

ISSN 0452-2982
UDC 629.7.014.16
629.7.025.35

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-482

第1回USB方式動力装備試験における
ウイング及びフラップ表面温度測定結果

能瀬弘幸・臼井弘・吉田豊明

1983年2月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

第1回USB方式動力装備試験における ウイング及びフラップ表面温度測定結果*

能 瀬 弘 幸** 白 井 弘** 吉 田 豊 明**

概 要

短距離離着陸機 (STOL: Short Take-Off and Landing) 用に開発が進められている USB (Upper Surface Blowing) 方式の高揚力装置についての動力 (エンジン) 装備試験に於て、ウイングおよびフラップ (実機大模型) 壁面の温度を、主にサーモカメラを用いて測定した。

主 な 記 号

- N_1 : エンジン低圧系回転数 (rpm)
 N_2 : エンジン高圧系 (コア) 回転数 (rpm)
 T_7 : エンジンコア排気温度 (°C)
 T_8 : エンジンファン出口空気温度 (°C)
 T_w : 壁面温度 (°C)
 $T_{w,max}$: 壁面最高温度 (°C)
 $\theta_{w,max}$: 無次元壁面最高温度 ($= (T_{w,max} - T_8) / (T_7 - T_8)$)

1. ま え が き

エンジンの排気を主翼上面に沿わせて高揚力を得る、いわゆる USB (Upper Surface Blowing) 方式の航空機の設計に於て、最も基本的で重要な問題の一つは、エンジン排気に曝される翼部の材料温度である。これは装着するエンジンの特性のみならず、エンジンの排気ノズル、ウイング、フラップ、剝離防止装置等の機構や形状、ならびにエンジン排気のフローパターンと翼面上に形成される温度境界層など多くの因子の影響を複雑に受けるため、綿密な実験を十分に行う必要がある。

本報告は、ウイング、フラップ、高揚力装置から成る模型に実機エンジンと排気ノズルを装着して野外に於て行った“第1回USB方式動力装備試験”の機会を得て、ウイング、フラップ等のエンジン排

気に曝される部分の表面温度を、主にサーモカメラを用いて計測した結果について述べる。なお上記試験は、機装時のエンジン性能の確認、高揚力装置の機能の確認および騒音測定等を主な目的として行なわれたもので、温度測定を主眼としたものではない。このため、試験ウイング、フラップ模型は、表面を除く部分の構造や、材料の熱物性値 (熱伝導率、比熱等)、表面状態 (表面粗さ、放射率等) など、伝熱試験模型として必要な実機との相似条件を厳密には満たしていない。

2. 試験装置および計測装置の概要

試験は、1979年7月、当所角田支所の屋外エンジン運転場に於て行なわれた。図1は、試験装置の主要部写真である。実機エンジン (FJR710/20) を装着したウイング模型は、エンジン排気と地面との

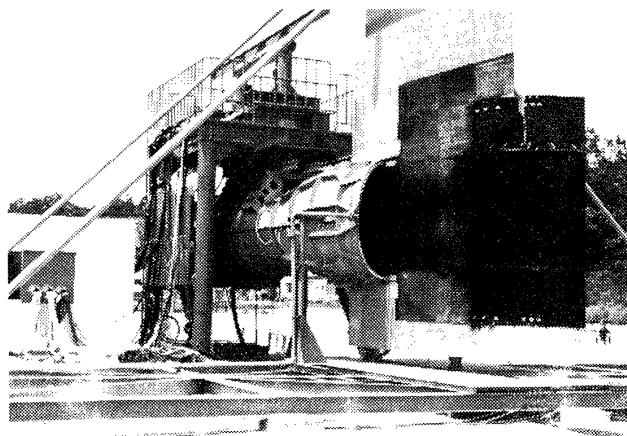


図1 試験装置概観
(後視, サイドフェンス付)
(ウイング・フラップ模型)

* 昭和57年11月16日受付

** 原動機部

干渉を小さくするために、地面に対して垂直に支持されている。エンジンの中心線は地上 2.5m である。模型部のクローズアップ写真を図 2 に示す。

ウイング及びフラップ表面の温度測定の方法とその目的は下記の通りである。

- (イ) フラッシュマウント型熱電対温度計（測定面上の代表点における温度測定）
- (ロ) 不可逆性測温テープ（エンジンの始動から停止までの運転サイクル中の最高温度測定）
- (ハ) 赤外線温度画像装置（測定面上の二次元温度分布測定）

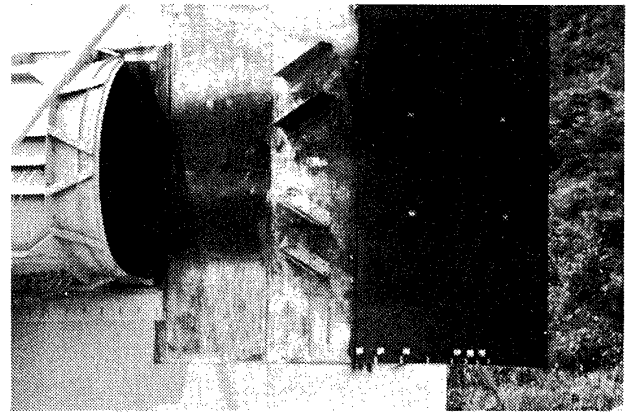


図 2 ウイング・フラップ模型概観
(ボルテックスジェネレータ付)

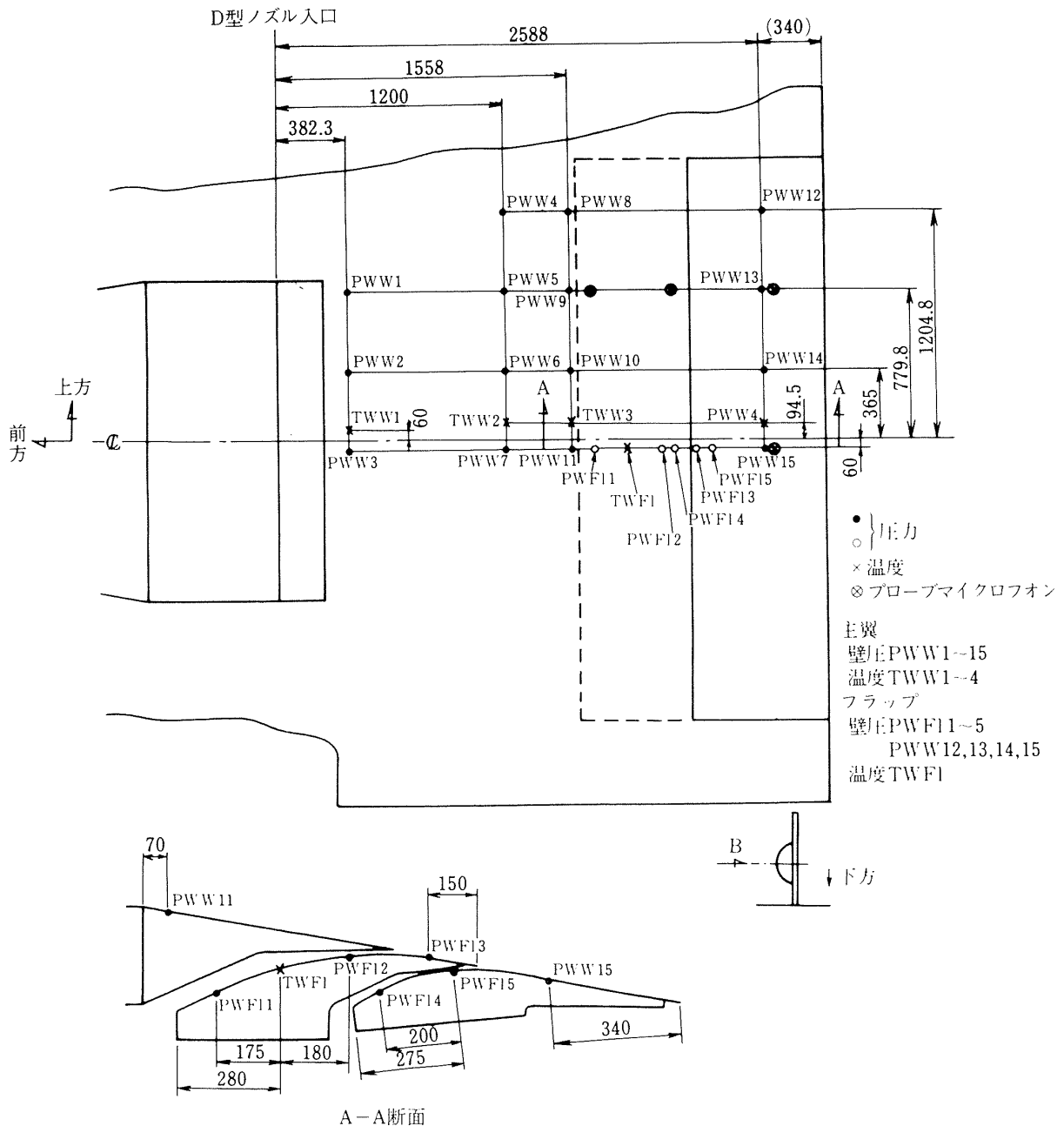


図 3 ウイング・フラップ部温度・圧力・音圧測定位置
(フラップを上げた状態)(長さ単位: mm)

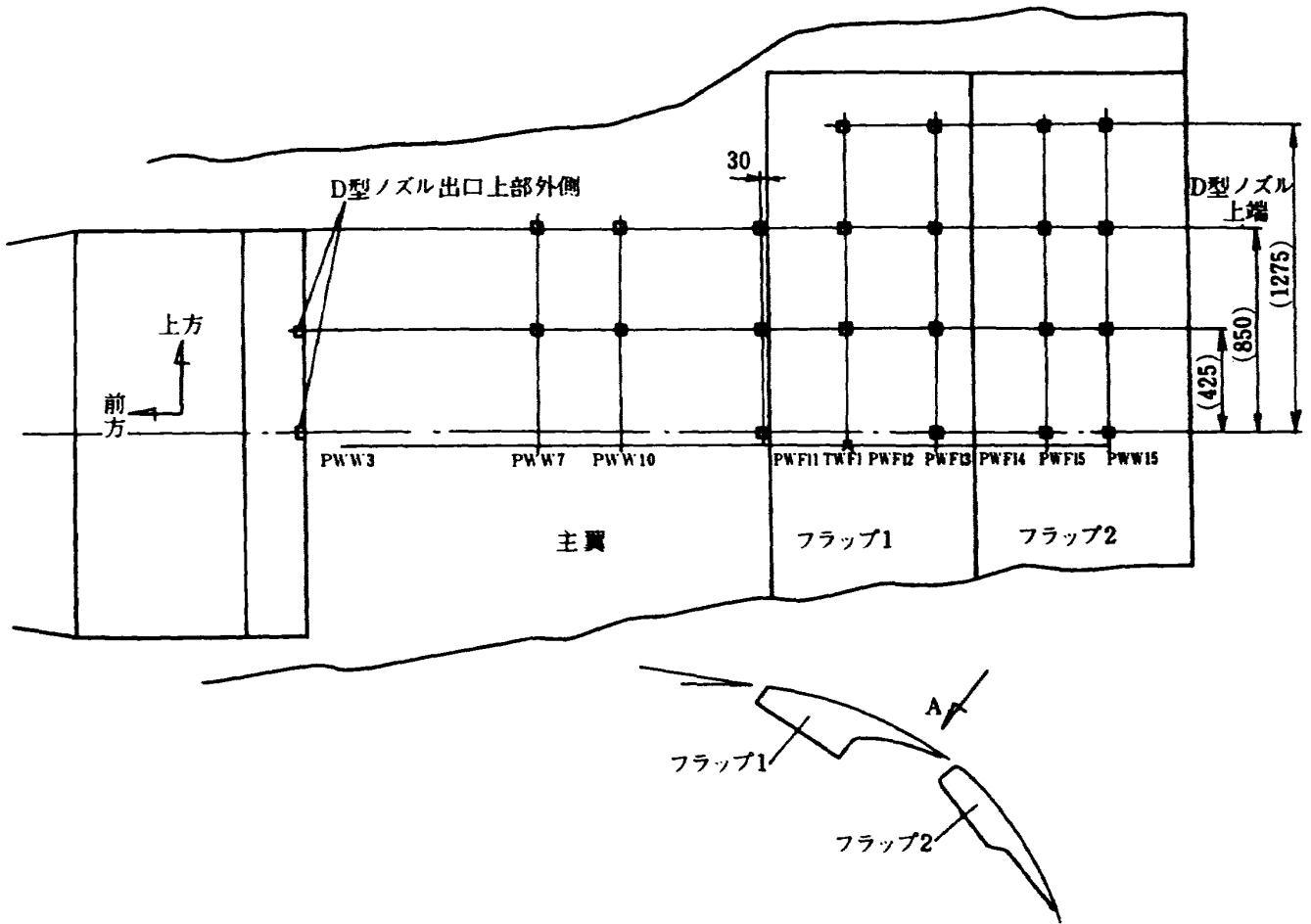


図4 ウイング・フラップ部測温テープ貼付位置
(フラップを下げた状態)

図3、図4にウイング、フラップ部における温度・圧力・音圧測定位置と測温テープの貼付位置をそれぞれ示す。使用した計測装置の概要と測定方法は、以下の通りである。

2-1 熱電対

シース外径 1.2mmφのクロメル-アルメル熱電対を、測定部にフラッシュマウントして計測した。なお壁面近傍の気流温度を測定するため壁面から垂直に先端部を突出して取付けられた熱電対もある。

2-2 測温テープ

不可逆性感温塗料がアルミニウム薄板ベースに塗付された測温テープを、測温部表面に接着材によって張り付けた。仕様を表1に示す。

表1 測温テープ仕様

名称	Temp-Plate(Wahl社製 P/N101-8)
精度	± 1 %
反応速度	1 秒以内
指示温度	43-48-54-60-65-71-76-82℃ 87-93-98-104-110-115-121-126℃ 132-137-143-148-154-160-165- 171℃ 176-187-198-210-223-232-240- 260℃
寸法	約 2.5mm×5mm (感温塗料部 1点 あたり)

2-3 赤外線温度画像装置

主な仕様を表2に示す。

表 2 赤外線温度画像装置仕様

名 称	インフラアイ 150 (改) (富士通株式会社製)
測定温度範囲*	0°C ~ 150°C
角度分解能	2mm rad
フレームタイム	4 秒
焦点範囲	20 cm ~ ∞
検 知 器	水銀カドミウムテルル HgCdTe (Liq N ₂ 冷却)
走査線数	220 本
水平方向画素数	220/ライン
表示方式	10 階調擬似カラー方式, 他
感知波長帯**	8.4μm ~ 12.4μm

注) * 標準仕様 (0°C ~ 50°C) のものを, 光路アパーチャーサイズを変更して使用。

** バンドパスフィルタ使用。

画像の収録には, ポラロイドカメラ (白黒およびカラー), 35mm カメラ (カラー) および VTR (白黒) を用いた。なお上記赤外線温度画像装置は, 1 フレーム分のデジタルメモリを内蔵している。

測定に先だって, 基準黒体炉を用いて赤外線温度画像装置の出力校正を測定温度範囲に於て行ない, 測定中は随時約 150°C に設定した黒体炉による校正を行った。表 3 に校正用基準黒体炉の主な仕様を示す。

表 3 基準黒体炉仕様

形 式	Advanced Kinetic 社製, モデル BB 1500
温度範囲	室温 ~ 1,200°C
アパーチャーサイズ	0.5 インチ
全放射率	0.998 以上

被測定部の主要部には, 放射率 0.99 以上の黒色塗料 Nextel Velvet Coating (3M 社製) をスプレーコーティングした。

図 5 に計測装置配置を示す。なお図中の赤外線カメラ (Barnes 社製 Optitherm, 測定温度範囲 250°C

~ 500°C, 500°C ~ 1,000°C, 放射率補正 0 ~ 1.0, 最小ターゲットサイズ 5mmφ) は, エンジン部材の温度測定に用いた。

3. 実験結果

実験番号と実験の概要, 温度分布測定結果図番号との対応を, 表 4 に示す。

3-1 フラップ角度 0° の場合

図 6-1 ~ 5 に, フラップ角度 0° の場合の, ウィングおよびアフターフラップ表面の温度測定結果を示す。メインフラップは, ほぼ全域がウィングに格納されている (図 3 参照)。

エンジン排気ノズル (D 形) 出口に於ける 2 列の排気ガス流の渦列に対応して温度分布も同様の傾向を有するが, これ等は対称ではなく, エンジン後視右側でより高温となり, 回転数の上昇に伴って左側に移行する。ウィングとフラップの継ぎ目でやや温度が低下するが, これは主にこの部分の透き間による冷却の影響と考えられる。壁面上の最高温度はいずれの場合もウィング上に存在する。

3-2 フラップ角度 60°, サイドフェンス付きの場合

温度分布を図 7-1 ~ 4 に示す。ウィング部の温度は比較的 low, いずれの場合も最高温度はフラップ部に存在する。温度分布は左右ではほぼ対称性を保っているが, 最高温度はエンジンの回転数上昇に伴ってメインフラップ右側 (エンジン後視) から左側に移行する。高温領域は, 1 対のサイドフェンスの内側に限定されている。最高温度は, 図 7.3 の結果 (等温線の最高値 144°C) から推定して, 144°C 以上に達していると推定される。

3-3 フラップ角度 60°, ボルテックスジェネレータ (V.G.) 付きの場合

温度分布を図 8-1 ~ 4 に示す。温度分布は対称ではなく, いずれの場合もフラップ部右側 (エンジン後視) が高い。最高温度は, 図 8.3 の結果 (等温線の最高値 145°C) から推定して, メインフラップ部で 145°C 以上に達していると考えられる。ウイン

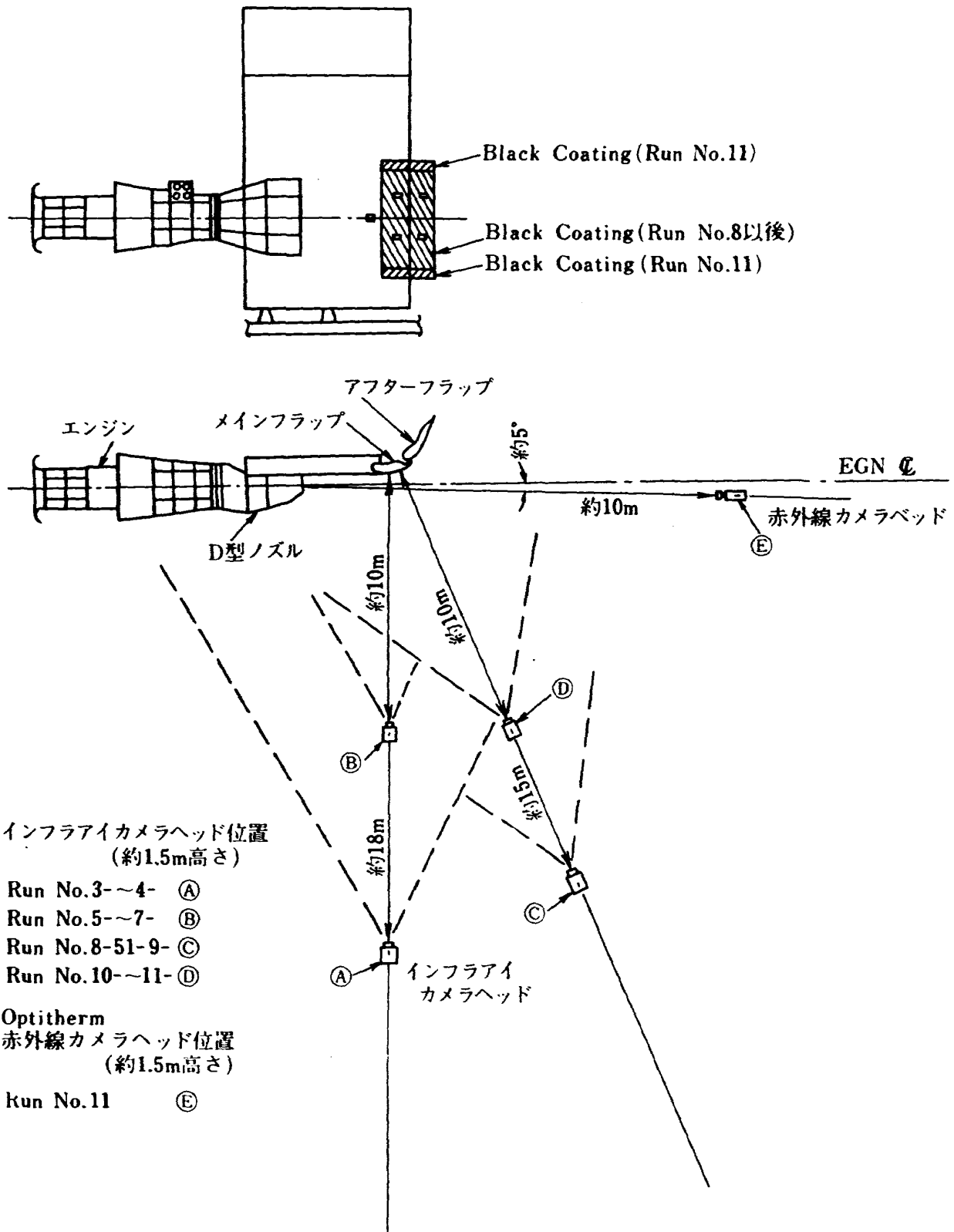


図5 計測装置の配置

表 4 実験概要一覧表

実験番号	Run No.	3-(2)	3-(4)	3-(5)	3-(6)	3-(7)	10-(1)	10-(2)	10-(3)	10-(4)	11-(1)	11-(2)	11-(3)	11-(4)
エンジン 運転条件	低圧系回転数 N_1 (rpm)	2,613	3,970	4,877	5,123	5,524	1,480	4,090	5,017	2,554	1,482	4,070	4,983	2,710
	高圧系回転数 N_2 (rpm)	11,050	12,530	13,420	13,700	14,100	9,500	12,580	13,480	11,100	9,480	12,650	13,520	11,220
	排気温度(コア) T_7 (°C)	395.8	453.9	535.5	557.4	594.5	536.8	457.0	533.1	384.9	538.5	466.3	539.3	391.5
	ファン出口空気温度 T_8 (°C)	30.6	40.8	49.5	53.4	57.1	28.2	41.6	51.0	33.4	29.7	43.3	53.3	34.5
	フラップ角度	0°												
サイドドア開閉	閉													
高揚力装置	——													
USBノズル番号	#3													
温度分布測定結果図番	6-1	6-2	6-3	6-4	6-5	7-1	7-2	7-3	7-4	8-1	8-2	8-3	8-4	
	サイドファエンス付き													
	#2													
	60°													
	60°													
	閉													
	ボルトックスジェネレーター付き													

実験番号	Run No.	4-	5-	6-	7-	8-	9-	
エンジン 運転条件	*低圧系回転数 N_1 (rpm)	5,500	5,045	5,060	5,080	5,040	5,000	4,990
	*高圧系回転数 N_2 (rpm)	14,000	13,500	13,500	13,530	13,530	13,500	13,500
	排気温度(コア) T_7 (°C)	590.9	542.5	543.3	542.2	539.5	535.4	533.5
	ファン出口空気温度 T_8 (°C)	56.2	48.9	50.5	53.5	53.1	51.4	48.8
	フラップ角度	30°	60°	60°	60°	60°	60°	60°
サイドドア開閉	閉	閉	閉	(上)開 (下)閉	(上)開 (下)閉	閉	閉	
高揚力装置	—	—	V.G.	V.G.	—	—	S.F.	
USBノズル番号	#2	#2	#2	#2	#2	#2	#2	
対象図番	—	—	—	10	10	10	10	

* 最高値

V.G. : ボルトックス
ジェネレーター付き
S.F. : サイドファエンス付き

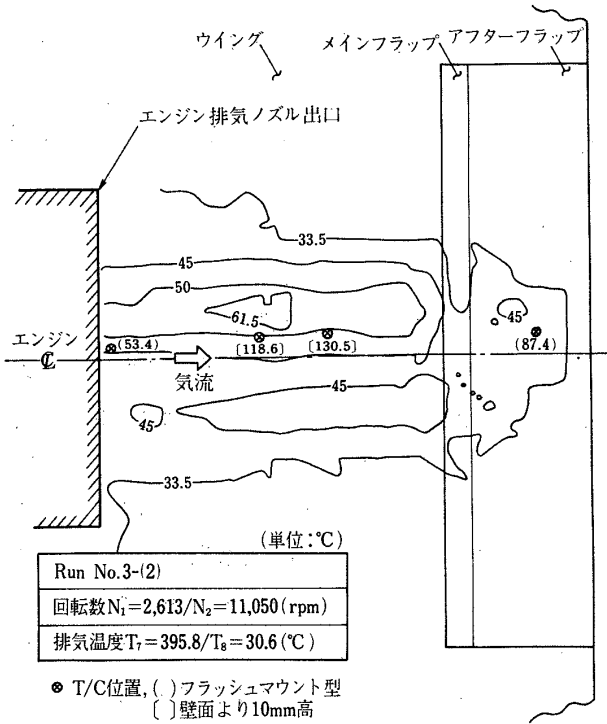


図6-1 温度分布 (フラップ角度0°) その(1)
サイドドア閉

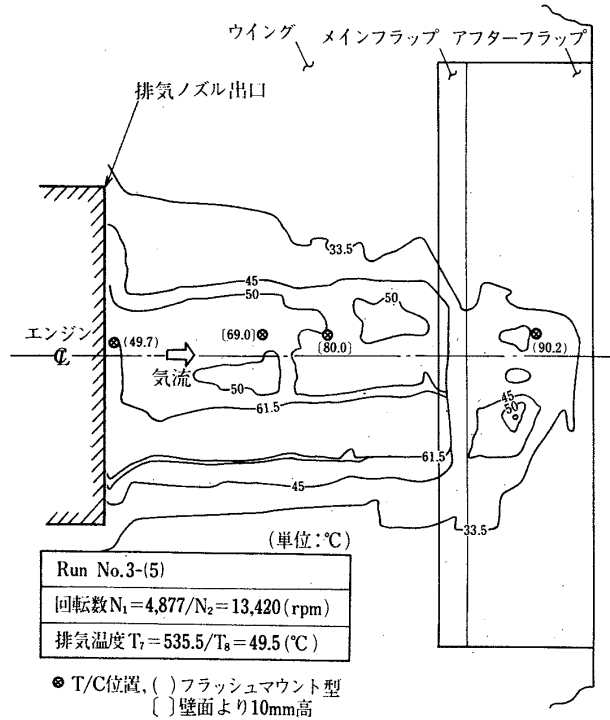


図6-3 温度分布 (フラップ角度0°) その(3)
サイドドア閉

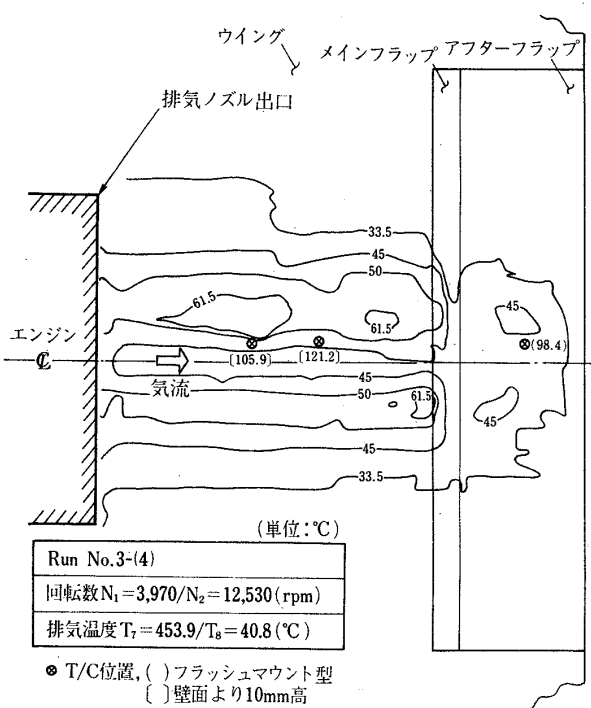


図6-2 温度分布 (フラップ角度0°) その(2)
サイドドア閉

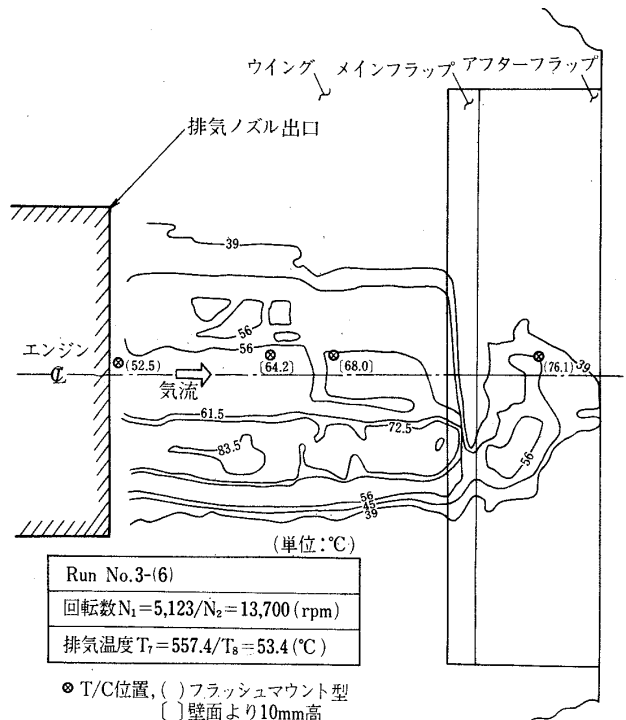


図6-4 温度分布 (フラップ角度0°) その(4)
サイドドア閉

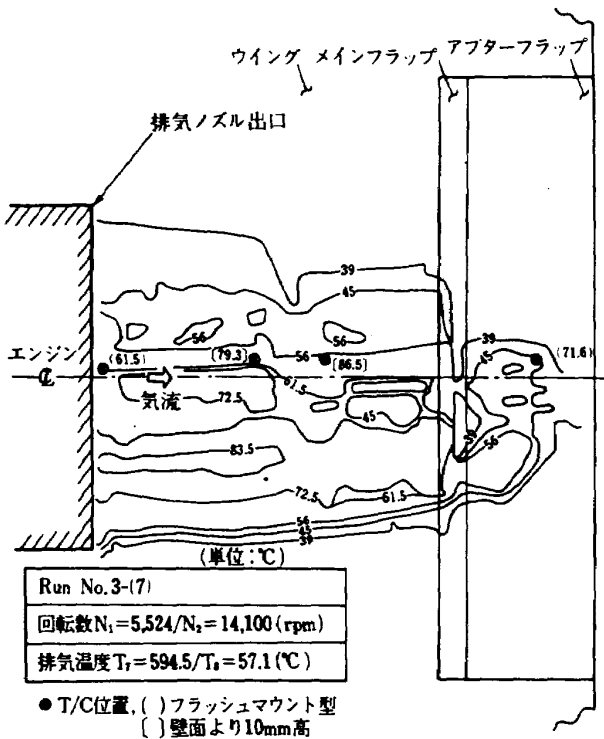


図 6-5 温度分布 (フラップ角度 0°) その(5)
(サイドドア閉)

グ部でも、ボルテックス・ジェネレーター (V.G.) の後流では、かなりの温度の上昇が認められる。

以上は、赤外線温度画像装置による測定結果である。なおフラッシュマウント型熱電対温度計による測定値と一致しないものもあるが、その主な原因は、測定誤差、測定の時間的および位置ずれによるものと考えられる。

3-4 壁面最高温度の変化

図 9-1 ~ 9-3 に、ウイング、フラップ表面に於ける最高温度 $T_{w,max}$ 、およびその無次元温度 $\theta_{w,max}$ のエンジンコア回転数 N_2 に対する変化を、ファン出口空気温度 T_8 およびコア出口ガス温度 T_7 の変化と共に示す。最高温度を示す位置は、フラップ角度 0° の場合はウイング上、他の二つのケースではメインフラップ上であるが、局所的には N_2 と共に位置は変化する。壁面温度は、裏面等からの熱伝導、エンジンコア排気ガス塊との熱放射、フラップの継ぎ目からのモレ空気等の影響のために、いわゆる断

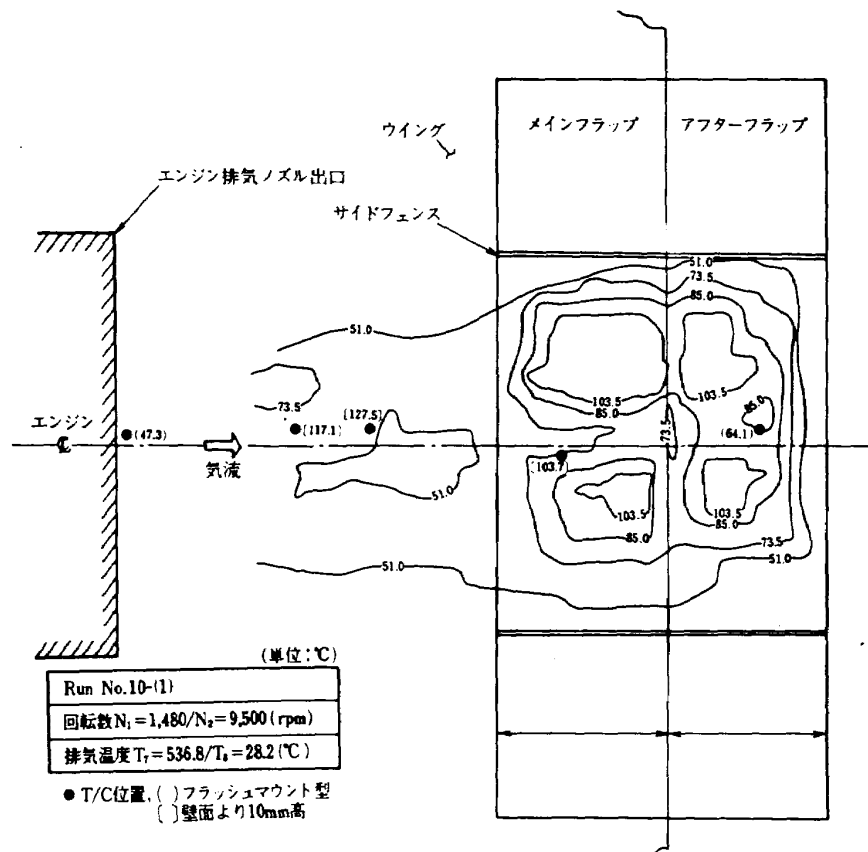
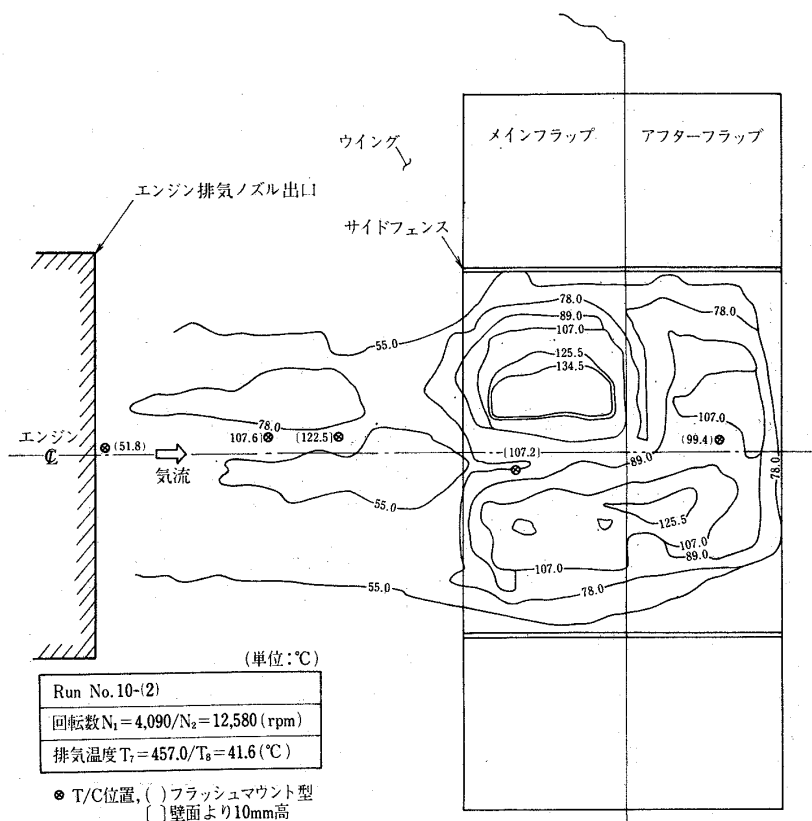
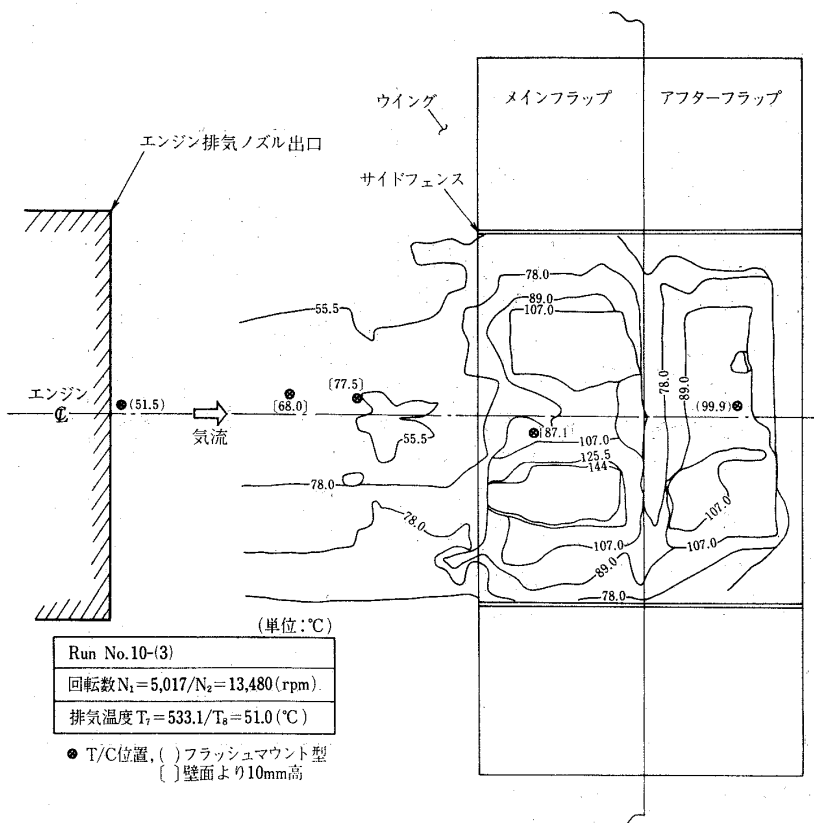


図 7-1 温度分布 (フラップ角度 60°) その(1)
(サイドフェンス付) サイドドア開



フラップ角度 60°
図7-2 温度分布 (サイドフェンス付) その(2)
サイドドア開



フラップ角度 60°
図7-3 温度分布 (サイドフェンス付) その(3)
サイドドア開

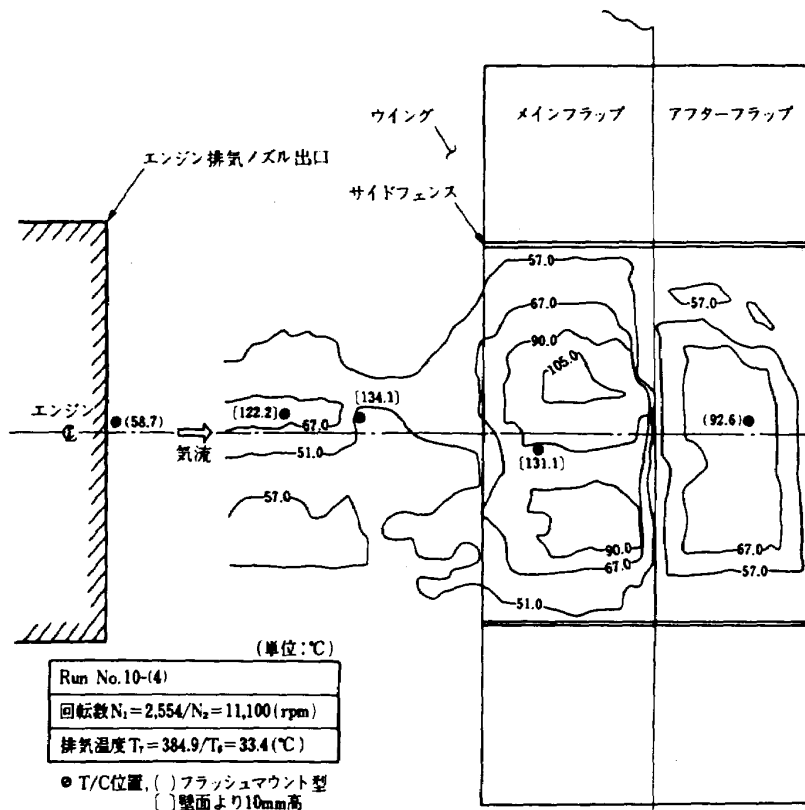


図 7-4 フラップ角度 60°
温度分布 (サイドフェンス付) その(4)
サイドドア開

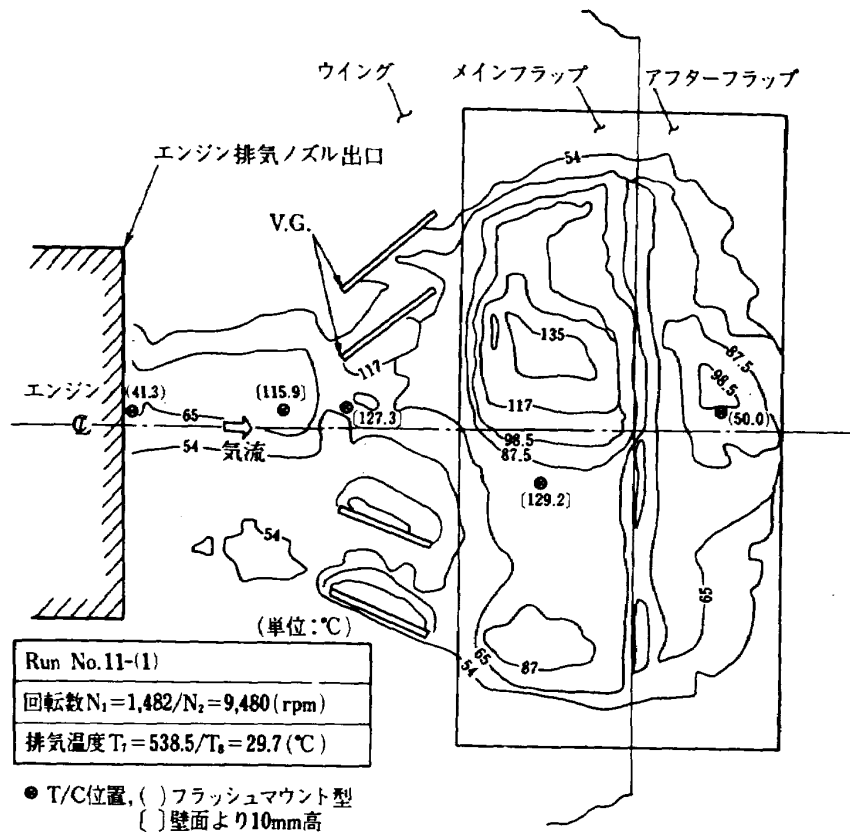


図 8-1 フラップ角度 60°
温度分布 (V.G. 付き) その(1)
サイドドア開

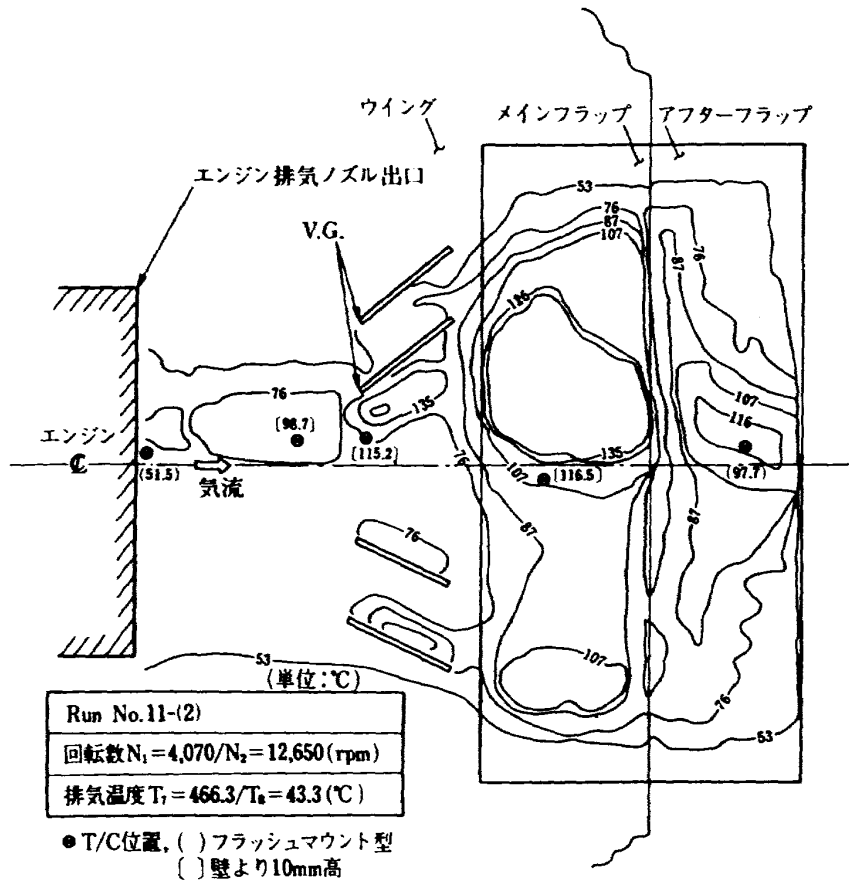


図8-2 温度分布 (V.G.付き フラップ角度 60° サイドドア開) その(2)

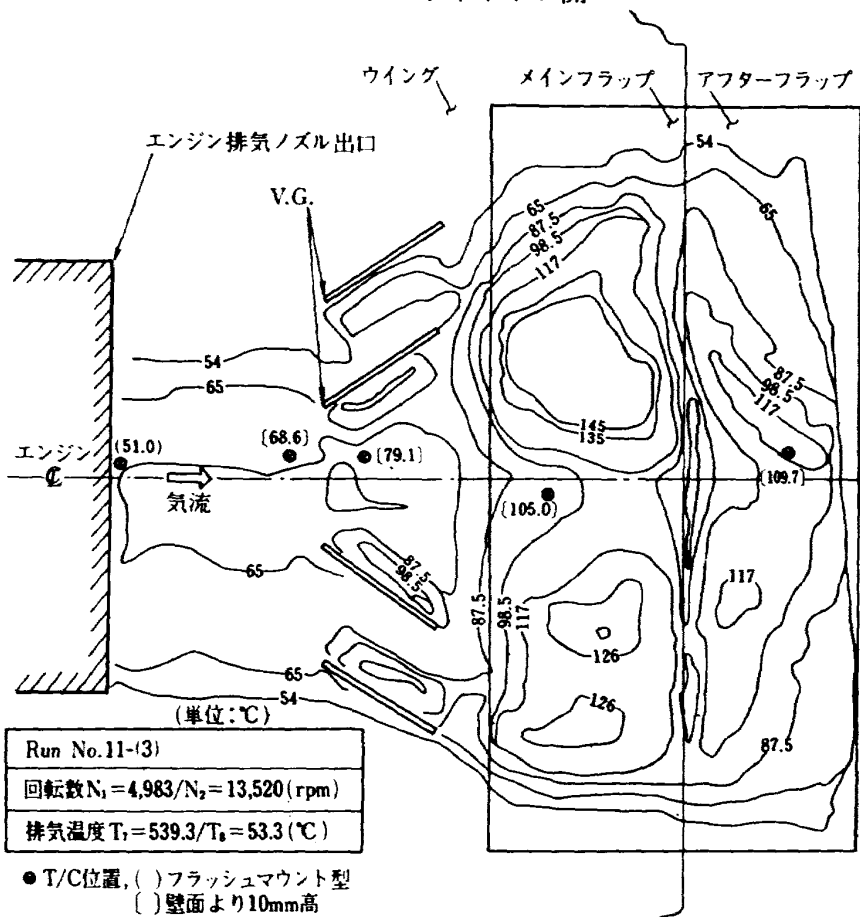


図8-3 温度分布 (V.G.付き フラップ角度 60° サイドドア開) その(3)

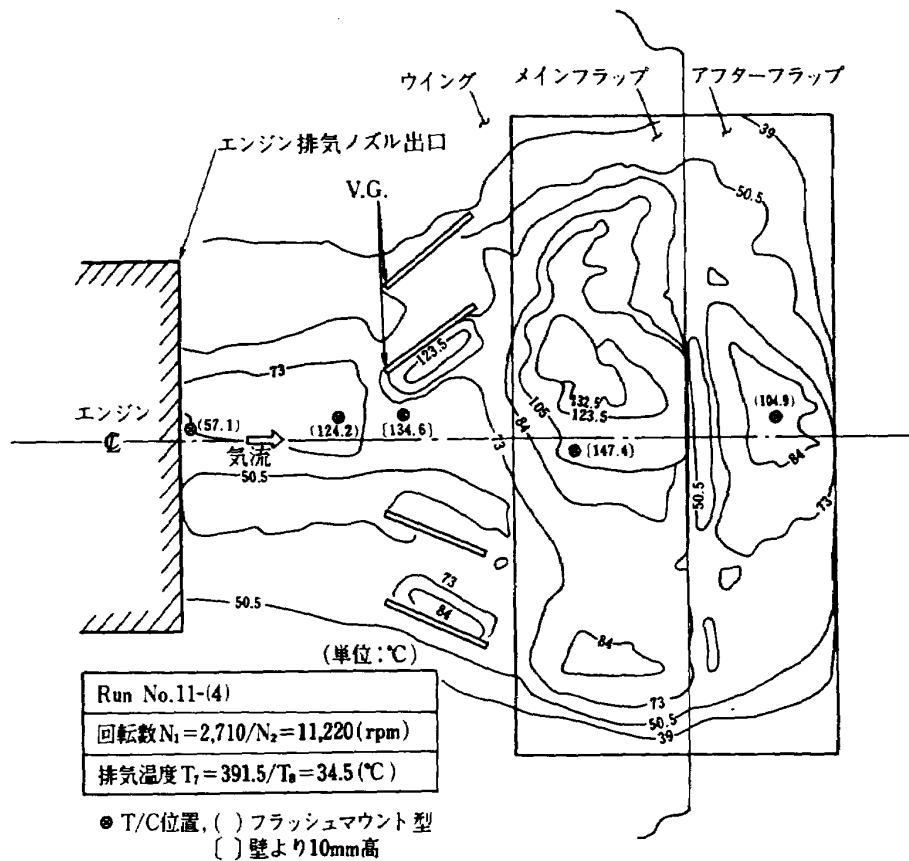


図 8-4 温度分布 (フラップ角度 0° V.G. 付き サイドドア開) その(4)

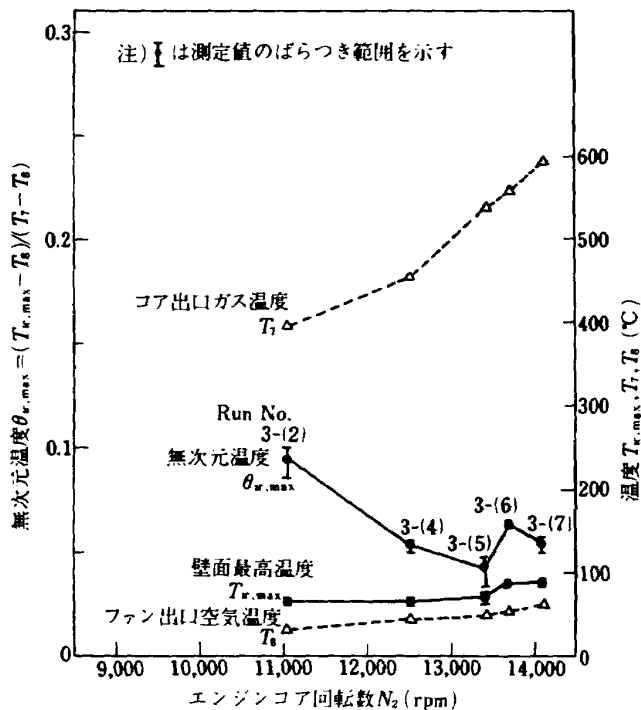


図 9-1 壁面最高温度の変化(1) (フラップ角度 0°)

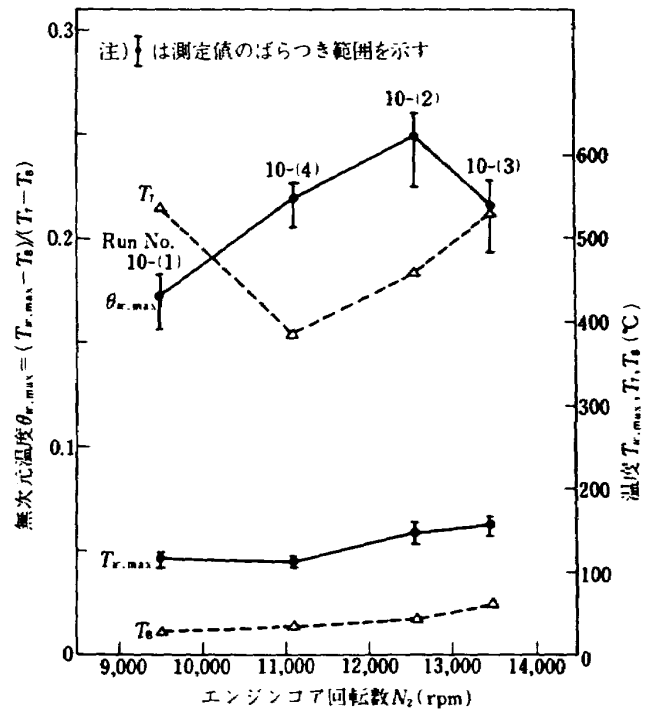


図 9-2 壁面最高温度の変化(2) (サイドフェンス付き, フラップ角度 60°)

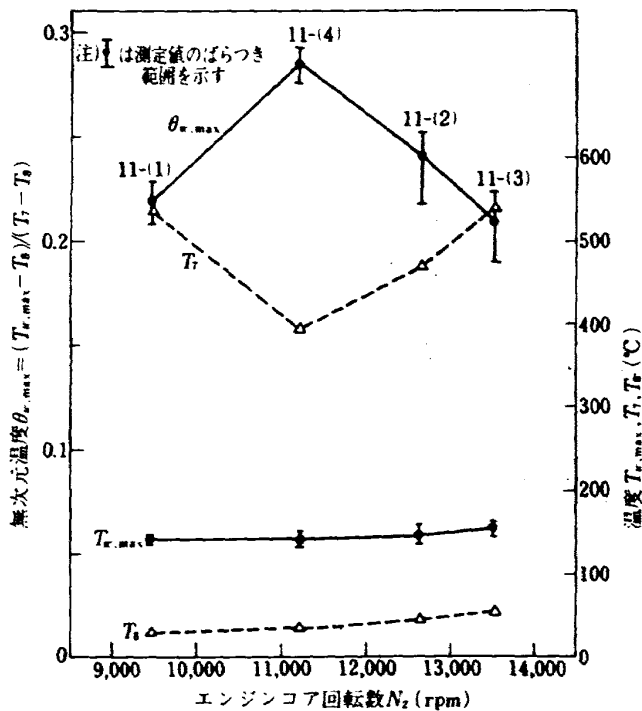


図9-3 壁面最高温度の変化(3)
(V.G. 付き, フラップ角度 60°)

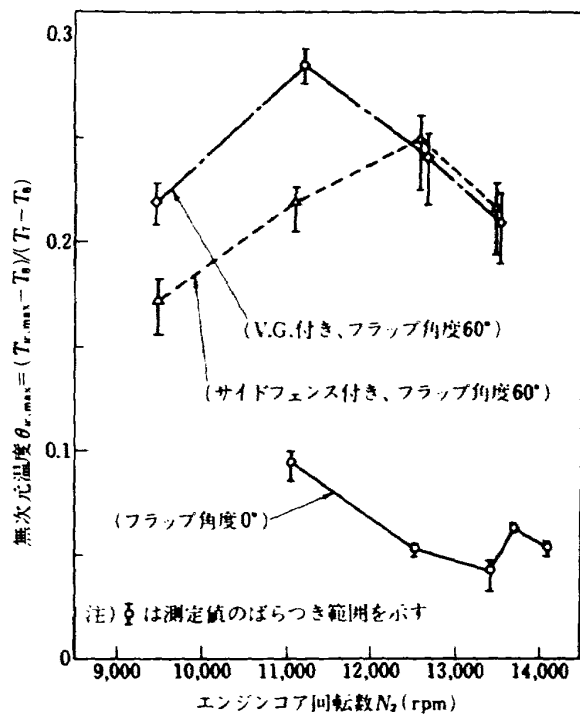


図9-4 \$\theta_{w,max}\$ の \$N_2\$ に対する変化

熱壁温度とは異なるが、図に示されるように \$T_{w,max}\$ は定性的には \$T_0\$ の影響が支配的である。

これ等3つのケースについて、\$N_2\$ に対する \$\theta_{w,max}\$ の変化を図9-4に比較して示す。V.G. (ボルテッ

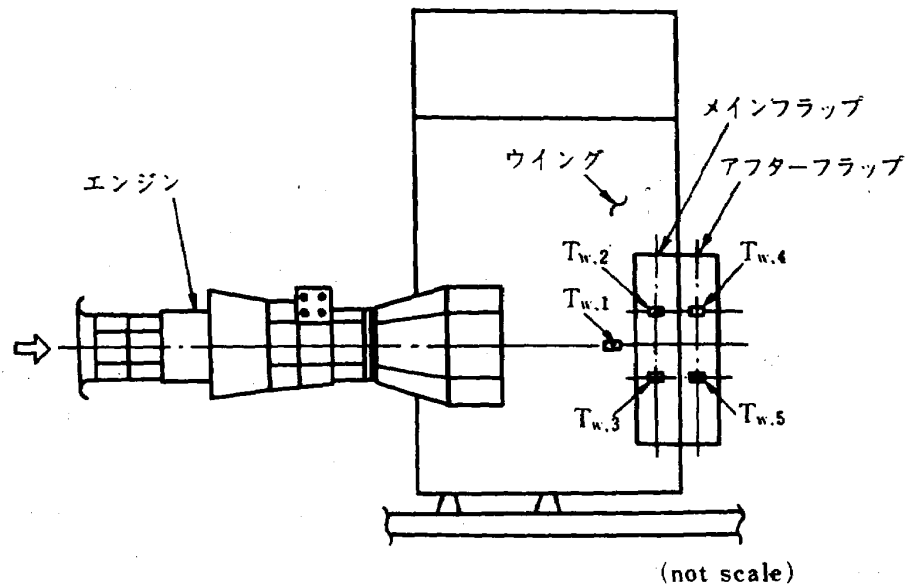
クスジェネレータ) 付きとサイドフェンス付きの場合、定性的に同様な変化を示し、\$N_2\$ が 12,500 rpm から、13,500 rpmの間では定量的にもほぼ一致する。高揚力装置なし(フラップ角度 0°) の場合は、\$\theta_{w,max}\$ の \$N_2\$ に対する変化の様子は前記2ケースとは全く異なると共に、ウイング、フラップ壁面上の温度上昇は遙かに小さい。

3-5 測温テープによる壁面温度測定結果

図10にフラップ角度 60°の一連の実験における不可逆性測温塗料を用いた測温テープによる壁面温度測定結果を示す。測定位置は図10に示す5ヶ所で、各実験開始時に新しいテープを張り付けた。結果は実験開始から終了までの間の最高温度を示すものである。ウイング上 (\$T_{w,1}\$) では各実験ケースで大きな差異はない。メインフラップ上では指示値は対称ではなく、V.G. 付きの場合のみ上側(エンジン後視右側, \$T_{w,2}\$) が下側 (\$T_{w,3}\$) より高温で、他はいずれも \$T_{w,2}\$ よりも \$T_{w,3}\$ が高温である。アフターフラップ上では、ジェットの付着の良好な V.G. 付き又はサイドフェンス付きの場合、ならびにスパン方向への流れの拡散の強いサイドドア開の場合が、より高温となる。5ヶ所の測定の中、最も高温となるのは、いずれの実験においてもメインフラップ上 (\$T_{w,2}\$ 又は \$T_{w,3}\$) である。

4. 考 察

サーモカメラによる固体壁温度の測定に於ては、壁面の放射率と、壁面からカメラに到る光路に介在する気体による熱線の放射、吸収が測定に影響する。本実験に於ては、図5に示すようにフラップ部にはブラックコーティングを施してあり、この部分についてはほぼ全放射率は 1.0 と見なして良い。ウイング部では、ブラックコーティングは行っていないが、エンジン排気中のカーボン等の付着により、全放射率は 0.9 前後に達しているものと推定される。気体の放射・吸収に関しては、エンジン排気中の \$CO_2\$ および水蒸気が問題となるが、これらは 8~12 \$\mu m\$ で吸収・放射がほとんど無視し得るため、この帯域のバンドパスフィルタを用いている。従って本実験では、気体の影響は無視し得る。これは、フラップ部



Run No.		7-	8-	51-	9-	10-	11-
ウイング	Tw.1	110~115	104~110	104~110	110~115	115~121	110~115
メイン フラップ	Tw.2	171~	132~137	132~137	121~126	132~137	171~176
	Tw.3	132~137	160~165	171~	171~176	165~171	132~137
アフター フラップ	Tw.4	126~132	60~65	60~65	104~110	121~126	121~126
	Tw.5	115~121	43~48	43~48	104~110	132~137	~132
V.G.		○					○
サイドフェンス					○	○	
サイド (上)		Open	Open	Close	Close	Open	Open
ドア (下)		Close	Close				

USBノズル #2
フラップ角度60°

図 10 測温テープによる壁面温度測定結果

以後に於て、排気を透して観測した背景の画像が、エンジン排気の影響を受けていないことから確認される。

本実験に於けるウイング、フラップ壁面温度の測定には、既に述べたように3種の方式を用いた。赤外線画像処理置は一般に、前述の放射率や気体の放射・吸収の影響などのため、温度パターンを定性的に理解するために用いられるが、本実験に於ては定

量的な測定を行うために、これらの問題に対して上記の対策を行った。しかし温度レンジ変更のためにサーモカメラ内部の光路中にそう入した絞り機構からの反射の影響が生じたため、基準黒体炉を用いて測定中も随時検定を行ったが、タイミングのずれなどのために、多少の誤差が含まれている。得られた熱画像から温度分布をトレースする際に、被測定体との位置関係が十分の精度で把握することが困難だ

ったが、ポジショニングについて何らかの対策を講じる必要がある。

測温テープによる結果は、エンジンの起動から停止に到る各Run中の最高温度を示すもので、図6, 7, 8のデータ採取のタイミングとは必ずしも一致しない。

熱電対の測定には、リード線からの熱伝導等、いくつかの検討すべき点が残されているが、図には測定値そのものを示した。

ウイング、フラップから成る測定模型は、まえきに述べた如く温度測定を主目的に企画されたものではないために、伝熱測定模型としては多少厳密性を欠いている点もある。これらの事情から、測定結果の中には疑問な値も含まれている可能性があるが、今後の計測方法の改善を進めるための資料として、結果に特に修正を施していない。

5. 結 論

ウイング、フラップ等から成る実機大のUSB方式高揚力装置試験模型に実機エンジンを装着した状態で、ウイング、フラップの壁面温度を、赤外線温度画像装置等を用いて測定した。その結果、以下の点を確認した。

(1) フラップ角度 0° 、高揚力装置なしの場合、エンジンのD型排気ノズル出口のウイング壁面上で、2列の非対称な温度パターンを生じ、エンジン回転数が上昇すると壁面上の最高温度の位置が、エンジン後視右側から左側に瞬時に移行する。

(2) フラップ角度 60° 、サイドフェンス付きの場合、高温領域はフラップ部壁面上で、サイドフェンス内側に限定される。フラップ壁面上ではほぼ対称な2列の温度パターンが生じ、最高温度は、エンジン回転数の上昇により、エンジン後視右側から左側へ瞬時に移行する。実験の範囲で、フラップ上の最高温度は 144°C 以上に達すると推定される。

(3) フラップ角度 60° 、ボルテックスジェネレーター付きの場合、ウイング部およびフラップ部で非対称な2列の温度パターンを生じ、実験範囲では常に、フラップ壁面上でエンジン後視右側が高温となり、最高温度は 145°C 以上に達すると推定される。

(4) ウイングないしはフラップ壁面上の最高温度

は、ファン出口空気温度 T_8 による影響が支配的で、最高温度を示す位置は、エンジンのコア回転数 N_2 と共に移動する。

(5) 測温テープを用いて、ウイングおよびフラップ壁面上5点(図10)に於て、フラップ角度 60° の場合のエンジン始動から停止に到る間の最高温度の測定を行った。その結果、メインフラップではエンジン中心線に対して指示値は非対称で、ボルテックスジェネレーター付きの場合、エンジン後視右側が、他はいずれも左側が高い値を示した。アフターフラップ上では、ジェットの付着の良好なボルテックスジェネレーター付き又はサイドフェンス付きの場合、ならびに翼のスパン方向へ流れの拡散が強いサイドドア開の場合が、より高温となる。またいずれの場合も、5点の測定点中、ウイングおよびアフターフラップよりもメインフラップ上で最も高温となる。

6. あとがき

本実験のサーモカメラによる温度測定にあたっては、富士通株式会社ならびに富士興業株式会社の御好意により、本実験に特に仕様を合わせて改造したサーモカメラシステム「インフラアイ150(改)」の提供を受けると共に、富士通株式会社大野勝氏には、実験の準備から完了迄の期間に亘り、角田支所実験場に於て機器の調整、測定に御尽力戴いた。ここに厚く御礼申し上げる次第である。

また、当研究所の松木正勝科学研究官、原動機部鳥崎忠雄部長、性能研究室森田光男室長ほか関係各位の指導と協力をいただいたことを記して、謝意を表します。

附 録

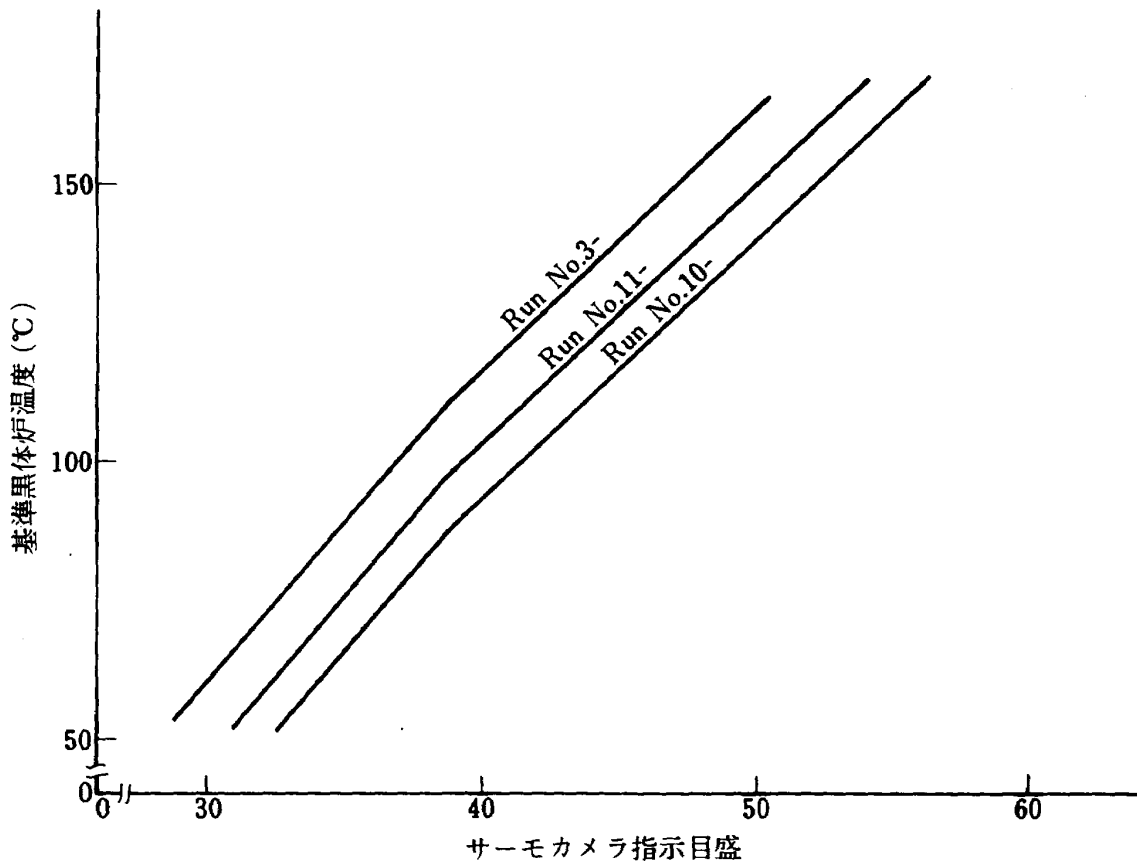
(附1) サーモカメラ指示の較正 附図1に、較正曲線の例を示す。4項に述べた理由により、カメラ周辺温度により出力が異なるが、図のように出力の変化は、使用温度範囲ではほぼ平行移動することが分かったので、実験中は約 150°C に設定した基準黒体炉により随時較正した。

(附2) 熱画像の例 附図2(a), (b), (c)にそれぞれサイドフェンス、ボルジェネなしの場合、サイドフェンス付の場合、ボルジェネ付の場合における

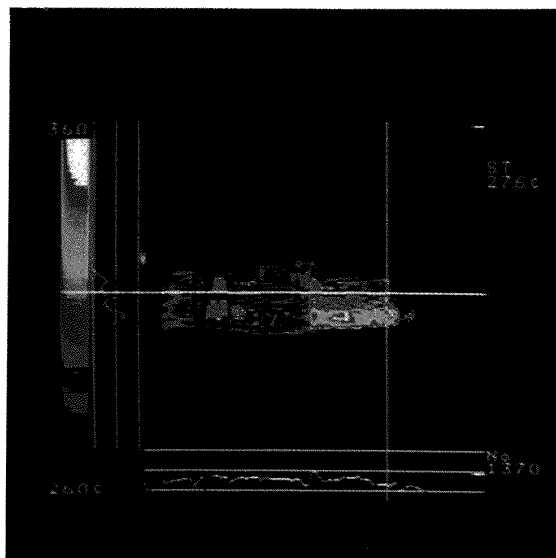
実験計測で N_1 が最高の時の熱画像を示す。画像を表示するモニターは白黒濃淡図用と10階調のカラー図用とがあり、本文で示した等温線表示図はカラー画像を解析したものである。ここに示した図中の数値は前項の校正を行う前の値である。

(附3) 赤外線カメラ(Optitherm)によるエンジン後視位置からの温度測定 フラップおよび高揚力装置によりエンジン排気が大きく偏向するため、

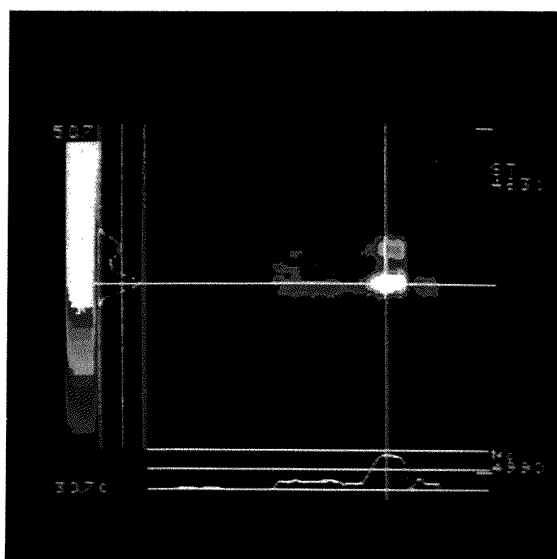
エンジン後方より赤外線カメラを用いて温度測定することが可能となった。測定部は図に示すように、低圧タービン最終段とコーンの部分で、回転中の動翼を含む時間的、空間的平均値である。放射率は1.0と仮定した。なお、 CO_2 および水蒸気の影響はCut offされていない。このため、排気ノズル出口での水噴射時には大巾に測定値が下がっている。



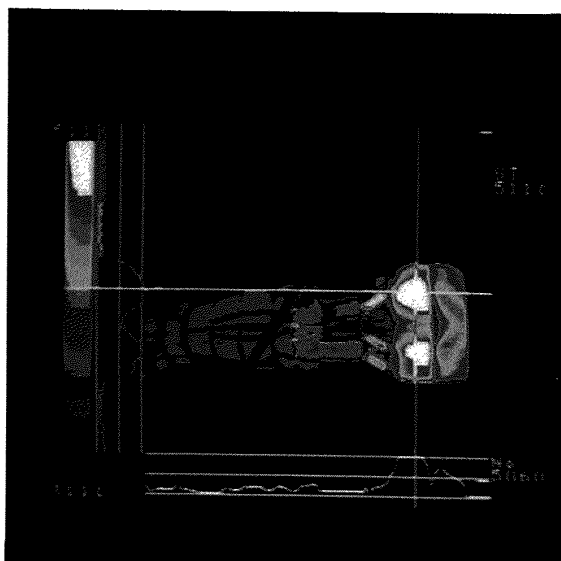
附図1 サーモカメラ校正曲線



- (a) Run No.3-6
- | |
|---------------------------|
| サイドフェンスなし |
| ボルジェネなし |
| フラップ 0° |
| サイドドア 閉 |
| ノズル #3 |
| $N_1 = 5,120 \text{ rpm}$ |

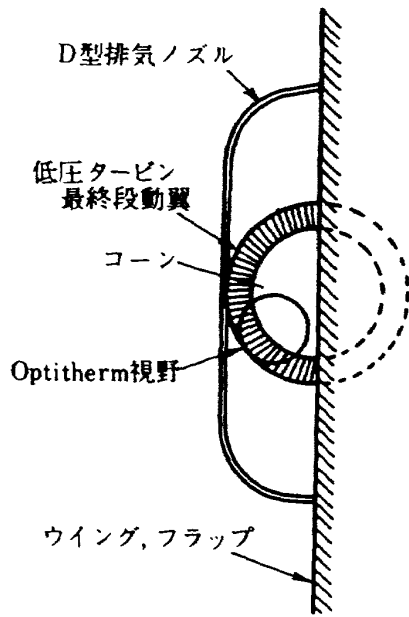


- (b) Run No.9-3
- | |
|---------------------------|
| サイドフェンス付 |
| フラップ 60° |
| サイドドア 閉 |
| ノズル #2 |
| $N_1 = 4,990 \text{ rpm}$ |



- (c) Run No.6-3
- | |
|---------------------------|
| ボルジェネ付 |
| フラップ 60° |
| サイドドア 閉 |
| ノズル #2 |
| $N_1 = 5,060 \text{ rpm}$ |

附図2 赤外線温度画像装置（インフラアイ 150）による熱画像の測定例



Optitherm視野(エンジン後視)

Run No.	*Optithermによる測定値 (°C)	エンジンコア排気温度 T_7 (°C)
11-(1)	445~450(370)	538.5
11-(2)	400~416(305)	466.3
11-(3)	473~480(330)	539.3
11-(4)	354(315~265)	391.5

*放射率=1.0として測定
()内数値は、水噴射時

附図3 赤外線カメラ (Optitherm) によるエンジン後方からの测温

航空宇宙技術研究所資料482号

昭和58年2月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社三興印刷
東京都新宿区信濃町12三河ビル
