

三菱パーソンズ・タービンとパーソンズ・タービンの盛衰 (<技術解説>「機械遺産(4)」)

坂上 茂樹

Citation	Lema. 529; 15-21
Issue Date	2017-10
Type	Journal Article
Textversion	Publisher
Rights	このコンテンツは、「私的使用」や「引用」など、著作権法上認められている適切な方法にかぎり利用できます。その他の利用には、著作権者の事前の許可が必要です。

Self-Archiving by Author(s)
Placed on: Osaka City University Repository

三菱パーソンズ・タービンとパーソンズ・タービンの盛衰

Mitsubishi Parsons Turbine and Decline of the Parsons Turbines

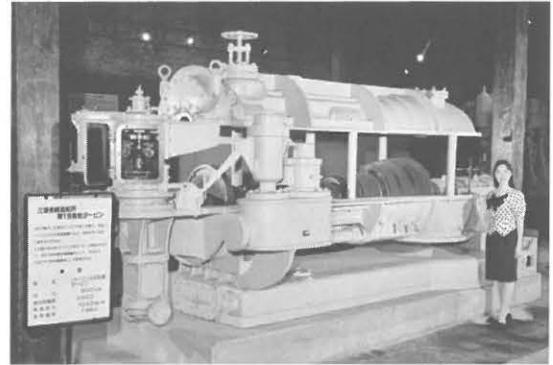
坂上 茂樹*
Shigeki Sakagami

はじめに……パーソンズ・タービンの 成立と展開

近代的反動タービンは、機械工学を学んだ後ケンブリッジで数学を修めた技術者 C. A. Parsons (英: 1854~1931) の圧力複式反動タービンから始まった。パーソンズ・タービン (以下, PT) はまた本格的な陸船用蒸気タービンの先駆けでもあった。パーソンズは 1884 年に彼のタービンに関する最初の特許を得た。翌年には発明博覧会に発電機直結型 10 HP (7.46 kW) /18000 rpm. の PT が出品され、以後、'88 年までに PT は小出力の船用補機として販売実績を重ねていった。

'89 年に独立したパーソンズは C. A. Parsons and Co. を設立する。一時期、元の会社との間に発生した特許権帰属問題のもつれから多段式遠心ポンプのような構造を有する輻流型^{ラジアル}タービンに逃げ道を見出したパーソンズは '93 年に特許を穩便に買い戻し、'94 年には船用蒸気タービンに関する重要な特許を取得した。この年、彼は Marine Steam Turbine Co. を設立し、'97 年にこれを Parsons Marine Steam Turbine Co. へと商号変更した。'98 年には最初の特許の延長を申請して許可され (1903 年まで)、以後も彼は自身の名を冠した陸船用タービンの発展に係わり続けていく。もちろん、イギリス海軍をして大艦巨砲主義の流れを領導せしめた一大要因は、その原動力としての PT の存在であった。

PT の国際的な波及について一瞥すれば、最も早くこれを導入した有力企業は 1886 年に設立され、今日においても GE に次ぐアメリカ第 2 の重電・重機械メーカーの地位を保つピッツバーグの



解説によれば、1980 年製、500 kW タービンは回転数 2,400 rpm.、段落数 84. 蒸気条件 1.03 MPa (13.26 kg/cm²)、186°C. 発電機は 625 kVA. 翼材は高压部 23 段が銅、中・低压部 61 段は真鍮で構内で自家発電用に使用された。

図1 機械遺産第4号 三菱パーソンズ・タービン

Westinghouse Electric 社である。技術導入契約が締結されたのは 1895 年であった。二番手はスイス、バーデンの Brown-Boveri = BBC (現・ABB) である。同社は 1891 年に電機メーカーとして設立され、発電機を主要製品としていたが、蒸気機関メーカーに対して従属的地位に甘んずることを潔しとせず、タービン化の趨勢を看取し、高速回転型発電機開発にめどを立てた上で 1900 年、PT の技術導入に踏み切った。三番手が三菱合資会社 (長崎造船所) であった。契約は 1904 (明治 37) 年 11 月に締結され、当初から陸・船用タービン技術の導入という内容であった。以上 3 社が言わば PT ライセンサーの世界御三家をなした。

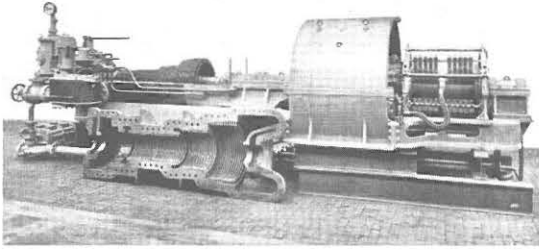
なお、日本海軍は 1911 (明治 44) 年、カーチス・タービン (米: Curtid, GE) の導入に引き続き、PT についても導入の方針を決定、9 月 1 日には日本帝国海軍、三菱合資会社、パーソンズ社及びパーソンズ卿との間に長崎造船所を主たる受け皿として 1928 (昭和 3) 年 8 月 31 日を期限とする製造権購入契約を締結した。この時、長崎造船所

* 大阪市立大学教授
Osaka City Univ., Prof.

は既に民間用として若干ではあるがPTの製造実績を挙げていたため、本の契約においては三菱の優先権・実績を重んじ、海軍艦艇用動力としてPTを用いる際にはその6割以上を三菱長崎造船所が製造するむねうたわえることとなっていた。

PTの技術的得失

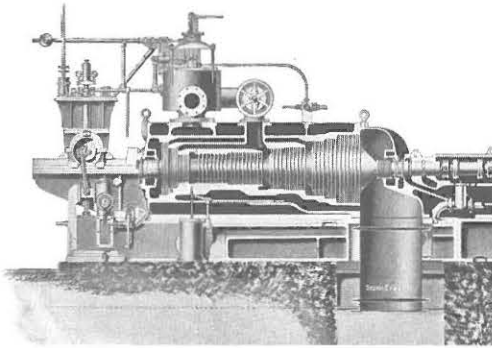
図2として掲げるのはしかし船用主機ではなく、機械遺産第4号に類似した比較的小出力のPTが船用補機、具体的には発電機駆動機関として実用された例である。



Alex Richardson, *The Evolution of The Parsons Steam Turbine*, London, 1911, Fig.338 (facing to p.199).

図2 機械遺産第4号に近いサイズ、出力375 kW (DC 110 V) のPTターボ発電ユニット

同じクラスのPTの断面見取り図が残されている(図3)。本機はターボ送風機直結駆動用原動機として用いられた個体である。

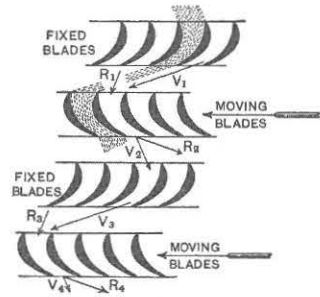


from *ditto*, Fig. 349 (facing to p.212).
バランス・ピストン群(B)に注意.

図3 類似のPTの縦断見取り図

これらのPTや機械遺産第4号のPTがなぜ、かくも間延びしたやたらに段数ばかりが多い構造を採らねばならなかったのかという疑問は、その作動原理にさかのぼれば直ちに水解する(図4)。

PTにおいて静翼列はケーシングに固定され、動翼列はローターに植込まれている。PTにおいて蒸気は静・動翼列の中で均等に膨張させられ



D.,A., Low, *Heat Engines*, London, 1930, p.434 Fig.537.

図4 パーソンズ・タービンの作動原理

る。すなわち、蒸気は蒸気室から先細ノズルの役割を担う第1段静翼列に入り、これを通過する間に膨張し速度 V_1 まで加速させられ第1段動翼列に進入する。動翼列は図では左方向に回転しているため、蒸気は動翼列に対してその周速を差し引いた R_1 なる相対速度で進入する。

静翼と同じ断面形状を有する第1段動翼の間を通過する際、蒸気はその進行方向を変えられ動翼にはその轉向反力が及ぼされる。また、蒸気は速度 R_2 まで膨張・加速させられて第2段静翼列に向うから、この加速反力もまた動翼に対して跳ね返ってくる。轉向と加速、2つの反力のトルクへの貢献度は半々に割り振られている。

第1段動翼列自身の回転のため、第2段静翼列が受取る蒸気流れの速度は R_2 ではなく V_2 となる。ノズル代りの第2段静翼列を通過して V_3 まで加速された蒸気は第3動翼列にその周速を差し引いた R_3 の速度で進入し、 R_4 まで加速され、第2動翼列の周速を差し引いた V_4 の速度で第3静翼列に進入し、以下、同じことが繰り返される。

各段ごとに消化される断熱熱落差、つまり各段ごとにおける蒸気の膨張度は圧力複式衝動タービンにおけるよりも低く設定されていた。これでは同じ出力を発揮するのにこの手の衝動タービンよりもかなり大きな段数が必要となるから、構造的に多段化、長大化しやすく、脆弱かつコスト的にも不利であった。

しかしあえてそうするには狙いがあった。パーソンズは蒸気の絶対速度を抑え、なおかつ翼車ピッチ円半径を相対的に大きくすることによって速度比、すなわち絶対速度に対する動翼列の周速の比を1に近い値に設定し、かつ、適正な翼断面形状を用いることによって動翼列内に穏やかに進入した蒸気流れの轉向・加速を極めて滑らかに行

わせようとした。

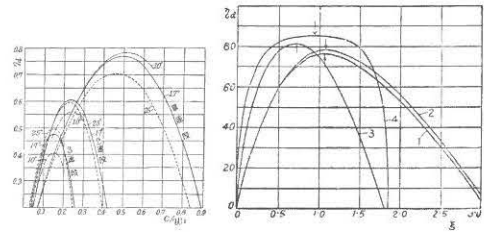
であればこそ、PTの翼材は13Cr鋼等の耐蝕性に富む難削材からではなく、黄銅等の加工容易な非鉄金属で間に合わせることができ、その複雑な翼断面はパーソンズ社からライセンス契約の一環として支給された金型を用いて順次、帯板を引き抜き加工することによって成形することもできた。

PTにおいては上述のとおり、動力（トルク）の半分は衝動タービン同様の轉向反力に、他の一半は蒸気が動翼列間において静翼列間におけるとまったく同じだけ膨張・加速させられる際に生ずる加速反力に由来する。その流体力学的根拠としてPTにおいては静翼と動翼に上述のとおりまったく同じ先細ノズル状の翼間流路を構成する翼断面形状が与えられていたが、その断面画法はながらく秘匿され、天才技術者パーソンズの脳裏に留まっていた。今日でもそれは解析的ではなく、コンピュータ・シミュレーションによってのみ到達されるモノであり続けている。

さらに、注目されるべき点として、速度比と効率（線図効率）との関係を示す図5に表現されているとおり、実用レベルにおいて衝動翼（次図、左）とパーソンズ翼（図5、右の反動タービン諸曲線の“4”）とを比べるとエネルギー利用効率は後者のほうがかなり高いという事実がある。この理由だけからしてもPTは熱機関として非常に優れた資質を有していたことになる。同じく、蒸気を滑らかに流すPTは速度の変化に対して著しく寛容で、その効率は天井が速度比0.6から1.3あたりにまたがる平たいドーム状の曲線として表され、回転数が真ん中の0.9付近から多少上下にズレても効率の低下は少なかった。これは設計上においても実用上においても望ましい性質であった。

なお、衝動タービンの内、単速段はド・ラヴァル・タービンや圧力複式衝動タービンの1個の段落、2速段は2動翼列1段の、3速段は3動翼列1段のカーチス・タービンである。これらのめんめんにはのちほど、ご登場願うことになるので念のため。

以上の長所に加え、1段当り熱落差が小さく多段化せざるをえないというPTの一面の短所は、各段のつながりが滑らかで段通過時の蒸気流れに無用の乱れや渦を生ぜしめない、という長所と表



菅原晋雄「改著 蒸気タービン」第3版、養賢堂、1955年、71頁、第2.42図、81頁、第2.52図。
角度はノズル角。右図“4”=PTの場合、ノズル角は20°。

図5 速度比（横軸）と効率（縦軸）

裏一体の関係にあった。これを要するに、単純な熱力学的・流体力学的効率からすればPTは他の諸形式に優れた特性を有していた。

しかし、好邪魔多し、以下に、PTにまつわる問題点を検討してみよう。蒸気の膨張を一樣にやどみなく行い高い効率を発揮できるはずのPTの効率は現実には圧力複式衝動タービンのそれとほぼ等しいところに落ちていた。それはPTが構造的脆弱性や高コスト以外にも現実的な問題ないし固有の構造的欠点を抱えていたからである。

まず、軸流反動タービンは各静・動翼列の前後に圧力差を発生させることによって初めて機能する。この時、静翼の先端と胴型回転子、動翼の先端ないしは翼縁抑えと車室との間に急激な熱膨張に対する逃げとして確保されていなければならない狭い隙間を通じて高圧側から低圧側へと蒸気がすり抜け、渦を発生させるとともに熱エネルギーの散逸（内部漏れ損失）が発生してしまう。

また、この圧力差に付随する現象として、各動翼列および段車式または円錐胴車に作用する圧力差の結果、PTの軸には衝動タービンにおけるそれと比べてかなり大きなスラスト（推力）が働く。これを放置することはできないのでスラスト相殺の方法として2通りの処方が開発された。1つは本稿図2や機械遺産第4号の写真にも写っている釣合ピストンと称する円盤を反スラスト側に設け、この両面に均圧管により蒸気圧（時として負圧）を導いて反スラスト力を発生させるやり方、もうひとつはもっぱら低圧部に用いられた「ダブルフロー方式」と呼ばれるやり方で、タービンを2分割するとともに両者を同軸上、前後対称に配することにより互いのスラストを相殺させる方法である。

前者においては設計が面倒で、コストもかさむ。しかも復水器に至る均圧管を通じて負圧を効かせられる場合、負圧側への漏洩は以後回収不可能な漏洩損失として計上される。つまり、熱効率の低下をきたす。しかも、負荷状況に応じて圧力のバランスが崩れるため、常に完全なスラストの相殺を期することはできない。残された不釣り合い分は結局スラスト軸受に負担させることとなる。

これに対して後者は低圧タービンを2つ用いるため軸をはじめタービンは長大・脆弱化（軸の危険速度が低下）しやすくコスト・アップも避けがたい。しかし、この方式においては熱効率うんぬんの問題は生じない。スラストをいかなる負荷条件の下においてもほぼ完全に（片側に後進タービンが併設されていなければ理論上完全に）相殺することが可能である。このため日本海軍艦艇主機として一時期まで多用されたPTはおおむね低圧部「ダブルフロー方式」のそれであった。

PTは出力制御にも難点を抱えていた。一般に蒸気タービンの部分負荷運転時における出力制御に2つの方法がある。絞り調速法とノズル調速法である。前者においてはタービンに入る前の段階で絞り弁によって蒸気圧を低下させ発生出力を落とす。熱落差という観点からこれを見れば、弁において発生する絞り損失によって断熱熱落差の一部を失わせることにほかならず、タービンが利用できる熱落差は小さくなる。この場合、タービンの熱効率はそれが直接利用し得る断熱熱落差を分母として考える限り低下しないが、有効熱落差の一部を浪費してしまうことによりプラント全体としての熱効率は低下する。タービン入口蒸気温度の降下に起因する復水の増加により蒸気の持つ速度エネルギーのより多くが発生した水滴の加速のために浪費され、しかも速度の遅い水滴が動翼の背面に衝突して制動及び侵食作用を及ぼす、などというおなじみの、実用上切実な問題も附随する。

これに対して高圧初段（調速段）ノズルをあらかじめいくつかのグループに区分しグループ単位で蒸気を供給・遮断できるようにしておき、必要に応じていくつかのノズル群への蒸気供給を活殺すること（部分噴射）によって出力を制御するのがノズル調速法である。末広ノズル数本をオン/オフすることによって出力を制御したドラヴァル・タービンは同方式の嚆矢をなす。ノズル調速

においてはタービンへの熱供給量は低下するが、タービン入口蒸気温度自体を低下させるわけではないので、タービンが利用可能な断熱熱落差自体は全負荷時と変わらず、この点だけを見れば熱効率も低下しない。したがって部分負荷効率においてはこのノズル調速法に軍配が上げられる。

2つの調速法は両立しないわけではない。だが、少なくとも原型PTの場合、構造上ノズルとこれを支える仕切り板という構造物を持たぬため出力制御は部分負荷効率に不利な絞り調速法のみ relied ざるをえなかった。

全周噴射方式を採るしかなかったPTの高圧部は比体積の小さな高圧蒸気を扱う関係上、その直径を極端に抑えざるをえず、静動翼十数段～数十段は極度に、遠目にはあたかもラビリンス（迷路）・パッキンかと思いがうほど矮小な形状となった。内部漏れ損失は翼の長さに対する翼先端隙間の割合が高くなる高圧部において特にはなほだしい。また、PTの高圧部は翼丈の短小化のみならず1段当り熱落差の切り下げのあおりをくって多段化・長大化せざるをえず、矮小な静動翼列を有する高圧部は恐ろしく間延びした極端に細長い脆弱なパワープラントとなった。

なお、PTにおいても高圧初段の静翼列を全周に配さず仕切り板の窓に植えて部分噴射とし、1段当り熱落差が小さいため数段ごとに順次より大きな窓と多くの静翼列を持つ仕切り板を設けては総計3段階にわたって部分噴射を繰り返していく方式が開発されている。しかし、PTは動翼内でも蒸気を膨張させるため中間（仕切り板の間の）静翼列からは先端のみならず両脇（窓の無い壁の部分）への漏洩がはなほだしく、確かに部分噴射の導入によって高圧部の直径を大きくできたとはいえ、構造的複雑化に見合うほどの効率向上効果は得られなかったようである。また、この場合において、ノズル調速に類する複数静翼列群のオン/オフ制御まで試みられたのか否かについては不明である¹⁾。

混式タービンの登場からPTの退潮へ

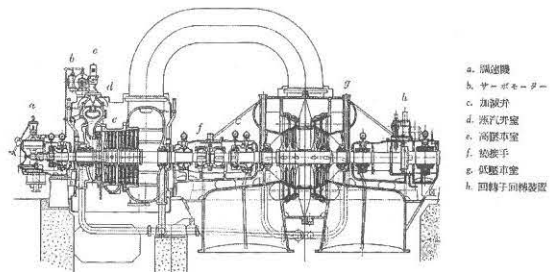
日本海軍関係者はPTに対して相対的に低い評価を下すに至っていた。その理論的根拠の筆頭は実にこの高圧段における部分負荷効率の低さ＝絞り調速に頼らざるをえないという出力制御様式上

の欠点と高圧部の低効率、構造的脆弱性にあった。それはまた、PTが調速段（カーチス）に続く高圧部にヨリ小さな速度比を活かして1段あたり熱落差を大きく取れ、少ない段数で所定の熱落差を吸収できる衝動タービンをいただき、自らは低圧タービンに退いた「混式タービン」へと発展せざるをえなかった理由のひとつもなっている。

その一例を陸用タービンにたずねてみれば、当該機械遺産と同じ500 kW発電機用カーチス・パーソンズ・タービンの存在を挙げることができる（図6）。PTが苦手とする高圧部ないし調速段にカーチス・タービンを持ってきただけのシロモノであるが、タービン全体の大幅な短小化が実現されている。さらに、図4左に示されているように調速段を2動翼列ではなく3動翼列にすれば同じノズルを用いつつ（同一断熱熱落差を消化させつつ）カーチス翼車のピッチ円直径を本図のその半分程度に縮小することが可能となることはいうまでもなからう。

当然のことながら、調速段のみならずタービン全体を衝動タービン化してしまえば、結局、調速段にカーチスをいただく圧力複式衝動タービンと

いう全体構成にすればプラントのコンパクトさはいっそうきわ立ったモノとなる。陸用タービンの一例を挙げれば、1934年12月、八幡製鐵所は日立製作所に対して第四発電所増設工事向けとして連続定格発電能力25,000 kWという当時、本邦最大の蒸気タービン・プラントを一括発注し、機器類は1936年初頭に完成、納入された（図7）。そのボイラは微粉炭を燃料とする日立-ヤロー（Yarrow：英）ボイラ初号機であったが、ここでもなによりも高圧部、2動翼列1段カーチス+圧力複式8段、低圧部圧力複式3段複流というそのラトー（Rateau：仏）→AEG（独）流圧力複式25,000 kW衝動タービンのシンプルさにご注目いただきたい²⁾。



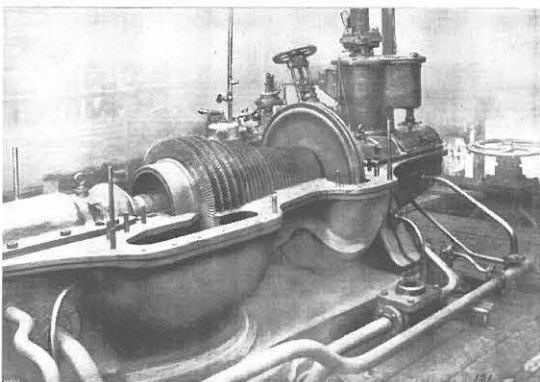
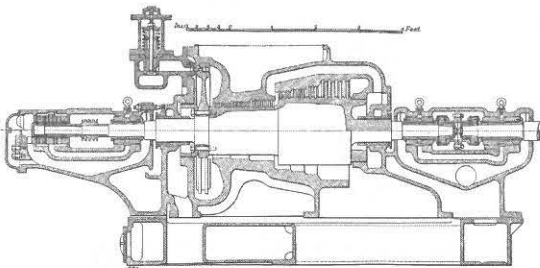
日立製作所『31,500 kW 蒸気タービン発電機（日本製鐵八幡製鐵所納）』無刊記、より。

軸はたわみ軸、低圧最終段動翼の翼根部はすでにクリスマス・ツリーになっていた。

図7 八幡製鐵所第四発電所向け25,000 kW 日立 AEG タービン

実は、これに先立つ1925（大正14）年、日本海軍のパーソンズ・タービンぎらいにへきえきしたためもあってか、PT世界御三家の一角を占める三菱長崎造船所自らが圧力複式衝動タービンとしてラトーと双壁をなしたツェリー・タービンの製造権をスイス、エッシャー・ウイス社（Zoelly, Escher Wyss：1969年、Sulzerに吸収）より購入し陸船用にそのライセンス生産を始め、矢継ぎ早にその出力レンジを高め、水主火従の事業発電体系の中であってその存在感を急速に高めはじめていた。

すなわち、陸用三菱ツェリー・タービンは第1号機、'27年の九州炭砒汽船会社崎戸砒業所向け3,000 kW機を皮切りに、同年の八幡製鐵所第四発電所向け25,000 kW機（当時、日立の製品と並んで国内最大）、'31年の山陽中央水電会社鉾磨第三発電所向け35,000 kW機（当時、国産最大）、'33年の山口県電気局宇部第二発電所向け18,000 kW

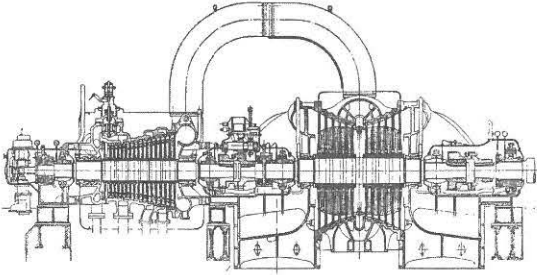


Alex Richardson, *The Evolution of The Parsons Steam Turbine*. Fig. 342, 343 (facing to p. 202 and p. 203).

タービン入口蒸気温度316℃（過熱）、回転数3000 rpm..

図6 混式（Curtis-Parsons）発電用タービン（出力500 kW）

機（国内初の3,600 rpm.大型機）、同年の関西共同火力発電会社尼崎第一発電所向け53,000 kW機（当時、東洋最大：図8）へと順調な発展を上げていった³⁾。



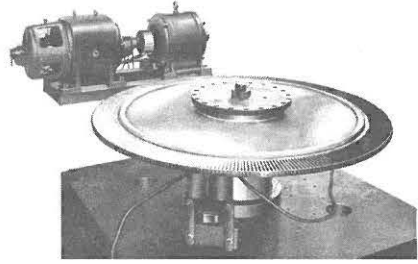
三菱重工業(株)長崎造船所「三菱スチームタービン」より。
図8 関西共同火力発電会社尼崎第一発電所向け53,000 kW三菱ツェリー・タービン

日本海軍の洋上艦艇においても同じような展開が観察されていた。民間に遅れを取った海軍は上述のとおり、メンツを捨ててまで競合・発展を上げつつある技術に関して両道をかけ、技術的自立の方途をさぐる作戦に打って出たワケであるが、やがては独自設計とはいうものの、極めてツェリー/ラトー色の強い船用衝動タービン、「艦本式タービン」を系列化していくことになる⁴⁾。

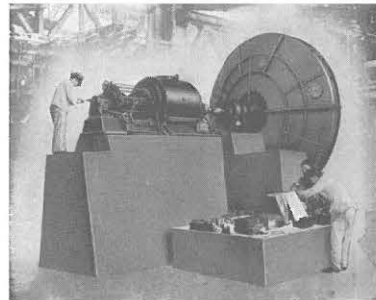
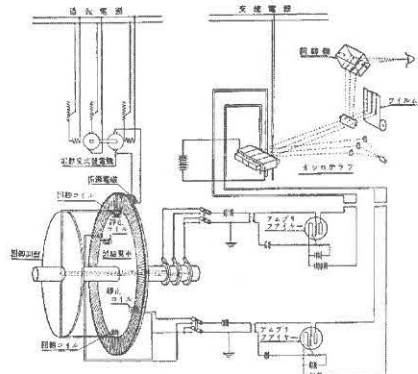
そうした過程の傍流として、三菱は1920年、海軍の駆逐艦 澤風用を嚆矢として高圧段に衝動タービン、低圧段にPTを配した混式タービン、三菱インパルス・リアクション・タービンを「開発」していた。そもそも、この峯風型駆逐艦主機たる“三菱パーソンズ・イムパルス・リアクション・タービン”なるものはジョン・ブラウン社(英)からブラウン・カーチス・タービンの製造権を得ていた川崎造船所が面倒な駆逐艦用タービンの開発に熱意を示さなかったため、図面購入に際し費用30万円を支弁した海軍が川崎を説き伏せて図面を三菱造船所に貸与せしめ、結果的に低圧部を三菱得意のPTとした混式タービンの形で結実した作品であった。しかしながら、客観的に観るにそれは失敗作でしかなかった⁵⁾。

この時、海軍より「技術の拙劣」を難じられた三菱は捲土重来を期すかのように'26年の南満洲電気会社向け5,000 kW機をはじめとしてツェリー・パーソンズへと更新された混式陸用タービンを投入している。しかしながら、こちらも注文があれば応じられる、といった程度のアイテムに終わっている。

三菱長崎造船所はツェリー・タービンの国産化を通じて翼車振動をはじめとする衝動タービンの研究開発手法をマスターし、やがて独自の開発能力を獲得していった(図9, 10)。'52年にエッシャー・ウィス社から再度、最新の設計技術が導入されたことも相まち、三菱長崎は大型蒸気タービンの分野で戦後のわが国をリードする立場を堅持した。その一方においてPTは歴史的記憶の底に沈潜していった。



三菱重工業(株)長崎造船所「三菱スチームタービン」より。
図9 翼車の静的振動測定装置



同上。

図10 回転中の翼車の振動測定装置

むすびにかえて

戦前・戦時期の蒸気タービン界におけるPTの退潮は内外・陸船用の別を問わず顕著であった。一方、大戦末期には衝動タービン低圧部の長大動

翼に反動度を付与し、蒸気流れにおける半径方向圧力分布と蒸気回転速度の軸方向成分との間に折り合いをつける3次元設計法が開発され、衝動タービンと反動タービンを隔ててきた絶対的障壁が取り払われるに至っている。もっとも、それが我国に最新技術の一つとして導入されたのは戦後の事蹟である。

技術の着実な進歩の裏面として、戦後世界においてはタービン諸形式がその開拓者の名を冠して表現されてきた長い伝統の根柢までが失なわれてしまった。これは、いくらそれが技術進歩の健全な帰結であるにせよ、当方のごとき歴史屋にとっては惜しんでもなお余りある事態とせざるをえない。

1) cf. Alex Richardson, *The Evolution of The Parsons Steam Turbine*, pp.151~154. 拙稿「蒸気動力技術略史」(大阪市立大学学術機関リポジトリ登載)。

2) 日立製作所『31,500 kW 蒸気タービン発電機 (日本製鐵八幡製鐵所納)』無刊記, 参照。タイトルにうたう 31500 kW は蒸気タービンの2時間最大出力。

なお、戦後はこの調速段まで圧力複式化して熱効率を一層高める方向への技術シフトが行なわれた。

3) 三菱重工業(株)長崎造船所『三菱スチームタービン』1935年(?), 参照。

4) 船用蒸気タービンの発展については拙著『船用蒸気タービン百年の航跡』ユニオンプレス, 2002年, 参照。艦本式補機駆動タービンについては「日本海軍洋上艦艇における補機駆動タービンについて」(大阪市立大学学術機関リポジトリ登載), 参照。

蒸気動力技術史全般については前掲拙稿「蒸気動力技術略史」, 本邦蒸気動力技術史一般については内野 稔・朝永研一郎「蒸気動力」(日本機械学会『日本機械工業五十年』1949年, 所収), 参照。

5) 『船用蒸気タービン百年の航跡』, 参照。