

## まえがき

---

システム工学は機械系の多くの学問とはその性格を異にする。機械系の学科で学ぶ科目の多くは機械や装置の要素の設計あるいは特定の物理的現象の解析にかかわるものである。これに対して、システム工学は機械や装置、さらにそれらを要素として含む大規模なシステムの構想から開発、運用に至るすべての段階を対象とする。このような開発、運用にかかる技術や知識はかつては技術者個人や企業の開発部門のような技術者のグループに蓄積され、それをだれにも理解できるように体系的に記述したり、伝達することは困難あるいは不可能とされてきたものである。しかし、開発の対象となるシステムがしだいに大規模になり、さまざまな専門の多くの人々が協力して作業しないと目的を達成できないようになると、開発、設計といった一連の作業の進め方について共通の認識を持ち、効率よく管理しないと無駄が多くなるだけでなく、場合によっては目標の実現さえ危うくなる。システム工学はこのような課題にこたえようとするものである。すなわち、システム工学はシステムの開発、設計、運用などシステムの誕生から死に至るすべての段階にかかわる方法論と、それを効率良く進めるための手法より構成される。システム工学が提唱されて以来、多くの努力が重ねられてきたが、問題は、着想、アイデア、設計といった個人の創造的活動に強く依存する行為にかかわるものであるため、いまなおシステム工学の体系について一般的に認められている考え方は存在しない。そこで、本書においては、システム開発に関する多くの段階の中で比較的理論化の進んでいる部分を中心に理論と利用可能な手法の紹介を行うこととする。

第1章はシステムについての基礎的事項とシステム開発の一般的プロセス、および各段階でのシステム工学の課題について述べる。第2章はシステム開発のすべての段階で取り扱う数量的観測データの取扱いに関する基礎的事項をまとめてある。さまざまなデータの性質を知ることはシステムの理解やモデル

化の第一歩である。この章の内容は、その意味でシステム開発にかかわるすべての人々が共通に持たねばならない教養ともいべきものである。システム工学の基本はモデルの利用である。第3章にモデル化の意義とシステム工学で用いられる主要なモデルを紹介をする。システム工学の多くの分野のなかで比較的体系化されているのがシステム設計のうち最適設計といわれる分野である。第4章はこの最適設計の主要な手法を紹介する。第5章は待ち行列とそのシミュレーションの方法を紹介している。システム工学の代表的モデルの一つである待ち行列は理論的にも興味深く、実際によく使われるモデルである。また待ち行列を例として、モデル化とそのモデルのシミュレーションによってシステムの理解を深め設計に役立てるといふシステム工学の方法を理解することも本章の目的である。第6章はシステムの重要な性質である信頼性の理論についてその基礎を述べる。システムは大規模になればなるほど故障が重大な結果をもたらす。したがって、故障しにくいシステムの設計がシステム設計の最重要課題となる。そのような設計の基礎となるのが信頼性理論である。

いずれの章や節もそこで対象とする課題はそれぞれ一つの学問の分野として研究が進められており、一通りの基礎を学ぶだけでも1冊の教科書を必要とする。したがって、本書によって個々の理論や手法について深い知識を得ることは不可能であり、またそれは本書のめざすところではない。システムの開発、運用の工学としてのシステム工学自身一つのシステムである。本書はこのシステムを構成する要素と全体のシステムの目的について基礎的な知識を提供することを目標とするものである。なお、第4章、5章、6章は独立に理解できるようになっているので順に読む必要はない。また、教科書として用いる場合は3章からどの章へ進んでもかまわない。

なお、本書の分担はつぎのとおりである。

第1章、4章、6章	足立紀彦	第2章	酒井英昭
第3章	飯國洋二	第5章	高橋 豊

1996年6月

著者しるす

# 目 次

---

## **1** システムとシステム工学

---

1.1 システム概念 .....	1
1.1.1 システムと秩序 .....	1
1.1.2 自然システムと人工システム .....	3
1.1.3 システムの構造と機能 .....	4
1.1.4 システムと環境 .....	6
1.1.5 システム要素とサブシステム .....	7
1.1.6 いろいろなシステム .....	9
1.1.7 システム思考 .....	11
1.2 システムの開発と設計 .....	11
1.2.1 システムのライフサイクル .....	11
1.2.2 システム工学 .....	14
演習問題 .....	16

## **2** データの統計的処理

---

2.1 確率変数と分布関数 .....	17
2.1.1 母集団と分布（密度）関数 .....	17
2.1.2 平均値，分散，相関係数 .....	19
2.1.3 いろいろな分布 .....	20
2.2 確率分布の推定 .....	24
2.3 回帰分析 .....	27
2.3.1 統計的検定 .....	27

2.3.2	重回帰と最小二乗法	28
2.3.3	推定量の分布	30
2.3.4	回帰式, 回帰係数の有意性の検定	33
2.3.5	非線形回帰	35
2.4	時系列分析	37
2.4.1	線形予測	37
2.4.2	有限長のデータへの適用	41
	演習問題	46

## 3 システムモデル

3.1	モデル化の意義	47
3.2	モデルの分類	48
3.3	静的モデルと動的モデル	50
3.3.1	静的モデルの例	50
3.3.2	動的モデルの例	51
3.3.3	システムの類似性	53
3.3.4	非線形モデルの線形近似	54
3.3.5	モデルの離散化	55
3.4	ネットワークモデル	57
3.4.1	回路ネットワーク	58
3.4.2	接続行列	59
3.4.3	閉路行列	60
3.4.4	節点変換式	62
3.4.5	閉路変換式	63
3.4.6	節点方程式	63
3.4.7	節点方程式の解法	65
3.4.8	閉路方程式	65
3.5	マルコフ連鎖	67
3.5.1	マルコフ連鎖の具体例	68
3.5.2	遷移確率と遷移確率行列	69
3.5.3	チャップマン・コルモゴロフの式	70



3.5.4	状態確率ベクトル	71
3.5.5	遷移確率行列と状態確率ベクトルの関係	71
3.5.6	$P^t$ と $P^\infty$	72
3.5.7	$\pi(t)$ の極限分布	73
3.5.8	いくつかの重要な確率	74
3.5.9	平均到達時間	76
3.5.10	平均訪問時間	77
3.5.11	マルコフ連鎖と状態の分類	77
	演習問題	79

## 4 システムの最適化

4.1	数理計画問題	81
4.2	線形計画法	83
4.2.1	線形計画問題の例	83
4.2.2	図式解法	86
4.2.3	線形計画問題の標準形	89
4.2.4	単体法	91
4.2.5	単体表	94
4.2.6	2段階法	99
4.3	非線形計画法	103
4.3.1	非線形計画問題	103
4.3.2	1変数関数の最適化	105
4.3.3	降下法	107
4.3.4	Kuhn-Tucker条件	109
4.3.5	ペナルティ法と射影法	111
4.4	ネットワーク計画法	115
4.4.1	グラフとネットワーク	115
4.4.2	最短路問題	117
4.4.3	最大流問題	121
4.4.4	その他のネットワーク計画問題	127
	演習問題	130

## 5 待ち行列とシミュレーション

5.1 序 論	133
5.2 待ち行列理論	135
5.2.1 起 源	135
5.2.2 具体的活用例	135
5.2.3 基本的確率過程および分布	136
5.2.4 待ち行列システムの記述	147
5.2.5 出生死滅型待ち行列モデル	150
5.3 待ち行列モデルのシミュレーション	161
5.3.1 乱 数	162
5.3.2 時 間 管 理	163
5.3.3 入 力 の 生 成	164
5.3.4 統 計 処 理	165
5.3.5 シミュレーション言語	166
5.3.6 シミュレーションと解析的手法の比較	166
5.3.7 シミュレーションプログラムの構成要素	167
5.3.8 サンプルサイズ	168
演 習 問 題	170

## 6 システムの信頼性

6.1 信頼度と故障率	173
6.2 代表的な故障時間分布	176
6.3 システムの信頼度	179
6.3.1 直列システム	179
6.3.2 並列システム	180
6.3.3 待機冗長システム	182
6.4 保全度とアベイラビリティ	187

6.4.1 直列システムのアベイラビリティ .....	192
6.4.2 並列システムのアベイラビリティ .....	193
6.4.3 待機冗長システムのアベイラビリティ .....	194
6.5 保 全 方 式 .....	195
演 習 問 題 .....	198

引用・参考文献

演習問題の解答

索 引

# 1

## システムとシステム工学

### 1.1 システム概念

#### 1.1.1 システムと秩序

システムということばは毎日の生活で広く用いられている。しかし、広く用いられるということはそれだけ、そのことばの意味するところはあいまいで漠然としているということでもある。例えば、<sup>ばく</sup>莫大な数の計算機と通信回線で構成される全世界的な通信網、抵抗・コンデンサ・コイルで構成される簡単な電気回路、ばね・ダッシュポット・重りで構成される振動系、あるいは生態系、太陽系、生物個体、これらはすべてシステムの例である。

それを構成する素材、規模、そこに働く科学的法則もまったく異なったさまざまな対象が同じくシステムとよばれる理由はどこにあるのであろうか。それは、(1) これらの対象が複数の部分に分けられること、(2) 分けられた部分(システム要素)がたがいに作用しあって全体として秩序をつくっていること、にある。

図 1.1 に示す機械振動系において重り  $m$ 、ばね  $k$  はそれぞれ運動エネルギー、ひずみエネルギーを蓄積し、ダッシュポット  $c$  はエネルギーを消散する。したがって、これらの要素はエネルギーに対する関係によってたがいに区別されるシステム要素である。

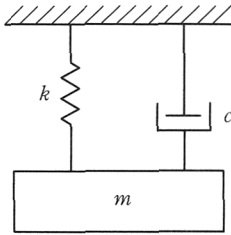


図 1.1 1自由度の振動系

また**秩序** (order) とは**混沌** (chaos) に対する概念であり、なんらかの規則性を意味している。例えば結晶は原子が規則的に配列し空間的秩序をつくりだしている。時間的秩序の代表的なものは周期性である。最も簡単な機械振動系であるばねとダッシュポットおよび重りからなる図 1.1 のシステムは一つの固有振動数という周期性を表すパラメータによって特徴づけられる。以上の考察より、システムの最も一般的な定義は以下のように述べることができる。

複数の要素が

- (1) たがいに作用し合って
- (2) 全体としてある秩序を維持している

場合に、その要素の集合と相互作用の全体を一つのシステムという。

このように定義するとこの世界に存在するほとんどすべてのものはシステムであり、なんら意味のない定義のように思われるかもしれない。しかし、ある対象をシステムとよぶときは、その対象の持つさまざまな性質のうち、特に上の二つの性質に注目してその対象を見ることを意味する。例えば、自動車は一つのシステムであるというとき、われわれは自動車をエンジン、動力伝達機構、シャシ、車輪、種々の制御装置などのシステム要素が相互に秩序ある関連を保ちつつ人や物を輸送するという機能を実現する機械としてみているのである。言いかえれば、これらの要素とそれらの間の相互関係の総体として自動車を見ると、自動車はシステムになるのである。

日本語でシステムに対応することばは体系、系統、系、組織、制度、機構などである。いずれもたがいに関連する要素が全体として秩序をつくっているものを示している。

### 1.1.2 自然システムと人工システム

ところで、自動車も生物の個体も上の定義によればシステムである。しかしこの両者には大きな違いがある。自動車は人間が輸送という目的を実現するためにつくりだしたものである。一般には、生物の個体は人間がある特定の目的を実現するためにつくりだしたのではない。人間が目的をもってつくりだしたシステムは**人工システム**、自然に生成されたシステムは**自然システム**とよばれる。

システム工学が対象とするシステムは人工システムである。人工システムと自然システムを区別するものは外部から人間によって与えられた目的があるか否かである。例えば、河川とダムや堤防でつくられる洪水防止のシステムはその中に自然の河川を含んでいても、洪水防止という目的を実現するためのシステムであるから、人工システムである。また、日本語や英語は自然システムであるがFORTRAN やCのような計算機言語は人工システムである。また、家畜や栽培植物は、人間が長年かかって品種改良をつづけてつくりだしたものであるから人工システムといってもよいであろう。

社会のさまざまな制度や企業などの組織も人工システムである。しかし、家畜や栽培植物の個体を構成するシステム要素やそれらの相互関連は人間によって設計されてつくりだされたものではない。その意味で家畜や栽培植物のような農業の生産物は機械や装置のような工業による生産物とは異なるシステムである。このような人工システムにおいては、上のシステムの定義の(2)にいう「秩序」はシステムの目的と適合するものでなければならない。したがって、人工システムの定義は

- (1) 複数の要素が
- (2) たがいに作用し合って
- (3) 全体としてある目的を実現している

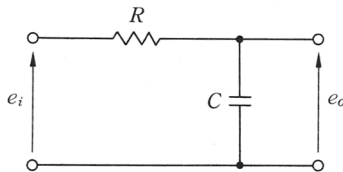
ものと言いかえることができる。システムの目的は必ずしも一つであるとは限らない。高速道路網は人の移動と貨物の輸送という二つの目的を実現するためのシステムである。大学は要約すれば教育と研究という二つの目的を持つシス

テムである。

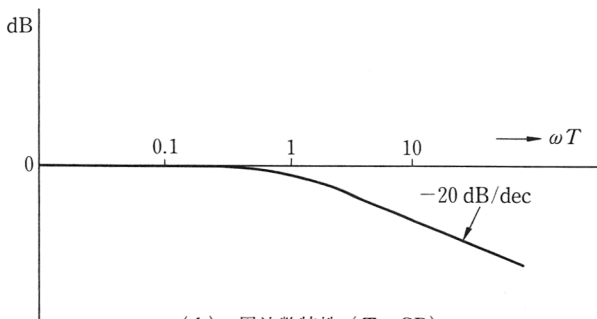
### 1. 1. 3 システムの構造と機能

本書で考察の対象とするシステムは人工システムであるので、以下においてはシステムといえば人工システムを意味するものとする。システムはまず第1にシステム要素とその相互作用であるが、この要素間の関係の総体をそのシステムの**構造**という。システム要素は構造を通してシステムの目的を実現するように相互作用する。その作用、あるいは活動の全体をシステムの**機能**という。言い換えればシステムの目的を実現する「目的に適合した過程」をそのシステムの機能という。

図 1. 2 は抵抗とコンデンサを直列に結合した電気回路である。これは最も簡単な低域フィルタ回路の例である。この回路の目的は入力端子に加えられた、雑音を含んだ電気信号から雑音を取り除いて信号のみを取り出すことである。このシステムの構造は「二つのシステム要素の直列結合」であり、機能は回路の周波数特性として表現される。

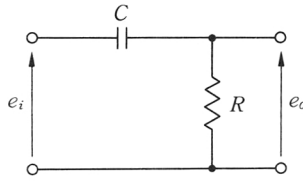


(a) フィルタ回路

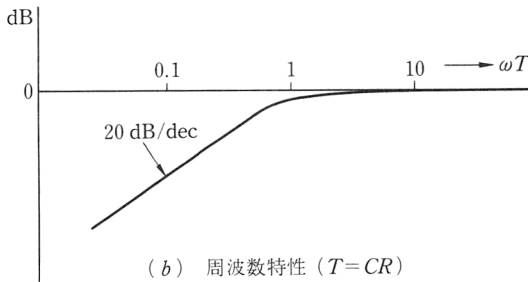


(b) 周波数特性 ( $T=CR$ )

図 1. 2 直列結合回路と周波数特性



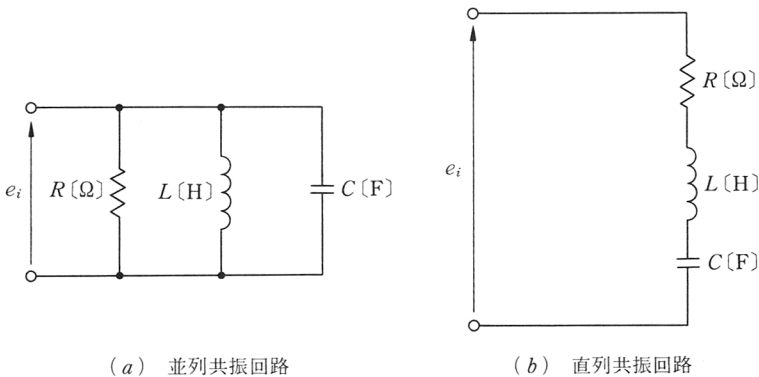
(a) 微分回路



(b) 周波数特性 ( $T=CR$ )

図 1.3 微分回路と周波数特性

図 1.3 は図 1.2 の抵抗とコンデンサの位置を交換して結合したシステムである。これは微分回路とよばれる回路である。この回路の周波数特性は図 1.2 のそれとは明らかに異なる。同じ要素から構成されたシステムでも構造が異なれば機能も変化する。しかし、ある機能を実現するシステム要素や構造は唯



(a) 並列共振回路

(b) 直列共振回路

図 1.4 RLC 共振回路



一とは限らない。

図 1.4 は  $R$ ,  $L$ ,  $C$  の並列共振回路と直列共振回路を示す。この二つの回路の共振周波数はいずれも  $f=1/(2\pi\sqrt{LC})$  [Hz] であり、構造は異なっても同一周波数で共振するという同じ機能を持つ。ある特定の機能はいろいろなシステムによって実現される。ここにシステム工学の存在の基盤がある。システム工学が対象とするシステム開発とは、要約していえば、ある機能が指定されたときその機能を実現するシステムを多くの可能なシステム（代替案）のなかから一つを選ぶということにほかならない。

#### 1.1.4 システムと環境

ところで、この世界に存在するすべてのものはなんらかの形でたがいに影響を与えあっている。ほかのものからまったく影響を受けない孤立して存在しているものは厳密に存在しないであろう。この相互作用する全体のなかで相対的に他から独立している部分を取り出したものを一つのシステムとよぶのである。

図 1.5 に示すように、システムに含まれないすべての世界をシステムの環境 (environment) という。また、システムと環境の境界を界面 (interface) という。したがって、システムの界面はそのシステムによって必然的に決まるわけではなく、ある程度便宜的に「決められる」ものである。システムはこの界面を通して環境と相互作用をする。環境からシステムに及ぼす作用あるいは影響をそのシステムへの入力といい、逆にシステムから環境に与える影響あるいは作用をシステムの出力という。入力のなかで、特に人間によって操作、あるいは制御可能な入力を制御入力とよぶ。

例えば、パーソナルコンピュータは演算装置、記憶装置、入出力制御装置から構成される一つのシステムである。外部とのデータの出入りは入出力制御装置を介して行われるので、システムの境界は入出力制御装置である。しかし出力装置としてディスプレイ、入力装置としてキーボードが装備されているなら、計算機とディスプレイ、キーボードを含めて一つのシステムとして考えることができる。この場合、キーとディスプレイの画面がシステムの界面とな

# 索引

## 【A】

アベイラビリティ 190  
アーラン分布 135, 144, 145

## 【B】

bathtub 曲線 176  
Burg アルゴリズム 42  
Burg 法 42, 44  
バイアス 26  
罰金法 111  
ベキ等行列 32  
ベータ関数 23  
母関数法 154  
母集団 18  
分布関数 18  
分布の母関数 140  
分散 19  
ブラックボックス 7  
ブラックボックスモデル 48  
ブレーン・ストーミング 15  
物理モデル 48  
物理システム 9

## 【C】

CM 195  
CPM 128, 130

## 【D】

DPCM 法 44

台形法 56  
ダイクストラ 118  
ダミー作業 128  
同時到着個数 147  
独立 19  
独立性 137  
動的モデル 48  
同時分布関数 18  
同時密度関数 18

## 【E】

erlang 135  
枝 115  
枝アドミタンス行列 63  
枝電圧 61  
枝電圧ベクトル 61  
枝インピーダンス行列 65  
枝特性方程式 64  
エルゴードのマルコフ連鎖 78

## 【F】

F 分布 23  
フィードバックシステム 10

## 【G】

外生型 165  
外点法 111  
概要計画 12  
ガンマ関数 22  
ガウス分布 20, 21, 24, 33  
ガウス・ニュートン法 36

ガウス・ヤコビ法 65  
擬似乱数 163  
偶発故障期間 176  
グラフ 115  
具体的計画 12  
行列理論 134

## 【H】

掃出し法 98  
平均訪問時間 77  
平均保全費用 196  
平均故障時間 175  
平均二乗予測誤差 37  
平均サービス時間 150  
平均再帰時間 76  
平均システム内客数 155  
平均修理時間 188  
平均値 19  
平均到達時間 76  
平均到着時間間隔 150  
平衡方程式 152, 153  
平衡点 55  
平衡状態 54  
平衡状態遷移図 152  
並列システム 180  
閉路 60, 116  
閉路行列 60  
閉路変換式 63  
閉路方程式 65, 66  
閉路インピーダンス行列 66  
閉路解析 66  
閉ループシステム 10  
偏自己相関係数 42  
ヘッセ行列 105

左片側検定 28  
 非復帰の状態 79  
 非基底変数 93,94  
 非線形回帰 35  
 非線形計画法 103  
 非線形計画問題 103  
 非線形モデル 48  
 ヒストグラム 25  
 非定常ポアソン過程 141  
 非割込み 149  
 費用-効果分析 15  
 保留時間 135  
 保全 187  
 保全度 187  
 保全方式 195  
 不偏推定量 32  
 フロー 57  
 不等式制約 82,83  
 標本平均 22  
 評価関数 82  
 評価・決定 13  
 評価システムの設計 12  
 標準偏差 19  
 標準正規分布 21

## 【I】

陰解法 57  
 因子分析法 15  
 一斉取替え 195,197  
 一様分布 144,146  
 一様乱数 163  
 一様性 143

## 【K】

KCL 方程式 59  
 KJ 法 15  
 Kuhn-Tucker 条件  
 109,110  
 KVL 方程式 61  
 回帰係数 30

回路解析 59  
 回路ネットワーク 58  
 開ループシステム 10  
 階層構造 8  
 核形経験密度 27  
 核関数 27  
 確率母関数 138,140  
 確率過程 67  
 確率密度関数 142  
 確定モデル 49  
 重ね合わせの原理 48  
 過渡的状态 79  
 経験分布関数 25  
 ケンドールの記号 149  
 検定統計量 27  
 結合点 128  
 基本閉路 61  
 基本閉路電流 63  
 基本閉路行列 62  
 機械論的モデル 48  
 危険率 28  
 帰無仮説 27,33,34  
 キルヒホッフの電圧則 61  
 キルヒホッフの電流則 59  
 希少性 137  
 基底変数 93,94  
 基底解 93  
 既約なマルコフ連鎖 78  
 既約接続行列 60  
 基準節点 60  
 勾配法 36,108  
 勾配射影法 115  
 個別取替え 195  
 降下法 107  
 呼の発生 136  
 コルモゴロフの前進方程式  
 152  
 呼量 erlang 135  
 更新率 195  
 故障率 175  
 故障率関数 175  
 故障時間 174

後退オイラー法 56  
 古典的ルンゲ・クッタ法  
 56  
 後着順 148  
 組合せ回路 50  
 クラスタ分析法 15  
 クリティカルパス 129  
 共分散 19  
 共分散法 42,44  
 狭義の路 117  
 極大解 104  
 極大点 104  
 極大値 104  
 極限分布 72,73,78  
 極小解 104  
 局所最適解 104  
 局所最適値 104  
 極小値 104  
 共役勾配法 109  
 吸収マルコフ連鎖 78  
 吸収状態 78

## 【L】

Levinson-Durbin 40,41

## 【M】

M/M/c 158  
 M/M/1 150  
 MTTF 175,178  
 MTTR 188  
 窓関数 27  
 摩耗故障期間 177  
 マルコフ過程 68  
 マルコフ連鎖 68  
 マルコフ連鎖モデル 189  
 待ち行列 133  
 待ち時間 156  
 待ち時間分布 156  
 右片側検定 28  
 密度関数 18

モデリング 47  
 模 擬 47  
 目的変数 28  
 目的関数 81, 82  
 無記憶性 143  
 無向グラフ 116  
 無相関 20

## 【N】

内生型 164  
 内点法 111  
 年齢取替え 195, 196  
 ネットワーク計画問題 115  
 ネットワークモデル 58  
 ネットワークの流れ 122  
 2段階法 99  
 2次計画問題 103  
 入 力 6  
 ニュートン法 36, 109

## 【O】

黄金分割 106  
 オイラー法 56

## 【P】

p 重のマルコフ連鎖 67  
 PARCOR 係数 42  
 PART 128  
 PASTA 157  
 PERT 130  
 PM 195  
 パケット 136  
 ペナルティ法 111  
 ピボット要素 95  
 ポアソン分布 139  
 ポアソン過程 136, 139  
 —の分解 141  
 —の合成 139  
 プロジェクトスケジューリ

ング問題 127

## 【R】

ラベリング法 123  
 ライブラリー部 168  
 ランダム誤差 26  
 乱 数 163  
 ラウンドロビン 148  
 連続時間モデル 49, 55  
 レポート作成部 168  
 離散化 55  
 離散時間モデル 49, 55  
 離散事象システム 134  
 路 116  
 論理回路 50  
 類似性 53  
 両側検定 28

## 【S】

サーバ数 135, 136  
 サービス 135  
 サービス過程 147  
 サービス時間  
 134, 135, 136, 148  
 サブシステム 7, 57  
 最大流問題 121  
 最大流=最小切断定理 126  
 最大点 104  
 再帰的狀態 78, 79  
 最急降下法 108  
 再生方程式 196  
 最早結合点時刻 128  
 最小費用流問題 127  
 最小二乗法 29  
 最小二乗推定値 41  
 最短路問題 117  
 最適化 13  
 最適解 88, 103  
 最適化問題 82  
 最適性の判定 95

最適値 103  
 最遅結合点時刻 129  
 制御入力 6  
 制御システム 10  
 正規分布 20  
 正規方程式 30  
 正規条件 110  
 生産計画問題 83  
 静的モデル 48  
 遷移確率 69  
 遷移確率行列 69, 71, 184  
 遷移図 69  
 線形回帰モデル 28  
 線形計画法 83  
 線形計画問題 83  
 —の標準形 89  
 線形近似 54  
 線形モデル 48  
 線形予測 37  
 線形予測係数 40  
 先着順 148  
 節 点 115  
 節点アドミタンス行列 64  
 節点電位ベクトル 62  
 節点変換式 62  
 節点方程式 64  
 —の解法 65  
 節点解析 64  
 切断集合 117  
 説明変数 28  
 接続行列 59  
 シミュレーション 47  
 シミュレーション言語 166  
 シミュレーションクロック  
 167  
 信頼度関数 174  
 信頼性確認試験 178  
 信頼性決定試験 178  
 信頼性工学 174  
 信頼性試験 179  
 真理値表 50  
 指数分布 142, 177

システム  
 —の界面 6  
 —の環境 6  
 —の機能 4  
 —の機能的定義 7  
 —の構造 4  
 —のライフサイクル 12  
 システム合成 12  
 システム開発 12  
 システム解析 13  
 システム計画 12  
 システム建設・製造 12  
 システム思考 11  
 システム滞在時間 156, 157  
 システム運用・評価 12  
 システム容量 148  
 システム要素 7  
 システム状態 167  
 自然システム 3  
 疎行列 65  
 創発的性質 9  
 総余裕時間 130  
 数学モデル 47  
 推定量の分布 30  
 スパース行列 65  
 スラック変数 90  
 数理計画法 83  
 数理計画問題 83  
 スティフな方程式 57  
 ステップ幅 107  
 射影法 111, 113  
 初期分布 71  
 初期故障期間 176  
 処理規範 148  
 周期的マルコフ連鎖 78  
 出力 6

## 【T】

$t$  分布 22

Toeplitz 行列 38  
 多変数ガウス分布 24  
 待機冗長システム 182  
 対立仮説 27  
 単峰 105  
 単位分布 146  
 単体法 89, 91  
 単体表 94, 95  
 単純マルコフ連鎖 67, 183  
 定常アベイラビリティ 192  
 定常過程 37  
 定常マルコフ連鎖 68  
 定常性 137  
 統計量変数 168  
 統計的検定 27  
 等式制約 82, 83  
 凸領域 89  
 —の端点 89  
 到着過程 139, 140, 147  
 到着時間間隔 134, 142, 147  
 チャップマン・コルモゴロフ方程式 151  
 チャップマン・コルモゴロフの式 70  
 直列システム 179  
 超指数分布 145  
 中心極限定理 21  
 抽象システム 9

## 【W】

ワイブル分布 177  
 割込み 149

## 【Y】

Yule-Walker 法 41, 43  
 山登り法 107  
 矢線図 128  
 予防保全 195  
 陽解法 57

浴槽曲線 176  
 容量 121  
 予測誤差分散 40  
 有限マルコフ連鎖 68  
 有意性の検定 33  
 有意水準 28  
 有向グラフ 116  
 優先権 149  
 輸送計画問題 85

## 【Z】

残差 30  
 前進オイラー法 56  
 事後保全 195  
 時変モデル 49  
 時不変モデル 49  
 時間管理部 168  
 時間駆動型 164, 166  
 時系列 67  
 実行可能解 91, 103  
 実行可能基底解 93  
 実行可能領域 87, 103  
 人為変数 100  
 人工システム 3  
 事象管理部 168  
 事象駆動型 163, 166  
 事象リスト 167  
 情報システム 10  
 情報通信ネットワーク 136  
 状態確率ベクトル 71  
 状態遷移 183  
 冗長システム 182  
 重回帰分析 28  
 順序回路 51  
 ~~~~~  
 $\chi^2$  分布 22

— 著 者 略 歴 —

あ だち のり ひこ  
足 立 紀 彦

1964年 京都大学工学部数理工学科卒業  
1966年 京都大学大学院工学研究科修士課程修了(数理工学専攻)  
1972年 工学博士(京都大学)  
1983年 新潟大学教授  
1992年 京都大学教授  
2004年 京都大学名誉教授  
2004年 奈良産業大学教授  
現在に至る

たか はし ゆたか  
高 橋 豊

1975年 京都大学工学部数理工学科卒業  
1980年 京都大学大学院工学研究科修士課程単位取得退学(数理工学専攻)  
1982年 工学博士(京都大学)  
1989年 京都大学助教授  
1996年 奈良先端科学技術大学院大学教授  
1999年 京都大学教授  
現在に至る

さか い ひで あき  
酒 井 英 昭

1972年 京都大学工学部数理工学科卒業  
1975年 徳島大学助手  
1981年 工学博士(京都大学)  
1985年 京都大学助教授  
1997年 京都大学教授  
現在に至る

いい ぐに よう じ  
飯 國 洋 二

1982年 京都大学工学部数理工学科卒業  
1984年 京都大学大学院工学研究科修士課程修了(数理工学専攻)  
1990年 工学博士(京都大学)  
1995年 大阪大学助教授  
2004年 大阪大学教授  
現在に至る

システム工学

Systems Engineering

© 足立・酒井・高橋・飯國 1996

1996年8月30日 初版第1刷発行  
2006年8月20日 初版第3刷発行

検印省略

著 者 足 立 紀 彦  
酒 井 英 昭  
高 橋 豊  
飯 國 洋 二

発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来辰巳  
印刷所 新日本印刷株式会社

発行所 株式会社 コロナ社  
CORONA PUBLISHING CO., LTD.  
Tokyo Japan

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10  
電話 (03) 3941-3131 (代) 振替 00140-8-14844

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 4-339-04065-7

(横尾) (製本: 愛千製本所)

Printed in Japan



無断複写・転載を禁ずる

落丁・乱丁本はお取替えいたします