

[事業報告]

大学初年次教育における電磁気学についての 概念調査の実施報告(2022年度)

岸本 功, 笠置 映寛, 金田 和博, 吉井 涼輔

山陽小野田市立山口東京理科大学 共通教育センター

Implementation Report on Brief Electricity and Magnetism Assessment in Introductory College Physics (AY2022)

Isao KISHIMOTO, Teruhiro KASAGI, Kazuhiro KANEDA, Ryosuke YOSHII

Center for Liberal Arts and Sciences, Sanyo-Onoda City University

要約

山口東京理科大学工学部3学科(機械工学科・電気工学科・応用化学科)の1年生向けに「物理学及び演習」(応用化学科は「物理学II及び演習」として開講している電磁気学分野の入門的講義において, 著者らが2022年度第IV期にそれぞれ担当したクラスの受講生に対し電磁気学についての概念調査(BEMA)のプレテスト及びポストテストを実施した結果に関して報告する。これは, 2019年度に2クラスのみで実施した調査の拡大版に相当する。本調査の問題は全問選択式の出題形式であり, オリジナル[Chabay-Sherwood(1997)]は英語で書かれているが, その日本語版[土佐幸子訳(2014)]を使用した。ここでは, この調査のプレテスト・ポストテストの採点結果について統計的に処理し, 2019年度の結果との比較や学科依存性, 入試形態依存性等の解析をする。さらに, BEMAを多次元項目反応理論で解析した文献[Hansen-Stewart(2021)]に具体的に記載されている2つのモデルを本調査の回答データに適用して解析する。以上の解析結果をまとめて報告し, コメントを述べる。

Key words: introductory college physics, BEMA, average normalized gain, item response theory

キーワード: 大学初年次物理教育, 電磁気学についての概念調査, ゲイン, 項目反応理論

BEMAの各受験者のプレテストの得点率 x_{pre} とポストテストの得点率 x_{post} の変化を

$$\Delta_{BEMA} = x_{post} - x_{pre}$$

とするとき、横方向 x_{pre} 、縦方向 Δ_{BEMA} として全データ(ALL)をプロットしたものを図1に示す。この図1で、 $\Delta_{BEMA}=0$ の軸より上にあるものは授業効果により得点率が上がったことを示している。特に、受講開始前に得点率が20%未満だった受講者は全員得点率が上がったことが読み取れるが、逆に授業後得点率が下がった受講者もいる。

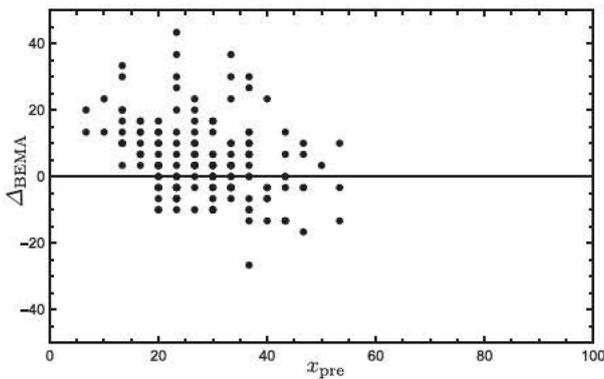


図1 x_{pre} [%]と Δ_{BEMA} [%]の関係

プレテスト、ポストテストの平均得点率 \bar{x}_{pre} 、 \bar{x}_{post} を元に、成績の伸びの余地に対し、授業後どれだけ伸びたかを表す比であるゲイン(average normalized gain)³⁾を

$$\langle g \rangle = \frac{\bar{x}_{post} - \bar{x}_{pre}}{100\% - \bar{x}_{pre}}$$

で定義すると、表1に対応して表3⁵⁾が得られる。

表3 BEMAのゲイン $\langle g \rangle$ (2022)

	A	BM	BE	BK	ALL
BEMA	0.0767	0.106	0.0637	0.0469	0.0723
(E)	0.0692	0.105	0.0729	0.0276	0.0661
(M)	0.0883	0.107	0.0504	0.0754	0.0817

A, BKクラスでは磁場を含む問(M)の方がゲインが大きくなっており、特に磁気分野の理解が授業により進んだと思われる。ただし、2019年度¹⁾と比べて、ゲイン $\langle g \rangle$ の値は2022年度の方が小さく、授業の効果は小さかったようである。表3ではいずれも $\langle g \rangle < 0.3$ なのでLow- g に分類されるものであるが、まずは2019年度の $\langle g \rangle = 0.1345$ 程度以上⁶⁾を目指したい。

受験者数 N に対し、BEMAポストテストの点数が中央値より上の人の集合を H 、中央値より下の人の集合を L 、ちやう

ど中央値の人の集合を M とし、各問に対し正答者のうち H に属する人数を N_H 、 L に属する人数を N_L 、 M に属する人数を N_M とすると、各問に対してdifficulty index P とdiscrimination index D を次のように定める:⁷⁾

$$P = \frac{N_H + N_L + N_M}{N}, \quad D = \frac{N_H - N_L}{N/2}.$$

定義から $0 \leq P \leq 1$ 、 $-1 \leq D \leq 1$ であり、 P が大きいほどその問の難易度が易しいことを表し、 D が大きいほどその問の識別力が高い(全体の理解の高い人の方が正答しやすい)ことを表す。各問の P 、 D を今回の全データ(ALL)について示したものが図2、図3である。それぞれ2019年度¹⁾の図1、図2と比較すると概ね似たパターンとなっている。

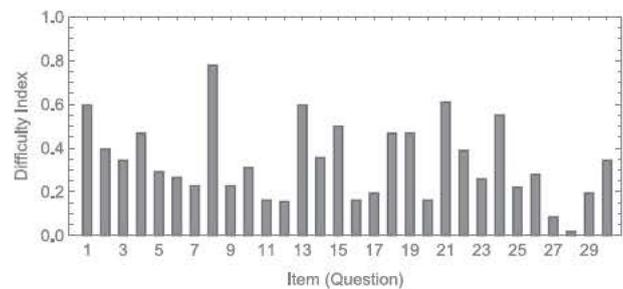


図2 BEMA各問のdifficulty index P (2022)

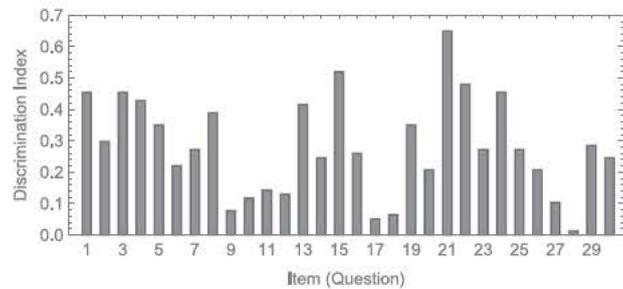


図3 BEMA各問のdiscrimination index D (2022)

difficulty index P の平均 \bar{P} とdiscrimination index D の平均 \bar{D} は

$$\bar{P} = 0.336, \quad \bar{D} = 0.281$$

となっており、特にdiscrimination index D の平均 \bar{D} は2019年度¹⁾の $\bar{D} = 0.28$ とほぼ同じであり、全体としてBEMAの識別力は同等だった。一般にdiscrimination index D は0.3以上が望ましいとされている⁵⁾が、図3を見ると0.3よりかなり小さい問が複数含まれていた。一方、difficulty index P の平均 \bar{P} は2019年度¹⁾の $\bar{P} = 0.41$ より小さくなっており、2019年度と比べて2022年度の受験者にとってBEMAがより難しかったことを示している。一般にdifficulty index P は0.3~0.9が望ましいとされている⁵⁾が、図2を見ると0.3より小

い問がかなり含まれている。

図2 (Item 28)から、特に電磁誘導について理解が足りていないことがわかる。これは、2019年度¹⁾でも全く同様であり、さらに文献[HS(2021)]²⁾の対応する難易度パラメータの値からも読み取れるようにBEMA受験者の一般的な傾向である。さらに、図2から読み取れる得点率の低い問いのテーマは、電場の重ね合わせ、電場による力、静電誘導、電流と豆電球、電場と電位差、ローレンツ力、電流による磁場であった。これらの結果を、今後の電磁気学の入門的講義に活かしたい。

今回の解析の対象となっている受講者(計154名)のうち、推薦入試入学者(S)の数は65名、一般入試入学者(I)の数は89名である。物理学(II)及び演習のクラス分けではなく、この入試形態(S, I)で分けると、表1, 表3に対応して、それぞれ表4, 表5が得られる。表4をみると、BEMAプレテスト・ポストテスト、中間試験・定期試験のいずれにおいても平均得点率が $\bar{x}_S < \bar{x}_I$ となっており、一般入試入学者の方が高い。表5によると、BEMAのゲイン $\langle g \rangle$ も一般入試入学者の方が大きくなっているが、BEMAの後半(M)のゲインは、前半(E)のゲインとは逆に推薦入試入学者の方が大きい。推薦入試入学者は早い時期に進学が確定するため、一般入試入学者と比べて高校での学習の定着度が不足しがちであることが考えられる。ただし、今回の推薦入試入学者は、物理学(II)及び演習の授業効果により、特に磁場を含む内容の理解が進んだと思われる。

表4 推薦・一般入試入学者のBEMA・試験結果

	\bar{x}_S	σ_S	\bar{x}_I	σ_I
pre	25.3	8.53	30.7	10.2
post	30.6	10.7	35.9	13.4
pre(E)	29.4	9.41	34.3	11.7
post(E)	33.7	12.2	38.9	14.0
pre(M)	18.3	13.8	24.6	15.2
post(M)	25.2	16.2	30.6	19.1
中間	65.2	11.7	72.6	11.4
定期	71.4	6.84	75.6	5.95

表5 推薦・一般入試入学者のゲイン $\langle g \rangle$

	S	I
BEMA	0.0701	0.0741
(E)	0.0608	0.0702
(M)	0.0839	0.0799

3. 項目反応理論を用いた解析

前節まで、BEMAに関して得点率(とそれを用いたゲイン $\langle g \rangle$)で受験者の電磁気学の理解度を論じて来たが、さらに項目反応理論(item response theory)⁸⁾を用いた解析を試みよう。ここでは、BEMAを多次元項目反応理論(multidimensional item response theory, MIRT)で解析した文献[HS(2021)]²⁾に載っている複数のモデルのうち、パラメータ値が具体的に示されているprincipleモデルM13とtopicalモデルM18に着目する。MIRTでは、受験者が問jを正答する確率が

$$\frac{1}{1 + \exp(-\vec{a}_j \cdot \vec{\theta}_i - d_j)}$$

で与えられると仮定する。 $\vec{\theta}$ は能力に対応する潜在特性尺度を表し、M13では「電磁気学の知識全般」とprinciples(複数の「法則」「系」「補題」「定義」「事実」)を成分にもつ31次元ベクトルで、M18では「電磁気学の知識全般」とtopic(「静電気学」「電気回路」「電位」「静磁気学」「磁気誘導」)を成分にもつ6次元ベクトルである。M13, M18共に、 \vec{a}_j, d_j の値はBEMAの問jに対して具体的な数値がそれぞれ求められている(文献[HS(2021)]²⁾の表4)。

以下では、簡単のため潜在特性尺度としてM13・M18の「電磁気学の知識全般」のみ用い(これを θ と書く)、M13のprinciples成分・M18のtopic成分を全て0に固定して⁹⁾それぞれ解析する。この θ は(負の値を含む)実数値をとり、 θ の値が大きい方が電磁気学の知識が全般的に優れていると解釈する。このとき、BEMAの項目の問jを潜在特性尺度 θ の受験者が正答する確率 $P_j(\theta)$ は

$$P_j(\theta) = \frac{1}{1 + \exp(-a_{j0}\theta - d_j)}$$

となり、潜在特性尺度 θ の受験者の問jの反応が u_j (正答なら1, 誤答なら0)となる確率は¹⁰⁾

$$\text{Prob}(\{u_j\}|\theta) = \prod_j P_j(\theta)^{u_j} \{1 - P_j(\theta)\}^{1-u_j}$$

となる。実際の回答データ u_j から最尤法で求めた各受験者の潜在特性尺度を $\hat{\theta}$ とする。つまり、 $\hat{\theta}$ は $\log \text{Prob}(\{u_j\}|\theta)$ を θ で微分して得られる θ の方程式

$$\sum_j \{u_j - P_j(\theta)\} a_{j0} = 0$$

を数値的に解いて求めることができる。なお、

$$I(\theta) = \sum_j a_{j0}^2 P_j(\theta) \{1 - P_j(\theta)\}$$

で与えられるテスト情報量⁶⁾を用いて、この推定値 $\hat{\theta}$ の標準

誤差は $1/\sqrt{I(\hat{\theta})}$ となる。(図4, 図5)^{*11}

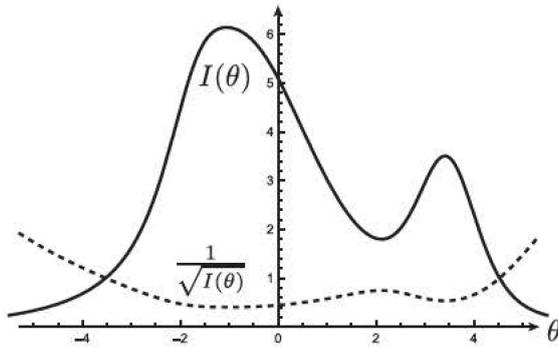


図4 M13のテスト情報量 $I(\theta)$ と $1/\sqrt{I(\theta)}$

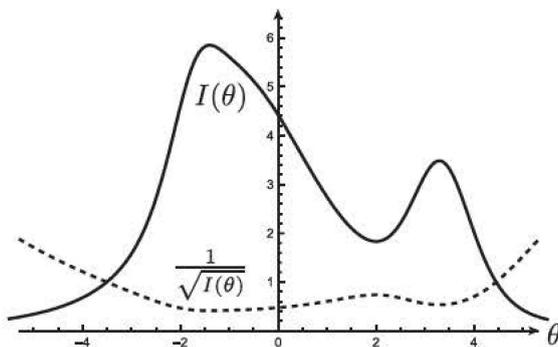


図5 M18のテスト情報量 $I(\theta)$ と $1/\sqrt{I(\theta)}$

上述の方法により、今回のBEMAの回答データから「電磁気学の知識全般」の潜在特性尺度の推定値 $\hat{\theta}$ をMathematicaのFindRoot(初期値 $\theta=0$)で全て求めることができた。図6, 図7は、横軸をそれぞれM13, M18の $\hat{\theta}$ 、縦軸をBEMAの得点率[%]としたときの全データ(ALL)の散布図である(○はプレテスト, ●はポストテストを表す)。

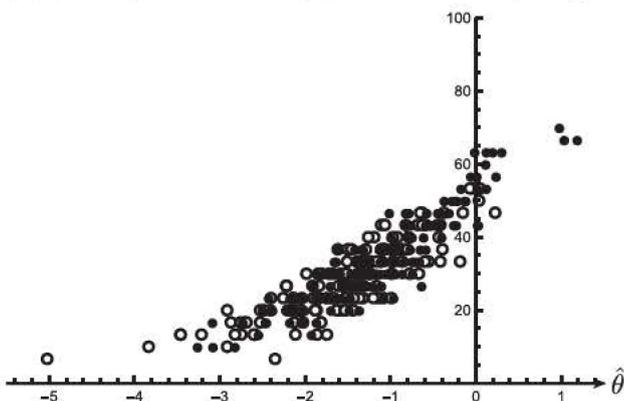


図6 M13の $\hat{\theta}$ と得点率[%]の関係

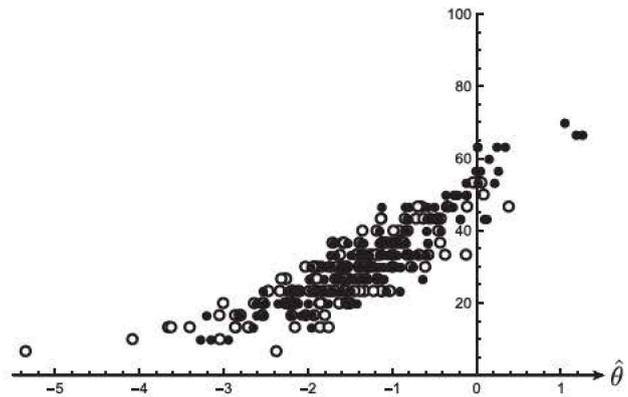


図7 M18の $\hat{\theta}$ と得点率[%]の関係

図6・図7によると、得点率は大雑把には $\hat{\theta}$ の一次関数のグラフ(傾き正)のように振る舞っているが、細かく見ると得点率の縮退が解けているように見える。よって、各受験者の電磁気学の知識全般について、 $\hat{\theta}$ を用いることでより詳細な情報を引き出せる可能性がある。ただし、 $\hat{\theta}$ は図4・

図5に示されている $1/\sqrt{I(\hat{\theta})}$ 程度の誤差を含み、さらに

M13・M18の潜在特性尺度 $\vec{\theta}$ を $\vec{\theta}=(\theta, 0, \dots, 0)$ のように θ のみで近似したことに注意する。

BEMAプレテスト・ポストテストについて、得点率の平均に基づく表1, 3, 4, 5に対応するものとして、M13・M18の電磁気学の知識全般を表す $\hat{\theta}$ の平均 $\langle\hat{\theta}\rangle$ を、授業のクラス分け(A, BM, BE, BK), 4クラス合わせたもの(ALL), 推薦入試入学者(S), 一般入試入学者(I)で評価したものが表6・表7である。これらの表では、プレテストの $\hat{\theta}$ の平均 $\langle\hat{\theta}_{pre}\rangle$ 及びポストテストの $\hat{\theta}$ の平均 $\langle\hat{\theta}_{post}\rangle$ はいずれも負の値となっているが、その変化の平均 $\langle\hat{\theta}_{post}-\hat{\theta}_{pre}\rangle$ は全て正の値であり、プレテストよりポストテストの方が大きい値をもつ。これは、授業効果により電磁気学の知識が全般的に向上したことを示している。授業のクラス分けで比較すると、 $\hat{\theta}$ の伸びの大きさは、表3のゲイン $\langle g \rangle$ の値に対応して、表6・表7とも大きい順にBM, A, BE, BKとなっている。入試形態で比較すると、表6・表7ともに表5のゲイン $\langle g \rangle$ の値とは逆に推薦入試入学者の方が $\langle\hat{\theta}\rangle$ の伸びが大きくなっており、電磁気学の知識は全般的により向上したといえるだろう。

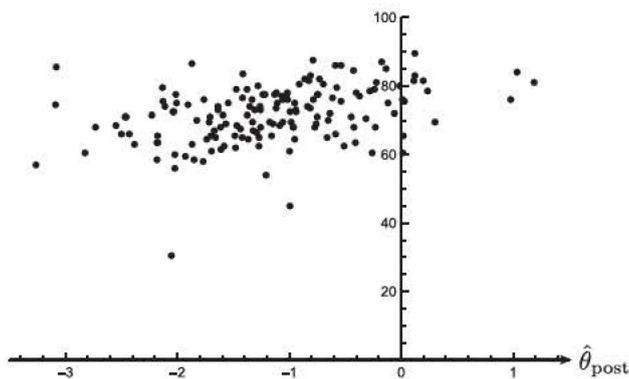
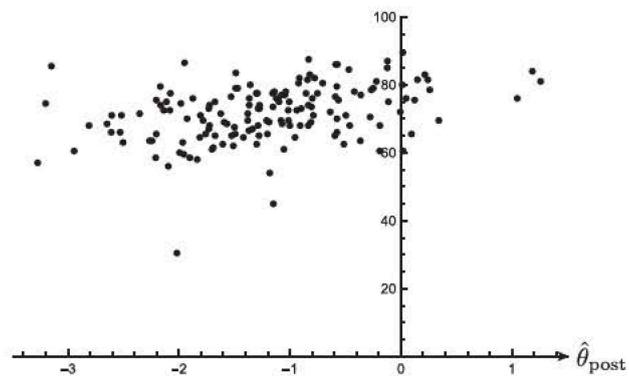
表6 M13の電磁気学の知識全般を表す $\hat{\theta}$ の平均

	A	BM	BE	BK	ALL	S	I
$\langle\hat{\theta}_{pre}\rangle$	-1.403	-1.527	-1.510	-1.756	-1.533	-1.819	-1.324
$\langle\hat{\theta}_{post}\rangle$	-1.065	-0.876	-1.204	-1.496	-1.159	-1.315	-1.045
$\langle\hat{\theta}_{post}-\hat{\theta}_{pre}\rangle$	0.339	0.651	0.306	0.260	0.374	0.504	0.280

表7 M18の電磁気学の知識全般を表す $\hat{\theta}$ の平均

	A	BM	BE	BK	ALL	S	I
$\langle \hat{\theta}_{pre} \rangle$	-1.446	-1.575	-1.552	-1.811	-1.580	-1.872	-1.366
$\langle \hat{\theta}_{post} \rangle$	-1.100	-0.899	-1.224	-1.536	-1.190	-1.345	-1.077
$\langle \hat{\theta}_{post} - \hat{\theta}_{pre} \rangle$	0.346	0.676	0.328	0.275	0.390	0.527	0.290

なお、BEMAポストテストのM13・M18の $\hat{\theta}$ を横軸にとり、中間試験と定期試験の合計の得点率[%]を縦軸にとった散布図(全データALL)は、それぞれ図8・図9のようになった。これらの分布から、BEMAで測れる電磁気学の知識全般の優劣と授業の中間試験・定期試験の得点率はそれほど関係していないように見える。このことは、電磁気学の知識が全般的に劣っていても授業の試験対策をしていればそこそこの点数を取れること、逆に電磁気学の定性的な知識が優れていたとしても計算問題を含む物理学(II)及び演習の中間試験・定期試験ではその実力を十分には発揮できない学生もかなりいること、を反映していると思われる。

図8 M13の $\hat{\theta}_{post}$ と中間・定期合計の得点率[%]の関係図9 M18の $\hat{\theta}_{post}$ と中間・定期合計の得点率[%]の関係

4. おわりに

本報告では、2019年度に実施した調査の拡大版として、2022年度に本学工学部1年の全学科で実施したBEMAの

プレテスト・ポストテストの結果をまとめた。全般的に、2022年度の方が2019年度よりも得点率が低かった。これは、2020年度からの新型コロナウイルスの感染拡大の影響により、高校での学習が従来よりも不十分だったのかもしれない。ゲインについても、2022年度の方が2019年度よりも低く、授業効果が電磁気学についての概念形成に比較的活かせていなかったようである。

物理学(II)及び演習の授業クラスで比較するとBKクラスのBEMAの得点率が低い、BEMAの後半(磁場を含む間)のゲインはBEクラスよりも大きくなっており、授業を通して磁気分野の理解が進んだようだ。BEクラスは電気工学科の学生なので、電磁気学に興味を持つ人が多いと期待されるが、BEMAの得点率、ゲインの低さからみると必ずしもそうではないと思われる。また、例年の一般的傾向として、推薦入試入学者より一般入試入学者の方が成績が良い(と言われている)が、今回のBEMAの結果もそのようになっている。ただし、項目反応理論を用いた電磁気学の知識の全般的な伸びでは推薦入試入学者の方が大きくなっていったことから、本学の入学前教育や初年次共通教育を適切に行うことで格差は縮まると期待している。

力学概念調査(Force Concept Inventory, FCI)と同様に、BEMAは電磁気学分野の定性的な問いからなっており、回答する上でほとんど計算を必要としない。そのため、高校までの電磁気学分野の学習が十分に出来ていれば高校生でもかなりの高得点を取れる⁴⁾ものである。一方、本学の電磁気学分野の初年次共通教育である「物理学(II)及び演習」は高校の物理基礎・物理の復習に留まらず、ベクトルや微分積分を含む計算についても授業で扱い、中間試験・定期試験で計算問題も出題している。このような違いのため、BEMAの回答データによって推定される電磁気学の知識の全般的な優劣が、中間・定期試験ではそれほど反映されないようである。大学の授業で電磁気学分野の内容をベクトル・微分積分を用いて学習し直すことにより、高校までに学習した電磁気学の知識全般を統一的に見渡して深い理解につなげられるように、今後の授業改善を模索して行きたい。

本報告では、MIRTをBEMAに適用したモデルのうち、文献[HS(2021)]²⁾のprincipleモデルM13及びtopicalモデルM18を本調査の回答データに適用した。その際、簡単のためM13・M18のそれぞれで「電磁気学の知識全般」を表す潜在特性尺度 θ 以外はゼロに固定して推定値 $\hat{\theta}$ を求めて解析した。前節の図・表からわかるように、M13による結果とM18による結果は大体同じようなパターンとなっている。これは、M13とM18に含まれる「電磁気学の知識全般」の識別パラメータ a_j 及び難易度パラメータ d_j のパターンが似て

いることに起因するが, MIRTを a_{j0} , d_j だけの項目反応理論として解析したここでの近似でも「電磁気学の知識全般」の普遍的な特徴を引き出せているとも解釈できる。いずれにせよ, BEMAポストテストで $\hat{\theta}$ の平均が正の値になるくらいに, 本学の工学部1年生の電磁気学の知識の全般的な理解度を全体的に引き上げるような共通教育としての授業を目指したいところである。

謝 辞

電磁気学についての概念調査に関する情報を提供していただいた新潟大学の土佐幸子氏に感謝いたします。また, 文献について議論していただいた山口東京理科大学共通教育センターの福田みのり氏に感謝いたします。本研究の一部はJSPS科研費JP19H01711の助成を受けたものです。

注

- *1 クォーター制の第II期に週3コマで開講している工学部1年生向け共通の必修科目「一般力学及び演習」(応化は「物理学I及び演習」)の中間試験・定期試験の合計点で評価。
- *2 実際の受講者数はそれぞれ69, 50, 47, 59であり, 特にBクラスの方で(部分的に)受験しなかった人が多かった。
- *3 これは, 2019年度の報告¹⁾の表1に対応する。ただし, 中間・定期試験問題は2019年度と2022年度で異なる。
- *4 これは, 2019年度の報告¹⁾の表3,4に対応する。
- *5 これは, 2019年度の報告¹⁾の表2に対応する。
- *6 高校での調査実施例(受験者79名)⁴⁾では, $\langle g \rangle = 0.43$ と報告されている。平均得点率自体も本学の結果よりかなり大きい。
- *7 ポストテストの点数がちょうど中央値だった人数が0の場合, 2019年度の報告¹⁾のように $P = (N_H + N_L) / N$ となる。
- *8 現代的なテスト理論で, 心理学事典⁶⁾に簡潔な解説がある。
- *9 今回のBEMAの回答データを用いて, M13は31次元,

M18は6次元でそれぞれ $\vec{\theta}$ を最尤法で推定すると, (少なくとも素朴な初期値 $\vec{\theta} = \vec{0}$ では) 数値的な収束性が微妙になった。これは, 文献[HS(2021)]²⁾の表4に記載されているM13・M18のパラメータの数値(3桁)では精度が十分でないためかもしれない。

- *10 M13及びM18ではBEMAの全31問のうち27問を用いているので, j は27個の問いを走る添字である。
- *11 $\log \text{Prob}(\{u_j\}|\theta)$ を $\hat{\theta}$ 周りでテイラー展開すると次式を得る:

$$\text{Prob}(\{u_j\}|\theta) = \text{Prob}(\{u_j\}|\hat{\theta}) \exp\left\{-\frac{1}{2}I(\hat{\theta})(\theta - \hat{\theta})^2 + o((\theta - \hat{\theta})^3)\right\}.$$

参考文献

- 1) 岸本功, 笠置映寛: 大学初年次教育における電磁気学についての概念調査の実施報告, *山陽小野田市立山口東京理科大学紀要*, **4**, 67-71 (2021)
- 2) John Hansen, John Stewart: Multidimensional item response theory and the Brief Electricity and Magnetism Assessment, *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* **17**, 020139 (2021)
- 3) Richard R. Hake: Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses, *Am. J. Phys.* **66**, 64 (1998)
- 4) 今井章人: 高校における電磁気学概念調査(BEMA)の実施報告, *物理教育通信*, **172**, 38-41 (2018)
- 5) Lin Ding, Ruth Chabay, Bruce Sherwood, Robert Beichner: Evaluating an electricity and magnetism assessment tool: Brief electricity and magnetism assessment, *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.* **2**, 010105 (2006)
- 6) 藤永保(監修), 内田伸子, 繁榎算男, 杉山憲司(責任編集委員): *最新心理学事典*, 平凡社, 東京, 2013年, pp. 201-204