

# 実践 機械システムの振動

—実機振動問題の簡易解析—

工学博士 松下 修己  
博士(工学) 小林 正生 共著

コロナ社

## ま え が き

前著『回転機械の振動 ー実用的振動解析の基本ー』、『続 回転機械の振動 ー実機の振動問題と振動診断ー』では、実務にすぐ役立つ理論・技術の応用知識に重点を置いてきた。その後、著者らはコンサルタント業務の中で実際に遭遇したトラブルとその解決策や、講習会で話題になったり、反応のよかったテーマを整理した。その結果が、今回の第3巻『実践 機械システムの振動 ー実機振動問題の簡易解析ー』および第4巻『演習 機械システムの振動 ー振動診断力アップの精選問題ー』の上梓である。特に、この第3、4巻の書名には「回転機械」の冠を外し、制御工学を含むより広い視野から「機械システム」の振動全般を念頭に執筆した。

既刊の「回転機械の振動」2冊をテキストに講習会などを行い、さまざまな機会をとらえ速習講義を行ってきた。大学における機械力学の課目で振動工学を学んできたような技術者の方でも、「ロータ」関連の振動となると、特異な分野風に映るようで、新鮮に聴講していただいた。感想はいつも「難しかった」であった。しかし、現実の振動問題は待ったなしである。聴講者の多くは機械の設計開発に従事し、しかも何人かはすでに機械振動問題を経験し、悩み、まさに現下にその対策に邁進しているなど、聴講者の勉強熱心さや迫力も印象に残っている。まさに、「現場が最強の教師」とはよく聞かすが、言い得て妙である。著者らも、企業での機械の振動トラブルシューティング参加がきっかけで真剣に機械振動と制御を学び、それを生業としてきた。現場を説得するためには、簡潔な振動モデルと現象を的確に説明する平易な力学が必要である。そのために本書はまず、機械システムの振動モデル化技術から論を始める。

国内の学協会活動の中で、機械振動のトラブルシューティングということに関しては、日本機械学会の **v\_BASE** 活動が質・量ともに群を抜いている。こ

これは産業界で発生した実機振動問題の事例を集めるデータベース化の活動で、それは約 30 年にわたり、全データは 1 000 件を超えている。各種各様の実機振動問題が取り上げられ、解決への苦心の足跡を物語る事例ばかりである。そこで本書の最終章では、この事例のいくつかを演習問題風に解説し、解決に向けての基本的知識の応用力強化に努めている。機械振動関係の仕事に関わる人にとって、振動問題への遭遇とその解決業務は、ほぼ全員が辿る道と思われ、本書がその役に立つことを望むばかりである。

本書の内容を、以下少しばかり丁寧に説明する。

### 第 1 章 ロータ振動系の縮小モデル化と精度

実機のモデル化としてモード解析が有名であるが、軸受やシールのように回転数で変化する境界条件には不向きである。代わるものとして、境界条件の変化に強い Guyan (グヤン) 法やモード合成法を推奨し、得られたモデルの精度を比較し、両者の優劣を論じる。今日では、各種の振動・制御の解析コードは揃っており、全分野に共通の課題として、いかに精度および使い勝手のよいモデルを作るかが仕事の効率を左右しているといっても過言ではない。

### 第 2 章 油膜軸受ロータ系の安定限界の簡易近似予測

油軸受の動特性に関し、クロスばね  $K_c$  はダイレクト減衰  $C_d$  に回転数  $\Omega$  を乗じた剛性の  $\lambda$  倍、すなわち  $K_c = \lambda \Omega C_d$  と考え、例えば  $\lambda = 0.47$  などが用いられる。この状況では、「クロスばね」の振動不安定化要因  $\lambda \Omega$  が回転上昇とともにその勢いを増し、自励振動が発生すると考える。これは、「Bently- Muszynska の  $\lambda$  モデル」と呼ばれる。この考えを踏襲、発展させた安定性診断法を提案する。

### 第 3 章 翼軸連成系の総合的振動解析

タービン翼振動 (節直径数  $\kappa = 0$ ) と回転軸のねじり振動は翼軸連成振動問題として有名で、ISO22266 で規定されている。しかし、この考えは不十分で、軸の縦振動もこの連成に加えることで精度が向上することを本章で例証する。また、羽根車振動 (節直径数  $\kappa = 1$ ) と回転軸の横振動の連成振動問題にも言及する。本章は翼軸連成振動問題の総まとめ編で、現行での最高レベルの連成

解析の根幹を紹介する。

#### 第4章 振動制御技術者向けメカトロニクスの基礎

最も腐心した章で、本書の特長をなす。ニュートンの運動方程式から始まる従来の考え方に代わって、ここではラプラス変換後の  $s$  領域のブロック線図で系を表す。 $n$  回微分を  $s^n$  に頭を切り替えて、システムを伝達関数で表すため機械系の視点は制御系の知見に移る。と同時に、従来の固有値解析は開特性（一巡伝達関数）の分析・チューニングに変わる。そして、実機で遭遇するであろう機械系特有の弾性振動問題の解決法が制御系アプローチから解釈される。この一連の解釈をメカトロニクス・ダイナミクス「知能機械の力学」と呼び、その核心技術を提案する。

#### 第5章 動吸振器の最適設計

動吸振器は強制振動の共振振幅低減のために有効で、その最適設計理論は広く知られている。しかし、自励振動防止にも有効であることを最近の研究で再確認、最適設計法を導出したので本章で紹介する。読後には、振動問題に対し「動吸振器は万能薬だ」と認識するかもしれない。

#### 第6章 トラッキング解法

ロータ系では、油軸受動特性（境界条件の定数）が回転数に依存するため、厳密には、複素固有値計算については回転数ごとに実施しなければならない。しかし、その回転数変更のたびに固有値計算コードを呼び出し、新規に計算する現状の方法では無駄が多いので、回転数・境界定数の変更ごとに特性方程式を満足するように「少しずつ固有値を修正していく」という観点から、固有値解を追跡 (tracking) する手法を開発した。回転数を時間と見て、固有値解を連続的に時刻歴応答のように求める方法で、著者らが便利に活用している。

#### 第7章 実機振動問題 (v\_BASE) の事例研究

v\_BASE に収められている事例から、モータの音響騒音や TPJB (テイルテイングパッドジャーナル軸受)、蒸気タービン制御弁、アクティブ防振制御、モータ駆動系ねじり振動など5事例を選び、演習問題として解説した。実機のトラブルシューティングを担当するつもりで挑戦していただきたい。

## 付 録

ここでは長文の解説3編を加えた。一つは付録3で、回転座標系の翼・羽根車の運動方程式の導出とモード合成法による低次元モデル化である。汎用の3D-FEMコードの計算結果を正しく再認識するための礎となることを期待する。残りの二つは付録4と5で、メカトロニクスにおける振動工学と制御工学を結ぶ共通基礎をあえて設けた。付録4は剛体モード、付録5は弾性モードである。特に後者は他書にはないアプローチで、両モードを俯瞰するような開特性（ゲイン交差周波数と位相余裕）解釈を展開しており、著者らの経験に基づく実践向け知見で、多少とも自負しているところである。

書き終えてみると、筆力の不足から、講義やセミナーのように振動現象の解明と対策のおもしろさを表現できてはいないのではないかと、また著者らの浅学非才や独断に基づく誤った説明がなされているのではないかという不安もある。万全の体制で執筆に努めたが、専門の範囲も広く、また奥も深く、山の高さを痛感している。読者の皆様の批判や叱正を得ることができれば著者らの望外の喜びとするところである。

最後に、本書に引用した書物、文献の内外の著者に対して深甚の謝意を表します。また、日本機械学会主催の振動セミナーでご活躍いただいている藤原浩幸教授（防衛大学校）らには、終始多大なご支援ご鞭撻を仰いだ。皆様のご厚情に深く感謝の意を申し上げます。また、新川文登様（新川電機株式会社 社長）には著作作業に関し終始格段のご鞭撻を賜り感謝申し上げます。

最後に、本書の出版企画にご支援いただいたコロナ社に厚く御礼申し上げます。

2021年5月

著者代表 松下 修己

# 目 次

## 第 1 章 ロータ振動系の縮小モデル化と精度

1.1	Guyan (グヤン) 縮小法の作り方と精度	1
1.2	モード合成法による縮小法の作り方と精度	4
1.3	Guyan 法とモード合成法の精度比較	8
1.4	連続体の離散モデル化	10
1.5	モード分離	14

## 第 2 章 油膜軸受ロータ系の安定限界の簡易近似予測

2.1	剛体ロータ (1 自由度系) と簡易安定判別	19
2.2	弾性ロータ (2 自由度系) と不減衰固有振動数	21
2.3	弾性ロータ (2 自由度系) と簡易安定判別	24
2.3.1	$\zeta_d \ll 1$ の場合	24
2.3.2	$\zeta_d \gg 1$ の場合	25
2.4	3 円板を有する弾性ロータ系の計算例	27
2.5	軸受動特性異方性の影響	30
2.5.1	1 自由度系	30
2.5.2	2 自由度系	31
2.5.3	計算精度の検証	33
2.6	Muszynska (ムジンスカ) ロータ系の数値計算例	36
2.7	ケーシングホワールの数値計算例	38

### 第3章 翼軸連成系の総合的振動解析

3・1	モード合成法モデルの連成質量	42
3・2	3次元有限要素法(3D-FEM)を活用したモード合成モデル化手法	44
3・3	翼のモード合成法モデル	46

### 第4章 振動制御技術者向けメカトロニクスの基礎

4・1	ブロック線図	64
4・2	制御対象の伝達関数 $G_p(s)$	66
4・3	制御器の伝達関数 $G_c(s)$	69
4・4	開特性 $G_o(s)$ および閉特性 $G_c(s)$	74
4・5	安定性評価	77
4・6	振動応答解析	84

### 第5章 動吸振器の最適設計

5・1	強制振動に対する共振振幅低減の最適設計	88
5・1・1	P, Q点の応答の高さを揃える	90
5・1・2	P, Q点で極大になる減衰(最適減衰の付加)	91
5・1・3	注意点: 動吸振器の最大振幅	92
5・2	自励振動に対する安定化シミュレーション	93
5・2・1	負性抵抗のモデル	93
5・2・2	動吸振器の最適設計	95
5・3	自励振動に対する安定化の最適設計指針	97
5・3・1	運動方程式と実モーダル解析	97
5・3・2	動吸振器単体での固有周波数 $\omega_2$ の最適な選択	99
5・3・3	動吸振器のフィルタ特性	101

5・3・4	動吸振器のフィルタ特性と開特性の関係	104
5・3・5	開特性とベクトル軌跡	108
5・3・6	動吸振器減衰定数の最適な選択	109
5・3・7	動吸振器パラメータのロバストな選択	111

## 第6章 トラッキング解法

6・1	固有値解析の問題点と解決へのアイデア	114
6・2	アルゴリズムの基本	115
6・3	計 算 例	117
6・4	トレースの定理	122
6・5	2Dトラッキング解法	125
6・6	3Dトラッキング解法	128

## 第7章 実機振動問題 ( $v\_BASE$ ) の事例研究

7・1	モータの音響騒音	132
7・1・1	問題 モータ電磁振動と動静翼干渉問題の類似性	132
7・1・2	問題 周期構造物系の多点モード加振	137
7・2	テイルテイングパッドジャーナル軸受 (TPJB)	139
7・2・1	問題 TPJ 軸受試験機におけるオイルホイップ	139
7・2・2	問題 TPJ 軸受形ロータのオイルホイップ	143
7・3	油圧機器などの流力弾性振動	150
7・3・1	問題 蒸気タービンのバルブ制御機構 (理想流体)	150
7・3・2	問題 蒸気タービンのバルブ制御機構 (体積弾性率を考慮)	153
7・3・3	問題 ポンプバランスピストンの制御機能	159
7・4	アクティブ防振	166
7・4・1	問題 強制振動の低減策：受動および能動制御(1)	166
7・4・2	問題 強制振動の低減策：受動および能動制御(2)	168



7・5	パワーエレクトロニクス of 弾性振動制御	175
7・5・1	問題 電機子制御形 DC モータ of 速度制御	175
7・5・2	問題 電機子制御形 DC モータ とねじり弾性振動制御	185
付 録		
付録 1	式 (2・13) および式 (2・16) of 導出	193
付録 2	式 (2・33) of 導出	194
付録 3	翼 of モード合成法モデル化手法	195
付録 3・1	変数 と 定義	195
付録 3・2	全翼系 of 運動方程式	197
付録 3・3	翼 of モード合成法モデル	201
付録 4	ゲイン交差周波数 と固有振動数	205
付録 4・1	時定数 $\tau$ で表す 1 次遅れ系	205
付録 4・2	固有振動数 $\omega_n$ と減衰比 $\zeta$ で表す 2 次遅れ系	206
付録 4・3	ゲイン交差周波数 および位相余裕 とオーバーシュート評価 of 関係	208
付録 5	位相余裕 と弾性モード of 減衰比	209
付録 5・1	システム of 記述 と問題点	209
付録 5・2	モード別開特性 と弾性モード減衰比	212
付録 5・3	$Q$ 値 計 測	214
付録 5・4	感度関数ピーク から見たモード減衰比	215
付録 6	臨界点 から見た開特性 of 距離 $D=1+G_o$	219
引用・参考文献		220
索 引		226

# 第1章

## ロータ振動系の縮小モデル化と精度

R1<sup>†1</sup>\_4章にて縮小モデル化手法の全体<sup>†2</sup>をレビューし、実践向き的手法<sup>2)</sup>としてのGuyan（グヤン、ガイヤン）静縮小法とモード合成法を紹介した。ここでは、得られた縮小モデルについてより具体的に精度を比較してみよう。

### 1.1 Guyan（グヤン）縮小法の作り方と精度

まずは、図1.1に示す5-DOF多質点系を例に、それぞれの方法による縮小モデルの作り方を再確認してみよう。

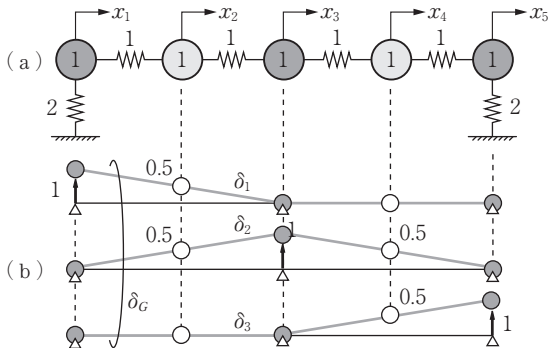


図1.1 5自由度系とGuyan縮小用モード  
 $\delta_G = [\delta_1, \delta_2, \delta_3]$

†1 R1：第1巻『回転機械の振動—実用的振動解析の基本—』（以下、R1と略記）

R2：第2巻『続 回転機械の振動—実機の振動問題と振動診断—』（以下、R2と略記）

†2 肩付き数字は、巻末の引用・参考文献の番号を表す。

マスタ座標 (“A” set of Nastran<sup>®</sup>) として、図(a)に濃い灰色で示す3質点を選んだ場合の解の精度を検討する。ここでは、5個の座標  $\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$  の中から、 $\{x_1, x_3, x_5\}$  をマスタ座標に選び、 $\{x_2, x_4\}$  をスレーブ座標（内部座標）とする。マスタ座標とは、文字どおり重要な点である。スレーブ座標とは、マスタ座標間の座標で、左右のマスタ座標の値から内挿される。

縮小モデル作成の手順は、オリジナル座標系の剛性行列  $K$  を、マスタ座標と内部座標に区分けするところから始まる。その区分け行列  $T_B$  をつぎのように定義すると

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_3 \\ x_5 \\ x_2 \\ x_4 \end{bmatrix} \equiv T_B \begin{bmatrix} x_1 \\ x_3 \\ x_5 \\ x_2 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

よって、剛性行列  $K$  を書き換える。

$$K = \begin{matrix} & \begin{matrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 3 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 3 \end{bmatrix} & \end{matrix}$$

$$\rightarrow K_B^t K T_B = \begin{matrix} & \begin{matrix} x_1 & x_3 & x_5 & x_2 & x_4 \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 3 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 2 \end{bmatrix} & \begin{matrix} x_1 x_3 x_5 & x_2 x_4 \\ \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \end{matrix} \end{matrix} \quad (1.2)$$

マスタ座標を固定している状態で、その一つを順次強制変位させたときの内部座標の変形を求めると、図(b)のような静的変形モード  $\delta_G$  が求まる。すな

# 第3章

## 翼軸連成系の総合的振動解析

翼振動と軸振動の連成については、R1\_表 10・4 に示したようにつぎの2通りに分かれる。

- (1) 節直径数  $\kappa=0$  の翼振動に対して、軸のねじり振動および軸の縦振動が連成する。
- (2) 節直径数  $\kappa=1$  の翼振動に対して、軸の横（曲げ）振動が連成する。

現状の翼軸連成振動解析は、R2\_9・3 節で述べたように、翼の  $\kappa=0$  振動と軸のねじり振動の連成で、軸縦振動連成は無視されており、不完全な連成である。ここでは、上記(1)、(2)に関わるグローバルな視点で連成振動を統一的かつ精確に解析する手法の「完結版」を提供する。

### 3・1 モード合成法モデルの連成質量

モード合成法モデル化についてはR1\_4章にて詳述した。つぎの例題を通じ、それを確認しておこう。

**例題 3・1** 図 3・1 に示す 3 質点系において  $x_0$  を境界座標（マスタ座標）、 $x_1$ 、 $x_2$  を内部座標（スレーブ座標）として、モード合成法モデルを求めよ。

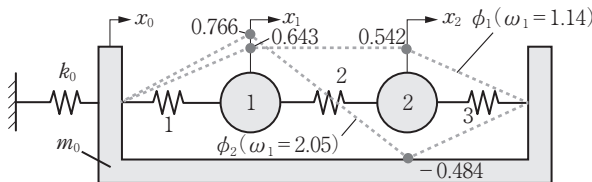


図 3・1 基礎  $(x_0)$  上の 2-DOF モデル

解 運動方程式は

$$M\ddot{X} + KX = F \quad (3\cdot1)$$

$$\text{ただし, } M = \text{diag.}[m_0 \ 1 \ 2], \quad K = \begin{bmatrix} k_0 + 4 & -1 & -3 \\ -1 & 3 & -2 \\ -3 & -2 & 5 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

強制変形モード  $\delta$  は、境界座標  $x_0 = 1$  としたときの内部座標の動き  $\{x_1 = 1, x_2 = 1\}$  だから、剛体モード  $\delta = \{x_0, x_1, x_2\} = \{1, 1, 1\} = 1$  である。また、内部系の固有モード  $\phi$  とは、境界座標  $x_0 = 0$  としたときの固有値および固有モードだから、図示の値である。対応する1次および2次固有振動数は  $\{\omega_1 \ \omega_2\} = \{1.14 \ 2.05\}$  である。モード合成変換行列は次式で定義される。

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0.643 & 0.766 \\ 1 & 0.542 & -0.454 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} \equiv [\delta \ \phi] \begin{bmatrix} x_0 \\ \eta \end{bmatrix} \quad (3\cdot2)$$

ここで、固有ベクトルは質量行列  $M$  に関して規格化されているので

$$\phi_i^t M_i \phi_i = 1 \quad (i = 1, 2)$$

であることに留意して、上式の合同変換はモード合成法モデルを与える。

$$\begin{bmatrix} m_\delta & M_c^t \\ M_c & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_0 \\ \ddot{\eta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_0 & 0 \\ 0 & [\omega_n^2] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ \eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^t F \\ [\phi]^t F \end{bmatrix} \quad (3\cdot3)$$

ただし、 $m_\delta = \delta^t M \delta = m_0 + 3$  (系全質量)、

$$[\omega_n^2] = \text{diag.}[1.314 \ 4.186] \text{ (内部系の固有値)}$$

$$M_c = [\phi]^t M \delta = [\phi]^t M \mathbf{1} \equiv \begin{bmatrix} m_{c1} \\ m_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.726 \\ -0.143 \end{bmatrix} \text{ (内部-境界連成質量)}$$

式 (3・3) の質量行列が対角行列ではないので、物理的な  $m-k$  系を描くことができない。あえて、これを模式的に振動系に描いたものが図 3・2 である。質量行列の非対角項  $m_{c1} = 1.726$ 、 $m_{c2} = -0.416$  以外は多質点の集中質量系なので、正確に対応する振動系を描くことが可能である。ここの非対角項を視覚的に理解するために、図

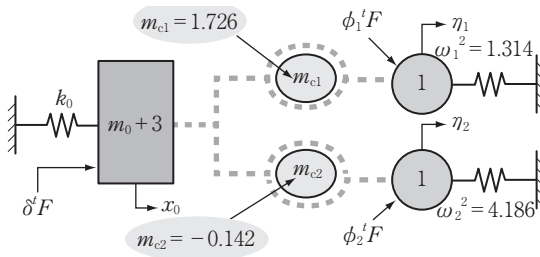


図 3・2 モード合成法モデル図の作成 (案)

# 第4章

## 振動制御技術者向け メカトロニクスの基礎<sup>24), 25)</sup>

機械系に制御系を導入し、機械に対して所望の動作をさせる構成を「モーション制御」と考えると、そのような機械は自動化・ロボット機械などと呼ばれ、産業界の至るところで活躍している。そのようなメカトロ機械は、制御対象としては剛体質量あるいは1-DOFの剛体ばねマス系と考えて、制御系設計されている。しかし、機械動作の高速化と原価低減の要請により機械の軽量化と進み、その行き過ぎの結果として「寄生振動、ビビリ振動、スピルオーバー」などと呼ばれる弾性振動問題に遭遇する場合が多い。この一連の傾向は、メカトロ機器の高性能化とともに、必然の事象のごとく多々発生している。本章では、これらの問題の解決を「弾性振動制御」と呼び、その問題解決のための考え方の中心技術を学ぶ。

### 4.1 ブロック線図

まず、はじめに、ブロック線図に従い制御システムを表現する基本構造に慣れよう。

図4.1(a)は磁気浮上系の構成図である。質量  $m$  の上下に電磁石を配置し、質量が下がれば上の電磁石が作用し吊り上げ、上に上がりすぎれば下の電磁石が作用し引き下ろす。具体的には質量の上下方向変位  $x$  [m] を変位センサで計測、その入力信号の変位量に応じてどの程度の電流を流すかを補償器の制御則に従って決定し、その出力指令がパワーアンプに送られ、指定の電流がコイルに流れ、アクチュエータである電磁石から電磁力が復元力  $u$  [N] として発生、それが質量体に作用する。いま、変位  $x$  から復元力  $u$  までの制御則が

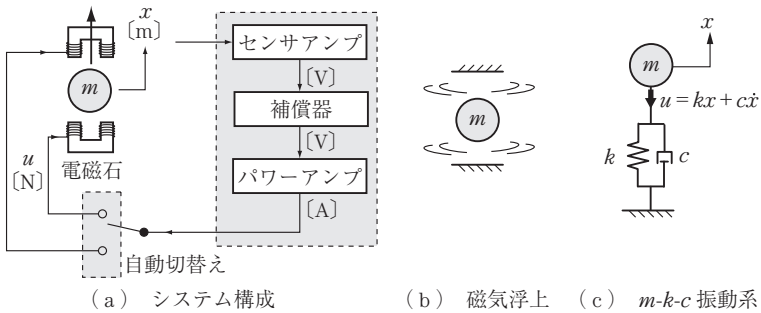


図 4・1 磁気浮上制御システムと 1-DOF モデル

「 $PD=k+cs$ 」ならば、その単位は  $[N/m]$  ゆえ、それは見えないながらも、図 (c) のばねダンパで物理的に支持していることと同等で、図 (b) の非接触磁気浮上が実現できる。

ここでは、質量  $m$  が制御対象 (control plant) で  $G_p$ 、変位  $x$  [m] から電磁力  $u$  [N] までを制御器 (regulator)  $G_r$  として、ブロック線図に描いて図 4・2 である。参照信号  $r$  は中立位置を示す値で、ここでは  $r=0$  とする。

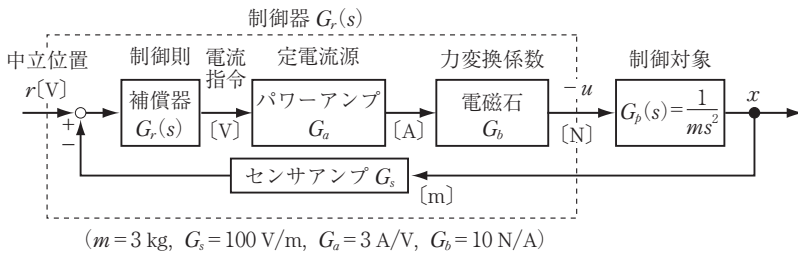


図 4・2 磁気浮上制御システムのブロック線図表現

図 4・1(c) において、質量  $m=3\text{ kg}$  の単振動系で、固有振動数  $\omega_n=20\text{ Hz}$ 、減衰比  $\zeta=0.2$  を実現するための、機械系パラメータであるばね定数  $k$  および減衰定数  $c$  は次式から求まる。

$$k = m\omega_n^2 = 47\,374\text{ [N/m]} = 93.5\text{ dB [N/m]},$$

$$c = 2\zeta(mk)^{1/2} = 1\,507\text{ [N}\cdot\text{s/m]}$$

同等のものを図 4・2 で実現しよう。系の定数は図に併記されている。また、

# 索引

## 【あ】

アウトロータ形モータ	132
アクチュエータ	64
アクティブ振動制御	166
アクティブトルクロッド 制御	174
アクティブ防振	166
安定限界回転数	31
安定限界固有振動数	31
安定性評価	77
安定判別	20, 83, 107

## 【い】

位相曲線	104
位相進み回路	70
——の最適設計	87
位相進み+積分器	71
位相進み電子回路	168
位相進みの最大値	71
位相面	116
位相余裕	77, 82, 188
位相余裕読み値	213
一巡伝達関数	→開特性
異方性	30
軸受動特性の——	30, 35
インナロータ形モータ	137
インパルス応答	84, 156, 157, 183, 188, 192

## 【う】

ウォータフォール	37, 144
後ろ向き	28, 58
後ろ向き成分	30
運動エネルギー	198

## 【え, お】

円環リング	132
エンジン支持	174
遠心ポンプ	159
オイルホイップ	27, 118, 139, 143
オイルホイップ周波数	27
オイルホワール	27, 37
オイルホワール周波数	27
オーバシュート	208
オーバシュートピーク値	184
音圧レベル	136

## 【か】

解曲線	118, 130
回転座標系	56, 135, 202
回転座標変換	195
回転するタイヤ	120
開特性 ( $G_o$ )	74, 77, 79, 80, 82, 83, 108, 153, 164, 176, 181, 187, 206, 210, 218
外周形——	219
内周形——	219
——の測定	83
ガイヤン(静)縮小法	1
外乱	85
傾き運動	142
傾き振動	145
カットオフ周波数	188
カルダーノ法	97
簡易安定判別	19, 24, 36
簡易予測法	36
慣性座標系	56, 135
慣性ダンパ	175
感度関数	84, 215, 218

## 【き】

機械系パラメータ	65
擬モーダルモデル	22, 66, 69
ギャロッピング	93
キャンベル線図	135, 136
境界座標	4, 43, 44, 45
共振条件	132
強制振動	88, 166
強制変位モード	44
強制変形モード	43
極周波数	67
「極・零」相殺	101
近似解	12
近似固有振動数	13

## 【く, け】

グヤン(静)縮小法	1
ゲイン曲線	70, 104
ゲイン交差周波数	77, 153, 163, 177, 184, 188, 205
ゲイン余裕	82, 184
ケーシング「支持」固有 振動数	38
ケーシングホワール	38
減衰効果	73
減衰固有振動数	21, 109, 118
減衰比	78, 85, 118, 157, 212
到達可能な——	167
——の測定	157
厳密解	4, 13, 29

## 【こ】

剛性行列	2, 7
剛体質量	46
剛体モードループ	213
剛体ロータ	19



合同変換  
 3, 7, 43, 46, 55, 60, 92, 147  
 コーナ周波数 71  
 ゴムの粘弾性剛性 120  
 固有振動 58  
 固有振動数 4, 77  
 ———のチューニング 97  
 固有振動数比 89, 167  
 固有振動モード 4  
 固有値問題 4, 7  
 固有ベクトル 4  
 固有モード 22

【さ】

最終値 84  
 最大位相進み 191  
 最大減衰比 124  
 最適減衰 90, 91, 124, 170  
 ジェフコットロータの—— 123  
 最適設計 87, 88, 90, 95, 170  
 サイドバイサイド制御 16  
 差動演算増幅器 115  
 サーボアナライザ 77  
 参照信号 65, 74

【し】

磁気吸引力 133  
 磁気浮上制御システム 65, 85  
 磁 極 133  
 軸剛性行列 22  
 軸ねじり・縦振動 52  
 軸曲げ振動 54  
 軸曲げモード 118  
 磁束分布 133  
 実効位相余裕 189, 213, 214  
 実モーダル 97  
 質量行列 3, 7, 22  
 「質量形」開特性 218  
 質量比 23, 89, 100  
 時定数 70, 152, 162, 205  
 自動車の走行軌跡 125  
 自動調心形玉軸受 149  
 ジャイロファクタ 49, 204

車 窓 85, 107  
 周期構造 56, 132, 137  
 縮小行列 4  
 縮小モデル 1  
 縮小モデル化 1, 44  
 主系固有振動数 89  
 主振動系 88  
 蒸気タービン 150  
 シリンダ 150  
 自励振動 93, 113, 140  
 ———の発生回転数 19  
 真円軸受 41, 117  
 振動数比 100  
 振動伝達率 166, 170

【す】

スイッチ 116  
 スカイフック 175  
 スタガ角 49, 50, 201  
 ステアリング角度 125  
 ステアリング制御 127  
 ステップ応答 84, 155, 162, 183, 188, 192, 208  
 スピルオーバー 64  
 スプリット率 54  
 スプール弁 150  
 スレーブ 45  
 スレーブ座標 2, 42  
 スロット 133, 134

【せ, そ】

制御器 65, 102  
 制御器動特性 73  
 ———の伝達関数 69, 73  
 制御系パラメータ 66  
 制御システム 64  
 制御則 64  
 制御対象 65, 102  
 制御フィルタ 185  
 正減衰 73  
 静止座標系 135, 203  
 静的変形モード 2, 6  
 静 翼 134  
 積分器 70, 86  
 積分ゲイン 70

積分操作 70  
 節直径 47, 133  
 節直径数 197  
 ゼロ点周波数→反共振周波数  
 速度ゲイン 66  
 速度制御 175  
 ゾンマーフェルト数 41, 140

【た】

第1オリフィス 159  
 第2オリフィス 159  
 体積弾性率 153, 160  
 多質点系 1  
 縦振動 47  
 縦振動モード 52  
 多点モード加振 137  
 単振動系 66  
 弾性振動 64  
 弾性振動制御 64, 185  
 弾性モード 69, 187  
 弾性モード減衰比 212  
 弾性モートループ 213  
 弾性ロータ 21

【ち】

カフィードバック 69  
 チューニング 72, 87  
 固有振動数の—— 97  
 超越方程式 120  
 直線モード 9, 44

【て】

定点周波数 170  
 定点振幅 170  
 定電流源 178  
 定点理論 89, 170, 172  
 ディフューザ 134  
 ティルティング(傾き)モード 16  
 ティルティングパッド  
 ジャーナル軸受 139  
 データベース 132  
 電磁音 136  
 電磁石 64  
 電磁振動 132

電子フィルタ 101, 104  
 電流アンプ 178  
 電流アンプ ACR 180  
 電流制御 175, 178

## 【と】

等価減衰 75  
 等価質量 22, 28  
 動吸振器 88, 166, 167  
 ——のフィルタ特性 101  
 万能薬としての—— 113  
 動吸振器固有振動数 89  
 動静翼干渉 132  
 動特性 19, 130, 140, 142  
 等方性 142  
 動翼 133  
 特性方程式 11, 32, 74  
 トラッキング解法 115  
 トレースの定理 122

## 【な】

ナイキスト線図 77, 83  
 内部系の固有値 6, 43  
 内部系の固有モード 43  
 内部座標 2, 4, 43, 45, 201

## 【ね, の】

ねじり振動 47  
 ねじりモード 53  
 粘弾性ゴムの回復特性指数 121  
 能動制御 166

## 【は】

ハイゲイン 116  
 ばね効果 73  
 ハーフスピードモード 118  
 パラメータ 41  
 パラレル (平行) モード 16  
 バランスピストン 159  
 バルブ制御機構 150  
 パワーエレクトロニクス 175  
 反共振周波数 67, 103, 186  
 半値法 85

## 【ひ】

飛行機の根軌跡 128  
 非線形ばね系の振幅応答 127  
 ピッチング 128  
 微分ゲイン 70  
 微分操作 69  
 比例ゲイン 66, 70  
 比例操作 69

## 【ふ】

フィードバック回路 115  
 副振動系 88  
 負減衰 73, 76  
 負減衰作用 76  
 負性抵抗 93, 96, 97  
 負の減衰 93  
 負ばね 73  
 プラント伝達関数 67, 69, 210  
 フリーフリー固有振動数 67  
 フルピットの安定条件 95  
 ブロック線図 64, 151, 155, 161, 206, 210

## 【へ】

並進運動 142  
 ——の動特性 145  
 並進と傾きの動特性式 147  
 閉特性 74, 152, 165, 177, 188, 207, 218  
 閉ループ伝達関数 74  
 ベクトル軌跡 79, 83, 108, 164, 207

変位センサ 64  
 変位フィードバック 68  
 変形モード 4

## 【ほ】

母子モデル 69  
 補償器 64  
 ボス部 47  
 ポテンシャルエネルギー 199  
 ボード線図 77, 87

## 【ま】

前向き 58  
 ——のふれまわり 19  
 前向き成分 30  
 曲げ振動 47  
 曲げモード 9  
 摩擦自励振動 93  
 マスタ 45  
 マスタ座標 2, 8, 42

## 【む, め】

ムジンスカロータ 36  
 むだ時間要素 121  
 メカトロ機械 64  
 メカトロニクス 64  
 面外傾きモード 202  
 面外振動 197  
 面内振動 197  
 面内変位モード 201

## 【も】

モーション制御 64  
 モータ電磁振動 132  
 モーダル減衰 99  
 モード解析 (モデル) 28, 210  
 モード加振 137  
 モード合成変換行列 201  
 モード合成法 1, 4, 145  
 ——の変換行列 6  
 モード合成法モデル 42, 46, 69, 201, 209  
 モード誤差 4  
 モード座標 44  
 モード質量 22, 217  
 モード質量形開特性 213  
 モード制御 16  
 モード分離 14  
 モード別開特性 212, 217

## 【ゆ, よ】

油圧機器 150  
 油圧弁制御システム 151  
 ヨーイング 128  
 翼 46, 52, 54

——のモード合成法モデル

	195
翼固有振動数	56, 204
翼座標系	198
翼軸連成	42, 57
翼軸連成振動解析	42
翼振動モード	197
翼ディスク	49, 57

**【ら, り】**

ラグランジュ式	199
ラプラス逆変換	84
ラプラス変換	67, 121
離散モデル化	10
理想流体	151
リニア軸ポーラ線図	79
臨界点	79, 107
臨界点 (dB/log) ポーラ図	79, 219

**【れ, ろ】**

連成質量	22, 43, 46, 47, 52, 56
連成振動	48
連続体	10
ロケットエンジン用ターボポンプ	159
ロバスト	111
ロバスト設計	112
ローリング	128

**【A】**

ACR	175, 178
ACR 特性	180
A-set	44
ASR	175, 180
ATR 制御	174

**【B】**

Bently-Muszynska モデル	19
B-M モデル	19

**【D】**

dB 軸ポーラ円	82
dB ポーラ	164
dB ポーラ軸	108
dB ポーラ軸表示	103
DC モータ	175
——のプロック線図	176
DC モータの等価回路	175

**【G】**

Guyan 縮小法	3
Guyan 縮小モード	4
Guyan (静) 縮小法	1

**【L】**

lin (軸) ポーラ線図	79
log 軸ポーラ線図	79

log ポーラ表示	103
low pass filter	178
LPF	72, 178

**【M】**

Muszynska ロータ	36
MyROT	19

**【N】**

$N+2$ 面法バランス	7
「 $N+2$ 」ルール	8
Nastran <sup>®</sup>	44

**【P】**

PBF	190
phase bump filter	190
PID 制御	69
PI 回路	178
PL 回路	70
PWM パワーアンプ	115

**【Q】**

q-set	44
Q 値	85, 214
Q 値計測	214

**【S】**

s 領域	67
------	----

**【T】**

TPJB	139
TPJ 軸受	139

**【V】**

$v\_BASE$	132
-----------	-----

**【ギリシャ文字】**

$\Delta$ 補正	81
$\lambda$ 値	41, 149

**【数字】**

1.5 自由度系	123
1D-FEM	12, 57
1次LPF	72, 190
1次遅れ系	151, 162, 205
1自由度系	19
1自由度フラッタ	93
2Dトラッキング解法	125
2次遅れ系	178, 184, 206
2次元連立方程式	131
2自由度系	21
2段軸受	169
2段軸受系	172
3D-FEM	44
3Dトラッキング解法	128
3円板回転軸系	28
3次元有限要素法	44

— 著者略歴 —

松下 修己 (まつした おさみ)  
1972年 東京大学大学院工学系研究科博士課程  
修了 (機械工学専攻)  
工学博士  
1972年 株式会社日立製作所機械研究所勤務  
1993年 防衛大学校教授  
2010年 防衛大学校名誉教授

小林 正生 (こばやし まさお)  
1977年 東京工業大学大学院理工学研究科修士  
課程修了 (機械物理工学専攻)  
1977年 石川島播磨重工業株式会社 (現 株式  
会社 IHI) 勤務  
1993年 博士 (工学) (東京工業大学)  
2021年 株式会社 IHI 退社

実践 機械システムの振動  
— 実機振動問題の簡易解析 —

Comprehensive Vibration Analysis of Mechanical System  
— For Practical Knowledge of Troubleshooting for Mechanical Vibration —

© Osami Matsushita, Masao Kobayashi 2021

2021年7月21日 初版第1刷発行



検印省略

著者 松下 修己  
小林 正生  
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  
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 978-4-339-04670-0 C3053 Printed in Japan

(柏原)



**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。