回轉復水管における温度分布及び傳熱率等に就て⁽¹⁾

(昭和 15 年 3 月 22 日 故井口博士記念講演會に於て講演)

正員 山中直次郎⁽²⁾

I. 緒言

I-1 研究題目の概観 蒸気復水管を回轉するときには、普通の靜止管の場合に比し、傳熱率は如何に増減するかを詳かにし、尙これと密接なる關係にある管内冷却水の抵抗に対する回轉の影響の概略をも研究し、熱通過率を高める一方法としての回轉復水管の價値の判定に資せんとするのが本研究の主なる目的である。

諸表面復水器設計上の重要事項たる、復水管における熱通過率“ k ”の値を増進するには、水側傳熱率 α_w 及び蒸気側傳熱率 α_s を、同時に高める必要あることは、周知の事であるが α_w を高めるために管内流速を増加する事に就ては $w=2\text{ m/s}$ 以上は、“ k ”の増加率衰へ尙又流水抵抗の増加による動力損失急増するため及び管の腐蝕の考慮から、一般には採用せられず、流速は特殊の場合漸く 3 m/s に到達せしに過ぎず、 α_s に関しては、蒸気速度を一様に高めること又これに依りて混入空氣の悪影響を少くすること、又配管を工夫して復水の落下促進を計る等、色々の工夫はあるが、これも k の増加に伴ひ、復水の表面密度が増して来ると α_s は却て下つて来て、この方からも制限を受け、結局 k は行き詰りの状態に達してゐる。

近來の大動力利用に伴ふ、大型復水器の冷却面積の著しき増加は、管数の増加と共に、復水器容積及び重量を著しく増加せしめ、馬力當りに就ての数字も一般の通則によれば減少すべきものが、却て増加する傾向さへあり、特殊の場合、例へば軍艦等の場合は、主として容積の制限のために、効率及び容量を犠牲にする場合を生ずる。

されば今日“ k ”を増進することは、重要な問題であるが、 α_s の値は α_w に比し相當高い所まで来てをり、 α_w の方が既に行き詰りであるから、 α_s の方をこれ以上改良し得ても、結局 k に対しての影響は少いから α_s を問題にする價値はないと考へられ易い。然し α_s が改良されれば、 α_w の方にも未だ改良の余地があると認めたので、先づ α_s 側の改良の可能性を再検討するために予備研究に着手した。

I-2 予備研究概要 昭和 6 年、ばね環を復水管表面上に滑動させて復水を掻き落とし、 α_s の増加率を驗する実験を試み、相當の効果あることを認めた。然しこの手段はこれを実地に應用する事は困難である。そこで次に復水管を回轉し、その遠心力によりて、復水を飛散させる方法に想到したが、先づ実験により効果の程度を大体調査する必要を認め、クランク形の復水管を蒸気函中に回轉する装置を作り、質的実験を開始すると同時に、蒸気の復水状態を明らかに知る事が大

切と考へて、蒸気函に耐熱ガラスの窓を作り、こゝから直接觀察により膜狀復水の他に滴狀及び混合狀復水を生ずることを発見し、この写真及び活動写真を撮影し又 k の値がこの復水状態により著しく相違する事を知つた⁽³⁾。この他復水管の軸向 (Axial) 部或は心向 (Radial) 部を露出し、他を被覆せる実験の結果より、軸向管が心向管に比し、低速回轉に於て早く回轉効果を顯し、且 k 大なることを知り、以後は専らこの軸向管に就て実験を行つた。尙回轉管に於ては、管内流水抵抗は回轉と共に増加し、従て α_w に回轉効果あるべきことが判明した。

次に実地應用を考慮し、軸方向の管群を、回轉軸の囲りに公轉せしむる方法の一番手始めとして、5 本の軸向管を第 7 図の如く配管せる場合を実験し、大体上記と同様効果あることを確かめ、又写真及び活動写真を撮つた。然し上記実験は、何れも管壁温度及び水温上昇の直接測定が困難なるため、これを省略したので“ k ”を詳細に分析的に研究することが出来なかつた。こゝに於て更に実験を進め、上記諸温度を測定しこれより α_s 、 α_w 及び k 等の特性を詳細に研究せんとし、現実実験研究を開始した次第である。

I-3 文献 復水管における温度分布及び傳熱率に就ては丹羽教授の実験研究⁽⁴⁾等があるが、本研究の眼目たる回轉式復水管の考案は新規であつて、直接役に立つ文献はない。復水状態に関するものとしては脚註 (4)~(8) が重要である。尙回轉管内の流水抵抗に就ては富田氏の実験⁽¹⁰⁾があるが、これは自轉管におけるもので本研究の場合とは相違がある (脚註 (11) 参照)。

I-4 復水状態の種々相とこれが実験結果に及ぶ影響

蒸気の復水状態は曾つて Nusselt の提唱し假定⁽⁴⁾せる如く、簡單なる膜狀ではなく、これと著しく異なる滴狀なる状態が存在し、一般にはこの両者の色々な割合の混合状態なることが、実験に依り判明した。さて k に就て従来諸家の実験研究結果に、相當開きがあつて、永い間その原因は明らかにされなかつたが、これは実に復水状態の相異に依るものであつた。

そこで実験結果を、比較研究するには、復水状態を一定に

(1) On the Revolving Condenser Tube, its Temperature Distribution and the Coefficients of Heat Transfer.

(2) Naoziro, YAMANAKA, Tōkyō Imperial University. 東京帝國大学。

(3) 昭和 7 年 12 月。 (4) Nusselt, Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes (V.D.I. 1916 s. 541) (5) E. Schmidt, Versuche über die Kondensation von Wasserdampf in Film- und Tropfenform (Techn. Mech. und Thermodyn. Bd. 1. 1930 s. 53) (6) J. O. Jeffrey and J. R. Moynihan, Drop versus film formation in the condensation of steam on condenser tubes. (Mech. Engng. Bd. 55. 1933 p. 751) (7) E. Gnam, Tropfenkondensation von Wasserdampf (Forsch. H. 382 JAN./FEB., 1937 Berlin V.D.I.) (8) M. Fishenden (Engg. 1938 p. 643-64.) (9) Prof. S. Niwa 復水管に於ける温度分布 (機械学会講演 昭和 12-7-29 未印刷) (10) Prof. K. Tomita 回轉管内の水の流動に就て (機械学会論文集第 1 巻 昭和 8-11-1) (11) N. YAMANAKA & others クランク形回轉管内流水抵抗 東京帝國大学機械工学実験報告 (第 217 号昭和 12 年、第 238 号昭和 13 年、第 264 号昭和 14 年) *印、続報参照。

して結果の混乱せざるやうに、比較基準を確立することが先決要件である。今復水状態の相違が如何に著しいか又特に水平復水管に於て如何なる風に膜状及び滴状復水が生じ且落下するかを、写真図に依て例示する(第6図、第7図、第8図*及び第9図*)。

II. 基礎的考察と研究の方針

第1a図に就き、管壁の外が100°Cの蒸汽、内側が平均 $t^{\circ}\text{C}$ の流水とし、又蒸汽側に復水膜を仮定し、水側に薄き水垢層、その内側に限界層を考へると、温度勾配線は大略図示のようになる。但し θ_0 、 θ_i 及び θ_{is} は夫々壁の外、内表面及び水垢内表面の温度とする。今管壁及び水垢の厚みと及び熱傳導率を、 e 、 λ 及び e' 、 λ' とし、又管壁を平面壁と看做

第1a図

第1b図

す⁽¹²⁾と、壁を通る熱量 $q \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ は

$$q = \frac{\lambda}{e} (\theta_0 - \theta_i) \dots \dots \dots (1)$$

$$= (\theta_0 - \theta_{is}) / \left(\frac{e}{\lambda} + \frac{e'}{\lambda'} \right) \dots \dots \dots (1')$$

又 α_s 、 α_w 及び k を蒸汽側と水側の傳熱率、及び熱通過率とすると

$$q = \alpha_s (t_s - \theta_0) = \alpha_w (\theta_{is} - t) = k (t_s - t) \dots \dots (2), (3), (4)$$

これ等から次式を得る。

$$(\theta_0 - \theta_i) = k (t_s - t) \frac{e}{\lambda} \dots \dots \dots (5)$$

$$(\theta_0 - \theta_{is}) = k (t_s - t) \left(\frac{e}{\lambda} + \frac{e'}{\lambda'} \right) \dots \dots \dots (5')$$

$$\frac{1}{\alpha_s} + \frac{1}{\alpha_w} = \frac{1}{k} - \left(\frac{e}{\lambda} + \frac{e'}{\lambda'} \right) = \left(\frac{1}{a} \text{ とし} \right) \dots \dots \dots (6)$$

$$\alpha_s / \alpha_w = (\theta_{is} - t) / (t_s - \theta_0) = (b \text{ とする}) \dots \dots \dots (7)$$

$$\alpha_s = a(1+b) \dots \dots \dots (8)$$

$$\alpha_w = a \left(1 + \frac{1}{b} \right) \dots \dots \dots (9)$$

管長 l に沿ひての諸温度の分布を略示する第1b図に就て、 l に対する平均熱通過率 k_m は今の場合次式を用ひて差支ない。

$$k_m = \frac{G}{A} \log_e \frac{t_s - t_1}{t_s - t_2} \dots \dots \dots (10)$$

但し、 G は冷却水量 kg/s 、 A は管の外表面積、 t_1 、 t_2 及び t_s は管の入口と出口の水温度及び蒸汽温度(一定)とする。

さて、実験より k_m を出し(5)及び(5')式の k に代用すると、 $(\theta_0 - \theta_i)$ 又は $(\theta_0 - \theta_{is})$ の近似値が出る。そこで平均壁温 θ の分布曲線が実験から得られると、この上下に θ_0 及び θ_i 或は θ_{is} の分布曲線を近似的に引く事が出来るから、 l 上各点に於て、 b の近似値は(7)式を用ひて出せるし、又一方(6)式の k に k_m を代用して $1/a$ の近似値が出せるから、 α_s と α_w の近似値は(8)(9)式で算出される。(但し e'/λ' の精密の値を得る事は困難と思はれるから、水垢のない場合の実験が望ましいがこれは事実上相當困難であるから、水垢のある場合に於ては適當の方法で e'/λ' の近似値を算定する事が必要である。)次に斯くして得たる α_s 、 α_w より管の入口及び出口等における k の値 k_1 、 k_2 等を漸次精密に計算した後これを用ひ $(\theta_0 - \theta_i)_1$ 、 $(\theta_0 - \theta_i)_2$ 等を精密に算定し必要あらば繰返し計算を行ひ漸次更に精密なる α_s 、 α_w 、 k 等の値を出す事が出来る。そこで図に示す様に壁温 θ 、水温 t 等の管長に沿ひての分布を求めるのを目標として実験の方針を定めた。

III. 実験装置

III-1 実験装置の概要

第2図は実験装置の構成要領を示す説明図である。図の中央部函型木製(ブリキ裏張り)蒸汽函(1)中に実験の主要部なる黄銅製直径19mm復水管(2)を納め、これを水平の中空回轉軸(3)(3')の周りに平行に半径 $R=350 \text{ mm}$ を以て恰もクランクピンの如く回轉し得る様に取り付ける。蒸汽は低圧罐(20)より加減弁(22)を通して蒸汽函(1)の下部蒸汽入口(1)から送入され、配汽随(23)(24)(24')(25)等にて函内各部に不平均のない様に分配供給される。冷却水は、主水槽(30)から「堅軸タービンポンプ」(31)で汲揚げ、矢印の様に蒸汽加熱器(35)、加減弁(37)及び三方コック(38)を通し、送入管(39)を経てパッキン箱附T管(40)に送り、こゝで中空回轉軸(3)の左端の通水孔を通して送り込み、更に腕管(4)を通して初めて復水管(2)の入口に達せしめ、この中を流過させたる後、出口より右側腕管(4')を経て、中空回轉軸の右端(3')に於てパッキン箱(41)に依り連絡せる出口管(42)を通して、「三角ノッチ箱」(47)に流下せしめて、水量を測定する。ノッチを通過したる冷却水は受水槽(48)に受け、温度調整のため加減弁(49)にて加減してその一部或は全部を捨て、残部を「戻し管」(50)を通して主水槽(30)に戻す。尚補給冷水は屋外の大水槽から別の「渦巻ポンプ」で一旦屋上の「溢水管附水槽」へ汲揚げたるものを加減弁(33)を通じて適當量を主水槽(30)に入れ、又は水道より直接に補給する。

復水管及び中空回轉軸は三相誘導電動機(51)からベルト

(12) 円筒壁の場合は α_w の代りに $\left(\frac{d_o}{d_i} \right) \alpha_w = 1.15 \alpha_w$ を用ふればよろしい、又壁の傳導による熱抵抗の誤差は $1/k$ の0.5%程度で省略して差支ない。
* 詳細続報。

で傳動せられ、回轉速度は円錐ベルト車 (52) の仕掛で自由に變更調整され、「ベルト寄せねじ」装置 (53) で調整保持される。この測定は別の小ベルト車 (55) (56) で回轉され、ネオンランプで照される「ストロボスコープ式回轉計」(57) に

より 100~400 rev/mn の範囲で正確に行ふ。

蒸汽函 (1) 内蒸汽圧力は空氣の洩込を防ぐために大汽圧より僅かに高く (水柱 2 cm) 一定に保つ様にマノメーター (28) を注視しつつ、加減弁 (22) にて蒸汽量を調整し、凝結せる

第 2 図 実験装置説明図

第 3 図 (上、C 図、渦止め十字羽根及び冷却水管内水温測定装置、下 A 図)

第 1 表 測定器具表

器具名	型式番号	製造者名	用途	使用範囲	備考
検流計	可動線輪型	リース・アント ノースラップ	熱起電力測定		
〃	短周期型	理研製	〃		周期 0.34 s
電位差計型温度計	T-3 3020	島津製	〃	-20°~50°C	
オシログラフ	3極電磁型	横河製	〃		D 型振動鏡

復水は「ドレンコック」(26)を加減して適量を常に流出させる。尚空気を確実に追ひ出すために常に少量の蒸汽を「逃しコック」(27)から吹かせる。蒸汽温度は精密水銀温度計(29)により測定し、尙常に大気圧計を読み、蒸汽表を用ひ(大気圧+2 cm 水柱)に対する蒸汽温度を出して、比較検査を行ふ。復水管内流速は 0.5~5.0 m/s の範囲内で加減弁(37)で精密に調整し、13°~8' の「三角ノッチ」及び鉤水面計を用ひ流量を精測して、これより算定する。尙流量及び圧力調整のため、出口に大小 2 箇の調整弁(44)(45)を設けてある。

冷却水の入口及び出口温度は、先づ第一に蒸汽函外で水銀温度計(69)及び(70)で、間接ではあるが、確実に、これを測定し、次に復水管(2)の入口及び出口に熱電対(60)を装備して、直接にこれを測定する。復水管(2)の管壁の温度も、管壁内数箇所に特殊構造の熱電対(60)を仕込み、直接に測定する。

これ等の熱電対及び導線は、各自互に絶縁の上更に水密及び汽密とするために「ニッケル細管」及び 6 mm の案内銅管(61)中に密封する。これ等導線は、中空回轉軸(3)の導入孔(8)よりこの軸中に導き入れ、更に内管(電線密封管)(9)内を水密に保ちて、これを蒸汽函外に導出し、軸(3)の延長の中空軸(62)上に設けた特殊滑動環(63)に接続し、こゝから更に切替開閉器(64)(65)或は(66)を経て検流計又は電位差計(67)或はオシログラフ(68)に連絡し、斯くして復水管の回轉中にも温度測定が出来る様にしてある。

復水管内の流水抵抗による水頭損失を管の回轉中に測定する

ために管壁数箇所に直径 1 mm の細孔を穿ち、これ等を 3 mm 及び 6 mm 銅管(7)にて導入孔(8)から(3)軸中に導き入れ、水密を保持しつつ内管(9)内を通し、結局尾管(10)上に穿ちたる 2 箇の直径 1 mm 細孔に連絡し、こゝでパッキン箱附の連絡環(12)(12)を通じて水柱及び「水銀柱マノメーター」(13)に継ぎ、水頭差を直接に測定する。尙コック(6)により測定孔の位置を色々切り替へることが出来る。

尙蒸汽函(1)外に於て送入及び出口管端部(71)(72)に挿入したる「ピトー管」様の

第 3 図 B 右側面

第 2 表 水銀温度計表

符 号	用 途	度盛の長さ cm	使用範囲 °C
A_3	入 口 水 温	32.5	-12°~50°
H	出口又は入口〃	49.0	-16°~100°
G	出口又は入口〃	45.0	-16°~100°
J	眞空瓶内温度	44.5	-16°~100°
ハ	蒸 汽 温 度 用	30.5	70°~120°

細管(71)(72)を用ひ、これをマノメーター(73)に連絡して間接に水頭損失を測定し得る様にし、これを補助として用ふる。尙(58)は耐熱硝子窓にて内面を拭ふ装置があり、(59)は函内照明装置である。

III-2 要部詳細 復水管は第 3 図に示す如く、その入口に、冷却水の方急変の影響を少くするために、内径 72、幅 26 の円筒形入口室を設け、且縮流を避けるために半径 9 の丸味をつける。又熱電対 J_1 及び J_2 にて水温の平均値を測定するために攪拌羽(a)及び(b)を設ける。

熱電対 は銅-コンスタンタンを採用した。管壁温度測定用には 100°C の蒸汽中に於て又振動に対して絶縁を確保するために熱電対を先づ細管中に密封しこの細管を管壁に埋め込むといふ確実なる方法を採用した。管壁は 1.275 の薄肉であるから第 5b 図に示す様に細管には内径 0.9 のニッケル注射針を用ひ、この中に直径 0.25 銅線及び直径 0.18 コンスタンタン線を各絹巻の上ベークライト塗として隙間なき様挿入し、この細管を管壁内に軸方向に掘つた溝に 30 mm 埋め込み、はんだ付とし表面を完全円筒に仕上げる。細管の一端は管壁外へ曲げ出し 6 mm 銅導管と図示の様に汽密に接合し、この銅管中に 0.3 mm の銅及びコンスタンタン導線を汽密に封入し、中空回轉軸内へ導入する。

水温測定用の $J_1 J_2$ には導線と同大の 0.30 線を用ひ内径 1.5 のニッケル注射針内に封入して復水管出入口近くに装備した。

次に復水管内中途の水温の測定は特別の熱電対(J_m)を第 3c 図に示す如く復水管出口端より挿入し、入口よりこの点迄の管長に対する別の実験を行ふことにした。(J_m)は直径 2 mm のニッケル細管内に熱電対線を前記同様に仕込み頭部に細孔 8 箇を穿てる銅帽(f)をはんだ付となし、復水管内径に適合する外径のエボナイト筒(d)内に納め、尙この入口に水流攪拌羽根(c)を設け、正しく平均水温を測定し得る様考慮した。

熱電対位置は第 5a 図に示す如く管の 5 箇所の断面に種々

第5a図 熱電対及び水圧測定孔位置 (註、熱電対の符号は J を以て表はし、その番号は断面の番号及び各断面の熱電対位置の番号を並記した添字にて表はす。例へば J_{30} は断面 (3) の位置 [0] に仕込みたるものを示す)。

の位置に装備す。

滑動環 第2図及び第4図*に示す如く中空回転軸延長上の管 (62) の外部には絶縁用ベークライト円筒 (B) を嵌め込みその上に交互に5対の銅及びコンスタンタン滑動環 (63c) 及び (63k) を装備し、而して同材質の熱電対導線を夫々配分接合する。各1の滑動環に対しては夫々同材質の蹄鉄型ブラシ (63cs) 及び (63ks) を設け、カム E により作動される横桿 (L) にて接触又は切離す。

III-3 測定器詳細は第1表及び第2表に示す如くである。

IV. 実験の経過及び結果

IV-1 実験の準備

IV-1-a 温度測定器の検定及び補正 先づ水銀温度計の検定を行ひ補正曲線を作成する。次に熱電対に就ては普通の如く寒接点に 0°C を採用せず室温の冷却水を通じて定常状態となる管内及び管壁内の接合点を寒接点となし他端を真空瓶内の温湯中に入れて温接点となし、この温度を変化して検定を行ひ、斯くの如くにして、熱電対の狂なき事を屢々確かめる。然し測定時にはこの温接点を蒸汽函内に入れ一定になし (大体 100°C) 管壁温或は水温との温度差を測定し読みの精度を高めた。但しこのためには前記検定曲線より得たる値に特別の補正*を行つた。

IV-1-b 滴状及び膜状復水の形成方法

(イ) 滴状復水。復水管表面を黄銅磨微粉にて磨きたる後、カリ石鹼⁽¹³⁾ を擦り込み、静止の儘実験したるに、最初は滴状復水となるが、管を数分間回転したる後これを停止して検すると、処々に膜状復水部を発生し、尙回転を継続すると漸次滴状部は減少したので、種々の油を試用の結果、「ころ切削油」⁽¹⁴⁾ を丁寧に数回管表面に擦り込み、遂に 6~8 h の継

続運転に耐へる完全滴状復水状態を得ることに成功した。

(ロ) 膜状復水は、管表面を極めて平滑に磨きたる上に、苛性カリ溶液を擦り込み、比較的容易に完全且安定なるものを得られた。

IV-1-c 管内流水抵抗に対する回転の影響及びその防止

回転管の場合に於ては、静止管の場合に比し流水抵抗は増加し、従て傳熱率 α_w も亦増大すべきを以て、この回転の影響を生ぜざる場合とこれを比較研究する必要があるので第3c図に示す渦止め十字羽根 (G) を、管入口に (逆流の場合には反対側に) 設けて実験を試みたるに、これで回転の影響が防止される事が判つたので、この十字羽根 (G) を着脱し得る構造として、「G 入り」及び「G 無し」の実験を行つた。

IV-2 実験の施行

IV-2-a 実験施行の順序方法及び記録型式

先づ復水管に通水し、その出入口水温 t_i , t_o の差殆どなく、定常状態になるを待つて、各熱電対の検定*を行ひ及びその回路の絶縁抵抗を測定して異常なきを確かめる。この間低圧蒸汽罐を加熱して蒸汽圧力を 0.7 kg/cm^2 に上昇せしめ、蒸汽函 (I) 内に通汽し、函内圧力を水柱 2 cm に調整する。最初は函内に空気が充滿し、蒸汽分圧が低下するために蒸汽温度低く函内全部に所謂「水蒸汽」を生じて函内を観察することが出来ぬが数分の後に漸次空気が追ひ出されるに從て蒸汽温度は上昇し「水蒸汽」も減少して函内の復水状況を窓より観察することが出来る様になる。斯くして蒸汽温度が、その時の大気圧に対応する飽和温度に達すれば、函内は完全に透明となり、全く水蒸汽を認め得るに至る。この間復水管は低速回転を行ひ函内を攪拌して、空気の追ひ出しを促進する。次に復水管の回転を停止して、復水状況を点検し、滴状又は膜状の完否を確かめる。尙極く僅かの空気混合せる時は、復水管の周囲特に管の端部の内隅に時々薄き「水蒸汽」の発生するを認め得るから、このなくなる事を確かめ、又一方上記の経過に伴ひ、冷却水の温度上昇 ($t_o - t_i$) が漸次増加するが、完全に空気の追ひ出された時、初めて極大に達し定

(13) 文献 (7) 参照。 (14) コロ切削油、吉川製油所製、工場にて普通に用ひられる切削油にて水溶性の複雑なる混合油、「コロ」は商品名。

(23) 助手磯部孝一、洗淳郎、長野彌の諸君外數氏。

常となる（但し管内流速は一定に保つ）のを待つて実験資料を取り始める。即ち先づ管内流速、回転数及び入口水温 t_i を所要の値に調整したる後先づ一つの熱電対に対する測定器の読みと t_0 を同時に取り、後直ちに、 t_0 , t_i , H (三角ノッチ) 等を読む。

次に他の熱電対と切り替へて、同様の方法により実験を行

ひ、順次全部の熱電対に対する記録をとりて、或流速或回転数に対する場合を完了す。これに要する時間は 8~10 mn である。次に回転数（又は方向）を変へ、 $n=0$ （静止） ± 100 , ± 200 , ± 300 , ををばれば、次の流速にうつり、同様に実験を行ふ。

静止の場合、検流計の振れはその周期大なるため平均を指示し難く、又電位差計では平衡を保ち難く測定不能なればオシログラムをとりて平均温度を算出した。第 10 図にこれを例示する。尚この場合は管の位相により若干の差異ある故、 $\beta=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 等の場合の実験を行つたがその中標準点としては主として $\beta=90^\circ$ を採用する。

IV-2-b 実験系列と経過

(イ) 大要 実験の種類は第 5c 図に示す如く、先づ熱電対配置に就て、K-0 より K-6 に至る 7 種の場合を生じ、又 K-2 以下に於てはその各 i に対し膜状或は滴状復水の二つの場合を區別し、尚各場合に就て十字羽根 (G) 入り及び (G) なしの二つの管入口条件を區別するの必要を生じ、これ等の条件の組合せにより、複雑なる多数の系列を生じたるにより、実験順序に従ひ、系列番号及び記号を定めてこれを明示した。(H-8 a)*

(ロ) 系列の分け方と実験経過

(i) K-0 の場合は、先づ管長に沿ひたる壁温の分布を見るために J_{10} , J_{30} , J_{50} , 及び水温に対し J_1 , J_2 合計 5 箇を配置し、膜状滴状混合（自然的）復水の場合を実験す。

(資料 H-9)*

(ii) K-1 の場合は端部影響を考慮し、断面 (2) 及び (4) を設け、(1) を略し、猶各断面熱電対の位置を 0 番より 2 番に改造し、膜状滴状混合復水の場合につき実験す。

(資料 H-10)*

(iii) K-2 の場合は断面 (5) を略し又 J_1 , J_2 を略し（水銀温度計にて代用す）断面 (4) に J_{40} , J_{47} を増置して同断面の壁温分布を同時に測定す。

尚以降復水状態を膜状 (F), 滴状 (D) に區別し、又復水管左端に十字羽根 (G) を装備し、冷却水を逆流せしめる場合（符号 (-) G）は水の回転効果を生ぜざる様にして、正流 (+) の水の回転効果ある場合と區別して実験し、更に又回転方向正 (+) 逆 (-) 二つの場合につき行ひ、小数の熱電対を以て温度分布を更に明らかにする工夫をなす。

(実験資料、H-11~H-15)*

(iv) K-3 の場合は J_{40} , J_{47} を J_{43} , J_{44} に切換へ、(K-2) の結果と連絡せしめて断面 (4) の壁温分布を明らかにせんとした。

(v) K-4 の場合は上記方法にては誤差を生ずること多きを知り、断面 (4) に 5 箇の熱電対を装置し、資料を同時に読み、管周における温度分布を測定す。

(vi) K-5 の場合は復水管の左端より特別の熱電対 J_m を管の中途迄挿入し、管長 l_m に対する温度上昇を見る実験にして先づ最初に $l_{m2}=690$ mm の場合、次に $l_{m1}=265$ mm 最後に $l_{m3}=1140$ mm の場合を実験した。

第 5b 図
熱電対詳細

第 5c 図 系列と熱電対及び水銀温度計配置

昭和 16 年 2 月

第 6 図 滴状、膜状及び混合状復水（水平復水管、外径 19 mm、総長 440 の一部）
管内流速 4.2~4.9 m/s、蒸汽温 100°C（昭 7-12-5、予備実験）

第 3 表（膜状復水、正流（断面[4] 出口に近く）、水の回転効果あり、水垢ある場合）

（系列） K4 F(+)S 【元表 H-21 (2)】

試験 番号	水 速 w m/s	回転数毎分 又は管位 $n, (\beta^\circ)$	水 温 $^\circ\text{C}$		断 面 [4] 管 壁 温 度 $^\circ\text{C}$					蒸汽温度 $^\circ\text{C}$ t_s	備 考 B 大気圧 T 室温 $^\circ\text{C}$ () オシログラム
			入 口 t_1	出 口 t_2	θ_{40}	θ_{42}	θ_{43}	θ_{44}	θ_{47}		
d1	3.67	(90)	21.60	28.72	—	—	—	—	—	99.82	13-6-9 (1) (ロ) B=757.4 T=22.3
2	3.58	+300	21.47	33.08	79.3	84.2	85.8	78.5	79.0	—	
3	3.64	-300	21.42	31.56	83.8	82.2	84.1	82.9	80.0	—	
4	3.11	-300	21.52	33.91	81.5	82.6	84.8	83.9	82.5	—	
5	3.11	+300	21.53	34.32	80.5	85.4	86.7	80.2	80.5	—	
e1	2.06	(270)	21.74	30.31	62.0	73.2	71.2	81.3	65.2	99.79	13-6-15 (A)
2	2.05	(-45)	21.14	30.60	66.3	73.2	77.4	77.0	60.5	—	B=756.8 (B)
3	1.01	(270)	21.77	36.86	70.8	84.5	85.3	90.0	78.0	—	T=21.4 (C)
4	2.06	+100	21.84	34.81	—	84.1	83.1	—	—	—	(D)
5	2.04	+200	21.39	36.52	82.3	87.5	85.7	83.5	82.3	—	
6	2.04	+300	21.31	37.49	85.0	88.8	87.5	84.8	84.5	—	
7	2.06	-100	21.04	34.03	77.2	79.1	80.1	85.2	80.7	—	
8	2.06	-200	21.13	35.71	83.4	85.1	85.0	86.1	83.3	—	
9	2.04	-300	21.35	36.85	86.7	86.2	86.9	86.6	85.4	—	
10	1.03	+100	21.71	41.89	84.1	88.3	88.9	89.7	87.0	—	(E)
11	1.03	+200	21.89	44.18	89.1	91.1	89.9	90.2	89.1	—	
12	1.03	+300	22.13	45.89	90.8	91.8	92.4	90.4	88.9	—	
13	1.04	-300	22.14	44.84	91.0	91.0	91.7	91.6	90.8	—	

[第 7 巻, 第 26 号 (第 2 部)]

(上図) $w=1.15$ m/s, $\beta=90^\circ$
 (中図) $w=1.63$ m/s, $\beta=90^\circ-5.7^\circ$
 (下図) $w=3.62$ m/s, $\beta=90^\circ$

第 7 図 膜状復水 (5 本平行管)

(vii) K-6 の場合は復水管内を毛ブラシで掃除し水垢を出るだけ取り去り復水管入口に J_1 を出口に J_m を置き、管総長 $l=1270$ mm につき水温上昇及び水銀温度計との温度差 $\Delta t_1=t_1-t_i$ 及び $\Delta t_2=t_0-t_2$ の精測検定実験を行ひ、尙冷却水を蒸汽加熱を行ひて、入口温度 t_i を変化したる場合の実験を行ふ。(壁温は熱電対故障のためその資料を取らず) K-5 以前の水垢ある場合に対しては記号 (S) を附してこの場合と區別する。

(viii) 復水管内流水抵抗 冷却水温度上昇なき常温の場合 [記号 (C)] は、準備運転の際に大体の模様を実験し、又復水しつゝある場合 [記号 (H)] も実験の初期に於て断片的資料を採つたが、空気を完全に追ひ出す操作面にて時間を要する事多きため、壁温測定を主とする実験に於ては、水頭損失の資料をとる事を省略し、別にこの測定を主とした連続的昭和 16 年 2 月]

第 7 図

管断面及び熱電対の位置略図

第 10 図 F(+), S 壁温オシログラム

実験を行つた。管内水垢ある場合につき、G 入りの場合の資料は (H-23)' a*, G なしの場合の資料は (H-23)' b*

第4表 熱通過率、 k_m (滴膜混合復水、
水の回転効果あり、水垢僅少の場合)

(系列) (D+F)(+) [元表 H-32(c)] ($t_1=20^\circ\text{C}$)

水速 w m/s	回転数 n rev/mm	水温 t_2 $^\circ\text{C}$	k_m kcal/m ² h $^\circ\text{C}$	$\frac{k_m - (k_m)_{n=0}}{(k_m)_{n=0}} \times 100$
0.83	0	38.8	2 270	
	100	47.3	3 540	56.0
	200	50.0	3 990	75.8
1.05	300	51.1	4 170	83.7
	0	37.2	2 600	
	100	43.6	3 760	44.6
2.10	200	45.6	4 140	59.2
	300	47.2	4 460	71.5
	0	30.9	3 150	
3.10	100	37.3	5 280	67.7
	200	39.4	5 960	89.2
	300	40.7	6 430	104.0
3.60	0	28.1	3 380	
	100	34.4	6 290	86.1
	200	36.2	7 170	112.1
3.60	300	37.4	7 550	123.2
	0	27.4	3 570	
	100	33.4	6 740	88.8
3.60	200	35.0	7 640	113.8
	300	36.0	8 210	130.0

第6表 熱通過率 k_m (滴状復水、水垢ある場合)

($t_1=20^\circ\text{C}$) [元表 H-32 a_3, a_4]

(A) (系列) D(-)GS (水の回転効果なし)				(B) (系列) D(+)S (水の回転効果あり)	
水速 w m/s	回転数 n rev/mm	水温 t_2 $^\circ\text{C}$	k_m kcal/m ² h $^\circ\text{C}$	水温 t_2 $^\circ\text{C}$	k_m kcal/m ² h $^\circ\text{C}$
1.00	0	38.0	2 610	37.6—38.7	2 550—2 720
	100	39.6—40.3	2 880—2 680	41.5—43.6	3 210—3 570
	200	40.6—40.9	3 050—3 090	44.3—45.3	3 700—3 880
	300	41.4	3 180	45.6—46.9	3 950—4 190
2.00	0	32.4	3 450	32.3—33.3	3 410—3 710
	100	35.1	4 400	35.0—36.3	4 250—4 670
	200	35.6	4 530	37.2—37.8	4 940—5 150
	300	36.3	4 570	37.6—38.2	5 080—5 280
3.00	0	24.0	3 660	29.7—30.6	3 890—4 360
	100	31.8	4 890	32.3—33.4	5 110—5 630
	200	32.1—32.6	5 030—5 250	34.1—34.6	5 820—6 180
	300	32.6—33.0	5 250—5 440	34.4—35.1	6 090—6 420
3.50	0	28.0	3 780	28.5—29.4	4 020—4 470
	100	30.4	4 990	31.3—32.2	5 520—5 920
	200	31.3	5 400	32.8—33.3	6 240—6 510
	300	31.8	5 710	33.1—33.8	6 400—6 770

次に水垢を掃除後更に実験を行ふ。復水の場合 (H) の資料は (H-29)*, 常温の場合 (C) の資料は (H-30)* にして、何れも正流 G なしの場合である。第 19 図にこれを示す。 G 入りの場合は静止の場合と同じく回転効果なき事を知り、

第5表 (A), (B) 熱通過率、 k_m (膜状復水、水垢ある場合)
($t_1=20^\circ\text{C}$) [元表 H-32 a_1, a_2]

(A) (系列) F(-)GS (水の回転効果なし)				(B) (系列) F(+)S (水の回転効果あり)	
水速 w m/s	回転数 n rev/mm	水温 t_2 $^\circ\text{C}$	k_m kcal/m ² h $^\circ\text{C}$	水温 t_2 $^\circ\text{C}$	k_m kcal/m ² h $^\circ\text{C}$
1.00	0	33.0—34.8	1 810—2 100	36.0	2 310
	100	38.5—39.5	2 690—2 860	40.6	3 040
	200	39.9	2 920	42.9	3 450
2.00	300	40.3	3 000	44.0	3 700
	0	30.2—30.5	2 780—2 880	30.2	2 880
	100	33.3—33.6	3 720—3 810	33.55	3 800
3.00	200	34.1—34.7	3 960—4 150	35.4	4 420
	300	34.5—34.9	4 220	36.4	4 750
	0	28.0—28.2	3 240—3 320	27.7	3 100
3.50	100	30.2—30.7	4 180—4 410	30.6	4 410
	200	31.1—31.6	4 620—4 800	32.4	5 170
	300	31.9—31.4	4 940	33.25	5 550
3.50	0	27.3—27.5	3 420—3 530	26.8	3 180
	100	29.1—29.8	4 320—4 680	29.6	4 530
	200	30.0—30.5	4 780—5 030	31.3	5 450
3.50	300	31.0—30.5	5 300	32.0	5 820

これを略す。

(ix) 写真及び活動写真 [(第 8 図、第 9 図) 参照]*
撮影のための実験等を行ひ、本研究実験を終了す。

IV-3 実験資料及びその整理

IV-3-a 水温及び壁温の補正 管入口及び出口水温 t_1 及び t_2 の沢山の資料を精密に一々直接に熱電対から読むのは不便であるので、K-6 の実験にて検定せる僅少の温度差 $\Delta t_1 = t_1 - t_{1i}$, $\Delta t_2 = t_2 - t_{2i}$ から補正曲線*を作り、これを用ひて確実なる水銀温度計の読み t_{1i} 及び t_{2i} から t_1 及び t_2 を出した。壁温 θ_{xy} にも前記の特殊の補正*を施した。第 3 表に系列 K-4, 即ち管周に於ける温度分布を出す場合、の資料の一部を例示する。次に正確な比較を行ふために標準入口水温を 20°C にとり、これに対する t_2 及び θ_{xy} を出すために特別の補正法*を用ひ僅少の補正を施した。第 4~8 表に各種の場合の t_2 を示す。

IV-3-b 壁温分布

(1) 管長に沿ひての壁温分布 管長に沿ひての壁温は、断面 (2) (3) (4) に於て、断面の平均温度に近き代表点 [2] を選び、即ち J_{22} , J_{32} , J_{42} を用ひて正逆二方向の回転につき実験 (K-2, K-3) を行ひ、[2] 及び [6] に対する資料をとり (H-11~19)* $\theta-l$ 線図*を作る (省略)。

(ロ) 管周における壁温分布及び平均壁温 (第 11~14 図参照)

(i) 壁温分布 断面 (4) における 5 箇の熱電対に依り、又回転方向を (+), (-) に変へて、管周位置 [1] [5] [6], 3 点の資料を補ひ、計 8 箇所の温度を測定す。

但し [4] 点は、工作の都合で 270° の位置より約 13° 離

[第 7 巻 第 26 号 (第 2 部)]

第 7 表 熱通過率 k_m (膜状復水、水垢なき場合)
 $(t_1=20^\circ\text{C})$ [元表 H-32 b_1, b_2]

(A) F(+)G (水の回転効果なし)				(B) F(+) (水の回転効果あり)	
水 速 w m/s	回転数 n rev/mn	水温 $^\circ\text{C}$ t_2	k_m	水温 $^\circ\text{C}$ t_2	k_m
1.00	0	37.8	2 570	38.1	2 620
	100	41.2	3 130	43.5	3 550
	200	42.5	3 370	46.3	4 070
	300	43.4	3 530	47.8	4 360
2.00	0	31.9	3 290	32.2	3 380
	100	34.9	4 200	35.4	4 360
	200	36.4	4 680	38.7	5 430
	300	37.3	4 970	40.1	5 920
3.00	0	28.9	3 610	28.9	3 610
	100	31.5	4 760	32.1	5 020
	200	33.2	5 530	34.5	6 130
	300	34.1	6 030	35.9	6 780
3.50	0	28.1	3 750	27.6	3 570
	100	30.5	5 030	30.9	5 230
	200	32.3	5 970	33.1	6 390
	300	33.2	6 450	34.5	7 150

 第 8 表 熱通過率 k_m (滴状復水、水垢なき場合)
 $(t_1=20^\circ\text{C})$ [元表 H-32 b_3, b_4]

(A) D(+)G (水の回転効果なし)				(B) D(+) (水の回転効果あり)	
水 速 w m/s	回転数 n rev/mn	水温 $^\circ\text{C}$ t_2	k_m	水温 $^\circ\text{C}$ t_2	k_m
1.00	0	44.1	3 660	43.8	3 610
	100	45.5	3 910	49.6	4 700
	200	45.9	3 990	50.9	4 980
	300	46.1	4 030	51.7	5 150
2.00	0	35.8	4 500	36.8	4 820
	100	40.0	5 860	42.8	6 850
	200	40.4	6 000	44.1	7 310
	300	40.7	6 110	45.5	7 840
3.00	0	31.6	4 800	31.7	4 850
	100	37.1	7 370	38.2	7 920
	200	37.6	7 600	39.8	8 700
	300	37.8	7 700	41.7	9 360
3.50	0	30.2	4 860	29.8	4 660
	100	36.2	8 090	37.0	8 500
	200	36.6	8 300	38.5	9 350
	300	36.9	8 480	39.7	10 070

 第 11 図 F(-)GS (入口、G 羽入) 及び第 12 図 F(+)S (出口、G 羽無し)
 管壁断面 [4] 壁温分布 (膜状復水、水垢あり)

 第 13 図 D(-)GS (入口、G 羽入) 及び第 14 図 D(+)S (出口、G 羽無し)
 管壁断面 [4] 壁温分布 (滴状復水、水垢あり)

昭和 16 年 2 月]

れたので、(+) 回轉の場合は裏側、(-) 回轉の場合は表側の温度を示す。今 [0] 点を両端にして、管周を 0, 7, 6, 5, (44'), 3, 2, 1, 0 の順に直線上に展開して横軸とし、これ等の温度を縦軸とした線図を作り、管周における温度分布を示す。但し $n=0$ の場合は、波形比較の便を考慮して重力の方向と回轉による遠心力の方向とが一致する様、横軸を 180° づらして記入した。K-4 の場合は θ の資料が殆ど $t_1=20^\circ\text{C}$ に近く、補正は僅少で、これ等の曲線は、元の資料その儘のものに極く近いものである。

(ii) 平均温度 これ等の温度分布曲線を面積計にて積分し、

IV-3-c 平均熱通過率 k_m , 管長は $l=1270\text{mm}$ で標準温度 $t_1=20^\circ\text{C}$ に対して t_2 の値は第 4~8 表に示す通りである。又管長 $l_{m2}=690\text{mm}$ に対する水温上昇実験(K-5)の結果を考察すると回轉の場合も静止の場合と同様に蒸気と水温との平均温度差は普通、対数平均温度差式を用ひて差支ないことが判るから k_m 算出には前記の式(10)を用ひる、即ち

$$k_m = 3600 \times \frac{G}{A} \log_e \frac{t_2 - t_1}{t_s - t_2} \\ = C_1 w \log_{10} \frac{t_2 - t_1}{t_s - t_2} \dots\dots\dots (10')$$

第 15 図 F(-)GS 及び第 16 図 F(+)S, $[\theta' = \theta_m + \epsilon_s]$

平均温度を出し、平均直線を引いた。尚 $(\theta_{42} + \theta_{46})/2$ と、平均温度とを比較すると、この比 f は凡ての場合 1 に近いことが判つた。(H-35* 参照)

(ハ) 管長に沿ひての断面平均壁温 " θ_m " の分布、断面(4)に於てこれが出口に近き場合(正流)も又入口に近き場合(逆流)も常にその平均壁温は $(\theta_{42} + \theta_{62})/2$ に基だ近いのでその他の断面に於ても同様と推定して差支ないから前記の係数 f を断面(2)(3)等にも準用してその断面平均壁温 θ_m を算定し得る。斯くして $(\theta_m - l)$ 線図を作り θ_m に僅少の補正 ϵ_s を施したものが第 15~18 図である。尚この線図中に $t_s (=100^\circ\text{C})$ 、及び水温分布線を記入して α_s 、及び α_w の算出に使用した。水温上昇線は殆ど直線と看做して差支ない事は実験(K-5)* から判明した。

但し w = 流速 m/s, C_1 = 常数である。

本実験に於ては、 $d_0=18.95$ 、復水管の有効管長 l' は復水管中途に設けたる 2 箇の水圧測定用環(5)の幅 10 mm の $1/4$ だけを有効と見積ると有効管長は、 $l' = 1270 - (2 \times 10 \times \frac{1}{4}) = 1255$ となり、然るときは $A = \pi \times 0.01895 \times 1.255 = 0.0747\text{m}^2$ 管内径は $d_i = 16.40\text{mm}$ 、流水断面積は $a = (\pi/4)(0.0164)^2 = 0.000212\text{m}^2$, $\therefore G = aw \times 1000 = 0.212 w\text{ kg/s}$

$$\therefore C_1 = \frac{0.212 \times 2.3026 \times 3600}{0.0747} = 23500$$

この値を用ひ式(10')により各場合につき算出せる結果を第 4~8 表に示し、又これを w 横軸の線図として第 20 図~第 24 図に示す。

[第 7 巻 第 26 号 (第 2 部)]

第 17 図 D(-)GS 及び第 18 図 D(+)S

V. 結果の考察 (その 1)

V-1 温度分布の考察

V-1-a 管壁断面温度分布

(i) F(-)GS の場合 第 11 図は、この場合の入口に近き管壁断面 (4) における温度分布図である。今この図に就て考察するに、

(i) 静止の場合と回転の場合とは、その曲線の形状著しく異なり、特に中央部に於ては両者接近して流速 w 大なる場合は遂に接触するに至る。尚曲線の両端に到るに従て両者相離れ n と共にその開きは著しく増大する。即ち、曲線の両端に到るに従ひ、その回転効果著しくなることを示す。

(ii) 静止の場合 ($\beta = 90^\circ$) は最下点 (4), (4') 回転の場合は (0) の個所がその温度が著しく低い、これは静止の場合に観察し得る様に回転の場合にも亦復水が膜状に傳はり流れてこの極限位置に至りて始めて離脱することを示す。次に低き点は回転の場合 (4), (4') の個所であるがこれは復水膜の流速が最も遅く膜厚大なることを推定させる。

(iii) 点 (3) が最高温を示し (5) がこれに次ぎ遠心力の分力の影響最も大なる (2), (6) とがこれに続く順であるのは注目し得る。これ等の結果は (3) と (5) には復水管と蒸汽との関係速度の影響大なるためであり (2), (6) に於ては管周半分の復水が集積して流れ膜厚を大ならしむる結果であると考へられる。

昭和 16 年 2 月]

(iv) 曲線は大略対称的であるが稍管の回転方向側が温度が高い。これは遠心力の外に前記蒸汽との関係速度の影響が

 第 20 図 平均熱通過率 k_m
(滴膜混合復水 G 羽なし、水垢僅少)

利くことを推定させる。 $n=0$ の場合曲線に段階を生じてゐるのは四周に沿ひての流下状況が平滑でなく波条を生ずるためであることは写真第 7 図 (第 8 図)* を観察すると了解される。

(ロ) F(+)S の場合 第 12 図はこの場合の出口に近き断面 (4) における温度分布図である。G 入りの場合と大体の傾向は同じであるが出口に近き故水温高く従て壁温も全体的に高く、静止の場合と回転の場合との開きが、G 入りの場合より小なるは水側の α_w に回転効果あるために、水の冷却作用大にて水温上昇大なるにも拘らず、壁温を下げることに著しいためで

ある。

(ハ) D(−)GS の場合 第 13 図はこの場合の入口に近き断面 (4) における温度分布図で、膜状の場合とは大いにその趣が相違する。

(i) $n=0$ の場合は曲線は平になり最低と最高との温度差が少くなる。この場合は膜状の場合と異なり、滴粒の流速は

轉效果充分なることを示す。

(ハ) 上記線図を全体的に考察するに、管長に沿ひての壁温分布は初め稍急に上昇し、中央に到れば殆ど出口温度に近き緩曲線になることが判る。

V-2 平均熱通過率 k_m に就て

V-2-a 水垢殆どなき場合 (管内掃除後)

第 21 図 k_m (膜状復水、水垢あり)

第 22 図 k_m (滴状復水、水垢あり)

第 23 図 k_m (膜状復水、水垢なし)

大きく、又四周の全部に沿ひては傳はらないで、回轉の場合に於ても静止の場合に觀察される様に管の途中 (2)(6) 附近にて既に離脱するものが沢山あることを推定させる。回轉の場合の最高点は (0), (1), (3) にして殆ど同じく、これに次いで (5) が高い。これは上記の理由によりて了解される。

(ii) 静止の場合の最高点と回轉の場合の最低点とがやはり中央部に於て接近するが、膜状の場合よりはるその開きが大きい。これは矢張り回轉のときは、滴粒の離脱が膜状の場合より、早いことから説明し得る。

(iii) $n=0$ の場合の最高点は膜状の場合と大差なく、回轉の場合は $n=100$ にて壁温は既に著しく高くなり、200, 300 と n を増加してもこれ以上余り上らなくなる。

(ニ) D(+)S の場合。第 14 図は、この場合の出口に近き断面 (4) における温度分布図で G 入りの場合より全体的に高く、 $n=0$ の場合の曲線は更に平になる。以上全体を通じて考察するに、回轉の場合に於て曲線は稍対称を欠き回轉方向側が反対側より常に高い。

これは蒸汽との関係速度が前者に於て大なるためである。殊に表側の (4') がこれに近い裏側の (4) よりも著しく高いのは、この部における蒸汽の流れの状態の影響なることは、明らかに推察し得られる所である。

V-1-b 管長に沿ひての平均温度分布

(イ) 第 15~18 図に就て (G) 入りは (G) なしの場合に比して平均壁温 θ' が高い。これは (G) 入りの場合は前述の様に水側の α_w に対する回轉效果のために、冷却作用大なる結果である。

(ロ) 滴状の場合は、膜状の場合より壁温高く、 $n=200, 300$ の線が非常に接近するが、膜状の場合は n と共に漸次上昇する。これは 200 にて滴状の場合は、既に實際的に回

(イ) 膜状復水 G 入り [(F+) G] の場合

第 23 図 (点線) は w を横軸とせる k_m の線図である。先づ $n=0$ の場合は、 $w=2$ m/s 以上になると k_m は殆ど増加しないが、然し回轉の場合は $w=3.5$ m/s 以上に至りても尚 k_m は増加する。 n に就ては、100 以上 200 までは、急に増加し、 $n=200$ 以上は増加率稍減少するが、 $n=300$ 以上に於ても尚上昇の傾向明らかである。 $n=0$ と 100 との間に於て、曲線に不連続点を生ずるがこれに就ては続報に詳述する。

(ロ) 膜状復水 G なき [F(+)] 場合

第 23 図 (実線) に示す様に $n=0$ の場合は、 G の效果なき故前述 G 入りの場合と同様の曲線であるが、回轉の場合は、 k_m の増加率が G 入りの場合に比し著しく大である。これは流水抵抗がこの場合に増加することより推定せられる様に、水側の α_w にも回轉效果を生じて k_m を高める故である。尚詳細の分析的説明は続報に述べる。

(ハ) 滴状復水 G 入り [D(+) G] の場合

第 24 図 (点線) に示す様に、この場合は $n=0$ の時も膜状復水の場合に比し、 k_m は著しく大であるが、 $w=2$ m/s 以上になると矢張り増加しなくなる。回轉の場合は w と共に急に高くなり、膜状の場合よりは著しく大きくなる。但し n に就ては $n=100, 200, 300$ と曲線は殆ど重なる。即ち $n=100$ に於て復水滴が飛散し、充分 α_w の回轉效果が表はれるが、これ以上更に 200, 300 と n を増しても、回轉效果が増すこと少なきを示す。

(ニ) 滴状復水 G なき [D(+)] 場合

第 24 図 (実線) に示す様に w と共に k_m の増加する割合は、(G 入り) の場合に比し更に著しく、 $n=100$ で $n=0$ との開きは著しく大となるが、然し $n=200, 300$ となつても、幾分 k_m は上昇の傾向にある。これは復水滴が $n=100$

にて、既に充分飛散し α_w に就ては n の効果は充分表はれるが、水側の α_w に就ては回転効果が 200, 300 になると、

益、利い末でること示す。

(ホ) 膜状滴状混合復水 G なし [(D+F)(+)] の場合 第 20 図に示す様に曲線は大体に於て、F (+) と (D) (+) の場合の中間に入り、この場合の α_w に対する回転効果も、両者の中間なることを示す。

V-2-b 水垢ある場合の k_m
F(-)GS 及び F(+)S の場合は、第 21 図、D(-)GS 及び D(+)S

第 24 図 k_m (滴状復水、水垢なし)

の場合は、第 22 図にこれを示す。

曲線の模様は、前記同様であるが、 k_m の値は全体に稍低く、又 w 及び n に伴ひ増加する率も緩慢である。これは水垢のために α_w が小さくなり、この影響が著しいから α_w の回転効果が覆はれて、 k_m 全体に対する回転効果が充分頭はれないことを示す。要するに回転効果を充分に發揮するには、管内の掃除を充分にして、水垢を取り去る事が大切なことを示す。

V-2-c k_m の増加率 静止の場合に比較せる回転の場合に対する k_m の増加率、%

$$e = \frac{k_m - (k_m)_{n=0}}{(k_m)_{n=0}} \times 100$$

の曲線を実際の場合に最も近い (D+F) 混合復水の場合に就き第 4 表に示す (線図省略)。

これから流速が高くなる程回転効果も大となる模様が明らかに判る。

VI. 結果の考察(その 2)* 大要

VI. 1. 復水管内流水抵抗*

VI-1-a 水垢ある場合 水垢ある場合は、先づ大体の模様を見るために、主として全長 L_3 につき簡単なる実験を行ひ、次の事が判明した (資料省略)。

(イ) 復水実験、十字羽根 G 入りの場合は、水頭損失 h は、(L_3 に対する) 回転数に関係なく $n=0$ の場合と同様である。

尚復水を行はざる場合との差異は、この場合僅少である。

(ロ) 復水実験、十字羽根 (G) なき場合は、水頭損失 h は、回転数 n と共に著しく増し、従て水側の傳熱率 α_w が n と共に増加すべきことを推定し得る。

(ハ) 又復水せざる場合は 静止の場合と同様回転の場合に

昭和 16 年 2 月]

於ても復水の場合と、質的には大差なき事が判明した。故に回転の影響に関する基本的研究は、実験容易なる冷水の場合につき行へばよい事が判る。

VI-1-b 水垢なき場合 管内水垢掃除後十字羽根 (G) なき、即ち回転影響ある場合を復水しつつある場合及び常温の場合につき稍詳細なる実験を行つた。その結果を第 19 図

第 19 図 管内流水抵抗

に示す。この場合は、傳熱良好なるために温度上昇も水垢ある場合に比し大であるから、復水を行ふ場合と行はざる場合とにおける管内流水抵抗の差も稍大であるが然し $h-w$ 曲線の形は、質的にはやはり大差はなく。回轉数 n と共に h の著しく増大する事が明らかに判る。

VI-2 α_s 及び α_w * k_m を用ひて管壁内の温度勾配を略算し、尙管内壁に附着せる水垢の影響をも考慮して管の内外表面温度を算定しこの分布曲線を第 15~18 図上に記入しこれ等から α_s 及び α_w の近似値を求め更にこの値により k_m を修正して、繰返し計算を行ひ漸次充分精密な近似値を出し、これを線図に表はしその特性を明らかにした。

VI-3 最適流速及び回轉数* 管内流水抵抗 h は G 羽なき場合は n と共に著しく増加するが、 h 曲線を k_m 曲線と対比すると(論文要報参照)流速 w 及び回轉数 n を或限度以上に増して行く事は不得策で、換言すれば、場合に應じて最適の w 及び n が存在すべき事が推察される。

VI-4 復水状態* には膜狀及び滴狀なる全く異なる場合が存在し、靜止管の場合における復水落下の模様及び落下滴粒の大きさは著しく相異なり、回轉管における復水飛散の状況も亦大いに異なる。自然に生ずる一般の復水状態は前記 2 者を種々なる割合に含む混合状態に従て一定せざるものと推察される。

VII. 應用に関する示唆*

回轉復水管を実地に應用する場合は構造上適當なる管配置の管群を公轉するのが得策であるが、著者の考案になる一型式を例示すれば第 25 図(特許第 106553 号附図)の如くである。斯くの如き構造に於ても適當の流速及び回轉数を用ひると靜止管の場合に比し k_m の値をかなり大となす事は可能と推察される。然らば復水管の表面積を減少し従て復水器の重量容積及び價格等を相當節約する事が可能と考へられる。そこで実地の適用に就ては尖頭負荷大なる火力発電所又は過負荷大にして重量容積節約の要求大なる艦船等の場合にその可能性が最も大きいと思はれる。

後記

本研究の遂行に就ては、東京帝国大学教授丹羽重光博士の懇切なる指導に負ふ所多大である。これに対して茲に深厚なる感謝の意を表する。又同僚兼重博士初め機械工学科教官及び学部内知友各位の援助による所頗る多く、実験の施行及び結果の整理に就ては実験室助手数氏⁽²³⁾の熱心なる助力を受けた。尙本研究の前半に対しては近藤記念海事財團より、後半に対しては學術振興會より多額の援助金を受け多大の便宜を得た。以上茲に特記して深く感謝する次第である。

(昭和 16 年 1 月 21 日受付)

第 25 a, b 図 (特許 106553 号附図)

討

質問(武村耕太郎) 私は今夕初めて回轉復水器の御研究を拜聴して多大の興味を感ずるのであります。而して直に私の記憶を呼び起すものは彼のアトモス罐であります。御承知の通り同罐は初め單管回轉罐でありましたがその後多管式の籠型回轉罐に発達したのであります。そこで實際問題として回轉復水器を考察致しますと矢張りアトモス罐の如き籠型の組合せとなるのではなからうかと思はれるのであります。

1. 故に只今映画で拜見しました水平管を半径方向に数本並列したるものの試験の外に円周方向に数本並列したるもの

議

を試験し、單管試験と比較し管間干渉の影響等を試験されては如何ですか。

2. 尙進んで單一及び組合せの籠型回轉復水器をも試験されては如何ですか。

3. 半径方向管のものも試験されたやうですが、水平管に比較して如何ですか。

4. 實際的モデルによつて普通復水器とを比較し重量容積の節減が如何なる御見込でせうか。私は船用機関に関心を有するものですが、船用機関では重量よりも容積の節減が寧ろ

[第 7 卷 第 26 号 (第 2 部)]

重要視される場合が多いのであります。回轉復水器では果して容積節減上どれだけの利点がありませうか甚だ興味ある問題と思ひます。

應答 実際の復水器の設計としては、管配置は御意見の様に複合形の籠型の様なものに帰着すると考へます。私の一考案は第 25 図の様なもので“ユニフラックス”の考へ等が加味してあります。実はこの型式で $1\frac{1}{2}$ 吋管 20 本を入れたモデルを作り少々実験をやりましたが、この位の大きさでも随分多量の蒸汽を要し、実験が中々難しく、不備の点も色々ありまして、未だ報告出来る所迄行つてをりませぬ。半径方向の管では管長によりますが大体水平管よりも回轉速度を少し

増さぬと同一効果を得られぬ事になります。管の中途に数箇のフィンをつけてやりますと相當良い結果を得られる様ですが、実際の非常に多数の管の場合、管の掃除や修理等を考へますと構造上水平管に帰着すると考へて、半径方向管の詳しい実験は省略しました。実際の場合に重量の節減は相當出来さうですが容積の方はそれ程行かぬかも知れません。然し管数が少くなるといふ事は、管内掃除、検査及び修理等が楽であり従て、屢々行ひ易く、故に効率を高く保ち得る事、又回轉数を靜止より最大迄適當に変化出来て容量に順應性（フレキシビリティ）が大である点は過負荷大なるものには面白味があるかと考へます。