

工業設計原論 I 機械設計方法の変化

伊 東 精

緒 言

安全で長持ちし、製品は使いやすく性能がよく、経済的でなければならないという基本的な考え方は、今始まったことでなく、既に半世紀前から私は実践してきている。しかし、世の中の移変りと科学技術の長足な進歩に伴って、設計方法の内容に対する考え方や設計手法にも変化が起り、それらに対応して新しく造語して表現（最適設計、Trade Off, Fail Safe, Fool Proofなど）したり、旧来の考え方を含めて新しい表現（例えば安定性、安全性に代って信頼性（Reliability）、冗長性（Reduncy）など）で代表させるという事実が認められる。さらには「情報」、「導入」、「開発」という語句がむやみやたらに巷に氾らんしている。情報は預るとして、導入はやり方、つまり方法や有形の品物を新たに受入れて使用することであり、開発は今まで未開拓であった分野に踏みこんで新規の方法や物品を得ようとする意志に基づく行為を指すといえる。

ここで今一度設計とは何かを別の角度から見返すと、（人間は思考する動物で、物を製作する前に現実の場面の見通しを行なう。この見通しが設計である）。設計はその対象によって困難度が大きく変化するが、共通して云えることは、どんな場合でも多かれ少なかれ獨創性（創造性）が求められる。その意味で設計は開発につながるが、局部の常識的改善に止まるものは新製品開発ではない。機械の改善には、次のどれかの目的が含まれるものである。1：性能の向上、2：取扱・保守の容易化、3：耐久性の向上、4：安全性の向上、5：見ばを良くする、6：生産費低減。たとえば、蒸気機関のD形汽缸が、Piston弁に置換えられたり、内燃機関の気筒配置が直立形からV形、V形からW形、X形さらに星形へと移行すれば、誰にでもそれを一見ただけで新規開発の製品であることが鳴りもの入りで宣伝しなくとも容易に理解して貰える筈である。図

1に実用例の少ない自動車用水平形ガソリン機関（フォルクスワーゲン製）の例を示す。その代表的のものにシリンダ77φ×64、排気量1192cc、圧縮比7.0：1、出力3900RPMで40軸馬力がある。序に付加しておくが、英国ロールス・ロイス社では軽航空機用として空冷6気筒4950cc 145軸馬力／2700RPMの水平形機関が製作されている。

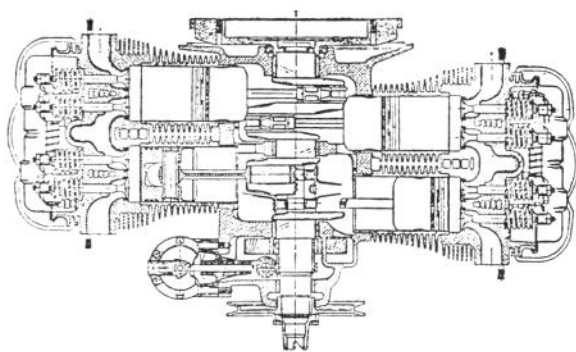


図1 水平対向形空冷ガソリン機関²⁾

³⁾ M.J.Siegel は、新機械を計画する才能は創造力、理論及び蓄積された経験が基礎になり、力学、荷重、応力、変形解折、材料の挙動と構成が設計の根本をなし、これらが創造力と融合して新しい機械は開発されるとして表1を示した。

画期的な新製品を開発するには、一般に驚くべき長年月と膨大な経費と複数の優れた人材の英知の結集を要するが、戦時には国家的要請の立場から一流の科学者・技術者に惜しみなく充分に施設と財政的供与がなされて、その開発が著しく促進されることは数々の歴史的事実が証

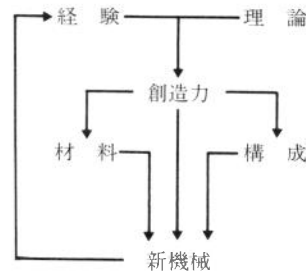


表1 新機械開発の要素

明している。引用例が適切を欠くかも知れないが、原子爆弾の製造は、⁴⁾ イギリスとアメリカの科学者・技術者が核分裂の過程を利用して可能とするには、平時ならば25年から50年を要したかもしれないが、5億ポンドを費して4カ年で解決した。それから過去に何度も聞かされ身をもって体験したことであるが、兵器は戦闘という特殊目的を持っているので、いつもその時代その国の科学技術の粋を尽したものであって、経済性を度外視すればとびぬけた最優秀の製品であり、その時代の科学技術を大きくleadしている。そして、残念ながら今もなおこのことは生きている現実と思われる。戦艦陸奥の16インチ主砲塔の雄大にして内部機構のすばらしさ、砲隊鏡と称する双眼望遠鏡が2km先の草の葉を1本1本手にとって見るように見せてくれた精巧さ、F 86Fのマイクロスイッチだけでも数百千並んだ電子装置の複雑さの前には、現在自動制御化の最も進んだものの一つNC工作機械でもオ月サマと朱盆の感じがする。

信頼性と信頼性設計

装置や製品が信頼できるかどうかと云うことは、要するにそれらが規定の条件で規定の時間、規定の機能を故障することなく遂行するかどうかということに帰着し、信頼度 (Reliability) とはこの遂行する確率を指す。満足すべき状態とするために次の措置をとる。

1) 故障が起らぬようにするために

故障源となる欠陥を排除、一部が破損もしくは誤動作しても全体に影響しない配置 (たとえば冗長にする) や構造にする。故障が起る前に予防保全 (Preventive Maintenance) などを行う。装置や製品の品質は信頼度で測る。

2) 故障が起ったならば

予備品と取替えたり故障カ所を早く見付けて満足な状態に修復する。保全技術ばかりでなく始めから故障を発見しやすく修理もしやすい設計にしておく。修復の能力は保全度 (Maintainability) で測る。

このように、信頼性では故障と修復を眼目においている。これまでとても安全性や耐用性など個々の形で信頼性問題が取上げられてきたが、信頼性はこれらを1本化して総合的な立場から、

現代の科学技術を駆使して取組もうとするのが基本的な考え方であって、第二次大戦後日本に入ってきた。

信頼性確保に最も大きな重さを持つのは、第一に計画を含めた設計、第二に製造であり第三に使用環境であるが、装置や機械が高性能になり精巧になる程構造は複雑化し、部品点数が増加することは免かれぬし、それらを扱うのは結局人間であるから、故障をなくすために人間も慎重ならざるを得なくなる。

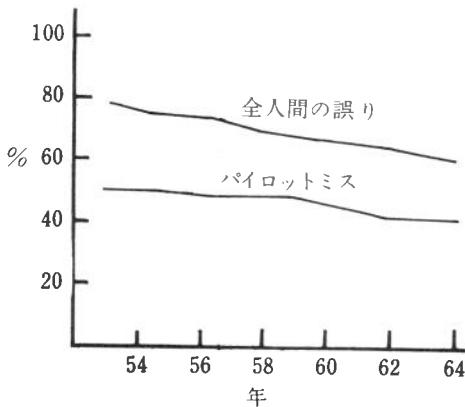


図2 米海軍航空機事故における人間ミスの寄与⁵⁾

図2はアメリカ海軍航空機事故のうち、人間ミスの占める割合をあらわしたもので、平均値でいうと事故全数の70%が人間ミスで起り、70%の内47%が操縦者ミスであることを教えている。

パイロットミスに関連して、「操縦の神様」といわれ参議院議員になるまでジェット戦闘機を操縦していた源田実⁶⁾(元空将)の述懐を紹介する。次期戦闘機機種選定のため、調査団長としてエド

ワーズ米空軍基地で自らロッキードF104に乗り、着陸のためギアダウン(車輪おろせ)を称えながらボタンを押した。滑走路に近づき車輪が出たというランプのついていないことに気がついて大あわてで調べたら、押したつもりボタンが押してない。接地したのは車輪が出た直後だった。人間は機械がよくなればなるほど油断をする傾向がある。含蓄のある言葉だと思う。

最近の装置では極限技術で高度の性能が求められる場合が多くなっていて、システムの一部として人間の役割が極めて大きいことを示している。(注:航空機材料の安全率は1.25~1.50位)

世界の航空輸送の10万時間当り死亡事故発生率は、昭和25年の0.54人に比べ46年は0.18人と、この20年間に $\frac{1}{3}$ に減っていて安全性が向上していることがわかる。

時間 t を指定してその時間までのサンプル n 個中の故障数 r 個を数えると、信頼度は

$$R(t) = \frac{n-r}{n} \text{ で推定される。}$$

信頼度を時間の関数としたものが信頼度関数で、信頼度関数の値はその時間の残存確率である。

云いかえると信頼度関数 $R(t)$ とは時間 t までに故障を生じない確率で $0 \leq R(t) \leq 1$ の関係があつて常に

$$t = 0 \text{ では } R(t) = 1$$

$$t = \infty \text{ では } R(t) = 0$$

である。

次に、いくつかの区間の終り(たとえば100時間ごとに)で観測が行われている時、始めから j 番目の区間の信頼度 P_j は $P_j = \frac{n_j - r_j}{n_j}$ で推定される。 n_j はその区間の始まりでのサンプル数、 r_j はその区間中の故障数である。そうすると、始めから i 番目の区間 t_i 時点での信頼度は、

$$R_i(t_i) = \prod_{j=1}^i P_j = \prod_{j=1}^i \left(\frac{n_j - r_j}{n_j} \right)$$

で求められる。

修理可能な装置では信頼性のほかに保全性を考慮しなければならない。**Availability A** は信頼度 **R** と保全度 **M** を総合した装置の広義の信頼性を表す尺度であって「装置がある規定の条件下で使用されたとき、任意の時点において満足に動作する確率」として定義される。この場合、たとえ装置が破損してもある制限時間内に修理が完了していれば、満足な動作が保証されるので単純な信頼度よりも満足に動作する確率は増大する。修理が不可能であれば保全度の寄与がなくなって信頼度 $R = A$ となる。

いま、装置に要求される全動作時間を **T**、**T** に比べて十分短い修理制限時間を τ とすると、装置のアベイラビリティ $A(T, \tau)$ は

$$A(T, \tau) = R(T) + (1 - R(T)) \cdot M(\tau)$$

不信頼度 $1 - R(T) = F(T)$ で表せば

$$A(T, \tau) = 1 - F(T)(1 - M(\tau))$$

で示される。

信頼性設計、保全性設計や保全方針の検討のために、使用者の協力を得て故障、故障原因、無故障における使用条件、そのほか温度、湿度、荷重、衝撃、振動などの環境 **Stress**、人間関係などの **Field** 情報を丹念に収集・解析してその蓄積と活用を計ることは、信頼度予測精度の向上、信頼性保証を期待するためにも極めて有効な手段である。**H. Braun**⁸⁾ は過去に蓄積された事故の情報とその対策資料によって、機械の設計と加工の参考とする方法を述べている。

このような手順を経て設計部門から離れると製造部に移るが、製造の過程では大企業におけるような徹底した品質管理から零細企業の勘に頼る品質管理まで管理の程度はさまざまであるが、とにかく何等かの管理の下で工程が組まれ工事が進められる。特に程度の高い品質管理では確率統計手法によって厳しい規制が行われるのが普通である。

日本人は優秀製品を **Dead Copy** して猿まねが旨いとしばしば悪評を買うが、**Dead Copy** では外観は本物と似たものになるが、中身は劣って信頼性が本物よりおちるのが通例であって、**Know How** という技術の意味がここに厳然と存在するのを知らされる。科学技術庁が調査した未公開の、民間の化学系・機械系企業60社が導入技術を含めて開発した技術82種について云えば、基本的特許のみ導入13%、基本的特許と周辺特許導入7%、特許と**Know How**導入58%、**Know How**のみ7%となっている。

現在、航空原動機には **Jet Engine** が数多く使用されているがその原型は1940年英人 **Frank. Whittle** が発明したもので、その功績で **Sir** の称号を受けている。

昭和46年末の日本の民間航空機の登録機数は1226機で、その内訳は**Jet機89**、ターボプロット機103、ピストン機498、ヘリコプタ295（タービン60、ピストン235）、滑空機241となっている。⁷⁾

10
 日本航空会社は1962年JT3D Jet Engine 装備DC 8 型機を輸入し、1970年までの10年間に43機200基に達したが、この間信頼性方式による機関の改善と保全技術の進歩によって、TBO (Time Between Overhaul) は当初1 200時間であったが69年には12,000時間に飛躍的に増大し、Overhaul は4年に1回しか行われなくなってその存在意義が極めて薄いものになり、70年8月運輸省航空局からTBO廃止の認可を受け今日に至っている。また、70年から使用開始したB747型機のJT 9 D エンジンは最初から保全設計として、エンジン全体を9個のmoduleに分割して、故障の場合関係するmoduleを交換して極めて簡単に取付替ができる構造とし速かにエンジンを修復する。さらに高温のローター部では、ほとんどの段のブレードの状況及び燃焼室内部が直接日視できるようにボアスコープ用孔が用意してある。

次には人間工学 (Human Eng) という点に少しふれる。ちょっと考えるとまことに妙な言い廻しではあるが、人間工学的な考え方を機械設計に取入れる場合を一口にせんじつめると、人間が機械を扱う場合に誤動作をすることない取扱いやすい寸法、形状、色彩、配置、構造にせよということになると思う。何度も云うようだが、このような学問体系のなかった時代でも、設計の場合には以上の点に留意せられたことは間違のないことであるが、世の中が進み社会が複雑になるに従ってこれらに対する要求が深まり、結果として学問として現われてきたのである。人間工学の定義は、アメリカ ピッツバーグ大学 T. Hatch 教授によると、人間の外部ストレスに対する反応を支配している原理、法則、量的関係を、機械や器具の設計や分析に適用して、人間に最適な機械の条件を見出すこととなっていて、これで人間工学的考え方がすべて尽されている。機械・装置などを設計する場合には、この人間工学的条件を満すべく配慮するのが今日では常識となっているが、最適設計というのはこれとは趣きが異なり、その機能、構造、耐久性、価額などを使用条件に合せて最適とするための設計手段であって、結局、最適設計とは評価関数 Y の最小値を見出すことに帰着する。

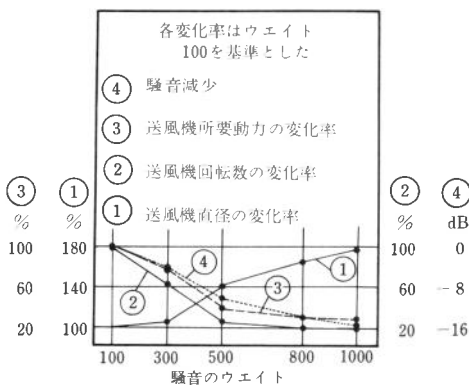
$$Y = \sum_i W_i \times X_i$$

X : 設計評価の対象 (価格、耐久性、機能など)

W : 評価する機器の評価項目のウエイト

i : 評価項目を表わすサフィックス

図3に空冷式パッケージ形空調装置用室内送風機の騒音に関する評価項目のウエイトを集約して例示した。各項目の変



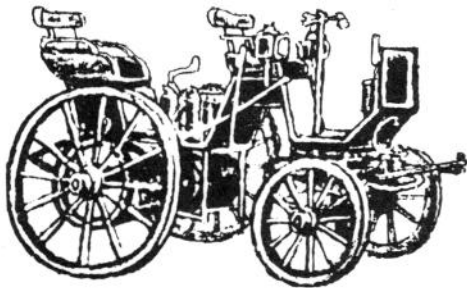
12
 図3 騒音と室内送風機
 (図表は筆者集約)

化率の基準を100としているが、項目の内容によっては0を基準とした方が都合よいことがある。著者鈴木は、送風機の騒音低下を目的とした本装置の設計では次のように結論している。

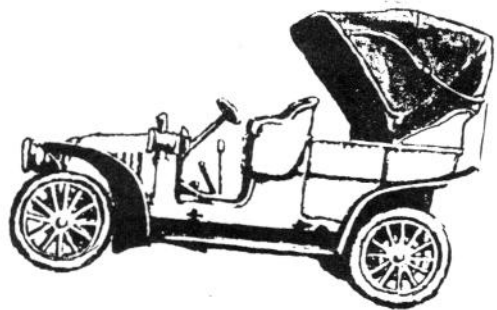
- 1) 送風機は比騒音最小の点で設計すべきである。流量係数に対して比騒音の変動が少ない送風機の場合は、送風機直径を小さくできる。
- 2) 送風機動力が下がるので、装置の空気抵抗・所要風量は極力減らす必要がある。その結果熱交換器は大きくなる。
- 3) 送風機騒音と装置のコスト・大きさは相反する傾向となるので、設計ポリシーに基づいて妥協点を決める必要がある。

形 態

次には形態について考察する。一世紀前の機械製品はギコチナイ形をしたものが多かった。文明の程度低く生存競争は今程でなく、人々はノンビリ暮していたその頃に、今日第一線で活躍している種々の機械の多くの原型と認められるものが続々と現われた。それから30年後に現われた航空機でも、最初はまず飛ぶことが先決であったから形などはどうでもよかった。社会状況の変化とその要求は科学技術の発展を促し、機械は自然に性能を発揮しやすい形状をとるようになった。それに美を好む人間本来の特性のため、今日ではスマートで快感を与える色彩感覚の豊かな設計でなければ受け入れられなくなった。



ダイムラ 1886年
(世界最初)



ルノー 1903年

図4 初期のガソリン自動車

筆者は本稿の序論で「形の整ったものは性能もよい」といったが、同様の受止め方をした人が¹³⁾いる。

新製品特にそれが創意に基づくものであればある程形態美は重要である。小川は、¹⁴⁾独創的な設計は新しい型を産出するが、その際その姿を美しく造形することは我々の文化的欲求に対し或は

製品の市場性を高める点から度外視できない一要素であると述べ、H. Kettner¹⁵⁾らは形態に関する素養が設計に有用であるとして、機械の組織的設計について論じている。

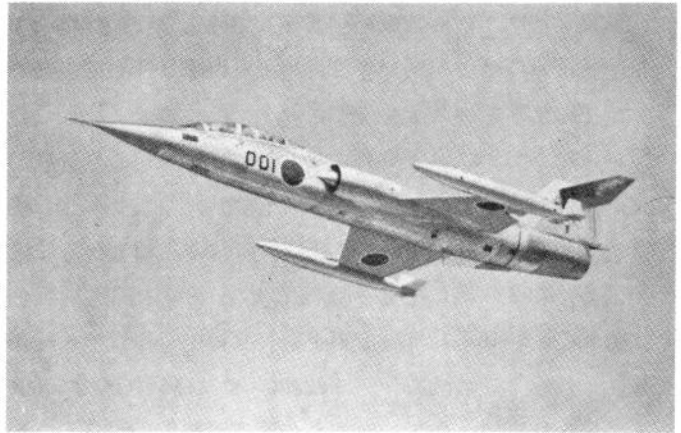


図5 近代航空機の形態美の例(F104J戦闘機)

部品分化の進んだ寡占市場を持つ典型的な産業といわれる自動車産業について四本は、かつては企業が設計を求めたが、今では人々がデザインを求め

るようになり時代は変っている。デザインには心理的・感覚的なイメージが重要になる。デザインが非価格競争の最も重要な手段の一つであるばかりでなく、性能部品生産の合理化が一段落すると、外観や塗装が生産性向上とコストダウンの鍵になる。使いすてになり性能は要因より外された。西本は新しい時代の商品デザインのあり方を模索している。

ここでは、限られた一部について形態変遷の推移を眺めてみる。

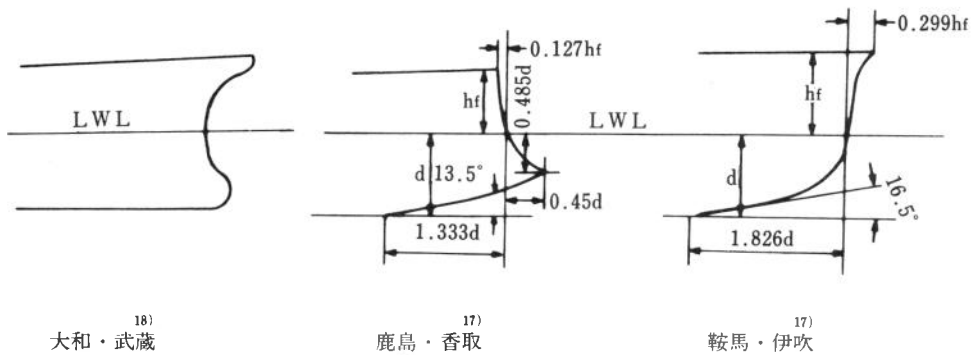


図6 船の変遷

図6に旧日本海軍の装甲巡洋艦、戦艦の船(艦首)形状の変遷を例示した。日露戦争(1904~1906年)頃までは巡洋艦以上の大艦の船には、世界各国とも衝角(Ram)を付して敵艦の腹に突き当てて沈没させるいわゆる舷々相摩す式の戦法がとられていた。1886年Lissa島沖でオーストリアとイタリアの艦隊が海戦し、イタリアの艦2隻がラムで沈没したのが甲鉄艦の初めての戦で、明治37年5月編隊航行中濃霧に遭遇して、巡洋艦吉野(4160排水トン)が変針の際後続艦春日(装甲巡洋艦7628排水トン)のラムに突かれて沈没した。この戦訓に鑑みてRamは廃止され船は水切形に変わった。

鹿島：英国アームストロング社建造，16400排水トン，

香取：英国ウィッカーズ社建造16000排水トン、共に明治39年5月竣工。

鞍馬・伊吹：初め装甲巡洋艦として建造、後に巡洋戦艦となる。共に14500排水トン、鞍馬は横須賀海軍工廠で明治44年2月竣工。伊吹は呉海軍工廠で明治42年11月竣工した国産艦で、初めて主砲射撃指揮装置を備えた。

その後細かい形状は多少異にしたとしても水切形を基調として久しく採用せられたが、船体の航走抵抗に大きな影響を与える造波抵抗（一般に計画速度付近で船体抵抗の平均30%を占め、計画速度を超えると急増する）の軽減に研鑽が重ねられて球状型が出現した。本例の場合、吃水線下で前方に約3m出して全速時（27.1ノット）の船体抵抗を約8%低減することに成功した。

大和：昭和16年12月呉海軍工廠、武蔵：昭和17年8月三菱造船会社社長崎造船所にてそれぞれ竣工、排水トン数満載状態で72800、公試運転状態で69000、計画に2カ年を要し第一級軍機として厚い秘密のベールに包まれて建造が進められたという幻の戦艦、世界最後の大艦巨砲主義の権化たる46cm（18インチ）砲の偉力も、終始敵側の巧妙な回避作戦によって遂に一発も米戦艦に浴びせる機会をつかむことができず、文字通りウンカのような米航空機の集中猛攻で南海の藻屑と消えた。

注：小形高速艇、モータボート、ホーバクラフトのように高速時艇体前部を水面より離脱させてSkin Frictionの低減を計る様式のものとは別として、一般の船の最高時速は60ノットが限界とされている。旧日本海軍の記録¹⁹⁾でも昭和18年5月舞鶴で建造した試作駆逐艦 島風（公試排水トン3018、35000SHP×2軸）で公試速度40.1ノットがあるのみである。

1903年（明治36年）12月17日ライト兄弟が、12HP 2サイクル4気筒水冷ガソリン機関を載せた複葉機で、ノースカロライナの丘から舞い上がり制御しながら22秒間、22.5mの人類初の空中飛翔に成功（日本では7年遅れた明治43年（1910年）12月19日徳川好敏工兵大尉（後に中将）がアンリ・ファルマン式複葉機で東京の青山練兵場を2周したのが始まりで、最高70mの高度で時速53km、

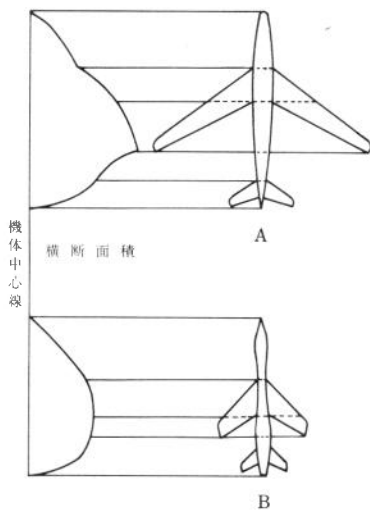


図7 航空機の横断面積の変化

滞空時間4分で3000m飛んだ）した。その後飛行機は順調に展びて1909年にはブレリオが英仏海峡を飛んだが、その発達に長足の進歩をもたらしたのは1914～1918年の第一次大戦で、兵器として登場し機関銃を積んだ戦闘機は空中線を演じ、爆弾を手づかみで落した爆撃機が現われた。

飛行原理の探究に科学者が科学のメスを入れ出したのは1908年頃と云われている。

機体は木骨羽布製の胴・翼を備えた複葉、単葉、イタリアのカプロニの如き三葉機も一時現われたが、30年ばかり単・複葉混用が続いた後、落ちつく処に落付いて現在の全金属製単葉機が主流をなすようになった。航空機の重要な性能の一つである速度は、

今では大形旅客機では時速 900~1000km, 軍用機では2 マッハ以上は珍らしくない。遷音速以上では、特に機体の形状・断面積変化の状況が速度に大きな影響をもつ。横断面の変化がなめらかであれば空気抗力は低く、急激であれば高くなる。図7に横断面変化の1例を示す。

A : 通常の後退翼機, B : Coke Battle型変化胴体機

航空原動機は、わが国では従来V型、W型が使用されることが多かったが、第二次大戦では星型空冷が圧倒的に多用され、量産機種¹⁹の最優秀品に18シリンダー、2800rpm、地上2000HP、離昇馬力2200HP、重量980kgがあった。

生物工学成果の寄与

人間は他の動物にない優れた特性と機能を備えているが、ある種の機能は他の動物から遥かに劣っている。動物の神秘に包まれたすばらしい運動機能・神経系の働き・視覚、聴覚などの情報の受容・伝達・処理の機構を解析し、そのモデル化を計って人間が工学的に再現するため、Bio-nicsと称する学問分野が拓けてきた。そのなぞも少しずつ解明され、成果が期待される。

なぞにはどんなものがあるか？ ほんの一部を紹介すると

1. コウモリは飛びながら口から超音波を出し、両耳でその反響をキャッチして空中の虫を捕えるが、コウモリ同志には超音波はじゃまにならない。
2. 生物の眼の構造機能は実に巧妙且合理的にできている。
3. ノミは自分の高さの150倍も高く跳ぶことができる。
4. クモは巣を放射線間にはり、等角ラ線に近いラセンの糸は空中で、アラビヤゴムのよ
うな粘液で充され且撚りがかけてある。
5. ウミネコは特に嗅覚が発達し、嗅覚によって自分の巣にもどる。
6. マスも嗅覚が発達し、生まれた元の川に、ニオイで知ってもどる。
7. ネコは運動感覚が群を抜いてスバラシク、視覚、聴覚、触覚もよく発達している。し
かし、ネズミを捕ることを親猫から学習しないとネズミの捕り方を知らぬことが多い。
8. カモメの翼は内側の半分で浮力を発生させ、外側の半分が飛翔の働きをする。時速45
kmで1時間飛び続けても、エネルギー源の脂肪消費量は全量の0.2%に過ぎない。
9. イルカは平均遊泳速度18ノット、最大40ノット、体重約100kg、その動力は0.4PSと推
定される。一方アメリカの魚雷は18ノットで走って所要動力は2.3PS。イルカの所要動
力は魚雷の17%に過ぎない。この秘密は結局魚体表皮の構造にあることが解明されつつ
ある。²⁰
10. 松原は、²¹イギリスの Leeds 大学が理・工・医協力して、理・工の面からは人間を機
械と見立て、医の立場からは関節炎など関節の治療の確立を共同研究していることを紹
介している。そのなかで文献を引用して次のように述べている。²²

関節の構造は、図8のAに示すように、関節の骨、骨をとりまく軟骨および潤滑剤の

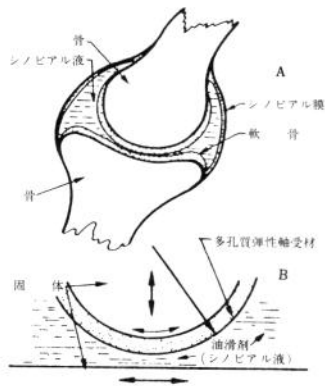


図8 人間の関節と平軸受の相関図

役割をするシノビアル液（いわゆる関節液）からなっている。軟骨は多孔質でシノビアル液を含み、これが体重の負荷によって外へにじみ出され、この圧力によって軟骨と軟骨の固体接触を妨げるといふ機構が考えられていて、平軸受のモデルと対応させたのが図8のBであって、弾性流体潤滑によりなめらかな運動を行ない、また体重を支えている。軟骨はコラーゲンの繊維束から成りたっていることが走査型電子顕微鏡によって確認されていて、シノビアル液の含有性を示している。

後 記

以上論述したほか、色彩・製品の巨大化または小形軽量化・工作加工技術の進歩ならびに工法の発達・組立技術の進歩・保守技術の進歩・情報処理・自動制御・自動設計製図・工業材料の開発等々。さらに、人間の知能・感情・情緒などまで含めて、設計に直接関係のある多くの重要な事項が残されておいて、複雑多岐かつ広範であるため、続報として筆を進めることにする。

引用・参考文献

- 1) 藤沢正武：日機学誌，75-638，（昭47-3），
- 2) W. Judge：Modern Petrol Engines，（1965），393.
- 3) M. J. Siegel：Mechanical Design of Machines，（1965），4.
- 4) S. Lilley著，小林・伊藤訳：人類と機械の歴史，（昭39），206.
- 5) 塩見 弘：信頼性工学入門，（昭42），164.
- 6) 中日新聞，（昭47-9-1）.
- 7) 日機学誌，75-644，（昭47-8），145.
- 8) H. Braun：Maschinenschaden，44-5，（1971）.
- 9) 科学新聞，（昭47-2-18）.
- 10) 松尾芳郎：機械設計，16-5，（昭47-5）
- 11) 倉田正一：日機学誌，64-504，（昭36），135.
- 12) 鈴木 匡：三菱重工技報，9-4，（昭47-7），516.
- 13) 福永年雄：機械設計，11-1，（昭42），27.
- 14) 小川義朗：機械設計，上，（昭41），7.
- 15) H. Kettnerほか：Werkstattstechnik，61-12，（1971）.

- 16) 四本和巳：日産技報， 4， (昭43).
- 17) 永村 清：造艦回想， (昭32)， 199.
- 18) 福井静夫：日本の軍艦， (昭34)，
三菱造船(株)：創業100年の長崎造船所， (昭32).
- 19) 日本機械学会：日本機械工業五十年， (昭24)， 249.
- 20) 柵沢一郎：日機学誌， 75-636， (昭47-1)， 98.
- 21) 松原 清：機械の研究， 24-10， (昭47-10)， 8.
- 22) P. S. Walker ほか：Nature, 225, (1970), 956.