

# 歯車技術の基礎知識 (6)

## —騒音の対処, 潤滑, 材料と高強度化, 製造—

北條 春夫\*

### 1 はじめに

振動を生じるメカニズムについて前回示した。振動は騒音となって問題を生じる。そこではじめに、騒音の対処のためのヒントをまとめる。次に、運転に必要な潤滑、材料とその高強度化、歯車製造の手順について概観して、本講座を終了する。

### 2 騒音の対処法

#### 2.1 騒音の発生メカニズム

歯車騒音は、歯車箱の振動や、軸を介して連結される機器へ伝搬した先での振動が、音として放射されて認識されるものである。

図1のように、歯と歯のかみ合いを起振源とする振動は、歯車本体や軸の質量と剛性を介して軸受に伝わる。軸受には、軸のたわみ角方向や軸直角方向にモーメントや力が作用する。軸受が歯車

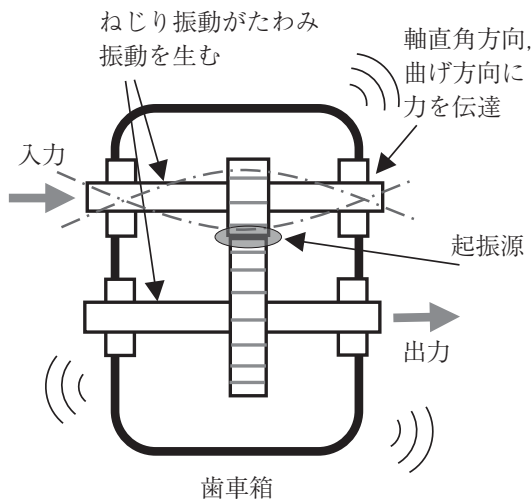


図1 歯車振動の伝ばの概念

箱の中立面から軸方向にずれていても、歯車箱に対し曲げモーメントが作用する。したがって、これらの方向の力やモーメントとして歯車箱に振動を伝える。結局のところ、歯車と歯車箱を含めて質量やばねで構成される振動系を構成し、振動や騒音の問題が生じるのである。

歯車箱は加振力が伝われば、その周波数で振動する。その外面での振動が、表面に接している媒質（空気）を揺らし、音となって空気中に伝わってゆく。空気の密度は歯車箱の金属質に比べて著しく小さいので、空気の振動は機械振動の抵抗になることもなく、そのまま音波となってしまふ。

#### 2.2 振動系の共振との関係

図2は、歯車装置の振動の周波数スペクトルを回転数を変えて上下に並べたもので、スペクトルのウォーターフォール図とよばれる。図は振動のスペクトルであるが、騒音も似たように観測される。

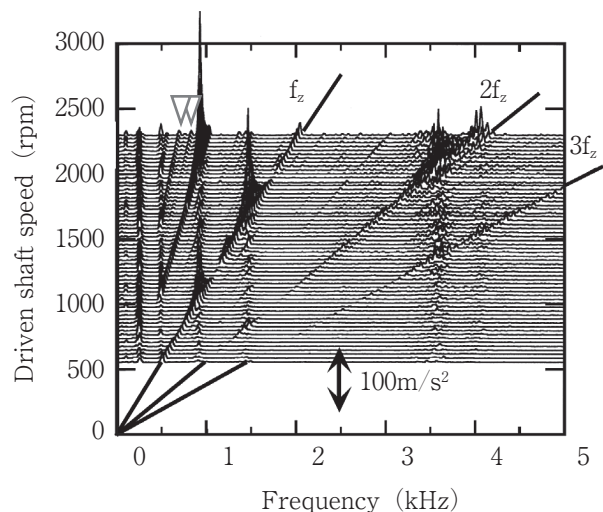


図2 振動スペクトルのウォーターフォール

\* Haruo Houjoh 東京工業大学 名誉教授 工博

なお音波には指向性があるので、周波数ごとの強さは観測位置によっても変化する。

図のいくつかのピークは、原点を通る斜めの直線上に認められる群と、鉛直線上に認められる群とがある。斜めの直線はかみ合いの整数次を含む回転整数次の加振成分を意味し、鉛直線は系の固有振動数であり、両者の交点の位置で振動振幅のピークが極大となって共振現象を呈する。

結局、騒音が問題となる原因は、加振力が大きいのか、加振力が小さくても振動系を共振させることである。図では、共振周波数は1kHz付近、1.4kHz、3.6kHz、4.2kHz近傍に認められる。さらに、0.25、0.5kHzにもピークが認められる。

かみ合い、非かみ合い成分のどちらの成分にしても、振動系が振動しにくければ騒音を認めにくくなる。

## 2.2 対処法の概要

音の主原因は機械振動であるので、対処するためには、以下のような手法がある。

- ①加振力を小さくする：これは、前回説明した負荷伝達誤差の振幅をできる限り小さくすることである。
- ②軸受での振動伝達を弱める：たとえば歯車箱の軸受位置を振動しにくい部位になるよう設計することが考えられる。
- ③振動の減衰性を高める：共振周波数に対して有効であるが、対処は容易ではない。
- ④加振周波数を共振周波数と一致させない：いくつかの加振周波数、共振周波数が存在することを意識する必要がある。
- ⑤聴感に頼る：周波数によるヒトの聴感特性を利用し、問題となる周波数を変更する（一般に1～3kHz付近の感度が高い）。

最後の2項目について、かみ合い周波数を変更するには回転速度を変えるか、歯数を変更する。

## 2.3 デシベルの不思議

騒音を評価する目盛はデシベルである。詳細は省略するが、騒音のパワーを対数変換して表すもので、振幅が1/2になったときには6dB、さらに1/2でまた6dB下がる。始めの6dBは容易でも、次の6dB低減はチャレンジングである。

## 3 潤滑の基礎知識

ここでは潤滑油を用いる前提で記すが、小形や低速の減速機ではグリースを用いることも多い。歯面間に潤滑剤を介在させて、摩擦力を少なくするのが潤滑の第一義である。

歯面間の潤滑状態は境界潤滑（固体表面同士が接触するが潤滑薄膜が介在する）、または混合潤滑（流体が介在する流体潤滑領域と境界潤滑領域とが混在する）と考えられている。なお歯面間の運動挙動は、潤滑状態によらず「摩擦」の言葉が使われている。

### 3.1 潤滑の代表的な方法

歯車の潤滑方法の代表例を図3に示す。(a)の油浴潤滑では、潤滑油は歯車箱内に封じ込まれる。歯車静止時には歯車の一部は油に浸かっており、歯面に油が付着する。(b)の強制潤滑では、ポンプと冷却用熱交換器が用いられる。通常はオイルタンクも箱外に設けられる。これらの機器を歯車箱外に設けるため、設備が大掛かりになるので大型機器に用いられることが多い。

### 3.2 潤滑の役割

実際に潤滑が担う役割を改めて整理すると以下のように整理できる。

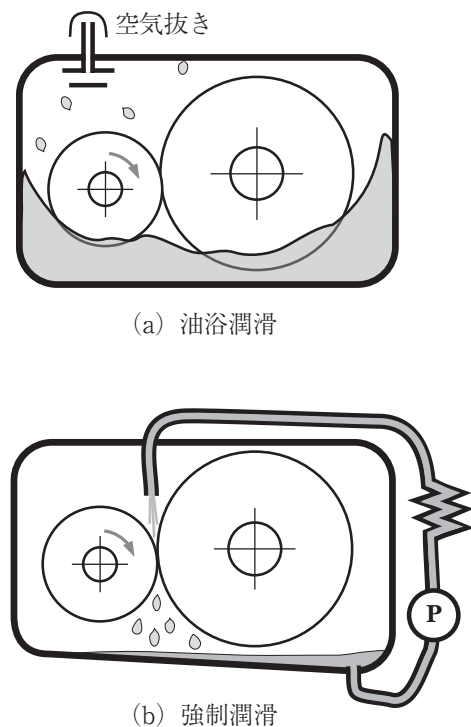


図3 潤滑油を用いた潤滑方法の代表例

**3.2.1 摩擦損失の低減** 省エネに必須のことである。摩擦損失の仕事率は、

$$P_L = \mu F \times v \quad (1)$$

である。伝達力  $F$  は設計上ほぼ決まるので、摩擦係数  $\mu$  を小さくするか、すべり速度  $v$  を低くすることで損失を小さくできる。前者は油の選択や添加剤あるいは表面粗さで、後者は小モジュール化等の諸元変更で改善が期待される。

**3.2.2 摩耗の低減** 歯面間が適切に潤滑されていても、表面にすべりの痕跡が残る。すなわち摩耗している。摩耗を防げれば歯面の損傷も発生しにくく、歯車の寿命が長くなる。

**3.2.3 冷却** 摩擦損失は全て熱となるから、歯面の温度上昇をもたらす、スカuffing（焼付き）に結び付く。また、材料組織の変成が起こりうることも相まって、ピッチングの発生にも関わるので的確な冷却が必要である。

このとき、仮に100kWの減速機の効率が98%とすれば、減速機の内部に2kWの電熱器を抱えているに等しい。潤滑油の温度は通常、80℃程度を超えないようにするので、潤滑油を適切に冷却することが大きな課題となる。

油浴潤滑の歯車箱内部における熱の発生と移動の様子を図4に示す。熱は歯車本体から軸を介して軸受を経て外部へ伝わるものと、歯面を含む歯車表面と接している油が熱を受取り、雰囲気中の油と混ざり、歯車箱の内壁に付着し外部へ伝達するものがある。

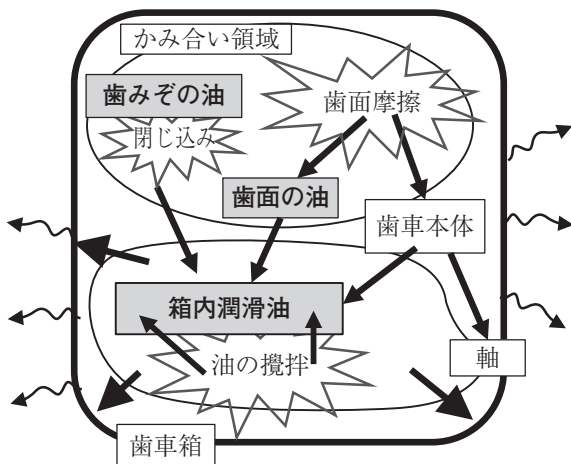


図4 歯車の熱（損失）の発生と輸送

さらには、潤滑油の攪拌による発熱（攪拌損失）が無視できない。上述の発熱量に上乘せされるので十分に注意を払う必要がある。なお、強制潤滑の場合は、潤滑油を外部の冷却器で冷却する。

**3.3 潤滑油量**

歯車箱内の潤滑油は熱を受取り運搬する役割を担うので、その熱容量が大きい必要がある。したがって油量を適切に設定しなければならない。同時に、高温になると油の劣化が進むので、これを緩和するためにも熱容量を確保して温度上昇を抑制する必要がある。

安易に潤滑油量を減らしてはいけないのである。

**3.4 損失の速度依存性と低減法**

主な損失要因である、かみ合いの歯面間の摩擦と油の攪拌について、損失仕事率を定性的に示したのが図5である。

歯面摩擦損失は、3.2.1に示した通りで、油量には関係なく、伝達トルクと速度に比例する。

攪拌損失は、伝達トルクにはよらず、油の粘度と、速度のべき乗に依存し、そして油量が多い（油面が高い）と大きくなる。その際、油温が高くなると粘性が低くなるので、速度が高くなっても飽和あるいは低下する傾向にもなりうる。

そこで、歯車箱に必要な油量を保持しつつ攪拌損失を少なくするように油面を低くする方策が考えられている。図6（b）は、箱の内壁に油溜め

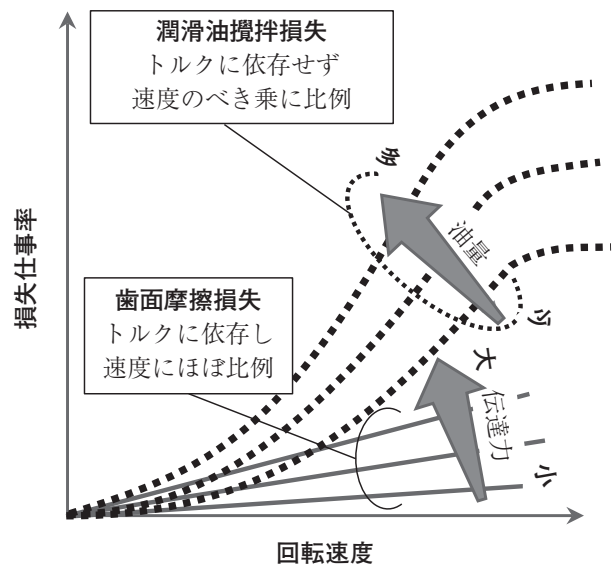


図5 かみ合い摩擦損失と油の攪拌損失

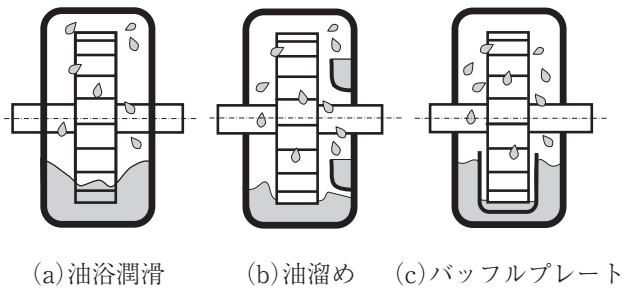


図6 攪拌損失低減の工夫

を設けて歯車がはねあげた油を蓄え、同図(c)は、歯車の周囲にバッフルプレート(囲い)を設けてその内側への油の侵入を抑制し、歯車から見た油面を低くするものである。

#### 4 歯車用材料

##### 4.1 材料の種類

歯車用の材料として、一般的には鉄鋼材料をイメージするが、鉄鋼材料でも種々のものがある。また、小型のものでは黄銅やプラスチックも用いられる。ざっくりとこれらをまとめると、表1に示すようになる。

自動車、航空機、産業機械等の主要な動力伝達用歯車は、鋼を用いることがほとんどである。中でも小形や高強度を要求するものについては、後に説明する熱処理や表面処理を施す。

このとき、小歯車は1歯あたりのかみ合い回数が大歯車より多くなるので、その分、疲労強度を

高く設定する必要がある。このため使用する材料を小歯車と大歯車で違えることも多い。

また、すべり速度が高くなるウォームギヤでは、ウォームには鋼、ホイールには青銅のような銅合金を採用する。かみ合いの歯あたりを、初期なじみの過程で歯面を摩耗させてつくり出す。そのため、摩耗しやすい材料として銅合金を用いるが、歯あたりが広がって安定した後は、油膜の介在によって摩耗の進行が抑えられる。

##### 4.2 鋼歯車の高強度化

歯車に高強度が求められるとき、種々の処理が施される。その基本的考え方を図7に表す。歯は通常、引張応力で破断するので、材料の引張強さを増すことと、残留圧縮応力というバイアスを与えて引張に抵抗させることが主眼である。

**4.2.1 焼入れ・焼戻しによる硬化** 材料を硬化する熱処理が焼入れ・焼戻しである。硬化によって材料の引張り強さが増し、歯の曲げ強度と歯面の耐久性が高くなる。

熱処理においては材料の選択と同時に、温度の時間履歴の設定が重要で、単に高温から急冷すればよいというものではない。1000℃以上で生成する結晶組織(オーステナイト)が急冷されるとマルテンサイト組織に変化し、炭素原子を組織の中に固定して硬くなる。また、一般に炭素の含有量が多い鋼ほど硬くなるが、もろくなる一面もあり、焼き戻しで材料の組織を調整して靱性を高める。このとき、結晶粒の微細化もノウハウとなる。

表1 歯車に用いられる主要な材料

炭素鋼	S45Cに代表される構造用炭素鋼。45は0.45% (重量) の炭素含有を表す。
合金鋼	SCr (クロム鋼), SNCM (ニッケルクロムモリブデン鋼), SCM (クロムモリブデン鋼) とか
鋳鉄	FC (ネズミ鋳鉄), FCD (球状黒鉛鋳鉄)
黄銅	C3604に代表される銅と亜鉛の合金
銅合金鋳物	CAC (黄銅, アルミ青銅, リン青銅など)
プラスチック	POM (ポリアセタール) がポピュラー

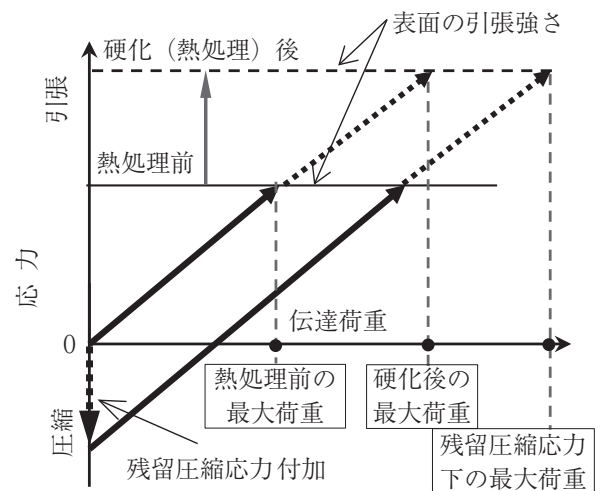


図7 歯車の高強度化のイメージ

**4.2.2 浸炭処理, 窒化処理** 歯は、引張り応力の高い表面に亀裂が生じ、これが起点となって欠けや破断につながる。そこで表面のみを硬くすれば亀裂が生じにくくなるから、表面近くの炭素濃度を高め、硬化させるのが浸炭処理である。

高温で炭素雰囲気の中に歯車をおけば、炭素が表面から内部へ拡散する。その後焼入れ・焼戻しを行えばよい。歯の内部は炭素量が少ないため比較的粘り強く、割れに対して強くなる（図8）。

この処理では、表面の組織が膨張傾向となる結果、全体形状を保持するように内部が膨張を妨げるので残留圧縮応力が発生する。

以上のように亀裂や割れの発生を抑制する効果が二重にあることになる。なお、この処理を行うためにはクロムやニッケルなどを微量含む合金鋼が用いられるため、コストは高くなる。

窒化処理も類似の処理であるが、表面硬化層の厚さが薄い。詳細は省略する。

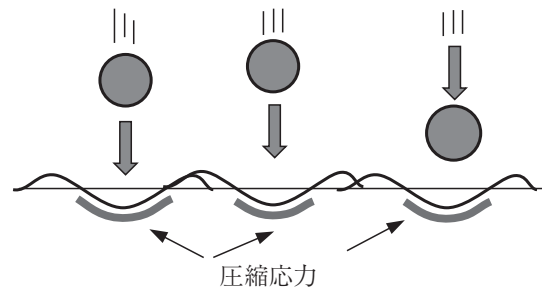


図9 ショットピーニングの概要

## 5 製作の手順

前節の高強度化の手法を踏まえ、鋼製歯車を製作するときの手順を図10に例示する。なお、表面硬化処理については前節で述べているので、それ以外について以下に記す。

### 5.1 加工素材（ワーク）の準備

まず、歯の熱処理変形の影響を最小化し、強度のばらつきが少ないように、均質化した素材が必要である。鍛造で外形を整えてから、焼きなましを行うこともある。その後、旋盤で仕上げる。

### 5.2 歯切り（ホブ、ピニオンカッタ、ブローチ）

歯切りは熱処理後の仕上げしろを残すように行う。通常はホブ加工をするが、形削りと総称されるピニオンカッタあるいはラック形カッタによる創成歯切りも行われる。遊星歯車のリングギヤについては、ピニオンカッタによる歯切りか、ブローチの引抜きで加工する。加えてスカイピングという加工法が近年、脚光を浴びている。

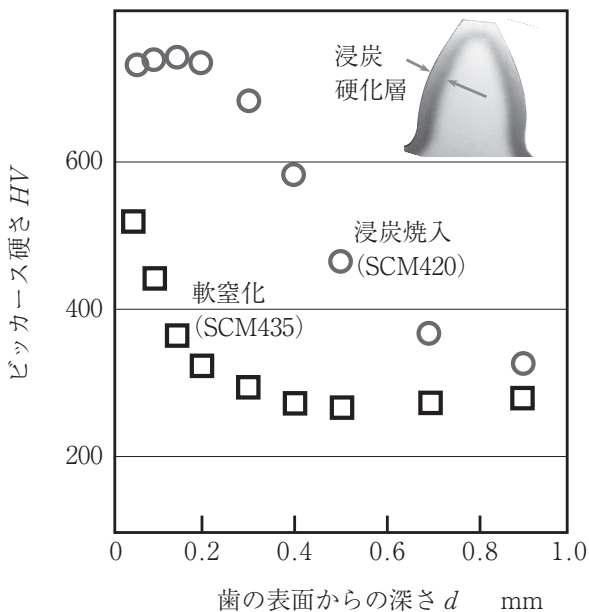


図8 浸炭と窒化による表面近くの硬度分布  
文献(1)から編集

**4.2.3 ショットピーニング** 表面に微小で硬い金属球などの粒子を高速でランダムに衝突させて、加工硬化や残留圧縮応力を発生させる処理である（図9）。打撃により表面が伸びるように塑性変形を生じるが、下地の拘束が伸びを妨げるように働き、圧縮応力が生じる。

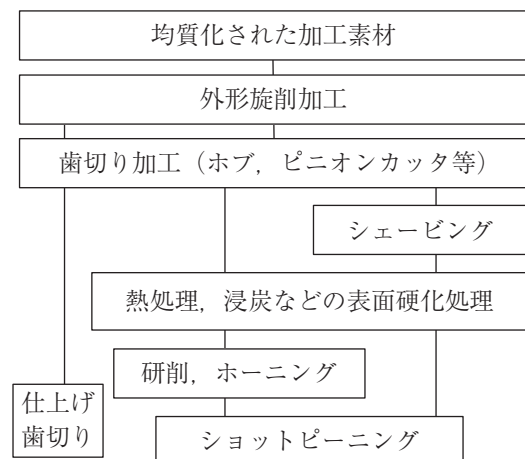


図10 歯車製造の流れの例

仕上げ加工を別に行う歯車については、生産性（コスト）優先で歯切りをする。強度や耐久性の問題がない歯車では、このまま仕上げ歯切りまたは研削などをして完成となる場合もある。

小歯数の歯車ではアンダーカットを防ぐために、ホブの代わりにピニオンカッタを選択することもあるが、後工程にも留意しなければならない。

### 5.3 シェービング

シェービングは、その名の通り歯面をそぎ取る加工であって、熱処理の前に行い、熱処理後の仕上げ加工を省略する。大量生産において、研削仕上げよりコストが低いことを大きな特色とする。

このため、熱処理変形や歯面修整を考慮に入れた仕上げ歯面形状を想定して、カッタの歯面形状と加工条件を決める。図11はシェービングカッタによる加工の概要である。カッタ歯車とワークの歯車を、軸がねじれのあるようにかみ合わせ、回転させる。その結果歯すじ方向の滑りが発生し、カッタの歯が相手歯面をそぎ取る。

### 5.4 研削・ホーニングなどの仕上げ加工

熱処理変形分を除去し、歯面の粗さを小さくす

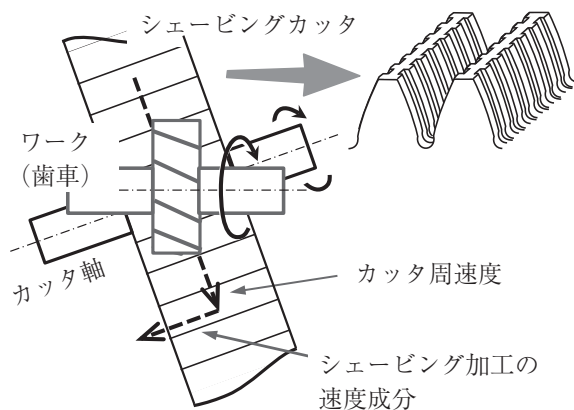


図11 シェービングのイメージ

表2 JISによる精度等級の新旧比較の一例（単一ピッチ誤差）

$m=2$ ,  $d=150\text{mm}$  ( $z=75$ ) を想定 単位  $\mu\text{m}$

JIS B 1702-1 : 2016 (新 JIS)	等級	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10
	許容値	4.2	6.0	8.5	12.0	17.0	24.0	34.0

0～11級の一部を表記。値は計算式に基づく。

旧 JIS と区別するために接頭文字 N を慣用している。

JIS B 1702 : 1995 (旧 JIS, 1998に廃止)	等級	0	1	2	3	4	5	6
	許容値	4	6	8	12	16	23	33

るために研削を行う。研削には、連続方式と割出方式がある。前者はホブをねじ状砥石に置き換えたもの（但し直径は大きい）と考えればよく、加工機械の癖が転写されやすい。後者は、1歯ずつ割出して加工するので時間がかかる。

ホーニングはより細かい粒度の砥石での研磨と考えればよいが、砥石は歯車の形をしていてシェービングと同じ動きとなる。

## 6 歯車の精度等級

歯車の精度として、ピッチ誤差、歯形や歯すじ形状誤差についての精度等級が、JIS B 1702-1 : 2016<sup>(2)</sup> (ISO1328-1 : 2013に準拠) に規定されている。例えば形状誤差については、評価範囲における設計形状からの偏差の最大幅が、等級ごとの許容値として定義されている。

### 6.1 旧 JIS と新 JIS

この規格は1998年に、従来の JIS B 1702 (旧 JIS) が廃止されて、新たに制定、後に改正されたものである。旧 JIS との混同を避けるため、精度等級の前に文字 N を付けて用いることが多い。新旧を比較すると、表2のように、ほぼ同等の偏差の許容値に対して等級で概ね4のずれがある。

精度等級が2級高く（良く）なると、許容値は半分になるが、製造コストが高くなる。N0級の歯車を作ることは著しく困難であって、安易な等級指定は避けるべきである。

### 6.2 精度等級と歯車の性能

振動を考えると、累積ピッチ誤差の等級は高いことが望ましいのは確かと考えられる。一方歯形形状誤差の等級が高くても、形状の微細構造が規定されないため、かみ合い非整数次振動を励起することもある。

また、精度等級が低く（悪く）ても騒音が問題とならないことも多く、精度等級イコール性能と決めつけるのは早計である。

## 7 軸受に作用する力

最後に、軸受や歯車箱に作用する力について、設計における留意点を以下に記す。

### 7.1 一对の歯車の軸受反力

ピニオンとギヤの軸直径は伝達トルクに応じて異なる。しかし、かみ合い伝達力と軸受反力は等しいので、駆動軸と被動軸の軸受の動定格荷重は同じとして軸受を設計することになる。

### 7.2 歯車の小径化の影響

歯面強度を高めると歯車を小径化でき、中心距離が短くなる。このとき伝達トルクが不変なら、歯面伝達力と軸受反力が大きくなり、軸受を強化しなければならなくなる（図12）。

### 7.3 はすば歯車および多段歯車の場合

はすば歯車の接線方向伝達力  $F_t$  と軸方向力  $F_x$  は次の関係となり、軸方向の力が無視できない。

$$F_x = F_t \cdot \tan \beta \quad (2)$$

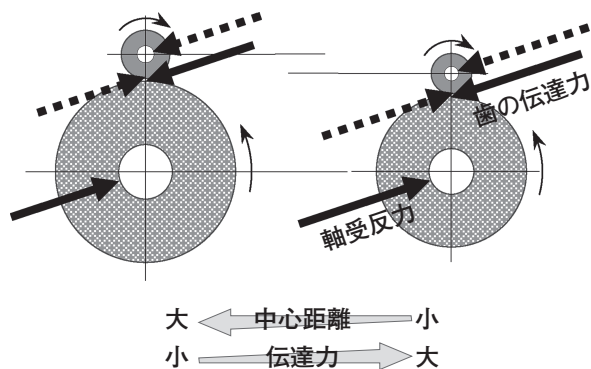
ねじれ角が30度なら、接線力に対して  $1/\sqrt{3}$  の軸方向力が生じる。軸受ばかりか歯車箱の剛性も、平歯車に比べて、十分に考慮する必要がある。

さらに多段歯車の中間軸には、作用線方向の伝達力や軸方向力が種々作用するので、これらをキャンセルするような工夫も重要で、中間軸のねじれ角の向きにも注意を払う必要がある（図13）。

## 8 終わりに

歯車をつくり、使うには運転、製造に関しても多くの知識が求められる。本講座では平行軸歯車しか取り扱わなかったが、交差軸、ねじれ軸の歯車などはさらに複雑な一面がある。理論もさることながら経験も重要である。歯車をうまく活用するためには、幅広い知識の獲得が重要である。

なお、歯車に関する書籍の新しいものはあまりないのが実情で、相談する先も多くはない。その背景の下、日本機械学会機素潤滑設計部門主催の歯車技術基礎講座（本講座レベル）と、日本歯車工業会のギヤカレッジ（大学院レベル）という二



左右で伝達するトルクは等しい

図12 伝達力への歯車の小径化の影響

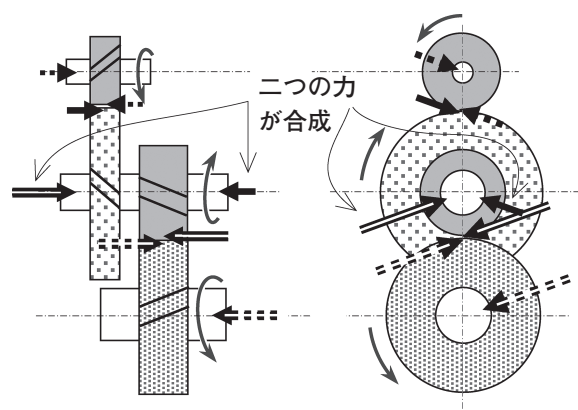


図13 はすば2段減速機に作用する力

種類の歯車技術に関する講座が開設されている。また研究面では、日本機械学会に歯車技術に関する調査研究分科会（2021年度はRC-283）が設置されていて、産学連携研究も行われている。これらに参加しての人脈づくりも、価値があると思う。

## 参考文献

- (1)日本機械学会, RC-132伝動装置の現在技術の限界とその克服に関する調査研究分科会報告書, 1997.
- (2)JIS B 1702-1 (2016) 円筒歯車—精度等級—第1部: 歯車の歯面に関する誤差の定義及び許容値.

その他全般的に役立つ図書をいくつか示しておく。  
久保愛三編, 歯車損傷大全, 応用科学研究所, 2019.  
日本歯車工業会出版物: 歯車製造便覧 2019年,  
新歯車便覧 (第3版) 2010年, 歯車規格集 2008年,  
日本機械学会編, 歯車強さ設計資料, 1979年.