



剛性軸についての考察

平成 23 年 10 月 12 日

(有)杉村プランニング 杉村回転機械研究所 杉村章二郎

回転軸の振動解析をされている方々の間では、剛性軸（Rigid Rotor）という言葉がよくつかわれています。

実はこの言葉には統一された技術的な定義があるわけではありません。

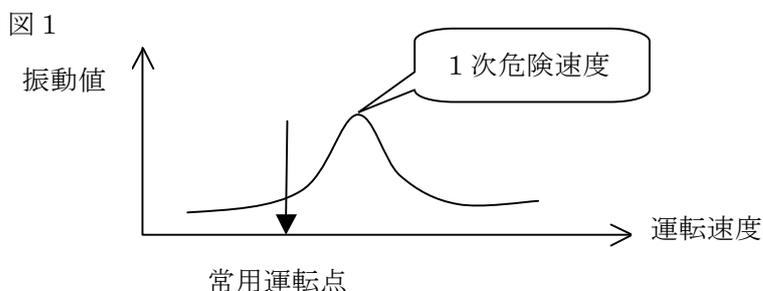
一般的に理解はされており、お互いに使っていますが、多少ニュアンスがつかわれる方によって違っているようです。

今回はこの言葉をテーマにして、解説したいと思います。

1. 一般的な解釈

ロータ系の 1 次危険速度を超えない範囲で使われる回転軸は剛性軸であるという定義です。これは **Under critical** と呼ばれているものです。Rotor operated **under critical speed** で危険速度の下で運転されるロータの略と考えればわかりやすいものです。たとえば「転がり軸受は減衰がないので剛性軸として使用されるのが一般的である。」といった使い方です。

図で説明すれば図 1 のような使い方になります。



この場合は軸の剛性が高いか低いかは直接議論されません。ただ常用運転速度と危険速度の関係が言われているのみです。

これに対して **Over critical** と呼ばれるものは、Rotor operated **over critical speed** で危険速度を超えて使われるロータのことです。危険速度の上の運転速度で運転されるというもので、軸系としては 1 次の共振点（固有値）を超えて運転されるもので、軸系としては 2 次の共振点に近づいて運転されることとなり、当然軸の曲げ剛性は、低くなって柔軸の性質を帯びているものと思われまます。この場合は弾性軸といわれます。



2. Rotor の Balancing 規格で用いられている解釈

規格でどのように剛性軸という概念が用いられているか調べてみますと、基本的には **balancing** の取り方が剛性軸と弾性軸で異なるので、**Balancing** 規格が参考になります。

まず JIS 規格

(1) JIS B0905-1992 剛性ロータの釣り合いよさ

剛性ロータの釣り合い方法に関する規格であり、これに属さないものが弾性ロータになります。

「任意に選んだ 2 面で釣り合わせ、最大回転速度以下の任意の速度で、使用時に近い支持条件で回転させても、ロータの変形によって軸受荷重が許容値を超えないロータを言う。」

と定義されています。意味するところは 2 面釣り合わせで釣り合いが取れて、任意の回転数で利用できるロータであると解釈できます。

さらに言えば、回転速度によってロータの変形モードが変わらないで釣り合い状態が変化しないものです。ただし厳密にはモードの基本形は同じでも変形量は異なるので釣り合いをとった回転数から離れるほど、変形が増えるので釣り合いは崩れてゆきますが、その場合の振動値はたとえ増えても許容値以内には収まっている程度であれば剛性軸として判断してよい（釣り合いをとってもよい）というふうに、かなり実用的な解釈になっています。また同規格の補足として、剛性ロータ以外でも（つまり弾性ロータでも）剛性ロータとして釣り合いを行う場合にはこの基準が適用できることになっています。

1 項でみた剛性ロータとしての危険速度との関係には一切触れていません。

ただ、了解されている事項として、釣り合いをとった回転速度でのモードと実際の使用時のモードの形が変わらず、かつ変形量の変化も許容値を超えるほど大きくはないと理解されています。

また ISO 規格で

剛性軸としての釣り合いよさとして

(2) ISO 1940/1-1986 Mechanical Vibration –Balancing Quality requirement of rigid rotor があり（この規格は上記の JIS B905-1992 にそのまま含まれています。）、

弾性ロータとして、

(3) ISO 5406-1980 Mechanical balancing of flexible rotor

あるいはこの新規格として

ISO 11342-1998 Mechanical vibration-Methods and criteria for the mechanical balancing of flexible rotors

があります。



これらの中では rotor を

- ・ Rigid rotor (剛性ロータ)、
- ・ Quasi-rigid rotor (擬似剛性ロータ)、
- ・ Flexible rotor (弾性ロータ)

に分類しています。

規格の中でのそれぞれの定義は、

Class1 : rigid rotors

A rotor whose unbalance can be corrected in any two (arbitrarily selected) planes so that, after that correction, its unbalance does not change significantly at any speed up to maximum service speed.

Class2 : quasi-rigid rotors

A rotor cannot be considered rigid but that can be balanced using modified rigid rotor balancing techniques.

Class 3 : flexible rotors

A rotor cannot be balanced using modified rigid rotor balancing techniques but instead require the use of high speed balancing methods

となっており、釣り合い技術の面から rotor を定義しています。

Class 1 : 最大運転回転数までのいかなる運転速度でも、アンバランスが著しく変化しないように、任意に選んだ 2 面で釣り合いの修正ができるロータ。つまり、任意に選んだ 2 面で釣り合いが取れるロータを **rigid** (剛性) ロータと分類しています。

Class 2 : 剛性ロータとは言えないけれども、**rigid** ロータ釣り合い法 (一部修正したもの) が適用できるものを擬似剛性ロータと分類。

Class 3 : **rigid** ロータ釣り合い法 (一部修正したもの) が適用できなくて、高速バランスが必要なロータと分類。

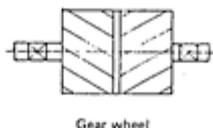
ということで、剛性ロータに関しては前述の JIS 規格と同じ定義です。

規格の中でそれぞれの例として、いくつかのロータ形状が挙げられています。

たとえば次のような形状のロータです。

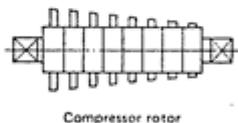
図2 ロータの例

Class 1 Rigid rotor



運転回転速度によって、バランスが影響されないロータの例として **Gear wheel** を挙げています。

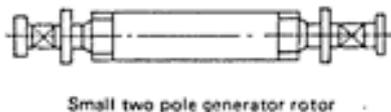
Class 2 Quasi-rigid rotor



アンバランスの起こる面が軸方向に 2 か所以上あるロータとして、軸流圧縮機ロータを示しています。



Class 3 Flexible rotor



First modeあるいはSecond modeのアンバランスによって著しく影響されるロータとして、小型の2極発電機を挙げています。

3. 少し掘り下げた本質的な解釈

Balancingの規格の中に説明がありますように、ロータのみの梁としての剛性の議論だけでは不十分であることとなります。つまり支持剛性を考慮しないと弾性軸、剛性軸としての挙動は決まらないからです。

剛性軸（弾性軸）という定義は相対的なものであることがわかります。

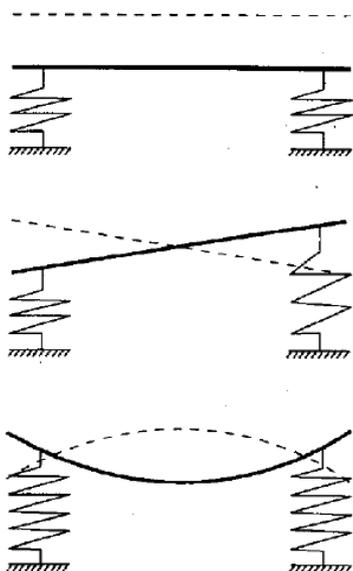
同じロータでも支持剛性によって剛性軸としての挙動をとるもの、弾性軸の挙動をとるものに分かれます。たとえばAPI規格の記述中に以下の説明図があります。

図3 支持剛性による区分

柔支持／剛ロータ

支持剛性 << 軸剛性

Soft bearings/stiff rotor
Bearing stiffness << shaft stiffness



剛支持／柔ロータ

支持剛性 >> 軸剛性

Stiff bearings/flexible rotor
Bearing stiffness >> shaft stiffness

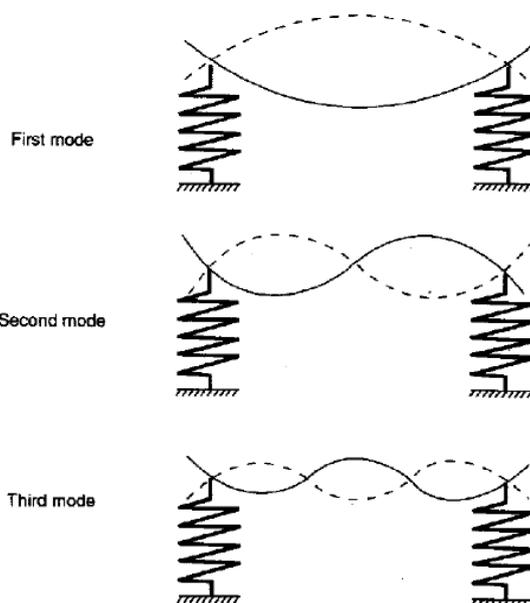


Figure 2-66—Mode Shape Examples for Soft and Stiff Bearings Relative to Shaft

API Recommended Practice 684, 2nd Edition August 2005 P2-61 より掲載

図3では左側のものと右側のものでは同じ軸剛性でも支持剛性との相対関係で剛性軸としての挙動を示したり、弾性軸としての挙動を示したりすることがわかります。



図3では軸受油膜の剛性や軸受台 (Pedestal) の剛性もすべて含んで支持剛性と呼んでいますが、左側は軸の梁としての曲げ剛性よりも支持剛性が低く柔らかく支持されているロータ系の場合です。First mode、Second mode では、軸のたわみ性には関係なく、軸の質量と支持部のバネ剛性で共振 mode が決まっています。Third mode になって初めて軸としての1次曲げ mode が出てきています。

つまり First mode と Second mode では剛性軸としても挙動をしています。

Third mode で初めて弾性軸としての挙動が出てきています。

一方右側のものは、軸剛性が支持剛性より低い柔らかな軸の場合で、初めから軸には1次曲げ mode が出てきており、弾性軸としての挙動が出てきています。

これを実際に Model 軸を使って、ARMD で解析した例を次に示します。

Critical Map 解析と Stability 解析から求めることができます。ARMD でのモデル軸で軸受剛性を変えた Critical Map でこの状況を見ることができます。

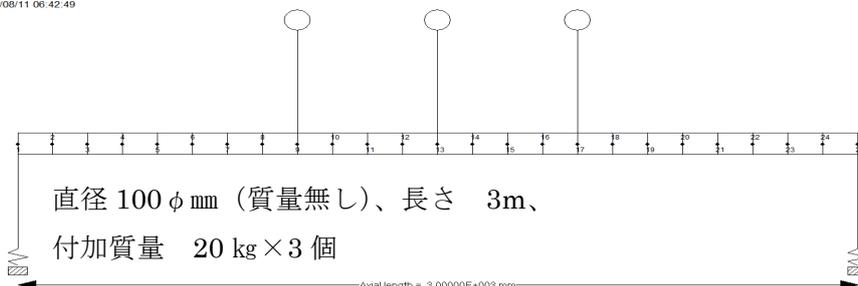
説明を簡単にするために、解析はジャイロ効果の影響を無視しています。

(ROTLAT 解析で Options menu から System DOF/Gyroscopic を選んで、4 DOF をえらび、gyroscopics のチェックを外します。)

(ジャイロ効果を考慮すると Reverse Precession (後ろ向き旋回共振モード) が出てきますので複雑になります。) 解析は図4の形状で行っています。

図4 解析モデル軸

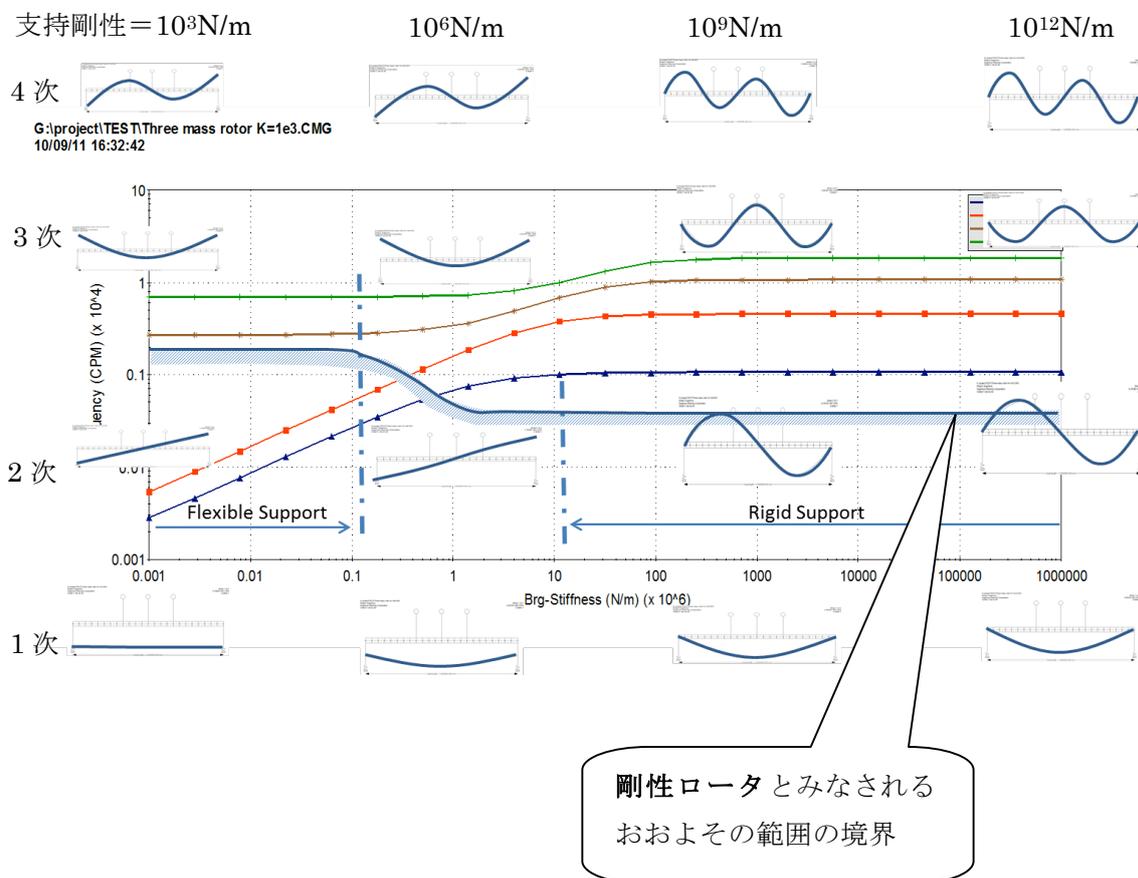
G:\project\TEST\Three mass rotor K=1e3 ROI
Shojiro Sugimura
Sugimura Planning Corporation
10/08/11 08:42:49



支持剛性を 10^3N/m 、 10^6N/m 、 10^9N/m 、 10^{12}N/m の4種類で Bearings にマニュアル入力して Stability 解析を行い、結果の Mode 図を Critical Map に重ねて描くと図5のようになります。



図5 Critical Map 上での支持剛性によるロータ共振モード形状の推移



固有振動数は1次から4次までを表示しています。下から順に1次から4次を示します。

大まかにバランス挙動から剛性ロータの範囲（剛性ロータとして釣り合いが取れるもの）は中央から下の斜線の領域で示すことができます。

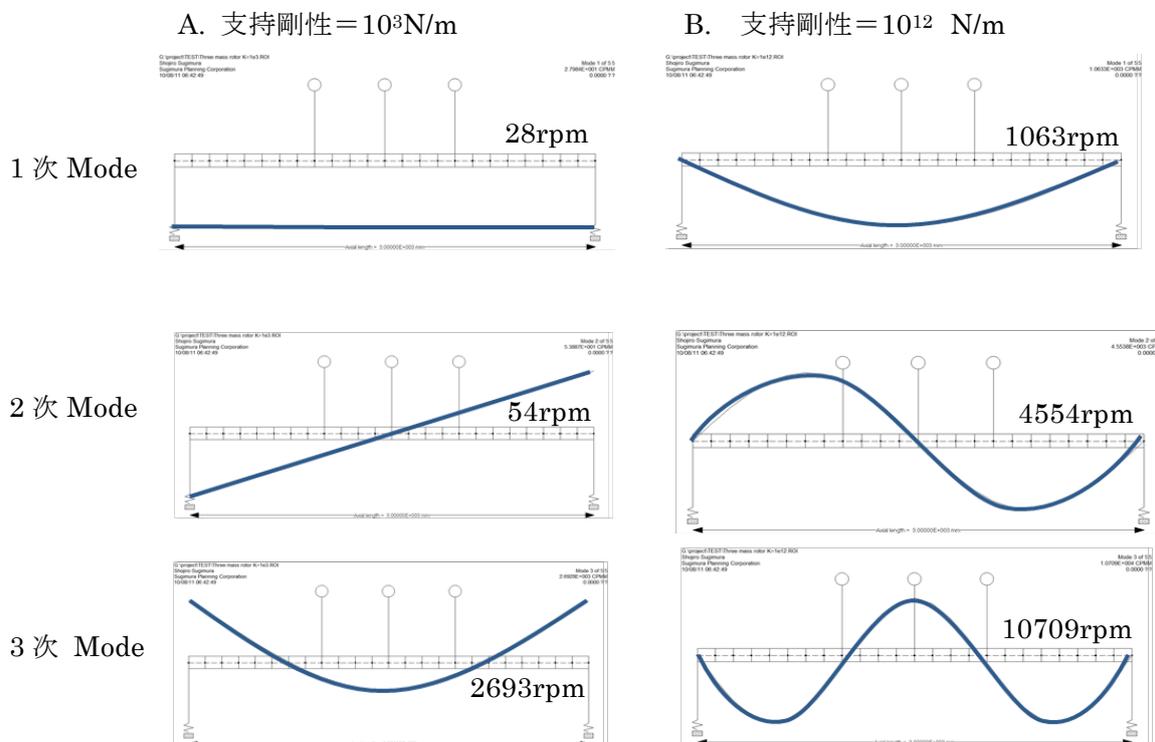
また支持剛性は Flexible support と Rigid support の範囲を図に記入しています。

これらはあくまでも相対的なもので、目安として領域に分けられることを示しています。

また、1次から3次までの Mode 図を 10^3 N/m と 10^{12} N/m に関して順に描くと図6のようになり、図3の説明図の通りになっていることがわかります。



図6 支持剛性 10^3N/m と 10^{12}N/m の場合の Mode 図



以上で剛性ロータについて簡単に見てみましたが、ロータとしては運転挙動から決めるべきであって、支持剛性を考慮した場合の判定が必要であることがわかります。また更に以上は非減衰の Critical Map 上で議論されましたが、正しくは減衰も考慮したアンバランス応答解析からの危険速度からの判断が必要であることは言うまでもありません。

以上