

技術教育における電気回路設計の学習に関する研究課題の展望 — 中学校技術科および高等学校工業科に焦点化して —

Prospects on Research Issues Regarding Learning of Electric Circuit Design
in Technology Education

— Focused on Technology Education in Junior High School and Industry
Education in High School —

石橋 直

Tadashi ISHIBASHI

技術教育ユニット

森山 潤

Jun MORIYAMA

兵庫教育大学大学院

(令和3年9月15日受付, 令和3年12月23日受理)

概要

近年の科学技術の急速な発展に伴い, 中学校技術・家庭科技術分野や高等学校工業科を主とする技術教育では設計学習が一層重視されるようになってきた。設計は, 社会や個人に係る問題・課題に対し, 科学技術に関する諸概念を操作しながら最適解を創造する取組みである。これまでの技術教育における電気回路の取り扱いについては, 仕組みの理解や製作といった学習活動が中心であったため, 設計に関する教育的な知見が不足している現状にある。一方で, 学校教育で取り扱う電気については, 理科, 社会科, 家庭科などが関連する教科横断的な特性を伴っており, 2000年代から国際的に注目されている教育モデルであるSTEM教育およびSTEAM教育に深く関連している。本研究では, 電気回路設計学習に関する諸問題を明らかにするために, STEM/STEAM教育の中核をなす「知る」と「創る」の視点から, 電気に関する学校教育のカリキュラム, 児童生徒の科学概念の実態, 技術教育における教材開発・授業実践の先行事例を整理した。その結果, 電気回路設計における思考モデルの不在が明らかになったため, 解決のアプローチとして設計学の方法論の援用を提案するとともに, 研究課題を整理して今後の研究の在り方について展望した。

キーワード: 技術教育, 電気回路, 設計, STEM教育, STEAM教育, 科学概念, 教材, 設計学

1. 研究の目的

本研究の目的は, 中学校技術・家庭科技術分野(以降「技術科」と表記)および高等学校工業科(以降「工業科」と表記)における電気回路設計の学習に関する諸問題について整理し, 今後の研究課題を展望することである。

2. 研究の背景

近代以降の人類史上において, 電気技術は常に生活と産業の発展を支えてきた。18世紀後半にイギリスで起こった, 石炭を主要な動力源とした第一次産業革命の約100年後には, アメリカで世界初の発電所が操

業開始されたことを皮切りに、利用するエネルギーが次第に電気へと移行し、やがてそれは第二次産業革命と呼ばれるようになった。20世紀後半からは電子機器の急速な発展により、情報技術を駆使した生産現場のオートメーションが図られ、第三次産業革命の時代に突入した。そして現代は第四次産業革命と呼ばれる、高度化した電子情報通信技術やロボット技術が生産現場に投入され、コンピュータによる自動的かつ自律的な生産活動を可能とする時代が到来しつつある。この第四次産業革命については、人工知能やビッグデータなどの情報技術の発達という側面が強調されがちであるが、根幹にはそのようなアルゴリズムを高速かつ確実に処理するためのハードウェアの進化や、それらのデバイスを安定的に動作させるためのインフラの高度化があり、電気技術の発達が土台になっていることに他ならない。このように、電気はエネルギー源として、また、制御や情報通信の手段として生活や産業に極めて重要な役割を果たしてきた。今後も、電気技術は人類の諸活動を支えるとともに、技術イノベーションの基盤的役割を果たすことは容易に予想できる。

我が国では、1995年に「経済社会の発展と国民の福祉の向上に寄与するとともに世界の科学技術の進歩と人類社会の持続的な発展に貢献する」ことを目的とした科学技術基本法が施行された。これに基づき、政府は科学技術基本計画を策定し、平成28年度～32年度を対象とした第5期科学技術基本計画においては、超スマート社会といわれる Society5.0の実現を提唱した¹⁾。

また、近年の教育界に注目すると、2018年に文部科学省は「Society 5.0に向けた人材育成に係る大臣懇談会 新たな時代を豊かに生きる力の育成に関する省内タスクフォース」において、新たな社会を牽引する人材として「技術革新や価値創造の源となる飛躍知を発見・創造する人材」を挙げており、また、「課題解決を指向するエンジニアリング、デザインの発想」を教育に求めることとしており、その思考の基盤としてSTEAM教育（Science, Technology, Engineering, Art, Mathematics）の推進について述べている²⁾。また、Society5.0の概念のもと、2018年に経済産業省は「未来の教室」とEdTech研究会を立ち上げ、「『知る』と『創る』が循環する、文理融合の学び」として「学びのSTEAM化」を掲げた³⁾。この「知る」と「創る」を往還させる学びの学術的な概念を2003年に日本学術会議新しい学術体系委員会による「新しい学術の体系—社会のための学術と文理の融合—」に見ることができる。ここには、「あるものの探究」としての認識科学と、「あるべきものの探究」としての設計科学の統合が学術の真の姿であるとして、この認識科学と設計科学を車の両輪とする新しい学術の体系を構築することが社会のための学術を実現するという主張が述べられている⁴⁾。また、設計科学の対象を人工物システムとしており、その定義は広く、「機械の設計、品種の改良、新しい治療方法の開発など、従来工学・農学・医学などの領域で行われていた設計活動に加えて、介護制度や博覧会など広く人工物の設計をその対象」とみなしている。

以上を踏まえると、我が国においては、科学を活用し技術による問題解決を図ることができる人材が時代を超えて望まれており、その人材育成にSTEAM教育のような領域横断的な資質・能力の育成を指向した教育が求められている。電気技術に焦点化して考えると、ここでの問題解決とは問題を発見して課題を設定し、それを電気電子工学等の知識や過去の製品事例に基づき電気回路を考案・構築することによって課題解決を図ることである。この行為は、要求から人工物を創造する一連の設計・製作活動として捉えることができる。学校教育における電気に関連する学習は、理科や技術科、あるいは工業科が中心となっており、理科教育においては電磁気現象の解析を中心に、技術教育では設計・製作を中心に展開されることが多い。技術科の2017年告示の学習指導要領解説においては、内容「C エネルギー変換の技術」に、「問題を見いだして課題を設定し、電気回路又は力学的な機構等を構想して設計を具体化する（後略）」⁵⁾、また、工業科の2018告示学習指導要領解説においても、「電子機械に関わる知識と技術の活用に関する学習の充実」や「組込み技術について知識と技術の一体的な習得を図る学習の充実」が明記されており、原則履修科目「工業技術基礎」をはじめ種々の科目の内容とその取扱いに「設計」が記されている⁶⁾。しかしながら、電気回路に関する概念理解そのものの困難さや適切な教材の不足などが相まって、電気回路設計の指導は難しいとされており、またその事例が少ない。したがって、電気回路設計の学習に関連する学術的知見が極端に不足しており、今後の研究の充実が期待されているといえる。

以上のことから、電気回路設計の学習を充実させるには、領域横断的に設計について取り扱うとされるSTEM/STEAM教育について着目しつつ、その理念や構成、取り扱われる各語句の概念を整理する必要がある。次に、我が国の学校教育における電気に関連する教育についてSTEM/STEAM教育との対照を図るために、その内容や特徴を整理し、教育課程を段階的に把握する必要がある。さらに、電気に関する児童生

徒の「知る」および「創る」に関する諸能力や教育実践について整理することを通して、電気回路設計の学習に関する問題の所在を特定し、研究アプローチを提案するとともに課題を展望することが求められる。

3. 科学技術教育の振興と STEM/STEAM 教育の潮流

科学技術教育の振興と我が国に普及しつつある STEAM 教育について、またその根幹となっている STEM 教育の潮流について概観する。さらに、STEM/STEAM 教育に深く関連する、米国科学教育 / 技術教育の両スタンダードにおける設計および電気回路に関連する内容の取扱いについて整理する。

3.1. 科学技術教育振興の動き

科学技術教育振興の大きなきっかけとして、1957 年の東西冷戦時において旧ソ連が人類初の人工衛星 スプートニク 1 号の打ち上げに成功した、いわゆる「スプートニクショック」が挙げられる。これを防衛上の脅威と感じた米国は、1958 年に国家防衛教育法により理数系教育推進を掲げることとなった。この動きは全世界的に広がり、急速な技術の発展を支える科学技術教育の必要性が叫ばれるようになり、我が国においては 1957 年における中央教育審議会「科学技術教育の振興方策について（答申）」⁷⁾を受け、1958 年に技術・家庭科が設置された。その後の米国の動きに着目すると、1982 年に全米科学教育連合学会 (NSTA : National Science Teachers Association) は基本声明として「科学—技術—社会 : 1980 年代の科学教育」の宣言を行い、STS (Science / Technology / Society) の基本理念を明言した。1985 年には、全米科学振興協会 (AAAS : American Association for the Advancement of Science) が科学、数学、技術の分野におけるカリキュラム改革を目指して「プロジェクト 2061」を発足させ、後に 1989 年に「全米科学教育スタンダード (Science for All Americans)」を刊行した⁸⁾。ここでは、高等学校卒業時まで生徒が身に付けるべき科学リテラシーが定義されている。また、NSTA は 1991 年に全米科学教育スタンダード (NSES : National Science Education Standards) の開発を米国研究協議会 (NRC : National Research Council) に要請し、これを 1996 年に刊行した⁹⁾。一方、数学に関しては、1989 年には、全米数学教師協議会 (NCTM : National Council of Teachers of Mathematics) が「数学教育のスタンダード (Mathematics Education Standards)」を開発しており、2000 年に「学校数学のための原則とスタンダード (Principles and Standards for School Mathematics)」へと改訂している¹⁰⁾。技術教育に関しては、国際技術教育学会 (ITEA : International Technology Education Association) が 1996 年ごろから Technology for All Americans Project を開始し、2000 年に「技術リテラシーのスタンダード (STL : Standards for Technological Literacy)」を刊行した¹¹⁾。ITEA は、技術リテラシーを「技術を理解し、活用し、管理する能力」としており、高度な技術に支えられる社会に主体的に参画できるよう、全ての市民が技術について理解し、技術を適切に活用する能力をもつことの必要性について述べ、そのための素養を 20 のスタンダードで示した。これらのように、20 世紀の米国では科学・数学・技術に関するスタンダードが相次いで刊行され、固有の専門領域において身に付けるべき資質・能力を定義しながらも、STS に見られるような領域横断的な学びの価値が注目されてきた。この動きは 2000 年以降、STEM/STEAM 教育を指向した新たなスタンダードへの改訂へとつながっていくこととなった。

3.2. STEM 教育の概要

STEM 教育という用語は、2001 年にアメリカ国立科学財団 (NSF : the National Science Foundation) による使用が初めてとされている¹²⁾。STEM 教育について、Bybee (2010) は、「科学、技術、エンジニアリング、数学の協調的な教育のための方略であり、STEM 専門職の多様性や、豊かなテクニクとスキルをもつ労働力、および 21 世紀の壮大な課題に対処できる STEM リテラシーのある市民の要請に対応する教育」としており、「真の STEM 教育とは、モノがどのように働き、どのように技術を向上させたらよいかを理解させるべきものであり、特に初等中等教育で学ぶ子どもたちにエンジニアリングに触れさせるべきである」と述べている¹³⁾。なお、ここでは山崎 (2016) が指摘するように、本研究では Engineering を「人類の利益のために、自然の素材と力を利用するための方法を開発するための判断と創造性を得る際に、数学と自然科学 (生物的、物理的) の知識を活用する」¹⁴⁾ という解釈のもと、訳語を工学ではなく「エンジニアリング」と表記する。STEM 教育は当初、科学、技術、エンジニアリング、数学の 4 教科としての伝統的

コースワークであると捉えられてきた側面があるが、近年ではこれらを統合的に捉えた定義として整いつつある^{15), 16)}。統合的なアプローチとして、Vasquez (2013) は「STEM教育とは、科学、技術、エンジニアリング、数学という4つの伝統的な領域の障壁を取り払い、それらを実世界の厳密かつ実的な価値をもつ学習体験へと統合する、学際的アプローチのことである」としており、STEM教育の統合の度合いについて4つのアプローチを定めた¹⁷⁾。それは、最も細分化された段階であり各領域固有の概念とスキルを学習する Disciplinary アプローチ、領域間で共通のテーマを取り扱うが領域個別の概念とスキルを学習する Multidisciplinary アプローチ、2つ以上の領域から結びついた概念とスキルを学習する Interdisciplinary アプローチ、そして最も統合的なレベルとして複数領域の概念とスキルを総合的に活用して学習経験を形成する Transdisciplinary アプローチである。このようにSTEM教育は統合的な文脈を多分に含んでいることから、過去のSTS教育運動の流れを受けていることが分かる。

3.3. STEAM教育の台頭

STEM教育にArtsを加えたSTEAM教育という語は、Yakman (2006) により初めて使用された (YakmanはSTΣ@Mと表現している)¹⁸⁾。ここでのArtsは、以下の学問領域を包含する広範な概念として示している。国語や第二外国語、手話などのコミュニケーションに関連する領域である Language Arts[LA]。絵画、彫刻、色彩、その他の表現物など、いわゆる美術領域である Fine Arts[FA]。スポーツ、ダンス、演技や演奏の領域としての Physical Arts[PA]。手芸や手工に関する Manual Arts[MA]。社会学、哲学、心理学、神学、市政学、政治学、教育学までを含むものとしての Liberal/Social Arts[SA]、である。YakmanはSTEAM教育における統合の程度をピラミッドモデルによって以下の5つの階層で示している。生涯にわたってSTEAMのすべてを統合・深化していくものとして、最上位に Universal Level。次のレベルは、学習者が現実世界における各領域全分野の相互依存性を学び、STEAM全体を統合する Integrated Level。その下には、学習者が選択された範囲においてどのように相互関係を築いているかを概観する、Aを分離しSTEMが結合した状態の Multidisciplinary Level。そして、個々の領域を示す Discipline Specific Level。最下層には、電磁気学や電気回路学のように個々の領域において細分化した内容として Content Specific Level が位置づいている。なお、Aの概念は定まっていなくてとされており¹⁹⁾、Artsをいわゆるアートと捉え、デザインを意匠的な創造としてSTEAM教育を展開する向きもあるが²⁰⁾、本研究で取り扱う設計は、社会からの要求や経済性などを重視し展開される性質を指向しているため、より社会要求な視座から考察可能な Yakman の提唱する STEAM 教育の枠組みに基づき議論していくこととする。このことは、山崎 (2020) が、STEAM 教育と認識科学/設計科学の概念をなぞらえて「STEAM 教育は、『学 (Science, あるものの探究)』と『術 (Arts, あるべきものの探求)』の調和を目指している」²¹⁾と整理していることから妥当であると考えられる。なお、本研究では意匠的・審美的な性質をもつものを含意する語句として「デザイン」を、一方で機能や性能、品質や生産効率のように、製品の役割や生産活動に関する語句として「設計」を用いることとした。Yakman は、エンジニアリング教育を、科学と数学を使用して新たな技術を設計するという行為に関する教育として捉えており、統合の架橋役としてエンジニアリングを据え (そのため E を Σ と表現している)、その中核に設計を位置づけていると読み取ることができる。

3.4. 我が国における STEAM 教育

我が国では第5期科学技術基本計画以降、STEAM教育への関心が急速に高まってきた。2019年に文部科学大臣は中央教育審議会に「新しい時代の初等中等教育の在り方について」の審議を要請する諮問を行った。ここでは、「いわゆる文系・理系の類型にかかわらず学習指導要領に定められた様々な科目をバランスよく学ぶことや、STEAM教育の推進」を掲げ、AをArtと表現している²²⁾。同年、教育再生実行会議においては、初等中等教育段階に目を向け、「STEAM教育等の各教科での学習を実社会での問題発見・解決にいかしていくための教科横断的な教育」の推進のために「総合的な学習の時間」や「総合的な探究の時間」、「理数探究」の充実について述べている²³⁾。さらに、内閣府は統合イノベーション戦略2019において「教科横断的な教育であるSTEAM教育を推進し、具体的な社会課題と紐付けながら学習する環境を確保する。」²⁴⁾としており、ここでも、AがArtとして捉えられている。その後、AをArtsとする捉え方の提言は同年9月の文部科学省教育課程部会における国立教育政策研究所(2019)の資料に見ることができる。ここでは、Yakmanによる統合のピラミッド構造が資料として示されており、「STEAM教育は、エンジニア

リングとアーツ（言語や歴史などを含む文科）を通して解釈される科学と技術」としている²⁵⁾。その後、統合イノベーション戦略2020では、初等中等教育段階を中心としたSTEAM・AIリテラシー教育の推進が掲げられ、「STEAM人材の育成」といった用語がみられる²⁶⁾。我が国の各種機関ではそれまでArtとされたAの概念が2020年からArtsと表記されるようになってきている。2021年4月の文部科学省教育課程部会では、STEAM教育を「STEM (Science, Technology, Engineering, Mathematics)に加え、芸術、文化、生活、経済、法律、政治、倫理等を含めた広い範囲 (Liberal Arts) でAを定義し、推進することが重要」と示しており、幼児期のものづくり体験や科学的体験、小学校・中学校段階では教科横断的な学習や探究的な学習、プログラミング教育、高等学校においても教科横断的な学習の重要性について説明している。なお、高等学校については、「総合的な探究の時間」や「理数探究」といった科目を中心としてSTEAM教育に取り組むことを期待している²⁷⁾。

このように、我が国の各種機関ではAをArtsとして拡張して解釈する方向性になってきたが、文部科学省を中心とした教育関連分野においては、教科横断的な学習を意図した文脈でSTEAM教育が語られる傾向にあり、教育活動の一種の枠として議論されているように見られ、カリキュラム・マネジメントを図り、教科架橋型の統合的な教育を展開することへの期待としてSTEAM教育という語が用いられている印象を受ける。一方で、社会からの要請を意識した統合イノベーション戦略においては、地域創生や価値創出、社会的課題解決のための人材育成といった文脈としてSTEAM教育が注目されている点が特徴的である。

3.5. 科学教育スタンダードにおける設計および電気の取扱い

2012年にNRCはA Framework for K-12 Science Educationにて科学教育の指針を打ち出し、翌2013年にはNSESの改訂版に相当する新しい科学教育スタンダード (NGSS: Next Generation Science Standards) を刊行した^{28), 29)}。ここで、K-12の“K”は幼稚園 (Kindergarten) を表しており、“12”は高校卒業学年相当である第12学年を表している。米国では9月からの年度始まりが主流であるが、小学校入学に係る生まれ月による学年の区切りが州によって大きな幅があり統一されていない。しかし満6歳が学齢であることや、小・中・高等学校において12年間を学ぶ期間の基準としている点は我が国と同じであるため、本論文では、我が国と米国の学年を対応させて検討することとした。NGSSは、ミニマムスタンダードであり、身に付けるべきものとして、「領域のコア概念 (DCI: Disciplinary Core Ideas)」、「科学的・エンジニアリング的プラクティス (SEP: Scientific and Engineering Practices)」、「領域横断概念 (CC: Cross-cutting Concepts)」の3つの側面およびこれらの統合を掲げている。コア概念には、「物理科学 (PS: Physical Sciences)」、「生命科学 (LS: Life Sciences)」、「地球宇宙科学 (ESS: Earth and Space Sciences)」に加えて、「エンジニアリング・技術・科学の応用 (ETS: Engineering, Technology, and applications of Science)」を定義していることから、NGSSは科学の実装の側面を捉え、技術教育で取り扱われる領域にまで言及していることがわかる。例えば、幼稚園段階におけるコア概念のETSには、物理科学の「運動と安定: 力と相互作用」におけるエンジニアリング課題として、「人々の変化や創造への欲求のために、エンジニアリングを通して解決できるような課題」を設定したり、「課題解決には、複数の解決策が見つかる可能性がある」ことを学んだり、我が国の技術科における技術の見方・考え方に通じる概念がみられる。また、かつて探究としていた学習活動を「プラクティス (SEP)」として捉えなおし、「(a) 科学者が世界についてのモデルや理論を調べ構築する際に用いる主要なプラクティス」と、「(b) エンジニアたちがシステムを設計し構築する際に用いる重要なエンジニアリング的プラクティス」とし、その段階を次の8つに示している。1. (科学的に) 問いを抱き、(エンジニアリング的に) 問題を明確にする。2. 問題を解き、モデルを用いる。3. 計画を立て、さらに実験方法を考える。4. 分析し、データを読み取る。5. 数学的、コンピューターショナルな考え方を援用する。6. (科学的な) 説明を考え、(エンジニアリング的に) 解答を導き出す。7. 証拠に基づき議論する。8. 情報を得て、それを評価し、情報交換をする。このように、プラクティスの中にエンジニアリングを多用していることから明らかなように、科学の学びにエンジニアリングを深く関連付けている。領域横断概念については、随所に「エンジニアリング、技術、科学の応用とのつながり」が記されている。さらに、NGSSではエンジニアリングデザインについて、科学的な探究と同レベルにまで科学教育の体系に統合することを明示しており、生徒たちが今後数十年で直面する社会的・環境的な課題に対して関与・解決するための基盤になることを述べている。ここで、“Engineering Design”については「工学設計」と訳されることもあるが、本研究では工学とエンジニアリングを区別しているため混乱を招く可能性がある。そ

表1 NGSS における学年に応じたエンジニアリングデザインのレベル

学年	問題の明確化	解決策の構築	最適化
GRADES K-2	人々が変化を望んでいる, エンジニアリングによって解決可能な問題の状況を認識すること。	視覚的または身体的な表現によって, 解決策を伝えること。	解決策を比較, テスト, 相互評価すること。
GRADES 3-5	単純な問題に対し, 解決策が満たさなければならない基準や制約について明確に述べること。	複数の可能性のある解決策を調査・探求すること。	うまくいかない点も考慮しながら, 簡単な試験の結果に基づき改善すること。
GRADES 6-8	基準や制約および解決策を制限する可能性を考察し, その精度に注意を払うこと。	新たな解決策を創造するために異なる解決策の要素を結合すること。	反復的に試験し, 解決策を精緻化するために体系的な手法を用いること。
GRADES 9-12	社会的・国際的に重要な問題の基準と制約に関する幅広い考慮事項に注意を払うこと。	主たる問題を, 個別に解決できる小さい問題へと細分化すること。	複雑な問題の解決を試行・改善する際に, 基準に優先順位をつけ, トレードオフを検討し, 社会的・環境的な影響を評価すること。

ここで、エンジニアリングの文脈で用いられる「設計」については訳語として「エンジニアリングデザイン」と表記することとした。NGSSでは、エンジニアリングデザインを3つの要素から構成しており、それぞれ「問題の明確化」「解決策の開発」「最適化」とし、これらを有機的に関連づけ、なおかつ学年に応じてその内容が高度化されるように示している（表1）。このように、NGSSは自然科学における真理の追究のみならず、人間社会の活動の文脈において科学がどのように活用されるのかについて幅広く捉え、エンジニアリングと技術まで含めた科学リテラシーの育成をねらいとしている。

NGSSにおいて、電気は物理学の第3学年（我が国における小学校第3学年相当）以降に言及されている。第3学年では、3-PS2にて静電気と磁気を取り扱われており、物体間に働く静電作用や磁気作用による力について学ぶこととなっている。第4学年では4-PS3に電流が登場し、エネルギー変換の文脈において電気エネルギーが取り扱われており、電気エネルギーが、運動、音、光、熱に相互変換されることが述べられている。ここでは、物体同士の衝突といった、力学的なエネルギーと併せて学習することとなっており、エネルギーの捉え方のひとつとして電気を位置づけている。また、電気回路についてもここで初めて取り扱われ、科学的なアイデアをエネルギー変換のデバイスの効率化や設計に適用することがねらいの一つに位置づけられている。そのデバイスの例として、電気自動車や電車などの乗り物、光や音に変換する回路などが紹介されている。さらに、設計の制約として、素材、費用、設計にかかる時間などが含まれることも記されている。第5学年では5-PS1にて物質の性質として導電性が扱われている。中学校（Middle School）段階では、MS-PS2にて電磁石が登場し、モータや発電機について取り扱われている。また、MS-PS3では電場や磁場の考え方が登場するなど、電磁気学の基礎的内容に踏み込むものとなっている。高校（High School）段階になると、HS-PS1では分子間の電気力などに内容が深まっており、電磁気現象の微視的な解析へと視点が移っている。

NGSSでは、電気に関して取り扱う内容および配列については、我が国の理科教育と大きな違いはない。しかしながら、各項目で問題の発見と課題の設定があり、その解決策を構想あるいは設計し実行するというプラクティスが含まれている。そこではエンジニアリングが実行され、同時に社会や生活に生かされている技術と関連付けられながら学びを深めていくことが目指されている。なお、NGSSが取り扱う範囲の広さから、米国の科学教育はScienceを人工物科学として捉えていることが分かる。そのため、日本の自然科学（Natural Science）に特化した理科教育とは同一の概念ではないことに留意する必要がある。

3.6. 技術・エンジニアリング教育スタンダードにおける設計および電気の取扱い

ITEAは2011年に国際技術・エンジニアリング教育者学会（ITEEA：International Technology and Engineering Educators Association）へと名称を変更し、2020年にはSTLの改訂版である「技術エンジニアリングリテラシーのためのスタンダード（STEL：Standards for Technological and Engineering Literacy – The Role of Technology and Engineering in STEM Education）」を刊行した³⁰⁾。この題目の通り、STEM教育におけるTechnologyとEngineeringを、技術教育の範疇に含めていることを明言している。

表2 STEL, TEP, TEC の一覧

Core Disciplinary Standards (STEL)	STEL-1	技術・エンジニアリングの原理・特徴
	STEL-2	技術・エンジニアリングのコア概念
	STEL-3	知識・技術・プラクティスの統合
	STEL-4	技術の影響
	STEL-5	社会が技術の進展に及ぼす影響
	STEL-6	技術の歴史
	STEL-7	技術・エンジニアリングの設計
	STEL-8	技術製品やシステムの活用, 運用・維持, 評価
Technology and Engineering Practices (TEP)	TEP-1	システム思考
	TEP-2	創造性
	TEP-3	製作・実行
	TEP-4	批判的思考
	TEP-5	最適化
	TEP-6	協働(コラボレーション)
	TEP-7	協調(コミュニケーション)
	TEP-8	倫理的配慮
Technology and Engineering Contexts (TEC)	TEC-1	コンピューテーション, 自動化, 人工知能およびロボット
	TEC-2	材料の加工・プロセス
	TEC-3	輸送・物流
	TEC-4	エネルギーと動力
	TEC-5	情報・コミュニケーション
	TEC-6	構築された環境
	TEC-7	医療や健康に関する技術
	TEC-8	農業や生物に関する技術

STELは、「教科のコア (STEL : Core Disciplinary Standards)」、「技術・エンジニアリングのプラクティス (TEP : Technology and Engineering Practices)」、「技術・エンジニアリングの文脈 (TEC : Technology and Engineering Contexts)」の3領域から構成されている。コアは8つの要素から構成されており、そのコアに関して実践・実行する側面においては、8つの要素から成るプラクティス (TEP) が活用される。さらに、これらがどのような技術的活動の領域において提供されるかについて、文脈 (TEC) が規定している。これらの一覧を表2に示す。表2のSTELの項目から、米国における技術教育で取り扱われる技術・エンジニアリングを、技術を体系化された科学として捉え、記録可能・記述可能な知として取り扱おうとしていることがうかがえる。

STELのうち、設計に関連する項目はSTEL-7である。ここでは、「STEL-7 : 技術・エンジニアリングの設計」について整理する。STEL-7の説明には、技術・エンジニアリングの設計に通底する、次の重要な8つのアイデアが示されている。(1) 設計とは人間の基本的な活動であるということ、(2) 技術・エンジニアリングの設計には唯一の正しい解決策が無い場合が多いということ、(3) 今日において試行錯誤 (トライ & エラー) の連続や偶発的に生まれた製品およびシステムはほとんど無いということ、(4) 設計という行為には、コミュニケーション、創造性、協働性、批判的思考、コンピューテーショナルな思考、視覚化、工夫、イノベーション、発想、抽象的思考、公共心、忍耐力、失敗からの学習、フィードバックの受け入れと提供、空間的思考、プロジェクトと時間の管理、自己学習などの、幅広いスキルが求められるということ、(5) 設計には普遍的な原則と設計要素があるということ、(6) 製作が技術・エンジニアリングの本質的な部分であるということ、(7) 設計の最適化は、基準と制約によって管理されるということ、(8) 設計には多くのアプローチが存在するという、ことである。STEL-7では学年ごとにコア概念を設定しおり、そのベンチマークを表3に示す。ITEAによるSTLでは、設計の性質に関する理解や設計技術の適用について、カテゴリ3の「デザイン (設計)」の「STL-8 : 設計の特徴」「STL-9 : エンジニアリングデザイン」と、カテゴリ4の「技術社会に必要な能力」の「STL-11 : 設計プロセスの応用」に分けて示されていた。すなわち、「develop an understanding」と「develop abilities」が区別されていた。STELでは、表3に示すように、これらを継承し統合したものとなっており、発達段階に応じて設計の概念理解やその適用について、TEP

表3 「STEL-7:技術・エンジニアリングの設計」におけるベンチマーク

GRADES K-2	STEL-7A STEL-7B STEL-7C STEL-7D STEL-7E STEL-7F STEL-7G	遊びと探求を通して設計概念や原理, 設計プロセスを適用すること。 設計には要求が含まれていることを説明すること。 設計は要求や欲求への応答であることについて説明すること。 設計は説明可能な異なる性質を持っていることについて議論すること。 設計には様々な解決策があり, 完璧なものはないことを説明すること。 技術とエンジニアリングデザインプロセスの基本的なスキルを区別すること。 設計に必要なスキルを適用すること。
GRADES 3-5	STEL-7H STEL-7I STEL-7J STEL-7K STEL-7L STEL-7M STEL-7N STEL-7O	設計には複数のアプローチがあることを説明すること。 技術とエンジニアリングの設計プロセスを適用すること。 規準, 制約, 基準に基づいて設計を評価すること。 優れた設計が人間の状態をどのように改善するかについて解釈すること。 設計の普遍的な原則と要素を適用すること。 独自の解決策を含め, 設計における既存の解決策の長所と短所を評価すること。 成功する設計スキルについて練習すること。 設計プロセスの一環として, 安全な方法で工具, テクニック, 材料を適用すること。
GRADES 6-8	STEL-7P STEL-7Q STEL-7R STEL-7S STEL-7T STEL-7U STEL-7V	設計の様々な異なるアプローチに関連する利点や機会を説明すること。 技術とエンジニアリングデザインプロセスを適応すること。 基準や制約に照らして解決策を改良すること。 設計における人的要因を特定して適用することで問題の解決策を創生すること。 確立された原則と設計要素に基づき設計の品質を評価すること。 異なる解決策の長所と短所を評価すること。 設計を成功させるために必要な基本的なスキルを改善すること。
GRADES 9-12	STEL-7W STEL-7X STEL-7Y STEL-7Z STEL-7AA STEL-7BB STEL-7CC STEL-7DD	設計目標を評価し, 最適なアプローチを決定すること。 技術とエンジニアリングのデザインプロセスにおけるトレードオフを文書化し, 最適な設計を作成すること。 基準と制約の中で要求されている品質に対処することで, 設計を最適化すること。 人間中心の設計を原則として適用すること。 設計の原理・原則や, 要素を説明すること。 設計に可能な限り最善な解決策を取り入れること。 設計プロセスに幅広い設計スキルを適用すること。 設計プロセスに幅広い製作スキルを適用すること。

や TEC に関連付けながら身に付けていくことを求めている。

次に, 電気回路の取扱いについて整理する。回路 (circuits) について言及されている箇所は, 「STEL-3: 知識・技術・プラクティスの統合」に見られる。そこには, 「STEL-3C: 単純な技術を組み合わせて, より複雑なシステムを形成する方法を説明する。生徒は, 電線, モータ, 電源 (バッテリー) を使用して簡単な回路を小型のロボットに実装することができる。他の例として, エスカレータがどのようにホイール, 軸, 斜面, 滑車, 歯車, ベルト, モータを使用して, 人々を異なる階に移動させているか, などが挙げられる。」と示されている。また, 「TEC-1: コンピューテーション, 自動化, 人工知能およびロボット」の文脈が, 「STEL-2A: 目標を達成するために連携機能する部品や構成要素がシステムにどのように組み込まれているか説明する」に適用可能としており, そこには「基本的な電子回路設計や回路機能を取扱う場面において, 目標達成のために製品システムがどのような部品や機能連携させているかについて説明する。光や音を取り扱うナショナルカリキュラムで学ぶ生徒は, スイッチと電源を使用したライトやブザーなどの装置を用い, 単純な直列回路の電流の流れをたどる活動を通して学ぶことができる。これは, TEP-1: システム思考にリンクしている。」と記されている。このように, 電気回路は製品システムの構成要素として出現しており, 製品の機能の価値付けに回路がいかに関与可能かといった視点で取り扱われている。また, 回路そのものの学習においても, 電気の科学的側面ではなく, 電源・負荷・スイッチが関連して機能を提供しているというシステム思考に関連付けて述べられている。なお, 「TEC-4: エネルギーと動力」においては, エネルギーを電力以外のものも含めて広く捉えられており, エントロピー, 効率, 省エネなどの文脈において取り扱われている。

3.7. まとめ

これまで、科学技術教育の国際的な動向について、STEM/STEAM教育および各種スタンダードの内容を俯瞰した。STEM/STEAM教育については、社会における様々な問題・課題に対応するために必要な科学および技術リテラシー育成のために、単に各領域を連携させるだけではなく、それぞれの統合のレベルに即したアプローチが求められるという基本構造が明らかになった。その中で、エンジニアリングがSTEM/STEAM教育における各領域を連携させるための軸として機能させる考え方がうかがえた。一方で、特にSTEAM教育の認識については未だ課題があり、十分に定まっていない概念であることも分かった。また、我が国の各種機関ではこれらの用語が近年になって使用されはじめたばかりであるが、学校教育における「総合的な学習の時間」「総合的な探究の時間」や「理数探究」との関連が意識されており、カリキュラム・マネジメントの概念に通じる教育モデルであることも分かった。さらに、NGSSとSTELの両スタンダードに共通することとして、身に付けるべきリテラシーにエンジニアリングが位置付けられており、特に設計（エンジニアリングデザイン）思考に力点が置かれていた。しかしながら、NGSSやSTELで示された設計については、「設計は要求・欲求に基づいていること」「設計には基準や制約を伴うこと」「設計には異なる解が存在し、最適解を選択すること」などのように、設計そのものの特徴が示されているのみであり、設計に必要な基礎知識や概念操作の具体や、設計能力の育成にどのような指導が求められるかについてまでは言及されていない。したがって、電気回路設計、機械設計、建築設計といった個別具体的な事項を取り扱う場合は、示されている設計の特徴に関する項目を各専門領域に適合するように再構成したうえで指導方略を立てる必要があるといえる。

4. 我が国の学校教育における電気の取扱い

STEM/STEAM教育のような統合的な科学技術教育モデルにおいて、電気は主に科学教育の内容として、また技術・エンジニアリング教育の内容として取扱われる。STELでは、電気回路は製品システムを統合する要素として、電気そのものはエネルギーの文脈として取り扱われることが紹介されていた。我が国においてエンジニアリングデザインとして電気回路設計学習を展開するには、まず、学校教育カリキュラムで電気がどのように取り扱われているかについて整理しておく必要がある。電気は、科学的・技術的・社会的な性格を有しており、学校教育では関連する教科として、技術科、家庭科、理科、社会科などがある。また、教科ではないが横断的な学びとして総合的な学習/探究の時間が設定されている。

ここでは、2017年の小学校・中学校学習指導要領に示されている電気に関する内容について整理した。高等学校については、2018年の学習指導要領に基づき整理するが、高等学校では各教科・科目の内容が中学校の内容を基礎にしており、かつ選択科目が多岐にわたっていることから全ての生徒が共通して学ぶ内容とはいえないため、対象を工業科・理科・総合的な探究の時間にとどめた。

4.1. 技術科（技術・家庭科技術分野）

技術科は中学校の教科である。技術科の内容は、中学校学習指導要領解説技術・家庭編⁵⁾において、「A材料と加工の技術」「B生物育成の技術」「Cエネルギー変換の技術」「D情報の技術」で構成されている。また、技術科ではこれらについて、実践的・体験的な活動を通して、技術によってよりよい生活や持続可能な社会を構築する資質・能力を育成することが目指されている。

電気は主として「Cエネルギー変換の技術」において取り扱われる。その目標は、資質・能力の三つの柱に即して(1)～(3)に渡って記されており、「(1)知識及び技能」に関するものとしては、「ア電気、運動、熱の特性等の原理・法則と、エネルギーの変換や伝達等に関わる基礎的な技術の仕組み及び保守点検の必要性について理解すること。」「イ技術に込められた問題解決の工夫について考えること。」が示されている。ここでの内容の取扱いには、「電気機器や屋内配線等の生活の中で使用する製品やシステムの安全な使用についても扱うものとする。」や、「原理や法則に関しては、関係する教科との連携を図ること。」とあり、後述する理科や社会科との教科横断的な取り組みについて明記されている。続いて、「社会からの要求、安全性、環境負荷や経済性などに着目し、技術が最適化されてきたことに気付かせること。」とあり、「STEL-7:技術・エンジニアリングの設計」の概念と共通する視点が述べられている。さらに、「(2)思考力・判断力・表現力等」に関するものとしては、生活や社会における問題を解決する活動を通して、「ア安全・適切

な製作、実装、点検及び調整等ができること。」「イ 問題を見いだして課題を設定し、電気回路又は力学的な機構等を構想して設計を具体化するとともに、製作の過程や結果の評価、改善及び修正について考えること。」が求められている。この文言は、平成25年度学習指導要領実施状況調査中学校技術・家庭科編（技術分野）³¹⁾において課題とされた「電気回路を読み解く能力や、目的や条件に応じて電気回路を設計する能力の育成に課題があると考えられる。」という指摘の影響を受けたと考えられる。新学習指導要領の柱の一つともいえる「思考力、判断力、表現力等」の育成のための「問題を発見し、課題を設定して解決する」学習の推進に照らして考えると、電気に関する学習で回路設計が重視されたことは自然な流れであるといえる。したがって、これまでの学校現場の授業実践で多く見られた組み立て式のキット教材を製作するだけの実習では、この目標達成に迫ることが困難になるため、今後は電気回路を発想・考案させたり、シミュレーションを取り入れながら評価・改善したりといった学習活動が求められる^{32), 33)}。さらに、「(3) 学びに向かう力・人間性等」に関しては、「ア 生活や社会、環境とのかかわりを踏まえて、技術の概念を理解すること。」「イ 技術を改良し、適切な選択と管理・運用の在り方や、新たな発想に基づく改良と応用について考えること。」のように、創造性を育む取組みが明記されている。

一方、「D 情報の技術」では、電気回路に関連の深い目標として、「(3) ア 計測・制御システムの仕組みを理解し、安全・適切なプログラムの制作、動作の確認及びデバッグ等ができること」や「(3) イ 問題を見いだして課題を設定し、入出力されるデータの流れを元に計測・制御システムを構想して情報処理の手順を具体化するとともに、制作の過程や結果の評価、改善及び修正について考えること。」について述べられており、組込みシステムなどの電子回路に関連する内容に言及されている。

4.2. 理科

理科は小学校第3学年から学習する科目である。理科は「エネルギー」「粒子」「生命」「地球」といった自然科学の各領域を柱として、これらについて見通しをもって観察・実験を行うことなどを通して、自然の事物・現象を科学的に探究するために必要な資質・能力を育成することを目標としている。理科では、学年ごとに目標と内容が設定されており、電気に関連が深い領域は「エネルギー」となっている。

小学校学習指導要領解説理科編³⁴⁾では、第3学年の「電気の通り道」において、電気を通すつなぎ方や電気を通す物について取り扱うこととなっている。ここでは、乾電池と豆電球を用いて、電気を通すときと通さないときの条件を観察・実験を通して学ぶように示されており、「回路」という言葉を使用して考察することが述べられている。また、電気の性質を活用したものづくりとして、豆電球の動作を制御するスイッチや、導体と絶縁体を調べるテスターが例示されている。第4学年では、「電流の働き」において、「電流」という用語が登場し、その向きや大小について取り扱う。また、乾電池の数やつなぎ方を変えることで豆電球の明るさやモータの回り方が変わることも言及されている。発光ダイオード(LED)についてもこの学年から登場する。さらに、電気用図記号を扱い、回路図を抽象化して表すことも取り入れられている。ものづくりの例としては、乾電池などを用いた自動車や回転ブランコ、クレーンが紹介されている。第5学年では、「電流がつくる磁力」において、電流と磁気の関係について取り扱われるようになってきているが、電気回路に関する記述はみられない。第6学年では、「電気の利用」において、発電、蓄電、電気エネルギーの変換について取り扱われる。発電に関しては、手回し発電機や光電池の利用がある。また、蓄電に関してはコンデンサの利用が例示されている。エネルギーの変換では、電気は、光、音、熱、運動などに変換できることを取り扱うようになってきている。第6学年になると、身の回りにある電気を利用している道具の働きに注目することや、エネルギー資源の有効利用の観点などが取り入れられるようになり、電気の物理的な現象だけでなく、社会と電気との関わりに視野を広げていくようになってきている。また、新たにセンサを用いたプログラミングといった内容も導入されている。

中学校学習指導要領解説理科編³⁵⁾では、電気に関連する「エネルギー」領域は第1分野として取扱われており、第2学年で学習する項目になっている。「電流とその利用」では、電流と磁界に関する事物・現象を日常生活や社会と関連付けながら理解することや、電流と電圧、電流と磁界、静電気の規則性や関係性を見いだすことが求められている。取り扱う物理量が、小学校までは「電流」のみだったことに対して、中学校では「電気抵抗」「電圧」「電力」「電力量」「電子」という新たな概念が一度に数多く登場し、また、実験等で取り扱う機器も電流計、電圧計、電源装置などに拡張され、さらにオームの法則や合成抵抗、キルヒホッフの法則に通じる基礎概念（回路の分岐点における電流の取扱いや、並列接続時の電圧の取扱い）、

ジュールの法則など、広範に及んでいる。さらに、第3学年で学ぶ「化学変化とイオン」では、第2学年で学んだ内容を踏まえて、原子の成り立ちについて学習することとなっており、ダニエル電池を例に電気と化学の関連性についても取り扱うこととなっている。また、「科学技術と人間」では、電気エネルギーを水力、火力、原子力、太陽光などから発生させていることや、日常生活や社会ではエネルギーを適宜変換して利用していること、科学技術が防災、医療、農林水産業、工業、交通及び通信などに活用されていること、科学技術は有用である一方で負の側面も持ち合わせていることに気付かせる取り組みが記されている。

高等学校学習指導要領解説理科編³⁶⁾では、電気は主として科目「科学と人間生活」「物理基礎」「物理」において取り扱われる。「科学と人間生活」では電磁波の性質と利用、「物理基礎」では物質と電気抵抗、発電、送電及び電気の利用、エネルギー変換、「物理」では電荷と電界、電界と電位、電気容量、電気回路(交流回路含む)、電流による磁界、電流が磁界から受ける力、電磁誘導、電磁波、原子、電子と光など、中学校における学習を基礎に高度化した内容で構成されている。「科学と人間生活」は必修であり、「物理基礎」は選択必修、「物理」は選択の取扱いになっている。「物理」まで学習すれば、電磁気現象に関する科学概念をはじめ、抵抗、コイル、コンデンサの取扱いを数式モデルで表し知的に操作することを学ぶため、電気回路設計に関する基礎的な概念を一通り習得することができると考えられる。

なお、理科教育は自然科学に特化したものであり、STEM/STEAM教育におけるScienceの一領域とみなすことができる。我が国においては、Scienceを「科学＝理科」と解釈する傾向が強いが、STEM/STEAM教育がScienceを人工物科学も含めて捉えていることを考えると、「科学＝理科」のように完全対応させた解釈には問題がある。そのため、STEM/STEAM教育について議論する際は、理科と科学の混同に留意して用いる必要がある。

理科における電気は、電磁気に関する諸現象の規則性や関係性を探究し、量的に捉えることが主たるねらいになっているが、電磁気に関する概念形成を促進させる取り組みとして、随所に「ものづくり」が含まれている。このことは理科の内容全般に共通しており、学習指導要領の「指導計画の作成と内容の取扱い」には「ものづくりの推進」が明記されている。また、生活や社会との関わりへの着目を促す記述も多く、「科学技術と日常生活や社会との連携」を生徒に認識させ、理科学習と様々な職業との関係について触れることも記述されていることから、技術科の内容に近接・重複したものが多いため。この考え方はNGSSと共通しており、我が国の理科のなかにもエンジニアリングのものづくりに関連する内容を多分に含んでいることがうかがえる。

4.3. 社会科

社会科も理科と同様に小学校第3学年から学習する科目である。社会科は「地理的環境と人々の生活」「歴史と人々の生活」「現代社会の仕組みや働きと人々の生活」を主な枠組みとしている。これらについて課題を追及したり解決したりする活動を通して、広い視野に立ち、グローバル化する国際社会に主体的に生きる平和で民主的な国家及び社会の形成者に必要な公民としての資質・能力の基礎を育成することを目標としている。小学校では学年ごとに目標と内容が示されており、中学校では地理的分野、歴史的分野、公民的分野を構成単位にしている。

小学校学習指導要領解説社会編³⁷⁾においては、内容の枠組みに基づいた明確な単元分けはなされておらず、枠組みをまたぐ形で構成されているため、学年別に整理する。第3学年では、地域の安全を守る働きの一部として、生活インフラである電気を供給している機関が、日常的に施設・設備の点検、訓練、広報活動などに取り組んでいることについて記載されている。また、交通や生活の道具などが時代とともに変化してきたことに着目し、電化製品が普及する前後における生活の変化について学ぶことが示されている。第4学年では、電気を供給する事業が、安全で安定的に供給できるように進められていることや、地域の人々の健康や生活の維持と向上に役立っていることへの理解がねらいとされている。ここでは、発電所について発電方法別に述べられており、供給の仕組みや経路を詳しく調べたり、考えたことを表現したりすることが求められる。しかしこれは「人々の健康や生活環境を支える事業」の一般的な理解を目指すものであるため、飲料水、電気、ガスの中から選択して取り上げることとされている。第5学年では電気に関する直接的な記述はないが、我が国の産業の現状や社会の情報化と産業の関わりについて学ぶこととなっており、工業生産や情報通信技術について触れることとなっている。ここでは、工業製品の改良に着目することが示されており、自動車、テレビ、炊飯器、掃除機、電話機などの工業製品を取り上げることが例示されている。ま

た、製造の工程に用いられる産業用ロボットやオートメーションなど、工業生産に関わる人々の工夫や努力、優れた技術の存在について認識することが記されている。第6学年においても電気に関する直接的な記述はないが、この学年では我が国の歴史について取り扱うこととなっており、その一部に「科学の進展」についての記載があり、我が国の研究者が世界的に注目されたことについて触れられている。

中学校学習指導要領解説社会編³⁸⁾では、電気は「地理的分野」において取り扱われている。「日本の地域的特色と地域区分」に「資源・エネルギーと産業」の項目があり、ここでは、環境やエネルギーに関する課題として、我が国が風力発電や太陽光発電などの新しいエネルギーの開発に努力していることが例示されている。また、小学校と同様に、工業や情報通信網、交通機関の特徴が取り上げられている。その他の分野では電気に関する直接的な記述はないが、「歴史的分野」では第二次世界大戦後に科学技術の急速な発展を成し遂げたことで生活が向上し、国際社会における我が国の役割が大きくなってきたことが示されている。「公民的分野」では資源・エネルギー問題について述べられており、省資源、省エネルギー及びリサイクルなどが求められていることや、新しい資源・エネルギーの開発やその利用の必要性について取り扱われている。

以上のように、社会科における電気は、産業や生活を支えるエネルギー資源としての価値、電力の生産や輸送に関する施設設備の役割、これらに関わる職業人の存在など、社会生活において電気が果たしている役割という文脈上で取り扱われている。また、エネルギー資源の持続的な利用なども内容に含まれており、電気に関する技術を我々がどのように選択し活用していくかという問いを投げかける内容にもなっている。したがって、あるべき社会のためにどのような電気エネルギー利用の制度設計が必要かといった社会的視点からの設計科学の側面を持ち合わせており、電気回路設計に関する要求や欲求あるいは問題発見・課題解決の場面においては社会科の学びが生かされることが考えられる。

4.4. 家庭科（家庭科および技術・家庭科家庭分野）

家庭科は小学校の第5学年から学習する教科である。家庭科の内容は、「A 家族・家庭生活」「B 衣食住の生活」「C 消費生活・環境」で構成されている。また、家庭科では、これらに関しての実践的・体験的な活動を通して、生活をよりよくしようと工夫する資質・能力の育成が目指されている。

小学校学習指導要領解説家庭編³⁹⁾では、「B 衣食住の生活」において電気に関連する記載がある。ここでは、食生活の項目において「加熱調理器具の安全な取扱い」の一部に電力の使用と電気機器の取扱いにおける注意事項が述べられている。住生活では、「季節の変化に合わせた住まい方」に換気装置や冷暖房機器、人工照明の適切な取扱いについて示されている。また、「C 消費生活・環境」では、環境に配慮した物の使い方に関して、資源やエネルギー利用などの視点から電気の使い方を振り返り、改善することについて触れられている。

同様に、中学校学習指導要領解説技術・家庭編⁵⁾においても「B 衣食住の生活」の食生活の内容に、「調理用の熱源については、主に電気とガスの特徴を理解し、電気やガス用の器具を効率よく安全に取り扱うことができるようにする」とある。住生活については、「家庭内の事故の防ぎ方など家族の安全を考えた住空間の整え方」として、幼児や高齢者など様々な年齢で構成される家族が安全に生活するための住空間を考えるうえで、照明や空間の温度差といった事項に配慮することについて触れられている。

以上のように、家庭科では個人や家族のより良い生活の創造という、いわゆる消費者の文脈において電気の利用について述べられている。特に、生活環境を整えるための道具としての電気の利用や、電気の安全な利用、地球環境やコストに配慮した電気の効率的な利用に焦点化されている。

4.5. 総合的な学習の時間・総合的な探究の時間

総合的な学習の時間は、小学校第3学年以降に設定されている。総合的な学習の時間の目標は、「探究的な見方・考え方を働かせ、横断的・総合的な学習を行うことを通して、よりよく課題を解決し、自己の生き方を考えていくための資質・能力」を育成することとしている^{40), 41)}。学習指導要領には、「課題の設定」「情報の収集」「整理・分析」「まとめ・表現」のスパイラルアップによる一連の学習過程が図的に示されており、見方・考え方を説明する語句には「探求」ではなく「探究」を用いていることから、物事の本質を見極めることが第一義的に求められていることがうかがえる。また、「横断的・総合的な学習を行う」としてのことから、教科等の枠を超えた学習活動が期待されており、この意図においてはSTEM/STEAM教育に通じる概念を持ち合わせている。総合的な学習の時間には検定教科書がなく、学校独自の裁量で授業を進

めることになるため、多種多様な教育活動が展開されることになる。また、高等学校では「総合的な探究の時間」が設定されており、小学校から高等学校まで継続して設定されている学習になっている。

小学校では、情報に関する課題の一部として、新たにプログラミングを体験する旨が記されており、論理的思考力を身に付けるための学習活動が例示されている。ここではカプセルトイの販売機とジュースの自動販売機の比較が示されているが、これらはあくまでコンピュータが命令に基づき、命令の順序性などで挙動が変わることなどの、プログラミング（ソフトウェア）に着目することが記されている。その他、電気・水道・公共交通機関などのライフラインを維持するためのプログラムが例示されている。中学校では小学校と共通する内容として、「例えば、エネルギーや環境の問題に関心をもち、探究的な学習を行った場合、生徒は、各家庭の電気やガスなどのエネルギーについて調査し、身近なエネルギーと環境・災害に関する課題を探究していく。」とあり、エネルギー資源や環境問題が題材例として示されている。いずれにおいても、電気を学習対象とするような直接的な記述は見られないが、電気が産業や生活と密接に関わっていることから、電気を題材とした総合的な学習の時間の展開は十分に可能性があると考えられる。

高等学校学習指導要領解説総合的な探究の時間編⁴²⁾では、小・中学校における総合的な学習の時間をより高度化し自律的に行うとともに、他教科・科目における探究との違いを踏まえた学びにすることが求められている。また、高等学校では「自己の在り方生き方を考え」ていくことが一層重視されているなど、キャリア教育の側面が強調されている。高等学校でも電気に関する直接的な記述は見られないが、設定課題の例として、資源やエネルギーの問題が挙げられている。一方、高等学校の総合的な探究の時間は、文部科学省によるSTEAM教育の推進に絡めて言及される機会が多い。中教審高校改革WGでは、2019年に「総合的な探究の時間」や「理数探究」におけるSTEAM教育の位置づけについて言及されている⁴³⁾。

4.6. 小学校生活科・図画工作科

小学校では、第1・2学年に、後の理科や社会科に接続する教科として生活科が設定されている。小学校学習指導要領解説生活編⁴⁴⁾には、生活科の目標として自立し生活を豊かにしていくための資質・能力の育成が掲げられている。生活科では電気に関連する記述は見当たらず、電気が学習対象になることがない。しかしながら、地域には電車などの電気を利用した交通機関があることや、電話やファックスによって情報のやり取りを行うこと、世の中には様々な仕事があることなどについて学ぶことから、エネルギー利用や産業の一部として電気について暗黙的に触れる機会がある。また、「安全に生活」といった文脈からは、日常における電気の利用上の注意事項について取り上げられることも想定される。

また、小学校では第1学年から図画工作科が設定されているが、小学校学習指導要領解説図画工作編⁴⁵⁾にも電気を学習対象とした記述はない。学習指導要領には、工作に関連する資質・能力が中学校技術科の「A材料と加工の技術」につながるものであるとされているが、「Cエネルギー変換の技術」との関連性は示されていない。また、図画工作科では安全指導に関連して電動式の用具の使用に留意することが示されているが、機械操作上の留意点であり感電や漏電といった電気に関する記載は見当たらない。一部、モータの利用が提案されているが、「面白い動きをつくり出すため」という文脈上のものである。なお、工作という性格から、設計が取り組まれているように考えられるが、あくまで「構想」や「アイデアスケッチ」という表記にとどまっている。

4.7. 高等学校工業科

高等学校工業科の科目は、工業に関する専門学科に所属する生徒を主な対象としている。高等学校学習指導要領解説工業編⁶⁾においては、電気が産業の基幹的な役割を担っていることから、分野に応じて複数の科目が設定されている。電気電子工学に直結している科目として、「電気回路」「電気機器」「電力技術」「電子技術」「電子回路」「電子計測制御」「通信技術」「ハードウェア技術」等がある。また、実際の作業を通して電気について学ぶ科目として、「工業技術基礎」「課題研究」「実習」「製図」がある。その他、工業に関する科目は59科目にわたるが、「工業情報数理」「原動機」「電子機械」「生産技術」「自動車工学」「自動車整備」「船舶工学」など、多くの科目で電気が内容の一部に設定されている。工業科のいわゆる座学における電気の学びの多くが解析的であり、例えば「電気回路」における「内容を取り扱う際の配慮事項」には「計算方法の取扱いに当たっては、演習を重視し、実際に活用できるよう工夫して指導すること」とされており、設計・製作のための学習というより、既存の回路を解析し数値を求めていくことが中心になっている。

る。その他の科目についても、電気を用いた製品やシステムの仕組みの理解が中心であり、電気回路設計を取り扱うような記述は見当たらない。

また、工業科については、原則履修科目として「工業技術基礎」と「課題研究」が位置づけられており、このうち「課題研究」においては、「課題研究等の履修により、総合的な探究の時間の履修と同様の成果が期待できる場合においては、課題研究等の履修をもって総合的な探究の時間の履修の一部または全部に替えることができる」としていることから、多くの工業科では「課題研究」が「総合的な探究の時間」を代替している。したがって、工業科では「課題研究」に我が国のいう STEAM 教育の視点を取り入れることが期待されるが、そもそも「課題研究」のねらいが「工業科に属する科目の学習により身に付けてきた専門的な知識、技術などを基に、工業に関する課題を発見し、…（中略）…社会を支え産業の発展を担う職業人として必要な資質・能力を育成することを主眼」としていることから、従来から STEAM 教育的な学びを展開していたとも捉えることもできる。一方で、工業科における電気回路設計に関する問題として、基礎理論的な科目の学習では解析を行い、卒業年次に取り組みることが多い「課題研究」において突如として設計が求められるような教育課程の構造になっており、電気回路の設計理論を体系的に学ぶことなく実践に取り組みなければならないことが考えられる。

4.8. まとめ

ここまで、学習指導要領を基に学校教育における電気の取扱いについて取り上げた。表4～6に、それぞれ小学校、中学校、高等学校における学習指導要領に記載されている電気に関連する学習内容を示す。小学

表4 小学校学習指導要領解説における電気に関連する学習内容

		理科	社会	家庭	総合的な学習の時間	その他
小学校	1・2年					[生活科] ・生活における様々な人や仕事、施設との関わり ・安全な生活 [図画工作] ・特記なし
	3年	・電気を通すつなぎ方 ・電気を通す物 ・「回路」	・電気を生産する機関の安全管理 ・生活を豊かにした電化製品		・(例として)自動販売機や電気インフラのプログラミング ・(例として)資源やエネルギーの問題	[図画工作] ・特記なし
	4年	・「電流」 ・電流の大きさ ・電流の向き ・乾電池の数による電流の違い ・直列つなぎ、並列つなぎ ・回路図	・(選択)発電所、電気を生産・輸送する仕組み			
	5年	・電流と磁力の関係 ・電磁石	・工業製品の改良 ・情報通信技術の発展	・加熱調理器の安全な取扱い ・電気洗濯機、電気掃除機 ・環境に配慮した電気エネルギーの使い方		
	6年	・発電、蓄電 ・電気の変換 ・身の回りにある電気の利用	・科学の進展			

表5 中学校学習指導要領解説における電気に関連する学習内容

		技術	理科	社会	家庭	総合的な学習の時間	
中学校	1年	<ul style="list-style-type: none"> 電気の原理・法則 エネルギー変換や伝達に関わる基礎的な技術の仕組みと保守点検 電気機器や屋内配線等の製品やシステム 	/	[地理的分野] ・資源・エネルギーと産業 ・新エネルギー	・効率のよい電気の使い方 ・安全な住空間のための室内環境	・(例として)資源やエネルギーの問題	
	2年	<ul style="list-style-type: none"> 電気の安全な使用 電気回路を構想し設計を具体化 製作の過程や結果の評価、改善および修正 		・「電気抵抗」「電圧」「電力」「電力量」 ・オームの法則 ・ジュールの法則 ・電流と磁界の関係			[歴史的分野] ・急速な科学技術の発展
	3年			・原子、原子核、電子、化学電池 ・自然環境の保全と科学技術の利用			[公民的分野] ・資源・エネルギー問題 ・新エネルギー

表6 高等学校学習指導要領解説における電気に関連する学習内容

		工業	理科	総合的な探究の時間
高等学校	1年	[電気回路] ・電気回路の要素、直流回路、交流回路、電気計測、各種の波形 [電気機器] ・直流機器、交流機器、電気材料、パワーエレクトロニクス [電力技術] ・発電、送電と昇降、電力の制御、電力の利用、省エネルギー技術、電気に関する法規	[科学と人間生活] ・電磁波の性質と利用 [物理基礎] ・物質と電気抵抗 ・発電、送電および電気の利用、エネルギー変換 [物理] ・電荷と電界、電界と電位、電気容量、電気回路 ・電流による磁界、電流が磁界から受ける力、電磁誘導、電磁波 ・原子、電子と光	・(例として)資源やエネルギーの問題 ※工業科「課題研究」に代替可能 [課題研究] ・作品制作、製品開発 ・調査、研究、実験 ・産業現場等における実習 ・職業資格の取得
	2年	[電子技術] ・電子技術の概要、半導体と電子回路、通信システム、音響・映像機器、電子計測 [電子回路] ・電子回路素子、増幅回路、各種の電子回路 [電子計測技術] ・電子計測制御の概要、シーケンス制御、フィードバック制御、ネットワークを活用した計測制御		
	3年	[通信技術] ・有線通信、無線通信、画像通信、通信装置の入出力機器、通信に関する法規 [ハードウェア技術] ・コンピュータの電子回路、コンピュータの構成、コンピュータによる制御、マイクロコンピュータの組み込み技術		

校ではいずれにおいても、電気の科学的な探究、電気が社会に果たす役割、電気（製品）の適切な使用といった文脈で電気が取り扱われており、要求機能の実現のために電気回路を設計するという内容は確認できなかった。中学校では、小学校で学んだことを基礎に、理科・社会科・家庭科が展開されるが、いずれも小学校と同様の文脈で電気が登場している。唯一、技術科において回路の設計について触れられており、それに加え、これまでの製作中心の学習活動からの脱却が指摘されている。高等学校においては、主として理科と工業科で展開される教科・科目に限って整理したが、工業科の専門科目であっても電気回路設計に関する記述はみられず、電気回路の理解や解析の演習が中心になっていた。唯一、電気回路設計が行われると考えられる科目は「課題研究」であった。以上のように、学校教育全体を通してみると、電気の科学的な理解や

電気による製品やシステムの仕組みの理解などの解析（アナリシス）が圧倒的に多く、また、電気の利用者（ユーザ）としての視点から学習する内容が多く、いわゆる「知る」が中心的であり「創る」の中核である設計が取り扱われる箇所が極めて少ないことが分かった。

その一方で、「電気」というキーワードについて、文脈は異なるが複数の教科・科目が共有していることから、電気を主軸とした横断的な学びに広げることができることが示唆された。前章では、STEM/STEAM教育においては、エンジニアリングが各領域の連携軸として機能することを指摘した。エンジニアリングでは設計（エンジニアリングデザイン）思考が重視されることを踏まえると、例えば、生活を便利で豊かにするための機能に着目した電気回路設計や、エネルギー問題に取り組むための使用効率に着目した電気回路設計、既存の製品の安全性をさらに高める配慮をした電気回路設計など、各教科・科目を接続する取り組みの一つに電気回路設計を位置づけることが可能である。しかし、学習指導要領ではやや抽象的・概念的に記されているため、児童生徒が直接的にどのような電気の内容に触れているかを調べるには更なる調査が必要となる。

5. 電気の認識科学的側面に関する教育研究

電気に関する教科・科目における取扱いについて整理してきた。ここでは、電気を「知る」ことに関する、いわゆる「認識科学」としての教育研究の成果と課題について整理する。電気は科学教育の研究対象として長年取り扱われ、そこでは科学概念の形成に関心が寄せられてきた。また、技術教育でも原理・法則の理解や、仕組みの理解の対象として取扱われてきた。

5.1. 電気の認識科学的側面に関する科学教育研究

電気回路の原理・法則に関する電磁気現象の概念理解の指導は、電気が不可視であるという性質により、学校教育において困難とされている。児童生徒も困難さを感じており、平成25年度学習指導要領実施状況調査生徒質問紙調査結果（理科）によれば、「電流（静電気の性質、直列回路や並列回路、電流や電圧、電気の抵抗）など」の項目において、「よく分からなかった」と回答した生徒は45.9%であり、「きらいだった」と回答した生徒が55.5%という実態が明らかになっている⁴⁶⁾。これまで、科学教育では古くから児童生徒の電気回路に関する概念理解が研究対象とされており、概念理解の実態調査や指導方略に関する研究事例が多くある。科学概念に関する研究では、学習者の日常の生活体験から自生的に概念化されたものを、ルーバー（*rui*）や前概念（preconception）、素朴概念などと呼び、その性質や修正の可能性について関心が寄せられてきた。これらの研究では、問題の根底として児童生徒が誤って保持している概念（誤概念）を出発点にしていることが多い。電気に関しては、児童生徒の電流概念に関する研究が盛んに行われてきた。児童生徒が学校ではじめて学ぶ電磁諸量は電流であり、続いて直列つなぎや並列つなぎを学ぶ。電流概念に関する研究事例は多く、さまざまな評価方法が開発されている一方で、電圧概念や抵抗概念などについても研究事例があるが、電流概念に比べると少ない傾向にある。ここでは、中学校までに学習する電気回路概念の要素である、「接続」「抵抗」「電流」「電圧」を個別的に整理し、最後に回路全体を対象とした事例について整理した。

5.1.1. 接続に関する概念

接続概念は、部品のどの部分がどこに接続されているかの認識や、直列つなぎ・並列つなぎの判断などに関する概念である。回路構成や構成要素同士の関連性の把握に関する概念であるため、回路を理解するうえで最も基本的な概念といえる。また、この概念は配線設計を行う際に最も活用される概念でもある。接続概念に関する研究として、木村（2003）の研究がある。これは、図の理解について同値関係に着目し、並列つなぎの理解の程度を調査したものである。その結果、典型的な参照図とは異なる部品配置の図を示された場合に、判断が難しくなることを報告している⁴⁷⁾。麻柄（1998）は、大学生を対象に、送電線や身近な家電製品に適切な回路モデル（回路が輪になっているという考え方）を適用できているか、また、感電を事例に短絡（ショート）が起こる場面についても回路モデルを適用できているかを調査した。その結果、様々な製品や電気に関する事象に回路モデルを適応した様子が見られず、表面的なレベルである形態的側面の学習にとどまったことについて述べている⁴⁸⁾。このように、回路構成に対する認識や、接続形態の判定について

は、授業で取り扱うものと図的に同様のものでは、児童生徒はうまく認識できず、また応用が困難であることが分かった。

5.1.2. 抵抗に関する概念

抵抗概念は、抵抗が熱エネルギーに変換する素子であることをはじめ、直・並列接続における抵抗値の変動や、値が時間とともに変化しない受動部品であるという性質、接続の仕方によって値が変化すること、電流・電圧の変換器として機能することに関連する概念である。しかしながら科学教育研究では、抵抗を熱エネルギーへの変換器として扱った事例が多い。有川ら（1998）は、発熱体に対して中学生が持つメンタルモデルを分析しているが、発熱体の原理の理解と電気回路の基本の理解との関連性は薄いと結論付けている⁴⁹⁾。また、石井ら（2017）は電熱線の学習への粒子概念の導入を試みており、一定の効果があることを報告している⁵⁰⁾。なお、ここでの粒子のアナロジーは電流を模したものとなっており、電熱線の直・並列接続時の違いを電流の視点から捉えさせるものとなっている。その他、体験的な取り組みによって抵抗の性質を学習させるものとして、石川ら（2017）の報告がある。これは、自作の簡易テスターを用い、鉛筆手書きによる抵抗値の変化をLEDランプの明るさ（＝電流の大きさ）で捉えさせる授業を通して、直列・並列接続による抵抗値の変化を定性的ではあるが視覚的に理解させようとするものである⁵¹⁾。このように、抵抗の概念理解に関する研究は、抵抗そのものの物性的な側面に着目した研究が目立ち、回路設計に必要な実用的な側面からやや切り離されて議論される傾向にある。

5.1.3. 電流に関する概念

電流概念に関する研究は、理科を含む科学教育において関心の高いテーマの一つである。Osborneら（1988）は単純な直流回路（乾電池が1つ、豆電球が1つの回路）の電流の方向および量に関する考え方が、①電流は電池の正極から負極に向かって流れ、流れる量が一定であるという循環モデル（正答）、②電流は電池の正極から負極まで流れるが、その後は流れないという単極モデル（消滅モデル）、③電流は電池の正極および負極から負極に向かって流れるという衝突モデル、④電流は電池の正極から負極に向かって流れるが、電流の強さは負荷を通った後に減少するという減衰モデルの4パターンに類型化できるとした⁵²⁾。正答のモデルは、研究者によっては科学概念の適切な形成を示したものとして、「科学（的）モデル」と称することもある。この研究を起点に、電流概念をより詳細に明らかにしようとする研究や、誤概念の修正に取り組もうとする研究報告は多くあり、現在ではOsborneらが示した4類型だけでなく、電線の途中で減衰するモデルなど、複雑な様相であることが明らかになっている⁵³⁾。また、小・中学校で習得または形成された望ましい科学概念であっても、時間の経過によって、もともと保持していた誤概念に逆戻りし、その誤概念が大学生になっても保持される傾向にあるという調査結果から、電流・回路教育の混乱を解消していけるだけの教授法は未だに確立していないとする報告もある⁵⁴⁾。河本ら（1992）⁵⁵⁾、古屋ら（2001）⁵⁶⁾も、児童生徒のもつモデルの同定に取り組んでおり、古屋（2002）⁵⁷⁾、高垣ら（2004, 2005）^{58), 59)}は誤概念から科学概念への再構成を試みている。これら電流概念の修正を図った学習活動では、実験・観察を通して認知的葛藤を意図的に生じさせ、自己のもつモデルの修正を通して誤概念の解消を図ろうとする手法がとられている。なお、これらの実験・観察は教師が準備した物であり、児童生徒自身による設計の要素は含まれていない。

一方で、西川ら（1996, 1997）は、概念獲得および定着の程度が、文脈依存性によって左右されることを明らかにしている。ここでの文脈とは、負荷の種類や組合せの違いのことである。負荷の接続形態が同一であっても、負荷を豆電球からモータに置き換えるなどによって、回答を変える生徒が一定数おり、「考え方の強さ」と定着率が関連していることを報告している^{60), 61)}。このことは、設計学習を行う際、新たな部品を取り扱う場面において電流や電圧の基本的法則を上手く応用できない生徒がいる可能性を示しており、授業における留意点を示唆している。

5.1.4. 電圧に関する概念

電圧は中学校から学習する概念である。回路を計測制御や情報通信に用いる場合、物理化学的な情報を電圧の高低で表すことが多く、回路設計において電圧概念の理解は極めて重要になる。しかしながら、これまで述べた通り、電気の科学的側面の教育においては、児童生徒の電流概念の理解が重視される傾向にある。

電圧概念に関する研究として、後田ら（1995）は、直列回路における電圧の配分（分圧）や並列回路における電圧の保存に関する理解について、中学生が困難さを示していると報告している⁶²⁾。伊藤（2006）は、電圧測定の実体配線図作成テストを通して、電圧の理解度が低い原因が、電圧を電位の差として捉えられていないことにあると指摘し、水流モデルの実物模型を用いた授業実践の効果について報告している⁶³⁾。また、石井ら（2016）は小学校理科への電圧概念の導入を試み、豆電球の明るさの違いについての説明を、電圧概念を根拠に考えさせるというアプローチで授業実践し、小学生でも電圧概念を学習可能であることを示している⁶⁴⁾。

5.1.5. 電気回路概念を総括的に取り扱った研究

電気回路概念の獲得状況を個別的ではなく、総括的に評価するためのテストとして、Engelhardtら（2004）によって開発されたDIRECT（Determining and Interpreting Resistive Electric Circuits Concepts Test）がある⁶⁵⁾。これは、「回路概念（抵抗概念を含む）」、「電力（エネルギー）概念」、「電流概念」、「電圧（電位差）概念」の獲得状況について、多肢選択式で回答することによって把握するためのものであり、あらかじめ生徒が陥りやすい誤概念が選択肢に仕込まれている。Engelhardtらは、このテストを通して、「乾電池は定電流源であると捉えがちである」「解くときには電流に注目しがちである」「電圧や抵抗に、電流の特性をそのまま当てはめて考えようとする」と考察している。このことは、学校教育で電流概念のみを先行的に学習することによって、電流概念のみで電気回路全体を解釈可能であると児童生徒を勘違いさせている可能性を示唆している。電流に対して、抵抗や電圧は上位概念ではない。回路の解釈には、各概念を相互に連動させながら、ある接続の状態において適応可能な電流・抵抗・電圧の考え方をシステムティックに働かせることが求められる。これに対し、古屋（2000）は、生徒はオームの法則を使えるが回路のシステム全体を正しい概念で捉えられていないと指摘して、まずは知識の豊富化を行い、続いて再構造化を図ることが有効であると提案している⁶⁶⁾。さらに、佐々木（2015）は、電力の学習について、電流と電圧の概念を生徒が理解できていない現状から、「唐突に電力の学習が始まるため、言葉や公式の丸暗記になってしまっている。」と指摘している⁶⁷⁾。

5.2. 電気の認識科学的側面に関する技術教育研究

技術教育における電気は、主として技術科および高等学校工業科において展開されている。ここでは、技術教育研究における電気回路に関する教材や実践事例について整理し、その特徴を整理した。技術科「C エネルギー変換の技術」の「知識及び技能」に関する目標には、「原理・法則と、エネルギーの変換や伝達等に関わる基礎的な技術の仕組み及び保守点検の必要性について理解すること」が掲げられている⁵⁾。そこでまず、原理・法則の理解について、続いて仕組みの理解に関する教材開発事例や実践事例について整理した。

5.2.1. 電気技術の原理・法則に関する教育研究

電磁気現象の科学概念の理解とは異なり、電気技術の理解については実用的な側面に深く関連のある電気回路の理解が主となる。電気回路の振る舞いを捉えるには、体験的な実験・実習を通して確認することで理解が促進されると考えられている。Sokoloff（1999）は、直流回路を題材にスイッチ操作で負荷に加わる電圧や電流の変化をリアルタイム波形によって観測可能な教材を活用し、生徒の理解に効果があったことを報告している⁶⁸⁾。交流回路については浅野ら（1996）が、実験内容をPCに表示し、かつ実物の回路を構成し動作させた際の実測値をパソコンに取り込めるCAI（Computer Assisted Instruction）と実測の融合的な実験教材を開発し、シミュレーションと同時に解析を行うことで理解を促進できることを報告している⁶⁹⁾。このように、電気回路内の電磁気現象を何らかの形で可視化することは、電気の原理・法則の理解には極めて有効になっている。さらに、この可視化の手法を発展させたものとして、馬ら（2016,2017）は、AR（Augmented Reality）を用いて、回路の電流や電圧のアナロジーを立体表示することで回路の理解を支援するシステムを構築し、授業実践によってその有用性を検証した^{70), 71)}。その他、四元（1998）は工業高校生を対象に電磁気現象の基礎的な理解をねらい、電磁誘導、渦電流、放電現象、変成器の実験教材の活用を報告している⁷²⁾。富ヶ原（2015）も工業高校生を対象に、小学生に電気工作を体験させるための教材を生徒自身に製作させ、科学イベントにて小学生に製作指導を実施させるという取組みを通して、体験的な活動

が実践的技術の向上につながることを指摘した⁷³⁾。また、東(2017)は小・中学校向けに電磁石の応用機器の原理の理解を促すための演示用教材を提案している⁷⁴⁾。さらに、青井ら(2013)は、中学生を対象とした電波の理解について取り扱っており、スペクトラムアナライザとプリアンプによって電波を可視化し生徒が観測する活動を通して、電波利用の技術の基礎的な知識を身に付けることができたことを授業実践によって示している。ここでは、アンテナの向きなどによって観測値が変動することなど、実測とシミュレーションを組み合わせることによって効率よく電波を届ける条件を探索するという、実際の設計に近い学習活動も展開している⁷⁵⁾。

これらの研究は実用化されている電磁気現象や電気回路について、実物による実験・観察や、実物を作ることで学ぶ⁷⁶⁾という方略によって理解を促進させる試みと考えられ、これは近年の理科教育におけるものづくり活動⁷⁷⁾に通じるところがある。

5.2.2. 電気技術の仕組みに関する教育研究

電気技術の原理・法則の理解とは異なり、人工物としての電気製品の仕組みを学ぶための教材も多数報告されている。山本ら(2007)は中学生へのエネルギー環境教育を目的として、海洋温度差発電の仕組みを学ぶためのペルチェ素子を用いた教具の開発を行った⁷⁸⁾。同じく山本ら(2012)は、日本のエネルギー問題をテーマに、永久磁石とコイルが相対的に上下振動を起こすことで起電力を生じる自作の波力発電教具を用いた授業実践を行った。これらを通して、生徒は発電技術の基本的な知識を習得でき、エネルギーと生活との関わりについて意識を高めることができたとしている⁷⁹⁾。秋葉(2013)は、実際の作業と動作確認を通して屋内配線の仕組みを体験的に学ぶための教材を開発している⁸⁰⁾。片岡ら(2018)は、サーボモータの仕組みや原理、使用方法を学ぶための演示用教材を開発している⁸¹⁾。市川(2017)は、スギ材を電解液で浸し、化学電池としてエネルギー利用する教材を開発し、AMラジオキットを動作させたことを報告している⁸²⁾。これらのように、電気機器の仕組みの理解に着目した教材には、電気回路から電気エネルギー利用の概念理解まで、様々なねらいのもとで教材開発が行われている。さらに、電気技術のみに限定するのではなく、松原ら(2014)は、圧電素子を利用した床発電装置の開発を行い、「材料と加工に関する技術」や「情報に関する技術」との複合教材としての可能性を示している⁸³⁾。門田ら(2019)は3D-CADや3Dプリンタを活用した製作題材として、micro:bitを活用したラジコンカーの製作教材の開発を行っている⁸⁴⁾。永野ら(2021)は計測・制御の概念理解のために、多様なセンサ・アクチュエータを組み合わせた演示教材としてインタフェースボードとターゲットを開発している⁸⁵⁾。このように、近年ではロボットやコンピュータ制御のように、領域横断的な統合教材も報告されるようになってきている。さらに、中尾ら(2020)はLED点灯基板をあらかじめ配布し、その点灯制御のプログラムについて、ハードウェアとソフトウェアの両面から検討させる問題解決的学習活動を提案している⁸⁶⁾。このように、技術科で取り扱われる教材は多数あり、また、技術科内の領域横断的な教材研究が盛んに行われている。教材が多岐にわたることについては、魚住ら(2000)が、複数の題材を用いた指導過程が「自ら進んで工夫し創造する能力」や「自ら進んで実践してく態度」の向上に効果的であることを指摘しているように⁸⁷⁾、様々な教材に触れることが生徒の電気に関する知識だけでなくイノベーション力の向上にもつながると考えられている。

上記のように、電気技術の仕組みの理解をねらいとした教材に共通する特徴は、現実の技術を実物教材として取り扱っており、それらが社会においてどのような価値を持つものなのかという視点を含んでいる。また、エネルギーや環境に対する視点をもたせる取組みについては、仕組みの理解に加えて技術ガバナンスと技術イノベーションの両面を意識させる教材になっているといえる。

5.3. まとめ

電気回路設計の学習には、その準備として接続・電流・抵抗・電圧の各概念を適切に相互に働かせた回路理解の学習を実施しておくことが必要である。学校教育における電気回路に関する概念理解は理科を中心に取り扱われ、古くから取り組まれてきた内容であるが、未だに習得が困難な学習内容であることが分かった。また、特定の回路構成における個別の概念について取り扱われる事例が多く、電流概念に依存して回路解釈を行う傾向にあることも分かった。学校では、小学校第4学年から接続・電流を取扱い、中学校で抵抗・電圧へと段階的に学習が進められている。したがって、現行のカリキュラムに適応させて回路設計学習を構想するためには、初歩の段階では電流に着目させながら回路理解や設計に取り組ませることが適切と考え

られる。檉原ら(1997)は、大学生に対する中学校電気学習の定着度を測定し、大学生の理解の低さを、中学校の授業過程における概念構造の不形成に起因するとし、その背景として実験が少ないことや、概念と実体が結びつきにくいなどの、経験的な側面に対する問題を提起している⁸⁸⁾。したがって、電気回路を「創る」取り組みである設計を学校教育で行う場合は、理科との連携を視野に入れつつ、電気回路を実際に構築する取り組みを通して、電気回路を「知る」プロセスを適切に位置付けながら実施することが効果的であると考えられる。

技術教育研究においても、原理・法則や仕組みの理解を指向した研究を多数確認できた。これらは、社会に実装されている技術を学習の糸口として捉えているものが多く、実物の活用を重視して理解を促す取り組みが目立った。

6. 電気的设计科学的側面に関する教育研究

電気回路の設計学習は、主として技術科および高等学校工業科において展開されている。人工物設計、とりわけ電気機器のような製品の設計に関する教育上の知見は、技術教育研究の成果から見いだすことができると考えられる。ここではまず、技術教育研究における設計そのものに関する研究について整理し、次に、電気回路の設計・製作を主眼とした教材や実践事例について整理することとした。電気回路設計では、機能実現のために配線を含めて回路構成をどのようなものにするかを検討する場面と、その回路の特性を最適化するために回路定数をどのように設定するかを検討する場面に分けることができる。

6.1. 設計に関する技術教育研究

紅林(2015)は、設計の過程を取り入れたものづくりの学習は、学習者がアナリシスとシンセシスの思考を体験できる有用なものであるとし、設計学習には「要素の選択」と「要素の組み合わせ」の学習を事前に実施することの重要性を指摘するとともに、そこでは科学的な見方・考え方に基づく学習が必要であると述べている⁸⁹⁾。さらに紅林ら(2017)は、この科学的な思考が、要素の選択や組み合わせの場面でより確かなものを作り出すための知識を提供するとしており、設計における科学的な探究の意義について述べている。また、設計に必要な推論として、アブダクションが用いられていると述べている^{90), 91)}。

中学生の設計学習の指導に関して、尾崎(2011)は、設計学習の充実の視点として、問題解決的な学習のための学習ノートにおいて「生徒の思考の流れに合わせた記入枠」「思考・判断の経過を記録させる記入欄」を設定することや、使用目的や制約条件の明確化、比較・検討を深める支援、詳細決定の支援のように、設計の各段階における教員の支援の必要性について整理している⁹²⁾。教育実践的な成果として、西ヶ谷ら(2020)は、エンジニアの視点の獲得のために工学設計(エンジニアリングデザイン)の手法を取り入れた授業を行い、生徒はエンジニアの視点(目標・目的、アイデア、記録、新しい知識の獲得、機能、改善、改良)を重視したことを報告している。ここでは生徒が視点を獲得するために、製品プラン、製品コンセプト、設計仕様、設計情報を整理させる手続きを用いている⁹³⁾。

加工に関する学習に関して、竹野ら(1993)は、初期構想場面で生徒自身が「今までにそなえた造形感覚を働かせて構想する」ことを明らかにした⁹⁴⁾。また、構想を表現する際、知識の不十分さが作業計画や頭に描いた作品の具体化を妨げていることを指摘している。このことから、材料の加工といった形状を取り扱うものづくりについては、児童生徒がこれまでに触れた様々なものに関する経験値が設計に生かされることを示唆している。また、谷田ら(2001)は材料加工のものづくり学習において、設計の思考活動を構成する因子として「材料・加工法の検討」を抽出し、その内訳として、「材料の顕在的特徴(形状、大きさ等)に関する加工法の検討」「材料の性質(特徴や接合のしやすさ等)を考慮した加工法の検討」「強度についての検討」の3つのクラスターから構成されることを見いだした⁹⁵⁾。これらのことから、木材加工や金属加工、機械などの、材料を加工・変形させたりすることに関する設計は、ものに関する直接体験や視覚的情報に基づいて行われていることが推察される。その他、このような材料と加工に関する設計学習については、勝本ら(2018,2019)は概念設計の初期段階でスケッチに表しながら製作品を構想する力の学齢に伴う変化を調べ、また、図画工作科における段ボールによる設計・製作の取り組みを通して、小学生でも設計プロセスの学習が可能であることを報告している^{96), 97)}。経験や知識が未熟な小・中学生を対象に設計を行わせるには、前提となる知識や理解を考慮する必要がある。上記のような加工に関する研究においては、いずれにお

いても設計の前提となる学習の重要性を指摘しつつも、実際に設計（創造的活動）と解析（探究的活動）を相互に行き来しながら設計を精緻化していくような取り組みは見られなかった。一方で、設計成果物のコンピュータを活用した検証に関する研究として、松本ら（2014）は遺伝的アルゴリズムを用いて構造と強度の最適化を取り入れた授業実践を報告している⁹⁸⁾。このような、設計の結果を適切にフィードバックするプロセスを、シミュレータなどの使用によって適切に位置付けていくことは効果的であると考えられる。

他方、プログラム設計能力については、森山ら（1996）がプログラミングの思考過程自覚尺度を作成し、「要素分解・統合過程」の水準を高める学習指導方法の有効性を報告している⁹⁹⁾。さらに、作成した尺度等を用いて中学生を対象に追調査を行った結果、潜在的・深層的な思考過程の内省が、プログラミング言語の文法的知識や実行結果を予測する知的技能といった顕在化しやすい表層的要因に作用しており、設計能力に影響することを明らかにしている¹⁰⁰⁾。また、プログラムの修正・点検能力の向上は、エラー修正の学習経験の蓄積が必要であることや、問題理解の思考過程とプログラム設計における思考過程にはそれぞれに関係する因子が異なることを報告している。これらのことから、プログラム作成の実習では、設計者（制作者）の作業結果がすぐにコンピュータから返ってくるため、フィードバックを得やすく、それゆえエラーが設計者の学習における強化子になっていることを示唆している。

6.2. 電気回路の構成・配線設計に関する教育研究

概念理解が十分でない電気回路初学者の中学生を対象に、回路構成から検討させることは非常に困難である。藤川ら（2012）は、電気回路設計学習には市販のキット教材では限界があることについて中学校教員の立場から述べており、独自の教材利用を検討し、授業でスイッチの種類や数およびそれらの接続方法について生徒自身に選択・設計させる活動を取り入れ、使用目的に応じたオリジナルLEDランプの製作が可能な題材開発を報告している¹⁰¹⁾。また、中原ら（2016）も同様に、LEDを用いた照明機器の設計・製作を題材とした生徒による回路構成の創出に取り組んでいる。ここでは、独自開発によるブロック化した回路部品およびシミュレータを用いた授業を行い、基礎的な学習としてグループによる懐中電灯などの開発プロジェクトを先行的に実施し、その後に製作品の構想・設計へと展開した。その結果、生徒は回路の工夫点を各自で調査し、昇圧回路などを教員に要求するなど、主体的な学習態度が促されている¹⁰²⁾。このことから、既存の回路パターンの組み合わせによって目的とする回路を構成していくという展開が、中学生に適した電気回路設計学習のレベルであることが示唆される。またその実装の際、配線設計も同時に行っていくこととなる。尾崎（2018）は、定型的な回路から一部を変更することによる回路の挙動の変化を観察させ、そこから回路の仕組みを理解させる展開を考え、そのためのマイコンボードを開発した。これは、スイッチによるON/OFF制御から、モータの正転・逆転へと取り扱う内容を高度化させていくといった、単純なものから複雑な動作へと段階的に発展する設計課題を設定した。なお、ここでは実装までは実施しておらず、生徒のアイデア創出までを評価している¹⁰³⁾。横山（2019）は、電源、スイッチ、負荷の役割の組み合わせを重視した電気回路設計に取り組ませている。考案した回路は銅テープを用い、そこにはんだ付けすることで回路を製作させている。光、磁気、傾斜スイッチとトランジスタを組み合わせたものをスイッチとして用いており、さらに負荷にLED、モータ、ブザー・オルゴールを準備することで、機能の選択を生徒自身が行えるようにした¹⁰⁴⁾。これらの授業実践に共通することは、設計に取り組ませる前に、回路の各要素を一つ一つ取り上げ、それぞれの機能の理解を図っている点にある。そして、単独から複数、単純から複雑なものへとスモールステップで取り組ませている。また、配線設計に関して宮川（2007）は、中学生の実体配線図の作成能力について測定し、中学生の回路図から実体配線図を作成する際につまずきを調査した。並列つなぎにつまずきのポイントがあるとしている¹⁰⁵⁾。

6.3. 電気回路の最適化に関する教育研究

電気回路の定数設計は、電気回路の解析に基づいて実行されるため、高度な概念理解が求められる取り組みである。道法ら（1997）は、トランジスタの特性を実測し、動作解析シミュレーションを行ったのちに、生徒が個々のトランジスタに即した回路定数を設定する学習活動を可能にするためのシステムを開発した¹⁰⁶⁾。また、後に道法ら（2016）はLED点灯回路の動作点、電源電圧および保護抵抗値の設定について、同様に実測とシミュレーションを通した電気回路設計学習を展開している。これらの取り組みによって、設計に関する知識・理解の定着および情意面に良好な影響を与えたとしている¹⁰⁷⁾。類似のアプローチ

に、遠藤ら（2020）の報告がある。これは、照度センサ付き回路を題材に、回路素子の電気的特性を自動計測し、シミュレーションによって最適抵抗値を求めることができる装置の開発について述べたものである。ここでは、回路定数を取り扱った授業実践によって、電気回路設計における要素の選択・組合せのうち、要素の選択に関する設計能力への教育効果が認められたことを示した¹⁰⁸⁾。また、遠藤ら（2020）は、回路定数に着目した電気回路設計学習の題材として、待機電力ゼロ光センサ回路を提案している。受光センサとしてLEDを活用し、センサ用と照射用の2つのLEDを2色LEDのワンパッケージで構成し、抵抗値設定のみでセンサ感度を変更できる回路を考案している¹⁰⁹⁾。嶋ら（2019）によるジュールシーフ回路の特性測定によるLED点灯回路の教材としての有用性の再検討などの¹¹⁰⁾、生徒の実態に即した教材の改良や、回路の電気的特性を詳細に分析する取り組みも見られる。また、嶋ら（2020）は、LED懐中電灯の光について、明るさ、LED部品数、色、照射範囲、寿命といった観点からトレードオフさせ、回路定数を設定させる電気回路設計学習を中学校にて展開した。定電流回路を用いることで、LEDの個体差の影響を生じさせないよう教育的な配慮をした一方で、回路が複雑化するという問題点について報告している¹¹¹⁾。これらは半導体固有のばらつきに対応するための最適化を工学的アプローチによって生徒に取り組みさせたものであるが、その他の例として、LEDやメロディの再生時間をコンデンサの放電特性を利用して制御するために、生徒に静電容量を設定させる授業を提案した鶴本（2000）の報告もある¹¹²⁾。回路定数の設計を主として取り扱う教材においては、1つのパターンの回路構成を取り扱うことになりがちであり、必然的に機能の制約が生じる。そのため、目的が最適化のみになる傾向がある。一方で、電気回路設計の学習方略について、改正（2018）は、電気は元来不可視であることから、事象の因果関係の予測が困難であることを述べている。そこで、図的な表現として負荷線と動作点をグラフ上に示し、数学的に因果関係を捉えさせながら電気回路の理解と設計力とを結びつけることを提案している¹¹³⁾。

6.4. まとめ

以上、電気回路設計に関する教育研究について整理したが、設計・製作については、市販のキット教材のように製作そのもの（単純な製作）に焦点化したものから、創造的な設計に取り組みせるものまで広範囲に及んでいた。回路の構成そのものを考案させる試みから、既存の回路構成において適切な回路定数を工学的アプローチで設計させるものまで確認できた。技術教育における設計・製作は、問題発見が出発点であり、そこから要求される機能の設定（課題設定）が行われる。電気回路設計のプロセスでは、要求機能が設定された次のフェーズは、機能に合致する回路を構成することであり、その最適化のフェーズとして回路定数設計が実行される。電気回路の設計には「知る」と「創る」を往還させながら展開することが求められるが、先行研究では、「知る」のプロセスが欠落していたり、これらの「創る」に係る部分的な設計学習になっていたりとおり、一連の設計の展開を学校現場で行うには高度かつ困難なものともみられた。その原因は、解析と総合に取り組みせつつ両者を結び付けながら同時に行なうという高度な指導方略が要求されることや、そもそも電気回路設計の知識を下支えする科学概念の理解が困難なこと、電気回路のエンジニアリングデザインのための初歩的・基本的な知識構造や思考法などが明らかにされていないことにある。

7. 研究課題の整理

学校教育における電気回路の取扱いについて、その位置づけや関連する研究事例について整理してきた。ここでは、電気回路設計の学習に関する問題の所在を整理するとともに、その解決手法として設計学を援用することについて提案し、研究課題を展望する。

7.1. 問題の所在

先行研究の調査を通して明らかになった問題は、次の通りである。

問題1：生徒の学習経験に基づく、STEM/STEAM教育を指向した設計課題が検討されていない。

問題2：電気回路に関する科学概念の理解は困難とされている。

問題3：電気回路設計の思考に関する認知構造はこれまで検討されていない。

問題4：問題3ゆえに、電気回路設計の学習に適した指導方略が検討されていない。

電気回路の設計学習は、創造的・探求的なプロセス（シンセシス）を主軸としながらも、場面に応じて解

析的・探究的なプロセス（アナリシス）を必要とする。そのため、適切な設計課題を設定するとともに、電気回路設計を主として取り扱う技術科や工業科において、生徒の発達段階に適した電気回路の思考モデルを構築し、実証および成果を普及することが望まれる。

7.2. 研究のアプローチ（設計学の援用）

電気回路設計モデルの構築には、設計そのものを対象とした設計学的なアプローチが効果的であると考えられる。設計学の方法論には、設計の過程を取り扱う動的研究方法や、設計の結果に着目し過程は考慮しない静的研究方法があり、それぞれにモデル的に議論するものと分析的に取り扱うものに分けられる（表7）¹¹⁴⁾。本研究が目指すところは、中学生や高校生が電気回路設計学習を行うために有用な思考の枠組み（モデル）を得ることであり、中高生に適用可能な、動的かつモデル的な設計学の構築をねらいとしている。すなわち「設計知識の操作のモデル」を構築するためのアプローチを検討し実証するところにある。そのため、モデルの取扱いや分析的な設計学の知見を検討する必要がある。モデル的な設計学の方法論の一つに、静的な方法論として帰納的方法があり、分析的な設計学の方法論の一つに、動的な方法である実験設計学がある。

表7 設計学の方法論¹¹⁴⁾

	モデル的	分析的
動的な方法	設計知識の操作モデル	実験設計学
静的な方法	帰納的方法(一般設計学)	設計における入出力分析

7.2.1. 設計学の静的・モデル的方法論

設計学の静的・モデル的な方法論である帰納法的方法の一つに、一般設計学がある。これは、吉川（1979）が提唱した総合・統合（シンセシス）に関する一般的方法ないし原理を解明することに目標をおいた、集合論的モデルによる設計方法である¹¹⁵⁾。これは、実体（実体概念）、実体の分類（抽象概念）、ものの性質を表す属性（属性概念）、機能的価値（機能概念）などを集合で表現し、設計を「抽象概念空間上に示された領域に対応する属性空間上の領域を指定すること」と定義している。一般設計学の特徴は、設計者は理想的知識（実体の全てを知っているという“supermanの知識”）を持ち合わせている前提で説かれている点にあり、設計者の知識が豊かであることから出発している。したがって、電気回路設計を行う際には、その準備として電気に関する科学的な性質を学ぶことや、電気機器の仕組みや原理を理解しておくことが求められるといえる。また、設計プロセスとは機能概念で表現された要求を属性概念で言い換えることであるとし、設計は両集合間の写像であるとしている。また、設計の実務的な手順について吉川は、「人工物の設計は、要求（それは機能や性能という形で表現されている）を実現する人工物の動作原理、構造や形状、あるいは挙動を決定していく過程であり、概念設計、基本設計、詳細設計という手順を踏んでいく。」と説明している。この設計の一連の流れについて、同様の捉えとして、畑村（2000）は、設計思考の展開として、要求機能を分析・分解して機能を得て、それを機構へと写像し、さらに機構を展開・総合することで構造を得る一連の流れのことであるとした¹¹⁶⁾。これらを電気回路設計に照らして再構成すると、図1のような表現が考えられる。

図1に示す設計の初期段階は、ユーザーが抱えている問題や解決すべき課題を要求概念として整理し、ここから機能を書き起こしていくことである。ここでは、ユーザーのニーズを適切に定義し、課題を明確化することが重要になる。Suh（2004）は「設計とは“何を達成したいのか”（what we want to achieve）と“どのように達成したいのか”（how we want to achieve it）の相互作用」と表現し、顧客ニーズから要求機能への分析の段階において、設計者は適切な質問を顧客に行うことで要求を理解するよう努力すべきと指摘している¹¹⁷⁾。電気回路設計として捉えなおすと、問題の解決のためにどのような機能を電気回路にもたせる必要があるかを考案すること、すなわち問題から課題を設定すること（要求概念を機能概念へ分析・分解すること）となる。課題設定が完了することで、いわゆる仕様書が完成する。なお、Pahlら（2015）は仕様書を解析することによって、求められる機能と本質的な制約を同定することの重要性を述べている¹¹⁸⁾。ここから機能概念から属性概念への写像の段階となるが、電気回路設計は大きく「回路設計」と「配線設

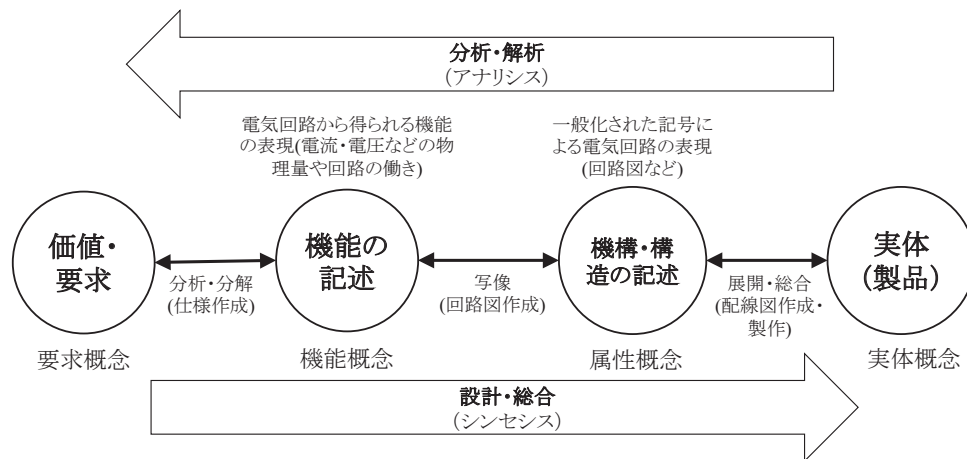


図1 電気回路設計に係る諸概念の相互関係

計」に分けられる。ここでの回路設計とは、回路の機能や物理的特性の要求を満たすために、回路の構成や部品のパラメータを決めて回路図を決定していく作業であり、配線設計とは完成した回路図に基づき環境（多くの場合は筐体）に適合するように部品のレイアウトや配線ルートを決めていく作業である。したがって、配線設計は回路設計の後工程となる。いずれにおいても、機能概念に合致するような最適解を見つけることが求められる。畑村ら（1988）はエレクトロニクスの回路設計の基本視点として、①電流と電圧（電力）、②回路と回路素子（全体構成）、③回路定数（定量値）、④定格（強度）、⑤インタフェース、⑥状態変化・物理量、⑦動特性を定めており、これらを俯瞰しながら設計を進めることの重要性を指摘している¹¹⁹⁾。このことは、設計や創造の思考には常に解析的な思考も同時に展開すべきであることを意味しており、考案したことについて直ちに科学的な知識や概念を活用してフィードバックを行い検証することが設計者に求められるということである。すなわち、設計科学には認識科学が必要であるという考え方と同じである。技術教育でも同様のプロセスを体験しながら設計について学ばせることが大切であると考えられるが、理科学習の電気の分野でつまずく生徒は多い。そのため、機能概念から属性概念への写像の段階における指導では、基礎・基本に立ち戻って回路を解析する取組みや、シミュレーションを適切に活用することが有効になると考えられる。また、設計解を見つける方法として Pahl らは、既存システムを分析したり、類似のものに置き換えて取り扱ったりすることを提案している¹¹⁸⁾。属性概念から実体概念への展開は、製作方法・手順を検討する知的技能が求められ、製作段階では運動技能としての製作スキルが求められる。このように、設計学の静的・モデル的方法論では、設計の様々な場面をスタティックに思考実験から検討し、公理的なモデル構築を行うことによって設計方法を規定しようとするものである。このモデルは、実際の設計課題を通して得られたデータによって修正されることがあるため¹²⁰⁾、静的・分析的な研究の成果を援用しながらモデルを構築していくこととなる。

7.2.2. 設計学の分析的・動的方法論

実験設計学とは、設計を実験的に観察し、それから設計に関する何らかの法則を発見しようというものである。設計に関する知識・技能を一般化するために、これまで設計の思考過程に関する様々な研究がなされてきた。これらは、設計者の思考を質的に検証するために、プロトコル分析が主として用いられてきた。プロトコル分析とは、被験者に自己の知的営みを発話させ、得られた言語データや行動・生理データ（プロトコル）に基づき検証する分析方法のことである¹²¹⁾。設計時における思考過程を分析した例として、武田ら（1992）は、機械設計（自動販売機、体重計、首振り機構、飛び上がるおもちゃ）の設計課題を通して、設計者の発話プロトコルと作図過程を、心理学的視点と設計学的視点から分析し、その有用性を指摘している¹²²⁾。また、武田ら（1994）は、設計過程に用いられる概念を7つに整理し、その出現度合いや関連度合いを調査している。また、コネクショニスト的アプローチによって概念ネットワークの構築まで試みている¹²³⁾。田中ら（2016）は、プロダクトサービスシステム（PSS）の業務形態の設計支援のための研究として、PSSとDesign for Xの視点の遷移をプロトコル分析し、設計過程の特徴を調査している¹²⁴⁾。西村

ら(1994)は、やや静的ではあるが、建築設計を題材に、設計者がイメージする立ち位置や視点についてヒアリングを通して調査し、得られた視点を分類・計量し、時系列的に整理し、特徴の把握を試みている¹²⁵⁾。大坂ら(1988)は、電力系統運用計画の立案における専門家の知識の分析と一般化により知識モデルを立て、操作記録と発話データに基づくプロトコル分析を通して得られたパターンからエキスパートシステムをプログラミングで構築し、モデルを評価した¹²⁶⁾。これらのように、設計は設計者の内的な知的活動であることから、分析するには何らかの思考の外化手段が必要となり、そこでプロトコル分析の利用が有益とみなされている。

7.3. 研究課題の整理

指摘した問題から図1の相互関係に照らして電気回路設計学習に関する課題を整理すると、次の5点に集約される。研究課題の構想図を図2に示す。

7.3.1. 研究課題1：設計課題を規定するための教科書上の電気的位置づけに関する精査

設計の初期における概念操作の対象は要求概念と機能概念であり、その学習の過程には問題発見と課題設定に関する指導が適切に位置づかなければならない。その際、文脈(どのような欲求や要求を対象にするか)を規定できなければ、設計課題を統制することが困難になる。しかしながら、生徒がどのように学校教育を通して電気について知識・経験を蓄積してきたか、電気製品の機能概念をどのように形成しているかについては、抽象表現の多い学習指導要領の記述のみでは判断できず、それゆえ電気回路設計学習の前提条件が不明である。そこで、具体的内容が記されている教科書の調査を通して、生徒の発達段階に応じた電気に関する領域横断的な位置づけを同定し、電気回路の設計課題の規定に役立つ資料を得る。

7.3.2. 研究課題2：回路設計に関する電気回路の概念理解と設計力との関連性の検討

回路構成や回路定数を設定する回路設計は、機能概念から属性概念に写像する段階に位置づく。ここでは、科学概念の理解に関する解析(アナリシス)と、回路図を検討する総合(シンセシス)のループを繰り返していくことになる。このループにおいて、どのような知的技能が影響しているかを明らかにできれば、生徒が取り扱う設計課題の程度(レベル)を規定することができる。解析と総合に関する能力の関連性を評価するには、電気回路の概念理解の程度や、設計力の測定を定量的に行う必要がある。したがって、電気回路の概念理解と設計力との関連性を調査し、設計に求められる重要な概念を抽出する。調査の対象としては、一定の電気回路に関する学習を終えた生徒を対象に、DIRECT⁶⁵⁾のような総括的な概念テストと、同等のレベルの設計テストを開発・実施して関連性を検討する。

7.3.3. 研究課題3：配線設計に関する電気回路の概念理解と設計力との関連性の検討

属性概念から実体概念への展開は電気回路設計においては配線設計が該当し、その作業には接続概念が関連していると考えられる。接続概念は小学校理科から取り扱うことになっているため、配線設計は電流や電圧を量的に取り扱う前の段階から取り組める可能性がある。また、接続の概念を適切に理解していれば電源と負荷の関係性を把握することができるため、単純な機能の電気回路設計に取り組みせられることが期待できる。設計課題のレベルや設計学習に適した学年の設定を行うために、小学校の理科履修済の生徒を対象に接続に関する概念理解と配線設計の能力との関連性を調査する。

7.3.4. 研究課題4：設計者の思考過程の特徴の抽出と設計の思考モデルの構築

アナリシスとシンセシスを意図的に関連付けた設計学習を計画するには、概念の操作の仕方についても測定し、一種の問題解決スキーマ¹²⁷⁾とも呼べる設計の思考モデルを構築してそれを援用することが効果的であると考えられる。モデルの構築には、設計者の概念操作の状況を把握する必要があり、動的な特徴抽出を行う必要がある。設計力がある者は、実際の設計時に、どのような情報を有用なものとして活用しているのか、そこに法則性はあるのかなどを、プロトコル分析等によって明らかにする。

7.3.5. 研究課題5：電気回路設計学習に適した教材と教育プログラムの開発と教育効果の実証

概念理解や仕組みの理解には、実物を用いることが効果的であることが多くの研究成果から明らかになっ

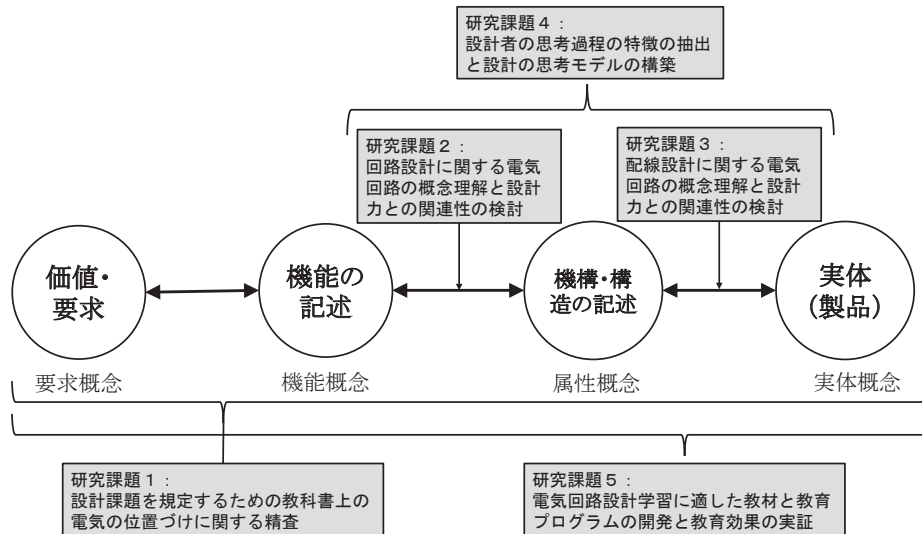


図2 研究課題の構想図

ている。電気回路概念の理解が不十分な初学者にとっては、要求概念から実体概念までの一連の設計過程を学習させるには総合（シンセシス）と解析（アナリシス）を適宜往還する取組みが有効であると考えられる。そのためには、個別的な回路製作・計測を繰り返すことができる、手早く回路を構築するようなハンズオン教材が求められるため、その開発が必要となる。さらに、その教材を適切に活用するための指導方略を検討する必要がある。一般に誤概念は修正されにくいと考えられているが、学習方略として麻柄（1990）は、誤った知識の組み換えには誤概念を適切に位置づけた教示が有効であることを明らかにしている¹²⁸⁾。のちに麻柄は、正しい知識を得てもそれを正しく利用できるようにしなければ孤立した知識を構成してしまい、概念が修正されにくくなることも指摘している¹²⁹⁾。そのため、概念の再構築に取り組みつつ設計学習を展開するための教育プログラムを開発し、電気回路設計の授業実践を通してモデルや開発教材の有用性を検証・評価する。

7.4. まとめ

以上、本研究では中学校技術科および高等学校工業科に焦点化して技術教育における電気回路設計の学習に関する研究課題を展望した。その結果、設計に係る概念体系の各プロセスにおける生徒の知的概念操作の様相を解明しモデルを構築することが、電気回路設計の学習指導に役立てられることを指摘した。また、そのモデルを活用するための教材開発や授業実践の必要性についても明らかになった。今後は、これらの課題に体系的に対処していく研究を継続的に取り組んでいく必要がある。

本研究は JSPS 科研費 JP19K14206・JP18K02981・JP21K02903 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 内閣府（2016），第5期科学技術基本計画，<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5honbun.pdf>，（最終アクセス 2021.9.1）
- 2) 文部科学省（2018），Society 5.0 に向けた人材育成～社会が変わる、学びが変わる～，https://www.mext.go.jp/component/a_menu/other/detail/_icsFiles/fieldfile/2018/06/06/1405844_002.pdf，（最終アクセス 2021.9.1）
- 3) 経済産業省（2018），「未来の教室」と EdTech 研究会，https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/mirai_kyoshitsu/index.html，（最終アクセス 2021.9.1）
- 4) 日本学術会議新しい学術体系委員会（2003），新しい学術の体系—社会のための学術と文理の融合—，<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/18pdf/1829.pdf>，（最終アクセス 2021.9.1）
- 5) 文部科学省（2018），中学校学習指導要領（平成29年告示）解説技術・家庭編，開隆堂出版，167p
- 6) 文部科学省（2019），高等学校学習指導要領（平成30年告示）解説工業編，実教出版，495p

- 7) 文部省 (1957), 科学技術教育の振興方策について (答申), https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chuuou/toushin/571101.htm, (最終アクセス 2021.9.1)
- 8) American Association for the Advancement of Science(1989), SCIENCE FOR ALL AMERICANS, http://www.project2061.org/publications/sfaa/SFAA_Japanese.pdf, (最終アクセス 2021.9.1)
- 9) National Research Council(1996), NATIONAL SCIENCE EDUCATION STANDARDS, NATIONAL ACADEMY PRESS, 272p
- 10) National Council of Teachers of Mathematics(2000), Principles and Standards for SCHOOL MATHEMATICS, <https://www.nctm.org/standards/>, (最終アクセス 2021.9.1), 402p
- 11) International Technology Education Association(2000), Standards for Technological Literacy : Content for the Study of Technology, <https://www.iteea.org/File.aspx?id=42513&v=2a53e184>, (最終アクセス 2021.9.1), 248p
- 12) 胸組虎胤 (2019), STEM 教育と STEAM 教育—歴史, 定義, 学問分野統合—, 鳴門教育大学研究紀要, 第 34 巻, pp.58-72
- 13) Bybee, R. (2010), What Is STEM Education?, Science, Vol.329, Issue.5995, p.996
- 14) 山崎貞登, 大森康正, 磯部征尊 (2016), イノベーション型学習能力を育む STEM / STEAM 教育からの小学校国語・社会・理科教科書の教材解釈, 上越教育大学研究紀要, 第 36 巻, 第 1 号, pp.203-215
- 15) 松原憲治, 高阪将人 (2017), 資質・能力の育成を重視する教科横断的な学習としての STEM 教育と問い, 科学教育研究, Vol.41, No.2, pp.150-160
- 16) 齊藤智樹 (2020), STEM/STEAM 教育の構成概念, 日本教育工学会論文誌, 44 (3), pp.281-296
- 17) Vasquez,J., C.Sneider and M.Comer,(2013), STEM lesson essentials, grades 3-8 : integrating science, technology, engineering, and mathematics, Heinemann, 178p
- 18) Yakman,G.(2008), STEAM Education : an overview of creating a model of integrative education, Pupils Attitude Toward Technology, 2008 Annual Proceedings, pp.1-28
- 19) 辻合華子, 長谷川春生 (2020), STEAM 教育における "A" の概念について, 科学教育研究, Vol.44, No.2, pp.94-103
- 20) Maeda,J. (2013), STEM+Art=STEAM, The STEAM Journal, 1, 1, pp.1-3
- 21) 山崎貞登 (2020), STEM,STEAM, エンジニアリング教育概念の比較教育からの論点整理, 日本産業技術教育学会誌, 第 62 巻, 第 3 号, pp.197-207
- 22) 文部科学省 (2019), 新しい時代の初等中等教育の在り方について (諮問), https://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/_icsFiles/afiedfile/2019/04/18/1415875_1_1.pdf, (最終アクセス 2021.9.1)
- 23) 教育再生実行会議 (2019), 施術の進展に応じた教育の革新、新時代に対応した高等学校改革について (第十一次提言), https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kyouikusaiei/pdf/dai11_teigen_1.pdf, (最終アクセス 2021.9.1)
- 24) 内閣府 (2019), 統合イノベーション戦略 2019 (2019 年 6 月 21 日閣議決定), https://www8.cao.go.jp/cstp/togo2019_honbun.pdf, (最終アクセス 2021.9.1)
- 25) 松原憲治 (2019), 資質・能力の育成を目指す教科横断的な学習としての STEM / STEAM 教育と国際的な動向, https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyo3/004/siryu/_icsFiles/afiedfile/2019/09/19/1420968_6_2.pdf, (最終アクセス 2021.9.1)
- 26) 内閣府 (2020), 統合イノベーション戦略 2020 (2020 年 7 月 17 日閣議決定), https://www8.cao.go.jp/cstp/togo2020_honbun.pdf, (最終アクセス 2021.9.1)
- 27) 文部科学省 (2021), 学習指導要領の趣旨の実現に向けた個別最適な学びと協働的な学びの一体的な充実に関する参考資料, https://www.mext.go.jp/content/210330-mxt_kyoiku01-000013731_09.pdf, (最終アクセス 2021.9.1)
- 28) Next Generation Science Standards Lead States (NGSS Lead States)(2013), Next Generation Science Standards : For States, By States, NSTA press, 532p
- 29) 白敷哲久 (2017), 児童の科学的概念の構造と構成—ヴィゴツキー理論の理科教育への援用, 福村出

版, 224p

- 30) International Technology and Engineering Educators Association(2020), Standards for Technological and Engineering Literacy – The Role of Technology and Engineering in STEM Education, <http://www.iteea.org/STEL.aspx>, (最終アクセス 2021.9.1)
- 31) 国立教育政策研究所 (2019), 平成 25 年度中学校学習指導要領実施状況調査 教科等別分析と改善点 (中学校 技術・家庭 (技術分野)), https://www.nier.go.jp/kaihatsu/shido_h25/02h25/10h25bunseki_gizyutsu.pdf, (最終アクセス 2021.9.1)
- 32) 古川稔 (2017), 平成 29 年版 新中学校学習指導要領の展開 技術・家庭 技術分野編, 明治図書出版, 154p
- 33) 古川稔, 杉山久仁子 (2017), 平成 29 年改訂 中学校教育課程実践講座 技術・家庭, ぎょうせい, 244p
- 34) 文部科学省 (2018), 小学校学習指導要領 (平成 29 年告示) 解説理科編, 東洋館出版社, 167p
- 35) 文部科学省 (2018), 中学校学習指導要領 (平成 29 年告示) 解説理科編, 学校図書, 183p
- 36) 文部科学省 (2019), 高等学校学習指導要領 (平成 30 年告示) 解説理科編, 実教出版, 177p
- 37) 文部科学省 (2018), 小学校学習指導要領 (平成 29 年告示) 解説社会編, 日本文教出版, 217p
- 38) 文部科学省 (2018), 中学校学習指導要領 (平成 29 年告示) 解説社会編, 東洋館出版社, 237p
- 39) 文部科学省 (2018), 小学校学習指導要領 (平成 29 年告示) 解説家庭編, 東洋館出版社, 133p
- 40) 文部科学省 (2018), 小学校学習指導要領 (平成 29 年告示) 解説総合的な学習の時間編, 東洋館出版社, 187p
- 41) 文部科学省 (2018), 中学校学習指導要領 (平成 29 年告示) 解説総合的な学習の時間編, 東山書房, 165p
- 42) 文部科学省 (2019), 高等学校学習指導要領 (平成 30 年告示) 解説総合的な探究の時間編, 学校図書, 185p
- 43) 文部科学省 (2019), 新学習指導要領の趣旨の実現と STEAM 教育について—「総合的な探究の時間」と「理数探究」を中心に—, https://www.mext.go.jp/content/1421972_2.pdf, (最終アクセス 2021.9.1)
- 44) 文部科学省 (2018), 小学校学習指導要領 (平成 29 年告示) 解説生活編, 東洋館出版社, 139p
- 45) 文部科学省 (2018), 小学校学習指導要領 (平成 29 年告示) 解説図画工作編, 日本文教出版, 181p
- 46) 国立教育政策研究所 (2019), 平成 25 年度中学校学習指導要領実施状況調査 生徒質問紙調査結果 (理科), https://www.nier.go.jp/kaihatsu/shido_h25/02h25/04h25seito_rika.pdf, (最終アクセス 2021.9.1), p.81
- 47) 木村和夫, 森川鐵朗 (2003), 図の同値関係を用いる「理解の程度」の測定—乾電池の「並列つなぎ」を例にとって—, 科学教育研究, Vol.27, No.5, pp.311-317
- 48) 麻柄啓一 (1998), 中学生と大学生における誤った回路認識, 科学教育研究, Vo.22, No.4, pp.215-222
- 49) 有川誠, 丸野俊一 (1998), 発熱体に対して中学生が持つメンタルモデルの分析, 教育心理学研究, 第 46 号, 第 1 号, pp.58-67
- 50) 石井俊行, 八朝陸 (2017), 電熱線の発熱の学習に粒子概念を導入することの効果—小学生に発熱の仕組みを理解させるために—, 科学教育研究, Vol.41, No.4, pp.438-448
- 51) 石川一樹, 鎌田正裕 (2017), 手描き抵抗と簡易テスターを用いた中学校理科授業の開発, 科学教育研究, Vol.41, No.2, pp.221-229
- 52) Osborne,R. and P.Freyberg(1988), 子ども達はいかに科学理論を構成するか—理科の学習論—, 森本信也・堀哲夫 (訳), 東洋館出版社, 270p
- 53) 安藤裕明, 森藤義孝, 中山迅 (1997), 単純電気回路に関する小・中学生の考え方の再検討—事象面接法を通して—, 科学教育研究, Vol.21, No.2, pp.115-125
- 54) 高松諭志, 倉賀野志郎 (2010), 大学生の回路・電流概念に関する実態報告—実態に即した電荷保存モデルの開発と授業実践—, 北海道教育大学釧路校研究紀要, No.42, pp.117-125
- 55) 河本隆弘, 吉崎静夫 (1992), 子どもたち特有の電流概念に関する調査, 科学教育研究, Vol.16, No.2, pp.44-50

- 56) 古屋光一, 戸北凱惟 (2001), 並列・直列回路における電流の流れ方の認識に関する実態調査—誤概念としての交通流モデルが高学年ほど増加していくことについて—, 科学教育研究, vol.25, No.2, pp.90-101
- 57) 古屋光一 (2002), 電流概念の形成を支援するための指導方法に関する研究—交通流モデルの概念転換を目指す指導方法についての実験的検討をとおして—, 科学教育研究, vol.26, No.2, pp.131-143
- 58) 高垣マユミ (2004), 協同的な理科学習を通じた電気回路における衝突モデル克服のプロセスの事例, 科学教育研究, Vol.28, No.3, pp.197-205
- 59) 高垣マユミ, 田原裕登志 (2005), 相互教授が小学生の電流概念の変容に及ぼす効果とそのプロセス, 教育心理学研究, 第 53 卷, 第 4 号, pp.551-564
- 60) 西川純, 冬野英二郎 (1996), 科学概念の獲得 / 定着と文脈依存性に関する研究—中学生の電気概念の実態をもとに—, 科学教育研究, Vol.20, No.2, pp.98-112
- 61) 西川純, 安達哲夫 (1997), 科学概念の獲得 / 定着と文脈依存性に関する研究 (第 2 報) —矛盾の意識化を促す指導法の開発—, 科学教育研究, Vol.21, No.2, pp.101-114
- 62) 後田浩, 三石初雄 (1995), 中学生の「電流および電圧」概念の実態調査分析, 福島大学教育実践研究紀要, 第 27 号, pp.43-52
- 63) 伊藤勝博 (2006), 電流と電圧の概念を容易に理解させる教具の開発, 千葉敬愛短期大学紀要, 第 28 号, pp.119-132
- 64) 石井俊行, 八朝陸, 伊東明彦 (2016), 小学校理科に電圧概念を導入することの効果～電気学習の新たな試み～, 科学教育研究, Vol.40, No2, pp.222-233
- 65) Engelhardt,P.V. and R.J.Beichner (2004), Students' understanding of direct current resistive electrical circuits, American Journal of Physics, Vol.71, No.1, pp.98-115
- 66) 古屋光一, 戸北凱惟 (2000), 電磁気概念の概念形成を支援するための指導方略に関する実践的研究—子どもの知識の豊富化と再構造化を通して—, 科学教育研究, Vol.24, No.4, pp.202-216
- 67) 佐々木庸介 (2015), 電流・電圧・抵抗の概念形成を目指した中学「電流とその利用」の指導の工夫, 物理教育, 第 63 卷, 第 3 号, pp.209-212
- 68) Sokoloff,D.R.(1996) Teaching Electric Circuit Concepts Using Microcomputer-Based Current/Voltage Probes, NATO ASI Series (Series F: Computer and Systems Sciences), vol 156, pp.129-146
- 69) 浅野博, 荒隆裕 (1996), パソコンによる基礎電気回路の実験教材, 日本産業技術教育学会誌, 第 38 卷, 第 4 号, pp.249-254
- 70) 馬文鵬, 伊藤陽介, 林秀彦 (2016), 拡張現実技術を用いた実験学修システムの構築, 日本産業技術教育学会誌, 第 58 卷, 第 2 号, pp.109-117
- 71) 馬文鵬, 伊藤陽介 (2017), 電気回路を対象とする拡張現実技術を用いた実験学習支援システムの有用性, 日本産業技術教育学会誌, 第 59 卷, 第 1 号, pp.9-18
- 72) 四元昭道 (1998), 電磁気学習のための教材開発 と学習の展開, 日本産業技術教育学会誌, 第 40 卷, 第 1 号, pp.57-60
- 73) 富ヶ原健介 (2015), 電力の安定供給を考える体験教材開発の実践事例, 日本産業技術教育学会誌, 第 57 卷, 第 3 号, pp.187-190
- 74) 東徹 (2017), 小学校・中学校における電気に関する教育への提案, 日本産業技術教育学会誌, 第 59 卷, 第 2 号, pp.141-144
- 75) 青井中央人, 伊藤陽介, 谷陽子 (2013), 電波を題材とする技術教育の開発と評価, 日本産業技術教育学会誌, 第 55 卷, 第 3 号, pp.199-206
- 76) Martinez,S. and G.Stager(2015), Invent to Learn — Making, Tinkering, and Engineering in the Classroom — (「作ることで学ぶ—Maker を育てる新しい教育のメソッド—」阿部和広監修, 酒匂寛訳), オライリー・ジャパン, 400p
- 77) 寺田光宏 (2014), 理科教育における「ものづくり」の研究, 日本評論社, 146p
- 78) 山本利一, 森山潤, 角和博, 池上康之 (2007), ペルチェ素子を用いた温度差発電学習教具の開発と授業実践, 日本産業技術教育学会誌, 第 49 卷, 第 4 号, pp.315-322
- 79) 山本利一, 森山潤, 角和博 (2012), 電磁誘導を利用した波力発電教具の開発と授業実践, 日本産業技

- 術教育学会誌, 第54巻, 第1号, pp.21-28
- 80) 秋葉治克 (2013), 屋内配線の仕組みを理解するための実践的な教材の開発, 日本産業技術教育学会誌, 第55巻, 第2号, pp.95-102
 - 81) 片岡祥, 伊藤陽介 (2018), サーボモータを用いた計測・制御システム学習教材の開発, 日本産業技術教育学会誌, 第60巻, 第1号, pp.1-8
 - 82) 市川太智, 鄭基浩 (2017), 木電池を利用した技術教材の開発, 日本産業技術教育学会誌, 第59巻, 第3号, pp.179-185
 - 83) 松原佑, 室伏春樹, 鄭基浩 (2014), 床振動発電を利用した教材の開発, 日本産業技術教育学会誌, 第56巻, 第1号, pp.75-79
 - 84) 門田和雄, 猪股晃洋, 長嶋春樹 (2019), 中学校技術科における教育用小型マイコンボードを活用したラジコンカーの開発, 日本産業技術教育学会誌, 第61巻, 第4号, pp.297-304
 - 85) 永野玖実, 道法浩孝 (2021), コンピュータとインタフェースについての指導に配慮した多様なシステムを構成可能な計測・制御教材の開発, 日本産業技術教育学会誌, 第63巻, 第2号, pp.197-20
 - 86) 中尾尊洋, 森山潤 (2020), 中学生のLED制御プログラム作成過程における試行錯誤の効果に関する探索的検討, 日本産業技術教育学会誌, 第62巻, 第2号, pp.141-149
 - 87) 魚住明生, 宮川秀俊 (2000), 技術科教育における自己教育力の育成に関する研究 —「電気」領域における指導過程と複数題材についての一考—, 日本産業技術教育学会誌, 第42巻, 第1号, pp.19-27
 - 88) 樫原俊司, 松村佳子 (1997), アンケート調査に見る中学校電気学習の問題点, 教育実践研究指導センター研究紀要 (奈良教育大学), 第6巻, pp.93-104
 - 89) 紅林秀治 (2015), 設計を中核とした技術教育の提案, 教科開発学論集, 第3巻, pp.151-158
 - 90) 紅林秀治, 村上陽子 (2017), 設計の学習における最適解を得るまでの思考過程, 教科開発学論集, 第5号, pp.91-99
 - 91) 米盛裕二 (2007), アブダクション 仮説の発見の論理, 勁草書房, 260p
 - 92) 尾崎誠 (2011), 「工夫し創造する能力」を育む「設計・計画」の学習, 日本産業技術教育学会誌, 第53巻, 第4号, pp.287-292
 - 93) 西ヶ谷浩史, 紅林秀治 (2020), エンジニアの視点を獲得するための工学設計の手法を取り入れた中学校技術・家庭科 (技術分野) の学習, 日本産業技術教育学会誌, 第62巻, 第3号, pp.267-275
 - 94) 竹野英敏, 松浦正史 (1993), 中学生を対象とした加工学習での設計過程における初期構想場面の内的操作と外的行為に関する分析, 日本産業技術教育学会誌, 第35巻, 第4号, pp.279-286
 - 95) 谷田親彦, 村田耕一, 上田邦夫 (2001), 「ものづくり学習」の設計段階における中学生の思考活動の構造把握, 日本産業技術教育学会誌, 第43巻, 第3号, pp.137-144
 - 96) 勝本敦洋, 森山潤 (2018), 児童・生徒の発達段階における設計学習のレディネスとしての初期構想力の推移, 日本産業技術教育学会誌, 第60巻, 第2号, pp.81-90
 - 97) 勝本敦洋, 住谷淳, 川崎康隆, 世良啓太, 森山潤 (2019), 図画工作科において技術的な視点による設計プロセスを学習する題材の試行的実践, 日本産業技術教育学会誌, 第61巻, 第2号, pp.125-136
 - 98) 松本金矢, 中西康雅 (2014), 遺伝的アルゴリズムを用いた最適設計に関する教材の開発, 日本産業技術教育学会誌, 第56巻, 第3号, pp.177-185
 - 99) 森山潤, 桐田襄一 (1996), 中学生のプログラミングにおける思考過程の構造解析, 日本産業技術教育学会誌, 第38巻, 第4号, pp.255-262
 - 100) 森山潤, 桐田襄一 (1997), 「情報基礎」領域における生徒のプログラム設計能力の向上に対する諸要因間の因果関係, 日本産業技術教育学会誌, 第39巻, 第2号, pp.87-95
 - 101) 藤川聡, 安東茂樹 (2012), エネルギー変換における工夫し創造する能力をはぐくむ製作題材の開発と検証, 日本産業技術教育学会誌, 第54巻, 第3号, pp.135-141
 - 102) 中原久志, 森山潤, 上野耕史 (2016), LED照明機器の製作を通して工夫・創造力を育成するエネルギー変換学習の題材開発と試行的実践, 日本産業技術教育学会誌, 第58巻, 第1号, pp.22-30
 - 103) 尾崎誠 (2018), 設計学習に適した指導計画と教育用マイコンボードの開発, 日本産業技術教育学会誌, 第60巻, 第1号, pp.35-41
 - 104) 横山駿也 (2019), 中学校技術・家庭科における問題解決能力を育成するための電気回路題材の開発,

- 日本産業技術教育学会誌, 第 61 巻, 第 3 号, pp.231-236
- 105) 宮川洋一 (2007), 電気回路学習の実体配線図作成における生徒のつまずきの分析に基づく学習指導方法の検討, 信州大学教育学部附属教育実践総合センター紀要『教育実践研究』, No.8, pp.33-42
- 106) 道法浩孝, 上田邦夫 (1997), 技術科教育におけるトランジスタ増幅回路設計のための計測・シミュレーションシステムの開発, 日本産業技術教育学会誌, 第 39 巻, 第 1 号, pp.49-58
- 107) 道法浩孝, 山岡慎太郎 (2016), PC 計測・設計シミュレーションを導入した電気回路設計学習教材の開発, 日本産業技術教育学会誌, 第 58 巻, 第 2 号, pp.91-99
- 108) 遠藤直弥, 改正清広, 仲田和隆 (2020), 照度センサ付き回路を対象とした設計学習のための電気素子の特性自動測定装置の開発と検証, 日本産業技術教育学会誌, 第 62 巻, 第 3 号, pp.247-256
- 109) 遠藤直弥, 嶋崇志, 改正清広 (2020), LED の光起電力効果を利用した待機電力ゼロ光センサ回路の教材化に関する研究, 日本産業技術教育学会誌, 第 62 巻, 第 3 号, pp.209-217
- 110) 嶋崇志, 改正清広 (2019), 教材化に向けたジュールシーフ回路におけるパルス電流源的動作の有用性の検討, 日本産業技術教育学会誌, 第 61 巻, 第 2 号, pp.147-155
- 111) 嶋崇志, 市川太智, 改正清広 (2020), 昇圧回路と定電流回路を用いた LED 懐中電灯の回路設計の具体化による学習効果の検証, 日本産業技術教育学会誌, 第 62 巻, 第 3 号, pp.239-246
- 112) 鶴本正道 (2000), 「電気領域」での自ら目的を持って設計し, 工夫しながら製作する授業の実践, 日本産業技術教育学会誌, 第 42 巻, 第 2 号, pp.47-50
- 113) 改正清広 (2018), 数学—技術間の転移を必要とする電気回路設計法, 静岡大学教育実践総合センター紀要, Vol.27, pp.55-60
- 114) 吉川弘之, 富山哲男 (2000), 設計学—ものづくりの理論—, 放送大学教育振興会, 192p
- 115) 吉川弘之 (1979), 一般設計学序説—一般設計学のための公理的方法—, 精密機械, Vol.45, No.8, pp.906-912
- 116) 畑村洋太郎 (2000), 設計の方法論, 岩波書店, 172p
- 117) Suh,N.P. (2004), 公理的設計 複雑なシステムの単純化設計 (訳: 中尾政之, 飯野謙次, 畑村洋太郎), 森北出版, 288p
- 118) Pahl,G., W.Beitz, J.Feldhusen and K.H.Grote(2015), エンジニアリングデザイン 工学設計の体系的アプローチ (訳: 金田徹ほか), 森北出版, 656p
- 119) 畑村洋太郎, 実際の設計研究会 (1988), 実際の設計 機械設計の考え方と方法, 日刊工業新聞社, 416p
- 120) 吉岡真治, 富山哲男 (2001), 設計対象知識操作論, 精密工学会誌, Vol.67, No.9, pp.1490-1495
- 121) 海保博之, 原田悦子 (1993), プロトコル分析入門, 新曜社, 249p
- 122) 武田英明, 濱田進, 富山哲男, 吉川弘之 (1992), 設計実験における実験方法の検討と作図過程の分析, 精密工学会誌, Vol.58, No.11, pp.68-66
- 123) 武田英明, 富山哲男, 吉川弘之 (1994), 実験的手法に基づく設計知識とその利用に関する分析, 精密工学会誌, Vol.60, No.3, pp.422-426
- 124) 田中寛起, 武藤恵太, 木見田康治, 他 4 名 (2016), 製品サービスシステムのための設計過程の分析手法, 2016 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.89-90
- 125) 西村伸也, 高橋鷹志, 服部久雄, 石田滋之, 藤井昌幸 (1994), 空間認識からみた設計の思考プロセスの考察—『視点』による学生課題設計の分析, 日本建築学会計画系論文集, 第 455 号, pp.87-96
- 126) 大坂進, 藤原良一, 河野良之, 山西麻雄 (1988), プロトコル分析に基づく電力系統運用計画問題の知識獲得, 電気学会論文誌, C, 108 巻, 8 号, pp.571-578
- 127) 谷崎真也 (1995), 問題解決スキーマとその構成に関する考察, 全国数学教育学会誌, 数学教育学研究, 第 1 号, pp.9-17
- 128) 麻柄啓一 (1990), 誤った知識の組み替えに関する一研究, 教育心理学研究, 第 38 巻, 第 4 号, pp.107-113
- 129) 麻柄啓一 (1996), 学習者の誤った知識はなぜ修正されにくいのか, 教育心理学研究, 第 44 巻, 第 4 号, pp.12-21

