

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

# モーター・歯車装置からの音と振動を減らす

鉄道車両周りから発生する音や振動は、空力的な要因で発生するものや、レールや車輪から発生するものなどさまざまです。電動車には、車両床下の台車部に、モーターと歯車装置、そしてこれらをつなげる継手から構成される駆動装置がありますが、駆動装置から発生する音や振動は、乗客の乗り心地や、沿線へ悪影響を与えることがあります。ここでは、モーターと歯車装置の音や振動の発生メカニズムや、これらを低減するための対策の一例を紹介します。

## 電车用モーターの音の対策

電車（電動車）ではモーターの力を歯車装置に伝え、歯車装置で大きくした力で車輪を駆動して走行しています。小形軽量化したモーターは高速回転するのが得意ですが、強い力を出すのが苦手です。そこで、歯車装置を用いて、回転速度を減速させる一方で力を大きくして電車を走らせています。

しかし、高速回転するモーターからは不快な音、すなわち騒音（☞参照）が発生します。特に、回転軸に冷却ファンを取り付けているモーターでは、電車の速度が速くなると冷却ファンの回

転も速くなり、通風に伴う冷却ファンのゴォーという音が大きくなります。

そのため、対策としては、冷却構造を変えて、全閉構造とし、モーター内の音が外部に漏れないようにするのが効果的です。近年、永久磁石同期モーターなどでは高効率化に伴って、発熱を減らすことができるようになり、従来のように冷却ファンで冷却風を取り込まずに、表面から放熱する全閉構造のモーターが可能になりました。

**図1**は鉄道総研が以前試作した全閉形の永久磁石同期モーターの外観です。このモーターは従来の冷却ファンを用



**笹倉 実**  
Minoru Sasakura  
車両制御技術研究部  
動力システム研究室  
主任研究員  
【専門分野】 台車系振動・騒音解析



**近藤 稔**  
Minoru Kondo  
車両制御技術研究部  
動力システム研究室  
主任研究員  
【専門分野】 電车用モーター、車両のエネルギー消費

## ☞ 騒音

騒音とは人間がうるさいと感じる音を指す言葉です。そのため、騒音の大きさを評価する場合には、単なる音波の大きさではなく、人間がどのように感じるかを考慮して評価する必要があります。

物理的な音の大きさは音圧レベルと呼ばれるデシベル量ですが、人間の耳は周波数によって音の聞こえ方に違いがあり、音圧レベルに周波数毎の重みをかけることにより、人間の耳の特性にあわせた音の評価を行います。これが騒音レベルと呼ばれるものです。また、この重みはA特性フィルターと呼ばれます。楽器のように特定の周波数の音だけが卓越していると、人間がその音をより意識するようになるため、その分、騒音レベルを大きくするような補正が行われることもあります。

そのため、騒音対策としては、単に音波の大きさを小さくするのではなく、耳障りな音にならないように音の周波数を分散させるような対策が行われることもあります。あるいは、発生音がメロディーになるようにしたり、心地良い音になるようにしたりする取り組みが行われる場合もあります。



図1 鉄道総研で試作した全閉形永久磁石モーター

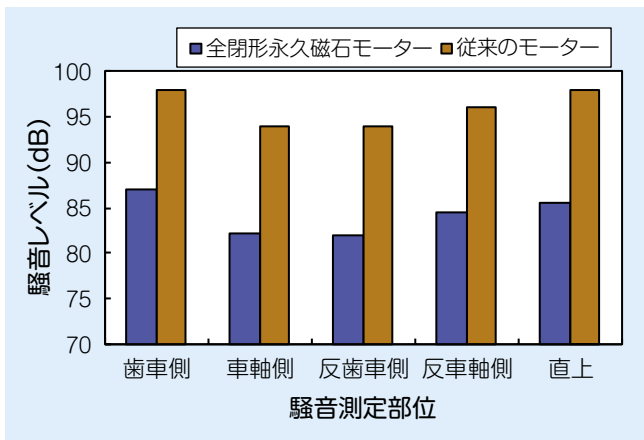


図2 全閉形永久磁石モーターの騒音測定結果 (毎分5000回転時, モーター表面から1m離れた点)

いるタイプのもと同じ大きさと同じ出力を確保しながら全閉構造を実現しており、高速回転時のモーターから1m離れた点での騒音レベルを10dB(デシベル)以上低減することに成功しています(図2)。

モーターの音を低減するもう一つの方法としては、歯車装置の減

速比を小さくし、回転速度を低下させる方法があります。この方法はモーターが大型化するデメリットがあるものの、モーターの騒音の低減には効果的です。

しかし、モーターの騒音を低減させると、これまでその陰に隠れていた歯車装置の音が目立ってくるようになります。そのため、現在では、歯車装置の音と振動の対策が重要になってきています。

また、冷却ファンを用いるモーターは主に在来線電車で使用されていますが、新幹線電車ではモーターの中にブロワで風を送る冷却方法が通常用いられています。この方法の場合、ブロワの回転は電車の速度と無関係なので、速度の上昇に伴い冷却ファンの音が

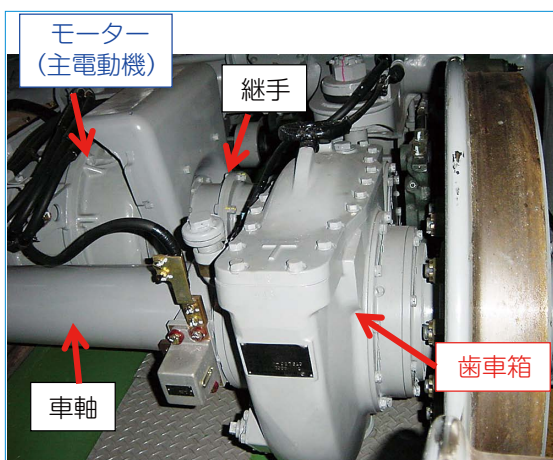


図3 電車の歯車装置

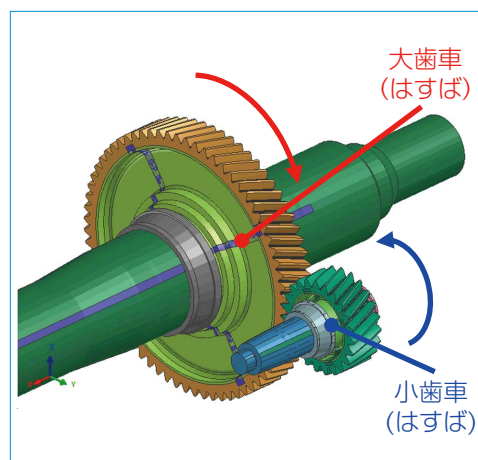


図4 歯車の内部と、かみ合い解析モデル

きくなることはありません。そのため、新幹線電車の場合ではモーターによる騒音は在来線電車の場合ほど顕著ではありません。

### 電车用歯車装置のしくみと音と振動の発生メカニズム

電車の歯車装置の一例を図3に示します。これは車軸とモーターが平行になるように配置された平行カルダンと呼ばれる方式で、大半の電車がこの方式をとっています。歯車箱の内部は、図4に示すような小歯車と大歯車で構成されています。自動車のような多段の変速機構を必要としないので、構造的にはシンプルです。

歯車の歯面の種類はさまざまなものがありますが、鉄道車両の歯車は、主

にはずば歯車を用いています。はずば歯車は、平歯車のように歯すじが歯幅方向に平行でなく、ねじれるように斜めになっており、歯面が斜めであることにより、平歯車に比べて、その接触面積を大きくすることが可能となります。このため鉄道車両のように伝達荷重が大きな場合は、強度的に有利になります。また音も平歯車に比較し、小さくなるのが特長です。

図5に歯車の振動発生と音響放射のメカニズムを示します。

- ①モーターから歯車軸に回転トルクを与えると小歯車は回転し、歯を介して、
  - ②相互にかみ合い、回転しながら、
  - ③大歯車側に力が伝達されます。
- かみ合いの過程では、お互いの歯面

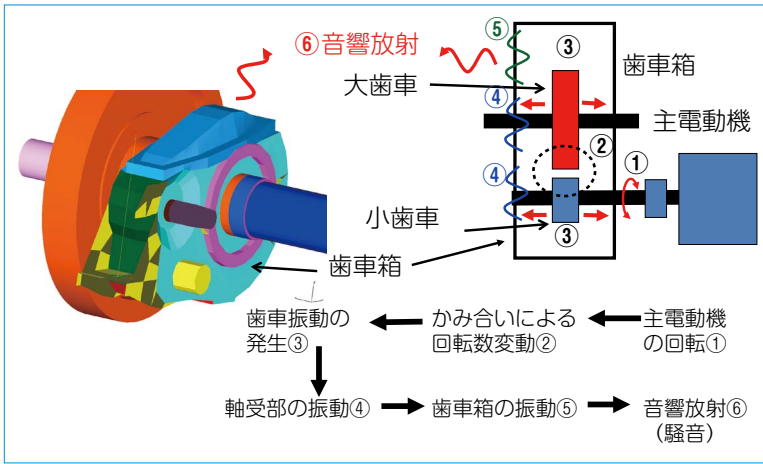


図5 歯車の振動発生と音響放射

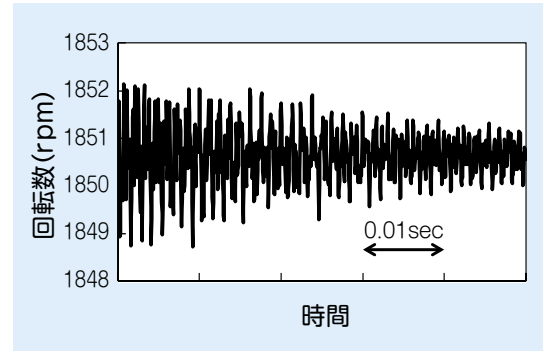


図6 歯車かみ合いによる回転数の変動

は、接触を始め、回転が進むにつれ転がりとともに、むしろ滑る感じで接触点が移動して、再び離れます。このとき歯車にわずかな回転数変動が発生します(図6)。これが、歯車系から発生する振動の原因の一つとなります。この変動が図5の①→⑥の流れに示すように歯車箱へ振動伝搬して、その表面から音が発生するメカニズムが考えられます。

### 走行時の歯車装置の振動状況

電車が走行しているときは、2つの歯車はそれぞれの歯車軸の回転数×歯車の歯数でかみ合うこととなります。図7は走行時の歯車軸受部の振動の一例で、260km/h走行では、毎秒約2200回かみ合うことになり、約2200Hz(2.2kHz)の振動成分として現れます。

これをかみ合い一次周波数と呼びます。図中の丸のように、力行や減速時の特定の速度域(特定の周波数)で振動が大きくなる傾向がわかります。また、かみ合い一次周波数の倍数成分で振動が大きくなる場合もあります。

### 歯車箱からの音の放射シミュレーション

歯車から発生する音と振動の詳細な解明は走行データの解析のみでは難し

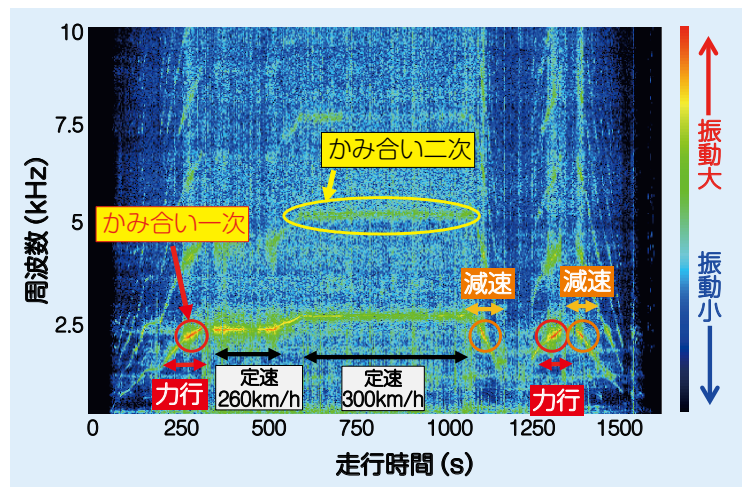


図7 走行時の歯車軸受部の振動

く、計算による解析も進められています。

複数のシミュレーション手法の組み合わせにより、図5に示す振動の伝搬と音の放射の計算が可能になります。歯車の軸受部の振動④は歯車かみ合い解析<sup>1)</sup>の計算により求めることができます。

これをもとに有限要素法(FEM)による歯車箱の振動解析を行い、音の放射部位となる歯車箱板部の振動⑤の計算を行います。さらに、この値をもとに歯車箱周囲の音響放射特性⑥を境界要素法(BEM)により求めます。

図8は境界要素法により求めた歯車箱板部全体から発生する音響パワーの計算結果の一例です。かみ合い一次周

波数のほか、かみ合い二次周波数によるピークもみられます。また、かみ合い周波数以外の成分でもピークがみられます。青丸の600Hz及び1000Hz付近のピークは、歯車箱の共振など歯車箱の構造的な要因による特性であると考えられます。

### 歯車からの振動と音の発生を抑える

歯車装置の音の低下を目指すには、歯車かみ合い振動の低減や、歯車箱の構造的な対策が必要です。

鉄道総研では、球状黒鉛铸铁(FCD、<sup>1)</sup>参照)の高強度タイプであるFCD900を候補に、材料的な側面から歯車の振動を抑え、音を小さく

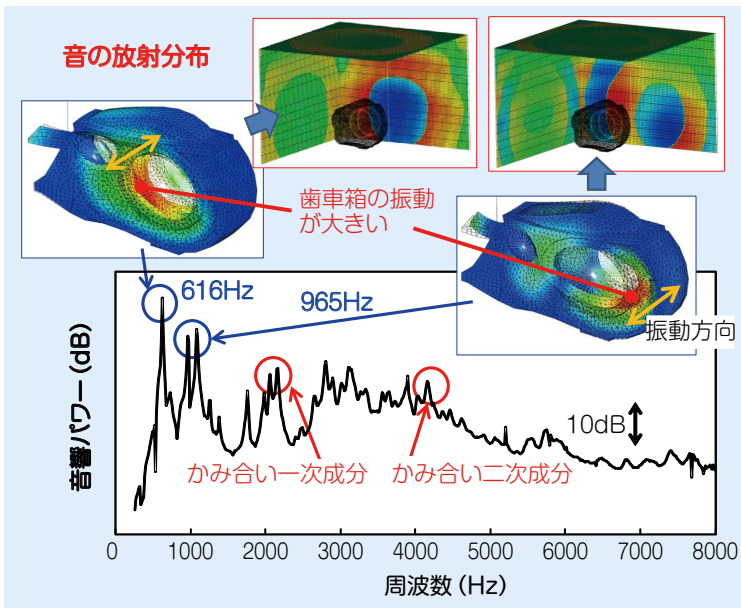


図8 歯車箱の振動と音響のシミュレーション

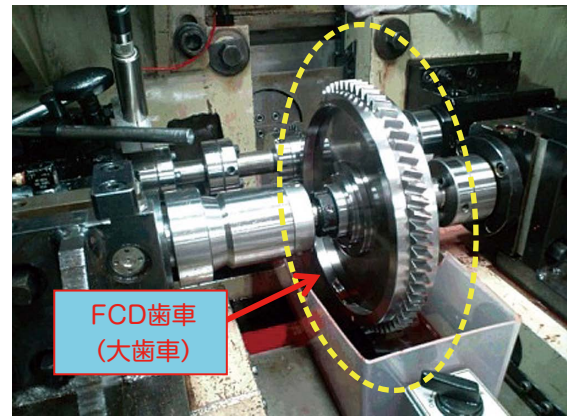


図9 FCD900製の縮尺歯車の回転試験

状態で直ちに使用が可能です。研削工程を省略できることから従来材料の歯車より製作コスト削減につながる事が期待できます。

図10は、図9の試験によるFCD900製の歯車の騒音測定の結果です。歯研を省略しているため、初期の歯面粗さが大きく、音は大きいですが、次第に粗さが改善され、回転開始から180時間程度で歯研が良好な従来材料歯車の騒音レベルを下回る特性を示します。

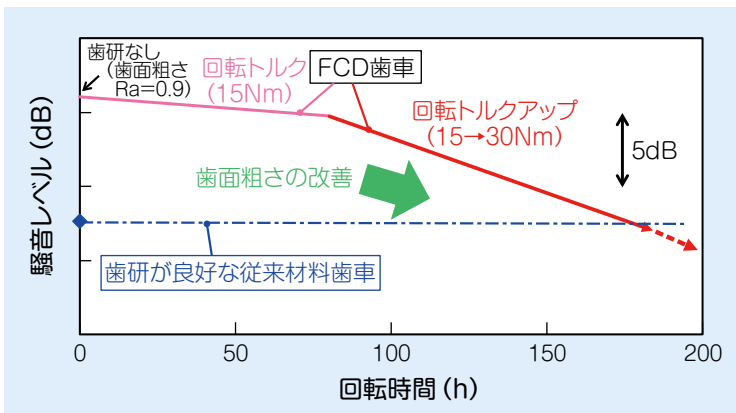


図10 FCD900製の縮尺歯車の騒音低下

する研究を進めています<sup>2)</sup>。図9は、FCD900製の縮尺歯車（実車の40%程度の大きさ）の回転試験の概要です。

FCDは黒鉛などが寄与することに

#### 球状黒鉛鋳鉄

ダクタイル鋳鉄（Ferrum Casting Ductile）とも呼ばれています。鋳鉄に含まれる黒鉛が球状になっており、切欠感がにぶく、普通鋳鉄（ねずみ鋳鉄）に比較して高い強度を示します。マンホールの蓋や自動車用クランクシャフト、各種ギアなどにも用いられています。

#### 歯研

歯車研削。歯車製造の最終段階で行う歯面の研磨工程のこと。これにより歯面の精度や粗さが改善する。

より、従来の歯車材料に比較すると振動減衰性能（材料減衰性能）に優れるほか、歯車に用いた場合は耐摩耗性や歯面の初期なじみ性にも優れています。

なじみとは、摩滅により歯面の表面粗さが均一化されることであり、これによりスムーズな噛み合いが得られるようになります。歯車噛み合い変動力が変化し、振動や音の低下が期待できます。

従来材料の歯車の場合、歯車製作の工程で、歯切りを行った後に歯研（参照）を行います。歯研は歯車製作コストの大きな割合を占めます。FCD歯車はなじみが良好なため、初期の歯面仕上げは粗くて良く、歯切り

#### おわりに

モーターと歯車装置から発生する音や振動について、それぞれ個別の対策について紹介しましたが、継手をふくむ駆動系全体の音の対策についても今後は取り組む必要があります。

FCD歯車については、今回の基礎試験から鉄道車両での実用化を目指し、実車規模での試験やシミュレーションを実施することを計画しています。

#### RRR

#### 文献

- 1) 笹倉実, 佐藤潔: 平行カルダン方式歯車装置の振動放射音の解析, 鉄道総研報告, Vol.26, No.3, pp.41-46, 2012
- 2) 笹倉実: 高強度球状黒鉛鋳鉄の適用による歯車の振動騒音低減, 鉄道総研報告, Vol.28, No.7, pp.45-50, 2014