

# 高強度球状黒鉛鑄鉄を適用した低騒音型歯車の性能評価

笹倉 実\*

## Performance Evaluation of Low Noise Gears Using H-FCD

Minoru SASAKURA

In order to reduce gear noise, it is general to perform a process such as shape correction of the gear contact surface. However, it causes a problem that the processing cost increases. We are developing a method that makes the gears low noise at low cost, by taking advantage of the damping characteristics of the gear material, without changing the shape of the gear contact surface by machining. High strength ferrum casting ductile (H-FCD) has high material damping performance, but the fatigue strength of H-FCD is lower than the steel materials. It is necessary to improve the fatigue strength of H-FCD. In this paper, first, we describe the experimental results of the noise reduction effect compared to conventional gears through the rotation test of H-FCD gears used in a real vehicle. Next, the heat treatment of H-FCD follows. Finally we introduce the effect of nitriding surface treatment on improving fatigue strength.

キーワード：高強度球状黒鉛鑄鉄，歯車騒音，疲労試験，組織分析，窒化処理

### 1. はじめに

在来線型車両の駆動系騒音は、電動機については低騒音型主電動機（全閉型）の普及により低下する傾向にあり、結果として、歯車騒音が占める割合は相対的に高くなる傾向にある。一般に歯車騒音の主たる加振源は、歯車のかみ合いによる変動力と考えられる。歯車の騒音低減を行うには、歯形修正等により歯接触面の形状を適正化し、かみ合い振動の低減を行う対策があるが、歯車の加工コストが増加する欠点がある。

筆者らは、加工による歯車接触面の形状変更が不要な、歯車材料の減衰特性等を生かして低コストに低騒音化を実現する手法の開発を進めている。高強度球状黒鉛鑄鉄（H-FCD）は、材料の減衰性能が高く、歯面のなじみ性も良好である。これを用いることにより、歯車製作コストの多くを占める最終歯研工程を省略し、初期騒音は大きくとも経時による騒音低下が大きく<sup>1)</sup>、歯研レスでの使用が可能である。

本報告では、H-FCD を用いた在来線型実機歯車を製作し、回転試験により同一形状の従来材料歯車と騒音性能等を比較した試験結果について述べる。また、本方式の実用化における課題は現状歯車材料並みの強度確保にあることから、H-FCD の表面処理改良と材料強化の取組みについても、あわせて述べる。

### 2. H-FCD 歯車の振動及び騒音性能評価

本章では、実機ベースで製作した H-FCD 歯車の振動及び騒音性能評価について述べる。振動における周波数応答関数（以下、FRF）の従来材料歯車との違いや、実車相当トルクによる歯車回転試験と騒音の経時変化（なじみ）、適用オイルの違いが騒音に及ぼす影響等について述べる。

#### 2.1 試験方法

##### 2.1.1 供試歯車

製作した H-FCD 大歯車を図 1 に示す。FCD900 を焼鈍しており、素材ベースでの振動及び騒音の基本性能を確認することを目的としている。このため、歯面の表面熱処理を行っていない。歯車形状は在来線低騒音型をベースとした。回転試験の歯車組合せは、小歯車を従来材料（SNCM420）とし、大歯車のみを交換して、従来材料（S45C）と H-FCD の比較を行った。ギア比は 5.65 である。

H-FCD の比重は約 7.2 であり、S45C の約 7.8 より小さい。縦弾性係数（ヤング率）は、S45C が約 212GPa、H-FCD が約 166GPa であり、約 20% 後者が低い。大歯車の振動固有値がこれらの違いで異なると歯車箱との振動連成の影響に違いが生じるため、この値は試験条件上、同じであることが望ましい。このため、両者の質量（約 120kg）と剛性を揃えている。リム厚をわずかに変えており、従来材料大歯車は 14mm、H-FCD 大歯車は 21mm としている。

\* 車両制御技術研究部 動力システム研究室



図1 H-FCD 歯車（大歯車）

### 2.1.2 大歯車の振動モード解析

H-FCD 大歯車の基礎的な振動評価を行うため、FRF の測定及び、FRF の周波数ピークから同定される振動モードの抽出を行った。試験方法は、動電型加振器と加振棒（ロードセル付き）により大歯車リム部の左右方向（面外方向）に加振力を加え、スキャニング型レーザー振動計（Polytec 製 PSV-400-1D）により、歯車箱表面の振動速度を計測する方法とした。大歯車は自由支持とした（図2）。

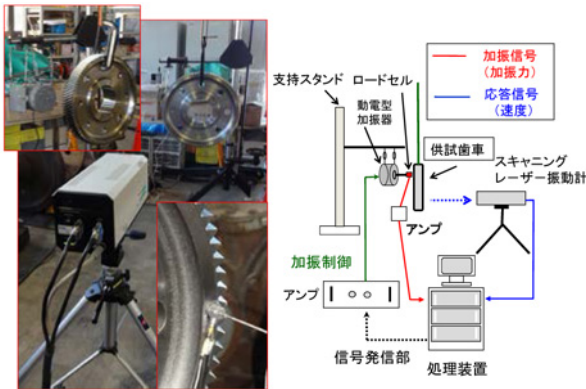


図2 H-FCD 大歯車の振動モード解析

### 2.1.3 H-FCD 歯車の回転試験及び騒音測定方法

歯車回転試験装置及び騒音測定の方法を図3に示す。駆動用主電動機（誘導電動機）からWN継手を介して小歯車側に駆動トルクを伝達する構造であり、車軸両側に圧入されている車輪は取外している。車軸側は負荷用主電動機に結合されており、駆動トルクと逆方向の負荷トルクを与えて歯車のかみ合い状態を再現している。なお、歯車装置の両側に吸音材により構成される防音囲いを設け、試験装置側から発生する騒音を遮断する仕組みとしている。

歯車用潤滑油は、低粘度型オイルである、出光興産製アポロイルワイドギア LW（GL-5, 80W-90 ここでは

Type A と記す。）及び高粘度型オイル（オイルメーカー試験油 Type B）で比較した。普通騒音計は、歯車装置の長手方向5か所とし、それぞれの距離は車軸中心から1.5mである。

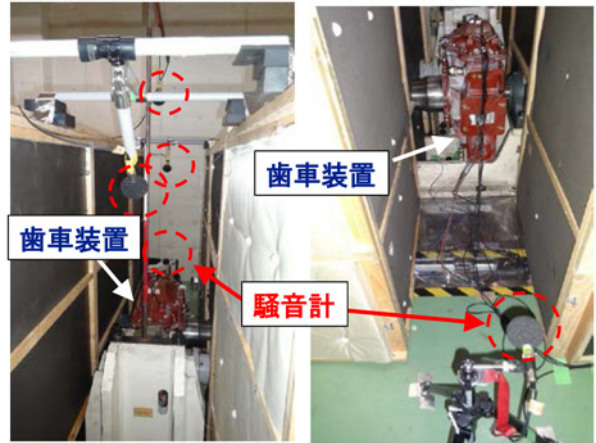


図3 H-FCD 歯車回転試験

## 2.2 試験結果

H-FCD 実機歯車の振動モード解析及び回転試験により得られた騒音特性等を以下に示す。

### 2.2.1 従来材料大歯車と H-FCD 大歯車の FRF 比較

従来材料大歯車（S45C）と H-FCD 大歯車の FRF の比較を図4に示す。511Hz では、H-FCD 歯車のピーク値が従来歯車より高くなるが、1000Hz 以上の主要な周波数で、H-FCD 歯車のピークは従来材料歯車より大幅に低くなる。H-FCD 歯車の振動減衰性能は、広い周波数帯域で効果があることがわかる。図5に H-FCD 大歯車の主な振動モードを示す。5000Hz までの周波数域では、リム及び板部の2～6節（1～5次）モードとなる。なお、従来材料歯車の各振動モードは、H-FCD 歯車の振動モードとほぼ同じ形状となる。

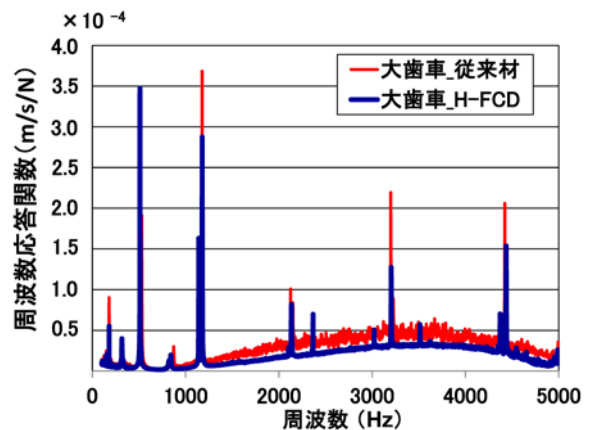


図4 従来材料大歯車と H-FCD 大歯車の FRF 比較

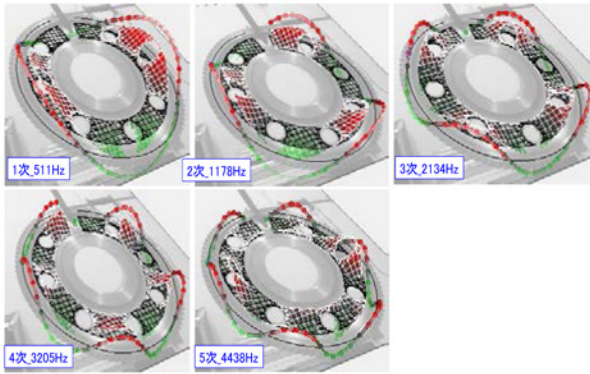


図5 H-FCD 大歯車の主な振動モード

## 2.2.2 H-FCD 歯車の騒音特性

### (1) 歯車騒音の経時変化

図6は、Type A のオイル条件で繰り返し回転試験を実施した場合の騒音レベル (O.A.) の経時変化の比較である。運転条件は、140s 程度の加速回転を行い、最大回転数は 4400rpm (速度 126km/h 相当) とした。それ以降の時間では無負荷条件 (定速) に移行する。ここでの値は、図3に示した騒音計5点の平均値とする。騒音の最大ピーク (107s 付近) 及び定速域 (140s 以降) での経時変化は少ないが、100s 付近までの加速域を中心に初回 (1回) に比較して試験回数を重ねるごとに騒音が低下する傾向が見られる。9回の繰返しで概ね一定の騒音レベルに収束し、初回に比較して最大で 5dB 程度低下する結果が得られた。

このような経時変化は従来材料の歯車でも見られることがあるが、H-FCD では騒音の低下傾向が顕著となり、本材料特有のなじみ特性が発現したものと考えられる。なお、これらの低下傾向は H-FCD 小型歯車の基礎試験<sup>1)</sup>でも既に確認されているが、同報告は低トルク条件の結果であり、本試験のような実車規模の負荷トルク条件では、それらに比較して短時間で騒音低下が進む傾向を示した。

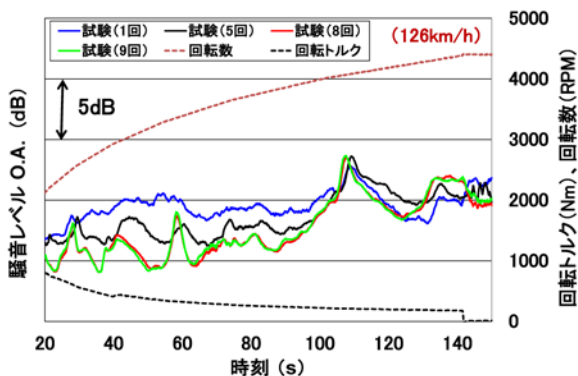


図6 H-FCD 歯車騒音レベルの経時変化

### (2) 従来材料歯車と H-FCD 歯車の騒音比較

図7は、オイル条件 Type A で比較した従来材料歯車と、なじみが十分進んだ状態の H-FCD 歯車の騒音レベルである。H-FCD 歯車は、加速域及び定速域とも、ほぼすべての時間領域で騒音低減効果が認められた。騒音レベルは、従来材料の歯車に比較し、最大ピークの比較で約 4.3dB 低下した。加速域で約 6dB の低下となり、加速域での騒音低下傾向が特に大きい結果を示した。加速域は、かみ合いトルク及びかみ合い振動が大きくなる領域であり、H-FCD の材料的な騒音低減効果が顕著になっている。回転開始より 107s 付近にピークがみられる。騒音スペクトログラム (時間周波数分析結果) を図8に示すが、ピーク付近の回転速度と周波数の関係から図5に示した 1178Hz の大歯車振動モードに対する共振と考えられる。このピークは、図6でも同様にみられるが、なじみによる騒音レベルの低下はみられず、ほぼ一定の値となることから、この騒音低減には大歯車の構造変更など材料による対策と異なる方法が必要であると考えられる。

H-FCD 歯車のオイル条件を Type B とした場合、Type A に比較して特に高速域 (時刻 110 s 以上) の騒音レベルが高くなる傾向を示した。騒音スペクトログラムを図9に示すが、1150Hz のほか、1330Hz 付近の騒音レベル及び、かみ合い2次に相当する騒音レベルが上昇している。

表1に、H-FCD 歯車の Type A と Type B の新油及び回転試験後の使用油の分析結果を示す。両者ともに、回転試験前後の動粘度変化はほとんどみられない。また、塩基価の低下、酸化・ニトロ化の増加は僅かであるため、オイルの熱劣化はほとんど発生していないと判断できる。残留鉄分について、Type A が 21ppm 増加、Type B が 44ppm 増加しており、Type B が多い傾向にあるが、摩耗と呼べるレベルではない。Type A は分散剤としてのボロン (B) の含有が多い。Type A の騒音レベルが Type B に比較して小さいのは、ボロンによる層状構造

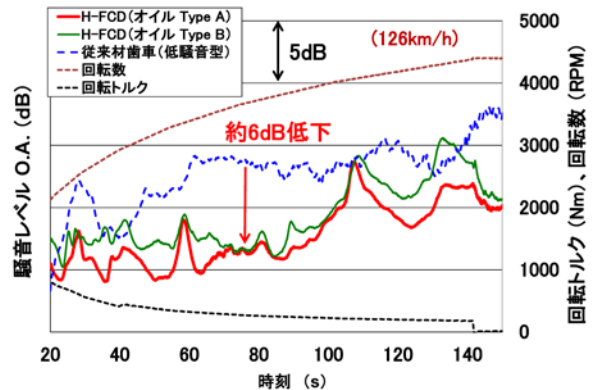


図7 H-FCD 歯車と従来材料歯車の騒音比較

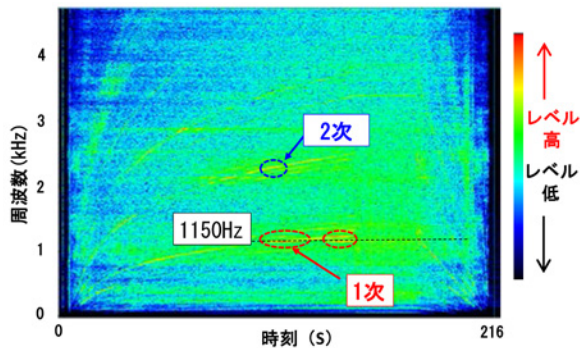


図8 H-FCD 歯車の騒音スペクトログラム (Type A)

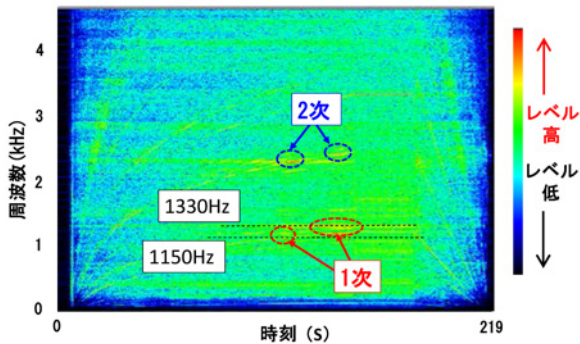


図9 H-FCD 歯車の騒音スペクトログラム (Type B)

表1 オイル分析結果 (H-FCD 歯車)

オイル性状		Type A (アポロイル)		Type B (メーカー試験品)	
		新油	使用油	新油	使用油
動粘度	40°C mm <sup>2</sup> /s	160.46	161.06	208.86	209
	100°C mm <sup>2</sup> /s	17.84	17.8	18.43	18.48
塩基価	mgKOH/g	1.7	1.5	2.4	2.2
酸化	ASTM E2412	7.5	7.8	10.9	10.6
ニトロ化	ASTM E2412	2.3	2.5	4.3	4.5
摩耗	Fe ppm	18	39	37	81
密度	15°C g/cm <sup>3</sup>	0.8795		0.9021	
SAE粘度分類		80W-90		90	
添加剤	P ppm	439		175	
	S ppm	10467		15267	
	Ca ppm	(8)		23	
	B ppm	190		(9)	
	Mo ppm	0		(10)	
	N ppm	408		853	

の膜を形成し、固体潤滑剤として摩擦係数を低下させていることが考えられる。なお、同表においてカッコ書の値はICP発光分光分析前処理(酸処理)によるブランク値であるため、実質は0である。

### 3. H-FCD 歯車材料の高強度化

従来の鉄道用歯車は、小歯車のニッケルクロムモリブデン鋼 (SNCM420) に浸炭焼入れを、大歯車の構造用炭

素鋼 (S40C 及び S45C) に高周波焼入れを施している。H-FCD 歯車の実用化への課題は、従来歯車材料並みの強度確保にある。本章では、H-FCD 材料強化のための表面処理改良と疲労試験等の結果について述べる。

#### 3.1 H-FCD の金属組織

H-FCD の化学成分を表2に示す。また、光学顕微鏡による金属組織を図10に示す。この鋳鉄は疲労強度の低下原因となる黒鉛の外周金属組織を銅 (Cu) の添加(約3%)により強化している。元素分布マップを図11に示す。金属組織中の黒鉛粒径は25~35μm、黒鉛周りの金属組織はパーライトである。元素濃度分布 (CP Level) において黒鉛周りにパーライト強化元素である銅 (Cu) が分布し、鋳鉄の強度向上に寄与していることがわかる。

表2 H-FCD の化学成分 (wt %)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mg
H-FCD900	3.62	2.35	0.32	0.020	0.008	0.02	2.85	0.040

(発光分光分析)

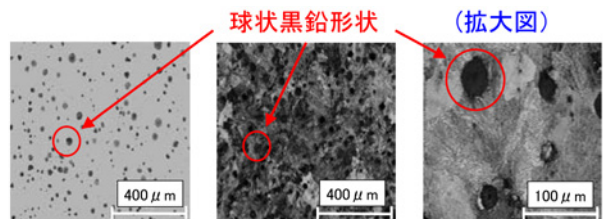


図10 H-FCD の金属組織

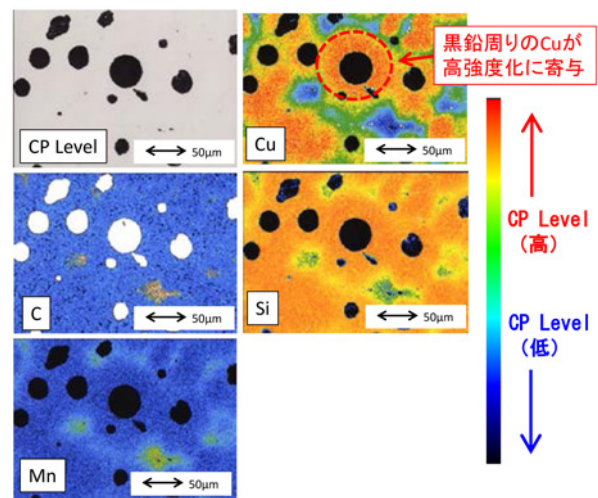


図11 H-FCD の元素分布マップ

#### 3.2 H-FCD 鋳放し材の強度

表3はH-FCDと従来歯車材の材料比較(メーカー規格)であり、括弧の値は実測平均値である。H-FCDの

引張強さは940MPaであり、SNCM420に匹敵する。鋳鉄の素材強度としては国内トップレベルである。図12は、小野式回転曲げ疲労試験により、各鋳鉄（加工処理前の鋳放し材）の回転曲げ疲労強度を実測した結果である。H-FCDは従来鋳鉄（FCA250及びFCD400）に比較し、高い疲労強度を持ち、 $10^7$ 回における回転曲げ疲労強度（以下、回転曲げ疲労限度）は3回の平均値で約300MPaとなる。しかしながら、小歯車材料であるSNCM420の一般的な疲労限度レベル（約640MPa）には達していない。

表3 H-FCDと従来歯車材の材料比較

材質名	引張強さ(MPa)	耐力(MPa)	伸び(%)	硬さ(HB)	備考
H-FCD	900~	600~	2~	270~350	鋳放し
	[940]	[650]	[4]	[320]	
	[1010]	[875]	[8]	[320]	QT処理
S40C	610~	440~	20~	179~255	QT処理
SNCM420	980~	-	15~	293~375	QT処理

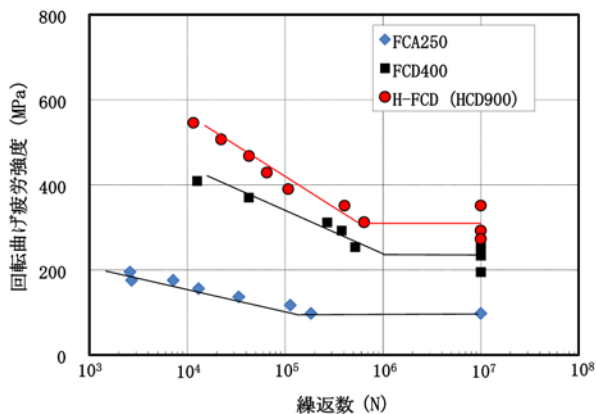


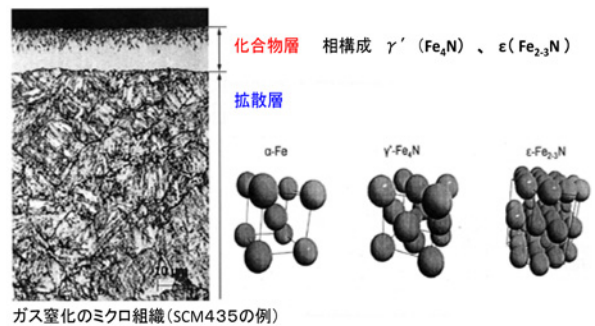
図12 各鋳鉄（鋳放し材）の回転曲げ疲労強度

### 3.3 H-FCDの窒化処理による素材強化

H-FCDの高強度化を図るため、表面処理による強化策を進めた。ここでは、後述する回転曲げ疲労限度で最も高い値が得られたガス窒化法について述べる。鉄鋼材料の代表的な表面処理である窒化処理は、その処理温度が共析変態点以下であるため、浸炭焼入れや高周波焼入れなど他の表面硬化処理と比べて熱処理後のひずみが少なく、高い寸法精度が必要となる歯車をはじめとする機械部品などに適用されているが、鋳鉄に窒化処理を適用した事例は少ない。窒化処理された鉄系材料の表面には $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N（以下 $\gamma'$ 相）や $\epsilon$ -Fe<sub>2.3</sub>Nからなる化合物層が形成され、化合物層下の内部金属相（ $\alpha$ -Fe）には窒素が拡散固溶し、母材中の窒化形成元素が微細な合金元素

窒化物を形成した窒素拡散層を形成する。表面化合物層は、窒素拡散層より硬く、耐摩耗性や疲労強度を向上させている<sup>2)</sup>。化合物層の結晶構造を図13に示す<sup>3)</sup>。今回、H-FCDに施した窒化処理は540℃20時間の条件で、窒素を拡散固溶させ、炉冷して形成させた。図14に $\gamma'$ 相を形成させるための鉄の窒化ポテンシャル—温度線図（Lehrer図）を示す<sup>3)</sup>。

$\gamma'$ 相は、降伏強さが拡散層より高く、化合物層の高い圧縮残留応力が生じることで初期き裂発生を遅延させ疲労強度の向上に寄与している。図15に表面窒化化合物層の金属組織（SEM）を示す。窒化化合物層は表面に存在する球状黒鉛底部にも形成されており、底部からのき裂抑制に有効に作用していると考えられる。図16に相同定及び結晶方位解析結果（EBSD法）を示す。表面



ガス窒化のマイクロ組織 (SCM435の例)

図13 窒化化合物層の結晶構造<sup>3)</sup>

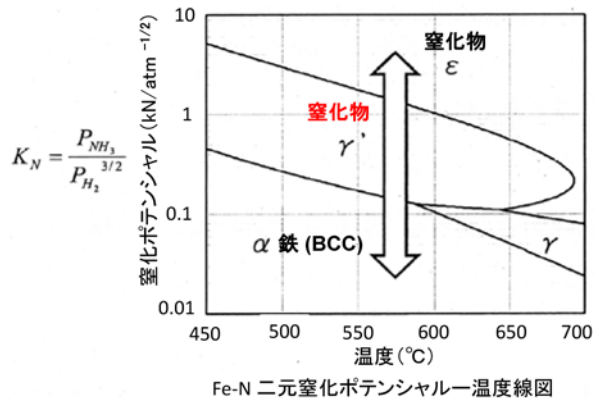


図14 窒化ポテンシャル—温度線図（Lehrer図）<sup>3)</sup>

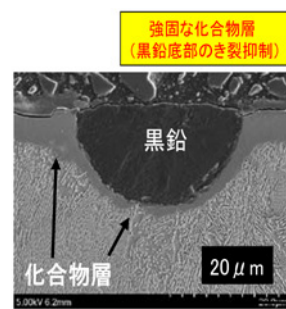


図15 表面窒化化合物層の金属組織 (SEM)

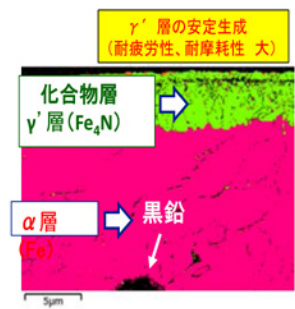


図16 結晶方位解析結果 (EBSD法)

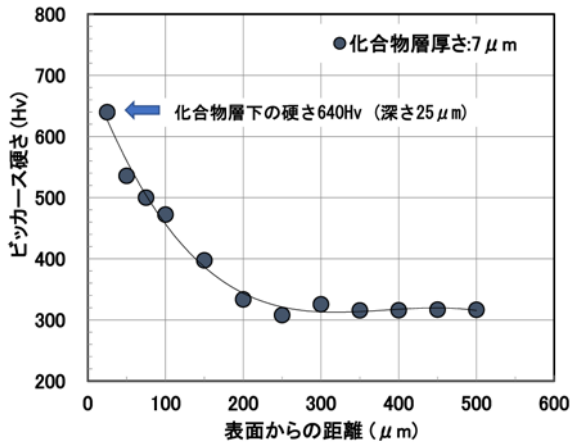


図 17 表面ビッカース硬さ分布

化合物層に  $\gamma'$  相が安定的に生成されている。図 17 に拡散層における表面からのビッカース硬さ分布を示す。化合物層下の窒素拡散層のビッカース硬さは 640Hv と、浸炭とほぼ同じ硬さであり、全窒化深さは 0.2mm である。

各種表面処理等による H-FCD の回転曲げ疲労限度の比較を図 18 に示す。ガス窒化 ( $\gamma'$  窒化) した回転曲げ疲労限度が最も高く (737MPa)、従来の小歯車材及び大歯車材の値を上回る結果を示した。

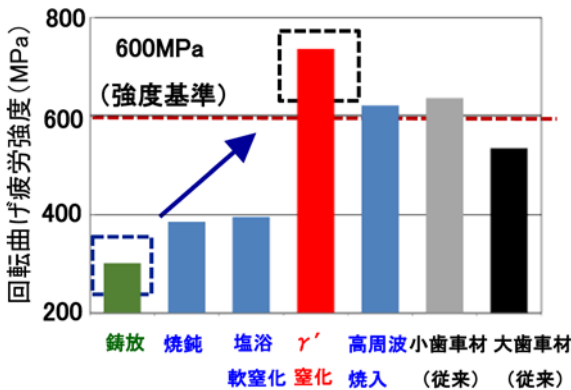


図 18 各種表面処理等による回転曲げ疲労限度の比較

従来材料歯車と H-FCD 歯車の製造工程の比較を図 19 に示す。H-FCD は、素材の被削性が良好で、高硬度の割に、歯切りに要するホブカッターの寿命が長く、機械加工のコストを低減できる。また、窒化による熱処理ひずみの減少と最終歯研の省略により、歯車製造工程を削減することが可能である。これらにより大幅なコスト削減が可能であると考えられる。

従来材料歯車(鍛造部品) H-FCD歯車(鑄造部品)

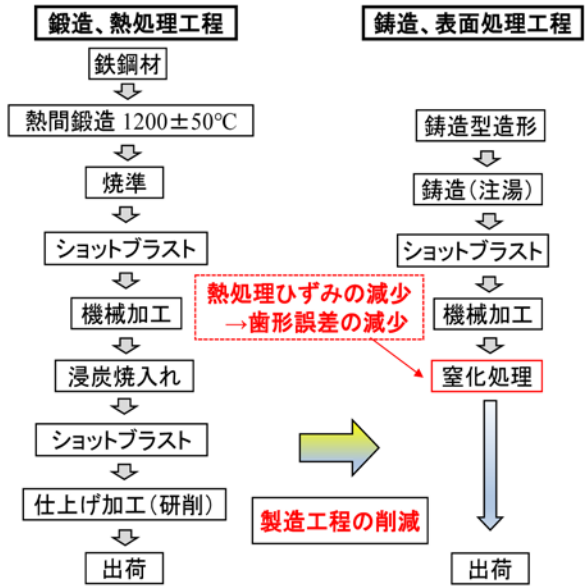


図 19 従来歯車と H-FCD 歯車の製造工程比較

4. おわりに

鉄道車両歯車に高強度球状黒鉛鑄鉄 (H-FCD) を適用するため実機歯車を製作して振動と騒音性能を評価した。その結果、従来歯車より大幅な騒音低下がみられた。また、H-FCD 鑄放し材に窒化処理を行い、回転曲げ疲労試験により強度評価を行い、従来材料の疲労強度を上回る結果が得られた。

今後は H-FCD 歯車の実用化を前提とした技術的課題 (表面処理コスト低減、歯切り加工精度の向上、引巢低減等の品質管理) について引き続き取り組む予定である。

謝 辞

本研究に協力頂きました青梅鑄造 (株)、パーカー熱処理工業 (株)、三菱電機 (株) に感謝の意を表します。

文 献

- 1) 笹倉 実, 鈴木 史比古, 三神 圭司: 鉄道歯車装置の振動・騒音解析と高強度球状黒鉛鑄鉄を用いた騒音低減の研究, D&D2014 論文集, 2014
- 2) 平岡 泰 ほか: ガス窒化処理した SCM435 鋼の回転曲げ疲労強度に及ぼす表面化合物相の影響, 熱処理 57 巻 2 号, 平成 29 年 4 月
- 3) 神奈川県産業技術センター: 熱処理技術フォーラム 熱処理・表面処理技術研究会資料, 平成 24 年 6 月