

ま え が き

本書は『回転機械の振動——実用的振動解析の基本——』（以下、前著）の続編である。前著では、発生する振動現象について本質を見失わない程度にまで簡素化されたモデルを用い、数式の助けを得て簡潔な説明につとめた。本書においても基本的なスタンスは同じであるが、サブタイトル「実機の振動問題と振動診断」が示すように、具体的な振動問題の発生に対し、測定や解析を通じて解決へと導いた振動診断の事例を多く挙げ、問題解決へのキーポイント知識を提供している。ここから振動トラブルシューティングに対するアプローチの基本的な考え方を学ぶ。

実機の振動問題として、産業界で発生した振動問題の事例を集めたデータベースに日本機械学会編「**v_BASE**」データブックがある。最新版は本年3月に発行され、全データ790件に対し、約1/2以上が回転機械に関連したものである。各種各様の実機振動問題が挙げられ、解決への苦心の足跡を物語る事例ばかりである。例えば、回転機械のコミッショニング時において振動問題に遭遇した場合、定格回転数まで昇速できないわけで、目標の未達成は明白である。あってはならないことではあるが、類似の振動問題は意外と多い。このような振動トラブルに対し、本書は強力な助っ人となることを目指している。

ロータは油軸受、転がり軸受、磁気軸受などで支えられる。有名な自励振動「オイルホイップ」が励起される油軸受に関連して、油膜特有の力学が振動に及ぼす影響について第2～4章で解説した。ほとんどのロータを支える転がり軸受については第5章で、磁気浮上制御原理を再現する磁気軸受については第6章で、それぞれの力学を語る。これらの軸受に関する知識にロータの力学的知見を加え、**v_BASE** から拾った実機の振動問題の事例を理解する。強制振動に関連した事例を第7章で、自励振動関連の事例を第8章で紹介する。以上はロータの曲げ振動に関するトピックスである。このほかにねじり振動問題も回転機械では大切で、第9章でねじり振動解析方法を説明する。

実機振動問題はFFT（高速フーリエ変換）解析器にて分析される。解析原理は工業

数学として最も重要なテーマの一つであるフーリエ変換技術である。よって、それを駆使した回転機械特有の信号処理法を第 10 章で解説する。最後の第 11 章で、これらの一連のロータダイナミクスすべての知見を応用・活用する振動診断技術について解説する。

本書で語る多くの知見は回転機械の設計者を対象に、同種の振動問題の再発防止を念頭に執筆している。また、ISO 機械状態監視診断技術者（振動、日本機械学会主宰）の試験対策になることも念じている。本書の例題と類似の問題も多く出されるようで、それらは受験者にとって難関問題らしく、本書の解答解説が受験者のあい路打開に寄与するものと期待する。また、ロータダイナミクスの研究者や教育者にも本書を薦める。特に、解析方法および数学的な考え方ならびに関連文献紹介などをご活用願いたい。

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不安もある。万全の体制で執筆につとめたが、専門の範囲も広く、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筆者らの最も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す。また、伊藤昭様（IHI）、和田和実様（新日鐵）、渡部幸夫様（東芝）、高橋直彦様（日立プラントテクノロジー）、小村英智様（3DIM 技研）などから原稿段階で有益なコメントとご指導をいただいた。さらに、防衛大学の元同僚、藤原浩幸准教授には本書の企画から入稿まで終始多大なご支援ご鞭撻^{べんたつ}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、本書の出版企画にご助力いただいたコロナ社に厚く御礼申し上げます。

2012 年 9 月

著者代表 松下 修己

目次

第1章 続回転機械の振動問題概観

1・1 回転機械の構造と特殊性	1
1・2 回転機械における振動トラブルと対策	4
1・3 健全性評価の指針	9
1・3・1 回転機械の振動に関連した国際規格	9
1・3・2 振動の許容基準	12
1・3・3 機械の状態監視と診断技術者（振動）認証制度	12
1・4 回転機械に発生する振動と振動診断	14
1・4・1 因果マトリックス	15
1・4・2 強制振動と自励振動の分類	17

第2章 すべり軸受の基礎

2・1 すべり軸受の作動原理	20
2・1・1 すべり軸受の機能	20
2・1・2 油膜の形成と油膜圧力の発生	20
2・2 油膜軸受の流体潤滑理論	22
2・2・1 座標系と油膜圧力の微分方程式	22
2・2・2 レイノルズ方程式の導出	23
2・3 すべり軸受油膜の静特性	24
2・3・1 レイノルズ方程式の無限小幅近似解法（真円軸受の場合）	24
2・3・2 油膜圧力の円周方向境界条件	25
2・3・3 軸中心の静的平衡点と軸心軌跡	26
2・3・4 定常油膜力とゾンマーフェルト数	27
2・4 すべり軸受油膜の動特性	29
2・4・1 真円軸受の油膜反力	29
2・4・2 真円軸受の線形ばね定数と線形粘性減衰係数	30
2・5 乱流油膜軸受の取扱い	32
2・6 実際のすべり軸受	34
2・6・1 各種すべり軸受	34
2・6・2 すべり軸受仕様の詳細	37

第3章 すべり軸受ロータの不釣り合い振動

3・1	不釣り合い振動の特徴	41
3・2	不釣り合い振動の表現	42
3・2・1	x - y の2方向表現	42
3・2・2	$z=x+jy$ なる複素変位表現	45
3・3	不釣り合い振動に対するすべり軸受の動特性の簡略化表現	47
3・4	軸受の種類やパラメータの影響	51
3・5	軸受支持台の剛性の影響	54

第4章 すべり軸受ロータの安定性

4・1	オイルホイップの発生原因と現象	56
4・1・1	オイルホイップの発生原因	56
4・1・2	オイルホイップの現象	57
4・2	微小振動理論に基づく真円軸受の安定判別と安定線図	59
4・2・1	座標系と運動方程式	59
4・2・2	特性方程式と安定限界速度	60
4・2・3	安定線図	63
4・3	真円軸受のオイルホイップ防止対策	65
4・4	非真円軸受の安定線図とオイルホイップ防止対策	65
4・5	オイルホイップ発生メカニズムの物理的説明	67
4・6	実際のすべり軸受における対策と注意	70
4・7	流体励起振動を防止するすべり軸受仕様	72

第5章 転がり軸受ロータの振動

5・1	転がり軸受の剛性	82
5・1・1	ラジアル方向剛性 k_r	82
5・1・2	スラスト方向剛性 k_z	85
5・2	転がり軸受の励振周波数	87
5・2・1	転動体の公転・自転周波数	87
5・2・2	玉通過に伴う励振周波数	88
5・2・3	転がり軸受の円環振動（リングング）	91
5・3	転がり軸受振動診断と信号処理	92
5・3・1	軸受箱の加速度振動波形	92
5・3・2	振幅変調	94
5・3・3	周波数帯域	94
5・3・4	エンベロープ（包絡線）処理	95

5・3・5 軸受振動診断の考え方	97
5・4 転がり軸受振動診断事例	99
5・4・1 転がり軸受損傷段階	99
5・4・2 転がり軸受損傷の振動波形とFFT解析	100

第6章 磁気軸受ロータの振動

6・1 磁気軸受の機能と特性	107
6・1・1 磁気回路	107
6・1・2 磁気軸受のサイズ	110
6・1・3 磁気軸受の磁気吸引力	112
6・1・4 磁気軸受における磁気力の線形化	115
6・2 磁気軸受のISO規格	117
6・2・1 磁気軸受用語	117
6・2・2 振動に関する評価基準	120
6・2・3 安定余裕に関する評価基準	121
6・2・4 事例研究	125
6・3 磁気軸受ロータのストレート制御	129
6・3・1 制御器伝達関数	129
6・3・2 磁気軸受の動特性	131
6・3・3 磁気軸受ロータのモデル化と制御 (1AMB)	132
6・3・4 磁気軸受ロータのモデル化と制御 (2AMBs+対称ロータ)	135
6・4 磁気軸受ロータのクロス制御	140
6・4・1 クロス制御	140
6・4・2 ふれまわり振動とクロス制御の安定性	141
6・4・3 不釣り合い振動のクロス制御	144

第7章 ロータ強制振動問題の実際

7・1 共振問題に対する考え方	154
7・1・1 回転数や負荷により変化する固有振動数や減衰比	154
7・1・2 一定回転数の回転機械と可変回転数の回転機械	155
7・1・3 一定回転中と加・減速中の振動	155
7・1・4 曲げ振動とねじり振動	155
7・2 回転機械の振動許容基準	156
7・2・1 振動規格の変遷	156
7・2・2 ISO 10816 (JIS B 0906)	157
7・2・3 ISO 7919 (JIS B 0910)	160
7・3 不釣り合い振動問題の実例	161
7・3・1 ガスタービンロータのバランス	162
7・3・2 立型ポンプの構造共振問題	164

7・3・3	ファン架構の低剛性による振動	166
7・3・4	熱曲がり振動	167
7・4	非対称ロータにおける強制振動の実例	169
7・4・1	非対称ロータにおける2次の危険速度	169
7・4・2	非対称ロータの不安定振動（モード円のだ円化）	170
7・5	歯車による振動	174
7・6	十字継手による振動	178
7・7	その他の強制振動の実例	182
7・7・1	電磁振動	182
7・7・2	旋回失速	187
7・7・3	動翼	190
7・7・4	動翼・静翼の干渉	192
7・7・5	4サイクル機関	194
7・7・6	ベルト駆動系の機械	195
7・7・7	ねじり振動の低減	197

第8章 ロータ自励振動（安定性問題）の実際

8・1	ロータの自励振動に対する考え方	201
8・1・1	自励振動の見分け方と対策	201
8・1・2	不安定化力の例	203
8・2	すべり軸受・シールによる自励振動問題	205
8・2・1	すべり軸受による自励振動（オイルホイップ）	205
8・2・2	シール（すきま流れ）による自励振動	209
8・3	翼車流体力による自励振動	213
8・3・1	タービン翼（軸流）による自励振動	213
8・3・2	遠心羽根車による自励振動	215
8・4	内部減衰による自励振動（ヒステリシスホイップ）	218
8・5	液体内蔵ロータ	221
8・6	フリクションホイップ	225
8・7	すきま流れにおけるベントリー・ムジンスカモデル	227
8・8	スクイーズフィルムダンパによる安定化	234
8・8・1	センタリングばねの有無	234
8・8・2	給排油法とエンドシール	235
8・8・3	スクイーズフィルムダンパ簡易モデルの動特性	236
8・8・4	一般的なダンパの動特性	238

第9章 ねじり振動およびその連成振動

9・1	ねじり振動の解析と計測	241
-----	-------------	-----

9・1・1	一軸系	241
9・1・2	エンジン軸系のねじり振動計測	245
9・1・3	歯車軸系	246
9・2	タービン発電機のねじり振動	249
9・2・1	タービン発電機軸系のねじり振動	249
9・2・2	ねじり振動の実測	249
9・2・3	ねじり固有振動数の計算	252
9・3	翼軸連成ねじり振動	253
9・3・1	翼軸連成ねじり振動問題の発端	253
9・3・2	翼振動(節直径数=0)の等価質点モデル	255
9・3・3	翼軸連成モデルの例	256
9・3・4	翼軸連成固有振動数の計算例	257
9・3・5	翼軸連成の効果	258
9・3・6	翼軸連成振動の実測による精度検証	260
9・4	曲げ・ねじり連成振動	265
9・4・1	曲げ・ねじり連成振動の運動方程式	265
9・4・2	曲げ・ねじり連成振動の安定性	268

第10章 回転機械の振動信号処理

10・1	ベクトルモニタ(バランスアナライザ)	278
10・1・1	ベクトルモニタ	278
10・1・2	PLL	279
10・1・3	ボード線図とナイキスト線図	280
10・2	不釣り合い振動の信号処理	282
10・2・1	不釣り合い振動波形と軸心軌跡	282
10・2・2	振動計測	283
10・2・3	不釣り合い振動のプロック線図	283
10・2・4	前向き不釣り合い振動成分抽出	285
10・2・5	前向き不釣り合い振動成分のみに注目したバランス	287
10・3	フーリエ級数展開(Fourier series expansion)	288
10・3・1	内在する \cos/\sin 波の振幅検出例	288
10・3・2	フーリエ級数展開の原理	290
10・4	離散フーリエ変換(DFT, Discrete Fourier Transformation)	292
10・4・1	離散フーリエ変換の原理	292
10・4・2	複素振幅のミラー(折返し)現象	294
10・4・3	サンプリング値	295
10・4・4	エリアシング(aliasing, 折返し)誤差	295
10・4・5	ノイズからの脱出	299
10・5	FFT解析の実際	300
10・5・1	基本仕様	301

10・5・2	信号処理手順	302
10・5・3	同期関数/非同期関数の DFT	303
10・5・4	フーリエ変換	306
10・5・5	分解能 (resolution)	309
10・5・6	オーバーオール	310
10・5・7	FFT アナライザの応用	313
10・6	FFT ズーム機能	317
10・6・1	原信号の FFT	317
10・6・2	周波数シフトと LPF	318
10・6・3	DFT と片側スペクトル表示	320
10・6・4	スペクトルズーム表示	321
10・7	フルスペクトル (full spectrum)	322
10・7・1	概 念	322
10・7・2	1 チャンネル FFT	323
10・7・3	2 チャンネル FFT	323
10・7・4	フルスペクトルによる振動診断例	324

第 11 章 回転機械ロータの振動診断と対策

11・1	機械が不調となる振動の大きさの判定	327
11・2	振動が大きくなる理由	330
11・2・1	ロータに異常が発生	330
11・2・2	共振している, 共振感度が高い	331
11・2・3	ミスアライメントがある	332
11・2・4	接触している	334
11・2・5	転がり軸受の損傷や不具合	336
11・2・6	歯車の損傷や不具合	337
11・2・7	ロータに付属する翼, 羽根車とその静止部に起因する不具合	339
11・2・8	機械のゆるみ, ガタ	339
11・2・9	不安定 (自励振動) の発生	340
11・3	原因と発生振動数	341
11・4	振動診断の方法	343
11・4・1	時間領域での観察	343
11・4・2	周波数領域での観察	344
11・4・3	位相情報の活用	348
11・4・4	ロータ振動の特徴分析概観	348
11・5	振 動 の 対 策	352
11・6	振動診断の手順	354
11・7	振動診断の演習	361

付 録

付録 1 無限小幅近似真円軸受のばね定数と粘性減衰係数	371
付録 2 だ 円 座 標	372
付録 3 フーリエ変換	373
付録 3・1 フーリエ変換の定義	373
付録 3・2 フーリエ変換の例	375
付録 3・3 窓関数の振幅スペクトルの比較	380
付録 4 PLL 回路および同期正弦波発生回路	383
付録 5 キャンベル線図	385
引用・参考文献	388
索 引	398

第1章

続 回転機械の振動問題概観

本書は、前著「回転機械の振動——実用的振動解析の基本——」（以下、R1と記す）に続くもので、副題「実機の振動問題と振動診断」が示すように、回転機械の振動問題に対して振動事例をもとに、現象・メカニズム面から整理して解説することに力を置いている。また、現場において必要になる振動診断、および振動対策に直接役立つことを意図して構成することとした。

回転機械で実際に発生している現象のようすについては振動や騒音などを計測すればわかるが、それを対策に直接結び付けることはなかなか難しい。観測される現象のようすから真の原因を推定するには、事例についての豊富な知識が必要になる。本書は、こうした振動問題の現場における解決の一助となることを意図した。

1.1 回転機械の構造と特殊性

回転機械の構造例として、図1.1に車両用過給機（ターボチャージャ）を示す。過給機は内燃機関の排気ガスのエネルギーを利用してタービン翼車を高速回転させ、その回転力で同軸の遠心圧縮機翼車を駆動して内燃機関燃焼室へ吸気を高圧力で押し込む。これによって熱効率を上げ、見掛けの排気量を超える出力を得るために用いられるターボ機械である。機械振動の観点からこの回転機械の構造を見ると

- ① 回転軸（ロータ：回転する部分）
- ② ケーシング・ハウジング（ステータ：静止部分）

があり、さらにそれらをつなぐ部分として

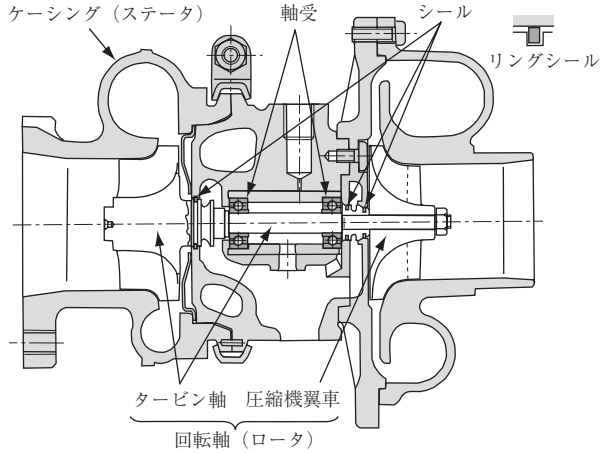


図 1・1 車両用過給機（ターボチャージャ）

③ 軸受・シール（ロータとステータをつなぐ部分）

の3部分に区分できる。回転機械の中には図 1・2 のように、回転体を中空軸にして多重に配置する構造もある。航空エンジンやガスタービンでは、内側に低圧回転軸（LP ロータ）、外側に高圧回転軸（HP ロータ）を配置して、高圧回転軸で発生させた燃焼ガスで低速回転軸を駆動する多重形式の回転軸構造がよく用いられる。複雑ではあるが、基本構造としてはターボチャージャと同様である。

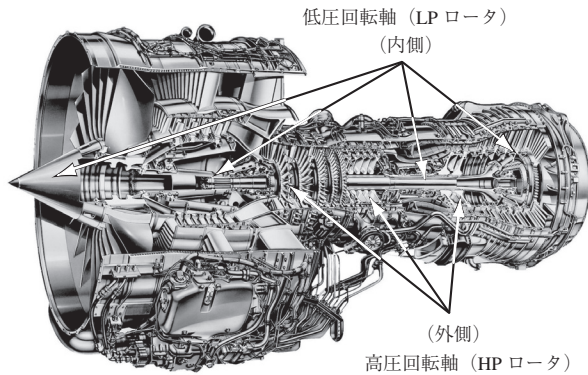


図 1・2 航空エンジンのロータ構造
（提供：一般財団法人 日本航空機エンジン協会）

これらの回転機械をどこまでどのようにモデル化するのは、つねに難しい問題である。まず、軸の回転方向自由度の振動であるねじり振動では、ロータ部分のみのモデル化でよい。しかし、軸の横方向自由度の振動である曲げ振動では、軸受・シール部の動特性やケーシング・ハウジングの動特性が振動解析結果に大きく影響する。このため、軸受・シール部はモデルにつねに含める必要がある。ケーシングについては、回転軸の回転数範囲とケーシングを考慮した場合の危険速度（不釣り合い振動の共振回転数）で決まる。ケーシングが剛で回転数範囲内の危険速度に影響がなければケーシングのモデル化は不要であるが、ケーシングが柔で危険速度に影響する場合はケーシングまでモデル化することが必要になる。

振動系として見た回転機械は、いくつかの点で一般構造物と大きく異なる。一番大きな差異は、前述の③軸受・シールなど回転機械に特有な要素の動特性に由来するもので、システム全体を特徴付けるほどの影響がある。このため、本書では、すべり軸受を中心に、転がり軸受および磁気軸受についても力点を置いて解説する。

これらの要素の動特性は、回転数および負荷ならびに圧力などの運転状態で大きく変化し、モデル化するとふれまわりの自由度（ x 、 y の2自由度）で表現でき、 2×2 の成分を持つ減衰マトリックスや剛性マトリックスとなる。このマトリックスは非対角成分（ xy 、 yx 成分）が対角成分（ xx 、 yy 成分）よりも大きな場合がある。特に、剛性マトリックス非対角成分における非対称性は振動安定性に影響があり、すべり軸受におけるオイルホイップ（oil whip）などの不安定振動（自励振動）の原因となることが知られている。

つぎの大きな相違は、回転軸においては、回転することによって回転数に比例して大きさが変わるジャイロモーメント（こまを立たせる作用）が生じることである。この結果、 x 方向振動と y 方向振動が相互に連成する。このジャイロモーメントはマトリックスで表現すると反対称マトリックスとなる。このため、先の軸受特性の非対称性も含め、対称マトリックスを前提にしている多くの解析手法や市販の汎用FEM（有限要素法）ソフトが、回転機械の振動解析にはそのままでは使えない。R1第12章で紹介したMyROTなど、ロータ振動に特化したソフトが活躍するゆえんである。

また、軸受特性は自励振動の原因となる場合があることを述べたが、すべり軸受や油膜ダンパが有する減衰は、一般構造物で考慮する材料減衰や構造減衰などとは比較

にならないほど大きい。したがって、不安定化要素も大きい、安定化要素も大きい。回転機械では使用回転数全領域にわたって安定した回転を実現することが重要であり、こうした振動安定性の検討が必須である。このため、固有振動数だけでなく減衰比も求める複素固有値解析がよく一般的に用いられる。

1.2 回転機械における振動トラブルと対策

高性能な機械の開発段階では、予期しえぬ現象が生じて機能をまったく果たせないような問題がよく発生する。その現象がわかっているのであれば対策はやさしいが、ほとんど前例のない未知の場合にはその解明にたいへんな困難を伴う。しかし、この解明自体によって技術は着実に進歩する。

歴史を見るに、振動工学の分野では、有名なタコマ橋の落橋問題に端を発して耐風安定性の良い橋梁^{りょう}設計技術が進歩した。日本における飛行機の翼のフラッタ問題は、ゼロ戦の開発において特定飛行速度以上で尾翼が飛散してしまう問題から始まった。また、すべり軸受で生じるオイルホイップなどの自励振動も、より高速運転を目指した回転機械において軒並みに大振動が発生するという深刻な問題があり、そのメカニズムを解明するところから一連の技術進歩が始まっている。このように振動工学は機械の性能向上に付随する形を採りながら進歩してきている。このため機械には実際に

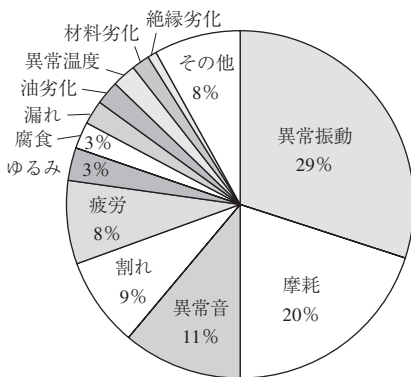


図 1-3 回転機械における
トラブル事例

どのような振動現象があり、それに対してどのような対策が採られているかを知っておくことは、同じ問題を繰り返さずに、より高性能な機械を開発するために重要である。

企業の現場では、実際には規模が大きいものから小さいものまで、多くの振動トラブルが日常的に起きている。回転機械の設備診断としてトラブル事例を調査し、故障モード別に整理した例を図 1-3 に示す。これによると、「異常振動」が

29%、「異常音」が11%、「疲労」が8%であり、また「摩耗」の20%も振動が原因である場合が多い。こうしてみると、回転機械で発生するトラブルのなんと半分以上が、直接的あるいは間接的に振動が関与した問題といえる。

このように、回転機械に振動は付き物である。原因があつて結果として振動が生じているわけで、これを早急に対策することが必要になる。通常は、以下の手順を踏みながら対策（トラブルシューティング）を行う。

〔1〕 機械構造の理解、情報の収集

最初に機械の構造（しくみ）を理解することが大切である。図面を見て担当者から話を聴く。振動技術的に難しいことをやっているのか、常識に照らし合わせて判断する。特に現物を見ることが大切である。また、問題を生じている機械の運転担当者や機械の状態に詳しい現場の人々からの情報収集も大切である。

〔2〕 振動の計測・調査

つぎに、生じている現象を把握するために計測を行う。人間が病気の場合にはどこが痛いなどの意思表示をしてくれるが、機械では現象把握のための計測が必要である。結果として振動が大きいのであり、計測するのは振動だけには限らない。原因として可能性のあるもの（運転条件、例えば圧力や温度など）も計測してみる。回転数を変えて振動の発生状態の変化を見ることも重要である。

情報量が多い方がよいように思えるが、実際のところ現象把握と原因検討に役立つ最終的なデータはわずかである。データを取るのが最終目標でないので、決め手となる核心データを早期に入手できるようにする。

〔3〕 原因の推定

現象がだいたい把握できれば、つぎにその原因を推測する。事例を調べ、メカニズムを明確にするための簡易モデル計算を行う。大掛かりな解析が必要となる場合があるかも知れない。

表 1・1 に、回転機械における振動の現象と原因を大まかに分類整理した例を示す。各種の振動問題は、まず強制振動と自励振動に分類され、続いて要因別に分類される。

〔4〕 対策の実施

原因の推定がつけば、つぎは対策である。この時点で十分に原因が突き止められて

表 1-1 振動の現象と原因

		強制振動	
不 釣 合 い 振 動	残留不釣り合い過大 サーマルアンバランス 回転体変形 ミスアライメント クラックドロータ ボウドロータ 基礎不良	機 構 に よ る 力	電磁力 転がり軸受励振力 歯車励振力 十字（フックス）継手 機構（カム・リンク）
	共 振		不釣り合い振動共振 高・分数調波共振 ねじり共振 選択共振
流 体 力	旋回失速・ キャビテーション 気柱振動 燃焼振動		

いる必要はない。問題解決は時間との勝負でもある。原因を仮定して対策し、その結果が予想通りならば、その仮定が証明されたことになる。最終的には因果関係を定量的にまとめ、技術として残すことが大切である。

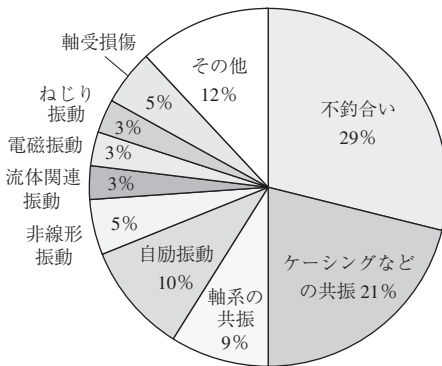


図 1-4 回転機械の振動原因の比率の一例

図 1-4 に、ある特定の機種において過去の振動トラブル事例の原因を比率で整理した結果を示す。機種によってこれらの構成比率は当然に異なる。この場合では、不釣り合いや共振など強制振動に関連する項目が多く、自励振動の割合（10%）は思いのほか少ない。

図 1-4 に、ある特定の機種において過去の振動トラブル事例の原因を比率で整理した結果を示す。機種によってこれらの構成比率は当然に異なる。この場合では、不釣り合いや共振など強制振動に関連する項目が多く、自励振動の割合（10%）は思いのほか少ない。

補遺 1 回転機械における予防保全の方法 機械設備の保全を行う方法は、故障が発生してから行う「事後保全」と、故障が起きる前に計画的に実施する「予防保全」に大別できる。「予防保全」は大きく分けると、TBM（time based maintenance, 時間基準予防保全）と呼ばれる一定周期の間隔で定期的な点検、補修、部品交換を行

索 引

【あ】	——のインペラ	215	ガスホワール	202	
圧力分布	24	エンジン軸系	245	ガ タ	339
アライメント	332	遠心振り子	198	過大振動	55
アラーム値	→警報値	遠心分離機	149	カップリング	332
アルフォードフォース	214	遠心力場のスロッシング	223	カテゴリー	13
アルミ基合金	38	エンドシール	235	かみ合い (異常, 周波数)	174,337,338
アンチエリアシング		エンベロープ (包絡線)	95	カルダン継手	178
フィルタ	296	【お】		乾式スクリュウ	
安定限界軸回転速度	62	オイルホイップ		コンプレッサ	103
安定性	268	36,41,56,67,205,326,340		慣性係数	47,238
安定線図	63	オイルホワール (ハーフ		感度関数	122,138
安定余裕	121,128,138	スピードホワール)		【き】	
【い】		58,67,205		危険速度	41
位相同期ループ	279	応答曲線	54	——の感度	41
位相余裕	122,132	大形回転機械	41	危険速度マップ	126,127,134,136
一軸ねじり振動系	241	置き曲がり	348	技術委員会	9
異方性	38,54	オーバオール	310	気筒数	194
因果マトリックス	15	オービット (リサージュ)		キーボット	38
インパルス試験	313	オフセット軸受 →偏心軸受	340,343	気泡発生	→油膜破断
インレットガイドベーン	193	オフセットピボット	38	キー溝	169
【う】		オフラインモニタリング	8	ギヤード圧縮機	177
ウォータフォール線図		折返し現象	294	ギヤード圧縮機	177
	345,357	折れ角	179	キャビテーション→油膜破断	
後ろ向き	225	オンラインモニタリング	8	キャリアリング	37
後ろ向きホワール	44,51	【か】		キャンベル線図	17,262,345,385
渦巻ポンプ (ポリユート		回転座標系	267	給油孔	34,235
ポンプ)	190	回転磁界	183	給油溝	34
【え】		回転周波数	88	給油量不足	340
エアギャップ	184	外部減衰	271	ギョンベルの境界条件	26
影響係数	162	外輪傷	336	境界潤滑	71
液体内臓ロータ	221	外輪玉通過周波数	88	共振感度	331
エネルギー収支	67	開ループ伝達関数	122,123	共振振幅	41
エリアシング (誤差)	295,320	開ループ特性	135,137	【く】	
円環衝撃振動		過給機	1	食い違い軸受	→偏心軸受
(リングング周波数)	96	重なりかみ合い率	175	矩形窓関数	377
円環振動 (リングング)	91,96	重ね板ばね式の		くさび効果	41
遠心圧縮機	189	カップリング	220		
		ガスタービン	2,163		

駆動軸 179
 クラウニング 220
 クロス (カップリング)
 ばね →連成ばね
 クロス制御 129,140,149
 クロスばね →連成ばね

【け】

傾斜パッド軸受
 →テイルテイングパッド軸受
 係数励振 (パラメトリック励振) 196
 計測ギヤ 245
 ケイ素鋼板 →電磁鋼板
 系の減衰比 75
 系の散逸エネルギー 72
 警報値 (アラーム値) 160,237
 ケーシング 1
 減衰 (効果, 能力) 41

【こ】

高圧流体振動 210
 航空エンジン 2,224
 剛性行列 42
 高速フーリエ変換 292
 国際電気標準会議 10
 国際標準化機構 9
 固有振動数 60
 固有モード 135
 コリオリ力 229
 転がり軸受 20,41,82,83
 転がり軸受 (の) 診断 93,105
 転がり軸受振動診断 97
 転がり軸受損傷段階 99
 転がり接触時のふれまわり 225

【さ】

最小油膜厚さ 22,71
 サイズモ式ピックアップ 157
 最大軸振動変位 160
 サイドバイサイド制御 129
 サイドバンド →側帯波
 サイドロープ 380
 作業班 9
 差分法 31
 算術平均 346
 サンプリング値 295

【し】

ジェフコットロータ 59
 時間基準予防保全 6
 時間波形 343
 磁気回路 108,113
 磁気吸引力 109
 磁気軸受 20,110,111,118
 —のシンボル 118
 磁気飽和 114
 仕切り板 223
 磁気力の線形化 115
 軸 41
 —の弾性度係数 65
 —の弾性度指数 54,60
 —の偏心率 24
 —の曲がり 330
 軸受系 41
 軸受支持台剛性 55
 軸受支持台の動特性 54
 軸受ジャーナル接触 336
 軸受定数 63,65
 軸受パッド 209
 軸受平均半径すきま 21,60
 軸受ミスアライメント 332
 軸剛性の非対称性 330
 軸心軌跡 70
 軸方向アライメント 38
 軸流圧縮機 187
 軸流タービン翼車 213
 事後保全 6
 自在継手 178
 支持台剛性 42
 地震波加振 152
 次数比分析 344
 指数平均 346
 磁束の漏れ 114
 実効値 310
 実効非対称率 171
 質量行列 42
 質量効果 48
 シムアップ 353
 ジャイロ行列 42
 ジャイロ項 50
 シャントホール 212,215
 十字継手 178
 修正ゾンマーフェルト数 33
 従動軸 179
 周波数応答解析 314

周波数変調 338
 主対角項 36
 潤滑不良 342
 蒸気タービン 211
 蒸気によるあおり 214
 状態監視 15
 状態基準予防保全 7
 衝突振動 335
 正面かみ合い率 175
 シール・ラビリンズ不安定 340
 自励振動 →不安定振動
 真円軸受 20,52,53,54,371
 心ずれ 332
 診断 15
 診断技術者(振動)認証制度 12
 振動因果マトリックス 341
 振動工学データベース
 研究会 18
 振動値のトレンド 328
 振動評価 121,127
 振動ベクトル変化 328
 振幅変調 94,337
 心振れ 333

【す】

水中軸受 47
 スクィーズフィルムダンパ 234
 スズ基金金 38
 スチームホワール 202,340,370
 ストレート制御 129,140
 スパイラル振動 168
 スベクトル解析 344
 すべりうなり音 185
 すべり軸受 20,41,54
 すべり軸受油膜
 —の不安定化作用 56
 —の連成ばね定数 57
 スポット傷 91
 ズーム機能 317
 スラスト (方向) 剛性 85,86
 スワールブレーカ 212,354

【せ】

静荷重 20,41
 制御オプション 146
 静的平衡点 22

パラメトリック励振 →係数励振	フーリエ変換 (対)	303,373	マシュー方程式	196
バランサ	フリクションホイップ	225,336	窓関数	305,307
バランスング→バランス(作業)	振り子振動	335	窓時間	303
284	フルスペクトル	322	摩 耗	338
バランスアナライザ	ブレード不安定	340	マルチスパンロータ	332
279	振れ止め振動	336	【み】	
バルクフロー理論	ふれまわり軌跡	44	ミスアライメント	332
210	ふれまわり振幅	57	ミスカップリング	332
ハンマリリング(打撃試験)	分解能 (resolution)	309	ミラー現象	294
201	分科会	9	【む】	
【ひ】	【へ】		無限小幅軸受近似解法	25
微小振動理論	平均周速比	228	無次元安定限界速度	62
ヒステリシス	米国石油協会	10	無次元回転数	52
352	ベクトルモニタ	279	無次元長軸振幅	52
ヒステリシスホイップ	ベースライン	159,327	無次元動剛性	49
204,218	ヘテロポーラ形	118	無次元油膜係数 →油膜係数	
ピストンの回転軸	ベルト駆動	195	【め】	
198	偏角取付け	338	メインローブ	380
歪みゲージ	偏心角	22,28	面開き	332
244	偏心軸受(オフセット軸受,	35,208,	面振れ	333
非接触シール	食い違い軸受)		【も】	
210	偏心取付け	338	モジュール	175
非対称軸剛性	偏心(ピッチ円) 誤差	177	モード円のだ円化	170
331	偏心率	47	モード(剛性)非対称率	171
非対称ロータ	ベントリー・ムジンスカ	228	モード制御	130
169	モデル		モード分離制御法	137
ピッチ誤差	【ほ】		モード別影響係数法	162
177,337,338	ホイール歯車	177	モートン効果	168,334
ヒットアンドバウンス	ポウドロータ	167	【ゆ】	
336	包絡線 →エンベロープ	336	有限要素法	71
非同期振動	保持器欠陥	336	誘導機	182
201	ボード線図	280,357	油膜厚さ	24
ビボット(位置, 形状)	ホモポーラ形	118	油膜係数(無次元油膜係数)	47
37	ポーラ線図	358	油膜軸受	20
評価基準 I, II	ポリユートポンプ→渦巻ポンプ		油膜動特性	41
159	ホワール軌跡	285	油膜の仕事量	206
平歯車	ポンプ	47	油膜破断(気泡発生, キャビテーション)	41,237
175	【ま】		ゆるみ	339
【ふ】	前向き	204	【よ】	
ファン	前向きホワール	44,51	予 圧	35,105
166,169	曲げ剛性	59	予圧係数	37,54
不安定化力	曲げ・ねじり連成	265,275		
41,203	曲げ・ねじり連成振動の 安定性	268		
不安定振動(自励振動)	摩擦クラッチ	243		
41,56,201				
フィードバック制御				
151				
フィードフォワード制御				
151				
フィールドバランス				
162				
付加質量効果				
238				
複素加振力				
44				
複素固有値(解析)				
4,44				
フック継手				
178				
不釣合い				
330				
——位相				
42				
——応答				
55				
——振動				
41,161,282				
——量				
42				
フードダンパ				
197				
部分円弧真円軸受				
48,50				
フラットトップ窓関数				
305,378				
プーリ				
195				
フーリエ級数展開				
288				

翼軸連成	386	乱流潤滑理論	32	レイノルズ (境界) 条件	26,31
翼軸連成ねじり振動	253,261				
翼軸連成モード	259	【り】		レイノルズ数	32
翼通過周波数	190,339	リサージュ → オービット		レイノルズの流体潤滑理論	
翼・ディスクの連成	192		343	連成項	36
予知保全	7	離散フーリエ変換	292	連成 (クロスカップリング)	
予防保全	6	流体潤滑理論	22	ばね	142,204
		流体力の釣合せ	192	連成モード	258
【ら】		流体励起振動	72	連続の式	23
ラウス・フルビッツ	61	リンギング → 円環振動			
ラジアル (方向) 剛性	83,84	リンギング周波数 → 円環振動		【ろ】	
ラズボーンチャート	156			ロータ系	41
ラビリンスシール	205,209	【る】		ロータバー (の不良)	184
ラビング振動	325	ルーツプロア	195	ローリングピボット	38
ランアウト	358				
乱調	183	【れ】			
乱調周波数	366	励振周波数	89		

【A】		【C】		【H】	
AE センサ	7	Cardan joint → カルダン継手		Hooke's joint → フック継手	
Alford フォース		CBM, condition based maintenance → 状態基準予防保全		HP ロータ	2
→ アルフォードフォース		CFD ソフト	210	hunting → 乱調	
AMB, active magnetic bearing		cross joint → 十字継手		【I】	
→ 磁気軸受		【D】		IEC, International Electro-technical Commission	
AMB システムのプロック線図	119	DFT, Discrete Fourier Transformation		→ 国際電気標準会議	
API, American Petroleum Institute		→ 離散フーリエ変換		IGV → インレットガイドベーン	
→ 米国石油協会		【F】		ISO, International Organization for Standardization	9
API 617	11,215	FB 制御 → フィードバック制御		ISO 10814 (JIS B 0911)	10
【B】		FF 制御		ISO 10816 (JIS B 0906)	10,12,156,157
backward → 後ろ向き		→ フィードフォワード制御		ISO 13373	11,12
baseline value → ベースライン		FFT, Fast Fourier Transformation → 高速フーリエ変換		ISO-14839	117
Bently Muszynska モデル		FFT 解析	300	ISO 18436	12
→ ベントリー・ムジンスカモデル		forward → 前向き		ISO 1940	10
bowed rotor → ボウドロータ		Fourier series expansion		ISO 2041 (JIS B 0153)	10
BPF, blade passing frequency		→ フーリエ級数展開		ISO 7919 (JIS B 0910)	10,12,156,160
→ 翼通過周波数		FRA, Frequency Response Analysis		【J】	
BPFI, ball pass frequency inner race		→ 周波数応答解析		JIS, Japanese Industrial Standard	
→ 内輪玉通過周波数		free-free 条件	359	→ 日本工業規格	
BPFO, ball pass frequency outer race		FTF, fundamental train frequency		JIS B 0153 → ISO 2041	
→ 外輪玉通過周波数		→ 回転周波数		JIS B 0906 → ISO 10816	

JIS B 0911 → ISO 10814

[L]

labyrinth seal
→ラビンリンシール
LBP, load between pads 38,212
LOP, load on pad 38,213
LP ロータ 2

[M]

Mathieu 方程式
→マシユー方程式
MCSA, motor current
signature analysis
→電動機電流徴候解析
Morton effect →モートン効果

[N]

N カット 146
N クロス 146
Newkirk effect
→ニューカーク効果
non-synchronous vibration
→非同期振動

[O]

oil film bearing →油膜軸受
oil whip →オイルホイップ
oil whirl →オイルホワール

[P]

PAD 64
PLL, phase locked-loop
→位相同期ループ
PLL 回路 383
predictive maintenance
→予知保全

[Q]

Q 値 (ファクタ) 155

[R]

RBM, risk based maintenance 8
resolution →分解能
Reynolds の流体潤滑理論
→レイノルズの流体潤滑理論
rms →実効値
rolling bearing →転がり軸受
rotating stall →旋回失速

[S]

SC, Sub-Committee 9
self-excited vibration
→自励振動
side by side 制御
→サイドバイサイド制御
SN 比 299
SNR, signal to noise ratio, S/N 299
Sommerfeld 変換
→ゾンマーフェルト変換
squeeze film damper
→スクイズフィルムダンパ
step-out →脱調
sub-synchronous vibration
→低周波振動
swirl →旋回流

[T]

TBM, time based maintenance →時間基準予防保全
TC, Technical Committee 9
TC108 9
Thomas フォース
→トーマスフォース
twice (double) slip frequency 186

[U]

UFRC, unbalance force
rejection control
→N カット

universal joint →自在継手

[V]

v *BASE* 18
VDI 規格 156
vector monitor
→ベクトルモニタ

[W]

Wachel の式 216
Web-Learning 341
WG, Working Group 9
WRF, whirl frequency ratio 62

[X]

XY 異方性 41
XY クロス制御 →クロス制御
XY ストレート制御
→ストレート制御
XY 連成項 41
XY 連成効果 49

【ギリシャ文字】

π フィルムモデル 237

【アラビア数字】

1 次危険速度 331
2 円弧軸受 35,51,53,54
2 極機 183
2 次の危険速度 169,331
2 π フィルムモデル 237
2 溝付き真円軸受 35,63
3 円弧軸受 35
4 円弧軸受 35
4 極機 183
4 サイクル機関 194
4 Pad LBP 53
4 枚 (ティルティング)
パッド軸受 53,54
5 Pad LBP 53
5 Pad LOP 53
5 枚 (ティルティング)
パッド軸受 53,54

— 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

現在に至る

1993年 博士(工学)(東京工業大学)

神吉 博 (かんき ひろし)

1970年 神戸大学大学院工学研究科修士課程
修了(機械工学専攻)

株式会社三菱重工勤務

1977年 工学博士(大阪大学)

1995年 神戸大学教授

2009年 神戸大学名誉教授

田中 正人 (たなか まさと)

1971年 東京大学大学院工学系研究科博士課程
修了(産業機械工学専攻)
工学博士

1984年 東京大学教授

2004年 東京大学名誉教授

2004年 独立行政法人大学評価・学位授与機構
教授

2007年 富山県立大学学長

2011年 富山県立大学名誉教授

古池 治孝 (こいけ はるとか)

1968年 京都大学大学院工学研究科修士課程
修了(精密工学専攻)

1968年 川崎重工工業株式会社技術研究所勤務

1998年 博士(工学)(京都大学)

1999年 財団法人高輝度光科学研究センター
(SPring-8) 勤務

1999年 岡山大学産学官融合センター客員教授

続 回転機械の振動—実機の振動問題と振動診断—

The Second Volume of Vibration of Rotating Machinery

— Applications of Analysis, Troubleshooting and Diagnosis —

© Matsushita, Tanaka, Kobayashi, Koike, Kanki 2012

2012年12月5日 初版第1刷発行



検印省略

著者 松下 修己
田中 正人
小林 正生
古池 治孝
神吉 博
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 萩原印刷株式会社

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 978-4-339-04608-3 (横尾) (製本:グリーン)

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