

設計論

—製品設計からシステムズイノベーションへ—

工学博士 藤田 喜久雄 著

コロナ社

ま え が き

設計は古くて新しい課題である。だれもが行えてだれも行い難い課題である。何らかの人工的なものをつくり出すためにそのイメージを想定することは古くからだれもが日常的に行ってきたことである。一方、工業的なプロセスを経てつくり出される人工物、すなわち、製品は、近年、ますます複雑になってきていたり、それに求められる内容は社会や生活の成熟を受けて多様で移ろいやすくなってきていたりする。そのため、優れた製品を迅速に世に送り出すためには、また、そのような製品をもととして必要なサービスや新たな経験を提供していくためには、多種多様な方面の知識を縦横無尽に活用して、しかるべき組織的な活動を的確に進めることが求められる。加えて、イノベーションを創出することへの要請が高まるにつれて、斬新な製品やサービスへの期待感も高まっている。それらの背後にあって、人工物がもたらす負の側面もさまざまな方面で顕在化している。一連の動向のもと、潜在的には、設計の中でも上流段階での企画や概念設計などの重要性が増しているし、下流段階での実体設計や詳細設計についても従来以上に合理的かつ統合的に進めていくことが求められるようになってきている。あわせて、ビジネスのしくみや組織のマネジメントなどとの関係も無視できなくなっている。

本書は、上記のような状況のもとにある設計の取組みを合理的に進めてイノベティブな製品・サービス・経験を世に送り出すための設計の考え方と設計工学に向けた羅針盤を意図している。伝統的な学術の体系のもと、例えば、工学にあっては、さまざまな専門分野はそれぞれの領域ごとに当該の産業分野における新たな製品を生み出すための知識や技術の体系を担っていることに対して、設計工学は、端的には、それぞれの領域固有の内容を捨て去った際に普遍的に残る問題解決や課題解決に関わる横断的な専門領域である。各分野の専門書

では当該の対象における学理がその基盤となる。工学であれば、物理的あるいは数学的な内容が基盤となるが、設計工学では、その横断性がゆえに、同様の基礎だけでは足りず、むしろ、横断性の広がり方についての理解、問題解決や課題解決についての考え方などが基盤となる。また、設計の対象が製品に留まらずサービスや経験にまで広がってくれば、前提にすべきことは従来からの工学の範疇を超えてくる。製品やその設計プロセスの全貌を俯瞰できること、目の前のことを全貌のもとに位置付けて処理できること、少なくともそれらのことが必要であることを体系的に理解できること、それらがイノベーションの時代における設計の基礎といえる。そのような理解は分野を超えて設計を考えていく上での礎ともなる。なお、設計にかかる専門領域の学術上の呼称としては「設計学」や「デザイン学」などが用いられる場合もあるが、本書では、具体性を伴いつつ汎用的な議論を展開したいという意図のもと、また、技術を司る工学にあつて設計こそがその根底に横たわっているとの考え方から、基盤となる学術の呼称としては「設計工学」を用いる。

上記のもと、本書は、まず、設計が関わる事柄の全体像を俯瞰するための礎となるシステムの考え方から始める。そのもとで、設計において考えるべき内容が広がっていくいくつかの筋道を示す。その後、そのような広がりにより混沌とする問題や課題の一般的なあり様やそれについての対処の考え方や方法論の要点を示す。加えて、イノベーションの時代の発展的な課題に向けた展望を示す。本書の具体的な構成は以下のようになっている。

第1章では、導入としてそもそもの設計や設計工学の意味について概説する。

第2章と第3章では、システムという考え方とその設計における意義、複雑な対象をシステムとしてとらえてその構造により理解したり操作したりしていくための基本を導入する。また、第4章では、設計が情報処理として進められることを受けて、モデルと計算についての要点を整理しておく。

第5章から第9章では、設計の対象である製品をシステムとしてとらえた上で、その優劣を評価する視点の広がりについて考える。具体的には、普遍的で横断的なシステムとしての評価軸として、価値とその広がり、信頼性と安全性、

生産の工程，ライフサイクル，経営などについての評価軸を取り上げる。

第10章から第14章では，第9章までの内容などを前提としつつ，まず，対象は異なっても共通的に現れるシステムの設計問題の形式や最適性に関する性質を整理した上で，問題解決の進め方と設計における要点を論じていく。また，設計活動の管理についても論じる。それらのもと，設計のための各種の技法を計算機援用設計技術に重点を置きながら横断的に取り上げる。

第15章から第17章では，一連の内容を踏まえつつ，イノベーションを切り口に据えて，大規模で複雑なシステムを設計していく際の論点，創造的な設計のあり様や進め方についての論点を展開した後に，社会と技術の関係とそれらとの設計の役割についての展望を論じて本書を締めくくる。

本書は，基本的には，設計あるいは設計工学を体系づけるという意味合いにおいて学術書を意図しているが，教科書や参考書としての活用も意識した構成としている。後者の意味合いでの読者としては，まずは，工学の中でも機械工学を学ぶ学部高学年あるいは大学院の学生を想定しているが，工学の各分野のみならず，経営やインダストリアルデザインなどをはじめとして，設計に関心のある他分野の学生にもなじむはずである。また，設計実務や企画業務などに関わる実務家，設計業務を統轄している管理者，設計を通じてイノベーションの創出を目指したい経営者などが，改めて日頃の業務を振り返り，その背景に潜んでいる広い意味での設計について考えを新たにするための独学書となるようにも構成している。なお，第1章から第14章までを読めば，設計にかかる一定のことは理解できるようになるはずである。ただし，第4章，第11章，第14章は，情報処理に関する内容に踏み込むので，除外することも可能である。一方，イノベーションや設計の将来像について改めて考えてみたいということであれば，第1章から第3章までを読んで前提となる考え方を確認した上で，第15章から第17章を読んでみることを勧める。この第15章から第17章については，リーダーを目指していく若い人にこそ読んでみてほしい。

本書では，設計が関連する各方面での最新動向のみならず，過去から現在に至るまでの歴史的な経緯や背景なども踏まえた上で，設計工学関連での学術や

関連分野のエッセンスをできる限り広く盛り込みつつ、とはいえ、独特な偏りや幾多の漏れも残ることを覚悟しつつ、いろいろな糸を紡いで、それらを一本の綱に撚り上げることを試みている。本書を貫いている抽象的な意味合いでのシステムの広がりに対して統合を目指していく設計の考え方は、今後も拡大していくであろう設計の営みに対峙していくための基盤として有用であることを期待している。

2023年5月

藤田 喜久雄

目次

目 次

1. 設計論の背景

1.1	設計とは、優れた設計とは	1
	☐ コーヒーブレイク “ものづくり” という独特な言葉	5
1.2	道具の発明から産業の形成へ	6
1.3	市民社会の形成と設計ニーズの多様化	10
1.4	製品の複雑化の進展	11
1.5	生産性や豊かさの向上の背後で進んだこと	13
1.6	工学設計から製品設計へ、さらにその先へ	15
	1.6.1 設計の普遍性	15
	1.6.2 設計の再認識	16
	1.6.3 設計の再定義	17
1.7	設計工学の学び方	18
	☐ コーヒーブレイク 2000 年前後における日本での工学教育の動向	20
1.8	第1章のまとめ	21

2. 設計の複雑化とシステムという考え方

2.1	価値の生産性と製造業におけるモード	23
2.2	さまざまな技術を取りまとめる設計の横断性と普遍性	24
2.3	システムという抽象	26
2.4	システム工学の由来	27

[コーヒーブレイク] A Philosophy of Technology	29
2.5 システムの形式	30
2.6 システムの具体例	32
2.7 人工物のシステムとしてのさらなる複雑化	34
2.7.1 超システムの課題	34
2.7.2 超スマート社会への展望	36
2.7.3 エネルギーシステムの課題	36
2.8 システムの複雑さへの対応指針	37
2.8.1 複雑さについての寓話	37
2.8.2 準分解可能性・限定合理性・満足化	39
[コーヒーブレイク] 意思決定における合理性	40
2.8.3 設計における準分解可能性	41
2.9 システムの制御方式とその分類	43
2.10 システムの総合性	44
2.10.1 システムの目的	44
2.10.2 システムの設計や計画	45
2.10.3 設計工学の課題	46
2.11 第2章のまとめ	48

3. システムの構造と設計問題の形式

3.1 システムの構造に対する視点と相互の関係	49
3.2 システム構造の物理的意味と機能構造	50
3.2.1 物理的意味の把握	50
3.2.2 システムにおける機能構造	51
3.3 機能構造から実体構造への展開	52
3.3.1 機能構造と実体構造	52

3.3.2 展開における支配因子と法則性	54
3.3.3 展開における階層性	55
3.4 レイアウトの持つ意味	58
3.5 システム論の展開	59
3.6 概念と価値の体系	61
3.7 設計問題の形式	64
3.7.1 設計と設計プロセスの目的	64
3.7.2 設計問題の数理的な形式化	65
3.7.3 定式化の基本形	66
3.8 設計問題における再帰性	67
3.8.1 部分問題の切り出し	67
3.8.2 複雑さの克服と知識の役割	68
3.8.3 物理法則と設計知識	71
3.8.4 設計問題の自己産出	71
3.9 第3章のまとめ	73

4. 設計における情報の表現と処理

4.1 情報処理における符号の役割	74
4.2 形の表現と設計における役割	76
4.3 計算とは何か	78
4.4 プログラミング言語からみた情報処理の進展	81
4.5 対象表現から挙動の予測へ	84
4.5.1 システム構造の表現と操作	84
4.5.2 形状の表現	86
4.5.3 計算機シミュレーションへの展開	88
4.5.4 大規模で複雑なシステムの挙動予測	90

4.6	モデルの役割と種類	91
4.6.1	モデルとは	91
4.6.2	設計におけるモデルの活用	92
4.6.3	モデルにおける理想化	93
4.6.4	モデルの形式	95
4.7	モデルの構成と較正	96
4.8	思考のモデルと推論	99
4.9	第4章のまとめ	100

5. ユーザーの視点から広がるシステムの価値

5.1	製品の成否に左右する視線	101
5.2	製品としての価値	103
5.2.1	人間の欲求の5段階発達説	103
5.2.2	欲求の充足から欲望の循環へ	104
5.2.3	製品価値の広がりとその展開	105
5.3	使用価値に関わる機能の実装	107
5.4	感性価値とその設計	110
5.4.1	インダストリアルデザインの世界	110
5.4.2	インターフェースに潜む意味	111
5.4.3	美しさの秘密	113
5.5	付加価値がつくり出される様の広がり	115
5.5.1	“もの”から“こと”への展開	115
5.5.2	本当に新しいこと	116
5.6	あらゆる人々を包摂する設計	118
	コーヒーブレイク ユニバーサルデザインの7原則	119
5.7	経済発展と適正技術	120

5.8 第5章のまとめ	122
-------------	-----

6. 信頼性の数理とシステムの安全性

6.1 システムの信頼性と安全性の課題	123
6.2 信頼性の基礎理論と指標	125
6.3 故障発生のパターンと故障データの解析	127
6.4 システムの信頼性とその基本形	128
6.4.1 システムにおける冗長性	128
6.4.2 直列システムの信頼性	129
6.4.3 並列冗長システムの信頼性	130
6.4.4 待機冗長システムの信頼性	131
コーヒーブレイク システムの信頼性の計算例	133
6.5 構造的な信頼性の解析と設計	134
6.5.1 システムの構造的な信頼性	134
6.5.2 故障モード影響評価	135
6.5.3 故障の木解析	138
6.6 リスクの見積りと評価	140
6.7 それでも事故は起こる	143
6.8 信頼性や安全性に潜む根源的な限界	145
6.9 第6章のまとめ	146

7. 生産の工程から考えるシステムの経済性

7.1 システムの経済性	147
7.2 生産コストの内訳	148
7.3 部品についてのコスト	150

7.3.1	部品についてのコストの内訳	150
7.3.2	部品についての材料コスト	150
7.3.3	部品加工の工程とコスト構造	151
7.3.4	加工法と部品コストにおける損益分岐	153
7.4	組立てについてのプロセスコスト	155
7.4.1	組立てコストの内訳	155
7.4.2	個別組立て作業の効率化	155
7.4.3	組立ての工程とその形式	158
7.4.4	組立て工程の設計	159
7.5	生産における習熟効果とそのモデル	161
7.6	間接費の取扱い	162
7.7	サプライチェーンとその設計	162
7.8	コストの設計	164
7.8.1	コストと価値のバランス	164
7.8.2	コストに関わる要因の広がりと循環	164
7.9	付加製造技術が設計にもたらす意味	165
7.10	第7章のまとめ	167

8. ライフサイクルから考えるシステムの価値

8.1	製品の寿命と修理や廃棄の意味	168
8.2	製品のライフサイクル	170
8.3	保全を考える設計	173
8.3.1	アベイラビリティという考え方	173
8.3.2	保全のための方策とその有効度	173
8.3.3	保守のための分解・組立てに向けた指針	174
8.3.4	予防保全の展開	175

8.4	リサイクルを考える設計	176
8.4.1	環境への負荷の低減に向けたリサイクルの課題	176
8.4.2	リサイクルのための設計指針と損益分布性	176
8.4.3	リサイクルの過程と設計の展開	178
8.5	循環型生産のための設計	180
8.6	ライフサイクルアセスメント	182
8.7	ライフサイクル設計の社会的背景と政策などによる誘導	182
8.7.1	ライフサイクル設計の社会的背景	182
8.7.2	社会的費用という考え方	183
8.7.3	ライフサイクル設計への誘導	184
8.8	持続可能性と建築や都市計画での展開	185
8.9	人工物の循環と自然界における循環の調和	186
8.10	第8章のまとめ	188

9. システムとしての経済性と経営の課題

9.1	製品の設計開発の全容と収支	189
9.2	経済性評価の基本	191
9.2.1	資金の時間換算とその公式	191
9.2.2	時間の影響を考える経済性の測定と評価	193
9.3	製品の個別化や多様化への要請とそれらへの対応	195
9.4	製品アーキテクチャとその様式	197
9.5	モジュール構造がもたらす効果や影響	200
9.5.1	多品種生産における柔軟性	200
9.5.2	製造業のあり様への効果や影響	201
9.6	より長期的な意味での経済性	202
9.6.1	評価軸の変化	202

9.6.2	収益構造の変化	204
9.7	企業間の競争と市場の支配	206
9.8	グローバリゼーションのもとでの設計	208
	コーヒーブレイク グローバリゼーションのもとでの新たな動き	209
9.9	経営における意思決定の課題	210
9.10	第9章のまとめ	214

10. 設計問題における類型

10.1	類型とその活用	215
10.2	設計問題の類型	215
10.2.1	選 択 設 計	216
10.2.2	形 態 設 計	217
10.2.3	パラメトリック設計	217
10.2.4	再 設 計	217
10.2.5	新 規 設 計	218
10.3	設計解の最適性における類型	218
10.4	複数の評価尺度の評価と競合	220
10.4.1	複数の評価尺度の取扱い	220
10.4.2	トレードオフの関係	221
10.5	問題の在処についての類型	224
10.6	設計解のスケーラブルな類型性とその活用	225
10.7	システムの大型化における限界とその類型	227
10.8	設計解の質的な類型性とその活用	228
10.8.1	類概念に基づく設計過程の形式化	228
10.8.2	有効なパターンの形式化と活用	229
10.8.3	概念空間における空孔からの発想	231

10.9 システム構造における階層性という類型	232
10.10 第10章のまとめ	237

11. 問題解決とその技法

11.1 問題を解くということ	239
11.1.1 問題を解くことの広がり	239
11.1.2 生成検査による求解	241
11.2 数理計画法とその活用の基本	242
11.2.1 数理計画問題の種別	242
11.2.2 線形計画問題のための手法	243
11.2.3 非線形計画問題のための手法	244
11.2.4 創発的な手法	245
11.3 状態空間探索とその活用の基本	247
11.4 計算機による知識処理とその活用の基本	250
11.4.1 知識情報処理とその活用	250
11.4.2 オントロジーに基づいた知識処理	252
11.4.3 知識の曖昧さと文脈依存性への対応	253
11.5 生成モデルと問題解決	254
11.6 問題解決における問題の再構成	256
11.7 情報処理におけるフレーム問題	258
11.8 自然界のしくみから眺める問題解決の深層	259
11.9 第11章のまとめ	261

12. 設計という問題解決とそのプロセス

12.1 日常にみる問題解決の深層	262
-------------------	-----

12.2 問題解決における形式化の効用と限界	264
12.2.1 問題の抽象化と形式化の意義	264
12.2.2 閉じた問題と開いた問題	266
12.2.3 設計における課題設定の意義	268
12.3 フレーム問題から考える設計や計画の進め方	268
12.3.1 システムの複雑さとフレーム問題	268
12.3.2 フレーム問題の克服	270
12.4 設計プロセスの編成	271
12.4.1 問題解決と設計プロセス	271
12.4.2 デザインスパイラル	271
12.4.3 設計プロセスの多段階性	273
12.5 設計プロセスの構成	275
12.5.1 設計プロセスの流れ	275
12.5.2 部門間の連携	277
12.6 システムの大規模化と設計プロセス	279
12.7 第12章のまとめ	280

13. 設計プロセスの管理

13.1 設計プロセスの重要性	282
13.2 コンカレントからバーチャルへ	283
13.3 上流設計の重要性と方法論	286
13.4 情報システムの関係による効率化	289
13.4.1 デジタルエンジニアリングの展開	289
13.4.2 図面レス化と試作レス化の自動車産業での進展	290
13.4.3 国際共同設計の航空機産業での先駆例	291
13.4.4 製品設計開発業務の複雑化への対応	292

13.5	モデルベース開発による統合的な設計環境	292
13.6	設計プロセスの設計と合理化における課題	296
13.6.1	分散化に向けた設計組織の編成	296
13.6.2	並行化に向けた設計プロジェクトの計画	298
13.6.3	協調化に向けたコンピューター援用技術の展望	301
13.7	設計におけるモデルの標準化と相互運用	301
13.8	第13章のまとめ	303

14. 設計のための技法とその体系

14.1	設計の方法	304
14.2	閉じた問題に対する計算に基づく設計技法	306
14.3	最適設計のための適切なモデルの導入	309
14.4	複雑なシステムの最適設計	310
14.4.1	システムの複雑化がもたらす課題	310
14.4.2	代替モデルによるアプローチ	311
14.4.3	設計変数の支配関係に基づくハイブリッド化法	313
14.4.4	動作状況に依存する最適設計	314
14.4.5	システムの分解と統合によるアプローチ	315
14.4.6	生成モデルによるアプローチ	317
14.5	代替案の導出とその取扱い	318
14.6	モデルの不確実性のもとでの最適設計	320
14.7	開いた問題への対応とその考え方	323
14.7.1	設計知識の取扱いと発想支援	323
14.7.2	シナリオとの関係による設計の展開	325
14.7.3	設計プロセスと設計根拠のマネジメント	327
14.7.4	設計プロセスへの統合	329

14.8	超システムの設計に向けた対応	330
14.8.1	モデルの重層化とそれらの関係による対応	330
14.8.2	部分問題のブラックボックス化による対応	331
14.9	計算機援用設計技術の体系	332
	コーヒープレイク 学術講演会などにみる設計工学の動向	335
14.10	第14章のまとめ	336

15. システムの規模と構造の転換

15.1	システムの大型化における限界の克服	337
15.2	機能構造の転換と技術革新	338
15.2.1	ボイラーの発達法則にみる機能の分化	338
15.2.2	蒸気機関の効率の向上にみる構造の分化	339
15.3	機能構造についての法則性	341
15.3.1	機能分化における法則性と好適方式	341
15.3.2	コストからみる機能分化の法則性	342
15.3.3	機能分化を規定する規模の意味	343
15.3.4	好適方式を介在するハイブリッド方式	344
15.4	イノベーションの時代へ	344
15.5	持続的イノベーションと破壊的イノベーション	346
15.6	製品の複雑化とその進み方	349
15.6.1	製品の複雑化に潜む重層性	349
15.6.2	垂直統合から垂直非統合へ	350
15.6.3	垂直非統合におけるコスト構造	352
	コーヒープレイク フランチャイズとそのしくみ	353
15.6.4	統合の進展とモジュール化の相互連鎖	353
15.7	技術ロードマップと先導設計	355

15.8	プラットフォームという悪魔	358
15.9	第15章のまとめ	360

16. 創造的な設計とその進め方

16.1	社会課題から眺める設計の全容	362
16.2	問題設定に重きを置く設計への展開	364
16.2.1	設計と技術の関係	364
16.2.2	つくり込みから組合せへ	366
16.2.3	組合せを描き出す設計	368
16.3	プロジェクト化する設計	369
16.4	リフレーミングを行う設計	371
16.5	創造的活動としての設計	372
16.5.1	創造性を引き出すための基本	373
16.5.2	暗黙的な知識と明示的な知識	374
16.5.3	知識の忘却と学習	375
16.5.4	リーダーシップの役割	376
16.6	創造的な設計の進め方	377
16.6.1	デザイン思考	377
16.6.2	潜在的なニーズの掘り起こし	378
16.6.3	ストーリーとその想定	379
16.6.4	プロトタイピングとその活用	380
16.6.5	発散と収束の繰り返し	382
16.7	再設計としての設計	385
16.8	設計プロジェクトの総合性	386
16.9	第16章のまとめ	387

17. 社会と技術を統合する設計

17.1	改めて、イノベーションとは	388
17.2	イノベーションの時代の社会と科学技術	389
17.2.1	社会と知の関係性の変遷	389
17.2.2	モード論と知識基盤社会	392
17.2.3	学際研究の展開と社会との関係	393
17.2.4	イノベーションのあり様の変遷	395
17.3	関係性の広がりと人工物の設計	396
17.3.1	設計における現状と関係性の広がり	396
17.3.2	関係性から考える設計の再認識	398
17.4	断絶の時代と新たな統合へ	400
17.5	設計の全容と設計工学の課題	403
17.6	改めて、設計とは何か	404
17.7	新時代の人材像と設計の視点	408
	☐ コーヒーブレイク 大学システムの世代論	411
17.8	システムズイノベーションは設計できるか	412
17.9	第17章のまとめ	414
	☐ コーヒーブレイク 設計のあり様と国民性	415
あ と が き		417
引用・参考文献		423
索 引		465

1

設計論の背景

1.1 設計とは、優れた設計とは

そもそも、「設計」という言葉の意味は広辞苑（第七版，2018）[†]には下記のようにある。

- せつ・けい【設計】(plan; design)
 1. ある目的を具体化する作業。製作・工事などに当り，工費・敷地・材料および構造上の諸点などの計画を立て図面その他の方式で明示すること。「ビルの一」
 2. 比喩的に，人生や生活について計画を立てること。
- せつけい・ず【設計図】・ツ
 - － 設計した構造・形状・寸法を一定の規約に従って描いた図面。
- せつけい・としょ【設計図書】
 - － 設計の内容を示す仕様書・設計図・計算書などの総称。

また，設計を構成する各漢字の元来の意味は，「設」はくさびを打ち込む意が転じて，物をこしらえる意，「計」は口でよみあげた数（＝言）を集約する意，である。それらのもと，設計という語句は，漢文流には「設レ計」，つまり，「計を設ける」という動詞句に相当する。その場合の「計」は「はかりごと」などを意味し，元来，設計は実現が難しいことの実現に向けてその方策や方法を考案することを意味していたことになる。明治初期になって，西洋流の design に

[†] 肩付き番号は，巻末の引用・参考文献番号を示す。

2 1. 設計論の背景

訳語を充てる必要性のもとで一語として用いられる、つまり「設計する」などの形式で用いられる¹⁾ようになっていき、紆余曲折を経て、やがて、上記のような限定的ながらも明快な意味合いに至ったようである^{2), 3)}¹²⁾。

かたや、英語での設計に対応する単語は **design** とされ、上述のように、英語に限らず、西洋語におけるそれは日本語での設計という語の今日流の意味合いに一定の影響を及ぼしたようである。そのような design は de + sign であって、designate と語源を共有していて、そもそもの意味するところは、これから創り出される何かに向けた“印を出す”というあたりになるとされる。design は Oxford Advanced Learner's Dictionary (10th Edition, 2020)⁴⁾ では以下のように説明されている。

1. the general arrangement of the different parts of *sth* that is made, such as a building, book, machine, etc.
2. the art or process of deciding how *sth* will look, work, etc. by drawing plans, making models, etc.
3. a drawing or plan from which *sth* may be made.
4. an arrangement of lines and shapes as a decoration.
5. a plan or an intention.

両者の語源は異なるが、意味は重なっていて、今日にあっては英語のほうが広い。なお、日本語では design をカタカナにしたデザインは、設計とは区別されて用いられる場合が多い。狭義には芸術系での限定的な意味合いに対応するが、広義には、設計という言葉が技術よりの狭い意味合いに対応していることを克服すべく、同意ながらも標記の異なるデザインが用いられることもある。とはいえ、設計という語句の元来の意味合いに立ち返ると、むしろ、デザインよりも設計のほうが意味は広いことになる。

本書では、一連のことを踏まえつつ、端的には、設計とは、おおむね、何ら

¹¹⁾ 一語となれば、他動詞となって目的語を取れるようになる。それ以前は、動詞句のうちの目的語である「計」に修飾語がかかって、多様な意味を持ち得た。

¹²⁾ 中国語では、「設計」という語句は、3世紀には動詞句として用いられたものの、その後は使われなくなっていたようであり、19世紀末以降になって、日本語での場合からやや遅れて、復活して一語として使用されるようになり、普及が進んだようである。

かの人工的につくり出されるものやしくみに対して、その具体化や実施に向けた計画を立てて、その内容を文書などのかたちを整えることとし、また、整えた結果を指すこともあるとする。

設計を上記のように位置付けた上で、機械工学におけるさまざまな専門領域に対応付けると表 1.1 のようになる。端的には、各専門領域は何某かのものを設計するための理論や知識の体系とみることができる。しかし、そうなると、機械工学からみた設計工学とは何を設計するための理論であり知識であるか、という素朴な疑問に行き当たる。また、設計すべき対象が多様である場合に個々の対象ごとに専門領域を用意できるのか、という疑問にも行き当たる。そのような意味合いのもとでは、設計工学とは、当座のこととしては、対象に依存しない問題解決 (problem solving) についての専門領域であり⁵⁾、対象を捨て去った後にプロセスとして残る設計の営みについての専門領域ということになる^{6),7)}。

プロセスとしての設計は端的には図 1.1 のように理解される。すなわち、さまざまな専門領域の理論や知識は設計対象の内容を与えたときにその振舞いを予測することに主眼が置かれ、設計を合理的に進めていくためにそのような予測を活用することが意図される。それに対して、設計では設計対象に求める目的としての振舞いに対してそれを実現し得る設計対象の内容を探し出すことその

表 1.1 機械工学におけるさまざまな科目と設計

授業科目	それによってできるようになること
	→
機械力学	→ 回転体の設計
材料力学	→ 構造物の設計
流れ学	→ 流路や翼の設計
熱力学	→ エンジンの設計
制御工学	→ 信号処理系の設計
機構学	→ メカニズムの設計
機械要素	→ 軸・歯車・カムの設計
⋮	→ ⋮
⋮	→ ⋮
⋮	→ ⋮
設計工学	→ ? の設計
	→

4 1. 設計論の背景

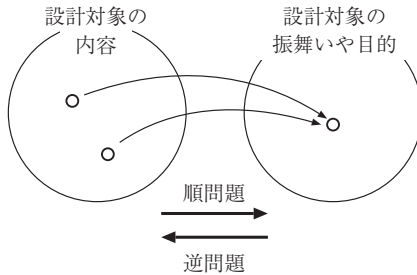


図 1.1 写像としての設計

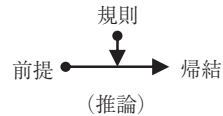


図 1.2 推論の形式

ものに主眼がある。前者では、分析（アナリシス，analysis）に重点があり，順問題に相当して，自然科学や社会科学とも馴染みやすい。後者では，総合[†]（シンセシス，synthesis）に重点があり，逆問題に相当し，自然科学や社会科学などに基づく部分はあるものの，それを越えた考え方が必要になる。また，推論の形式は，図 1.2 のような前提と規則と帰結の関係により規定され，前提と規則から帰結を求めることを演繹，前提と帰結から規則を定めることを帰納，規則に対して帰結に至る前提を見出すことをアブダクション（仮説生成）と呼ぶ。端的には，分析では演繹が，総合ではアブダクションが鍵となる役割を担う。一連の状況に対して，^{ハーバート・サイモン}Herbert Simon（1916–2001）は「人工的なものや現象（the artificial）に関する科学」を唱えている⁸⁾。また，吉川弘之（1933–）は工学の体系におけるシンセシスやアブダクションの重要性を指摘している⁹⁾。

設計はそもそものところでは機械や装置などを典型とする人工的な“もの”を対象とした目的指向の取組みである。なお，欧米では日本語の“もの”に代わる言葉として“product”という言葉が使われる。その意味合いは日本語での“製品”よりも広く，サービスなどの無形のものを除き，有形の人工的につくり出されるものを広範に指していて，本書では製品という言葉で product の意味で用いる。なお，人工的につくり出されるものやその影響する範囲が広がっていることを受けて，最近では，“もの”に留まらず，それが介在するサービスや経験などが重要であるとして“こと”をつくることが重要であるという言

[†] 「総合」については「綜合」とする場合もある。

い方もされるようになっていく。

目的指向のもと、設計の優劣は、おおむね、品質・コスト・時間[†]の三つの観点から規定される。品質とは、そもそもの目的とする機能を適切に達成することに対応する。コストはそのような機能に関わる品質をできるだけ少ない費用で実現することを意味する。時間とは“*Time to market*”ということであり、ニーズが存在しているタイミングで製品を市場に送り出すことを意味する。

機能に関わる品質・コスト・時間を総合的に考えていく設計は、限定的に考えたとしても、自然科学に留まらず、社会科学やアートなどにも関係していて、図面を描いて強度や機能の保証を計算することだけでは済まない。そのような広がりに対して、^{ジョン デイクソン}John Dixon は工学設計の位置付けに関して図 1.3 のような

コーヒーブレイク

“ものづくり”という独特な言葉

1990年代後半以降の日本では“ものづくり”という言葉が製造業あるいはそれを構成する営みを意味する語として用いられるが、技能や匠の技の重要性を再認識し現場主義を呼び起こすために用いられる場合が多いことを受けて、設計の立場からすれば、やや復古的な意味合いを伴う。“もの”とそれと対をなす“こと”という語も日本独特である。それらのことから、本書では上記の節とその明示的な引用箇所を除いて一連の語句を当該の意味合いでは用いないようにしている。

なお、1999年に制定された「ものづくり基盤技術振興基本法」は、第2条第1項中に『この法律において「ものづくり基盤技術」とは、工業製品の設計、製造又は修理に係る技術のうち汎用性を有し、製造業の発展を支えるものとして政令で定めるものをいう。』とあり、工業製品を対象としている。また、第3条第1項中には『ものづくり基盤技術はものづくり労働者によって担われていることにかんがみ、』、同第3項中には『ものづくり事業者の大部分が中小企業者によって占められていることにかんがみ、』とあって、その製造にかかる現場を具体的対象に据えていることが窺える。

ちなみに、英語では“もの”に相当する言葉として“products”という言葉が使われるとしたが、そのようになる以前は設計などの対象を指し示す言葉としては goods, machines, machinery などが用いられていたようである。

[†] 日本では、quality, cost, delivery として、QCD と称される。欧米には better, cheaper, faster という言い方がある。

索引

【あ】	意味	117, 368	エンジニアリングチェーン	
アーキテクチャ	意味の価値	106		190, 282
	意味ネットワーク	251	エンジニアリングデザイン	110
197, 359, 404	イリティ	45	【お】	
悪構造問題	因果ループ図	90	黄金比	113
浅い知識	インクルーシブデザイン	120	応答曲面法	98, 311
当たり前の品質	インサイト	378	オートポイエーシス	60
アップグレード	インダストリアルエンジニアリング	27	オーバーヘッド	150
アップデート	インダストリアルデザイン	110	オーバーラップ型	283
アーツ・アンド・クラフツ	インテリジェントCAD	324	オブジェクト指向	83
運動	インバースマニユファクチャリング	181	オブジェクトレベル	399
アナリシス	【う】		オープンイノベーション	396
アフオーダンス	ヴィジュアルシンキング	371	オープンサイエンス	396
アブダクション	ウォーターフォール型	283	オープン戦略	202, 352
アベイラビリティ	後向き推論	252	オペレーションズリサーチ	27
アポロ計画	美しさ	111		
アルゴリズムミックデザイン	売り切り	205	オンコンディション	
	【え】		メンテナンス	175
317	エキスパートシステム		オントロジー	253, 303, 328
アルゴリズム	83, 252		【か】	
アレンジメント	エージェント	301	下位機能	52
安全性	エスカレーション	341, 348	開システム	30
安全欲求	エネルギー	50	解釈	97
暗黙知	エネルギーリカバリー	176	解析的目標カスケードイング	317
	エリアマネジメント	186	階層型システム	43
【い】	エルゴノミックス	111	階層性	51
意思決定	演繹	4, 20	階層のクラスタリング	320
一元的品質	エンジニアリングサイエンス		概念	62
一般言語学講義			概念設計	274
一般縮小勾配法			外部システム	30
一般設計学			下界値	249
遺伝的アルゴリズム			価格	148
イノベーション				
344, 388, 412				
イノベーションエコシステム				
359				

コントロール 30
 コンバージョン 186
 コンピューター援用設計 289
 コンフィグレーション 58

【さ】

サーキュラーエコノミー 184
 サイエンスマップ 394
 最急降下法 244
 サイクルタイム 158
 再資源化 178
 最終処分 176
 再生的思考 257
 再設計 216
 最適解 219
 最適化計算 66
 最適化問題 66
 最適設計 66, 219, 306
 サイバネティクス 28
 サイバーフィジカルシステム 36
 細分化 19
 再利用 176
 材料リサイクル 176
 サービス 4, 115, 350
 サーフフェイス 87
 サブシステム 33
 サブスクリプション 205
 サプライチェーン 33, 162
 サロゲートモデル 98, 311
 産業革命 9
 参与観察 378

【し】

シェアリングエコノミー 205
 ジェネレーティブデザイン 317
 自我欲求 103
 時間 5, 44, 64
 時間的非整合性 35
 次元の呪い 250
 自己産出 60, 372
 自己実現欲求 103

自己組織化 60
 自己組織化マップ 319
 事後保全 173
 試作 92
 試作レス 291
 市場原理 148
 次数 95
 指数分布 128
 システム 25, 84
 システム工学 27
 システム思考 60, 90
 システムズイノベーション 412
 システムダイナミクス 60, 90, 330
 システム理論 28
 自然言語処理 254
 持続可能性 14, 185
 持続可能な開発目標 14, 210
 持続的イノベーション 347
 シソーラス 253
 実験計画法 311
 実行可能領域 218
 実装 363
 実体設計 274
 自動設計 335
 シナリオ 326, 358, 380
 資本回収係数 192
 シミュレーション 88
 市民社会 10
 社会的費用 184
 社会的欲求 103
 社会における科学と社会のための科学 393
 射出成型 154
 終価 191
 終価係数 191
 自由曲面 87
 習熟曲線 161
 習熟効果 161
 収束 382
 集中定数系 88
 修理 169

述語 83
 寿命 168
 シュレディング 178
 循環型生産 181
 循環経済 184
 瞬間故障率 125
 準ニュートン法 245
 準分解可能 40
 順問題 4
 使用(性)価値 106
 詳細設計 274
 省察 372
 状態 31, 88
 状態空間探索 247
 状態遷移 31
 状態量 31
 冗長 129
 消費社会 10
 情報 50
 情報処理 78
 上流段階 286
 初期故障期 127
 除去加工 150
 ジョブ 116, 378
 自立共生 402
 自律分散 35
 事例ベース推論 252
 シーン 378
 進化型計算 246, 260
 新規設計 216
 人工知能 82
 人工物 15
 人新世 15
 シンセシス 4, 25
 深層学習 95, 255, 320
 深層生成モデル 256, 318
 身体性 259
 シンプレックス法 243
 信頼性 124
 信頼度 125
 信頼度関数 125
 信頼領域法 245

【す】	生成検査法	242, 306	先導設計	357	
垂直統合	351	生成 AI	256	専門領域	391
垂直非統合	351	生成モデル	255, 318	戦略性	19
水平分業	352	生成 AI	256, 325	【そ】	
水平統合	352	製造性設計法	288	総合	4
推論	62, 250	製造物責任	124	総合知	409
数値計算	81, 92	成長期	106	総合評価	220
数値計算モデル	91	成長の限界	14	相互運用性	302
数値シミュレーション	88	精度	93	相似設計	225
数理計画法	242, 306	製品	4, 115	創成型科目	20
数理計画問題	66	製品アーキテクチャ	197	創成科目	20
数理モデル	91	製品イノベーション	354	想定外	144, 258
スケールフリーネットワーク		製品系列	164, 189, 197	創発	35, 246, 260, 317
	353	製品設計	17	属性	31
スケッチ	382	製品定義	207, 364	属性空間	228
スケーリング	310	製品データ管理	289	属性項目	31
スケルトンインフィル	186	制約条件	65	属性値	31
スケールメリット	227	制約条件式	66	ソーシャルビジネス	209
ストーリー	379	制約条件付最適化問題	243	ソフトウェア	50
ストーリーテリング	380	生理的欲求	103	ソフトコンピューティング	96
ストレッチ	226	積層造形	150	ソフトスキル	409
スナップフィット	158	設計	1	ソフトフェイル	143
スベキュラティブデザイン		設計エキスパートシステム		ソリッド	87
	378	設計科学	393	損益分岐性	177
スペースレイアウト	58	設計カタログ	71	損益分岐点	153
図法幾何学	78	設計公理	55	【た】	
スマイルカーブ	206	設計根拠	327	大域的最適解	219
図面レス化	290	設計支援	305	待機冗長システム	131
擦合せ	198	設計自動化	305	代替案	52
【せ】		設計知識	71	大量生産	10
正規分布	128	設計の原理	304	第4次産業革命	36
成形加工	150	設計パラメーター	66	ダウングレード	179
省察	372	設計変数	65	タスク	297
生産コスト	148	接続	30	脱炭素社会	14
生産システム	33, 147	セル生産	159	縦型探索	248
生産性	7, 23	专业化	8	多品種少量生産	11
生産設計	274	線形計画問題	242	多目的遺伝的アルゴリズム	319
生産的思考	257	宣言的知識	251	多目的最適化問題	319
成熟期	106	選好解	223, 319	探索	241, 306
製図	92	全体機能	52	炭素税	184
整数計画問題	243	全体像	19		
		選択設計	216		

単調性解析 220

【ち】

地球環境問題 13

地球の境界 15

逐次線形計画法 245

逐次2次計画法 245

知識 62, 70

知識基盤社会 393

知識集約型 24

知識情報処理 250

知識処理 250

知識表現 250

知のプロフェッショナル 409

中間形態 344

中間ファイル 302

忠実度 309

抽象化 52

超システム 35, 330

超スマート社会 36

直接費 149

直線探索法 244

直列システム 129

【つ】

つながり 116

ツリー表現 84

【て】

ティアダウン 232

定式化 66, 265

ディシプリン 391

定性推論 100

適正技術 120

デザイン型科目 20

デザイン思考 117, 377

デザインシンキング 117, 377

デザインスパイラル 272

デザインドリブン
イノベーション 368, 396

デザインラショナル 327

デザインレビュー 277

デジタルエンジニアリング 289

デジタルツイン 94, 176, 296

デジタルトランス
フォーメーション 289

デジタルモックアップ 289

データ構造 81

データサイエンス 96, 319

データ同化 94

手続きの知識 251

デファクトスタンダード 303

点検 169

伝達 50

【と】

ドイツ流設計方法論 51

道具 7

統合構造 197

透視図 76

動的計画法 245

導入期 106

閉じた問題 266

トータルエントロピー
アセスメント 182

トポロジー最適化 307, 318

ドミナントデザイン 207, 358

トランジション 261, 331

トランスサイエンス 394

トランスファラブルスキル 409

トレードオフ 221

【な】

内的発達法則 54, 342

内部システム 30

ナラティブストーリー 379

南北問題 120

【に】

ニュートン法 244

ニューラルネットワーク 95

人間の欲求 103

認識科学 393

【ね】

ネットシェイプマニユファク
チャリング 154

ネットワーク表現 84

年価 191

年金現価係数 192

年金終価係数 192

【の】

ノンパラメトリックモデル 95

【は】

バイアス 212

廃棄 169

排出権取引 185

配置設計 307

ハイブリッド 344

ハイブリッド化 313

バウハウス 110

破壊的イノベーション 347, 412

白銀比 114

バージョンアップ 116

バスタブ曲線 127

バタフライダイアグラム 187

パターンランゲージ 230

バーチャルエンジニアリング 283, 352

バーチャルファクトリー 291

ハッカソン 384

バックキャスティング 357

発散 382

発想支援 324

ハードウェア 50

ハードスキル 409

ハードフェイル 143

パラメーター 95

パラメトリック設計 216

パラメトリックモデル 95

バリアフリー 118

バリューチェーン 205

マルチエージェントシミュレーション 90, 330
 マルチフィデリティ 313
 満足化 41, 273

【み】

魅力的な品質 109

【む】

無差別 222
 無差別曲線 222
 無次元系 88

【め】

メタファー 112
 メタモデル 302
 メタレベル 399
 メンタルモデル 99

【も】

模擬焼きなまし法 246
 目的 30
 目的関数 65
 目標定義 271, 364
 モジュール 42, 197
 モジュール構造 197
 モダニズム 110
 モダンデザイン 110
 モデリング 91, 96
 モデリング言語 295, 302
 モデル 46, 74, 91
 モデル化 265
 モデルベース開発 293
 モード論 392
 もの 4
 ものづくり 5
 モーフオロジカルチャート 383
 問題 268
 問題解決 3, 362
 問題設定 266, 363

【や】

役割 (目的) の明確化 274
 厄介な問題 267, 330

【ゆ】

豊かさ 103
 ユニバーサルデザイン 118
 ゆりかごからゆりかごまで 187

【よ】

溶接 150
 予見 69
 横型探索 248
 予防保全 173

【ら】

ライフサイクル 170
 ライフサイクルアセスメント 182
 ライフサイクル工学 170
 ライフサイクル設計 170
 ライフステージ 106
 ライブラリー 295, 302
 ラインアップ 332
 ライン生産 159
 ラピッドプロトタイピング 166

【り】

利益 148
 リカーリングモデル 205
 リコール 124
 リサイクル 170, 172
 リスク 140
 リスクガバナンス 145
 リスクコミュニケーション 145
 リスクマップ 141
 リスクマネジメント 143

理想化 93
 リーダーシップ 376
 リデュース 171
 リニアモデル 392
 リバースイノベーション 209
 リバースエンジニアリング 87
 リープフロッグ 209
 リフレクション・イン・アクション 372
 リフレミング 270, 372
 粒子群最適化 246
 粒度 30
 リユース 172, 176
 領域知識 408
 量産効果 155
 利率 191

【る】

類型 215
 累積故障確率 125
 ルーチン設計 218

【れ】

レイアウト 58
 レーダーチャート 221
 レジリエンス 143

【ろ】

労働集約型 24
 ロジスティクス曲線 261, 342
 ロードマップ 357
 ロバスト最適設計 321
 ロバスト性 321, 331

【わ】

ワイブル分布 128
 ワイヤフレーム 86
 ワーキングメモリー 83
 ワークエレメント 158
 ワークステーション 158



[A]		[D]		[I]	
A アルゴリズム	249	DE	289	IE	27
A*アルゴリズム	249	deep generative model	256	IGES	302
ABC	162	design	2	ill-posed problem	267
additive manufacturing	165	design for assembly	156	ill-structured problem	267
AM	166	design for X 方法論	288, 304	Industry 4.0	36
analysis	4, 25	design rationale	327	innovation	344
AR	94	design structure matrix	300	interpretive structural modeling	233
[B]		detail design	274	ISM	233
base of the economic pyramid	208	DFA	156	[K]	
BOM	289	DFM	288	KJ 法	373
BOP	208	DfX 方法論	288, 304	[M]	
BOP ビジネス	209	DMU	289	mathematical programming	242
boundary representation	87	DSM	300	MBD	293
B-reps	87	DX	289	MDO	311
[C]		[E]		method	25
CAD	86, 289, 329	electronics manufacturing service	163	methodology	25
CAE	88, 289, 329	ELSI	394	MILS	295
CAM	292	embodiment design	274	Modelica	302
capstone project	20	EMS	163, 352	model-based development	293
CE	283	ESG 投資	185	MOGA	319
computer-aided design	86, 289	evolutionary computation	246	Moore の法則	356
computer-aided engineering	88, 289	exploitation	347	MTBF	126
computer-aided manufacturing	292	exploration	347	MTTF	126
computer supported cooperative work	301	[F]		multi-disciplinary design optimization	311
conceptual design	274	FMEA	135, 288	[N]	
constructive solid geometry	87	FTA	135, 138, 288	narrative story	379
cornerstone project	20	[G]		[O]	
CPS	36	GA	246	OR	27
Cradle to Cradle	187	generative model	255	[P]	
CSCW	301	genetic algorithm	246	particle swam optimization	246
CSG	87	geometry	86	PBL	20, 409
cyber-physical systems	36	[H]			
C2C	187	HILS	294		

PDCA	370	SILS	295	VE	283
PDM	289	simulated annealing	246	verification and validation	
PDPC	135	Society 5.0	36		90
PMBOK	297	SOM	319	VILS	295
preliminary design	274	SoS	35, 330	void	231
problem-based learning	20	STEAM 教育	19, 408	VR	94
problem solving	3	STEM 教育	19, 408	VUCA	267
product data management		STEP	302	V&V	90
	289	STL	87, 302		
project-based learning	20	story	379		
PSO	246	sustainability	185	【W】	
PSS	181	synthesis	4, 25	wicked problem	267, 330
		SysML	302		
【Q】		system	25	【数字】	
QFD	108, 164, 288	systems engineering	27	1D モデル	293
quality function		system of systems	35, 330	2 次計画問題	243
deployment	108			2 レベル統合化システム	
		【T】		シンセシス	316
【R】		TRIZ	230	21 世紀型スキル	408
R-Map	141			3D プリンター	150, 166
		【U】		3R	171
【S】		UML	302	【ギリシャ文字】	
S カーブ	261, 342			ε 制約法	319
SA	246	【V】			
SDGs	14, 210	V 字モデル	294		
SECI モデル	375	value	23		

— 著者略歴 —

1985年 大阪大学工学部産業機械工学科卒業
1987年 大阪大学大学院工学研究科産業機械工学専攻博士前期課程修了
1990年 大阪大学大学院工学研究科産業機械工学専攻博士後期課程修了
工学博士（大阪大学）
1990年 大阪大学助手
1993年 大阪大学講師
1995年 大阪大学助教授
1995～
1996年 スタンフォード大学客員研究員（兼任）
2002年 大阪大学教授
現在に至る

設計論

— 製品設計からシステムズイノベーションへ —

Design, a Comprehensive Overview

— From Product Design to Systems Innovation —

© Kikuo Fujita 2023

2023年7月7日 初版第1刷発行



検印省略

著者 藤田 喜久雄
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来 真也
印刷所 三美印刷株式会社
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 <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-04684-7 C3053 Printed in Japan

(鈴木)



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 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, 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。