

## 誤り可視化演習と構造的記述演習の順序効果の検証

## Verification of the order effect of Error-Based Simulation and Structural Description Exercises

井門 匠<sup>\*1</sup>, 倉山 めぐみ<sup>\*2</sup>, 平嶋 宗<sup>\*1</sup>Takumi IMON<sup>\*1</sup>, Megumi KURAYAMA<sup>\*2</sup>, Tsukasa HIRASHIMA<sup>\*1</sup><sup>\*1</sup>広島大学大学院先進理工系科学研究科<sup>\*1</sup>Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University<sup>\*2</sup>函館工業高等専門学校<sup>\*2</sup>National Institute of Technology, Hakodate College

Email: m245231@hiroshima-u.ac.jp

**あらまし:**本研究では力学学習において、学習者自身の誤りを作図シミュレーションによって提示する「誤り可視化演習 (EBS)」と、運動状態と物理量の関係を表形式で整理させる「構造的記述演習 (SDE)」の実施順序が学習効果に与える影響を検証した。実験による比較の結果、SDE 先行条件と比較して EBS 先行条件で有意に高い成績が確認され、「誤りの自覚 (EBS)」と「構造的整理 (SDE)」を演習上で適切に配置することの重要性が示唆された。

**キーワード:** 誤り可視化, EBS, 運動状態の構造的記述演習, SDE

## 1. はじめに

力学において物体の運動を理解するには、運動方程式を立てて解く必要がある。この過程では、対象となる物体のみを取り出し、作用している全ての力を矢印で表した図を描き、その図に基づいて、力・加速度・速度の関係を踏まえながら、運動状態を整合的に記述しなければならない。物理教育研究においては、このような図を自由物体図 (free-body diagram) と呼び、力学問題解決の成否と強く結びつく表現として位置づけている<sup>(1)</sup>。しかし、初学者はしばしば、力の向きや大きさを誤った作図や、加速度・速度との関係の取り違いなど、運動状態の理解に関する誤りを抱えたまま学習を進めてしまうという問題がある。この課題に対する演習手法として誤り可視化演習 (Error-Based Simulation; EBS)<sup>(2-4)</sup>と構造的記述演習 (Structural Description Exercise; SDE)<sup>(5)</sup>が提案されている。EBS は学習者の誤った図に基づき「その考えが正しければどう動くか」をシミュレートする手法であり、学習者の誤った理解に起因する作図の不整合を可視化することで認知的葛藤を誘発する。一方 SDE は、物体の運動を複数の状態に分割し、各状態において働いている力・加速度・速度などを「状態×物理量」の表形式で記述させることにより、力学知識を構造として明示的に組織化させることを支援する。

## 2. 先行研究

高等専門学校での実践利用において、EBS 実施後に SDE を実施したところ、有意な追加的学習効果が得られることが報告されており<sup>(6)</sup>、EBS で十分な得点向上が見られなかった学習者に対しても、SDE を続けて実施することで成績が改善することが示唆されている。しかし、この結果からは「SDE のみ、あ

るいは SDE を先行させる構成でも同様の効果が得られるのではないか」という仮説 (仮説 1) と EBS の、誤りの意識化と修正の動機づけという独自の役割から「EBS を先行させる構成のほうがより高い学習効果をもたらすのではないか」という仮説 (仮説 2) が考えられる。

## 3. 研究目的

本研究では、この 2 つの仮説を検証することを目的として、EBS と SDE の演習順序の違いが、力学学習における誤りの修正に与える影響を検証した。

## 4. 実験内容

初等力学の履修を終えた高等専門学校 3 年生 42 名を対象に SDE→EBS の順で演習を実施し (SDE-EBS 群)、先行研究における EBS→SDE の順で同一内容の演習を実施した結果 (EBS-SDE 群)<sup>(6)</sup>と事前テスト、1 回目演習後テスト (EBS-SDE 群では EBS 後、SDE-EBS 群では SDE 後)、2 回目演習後テスト、遅延テストの正答数の変化を比較する。テストでは、基礎的な自由物体図の作成が要求される学習課題 6 問と、より複雑な物体の遷移状況での作成を要する転移課題 4 問を実施している。

## 5. 学習課題の分析

両群内で学習課題の事前・各演習後・遅延テストの正答数 (全 6 問) を比較した。多重比較による分析の結果、EBS-SDE 群と SDE-EBS 群の両群で、事前テストから 1 回目演習後、2 回目演習後、遅延テストへと平均正答数が一貫して増加し、いずれの比較においても有意な向上が確認された ( $p < .05$ , 表 1)。このことから、いずれの順序においても EBS と SDE を統合した二段階演習が学習課題に対して一定

の学習効果を有することが示された。

表 1 EBS-SDE 群と SDE-EBS 群の学習課題における平均正答数の多重比較

	<i>t</i> 値	<i>p</i> 値	効果量 <i>d</i>	
EBS-SDE群	事前-EBS後	-8.12	.000	-1.50
	事前-SDE後	-10.84	.000	-1.98
	事前-遅延	-9.54	.000	-1.61
SDE-EBS群	事前-SDE後	-5.63	.000	-0.99
	事前-EBS後	-8.86	.000	-1.63
	事前-遅延	-7.63	.000	-1.31

一方、群間比較では、集団ごとの初期知識や学習能力の差異が結果に混入する懸念を最小限に抑えるため、事前テストを共変量とした共分散分析を行った。結果、1回目・2回目演習後テストのいずれにおいても、EBS-SDE 群の正答数が SDE-EBS 群を有意に上回った。また遅延テストについても、EBS-SDE 群が有意傾向で上回った ( $p < .10$ , 表 2)。以上より、順序条件間で成績差が観察され、EBS 先行条件が有利に働く可能性が示された。

表 2 EBS-SDE 群と SDE-EBS 群の学習課題における平均正答数の共分散分析

	EBS-SDE群 SDE-EBS群		<i>p</i> 値	効果量 <i>d</i>
	平均値	平均値		
1回目演習後	3.83	2.67	.003	.697
2回目演習後	4.46	3.68	.040	.468
遅延	4.01	3.34	.085	.390

## 6. 転移課題の分析

転移課題(全4問)についても、多重比較の結果、EBS-SDE 群では EBS 後から SDE 後にかけて有意な正答数の増加が確認された。一方、SDE-EBS 群での改善は限定的であった(表 3)。学習課題と同様に、事前テストを共変量とした共分散分析を実施した結果、2回目演習後テスト時点の成績で EBS-SDE 群が SDE-EBS 群を有意に上回る傾向が得られた(表 4)。総じて、転移課題においても学習課題と同様に、EBS 先行条件で相対的に高い成績が得られる傾向が示唆された。

表 3 EBS-SDE 群と SDE-EBS 群の転移課題における平均正答数の多重比較

	<i>t</i> 値	<i>p</i> 値	効果量 <i>d</i>	
EBS-SDE群	EBS後-SDE後	-3.42	.004	-.300
	EBS後-遅延	-2.28	<i>ns</i>	-.269
	SDE後-遅延	0.15	<i>ns</i>	.018
SDE-EBS群	SDE後-EBS後	-1.42	<i>ns</i>	-.180
	SDE後-遅延	-1.80	<i>ns</i>	-.251
	EBS後-遅延	-0.68	<i>ns</i>	-.077

表 4 EBS-SDE 群と SDE-EBS 群の転移課題における平均正答数の共分散分析

	EBS-SDE群 SDE-EBS群		<i>p</i> 値	効果量 <i>d</i>
	平均値	平均値		
1回目演習後	1.53	1.16	.178	.304
2回目演習後	1.95	1.36	.026	.508
遅延	1.91	1.47	.118	.354

## 7. 考察とまとめ

両順序条件において、事前テストから演習後・遅延テストへと成績が向上したことから、EBS と SDE を組み合わせた二段階演習自体が、力の作図課題および転移課題の理解に有効であることが確認された。一方で、群間比較の結果、EBS-SDE 群が SDE-EBS 群を一貫して上回った。EBS は、学習者自身が作成した自由物体図に基づき「自分の考えが正しければこう動くはずだが、現実とは異なる」という不整合を可視化することで、認知的葛藤と誤りへの気づきを喚起する手法である。今回の結果は、この「誤り可視化」によって修正の必要性が強く意識された状態で SDE による構造的記述に取り組むことが学習者に対してより大きな改善をもたらすことを示唆している。これは、設定した 2 つの仮説の内、仮説 1 よりも仮説 2 と整合的な結果であり、EBS を先行させることで、誤りへの気づきと動機づけの喚起の役割が有効に機能したことが考えられる。本知見は、誤りの修正を目指す学習支援システムの設計において、単に正しい知識構造を提示・演習させるだけでなく、「誤りの自覚」と「構造的整理」を適切なシーケンスで配置することの重要性を示唆している。今後は、ログデータの詳細な分析による概念レベルでの概念変容プロセスのモデル化や、より長期的な保持効果の検証、および他領域への適用可能性の検討が課題となる。

### 参考文献

- (1) Rosengrant, D., Van Heuvelen, A., & Etkina, E.: “Do students use and understand free-body diagrams?”, *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, Vol.5, 010108 (2009)
- (2) 野田尚志, 平嶋宗, 柏原昭博, 豊田順一: “力学における誤り修正支援を目的としたフェイクシミュレーションの提案”, *人工知能学会誌*, Vol.10, No.4, pp.641–645 (1995)
- (3) 堀口知也, 平嶋宗, 柏原昭博, 豊田順一: “定性推論技法を用いた誤り可視化シミュレーションの制御”, *人工知能学会誌*, Vol.12, No.2, pp.285–296 (1997)
- (4) 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)
- (5) 磯貝通也, 倉山めぐみ, 林雄介, 平嶋宗: “Error-Based Simulation を用いた力学学習における運動状態構造的記述演習の開発と実験的評価”, *教育システム情報学会誌*, Vol.42, No.2, pp.232–242 (2025)