

# 自動車のエクセルギー解析

— エネルギーの有効活用をはかる —

工学博士 雑賀 高 著

コロナ社

## はじめに

エネルギーは保存される。形を変えても消えてなくなることはない。しかし、普通の感覚ではエネルギーは減っていく。化石燃料は年々減っていくから可採埋蔵量が気になるわけである。風力、太陽光、水力などの再生可能エネルギーなら再生される感じがする。とはいっても、エネルギーは消えてなくなるのだから、いくら使ってもいいのか。そういうわけにはいかず、省エネルギーや節電は重要である。

じつは消えてなくなるのはエクセルギーである。節約しなければならないのはエネルギーではなく、エクセルギーである。例えば、化石燃料の持っているエクセルギーをどういう経路を通して仕事に変換するかでエクセルギーの価値が変わってくる。その視点が重要である。

熱力学の教科書には必ずエントロピーが出てくる。熱力学第1法則はエネルギー保存則であるから、比較的わかりやすい。熱効率も理解しやすい。ところが第2法則のところで、エントロピーが出てくると途端にわからなくなる。筆者は30年以上、機械工学系学科において熱力学を教えているが、エントロピーをうまく説明できたと思ったことがない。ほとんどの学生はエントロピーという言葉は知っているけれども、どういう意味があり、どのように役立つかを知らずに卒業しているのではないか。本書のテーマであるエクセルギーは、エントロピーが実際に役立つ実例である。ぜひ、この機会にエントロピーにもう一度、挑戦していただきたい。

卒業生の多くが製造業に進み、設計開発をしている者も大勢いる。エントロピーとは関係なく、仕事をしているのかもしれない。筆者の研究室からも自動車業界に就職する学生が多い。エクセルギーを使って設計すれば、本当の意味でのエネルギーの有効利用になると、彼らをはじめとして自動車関連の技術者

## ii は じ め に

に知ってもらいたくて、本書をまとめた。

自動車は閉じた小さなエネルギープラントとして扱うことができる。動力がエンジンから電力へと変わっていくにしても、すでに自動車は機械システムだけでなく、電気・電子・情報システムなしでは成り立たなくなっている。自動車のエネルギー関連機器の最適な設計を行うためには、エクセルギーを用いて解析を行うことが必要である。

本書は熱力学の習得を前提とはしているが、すでに遠のいている方もいるだろうから、巻末に付録として熱力学の重要事項をまとめてある。理論は実際に使えなければ意味がない。本書では基本原理を習得するために具体的な数多くの計算例を示した。これらが自動車のエネルギー関連機器の設計に役立つことになれば幸いである。

2018年3月

雑 賀 高

## 本書で用いるおもな記号

本書で用いる記号を整理してある。数値が大きい場合には、単位にk（キロ）やM（メガ）などの単位の接頭語を使用している。これ以外の記号は本文に記載する。

AF	: 空 燃 比 [—]	$S_G$	: 発生エントロピー (entropy generation) [J/K]
$c_p$	: 定 圧 比 熱 [J/(kg·K)]	$s$	: 比エントロピー [J/(kg·K)]
$c_v$	: 定 容 比 熱 [J/(kg·K)]	$T$	: 温 度 [K]
$E$	: エクセルギー [J]	$t$	: 温 度 [°C]
$e$	: 比エクセルギー [J/kg]	$U$	: 内部エネルギー [J]
$G$	: ギブスエネルギー (Gibbs energy) [J]	$u$	: 比内部エネルギー [J/kg] または速度 [m/s]
$g$	: 重力加速度 [m/s <sup>2</sup> ]	$V$	: 体 積 [m <sup>3</sup> ]
$H$	: エンタルピー [J]	$\dot{V}$	: 体 積 流 量 [m <sup>3</sup> /s]
$h$	: 比エンタルピー [J/kg]	$v$	: 比 体 積 [m <sup>3</sup> /kg]
$I$	: 不 可 逆 性 (消滅エクセルギー) [J]	$W$	: 仕 事 [J]
$i$	: 物質 1 kg 当りの不可逆性 [J/kg]	$\dot{W}$	: 出 力 [W=J/s]
$m$	: 質 量 [kg]	$w$	: 物質 1 kg 当りの仕事 [J/kg]
$\dot{m}$	: 質 量 流 量 [kg/s]	$x$	: モル分率 [—] または質量燃焼割合 [—]
$N$	: エンジン回転速度 [rpm]	$z$	: 高 さ [m]
$P$	: 圧 力 [Pa]		
$Q$	: 熱 量 [J]		
$\dot{Q}$	: 伝 熱 量 [J/s]		
$R$	: ガス定数 [J/(kg·K)]		
$R_u$	: 一般ガス定数 = 8 314 [J/(kmol·K)]		
$r_c$	: 圧 縮 比 (compression ratio) [—]		
$r_{off}$	: 縮 切 り 比 (cut-off ratio) [—]		
$S$	: エントロピー [J/K]		

### ギリシャ文字

$\gamma$	: 比熱比 = $c_p/c_v$ またはポリトロプ指数 [—]
$\eta_I$	: 熱力学第1法則効率 (エネルギー効率) [—]
$\eta_{II}$	: 熱力学第2法則効率 (エクセルギー効率) [—]
$\nu$	: 化学量論係数 [mol]

$\phi$  : 等量比 [—]

添字

0 : dead state

fuel : 燃料

HP : ヒートポンプ (heat pump)

in : 入力エネルギー  
または入力エクセルギー

irrev : 不可逆変化 (irreversible change)

LHV : 低発熱量 (lower heating value)

out : 出力エネルギー  
または出力エクセルギー

P : 生成物 (product)

R : 反応物 (reactant)

ref : 冷凍機 (refrigerator)

rev : 可逆変化 (reversible change)

略語

°CA : クランク角度 [deg]

BDC : 下死点 (bottom dead center)

CI : 圧縮着火  
(compression ignition)

CNG : 圧縮天然ガス  
(compressed natural gas)

COP : 成績係数  
(coefficient of performance)

FC : 燃料電池 (fuel cell)

MBT : 最小点火進角 (minimum  
advanced for the best torque)

SI : 火花点火 (spark ignition)

TDC : 上死点 (top dead center)

WOT : 全開スロットル  
(wide open throttle)

# 目 次

## 1. エントロピー生成とエクセルギー

1.1	エクセルギーは仕事の最大能力	1
1.1.1	dead state	1
1.1.2	エクセルギー	2
1.2	エントロピーの導入	4
1.2.1	可逆仕事と不可逆性	5
1.2.2	固体・液体のエントロピー変化	10
1.3	エントロピー生成	12
1.3.1	固体のエントロピー生成	12
1.3.2	気体のエントロピー生成	15
1.3.3	蒸気のエントロピー生成	18
1.3.4	伝熱によるエントロピー生成	19

## 2. エクセルギーによるエネルギー評価

2.1	エネルギーの有効性の評価	21
2.1.1	熱力学第1法則と第2法則	22
2.1.2	熱力学第2法則効率	23
2.2	理想気体の熱量と圧力のエクセルギー	24
2.2.1	温度と熱量のエクセルギー	24
2.2.2	圧力のエクセルギー	28
2.3	閉じた系と開いた系のエクセルギー	31

2.3.1	閉じた系における内部エネルギーのエクセルギー	31
2.3.2	開いた系におけるエンタルピーのエクセルギー	33
2.4	エクセルギー収支	35
2.4.1	物質の出入りがない閉じた系のエクセルギー収支	35
2.4.2	熱伝達を伴うエクセルギーの移動	40
2.5	化学反応のエクセルギー	43
2.5.1	ギブスエネルギー	43
2.5.2	標準反応ギブスエネルギー	45
2.5.3	化学反応を伴うエクセルギー収支	46
2.5.4	ギブスエネルギー変化による電気的工作	49

### 3. プロセスのエクセルギー解析

3.1	定常流れ系のエクセルギー解析	51
3.1.1	エネルギー収支とエクセルギー収支	51
3.1.2	廃熱回収システムのエクセルギー解析	54
3.2	ボイラのエクセルギー解析	58
3.3	蒸気タービンのエクセルギー解析	62
3.4	ガスタービンのエクセルギー解析	66
3.5	エアコンディショナのエクセルギー解析	70
3.5.1	冷凍サイクルおよびヒートポンプサイクルの成績係数	71
3.5.2	冷凍機およびヒートポンプの熱力学第2法則効率	73
3.5.3	冷凍サイクルおよびヒートポンプサイクルのエクセルギー解析	73
3.6	燃料電池のエクセルギー解析	76

### 4. エンジンシステムのエクセルギー解析

4.1	空気標準エンジンサイクル	79
4.2	4ストローク理論サイクル	81

4.3 エンジンサイクルのエクセルギー解析 .....	84
4.3.1 サイクルのエントロピー変化 .....	85
4.3.2 サイクルへの発熱量の供給 .....	85
4.3.3 各プロセスのエクセルギー変化 .....	87
4.4 定容サイクルのエクセルギー変化 .....	87
4.4.1 各行程におけるエクセルギー変化 .....	87
4.4.2 定容サイクル全体のエクセルギー変化 .....	91
4.4.3 熱力学第1法則効率 .....	93
4.5 定圧サイクルのエクセルギー変化 .....	94
4.6 火花点火エンジンサイクルのエクセルギー解析 .....	97
4.6.1 ポリトロップ変化過程 .....	98
4.6.2 燃焼過程の解析モデル .....	101
4.6.3 圧縮・膨張過程の解析モデル .....	102
4.6.4 火花点火エンジンのエクセルギー変化 .....	103
4.6.5 水素とイソオクタンと比較 .....	104
4.7 過給システムのエクセルギー解析 .....	105
4.7.1 過給方法 .....	105
4.7.2 基本的な関係式 .....	106
4.7.3 圧縮機の熱力学第2法則効率 .....	107
4.7.4 タービンの熱力学第2法則効率 .....	108
4.8 ラジエータのエクセルギー解析 .....	111
4.8.1 ラジエータの機能 .....	111
4.8.2 ラジエータの伝熱特性 .....	111
4.8.3 熱交換器の熱力学第2法則効率 .....	112

## 5. 自動車パワートレインのエクセルギー解析

5.1 エンジンシステムのエクセルギー解析 .....	115
5.1.1 熱力学的平衡と化学平衡 .....	115
5.1.2 熱力学的エクセルギーと化学エクセルギー .....	116
5.1.3 エンジン内エクセルギー変化の一般式 .....	117



5.2 火花点火エンジンのエクセルギー解析 .....	119
5.2.1 エンジン速度と負荷がエクセルギーに及ぼす影響 .....	119
5.2.2 圧縮天然ガスエンジンのエクセルギー解析 .....	120
5.2.3 水素火花点火エンジンのエクセルギー解析 .....	121
5.2.4 エタノールエンジンのエクセルギー解析 .....	124
5.3 ディーゼルエンジンのエクセルギー解析 .....	125
5.3.1 燃料噴射時期がエクセルギーに及ぼす影響 .....	126
5.3.2 バイオ燃料ディーゼルエンジンのエクセルギー解析 .....	127
5.4 燃料電池自動車のエクセルギー解析 .....	128
5.4.1 エネルギー形態によるエクセルギー量 .....	128
5.4.2 燃料電池自動車のエクセルギー .....	129
5.5 アンモニア燃料自動車のエクセルギー解析 .....	132
5.5.1 自動車用燃料としてのアンモニア .....	132
5.5.2 アンモニア燃料電池システム .....	133
5.5.3 アンモニア燃料 SI エンジンのエクセルギー解析 .....	135
5.5.4 アンモニア燃料 FC システムのエクセルギー解析 .....	137

## 付録 A. 熱力学の重要事項

付 A.1 熱力学第 1 法則 .....	139
付 A.2 可逆変化過程 .....	140
付 A.3 カルノーサイクル (Carnot cycle) .....	141
付 A.4 エントロピー .....	142
付 A.4.1 理想気体のエントロピー .....	142
付 A.4.2 さまざまな過程におけるエントロピー変化 .....	144
付 A.5 空気標準サイクル (air-standard cycle) .....	144
付 A.5.1 空気標準オットーサイクル .....	144
付 A.5.2 空気標準ディーゼルサイクル .....	146
付 A.6 定常熱伝導・熱伝達 .....	148
付 A.7 化合物 $C_\alpha H_\beta O_\gamma N_\delta$ の標準生成エクセルギーの求め方 .....	149

## 付録 B. 各種物性値表

付表 1 主要燃料の標準生成エンタルピーと 標準生成ギブスエネルギー .....	151
付表 2 主要燃料の標準反応エンタルピーと 標準反応ギブスエネルギー .....	152
付表 3 主要化合物の標準生成エクセルギー .....	152
引用・参考文献 .....	155
索引 .....	157

# 3

## プロセスの エクセルギー解析

本章では、各種のエネルギー変換機器のエクセルギー解析を例題とともに考える。まず、ボイラ、蒸気タービン、ガスタービンなどのエクセルギー解析を行う。ガスタービンの解析は第4章の過給システムにつながる。さらに、冷凍機・ヒートポンプの解析も行い、エアコンディショナの解析につなげる。燃料電池についても解析を行い、第5章の燃料電池自動車へと発展させる。

### 3.1 定常流れ系のエクセルギー解析

#### 3.1.1 エネルギー収支とエクセルギー収支

図3.1に定常流れ系を示す。

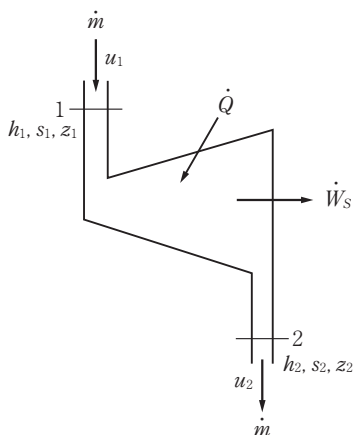


図3.1 定常流れ系

〔1〕 連続の式 (式 (3.1))

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m} \quad [\text{kg/s}] \quad (3.1)$$

〔2〕 エネルギー収支 (熱力学第1法則) (式 (3.2))

$$\dot{m} \left( h_1 + \frac{u_1^2}{2} + gz_1 \right) + \dot{Q} = \dot{m} \left( h_2 + \frac{u_2^2}{2} + gz_2 \right) + \dot{W}_S,$$

$$\dot{Q} - \dot{W}_S = \dot{m} \left[ h_2 - h_1 + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right] \quad (3.2)$$

運動エネルギーと位置エネルギーが無視できるときには

$$\dot{Q} - \dot{W}_S = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad [\text{J/s}]$$

となる。ここで、熱量  $\dot{Q}$  [J/s]、質量流量  $\dot{m}$  [kg/s]、軸仕事  $\dot{W}_S$  [J/s]、比エンタルピー  $h$  [J/kg]、速度  $u$  [m/s]、高さ  $z$  [m] とする。

〔3〕 エントロピー収支 (熱力学第2法則) (式 (3.3))

$$\Delta \dot{S} = \dot{m}(s_2 - s_1) = \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_G,$$

$$\frac{T_0}{T} \dot{Q} = \dot{m} T_0 (s_2 - s_1) - T_0 \dot{S}_G \quad (3.3)$$

ここで、 $T$  [K]、 $T_0$  [K]、物質に伴うエントロピー  $s$  [J/(kg·K)]、系内の発生エントロピー  $\dot{S}_G$  [J/(K·s)]、熱の移動によるエントロピー： $\dot{Q}/T$  [J/(K·s)] とする。

〔4〕 エクセルギー収支 (熱力学第1法則と第2法則の結合)

式 (3.2) から式 (3.3) を引くと、つぎのエクセルギー収支を得る (式 (3.4))。

$$\left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) \dot{Q} - \dot{W}_S = \dot{m} \left[ h_2 - h_1 - T_0 (s_2 - s_1) + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right] + T_0 \dot{S}_G \quad (3.4)$$

式 (3.4) を改めてエクセルギーの記号  $E$  で書き直すとつぎのようになる。

$$\dot{E}_{H2} - \dot{E}_{H1} = \dot{E}_Q - \dot{E}_W - \dot{E}_{\text{loss}},$$

$$\dot{E}_{H2} - \dot{E}_{H1} = \dot{m} \left[ h_2 - h_1 - T_0 (s_2 - s_1) + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right].$$

$$\begin{aligned}
 \dot{E}_Q &= \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q}, \\
 \dot{E}_W &= \dot{W}_S, \\
 \dot{E}_{\text{loss}} &= T_0 \dot{S}_G
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

ここで、 $\dot{E}_{H2} - \dot{E}_{H1}$  はエンタルピーのエクセルギー変化、 $\dot{E}_Q$  は熱量のエクセルギー、 $\dot{E}_W$  は軸仕事  $\dot{W}_S$  のエクセルギー、 $\dot{E}_{\text{loss}}$  は消滅エクセルギーである。

### 〔5〕 軸出力

式 (3.2) を単位質量当りに直すと、次式になる。

$$h_2 - h_1 + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) = q - w_s \tag{3.6}$$

式 (3.3) から比エントロピー変化は

$$\begin{aligned}
 s_2 - s_1 &= \frac{q}{T} + s_G, \\
 T(s_2 - s_1) &= q + Ts_G
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

となる。したがって、軸出力  $w_s$  は式 (3.8) となる。

$$\begin{aligned}
 w_s &= q + (h_1 - h_2) + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2} + g(z_1 - z_2) \\
 &= (h_1 - h_2) - T(s_1 - s_2) + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2} + g(z_1 - z_2) - Ts_G
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

熱力学第1法則から比エンタルピーを求めると

$$\begin{aligned}
 dq &= dh - vdp, \\
 dh &= vdp + Tds
 \end{aligned}$$

となり、温度一定の場合、比エンタルピーはつぎのようになる。

$$h_2 - h_1 = \int_1^2 vdp + T(s_2 - s_1) \tag{3.9}$$

したがって、軸出力は以下のようにになる。

$$w_s = - \int_1^2 vdp + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2} + g(z_1 - z_2) - Ts_G \tag{3.10}$$

## 3.1.2 廃熱回収システムのエクセルギー解析

図 3.2 の廃熱回収システムについてエクセルギー解析を行う。これはガスタービンなどの排熱を、蒸気タービンを用いて回収するシステムである。このシステムは、熱回収蒸気発生器と蒸気タービンとを組み合わせたものである。

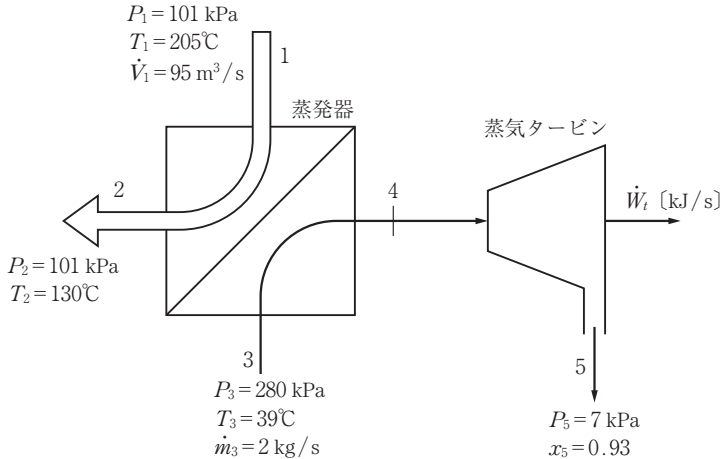


図 3.2 廃熱回収システム

定常状態で、 $205^\circ\text{C}$ 、 $101 \text{ kPa}$  の燃焼排ガスが  $95 \text{ m}^3/\text{s}$  の流量で蒸気発生器に流入する排ガスは、 $130^\circ\text{C}$ 、 $101 \text{ kPa}$  で蒸気発生器を出る。一方、 $2 \text{ kg/s}$  の質量流量の水は  $280 \text{ kPa}$ 、 $39^\circ\text{C}$  で蒸気発生器に入り、熱交換をして蒸気となった後、蒸気タービンに入る。

タービン出口での圧力は  $7 \text{ kPa}$  で、乾き度は  $93\%$  である。蒸気発生器とタービンの外面からの熱伝達は、運動エネルギーおよび位置エネルギーの変化と同様に、無視することができる。蒸気発生器を通して流れる水には大きな圧力降下はない。燃焼排ガスは、 $c_p = 1.005 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 、 $R = 0.28703 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  の理想気体として空気としてモデル化することができる。

## 〔1〕 燃焼排ガスの質量流量

まず、質量流量  $\dot{m}_1$  をつぎに示すように入力 1 の条件と理想気体の状態方程式から求める。

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{V}_1}{v_1} = \frac{\dot{V}_1 P_1}{RT_1} = \frac{(95 \text{ m}^3/\text{s})(101.325 \text{ kPa})}{(0.28703 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}))(478.15 \text{ K})} = 70.14 \text{ kg/s}$$

ガスと水の流れは混合しないので、それぞれの流れの質量速度にはつぎの関係がある。

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2, \quad \dot{m}_3 = \dot{m}_5$$

〔2〕 エネルギー収支

(1 → 2) :

式 (3.2) より次式のようになる。

$$\dot{Q}_{12} - \dot{W}_{12} = \dot{m}_1 \left( h_2 - h_1 + \frac{u_2^2}{2} - \frac{u_1^2}{2} + gz_2 - gz_1 \right)$$

ただし、検査体積と外部の間には熱のやりとりがなく、外部に仕事をしない。また、運動エネルギーと位置エネルギーも無視すると

$$\dot{W}_{12} = 0, \quad \frac{u_1^2 - u_2^2}{2} = 0, \quad g(z_1 - z_2) = 0$$

であるから、熱流束  $\dot{Q}_{12}$  はつぎのようになる。

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m}_1(h_2 - h_1),$$

$$h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1) = (1.005 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}))(130 - 205)\text{K} = -75.38 \text{ kJ/kg},$$

$$\dot{Q}_{12} = (70.14 \text{ kg/s})(-75.38 \text{ kJ/kg}) = -5286.6 \text{ kJ/s}$$

(3 → 4) :

$$\dot{Q}_{12} + \dot{Q}_{34} = 0,$$

$$\dot{Q}_{34} = -\dot{Q}_{12} = 5286.6 \text{ kJ/s}$$

状態3では、水は液体である。表 3.1 の飽和蒸気のデータを使用すると

$$h_3 = 163.273 \text{ kJ/kg}$$

となり、仮定2とこれらの質量流量関係では、定常状態のエネルギー収支はつ

表 3.1 飽和蒸気表

$T$ [°C]	$P$ [kPa]	$h_f$ [kJ/kg]	$h_g$ [kJ/kg]	$s_f$ [kJ/(kg·K)]	$s_g$ [kJ/(kg·K)]
39	—	163.273	2572.6	0.55876	8.27715
—	7	163.376	2572.6	0.55909	8.27669

# 索 引

<b>【あ】</b>		可逆仕事	5	全開スロットル	80
圧縮機	107	過給システム	105	潜 熱	30
圧縮着火機関	79	ガスタービン	66	<b>【た】</b>	
圧縮天然ガス	120	カルノーサイクル	141	タービン	108
圧縮天然ガスエンジン	120	<b>【き】</b>		ターボチャージャ	105
アネルギー	25	ギブスエネルギー	43	断熱効率	6
アンモニア燃料 FC システム	137	逆カルノーサイクル	142	<b>【て】</b>	
アンモニア燃料 SI エンジン	135	<b>【く】</b>		定圧サイクル	94
アンモニア燃料自動車	132	空気標準エンジンサイクル	79	定常熱伝導・熱伝達	148
アンモニア燃料電池システム	133	空気標準オットーサイクル	144	ディーゼルエンジン	125
<b>【え】</b>		空気標準サイクル	79	定容サイクル	87
エアコンディショナ	70	空気標準ディーゼルサイクル	146	デッドな状態	1
エクセルギー	1, 2	クローズドサイクル	80	<b>【ね】</b>	
——の移動	40	<b>【け】</b>		熱交換器	112
エクセルギー収支	52	系	1	熱交換効率	112
エタノールエンジン	124	<b>【し】</b>		熱伝達	40, 117, 149
エネルギー収支	35, 52	指圧線図	97	熱伝導	148
エンジンサイクル	84	縮切り比	97, 147	熱力学第 1 法則	22, 35, 52
エントロピー	4, 142	蒸気タービン	62	熱力学第 1 法則効率	6, 23
——の移動	40	正味平均有効圧力	119	熱力学第 2 法則	22, 35, 52
エントロピー収支	35, 52	<b>【す】</b>		熱力学第 2 法則効率	23
エントロピー生成	6, 12	水素火花点火エンジン	121	熱力学的エクセルギー	116
<b>【お】</b>		スーパーチャージャ	105	熱力学的平衡	115
オットーサイクル	81	<b>【せ】</b>		燃焼開始	101
オープンサイクル	80	生成物	45	燃焼質量割合	101
<b>【か】</b>		成績係数	72	燃焼終了	101
外界仕事	37			燃料電池	76
化学エクセルギー	117			燃料電池自動車	128
				燃料噴射時期	126



<b>【は】</b>		火花点火エンジンサイクル		<b>【ほ】</b>	
バイオ燃料ディーゼル			97	ボイラ	58
エンジン	127	火花点火機関	79	<b>【ら】</b>	
バルブオーバーラップ	84	標準生成エクセルギー	149	ラジエータ	111
反応物	45	標準反応エンタルピー	48	ランキンサイクル	63
		標準反応ギブスエネルギー	45, 48	<b>【れ】</b>	
<b>【ひ】</b>		<b>【ふ】</b>		冷凍機	70
ヒートポンプ	70	不可逆性	5	冷凍サイクル	71
ヒートポンプサイクル	71				
火花点火エンジン	119				

<b>【B】</b>		<b>【E】</b>		<b>【S】</b>	
BDC	81	EOC	101	SI エンジン	79
BMEP	119	EVO	98	SOC	101
<b>【C】</b>		<b>【I】</b>		<b>【T】</b>	
CI エンジン	79	IVC	98	TDC	81
CNG	120	<b>【M】</b>		T-S 線図	143
COP	72	MBT	124	<b>【w】</b>	
<b>【D】</b>				Wiebe の燃焼関数	101
dead state	1			WOT	80, 124

— 著者略歴 —

- 1978年 東京都立大学工学部機械工学科卒業  
1981年 東京都立大学大学院工学研究科修士課程修了（機械工学専攻）  
1981年 工学院大学助手  
1990年 工学博士（東京大学）  
1990年 工学院大学講師  
1996年 工学院大学助教授  
2001年 工学院大学教授  
現在に至る  
2006年 技術士（機械部門）

自動車のエクセルギー解析—エネルギーの有効活用をはかる—

Exergy Analysis of Automobiles — To Promote Effective Use of Energy —

© Takashi Saika 2018

2018年4月27日 初版第1刷発行



検印省略

著者 さい 高  
雑 賀  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来真也  
印刷所 新日本印刷株式会社  
製本所 有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-04655-7 C3053 Printed in Japan

(齋藤)



**JCOPY** <出版者著作権管理機構委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構(電話 03-3513-6969, FAX 03-3513-6979, e-mail: info@jcopy.or.jp)の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。