システム制御工学シリーズ　17

システム動力学と振動制御

工学博士　野波　健蔵　著

コロナ社

システム制御工学シリーズ編集委員会

編集委員長	池田　雅夫	（大阪大学・工学博士）
編 集 委 員	足立　修一	（慶應義塾大学・工学博士）
（五十音順）	梶原　宏之	（九州大学・工学博士）
	杉江　俊治	（京都大学・工学博士）
	藤田　政之	（東京工業大学・工学博士）

（2007年1月現在）

刊行のことば

わが国において，制御工学が学問として形を現してから，50 年近くが経過した。その間，産業界でその有用性が証明されるとともに，学界においてはつねに新たな理論の開発がなされてきた。その意味で，すでに成熟期に入っているとともに，まだ発展期でもある。

これまで，制御工学は，すべての製造業において，製品の精度の改善や高性能化，製造プロセスにおける生産性の向上などのために大きな貢献をしてきた。また，航空機，自動車，列車，船舶などの高速化と安全性の向上および省エネルギーのためにも不可欠であった。最近は，高層ビルや巨大橋梁の建設にも大きな役割を果たしている。将来は，地球温暖化の防止や有害物質の排出規制などの環境問題の解決にも，制御工学はなくてはならないものになるであろう。今後，制御工学は工学のより多くの分野に，いっそう浸透していくと予想される。

このような時代背景から，制御工学はその専門の技術者だけでなく，専門を問わず多くの技術者が習得すべき学問・技術へと広がりつつある。制御工学，特にその中心をなすシステム制御理論は難解であるという声をよく耳にするが，制御工学が広まるためには，非専門のひとにとっても理解しやすく書かれた教科書が必要である。この考えに基づき企画されたのが，本「システム制御工学シリーズ」である。

本シリーズは，レベル 0 (第 1 巻)，レベル 1 (第 2 ～ 7 巻)，レベル 2 (第 8 巻以降) の三つのレベルで構成されている。読者対象としては，大学の場合，レベル 0 は 1，2 年生程度，レベル 1 は 2，3 年生程度，レベル 2 は制御工学を専門の一つとする学科では 3 年生から大学院生，制御工学を主要な専門としない学科では 4 年生から大学院生を想定している。レベル 0 は，特別な予備知識なしに，制御工学とはなにかが理解できることを意図している。レベル 1 は，少

し数学的予備知識を必要とし，システム制御理論の基礎の習熟を意図している。レベル 2 は少し高度な制御理論や各種の制御対象に応じた制御法を述べるもので，専門書的色彩も含んでいるが，平易な説明に努めている。

1990 年代におけるコンピュータ環境の大きな変化，すなわちハードウェアの高速化とソフトウェアの使いやすさは，制御工学の世界にも大きな影響を与えた。だれもが容易に高度な理論を実際に用いることができるようになった。そして，数学の解析的な側面が強かったシステム制御理論が，最近は数値計算を強く意識するようになり，性格を変えつつある。本シリーズは，そのような傾向も反映するように，現在，第一線で活躍されており，今後も発展が期待される方々に執筆を依頼した。その方々の新しい感性で書かれた教科書が制御工学へのニーズに応え，制御工学のよりいっそうの社会的貢献に寄与できれば，幸いである。

1998 年 12 月

編集委員長　池　田　雅　夫

まえがき

振動は古くて新しい問題である。先端科学や先端的な技術革新の裏には多くの振動問題が存在しており，振動問題の解決なくして先端科学や先端技術は生まれない。1980 年代後半から 1990 年代前半頃，超高層ビルや長大橋などの振動制御が盛んに研究され，超高層ビルの多くにアクティブ（能動形）動吸振器が搭載され実用化がなされた。しかし，阪神淡路大震災を契機として，巨大地震の際の電力系統遮断の問題が深刻となりアクティブ動吸振器が見直され，セミアクティブ（準能動形）やパッシブ（受動形）な振動制御が主流を占めるに至っている。しかし，セミアクティブやパッシブな振動制御性能を最大限に引き出すために，アクティブな振動制御系を規範として性能の限界を極め，その上で，いかにセミアクティブやパッシブな制御系を設計するかが重要な関心事となっている。しかも，多くの輸送機器，精密機器，知能機器，ロボティクス・メカトロニクス機器においてはアクティブ振動制御の技術は必須であり，いまや常識的な範疇に入る概念である。このような観点から，本書で述べる振動学と振動制御は不可分の表裏一体の関係にあり，先端科学技術を裏方から支えている基礎工学といえる。

本書は，「システム制御工学シリーズ」として企画された，新しいスタイルの『システム動力学と振動制御』である。ここでいう“新しいスタイル”とは，振動学を制御工学の視点からとらえて記述することである。特に，上述したように振動解析と振動制御を設計論の立場から一体的にとらえることを心掛けた。そして，いろいろな振動解析法が存在する中で，制御工学として初等レベルで学ぶラプラス変換法を解析法として用いている。さらに，後半の内容はアクティブな振動制御法をいかに設計するかという観点から，先端的な制御理論を適用した振動制御について，設計法と実際に適用した実験結果を示して

いる。

1章では，ラプラス変換について復習している。2章では1自由度系の振動を，3章では2自由度系および多自由度系，4章では連続系の振動について述べている。5章では，振動制御の考え方を基本的な視点に立って考察し，パッシブ，セミアクティブ，アクティブなどの各振動制御法について包括的に述べている。ここまでが，振動学と振動制御の基礎となっており，学部または一部大学院での講義などで活用できる内容を含んでいる。

6章以降はかなり先端的な振動制御法について論じており，6章ではH_∞制御理論による振動制御を記述した。特に，6章では，H_∞制御理論をどのように振動制御系として適用するかについていくつかの代表的な方法論を述べた。7章では，μ設計理論としてディスクリプタμ設計法による振動制御を取り上げた。8章では，出力フィードバック形スライディングモード振動制御について紹介した。これらの内容は大学院レベルあるいは研究者レベルの内容となっており，関係の参考文献をいくつか示した。本書が読者の勉学や研究の座右の書になれば幸いである。

2010年7月

野　波　健　蔵

□□□□□□□□□□□ 目　　　次 □□□□□□□□□□□

1. ラプラス変換と振動学・制御工学

1.1　ラプラス変換法の基本的な考え方 ………………………… 2
1.2　ラプラス変換とフーリエ変換の関係 ……………………… 4
演 習 問 題 ……………………………………………………… 5

2. 1自由度系の振動

2.1　自 由 振 動 ………………………………………………… 6
2.2　強 制 振 動 ………………………………………………… 13
演 習 問 題 ……………………………………………………… 25

3. 2自由度系・多自由度系の振動

3.1　2自由度系の運動方程式 ……………………………………… 29
3.2　減衰のない2自由度系の固有振動数と固有モード ………… 31
3.3　減衰のない2自由度系の強制振動解 ………………………… 34
3.4　モード解析を用いた2自由度振動系の解析 ………………… 37
3.5　多自由度系の振動 …………………………………………… 39
3.5.1　ラグランジュの運動方程式 ……………………………… 40
3.5.2　多自由度系の不減衰自由振動と固有値問題 …………… 44
3.5.3　モードベクトルの直交性 ………………………………… 44
3.5.4　レイリー商 ………………………………………………… 45
演 習 問 題 ……………………………………………………… 47

4. 連続系の振動

4.1　弦の横振動 …… 51
4.2　棒の縦振動 …… 56
4.3　梁の曲げ振動 …… 56
演習問題 …… 60

5. 振動制御の考え方とパッシブ制御・セミアクティブ制御・アクティブ制御

5.1　振動制御の基本的な考え方 …… 62
5.2　振動のパッシブ制御 …… 64
5.2.1　狭義の振動制御 …… 64
5.2.2　振動の絶縁 …… 70
5.2.3　外乱除去 …… 73
5.3　振動のセミアクティブ制御 …… 73
5.4　振動のアクティブ制御 …… 75
5.4.1　パッシブ制御とアクティブ制御 …… 75
5.4.2　振動制御におけるフィードバック制御とフィードフォワード制御 …… 80
5.4.3　アクティブ制御の方法 …… 81
5.5　コロケーションとノンコロケーション …… 102
5.6　スピルオーバ問題 …… 108
演習問題 …… 112

6. H_∞制御理論による振動制御

6.1　振動制御の現状と H_∞ 制御 …… 115
6.2　H_∞制御による代表的な振動制御系設計法 …… 117
6.3　スピルオーバ抑制をめざした弾性系への適用 …… 124
6.4　高周波域遮断特性をめざした剛性系への適用 …… 131
6.5　外乱オブザーバと等価な H_∞ 制御 …… 132

6.6　振動制御における H_∞ 制御の利点 ……… 134

7. μ 設計理論による振動制御

7.1　μ 設計理論の枠組み ……… 136
7.2　ディスクリプタ μ 設計 ……… 144
7.3　ディスクリプタ μ 設計による柔軟構造物のロバスト制御 ……… 152
7.3.1　モデリング ……… 152
7.3.2　制御系設計およびシミュレーション ……… 155
7.3.3　実験および考察 ……… 161

8. スライディングモード制御理論による振動制御

8.1　モ デ リ ン グ ……… 167
8.2　制 御 系 設 計 ……… 170
8.2.1　切換超平面の設計 ……… 171
8.2.2　制御系設計 1（非線形入力による制御器） ……… 171
8.2.3　制御系設計 2（準等価制御入力を有する制御器） ……… 173
8.3　シミュレーションによる検証 ……… 175
8.3.1　インパルス外乱応答 ……… 175
8.3.2　地震外乱応答 ……… 177
8.4　実験による検証 ……… 178
8.4.1　自由振動に対する制振結果 ……… 179
8.4.2　地震外乱に対する制振結果 ……… 180
8.5　制御器の特性と比較検証 ……… 181
8.5.1　制約条件と制御系設計 ……… 182
8.5.2　制御器の比較検証 ……… 183
8.6　出力フィードバック形スライディングモード振動制御の特徴 ……… 184

引用・参考文献 ……… 185
演習問題の解答 ……… 188
索　　　引 ……… 194

1 ラプラス変換と振動学・制御工学

振動学あるいは機械振動学は，機械工学の４力学（材料力学・熱力学・流体力学・機械力学）のうちの機械力学の中に含まれるたいへん重要なアナリシスを中心とした専門科目で，学問としてはかなり以前に体系化されている。一方，制御工学は工学全般を対象としてシンセシスを中心とした横断的な学問としてやはり重要な科目となっている。そもそも制御工学が対象とする分野は，実は工学のみならず経済事象や社会モデルまでも含むたいへん広範囲な学問分野である。ある事象がなんらかの方法で数式化されれば制御工学の対象となり得る。

以上述べたように，振動学と制御工学は，縦糸としてのアナリシスと，横糸としてのシンセシスというように，かなり異なる学問体系のようではあるが，方法論において酷似しているところも多い。振動学も含めてダイナミカルシステムは一般に微分方程式で表される。こうした微分方程式で表現された動的システムを解析するのに，たいへん便利な方法としてラプラス変換がある。制御工学では，伝達関数を導出するためにラプラス変換が重要な役割を果たす。振動学はダイナミカルシステムの一つの学問であり，ラプラス変換を積極的に用いて解析することはたいへん有意義である。

本章では，まずラプラス変換について定義式から述べる。

1.1 ラプラス変換法の基本的な考え方

ラプラス変換法の基本的な考え方は，比較的複雑な微分方程式で記載された問題を代数方程式に帰着して解き，それからラプラス逆変換によって本来の問題の解を得ようとするものである。

正のすべての時間，$t>0$ に対して定義された関数 $f(t)$ を考え，$f(t)$ の一方向のラプラス変換を式 (1.1) の定積分で定義する。

$$\mathcal{L}[f(t)] = F(s) = \int_0^{\infty} f(t)\, e^{-st} dt \tag{1.1}$$

ここに，$s=\sigma+j\omega$ とする。s は**ラプラス演算子**と呼ばれる。式 (1.1) により時間関数 $f(t)$ が s の関数 $F(s)$ に変換された。逆に，s の関数 $F(s)$ から時間関数 $f(t)$ を求めることを**ラプラス逆変換**といい，式 (1.2) で定義される。

$$\mathcal{L}^{-1}[F(s)] = f(t) = \frac{1}{2\pi j}\int_{\sigma-j\omega}^{\sigma+j\omega} F(s)\, e^{st} ds \tag{1.2}$$

表 1.1　ラプラス変換表

$f(t)$	$F(s)$	$f(t)$	$F(s)$
衝撃関数 $\delta(t)$	1	$\sinh\omega t$	$\frac{\omega}{s^2-\omega^2}$
単位階段関数 $u(t)$	$\frac{1}{s}$	$\cosh\omega t$	$\frac{s}{s^2-\omega^2}$
t	$\frac{1}{s^2}$	$te^{-\alpha t}$	$\frac{1}{(s+\alpha)^2}$
t^n	$\frac{n!}{s^{n+1}}$	$e^{-\alpha t}\sin\omega t$	$\frac{\omega}{(s+\alpha)^2+\omega^2}$
$e^{-\alpha t}$	$\frac{1}{s+\alpha}$	$e^{-\alpha t}\cos\omega t$	$\frac{(s+\alpha)}{(s+\alpha)^2+\omega^2}$
$\sin\omega t$	$\frac{\omega}{s^2+\omega^2}$	$e^{-\alpha t}\sinh\omega t$	$\frac{\omega}{(s+\alpha)^2-\omega^2}$
$\cos\omega t$	$\frac{s}{s^2+\omega^2}$	$e^{-\alpha t}\cosh\omega t$	$\frac{(s+\alpha)}{(s+\alpha)^2-\omega^2}$

振動学で多用される時間関数 $f(t)$ とそのラプラス変換 $F(s)$ を式 (1.1) により求めると**表1.1**となる。この表を用いて $F(s)$ から $f(t)$ へのラプラス逆変換を行うため，一般には式 (1.2) のラプラス逆変換の演算は行わない。

導関数 dx/dt および d^2x/dt^2 のラプラス変換を部分積分により求めると

$$\mathcal{L}\left[\frac{df(t)}{dt}\right]=\int_0^\infty e^{-st}\frac{df(t)}{dt}dt=\left[e^{-st}f(t)\right]_0^\infty-\int_0^\infty(-se^{-st})f(t)\,dt$$
$$=sF(s)-f(0) \tag{1.3}$$

ここに，$f(0)$ は $t=0$ における関数 $f(t)$ の初期値である。同様に

$$\mathcal{L}\left[\frac{d^2f(t)}{dt^2}\right]=\int_0^\infty e^{-st}\frac{d^2f(t)}{dt^2}dt=s^2F(s)-sf(0)-\dot{f}(0) \tag{1.4}$$

表1.2　ラプラス変換の定理

定　理	説　明
$\mathcal{L}[f(t)]=F(s)=\int_0^\infty f(t)\,e^{-st}dt$	定義式
$\mathcal{L}[kf(t)]=kF(s)$	線形則
$\mathcal{L}[f_1(t)+f_2(t)]=F_1(s)+F_2(s)$	線形則
$\mathcal{L}[e^{-at}f(t)]=F(s+\alpha)$	平行移動
$\mathcal{L}[f(t-T)]=e^{-sT}F(s)$	むだ時間
$\mathcal{L}[f(\alpha t)]=\frac{1}{\alpha}F\left(\frac{s}{\alpha}\right)$	時間スケーリング
$\mathcal{L}\left[\frac{df}{dt}\right]=sF(s)-f(0)$	1階微分
$\mathcal{L}\left[\frac{d^2f}{dt^2}\right]=s^2F(s)-sf(0)-f(0)$	2階微分
$\mathcal{L}\left[\frac{d^nf}{dt^n}\right]=s^2F(s)-\sum_{k=1}^{n}s^{n-k}f^{k-1}(0)$	n 階微分
$\mathcal{L}\left[\int_0^t f(\tau)\,d\tau\right]=\frac{F(s)}{s}$	積分
$f(\infty)=\lim_{s\to 0}sF(s)$	最終値の定理
$f(0+)=\lim_{s\to\infty}sF(s)$	初期値の定理

ここで，$f(0)$，$\dot{f}(0)$ は $t=0$ における関数 $f(t)$，$\dot{f}(t)$ の値である。これらをまとめてラプラス変換の定理を**表 1.2** に示す。

1.2　ラプラス変換とフーリエ変換の関係

フーリエ変換とは式 (1.5) で定義される。

$$\mathcal{F}\left[f(t)\right] = F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\, s^{-j\omega t}\, dt \tag{1.5}$$

また，フーリエ逆変換は式 (1.6) で表される。

$$\mathcal{F}^{-1}\left[F(\omega)\right] = f(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)\, e^{j\omega t}\, d\omega \tag{1.6}$$

式 (1.5) から，時間関数 $f(t)$ はフーリエ変換により周波数 $F(\omega)$ の関数に変換されている。すなわち，時間関数が周波数の関数に変換されることで周波数スペクトルが得られている。また，式 (1.6) のフーリエ逆変換により，周波数スペクトルから時間関数が得られることを示している。

いま，$f(t)$ が $t<0$ で $f(t)=0$ と仮定して，式 (1.7) を考える。

$$F(\omega) = \int_{0}^{\infty} f(t)\, e^{-\sigma t} e^{-j\omega t}\, dt = \int_{0}^{\infty} f(t)\, e^{-(\sigma + j\omega)t}\, dt \tag{1.7}$$

これから，$s=\sigma+j\omega$（複素数）とすることで，フーリエ変換からラプラス変換が得られる。

$$F(s) = \int_{0}^{\infty} f(t)\, e^{-st}\, dt \tag{1.8}$$

以上から，フーリエ変換では $f(t)$ は

$$\int_{-\infty}^{\infty} \left| f(t) \right| dt < \infty \tag{1.9}$$

を満たす必要があるが，ラプラス変換では $f(t)$ は $t<0$ で $f(t)=0$ と仮定して，かつ

$$\int_{0}^{\infty} \left| f(t)\, e^{-\sigma t} \right| dt < \infty \tag{1.10}$$

を満たせばよい。すなわち，対象としている関数 $f(t)$ は時刻 0 以前では 0 であり，十分大きな t に対して $\left| f(t) \right|$ は指数関数でおさえられる関数である。し

たがって，式 (1.11) が得られる。

$$\mathcal{F}\left[f(t)\,e^{-\sigma t}\right]=\int_{-\infty}^{\infty}f(t)\,e^{-\sigma t}e^{-j\omega t}dt=\int_{0}^{\infty}f(t)\,e^{-(\sigma+j\omega)t}dt$$

$$=\int_{0}^{\infty}f(t)\,e^{-st}dt=\mathcal{L}[f(t)]=F(s) \tag{1.11}$$

式 (1.10) の条件は多くの工学的な問題では容易に満足する。このことから，フーリエ変換の厳しい条件をラプラス変換は和らげているともいえる。そして，本質的には時間関数を周波数関数に変換している点で，フーリエ変換とラプラス変換は目的は同じである。

＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊ 演　習　問　題 ＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊

【1】 ラプラス変換を用いて，つぎの微分方程式の初期値問題を解け。

$$\frac{dy^2}{dt^2}+2y=5t \qquad (t>0)$$

$$y(0)=1,\quad y'(0)=-2$$

【2】 ラプラス変換を用いて，つぎの微分方程式を解け。

$$\frac{d^2y}{dt^2}+2a\frac{dy}{dt}+by=u(t) \qquad (t>0)$$

ただし，$u(t)$ は単位ステップ関数，$a>0$，b は定数で，初期条件は

$$y'(0)=0,\quad y(0)=0$$

とする。

【3】 つぎの連立微分方程式を解け。

（a）
$$\begin{cases}\dfrac{dx}{dt}=2x-3y\\[2mm]\dfrac{dy}{dt}=3y-2x\end{cases}$$

$x(0)=1,\quad y(0)=2$

（b）
$$\begin{cases}3\dfrac{dx}{dt}+2x+\dfrac{dy}{dt}=1\\[2mm]\dfrac{dx}{dt}+4\dfrac{dy}{dt}+3y=0\end{cases}$$

$t\geqq 0$，$t=0$ において $x=0$，$y=0$

【4】 つぎの積分方程式を解け。

$$y(t)=2t+\int_0^t y(\tau)\sin(t-\tau)\,d\tau$$

【5】 つぎの状態方程式の解をラプラス変換を用いて導け。

$$\frac{d\boldsymbol{x}(t)}{dt}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t)+\boldsymbol{b}u(t)$$

索　　引

【あ】

アクティブ制御　63, 75
アクティブ動吸振器　77
アフィン変換　122
安定化　81

【い】

位　相　9, 15
位相曲線　15
1次のモードベクトル　32
1自由度振動系　6
1自由度制御系　79
一般化外乱ベクトル　99
一般化固有値問題　106
一般化2次形式評価関数　85
一般化プラント　117
一般化モード変位ベクトル　99

【う】

ウォターフォール図　129
打切り誤差　101, 116
運動エネルギー　95

【お】

オイラー・ベルヌーイ梁　102
オイラー・ラグランジュの微分方程式　42
応答倍率　15, 36
オブザーバ　100, 110, 132
重み関数　118, 126
重み行列　85

【か】

回転慣性　57
外乱オブザーバ　132
外乱除去　62, 73
外乱相殺制御入力　100
拡張 H_∞制御　133
確定系　115
確率系　115
過減衰系　11
仮想仕事の原理　42
仮想的変位　40
加速度計　23
過渡解　16
過渡特性　79
加法的誤差　118
カルマンフィルタ　109
観測スピルオーバ　110
感度関数　132
感度低減　118

【き】

危険速度　17
期待値　97
吸振器　67
境界条件　53
境界値問題　53
共振角周波数　65
共振曲線　15
強制振動　6, 13, 21
強制振動解　20, 34
極指定法　89
極値探索法　151
極と零点　103
　——の配置　107
極配置法　89
極・零相殺　118
切換超平面　171, 173

【け】

ゲイン　15
ゲイン行列　85
ゲインスケジュール形スライディングモード制御　184
減　衰
　——のある動吸振器　68
　——のない動吸振器　66, 68
減衰行列　30
減衰固有角振動数　10
減衰軸　10
減衰自由振動　9
減衰比　9
原点極　133
弦
　——の横振動　51
　——の離散モデル　52
　——の連続モデル　53

【こ】

高周波域遮断特性　131
剛性行列　30
構造化特異値　123, 124
構造制御系　85
構造的不確かさ　116
後退波　54
剛体モード　83
誤差共分散　110
固定端点　59
固有円振動数　8

固有角振動数　8, 9
固有振動数　8
固有関数　51, 58
固有座標　37
固有振動モード　37
固有値　44
固有値問題　44, 106
固有ベクトル　44
固有モード　29
固有モードベクトル　37
コロケーション　76, 102
コロケーション問題　88
混合感度法　117
混合感度問題　118, 119, 130

【さ】

最悪応答　116
最悪外乱　116
最終スライディング
　モード法　172
最終値の定理　3
最小誤差励振法　167
最小固有値　88
最大階数分解　146
最大固有値　88
最大特異値　88, 123
最適減衰　64
最適制御入力　86, 95
最適制御問題の解　86
最適同調条件　70
最適モード制御入力　96
最適レギュレータ　85
座標変換　37
残余モード　109

【し】

指数安定　110
自然のフィードバック力　75
持続外乱　132
質量行列　30
自動調心作用　20
4 ブロックの混合感度問題　119, 130
周　期　9
重　心　17
自由振動　6
自由端点　59
集中制御　116
集中定数系　51
周波数重み関数　126
周波数行列　99
周波数整形　116
周波数整形形スライディング
　モード制御　184
主座標　37
主振動系　67
出力フィードバック　83
出力フィードバック形
　切換超平面　173
出力フィードバック形スライ
　ディングモード制御　167
出力フィードバックゲイン　171
受動的方法　63
主ループ定理　123, 142
準最適制御　170
準等価制御入力　173
準能動的方法　63
上　界　89
上界値　175
小ゲイン定理　136
衝撃関数　2
状態推定オブザーバ　100
乗法的誤差　118
初期値の定理　3
進行速度　54
人工のフィードバック　78
進行波　54
振　動
　——のアクティブ制御　63, 75
　——のセミアクティブ制御　63, 73
　——のパッシブ制御　63, 75
振動数軸　10
振動制御　62
振動絶縁　62, 74
振　幅　9

【す】

推定誤差　110
スカイフックダンパ系　93
スカラブロック　138, 140, 147
スケーリング行列　124, 151
スケーリングマトリックス　140
図　心　17
スピルオーバ問題　108, 116
スペクトルノルム　88
スライディングモード
　制御理論　102, 166

【せ】

正規化既約分解法　117
正規化されたモード行列　99
制御行列　77
制御構造の制約条件　76
制御スピルオーバ　110
整形フィルタ　97
制　振　62
制振性　119
正　定　78
整定関数　118
制約条件　173
絶対安定性　76
摂　動　139
摂動パラメータ　146
セミアクティブ制御　63, 73
漸近安定　83
線形分数変換　120
せん断変形　57
せん断力　57

【そ】

双曲線関数　10
相補感度関数　132
速応性　119

速度フィードバック　96
速度連成項　30

【た】

対数減衰率　11, 12
多自由度振動系　39
畳込み積分　16
縦剛性　56
縦弾性係数　57
ダランベールの原理　42
単位インパルス外乱　13
単位階段関数　2
単位ステップ外乱　14
単純支持点　58
弾性倒立振り子　127
断面2次モーメント　57

【ち】

力の伝達率　22, 72
力ベクトル　30
重複実スカラブロック　140
重複スカラブロック　138, 147
重複複素スカラブロック　140
調和外乱　14
調和振動　8
調和励振力　99
直列ばね　7

【て】

低次元化モデル　116
定常特性　79
定数スケーリング H_∞ 制御　124, 129
定数スケーリング行列　124
定数スケーリング法　117
ディスクリプタ形式　144
ディスクリプタ μ 設計　144
停留値　40
適応制御　81
伝達率　22, 71
伝搬速度　54

【と】

等価ばね定数　7
動吸振器　66, 68, 77, 112
特性方程式　10
凸最適化問題　143
トランケーション問題　115

【に】

2次形式評価関数　85
2次のモードベクトル　32
2自由度系　29, 30, 33
2自由度制御系　79
2ブロックの混合感度問題　117, 130
入力端低域フィルタ　169

【の】

能動的方法　63
ノミナル制御性能　147
ノミナル性能　123, 127
ノミナル性能条件　140
ノンコロケーション　77, 102

【は】

ハイブリッド形　64
ハイブリッド動吸振器　77, 112
ハイブリッドマスダンパ　112
白色ノイズ　97
パッシブ制御　63, 73, 75
波動制御　81
波動方程式　51
ハミルトンの原理　42, 44
梁
　——の曲げ振動　51
　——の曲げ振動モデル　57
半正定　78

【ひ】

非共振　65
非構造的不確かさ　116
非最小位相系　116
非振動状態　65
ひずみエネルギー　95
非線形切換入力　172
評価関数の最適化　81
標準問題可解条件　121

【ふ】

不安定零点　107
フィードフォワード制御　79
符号付きの応答倍率　36
不足減衰系　11
不確かさ　116
　——のブロック対角構造　149
物理座標　37
負　定　78
フーリエ逆変換　4
フーリエ変換　4
フリーフリーな一様梁　107
フルアクティブ形　64
フルブロック　138, 147
ブロック対角構造　123
ブロック対角行列　140
分散制御　116
分布定数系　51
分離定理　110

【へ】

並列ばね　6
ヘルツ　9
変位強制振動　21
変位計　23
変位伝達率　71
変位フィードバック　96
変位ベクトル　30, 99
変位連成項　30
偏重心　17
変数分離　55
変　分　40
変分法　40

【ほ】

棒
——の縦振動　51
——の縦振動モデル　56
——のねじり振動　51

【ま】

曲げ剛性　56
曲げモーメント　57
マッチング条件　184

【む】

無減衰系　8
無減衰固有角振動数　9
無次元比　15
むだ時間　3

【も】

モーションコントロール　132
モーダルパラメータ誤差　101, 116
モデル誤差　118
モデルの低次元化　101
モード解析　38
モード行列　37, 99
モード減衰行列　99
モード座標　37
モードベクトル
——の直交性　45
——の直交性の条件　45

【ゆ】

有色ノイズ　97
ユークリッドノルム　172
ユニモジュラな有理関数　152

【ら】

ラグランジアン　43
ラグランジュ関数　42, 43
ラグランジュの運動方程式　39
ラジアン毎秒　9
ラプラス演算子　2
ラプラス逆変換　2
ラプラス変換法　2

【り】

リアプノフの意味で安定　83
リアプノフ方程式　171
離散系　51
離散時間 H_∞ 補償器　129
理想的振動絶縁法　74
リッカチ方程式　95
臨界減衰　11
臨界状態　65

【る】

ルーエンバーガーオブザーバ　110
ループ整形　121

【れ】

零固有値　78
レイリー商　46
レギュレータ　85, 110
連続系　51
連続時間 H_∞ 補償器　129
連続梁モデル　106

【ろ】

ロバスト安定　118
ロバスト安定条件　140
ロバスト安定性　147
ロバスト感度問題　149
ロバスト極配置　127
ロバスト極配置法　117
ロバスト制御　81, 101
ロバスト制御性能　147, 149
ロバスト制御理論　101
ロバスト性能　123
ロバスト性能条件　140

【D】

D-K 反復　135, 142, 151
Doyle の記号法　146

【H】

H_∞ 制御理論　101, 115
H_∞ ノルム　116
H_∞ 標準問題　118

【L】

LFT　120
LFT 変換　147
LQR 理論　90

【S】

Schur 分解　157

【ギリシャ文字】

γ イテレーション　121
μ 解析　142
μ 設計　144
μ 設計法　123
μ 設計理論　101, 136
σ プロット　126

—— 著 者 略 歴 ——

1972 年　福井大学工学部機械工学科卒業
1976 年　東京都立大学大学院修士課程修了
　　　　（機械工学専攻）
1979 年　東京都立大学大学院博士課程修了
　　　　（機械工学専攻）
1979 年　工学博士
1985 ～ 1986 年　NASA 研究員
1988 年　NASA シニア研究員
1988 年　千葉大学助教授
1994 年　千葉大学教授
2014 年　千葉大学名誉教授，千葉大学特別教授
　　　　株式会社自律制御システム研究所代表取締役
　　　　現在に至る

システム動力学と振動制御
System Dynamics and Vibration Control

© Kenzo Nonami　2010

2010 年 9 月 30 日　初版第 1 刷発行
2015 年 4 月 25 日　初版第 2 刷発行

検印省略

著　者　野波健蔵（のなみけんぞう）
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 978-4-339-03317-5　（横尾）　（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