

# ものづくりの現場で役に立つ 設計の勘どころ・概論



阿部技術士・  
労働安全コンサルタント事務所  
阿部弘  
Hiroshi ABE  
(機械部門)

## 1. 緒言

トラブルがなく安定稼働が実現した生産ラインで生産された製品の品質は安定している。即ち、製品の品質異常がないことは生産ラインが安定稼働していることを意味しているのである。生産ラインを安定稼働させるためにはラインを構成する各機械装置を安定稼働させなければならない。そのためには製品の品質ではなく、各機械装置の品質(信頼性)を高めなければならない。

各機械装置の信頼性を高めるためには、設計段階で、各部品、メカニズム等の品質を作り込み、高めておかなければならない。機械装置の製作工程には組立調整の段階があり、設計のミスを見事に補完する「職人の技」が飛び出すこともある。しかし、ほとんどの場合において設計の未熟さまではカバーしきれない。即ち、機械装置の信頼性は設計において品質を作り込んでいるか否かにかかっているのである。

筆者は定年退職後、技術士・労働安全コンサルタント事務所を開設し各種業務を行っているが、基礎教育のテキストとして医薬品製造の現場で身につけた知識や経験を基に「ものづくりの現場で役に立つ設計の勘どころ」を作成、使用している。全体の構成は、以下のとおりであるが、本稿では第1章から第4章までの概要を紹介する。

### 第1章 設計の流れ

1. 設計の流れと確認項目 2. 工業化とライフサイクル 3. 真の科学的理解

### 第2章 変形と破壊

1. フックの法則 2. 材料の力学的挙動 2-2-1. 変形 2-2-2. 破壊 3. アンウィン(Unwin)の安全率と確率論的安全評価 4. 応力集中

### 第3章 力学的視点

1. 締結いろいろ 2. 力学の問題／ダランベールの原理 3. 機構学／機械の仕組みと運動-カム及び歯車 4. トライボロジー

### 第4章 設計の合理化

1. 標準数／単純化・共通化・標準化 2. 信頼性向上・冗長性の考察 3. ウェーバー・フェヒナーの法則—感覚の定量化の試み 4. 品質保証／全数検査・抜取検査・間接検査 5. 傾聴力

第5章 生産工学

1. 生産工学の概要 2. VA と VE 3. Group Technology 4. 生産管理  
5. 品質管理 6. 品質保証と維持管理

第6章 孫子に学ぶ

1. 五事七計(孫子・計篇) 2. 巧久拙速(孫子・作戦篇) 3. 呉越同舟(孫子・九地篇)  
4. 迂直の計(孫子・軍争篇) 5. 臨機応変(孫子・九変篇) 6. 得失の計(孫子・虚实篇)  
7. 形勢逆転(孫子・形篇・勢篇)

2. 設計の流れ

2-1. 設計の流れと確認項目

表 2-1 は設計の流れと確認項目をまとめたものである。

表 2-1. 設計の流れと確認項目

製品企画	構想設計	安全性	確認項目(思いつまま順不同)	
		信頼性	法律、ガイドライン、安全情報等の規制の有無	
		市場のニーズ	知的所有権(国内、海外)	
		使用環境	使用環境(国内、海外)	
		使用条件	開発期間の適正化	
		使われ方	設計者の顧客志向性	
↓			源流管理(可能な限り上流で対応) ユーザーの利便性	
製品設計	形状設計	使用環境	使い易さ、保守のし易さ	
		使用条件	ヒューマンエラーの未然防止検討	
		重量・大きさ	フェイルセーフ、フェイルブルーフ	
		コスト	FMEA、FTAなどによる信頼性確認	
		納期	リスクアセスメントによる安全性確認	
	↓			仕様の適正化(過剰仕様の排除)
	構造設計	使用環境	差別化、セールスポイント	
		剛性	小型化、軽量化、機構の単純化	
		強度	規格品、市販品の多用	
		変形(熱、残留応力)	逃げの設計(過剰加工の排除)	
↓			仕上げ記号の適正化	
	FMEA、FTA	FMEA活動	塗装・めっきの回避	
↓			過剰な仕上げ・装飾の回避	
	試作評価	デザインレビュー	寸法公差の適正化	
↓			使用材料の適正化と種類削減	
製造方法	試作評価	デザインレビュー	使用寸法の適正化(標準数による種類削減)	
	評価、確認		特殊治工具不要の設計	
↓			材料の寸法取り適正化、標準化の検討	
製造準備	図面化	デザインレビュー	部品の共有化と部品点数の削減	
	設備製作		加工方法、組み立て方法配慮	
	実機評価		保全方式の選定	
			コストパフォーマンス	
			デザインレビュー	

岡部技術士・労働安全コンサルタント事務所

まず、製品企画の段階では顧客ニーズなどを基に構想設計を行う。構想がまとまると製品設計(詳細な形状や構造に関する)に移る。この段階で設計者は不具合を漏れなく予測しなければならない。設計者は不具合を予測するため、FMEAやFTAを実施し、設計に反

映し、製品試作を行う。試作品において評価、確認を得た後、生産の準備に入る。

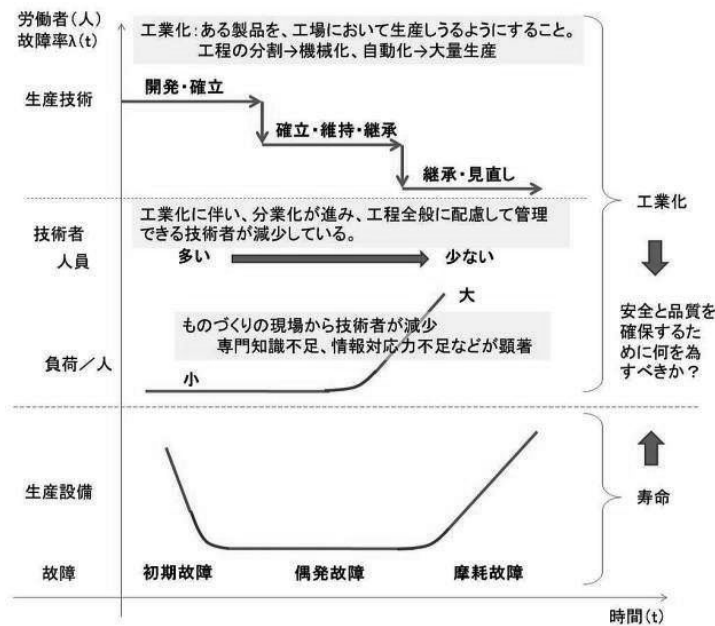
これら一連の流れの中で、関連の部署では検討会の開催や、多くの専門家によるデザインレビューが行われる。デザインレビューは、その目的が設計レベルの向上であることを認識して実施しなければ時間と金の浪費につながるため、注意が必要である。

2-2. 工業化とライフサイクル

工業化とは、設計された製品を工場において生産できるようにすることをいう。即ち、工程を効率的に分割し、各工程で必要とする作業の機械化や自動化を計画し、大量生産可能な生産ラインを構築するということである。

中国、呉の時代、孫武が説いた兵法書「孫子」の用間篇では、間(間諜(スパイ))による情報戦争について述べられている。戦争では、的確な情報を獲得し、それに基づいて対策を立て行動した者が勝利をおさめている。これは戦争に限らず、企業の競争においても同様であり、ものづくりの現場においても的確な情報を獲得することは重要である。的確な情報を得ずに行動すれば、ほとんどの場合、失敗する。

図 2-1 はものづくりの現場において変化する生産技術(技術者)と生産設備の一例を示したものである。



生産技術は、開発、確立、維持、継承、見直しの段階をたどる。この間、技術者は、製造ラインにおけるイベント(自動化設備導入、人員削減など)により、ものづくりの現場から離れ、新製品や新技術開発へと移っていく。このためものづくりの現場では、技術者の減少により、専門知識不足や情報対応力不足などが顕著になってくる。

図 2-1. 工業化に伴う生産技術と生産設備の変化

一方、生産設備は、初期、偶発、摩耗故障(バスタブ曲線)をたどり、老朽化が進行していく。しかし、工程全般を見通し、製品品質を管理できる技術者が減少しているものづくりの現場では、このような老朽化への対応は、後手に回っているのが実情ではないだろうか。

このように技術者が減少し、生産ラインの老朽化(寿命)が進行する状況において、安全と品質の確保のため何を為すべきか。最優先すべきは、的確な情報を獲得し、それに基づいて対策を立てることだと考える。例えば、技術に関わることであれば、技術を標準化し、留意すべきポイントを明確化することにより技術を継承可能な状態にしなければならない。同時に、生産設備については、製品や設備のライフサイクルを把握し、改善、改良を進めなければならない。ものづくりの現場においては、人員削減による単純なコスト競争ではない安全と品質に関わる情報を得るための投資こそが求められている。

### 2-3. 真の科学的理解

ここでは、真空技術の応用例の中から、真空装置の漏れ検知と応用について紹介しながら真の科学的理解について説明する。

真空装置による漏れ検知の方法には加圧法、テスラーコイル法、ガイスラー管法、真空

放置法などがある。中でも、ヘリウムガスを利用した漏れ試験法は精度が高く、広く利用されている。そこで用いられるヘリウムリークディテクタは検出器にヘリウム専用の質量分析器を内蔵したもので質量数4のイオンのみを検出するように調整されている。

筆者は1992年にヘリウムリークディテクタに出会い、検査装置への応用開発など、多くの経験を積み重ねることができた。ヘリウムリークディテクタは検査対象から漏れ出すヘリウムガスを検出することにより良否を判定する装置で、検査対象に確実にヘリウムガスを封入しておく必要がある。封入が不完全だと不良品であってもヘリウムガスが漏れ出さないため良品と判定する可能性がある。このため、ヘリウムガスを用いる漏れ検知では漏れ検査方法の精度を高めると共にヘリウムガスの封入技術を高める必要がある。ここでは30年前に行ったヘリウムガスの封入実験を基に、設計の勘どころ(真の科学的理解)をまとめてみた。ヘリウムガスは高価なため必要以上の使用は避けなければならない。また、効率的に封入できなければヘリウムリークディテクタの設置環境のヘリウムガス濃度が高くなり、誤検知が多発する。それ故、ヘリウムガスの封入技術の確立は重要になる。

当時はパソコンも今のように普及しておらず、グラフは手書きになっているが、真の科

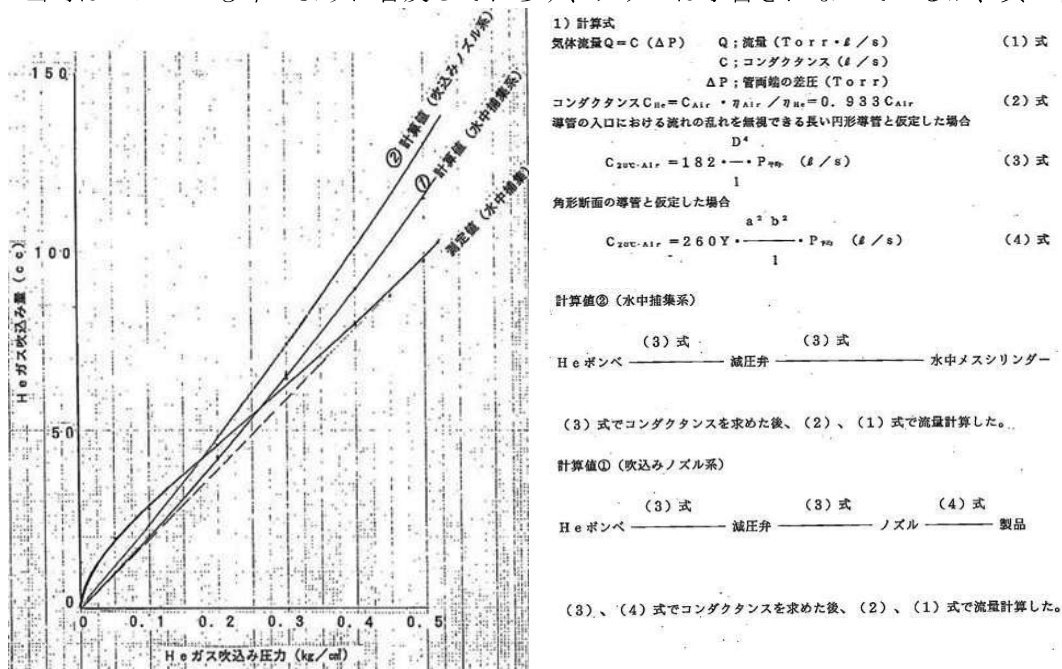


図2-2.ヘリウムガス吹込み量と吹込み圧力の比較(単位は非SI単位系)

学的理解のため何をどのようにしたのかを振り返る。うまくいった現象が偶然か否かを検証すること無く、検討を終了したのでは真の科学的理解は得られない。これから説明する封入方法についても細かなことには触れずに「吹き込み圧力を高く、吹き込み時間を長く設定すれば安心できるではないか」との考え方もあるかもしれないが、そのような考え方は真の科学的理解の追求とは全く次元の異なる考え方なのだ。ここで紹介するヘリウムガスの封入実験は真の科学的理解を追求した一例である。

当時、ガス封入方法で用いられるものとして次のようなものが知られていた。



- 1) 真空室内で脱気及びガス吹き込み後、シールする方法
- 2) ガス雰囲気中を容器開放状態で通過させる間に自然封入、シールする方法
- 3) ノズルにより容器内にガスを吹き込んだ後、シールする方法
- 4) 一本のノズルで脱気した後、他の一本でガスを吹き込みシールする方法

ここでは 4) に関する実験結果を紹介する。

実験の目的は制御変数(ヘリウムガス吹き込み量)と操作変数(吹き込み圧力又は吹き込み時間)を把握してヘリウムガス濃度を制御することであった。そこで操作変数の内、吹き込み時間を固定し、吹き込み圧力を操作することにより、ヘリウムガスの吹き込み圧力と吹き込み量の関係を調べた。

図 2-2 は水中捕集して得られたヘリウムガスの吹き込み量のグラフと流体力学の式を用い計算して得られたグラフを比較したものである。このグラフを用いて設定した条件でヘリウムガスを封入した対照物についてヘリウムガス漏れ検知試験を行った結果、ヘリウムガス漏れ検知精度に異常は認めなかった。これらの結果より、図 2-2 の計算式はヘリウムガスの配管系及びノズル設計の目安として使用できるものである(真の科学的理解に到達)と判断した。なお、実験装置及びデータの詳細は省略した。

### 3. 変形と破壊

#### 3-1. フックの法則

機械材料に求められる重要な性質に「外力に対する強さ」と「外力による変形」がある。機械を設計する際、最適な材料を選択するためには材料の機械的性質を知らなければならない。この機械的性質は日本産業規格(以下、JIS 規格)で定められた材料試験を行うことによって得られる。材料試験には引張、圧縮、ねじり、曲げ、衝撃などがある。

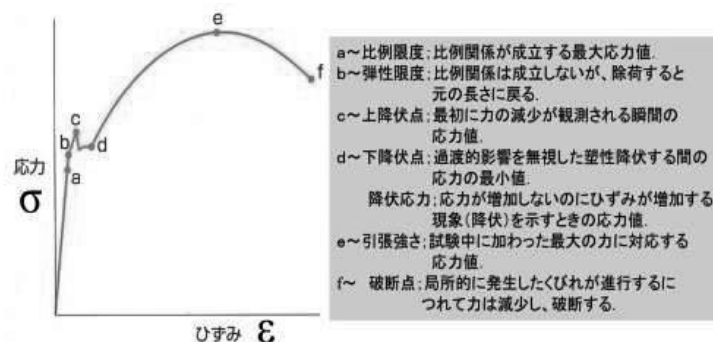


図 3-1 応力-ひずみ線図 出典: 機械材料学(日本機械学会)

材料の種類により、応力とひずみの関係は異なるが、機械を設計する際はこの関係を把握した上で、JIS 規格の材料試験で得られた数値を使用しなければならない。材料の力学的挙動については次項 3-2 で詳述する。

#### 3-2. 材料の力学的挙動

技術には危険がつきものである。このため、危険源を特定し、可能な限りリスクを減らすことによって、その技術の恩恵を受けることが可能となる。

外力に対する強さ(応力)と外力による変形(ひずみ)の関係は引張試験により求めることができる。図 3-1 は軟鋼の引張試験で得られた応力-ひずみの関係を示したものである。

材料の種類により、応

例えば、自動車の登場は蒸気自動車が1769年、ガソリン自動車が1870年(内燃機関によるものでは1885年にそれぞれ発明したダイムラーとベンツによるものが最初)とされている。航空機は1903年にライト兄弟により初飛行が行われた。また、原子力発電は1951年にアメリカで初めて行われた。原子力発電については世界中で存続の是非が問われているが、自動車と航空機については無くてはならないものになっている。それ故、今日まで、安全性向上のための技術開発など、不断の努力が続けられているのである。

機械工学はこれらの技術開発・改良に欠くことのできない学問で、特に、材料力学は機械や構造物が安全に運用されるための基礎となる学問である。材料力学の知識なしに設計された機械や構造物は危険源の塊かも知れない。

それでは、そのような不安を解消するためにはどのようにすればよいのか。答えは簡単で、最適な材料を選択し、合理的な安全率を見込んだ設計をすればよい。最適な材料を選択するためには材料の機械的性質を知らなければならないが、機械的性質はJIS規格で定められた材料試験を行うことによって得られる。以下の項目で、外力に対する材料の変形並びに破壊に関する力学的挙動について紹介する。

### 3-2-1. 変形

外力に対する材料の変形は次のように分類できる。

①弾性変形：物体に外力が作用すると同時に外力の方向にその力に応じた量の変形を生じ、外力を除去すると同時に原形に回復する性質を有している。なお、外力が一定であれば、ひずみも一定であり、外力を除去すると同時にひずみも消失し、永久的な変形が残ることはない。

②塑性変形：物体に外力が作用すると同時に外力の方向にその力に応じた量の変形を生じ、外力を除去しても原形には回復しない(永久的な変形が残存)性質を有している。

③粘性変形：物体に外力が作用すると時間の経過と共に変形し、外力を除去すると原形付近までは回復するが、原形には戻らず永久的な変形が残る性質を有している。

材料の強さとは「その材料に外力が作用したとき、材料が破壊するまでに耐えられる極



写真 3-1. アルミニウム単結晶の  
沁り線(猪子) (×180)  
出典: 機械材料の基礎(美馬、長谷川)

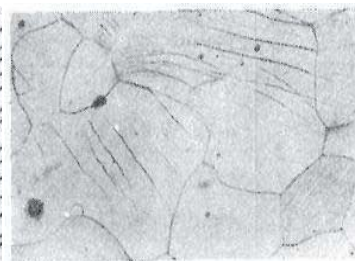


写真 3-2. 多結晶極軟鋼の沁り線  
(沁り線が波状を呈し、また結晶粒内  
で止まっている)  
(稲田、坂巻、阿部) (×400)  
出典: 機械材料の基礎(美馬、長谷川)

限の強さ」を意味することが多いが、材料の塑性変形に対する抵抗も材料の強さであることは論を俟たない。

金属材料は細かな粒子状の結晶が集合したもので、それぞれの粒子は一定の原子配列をした結晶構造を有する結晶粒から

なっている。そして、各結晶粒は方位が異なるので、結晶粒の境界には結晶粒界ができる。

写真 3-1 は単結晶なので、結晶粒界はないが、写真 3-2 は多結晶のため結晶粒界が存在している。

多くの金属材料はせん断応力が臨界せん断応力を超えると降伏して、塑性変形する。この塑性変形は材料内部の欠陥が原因で生じている。この材料内部に存在する一次元欠陥(転位と呼ぶ)が材料内部を移動することにより材料を塑性変形させている。しかし、この転位は材料内部の特定の結晶面(すべり面)しか移動できない。このすべり面とすべり方向をすべり系と呼び、結晶構造ごとにすべり面、すべり方向、すべり系の数が調べられている。通常の金属材料の転位密度は  $10^8 \text{ cm} / \text{cm}^3$  程度であるが、この初期の転位が、せん断応力を受けて、材料内部で増殖することにより塑性変形が進むことも明らかになっている。

### 3-2-2. 破壊

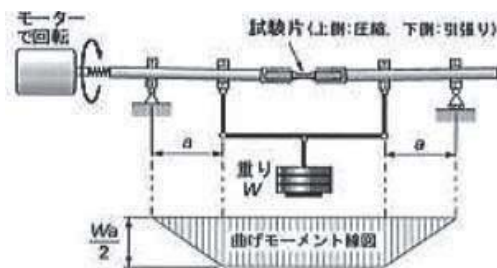
破壊とは物体が外力の作用により二つ以上の部分に分離する現象のことである。機械の部材が破壊した場合には決定的なダメージを与えてしまうことがあるので、破壊の未然防止については変形以上に注意しなければならない。

材料が破壊する場合、破壊面全体が同時に破壊するわけではない。破壊面の一部にクラック(割れ目)が発生し、このクラックが成長し、破壊面全体に拡大することにより二つ以上の部分に分離(破壊)するのである。

ここでは、破壊の形式をいくつかの観点から分類したものを紹介する。

- (1) 破壊が起こるまでに生じる塑性変形量により-----延性破壊、脆性破壊
- (2) 外力の作用の仕方により-----静的破壊、衝撃破壊、疲労破壊、クリープ破壊
- (3) 多結晶材料における破断箇所により-----結晶粒内破壊、結晶粒界破壊
- (4) 破壊面の結晶学的方位により-----へき開破壊、せん断型破壊
- (5) 破壊面の外観により-----粒状破壊、せん断破壊、繊維状破壊

例えば、疲労破壊は巨視的な塑性変形を示さず脆性破壊に類似しているようであるが、その破壊面は極めて特徴のある様子を示している。図 3-2 は回転曲げ疲労試験機で、図 3-3 はこの試験機により得られた疲労破壊面のスケッチである。ある一点(クラック発生点)から始まって拡大する貝殻模様部と非常に荒い凹凸を示す最終破断部の二つの部分に分けられる。貝殻模様部は疲労破面の特徴で、貝殻の模様は疲労クラックが外力の繰り返し数の



回転曲げ疲労試験機(日本材料学会web資料)

図 3-2. 回転曲げ疲労試験機  
出典: 日本材料学会 web 資料

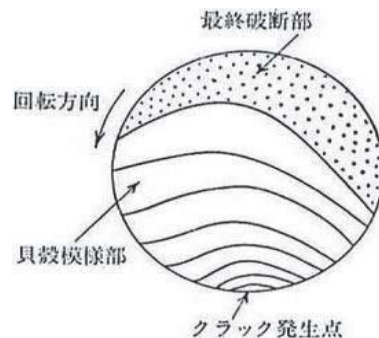


図 3-3. 回転曲げ疲労破壊面のスケッチ  
出典: 機械材料の基礎(美馬、長谷川)

増加と共に徐々に成長した痕跡である。残りの最終破断部は破壊の寸前に疲労クラックが非常に速く進行した部分である。

### 3-3. アンウィン(Unwin)の安全率と確率論的安全評価

構造設計では機械や構造物の使用及び設置環境における部材の剛性、強度及び変形を検討しなければならない。通常、機械や構造物を設計する際には、使用する部材の破壊や変形の許容値を超えないように部材中に生じる応力を弾性限度以下に選ぶ。

しかし、弾性限度以下であっても破壊や変形が生じることがある。繰り返し荷重による疲労破壊と一定荷重を作用させることによるクリープ現象(変形)が知られている。これらの場合、部材中に生じる応力は疲労限度やクリープ限度以下に設計しておかなければならない。疲労限度には繰り返し荷重が(10<sup>7</sup>回以上)作用しても破壊しない応力振幅の値を採用する。また、クリープ現象を生じる材料については、例えば、1000 時間に 0.1%の歪を生じる応力の限界をクリープ限度として採用する。

構造設計ではこれらのことを考慮しながら、破壊や変形が生じないように部材に許容される応力(許容応力)を設定しなければならない。

ところで、許容応力は次式で求められる。

$$\sigma_a \text{ (許容応力)} = \sigma_s \text{ (基準強さ)} / s \text{ (安全率)}$$

$\sigma_s$  (基準強さ)は材料の種類や使用条件により決定する。

表 3-1. 極限強さを基準とした安全率  
出典: JSME テキストシリーズ  
「材料力学」(日本機械学会)

材料	静荷重	繰返し荷重		衝撃荷重
		片振り	両振り	
軟鋼	3	5	8	12
鋳鉄, もろい金属	4	6	10	15
銅, 軽金属	5	6	9	15
木材	7	10	15	20
石材, れんが	20	30	—	—

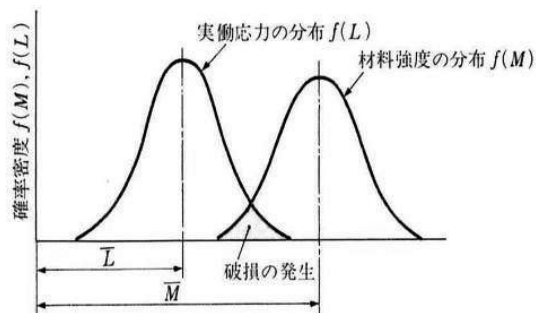


図 3-4. 部材に作用する実働応力と材料強度との関係  
出典: 基礎機械設計工学(兼田、山本)

例えば、軟鋼やアルミニウム合金などの延性材料では下降伏応力や耐力、鋳鉄のような脆性材料では引張や圧縮による極限強さを採用する。また、繰返し荷重を受ける場合は疲労限度、高温で使用される場合はクリープ限度を採用する。

安全率 S はその部材が使用される環境下でどの程度の余裕をもって安全であることを示す係数である。ここでは表 3-1 にアンウィン教授が提唱した安全率の一例を紹介する。表 3-1 は JSME テキストシリーズ「材料力学」から引用したもので、極限強さを基準とした安全率を示している。

ところで、実際の部材が受ける応力及び部材の強度は統計的にばらついている。図 3-4 は基礎機械設計工学から引用したもので、重なった領域では破壊が発生する。従って、安全率は破損(破壊)確率と関係づけて考え、設定しなければならない。このように設計技術



者には安全率の設定という難問が課せられていることを認識しなければならない。安全率の設定を誤ると事故が発生するのである。アンウィン教授は1800年代後半に安全率の考えを提唱し、その後、確率論的安全評価へと発展、進歩している。

確率論的な方法では、従来、明確には意識していなかった確率的な分布を意識し、定量的な評価を試みる。そして、確率論的安全評価では被害発生を程度を明らかにしていくため種々の解析方法が開発、使用されている。例えば、①FTA (Fault Tree Analysis)、②ETA (Event Tree Analysis)、③HAZOP (Hazard and Operability Study)、④FMEA (Failure Modes Effects Analysis)、⑤FMECA (Failure Modes Effects and Criticality Analysis) などがある。

### 3-4. 応力集中

一般の機械や構造物は複雑な形状をしている。特に断面の形状が急激に変化している箇所については形状に基づく応力集中が発生する。このため、構造設計では破壊や変形が生じない部材に許容される応力(許容応力)を設定すると同時に、形状に基づく応力集中に注意しなければならない。

一様な断面積Aを有する丸棒に引張力Pをさせた場合、丸棒の断面には一様な応力 $\sigma_0$  ( $=P/A$ )が発生する。しかし、機械や構造物は複雑な形状をしており、切欠き、穴、角、

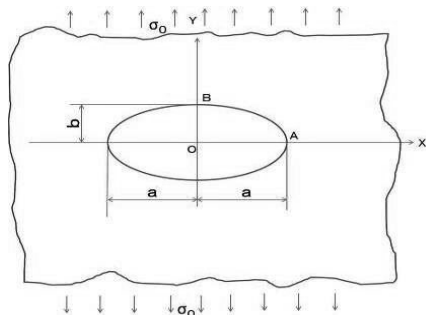


図3-5. 楕円孔を有する無限板

段違い部などの存在により、部材の断面形状が急激に変化している箇所には局所的に高い応力が発生する。この現象を応力集中と呼ぶ。

この集中応力 $\sigma_{max}$ と平均応力(公称応力) $\sigma_0$ の比を応力集中係数と呼び、次式で表す。

$$\alpha = \sigma_{max} / \sigma_0$$

応力集中係数 $\alpha$ は弾性力学を用いて求められる。

例えば、図3-5のような楕円孔を有する無限板に静荷重Pが作用したと仮定した場合の応力集中係数を求めると次式のようなになる。

図3-5のA点( $X=a$ )で $\sigma_y$ は最大値 $\sigma_{y_{max}}$ となり、次式で表される。

$$\sigma_{y_{max}} = \{1 + (2a/b)\} \sigma_0$$

従って、応力集中係数は次式で求められる。

$$\alpha = \sigma_{y_{max}} / \sigma_0 = 1 + (2a/b)$$

ここで、楕円孔ではなく、円孔を有すると仮定した場合、 $a=b$ となるので、応力集中係数 $\alpha$ は3となる。安全率の設定は応力集中も考慮した上で行わなければならないのである。

## 4. 力学的視点

### 4-1. 締結いろいろ

機械は部材を組み合わせた構造物、その部材を駆動するための伝動機構及び動力源から

構成されている。また、機械には付属の各種センサーから取り込まれた情報を処理する制御系も装備されており、人間に有用な機能を発揮するための役割を果たしている。

機械の構造は複雑であるが、細かく見れば、共通した機能を有する部品から構成されていることが判る。これらの部品のことを「機械の要素」とよび、日本機械学会の「機械実用便覧(改訂第7版)」には第7章に「機械の要素」が採り上げられている。第7章の「機械の要素」は、機械要素、伝動要素、密封要素、弁・管要素で構成されている。

そして、機械要素は、「ねじ、接着継手、ピン、止め輪、キー及びコッター、スプライン、リベット」に分けられている。

ここで、「機械の要素」を機能で分類すると次のようになる。機能の分類及び括弧内の要素は代表的な例として記載している。

- ①締結(機械実用便覧の機械要素で採り上げたもの以外に、溶接継手、軸継手などがある)
- ②軸受・案内(すべり軸受、転がり軸受、送りねじ等)
- ③動力・運動の伝達(軸、軸継手、歯車、ベルト&プーリ、摩擦車、チェーン&スプロケット、カム、リンク等)
- ④制動(ブレーキ、クラッチ等)
- ⑤緩衝(ばね等)
- ⑥輸送(管、管継手、弁など)
- ⑦密封(パッキン、ガスケットなど)

ここでは、①の締結について紹介する。

機械部品の締結方法は永久的締結と一時的締結の二通りに分けられる。永久的締結は、溶接やリベットのように交換時には継手部分を壊さなければならない。しかし、一時的締結は、ねじ、ピン、キーのなどのように取り外しが可能となっているので、交換が容易である。締結方法を選択する際には、取り外しの頻度、使用環境などを考慮し、最適な選択をしなければならない。

ものづくりの現場において、ねじの折損、溶接部の破断など締結に関わるトラブルは少なくない。ねじの折損を防ぐためには、ねじの設計をおろそかにしてはならない。たかが「ねじ」、されど「ねじ」なのだ。設計者は材質の選定から強度設計まで確実に手順を踏んで行う必要がある。経験を過信せず、基本に忠実な設計をしなければならない。加工者は設計者が描いた図面に忠実に加工しなければならない。締結時をイメージしなければ、ねじの深さを間違えても気付かず、締結不良を起こしてしまうことがある。また、組立者は確実に締結できているか、手の感触と目で確認しなければならない。締結不良のまま使用していると振動によりねじ部に緩みが生じる。この緩みは、ねじの折損のみならず周辺の部材にも影響を及ぼし大きなトラブルを引き起こす可能性がある。

#### 4-2. 力学の問題／ダランベールの原理

力学の問題を解くためには物体に作用している力とその性質を知らなければならない。そのためには、考えている座標系がどのようなものなのかをはっきりと認識しなければならない。ここでは、慣性系と非慣性系の違いについて、加速している電車のつり革の動きで考える。

図4-1は慣性系を説明したもので、車外から電車を見ると、電車は右向きに加速してい

るように見える。この場合、そのまま運動方程式をたてる。

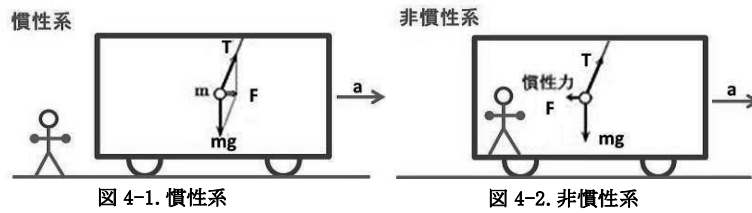


図 4-2 は非慣性系を説明したもので、車内から外を見ると、電車が加速しているので、静止したままの外の景色は電車の進行方向とは逆の向きに加速しているように見える。この場合、見かけの力(慣性力)を加えて運動方程式を立てる。

慣性系において、力  $F$  が働いたとき質量  $m$  の質点の加速度が  $a$  であるとすれば、質点の運動はニュートンの運動方程式  $F=ma$  によって決定される。

この式の右辺を移項して  $F+(-ma)=0$  と書直せば、非慣性系では、質点は力  $F$  と力  $(-ma)$  により、つり合っているとみなすことができる。力  $(-ma)$  は見かけの力(慣性力)であり、真の力ではない。

このように、見かけの力を仮定することで、運動の問題を力のつり合いの問題に帰着させることができるようになる(1743 年フランスの数学者ジャン・ル・ロン・ダランベール発表)。

#### 4-3. 機構学／機械の仕組みと運動-カム及び歯車

日本機械学会発行の JSME テキストシリーズの「機構学 機械の仕組みと運動」の第 1 章序論には、機械の定義、限定運動及び機構について、次のように記載されている。

- ・機械の定義：機械は、幾つかの動力源を持ち、限定運動を行うことによって有効に機械的仕事を行う剛体または力やモーメントが作用する方向に変形しない物体の集合体である。
- ・限定運動：力の作用方向に剛性を持つ複数の物体を相対運動が可能となるように連結して再現性のある作業を行う場合、各物体は限定運動を行うという。
- ・機構：限定運動を行う複数の物体を理論的に取り扱うために、機械における運動の変換や力の伝達を担う物体系をモデル化したものを機構といい、機構は、機械において運動の変換や力の伝達を担って限定運動する物体系であり、それらの物体は互いに相対運動が可能のように連結され、その中の一つがフレームとして固定される。

従来から、リンクやカム、歯車や軸継手などが運動の変換や力の伝達などの手段として、用いられている。設計者は、目的とする作業を実現する機械や装置を低コストで実現するために、これらの機構を効率的に組み合わせて設計しなければならない。ここでは、カムと歯車について説明する。

カム機構は、自動組み立て機、包装機械、印刷機などの機械で用いられているが、間欠割出や連続回転などを得るのに用いられているローラギヤカムは、鼓型カムの一種である。

歯車は車の周上に突起状の歯を設けたもので、二つの歯車を相対的な位置が変わらない軸の周りに噛み合わせるにより回転運動を伝達させようとするものを歯車対とよぶ。

歯車対の二つの歯車間の角速度比を一定に保つことができるため、時計などの精密機器や大きな動力伝達を必要とする減速機など幅広く用いられている。

#### 4-4. トライボロジー

破損による機械装置の寿命の三大原因は破壊、腐食、磨耗と言われている。短寿命や性能低下を含めると磨耗の問題が破損原因の50%以上を超えているため、機械設備の維持管理にとって解決すべき重要な課題となっている。

機械装置には固体同士が相対運動しながら接触する部分が存在する。この部分には摩擦や磨耗が発生する。機械装置には多くの接触する部分があり、機械装置の性能や信頼性などはこれら接触面の摩擦や磨耗特性に影響される。接触面に生じた磨耗は機械装置を損傷したり、破壊に至らしめる原因となる。そこで、機械を設計するにはこのような表面現象に関連した諸問題を取り扱う学問分野であるトライボロジーを考慮しなければならないが、トライボロジーは物理学や化学など関連する分野が多いので、効率的に設計を進めるためには学際的な協力体制を整えておく必要がある。

### 5. 設計の合理化

#### 5-1. 標準数／単純化・共通化・標準化

JIS規格のJIS Z8115:2000によると、信頼性とは「アイテムが与えられた条件で、与えられた期間、要求機能を遂行できる能力」、信頼度とは「アイテムが与えられた条件で、規定の期間中、要求された機能を果たす確率」と定義されている。この考え方は機器だけではなく、ソフトウェアや人間も含めたシステム全体にも適用される。

信頼性を向上させるために重要な要素として、JSQC選書19は、耐久性、保全性、設計信頼性の三つを挙げており、「単純化・共通化・標準化」は設計信頼性を高めるための設計技術の一つである。部品数を削減することで、故障率は下がり、信頼性は向上し、部品の共通化や標準化により機器の開発期間を短縮できる。

このように品質の良いものを安価に早く作るために行う工業標準化や設計などにおいて必要となるのが、系列的かつ合理的な数列から標準化や設計に関わる最適な数値を定める作業である。設計者が機器の主要寸法を無分別に選択すると標準化の目的は達成できないので、この目的に適う合理的な数列が必要となる。

Wikipediaによると「標準数は、1877年～1879年頃に当時フランスの軍人であったシャルル・ルナールが気球の多種多様なロープの太さをまとめようとしたのが始まりで、ルナール数とも呼ばれる。」とある。例えば、4mmのロープ径で不足の場合、1mmプラスした5mmのものを採用するが、40mmのロープ径の場合、1mmプラスの41mmではなく、10mmプラスの50mmのものを採用する。これは、実用上の経験則（例えば、ウェーバー・フェヒナーの法則など）によるもので、この場合は等比数列を採用している。

JIS規格のJIS Z8601-1954には、標準数(Preferred Numbers)が規定されており、工業標準化や設計などで最適な数値を定める作業において、選定の基準として用いられている。



表 5-1. 標準数 R5~R40 及び R10 計算結果

R10		R5	R10	R20	R40
Excel計算結果	JISZ8601	1.00	1.00	1.00	1.00
1.00000000	1.00			1.06	1.12
1.25892541	1.25		1.25	1.12	1.18
1.58489319	1.60		1.40	1.25	1.32
1.99526231	2.00		1.50	1.40	1.40
2.51188643	2.50		1.60	1.50	1.50
3.16227766	3.15		1.70	1.60	1.60
3.98107171	4.00		1.80	1.70	1.70
5.01187234	5.00		1.80	1.80	1.80
6.30957344	6.30		1.90	1.90	1.90
7.94328235	8.00		2.00	2.00	2.00
			2.12	2.12	2.12
			2.24	2.24	2.24
			2.36	2.36	2.36
		2.50	2.50	2.50	2.50
			2.65	2.65	2.65
			2.80	2.80	2.80
			3.00	3.00	3.00
			3.15	3.15	3.15
			3.35	3.35	3.35
			3.55	3.55	3.55
			3.75	3.75	3.75
			4.25	4.25	4.25
			4.50	4.50	4.50
			4.75	4.75	4.75
			5.00	5.00	5.00
			5.30	5.30	5.30
			5.60	5.60	5.60
			6.00	6.00	6.00
		6.30	6.30	6.30	6.30
			6.70	6.70	6.70
			7.10	7.10	7.10
			7.50	7.50	7.50
			8.00	8.00	8.00
			8.50	8.50	8.50
			9.00	9.00	9.00
			9.50	9.50	9.50

表 5-2. 標準数応用例 (円筒型容器の寸法、容積)

番号	直径 d(mm)	高さ h(mm)	容積 V(l)
	R 10	R 10	R 10/3
1	100	125	1
2	125	160	2
3	160	200	4
4	200	250	8
5	250	315	16
6	315	400	31.5
7	400	500	63
8	500	630	125
9	630	800	250
10	800	1000	500

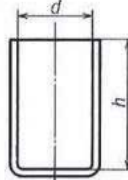


表 5-1 は JIS に基づく標準製図法から引用したものに Excel で求めた計算結果を追記したものである。また、表 5-2 は円筒型容器の寸法、容積に応用した例を引用した。

## 5-2. 信頼性向上・冗長性の考察

ものづくりの現場では各種の機械が単体もしくはシステムとして稼働している。それぞれの機械やシステムが問題なく稼働しなければ品質に問題が無い製品を作ることはできない。

### システムの信頼度(Rs)比較



$$R_s = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 = 0.8 \times 0.8 \times 0.8 = \mathbf{0.512}$$



$$R_s = 1 - (1 - R_1) \cdot (1 - R_2) \cdot (1 - R_3) \\ = 1 - (1 - 0.8) \cdot (1 - 0.8) \cdot (1 - 0.8) = \mathbf{0.992}$$

図 5-1. システムの信頼度比較

このため機械やシステムの信頼性を向上させることが必要になる。ここでは、機械やシステムの設計製作の段階で検討すべき信頼性向上、特に、冗長性について考えてみる。

冗長性とは既定の機能を遂行するための要素や手段を余分に付加し、その一部が故障しても既定の機能を維持できる性質ことで、図 5-1 はシステムの信頼度を直列系と並列系で比較したものである。

直列系ではどの機能が故障してもシステムは停止するが、並列系ではいずれかの機能が正常であればシステムは停止しない。

次に、それぞれの系を構成する機能 (R1, R2, R3) の信頼度(機能を維持している確率)を

0.8 と仮定してそれぞれの系の信頼度を求めてみる。信頼度は、直列系  $R_s=0.512$ 、並列系  $R_s=0.992$  となり、並列系の方が優れていることが判る。

### 5-3. ウェーバー・フェヒナーの法則—感覚の定量化の試み

ウェーバー(Ernst Heinrich Weber)は、1834年に行なった錘を持ち上げる実験で、錘の重さの変化を感じ取る感覚は、何g増えたかといった差ではなく、何倍になったかという比に依存していることを示し、次式(1)の関係(ウェーバーの法則)を発見した。

$$\Delta S (\text{弁別閾}) / S (\text{刺激強度}) = C (\text{定数}) \quad \text{----- (1)}$$

例えば、100gの錘を持ち上げた場合、10gの変化を感知できる人は、  
200gの錘を持ち上げた場合、20gの変化を感知できる。

後に、弟子のフェヒナー(Gustav Theodor Fechner)は(1)式を基に、「感覚量は刺激強度の対数に比例する」ことを証明し、次式(2)の関係(ウェーバー・フェヒナーの法則)を得た。

$$E = C \log S \quad \text{----- (2)}$$

E : 感覚量、S : 刺激強度、C : 定数

例えば、100の刺激が倍に増加して200になるときの感覚量の変化と、200の刺激が倍に増加して400になるときの感覚量の変化は等しいということである。

$$\Delta E (200-100) = C \log 200 - C \log 100 = C \log (200/100) = C \log 2$$

$$\Delta E (400-200) = C \log 400 - C \log 200 = C \log (400/200) = C \log 2$$

ウェーバー・フェヒナーの法則が成り立つ「感覚量」として、重さ以外にも、明るさ、振動(音)、味、匂いなどが考えられるとしている。

### 5-4. 品質保証／全数検査・抜取検査・間接検査

生産ラインでは製品の品質を保証するために目的に応じた検査を行っている。検査には、製品すべてを検査する全数検査と製品すべてを検査するのではなく、抜き取った一部だけを検査し、全体(ロット)が適合か、不適合かを判定する抜取検査がある。これ以外には、例えば、事前の取り決めにより、仕入れ先の検査成績書等を確認することによって、自社での受入検査を省略する間接検査がある。

なお、JIS規格ではJIS Z8101-2:1999 統計-用語と記号-の第2部において、統計的品質管理用語が分類、規定されている。

設計者は生産ラインを安定稼働させ不良を限りなくゼロに近づけるために何を為すべきかについて、企画から運用にいたる全ての段階で考え続ける。特に、不良の発生傾向が把握できていない新製品の場合は、対応に苦慮するが、新製品に限らず、不良傾向が把握できない場合はその品質の安定限界を超える不良をすべて検出し、排除できる検査装置を開発し、導入しなければならない。

医薬品や食品などのように健康被害を及ぼす可能性がある場合や自動車のブレーキのように不具合が事故原因になるような場合には1個でも不適合品は見逃すことはできない。

例えば、医薬品や食品製造では、異物混入検査を行う。異物が金属と分かっていたら、

金属検出器を使用することにより容易に全数検査できるが、既存の技術で対応できない場合は目的に応じた検査装置の開発が必要になる。全数検査できないから全数検査しないのではなく全数検査できる装置を開発しなければならないのである。

一方、製品ロットの中に、不良品の混入を許容できる場合、抜取検査を行う。許容できる品質を設定する考え方である。この考え方はAQLと呼ばれ、Acceptable Quality Limitの略であり、合格品質水準の意味である。アメリカ合衆国の国防総省が、故障が少なく、かつ安定した武器、装備などの製作にあたり、部品を調達する際の品質として不良率を抜取検査から割り出し、受入れ可否の判定に採用したのが始まりとされ、JIS規格ではJIS Z 9015:1999において規定されている。

### 5-5. 傾聴力

ものづくりの現場では多くのトラブルや事故が発生しているが、そのほとんどが人間行動に起因するものと考えられる。原因が究明され、再発防止対策が講じられているものがある反面、新たな原因による新たなトラブルが後を絶たないのが現実である。これらについては対策が不完全であったと反省し、新たに対応すればよい。対策が的確になればトラブルは時間と共に減少する。

しかし、この世の中には新しいものが次から次へと生み出されている。そこには新たなトラブルが潜んでいる可能性がある。これらを想定し、未然防止のための行動をとらなければならない。

筆者は人間行動に起因する事故・品質トラブルの未然防止のサポートの一環として、様々な情報を発信している。これらの情報において一貫していることは「発生した事故・品質トラブルの再発防止や未然防止を行うためには、そこで介在した、若しくは介在する人間（当事者）から、真実を聴き取り、対策に反映させなければならない」ということである。不都合な真実を明らかにしなければ真の対策はできない。当事者から真実を聴き取り、設計までフィードバックされなければ、未然防止には繋がらないのである。ここでは、聴き取り担当者の傾聴力が試されるのである。

傾聴とは注意深く、丁寧に、耳を傾け、自分の聴きたいことにこだわらず、相手の話したいことや伝えたいことを真摯に聴くことなので、相手の話を遮ったり、意見を否定（明らかに間違っている場合は訂正をすべき）してはならない。また、自分の都合で、相手の話している話題を変えてはならない。あくまでも、相手の話したいこと、伝えたいことを真摯に聴き取らなければならない。真実を聴き取り、最善の対策を講ずることが人間行動に起因する事故・品質トラブルの再発防止や未然防止への近道なのだ。

## 6. 結言

生産ラインを安定化させるためには、例えば、パレート分析により、優先順位をつけて、トラブル要因の対策を行うが、実施した対策が成果として現れるまでに多少のタイムラグがある。

生産ラインのトラブル対策率が高くなると対策の効果が複合され、例えば、稼働率が急

上昇することがあるが、既に90%台に達している稼働率を更に1%アップさせるには想定以上のエネルギーを必要とするので、その効果が現われるまで、あきらめずに対策を継続することが肝要と考える。一旦稼働し始めた生産ラインの信頼性を高める作業は容易ではない。生産ラインの信頼性は設計段階で高めておかなければならないのである。

## 7. 参考資料ほか

- 1) 草間、一色、佐藤、阿武、機械工学概論第3版、理工学社(1995)
- 2) 兼田、山本、基礎機械設計工学、理工学社(1996)
- 3) 美馬、長谷川、機械材料の基礎、日新出版(1977)
- 4) 畑村、失敗学のすすめ、講談社(2000)
- 5) 真壁編、信頼性工学入門改訂版、日本規格協会(2000)
- 6) 畑村、失敗の工学、日本機械学会誌, 103-980(2000), 424-427.
- 7) 阿部、失敗に学ぶ、徳島県技術士会報 Vol.9(2001)、p.15~21
- 8) 中條ほか、人間行動に起因する事故・トラブルの未然防止のための方法論の体系化 最終報告書、日本品質管理学会(2002)
- 9) 阿部、失敗を活かす、徳島県技術士会報 Vol.10(2002)、p.13~20
- 10) 阿部、失敗を防ぐ、徳島県技術士会報 Vol.11(2003)、p.15~19
- 11) 鈴木、信頼性・安全性の確保と未然防止、JSQC 選書19、日本規格協会(2011)
- 12) JIS Z8101-2: 1999 統計-用語と記号-
- 13) JIS Z 9015 : 1999 計数值検査に対する抜取検査手順
- 14) JIS Z8115 : 2000 信頼性用語
- 15) JIS Z8601-1954 標準数
- 16) Wikipedia 閲覧、標準数
- 17) 阿部技術士・労働安全コンサルタント事務所ホームページ
- 18) JSME テキストシリーズ材料力学、日本機械学会、丸善(2010)
- 19) JSME テキストシリーズ機械材料学、日本機械学会、丸善(2010)
- 20) JSME テキストシリーズ機構学、日本機械学会、丸善(2010)
- 21) 大西、JISにもとづく標準製図法第13全訂版、オーム社(2016)
- 22) 新・機械技術史、日本機械学会、丸善(2010)