

# 物理学系講義受講生の力学概念調査と物理学教育改善

Study on the Force Concept of the Students in Several Physics Classes and the  
Improvement on the Physics Education

黒田 潔\*, 水野貴敏\*, 宮田成紀\*\*

Kiyoshi Kuroda \*, Takatoshi Mizuno \* and Seiki Miyata \*\*

\*玉川大学 工学部 エンジニアリングデザイン学科 物理研究室

\*\*玉川大学 工学部 情報通信工学科 物理研究室

194-8610 東京都町田市玉川学園 6-1-1

\*Physics Laboratory, Department of Engineering Design,

\*\*Physics Laboratory, Department of Information & Communication Technology,

College of Engineering, Tamagawa University

6-1-1 Tamagawa-Gakuen, Machida, Tokyo 194-8610

## Abstract

Understanding of the force concept was analyzed by evaluating the Force Concept Inventory (FCI) in several physics lectures from FY2016 to FY2018. Correct and false choice of the FCI corresponds to the understanding and misunderstanding of the natural phenomenon derived from dynamics respectively. Therefore, the analysis of the results by FCI is considered to contribute to improving the Physics Education. By analyzing the results of FCI, it became clear that the importance of the integration between the equation of motion and the natural phenomenon of dynamics.

Keywords: force concept, force concept inventory, FCI, physics education, active learning

## 1. はじめに

力学的自然現象の理解度、換言すれば誤概念（素朴概念とも言われる）の保持の度合いを測定するための手段として、「力学概念指標（Force Concept Inventory；以下FCI）」<sup>1)</sup>が広く用いられている。計算はなく、概念のみの5択の解答を選択する設問形式であり、学生は30問を30分間でマークシートにマークする。各設問が問うニュートン力学的概念と、各設問の間違いとして設定された選択肢ごとに予想される力学的誤概念が、新田ら<sup>2)</sup>や右近<sup>3)</sup>によって詳しく解説されている。

本学におけるFCIを用いた力学概念調査については既に報告されており<sup>4)</sup>、その調査の意義や当時（2016年度）の調査結果についてはその既報に詳細を譲るが、当時に結論された事実の概要は以下のようである。

- ・全学型から農学部、工学部対応のいくつかの講義でFCIを実施した。
- ・15回の講義の最初と最後にFCIを実施した。
- ・各学生の正答率の平均の変化から計算される規格化された向上率（GAIN）は、講義ごとに0.07～0.25に分布した。

- ・誤答率が大きかったニュートン力学的概念として、「力が打ち消しあう場合」と「打ち消しあう力」などが挙げられた。
- ・学生が保持すると推測される誤概念として、「ベクトルとして速度を合成できない」、「速度は加えられた力に比例する」、「運動は活性力の存在を示唆している」、「加速は力が増加していくことを示唆している」などが挙げられた。

15回の講義の最初回から最終回に至り、FCIの正答率の向上の度合いを示す指標として、Hakeは(1)式に示す規格化された向上率 (*GAIN*)<sup>5)</sup>を用いた。15回の講義の最初回と最終回のFCIの平均値をそれぞれ *pre*. (%), *post* (%)として以下となる。

$$GAIN = \frac{post(\%) - pre(\%)}{100 - pre(\%)} \quad (1)$$

この *GAIN* は伸びしろに対する伸び値の割合である。笠<sup>5)</sup>によれば、いわゆる教師がしゃべり続けるタイプの講義では *GAIN* が 0.23 を中心に分布し、アクティブ・ラーニングなどを含むインタラクティブな講義では 0.48 を中心に分布したという。2016年度の本学での調査結果によれば、0.07～0.25 に分布したので、従来型の教え込む形式の講義が多く実施されていると思われるが、実際にはグループワーク、あるいは動画による事前学習等のアクティブ・ラーニング型講義も含まれていたはずである。それにもかかわらず *GAIN* が低いことの原因については言及されていないが、FCIを使用する目的が「FCIは学生の持つ誤概念を客観的に測定し、それを授業改善にのみ用いるべきである」<sup>4)</sup>とされているため、継続的に観察し、授業改善へ資する情報を得ることの意義は大きいと考えられる。

本稿では、2016年度に続くFCI継続実施の結果を示すとともに、学生が持つ誤概念の変遷とその内容、さらに本学における物理学教育の今後の方針等について言及する。

## 2. FCIの示すニュートン力学的概念と誤概念

FCIには、ニュートン力学的概念とその誤概念が設問ごとに設定されていることは既に記述した。新田らによると、FCIの設問とニュートン力学的概念の対応が表1のように示されている<sup>2,4)</sup>。つまり、学生の解答を分析することにより、特に誤答率の高い設問がどの項目を示しているかを明らかにすることができる。2016年度に観測された、例えば「力が打ち消しあう場合」は、「1. 第1法則・項目1.2」という分類であることがわかる。

表1 FCIの設問とニュートン力学的概念の対応<sup>1,4)</sup>

ニュートン力学的概念	設問番号
0. 運動学	該当する設問番号が複数示されている
0.1 位置と速度の区別	
0.2 加速度と速度の区別	
0.3 等加速度による放物軌道	
0.4 等加速度による速度変化	
0.5 ベクトルとしての速度の加法	
1. 第1法則	
1.1 力が加わっていない場合	
1.1.1 速度の向きが一定	
1.1.2 速さが一定	
1.2 力が打ち消し合う場合	
2. 第2法則	
2.1 撃力	
2.2 一定の力は一定の加速度をもたらす	
3. 第3法則	
3.1 撃力の場合	
3.2 連続的な力の場合	
4. 重ね合わせの原理	
4.1 ベクトル和	
4.2 打ち消し合う力	
5. 力の種類	
5S.1 受動的	
5S.2 撃力的	
5S.3 摩擦は運動を妨げる	
5F.1 空気抵抗	
5G 重力	
5G.1 重さによらない加速	
5G.2 放物軌道	

一方、新田らによると、HestenesらはFCIの設問内の選択肢と誤概念の対応を表2のように示しているという<sup>1,2,4)</sup>。同様に学生の誤答選択肢を分析

表 2 FCI の設問内の選択肢と誤概念の対応<sup>1,2,4)</sup>

誤概念		設問番号 と選択肢
0. Kinematics（運動学）		
K1.	位置と速度が区別できない	該当する設問番号と選択肢が示されている
K2.	速度と加速度が区別できない	
K3.	ベクトルとして速度を合成できない	
K4.	自己を中心とした観測系	
1. Impetus（インペタス）		
I1.	「たたかれて」供給されるインペタス	
I2.	元からあったインペタスの損失（または回復）	
I3.	インペタスの散逸	
I4.	徐々に（または遅れて）蓄えられるインペタス	
I5.	回転のインペタス	
2. Active Forces（活性力）		
AF1.	活動的なものだけが力を及ぼせる	
AF2.	運動は活性力の存在を示唆している	
AF3.	運動していないことは力が存在しないことを示唆している	
AF4.	速度は加えられた力に比例する	
AF5.	加速は力が増加していくことを示唆している	
AF6.	力は終端速度に達するまでの加速の原因となる	
AF7.	活性力は消費されていく	
3. Action/Reaction Pairs（作用・反作用のペア）		
AR1.	より大きな質量はより大きな力を示唆している	
AR2.	最も活動的なものが最も大きい力を発生させる	
4. Concatenation of Influences（影響の連鎖）		
CI1.	最も大きい力が運動を決定する	
CI2.	力の折衷が運動を決定する	
CI3.	最後に働いた力が運動を決定する	
5. Other Influences on Motion（その他の運動への影響）		
CF.	遠心力	
Ob.	障害物は力を及ぼさない	
Resistance（抵抗）		
R1.	質量は物体を止める	
R2.	力が抵抗に打ち勝つときの運動	
R3.	抵抗は力／インペタスに逆らう	
Gravity（重力）		
G1.	空気の圧力を利用した重力	
G2.	質量に固有の重力	
G3.	重い物体のほうが速く落ちる	
G4.	物体の落下に連れて重力は大きくなる	
G5.	インペタスが消耗してから重力が働く	

することにより，学生が保持すると推測される誤概念を講義ごとに示すことが可能になると考えられる．2016年度に観測された，例えば「ベクトルとして速度を合成できない」という誤概念は，「0. Kinematics（運動学）・項目K3.」という分類であることがわかる．

### 3. FCIの実施とその結果

2016年度同様，2017～2018年度に開講されたいくつかの物理学系講義について，FCIを実施した．その講義の特徴は2016年度における標記と同じくし，以下のとおりである．

- ・type A：全学US「物理学入門」：全学部～全学年が対象，主に科学リテラシーの醸成を想定：アクティブ・ラーニングを一部含む．
- ・type B：農学部「物理学」：農学部理科教員志望学生が対象，中等教育での理科全般教育のための科学的概念の醸成と，教員採用試験対応を見据えた講義：アクティブ・ラーニングを一部含む．
- ・type C：工学部US「物理学入門」：いわゆる初年次リメディアル教育で，大学物理内容に沿う科目「物理学Ⅰ」への準備
- ・type D：工学部「物理学Ⅰ」：いわゆる微分方程式による運動を記述するまでに至る大学初等物理学：アクティブ・ラーニングを一部含む．

以下の結果に関しては，講義による個人情報の特定をなるべく避ける表示としてあることをあらかじめお断りしたい．講義によって，調査時期（2016～2018年度の春学期と秋学期）と受講者数が異なる．また，講義の特徴はtype A/B/C/Dとして簡便に表示してある．

type A/B/C/Dの講義の受講者数と  $GAIN$  の関係を図1に示す．黒く塗った凡例（●，■，◆）はアクティブ・ラーニングを一部含む講義（type A/B/D）であるが，含まない講義（○）に比して全体の傾向として高い  $GAIN$  を示すことがわかる．しかし，

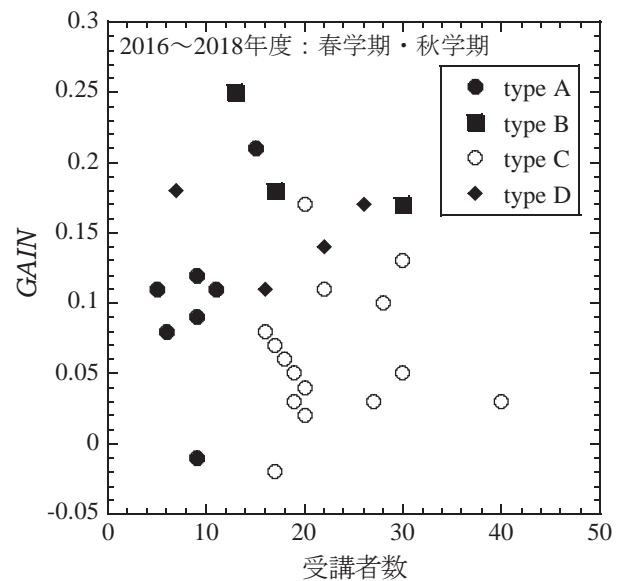


図1 type A/B/C/D の講義の受講者数と  $GAIN$

$GAIN$ は $0.15 \pm 0.1$ 程度を示し，笠<sup>5)</sup>による0.48には及ばず，むしろ従来型の講義の値に近い．一方，従来型の教え込む形式の講義であるtype Cについては  $GAIN$ の平均が $0.05 \pm 0.1$ 程度を示し，これはつまり講義前後のFCIの向上がほとんど観られないことを意味する．また，30名程度までの受講者数と  $GAIN$ には関係性は観られない．

type A/B/C/Dの講義の最初回のFCIの正答率と  $GAIN$  の関係を図2に示す．ここでも二つの指標に相関は観られない．本学での講義の最初回のFCIの正答率の平均は約40%で，30問中12問前後の正答数を示すことが多い．別に実施されたプレースメントテストで上位層を集めた講義では，最初回のFCIの正答率が65.6%を示したが，その  $GAIN$ は0.18で決して高くはない．

この二つの結果から結論されることは，ニュートン力学的概念の修得にとって，受講者数が30人程度までの規模であることと，講義の最初回のFCIの正解率が40%程度であることは，その後の講義の展開にとって大きな影響を与えないであろうということである．もっとも，受講者が30人以上の規模の講義で，どの程度的人数までが  $GAIN$ に関与しないかということについては明らかではない．また，講義の最初回のFCIの正答率が

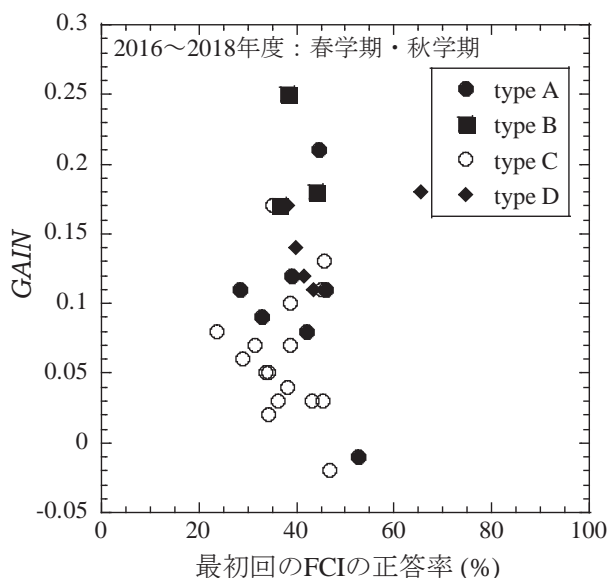


図2 type A/B/C/D の講義の最初回の FCI の正答率と *GAIN* の関係

より高い場合やより低い場合について、同様の結論を導き出せるかについても明らかではない。

そもそも、ここで示された *GAIN* は、アクティブ・ラーニングを一部含む講義であっても先行研究で示された値の 0.48 には及んでいない。

Hestenes らによる先行研究では、FCI の正答率が 60% (正答 18 問) 以上である場合、ニュートン力学の学習を始めることが可能とされ、85% (正答 26 問) 以上である場合、ニュートン力学的概念の理解度が要求水準に達しているとされる<sup>9)</sup>。この考え方に依るならば、type D のある一つの授業のみがニュートン力学の学習を始めることが可能であったことを意味し、講義の最終回の FCI の正答率の平均が 85% を上回る講義は存在しなかった

(最高値は 72% であった) ので、ニュートン力学的概念の理解度が要求水準に達していなかったと言える。しかしこれらはあくまでその講義内で受講している学生の平均値を示しているため、個々の学生を対象にすれば、正答率が 60% あるいは 85% を超える学生は存在する。そうではあるが、ある講義のすべての学生を対象として授業改善をするわけであるから、ここはやはり平均値の議論が重要と言え、その意味では力学的概念のさら

なる理解のための継続的な授業改善が必要ということを示す。

次に、ある年度のアクティブ・ラーニングを一部含む type A/B/D の講義における、個々の学生の最終回の FCI の正答率と、その学生が示した *GAIN*、および成績評価対象である最終試験の結果 (100 点満点) について図 3 に示して議論する。このことを俯瞰すると、前出の議論における「個々の学生を対象にすれば、正答率が 60% あるいは 85% を超える学生は存在する」様子を観ることができる。平均の *GAIN* の議論が重要であることは指摘したが、個々の学生の一定の傾向を知ることも重要であろう。

図 3 の type A は全学を対象にした「物理学入門」の結果を示す。受講人数が 9 人と少なく、最終回の FCI の正答率と *GAIN* がほぼ相関していることがわかる。つまり講義を受講したのち、正しい概念持つに至った学生が存在するというを示すが、向上の大きい学生はどの講義にも少なからず存在するため、当然の結果である。type A の授業は、力学のみではなく、簡単な電気回路と原子およびその反応に関する内容も含むため、最終試験の結果は力学概念の修得度を直接的に示すものではない。したがって、最終回の FCI の正答率が低く *GAIN* が ~0.15 程度であっても、最終試験結果が 60 点以上である学生が存在する。この type A の講義に関しては、特に最終試験乃至中間試験での力学概念に関する事項のみを抽出する必要がある。

図 3 の type B は農学部理科教員志望学生が対象の講義であり、type A 同様、力学以外についても学習する。最終回の FCI の正答率と *GAIN* は関係性が強い。また最終回の FCI の正答率が 60% を超え、*GAIN* も 0.4 を超える学生が 1/4 程度存在しており学生個々に観た場合は良好な状況である。しかし、最終回の FCI の正答率が 40% 以下で *GAIN* が負の値を示す学生も多く、検討が必要である。また、type A 同様、最終回の FCI の正答率が低くとも、最



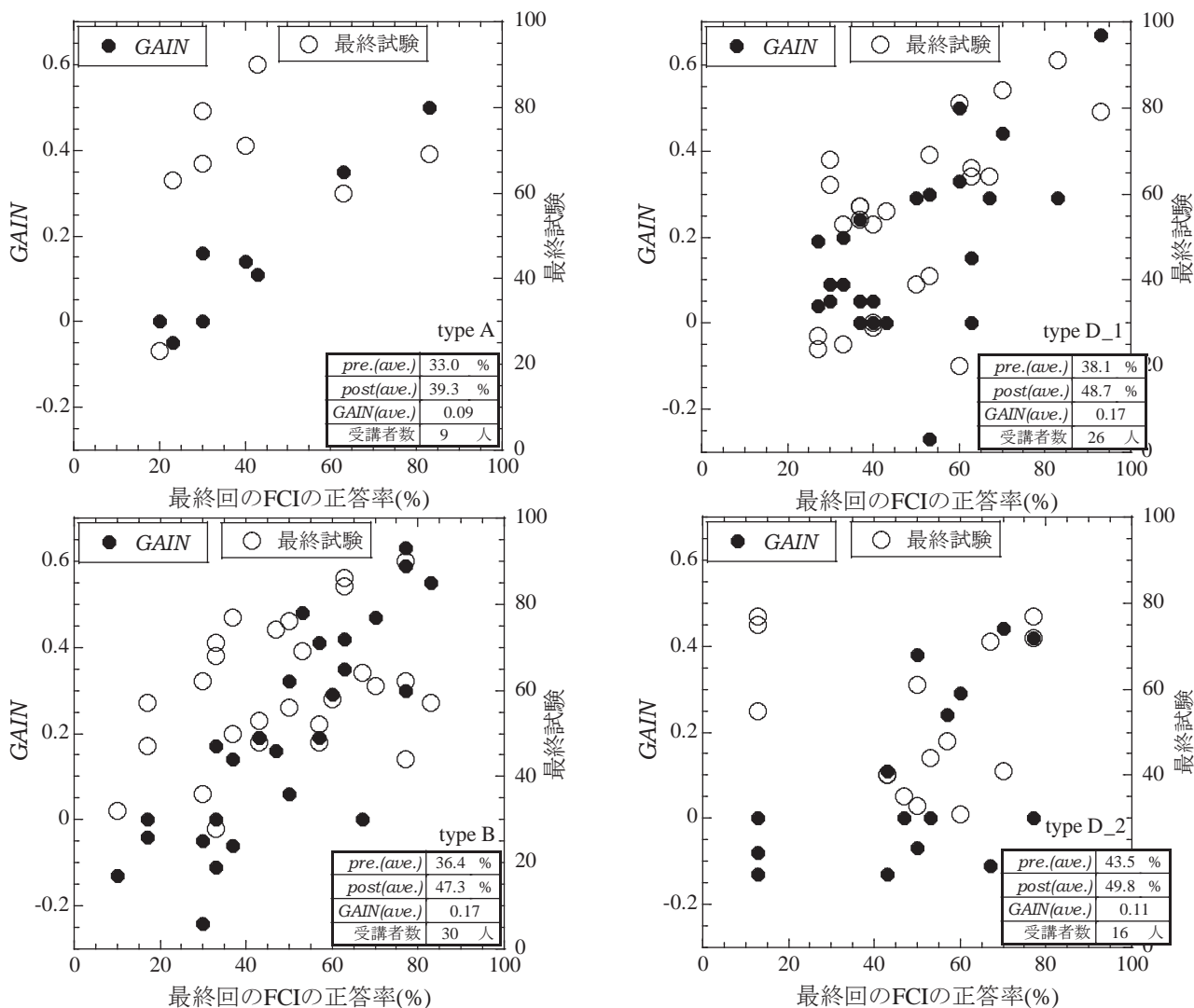


図3 ある年度の type A/B/D の講義における個々の学生の最終回の FCI の正答率と *GAIN* および最終試験の関係

最終試験結果が70点前後である学生が存在する。

図3のtype Dは工学部対象の講義であり、他のtypeの講義との大きな違いは、いわゆる微分方程式によって運動を記述するまでに至る大学初等物理学の力学のみを扱うことである。したがって、Hestenesらに因るように最初回のFCIの正答率が60%（18問）以上であることが望ましい。type D\_1とtype D\_2のFCIの平均はそれぞれ38.1%と43.5%であり、60%を大きく下回っている。また、その最終回のFCIの正答率が平均値以下である学生は*GAIN*も $0 \pm 0.2$ 程度で、大きな向上を認められないばかりか、理解度が低下した学生も存在する。一方、そのような学生が最終試験で60点前後を取得

している場合があり、この場合、成績評価は平均程度となることが多い。これは、成績評価に用いる最終試験や中間試験において、事前に問題集を解かせることを課していて、そこには数値計算も多く含まれており、いわゆる「暗記」的にそのトピックを覚えてくれば、ある程度正答できることによると考えられる。実はこのことが、物理学教育における現状において最も困難な事象であると認識されている。以前の報告<sup>4)</sup>でも指摘したことであるが、例えば鉛直投げ上げに関する問題で、物体が投げられて手から離れた瞬間、その物体に作用している力は何かと問われた時、多くの学生は重力とともに「上昇する力 (impetus)」を挙げ

る。そうは言いつつ、試験の解答では、物体の質量を $m$ 、物体の加速度を $a$ 、重力加速度を $g$ 、鉛直上方を正として、運動方程式を $ma = -mg$ と正しく記述できる。試験では、学生はこの「上昇する力」を運動方程式には記述せず正答するが、FCIを解く時や授業中に質問され答える時などには、多くの学生が「上昇する力」の存在を疑わず、ごく普通に「上昇する力」を口にする。要するに、目で観察したりイメージしたりする自然現象と、教科書で学習するような数式を用いた自然現象の記述が合致しないのである。2016年度に課題としたが、このことは現在に至るまで改善されておらず、大きな課題である。「誤概念」の糸をほぐすような授業改善が必要であるが、現象の理解に生じる乖離は、いわゆる問題集的な出題をする最終試験等で測定するのは困難である。それは「暗記」という事実がそこに存在するからと思われる。

「上昇する力」以外の誤概念もFCIで測定されるが、それら誤概念の種類や変遷を検討することで、学生が持ちやすい誤概念の低減手法を検討できる可能性がある。

2017～2018年度のtype A/B/C/Dの講義に関して、誤答率が高く（上位3位以内を採用）、多くの講義に共通して出現する設問番号を誤答率と共に表3に示す。設問番号が示すニュートン力学的概念と、その設問の誤った選択肢による誤概念を対応させた。type Cの講義は3人の教員が別教室で実施しているが、合算された結果を表示してある。

表3を俯瞰してわかることは、誤答率が多い設問番号は多くの授業で共通していることである。設問番号4と15は3つから4つの講義で多く見いだされるニュートン力学的概念で、表1によれば「3. 第3法則・3.1撃力の場合・3.2連続的な力の場合」に該当し、誤答率は46～78%である。実は第3法則に関しては、時間の都合上あまり多く説明をしていないことは認識しており、その結果が如実に反映されている。選択肢の誤った選択からうかがえる誤概念は、表2より「AR1.より大きな質量はよ

り大きな力を示唆している・AR2.最も活動的なものが最も大きい力を発生させる」である。例えば、トラックと車のような質量の異なる物体が衝突した場合に、トラックが車に及ぼす力の方が、車がトラックに及ぼす力より大きい、と答えるのがその典型である。衝突後、二つの物体が一体となってトラックが動いていた方向に等速度で運動している場合に、運動方程式を書く時は、等速度であるため一体となった二物体の加速度はゼロとするにも関わらず、「より大きな質量はより大きな力を与え、物体が動く方向に最も大きい力が発生している」と考える学生は相変わらず多い。これも誤概念の典型例である。

設問番号17も3つから4つの講義で多く見いだされ、「1. 第1法則・1.2力が打ち消し合う場合」に「CI1.最も大きい力が運動を決定する」と考える誤概念である。例えば、等速度で上昇するエレベータを引く力と重力の関係を考える場合などに多く出現する。運動方程式を加速度ゼロとして正しく記述し、目の前の事象と比較することで理解できることは多いはずなのだが、学習者にとってその二つを滑らかに接続させることは難しい。

その他、「AF4.速度は加えられた力に比例する」や「AF5.加速は力が増加していくことを示唆している」、「G3.重い物体のほうが速く落ちる」、「R2.力が抵抗に打ち勝つときの運動」、「II.「たたかれて」供給されるインパルス」など、典型的な事例が多くうかがえる。これらの項目については2016年度において測定された事象とほぼ同一であり、ニュートン力学的概念の正しい修得に関する改善が道半ばであることを示している。

#### 4. まとめ

物理学系講義の受講者数が30人程度までであることと、講義の最初回のFCIの正解率が40%程度であることは、その後の講義の展開にとって大きな影響を与えない傾向を持つことがわかった。また、講義の最終回のFCIの正答率と理解度向上

表3 各講義で誤答が多いニュートン力学的概念, 誤概念の種類, 誤答率

FCI 設問 番号	表1における ニュートン 力学的概念	表2におけ る誤概念	2018年度					2017年度				
			type A	type B	type C	type D_1	type D_2	type A	type B	type C	type D_1	type D_2
4	3.1	AR1	67%		64%	69%	58%	78%		66%		73%
15	3.2	AR2		61%		63%	46%		59%	52%		64%
17	1.2/4.2	CI1	56%	75%	59%		46%	78%			50%	59%
26	2.2	AF4/AF5	89%						59%	57%		
25	1.2/4.2	R2		57%					59%			
30	5F.1	I1			55%							73%

の指標となる *GAIN* は関係性が強く, 最初回の FCI の正答率が低くとも, その後の講義の展開次第では FCI の正答率が上昇することは自明である。

成績評価に用いる試験の点数が高ければ FCI の正答率も高く, 力学的概念の理解度が高い傾向は明らかであるが, これは十分条件ではなく, FCI 正答率が低くとも試験でよい点数を取得することは頻繁に起こる。その理由は, 学生の「暗記」, または「数学的処理のみの理解」に因るためと考えられる。学生が本来理解すべきことが暗記のために見過ごされ, 未達であることは憂慮すべき問題である。

FCI 正答率が低い原因は, 学生が「誤概念」(素朴概念)を持つためである。従来型の教え込む講義では, 学生の関心と解決意欲を向上させることが難しく, 誤概念の払拭は困難であると言われ, それゆえアクティブ・ラーニングが推奨される。本稿で取り上げたアクティブ・ラーニングを含む講義 (type D) は, 事前学習で得た基礎知識を基に微分方程式を用いて運動方程式をグループで解く形式としたが, どちらかという「数学的処理のみの理解」に傾きがちであり, 基礎知識を自然現象に正しく当てはめていない可能性がある。このような知識と現象が誤概念によって乖離する傾向は極めて多くの学生に観察される。この乖離の谷を埋めて解消することが, これからの物理学教育の最大の課題であると考えられる。

FCI に使用される設問は力学的概念の誤概念を

測定できるが, FCI が長く指標として使われるため, それをそのまま学生に解説することは良しとされない。そうではあるが, FCI により明らかになる誤概念を精査し, FCI とは別の事例を用いて一つ一つ解説することは重要である。しかし, この手法が, 結局のところ前述した教え込む講義となってしまうことが問題である。自然現象を深く理解し, それを数式で記述する能力は, 自ら思考し, 自ら記述し, 自ら間違いを修正する以外, おそらく手段を見つけれない。以上のことを鑑みつつ, 単に教え込むのではなく, 学生が自らの思考力を用いた正確な自然現象の理解を可能とする, 継続的な授業改善を実施していく予定である。

## 参考文献

- 1) D. Hestenes, M. Wells and G. Swackhamer, Phys. Teacher **30**, 141 (1992).
- 2) 新田英雄, 塚本浩司 大学の物理教育 **17**, 16 (2011).
- 3) 右近修治 東京都市大学共通教育部紀要 **9**, 67 (2016).
- 4) 黒田 潔, 水野貴敏, 宮田成紀 玉川大学工学部紀要 **54**, 9 (2017).
- 5) 笠 潤平 大学の物理教育 **16**, 83 (2010).

2019 年 2 月 20 日原稿受付, 2019 年 3 月 7 日採録決定  
Received, February 20, 2019; accepted, March 7, 2019