

ホ

永瀬唯の
サイエンス・
パースペクティブ



人間の営為を支える「揚水」のメカニズム

ン

6

永瀬唯(ながせ・ただし)
1952年生まれ。東京都立大学
理学部卒業。理工学系出版社
の編集を経て、科学技術ライター
となる。1987年、サイバーパンク
ムーブメントを契機として、技術文
化史、SF思想史を中心とした評
論活動を開始。明治大学理工学
部講師。著書『宇宙世紀科学読
本 スペース・コロニーとガンダ
ムのできるまで』(角川書店)、『腕
時計の誕生』(廣済堂出版)、『京
極夏彦の世界』(青弓社)、『欲
望の未来 機械じかけの夢の文
化誌』(水声社)ほか。

プ

日立創業のルーツの一つ

株式会社日立プラントテクノロジーの土浦事業所(旧日立製作所土浦工場)は、霞ヶ浦を擁するかすみがうら市を東に、研究学園都市を擁するつくば市を西にのぞむ、茨城県の内陸部、筑波山と太平洋にはさまれた緑濃い田園地帯にある。ここ土浦事業所では、圧縮機や送風機などもつくられているが、その生産の主役として真っ先にあげられるのはポンプである。

水など液体を吸い上げて高所に上げ、また遠くに押し出す大型ポンプの製造の大部分は、現在、ここ日立プラントテクノロジーの土浦事業所(社会・産業システム事業本部機械システム事業部)で行っている。

「日立製作所におけるポンプ製造のルーツは

1907(明治40)年といえますから、創業した1910年よりもさらにさかのぼることになります」(大谷健二事業所長)

日立製作所の前身は、久原鉱業所日立鉱山で電気機械の修理を担当していた付属工場で、当時、この修理工場の運用を任されていた小平浪平が、国産初の5馬力誘導電動機を製造した1910年を、その創業の年としている。

この工場が久原鉱業所日立製作所時代を経て、完全な独立を果たしたのは1920年である。

「1907年に設立された東京佃島機械製作所は久原系列の傘下工場として小型ポンプなどを製造、1912年に久原鉱業所佃島製作所に名前を変え、さらに1918年に久原鉱業所日立製作所と合併、その亀戸工場となり、1920年の日立製作所独立に伴い、正式に日立製作所亀戸工場と位置づけられました」(大谷)

のちにポンプの製造は、日立工場に移管されたが、戦後は亀有工場に移管され、1974年に土浦工場が新設されると、生産拠点をここに移すこととなった。

現在、汎用の小型ポンプを除き、日立ブランドのポンプのほぼすべてが、ここ土浦事業所で生産されている。

揚水の技術革新

——ピストンポンプから渦巻ポンプへ

ポンプとは、水などの液体を高く運び上げ、

また、遠くへと送るためのメカニズムをいう。

人間が現在の文明を築き上げる最初のきっかけとなったのは、およそ1万5000年前に発明された農業であるが、その農業が組織化され、古代の四大文明が、チグリス・ユーフラテス、ナイル、インダス、黄河のほとりに生まれたとき、重要となったのが、広い意味での治水という概念である。天然の水路である河川の流れを人工的にコントロールし、人工の水路をつくって耕地へと運び、人の力や機械を使って耕地に注ぎ、そして、余剰の水を排除する……。

治水、用水、灌漑、排水。ここで重要となるのが水を高所へと汲み上げ、押し上げる「揚水」のメカニズム、つまり、ポンプだ。

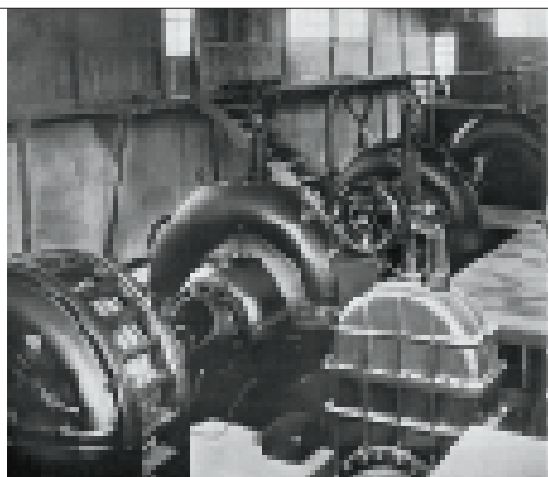
古代には、広い意味での治水関連技術にとどまったポンプの応用範囲は、時代を経るにつれてさらに広がっていく。

なかでも重要な変化は、18世紀にイギリスやヨーロッパで始まった産業革命だった。

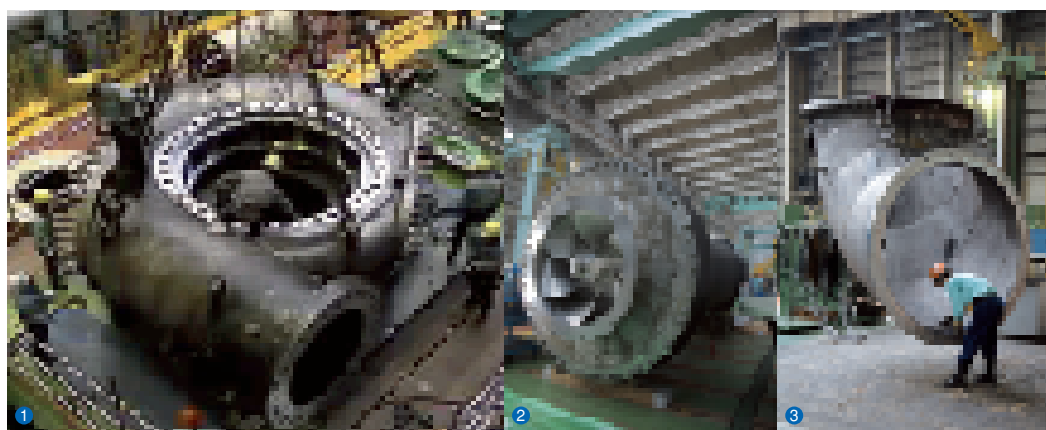
まず、新式のポンプが必要とされたのは、工業生産の基礎となる原材料としての鋼鉄や、石炭を掘り起こすための鉱山だった。掘れば掘るほど出てくる水、わき水や突然の出水をどうやって排水するかという問題に、従来の人力ポンプではこたえることができなかったのだ。

実は、ワットの蒸気機関の原型となったニューコメンの蒸気機関は、まさにその鉱山で、わいてきた水を排水させるための新方式のピストンポンプ用に関連されたものだった。

ニューコメンに続き、ワットが改良開発した新型の蒸気機関は、鉱山での排水のみならず工場に設置された大型機械の動力源にも使われ、しばらくのちには、物資運送の主役だった運河に代わって物資や人々を運ぶ蒸気鉄道にも用



茨城県長井戸沼 渦巻ポンプ(150馬力) 1918年



土浦事業所の最新のポンプ製造工程。①軸多段タービンポンプのスパイラルケーシング、②立軸斜流ポンプの羽根車部(口径1650mm)、③立軸斜流ポンプのデスチャージケーシング



東京都芝浦污水処分場 渦巻ポンプ
(口径910mm) 1933年

いられるように
なった。

蒸気動力の普
及に伴う産業
革命の進展と
もに、ピストン
式の蒸気ポン
プの応用範囲も
広がった。

工場用大型蒸気機関の冷却用に、人口が集
中する都市部の上下水道を支えるために、また、
鉱山ばかりでなく鉄道トンネル工事にも、また、
地下鉄用トンネルの工事と維持のためにも、地
下水排水のためのポンプの重要性は増していった。
そのような時代的要請を受け、19世紀初め
の1818年には、アメリカで全く新しい方式の
マサチューセッツ・ポンプが発明された。現在で
は、渦巻ポンプと総称されるメカニズムだ。

蒸気の圧力とそれが冷えたときの真空を利用
して、水を高くに吸い上げようとする従来の
ピストンポンプには大きな欠点があった。吸い上
げる水の高さと大気の圧力が一致する10mを
超えると、水の柱の上端が真空となってしまう、
これ以上高くは水を運べなくなるのだ。さらに
ピストンポンプは回転数が低く、大容量を送水
するには大型となり、場所をとる欠点もあった。
そこに登場したのが渦巻ポンプ、別名遠心ポ
ンプだった。

渦巻ポンプでは、インペラと呼ばれる回転羽
根を回転させることによりその軸部から水を

吸い込んでゆく。インペラとはつまり、吸い込み
用の内蔵プロペラである。

インペラの回転によって吸い込まれた水は中
心部から外側へ、つまり、鳴門の渦潮や台風の
風と逆の向き、外周方向へと渦を巻きながら
吹き出してゆく。この水流を受け止めた外周
部の空間には、遠心力によって強大な圧力が与
えられる。この水の流れを外周中空部（ボリユ
ー）から吐き出し口へ導くことにより、渦巻ポ
ンプでは、きわめて大きな高低差を超えて、水
を高く上げる（揚げる）ことができるのだ。

さらに回転型のため、高速・小型化が可能
な長所を有している。

この画期的な性能により、渦巻ポンプとその
発展型を含む回転型ポンプ（ターボポンプ）は、
駆動機の蒸気機関から蒸気タービン、電動モ
ーターへの転換による高速化と歩調を合わせてポ
ンプ技術における花形となった。現在も、水など
の液体を吸い上げ、押し上げ、送り出すためのポ
ンプの大部分は、渦巻ポンプに代表される回転
方式のターボポンプによって占められている。

軸流ポンプ、斜流ポンプ——井口理 論に基づく高性能国産ポンプ誕生

日立とポンプとのかかわりは、前述したよう
に、東京佃島機械製作所が設立された190
7年にまでさかのぼる。このころ、この佃島の工
場では、小型ポンプが製造されているが、日立で
ポンプの開発と製造が本格的に始まるのは、大

正になつてからである。

この時代、日本のポンプ技術発展のキーパー
ソンとなった人物がいる。ヨーロッパ留学などを
経て、帝国大学教授に就任した機械工学の井
口在屋博士である。井口博士は、1905年に、
世界的にみても画期的な渦巻ポンプ理論を発
表、この理論を用いた小型ポンプを試作してい
る。

渦巻ポンプは、19世紀の初めに発明されて以
来、大気圧よりもずっと高い圧力で水を吹き出
すポンプの主流となっていたが、その開発はもっ
ばら経験に基づいており、理論的研究はほとん
ど進められていなかった。

そこに登場したのが、流体力学の最新の成
果をもとに組み立てられた井口博士の「渦巻
ポンプ」だった。

「それまでのポンプ理論は、線である一次元
の解析にとどまっていた。井口博士の理論
は、その解析の範囲を面である二次元、立体を
意味する三次元へと拡張し、のちの軸流ポンプ
や斜流ポンプの理論へと直接つながる、欧米に
も例が見られないものとなったのです。当時の

日本のポンプ技術はまだ、欧米からの技術移転
に頼っていたところが多かったのですが、この井
口理論に基づき、日本では世界的にみても最先
端の渦巻ポンプが製造できるようになったので
す」（吉川慶彦ポンプ・送風機統括部長）

井口博士の渦巻ポンプは、試作型でさえも、
揚程、つまり、ポンプ1台で水を揚げられる高
低差で40m近く、効率も70%近くと、当時とし
ては驚異的な性能を有していた。

また、井口博士の理論の功績は、渦巻ポン
プの領域にとどまるものではなかった。

ターボポンプ——回転式のポンプには、渦巻ポ
ンプ以外にも、軸流ポンプと斜流ポンプがある。

渦巻ポンプは羽根車の回転による遠心力を
介して、軸部から吸い込んで送り出す水に大
きな圧力を与える。圧力が高ければ、高低の
差が大きくても、水を高いところに送り込むこ
とができる。

しかし、ポンプにはこれとは別の使い道もあ
る。広い面積に絶えず大量の水を送る大規模
な灌漑や排水には、大きな高低差を克服でき
る能力——高い揚程差よりも、一台のポンプで



九州電力諸塚発電所 立軸多段タービ
ンポンプ(5万6500kW) 1961年



アラブ連合共和国 斜流軸流ポンプ
1960年代

どれだけの量の水を送り出せるかが重要となる。この場合、入ってくる水と出ていく水の圧力の差はさして必要ない。

このために考案されたのが軸流ポンプだった。軸流方式では、水の吸い込み口と吐き出し口とは同じ直径のチューブを構成している。このチューブ状の中央には、チューブの内径とほぼ同じ大きさの羽根車が置かれている。

その原理は、飛行機の翼が空を飛ぶために揚力を生み出すのと同じ。厚みをもった羽根の回転運動によって生じた羽根の内と外との水圧の差、つまり、揚力によって水を回転軸の後方へと押しやるのだ。軸前方から流れ込んだ水を、羽根車全体で受け止め、軸方向後方に押し出すため、軸流ポンプと呼ばれる。

回転方式のターボポンプには、ほかに、遠心ポンプの遠心力と軸流ポンプの揚力の両方を利用する斜流ポンプがある。

軸流ポンプや斜流ポンプの羽根は、飛行機の翼やプロペラ、船のスクリーンと同じく、立体的な形状、翼断面で性能が決まる。つまり、軸流ポンプや斜流ポンプの登場によって、渦巻ポンプを含めたターボポンプの開発には、航空工学や船舶技術と同じ、流体力学の高度な理論と、

その応用が必要とされることになったのである。井口博士の渦巻ポンプ理論は、ライト兄弟以後の航空工学における翼断面研究に先行して、ターボポンプの開発に三次元的な解析をもちこんだものでもあった。

農業、上下水道、産業プラント、発電……社会・産業インフラとして
経済成長を支える

こうした成果をふまえ、1926年にはすでに、東京市の淀橋浄水場に日立、荏原、三菱の国内産ポンプが採用され、外国産ポンプに比較しその真価が認められることになった。

日立製作所では1932年、愛知県蟹江川揚水機場に可動翼ポンプを納入し、1933年には、東京芝浦の汚水処理場にターボポンプを納入、1936年には、八幡製鐵所にボイラー給水ポンプも納品している。

「このように、渦巻ポンプにおいてはもちろん、ターボポンプ全般においても、日立は戦前すでに、世界に伍した製品を生み出すことになりました。ただし、その応用分野は、農業、上下水道、治水・排水など社会的インフラを中心としてお

り、火力発電設備の大型ボイラー給水用など産業向けについては、海外からの技術移転に頼らざるをえないものもありました」(吉川)しかし、その遅れも、戦後の急速な復興と、これに続く重工業の発展とともに、克服されていく。

ここで興味深いのは、1950年代から'60年代初めにかけて、日立が納品した水力発電用の揚水ポンプだ。

ダムにためた水を落下させ、そのエネルギーを電気に変えるのが水力発電であり、その水を水力発電所用に揚水してやるというのは、ちょっと不思議に思える。

水力発電にはダムの上方に設けた池(ダム湖)に水をため、これを電力源とする。その水を安定して保持するため、揚水発電システムでは、電力消費が少なくなる夜間に、余剰電力を利用して下流の池にためた水を上方のダム湖に戻してやるのだ。発電時と同じ水路を用い、ポンプで水を逆流させるこのシステムは、1952年、福島県の東北電力沼沢沼発電所で運用を開始した。また、1961年には、当時は最大級の九州電力諸塚発電所の調整池を利用して、揚水発電が行われたが、ここにも、日立のポン

プが活用されている。

1960年代には、製鉄や化学プラントなど産業用、なかでも火力発電所のボイラー給水ポンプや循環水ポンプが多数、製造され、日本の高度成長をその足元から支えることとなった。

その一方で、1970年代のオイルショックを契機に、エネルギーの安定供給の観点から原子力発電が推進され、この結果、原子力発電所用の多種多様のポンプが開発、製造されてきた。最近では地球温暖化防止の観点から二酸化炭素を排出しない原子力発電システムが再度注目されている。

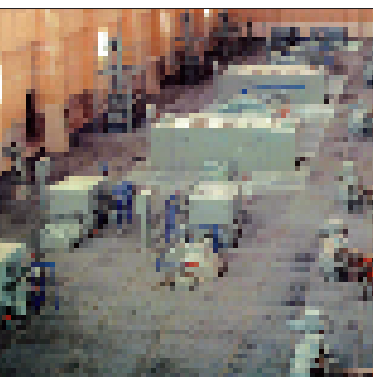
コンピュータ解析技術と模型シミュレーションにより究極の性能を実現

では、土浦事業所におけるポンプ製造の現在の柱はどこに置かれているのだろうか？

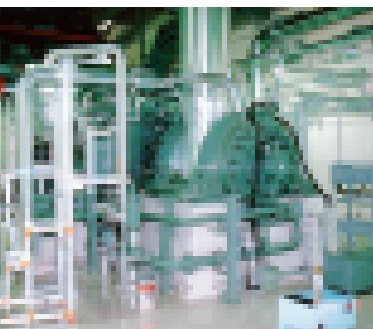
一言でいえば、それは原点への回帰である。

19世紀、ポンプは、鉾山やトンネルなど地下構造物の排水用として利用されはじめた。

現在の大都市では、地下鉄などの社会インフラはより深く、大深度と呼ばれる地下深くへと延びつづけている。さらに都市を洪水から守るための巨大な地下水槽。こうした地下構造物の維持のためには、わき水や排水を迅速に、確実に処理するための排水設備が常に必要とされる。文字どおり見えない構造、不可視の都市インフラとしての排水システムの需要は今後もさらに高まるはずだ。



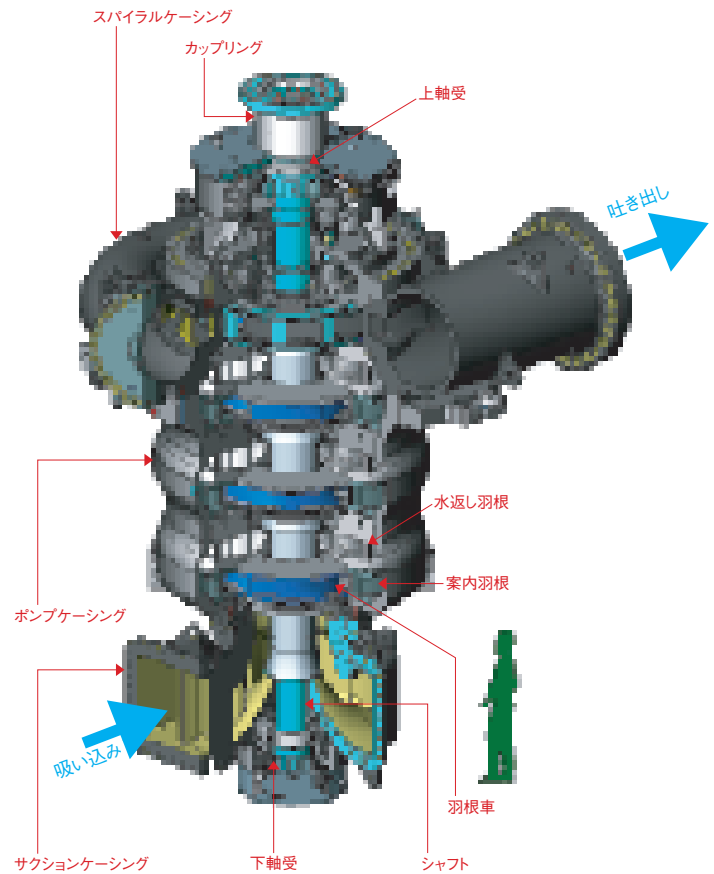
水資源開発公団霞ヶ浦用水機場
両吸込渦巻ポンプ(口径
1650mm 8000kW)1986年



東京電力柏崎刈羽原子力発電所
給水ポンプ 1993年



エジプト・ムバラク・ポンプ場
立軸片吸込渦巻ポンプ(口径
2400mm 1万2000kW)2003年



米国・エドモントン 立軸多段タービンポンプ (8万馬力) 2006年
サクシヨンケーシングに吸い込まれた水は、遠心型羽根車の回転により昇圧し、案内羽根、水返し羽根で効率よく圧力エネルギーに変換された後、スパイラルケーシングで送水される。

また、四大文明発祥の時期から始まる治水、用水の分野においても、大型ポンプの活躍は続いている。

国内なら、たとえば1988年には、土浦事業所のすぐそば、霞ヶ浦から筑波山まで水を運び、ここから水路を用いて茨城県南部に農業・工業・水道水を運ぶ霞ヶ浦用水ポンプステーションが稼働を始めた。約60mの高低差(揚程)を超えて水を運び上げるのに使われているのは日立製の巨大ポンプである。

また、世界的に見ても、日立の大型ポンプは上水用下水用、また灌漑用に活躍している。

海外のプロジェクトで特筆すべきは、カリフォルニア州北部から同州南部へと、山岳地帯の600mの高低差を超えて生活用水を運ぶエドモントン・ポンプ場に納品される世界最大級の

ポンプ4基だ。また、エジプトのナイル川上流の巨大人工湖ナセル湖から膨大な水を汲み揚げ、トシユカ地区とその西方に広がる広大な砂漠地帯を灌漑、緑化しようというムバラク・ポンプ場も忘れることはできない。

両プロジェクトに用いられるポンプを直接担当する松井志郎(ポンプ・送風機統括部海外システム計画部長)は語る。

「来年から納品が始まるエドモントンのポンプは、施設更新に伴って発注を受けたものですが、現在世界でも最も優れた性能のポンプとなっています。モーター出力は4基で32万馬力にも及びますが、発注元のカリフォルニア州水資源局が要求した出力効率は91.2%以上。これを、われわれは、最新のコンピューター解析技術と模型によるシミュレーションで解決し、92%を

超える高効率化に成功しました。規模・性能ともに、文字どおり、世界最高のポンプといえるものです」

井口博士のつくり出した渦巻ポンプの効率は70%。それでも当時は、驚異的な高効率とされた。それを現在では軽々と90%をも超える効率の、しかも、超大型高速のポンプが建造されつつあるのだ。

その驚異的な性能を実現する鍵となったのは、コンピューター解析技術である。

こうした解析・流体力学を専門とする田中定司(ポンプ・送風機統括部 ポンプ・送風機設計部 主管技師)は語る。

「ターボポンプや船舶のスクリューを高速化する場合、圧力の局所的な低下に伴って水中の気体成分が放出され気泡となるキャビテーション現象が、最大のネックとなります。大気圧状態ではわずか毎秒14mで気泡が発生し、これにより羽根は空回りして性能は低下します。また、気泡のはじけるときに発生するエネルギーは、騒音を生みます。さらに、この気泡の壊滅により、ポンプの内壁や羽根には局所的な衝撃が与えられ、ミクロな破壊現象によってポンプの寿命も縮まっています。

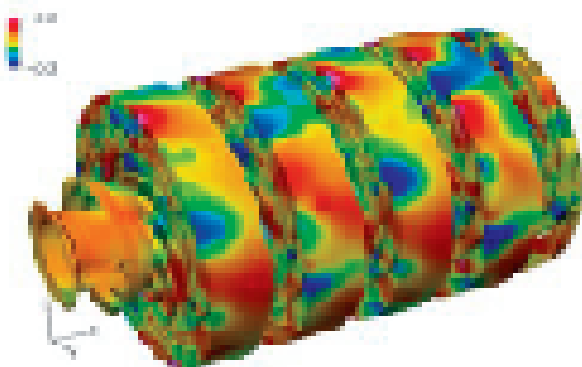
突然、しかも不連続に泡が発生するのは、水と空気(泡)という物理的な性質を全く異にする物質がかかわっているからです。そのために、こうした現象は従来の設計では近似的に扱うことさえ難しかったのです」

キャビテーション現象のシミュレーションを可能にしたのが、コンピューター解析技術であった

わけだが、エドモントンの場合には、さらにレーザー硬化型の樹脂を用いて、精密な三次元模型を迅速につくり出し、模型シミュレーションを重ねて、こうした究極の高効率を実現した。

現在、海洋研究開発機構地球シミュレータセンターで運用されている地球シミュレータでは大規模な実現象もシミュレートできる。これにより、ボイラー給水ポンプの全流路を同時に解析し、インペラが発生する圧力脈動によるポンプ全体の振動、さらには騒音まで予測することが可能になっている。

大地に豊かな水をもたらし、都市部の住民に飲み水を提供、都市構造を維持するために過剰な水を排出する。日立の大型ポンプは、人間のあらゆる営為を支えるために、今この瞬間も活躍しているのである。



スーパーコンピューターを使った圧力脈動解析(遠心多段ポンプ)