

中学校理科「力の合成・分解」の 理解度向上に向けた教材の提案 ～力の可視化に着目した新規教材の定量的評価～

上村 弘明*・重松 宏武**

A Proposal for Teaching Materials to Improve Understanding of the Junior High School
Science Class “Synthesis and Decomposition of Forces”
～ Quantitative Evaluation of New Teaching Materials Focusing
on Visualization of Forces ～

KAMIMURA Hiroaki*, SHIGEMATSU Hirotake**

(Received September 25, 2025)

中学校第三学年理科で行われる単元「力の合成・分解」では、ばねばかりを組み合わせた教材を用いて力の合成・分解の理解を深める。しかしながら、ばねばかりに組み込まれたばねは、ばね係数が大きく伸びが小さいことから、ばね係数とばねの伸びの積で表される力の大きさの変化を視覚的・直感的に理解しづらいという課題がある。そこで、ばねばかりの代わりとしてばね係数の小さく伸びの大きな単体のばねを用いて、従来の教材と比較してより視覚的・直感的に理解できる教材開発を試みた。さらに、提案教材の性能に関する定量的評価を行った。

はじめに

中学校第三学年理科で学習する「力の合成・分解」は、物体に働く複数の力を「力の大きさ」、「力の向き」、「作用点」の3要素に着目して学習を行い、それぞれの要素を矢印の「長さ」、「向き」、「始点」で表現することで力の変化を視覚的に表現している。

検定教科書（啓林館（鎌田 他、2020年検定）、大日本図書（有馬 他、2020年検定）、学校図書（霜田 他、2020年検定）、教育出版（室伏 他、2020年検定）、東京書籍（梶田 他、2020年検定））では、ばねばかり及びばねを図1に示すように組み合わせ（ばねIは張力固定。ばねIの代用として輪ゴムを用いる場合もある）、ばねばかりII、IIIに掛かる力の大きさと向きを変化させることで、ばねIに釣り合う2力を測定する実験を行う。しかし、これらの実験で扱うばねばかりは、ばね係数が大きく、伸びの変化が小さいため、力の変化を視覚的に理解することが困難な場合がある。例えば、図1中の左図のばねばかりII、IIIの伸びは右図のそれらに比べると大きくなっていることはわかるが、これらの伸びの差をばねばかりの値を読み取らずに視覚的・直感的に理解する

ことは難しい。そのため、ばねIに釣り合う力を考えるにあたり、ばねばかりII、IIIの目盛り及び向きから力の大きさと向きを読み取り、別途、矢印等を用いて改めて作図を行うことでばねばかりII、IIIによる2力を可視化する必要がある。

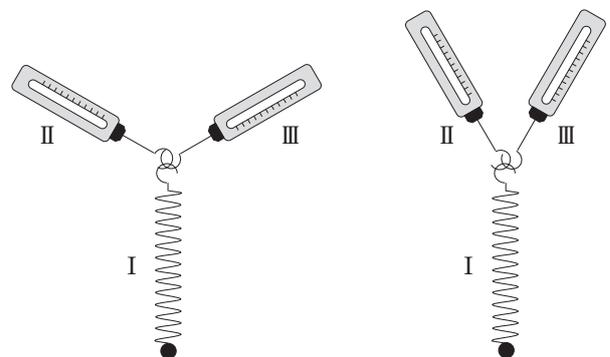


図1. ばねばかりを用いた従来の教材の模式図
大日本図書、教育出版、東京書籍の教科書では、ばねIの代用として輪ゴムを用いて同様の実験を行う。

* 防府市役所 ** 山口大学教育学部, 〒753-8513 山口市吉田1677-1, shigema@yamaguchi-u.ac.jp

そこで、市販のばねばかりを用いた従来の教材と比較して、力の変化をより視覚的・直感的に理解しやすくし、且つ、釣り合う力の可視化を効率的に行うことを目的とした教材開発を試みた。以下にこの教材の特徴を示す。

- ① 視覚的理解度向上のために伸びが大きい（＝ばね係数が小さい）ばねを採用し、ばねの長さの変化から力の変化を読み取ることを可能とした。
- ② 力の変化を定量的に評価するための張力測定機器として、ばねばかりの代わりに、力が働いても本体の長さが変化しないデジタルニュートンメーター GN-1（(株)ナリカ）を採用した。

本論文においては、第1章では従来用いられている教材の評価を行い、その課題を分析・改善方法の提案を行う。そして、この課題を解決するために新たに提案した教材を構成する主たる部品（デジタルニュートンメーターと実験用ばね）の性能測定並びに評価を第2章、第3章にそれぞれ示す。続く第4章に教材の概要の説明、第5章において開発した教材の性能評価を行い、最終第6章においてまとめを行う。なお、力の合成・分解に着目した実験及びその評価に関する論文は多く公開されており、こちらも参照いただきたい（蛭名 他、2020; 長谷川、2018; 杉森 他、2013; 金児、2014; 北村、1981; 谷崎他、2023）。

1. 従来用いている教材の性能評価と改善提案

従来用いられている教材の性能を確認・評価するために、市販されている（株）ナリカ SF-03, SF-04, SF-05、シンワ測定（株）74451の計4種を採用し、それぞれ最大計量[N]、目盛りの最小表示[N]、目盛長[mm]、ばね係数[N/mm]の4つの項目を表1にまとめる。なお、シンワ測定（株）74451の耐荷重量と最小表示の公称値（表中括弧内 単位[g]）においては、山口市の重力加速度 g^{*1} を用い、単位[N]に換算した値を掲載した。これら公称値を用いてフックの法則から成る(1)式を活用し、ばね係数を求めた。

$$(\text{ばね係数}[\text{N/mm}] = \frac{\text{最大計量}[\text{N}]}{\text{目盛り長}[\text{mm}]}) \quad (1)$$

表1. 教育現場で用いられているばねばかりの性能

物理量	(株)ナリカ			シンワ測定(株)
	SF-03	SF-04	SF-05	74451
最大荷重 [N]	1	2	5	4.898295 ^{*1} (500g重)
最小表示 [N]	0.02	0.04	0.1	0.04898295 ^{*1} (5g重)
目盛長 [mm]	100	100	100	100
ばね係数 [N/mm]	0.01	0.02	0.05	0.04898295

表1に示す市販のばねばかりは3-1節にて後述する単体の実験用ばねと比較してばね係数が大きい（＝伸びが小さい）。例えば、表1中の最もばね係数の小さなばね（(株)ナリカ SF-03）であってもその値は0.01N/mmであり、1Nの張力を掛けた際に100mm程度しか伸長しない（今回最終候補として採用した単体ばね（ケニス（株）S50, S100, S150）のばね係数は、0.00083821～0.0035879 N/mmという小さな値を持つ。3-1節参照）。ばねばかりに用いられるばねは、大きな全長の変化を伴うとはかりとしての機能を為さないため、表1に示すように最大荷重は比較的小さく且つ、伸長の変化幅も小さい。そのため、力の変化をばねの伸びから視覚的・直感的に理解することが困難であるという課題が生じる。ゆえに、視覚的に理解しやすい教材開発を目標とする本研究では、より伸びの大きいばね（＝ばね係数の小さいばね）を用いることが適切と考え、ばねばかりに内蔵されたばねではなく、単体のばねを用いる事が適切であると考へた。なお、力の大きさの測定は、全長の変化しないデジタルニュートンメーターを活用した。ばね及びデジタルニュートンメーターを組み合わせて扱う際の基本形として、図2（実物写真）、図3（模式図）に示すようにばねの片端にデジタルニュートンメーターのフックを掛けたものを用いた。



図2. ばねとデジタルニュートンメーターを組み合わせたもの（ばねの固定のためにマグネットを使用）



図3. ばねとデジタルニュートンメーターを組み合わせた模式図

2. デジタルニュートンメーターの性能評価

本章においては、教材として活用するデジタルニュートンメーター GN-1（(株)ナリカ、分解能0.01N表記）の性能評価について述べる。具体的には、3.07710gのプラスチックカップをデジタルニュートンメーターのフックに吊り下げ、カップ内に入れるクリップの個数を増加させていき、吊り下げた質量とデジタルニュートンメーターの表示の相関の確認を行った（図4、5）。なお、ゼムクリップは一つあたりの質量が $0.242\text{g} \pm 0.007\text{g}$ （重力換算で $0.00237\text{N} \pm 0.00007\text{N}^{*1}$ ）のものを用いた。

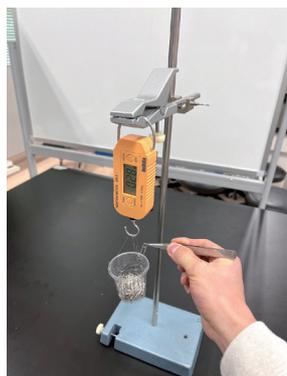


図4. デジタルニュートンメートルの性能評価の様子

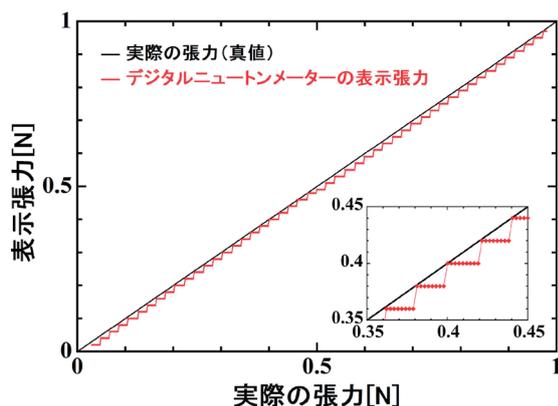


図5. クリップの個数（張力）とデジタルニュートンメートルの表示値との関係

図5中において、それぞれ黒線がクリップの質量から換算した張力（計算値）、赤色がデジタルニュートンメートルの表示値であり、さらに挿入図は図5の一部を拡大したものである。黒線で表されるデジタルニュートンメートルに掛かる張力 F [N] は、プラスチックカップの質量 M_0 [g]、ゼムクリップの1個当たりの質量 M_1 [g]、ゼムクリップの個数 n [個]、山口市の重力加速度 g [N/(m²)]^{*1}を用いて。

$$F = \{(M_0 + M_1 n) \times 10^{-3}\} \times g \quad (2)$$

と表される。ここで $M_0 = 3.07710$ g、 $M_1 = 0.24213$ g である。黒色の直線で表される換算値（理想値）に比べ、デジタルニュートンメートルの表示値は階段状な変化を示している。これはデジタルニュートンメートルの分解能が0.01Nではあるが、実際、認知するステップが0.02Nと大きいため、実際より小さい値を示す傾向にあることが読み取れる。この条件の中、表示値が変化した瞬間の値がより新値に近いことからデジタルニュートンメートルの表示値が変化した瞬間の値が真値と考えられる。ゆえに力を増加していきデジタルニュートンメートルが示す表示値が変わった瞬間の値を採用することとした。

3. 実験に用いるばねの性能評価

図1に示す従来の教材に用いられるばねばかりの代用として、始めにばね係数が異なる6種類の実験用ばね（ケニス（株）S50, S100, S150, S200, S300, S500）を候補として挙げた。本章においては、第2章で特性を確認したデジタルニュートンメートルを用いてこれら実験用ばねの性能評価を行い（3-1節）、開発教材に採用するばね（3種）の選定過程を示す（3-2節）。

3-1. 実験用ばねの性能評価

一般的にばねは、張力 F [N]、ばね係数 k [N/mm]、伸長 l [mm]、初張力 F_0 [N]、自由長 l_0 [mm] という代表的な5種類の物理量で特長付けられる。これらは初張力 F_0 [N] を考慮したフックの法則として

$$F = kl + F_0 \quad (3)$$

と表される。中学校におけるばねの学習においては初張力 F_0 を考慮しないが（ $F_0 = 0$ 、つまり、フックの法則は $F = kl$ と表される）、実際に教育現場で使用しているばねの多くが初張力 F_0 を持つことから取り扱いに注意が必要である。具体的には、(3)式から伸長 l は

$$l = \frac{F - F_0}{k} \quad (4)$$

と表されることから、伸長 l を中学校の学習内容に沿う $l \equiv F/k$ と扱うためには、①初張力 F_0 そのものの値が小さいばねを選択する、②ばね係数 k が小さいばねを選択する、③張力 $F \gg$ 初張力 F_0 の領域のみを活用するなどの対応が必要である。なお、現実的にはこれらの物理量は相関があるため、総合的な判断が必要となる。また、伸長 l を $l \equiv F/k$ として示される比例式として視覚的に理解するには、図6に示すように全長 L [mm] (= 自然長 l_0 + 伸長 l) に対して自然長 l_0 が無視できるぐらい伸長 l が大きくなると良い（図6は例として、全長 L が自由長 l_0 の8倍の長さに伸びている状態を示す）。

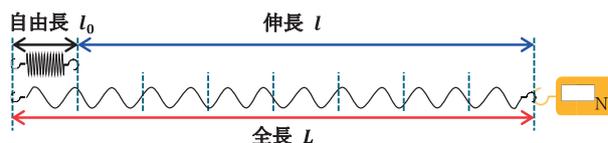


図6. ばねの全長 L 、自由長 l_0 、伸長 l の関係
全長 L はばねに張力を掛けた際のばね両端の内径間の長さ、自由長 l_0 はばねに張力が掛かっていない際のばね両端の内径間の長さ、伸長 l はばねに張力を掛けた際の伸びをそれぞれ意味する（ばね技術研究会、1978）。

ばねに働く張力 F [N] と伸長 l [mm] の実際の関係を、デジタルニュートンメーターを用いて検証を行った。具体的には、図2に示すように一方をマグネットで固定したばねを地面に接しないように水平に置き、水平に力を与えばねを伸ばし、ばねの伸長 l と張力 F を読み取った。得られた結果を図7 (全体)、図8 (原点付近を抜粋) に公称値を基に引いた破線と共にそれぞれ示す。さらに図7、図8中の公称値及び実測値を基に引いた直線を示す式及びばね係数 k 、初張力 F_0 を表2、3にそれぞれまとめる。

なお、張力の上限值はそれぞれのばねの許容荷重 (S50: 50g, S100: 100g, S150: 150g, S200: 200g, S300: 300g, S500: 500g) を考慮し、これらの値を下回るよう余裕を持たせた値として S50は0.40N、S100, S150, S200, S300, S500は0.80N をそれぞれ採用して測定を行った。

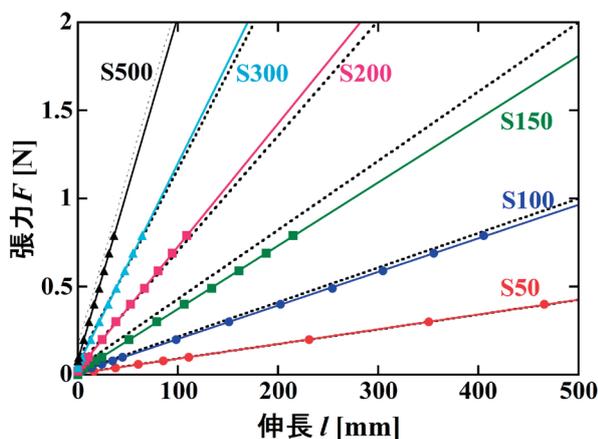


図7. ばねの伸長 l と張力 F の関係 (全体)

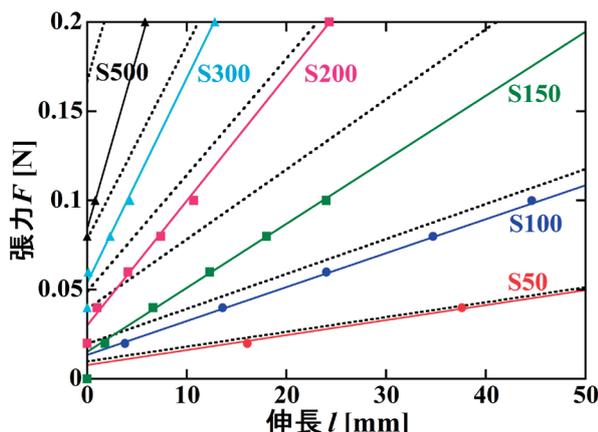


図8. ばねの伸長 l と張力 F の関係 (図7の抜粋)

表2. 図7, 8中の破線を表す関係式 (公称値)

	回帰直線の数式 $F = kl + F_0$	ばね係数 k [N/mm]	初張力 F_0 [N]
S50	$F = 0.000830l + 0.00980$	0.000830	0.00980
S100	$F = 0.001959l + 0.01960$	0.001959	0.01960
S150	$F = 0.003919l + 0.03919$	0.003919	0.03919
S200	$F = 0.006531l + 0.04898$	0.006531	0.04898
S300	$F = 0.010885l + 0.07838$	0.010885	0.07838
S500	$F = 0.019593l + 0.16654$	0.019593	0.16654

表3. 図7, 8中の実線を表す関係式 (実測値)

	回帰直線の数式 $F = kl + F_0$	ばね係数 k [N/mm]	初張力 F_0 [N]
S50	$F = 0.000838l + 0.00776$	0.000838	0.00776
S100	$F = 0.001903l + 0.01340$	0.001903	0.01340
S150	$F = 0.003588l + 0.01524$	0.003588	0.01524
S200	$F = 0.006978l + 0.03012$	0.006978	0.03012
S300	$F = 0.011467l + 0.05397$	0.011467	0.05397
S500	$F = 0.019497l + 0.08430$	0.019497	0.08430

表2, 3から、実測値から算出したばね係数は公称値と比較して S150は約-8.4%、S200は約+6.8%、S300は約+5.3%程度の差がそれぞれ存在するが、それ以外のばねは公称値との整合性に大きな問題がないことが確認できた (公称値との差が±5%以下と小さい)。

また、図7からは、実測値を基に引いた回帰直線は原点を通るように見えるが、実際は図8に示す通り、わずかな初張力を持つ原点を通らない直線で特徴づけられる。この初張力の影響については使用するばねの選定も含め、3-2節にて改めて検討を行う。なお、ばね係数及び初張力において実測値と公称値との間に差異が確認されたが、これらはばねの個体差と考え、本研究においては公称値ではなく、本実験によって得られた実測値を採用することとした。

3-2. 使用するばねの選定

本教材開発の目標である視覚的な理解のしやすさの向上に向け、より適したばねの選出を行うために、ばねを伸ばした際のばねの全長 $L (= l + l_0)$ に対する伸長 l が占める割合となる「伸長割合」

$$\text{伸長割合} [\%] = \frac{l}{L} \times 100 = \frac{l}{l + l_0} \times 100 \quad (5)$$

を導入する。例えば、図6に示すばねは、自由長 l_0 のばねに張力を掛け、全長 L が元の自由長の倍の長さ ($8l_0$) に伸びているため、伸長 l の長さは $7l_0$ と表され、(5)式より伸長割合は87.5%と算出される。

なお(5)式中の伸長 l に、(4)式を代入することにより、

$$\begin{aligned} \text{伸長割合}[\%] &= \frac{\frac{F-F_0}{k}}{\frac{F-F_0}{k} + l_0} \times 100 \\ &= \frac{F-F_0}{F-F_0 + kl_0} \times 100 \end{aligned} \quad (6)$$

と表され、(6)式中のばね係数 k にケニス (株) の公表する定数を用いて公称値から算出した伸長割合を算出することも可能である。

表3に示す結果を(5)式に代入することにより求められた伸長割合をマーカーで、(6)式を用いて公称値から算出した伸長割合を黒の破線でそれぞれ図9に示す。S500全体並びにS150, S200, S300の0.2N未滿において差が観測されるもののおおむね良い一致が示された。

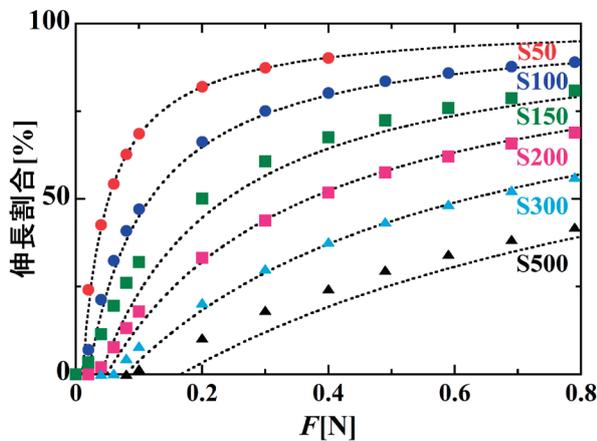


図9. 各実験用ばねの伸長割合

図9が示す結果から、本研究を遂行するための条件を満たす、伸長割合が比較的高い3種類のばね (S50, S100, S150) を教材に用いるばねとして採用することとした。なお、これらのばねにおいても、伸長割合が小さい範囲では伸長 l を $l \cong F/k$ として示される比例式として視覚的に理解することが難しいため注意が必要である。また、この3種のばね S50, S100, S150 は初張力が小さく、後述する測定シートの張力範囲では伸長に与える影響は小さいことから初張力を以後、無視する。

4. 開発した教材の概要

本教材は、3力の合成・分解を理解することを主と考え、図2の様に繋げたばねとデジタルニュートンメーターを金属リングに3つ組み合わせた形を新たな基本形として関係を考える (図10、表4)。なお、測定用シートは目盛りの長さを力の単位 [N] で表しているため、デジタルニュートンメーターなどの張力の測定機器がなくとも目盛りから直接力の大きさを読み取ることが可能 (黒板に張り付けての活用等も可能) である。

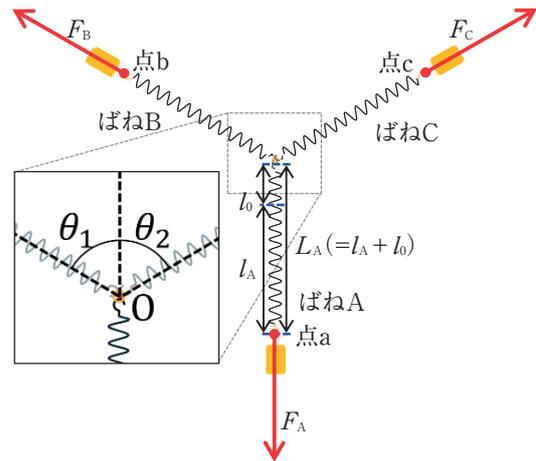


図10. ばね・デジタルニュートンメーターを金属リングに組み合わせた模式図

表4. 本教材開発に用いた材料

表中のラミネートフィルム及びメンディングテープは分割印刷された測定用シートを組み立てるために用いた。

材料	購入先	規格等
実験用ばね	ケニス(株)	S50, S100, S150
金属リング	KUKU工房	外径4 mm 内径3mm(半径1.5mm)
デジタルニュートンメーター	(株)ナリカ	A05-4064
測定用シート	(印刷物)	S50, S100, S150
ラミネートフィルム	アスクル(株)	A3+ 100ミクロン
メンディングテープ	3M Scotch	幅15mm 長さ9m

金属リングの中心点 O を基準にばね A, B, C にはそれぞれ F_A, F_B, F_C の力が与えられ、A, B, C に共通の自然長 l に対して伸長 l_A, l_B, l_C の伸びが発生している (ばね A, B, C がデジタルニュートンメーターに接する点を点 a, b, c とし、張力 F_A, F_B, F_C は点 a, b, c を作用点とする)。また、それぞれのばねの全長は $L_A (= l_A + l_0), L_B (= l_B + l_0), L_C (= l_C + l_0)$ と表される。ばね A, B, C をつないでいる金属リングの半径 (1.5 mm) は全長 L_A, L_B, L_C と比較して十分に小さいことから無視することとする。また、図10挿入図に示すように、直線 Oa の鉛直上方への延長線と直線 Ob, Oc それぞれとのなす角を θ_1, θ_2 とする。

これらの力の関係を考えるにあたり、基本となる1つの力を固定すると議論を行いやすいことから、ばね A に掛かる力 F_A を原点から鉛直下方に固定し、この力に釣り合う力の分解・合成を視覚的に考えるために図11に示す測定用シートを新たに本教材のパーツとして提案する。なお、本教材は y 軸を基準とした極座標を採用し、 y 軸から反時計回りの方向でなす角の大きさを負 ($\theta < 0^\circ$)、 y 軸から時計回りの方向でなす角の大きさを正 ($\theta > 0^\circ$) とした。つまり θ_1, θ_2 の大きさはそれぞれ $\theta_1 < 0^\circ, \theta_2 > 0^\circ$ の値をとる。

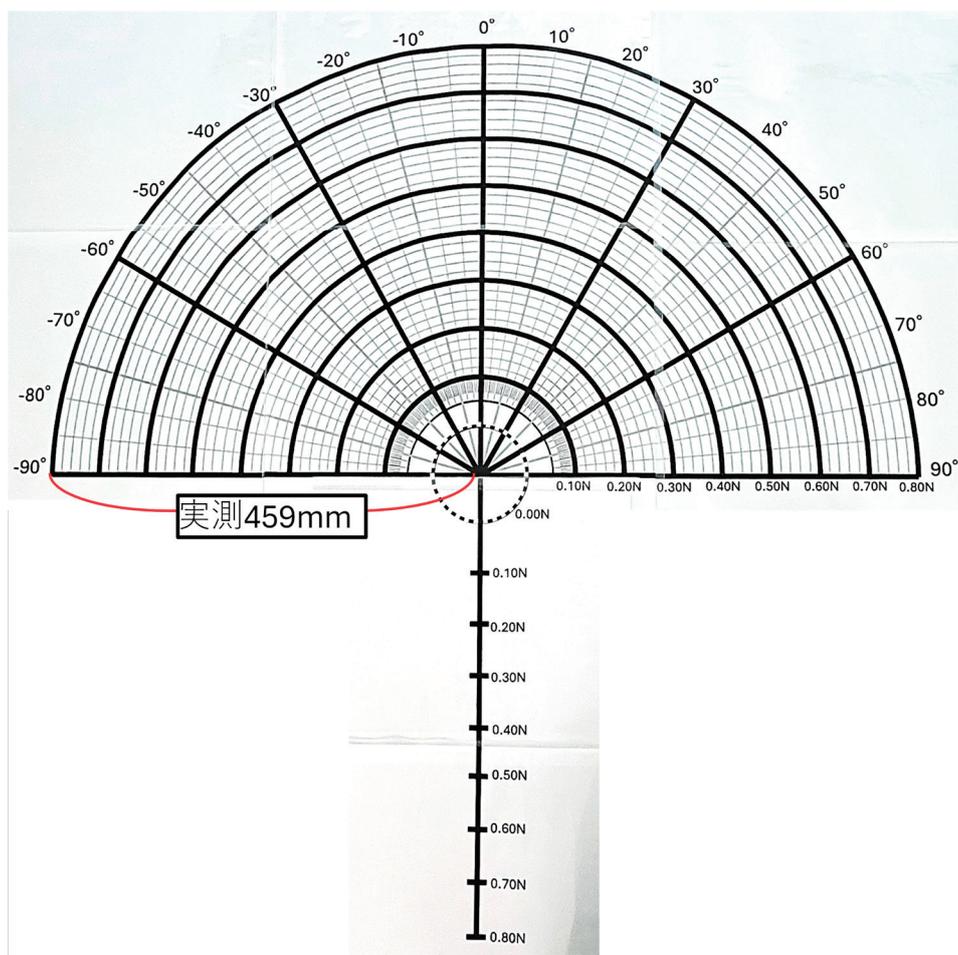


図11. 測定用シートの一例 (S100ばね専用)

本教材は力 F_A の向きを y 軸下方に固定することにより、これに釣り合う2力 F_B, F_C の合成・分解を上部の半円部内で構成することが可能となっている。原点部の破線で描かれた小円は自由長 l_0 を考慮した張力0.00Nでのばねの長さを示し、そこからの張力の変化を極座標の一軸とした。測定用シートは目盛りの長さを力の単位[N]で表しているため、デジタルニュートンメーターなどの張力の測定機器がなくとも目盛りから直接力の大きさを読み取ることが可能(黒板に張り付けての活用等も可能)である。

開発教材は、図10に示す組み合わせたばね及びデジタルニュートンメーターを、図11に示す測定用シート上で動かすことで活用する(図12)。

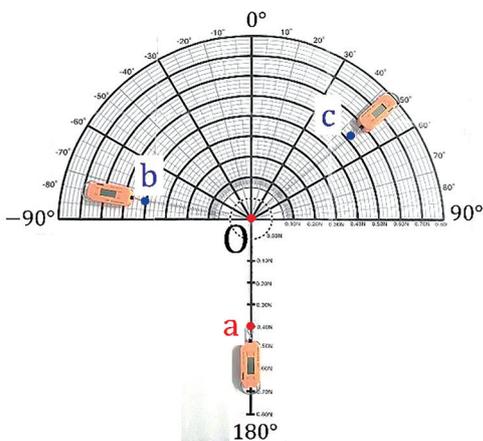


図12. 開発教材の使用例

中心点 O が測定用シート原点と重なる際の3点 a, b, c の位置から、釣り合う3力 F_A, F_B, F_C の大きさと向きを読み取る事ができる。

図12は開発教材の使用例であり、力が中心点 O で釣り合った状態にある他端 a, b, c の位置はそれぞれ、測定用シートの数値から極座標(働く力と角度)を用いて $a(0.400N, 180^\circ)$, $b(0.400N, -80^\circ)$, $c(0.521N, 50^\circ)$ と求められた。つまり、3力 $F_A(0.400N, 180^\circ)$, $F_B(0.400N, -80^\circ)$, $F_C(0.521N, 50^\circ)$ が釣り合っていることが本シートを用いて定量的に算出されたことを意味する。ちなみに、後述する(7)式を用いて算出した F_C の計算値(F_A, F_B を固定)は約0.514Nとなり、本教材から得られた結果0.521Nと非常に良い一致を示した(誤差約1.4%)。

なお、単体のばね及び測定用シートを用いた教材の特長として以下の3点が挙げられる。

1. 描いてある半円・直線から、力の大きさ・向きを視覚を用いて容易に理解することができる。
2. 測定シートの目盛りから張力[N]を直接読み取ることができることから、張力測定機器(ニュートンメーター等)を必ずしも利用する必要が無い(本論

文中ではデータ精度の確認のため、さらに測定用シートとの併用の例としてニュートンメーターも用いた図や写真を採用しているが、実施はニュートンメーターは不要で、単体のばねと測定用シートのみで実験は可能である。さらに、黒板に張り付けて演示実験を行う等の活用が可能である。

3. 伸びの大きいばねを用いているため、力の変化を直感的に理解することが容易である。

これら特徴を持った開発教材を使用する際の手順を以下の手順①～⑤に示す、さらに手順①～④に対応した模式図を図13に、実際の様子を図14にそれぞれ示す。

- 手順① 金属リングにばね A, B, C とデジタルニュートンメーターをつなげ、測定用シート上に置く。このとき中心点 O は測定用シートの原点に、点 a, b, c は破線で描かれた小円上に位置する。
- 手順② 始めに、ばね A を引き、y 軸下方の任意の位置で点 a を固定する。
- 手順③ 続いて、ばね B を引き、 $\theta_1 < 0^\circ$ の範囲で点 b を任意の位置で固定する。
- 手順④ さらに、ばね C を引き、中心点 O が測定用シートの原点で釣り合うよう点 c の位置を変化させる。なお、このように中心点 O が原点と重なり、3力 F_A, F_B, F_C が釣合った状態を「均衡状態」と定義する。
- 手順⑤ 最後に、均衡状態での点 a, b, c の位置から、基本となる1力 F_A に釣り合う2力 F_B, F_C の大きさと向きを読み取る。

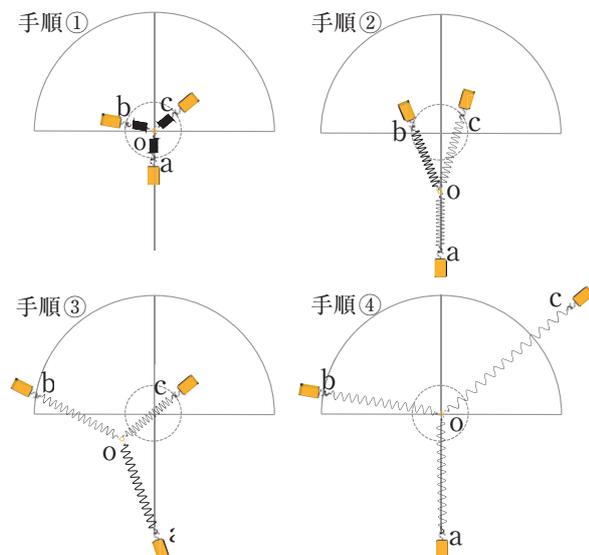


図13. 開発教材を使用する際の手順①～④
測定用シートは簡略化して描いている



図14. 開発教材を活用した実験の様子

本教材は原点から点 a, b, c までの距離は自由に設定できるが、実際に教育現場においてはグループ間の比較や評価を効率よく行うために、例えば原点からの点 a または点 b までの距離が同じ条件 ($F_A = F_B$ の場合) を付加して扱うと生徒は理解し易いと考えられる。ちなみに、この条件を課した場合は θ_1, θ_2 の大小関係により、全長 L_A, L_B, L_C 、伸長 l_A, l_B, l_C 、張力 F_A, F_B, F_C の関係性は図15並びに表5に示す3つのケースに分けられる。つまり、 $|\theta_1| = |\theta_2| = 60^\circ$ を境に、最後に導く張力 F_C の大きさが、2つの張力 $F_A, F_B (= F_A)$ より大きくまたは小さくなることがわかる。なお、測定用シートはばねごとに作製されており、それぞれの模式図を参考資料として「付録」に示す。

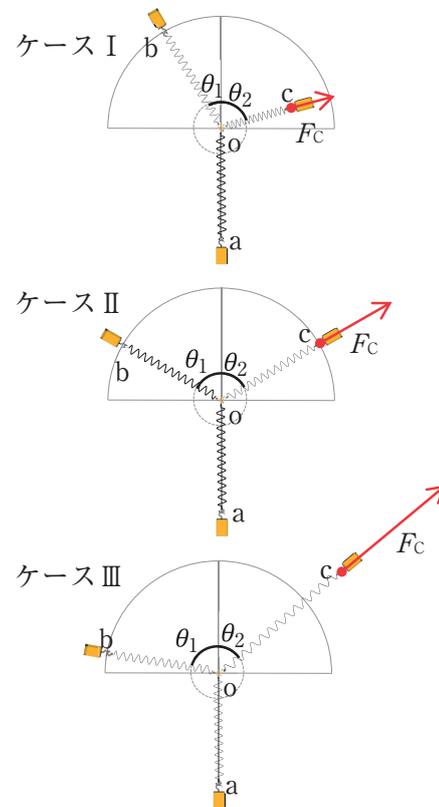


図15. ケース I, II, III におけるばねの位置関係
ケース I : $F_A = F_B > F_C$ 、ケース II : $F_A = F_B = F_C$ 、
ケース III : $F_A = F_B < F_C$

表5. なす角 θ 、全長 L ・伸長 l 、張力 F の大小関係

ケース	なす角 θ	全長 L ・伸長 l	張力 F
I	$ \theta_1 < 60^\circ < \theta_2 $	$L_A = L_B > L_C$ $l_A = l_B > l_C$	$F_A = F_B > F_C$
II	$ \theta_1 = \theta_2 = 60^\circ$	$L_A = L_B = L_C$ $l_A = l_B = l_C$	$F_A = F_B = F_C$
III	$ \theta_1 > 60^\circ > \theta_2 $	$L_A = L_B < L_C$ $l_A = l_B < l_C$	$F_A = F_B < F_C$

5. 開発教材の性能評価

本章では第4章の手順①～⑤に則った測定を行い、開発教材の性能評価の結果をまとめる。初めに教育現場での実践を想定し、測定条件の簡易化のため原点からの点 a 及び点 b までの距離が同じ条件 ($F_A = F_B$ の場合) を付加する。具体的には、この $F_A = F_B$ の条件下においてなす角 θ_1 ($< 0^\circ$) を変化させ、それぞれの均衡状態における3力 F_A, F_B, F_C の張力及び向きを測定することで、1力 F_A に釣り合う2力 F_B, F_C の合成が成立していることを確認、理解する。本実験の模式図 (図16) 及び、図16の3力 F_A, F_B, F_C を、中心点 O を基準として作図したものを図17に示す。

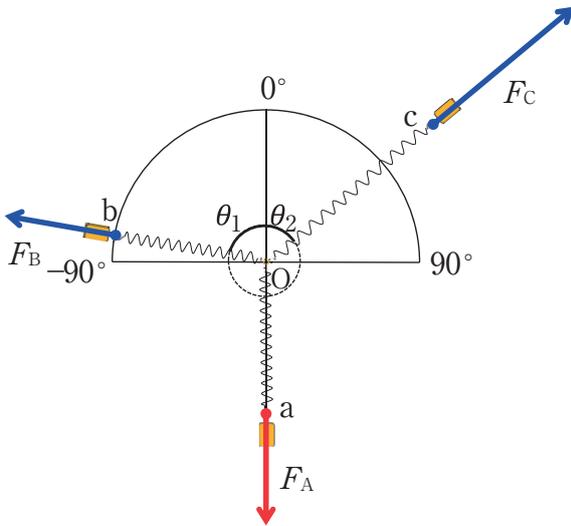


図16. 実験④の模式図

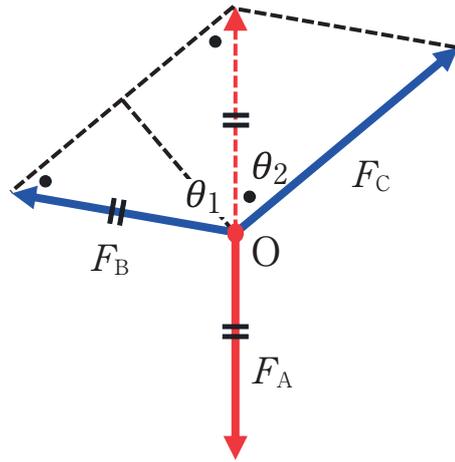


図17. 図16の3力 F_A, F_B, F_C を、中心点 O を基準に作図したもの

F_B, F_C をそれぞれ平行移動して作る平行四辺形の対角線は2力 F_B, F_C の合力を表し、その大きさは F_A である。

なす角 θ_1 を頂角とする三角形は斜辺の大きさが F_A 、底辺の大きさが F_C の二等辺三角形であるため、張力 F_C の大きさは、張力 F_A 、なす角 θ_1 を用いて(7)式で表される。

$$F_C = -2F_A \sin\left(\frac{1}{2}\theta_1\right) \tag{7}$$

また、なす角 θ_2 の大きさは、錯角より、なす角 θ_1 を頂角とする二等辺三角形の底角の大きさと等しいため

$$|\theta_2| = \frac{180^\circ - |\theta_1|}{2} \tag{8}$$

となり、 $\theta_1 < 0, \theta_2 > 0$ であることから

$$\theta_2 = \frac{180^\circ + \theta_1}{2} \tag{9}$$

とそれぞれ求められる。なお、張力 F_A, F_B はばねの耐荷張力 F_{MAX} を考慮し、S50, S100, S150でそれぞれ0.200N, 0.400N, 0.400N とした。

測定用シートから読み取った張力 F_C 、なす角 θ_2 の測定値をマーカーで、(7)式、(9)式で求められるそれぞれの理論値を黒の破線で図18に示す。これらは良い一致を示し、力 F_A に釣り合う2力 F_B, F_C の合成が正しく行われていることが確認された。

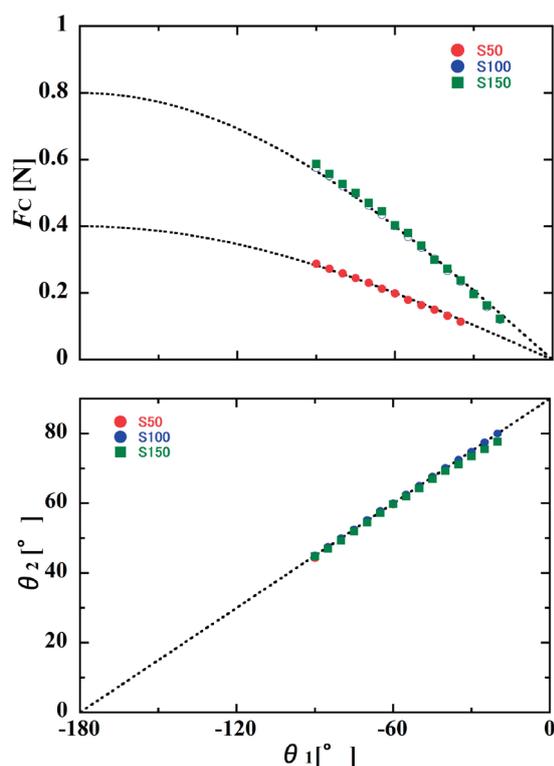


図18. なす角 θ_1 の変化に伴う張力 F_C 及び θ_2 の推移。

6. まとめ

本研究では「力」という抽象的な概念をばねの伸びと結びつけることによって、中学校第3学年理科で学習する「力の合成・分解」を視覚的・直感的に理解できる教材の提案を行った。示した開発教材は、測定用シートから3点 a, b, c の位置を読み取る事で釣り合う3力 F_A , F_B , F_C の向きと大きさも同時に読み取る事が可能な構成となっている。さらに、読み取った2力 F_B , F_C を基に、図17に示すように平行四辺形を描くことでその対角線から2力の合力を読み取る事ができる。しかし、2力 F_B , F_C が小さい場合はばねの自由長 l_0 の影響を受けることから2力の合力を読み取る事が難しい場合があることを注意しなくてはならない。そのため、教材の外観からも力の合成を理解できるようにするためには、伸長割合の大きな条件下で教材を活用し、自由長 l_0 の影響を小さくする必要がある。このように課題はあるものの、以下に示す特徴を持ち、実際の教育現場での活用を視野に入れた扱いやすさも備えており、十分に実用的なものであると考える。

- ① 測定用シートから、力の大きさ及び向きを視覚的に理解することが容易である。
- ② 伸びの大きい単体のばねを用いることから、力の変化を視覚的に理解することが容易である。
- ③ 測定用シートの目盛りから張力を読み取る事も可能であるため、黒板に張り付けた状態で演示実験を行うことができる。つまり、張力測定機器（ニュート

ンメーター等）を必ずしも利用する必要が無い。

- ④ 安価で作製することができるため、生徒が各自で実験を行うことも可能である。

なお、第5章においては、教育現場での使用を想定し、比較条件を簡素化するために $F_A = F_B$ という条件を課した場合のみの解説を行ったが、3力 F_A , F_B , F_C をそれぞれ異なる張力を設定することでより複雑な「力の分解・合成」の組み合わせを学習することが可能である。このように多様な活用ができる本教材を用いることにより、力の概念や、そのつり合いに対する生徒の理解度向上の一助になることを切に願います。

備考

*1 山口市の重力加速度 $g = 9.79659 \text{ N/m}^2$

参考文献

- 有馬朗人 他 文部科学省検定済教科書 中学校理科用 (2020年検定)『理科の世界 3年』大日本図書株式会社。
- 蛭名正司・小野耕一・宮田佳緒里 (2020)「中学校理科における力の合成・分解ルールの適用を促す教授法の検討」教授学習心理学研究 16, 1-14.
- 梶田隆章 他 文部科学省検定済教科書 中学校理科用 (2020年検定)『新しい科学 3年』東京書籍株式会社。
- 金兎正史 (2014)「数学と理科を総合した授業の実際と授業分析」日本科学教育学会年会論文集 38, 381-382.
- 鎌田正裕 他 文部科学省検定済教科書 中学校理科用 (2020年検定)『未来へ広がるサイエンス』株式会社新興出版社啓林館。
- 杉森遥介・川村康文 (2013)「実験を通して学ぶ理科大好き実験教室の実践－その1『力、力の合成・分解』」日本科学教育学会論文集 37, 480-481.
- 北村太一郎 (1981)「中学生の力の概念の理解に関する調査」日本理科教育学会研究紀要 22(1), 59-66.
- 霜田光一 他 文部科学省検定済教科書 中学校理科用 (2020年検定)『中学校 科学3』学校図書株式会社。
- 谷崎瑞穂・田中佐代子 (2023)「中学校理科教科書物理分野における視覚表現の現状」日本科学教育学会論文集 47, 407-410.
- 長谷川智子 (2018)「岩波映画〈力のたし算〉と“力の平行四辺形が見えるばね”による合力の学習効果」日本科学教育学会論文集 42, 381-382.
- ばね技術研究会 編 (1978)『第2版 ばねの設計』株式会社丸善。
- 室伏きみ子 他 文部科学省検定済教科書 中学校理科用 (2020年検定)『自然の探求 中学校理科3』教育出版株式会社。

付録

第5章での開発教材を用いた測定において、なす角 θ_1 を変化させて測定を行った際の図を以下に掲載する。

