

## 機械式粉砕機（回転体）の振動

### Vibration of Mechanical Mill (Rotating Body)

岸下 年秀

ホソカワミクロン株式会社 粉体システム事業本部 東京技術部 部長

Toshihide KISHIGE

General Manager, Tokyo Engineering Group, Powder Processing System Division, Hosokawa Micron Corporation, JAPAN

#### 抄 録

近年の市場傾向により粉体のさらなる微粒子化が求められている。粉砕において微粒子を求める有効な手段は通常、粉砕力の強いジェットミルや媒体攪拌型粉砕機が挙げられる。しかしながら機械式粉砕機による粉砕品にはそれらの粉砕品とは異なる特性を有することがあり、そのような特性を持つ微粒子を得るには機械式粉砕機の粉砕力を高めるべく衝撃力増加のために、周速度（回転速度）を上昇させる必要がある。機器の高速化を進める上で振動という要素は非常に重要であり、ここで簡単にはあるが纏めた。これらを元に我々はエンジニアリング、設計、製造、設備工事、メンテナンスの各分野で幅広い経験を積んできた。そこで得た知識を生かしながら、お客様のご要望の粉体特性を有する粒子を製造するための設備を提案していきたい。

#### ABSTRACT

Due to the market trends in recent years, there is a growing demand for further miniaturization of powders. Effective methods for obtaining fine particles during pulverization usually include jet mills and agitating media mills with strong pulverizing power. However, products pulverized by mechanical mills sometimes exhibit characteristics different from those pulverized by jet mills. In order to obtain fine particles with specific characteristics, it is necessary to increase the rotational speed of the mechanical mills to enhance the impact force. Vibration is a crucial factor in promoting high-speed machines, and we will concisely summarize its importance here. With our extensive expertise in engineering, designing, manufacturing, facility installation and maintenance, we have accumulated various experiences in this field. Based on these experiences, we are pleased to propose equipment capable of manufacturing particles that possess the desired powder characteristics as requested by our customers.

#### 1 はじめに

近年の市場傾向により粉体のさらなる微粒子化が必要とされている。単純に微粒子化を求めるならば粉砕力の強いジェットミルや媒体攪拌型粉砕機を用いるが、機械式粉砕機の粉砕品にはそれらと異なる

特性を有している事がある。

その特性を有する微粒子を得るために、当社の粉体処理装置、とりわけ機械式粉砕機およびそれらに搭載される分級機の高速化が近年進んでいる。例えば機械式微粉砕機グラシス® (GC) (図 1) の粉砕ロータ (図 2) や、ACM パルペライザ® (ACM-H) の粉



図1 高冷却型機械式微粉碎機グラスィス® GC-600<sup>[1-3]</sup>  
 Fig. 1 High performance cooling type mechanical mill  
 GLACIS® GC-600<sup>[1-3]</sup>.

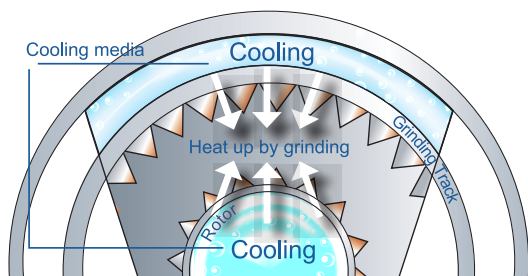


図2 グラスィス® の基本構造  
 Fig. 2 Structure of GLACIS®.

砕ロータ等は音速の約半分程度の周速で回転しており、通常身近に存在しない速度域での動作となっている。また、その運動エネルギーは速度の2乗に比例することから非常に大きなエネルギーを有している事が分かる。

この様に大きな運動エネルギーを持つ高速回転体を有する装置のエンジニアリング、機械設計、製造、設備工事、メンテナンスに振動を考慮する事は必須であり、それに関して簡単にまとめる。

## 2 振動測定における基礎知識

### 2.1 振動測定におけるパラメータ

#### ①振動数 (F)

振動している物体が1秒間に繰り返す運動する回数を振動数(周波数)という。単位は Hz を用いる。

#### ②変位 (D)

Dは片振幅を表す。通常、振動は両振幅2Dで表す。単位は  $\mu\text{m}$ , mm を用いる。

#### ③振動速度 (V)

変位の時間に対する変化率を速度という。

$$V = 2\pi FD \text{ [mm/s]}$$

単位は mm/s, cm/s を用いる。

#### ④振動加速度 (A)

速度の時間に対する変化率を加速度という。

$$A = (2\pi F)^2 D \text{ [mm/s}^2\text{]} = (2\pi F)^2 D / 9,800 \text{ [G]}$$

単位は  $\text{mm/s}^2$ , G を用いる。

### 2.2 振動測定における判断基準

#### ①測定ファンクション

- ・PEAK 値 (ピーク値)

一定区間の最大値。

- ・P-P 値

一定区間の正側、負側の最大値の絶対値の和。

- ・rms (実効値)

一定区間における各瞬時値の2乗平均値の平方根。例として振動速度の rms 値を示す。

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} V(t)^2 dt} \quad * T = t_2 - t_1$$

$$\doteq \frac{\text{PEAK}}{\sqrt{2}} \quad (\text{正弦波の場合})$$

- ・ $A_{o/A}$  (オーバーオール) 値

周波数範囲全体における振動加速度の大きさ。

#### ②振動測定における各パラメータの守備範囲

2.1 で記した変位 (D), 振動速度 (V), 振動加速度 (A) の一般的な適応を表1に示す。

#### ③振動速度 (V) での判断基準 (ISO10816-3)<sup>[4]</sup>

ISO規格の中に  $V_{\text{rms}}$  (振動速度実効値) を回転機器におけるコンディションの総合判定に使用するという記述があるのでここに紹介する。ISOの情報を図3に引用し示す。図3中に「機械の基礎状態」という項目が存在する。これは回転機械とそれが設置された基礎を含む固有振動数が(固有角振動数)が回転機械自身の危険速度の25%以上かどうかで判断される。25%以上であれば「固い」。25%未満であれば「柔らかい」に分類される。

危険速度とは3.1②に記載するが、回転体自身も固有振動数(固有角振動数)である。

また回転機械を構成する材料には必ずS-N曲線が存在し、D(振幅)を応力、F(周波数)を回転と考えると  $V = 2\pi FD$  より  $V$  (振動速度) は回転機械の

表 1 振動測定における各パラメータの守備範囲

Table 1 Scope of each parameter in vibration measurement.

振動パラメータ	異常の種類	守備範囲 (Hz)
振動変位 (D)	すべり軸受で支持された回転機械 アンバランス, ミスアライメント, ガタ等	1~200
振動速度 (V)	転がり軸受で支持された回転機械 アンバランス, ミスアライメント, ガタ, ギア異常等	10~1000
振動加速度 (A)	転がり軸受で支持された回転機械 転がり軸受の異常, ギア異常等	1000 Hz 以上

振動シビアティの値	機械のグループに対する「よさ判定」例			
速度のrms値-区分境界の値-	グループ2		グループ1	
0.7 mm/s	A	A	A	A
1.4	B	B	B	A
2.3	C	B	B	A
2.8	C	B	B	B
3.5	D	C	C	B
4.5	D	C	C	C
7.1	D	D	D	C
11.0	D	D	D	D
機械の基礎状態	固い	柔らかい	固い	柔らかい

グループ1: 大型機械 出力、300kW~50MW  
グループ2: 中型機械 出力、15kW~300kW

図 3 振動シビアティ測定器に関する要求事項  
Fig. 3 ISO10816-3 Guidelines: Vibration monitoring.

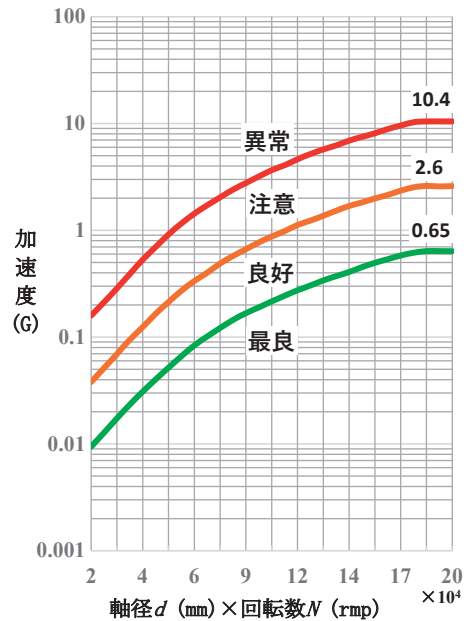


図 4 振動加速度判定基準  
Fig. 4 Vibration acceleration standard.

振動（繰り返し応力）による破壊の指標とも言える。

④振動加速度 (A<sub>0/A</sub> オーバーオール値) での判断基準

基本的に振動加速度には統一された判断基準は存在しない。参考として、振動センサーメーカーより提供され、ネット上でも入手可能な判定基準例を図4に示す。

3 回転体の振動<sup>[5]</sup>

3.1 回転体自身の振動

①固有振動数 (固有角振動数) (P<sub>0</sub>)

振動について考える際によく耳にする言葉に固有振動数がある。物体それぞれにある固有振動数だ

が、ここでは機械式粉砕機を例に考える。通常、シャフトやロータは金属から構成されているが、完全な剛体ではない。従って回転数(角速度)を上昇させるにつれ必ずシャフトに「たわみ」が発生する。またシャフトやロータの重心は製作誤差や質量の不均一から必ず偏重心が発生している。

回転軸のたわみに対するばね定数を  $k$ 、ロータの質量を  $m$ 、偏重心を 0 (ゼロ) として運動方程式を解くと、下記に表される。

$$P_0 = \sqrt{k/m} \text{ (Hz または Rad/s)}$$

この事より物体の固有振動数 (固有角振動数) はそれらの寸法で決定された物体の「たわみ」による

振動という事が分かる。

## ②危険速度 ( $P_0$ )

固有振動数 (固有角振動数) において回転している回転体に偏重心  $e$  が存在するとその振幅は増大する。それを危険速度という。角速度を  $\omega$  として偏重心による振幅への影響は実験式により下記で表される。

$\omega < P_0$  の時は

$$D = \frac{me\omega^2}{k - me\omega^2} = \frac{e\omega^2}{P_0^2 - \omega^2}$$

$\omega > P_0$  の時は

$$D = \frac{me\omega^2}{|k - me\omega^2|} = \frac{e\omega^2}{|P_0^2 - \omega^2|}$$

これより  $\omega < P_0$  の時は  $\omega$  が  $P_0$  に近づけば  $D$  (片振幅) が大きくなり、 $\omega > P_0$  の時は  $\omega$  が大きくなると  $D$  が小さくなる事が分かる。従って危険速度 ( $P_0$ )  $\equiv$  固有振動数 ( $P_0$ ) となる。また偏重心  $e$  に起因する振動は強制振動に分類される。

## 3.2 機械要素に起因する振動

### ①軸芯のずれによる振動

精密に製作された軸受であっても、転動体の大きさには不ぞろいが存在する。この不ぞろいが原因となり振動が発生する。仮に1つの転動体が大きいと仮定し、内輪 (軸) の角速度を  $\omega$  とした場合、転動体の公転は  $a\omega$  と表せる。この  $a\omega$  が系の固有振動数  $P_0$  と一致した際、 $P_0 = a\omega$  で共振が発生する。

### ②水平軸における玉軸受の玉通過による振動

重力がかかる水平軸の場合、玉が回転軸の下側を通過する時、玉に荷重が加わる事で玉に僅かながら変形が生じる。また回転軸の回転に伴い玉の配置が周期的に変化する。玉数が少ない単列深溝玉軸受では、この変化が顕著に現れると言われている。

### ③軸受台の剛性に起因する振動

通常、回転軸は軸受によって支持され、更に軸受は軸受台で支えられている。支持の剛性差が生じ撓む事に起因し振動が発生する。

### ④ラビング

ロータがその周囲にある静止した部分に接触した時に激しい振動が発生する。この接触は軸と振れ止めの間、ロータとライナ、スクリーン、ラビリンス等で発生する。基本的には摩擦が関与するので不明

な点も多く機器の形状により様々な振動が発生する。

## ⑤自励振動

一般的には摩擦により振動を減衰または振幅を小さく抑える働きがあるが、場合によっては摩擦が系を不安定にし、振動を成長させたり持続する振動を発生させたりする事がある。また回転体に生じる摩擦力は動いている物体と静止している物体との間に働く外部摩擦と、動いている物体の間で働く内部摩擦に分けられる。更に内部摩擦は軸と取付部品間で働く構造減衰と履歴減衰に区別される。また自励振動は幅広い角速度 (回転数) で発生すると言われている。

## 4 回転体の制振<sup>[5]</sup>

### 4.1 強制振動の制振

#### ①回転体の釣合わせ

回転機器は製作誤差によって偏重心や偏角が避けられない。またそれによって振動が発生する。これらを小さくする為に釣合わせ (バランシング) と言われる操作を回転体を実施する。釣合わせ (バランシング) には一般的に1面釣合わせと2面釣合わせの2通りの方法がある。1面釣合わせはその言葉通りロータの1面を削るまたは錘を付ける事によって偏重心、偏角を減少させる方法であるが、ロータと軸に対して直角に製作されている事が前提となる。2面釣合わせはロータの対向する2面を削るまたは錘を付ける事により偏重心、偏角を減少させる方法である。一般的には2面釣合わせを用いて釣合わせ (バランシング) 行う。

JISB0905<sup>[6]</sup> に実用回転速度と釣合良さ等級に対する許容残留比不釣合いの図が記載されている。

#### ②共振の回避

一般的には定格速度が危険速度 ( $P_0$ ) の  $\pm 20\%$  に入らない様にロータ寸法を設計しなければならない。また軸受台及び架台の設計についても同様の事が言える。

### 4.2 自励振動の制振

自励振動は摩擦が起因するのでそれを取り除く事が基本となる。例えば軸とロータの嵌め合い部ですべらない構造にすれば発生しづらくなる。もちろんベアリングの外輪等の嵌め合いもそれに含まれる。

## 5 振動の他設備（計装品）への影響（共振）

ここでは回転体により発生する振動が他設備（計装品）へ影響を及ぼした特異な例を記載する。

### ・計装品（電子天秤、差圧伝送器等）への影響

回転体を有する粉砕機の振動により電子天秤の据付面が振動し、その影響で電子天秤自身も振動し計量値がずれてしまう事を想像するが、そうではなく電子天秤のセンサー部の固有振動数（固有角振動数）が偶然にも粉砕機が発する振動数と一致し、センサが共振し計量値が狂ってしまった事例がある。例えば電子天秤の表示が誤作動するのは決まった粉砕機の回転数幅（例：4000～4200 rpm）の時だけであり、この回転数が常用使用域である場合、電子天秤の固有振動数（固有角振動数）を変更する事は不可能なので振動（振動数）の伝達を弱めるべく粉砕機や電子天秤の設置部分に振動（振動数）を吸収する防振ゴム等を設置する事となる。尚、この時の粉砕機と電子天秤の配置は、高さにおいて4 m、水平では30 m程の位置関係であった。

また同様の事がループロウと風量センサ（差圧伝送器）で発生した事もある。

この様に機器が発する大きな振動が周辺設備を大きく振動させるだけでなく、機器の微少な振動でさえも周辺設備の固有振動数（固有角振動数）と合致した際には問題を引き起こす事がある。

## 6 おわりに

我々は、本報で記した振動の評価方法、回転体自身の振動の原因、回転体の制振、振動の他設備への

影響（共振）について留意し、エンジニアリング、機械設計、製造、設備工事、メンテナンスを実施することで、様々な経験を積んできた。今後もこれらの経験を生かし、かつ高速化した機械式粉砕機は原料やプロセスにも左右されるがジェットミルと比較して大きく省エネに貢献する側面を持つ事も視野に入れ、お客様のご要望の粉体特性を持つ微粒子を製造できる設備提案をしていきたい。

さらに、2021年より製品化したデータ監視・解析システム HOSOKWA GEN4<sup>®</sup> を活用し、生産設備のデータ解析を行い、適切な運転条件や予防保全、メンテナンスサイクルの提案をできる様に取り組む所存である。

## References

- [1] ホソカワミクロン（株），“高冷却型機械式微粉砕機ホソカワミクロングラシス<sup>®</sup>”，粉砕，55（2012）77-78. High cooling mechanical mill HOSOKAWA MICRON GLACIS<sup>®</sup>, The Micromeritics, 55（2012）77-78. <https://doi.org/10.24611/micromeritics.2012015>
- [2] ホソカワミクロン（株）編：ホソカワ製品バンドブック，“グラシス<sup>®</sup>GC 高冷却型機械式粉砕機”，pp. 226-227, 凸版印刷（株），大阪（2013）.
- [3] 吉川 雅浩，“高冷却型機械式微粉砕機グラシスを使ったトナー処理”，粉砕，57（2014）78-83. Yoshikawa M., Treatment of the toner by Glacis, The Micromeritics, 57（2014）78-83. <https://doi.org/10.24611/micromeritics.2014014>
- [4] ISO 20816-3, Mechanical vibration—Measurement and evaluation of machine vibration—Part 3: Industrial machinery with a power rating above 15 kW and operating speeds between 120 r/min and 30 000 r/min, ISO (International Organization for Standardization), 2022.
- [5] 石田 幸男, 池田 隆, 回転体力学の基礎と制振, コロナ社, 2016, ISBN: 9784339046458.
- [6] JIS B0905, 回転機械—剛性ロータの釣合い良さ, 日本産業規格（JIS）, 2021.