

まえがき

本書を書き始めた頃の2011年3月11日、想像を絶する甚大な被害を引き起こした東日本大震災が発生した。この震災被害の深刻さのひとつは、福島にある東京電力原子力発電所の崩壊ともいえるべき破壊である。水素爆発、压力容器のメルトダウンなどによる放射能の拡散汚染が起きたのである。最先端科学技術の粋を集めた原子力発電所の崩壊について、これまで光り輝いていた科学技術の影を目の当たりにして、多くの人が科学技術への懐疑心をもち始めるとともに、科学技術に従事する専門家のなかには、従来の科学技術が要素還元主義であったことに深刻な反省を示す人たちもいる。異分野や環境も含めた総合的・融合的検討・研究、そしてその結果としてのものづくりの新たなあり方の重要性の指摘である。

設計工学では、製品設計は解析と総合の往復であるといわれている。解析は部品、ユニット、製品を対象にして、基本的には関係する物理現象のモデルと境界条件を単純化して行われる。総合は解析の結果を集合し、製品としての性能が満足できるかどうか判断する。判断できなければ、必要な解析のモデルとその初期条件、場合によっては境界条件の修正を行うことになる。大事なことは、解析結果の集合の際に、解析モデルの適用範囲と解析結果間の関係性の把握および解析で与えた境界条件の妥当性の評価である。実際の製品はさまざまな意味で複雑化してきている。その適用性・関係性の把握と境界条件の妥当性評価は、総合にとって重要である。こうした解析と総合は、実際の設計のプロセスのなかでレベルを深化させながら繰り返し実行される。

筆者は、これまで研究活動の関係で製造メーカーの設計技術、製品開発に従事されている方々と交流をさせていただいた経験が多い。そのなかで、製品設計においては、機械要素設計の重要性とともに、総合の観点から設計プロセス

の構成とその意味を知ることの重要性を学んできた。一方、従来の機械系の設計工学の学生向けの著作物には、設計のプロセスの重要性に着目し、これを中心に書かれたものは比較的少ない。

筆者自身は過去数年、大学で設計工学の科目を授業担当してきているが、設計プロセスの観点から独自の講義ノートをつくり、講義に臨んできた。本書はこの講義ノートをもとに新たに原稿を書き下ろした著作である。しかし、書籍としてまとめるにあたっては、既存の多くの書籍からも内容的な引用をさせていただいた。特に『機械工学便覧』（日本機械学会）、『JISハンドブック』（日本規格協会）、および機械設計全般について簡便にまとめた『ハンディブック 機械』（オーム社）については、参考にさせていただいた内容も少なくない。ここに記して感謝の意を表したい。

本書は全8章から構成されている。第1章が機械と設計、第2章が設計のプロセス、第3章が材料の選択、第4章が設計と機械要素、第5章が設計と3次元CADモデリング、第6章が設計と解析、第7章が設計と機械加工、第8章がメカトロニクス設計である。このうち第2章では、本書の主題である設計プロセスそのものについてまとめた。ページ数的にも全体の約1/3を占める。第3～7章は、設計プロセスの各段階に関係する個別的内容について設計の観点からまとめている。第8章は、近年の一般的製品形態がメカトロニクスに基づくこともあり、メカトロニクスの観点から各種製品の基本構成を目的性能に関連してまとめたものである。

また、設計に関する話題などを「コーヒーブレイク」として七つ紹介した。設計工学を学ぶ楽しさの一端を感じていただきたい。

最後に、本書の出版の機会を与えていただいたコロナ社に御礼申し上げます。

2012年2月

石川 晴雄

執筆分担

第1～5章、7章 石川晴雄／第6章 井上全人／第8章 中山良一

目 次

1. 機 械 と 設 計

1.1 機械とは何か	1
1.2 機械の構成単位	7
1.3 設計とは何か	11
1.3.1 設計と目的	11
1.3.2 設計のアプローチ	14
1.3.3 多様な要求と設計	15
1.3.4 設計の自由度	16

2. 設計のプロセス

2.1 設計プロセスの全体像	18
2.2 製品設計企画	18
2.2.1 製品企画	18
2.2.2 設計企画	21
2.2.3 製品企画と設計企画の事例	23
2.3 概念設計（機能設計）	25
2.3.1 機能展開	25
2.3.2 設計解原理の探索	29
2.4 初期設計（設計解原理の組合せと評価）	34
2.4.1 設計解原理の組合せ	35
2.4.2 組合せ結果の評価	37

2.5 詳細設計	39
2.5.1 詳細設計における事前的検討	40
2.5.2 設計対象の性能実現と構造化	43
2.5.3 多目的設計	46
2.5.4 設計とCADと解析	50
2.5.5 制約条件	52
2.6 ライフサイクル設計 (コンカレントエンジニアリング)	66

3. 材料の選択

3.1 設計と材料	71
3.1.1 設計性能と材料性能	71
3.1.2 設計と加工	74
3.1.3 設計とリサイクルなど	75
3.2 材料の選択指針	79
3.2.1 機械的性質	79
3.2.2 金属材料の引張試験と規格	81
3.3 基本的材料	85
3.3.1 金属材料	86
3.3.2 鉄鋼材料	87
3.3.3 アルミニウム材料	88
3.3.4 非金属材料	92

4. 設計と機械要素

4.1 設計プロセスと機械要素	96
4.2 標準化と要素	99
4.3 要素の種類と選択方法	100
4.3.1 ねじ要素	100
4.3.2 キー、スプライン	105
4.3.3 軸継手	108

4.3.4 転がり軸受け	109
--------------	-----

5. 設計と3次元CADモデリング

5.1 3次元CAD開発の背景	113
5.2 3次元形状モデル	114
5.3 設計とモデル表現機能	117
5.3.1 パラメトリック機能	117
5.3.2 フィーチャーベース機能	118
5.4 3次元CADシステムの特徴	120
5.5 設計プロセスと3次元CAD	122
5.6 3次元CADモデルの価値	125

6. 設計と解析

6.1 解析の目的とシミュレーションの意味	128
6.2 解析の種類	128
6.3 弾性体の解析	129
6.3.1 2次元弾性体の有限要素解析	130
6.3.2 有限要素法解析例	141

7. 設計と機械加工

7.1 設計プロセスと機械加工	145
7.2 機械加工の種類、工作機械	146
7.2.1 切削加工	146
7.2.2 研削加工	150
7.2.3 鋳造加工	152
7.2.4 塑性加工	155
7.2.5 鍛造加工	155

7.2.6 押出し加工	157
7.2.7 引抜き加工	158
7.2.8 圧延加工	159
7.2.9 プレス加工	160
7.2.10 曲げ加工	160

8. メカトロニクス設計

8.1 はじめに	162
8.2 メカトロニクスの進歩	164
8.3 メカトロニクスの構成要素	166
8.3.1 機構	168
8.3.2 アクチュエータ	168
8.3.3 センサ	170
8.3.4 制御系	171
8.4 メカトロニクスを利用した事例について	172
8.4.1 数値制御を組み込んだ工作機械	172
8.4.2 産業用ロボットを利用した自動化工場	173
8.4.3 半導体製造装置	177
8.4.4 自動車のメカトロニクス利用	179
8.4.5 郵便番号自動読取り区分装置	181
8.4.6 エスカレータ, エレベータ	182
8.4.7 自動販売機	184
8.4.8 自動改札機	185
8.4.9 電子料金收受システム (ETC)	186
8.4.10 自動預け払い機 (ATM)	187
8.4.11 全自動洗濯機	188
8.4.12 ハードディスクドライブ (HDD)	189
8.5 メカトロニクスの将来	190
引用・参考文献	192
索引	195

1

機 械 と 設 計

1.1 機 械 と は 何 か

私たちの生活、産業、社会は、数多くの機械がそれらに組み込まれた形で存在していて、機械の存在なくしては成立しない。生活の場を見てみれば、食生活の場面では、炊飯器、冷蔵庫、電子レンジなどがあり、情報のやり取りの場面では、パーソナルコンピュータ（以下、パソコン）、携帯電話、テレビジョン（以下、テレビ）などがあり、移動の場面では、航空機、自動車、自転車などがあり、駅に行けば自動発券機や自動改札機がある。それ以外にも、さまざまな掃除機、洗濯機、簡単な工具類も家庭にとっては必需品であろうし、製造企業によっては各種ロボット、工作機械なども必要とされる。このように、私たちは多種多様な機械に直接的、あるいは間接的に囲まれて生活や社会を維持しているし、それらの内容も日進月歩ともいうべき技術開発の進展の流れのなかにある。

一方で、機械は、歴史的にはおおむね人類の文明とともに存在していたと思われる。1902年、今から2000年以上前の古代ローマ時代の機械らしきものが地中海のクレタ島近くの海底から発見され、「アンティキティラ島の機械の謎」と騒がれた。その後2006年、巨額の費用を費やした調査チームによって、この機械はメカニカルな計算機であり、天体、特に太陽と月および惑星の運行を追跡するために設計されたと報告されている。また、中国の資料（蘇頌の著書『新儀象法要』）には、北宋時代（1087年）に水運儀象台という天体の運行を

2 1. 機 械 と 設 計

もとにして時刻を示す天文観測時計塔が設置されていた、とあり、水を動力源としていたので水時計ともいわれている^{1)~3)†}。その復元展示品は諏訪湖の「諏訪湖 時の科学館（儀象堂）」に展示されている（**図 1.1**）。



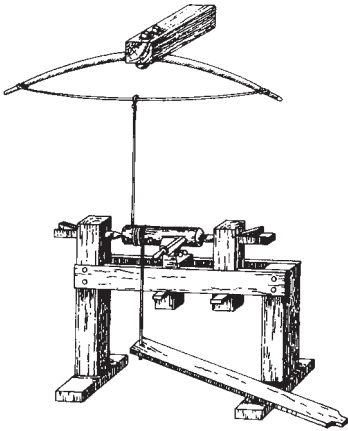
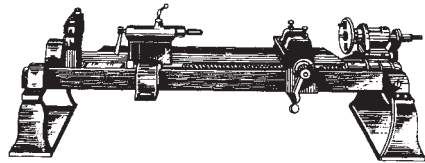
図 1.1 諏訪湖 時の科学館
（水運儀象台³⁾）

現在使用されている機械や装置のなかには、その原型がこうした歴史のなかで発明され、改良が加わり、現在の製品に至っているものも多い。例えば、最初の自転車（「ドライジーネ」という）はドイツのドライス（Karl Drais）によって1817年に発明された。2輪を縦に並べ、ハンドルをもち、座席に座って地面を足で蹴って進む木製の乗り物（**図 1.2**）であったが、ホビーホース（hobby horse）として大流行したようである。その後、ペダルによる直接後輪駆動、前輪へのペダルとクランクの装着、センターステアリング型ヘッド、チェーンによる後輪駆動へと発展してきている（コーヒーブレイク^③参照）。また工作機械の一種である旋盤の原型の一つは、**図 1.3**に示すように弓を動力源にするものであった^{4),5)}。イギリスのモーズリ（H. Maudslay）は1797年、刃物を載せる送り台の付いた旋盤（**図 1.4**）を考案し^{4),5)}、現在の旋盤の



図 1.2 最初の自転車「ドライジーネ」と同種のもの（自転車文化センターにて著者撮影）

† 肩付数字は、巻末の引用・参考文献の番号を表す。

図 1.3 弓旋盤^{4),5)}図 1.4 モーズリの送り台付き旋盤^{4),5)}

基本的構造を備えるようになった。

このように、機械は歴史的にもさまざまな種類のものが発明されてきている。本書では、基本的には機械に関する設計工学を扱うので、まず設計工学で扱うところの機械とは何かについて、その定義を説明する。

歴史上、初めて「機械 (machine)」についての定義が示されたのは、紀元前のウィトル-ウィウスによる書籍『建築書』であるといわれている⁶⁾。書籍のタイトルが示すように、当時の主要な事業であった建築の分野において用いられていた装置をもとにした定義であり、「重い物体を比較的容易に移動させることが可能な装置」と定められている。図 1.5 に示すように木製の枠で重

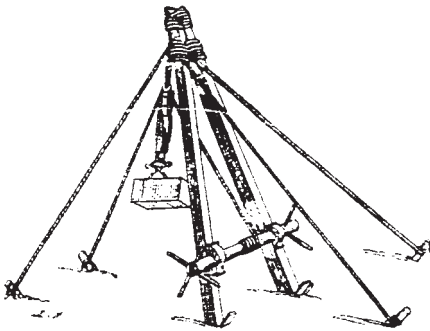


図 1.5 ウィトル-ウィウスによる『建築書』（紀元前）に説明されている機械（装置）⁶⁾

いものを吊り上げ、移動させたものと思われる。

17世紀にはツァイジングにより、ほぼ同様な定義「重荷の移動に対して優れた本質をもつ一組みの木製の装置」が示されている。

その後、1785年のワット（James Watt）による蒸気機関の改良により、蒸気機関はイギリスにおける産業革命（18世紀後半～19世紀前半）においても紡績機、蒸気機関車、あるいはそれらを製造する工作機械など、それまでのおもに建設業にかかわる機械だけではなく、さまざまな機械の動力源として使用されていく。こうした大きな工業の変化の時代を経て、19世紀に至ってなされた機械の定義が、フランツ・ルーロー（Franz Reuleaux）によりその著書『機械の力学』のなかで与えられている。この定義はその後の機械の定義に影響を与えたといわれている⁷⁾。その内容は、以下の4項目からなる。

- ① 機械の構成部分は数個の物体から成立していること。
- ② 各構成部分は一定の相對運動を行うように拘束されていること。
- ③ 各構成部分はそれを通して伝達される力に耐えるだけの強度を有すること。
- ④ 動力源から与えられたエネルギーを変形して有用な仕事をする事。

私たちの身近な生活、あるいは社会に存在する機械的なものを類型化する表現には、機械のほかに、工具、器具、機器、装置、構造などがある。ここでは、まず私たちの身近にもある工具に注目し、ルーローの定義に従って、機械との違いについて説明をしよう。

工具にも多種多様なものがあるが、例えば、機械工作用の刃物類、測定のための道具、家庭でも作業用として使用するドライバやのこぎりなどである。これらは、上記の①、③の項目は満足している。しかし、②の相對運動が存在しないことと、④の必要な動力源が人力であることで機械の定義を充足しない。

器具は元来、人間の感覚に基づく判断、認知を補助する時計や測長機などであるが、最近では調理器具など使用対象範囲が拡大している。**構造**については、その意味するところは、まず橋梁、塔などの建設・土木における構造がある。あるいは、機械の構造という表現もあるが、この場合の意味は、機械のメカニ

ズムおよびシステムを指す場合と、機械の躯体を指す場合がある。橋梁などや機械の躯体はおもに荷重を支える役割を担うが、ここではこれらについて焦点を当てるものとする、構造は機能を発揮するための相対運動やエネルギーの変形・伝達がないので、②と④の項目が対応していない。一度設置すれば、そのままの状態を維持するのが本来の機能である。

機器や**装置**については、計測を例にとると、計測機器、計測機械、計測装置など、實際上、さまざまな表現が個別対象について用いられている。装置はルーローの定義の②に示されるような機構としての運動的要素は少ない。機器は、複数の機械や装置の種類の総称として用いられることが多い。物理的なハードウェアとして存在するもの、運動を機構の基本とするもの、あるいはそれらがシステム化されたものなどによっても、時として表現が異なる。辞書『大辞林』（三省堂）によれば、**機械**とは、「**動力源から動力を受けて一定の運動を繰り返し、一定の仕事をする装置**」とあり、**機械**は装置である、と表現さ

コーヒーブレイク ①

機械と器械

矢田氏の調査⁸⁾によれば、「機械と器械」について、つぎのようないわれがあるようである。

紀元前の時代から、漢語ではもともと仕掛けのあるものが機械、道具は器械と表現されていたようで（『莊子』外編天地 11, 『韓非子』第 15 卷 第 37 篇 難二）、日本でもこの影響を受け、5 世紀頃は、糸から布を紡ぐ「はたおり」は「機織り」と書き、その装置は機械であった。しかし室町時代以降、洋式時計は道具として扱われ、器械として認識されていたようである。

黒船の来航とともに目を覚まされた幕府は、欧米の文化を吸収すべく、幕府や雄藩の有能な人材を外国に派遣し、見聞録を残した。これらの人々は欧米での蒸気機関の存在に目を見張る思いをし、それを蒸気器械、その他の機械類も器械として記述している。

現在の意味での機械が使われるきっかけをつくったのは、明治 5 年（1872）田代義矩が著した『図解機械事始』ではないかと思われる。この書は機械工学の入門書であるが、その序文では上述の莊子の一節を引用し、器械から機械への転換の意味を強調している。

れている。

一方、近年、機械が扱う機能や入力・出力としての物理量については、機械（力学）的な仕事や機械（力学）的諸量（力、変位、エネルギー）だけではなくってきた。それらが意味する内容の範囲が広がるとともに、情報処理技術やエレクトロニクスなどの発展により、ここまで述べてきた機械の定義や概念も変化してきている。

新たなエネルギーを動力源とする機械として、例えば、風力、潮力に基づく発電機、圧縮した空気と燃料の燃焼により推進力を得るジェットエンジン、太陽光をもとに電荷陽イオンによって推進力を得るイオンロケット、熱エネルギーを動力源とするアクチュエータとしての形状記憶合金を用いた内視鏡、給湯器の蛇口、火災報知器など、化学エネルギーを力学エネルギーに変換するメカノケミカル機構などさまざまである。また、各種情報を入力とする場合もある。コンピュータは、計算機械あるいは情報処理をする機械ともいわれている。その入力情報の物理的実体は電気信号という物理量である。

以上のように、機械の入力、出力およびそれらに関係付けるメカニズムのいづれも、ルーローの定義やその延長上にある機械の定義だけでは説明できない各種の機械が実現されている。このような実情もあり、機械の定義をつぎのように一般化することも提案されている⁹⁾。

機械とは、「物理量を変形したり、伝達したりして、人間に有用な働きをす

コーヒーブレイク ②

アンティキティラ島のミステリー

1901年、エーゲ海に浮かぶギリシャの島アンティキティラの沖合いの沈没船から回収された機械は、30以上の歯車や三つの表示盤をもつ機械であった。製作は紀元前150年～100年（古代ギリシャ時代）とされている。この機械の目的は、天動説に基づいて天体の位置を計算するための最古のアナログ計算機ではないか、といわれている。文字盤の一つにはOlimpiaの文字が書かれていることも発見されている。このことから、古代ギリシャのオリンピックの開催日の計算にも使用されたかもしれない。

索引

あ		解析的解析	128	協調工学	23, 68
アクチュエータ	163, 169, 183	解探索	25	共通集合	49
アセンブリ	121	概念設計	25	強度	128
圧延加工	159	開発設計	11, 25	近似解析	50
アップグレード	63	改良設計	12	く	
アルミ合金鋳物材	90	加工基準	58	駆動方式	168
アルミニウム合金	88	加工シミュレーション	122	組込みシステム	172, 189
アルミニウム合金展伸材	89	加工性	72, 79	組立性	59
安全衛生法	176	加工精度	147	け	
い		加工法	53	形状関数	132
意匠設計	122	荷重-伸び線図	83	形態情報	36
位置センサ	179	仮想仕事の原理	135	軽量化	72
一般構造用鋼	87	加速度センサ	180	研削加工	150
一般的目的	15	型鍛造	157	こ	
う		可能性分布	48, 49	工具	4
運動伝達要素	8	環境負荷対応	61	公差	54
え		き		剛性	128
永久伸び	83	キー	105	構造	4
エスカレータ	182	機械機能の抽出	11	構造化	11, 40
エレベータ	183	機械構造用セラミックス	94	構造化設計	39
円筒外面研削	150	機械構造用炭素鋼	87	構造材料	85
お		機械的性質	79, 83	降伏応力	83, 84
応力 $\{\sigma\}$ -ひずみ $\{\varepsilon\}$		機械要素	7, 53, 96	小型モータ	179
関係式	130, 134	規格化	8, 99	国際標準化機構	7
応力集中係数	142	規格品	53	コスト	79
応力集中問題	51	幾何公差	54, 56	固定軸継手	108
応力-ひずみ関係式	130	機器	5	転がり軸受け	109
押し出し加工	157	器具	4	コンカレントエンジニアリング	23, 68
か		機構展開	37	コンピュータ技術	163
外界センサ	170	機構 (メカニズム)	11	さ	
解析	14, 37	機構 (メカニズム)	11	最小化	47
		基準寸法	53	細分化	25
		機素	7		
		機能性材料	86		
		機能展開	25		
		技術システム	31		
		競合関係	47		

ふ	
フィーチャーベース	119
フィーチャーベース モデリング機能	117
フィードバック制御	171, 183
不確実性	69
普通公差	55
部 品	7, 53
プラスチック	92
プレス加工	160
プロペラ軸	8
へ	
平面応力	134
平面研削	150
平面ひずみ	134
変位関数	131
変位-ひずみ関係式	130, 132
ほ	
ポイントベース	48, 51
ポイントベース設計	46
法規制	42
補助要因	41

ま	
マイクロコンピュータ (マイコ ン)	172, 177, 179, 189
埋蔵資源量	75
曲げ加工	160
め	
メカトロニクス	163
メンテナンス	42, 62
も	
目的関数	47
目的の明確化	11
文字認識技術	181
モジュール	8
模倣設計	12
ゆ	
油圧アクチュエータ	169
有限要素解析	125
有限要素法	51, 128
郵便番号自動読取り区分 装置	181
ユニット	8, 53
よ	
要求の満足化	11

要素剛性マトリックス	136
要素分割	51
ら	
ライフサイクルアセスメント (LCA)	61
ライフサイクルオプション	62
ライフサイクル設計	68
り	
リサイクル	64, 76
リサイクル性	79
リデュース	62, 76
リニアモータ	190
流用設計	12
リユース	63, 76
れ	
レイアウト	42
レイアウト設計	175
ろ	
労働安全衛生法	42
わ	
ワイヤフレームモデル	115

B	
B-reps	116
C	
CAD モデル	39
CAE	121
CAM	122, 173
CNC	122, 125
CSG	116

H	
Hook 則	129
I	
ISO (国際標準化機構)	7, 99
J	
JIS (日本工業規格)	7, 99

L	
LCA	78
N	
NC 機械	172
P	
PSD	49

—— 編著者・著者略歴 ——

石川 晴雄 (いしかわ はるお)

- 1972年 電気通信大学電気通信学部機械工学科卒業
- 1974年 電気通信大学大学院電気通信学研究科
修士課程修了 (機械工学専攻)
- 1977年 東京大学大学院工学系研究科博士課程
修了 (機械工学専攻)
工学博士
- 1977年 電気通信大学助手
- 1985年 電気通信大学助教授
- 1992年 電気通信大学教授
現在に至る

中山 良一 (なかやま りょういち)

- 1973年 電気通信大学電気通信学部機械工学科卒業
- 1975年 電気通信大学大学院電気通信学研究科
修士課程修了 (機械工学専攻)
- 1975年 株式会社東芝入社
- 1978年 株式会社東芝 原子力技術研究所
- 1998年 株式会社東芝 総合企画部
- 2002年 東芝総合人材開発株式会社
兼 株式会社東芝業務人事部人材開発部長
- 2010年 東芝総合人材開発株式会社顧問 (常勤)
退任
- 2010年 工学院大学教授
現在に至る

井上 全人 (いのうえ まさと)

- 2000年 慶應義塾大学理工学部機械工学科卒業
- 2002年 慶應義塾大学大学院理工学研究科修士課程
修了 (総合デザイン工学専攻)
- 2005年 慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程
修了 (総合デザイン工学専攻)
博士 (工学)
- 2003年 慶應義塾大学助手
- 2006年 電気通信大学助手
- 2007年 電気通信大学助教
- 2012年 明治大学専任講師
現在に至る

現代設計工学

Modern Design Engineering

© Ishikawa, Nakayama, Inoue 2012

2012年4月20日 初版第1刷発行



検印省略

編著者 石川 晴 雄
著者 中山 良 一
井上 全 人
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

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 978-4-339-04625-0 (吉原) (製本：愛千製本所)

Printed in Japan



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おります。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おりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします