を定めるため 2, 3 の実験を行つた。ヘール双物を使用し送り毎回転に付き 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 及び 1.0 mm の 5 種に変じ、これに対する面の仕上り状態を定めた。加工材料は軟鋼及び黄銅の 2 種である。

第 15 図はこの実験結果を示す。旋盤の仕上加工は双物の研ぎ方及び加工法の良、不良により相当異つた結果を示すものであるが、本実験における加工状態は普通程度のものである。本式滑度計に依り測定した結果に依れば旋盤仕上面の滑度著しく不良で黄銅に就て求めた最良のものでも 4.05 m.A. 軟鋼に就ては 5.88 m.A. になつてゐる。これを前記研磨加工の場合におけるメータの読み、1.0 m.A. 前後に比すれば 4~5 倍になつてゐる。又送りを増す時は滑度は次第に不良になる。尚黄銅に就ては削速度を 5 m/mn と 13 m/mn の 2 種に変じて実験した所低速度の 5 m/mn の方が高速度の

13 m/mn に比し良好なる結果を示してゐる。

3. 結 言

上記の如く圧電気現象を應用せる滑度計に依り上記の如き実験を行つた結果より見て、本式滑度計は実地工作上及び研究上に於て面の滑度を決定する上に於て有效なるものと信する。特に研磨仕上げ面の滑度の測定は頗る鋭敏であり肉眼にて判別し得ない程度の差異も判断し得る。著者は今後尙進んで本式滑度計を應用せる実験を行ふ予定である。

終にに本研究に助力せられた山本誠一及び鈴木顯治両氏に深く感謝の意を表す。

尙本研究は日本學術振興會研究補助金に拠つて行つたことを附記する。 (昭和 13 年 7 月 27 日受付)

蒸気タービンのノズル及び羽根効率に関する研究 (第 3 報)⁽⁴⁾

(昭和 13 年 4 月 10 日 第 15 期定時總會講演會に於て講演)

正員 菅原 菅雄⁽²⁾ 正員 中村 行三⁽³⁾ 准員 野澤 律三⁽⁴⁾

摘 要

種々の出口角を有する直線並行ノズル 14 種と、種々の擴がり率を有する末廣ノズル 7 種につき、空気及び蒸気を用ひて実験を行ひ、噴出气流の方向及びノズル内外における圧力分布を測定した。

擴がり率 1.2 以上の末廣ノズルに対する噴出方向の実験値は計算値とよく一致するが、出口角の小さい並行ノズルでは圧力比の大きな時には噴出角が出口角より小さくなり、或る圧力比の時にノズル軸の方向に噴出し、これより小さい圧力比の時は噴出角が出口角より大きくなるが、出口角が 50° 以上のノズルでは噴出角は出口角より小さくはならない。

並行ノズル又は擴がり率 1.2 以下の末廣ノズルでは超過膨脹は起らないが、初圧の高い時は不足膨脹が大きい。擴がり率 1.4 以上のノズルでは圧力比の如何により超過膨脹又は不足膨脹が起る。

1. 緒 言

蒸気タービンに使用されるノズルの如く出口辺がノズル軸に対して直角でない場合には、ノズル前後の圧力関係の如何に依てノズルから噴出する气流の方向は必しもノズル軸の方向と一致しない。本報告はこの噴出气流の方向に関する二三の計算結果と、種々の出口角を有する直線並行ノズル及び種々の擴がり率を有する末廣ノズルに就て空気及び蒸気を用ひて実験を行ひ、噴出气流の方向と圧力分布とを測定して得た結果とに就て述べる。

2. 噴出气流の方向の計算

ノズル中を流れる空気又は蒸気の状態変化は、断熱変化

(1) Researches on the Efficiency of Nozzles and Blades of Steam Turbin (3rd Report). (2) Sugao SUGAWARA, Member. The Kyoto Imperial University. 京都帝國大学. (3) Kozo NAKAMURA, Member. The Naval Engineering College. 海軍機関学校. (4) Ritzuo NOZAWA, Associate Member. The Mitubisi Jūkōgyō K.K. 三菱重工業株式会社.

が (1) 式で表はされ、流動抵抗 Wr が式 (2) で示される如く速度の二乗に比例すると仮定する時は、式 (3) で表はすことが出来る。

$$pv^k = C \dots\dots\dots (1)$$

$$Wr = \zeta w^2 / (2g) \dots\dots\dots (2)$$

$$pv^n = K \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{茲に、} n = (1 + \zeta)k / (1 + \zeta k) \dots\dots\dots (4)$$

今ノズル前の圧力を p_1 、任意の断面における圧力を p とする時はこの断面における流動速度 w 及び比重量 γ は次式で與へられる。

$$w = \sqrt{2gk/(k-1)p_1v_1\{1 - (p/p_1)^{(n-1)/n}\}} \dots\dots\dots (5)$$

$$\gamma = (p/p_1)^{1/n} / v_1 \dots\dots\dots (6)$$

ノズルの喉即ち断面 CC (第 1 図) における圧力は限界圧力

$$p_c = \{2/(n+1)\}^{n/(n-1)} p_1 \dots\dots\dots (7)$$

であるから、こゝにおける速度 w_c 並に比重量 γ_c は次の如くなる。

第 1 図

$$w_e = \sqrt{2gk/(k-1)(n-1)/(n+1)p_1 v_1} \dots\dots\dots(8)$$

$$\gamma_e = \{2/(n+1)\}^{1/(n-1)} v_1 \dots\dots\dots(9)$$

今ノズルの出口角を α 、ノズルの擴がり率を ρ 、ノズル後の圧力を p_2 とする時は、圧力比 p_2/p_1 が擴がり率 ρ に相當するものに等しいか又はこれより大きい時は、膨脹は断面 AA までに終り気流は普通ノズル軸の方向に噴出すると考へられるが、これより小さい時は膨脹は断面 AA で終らずその後も引続いて起り、気流の噴出方向は軸方向から偏る。この偏向角を δ とする。而してノズル後の圧力 p_2 の或る値の時にこの膨脹が全部ノズル内で終り出口辺 EE に於て外圧に等しくなる。この時の圧力を p_e とし偏向角を δ_e とする。 p_2 が p_e より小さい時は膨脹はノズルを出た後にも起り偏向角は更に大きくなる。次に膨脹がノズル内で完了する場合とノズル外に及ぶ場合とに分けて考へる。

(a) 膨脹がノズル内で完了する場合、即ち $p_2 \geq p_e$ 。この場合は連続流動の条件に依て充分正確に求めることが出来る⁽⁵⁾。第1図に於て断面 CC 、 AA 及び出口辺 EE の断面積を夫々 F_c 、 F_a 及び F_e とし、流量を G とする時は連続流動の条件から次の関係がある。

$$G = F_c w_c \gamma_c \dots\dots\dots(10)$$

$$G = F_a w_a \gamma_a \dots\dots\dots(11)$$

$$G = F_e \sin(\alpha + \delta) w \gamma = F_a w \gamma \sin(\alpha + \delta) / \sin \alpha \dots\dots(12)$$

茲に w_c 、 w_a 、 γ_c 、 γ_a は夫々断面 CC 、 AA における速度及び比重量であり、 w 、 γ 、 δ は夫々流出口における速度、比重量及び偏向角であり、 α はノズルの出口角である。

式(10)と(11)とから、

$$w_a \gamma_a = w_c \gamma_c F_c / F_a = w_c \gamma_c / \rho \dots\dots\dots(13)$$

$$\text{但し、} \rho = F_a / F_c \dots\dots\dots(14)$$

式(11)、(12)及び(13)から、

$$\sin(\alpha + \delta) / \sin \alpha = w_a \gamma_a (w \gamma) = w_c \gamma_c / (\rho w \gamma) \dots\dots(15)$$

式(15)に式(8)及び(9)の関係を代入すると、

$$\frac{\sin(\alpha + \delta)}{\sin \alpha} = \frac{1}{\rho} \sqrt{\frac{n-1}{n+1}} \frac{\{2/(n+1)\}^{2/(n-1)}}{(p_2/p_1)^{2/n} - (p_2/p_1)^{(n+1)/n}} \dots\dots(16)$$

式(16)により p_2/p_1 の與へられた値に對し偏向角 δ を求めることが出来る。

次に圧力 p_e 及びその時の偏向角 δ_e を求めるには噴出速度と噴出方向との関係を假定せねばならぬ。傾斜末細ノズル又は傾斜並行ノズルに対しては超音響速度の流動に関する Prandtl の法則を利用して次の假定をすることが多い。

$$\sin(\alpha + \delta_e) = w_s / w_e \dots\dots\dots(17)$$

茲に w_e は出口で圧力が p_e になる時の流出速度、 w_s はこの時の空気又は蒸気中の音響速度で $w_s = \sqrt{gk p_e v_e}$ で與へられる。この假定は出口辺 EE に直角方向の分速度は w_s に等しいことを表はしてゐる。

式(17)で與へられる假定は末細又は並行ノズルで断熱流動の場合には妥當な假定であるが、傾斜末廣ノズルにこの假

定を行ふ時は矛盾を生ずる。從てこゝでは次の如き假定をする。直角末細ノズルの限界速度は $w_e = \sqrt{gk p_e v_e}$ でその方向は出口辺に直角である。然るに傾斜末細ノズルで式(17)の假定をする時は出口辺におけるこれに直角方向の分速度は $w_s = \sqrt{gk p_e v_e}$ であるから、傾斜部分による該分速度の變化率は、

$$w_s / w_e = \sqrt{gk p_e v_e} / \sqrt{gk p_e v_e}$$

$$\text{或は、} w_s / w_e = \sqrt{p_e v_e} / (\sqrt{p_e v_e}) \dots\dots\dots(18)$$

今末廣ノズルに於てもこれと同一割合の速度変化があるものと假定すると、出口における辺 EE に直角方向の分速度は、 $\sqrt{p_e v_e} / (\sqrt{p_e v_e}) w_a$ となる。從て、

$$\sin(\alpha + \delta_e) = \sqrt{p_e v_e} / (\sqrt{p_e v_e}) w_a / w_e$$

$$\text{或は、} \sin(\alpha + \delta_e) = (p_e / p_a)^{(n-1)/(2n)} w_a / w_e \dots\dots\dots(19)$$

式(11)及び(12)から、

$$F_a w_a \gamma_a = F_a w_e \gamma_e \sin(\alpha + \delta_e) / \sin \alpha$$

$$= F_a w_a \gamma_e (p_e / p_a)^{(n-1)/(2n)} / \sin \alpha$$

$$\therefore \gamma_a / \gamma_e = (p_e / p_a)^{(n-1)/(2n)} / \sin \alpha$$

然るに一方 $\gamma_a / \gamma_e = (p_a / p_e)^{1/n}$ であるから

$$p_e / p_a = (\sin \alpha)^{2n/(n+1)} \dots\dots\dots(20)$$

式(20)の假定は式(17)の假定を更に一般化したもので式(20)の特別の場合として、 $\rho=1$ 、 $n=k$ ならば式(17)が得られ、 $\alpha=90^\circ$ ならば $p_e=p_a$ となり、 $\alpha=90^\circ$ で且 $\rho=1$ ならば $p_e=p_a$ となる。式(20)に依て圧力 p_e を求めることが出来る。而してこの時の偏向角 δ_e は式(16)の p_2 の代りに p_e を挿入すれば求められる。その式は次の如くである。

$$\frac{\sin(\alpha + \delta_e)}{\sin \alpha} = \frac{1}{\rho} \sqrt{\frac{n-1}{n+1}} \frac{\{2/(n+1)\}^{2/(n-1)}}{(p_e/p_1)^{2/n} - \sin^2 \alpha (p_e/p_1)^{(n+1)/n}} \dots\dots\dots(21)$$

(b) 膨脹がノズル外でも起る場合即ち $p_2 < p_e$ 。この場合は衝動法則に依て求める⁽⁶⁾。第2図に於て出口面 EE と境界面 $EFFE$ とに依て囲まれた空間を考へ、面 $EFFE$ に於ては圧力が p_2 である様に選り、空間 $EFFE$ に作用する静圧力と動圧力とによる力の平衡を考へる。ノズル軸の方向の平衡条件は、

$$p_e F_e \sin \alpha + G / g w_e \cos \delta_e = p_2 F_e \sin \alpha + G / g w_2 \cos \delta$$

$$\text{或は、} G / g w_2 \cos \delta = G / g w_2 \cos \delta_e + F_a (p_e - p_2)$$

ノズル軸に直角の方向には、

$$p_e F_e \cos \alpha + G / g w_e \sin \delta_e = p_2 F_e \cos \alpha + G / g w_2 \sin \delta$$

或は、

$$G / g w_2 \sin \delta = G / g w_e \sin \delta_e + F_a (p_e - p_2) \cot \alpha$$

$$\therefore \tan \alpha = \frac{G / g w_e \sin \delta_e + F_a (p_e - p_2) \cot \alpha}{G / g w_e \cos \delta_e + F_a (p_e - p_2)}$$

これを整理して次式を得る。

第 2 図

(5) G. Flügge, Die Dampfturbinen, 68.

(6) 脚註(5)参照。

$$\tan \delta = \frac{A\sqrt{1-(p_2/p_1)^{(n-1)/n}} \sin \delta_e + \rho(p_2/p_1 - p_2/p_1) \cot \alpha}{A\sqrt{1-(p_2/p_1)^{(n-1)/n}} \cos \delta_e + \rho(p_2/p_1 - p_2/p_1)} \dots (22)$$

但し、

$$A = 2k/(k-1)\{2/(n+1)\}^{1/(n-1)}\sqrt{(n-1)/(n+1)} \dots (23)$$

第3図 摩擦のない並行ノズルにおける $\alpha-\delta_e$, $\alpha-(p_2/p_1)$ の関係

は摩擦のない並行ノズルから空気の噴出する時のノズル角 α 、圧力比 p_2/p_1 及び偏向角 δ の相互関係を示す。図中破線で示されるものは膨脹が頂度ノズルの出口で完了した時の偏向角 δ_e である。この計算結果によると圧力比の大きい間はノズル角の大きい方が偏向角が大きいが、圧力比が減るに従ってノズル角の小さい場合の偏向角が急激に増加す

第4図 摩擦のない並行ノズルにおける空気流動の $\alpha-(p_2/p_1)-\delta$ の関係

第5図 末廣ノズルにおける 圧力比と偏向角との関係

第6図 第1号ノズル

第7図 第2号ノズル

第8図 第3号ノズル

第9図 第4号ノズル

以上の諸式に依て 傾斜ノズル からの噴出 気流の偏向角並に ノズル 中における膨脹の 最小限度を計算する ことが出来る。而して 並行ノズル 又は 末細ノズル に対しては $\rho=1$ とおけば よく、摩擦抵抗のない 場合には $n=k$ と して計算すればよい。

第3図は 並行ノズル で $n=k$ の場合の出口角 α と圧力比 p_2/p_1 並に偏向角 δ_e との関係の計算値を示す。第4図

第10図 第5号ノズル

第11図 第6号ノズル

第12図 第7号ノズル

第13図 第8号ノズル

る。第5図は $n=1.4$, $\alpha=15^\circ$ の時の 末廣ノズル における圧力比 p_2/p_1 と 擴がり率 ρ 及び偏向角 δ との関係を 示す。これによると 末廣ノズル に於ては圧力比が大きい時は偏向は負の方向に現れる。破線は膨脹がノズル中で完了する限界を示す。

3. 並行ノズルの実験

実験に用いた ノズル は孔径 10 mm で出口角 15° , 20° , 25° , 30° の直線ノズルと、一辺の長さ 10mm 正方形の断面の孔で、出口角 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° , 50° , 70° ,

[第4巻第17号]

80° 及び 90° の直線ノズルとの合計 14 個で、何れも黄銅製で入口は半径 10mm の丸味を有し長さは 90~130mm である。第6図乃至第19図はその主要寸法を示す。

第14図
第9号ノズル

第15図
第10号ノズル

第16図
第11号ノズル

第17図
第12号ノズル

第18図
第13号ノズル

第19図
第14号ノズル

第20図 圧力比と噴出角との関係 (並行ノズル)

第21図 圧力比と噴出角との関係 (並行ノズル)

第22図 理論噴出速度と噴出角との関係 (並行ノズル)

昭和13年11月]

実験は空気又は飽和蒸気を用ひて行ひ、噴出気流の方向とノズル内外における圧力分布とを測定した。噴出気流の方向の決定には出口辺に針金を張り気流に紐を浮べその方向を

第 23 図 理論噴出速度と噴出角との関係 (並行ノズル)

測定した。而して測定は孔の中央及び両端近くの 3 個所で行つた。第 20 図乃至第 23 図は空気を用ひ第 5 号乃至第 14 号ノズルに就て行つた実験結果で、第 20 図と第 21 図とは圧力比 p_2/p_1 と噴出角との関係を示し、第 22 図と第 23 図とは理論噴出速度と噴出角との関係を示す。縦座標の噴出角

第 24~27 図 圧力比と噴出角との関係 (並行ノズル)

第 28~31 図 圧力比と噴出角との関係 (並行ノズル)

第 32~35 図 理論噴出速度と噴出角との関係 (並行ノズル)

[第 4 卷 第 17 号]

度はノズルの出口辺から測定したもので、太実線は平均値で中央の測定値の2倍と両側の測定値を加えて4で割つたものである。例へば第20図で出口角 25° のノズルに対する曲線は角度 25° の上下に横はり、圧力比 0.47 の所で 25° の線と交つてゐる。これは圧力比 0.47 の時に頂度ノズル軸の方向に噴出し、これより大きい時は偏向角 δ が負と

なり、圧力比がこれより小さい時は δ は正となることを示す。この実験結果によると出口角の小さい時は δ に正負の値が存在するが、出口角が大きくなると δ は正の値のみと

第36~39図 理論噴出速度と噴出角との関係(並行ノズル)

第42図 圧力分布(第2号ノズル、 $\alpha=20^\circ$)

第44図 圧力分布(第4号ノズル、 $\alpha=30^\circ$)

第40図 圧力分布測定装置

第41図 圧力分布(第1号ノズル、 $\alpha=15^\circ$)

第43図 圧力分布
(第3号ノズル、 $\alpha=25^\circ$)

第45図
第15号ノズル

なり、出口辺が軸に直角の場合には $\delta=0$ 即ち偏向がない。

第24図乃至第39図は蒸気を用ひ第1号乃至第8号ノズルに就て実験した結果で、上記の空気を用ひての実験結果と略同一である。

圧力分布の測定にはピトー管を用ひ、これをノズル軸に沿ふて移動してその中心における静圧を測定した。第40図はその測定装置を示す。第41図乃至44図は蒸気を用ひて行つた実験結果の一部で、これによると限界圧

力は、出口附近に於て漸く達せられることゝ初圧の高い時は、不足膨脹のためノズルを出た後に圧力の波動のあることが判る。

4. 末廣ノズルの実験

実験に用いたノズルは出口角 15° 、喉面積 10 mm^2 平方の黄銅製直線ノズルで、擴がり率は $1.0, 1.1, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8$ 及び 2.0 の7種であつて、第45図乃至第51図にその主要寸法を示す。実験は蒸気を用ひて行ひ気流の噴出方向及びノズル内外における圧力分布を測定した。実験方法及び実験装置は並行ノズルの場合と同一である。第52図乃至

第65図は圧力比と偏向角 δ との関係を示す。図中○印は孔の中央、×印及び△印は両端近くの測定値、太実線はその平均値である。この実験結果によると擴がり率の小さい一二的場合をのぞき、圧力比が擴がり率に相當する場合は軸方向に噴出し、これより大きい時は負、小さい時は正の偏向となる。このことは第5図に示した如く上記の計算から予期されることゝ一致してゐる。

第66図乃至第70図は圧力分布の測定結果であつて、ノズル前後の圧力比と擴がり率の如何にと依て超過膨脹又は不足膨脹が起る。例へば第69図は擴がり率 1.6 の場合であるが、この擴がり率に對應する初圧は 5.4 atm であつて、初

第46図 第16号ノズル
第47図 第17号ノズル
第48図 第18号ノズル

第49図 第19号ノズル
第50図 第20号ノズル
第51図 第21号ノズル

第52~54図 圧力比と偏向角との関係 (末廣ノズル)

第55~58図 圧力比と偏向角との関係 (末廣ノズル)

第 59~61 図 圧力比と偏向角との関係 (末廣ノズル)

第 62~65 図 圧力比と偏向角との関係 (末廣ノズル)

第 66 図 圧力分布 (第 16 号ノズル、 $\rho=1.1$) 第 67 図 圧力分布 (第 17 号ノズル、 $\rho=1.2$) 第 68 図 圧力分布 (第 18 号ノズル、 $\rho=1.4$)

昭和 13 年 11 月]

圧がこれより高い時は不足膨脹、低い時は超過膨脹になることがよく現れてゐる。この実験結果を総合すると並行ノズル又は擴がり率 1.2 以下の末廣ノズルでは超過膨脹は起らないが初圧の高い時は不足膨脹が大きい。擴がり率が 1.4

究委員會の報告⁽⁷⁾及び本研究第 2 報⁽⁸⁾中には認められる事実である。この実験に用いたノズルは前示の如く並行部の極めて長いノズルであるからノズルの入口附近の状態が噴出方向に影響するとは考へられない。然し實際 蒸気タービ

第 69 図 圧力分布 (第 19 号ノズル、 $\rho=1.6$)

第 70 図 圧力分布 (第 20 号ノズル、 $\rho=1.8$)

以上になると超過膨脹も現れてくる。

5. 実験値と計算値との比較

第 71 図乃至第 76 図は空気を用ひ並行ノズルに就て行つた実験の平均

第 71~73 図 計算値と実験値との比較 (並行ノズル)

第 74~76 図 計算値と実験値との比較 (末廣ノズル)

正の偏向は起らないと考へられる。而して負の偏向は動羽根の腹に衝突を引起して流れは乱れるが推力を増加するから、この実験に現れた如き $2\sim 3^\circ$ の衝突は却て好都合である。

値と計算値との比較であつて、実験値を実線、計算値を破線で示した。これによると出口角の如何に拘らず計算では限界圧力の時に軸方向に噴出し圧力比の減少と共に偏向角が増加するが、実験結果では出口角が約 40° 以下のノズルでは圧力比の大きい範囲で負の偏向が存在し、圧力比が理論的限界値より小さい時に軸方向に噴出し、圧力比がこれより小さい時に正の偏向が起る。これに対し出口角が 40° より大きいノズルでは圧力比が理論的限界値より大きい時にも正の偏向が起り圧力比の減少と共に順次増加する。並行ノズルに於て偏向が負になることは今迄一般には認められてゐない様であるが、英国の蒸気ノズル研

第 77 図 計算値と実験値との関係 (並行ノズル)

第 77 図は末廣ノズルに対する計算値と代表的実験値との比較で曲線は計算値である。これに依て擴がり率 1.2 以上の場合には実験値が計算値によく一致することが判る。従てこの場合の噴出気流の方向は式 (16), (21) 又は (22) を用ひて計算することが出来る。

本研究は學術振興會の援助の下に京都帝国大学機械工学実験室で行つたもので、同會に対して深謝すると共に実験並に結果の整理に當られた河合敦夫、沼田伊雄、及び中原嘉郎の 3 君に對

し衷心より感謝する次第である。

(7) Eng., 115 (1923), 377 以下数回に渡つて發表。
(8) 機械學會誌 40, 248, (昭和 12-12) 733.
(9) 彎曲ノズルに就ては目下実験中である。