数学的概念が現実世界に広く存在することを体験的に理解する。この段階は、Kolbモデルの「能動的実践」に相当し、概念の転移と応用を促すことを目的としている。

以上の学習プロセスを通じて、学習者は自然物の観察(具体的経験)から出発し、螺旋構造の可視化と数的対応の確認(内省的観察)、フィボナッチ数列および黄金比の概念理解(抽象的概念化)、および実空間における比例関係の探索(能動的実践)へと段階的に学習を進める。本機能は、自然界の規則性と数学的構造の関係を可視化し、視覚的理解と数的理解の統合を支援することを目的として設計した。

3.4 LLM を用いた対話的学習支援

本システムでは、学習者の理解を支援するために、大規模言語モデル(Large Language Model, LLM)を用いた対話エージェントを統合している。本エージェントは、自然観察を起点とした学習過程において、事前に設計された説明内容を提示するとともに、学習者からの自由な質問に回答することで、概念理解を支援する役割を担う。

具体的には、フラクタル構造やフィボナッチ数列に関する基本的な説明や学習の進行は、あらかじめ設計されたプロンプトに基づいて提示される。一方で、学習者は観察対象に関する疑問や気づきを自由に入力することができ、エージェントはその内容に応じて補足説明や追加の問いかけを生成する。これにより、学習者は提示された説明を受動的に受け取るだけでなく、自身の関心や理解状況に基づいて対話を展開し、理解を深めることが可能となる。

例えば、シダの葉の観察において提示された説明に対して、「なぜ同じ形が繰り返されるのか」といった質問が入力された場合、エージェントは自己相似性の概念を補足的に説明する。また、松かさの観察において「なぜ螺旋の数が決まっているのか」といった問いに対しては、フィボナッチ数列や成長効率との関係が追加的に説明される。このような応答は、学習者の疑問に応じて説明内容を再構成する適応的支援として機能する。

このような設計は、事前に構造化された学習内容の提示と、学習者主導の対話的探究を両立させるものである。固定的な教材のみでは対応できない個別の疑問に対応できる一方、完全に自由生成型の対話に比べて、学習内容の正確性と教育的整合性を担保できる点に特徴がある。

また、本エージェントはKolbの経験学習モデルにおける学習サイクルの各段階を支援するよう設計されている。提示される説明は「具体的経験」の意味づけを補助し、学習者からの質問は「内省的観察」を促し、応答として提示される概念説明は「抽象的概念化」を支援し、追加の問いかけや応用例の提示は「能動的実践」への移行を支援する。このように、LLMによる対話機能は、MRによる空間的・身体的経験と結びつくことで、経験学習サイクル全体を支援する役割を果たす。

以上より、本システムにおけるLLMを用いた対話的学習支援は、事前設計された学習内容の提示と自由質問への応答を統合することで、学習者の内省、概念化、および意味構成を促進する重要な要素として位置づけられる。

最終的に、学習者は周囲の自然物を観察し、フラ

クタル構造やフィボナッチ数列に関連する対象を探索する活動を行う(図 12)。この探索活動は、学習した概念を実環境に適用する過程であり、Kolb の経験学習モデルにおける「能動的実践」に対応する。

4. 評価実験

本章では、第 3 章で提案した自然観察を起点とした MR 数学概念学習システムの学習効果を検証するために実施した評価実験について述べる。本実験では、本システムを用いた学習とテキストベースによる学習を比較し、理解度、学習意欲、および体験満足度の観点から学習効果を評価することを目的とした。

4.1 実験目的

本実験の目的は、自然観察を起点とした MR 学習が、従来のテキストベース学習と比較して、学習者の数学概念の理解、学習意欲、および学習体験にどのような影響を与えるかを明らかにすることである。

従来の数学学習では、数式や図表を中心とした抽象的表現による学習が主であり、日常生活における事象との関連性を実感しにくいという課題が指摘されている。これに対し、本研究で開発した MR 学習システムは、自然物の観察と仮想オブジェクトの可視化を組み合わせることで、数学的概念と現実世界との対応関係を体験的に理解できる学習環境を提供する。

本実験では、フラクタル構造およびフィボナッチ数列を学習対象とし、以下の観点から両学習方法の比較を行う。

1. 学習理解度

各学習後に実施するテストの得点を用いて、数学概念の理解度を評価する。

2. 学習意欲

Intrinsic Motivation Inventory (IMI) を用いて、学習に対する興味・楽しさ、努力、価値認知などの内発的動機づけを測定する。

3. 体験満足度およびユーザビリティ

System Usability Scale (SUS) および独自質問項目を用いて、学習体験の満足度およびシステムの使いやすさを評価する。

これらの指標を総合的に分析することで、自然観察を起点とした MR 学習の教育的有効性を検討する。

4.2 実験参加者

本実験は、公立はこだて未来大学に在籍する学生 21

名を対象に実施した。参加者の内訳は男性 15 名、女性 6 名であり、いずれも大学生または大学院生である。参加者の年齢は 20 歳から 25 歳の範囲であり、平均年齢は 22.1 歳であった。

参加者は全員、日本の学校教育においてフラクタル構造やフィボナッチ数列を体系的に学習した経験が少ない、あるいは学習内容を十分に記憶していないと自己申告した者である。そのため、本実験は初学者に近い状態での概念理解の促進効果を検証することを目的として実施した。

なお、すべての参加者には実験の目的および手順を事前に説明し、参加は任意であること、途中で辞退できること、および取得したデータは研究目的以外には使用しないことを伝え、同意を得た上で実施した。

4.3 実験環境・機材

本節では、評価実験で使用した学習環境、教材、および評価手法について述べる。MR 学習には第 3 章で述べた HoloLens2 向け学習システムを用い、テキストベース学習と比較するための教材を準備した。また、学習意欲、体験満足度、および理解度を多面的に評価するため、質問紙およびテストを実施した。

4.3.1 MR 学習環境

MR 学習には、第 3 章で述べた学習システムを実装した HoloLens2 を使用した。学習者は実空間に配置された自然物を観察しながら、仮想オブジェクトによる可視化および対話型エージェントによる解説を通じて学習を行った。

学習環境には、フラクタル構造およびフィボナッチ数列に関連する自然物と、関連しない自然物を混在させて配置した。フラクタル構造の学習では、ロマネスコ、ブロッコリー、シダなど自己相似性を持つ自然物を含めた環境を構築した。学習者はこれらの対象物を観察しながら、MR による可視化および対話的説明を通じて構造的特徴を学習した(図 9)。フィボナッチ数列の学習では、松かさなど螺旋構造を持つ自然物を含む環境を構築した。学習者は対象物の螺旋構造を観察し、MR による可視化およびエージェントの説明を通じて数的規則との対応関係を学習した(図 10)。学習者が観察と比較を通じて、数学的構造の特徴に気づくことができるよう設計した。

4.3.2 テキストベース学習教材

比較対象として、書籍を用いたテキストベース学習

を実施した。フラクタル構造の学習には石村ら[19] および芹沢 [20] の文献を使用し、フィボナッチ数列の学習には岩永 [21] および新藤 [22] の文献を使用した。これらの教材は、両学習内容の基本概念および具体例を網羅する内容であり、本システムで扱う学習範囲と対応するよう選定した。

学習者には、指定された時間内に自由に教材を参照しながら学習を行うよう指示した。

4.3.3 評価用質問紙およびテスト

学習効果を多面的に評価するため、以下の質問紙およびテストを用いた。

(1) 内発的動機づけの測定

学習意欲の評価には、McAuley ら [23] による Intrinsic Motivation Inventory (IMI) を使用した。IMI は、興味・楽しさ、知覚された有能感、努力・重要性、価値・有用性、知覚された選択性、圧力・緊張、関係性の各側面について、7 段階のリッカート尺度で回答する形式である。本研究では、これらの項目に加え、学習体験の印象を把握するための独自質問項目を追加した (表 1)。

(2) ユーザビリティおよび体験満足度の測定

MR 学習システムの使用感の評価には、Brooke [24] による System Usability Scale (SUS) を使用した。SUS は 10 項目から構成され、5 段階のリッカート尺度で回答する。本研究では、システムの操作性およびエージェント機能に関する評価を把握するため、独自質問項目を追加した (表 2)。

(3) 理解度テスト

各学習後に、フラクタル構造およびフィボナッチ数列の理解度を測定するテストを実施した。テストは両学習方法で扱った内容を網羅する難易度で構成し、選択問題に加えて、学習内容の特徴を満たす図形を作成する課題を含めた。この課題は、学習者が概念をどのように視覚化・表現するかを把握することを目的としている。

4.4 実験手順

本実験では、MR 学習とテキストベース学習の比較を行うため、被験者内計画を採用した。すべての参加者が両方の学習方法を体験し、学習方法および学習内容の順序効果を低減するため、カウンターバランスを行った。

4.4.1 学習条件の割り当て

本実験では、学習方法 (MR 学習、テキストベース学

習) と学習内容 (フラクタル構造、フィボナッチ数列) の組み合わせにより、以下の 4 条件を設定した。

1. フラクタル構造 (テキスト) → フィボナッチ数列 (MR)
2. フラクタル構造 (MR) → フィボナッチ数列 (テキスト)
3. フィボナッチ数列 (テキスト) → フラクタル構造 (MR)
4. フィボナッチ数列 (MR) → フラクタル構造 (テキスト)

参加者はこれらの条件のいずれかに割り当てられ、学習順序の影響を統制した。

4.4.2 実験の流れ

実験は以下の手順で実施した。

(1) 事前説明

参加者に対して実験の目的および手順を説明し、MR 学習とテキストベース学習の両方を体験することを伝えた。また、各学習後にアンケートおよび理解度テストを実施すること、学習中に必要に応じてメモを取ることが可能であることを説明した。

(2) 学習の実施

各学習は最大 10 分間とし、参加者は指定された学習方法および学習内容に従って学習を行った。学習が完了したと判断した場合は、制限時間内であっても終了を申告できるようにした。

MR 学習では、HoloLens2 の基本操作およびシステムの主要機能について事前に簡単な説明を行い、必要に応じて操作説明図を参照できるようにした。テキストベース学習では、指定した教材を自由に参照しながら学習するよう指示した。

(3) 質問紙調査

各学習終了後、内発的動機づけを測定する IMI 質問紙への回答を求めた。さらに、MR 学習を実施した場合には、システムのユーザビリティおよび体験満足度を評価するため、SUS 質問紙および追加質問項目への回答を求めた。

(4) 理解度テスト

質問紙回答後、各学習内容に対応する理解度テストを実施した。テスト時間は 5 分とし、学習内容に関する知識および概念理解を測定した。

(5) 第 2 条件の実施

1 回目の学習、質問紙回答、理解度テストの終了後、割り当てられた条件に従い、第 2 の学習条件について同様の手順を繰り返した。

(6) 実験終了

すべての手順終了後、参加者に対して実験終了を告げ、必要に応じて追加の感想を収集した。

4.5 評価指標

本実験では、自然観察を起点とした MR 学習の有効性を多面的に評価するため、理解度、学習意欲、および学習体験の満足度の3つの観点から評価を行った。各指標の測定方法を以下に示す。

4.5.1 理解度の評価

学習内容の理解度を測定するため、各学習後にフラクタル構造およびフィボナッチ数列に関する理解度テストを実施した。テストは選択問題および記述課題で構成し、両学習方法で扱った内容を網羅する難易度とした。

記述課題では、学習者自身が学習内容の特徴を満たす図形を作成する問題を含め、概念の適用および表現の観点から理解の深さを評価した。この課題により、学習者がフラクタル構造の自己相似性やフィボナッチ数列に基づく構造的特徴をどのように視覚的に表現するかを把握することを目的とした。

理解度はテストの得点に基づいて定量的に評価し、MR 学習とテキストベース学習の間で比較を行った。

4.5.2 学習意欲の評価

学習に対する内発的動機づけを測定するため、McAuley ら [23] による Intrinsic Motivation Inventory (IMI) を使用した。IMI は、興味・楽しさ、知覚された有能感、努力・重要性、価値・有用性、知覚された選択性、圧力・緊張、関係性の各側面を7段階のリッカート尺度で評価する質問紙である。

本研究では、学習方法の違いが学習者の動機づけに与える影響を把握するため、各学習終了後に IMI への回答を求めた。また、学習体験に対する主観的印象を補足的に把握するため、独自の質問項目を追加した。これにより、学習者が感じた興味や有用性、学習への関与度を総合的に評価した。

4.5.3 体験満足度およびユーザビリティの評価

MR 学習システムの使用感および体験満足度を評価するため、Brooke [24] による System Usability Scale (SUS) を使用した。SUS は 10 項目から構成される質問紙であり、システムの使いやすさおよび学習者の主観的満足度を5段階のリッカート尺度で測定する。

本研究では、MR 学習後に SUS への回答を求め、さらにシステムの操作性、仮想オブジェクトの可視性、および対話型エージェントの理解支援機能に関

する独自質問項目を追加した。これにより、MR 学習環境のユーザビリティと学習体験の質を詳細に評価した。

4.5.4 評価指標の統合的分析

本研究では、上記の理解度、学習意欲、および体験満足度の各指標を統合的に分析することで、自然観察を起点とした MR 学習の教育的有効性を検討した。これにより、単なる知識獲得の効果にとどまらず、学習者の動機づけや学習体験の質に与える影響を含めた総合的な評価を行うことを目的とした。

5. 結果

本章では、第4章で示した評価指標に基づき、自然観察を起点とした MR 学習とテキストベース学習の比較結果を示す。理解度、学習意欲、および体験満足度の観点から、各学習方法による差異を報告する。

5.1 理解度の比較

フラクタル構造およびフィボナッチ数列に関する理解度テストの結果を表1に示す。各学習方法における選択式問題の正答率を算出し、MR 学習とテキストベース学習の比較を行った。

フラクタル構造

フラクタル構造の選択式問題における正答率は表1の通りであった。全体として、MR 学習の正答率はテキストベース学習より高い傾向が見られた。

表1 フラクタル構造に関する理解度テスト正答率 (学習媒体別)

問題	MR 学習	テキスト学習
Q1 概念理解	100%	64%
Q2 識別	100%	36%
Q3 解釈	60%	27%
Q4 定義	60%	27%

フィボナッチ数列

フィボナッチ数列の選択式問題における正答率は表2の通りであった。フィボナッチ数列の選択式問題における正答率を表2に示す。全体として大きな差は見られなかったが、結果推論に関する項目では MR 学習が低い値を示すなど、課題の性質によって学習媒体の効果が異なる可能性が示唆された。

表 2 フィボナッチ数列に関する理解度テスト正答率 (学習媒体別)

問題	MR 学習	テキスト学習
Q1 結果推論	100%	63%
Q2 計算	40%	36%
Q3 解釈	100%	100%
Q4 結果推論	0%	9%

一部の問題において両学習方法の差が小さい項目も見られたが、概念理解を問う問題では MR 学習の正答率が高い傾向が確認された。

記述式回答の傾向

記述式課題において、フラクタル構造の図示問題では、MR 学習群の参加者 10 名全員がフラクタル構造に関連する図示を行ったのに対し、テキスト学習群では 11 名中 9 名が図示を行った。

5.2 学習意欲の比較 (IMI)

学習後に実施した Intrinsic Motivation Inventory (IMI) の結果に基づき、MR 学習とテキストベース学習における学習意欲の差を比較した。各設問について平均値、標準偏差、および Welch の t 検定の結果を算出した。IMI の各設問の平均値を表 3 に示す IMI の各設問の平均値を表 3 に示す。以下では、主要な下位尺度ごとに結果を述べる。

5.2.1 興味・楽しさ

Q1「この体験はとても楽しかった」において、MR 学習の平均値は 5.86 (SD=1.08)、テキスト学習は 3.14 (SD=1.55) であった。Welch の t 検定の結果、両群間に統計的に有意な差が認められた ($p < .001$)。

Q2「時間を忘れて夢中になった」において、MR 学習の平均値は 5.05 (SD=1.81)、テキスト学習は 3.52 (SD=1.84) であった。統計的に有意な差は認められなかった ($p = 0.012$)。

また、Q3「この活動は退屈だった」(逆転項目)では、MR 学習の平均値は低く、退屈さが少ない傾向が確認された。

5.2.2 努力・集中

Q8「この課題に真剣に取り組んだ」において、MR 学習の平均値は 6.33 (SD=0.71)、テキスト学習は 5.62 (SD=1.05) であった。統計的に有意な差は認められなかった ($p = 0.016$)。

Q7「かなりの努力をしたと思う」では、テキスト学習の平均値がやや高かったが、有意差は認められなかった ($p = 0.038$)。

5.2.3 価値・有用性

Q10「この体験は自分の学びに役立つと思う」において、MR 学習の平均値は 5.38 (SD=1.50)、テキスト学習は 4.52 (SD=1.68) であった。有意差は認められなかった ($p = 0.096$)。

Q11「この活動は自分にとって意味がある」においても、MR 学習の平均値が高い傾向が見られたが、有意差は認められなかった ($p = 0.023$)。

5.2.4 圧力・強制感

Q14「強制的にやらされていると感じた」において、MR 学習の平均値は 2.62 (SD=1.56)、テキスト学習は 4.19 (SD=1.87) であった。Welch の t 検定の結果、両群間に統計的に有意な差が認められた ($p < .001$)。

5.2.5 学習方法の選好

学習方法の選好に関する設問では、「日常のモノから数学的要素を探しながら学習する方式が良い」と回答した参加者は 18 名 (85.7%) であり、「テキストで学習する方式が良い」と回答した参加者は 3 名 (14.3%) であった。

5.2.6 結果の概要

IMI の結果から、MR 学習はテキストベース学習と比較して、興味・楽しさに関する評価が有意に高く、圧力・強制感が有意に低いことが確認された。また、価値・有用性に関しても MR 学習の平均値が高い傾向が見られた(表 3)。

表 3 学習媒体別の IMI 結果 (統合平均値)

下位尺度	設問	MR 学習 平均	テキスト 学習 平均
興味・ 楽しさ	Q1 楽しかった	5.98	3.15
	Q2 夢中になった	5.27	3.73
	Q3 退屈だった (逆転)	2.49	4.18
努力・ 集中	Q7 努力した	4.58	5.67
	Q8 真剣に取り組 んだ	6.17	5.41
価値・ 有用性	Q10 学びに役立つ	5.44	4.66
	Q11 意味がある	5.42	4.21
圧力・ 強制感	Q14 強制的に感じ た	2.71	4.46

5.3 体験満足度およびユーザビリティ

MR 学習システムの体験満足度およびユーザビリティを評価するため、System Usability Scale (SUS) および独自質問項目の結果を分析した。

5.3.1 SUS 各設問の結果

SUS の各設問における平均値は表 4 の通りであった。操作のしやすさ (Q3 : M=3.62) および機能統合 (Q5 : M=3.71) に関する評価は比較的高く、多くの参加者が本システムを直感的に操作できると評価した。一方で、自信 (Q9 : M=2.52) や学習のしやすさ (Q7 : M=2.95) に関する項目では中程度の評価が見られた。

表 4 SUS 各設問における平均評価値

設問	評価項目	平均値
Q1	使用頻度	3.38
Q2	複雑さ	2.81
Q3	使いやすさ	3.62
Q4	使用前の不安感	2.86
Q5	機能統合	3.71
Q6	一貫性	3.38
Q7	学習のしやすさ	2.95
Q8	操作の煩雑さ	2.95
Q9	自信	2.52
Q10	事前学習の必要性	2.86

表 5 UI および学習支援機能に関する評価結果
(独自質問項目)

設問	評価項目	平均値
Q11	ジェスチャ操作のしやすさ	3.14
Q12	メニュー配置の分かりやすさ	3.40
Q13	情報量の適切さ	3.35
Q14	表示の分かりやすさ	3.81
Q15	可視化による理解支援	4.19
Q16	エージェントの説明の分かりやすさ	3.90
Q17	学習支援全体の有用性	3.65

仮想オブジェクトの可視化による理解支援 (Q15 : M=4.19) は最も高い評価を示した。また、エージェントの説明の分かりやすさ (Q16 : M=3.90) および

5.3.2 UI および学習支援機能の評価

独自質問項目による UI および学習支援機能の評価結果を表 5 に示す。表示の分かりやすさ (Q14 : M=3.81) も比較的高い評価を示した。一方で、ジェスチャ操作のしやすさ (Q11 : M=3.14) は他の項目と比較して低い値を示した。

5.3.3 エージェント機能に関する評価

対話型エージェントによる解説機能については、多くの参加者が理解の補助として有用であると評価した。特に、観察後に概念を整理する説明が理解の助けになったとする回答が見られた。

一方で、説明の長さやタイミングに関して調整の余地があるとする意見も確認された。

5.4 質的分析

本節では、フラクタル構造およびフィボナッチ数列に関するテストの自由記述回答および図示回答を分析し、学習者の概念理解の質的側面を検討する。特に、各単元の Q4 では、学習内容の理解を自分の言葉で説明することを求めた。フラクタル構造では「フラクタル構造とはどのような性質を持つものか」を説明する設問、フィボナッチ数列では「フィボナッチ数列や黄金比が自然界に現れる理由や特徴」を説明する設問とした。これらの回答内容を分類し、学習媒体による理解の特徴を比較した。

5.4.1 フラクタル構造の理解の特徴

フラクタル構造の Q4 回答では、MR 学習群において、自己相似性や部分と全体の類似性に言及する回答が多く見られた。例えば、「全体の構造と一部の構造が同じような構造になっている性質」「自分の一部と自分全体が同じ形をしている性質」「ある図形の中に同じ図形が見られること」といった記述が確認された。これらは、フラクタルの本質的特徴である自己相似性を、自然観察や視覚的経験と結びつけて理解していることを示唆している。

一方、テキスト学習群では、「大きさは異なっても必ず同じ形になる性質」「図形の中の任意の 2 つの点を取ると一定の比率で距離が縮小される」といった定義的・形式的な説明が見られたが、「未回答」も複

数確認された。

これらの結果は、MR 学習がフラクタル構造の特徴を観察経験と結びつけて理解することを促した可能性を示唆している。

5.4.2 フィボナッチ数列の理解の特徴

フィボナッチ数列の Q4 回答では、MR 学習群において、数列の規則と自然界との関連を具体的に説明する回答が見られた。例えば、「フィボナッチ数列は回転を重ねると渦の連続となり、2 つの数の比が黄金比に近づく」「スマートフォンの縦横比が 1:1.618 に近い」といった、黄金比との関係を具体例とともに説明する記述が確認された。

一方、テキスト学習群では、「自然界によく存在している比であり、美しく見えるから」「比率 1:1.61 は黄金比における比率のため」といった説明が見られたが、具体的な観察対象との結びつきを示す記述は限定的であり、「未回答」も複数見られた。

これらの結果は、MR 学習が数列の規則性を自然物の観察と関連付けて理解することを促した可能性を示唆している。

5.4.3 図示回答の分析

図示問題では、学習内容に基づいてフラクタル構造やフィボナッチ数列の特徴を図で表現することを求めた。回答例から、学習者はこの学習で扱った内容に沿った図を作成していることが確認された。

フラクタル構造の図示では、自己相似的な形状の繰り返しや分岐構造が描かれており、フィボナッチ数列の図示では、螺旋構造や黄金比に基づく配置が表現されていた。しかし、これらの図示は学習内容を再現したものが中心であり、新たな構造的発見や独自の解釈が顕著に見られるわけではなかった。

この結果は、本システムが学習内容の理解と再現を支援していることを示す一方で、創造的な応用や新規表現の生成を促す段階には至っていない可能性を示唆している。

5.4.4 質的結果の総括

自由記述および図示回答の分析から、MR 学習群は、

- ・自己相似性や構造的な特徴への言及
- ・自然物との関連づけ
- ・具体例を伴う説明

といった特徴を示した。一方、テキスト学習群では、定義的説明や抽象的記述が中心であり、未回答も見られた。

また、図示回答は学習内容の理解を反映していたが、新たな発見や創造的応用は限定的であった。

以上より、MR を用いた体験型学習は、数学概念を観察経験と結びつけた理解を促進する可能性がある一方で、創造的応用を促すためには追加的な学習支援が必要であることが示唆された。

6. 考察

本章では、評価実験の結果に基づき、MR を用いた体験型学習および LLM による対話的説明が、学習者の内発的動機づけ、数学概念理解、および日常との関連付けにどのような影響を与えた可能性があるかについて考察する。

6.1 内発的動機づけの向上と経験学習の

役割 (RQ1)

本研究の結果は、MR を用いた体験型学習がテキストベース学習と比較して、学習者の内発的動機づけを向上させる可能性を示した。特に、IMI の結果において「興味・楽しさ」が有意に高く、「強制的に感じた」が有意に低かったことは、学習者が主体的かつ自発的に学習へ関与したことを示唆している。

この結果は、Kolb の経験学習モデルにおける「具体的経験」および「内省的観察」が学習への関与と動機づけを高めるとする知見 [10] - [14] と整合する。MR 環境では、学習者が自然物を観察し、仮想オブジェクトを操作しながら概念を理解する過程を通じて、受動的な知識受容ではなく、身体的関与を伴う学習経験が提供される。本研究において楽しさの向上と強制感の低減が確認されたことは、このような具体的経験が学習の意味づけを強化し、内発的動機づけを高めた可能性を示している。

さらに、本システムでは、事前に設計された説明に加えて、学習者が自由に質問できる対話機能を備えている。このハイブリッド型の対話設計により、学習者は受動的に説明を受け取るだけでなく、自身の疑問や関心に基づいて学習を進めることが可能となる。このような主体的な関与は、学習の自己決定感を高め、内発的動機づけの向上に寄与した可能性がある。

また、自然観察を起点とする学習設計は、学習内容を現実世界と関連付ける文脈を提供し、学習者が数学を日常生活と結びつけた知識として捉えることを可能にする。これは、数学学習における意味づけの不足が動機づけ低下の要因となり得るという指摘 [1] - [3] を補完するものである。

6.2 数学概念理解の促進と表象統合 (RQ2)

理解度テストにおいて MR 学習とテキスト学習の間に有意差は認められなかったが、記述課題および質的分析では、MR 学習群において自己相似性や自然界との関連に言及する回答が多く観察された。この結果は、MR 学習が単なる知識の記憶ではなく、構造的理解の形成を支援した可能性を示唆している。

この結果は、Duval が指摘する表象間の変換の困難性 [6] を、MR が外在化された形で支援した可能性と整合する。MR 環境では、実物、視覚表象、言語的説明が同一空間内で提示され、学習者はそれらを身体的操作を通じて関連づけることができる。このような表象統合環境は、表象間の対応関係を内部認知に依存させるのではなく、外部化された形で提示する点において、理解の負荷を軽減すると考えられる。

また、Arcavi が指摘する視覚表象と概念理解の乖離の問題 [7] に対しても、本研究の可視化機能が高い評価 ($M=4.19$) を得たことは、動的・空間的表象が概念理解を支援する可能性を示す結果である。特に、L-System の成長過程の観察やフィボナッチ数列の可視化は、数学的構造を時間的・空間的変化として理解する契機となる。

加えて、本システムにおける対話エージェントは、提示された説明に対する学習者の疑問に応答し、概念の補足説明や再構成を行う。このような自由質問を可能とする対話的支援は、学習者が表象間の対応関係を自ら確認し、再解釈する機会を提供し、概念理解の深化を支援した可能性がある。

6.3 空間的操作と数的理解の関係 (RQ2 との関連)

空間スキルと数学理解の関連を示した先行研究 [8] [9] を踏まえると、本研究において MR 学習群が図示課題において多様な構造表現を示したことは、空間的操作を伴う学習環境が概念理解を支援した可能性を示唆している。

MR 環境では、学習者は仮想オブジェクトを視点移動や身体動作を通じて観察・操作することができる。このような空間的関与は、数的構造を空間的関係として把握する契機となり、抽象概念の理解を支援すると考えられる。

さらに、本研究では学習意欲の向上も確認されており、空間的支援と動機づけ支援が同時に提供された可能性がある。先行研究 [8] [9] が指摘するよう

に、空間スキルと動機づけの相互作用が学習効果を高めるとすれば、本研究の MR 環境はその両者を統合的に支援する学習環境として機能した可能性がある。

さらに、MR 環境における対話的支援は、空間的操作を通じて得られた観察結果を言語化し、概念として再構成する過程を支援する。この過程は、空間的経験と数的理解を結びつける媒介として機能した可能性がある。

6.4 自然観察を起点とした学習設計の意義 (RQ3)

本研究の特徴は、自然観察を起点として数学概念を学習する設計にある。フラクタル構造やフィボナッチ数列は自然界に広く存在する概念であり [5]、それらを実際の物体観察と結びつけることは、数学を抽象的な記号操作ではなく、世界の構造を理解する手段として捉える視点を提供する。

学習方法の選好において、自然観察を伴う学習を選好した参加者が 85.7%であったことは、この学習設計が学習者に受け入れられやすいことを示している。これは、数学と実世界との関連性を実感できる学習環境が、学習者の関与を高める可能性を示唆する結果である。

また、自然観察を起点とした学習において、学習者が自由に疑問を表明できる対話環境は、観察経験を個人的な意味づけへと転換する契機となる。提示された説明だけではなく、学習者自身の疑問を起点とした対話が可能であることは、数学概念を自らの経験と結びつけて理解する過程を支援したと考えられる。

6.5 MR の役割：可視化から意味構成の支援へ

本研究の結果は、MR と LLM を統合した学習環境が、単なる可視化ツールや説明支援を超えて、学習者が意味を構成する過程を支援する可能性を示している。

MR は、抽象的概念を空間的・身体的に体験可能な形で提示することにより、観察と操作を通じた理解を支援する。一方、LLM を用いた対話機能は、提示された説明に対する自由な質問を可能とし、学習者の疑問や気づきに応じて説明を補完する。

この「構造化された説明」と「自由質問による対話」を統合したハイブリッド設計は、学習内容の正確性

と教育的整合性を維持しながら、学習者主導の探究的学習を支援する点に特徴がある。従来の静的教材では対応が困難であった個別の疑問への対応が可能となり、学習者は観察、内省、概念化、応用という経験学習サイクルを主体的に循環することができる。

特に、本研究の特徴は、MRによる身体的・空間的経験と、LLMによる対話的説明を統合し、学習者の観察、疑問、理解の再構成を循環的に支援する学習環境を設計した点にある。以上より、MRによる空間的経験と、LLMによる自由対話型支援の統合は、数学概念の理解を単なる知識獲得から意味構成のプロセスへと拡張する学習環境として機能する可能性が示された。

7. 限界

本研究は、自然観察を起点としたMR体験学習が数学概念理解および学習意欲に与える影響を検討したものであるが、いくつかの限界が存在する。

まず、本研究の参加者は同一大学に所属する学生21名に限定されており、年齢層や学習背景が均質である。そのため、本研究の結果を他の年齢層や教育段階に直接一般化することには慎重である必要がある。特に、本システムは初等・中等教育段階での活用を想定した設計要素を含んでいるため、対象年齢を拡張した検証が今後の課題である。

次に、本研究で扱った数学概念はフラクタル構造およびフィボナッチ数列に限定されている。これらは自然界との関連が比較的明確な概念であるため、自然観察を起点とする学習設計と親和性が高い。したがって、他の数学領域、例えば代数的概念や証明を中心とする内容において同様の効果が得られるかについては、今後の検討が必要である。

また、本研究では学習時間を各条件最大10分に統一しており、短時間の学習効果を評価する設計となっている。そのため、長期的な理解の定着や学習成果への持続的影響については明らかではない。今後は、授業単位での継続的な利用や、時間経過後の再テストによる保持効果の検証が求められる。

さらに、本研究では主に質問紙およびテスト結果に基づいて学習効果を評価しており、学習過程における認知的変化の詳細な分析までは行っていない。MR環境における視線行動、操作ログ、発話内容などのプロセスデータを統合的に分析することで、学習メカニズムをより精緻に理解できる可能性がある。

これらの限界を踏まえ、本研究はMRを用いた自然観察型数学学習の有効性を示す初期的知見として位置づけられる。

8. 結論

本研究では、自然観察を起点としたMixed Reality (MR) 体験学習が、数学概念理解および学習意欲に与える影響を明らかにすることを目的として、フラクタル構造およびフィボナッチ数列を題材とした学習システムを開発し、テキストベース学習との比較評価を行った。

その結果、MR学習はテキストベース学習と比較して、学習者の興味・楽しさを有意に高め、強制感を低減することが確認された。また、学習方法の選好においても、多くの参加者が日常のモノを起点とした学習を支持しており、本システムが学習者の主体的関与を促進する学習環境として機能する可能性が示された。

さらに、図示課題において多様な表現が確認されたことや、可視化機能に対する高い評価は、MR環境が数学的構造の理解を支援する表象統合の場として機能する可能性を示唆している。自然物の観察、仮想オブジェクトの操作、エージェントによる説明を組み合わせた学習体験は、抽象概念を具体的経験と結びつける契機となり、数学を現実世界の構造として捉える視点を提供する。

加えて、本研究では、事前に設計された説明と学習者の自由な質問を可能とする対話機能を統合したハイブリッド型の学習設計を採用した。この設計により、学習者は提示された内容を受動的に理解するだけでなく、自身の疑問や関心に基づいて概念の再解釈や補足説明を得ることができる。このような対話的支援は、観察経験を言語化し、概念として再構成する過程を支援し、学習者が経験学習サイクルを主体的に循環することを可能にする学習環境の実現に寄与した可能性がある。

本研究の新規性は、以下の点にある。

- 自然観察を起点とした数学学習設計の提案
- MR環境を、単なる可視化ツールではなく「意味構成を支援する媒介」として位置づけた点
- 構造化された説明と自由質問を統合した対話的学習支援の導入
- 数学概念理解と内発的動機づけを統合的に評価した点

これらの知見は、数学を抽象的で切り離された知識としてではなく、環境の中に存在する構造として理解する学習観への転換に寄与する可能性を示している。特に、空間的経験と対話的支援を統合した学習環境は、概念理解を単なる知識獲得から意味構成

のプロセスへと拡張する教育的枠組みとして位置づけられる。

今後は、対象年齢や数学領域の拡張、長期的学習効果の検証、学習プロセスの詳細分析に加え、対話ログの分析を通じた理解形成過程の解明を進めることで、自然観察とMR、さらに対話的学習支援を統合した学習環境の教育的可能性をさらに明らかにしていく必要がある。

謝辞

実験を快く引き受けてくださった被験者の皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 文部科学省・国立教育政策研究所: “OECD 生徒の学習到達度調査 PISA2022 のポイント”. p.4
- [2] 文部科学省”国際数学・理科教育動向調査 (TIMSS2019)のポイント”, p.1
- [3] 文部科学省・国立教育政策研究所: “OECD 生徒の学習到達度調査 PISA2022 のポイント”. p.7
- [4] Karakus, Fatih. "A Cross-age study of students' understanding of fractals." *Bolema: Boletim de Educação Matemática* 27 (2013): 829-846.
- [5] Frame, Michael, and Benoit Mandelbrot. *Fractals, graphics, and mathematics education*. No. 58. Cambridge University Press, 2002.
- [6] Duval, Raymond. "A cognitive analysis of problems of comprehension in a learning of mathematics." *Educational studies in mathematics* 61.1 (2006): 103-131.
- [7] Arcavi, Abraham. "The role of visual representations in the learning of mathematics." *Educational studies in mathematics* 52.3 (2003): 215-241.
- [8] Atit, Kinnari, et al. "Examining the role of spatial skills and mathematics motivation on middle school mathematics achievement." *International journal of STEM education* 7.1 (2020): 38.
- [9] Lowrie, Tom, and Tracy Logan. "Spatial visualization supports students' math: mechanisms for spatial transfer." *Journal of Intelligence* 11.6 (2023): 127.
- [10] Comer, Lucette B., and J. A. F. Nicholls. "Simulation as an aid to learning: how does participation influence the process?." *Developments in Business Simulation and Experiential Learning: Proceedings of the Annual ABSEL conference*. Vol. 23. 1996.
- [11] Herz, Bernhard, and Wolfgang Merz. "Experiential learning and the effectiveness of economic simulation games." *Simulation & gaming* 29.2 (1998): 238-250.
- [12] Callewaert, John H. "Measuring the impact of experiential learning." 2019 ASEE Annual Conference & Exposition. 2019.
- [13] Meyer, Eric G., et al. "Experiential learning cycles as an effective means for teaching psychiatric clinical skills via repeated simulation in the psychiatry clerkship." *Academic Psychiatry* 45.2 (2021): 150-158.
- [14] Hung, Ling-Ya, Shun-Mei Wang, and Ting-Kuang Yeh. "Kolb's experiential learning theory and marine debris education: Effects of different stages on learning." *Marine Pollution Bulletin* 191 (2023): 114933.
- [15] Radu, Iulian. "Augmented reality in education: a meta-review and cross-media analysis." *Personal and ubiquitous computing* 18.6 (2014): 1533-1543.
- [16] Howard, Matt C., and Maggie M. Davis. "A Meta-analysis of augmented reality programs for education and training." *Virtual Reality* 27.4 (2023): 2871-2894.
- [17] Freeman, Scott, et al. "Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics." *Proceedings of the national academy of sciences* 111.23 (2014): 8410-8415.
- [18] Erbas, Cagdas, and Veysel Demirer. "The effects of augmented reality on students' academic achievement and motivation in a biology course." *Journal of Computer Assisted Learning* 35.3 (2019): 450-458.
- [19] Bedford, Tim. "Michael F. Barnsley, *Fractals everywhere*." (1991): 151-156.
- [20] 石村貞夫, 石村園子 (1990). *フラクタル数学*, 東京書籍
- [21] 芹沢浩 (1995). *複素数とフラクタル*, 東京図書
- [22] 新藤茂 (2024). *北斎と数学*, 東京美術
- [23] R.A. ダンラップ (2003). *黄金比とフィボナッチ数*, 日本評論社
- [24] McAuley, Edward, Terry Duncan, and Vance V. Tammen. "Psychometric properties of the Intrinsic Motivation Inventory in a competitive sport setting: A confirmatory factor analysis." *Research quarterly for exercise and sport* 60.1 (1989): 48-58.
- [25] Brooke, John. "SUS-A quick and dirty usability scale." *Usability evaluation in industry* 189.194 (1996): 4-7.
- [26] 古市駿, 角薫. 仮想空間を利用したジェネラティブアートによる体験型学習システム. 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI). 2024, 22号, p.1-9
- [27] E. Kasneci, K. Sessler, S. Küchemann, M. Bannert, D. Dementieva, F. Fischer, and G. Kasneci, "ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language

models for education,” *Learning and Individual Differences*, vol. 103, 102274, 2023.

- [28] A. C. Graesser, P. Chipman, B. C. Haynes, and A. Olney, “AutoTutor: An intelligent tutoring system with mixed-initiative dialogue,” *IEEE Transactions on*

Education, vol. 48, no. 4, pp. 612–618, Nov. 2005.

- [29] OpenAI, “GPT-4 Technical Report,” arXiv:2303.08774, 2023.