

令和元年6月26日現在

機関番号：32503

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K16273

研究課題名(和文) イギリス土木・機械技術の展開と工学理論との相互関係について

研究課題名(英文) On the Interrelationship among the Development of Civil and Mechanical Engineering and Engineering Theories in Britain

研究代表者

小林 学 (KOBAYASHI, Manabu)

千葉工業大学・工学部・准教授

研究者番号：60447555

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、土木・機械技術とそれらに関連した工学理論との相互関係を研究することを目的とした。

具体的には(1)「土木技術と材料強度理論との相互関係」、(2)「蒸気機関と熱理論との相互関係」という2つの主題を中心に、それらを総合して、(3)「18-19世紀の指導的技術者が使った工学理論の水準および具体的な設計との相互関係」について研究した。

研究の進展につれ、橋梁技術展開のメカニズムを知るためには、理論の影響だけでは不十分であり、橋梁技術をその形式から分類し、それらの特徴とその歴史を明らかにする必要があると認識した。1850年に建造された英国のブリタニア橋を技術史研究上に位置づけることを試みた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

イギリス産業革命期において、道路・橋梁建設などの土木技術と蒸気機関を含む機械技術の発展は、綿工業・製鉄業などとともに当時のイギリスの科学・技術の展開を象徴するものの一つである。我が国では科学の技術への適用についての体系的技術史研究はそれほど進んでいない。一方で、国外では技術と科学の相関関係に関する研究が蒸気機関と熱力学成立前の熱理論に関して研究されている。本研究では蒸気機関のような機械技術だけでなく土木技術についても実際の設計・施工と理論との関係から技術発達メカニズムを解明するもので、これは学術的意義がある。本研究では、さらに踏み込んで橋梁形式の歴史的展開と最大スパンとの関係を研究した。

研究成果の概要(英文)：I focused on the interrelationship among the development of civil and mechanical engineering and engineering theories in Britain. Specifically, I studied two issues, "interaction between civil engineering and strength of materials" and "interaction between the steam engine and theories of heat." I tried to summarize the relationship between the level of engineering theories used by the leading engineers and the design of some engineering works in the 18th and 19th century in Britain. I came to recognize that the influence of theory is not enough and classifying types of bridges is necessary to understand the historical development of bridge building technology. I tried to re-evaluate the Britannia Tubular Bridge built by Robert Stephenson in 1850 at the Menai Strait which separates Anglesey and Wales.

研究分野：技術史、科学史、科学技術史

キーワード：橋梁 ロバート・スチーブンソン ウィリアム・フェアバーン ブリタニア橋 設計と理論 ジェームス・ワット イートン・ホジキンソン コンウェイ橋

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

イギリス産業革命期において、道路・橋梁建設などの土木技術(civil engineering)と蒸気機関を含む機械技術(mechanical engineering)の発展は、綿工業・製鉄業などとともに当時のイギリスの科学・技術の展開を象徴するものの一つである。

科学理論は技術に刺激されて発展してきたことは科学史技術史研究において一定の支持を受けているが、その逆、つまり技術は科学理論の応用だという考えに反感を持つ研究者も多い。特に日本では、技術の概念規定をめぐる「労働手段体系説」と「意識的適用説」との間の論争の結果、「労働手段体系説」が一応の勝利を収めたことで、科学の技術への適用についての体系的技術史研究は国内ではそれほど進んでいない。

イギリスにおいても、ジェームズ・ワット(James Watt, 1736-1819)らの技術者、および蒸気機関の研究をして、今日の技術史研究の基礎の一つを築いた H. W. ディッキンソンは、ワットの技術者としての側面を強調し、彼の自然哲学者としての側面をあまり重視しなかった。結果、「技術者ワット」という固定化したイメージが今日まで続いている。

元来、技術と科学は別々の発展を遂げてきた。しかし、中世後期以降この2つの流れは接近して、ついには合流し、18～19世紀にかけて一つの大きな流れとなる(メイスン『科学の歴史上』[矢島訳、岩波書店、1955年]でも同様な主張をしている)。私は、そのちょうど変遷期にあたる18世紀末～19世紀初頭を本研究の主たるターゲットにした。

本研究の先行研究として、ティモシェンコの方法力学史研究(*History of the Strength of Materials*, 1953)がある。ただ、19世紀前半、**実験によって導かれた材料・構造強度研究が実際の設計に適用されたことは書かれているが、純粹理論による材料力学が具体的技術設計に与えた影響については、判然としない。**カードウェルの *From Watt to Clausius*(1971)は、熱力学の成立史を著述した大作で、蒸気機関が熱力学の成立に影響を与えたと主張する。しかし、**カードウェルも工学理論から技術への影響については、ほとんど述べていない。**

一方、近年、海外においては、**科学と技術との相関関係にかかわる研究が進んでいる。**クローズは、19世紀前半における具体的な蒸気機関を改良するための熱力学ではない「蒸気機関の理論」の成立を議論した(“On the Role of Design in the Engineering Theories; Pambour’s Theory of the Steam Engine,” edited by Peter Kroes and Martijn Bakker, *Technological Development and Science in the Industrial Age: New Perspectives on the Science-Technology Relationship* (1992): 69-98.なお、Pambourの研究は、1978年に我が国で高山がクローズに先行して行っていたことを記しておかなければならない。高山進「蒸気機関の理論」の成立史——理論的工学を媒介とした技術と科学の関係」『科学史研究』第二期 No.126(1978年)、90-100頁)。ベアードとミラーは、ワットを技術者としてだけでなく化学者の側面を強調した(Baird, “Instruments on the Cusp of Science and Technology: The Indicator Diagram,” *Knowledge and Society* Vol.8, (1989): 107-122.) (Millar, *James Watt, Chemist* (2009), 147-168.)。当時の熱理論は熱素説を基礎としたもので現在の熱力学に照らし合わせれば不正確であるのだが、それでも実地の技術の設計に少なからぬ影響を及ぼしたのである。

私は、科研費若手研究(B)「19世紀における技術者への熱学の普及と蒸気機関への応用について」にて熱力学成立前の熱素説と熱運動説それぞれの熱理論が蒸気機関開発に与えた影響を研究し、また当時の技術者・科学者の情報交換ルート(人的コネクション)を重視するようになった。さらに、科研費基盤研究(C)「物質・技術文化からみた近代数理諸科学の展開(1660-1840)」(研究代表者: 隠岐さや香氏、私は研究分担者の一人として参加)では、主として橋梁建設に使用された材料の種類と橋梁の形状および材料強度理論との相互関係について

研究してきた結果、19世紀半ばまでの土木・機械技術の展開を語る上で、科学者・技術者間の人的コネクションだけではなく、実際に技術に適用できた工学理論の重要性を強く意識するようになった。

2．研究の目的

本研究は、18世紀後半頃から19世紀半ば頃までの主としてイギリスの土木・機械技術と工学理論との相互関係について歴史的に明らかにすることを目的とした。

具体的には(1)「土木技術と材料強度理論との相互関係」、(2)「蒸気機関と熱理論との相互関係」という2つの主題を中心に、(3)「18-19世紀の指導的技術者が使った工学理論の水準および具体的な設計との相互関係」について研究を始めた。

3．研究の方法

本研究は一次史料に基づく実証的歴史研究である。本研究を遂行するための一次資料は、書簡を含めた手書きの史料、図面、論文、書籍に加え、実際の橋梁などの建造物、産業遺跡および機械類などを含む。これら一次史料を閲覧・複写・視察および情報収集のためにイギリスに出張した。二次文献の収集には、通常の書籍購入や図書館を通じた複写依頼の他に、インターネットを活用した。

4．研究成果

(1)「土木技術と材料強度理論との相互関係」

前述の通り、科研費基盤研究(C)「物質・技術文化からみた近代数理諸科学の展開(1660-1840)」以来、土木技術と理論との関連を、特に橋梁建設の技術を中心に研究を行っており、その結果、蒸気機関に限らず、土木技術においても多くの技術者・科学者との協業があったことが分かっていた。材料力学の理論は、イギリスよりフランスなど大陸諸国の方が進んでいた。フランスでは、ナヴィエ(Claude Louis Marie Henri Navier, 1785-1836)やコーシー(Augustin Cauchy, 1789-1857)が行ったような現在の材料力学につながる研究があったことは事実だが、土木技術ではイギリスは他のどの国よりも抜きん出ている。1826年にトーマス・テルフォード(Thomas Telford, 1757-1834)がメナイ海峡吊り橋を建設し、ナヴィエはこれを視察するために渡英している。1850年にはロバート・スチーブンソン(Robert Stephenson, 1803-1859)が箱形断面を持つブリタニア橋とコンウィ橋を建造するなど当時の土木技術の最先端を行く建造物を建築している。

理論では遅れたイギリスがブリタニア橋・コンウェイ橋という技術的偉業を達成し得た要因は、最初の工業国としての技術的経済的蓄積以外にも技術者(ロバート・スチーブンソン、ウィリアム・フェアベーン(William Fairbairn, 1789-1874))と応用科学者(イートン・ホジキンソン(Eaton Hodgkinson, 1789-1861)、ウィリアム・ポール(William Pole, 1814-1900))との相互的協業があったためである。

元来、イギリスの多くの技術者は徒弟制度によって教育を受けてきたのであり、大学などの高等教育機関で数学を基礎とした工学教育を受けてきたわけではない。一方で、19世紀、フェアベーンのような指導的技術者は科学と技術を合体させようとした。同時期に、ホジキンソン、ポールのような数学に明るい技術者もしくは応用科学者とも言うべき人々が登場し、設計に貢献した。ロバート・スチーブンソンとフェアベーンらを取り組んだブリタニア橋・コンウェイ橋の設計にどのようなタイプの橋の断面決定に関わる材料強度研究は、**実験による試行錯誤**に

よってなされた。フランスからイギリスへの材料力学に関する理論の導入は現在のところ認められない。

(2) 「蒸気機関と熱理論との相互関係」

研究を進めるにつれ、トーマス・ベドーズ(Thomas Beddoes, 1760-1808)なる医師・化学者が当時の技術・科学に与えた役割について注目するようになった。ベドーズについては Trevor Levere による長年の歴史研究があった。私はこれまでベドーズ研究では使用されていなかったであろう Royal Institution of Cornwall 所蔵の Hornblower Papers の記載からベドーズの技術への貢献について検討した。この研究は、「トーマス・ベドーズとイギリスの科学者・技術者共同体」と題して東京工業大学で開催されている科学史・技術史・科学技術社会論(STS)の研究会である火ゼミにて 2019 年 3 月 5 日に発表した。

(3) 「18-19 世紀の指導的技術者が使った工学理論の水準と具体的な設計との相互影響」

上記(1),(2)を踏まえて、18-19 世紀の指導的技術者および応用数学者が使った工学理論が現代からみてどの程度の水準だったのか、およびその工学理論が具体的な技術の設計へどのような影響を与えたかを総合的に検討する予定であった。逆に、具体的な技術が工学理論の展開に与えた影響についても研究を進める計画であった。

一方で、ロバート・スチーブンソンがブリタニア橋とコンウェイ橋を設計するにあたって、蒸気機関車の動荷重に耐えうる橋梁の強度やイギリス海軍本部による工事期間も含めメナイ海峡の交通を遮断しないなど種々の制約条件があったが、どんな形態の橋を採用するかについては全く設計者に委ねられていた。もちろん橋梁の基本形式は古代から複数のものが使われており、全てをゼロから発明する必要があったわけではない。しかし、工学理論は限定された形状の設計物の強度を計算することができるが、どのような形状が相応しいかを技術者には教えない。工学理論は設計を助けるが、設計を規定しはしない。

以上のような見解に立ち、私は橋梁の設計を決める重要な要素として工学理論はさほど重要ではないという意見を持つに至った。橋梁技術史全体の中からブリタニア橋の位置づける研究にシフトした。

橋梁の歴史的発展を分析する指標としては、用途、固定橋・可動橋・可搬橋、構造(桁橋、吊り橋、アーチ橋、トラス橋、斜張橋、吊り橋)、主桁の支持条件(単純支持橋、連続橋、カンチレバー橋)、使用材料(木材・ツタなどの植物性材料、石材・レンガなどの脆性材料、鉄系材料[鑄鉄、鍛鉄、鋼]、鉄筋コンクリート、プレストレスト・コンクリート等)などがある。橋梁の性能は最大スパン(最大支間長)によって計りうるので、上記の指標のうち最大スパンに最も影響するのはどれか、そしてそれらの史的発展の様相について研究した。

私は、過去に行ったボイラ強度に関する研究から、材料より形式の方がよりボイラ強度に影響があることを見いだしていた(「蒸気ボイラの性能(圧力・温度・蒸発量)の発展にとっては、形式の変化(例えばワゴン型から円筒形、さらに円筒形から水管型)が主導的であり、材料の変化は副次的である。」小林学「蒸気機関用ボイラの発達と材料技術との関係に関する研究」『科学史研究』No.221(2002年)、14-25頁)。橋梁の歴史的展開を見る場合でも形式の変化が最大スパンの変化には主導的であると想定し、事実、桁橋、アーチ橋、トラス橋、斜張橋、吊り橋の順で最大スパンは長くなることは橋梁技術に関わる多くの教科書・書籍に記載されていた。橋梁技術史上、こういった単純なことが整理されていなかった最大の理由は、最大スパンが短い橋から長い橋へと順番に発明されたわけではないためである。例えば、おそらく最古の橋は桁

橋であると推定できるが、最大スパンの性能を持つ吊り橋も有史以前から中国やインドなど世界各地で使われていたと考えられている。

結局、ブリタニア橋とコンウェイ橋には矩形の断面を持つ管の中を鉄道が走る桁橋が採用された。このタイプの橋は19世紀半ばにおいては最先端技術であったが、その後、あまり使用されなかった。ブリタニア橋を全橋梁技術史の中に位置づける研究は、2018年12月に火ゼミで発表し、さらに内容を整理・発展させたものを2019年6月の日本科学史学会第66回年会にて発表した。

2019年は、ジェームズ・ワット没後200年、ワットの分離凝縮器を含む蒸気機関の改良に関する1769年の特許(特許番号913)取得からちょうど250年にあたる。ワットの業績およびこれまでのワットの歴史研究と現状、今後の課題等について、2019年3月に開催された日本科学史学会技術史分科会で発表した。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 3 件)

- 1, 小林学、ブリタニア橋の再評価——橋梁技術の史的展開メカニズムの解明へ向けて、日本科学史学会第66回年会、2019年
- 2, 小林学、ジェームズ・ワット再考——ワット没後200年、ワットの分離凝縮器を含む蒸気機関改良に関する1769年の特許250年によせて、日本科学史学会技術史分科会(共催:科学論技術論研究会)、2019年

〔その他〕

研究会での発表:

- 1, 小林学「トーマス・ベドーズとイギリスの科学者・技術者共同体」火ゼミ、東京工業大学大岡山キャンパス、2019年3月5日発表
- 2, 小林学「ブリタニア橋の再評価——橋梁技術の史的展開メカニズムの解明に向けて」火ゼミ、東京工業大学大岡山キャンパス、2018年12月4日発表

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。