

# 本校蒸気タービン実験装置再生プロジェクト（第3報）

ダワァ ガンバット\*・曾我部 優\*\*・松岡 桂司\*\*\*

## Project to Restore a Steam Turbine Workshop at the College (3<sup>rd</sup> Report)

Ganbat DAVAA\*, Masaru SOGABE\*\*, Keiji MATSUOKA\*\*\*

### Abstract

In the present report, we summarized the last year activities accomplished within the “Project to Restore a Steam Turbine Workshop at Our College”. This is a three year project which was completed in 2011. The aim of the project was to let the students to deepen their knowledge on each part of turbine equipment and to practice their theory based knowledge while repairing a turbine at our college. The college turbine work shop was built in 1969 and the steam turbine was out of service since 2002. As a result of carrying out the project, the students could gain opportunity to combine their theoretical knowledge with practical experience. Besides that as a result of the project, the college steam turbine work shop became available for its original purposes that can be used for practical training and experimental works for the 4<sup>th</sup> year students of the Marine Technology Department and the Electronic-Mechanical Engineering Department.

### 1. 緒言

本校蒸気タービン実験装置は昭和 44 年実習工場に設置され、商船学科の卒業研究及び 4 年生機関コースの工学実験等の実験・実習用として使用されていたが、老朽化による故障のため平成 14 年より運転できない状態が続いていた。そこで、平成 20 年度から「本校蒸気タービン実験装置再生プロジェクト」を開始し、学生に蒸気タービンの理論と各部の構造や作用、修理技術を身に付けさせるために、故障した蒸気タービン装置の修理に取り組んだ。

本稿では、卒業研究として昨年度行って来た蒸気タービン実験装置の修理や本プロジェクトによる専門教育について報告する。

### 2. 目的

故障のため長期間運転できない状態が続いている蒸気タービン実験装置の修理を実際に行い、それを通して修理技術を学生に身につけさせ、蒸気タービ

ンの動作確認のため試運転を行う。また、蒸気タービンの蒸気速度とタービン出力を計算、それらのプログラムの作成と古くなったマニュアルの復元を通して蒸気タービンの理論と各部の構造と作用などを学び、CAD 等の復習をする。今年度で本再生プロジェクトが終了するため、本校蒸気タービン実験装置を商船学科や電子機械工学科の 4 年生の実習や実験に使用できる状況にする。何より、この「蒸気タービン実験装置再生プロジェクト」を通して学生が壊れたものを自分の手で修理することが出来る専門知識を習得することを目的とする。

### 3. 蒸気タービンプラントの蒸気サイクルの流れ

蒸気タービンプラントでは主機は、蒸気タービンですが、タービン本体だけでは動かない。タービン以外に原子炉あるいはボイラー、復水器、脱気給水加熱器、加熱機など様々な補機類が必要です。以下に、蒸気タービンプラントの蒸気サイクルの流れについて簡単に述べる。

\*電子機械工学科

\*\*電子機械工学科 5 年生（現：コベルコ建機エンジニアリング株式会社）

\*\*\*電子機械工学科 5 年生（現：海日信電子サービス株式会社）

- ボイラーで燃料（石炭、石油、天然ガスなど）を燃焼させ、燃焼ガスの熱エネルギーをボイラー水に伝達することにより蒸気が発生する。この蒸気は更にボイラー内の過熱器で加熱され過熱蒸気になる。現在、蒸気タービンだけを使用している火力発電では、最高熱効率が43%に達し、蒸気条件は温度450°C、圧力は24.5 MPa（245気圧）である。
- 過熱蒸気は、プロペラ回転の原動力を得る主機タービンや発電機を駆動するタービンに流入し、タービンを回転させる。現在、蒸気タービンの発生動力は1MW（100万kW）から250MWである。
- タービン内で終圧0.005 MPa（0.05気圧）まで膨張して仕事をし終わった蒸気は、復水器において海水によって冷却され水に戻る。
- 復水器内の復水は、復水ポンプによって吸入、加圧され、低圧給水加熱器で加熱された後、脱気給水加熱器に送られる。
- 脱気給水加熱器で復水を更に加熱し、水に溶け込んでいる空気（腐食などの金属を悪い影響を起こす物質）を追い出す。
- 脱気給水加熱器内の給水は、主給水ポンプで吸入加圧され、高圧給水加熱器を経由して更に高温になり、節炭器（排ガスで給水を予熱するもの）を通り、ボイラー蒸気ドラムに送り込まれる。

## 4. 試運転

### 4.1 試運転を行う手順

試運転を行う前に、学生に本校蒸気タービン実験装置の蒸気、復水、冷却水それぞれのパイプラインについて現場にて調査学習を行い、蒸気タービン実験装置のサイクル図を描かせた。図1に、その蒸気タービン実験装置のサイクル図を示す。

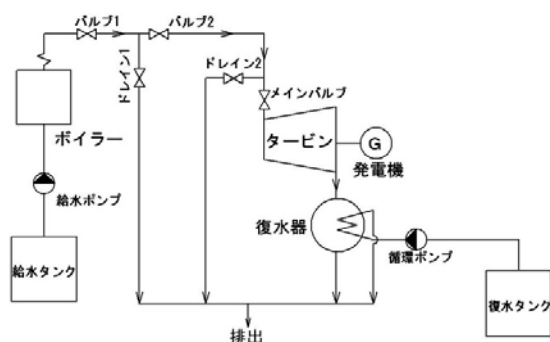


図1 蒸気タービン装置のサイクル図

試運転を行う手順は以下の通りである。

#### 1) 循環ポンプを始動

貯水タンクに溜まった復水を取り出し、その復水を復水器へ冷却水として送り出す役割を循環ポンプが果たしている。循環ポンプを始動する前にはまず、貯水タンク内に一定以上の水を溜めなければいけない。そこで水を貯水タンクに溜めるために水を入れるバルブを開け、水を溜めた。また、循環ポンプの中に空気が残っているとモーターが回転しても空気が圧縮されるだけで貯水タンクから水を吸い込む事が出来ないため、循環ポンプ本体にも水を充填させなければならない。そのため循環ポンプの冷却水入口弁に直接ホースを繋いで水を充填させる。その後、循環ポンプの電源を入れポンプを起動させる。

#### 2) 蒸気配管を暖管（バルブ2まで）

本校の石油ボイラーにより温度が約200°C、蒸気圧力が13~14 kg/cm<sup>2</sup>の蒸気を製造できたらドレイン1を解放しバルブ1を少しずつ開けて蒸気配管を（バルブ2まで）温める。この時バルブ2を閉めたままに置く。この作業はドレイン1から乾燥蒸気だけを出るまで続く。

#### 3) 蒸気配管を暖管（メインバルブまで）

ドレイン2を解放しバルブ2を少しずつ開けて蒸気配管を（メインバルブまで）温める。この時メインバルブを閉じたままに置く。バルブ2を半分ぐらい開けた時、ドレイン1を閉じる。この作業はドレイン2から乾燥蒸気だけを出るまで続く。その後メインバルブを少しずつ解放し蒸気タービンを始動する。

#### 4) 蒸気タービン始動

蒸気タービンに蒸気を入れる作業と同時にタービン潤滑油ポンプを手動で動作させる。この作業は蒸気タービンの回転数が上昇し、タービンの自動油ポンプが働き始めるまで続く。その後調速ハンドルにより回転数を徐々に上げていく。始動後、蒸気漏れや破損している部分がないか確かめる。

#### 5) 蒸気タービンの停止

蒸気タービンの回転を止め、メインバルブを閉じて蒸気タービンを停止する。この作業と同時にタービン潤滑油ポンプを手動で動作する作業が始まる。この作業はタービン潤滑油の温度がおよそ30°C以下に下がるまで続く。タービン軸の変形を防ぐため、一定時間（20分）ごとに180°ずつタービンのローターを回転させる。

## 4.2 試運転

うず電流式電気動力計を取り外し、発電機を取り付ける作業を内海造船(株)田熊工場に依頼し、動作確認する目的で(6月25日)試運転を行った。4.1で述べた手順によりボイラー、循環水ポンプ始動し蒸気タービンを駆動させた。試運転をした結果:取り付けた発電機の回転数を上昇しても予想に反しあまり発電されなかった。幾つかの点で同時に回転数を計測しようとしたが不備により次回に持ち越した。図2に、試運転の様子を示す。



図2 試運転中の様子

二回目の試運転を7月2日に実施した。前回計測できなかったタービン装置の回転数をデジタルタコメーター(小野測器製、HT-411)を利用して3点で同時に測定した(図3を参照)ところ、タービン本体の回転数6000[rpm]の時、タービン軸2020[rpm]、発電機の回転数は1000[rpm]であり、発電された電圧は約85Vであった。図4に、回転数の測定箇所を示す。試運転中、蒸気タービンメインバルブからの蒸気漏れと潤滑油給油口のレベルゲージの破損が判明した。



図3 デジタルタコメーター

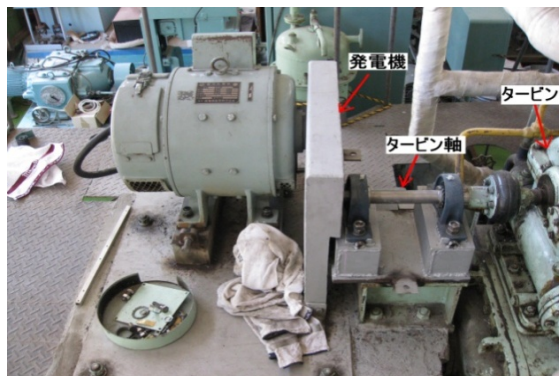


図4 回転数測定箇所

## 5. ガラス管の交換

取り出したガラス管は先端が割れていたため、新しいガラス管を作成し交換することにした。このガラス管はタービン内のオイルタンクの油面高さを確認するものである。ガラス管は長さが200mm、直径が13mmになるように加工した。

ガラス管の先端は平らになっていないためやすり



図5 先端を平らに削っている様子



図6 加工済みガラス管と破損したガラス管



図7 古くなったラバーパッキン



図8 ラバーパッキンに穴を開けている様子

を使用して（図5を参照）ほぼ平面になるまで削った。図6の上は加工したガラス管（回作成したガラス管）、下は破損したガラス管（以前使われていたガラス管）を示す。

取り出したラバーパッキン（図7を参照）は硬直しボロボロになっていたため、新しいラバーパッキンを作り、交換することにした。ガラス管の直径13mmにプラス1mm、足した直径14mmのラバーパッキンを作り、ガラス棒にオイルが流れないように作ったパッキンに直径約10mmの穴を開けた（図8を参照）。

## 6. タービン内を流れる蒸気速度と出力計算

### 6.1 計算の目的

蒸気タービン内を流れる蒸気速度の理論を学び理解した上で、プログラム作成ソフトを使用し、蒸気タービン内部を流れる蒸気速度と回転羽の出力を計算するプログラムの作成を行う。

### 6.2 蒸気速度の計算

本校蒸気タービンは、15 [kW] 実験用復水式タービン、東京芝浦電気社製である。取扱説明書<sup>[1]</sup>上では、蒸気タービン本体の最大回転数は11250 [rpm]、

有効出力は14.8 [kW]、蒸気流量は285 [kgf/h] である。図9はタービンローター軸断面図を示す、本校蒸気タービンは三段落から構成されている。タービンローター軸部分をローターホイールと呼び、ローターホイールと第1列羽根、案内羽根、第2列羽根からなるカーチス段、第2段落、第3段落はローターホイールと回転羽根からなるラトー段で構成されている。

図10に、タービン内の各段落ノズル、羽根の入口、出口の蒸気圧 [MPa] と温度 [°C] を元<sup>[1], [2]</sup>に有効熱落差、損失熱落差、各段落の理論熱落差 [kJ/kg] を h-s 線図を利用して導出し描いた本校蒸気タービンの各段落における蒸気状態線図を示す。

h-s 線図上において、第1段落のノズルに流入する蒸気圧1.027 [MPa] と蒸気温度235 [°C] の曲線の交点を求める (A点)。次にA点からの垂線とノズル出口の蒸気圧0.127 [MPa] との交点B、第1

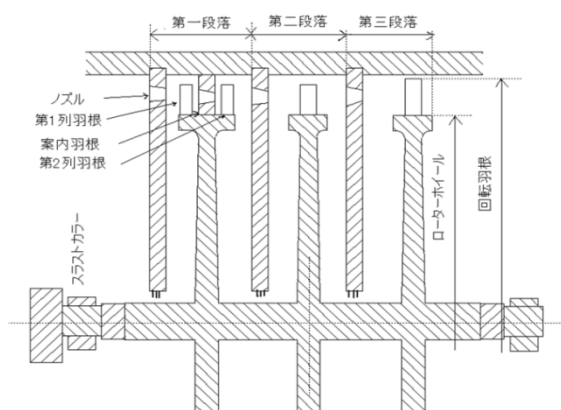


図9 タービンローター軸断面図

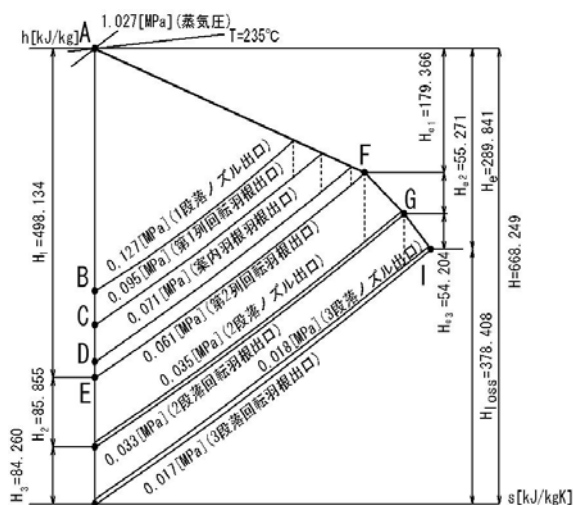


図10 本校タービンの各段落における蒸気線図

列回転羽根の出口 0.095 [MPa] との交点 C、案内羽根の出口の蒸気圧 0.071 [MPa] との交点 D および第 2 列回転羽根の出口 0.061 [MPa] との交点 E を求める。この A 点と E 点の差が第 1 段落の理論熱落差  $H_1$  であり、図より 498.134 [kJ/kg] となる。同様に第 2 段落、第 3 段落を求めると、理論熱落差はそれぞれ 85.855 [kJ/kg]、84.260 [kJ/kg] となる。これら 3 段落の合計  $H=H_1+H_2+H_3=668.249$  [kJ/kg] が本タービン全体の理論熱落差である。

次に有効熱落差を求める。第 1 段落最終段の第 2 列回転羽根の蒸気圧 0.061 [MPa] の曲線と出口温度 123 [°C] との交点 F を求め、A 点との縦軸の差が第 1 段落における有効熱落差  $H_{e1}$  であり、図から 179.366 [kJ/kg] となる。同様に第 2 段落の出口蒸気圧と出口温度から G 点、第 3 段落の出口蒸気圧と出口温度から I 点が求まり、これらの和として有効熱落差  $H_e=289.841$  [kJ/kg] が得られる。

また全理論熱落差と有効熱落差の差として損失熱落差が求められる。 $H_{loss}=378.408$  [kJ/kg]

以上の蒸気状態線図による検討から本タービンの内部効率  $\eta = \frac{H_e}{H} \times 100$  [%] より、43.373 [%] であることが分かった。

得られた有効熱落差分の蒸気が羽根を回転させ、さらに、軸受や歯車の損失分を差し引くことでタービンの出力となる。ノズルから噴出した蒸気が羽根の回転力となるため、蒸気の色度が重要となる。そこで速度線図を描く事を導くため、蒸気速度を求めた。ノズル入口、出口の運動エネルギーは  $\frac{V_0^2}{2}$ 、 $\frac{V_1^2}{2}$  で

ありノズル内部で増加するエネルギーは  $\frac{V_1^2}{2} - \frac{V_0^2}{2}$  となる。ノズル内の蒸気の摩擦のない断熱膨張をするとなれば運動エネルギーの増加は、エンタルピーに等しい。

$$\frac{V_1^2}{2} - \frac{V_0^2}{2} = h_0 - h_1 \quad (6.1)$$

また入口速度  $V_0$  は出口速度  $V_1$  に比べてきわめて小さいので、これを、式(6.1)より  $\frac{V_1^2}{2} = (1 \cdot R)H$  となる。したがってノズルから噴出される蒸気の理論速度  $V_1$  は次の式により求める

$$V_1 = \sqrt{2(1-R)H} \quad [m/s] \quad (6.2)$$

回転羽根の入口側絶対速度  $V_2$  は次の式より求める。

$$V_2 = \phi V_1 \quad [m/s] \quad (6.3)$$

ノズルの速度係数  $\phi$  は、縦軸にノズルの速度係数  $\phi$ 、横軸をノズルから噴出される蒸気の理論速度  $V_1$  [m/s] として、水蒸気の過熱度との関係を線図<sup>[3]</sup>にしたノズル蒸気速度係数図<sup>[4]</sup>により求めた。

次に、 $D$  を平均羽根円直径 [m]、 $N$  をタービンの回転数 [rpm] とすると回転羽根の速度  $u$  は次の式により求まる。

$$u = \frac{\pi D N}{60} \quad [m/s] \quad (6.4)$$

回転羽根の蒸気の入口側相対速度  $\omega_1$  は  $\alpha$  をノズル角度[°]とすることで求めることができる。また、 $r$  を回転羽根の反動度とすると、回転羽根の蒸気の出口相対速度  $\omega_2$  は、次の式により求まる。

$$\omega_1 = \sqrt{(V_2^2 + u^2 - 2V_2u \cos\alpha)} \quad [m/s] \quad (6.5)$$

$$\omega_2 = \phi_m \sqrt{2 \left( \frac{\omega_1^2}{2} + H \cdot r \right)} \quad [m/s] \quad (6.6)$$

回転羽根の速度係数  $\phi_m$  は、縦軸に回転羽根の速度係数  $\phi_m$ 、横軸に回転羽根の蒸気の入口相対速度  $\omega_1$  [m/s] として水蒸気の過熱度との関係を線図にした回転羽根速度係数図<sup>[4]</sup>により求める。

次に回転羽根の出口角を  $\beta_2$  とすると、回転羽根の蒸気の出口側絶対速度  $V_3$  は次の式より求めることができる。

$$V_3 = \sqrt{(\omega_2^2 + u^2 - 2\omega_2u \cos\beta_2)} \quad [m/s] \quad (6.7)$$

### 6.3 第一段落の速度線図

理論熱落差  $H_1 = 498.134$  [kJ/kg]、反動度  $R = 25$  [%] とすると、式 (6.2)より理論速度

$$V_1 = \sqrt{2 \times 0.75 \times 498134} = 864.41 \quad [m/s] \quad (6.8)$$

入口側絶対速度 (ノズル速度係数図より  $\phi = 0.947$  を求める) は式 (6.3)より

$$V_2 = 0.947 \times 864.41 = 818.6 \quad [m/s] \quad (6.9)$$

回転羽根の速度

$$u = \frac{\pi \times 0.275 \times 11250}{60} = 161.99 \quad [m/s] \quad (6.10)$$

入口側相対速度

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \sqrt{818.60^2 + 161.99^2 - 818.60 \times 161.99 \times \cos 18^\circ} \\ &= 666.42 \quad [m/s] \end{aligned} \quad (6.11)$$



回転羽根速度係数図より  $\phi_m = 0.888$  を求める。  
また、第1列回転羽根の反動度は  $r = 10\%$  なので、  
式(6.6)より出口側相対速度は

$$\omega_2 = 0.888 \cdot \sqrt{2 \left( \frac{666.42^2}{2} + 498134 \times 0.1 \right)} = 654.8 \text{ [m/s]} \quad (6.12)$$

案内羽根の蒸気の入口側速度  $V_{g1}$  は、第1列回転羽根の蒸気の出口側絶対速度と等しいため、式(6.7)より入口側速度

$$V_{g1} = \sqrt{654.80^2 + 161.99^2 - 2 \times 654.80 \times 161.99 \times \cos 18.5^\circ} = 503.81 \text{ [m/s]} \quad (6.13)$$

案内羽根の蒸気の出口側速度  $V_{g2}$  は次式による求める。

$$V_{g2} = \phi_g \cdot \sqrt{2 \left( \frac{V_{g1}^2}{2} + H_1 \cdot r_g \right)} \text{ [m/s]} \quad (6.14)$$

案内羽根の速度係数  $\phi_g$  は回転羽根の速度係数と同様にして  $\phi_g = 0.897$  を求める。また案内羽根の反動度  $r_g = 10\%$  なので、 $V_{g2}$  は式(3.14)より

$$V_{g2} = 0.897 \cdot \sqrt{2 \left( \frac{503.81^2}{2} + 498134 \times 0.1 \right)} = 533.27 \text{ [m/s]} \quad (6.15)$$

第2列回転羽根の蒸気の入口側相対速度  $\omega'_1$  は式(6.5)より

$$\omega'_1 = \sqrt{533.27^2 + 161.99^2 - 2 \times 533.27 \times 161.99 \times \cos 28^\circ} = 396.60 \text{ [m/s]} \quad (6.16)$$

第2列回転羽根の速度係数  $\phi'_m = 0.906$  を求める。  
また、第2列回転羽根の反動度は  $r' = 5\%$  なので、  
第2列回転羽根の蒸気の出口側相対速度  $\omega_2$  は式(6.6)より

$$\omega_2 = 0.906 \cdot \sqrt{2 \left( \frac{396.60^2}{2} + 498134 \times 0.05 \right)} = 412.32 \text{ [m/s]} \quad (6.17)$$

第2列回転羽根の蒸気の出口側絶対速度  $V_3$  は式(6.7)より

$$V_3 = \sqrt{412.30^2 + 161.99^2 - 2 \times 412.30 \times 161.99 \times \cos 34^\circ} = 292.39 \text{ [m/s]} \quad (6.18)$$

以上の計算により描いた第1段落の速度線図を図11に示す。また第1段落と同様に式(6.2)から式(6.7)を用いて第2段落、第3段落の蒸気速度を導出す。

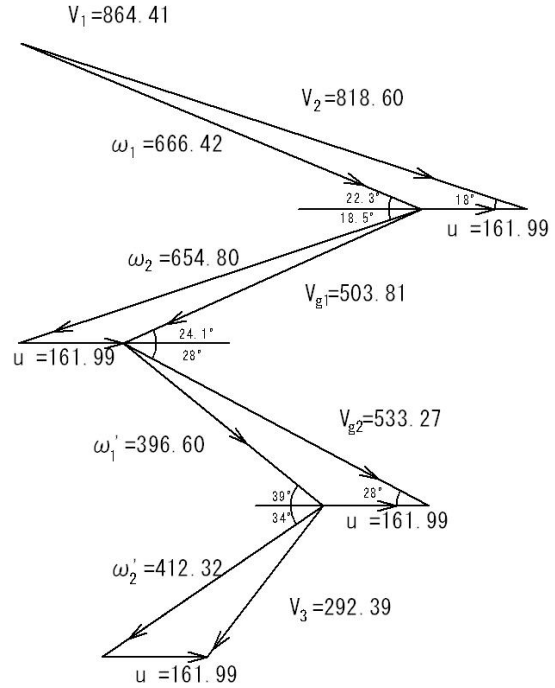


図11 第1段落の速度線図

#### 6.4 速度線図によるタービン出力の計算

蒸気タービンの出力  $L$  は次式によって求められる。

$$L = Q \cdot u (\omega_1 \cos \beta_1 + \omega_2 \cos \beta_2) \text{ [W]} \quad (6.19)$$

ここではカタログ値の蒸気流量  $Q = 285 \text{ [kgf/h]}$  を  $1\text{[s]}$  あたりの蒸気流量  $[\text{kgf/s}]$  に換算し計算した。

##### 第一段落の出力

第1列回転羽根による出力

$$L = \frac{285}{3600} \cdot 161.99 (666.42 \cos 22.3^\circ + 654.80 \cos 18.5^\circ) = 15.87 \text{ [kW]} \quad (6.20)$$

第2列回転羽根による出力

$$L' = \frac{285}{3600} \cdot 161.99 (307.73 \cos 16.8^\circ + 412.32 \cos 34^\circ) = 8.336 \text{ [kW]} \quad (6.21)$$

第一段落の出力は  $15.87 + 8.336 = 24.206 \text{ [kW]}$  となるが補正係数は第一列が  $0.577$  であるため実際の出力は  $13.967 \text{ [kW]}$  となる。

##### 第二段落の出力

$$L = \frac{285}{3600} \cdot 161.99 (307.73 \cos 16.8^\circ + 298.41 \cos 20^\circ) = 7.314 \text{ [kW]} \quad (6.22)$$

第二段落補正係数第二列が 0.658 であるため実際の出力は 4.812 [kW] となる。

第三段落の出力

$$L = \frac{285}{3600} \cdot 161.99(247.15\cos 18.2^\circ + 238.60\cos 20^\circ) = 6.037 \text{ [kW]} \quad (6.23)$$

第三段落補正係数は第三列が 0.689 であるため実際の出力は 4.812 [kW] となる。

以上の計算より線図出力は 22.882 [kW] となる。

最終的には、ここで得られた線図出力から軸受や歯車の機械損失を差し引くことでタービンの出力が得られることになる。

6.5 計算プログラムモデル

蒸気速度計算プログラムを C 言語で作成するように学生に指導したが、学生が以前 C# (シーシャープ) を用いたプログラムの作成をしていたとの事でその時に使用していた Microsoft Visual Studio 2010 で速度計算プログラムを作成するようになった。

そして、C#を用いて既に計算されてある計算式を使い、値を変えても計算ができるようにプログラムの作成[14],[15]を行った。図 9 に示したように、回転羽が第一段落から第三段落の羽根のうち、第一段落の回転羽は第 1 列羽根、案内羽根、第 2 列羽根があり他の第二段落と、三段落の羽根とは異なり蒸気速度も

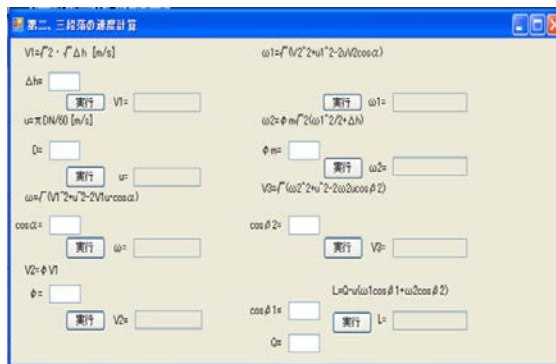


図 14 第二、三段落の速度計算プログラムの画面

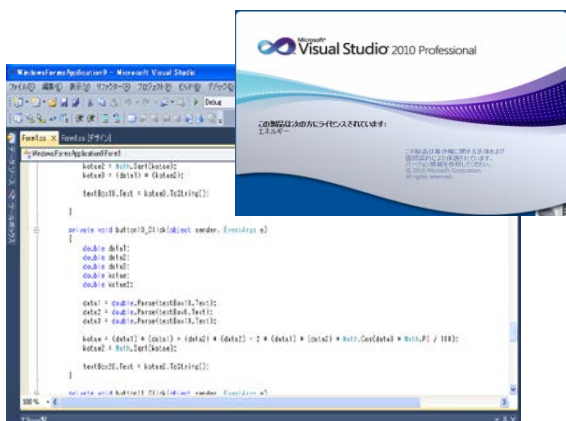


図 12 速度計算プログラムの例図



図 15 蒸気タービン取扱い説明書の比較

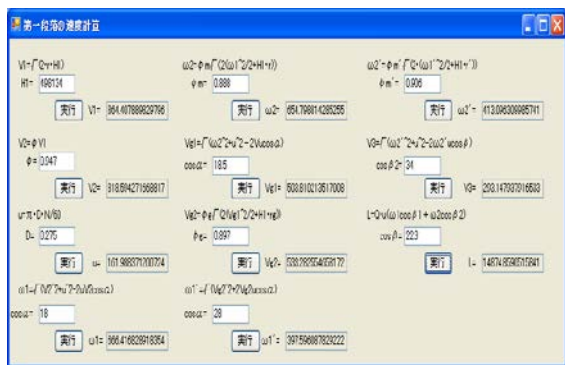


図 13 第一段落の速度計算プログラムの画面

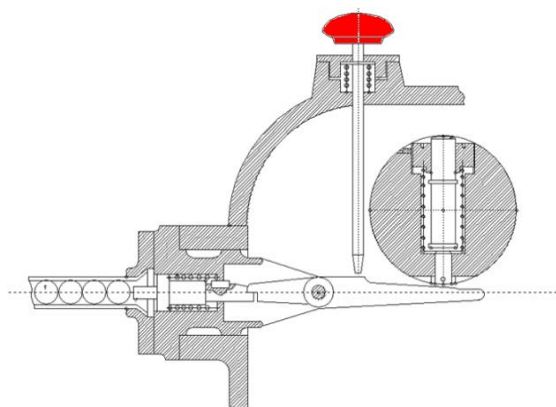


図 16 タービンの安全装置

変化してくる。なので、第一段落の羽根と第二段落、第三段落の羽根では計算式が違っているので別々にプログラムを組むことにした。図 12 に速度計算プログラムの例図を、図 13 に第一段落の速度計算プログラムの画面を、図 14 に第二段落と第三段落の速度計算プログラムの画面を示す。

また、古くなったマニュアル<sup>[1]</sup>の復元（図 15 参照）を通して CAD の復習を行った。図 16 に CAD 利用した作図の例図（タービンの安全装置）を示す。

## 7. 結果

本校蒸気タービン実験装置の修理を完了し、二回試運転を行った。試運転ではデジタルタコメーターを使い各部の回転数を計測し、タービン本体の回転数が 6000 [rpm]、タービン軸の回転数が 2020 [rpm]、発電機の回転数が 1000 [rpm] である時、85 [V] の電圧を発電されている事を確認した。

学生にグランドパッキンについて教え、パッキンを交換する技術やガラス管を切る技術を習得させた。また、蒸気タービンオイルタンク内のオイルを交換する作業を行った。

本校蒸気タービンの蒸気速度とタービン出力の計算を行うプログラムの完成と古くなったマニュアルの復元を行う事が出来た。

この再生プロジェクトにより、本校蒸気タービン実験装置を実習や実験用として使用することが可能になった。

## 8. 結言

去年行えなかったタービン本体の電動機を発電機に置き換えて試運転を行うことが出来たが、回転数を上げて予想よりあまり発電されなかった。作成したガラス棒を交換した際に 7 日間様子を見たがオイル漏れは確認されませんでした。

結果としては、「本校蒸気タービン実験装置再生プロジェクト」を終了し、長期間運転できない状態が続いていた蒸気タービン実験装置を商船学科や電子機械工学科の 4 年生の実習や実験用として使用することを可能にした。

3 年間継続した本プロジェクトに参加した学生は、専門技術と共に修理技術を身に付ける体験した。本プロジェクト実施により実物を多く使う事で分かりやすい授業や卒業研になり、現場に近い環境で専門技術教育を提供する事ができた。

## 謝辞

本プロジェクトは校長裁量経費（3 年間で 150 万円）の助成を受けて行われているものであり、ここに謝意を表します。本プロジェクトのタービン修理において予算、工具、情報を提供していただきました落合敏邦校長、商船学科の松下邦幸教授、商船学科（弓削丸練習船）の松永直也准教授、実習工場の職員の皆さま、内海造船（株）田熊工場職員の皆様に深く感謝致します。

## 参考文献

- [1] 東京芝浦電気株式会社：15kw 蒸気タービン 取扱い説明書、(昭和 46 年 3 月)
- [2] 山田広中：15 kW 蒸気タービンの性能試験に関する考察、弓削商船高等専門学校紀要、第 5 号 1 類、p.257-270 (1973)
- [3] 越智敏明、老固潔一、吉本隆光：熱機関工学、p.159-162 (2006) コロナ社
- [4] 生産技術協会：船用蒸気タービン設計法、p.16-17 (1954) 生産技術協会
- [5] 電気学会：エネルギー基礎論、p.76-89 (2005) 電気学会
- [6] 梶川武信：エネルギー工学入門、p.57-60 (2006)、日本材料科学出版委員会
- [7] 社団法人生産技術協会：船用蒸気タービン設計法、pp.16-17、生産技術協会 (1954)
- [8] 土居政吉：船用蒸気タービン講義、(増補版) 海文堂 (昭和 37 年 10 月)
- [9] 角田哲也、斉藤 郎：蒸気タービン要論、成山堂書店株式会社 (2005)
- [10] 兵動務、石田雄三：タービンの設計、p.55 (昭和 49 年 11 月)、東京パワー社
- [11] 古川守、杉田英昭：船用蒸気タービン、p.126-127 (1984)、成山堂書店株式会社
- [12] 山田広中：基本蒸気タービンの設計 (1976 年 5 月)、海文堂
- [13] テック・ステート：10 日で覚える Visual C#.NET 入門教室、翔泳社 東京 (2002)
- [14] ハーバート・シルト：独習 C：ANSI 規格準拠 独習 (第 3 版)、翔泳社 東京 (2002)
- [15] ハーバート・シルト：独習 C#、翔泳社 東京 (2002)