

## 蒸気タービン・発電機軸系のねじり振動

**TOSHIBA**

東芝エネルギーシステムズ エネルギーシステム技術開発センター  
平野俊夫

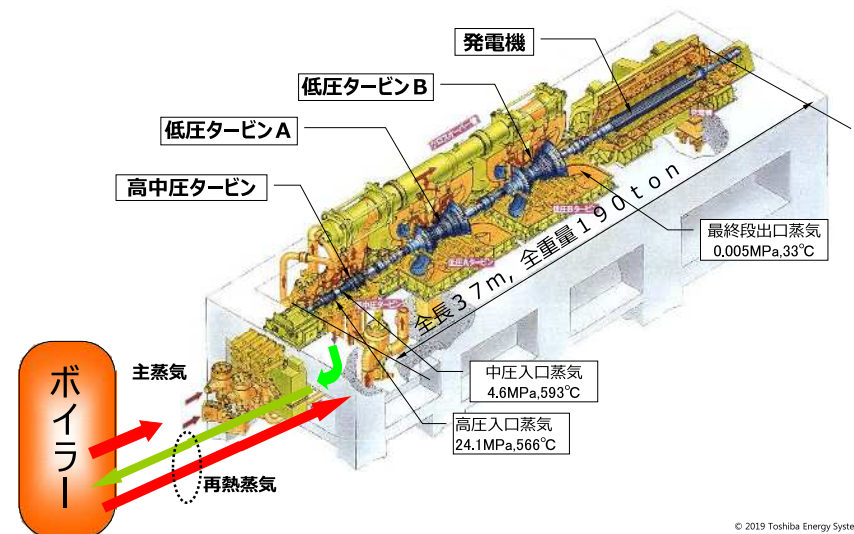
## Contents

- 01 蒸気タービンの特徴
- 02 蒸気タービンに発生するねじり振動
- 03 関連するISO規格と評価規準
- 04 ねじり振動の事例 (EPRIレポートより)
- 05 まとめ

# 01

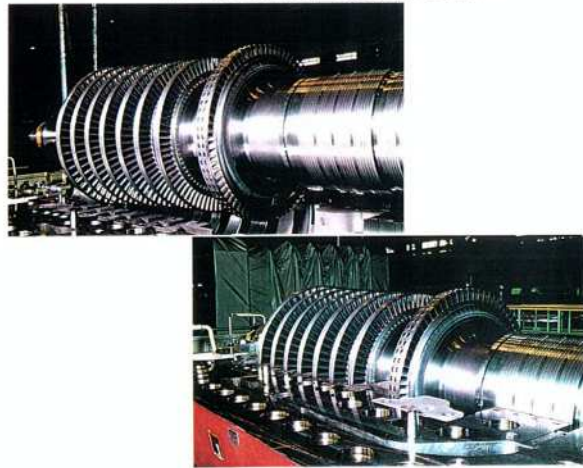
## 蒸気タービンの特徴

## 蒸気タービン・発電機の構造(700MWタンデム機)

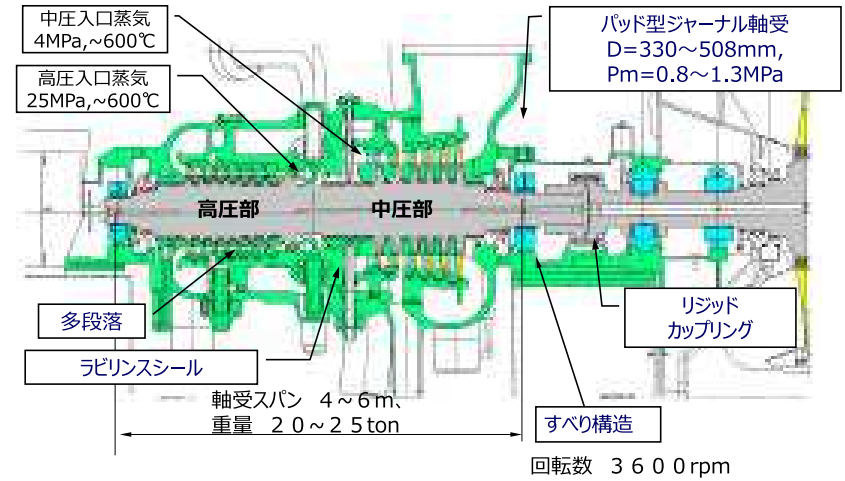


## 蒸気タービン高圧ロータ

HP ROTOR OF 600MW UNIT



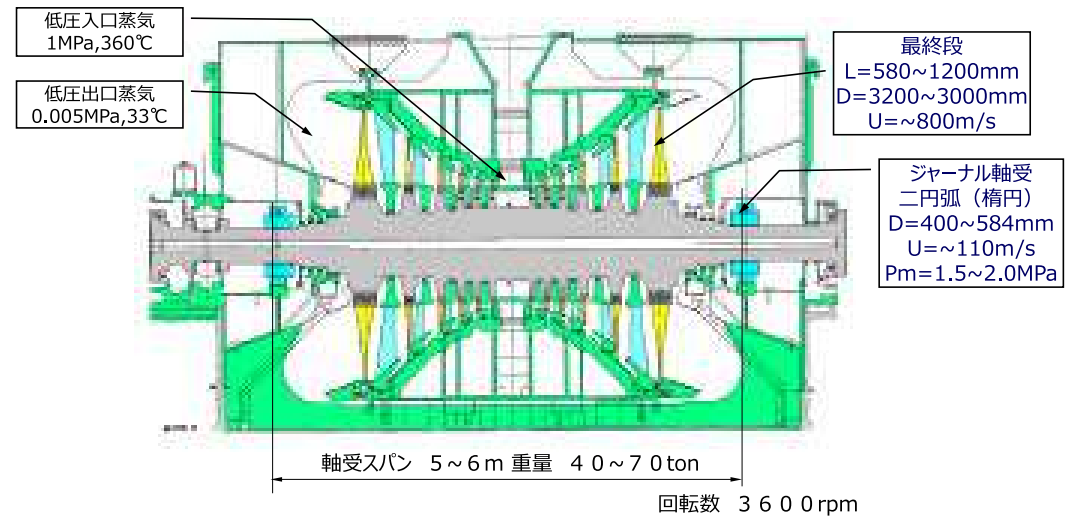
## 蒸気タービン高中圧ロータの構造



## 蒸気タービン低圧ロータ



## 蒸気タービン低圧ロータの構造

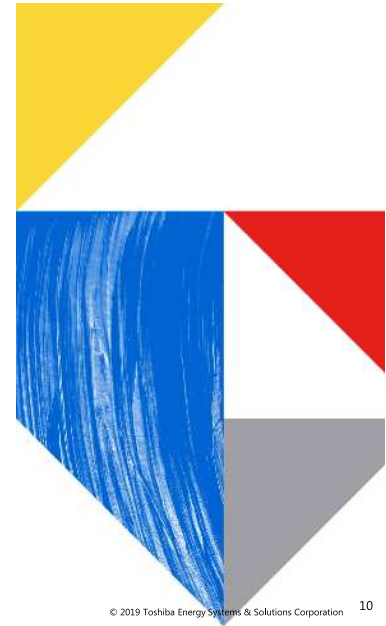


## 蒸気タービンに発生する代表的な振動

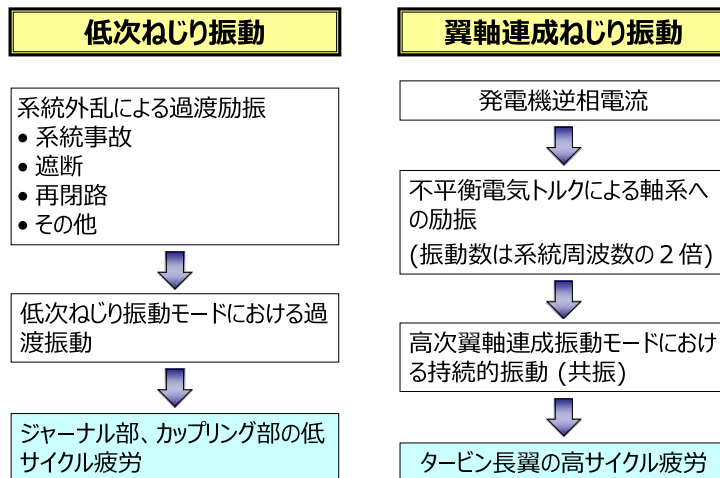
大分類	小分類
残留不釣り合い（回転同期振動）	
運転中に発生しうる不釣り合い振動（回転同期振動）	ロータの経年的曲り
	熱特性変形
	回転体の一部欠損
	カップリング不良
	ラッピング振動
アライメント変化による振動（回転同期振動、回転非同期振動）	
不安定振動（回転非同期振動）	オイルホイップ、オイルホワール
	スチームホワール
	軸受給油不足による振動
配管または基礎台の影響による振動	
他の機器によるもらい振動	
ねじり振動	低次ねじり振動
	翼軸連成ねじり振動

# 02

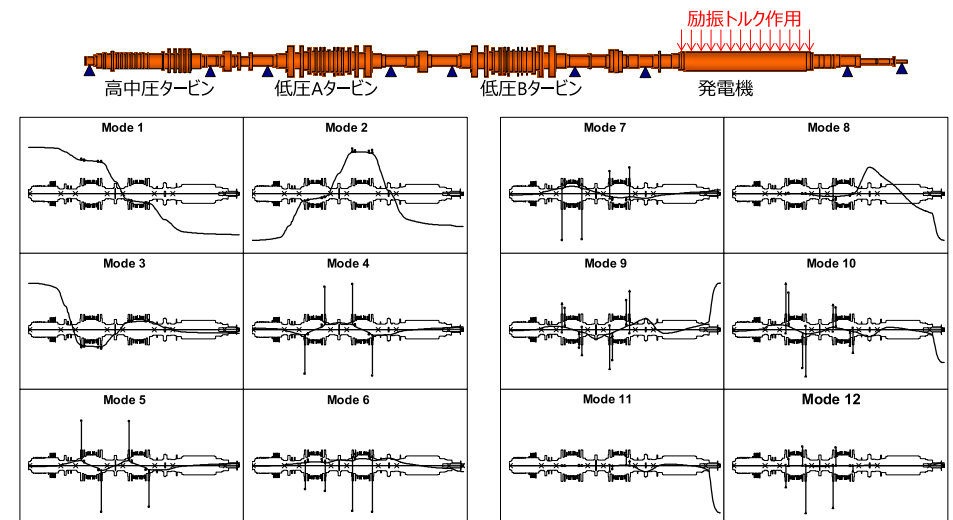
## 蒸気タービンに発生するねじり振動



## 蒸気タービン・発電機のねじり振動



## ねじり振動モードの例（700MW級蒸気タービン）



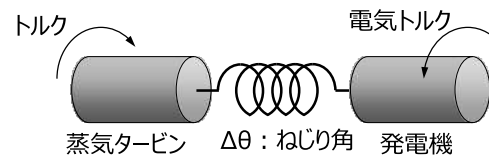
## 外乱タイプ別の励振周波数

外乱のタイプ	ステップ変化	系統周波数で励振	系統周波数の2倍で励振	系統周波数の0.1~0.9倍で励振
非定常	3相短絡	✓	✓	
	その他の短絡	✓	✓	
	非同期投入	✓	✓	
	負荷遮断	✓		
	SSR			✓
	サイリスタ制御による外乱		✓	✓
定常	相電流不平衡(逆相電流)		✓	
	SSR			✓

SSR : Sub Synchronous Resonance

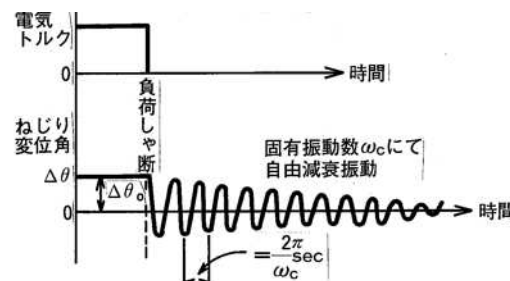
## ねじり振動の挙動

### ■ 負荷遮断時の低次ねじり振動例



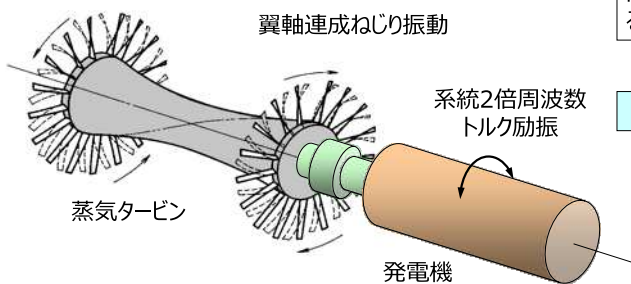
低次ねじり振動モードが励振

ジャーナル部、カップリング部の低サイクル疲労



## ねじり振動の挙動

### ■ 高次ねじり振動

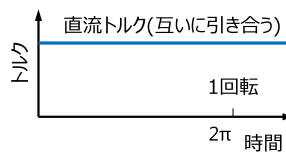
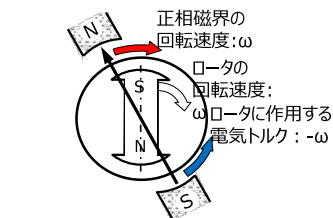


高次翼軸連成振動モードにおける持続的振動(共振)

タービン長翼の高サイクル疲労

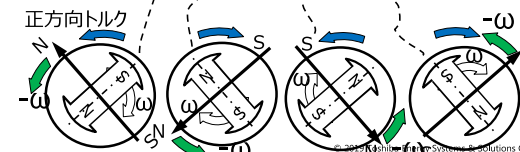
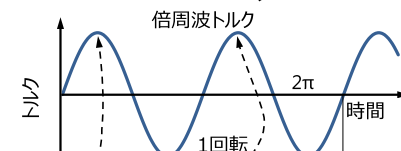
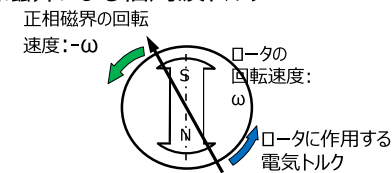
## 倍周波トルク励振

### ■ 正相磁界によるトルク(直流)



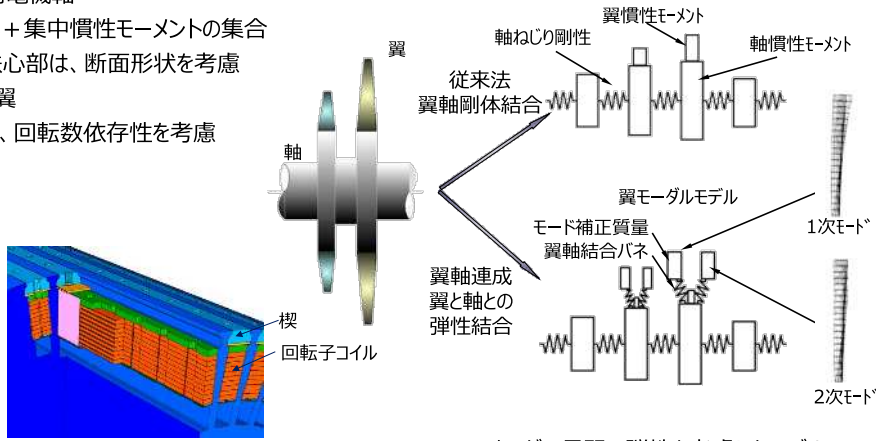
ω: ロータの回転速度

### ■ 逆相磁界による倍周波トルク



## ねじり振動の解析モデル

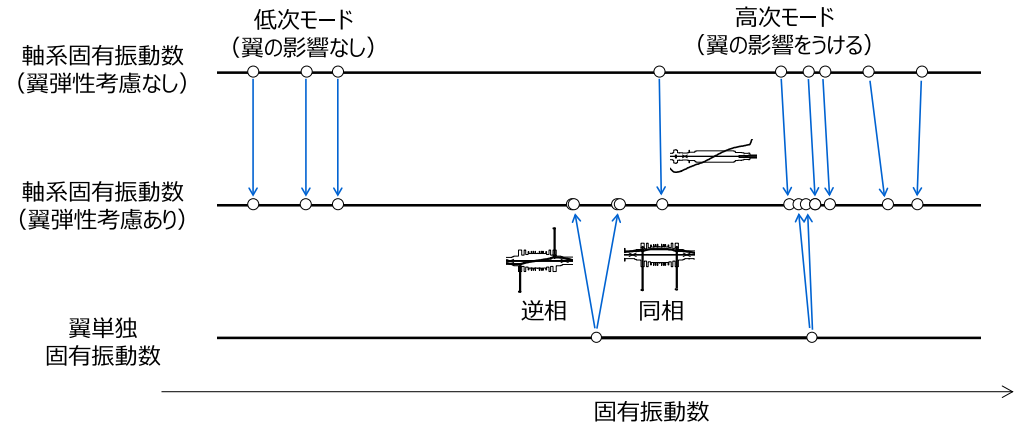
- タービン・発電機軸
  - ねじりバネ+集中慣性モーメントの集合
  - 発電機鉄心部は、断面形状を考慮
- タービン長翼
  - 翼の弾性、回転数依存性を考慮
- 境界条件
  - なし



発電機鉄心部の断面形状

タービン長翼の弾性を考慮したモデル

## 翼弾性の軸系ねじり固有振動数への影響



# 03

## 関連するISO規格と評価規準

### 関連するISO規格

規格番号 : ISO 22266-1:2009

タイトル :

- Mechanical vibration — Torsional vibration of rotating machinery —
- Part 1: Land-based steam and gas turbine generator sets in excess of 50 MW

スコープ :

- 出力50MW以上、回転数1500,1800,3000,3600r/minの陸用蒸気タービン発電機
- 出力50MW以上、回転数3000,3600r/minの陸用ガスタービン発電機

記述 :

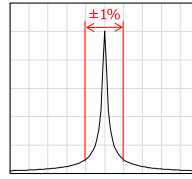
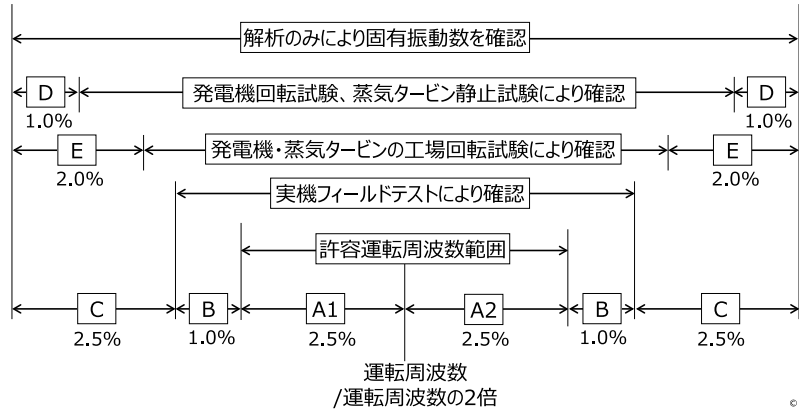
- タービン・発電機軸系ねじり振動の評価規準
  - 固有振動数の系統周波数およびその2倍周波数からの離調幅 (Informative)
  - ねじり振動による応力評価



## 離調率の考え方

- 許容運転範囲 + 応答曲線の幅 + 計算誤差で規定
- 各種試験結果を反映することにより、計算誤差低減
- 数値はinformative

A1,A2:許容運転周波数  
 B:応答曲線におけるマージン  
 C:計算誤差  
 D,E:各種試験による解析精度の向上分



応答曲線の例  
 $(\zeta=0.1\%)$

## 応力評価

### 応力評価

- 2種類の応力評価について記載

### 過渡応答

- 想定される系統事故に伴うねじり過渡応答評価を行い、最大応力を確認

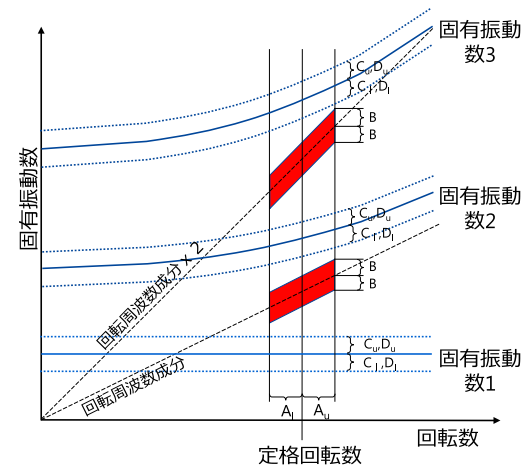
### 定常応答（周波数応答）

- 十分な離調が確保できない場合に実施
- 問題となる振動モードについて、励振トルクに対する感受性を評価し、軸系の健全性を確認
- 想定される励振トルクに対する、ねじり振動および応力の応答を確認

## 改定案

- ISO/TC108/SC2/WG1内で、検討
- 2017年9月ロンドン会議で改訂することを決定し、2018年3月ベルリン会議で議論
- 主な改訂ポイントは下記
  - スコープ変更
    - 出力による限定は除外（系統につながっていれば影響はあるはず）
    - 系統につながっているものに限定
  - サブタイトル
    - Evaluation of Steam and Gas turbine generator set due to electrical excitation
  - 計算誤差（uncertainty）・・・モード毎に異なる値を許容
  - ねじり振動評価のフローチャート
  - ねじり固有振動数の回転数依存性を考慮した、離調の図
  - 詳細な応力評価の記述を追加
  - レトロフィット案件で、既設の一部を流用する場合、計算に必要な流用部の情報提供は、発注者の責任であることを明記

## 回転数依存性を考慮した離調の考え方



	説明
$A_u, A_l$	系統周波数の変動量
B	応答曲線におけるマージン
$C_u, C_l$	計算誤差 (モード毎に変えても良い)
$D_u, D_l$	試験などで検証されたモデルに基づく計算の誤差 (モード毎に変えても良い)

# 04

## ねじり振動の事例（EPRIレポートより）



### ねじり振動による損傷の事例

#### ■参照元

- EPRI レポート
- “Steam Turbine-Generator Torsional Vibration Interaction with the Electrical Network”
- 2005年11月発行

No.	年	容量	回転数	損傷箇所	原因
1	1971	483MVA	3600	コレクタシャフトクラック、絶縁損傷	SSR (30Hz)
2	1974	530MW	1800	低圧タービンL1,L2翼損傷	120Hzでの共振、L1翼、L2ディスク変更
3	1985	1057MVA	1800	低圧タービン最終段、発電機軸損傷	120Hz近傍での共振によりタービン翼損傷、その後、軸振動大により発電機軸損傷
4	1985	570MVA	1800	損傷はないが、軸の疲労寿命は消費	直流送電のインバータ不具合による励振
5	1987	350MW	3600	発電機軸にクラック	120Hz共振、近くの製鉄所が励振源
6	1993	1050MW	1800	タービンL1翼損傷	120Hz共振
7	1994	350MW	3600	発電機リテイニングリング破損	No.5と同じ
8	1998	80MW	1800	発電機リテイニングリングクラック	製鉄所との電氣的な相互作用によるSSRと推定
9	2002	1300MW	1800	タービン翼破損（クラックは多数）	120Hzでの共振
10	2004	912MW	1800	発電機軸クラック	断続的に発生励振トルクが原因と推定

# 05

## まとめ



### まとめ

蒸気タービン・発電機に生じるねじり振動は2種類

- 電気系統の事故などによる低次ねじり振動
  - シャフト、カップリングの損傷
- 逆相電流に伴い発生する系統2倍周波数で励振される高次ねじり振動
  - 翼軸連成振動
  - タービン長翼の損傷
  - 高次モードを精度良く予測するためには、タービン翼および発電機鉄心部振動特性の把握が重要

ISO規格（ISO 22266-1）

- 蒸気タービン・発電機軸系のねじり振動に関するISO規格が2009年に発行
- 系統からの励振源となる、系統周波数・その2倍周波数からの離調の考え方を記述
- 現在、改訂作業中

# TOSHIBA

© 2019 Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation