Vol.2015-CE-129 No.3
2015/3/21

学習エージェントとの対話体験による数学学習支援ゲーム

敷根伸光[†1]　山中敏正[†2]　星野准一[†3]

数学は理系大学生にとって重要であるが，苦手意識を持つ学生は多い．高校までの数学的概念の繋がりをよく理解できていない学生は大学数学で躓いてしまう傾向にある．数学に苦手意識を持つ学生は数学学習に消極的であるという問題がある．数学に苦手意識を持っている大学生が数学的概念の繋がりを覚え成績を向上させることを目的として，学習エージェントとの対話体験によって数学学習を支援するゲームシステム Pedicom (Pedagogical Interactive Communicator)を提案し，コンテンツ事例としてコンピュータ上に CG で表示される学習エージェントと主人公の対話を基調にして進行するノベル形式のゲームを作成した．システムの評価実験において Pedicom を利用したことによる学習効果や情意面にもたらす効果について調査し，本システムの有用性を検証した．

Game System as the Pedagogical Interactive Communicator in Learning Mathematics

NOBUMITSU SHIKINE[†1]　TOSHIMASA YAMANAKA[†2]
JUNICHI HOSHINO[†3]

The purpose of this study was to investigate the impact of the game system as the pedagogical interactive communicator in learning mathematics. Although mathematics plays an important role in everyday life, there are many undergraduate students who are not good at mathematics. The study examined the learning effect and the affective impact of the game system. Participants were three undergraduate students who are not good at mathematics to assess the game system in a simulation of conversation with CG pedagogical agent in a computer-based environment. The results suggested that the game system could play an effective role in learning mathematics and had positive impact on student mathematics' anxiety.

1. まえがき

文部科学省[1]は数学や数学的思考は諸現象の背後に潜む本質を捉え，具体的実体を一般化・普遍化するのに活用することができると述べている．Petocz らの調査[2]によれば，多くの理系大学生は数学が生活における思考のためのひとつの観点となることを認識している．理工系の大学の数学や物理学の授業では，高校までの数学や物理の知識の活用を前提とすることが多い[3]．しかし入学時の学力や知識のばらつき，講義や数学の学習に対する認識の差などが指摘されている[4]．大学数学では線形代数の線形空間や解析学の ε-δ 論法のような，抽象度の高い数学的対象を認識し，論理を順序立てて読み解くことではじめて理解ができるような概念が登場する．高校から大学受験までは問題と解法を一対一で覚えるような，解法の暗記によって問題を解くことができた学生でも，大学数学ではそういうわけにはいかないため，大学で初めて数学学習に躓くことがある[4][5]．高校までは数学的概念の繋がりはあまり重視されてこなかったため，解法の暗記という方略のみで大学受験をむかえる学生も多いことは想像に難くない．このような学生は，数学的概念を抽象的な対象として捉えることができておらず，高校と数式などの表記が違うだけでも混乱してしまうと言われている[4][6]．

また，数学に苦手意識や不安感をもつ学生は多いと言われている[7]．そういった学生は実際に数学の問題に取り組むときよりも，数学について考えるときに不安や危機を感じると言われている[8]．

一方で，大学の数学のカリキュラムは一対多数の講義形式を主に構成されている．先述のような表面的な理解しかしていない，あるいは数学に苦手意識を持っている学生はいずれ授業についていけなくなってしまうという問題がある．この問題を解消するためには数学的概念の繋がりを意識した学習と，数学に不安感を持つ学生が数学への拒否反応を無くせるように，学生の興味を引き，励ましながら指導を行うことが重要だと考えられる．しかし，教員が個別に指導できる学生の数や，授業準備の手間，時間の制約などを考慮するとそれを理想的な形で行うのは現実的に困難である．

そこで，本稿では数学に苦手意識を持っている大学生が数学的概念の繋がりを覚え，成績を向上させることを目的として，学習エージェントとの対話体験によって数学学習を支援するゲームシステム Pedicom（Pedagogical Interactive Communicator）を提案する．ゲームを提案する理由は，学習に苦手意識や不安感を持つ生徒に対してエ

†1 筑波大学理工学群工学システム学類
College of Engineering Systems, School of Science and Engineering, University of Tsukuba
†2 筑波大学芸術系
Faculty of Art and Design, University of Tsukuba
†3 筑波大学システム情報系
Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba

ⓒ2015 Information Processing Society of Japan

ンタテインメント性のあるアニメーションやゲームシステムを用いた指導を行うことで，情意面（数学に対する態度[a]）において望ましい効果が見られたことと[9]，提案するシステムが学習者の入力にあわせて挙動を変える対話性とゲーム性を備えていることにある．

本稿では提案システムのコンテンツ事例として，コンピュータ上に CG で表示される学習エージェントと主人公の対話を基調にして進行するノベル形式のゲームを作成した．評価実験において，Pedicom を利用したことによる学習効果や情意面にもたらす効果について調査し，本システムの有用性を検証した．

2. 従来研究

2.1. 数学の理解度の調査に関する研究

Forrester ら[10]は，子供の数学的な理解方略を調査するためには会話分析が有効であると述べ，授業中の会話分析から子供の理解方略を認識する手法を提案した．

数学の理解度を測るためのテストとしては，経済協力開発機構による学習到達度調査（PISA）や国際教育到達度評価学会による国際数学・理科教育動向調査（TIMSS）が実施されている[12]．特に，PISA は実生活と結びつくような数学的能力について測っており，日本の学生に関しては情意面で好ましくない傾向にあることが指摘されている[14]．また，国内では 2013 年に日本数学会による大学生数学基本調査が実施された[5]．この調査では，代数・幾何・解析における問題を大学生に対して出題することにより，数学的概念の論理的な理解が不適切である大学生が一定数いることを明らかにしている．

2.2. 個人にあわせた数学教育に関する研究

学習者の持つ多様性を考慮するために，梶田ら[15]は個人レベルの学習・指導論（Personal Learning and Teaching Theory）を提案している．梶田らは学習者と教師に対してアンケート調査を行い，その因子分析結果から学習者の学習方略を「実行性」「計画性」「指向性」「自主性」「動作性」に分類した．また小島[17]はある生徒の指導の中で，梶田らの学習・指導論における指導方略を意図的に変化させ，そのマッチングによって学習意欲が高まる傾向があることを明らかにしている．

数学に対する学習意欲を改善させる取り組みとしては，学習者が自身の学習状況を把握するための研究[18]や，学習者の情意面を改善するための研究[19]が行われている．

しかし，いずれの研究においても一人の指導者が個々の学習者に合わせて指導することは必要であり，指導者が個々を理解した上で見合った指導を行うことは難しいと考えられる．特に，数学に不安感を持っている学習者には，興味・関心を抱かせ，数学に対して好感の持てるような指導を行うことが重要であるとされているが[20]，一対多数の授業で個々の興味・関心を考慮するとは困難である．

2.3. 数学学習支援システムに関する事例

個々の学習状況に応じた教育システムとして，近年では e-Learning システムが注目されている[3]．主流の e-Learning システムは，データベースに格納されている膨大な教材データから学習者が必要とするデータを自由に閲覧することができるシステムとなっている．指導者は学習者の進捗状況（学習時間，学習範囲，学習内容）をリアルタイムに把握することができ，個々の学習者に合った授業を効果的に行うことが可能である[21]．

しかしコンテンツそのものの魅力や，学習者が問題を解いたときの反応が希薄であるなど，人対人の指導と比べるとまだ情意面を考慮しきれていない部分が見られる．

2.4. CG アニメーションを用いた教育エージェントに関する研究

学習者の学習意欲を情意面から支援するために，教育エージェント（Pedagogical Agent）を利用した研究がされている（[22][23][24]など）．例えば，Lester ら[9]はインタラクティブ性を取り入れた教育エージェントを利用し，中学生の学習を励まして学習意欲を継続させた．Shen[26]は授業での問題の解消を補助する教育エージェントを利用し，高校生の学習意欲と数学不安の解消をさせた．

しかし，これらの研究は小学生，中学生，高校生を対象としたものであり，大学生を対象とした場合の効果は検証されていない．

3. システム概要

本稿で提案する Pedicom（Pedagogical Interactive Communicator）は個々の情意面を考慮した数学教育が抱える問題として指摘した

① 個別の情意面を考慮した指導を行う環境がない
② 従来の e-Learning システムでは情意面からの支援が十分に行われていない
③ 大学生向けの学習エージェントがない

という点を解決するためのシステムである．

提案システムは学習エージェントとの対話体験によって個々の学習者の苦手意識や不安感を取り除きながら，興味を引き，学習意欲を維持する．本稿において学習エージェントとはコンピュータ上でキャラクターが利用者に話しかけるようにメッセージを表示し学習を支援するシステムと定義する．教師と対話するのと同様に教師キャラクターと一対一で会話しながら学習する感覚を与えることによって，

a) 数学に対する感情的傾向のこと．楽しさや自己効力感などが望ましい傾向とされ，不安や恐怖などが望ましくない傾向とされる．

数学が苦手な学習者を情意面から支援する．

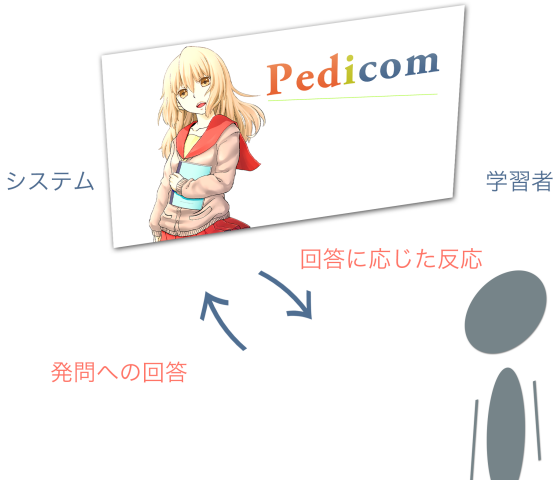

図 1　システム概要図
Figure 1　System Image

3.1.　コンテンツ制作事例

本稿では提案システムのコンテンツ制作事例として，コンピュータ上に CG で表示される教師キャラクターと主人公の対話を基調にして進行するノベル形式のゲームシステムを作成した．

今回は扱う学習分野として線形代数学を採用した．その中でも特に，固有空間の概念を習得することを目標にする内容にした．理由は，線形代数学の中でもこの概念を理解するためにはそれ以前の多くの概念を正確に把握している必要があり，本稿の目的である「数学的概念の繋がりを覚え，成績を向上させること」を評価するのに適した学習分野であると考えられるからである．

コンテンツは導入シーン(図 2)で学習者の興味・関心を引き，発問シーン(図 3)と説明シーン(図 4)を交互に繰り返して進行する．まとめシーン(図 5)で学習を区切り，継続的な利用を促すメッセージを表示して終了する．

図 2　Pedicom の導入シーン
Figure 2　Introducing Scene

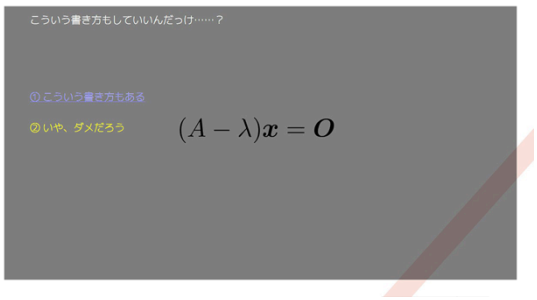

図 3　Pedicom の発問シーン
Figure 3　Questioning Scene

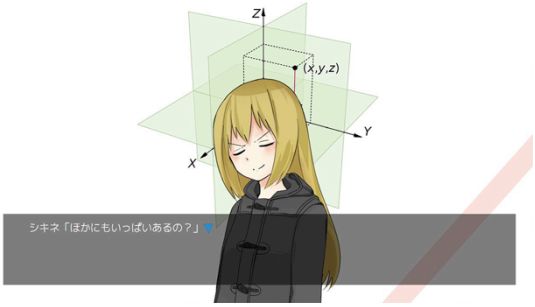

図 4　Pedicom の説明シーン
Figure 4　Lecturing Scene

図 5　Pedicom のまとめシーン
Figure 5　Concluding Scene

3.2.　ゲームの内容

今回，ゲームシステムの制作には無償で公開されているノベルゲームフレームワークである AIRNovel[27]を利用した．文章と画像，音楽からなるマルチメディア教材を提供する．Pedicom は次の 4 つのシーンから構成される．

① 導入シーン(図 2)
このシーンでは学習者をゲームのシナリオへと導入する．今回のシナリオは線形代数の単位を落としてしまい落胆した主人公が，数学に長けた友人に教えを請いながら追試に向けた学習を行うというストーリーになっている．このシーンは対象としている数学が苦手な学習者の緊張を解消させることを目的としている．

ⓒ2015 Information Processing Society of Japan

② 発問シーン

対話の中でその単元の重要なポイントとなる箇所について教師キャラクターが発問を行う(図 3). また，学習内容を定着させるための具体的な例題も出題される(図 6). 回答は選択式で学習者は最も自分の考えに近いものを選択する．その回答によって教師キャラクターの反応も変わるようになっている(図 7). システムは発問シーンと説明シーンを繰り返しながらシナリオを展開させていく．発問される例題は標準的な教科書を参考に，表 1 のように選定した．ただし，発問は対話の中で行われるため，問題の言い回しや回答のさせ方はコンテンツに合わせて若干の変更を加える．

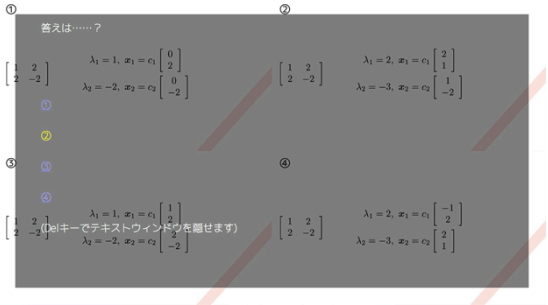

図 6 例題演習

Figure 6 Exercise Practice

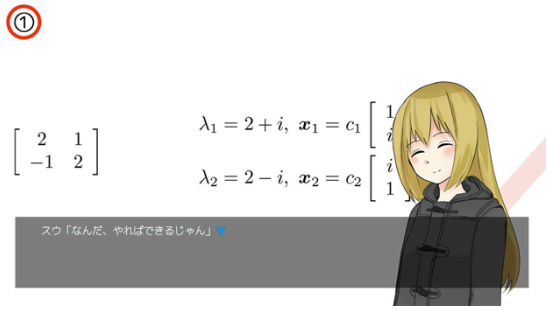

図 7 問題に正解したときの反応

Figure 7 Reaction When the Correct Answer Given

表 1 コンテンツ内の例題

Table 1 Exercise in the Contents

(a)	固有空間の定義を述べよ.
(b)	固有値，固有ベクトルの定義を述べよ.
(c)	$\boldsymbol{Ax} = \lambda\boldsymbol{x}$ が成り立つときの$\lambda, \boldsymbol{x}$を求めるための連立一次方程式を導け.
(d)	$\boldsymbol{Ax} = \lambda\boldsymbol{x}$を式変形して$(A-\lambda)\boldsymbol{x} = \boldsymbol{0}$ という形にした．これは正しいか，正しくないか.
(e)	同次連立一次方程式$\boldsymbol{Ax} = \boldsymbol{0}$が自明でない解を持つための条件を述べよ.
(f)	$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & -2 \end{bmatrix}$ のとき，Aの固有値・固有ベクトルを求めよ.
(g)	$A = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ \sin\theta & -\cos\theta \end{bmatrix}$ のとき，Aの固有値・固有ベクトルを求めよ.
(h)	$A = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix}$ のとき，Aの固有値・固有ベクトルを求めよ.
(i)	固有空間W_λの定義は「n次の正方行列Aの 1 つの固有値λに対する固有ベクトル全体に，零ベクトル$\boldsymbol{0}$をつけ加えた集合」である．W_λを表す集合としてもっともふさわしいものを選べ.
(j)	$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \end{bmatrix}$ のときAの固有空間を図示せよ.
(k)	線形空間の定義に含まれないものを選べ.

③ 説明シーン(図 4)

教師キャラクターとの対話形式で，多くの大学生が弱点としている[5]「論理的な文章の理解 」と「論理的な説明」を意識した説明をする．本稿ではコンセプトマップ(図 8)を利用した学習法[28]を参考にし，概念同士の繋がりを「概念マップ」として図に描かせながら指導した．また，対話の中で主人公が自発的に質問をする場面もあり，暗黙的な不理解箇所へのメタ認知も支援する．

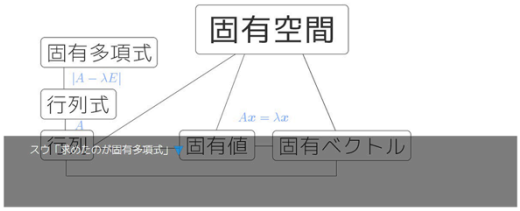

図 8 概念マップを描いて概念の繋がりを覚える

Figure 8 Memorizing the *Concept-map* by Drawing

④ まとめシーン(図 5)

まとめとシナリオの締めくくりにあたるシーンである．今回の学習内容を教師キャラクターが簡潔にまとめる．数学学習の不安を取り除き，次回も勉強がしたくなるようなメッセージを投げかけることによって継続的な学習を支援する．

⑤ 練習モード

また，シナリオとは独立して例題演習ができるようにした．具体的な問題を解く練習をすることで学習分野が定着するようにする．

4. 評価実験

本稿では Pedicom について以下の 2 つの項目に関する評価実験を行った．

4.1. 学習効果の評価

提案システムの利用前と後に学力テストを行い，結果を

比較することによって学習効果を評価する．今回の実験で用意した学力テストの問題は図 9 のようになる．

問題 1 次の行列の固有値、固有ベクトルを求めよ。
また、その固有値に対応する固有空間の要素となる
ベクトルを一つずつ示せ。

① $\begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \end{bmatrix}$

② $\begin{bmatrix} 1 & 4 \\ 2 & 3 \end{bmatrix}$

③ $\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$

問題 2 次の行列の固有値、固有ベクトルを求めよ。
また、その固有値に対応する固有空間の要素となる
ベクトルを一つずつ示せ。

④ $\begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & -2 \end{bmatrix}$

⑤ $\begin{bmatrix} 5 & 3 \\ 1 & 3 \end{bmatrix}$

⑥ $\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$

図 9　今回用意した学力テスト
Figure 9　The Exam for This Study

この問題の出題意図は

- 行列の固有値・固有ベクトルを求める計算を正確に行えるか
- 同次連立一次方程式の自明でない解を正しく求めることができるか
- 固有空間がどういった数学的概念なのかを理解しているのか

ということを確かめることである．システム利用前に問題 1 を，利用後に問題 2 を解かせた．各小設問の採点基準は次の通りである．

- 完答 10 点
- 固有値・固有ベクトルを導出していれば 8 点
- 固有ベクトルを一つでも導出していれば 5 点
- 固有ベクトルを導出するための式が正しく書けていたら 3 点
- 固有値を全て導出できれば場合は 2 点
- 固有値を一つでも導出していれば 1 点

また，本稿で採用した概念マップを描いて覚える学習法が学習者の学力向上に有用であったかを示すために，システム利用前と後に被験者に，コンテンツ内で表示したものと同様な固有空間に関する概念マップを描かせた．模範となるマップ(図 10)との類似度を

- ノード同士を正しく繋げられているか（α）
- 学習項目に適したノードが存在しているか（β）

という点に着目して採点する．ノード同士を繋ぐ正しいリンクには 1 点，固有空間を具体的に説明するのに不必要なノード（「線形代数」）などを繋ぐリンクや，本来なら直接繋がらないノード同士を繋ぐリンクは 0 点として加点しなかった．学習項目に適したノードの数は模範となるマップ(図 10)にあるノードが被験者の描いたマップに何個あるかを調べた．リンクの採点と同様に，不必要なノードは採点対象としなかった．システム利用前に描いたマップと利用後に描いたマップを比較し学習効果との関係を調査する．

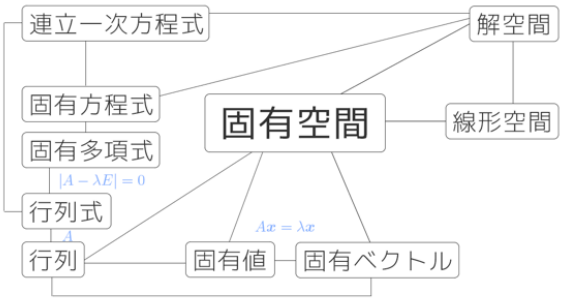

図 10　固有空間に関する概念マップ
Figure 10　The *Concept-map* about the Eigenspace

4.2.　学習者の情意面にもたらす効果の評価

提案システムを利用した数学学習において，キャラクターや対話形式のシナリオ等が被験者に情意面でどのような効果をもたらすのかを調査する．キャラクターは魅力的だったか，システムを利用した学習は楽しかったかなどの質問項目が記載されたアンケートを実施し，評価する

5.　結果

２つの項目を調査するための評価実験を行った．被験者として，数学に苦手意識があり，一度でも線形代数学を履修したことのある理系の大学生 3 人に協力を得た．

5.1.　学習効果

概念マップの描画方法について説明し 10 分間程度の時間をとって，被験者に固有空間に関する概念マップを描かせた．その後すぐ，また 10 分程度の制限時間を設けて学力テストの問題 1 を解かせた．次に，被験者が持参したノート PC に各自イヤホンを装着してもらい Pedicom を利用した数学学習を行ってもらった．ノートやメモは自由に取ることができるようにした．また，再テストを行う前に，各自で自身がつくまで練習モードの利用をさせた．そして，再び概念マップの描画と，学力テストの問題 2 の解答に取り組ませた．システム利用前後での学力テストの結果は図 11 のようになった．

ⓒ2015 Information Processing Society of Japan

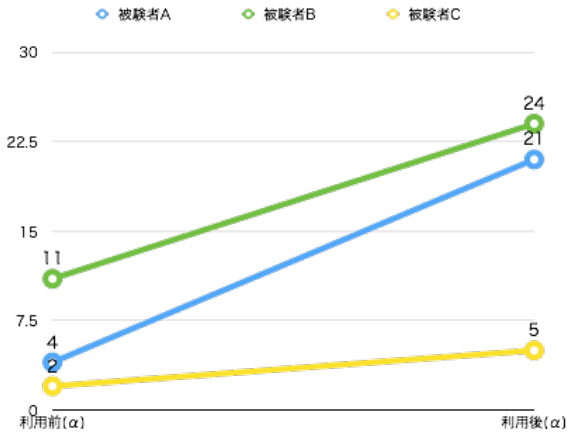

図 11　学力テストの結果

Figure 11　Result of the Exam

被験者全員がシステム利用前よりも得点を上げた．被験者 A，被験者 B は点数を倍以上に伸ばした．被験者 C も点数は倍以上に伸びていたものの得点は被験者 A，被験者 B に比べると低かった．今回，完答した被験者はいなかった．

次に概念マップの採点を以下の 2 点に着目して行い，その結果を図 12，図 13 に表した．

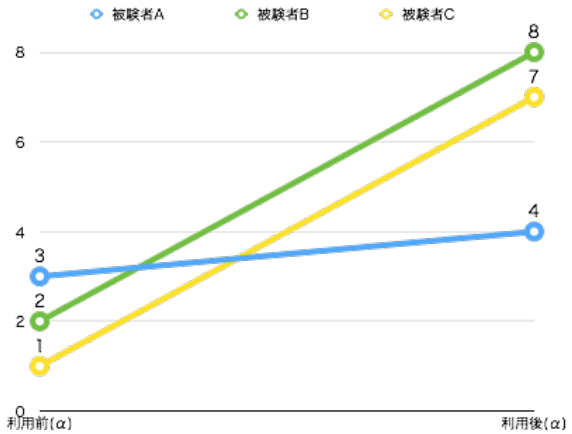

図 12　ノード同士を正しく繋げられているか（α）

Figure 12　Result of the Drawing *Concept-map* (α)

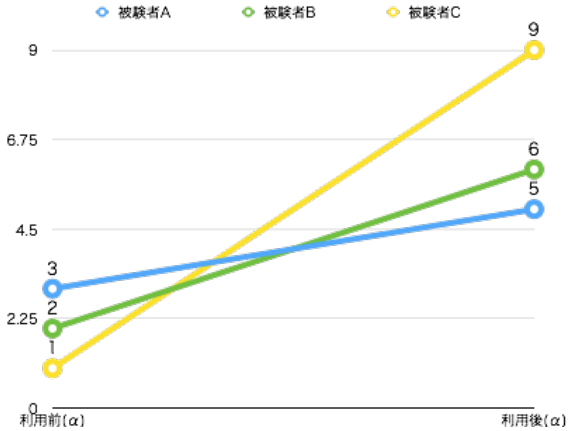

図 13：学習項目に適したノードが存在しているか（β）

Figure 13　Result of the Drawing *Concept-map* (β)

被験者全員がシステム利用前に比べて，利用後の描画で(α)(β)の両方で得点を上げていた．

5.2.　学習者の情意面にもたらす効果

Pedicom が学習者の情意面にどのような効果をもたらすのかということを調べるために，学力テストの終了後にアンケートによる印象調査を行った．

各質問は表 2 に示したとおり，評価したい項目に分けられている．各項目について，回答の平均値を図 14～図 16 に示す．アンケートの結果の各回答において，分散が 1 未満であった．

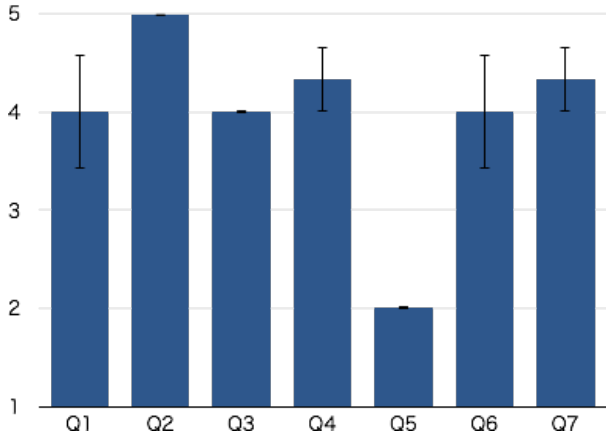

図 14　被験者のプロフィール

Figure 14　Participants' Profile

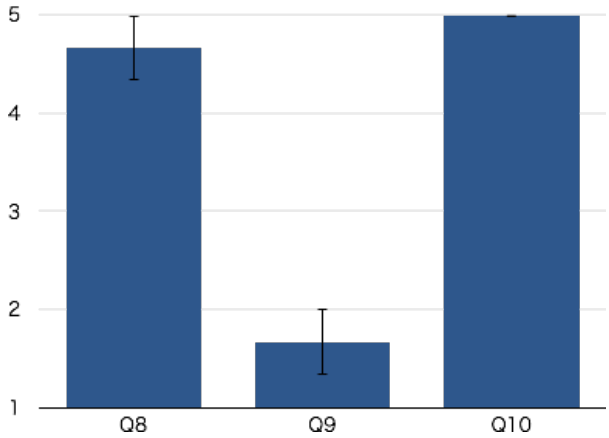

図 15　コンテンツの魅力

Figure 15　Entertainment Value of the Contents

ⓒ2015 Information Processing Society of Japan

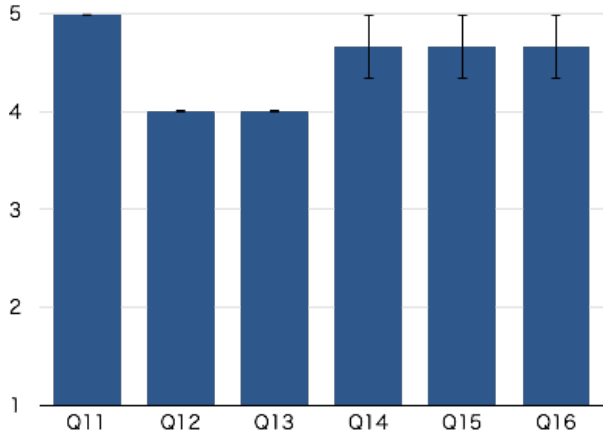

図 16　情意面にもたらす効果
Figure 16　Affective Impact of the Contents

表 2　アンケート質問項目
Table 2　Assessment Form

被験者のプロフィール	Q1	あなたは数学にどのくらい苦手意識を持っていますか？
	Q2	数学の授業が難しくてついていけないと思ったことはありますか？
	Q3	あなたはアニメをどのくらいの頻度で見ますか？
	Q4	あなたは漫画をどのくらいの頻度で読みますか？
	Q5	あなたは小説やライトノベルなどの本をどのくらいの頻度で読みますか？
	Q6	あなたはゲームをどのくらいの頻度でやりますか？
	Q7	あなたはノベル形式のゲームをやったことがありますか？
コンテンツ	Q8	このゲームは楽しかったですか？
	Q9	このゲームで飽きがきたと感じたことはありましたか？
	Q10	スウは魅力的でしたか？（教師キャラクター）
情意面にもたらす効果	Q11	スウによって励まされましたか？
	Q12	スウと主人公の会話は疑問点を理解するのに役立ちましたか？
	Q13	スウと主人公の会話によって数学的概念の繋がりを理解できるようになりましたか？
	Q14	回答の選択により展開したシナリオは学習に役立ちましたか？
	Q15	スウと一緒に学習することは楽しかったですか？　つまらなかったですか？
	Q16	今後もこの教材で勉強したいと思いますか？

6.　考察

6.1.　学習効果の考察

今回の実験結果から本稿で提案したシステムが学力向上のために有効であったことが示された．また，数学的概念の繋がりを学習するために，概念マップを描いて覚える学習が学力向上のために有効であったことも，概念マップの点数と学力テストの点数が同時に上がっていることから示唆された．よって，数学的概念の繋がりを覚え，成績を向上させるという目的を達成するのに本稿で提案したシステムが有効であったことがわかった．

しかし，被験者 C に着目すると概念マップの点数は大きく増加しているが，学力テストの結果は他の被験者に比べて悪く，得点増加の度合いも比較的低かった．この原因として，被験者 C の回答を確認すると式変形の途中で符号を間違える等のケアレスミスが多かったことがわかった．今後はこういった無意識的な誤答に対しても注意喚起できるような工夫を取り入れることや，練習モードをより充実させること等によって理解度の低い学生が問題を解けるようになるまでの支援を行う必要があると考えられた．

また，完答していた被験者がいなかったことについて，問題の出題意図の一つであった「固有空間がどういった数学的概念なのかを理解しているのか」ということを今回の被験者は達成できなかったという結果になった．今回の実験では固有値・固有ベクトルを導出するような例題はいくつか出していたが，固有空間という抽象度の高い数学的概念を具体的に考えなければいけない問題は演習用の例題としては扱わなかった．提案システムは数学を苦手とする学生を対象にしているので，抽象的な概念を具体的な例題から段階的に理解させていくような配慮もすべきことがわかった．

6.2.　学習者の情意面にもたらす効果の考察

今回のアンケート結果結果からは次のようなことがわかった．

① 被験者のプロフィールについて
今回の被験者は数学の学力テストの結果は異なっていたが，プロフィールが似ていた．どの被験者もノベル形式のゲームをやったことがあったが，ライトノベルや小説はあまり読んでいなかった．

② コンテンツの魅力について
全ての被験者が教師キャラクターのことを魅力的に感じていた．そして飽きを感じることなく楽しむことができていた．

③ 情意面にもたらす効果について
全ての被験者が教師キャラクターに励まされたという回答をしていた．また提案システムを利用した学習について好印象の回答をしていた．

②から今回の被験者は全員がコンテンツや教師キャラクターを魅力的に感じていたという前提に立てる．③と 6.1 節の考察結果から本稿の提案システムは学生の興味を引き，励ましながらの情意面を考慮した指導を行うことができ，それによって学力向上の結果を導いたことがわかった．また，提案システムはテキストを読み進めるノベル形式のゲ

ームであったが，小説やライトノベルをあまり読まないような被験者にも受け入れられ，学力向上に有用であることが示唆された.

7. まとめと今後の展望

本稿では，数学に苦手意識を持っている大学生が数学的概念の繋がりを覚え,成績を向上させることを目的として，学習エージェントとの対話体験によって数学学習を支援するゲームシステム Pedicom（Pedagogical Interactive Communicator）を提案し，そのコンテンツ事例としてコンピュータ上に CG で表示される学習エージェントと主人公の対話を基調にして進行するノベル形式のゲームを作成した．そして，本システムの利用によって成績向上の傾向が見られることと，本システムが学生の興味を引き，励ましながら学習支援を行えるということが示唆された.

今後は，より多数の被験者を対象にした統計的評価実験により,提案システムの有用性を更に見極めていくことや,他の教材による学習との比較実験が必要である．また理解度がばらばらである学生の理解の特性をシステムが認識し,学習者個別の支援を行うための研究も進めていきたい.

参考文献

1) 文部科学省：数学・数理科学と諸科学・産業との連携による数学イノベーションの推進，http://www.mext.go.jp/a_menu/math/（2015/2/8 参照）
2) Peter Petocz, Anna Reid, Leigh N. Wood, Geoff H. Smith, Glyn Mather, Ansie Harding, Johann Engelbrecht, Ken Houston, Joel Hillel, Gillian Perrett: Undergraduate Students' Conceptions of Mathematics: An International Study, International Journal of Science and Mathematics Education, Vol.5, No.3, pp.439-459 (2007)
3) 小松川 浩：理工系の知識共有に向けた e-Learning の実証研究 (特集:高等教育における生涯教育への e-Learning の実践--新たなる e-Learning の実践), メディア教育研究 Vol.1, No.2, pp.11-22（2005）
4) 黒木哲徳, 大学の数学の授業で起きていること ―日本数学会のある調査より―，高等教育ジャーナル―高等教育と生涯学習―（2000）
5) 一般社団法人 日本数学会 教育委員会：第一回 大学生数学基本調査報告書（2013）
6) Crawford, K.; Gordon, S.; Nicholas, J.; Prosser, M: Conceptions of mathematics and how it is learned: The perspectives of students entering university, Learning and Instruction, Vol.4, No4, pp.331-345 (1994)
7) Betz, Nancy E: Prevalence, Distribution, and Correlates of Math Anxiety in College Students, Journal of Counseling Psychology, Vol.25, No.5, pp.441-448 (1978)
8) Ian M. Lyons, Sian L. Beilock: When Math Hurts: Math Anxiety Predicts Pain Network Activation in Anticipation of Doing Math, PLOS ONE. 2012; 7(10):e48076. Epub 2012 Oct 31.PMID: 23118929.
9) James C. Lester, Sharolyn A. Converse, Susan E. Kahler, S. Todd Barlow, Brian A. Stone, Ravinder S. Bhogal: The Persona Effect: Affective Impact of Animated Pedagogical Agents, Conference: Computer Human Interaction - CHI , pp. 359-366 (1997)
10) Michael A. Forrester and Christopher D. Pike: Learning to Estimate in the Mathematics Classroom: A Conversation-Analytic Approach, Journal for Research in Mathematics Education Vol.29, No.3, pp.334-356 (1998)
11) Ed Dubinsky, Michael A. Mcdonald: APOS: A Constructivist Theory of Learningin Undergraduate Mathematics Education Research, The Teaching and Learning of Mathematics at University Level New ICMI Study Series, Vol.7, pp.275-282 (2002)
12) 文部科学省：全国的な学力調査（全国学力・学習状況調査等），http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/gakuryoku-chousa/sonota/1344324.htm（2015/1/27 参照）
13) 田中裕人：PISA 調査からみた算数・数学の教科書の調査研究 ―PISA 型の数学的リテラシー向上を目指す授業改善のために―，福井大学教育実践研究，Vol.207, No.32, pp.7-15 207（2007）
14) 国立教育政策研究所：OECD 生徒の学習到達度調査 Programme for International Student Assessment ~2012 年調査国際結果の要約~（2013）
15) 梶田正巳，石田勢津子：展望学習と指導のパーソナルセオリー，教育心理学年報，Vol.28, pp.176-187 （1989）
16) 石田勢津子，伊藤篤，梶田正巳：小・中学校教師の指導行動の分析: 算数・ 数学における教師の「個人レベルの指導論」，教育心理学研究，Vol.34, pp.34-42（1986）
17) 小島基嗣：中学校数学における意欲を高める支援についての研究，上越数学教育研究，Vol.27, pp.37-46（2012）
18) 重松敬一：数学教育におけるメタ認知の発達的研究，奈良教育大学紀要，Vol.39, No.1（1990）
19) 花房哲也：情意面を考慮した高等学校数学における学習指導，神戸大学発達科学部研究紀要，Vol.9, No.1, pp.41-64（2001）
20) 藤井義久：数学不安尺度（MARS）に関する研究，教育心理学研究，Vol.42, No.4, pp.448-454（1994）
21) 柏原昭博：電子情報通信学会「知識ベース 知識の森」 S3 群(脳・知能・人間)- 11 編(教育支援システム) 4 章 教育・学習支援システム（2011）
22) Amy L. Baylor: Expanding preservice teachers' metacognitive awareness of instructional planning through pedagogical agents, Educational Technology Research and Development (Impact Factor: 1.09), Vol.50, No.2, pp.5-22 (2002)
23) Maria Meletiou-Mavrotheris: Game Enhanced Mathematics Learning For Pre Service Primary School Teachers, ICICTE 2012 Proceedings, p455 (2012)
24) K. Ryokai, C. Vaucelle & J. Cassell: Virtual peers as partners in storytelling and literacy learning, Journal of Computer Assisted Learning, Vol.19, pp.195-208 (2003)
25) Judy Robertson: Children's Interactions with Animated Agents in an Intelligent Tutoring System, I. J. Artificial Intelligence in Education, Vol.14, pp.335-357 (2004)
26) E Shen: The Effects of Agent Emotional Support and Cognitive Motivational Messages on Math Anxiety, Learning, and Motivation, Florida State University Tallahassee, FL, USA (2009)
27) 電子演劇部：AIRNovel, http://famibee.web.fc2.com/intro/home.htm（2015/2/9 参照）
28) John.R. McClure, Brian. Sonak, Hoi.K. Suen: Concept map assessment of classroom learning: Reliability, validity, and logistical practicality, Journal of Research in Science Teaching, Vol.36, No.4, pp.475-492 (1999)

ⓒ2015 Information Processing Society of Japan