

■ 技術報告 ■

スターリングエンジン開発の現状

On the Present Status of the Art of the Stirling Engine

野間口 有*・藤原 通雄**・数本 芳男**
 Tamotsu Nomaguchi Michio Fujiwara Yoshio Kazumoto

1 ま え が き

スターリングエンジンの歴史は、1816年、スコットランドの牧師ロバート・スターリングによって発明された“Closed-Cycle Regenerative Hot Air Engine”に始まるとされている。しかし、彼の考案したこのエンジンは、当時から、1)比出力(単位体積当たりの出力)が小さい。2)高温側熱交換器の焼損による故障が多い。等の欠点が指摘されており、その後の蒸気機関の発達と内燃機関の発明によって、今世紀初頭にはほとんど姿を消してしまっていた。

しかし、1938年、オランダの Philips社¹⁾が小型発電機用エンジンとしてスターリングエンジンの再開発に着手し、近年の材料技術等の進歩によってエンジンの性能が飛躍的に向上すると、欧米の自動車・エンジンメーカーを中心としてより積極的な開発が進められるようになり、その結果、現在では、性能的には内燃機関を上回るエンジンも試作され、既に車載試験を行なった例さえ報告されている。

一方、わが国においても、エネルギー危機以後、高効率、低公害、多種燃料といった特長を持つスターリングエンジンに対する関心が高まり、これまでに機械技研、船舶技研等の国立研究機関の他、メーカー各社においてその基礎及び実用化研究が行なわれてきた^{2) 3) 4) 5) 6)}。

本報では、スターリングエンジンの構造、原理、形式、特長、開発状況等について説明したのち、現在当社で行なっている研究の概要を紹介する。

2 スターリングエンジンとは何か

2.1 構造と原理

典型的なスターリングエンジンの構造を図-1に示す。

スターリングエンジンを構成する主要要素は、次のようなものである。

1) 作動空間部

膨張室、圧縮室、ヒーター、クーラー、再生器から成り、密封された作動ガスを加熱、冷却、膨張、圧縮することにより、“スターリング・サイクル”と呼ばれる熱力学的サイクルを構成し、熱エネルギーを機械エネルギーに変換する。

2) 機械部

ピストン、ディスプレイサー、ピストン駆動機構から成り、機械エネルギーを外部に出力として取り出すとともに、ピストン及びディスプレイサーに適当な動きを与えることによってガスを膨張、圧縮し、スターリングサイクルを完成させる。

3) 燃焼器、排熱回収器

4) 冷却水循環系

5) エンジン制御機構

6) 作動ガス密封装置

7) 油ポンプ等補機

このうち、3)4)に関しては、スターリングエンジンが外燃機関であるため、高温熱源としては太陽熱、冷

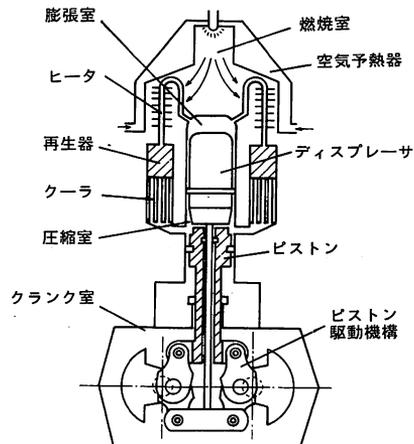


図-1 スターリングエンジンの構造

* 三菱電機(株) 応用機器研究所 グループマネージャー

** 三菱電機(株) 応用機器研究所

〒 661 尼崎市南清水字中野 80

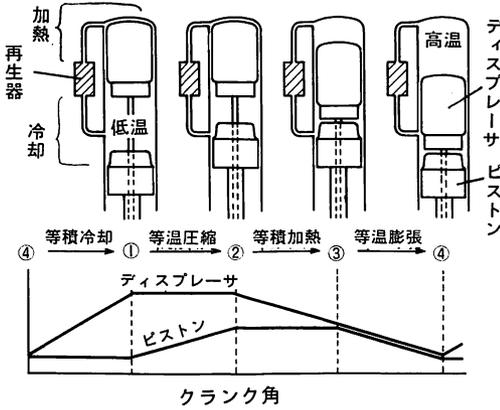


図-2 スターリングエンジンの動作原理

熱源としてはLNG等を用いることもできる。

次に、スターリングエンジンの動作原理を図-2に示す。作動空間内に水素やヘリウム等の作動ガスを密封した状態で、膨張室及びヒーターを加熱し、圧縮室及びクーラーを冷却する。ここで、ピストンとディスプレーサーを駆動機構によって同図 (b) のように一定の位相差を保って動かしてやると、作動空間内の作動ガスは図-3の $P-V$ 、 $T-S$ 線図に示すような等温圧縮→等積加熱→等温膨張→等積冷却の4つの過程から成る“スターリング・サイクル”を構成し、線図の面積に等しい仕事を外部に出力する。簡単な熱力学的計算より、この基本サイクルの仕事及び熱効率を、

$$W = MRT_H(1-\tau) \ln \epsilon \quad (1)$$

$$\eta = \frac{(1-\tau) \ln \epsilon}{\ln \epsilon + \frac{C_v}{R}(1-\tau)} \quad (2)$$

- ただし
- M : 封入ガス質量
 - R : 気体定数
 - C_v : 定積比熱
 - ϵ : 圧縮比 ($= V_2/V_1$)
 - τ : 温度比 ($= T_L/T_H$)

と求まる。

実は、上式には再生器の働きは全く考慮されていない。蓄熱器ともいふべき再生器を用いて、等積冷却時に作動ガスから外部へ放出されるべき熱を一たん再生器にたくわえておき、その後の等積加熱の際にその熱を再利用できるようにしてやれば、熱効率は再利用の熱量分だけ改善されることになる。再生器付きのスターリングエンジンの熱効率は、再生器の効率を η_{reg} とすると次式で与えられる。

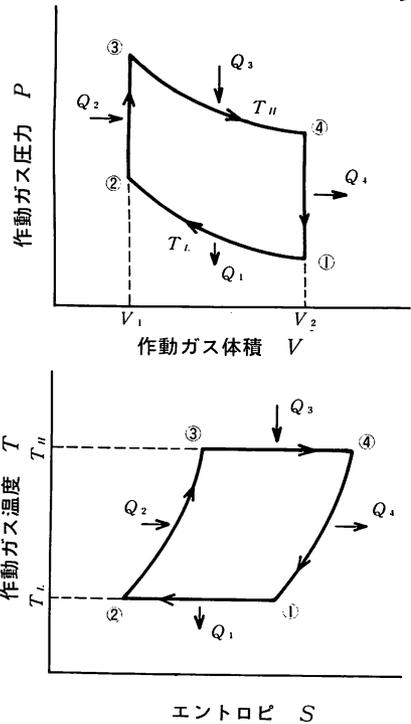


図-3 スターリングサイクルの $P-V$ 、 $T-S$ 線図

$$\eta = \frac{(1-\tau) \ln \epsilon}{\ln \epsilon + \frac{C_v}{R}(1-\tau)(1-\eta_{reg})} \quad (3)$$

従って、 $\eta_{reg} = 1.0$ (完全再利用) の場合には、

$$\eta = 1-\tau \quad (4)$$

となって、原理的にはカルノー効率に等しい熱効率が得られることになる。

ここでスターリングエンジンの標準的な設計条件に対して、(2)(3)式を用いて再生器がある場合と無い場合の熱効率を具体的に計算してみる。設計条件を、 $T_H = 650^\circ\text{C} = 923\text{ K}$ 、 $T_L = 50^\circ\text{C} = 323\text{ K}$ 、 $\epsilon = 1.5$ 、 $C_v/R = 1.5$ (He) とすると、再生器無しの場合(2)式より、

$$\eta_{\text{再生器無し}} = 19.1\%$$

となる。又、同じ条件で $\eta_{reg} = 0.9$ とすれば、再生器付きの場合に対して(3)式より

$$\eta_{\text{再生器付き}} = 52.4\%$$

となって、これは再生器無しの場合の約3倍の効率に相当する。このように、スターリングエンジンの効率は再生器効率によって大きく支配されるのである。

2.2 スターリングエンジンの形式

スターリングエンジンは、その構成要素が多いため、これらの要素をどのように組み合わせ、配置するか

よって種々の形式が存在する。このうち、作動空間の構成の仕方についてエンジンを分類すると図-4のようになる。以下に、各々の形式について説明する。

1) 単動2ピストン形

約90°位相をずらした2つのピストンと2つのシリンダーによって膨張室及び圧縮室が形成され、両ピストンの間にヒーター、再生器、クーラーが配置されている。モデル化が容易なため、これまで多くの研究用エンジンが試作されている。

2) 単動ピストン—ディスプレイサー形

出力を取り出すためのピストンと作動ガスを移動させるためだけのディスプレイサーによって圧縮室が形成される。ディスプレイサーにかかる荷重が小さい、死容積を小さくできる等の理由から、機械効率、圧縮比の面で有利とされている。

3) 複動Siemens形

90°ずつ位相をずらした4つのピストンとシリンダーによって形成される空間を順番につなぐ形になっている。原理的に4気筒であるため、数十馬力以上の大型が主である。ピストンの数が単動の場合の半分であり、かつ、各ピストンにかかる荷重が小さいため、シールや機械効率の面で優れているとされている。

4) フリーピストン形

ピストン—ディスプレイサー形エンジンの一種であるが、ピストンとディスプレイサーが機械的に接続されておらず、ディスプレイサーはガススプリングと自重及びピストンの運動によって定まる振動を行なう。機構上、構造がシンプルで機械効率が良い等の利点があるが、半面、ディスプレイサーの運動を制御することが難しいといわれている。

2.3 他の熱機関との比較

スターリングエンジンと他の熱機関の理論熱効率の

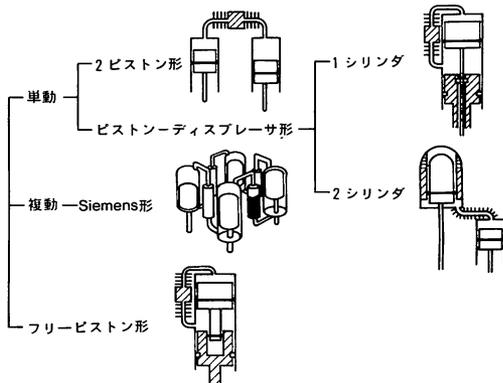


図-4 スターリングエンジンの形式

圧縮比依存性を図-5に示す。図のように、再生器付きのスターリングエンジンは低圧縮比においてもあまり効率が低下せず、他の熱機関に比べ高い効率を示している。又、低圧縮比になる程再生器による効率の改善が著しく、構造上圧縮比を大きくとれない ($\epsilon = 1.5 \sim 2.0$) スターリングエンジンにとって、再生器の果たす重要性が良くわかる。

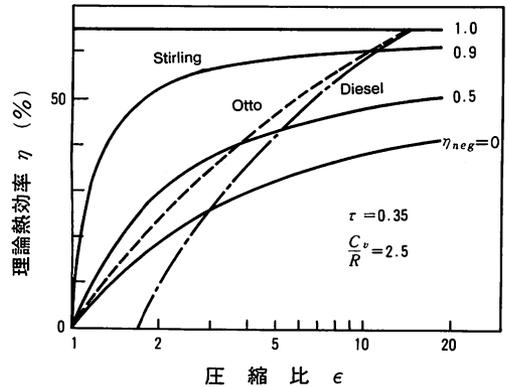


図-5 各種熱機関の理論熱効率と圧縮比の関係

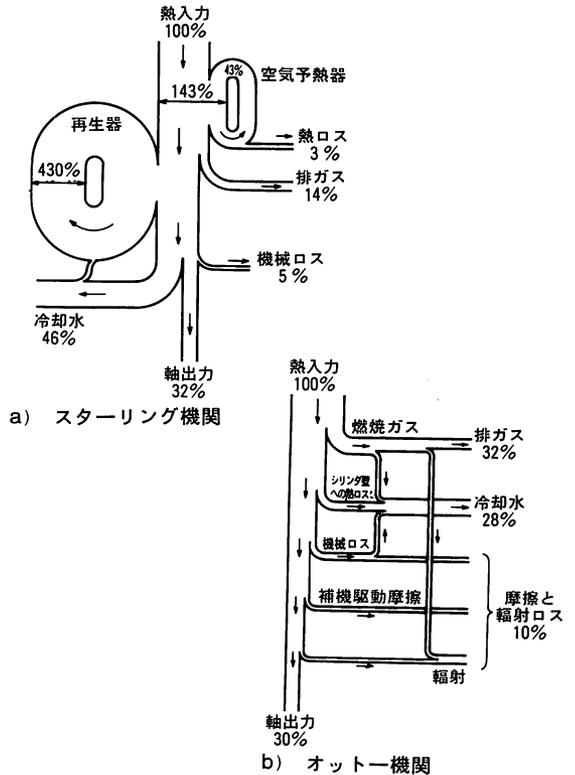


図-6 熱の流れの面からみたスターリング機関とオットー機関の違い (数値はスターリング機関は文献(17)、オットー機関は長尾不二夫著“内燃機関講義”(養賢堂)をもとに作成した。)

一般に、オットー機関（ガソリンエンジン）では圧縮比が8～10と高いため、圧縮比を考慮した場合図-5からは必ずしもスターリングエンジンの方が優れているとは言えない。しかし、これを図-6のように熱の流れにおいて比較すると、実際の内燃機関ではシリンダーの冷却による熱損失が大きいので、実機においてはスターリングエンジンの方が高い効率を望むるとされている。又、スターリングエンジンは、原理上、弁機構がなく連続燃焼であるため低騒音で排気ガスがクリーンであり、外燃機関であるため多種燃料が使用できる等の内燃機関にない大きな特長を有している。

3 スターリングエンジンの開発状況

これまで各社によって数多くのエンジンが試作されたが、それらのうちの代表的なものを表1にその性能とともに示す。ここで、Beale数⁷⁾とはエンジンの性能を表す無次元数で次式によって定義されている。

$$Beale数 = \frac{\text{軸出力}(W)}{\text{平均圧力} \times \text{掃気容積} \times \text{回転数}} \quad (5)$$

(bar) (cc) (rps)

これらのエンジンの中には、Philips社の4-215 DAエンジンのように、既にFordのTorinoに積載され走行試験を行なった結果、従来の内燃機関と何ら遜色のない性能を示すことが確認された優れたエンジンもある。

しかし、コスト、信頼性、寿命の面ではまだ問題点を残しており、実用化までにはなお、設計・解析手法、機構、シール技術、高温材料等に関してより一層の技術開発が必要である。以下に、これらの技術の現状について説明する。

1) 設計・解析手法

スターリングエンジンの設計は、通常、計算機によるシミュレーションによって行なわれるため、このシミュレーションの際にどのような仮定を設けるかによって、1)等温モデル2)断熱シリンダーモデル3)Nodal Analysis等に分類される。等温モデルは、Schmidt理論⁸⁾とも呼ばれ、エンジン各部における作動ガスの温度を一定、全作動空間で圧力一様として扱うもので、解析的な解を得ることができる。対照的に、断熱シリンダーモデルでは^{9) 10)}、膨張室及び圧縮室での変化を断熱的であると仮定しており、実際の機関により近いモデルであるとされている。しかし、上の2つの計算はいずれも精度の点で問題があるため、計算から得られた値に経験的な補正因子を乗じたり、平均流量から平均熱伝導率、平均温度を求め直し、これを収束するまで繰り返す等によって設計の近似度を上げてゆく方法も提案されている¹¹⁾。又、Nodal Analysisは、エンジン内の作動空間を多数のControl Volumeに分割し、各Control Volumeに対して、エネルギー式、運

表1 これまでに試作された代表的エンジンの性能例
(本表は最右欄に示す文献等を基にして作成した。)

製作者 形名	形式	シリンダー		作動ガス	平均 圧力 (MPa)	性能					備考 (内の数字は文献番号)		
		容積, (cc)	ボア, (cm)			ストローク (cm)	回転数 (rpm)	出力(kW) 図示	正味 正味	正味 効率		平均有効 圧(MPa)	Beale数
Philips MP-1002C	単気筒 ディスプレイサ形 ロッカークランク	67.1,	5.6,	2.7	空気	1	1,400	0.468	8.4	0.299	0.024	製作 1950年頃 小型発電機用エンジン (16)	
					"	"	1,600	0.479	8.0	0.268	0.022		
					"	"	1,800	0.466	7.8	0.231	0.019		
Philips 4-215DA	4気筒 ジメンス形 スワッシュプレート	860,	7.3,	5.2	水素	19.7	1,500	64	33以上	2.98	0.015	開発 1972年～ Torino搭載 1975 性能は設計値 (17)	
					"	"	3,000	111	28	2.58	0.013		
					"	"	4,500	121	21	1.88	0.010		
GM GPU-3	単気筒 ディスプレイサ形 ロンビック	117.5,	6.99,	3.12	水素	2.76	1,500	2.05	1.55	25.5	0.527	GPUシリーズ開発 1961年～ 製作 1965～66年 (15)	
					"	"	3,000	3.45	2.60	26	0.442		0.016
					ヘリウム	"	1,500	1.80	1.25		0.425		0.015
USS P75	4気筒V形 ジメンス形 クランク	756,			水素	15	1,000	31.5	32.5	2.50	0.017	製作 1975年 (11)	
					"	"	2,000	58.5	31.3	2.32	0.016		
					"	"	2,400	65	29.5	2.15	0.014		
アイシン精機	4気筒 ジメンス形 スワッシュプレート	756,	6.8,	5.2	ヘリウム	14	1,000	39	29	30	2.30	製作 1978～79 (5)	
					"	"	2,000	66	48	25	1.90		0.019
					"	"	2,500	76	52	22	1.65		0.011
GE	フリーピストン形	194*	7.58,	4.3*	ヘリウム	4～8	1,080 ～1,560	1.4 MAX	30 MAX		*設計値 (18)		

動量の式，連続の式，状態方程式をたて，これらの連立微分方程式を計算機によって数値的に解くことによりエンジンの性能を評価するもので，各研究者，メーカーにより独自のコードが多数開発されている^{12) 13) 14)}。

2) 機構

スターリングエンジンの駆動機構としては，通常のクランク機構の他に，単気筒ピストンディスプレイサー形エンジン用として，2本のクランクを対称に配置することによってピストンの側圧をお互いに打ち消し合う構造にしたロンビック機構¹⁵⁾や，ロッカーアームを用いてディスプレイサーを駆動するロッカークランク機構¹⁶⁾，又，複動Siemens形エンジン用として，回転斜板式カムによってピストンを駆動するスワッシュプレート機構^{5) 17)}等が考案されている。

3) シール技術

軸シールの方法に関しては，現在，ロールソックシールとスライディングシールの2つが考えられている。このうち，ロールソックシールはローリングダイヤフラムの低圧側に油等の支持液を満たすことによって耐圧性を高めたもので，作動ガスの完全シールが可能であるが，ダイヤフラム材料の繰り返し寿命に問題を残している。一方，スライディングシールは作動空間と大気との間に設けたバッファ室と大気との間でシールを行なうもので機構上信頼性は高いが完全シールは困難であるとされている。

4) 高温材料

高温側熱交換器は，現在，多管式が主流であり，材料としてはコストの関係からステンレス系が用いられる場合が多い。従って，この場合，加熱の均一化や形状の工夫，表面処理等によって熱応力や腐蝕を軽減し，長寿命化を図ることになる。

以上，ここに述べた技術開発のほとんどは海外メーカーによるものであり，これまでは外国における開発が一步進んでいる状況にあった。しかし，我国でも昭和57年度以降政府資金の援助のもとに本格的な開発研究が発足する予定であり，実用化に向けて大きな飛躍が期待できよう。

4 三菱電機における試作研究

著者らも，ここ数年来スターリングエンジンの試作研究を行なっている^{19) 20)}。著者らが，これまでに試作したエンジンは出力，効率といった性能面において高い値をねらって設計したのではなく，エンジン各部の温度，圧力等エンジン内で起こっている諸現象を詳

細に把握するうえで必要なデータを取得することをねらって設計したものである。表1に示すように，これまでかなりの数のスターリングエンジンが試作され，一部にはきわめて高い性能を実現した例も報告されているが，実用化までにはなお前章で示したような解決すべき技術課題が数多く横たわっている。しかも，これらの課題に関してこれまで各研究機関で実施された検討の成果は必ずしも十分公開されているとは言えない。それ故，問題の本質がどういったところにあるかを知るために自らエンジンを試作して，その作動状況を調べざるを得ないと判断した。これが，トルク，回転数といったエンジンの総合性能の他に，エンジン内部の圧力，温度，エンジン冷却熱量等の測定が容易にできるように実験機を設計した理由である。

図-7は，著者らの試作エンジンの構成図である。単気筒ピストンディスプレイサー形で，クランク部はロンビック機構である。ヒーター及びクーラーは，それぞれ，内径6mm，2mm外径8mm，3mmのステンレス管から成り，再生器は金属メッシュで，いろいろなメッシュ数のものを取り換えられるようになっている。現在までに，この他にも，同一形式ではあるがヒーターを側壁加熱形としたものも試作しており，これらを用いてエンジンの作動ガスの種類，封入圧による性能の違い，再生器の効率の測定，エンジンシステム全域での熱流速の把握など実用機設計のための基

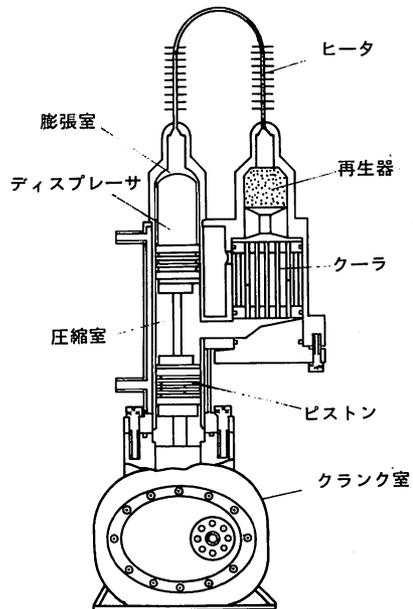


図-7 当社の試作エンジン

礎的データを収集している。実験機ではあるが、燃料LPG, 作動ガスヘリウム, 封入圧力 1.5 MPa という条件で、約 1 kW の出力 (この時の *Beale* 数 0.014) を得ており、表 1 に示した従来のエンジン群と遜色のない特性を発揮しているといつてよいようである。

著者らのスターリングエンジンの開発は、研究開始以来まだ日が浅く、十分その特性を把握していないが今後、実験、理論両面での検討を重ねていくことによって、一日も早い実用化を達成したいと考えている。

9 参考文献

- 1) H. C. J. van Beukering and H. Fokker : SAE paper 730646 ('73)
- 2) 山下：機械技研所報 31, No 6 ('77)
- 3) 山下, 田中：機講論 No 790-16 p.114~116 ('79)
- 4) 吉識, 橋本 et al: 機講論 No 790-16 p.83~85 ('79)
- 5) 石崎, 谷, 原村：機講論 No 790-16 p.111~113 ('79)
- 6) 星野, 川喜田：機講論 No 780-18 p.236~242 ('78)
- 7) G. Walker : Proc. IECEC, 14, No 1 p.1066~1068 ('79)
- 8) G. Schmidt : Z. Verb. dt. Ing., 15, No 1, p.97 ('1871)
- 9) T. Finkelstein : SAE paper, 118B ('60)
- 10) G. Walker and M. I. Khan : SAE paper, 949A ('65)
- 11) W. R. Martini : DOE/NASA/3152-78/1, NASA CR-135382 ('78)
- 12) R. Tew et al : DOE/NASA/1011-78/24, NASA TM-78884 ('78)
- 13) D. M. Berchowitz and C. J. Rallis : SAE paper 789111 ('78)
- 14) T. Finkelstein : IECEC Record, 759140 ('75)
- 15) W. R. Martini : SAE paper 789115 ('78)
- 16) G. Walker et al : Proc. IECEC, 14, No 1 p.1157~1161 ('79)
- 17) G. Walker : "Stirling Engines", Clarendon Press ('80)
- 18) W. D. C. Richard et al : IECEC Record, 789453 ('78)
- 19) 藤原, 数本, 野間口：機講論 No 814-9 p.94~96 ('81)
- 20) 藤原, 数本, 野間口：機講論 No 824-7 p.56~58 ('82)

話の泉

石器への逆行時代 (其の1)

数万年前の人類の生活は石器時代といわれ、食物は別として生活環境は土と石の時代があったらしい。

生活用具、武器は石を加工し、火を使うようになって土から陶器をさらに磁器へと発展して来た。一方火の利用から鉄器時代が到来し、さらに錫、銅など非鉄金属が開発され、人類の生活様式は近代化への路線に踏入れた。

文化の発展とともに人間の生活は、エネルギーを自由に駆使し、資源を最大限に活用する技術は発達したとしても、それらの終局は何れも消費という結果となり、たとえそれらの一部は回収され再利用されたとしても消費という言葉から離脱することはできない。一時期に「消費は王様」という思想もあったが、また紙の消費量と文化の程度は比例するとも云われており、「消費は文化」だと云い替えても差支えないだろう。

消費のないところに生産はないと考えることが妥当だとすれば、凡ゆる生物の死があるからこそ新しく生命が生まれて来ることが大自然の法則の根源である。

近代社会における人間の生活は、戦争を別として生産と破壊の繰り返しとみてもよいだろう。逆に見れば破壊があるからこそ次の生産があり、見方を変えれば生産のための破壊をみることもできよう (Scrap & Build)。

これらの生産は加速度的に総合技術によってエネルギーと資源をほしいままに独占することによって、文化人としてのプライドを保持している感がある。見方によれば新しい文化とは即ち異質の石器時代への逆行ともみられる。

大型マンション、地下鉄での生活はその構築物本体が焼結生成物 (セメント、煉瓦など) であることから大古の穴居または日干煉瓦の家での堅穴生活と同じ意味をもち、将に土と石の生活そのもので、僅かに鉄の使用が付加されているに過ぎない。

生活用具は石から鉄、その他の金属へと発展してきたが新しい要望すなわち硬度、耐熱性、耐食性からダイヤモンドを始めとして多くのセラミックが誕生 (創生) し、最新の機械としてセラミックエンジンへと進んできた。道具としての刃物も

(注) 82ページに続く (F)