

## 水力利用の昔と今

Water Power Utilization — Past and Present

田 中 宏\*

Hiroshi Tanaka

## 1. はじめに

秀吉の家来に、黒田官兵衛孝高という名将がいた。「如水」と号したが、この人が次のような水五則といわれる言葉を残している<sup>1)</sup>。

- 一、自ら活動して他を動かしむるは水なり。
- 二、つねに己れの進路を求めて止まざるは水なり。
- 三、障害にあいて激しくその勢力を百倍し得るは水なり。
- 四、自ら潔うして他の汚濁を洗い、清濁あわせ容るる量あるは水なり。
- 五、洋々として大海を満たし、発しては雲となり、雨雲と変じ霧と化す。凝っては玲瓏たる鏡となり、しかもその性を失わざるは水なり。

清らかな水が、状況に応じ柔軟に姿や形を変えながらも、障害などに会えば激流となってこれを突破する強い力を持っていることに官兵衛は深く感銘を受けたものと思われる。

官兵衛ならずとも人間は有史以前の昔からしばしば水の力の強大さを眼のあたりにし、このエネルギーを有効に文明の中に取り込もうとした。

2. 古代の水力利用<sup>2) 3)</sup>

古代の人々にとって、穀物の精製、製粉は、大変な労働であった。特に製粉には、人力(奴隷の労働力)や牛馬の畜力などを利用してしたが、紀元前1000年頃からチグリス、ユーフラテス川の流域などの西アジアを中心に、水車が利用されるようになったといわれている。

ギリシャ、ローマ時代になると都市人口の急増により製粉需要も増大し、製粉用水車も従来の半馬力程度のものから3馬力程度の大型のものが利用されるよう

になった。その後、水車の利用範囲は漸次拡大され、大理石の切断、冶金の鞴(ふいご)の駆動用などにも用いられるようになったという。

中国でも後漢(1~3世紀)の頃から穀物の精製などに「水碓」(すいたい、水車利用の搗き臼)が用いられ始めた。その後、3~4世紀には、筒車(灌漑用の揚水をする水車)といったものも用いられるようになったという。

日本では、日本書紀に、推古天皇8年(紀元610年)高句麗の僧曇徴(どんちょう)が「碾磑」(てんがい、みずうすのこと)を伝えたのが始まりとされている。これがどのような物であったのかはよく分かっていないが、水車を利用した穀物の精製、製粉用の臼であったことは間違いない。また、それから約60年後に、水車を鉄の溶解に用いたとの記録も有る。おそらく鞴の動力として用いたものであろう。

その後9世紀には、太政官府が、唐にならって米作灌漑用の揚水水車を使用するよう奨励した文書を出した記録も残っている。

このように、古代の水力利用は、いずれも省力のための人力代替としての使用法が主であったが、当時の農業や冶金などの文明を支える動力源として広く用いられていた。

3. 中世の水力利用<sup>2) 3)</sup>

9~10世紀には、水車も段々大型化してきて、シリアでは直径27メートルに及ぶ揚水用水車が作られたという。この水車は、水車の側面の円周上に水を汲み上げる水箱を多数配置し、水車の回転によって水箱が水車下端に来たとき水を汲み取り、上端に来たとき傾いて横に設けられた樋状の水路に水を流し込むようになっているもので、ほぼ水車の直径の高さまで水を汲み上げることが出来るようになっている。

その後中世に入ると、他の工業分野の発達に伴ってこのような大型水車が工業用の動力源として利用され

\* ㈱東芝 京浜事業所エネルギー事業本部首席技監  
〒230 横浜市鶴見区末広町2-4

るようになってきた。

まずヨーロッパでは、ルネッサンス期以後、軍事用や貨幣用の金属需要の増大に伴って鉱山や金属精錬工業が発達したが、これに関連して、鉱山の排水、鉱石の粉碎、溶鉱炉への送風などの動力源として大容量の水車が多く用いられるようになった。これらには直径が10メートルを超える大型のものも使用された。

変わった例では、1682年、直径8メートルの水車13台をセーヌ川に据え付け、これによって235台のポンプを駆動し、毎日5千トンの水をベルサイユ宮殿へ給水するのに使用したという例がある。

ヨーロッパではその後、工業化による水力利用の発達に伴い、利用の便を図るために水源から幹線水路を引き、それを水車を利用する事業場に配水する管路網も設けられていた。あの有名なスイスのレマン湖の噴水の起源は、その昔、ジュネーブ近辺の水力利用の事業所に配水していた管路網から事業所の操業停止時の余剰水をレマン湖に放出するための放流管であったという<sup>4)</sup>。

日本では、江戸中期から後期にかけて、産業用動力として水車が精米、製糖、製油、製糸、窯業などに広く使用されるようになった。18世紀には、六甲山麓の製油業者が油絞り用の水車約80台を設置し、他の人力による油絞り業を駆逐したいという話も有る。またこの頃、灘の酒造米を精白するための米水車も50台近く稼動していたと言われている。

このほか、佐渡金山の鉱石粉碎用動力、あるいは佐賀藩や水戸藩において、大砲の砲身を作るための反射炉への送風用の鞆の動力としても利用されたという。

#### 4. 近代水車の誕生<sup>2)</sup>

以上述べてきた水車は、かなり大型のものでも、本体は木造で、一部に補強材として鉄が使用されているに過ぎなかった。従って、水車は低速回転のものしかなく、高速回転を必要とする場合は歯車装置を併用していた。

17世紀に入り、各種の機械に鉄材が使用されるようになり、水車も鉄材を用いているいろいろな改良が加えられるようになった。

その後18世紀の中頃、優れた数学者であり物理学者であったオイラーが水車の作動に関する基礎理論を確立した。その後しばらくこの理論は具体化されずにはいたが、1827年に至り、この理論に従って設計された反動型のフルネイロン水車が誕生した。これは、上から

軸方向に流れ込んだ水をもその下に設けた外向き輻流の案内羽根で放射状の旋回渦巻き流れとし、これでその外側に環状に配置された羽根を持つ回転羽根車を駆動するものである。1835年には、彼は、この形式で落差108メートルで作動する出力40馬力の水車を製作している。

その後ジョンバル水車、ジラル水車などといったものが発明されたが、特筆すべきは、1849年のフランス水車の発明であった。これは、外側から内向きに案内羽根を通して旋回しながら流れ込んだ水が、その内側に設置された羽根車を駆動する反動型水車である。この水車は、羽根車などの設計形状を変えることで30メートル位から700メートル位までの広範囲の落差に適用出来、かつ効率も高いので、現在でも発電用水車の8割位にこのフランス水車が用いられている。

その後1870年には、もっと高落差に適用出来る衝動型のペルトン水車、また1912年には低落差で優れた特性を持つカプラン水車が相次いで発明され、今日用いられている近代水車が一通り出揃った。

1774年にジェームス・ワットにより蒸気機関が発明され、いわゆる産業革命が起こって蒸気動力が多く of 産業分野で用いられるようになった。しかし、水利の便の良い所では、燃料の運搬が不要で運転経費が掛からずかつ煤煙などの環境汚染の少ない水車が依然として盛んに用いられ、近代発展に貢献した。

#### 5. 発電への利用、水力発電の曙

1879年にトーマス・エジソンが白熱電灯を発明し、電力利用に対する社会的要請が急激に高まった。

わが国でも、文明開化の波に乗って、1883年(明治16年)東京電灯が設立され、電力の事業化に着手した。欧米に遅れること僅か1年であった。以後わが国の電力事業は急ピッチで展開することとなる。

これらの電力事業の当初は、蒸気機関などの火力発電であったが、間もなく水力発電も採用されるようになった。わが国の電力の送電開始は、東京電灯が1887年、大阪電灯が翌1888年であったがいずれも火力発電であった。しかしこの後間もなく1892年には、琵琶湖疎水事業とリンクした日本初の水力発電所である蹴上(けあげ)発電所(京都市)が運転を開始することとなる。

水力開発は、治水及び利水事業と組み合わせて行なうことが多いが、この蹴上発電所の場合は、まさにその典型であった<sup>5)</sup>。

当時、東京遷都の後を受けて京都の衰退を懸念していた北垣国道京都府知事が、1881年、京都の興隆策の目玉として琵琶湖疎水計画を推進することを決定した。これは、滋賀県大津市三保ヶ崎から京都市蹴上まで延長8.7キロの水路を作り、これによって大阪湾と琵琶湖を結ぶ舟運と京都市の水道用水確保を狙ったものである。

この大土木工事の技術責任者として、北垣知事は工部大学校（現東大工学部の前身）を卒業したばかりの工学士田辺朔郎（1861～1944）を技師長に任命、すべての設計と工事指揮に当たらせた。

1885年の着工当初は、この疎水計画には発電事業は組込まれていなかった。しかし、米国における水力発電の成功を聞いた北垣知事らは、急遽米国を視察の上1889年に発電所建設を計画に追加したものである。

このような工事内容の変更にも拘らず、田辺技師は1890年には当初計画通り疎水工事を竣工させ、次いで翌1891年には蹴上発電所からの送電にも成功した。いかに北垣知事の支援があったとはいえ、若冠20歳代の田辺技師の土木技術と工事管理能力には驚く他はない。

この蹴上発電所は、当初は直流発電機80キロワット2台という小規模のものであったが、その後漸次増設され、京都市電への動力供給、西陣などの市内の工場電化に大きく貢献した。

日本のみならず世界的にも、この頃から、水車は一般工場動力用の原動機としての地位を電動機に譲り、その役割を専ら水力発電用原動機に絞って大容量化を目指すこととなる。

しかしながら、大容量水力の開発地点は、消費地から遠隔の地にあることが多く、このため、水力発電の大容量化には、遠距離高圧送電技術の発達を待たねばならなかった。

1899年（明治32年）福島県の郡山絹糸紡績が300キロワットの水力電気を3相60ヘルツ1万1千ボルトで22.5キロ離れた郡山への送電を実用化したのを皮切りに、1907年には東京電灯が山梨県駒橋からの1万5千キロワットの電力を75キロ離れた東京早稲田まで5万5千ボルトの電力で送電を開始した。次いで1915年には猪苗代水力の3万7千5百キロワットの電力を11万5千ボルトで225キロ離れた東京に送電し、以後の大容量水力の発展を可能とした<sup>2)</sup>。

## 6. 日本の水力発電

日本の近代化、工業化とあいまって電源開発が積極

的に進められた結果、1912年（大正元年）の日本の総発電容量は46万2千キロワットで水力と火力の比率はほぼ50：50であったが、1921年には総発電容量150万キロワットとなり水力と火力の比率は60：40となった。これを見ても分かるように、わが国の発展期における電源開発は、大きく水力に依存していた。

1910年（明治43年）わが国は韓国を併合したが、昭和10年代に至り、富国強兵策の一環として朝鮮半島における大規模水力開発を推進した。昭和17年に、鴨緑江の水豊発電所に当時世界最大容量機である10万キロワットの水力発電機を7台設置したのは当時の日本の水力発電技術のレベルの高さを示したものとえよう。

1945年終戦直後の頃の日本の電力事情は惨憺たるものであった。主だった火力発電設備は賠償に指定され、電源容量は極度に不足していた。それでも戦後の復興に注力した結果、昭和22年には、一般産業の生産高は戦前の40%程度までしか回復しなかったに拘らず、電力量は140%にまで達した。しかしそれでも戦後の異常な電化による需要増に対し不足で、昭和24年の経済復興5ヶ年計画の中で大幅な電源開発計画なども策定された。しかし、当時の資金難で、これらの計画は必ずしも順調に実施出来なかった。

その後、昭和25年からの朝鮮特需などで経済状態も好転し、昭和27年には電源開発促進法も制定されて、鋭意電源開発に注力した結果、電力事情は急速に改善されてきた<sup>3)</sup>。

この間の昭和35年頃までの電源開発時期は、いわゆる水主火従の時代であり、大容量水力が続々と開発された。佐久間、奥只見、御母衣、黒四などがそれである。これらの水力発電所がその後の日本の経済発展に果たした役割は非常に大きい。

しかし昭和35年を境として、わが国の電力は急速に火主水従へと傾斜して行く。これは、わが国の急速な経済成長の結果電力需要が急増し、短期間で開発可能な火力電源に頼らざるを得なくなってきたことと、一方では、経済的に開発可能な大水力電源が枯渇してきたことによる。

こうして昭和45年位までの高度成長期には、専ら大容量石油火力が電源開発の主流を占めることとなった。

しかるに昭和47年の石油ショックが起り、エネルギーに関するナショナルセキュリティの見地から石油一辺倒の体制が見直され、またSO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>などによる環境汚染、CO<sub>2</sub>の排出による地球温暖化などの環境問題が大きく取り上げられるようになり、原子力を

電源のベースとする方向に軌道修正されてきた。

ところが、原子力や大容量火力は負荷変動に対する応答が悪く、原子力では、負荷の如何によらず100%の一定出力運転が望ましいとされている。こういった負荷変動に対する応答性の低いいわゆる硬直電源の比率の増加による弊害を低減するため、負荷変動に対して応答の良い水力発電の比率をあるレベルに維持する必要があるとされている。この水力発電容量の適正比率は、全発電容量に対して15%程度といわれている。しかし現在のわが国では、この必要とされる水力発電容量をすべて在来水力（自然の河川水で発電するもの）で賄うことは、水力電源の枯渇から困難になってきている。

そこでわが国では、自然の河川水によらない水力、即ち揚水発電が20年位前から盛んに建設されるようになってきた。これは、深夜の負荷の低い時に原子力などの余剰電力を用いて下池の水を上池へ揚水しておき、昼間のピーク負荷時の変動負荷に対してはこの水を用いて発電しようというものである。これにより、深夜の余剰電力を吸収すると同時に昼間の変動負荷にも速い応答速度で対応出来ることとなる。

このような揚水発電は、現在のわが国の新設水力発電所の容量の大部分を占めるようになってきているが、これは本来の水力エネルギーの利用ではなく、一次エネルギーの生産には全く寄与するものではない。しかし電力系統の負荷変動調整用の蓄エネルギーシステムとして、非常に大きい役割を担っている。

わが国は現在、一次エネルギーの約5割を輸入石油に、更に原子力、石炭、LNGも含めた全体では約9割を輸入に依存すると言う極めて不安定なエネルギー基盤の上に立っている。その中で水力は、一次エネルギーを産出する在来水力の比重が低下しつつあるとはいえども、依然、わが国の国産一次エネルギーの約半分を供給しており、エネルギー源として重要な役割を果たしている。一方、わが国の包蔵水力は、小規模のものしか残っていないが、約3割は未開発である。貴重な国産エネルギーの活用という意味からも今後とも水力電源開発に注力して行くことが望まれる。

## 7. 世界的視点から見た水力

水力発電は、太陽エネルギーが地球に入射して、一旦熱となり、これが水分の蒸発、凝縮、降水の繰返しに用いられ、最終的に熱となって再び熱輻射で地球外に放出されるまでの間のエネルギーサイクルの途中でのエネルギー利用であり、それ自体は地球環境に何の影響も及ぼさない。しかし、最近、大規模水力開発による森林の水没、大規模人造湖による局地気候の変化による二次的環境効果などが問題にされるようになってきた。とは言っても、これも他の一次エネルギー源による環境へのインパクトに比べれば、甚だ低いと言えよう。

そういった観点からすれば、世界的に利用出来る水力は、環境への配慮は勿論必要であるが、出来る限り有効に開発利用すべきである<sup>7)</sup>。

表1 水力発電量の多い国（1990，年末）<sup>7)</sup>

国名	水力発電設備 (万kW)	水力発電量 (億kWh)	経済的 包蔵水力 (億kWh)	開発率 (%)
カナダ	6,027	3,050	5,930	51
米国	8,754	2,798	3,760	74
旧ソ連 (ロシア)	6,500 (4,257)	2,330 (1,670)	10,950 (8,520)	
ブラジル	4,555	2,072	7,510	28
中国	3,605	1,264	19,230	7
ノルウェー	2,663	1,216	1,700	72
日本	2,630	958	1,342	71
スウェーデン	1,630	731	950	77
インド	1,886	660	2,000	33
フランス	2,005	517	1,000	52
ベネズエラ	1,009	365	1,860	20
イタリア	1,538	328	650	50
北朝鮮	500	317	—	
スイス	1,235	309	410	75
オーストラリア	1,032	300	537	56

(出典) 15回WEC-1992, その他

(注) カナダは1991年末データ、自家発電を含む。日本のデータには混合揚水を含む。

表2 世界の大水力発電所(規模順)<sup>7)</sup>

	発電所	国名	設備出力 (万kW)	運開年
1	イタイブ	ブラジル・パラグアイ	1,260	1983
2	グリ	ベネズエラ	1,030	1986
3	グランド・クーリ	米	978	1942
4	サヤノ・シュセンスク	旧ソ連	640	1989
5	クラスノヤルスク	旧ソ連	600	1968
6	チャーチルフォールズ	カナダ	542	1971
7	ラ・グランデ第2	カナダ	532	1979
8	ブラーツク	旧ソ連	450	1961
9	ウスチ・イリム	旧ソ連	432	1977
10	ツクルイ	ブラジル	400	1984
11	ログン	旧ソ連	360	1990
12	イリヤソルテラ	ブラジル	320	1973
13	タルベラ	パキスタン	304	1977
14	葛洲壩	中国	271	1981
15	ヌレク	旧ソ連	270	1976
16	マイカ	カナダ	266	1976
17	ラ・グランデ第4	カナダ	265	1984
18	ボルゴグラード 第22コングレス	旧ソ連	256	1958
19	イタバリカ	ブラジル	250	1988
20	パウロ・アフォンソ第4	ブラジル	246	1979
21	カボラボッサ	モザンビーク	242	1975
22	ベネットWAC	カナダ	241	1968
23	チコアセン	メキシコ	240	1980
24	ラ・グランデ第3	カナダ	230	1982
25	ボルガ・レーニン	旧ソ連	230	1955
26	ジョン・デイ	米	216	1969
27	アイアンゲイト第1	ルーマニア/ユーゴ	213	1970

(出典) ウォーターパワー 1993

表1に世界各国の包蔵水力及び開発率を、また表2に世界の大水力発電所を示した。

大河川の多い国は大規模水力開発により安価な電力を豊富に入手することが出来る。豊富な包蔵水力を持つ国でも、電力消費の多い米国、ノルウェー、日本、スウェーデン、スイスなどは、70%以上を既に開発してしまっている。しかし豊富な水力が有りながらも、需要が無いあるいは消費地に遠いために開発がほとんど進んでいない国もある。

このような未開発水力を、国際的な経済協力で開発し、遠距離直流送電による近隣消費国への電力輸出によって発電国の経済振興を図ることをもっと推進すべきであろう。

また、国際的な研究課題として、このような遠隔地の大規模水力を、近い将来に来るであろう水素エネルギー時代における水素製造のエネルギー源として利用することも重要なテーマであると思う。

表2には載っていないが、現在中国では発電所出力1820万キロワット(70万キロワット×26台)という世界最大の三峡発電所の建設を推進中である。多大の資金と、100万人に及ぶ住民の移住という犠牲を払っての建設であるが、中国の現在の電力不足解消のために

工事着手を決定したものである。またベネズエラも、すでにグリ発電所という大規模水力を持っているが、同発電所のあるオリノコ川の豊富な水力を活用すべく、現在も下流にマカグア発電所という大規模水力を建設中である。ベネズエラは産油国であるが、産出した石油は輸出し、国内のエネルギー需要は水力で賄うという方針をとっている。

いずれにせよ、中国やベネズエラはとも角として、未開発の大水力地点を持っている国は開発途上国が多く、資金が無い。しかし、地球環境へのインパクトが少ないエネルギー生産を増やすといった世界的な観点からも、適切な経済協力によりこれを開発し、なんらかの形でその国のエネルギー収入も増やして共存共栄を図れるようにしたいものである。

## 参考文献

- 1) 中山：流れに学ぶ、機械の研究、42巻11号1990、p61
- 2) 日本大百科全書、小学館、昭61
- 3) ブリタニカ国際大百科事典
- 4) IAHF Bulletin 1990
- 5) 関西電力：蔵上発電所100周年記念資料
- 6) 渡辺：電力、岩波新書、昭29
- 7) 玉貫：国際的視点からの水力発電評価、電気評論、1993-12、p77