

問題解決演習を対象とした学習ゲーム作成法

梅津 孝信[†] 垣屋 良式^{††} 平嶋 宗^{††} 竹内 章[†]

Methodology of Designing Learning Games for Problem Solving

Takanobu UMETSU[†], Yoshinori KAKIYA^{††}, Tsukasa HIRASHIMA^{††},
and Akira TAKEUCHI[†]

あらまし 学習への動機付けを高める一つの方法として学習ゲームが注目されているが、その作成法についてはほとんど論じられていないのが現状である。本研究では、問題解決演習を対象とした学習ゲームの作成法として問題組込み法を提案する。これは、記憶学習を対象とした学習ゲームを作成するプロパティ交換法を拡張したものである。プロパティ交換法では、既存カードゲームのカードと記憶したい概念を交換することによって学習ゲームを作成するが、問題組込み法では、既存カードゲームのカードと問題を交換することによって学習ゲームを作成する。問題組込み法では、この交換の際、問題と解答の関係をより詳細に考慮しなければならない。本論文では、問題組込み法の基本的な手順の説明に加え、問題と解答の組合せ方についてより詳細に述べる。また、その応用例として、問題解決演習を対象とした学習ゲームを自動生成するシステムについても報告する。

キーワード 学習ゲーム、問題組込み法、オーサリング、ILE、e-learning

1. ま え が き

本論文では、記憶学習を対象とした学習ゲーム作成法 [1], [2] を拡張することで、問題に対して手続きを適用し解答の値を導く学習（問題解決演習）を対象とした学習ゲームを作成する方法である「問題組込み法」を提案する。

学習ゲームとは、ゲーム形式で学習を行わせるものであり、高い動機付けのもとで学習を行わせることができることとされている。人の学習における動機付けの重要性は様々な観点より指摘されており、計算機上で学習を行わせる教育ソフトウェアに関する研究においても、論理的思考能力育成のための佐々木らの対戦ゲーム [3] や、思考の外化と共有を支援する楠らのグループ学習ゲーム [4] など、数多くの学習ゲームが作成され、その有効性が実証されている [5]~[7]。

しかしながら、事例としての学習ゲームは多数実現されているものの、その作成方法については十分な議論がなされているとはいえない。Half のアドベンチャーゲームの作成法 [8] や林らの FDCA 法 [9] など、

これまでにいくつかの学習ゲーム作成法が提案されているが [6], [10]~[12]、これらは学習ゲーム作成作業の一部分については議論しているものの、作成作業の大部分は依然として定式化されておらず、作成者の経験や直感に任せる形となっている。

経験や直感に基づいて作成された学習ゲームの提示を行うだけでは、その事例の中に存在する共有すべき情報が暗黙的なものであるため、その再利用や更なる積上げが困難である。このような現状では、学習ゲームの作成は、経験や直感に基づいて行わなければならないため、コストが高くなってしまふ。また、作成されたものについては、その質について信頼ができず、性質においても定かではないため運用に問題が生じる。そして、改良を行う際にも、改良対象がどのようなものであるかが不明であるため試行錯誤が必要となってしまう。

一方、面白い学習ゲームの作成手法を確立するのは非常に困難である。現在のところ、商業ゲーム業界であっても面白いゲームを作成するための経験や手法は十分ではない。また、同じゲームであっても、面白いと感じる人もいれば、面白くないと感じる人もいる。

そこで筆者らは、既存のゲーム、つまり、既にゲームとして認められており、ある程度の人々が面白いと感じていると考えてよいもの、を対象とし、その特徴

[†]九州工業大学、飯塚市

Kyushu Institute of Technology, Iizuka-shi, 820 8502 Japan

^{††}広島大学、東広島市

Hiroshima University, Higashihiroshima-shi, 739 8527 Japan

を保存しつつ学習を追加する手法を確立することを目的として、学習ゲーム作成法に関する議論を行ってきた [1], [2], [13]~[15].

プロパティ交換法はその成果の一つであり [1], [2], 「概念のもつ性質」を記憶するための学習ゲームを作成する手順を定式化したものである。ここでの概念のもつ性質とは、例えば「リチウム元素」という概念がもつ「電子数が2」「族が1」などの性質である。プロパティ交換法では、既存のカードゲームを用意し、カードゲームのカードを学習対象としたい概念と交換することで、その性質を記憶するための学習ゲームを作成する。カードゲームとは「ルールに従いカードのもつ性質を操作する」ゲームであるため、カードと学習する概念を交換することで「ルールに従い概念のもつ性質を操作する」ことになる。つまり、プレイヤーはゲーム中に学習対象概念の性質について触れることとなり、その記憶を促されることとなる。

しかし、教師が学習者に行わせたい学習は記憶だけではない。例えば、問題に対して手続きを適用し解答の値を導く作業を行わせるような学習形態（以下では、問題解決演習と呼ぶこととする）は、学習した内容の実践や確認のためによく用いられるものであり、学習者が自主的に行う学習としては最も一般的なものの一つである。

そこで本論文では、問題解決演習を行う学習ゲームを作成する方法を定式化した「問題組込み法」を提案する。また、小学校教育で使われている指導書に載せられている問題解決演習のうち、どれだけの数の演習を本手法でゲームに組み込むことができるかを調査した。更に、本手法に基づいて設計・開発した学習ゲームの自動生成システムについても報告する。

2. プロパティ交換法

本章では、問題組込み法のもととなっているプロパティ交換法について説明する。

プロパティ交換法は、概念のもつ性質を記憶するための学習ゲームを作成する手順の一つを定式化したものであり、記憶したい概念の性質と、既存のカードゲームを用意すれば、機械的に学習ゲームを作成することができる。作成される学習ゲームは、用意したカードゲームとほぼ同じ特徴をもちつつ、概念の性質の記憶に寄与するものとなる。図1の左側は、プロパティ交換法のモデル図である。以下、この図に従い、プロパティ交換法を説明していく。

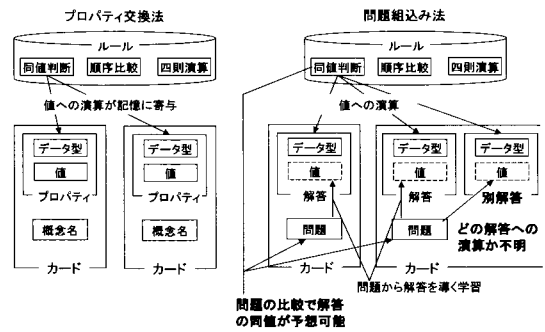


図1 プロパティ交換法と問題組込み法の比較
Fig.1 Comparison of old model with new model.

カードゲームとは「カードのもつ性質に対して演算を行い、その結果を用いてカードを操作する」ものである。このカードゲームの特徴は、ゲーム中で行う活動に大きく依存すると考えた。そこで、演算やカード操作については変更せずに、カードのみを学習したい概念と交換することで、もとの特徴を保ったまま「概念のもつ性質に対して演算を行い、その結果を用いて概念を操作する」ゲームへと変更する。概念の性質に対して演算をする際には、プレイヤーはその概念がどのような性質をもつかを確認することになるため、概念の性質の記憶に寄与する学習ゲームとなっているといえる。なお、プロパティ交換法では、カードの性質と概念の性質をプロパティと呼ぶ。

カードゲームにおいて、このプロパティに対して行われる演算は、「同値判断」、「順序比較」、「四則演算」の3種類である。これらの演算が可能かどうかは、プロパティの値間に存在する関係による。この値間の関係を、プロパティ交換法ではデータ型と呼ぶ。

Stevensによれば、値間の関係には、名義尺度、順序尺度、間隔尺度、比例尺度の4種類がある [16]. 名義尺度は、値がラベルの役割のみを果たし、同値判断のみ可能となっている。順序尺度では、値に順序関係が存在し、同値判断と順序比較が可能となっている。間隔尺度は、順序尺度に加え、値間に等間隔が保障されているため、同値・順序比較と四則演算が可能となっている。比例尺度は、順序と間隔に加え、絶対零点をもち、値の比にも意味をもつ。そのため、同値・順序比較、四則演算、比の計算が可能となっている。プロパティ交換法では、同値判断、順序比較、四則演算の3種類の演算を取り扱うので、このStevensの論より、名義、順序、間隔尺度の三つをデータ型として取り扱

う。比例尺度は間隔尺度でもあるため、プロパティ交換法では間隔尺度として取り扱う。

カードゲームとは「カードのもつプロパティに対して演算を行い、その結果を用いてカードを操作する」ものであるため、ゲーム中で行われる演算がプロパティの値に対して適用可能であれば、別のカードを用いても、演算やカード操作については変更せずにプレイ可能となる。よって、プロパティ交換法の手順は以下のとおりとなる。まず、既存のカードゲームと、学習したい概念を用意する。次に、カードゲームでプロパティに対し行われる演算を調べる。そしてその演算が、学習したい概念のもつプロパティのデータ型にも適用可能であった場合、概念名とプロパティの値を書いたカードを用意し、もとのカードと交換する。この3手順で、もとの特徴を保ったまま、概念のもつプロパティの値を記憶する学習ゲームを作成することができる。

3. 問題組込み法

問題組込み法とは、プロパティ交換法を拡張した手法で、既存カードゲームのカードと問題を交換することで問題解決演習を行う学習ゲームを作成する方法である。

問題解決演習とは、問題に対して手続きを適用し解答の値を導く作業を行う学習である。例えば、「 $13-5=?$ における?の値を求めよ」という問題から、解答「?」の値である「8」という値を導く作業や、「鉄が燃焼して酸化鉄となる化学変化を化学変化式で書くと(A)Fe+(B)O₂=2FeOとなる。(A)と(B)に入る数はいくらか」という問題から、解答(A)が「2」、解答(B)が「1」という値を導く作業を行うものである。これらの作業により、例えば線り下がりのある引き算や化学反応式の係数についての知識の確認や実践を行う学習である。

このように、問題解決演習における問題には、それから導かれる解答が存在する。これを、「問題という概念が解答というプロパティをもつ」と考えるならば、プロパティ交換法と同様の手順でカードと問題を交換することができる。作成される学習ゲームは、概念が問題に、プロパティが解答に置き換わるので、「まず問題から解答を導き、その解答に対して演算を行い、その結果を用いて問題を操作する」といった、問題解決演習を行うものとなる。図1は、プロパティ交換法と、この問題組込み法のモデル比較である。左がプロ

パティ交換法、右が問題組込み法であり、学習対象の概念が左下、問題が右下に示されている。

3.1 問題をゲームに組込む際の問題点

ここでは、プロパティ交換法と同じ考え方で、問題解決演習を対象とした学習ゲームを作成した場合に発生する問題について説明する。

問題と解答の関係は、プロパティ交換法における概念とその性質の関係より複雑であるため、作成法のモデル上で差があり、プロパティ交換法と同じ手順ではうまくいかない場合がある。概念のもつプロパティの値は必ず一意に定まるのに対し、問題に対する解答は一意に決まらない場合がある。また、問題のもつ解答が特殊で、他の問題からは導かれることがない場合がある。この関係の違いが、問題解決演習をゲームへと組み込む際に問題を引き起こすことがある。

問題に対する解答が一意に決まらない場合、言い換えるなら別の解答が存在する場合は、どの解答を用いるかによって同値判断、順序比較、四則演算の結果を大きく変えてしまうため、演算結果が一意に決まらない。例えば、「二乗して4になる数を答えよ」という問題では、2と-2の二つの解答が、「二乗して9になる数を答えよ」という問題では、3と-3の二つの解答が存在する。プロパティ交換法と同様の手順を用いてこの二つの問題をゲームに組み込んだ場合、「この二つの問題の、解答の順序を比較する」といった学習ゲームが作成される可能性がある。このとき、2と-3を比較する、2と3を比較する、といったように、どの解答を用いるかによって、その結果が変わってしまう。

プロパティ交換法で取り扱っているカードゲームでは、このような事態を想定していないため、ゲームルールに矛盾が生じることがある。また、解答によってデータ型が異なっている場合は、ゲーム中で行われる演算が適用可能かどうか保障できないため、ゲームが成立しない可能性がある。

問題のもつ解答が特殊で、他の問題からは導かれることがない場合は、演算として解答の同値判断を行うゲームを対象とすると、問題解決演習が全く行われぬ学習ゲームが作成されてしまう。例えば、学習ゲームが「一けた同士の足し算」のみを対象としていた場合、 $9+9$ の解答である18は他の問題から導かれることはないため、「 $9+9$ と $8+7$ の解答が同じかどうか考える」や「 $9+9$ と同じ解答の問題を探す」といった作業は、問題を解くまでもなく結果を出すことがで

きてしまう。

以降では、これらの問題を考慮し、問題と解答の関係のパターンを考え、それぞれのパターンでの問題解決演習を対象とした学習ゲームを作成する方法を提案する。

3.2 問題と解答の関係のパターン

ここでは、問題と解答の関係のパターンにどのような種類のものがあるかについて説明する。問題組込み法において考えるべき分類として、問題から解答の値が一意に決まるかどうか、解答の値から問題が一意に決まるかどうかから、「一対一」「多対一」「一対多」「多対多」の関係に分類する。これは、前述のとおり、作成法のモデル上で問題と解答の対応関係の数に差があるからである。

なお、通常、問題解決演習などの問題を解く学習を行う場合、学習単元などに従った、ある範囲の問題のみに集中して学習が行われる。例えば、数学の方程式の問題と化学の化学変化式の問題を同時に行うことはほとんどなく、まずは数学の方程式の問題だけ学ぼうといったように、学ぶ必要があると思われる範囲の問題のみに絞って問題を解く学習を行うのが一般的である。そのため本論文では、一つのゲームに組み込む問題は、学習ゲーム作成者が必要だと考えた、ある範囲に限定されたものであることを想定する。本論文ではこの範囲のことを「単元」と呼ぶ。これから一対一、多対一、一対多、多対多の関係について説明するが、これらは特定の単元に限った範囲での定義とする。

一対一関係とは、問題から解答の値が一意に決まり、また学習対象とする単元においてその解答をもつ問題が一つしかない関係である。例えば、「二けた×二けたの計算」という単元の場合における、「 99×99 」を計算する問題がこれにあたる。 99×99 の解答は9801と一意に決まる。また、二けた×二けたの計算で解答が9801となる問題は 99×99 しか存在しない。

多対一関係とは、問題から解答が一意に決まるが、学習対象とする単元においてその解答をもつ問題が複数存在する関係である。例えば、二けた×二けたの計算という単元における、「 36×10 」を計算する問題がこれにあたる。 36×10 の解答は360と一意に決まる。また、二けた×二けたの計算で解答が360となる問題は、 36×10 以外にも「 18×20 」「 12×30 」など複数が存在する。

一対多関係とは、問題の解答が一意に定まらないが、学習対象とする単元においてその解答をもつ問題は

つしかない関係である。例えば、「立体の展開図を求める」という単元において、「直方体の展開図を書く」問題がこれにあたる。直方体にはいくつかの展開パターンがあり、別解答が複数存在する。しかし、それらの展開図は必ず直方体の展開図であり、違う問題から得られる解答にはならない。

多対多関係とは、問題の解答の値が一意に定まらず、また学習対象とする単元においてその解答をもつ問題が複数存在する関係である。例えば、「気体の発生方法（化学）」という単元において、「酸素の発生方法を書く」問題がこれにあたる。この問題には、「二酸化マンガンとオキシドールを混合する」「水を電気分解する」など、複数の別解答が存在する。また、「水を電気分解する」という解答は、「水素の発生方法を書く」問題における解答でもある。

3.3 各関係における学習ゲーム作成法

ここでは、前述した4種類の関係をもつ問題それぞれに対し、その問題を学習ゲームに組み込む方法を説明する。表1はそれぞれの場合の作成法を整理したもので、表中(i)については3.3.1、(ii)(iii)(iv)については3.3.2で説明する。

3.3.1 基本的な手順

まずはじめに、問題組込み法の基本的な手順を説明する。ここで説明する手順を基本とし、ゲーム中で行う演算と対象とする問題が特別なものの場合にだけ、手順の一部を変更して学習ゲームの作成を行う。

表1の(i)にあたる、同値判断を行わないゲームへ一対一若しくは多対一問題を組み込む場合は、解答が一意に定まり、かつ解答の同値判断を行わないため、3.1で述べた問題は発生しない。よって、ここで説明する基本手順どおり作成すればよい。

具体的な手順だが、まず、既存のカードゲームと、対象とする問題を用意する。次に、カードゲームでプロパティに対し行われる演算を調べる。そして、その演算が解答のデータ型にも適用可能であった場合、問題内容を書いたカードを用意し、もとのカードと交

表1 関係と演算による分類に対応した作成法
Table 1 Procedures for designing learning games.

| | 同値判断しない | 同値判断する |
|-----|------------------|----------------------------------|
| 一対一 | (i) 基本どおり作成 | (ii) 解答が書かれたカードを用意 |
| 多対一 | | (iii) 全解答それぞれが必ず複数の問題から導かれるようにする |
| 一対多 | (iv) 本手法では対象としない | |
| 多対多 | | |

換する。なお、プロパティ交換法ではカードにプロパティの値まで書くが、問題組込み法では解答を書かない。この3手順で、もとの特徴を保ったまま「まず問題から解答を導き、その解答に対して演算を行い、その結果を用いて問題を操作する」学習ゲームを作成することができる。

例として、「プレイヤー全員がカードを1枚出し、数字が最も大きいカードを出したプレイヤーが得点する」ゲームであるゴップと、「二けた同士の計算」問題を対象とした場合について説明する。ゴップは順序比較を行うゲームで、二けた同士の計算の解答は間隔尺度である。間隔尺度は同値判断を行うことができるため、「 $12 + 31$ 」「 $54 - 11$ 」などの問題を書いたカードを用意し、ゴップのカードと交換する。解答はカードに書かない。この交換によって、「プレイヤー全員がカードを1枚出し、解答が最も大きいカードを出したプレイヤーが得点する」ゲームが作成される。このゲームをプレイする際、カードには問題しか書いていないため、プレイヤーが解答の大きさを比較するには、問題を解くことが必要となる。

3.3.2 特殊な場合の手順

特殊な場合とは、問題に対する解答が一意に決まらない場合と、問題のもつ解答が特殊で、他の問題からは導かれることがなく、かつ同値判断をゲーム中で行う場合である。前者はどの解答を用いるか決まらないため、後者は、解答について考えずとも、問題が同一の場合が解答が同値の場合であり、問題が異なれば解答が同値でないと判明してしまうため、それぞれ特殊な対応が必要となる。

まず、表1の(ii)である、同値判断を行うゲームへ一対一問題を組み込む方法について説明する。この場合、解答の同値判断を行うゲームとなるが、問題と解答が一対一であるため、問題から解答を導かなくてもその同値判断が可能となってしまう。そこで、基本的な手順がすべて終わった後に、一対一問題の「解答のみ」が書かれたカードをゲームに追加する。こうして作成したゲームを、問題カード同士の解答の同値判断を行うのではなく、問題カードの解答と解答カードの同値判断を行うゲームとして遊ぶ。これにより、問題から解答を導かないとプレイできない学習ゲームとすることができる。例えば3.2で示した二けた×二けたの計算における 99×99 の場合、解答のみが書かれたカードとして「9801」と書かれたカードを用意し、ゲームに追加する。このゲームは、「 99×99 」の解答

と「9801」が同値かどうかを考えるゲームとしてプレイされる。

次に、表1の(iii)である、同値判断を行うゲームへ多対一問題を組み込む方法について説明する。この場合も、組み込む問題によっては、(ii)と同様に解答を導かなくても同値判断ができるゲームを作成してしまう可能性がある。よって、同じ解答をもつ問題を複数種類用意し、すべての解答それぞれが、必ず複数の問題から導かれるようにする。そして、同じ解答をもつ別の問題を用意しない場合、その問題はゲームへと組み込まないようにする。これにより、ある解答が一つの問題からしか導かれない状況が発生しないようになり、異なる問題カードの解答が同じかどうか判断する学習ゲームとすることができる。例えば3.2で示した二けた×二けたの計算における 36×10 の場合、 18×20 や 12×30 を必ず入れることによって、解答の360が複数の問題から導かれるようにしておく。もしこれらを入れなかった場合、 36×10 と同じ解答をもつものは 36×10 しかなくなり、 36×10 と 36×10 の解答が同じかどうか比較するという、解答を導く必要のない活動が行われてしまう。 18×20 や 12×30 を用意しない場合、 36×10 をゲームに組み込むことは中止する。

最後に、表1の(iv)である一対多と多対多問題を対象とする場合だが、現在のところ問題組込み法では対象としない。問題に対する解答が一意に決まらない場合は、もとなるカードゲームのルールに大きな変更を加えなければ解決しないと思われる。例えば、「別解答がある場合プレイヤーがどちらの解答を用いるか決めてよい」といったルールを追加することで、一対多と多対多にも対応することができる。しかしこの変更は、もとのゲームのルールの変更であり、作成される学習ゲームがどのような特徴となるか、それぞれの事例によって変わってくると思われる。よって、一対多と多対多のようなルール変更を伴う方法は本手法では対象としない。ただし、3.4で述べるが、一対多・多対多問題は他と比べて数が少ない傾向があるため、これらを除いた範囲でも本手法に十分な意義が存在すると考えている。

しかしながら、上述のような対処を行った上でも、解答を求めずともゲームを進行できてしまう場合が存在する。例えば、「 99×98 」の解答と「9801」が同値かどうかを判断する場合、下一けたの計算である 9×8 の解答の下一けた、つまり2が、「9801」の下一けた

の1と違うため、「99×98」の解答と「9801」は同値ではないと判断することができてしまう。

この問題は、選択肢から解答を選ぶ問題解決演習であれば起こり得るもので、問題の一部を解いた時点で、まずあり得ない選択肢を排除できてしまうことが原因である。対策としては、一部を解いただけでは選択肢が排除できないよう、選択肢、つまりこの場合は問題や解答を厳選すべきだが、現在のところその厳選方法については十分な議論ができていない。この件については、今後更に検討が必要であると考えている。

3.4 問題組込み法の適用範囲調査

一般的に行われている問題解決演習を対象とした場合、問題組込み法がそのうちどれだけの数の演習を対象として学習ゲームを作成することができるかを調査した。調査対象は、教育出版の小学算数1年から6年の指導書6冊、新興出版の理科1分野上、下の指導書2冊である。これらの指導書は、実際に小学校で授業を行う教師向けに作られたものであり、そのまま授業で出題できる実用的な問題解決演習が、全部で7093問記載されている。この7093問の問題と解答の関係と、その解答のデータ型について調査した。

調査結果を表2に示す。表2の(i)~(iv)は、表1で示した4種類の作成法のうち、どの方法で学習ゲームを作成することになるかを示したものである。(i)(ii)と示しているものは、もととなるゲームが同値判断を行わない場合が(i)、行う場合が(ii)となる。また、(i)(iii)と示しているものは、もととなるゲームが同値判断を行わない場合が(i)、行う場合が(iii)となる。

この表2より、7093問のうち、(i)(ii)(iii)で作成する問題は6493問、対象とできない(iv)は600問であることが分かる。つまり、実際に教育現場で使われることを想定した問題7093問のうち、約9割の6493問が、理論上問題組込み法で対応可能であることが分かる。この6493問を対象として学習ゲームを作成した場合、それらがゲームとして面白いのか、どれだけの学習効果があるのかについては現在のところ不明である。しかし、問題解決演習を対象とした学習ゲームを

機械的に作成する手法はこれまでのところ存在していないため、この6493問を対象とすることのできた問題組込み法は、新規性があり、発展させていく価値のあるものと判断できる。

なお、(iv)一対多、多対多問題に分類されたものは、作図や、文章での自由記述のものがほとんどであった。本論文で提案する手法ではこれらを対象とすることができないため、作図、証明などの演習に限定した新たな学習ゲーム作成法を定式化することを、今後の課題の一つとする。

4. 問題解決演習を対象とした学習ゲーム自動生成システム

4.1 システムの説明

ここでは、問題組込み法をもとに開発した、問題解決演習を対象とした学習ゲーム自動生成システムについて説明する。このシステムは、問題組込み法に基づいて機械的な作業で学習ゲームが作成可能であることを確認する意味で、本手法に基づき設計・開発した。問題組込み法自体、まだ多くの課題を含んでいるが、本手法の可能性を確認する上で、現時点でのシステムの試作は十分意味があると考えている。

このシステムは、「計算機上で動く既存カードゲームアプリケーション」「既存カードゲームで扱うカードの情報」と、「単元の情報」を入力とし、「計算機上で動く学習ゲーム」を出力する。このとき、計算機上で動く既存カードゲームアプリケーションは、ゲームで取り扱うカードの情報を外部データとしてもち、そのカード情報は別のカード情報と交換可能であり、そしてプロパティの値をプレイヤーに見せないようにすることが必要である。「既存カードゲームで扱うカードの情報」はゲーム名、カード名、プロパティ、プロパティの値、ゲームで行われる操作からなる。「単元の情報」は、単元名、問題、解答、問題と解答の関係、解答のデータ型からなる。既存カードゲームで扱うカードの情報と単元情報の入力の例を表3、表4に示す。これは入力すべてではなく一部であり、実際には、

表2 指導書に記載されている問題の分類
Table 2 A classification of problems.

| | 名義尺度 | 順序・間隔尺度 |
|-----|----------|---------------|
| 一対一 | (ii) 823 | (i)(ii) 61 |
| 多対一 | (iii) 82 | (i)(iii) 5527 |
| 一対多 | | (iv) 600 |
| 多対多 | | |

表3 既存カードゲームで扱うカードの情報
Table 3 Information of a card game.

| ゲーム名 | カード名 | プロパティ | プロパティ値 | 操作 |
|------|-------|-------|--------|------|
| スピード | ハートの5 | マーク | ♡ | 使用せず |
| | | 数字 | 5 | 順序比較 |
| | ハートの6 | マーク | ♡ | 使用せず |
| | | 数字 | 6 | 順序比較 |

表 4 単元の入力情報
Table 4 Information of problems.

| 単元名 | 問題 | 解答 | 解答の値 | 関係 | データ型 |
|-----------|-------------|----|------|-----|------|
| 一けた同士の足し算 | $5 + 2 = ?$ | ? | 7 | 多対一 | 間隔尺度 |
| | $7 + 3 = ?$ | ? | 10 | 多対一 | 間隔尺度 |

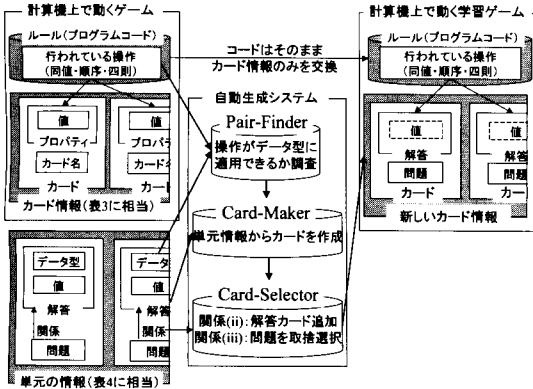


図 2 学習ゲーム自動生成システム
Fig. 2 Learning game generator.

ゲームで使われるカード 52 枚すべて、学習させたい問題数十問すべての情報を入力する。

システムの動作を図 2 に従って説明する。まずシステムは、入力から「ゲームで行われる操作」と「問題のデータ型」を比較し、操作が解答の値に可能かどうかを調べる。データ型と可能な操作の対応は、2. で述べたとおりである。もし操作可能であれば、次に、単元の情報を用い、問題をカード名、解答をプロパティ、解答の値をプロパティの値として、新たなカード情報を作成する。このとき、表 3 の操作と表 4 の関係から、3.3.2 の特殊な場合に相当するかどうかを調査する。表 1 の (ii) に相当する場合は解答のみを情報としてもつカードを追加し、(iii) に相当する場合は問題の取捨選択を行い、すべての解答それぞれが、必ず複数の問題から導かれるようにカード情報を作成する。こうして作成されたカード情報を、既存ゲームのカード情報と交換する。最後に、プロパティの値、つまり解答の値をプレイヤーに見せないように設定することで、計算機上で動く学習ゲームを作成する。

表 3 で示したスピードは有名なトランプゲームであり、「置かれているカードに対し、数字の順序が前後どちらかとなるカードを出していき、手持ちのカードが先になくなったプレイヤーの勝利」というルールである。例えば、♡5 に対し、♡6 や ♣4 など置くゲームである。このゲームと表 4 のような一けた同士の

の足し算問題をシステムに入力した場合、まずスピードの操作である順序比較が、一けた同士の足し算の解答のデータ型へと適用可能かどうか調査される。間隔尺度への適用は可能なため、一けた同士の足し算の $5 + 2 = ?$ をカード名、? をプロパティ、7 をプロパティの値、といったように変換し新たなカードの情報を作成していく。この場合、表 1 の (i) に相当するため、他に特別な手順は必要としない。そして、カード情報を交換可能な、計算機上で動くスピードのアプリケーションを用意し、作成した新たなカード情報をスピードに用いることによって、「置かれているカードに対し、カードに書かれた足し算の解答の値の順序が前後どちらかとなるカードを出していき、手持ちのカードが先になくなったプレイヤーの勝利」という、計算機上で動く学習ゲームが生成される。この学習ゲームは、例えば、置かれている $2 + 6 = ?$ に対し、 $3 + 4 = ?$ や $4 + 5 = ?$ を出すものとなる。このゲームにおいて、解答の値をプレイヤーから隠してプレイさせると、プレイヤーは問題から解答の値を導き出し、その値を用いて順序を調べることになり、一けた同士の足し算演習に役立つゲームとなる。

なお、この自動生成システムに入力された情報はデータベースに蓄えられ、次回からはカードゲームの名称や単元の名称を選ぶだけで、入力の代わりとすることができる。データベースにある範囲であれば、任意のカードゲームを一つ選択し、そのカードゲームを用いた場合に対象とできる単元を検索したり、逆に単元を一つ選択し対象とできるカードゲームを検索したりすることもできる。カードゲームと単元の名称は、この使用法のために入力する。

4.2 実験的評価

本評価では、システムから出力されたソフトウェアについて、(1) 学習効果が見込めるか、及び (2) もとのゲームの特徴を残したゲームとなっているか、をソフトウェアを実際に被験者に使ってもらった上でアンケートによって調査した。

この調査は、作成された学習ゲームの学習効果や動機付け効果を直接的に評価しているものではないが、本手法及び本手法に基づく学習ゲーム自動生成の有望性を確認する意味をもっていると考えている。本手法及びシステムには様々な問題点が存在するが、今後それらを順次解決していくとともに、学習効果や動機付け効果の直接的な評価の調査も行っていく予定である。

なお、作成された学習ゲームの面白さではなく、も

とのゲームの特徴を残しているかどうかについて調査した理由は、1. で述べたとおり、面白さの客観的な評価が難しいからである。本手法は、ゲームの面白さを直接解明するのではなく、面白いとされているゲームの特徴を保存することに着目したことによって成立しており、この仮定に基づく学習ゲームの生成が行えているかどうかを確認することは、研究の現時点においては必要かつ妥当であると考えている。

実験では、システムから出力した学習ゲームを8種類用意し、被験者である大学生34名にプレイさせ、アンケートをとることとした。被験者のうち18名には「(A) 四則演算問題を七並べゲームに組み込んだもの」「(B) 一次方程式問題をスピードゲームに組み込んだもの」「(C) 時計を読む学習をスピードゲームに組み込んだもの」「(D) 化学式に関する問題を神経衰弱ゲームに組み込んだもの」の4種類を、残りの16名には「(E) 集合の要素数を数える問題を七並べゲームに組み込んだもの」「(F) 立体の展開図を考える問題を神経衰弱ゲームに組み込んだもの」「(G) 数列の問題をスピードゲームに組み込んだもの」「(H) 一けた同士の四則演算で解く文章問題をスピードゲームに組み込んだもの」の4種類の学習ゲームをプレイしてもらった。組み込んだ問題は、すべて3.4で紹介した指導書に記載されていたものである。

プレイ時間は5種類合わせて20分で、4種類のゲームにどのように時間を掛けてもよいとした。また、それぞれの学習ゲームプレイ後に、アンケートに答えてもらった。

アンケートの内容として、(1) 学習効果が見込めるか調べるため、「Q1. 学習効果がありそうですか」、その回答の信憑性を問うため「Q2. この問題についてよく知っていますか」、(2) もととなったカードゲームの特徴を残しているか調べるため、「Q3. もとのゲームの特徴を残していますか」、その回答の信憑性を問うため、「Q4. もとのゲームをよく知っていますか」、の4問を用意した。以上の質問に対し、「5. そう思う」「4. ややそう思う」「3. どちらでもない」「2. ややそう思わない」「1. そう思わない」という5件法で回答してもらった。それぞれの回答には上記のように5から1までの数字が割り振られている。また、Q1~4以外に、気づいたことを自由に書いてもらう自由記述欄も用意した。

各ゲームに対しての、プレイした人数、平均プレイ時間（小数点第一位四捨五入）、アンケートの結果を

表5 アンケート結果
Table 5 Results of questionnaires.

| | A | B | C | D | E | F | G | H |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 人数 | 18 | 18 | 14 | 15 | 16 | 16 | 16 | 16 |
| 時間 (s) | 334 | 271 | 114 | 245 | 259 | 277 | 171 | 193 |
| Q1 | 4.2 | 4.0 | 4.0 | 4.1 | 2.6 | 3.3 | 3.3 | 3.7 |
| Q2 | 3.6 | 3.7 | 4.0 | 4.2 | 2.3 | 2.7 | 3.1 | 2.9 |
| Q3 | 4.6 | 4.4 | 4.9 | 4.5 | 4.5 | 3.6 | 4.3 | 4.1 |
| Q4 | 4.6 | 4.6 | 5 | 4.7 | 4.1 | 4.4 | 4.9 | 4.5 |

表5に示す。AからHまでのアルファベットは用意した8個の学習ゲームを表している。プレイした人数とは、与えられた20分の間にその学習ゲームを一度でもプレイした人数を示す。20分という時間で好きな学習ゲームをプレイしてよいという条件のもとで実験を行ったため、学習ゲームによりプレイした人数に差があった。また、プレイした学習ゲームのみに対してアンケートに答えてもらったため、一つの学習ゲームに対して18名すべてがアンケートに答えているわけではない。アンケートに答えた人数はプレイした人数と同数であった。なおアンケートの結果に関しては、回答に割り振られた数字を数値と考え、平均を算出し小数点第二位を四捨五入した値となっている。

アンケート結果を考察する。Q1では、やや(1)学習に役立つ側に傾いた結果が得られた。少なくとも学習に寄与するものが作成できるが、その効果に疑問があるものがいくつかあるのだと思われる。その理由は、自由記述に明確に書いてあるものが多かった。まず、BCGHだが、速度を競うスピードゲームにおいて、「対戦相手のコンピュータが強すぎて、考えられる時間がほとんどなかった」ため、これらの評価が、特に解答を導くのに時間のかかるGHの評価が下がったのだと思われる。次に、EFGHだが、「どんな学習なのかよく分からなかったため、効果があるかどうかも分からなかった」とあった。EFGHはQ2の値が低いこともこれを裏づけており、これがQ1の評価が低かった原因だと思われる。

Q3を見ると、ほとんどの被験者が(2)もとのゲームの特徴が残っていると判断していたことが分かる。また、Q4から、被験者は十分にもとのゲームを知っており、その判断は信頼できると思われる。なお、自由記述欄に、カードを記憶するゲームである神経衰弱を対象としたFについて、「ただでさえ記憶するのが大変なのに、立体の組立てまで頭でやるので難しすぎた」といった意見がいくつか見られた。学習ゲーム化によってもとのゲームより難しくなったため、3.6と、

他のものより数値が下がっていることが考えられる。

結果として、この学習ゲーム自動生成システムは、(1) 学習効果が見込める (2) もとのゲームの特徴を残した学習ゲームを出力可能だということが確かめられた。そして、その学習効果については、疑問の残るものが出力されることもあることも分かった。しかし、学習対象と既存ゲームとそれらの性質の入力から、自動的に問題解決演習を対象とした学習ゲームを生成するシステムはほかにないため、この結果から十分にその有用性を認めることができる。また、それぞれの学習効果における問題について、今回の実験の範囲では、原因と思われるものがいくつか分析できている。よって、このような分析結果をもとに、出力の学習ゲームを手作業で修正し、学習ゲームを改良するという使い方も想定することができる。このような使い方でも、一から作成するより楽なため、役立つと思われる。

5. む す び

本論文では、問題解決演習を行わせる学習ゲームを作成する手法として、問題組込み法を提案した。これはプロパティ交換法という、記憶学習を対象とした学習ゲームを作成する手法を拡張したものである。プロパティ交換法では、既存カードゲームのカードと記憶したい概念を交換することによって学習ゲームを作成するが、問題組込み法では、既存カードゲームのカードと問題を交換することによって学習ゲームを作成する。問題組込み法では、この交換の際、プロパティ交換法に比べ、問題と解答の関係をより詳細に考慮しなければ、学習ゲームとして破綻する可能性がある。本論文では、問題組込み法の基本的な手順の説明に加え、問題と解答の関係について分析し、それぞれの関係を対象とした場合に必要な特殊な作成手順について述べた。また、その応用例として、問題解決演習を対象とした学習ゲームを自動生成するシステムについても説明した。

今後の課題として、問題組込み法で作成される学習ゲームの、学習効果に関する安定化を行う必要がある。学習ゲーム自動生成システムは、もとのゲームの特徴を残した学習に寄与するゲームを出力可能だが、その学習効果については、疑問の残るものが出力されることがある。その原因について更なる調査を行い、原因を取り除く方法を定式化することによって、問題組込み法を改良する必要がある。また、問題組込み法では対象とできない、作図や証明などの、一対多・多対多

演習問題を学習ゲームへと組み込む方法を定式化することも、今後の課題の一つである。

文 献

- [1] T. Umetsu, T. Hirashima, and A. Takeuchi, "Property exchange method for automatic generation of computer-based learning games," Proc. ICCE2006, pp.483-490, 2006.
- [2] 梅津孝信, 平嶋 宗, "プロパティ交換法とそれに基づく学習ゲーム設計支援システムの開発," 人工知能誌, vol.22, no.1, pp.19-28, 2007.
- [3] 佐々木整, 森川哲史, 竹谷 誠, "対戦型ゲームを利用した論理的思考能力育成教材の開発," 信学論 (D-I), vol.J83-D-I, no.6, pp.635-643, June 2000.
- [4] 楠 房子, 杉本雅則, 橋爪宏達, "思考の外化を支援することによるグループ学習支援システム," 信学論 (D-I), vol.J83-D-I, no.6, pp.580-587, June 2000.
- [5] 磯本征雄, 宮原一弘, 中野宇宙, 伊藤 敏, "ニュートン力学シミュレーション教材の校正と教授方略—宇宙旅行シミュレーションによる事例研究," 信学論 (D-I), vol.J83-D-I, no.6, pp.599-609, June 2000.
- [6] M. Prensky, Digital game-based learning, McGraw-Hill, 2001.
- [7] 教育システム情報学会編, 教育システム情報ハンドブック, 実教出版, 2001.
- [8] H.M. Halfi, "Adventure games for science education: Generative methods in exploratory environments," Proc. AIED05 WORKSHOP5: Educational Games as Intelligent Learning Environments, pp.12-20, 2005.
- [9] 林 敏浩, 織田好洋, 澤田寛, 林田行雄, "漢字の字画を学習するためのゲーム型ドリルシステムの開発," 教育システム情報学会誌, vol.18, no.1, pp.7-15, 2001.
- [10] T.W. Malone, "Toward a theory of intrinsically motivating instruction," Cognitive Science, vol.5, pp.130-145, 1981.
- [11] M.M. Klawe, "When does the use of computer games and other interactive multimedia software help students learn mathematics?," <http://www.cs.ubc.ca/nest/egems/reports/NCTM.doc>, 1998.
- [12] K. Maragos and M. Grigoriadou, "Towards the design of intelligent educational gaming systems," Proc. AIED05 WORKSHOP5: Educational Games as Intelligent Learning Environments, pp.35-38, 2005.
- [13] T. Umetsu, T. Hirashima, and A. Takeuchi, "Fusion method for designing computer-based learning game," Proc. ICCE2002, pp.124-128, 2002.
- [14] T. Umetsu, T. Hirashima, and A. Takeuchi, "A computer-based learning game designed by fusion method," J. Information and Systems in Education, vol.2, no.1, pp.7-13, 2003.
- [15] 梅津孝信, 平嶋 宗, 竹内 章, "学習ゲーム作成のための部分構造交換法とその実践例," 信学論 (D-I), vol.J88-D-I, no.1, pp.36-44, Jan. 2005.
- [16] S.S. Stevens, "On the theory of scales of measure-

ment," Science, vol.103, pp.677-680, 1951.

(平成 19 年 4 月 5 日受付, 8 月 24 日再受付)



梅津 孝信 (正員)

2002 九工大・情報工学卒, 2004 同大大学院情報工学研究科博士前期課程了, 2006 九州工業大学情報工学部助手, 2007 広島大学大学院博士後期課程了。2007 より九州工業大学情報工学部助教。人の学習を促進する学習支援システムにおいて, 学習者の学習への動機付けを高めるため学習とゲームを融合する方法を定式化する研究に従事。2002 年度 ICCE2002 Best Paper Award, 2003 年度ゲーム学会ゲーム作品コンペティションアカデミック部門優秀賞受賞。人工知能学会会員。



垣屋 良史

2006 広島大・工学卒。在学中は, 計算機による学習支援の研究において, 高い動機付けのもとで学習を行わせることを目的とした学習ゲームの作成方法の定式化と, その自動生成の研究に従事。現在, トヨタテクニカルディベロップメント勤務。



平嶋 宗 (正員)

1986 阪大・工学卒, 1991 同大大学院博士課程了。同年大阪大学産業科学研究所助手, 1996 年同講師。1997 九州工業大学情報工学部助教授, 2004 より広島大学大学院工学研究科教授。人間を系に含んだ計算機システムの高度化に興味をもち、特に知的学習支援システム及びユーザモデルを用いた情報フィルタリング・情報整理支援の研究に従事している。工博。1993 人工知能学会全国大会優秀論文賞, ED-MEDIA95 優秀論文賞, 1996, 1998, 1999 年度人工知能学会研究奨励賞, ICCE2001, ICCE2002 優秀論文賞, 2003 年度人工知能学会優秀研究賞, 2003, 2005 年度ゲーム学会ゲーム作品コンペティションアカデミック部門優秀賞受賞。人工知能学会, 情報処理学会, 教育システム情報学会, 教育工学会, 日本教育心理学会, IAIED, APSCE, AACE 各会員。



竹内 章 (正員)

1976 九大・工学卒。1987 同大大学院修士課程了。九州大学工学部助手, 講師を経て, 1989 九州工業大学情報工学部助教授。現在, 九州工業大学情報工学部教授。工博。学習支援システム, ヒューマンマシンインタフェースなどの研究に従事。情報処理学会, 人工知能学会, 教育システム情報学会等各会員。