古典制御論

工学博士 吉川 恒夫 著

コロナ社

修正版まえがき

本書の出版から2年半が経過したが，この間の講義の経験などからぜひ改善したい点がいくつか出てきた．そこで今回，これまでに見つかった校正ミスの訂正に加えて，本書の内容をより分かりやすくするために以下のような修正を行った．これらの内主要なものはつぎの(1)〜(6)である．

(1) ラプラス変換の基本的性質 P11 の表 2.2 への追加とその説明，および関連する 演習問題 2.10 と略解の追加 (pp.24, 28, 44, 258)

(2) 位相進み要素，位相遅れ要素の表現式の変更とその説明 (pp.226-227, 231-232)

(3) サーボ系の設計に関する例 8.1, 8.2, 8.3, 8.4 の説明，数値，図などの変更 (pp.224-226, 228-230, 232-234, 234-235)

(4) ブロック線図の描き方に関する説明と図 3.29(a) の追加，および関連する演習問題 3.6 とその略解の修正 (pp.77-79, 90, 259)

(5) 安定性の定義の説明変更 (pp.136)

(6) 力学系，電気系，および熱系の例題における特性導出法の説明追加 (pp.46, 52-53, 54, 58-59, 67)

これら以外にも，以下のような修正を行っている．

(7) ラプラス変換の基本的性質 P1 および P5 の説明変更 (pp.23, 25)

(8) デシベル値計算に関する表 4.1 の備考の修正とそれに伴う本文の修正 (pp.97-98)

(9) ボード線図におけるゲイン余裕と位相余裕の説明の変更 (pp.176)

(10) 図 3.1 の修正，表 4.3, 6.1 の説明文修正と追加 (pp.46, 125-126, 197)

(11) 本文説明のこまかな変更，脚注追加，および索引修正 (pp.12, 23, 24, 25, 31, 49, 53, 54, 57, 59, 60-61, 65, 71-72, 86, 87, 92, 97, 103, 120, 133, 140, 196, 202, 204, 222, 240, 241, 274-276)

(12) 演習問題 2.9, 4.1, 4.2, 8.1 の修正，および演習問題 2.9, 3.5, 3.7, 4.1, 4.2, 7.3 の略解の修正 (pp.44, 132-133, 253, 258-262, 271)

なお校正ミスに関しては，京都大学助教授横小路泰義氏から多くのご指摘をいただいた．記して感謝の意を表す．

2006 年 11 月　　著者しるす

まえがき

各種の工学システムを制御するための理論であるいわゆる制御理論のうちで，伝達関数という周波数領域での概念に基づいて体系化されたものを古典制御理論と呼ぶ．本書の目的はこの古典制御理論の基礎をわかりやすく体系的に講述することである．

まず制御理論とはどのようなものであるかについて簡単に述べよう．人類は文明の発達とともに種々の装置を作ってきた．身の回りを見渡しても，飛行機，鉄道，自動車，ロケット，洗濯機，冷蔵庫，炊飯器，テープレコーダ，複写機，自動化製造ライン，ロボット，化学プラント，など枚挙にいとまがない．これらにはなんらかの制御機能がついており，それなしでは装置としての機能を十分に発揮できないという場合がほとんどである．このような制御機能がはっきりとした形で装備され，装置がその機能を発揮できるためには制御系としての十分な検討が必要であることが一般に認識されるようになったのは，18 世紀後半の産業革命期に開発された蒸気機関の調速器においてであると考えられる．これを契機として，サーボ機構などの制御系の研究が盛んとなり，その解析や設計のための方法論の集積がしだいに制御理論（ないし制御工学）として整備されてきた．

制御理論はおおまかに，古典制御理論と現代制御理論に分けられる．古典制御理論は伝達関数という周波数領域におけるシステムの表現手法に基づいており，1870 年頃から 1950 年頃までの間に一応の体系化が行われたものである．他方，現代制御理論は，状態方程式という時間領域におけるシステムの表現手法に基づいており，1960 年頃から新たに展開されてきた制御系設計の方法論である．現代制御理論は数学的色彩が強く，実用化が難しいと言われてきたが，近年のディジタル計算機技術の発展にともなって，その実用的価値が認められるようになった．しかしながら，古典制御理論は，現在

でも多くの制御系の解析や設計において用いられており，実用面において重要な役割を果たしている．また，現代制御理論を用いる場合でも，周波数領域における制御特性の検討において古典制御理論の種々の概念が役立っている．

冒頭にも述べたように，本書の目的はこのような古典制御理論の最も基礎となる事項を厳選して，初心者にわかりやすく，また体系的に講述することである．そのために，重要な概念や結果を取り上げる場合には，その物理的および直感的な意味あいの説明，ならびにそのような結果がどうして成立するのかという根拠の説明をていねいに行うとともに，できる限り数値例を挙げて，それらの理解が容易となるようにつとめた．また各章，各節で取り上げた内容の相互関係についてもできる限り説明を加えることにした．これらによって古典制御理論体系の論理的な透明性をなるべく保つように配慮したつもりである．さらに他の数学などの参考書を見なくても読み進めるように，本書で必要となる数学的な事項の要点を本書に含めるようにした．

さらに以下のような私なりの工夫も加えている．実は学生時代以来，古典制御理論を学習した時に，いくつか混乱した点があったことを記憶している．またその後講義をするようになってからも気になる点や説明が明快でないと感じる点がいくつかあった．本書では，これらの点について以下のようにして，わかりやすくなるように配慮した．

（1）零点あり2次要素を基本的要素の一つとして取り上げた．これによって，2次系の取り扱いに一貫性が得られるとともに，高次の系が基本的要素の組み合わせで表現できることをより明確に表現できるようになった．

（2）周波数伝達特性の位相の多価性について，簡明な説明を行った．

（3）位相進み，位相遅れ補償による制御系の設計が容易に行えるように，位相進み要素および位相遅れ要素のわかりよいパラメータ表現を採用した．

（4）根軌跡法において，一巡伝達関数の形と根軌跡の形状の関係をより明確に説明し，根軌跡の形状分類をより体系的に理解できるようにした．

（5）むだ時間要素を含む制御系について，安定性の定義やナイキストの安

定判別法がどこまで有効なのかを理解しやすくするために，むだ時間要素は例外的に扱える要素であるとして，話の主な流れとは少し区別して記述することにした．

(6) これまでのほとんどの教科書ではラウスの安定判別法およびフルビッツの安定判別法の証明がまったく省略されていて，なぜこの方法が得られるのか想像もつかなかった．本書では最近発表されたより簡単な証明の成果をもとに，わかりやすい証明を加えた．またラウスの安定判別法においてラウス表の第1列の要素が0となる場合の扱いが不明確であった．これを明確にしその根拠も与えた．さらにその記述法もわかりよいように工夫を加えた．

(7) ボードの定理の証明をわかりやすい形で与えた．

これら以外にもこまかな点になるが

(8) 単位インパルス関数の物理的意味と，そのラプラス変換における扱いをていねいに説明した．これによってラプラス変換における初期値の取扱いや制御系のインパルス応答の理解が容易になると考える．

(9) 角度を表す変数の単位がラジアン (rad) なのか度 (deg) なのかを明確にするために，本書ではラジアンを基本とし，ラジアン表示の変数 ϕ に対応する度表示の変数には下付き添字 deg を付けて ϕ_{deg} とすることにした．

(10) 制御系設計のための様々な評価指標を一つの章にまとめるなど，内容の主な流れができるだけ整理された形になるように配慮した．

なお，これらの事項の多くは本書で初めて行われたというものではなく他の教科書にも散見されるが，本書ではそれらをよりわかりやすくなるように改善したつもりである．筆者は，これらの工夫によって読者がより容易に古典制御理論を一貫した体系として理解できるようになったのではないかと考えている．

本書は，著者が京都大学工学部で主として機械系の学部3年の学生を対象として講義してきた内容をまとめたものであり，大学学部の第3学年，第4学年の学生用の教科書としての性格をもっている．しかし，本書で取り上げた事項はすべてていねいに説明してあるので，古典制御理論を応用しよ

うとする現場の技術者が独習したり，復習したりするための参考書としても，適していると考えている．なお，第2.5節，第4.2.2項，第5.2.2項，第5.3.2項および第5.3.3項は付録として扱ってもよい内容であり，初めて制御工学を学習される読者は省略して先に進まれても差し支えない．また本書は，著者らがやはり昭晃堂から出版した「現代制御論」（吉川恒夫，井村順一著，1994）の前段階の内容であることを意識してまとめている．この本を終えた読者の方々には，次のステップとして「現代制御論」に進まれることをお勧めする．

出版にあたっては多くの方々にお世話になった．東京工業大学・井村順一助教授ならびに神戸大学・大須賀公一教授には原稿を読んでいただき，多くの貴重なコメントを寄せていただいた．京都大学・片山徹教授にはラウスの安定判別法の証明に関する文献27)をご教示いただいた．研究室の大学院学生・菊植亮君（現在名古屋工業大学助手）および渡辺忠幸君には，図面の作成などでご協力いただいた．また講義を受けた学生諸君には，まちがいの多い講義プリントでずいぶんご迷惑をおかけしたことと思う．この場を借りて心からお礼を申し上げる．

2004年1月

著　者

本書を発行していただいていた昭晃堂が2014年6月に解散したことに伴い，この度，コロナ社より継続出版していただくことになった．昭晃堂において2004年3月の1刷発行から11刷までに至ったが，引き続き多くの方にご拝読いただき役に立つならば，著者としてこの上ない喜びである．

2014年8月

著　者

目　　次

1　古典制御論序説

1.1　制御の概念と適用例 1
1.2　制御工学とは 4
1.3　制御系の基本構成 5
1.4　本書の内容 8
演習問題 9

2　ラプラス変換

2.1　ラプラス変換の意義 10
2.2　ラプラス変換の定義 11
2.2.1　複素数と複素指数関数 ... 11
2.2.2　単位インパルス関数 14
2.2.3　ラプラス変換の定義，公式，性質 17
2.3　逆ラプラス変換 28
2.4　微分方程式の解法への応用 33
2.5*†ラプラス変換の物理的意味 38
演習問題 43

3　伝達関数

3.1　システム特性の伝達関数表現 45
3.2　基本的な要素の特性と伝達関数 51

† ＊印をつけた節および項は，初学者が学習する際には省略して先に進んでも差し支えない．

3.2.1 1次遅れ要素..... 52
3.2.2 積分要素..... 57
3.2.3 2次遅れ要素..... 58
3.2.4 零点あり2次要素..... 65
3.2.5 比例要素..... 69
3.2.6 微分要素..... 70
3.2.7 むだ時間要素..... 71
3.3 ブロック線図..... 74
3.4 高次系の特性..... 81
演習問題..... 88

4 周波数応答特性

4.1 周波数応答と周波数伝達関数..... 91
4.2 周波数特性の表現法..... 95
4.2.1 ボード線図..... 95
4.2.2* ボードの定理の証明と補足115
4.2.3 ベクトル軌跡..... 118
4.2.4 ゲイン位相線図..... 124
4.3 閉ループ系の周波数特性..... 127
4.3.1 M-α 線図..... 128
4.3.2 ニコルス線図..... 130
演習問題..... 132

5 安定性

5.1 安定性の定義..... 135
5.2 代数的安定判別法..... 140
5.2.1 ラウスの安定判別法..... 142
5.2.2* ラウスの安定判別法の証明と補足..... 146
5.2.3 フルビッツの安定判別法. 152
5.2.4 極零相殺と安定性..... 157
5.3 フィードバック制御系の安定判別法..... 159
5.3.1 ナイキストの安定判別法. 160
5.3.2* ナイキストの安定定理の証明..... 168
5.3.3* むだ時間要素を含むシステムへの適用..... 171
5.4 フィードバック制御系の安定度評価..... 172

演習問題 178

6　根軌跡法

6.1 根軌跡の概念と定式化 180
6.2 ゲイン条件と位相条件 184
6.3 根軌跡の性質 186
6.4 根軌跡の形状分類 195
演習問題 198

7　制御系の評価指標

7.1 過渡特性 199
7.1.1 時間領域の指標 200
7.1.2 周波数領域の指標 202
7.1.3 指標間の関係 204
7.1.4 代表極 208
7.2 定常特性 210
演習問題 219

8　制御系の設計

8.1 制御系の分類 221
8.2 サーボ系 223
8.2.1 ゲイン調整 224
8.2.2 位相進み補償 226
8.2.3 位相遅れ補償 230
8.2.4 位相進み遅れ補償 234
8.2.5 フィードバック補償 235
8.3 プロセス制御系 237
8.3.1 P 制御 238
8.3.2 PI 制御 239
8.3.3 PD 制御 239
8.3.4 PID 制御 239
8.3.5 PID ゲインの選定 240
8.4 高度化設計法 242

8.4.1 2 自由度制御系 242
8.4.2 感度関数と相補感度関数 . 246
8.4.3 I+PD 制御 250
演 習 問 題 252

参 考 文 献 255
演 習 問 題 略 解 257
索 引 274

1　古典制御論序説

本章では自動的な制御機能をもつ機械システムの例を3つ挙げ，それらを通じて，制御とは何か，制御工学とは何かについて説明する．ついで，制御機能をもつシステムの基本的構成であるフィードバック制御系の働きについて説明する．最後に次章以降の内容の概略について述べる．

1.1　制御の概念と適用例

我々の普段の生活をちょっと振り返ってみると，人類は自分たちの日常生活をより快適で豊かなものとするために，いろいろな機械装置やシステムを造り出してきた．そしてそれらがあまり人間の手を煩わすことなく自動的に機能するための工夫をしてきた．家庭内では，冷暖房機器，冷蔵庫，炊飯器，洗濯機，水洗トイレなど，娯楽分野では，テレビ，ビデオ，カメラ，CDプレーヤ，ゲーム機など，社会分野では，自動車，列車，飛行機，電力/水道/ガス/通信/交通システムなど，生産分野では，自動化製造ライン，工作機械，産業用ロボット，化学プラントなど，さらには宇宙空間での人工衛星，ロケットなど，実にたくさんの例が思い浮かぶ．

我々が，これらの装置の操作にあまり煩わされることなくその恩恵を享受できているのは，これらの装置に何らかの自動的な制御機能が付加されているためであると言える．たとえば，部屋の暖房装置は，希望の室温を設定ダイヤルなどにより入力しておけば，常にその希望室温に近い温度になる

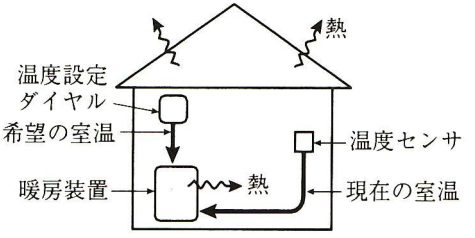

図 1.1　部屋の暖房装置

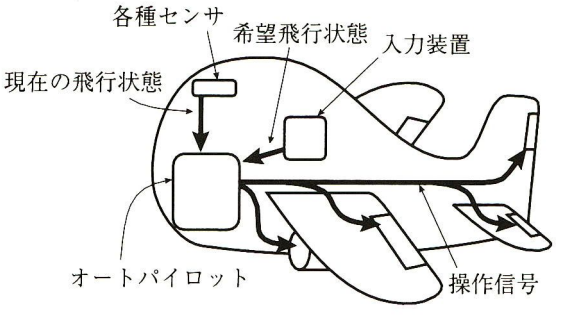

図 1.2　飛行機のオートパイロット

ように制御機能が働く (図 1.1 参照)．この制御機能は，多くの暖房装置においては，温度センサによって測定された現在の室温が希望の温度よりも低ければ加熱器のスイッチが入れられ，希望温度よりも高くなればスイッチが切られることによって果たされる．さらにこの機能は，室外温度の変動，扉や窓の開閉，在室者の人数の変動などの不確定変動要因（外乱と呼ばれる）が存在しても，それらに打ち勝って室温を希望通りに保つように働く．別の例として，飛行機の場合を考えよう．飛行機ではオートパイロットという制御装置が装備されており，一定の高度で一定の方向に一定の速度で巡航するようにという指令を入力すると，時々刻々現在の飛行状態を計測し，希望の飛行状態からの誤差を算出し，その誤差を減少させるように，エンジンへの燃料供給量や補助翼を操作するという機能が果たされている (図 1.2 参照)．

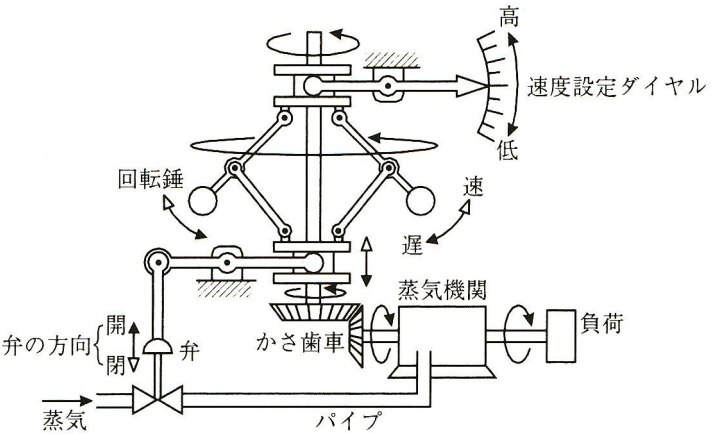

図 1.3　蒸気機関の回転速度制御

さらにこの機能によって，気候条件の変動，乗客数の変化などの外乱の影響も抑制される．

さらにもう一つの例として，ワット (J. Watt) によって 1788 年に発明された蒸気機関の遠心調速器を挙げよう．これは，自動制御の考え方が明確に打ち出され，広く普及するきっかけになった装置であるといわれており，制御工学において記念碑的意義を持つものである．産業革命期に新たな動力源として現れた蒸気機関は負荷の変動によってその回転速度が変わりやすいという問題点を抱えていた．この問題点を解決して回転速度を一定に保つために開発された制御装置の一つがワットによる遠心調速器である．

図 1.3 の概念図によって遠心調速器の働きを説明しよう．エネルギーの主な流れは，ボイラーなどから得られる蒸気をパイプを通じて蒸気機関に供給し，蒸気のエネルギーを回転運動に変換し，負荷に何らかの作業を行わせる（たとえば臼を回して穀物を粉にする）という部分に存在する．それ以外は制御機能を付加するための部分である．負荷の回転速度を望ましい速度に保つために，まず速度設定ダイヤルを希望の速度に設定し，固定する．運転中に蒸気機関の回転速度がこの希望速度よりも速くなった場合には，回転

錘に水平方向に加わる遠心力が大きくなって，回転錘が通常の位置よりも白抜き矢印の方向に移動する．すると回転錘が取り付けられているリンク機構が下部のスライド板を上方に持ち上げ，蒸気供給パイプの弁が閉じる方向に動き，供給蒸気量が減少し，その結果蒸気機関の回転速度が遅くなる方向に修正される．逆に，蒸気機関の回転速度が希望速度よりも遅くなった場合には，供給蒸気量が増大し回転速度が速くなる方向に修正される．以上の原理によって，たとえ負荷変動などの外乱が存在しても回転速度を一定に保つ機能が実現されている．なお，電子計算機などの技術がなかった 18 世紀に開発されたこのシステムでは，速度検出，希望速度との比較，および速度修正動作が，純機械的な装置によって自動的に行われるように工夫されている点に注意されたい．現在であれば，このような制御機能の実現のためには，回転速度を計測するセンサ，蒸気供給量を調節する弁の開閉を行うための電動モータ，および計測された回転速度とあらかじめ与えられた希望速度をもとに電動モータへの指令電圧を計算する電子計算機（マイクロプロセッサ）などが使われるかも知れない．その主な理由は電子計算機の導入によって，制御機能の高度化，制御装置の小型軽量化，制御方式の変更，運転履歴の保存，などが容易になるためである．

1.2　制御工学とは

上の三つの例からもわかるように，種々の機械装置の制御機能は，その具体的な形状や機能の詳細はそれぞれ異なるものの，基本的には同じような考え方に基づいている．このことを明確にし，本書の目的を具体的に述べるために，まず制御にかかわるいくつかの基本概念を定義しよう．

制御 (control) とは一般的には，ある対象物に何らかの働きかけをして，それを自分の思う通りに動かすことである．人が自動車を運転する場合を考えると，ハンドル，アクセル，およびブレーキを操作して自分の思った通

りに動かすのであるから，これは人が自動車を制御していることになる†．この場合は人間が直接的に手をくだして制御しているので特に手動制御と呼ばれる．これに対して先に述べた暖房装置，飛行機，蒸気機関などの場合には，もともと人間が行っていた制御のための操作を機械に肩代わりさせて自動的に行わせるようにしており，このような制御は自動制御 (automatic control) と呼ばれる．また自動制御機能を持つシステムは自動制御系（または自動制御システム，automatic control system）と呼ばれる．

制御工学または制御理論とは，このような種々の機械装置の制御に関する技術的成果を理論的に体系化したものを意味し，制御対象や自動制御系の，数学的表現，特性解析，および設計のための方法論を提供するものである．

1.3　制御系の基本構成

先に挙げた図 1.3 の蒸気機関の回転速度制御系を，それを構成する要素（または部分システム）とそれらの間の信号（ないし情報）の流れという観点から捕らえてより簡潔に表現すると，図 1.4 が得られる．この図は構成要素が，蒸気機関（負荷を含む），弁，調速器の三つであると考えることにすれば，それらの間では，蒸気機関の回転速度が調速器に伝えられ，調速器は目標回転速度と現在の実際の回転速度の情報から弁の開度を決定して弁に

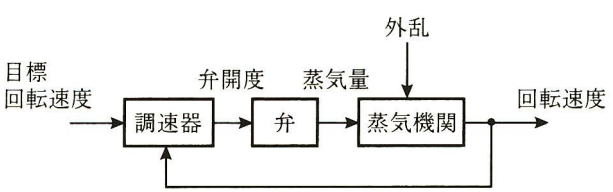

図 1.4　図 1.2 の制御系の概念図

† なお，エンジンの燃料噴射制御，ブレーキ制御，サスペンション制御など，下位の個々の機能にはそれぞれ多くの自動制御系が組み込まれている．したがって自動車全体の制御系を詳しく見ると手動制御と自動制御が混在していることになる．このことは多くの高度な機械システムにおいて見られる．

索　引

（五十音順）

I 制御　239
I+PD 制御系　250
安定限界　136
安定根　140, 147
安定性　135, 199
安定度　228
安定判別法　140, 159
安定余裕　175

位相遅れ補償　230
位相遅れ要素　230
位相角　94
位相曲線　95
位相交叉角周波数　173
位相交点　173
位相条件　184
位相進み遅れ補償　234
位相進み補償　226
位相進み要素　226
位相余裕　174, 202
1 型の系　212
1 次遅れ系　52
1 次遅れ要素　52, 95, 119
一巡伝達関数　159
インディシャル応答　50
インパルス応答　49, 56
インパルス関数　20, 36

液位系　53
M-α 線図　128

l 型の系　211
遠心調速器　3

オイラーの公式　12
オーバーシュート　200
折れ線近似　99
折点角周波数　100

解析　8
外乱　7, 216
開ループ制御　7
開ループ伝達関数　159
角周波数　95
荷重関数　50
過渡応答法　240
過渡特性　199
感度関数　247
簡便な安定判定法　167

機械系　57
逆応答　69, 112
逆ラプラス変換　10
共振周波数　203
共役複素数　13
極　135
極軌跡　119
極の配置領域　202
極零相殺　157, 167, 230
近似微分要素　71

加え合わせ点　74

系の型　215
ゲイン　52, 94
ゲイン位相線図　124
ゲイン曲線　95
ゲイン交叉角周波数　174, 202
ゲイン交点　174
ゲイン条件　184
ゲイン調整　224
ゲイン余裕　174, 202
結合系　108, 122
限界感度法　240
減衰係数　61, 183, 200
減衰振動　61
減衰比　200, 241

合成積　25
根軌跡　181, 225
根軌跡の形状分類　195

サーボ系　221
最終値定理　24, 27, 211
最小位相系　112, 115

ジーグラ・ニコルス　240
時間遅れ要素　71
時間領域　199
次数　48

指数型関数　20
指数関数　19
システムの次数　48
自然角周波数　61, 183, 200
時定数　52
自動制御　5
自動制御系　5
支配極　208
収束座標　20, 29
周波数応答　92
周波数応答特性　127
周波数伝達関数　94
周波数特性　45
周波数領域　38, 199
手動制御　5
蒸気機関　3
初期値定理　26
2 振動性 2 次遅れ系　201

ステップ応答　50, 225

制御　4
制御工学　5
制御装置　6, 223
制御対象　6, 223
制御量　6
制御理論　5
整定時間　200
積分時間　238
積分制御　239
積分性 2 次要素　64
積分要素　57, 103, 119
設計　8
絶対可積分性　172
漸近線　187
線形化　54

操作量　6
相補感度関数　247
速応性　199

帯域幅　202
耐外乱性　244
代数方程式　10
対数目盛　96
耐特性変動性　244
代表極　208, 225
ダイポール　230
たたみ込み積分　25
立ち上がり時間　200
単位インパルス関数　14, 20
単位ステップ関数　16

遅延時間　200
中立根　146
超関数　14
直流サーボモータ　75
直列結合　79, 108
直列補償法　223
直結フィードバック制御　242

追従制御系　222

D 制御　239
定常位置偏差　211
定常加速度偏差　211
定常速度偏差　211
定常特性　210
定常偏差　210
定値制御系　222
デカード　96, 113
デシベル　95
デルタ関数　14
電気系　52
伝達関数　45, 47

等 α 曲線　129
等 M 曲線　128
導関数　16
倒立振子　89
特性根　181
特性方程式　140

ナイキスト線図　160, 173
ナイキストの安定定理　161
ナイキストの安定判別法　159

2 型の系　213
ニコルス線図　131
2 次遅れ要素　58, 104
2 自由度制御系　242

熱系　52
粘性摩擦係数　46

パデー近似　73, 133
ばね定数　46
バンド幅　202

PI 制御 239
PID 制御 237
PID 調節計 238
BIBO 安定 137
PI+D 制御系 251
ピーク値 202
P 制御 238
PD 制御 239
引き出し点 75
非線形システム 54
左極限 20
微分時間 238
微分制御 239
微分方程式 10, 33
微分要素 70, 106
表現 8
比例ゲイン 238
比例制御 238
比例要素 69, 106

不安定 136
不安定根 147
フィードバック結合 79
フィードバック制御 6
フィードバック補償法 223, 235
フィードバックループ 7
フーリエ級数 38
フーリエ変換 38
複素指数関数 11
複素数 11
部分分数展開 30
フルビッツ行列 153
フルビッツの安定判別法 152
プロセス制御系 222, 237
ブロック線図 6, 74
ブロック線図の等価変換 78
プロパー 135

閉ループ系 127
閉ループ制御 6
並列結合 79
ベクトル軌跡 119, 173
ヘビサイド 30
偏角 12

ボード線図 95, 175, 224
ボードの定理 112, 115
ポテンショメータ 75

右極限 20

むだ時間要素 71, 107, 171

目標値 6
目標値追従特性 244

有界入力有界出力安定 136
有理関数 30
有理伝達関数 135, 140
行き過ぎ量 200

ラウス数列 144
ラウスの安定判別法 142
ラウス表 142
ラグランジュの運動方程式 89
ラジアン表示 12
ラプラス演算子 17
ラプラス変換 10, 47
ラプラス変換形 17
ラプラス変換公式 22
ランプ応答 232
ランプ関数 18

零点あり 2 次要素 65

ロバスト安定 177
ロバスト安定性 248

— 著者略歴 —

1964年　京都大学工学部精密工学科卒業
1969年　京都大学大学院工学研究科博士課程修了，
　　同大学助手
1969年　工学博士（京都大学）
1970年　京都大学助教授
1986年　京都大学教授
2005年　京都大学名誉教授
　　立命館大学教授（情報理工学部，知能情報学科）
2012年　立命館大学チェアプロフェッサー（総合科学技術研究機構）
2013年　立命館大学上席研究員（総合科学技術研究機構）

古典制御論

Classical Control Theory

© Tsuneo Yoshikawa 2014

2014年 9月30日　初版第1刷発行
2020年 2月15日　初版第6刷発行

検印省略

著　者　吉川恒夫
発行者　株式会社　コロナ社
　　代表者　牛来真也
印刷所　有限会社鈴木印刷所

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 978-4-339-03211-6　C3053　Printed in Japan　（壮光舎印刷，グリーン）（中原）

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。