

誤りの可視化システムのフィードバックに対する 発話プロトコル分析と考察

中村 祐希人^{*1}, 東本 崇仁^{*1}

^{*1} 東京工芸大学工学部

Thinking Aloud Protocol Analysis and Considerations for Feedback of Error-Visualization System

Yukito Nakamura^{*1}, Takahito Tomoto^{*1}

^{*1} Faculty of Engineering, Tokyo Polytechnic University

学習では自身の解答を振り返り、誤り原因を理解することが重要である。振り返りの支援として誤りの可視化が存在する。本研究ではこれまで開発されてきた誤りの可視化システムのフィードバックが学習者に正しく伝わるのかを発話プロトコル分析により評価した。その結果、一部のフィードバック内容について、学習者が適切に認識できていないことが判明したため、その原因について考察した。

キーワード: 適応的支援, リフレクション支援, 発話プロトコル分析, Error-based Simulation

1. はじめに

学習をするうえで、学習者が誤った解答をした場合、自身の解答を振り返ることは重要である。学習者が解答を振り返ることで学習者は自身の解答がなぜ誤りなのかを考えることができ、それによって誤り箇所や誤り原因を特定することなどの問題の理解につながる。そのため、学習者が誤った解答をした際、自分の解答を振り返ることは重要であるといえる。

学習者に自身の解答の振り返りを促す方法として、誤りの可視化という支援方法がある。誤りの可視化とは学習者の誤った解答に基づいた時、どのような結論が導かれるのかを示すことで学習者に誤りへの気づきを与える支援方法である。この誤りの可視化を用いた手法の1つに Error-based Simulation (EBS)⁽¹⁾がある。EBSとは、学習者の解答を正しいと仮定したときの現象をフィードバックとして学習者に提示する手法である。提示されたシミュレーションと実際の挙動との差から学習者は自身の誤りに気づくことができる。

本研究では、誤りの可視化を用いた場合の数システム⁽²⁾、Error-based Problem Posing (EBPP)システム⁽³⁾のフィードバックが学習者にどのように伝わっている

のかを実験から調査する。実験では発話プロトコル分析を用いた。発話プロトコル分析とは、頭の中に思い浮かんだことをそのまま声に出す手法である。そして、調査した結果から現状のシステムの問題点を洗い出し、そのような問題が発生する原因を考察した。

2. 誤りの可視化

誤りの可視化とは、誤った解答をした際、学習者の解答を正しいと仮定した場合の状況を学習者に見せることで、学習者が自身の解答では誤りであると内発的に気づかせるための支援方法である。誤りの可視化を用いた手法の1つに Error-based Simulation (EBS)⁽¹⁾がある。EBSとは、学習者の誤った解答に基づいて、学習者の入力した式を正しいと仮定した場合、このような結果になるという現象を学習者に提示する手法である。

EBSによる誤りの可視化の具体例を図1に示した。図1は、「物体が床に静止している」という問題を解いたときのEBSによる誤りの可視化の例である。正解の場合は物体が床の上に静止している正しい様子がシステムによりシミュレーションされる。対して、誤答の場合、物体が床に沈んでいくという現実ではおこり

えない現象がシステムによりシミュレーションされる。上記のように、学習者が想定していないシミュレーション結果が提示されることで、学習者は自身の誤りに気づくことができる。このように、EBSは学習者の解答をもとにシミュレーションを提示することで、学習者が自身の解答の誤りに気づくように促している。

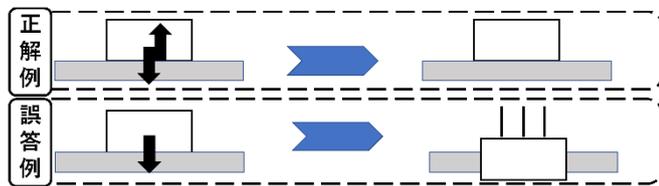


図 1 EBS における誤りの可視化の具体例

誤りの可視化を実現するために EBS ではシミュレーションに対して顕在性、もっともらしさ、示唆性という 3 つの重要な要素を用いている。顕在性とは、EBS により生成されたシミュレーションと正しい挙動の差の程度を示している。次にもっともらしさとは、生成されたシミュレーションの妥当性を示している。最後に示唆性とは、EBS によって顕在化された誤りが、学習者が修正すべき点を適切に示唆しているかどうかを示したものである。顕在性、もっともらしさ、示唆性が高いフィードバックは、学習者に自身の解答ではどのようなものかを考えさせ、試行錯誤を促すことができる。上記より、EBS では顕在性、もっともらしさ、示唆性の 3 要素を高くすることが重要である。EBS は誤りの可視化を用いた手法であることから、誤りの可視化でも同様にこれら 3 つの要素を高くすることが重要であるといえる。

3. 誤りの可視化を用いたシステムの調査

本研究では、調査のために誤りの可視化を応用した場合の数システムと EBPP システムを用いた。

3.1 場合の数システム

この節では場合の数システムのフィードバックについて説明する。場合の数システムは、場合の数の文章問題の解き方を支援したシステムである⁽²⁾。場合の数システムのフィードバック例を図 2 に示す。学習者に与えられるフィードバックとして、以下の 3 つが与えられている。1 つ目は学習者が選んだ式に基づいてカードの並びが可視化される「あなたの解答の可視化」

である。2 つ目は学習者が正解を入力した場合のカードの並びを可視化する「正しい解答の可視化」である。3 つ目は組合せ・順列式の可視化と階乗式の可視化をあわせた「結果可視化」である。

今回は組合せ式 $7P1$ 、階乗式 $3!$ を選択した場合を例にして説明する。図 2 より、組合せ・順列式、階乗式において「あなたの解答の可視化」と「正しい解答の可視化」に並んでいるカードの数字と色、並んでいるカードの枚数が異なっていることがわかる。この違いにより、学習者は組合せ・順列式、階乗式の選択は誤りであるとわかる。結果可視化についても「あなたの解答の可視化」と「正しい解答の可視化」でカードの数字と色、カードの並んでいる枚数が異なっており、この違いから学習者は自身の選択した式が誤っていることを理解できる。このように「あなたの解答の可視化」と「正しい解答の可視化」の違いから、システムは学習者に自身の誤りへの気づきを促している。

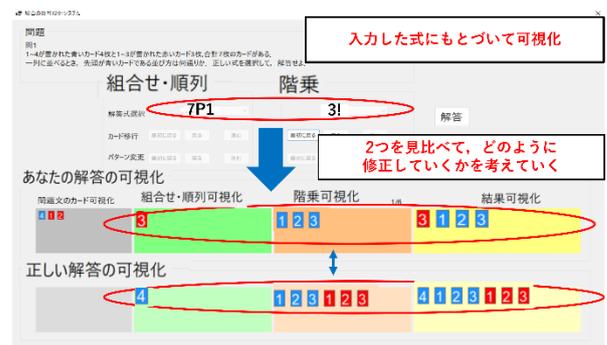


図 2 場合の数システムの可視化例

3.2 EBPP システム

この節では EBPP システムのフィードバックについて説明する。EBPP システムは、システムが学習者の入力した誤った解答に対して、「あなたの入力した解答は提示された問題ではなく、この問題を解いていることになる」と別の問題を学習者にフィードバックとして提示するものである⁽³⁾。

EBPP システムのフィードバック例を図 3 に示す。図 3 より、EBPP システムでは、問題に対して学習者が入力した力が誤っていた場合、入力された力に基づいて別の問題を提示する。学習者が入力した力が元の問題と一致していた場合は、システムが元の問題と同じ問題設定を可視化する。対して、学習者が誤った力を入力した場合は、システムが元の問題設定とは違う

状況を可視化する。

具体例を図 4 に示す。「物体が床の上に静止している」という問題に対し、学習者が上向きの力を加えるなどの誤った力を入力した場合は、「物体が床の上で静止している」という問題ではなく、「紐に引っ張られている」や「磁石に引っ張られている」「1つの壁に押されている」といった問題がシステムによって生成される。学習者が重力を入力しなかった場合は、「重力のない空間にある」といった問題設定がシステムからのフィードバックとして学習者に与えられる。これにより学習者は、自身の入力した力がどのような問題設定になるのかをフィードバックから読み取り、誤りに気づくことができる。

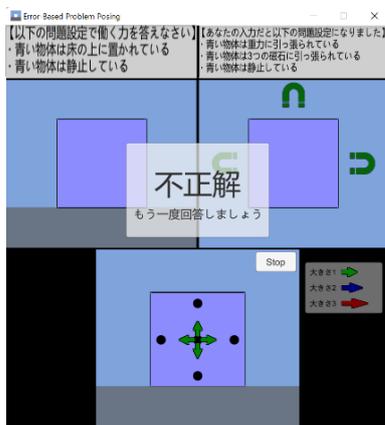


図 3 EBPP フィードバック例

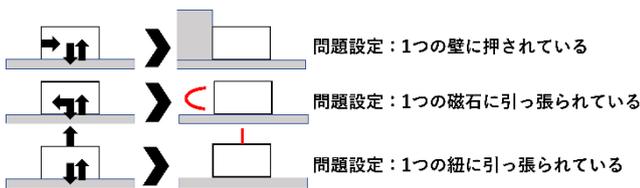


図 4 EBPP システムのフィードバック例

4. 発話プロトコル分析

実験では発話プロトコル分析を用いた。発話プロトコルを用いた理由として、発話内容を記録することで、繰り返し実験内容を確認できるためである。

発話プロトコル分析とは、実験を行う際、被験者が課題を遂行中に頭に浮かんだ言葉や考えたことをそのまま即座に口に出し、それを動画などで記録する手法である⁽⁴⁾。その際の注意点として、観測者は被験者の思考に関与してはならないため、被験者にヒントを与えてはいけない点がある。さらに、プロトコルとそのときの行動からのみわかることの理由を考えるため、

観測者が勝手に想像して記録してはいけない点がある。

発話プロトコル分析では、頭の中で思い浮かんだことや考えたことを声に出しながらシステムを触ってもらい、その発話内容からわかることを分析していく。発話プロトコル分析の具体例を図 5 に示した。この具体例であげた発話内容からわかることとして、「あれ！？自分のカードの可視化と正しいカードの可視化の結果が違う。てことは、何かが違うってことだよな…」という発話から、学習者は自身の解答が誤っていることに気がついているが、どこで誤っているのかには気がついていないことがわかる。このように学習者の発話内容からわかることを分析していく。

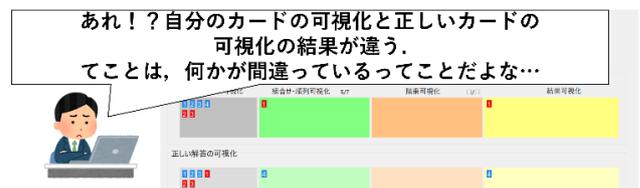


図 5 発話プロトコル分析具体例

5. 評価実験

5.1 評価実験方法

本実験では工学部学生 11 名を対象に、被験者を A 群 6 名と B 群 5 名に分けて調査を行った。調査対象である 2 つのシステムのフィードバックがどのように学習者に伝わっているのか、上記 2 つの群の発話内容とアンケート結果から計測する。また、学習者がシステム使用中、誤った解答をした際、なぜ自分の解答では誤りなのかということを考えているかを計測する。さらに、2 つのシステムのフィードバックの妥当性や示唆性を測定する。以上の 3 つを目的に実験を行った。

A 群は場合の数システム→EBPP システムの順番で、B 群は EBPP システム→場合の数システムの順番で発話プロトコルを用いて発話内容を記録した。これは、2 つのシステムに取り組む順番を固定することによって、発話プロトコル法での発話が初めての被験者の発話量がシステム間で偏ること、そして 1 つ目のシステムの効果が 2 つ目に取り組んだシステムに影響してしまうこと、これらの影響がある危険性があるからである。順番を入れ替えた 2 群を設けることにより、ある結果がシステムのフィードバックによるものか、順番によるものかを推測することができる考えた。

5.2 発話分析方法

本節では記録した発話の分析方法について説明していく。今回の分析では、被験者の発話の中でも、特に被験者がシステムからフィードバックをうけた後の発話に注目した。それらの発話から(1)「フィードバックの解釈」と「修正の検討」に言及しているものをピックアップし、その中から(2)「～だから～である」という理由に言及している発話をピックアップした。そして、(3)ピックアップした発話に属性を付与し、その属性をもとに(4)顕在性、もっともらしさ、示唆性に発話を分類した(図6)。これらについて順に説明していく。

(1)として、発話について「フィードバックの解釈」と「修正の検討」に言及しているものをピックアップした。被験者はシステムからのフィードバックをうけた後、フィードバックの内容を認識し、(A)被験者なりにフィードバックの内容を解釈する。そして、(B)被験者はフィードバックの解釈に基づいて修正を行う。このことから被験者の発話の「(A)フィードバックの解釈」と「(B)修正の検討」に言及しているものをピックアップした。具体例として「人は重力に引っ張られていて、えーと、人は一つの紐に引っ張られている、初速がかかっている」という発話を、フィードバックに言及しているため「フィードバックの解釈」とした。また、「あと、初速してんのは足元がいちばん初速の大きさとして大きいからこうなる」という発話を、解答の修正に言及しているために「修正活動」とした。

次に、(2)として「～だから～である」という理由に言及している発話をピックアップした。さらに「修正の検討」に言及した発話については、理由に言及していてもフィードバックに言及せずに修正をしている発話もあったため、フィードバックに言及した上で理由を述べた発話に限定した。具体例として「下向きの力のみだと地面に落下した。地面を突き破るのはおかしいから下向きの力を消してみよう」というものがある。

次に(3)として、ピックアップした発話に属性を付与した。ピックアップした発話はすべて「理由(～だから)と結果(～である)」のセットになっており、属性は理由と結果のそれぞれに付与した。付与する属性は4種類ある。1つ目は「地面に落下した」のようなシステムから与えられたフィードバック(自分の解答にそったふるまい)について言及しているものを「フィー

ドバック」とした。なお、(2)までの工程でピックアップされた発話は「理由と結果のセットである」かつ「フィードバックに言及している」発話となっているので、全ての発話のセットには、「フィードバック」の属性を持つ発話が含まれる。2つ目は「下向きの力のみだ」とのような被験者自身の今の解について言及しているものを「自分の解」とした。3つ目は「地面を突き破るのはおかしいから」のようなふるまいの正しさやおかしさについて言及しているものを「正しいふるまい」とした。4つ目は「下向きの力を消してみよう」のような解答をどうすべきか(どのように修正するのか)について言及しているものを「修正」とした。

そして最後に、被験者の発話を以上の4つに属性に付与した後、(4)としてこの属性をもとに顕在性、もっともらしさ、示唆性に分けていく。顕在性、もっともらしさ、示唆性についての関係を図7に示した。

まず、顕在性の分類方法について説明する。顕在性とは、EBSのフィードバックと正しいふるまいの差の程度を示したものであり、これが十分でないと学習者は誤りに気づくことができない。そのため、システムのフィードバックと正しいふるまいと比較して誤りを認識している発話は顕在性についての発話といえる。よって本研究では、「フィードバック」と「正しいふるまい」のセットの発話を顕在性の発話とした。

次に、もっともらしさの分類方法について説明する。もっともらしさとは、EBSのフィードバックが学習者自身の解答に基づいているものだと納得できるかどうかをあらわしたものである。そのため、システムのフィードバックと学習者の解答に言及した発話はもっともらしさについての発話といえる。よって本研究では「フィードバック」と「自分の解答」のセットの発話をもっともらしさの発話とした。

最後に、示唆性の分類方法について説明する。示唆性とは、EBSのフィードバックが学習者の修正すべき点を適切に示唆しているかどうかを示したものである。そのため、EBSのフィードバックに基づいて修正を行っている発話は示唆性についての発話といえる。よって本研究では、「フィードバック」と「修正」のセットの発話を示唆性の発話とした。

このように発話を分類することで、本研究では調査対象のシステムの顕在性、もっともらしさ、示唆性に

ついて分析を行った。また、本来は分類分けを行った後、顕在性やもっともらしさ、示唆性について正しい認識や正しい修正を行えているのかを分析する必要がある。しかし、今回は分類分けまでを行った。

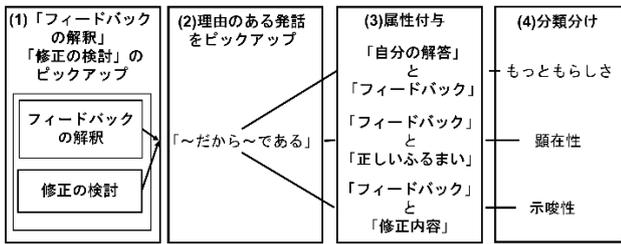


図 6 発話分析方法

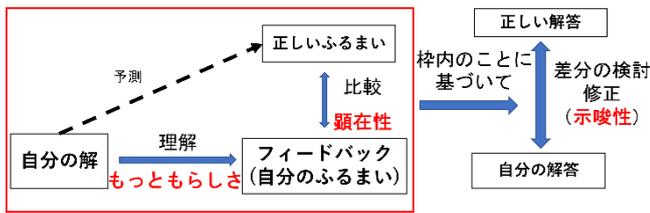


図 7 顕在性、もっともらしさ、示唆性の関係

6. 発話の分析結果

6.1 場合の数の発話の分析結果

本節では、場合の数システムを使用している際の発話の問題箇所を説明する。学習者が詰まる様子を見せた問題として、カードの組合せにおいて隣り合わない並び方があった。

この問題の正解時、被験者から見られた発話として、「赤色を設置できるのが 5 か所あって、その中から 3 つ選ぶのか」のように正しい認識ができていたものが見られた。しかし、「さっき 5C3 でダメだったから、次 5P3 でやってみよう。正解と回答がおなじっぽいから」、「えーと、あれ、隣、5P3 だとそうっぽい」のような解答に理由が見られない発話も被験者から見られた。

このように理由もなく解答する原因として、被験者が選択できる式の数が少ないことがあげられる。実際に被験者からも「なんか赤いカード 3 枚あって、そのそれを取りあえず順番決めてからできるのかなと思って 3P いくつとかの選択数があるかなと思ったけど、なくて」や、「あ、これ、学習として考えた場合に選択肢がちょっと少なすぎるかとは思いますが」のように選択肢に関する発話が見られた。上記より、選択肢が少ないことで、被験者の解答が誤っていた場合も被験者の考えを反映できる式が存在せず、総当たりを行わせ

てしまったのではないかと考えられる。

また、5 章述べた発話の分析方法をもとに被験者の発話を顕在性、もっともらしさ、示唆性に分類した。実際に被験者の発話で分類したものを表 1 に記載する。

顕在性と分類できる発話として、「そこまではあって赤のカードもあってる。パターン変更何回か押してみても、特に違いがなさそうだし」というものがある。もっともらしさと分類できる発話として、「その時点でもうすでに違うから、4C3 は違うとして」というものがある。示唆性と分類できる発話として「まあでもこの時点で足されてる数が違うから、じゃあ違うってことか。階乗さっき 3 枚だけだったから全部の枚数を選んでみるかな」というものがある。

表 1 場合の数システム被験者の発話の属性と分類

被験者の発話	属性	分類
そこまではあって赤のカードもあってる	フィードバック	顕在性
特に違いがなさそうだし	正しいふるまい	
その時点でもうすでに違うから	フィードバック	もっともらしさ
4C3 は違うとして	自分の解答	
まあでもこの時点で足されてる数が違うから	フィードバック	示唆性
階乗さっき 3 枚だけだったから全部の枚数を選んでみるかな	修正	

6.2 EBPP 発話の分析結果

被験者の多くが誤った問題として、「人には初速がかかって。人は滑らかな床の上を滑っている」時の力を入力するというものがあった。誤答例として、中央から右方向に力を伸ばす誤答を行っていた。フィードバックを受けた後、このような発話を行っていた。「磁石に引っ張られてるっていうとこだけ違うから、やっぱり右向きの矢印にするのはあってることだから、場所が違うのか」や「磁石に引っ張られている。重力が無い空間にいる。右上のところに書かれている。しかし、初速がかかっている。磁石に引っ張られている。人は右に移動している。ということから、右向きの矢印では正しいのだろう」このように右向きに力を入れることが正しいとフィードバックを受けた後も学習者は考えている。さらに、右向きへの力に関する発話はこれ以外にも正解後で見られた。「正解、あっそうなんだ。上と下。床から押す力と重力の 2 つだけで右に進むんだ。へー」や「えっどういうこと。右に移動するだから、右に書かなくてもいいのか。よくわからん」というように正解に右向きの力がないことに違和感や

納得のいっていない様子が見られた。このように右向きに力を入れていた被験者は7人中6人だった。

上記のように、右向きに力がないことに被験者が納得できない理由として、以下のことが考えられる。生成された問題設定と提示された問題設定どちらにも「人は右に移動している」というフィードバックが与えられている。このことから被験者は、右向きに力を入れることは正しいと誤った認識をした可能性がある。

また、被験者から正解に違和感を覚えている様子や、「これだと多分。これでいいんだ」という発話から、誤り前提で解答をしている様子が見られた。被験者が誤り前提で問題を解いていることから、被験者はフィードバックの内容を正しく理解できていない。そのため、被験者はどのように修正すれば正解になるのかを考えずに解答を行っているといえる。

また、5章で述べた発話の分析方法をもとに被験者の発話を顕在性、もっともらしさ、示唆性に分類した。実際に被験者が問2に取り組んでいる際の発話で分類できたものを表2に記載する。

表 2 EBPP システム被験者の発話の属性と分類

被験者の発話	属性	分類
重力に従って右下に引っ張られていたから	フィードバック	顕在性
ふつうは床があれば下に行くことはないから	正しい ふるまい	
宇宙に行くわけか。これだと一つのひもに引っ張られている。人は一つの磁石に貼られている。能力は重力がない空間にいる。初速がかかっている。人は減速しながら右向きに移動している。人には初速がかかっている	フィードバック	もっともらしさ
そうなら摩擦の大きさがたりなかったのか	自分の解答	
重力に従って右下に引っ張られていたから	フィードバック	示唆性
床が重力に反作用して床が重力に反発する作用がある	修正	

顕在性と分類できる発話として、「重力に従って右下に引っ張られていたから、ふつうは床があれば下に行くことはないから」というものが見られた。もっともらしさと分類できる発話として、「宇宙に行くわけか。これだと一つのひもに引っ張られている。人は一つの磁石に引っ張られている。能力は重力がない空間にいる。初速がかかっている。人は減速しながら右向きに移動している。人には初速がかかっている。そうなら摩擦の大きさがたりなかったのか」というものが見られた。示唆性と分類した発話として、「重力に従って右下に引っ張られていたから、ふつうは床があれば下に

行くことはないから、床が重力に反作用して床が重力に反発する作用がある」というものが見られた。

被験者の多くが示唆性の発話において、誤った修正を行っている様子が見られた。このことから示唆性に問題がある可能性が示唆された。

7. おわりに

本稿では、誤りの可視化を応用したシステムを用いて評価実験を行い、学習者の発話から問題点を分析した。分析結果から学習者がフィードバックの内容を正しく理解できない、誤り前提で解答を行ってしまう、根拠のない解答を行ってしまう、理由なく解答の修正を行ってしまうという問題点が見つかった。今後の課題として、被験者の発話からえた顕在性、もっともらしさ、示唆性に関して、正しい認識や修正を行っているものを計測することが挙げられる。さらに計測の結果からどのような誤りに対して誤った認識をしているのかを分析することが必要である。

さらに、この問題点を解決する手法を提案することがあげられる。また、提案した手法をシステムに実装することと、提案した手法が学習者の能力向上に繋がっているのかを調べるために評価実験を行っていく。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP22K12322, JP21H03565, JP20H01730 の助成による。

参考文献

- (1) 平嶋宗, 堀口知也: “「誤りからの学習」を指向した誤り可視化の試み”, 教育システム情報学会誌, Vol.21, No.3, pp.178-186 (2004)
- (2) 白戸晟真, 東本崇仁: “問題解決過程の可視化による場合の数学学習支援システム”, 電子情報通信学会技術研究報告(ET), Vol.121, No.406, pp.25-30, (2022)
- (3) 相川野々香, 齊藤寛, 古池謙人, 東本崇仁: “力学における学習者の誤りに基づいた問題提示 (Error-based Problem Posing) システムの開発”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J106-D, No.2, in press, (2023)
- (4) 加藤隆: “認知インターフェース”, オーム社出版局 (2002)