

令和5年度

修士論文

誤りの可視化を通じた学習における  
運動状態構造的記述演習の  
設計開発と実験的評価

指導教員 平嶋 宗 教授

広島大学大学院 先進理工系科学研究科

博士課程前期 先進理工系科学専攻

情報科学プログラム

M220275

磯貝 通也

令和6年2月6日 提出

## 概要

Motion Implies a Force (MIF) 素朴概念は「運動している物体には必ず進行方向に力が働いている」とする誤概念であり、力学を学ぶ際の妨げになると考えられる。物理学を履修した後も MIF 素朴概念が残る学習者は非常に多く、その修正は難しいことが分かっている。

Error-Based Simulation (EBS) は学習者の導出した答えや仮説に基づいて得られた事象と正しい事象の差異を可視化する手法であり、自ら誤りに気付かせることで誤り修正を内発的に動機づける。力学における EBS では、運動する物体について学習者が力の作図をし、その作図からなる物体の挙動をシミュレートすることで誤りの可視化を行っており、多くの実験的利用を通して MIF 素朴概念修正に対する効果が示されている。

しかし、EBS 利用だけでは作図を修正できない、或いは作図を修正した場合においても運動状態を正しく理解できない場合があることが先行研究によって報告されている。作図ができて運動状態が理解できていない学習者は作図と運動状態の結びつきができていないと考えられ、作図が修正できない学習者に対しても同様の課題があると考えられる。

そこで本研究では作図と運動状態を結び付けることを目的とし、新たな運動状態の表現方法として表を提案し、作表プロセスを経験することを指向した運動状態構造的記述演習 (Structural Description Exercise, SDE) システムの設計開発を行った。

EBS 利用後に SDE を利用することによる学習効果を調べるために、2022 年度、2023 年度の二度にわたり、高等専門学校三年生を対象にシステムの実験的利用を実施した。どちらも EBS と SDE を順に演習し、演習前の事前テスト、EBS 利用後及び SDE 利用前の EBS 後テスト、SDE 利用後の SDE 後テストで力の作図を行わせ学習効果を測った。また、演習の学習効果の持続を調べるために 2022 年度は実験の約一年後、2023 年度は実験の約一週間後に遅延テストを行っている。

結果として、2022 年度では、EBS 後テストに対して SDE 後テストで有意に誤答が減少したため、SDE による学習の積み上げ効果が確認でき、また事前テストと遅延テストで有意に誤答が減少していることから学習効果の定着が示唆されている。MIF 誤答 (MIF 素朴概念を含んだ誤答) に焦点を絞った場合、EBS 後テストの MIF 誤答数に対して SDE 後テストに有意に減少しており、MIF 素朴概念に対する SDE による積み上げ効果が示唆された。事前テストに対する遅延テストにおいて有意な減少が見られなかったが、事前において MIF 誤答数が多かった学習者により効果があったと考え、事前における MIF 誤答数が多い群と少ない群に分けて分析を行ったところ、事前において MIF 誤答数が多かった群については事前と遅延で有意な減少が見られたため、MIF 誤答数の多かった学習者に対しては定着した学習効果が得られていたことが示唆されている。事前において MIF 誤答数が少なか

## 概要

った群については、事前と遅延で誤答数の有意な減少が見られなかったため、元々理解度の高かった学習者により高い学習効果を与えるまでには至っていないと考えられる。

2023年度では、EBS 後テストに対して SDE 後テストにおいて有意に誤答が減少しており、SDE による学習効果の積み上げが確認できた。また、事前と遅延においても有意な誤答の減少が見られ、学習効果が定着していることが示唆された。MIF 誤答については、EBS 後テストに対する SDE 後テストにおいて有意に MIF 誤答数が減少しなかったために、SDE による学習効果の積み上げが MIF 誤答では見られなかった。しかし、EBS 後テストでの MIF 誤答数が多い群においては効果がある可能性があると考え分析したところ、EBS 後テストにおける SDE 後テストの MIF 誤答数の有意な減少が確認できた。事前に対する遅延の MIF 誤答数は全体において有意な減少が見られた。

これらの結果より SDE は、EBS と組み合わせることで運動状態の理解に対する学習効果を積み上げることができ、また MIF 素朴概念をもともと多く持っている、或いは EBS 利用後でも MIF 素朴概念を修正できなかった学習者に対して特に MIF 素朴概念の修正効果がある演習であることが示唆された。

# 目次

概要.....	i
目次.....	iii
図索引.....	v
表索引.....	vi
第1章 はじめに.....	1
第2章 背景.....	3
2.1 MIF 素朴概念.....	3
2.1.1 MIF 素朴概念とその種類.....	3
2.1.2 MIF 素朴概念を持つ学習者の多さ.....	5
2.1.3 MIF 素朴概念修正の困難性.....	6
2.2 Error-Based Simulation による誤りからの学習.....	8
2.2.1 誤りからの学習.....	8
2.2.2 力学における Error-Based Simulation.....	8
2.2.3 作図と運動状態の結び付けに対する課題点.....	9
第3章 運動状態構造的記述演習.....	11
3.1 表としての運動状態の表現.....	11
3.2 運動状態構造的記述演習.....	11
3.2.1 運動状態の分節化.....	12
3.2.2 運動状態の詳細化.....	14
第4章 演習システムの実験的利用.....	17
4.1 2022 年度実験的利用.....	17
4.1.1 目的と手順.....	17
4.1.2 EBS と SDE の課題達成状況.....	18
4.1.3 学習課題の結果と分析.....	18
4.1.4 EBS と SDE の関係分析.....	23
4.1.5 転移課題の結果と分析.....	24
4.1.6 アンケート結果.....	25
4.2 2023 年度実験的利用.....	26
4.2.1 目的と手順.....	26
4.2.2 EBS と SDE の課題達成状況.....	26
4.2.3 学習課題の結果と分析.....	27
4.2.4 EBS と SDE の関係分析.....	30

## 目次

4.2.5 転移課題の結果と分析 .....	31
4.2.6 自信度に関する分析 .....	32
4.2.7 アンケート結果 .....	34
4.3 全体的な考察.....	37
第5章 まとめと今後の課題 .....	38
謝辞.....	39
参考文献 .....	40
研究業績 .....	41
付録.....	42
付録1 SDE のデモ映像.....	42
付録2 テスト問題.....	43
2022 年度テスト用紙 .....	43
2023 年度テスト問題 .....	49
付録3 アンケート用紙.....	55
2022 年度アンケート用紙.....	55
2023 年度アンケート用紙.....	57

## 図索引

図 1 MIF 素朴概念の例 1 .....	4
図 2 MIF 素朴概念の例 2 .....	4
図 3 MIF 素朴概念の例 3 .....	5
図 4 水平面における力学台車の実験 .....	7
図 5 斜面における力学台車の実験 .....	7
図 6 EBS の作図画面 .....	8
図 7 EBS のシミュレーション結果 .....	9
図 8 多視点 EBS 作図画面 .....	9
図 9 運動状態の区切り選択 .....	13
図 10 区間・区切りの状態判別 .....	13
図 11 働いている力の選択 .....	15
図 12 物理量の定性値記述 .....	15
図 13 2022 年度学習課題における全誤答数の平均値の推移 .....	20
図 14 2022 年度学習課題における MIF 誤答数の平均値の推移 .....	20
図 15 2022 年度事前 MIF 多群における MIF 誤答数の平均値の推移 .....	21
図 16 2022 年度事前 MIF 少群における MIF 誤答数の平均値の推移 .....	21
図 17 2022 年度アンケート結果 .....	26
図 18 2023 年度学習課題における全誤答数の平均値の推移 .....	27
図 19 2023 年度学習課題における MIF 誤答数の平均値の推移 .....	28
図 20 2023 年度 EBS 後 MIF 多群における平均値の推移 .....	28
図 21 2023 年度アンケート結果 .....	36

## 表索引

表 1 FCIにおける素朴概念による誤答率 (%) ([3]より引用) .....	6
表 2 作表プロセスにおける表の原型 .....	11
表 3 運動状態による合力・加速度・速度の関係 .....	14
表 4 運動状態の区切り選択後の表 (区切りが1つの状態でない場合) .....	14
表 5 運動状態の区切り選択後の表 (区切りが1つの状態である場合) .....	14
表 6 働いている力の選択後の表.....	16
表 7 物理量の定性値記述後の表.....	16
表 8 2022年度学習課題における全誤答数 .....	21
表 9 2022年度学習課題の全誤答数における多重比較 (自由度 37) .....	22
表 10 2022年度学習課題における MIF 誤答数.....	22
表 11 2022年度学習課題の MIF 誤答数における多重比較 (自由度 37) .....	22
表 12 2022年度事前 MIF 多群における MIF 誤答数 .....	22
表 13 2022年度事前 MIF 少群における MIF 誤答数 .....	23
表 14 2022年度事前 MIF 多群の学習課題の MIF 誤答数における多重比較(自由度 36) .....	23
表 15 2022年度事前 MIF 少群の学習課題の MIF 誤答数における多重比較(自由度 36) .....	23
表 16 2022年度演習の達成状況による各分類の課題数.....	24
表 17 2022年度 SDE 達成に対する各分類における事前・EBS 後・SDE 後の残差分析 (全誤答数・正答数と MIF 誤答数・その他解答数それぞれで分析, ▲が有意に大き く▽が有意に小さい (有意水準 5%)) .....	24
表 18 2022年度転移課題における全誤答数 .....	25
表 19 2022年度転移課題の全誤答数における多重比較 (自由度 37) .....	25
表 20 2022年度転移課題における MIF 誤答数.....	25
表 21 2022年度転移課題の MIF 誤答数における多重比較 (自由度 37) .....	25
表 22 2023年度学習課題における全誤答数 .....	28
表 23 2023年度学習課題の全誤答数における多重比較 (自由度 41) .....	29
表 24 2023年度学習課題における MIF 誤答数.....	29
表 25 2023年度学習課題の MIF 誤答数に対する多重比較 (自由度 41) .....	29
表 26 2023年度学習課題の EBS 後 MIF 多群における MIF 誤答数 .....	29
表 27 2023年度学習課題の EBS 後 MIF 多群に対する多重比較 (自由度 16) .....	30
表 28 2023年度演習の達成状況による各分類の課題数.....	30

## 表索引

表 29 2023 年度 SDE 達成に対する各分類における事前・EBS 後・SDE 後の残差分析 (全誤答数・正答数と MIF 誤答数・その他回答数を分けて分析, ▲が有意に大き く▽が有意に小さい(有意水準 5%))	31
表 30 2023 年度転移課題における全誤答数	31
表 31 2023 年度転移課題の全誤答数における多重比較(自由度 41)	31
表 32 2023 年度転移課題における MIF 誤答数	32
表 33 2023 年度転移課題の MIF 誤答数における多重比較(自由度 41)	32
表 34 各テストの各解答における自信度の分布	33
表 35 EBS 利用前の MIF の自信度の高さに対する EBS 利用後の正誤のクロス集計表	33
表 36 SDE 利用前の MIF の自信度の高さに対する SDE 利用後の正誤のクロス集計表	33
表 37 EBS 利用前の MIF の自信度の高さに対する EBS 利用後の MIF のクロス集計 表	33
表 38 SDE 利用前の MIF の自信度の高さに対する SDE 利用後の MIF のクロス集計 表	34
表 39 各演習利用前の自信度が低い解答に対する演習後の自信度の高さのクロス集計 表	34
表 40 各演習利用前の自信度が低い MIF 誤答に対する演習後の MIF 誤答の自信度の 高さのクロス集計表と残差分析の結果(▲が有意に大きく▽が有意に小さい(有意 水準 5%))	34

## 第1章 はじめに

成長する過程で身の回りの観察を通して自然に獲得する知識体系として、素朴概念が知られている[1]。素朴概念は日常生活における経験の中で多くの例を見て形成されるものであるため、修正することが困難であることが分かっている。

素朴概念の一種として、初等力学における **Motion Implies a Force (MIF)** 素朴概念が存在する[2]。これは、動いている物体には進行方向に力が働いているとする誤概念である。高等学校や大学で物理を履修した学習者でもその多くに **MIF** 素朴概念が残っていることが分かっており[3]、これまで様々な手法でその修正が試みられてきている[4]。

先行研究において、素朴概念の修正を動機づけるためには学習者自身が自らの誤りに気づく「誤りからの学習」が重要であるという考えのもと、学習者の出した答えや仮説に基づいて得られた事象と学習者が知っている事象の差異を可視化する学習支援方法として **Error-Based Simulation (EBS)** が提案されている[5]。日常生活で学習者が見た例における考え方に対して、**EBS** によって反例を作成し与えることで誤りからの学習を動機づけることに貢献していると考えられる。

力学における **EBS** では、運動する物体について学習者が力の作図をし、その力の作図から成る物体の挙動をシミュレートすることで誤りの可視化を行う。学習者は正しい挙動と自らの作図による誤った挙動を比較することで自らの誤りに気づき、**MIF** 素朴概念の修正が動機づけられる。**EBS** は多くの実験的利用を通して **MIF** 素朴概念の修正に対して効果があることが示唆されている[6]。

また、力だけでなく、加速度と速度についても矢印で作図をし、正解、力、加速度、速度の四つの挙動を比較することでパラメータ間の関係を理解することを指向して多視点 **EBS** が提案され、実験的利用を通して力の作図のみを行う単視点 **EBS** に対して学習効果を積み上げられることが示唆されている[7]。

しかし、実験的利用を通じてしばしば作図の修正ができない場合があり、その場合には学習効果が見られず、また、作図が修正された場合においても誤りの修正に至らない場合があることが分かっている。西岡ら(2021)は、概念マップを用いた多視点 **EBS** 利用前後における **MIF** 素朴概念の変容を観測する実験において、作図では **MIF** 素朴概念が修正されていても概念マップでは **MIF** 素朴概念が現れる学習者が存在することを示している[8]。この結果は、作図上で誤りが修正されても概念的には誤りが修正されていない場合があることを示しており、したがって、作図と運動状態を繋ぐ部分への支援の必要性を示唆するものである。作図の修正自体ができない場合においても作図と運動状態の関係づけに問題があると考えられるので、同様の支援が有用と期待できる。

そこで本研究では、作図と運動状態を繋げる新たな運動状態の表現手法としての表とそ

## 第1章 はじめに

の作表プロセスを定義し、プロセスを経験する運動状態構造的記述演習システムの設計・開発を行った。EBS 利用に対する SDE の学習効果を調べるために、2022 年度、2023 年度の二度、高等専門学校三年生を被験者として演習システムの実験的利用を実施した。どちらも EBS と SDE を順に利用し、演習前に事前テスト、EBS 利用後に EBS 後テスト、SDE 利用後に SDE 後テストを行わせることで学習効果を測った。また、演習の学習効果の持続を調べるために 2022 年度は実験の約一年後、2023 年度は実験の約一週間後に遅延テストを行った。

2022 年度では、EBS 後に対して SDE 後で有意に誤答が減少したため、SDE による学習の積み上げ効果が確認でき、また事前と遅延で有意に誤答が減少していることから学習効果の定着が示唆された。MIF 誤答数（MIF 素朴概念を含んだ誤答）に焦点を絞った場合、EBS 後の MIF 誤答数に対して SDE 後で有意に減少しており、MIF 素朴概念に対する SDE による積み上げ効果が示唆された。事前に対して遅延において有意な減少が見られなかったが、事前において MIF 誤答数が多かった学習者に対してより効果があったと考え、事前における MIF 誤答数が多い群と少ない群に分けて分析を行ったところ、事前において MIF 誤答数が多かった群については事前と遅延で有意な減少が見られたため、MIF 誤答の多かった学習者に対しては定着した学習効果が得られていたことが示唆されている。事前において MIF 誤答数が少なかった群については事前と遅延で誤答数の有意な減少が見られなかったため、元々 MIF 素朴概念をあまり持っていない、理解度の高かった学習者により高い学習効果を与えるまでには至っていないと考えられる。

2023 年度では、EBS 後に対して SDE 後において有意に誤答が減少しており、SDE による学習効果の積み上げが確認できた。また、事前と遅延においても有意な誤答の減少が見られ、学習効果が定着していることが示唆された。MIF 誤答については、EBS 後に対する SDE 後において有意に MIF 誤答数が減少しなかったため、SDE による学習効果の積み上げが MIF 誤答では見られなかったが、EBS 利用後でも MIF 素朴概念が残った学習者には効果があったのではないかと考え、EBS 後での MIF 誤答数が多い群について分析したところ、EBS 利用後における SDE 利用後の MIF 誤答数の有意な減少が確認できた。事前に対する遅延の MIF 誤答数は全体において有意な減少が得られた。

これらの結果より SDE は、EBS 利用後に用いることで、運動状態の理解に対する学習効果を積み上げることができ、また MIF 素朴概念をもともと多く持っている、或いは EBS 利用後でも MIF 素朴概念をあまり修正できなかった学習者に対して特に MIF 素朴概念の修正効果がある演習であることが示唆され、本研究の目標に適した結果が得られたと考えられる。

本稿では、まず第 2 章で背景となる MIF 素朴概念及び EBS について紹介し、第 3 章で運動状態の表現としての表、その作表プロセス及び SDE の内容、第 4 章で実験とその分析結果の考察、第 5 章でまとめと今後の課題について述べる。

## 第2章 背景

本章では、多くの学習者が持っていると思われる素朴概念と、その一種である初等力学における MIF 素朴概念について紹介し、MIF 素朴概念を持つ学習者が多いことが分かる調査と、その修正が困難であることを示した実験を紹介する。また、誤りに自ら気づき誤り修正の内発的動機づけを行うことで素朴概念を修正することを指向した EBS と、その MIF 素朴概念修正における有効性について紹介する。

### 2.1 MIF 素朴概念

#### 2.1.1 MIF 素朴概念とその種類

成長する過程で、日常経験から自然現象に対して作り上げられる自分なりの理解を素朴概念と呼ぶ[1]。この素朴概念はしばしば科学的に正しい概念と矛盾することとなり、科学的概念の獲得を困難なものにする。素朴概念は長い時間をかけ多くの例を見て形成される強固なものであるためその修正は容易ではなく、科学概念の学習後においても保持される場合が多いことが分かっている。

素朴概念の一種として、初等力学における Motion Implies a Force (MIF) 素朴概念が知られている[2]。この MIF 素朴概念は、(1) 運動の維持には等速であっても運動を引き起こす力が必要、(2) 特に明確な抵抗力があるときに運動を継続するには抵抗より大きい力が必要、(3) 運動の方向に働く力は物体の速度に応じて減ったり増えたりする、という 3 つの誤った考え方からなるとされている。例えば、空気抵抗及び摩擦の無い水平面上を、大きさを持たない物体が等速直線運動しているとき、物体には重力と床からの垂直抗力のみが働き力のつり合いがとれているが、多くの学習者は動いている方向に力が働いていると考えてしまう (図 1)。この誤りが (1) に分類される。また、摩擦のある水平な床の上で、物体を水平方向に一定の力で押し、その方向に物体が等速直線運動している時、重力と垂直抗力がつり合い、また動摩擦力と物体を押し力が釣り合っているが、摩擦力よりも物体を押し力の方が強いと考えてしまう誤り (図 2) が (2) に分類される。(3) には、物体が鉛直上向きに投げ上げられたとき物体には一定の重力が働き続けるが、頂点まで上昇するまでは上向きに働く力が徐々に小さくなっていき、頂点で静止する瞬間は力が働かず、下降し始めると下向きに働く力が徐々に大きくなっていくという誤り (図 3) などが分類される。

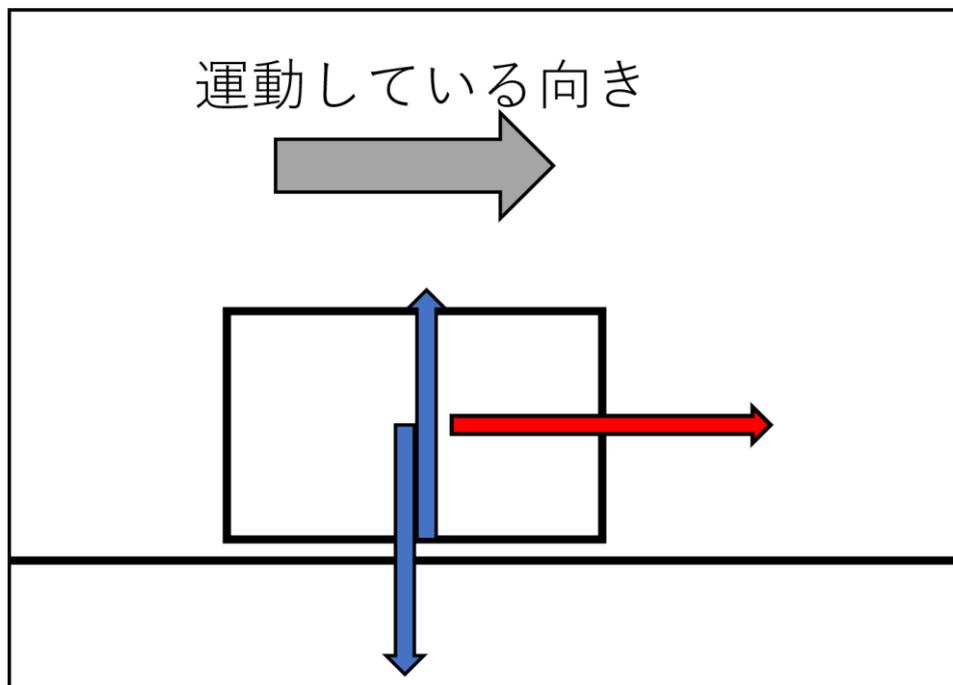


図 1 MIF 素朴概念の例 1

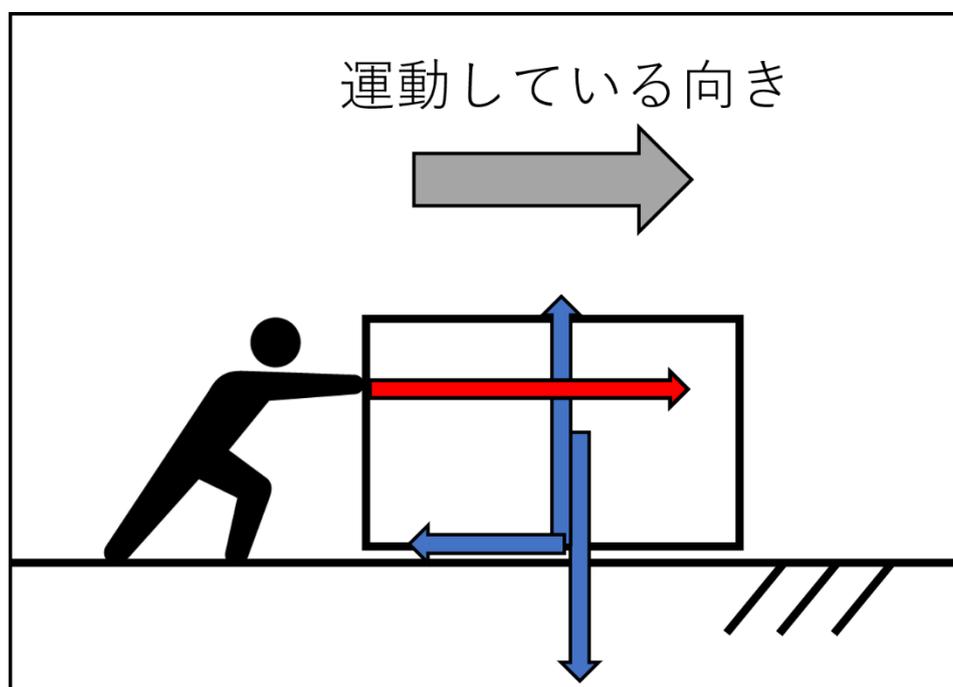


図 2 MIF 素朴概念の例 2

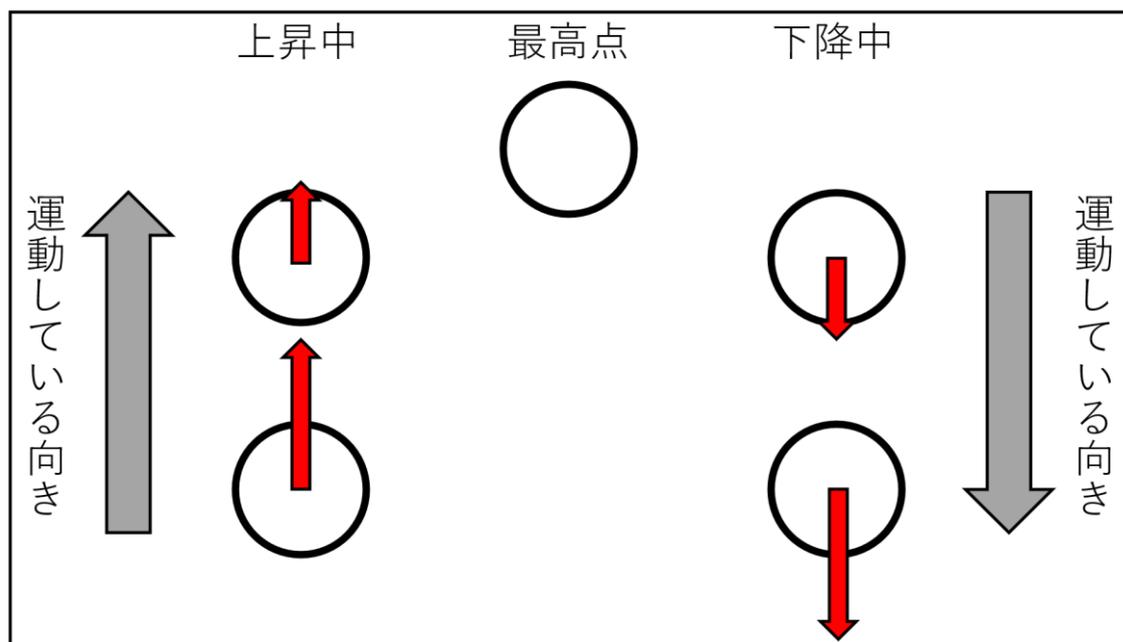


図 3 MIF 素朴概念の例 3

### 2.1.2 MIF 素朴概念を持つ学習者の多さ

2014 年から始まった、高等学校及び大学初年次の物理教育の現状を探る「物理教育の現状調査プロジェクト」での「力学概念調査」(Force Concept Inventory, FCI) で、高校生及び大学一年生を対象とし、基本的物理概念理解の調査が行われた[3].

その結果を表 1 に引用する. 結果として、大学一年生の物理Ⅱ既習者でも、MIF 素朴概念の (1) に該当する問題 A17 の誤答率は 44.0%, (2) に該当する問題 A15 の誤答率は 47.3%, (3) に該当する問題 A13 の誤答率は 36.5%となっている. 問題によっては半数以上の学習者が素朴概念による誤答をしており、素朴概念を持つ学習者が非常に多いことが示唆されている. 物理Ⅱを履修しても MIF 素朴概念は根強く残るため、力学を学習する上で大きな障害になると考えられる.

表 1 FCI における素朴概念による誤答率 (%) ([3]より引用)

問題	科目	内容	素朴概念	高・物理 未履修	高・物理 既習	大・物理 II 既習
A4	物理 基礎	作用反作用の法則	質量の大きなものは小さなものより大きな力を及ぼす	77.9	59.6	61.1
A30	物理	放物運動	撃力が残っている（進行方向に力が働く）	67.5	60.4	52.7
A15	物理 基礎	作用反作用の法則	加速の向きに押す物は押される物より大きな力を及ぼす（加速度運動で）	53.1	54.2	47.3
A17	物理 基礎	ニュートンの第一法則	等速度で動くときは、運動の向きに合力が働く	54.0	56.7	44.0
A13	物理 基礎	投げ上げ運動	上昇中に、減少し続ける上向き力が働く	43.5	42.0	36.5

### 2.1.3 MIF 素朴概念修正の困難性

MIF 素朴概念修正の困難性を示すために、MIF 素朴概念の修正を目的とした教材の開発と授業実践をした研究を紹介する。

山崎ら（2009）は、せんたくのりを溶かした水の中に振り子をつけ力学台車に乗せることで、振り子の傾きによって力を可視化した運動教材を開発した[4]。水平面上と斜面上での運動教材の振る舞いを説明する。水平面上では、運動教材を押したとき、力を与えた直後は慣性力により押した方向とは反対に振り子が傾き、等速直線運動を始めたなら振り子が鉛直下向きに戻る（図 4）。斜面上では、止まっているとき振り子は鉛直下向きになり、台車が動き出すと斜面に対して垂直に傾く（図 5）。つまり、台車に力が働かなければ振り子は鉛直下向きになり、台車に力が働き加速度を持つと振り子が傾くという違いにより、力の有無を可視化することで MIF 素朴概念が修正されることが期待されている。

中学生を対象にこの運動教材を用いた授業を行い、効果を確かめる実験が行われた。結果として、授業直後は等速直線運動中に働く力を正しく解答できた学習者が 60%を超えていたものの、1.5 カ月後には約 25%になった。また、等速直線運動中は一定の力が働き続けるといった MIF 誤答を含んだ解答は授業実践直後には 20%未満だったものの、1.5 カ月後には 60%以上となった。運動教材を使用していないクラスでの 1.5 カ月後の正答率は約 5%だったため、運動教材を使用した方が正答率は約 5 倍近く上がっていると言えるが、運動教材による学習の有無に関わらず等速直線運動中は一定の力が働き続けるといった解答が 50%を超える結果となった。

この実践結果から、MIF 素朴概念の修正効果を持続させることが困難であることが分か

## 第2章 背景

る。これは、この教材が正解を示すだけのものであり、学習者が持っている概念が何故誤りなのかを説明できておらず、学習者が自身の誤りに納得できていないことが原因であると考えられる。次節では、学習者が自身の誤りを納得し、学習するための手法について紹介する。

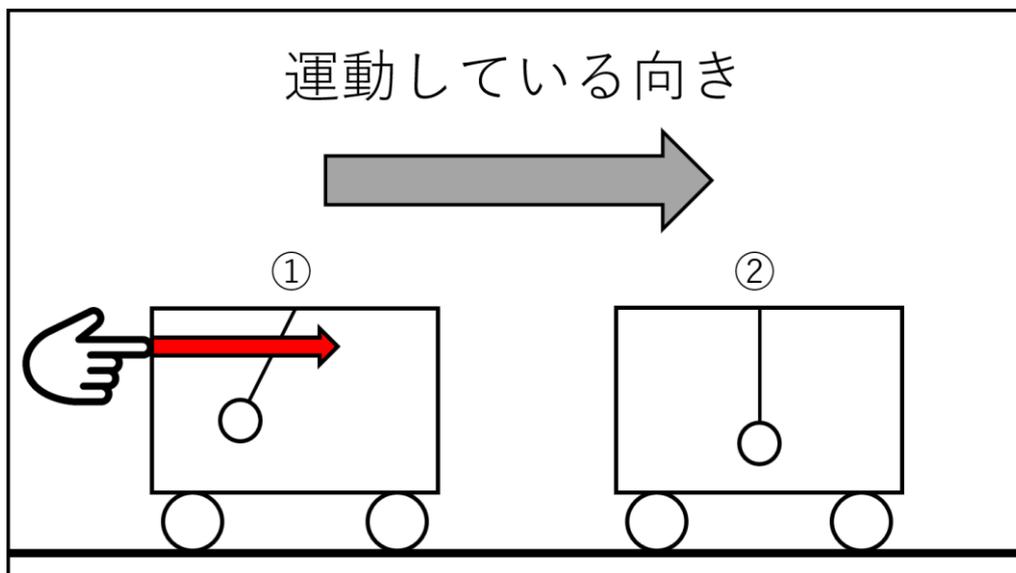


図 4 水平面における力学台車の実験

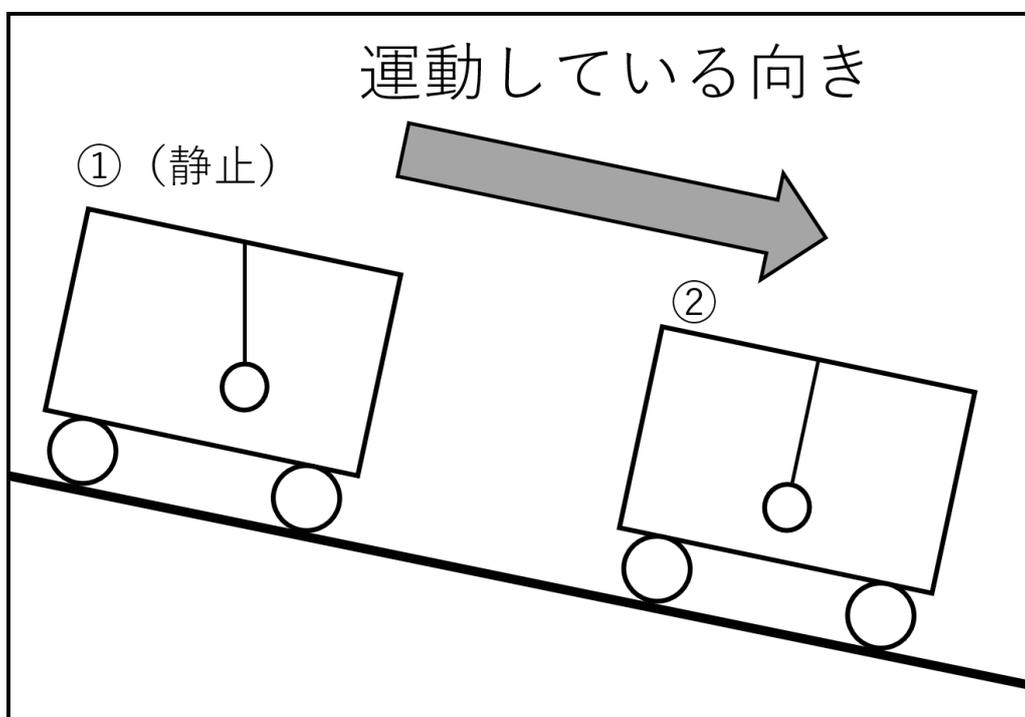


図 5 斜面における力学台車の実験

## 2.2 Error-Based Simulation による誤りからの学習

### 2.2.1 誤りからの学習

前節で述べた通り，MIF 素朴概念は長い時間をかけて多くの例を見て形成される強固な誤概念であり，その修正は困難である．そこで，学習者が自ら誤りに気付くことで認知的葛藤の生起及び誤り修正の内発的動機づけを行うことを目的とし，学習者の出した答えや仮説に基づいて誤りを含んだ事象を生成・可視化し，正しい事象との差異として誤りを顕在化する手法として，Error-Based Simulation (EBS) が提案されている[5]．

### 2.2.2 力学における Error-Based Simulation

力学における EBS では，学習者は運動する物体に対して矢印による力の作図を行い（図 6），その作図が誤っていた場合，その誤った作図を正しいものとして反映した物体の挙動をシミュレーションすることで誤りの可視化を行う（図 7）．学習者が想定する挙動と誤りシミュレーションの挙動の間に差異が生まれることで，学習者は自分の考え方が誤っていたことに気づき，誤り修正への内発的動機づけが与えられることが期待される．

この EBS における作図を，力だけでなく加速度と速度についてもそれぞれ行い（図 8），正解，力の作図，加速度の作図，速度の作図からなる 4 つの挙動を比較することでその関係の理解を指向した多視点 EBS が開発されている[7]．

これらの EBS は多くの実験的利用を通して MIF 素朴概念修正に有効性があることが報告されている（[6]-[8]）．



図 6 EBS の作図画面

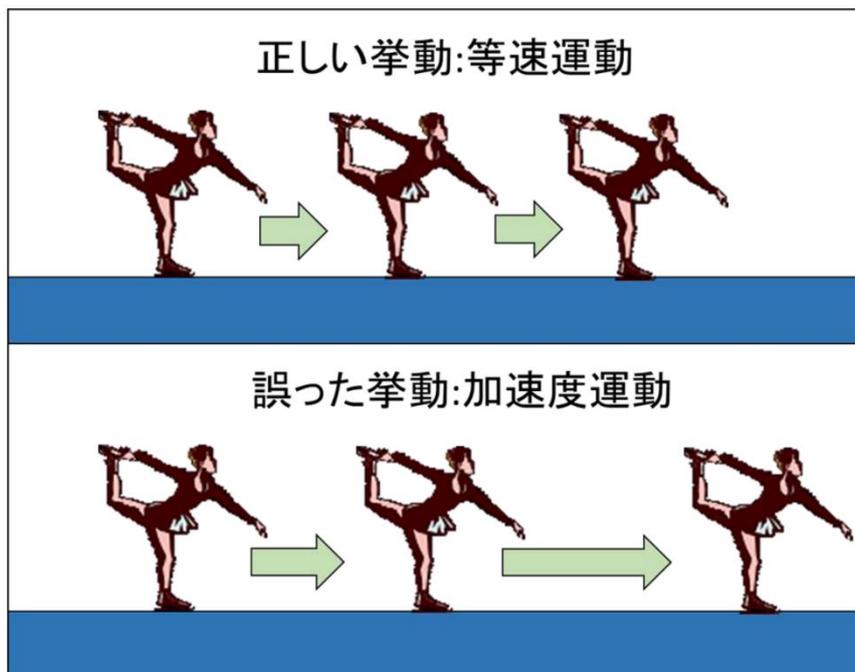


図 7 EBS のシミュレーション結果



図 8 多視点 EBS 作図画面

### 2.2.3 作図と運動状態の結び付けに対する課題点

前述のとおり EBS は MIF 素朴概念修正に効果があることが分かっているが、作図による運動状態の表現についての課題点も指摘されている。

## 第2章 背景

西岡ら (2021) による概念マップ・Error-based Simulation 統合的学習環境での実践利用では、多視点 EBS 利用の前後に、同じ課題に対する力・加速度・速度についての概念マップを作成することで概念変容の測定が行われている[8]。概念マップとは、2つの概念とそれらの関係から構成される命題を複数相互連結することによって意味構造を図的に表現する手法のことであり、知識や理解の外化や整理活動としての学習効果があり、学習者の理解状況の共有や評価においても有効であることが知られている ([9]-[11])。この実験では、概念マップで正解できた場合は作図テストで正解できている割合は大きいですが、作図テストで正解できても概念マップで正解できない場合があることが示唆されている。このことから、作図上で誤りが修正された場合においても、概念的には誤りの修正ができていない、つまり作図を正しく解釈し運動状態の理解に結び付けることができない学習者が存在すると考えられる。

この原因として、作図とシミュレーションの、運動状態の表現としての制約や特徴が影響していると考えられる。作図は、運動状態の表現として広く用いられる手法であるため記憶で解けてしまう可能性があること、図はより直感的な表現であるため運動状態を正しく理解できていなくても作成できてしまう可能性があること、煩雑性回避のために力・加速度・速度はそれぞれ別の図において表現され、同様に時系列における変化に関しても別の図に作図を行うようになっていることからパラメータ間・時系列間での比較をすることが難しい場合があることなどがデメリットとして挙げられる。

また、シミュレーションにおいても各パラメータに対する解答による挙動の違いを1つの図に表すことは不可能であるため、それぞれ別の図において表現しそれらを比較することで運動状態について考えるように設計されていることから、作図と同様にパラメータ間の関係を考えることが難しい場合が考えられる。

これらのことが原因で、作図とシミュレーションを結び付けて考えることができず、EBS 利用だけでは運動状態の正しい理解ができない学習者がいると考えられる。

これらの課題を解決するためには、作図とシミュレーションを結び付ける新たな運動状態の表現が必要である。そこで本研究では、作図と運動状態を結び付けて考えられない学習者に対する支援及び運動状態のより深い理解の促進を目的とし、各運動状態における各パラメータの有無と向きという定性値を一覧的に表現することができる表による運動状態の表現と、その作表プロセスを経験することを指向した演習を提案したので、次章で説明する。

## 第3章 運動状態構造的記述演習

### 3.1 表としての運動状態の表現

本研究では新たな運動状態の表現方法として表を提案した。運動状態の表では、列で分けられた各運動状態について、物体に働いている力とその合力、加速度、速度の有無、ある場合はその向きを記述することで運動状態を表現することができる。

この手法を用いることにより運動状態の各パラメータとその変化を一つの図にまとめることができるようになるため、表は作図とシミュレーションでの運動状態の表現を統合的にまとめた表現であると言える。運動状態を表で表現することにより、一覧性が良くなり、パラメータ間および時系列間でのパラメータの比較が容易になることが期待される。また、多くの学習者にとって新しい運動状態の表現手法であると考えられるため、記憶に左右されず、直感的な解答ができないと考えられる。これらの表の特性は2.2.3で述べた、作図とシミュレーションのデメリットを解消するようなものであると考えられる。

また、作表プロセスを定義し経験させることで運動状態の構造的理解の促進が期待される。本研究では、作表プロセスを経験するための運動状態構造的記述演習（Structural Description Exercise, SDE）を、自動診断・フィードバックが可能なシステムとして設計開発した。

### 3.2 運動状態構造的記述演習

本研究では、運動状態の表の原型（表2）から完成までの作表プロセスを経験するためのSDEを、運動状態の分節化と運動状態の詳細化の二段階に分け、さらに分節化として（1）運動状態の区切り選択、（2）区間・区切りに対する状態判別、詳細化として（3）働いている力の選択、（4）物理量の定性値記述、の4つの段階として定義した。この節では、各段階における作表プロセスとそれに対応する演習を、鉛直投げ上げ課題を例として実際のシステム画面を交えながら説明する。

表2 作表プロセスにおける表の原型

	状態
合力	
加速度	
速度	

### 3.2.1 運動状態の分節化

多視点 EBS では、予め時系列順で分けられた 3 つの図が与えられ、それぞれについて矢印を作図する演習となっている。これは、パラメータが最大で二回変化する課題のみを扱っているからであり、変化が無いパラメータに関しては全てについて同じ作図をすることで正解となる。つまり、運動状態が変化する場合においても予め分節化された状態に対して作図を行わせているため、いくつの状態に分節化することができるかを能動的に把握させていなかったと言える。

しかし運動状態を正しく把握できている学習者は運動状態の分節化もできるはずであるため、表は運動状態の分節化を必要とするような方法で表現することとする。具体的には、予め分けられた 3 つの状態それぞれにパラメータを記述するのではなく、変化しない状態に対しては分けずに記述するようにするのである。これにより、運動状態がいくつの状態に分けられるかを決定するプロセスが必要となる。

運動状態の分節化を行うためには、運動状態の定義が必要である。そこで本研究では、MIF 素朴概念が発生する状況において、運動状態をある方向に対する静止・等速・加速・減速の 4 つに定義した。この 4 つの状態は、物体に働く合力及び加速度と速度の有無と向きによって決まる。各運動状態に対する合力・加速度・速度の関係を表 3 に示す。これらの物理量が増加することにより運動状態が変化し、分節化が可能となる。

演習では、分節化を操作可能な課題とするために、(1) 運動状態の区切り選択、(2) 区間・区切りの状態判別を行う。

(1) 運動状態の区切り選択の演習画面を図 9 に示す。この段階では、学習者は運動の動画を見て、挙動の変化から運動状態が変化すると考えられる時点において、シークバーに予め配置されているダミーを含む区切りの中から選択する。これにより、表の枠組みにおける列にあたる、運動状態数の候補が決まる (表 4, 表 5)。この時点では、区切りが前後の区間と独立して 1 つの状態となるかどうかの判断ができていないため、状態数の決定はできない。

状態数を決定するために、(2) 区間・区切りの状態判別を行う。この演習画面を図 10 に示す。(2) の段階では、区間・区切りに対して状態のラベルをドラッグ&ドロップで貼り付けることで状態の数を決定する。その区間・区切りが状態でない場合、ラベルを貼り付けることで正解となる。ここで、区間は必ず状態の 1 つとなるため区切りが状態になるかを判別するだけでも演習として十分と考えられるが、どの区間・区切りがどの状態になるかを能動的に把握させるために、状態にもラベルを貼り付けるように設計している。この演習により、表の列数に相当する運動状態数が決まる (表 5)。

**問題3-1** 物体が動画のように鉛直上向きに投げ上げられました。物体の運動を分けられると思う瞬間をシークバーの区切りから選択してください。  
空気抵抗は考慮しないものとします。

メニュー

答え合わせ

図 9 運動状態の区切り選択

**問題3-2** 1つの状態だと言えると思う状態ラベルを区間・区切りに配置してください。  
数字は時系列順に並べるようにしてください。

メニュー

リセット

答え合わせ

図 10 区間・区切りの状態判別

表 3 運動状態による合力・加速度・速度の関係

状態	合力	加速度	速度 (方向)
静止	無し	無し	無し
等速	無し	無し	有り
加速	有り	有り	有り (力・加速度と同じ)
減速	有り	有り	有り (力・加速度と同じ)

表 4 運動状態の区切り選択後の表 (区切りが1つの状態でない場合)

	状態 1	状態 2
合力		
加速度		
速度		

表 5 運動状態の区切り選択後の表 (区切りが1つの状態である場合)

	状態 1	状態 2	状態 3
合力			
加速度			
速度			

### 3.2.2 運動状態の詳細化

運動状態の詳細化は、(3) 働いている力の選択、(4) 物理量の定性値記述、の2つの段階から構成される。

運動状態を理解するためには、各状態に働いている力を把握しその合力を考える必要があるため、表では合力と働いている力すべてを記述する。そのため、(3) 働いている力の選択が必要となる。この段階の演習画面を図 11 に示す。自動診断・フィードバックを行うため、予め考えられるいくつかの力の候補から、実際に働いている力を選択するようにしている。これにより、記述しなければならない力が決定され、表の枠組みが完成する (表 6)。

(4) 物理量の定性値記述 (図 12) では、表において、各状態における合力と各力、加速度、速度の有無 (ある場合はその向き) をドロップダウンから選択する。これにより、運動状態の表が完成する (表 7)。しかし、運動状態の正しい認識が難しい学習者には (1) の演習を行うことが難しい可能性があるため、(4) の演習をして運動状態を把握させたのちに (1) から (4) の演習を行うことで作表プロセスを経験させることとした。

ここまでの4つの段階の演習において、フィードバックは、(1) ~ (3) については正誤判定のみ、(4) については誤り箇所の指摘となっており、各段階で正解しないと次の段階には進まないようになっている。また、斜方投射を扱った課題では、運動を鉛直方向と水平方向に分けて考える必要があるため、それぞれの方向についての表を作成することとした。

### 第3章 運動状態構造的記述演習

次章では、この演習システムの実験的利用を行ったため、実験内容とその結果と考察を述べる。

問題3-3

メニュー

各状態について物体に働いている力を全て選択してください。

状態1 状態2 状態3

重力 垂直抗力 摩擦力 進行方向の力 その他の力

答え合わせ

図 11 働いている力の選択

問題3

メニュー

上方に投げ上げられたボールがあります。空気抵抗は受けないものとします。各状態における力、加速度、速度について、それぞれ表のドロップダウンから選択してください。

	状態1	状態2	状態3
重力	~	~	~
加速度	~	~	~
速度	~	~	~

答え合わせ

図 12 物理量の定性値記述

### 第3章 運動状態構造的記述演習

表 6 働いている力の選択後の表

	状態 1	状態 2	状態 3
合力			
重力			
加速度			
速度			

表 7 物理量の定性値記述後の表

	状態 1	状態 2	状態 3
合力	下	下	下
重力	下	下	下
加速度	下	下	下
速度	上	静止	下

## 第4章 演習システムの実験的利用

多視点 EBS 利用後における SDE による学習効果を調べるために、2022 年度と 2023 年度の二回にわたって演習システムの実験的利用を行った。本章では、それぞれにおける実験的利用の目的と手順、結果と分析、考察を述べる。

### 4.1 2022 年度実験的利用

#### 4.1.1 目的と手順

2022 年度では、多視点 EBS 及び SDE が対象とする物理学を履修済みである高等専門学校三年生 41 名に対して実験的利用を行った。

調査の目的を、(1) SDE が演習方法として利用可能で学習者に受け入れられるか、(2) 多視点 EBS 利用後に SDE を利用することで多視点 EBS 利用後より学習効果の積み上げができるか、(3) 本実験による学習が暗記になっておらず正しい理解として効果が持続するか、を調べることとし、実験は以下の手順に従って行われた。

- |                    |              |
|--------------------|--------------|
| ① 事前テスト (事前)       | (所要時間 : 7 分) |
| ② 多視点 EBS 利用       | (27 分)       |
| ③ EBS 後テスト (EBS 後) | (8 分)        |
| ④ SDE の説明          | (3 分)        |
| ⑤ SDE 利用           | (25 分)       |
| ⑥ SDE 後テスト (SDE 後) | (8 分)        |
| ⑦ アンケート            | (3 分)        |
| ⑧ 遅延テスト (遅延)       | (15 分)       |

①の事前テストの課題は多視点 EBS と SDE とともに扱っている課題と同じ状況における力の作図課題 (全 6 課題, 正解 1 点, 不正解 0 点, 6 点満点) であり, ③, ⑥, ⑧のテストはそれにシステムでは扱っていない力の作図課題 (全 4 課題, 4 点満点) を加えた全 10 問となっている。以下, システムで扱った課題を学習課題, 扱っていない課題を転移課題と呼ぶ。本実験と同一の学校の同一の学年を被験者とした EBS 利用の先行研究[8]により, これらの課題に MIF 素朴概念が多く発生すること, 多視点 EBS 利用のみでは修正が十分行えない学習者が存在することは確認済みである。また, テストや演習における時間についても先行研究[8]を参考にしている。

④及び⑤が本実験で追加された部分であり, 目的の (2) を確認するために③の EBS 後

テスト及び⑥の SDE 後テストを設定した。(1)は⑦のアンケートにより調査する。(3)を確認するために、本演習を行った日から約一年後に⑧の遅延テストを実施した。遅延テストでは3名が欠席したが、欠損値は完全にランダムな欠損であると考えられるため、各検定においてはリストワイズ処理を行った。また、本章では簡単のために多視点 EBS を EBS と呼ぶこととする。

### 4.1.2 EBS と SDE の課題達成状況

まず、EBS と SDE の課題達成状況について述べる。それぞれの演習において、正解した課題の数を課題達成数として集計した。EBS では力・加速度・速度それぞれについて全て正しい作図を行うこと、SDE では第3章で述べた演習段階を全て正解することで課題達成とした。EBS の平均課題達成数は 3.46 (標準偏差 1.58)、SDE は 5.73 (標準偏差 1.00) であり、t 検定を行ったところ有意差が見られた ( $p < .001$ , 効果量  $d = 1.72$ )。

このことから、SDE では多くの学習者が殆どの課題を正解できたのに対して、EBS では時間内に正解できなかった、或いは取り組みなかった課題が多く存在すると考えられる。この原因として、EBS では誤った作図の直接的な指摘を行っておらず、学習者自身が挙動シミュレーションから誤りを推定する必要がある、これが難しい場合があったことが考えられる。EBS で間違った作図を直接的に指摘することは、誤りを理解しない表層的な修正となる可能性が高いと考えられることから、避けるべき方法と判断されている。SDE の物理量の定性値記述においては誤りに対する直接的な指摘を行っているが、運動状態を表すパラメータを一覧しながらの指摘であり、その修正も関係付けが意識されると期待されるため、そのようなフィードバックとなっている。

### 4.1.3 学習課題の結果と分析

事前・EBS 後・SDE 後・遅延テストの結果について述べる。分析するにあたって、全誤答数 (種類に関わらない誤答の数) と MIF 誤答数 (MIF 素朴概念によるものと考えられる誤答の数) の2つのデータを用いている。

まず、学習課題における各テストの平均全誤答数とその標準偏差を表 8、その推移のグラフを図 13 に示す。各平均値の差を調べるために多重比較 (p 値は Holm 法により調整、有意水準 5%、有意水準を超える p 値は ns と表記、以下の分析でも同様) を行った結果を表 9 に示す。結果として、事前と EBS 後に有意差があったことから、EBS による学習効果が再確認できた。EBS 後と SDE 後に有意差があったことから、SDE は EBS に対して全体的な誤答を減らす追加効果を持っていたと考えられる。また、事前と遅延に有意差があったことから EBS と SDE を組み合わせた演習を行ったことによる効果が約一年後にも持続されていると考えられる。

次に、学習課題における MIF 誤答数の平均値と標準偏差を表 10、その推移のグラフを図 14 に示す。事前における MIF 誤答数の平均値が 2.98 であったことから、物理学を履修

済みの学生においても MIF 素朴概念を持っている学習者が少なくないことが確認できる。全誤答数と同様に多重比較を行った結果を表 11 に示す。事前と EBS 後に有意差があったことから、EBS による MIF 素朴概念修正の効果が再確認できた。EBS 後と SDE 後に有意差があったことから、SDE は EBS に対して MIF 誤答数を減らす追加効果を持っていると考えられる。遅延は事前と有意差がなく、MIF 素朴概念に対しては修正が行われていても約一年後には戻ってしまうことが示唆された。しかし、事前から遅延にかけて平均値が小さく、標準偏差は大きくなっていることから、効果が持続した群とそうでない群が存在する可能性が考えられる。

そこで、事前学習課題の MIF 誤答数の差異による学習者の傾向を調査するために、事前での MIF 誤答数の平均値 2.87 に着目し、MIF 誤答数が平均値以上の群（事前 MIF 多群、N=20）と平均値未満の群（事前 MIF 少群、N=18）に分けて追加の分析を行った。この二群を参加者間要因、事前・EBS 後・SDE 後・遅延テストの MIF 誤答数を参加者内要因とし、二要因の混合要因分散分析を行った。各群における MIF 誤答数の平均値と標準偏差を表 12, 表 13 に、それぞれの推移を図 15, 図 16 に示す。要因の効果として、参加者間要因では  $F(1,36) = 22.73$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .39$ , 参加者内要因では  $F(3,108) = 16.55$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .32$  となり、参加者間要因・参加者内要因ともに有意差が生じていることが分かった。そこで、各群の単純主効果を調べたところ、各群でテストの MIF 誤答数に有意差が見られた（どちらの群も  $p < .001$ ）ため多重比較を行ったところ表 14, 表 15 のような結果が得られた。事前 MIF 少群は事前・遅延間の MIF 誤答数に有意差が見られなかったのに対し、事前 MIF 多群は事前・遅延間で有意に減少しており、約一年後においても学習効果が持続され、その効果が一過性なものではないことが示唆された。これは、実験前から MIF 素朴概念をあまり持っていない学習者に対しては EBS の誤り可視化による誤り修正への内発的動機づけが生起しづらく誤りの印象が残りにくいのに対し、実験前に MIF 素朴概念を多く持っていた学習者に対しては EBS による誤りの印象が強く残ったことで学習効果が持続したためと考えられる。このことから、EBS と SDE を組み合わせることによる演習は特に MIF 素朴概念を多く持っている学習者に対して修正効果をより強く残すことができる演習であることが窺われる。

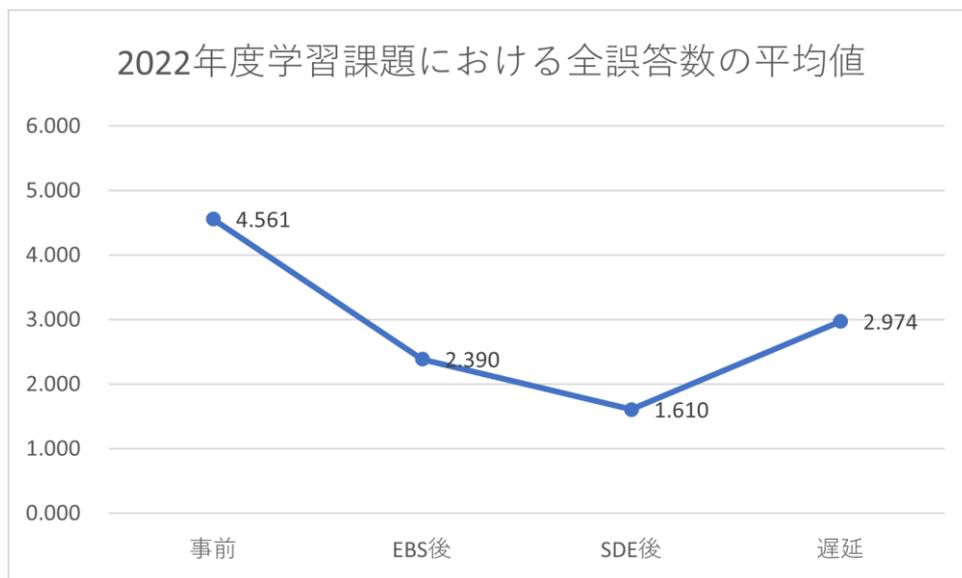


図 13 2022 年度学習課題における全誤答数の平均値の推移

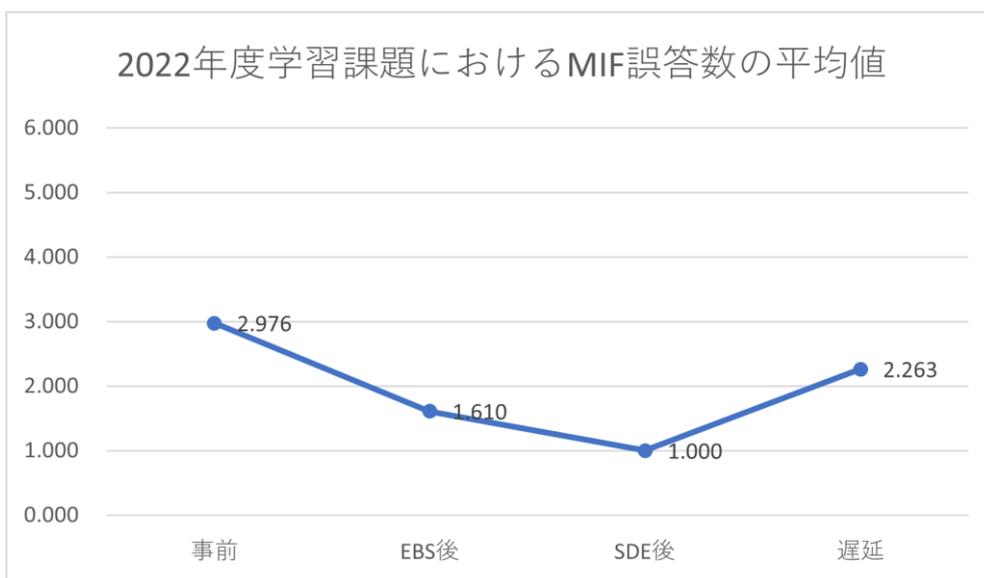


図 14 2022 年度学習課題における MIF 誤答数の平均値の推移

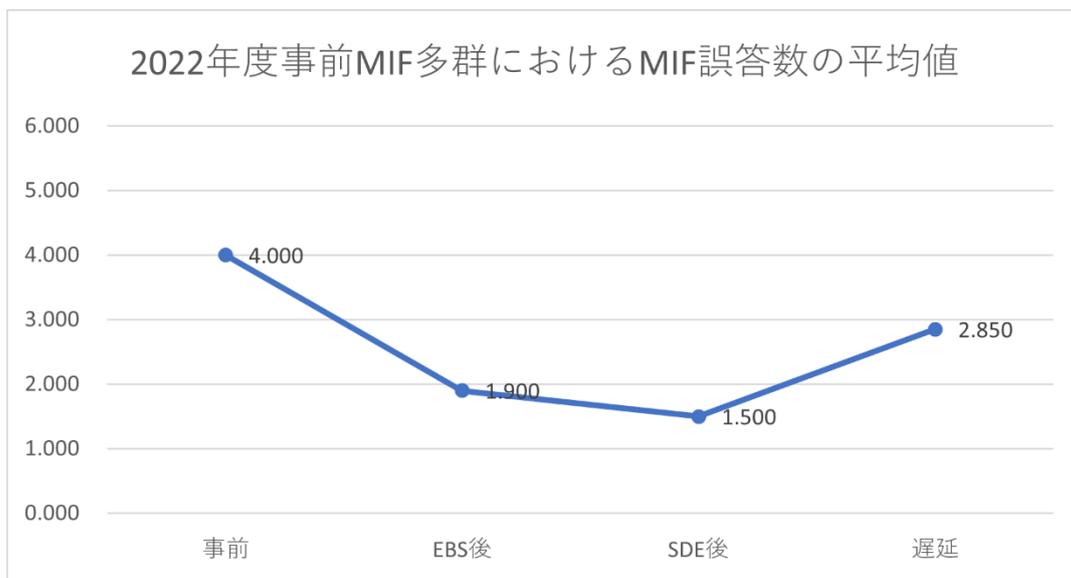


図 15 2022 年度事前 MIF 多群における MIF 誤答数の平均値の推移

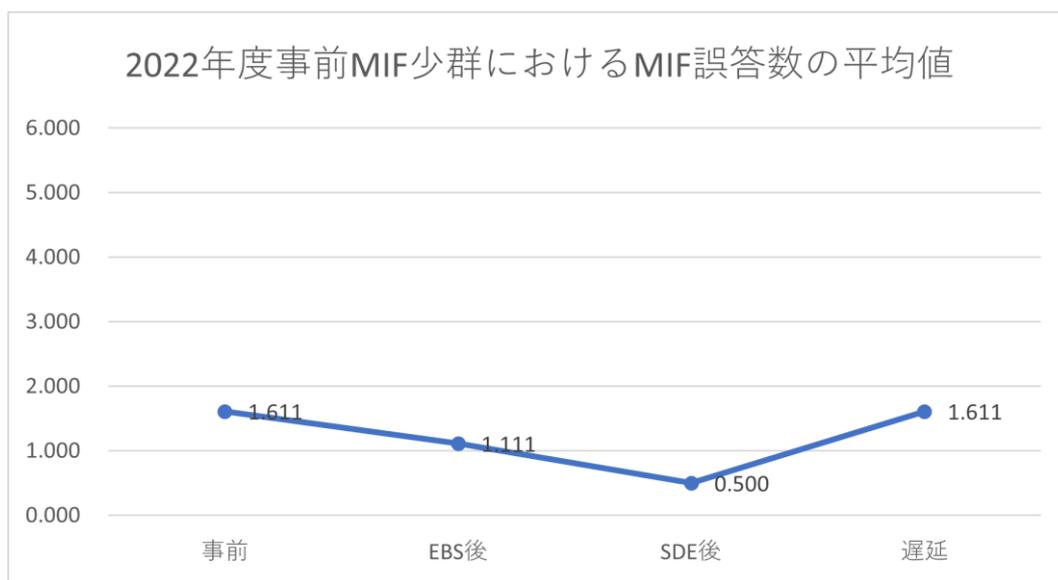


図 16 2022 年度事前 MIF 少群における MIF 誤答数の平均値の推移

表 8 2022 年度学習課題における全誤答数

	有効 N	平均値	標準偏差
事前全誤答数	41	4.561	1.305
EBS 後全誤答数	41	2.390	1.611
SDE 後全誤答数	41	1.610	1.563
遅延全誤答数	38	2.974	1.793

表 9 2022 年度学習課題の全誤答数における多重比較 (自由度 37)

	t 値	調整 p 値	効果量 d
事前全誤答数・EBS 後全誤答数	8.285	.000	1.483
事前全誤答数・SDE 後全誤答数	9.806	.000	1.999
事前全誤答数・遅延全誤答数	4.570	.000	0.946
EBS 後全誤答数・SDE 後全誤答数	3.782	.001	0.461
EBS 後全誤答数・遅延全誤答数	-2.093	.043	-0.399
SDE 後全誤答数・遅延全誤答数	-4.421	.000	-0.844

表 10 2022 年度学習課題における MIF 誤答数

	有効 N	平均値	標準偏差
事前 MIF 誤答数	41	2.976	1.541
EBS 後 MIF 誤答数	41	1.610	1.595
SDE 後 MIF 誤答数	41	1.000	1.323
遅延 MIF 誤答数	38	2.263	1.766

表 11 2022 年度学習課題の MIF 誤答数における多重比較 (自由度 37)

	t 値	調整 p 値	効果量 d
事前 MIF 誤答数・EBS 後 MIF 誤答数	4.392	.000	0.845
事前 MIF 誤答数・SDE 後 MIF 誤答数	6.925	.000	1.272
事前 MIF 誤答数・遅延 MIF 誤答数	1.967	ns	0.363
EBS 後 MIF 誤答数・SDE 後 MIF 誤答数	3.221	.008	0.373
EBS 後 MIF 誤答数・遅延 MIF 誤答数	-1.976	ns	-0.423
SDE 後 MIF 誤答数・遅延 MIF 誤答数	-3.902	.002	-0.790

表 12 2022 年度事前 MIF 多群における MIF 誤答数

	有効 N	平均値	標準偏差
事前 MIF 誤答数	20	4.000	0.973
EBS 後 MIF 誤答数	20	1.900	1.483
SDE 後 MIF 誤答数	20	1.500	1.469
遅延 MIF 誤答数	20	2.850	1.663

表 13 2022 年度事前 MIF 少群における MIF 誤答数

	有効 N	平均値	標準偏差
事前 MIF 誤答数	18	1.611	0.698
EBS 後 MIF 誤答数	18	1.111	1.491
SDE 後 MIF 誤答数	18	0.500	1.043
遅延 MIF 誤答数	18	1.611	1.685

表 14 2022 年度事前 MIF 多群の学習課題の MIF 誤答数における多重比較 (自由度 36)

	t 値	調整 p 値	効果量 d
事前 MIF 誤答数-EBS 後 MIF 誤答数	6.211	.000	1.693
事前 MIF 誤答数-SDE 後 MIF 誤答数	8.209	.000	2.245
事前 MIF 誤答数-遅延 MIF 誤答数	2.962	.022	0.848
EBS 後 MIF 誤答数-SDE 後 MIF 誤答数	1.763	ns	0.282
EBS 後 MIF 誤答数-遅延 MIF 誤答数	-1.903	ns	-0.588
SDE 後 MIF 誤答数-遅延 MIF 誤答数	-2.954	.000	-0.887

表 15 2022 年度事前 MIF 少群の学習課題の MIF 誤答数における多重比較 (自由度 36)

	t 値	調整 p 値	効果量 d
事前 MIF 誤答数-EBS 後 MIF 誤答数	1.403	ns	0.550
事前 MIF 誤答数-SDE 後 MIF 誤答数	3.461	.008	0.995
事前 MIF 誤答数-遅延 MIF 誤答数	0.000	ns	0.000
EBS 後 MIF 誤答数-SDE 後 MIF 誤答数	2.555	ns	0.430
EBS 後 MIF 誤答数-遅延 MIF 誤答数	-0.950	ns	-0.309
SDE 後 MIF 誤答数-遅延 MIF 誤答数	-2.307	ns	-0.728

#### 4.1.4 EBS と SDE の関係分析

EBS と SDE の関係を詳細に分析するために、EBS と SDE のログデータから学習課題を演習で、達成、取り組んだが非達成 (以下、取組と呼ぶ)、非取組、の 3 つに分類し、それぞれに対する EBS と SDE の学習効果を調べた。それぞれの分類における課題数を表 16 に示す。ここで、EBS で要求される力の作図はテストで行われる作図と同じであるため、EBS は力の作図を正解できていれば達成として集計した。

SDE での取組・非取組課題はデータ数が少ないため、SDE での達成課題における EBS での達成・取組・非取組課題についての分析を行った。

事前・EBS 後・SDE 後に有意差があるか調べるため、全誤答数では誤答数と正答数に対して、MIF 誤答数では MIF 誤答数とその他解答数に対してカイ二乗検定を行った後、各項目全てでそれぞれ有意差が見られたため残差分析を行った。結果を表 17 に示す。ここで、

#### 第4章 演習システムの実験的利用

遅延テストは EBS と SDE 両方の効果が関係していると考えられ、今回は EBS での課題達成状況に対する SDE の効果を調べたいため、分析対象から外している。この結果から、SDE の利用前後において、全誤答数、MIF 誤答数ともに EBS 達成の場合有意に減少はしていないが、EBS 達成でない 2 つの場合においては誤答が有意に少なくなっていると言え、SDE は EBS 未達成の場合に顕著な効果が現れると考えられる。

表 16 2022 年度演習の達成状況による各分類の課題数

	SDE 達成	SDE 取組	SDE 非取組
EBS 達成	160	2	3
EBS 取組	40	3	2
EBS 非取組	33	1	2

表 17 2022 年度 SDE 達成に対する各分類における事前・EBS 後・SDE 後の残差分析  
(全誤答数・正答数と MIF 誤答数・その他解答数それぞれで分析、▲が有意に大きく▽  
が有意に小さい(有意水準 5%))

EBS 達成	全誤答数	正答数	MIF 誤答数	その他解答数
事前	111▲	49▽	72▲	88▽
EBS 後	40▽	120▲	26▽	134▲
SDE 後	30▽	130▲	16▽	144▲
EBS 取組	全誤答数	正答数	MIF 誤答数	その他解答数
事前	35▲	5▽	21	19
EBS 後	23	17	20	20
SDE 後	16▽	24▲	11▽	29▲
EBS 非取組	全誤答数	正答数	MIF 誤答数	その他解答数
事前	24	9	19▲	14▽
EBS 後	23	10	15	18
SDE 後	12▽	21▲	9▽	24▲

#### 4.1.5 転移課題の結果と分析

転移課題における平均全誤答数と標準偏差を表 18, 多重比較の結果を表 19 に示す。EBS 後と SDE 後に有意差があることから、EBS 利用後における SDE 利用による追加的な学習効果が示唆されている。遅延テストは他の 2 つとは有意差が見られないため、演習での学習効果が持続していると考えられる。

同様に、転移課題における MIF 誤答数について分析すると(表 20, 表 21), どのテスト間においても有意差は見られなかった。ここで、EBS 後の転移課題では全誤答割合が 0.70 なのに対して MIF 誤答割合が 0.18 と小さく、また EBS 後の学習課題の MIF 誤答割合が

0.27であった。そのため、転移課題はMIF素朴概念以外の部分で難しさを含んでおり、それに対してSDEで有効だったため全誤答数が減少したが、EBS後テストの時点でMIF誤答数が少なくSDEによる学習効果が現れなかったのだと考えられる。

表 18 2022 年度転移課題における全誤答数

	有効 N	平均値	標準偏差
EBS 後全誤答数	41	2.805	1.327
SDE 後全誤答数	41	2.098	1.513
遅延全誤答数	38	2.500	1.202

表 19 2022 年度転移課題の全誤答数における多重比較 (自由度 37)

	t 値	調整 p 値	効果量 d
EBS 後全誤答数-SDE 後全誤答数	3.701	.002	0.491
EBS 後全誤答数-遅延全誤答数	0.904	ns	0.164
SDE 後全誤答数-遅延全誤答数	-2.158	ns	-0.360

表 20 2022 年度転移課題における MIF 誤答数

	有効 N	平均値	標準偏差
EBS 後 MIF 誤答数	41	0.732	1.025
SDE 後 MIF 誤答数	41	0.878	1.077
遅延 MIF 誤答数	38	1.026	0.944

表 21 2022 年度転移課題の MIF 誤答数における多重比較 (自由度 37)

	t 値	調整 p 値	効果量 d
EBS 後 MIF 誤答数-SDE 後 MIF 誤答数	-0.442	ns	-0.051
EBS 後 MIF 誤答数-遅延 MIF 誤答数	-1.781	ns	-0.315
SDE 後 MIF 誤答数-遅延 MIF 誤答数	-1.351	ns	-0.264

#### 4.1.6 アンケート結果

アンケートの結果としては、(1) システムで行った演習は簡単だったか、(2) システムは使いやすかったか、(3) 作成した表は力学の運動について表現できていると思うか、(4) システムで演習している時の思考は力学問題(矢印で力を作図する問題)を解くときと同じだったか、(5) システムは力学問題を考えるうえで問題の整理に役立つか、といった質問に対して、図 17 の結果が得られた。演習の有効性に関する質問である(3)から(5)に関しては、いずれも8割以上の肯定的回答が得られており、被験者にとっても本演習が有効なものであると判断されていることが分かる。

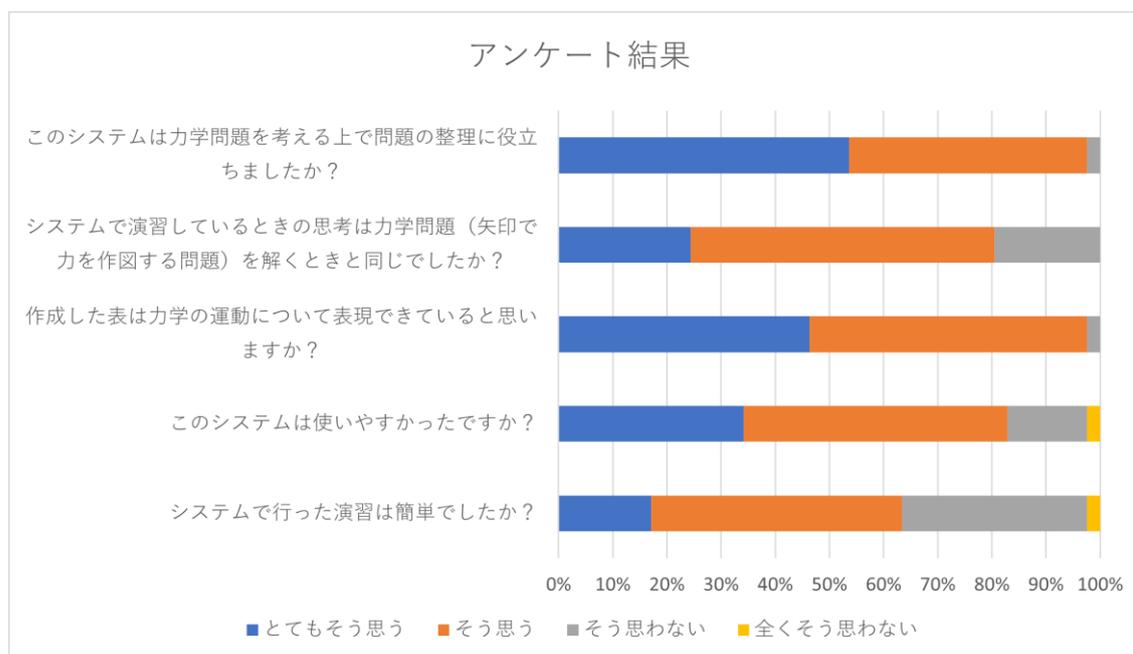


図 17 2022 年度アンケート結果

## 4.2 2023 年度実験的利用

### 4.2.1 目的と手順

2023 年度に、2022 年度実験的利用と同学校同学年の 43 名を対象に、4.1.1 で述べた (1) から (3) の調査目的に加え、(4) 実験結果の再現性があるか、(5) テストの各課題における被験者にとっての自信度にどのような影響を与えるか、(6) 被験者が SDE と EBS を比較してどう感じたか、を調べることを目的とし、二回目の実験を行った。演習手順、テスト内容は変えていないが、遅延テストは一週間後に行われた。また、(5) を調べるためにテスト課題に対して「この問題に対して自分の答えに自信がありますか？」という質問を用意し、「とてもそう思う」、「そう思う」、「そう思わない」、「全くそう思わない」の四件法で自信度を測った。そのため、各テスト時間は 2022 年度より 1 分多く設定している。(6) を確認するためには、SDE に対するアンケート項目を増やすことで調査した。アンケートに関する詳細は後述する。また、遅延テストでの欠席者 1 名の欠損値は、2022 年度と同様の理由で検定を行う際にリストワイズ削除を行った。

### 4.2.2 EBS と SDE の課題達成状況

4.1.2 と同様に、2023 年度における EBS と SDE の平均課題達成数を調べたところ、EBS は 3.84 (標準偏差 1.76)、SDE は 5.74 (標準偏差 1.00) であり、t 検定を行ったところ有意差が見られた ( $p < .001$ , 効果量  $d = 1.34$ )。このことから、課題達成状況において 2023 年度でも 2022 年度と同様の結果が得られたと考えられる。

### 4.2.3 学習課題の結果と分析

学習課題の全誤答数の平均値と標準偏差を表 22, 平均値の推移を図 18, 多重比較を行った結果を表 23 に示す. 事前・EBS 後間, EBS 後・SDE 後間, 事前・遅延間で有意差があることから, 2022 年度と同様に EBS, SDE ともに学習効果があり, 一週間後まで効果が保たれていることが示唆されている.

MIF 誤答数の平均値と標準偏差を表 24, 平均値の推移を図 19, 多重比較を行った結果を表 25 に示す. 事前・EBS 後間, 事前・遅延間に有意差が見られることから, EBS での MIF 修正効果があり, また一週間後まで学習効果が持続されていることが示唆されているが, EBS 後・SDE 後間で有意差が見られなかった. そこで, EBS 利用後でも MIF 誤答数が多く現れた学習者に対する効果を調べるため, EBS 後での MIF 誤答数において, 平均値の 1.47 以上現れた群 (表 26, 図 20) に対して多重比較を行ったところ, 表 27 表 27 に示した通り EBS 後・SDE 後間で有意差が見られ, 効果量が大きかった. このことから, EBS 利用を行っても MIF 素朴概念があまり修正されなかった学習者に対しては, SDE での修正効果が十分に現れていると考えられる.

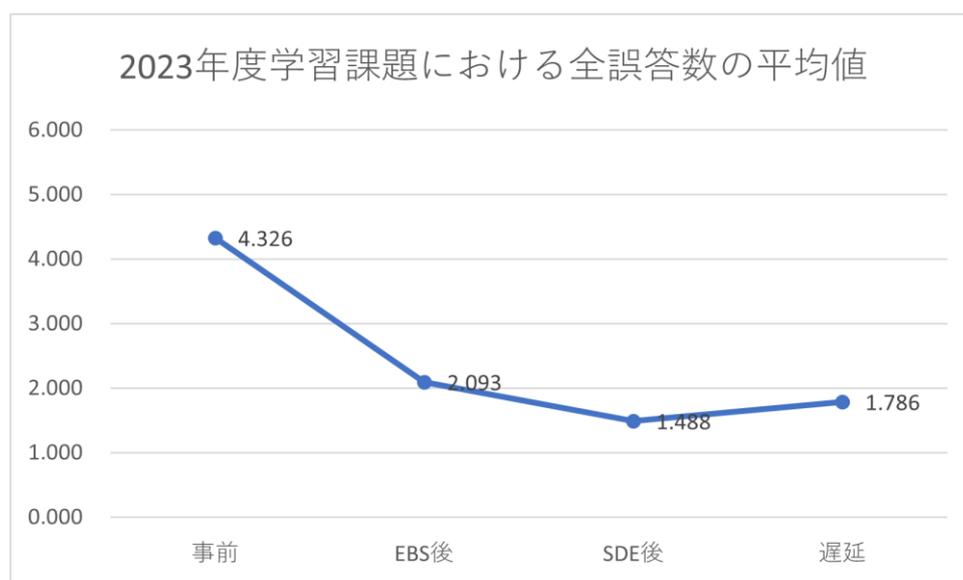


図 18 2023 年度学習課題における全誤答数の平均値の推移

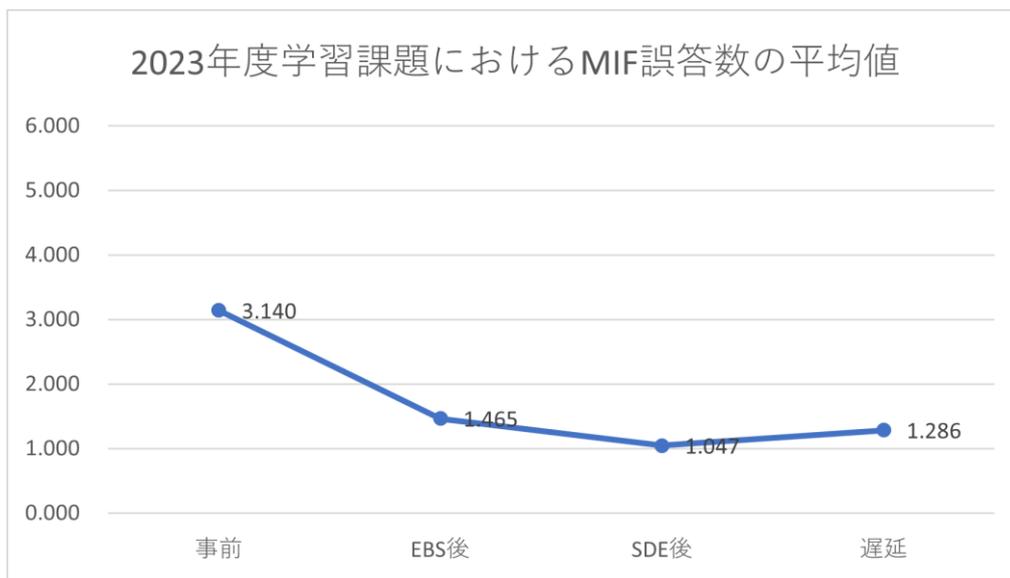


図 19 2023 年度学習課題における MIF 誤答数の平均値の推移

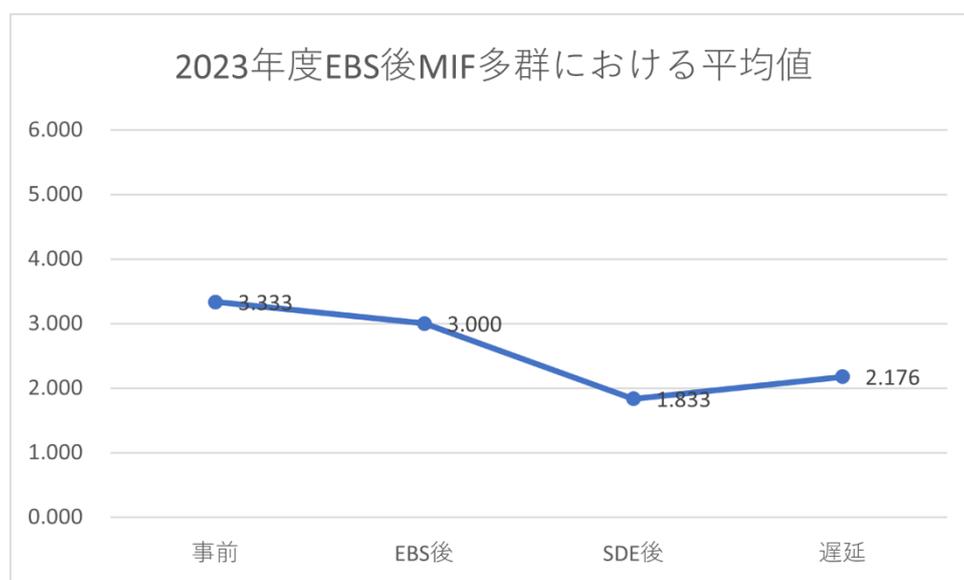


図 20 2023 年度 EBS 後 MIF 多群における平均値の推移

表 22 2023 年度学習課題における全誤答数

	有効 N	平均値	標準偏差
事前全誤答数	43	4.326	1.358
EBS 後全誤答数	43	2.093	1.688
SDE 後全誤答数	43	1.488	1.609
遅延全誤答数	42	1.786	1.718

表 23 2023 年度学習課題の全誤答数における多重比較 (自由度 41)

	t 値	調整 p 値	効果量 d
事前全誤答数-EBS 後全誤答数	8.116	.000	1.978
事前全誤答数-SDE 後全誤答数	10.841	.000	2.502
事前全誤答数-遅延全誤答数	9.542	.000	2.099
EBS 後全誤答数-SDE 後全誤答数	4.172	.000	0.814
EBS 後全誤答数-遅延全誤答数	1.167	ns	0.565
SDE 後全誤答数-遅延全誤答数	1.918	ns	0.193

表 24 2023 年度学習課題における MIF 誤答数

	有効 N	平均値	標準偏差
事前 MIF 誤答数	43	3.140	1.656
EBS 後 MIF 誤答数	43	1.465	1.564
SDE 後 MIF 誤答数	43	1.047	1.511
遅延 MIF 誤答数	42	1.286	1.566

表 25 2023 年度学習課題の MIF 誤答数に対する多重比較 (自由度 41)

	t 値	調整 p 値	効果量 d
事前 MIF 誤答数-EBS 後 MIF 誤答数	5.614	.000	1.539
事前 MIF 誤答数-SDE 後 MIF 誤答数	6.719	.000	1.863
事前 MIF 誤答数-遅延 MIF 誤答数	5.621	.000	1.571
EBS 後 MIF 誤答数-SDE 後 MIF 誤答数	2.291	ns	0.721
EBS 後 MIF 誤答数-遅延 MIF 誤答数	0.432	ns	0.486
SDE 後 MIF 誤答数-遅延 MIF 誤答数	-1.388	ns	0.203

表 26 2023 年度学習課題の EBS 後 MIF 多群における MIF 誤答数

	有効 N	平均値	標準偏差
事前 MIF 誤答数	18	3.333	1.609
EBS 後 MIF 誤答数	18	3.000	1.188
SDE 後 MIF 誤答数	18	1.833	1.724
遅延 MIF 誤答数	17	2.176	1.425

表 27 2023 年度学習課題の EBS 後 MIF 多群に対する多重比較 (自由度 16)

	t 値	調整 p 値	効果量 d
事前 MIF 誤答数-EBS 後 MIF 誤答数	1.000	ns	0.872
事前 MIF 誤答数-SDE 後 MIF 誤答数	3.373	.018	1.552
事前 MIF 誤答数-遅延 MIF 誤答数	3.173	.022	1.447
EBS 後 MIF 誤答数-SDE 後 MIF 誤答数	4.123	.004	1.435
EBS 後 MIF 誤答数-遅延 MIF 誤答数	2.521	ns	1.349
SDE 後 MIF 誤答数-遅延 MIF 誤答数	-0.524	ns	0.504

#### 4.2.4 EBS と SDE の関係分析

4.1.4 と同様に、ログデータから EBS と SDE の課題を達成・取組・非取組に分類した (表 28)。SDE の達成課題に対する EBS の課題を達成、取組、非取組に分け、それぞれにおける事前・EBS 後・SDE 後の全誤答数・正答数、MIF 誤答数・その他解答数でカイ二乗検定を行ったのち、有意差があった場合残差分析を行った結果を表 29 に示す。EBS 達成においては、全誤答数・MIF 誤答数ともに 2022 年度と同じ結果が得られた。また、EBS 取組においても、SDE 後の全誤答数・MIF 誤答数が有意に少なく、正答数・MIF 以外の解答数が有意に多かったため、EBS で取り組んだ課題に対しては SDE により MIF 素朴概念・その他誤りの修正効果があったと考えられる。しかし、EBS 非取組に関しては 2022 年度と異なり、全誤答数・MIF 誤答数ともに有意差が現れなかった。EBS 非取組課題は達成・取組課題に比べてデータ数が少ないため、SDE のみでの学習効果に対する詳細な分析は今後の課題となると考えている。

表 28 2023 年度演習の達成状況による各分類の課題数

	SDE 達成	SDE 取組	SDE 非取組
EBS 達成	181	1	0
EBS 取組	37	3	3
EBS 非取組	25	1	1

表 29 2023 年度 SDE 達成に対する各分類における事前・EBS 後・SDE 後の残差分析  
(全誤答数・正答数と MIF 誤答数・その他回答数を分けて分析, ▲が有意に大きく▽が  
有意に小さい (有意水準 5%))

EBS 達成	全誤答数	正答数	MIF 誤答数	その他解答数
事前	119▲	62▽	86▲	95▽
EBS 後	35▽	146▲	25▽	156▲
SDE 後	22▽	159▲	13▽	168▲
EBS 取組	全誤答数	正答数	MIF 誤答数	その他解答数
事前	35▲	2▽	22▲	15▽
EBS 後	26	11	14	23
SDE 後	17▽	20▲	9▽	28▲
EBS 非取組	全誤答数	正答数	MIF 誤答数	その他解答数
事前	18	7	13	12
EBS 後	17	8	12	13
SDE 後	12	13	10	15

#### 4.2.5 転移課題の結果と分析

転移課題に対する全誤答数の平均値と標準偏差を表 30 に, 多重比較の結果を表 31 に示す. また, MIF 誤答数の平均値と標準偏差を表 32 に, 多重比較の結果を表 33 に示す. どちらの場合においても 2022 年度と同様の結果が得られ, また 2023 年度でも EBS 後の転移課題の全誤答割合が 0.494 であるのに対し MIF 誤答割合が 0.273 と低いため, 2022 年度と同様に MIF 素朴概念以外の難しさに SDE による学習効果があり, MIF 誤答数は EBS 後の時点で少なかったため効果が現れなかったと考えられる.

表 30 2023 年度転移課題における全誤答数

	有効 N	平均値	標準偏差
EBS 後全誤答数	43	2.372	1.398
SDE 後全誤答数	43	1.977	1.300
遅延全誤答数	42	2.000	1.431

表 31 2023 年度転移課題の全誤答数における多重比較 (自由度 41)

	t 値	調整 p 値	効果量 d
EBS 後全誤答数-SDE 後全誤答数	3.410	.004	0.711
EBS 後全誤答数-遅延全誤答数	2.281	ns	0.681
SDE 後全誤答数-遅延全誤答数	-0.151	ns	0.402

表 32 2023 年度転移課題における MIF 誤答数

	有効 N	平均値	標準偏差
EBS 後 MIF 誤答数	43	1.093	1.109
SDE 後 MIF 誤答数	43	1.093	1.042
遅延 MIF 誤答数	42	0.905	1.008

表 33 2023 年度転移課題の MIF 誤答数における多重比較 (自由度 41)

	t 値	調整 p 値	効果量 d
EBS 後 MIF 誤答数-SDE 後 MIF 誤答数	0.000	ns	0.000
EBS 後 MIF 誤答数-遅延 MIF 誤答数	1.045	ns	0.156
SDE 後 MIF 誤答数-遅延 MIF 誤答数	1.155	ns	0.161

#### 4.2.6 自信度に関する分析

EBS 利用前後, SDE 利用前後における解答の種類と, 自信度の関係を調査した. 事前・EBS 後・SDE 後それぞれの正答・MIF 誤答・その他解答に対する自信度の分布を表 34 に示す. この表から, (1) MIF 誤答で自信度が低い課題は演習後に正答に推移しやすい, (2) MIF 誤答で自信度が高い課題では MIF 素朴概念を維持しやすい, (3) SDE は, 特に MIF が修正されない場合においても自信度を高めやすい, という 3 つの仮説を立て, 詳細な調査を行った. ここで, 煩雑性を回避するために四件法で行った自信度の回答を, 自信度が高いものと自信度が低いものの 2 つに分けて分析した.

まず (1) について, 演習前で MIF 誤答だった解答の自信度の高低を行, その課題が演習後で正解か不正解だったかを列で表すクロス集計表を作成し, カイ二乗検定 (イエーツの補正込み, 以下のカイ二乗検定で同様) を行ったところ, 両演習共に有意差が出なかったため, 仮説が立証されたとは言えなかった (表 35, 表 36). しかし, 傾向としては, EBS 利用前後では自信度が低い MIF 誤答の方が, 自信度が高いものより多い割合で正答に推移しているため, 今後検証する余地はあると考えている.

次に (2) では, 演習前で MIF 誤答だった解答の自信度の高低を行, 演習後で MIF 誤答か MIF 誤答意外だったかを列で表すクロス集計表を作成し, カイ二乗検定を行ったところ, 両演習共に有意差が出なかったため, こちらも仮説が立証される結果とはならなかった (表 37, 表 38). しかし (1) と同様に EBS 利用前後では割合として傾向が見られるため, こちらも今後検証すべき仮説であると考えられる.

最後に (3) では, 演習前に自信度が低かった課題数を行, 演習後に自信度が高かった課題数を列としてクロス集計表を作成しカイ二乗検定を行ったところ, 有意差が出なかった (表 39). しかし利用前後ともに MIF だったものに限定したクロス集計表 (表 40) ではカイ二乗検定で有意差が見られたため残差分析を行ったところ, SDE 演習前に自信度が低かったものが演習後に自信度が高くなる割合が EBS より有意に大きいという結果が得られ

#### 第4章 演習システムの実験的利用

た. この結果より, 自信度が低い MIF 誤答をした課題に対しては, SDE 利用により MIF 素朴概念が修正されない場合においても自信度を高めることが示唆された. これは, SDE が運動状態をよく理解できていない場合でも正解に辿り着けてしまう演習であり, 正解することを体験したから理解できていなくても自信度が上がった, という場合が生じていることが原因の1つとして考えられる.

表 34 各テストの各解答における自信度の分布

	4 (自信度高)	3	2	1 (自信度低)
事前正解	9	23	25	7
事前 MIF	8	42	62	19
事前その他	2	15	24	4
EBS 後正解	33	84	30	6
EBS 後 MIF	3	22	27	7
EBS 後その他	0	11	8	2
SDE 後正解	56	98	18	3
SDE 後 MIF	3	23	13	5
SDE 後その他	3	12	1	1

表 35 EBS 利用前の MIF の自信度の高さに対する EBS 利用後の正誤のクロス集計表

	EBS 後正解	EBS 後不正解
事前 MIF 自信度高	26	24
事前 MIF 自信度低	53	28

表 36 SDE 利用前の MIF の自信度の高さに対する SDE 利用後の正誤のクロス集計表

	SDE 後正解	SDE 後不正解
EBS 後 MIF 自信度高	8	17
EBS 後 MIF 自信度低	10	24

表 37 EBS 利用前の MIF の自信度の高さに対する EBS 利用後の MIF のクロス集計表

	EBS 後 MIF	EBS 後 MIF 以外
事前 MIF 自信度高	21	29
事前 MIF 自信度低	23	58

表 38 SDE 利用前の MIF の自信度の高さに対する SDE 利用後の MIF のクロス集計表

	SDE 後 MIF	SDE 後 MIF 以外
EBS 後 MIF 自信度高	15	10
EBS 後 MIF 自信度低	21	13

表 39 各演習利用前の自信度が低い解答に対する演習後の自信度の高さのクロス集計表

	演習後自信度高	演習後自信度低
EBS 演習前自信度低	63	66
SDE 演習前自信度低	46	33

表 40 各演習利用前の自信度が低い MIF 誤答に対する演習後の MIF 誤答の自信度の高さのクロス集計表と残差分析の結果（▲が有意に大きく▽が有意に小さい（有意水準 5%））

	演習後 MIF 自信度高	演習後 MIF 自信度低
EBS 演習前 MIF 自信度低	2▽	20▲
SDE 演習前 MIF 自信度低	8▲	13▽

#### 4.2.7 アンケート結果

2023 年度のアンケートでは、より詳細に被験者がどのような姿勢で SDE に取り組んでいたかを調べるため、EBS と比較する質問を増やした。アンケート結果を図 21 に示す。

まず、SDE に対する学習者の主観的な評価を調べるために 2022 年度と同じ質問に着目すると、いずれも 80%を超える肯定的な回答が得られているため、被験者にとっても本演習が有効なものであると判断されていることが分かる。

五件法で質問した「EBS モードで誤りのシミュレーションを見たときの印象は、構造的記述演習モードで誤ったときの印象より強かったですか？」という質問では、70%を超える肯定的回答が得られた。これに対し、SDE 演習を行った際の EBS との関係・比較についての質問である、「システムで演習しているとき、EBS での演習と関連付けながら考えましたか?」、「システム演習を通して、EBS で分からなかった部分も分かるようになりましたか?」、「EBS の作図と比べて、表では力と加速度と速度の関係が分かりやすいと感じましたか?」、「EBS の作図と比べて、表では力と加速度と速度の変化が分かりやすいと感じましたか?」、という質問でいずれも 80%以上の肯定的回答が得られた。これらのことから、EBS による挙動シミュレーションが学習者にとって印象深いものであるため MIF 素朴概念修正の動機づけに特に強い効果があり、更に EBS 利用後に SDE を利用することによって運動状態のより正しい理解が促されていることが期待される。

最後に、①「EBS モードと構造的記述演習モードの 2 つは必要だと思いますか?」、②「EBS モードだけでも十分だったと思いますか?」、③「運動状態の構造記述演習モードだけでも十分だったと思いますか?」という質問についての結果を述べる。全ての質問に対す

#### 第4章 演習システムの実験的利用

る肯定的回答は矛盾である回答として両方必要であるという意見から除外した。また、①に肯定かつ②或いは③のどちらかのみで肯定である場合、両方必要だと感じたがどちらかといえばこの演習の方が必要だと感じたのみなし両方必要だと感じた被験者としてカウントした。その結果、両方必要だと感じた被験者の割合は約 72%となった。この結果から、多くの被験者にとって EBS と SDE は演習として両方必要であると考えられたことが分かった。

## 第4章 演習システムの実験的利用

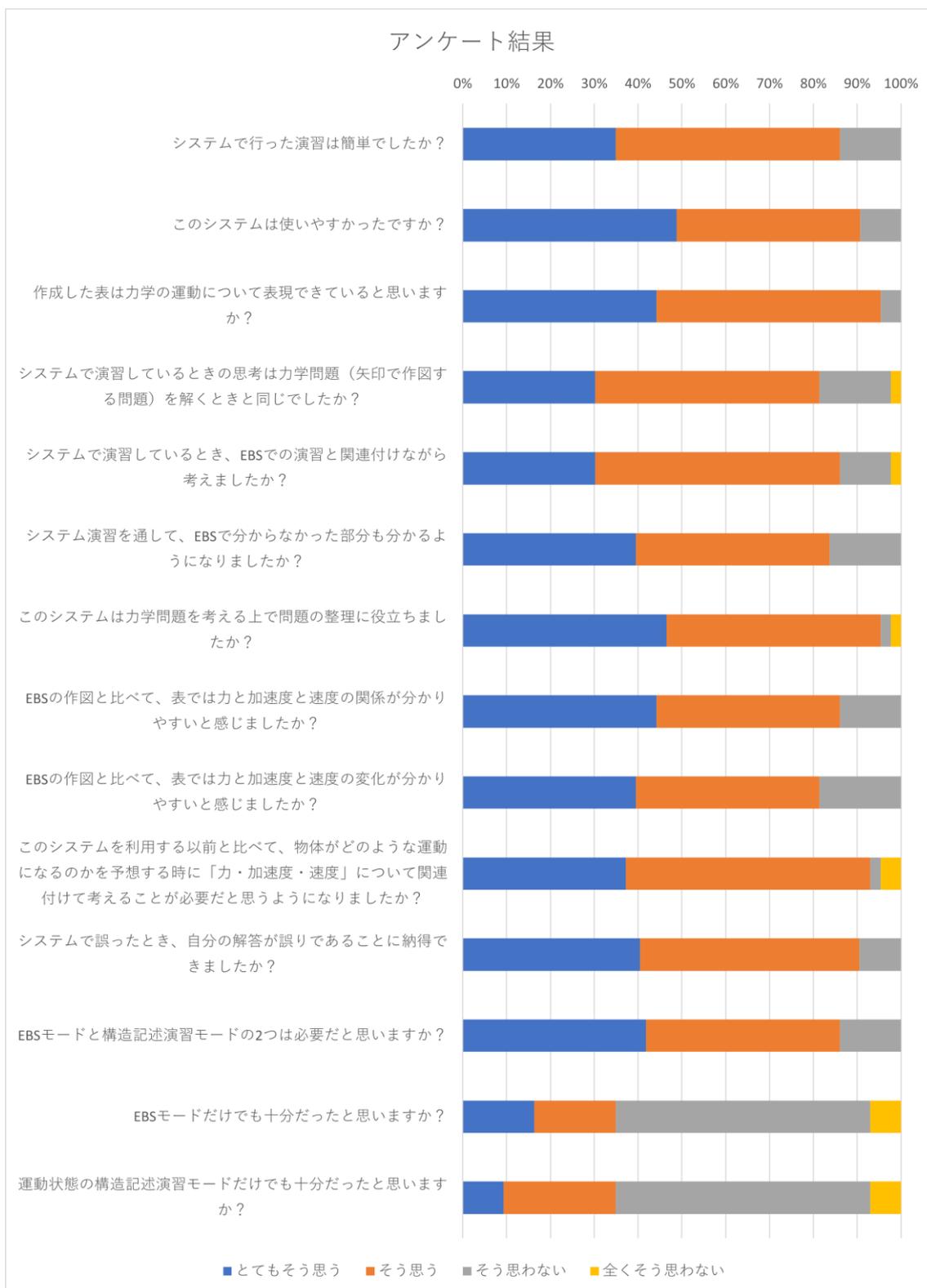


図 21 2023 年度アンケート結果

### 4.3 全体的な考察

4.1.1 及び 4.2.1 で述べた (1) から (7) の実験目的に対する考察をそれぞれ述べていく。

(1) では、ほとんどの学習者が時間内に SDE を終わらせることができ、また SDE に対するアンケートで多くの肯定的な意見を得たことから、SDE が演習方法として利用可能で学習者に受け入れられる結果が得られたと考えられる。

(2) では、EBS 後テスト、SDE 後テストにおける学習課題及び転移課題の結果より、EBS に追加で運動状態の理解に SDE の効果があると考えられる。MIF 素朴概念修正に関しては、2022 年度では被験者全体に有意差が見られ、2023 年度では EBS 後テストで MIF 誤答数が多い被験者に対して有意差が見られたことから、特に EBS 利用だけで修正がされにくい学習者に対して SDE による追加的な修正効果が示唆されている。また、課題達成の分類における分析結果から、特に EBS で達成できなかった課題に対して SDE 演習の効果が強く現れることが期待される。

(3) では、2023 年度実験的利用の遅延テストにおいて、その修正効果が一週間後まで全誤答数・MIF 誤答数ともに維持されたため、EBS と SDE を組み合わせた演習が答えの暗記ではなく正しい理解に結び付いていると考えられる。2022 年度実験的利用の一年後の遅延テストにおいては、全誤答数に対しては効果が持続したものの、MIF 誤答数に対しては事前テストで MIF 誤答数が多かった群に対してのみ効果が持続した。これは、MIF 素朴概念を多く持っている学習者に対して EBS と SDE を組み合わせた演習を行うことで、より強く誤り修正への内発的動機づけが行われているためであり、そのような学習者に特に MIF の修正効果がある演習であることが示唆されたと言える。

(4) については、2022 年度と 2023 年度の結果を比較して、課題達成状況、学習課題及び転移課題における全誤答数及び MIF 誤答数の推移、アンケート結果などで殆ど同じ傾向が得られたことから、この実験は再現性が十分にあるものと判断できると考えている。

(5) では、SDE が MIF 素朴概念を持っている学習者に対して MIF 素朴概念が修正されない場合において自信度を上げてしまうことが示唆されており、これについての対策は今後の課題となる。

(6) ではアンケートにより、多くの学習者が EBS と関連付けて SDE に取り組み、SDE の利点を感じながら EBS での理解の不足を補い、かつ EBS と SDE の両方が必要であると感じたことと考察できる結果が得られた。

以上のことより、本研究の目的である作図と運動状態を結び付けて考えられない学習者に対する支援として、また運動状態のより深い理解の促進に対して SDE の有効性があるものと考えられる。

## 第5章 まとめと今後の課題

本研究では、MIF 素朴概念修正を目的とした多視点 EBS 演習の課題である、作図と運動状態を結び付けて考えられない場合に対する支援を目的とし、運動状態の新たな表現方法としての表を提案し、作表プロセスを経験させるような運動状態構造的記述演習システム的设计開発を行った。二度行われた演習システムの実験的利用により、多視点 EBS 利用後に SDE を利用することで運動状態の正しい理解に対する追加的な学習効果があり、特に多視点 EBS 利用後に MIF 素朴概念が多く残っていた学習者に対して MIF 素朴概念修正効果があることが示唆された。また、転移課題に対しても全誤答数が減少したことから、SDE が運動状態の正しい理解に効果があることが示唆されていると考えられる。遅延テストにおいて、一週間後には全体的な誤答及び MIF 素朴概念による誤答に対して、一年後には全体的な誤答に対して学習効果が維持されたことから、多視点 EBS と SDE の組み合わせによる学習が深い理解に結び付いていることが示唆された。一年後の遅延テストにおける MIF 素朴概念に対する学習効果は、演習前から MIF 素朴概念を多く持っていた学習者に対しては維持されることが分かった。これらのことから、SDE は作図と運動状態の理解を結び付け、また運動状態に対する深い理解の促進をできることが示唆された。

今後の課題として、概念マップを用いた SDE 利用前後の MIF 素朴概念の変容を観測すること、SDE のみで学習効果があるか調べること、SDE で課題を達成しても MIF 素朴概念が維持された場合に自信度が上がりやすくなることに対する対策などが挙げられる。

謝辞

## 謝辞

本研究を行うにあたり，ご指導をいただいた平嶋宗教授，林雄介教授，並びに本論文の審査をしていただいた金田和文教授に感謝いたします。

また，実験に協力していただいた函館工業高等専門学校の倉山めぐみ准教授，並びに広島大学学習工学研究室の渡邊弘大氏，長澤怜男氏，伊東隆太氏に感謝いたします。

そして，多くの意見や助言をいただいた学習工学研究室の皆様にも感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Fisher, K.: A Misconception in Biology: Amino Acid and Translation, *Journal of Research in Science Teaching*, 22(1), pp. 53-62 (1985)
- [2] Clement, J.: Students' preconception in introductory mechanics, *American Journal of Physics*, 50(1), pp. 66-71(1982)
- [3] 山崎敏昭, 岸澤眞一, 長谷川大和, 安田淳一郎, 合田正毅, 覧具博義 : A9a-2 2014 物理教育の現状調査・力学概念調査からの分析 (2) : 問題別正答率分布から見た現状 (原著公園 (A9a), 大会テーマ「物理教育で大学と小・中・高校教育をどうつなぐか」), 物理教育学会年会物理教育研究大会予稿集 32, pp. 35-36 (2015)
- [4] 山崎翔平, 定本嘉郎, 牧井創 : MIF 素朴概念をなくす教材の開発と中学校での授業実践, *物理教育*, 57 (3), 215-219 (2009).
- [5] 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*, 21 (3), pp. 178-186 (2004)
- [6] Horiguchi, T., Hirashima, T., &Hayashi, Y.: Error-based simulation as a thought experimental method for changing “motion implies a force” misconception: An evaluation, *Journal of Computer Assisted Learning*, 39(4), pp. 1290-1302(2023)
- [7] 山田敦, 篠原智哉, 堀口知也, 林雄介, 平嶋宗 : 多視点 Error-based Simulation の設計・開発と実験的評価, *電子情報通信学会論文誌 D*, J99-D (12), pp. 1158-1161 (2016)
- [8] 西岡佳希, 下條一駿, 林雄介, 平嶋宗 : Error-based Simulation 利用学習による MIF 素朴概念修正の再構成型概念マップによる観測, 第 91 回人工知能学会 ALST 研究会 (2021)
- [9] Novak, J. D., &Canas, A. J.: The theory underlying concept maps and how to construct them, *Florida Institute for Human and Machine Cognition*, 1(1), pp. 1-31(2006)
- [10] Maria Araceli Ruiz-Primo. Richard, J., &Shavelson.: Problems and issues in the use of concept maps in science assessment, *Journal of Research in Science Teaching*, 33(6), pp. 569-600 (1996)
- [11] 山口悦司, 稲垣成哲, 福井真由美, 舟生日出男 : コンセプトマップ : 理科教育における研究動向とその現代的意義, *理科教育学研究*, 43 (1), pp. 29-51 (2002)

## 研究業績

1. 磯貝通也, 下條一駿, 平嶋宗, 林雄介: 誤りの可視化を通じた学習における運動状態の構造的記述演習の設計・開発, 2021年度 JSiSE 学生研究発表会 中国地区 (2月26日発表)
2. 藤田隆雅, 磯貝通也, 林雄介, 平嶋宗: 誤答に対する共感的理解の演習化と予備的評価, 2022年度 JSiSE 学生研究発表会 中国地区 (2月23日発表)
3. 磯貝通也, 平嶋宗, 林雄介: 初等力学における運動状態の構造的記述演習の実験的評価, 人工知能学会資料 先進的学習科学と工学研究会, 98, pp.19-24 (2023)

## 付録

### 付録 1 SDE のデモ映像

本研究で設計・開発した SDE のデモを記録した動画「運動状態構造的記述演習デモ」を YouTube にアップロードしたため、学習工学研究室のチャンネルの URL を付録として載せる。

<https://www.youtube.com/@user-cg2ix3ur3w>

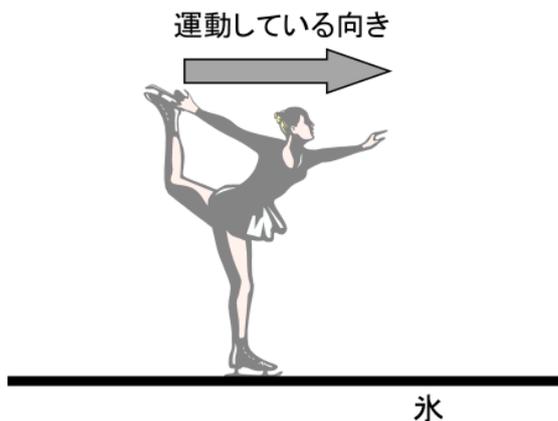
## 付録2 テスト問題

2022年度, 2023年度の実験的利用で用いたテスト問題をそれぞれ掲載する. 事前テストは, このテストの1から6の課題のみを扱っている. なお, 本誌に掲載するにあたってレイアウトを調整している.

### 2022年度テスト用紙

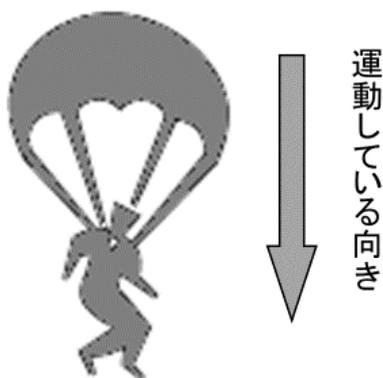
1. 女の子がスケートで氷の上をすべっています. 女の子は今, 矢印の方向に等速直線運動をしています. 空気抵抗や氷からの摩擦力は受けないと仮定します. このとき, 女の子には, どのような力がはたらいていますか?

下の図に矢印で表してください. 何も力がはたらいていないと思う場合には, 女の子に大きくバツ印(×)を付けてください.



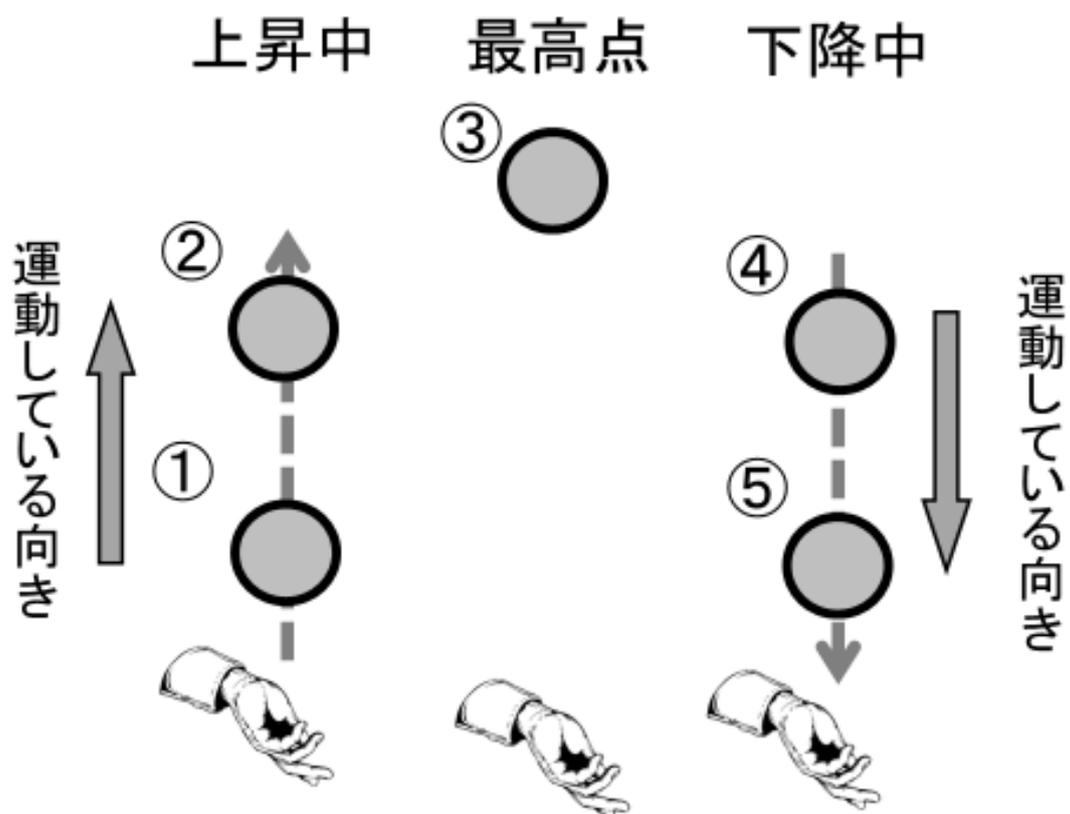
2. 男の人がパラシュートを開いて落下しています. 男の人は今, 矢印の方向に等速直線運動をしています. このとき, 男の人には, どのような力がはたらいていますか?

矢印で表してください. 何も力がはたらいていないと思う場合には, 男の人に大きくバツ印(×)を付けてください.



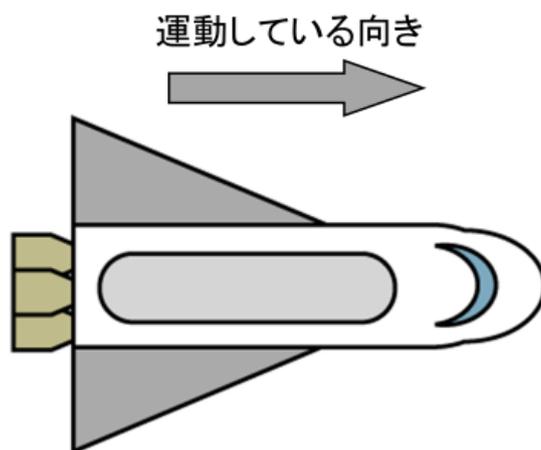
3. ある人がボールを真上に投げ上げました。①と②は上昇しているとき、③は最高点に達したとき、④と⑤は下降しているときの位置を表しています。空気抵抗は受けないと仮定します。①～⑤の位置において、それぞれボールにはどのような力がはたらいていますか？

矢印で表してください。その位置では何も力がはたらいていないと思う場合には、ボールに大きくバツ印（×）を付けてください。



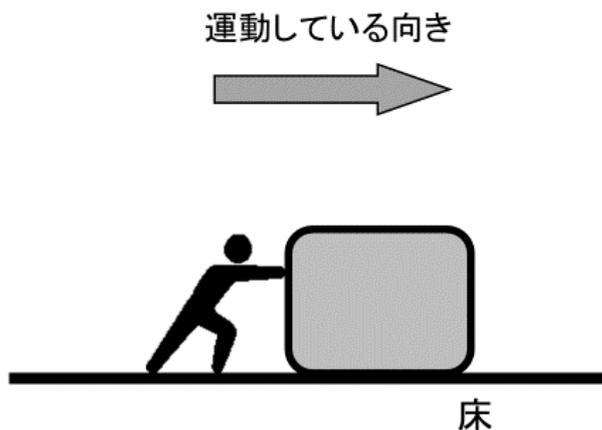
4. ロケットが宇宙空間を、矢印の方向に等速直線運動しています。エンジンは作動していません。ロケットには、どのような力がはたらいていますか？

矢印で表してください。何も力がはたらいていないと思う場合には、ロケットに大きくバツ印（×）を付けてください。



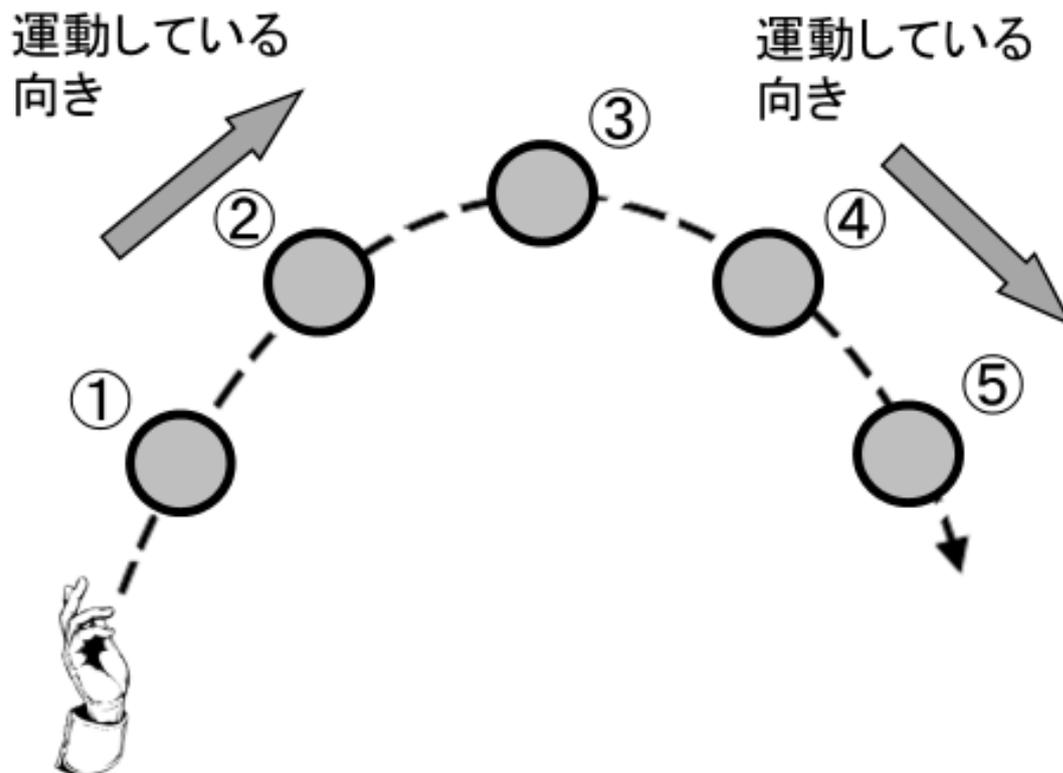
5. 大きな箱を、摩擦のある水平な床の上で、一定の力で右向きに押しています。今、箱は矢印の方向に床の上を等速直線運動しています。空気抵抗は受けないと仮定します。このとき、箱には、どのような力がはたらいていますか？

矢印で表してください。何も力がはたらいていないと思う場合には、箱に大きくバツ印（×）を付けてください。

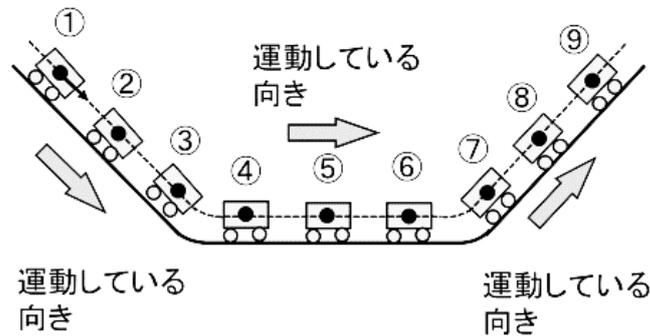


6. ある人がボールを斜め上に投げ上げました。①と②は上昇しているとき、③は最高点に達したとき、④と⑤は下降しているときの位置を示します。空気抵抗は受けないと仮定します。①～⑤の位置において、それぞれボールにはどのような力がはたらいていますか？

矢印で表してください。その位置では何も力がはたらいていないと思う場合には、ボールに大きくバツ印（×）を付けてください。

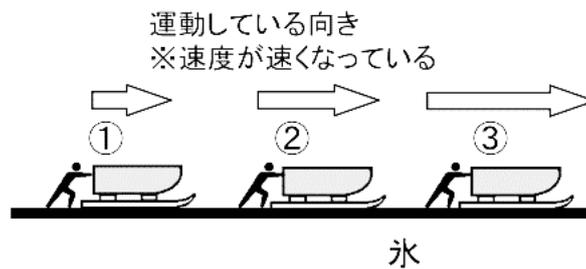


7. 力学台車が図のように、摩擦のない面を左から右へ運動しています。①の位置で力学台車には図のように点線方向に力がはたらいているとします。空気抵抗や摩擦力は受けないと仮定します。②～⑨の位置で点線方向にはたらく力を矢印で表してください。その位置では点線方向に何も力がはたらいていないと思う場合には、力学台車に大きくバツ印（×）を付けてください。



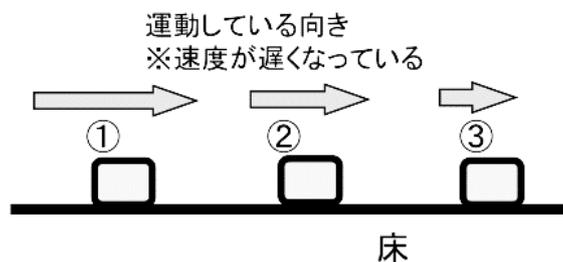
8. そりを、摩擦のない水平な氷の上で、矢印の方向に押しています。そりと氷との間に摩擦はありませんが、押している人はスパイクを履いていて、すべらずに歩かことができます。このとき、そりは床の上を一定の割合で矢印の方向に加速しながら運動しています。空気抵抗は受けないと仮定します。①～③の位置において、それぞれそりにはどのような力がはたらいていますか？

矢印で表してください。その位置では何も力がはたらいていないと思う場合には、そりに大きくバツ印（×）を付けてください。



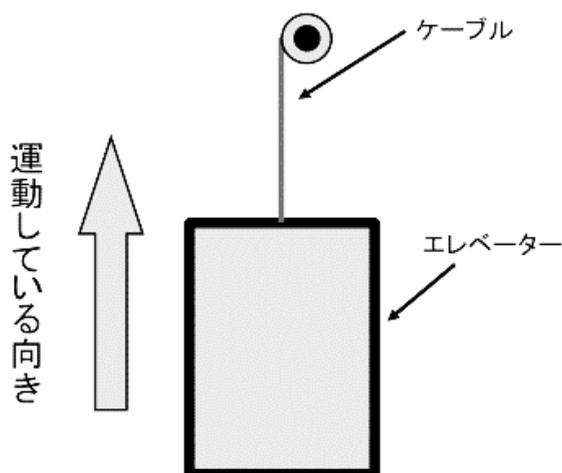
9. 大きな箱を、摩擦のある水平な床の上で、矢印の向きに押しています。その結果、箱はある速度で矢印の向きに進んでいました。図の①の位置より手前で押すのを止めたところ、箱は床の上を一定の割合で減速しながら矢印の向きに運動しています。空気抵抗は受けないと仮定します。①～③の位置において、それぞれ箱にはどのような力がはたらいていますか？

矢印で表してください。その位置では何も力がはたらいていないと思う場合には、箱に大きくバツ印（×）を付けてください。



10. エレベーターが鋼鉄のケーブルに引かれて上昇しています。エレベーターは一定の速度で上昇しています。空気抵抗や摩擦力は受けないと仮定します。このとき、エレベーターには、どのような力がはたらいていますか？

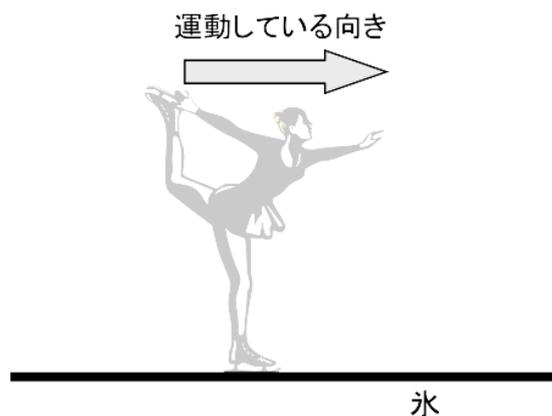
矢印で表してください。何も力がはたらいていないと思う場合には、エレベーターに大きくバツ印（×）を付けてください。



### 2023 年度テスト問題

1. 女の子がスケートで氷の上をすべっています。女の子は今、矢印の方向に等速直線運動をしています。空気抵抗や氷からの摩擦力は受けないと仮定します。このとき、女の子には、どのような力がはたらいていますか？

下の図に矢印で表してください。何も力がはたらいていないと思う場合には、女の子に大きくバツ印（×）を付けてください。

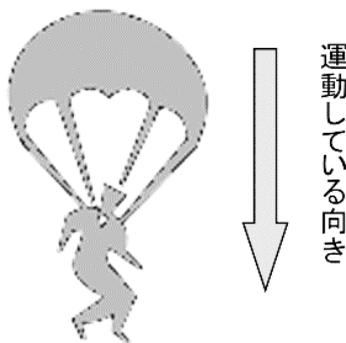


この問題に対して自分の答えに自信がありますか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない

2. 男の人がパラシュートを開いて落下しています。男の人は今、矢印の方向に等速直線運動をしています。このとき、男の人には、どのような力がはたらいていますか？

矢印で表してください。何も力がはたらいていないと思う場合には、男の人に大きくバツ印（×）を付けてください。

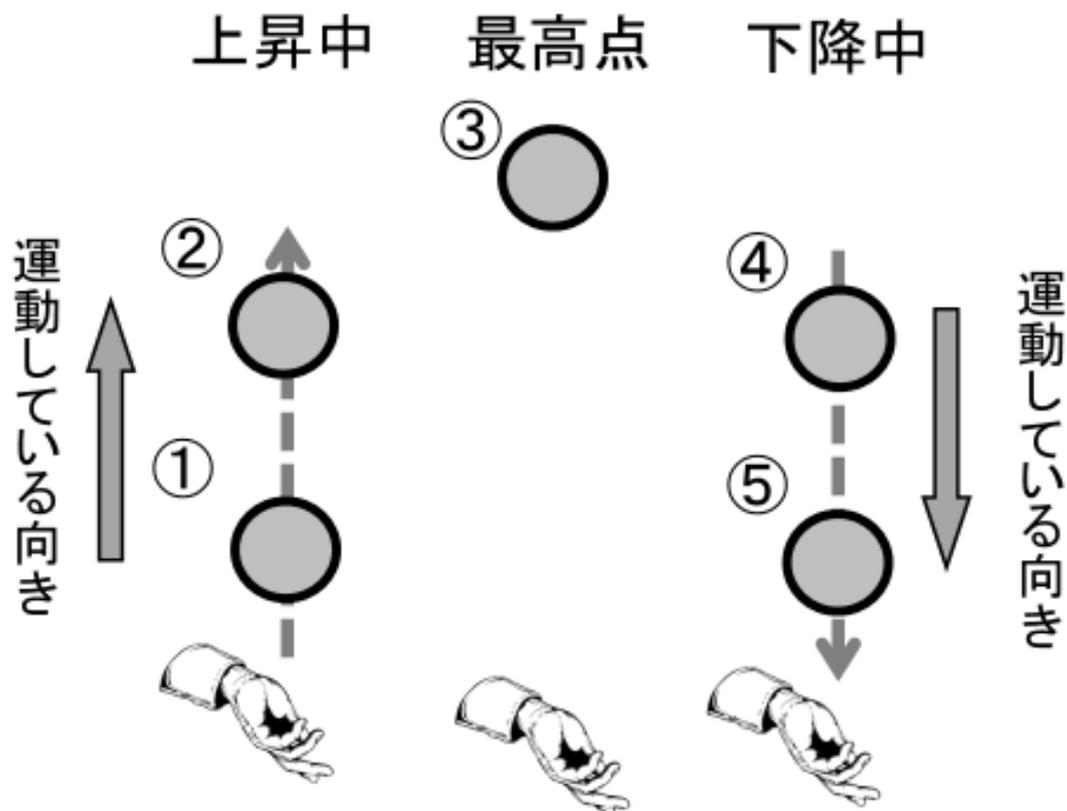


この問題に対して自分の答えに自信がありますか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない

3. ある人がボールを真上に投げ上げました。①と②は上昇しているとき、③は最高点に達したとき、④と⑤は下降しているときの位置を表しています。空気抵抗は受けないと仮定します。①～⑤の位置において、それぞれボールにはどのような力がはたらいていますか？

矢印で表してください。その位置では何も力がはたらいていないと思う場合には、ボールに大きくバツ印（×）を付けてください。

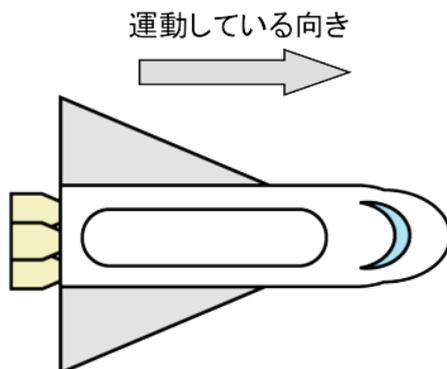


この問題に対して自分の答えに自信がありますか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない

4. ロケットが宇宙空間を、矢印の方向に等速直線運動しています。エンジンは作動していません。ロケットには、どのような力がはたらいていますか？

矢印で表してください。何も力がはたらいていないと思う場合には、ロケットに大きくバツ印（×）を付けてください。

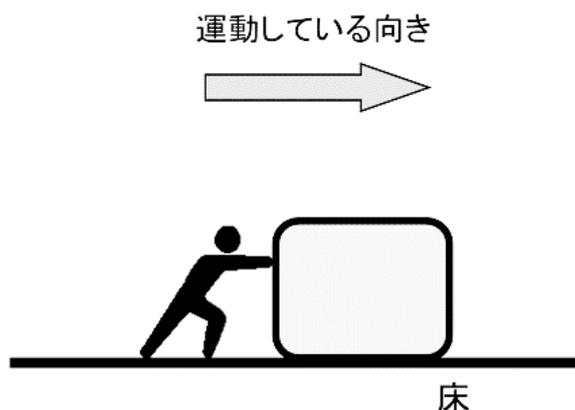


この問題に対して自分の答えに自信がありますか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない

5. 大きな箱を、摩擦のある水平な床の上で、一定の力で右向きに押しています。今、箱は矢印の方向に床の上を等速直線運動しています。空気抵抗は受けないと仮定します。このとき、箱には、どのような力がはたらいていますか？

矢印で表してください。何も力がはたらいていないと思う場合には、箱に大きくバツ印（×）を付けてください。

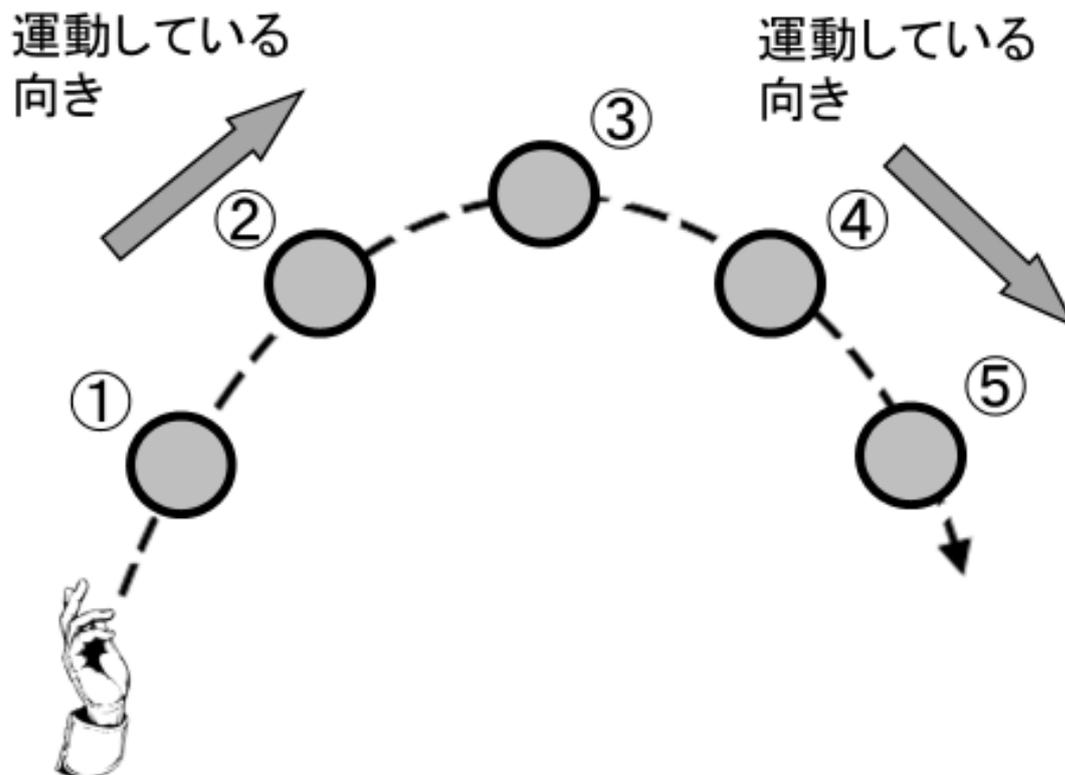


この問題に対して自分の答えに自信がありますか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない

6. ある人がボールを斜め上に投げ上げました。①と②は上昇しているとき、③は最高点に達したとき、④と⑤は下降しているときの位置を示します。空気抵抗は受けないと仮定します。①～⑤の位置において、それぞれボールにはどのような力がはたらいていますか？

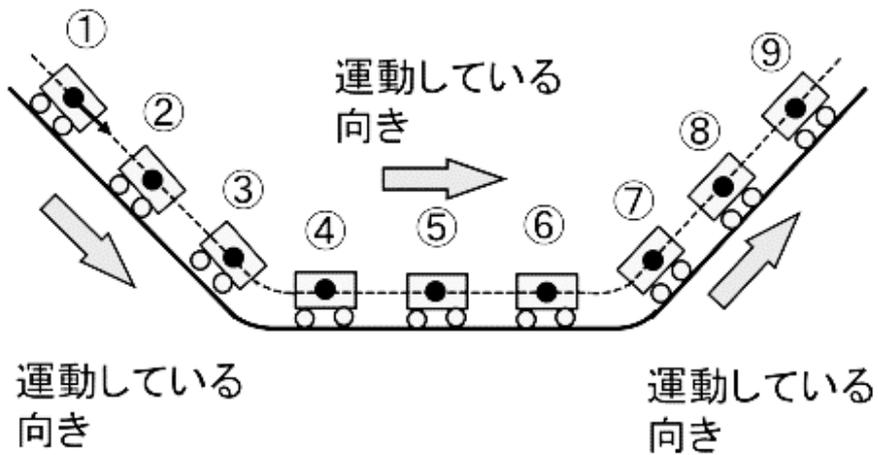
矢印で表してください。その位置では何も力がはたらいていないと思う場合には、ボールに大きくバツ印（×）を付けてください。



この問題に対して自分の答えに自信がありますか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない

7. 力学台車が図のように、摩擦のない面を左から右へ運動しています。①の位置で力学台車には図のように点線方向に力がはたらいっているとします。空気抵抗や摩擦力は受けないと仮定します。②～⑨の位置で点線方向にはたらく力を矢印で表してください。その位置では点線方向に何も力がはたらいっていないと思う場合には、力学台車に大きくバツ印(×)を付けてください。



この問題に対して自分の答えに自信がありますか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない

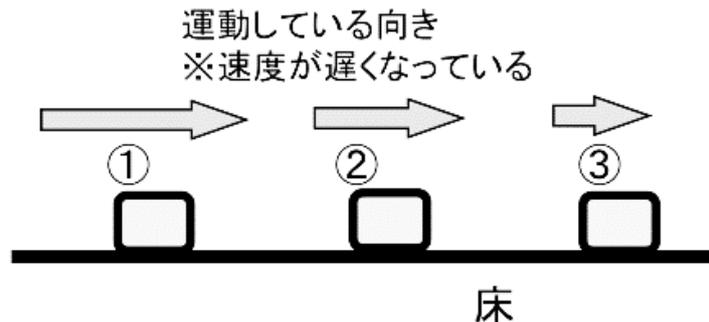
8. そりを、摩擦のない水平な氷の上で、矢印の方向に押しています。そりと氷との間に摩擦はありませんが、押している人はスパイクを履いていて、すべらずに歩くことができます。このとき、そりは床の上を一定の割合で矢印の方向に加速しながら運動しています。空気抵抗は受けないと仮定します。①～③の位置において、それぞれそりにはどのような力がはたらいていますか？矢印で表してください。その位置では何も力がはたらいっていないと思う場合には、そりに大きくバツ印(×)を付けてください。



この問題に対して自分の答えに自信がありますか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない

9. 大きな箱を、摩擦のある水平な床の上で、矢印の向きに押しています。その結果、箱はある速度で矢印の向きに進んでいました。図の①の位置より手前で押すのを止めたところ、箱は床の上を一定の割合で減速しながら矢印の向きに運動しています。空気抵抗は受けないと仮定します。①～③の位置において、それぞれ箱にはどのような力がはたらいていますか？矢印で表してください。その位置では何も力がはたらいていないと思う場合には、箱に大きくバツ印（×）を付けてください。



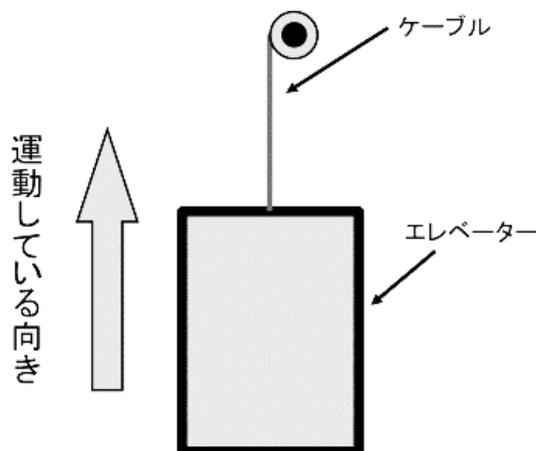
この問題に対して自分の答えに自信がありますか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない

10.

エレベーターが鋼鉄のケーブルに引かれて上昇しています。エレベーターは一定の速度で上昇しています。空気抵抗や摩擦力は受けないと仮定します。このとき、エレベーターには、どのような力がはたらいていますか？

矢印で表してください。何も力がはたらいていないと思う場合には、エレベーターに大きくバツ印（×）を付けてください。



この問題に対して自分の答えに自信がありますか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない

### 付録3 アンケート用紙

2022年度, 2023年度の実験的利用で用いたアンケート用紙を掲載する. なお, 本誌に掲載するにあたりレイアウトの調整をしている.

#### 2022年度アンケート用紙

#### 7. システムに関するアンケート

出席番号： \_\_\_\_\_

1 システム（運動状態の構造的記述演習モード）についてお聞きします。

質問1 システムで行った演習は簡単でしたか？

とてもそう思う      そう思う      そう思わない      全くそう思わない

質問2 このシステムは使いやすかったですか？

とてもそう思う      そう思う      そう思わない      全くそう思わない

質問3 作成した表は力学の運動について表現できていると思いますか？

とてもそう思う      そう思う      そう思わない      全くそう思わない

質問4 システムで演習しているときの思考は力学問題（矢印で力を作図する問題）を解くときと同じでしたか？

とてもそう思う      そう思う      そう思わない      全くそう思わない

質問5 このシステムは力学問題を考える上で問題の整理に役立ちましたか？

とてもそう思う      そう思う      そう思わない      全くそう思わない

質問6 このシステムに欲しい機能、その他感想・コメント等あればお願いいたします。

2 システム（EBSモード）についてお聞きします。

## 付録

質問1 システムで行った作図は簡単でしたか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない

質問2 このシステムは使いやすかったですか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない

質問3 システムで作図している時の思考は、普通の力学の問題を解くときと同じでしたか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない

質問4 システムで正しい作図を行った時に提示されるシミュレーションは、自分が納得できるものでしたか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない 正解に至っていない

質問5 システムで誤った作図に基づいたシミュレーションを見たことによって、自分の作図が誤りであることに納得できましたか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない

質問6 システムで誤った作図に基づいたシミュレーションを見たことによって、自分の誤った作図を修正しようと思いましたか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない

質問7 システムで誤った作図に基づいたシミュレーションを見ることは、誤りの修正に役立つと思いますか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない

質問8 システムで誤った作図に基づいたシミュレーションを見た後の思考によって、出題された問題についての理解が深まったと思いますか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない

質問9 このシステムを利用することで、物体がどのような運動になるのかを予想する時に「力・加速度・速度」について関連付けて考える必要があるということに気がきましたか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない

質問 10 このシステムを利用する以前と比べて、物体がどのような運動になるのかを予想する時に「力・加速度・速度」について関連付けて考えることが必要だと思いうになりましたか？

とてもそう思う      そう思う      そう思わない      全くそう思わない

質問 11 このシステムに欲しい機能、その他感想・コメント等あればお願いいたします。

以上でアンケートは終了です。ご記入、ありがとうございました。

## 2023 年度アンケート用紙

### 7. システムに関するアンケート

出席番号： \_\_\_\_\_

質問 EBS モードで誤りのシミュレーションを見たときの印象は、構造的記述演習モードで誤ったときの印象より強かったですか？

とてもそう思う   そう思う   どちらとも言えない   そう思わない   全くそう思わない

#### 1 システム (EBS モード) についてお聞きします。

質問 1 システムで行った作図は簡単でしたか？

とてもそう思う      そう思う      そう思わない      全くそう思わない

質問 2 このシステムは使いやすかったですか？

とてもそう思う      そう思う      そう思わない      全くそう思わない

質問 3 システムで作図している時の思考は、普通の力学の問題を解くときと同じでしたか？

とてもそう思う      そう思う      そう思わない      全くそう思わない

質問 4 システムで正しい作図を行った時に提示されるシミュレーションは、自分が納得できるものでしたか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない 正解に至っていない

質問 5 システムで誤った作図に基づいたシミュレーションを見たことによって、自分の作図が誤りであることに納得できましたか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない

質問 6 システムで誤った作図に基づいたシミュレーションを見たことによって、自分の誤った作図を修正しようと思いましたか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない

質問 7 システムで誤った作図に基づいたシミュレーションを見ることは、誤りの修正に役立つと思いますか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない

質問 8 システムで誤った作図に基づいたシミュレーションを見た後の思考によって、出題された問題についての理解が深まったと思いますか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない

質問 9 このシステムを利用する以前と比べて、物体がどのような運動になるのかを予想する時に「力・加速度・速度」について関連付けて考えることが必要だと思うようになりましたか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない

## 2 システム（運動状態の構造的記述演習モード）についてお聞きします。

質問 1 システムで行った演習は簡単でしたか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない

質問 2 このシステムは使いやすかったですか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない

質問 3 作成した表は力学の運動について表現できていると思いますか？

とてもそう思う そう思う そう思わない 全くそう思わない

質問 4 システムで演習しているときの思考は力学問題（矢印で作図する問題）を解くときと同じでしたか？

付録

とてもそう思う      そう思う      そう思わない      全くそう思わない

質問5 システムで演習しているとき、EBSでの演習と関連付けながら考えましたか？

とてもそう思う      そう思う      そう思わない      全くそう思わない

質問6 システム演習を通して、EBSで分からなかった部分も分かるようになりましたか？

とてもそう思う      そう思う      そう思わない      全くそう思わない

質問7 このシステムは力学問題を考える上で問題の整理に役立ちましたか？

とてもそう思う      そう思う      そう思わない      全くそう思わない

質問8 EBSの作図と比べて、表では力と加速度と速度の関係が分かりやすいと感じましたか？

とてもそう思う      そう思う      そう思わない      全くそう思わない

質問9 EBSの作図と比べて、表では力と加速度と速度の変化が分かりやすいと感じましたか？

とてもそう思う      そう思う      そう思わない      全くそう思わない

質問10 このシステムを利用する以前と比べて、物体がどのような運動になるのかを予想する時に「力・加速度・速度」について関連付けて考えることが必要だと思うようになりましたか？

とてもそう思う      そう思う      そう思わない      全くそう思わない

質問11 システムで誤ったとき、自分の解答が誤りであることに納得できましたか？

とてもそう思う      そう思う      そう思わない      全くそう思わない

質問12 EBSモードと構造記述演習モードの2つは必要だと思いますか？

とてもそう思う      そう思う      そう思わない      全くそう思わない

質問13 EBSモードだけでも十分だったと思いますか？

とてもそう思う      そう思う      そう思わない      全くそう思わない

質問14 運動状態の構造記述演習モードだけでも十分だったと思いますか？

とてもそう思う      そう思う      そう思わない      全くそう思わない

質問 15 実験全体を通して感想・コメント等あればお願いいたします。

以上でアンケートは終了です。ご記入、ありがとうございました。