

## 文系学生の持つ典型的力学誤概念 : Force Concept Inventory (FCI) を用いた解析

原田, 恒司  
九州大学基幹教育院自然科学理論系部門 : 教授

小島, 健太郎  
九州大学基幹教育院自然科学理論系部門 : 准教授

<https://doi.org/10.15017/1799321>

---

出版情報 : 基幹教育紀要. 3, pp.9-19, 2017-03-28. Faculty of Arts and Science, Kyushu University  
バージョン :  
権利関係 :

## 文系学生の持つ典型的力学誤概念 Force Concept Inventory (FCI) を用いた解析

原田 恒司\*, 小島 健太郎

九州大学基幹教育院自然科学理論系部門, 〒819-0395 福岡市西区元岡 744

### Typical misconception in mechanics that students with majors in the schools of humanities have, probed with Force Concept Inventory (FCI) test

Koji HARADA\*, Kentaro KOJIMA

Division of Theoretical Natural Science, Faculty of Arts and Science, Kyushu University, 744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan

\*E-mail: harada@artsci.kyushu-u.ac.jp

Received Sep. 29, 2016; Accepted Nov. 25, 2016

For the purpose of detecting misconception in Newtonian mechanics that students majoring in humanities and social science have, we gave Force Concept Inventory (FCI) test to those who attended the classes of “Physics in Daily Life” in KIKAN Education. We find that they have very low scores for several questions, most of which are closely related to impetus misconception. Principal component analysis of the students’ answers reveals that these questions have large components of the eigenvector corresponding to the largest eigenvalue of the correlation coefficient matrix. Effects of introducing “Basic Physics” into the high school curriculum are briefly discussed.

## 1. 導入

現在われわれは非常に高度に科学の発達した社会に生活しており、日々その恩恵に浴さないことはない。一方で、科学技術がもたらす様々な問題にも直面している。科学技術は単に一部の専門家だけの関心事ではなく、われわれの日常と深く関わっている。それゆえ科学技術の基本的な理解は、現代人にとって必須であるといっていいただろう。

一方で、大学進学のための文理選択の時期は通常高校1年生にあり、文系を選択した学生は十分な科学教育を受けないまま大学生になる可能性が高い。特に物理は自然科学の基礎的な科目であるにもかかわらず、多くの文系学生が苦手とし、わからないと感じている。このことは、文系学生が科学技術の基本的な事柄を理解する上で大きな障害となるだろう。

科学教育研究、特に物理教育研究では、**誤概念**、あるいは**一般的な素朴概念**と呼ばれるものが果たす役割が注目されている<sup>1</sup>。誤概念とは、物理現象に関する学生の持つメンタルモデルや推論の筋道のうち、強固で、かなりの割合の学生にみられるようなものである。これらは学生が物理の授

業を受ける前に、個人的な経験から得られた知識や推論形式に基づき形成されたものである。これらは一旦獲得されると容易には修正されず、しばしば正しい物理概念を学ぶ際の障害となる。

この論文では、FCI (Force Concept Inventory)<sup>2,3</sup> という基本的な力学概念の理解を評価するときに標準的に用いられる調査テストを利用して、特に初年次の文系学生に焦点を絞り、彼らの持つ誤概念に関する特徴を抽出することを目的とする。

FCI は数式を用いずに日常的な言葉で表された、基本的な力学概念に関する多肢選択式 (5 つの選択肢の中に正解が 1 つ) の 30 問からなる調査テストである。この調査テストでは、学生が持つ誤概念と、学習による誤概念脱却の効果を測定することができ、世界的に広く用いられている。日本語への翻訳は何人かの研究者の共同作業によってなされ、現在標準的なものが作られている<sup>4</sup>。われわれもそれを利用した。

国内での FCI を用いた調査は、2003 年ごろから進んできており<sup>5</sup>、2014 年には「物理教育の現状調査」として、高校生・大学生の両方を含む 5600 人ほどの大規模調査が行われた<sup>6</sup>。その解析結果については部分的に公表されているが、いくつかの興味深い結果が得られている。そのひとつは高校の物理科目履修状況による正答率の差である。「高校・物理未履修」グループでは正答率は 23% 付近にピークがある。当然のことながら、物理未履修者に比べて、「物理 II」(旧課程での物理の上級コース) まで履修したものは正答率が高い。「大学・物理 II 既履修」グループの平均正答率は 60% 程度であるが、その分布は大きく広がっている。しかし、「物理 II」の履修者でも正答率が 80% (ニュートン力学の基本概念をほぼ理解したといえる段階) を越える学生の割合は 5 割程度しかないことが報告されている。このことは誤概念がいかに執拗に学生の思考パターンを支配しているかを如実に示している。

本研究では、対象を九州大学文系学部の 1 年生と絞っていることが特徴である。そのことによって、学生の全般的な理解の等質性が確保されていると考える。また、2 年半にわたる 5 クラスの調査によって、370 名の学生から回答を得ている。この数は国内で報告されている他の FCI の調査と比べても規模の大きなものと言えるだろう。

われわれは文系学生の多くが持つ中心的な誤概念を抽出するために、FCI 調査テストの問題の回答の相関係数を求め、それに基づく主成分分析を行った。相関係数行列の固有値がもっとも大きなものに対応する固有ベクトルの、大きな成分に対応する問題は正答率が低く、しかもすべてを間違えている学生の数が多い。このことは、これらが文系学生に特徴的な中心的誤概念と関わる問題であることを意味する。その中心的な誤概念は、アリストテレスの運動に関する考え<sup>7</sup>と 14 世紀のスコラ学者であるジャン・ビュリダンのインペトゥス理論<sup>8</sup>に類似するものである。

ニュートン力学では力は運動の状態を変化させるもので、力が働かなければ物体は静止しているか等速直線運動をする。一方、アリストテレス以来の考えでは、力は運動が継続するために必要なもの (omne quod moventur ab aliquo moventur) であり、力が働かなければ物体は静止すると考えられた。この考えによって説明するのが難しい運動の一つは投射体の運動である。アリストテレスは投射体の周囲にある媒質 (空気) に伝えられた力が、(投射体の後方に回り込んで) 投射体を推進すると論じたが、これは 13 世紀、14 世紀のスコラ学者らによって否定される。それに代わって現れたのが、投射体に力が「籠められる」と考えるインペトゥス理論である。投射体は投擲された後、

その「籠められた」力 *vis impressa* または *impetus* によって運動を継続する。

われわれはさらに、正答率の経年変化にも注目した。2014年から2016年は、高校の学習指導要領が旧課程から新課程に切り替わる時期に当たる。2014年までの入学生は旧課程で理科を履修した学生で、文系学生の多くは物理を高校でまったく履修していない。一方、新課程ではほとんどの学生が「物理基礎」(新課程での物理の基礎コース)を履修している。それゆえ、3年間の調査結果の経年変化には「物理基礎」履修による効果が反映されているはずである。(2015年は一定数の浪人生がいるため、過渡的であると考えられる。)

FCIテストは異なった地域の異なった時期の学生を対象として、同一問題による同一基準での評価を可能にする。そのために実施に際して問題は回収され、問題についての解説は行わないなど、問題の学生への流布を防ぐ最大限の努力が求められている。それゆえ、この論文でも問題自体を直接引用することを差し控える。教育関係者は、<http://modeling.asu.edu/R&E/Research.html> に記載されている手続きに従ってパスワードを得ることにより、問題をダウンロードすることができる。

論文の構成は以下の通りである。第2節では、まず調査の方法の詳細を述べ、次に学部ごと、問題ごとの正答率と平均点を示す。正答率には問題ごとに大きな差があることから、特に正答率が低い問題に焦点を当て、それらについて詳細に調べる。問題の正答率の低さには、誤概念が関わっていることが示唆される。これを定量的に示すために、第3節では問題の正答率の相関を主成分分析によって調べる。第1主成分は他の成分に比べて大きな固有値を持つ。第1主成分軸の方向は、正答率が低い問題に大きな成分を持つことが示される。学生の総得点は、第1主成分と極めて高い相関がある。また、総得点と第1主成分軸に大きな成分を持つ正答率の低い問題の得点の相関係数も大きいことが示される。第4節では、正答率の経年変化と「物理基礎」の履修の影響を論じる。第5節では、この論文のまとめと今後の展望について述べる。

## 2. 調査と結果の解析

### 2.1. 調査の方法

本研究が対象とするFCI調査テストは、2014年前期から2016年前期まで、筆者らが担当した九州大学基幹教育科目「身の回りの物理学」の授業時間内に実施された。「身の回りの物理学」はいわゆる教養系に分類される科目で、履修者の多くは文系学生であるが、理系の学生も含まれている。前期は原田が、後期は小島が担当した。前期のクラスは履修者数が多く、後期は比較的少ない。

著者らが担当した講義では、前半にニュートン力学の基礎的な内容を扱い、後半には熱、音、光などに関連したテーマを扱った。FCI調査テストは力学講義の最初と、力学の内容を終えたときとの2回行った。以下では、前者をプレテスト、後者をポストテストと呼ぶ。本研究で注目するのは学生が講義前に持っている力学概念であり、プレテストの回答結果を中心に解析を行う。

この論文で解析するのは「文系」の学生からの回答である。上述のように、クラスには理系の学生も含まれているので、経済学部経済経営学科(EC)、教育学部(ED)、法学部(LA)、文学部(LT)の学生を「文系」とし、これを回答の中から抽出して解析した。経済学部経済工学科は、入試にお

いてセンター試験では理科が基礎コースではなく上級コースの科目が課され、個別試験においても数学が「数学 III」まで課されるなど、多分に「理系」的であるため、解析から除外した。

以上の条件によって抽出されたデータ数を表 1 にまとめる。

表 1 調査対象となるデータ数。

	2014 前期		2014 後期		2015 前期		2015 後期		2016 前期		合計	
	プレ	ポスト	プレ	ポスト	プレ	ポスト	プレ	ポスト	プレ	ポスト	プレ	ポスト
EC	32	22(22)	1	1(1)	17	18(17)	0	0(0)	13	13(12)	63	54(52)
ED	15	10(10)	10	7(7)	4	4(4)	3	2(2)	2	2(2)	34	25(25)
LA	82	62(58)	15	11(11)	49	40(38)	9	6(6)	39	36(33)	194	155(146)
LT	40	31(31)	8	6(6)	16	16(14)	8	4(4)	7	6(6)	79	63(61)
合計	169	125(121)	34	25(25)	86	78(73)	20	12(12)	61	57(53)	370	297(286)

ポスト欄にある括弧内の数字は、プレとポストの両方を受けた学生数。

## 2.2. 平均点、問題ごとの正答率

はじめに、学部ごとのプレテストの平均点を図 1 に示す。テストは 30 点満点であり、文学部の平均点が少し低めであること以外は学部による大きな差はない。以下では学部ごとの差異には注目せず、「文系学生」全体としての特徴について考察する。

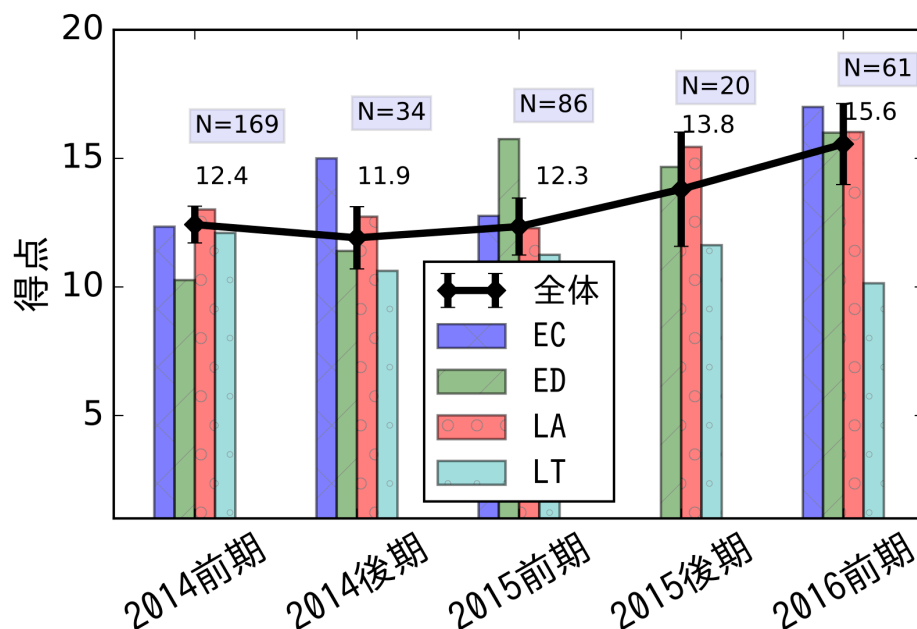


図 1 学部ごとの平均点と全体の平均点。

エラーバーは 95% 信頼区間を表す。

平均正答率は40% (11.9/30) から52% (15.6/30) である。第1節で紹介した「高校・物理未履修」グループの得点に比べてはかなり高い。このことは調査対象となっている九州大学の学生の一般的な理解度の高さの反映であると考えられる。しかし、そうであってもニュートン力学の基本概念をほぼ理解したといえるレベルである正答率80%には遠く及ばない。

平均点は年を追うごとにだんだんと高くなっていく傾向がみられる。2016年度前期の結果は、2014年度前期、2014年度後期、および2015年度前期の結果に比べ、正答率は有意に高い。これは新課程での「物理基礎」の履修の影響と考えることができるだろう。

次に問題ごとの正答率を図2に示す。問題ごとにその正答率には大きな開きがあることがわかる。特に問題17や問題26のように正答率が1割程度しかない問題があることは注目し値する。

われわれは学生の理解が不十分な所に興味があるので、以下では正答率が20%以下の問題について詳しく検討していくことにする。

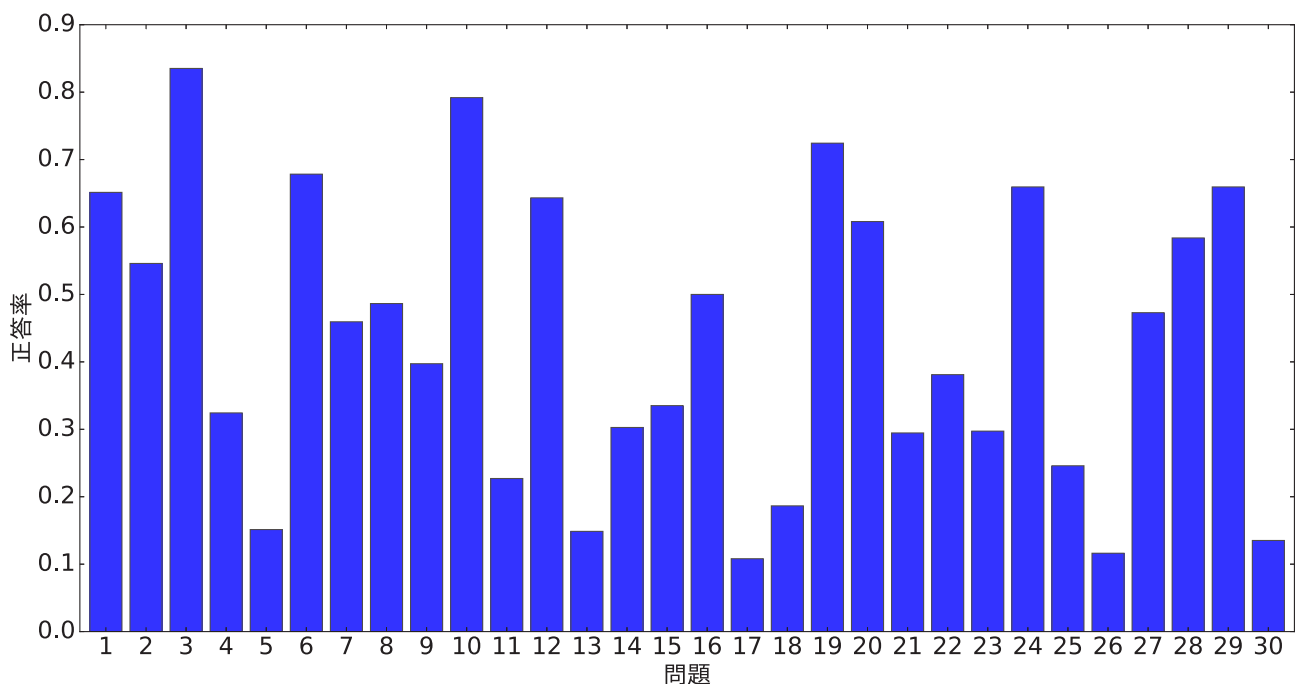


図2 問題ごとの正答率。

全ての学期の学生のプレテストの回答 (N=370) を元に算出した。

### 2.3. 正答率の低い問題

正答率が20%以下の問題は問題17(10.8%)、問題26(11.6%)、問題30(13.5%)、問題13(14.9%)、問題5(15.1%)、問題18(18.6%)の6問である。

これらの問題に関わる誤概念と、学生の回答パターンを回答率の高い順に表2にまとめる。学生の回答の中には、正解に比べてずっと高い割合の回答(誤答)があることがわかる。例えば問題30

では、正しい選択肢を選んだ学生が 13.5%であるのに対し、80%以上の学生が選択した誤答選択肢がある。

これらを見ると、誤概念のために、一連の問題に対して学生が誤った回答をしている様子がわかる。特に、①（等速度であっても）「運動するためには力が必要」であるというアリストテレス的な考えに基づき、②運動方向への力の存在を想定し、③その力は投擲や打撃において物体に籠められたもので、運動の過程で働いているとするインペトウスの考えを持っていると思われる。

表 2 正答率の低い問題の学生の回答を回答率の高い順に並べたものと、その問題に関する誤概念<sup>a</sup>。

回答率順	1	2	3	4	5	誤概念
問題 17	63.8%	19.7%	10.8%	4.3%	1.1%	最大の力が運動を決定する
問題 26	41.9%	34.9%	11.6%	10.0%	1.4%	速さは力に比例する、運動は力が抵抗に打ち勝つとき起こる
問題 30	81.4%	13.5%	3.2%	0.5%	0.3%	打撃によって供給されたインペトウス
問題 13	62.2%	14.9%	13.8%	8.1%	1.1%	(だんだん減少する) インペトウス
問題 05	29.5%	25.7%	25.1%	15.1%	4.6%	回転運動に対するインペトウス、運動するためには運動方向への力が必要
問題 18	25.9%	24.1%	23.8%	18.6%	7.6%	回転運動に対するインペトウス、遠心力

正解に対応する選択肢には網がかかっている。

### 3. 主成分分析（相関係数行列の対角化）

#### 3.1. 第 1 主成分

問題の回答パターンには、相互の関連性があると考えられるので、それを明らかにするために回答の相関係数行列を求め、それを対角化して、固有値と固有ベクトルを調べる。

学生  $i$  ( $i=1, \dots, N$ ) の回答で問題  $a$  ( $a=1, \dots, 30$ ) が正解のとき  $x_a^i=1$ 、不正解のとき  $x_a^i=0$  とする。相関係数（ピアソンの積率相関係数）は

$$r_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_a^i - \bar{x}_a)(x_b^i - \bar{x}_b)}{\left[ \sum_{i=1}^N (x_a^i - \bar{x}_a)^2 \sum_{i=1}^N (x_b^i - \bar{x}_b)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

で与えられる。ただしバーは平均を表す。これは 30 行 30 列の実対称行列であり、対角成分はすべて 1 である。行列要素は -1 から +1 までの値を取り、問題の回答間の相関の強さを表す。+1 に近ければ正の強い相関を表し、-1 に近ければ負の強い相関を表す。問題  $a$  と問題  $b$  の間に正の相関が

<sup>a</sup> FCIは論文<sup>2</sup>で公開されたのち1995年に改定されており、改定版は前述のWEBページから入手できる。本表は、改定版とともに示された1995年版の表をもとに作成されている。

あるということは、 $a$ と $b$ をともに正解する、あるいはともに間違える学生が多いことを意味する。

相関係数行列は直交変換によって対角化され、その固有値は実数である。その固有値の大きさは、対応する固有ベクトルが表す軸に沿っての分散の大きさを表す。もし、すべての問題の回答間に何ら相関がなかったならば、すべての固有値は1に縮退する。これは相関係数行列が規格化されていて、すべての(独立な)問題の分散が1になっていることを表す。直交変換によって行列のトレースは不変であるので、すべての固有値の和は30となる。一般に固有値は1より大きいものと1より小さいものとに分かれる。1より大きな固有値に対応する固有ベクトルは、その方向の軸に沿っての分散が(相関がない時に比べて)大きいことを意味している。最大固有値に対応する固有ベクトルの方向は、最も分散が大きな方向である。

すべての学期における学生の回答( $N=370$ )から求めた相関係数行列を対角化した時の固有値は、大きい順から  $\lambda_1=4.97$ ,  $\lambda_2=1.71$ ,  $\lambda_3=1.54$ , ...,  $\lambda_{30}=0.37$  である。10個の固有値は1より大きく、20個の固有値が1より小さい。

これらのうち第一のもの  $\lambda_1$  が他に比べてずっと大きな値であることに注意しよう。このことはこの固有値に対応する固有ベクトルが学生の集団をよく特徴づけ、学生の持つ誤概念を強く反映していることを示唆する。

最大固有値に対応する(規格化された)固有ベクトル  $\mathbf{u}_1$  の成分は多くの問題に分布し、少数の問題のみに関連するというような単純な構造はない。われわれは、 $\mathbf{u}_1$  の成分のうち、その大きさが大きい成分が重要であると考え。成分の2乗が大きな(成分の2乗が0.06より大きい)上位3つの問題(成分)は、大きい順に問題13(0.279)、問題26(0.247)、問題30(0.245)である。これらの問題が、前節で議論した正答率の低い問題であることは重要である。これらはどれも、インペトウスと関連した誤概念と関係している問題である。

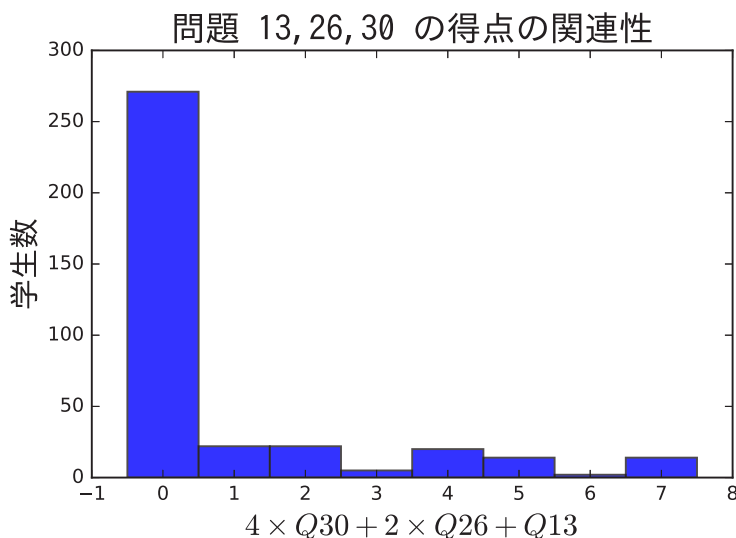


図3 最大固有値に対応する固有ベクトルの大きな成分に対応する問題の回答状況。

図3に、これらの3つの問題に対する学生の回答状況を示す。横軸は学生のこの3問についての回答を2進数的に表したものである。例えば、問題30のみ正解( $Q_{30}=1$ )し、残りの2つは不正解( $Q_{13}=Q_{26}=0$ )だった場合には $[100]_2$ と表すことにする。このとき、( $4 \times 1 + 2 \times 0 + 0 = 4$ から)図の4の位置にこの回答パターンの学生数がプロットされる。これを見ると、3問全てに不正解(0)である学生は非常に多く、271名で全体の73.2%にあたる。



### 3.2. 総得点との相関

以上見たように、第1主成分は、学生の誤概念を反映したものと考えられる。次に、第1主成分がどのように FCI の総得点に反映されるのか、すなわち、基礎的な力学概念全体の把握にとって、第1主成分が表す誤概念がどのような意味があるのかを見ていくことにしよう。

学生  $i$  の回答を 30 次元のベクトル  $\mathbf{x}^i$  とし、 $k$  番目の固有値に対応する規格化された固有ベクトル (第  $k$  主成分) を  $\mathbf{u}_k$  とすると、

$$\mathbf{x}^i = \sum_{k=1}^{30} \mathbf{u}_k (\mathbf{u}_k \cdot \mathbf{x}^i)$$

と表すことができる。

ここで、 $(\mathbf{u}_k \cdot \mathbf{x}^i)$  は第  $k$  主成分軸に関する成分である。図 4 は第1主成分軸に関する成分  $(\mathbf{u}_1 \cdot \mathbf{x}^i)$  と総得点との相関を散布図として表したものである。

極めてはっきりとした相関が見られる。単純な最小 2 乗法による線形回帰分析での決定係数は  $R^2 = 0.97$  と非常に高い。

前にも注意したように、第1主成分ベクトルの成分は多くの

問題にわたっているの、その成分が大きいものをいくつか選ぶことにどの程度の意味があるのか、それほど自明ではない。図 5 にはインペトゥス誤概念と関連した正答率の低い 3 つの問題 (問題 13、問題 26、問題 30) の合計得点 (0,1,2,3) が異なる学生ごとに、総得点の平均点を示している。これを見ると、第1主成分ベクトルが表す方向に沿った成分のすべてを考慮しなくても、

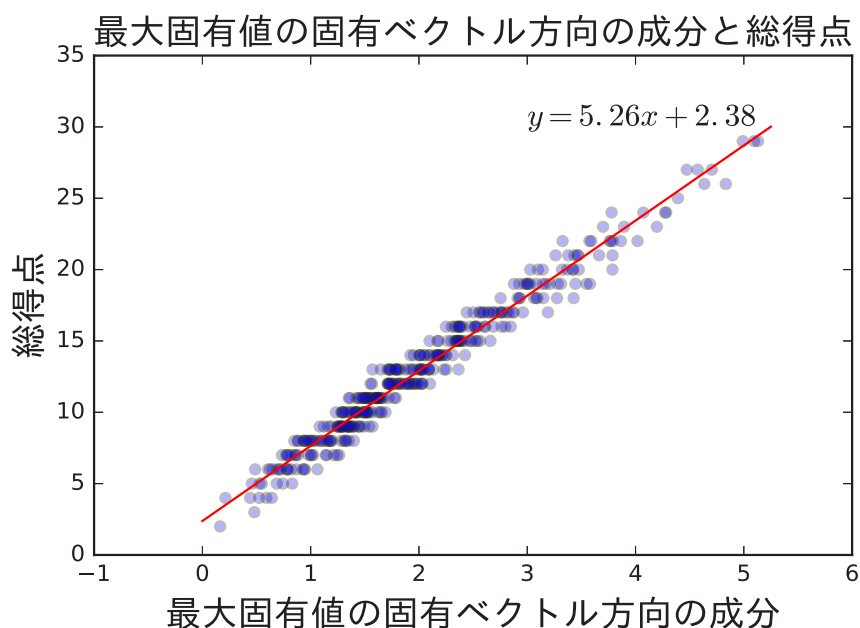


図 4 第一主成分軸に沿った成分と、総得点との相関を表した散布図。単純な最小 2 乗法による回帰直線も一緒に示した。

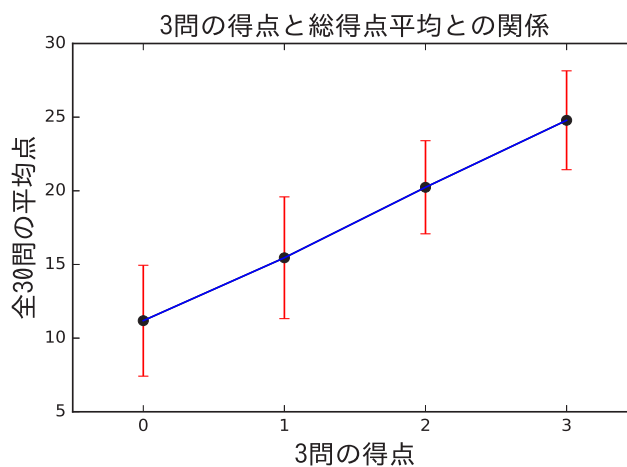


図 5 インペトゥス誤概念と関連する 3 問の得点と、その得点をとった学生の総得点との関係。

3問の得点を見れば総得点との相関が良いことが明らかである。

このことは、第1主成分に大きな成分を持つ問題の得点と、総得点との相関係数を見ても確認することができる。表3には、第1主成分に大きな成分を持つ問題を、大きい順にいくつかとったときの得点と、総得点との相関係数を示した。すでに問題13だけでも高い相関係数を持っていることがわかる。

表3 第1主成分の大きな成分の問題の得点と、総得点との相関係数。

問題	13	13+26	13+26+30	13+26+30+22
相関係数	0.548	0.638	0.672	0.742

図6には、3問の得点ごとの学生の総得点の分布を示した。3問の得点ごとに学生グループが分離している様子がよくわかる。

これらの結果はどれも、インペトゥス誤概念を克服することが、総得点をあげることに、すなわち、力学の基礎概念全体の理解のために重要であることを示唆している。

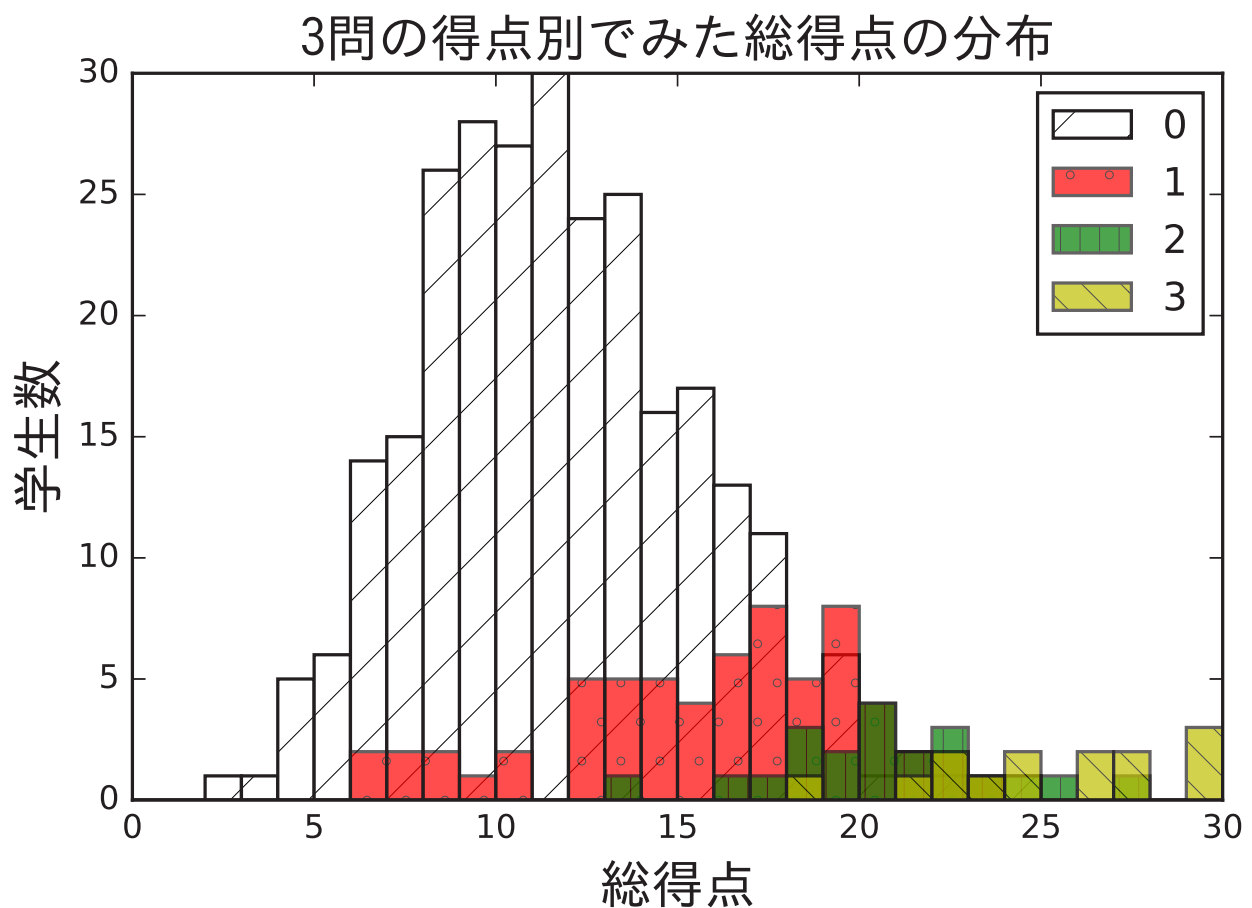


図6 3問の得点ごとの学生の総得点の分布。

#### 4. 経年変化と「物理基礎」履修の影響

第2節で示したように、平均点は年度ごとに一般的に上がっているの、これを旧課程から新課程に移行して「物理基礎」を履修する学生が増えたためだと考えることができるだろう。しかし、旧課程での文系学生の「物理 I」(旧課程での基礎コース)の履修が少なかったことを考えると、その「伸び」は期待されるほど大きくはない。

さらに詳しく、設問ごとに平均点の変化を見てみよう。図7には問題ごとの2014年のプレテストの正解率と、2016年のプレテストの正解率を示した。問題によってほとんど正解率の変化のないものもあるが、大きく変化したものもある。最も正解率が上がったのは問題9である。この問題は、「最後に働く力が運動を決定する」という誤概念と主に関係している。

われわれが注目してきたインペトゥス誤概念に関わる問題はどれも正解率を伸ばしているが、問題13では正解率が10.8% → 31.1%、問題26では8.4% → 21.3%、問題30では9.3% → 26.2%であり、2016年でも正答率は高くない。

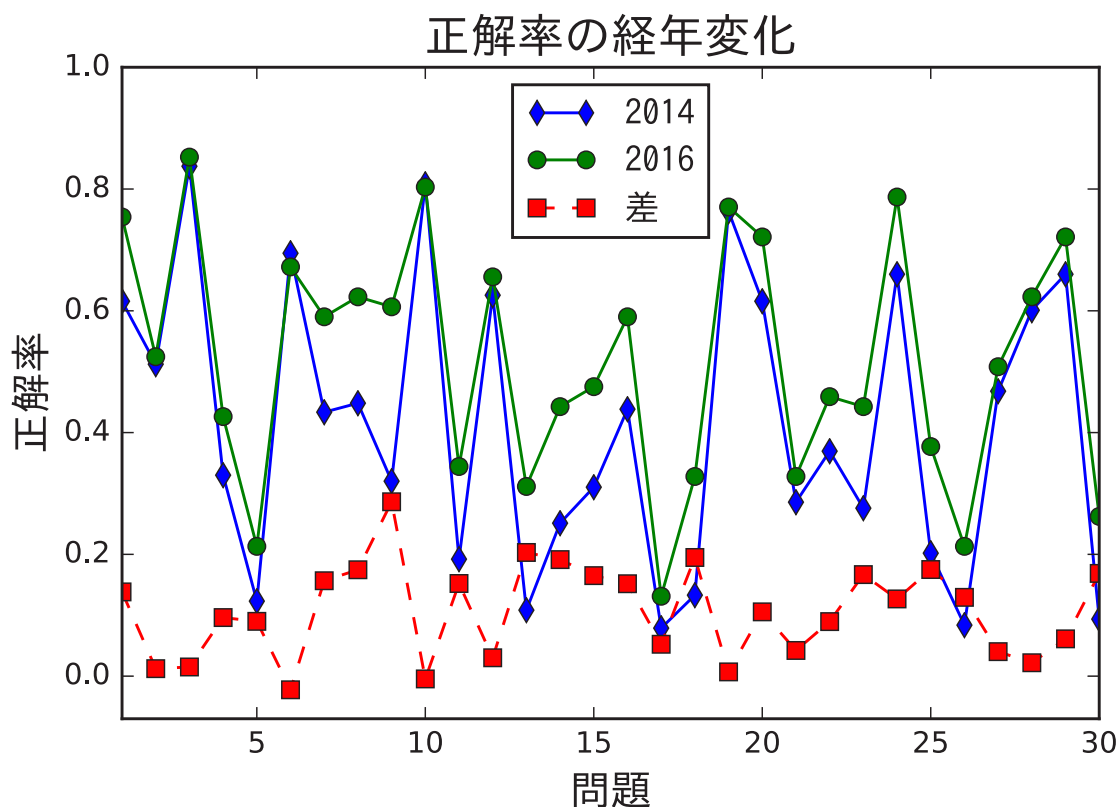


図7 問題ごとの正解率の変化。

#### 5. まとめと展望

この論文では、九州大学の文系学生の力学概念の理解度を、Force Concept Inventory (FCI) という調査テストを用いて測定したデータに対して正答率を調べ、また、主成分分析することで、文系

学生が持つ典型的な誤概念を抽出した。その誤概念はインペトゥス理論に類するものである。この誤概念を克服し、正しい理解を得ることが、力学概念全体の獲得に本質的であることは、これらの問題だけの得点と、総得点の間の高い相関から示唆される。

調査した期間は旧課程と新課程の切り替わりの時期である。新課程で文系学生でも高校時代に「物理基礎」を学び、基礎的な物理学の理解を得る機会が旧課程に比べて増しているはずであるが、その伸び率は期待されるほど高くはない。このことは、誤概念がいかに執拗に学生の思考パターンに組み込まれているかを示しているとともに、高校における「物理基礎」の授業の際に、誤概念の克服を強く意識しながら教えることが重要であることを示唆している。

本論文では、プレテストとポストテストでの比較、理系学生と文系学生の比較など、いくつかの議論すべき事柄を割愛した。これらの解析については別の機会に発表したいと考えている。

## 謝辞

本論文をまとめるにあたり、FCI テストのデータの取り扱いについて、基幹教育院の倫理委員会、特に丸山徹委員長にご指導戴きました。本研究は一部 JSPS 科研費 16K16173（研究代表者：小島健太郎）の助成を受けて行われたものです。

## 参考文献

- <sup>1</sup>エドワード・F・レディッシュ, 日本物理教育学会監訳, 「科学をどう教えるか」(丸善出版, 2012).
- <sup>2</sup>David Hestenes, Malcom Wells, and Gregg Swackhamer, “Force Concept Inventory”, *The Physics Teacher* **30**, 141 (1992).
- <sup>3</sup>Richard Hake, “Survey of Test Data for Introductory Mechanics Courses”, *AAPT Announcer* **24**, 55 (1995).
- <sup>4</sup>石本美智, 植松晴子, 塚本浩司, 新田英雄, 覧具博義, 「力と運動についての概念調査 日本語版第2版」.
- <sup>5</sup>塚本浩司, 樋幸江, 加納誠, 「大学生の力学基礎概念」*日本物理学会誌* **60** (2005) 294.
- <sup>6</sup>岸澤眞一, 山崎敏昭, 長谷川大和, 安田淳一郎, 村田隆紀, 覧具博義, 「2014 物理教育の現場調査・力学概念調査からの分析 (1): 全体の概況」*物理教育研究大会発表予稿集* (2014).
- <sup>7</sup>アリストテレス, 「自然学」第7巻、第8巻 (「アリストテレス全集3 自然学」出隆、岩崎允胤訳 (岩波書店, 1968)).
- <sup>8</sup>ジャン・ビュリダン, 『自然学第八巻問題集』第八巻第十二問 (「科学の名著5 中世科学論集」 青木靖三、横山雅彦訳 (朝日出版, 1981)).