

1516 FCD900 を適用した鉄道用歯車装置の振動及び騒音低減予測

正 [機] ○笹倉 実 (鉄道総研) 正 [機] 佐藤 潔 (鉄道総研) 正 [機] 後藤 智 (日本 ESI)

嶋村 和則 (日本 ESI) 三吉 俊幸 (青梅鑄造) 小川 節夫 (菊地歯車)

Prediction of Low-vibration and Low-noise of Railway Gear Unit using FCD900

Minoru SASAKURA, Kiyoshi SATO, (Railway Technical Research Institute) Satoru GOTO, Kazunori SHIMAMURA, (ESI Japan,Ltd) Toshiyuki MIYOSHI,(OME IRON CASTING CO.,LTD) Setsuo OGAWA,(KIKUCHI GEAR CO.,LTD)

In these years, drive-system noise generating from motor vehicles on meter-gauged railways is decreased by employing fully enclosed type traction motors. However, the sound level of a gear noise is still remained high relatively. Our purpose is to develop a low noise gear systems by changing gear materials. In this paper, We carry out the running test and analysis of low noise gear made by ductile cast iron(FCD900), using mechanical dynamic behavior analysis,FEM analysis and BEM analysis to predict the vibration and sound power reductions of the gear systems. Consequently, we found that the gear which added to the materials has the lowest sound level by the improvement effect of the gear contact surface, compared to conventional one.

Keywords : Mechanical analysis ,FEM/BEM analysis, Gear noise, Ductile cast iron

1. はじめに

本報告では球状黒鉛鑄鉄 (ダクタイル鑄鉄とも言う。以下 FCD と記す) と従来鋼の小型試験歯車を用いた回転試験と歯面形状の経時変化の比較、歯面形状データをもとにした噛合い解析、さらに歯車軸受部作用力を入力とする歯車箱の構造/音場解析を行い、従来歯車と比較した FCD 歯車による振動および騒音低減効果について、まとめた結果を報告する。

2. 球状黒鉛鑄鉄歯車の鉄道車両への適用可能性

鑄鉄は黒鉛が含まれることにより振動減衰性能 (材料減衰性能) に優れるといわれ、その中でも普通鑄鉄 (ねずみ鑄鉄または、片状黒鉛鑄鉄とも言う) が最も優れているが片状黒鉛を多く含み材料内部の切欠性により強度面で弱い欠点がある。このため歯車強度と信頼性の面で鉄道車両に適用することは難しい。一方、黒鉛を球状化した FCD は、切欠感度がにぶく鑄造性や耐摩耗性に優れ鋼に匹敵する性能を示すため適用可能性があると考えられる。FCD は自動車用クランクシャフトや各種ギアなどに適用されている。振動減衰性能は、普通鑄鉄に劣るものの従来鋼と比較すると高い。歯車に FCD を用いた場合、上述の振動減衰性能のほか、歯面の初期なじみ性の良い点が経験的に知られており、歯車噛合い変動力が変化し、振動および騒音が低下することが考えられる。FCD 歯車はなじみ性が良好なため、歯車制作時に歯研仕上げを省略し、歯切り (ホブ切り) 状態での使用が可能である。歯研工程を省略できることから実用化により従来の歯車より製作コスト削減につながることも期待できる。また、黒鉛の潤滑作用で同一硬度の鋼製歯車に比べ耐摩耗性が向上する利点も挙げられる。本研究では新しく開発された高強度球状黒鉛鑄鉄 FCD900 の鑄放し材を候補に、鉄道用低騒音歯車に応用出来る可能性を検討した。この材料は鑄造後の熱処理工程を行わずとも高強度を持つほか、鉄道用歯車として必須条件である水素脆化を抑制する特長を有する。この FCD900 は印刷機械や精密減速機への適用で歯車騒音が大幅に低下した例がある。Table. 1 は

FCD900 と従来歯車の材料規格であり、FCD900 の括弧の値は実測値である。FCD900 鑄放し材は耐力がやや劣るものの、引張強さや硬度では従来歯車と同等あるいは、それ以上の性能を持つことがわかる。なお、FCD900 に QT 処理を行った場合はさらに性能を向上させることが可能である。

Table 1 Comparison of material properties

Material	Tensile strength(MPa)	Yield strength(Mpa)	Rate of growth(%)	Hardness(HB)	Heat treatment
FCD900	900~	600~	2~	270~350	As cast
	[940]	[650]	[4]	[320]	
	[1010]	[875]	[8]	[320]	Quenching and tempering
S40C	610~	440~	20~	179~255	Quenching and tempering
SNCM420	980~	-	15~	293~375	Quenching and tempering

3. 歯車試験

3.1 試験歯車対の試作

歯面の経時変化 (なじみ) や、振動および騒音特性の比較を行う目的で従来鋼歯車 (以下、従来歯車と記す) と FCD 歯車の実車 40%程度縮尺試験歯車対 (小歯車: 歯先円径 78mm および大歯車: 歯先直径 222mm) を製作した (Fig. 1 は FCD 歯車対の例)。従来歯車は、実車同様に大歯車は S45C 高周波焼入れ、小歯車は SNCM420 浸炭焼入れとし、それぞれの歯面は歯車等級で 1~2 級程度の歯研仕上げを行った。FCD900 歯車も同一形状であるが、歯切りのみで歯研仕上げを省略した。新幹線のギア比に近い 3 とし、小歯車は歯数 24、大歯車は歯数 72 とした。モジュールは 3 である。歯面形状は、材料の相対比較を目的としていることや、後述する歯面形状の測定上の制約から、実車歯車のような、はずば歯車ではなく平歯車と単純化した。

3.2 試験歯車の測定

3.2.1 歯車回転試験

歯車回転試験の概要を Fig. 1 に示す。大歯車の歯面上

部より右側上方約400mmの位置に、普通騒音計を取付け、騒音レベルの比較を行った。本試験装置の負荷能力と、歯車共振特性などの事前検討を踏まえ、回転数は1950rpm(小歯車)とし、その負荷トルクは15Nmとした。また回転時間は48時間とした。

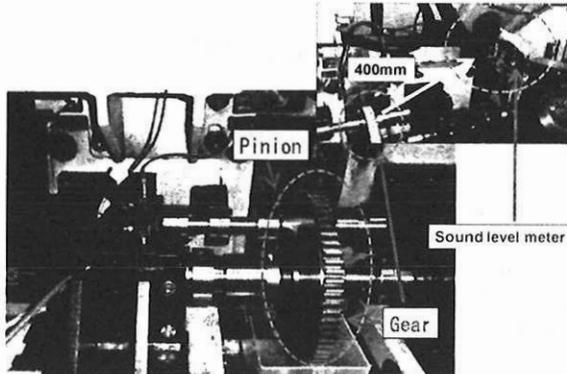


Fig.1 Model of pinion and gear (FCD900 Running test)

3.2.2 歯面形状測定

歯車回転試験の前後に歯面形状の実測を行い、両材料の経時変化の比較を行った。測定部位は小歯車と大歯車のそれぞれ接触側の代表歯面(1面)とし、歯筋および歯形方向の歯面粗さ測定と、次章の噛合い変動力解析の3次元形状データに必要な点群の測定(約1.0mmの等間隔格子点)を行った。

3.3 試験結果

3.3.1 試験歯車の騒音特性

歯車回転試験によるFCD歯車騒音レベルの経時変化をFig.2に示す。点線は大歯車の固有振動数(1次~3次)付近での値であり、実線は噛合い次数(1次~4次)での値である。回転開始から6時間は機器調整のためデータを省略する。回転開始より40時間の1次固有振動数および2次固有振動数と、48時間の噛合い2次(1548Hz)の値を除き、騒音レベルの減少傾向がみられた。なお、噛合い2次の上昇は歯面の状態が変化することによりピークの特長が変化した可能性が考えられる。10kHzまでの0.A.の値は約5dB(A)の減少となった。これらは歯面なじみによる効果であると考えられる。経時変化の傾向としては固有振動数付近の成分より噛合い振動数成分の減少が大きい結果を示しており、噛合い周波数成分となじみの相関がより高いことがわかった。従来歯車の騒音レベルは低減する傾向はみられず、0.A.の値もほとんど変化しない傾向を示した。

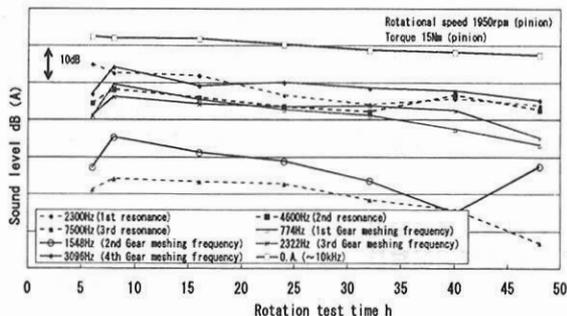


Fig.2 Sound level of spur gear (FCD900)

3.3.2 回転試験による歯面粗さの変化

Fig.3は各歯車の歯面Ra(平均粗さ)である。FCDの回転試験前で小歯車のRaは0.9 μ m程度、大歯車は0.5~0.7 μ m程度であり、歯研仕上げを省略しているため値は大きい。回転試験により粗さの値は大きく減少するが、歯面接触回数の多い小歯車の値の低下が大きく、回転試験後で歯形、歯筋方向とも0.4 μ m以下に低下した。大歯車は歯形および歯筋方向とも回転試験前に比較し0.1 μ m程度値が低下する結果を示した。従来歯車のRaは、歯研仕上げのために値は小さく、小歯車および大歯車とも歯筋方向のRaは0.05~0.11 μ m、歯形方向のRaは0.19~0.26 μ mであり、回転試験による粗さの低下はほとんどみられない傾向を示した。なお、FCD歯車は試験終了の48時間の時点においても、Raの低下傾向が継続しており、さらに長時間の試験によりRaが従来歯車と同等なレベルまで低下し、騒音レベルも大幅に低下する可能性が考えられた。

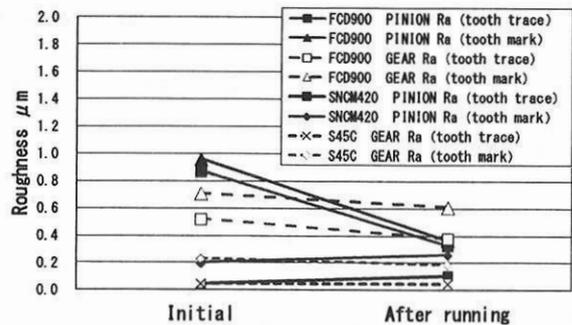


Fig.3 Comparison results of roughness (FCD900,steel)

4. 実車モデルによる歯車の振動特性および歯車箱放射音特性の比較

実車の歯車騒音は、主電動機からのトルク脈動や小歯車と大歯車の噛合い変動力が小歯車軸および車軸から各軸受を介し、歯車箱に伝播して、その表面を振動させ音響放射することにより発生すると考えられる。本章では前章での歯面形状データをもとに、軸受作用力の変化と歯車箱の騒音特性を評価するため、噛合い変動力解析と、歯車箱の構造/音場解析を実施した結果を述べる。

4.1 噛合い変動力解析

4.1.1 解析概要

小歯車軸に主電動機側からの回転トルクを与え、歯車噛合いにより歯車箱軸受部等に作用する力の時刻歴解析と、その周波数解析を計算した。Fig.4は前章の試験歯車による歯面形状データを実車歯車モデルに変換する手順である。初めに歯車回転試験前および試験後のFCD歯車および従来歯車の代表歯面の歯面点群データをソリッド要素モデル化した。実車歯車は、ほぼ形状であるため、基準ピッチ円上における、ねじれ角20°のモーフィングと相似変換を行い、歯形状を360°展開することにより疑似的な実車歯車モデルを作成した。Fig.5は、車軸および軸受を含めたソリッド要素モデルの概要である(節点数約90万、要素数約75万)。歯車噛合い接触面の摩擦係数は0.16と仮定し、各材料の減衰比は、加振試験結果⁽¹⁾を参考に、FCDは0.01875、その他の材料は0.015と仮定した。また、車輪相当の慣性モーメント($I_x:3.80 \times 10^7$, $I_y:1.93 \times 10^7$, $I_z:1.93 \times 10^7$)を車輪圧入部の軸受中心接点に定義した。解析条件はTable.2であり、

VPS(Virtual Performance Solution) Explicit ソルバ (PAM-MEDYSA)により時刻歴解析を実施した。小歯車軸への回転トルクの値は、解析対象となる車種の主電動機諸元値(定格回転トルク)から、トルクは回転速度に反比例するという仮定の下で300km/hでの値に換算し516Nmとした。なお、車輪相当の慣性モーメントが大きいため、計算開始直後の加速時には初期擾乱を生じるが、可能な限り早い時刻に収束させ、定常状態になるよう初期の $t=0$ (回転開始)～ $t=0.02\text{sec}$ では計算プロセス(初期トルク、強制回転条件、負荷トルク、および減衰トルク付与方法)を工夫した。このプロセスについては、文献(1)を参照されたい。規定回転数に達した後は車軸に発生する回転トルクと同じ値で、かつ逆回転方向の負荷トルクを車輪圧入部の車軸中心部に与え、定常回転とその負荷状態の挙動再現を行った。なお、回転開始から $t=0.12\text{sec}$ までの解析に約39時間の計算時間を要した。

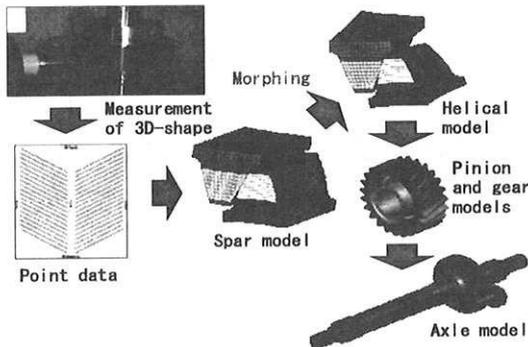


Fig.4 Transform of gear model

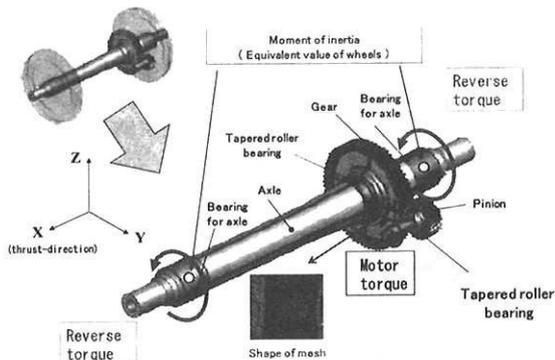


Fig.5 Analysis mode

Table.2 Specification of analysis model

Running speed	300 km/h
Diameter of wheel	860 mm
Number of tooth(gear)	72
Number of tooth(pinion)	24
Gear ratio	3
Rotational speed (gear)	1824 rpm
Rotational speed (pinion)	5471 rpm

4.1.2 解析結果

Fig.6は、FCD歯車の回転試験前歯面形状データをもとにした実車の定常回転域(回転開始より $t=0.06\sim 0.12\text{sec}$)での小歯車車軸受部の周波数解析例(0.5kHz～8kHz)である。Xはスラスト方向の作用力であり、Yは前後方向、Zは上下方向を示す。噛合い1次(2.2kHz付

近)や噛合い2次(4.4kHz付近)にピークがみられるほか、3.9kHzおよび4.5kHzなど、噛合いとは異なる周波数のピークがみられた。回転試験後の歯面形状データをもとにした小歯車軸受部の解析結果(Fig.7)との比較では、噛合い1次で約30%低下する結果を示した。同様な解析比較で大歯車軸受部の場合は約5%のピーク低下となった。Fig.3に示したように小歯車の歯面粗さは大歯車に比較し大幅に低下しており、歯面粗さと軸受部作用力は一定の相関があると考えられる。これら解析によりFCD歯車の歯面変化による軸受部作用力の低下を確認することが出来た。一方、従来歯車は、回転試験前後で歯面粗さはほとんど変化しない結果を示しており、軸受作用力の違いはほとんどないと考えられるため、回転試験後の歯面形状データのみで解析を実施した。小歯車軸受部の周波数解析結果をFig.8に示す。FCD歯車に比較して、4.4kHzの噛合い2次成分の値が大きくなり、小歯車軸受部では3.7kHz～5.4kHzの帯域で値が大きくなる傾向にある結果を示した。FCD歯車の歯面粗さが大きいにもかかわらず、その軸受部作用力が小さくなるのは歯車材料の減衰が大きいことも一因ではないかと推定される。

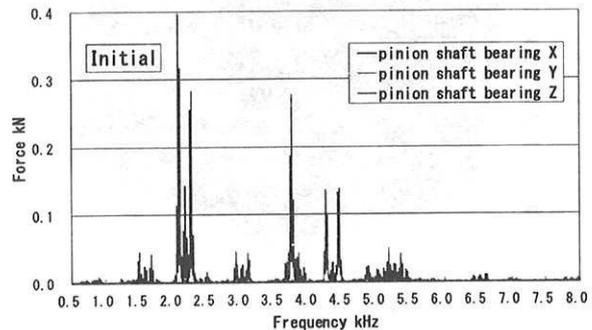


Fig.6 Excite force (Pinion bearing FCD900)

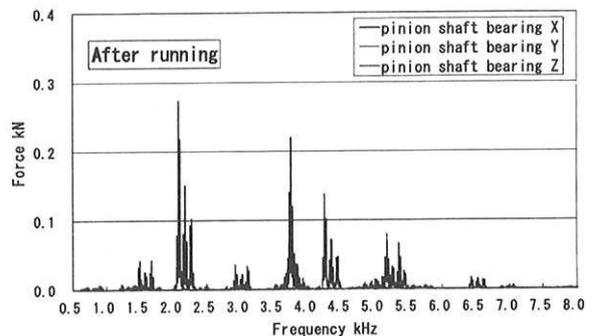


Fig7 Excite force (Pinion bearing FCD900)

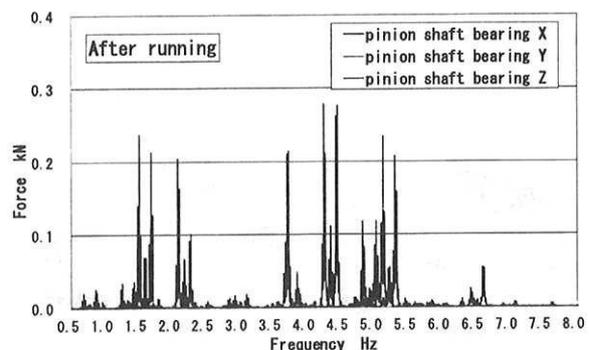


Fig.8 Excite force (Pinion bearing steel)

4.2 歯車箱の構造/音場解析

4.2.1 解析概要

噛合い変動力解析により得られた FCD 歯車および従来歯車の軸受部作用力を入力とした歯車箱の構造/音場解析をおこない、3次元音響放射分布(音圧分布)、音響パワーおよび歯車中心から6.25m離れた点での音圧を計算した。歯車箱の構造/音場モデル(中央の黒メッシュ)および歯車箱近傍の音響放射分布を Fig. 9 に示す。小歯車および大歯車軸受部をソリッド要素とし、歯車箱をシェル要素とした。軸受作用力を軸中心相当の位置に与え、軸受外輪へ剛体要素を張り、力を伝達した。歯車箱は従来鋼とし、減衰比は0.015とした。歯車箱表面からの構造振動を音響放射の境界条件とし、小歯車軸、車軸および各軸受押え蓋は放射部位に含めない条件とした。解析周波数は0.5kHz~8kHzとし、音響パワーは10Hz刻みの等間隔のほか、歯車箱の各振動モード周波数でも行った。

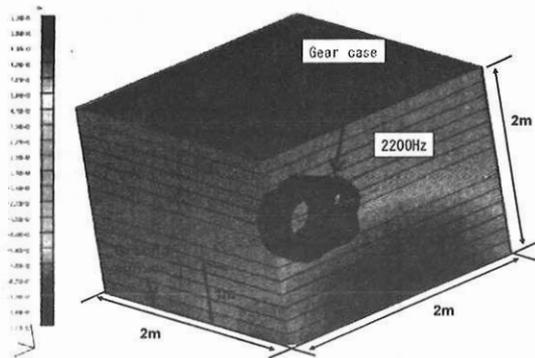


Fig.9 BEM analysis model and sound pressure (FCD900 after running)

4.2.2 解析結果

Fig. 10 は、歯車箱の FEM 解析による振動モード例であり、これら歯車箱の変形が周囲への音響放射となる。Fig. 9 は、FCD 歯車の噛合い 1 次付近 (2200Hz) の音圧分布例であり、歯車箱の内軌側側面の下部より放射した音が近傍の地上付近で高くなる様子がわかる。Fig. 11 は 8kHz までの音響パワー解析結果であり、FCD 歯車の回転試験前と回転試験後の値を比較すると、3kHz~4.3kHz 帯のピークが低下する傾向がみられ、歯面形状変化が原因とみられる一定の騒音低減効果が予測できた。FCD 歯車と従来歯車を比較すると 3kHz、3.75kHz および 4.3kHz 付近 (回転 2 次付近) の主要なピークが FCD 歯車では低下する傾向がみられた。2kHz~2.5kHz 付近では差がみられないが 3.5kHz 以上での高周波数域では FCD 歯車による低減効果が、より大きくなる傾向がみられた。また Fig. 12 は歯車中心から 6.25m 離れた点での音圧解析例である。従来歯車の 4.4kHz 付近のピークは約 97dB(A) と高いがその他のピークは概ね 70~80dB(A) 程度である結果を示した。

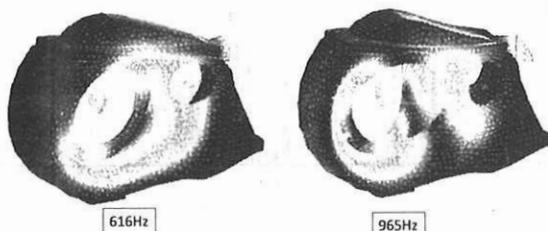


Fig.10 FEM-mode of gear case

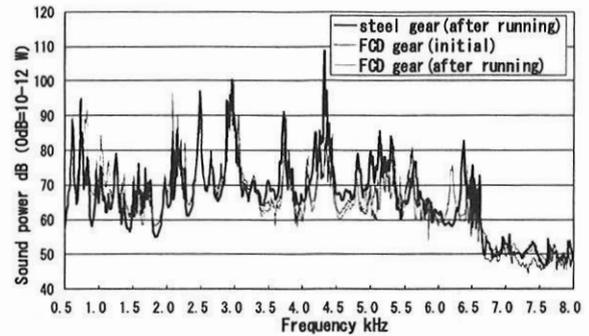


Fig.11 Sound power prediction of gear case

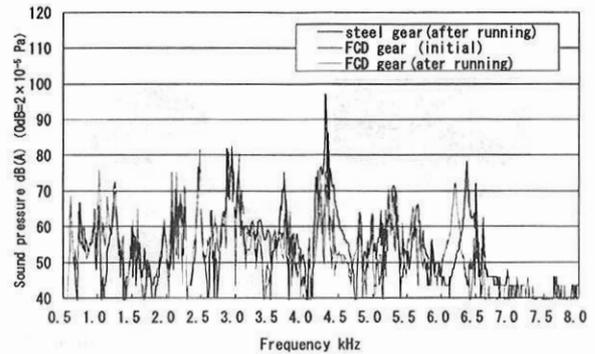


Fig.12 Sound pressure prediction of gear case (6.25m)

5. まとめ

FCD を鉄道用歯車に適用するための基礎試験および解析を行い、以下の成果を得ることができた。

- (1) 歯車回転試験により従来歯車にはない FCD 歯車の歯面粗さの低下と騒音低減効果を実験的に確認した。
- (2) 実車モデルに変換した歯車噛合い変動力解析により、歯車箱軸受部の振動低減効果を確認した。
- (3) 構造/音場解析により、歯車箱から放射する騒音低減効果を確認した。

6. 今後の取組み

FCD 歯車の利点は、なじみ改善性の良さと、材料減衰性能の良さの両方が考えられるが、これら影響因子の解明について、さらに考察を進める予定である。また、実車はすば形状歯車の製作と回転試験および解析を予定しており、実用化にむけて開発を進める予定である。

7. 謝辞

歯車回転試験の御協力を頂きました(株)小野測器に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 笹倉実 他: 鉄道車両の歯車系放射音に関する基礎的研究, D&D2011 CD-ROM 論文集, 日本機械学会 (2011)