

No. 269.

(Published August, 1943.)

---

**Theoretical calculation of the fuel consumption of  
aeroengines at altitude (Second report).**

Relation between the theoretical equation of indicated mean effective pressure of a supercharged engine with air fuel ratio and the changes in indicated thermal efficiency with altitude, boost pressure, and temperature.

By

Keikichi TANAKA, *Kogakuhakusi*,

Member of the Institute,

and

Tetsujiro OZONO, *Kogakusi*.

---

**Abstract.**

Numerical calculations of power variation with altitude in a gear driven supercharged engine were made, using a rich mixture ( $n=0.9$ ) in order to obtain maximum power both at altitude and take off.

In aeroengines, however, the reduction in fuel consumption when cruising is important for increasing the flight range of the aeroplane, for which purpose the use of a weak mixture in the engine is necessary.

The authors in this paper discuss the adaptability of the theoretical equation of indicated mean effective pressure, which is obtained with a mixture  $n=0.9$ , to the range of weak mixture of from  $n=1.1$  to  $n=1.2$  by comparing these values with those obtained by JS diagrams of combustion gases.

They also discuss the changes in indicated thermal efficiency, with boost pressure, temperature, and altitude, when the compression ratio and mixture ratio are constant, by means of the values obtained with JS diagrams of combustion gases.

As the results of these discussions, (i) it is possible to apply theoretical equation (7)' concerning indicated mean effective pressure also to weak mixtures ranging from  $n=1.1$  to  $n=1.2$  with maximum deviation of about 1% from the theoretical values obtained from JS diagrams, (ii) the change in indicated thermal efficiency with boost pressure, temperature, and altitude, when the compression ratio and mixture ratio are kept constant, is somewhat greater in the case of a weak mixture than in that of a rich mixture, but taking the indicated thermal efficiency of no boost at ground level as standard, the maximum change in efficiency is about 1% in a practical range of boost pressure, temperature, and altitude, when the compression ratio and mixture ratio are kept constant, and therefore we may assume the efficiency to be constant.

The foregoing results are necessary in a preliminary discussion on the theoretical calculation of reduction of fuel consumption of aeroengines at altitude by using weak fuel mixtures.

## 航空發動機の高空燃料消費率の 理論計算 (其の二)

過給機附發動機の指示平均有効壓力の理論計算式と  
混合比との關係，並に指示熱効率の高度，ブースト壓  
力及び溫度等に依る變化の關係

所 員 田 中 敬 吉  
特別研究員 尾 園 鐵 次 郎

### 目 次

1. 緒 言.....	21
2. 燃料消費率の計算法.....	22
3. 指示熱効率の變化の検討.....	22
4. 指示平均有効壓力の變化の検討.....	25
5. 結 言.....	28

### 1. 緒 言

航空發動機の地上出馬力及び高空に於ける出馬力の理論計算は發動機の最大出力を目標としたものであるから，空氣と燃料との混合比は最大出力に近い  $n=0.9$  の場合に就いて行つた。(1)

然し航空發動機として巡航時に於て燃料消費率を低減し，航續性能を増大せしめることも亦大切な問題であつて，このためには過薄混合比の使用が必要となる。この過薄混合比の場合の理論計算式を使用して，どの程度 JS 線圖に依る正確な數値と一致するか，又指示熱効率の，過濃混合比と過薄混合比で，高度，ブースト及び溫度で受ける影響がどの様に變化するかを確めたのが本文の目的であつて，過薄混合比に依る高空に於ける燃料消費率低減の理論計算の前提である。

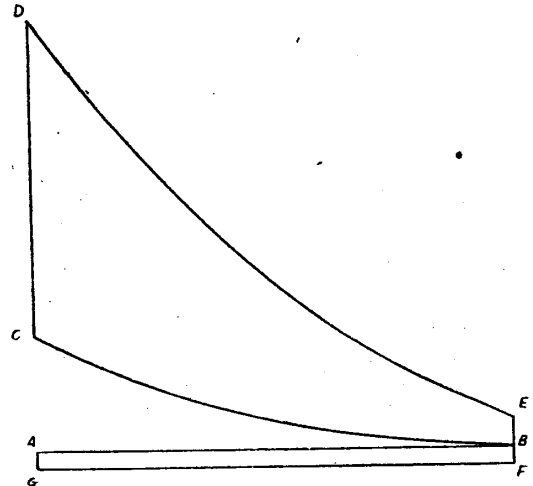
(1) 航空研究所報告第 268 號

## 2. 燃料消費率の計算法

過給機附發動機の理論サイクルのPV線圖を第1圖に示す。理論計算の都合上、同圖のBCDEの面積に相當する指示仕事量に對する平均有效壓力を指示平均有效壓力  $P_{mi}$  とし正味平均有效壓力  $P_{mb}$  を

$$P_{mb} = P_{mi} - P_{mi} - P_{ms} + P_{ma} \dots\dots\dots(1)$$

として表す。但し  $P_{mi}$  は摩擦其他の損失馬力に相當する平均有效壓力、 $P_{ms}$  は過給機驅動馬力に相當する平均有效壓力、 $P_{ma}$  は背壓に依る回復馬力に相當する平均有效壓力即ち第1圖のFGABの面積に相當するものである。



第 1 圖  
過給附發動機の理論的サイクル

然るときは第1圖のBCDEの面積に相當する指示仕事量を  $AL_i$  kcal/Nm<sup>3</sup> とし、 $W_v$  を燃燒瓦斯 1 Nm<sup>3</sup> の發生すべき化學的熱量とすれば指示熱效率は

$$\eta_i = \frac{AL_i}{W_v} \dots\dots\dots(2)$$

と定義せられ、又この場合の機械效率は

$$\eta_m = \frac{P_{mb}}{P_{mi}} = 1 - \frac{P_{mi} - P_{ms} + P_{ma}}{P_{mi}} \dots\dots\dots(3)$$

と定義せられる。

従つて發動機の燃料消費率  $b_{cg}$ /BHP・hr は  $H_u$  を燃料の低值發熱量 kcal/kg とすれば上述の  $\eta_i$  及び  $\eta_m$  が求められれば

$$b_c = \frac{63.2}{\eta_i \eta_m} \times \frac{10,000}{H_u} \dots\dots\dots(4)$$

として計算される。

## 3. 指示熱效率の變化の檢計

指示熱效率  $\eta_i$  を(2)式の如く定義した場合の、混合比  $n=0.9$  に對する、この

$\eta_i$  の数値は既に前報告に於て JS 線圖に依つて計算したものがあつた。(2) 發動機の壓縮比  $\epsilon=7$  の場合に就いて、高度  $Z=0\text{ m}$  及び  $Z=6000\text{ m}$  の場合を取り、ブースト壓力 ( $P_s-760$ ) mmHg を種々變化したこの數値  $\eta_i$  を第 1 表に再録して示す。燃燒中並びに膨脹中に各 7%、宛の熱損失があるものとし、過給機のリボトロップ指數  $n=1.63$  として計算したものである。

第 1 表 指示熱效率  $\eta_i$  [混合比  $n=0.9$ ](a) 高度  $Z=0\text{ m}$ .

ブースト壓力 ( $P_s-760$ )mmHg	—	—	0	200	400	600	800	1000
吸氣溫度 $t_s$ °C	—	—	15	42.2	66.1	87.6	107.3	125.5
指示熱效率 $\eta_i$	—	—	.3328	.3325	.3323	.3315	.3304	.3304

(b) 高度  $Z=6000\text{ m}$ .

ブースト壓力 ( $P_s-760$ )mmHg	-400	-200	0	200	400	600	800	1000
吸氣溫度 $t_s$ °C	-22.9	24.3	61.5	93.3	121.0	145.9	168.8	189.8
指示熱效率 $\eta_i$	.334	.334	.332	.331	.330	.328	.328	.326

この計算結果を見るに、混合比  $n=0.9$  の場合には壓縮比  $\epsilon=7$  の一定の場合に、ブースト壓力 ( $P_s-760$ ) mmHg 並びに吸氣管内溫度  $t_s$  °C の増加と共に、指示熱效率  $\eta_i$  が低下することを示すが、ブースト壓力に依つては殆ど變化がなく、吸氣管内の溫度の上昇と共に僅かづゝ低下することが前の計算結果に依つて確められた。

第 1 表の地上  $Z=0\text{ m}$  に於ける  $\eta_i$  の變化に對し、高度 6000 m の場合の變化の方が大きくなるのは吸氣の溫度範圍の大きくなるためである。實際の場合として高度  $Z=6000\text{ m}$  に於て 1000 mmHg ブーストの如き高ブーストは實現困難であるから、地上の 0 mmHg ブーストの場合の  $\eta_{i0}$  を基準として考へて、混合比  $n=0.9$  の場合には實用の範圍で指示熱效率  $\eta_i$  の變化は最大に於ても 1% 内外であることを知る。

以上は混合比  $n=0.9$  の場合であるが過薄混合比  $n=1.1$  及び  $n=1.2$  の場合に就いて發動機の壓縮比は前と同様に  $\epsilon=7$  とし、高度  $Z=0\text{ m}$  及び  $Z=6000\text{ m}$  の場合に就いて同様の計算を JS 線圖に依つて行へば第 2 表の如くなる。

第2表 指示熱効率  $\eta_i$  [混合比  $n=1.1$  及び  $1.2$ ]

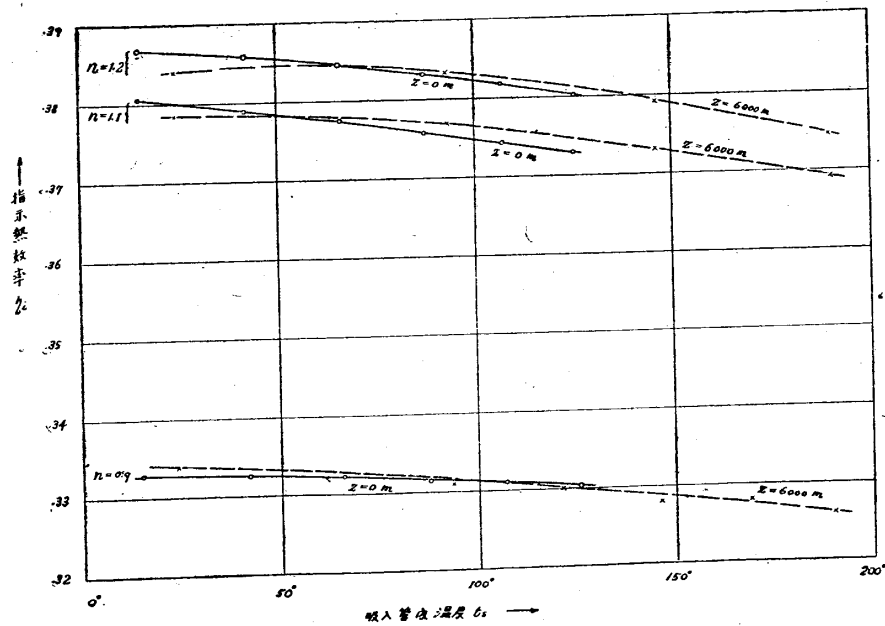
(a) 高度  $Z=0$  m.

ブースト圧力 ( $P_s-760$ ) mmHg		0	200	400	600	800	1000
吸気温度 $t_s$ °C		15	42.2	66.1	87.6	107.3	125.5
指示熱効率	$n=1.1$	.3807	.3790	.3775	.3757	.3742	.3730
	$n=1.2$	.3867	.3859	.3846	.3831	.3816	.3801

(b) 高度  $Z=6000$  m.

ブースト圧力 ( $P_s-760$ ) mmHg		-200	+200	600	1000
吸気温度 $t_s$ °C		24.3	93.3	145.9	189.8
指示熱効率	$n=1.1$	.3785	.3769	.3732	.3692
	$n=1.2$	.3839	.3834	.3789	.3744

第2表の数値計算結果を見るに指示熱効率  $\eta_i$  は過薄混合気の場合には過濃混合気の場合よりも吸気管内の温度上昇と共にその低下率は大きくなる。これ等の関係を圖示するために第1表及び第2表の数値を横軸に吸入管内のブースト温度  $t_s$  を取つて第2圖に示す。而して過薄混合比でブースト圧力が負の値を取る場合 (-200



第2圖 指示熱効率に及ぼす吸気温度の影響

mmHg プースト) の  $\eta_i$  は吸気温度  $t_s$  が低いに拘らず却つて低下することゝなる。

今混合比  $n=1.1$  及び  $n=1.2$  の場合の地上の 0 mmHg プーストの指示熱効率  $\eta_{i0}$  を基準として考へれば地上に於ては  $100^\circ\text{C}$  の温度上昇に依つて 1.0~1.5% 内外の指示熱効率の値の低下を表し、正規高度 6000 m に於ては却つて  $100^\circ\text{C}$  の温度上昇に依る指示熱効率の値の低下は小さくなつて居る。

地上に於ても亦正規高度 6000 m に於てもプースト 1000 mmHg といふ様な高プーストは実際には許されないから、混合比  $n=1.1$  及び 1.2 の場合の地上 0 mmHg プーストの指示熱効率  $\eta_{i0}$  を基準として 1% 内外の誤差を許すとすれば、任意の正規高度、任意の正規プースト壓力に對して一定値としてこの基準の指示熱効率の値を使用して支障なきことを知る。

上述のプースト壓力  $-200$  mmHg の場合に、吸気温度が低いに拘らず、却つて指示熱効率が低下し、而してこの様な事柄は混合比  $n=0.9$  の場合には起らず、混合比が  $n=1.1$  及び 1.2 の場合に起つて居る。一般にプースト壓力が低い時は、壓縮終りの温度は餘り變化しないものと考へられるから、この低プースト壓力のためにその比容積が比較的が大きくなる。従つて爆發最高點附近に於ける熱解離が大きく、燃焼瓦斯のなす仕事量が減少することゝなり、従つて指示熱効率は低下する傾向にある。而して熱解離の影響は過濃混合氣の場合よりも過薄混合氣の場合の方が大であるから、混合比  $n=0.9$  の稀薄混合氣の場合にはこの程度のプースト壓力の低下では未だ現れないものと考へられる。

指示熱効率は吸気温度に依つて變化し、プースト壓力は殆ど影響しないとこの前に述べたが、<sup>(3)</sup> 之はプースト壓力が比較的高い場合でプースト壓力が低く過薄混合氣の場合にはプースト壓力の影響が現れて來ることがこの計算結果で知られる。

上述は指示熱効率の變化に吸気温度  $t_s$  を基準に取つて考へたが指示熱効率に直接關係するものは最高爆發點附近の状態即ちその壓力並びに温度であるから、これを基準として論ずべきであらうが、實際の取扱上最高爆發壓力及び温度を基準にするためには相當の計算を必要とし、不便であるから、便宜上第 2 圖に示した如く、吸気温度を基準として上述の如く計算を進めたものである。

#### 4. 指示平均有效壓力の變化の検討

燃料消費率  $b_c$  の計算には更に機械効率  $\eta_m$  を計算しなければならないが機械効率の計算の基礎は(1)或は(3)式に示す指示平均有數壓力  $P_{mi}$  の計算である。

同一發動機で、一定の混合比  $n$ 、一定の壓縮比  $\epsilon$  に對して、氣筒内に實際に吸入

(3) 前掲論文

された新混合気の重量を  $G_{Bch}$  とし、そのときの上述の指示熱効率を  $\eta_i$  とすれば指示平均有効圧力  $P_{mi}$  は

$$P_{mi} \propto G_{Bch} \times \eta_i$$

と考へられるから、同一發動機で地上無過給の場合を

$$P_{mio} \propto G_{Bcho} \times \eta_{io}$$

で表すならば

$$\frac{P_{mi}}{P_{mio}} = \frac{G_{Bch}}{G_{Bcho}} \cdot \frac{\eta_i}{\eta_{io}} \dots\dots\dots(5)$$

の関係式が得られる。

而して混合比  $n=0.9$  の場合に對しては同一の壓縮化に對して理論式より導いた實用式として

$$\frac{G_{Bch}}{G_{Bcho}} = \frac{P_s}{760} \cdot \frac{495}{t_s + 480} \cdot \frac{1 - \frac{0.771}{\epsilon - 0.320} \cdot \frac{P_z}{P_s}}{1 - \frac{0.771}{\epsilon - 0.320}} \dots\dots(6)$$

及び

$$\frac{P_{mi}}{P_{mio}} = \frac{P_s}{760} \cdot \frac{495}{t_s + 480} \cdot \frac{1 - \frac{0.771}{\epsilon - 0.320} \cdot \frac{P_z}{P_s}}{1 - \frac{0.771}{\epsilon - 0.320}} \times \frac{\eta_i}{\eta_{io}} \dots\dots(7)$$

が得られる。但し  $P_s$  は吸氣管内の壓力、 $t_s$  は吸氣管内の溫度、 $P_z$  は背壓即ちその高度の大氣壓を示し、地上無過給の場合の吸氣管内の壓力を 760 mmHg, 溫度を 15°C と置いた場合である。

混合比  $n=0.9$  の場合には上述の如く指示熱効率の  $\eta_i$  の變化が 1% 以下となるからその程度の誤差を無視すれば  $\eta_i \doteq \eta_{io}$  と置いて上の (7) 式の代りに (6) 式を代入し

$$\frac{P_{mi}}{P_{mio}} = \frac{P_s}{760} \cdot \frac{495}{t_s + 480} \cdot \frac{1 - \frac{0.771}{\epsilon - 0.320} \cdot \frac{P_z}{P_s}}{1 - \frac{0.771}{\epsilon - 0.320}} \dots\dots(7)'$$

を使用してよいことになる。

一方上述の  $G_{Bch}/G_{Bcho}$  及び  $P_{mi}/P_{mio}$  は JS 線を使用する場合に最も正確な理論値として計算される。(3) 従つてこれ等の値と上述の (6) 式及び (7) 式に依つて計

(3) 田中, 栗野: 熱及熱力學



算した値とを比較することに依つて(6)式及び(7)式の数値の正確さが確かめられることとなる。

發動機の壓縮比  $\epsilon=7$  で、正規高度  $Z=0\text{ m}$  及び  $Z=6000\text{ m}$  の場合を取り、ブースト壓力を種々に變化した場合の比較を第3表に示す。燃焼及び膨脹衝程中に各7%宛の熱損失あるものと假定し、過給機のポリトロップ指數を  $n=1.63$  とした場合の計算結果である。

第3表 指示平均有效壓力比  $P_{mi}/P_{mi0}$ .

(a) 高度  $Z=0$ , 壓縮比  $\epsilon=7$ .

ブースト壓力 mmHg		0	200	400	600	800	1000
吸氣溫度 °C		15	42.2	66.1	87.6	107.3	125.5
$n=0.9$	$\frac{G_{Bch}}{G_{Bch0}}$	1.000	1.232	1.452	1.662	1.868	2.063
	(6)式或は(7)'式	1.000	1.230	1.446	1.647	1.846	2.034
	$\frac{P_{mi}}{P_{mi0}}$ (JS線圖)	1.000	1.226	1.435	1.626	1.830	2.012
	(7)式	1.000	1.229	1.443	1.638	1.835	2.020
$n=1.1$	$\frac{G_{Bch}}{G_{Bch0}}$	1.000	1.231	1.448	1.657	1.856	2.047
	(6)式或は(7)'式	1.000	1.230	1.446	1.647	1.846	2.034
	$\frac{P_{mi}}{P_{mi0}}$ (JS線圖)	1.000	1.224	1.435	1.636	1.830	2.012
	(7)式	1.000	1.224	1.430	1.626	1.816	2.014
$n=1.2$	$\frac{G_{Bch}}{G_{Bch0}}$	1.000	1.231	1.454	1.660	1.859	2.043
	(6)式或は(7)'式	1.000	1.230	1.446	1.647	1.846	2.034
	$\frac{P_{mi}}{P_{mi0}}$ (JS線圖)	1.000	1.227	1.444	1.642	1.832	2.006
	(7)式	1.000	1.229	1.443	1.638	1.835	1.997

(b) 高度  $Z=6000\text{ m}$ .

ブースト壓力 mmHg		-400	-200	0	200	400	600	800	1000
吸氣溫度 °C		-22.9	24.3	61.5	93.3	121.0	145.9	168.8	189.8
$n=0.9$	$\frac{G_{Bch}}{G_{Bch0}}$	.521	.753	.974	1.177	1.369	1.554	1.728	1.896
	(6)或は(7)'式	.511	.758	.978	1.181	1.372	1.552	1.724	1.891
	$\frac{P_{mi}}{P_{mi0}}$ (JS線圖)	.523	.758	.971	1.173	1.357	1.531	1.702	1.868
	(7)式	.516	.761	.975	1.177	1.359	1.528	1.698	1.862

$n=1.1$	$\frac{G_{Bch}}{G_{chB0}}$	—	.763	—	1.189	—	1.568	—	1.914
	(6) 或は (7)' 式	—	.758	—	1.181	—	1.552	—	1.891
	$\frac{P_{mi}}{P_{mi0}}$ (JS 線圖)	—	.758	—	1.176	—	1.539	—	1.855
	(7) 式	—	.753	—	1.168	—	1.520	—	1.832
$n=1.2$	$\frac{G_{Bch}}{G_{Bch0}}$	—	.762	—	1.193	—	1.572	—	1.918
	(6) 或は (7)' 式	—	.758	—	1.181	—	1.552	—	1.891
	$\frac{P_{mi}}{P_{mi0}}$ (JS 線圖)	—	.756	—	1.182	—	1.539	—	1.855
	(7) 式	—	.752	—	1.170	—	1.520	—	1.829

表中の数値の比較に依つて明な如く、混合比  $n=0.9$  の場合に JS 線圖に依る  $P_{mi}/P_{mi0}$  と (7) 式に依る  $P_{mi}/P_{mi0}$  とはよく一致し、高度  $Z=0\text{m}$  の場合も  $Z=6000\text{m}$  の場合も、その相違は最大に對しても 1% 以内である。即ち (7) 式は混合比  $n=0.9$  の場合に導き出した實用式であるから當然一致すべきものである。この (7) 式の代りに上述の如く  $\eta_i = \eta_{i0}$  と置いて (7)' 式に依つて求めた  $P_{mi}/P_{mi0}$  と JS 線圖に依る正確な値とを比較すればその相違は幾分か増加するがその誤差も最大 1% 内外であることが知られる。

次に混合比が稀薄となつた  $n=1.1$  及び  $n=1.2$  の場合に就いて、この  $n=0.9$  の場合に使用した (7) 式或は (7)' 式の値が JS 線圖に依る正確な理論値にどの程度一致するかを見るために、それ等の計算結果を同表に挿入した。

正規高度  $Z=0\text{m}$  の場合は (7) 式と JS 線圖のものとはよく一致し (7)' 式の値でも 1% 以内の誤差に止る、然し正規高度  $Z=6000\text{m}$  の場合は (7) 式の値でブースト壓力が 1000 mmHg にもなると 1.5% の誤差となり (7)' 式とすれば 2% の誤差となるが 500 mmHg ブースト當りまでが實用ブーストと考へればこの様な過薄混合比  $n=1.1$  及び  $n=1.2$  の場合にも指示平均有效壓力  $P_{mi}$  の計算に混合比  $n=0.9$  の場合に導いた實用式 (7)' を使用して最大 1% 内外の誤差として求められ、之を基礎として求める機械效率  $\eta_m$  の誤差も、(3) 式に於ける  $P_{mL}$ ,  $P_{ms}$ ,  $P_{m0}$  の値を正確に計算し得るならば、約 1% 内外であることが確められたこととなる。

## 5. 結 言

壓縮比及び混合比が一定の場合指示熱效率  $\eta_i$  の變化は過薄混合比の場合の方が過濃混合比の場合よりも大きくなるが、實用可能のブースト壓力及び温度の範圍では凡ての混合比に對してその地上無過給の場合の値  $\eta_{i0}$  を基準として  $\eta_i$  の變化は 1% 以内であるから地上無過給の場合の  $\eta_{i0}$  を壓縮比及び混合比の變化に對して正確に計算して置けば、 $\eta_i = \eta_{i0}$  として (4) 式の燃料消費率の計算を行つて支障なき

ことを知る。

又指示平均有効圧力を表す實用理論式 (7)' は混合比  $n=0.9$  の場合に就て求めたものであるが實用可能のブースト圧力及び温度の範囲では混合比  $n=1.1$  及び  $n=1.2$  の如き過薄混合比の場合に使用してもその誤差は最大 1% 内外であるから地上無過給の場合の指示平均有効圧力  $P_{m0}$  を壓縮比及び混合比の變化に對して豫め正確に計算して置けば (7)' 式に依つてその場合の指示平均有効圧力  $P_{mi}$  を求め得べく之を基礎として機械効率  $\eta_m$  の計算を行つて支障なきことを知る。