

送風機冷却の模型実験¹⁾

Model Experiments of Blower Cooling of Aero-engines,
Niiti Nishiwaki, Nagao Mizumati

所 員 西 脇 仁 一
囑 託 水 町 長 生

目 次

1. 緒 言.....	335	(a) 抵抗馬力 (b) 送風馬力 (c) 全消費馬力
2. 実験装置及び実験方法.....	336	
2・1 実験用模型.....	336	
2・2 冷却器部通過風量の測定.....	340	
2・3 送風機による圧力上昇の測定....	340	
2・4 抵抗測定.....	340	
3. 実験結果並びに之に對する考案.....	340	
3・1 送風機による圧力上昇と通風率との關係.....	340	
3・2 基本胴體の抵抗.....	342	
3・3 送風機を駆動しない時の抵抗....	343	
3・4 送風機を駆動した場合の抵抗....	343	
(a) 抵抗と通過風量との關係 (b) 抵抗係數と通風率との關係 (c) 抵抗と送風機による圧力上昇との關係		
3・5 抵抗馬力, 送風馬力及び全消費馬力.....	345	
4. 理論計算との比較.....	346	
4・1 理論計算式.....	346	(a) 通風率 (b) 冷却系の抵抗係數 (c) 抵抗馬力 (d) 送風馬力 (e) 全消費馬力
4・2 實驗値と計算値との比較.....	350	(a) 抵抗係數と通風率 (b) 送風機による圧力上昇と通風率との關係 (c) 抵抗馬力 (d) 送風馬力 (e) 全消費馬力
5. 放熱性能の推定.....	352	
5・1 推 定 法.....	352	
5・2 計 算 例.....	353	
6. 結 語.....	356	

1. 緒 言

航空發動機用冷却器の冷却方法として, 冷却器を導風路内に裝備しこれを送風機により強制的に冷却させる方法が考へられる. この理論計算の方法については先に“送風機冷却の理論的考察⁽²⁾”として既に發表した. そこで本報に於ては送風機冷却實驗用の風洞用胴體模型を用ひて風洞實驗を行つた結果につき考察し, 送風機冷却を行つた場合の抵抗並びに抵抗馬力, 送風機による圧力上昇と通風率並びに送風馬力及び全消費馬力等の間の關係を明らかにし, 且つこれに理論計算を適用し, 理論

(1) 本實驗擔當者: 是澤寅雄, 伊藤俊雄, 丸山重次.

(2) 西脇, 水町: 送風機冷却の理論的考察; 航研報告 262 號, 昭和 18 年 7 月.

計算と実験値とが可成り良く一致することを見出し、更にかゝる送風機冷却には如何なる冷却器が適してゐるかを理論計算から見出した。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 実験用模型

第1圖に実験に使用した模型を示す。模型は全長 2720 mm, 最大巾 340 mm の胴體模型にして、この兩側方から冷却空氣を取り入れ、胴體內にて一緒に合流させ冷却器を通過したる後再び兩側に分れ胴體後方の兩側から排出するやうになつてゐる。即ち前方 (A) 部から冷却空氣は取り入れられたる後合流し、送風機 (F) により或壓力上昇 Δp が與へられ、冷却器の代用たる金網 (R) を通りたる後兩方に分離し胴體の兩側の排出口 (B) から放出するやうになつてゐる。(M) は送風機驅動用の誘導電動機 (2 HP, 110 V, 6000 r. p. m. 同期) であつて外部から速度調整を行ふやうになつてゐる。(F) はボスの周りに板金を嵌めこんだ軸流送風機であつて第2圖にこの形狀並びに寸法を示す。本実験では送風機による送風壓と送風量とから理論送風馬力を計算し、實際に送風機を驅動するに要する馬力は測定しなかつた。従つて斯の如く簡単な送風翅を取り付け送風翅の效率は問題にしなかつた。

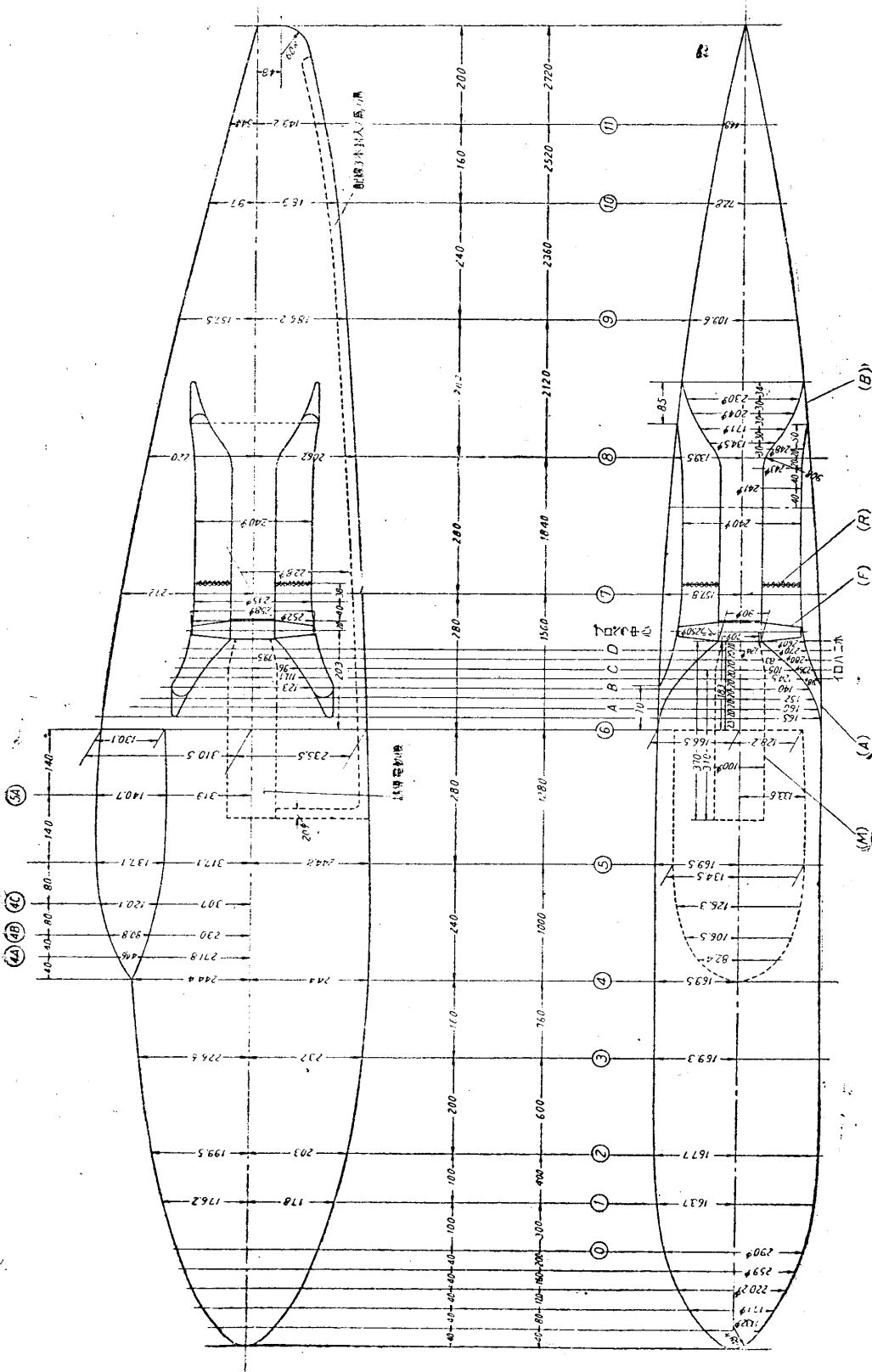
実験に使用した風洞は 1.2 m 風洞である。

初めこのやうにして風洞内に模型を裝備して実験した所、空氣取入部と送風機との間の設計が悪いため取入口から均一に空氣を吸ひこんでくれず、且つ一部分は逆流する如き現象を呈した。この原因としては空氣取入部の曲り方が急激過ぎること、及び兩側から空氣を吸ひこんだその合流點にて送風機を驅動するやうになつてゐるため送風翅に當る風の風速及び方向が各部に於て異なるためだと思はれる。このやうな場合には勿論送風機の效率も低下し更に冷却器に當る風も均一に行かないので冷却器の效率も低下する。従つて送風機を實際の場合に使用するに當つては以上の諸點に注意し、且つ冷却器と送風機の相互位置について注意することが肝要である。以上のやうな理由のために止むを得ず模型を反對に釣り、胴體後方から風を送り (B) から風を吸ひ込み金網 (R) を通過したる後送風機 (F) を通り (A) から吹き出す如き方法に依らざるを得なかつた。然し送風機驅動による影響のみを調べるためには以上の方法でも大して不都合ではないと思はれる。

R は冷却器代用の金網にして内徑 9 cm, 外徑 24 cm である。

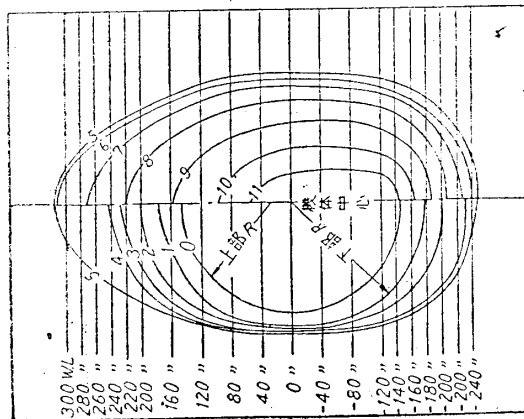
冷却器亂斷面積, S_r

$$S_r = \frac{\pi}{4} (0.24^2 - 0.09^2) = 0.0389 \text{ m}^2$$

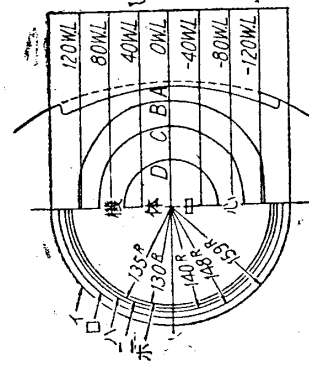


第 1 圖 (1) 實 驗 用 模 型

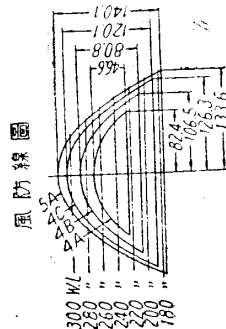
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
上高寸	145.0	176.2	199.5	226.6	244.4	317.1	310.5	272.0	220.0	157.5	97.0	54.4
上高R	145.0	167.6	180.5	194.0	170.5	80.4	78.8	74.4	66.4	54.0	28.5	24.0
上高寸	145.0	178.0	202.9	232.0	244.0	244.8	235.5	222.8	206.2	186.2	164.0	144.2
上高R	145.0	178.2	203.0	232.0	218.5	231.6	212.0	186.5	156.5	118.8	79.6	48.0
最大風速	145.0	163.7	167.7	196.3	169.5	169.5	166.5	157.8	139.5	109.6	72.8	44.8
位置 (標高40.317)						3.2	8.8	17.6	32.8	48.7	57.2	
300WL						49.6	39.0					
280"						70.7	62.4					
260"						86.6	79.5					
240"						100.9	94.2	63.2				
220"						113.2	107.1	81.0				
200"						118.0	124.3	118.2	96.2	49.2		
180"						72.2	112.6	135.6	142.5	143.7	137.5	120.5
160"						125.5	145.3	155.0	158.0	156.8	151.8	148.8
140"						149.5	160.2	164.9	165.0	160.9	148.8	126.9
120"						160.5	166.4	168.2	168.5	168.6	165.0	155.8
100"						163.7	166.7	169.2	169.5	169.5	166.5	157.9
80"						153.5	162.5	167.5	168.5	168.4	164.5	157.6
60"						130.8	150.0	161.4	163.5	163.6	158.5	147.2
40"						110.0	138.0	155.0	158.3	159.0	152.3	139.6
20"						78.2	120.2	145.6	149.0	151.5	143.3	128.6
0"						93.0	132.2	135.8	140.9	136.0	112.2	85.0
-20"						33.0	111.5	118.5	124.6	111.5	87.6	44.8
-40"						72.8	92.5	100.0	79.2	31.4		
-60"												
-80"												
-100"												
-120"												
-140"												
-160"												
-180"												
-200"												
-240"												



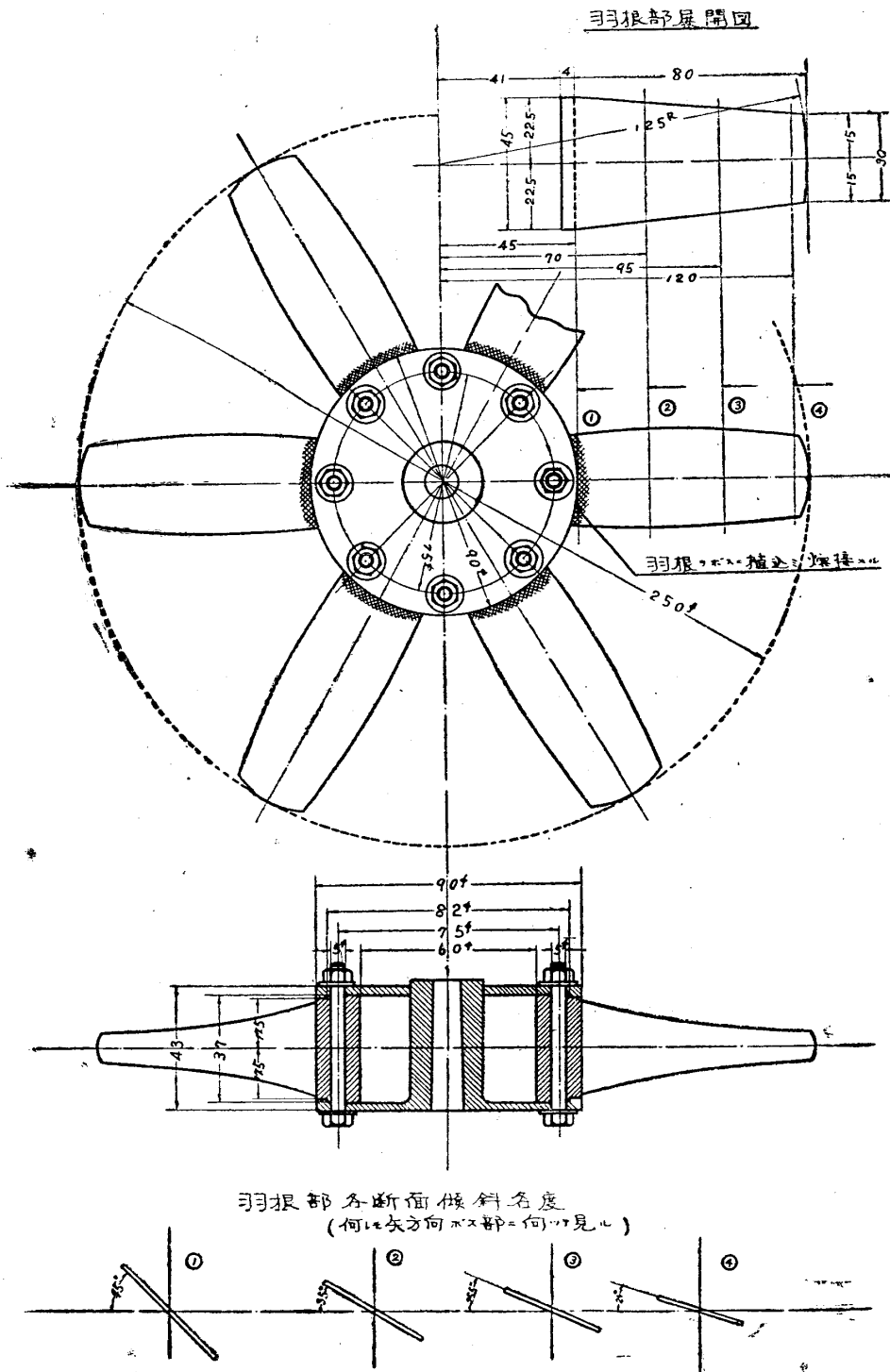
	A	B	C	D
120WL	133.0	54.6		
80WL	145.0	115.5	65.6	
-40WL	156.0	134.7	97.9	
0WL	160.0	140.0	105.0	62.0
-80WL	158.0	135.5	98.0	
-120WL	149.5	118.5	67.5	
標体中心	137.0	123.0	96.0	62.0
上部 R	65.0	112.0	91.0	62.0
下部 R	51.0	102.0	87.0	62.0



	4A	4B	4C	5A	5B
300WL				33.5	51.4
280WL				40.0	61.6
260WL				43.5	64.8
240WL				48.0	76.6
220WL				53.6	87.1
200WL				59.5	101.3
180WL				66.5	115.5
R	106.9	184.8	83.5	179.0	



第 1 圖 (2) 實 驗 用 模 型



第 2 圖 送風機羽根

空気取入口 (B) 部断面積, S_1

$$S_1 = 0.040 \text{ m (巾)} \times 0.280 \text{ m (高)} \times 2 \\ = 0.0224 \text{ m}^2$$

空気排出口 (A) 部断面積, S_4

$$S_4 = 0.026 \text{ m (巾)} \times 0.290 \text{ m (高)} \times 2 \\ = 0.0151 \text{ m}^2$$

胴體最大部断面積, S_0

$$S_0 = 0.1544 \text{ m}^2$$

2.2 冷却器部通過風量の測定

冷却空気通風量は空気取入口 (B) 部に於て上中下の 3ヶ所にて風速を測定しその風速分布から通過風量を計算した。尙 (B) 部を流れる風の方向は通過風量や風洞風速等により若干變動するので風速の測定にはこの影響の比較的少い N. P. L. 型風速計を使用した。

2.3 送風機による壓力上昇の測定

送風翅の前後に静壓用ピトー管を取付けて測定した。

2.4 抵抗測定

風洞天秤を使用した。

以上の方法により風洞風速 0, 10, 15, 20, 25 m/s の各の場合につき送風機の回転数を色々變化させて送風量及び送風壓を變へて實驗した。

3. 實驗結果並びに之に對する考察

測定結果は纏めて第 1 表に示す。

3.1 送風機による壓力上昇と通風率との關係

$$w_r = \text{冷却器部の風速} \quad \text{m/s}$$

$$w_0 = \text{一般流の風速} \quad \text{m/s}$$

$$\Delta p = \text{送風翅の後方と前方の壓力差} \quad \text{kg/m}^2$$

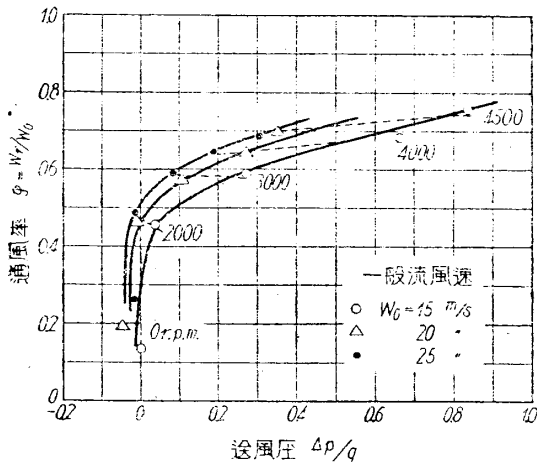
$$\rho_0 = \text{空氣の密度} \quad \text{kg} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4$$

$$q = \frac{1}{2} \rho_0 w_0^2 \quad \text{kg/m}^2$$

とし, $\Delta p/q$ と通風率 $\phi = w_r/w_0$ との關係を圖示すれば第 3 圖の如くなる。實線は一般流の風速が一定なる場合で何れの風速に於ても大體同一の傾向を示すが同一通

風洞風速	送風機回転数	径	冷却器部風速	送風機の成り前の圧力差	空気密度	動圧	送風機による圧上昇	抵抗係数	抵抗係数	通風量	通過風速	送風係数	増加抵抗係数	増加抵抗係数	増加抵抗係数	送風馬力	全消費馬力	単位空気流量当りの抵抗馬力	単位空気流量当りの送風馬力	単位空気流量当りの全消費馬力
w_0	n	D	w_r	Δp	ρ_0	$q = \frac{1}{2} \rho w^2$	Δp_1	$C_x = \frac{\Delta p}{\rho q}$	$C_x = \frac{\Delta p}{\rho q}$	V	$\varphi = \frac{w_0}{w}$	C_f	ΔC_x	ΔC_x	ΔP_0	$P_f = \rho V^3$	$P = \rho V^3$	$\frac{\Delta P_0}{\rho V^3}$	$\frac{P_f}{\rho V^3}$	$\frac{P}{\rho V^3}$
m/s	r.p.m.	kg	m/s	kg/m ²	kg/m ³	kg/m ²	kg/m ²			m ³ /s	m/s			kg	kg%	kg%	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	
0	1000	-0.021	1.73	---	---	0	---	---	---	0.067	---	---	---	0.021	0	---	---	0	---	---
	2000	0.043	3.80	---	---	"	---	---	---	0.148	---	---	---	0.043	"	---	---	"	---	---
	3000	0.170	3.76	---	---	"	---	---	---	0.224	---	---	---	0.120	"	---	---	"	---	---
	4000	0.194	7.45	---	---	"	---	---	---	0.291	---	---	---	0.194	"	---	---	"	---	---
	4500	0.238	8.47	---	---	"	---	---	---	0.329	---	---	---	0.238	"	---	---	"	---	---
10	0	0.248	0.69	---	0.1204	6.02	---	0.267	0.128	0.027	0.069	---	0.0322	0.030	0.300	---	---	11.11	---	---
	1000	0.271	2.77	---	"	"	---	0.291	0.224	0.108	0.277	---	0.0571	0.053	0.530	---	---	4.91	---	---
	2000	0.258	5.13	---	"	"	---	0.278	0.171	0.199	0.513	---	0.0451	0.040	0.400	---	---	2.01	---	---
	3000	0.207	6.91	---	"	"	---	0.222	0.047	0.269	0.691	---	0.0115	0.011	0.110	---	---	0.41	---	---
	4000	0.132	8.64	---	"	"	---	0.142	0.367	0.336	0.864	---	0.056	0.066	0.860	---	---	2.56	---	---
	4500	0.087	9.68	---	"	"	---	0.094	0.560	0.376	0.968	---	0.1410	0.131	1.310	---	---	3.49	---	---
15	0	0.558	1.96	0	0.1202	13.51	0	0.268	0.167	0.376	0.131	0	0.0422	0.086	1.320	0	1.32	16.36	0	16.36
	1000	0.568	4.15	---	"	"	---	0.273	0.186	0.161	0.277	---	0.0470	0.058	1.470	---	---	8.14	---	---
	2000	0.576	6.80	0.53	"	"	---	0.53	0.272	0.202	0.264	0.453	0.039	0.050	1.590	0.14	1.75	5.02	0.53	5.55
	3000	0.531	8.82	3.70	"	"	---	3.70	0.255	0.131	0.343	0.588	0.274	0.0293	0.061	0.915	1.27	2.15	1.67	3.70
	4000	0.467	10.20	7.20	"	"	---	7.20	0.224	0.006	0.396	0.680	0.533	0.0074	0.063	0.045	2.85	2.80	1.11	7.20
	4500	0.411	11.29	10.80	"	"	---	10.80	0.197	0.112	0.439	0.752	0.820	0.0283	0.059	0.885	4.74	3.65	3.02	10.80
20	0	0.385	3.86	-1.05	0.1208	24.17	0	0.766	0.170	0.501	0.193	0	0.0431	0.160	3.200	0	3.20	21.32	0	21.32
	1000	0.393	6.22	---	0.1203	24.05	---	0.268	0.179	0.242	0.371	---	0.0453	0.168	3.360	---	---	13.68	---	---
	2000	0.373	9.22	-0.25	"	"	---	0.79	0.262	0.159	0.358	0.451	0.053	0.039	1.468	0.28	3.24	8.27	0.79	9.06
	3000	0.398	11.52	3.55	"	"	---	4.60	0.253	0.121	0.448	0.576	0.191	0.035	0.113	2.260	2.06	4.32	5.04	4.60
	4000	0.892	12.50	6.55	"	"	---	7.60	0.241	0.011	0.502	0.645	0.316	0.0181	0.067	1.346	3.82	5.16	2.67	7.60
	4500	0.857	13.94	9.25	"	"	---	10.30	0.231	0.034	0.542	0.697	0.428	0.0066	0.032	0.640	5.58	6.22	1.18	10.30
25	0	1.497	6.34	-0.74	0.1209	37.78	0	0.257	0.164	0.245	0.254	0	0.0412	0.240	6.000	0	6.00	24.39	0	24.39
	1000	1.499	9.22	---	0.1202	37.51	---	0.259	0.166	0.358	0.369	---	0.0419	0.242	6.050	---	---	16.89	---	---
	2000	1.495	12.71	4.45	0.1200	37.50	1.20	0.258	0.163	0.475	0.468	0.032	0.0411	0.238	5.950	0.57	6.52	12.52	1.20	13.72
	3000	1.464	14.56	4.75	"	"	---	5.50	0.253	0.142	0.578	0.594	0.147	0.0357	0.207	5.180	3.18	8.36	8.96	5.50
	4000	1.449	16.73	8.05	0.1197	37.40	---	8.80	0.251	0.131	0.627	0.645	0.235	0.0333	0.192	4.800	5.52	10.32	7.66	8.80
	4500	1.415	17.16	11.35	"	"	---	12.10	0.245	0.108	0.668	0.686	0.324	0.0274	0.158	3.950	8.08	12.03	5.91	12.10

第 1 表



第 3 圖

風率に對して w_0 が大きい程 $\Delta p/q$ は小さくなる。これは導風路内の抵抗係数が風速により若干變化するため風速が大きくなれば抵抗係数が少くなるためである。従つて或レイノルズ數以上になり抵抗係数が風速により大して影響を受けなくなると、この w_0 による變化は更に小さくなると思はれる。抵抗係数や入口及び出口における損失係数等が風速に全然無關係であり、且つ出口に於て完全に大氣壓に歸るとすれば、後述する

如く $w_r/w_0 - \Delta p/q$ の曲線は w_0 には無關係に同一曲線上に重なるべきである。送風機を駆動しない時及び回転數が小さい時は Δp は負になつてゐるが、これは送風翅の所において損失があるためである。従つて送風翅による壓力上昇は次の如くなる。

今 $\Delta p_0 =$ 送風機を駆動しない時の送風翅前後の圧力差(圧力損失) kg/m^2

$q_{F_0} =$ 送風機を駆動しない時の送風翅を通る風の動圧 kg/m^2

とすれば、送風翅における損失係数 C_F は

$$C_F = \Delta p_0 / q_{F_0} \dots\dots\dots(1)$$

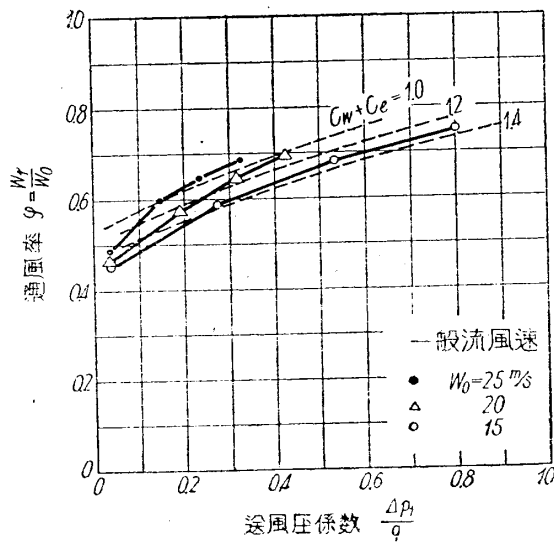
従つて送風機を駆動してゐる時送風翅によつて與へられる圧力上昇 Δp_1 は

$$\Delta p_1 = \Delta p + C_F \cdot q_F \dots\dots\dots(2)$$

となる。但し Δp は送風機を駆動してゐる時の送風翅の後方と前方の圧力差にして、 q_F はその時の動圧である。故に

$$\begin{aligned} \frac{\Delta p_1}{q} &= \frac{\Delta p}{q} + C_F \cdot \frac{q_F}{q} \\ &= \frac{\Delta p}{q} + C_F \left(\frac{w_r}{w_0} \right)^2 \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

となる。 $\frac{w_r}{w_0}$ と $\frac{\Delta p_1}{q}$ との関係を第 4 圖に示す。



第 4 圖

3.2 基本胴體の抵抗

基本胴體の抵抗とは導風路の入口及び出口を閉鎖した場合の抵抗で、冷却器を裝備しない時の胴體のみの抵抗である。 D_0 (kg) をその時の抵抗、 w_0 (m/s) を風洞風速、 S_0 (m^2) を胴體最大斷面積とし、抵抗係数 C_{x_0} を次のやうにとる。

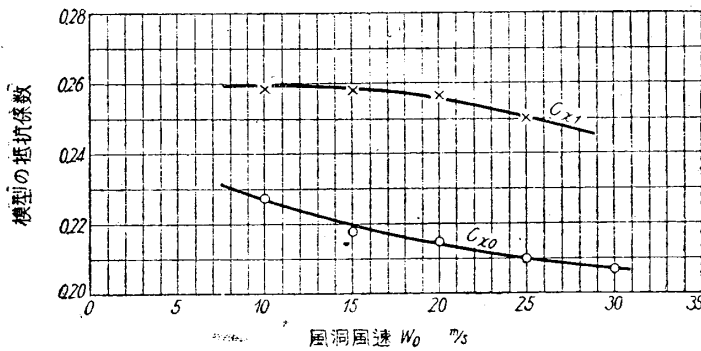
$$C_{x_0} = \frac{D_0}{\frac{1}{2} \rho_0 w_0^2 S_0} \dots\dots\dots (4)$$

C_{x_0} を各風速に對して描けば第 5 圖の如くなる。

3.3 送風機を駆動しない時の抵抗

送風機を駆動せず導風路内は自然通風させた場合の抵抗で、この時の抵抗を D_1 (kg) とし、抵抗係數 C_{x_1} を次のやうにとる。

$$C_{x_1} = \frac{D_1}{\frac{1}{2} \rho_0 w_0^2 S_0} \dots\dots\dots (5)$$



第 5 圖

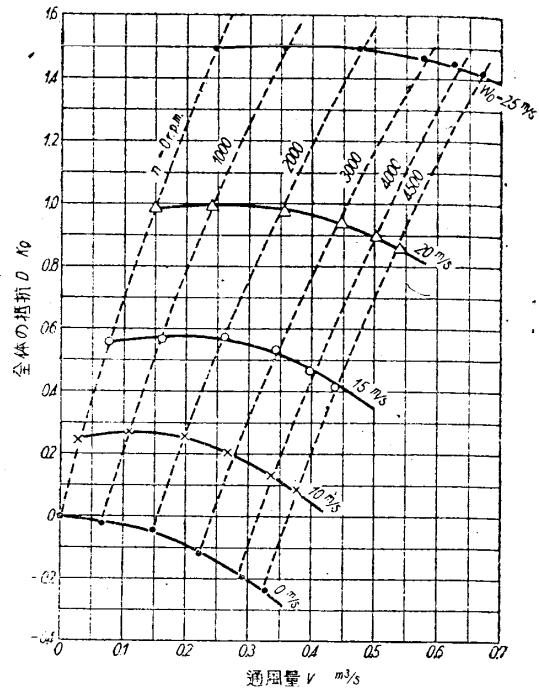
C_{x_1} を同じく第 5 圖に示す。同圖から分るやうに胴體に導風路を設け $C_w = 0.5$ なる抵抗係數の金網を入れると基本胴體の抵抗の約 $1/5$ の抵抗増加となる。

3.4 送風機を駆動した場合の抵抗

(a) 抵抗と通過風量との關係

第 6 圖は導風路内の空氣流量と胴體全體の抵抗との關係を示す。夫々風洞の風速及び送風機の回轉數が一定なる曲線である。この圖から分るやうに、風洞の風速を一定にして送風機の回轉數を上げて通風量を増大させる場合、初めの間は抵抗は却つて増大し或通風量に於て最大抵抗を示しそれより更に通風量を増大させて始めて抵抗は減少する。この理由として通風量の増加による抵抗の變化の原因に二つ考へられる。第一は通風量の増加により生ずる導風路内の抵抗損失及び入口や出口における衝突損失及び剝離損失等に基くものであつて、これらの諸損失は凡べて抵抗増加の原因となるから、これらの損失のため通風量の増大と共に抵抗が増加する。第二の原因は通風量の増大により生ずる出口風速の増大であつて、これは風洞風速

が一定なる場合は抵抗の減少の方向に作用し、従つて通風量の増大と共に抵抗は減少する。即ちこれは第一の原因による作用と反対方向の作用を呈する。実際の場合には以上の二原因が重なり合つて作用するので或場合には全体の抵抗が増大したり或場合には減少したりする。即ち通風量が小さい時抵抗が増大するのは第二の出口風速の増大による抵抗減少の効き方が小さく、第一の原因たる損失増大による抵抗増加の方が大きいために全体として抵抗が増大し、或一定の通風量以上になれば勿論損失による抵抗は通風量と共に増大するであらうが、これによる抵抗の増大よりも寧ろ第二の原因たる出口



第 6 圖

風速の増大による抵抗の減少の効き方が大きいために全体として抵抗が減少してくるといふ結果になる。故に若し導風路の損失やその他の損失が全然ないやうな場合には通風量の増大と共に抵抗は減少するのみであつて、導風路等の抵抗が大きければ大きい程抵抗を減少せしめるには通風量を大にしなければならない。

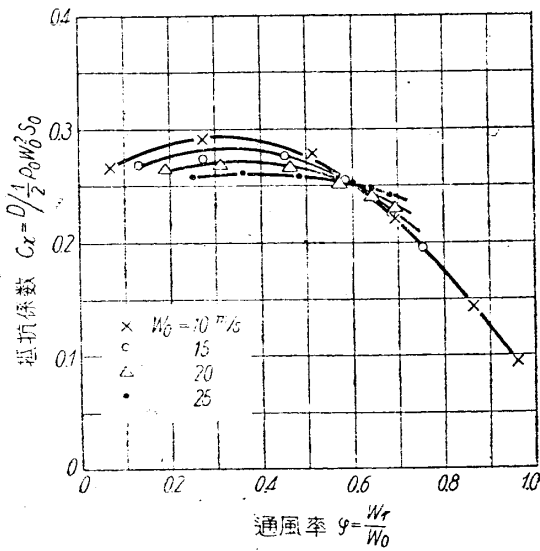
(b) 抵抗係数と通風率との關係

送風機を駆動してゐる時の抵抗を D (kg) とし、抵抗係数 C_x を次の如くとる。

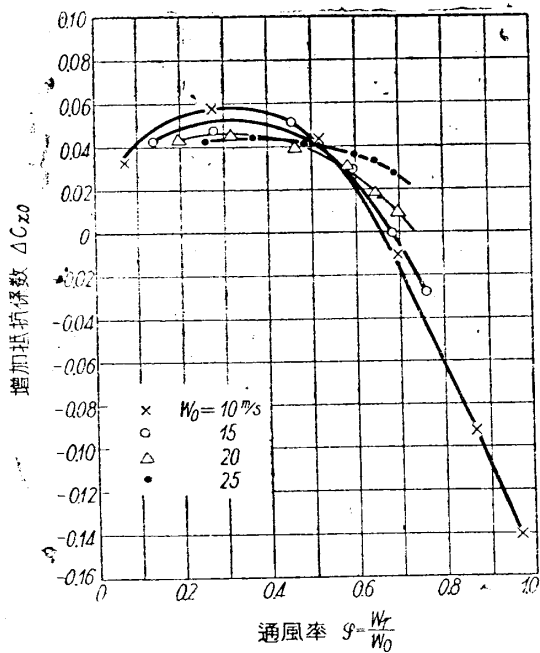
$$C_x = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho_0 w_0^2 S_0} \dots\dots\dots (6)$$

C_x と通風率 $\phi = w_r/w_0$ との關係を第 7 圖に示す。各部の抵抗係数が風速に全然無關係であり且つ導風路出口に於て完全に大氣壓になれば、後述する如く何れの風速に於ても各曲線は一致すべきであるが、風速により若干變化するのは以上の條件が満足されないためである。前節において述べた理由により同一風速にて通風率が大きくなれば抵抗係数 C_x は初めの間は若干増大し然る後減少してくる。

送風機冷却においては基本の抵抗に対する抵抗の増加或は減少の方が重要であつて、今この變化を見るために送風機を駆動してゐる場合の抵抗係数と基本抵抗係数



第 7 圖



第 8 圖

との差をとつてみる。

$$\Delta C_{x_0} = C_x - C_{x_0} \dots\dots(7)$$

ΔC_{x_0} と ϕ との関係を第 8 圖に示す。同圖から分るやうに ϕ が小さい時は w_0 が小さい場合程 ΔC_{x_0} は大きくなり、 ϕ が或値より大きくなると反対に w_0 が大きい場合程 ΔC_{x_0} が大きい。この理由については後に理論計算との比較に於て述べる。

(c) 抵抗と送風機による壓力上昇との關係

増加抵抗係数 ΔC_{x_0} と送風機により與へられた壓力上昇 $\Delta p_1/q$ との關係を第 9 圖に示す。 ΔC_{x_0} と $\Delta p_1/q$ との關係は理論的には後述せる (24') 式により與へられるが、同式から分るやうに導風路内の損失係數及び出口絞り比のみの函數であつて、これらが等しい時は皆相重なるべきものであつて、第 9 圖に於ては大體に重つてゐるが若干相違するのは以上の條件が完全には満足されないからである。

3.5 抵抗馬力、送風馬力及び全消費馬力

(a) 抵抗馬力

この模型實驗に於て送風機驅動の場合の抵抗馬力として如何

なる部分をとるべきかが問題になる。勿論模型全體としての抵抗馬力も考へられるが、實際に送風機冷却を行ふ場合、或與へられた胴體に如何なる状態に冷却器を裝

備して送風機冷却させた方が有利であるかが重要である。更に又送風機駆動による影響を明瞭ならしむるため抵抗馬力としては、導風路の入口及び出口を閉鎖した基本胴體の抵抗馬力に対する変化のみを考へることとする。然る時はこの時の増加抵抗馬力 ΔP_0 は

$$\Delta P_0 = \Delta D_0 \times w_0 \text{ (kg} \cdot \text{m/s)} \dots\dots\dots(8)$$

となる。増加抵抗馬力 ΔP_0 を各通風率 $\varphi = \frac{w_r}{w_0}$ に對して描けば第10圖のやうになる。

(b) 送風馬力

送風機により與へられた壓力上昇を $\Delta p_1 \text{ kg/m}^2$ とし、通風量を $V \text{ m}^3/\text{s}$ とすれば理論送風馬力 P_f は

$$P_f = \Delta p_1 \times V \text{ (kg} \cdot \text{m/s)} \dots\dots\dots(9)$$

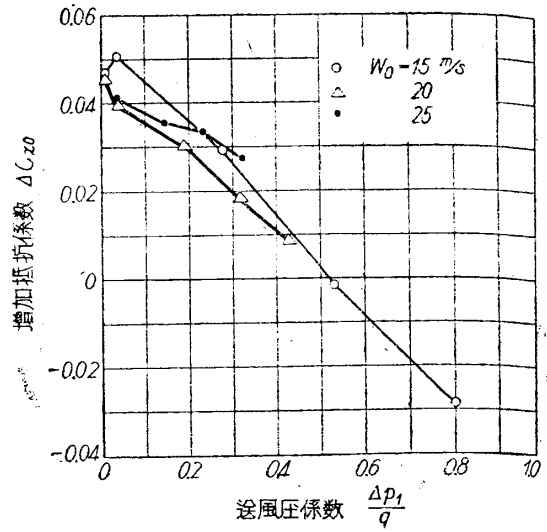
となる。この P_f を各 φ に對して描けば第11圖のやうになる。

(c) 全消費馬力

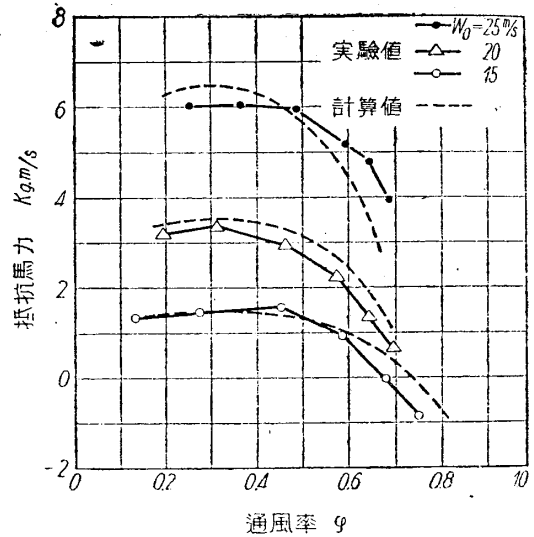
送風機冷却の時の全消費馬力は抵抗馬力と送風馬力の和になる。

$$P = \Delta P_0 + P_f \dots\dots\dots(10)$$

この P を各 φ に對して描けば第12圖のやうになる。



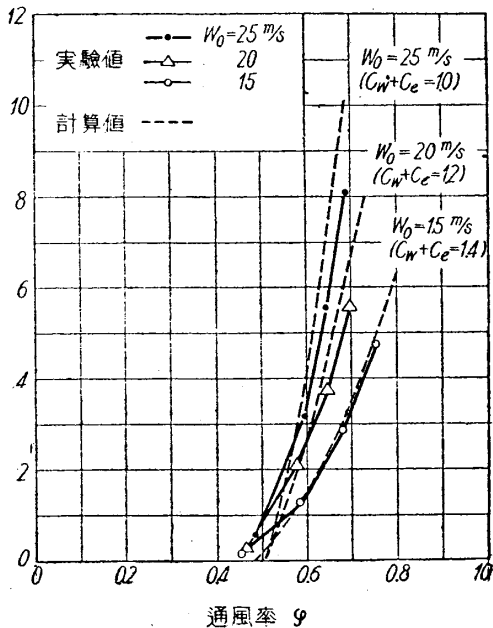
第 9 圖



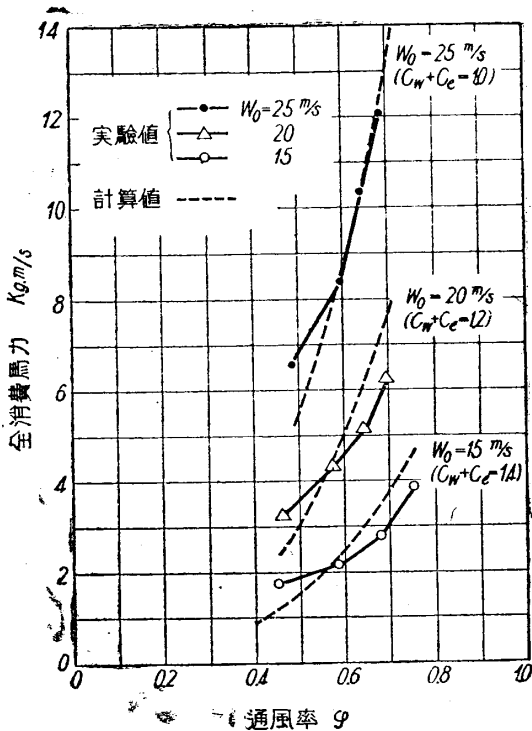
第 10 圖

4. 理論計算との比較

4.1 理論計算式



第 11 圖



第 12 圖

送風機冷却の理論計算方法に關しては、既に“送風機冷却の理論的考案”⁽¹⁾に於て大略を述べたが、この方法を本実験に適用し、実験から得られた結果と比較してみる。

(a) 通風率

記號は凡べて前掲論文の記號を用ひる。損失の式、ベルヌーイの式及び連続の式から、次の三式を得る。

$$h = h_a + h_r - h_f \dots\dots\dots(11)$$

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho_0 w_0^2 = p_0 + \frac{1}{2} \rho_4 w_4^2 + h \dots\dots\dots(12)$$

$$\rho_0 S_r w_r = \rho_4 S_4 w_4 \dots\dots\dots(13)$$

而して $q = \frac{1}{2} \rho_0 w_0^2$ とすれば

$$\frac{h}{q} = C_a + C_r - C_f \dots\dots\dots(14)$$

(1) 前掲

但し

$$\left. \begin{aligned} C_a &= \frac{h_a}{q}, \\ C_r &= \frac{h_r}{q}, \\ C_f &= \frac{h_f}{q}, \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(15)$$

冷却器の抵抗係数を C_w とすれば

$$C_r = \varphi^2 \left(C_w + 1 - \frac{\rho_0}{\rho_4} \right) \dots\dots\dots(16)$$

但し φ は通風率にして, $\varphi = \frac{w_r}{w_0}$ である.

一方導風路内の損失は次のやうに表はされる.

$$h_a = C_f \frac{\rho_0}{2} w_r^2 \dots\dots\dots(17)$$

従つて

$$C_a = \varphi^2 \cdot C_f \dots\dots\dots(18)$$

以上の諸式から通風率 φ は次のやうに表はされる.

$$\varphi = \sqrt{\frac{1 + C_f}{C_w + C_f + 1 + \frac{\rho_0}{\rho_4} (b_4^2 - 1)}} \dots\dots\dots(19)$$

茲に $b_4 = \frac{S_r}{S_4} \dots\dots\dots(20)$

密度の變化を無視し $\rho_0 = \rho_4$ とすれば,

$$\varphi = \sqrt{\frac{1 + C_f}{C_w + C_f + b_4^2}} \dots\dots\dots(19')$$

となる.

(b) 冷却系の抵抗係數

冷却系の抵抗係數を C_x とす. 但し C_x は次のやうに定義する.

$$C_x = \frac{D}{\frac{\rho_0}{2} w_0^2 S_r} \dots\dots\dots(21)$$

而して抵抗 D は次の如くなる.

$$D = \rho_0 w_r S_r (w_0 - w_4)$$

$$= \frac{1}{2} \rho_0 w_0^2 S_r \cdot 2 \frac{w_r}{w_0} \left(1 - \frac{w_r}{w_0} \cdot \frac{\rho_0}{\rho_4} \cdot \frac{S_r}{S_4} \right) \dots (22)$$

故に抵抗係数 C_x は

$$C_x = 2\varphi \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_4} \cdot b_4 \cdot \varphi \right) \dots (23)$$

或は

$$C_x = 2\sqrt{\frac{1+C_f}{C_w+C_i+1+\frac{\rho_0}{\rho_4}(b_4^2-1)}} \left[1 - \frac{\rho_0}{\rho_4} b_4 \sqrt{\frac{1+C_f}{C_w+C_i+1+\frac{\rho_0}{\rho_4}(b_4^2-1)}} \right] (24)$$

$\rho_0 = \rho_4$ とすれば

$$C_x = 2\varphi(1 - b_4\varphi) \dots (23)'$$

或は

$$C_x = 2\sqrt{\frac{1+C_f}{C_w+C_i+b_4^2}} \left[1 - b_4 \sqrt{\frac{1+C_f}{C_w+C_i+b_4^2}} \right] \dots (24)'$$

(c) 抵抗馬力

抵抗馬力 P_R は

$$\begin{aligned} P_R &= \frac{D \times w_0}{75 \eta_p} \\ &= \frac{\rho_0 w_r S_r w_0^2}{75 \eta_p} \left[1 - \frac{\rho_0}{\rho_4} b_4 \varphi \right] \\ &= \frac{w_0 q S_r}{75 \eta_p} \cdot 2\varphi \left[1 - \frac{\rho_0}{\rho_4} b_4 \varphi \right] \dots (25) \end{aligned}$$

即ち

$$P_R = \frac{w_0 q S_r}{75 \eta_p} \cdot C_x \dots (25)'$$

或は

$$P_R = \frac{w_0 q S_r}{75 \eta_p} \cdot 2\sqrt{\frac{1+C_f}{C_w+C_i+1+\frac{\rho_0}{\rho_4}(b_4^2-1)}} \left[1 - \frac{\rho_0}{\rho_4} b_4 \sqrt{\frac{1+C_f}{C_w+C_i+1+\frac{\rho_0}{\rho_4}(b_4^2-1)}} \right] \dots (25)''$$

(d) 送風馬力

送風機駆動に要する送風馬力 P_f は

$$\begin{aligned} P_f &= \frac{V \cdot h_f}{75 \eta_f} \\ &= \frac{w_0 S q \varphi}{75 \eta_p} \cdot \frac{\eta_0}{\eta_f} \cdot C_f \end{aligned}$$

$$= \frac{w_0 q S_r}{75 \eta_p} \cdot \frac{\eta_p}{\eta_f} \varphi \left[\left\{ C_w + C_l + 1 + \frac{\rho_0}{\rho_4} (b_4^2 - 1) \right\} \varphi^2 - 1 \right] \dots\dots\dots (26)$$

或は $P_f = \frac{w_0 q S_r}{75 \eta_p} \cdot \frac{\eta_p}{\eta_f} C_f \sqrt{\frac{1 + C_f}{C_w + C_l + 1 + \frac{\rho_0}{\rho_4} (b_4^2 - 1)}} \dots\dots\dots (26')$

(e) 全消費馬力

全消費馬力 P は抵抗馬力と送風馬力の和である。

$$P = P_R + P_f$$

$$= \frac{w_0 q S_r}{75 \eta_p} \varphi \left[2 - 2b_4 \frac{\rho_0}{\rho_4} \varphi + \frac{\eta_p}{\eta_f} \left[\left\{ C_w + C_l + 1 + \frac{\rho_0}{\rho_4} (b_4^2 - 1) \right\} \varphi^2 - 1 \right] \right]$$

$$= \frac{w_0 q S_r}{75 \eta_p} \varphi \left[2 - \frac{\eta_p}{\eta_f} - 2b_4 \frac{\rho_0}{\rho_4} \varphi + \frac{\eta_p}{\eta_f} \left\{ C_w + C_l + 1 + \frac{\rho_0}{\rho_4} (b_4^2 - 1) \right\} \varphi^2 \right] \dots\dots\dots (27)$$

或は

$$P = \frac{w_0 q S_r}{75 \eta_p} \sqrt{\frac{1 + C_f}{C_w + C_l + 1 + \frac{\rho_0}{\rho_4} (b_4^2 - 1)}} \left[2 + \frac{\eta_p}{\eta_f} C_f - 2 \frac{\rho_0}{\rho_4} b_4 \sqrt{\frac{1 + C_f}{C_w + C_l + 1 + \frac{\rho_0}{\rho_4} (b_4^2 - 1)}} \right] \dots\dots\dots (27')$$

4.2 実験値と計算値との比較

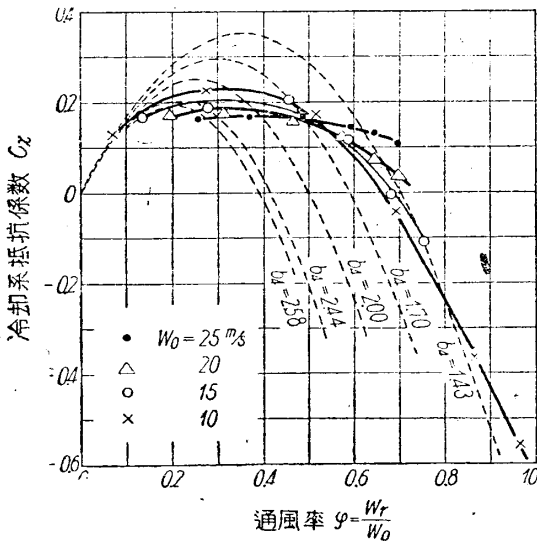
実験に使用したる如き模型では導風路内を通過した風の影響を見ることは出来ない。従つて以上の諸計算がそのまま完全に適用出来ないことは當然であるが、

送風機を駆動してゐる時の抵抗と基本胴體の抵抗との差を送風機駆動による抵抗として如何なる程度上式が適用されるかを見てみよう。

(a) 抵抗係數と通風率

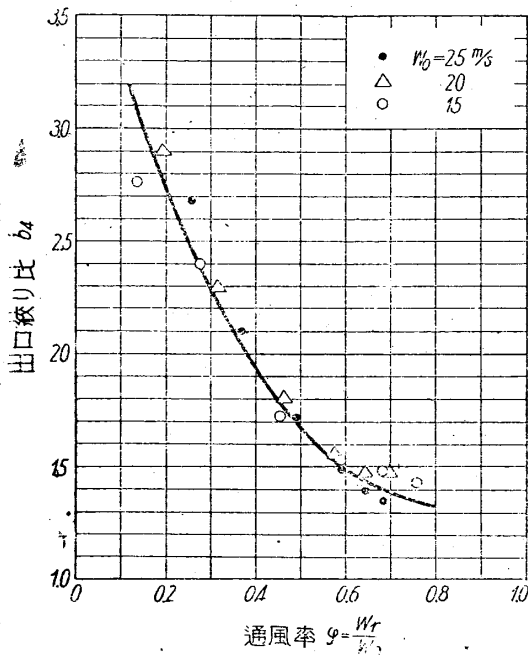
冷却系の抵抗係數と通風率との間には (23) 或は (24) 式が成立する。

今密度の變化を無視すれば (23') 式を用ふることが出来る。実験から冷却系の抵抗係數と通風率との關係を求めると第 13 圖のやうになる。(23') 式から分る如く導風路の出口に於て完全に大氣壓に歸るか、或は大氣壓に歸る部分の流れの面積が風速により變化しないならば、何れの



第 13 圖

w_0 に於ても常に同一曲線上に重なり、(23') に於て b_4 を適當に採ることにより完全に表はすことが出来る筈であるが、実験値から見れば送風機を駆動しない場合は殆んど出口に於て大気壓になつてゐることが分るが、送風機を駆動し送風量を増すに従ひ b_4 は小さくなり大気壓に歸る部分の流れの面積が大きくなること分る。この原因は送風機を駆動して送風量を増すに従ひ出口の所の壓力が上昇し外に出て大気壓迄更に膨脹するため、その部分の流れの面積は出口面積より更に大きくなり、その結果出口における外の流れとの干渉抵抗が大きくなり、そのため内部の流れ以外の抵抗が大きくなつたためだと考へられる。逆に実験結果から、抵抗増加を凡べて内部流れによるものとして(23') 式から b_4 を求めると第 14 圖のやうになる。



第 14 圖

なり、実験値と可成りよく一致する。 w_0 が小さくなるに従ひ $(C_w + C_i)$ の値が若干増加するのは當然である。又 w_0 が一定なる場合同一 φ に於て φ が大きい所では計算と実験とはよく一致するが、 φ が小さくなるに従ひ実験値の C_f が計算値よりも大きくなるのは、 φ が小さくなり風速が小さくなるため $(C_w + C_i)$ を一定とした場合よりも実際の場合には若干抵抗係数が大きくなつてゐるためと思はれる。従つて風速により抵抗係数が大して變化しなくなるとこの差違は當然小さくなつてくる。

(c) 抵抗馬力

この圖から分るやうに同一通風率に對しては w_0 の如何に拘らず b_4 は大體一定になるやうである。尙この模型の冷却器部の斷面積と導風路出口部の斷面積との比は 2.58 である。

(b) 送風機による壓力上昇と通風率との關係

送風機による壓力上昇と通風率との間には(19)或は(19') 式が成立するが、実験から $C_f = \frac{\Delta p_1}{q}$ と $\varphi = \frac{w_r}{w_0}$ との關係を求めると第 4 圖の如くなる。先きに(23') 式から求めた b_4 を用ひ、 $w_0 = 25 \text{ m/s}$ の時 $C_w + C_i = 1.0$ 、 $w_0 = 20 \text{ m/s}$ の時 $C_w + C_i = 1.2$ 、の時 $w_0 = 15 \text{ m/s}$ の時 $C_w + C_i = 1.4$ として(19') 式から φ と C_f との關係を求めると第 4 圖の點線の如く

抵抗馬力は (25), (25') 及び (25'') により表はされる。実験から抵抗馬力と通風率 φ との関係を求めると第 10 圖のやうになる。一方 (25) 式に於て, $\rho_0 \doteq \rho_4$, $\eta_p = 1$ とし先きに求めた b_4 を用ひて計算値を求めると同圖の點線のやうになり大體よく一致する。

(d) 送風馬力

送風馬力は (26) 及び (26') により與へられる。実験から求めた送風馬力と通風率との關係を示すと第 11 圖のやうになる。送風機の回轉數が低い場合は送風機による壓力上昇は極く僅かで測定装置の誤差の範圍に入り測定することが出來ず、従つて低回轉數の場合は送風馬力を求めることが出來なかつた。一方 (26) 式に於て実験から求めた b_4 を用ひ, $w_0 = 25 \text{ m/s}$ の時 $C_w + C_l = 1.0$, $w_0 = 20 \text{ m/s}$ の時 $C_w + C_l = 1.2$, $w_0 = 15 \text{ m/s}$ の時 $C_w + C_l = 1.4$ とし計算すると同圖の點線のやうになる。但し $\rho_0 \doteq \rho_4$, $\eta_p = \eta_f = 1$ とおいてある。

(e) 全消費馬力

全消費馬力は抵抗馬力と送風馬力の和にして第 12 圖に示す。計算から求めた抵抗馬力と計算から求めた送風馬力の和即ち計算から求めた全消費馬力を點線にて示す。同一 w_0 に於て φ が大きい時は計算による全消費馬力が実験値よりも大きく、逆に φ が小さい時は実験値が計算値よりも大きくなるが、これは w_r が變化し、その結果導風路等の抵抗係數が變化するため φ が大きく w_r が大きい時は實際の抵抗係數は計算に用ひた値よりも小さく、 φ が小さく w_r が小さい時は反對に實際の抵抗係數が計算に用ひた値よりも大きくなつてゐるためである。然し大體の傾向は兩者は可成りよく一致してゐる。

5. 放熱性能の推定

以上述べたことから理論計算式において、実験結果より b_4 を決定し $(C_w + C_l)$ の値を適當に採用することにより計算値と実験値とが可成りよく一致することが分つた。本実験では冷却器の代りに金網を用ひてゐるが、實際に冷却器を裝備した場合如何なる性能となるか、実験結果を用ひ計算式から理論的に求めてみる。

5.1 推定法

実験結果から明らかなる如く通風率が一定なれば w_0 の如何に拘らず b_4 が決定される。従つて他の抵抗係數の冷却器を裝備した場合通風率が一定なれば常に b_4 は一定であると考へて差支へない。次に w_0 が一定なる時は通風率が或範圍變化しても $(C_w + C_l)$ の値は大體に於て變らないものとしてよい。本実験に使用した金網の抵抗係數 C_w が分つてゐるから、実験値から w_0 の各の値に對して C_l が決定

される。この C_i の値は放熱してゐる場合には勿論若干違つてくるものと思はれるが今この変化を無視し、 w_0 が一定なる時は C_i は放熱量の如何に拘らず一定であると假定する。

以上のことから (19) 式を用ひ、各種の冷却器を用ひた場合の φ の値に對して送風係數 C_f が決定される。但し ρ_0/ρ_4 の値は次の式から計算する。

$$\frac{\rho_0}{\rho_4} = 1 + \frac{\theta \cdot \eta_{th}}{T_2} + C_w \frac{\frac{1}{2} \rho_2 w_2^2}{p_2} \dots\dots\dots (28)$$

茲に於て

η_{th} = 冷却器の溫度上昇率

C_w = 冷却器の抵抗係數

θ = 冷却空氣と冷却器との平均溫度差

p_2 = 冷却器直前の冷却空氣の壓力

w_2 = 冷却器直前の冷却空氣の速度

ρ_2 = 冷却器直前の冷却空氣の密度

T_2 = 冷却器直前の冷却空氣の溫度

冷却器の放置量 Q (kcal/s) は

$$Q = \varphi w_0 S_r \rho g C_p \theta \eta_{th} \dots\dots\dots (29)$$

で表はされる。但し C_p は空氣の定壓比熱である。この式を用ひ各の φ の値に對して放熱量 Q が求められる。

抵抗馬力 P_R は (25) 式にて與へられ、同式から φ の各の値に對して實驗から得た b_4 を用ひ抵抗馬力が決定される。

送風馬力 P_f は (26) 式に於て C_i は分り、 φ の各の値に對して b_4 が分つてゐるから冷却器の C_w が分ることにより同式から各の φ の値に對して送風馬力が決定される。

全消費馬力は抵抗馬力と送風馬力の和として求められる。

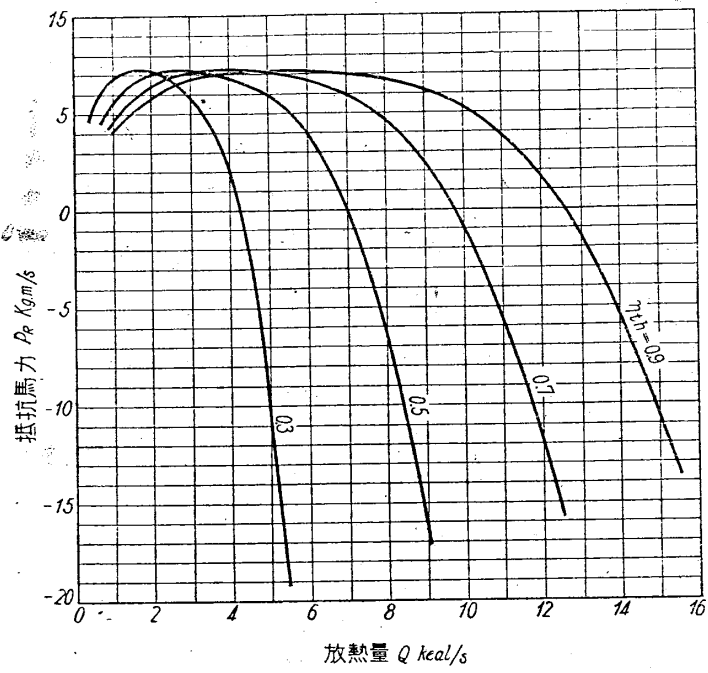
以上の計算式により各放熱量に對し抵抗馬力、送風馬力及び全消費馬力が決定される。

5.2 計算例

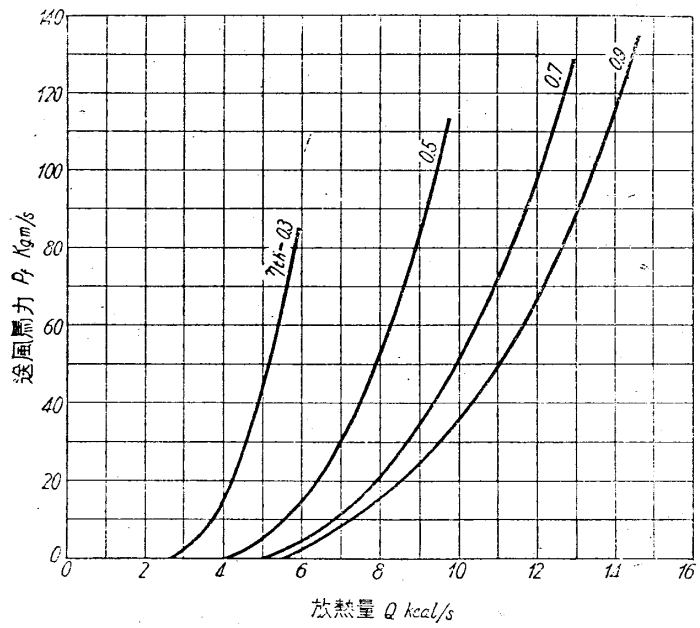
以上の方法により $w_0 = 25$ m/s なる時の放熱量、抵抗馬力、送風馬力及び全消費馬力を求めると第 15 圖、第 16 圖及び第 17 圖の如くなる。

但し冷却器の抵抗係數 C_w と溫度上昇率との間の關係式として次式を用ひた。

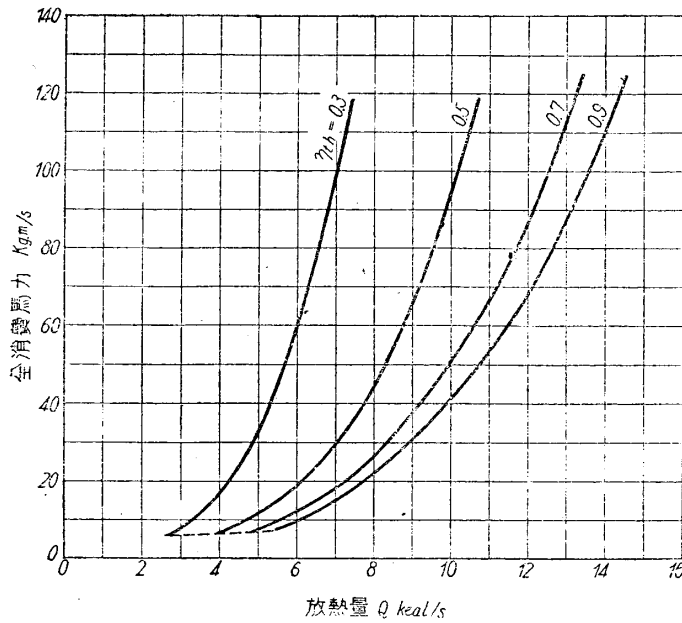
(1) 西脇, 水町: 送風機冷却の理論的考察 (航研報告, 昭和 18 年 7 月)。



第 15 圖



第 16 圖



第 17 圖

$$C_w = \frac{1}{f^2} \left(0.13 + 2.04 \log_e \frac{1}{1 - \eta_h} \right)^{(1)} \dots \dots (30)$$

第 15 圖から分ることは送風圧が小さい場合或は放熱量が小さい場合は温度上昇率は高い程抵抗馬力が小さい。送風圧が 0 なる場合は自然冷却の場合であるが、既に今迄に分つてゐる如くかかる場合は出来るだけ温度上昇率の高い冷却器を用ふべきである。然し送風圧を増し放熱量を大きくする時は反對に温度上昇率が小さい冷却器程抵抗馬力は減少する。

送風馬力は第 16 圖から分るやうに温度上昇率が高い程減少する。

結局に於て全消費馬力は第 17 圖に示す如く如何なる放熱量に於ても温度上昇率が高い程小さくなる。従つて冷却器の送風機冷却に於ては出来るだけ温度上昇率の高い冷却器を用ふべきであることが分る。然しこゝで考慮しなければならないことは冷却器の重量であつて温度上昇率を高くするに従ひ冷却器の重量は大きくなり、重量増加に基く抵抗馬力が増加するから、自ら冷却器の温度上昇率の増大にも限度がある。

(1) 西脇, 川口: 航空機用冷却器の参考データ (航研彙報, 昭和 17 年 7 月).
西脇, 冷却器の装備法第 3 報 (航研報告, 昭和 17 年 9 月)

6. 結 語

以上述べた実験結果並びに考察から次の如く云へると思ふ。

(1) 導風路等の抵抗係数は風速が變れば勿論若干變化するが、或範圍内例へば外の流れが一定で送風機の駆動變化により通風量を變へる如き場合には大體に於て一定であるとして計算することが出来る。

(2) 導風路より出た冷却空気が送風機を駆動しない自然通風の場合には導風路の出口に於て大體に於て大氣壓に復歸するが、送風機を駆動し送風量を増加させた場合は最早出口に於て直ちに大氣壓に復歸するとは考へられない。導風路を出た後初めて大氣壓に下る。この大氣壓に復歸すると考へられる部分の流れの斷面積と冷却器部の斷面積との比 b_4 は通風率 w_0 へ同一ならば如何なる w_0 に於ても餘り變化せず一定として計算出来る。

(3) 導風路等の抵抗係数や b_4 を適當に取ることにより理論計算と実験値とは可成りよく一致し、理論計算により計算して大して誤差は生じない。

(4) 既に分つてゐることではあるが送風機を駆動せず自然冷却の場合は温度上昇率の高い冷却器が適してゐる。然し送風機を駆動しそれにより送風量を増し放熱量を増加させる場合には、抵抗馬力は温度上昇率の低い方が同一放熱量に對して却つて小さくなる。

(5) 送風馬力は、既に理論的考察においても述べた如く、同一放熱量に對し温度上昇率が高い程少くて済み、全消費馬力を考へる時は送風機冷却に於ては温度上昇率の高い冷却器を用ふる方が得策である。

(6) 実験方法に於て注意した如く、送風機冷却を行ふに際しては、送風機の効率を下げないやうに空気取入口、導風路等の形狀を撰擇することは特に肝要である。

終りに臨み本実験に使用した模型を製作された川崎航空機に對し竝に送風機駆動用電動機の電源装置を借用させて戴いたプロペラ部に對し深く感謝の意を表す。