高校教育課程における物理量の体系化の有効性検証と 物理学学習支援ツールの提案

Validity Verification about the Systematization of Physical Quantities
and a Suggestion of the Physics Learning Tool

小川 勝史^{※1}
Katsushi OGAWA

田中 宏明^{※1}
Hiroaki TANAKA

鄭 聖熹^{※1}
Seonghee JEONG

In this paper, we propose the systematization of physical quantities and the learning tool for physics in high school curriculum. This tool gives students the correlation diagram of physical quantities with button operation on PC. We gave a class about correlations between each physical quantity to four groups under different conditions, and carried out before-and-after comprehension test and questionnaire survey on the lecture content. Group A is an explanation of answers to the test carried out before a class without them, group B is to teach the systematization, group C is to teach it with a learning tool, and group D is to study it by themselves with a learning tool. Here we report the effect on the systematization and learning tool.

Keywords : Learning Physics, Physical Quantities, Sensors, Systematization

キーワード：物理学学習，物理量，センサ，体系化

1. はじめに

物理学を学ぶ際に学生が理解し辛いと感じる原因として、物理量や理論式と実際の物理現象がどのように繋がるのかがイメージできないという事と、それらをうまく整理できていないという事が考えられる。教科書等では、物理量を教示する際に他の物理量から公式として記述しており、学習するすべての物理量の分類やその適切な体系化がなされていない。これが物理量の意味やそれらの相関関係を理解し辛くする原因であると考えられる。したがって、学習する物理量全体を分類及び体系化し、俯瞰的にみえるようにすることは、物理量を理解するのに役に立つと言える。根本¹⁾は「物理教育で用いる量概念の捉えやすさについて」で、遠山ら^{2),3)}による研究「量の体系」における主張に従い物理量の分類を行い、その活用について述べている。それは、従来の物理教育において、数値化された数値の大きさだけが問題にされてきたので、加法性の成立しない量で混乱が生じており、簡単に計測できる量であってもその数値的な扱いについては複雑な公式を覚え込む必要があったためである。

本研究ではこの分類及び体系化の視点に加えて学生の物理現象を実感することの重要性を考え、分類の基準としてRT (Robot Technology) を用いた物理量の

感覚化という視点に注目した。まず筆者らは、高等学校教育課程における物理の力学分野で学習する物理量を「センサで計測可能なもの」と「センサで計測できないもの」に簡単に整理した⁴⁾。それを基に、物理学学習支援用RT教材の具体的なアプリケーションの一つとして、摩擦現象の学習支援教材を開発、その教育効果を確認した⁵⁾。同RT教材は、学生が摩擦現象と関係する各物理量を視覚及び触覚で体験し学習できるものであり、学習後の学力試験結果及び理解度が大きく向上することが確認できた。

本稿では、効果が確認できた物理量の分類を更に相関関係を含めて体系化を行った。また、単位に関して従来のSI単位系では基本単位と組立単位に分類されているが、組立単位は物理現象を考慮した分類とはいえないので、提案する物理量の体系化に合わせてSI単位系の組立単位を細分化して、物理的な意味と合わせての学習を促すことを考えた。また、学生が各物理量を理解するためには、物理量の体系化だけでなく、それをいかに効果的に学生へ伝達するかも重要な問題であるため、分類と体系化の提案に留まらず、提案手法に基づいて各物理量の相関関係が視覚的に確認出来る簡易学習ツールも合わせて提案する。

提案手法では、各物理量を直接計測できるものと計測できないものに分類し、これらの物理量を性質が近いもの同士で集めて細分化している。これにより、散在していた物理量が一定の基準で分類され、学生は各

分類に属する物理量の性質が理解しやすくなる。また、分類された物理量間の関係をまとめて体系化し、相関関係図として提示することで、各物理量の意味と関係性を視覚的に把握できる。この特徴を利用したPC上のボタン操作で各物理量間の相関関係が視覚的に確認できる学習ツールを用いることで学習効果の更なる向上が期待できる。

2. 高校教育課程における物理量の分類と体系化
2.1 物理量の分類

提案する分類手法を図1に示す。まず、物理量をセンサ等で計測可能なものと、計測できないものに大きく二つに分類する。前者を「計測可能物理量」、後者を「組立物理量」と定義する。「計測可能物理量」は、学

図1 本研究で提案する物理量分類体系図

生が直接体感できることを意味しており、その量は定量的に数値化できるため視認することが可能である。さらに、これを「基本物理量」と「複合物理量」の2種類に細分する。前者は、物理量の基本となるもので、これらを組み合わせて他の物理量が記述できる。後者は、センサでの直接計測も可能であるが、一方で複数の物理量を用いて組み合わせることで算出することも可能な物理量である。次に、センサでは直接計測出来ず、他の物理量を組み合わせた理論式からのみ算出するのが「組立物理量」である。「組立物理量」の中でエネルギーに関連するものを「エネルギー物理量」、各物理現象における比例定数等を「係数物理量」としてさらに細分化している。

ここで、SI単位における分類と、本稿で提案する分類との関係について述べる。SI単位では、SI基本単位、そのべき乗の積からなるSI組立単位、固有の名称と記号で構成するSI組立単位に分類される⁶⁾。SI単位系では、7つの基本単位とそれらに対応する7つの基本物理量を定義しており、すべての物理量は基本物理量を組み合わせた組立量として記述できる。基本物理量の中で、長さ l [m]、質量 m [kg]、時間 t [s] が高校物理力学分野で扱う基本物理量である。これらが本稿で定義する基本物理量と同等のものである。また、基本物理量以外の物理量、つまり複合物理量とエネルギー物

表1 高等学校教育課程の力学分野で扱う物理量と物理公式一覧

物理量	公式及び 算出方法	関連する物理量	SI分類			提案分類	
			基本 単位	組立単位	固有名称 組立単位	分類 2	分類 1
時間 t [s]	直接計測		[s]			基本物理量	計測可能物理量 (センサと理 論式で算出)
質量 m [kg]	直接計測		[kg]				
距離 l [m]	直接計測		[m]				
速度 v [m/s]	v_0+at	v_0 [m/s], a [m/s ²], t [s]		[m/s]		複合物理量	
加速度 a [m/s ²]	$\Delta v / \Delta t$	Δv [m/s], Δt [s]		[m/s ²]			
角度 θ [rad]	ωt	ω [rad/s], t [s]		[1]	[rad]		
角速度 ω [rad/s]	θ / t	θ [rad], t [s]		[1/s]	[rad/s]		
周期 T [s]	$1/f$	f [Hz]		[s]			
振動数 f [Hz]	$1/T$	T [s]		[1/s]	[Hz]		
力 F [N]	ma	m [kg], a [m/s ²]		[kg m/s ²]	[N]		
遠心力 / 向心力 F [N]	$mr \omega^2$	m [kg], r [m], ω [rad/s]		[kg m/s ²]	[N]		
弾性力 F [N]	kl	k [N/m], l [m]		[kg m/s ²]	[N]		
摩擦力 F [N]	μN	μ [1], N [N]		[kg m/s ²]	[N]		
垂直抗力 N [N]	mg	m [kg], g [m/s ²]		[kg m/s ²]	[N]		
モーメント M [N m]	Fl	F [N], l [m]		[kg m ² /s ²]	[N m]		
摩擦係数 μ [1]	F/N	F [N], N [N]		[1]		係数物理量	組立物理量 (理論式で のみ算出)
ばね定数 k [N/m]	F/l	F [N], l [m]		[kg s ²]	[N/m]		
反発係数 e [1]	v'/v	v' [m/s], v [m/s]		[1]		エネルギー 物理量	
運動エネルギー E_k [J]	$1/2mv^2$	m [kg], v [m/s]		[kg m ² /s ²]	[J]		
位置エネルギー E_p [J]	mgh	m [kg], g [m/s ²], l [m]		[kg m ² /s ²]	[J]		
弾性エネルギー E_e [J]	$1/2kl^2$	k [N/m], l [m]		[kg m ² /s ²]	[J]		
仕事 W [J]	Fl	F [N], l [m]		[kg m ² /s ²]	[J]		
仕事率 P [J/s]	W/t	W [J], t [s]		[kg m ² /s ³]	[W]		
運動量 p [kg m/s]	mv	m [kg], v [m/s]		[kg m/s]			
力積 I [N s]	$F \Delta t$	F [N], Δt [s]		[kg m/s]	[N s]		

理量, 係数物理量は, SI単位系における組立量である. 表1に高等学校教育課程の力学分野で扱う物理量の一覧^{7), 8)}, 各物理量を算出する物理公式, 提案分類法とSI単位系での分類について示す.

2.2 物理量の相関関係の体系化

前章で述べたように, 基本物理量は他の物理量を算出する際に使われ, 複合物理量や組立物理量は, 基本物理量や他の物理量の組み合わせで算出される. 即ち, 各物理量はクモの巣のように互いに複雑な関係を持つ. この相関関係を分かりやすく体系化して学生へ提示することが可能であれば, 物理量間の相関関係の全体像把握や, 物理量そのものの性質の理解にも有効であると考えられる. 各物理量を前章での分類法を基に各物理量間の関係を矢印でつなげた相関図を図2に示す.

この体系化に基づいて具体的に運動量 p [kg m/s]の学習について考える. これは物体の質量 m [kg]と速度 v [m/s]のかけ算で算出されるもので, 学生は公式として

$$p = mv \quad (1)$$

を暗記することになりがちである. この相関関係を本稿の提案手法に当てはめる. まず運動量 p [kg m/s]は組立物理量で, 質量 m [kg]と速度 v [m/s]は計測可能物理量と分類される. ここで質量 m [kg]は基本物理量である. 速度 v [m/s]は複合物理量であり, 基本物理量である距離 l [m]と時間 t [s]から,

$$v = l/t \quad (2)$$

と算出される. つまり, 運動量 p [kg m/s]は, 基本物理量である質量 m [kg]と, 距離 l [m], 時間 t [s]により算出される速度 v [m/s]によって算出される物理量であり, その中でもエネルギー物理量と分類される. このように学生に指導することで公式を暗記するのではなく, 一つ一つの物理量の意味を理解して理論式を組み立てブロックのように構築することで効率的な定着が期待できる. また, 各量の計測センサの例を合わせて解説することで実際の物理現象と物理量及び理論式をリンクさせてイメージを容易にすることが可能になる.

図2の相関図では, 「計測可能物理量」と「組立物理量」をそれぞれ左と右に配置し, 「基本物理量」, 「複合物理量」, 「エネルギー物理量」と「係数物理量」を左から配置した. このように体系化することで, 物理量の関係性が大きな流れとして「左」から「右」へ流れるように見せることが可能である. すなわち, 「基本物理量」は多くのその他の物理量に係っていること, 「複合物理量」は「基本物理量」とその他の「複合物理量」の組み合わせで成り立っていること, 「エネルギー物理量」は「基本物理量」と「複合物理量」から算出できることが視覚的に把握できる. これを利用した各物理量の相関関係が把握できる学習支援ツールを次章で説明する.

2.3 物理量の相関関係学習ツール

提案学習ツールは, ソフトウェアへの接近性を容易にするために, 特別なソフトウェアを使用せず, 一般

図2 物理量相関図及び学習ツール表示キャプチャー画面

図3 PC上の学習ツールの操作パネル部分キャプチャー画面

的に入手可能なExcel (Microsoft社) のマクロ機能を使って開発した。学習ツール物理量相関関係表示画面 (図2) 及び、操作パネル画面 (図3) を示す。操作方法はシンプルで、操作パネル上の各物理量が記されたボタンの中で、相関関係が知りたい物理量のボタンをマウスでクリックすると該当する物理量とそれに関連する物理量の色が変化し、それらが矢印でつながる。クリアボタンをクリックすると初期状態に戻り、他の物理量が選択できる。このように相関図を視覚的に確認することにより各物理量の性質や算出方法までイメージでき、物理量の学習効率が向上すると期待できる。

3. 物理量体系化と相関関係学習ツールの評価

3.1 評価授業概要

本稿で提案した物理量の分類及び体系化手法、同手法を基にした相関関係学習ツールの有効性を確認するために評価授業を実施した。その際の授業風景を図4に示す。評価授業に参加した学生は、高校3年生64名で、16名ずつの4グループ (A, B, C, D) に分けた。グループ分けは「物理」の成績の平均点が各グループ間で 49.5 ± 1 点となるようにした。評価授業の手順を以下に示す。

- (1) 学生全員に対し、物理量に関する確認テストを実施 (20分間)。
- (2) Aグループに対し、確認テストの答え合せと物理現象に関して解説 (25分間)。
- (3) Bグループに対し、提案する物理量の分類と体系化をプリント授業で解説 (25分間)。
- (4) Cグループに対し、提案する物理量の分類と体系化をプリントと学習ツールで解説 (25分間)。
- (5) Dグループに対して、学習ツールを用いて提案する物理量の分類と体系化について自習後、簡単に解説 (25分間)。
- (6) 学生全員に対し、事前に実施した確認テストとは出題順を変更したテストと理解度アンケートを実施 (20分間)。

表2 授業前後に実施した確認テスト結果

グループ	人数n [人]	確認テスト平均 [点]		前後差分		
		事前	事後	平均 [点] $\bar{x}$	分散 s^2	標準偏差 s
A	16	5.75	30.00	24.38	147.71	12.15
B	16	3.31	46.13	42.88	220.65	14.85
C	16	3.69	62.44	58.88	577.72	24.04
D	16	5.75	43.44	37.75	138.60	11.77

3.2 確認テストとアンケート内容

評価授業で用いた確認テスト及びアンケートの内容について説明する。まず、確認テストの具体例として、以下に運動量に関する問題を示す。

【例題】運動量 p [kg m/s] は () と () から求められる。

問題は、特定の物理量の算出に関係する他の物理量を問題文中で括弧抜きにして出題し、100点満点で採点した。学生は、括弧内に質量 m 、速度 v と解答すれば正解となる。テストは表2に示す物理量の中から21個を選出しランダムな順序で2パターン作成した。アンケートは、授業の学習効果についての所感を「大変役に立った (5点)」、「役に立った (4点)」、「普通 (3点)」、「役に立たなかった (2点)」、「全然役に立たなかった (1点)」の5段階評価での回答とした。また、これだけでは答え難い質問は自由記述にして学生の考えを可能な限り読み取れるようにした。以下にアンケート内容を示す。なお、問1から問3までは全てのグループに対して行い、問4から問6まではグループB, C, Dに、問7はグループC, Dに対して行った。アンケートの内容を以下に示す。

- 問1. 今回の授業を通して各物理量の相関関係を理解、イメージ出来るようになりましたか。
- 問2. なぜそのように思いましたか? 理由をお書き下さい。(自由記述)
- 問3. このような授業はどのように感じましたか? (自由記述)

図4 学習ツールを用いた授業風景

- 問4. センサで計測できるかどうかによる分類は、各物理量の関係性の理解に役立ちましたか？
- 問5. エネルギー型と係数型で分類したのは、それらの物理量の関係性の理解に役立ちましたか？
- 問6. 基本物理量と複合物理量に分類した所は、それらの物理量の関係性の理解に役立ちましたか？
- 問7. 学習ツールは、すべての物理量の関係性を理解するのに役立ちましたか？

3.3 仮説検定によるデータ分析

授業前後の確認テストの得点とアンケートの各設問に対する5段階評価の回答値を基にそれぞれ標本平均値 $\bar{x}$ 、標本標準偏差 s を求めた。この結果にもとづいて条件の異なる2つのグループに対して仮説検定を行い母集団について設定した仮説についての有意性を判定する⁹⁾。これらの結果は、異なる標本（サンプルグループ）から導かれ、それぞれ独立した対応のないデータであり、それらの母平均 μ の有意性についての判定はt検定を行う。これらのデータにおいて母標準偏差 σ が不明であり仮説検定する際に、最初にF分布を活用して2つの標本分散 s^2 をもとに検定統計量 T を算出し、母分散 σ^2 が異なるかどうかを判定する。F検定の結果において、等分散($\sigma_1^2 = \sigma_2^2$)の場合2つのグループの標本数の和が100未満で小標本であるので、2つの母平均の差のt検定を実施する。また、小標本で非等分散($\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$)の場合2つの母平均の差のウェルチのt検定を実施する。また、アンケートの5段階評価で得た回答に関して評価を行う際には母平均 μ と比較値 μ_0 との差のt検定を行う。

確認テスト結果の仮説検定計算は次の手順で行う。まず、帰無仮説(H_0)の設定を行う。ここでは、比較する母平均が等しいという仮説を立てる。次に対立仮説(H_1)として、いずれか一方が大きな値をとるという仮説を立てる。そして、F検定の結果に応じた式を用いて検定統計量 T を計算する。有意水準を5%で右片側検定とし、自由度の算出結果から棄却域 R を決める。 $T \geq R$ なら帰無仮説 H_0 を棄却し、 $T < R$ なら H_0 を棄却しない。その結果を基に有意の差を判定する。アンケート結果については、帰無仮説は母平均が比較値($\mu_0 = 3$)と等しいとし、対立仮説は母平均が比較値より大きな値をとるという仮説を立て、同様に有意の

表3 確認テストの仮説検定結果

比較グループ		AとB	AとC	BとC	AとD
F検定	検定統計量 T	1.494	3.911	2.618	1.066
	棄却域 R	2.403	2.403	2.403	2.403
	母分散	等分散	非等分散	非等分散	等分散
	検定結果	$\mu_A < \mu_B$	$\mu_A < \mu_C$	$\mu_B < \mu_C$	$\mu_A < \mu_D$
t検定	検定統計量 T	2.293	5.124	2.265	1.880
	棄却域 R	1.697	1.717	1.708	1.697
	帰無仮説 H_0	棄却	棄却	棄却	棄却
	検定結果	$\mu_A < \mu_B$	$\mu_A < \mu_C$	$\mu_B < \mu_C$	$\mu_A < \mu_D$

差を判定する。

3.4 実験結果

確認テストの結果を表2に示す。同結果をもとに各グループの母平均 μ に関する有意の差についての判定結果を表3に示す。表2より、学習ツールを用いて行った物理量の分類と体系化に関する授業を行ったCグループが最も高い平均点であった。次いで学習ツールは使用せず物理量の分類と体系化に関する授業を行ったBグループの平均点が高く、提案手法に関しては触れずに確認テストの解説のみを行ったAグループの平均が最も低い結果が得られた。また、Dグループについては、学習ツールを使った自習のため他のグループとは条件が異なるが、Aグループに比べて高い平均点を得られた。この結果に対して表3より、 μ_A と μ_B では μ_B に、 μ_A と μ_C では μ_C に、 μ_B と μ_C では μ_C に有意の差が確認できた。この結果から物理量の相関関係に関する内容に限るが、本稿で提案する物理量の分類と体系化は学習効果があり、また学習ツールを用いることで更なる効果の向上がみられることが確認できた。Dグループでの結果からは μ_A と μ_D では μ_D に有意の差が確認できたことから、学習ツールを用いることが家庭学習などの自学自習で有効なツールとなり得る可能性を示唆していると考ええる。

次に授業後に実施した5段階評価アンケートの各設問の結果で得られた回答値の母平均 μ と「普通(3点)」を比較値 $\mu_0 (= 3)$ として、その差のt検定の判定結果を表4に示す。グループAでは母平均 $\mu < 3$ となり「役に立たなかった」と判定された。グループBでは各設問に対して $\mu = 3$ となり「普通」と判定された。グループC、Dでは、 $\mu > 3$ となり「役に立った」と

表4 授業後に実施したアンケート集計結果と仮説検定結果 ($\mu_0 = 3$, 棄却域 $R = 1.753$)

		問1	問4	問5	問6	問7
A	平均 $\bar{x}$	2.56				
	分散 s^2	0.53				
	標準偏差 s	0.73				
	検定統計量 T	-2.411				
	検定結果	$\mu < 3$				
B	平均 $\bar{x}$	3.13	3.06	3.19	3.31	
	分散 s^2	1.18	1.53	1.36	1.56	
	標準偏差 s	1.09	1.24	1.17	1.25	
	検定統計量 T	0.477	0.194	0.65	0.992	
	検定結果	$\mu = 3$	$\mu = 3$	$\mu = 3$	$\mu = 3$	
C	平均 $\bar{x}$	3.5	3.75	3.69	3.94	3.81
	分散 s^2	0.4	0.73	0.9	0.6	1.1
	標準偏差 s	0.63	0.86	0.95	0.77	1.05
	検定統計量 T	3.175	3.488	2.905	4.883	3.086
	検定結果	$\mu > 3$	$\mu > 3$	$\mu > 3$	$\mu > 3$	$\mu > 3$
D	平均 $\bar{x}$	3.63	3.81	3.75	3.94	4.19
	分散 s^2	0.52	0.7	0.33	0.33	0.96
	標準偏差 s	0.72	0.83	0.58	0.57	0.98
	検定統計量 T	3.5	3.904	5.172	6.596	4.857
	検定結果	$\mu > 3$	$\mu > 3$	$\mu > 3$	$\mu > 3$	$\mu > 3$

判定された。テスト結果を合わせて考えると、グループBは学力向上への効果は認められるが、理解に対して役立つという手応えは得られなかったようである。自由記述の回答では「分類したことであまりまとめてくれていて普段の物理より分かりやすかった」、「基本の時間、距離、質量が分かれば大抵出来る事が分かった」という意見がある反面、「物理があまり得意ではなく理解し辛かった」、「難しかった」という意見もあった。分類の効果で物理量に関する新たな気づきがあった学生と、難しいという先入観を覆すことが出来なかった学生が入り交じった状態という結果であった。また、グループCでは、テスト、アンケートの結果共に理解度は高かったが、自由記述では「矢印が理解しやすく、線のつながりで何と何とが関係していて、何に変わるかが分かった」、「見やすくて楽しく理解できた」、「自分でツールを使用するので頭に入りやすい」、「話を聞くだけより分かりやすくて良かった」という回答があった。これらの回答で、「矢印」や「線のつながり」、「見やすい」という学習ツールの視覚的な効果に関する評価と学習ツールを使用することによる学習意欲の上昇で能動的に授業に参加出来ることが成績と理解度が上がる要因だと考えられる回答が得られた。

4. まとめ

本稿では、物理量の算出方法による分類及び体系化と、それを用いた簡易的学習ツールを提案した。高校3年生を対象とした評価授業を実施し、提案分類及び体系化手法と学習ツールを使用したグループが物理量の相関関係に対する理解度、学力ともに向上していることが確認できた。その結果として、物理量とその相関関係の学習に限られることではあるが、提案する物理量の分類と体系化と学習ツールを用い、学習内容が記憶に残りやすく、学力の向上にもつながることが検証できた。今後の展開として、本稿の提案に基づいたRT教材を開発して、提案学習ツールを併用した物理学習の授業形態を開発し、その学習効果の検証を進めたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 根本和昭：物理教育で用いる量概念の捉え易さについて，日本科学教育学会，年会論文集18，pp.227-228，1994
- 2) 遠山 啓：量とはなにかⅠ，太郎次郎社，1978
- 3) 遠山 啓：量とはなにかⅡ，太郎次郎社，1981
- 4) 小川勝史，田中宏明，鄭 聖熹：高等学校教育課程における物理学習に関するRT教材の開発－物理量計測用センサの体系化－，第14回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会，3D1-3，2013
- 5) 小川勝史，田中宏明，鄭 聖熹：高等学校教育課程における物理学習支援用RT教材－摩擦現象学習支援教材の開発と評価，第15回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会，1E1-5，2014
- 6) 国際単位系(SI)日本語版刊行委員会：国際単位系(SI)の要約日本語版，独立行政法人 産業技術総合研究所 計量標準総合センター，pp.1-4，2006
- 7) 三浦 登，他：物理基礎，東京書籍，pp.14-110，2013
- 8) 三浦 登，他：物理，東京書籍，pp.6-96，2013
- 9) 上田拓治：44の例題で学ぶ統計的検定と推定の解き方，オーム社，2009

著 者 紹 介

小川 勝史

三重大学大学院工学研究科博士前期課程修了。三洋電機株式会社を経て、現在、大阪電気通信大学高等学校教諭、大阪電気通信大学大学院工学研究科博士後期課程。RTを用いた物理教育教材、RTセンサ技術の研究に従事