

電柱地中化政策を題材とした 理科「探究活動」導入教材の開発と実践

Development and Practice of Introductory Teaching Materials for Science "Problem- Based Learning"
on the Theme of "Removal of Roadside Utility Poles"

川口万太郎* 蓮見眞由香* 服部竜大* 浜瀬理紗子* 山川萌恵* 油布稜平* 近藤千香**

Mantaro Kawaguchi* Mayuka Hasumi* Tatsuhiro Hattori* Risako Hamase* Moe Yamakawa*

Ryohei Yufu* Chika Kondo**

* 東京工業大学

** 東京工業大学附属科学技術高等学校

*Tokyo Institute of Technology

**Tokyo Tech High School of Science and Tech

平成29年～30年に改訂された学習指導要領においては、持続可能な開発のための教育(ESD)や主権者教育などが取り上げられている。本稿では、新・逆向き設計に基づき、SDGsに関連した政策の評価を「総合的な学習の時間」で生徒が取り組めるようにするため、各教科で行う探究活動の準備段階で用いるゲーミング教材について、特に理科の物理と生物の知識を活用する教材を開発した。教材は無電柱化の政策に関する評価を題材とし、学習した知識と関連付ける形で優先的に無電柱化に取り組む地域の優先度を検証する活動を通じて、探究活動の流れと探究における知識活用の方法論を学び今後取り組む探究活動や市民生活における理科の知識の活用の見通しを得ることを教材の目標とした。実践の結果、生徒は理科の知識の重要性を認識した一方、教材に関しては化学の知識活用の追加、時間配分の改善、定量的評価を用いた探究の導入の3点の改善点があった。

キーワード：理科教育、探究活動、ゲーミング教材、総合的な探究の時間、新・逆向き設計

1. はじめに

2018年の高等学校学習指導要領においては、「総合的な学習の時間」の問題点として中央教育審議会(2016)答申が指摘した「総合的な探究活動の内容と科目との関連の不明瞭さ」が改善されているとは言えない。これに加えて、生徒たちが教科での学びが今後の人生において役立つと感じられる探究活動となっているものも少ない。

これに関して、松田(2020)は、まず、総合的な学習の時間にSDGsの問題解決を行う学習活動を設計して、そのサブ課題として各教科の探究活動を設計し、それに必要な教科の通常授業を設計するという『(新)逆向き設計』の発想が必要であると述べている。『(新)逆向き設計』は、多くの学校で行われているような、教科内容から探究活動を設計する方法ではない。市民として必要な問題解決能力を育成する課題をあらかじめ設定し、その解決に必要な教科の

見方・考え方や汎用的な知識を指導する方法である。この方法により、教科学習の必要性を感じられる探究活動を作ることができる。

教科や「総合的な学習の時間」の探究活動では、日常生活に適用できる汎用的な問題解決能力の育成が求められる。そのために、松田(2015)は縦糸・横糸モデルに基づいて授業を展開すべきだと述べている。従来の探究の過程は、「課題設定→情報収集→整理・分析→まとめ・表現」の4つの段階を繰り返すというものである。一方、縦糸・横糸モデルは、「目標設定過程→代替案発想過程→合理的判断過程→最適解導出過程→合意形成過程」という縦軸の各過程で、「情報収集→処理→まとめ」の横軸の手順を進める。従来の過程が調べ活動に終始したり、問題分析を繰り返しがちだったものを、縦糸によって明確に前に進めることを意識した授業展開としている。以上に基づいて理科の探究活動について考えると、その問題点として、学習内容の活用のみを考慮した専門性に偏った課題か、市民性を重視したために

理科の知識を必要としなくても解決できる課題のいずれかに二極化してしまう傾向が見られる。ここでは、生徒は理科の学習成果を活用する意義を見出すことが難しい。これを解決するために、「逆向き設計」の方法を適用し、理科の見方・考え方と教科の知識を用いて政策を批判的に検討させ、日常生活に必要な理科の学習成果の活用方法という観点からの問題解決方法の修得を図る必要がある。

2. 目的

本稿においては、縦糸・横糸モデルに基づいて、科学的な見方・考え方を活用させるゲーミング教材を考案する。さらに、当該教材を用いて東京工業大学附属科学技術高等学校の情報システム分野2年生を対象に実践して、学習後の生徒アンケートとゲーミング教材のログ解析より、教材の評価を行う。

3. 開発した教材

3.1 概要

本教材は、政策における主張の妥当性を科学的知見と関連付けて考察する活動を問題解決とみなし、松田（2017）の縦糸・横糸モデルに即した指導を行う。学習者は、政策に関する情報の収集を通して政策の良さの把握を行い、政策の主張における不十分な点や問題点を考察する。本教材では、特に通常の学習過程における知識を探究活動や政策評価において整理・活用することを中心に進める。

政策の具体例としては、島嶼部における無電柱化政策を取り上げ、防災・減災の観点から電柱の地下化を検討させる。実際の地下化政策は、優先順位を設けて長期計画で整備が進められるが、本教材では単純化のため、①住宅街、②強風地域、③発電所付近の3つの場所別に無電柱化する政策の良さを比較させる形式とした。

教材内の流れは、図1の通りである。

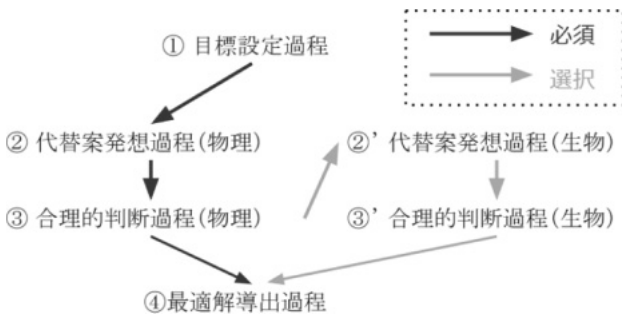


図1 教材全体の流れ

①目標設定過程ではストーリーの理解と各政策の主張の把握・整理を行う。②代替案発想過程では、物理基礎における回路の考え方を応用し、災害に対する強靱さの観点として、強風時の停電対策と火災防止への有効性を考察する。

③合理的判断過程では、強風以外の災害例として土砂災害を取り上げ、地域ごとの土砂災害の危険度から地下化が災害による被害の長期化につながらないかを検討する。

その後、学習時間の個人差への対応と学習成果の転移促進を考慮して、オプション課題として生物基礎における環境アセスメントの知識を活用させ、②'代替案発想過程、③'合理的判断過程で、地中化政策の優先度が高い地域について、環境アセスメントの観点から、政策の再評価を行う。本項目は、附属高校で生物の授業を必修としていないことを考慮して選択としたが、物理の観点から考えた無電柱化政策を生物の視点である環境アセスメントによって再考することは、多くの政策で実際に行われている上に、さまざまな仮説を立て、それを多面的に検証するという理科的な見方・考え方の育成の一助にもなる。

④最適解導出過程では、ここまでの検討を整理するとともに、未検討の観点がないかを検討し、優先すべき政策を決定する。

3.2 目標設定過程

まず、教材の題材となる架空の離島（東京都の島嶼部を想定）を舞台に、台風などの災害に強い島を目指して、無電柱化政策が検討されていることを説明し、優先的に整備すべき地域について、3つの案が出ていることを生徒に受容させる（図2）。その上で、それぞれの政策の目的と主張されている良さをまとめる（図3）。

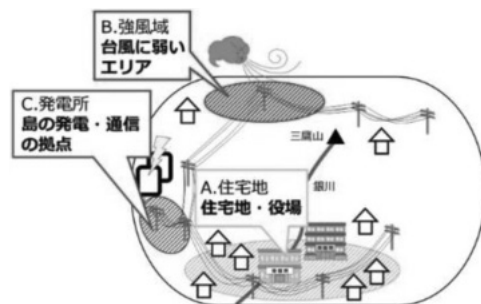


図2 目標設定過程における提案された各政策をまとめる様子

良さの観点	市街地の電線地下化	強風地域の電線地下化	発電所付近の電線地下化
建設費用	20億円	15億円	20億円
地下化の方法	道路の直下に移設	道路のわきの地下に移設	道路の直下に移設
2次災害の軽減	電柱転倒による道路封鎖	電柱転倒による道路封鎖	電柱転倒による道路封鎖 島内全域の停電の防止
景観の美化	良くなる	良くなる	

図3 3つの無電柱化政策(場所)の整理(表のみ拡大)

3.3 代替案発想過程(物理)

ここでは、各政策が主張する良さ以外の良さや、検討すべきリスクの検証を行う。政策を評価するにあたり、既習知識として物理基礎で学習した回路の性質とジュールの法則を用い、各地域の地下化による停電リスクの軽減や、電

柱倒壊による火災発生とそれによる人的被害のリスク軽減について定性的に評価する。

回路との関係では、強風等による電線倒壊や断線が停電を引き起こすことを確認し、電力網を既知の回路図にモデル化し(図4)、強風等による停電の影響を少なくするためにはどの地域の無電柱化を行うべきかを検討する(図5)。

ジュール熱との関係では、断線によるショートや漏電が火災の原因となることを確認し(図6)、ジュール熱が電圧に比例するため、高電圧地域での漏電は火災が発生しやすいことを確認する。一方で、火災による人的被害のリスクも想定し、居住地域における地下化の必要性も検討する。

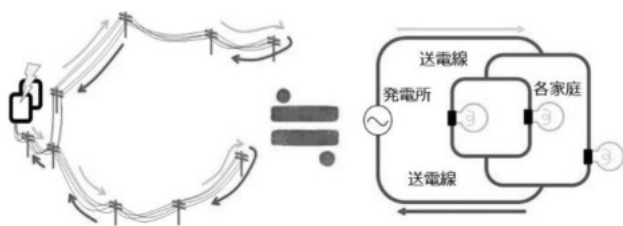


図4 電線網を既知の回路図にモデル化

停電に強い島にするために、優先すべきところは？断線すると停電の被害が大きくなる場所を考えましょう。3つの意見を反映した回路図は、このようになります。

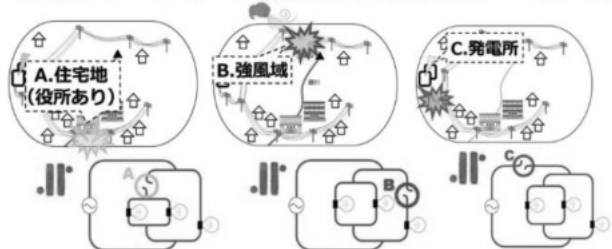


図5 回路図にモデル化し断線した場合の影響を考察

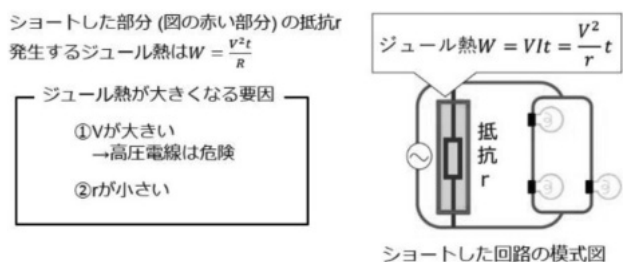


図6 回路図にモデル化し電線の発火リスクを考察

3.4 合理的判断過程(物理)

代替案発想過程で各政策の良さを再評価したが、ここでは良さだけでなく、電線地下化による問題点が無いかを議論する。まず、そもそも電柱を地下化する意味があるのか、電柱が折れる原因(図7)とその頻度(図8)について、原理を図示するとともに、法定上の耐風性能から評価する。次に、想定される直接的被害として台風時の強風や地震による電柱倒壊のほか、大雨や地震による土砂災害を挙げ、ハザードマップを用いて災害の予測と地下化の是非を検討する。

電柱を地下化した場合、地上にある状態よりも災害時における復旧作業に時間がかかるため、土砂災害等により電線が破断した場合は、復旧も長期化する恐れがある。こうした地下化に伴うリスクについて合理的判断過程の中で検討する(図9)。

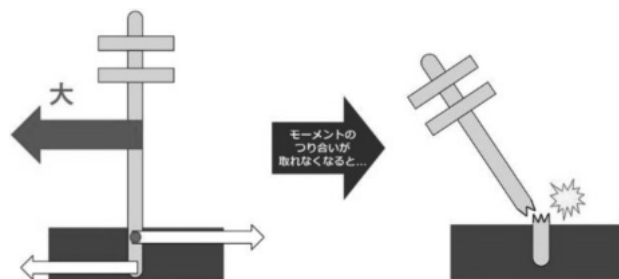


図7 電柱が折れる原理の考察

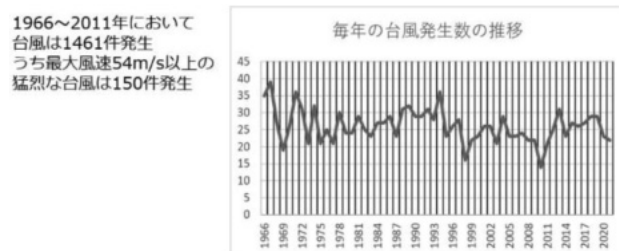


図8 電柱を折りうる猛烈な台風の頻度予測
グラフは気象庁(2022.11.22確認)をもとに作成

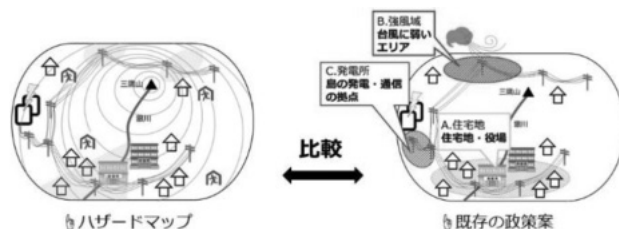


図9 ハザードマップを模擬的に与え、政策で主張された地域と比較する

3.5 代替案発想過程(生物)

生物基礎で扱われている環境アセスメントの流れは「調査→予測→評価」(図10)であり、本教材においては、「調査」と「予測」の段階を生物基礎の「生態系の多様性」で学習する知識を用いて考える。これらは、SDGsのうち「14 海の豊かさを守ろう」「15 陸の豊かさを守ろう」などを考えるためにも必要となる考え方である。

代替案発想過程は、「調査」の過程として、無電柱化政策を行う前後における生態系の乱れについて生物網を用いて検討する。まず、無電柱化政策を行う前の生物網については、住宅街・強風地域(丘陵地)・発電所付近(森林地帯)で異なるため、それぞれの場所の生物網について考える(図11)。後者ほど生態系は多様になり、生物網は複雑になる。

また、生物の種の多様性は場所だけでなく、その場所の気候や標高によって変化するものであるため、単純化のため今回は温帯の平地を想定した生物網を考えた。

環境アセスメント

開発事業内容が環境に及ぼす影響をあらかじめ調査、予測、評価し、環境の保全の観点からよりよい計画にするための制度

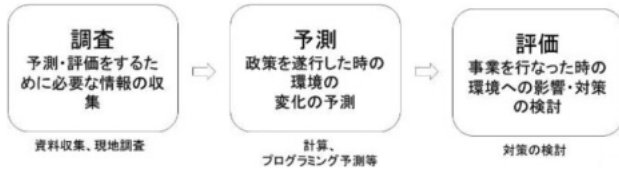


図10 環境アセスメントによる検証・評価の図式

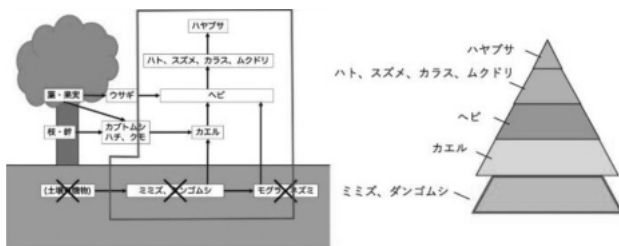


図11 森林地帯における生物網の図式

3.6 合理的判断過程(生物)

代替案発想過程で得た各地域の生態系に関する知識を踏まえ、本過程ではそれぞれの地域に対して、無電柱化政策を行ったときの生物網の変化を考える(図12)。今回は無電柱化政策のうち、特に地中への電柱の埋め立てについて考えているため、無電柱化によって電線に止まっていた鳥の数が減少するだけでなく、地面の変化ということからミミズやネズミなど地中に住む生物に対する影響があると考えられる。さらにこれらの生物の変化によって、生物網で結ばれていた生物に対しても変化が生じる可能性がある。

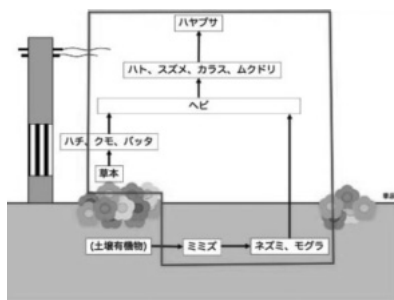


図12 電柱地中化による生物網への影響評価

一方で、それぞれの地域で生物網に変化があったとしても、鳥全体としての生物網に生じる変化は小さい可能性もある。これらの観点より、無電柱化政策は生態系の維持という観点からどのような影響が出るのかを考えることがこの過程の目的である。

3.7 最適解導出過程

物理および生物の観点から、3種類の地域のうちのどの地域の地中化を優先的に行うべきかを検討する。まず、既存の政策における主張・良さを再確認するとともに新たに検討した政策の良さ・メリット・デメリットをまとめる。そして、未検討の観点を取り上げ、どのようにすればその未検討の観点について政策を再評価できるかを考案する。最後に、教材で行った探求の方法を振り返る(図13)

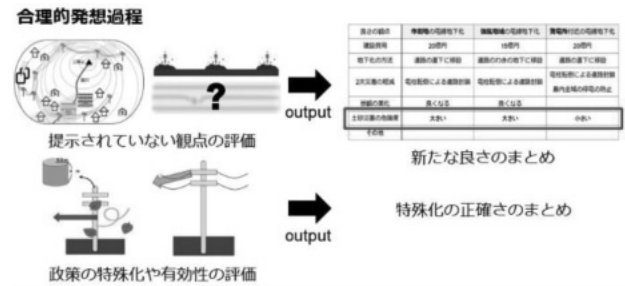


図13 教材の振り返り、合理的判断過程の図

4. ゲーミング教材の実践の概要と結果

4.1 実践の概要

東京工業大学附属科学技術高等学校情報システム分野の2年生41名(うち出席34名)を対象に、作成した教材を使用した授業実践を行った。1時限(45分間)の授業を行い、導入(5分)、教材を用いた個別学習と事後アンケート(40分)の流れで行った。

事後アンケートでは以下の3つの質問に対し、当てはまる程度を1から5の5段階で自己評価してもらった。

- ①無電柱化政策を評価するうえで、物理や生物の知識をどれくらい活用できましたか？
- ②今後、教科・科目内の知識を日常生活における思考に応用できる見通しは立ちましたか？
- ③これから社会の一員として主体的に課題に取り組むために、理科の知識は重要だと思いますか？

4.2 実践結果

まず、事後アンケートの結果を表1に示す。政策評価に理科で学習した内容を適切に活用できたと感じた度合い、および今後学んだ知識を日常生活の思考に応用する見通しの立った度合いは、半数以上が3または4であったが、理科の知識が主体的に課題に取り組む上で必要かという問いでは、5と回答した生徒が半数以上を占めていた。

表1 アンケートに対する回答結果(人)

質問項目(下)と選択肢(右)	1	2	3	4	5
政策評価に物理や生物の知識を活用できた	0	2	9	17	6
理科の知識を日常生活の思考に応用できる見通しが立った	0	2	9	15	8
社会の一員として課題に取り組み上で理科の知識は重要だ	1	0	5	7	21

以上より、本教材は課題学習における理科の知識の重要性を感じさせる役割は果たしたと読み取れる。自由記述の回答でも、「目に見えない部分も補えるような案にするために、日ごろの知識を生かすことでよりよい発想に変化させられる」「多角的な視点を持って物事を考察していくことが重要だということを理解できてよかった」と理科の知識の活用が問題解決につながると感じた生徒がみられた。一方で、「いざ自分で問題を見つけ、解決方法を見つけるのは難しいと思った」と知識活用を主体的に行うことに困難さを感じる生徒もあり、課題学習の過程そのものへの指導の改善の必要性も感じさせる結果となった。

教材を用いた実践では、生徒ごとの活動をログとして記録した。教材を構成する5つの過程のうち、34名全員が教材の必須部分(①目標設定過程、②代替案発想過程(物理、③合理的判断過程(物理,必須)、⑤最適解導出過程とまとめ)を通過し、うち15名が選択の④代替案発想過程(生物、選択)も実施していた。ただし、まとめまで到達後に、再び④を実施した生徒もいた。

ログに記録された時間に注目すると、実施した34人全員が30分以内に終了しており、人数分布をみると半数以上の生徒が20分以内に終了していた(表2)。

表2 教材の所要時間の分布

所要時間	10～15分	15～20分	20～25分	25～30分	30～35分	不明
人数	8	14	6	5	0	1

このことから、本教材は難易度が低く、また生徒に対する発問が少なかった可能性がある。生徒に対する発問は主に発散的思考を促す自由記述の発問、既習知識を問う発問、知識をもとに考察する発問の3種類があったが、特に教材後半の合理的判断過程、最適解導出過程において発問数が多くはなかった(表3)。このことは、教材の実施時間が短くなった要因の一つと考えられる。

表3 各過程における発問回数

目標設定	代替案発想(物理)	合理的判断(物理)	最適解導出/まとめ	生物
0	5	3	1	最大10

なお、アンケートのいずれの質問事項も、学習所要時間との有意な相関関係は見られなかった(表4)。このことから、教材に対する集中度合いや生徒が感じた難易度は教材の学習目標にはさほど影響していなかった。

表4 教材の所要時間とアンケート結果との相関

比較対象	相関係数	生物実施	生物未実施
質問1と時間	0.095	0.078	-0.044
質問2と時間	0.080	0.121	-0.183
質問3と時間	0.128	0.098	-0.050

5. 課題と改善点

本教材の改善点として、次の3点を検討した。

- ①取り入れる科目知識の追加
- ②時間配分の改善
- ③定量的評価の指導

まず、①取り入れる科目知識の追加である。本教材では「物理基礎」と「生物基礎」の知識のみを活用する例として提示したが、「生物基礎」をほとんど履修しない今回の対象者にとっては、既習知識の活用という教材本来の趣旨からやや外れたものとして認識された可能性がある。そこで、附属高校をはじめ多くの学校で開講されている「化学基礎」の知識の活用を追加すべきと考える。

次に、②時間配分の改善である。想定していた40分の学習時間に対し、半分以上の生徒が20分以内に終了した理由の一つは発問の少なさと想定される。そこで、特に合理的判断過程における知識活用の発展的課題の設定、最適解導出過程における情報処理段階の発問、まとめにおける教材で実施したことの復習に関する発問の設定を提案する。合理的判断過程では、代替案発想過程で既実施した知識活用による評価方法を受けた発展課題として設定する余地があり、新たな知識をふまえた結論に関する思考を問う発問を設定可能であった。また、最適解導出過程において情報処理に関するここまでの検討事項の振り返りの発問が可能であった。最後に、本教材での学習の振り返りを行う発問により知識活用の方法および見方・考え方の再定着を促すことができた可能性がある。

特に、理科の探究活動において重要なことは、「題材として挙げたある特定の知識を課題解決の場において活用できること」ではなく、「どのような課題解決の状況においても、その課題に対して既知の知識や自然現象、法則と関連付け、演繹的かつ論理的に考察できること」である。その点をふまえると、振り返りの場では「どの知識を活用したか」ではなく「どのように知識を課題と関連付け、思考したか」が重要になる。そのため、探究プロセスで生じた思考過程を整理する発問が必要であった。これらの発問の設定により、時間配分の改善はもちろんのこと、教材効果の改善も見込まれると考える。

最後に、③定量的評価の指導である。本教材では、ほとんどの検討事項において定性的な評価あるいは公式等を用いた大小関係を問う準定性的な評価が大半であった。しかし、定性的評価は評価事項の追加や簡易的な検討においては効果を発揮する一方、トレードオフ関係にある事項の比較など複雑な状況における合意形成においては不十分であり、データ等を用いた定量的な評価も取り入れるべきであった。実際、アンケートの自由記述欄には「データがないと判断しづらい」という意見が3件寄せられた。一方、既習の知識や現実事象の特殊化による定性的考察、概算によるオーダー評価などは理科の見方・考え方として重要な点のひとつでもある。既知の知識や経験、法則から想定される大まかな性質や大雑把な数量の予想・概算は主張の根拠やデータを評価し、見積もるうえで最初に行うべき事項である。しかし、アンケートを見ると一部の生徒は今回の考察ではデータがなく結論を得られなかったと感じており、定性的な評価の重要性が十分に伝わっていなかった。「定性的な評価方法もまた重要な科学的な見方・考え方の一つである」と強調した提示の仕方が必要であった。

6. まとめ

理科の探究活動における教材として、島嶼部における無電柱化政策を題材とした政策評価を縦糸横糸モデルにより行う教材を作成し、東京工業大学附属科学技術高等学校情報システム分野2年生を対象に実施しアンケートを集計した。既習の科目知識の活用および教科の見方・考え方の活用に重点を置いた教材であったが、アンケートを取ったところ半数以上の生徒が課題に取り組むうえで理科の知識が重要だと感じた。一方、取り入れる科目知識の追加、時間配分の改善、定量的評価に関する指導の3点について教材の改善の余地があった。

謝辞

本実践を行うにあたり、東京工業大学の松田稔樹教授、永原健太郎講師、ならびに、東京工業大学附属科学技術高等学校情報システム分野2年生にご協力いただきました。感謝申し上げます。

参考文献

浅野智亮, 松田稔樹(2021) 新・逆向き設計に基づく理科「探究活動」用教材の開発, 日本教育工学会研究会報告集, JSET21-4, 196-203
Bruer, J.T. (1993) Schools for Thought: A Science of

Learning in the Classroom. The MIT Press.

川口万太郎, 蓮見真由香, 服部竜大, 浜瀬理紗子, 山川萌恵, 油布稜平, 永原健太郎, 松田稔樹, 電柱地中化政策を題材とした理科「探究活動」導入教材の開発と実践, Informatio 20 (2023)

神里知弥, 嶋本拓海, 堀直輝, 松浦弘毅, 村田弘樹(2021) 数学課題学習と理科探究活動の指導計画改善を促す仮想授業ゲームの開発と効果検証, Informatio, 18, 31-40
気象庁 台風の発生数 (2022.11.22確認) <https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/statistics/generation/generation.html>

熊谷健太, 杉原沢理, 松田稔樹, 永原健太郎, 岡本敬, 濱名高宏, 電柱地中化政策を題材とした数学「課題学習」導入教材の開発と実践, Informatio, 20 (2023)

小山桂佑, 榎村耕佑, 山城六三郎, 岡本敬, 永原健太郎, 野本文彦(2022) 身近な題材で数学的政策評価方法を指導する「課題学習」導入教材と実践, Informatio, 19, 45-56

小山夏花, 浅野智亮, 近藤千香(2022) 太陽光/風力発電とした理科「探究活動」教材の開発と実践, Informatio, 19, 57-66

松田稔樹(2015) 情報化教育で扱うべき問題解決活動の明確化と授業・教材の設計指針, Informatio, 12, 37-43

松田稔樹(2018) 「縦糸・横糸モデル」を基盤とするインフォームドな指導を行うゲーミング教材の提案とその開発支援, シミュレーション&ゲーミング, 27 (2):49-60

Matsuda, T. and Nagahara, K. (2021) A Backward Design Checklist for PBL Lessons to Help Development and Utilization of Gaming Instructional Materials, Proceedings of the Innovate Learning Summit 2021, 396-403

松田稔樹(2021) 政策評価方法を指導する数学「課題学習」教材, 日本教育工学会研究会報告集, JSET2021-4, 237-244

松田稔樹(2022) 2021年度東京工業大学「数学科/理科教育実践演習Ⅱ」における教育実践研究の指導と高大連携の試み, Informatio, 19, 41-44

松田稔樹, 野本文彦(2021) 総合から各教科への逆向き設計を促す教師教育用仮想授業ゲームの設計フレームワークの検討と実践, Informatio, 18, 19-30

山崎浩也, 松田稔樹(2014) 数学「課題学習」用ゲーミング教材とその設計フレームワークに関する教科連携の視点に立った改善, 日本教育工学会研究会報告集, JSET14-4, 125-132市川 新・中村美枝子(2003) ゲーミング専門語の中核編纂の試み, シミュレーション&ゲーミング, 13 (2), 198-209