

歯車に生じる振動・騒音

飯 田 裕*

Vibration and Noise in Geared System

Hiroshi IIDA*

Key Words : gear, vibration, noise, coupled vibration, gear teeth, meshing frequency, rotating frequency

1. はじめに

歯車は紀元前から実用に供されてきた長い歴史をもつ機械要素である。現在使用されている歯車のほとんどは 16 世紀にレオナルド・ダ・ヴィンチがスケッチとして残している。それが産業革命以降、多種多様な動力伝達方法に対する需要と加工技術の進展によって産業機械の重要部品として利用されるようになった。

歯車は比較的単純かつ堅牢な機械要素として知られているが、その一方で騒音・振動をともなう要素でもある。古くから多くの研究が行われているが、現在でも歯車関連の振動・騒音トラブルが皆無とはいえない。特に近年のように機械の静音化が進むと、今まで他の機器の騒音に隠れて目立たなかった歯車の騒音が問題となることも多くなってきた。

本誌における過去の類似特集記事と重複があるかもしれないが、本稿では一般的な読者を対象に歯車の振動・騒音問題について概観する。

2. 歯車の振動・騒音問題のとらえ方

2.1 歯車の振動・騒音要因の多様性

歯車の振動・騒音問題には複数の側面がある。まずそれを原因面から図 1 のように三つに分類する。

- (1) 歯車系内部に何らかの異常があって、それが振動・騒音の原因となっている状態

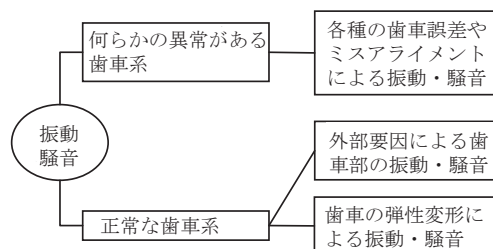


図 1 歯車の振動・騒音要因の多様性

どこまでを「歯車系」と考えるかにより違いは出てくるが、典型的な例としては歯形誤差や歯車の偏心などにより生じる振動・騒音が該当する。誤差やミスアライメントにより振動が励起される場合である。

- (2) 歯車そのものには問題がないが歯車系外部に起因する振動・騒音が歯車という要素で強調され歯車の振動・騒音として認識される状態
一例としてクラッチやリンク機構に連結された歯車軸が挙げられる。このような歯車軸では負荷や回転数の変動が大きく、瞬間的に歯面分離・衝突を生じて歯車の振動・騒音を引き起こす可能性がある。

- (3) 歯車が弾性体であることにより、正常な歯車でありながらそれ自身が振動・騒音を生じる場合

機構学的には歯車は変形しないとして歯形曲線が創成されているが、負荷を受けた歯にはたわみ

職業能力開発総合大学校 機械環境エネルギーユニット (〒187-0035 東京都小平市小川西町 2 丁目 32-1)
Machine Environment and Energy Unit, Polytechnic University (32-1, Ogawanishimachi 2-chome, Kodaira-shi, Tokyo 187-0035)

* Corresponding author : E-mail: iida@uitech.ac.jp

が生じる。そのため一定荷重を伝達しているときでも、荷重が作用している歯と前後の歯の間の距離は設計上の値とは異なったものとなる。この状態で次の歯のかみあいが始まると衝撃的な力が作用し振動・騒音が発生する。

これらの要因整理がされていないと、異常発生時に単純に高精度な歯車に交換したものの十分な効果が得られなかったということにもなりかねない。その一方で、実機の歯車系トラブルではどこに原因があるかすぐにわからないことも多く、これらの多様性を常に頭に置きながら対応することとなる。

2.2 歯車の振動・騒音研究の歴史

歯車の振動・騒音に関する研究は 1950 年代からなされている。初期においては理論解析の前提となる荷重による歯のたわみ量の計算式の提案¹⁾にはじまり潤滑や歯形誤差など各種パラメータと振動・騒音との関係の実験的追求²⁾がなされた。1960 年代にはかみ合いによる歯の衝突・たわみに着目した研究³⁾が開始された。1970 年代には歯車軸の曲げ固有振動数が歯車をかみ合わせた場合とかみ合わせない場合とで異なることに着目した歯車軸の曲げねじり連成振動に関する研究⁴⁾が行われた。また歯車のすきまであるバックラッシュをがたととらえ、がたのある系の振動の一環としてとらえた研究⁵⁾も行われた。1990 年代になると軸受部も含めた複合的なモデルに対する研究⁶⁾がなされ、さらに 2000 年代になると樹脂歯車に関する研究⁷⁾が進められるようになった。

2.3 歯車の振動・騒音の潜在的要因

歯車の振動・騒音の要因は前述のように歯車系の内外に存在するが、歯車という要素からみたときにそれらがどのように関わってくるかを図 2 に整理して示す。すべてについて詳細に説明する紙幅はないが、その要点を著者の文献 8) から引用すると、図の時計回りに次のようになる。

(1) 作用力は軸に対して、横荷重 + 回転荷重 (トルク) として働く

伝達力の変動が横振動、回転振動の両方を引き起こすことを意味する (詳細後述)。

(2) 歯車は回転円板でもある

回転円板として不釣合いによる遠心力を発生さ

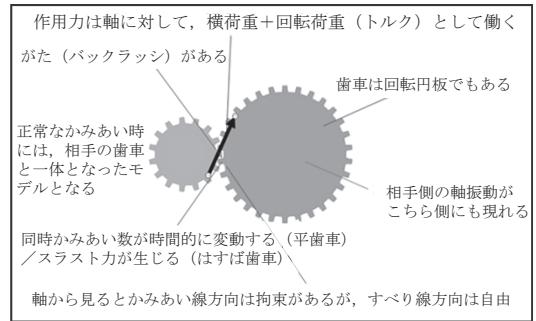


図 2 歯車振動・騒音の潜在的要因〔出典：文献 8)〕

せるほか、円板として面内の振動を生じ騒音の原因となる。

(3) 相手側の軸振動がこちら側にも現れる

回転軸では一般に軸回転に同期した振動が現れるが、歯車軸系では二つの歯車は線接触により接しているため、双方の軸回転に同期した振動成分が現れる。

(4) 軸からみるとかみあい線方向は拘束があるがすべり線方向は自由である

かみあう相手の歯があるかみあい線方向（動力伝達方向）とすべり線方向（その法線方向）とでは等価的な剛性が異なるため軸心の軌跡が円とはならない。（詳細後述）

(5) 同時かみあい数が増減する（平歯車）

平歯車では歯の同時かみあい数が 1 組と 2 組の状態を繰り返すので、歯のたわみ量が時間的に変動する（詳細後述）

(6) スラスト力が生じる（はすば歯車）

はすば歯車では歯が斜めであるために軸方向にも伝達力の分力が作用し、軸方向の剛性や慣性が挙動に影響を与える。

(7) 正常なかみあい時には、相手の歯車と一体となったモデルとなる

二つの歯車は線接触ではあるが接しているため一体のモデルとして解析を行う。ただし、静止時にはそれぞれの軸が独立な挙動を示す。

(8) がた（バックラッシュ）がある

かみあっている歯の裏側にはバックラッシュ（背隙）と呼ばれるがたがあり、荷重変動により歯面が分離するとがたのある系の挙動を示す。

以上の要因がすべての歯車系で顕著に表れるわけではないが、トラブル発生の際に現象を理解する助けとなる。これらの中から、多くのトラブルと関連があるとみられる二つの現象について以下に紹介する。

3. 歯車軸の曲げねじり連成振動⁴⁾

二軸からなる平歯車系で、かみ合わせる前のそれぞれの軸の曲げ固有振動数 (f_{n1} , f_{n2}) とかみ合わせ後の動力伝達中の曲げ固有振動数 f_n を比較すると異なる (図3)。そのメカニズムの追求から明らかになったのが曲げねじり連成振動である。

3.1 曲げねじり連成振動のメカニズム

歯車軸系では伝達動力は回転軸の軸心ではなく歯車の歯に作用する。そのため伝達動力の変動は軸心に対しては曲げ方向作用力と回転方向作用力として作用する (図4)。

その結果、歯の剛性が十分高いとして単純化して考えると軸は図5に示すようにかみあい点を中心とする円弧状の振動をする。これは図の右に示すように曲げ振動と回転振動が同時に発生しかつ連成することを表す。

3.2 曲げねじり連成振動の実験・計算例

図6に二軸平歯車系で駆動軸の等価ねじり剛性だけを変化させ、曲げ剛性を含む他のパラメータは一定としたときの曲げの危険速度 (固有振動

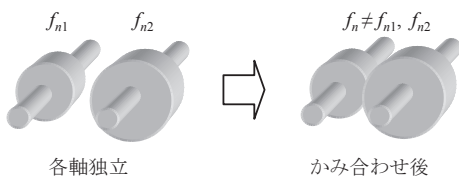


図3 かみ合わせによる曲げ固有振動数の変化

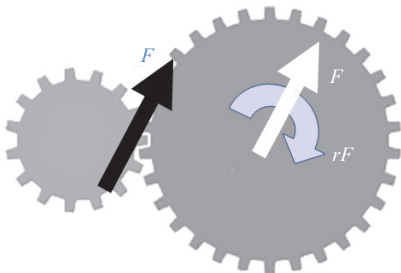


図4 歯面作用力と回転軸への作用力〔出典：文献8〕

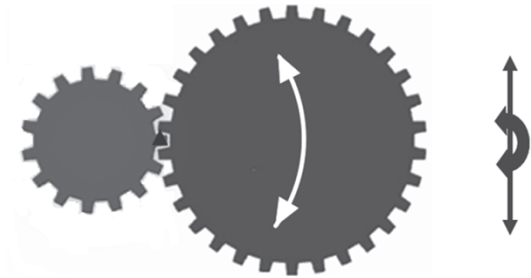


図5 曲げねじり連成による軸心の挙動〔出典：文献8〕

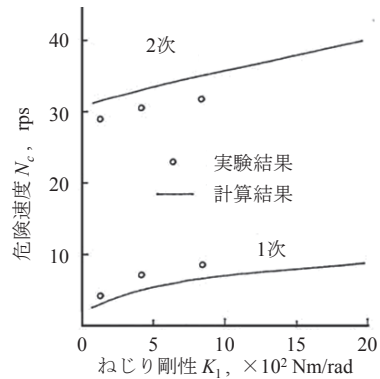


図6 ねじり剛性と曲げ危険速度の関係〔出典：文献8〕

数) の変化を示す。曲げねじり連成により、通常は回転振動に影響を与えるねじり剛性が、曲げ振動に影響を与えていることがわかる。

3.3 曲げねじり連成振動の加振原因

曲げねじり連成振動は言葉の通り、曲げとねじりが連成する振動であるから曲げ振動やねじり振動が誘起されれば発生する。

曲げ振動の原因として典型的なのは不釣り合い (アンバランス) であり、回転体の質量の偏りにより発生する遠心力によるものである。

一方、ねじり振動 (回転振動) を引き起こす原因としては歯車の幾何学的中心と回転軸の軸心がずれていることによる幾何学的偏心有る (ここで質量の偏心は考えない)。幾何学的偏心は図7に示すように原動軸が一定回転であっても従動軸を不等速で回転させる。

不釣り合いは軸の曲げ振動を直接的に引き起こしてねじり振動を、幾何学的偏心はねじり振動を直接的に引き起こして曲げ振動を連成により生じる。振動数成分としてはどちらも回転数同期である (駆動軸、従動軸それぞれの回転数成分が同時に

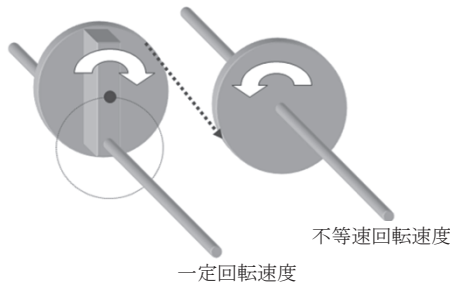


図7 幾何学的偏心による回転変動〔出典：文献8〕

現れる可能性はある)。

3.4 曲げねじり連成にともなう問題

歯車軸の曲げねじり連成振動はメカニズムを理解すれば比較的単純な現象であるが、実際にこの現象がからんだトラブル事例は多い。

3.4.1 誤ったバランシング 回転軸に同期した振動は一般的には不釣合いによるものが多く、その対策として修整おもりを付加するバランシング作業が広く行われている。

しかしながら歯車軸系では曲げねじり連成振動により歯車の幾何学的偏心も加振原因となりうる。不釣合いと幾何学的偏心はその加振効果が異なる(詳細は文献4を参照)ので、幾何学的偏心によって生じている振動を全速度領域で修整おもりによって打ち消すことはできない。速度領域によっては、逆に振動が増大することがある。図8にその計算例を示す。これは危険速度を二つ含むような速度領域で、幾何学的偏心により生じた回転速度同期振動を修整おもりで打ち消した場合の効果

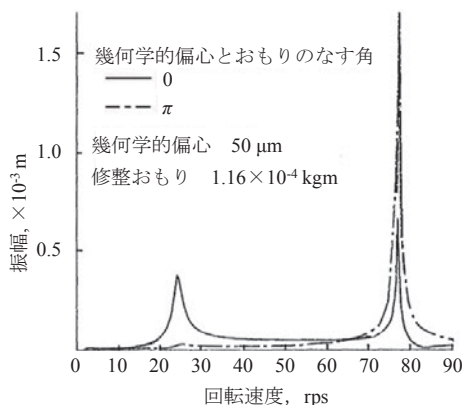


図8 幾何学的偏心と修整おもりの位置関係

を計算で求めたものである。図が煩雑となるため記入していないが、修整おもり付加前の振動は2本の曲線のほぼ中間となる。この例では修整おもりを幾何学的偏心に対して反対方向に付けた場合、一次の危険速度の振動は小さくなるが、二次危険速度は振動が増大する。同一方向に付けた場合には逆の傾向となっていることがわかる。

3.4.2 軸心の軌跡の変化 曲げ振動に限定すると、曲げねじり連成の影響は動力伝達方向であるかみあい線方向に現れる。それに対して、それと直角なすべり線方向は、ほぼ各軸が独立な状態となる。そのためこの二方向の振動の挙動はかなり異なったものとなる。図9に二軸平歯車系の回転数に対する応答と軸心の軌跡の測定例を示す。剛性の違いにより軌跡が非円形となることがわかる。特にすべり軸受を使用する系ではその影響を考慮する必要がある。

また同一の歯車の組合せであっても、図10に示すように原動側従動側、正転逆転により空間的にかみあい線の方法が変化するので注意が必要で

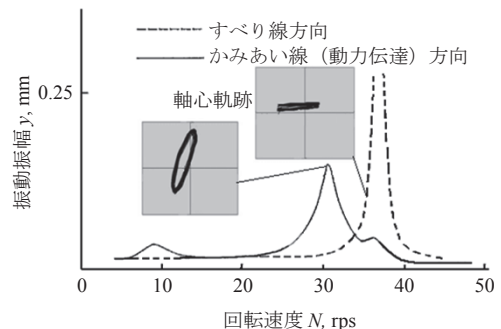


図9 かみあい線方向とすべり線方向の速度応答〔出典：文献8〕

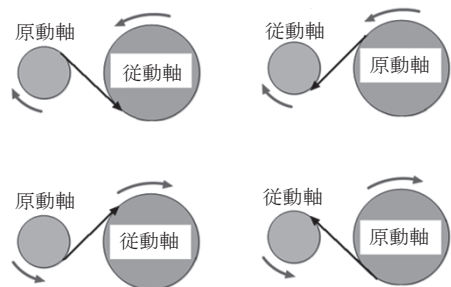


図10 同一の歯車組合せによる動力伝達方向〔出典：文献8〕

ある。たとえば減速過程では負荷の慣性により負荷側から駆動側に伝達力が作用し、通常状態とはかみあい線方向が変化する場合もある。工作機械で逆転時に異常振動が発生した例もある。

4. 歯のかみあいによる振動³⁾

歯車は歯を繰り出してそのかみあいにより動力を伝達している。同時にかみあっている歯の組数は時間的に変動し、平歯車であれば1対と2対の区間を繰り返す。これは御輿（みこし）を一組の担ぎ手と二組の担ぎ手で交互に運ぶようなもので歯のたわみは時間的に大きく変動する。これが歯のかみあいによる振動の基本的考えである。

4.1 歯のかみあいによる振動のメカニズム

歯のかみあいは駆動側から見ると歯元からかみあい始め、歯先で終わる（従動側からは逆）。そのため1組かみあいと2組かみあいの領域で剛性が大きく変化するだけでなく、同一のかみ合わせの中でも位置により変化する。図11に歯の等価剛性の回転による時間的変化を示す。おおよそ階段状となるが、かみあい位置の影響を受けて2組かみあい領域の剛性が1組かみあい領域の2倍とはなっていない。

このように時間的に剛性が変化する系では伝達力が一定でも釣合い点の位置が時間的に変化して振動が発生する係数励振振動系となる。

それだけではなく図12(a)に示すように歯がたわむことによって、歯と歯の間隔が変化し次の歯のかみあいはじめで衝撃が生じる。また同図(b)のように歯形誤差も歯のたわみと同レベルで存在

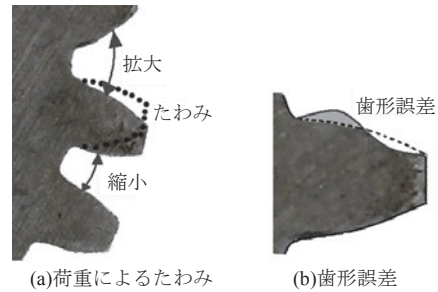


図12 たわみによるピッチ変化と歯形誤差

するのでその影響による振動も無視できない。

4.2 歯のかみあいによる振動・騒音

図13に横軸を時間にとった回転中の円周方向振動加速度とかみあっている1枚の歯の歯元ひずみの測定例を示す。

1枚の歯に着目すると、図中に数字で示すように歯は2組かみあいとしてかみあいを開始し、1組かみあいとなり、2組かみあいとしてかみあいを終わる。そして歯元ひずみからわかるように、同時かみあい数が増加するところで荷重が変化するためひずみも大きく変化している。またその際に円周方向に衝撃力がはたらき、固有振動数成分の振動が励起されている。実験結果にはそれに加えて歯形誤差による振動も含まれる。

4.3 歯のかみあいによる振動・騒音問題

4.3.1 回転数による振動・騒音の局所的変化 軸の回転数が変化するとかみあい周期が変化し、かみあい1周期中に含まれる固有振動数の周期数も変化する（高速になるほどかみあい1周期中の固有振動数の周期数は減少する）。そのため速度が増加すると全体として振動・騒音は増加傾向となるが、かみあい周期と固

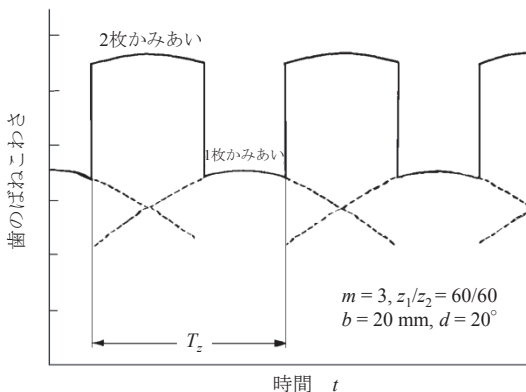


図11 歯の等価剛性の時間的変化〔出典：文献3〕

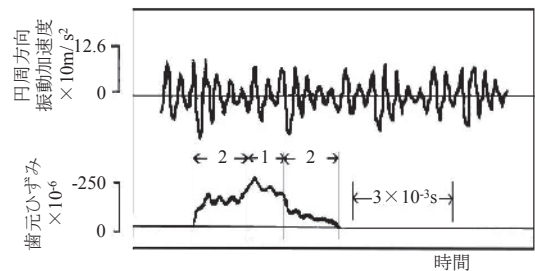


図13 回転中の円周方向加速度と歯元ひずみ測定結果〔出典：文献3〕

