

【研究ノート】

イギリスに見る動力利用の変遷—水車と蒸気機関—

永井 健太郎*・中村 修**・畑中 直樹***・中島 大****・友成 真一*****

The transition of motive power usage in United Kingdom

Kentaro NAGAI, Osamu NAKAMURA, Naoki HATANAKA,
Masaru NAKAZIMA, Shinichi TOMONARI

Abstracts

Currently, the use of renewable energy has been promoted in order to deal with global warming caused by anthropogenic CO² emissions. Each renewable energy has each trait, so the choice of what is suitable for a geographical feature of a region is important. In Japan small hydropower should be more used, because Japan has rich rainfall and the geographical feature which suitable for small hydropower. However, compared to European countries, in spite of such good condition, the use of small hydropower has made little progress. Indeed many factors like the large initial investment and the complexity of the procedure for permissions and constructions, hinder the progress. If so, there is a big difference between European countries and Japan in respect of the positiveness. This paper research the history of waterwheel using in the United Kingdom in order to uncover their attitudes and behavior for the use of renewable energy.

Key Words: waterwheel, watermill, small hydropower, United Kingdom, Industrial Revolution

1. はじめに

現在、人為的なCO²増加を起因とする地球温暖化に対応するために、省エネ、自然エネルギーの普及・拡大が進められている。自然エネルギーはその特性ゆえ、地理的特徴に適したエネルギーを導入していくことが望ましいとされる。中でも、小水力は日本の降水量の多さ、山間部が多い地形などから考えても、導入が進められていはいはずである。しかし、欧州に比べると、気候的にも、地形的にも好条件であるにもかかわらず、その導入はほとんど進んでいない。

経済的、政策的問題点などが挙げられている。

確かに、初期投資の多さ、手続きの複雑さなどが、導入の妨げになる要因は多い。しかし、政策、および小水力導入に対する積極性において、欧州とあまりにも差がある。そこには、日本人が持つ水力利用に対する認識と、自然エネルギー先進国であるヨーロッパの国々の認識との間になにか違いがあるのではないだろうか。

本論文では、イギリスにおける動力としての水車利用を事例として考察する。水車は自然エネルギーの祖とも言える。イギリスの水車利用の変遷を見ることによって、動力利用に対する態度や自然エネルギーを使用する姿勢を探った。そこには、日本の水車利用とは異なる多種多様な産業への水車利用が見られた。また、蒸気機関が発明され、産業革命が開始された後も、水車を動力源として利用する態度に大きな変化は見られなかった。むしろ、蒸気機関と同様に、その技術を発展させ、自然エネルギーの特

* 早稲田大学大学院環境・エネルギー研究科修士課程

** 長崎大学大学院生産科学研究科

*** 長崎大学大学院生産科学研究科博士後期課程

**** 全国小水力利用推進協議会

***** 早稲田大学大学院環境・エネルギー研究科

受領年月日 2009年11月30日

受理年月日 2009年11月30日

性を最大限利用しようとしていたのである。

以下、時系列的にその変遷を見ていく。

2. 水車の利用

2-1. 産業革命前の水車

まずここでは、イギリスで調査された11世紀から18世紀中ごろまでの水車の利用を見ていく。

イギリスに水車をもたらされたのは、今から2000年近く前のことである。紀元前55年にローマ帝国がグレートブリテン島に侵攻し、西暦43年にブリテン島の大部分を征服したことによってもたらされた。初期の水車の用途は、粉引きと水汲みであった。我々が普通、考える水車利用の典型は、この2つである。

しかし、イギリスを含めた西ヨーロッパの水車利用は、日本人の常識に収まるものではなかった。

初期の水車の利用から産業革命までの間に、水車は多くの工業分野において動力として使用されてきたのである。たとえば、中世において、水力利用は新たな発展を見せ、製麻、縮絨、製紙、絞油、製鉄、針金製造、水力作動の鉍石スタンプ、冶金用水力ふいごなどの作業用動力として使用された。さらに、製革、ビール製造、刃物、製材、圧延、貨幣製造、そして溶鉍炉などにも使用され、その用途は多岐に渡っている。

公式的な記録で一番古いものが、ウィリアム1世が制作させた土地台帳、ドゥムズデイ・ブック(Domesday Book)にある。記録では、11世紀末のイギリスには5624台の水車があったとされている。その大部分は粉挽きのために使用されていたが、イングランドの水車場のうちの二つはその使用料をブルームで支払っていたという記載がある(レイノルズ p93)。これは、製鉄業での水力の利用を示すものである。ブルームとは、海綿のように多孔質の金属の塊のことである。初期の溶鉍炉では、鉄を液状にするほど高温にならず、ブルームとして出てきたものを、叩いて硬くしていた。それを、水車使用料として納めていたようである。

製鉄業では、ハンマーとふいごの駆動に水車が使われていた。はじめに導入されたと考えられるのが、ハンマーである。ブルームを硬くするために、何度も叩く必要がある。この部分の作業工程を、水力を利用して機械化したのだ。水車の主軸に取り付けられたカムと呼ばれる突起が、錠などのスタンプを垂直に持ち上げたり、横置きの手ねハンマーを持ち上げたりした。

溶鉍炉のふいごへの水車の使用は、イギリスには、

15世紀までには伝わっていたとされ、1653年には73の水力溶鉍炉があったとされる(レイノルズ p156)。水力ハンマーやスタンプが早々に使用されたのが、縮絨である。縮絨とは、折りあがった布を叩き、繊維を絡ませてフェルト状にする作業のことである。イングランドで機械縮絨が始まったのは、12世紀とされている。Carus-Wilson (1941)の研究によると、イングランド東部の平野部で織物で有名であった多くの町は、縮絨水車の登場により、衰退したという。その後、1327年には少なくとも130を数えるまでに増加した(レイノルズ p90)。

製紙業でも水力撥ねハンマーは使用された。それは主に、ボロを叩いてパルプにする工程での使用である。この機械化により、紙の製造コストが下がり、日常的に使われるきっかけにもなった(レイノルズ p91)。1400年には、フランスではこの技術は当たり前のもになっていたが、それから100年間かけて、イギリスなどに伝わったとされる(レイノルズ p92)。

製紙業で使用された水力利用の技術が、もう一つある。ホルンダーである。1700年ごろに開発されたホルンダーとは、筒に鉄の刃を取り付けたものである。これを縦型水車の力で回転させ、その刃でボロをより効果的に細切れにするのに使われた。

15世紀中ごろの印刷機の発明を受けて、さらに紙への需要が高まり、水力利用は後押しされた。イギリスのケント州ダートフォードにあったジョン・スピルマン製紙工場では、16世紀後期という早い時期に、数十人の職人を雇って、工場規模で生産していた(レイノルズ p152)。製紙工場の数は、着実に増え、イングランドでは、1600年代前半は水力製紙工場が38であったが、1690年には106、1710年には約350、1800年には約400に増加している(レイノルズ p152)。また、複数の軽いハンマーを使用し、紙面をたたき、表面をなめらかにしあげる装置も開発され、水力が動力として使用された。他には、イングランドで、切断機械が16世紀末以前に用いられていたり、圧延機械が17世紀ごろから使用され始めていた。

1500年から1750年の間に、貴金属、普通金属に対する需要が増大し、鉍山が深く掘られるようになるにつれて、湧き水が問題になった。そこで、重要になったのが、水車による水の汲み上げである。イギリスのペニン山脈の鉛鉍山では、鉍山内の水を汲み上げるのに使用していた馬力巻揚げ機が役に立たなくなり、1730年代に水車に切り替えている(レイノルズ p153)。その後、1700年代後半までには、深い炭坑は水車使用の揚水ポンプを備えるようになって

いった（レイノルズ p154）。

水車は火薬の製造にも使用されていた。火薬は、木炭、硫黄、硝石を混ぜて作られるが、その3つを粉状になるように細かくする必要がある。16世紀には、火薬は水車を利用して製造されており、17世紀までは、水力スタンプで行われ、その後は、縦型水車で駆動される複数のスタンプあるいは周転石臼が使用されていた。いくつかの火薬工場は、18世紀半ばには巨大化し、たとえば、ケント州のファヴェルシャムにあった王立火薬工場は、1760年には11台の水車を原動機とした製造機械と6台の馬力車輪駆動の製造機を使用していた（レイノルズ p159）。以上見てきたように、イギリスだけを例に取ってみても、非常に多くの産業に水車が動力として使用されてきたことがわかる。

次に、イギリスでの水車利用をその増加数で見ていく。先に述べたように、ドウムズデイ・ブックの記録から、11世紀末のイギリスには5624台の水車場があった。その後、先述したように、産業への水車の利用が進み、18世紀には、1万から2万の水車があったとされている（レイノルズ p133）。

この水車の増加は、1700年代までに河川の水力利用の過密状態を引き起こした。たとえば、イングランドのイースト・ミッドランズにあるダービーシャーのダーヴェント川には、エクレスボーン川という小支流がある。その川沿いには、1600年から1700年までの間に、約13km間に9台の水車があり、鉛の採鉱や冶金、染料挽き、肥料用の骨の粉碎に使われていた（レイノルズ p133）。1700年ごろには、イングランド北西部を流れるマージー川は、マンチェスターを横切っているが、その下流の川沿いには、わずか約4.8kmの間に60もの水車があったとされる（レイノルズ p133）。これは、80m置きに水車が並んでいた計算になる。

イングランド中部の工業都市であるシェフィールドにおける水力の広範囲な開発が始まったのが1500年ごろである。しかし、1700年代の終わりまでには、この地域を流れる川沿いおよそ32kmに亘って、100以上の水車が建設されていた（レイノルズ p133）。イングランド北西端にあるカンブリアに統合されたウェストモアランドでは、13世紀の約25から、1800年ごろの90台へと増加している（レイノルズ p133）。

このように、イギリスでは、11世紀から18世紀中ごろまでの間に、水力利用は新たな発展を見せ、製麻、縮絨、製紙、絞油、製鉄、鉱石の破碎、水力ふいごなどの動力として使用されるようになった。そ

の用途拡大は、日本での水車利用とは一線を画した産業利用であり、水車が使用できる作業工程には積極的に水車を導入する態度がみてとれる。それは、酒（ワイン）造りや油絞りにも及んでおり、日本の酒造りや油がすべて手作業により行われていたことを考えると、対照的である。

そして、この産業での水車利用が増加したために、水利がいい地域では過密状態になっていた。このことから、産業革命に入る前から長期に亘って、水車から得られる動力をできるだけ利用しようとする傾向が強かったことが伺える。この傾向は、産業革命が開始されても変わらなかった。

3. 産業革命期の動力利用

3-1. イギリス産業革命

産業革命は、動力源であるエネルギーの革新期という点で非常に重要な時期である。従来の自然制約の大きいエネルギー、たとえば、人力や風力、畜力などの利用から、特に石炭を資源としたコントロール可能な効率の良いエネルギーの利用へと変化した。そして、そのエネルギー革新のもと、近代機械制工業が成立したことにある。これは、現在まで維持されている機械制工業形態のはじまりである。

以上の2点から、大規模に動力を利用する図式が成立したことで、エネルギー利用の動向を見るうえで、重要な転換期である。以下、この時期の水車の動力利用を、蒸気機関と併せて見ていく。

イギリスの産業革命は、一般的に1760年代から1830年代まで約70年間と言われている。その始期の指標にされているのが、いくつかの画期的な発明である。1764年ころにJ・ハーグリーブスがジェニー紡績機を発明し、1769年に、R・アークライトが水力紡績機を発明する。また、同年J・ワットが既存の蒸気機関を改良し、より効率がよい蒸気機関の特許を取得する。この一連の発明が、綿紡績業を急速に発展させることで、産業革命が開始したのである。

そして、その終わりは1820～30年代と考えられている。蒸気機関を主要な動力とした機械制工業に、その生産手段である機械を供給する生産手段生産部門の機械制大工業化を、産業資本の確立の一指標とし、産業革命の完了とされている。（大石 pp14-15）。

さて、一般的に、蒸気機関の登場と産業革命の開始を同一視する傾向は強い。事実、蒸気機関関連の発明とその改良がもたらした経済効果が、イギリスを「世界の工場」へと躍進させた。しかし、「蒸気機関が発明されたことによって産業革命がはじまり、

蒸気機関が動力源として一気に普及した」というわけではない。むしろ、それまでに着々と受け継がれてきた水車利用が、紡績業での機械化を受けて、一気に産業革命を開始させたのである。

水車利用は産業革命の始期でも衰えることなく、終期に渡るまで、広くエネルギーを供給し、産業革命後も、動力源として存続しつづけていく。

3-2. 産業革命期の水車利用

3-2-1. 水車の綿紡績への利用

すでに見てきたように、水車は、産業革命以前から、製粉、揚水、縮絨や石臼、ふいご、鉱石粉碎機、排水ポンプなど様々な産業の動力として利用されてきた。しかし、まだ使用されていない産業があった。それが、綿紡績と織布である。

1750年以前、羊毛、絹、亜麻の生産ではすでに一部の工程で水車が使用されていたが、綿織物生産では、どの工程でもいっさい使用されていなかった。そんな綿紡績と織物業において、機械化が進み、それが産業革命のきっかけになる。

1733年にジョン・ケイが、布を織る際に横糸を通す杼を改良し、飛び杼を発明した。このことにより、綿織の作業工程が大幅に短縮された。

布織りの工程は大幅に短縮されたが、紡績は手作業により行われており、糸の供給が間に合わなくなっていった。そこで、1764年にハーグリーブスがジェニー紡績機を発明し、生産効率を改善した。

決定的だったのが、1769年R・アークライトによる水力紡績機の発明である。これにより、水車を動力とした大型機械による大量生産が可能になったのだ。

アークライトが、初の水力紡績工場となるクロムフォード工場 (Cromford Mill) を建造したのが、1771年である。場所は、トレント河支流ダーウエント川沿岸のダービーシャーの寒村に建設された。さらに、1775年から76年に同じダーウエント川流域にベルパー工場 (Belper Mill)、ミルフォード工場 (Milford Mill) を建設し、1777年、1780年までに工場を次々に建設した。1780年では水力紡績工場は15～20に過ぎなかったが、アークライトが持つ水力紡績機の特許が切れると、1787年には119工場にまで一気に拡大した (堀江 pp10-11)。

これにより、産業革命の大きなきっかけの一つとなった紡績工業での近代機械制工場の始まり、動力として水車が最初に導入された。そして、水車はほとんどの産業において、動力として使用されるよう

になったのである。

3-2-2. 水車利用の飽和

さて、アークライトは、ダービーシャーの寒村に初の水力紡績工場を建設するが、なぜ、工業都市の近くに建設しなかったのか。それは、水力紡績機の発明までに、既存の産業によって、水利のよい地点はほとんど占有されてしまっていたからである。

レイノルズによると、1750年から1850年にかけてイギリスの河川では、水車場による飽和状態が見られるという (レイノルズ p295)。以下、レイノルズがいくつかの地域研究を紹介しているのので、そこからいくつかの例を挙げる。

たとえば、イングランドのウェスト・ミッドランド州に属する工業都市であるバーミンガムを中心とした半径5マイル (約8km) 以内では、水力利用可能地点は1700年までにはほぼ開発されており、1760年を過ぎると、利用可能な地点はまったく残っていなかった (レイノルズ p295)。

ランカシャーのチーズデンとネイデンの小川では、総延長約9.6kmに、1848年には23の水車場があり、420mごとに水車場があった計算になる。マンチェスター近くのスポーデンという小さい川には、その約14.5kmの流れに沿って18の水車場があった (レイノルズ p296)。

アーウェル川は、北西イングランドのアーウェル溪谷を流れている。その川沿いにあるボーカップとボルトン間の落差900フィートのうち800フィート (およそ244m) には、1830年代300以上もの水車場がひしめき合っていた (レイノルズ p296)。

ロビンフッドの丘からノッティンガム近郊の流れるリーン川は、全長わずか12マイル (約19.3km)、落差156フィート (約47.5m) に過ぎないが、1784年には17の水車場が占有していた。ケントでは、長さ約16kmのレン川に30ほどの水車場があり、ミッドウェイ川の支流の8kmしかないルーズ川には、そのわずか3.2kmの範囲で13の水車場が稼動していた (レイノルズ p296)。

図1は、ルーズ川の13水車のひとつのLower Chrisbook Millの水車場跡である。かつては、流れ落ちる水を受けて、あの幅の水車が、200年近く使われていた。

南イングランドを流れるテムズ川の支流であるヴァンダル川は、ロンドンの近くを通っている。そこでは、1850年代までに、水車の数が1700以上に達していたという (レイノルズ p296)。加えて、当時の水

車場を巡る訴訟等の法律問題に対する議論があがっていたことから、イギリスの河川での水車利用が飽和状態であったことが伺える（レイノルズ pp296-297）。

このように、水力紡績工場が建設され始めた産業革命前半期に、すでにイギリスの水車利用は飽和状態へと向かっていたのである。それほどまでに、イギリスでは水力資源の利用が追及されていたのだ。

3-3. 水車と蒸気機関

3-3-1. 初期の蒸気機関

以上見てきたように、蒸気機関を中心とする産業革命というイメージとは違う姿が見えてきた。では、産業革命の代名詞とも言える蒸気機関は、どのように利用されていたのだろうか。まず、簡単に蒸気機関の歴史を振り返る。

はじめて蒸気の圧力に注目し、大気圧機関を発明したのが、ドニ・パパンである。産業革命が始まるより70年も前の1690年ごろのことである。

最初の蒸気機関といえる鉱山用の揚水機関「鉱夫の友」が、セヴァリーによって開発され、1698年に特許が取られる。しかし、「鉱夫の友」は実用的ではなく、15mほどしか水を汲み上げることが出来なかった。そのころの鉱山は先に見たように、金属需要の増加のために、もっと深いところまで掘られるようになっていたのだ。

1712年に実用的な揚水用蒸気機関として、ニューコメン機関が発明される。メリットは、地形的制約が無いことだった。結果、水資源が乏しく、有効な

水利地点より離れた鉱山地域で導入が進んだようである。

たとえば、ニューカッスル・オン・タイン地方はニューコメン機関を早々と導入した。1733年までには、ニューコメン機関が14基設置された。その後、1775年までに約100基が運転されていた（剣持 p42）。しかし、当時の蒸気機関は高価であり、効率も悪く、石炭を大量に使用した。

17世紀の終わりから18世紀のはじめのころは、水車による揚水ポンプの代わりに使われ、炭鉱などの鉱山業で徐々に使われるようになっていった。初期の蒸気機関は、上下運動のみであったために、直接の動力源として製造業で使用されることはあまりなかった。むしろ、蒸気機関は水車と併用されていた。

3-3-2. 水車と蒸気機関の複合機関

1732年ごろから、水車とニューコメン機関との組み合わせで使用するようになり、1740年代にはニューカッスルなどでこのような複合装置が見られるようになっていく（レイノルズ p353）。その後、この複合装置の使用は拡大した。たとえば、ジョン・ファレイによると、1752年に建造され、ブリストルの真鍮工場で複数の上掛け水車に水を供給するため、1台のニューコメン機関が用いられたという（レイノルズ p353）。

水車の定量的研究を進め、その効率の改善に大きな功績を果たしたジョン・スミートンも、この複合機関を採用した。水量が減少する乾季に水車へ水を供給するための蒸気機関を、1760年代にキャロン鉄



図1 Lower Chrisbook Millの水車場跡

出典：Marku1988

1719年に製粉用水車として上掛け水車がルーズ川に建造され、4つの石臼を動かしていた。1905年まで使用され、その後解体された。

工所に設置している（レイノルズ p353）。

1762年には、河川からの水に頼らないシステムも開発された。ノームサムバーランドに建造された複合機関は、河川から水を引き込まずに、蒸気機関と水車だけで、水を循環させ動力を生み出した（レイノルズ p353）。

スミートンもこの循環装置の考え方を採用し、1777年に、ロング・ベントン炭坑用に設計した。この26インチのシリンダーを持つニューコメン機関は、毎分約42.7 m³の水を貯水池へ揚水し、引き上げられた水は、直径約9 m、幅約4.9 m、5.22馬力を出す上掛け水車を駆動させた（レイノルズ p353）。スミートンは、1782年にも、ニューカッスルのウォーカー炭鉱で出力8.44馬力の同形式の複合装置を建設している（レイノルズ p353）。18世紀後期のイギリスの一部の地域で、蒸気機関と水車を組み合わせて利用するのが好まれていた（レイノルズ p355）。

1780年ごろにクランクをニューコメン機関に適應させ、回転運動を得られるように工夫。さらに、ワットが1781年に回転機関、翌1782年に複動機関、89年には遠心调速器を発明し、複動回転蒸気機関が登

場していた。このように蒸気機関が改善されたにも関わらず、水車は廃止されることはなかった。水車の生み出す、一定で安定した回転運動が、多くの製造業で好まれていたためだと考えられる。

3-3-3. 水車の限界と蒸気機関の改良

しかし、歴史的事実から明らかなように、蒸気機関は工場の主要な動力になっていく。それは、自然エネルギーの使用に伴う制約に、蒸気機関は縛られなかったからである。

水力を動力として使用することで生じる問題、それは、地理的制約、不安定さ、出力の限界である。水車で出力を出すには、ある程度の水量と落差が必要である。動力を取り出すには、河川の近くに水車を設置するしかなかった。河川から遠く離れた位置まで水路を引くのは、技術的にも経済的にも難しかった。そのために、蒸気機関がまず普及したのが鉱山業であった。

鉱山も河川もその位置から動かさない。鉱山は時として、河川から遠く離れた位置で発見されることもある。よって、鉱山では地形的制限を受けない蒸

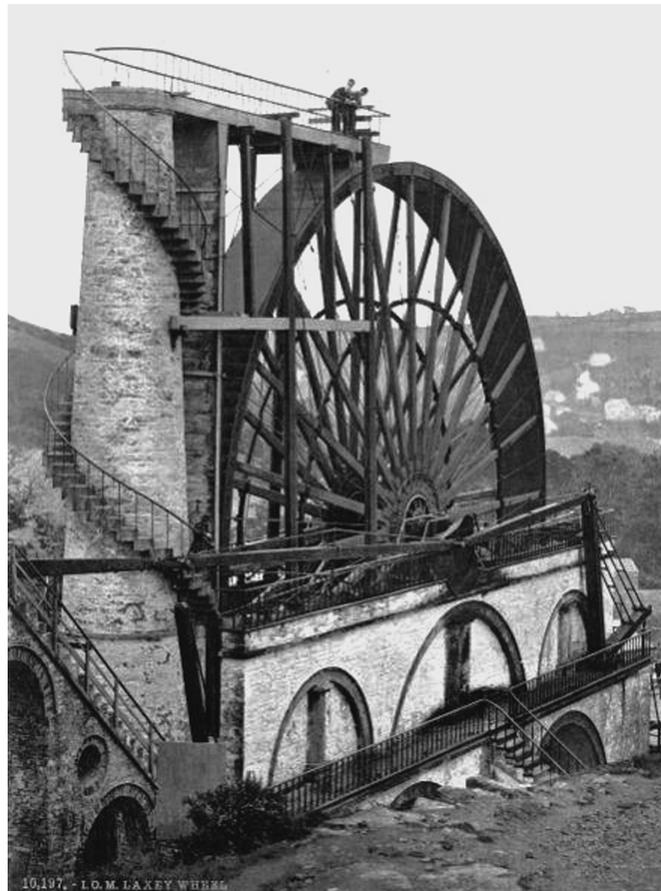


図2 マン島のレディ・イザベラ水車（1890～1905年ごろ）

出典：Library of Congress Prints and Photographs Division Washington

気機関が重宝された。

次に、水車で問題になったのが、その自然エネルギーゆえの不安定さである。水量は天候によって変化する。干ばつや洪水、凍結は、水車を停止させ、操業に大きな影響をあたえた。とくに、干ばつは、時として長期間にわたるため、水車を利用している製造業は操業を停止することもしばしばだった（レイノルズ p356）。

しかし、みな水車に頼っているうちはなんの問題もなかった。同じ問題を共有していたからだ。ところが、天候に左右されない動力機関の登場で話が一変する。

蒸気機関を備えた工場では、水車だけを使用している工場と違い、操業を停止する必要がない。蒸気機関を導入した工場の利益率だけが高まれば、投資家は工場に蒸気機関の導入を要求する。一方、利益率の低い工場には倒産する可能性も出てきた。ここで、水車だけ動力としている工場にとって、水車の不安定さは、深刻な問題へと変化していったのである（レイノルズ pp356-357）。

さらに、産業革命の進展とともに、工場の生産規模は増大し、その結果、出力の増強が必要になってきた。水車は出力を上げるために、木造から鉄製へ、大型化、貯水池の建造などが必要となり、初期コストが嵩む。一方、蒸気機関は、1800年以降、改良が進み、高効率化し、コストも削減されるようになっていた。

産業革命の前半では、蒸気機関は上下運動のみで、出力も低く、石炭を大量に消費していた。その運転

は不安定で、突然停止してしまうこともあったようだ（レイノルズ p355）。

しかし、こういった蒸気機関の問題を改善したのがワットであった。回転運動へと効果的に転換する遊星歯車機構（1791年）や蒸気機関の出力を一定に保つための遠心调速器（1798年）などを発明し、蒸気機関の持つ問題を解決した。

ワットの発明後ようやく、蒸気機関は、製造業へと普及していく。例えば、1790年にアークライトが、ワットの回転式蒸気機関を紡績工場の動力として使用している（平田 p289）。1790年代に入りようやく、蒸気機関は工場の動力として水車と争うようになる。

3-4. 鉄製水車と大型化

ワットの改良により、製造業分野での動力としての地位を獲得した蒸気機関であったが、すぐに水車を駆逐することは出来なかった。なぜならば、水車使用の飽和と蒸気機関の登場を受けて、水車も急速に発展したためである。

水車で出力を上げようとする、大型化する必要がある。しかし、従来水車は木材で建造されていた。そのために、ある程度の大きさまでしか建造することができなかった。

直径約12m、または幅約6～7.6m以上になると、水車の重量により、ひずみが生じるのである。この結果、約20～25馬力以上の木製縦型水車の設計は困難になっていた。また、素材が木材では、水で濡れたり乾燥することで、膨張と収縮を繰り返し、つなぎ目や留め金具が緩んでしまうのである。冬季に

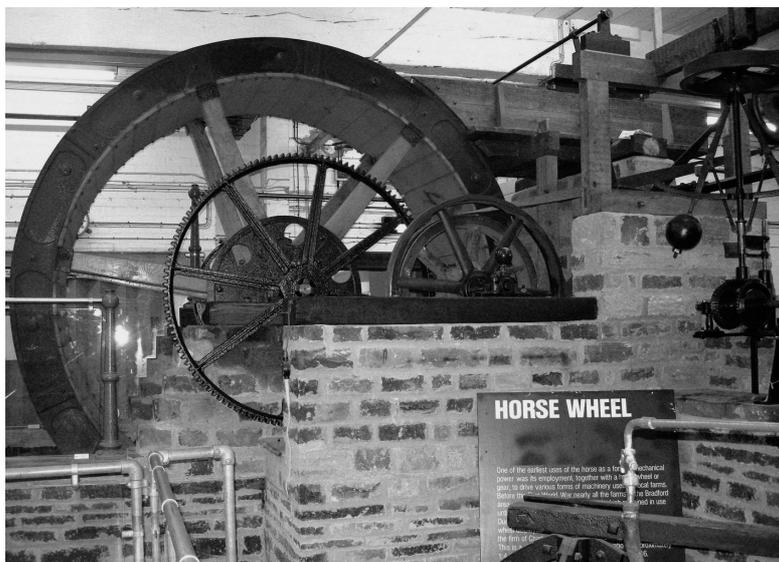


図3 木製部品と鉄製部品を組み合わせた水車 出典：Linda Spashett
ブラッドフォード産業博物館に保存されている。

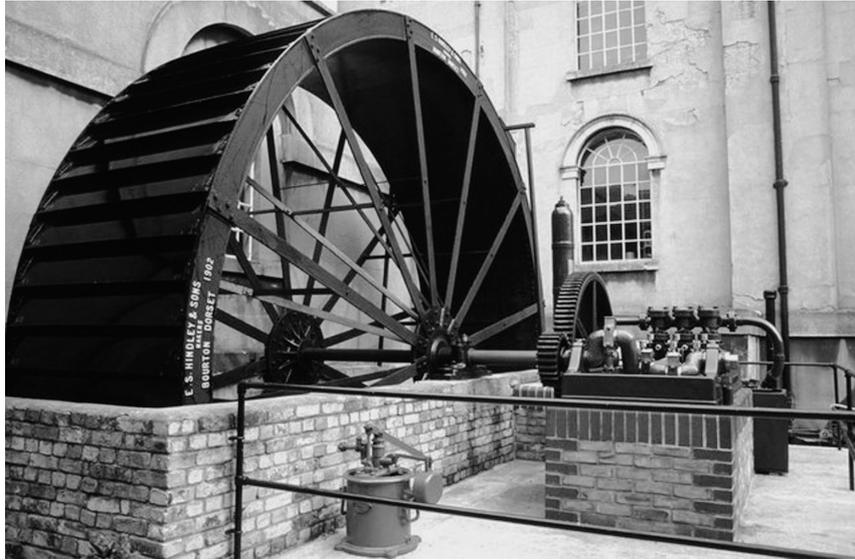


図4 全鉄製の揚水用水車 出典：Chris Allen
ケンブリッジ・スチーム・ミュージアムに保存されているもの。直径が約6 mあり、3つのポンプを動かしていた。

は凍結し、回転の障害になったりしていた。このために、木製水車は頻繁な修繕を必要とし、寿命も長くなかった。当時の水車技術者たちは、木製水車は5年から8年で修理または全交換を必要とするの見積もっている（レイノルズ p319）。

木材を金属に置き換えることで、これらの問題の多くは解決した。金属使用の最大の利点は、強度の増加であった。強度が増したことで、木材では不可能であった非常に大型で高出力の水車が建造可能になり、直径は約 21.3 ～ 24.4 mにまで及んだ。

たとえば、ディーンストンのジェームズ・スミスは、1830年から1835年ごろ、グリーンノックの近くにあるショー給水施設を利用して稼動する綿紡績機用に、直径約 21 mの鉄製水車を建造している（レイノルズ p340）。マン島のラクシーのレディ・イザベラ水車（図2）は、直径が約 22 mで、幅が約 1.8 mで、重量は 100t。200馬力以上の出力を出した。1854年に設置され、約 610mの深さから水をくみ上げていた（Musson p419）。また、当時イギリスの一部であったアイルランドのダブリンにいたジョン・マレットとロバート・マレットは、ダブリン近郊の製紙工場に、当時の最大と思われる直径 24.4 mの縦型水車建造している（レイノルズ p340）。

また、直径だけでなく、水車の幅も拡大した。典型的な木製水車（上掛け水車）は、高さ比べて幅は狭く、大部分が約 60 ～ 90 cmだった。幅が 6 ～ 7.6 mのものもあったが、ごくわずかだった（レイノルズ pp340-341）。しかし、鉄製の産業用水車では、幅

が広がった。

たとえば、ストラットのバルパーの工場用水車は、幅 4.6 mに対し、直径が 5.5 mしかなかった。1827年にバークウェルに建造された水車は、幅が約 5.5 mで、高さは約 7.6 mであった（レイノルズ p341）。巨大水車を多く製作したウィリアム・フェアベーンは、スコットランドのアリシャーのカトリン工場用に1827年に直径 15.2 m、幅 3.2 m、120馬力の水車2台を建設した（レイノルズ p342）。

同じくスコットランドのディーンストンでは、1780年ごろに、2つの紡績織物工場用水車を鉄製高胸掛け水車に置き換えることが計画された。フェアベーンが、はじめの2台を設計し、後にディーンストン商会のジェームズ・スミスによって引き継がれた。スミスは、フェアベーンの設計した2台に加えて、さらに2台の水車を設計し、1824年に建造した。結果、この工場は4台の水車から400馬力を得ることができるようになった（レイノルズ p342）。

このように、水車への金属使用は、1760年代から少しずつはじまり、鉄製部品の導入が試みられ、1770年から1810年の間に、徐々に木製から鉄製水車へと移行していった（図3・図4）。そして、1820年代には水車はほぼ鉄を使用して建造されるようになる。そして、産業革命も終わりに向かう1820年代から、1870年の間に多くの巨大縦型水車が建造されていったのであった。



出典：Wikipedia

図5 ニューラナークの第4水車
現在は観光用として稼動している。

3-5. 生き残った水車

鉄製水車の登場と大型化により、産業革命の後半になっても、蒸気機関は水車を完全に駆逐することはできなかった。確かに、1820年ごろまでに、蒸気機関がイギリス織物工業において、主要な原動機として水車に取って代わり、1840年には、綿織物工業で水力を利用している工場はごくわずかになっていた（レイノルズ p356）。しかし、ある統計によると、1838年では、イギリスの繊維工場の動力は、水車が2230台の2万7千馬力、蒸気機関は3053台で7万4千馬力であり、動力全体の25%を水車が担っていた（荒井 p83）。また、蒸気機関が多く使われていたランカシャーを除けば、綿紡績工場の動力のうち40%もが水車によって供給されていたのだ（レイノルズ p359）。

1位の座を譲ったとはいえ、その後も水車は、工場の動力として使用され続けた。それは、建造された水車が100年近く使用されていた事実からも明らかである。たとえば、1780年代に建設されたニューラナークの紡績工場では、1930年まで4つの水車が動力として150年間使用された（図5）。フェアバーンがカトリン工場用に建設した2台の水車は、1827年から120年間使用された。しかも、1947年に解体するときに、わずか3mmの歪みしかなかったことが確認されている（レイノルズ p343）。また、ディー

ンストンの工場用水車4台ほぼ125年間にわたって動力を供給した。マン島のレディ・イザベラ水車は、1854年から、排水していた鉱山が閉鎖された1929年までほぼ連続的に運転されたのである。

このように、イギリスの産業革命の近代機械制工場の発展過程においても、水車は、蒸気機に駆逐されることなく、非常に重要な動力源として、産業革命後も使用され続けていたのである。

4. 最後に

ここまで見てきたように、イギリスの水車利用は、日本のそれとはまったく違う形で発展してきた。特に、動力を利用しようという態度が際立つ。それは、製粉と揚水からはじまった水車利用が、多種多様な産業に拡大し、積極的に使用されてきた事実から見て取れる。また、イギリスの河川を埋め尽くさんばかりに増加した水車場の数もその証拠となる。

蒸気機関の技術革新に目が奪われがちな産業革命において、水車技術者たちは、水車を改良し、動力源として使用しつづけた。産業革命が完了したあとも、100年近くも水車は使われ続けた。この背景には、水車の自然エネルギーとしての特性があるのだ。

イギリスにおける水車と蒸気機関のコスト比較をしたチャップマンは、「1780年から1850年の間にわたって、水車は蒸気機関と競合した」と結論付けている（レイノルズ p361）。

その理由は、2つある。まず、ダムや貯水池、水路などの建設をあまり必要としない小出力の水車の場合、初期費用があまりかからなかったこと。そして、たとえ巨大水車であったとしても、燃料費は一切掛からず、運転費用が廉価であるからである。

つまり、水車を中世から産業革命以後まで使用していたイギリス人たちは、小規模水力の特性をよく理解していたといえる。なぜならば、現在、導入が進められている自然エネルギーの1つである小水力発電の特性も、水車のそれと同じだからである。

イギリスにもたらされた水車技術をはぐくんだヨーロッパの多くの国で小水力発電の導入が盛んな理由が、この辺りにあると言えるのではないか。イギリスの水車利用の歴史を振り返ると、小水力発電に対する認識やその導入になんらかの影響を与えている可能性は否定できない。

<参考資料>

- 荒井政治、内田星美、鳥羽欣一郎、産業革命の技術、
有斐閣、1981年
- 大石嘉一郎、日本産業革命の研究：確立期日本資本主義の再生産構造・上、東京大学出版会、1975
- 剣持一巳、イギリス産業革命史の旅、日本評論社、
1993年
- 平田寛、図説科学・技術の歴史：ピラミッドから進化論まで（下）、朝倉書店、1985年
- 堀江英一、イギリス工場制度の成立、ミネルヴァ書房、1971年
- T・S・レイノルズ、水車の歴史：西欧の工業化と水力利用、平凡社、1989年
- Chris Allen, *Waterwheel-driven waterpump, Kew Bridge*,
Wikipedia, 27/11/2009
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Waterwheel-driven_pump_at_Kew_Bridge.jpg
- Library of Congress Prints and Photographs Division
Washington, *Laxey Wheel*, Digital ID: ppmsc 08676,
US, 27/11/2009
- Linda Spashett, *Water wheel*, Wikipedia Commons,
27/11/2009
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bradford_Industrial_Museum_032.jpg
- Marku1988, *Loose Stream, Kent*, From Wikipedia
Commons, 27/11/2009
<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Tovil0142-143.jpg>
- Musson. A. E. *Industrial Motive Power in the United Kingdom 1800-70*, The Economic History Review, New Series, Vol. 29, No.3, pp415-439, 1976
- Wikipedia, *New Lanark Waterwheel 1*、27/11/2009
http://en.wikipedia.org/wiki/File:New_Lanark_Waterwheel_1.JPG