

目 次

1. 用語, 記号およびシステム理論の基本概念

| | |
|-----------------------------|----|
| 1. 序 | 1 |
| 2. システム解析: 例 | 2 |
| 3. 時間関数 | 5 |
| 時間関数の記号 | 5 |
| 時間関数の値域 | 7 |
| 4. 物理的対象, 抽象的対象 | 10 |
| 端子変数と端子関係 | 10 |
| 方向づけられた対象と方向づけられていない対象 | 11 |
| 抽象的モデルと物理的実現 | 14 |
| 抽象的対象の形式的な定義 | 17 |
| 入出力対空間のパラメトリック化 | 22 |
| 5. 状態という概念について | 22 |
| 6. 状態・入力・出力の定義 | 26 |
| 7. 状態および方向づけされた対象の概念についての付言 | 36 |
| 8. その他の種々の概念 | 45 |
| 連続状態の対象, 離散的状态の対象および有限状態の対象 | 47 |
| 確定的対象, 確率的(統計的)対象 | 47 |
| 単一実験と多重実験, 状態の可観測性 | 48 |
| 非先行的な対象と先行的な対象 | 50 |
| 9. 図による表現, システムの要素 | 53 |
| 抽象的対象の図表現 | 53 |
| 加算器, 乗算器, 伸縮器, 遅延器, 積分器 | 56 |
| 10. 対象の結合 | 59 |
| 直接積 | 60 |
| 初期自由直列結合と積 | 61 |
| 拘束のある直列結合および直列積 | 64 |
| N 個の対象の結合 | 66 |

| | |
|--------------------------|----|
| フローグラフとシグナルステートグラフ | 72 |
| システム (形式的定義) | 73 |
| 参考文献 | 75 |

2. 状態および状態方程式に関する諸概念・諸性質

| | |
|------------------------------|-----|
| 1. 序 | 76 |
| 用語および記号の要約 | 76 |
| 2. 状態等価性 | 80 |
| 3. 状態および状態方程式に関する基本的性質 | 87 |
| 4. 二つ以上のシステムの等価状態 | 95 |
| 5. システム等価性およびその関連諸概念 | 101 |
| 弱等価性 (単一実験のもとにおける等価性) | 102 |
| 6. 結合によって構成されたシステムの状態 | 109 |
| 確定性定理 | 112 |
| 確定的なシステムの特別なタイプ | 114 |
| 7. システムの等価性のその他の性質 | 120 |
| 結合の等価性 | 120 |
| 8. 零状態, 基底状態, 平衡状態 | 123 |
| 零状態 | 123 |
| 基底状態 | 124 |
| 平衡状態 | 126 |
| 9. 零状態等価性, 零入力等価性 | 127 |
| 10. 逆システムおよび相反システム | 130 |
| 逆システムのその他の性質 | 130 |
| 参考文献 | 137 |

3. 線形性と時間不変性

| | |
|----------------|-----|
| 1. 序 | 139 |
| 用語と記号の要約 | 139 |
| 2. 時間不変性 | 141 |
| 変時演算子 | 142 |

| | |
|--|-----|
| 零状態と零入力の時間不変性 | 143 |
| 時間的不変性 | 148 |
| 3. 線形性の基本性質：加法性と斉次性 | 151 |
| 4. 零状態と零入力線形性 | 158 |
| 零状態線形性 | 158 |
| 初期状態に関する線形性 | 159 |
| 零入力線形性 | 163 |
| 線形性の定義 | 165 |
| 5. 線形性とそれが意味するもの | 165 |
| 分解特性 | 165 |
| 線形性の別の定義 | 166 |
| 等価状態と等価システムに関することから | 167 |
| 線形システムの特殊な性質 | 168 |
| 閉鎖理論 | 169 |
| 6. 線形性の意味の補足 | 174 |
| 入出力状態方程式の表示 | 174 |
| 零状態時間不変性および等価性 | 176 |
| 和と積のインパルス応答 | 177 |
| 伝達関数 | 178 |
| 妥当なシステム，厳密な意味で妥当なシステム，不当なシステム | 181 |
| 零入力応答の性質 | 182 |
| 基底関数 | 184 |
| 既約形におけるシステム | 187 |
| 7. 基底関数と状態方程式 | 189 |
| 基底関数の派生的な性質 | 189 |
| $\mathbf{x}(t_0)$ と $\mathbf{x}(\tau)$ の関係 | 191 |
| 状態遷移行列とその性質 | 192 |
| 拡張遷移行列 | 195 |
| 微分形式による状態方程式 | 198 |
| 逆時間における入出力状態方程式の有効性 | 202 |
| 8. 微分形システムと時間離散形システム | 205 |
| 線形微分形システム | 205 |
| 微分演算子 | 209 |
| 微分方程式 | 209 |
| 線形微分形システムの定義 | 211 |
| 時間離散形システム | 213 |

| | |
|--------------------------|-----|
| 9. 線形システムの二つの基本的特性 | 216 |
| 弱い等価性と等価性との間の関係 | 216 |
| 参考文献 | 222 |

4. 定係数微分形システムの状態ベクトルと状態方程式

| | |
|--|-----|
| 1. 序 | 223 |
| 2. 入力・出力状態関係式の性質 | 225 |
| $m = n$ の場合の \mathbf{x} と $\dot{\mathbf{x}}$ の間の関係 | 228 |
| \mathbf{x} と $\dot{\mathbf{x}}$ の間の関係 | 231 |
| 3. 逆微分演算子形のシステム | 234 |
| 入力・出力状態関係式 | 234 |
| 任意の t_0 に対する一般解の表現 | 238 |
| 状態方程式 | 241 |
| \Re のいくつかの性質 | 244 |
| 特別な場合: 積分器 | 245 |
| 4. 微分演算子形のシステム | 247 |
| 一般解 | 247 |
| 入力・出力状態関係式 | 249 |
| 状態方程式の算出 | 251 |
| \mathbf{x} が状態ベクトルであることの直接の証明 | 253 |
| 微分形のシステムと逆微分形のシステムの間関係 | 256 |
| 5. 一般の微分システムの状態ベクトルおよび状態方程式 | 260 |
| 状態ベクトルと状態方程式 | 262 |
| 一般解 | 264 |
| 状態ベクトルの表現 | 265 |
| 状態方程式 | 265 |
| 入力・出力状態関係式 | 267 |
| \Re が仮性の場合 | 268 |
| ハイブリッド状態の方程式 | 271 |
| 6. 加算器・係数器・積分器・微分器の相互接続に対する状態ベクトルおよび状態方程式 | 276 |
| 状態ベクトルの結び付け | 276 |
| 状態方程式 | 278 |
| 状態方程式の一般形 | 282 |
| RLC 回路網の状態方程式 | 286 |

| | |
|--|-----|
| 7. 等価性に関する関係式と零入力応答の性質 | 289 |
| 基本定理 | 290 |
| 伝達関数の零入力応答の間の関係 | 291 |
| 基礎補助定理 | 293 |
| $z[s; \mathbf{x}(0-)]$ と $H(s)$ の間の関係 | 299 |
| \mathfrak{R} に等価なシステムの決定 | 301 |
| 微積分システムと微分システムの等価性 | 307 |
| 8. 定係数システムのさらに詳しい等価性 | 308 |
| \mathfrak{R} と \mathfrak{R} の間の等価性の判定性 | 309 |
| 9. 実現法による状態ベクトルと状態方程式の決定 | 318 |
| 逆微分形のシステム | 319 |
| 一般形のシステム | 321 |
| もう一つの実現 | 323 |
| 仮性な \mathfrak{R} の場合 | 326 |
| 部分分数展開法 | 327 |
| 単一の零点の場合 | 328 |
| 多重零点の場合 | 330 |
| 参 考 文 献 | 334 |

5. 線形定係数微分形システム

| | |
|----------------------------------|-----|
| 1. 序 | 335 |
| 2. 状態方程式で表わされた線形定係数システム | 336 |
| 零入力応答 (自由運動) | 336 |
| $\exp(At)$ の諸性質 | 340 |
| 外力に対する応答 | 340 |
| 3. $\exp(At)$ の計算 | 343 |
| 行列の関数の特別な場合としての $\exp(At)$ | 343 |
| ラプラス変換からみた $\exp(At)$ | 344 |
| 4. 線形定係数システムのモード (相異なる固有値) | 356 |
| 固有値・固有ベクトル・基底・反基底・スペクトル展開 | 356 |
| 自由運動のモードに基づいた説明 | 361 |
| 自由運動 (複素固有値) | 364 |
| 強制運動 | 367 |
| 共 鳴 | 369 |
| 単純一次変換における備考 | 370 |

| | |
|--------------------------------|-----|
| 5. 線形定係数システムのモード (一般の場合) | 371 |
| 6. 微分方程式システム | 374 |
| 入力・出力状態関係式 | 374 |
| 消去法 | 375 |
| 消去法の行列による説明 | 379 |
| 7. 同次系の解 | 381 |
| 参考文献 | 385 |

6. 線形変係数微分形システム

| | |
|---|-----|
| 1. 序 | 386 |
| 2. 状態方程式で表わされた線形変係数システム | 386 |
| 零入力応答 (自由運動) | 387 |
| $\Phi(t, t_0)$ の諸性質 | 389 |
| 強制入力に対する応答 | 391 |
| 随伴システム | 393 |
| 3. $L(p, t)y = u$ で表わされるシステムの随伴システム | 400 |
| 基底関数 | 405 |
| 随伴システム | 406 |
| 4. $Lx = Mu$ で表わされるシステム | 408 |
| 5. 縦続接続 | 412 |
| 6. 高次微分方程式のシステム | 414 |
| 7. 周期的に変化するシステム | 419 |
| 参考文献 | 421 |

7. 線形微分形システムの安定性

| | |
|-----------------------------|-----|
| 1. 序 | 423 |
| 2. 状態の自由運動に基づいた安定性の定義 | 424 |
| 3. 安定なシステムの規定 | 427 |
| 4. 特別の場合 | 429 |
| 線形定係数システム | 429 |
| $Ly = u$ で表わされるシステム | 433 |
| 5. 安定性に対するいくつかの十分条件 | 435 |

| | |
|--------------------------|-----|
| 6. 可約なシステム | 438 |
| 7. 入出力に関して定義された安定性 | 441 |
| 参考文献 | 450 |

8. 非微分性線形システムのインパルス応答

| | |
|------------------|-----|
| 1. 序 | 451 |
| 2. 縦続なシステム | 452 |
| 3. 随伴システム | 454 |
| 4. 零状態安定性 | 459 |
| 参考文献 | 464 |

9. 伝達関数とその性質

| | |
|--|-----|
| 1. 序 | 465 |
| 2. 定義と基本的関係 | 466 |
| 3. 伝達関数行列の実現 | 469 |
| 4. 安定な伝達関数 | 474 |
| 定義と性質 | 475 |
| Liénard と Chipart の安定性判定法 | 481 |
| 設計における考慮 | 483 |
| 5. Paley-Wiener の判定条件 | 484 |
| 6. $T(s)$ の実数部と虚数部の関係 | 493 |
| 7. 最小位相の伝達関数 | 499 |
| 8. 不確定性原理 | 502 |
| 9. 単位インパルス応答の分散 | 505 |
| 10. モーメント | 506 |
| 11. 群遅延 | 508 |
| 12. 反響波対 | 512 |
| トランスパースフィルタ | 514 |
| 13. $H(s)$ と $h(t)$ の漸近的性質 | 516 |
| t が小さいときの $h(t)$ の性質 | 516 |
| $t \rightarrow \infty$ のときの漸近的性質 | 518 |

| | |
|--------------------|-----|
| 14. 周期入力に対する定常応答 | 520 |
| 15. 信号線図 | 524 |
| 節点消去点 | 526 |
| 信号線図の利得 | 529 |
| Δ の計算 | 533 |
| N_{1k} の計算 | 535 |
| 16. ナイキストの判定法 | 537 |
| 17. 多重帰還路のシステムの安定性 | 541 |
| 参考文献 | 549 |

10. 離散時刻システム

| | |
|------------------------------|-----|
| 1. 序 | 551 |
| 2. 状態方程式によるシステムの表現 | 552 |
| 微分方程式システムを標本化して得られる離散システムの表現 | 552 |
| 安定性の問題 | 554 |
| 3. 離散システムに対する変換の理論 | 556 |
| 安定性の問題 | 566 |
| 参考文献 | 569 |

11. 可制御性と可観測性

| | |
|-----------------------------|-----|
| 1. 序 | 570 |
| 2. 1 入力システムのインパルスおよびダブレット応答 | 571 |
| 3. 可制御性 | 573 |
| 4. 可観測性 | 577 |
| 5. 状態空間 S の正規分解 | 581 |
| 6. 可制御性の別の表現 | 586 |
| 7. 線形時変系の可制御性 | 590 |
| 参考文献 | 593 |

付録 A. デルタ関数と超関数

| | |
|------|-----|
| 1. 序 | 594 |
|------|-----|

| | |
|-----------|-----|
| 2. デルタ関数 | 594 |
| 3. 試験関数 | 598 |
| 4. 超関数の定数 | 602 |
| 5. 超関数の演算 | 606 |
| 6. その他の性質 | 609 |
| 7. 応用 | 610 |
| 参考文献 | 615 |

付録 B. ラプラス変換と z 変換

| | |
|-------------------|-----|
| 1. 序 | 617 |
| 2. ラプラス変換の基本概念と定義 | 617 |
| 3. ラプラス変換の基本的性質 | 620 |
| ラプラス逆変換の公式 | 625 |
| 4. z 変換 | 626 |
| z 変換の性質 | 627 |
| 参考文献 | 629 |

付録 C. ベクトルと線形変換

| | |
|--------------------------------|-----|
| 1. 序 | 631 |
| 2. 線形ベクトル空間 | 632 |
| 3. 一次従属 | 633 |
| 4. 基底 | 635 |
| 5. スカラー積 | 638 |
| 6. シュミットの直交化法 | 646 |
| 7. 直交射影 | 642 |
| 8. 共役な基底 | 644 |
| 9. 線形変換 | 646 |
| 10. \mathbb{C}^n における線形変換の表現 | 648 |
| 11. 線形変換の行列による表現と基底の変換 | 650 |
| 12. 直和と射影 | 652 |

| | |
|--------------------------|-----|
| 13. 不変部分空間 | 657 |
| 14. 随伴変換 | 658 |
| 15. 連立一次方程式 | 660 |
| 16. ノルム | 665 |
| \mathbb{C}^n におけるノルムの例 | 665 |
| 線形変換のノルム | 666 |
| 17. 擬逆行列 | 668 |
| 擬逆変換の定義 | 668 |
| 擬逆変換の性質 | 670 |
| A^+ の計算 | 673 |
| 18. 単純線形変換 | 675 |
| 19. 正規線形変換 | 679 |
| 20. 随伴変換について | 684 |
| 参考文献 | 685 |

付録 D. 行列の関数

| | |
|---------------------|-----|
| 1. 序 | 687 |
| 2. 最小多項式と固有値の多重度 | 687 |
| 3. 固有値の指数 | 690 |
| 4. 行列の関数の定義 | 693 |
| 5. 線形変換 A の幾何学的構造 | 694 |
| 6. 基本公式 | 699 |
| 7. $f(A)$ の別の表現 | 702 |
| 8. $f(A)$ の実際的な計算法 | 703 |
| 内そう法 | 704 |
| 参考文献 | 709 |
| 記号表 | 711 |
| 索引 | 717 |

