

(昭和 22 年 11 月 10 日造船協會秋季講演會に於て講演)

船舶蒸氣タービンの特殊性能試験

正員 工學士 柴田 萬壽太郎*

I. 緒 言

蒸氣タービンの蒸氣消費量は、使用する蒸氣の状態、タービン内部の段落効率、排氣の眞空度、タービンからの排氣損失、並に機械的損失蒸氣漏洩損失等を含む外部諸損失の量から理論的に定まつて來るものであるが、船舶推進用蒸氣タービンの蒸氣消費量を問題にする場合には、特にタービン回轉數の變動による段落効率の變化と逆轉翼車による風損失の増加の二點を取上げて考えなければならない。

一般の陸上發電用タービンは常に一定の回轉數で運轉されるが、船舶推進用タービンではその出力の大小によつて回轉數が變動し、又同じ出力でも吃水の狀態や波の狀態によつて推進器の回轉數が變つて來て、從つてタービンの回轉數も變動して來る。回轉數の變動による蒸氣消費量の變化の數式による解法は Flügel 其他が發表しているが、實驗による裏付けに關しては殆んど何も資料が發表されて居ない。

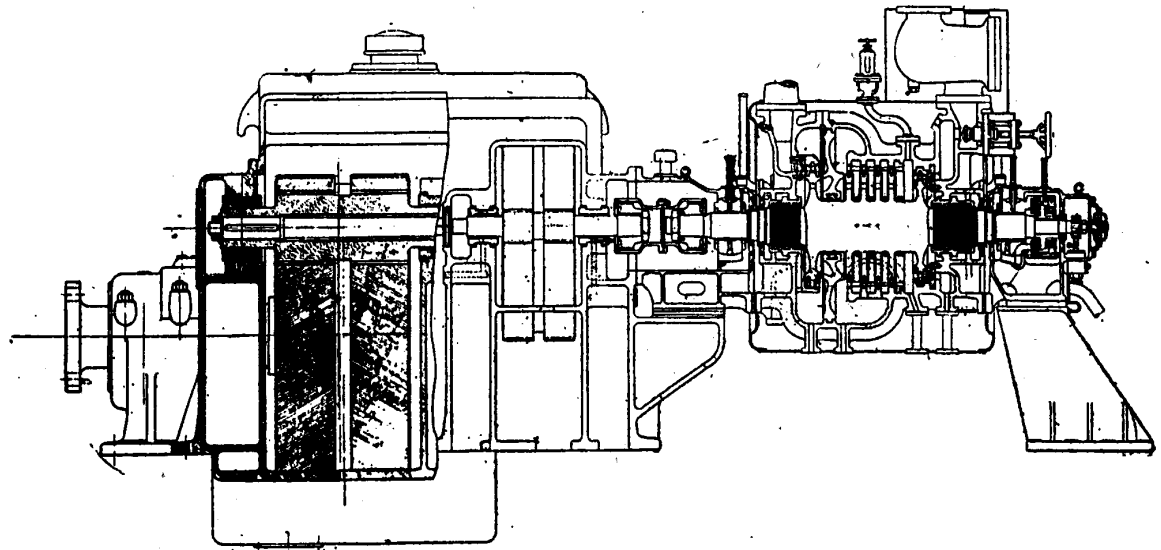
船舶推進用蒸氣タービンの逆轉翼車による損失は一般の蒸氣タービンには見られない現象であるが、船舶タービンの性能を問題にする場合にはどうしても考慮しなければならない點であつて、この逆轉翼の風損失に關しては從來各種の實驗式や實驗結果が發表されて居るが、何れもモデルによる試験が多く實際のタービン翼車を使つた實驗に關しては殆んど發表されて居ない。

これらの問題に關しては何れもタービンの設計の基礎に必要な事項であつて、タービンの性能を向上させる上に於いて是非とも究明して置かなければならない點であるが、船舶蒸氣タービンの船内に於ける蒸氣試験では船の積荷や吃水を自由に變えることが出來ないこと、船内には充分な試験裝置を備えることが難しいこと等のために満足出来るような性能試験を行うことは困難である。從つてこれらの性能を徹底的に究明するためには、陸上に大きな動力計を含む、大がかりな試験裝置を備えて性能研究を行わなければならない。

今回商船用の 2800 HP 船舶蒸氣タービンに就いてこのような試験裝置を用意して、上記の船舶用タービンの特殊性能に關する研究試験を行つたので、その結果を發表する次第である。

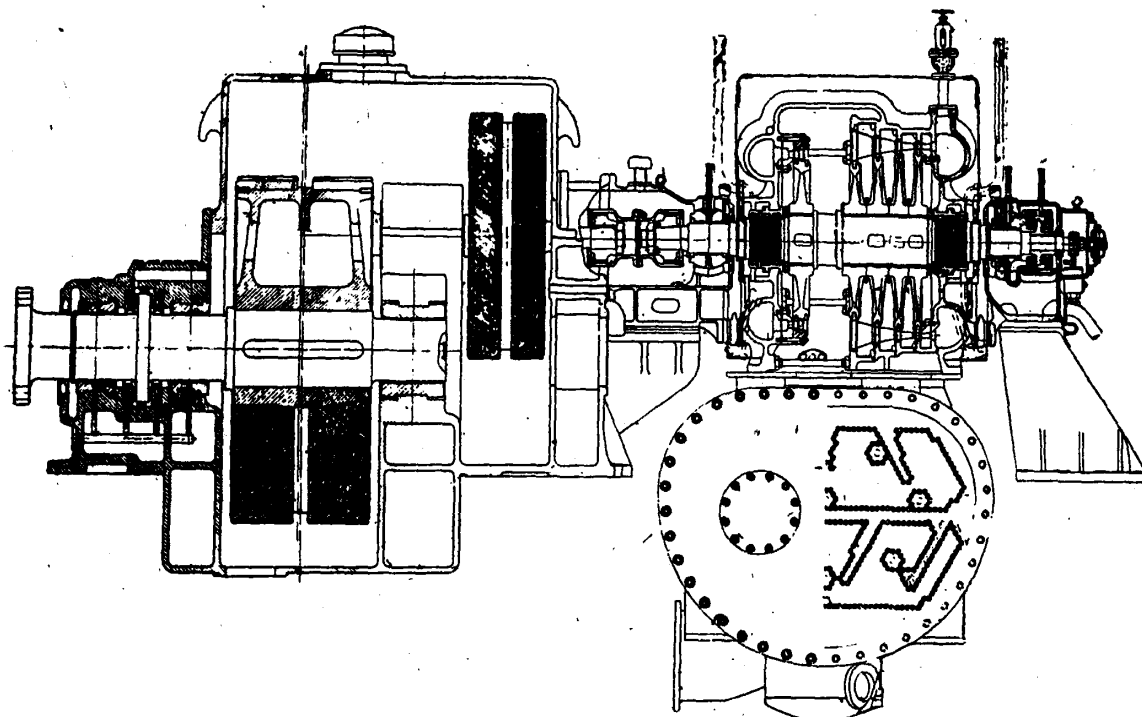
II. 試験裝置及び試験方法

試験に使用したタービンは第 1 圖及び第 2 圖に示す如きものである。第 1 圖は高壓タービンの斷面を示し、第

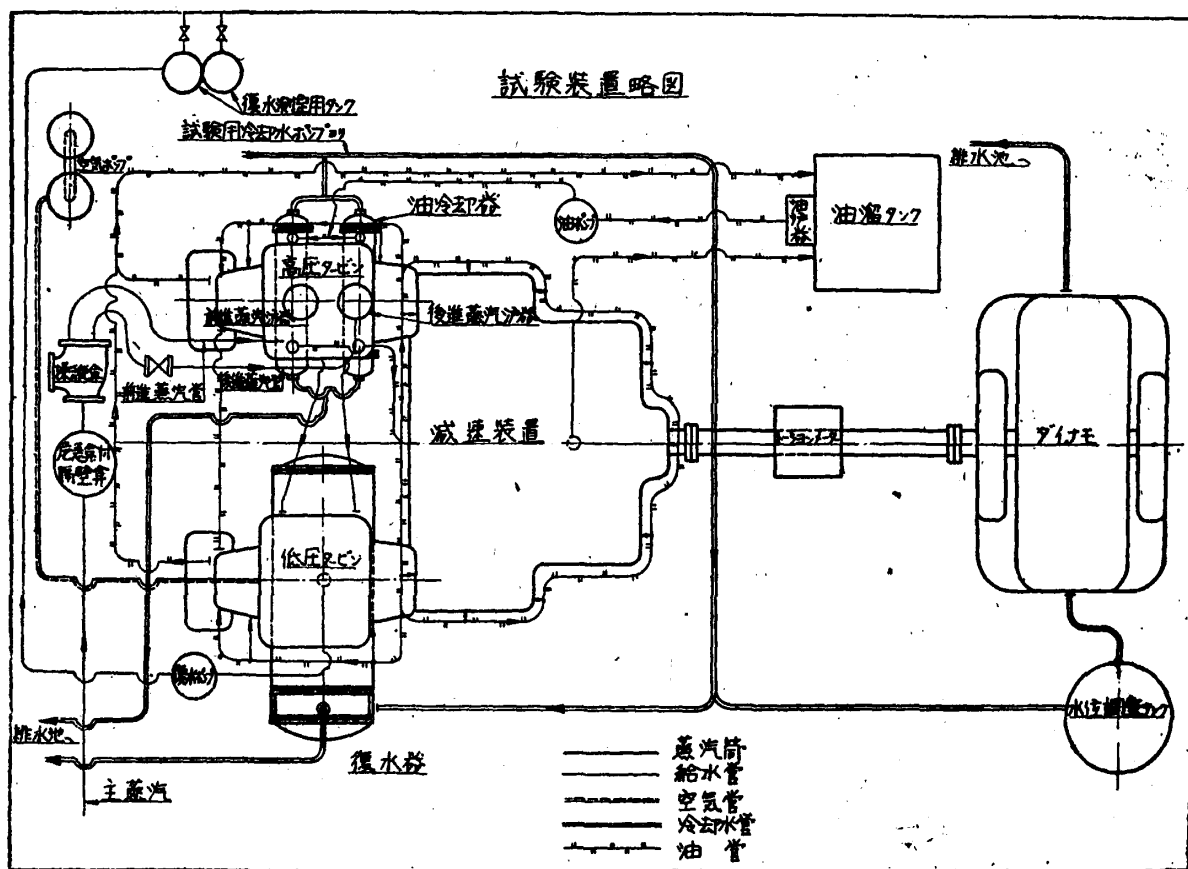


第 1 圖

* 日立製作所研究所技師



第 2 圖



第 3 圖

2圖は低壓タービンを示している。蒸気消費量の試験装置を第3圖に示す。軸馬力はホプキンソン振動力計を使用して測定し、軸馬力の吸収機械としてはフロード動力計を用いた。蒸気消費量の計測方法は1トンの水槽及び2トンの計測用天秤2組を備えて復水を交互に受入れ、その實重量を計測した。

翼車の風損試験は低壓タービンに誘導電動機を直結して行い、タービン車室内の蒸気壓力は復水器の真空を變化させて計測を行つた。この結果から蒸気比重の大小に因る風損失の多寡を見出した。風損試験に際しては完成

2 圖は翼車そのまゝの状態と後進翼車を取外した場合の順轉及び逆轉の試験を行つた資料を得た。

回轉數の變動による蒸氣消費量の試験に於いては負荷を約 1.370 HP に保ち、タービンの回轉數を $-10\%+30\%$ の範圍に變化させ、各回轉數に於いて 15 分間宛連續運轉し 3 回宛資料を取つて平均値を見出した。

翼車の風損試験は後進用の翼車を除いた場合及び除かぬ場合に就いて回轉數を 2,600 r. p. m. $\sim$ 3,900 r. p. m. の間に變化させ、順轉及び逆轉に就いて資料を採つた。この際に眞空度の測定は水銀マンローメーターに依つて測定した。車室内への補給蒸氣は衛帶蒸氣によつてのみ行つた。

尙試験に供したタービンの仕様は附記の項に記録する如きものである。

III. 試験結果及びその検討

(1) 回轉數の變動による蒸氣消費量の變化

回轉數の變動が蒸氣タービンの蒸氣消費量に變化を及ぼす因子は、(A) タービンの段落効率の變化、(B) タービンの機械効率の變化である。この内の (A) は内部効率に屬し、(B) は外部効率に屬する。タービンの段落効率は回轉數の變動によつて段落速度比が變り、直接に効率を變化させる。これらの變化する割合は各々のタービンの壓力の分布狀態及び速度比の取り方によつて異り、同一のタービンでも各々の負荷によつて異つて来る。

運轉狀態の變つた場合の段落効率の一般式は¹⁾

$$\eta_u = \eta_{u0} \frac{\nu}{\nu_0} \left[\mu - (\mu - 1) \frac{\nu}{\nu_0} \right] \frac{1 + \frac{v_2^2}{v_1^2}}{1 + \left(\frac{v_2}{v_1} \right)_0} \dots\dots\dots (1)$$

此處に η_u は段落効率、 ν は速度比 $= u/C_1$ 、 u は段落周速、 C_1 は熱降下による蒸氣速度、 v_2 及び v_1 は翼の前後に於ける蒸氣の比體積、尙 $\mu = 1 + \frac{2}{\eta_{u0}} \nu_0^2$ 、0 を附したの基準狀態に於けるそれぞれの値である。

實際のタービンに對しては動翼に蒸氣が理論的に考えるように流入する理想狀態はなく、従つて効率の變化する割合も上の式で示す割合と違つて来る。この影響を考へて μ の代りに μ' を用い、 μ' に對して Flügel²⁾ は經驗上

$$\mu' = \mu + \sigma(2 - \mu) \dots\dots\dots (2)$$

と置き $\sigma = \sim 0.5$ と與えている。

上の一般式に對して今回の試験の如く回轉數を變える場合は負荷が一定であれば、速度比は回轉數の比に極めて近似の値を持つから、(1) 式を下の如く書換へ得る。

$$\eta_u = \eta_{u0} \frac{n}{n_0} \left[\mu' - (\mu' - 1) \frac{n}{n_0} \right] \frac{1 + \frac{v_2^2}{v_1^2}}{\left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right)_0} \dots\dots\dots (3)$$

但し n は回轉數である。

今回試験した衝動タービンに於いては動翼内の反動度は普通の運轉狀態に於いて 0% と考へて差支えなく、又最終段に近い反動段落に於いても負荷が一定で回轉數が變動する條件の下では

$$\left(\frac{v_2}{v_1} \right) = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)_0 \dots\dots\dots (4)$$

である。従つて (3) 式は

$$\eta_u = \eta_{u0} \frac{n}{n_0} \left[\mu' - (\mu' - 1) \frac{n}{n_0} \right] \dots\dots\dots (5)$$

によつて段落効率の變化が示される。

次にタービン全體として回轉數の變動が各負荷に於ける内部効率に與える影響を考えると、一臺のタービンに於いて運轉狀態の變動によつて熱降下に甚しい影響をうけるのは、最初の段落即ちこのタービンではカーチス段落と最終段落とであるから、これ等の段落については効率の變化を段落毎に計算し、運轉狀態の變動によつて熱降下の變化の少く且つその變化する割合の略々同じである所の途中の段落は一括して効率の變化を考へて差支えない筈である。但しこの場合に μ の値は

$$\mu = 1 + \frac{2}{\eta_{u0}} \frac{\Sigma u_0^2}{(91.5)^2 H_0} \dots\dots\dots (6)$$

と置かなければならない。式中 H_0 は段落の全熱降下である。

これ等の関係を用い、 $\sigma=0.5$ として實驗に使用したタービンの効率をカーチス段、高壓タービン、低壓タービン及び最終段落に分けてその變化を計算し、タービン全體の効率の變化を各負荷に對して算定すれば第 4 圖の如くなる。

次に外部効率の變化を考えるに、回轉數の變動によつて最も大きな影響をうけるのは、タービン並びに減速裝置の軸受の摩擦損失と翼車並びに動翼の風損失及び減速齒車の噛合損失である。尚翼車並びに動翼の風損失は一般には内部損失の一部として分類されている場合が多いが、此處では分類の便宜上外部損失の方に含めて取扱う。

擬て軸受の摩擦損失は一般に次の式で表わされる。

$$L_R = K \cdot f \cdot P \cdot a \cdot d^2 \cdot n \dots\dots (7)$$

式中の K は常數、 f は摩擦係數、 P は軸受壓力、 a 及び d はそれぞれ軸受の長さ及び幅である。即ち軸受の摩擦損失は回轉數 n に比例して増減するのである。

翼車及び動翼の風損失を表わす式は各種の異つた式が導き出されて居るが、全損失を綜合した Bauer の式³⁾によれば翼車及び順轉翼列に對しては

$$N_w = k \left(\frac{u}{100} \right)^3 \gamma [1.8 D^2 + (1-B) \cdot Z \cdot D \cdot l^{1.5}] \dots\dots (8)$$

であり逆轉翼列に對して

$$N_w = K_1 \left(\frac{n}{100} \right)^3 \gamma \cdot D^4 \cdot Z \cdot l \dots\dots (9)$$

である。式中の k は蒸氣の乾度 X による恒數 $= 1 + 1/4 [10(1-X)]^2$ 、 u は周速度、 n は回轉數、 γ は蒸氣の比重、 D は節圓の直徑、 B は部分噴射比、 Z は翼列の數、 l は翼の長さ、 K_1 は翼形によつて定まる定數である。即ち翼車の風損失は回轉數の 3 乗に比例して増減する。

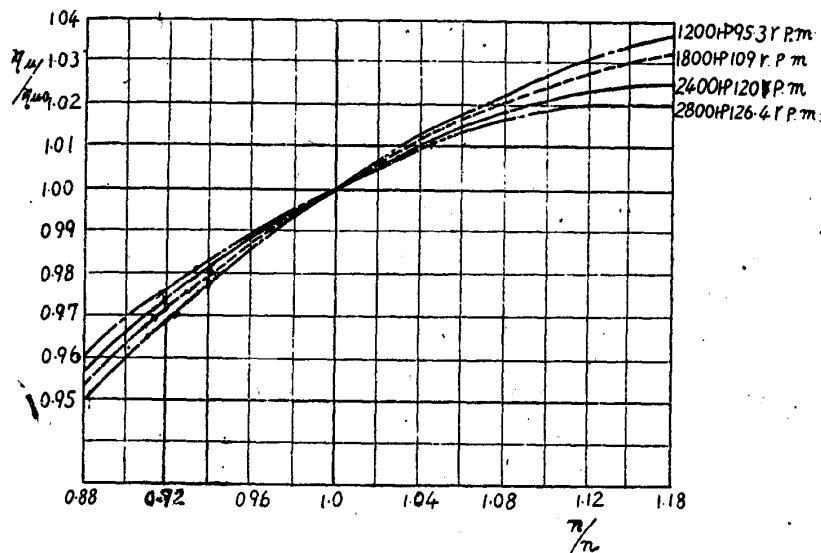
次に減速齒車の噛合損失は次の式で表わされる。

$$L_A = \mu_g \zeta \frac{\pi}{4} \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right) N \dots (10)$$

式中 μ_g は摩擦係數、 ζ は接觸率、 Z_1 及び Z_2 は大小齒車の齒數、 N は傳達馬力である。

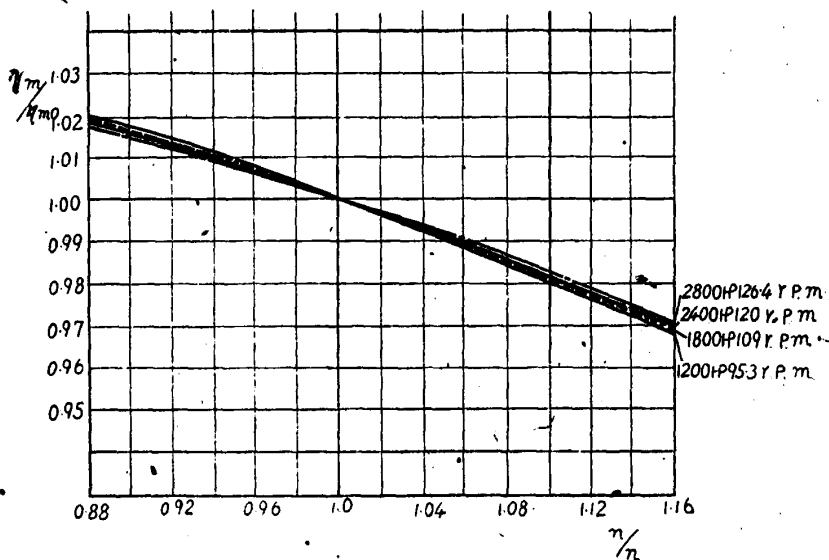
即ち齒車の噛合損失は傳達馬力の大きさによつて變化し、回轉數には直接關係しない。これらの關係を用いて回轉數の變動による風損失をも含めた機械損失の變化の

回轉數變動による内部効率の變化 ($\mu = \mu + 0.5(2-\mu)$)



第 4 圖

回轉數變動による外部効率(風損失を含む)の變化



第 5 圖

有様を實驗に供したタービンに就いて計算したものは第5圖に示す如くである。

回転数の變動による蒸気消費量の變化は前述のように内部効率と外部効率の變化を組合わせたもの、即ち第4圖と第5圖を組合わせた第6圖によつて示される。

今回の實驗に於ける回転数の變動による蒸気消費量の變化の實驗はタービンの出力約 1,370 HP に於いて行い、この結果から馬力當り蒸気消費量と出力との關係を示せば第7圖の實曲線の如くなる。圖中に示した點⊗の回転数は實測の回転数を示し、下の()内の數字は標準状態に於いてこの出力に相當する回転数を示している。この結果を Flügel の式による第6圖の補正曲線によつて補正すれば ② の點曲線の如くなり、又理論式そのまゝで補正すれば ① の曲線の様になる。この試験は出力が殆んど一定の状態で行つたのであるから、正しい補正曲線で補正すれば水平線になる筈である。即ち理論式そのまゝは勿論、Flügel の式でも完全には適合しないことが解る。 μ の補正式 (2) の $\mu' = \mu + \sigma(2 - \mu)$ の σ の値を Flügel の言う如く 0.5 とせず、 σ の値を變えて η_u/η_{u0} の變化の有様を曲線に畫けば第8圖の如くなる。

今回の實驗の結果から σ の値を算出すれば $\sigma = 0.36$ 即ち

$$\mu' = \mu + 0.39(2 - \mu) \dots\dots (11)$$

とするのが最もよく實驗結果と一致する。第9圖は $\sigma = 0.39$ とした場合の η_u/η_{u0} の實驗値と計算値の比較である。

2. 翼車の風損失試験

翼車の風損失に關しては各種の實驗式が出されているが、逆轉の場合をも考慮した比較的新しい式として前述の Bauer の式と久武氏の式とがある。

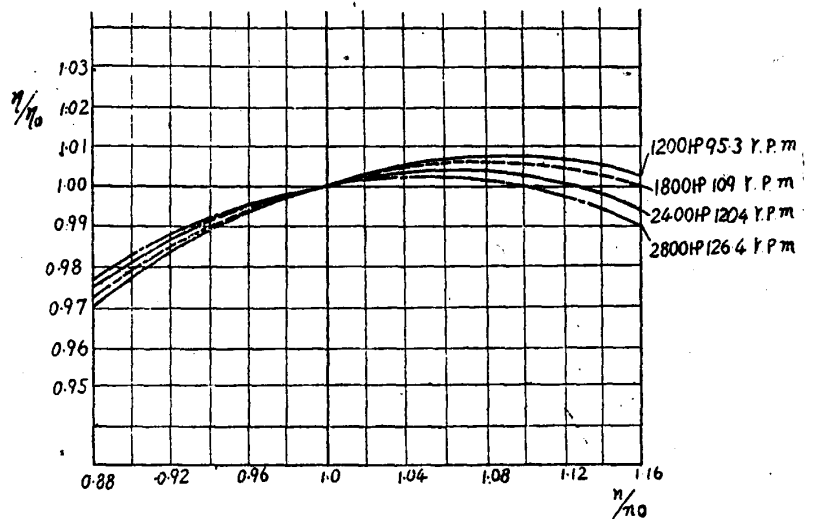
(8) 及び (9) の Bauer の式を書き代えて

$$N_v = \left(\frac{n}{100}\right)^3 r D^4 \left[\frac{\pi^3}{60^3} k \{1.8D + (1-B)Z \cdot l^{0.5}\} + K_1 Z l \right] \dots\dots (12)$$

とする。但し N_v の單位は HP, n は r.p.m, D は m, r は kg/m^3 , l は cm であり、各符號の字義は前述の通りである。式中 () の中の第一項は圓盤損失、第二項は順轉翼列損失、第三項は逆轉翼列の損失である。

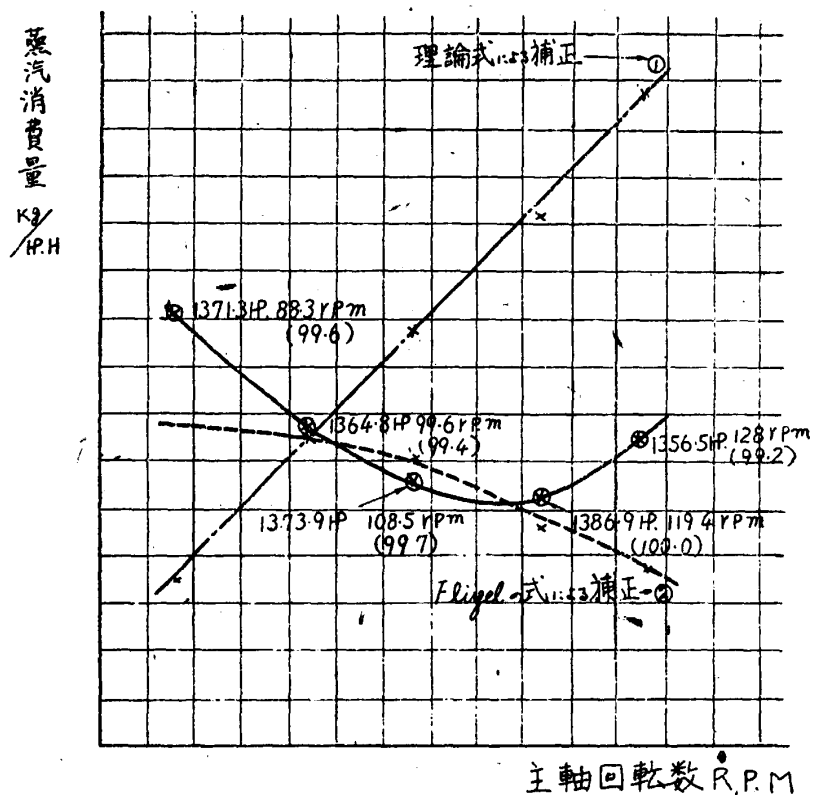
久武氏の式⁴⁾は密閉翼車に於いて

④ 回転数變動によるタービン効率の變化 ($\mu = \mu + 0.5(2 - \mu)$)



第 6 圖

⑤ 回転数變動による蒸気消費量の變化



第 7 圖

主軸回転数 R.P.M

回転数変動による内部効率の変化

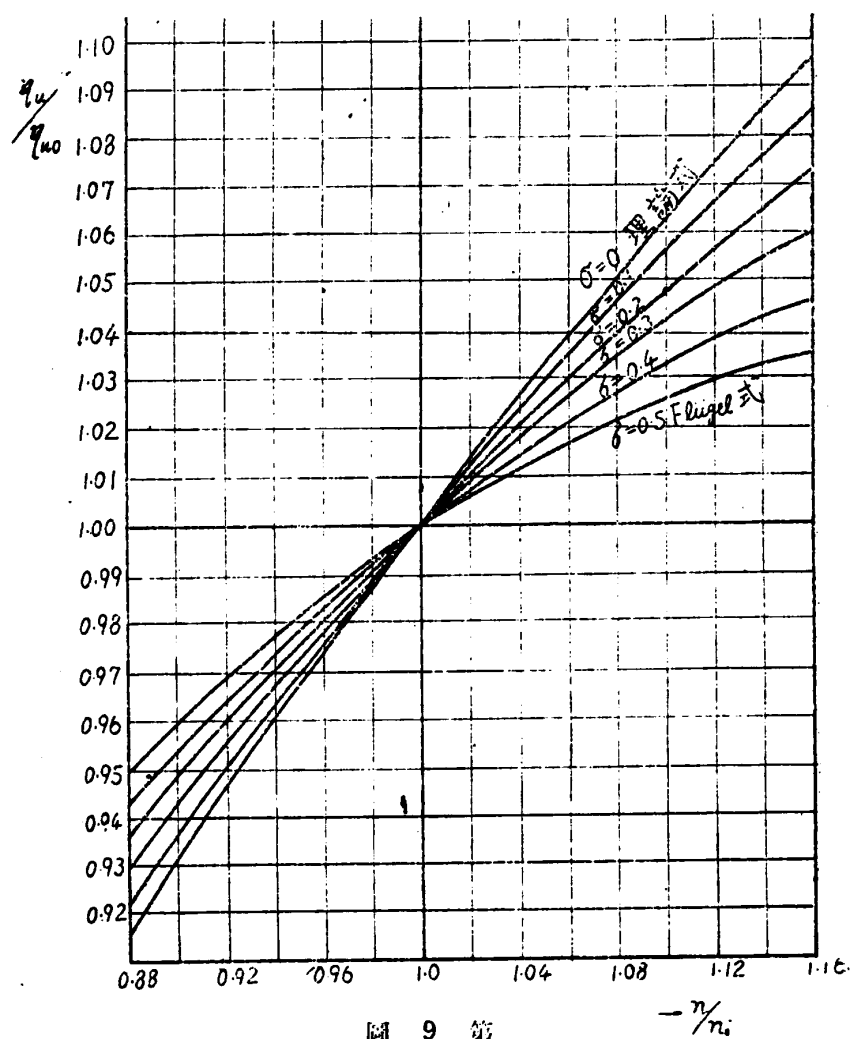
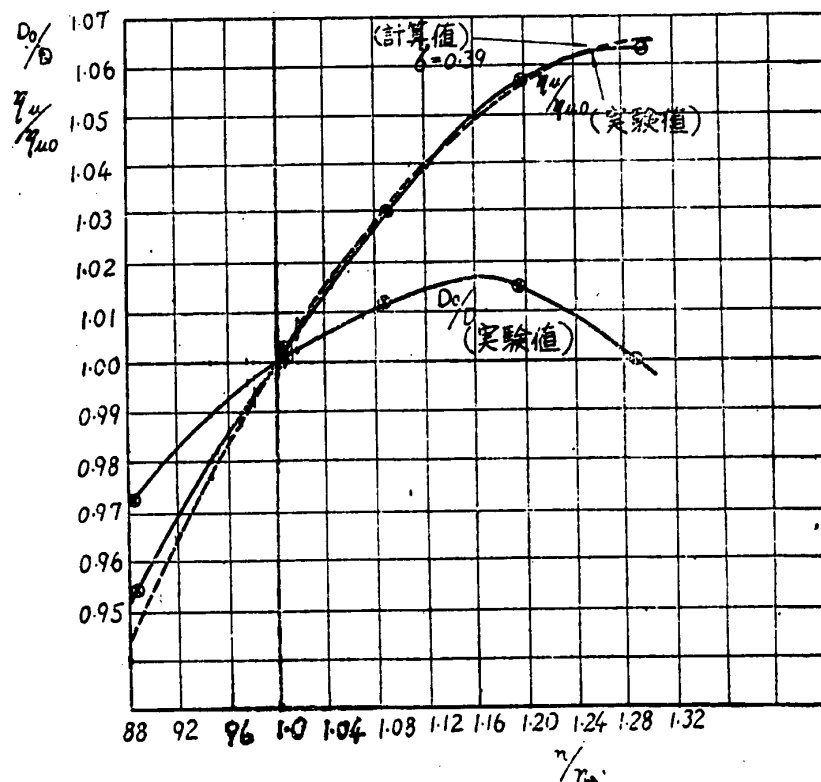


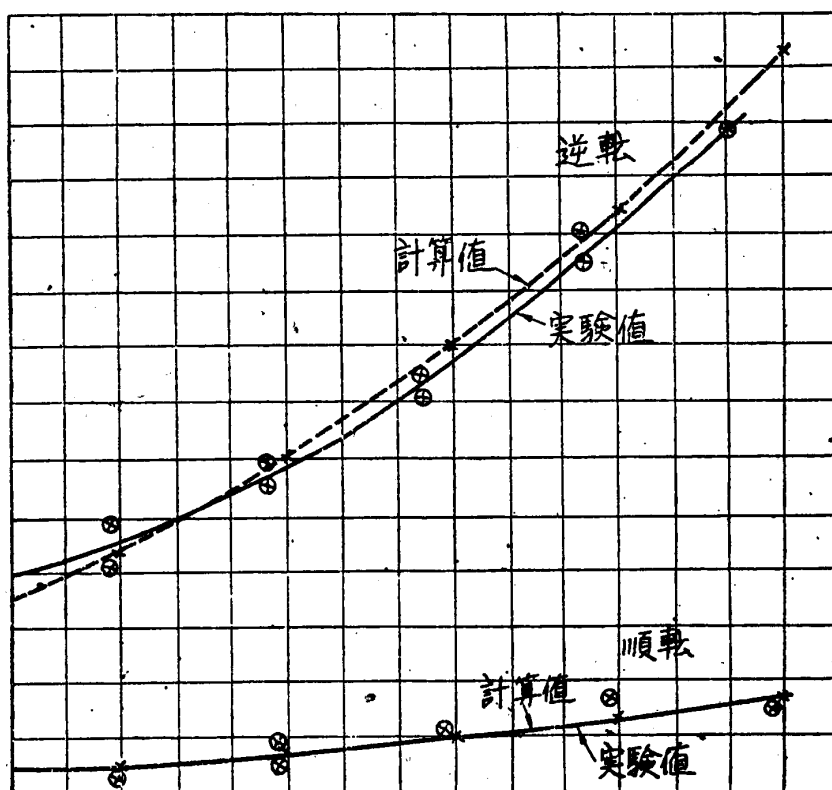
圖 9 第

回転数変動による蒸汽消費量比 D_0/D 及内部効率比 η_u/η_{u0}



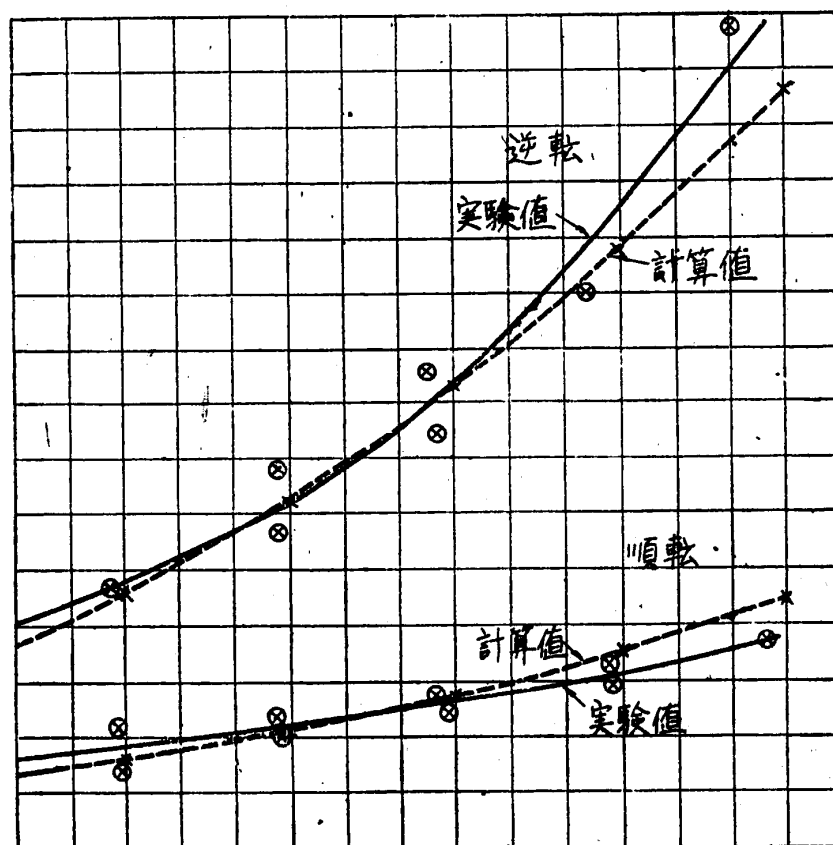
第 10 圖

損失仕事-回転数曲線(後進用翼車除く)



第 10 圖 回転数RPM

損失仕事-回転数曲線(後進用翼車除く)



回転数RPM

第 11 圖

$$N_v = \left(\frac{n}{100}\right)^3 \gamma D^4 \left[\frac{\pi^3}{60^3} k \{ \beta_1 D + \beta_2 (1-B) \} Z \cdot l^{1.2} \right] \dots\dots\dots (13)$$

$$\text{但し, } \beta_1 = \left(14.5 + 12.8 \frac{S_1}{r_*} \right) R^{-0.2}$$

$$\beta_2 = 0.425 \frac{1 - (17.5 - S_2) \times 3.8(n-220)^{-0.779}}{1 + \sqrt{3.074 + 0.001521n}}$$

S_1 は圓盤と車室との軸方向の間隙, S_2 は羽根と車室との軸方向の間隙, r は節圓半径, R はレイノルズ數であり, 單位は, D は m, γ は kg/m^3 , l は cm, S は mm, r は mm で表わす。久武氏のモデルによる實驗結果によれば密閉翼車に於いては順轉も逆轉も損失仕事は變らず, (13) の式を以て兩様に使用出来るとしてある。

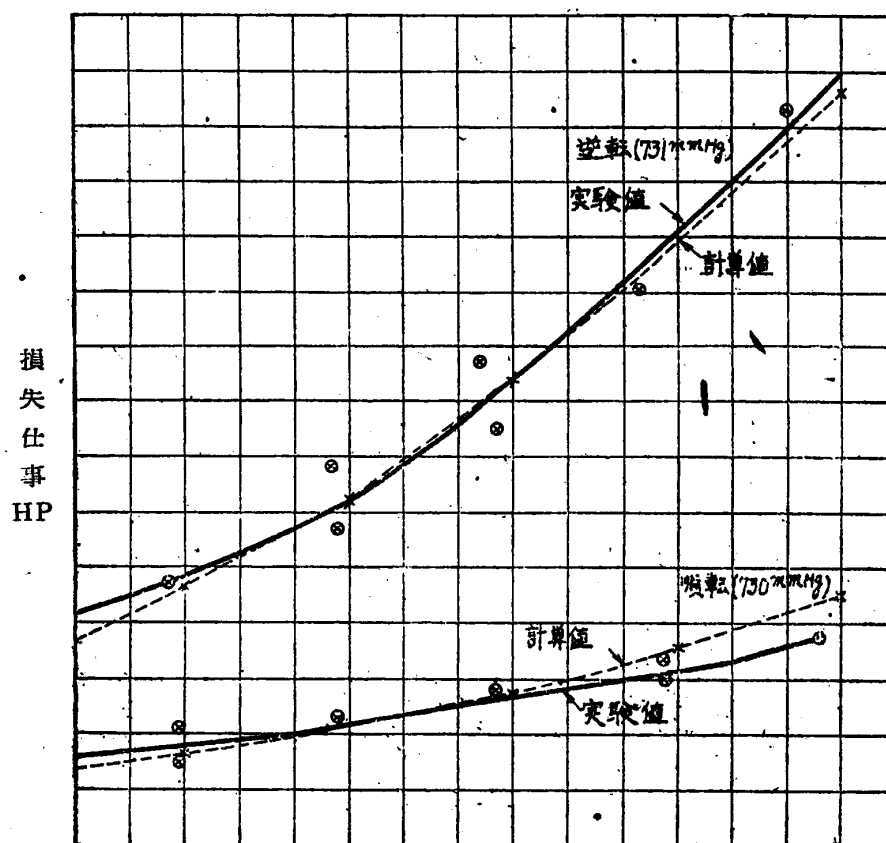
今回の實際のタービンに就いて行つた實驗では順轉と逆轉の場合は甚しく損失仕事が異り, 實際の動翼を植込んだ翼車を使用して動翼と動翼の間には噴口の如き空間がある實際のタービンの中で回轉させる場合には, 單翼車單翼によるモデル實驗と甚しく異つた結果が生ずることがわかつた。この結果を第10圖, 第11圖, 第12圖, 第13圖に示してある。

第10圖は後進用翼車を取除いた場合と取除かない場合の順轉及び逆轉の損失仕事の實測値を示す。上の二つの曲線の差は後進翼車が順轉する場合の損失を示して居り, 下の二つの曲線の差は後進翼車が逆轉する場合の損失の値を示していることになる。

第11圖は後進用カーチス翼車を取除いた場合の回轉數損失仕事曲線を示し, 第12圖は後進用翼車を取付けた場合の結果を示す。この場合に正回轉に於いては前進翼車が順轉して後進翼車が逆轉し, 逆回轉に於いては前進翼車が逆轉して後進翼車が順轉している譯である。第13圖は車室内に於ける蒸氣の比重と損失仕事との關係を示す結果である。

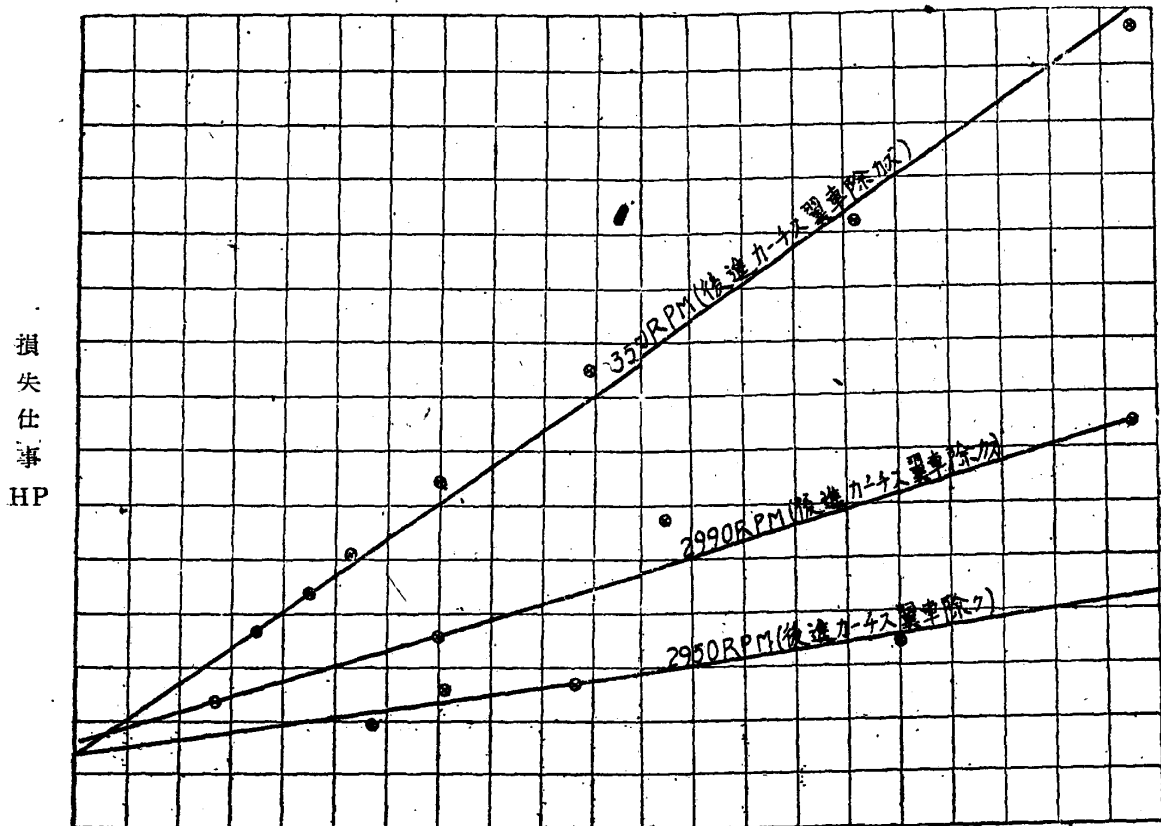
今回の試験の目的は風損失に對する新しい常數を決定することであつて, 上の (13) 及び (14) の兩式を考慮に入れて損失仕事の式を

損失仕事一回轉數曲線 (後進用翼車除かず)



第12圖 回轉數 RPM

蒸気比重と損失仕事の関係 (軸受損失を含む)
回転方向の平回転



第 13 圖 蒸気比重 kg/m^3

$$N_v = \left(\frac{n}{100} \right)^3 r D^4 k \{ 0.000257 D + (A_1 + A_2) (1 - B) Z \cdot l^{-1.2} \} \dots \dots \dots (14)$$

と置き実験結果から A_1, A_2 を求めた。式中第一項は (12) 式をそのまま持つて来たもので圓盤損失を示す。
 A_1 は順轉翼に對するもので、 A_2 は逆轉翼に對するものである。

第 10 圖、第 11 圖に示す結果から A_1 及び A_2 の値を決めると、

$$A_1 = 0.00022 \quad (\text{順轉})$$

$$A_2 = 0.0018 \quad (\text{逆轉})$$

を得た。この A_1 及び A_2 の値を式に入れて損失仕事を計算した結果を第 11 圖に點線で示してある。

上の A_1 及び A_2 の値は動翼と動翼の間に噴口の如き空間のある場合のものであり、カーチス車の如く動翼が二列接近して並ぶ場合にはこの常數も異つて來ることが考えられる。上の A_1 及び A_2 の値をそのままとつて損失仕事を計算すると、カーチス翼車を取付けた場合の実験結果殊にカーチス車が逆轉する場合の結果に於いては可成りの狂いが生じて來る。このことから二列翼逆轉の場合は別に常數を定めなければならないことがわかる。

二列翼逆轉の場合のみを別に考えることにして、第 12 圖及び第 13 圖の結果から別の A_2' の常數を求めると、

$$A_2' = 0.0014 \quad (\text{二列翼逆轉})$$

の結果を得た。

これらの A_1, A_2, A_2' を代入して後進翼車を除かぬ場合の損失仕事を計算して實驗値と比較したものが第 12 圖である。圖中の點線が計算値を示している。

IV. 結 論

船舶推進用蒸気タービンの特殊性能を研究するため陸上負荷試験裝置を備えて蒸気消費量試験を行い、回転數の變動により蒸気消費量の變化する有様を調べ、回転數の變動がタービンの效率を變化させる一般式の中の實驗

常數を定めた。

又後進運轉の場合の前進翼及び翼車、前進運轉の際の後進用翼及び翼車の風損失を測定し、損失仕事を表わす一般式の實驗常數を定めた。

その結果として回轉數の變動によるタービン段落效率の變化の理論式

$$\eta_u = \eta_{u0} \frac{n}{n_0} \left[\mu - (\mu - 1) \frac{n}{n_0} \right] \frac{1 + \frac{v_2}{v_1}}{\left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right)_0}$$

の μ の代りに μ' を置き

$$\mu' = \mu + \sigma(2 - \mu)$$

$$\sigma = 0.39$$

がよく實驗結果と一致することを確認した。

又翼及び翼車の風損失試験の結果として得た實驗式は次の如くである。

$$N_s = \left(\frac{n}{100} \right)^3 \gamma D^4 k \{ 0.000257 D + (A_1 + A_2)(1 - B) Z \cdot l^{1.2} \}$$

この式中の順轉翼に對する實驗常數 A_1 及び逆轉翼に對する實驗常數 A_2 を實驗によつて定めた結果

$$A_1 = 0.00022 \quad (\text{順轉})$$

$$A_2 = 0.0018 \quad (\text{逆轉})$$

$$A_2' = 0.0014 \quad (\text{二列翼逆轉})$$

を得た。

實際の船用タービンを使用して陸上に負荷裝置を備えて、この種の研究を行つた資料は從來全く發表されていない。今回の實驗によつてタービンの設計上並びにその性能を向上させる上に於いて貴重な資料を得たのであるが、今回の結果が我々の製作しているタービンと類似のタービン以外にも適用出来るか否かは更に研究を重ねなければならないと思う。

V. 参考文献

- (1) Flügel: Dampf Turbinen, 105 (1931).
- (2) Flügel: Dampf Turbinen, 104 (1931).
- (3) Bauer: Schiffsmaschinenbau, 34 (1927).
- (4) 久武眞直: 機械學會論文集 II—46 (昭 17~5).

VI. 附 記

附記タービン仕様、軸馬力、回轉數、蒸氣壓力溫度及び真空

	前 進 タ ー ビ ン			後進タービン
	過 負 荷	常 時	經 済	後 進
軸 馬 力	3,250	2,800	2,400	1,680
推 進 器 回 轉 數	133	126	120	106
高 壓 ター ビ ン 回 轉 數	5,540	5,250	5,000	4,420
低 壓 ター ビ ン 回 轉 數	4,430	4,200	4,000	3,540

討 論

○玉木 福宣君 試験に用いた turbine の馬力の大きさはどの位ですか。

○柴田萬壽太郎君 言い落しました。表にあります。

○玉木 福宣君 機械の損失はどれ位ですか。

○柴田萬壽太郎君 軸受損失、齒車損失等の所謂機械損失は計算で出しました。全體の loss を實測して出して

之から差引いたのでありますが、軸受の loss 等は計算と実験と餘り變らないからであります。

○玉木 福宣君 後進翼車の静翼は全周にありますか。

○柴田萬壽太郎君 そうです。

○玉木 福宣君 真空の程度はいかゞですか。

○柴田萬壽太郎君 真空の變化は大體 500~730 mm に變化せしめて損失測定を行いました。その結果は直線的に出ています。

○畑 賢二君 低壓 turbine の溫度はどの位ですか。

○柴田萬壽太郎君 車室密閉すると loss の爲に溫度が昇りますから冷却用蒸氣を僅か送つて溫度を一定に保ちました。真空なる爲僅かの steam で溫度一定に保つ事ができます。

○畑 賢二君 後進は高壓の方にもあるのですか。

○柴田萬壽太郎君 あります。但し windage loss の実験は低壓のみで行いました。

○畑 賢二君 そうしますと全體の内部効率の実験では自然と windage loss が入っていますか。

○柴田萬壽太郎君 入っていますが内部効率のみの變化を検討する際には前に述べたように windage や軸受損失、齒車啮合損失等の外部損失は皆取除いて、内部効率のみの變化と回転數の變動の關係を調べました。

○朝永研一郎君 高壓の windage loss は直接測つてないのですか。

○柴田萬壽太郎君 そうです。低壓の loss の結果を使用して算出しました。

○朝永研一郎君 此の結果は試験された turbine そのものに關係する數は出ていませんか。

○柴田萬壽太郎君 各種のものについてやらねば分りませんが impulse turbine は當所のものと、類似のものならば同様の結果が出るものと考えます。

○朝永研一郎君 各種の coefficient はすべてのものに當てはまるのでしょうか。

○柴田萬壽太郎君 夫は恐らくすべての場合に當てはまるとは斷言できませんが、此の実験も多くの時間と勞力を要しましたが、之を多方面でやつて頂き度いと思います。

○江口 端君 此の時の normal load の windage loss はいかゞですか。

○柴田萬壽太郎君 約 50 馬力です。

○玉木 福宣君 馬力は色々考えておやりですか。full からずつと……

○柴田萬壽太郎君 やりました。大體 full, economical, $3/4$, $1/2$, $1/4$ 程度に變化させました。

○玉木 福宣君 減速裝置はどうなのですか。

○柴田萬壽太郎君 二段です。

○玉木 福宣君 此の減速裝置の loss はどの位ですか。

○柴田萬壽太郎君 その數字は持つて來て居りませんが咬合損失だけならば 1% 以下と思います。