

## 製品紹介

## Products

## 面疲労／曲げ疲労強度に優れた浸炭浸窒用鋼

## 1. はじめに

近年、環境問題を背景として、自動車における燃費向上や電動化が求められている。電動車の普及が進む中で、モータ、インバータ、減速機が一体化した駆動装置である e-Axle が注目されている。減速機歯車において、モータの小型化（軽量化）にともなう高回転化により、すべり速度の増加や歯面温度の上昇など、歯面へかかる負荷はますます高くなる傾向にある。また、e-Axle を小型化するには歯車の小型化も必要なため、歯元へかかる曲げ応力は上昇する。したがって、歯車には歯面・歯元の両特性に高強度化が求められる。

高強度化のために用いられる表面硬化熱処理のひとつに浸炭処理がある。浸炭処理は、浸炭雰囲気中で加熱・焼入れし、表層に高Cのマルテンサイト組織を得ることで表層硬さを向上させる処理である。表層硬さ上昇により、歯面強度、歯元強度は向上する。この浸炭処理に、さらに窒素を加えて、高強度化を狙う浸炭浸窒処理がある。浸炭浸窒処理は、表層硬さの上昇に加えて軟化抵抗の上昇により、面疲労強度を向上させることが報告されている<sup>1), 2)</sup>。

近年、歯車使用環境において、ピッチング破壊以外の焼付き<sup>3)</sup>、水素脆化型剥離<sup>4)</sup>などが発生する可能性が指摘されている。そこで、面疲労強度の向上に有効とされる浸炭浸窒処理に着目して大同特殊鋼(株)（以下、当社と称称）が開発した浸炭浸窒用鋼<sup>5)</sup>の面疲労強度・曲げ疲労強度ならびに、損傷形態の多様化に対する強度や製造性を紹介する。

## 2. 開発鋼の概要

開発鋼の組成を表1に示す。比較として、一般的に歯車などの浸炭用鋼として広く用いられている JIS-SCM420 の組成を併記する。浸炭浸窒処理を施した Cr 添加鋼は、旧オーステナイト粒界および粒内に CrN が析出することで、不完全焼入れ組織が形成され、曲げ疲労強度が低下することが報告されている<sup>5)</sup>。Si について

表1. 化学成分 (mass%)

鋼種	C	Si	Mn	Cr	Mo
開発鋼	0.20	0.10	1.50	0.60	0.15
JIS-SCM420	0.20	0.20	0.80	1.00	0.15

も、浸炭浸窒処理により Si 窒化物が生成するため、焼入れ性の低下が懸念される<sup>6), 7)</sup>。このことから、窒化物の多量析出を防ぐため、開発鋼は Si と Cr 量を低減している。また、ガス浸炭浸窒処理（以下、浸炭浸窒処理と呼称）では、ガス浸炭処理（以下、浸炭処理と呼称）同様に、表層に粒界酸化層が形成される。粒界酸化層は破壊起点として作用し、Si は特に酸化されやすいため、粒界酸化層を抑制する目的でも Si 量を低減している<sup>8)</sup>。なお、Si および Cr 量を低減したことによる焼入れ性の低下を補う目的で Mn 量を増加している。

図1に焼戻し温度と表層硬さ（表層から 0.05 mm 位置）の関係を示す。図1から、開発鋼（浸炭浸窒処理）は JIS-SCM420（浸炭処理）に対して、高温下で高い軟化抵抗を有していることがわかる。これは、表層に固溶した窒素が焼戻しにより 300℃付近で鉄窒化物、500℃付近で微細な合金窒化物として析出し、析出硬化が生じるためと考えられる。

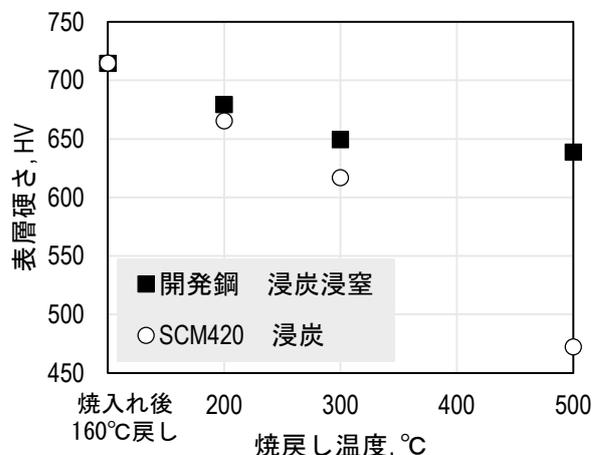


図1. 焼戻し温度と表層硬さの関係。

### 3. 開発鋼の特徴

#### (1) 歯面強度に関する特性

図2に、ローラーピッチング（以下、RPと呼称）試験機およびFZG歯車試験機を用いた疲労試験寿命の関係を示す。潤滑油としてATFを使用して試験を実施した。RP試験は、面圧3GPa、回転数1500rpm、すべり速度-1.22m/s、油温90℃の条件で実施した。FZG歯車試験は、C/9/90の規格条件で実施した。開発鋼はRP試験およびFZG歯車試験において、JIS-SCM420と比較して、どちらも高い寿命を示した。図1に示した通り、開発鋼は高温下での軟化抵抗に優れるため、試験時に摺動面が高温となっても、表層硬さの軟化が抑制されたことで高寿命を示したと考えられる<sup>9)</sup>。

面疲労強度には使用する潤滑油も影響する。燃費向上を目的としてトルク損失低減に有効な潤滑油の低粘度化が進められているが、潤滑油の低粘度化は油膜厚さの低下を引き起こす。油膜切れにより新生面が形成されると水素脆化は発生しやすくなるため、歯面の耐水素脆化特性を考慮する必要がある<sup>4)</sup>。図3に水素脆化が発生しやすい条件で実施した開発鋼のRP試験結果を示す。試験後品の断面観察において、いずれも内部起点の水素脆化

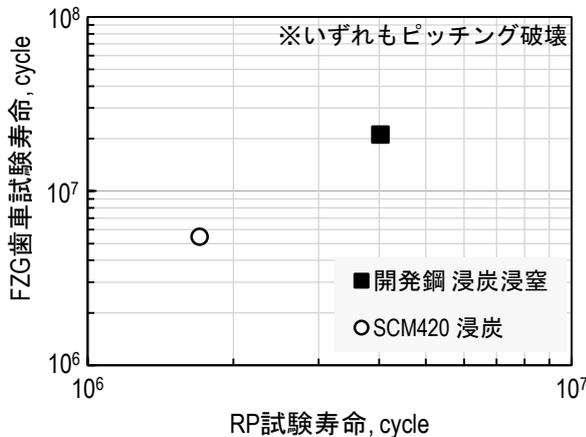


図2. RP試験およびFZG歯車試験結果の関係。

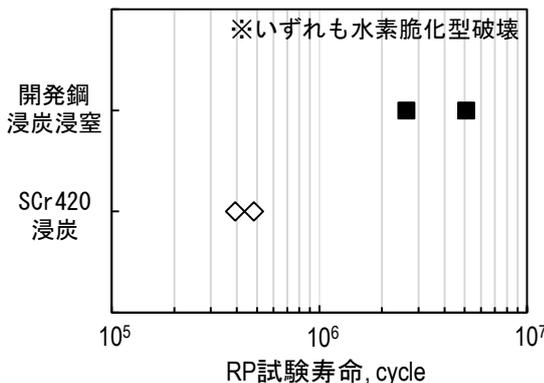


図3. 水素脆化型破壊条件におけるRP試験結果。

型破壊していることを確認している。水素脆化型破壊条件における開発鋼のRP試験寿命は、浸炭処理したJIS-SCr420と比較して高いことがわかる。このことは、開発鋼の窒化物が水素トラップサイトとして作用した結果と推察される<sup>7)</sup>。

歯面強度に関する特性について、その他特性の調査も実施した。歯車使用環境の変化のひとつに、歯車の高回転化による潤滑条件の悪化が考えられる。貧潤滑環境では、金属接触部の増加による焼付き発生が懸念される<sup>3)</sup>。開発鋼において焼付きが生じるすべり速度を調査したところ、浸炭処理したJIS-SCr420に対して、浸炭浸窒処理した開発鋼は同等以上の結果を示した。また、浸炭浸窒用鋼は、通常より高回転・高すべり率の負荷の高い条件でも、優れた面疲労強度を示す傾向にあることを確認している。

#### (2) 歯元強度に関する特性

図4に、小野式回転曲げ疲労試験結果を示す<sup>5)</sup>。試験は歯底形状を模擬した切欠き試験片（応力集中係数1.84）を用いて実施した。浸炭処理したJIS-SCM420と比較して、浸炭浸窒処理した同材の曲げ疲労強度は低下する一方で、浸炭浸窒処理した開発鋼の曲げ疲労強度は向上することがわかる。このことは、窒素導入による焼入性の向上と開発鋼成分設計思想における粒界酸化層および不完全焼入れ組織の生成抑制による結果と考えられる。

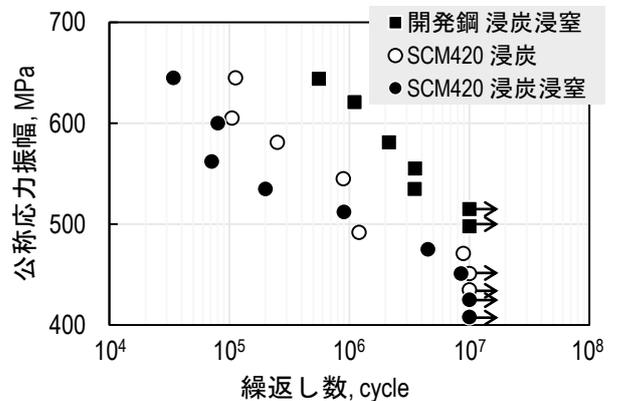


図4. 小野式回転曲げ疲労試験結果<sup>5)</sup>。

#### (3) 製造性

歯車は、熱間鍛造 - 軟化熱処理 - 粗加工 - 表面硬化熱処理 - 精加工の順で製造される。加工には切削が用いられるため、歯車用鋼の実用化にあたり被削性も重要となる。被削性評価の結果として、図5に開発鋼の旋削試験結果を示す。同図では、超硬合金にTiCNコーティングが施された工具の横逃げ面平均摩耗が200μmに達した切削時間を工具寿命（VB200）と定義した。開発鋼は焼なまし処理により、約80HRBまでの軟化が可能であり、その際の工具寿命は焼ならし処理したJIS-SCM420と同程度であることがわかる。

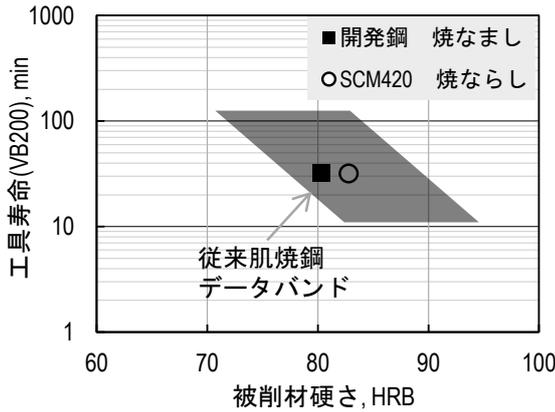


図5. 工具寿命と被削材硬さの関係.

(4) まとめ

開発鋼の諸特性をまとめた結果を表2に示す。比較対象はJIS-SCM420（耐水素脆化特性および耐焼付き性はJIS-SCr420と比較）である。表2より、開発鋼を用いた浸炭浸窒処理は、製造性を損なうことなく面疲労強度・曲げ疲労強度を向上させることが可能であるといえる。

本報では、ガス浸炭浸窒処理した開発鋼の特性を紹介したが、開発鋼は真空浸炭浸窒処理においても問題なく処理可能な鋼種である。当社では、浸窒機能も搭載した真空浸炭炉ModulTherm<sup>(\*)</sup>の製造・販売や狙った浸炭浸窒層を得るための熱処理条件を決定するシミュレーションソフト「浸炭くん<sup>®</sup>」, 「浸窒くん<sup>®</sup>」の開発など真空下での熱処理に対する研究にもとりくんでいる<sup>10), 11)</sup>。

表2. 開発鋼諸特性（比較材：SCM420）.

強度特性					
特性	(歯面強度に関係)			(歯元)	
	面疲労	耐水素脆化	耐焼付き	曲げ疲労	
評価	○	○	=~○	○	
処理条件	開発鋼	浸炭浸窒	浸炭浸窒	浸炭浸窒	浸炭浸窒
	比較材	浸炭	浸炭※	浸炭※	浸炭
製造性					
特性	熱間鍛造性	被削性	ひずみ特性		
評価	=	=	=		
処理条件	開発鋼	-	焼なまし	浸炭浸窒	
	比較材	-	焼ならし	浸炭	

○：比較材対比優位    =：比較材同等    ※SCr420比較  
 (\* ) ModulThermは当社の技術連携先である ALD VacuumTechnologies GmbHの商標または登録商標です。

## 4. おわりに

今回、面疲労強度に加え、曲げ疲労強度に優れた浸炭浸窒処理に適した開発鋼の強度特性および製造性について

紹介した。

近年、自動車の電動化や燃費向上が進められる中で、小型化（軽量化）のため、自動車部品に対する高強度化の需要が高まっている。本報で紹介した浸炭浸窒処理技術は、部品の強度特性向上に寄与できる技術として、今後の適用拡大が期待される。当社においては、今後も新しい技術を取り入れて、ユーザーのニーズへ応えられるように開発へととりくむ所存である。

(文献)

- 1) 渡辺陽一, 成田直樹, 梅垣俊造, 三島良直: 鉄と鋼, 84(1998), 12, 902.
- 2) 木村利光, 田中英明, 中村貞行: 電気製鋼, 69(1998), 1, 7.
- 3) 小田敏弘, 加藤豪, 玉井智也, 山崎歩見: 貧潤滑環境下での耐力を向上させる歯車材料・工法の開発, JSAE中部支部研究発表会(2023).
- 4) 七野勇人, 荻和慎平, 木村広人: コマツテクニカルレポート, 64(2018), 171, 10.
- 5) 大同特殊鋼(株): 電気製鋼, 84(2013), 1, 71.
- 6) 木南俊哉: 電気製鋼, 81(2010), 2, 89.
- 7) 木南俊哉: 電気製鋼, 85(2014), 2, 127.
- 8) 磯川憲二, 並木邦夫: 電気製鋼, 57(1986), 1, 13.
- 9) 石倉亮平, 井上圭介, 小林祐次, 辻俊哉: 電気製鋼, 81(2010), 2, 99.
- 10) 真空浸炭炉「ModulTherm」に浸窒機能を追加し2024年4月から販売: 大同特殊鋼プレスリリース, (2024年3月22日).
- 11) 辻井健太, 林幸宏, 山崎歩見, 林建太: 電気製鋼, 95(2024), 2, 79.

(問合せ先)

大同特殊鋼(株)  
 マテリアルソリューション部  
 第1カスタマーソリューション室  
 石倉亮平  
 TEL: 03-5495-1273  
 FAX: 03-5495-6740  
 e-mail: r-ishikura@ac.daido.co.jp



大同特殊鋼(株) 技術開発研究所  
 特殊鋼材料技術研究室  
 伊藤有沙  
 TEL: 052-611-9416  
 FAX: 052-611-7399  
 e-mail: a-ito@ct.daido.co.jp

