

光てこを活用した建築分野の工学的探究

—課題研究における生徒の葛藤を生かした教材開発—

藤野 智美

1. 研究開発の動機

高校生の進路選択において、建築分野への進学は人気が高く、本校においても毎年一定数の生徒が同分野への進学を果たす。この分野の特徴として、工学部の中でも特に女子生徒の進学者が多いことがあげられる。筆者が2016年度に奈良女子大学教授（現 奈良市立一条高等学校校長）の吉田信也と共に、「学んでみたい物理のテーマ」について奈良県内の男女計1133名の高校生を対象にアンケート調査を行った結果、男女共に上位に挙げた分野が「住居に関するテーマ」であった。このような背景から、課題研究等においても構造物の強度を調査する等、建築に関連するテーマを選択する生徒も多い。

一方、テーマ設定の多くは、トラス構造で組んだ橋の上に荷重をのせて、「何個まで耐えられるか」など、定性的な測定に帰着しやすく、構造の強さを評価する手法として生徒自身にも疑問が残りやすい。平成30年度に筆者が指導を担当した学生2名（高校3年生）も同様の状況に陥り、生徒自身から「部材の強度をより定量的に測定したい」という要望が挙げられた。このような声をきっかけとして生まれたのが今回の教材である。本研究では、「光てこの原理」を活用し、目視ではわからない部材のたわみ率を定量的に測定するための「ユーイングの装置」の製作と実験への活用に取り組み、教材の有用性を模索した。

2. 本校の探究活動

本校は平成17年度より文部科学省が推進するスーパーサイエンスハイスクール（SSH）事業に採択されている。特色あるSSH事業の1つとして、平成27年度からのSSH事業において探究活動の一部を課題研究として位置づけ、自然科学領域においては4年「課題研究 世界Ⅱ」、6年「SS課題研究」を平成28年度より順次開講した。

【本校の探究活動のカリキュラム（2018年度実施）】

学年	領域	名称	特徴	担当者
1年	世界遺産	奈良Ⅰ	短期集中	クラス担任中心(+社会科1)
2年	古都奈良の文化財	奈良Ⅱ	短期集中	クラス担任中心(+社会科1)
3年	ESD(持続可能な開発のための教育)	世界Ⅰ	統合型(65分×週1回)	社会科・創作科・保健体育科・国語
4年		世界Ⅱ	統合型(65分×週1回)	社会科・国語科・理科1・数学科1
5年	リベラルアーツ	コロキウム	統合型(65分×週1回)	全教科(希望教員)
6年	自然科学と実社会	SS課題研究	統合型(65分×週1回)	理科1・数学科1

今回指導を担当した課題研究のチーム（高校3年生、生徒2名）は、6年理系選択者全員を対象とした「SS課題研究」を受講している生徒である。

SS課題研究では、ベーシック講座（講義とグループでの課題研究を合わせた講座）とアドバンス講座（個人またはグループで設定した課題研究を行う講座）を用意し、生徒の活動スタイルに合った

講座を選択できるように工夫している。アドバンス講座は、科学クラブ「サイエンス研究会」に所属して研究に励んできた生徒に加え、発展的な課題設定に高い興味を示す生徒が選択している。本講座では、本校が独自に作成した「課題研究ロードマップ」の Stage3「高校の学習範囲に捉われない高度な探究活動を行う」ことを目標とした発展的な課題に取り組んでいる。サイエンス研究会に所属する生徒については、Expert「自らの学問的背景に基づいた独創的で発展的な研究活動を行う」ことを目標に、独創的な研究活動に粘り強く取り組んでいる。課題研究ロードマップの詳細については本校ホームページを参照されたい。

<サイエンス研究会に求める資質・能力の例（課題研究ロードマップより一部抜粋）>

NWUSS		Stage1	Stage2	Stage3	Expert
探究活動のアプローチ		探究活動の手法を学ぶ	数理的解釈を重視した探究活動を行う	高校の学習範囲に捉われない高度な探究活動を行う	自らの学問的背景に基づいた独創的で発展的な研究活動を行う
①課題の設定	課題の発見	・興味ある事柄の中から探究活動の対象につながる課題を見出すことができる			・社会的意義や学問的意義の高い課題設定を行うことができる
	課題の吟味	・課題設定において、検証可能な課題を選ぶことができる	・課題設定において、数理的解釈を深めることができる課題を選ぶことができる	・課題設定において、高校の学習範囲に捉われない発展的な課題に挑戦できる	・課題設定において、学ぶべき知識や領域を制限せず、自らの設定した課題に挑戦できる
	先行研究の調査	・先行研究を調査し、探究活動に必要な情報を見出すことができる	・先行研究を調査し、課題に対する分析方法を見出すことができる	・先行研究を調査し、課題に対する分析方法を見いだしたり、自身のアイデアとの整合性について検証できる	・先行研究を調査し、未解決になっている課題を見いだしたり、独創的な視点から新たな課題を設定できる
	課題の設定	・課題の難易度が高い場合、自身の探究スキルに合わせて、適切なレベルの課題を再設定できる	・課題の難易度が高い場合、必要な知識を学習しながら適切なレベルの課題を再設定できる	・課題の難易度が高い場合、必要な知識を学習しながら設定した課題に挑戦できる	・課題の難易度が高い場合、より高度な知識や技術の習得につとめ、当初設定した課題の達成を目指すことができる
②研究活動	手法の構築	・課題の解決に適した調査方法を見出すことができる	・数学や理科の知識を用いて、分析的な調査方法を見出すことができる	・必要な知識や先行研究を学びながら、課題の解決に必要な調査方法を構築できる	・課題の解決に向け、既存の方法に独自の視点を加えた調査方法や、新たな調査方法を構築できる
		・初めて使う実験器具や理論への理解を深めることができる	・適切な実験器具を選んだり、論理的解釈を行うことができる	・必要に応じて新たな実験器具や論理の構築に挑戦できる	・研究活動に適した実験器具を自作したり、検証に必要な論理を独自に構築できる

3. テーマ設定における生徒の葛藤と方針決定の過程

今回指導を担当した課題研究のチーム（高校3年生、生徒2名）は、共に建築分野への進学を希望する生徒であった。彼らは高校2年時にサイエンス研究会に入部し、トラス構造等の強度について研究を行っていた。しかし、前述したように、耐えられる荷重の個数を調べるなど、思うように研究が発展していない現状があった。6年の課題研究開始時、該当生徒と研究方針について面談した際、「もっと定量的に、分析的に強度を数値化する研究を行いたい」という要望が挙げられ、本研究のテーマ決定に至った。

【6年「SS 課題研究」全11コマ（1コマ65分）の内訳】

①テーマに関する先行研究の調査と予備実験（4コマ）

生徒自身が探究したい課題について、目的に合致しているか、実験可能な内容であるかの検証や、取得したデータから目指す分析結果が得られるかなどを実験しながら検討する。

②テーマの再考（2コマ）

①の課題点を整理し、目標とする分析に必要な活動を再考する。教員と生徒のアイデアの共有（面談）が主な活動となる。

③テーマの再設定と実験（4コマ）

②の議論をふまえてテーマを再設定する。再設定したテーマについて実験と分析を行う。

④ポスター作成（1コマ + 放課後）

ポスター発表の準備を行う。

今回の指導では、①の実験方法の課題点の明確化と、②の方針転換時の話し合いに時間を要した。

4. 開発した実験装置

(1) 市販の「ユーイングの装置」の仕組み

ユーイングの装置とは、図1に示すような機構を持つ市販の実験装置（約10万円）で、以下の光学的機構を持つ。

・ オプティカルレバー（光てこ）

オプティカルレバーとは、3つの脚をもつ小さな台に鏡を取り付けたものである。3つの脚のうちの2つを補助棒に、1つを試験棒にのせて使用する。オプティカルレバーをのせたまま試験棒におもりを吊ると、試験棒のたわみに応じて鏡面が傾く。この現象を利用して、たわみに応じて脚Cが下降した距離を測定することが目的である。

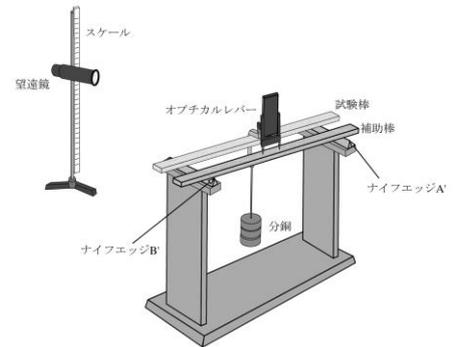


図1 ユーイングの装置

(慶応義塾大学 日吉物理教室より抜粋)

・ スケール付望遠鏡

市販のユーイングの装置では、オプティカルレバーの鏡の下降量の測定として、スケール付望遠鏡が用いられている。この望遠鏡は、スタンドに望遠鏡を水平に、スケールを鉛直に取り付けた仕組みを持つ。望遠鏡の中に目印となるマークが貼られており、鏡からの反射光による像を観測する。試験棒のたわみに応じて目印が下降すると、像の見える位置が変化し、変位の測定結果を利用して試験棒の下降量を算出する仕組みである。

(2) 「ユーイングの装置」を用いた固体の弾性の測定原理

固体に力を加えて変形させると、変形が小さいときには力の大きさと変形の大きさは比例する（フックの法則）。ここで、例として金属棒のようなやや固い素材の変形について考える。金属棒の両端に力を加えて引っ張ったり、押したりすると、長さが変わる。力がそれほど大きくない間は、加えた力の大きさと伸び（または縮み）は比例する。しかし、この比例定数は棒の太さや長さの要因でも変化するため、以下のヤング率が一般的に利用される。

【ヤング率（伸びの弾性率）】

太さが一様の棒状の物体において、長さを L 、伸びを ΔL 、断面積を S 、加える力を F としたとき、フックの法則は以下のように示される。

$$\frac{F}{S} = E \times \frac{\Delta L}{L}$$

比例定数 E は物質の種類だけに依存し、ヤング率（伸びの弾性率）とよばれ、その物質がどのくらい強いものかを図る尺度として考えることができる。金属棒などの固い物質の場合、部材の伸びはわずかな量であり、その変化量を測定することは難しい。そこで、図2に示したような、おもりに応じて物質がたわむ現象を利用し、そのたわみ率を測定することで、次ページのようにヤング率 E を算出することができる。

$$E = \frac{\ell^3}{4bd^3} \cdot \frac{mg}{e}$$

ℓ [m] : 2つの支点間の距離

m [kg] : 質量

g [m/s²] : 重力加速度

d [m] : 棒の厚さ b [m] : 棒の幅

e [m] : 中点の降下量

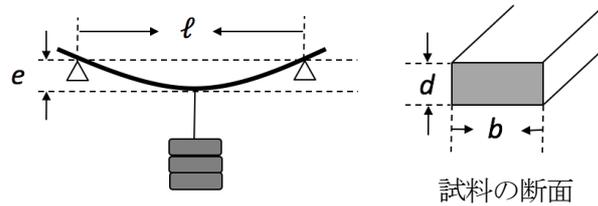


図2 ヤング率に関わる要素

(3) オリジナルの「ユーイングの装置」の製作

本校はユーイングの装置を所持していなかったため、その仕組みを模して、ユーイングの装置を自作することにした。自作品においては、市販品の持つ光学的機構を以下のように代用した。図3に自作したユーイングの装置を掲載する。

- ① オプティカルレバー：木枠内に手鏡をはめ込み、脚部分にはビスを用いた。
- ② スケール付き望遠鏡：レーザーポインターを鏡に照射し、その反射光の変位から部材の降下量を測定した。

今回の実験では、入手のしやすさから、実験台以外の材料は百円均一ショップで購入した木製ものを中心に利用した。補助棒・試験棒についても、加工のしやすさから木材を用いた。土台部分は古い実験装置を加工して代用した。

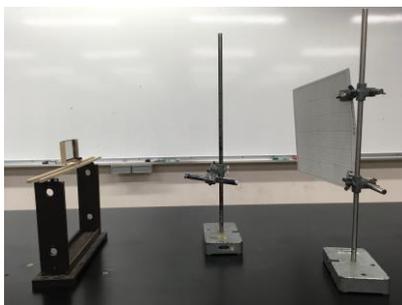
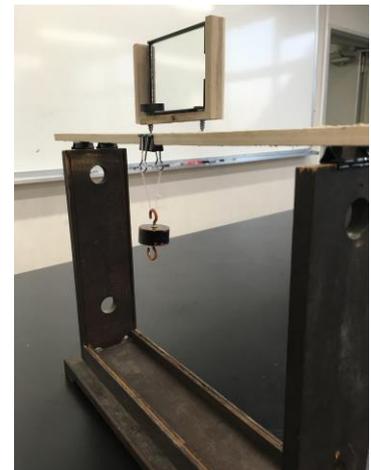
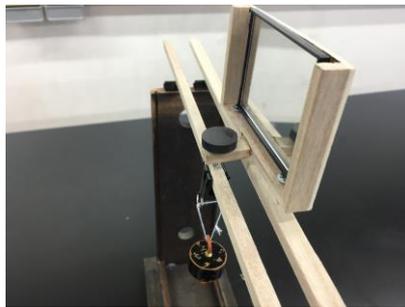
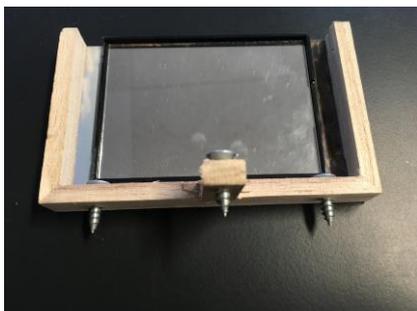


図3 自作した「ユーイングの装置」と実験の様子

左上：オプティカルレバー

中央，右上：おもりをつるした様子

左下：実験の全体の様子

5. 固体の弾性の測定実験と結果の分析

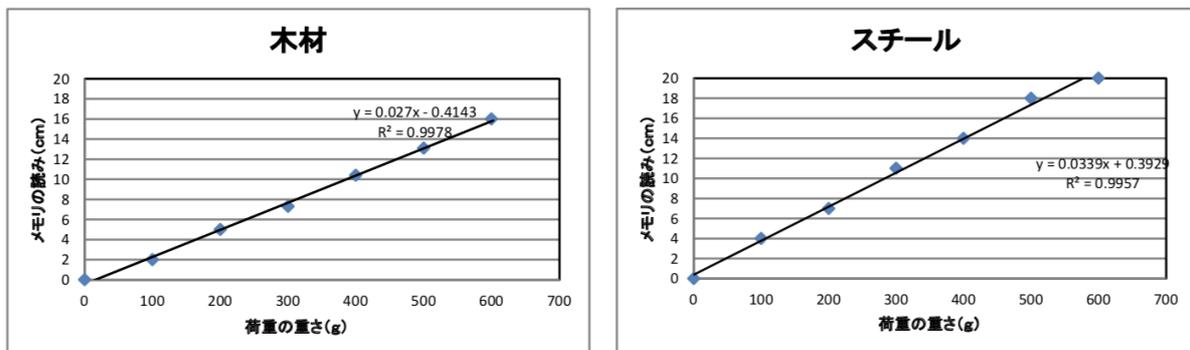
測定方法を以下に示す。なお、この測定方法は参考文献として記している「慶応義塾大学 日吉物理教室」の方法を参考とした。

【測定方法】

- ①おもりを吊るさない状態（荷重 0g）から測定を開始し、100g のおもりを 1 個ずつ増やしていったときのレーザーの反射光の位置を記録用紙に記録する（反射光の中心部分を記録用紙上にプロットする）。
- ②おもりを 1 個ずつ減らして、おもりを吊るさない状態まで測定し、同じ荷重に対する目盛りの読みに大きな差がある場合には、測定をやりなおす。
- ③①の記録結果から各荷重に対する反射光の変位を読み取り、同じ荷重に対する目盛の平均値を求める。
- ④荷重に対する目盛の読み（平均値）をエクセルでグラフ化し、ほぼ直線となることを確認する。直線から著しく外れている場合は、測定をやり直す。
- ⑤反射光の記録用紙と鏡の距離、試験棒支点間の距離を測定する。
- ⑥オプティカルレバーを軽く紙面に押しつけ、その跡を利用して前後の脚の間の距離を測定する。
- ⑦試験棒の幅と厚さをマイクロメーターで測定する。
- ⑧得られたデータからヤング率を算出する。

今回の実験では、試験棒として利用しやすい柱状の棒を入手することが難しかった。そこで、100円均一ショップで販売されている木材をカットしたものと、スチール製の物差し（1m）を試験棒として利用した。以下に【測定方法】④の結果をグラフ化したものを示す。

【荷重を変化させた際の反射光の変位】



実験結果から、木材およびスチールともに、反射光の変位は概ねフックの法則に従う直線になっていることがわかる。荷重が少ないときは、目視による部材のたわみ量の確認は難しかったが、自作した装置を用いることで、たわみ量を拡大して観測でき、フックの法則に従う変化量を観測可能であることがわかった。

次に、得られた直線データから荷重 600g に対する目盛りの変化量を算出し、その値を実際の降下量に換算した。この値と【測定方法】⑤～⑦の測定結果を活用して、ヤング率を算出したところ、以下のような結果が得られた。

使用した木材のヤング率 : $0.030 \times 10^{10} \text{ [N/m}^2\text{]}$

使用したスチールのヤング率 : $1.1 \times 10^{10} \text{ [N/m}^2\text{]}$

得られたヤング率は、既に測定されている一般的な値よりも小さかった。誤差の要因として、以下が考えられる。

【誤差の要因】

- ・使用した木材が MDF 材（中密度繊維板）であることがわかり、純粋な成分のみで構成される木材よりもヤング率が小さくなると予想される。
- ・使用したスチールの試験棒が装置に対して長すぎた。よって、たわみを正しく測定できない可能性が高い。
- ・レーザーの反射光には広がりがあり、中心位置を記録する際に誤差が生じやすい。

6. 教材としての有用性

実験結果より、自作したユースイングの装置によってわずかな部材のたわみ量を定量的に測定することができた。また、実験装置を自作する過程を通して、微小変化を可視化する手法を深く考察できると考える。生徒の振り返りレポートには、「建築をする上で構造を考えるだけでなく、素材に注目するという新たな視点を得た。」「定量的に素材の強度を分析する仕組みを探究することができた。」という記述があり、教材としての有用性は高いと考える。

一方で、レーザー光を用いた測定の場合、学校が所有している機材を用いることで実験装置を自作しやすいが、反射光の読み取りには課題も生じた。測定する部材の選び方等も含め、今後の課題として検討したい。

7. 参考文献

- ・慶應義塾大学 日吉物理教室「固体の弾性」(2008年9月1日分)
<http://www.sci.keio.ac.jp/gp/87B7D75A/4043CFE5/59145F87.pdf>