

UDC 665.753.2;  
621.452.32

# 航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-314

加圧時のジェット燃料の物性値

相波哲朗

1976年10月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# 加圧時のジェット燃料の物性値\*

相波 哲朗\*\*

## Properties of Jet Engine Fuels under Pressurized Conditions

By Tetsuro AIBA

Thermal and physical properties of jet engine fuels JP-4 and JP-5 under pressurized conditions up to 30 atms were evaluated based on the general evaluation methods shown in Reference 1. The properties shown are the critical temperatures, critical pressures, boiling points, densities, thermal conductivities, specific heats, latent heats of vaporization and diffusion coefficients. These properties are essential for the calculation of vaporization processes of fuel droplets in aircraft gas-turbine combustors. The results obtained showed dependence of the values on the distillation characteristics of the fuels, complex variations of the values at high pressures and fairly good agreements with the data shown in other reports.

### 1 ま え が き

航空用ガスタービン燃焼器内で燃料噴射弁から噴出した燃料液滴は空気や燃焼ガス中を通過しながら、温度上昇、蒸発を伴って燃焼し、あるいは、ライナ壁面に衝突する。本報告では排気中の未燃炭化水素に関するライナ壁面への衝突燃料の量、あるいは、燃料蒸発管内の液滴の蒸発量を計算する際に必要となる燃料の熱的、物理的物性値を最も良く使われるジェット燃料JP-4とJP-5に対していくつか調べた結果を示す。公表の物性値が殆んど常圧付近の条件で示されていること、および、最近の航空用ガスタービン燃焼器が高圧になっていることから、調査した基本的な物性値に基づいて30気圧までの加圧下における物性値の推算を行ってある。推算法は主に文献(1)に基づいている。高温になると燃料の熱分解や自発着火の問題があるが、それらの公表データが欠けているため推算法によって得られた値をそのまま示してある。対象としてとりあげた物性値は、臨界温度、臨界圧力、沸点、密度、蒸気圧、熱伝導率、比熱、蒸発潜熱、拡散係数に関してである。燃料の物性値としてはこれら熱的、物理的なもの他に、燃焼に関する発熱量、着火温度、可燃範囲、引火点、煙点等、

燃料の輸送や霧化の際重要になる粘性係数、表面張力、ペーパロック特性、その他、水溶解度、ガス溶解度、腐食性、帯電性、熱安定性、凝固点などがある。今回求めた物性値は燃焼器内燃料の蒸発の計算に必要なものに限られている。

### 2 熱的、物理的物性値を使用する単一液滴に対する主な基礎方程式

燃料液滴や液滴周囲の蒸気の分布が球状であると仮定した場合、単一液滴に対する運動、蒸発量、熱バランスの式が以下のように示される<sup>2,3)</sup>。これらの式における特に加圧時の物性値が不足している。

単一液滴の運動

$$-\frac{dv}{dt} = Cd \frac{\pi}{4} d_l^2 \frac{r_B v^2}{2g} \quad (1)$$

液滴からの蒸発量

$$-\frac{dm}{dt} = y_A(W_A + W_B) - \pi d^2 D \frac{\gamma}{g} \frac{dy_A}{dr} \quad (2)$$

液滴における熱バランスの式

$$\begin{aligned} \pi d_l^2 h^*(T_B - T_l) + \sigma \epsilon \pi d_l^2 (T_2^4 - T_l^4) \\ = gm C_{pl} \frac{dT_l}{dt} - gL \frac{dm}{dt} \end{aligned} \quad (3)$$

\* 昭和51年8月4日受付

\*\* 航空機公害研究グループ

ここで,  $C_d$ ; 抗力係数,  $C_p$ ; 定圧比熱,  $D$ ; 拡散係数,  $d$ ; 直径,  $g$ ; 重力の加速度,  $h^*$ ; 物質移動がある場合の熱伝達率,  $L$ ; 蒸発潜熱,  $m$ ; 液滴の質量 ( $=\pi d_l^3 \rho_l / 6g$ ),  $r$ ; 半径,  $T$ ; 絶対温度,  $t$ ; 時間,  $y_A$ ; 蒸発物質の重量濃度,  $v$ ; 流速,  $W$ ; 物質移動量,  $r$ ; 比重量,  $\epsilon$ ; ふく射率,  $\sigma$ ; ステファン・ボルツマン定数  
添字  $A$ ; 蒸発物質,  $B$ ; 周囲気体,  $l$ ; 液体,  $2$ ; 壁温

式(1)は液滴の速度が抗力によって変わること示す。式(2)は液滴からの蒸発量が右辺第一項のバルク流によるものと右辺第二項の純拡散によるもので表わされることを示す。式(3)は左辺第一項の対流, および, 第二項のふく射による伝熱量が, 右辺第一項の液滴の温度上昇, および, 第二項の蒸発熱に費されることを示している。

### 3 ジェット燃料 JP-4 と JP-5 の物性値

式(1), (2), (3)で必要な物性値とこれらの式の成立する限界を与える沸点, および, 推算法を適用する際に必要となる物性値から以下のものを対象にした。

臨界温度	$T_C$
臨界圧力	$P_C$
沸 点	$T_B$

密 度	$\rho$
蒸 気 圧	$P_v$
熱伝導率	$\lambda$
比 熱	$C_p$
蒸発潜熱	$L$
拡散係数	$D$

#### 3.1 ジェット燃料の規格<sup>4)</sup>

ジェット燃料として一般に使われている JP-4 と JP-5 は米国軍用規格 (MIL-T-5624G) でその性状が定められている。規格から関連項目を抜萃して表 1 に示す。

JP-4 と JP-5 はおのおの JIS の 4 号, 5 号に相当する また ASTM (American Society for Testing Materials) 規格の Jet A, および, Jet A-1 がケロシン系でほぼ JP-5 に相当するが比重は幾分小さい。Jet B はガソリン系でほぼ JP-4 に相当している。

物性値の推算の基礎となる JP-4 と JP-5 の分留特性を図 1 に示す。燃料の分留温度は図中の規格値以下であることが要求される。JP-5 の 50% 点の温度は規定されていないため ASTM 規格から相当する値を示してある。本報告の推算値は図中の実線で示された条件に対して得である。図中の破線は NACA で扱った実際の燃料の分留特性の例<sup>5)</sup>を示し, 一点鎖線は航技研で使用した燃料中の各十数例から得た平均値を示す。図示のように実際の燃料の分

表 1 ジェット燃料 JP-4 と JP-5 の規格 (抜萃)

	JP-4	JP-5
燃料型式	ワイドカット	ケロシン
比 重 15/4°C	0.751~0.802	0.788~0.845
比 重 °API (15.6°C)	45.0~57.0	36.0~48.0
分 留 性 状		
初 留 点 °C	報 告	報 告
10% 点 °C	報 告	204.4 以下
20% 点 °C	148.8 以下	報 告
50% 点 °C	187.8 以下	報 告
90% 点 °C	248.8 以下	報 告
終 点 °C	報 告	287.8 以下
蒸 気 圧 (37.8°C) g/cm <sup>2</sup>	140.6~210.9	—
折 出 点 °C	-58 以下	-46 以下
真 発 熱 量 cal/g	10220 以上	10170 以上
動 粘 度 cst	—	16.5 以下
芳香族炭化水素分 vol%	25.0 以下	25.0 以下
不飽和炭化水素分 vol%	5.0 以下	5.0 以下
炎 輝 度	60 以上	50 以上
煙 点 **	—	19.0 以上
煙 輝 指数	52.0 以上	—

留温度は実線で示した条件より幾分低いため、本報告で規格値に基いて仮定した燃料は重質成分を多めに含んでいることになる。

### 3.2 臨界温度

JP-4とJP-5は幅広い沸点(留出温度)を持つため初留点から終点までの各成分に対し沸点に基いて臨界温度を求めることにする。JP-4の規格は20, 50, 90%留出点を定めてあるのみなので図1の実線で示すように直線で沸点を代表し、初沸点115℃, 最終沸点258℃と仮定する。標準沸点(圧力1 atmのときの沸点)と臨界温度の関係を示すデータを整理した文献(1)の図15.2から、115℃と258℃の間で臨界温度 $T_c$ を求めると次のような形で表わされる。

JP-4の臨界温度

$$T_c = 564 + 156 \left( \frac{t_b - 115}{143} \right) \quad (k) \quad (4)$$

$$115(\text{℃}) \leq t_b \leq 258(\text{℃})$$

ここで  $t_b$ ; 標準沸点

JP-5の沸点は10%留出点と終点を与えられているのみであるが、JP-5にはほぼ相当するJet AやJet A-1

で50%留出点も示されているので、それらを合せて図1の実線の条件を仮定した。JP-4の際と同様な方法で初沸点200℃から最終沸点287.8℃までに対応した臨界温度を求めると次のように表わされる。

JP-5の臨界温度

$$T_c = 655 + 95 \left( \frac{t_b - 200}{87.8} \right) \quad (k) \quad (5)$$

$$200(\text{℃}) \leq t_b \leq 287.8(\text{℃})$$

JP-4とJP-5の臨界温度と標準沸点の関係を図2に示す。

式(4)と(5)あるいは図2で $t_b$ の等しい値に対して同一の $T_c$ が得られないのは原理的にはおかしいが、基準として用いた文献(1)の図からはそれ程の精度が期待されないこと、および、曲線の特定区間を直線近似で表示したためである。一方、燃料の組成は図1の分留特性によっても示されるように、試料によってかなりの幅を持つ。このため本報告の臨界温度の関係する物性値と実際の値との比較ではオーダーの一致を当面の目標とする。

### 3.3 臨界圧力

臨界圧力は液体の密度と圧力、温度の関係から常圧付近の値と臨界温度を使った次式により求めた<sup>1)</sup>。

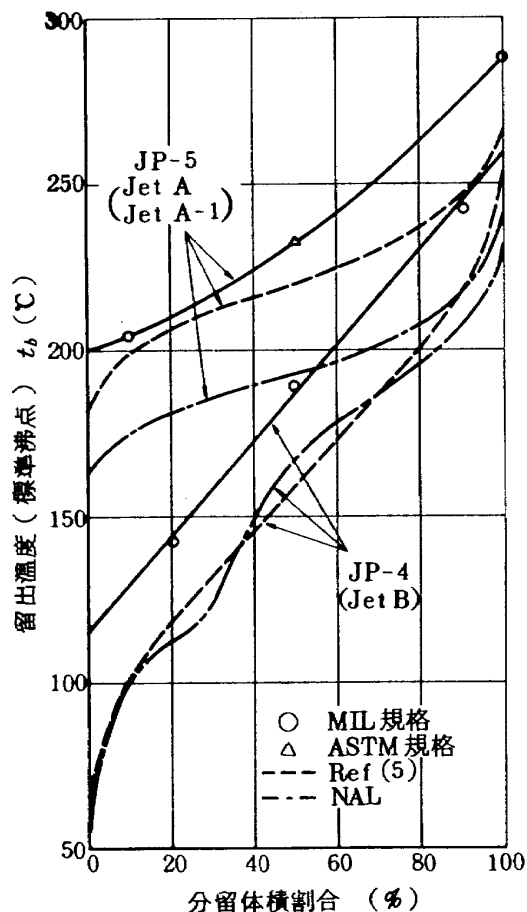


図1 ジェット燃料JP-4とJP-5の分留特性

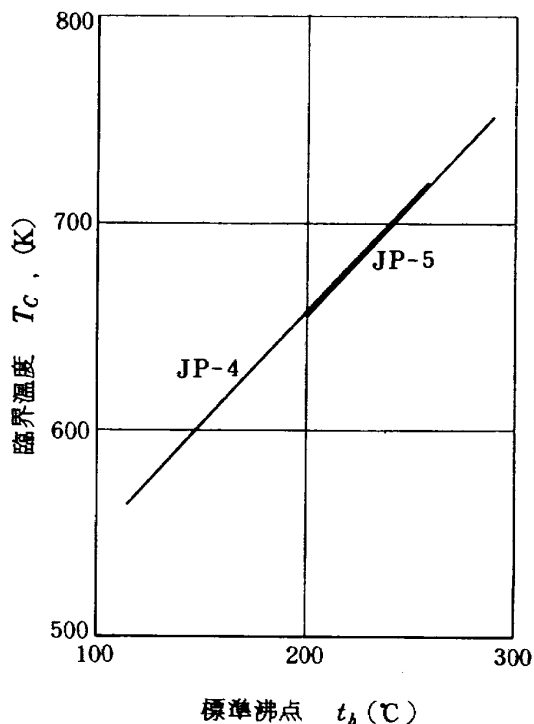


図2 ジェット燃料JP-4とJP-5の臨界温度

$$P_c = \frac{\rho^* T_c}{\omega^* M} \quad (6)$$

ここで  $P_c$ ; 臨界圧力 (atm),  $\rho^*$ ; 常圧付近の密度 (g/cc),  $\omega^*$ ; 常圧付近の膨脹因数 (expansion factor<sup>1)</sup>),  $M$ ; 分子量,  $T_c$ ; 臨界温度 (k)

分子量  $M$  として初期蒸留成分と最終蒸留成分に対する最

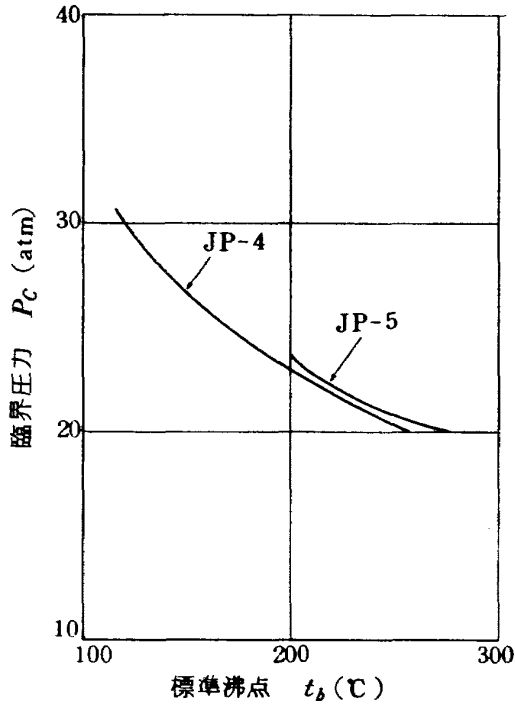


図 3 ジェット燃料 JP-4 と JP-5 の臨界圧力

小と最大の値, および, 10, 20, 50, 70, 90% 分留点の算術平均温度に基いた平均値をチャート<sup>4)</sup>から求めた。これら各分子量と密度間の正確なデータが示されていないので, 表1の比重の最小値を最小分子量に対応させるなど, 次の条件で臨界圧力を求めた。

燃料	JP-4			JP-5		
	最小	平均	最大	最小	平均	最大
分子量 $M$	105	150	210	158	186	230
臨界温度 $T_c$ (k)	564	644	720	655	691	750
密度 $\rho^*$ (g/cc)	0.751	0.777	0.802	0.788	0.817	0.845

求めた臨界圧力と標準沸点の関係を図3に示す。最近の航空用ガスタービン燃焼器の圧力が20~30気圧程度に達していることから, 得られた結果はそれらの燃焼器内で臨界圧力の問題が起きていることを示している。特にJP-5の場合は臨界圧力が低いため, 液体と蒸気の区分のつかない超臨界の現象が発生しやすいことを示している。

### 3.4 加圧時の沸点

文献(1)の式(10.14)で液体の蒸気圧  $P_v$  (atm) と温度  $T$  (k) の関係が次のように与えられている。

$$\frac{\log P_v}{\log P_c} \left(1 - \frac{T_b}{T_c}\right) \div 1 - \frac{T_b}{T} \quad (7)$$

ここで  $P_c$ ; 臨界圧力 (atm),  $T_b$ ; 標準沸点 (K)

設定圧力と式(7)の蒸気圧が等しくなる条件の温度で加圧時の沸点が与えられるものと仮定し, 沸点を求める。得ら

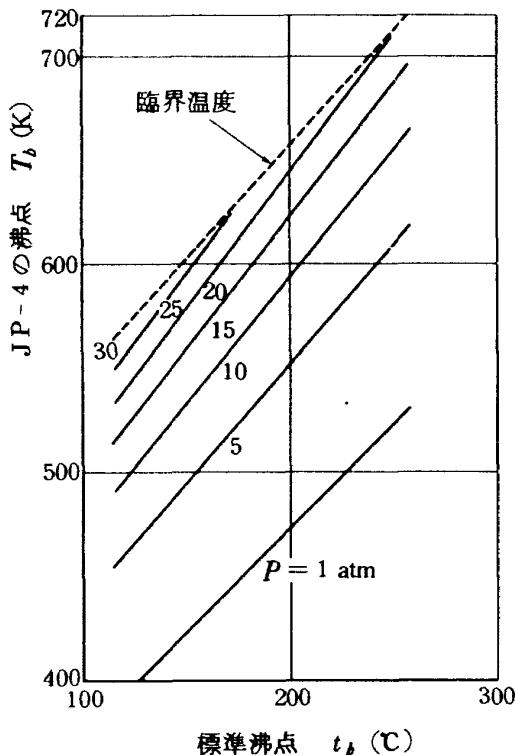


図 4 加圧時のジェット燃料 JP-4 の沸点

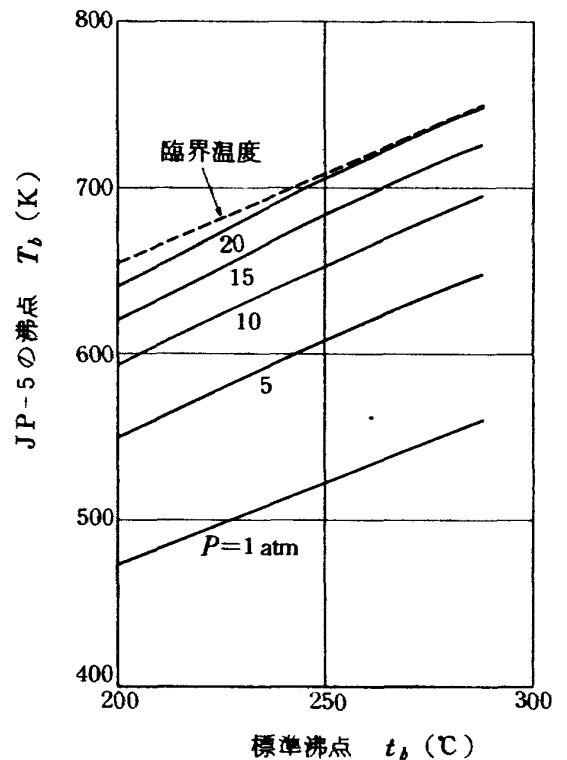


図 5 加圧時のジェット燃料 JP-5 の沸点

れた加圧時のジェット燃料の沸点と標準沸点の関係を図4と図5に示す。図は30気圧近くでJP-4の殆ど成分とJP-5の全成分が臨界圧力を越えるため沸点を持たないことを示している。

加圧時の燃料の沸点の範囲と燃焼器入口空気温度の関係を図6に示す。燃焼器入口空気温度は圧縮機出口空気温度と等しいものとし、次式で求めてある。

$$T_{CC} = \frac{T_1}{\eta_c} \left\{ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right\} + T_1 \quad (8)$$

ここで  $T_{CC}$  ; 燃焼器入口空気温度 (K),  $T_1$  ; 圧縮機入口空気温度 (= 298 K),  $P_1, P_2$  ; 圧縮機入口と出口の圧力 (kg/cm<sup>2</sup>),  $\eta_c$  ; 圧縮機断熱効率 (= 0.85),  $\kappa$  ; 空気の比熱比 (= 1.4)

図6にはBarnettら<sup>5)</sup>, および、文献(6)に示された臨界点も比較のため示してある。前者の臨界点はJP-4とJP-5の平均分子量Mを各々125と169として得られたものである。JP-5の臨界点は本報告の結果と良い一致を示したが、JP-4に対しては双方に示された臨界圧力が本報告よりかなり高くなっている。この差異は本報告の推算が図1の実線に基いて行なわれ、蒸気圧の高い軽い成分を無視する形になったためと思われる。

図6は高圧時に燃料が空気と混合するのみで沸点に達し、激しく蒸発する可能性のあることを示している。液滴の形で燃料を供給する場合、式(3)の如き形で熱を受けて液滴の温度が上昇するが、沸点に達し、あるいは、蒸発が終るまでは時間遅れがある。この時間遅れと空気の流れとの関係はライナ壁面への液滴の到達の程度や、蒸発管形燃焼器の蒸発管内の現象に大きな影響を与える。

### 3.5 燃料の密度 (比重)

加圧時の液状ジェット燃料の密度  $\rho$  は膨脹因数  $\omega$  を使って次のように表わされる<sup>1)</sup>。

$$\rho = \rho_1 \frac{\omega}{\omega_1} \quad (9)$$

ここで  $\rho$  ; 任意の状態 ( $P_r, T_r$ ) における液体の密度,  $\rho_1$  ; 同じ液体のある基準状態における密度,  $\omega, \omega_1$  ; ( $P_r, T_r$ ) または ( $P_{r1}, T_{r1}$ ) における膨脹因数,  $P_r ; P/P_C, T_r ; T/T_C$

$\omega$  の値は文献(1)の図7.10から  $T_r$  と  $P_r$  の関数として求められる。

図7に1気圧における液状JP-4の膨脹因数  $\omega/\omega_1$  の

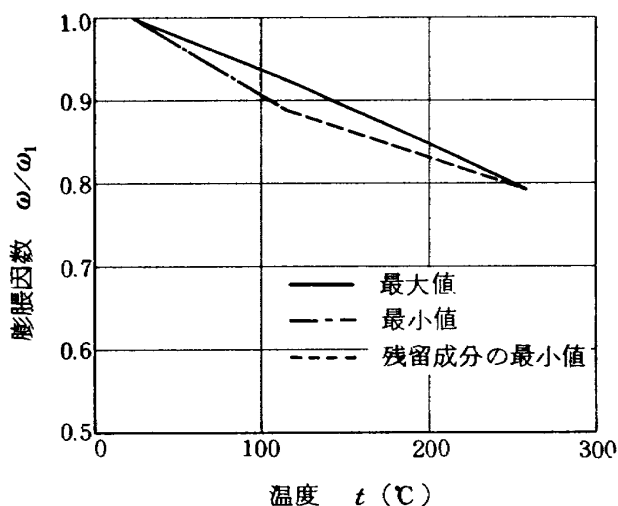


図7 JP-4の膨脹因数 (1 atm)

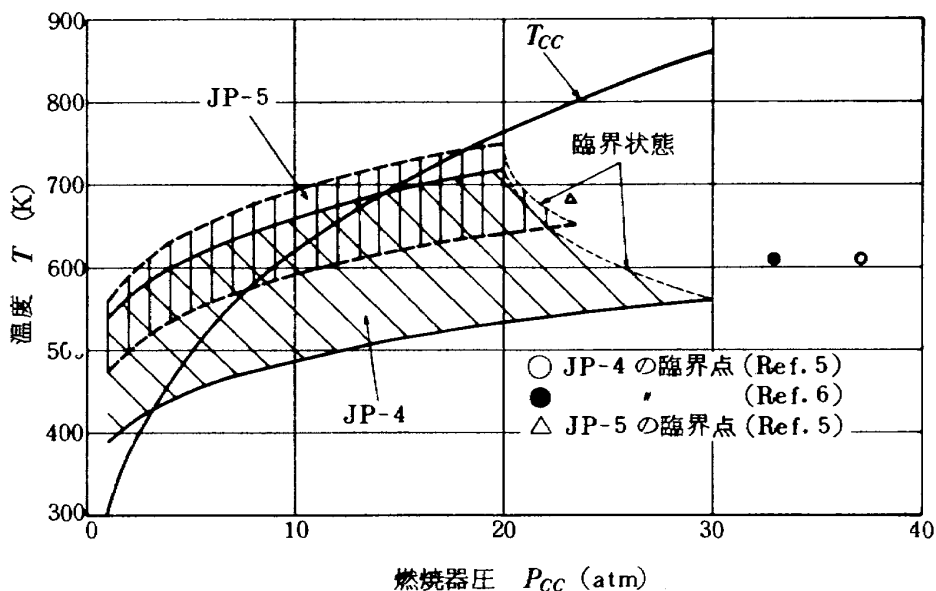


図6 燃焼器入口空気温度  $T_{CC}$  とジェット燃料の沸点の範囲

値を 298K を基準にとって示す。図中  $t = 25 \sim 115^\circ\text{C}$  における  $\omega/\omega_1$  の最小値は JP-4 の初期留出温度  $t_b = 115^\circ\text{C}$  に対するものであり、最大値は最終留出温度 258 $^\circ\text{C}$  に対するものである。JP-4 の場合 115 $^\circ\text{C}$  から燃料の一部が沸点に達し、次第に軽い成分が蒸発して無くなり、258 $^\circ\text{C}$  では最終留出成分も沸点に達する。このため、258 $^\circ\text{C}$  では最終留出成分に対する  $\omega/\omega_1$  のみを示してある。各温度における平均密度  $\bar{\rho}$  はその温度における燃料の全体重量  $W$  および留出温度に関する重量分布  $w(t_b)$  と膨脹因数  $\omega$  から

$$\bar{\rho} = \rho_1 \frac{1}{W} \int \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right) w(t_b) dt_b \quad (10)$$

の関係で与えられる。 $w(t_b)$  の分布は図 1 から推定して、JP-4 では温度に関して平均した変化を、JP-5 ではいくぶん低温留出成分の多い分布を与える。同一温度における  $\omega/\omega_1$  の最大値と最小値の差は 1 気圧では 8% 程度である。初沸点以上の温度における平均密度は残留成分の量に基いて決まる。温度上昇に伴って残留成分には図 1 の分留特性から次第に留出温度が高く、分子量の大きい成分が増えてくる。

加圧時にはジェット燃料の沸点が上昇すると共に燃料中の最大と最小密度の差が大きくなる。その様子を図 8, 9 に示す。基準点 1 atm, 298K では最大密度と最小密度の間に JP-4 で約 7%, JP-5 で約 4% の差があるが各々の値は 1 にとってある。

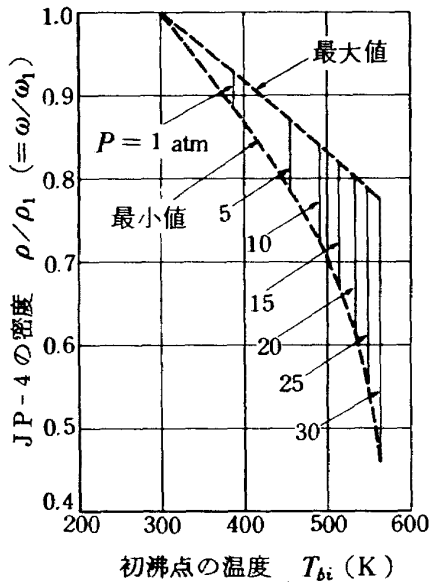


図 8 初沸点における JP-4 の密度の最大値と最小値 (1 atm, 298 K 基準)

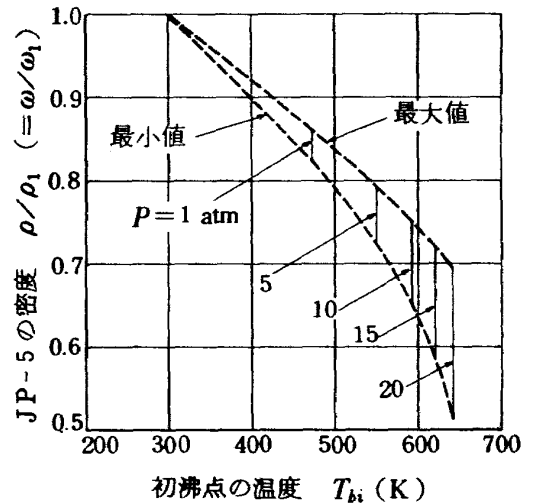


図 9 初沸点における JP-5 の密度の最大値と最小値 (1 atm, 298 K 基準)

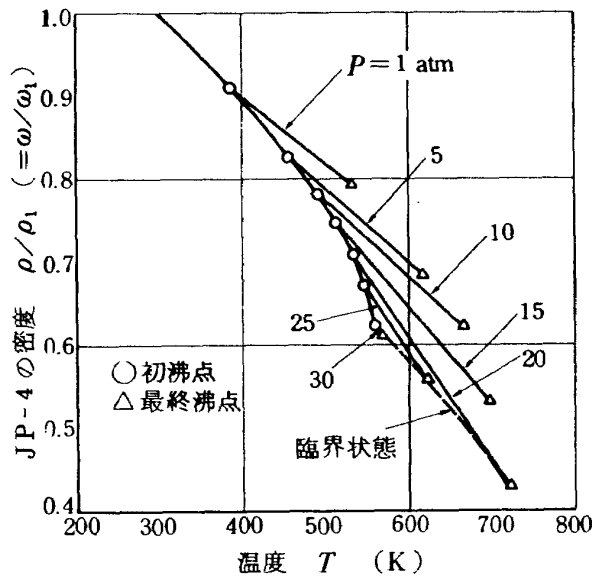


図 10 JP-4 の平均密度の温度と圧力による変化 (1 atm, 298 K 基準)

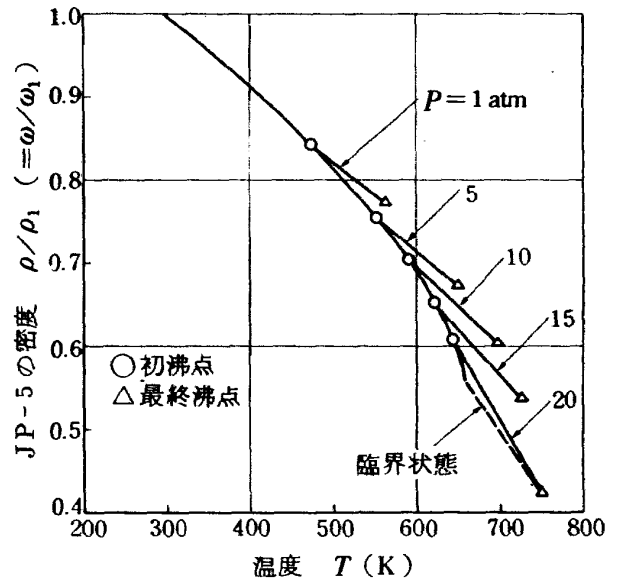


図 11 JP-5 の平均密度の温度と圧力による変化 (1 atm, 298 K 基準)

加圧時の液体燃料の平均密度の変化を図10, 11に示す。図では平均密度を単純に密度の最大と最小値の算術平均で示してある。温度上昇と共に平均密度は図示の全体に共通な曲線に沿って低下し、一定圧力では各気圧下の初沸点から次第に軽い成分が蒸発し、最終成分が蒸発する最終沸点まで図示のように分岐して達する。分岐した部分では、共通な曲線に比べて温度上昇による密度の低下が少ない。これは残留成分の密度が次第に大きくなるからである。

なお、実際の燃料では軽い成分から規則正しく蒸発する状態ではなく、重い成分も蒸気圧に相当して同時に蒸発することが考えられる。また、液滴内の温度差による流動や蒸気圧の液滴表面上の分布も考えられる。これらのことをとり入れて燃料や燃料液滴に対する物性値を求めることは現段階では無理なので、単純な仮定に基いて値を求めたのである。

気体状燃料の比重量は気体の状態式に基いて求められるが、高圧や温度の比較的低い領域では完全ガスの場合より値が大きくなる。この点を考慮した状態式は圧縮係数 $Z$ を用いると次のように補正した形で表わされる。

$$\frac{P}{T} = ZRT \quad (11)$$

ここで  $P$  ; 圧力,  $\gamma$  ; 比重量,  $R$  ; ガス定数,  $T$  ; 絶対温度

$Z$ の値は換算温度  $T/T_c$  と換算圧力  $P/P_c$  の関数として図示されているので<sup>1,10)</sup>、式(11)を用いて比重量を温度と圧力の関数として求めることができる。式(11)のガス定数 $R$ は一般ガス定数  $R_0$  および気体の分子量 $M$ から  $R=R_0/M$  の形で与えられるので、気体状ジェット燃料の各分子量成分に対して図12~図17の結果が得られる。図で圧力一定の条件では高温側の値から45°の傾斜線上に数値があれば完全ガスに近いことを示しているが、低温および高圧の条件では気体状燃料が大幅に完全ガスから離れることを示している。図中に液状燃料の比重量も表1と図8および図9に基いて破線で示してある。燃料の臨界圧力を越える圧力では別々に求めた液体と気体状燃料の比重量が温度に対し連続的に変化しており、妥当な傾向が示されている。

$M = 230$  の場合の食い違いはグラフからの読みとりの誤差に基くものと思われるが、この程度の誤差は全体に共通なものとする必要がある。

### 3.6 蒸気圧

蒸気圧と温度の関係は式(7)で与えられており、7気圧までの真蒸気圧が図18のように示されている<sup>4)</sup>。これらか

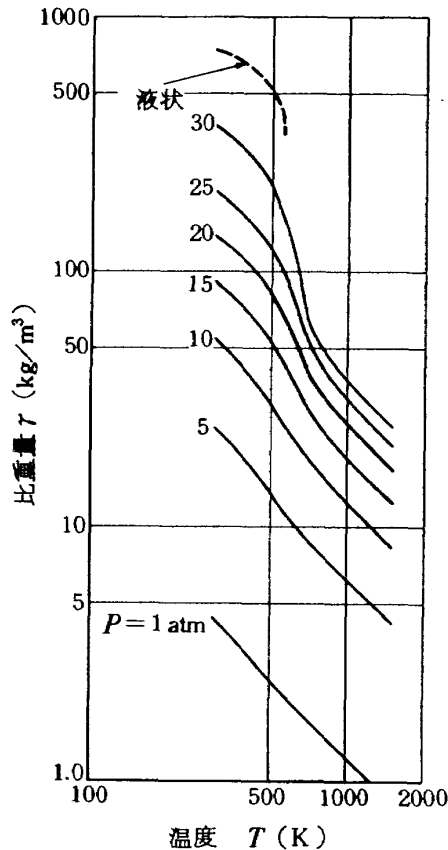


図 12 気体状JP-4の比重量 ( $M_{mn} = 105$ )

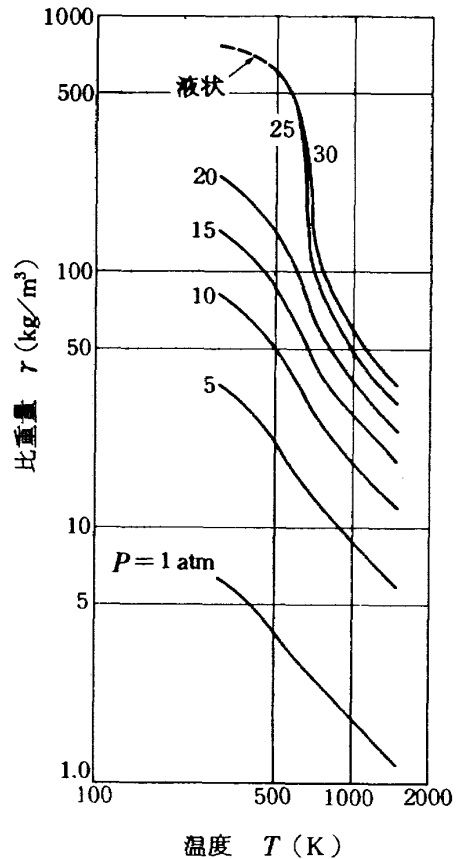


図 13 気体状JP-4の比重量 ( $M_{mv} = 150$ )



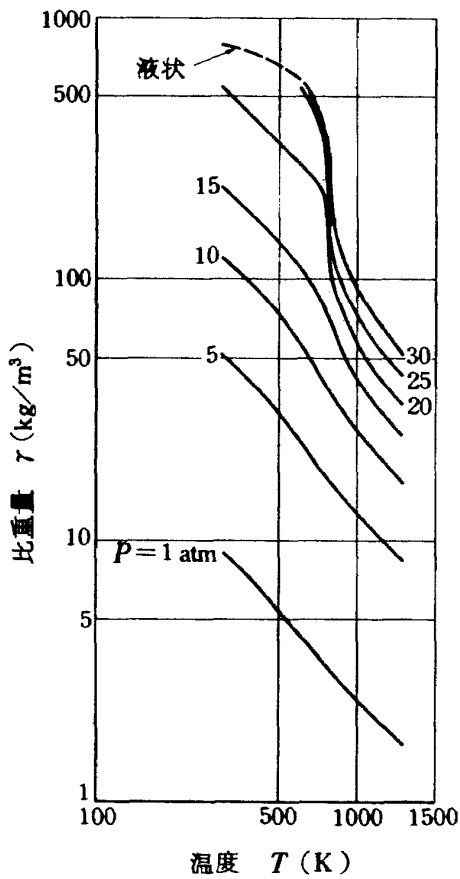


図 14 気体状JP-4の比重量 ( $M_{max}=210$ )

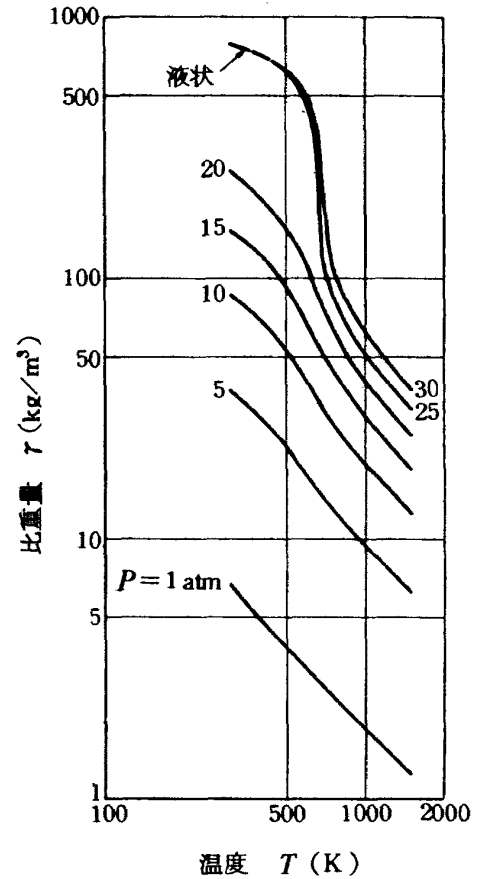


図 15 気体状JP-5の比重量 ( $M_{min}=158$ )

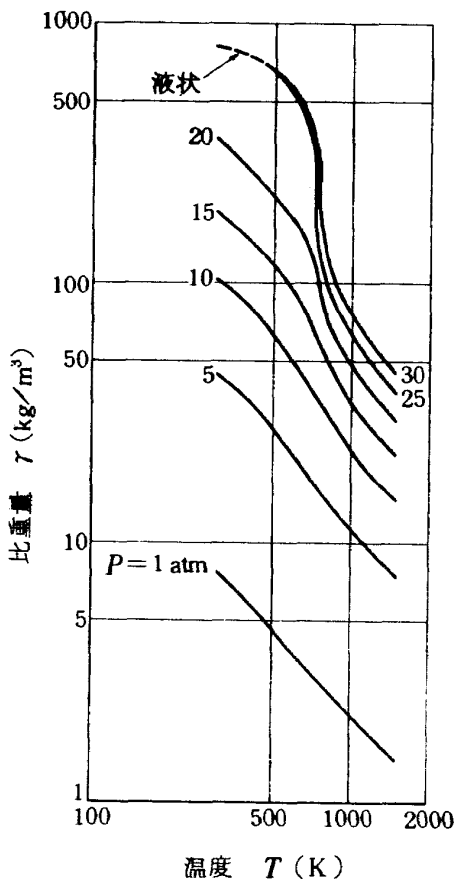


図 16 気体状JP-5の比重量 ( $M_{avr}=186$ )

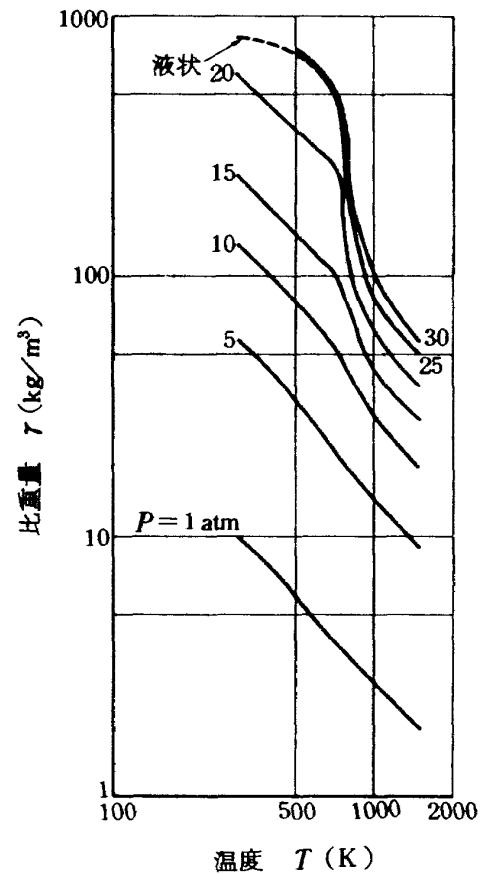


図 17 気体状JP-5の比重量 ( $M_{max}=230$ )

ら温度と蒸気圧の関係を再整理すると図19, 20のようになる。図中の斜線の部分が蒸気圧の範囲で、一定の温度状態では設定圧力以上の蒸気圧の部分が沸騰する。斜線の部分から各留出成分が平均して分布しているとして求めた平均値を実線で示してある。図中の真蒸気圧は図18から与えられ、各成分が残存している状態の値である。比較のため航空用ガソリンと灯油系のJP-1の飽和蒸気圧<sup>7)</sup>を、ガソリン系のJP-4と灯油系のJP-5に対して各々示す。本報告の平均値はオーダ的には良く一致している。

3.7 熱伝導率

液状ジェット燃料の熱伝導率は図21のように与えられている<sup>4)</sup>。JP-4の比重が約5<sup>1</sup>°APIに相当することから、メートル制に換算した値を図22に示す。図22には各圧力における沸点の範囲を示してあり、図21に示された温度範囲を越える熱伝導率に対しては破線で値を示してある。熱伝導率と温度の関係は広い範囲では直線的ではないが、狭い温度範囲では近似的に直線として取扱っても差支えないことが示されている<sup>1)</sup>。圧力による熱伝導率の変化は6,000気圧で常圧の値の約1.8倍から2倍、12,000気圧で約1.5倍から2.5倍である<sup>1)</sup>。高圧では変化量が低下するが、圧力に比例して増加すると仮定しても、30気圧では増加量が0.1%以下なので殆んど変化を無視できる。

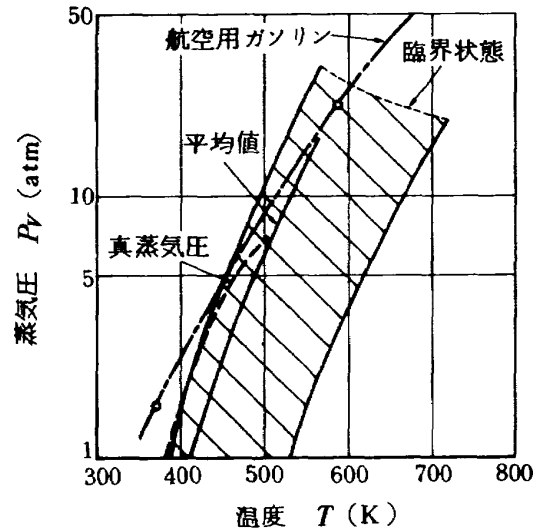


図19 ジェット燃料JP-4の蒸気圧

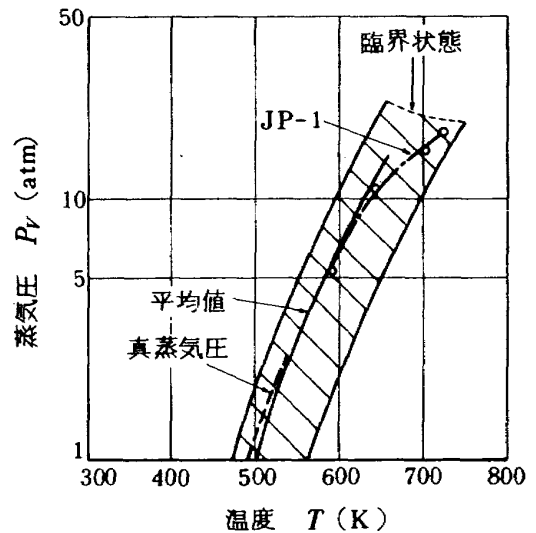


図20 ジェット燃料JP-5の蒸気圧

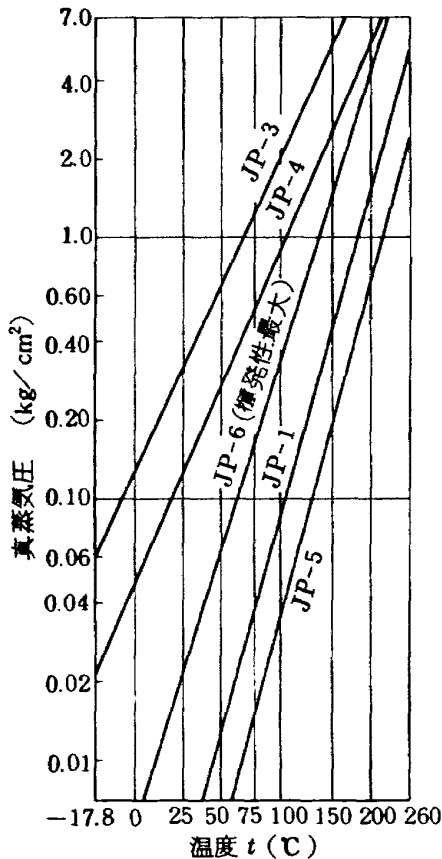


図18 各種航空タービン燃料の蒸気圧—温度関係

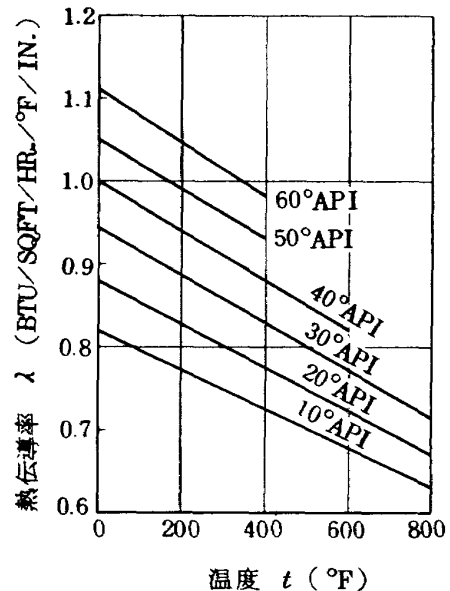


図21 液状石油製品の熱伝導率

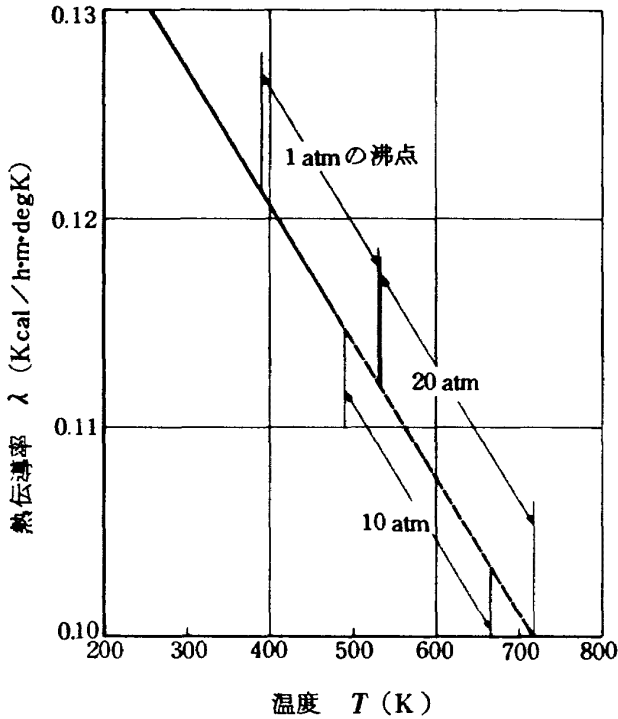


図 22 液状JP-4の熱伝導率と沸点の範囲

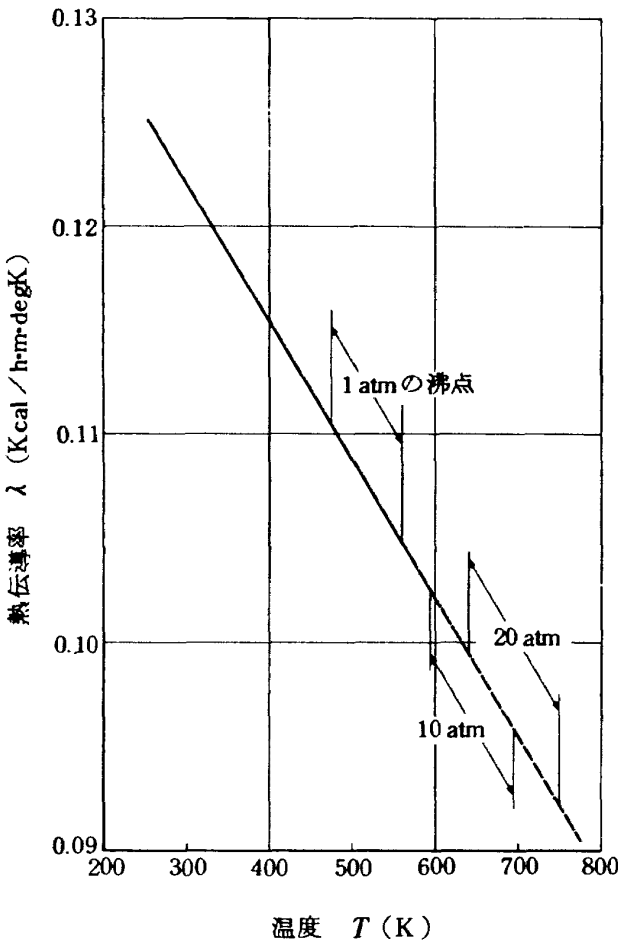


図 23 液状JP-5の熱伝導率と沸点の範囲

JP-5の比重が約4.2° APIとして同様に熱伝導率と各圧力における沸点の範囲を求めたのが図28である。

気体状ジェット燃料の熱伝導率の推算には対応状態原理に基づいて次式によって表わされる一般線図<sup>1)</sup>を利用できる。

$$\lambda = \frac{\lambda}{\lambda_c} = f(P_r, T_r) \quad (12)$$

ここで、 $\lambda_r$ ; 対臨界熱伝導率、 $\lambda$ ; 圧力 $P$ 、温度 $T$ における熱伝導率、 $\lambda_c$ ; 臨界点における熱伝導率、 $P_r$ ; 圧力 $P$ の対臨界圧(=  $P/P_c$ )、 $T_r$ ; 温度 $T$ の対臨界温度(=  $T/T_c$ )

熱伝導率の常圧における値  $\lambda_1^*$  が図24のように示されているので<sup>8)</sup>、 $\lambda_c$ の代りに  $\lambda_1^*$ を用いて式(12)の代りに次の関係から $\lambda$ の値を求めた。

$$\frac{f(P_r, T_r)}{f(P_{r1}^*, T_{r1}^*)} = \frac{\lambda_r}{\lambda_{r1}^*} = \lambda / \lambda_1^* \quad (13)$$

求めた結果を分子量の違いによって分けて図25~図80に示す。図中に示した飽和状態は加圧時の沸点に相当する。図には臨界点付近の熱伝導率の変化が極めて大きいことが示されている。

### 3.8 比熱

液状燃料の比熱が比重の関数として示されているので<sup>4)</sup>、JP-4とJP-5の比重を約5.1° APIと4.2° APIとして各々の値を図81に実線で示す。一点鎖線は文献(6)によるもので、双方の間には幾分差異が認められる。また、文

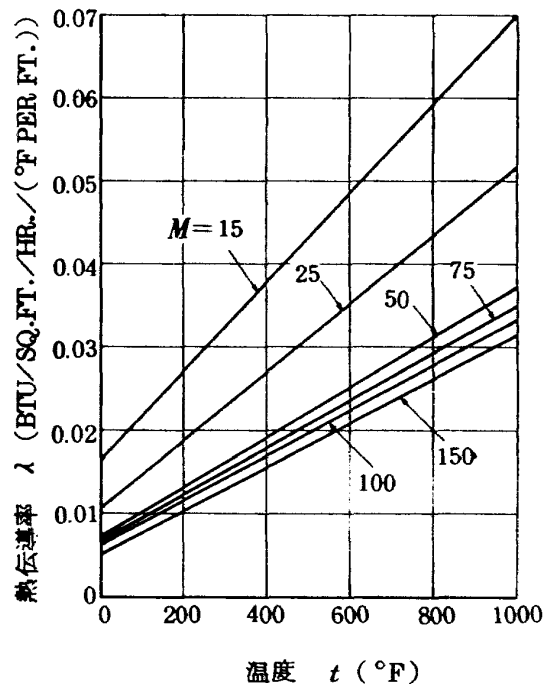


図 24 炭化水素ガスの常圧における熱伝導率

献(5)と(8)はここで用いた文献(4)の比重-比熱関係と幾分異なる値を示しており、これら4種の値の出典はそれぞれ異なっている。この差異の理由は明確でないが、差が大きいのでいずれも計算に利用することは可能と思われる。  
比熱に対する圧力の影響は膨脹因数 $\omega$ を用いると次のよ

うに表わされる。

$$\frac{C_{p2}}{C_{p1}} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^{2.8} \quad (14)$$

線図<sup>1)</sup>から常温300K、および、図31の実線で示された部分の限界の温度473Kに対して圧力の影響を求めた。

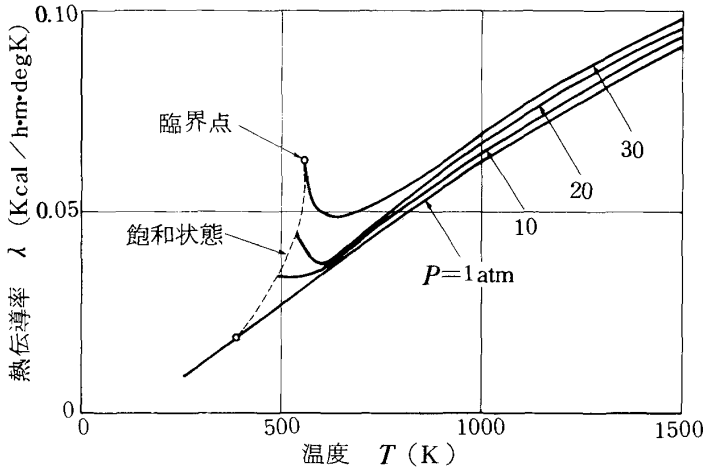


図 25 気体状JP-4の最も分子量の小さい成分の熱伝導率 ( $M=105$ )

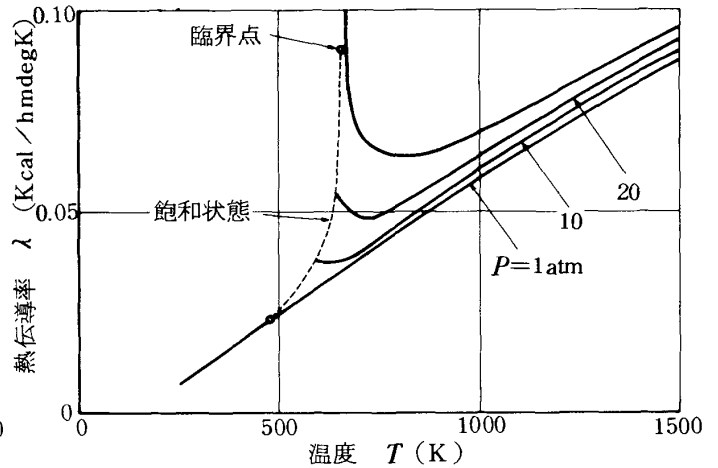


図 28 気体状JP-5の最小分子量成分の熱伝導率 ( $M=158$ )

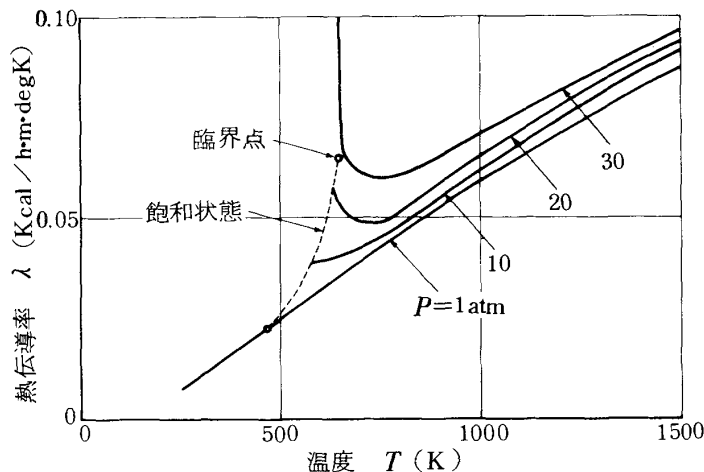


図 26 気体状JP-4の平均分子量成分の熱伝導率 ( $M=150$ )

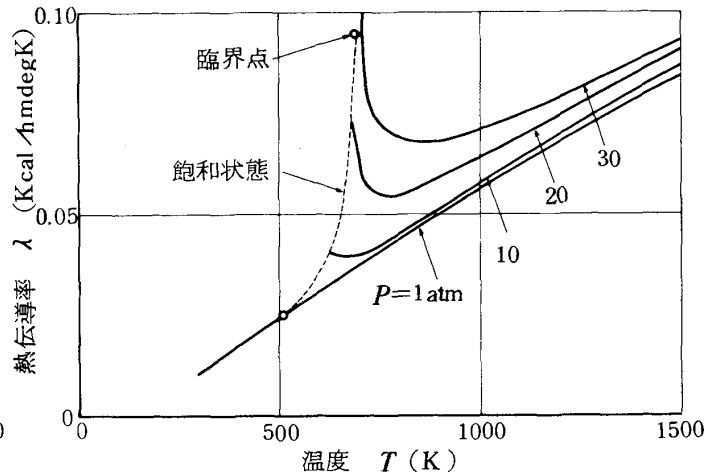


図 29 気体状JP-5の平均分子量成分の熱伝導率 ( $M=186$ )

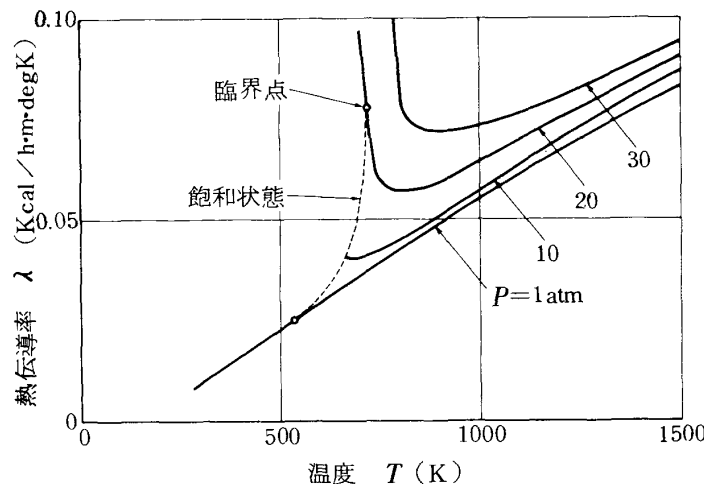


図 27 気体状JP-4の最大分子量成分の熱伝導率 ( $M=210$ )

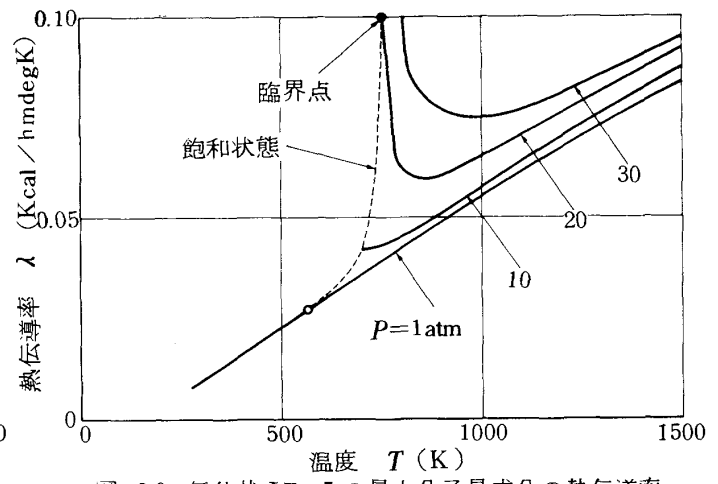


図 30 気体状JP-5の最大分子量成分の熱伝導率 ( $M=230$ )

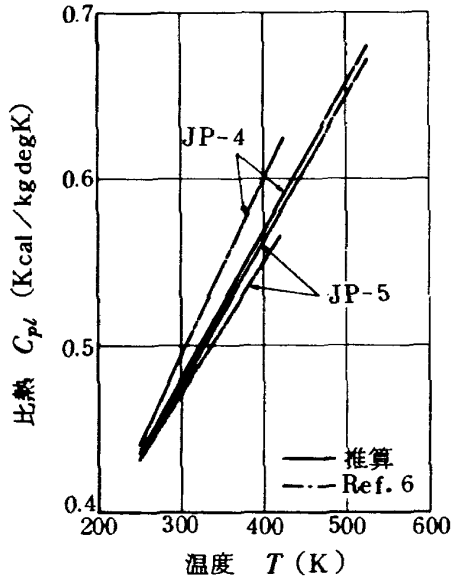


図 31 ジェット燃料JP-4とJP-5の比熱

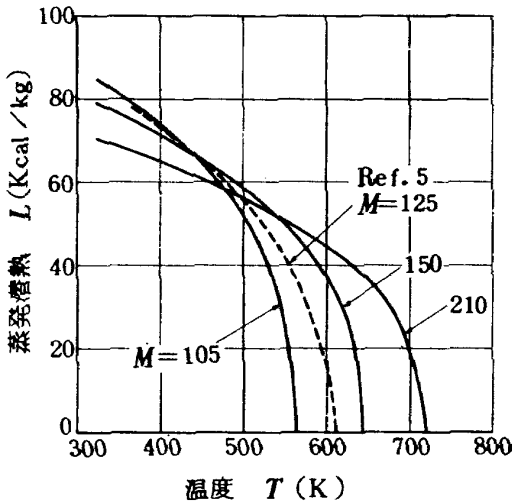


図 32 JP-4の蒸発潜熱

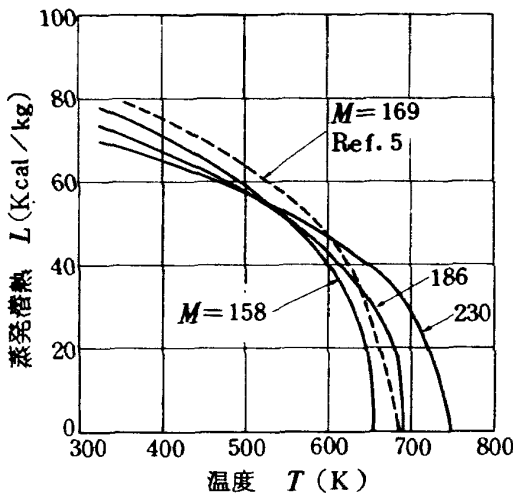


図 33 JP-5の蒸発潜熱

その結果、常温ではJP-4とJP-5の臨界圧力まで上げたとき約1.5%の比熱の低下を示した。473KではJP-4の最も軽い成分に対して約12%の低下、平均分子量成分に対しては双方とも5%弱の低下が臨界圧まで上げた条件で示された。臨界温度付近の変化量は図からは求められず明瞭でない。

3.9 蒸発潜熱

標準沸点における蒸発潜熱  $L_b$  はWatson-根岸の方法<sup>1)</sup>によって次のように得られる。

$$L_b = \frac{248(t_b + 273)^2}{(34.5 + 0.11t_b)M} \quad [\text{kcal/kg}] \quad (15)$$

液体の蒸発潜熱は温度の上昇と共に低下し、臨界点で零になる。温度による変化は次のように求められる<sup>1)</sup>。

$$L = L_b \left( \frac{T_c - T}{T_c - T_b} \right)^{0.38} \quad [\text{kcal/kg}] \quad (16)$$

式(16)によって得られたJP-4とJP-5の最小、最大、および、平均分子量成分に対する蒸発潜熱を図32と図33に示す。これらの図にはBarnettら<sup>5)</sup>の示す分子量  $M = 125$  と  $169$  の場合の推算値を比較のため示してある。双方の値はオーダー的には一致しているが、数値の小さいと

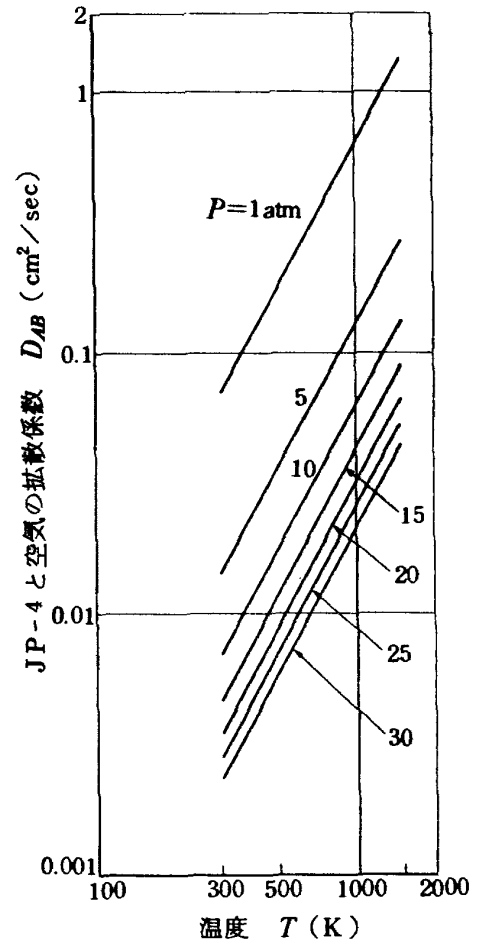


図 34 JP-4と空気の拡散係数 ( $M_{min}=105$ )

ここでは臨界圧力の違いに基く差異がかなりある。図示の高温部は加圧下でのみ液体燃料が存在し得る範囲であり、示された蒸発潜熱は加圧時の条件に対応している。蒸発潜熱に対する圧力の影響<sup>9)</sup>は100℃付近の常圧と臨界圧力間では1.5%程度と小さい。臨界温度付近になると蒸発潜熱が次第に低下し影響が相対的に大きくなる。

3.10 拡散係数

気体状ジェット燃料と空気の加圧時の拡散係数 $D$ は次式から求められる<sup>1)</sup>。

$$D_{AB} = \frac{0.00070 T^{1.833}}{\left[ \left( \frac{T_C}{P_C} \right)_A^{1/3} + \left( \frac{T_C}{P_C} \right)_B^{1/3} \right]^3} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}} \cdot \frac{P_0}{P}$$

[cm<sup>2</sup>/s] (17)

ここで  $T_C$  ; 臨界温度 (K),  $P_C$  ; 臨界圧力 (atm),  $T$  ; 温度 (K),  $P_0$  ; 基準圧力 (= 1 atm),  $P$  ; 圧力 (atm),  $M$  ; 分子量, 添字  $A, B$  は各々燃料と空気に対する値を示す。

求めた拡散係数をジェット燃料の最小, 平均, 最大分子量の場合に分けて図34～図39に示す。拡散係数は式(17)や図から分るように温度の1.833乗に比例し, 圧力には反

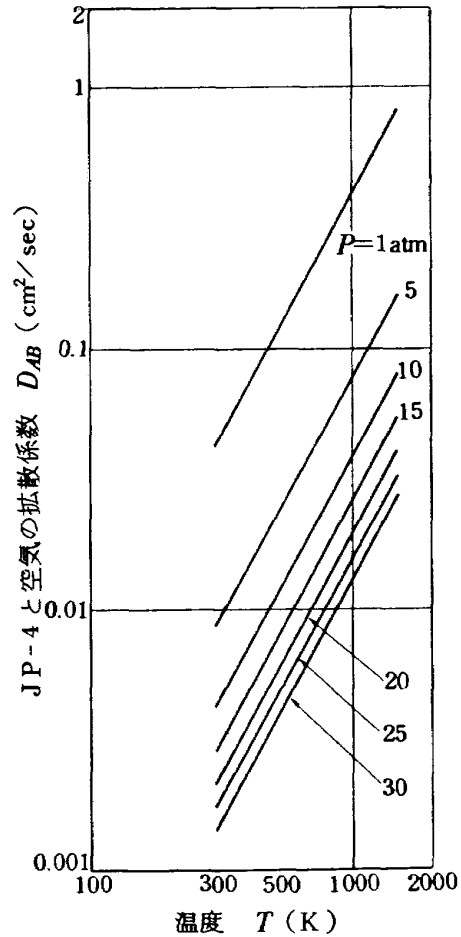


図 36 JP-4 と空気の拡散係数 ( $M_{max} = 210$ )

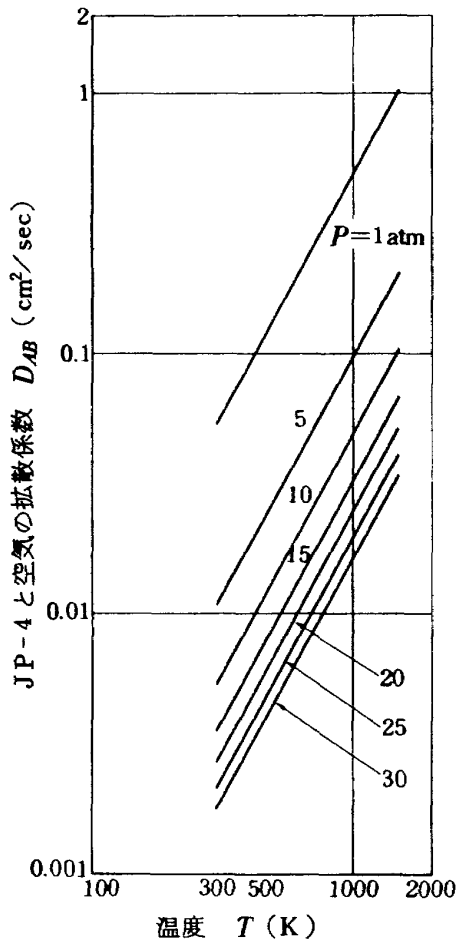


図 35 JP-4 と空気の拡散係数 ( $M_{avr} = 150$ )

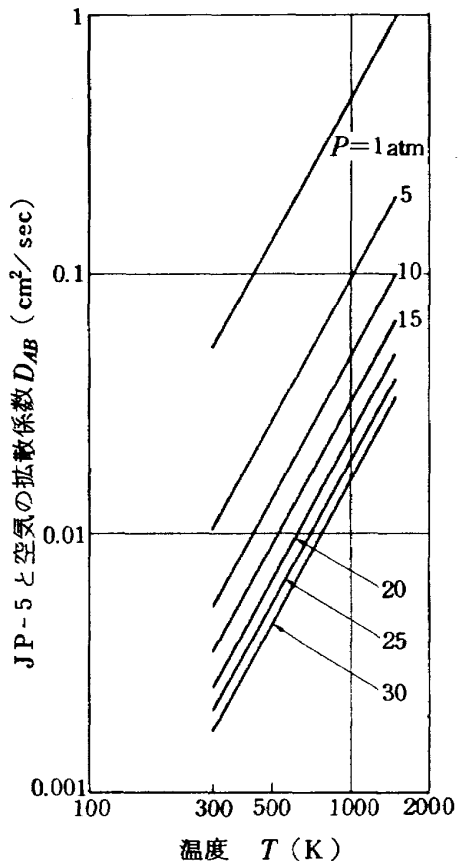


図 37 JP-5 と空気の拡散係数 ( $M_{Min} = 158$ )

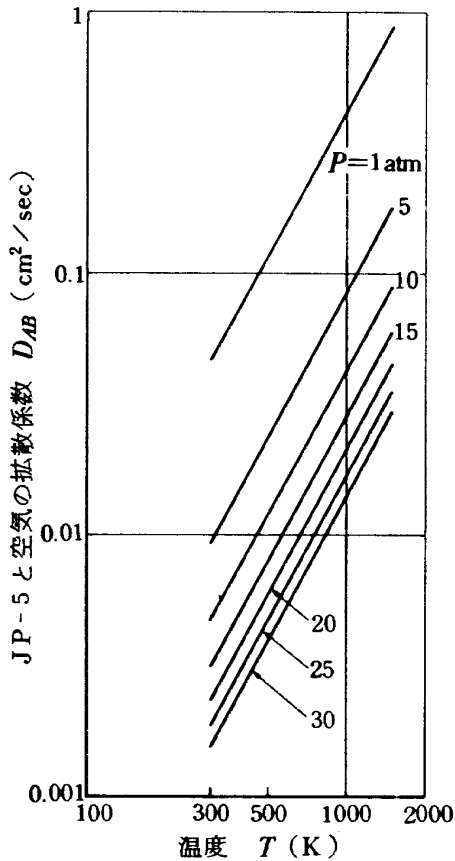


図 38 JP-5 と空気の拡散係数 ( $M_{avr} = 186$ )

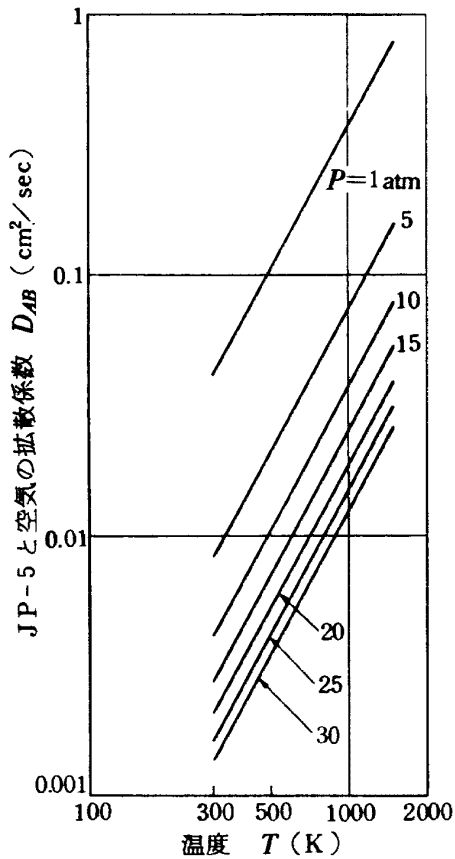


図 39 JP-5 と空気の拡散係数 ( $M_{avr} = 230$ )

比例する。また、分子量の大きい成分ほど同一温度と圧力では拡散係数が小さくなっている。

式(7)は高圧や燃料の分圧の高いときは補正が必要とされるが、相互拡散係数に対する補正の方法が明確でないため、自己拡散係数の補正法から近似的に補正値を求める方法が示されている<sup>2)</sup>。その方法では擬似臨界温度 $T'$ と圧力 $P'$ を次式から求めて、両方の値から補正値がグラフを利用して得られる。

$$T'_C = \sum_{i=1}^n x_i T_{Ci}$$

$$P'_C = \sum_{i=1}^n x_i P_{Ci} \tag{18}$$

ここで、 $x_i$ は $i$ 成分のモル分率、 $T_{Ci}$ と $P_{Ci}$ は $i$ 成分の臨界温度と臨界圧力である。本報告で扱っている最も高圧の条件 $P = 30 \text{ atm}$ と燃料蒸気の最大分子量 $M = 230$ の場合、補正値は図40のように示される。図中 $x_{F,S}$ は燃料成分のモル分率で残りは空気である。 $x_{F,S}$ が大きくと温度の低い場合にはかなり拡散係数 $D$ が低下するが、対象のジェット燃料JP-5の温度と蒸気圧の関係からは破線で示された $x_{F,S}$ のモル分率が与えられる。したがって、燃料液滴の蒸発を扱う場合には30気圧程度でも補正の量は僅かであることが分る。なお、1気圧では $x_{F,S}$ が大きくと補正の必要がなく、30気圧より低い条件では図34より補正量が少なくて良い。

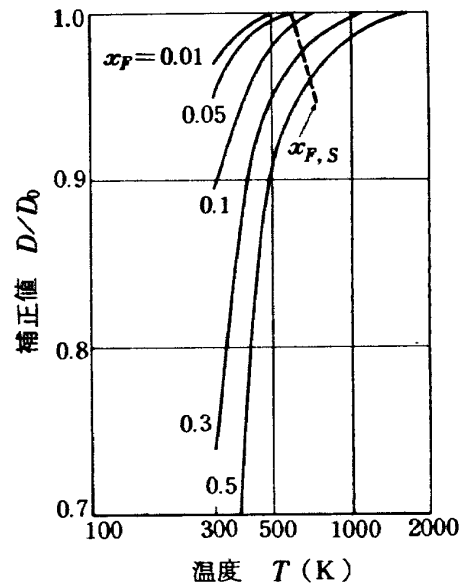


図 40 拡散係数の補正値 ( $P = 30 \text{ atm}$ ,  $M = 230$ )

## 4 む す び

航空用ガスタービン燃焼器内の燃料液滴の蒸発や到達距離を計算する際に必要な燃料の物性値として、ジェット燃料JP-4とJP-5の加圧時の熱的、物理的物性値を推算法により求め、あるいは、公表されている物性値に対して圧力の影響を検討して示した。燃料の組成が分子量の幅広い範囲に亘るため、得られた物性値もある幅を持つものが多い。推算した臨界温度、臨界圧力、蒸気圧、蒸発潜熱は特定の条件に対して公表されているそれらの値とオーダ的な一致を示した。

得られた結果から30気圧程度で使用されている最近のガスタービン燃焼器では入口空気の条件が燃料の臨界点を越えていることが示された。したがって高圧燃焼器の内部の解析に際しては低圧からの単純な類推でなく、燃料の物性値の変化を考慮した扱いが必要と思われる。また、幅を持った物性値から代表値としてどの値をとるかは、蒸発等の現象との関連で決まると考えられ、それらの具体的な計算における大きな課題の一つである。

最後に資料の一部をシェル石油花島脩氏より提供して頂いたことに対しお礼申し上げます。

## 文 献

1. 佐藤一雄；物性定数推算法，丸善（1958）
2. R. B. Bird, W. E. Stewart and E. N. Lightfoot ; Transport Phenomena, Wiley (1960)
3. 角田敏一，広安博之；高温高圧の気体中における単一液滴の蒸発（第2報，理論的研究）日本機械学会論文集（第2部）42巻356号（昭51-4）pp.1216-1223
4. 燃料燃焼に関する資料調査分科会調査報告書，日本機械学会第二企画部会（1969）PP. 14-17。
5. H. C. Barnett and R. R. Hibbard ; Properties of Aircraft Fuels, NACA-TN-3276(1956)。
6. Coordinating Research Council ; Aviation Handbook-Fuels and Fuel Systems (NAV AIR 06-5-504)(1967)。
7. N. A. Ragozin ; Jet Propulsion Fuels, Pergamon Press (1961) P. 13。
8. J. B. Maxwell ; Data Book on Hydrocarbons, D. Van Nostrand (1958) P. 215。
9. W. C. Edmister, R. E. Thompson and L. Yarborough ; Partial Enthalpies of Components in Gas Mixtures via Redlich-Kwong Equation of State, AIChE J. Vol 9, No 1 (1963) PP. 116-120。
10. E. F. Obert and R. L. Young ; Elements of Thermodynamics and Heat Transfer, McGraw-Hill (1962)。



---

## 航空宇宙技術研究所資料314号

昭和51年10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 株式会社東京プレス  
東京都板橋区桜川 2-27-12

---

