



タイトル Title	船用機関としての蒸気原動機の発達
著者 Author(s)	杉田, 英昭
掲載誌・巻号・ページ Citation	海事博物館研究年報,40:7-13
刊行日 Issue date	2012
資源タイプ Resource Type	Departmental Bulletin Paper / 紀要論文
版区分 Resource Version	publisher
権利 Rights	
DOI	
JaLCDOI	10.24546/81005590
URL	http://www.lib.kobe-u.ac.jp/handle_kernel/81005590

PDF issue: 2020-12-01

舶用機関としての蒸気原動機の発達

神戸大学 名誉教授 杉田 英 昭

1. まえがき

本稿は、神戸大学の第6回海事博物館市民セミナーで講演した内容を要約したものです。パワーポイントのスライド84枚の内容をここですべて凝縮することは到底できず、説明不足の部分もあるかと思い、はじめにお断りしておきます。また、文中の単位はSIに換算せず、文献等の当時の慣用単位系で記載しております。

2. 大気圧の発見およびニューコメンの大気圧機関の発明

ギリシャの哲学者で“万学の祖”と呼ばれたアリストテレス（B.C.384—B.C.322）は、真空はあくまでも概念上の問題で自然の中に真空は存在しないとして“自然は真空を嫌う”という「真空嫌悪説」を唱えた。この考えは実に17世紀初めまで広く受け入れられたようである。ところが17世紀に入ると、地下水をポンプで排水するとき、井戸の深さが約10m以上になると水を吸い上げることができなくなることが分かり、地動説で有名なイタリアの物理学者で天文学者であるガリレイは、「真空嫌悪説」ではこの現象を説明できないと考えた。

そのガリレイの晩年の弟子で、イタリアの数学者で物理学者であるトリチェリは、1643年に、中空のガラス管と水銀を用いた有名な「トリチェリの実験」により真空の存在を証明した。いわゆる「トリチェリの真空」である。また、トリチェリはその実験により、水銀柱が76cmの高さを保っているのは、水銀槽の面を押している大気圧の圧力によると発表した。

フランスの科学者で数学者のパスカルは、トリチェリの実験を巧みに応用した「真空中の真空の実験」によって大気圧の存在を証明した。さらに、ピユイ・ドゥ・ドームという山のふもとから頂上までの水銀柱の高さを測ったところ、頂上に行くにしたがって水銀

柱の高さがわずかに減少することを確認した。

大気圧の存在を証明したさらに有名な実験は、1654年にドイツのマグデブルク市で市長のゲーリケが行った「マグデブルクの半球の実験」である。図1に示すこの公開実験は、直径約30cmの銅製の半球二つを密着させて、真空ポンプで中の空気を抜いて真空にし、この球を左右8頭ずつ計16頭の馬で引っ張って引き離そうとするものであった。その結果、大気圧の力が強くこの球は二つに離れなかった。しかし、球に付いている空気コックを開け、空気を入れて中の真空を破壊すると球は容易に二つに離れた。大気圧力がいかに強いかを市民の前で証明したのである。この実験で、大気圧による球にかかった力は、球の中が完全真空と仮定すれば約30kNで、質量約3tonの物質を持ち上げる力に相当する。

大気圧を利用して動力を得ようとする試みは、フランスの物理学者のパパンによって初めてなされた。パパンは、直立のシリンダの中の少量の水を外から加熱させて蒸気の力でピストンを押し上げ、次にシリンダの外から蒸気を冷却して大気圧によってピストンを押し下げる装置を作製した。図2に示すこの装置は真空を作るために蒸気を利用しており、ピストンを押し下げる力は

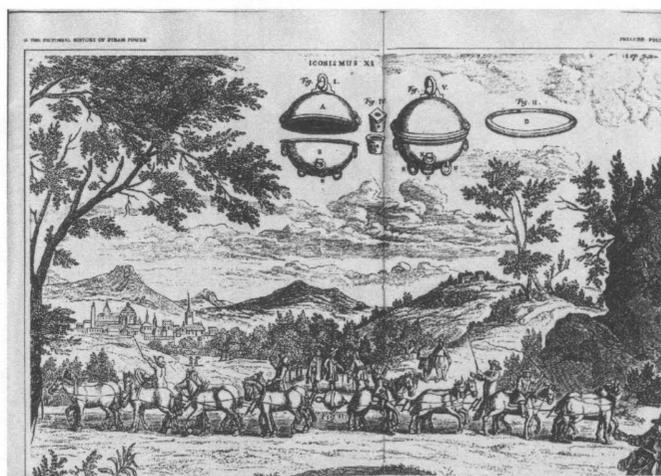


図1

気圧であるので、蒸気機関というよりは大気圧機関というべきものである。これは、シリンダとピストンの摩擦が大きくて卓上の実験装置の域を出なかったが、後の蒸気機関の原形である。

イギリスの技術者のセイヴァリは、1698年に蒸気の凝縮によって得られる真空を水の吸い上げに直接利用するという、図3に示すシリンダとピストンをもたない「セイヴァリの火力機関」を開発し、特許を取得した。しかし、これはピストンを用いるものでなく単に真空によって水を吸い上げる揚水ポンプであった。その作動原理は、まず、図の左のボイラで発生した蒸気は右隣の容器に

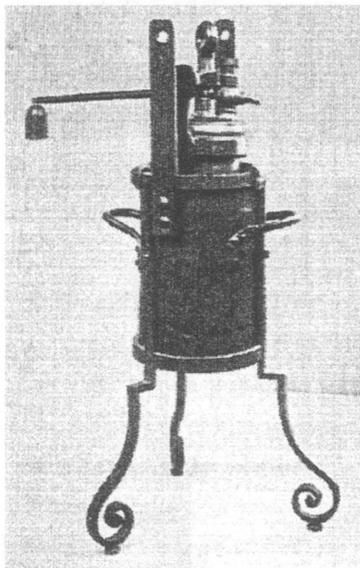


図2

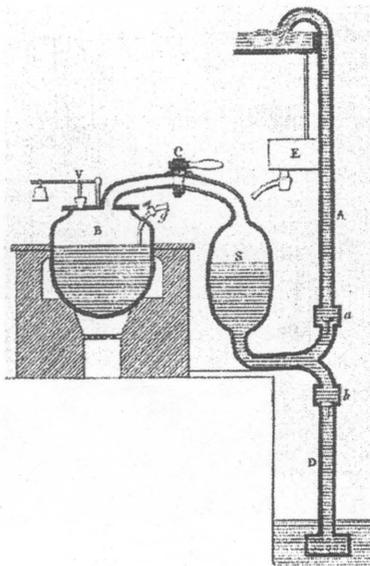


図3

導かれ、中の水を蒸気圧によって上昇管に押し上げる。次に、ボイラ出口弁とその上昇管の入口の弁を閉じて容器を外側から水で冷やすと中の蒸気が凝縮して真空を作り、地下水を汲み上げるもう一つの上昇管から水が容器の中へ吸い上げられる。そして、その上昇管の出口弁を閉め、ボイラ出口弁と上昇管入口弁を開けて容器の中へ蒸気を導くという動作を繰り返す。

セイヴァリの機関は水を6mほどしか汲み上げることができず、自家用の揚水には実用されたが鉱山の深い地下水の揚水には用いられなかった。この機関のもう一つの欠陥は、当時大気圧以上の蒸気圧力に耐えることのできるボイラの製造技術が未熟であったために、ボイラの破裂事故がしばしば起きたことである。

実際に鉱山の揚水用として最初に実用されたのは、ニューコメンの大気圧機関である。この機関が1712年にイギリスのスタッフォードシアのダッドリー城の近くに据え付けられたことは、1719年にバーニによって製作された版画から明らかである。その版画の説明文に初めて「THE STEAM ENGINE」と記されており、これが蒸気機関についての現存している最初の記述といわれている。機関の主要目は、真鍮製のシリンダの高さ239cm、直径53cm、茶釜形ボイラの高さ185cm、

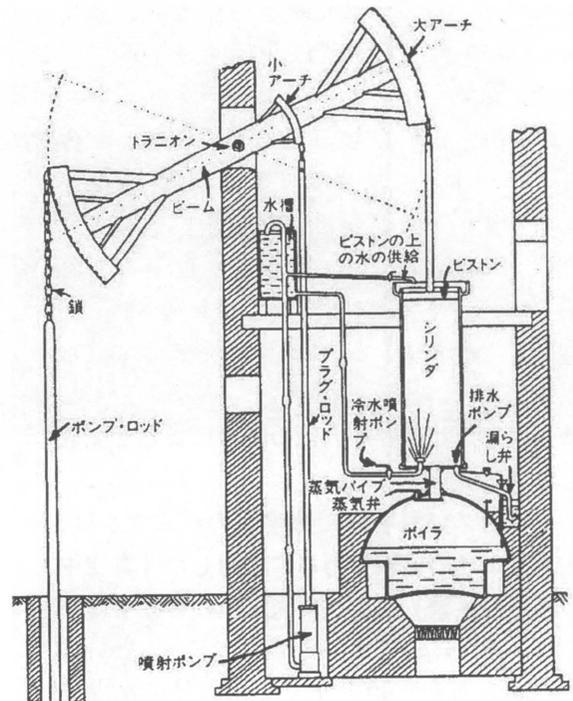


図4

直径168cm、容量39m³で、版画の記載内容から計算すると出力は5.5馬力となる。また、初期のニューコメン機関の熱効率は0.5%程度であった。

ニューコメンの大気圧機関の模式図を図4に示す。作動原理は簡単で、まず、上死点にあるピストンの下部のシリンダ内に蒸気を導き、冷却水を噴射して真空にし、大気圧によってピストンを押し下げ、ビームを介してポンプロッドを引き上げる。次に、ポンプロッドの重さでピストンが元の上死点の位置に戻り、再び同じ動作を繰り返す。ピストン上部へ水を補給するのは、往復運動をするピストンと固定したシリンダとの間の気密を保たせるためである。現在のピストンリングの代わりに、動物の皮がピストンに巻きつけられている。

ニューコメンの大気圧機関は、1712年以降の約70年間、鉱山の排水などに広く用いられ、イギリスの産業が必要としていた石炭を安価に供給するという重要な役割を果たしてきた。1770年代にはシリンダ直径が190cm、高さが320cm、質量が6.5tonという巨大なものが造られた。もし、シリンダ内が完全真空と仮定すれば、大気圧によってこのピストンにかかる力は280kNで、質量約28tonの物質を持ち上げる力に相当する。また当時、出力は100馬力近くに達するものもあり、熱効率は1.2%に増加していた。しかし、この機関は大量に石炭を消費するために、ワットの機関の出現によって徐々にその姿を消していった。

3. 初期の蒸気船

ワットの蒸気機関が世に出る前の蒸気船については、いろいろ伝えられているが、計画だけである場合や、実験の域を出ない場合が多い。前出のパパンは1707年に自作の大気圧機関によって外車を駆動させる船を造り、ドイツの川でデモンストラーションを行ったが成功はしなかった。川のはしけや渡し舟の関係者たちによって蒸気船の航行の妨害を受けたとの説がある。

また、1736年にイギリスのハルスはニューコメンの大気圧機関によって駆動される外車を船尾に設けた蒸気船の設計に対して特許を取得した。ハルスはピストンによる往復運動をラチェット機構の利用で回転運動にすることが可能だとしていた。しかし、船の推進に必要な出力を得るためにはニューコメンの機関ではあまりにも重くなりす

ぎて実際には造られなかったと思われる。

結局、船用機関は大気圧機関では成功せず、ワットの機関によって初めて実現するわけだが、そのためには多くの技術者などの努力があった。

4. ワットの蒸気機関の出現および蒸気圧の利用

ニューコメン機関は、ピストンの下降過程でシリンダが水で冷やされるので、蒸気が次の上昇過程でシリンダに入るとき最初のうちは蒸気が無駄に凝縮してしまい、シリンダを沸点まで加熱するために多量の蒸気が必要であった。このことに気が付いたのがイギリスの技術者のワットである。ワットはニューコメンの機関を改良し、性能向上のために多くの付属機器の開発を行った。大改良点は、1769年にシリンダから分離した復水器を採用したことで蒸気を冷やして真空をつくる場所を別にしたため、シリンダは常に蒸気と同じ温度に保つことができ、蒸気の消費量、結局は石炭の消費量を大幅に減少することができた。

さらにワットは、大気圧の代わりに蒸気圧を利用し、蒸気の膨張力でピストンを押し下げるといった画期的な改良も行った。そのため、シリンダの位置を自由に選択でき、ピストンの両面にも蒸気を供給でき、また冷却水が得られない場所でも復水器を設けずに排気蒸気を大気に放出することができるようになった。当時、すでに往復運動を回転運動に変換するクランク機構は、フランスのピカードとワズブローによって特許が取られていたので、ワットは遊星歯車装置で特許を取得し回転運動を実現した。これらの改良によりワットの蒸気機関は飛躍的に使用範囲を広めることができた。

ワットは、1776年にシリンダ直径127cmの最初の実用単動型往復動機関を完成させたが、成熟期のニューコメン大気圧機関と比較して石炭消費量を約1/4に減少させたという。このようなワット機関は、ワットの特許の切れる1800年までの25年間に炭坑用や繊維産業用に約500基製造され、そのうち37%が往復動のポンプ、62%が回転型であった。ワットの蒸気機関が、船舶や蒸気機関車や蒸気自動車といった交通用の原動機として用いられなかった最大の理由は、ワットがボイラの破裂事故を懸念して蒸気の高圧化を許さなかったこ

とである。ワットが蒸気圧を利用したといっても、大気圧よりもわずか高い1.1~1.5気圧であった。実際、後年に3~10気圧まで圧力を高めて小型となった蒸気機関車のボイラはよく破裂事故を起こした。

5. 船用主機関としての蒸気往復動機関

世界初の商業用の蒸気船は、1807年にアメリカのハドソン川で就航したフルトンによる郵便船「クラームント」である。図5に示すように長さ40m、幅4m、喫水60cm、総トン数100tonの細長い船で、機関は単シリンダ、ボア61cm、ストローク122cm、出力20NHPで、直径4.5mの両舷の外車を回転させ、試運転で平均4knot以上の速度を出した。なお、NHPは機関の寸法から算出する名目(nominal)馬力である。

一方、ヨーロッパで最初の商業用の蒸気船を造ったのはイギリスのベルで、1812年に「コメット」をグラスゴーで進水させた。船体は、長さ15.5m、幅3.4m、総トン数25tonとクラームントよりもかなり小さい船であった。機関は、単シリンダ、ボア32cm、ストローク41cm、出力4NHPで、速度は約7knotであった。蒸気船はこのようなクラームントやコメットから出発して、それ以後急速な発展を遂げるようになる。

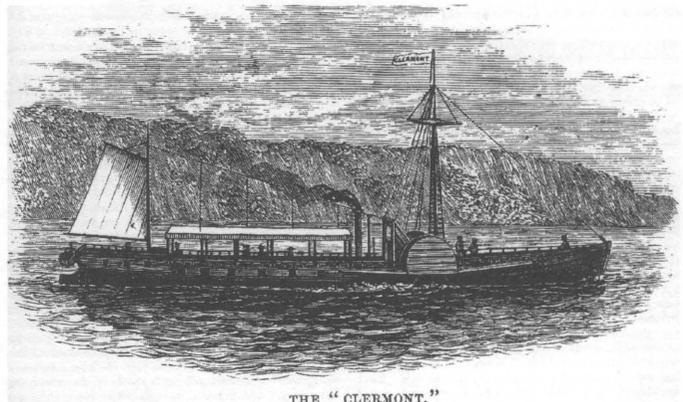
クラームントから12年後の1819年にはアメリカの「サバンナ」が、27日と11時間かかって初めて大西洋を横断している。船体は、長さ33.5m、幅7.8m、総トン数320tonで、機関は、単シリンダ、ボア10cm、ストローク150cm、出力90IHP、蒸気圧は1.1気圧で、速度は約4knotであった。サバンナは機関付きの帆船であって、このときも機走はわずか3日と13時間で、帆走時は外車をデッキの上に上げていた。

蒸気機関のみで初めて大西洋を横断した蒸気船は「シリウス」で、1838年に平均速度6.7knotで18日と10時間かかった。船体は、長さ61m、幅7.6m、喫水4.6m、総トン数703ton、機関は、2シリンダ、ボア152cm、ストローク183cm、出力320NHP、蒸気圧は1.38気圧で、直径7.32mの外車を回転数15rpmで回転させた。図6はシリ

ウスの機関ではないが、1849年頃の大きなサイドレバーを有する外車船用の蒸気機関である。サイドレバーの前の人物から機関の大きさが分かる。

なお、シリウスの顕著な特徴は、ワットの発明以来使われてきた混合式復水器の代わりに1834年にイギリスのホールの発明による表面式復水器を採用したことである。それまでは蒸気を得るために海水をボイラで加熱していたため、ボイラの腐食が激しく、また航海中にしばしば機関を止めて海水が凝縮して固着した塩をボイラ内から除去しなければならなかった。表面式復水器では、排気蒸気は伝熱面を通して海水で冷却されるので清水の使用が可能となり、長期間の航海が容易になった。

シリウス以降、北大西洋定期航路が開かれて、イギリス、ドイツ、フランス、アメリカなどが大型客船をこの航路に参入させ、有名なブルーリボンの獲得を目指したスピード競争が始まった。それにより機関の大出力化、高圧化が進んだ。高圧



THE "CLERMONT."

図5

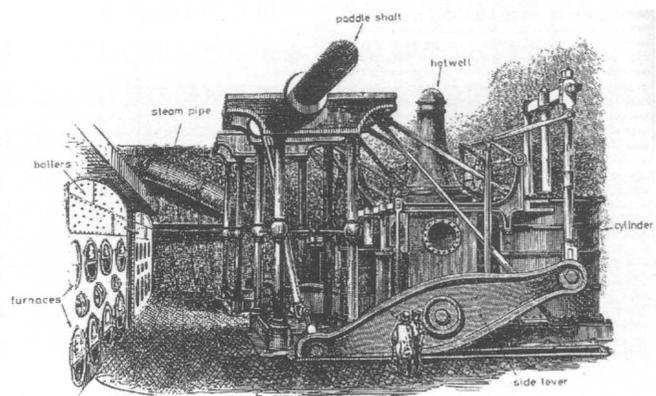


図6

になると、蒸気の膨脹によるシリンダの温度低下が顕著になり流入蒸気の一部が凝縮して、熱効率が低くなる。したがって、高圧、中圧、低圧といった複数シリンダを設けて順々に膨脹させる多段膨脹機関が出現した。また、1843年から1845年にかけて行われたイギリス海軍の外車船「アレクト」とスクリュープロペラ船「ラトラー」との綱引きでラトラーが圧勝して、それ以降、サイドレバー機関、遙動機関（垂直方向に設置されたシリンダが蒸気供給用パイプを中心にして首を振るような運動をする機関）、および斜動機関（シリンダを斜めに配置して、斜め上方に延びたピストンロッドがクランクを介して直接外車軸を回す直動機関）等が姿を消した。大洋航海をする最後の外車船は、イギリスの「スコシア」である。全長122m、総トン数6,520tonのこの船は、船形が非常に優雅であった。機関は、ボア2.54m、ストローク3.66m、蒸気圧2.8気圧、出力4,570IHPで、直径12.2mの外車を回して、大西洋を平均13.3knotで8日と3時間で横断した。そして、ブルーリボンを1862年から5年間保持していた。

6. 蒸気タービンの発明とタービン船の発達

紀元前120年頃に、古代アレキサンドリアのヘロンによって反動タービンの元祖といわれる図7に示す蒸気球が考案され、それから約1750年後の1629年にイタリアのブランカが衝動タービンの元祖といわれる蒸気タービンを文献に記述している。しかし、実際に製造され、現在でも船用や陸用で実用されている蒸気タービンは、1883年から1899年の間にその基本型式が完成している。すなわち、単一衝動タービンであるドラバルタービン、多段反動タービンであるパーソンスタービン、多段衝動タービンであるラトタービンとツェリータービン、そして速度段衝動タービンであるカーチスタービンである。

蒸気タービンは、基本的には固定円板に設けたノズル（反動タービンでは静翼と称する）と回転円板に設けた動翼から成り立っており、ノズルからの高速蒸気噴流を動翼に作動することによって高速回転軸から外部に仕事を与える熱機関である。このとき、動翼内で蒸気が膨脹しないタービンを衝動タービン、動翼をノズルの形状に加工し

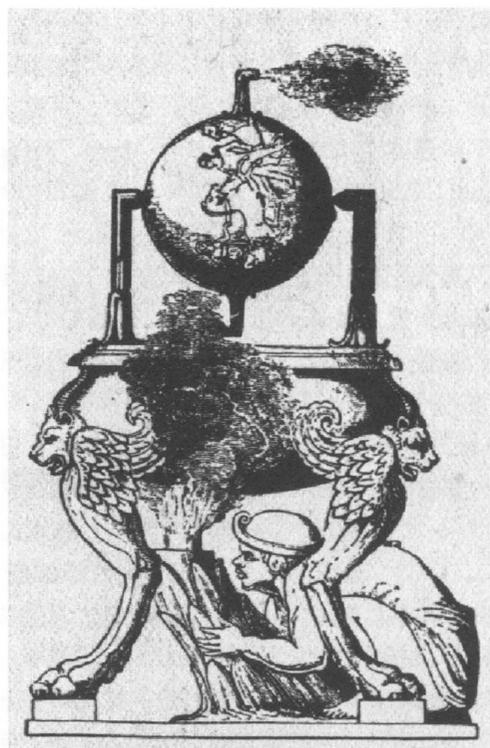


図7

て蒸気が動翼内でも膨脹して加速されるタービンを反動タービンと呼んでいる。このような蒸気タービンを船用機関として試みたのは、イギリスのパーソンズ卿である。パーソンズは1897年に、自分の発明したパーソンスタービンを搭載した世界初の蒸気タービン船「タービニア」の劇的な試運転を、イギリスのポーツマス沖で行った。ちょうどヴィクトリア女王即位六十年祭で、イギリス海軍の観艦式が開催されているときである。その海上をタービニアは当時いまだかつて水上では得られなかった34.5knotという猛スピードで航走し、沿岸の見物人を歓喜させた。海軍は監視ボートを出してこれを止めようとしたが、あまりにも速すぎて追いつけず、タービニアの波によってひっくり返りそうになったということである。

タービニアの船体は、全長30.5m、幅2.7m、喫水91cmで、44.5tonのヨットのような船形であった。また、機関はパーソンズ軸流反動タービンで、蒸気圧力はボイラ出口15.8気圧、タービン入口11.7気圧、出力2,000SHP、回転数2,000rpmである。この高回転数でキャビテーションを起こさないようにするために、プロペラ軸を3軸にし、各軸に大きくねじった形のプロペラを3個、計9個のプロペラを取り付けた。

このタービニアの大成功によって、船用としての蒸気タービンの重要さが世に認められ、直ちに軍艦および商船に採用された。まず、軍艦では1900年に進水した駆逐艦「ビーバー」(370ton、37.1knot、2,500SHP)が最初で、戦艦は1906年進水の「ドレッドノート」(17,900ton、23,000SHP、蒸気圧18.6気圧)が最初でタービンは前進用6基と後進用4基の計10基で、4軸船である。次に、商船では1901年と1902年に造られた「キングエドワード」と「クイーンアレクサンドラ」(665ton、全長82.3m、幅9.8m、4,400SHP、3軸船)の姉妹船が最初である。大西洋定期航路の最初のタービン船は、1904年に同時に進水した「バージニア」と「ヴィクトリア」の姉妹船で、ともに3軸船、高圧タービンが中央軸、2基の低圧タービンが両舷軸で後進タービンは低圧タービンの排気側に設けられている。総トン数10,754tonのバージニアは、全長165m、幅18.4mで、無線装置や船内電灯が完備している。蒸気圧13.7気圧のタービンは、合計出力12,000SHPのパーソンズタービンで、回転数は290rpmであった。

1906年には、翌年から22年間ブルーリボンを保持し続けた「モレタニア」が造られた。船体は、全長241m、幅26.8m、総トン数44,000tonであり、機関は両舷2軸を駆動する高圧タービン2基と、内側2軸を駆動する低圧タービン2基の計4基で、蒸気圧は14.7気圧、出力は70,000SHPである。同じ年に姉妹船の「ルシタニア」も進水している。

タービニア以降のタービン船ブームの中で、1911年5月に進水し、翌年4月に氷山に衝突して沈没した「タイタニック」とその姉妹船「オリン

ピック」は蒸気タービンと蒸気往復動機関の両方を搭載した。タイタニックの場合、両舷の2軸は各1,700IHPの4シリンダ三段膨脹機関2基で駆動され、中央の1軸は同じく17,000SHPのパーソンズタービン1基で駆動される。タービンは蒸気を低圧まで十分膨脹させてエネルギーを有効に利用することができるから、高圧蒸気をまず2基の蒸気往復動機関に入れて仕事をさせた後、その排気蒸気をタービンに流入させるという省エネルギーといえる。

これまで説明してきたタービン船は、タービニアと同じくタービンの回転数とスクリュープローペラの回転数が同じであるいわゆる直結タービン方式を採用していた。しかし、元来タービンは数千rpmという高回転数で効率がよく、プロペラは100rpm前後というそれよりもはるかに低い回転数で効率がよい。1910年代に大出力を伝達できる減速歯車装置の開発が進み、第一次世界大戦後の1920年以降はいわゆるギヤード・タービン船が主流になっていった。図8は2段減速歯車装置である。

7. 蒸気タービン船の現状

蒸気タービン船は、近代になり客船から巨大タンカーや高速コンテナ船へと移っていったが、1973年と1979年の2度の石油危機で石油価格が高騰し、熱効率の高い低速ディーゼル機関に取って代わられた。そして、世界で10社以上あった船用蒸気タービンメーカーが、日本の川崎重工業社と三菱重工業社の2社のみとなってしまった。ところが、2000年頃からLNG船の急激な需要が増えてきて、蒸気タービンの主機関としての優位性が評

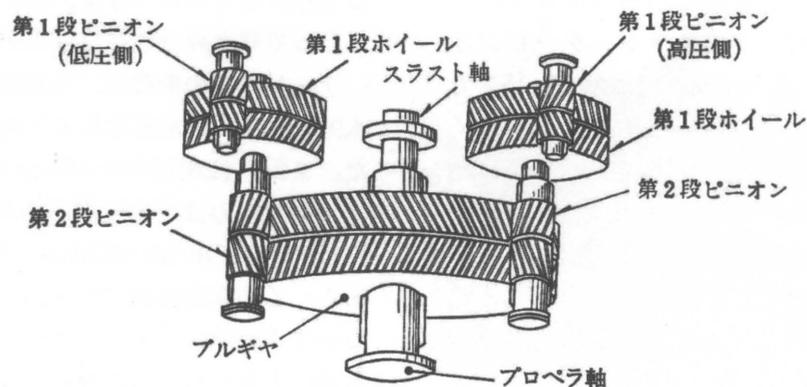
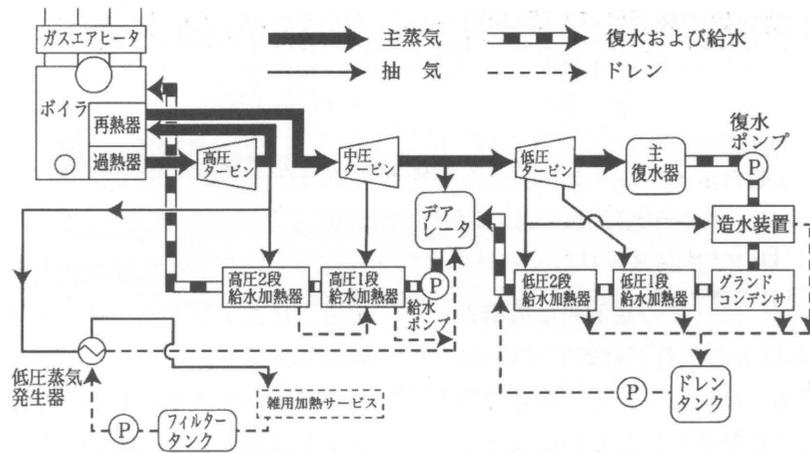


図8



第 序・26 図 URA 型プラントの基本ヒートサイクル

図9

価され、LNG 船には100%蒸気タービンが搭載されるようになった。その理由は、 -162°C のLNGの一部が航海中に気化すると体積が600倍になり、船のタンク内圧を高めて危険なためにタンクから取り出してボイラで燃焼させることが安全な処理法であるからである。この気化したガスを、BOG (ボイル・オフ・ガス) と称する。BOGの量は0.1%/day程度であり、一般にLNG船は航海に必要なエネルギーのうち、40~60%をBOGでまかなっている。出入港時など蒸気タービンが必要とする以上にボイラの発生蒸気量が多くなっても、余剰蒸気は復水器で安全に処理することができる。しかし、近年高効率のガス焼きディーゼル機関がLNG船の蒸気タービンに取って代わりつつあり、川重と三菱の両社とも高性能の再熱蒸気タービンを開発し、巻き返しを図っている。川重の再熱プラントの基本ヒートサイクルを図9に示す。

8. あとがき

蒸気機関は外燃機関であり、今日のエネルギー問題を考えるとき、燃料の種類を選ばないという特長は魅力があります。蒸気タービンはいまだ現役であるので脇においておき、蒸気往復動機関に関しては経済性の面から再登場の芽はきわめて小さいが、巷間ではこれに関心をもつ人々が多く、今回のセミナーでもそれを実感しました。お名前を出して大変恐縮ですが、元福井工大教授の島本氏はタイタニックの機関に強い興味を示され、ご高齢の身で最近イギリスの博物館や造船所ドック

等を訪問・調査研究し、帰国後、日本では手に入らない1911年発行のタイタニックに関する200余ページの複写本をイギリスから取り寄せました。ご本人のその執念はもとより、このような本を当時と同じ紙質で出版するイギリスもまたすばらしい国だと感じました。

参考文献

- ・飯島徹徳、真空のおはなし、日本規格協会、2003.
- ・田中 航、蒸気船、毎日新聞社、1977.
- ・杉田英昭、海事資料館研究年報 (神戸商船大学)、No15 (1987)、No24 (1996).