

# 特殊鋼

2019  
Vol.68 No.2

3

*The Special Steel*

特集／自動車用歯車の最新動向



# 特殊鋼

3

## 目次

2019

### 【編集委員】

委員長	井上幸一郎 (大同特殊鋼)
副委員長	渡辺 豊文 (中川特殊鋼)
委員	沢田 譲 (愛知製鋼)
〃	増田 智一 (神戸製鋼所)
〃	西森 博 (山陽特殊製鋼)
〃	浜田 貴成 (新日鐵住金)
〃	大矢 耕二 (大同特殊鋼)
〃	洲崎 恒年 (日新製鋼)
〃	正能 久晴 (日本金属)
〃	殿村 剛志 (日本高周波鋼業)
〃	戸塚 覚 (日本冶金工業)
〃	古谷 匡 (日立金属)
〃	福田 方勝 (三菱製鋼)
〃	阿部 泰 (青山特殊鋼)
〃	池田 正秋 (伊藤忠丸紅特殊鋼)
〃	岡崎誠一郎 (UEX)
〃	池田 祐司 (三興鋼材)
〃	金原 茂 (竹内ハガネ商行)
〃	平井 義人 (平井)

## 【特集／自動車用歯車の最新動向】

### I. 特別寄稿

和時計から日本の歯車の源流を探る ..... アムテック(株) 上田 昭夫	2
--	---

### II. 総論／技術解説

1. 歯車設計の現状と将来 ..... 公益財団法人応用科学研究所 久保 愛三	13
2. 歯車のものづくりの現状と将来 ..... アイシン・エイ・ダブリュ(株) 大林 巧治	19
3. 表面硬化熱処理用鋼の研究開発動向と将来 ..... 大同特殊鋼(株) 井上 圭介	24

### III. 歯車の加工技術

1. 鍛造成形..... トヨタ自動車(株) 森下 弘一	30
2. 切削加工..... 三菱マテリアル(株) 河野 賢祐	33
3. 熱処理 (制御ガス窒化) ..... パーカー熱処理工業(株) 平岡 泰	36
4. 最近のショットピーニング処理の 動向と開発の方向性..... 新東工業(株) 小林 祐次	40

### IV. 歯車の強度評価・シミュレーション

1. 歯車強度評価の現状と今後の課題 ～日本機械学会研究協力分科会RC268／RC275 での取り組みから～..... 岡山大学 藤井 正浩	43
2. 浸炭焼入時の熱処理ひずみ解析技術の動向 ..... 日産自動車 杉本 剛 日産自動車 藤川真一郎	49

### V. 各社の歯車用鋼

マイルド浸炭用鋼MSB20..... 愛知製鋼(株) 杉浦 孝佳	55
----------------------------------	----

神戸製鋼所の歯車用鋼…………… (株)神戸製鋼所	新堂 陽介	57
高強度肌焼鋼ECOMAXシリーズ …………… 山陽特殊製鋼(株)	橋本 和弥	59
表面硬化鋼の製造工程省略を可能とする JFEスチールの歯車用鋼…………… JFEスチール(株)	岩本 隆	61
新日鐵住金の歯車用鋼…………… 新日鐵住金(株)	堀本 雅之	63
大同特殊鋼の歯車用鋼…………… 大同特殊鋼(株)	宮崎 貴大	65
“特集”編集後記…………… 新日鐵住金(株)	浜田 貴成	81

---

●一人一題：「私の愛読書」…………… 伊藤忠丸紅特殊鋼(株)	野坂 哲嗣	1
--------------------------------	-------	---

---

■業界の動き ……………	67
▲特殊鋼統計資料 ……………	70
★倶楽部だより（平成30年12月1日～平成31年1月31日）……………	74
☆特殊鋼倶楽部の動き ……………	75
☆一般社団法人特殊鋼倶楽部 会員会社一覧 ……………	80

---

特集／「自動車用歯車の最新動向」編集小委員会構成メンバー

役名	氏名	会社名	役職名
小委員長	浜田 貴成	新日鐵住金(株)	棒線事業部 棒線技術部 棒線技術室 室長
委員	杉本 淳	愛知製鋼(株)	品質保証部お客様品質・技術室 主査
〃	西森 博	山陽特殊製鋼(株)	東京支社部長 自動車・産機営業部 自産機CS室長 品質保証部
〃	大矢 耕二	大同特殊鋼(株)	特殊鋼ソリューションパートナー部 副主席部員
〃	戸塚 覚	日本冶金工業(株)	ソリューション営業部 部長
〃	古谷 匡	日立金属(株)	特殊鋼カンパニー 技術部長
〃	金原 茂	(株)竹内ハガネ商行	技術部長
〃	渡辺 豊文	中川特殊鋼(株)	鉄鋼事業部 技術部長

## 「私の愛読書」

伊藤忠丸紅特殊鋼㈱  
代表取締役社長の さか てつ じ  
野 坂 哲 嗣

社会人になるまで読書は苦手であった。身体を動かすことの方が性にあったこともあったと思うが、薦められた書籍を読み始めても興味が湧かないと先に進まず途中で投げ出すことが多かった。社会人になり、先輩から薦められたのがフレデリック・フォーサイスの「ジャッカルの日」。読みはじめると次の展開を求めて一気に読破してしまった。それからは、次から次へと海外作家のサスペンス小説、スパイ小説や冒険小説等をむさぼるように読み始めた。特に気に入っているのが、

- ・フレデリック・フォーサイス：「戦争の犬たち」「オデッサ・ファイル」「神の拳」
- ・ブライアン・フリーマントル：「消されかけた男」、「再び消されかけた男」他
- ・ジェフリー・アーチャー：「百万ドルをとり返せ」「大統領に知らせますか？」「ケインとアベル」「ロフノフスキ家の娘」「めざせダウンング街10番地」他
- ・A・J・クイネル：「スナップ・ショット」「燃える男」「パーフェクト・キル」「ブルー・リング」「ブラック・ホーン」「地獄からのメッセージ」「血の絆」他
- ・クライブ・カッスラー「海中密輸ルートを探れ」「氷山を狙え」「タイタニック号を引き揚げろ」「QD弾頭を回収せよ」「マンハッタン特急をさがせ」「大統領誘拐の謎を追え」「スターバック号を奪還せよ」「ラドラダの秘法を探せ」他
- ・トム・克蘭シー：「レッドオクトバーを追え」「愛国者のゲーム」「クレムリンの枢機卿」「いま、そこにある危機」「日米開戦」「合衆国崩壊」などなどで書ききれない。

いずれもストーリーの緻密さや広大なスケール、また、懲悪ところが性に合った。

その後、日本作家のものも読みたくなり、高木彬光や森村誠一の推理小説を次々に読破し飽きがきた頃、書店で何気なく取って立ち読みしたのがきっかけで嵌ってしまったのが、池波正太郎の「剣客商売シリーズ」「鬼平犯科帳シリーズ」であり、佐伯泰英の「居眠り磐音江戸双紙シリーズ」「吉原裏同心シリーズ」「酔いどれ小藤次シリーズ」「密名シリーズ」であった。いずれも江戸時代が舞台で、もちろん主人公は途轍もない剣豪でチャンバラ満載ながら、魅了されたのはなんと言っても江戸の街であった。

江戸市中（特に下町）は河と堀と運河が縦横無尽にめぐり、漁師の船はもちろん、運搬等の作業船、野菜売りの船、奉行所の御用船、分限者が花火見物や花見に仕立てる座敷舟（今の屋形船）、大河を渡るための渡し舟、そして、猪牙船（ちょきぶね：現在のタクシー）などなどが水面を走る光景はまさに水の都そのものであった。現在の東京はそれらを埋め立ててしまい地名にその名前を残すだけとなったものが多いが、呉服橋、幸橋、数寄屋橋、京橋、薬研堀や越前堀などの地名に接すると想像の世界で江戸の街が鮮やかに甦る。

都心の交通渋滞緩和のためにも、水路復活を切に望みたい。



## I. 特別寄稿

和時計から日本の歯車の源流を探る  
Explores for the source of the gears in  
Traditional Japanese Clock (Wadokei)アマテック(有) うえだ あきお  
代表取締役 上田 昭夫

The purpose of this research is to understand the gears used in Japanese Watches (1688). Today's gear technology has been introduced since the Meiji Restoration from Europe and the United States, but this technology is based on Wadokei's "Manufacturing power". I hope that it will lead to reviewing the essence of technology that could do such things even in times without computers and machine tools.

*Key words:* Gear, Clock, History, Tooth profile, Involute, cycloid, Transmission error, Steel, Mechanism

## まえがき

今、我々が取り扱っている歯車は、欧米からの技術導入により成し得たものであるが、日本で最初に機器に使った歯車はいつの頃であろうかという思いがある。また、その歯車とはどのような歯形であったのか、さらに、その精度や材質についても非常に興味のあるところである。

誰しもが、機器に使われた歯車として最初に思い浮かべるのは時計であろう。日本最初の時計はキリスト教宣教師の指導の元、慶長6年(1600年)、天草島志岐のセミナリヨ(Seminario) 付属の実業学校で印刷技術やオルガン、天文機器などと共に時計製作が始まり、1601年、有馬のセミナリヨ、長崎のコレジオ(Collegio)で、日本の鍛冶たちが指導を受けながら時計を製作したのが日本

の機械時計の始まりである<sup>1)</sup>。

我が国に現存する最も古い時計は、静岡県久能山東照宮の宝物の置時計である。ぜんまい駆動の鉄製機械で1581年スペイン国マドリッドにおいて Hans de Evalo 製作と彫刻されている。これは、江戸初期(1608~1629年)の外交資料である異国日記(崇伝筆)に慶長17年7月ノビスパン(Nueva España、メキシコ)副王から使節が来朝したときの到来目録中に斗景1個とあるのに符合する。ただし、この時計の製作年は2014年の静岡大学で行ったX線撮影によって1573年であることが判明した<sup>2)</sup>。

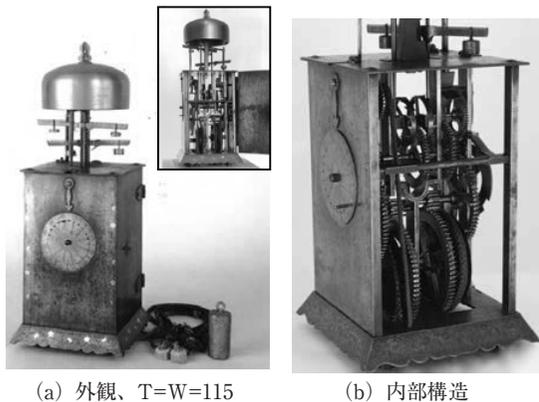
秀吉、家康の時代には相当数の舶来時計が当時の権勢ある人々に賞玩されていたようである。これらの時計のあるものは故障を起こし修理を要することになるのは必然で、ここに日本人による時計師なるものが生まれた。そして、やがて日本人

による時計ができ、時計用の歯車が日本人によって製作されることになる。今まで和時計の構造についての研究<sup>3)</sup>はなされているが、和時計に使われている歯車についての調査は歯車の大きさや歯数程度であり歯形や歯車の性能についての研究はなされていない。そのため、これらの古い歯車を探求するため貞享5年(1688年)三代目津田助左衛門信貫によって製作された和時計用の歯車について歯形や歯すじ誤差およびピッチ誤差を計測した。また、片歯面かみ合い試験機により回転性能を評価した。さらに、時計の材料についても調査した(津田助左衛門は刀鍛冶の流れを汲む)。このことにより、日本の歯車の源流を掌握できたことになる。即ち、これらの原点となる歯車技術の礎の上に、明治維新後に導入された欧米からの技術が融合し、現在そして未来への技術を構築することができることになる。

### ◇ 三代目津田助左衛門信貫作の和時計

本論は和時計に使用されている歯車について検討・調査するものである。対象とする和時計は、**図1**に示すセイコーミュージアムが所蔵する三代目津田助左衛門信貫が貞享五年(1688年)に製作した二挺天符櫓時計である。なお、**図1**の三代目津田助左衛門信貫が製作した和時計(1688年12月)の底板下面には「貞享五年辰ノ十二月(1688年)」の文字が彫られている。

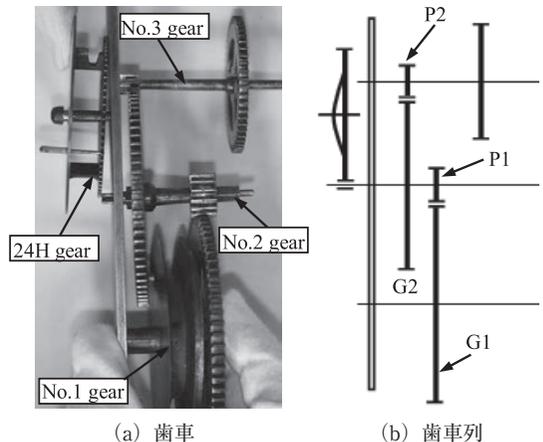
なお、和時計製作の元祖とされている津田助左衛門は、初代から10代良晃まで続いている<sup>3)</sup>。



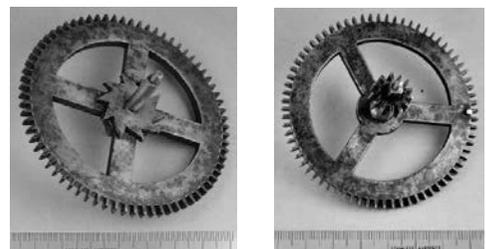
**図1** 三代目津田助左衛門信貫が貞享五年(1688年)に製作した二挺天符櫓時計

### ◇ 和時計の歯車

**図1**(b)の和時計を分解し取り出した歯車を**図2**(a)に示す。そして**図2**(b)に今回検討する歯車をP1、G1、P2、G2とし、歯車の写真を**図3**および**図4**に示す。写真を見るとこれらの歯車は300年以上経ているが全く錆びていない。これは、防錆技術として熱した鉄に漆を焼き付ける工法を採用

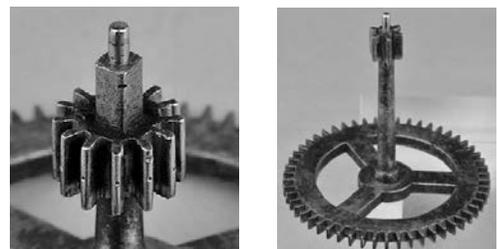


**図2** 三代目津田助左衛門信貫が貞享五年(1688年)に製作した二挺天符櫓時計の歯車と歯車列



(a) 1番車 (b) 2番車

**図3** 和時計歯車(大歯車)



(a) 2番車 (pinion) (b) 3番車 (pinion)

**図4** 和時計歯車(小歯車)

用していること、また、管理の方法にもよるだろうが、材料そのものが良質であると推測することができる。本論で対象とする歯車は、**図3**(a)の1番車 ( $z=72$ )と(b)の2番車の小歯車 ( $z=13$ )の歯車対、**図3**(b)の2番車の大歯車 ( $z=72$ )と**図4**(b)の3番車の小歯車 ( $z=6$ )の歯車対である。また、これら歯車の他にピン歯車 ( $z=3$ )とかみ合う24時車 ( $z=72$ )もあるが今回のかみ合い検討には含まない。また、**図5**に軸受けを示すが、軸受穴部には銅系のブッシュが丁寧に挿

入されている。歯車および軸受けの概略寸法図を**図6**に示す。

### ◇ 和時計歯車の歯形

#### 1. 和時計歯車のかみ合い

時計歯車の歯形(**図7**および**図8**)は、サイクロイド歯形と推察することができるため歯先円直径、歯底円直径、歯先形状そして歯厚を時計歯車の歯形に近付けるよう設計した。その歯形を**図9**および**図10**に示す。サイクロイド曲線に基づいて設計した歯車<sup>4)</sup>は、**表1**の諸元を持ち、かみ合い率も1.0以上を満足するため滑らかに回転するが、**図7**の歯車では、小歯車を矢印方向に回転させたとき、小歯車の2番歯と大歯車の2番歯は接触し



図 5 軸受け

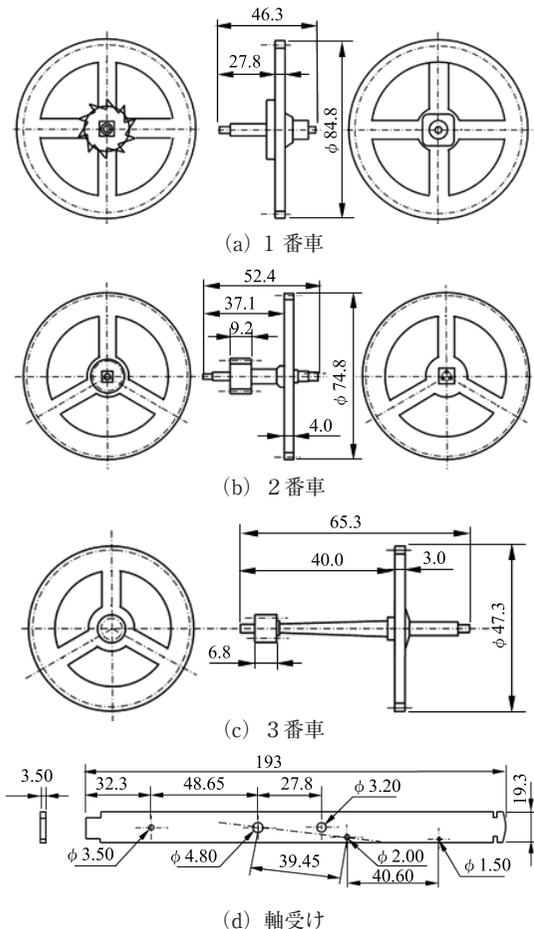


図 6 歯車図と軸受け図(スケッチ)

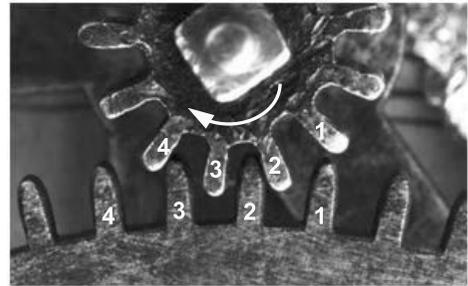


図 7 1段歯車対 ( $z_1=13, z_2=72$ )

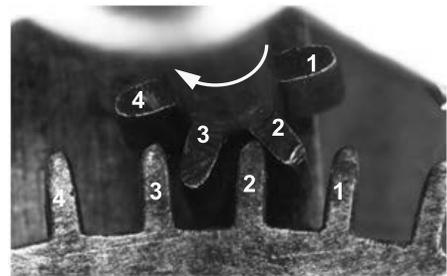


図 8 2段歯車対 ( $z_1=6, z_2=72$ )

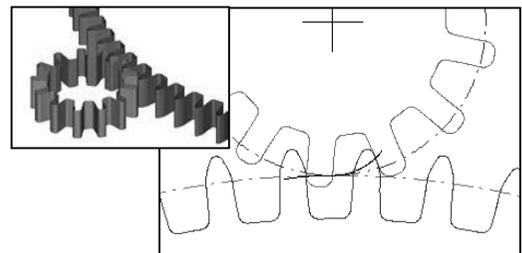


図 9 1段歯車対の設計歯形 ( $z_1=13, z_2=72$ )

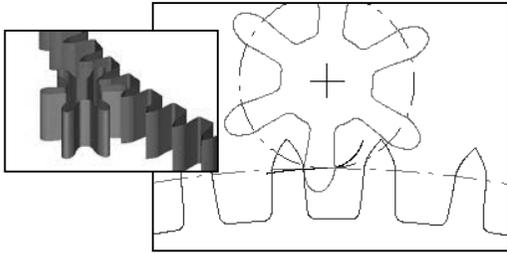


図 10 2段歯車対の設計歯形 ( $z_1=6, z_2=72$ )

表 1 サイクロイド歯車諸元

項目	1段歯車		2段歯車	
	P1	G1	P2	G2
種類				
モジュール	1.142		1.01	
歯数	13	72	6	72
基準円直径	14.85	82.22	6.06	72.72
エピ半径	14.85	3.00	12.00	1.28
ハイポ半径	3.00	14.85	1.28	12.00
歯先円直径	16.00	84.80	7.70	74.80
歯底円直径	10.00	78.00	3.40	69.20
歯元R	0.400	0.450	0.300	0.300
歯幅	9.2	4.2	6.8	3.5
中心距離	48.535		39.390	
かみ合い率	1.088		1.132	
バックラッシ	1.00		1.00	

ているが、次のかみ合いとなる3番歯同士は接触せず小歯車の4番歯と大歯車の3番歯の非作用面が接触している。そのため、かみ合い率は $\varepsilon < 1.0$ である。また、図8歯車のかみ合いでは小歯車の2番歯と大歯車の2番歯は接触しているが、次のかみ合いとなる3番歯同士は接触していない。そのため、この歯車対も、かみ合い率は $\varepsilon < 1.0$ である。

## 2. 歯車の外周振れ

1番車、2番車そして3番車の外周振れを計測した。測定の様子を図11に示す。これらの歯車は、3種類共、図7小歯車のように歯車の四角形状穴に軸を挿入しているにも関わらず歯車の外周振れは図12のように0.06~0.11mmである。当時の道具を想像するとハンマ、タガネ、キリ、ヤスリ程度で作ったと思われるが、どのような方法で作上げたのか非常に興味がある。昔の汎用旋盤時代の旋盤師はトースカンのみで軸の振れを電球の明るさを利用して0.02mm程度に抑えていたが、これらの時計歯車も同様の作業をしていたものと推測している。

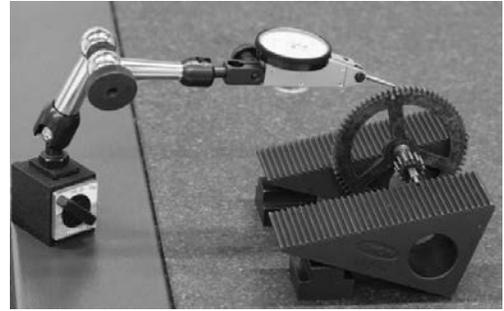


図 11 歯車外周振れ計測

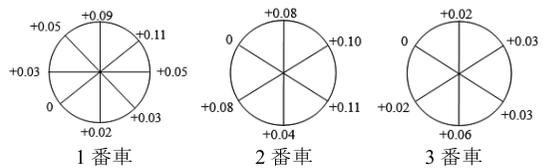
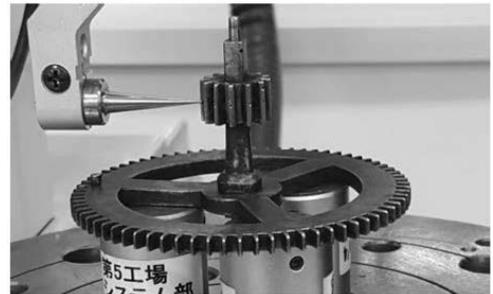


図 12 歯車外周振れ (mm)



2番車 (小歯車)

図 13 歯車測定の様子 (CLP-35、大阪精密機械)

## 3. 歯形測定

1番車と2番車そして3番車の小歯車をインボリュート歯車測定機 (大阪精密機械製、CLP-35) で修整インボリュート歯形として測定した。測定時の様子を図13に示す。測定項目は、歯形誤差、歯すじ誤差およびピッチ誤差とし、歯形誤差および歯すじ誤差は歯車円周4等分の位置で計測した。ただし、24時車は歯車測定機では測定不可であるため実施していない。和時計歯車の歯形は、歯形理論が不明であることから歯車の直径と歯数からモジュールを推測し、測定可能となる圧力角を決定した。その結果、1番車の大歯車と対をなす2番車の小歯車のモジュールは $m = 1.142$ 、圧力角は、 $\alpha = 18.5^\circ$ と決まる。また、2番車の大歯車と対をなす3番車の小歯車のモジュールは $m = 1.01$ 、

圧力角は、 $\alpha=0.98^\circ$ である。測定結果を見ると、例えば図14の1番車の歯形誤差（理論インボリュート歯形との偏差）は $F_\alpha=309\mu\text{m}$ であるが、4等分個所の歯形は等しく作られていることが解る。また、左右歯面の形状が大きく違ってないことから摩耗による大きな歯形変化は認められない。また、歯すじ誤差は $F_\beta=25.4\mu\text{m}$ であるが、これはクラウニングを施しているためであり、その形状は非常に綺麗に仕上がっている。歯面の摩耗について見ると、大歯車の摩耗は軽微であるが、小歯車

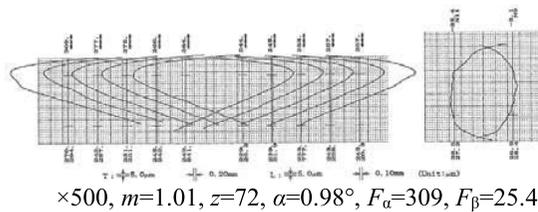


図 14 歯形測定結果（1番車）

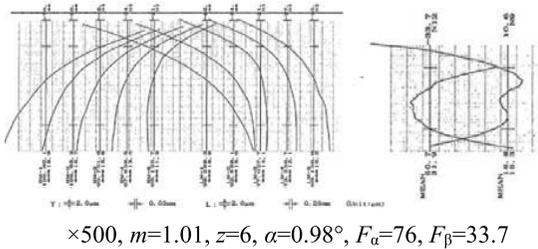


図 15 歯形測定結果（2番車）

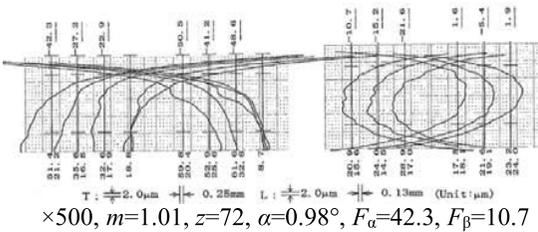


図 16 歯形測定結果（2番車）

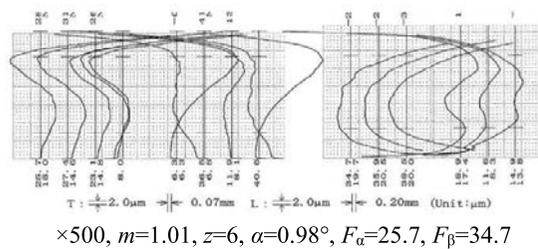
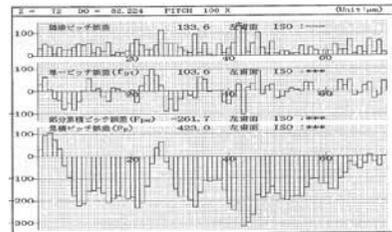


図 17 歯形測定結果（3番車）

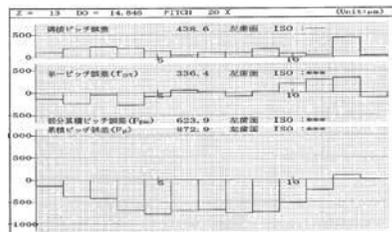
の図15の歯すじ誤差の検査結果から歯幅中央部で $17.0\mu\text{m}$ 程度摩耗し、同じく小歯車の図15から歯幅中央部で $18.8\mu\text{m}$ 程度摩耗していることが解る。しかし、反作用面の歯すじ形状は摩耗していないため大歯車と同様に綺麗なクラウニングが施されたままの歯形が残っている。

ピッチ誤差の測定結果を図18~21に示す。図18



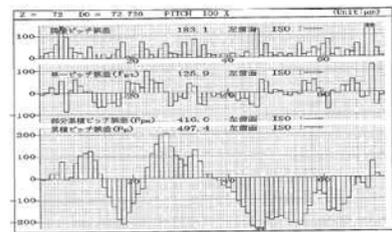
$$m=1.142, z=72, \alpha=18.5^\circ, f_{pt}=104$$

図 18 歯形測定結果（1番車）



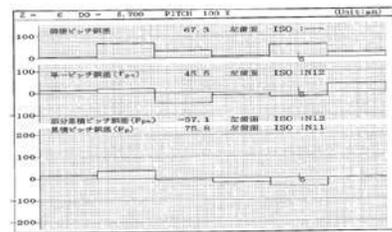
$$m=1.142, z=13, \alpha=18.5^\circ, f_{pt}=336$$

図 19 歯形測定結果（2番車）



$$m=1.01, z=72, \alpha=0.98^\circ, f_{pt}=126$$

図 20 歯形測定結果（2番車）



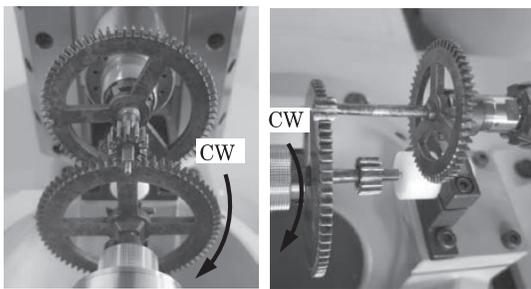
$$m=1.01, z=6, \alpha=0.98^\circ, f_{pt}=45.5\mu\text{m}$$

図 21 歯形測定結果（3番車）

および図20の $z=72$ ではそれぞれ $f_{pt}=104\mu\text{m}$ 、 $f_{pt}=126\mu\text{m}$ であるが、図21の $z=6$ では $f_{pt}=45.5\mu\text{m}$ と良好である。しかし、図19の $z=13$ では歯数が素数であることから $f_{pt}=336\mu\text{m}$ と極めて精度が悪い。歯を円周上に正しく削り出す方法は歯車の直径の数倍の円盤に分割目盛を与え、これを基準として歯を分割すれば基準円盤と歯車の直径に比例して分割精度は良くなるが、 $z=13$ の素数であるため基準円盤も正確に分割することができなかつたものと推測することができる。また、図4(a)のピニオン歯先に見える小さなポンチ穴は歯数を分割するための目印と思われる。

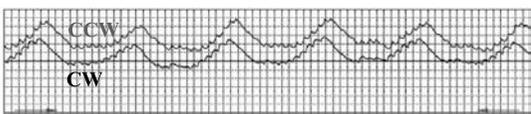
#### 4. 片歯面かみ合い試験

片歯面かみ合い試験機（小笠原プレジジョン、MEATE-3）にて時計歯車の回転伝達誤差およびバックラッシを計測した。測定の様子を図22に示す。図23(a)の1段歯車対のCCWの測定結果から全かみ合い誤差は $F'_i=112' 52''$ であるが、この値を歯車精度等級 JIS B 1702-1 (1998) で評価すると大歯車 ( $z=72$ ) のN12級（規格の最悪等級）の許容値は $F'_i=332\mu\text{m}$  ( $F'_i=27' 43''$ ) であること

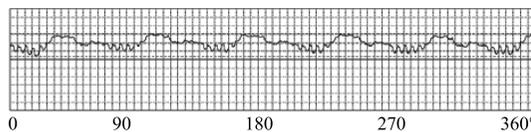


(a)  $m=1.142, z_1=13, z_2=72$  (b)  $m=1.01, z_1=6, z_2=72$

図 22 片歯面かみ合い試験 (MEAT-3)



(a) Transmission error



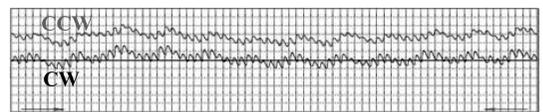
(b) Backlash variation

P1×G1,  $m=1.142, z_1=13, z_2=72$

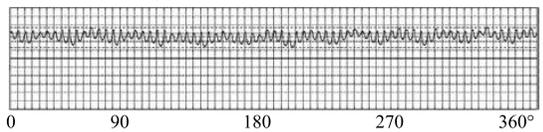
図 23 片歯面試験結果、1段歯車対

から時計歯車はN12級の4.1倍もの偏差を有していることが解る。ただし、歯車精度規格の許容値は、相手歯車をマスタギヤとしたときの許容値であるが、試験結果の $F'_i=112' 52''$ は、時計歯車同士のかみ合い結果である。また、1ピッチかみ合い誤差N12級の許容値は $f'_i=124\mu\text{m}$  ( $f'_i=10' 22''$ ) であるが、時計歯車は $f'_i=42' 47''$  であることから、これもN12級の4.1倍の偏差を持つ歯車である。このように偏差が大きい理由は、ピッチ誤差が大きいこと、そして、かみ合いに適した歯形でないこと、更に、かみ合い率が $\varepsilon < 1.0$ であることが原因である。なお、CW方向とCCW方向の差であるバックラッシの変化を図23(b)に示すが、このグラフから歯の分割精度（ピッチ誤差）の粗さおよび歯厚は不均一であることが読み取れる。

図24に2段歯車対の測定結果を示す。全かみ合い誤差は $F'_i=83' 02''$  であり1段歯車対よりも小さく、また、伝達誤差およびバックラッシの変動も小さく表れている。しかし、この値を歯車精度等級 JIS B 1702-1 (1998) で評価すると大歯車 ( $z=72$ ) のN12級の許容値は $F'_i=313\mu\text{m}$  ( $F'_i=29' 36''$ ) であることから時計歯車はN12級の2.8倍の偏差を有していることが解る。また、1ピッチかみ合い誤差N12級の許容値は $f'_i=105\mu\text{m}$  ( $f'_i=09' 56''$ ) であるが、時計歯車は $f'_i=45' 56''$  であるためN12級の4.6倍の偏差を持つことになる。即ち、かみ合いを基準とした歯形は、1段歯車対よりも2段歯車対のほうが劣るということができる。また、バックラッシの変化を図24(b)に示すが、このグラフから1段歯車対よりも2段歯車対のほうがバックラッシの変動が少ないが、波形から判断して歯の1ピッチかみ合い誤差は1段歯車対より悪



(a) Transmission error



(b) Backlash variation

P2×G2,  $m=1.01, z_1=6, z_2=72$

図 24 片歯面試験結果、2段歯車対

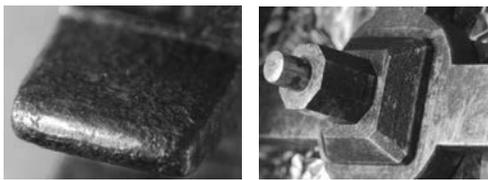
い。これらの結果から、2段歯車対は、1段歯車対よりも全かみ合い誤差 ( $F'_i$ ) は小さいが、1ピッチかみ合い誤差 ( $f'_i$ ) は大きい。そのため、2段歯車対は、1段歯車対よりもかみ合いに適した歯形ではないと言える。

本来、サイクロイド歯車のかみ合いでは図9および図10のようなかみ合い ( $\varepsilon > 1.0$ ) となるが、計測した歯車対では、表2のように大きな伝達誤差を持つ歯車であることが判明した。そして、これらの歯車対のかみ合い率は1未満であるが、回転速度は  $n = 1.39 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$  (1段車の場合) と小

表 2 片歯面かみ合い誤差およびバックラッシ

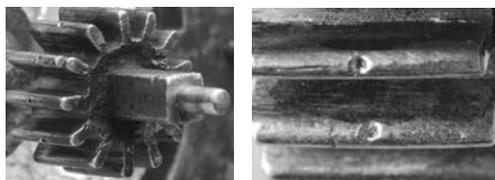
	1段歯車対		2段歯車対	
	CW	CCW	CW	CCW
$F'_i$	108' 39"	112' 52"	83' 02"	73' 42"
$f'_i$	37' 33"	42' 41"	45' 56"	32' 49"
$j_{n\_max}$	1° 33' 26"		1° 49' 32"	
$j_{n\_min}$	0° 11' 26"		0° 38' 04"	

$F'_i$ : 片歯面全かみ合い誤差  
 $f'_i$ : 1ピッチかみ合い誤差、 $j_n$ : バックラッシ



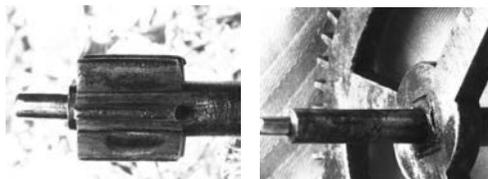
(a) 歯面 (b) 軸挿入部

図 25 1番車の歯と軸



(a) 小歯車 (b) 歯先

図 26 2番車小歯車と歯先マーク



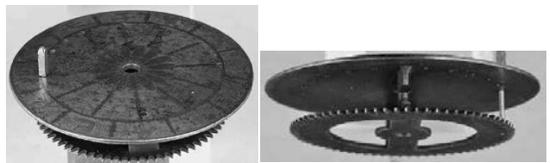
(a) 小歯車 (b) 大歯車と軸

図 27 3番車小歯車と軸

さく、また、時計歯車としては1歯ごとの送りピッチ移動が作用すれば機能を満たすことになるため、この時代の時計としては大きな問題にはならなかったといえることができる。

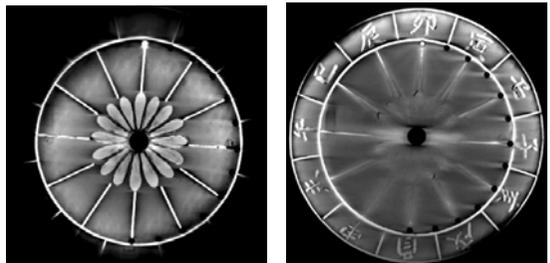
### ◇ 和時計歯車の観察

歯車の歯面を顕微鏡 (NIKON、SMZ800N + Ds-Ri2) で撮影した写真を図25~28に示す。大歯車の歯面に着目すると図25では歯車の歯先のみで摩耗が発生している。小歯車は、図27のように歯面が大きく摩耗している。この摩耗位置は、図7および図8のかみ合いと一致している。また、図28(a)の24時車の表面に描かれている菊十六花紋や時刻分割線そして時刻文字は象嵌細工されていて、顕微鏡での観察では象嵌細工は尖鋭に加工されている。この象嵌細工を調べるためX線CT装置 (Carl Zeiss、METROTOM<sup>®</sup>) でX線撮影した。その結果を図29に示す。図29(c)の24時車のピン

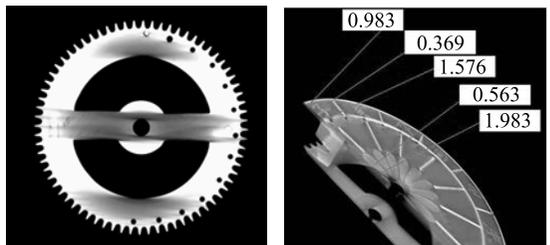


(a) 24時車 (盤面) (b) 背面 (ピン歯車)

図 28 24時車の象嵌と構造



(a) 十六花紋象嵌細工 (b) 時刻文字、干支



(c) ピン歯車 (d) 象嵌深さ

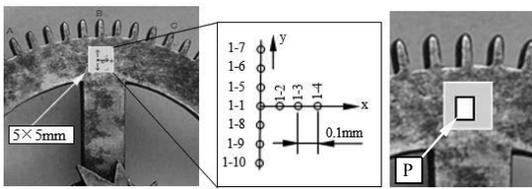
図 29 24時車のX線測定

歯車 ( $z=72$ ) は綺麗な歯形であり、図29(d) のように画像から象嵌深さは、約0.37~0.56mmであることが解る。

### ◇ 歯車材料

図30に示す1番歯車のリム部に5mm角の範囲(黄色枠)を#1200、#2000、#3000のエメリー紙で研磨後、マイクロピッカース硬度計(荷重0.98N、負荷時間15s)により表面硬さ測定(島津製作所製、微小硬度計、HMV-G20S)を行った(硬さ測定1回目)。測定位置は5mm角枠内の「・」位置(測定基準位置を1-1とする)を基準点とし、右方向へ3点(測定位置2~4)、下向へ3点(測定位置5~7)、上方向へ3点(測定位置8~10)を0.1mm間隔で測定した。また、歯車の歯元A~Cおよびリム内周近傍Dの位置で表面に光沢ある部分を測定位置とした。測定結果を表3および表4に示す。

研磨面の表面硬さはHV201~223の硬さを呈し、その変化は少ない。未研磨面(A~D)での測定値は表面がピッカース圧痕により菱形に歪む圧痕



(a) 硬度測定位置 (b) 組織検査範囲

図 30 No. 1 歯車の材料検査

表 3 硬度測定、図30(a)

測定場所	硬度	測定場所	硬度
1-1	210	1-6	210
1-2	211	1-7	201
1-3	203	1-8	215
1-4	210	1-9	223
1-5	208	1-10	208

表 4 歯の硬度測定、図30(a)

測定場所	硬度	測定場所	硬度
A	201	C	215
B	193	D	228

も見られたが硬さは研磨面の結果と大きな差異は認められない。

次に組織観察をするため図30(a)の5mm角内をさらに研磨仕上げを行い、金属顕微鏡(NIKON製、OPTIPHOT)により腐食前表面観察を実施し、4%ナイトル液で腐食後、表層部組織観察を行い、その後、硬さ測定を行った(硬さ測定2回目)。硬さ測定結果を表5に、硬さ測定後の顕微鏡写真を図31に示す。

時計歯車の材料の硬度分布および組織写真を図31に示したが、これと、現在、市販されている冷間引き抜き棒鋼材(S25C、焼準材、2014年、特殊鋼メーカ)を比較する。試験片は、直径40mm(長さ70mm)の丸棒に旋削加工を施し直径39mmとし、大気炉で900℃、60分加熱後空冷した試験片により硬さ測定と組織観察を実施した。全長70mmの試験片の中央部で長さ10mmの長さで切断し、軸直径方向に切断した試料を用いて硬さ測定をマイクロピッカース硬度計(島津製作所製、微小硬度計、HMV-G20S)で荷重0.98N、負荷時間15sとし、断面内で半径方向に測定を行った。硬さ測定後の試験片より採取した試料の断面組織観察結果を図32に示す。試験片の焼きならし組織は、僅かに炭素の拡散が見られ、フェライト・パーライトの層状組織が小さくなっていることが解る。

時計歯車および試験片(S25C)の硬さ測定結果を比較すると図33のように時計歯車材料の炭素含

表 5 硬度測定、図30(b)、P部

測定場所	硬度	測定場所	硬度
2-1	193	2-6	197
2-2	200	2-7	172
2-3	196	2-8	195
2-4	189	2-9	188
2-5	194	2-10	186

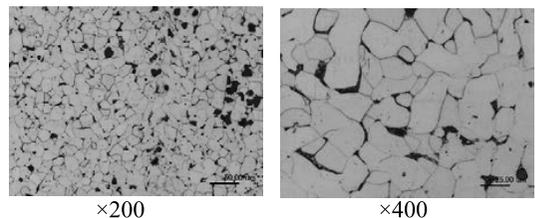


図 31 和時計歯車歯先側の表層部組織

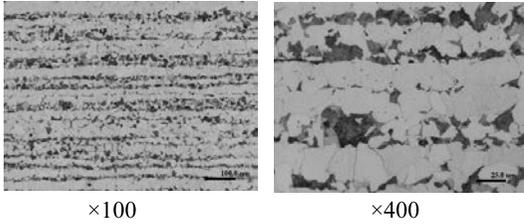


図 32 S25C材料

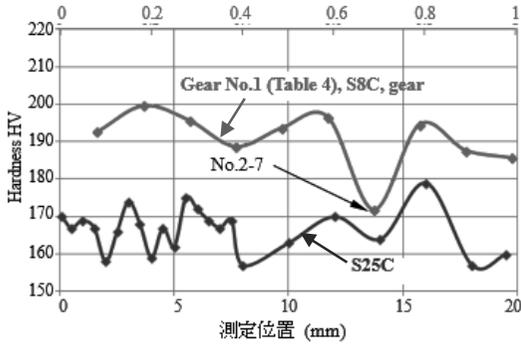


図 33 時計歯車とS25Cの硬度

有率は、0.07～0.09%であるにも関わらず、試験片のS25CよりHV20程度大きい値を示している。また、組織観察では粒界に見られるパーライトが均一に分散し、結晶粒も小さいことから時計材料の方が現在の市販材料より「良質」とであると判断することができる。なお、図33の時計歯車の硬さ分布でNo. 2-7 (HV172) は他の硬さに比して約HV20低下している理由は、HV測定子がフェライトの部分に落ち込み、粒界パーライトと、その隣のパーライト結晶粒（炭素の溶け込みは微量）の影響によるものと考えられる。

### ◇ 潤滑油

和時計歯車には、どのような潤滑油が使われていたのかを知るため、図34のように歯車と軸の接合部にごく僅か残っていた油分らしき微細粒（図35）を採取し、SEMによる外観観察と赤外線分光法（Infrared spectroscopy）による定性分析、そして元素の半定量分析（Thermo Fisher Scientific Inc.、Nicolet iN 10、赤外顕微鏡）を実施した。

分析の結果、IRチャートの図36には1,736 $\text{cm}^{-1}$ にエステルと思われる吸収が認められ、1711 $\text{cm}^{-1}$ にカルボン酸の吸収が認められた。また、1,030～

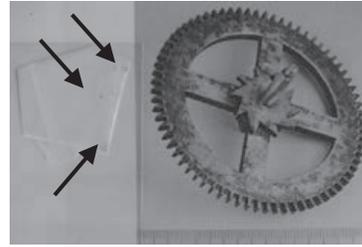


図 34 潤滑油（1番車）

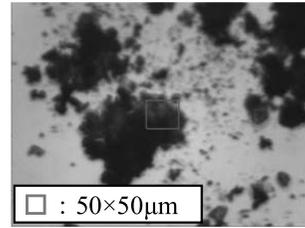


図 35 顕微鏡写真

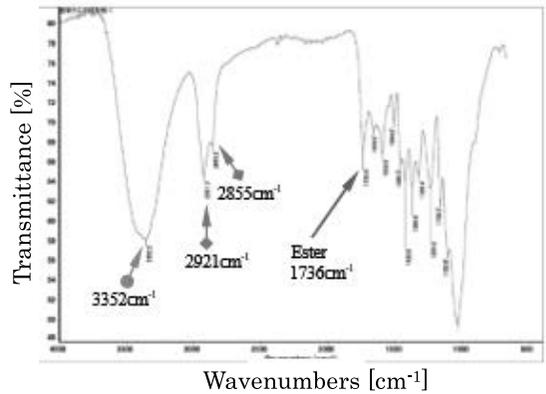


図 36 IRチャート

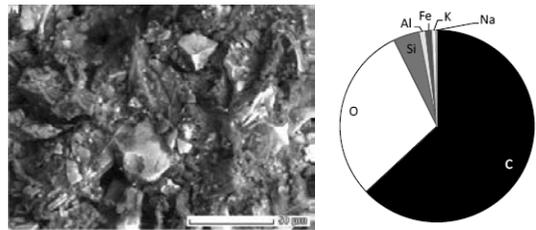


図 37 SEM (unit: 50 $\mu\text{m}$ ) and EDS

1,040 $\text{cm}^{-1}$ の範囲は土あるいは砂と推測することができる。なお、 $\nearrow$ は炭化水素を、 $\searrow$ は水酸基を示している。

ランダムに選択した試料のSEM観察とエネルギー分散型X線分析（EDS）の結果を図37に示す。こ

の分析結果から判断できることは、最も含有率の多いCの由来が炭化水素とすればCとOの比率バランスから炭化水素以外のCが含まれていると考えられる。Oは酸化物、SiおよびAlは、土や砂、KやNa、Sは、たんぱく質にも含まれている元素でありCuは、**図5**に示した軸受けメタルの銅かもしれない。**図37**視野の元素分析結果を**図38**に示す。

潤滑油について考察すると

(1) 和時計歯車の潤滑油と思われる試料 (**図34**) からカルボン酸の吸収 (**図36**) が認められることから油脂 (脂肪酸が主成分) と推定することができる。

(2) エステル (**図36**) の吸収が存在することから動物性油脂の可能性があるが、植物性油脂にもエステルが含まれている。このことから、本分析結果からは、植物性油脂であるのか動物性油脂であるのかは特定できない。

(3) **図37**および**図38**から炭素の比率が炭化水素比率よりも多く存在する。また、試料の外観が黒い理由は、潤滑油の炭化も考えられるが、時計歯車の負荷や運動からは大きな熱環境下にはない。このことから、固定潤滑材として炭素 (例えば“すす”) を意図的に混入していたかも知れないし、

歯車や軸の組み立て時に使用した「ろうそく」の“すす”が混入したかも知れない。

(4) 漆を防錆処理材として漆を使用していたことから**図36**の水酸基は、漆の主成分であるウルシオール (**図39**) の可能性が高い。

(5) 和時計の潤滑油としてどのようなものが使われていたのか、今回の分析の結果からは結論付けることが出来なかった。

(6) EDS分析結果に含まれる元素には時計材料 (機械要素、象嵌材料、潤滑油、表面処理材料) の他にも、製造時の道具、また、その後の管理も含めた履歴物質も含まれるため、これらを考慮して分析結果を判断する必要がある。

## むすび

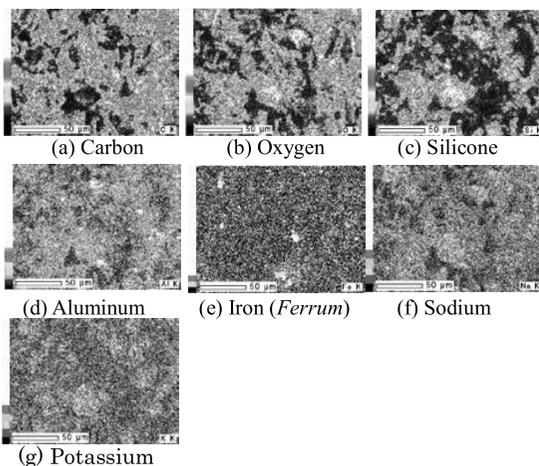
三代目津田助左衛門信貫が貞享五年 (1688年) に製作した二挺天符櫓時計に使われている歯車について調査を行った結果、以下のことが解った。

(1) 新しい発見としては、300年以上前の時計歯車の歯形はサイクロイドに近いものであるが、歯形理論に基づいては製作されていない<sup>6)</sup>。

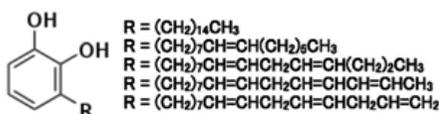
(2) 1851年に製作された田中久重の万年自鳴鐘<sup>5)</sup>に使われている歯車も単なる”ひっかかり歯車”であり、歯形理論に基づいて設計された形跡は見られない。このことから我が国では、歯形理論に基づく歯車の製造はされていなかったと考えられる。

(3) 歯形にエッジは無く、全歯均等に作られていてクラウニングが施されている。このことは、歯のかみ合いに関して非常に有用なことであり、航空機用歯車にエッジ部がないのと同様である。この当時の技術者は歯にエッジを付けてはいけないということを経験で承知していたのかも知れない。

(4) 時計歯車の材料は、刀鍛冶が作ったとされるため、300年以上経過した現在でも錆びていない。その結晶粒は極めて微細で一様であり、また、鉄鋼中に不可避免的に存在する介在物も集合せず、クラスターになっているところがない。近頃の鋼材では硫化マンガンがフォイル状に存在して鋼材の強度を弱めていることがかなり一般的であるが、この歯車材料では硫化マンガンが細かい粒状で内部に分散している。このような硫化マンガンの分布は、鋼材の強度をほとんど下げることなく加工



**図 38** 元素分析



**図 39** ウルシオール

性のみを向上させているものと思われる。また、0.08C%炭素鋼（S8C）であるにも関わらず、S25Cよりも硬く、組織も美しいため、現在の材料よりも良質であると言える。

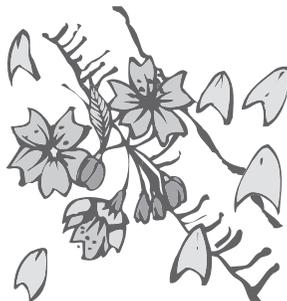
（5）歯車の加工について考察すると、大歯車と小歯車軸は四角穴で接合されているが、大歯車の外周振れは0.06～0.11mmと極めて小さい（手作りと想定して）。また、この軸穴は焼き嵌めであるとの説もある。当時工作機械が無く手作りで作ったにも関わらずこのような歯車（歯形の製造工法も含め）をどのように製作したかについては別途研究が必要である。

（6）この歯車は極めて真面目に素晴らしい技量で製作されている。330年ほど前の日本に、このような技術と機械技術者がすでに存在し、人々の生活の中の生きた技術として江戸時代に実用されていたからこそ、明治維新後に欧米から最新技術が導入された時にも臆することなく、それを吸収し、改良して自家薬籠中の物に出来たものであり、そ

の結果として今の日本があるということを承知しておく必要がある。今回調査した歯車は、我々の先人達が約300年前に作ったものであることは誇りにして良い。そして、この歯車の源流を把握することは、日本人のものづくりの精神を理解する上で非常に重要なことである。

#### 参考文献

- 1) Shiling, Drotheus, 岡本良知識、日本における耶蘇会の学校制度、日本教育史、(1943)、p. 15
- 2) Johan ten Hoeve and David Thompson, 'A Fremsh clock at the Shogun's Shrine' Antiquarian Horology, Vol. 35, NO. 4, (2014), pp. 1063-1076
- 3) 佐々木勝浩、近藤勝之、津田助左衛門の和時計と特徴、和時計学会、No. 42, (2010)、pp. 16-29
- 4) サイクロイド歯車ソフトウェアManual、AMTEC INC. (2002)
- 5) 久保田祐二、万年時計の機構解明、東芝レビューVol. 60 No. 7, (2005)、pp. 116-119
- 6) 上田昭夫、渡邊淳、宮崎美弥子、久保愛三、松岡裕明、和時計から日本の歯車の源流を探る、機論、Vol. 83, No. 847 (2017)



## II. 総論／技術解説

### 1. 歯車設計の現状と将来

公益財団法人 久保愛三  
 応用科学研究所

#### ◇ 歯車の設計

歯車はギヤボックスの中に存在してその機能を果たすものであるため、ギヤボックス抜き歯車単独の設計はあり得ない。図1は歯車の設計のそのような状況を示している。歯車装置運転中の負荷・温度条件が変化の中で、いかに歯面の広いところを均等に当てることが出来るか、いかに運転中にバックラッシュ間で部品が踊らないように出来るか、いかに歯のかみ合いを滑らかにすることが出来るか、いかに運転温度を下げられるか、いかに損失馬力を少なくできるか、と言った観点から、歯車装置の構造設計、歯車諸元、歯車材料の選定、熱処理・表面処理法、歯面形状修整設計、バックラッシュの管理、潤滑法等の決定がなされる。

一番基本となるのはギヤボックスの構造をどう決めるかであるが、これは経験の産物であって、最新のシミュレーションやCAD等は、その経験的構造を最適化するための道具でしかない。

#### ◇ 歯車の強さ設計の問題点

物理現象として、歯の折損、ピッチング、スカuffing等の損傷の発生・進展には相互依存の関係がある。しかし、現在使われている規格化された歯車強度推定の計算式は、全て、単独の損傷が独立して起こるような状況を想定しており、損傷の種類ごとに強度計算法が別個に用意されている。これら設計式で算出される応力は実際に発生している応力とはかなり隔たった、応力の単位を持つ指標値で、これを材料の耐力と比較して強

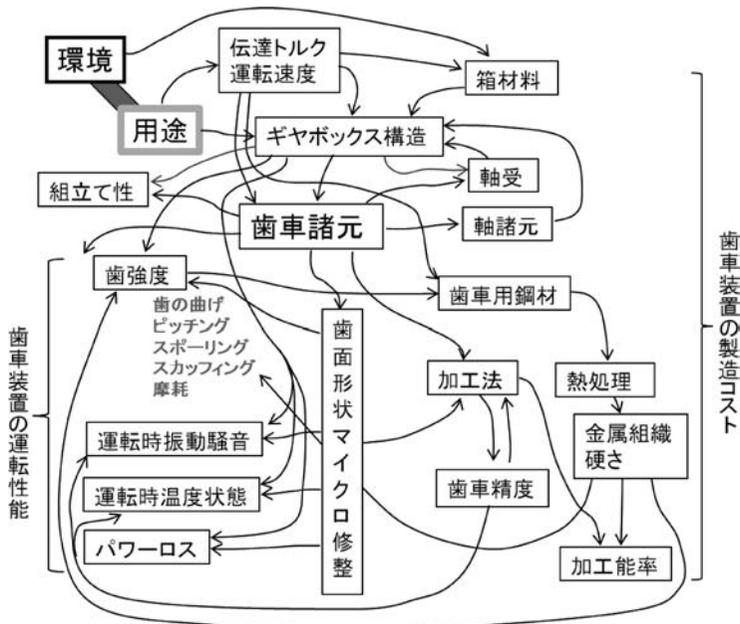


図 1 ギヤボックスと歯車の設計

さを判断する。したがって、材料の耐力も、その設計式に固有の値になっていなくてはならない。現在使われているのは：①歯元曲げ強さ計算式、②ピッチング強さ計算式、③スカフティング強さ計算式、④熱容量計算式である。歯面の摩耗を推定したいことも多くあるが適切な計算式の無いのが実情である。

いま、歯の曲げ強度計算について考えてみると、歯元に発生する曲げ応力とその箇所の材料耐力を超えた場合に歯が折損するモードのみを考えており、歯面の損傷が歯の折損に影響があるなどとは一切考えていない。一方、歯車材料の耐力を求める試験に於いても、対象とする種類以外の損傷が同時に起こらない様な、例えば固定した歯車の歯に繰り返し荷重を与えて疲労強さを求めるパルセータ試験のような実験法を考えて、耐力を求める研究をする。このようにして、発生応力の計算法の周辺状況と材料耐力を求める実験的方法の整合性をとっているのである。しかし、パルセータ試験に供したのと同じ材料で歯車を作り、運転試験をして歯の曲げ折損を起こさせる試験からその材料の耐久限度を求めると、パルセータ試験で得られた値と大きく異なり、またこれらの値は、材料研究者が歯車と形状の異なる棒や板の小さな試験片でアカデミックに決定した同じ材料の強度と

もさらに大きな隔たりがある。したがって、歯車屋は最終的には実機耐久で歯車装置の安全性を確認しなければ信用しない。実機あるいは実機のベンチ耐久試験では、歯のエッジの接触が悪さをするとか、振動的荷重が働くとか、潤滑油中に異物が混入してその破碎を歯車の歯がするとか、負荷を受けた時のユニットの変形が、歯車軸のアライメントや温度条件を変えるため運転状態が歯車みのテストの場合と全く異なるとか、前述の基礎研究では考慮できていない影響因子が大きく働いているのである。これらについて適正な考慮をせずに、理想的条件に置かれた部品に発生する応力と材料の耐力と言う単純な形で耐久試験結果が整理されるところに大きな問題がある。別の表現をすると、これらの影響はあまり正確には分からないので、材料耐力をどんぶり勘定にするのが実用的だとなっているのである。

重荷重運転される実機の損傷では、ほとんど全ての種類の損傷が起こっている。そして運転時間の経過とともに変化して行く経過的損傷を経て、歯車がそれ以上稼働できなくなる最終損傷に至る。経過的損傷は図3に示す様に様々な表面損傷が互いに影響を及ぼしあって進展して行く。すなわち、図2のようなダイナミックシステムの挙動が経過的損傷である。このシステム挙動が発散すれ

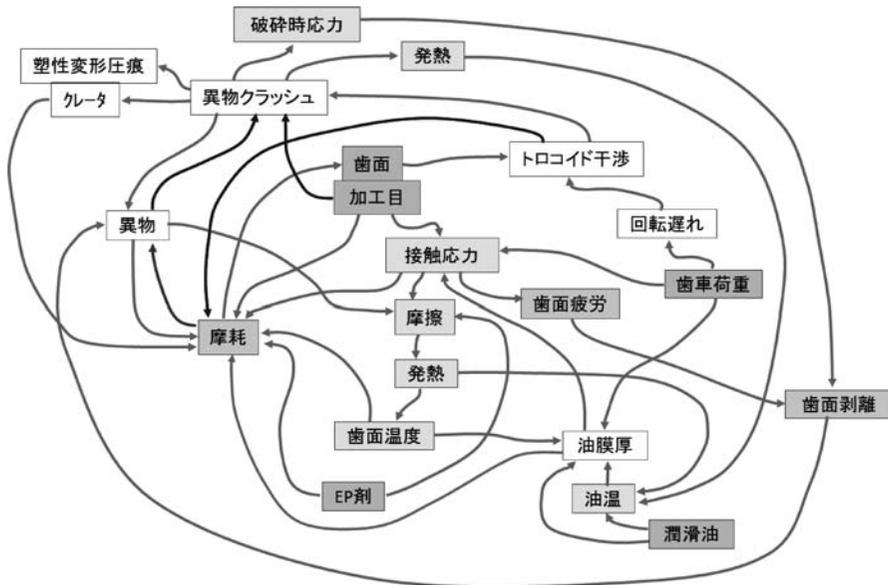


図 2 歯の経過的損傷の進展のダイナミックシステム

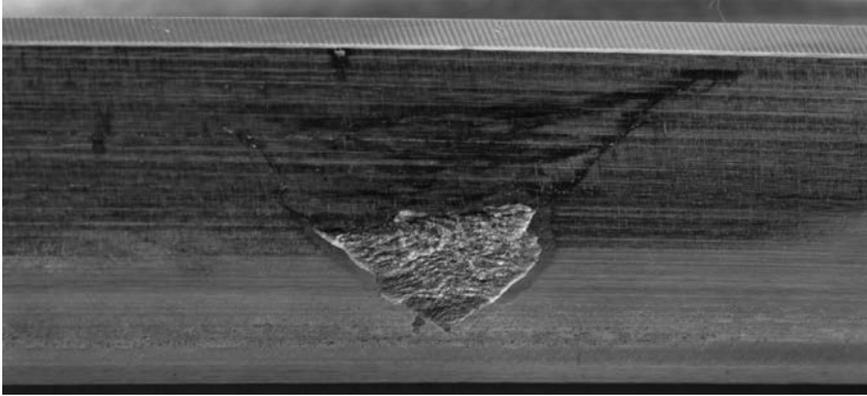


図 3 大形浸炭焼入れ研削仕上げ駆動歯車の典型的な歯面損傷

ばそれが最終損傷であり、発散しなければ、通常、損傷とはみなされない。何をもちて最終損傷と見做すかはその歯車装置の用途による。例えば、大形の低速歯車では、歯面に大きい剥離が起こっても、あるいは、歯厚が半分ぐらいまで歯が摩耗しても、回転運動に支障が無く、必要とする動力が伝えられている限りは、歯面損傷は最終損傷ではない。一方、航空機用歯車などでは歯面に小さなピッチングが発生しても、近いうちにその歯車が動力伝達できなくなる可能性があるとして最終損傷と見做される。

歯車の最終損傷で最も代表的なものは歯の折損である。歯が一発で飛んでしまう過負荷折損の原因は想定外の大荷重が働いた場合が多く、どのような荷重が歯車に発生するかの調査を正確に遂行すべき問題である。疲労折損は状況が少し異なる。従来の歯の曲げ強さ計算式は、歯元隅肉部の最大引張応力発生箇所から単純に疲労亀裂が入ってそれが進展して壊れるモデルに依っているが、現実の多くの歯元折損事故は若干異なる経過で発生している。すなわち、歯の側端や歯先エッジの欠け、面取りの荒い加工によりつけられた微小な切欠き、そのような箇所での浸炭異常、歯元修整の際に工具が隅肉部に付けた小さな切欠き等により発生したマイクロ亀裂が、運転の経過に伴い引張応力の大きい方に向かって進行し、介在物などの異常物に突き当たるとそこで停留して成長し、歯折損の疲労亀裂に結びつく最終破断面の起点を作る。そしてここからマクロ亀裂が運転の経過に伴い歯の曲げ応力が最大になる歯の最弱断面を歯筋方向に進

行して、歯の折損事故に至ることが多い。歯の疲労折損が起こった時、最終の疲労破断面に目を奪われ、真の損傷引き金を見ることが出来ないこともしばしばある。一蔑で目につく破断面の状況はこの歯が死刑宣告を受けてから死に至るまでの記録であって、なぜ、死刑宣告を受けるようになったかの経緯の解明を難しくしている側面がある。

このような状況は歯面の耐久力についても同様である。図3は大形浸炭焼入れ研削歯車の駆動歯面歯元から起こる典型的な損傷で、スポーリング、ケースクラッシング、フレーキングなどと呼ばれることが多い。この損傷の原因は、ピッチングに対する歯面耐久力計算法の考えを延長して、歯面剥離の起こっている個所の歯面接触応力が過大であると信じている人が多い。しかし、本当はかみ合い始め時に被動歯車の歯先エッジがトロコイド干渉で駆動歯車の歯元を攻撃して歯面に切込み、その箇所に来た歯形の変曲点に、歯面間にかみ込まれた異物が衝突して剥離のトリガーとなるマイクロ亀裂を発生させることが主たる原因である。その後、その亀裂が歯面接触の高圧力でしごかれて歯面剥離となっていった。すなわち、剥離の起こっている個所の歯面接触応力が過大であることがこの損傷の原因ではない。しかし、この事実を知っている歯車技術者は多くない。

#### ◇ 歯車設計における鋼材の問題

近年、歯車の事故の原因として鋼材の問題も無視できないようになって来た。これは企業経営における技術を離れたVAの過剰評価やグローバル

ゼーションの進展による世界的価格競争をもたらした結果で、残念ながら鋼材を使用する機械メーカーがいくらこの状況の改善を鉄鋼メーカーに言ってみたとところで、改善できるものではない。機械部品用の鋼を購入する場合、それが①規格材か、②ミルシートで品質が保証されているか、の条件だけで、機械会社の購買部署は世界中から最も安いものを探し出して買うようになってきている。小さな機械会社は通常、鉄鋼材を高炉メーカーと交渉して直接買うことはできず、添付されてくるミルシートを信用して市中材を買わざるを得ない。すなわち、ミルシートがその内容を疑ってはならない宗教的聖典のようになっているのである。

図4は、大形歯車用素材として世界で最も多く使われているDIN規格18CrNiMo7-6鋼につき、日本と韓国のトップメーカーの製品の組織と硬さ分布の相違を調査した一例である。日本製のものの組織の方が明らかに綺麗であるが、この組織写真からその鋼材の耐久力や加工性の相違の程度を推定することは難しい。しかし多点測定した硬さ分布の違いからは、その鋼材性能の違いがある程度定量的に推定できる。例えば、硬い異常点の多い

鋼材は加工性が悪く切削工具の持ちも悪いであろう。この図は生材の硬さ測定結果であるため、硬さの低い異常点の多い鋼材の疲労強度が弱いことに直接は結び付かないが、これら鋼材で製作した歯車を浸炭焼入れしてHV硬さの分布を調査した結果、浸炭硬化層の表面近くと心部において、生材における硬さのバラツキの大きかった鋼材は、浸炭焼入れ後においても硬さのバラツキが大きい結果が認められ、疲労強度的に問題があることが確認されている。しかし、このことで鋼材Aが鋼材Cに比べて無条件に勝っているとは言えない。鋼材Cは鋼材Aに比べて約半値で入手可能であり、コストパフォーマンス的にどちらが勝っているかを単純に言うことはできない。機械技術者が適材適所に材料を選定すべきものであろう。問題は、ミルシートがその材質の使用者要求品質に対応しないものになって来ている所にある。

図5は稼働後一年半で折損事故を起こした高周波焼入れ歯車軸の組織とEPMAによる元素成分の分布状況を示す。材料はミルシート付き規格鋼種であるがエッチングで組織を調べると、金太郎飴のような層状のブチ模様で、鋼を硬くするMo、

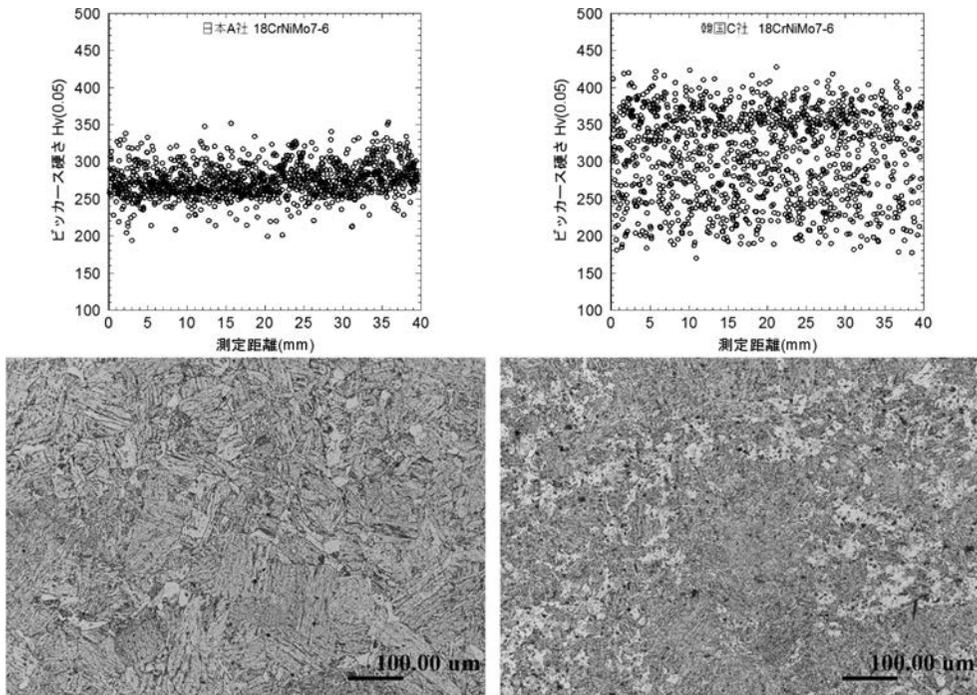


図 4 同じ規格鋼種でミルシート付きのものでの品質差

Cr、Si、Cの成分が縞状に偏析しており、また、同じ縞の中に軟らかい硫化マンガンも層状に認められる。この鋼材は製造過程上方で溶融状態の成分を調べれば、平均値としてミルシート合格品となっているのであるが、機械部品材料として、その材料中の局所局所を見てみると全く違う鋼種の集合体となっているのである。歯車の設計者はそんなことに気付かず、この材料の疲労強度は何々だと言って強度設計し、この事故にあってしまった。

多くの場合、高強度鋼材は材料中に硬い粒子を析出させて硬さを高め、強くしている。本来、これらの硬い粒子は細かく、鋼材中に均等に分布しているべきものであるが、それを実現するのはかなり難しいことで、現実には図5のように偏ってブチ模様分布していたり、集まってクラスター

になっていることも多くある。鋼材の疲労破壊は材料中の一番弱いところからマイクロ亀裂が入りそれが成長して損傷に至るものである、これは大きな問題である。

これらの例からも見られる本当の問題は、たとえば図4の両鋼材とも同じ規格銘柄で品質証明たる合格ミルシート付きで売られていることである。食品の産地偽装などの表示が問題になることがしばしばあるが、まさにこれと同じく、表示では品質が同じであるような印象を与えて、実品質の異なる鋼材が売られていることが問題で、規格などの法的不備が突かれている。

### ◇ 歯車の音振設計

歯車装置の運転騒音は歯車装置の品質を情緒的にユーザーに訴えるため、これを適切に抑えるこ

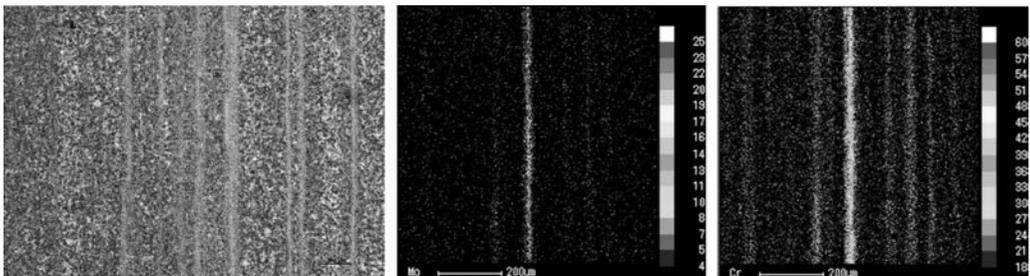


図 5 ミルシート付き規格鋼種での合金成分の偏析（エッチング面、MoとCrの偏析）

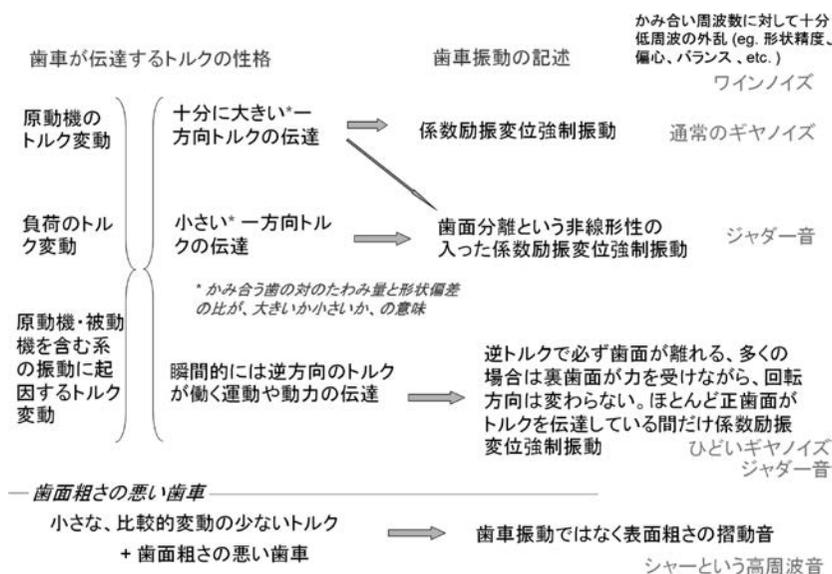


図 6 ギヤノイズの種類

とは極めて重要である。運転騒音は歯車のみの問題でなく、歯車装置の構造、駆動機や被動機との相性、装置設置基礎の状態、当該歯車装置が組み込まれる機械装置や設備の状態等によっても大きく変わってくる。これらの設計はコンピューターシミュレーションが容易に使用されるようになってから、長足の進歩を遂げた。しかしながら、シミュレーション結果と現実の測定結果との乖離はまだまだ大きく、将来においてもどの程度までその乖離が小さくなるかには不明な点も多い。

ギヤノイズの種類を図6に示す。運転時の振動騒音の第一原因は、歯のかみ合いに起因する起振力の発生である。これらに関する研究は1970年ごろから活発となり、現在ではそのモデル化と理論的取り扱いについてはほぼ解明されている。しかし、まともに取り扱うには、シミュレーションから得られる膨大な計算結果のどこをどのように理解して、現物の設計に反映させればよいか分からないところが問題なことも多い。また、歯車の設計が適切に出来たととしても、その歯車を実際、高精度に製作できるか、それも適切なコストで、といったところにバリアーの出来ることが多い。

#### ◇ 歯車設計におけるシミュレーションの利用

歯車設計においてシミュレーション結果を得たとき、そこからどのような情報を読み取って現実の低振動・低騒音歯車装置の設計を行うかには、多くの実務経験が必須である。すなわちシミュレーションは、熟練技術者がそれを使って設計を行うには極めて有用な道具であるが、未熟な技術者がシミュレーション結果をあたかも神の声を聴くようにして利用することは、危険以外の何物でもない。技術の分からない会社経営のトップが綺麗な

グラフィックスやアニメーションを見て、それが歯車技術であると勘違いし、高額なシミュレーションプログラムを購入して、それで自社の技術が向上したと考えるのはどうしようもない間違いである。若い技術者がそのシミュレーションを宗教的聖典のように信じて、自分の頭でものを考えず、現物を正確に見ることもしなくなるようであれば、シミュレーションの導入がかえって、自社の技術レベルの低下を招くものとなる。

設計とは「現実世界と仮想現実の世界の的一对対応を前提とした予測」であり、現実の物理世界での歯車損傷と仮想現実世界での発生応力計算値が一对一对応するとしたものである。歯車強度設計法を作った人にとってはその一对一对応が成立する有効範囲が認識されていたが、その結果のみが規格化され、年月が経って行くと、若い技術者がそれを経典のように思い込み、不可欠であったその設計法の有効範囲の認識が持たなくなってしまふ。まさに、設計法が信仰化してしまうのである。しかし、信仰とは関係なく物理現象としての損傷事故は起こる。どの設計式を使うかとかとは無関係にその損傷の原因と対策は存在するのであるが、歯車設計者の多くは、損傷が起こった時、物理現象を離れて、自分が使った設計式で、安全率の取り方がどうであったかとかにこだわることの多いのが実情である。その結果、起こった損傷に対しての正しい原因を特定できず、立てた対策が有効なのは、単に安全率を大きく取ったことで誤魔化された結果であると言うケースが多々ある。当然ながらこの世の中には、全て良いこととか、全て悪いことと言ったものはあるわけではなく、安全率を大きくとると、機械装置は大きく重く高価になり、性能は落ちる。

## 2. 歯車のものづくりの現状と将来

アイシン・エイ・ダブリュ(株) おお ばやし こう じ  
生産技術本部 Executive Advisor 大 林 巧 治

### まえがき

歯車は複雑な機械で高度な機能を発揮させるため大きく進化してきた。中でも自動車に使われる歯車は、品質・コスト・生産性・環境・安全（以下、QCDES）など難課題の同時実現を求め進化してきた。今後、100年に一度とも言われる自動車の電動化など大きな環境変化により、歯車への要求はますます高度化、複雑化する。自動車用歯車を中心に歯車加工、熱処理、鋼材など歯車のものづくりの現状と将来について考える。

### ◇ 歯車の進化

例えば、多くの歯車が必要となる自動車用オートマチックトランスミッション（以下、AT）は、およそ半世紀前2速ATだったものが、現在では10速ATまで多段化し、自動車エンジンからの入力トルクもおよそ100Nmから700Nmへ増大した。しかし、トランスミッションに与えられるスペースはさほど大きくなる訳ではない。ギヤノイズ低減なども同時に求められ、限られたスペース内に静粛かつ小型なATを取めるため、歯車の強度は2倍以上、歯車精度バラツキは約1/2以下となった。

また、更なる環境負荷低減を目指し自動車の電動化が進む。モータだけで走る電気自動車では、エンジンの騒音や振動が消滅し、従来よりもギヤノイズやギヤ振動が目立つようになる。歯車の高精度化や振動低減の工夫を計り、ギヤノイズ、振動を低減する必要がある。更にモータの特性を最大限に引出すために、モータ用トランスミッションや減速機が必要となる。歯車は大きく改良されてきたものの、まだまだ進化が必要である。

### ◇ 歯車のものづくり

#### ①歯車加工

##### a. 歯切り加工

歯車製造の初期、歯車加工はホブ切りが主流で

歯車精度はJIS N8級程度であった。しかし、自動車の静粛性向上に伴い歯車の高精度化の要求が高まった。高精度化の要求に応えるため、歯車加工はホブ切り後にシェービング加工を追加するようになった。さらに熱処理による歯車精度変形量を見込み、シェービング加工での歯形、歯筋のネライ値へフィードバックして熱処理後の歯車精度を高めるなど、精密な工程設計がされるようになり、精度はJIS N7級程度へ向上した。

また、高精度化と低コスト化の同時実現のため、ホブ切り、シェービング加工の高速化も取組まれた。冷間塑性加工化や、それにシェービング加工を組合せことによって粗形材のニヤネットシェイプ化も取組まれた。これらの取り組みにより、歯車加工は高精度化と高生産性、低コスト化を進めてきた。

##### b. 歯車仕上げ技術

歯車のさらなる高精度化のため、ギヤホーニング、歯研などの熱処理後歯車仕上げ技術が開発されている。ギヤホーニングは、内歯車状の砥石に交差角を持たせて被加工歯車と噛み合わせ仕上げる工法である。使用する砥石は、外歯車型のダイヤモンド工具にて成形し使用する。初期のギヤホーニング盤は、レジンボンドを用いた砥石を使用し、砥石軸とワーク軸も同期駆動でなかったため歯面の修整能力は低かった。その後砥石軸とワーク軸が同期駆動する設備が開発され砥石もビトリファイドボンドを用いたものになり修整能力が向上し、仕上げ精度も向上した。

歯研には成形歯研と創成歯研があるが、大量生産が必要な自動車用歯車では創成歯研が多く用いられる。創成歯研は、ねじ状の砥石とワークを噛み合わせ連続的に歯面を仕上げるため、成形歯研と比べ生産性が非常に高く、さらに高速化が取組まれている。

さらに精密な仕上げ技術として、創成歯研の砥石を従来の仕上げ用に加え、面粗度向上のための

粒度の細かい砥石を一体化したものが開発され、一工程で歯研加工と超仕上げ加工ができる工法も開発されている。また、歯研機ではなく歯面超仕上げ用の専用機も開発され、これらの活用により歯車伝達効率の向上も進んでいる。

## ②熱処理と鋼材

### a. 高周波焼入れ

高周波焼入れは、被処理部品表面に高周波誘導電流を発生させ短時間加熱を行い、その後、水焼入れによって表面硬化する比較的省エネルギーな短時間熱処理である。部品全体の熱処理も不可能ではないが、局所の熱処理に適しており、歯車に適用する場合、歯車部分のみ高周波焼入れすることが多い。

適用する鋼材には炭素の含有が必要だが、歯車加工性や焼割れ抑制の観点から、一般的には炭素0.35~0.55%程度の中炭素鋼が適用される。炭素鋼JIS S35C、S45C、S55Cなどの他、合金鋼JIS SCR440、SCM440、その他ボロン鋼、マンガンボロン鋼、非調質炭素鋼、高周波用特殊鋼が開発され適用される。しかし、さらなる歯車の高強度化を求め鋼材の炭素量、合金添加量を増加すると、歯車加工性が悪化してしまうため留意が必要である。

また熱処理歪の低減や、残留圧縮応力の付与を目的に、歯車の輪郭状に表面硬化する輪郭高周波焼入れ技術が開発されている。しかし浸炭焼入れのような完全な輪郭状の表面硬化層は得ることは困難であり、熱処理歪の低減も不十分である。また歯車を輪郭状に加熱するため、1秒以下の短時間加熱でオーステナイト変態させることが必要であり、粗形材には予め調質を施し比較的細かい金属組織を与えておくことと、オーステナイト変態

領域の高温域への加熱が必要となる。輪郭高周波焼入れは多くの制約条件について微妙な調整が必要で、歯車への適用は一部に留まっており、今後の改良が望まれる。

### b. 窒化

歯車に多く用いられる窒化は、ガス軟窒化、塩浴軟窒化などの軟窒化で、オーステナイト変態点以下の比較的低温で被処理部品に窒素、炭素を侵入、拡散させ表面硬化させる熱処理である。処理温度が低く、鋼材の相変態を伴わないため熱処理変形は少なく熱処理後の仕上げ加工無く高精度な歯車の製造が可能である。反面、硬化層深さは適用する鋼材にもよるが0.5mm程度以下が一般的で高強度化には制限がある。

窒化は歯車の高精度化には有効な熱処理であり、今後さらなる強度レベルアップが望まれる。窒化用鋼材との組合せにより硬化層を深くしたり、生成する窒素化合物を精密制御することにより従来窒化より高強度を得る制御窒化の開発など、さまざまな改良が取組まれる。

### c. ガス浸炭焼入れ

ガス浸炭焼入れは、高強度化が必要な歯車に広く適用されている。一般的なガス浸炭焼入れ歯車は、先ず炭素含有量0.2%程度の鋼材に、鍛造や歯車加工を施し、所望の歯車形状を得る。続いて浸炭焼入れ炉にてオーステナイト温度域へ加熱し、CO、CO<sub>2</sub>などの混合ガス雰囲気中の炭素を鋼材へ侵入させ、被処理部品の表層を炭素0.8%程度（共析点近傍）へ増加させた後、焼入れする熱処理法である。図1に示すように前工程の歯車加工性と熱処理後の高強度化を両立した歯車のものづくりが可能である。

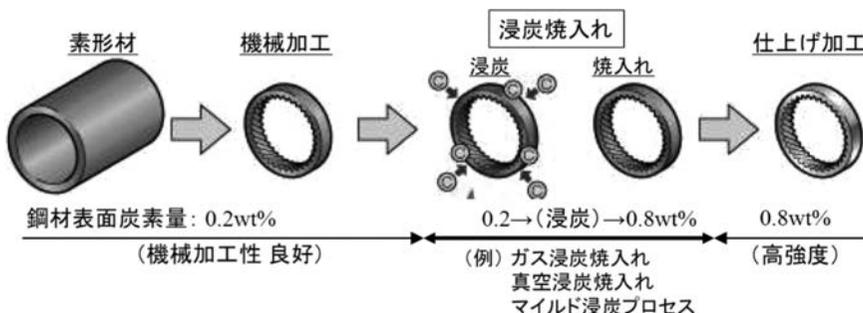


図 1 浸炭焼入れを含んだ歯車の製造工程イメージ

鋼材はクロムやモリブデン等が添加された合金鋼JIS SCR420、SCM420などの適用が一般的で、比較的緩速な焼入れでもマルテンサイト変態が成立するよう材料設計されている。これらの鋼材に焼鈍を施せば、歯車の冷間鍛造なども適用可能である。

浸炭焼入れは、部品を長時間高温中（950℃程度）に保持するため、結晶粒が粗大化し部品強度低下の恐れがある。そのため浸炭用鋼材には、結晶粒粗大化防止のため結晶ピン止めとなるAlNやTiN、NbCなどのピンニング粒子を微細分散させる配慮が必要である。またガス浸炭では、浸炭ガス中の酸素により鋼材に粒界酸化と浸炭異常層を発生させてしまう。これを低減するため酸化しやすい合金元素を低減し浸炭異常層をほとんど出さない特殊鋼が開発されている。またさらなる高強度化を求め、高温軟化抵抗を付与する特殊鋼など各種高強度鋼が開発されている。浸炭焼入れは、歯車の強度化・複雑化に応えるため、その適用が増大している。

#### d. 真空浸炭焼入れ

真空浸炭焼入れは、ガス浸炭では困難な狭い部分や細かい孔でも浸炭が可能で、炉からの放熱は少なく炎を伴った排気バントも無い。省エネルギーで環境にやさしい熱処理として、日本では1990年代後半から注目されてきた。真空浸炭の浸炭雰囲気中には酸素が含まれず粒界酸化や浸炭異常層の発生が無く、高強度化に有利である。反面、過剰浸炭によるセメンタイト析出抑制が課題となり、特に歯先に鋭角エッジを有した歯車への適用は注意を要する。環境負荷低減のため真空浸炭を比較的多く導入するヨーロッパでも、歯車への真空浸炭

の適用は多くはない。対策として真空浸炭用鋼が開発されている。例えば、大同特殊鋼DEG<sup>1)</sup>や新日鐵住金、愛知製鋼MSB20<sup>2)、3)</sup>は、鋼材中のSiを増量添加しCrを低減することで状態図中のセメンタイト生成領域を狭くし、歯先鋭角エッジなど過剰浸炭部でもセメンタイト析出を抑制できる。このように過剰浸炭の対策が確立されたとき、歯車への真空浸炭の普及が進むかもしれない。

#### e. マイルド浸炭プロセス

マイルド浸炭プロセス<sup>4)、5)</sup>とは、小型真空浸炭装置と高周波焼入れ装置からなり、バスケット積載した複数個の歯車を真空浸炭徐冷し歯車表層を傾斜炭素濃度分布化した後、歯車を一個流して高周波焼入れする熱処理で、アイシン・エイ・ダブリュ（株）（以下、アイシンAW）で2006年より量産化されている。

マイルド浸炭の最大の特徴は、バスケットに積載した複数個歯車の油焼入れではなく、歯車一個単位で水焼入れを適用したことで、安定した十分な急速冷却が可能となった。図2に歯車の高周波加熱と水焼入れの様子を示す。

歯車一個単位の急速冷却は、完全（100%炭素活用）なマルテンサイト変態と焼入歪バラツキ低減が両立しやすい。マイルド浸炭では、従来浸炭の浸炭濃度0.80%に比較し、0.65%程度の軽浸炭にしても、従来浸炭焼入れと同等以上の硬さと強度を得る。図3に歯車歯底の硬度分布と炭素濃度分布の対比例を示す。

この軽浸炭化により浸炭時間は大幅に低減し、セメンタイト析出も抑制しやすい。真空浸炭とその後の高周波焼入れによる再結晶を伴ったマイルド浸炭では、浸炭異常層も結晶粒粗大化も無い。

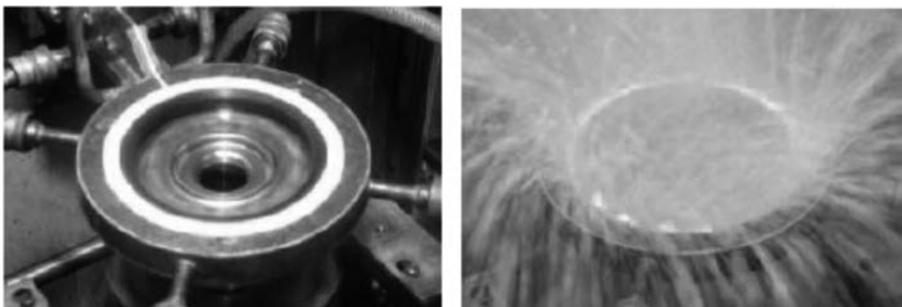


図 2 歯車の高周波加熱と水焼入れの様子<sup>6)</sup>

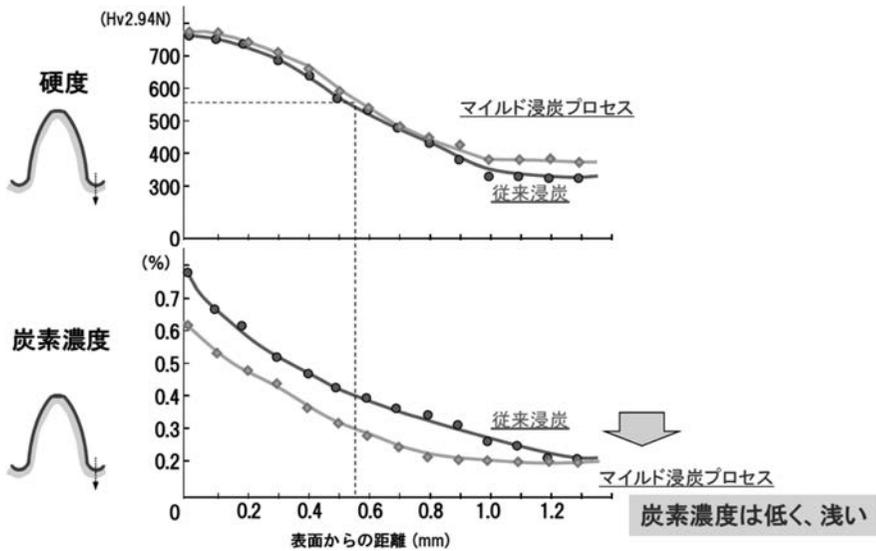


図 3 浸炭焼入れ歯車の硬度分布と炭素濃度分布例

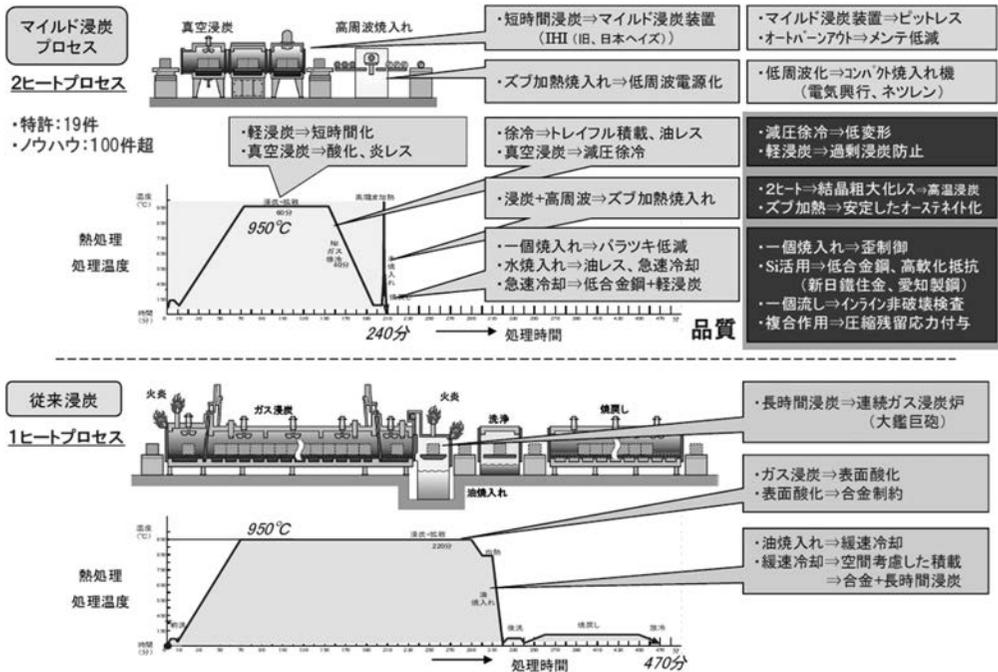


図 4 マイルド浸炭の概要とキー技術<sup>6)</sup>

適用鋼材は焼入れ性、耐酸化性、結晶粒粗大化防止などの制約が少なくシンプルな材料設計が可能となり、鋼材の低合金化が実現できる。マイルド浸炭用低合金鋼MSB20のMはマイルド浸炭のMであり、レアメタルMo、Crは添加不要となった。従来ガス浸炭焼入れ歯車に比較し疲労強度30%向

上、処理時間、CO<sub>2</sub>、スペースなどが約1/2となり、設置ラインに炎、油が無くなった。マイルド浸炭プロセスの概要とキー技術を図4に示す。

#### ◇ 歯車のもづくり変遷

冒頭記したように自動車用ATは、およそ半世

紀で2速ATから10速ATへ多段化し、自動車エンジンのトルクもおよそ100Nmから700Nmへ増大した。初期ATには熱処理リードタイムが短く環境負荷が低い炭素鋼の高周波焼入れ歯車が多く使われていた。その後、エンジントルクの増大により歯車の高強度化が必要となり、多くの歯車は合金鋼とガス浸炭焼入れへ代わっていった。一部の軽負荷で高精度が求められる歯車には軟窒化も採用されるようになった。高強度、高精度歯車には合金鋼、ホブ切り、シェーピング加工、ガス浸炭焼入れが適用され、軽負荷、高精度歯車には軟窒化が適用された。高周波焼入れを適用した歯車は減少した。

進化が進み、6速以上の多段ATでは、従来歯車より複雑で薄肉な形状が必要になり、さらなる高強度化も同時に求められた。浸炭焼入れ後に歯車仕上げ加工を追加したり、ショットピーニングを追加することにより高強度と高精度を確保した。鋼材に高強度特殊鋼が適用されるケースも出てきた。近年では、さらなる燃費向上を目的に、歯面に超仕上げ加工を追加し歯車伝達効率向上も計られている。

歯車のものづくりは、炭素鋼へホブ切り、高周波焼入れを施したシンプルなものから、合金鋼または高強度特殊鋼、ホブ切り、シェーピング加工、浸炭焼入れ、ショットピーニング、歯研、超仕上げ、のように高度化、複雑化し、歯車の強度は2倍以上、歯車精度バラツキは約1/2以下を達成したものの、工数とエネルギー消費は増大しCO<sub>2</sub>、レアメタルなど環境負荷も増大した。

近年、アイシンAWでは、マイルド浸炭プロセスを適用した歯車が增大している。また自動車メーカーを中心に、歯車への真空浸炭焼入れや窒化用鋼、制御窒化などの適用が試みられ、さらなる高強度化、高精度化とQCDES難課題の同時実現が取組まれる。図5にマイルド浸炭を適用したAT歯車を示す。

## むすび

歯車のものづくりは、鋼材、歯車加工、熱処理、仕上げ加工それぞれ技術改良や革新が進み、歯車の特性を大きく進化させてきた。もはや設計者が持っている設計標準によって最新歯車の設計図面を書くことはできない。歯車設計者と工程設計者、材料設計者が垣根を越えて技術間の擦りあわせと連携を持って取組むことが重要と考える。QCDES難課題の同時実現にはまだまだ多くの課題があるが、さらなる歯車とそのものづくりの進化を望む。

## 参考文献

- 1) 製品紹介：電気製鋼、79、No. 1、p. 83 (2008)
- 2) 宮西慶、小澤修司、久保田学、伊藤誠司、篠原光範、吉田卓：新日鐵住金技報、No. 406、p. 51 (2016)
- 3) 杉浦孝佳、佐藤裕和、安達裕司：愛知製鋼技報、Vol. 22、p. 19 (2016)
- 4) 大林巧治：日経Automotive Technology、11、p. 160 (2007)
- 5) 大林巧治、田口圭太：VDI-Berichte、2108、1、p. 349 (2010)
- 6) 大林、熱処理：vol. 54、3、p. 110 (2014)
- 7) <https://tv-aichi.co.jp/koujou2/archive/171111>、「工場へ行こうPART II」

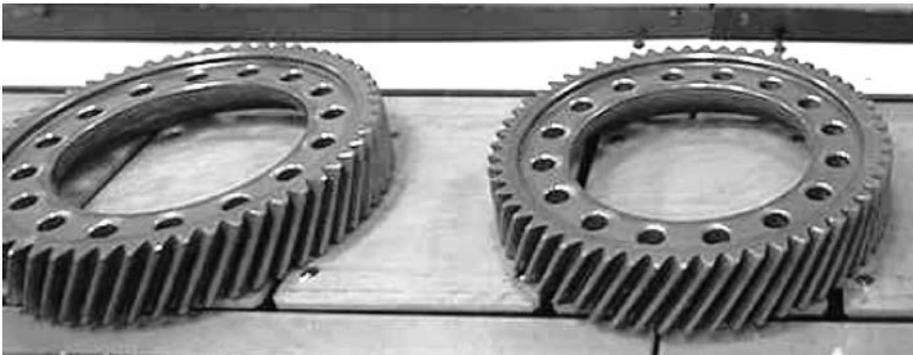


図 5 マイルド浸炭を適用したAT歯車<sup>7)</sup>

### 3. 表面硬化熱処理用鋼の研究開発動向と将来

大同特殊鋼(株) 技術開発研究所 いの うえ けい すけ  
 構造材料第二研究室 室長 **井上圭介**

#### まえがき

表面硬化熱処理は、疲労強度や耐摩耗性などの機能を高める目的で鋼材の表面に硬質な層を形成させるものであり、主なものとして浸炭<sup>1)</sup>、窒化<sup>2)</sup>、高周波焼入れ<sup>3)</sup>が挙げられる。表1に示すように処理条件や得られる特性が異なるため、各種表面熱処理の特徴を理解し適切な材料を選定しないと所望する特性を得ることは難しい。

本稿では、拡散浸透型表面熱処理で代表的な浸炭、窒化・軟窒化、浸窒焼入れを中心に、特徴と熱処理および鋼材の研究動向について事例を交えて紹介する。

#### ◇ 表面硬化処理の分類と主な特徴

表1に示すように表面硬化熱処理の種類は多岐にわたり、目的とする特性に合わせて処理方法と材料が選択される。ここでは各処理の特徴について概説する。詳細は後述する。

浸炭焼入れ、窒化・軟窒化、浸窒焼入れは、浸炭もしくは窒化雰囲気中で鋼材を加熱し、鋼材表面から炭素もしくは窒素を表面近傍に拡散させた後に冷却する熱処理であり、炭素もしくは窒素と親和性の高い合金元素を含有する肌焼鋼や窒化鋼が使用される。代表的としては、浸炭用にはJIS-SCr420やSCM420、窒化用にはJIS-SACM645がある<sup>4)</sup>。

どの熱処理を適用するか検討する際には、必要な硬さ（表面硬さおよび硬化深さ）や熱処理歪を考慮しなくてはならない。まず、処理温度は金属組織および熱処理歪に対して重要な因子である。浸炭、高周波焼入れ、浸窒焼入れはオーステナイト( $\gamma$ )温度域で行われる処理であり、オーステナイト相から急冷してマルテンサイト組織を得ることによって硬化させる処理である。一方、窒化・軟窒化は $A_1$ 点以下のフェライト( $\alpha$ )温度域での処理であり、マルテンサイト変態を伴わない点が大きな相違点である。このため、窒化・軟窒化処理では処理温度が低い上、変態に起因する寸法変化がなく、浸炭や高周波焼入れに比べて変形・変寸を小さくすることが可能である。

次に、代表的な鋼種に工業的に一般的に行われる処理条件で処理した部材の断面分布の一例を図1に示す。表面硬さに関しては、窒化・軟窒化>浸炭≒浸窒焼入れ>高周波焼入れの順である。窒化・軟窒化では、浸入した窒素が鋼中に含まれる窒化物形成元素(Cr, Al, Mo, Vなど)と硬質な窒化物を形成し硬化する。このためこれら元素の含有量により表面硬さは大きく変わるが、約1%のAlを含有するSACM645においては1,000HVを超える硬さを得ることもできる。次いで硬さの得られる浸炭や浸窒焼入れにおいては、CやNを浸入させた後に焼入れることで、高炭素もしくは高窒素

表 1 代表的な表面硬化熱処理とその特徴

名称	処理方法	使用鋼材 <sup>4)</sup>	処理温度	表面硬さ	硬化深さ
浸炭焼入れ	固形浸炭剤 ガス(常圧/減圧) 塩浴	肌焼鋼	750℃～ ( $\gamma$ 域)	700～800HV	深い
浸窒焼入れ	ガス				
窒化・軟窒化	ガス 塩浴	窒化鋼	400～600℃ ( $\alpha$ 域)	最大≥1,000HV	浅い
浸硫	塩浴				
高周波焼入れ 火炎焼入れ	誘導装置 火炎	中炭素鋼	850℃～ ( $\gamma$ 域)	600～750HV	最も深い

マルテンサイトにより硬化させる処理である。浸炭の場合は約0.8%C、浸窒の場合は約1.2%Nで最高硬さとなり、およそ700~800HVの表面硬さが得られる。最後に、高周波焼入れはCやNを表面から浸入させない処理であり、得られる最高硬さは素材のC量で決定される。従って、高C鋼を適用すれば得られる硬さを高くできるが、高C鋼ほど焼割れを発生する危険性が高くなることや鍛造や切削などの加工性が劣化するため、一般には0.55%C程度までの鋼材が適用される。

硬化層深さは、高周波焼入れ>浸炭>浸窒焼入れ>窒化・軟窒化の順であり、高周波焼入れは加熱条件を調整することによって広範囲の硬化層を得ることができる。一方、CやNを浸入拡散させる

処理の硬化深さは、浸入させる元素の拡散速度の影響を強く受ける。つまり、処理温度の高い浸炭や浸窒焼入れの方が窒化・軟窒化よりも硬化深さは深くなる。

#### ◇ 浸炭焼入れの基礎と最新動向

浸炭焼入れは、 $A_{C3}$ 変態点以上の高温雰囲気（通常 $\geq 900^{\circ}\text{C}$ ）で鋼の表面に化学反応によりCを浸透拡散させた後、焼入れにより表層を硬化する熱処理であり、焼入れ後は通常 $\leq 200^{\circ}\text{C}$ の低温焼戻しが施される。表層部のみ高Cで硬くなり、内部は低Cで軟らかく韌性に富む特徴を有し、歯車のような繰り返し接触を受ける部品に広く適用されている。

表1に示したように浸炭にも様々な手法が存在するが工業的に最も普及しているのはガス浸炭であり、現在までに多くのガス浸炭に適した材料が研究開発されてきた。一方、2000年前後から環境面や品質面の改善を目的として導入が始まった減圧（真空）浸炭に関しては、2000年以降活発に研究開発がなされており、浸炭機構の解明、その機構に基づいた浸炭レシピ計算ソフトや真空浸炭用鋼の発明などがなされ、工業的にも真空浸炭技術の導入が活発に検討されている。本節では、従来技術としてガス浸炭の基礎を振りかえった上で、最近の研究開発事例として真空浸炭に適した鋼材について概説する。

#### 1. ガス浸炭の基本

表2にガス浸炭および真空浸炭の処理条件の主

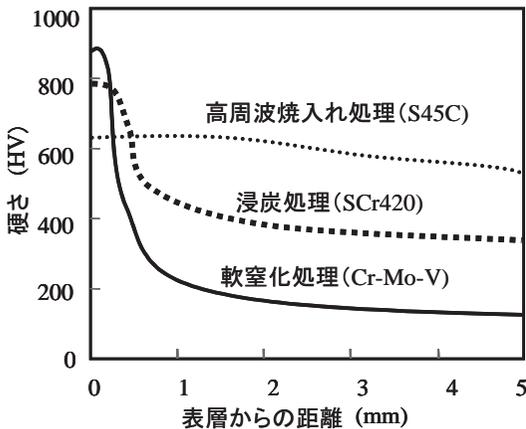
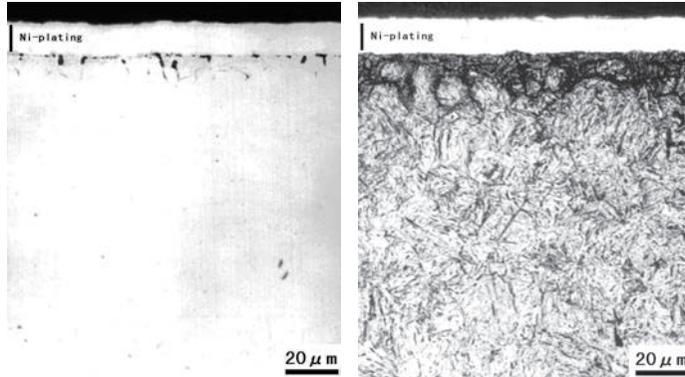


図 1 表面硬化処理材の断面硬さ分布

表 2 ガス浸炭と真空浸炭の比較

比較項目	ガス浸炭	真空浸炭（減圧浸炭）
使用ガス	プロパン ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) → 搬送ガス ( $\text{CO}$ 等)	炭化水素ガス [アセチレン ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ), プロパン ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) 等]
処理圧	大気圧	1/100気圧
制御	一定ガス流量 ( $\text{CO}$ , $\text{CO}_2$ 濃度)	流量制御（パルス浸炭）
浸炭機構	平衡反応（浸炭・脱炭反応が同時に進行） $\text{Fe} + 2\text{CO} \rightleftharpoons [\text{Fe} + \text{C}] + \text{CO}_2$	非平衡反応（浸炭反応のみ進行） $2\text{Fe} + \text{C}_2\text{H}_2 \rightarrow 2 [\text{Fe} + \text{C}] + \text{H}_2$
		Feの触媒作用によりアセチレンが分解



(a) 粒界酸化 (b) 不完全焼入れ層

図 2 ガス浸炭後の断面組織の観察例 (SCr420)

な違いを比較して示す。

ガス浸炭はプロパンやブタンなどのガスを主原料とし、次に示すブドア (Boudouard) 反応により鋼材に炭素が供給される<sup>1)</sup>。 $2CO \rightleftharpoons [C] + CO_2$

図2にJIS-SCr420ガス浸炭材の断面表層部の組織を示す。図2 (a) のノーエッチ写真に示すように、ガス浸炭においては浸炭雰囲気中に酸素が存在することに起因し処理材の最表層部には結晶粒界に沿って酸化物が形成する。この酸化物中にはSi、Cr、Mn等の合金元素が取り込まれ<sup>5)</sup> 粒界酸化物周辺の焼入性が低下する結果、図2 (b) の最表層部の黒色組織のようにマルテンサイトが得られない、いわゆる不完全焼入れ層が表層から数十μmの範囲に形成し強度低下の要因となるので注意が必要である。ガス浸炭用には一般的には、JIS-SCr420に代表されるような0.2%C前後の機械構造用鋼<sup>4)</sup> が用いられるが、特に強度が必要とされる用途に関しては、粒界酸化が抑制可能な高疲労強度鋼<sup>6)</sup> や歯車の歯面ピッチング強度を高められる鋼材<sup>7)</sup> など多く開発されている<sup>8)</sup>。

## 2. 最近の研究事例

### 2.1. 真空浸炭用鋼

真空浸炭はガス浸炭対比、生産中のCO<sub>2</sub>排出量が大幅に少ないため環境面で普及が期待される一方、炭素濃度が表面形状の影響を受け易いため期待される強度が得られないという課題がある。例えば歯車の歯面部を適正な炭素濃度とすると歯端のエッジ部は炭素濃度より高い、いわゆる過剰浸炭された状態となり、エッジ部の強度が低下する<sup>9)、10)</sup> ことが知られている。

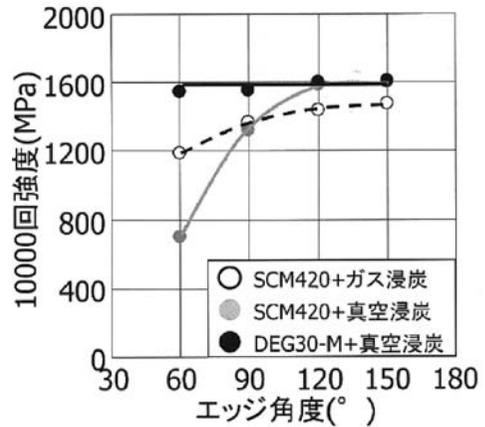


図 3 エッジ角度と疲労強度の関係

現在では、真空浸炭機構およびエッジ過剰浸炭発生機構の解明が進み<sup>11)</sup>、上記の課題を解決可能な真空浸炭用鋼が開発されている<sup>12)</sup>。図3に真空浸炭処理したJIS-SCM420および真空浸炭用鋼 (DEG30-M) の疲労強度をSCM420ガス浸炭材と合わせて示す。共に平面部の炭素濃度を0.8%前後になるように真空浸炭を行い疲労試験に供した結果、SCM420ではエッジ部が過剰浸炭し、エッジ角度が鋭角な場合においてガス浸炭よりも強度が低下している。一方、DEG30-Mにおいては強度低下がなく真空浸炭のメリットである粒界酸化抑制の効果を発現できるためガス浸炭材対比強度向上が可能である。

### 2.2. 高温浸炭用鋼

浸炭は高温で長時間を要する熱処理であるため、

省エネルギー化のみならずタクトタイム短縮のための短時間化要求が強い。高温ほど炭素の拡散速度は速く、例えば1020℃では920℃の3倍になるため浸炭時間を短縮できるがオーステナイト結晶粒の異常成長が発生する可能性がある。異常粒成長は部材の強度特性<sup>13)</sup>や歪を劣化させる要因とされている真空浸炭はコールドウォールで構成されているため、ガス浸炭に比べ高温浸炭に適した熱処理と言えるが、そのポテンシャルを発揮するためには異常粒成長の抑制が必要である。

鋼材中に結晶粒の成長を妨げる目的で、微細なピン止め粒子を多数分散させることは異常粒成長を抑制するきわめて有効な手段であり従来より多くの研究がなされている。代表的なピン止め粒子は、AIN、Nb (C, N)<sup>14)~16)</sup>、TiC<sup>17)、18)</sup>が挙げられ、ピン止め粒子の増加により異常粒成長が発生する温度を高めることが可能である。

ただし、ピン止め粒子鋼においても、極めて高い温度や長時間といった厳しい条件においては、いずれ異常粒成長が発生すると考えられる。そこで、ピン止め粒子をあえて分散させないことで、浸炭時にオーステナイト粒を均一に成長させ、異常粒成長の発生を抑制する肌焼鋼が提案されている<sup>19)</sup>。中山らは、従来鋼としてAINを分散させた鋼 (AIN鋼) とAINの析出を抑えた鋼 (AIN無鋼) の結晶粒成長特性を調査している。その結果が図4であり、AIN鋼は1,273K (1000℃) で異常粒成

長発生するのに対して、AIN無鋼は平均結晶粒度は小さいものの1,327K (1100℃) でも異常粒成長は認められなかったと報告している。さらに、本材料は平均結晶粒径が大きくなることから焼入性が向上し省合金化が図れることや低サイクル疲労強度が向上するとも報告している。

## ◇ 窒化・軟窒化の基礎と最新動向

### 1. 窒化・軟窒化の基礎

工業的には塩浴軟窒化 (タフトライド)、ガス軟窒化、ガス窒化、イオン窒化処理などが用いられている<sup>20)~24)</sup>。ガス窒化処理の場合、NH<sub>3</sub>気流中で鋼を500~580℃の温度域で加熱保持すると、鋼の表面に接触したNH<sub>3</sub>から解離した活性窒素[N]が鋼の表面に吸着、内部に拡散し、Feや鋼中に存在するCr、Alなどの窒化物形成性元素と結合して窒化物を生成し、鋼材の表面から化合物層および拡散相を形成し硬化する。浸炭と比べ、処理温度が低いいため深くまで硬化させるには長時間を要すが、特に高い表面硬さを必要とする場合や熱処理歪を嫌う部品の硬化処理として有効であり、低歪みと優れた耐磨耗性が得られる特徴を活かし、歯車、クランクシャフト、シャフト部品などに適用される他、工具・金型などにも適用されている。

窒化硬さを高めるためには、Al、Cr、V、Moなどの窒化物形成元素を鋼材に添加するのが有効である。窒化・軟窒化鋼を成分の観点から分類する

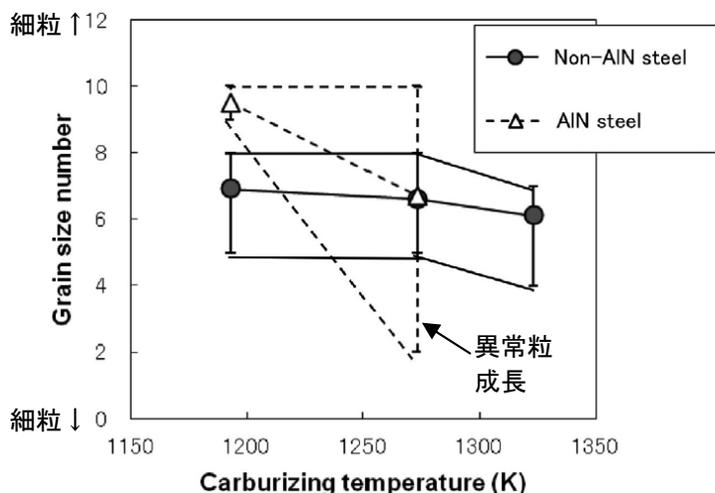


図 4 AIN鋼およびAIN無鋼の粗大化特性

表 3 窒化鋼の成分規格

区分	鋼種名 (規格)	化学成分 (mass%)							
		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Al	V
Cr-Mo系	31CrMo12 (DIN)	0.28 ~0.35	0.15 ~0.40	0.40 ~0.70	<0.30	2.80 ~3.30	0.30 ~0.50	—	—
	722M24 (BS)	0.20 ~0.28	0.10 ~0.35	0.40 ~0.70	<0.40	3.00 ~3.50	0.45 ~0.65	—	—
Cr-Mo-Al系	SACM645 (JIS)	0.40 ~0.50	0.15 ~0.50	≤0.60	≤0.25	1.30 ~1.70	0.15 ~0.30	0.70 ~1.30	—
	SACM645 (JIS)	0.40 ~0.50	0.15 ~0.50	≤0.60	≤0.25	1.30 ~1.70	0.15 ~0.30	0.70 ~1.30	—
	34CrAlMo5 (DIN)	0.30 ~0.37	0.20 ~0.50	0.50 ~0.80	<0.20	1.00 ~1.30	0.15 ~0.25	0.80 ~1.20	—
	41CrAlMo7 (DIN)	0.38 ~0.45	0.20 ~0.50	0.50 ~0.80	<0.20	1.50 ~1.80	0.25 ~0.40	0.80 ~1.20	—
	905M31 (BS)	0.27 ~0.35	0.10 ~0.45	0.40 ~0.65	<0.40	1.40 ~1.80	0.15 ~0.25	0.90 ~1.30	—
	905M39 (BS)	0.35 ~0.43	0.10 ~0.45	0.40 ~0.65	<0.40	1.40 ~1.80	0.15 ~0.25	0.90 ~1.30	—
	6467G (ASM)	0.38 ~0.43	0.20 ~0.40	0.50 ~0.80	<0.25	1.40 ~1.80	0.30 ~0.40	0.95 ~1.30	—
Cr-Mo-V系	39CrMoV139 (DIN)	0.35 ~0.42	0.15 ~0.40	0.40 ~0.70	<0.20	3.00 ~3.50	0.80 ~1.10	—	0.15 ~0.25
	897M39 (BS)	0.35 ~0.43	0.10 ~0.35	0.40 ~0.70	<0.40	3.00 ~3.50	0.80 ~1.10	—	0.15 ~0.25
Cr-Al系	34CrAlS5 (DIN)	0.30 ~0.37	0.15 ~0.40	0.60 ~0.90	<0.20	1.00 ~1.30	—	0.80 ~1.20	—
Cr-Al-Ni系	34CrAlNi7	0.30 ~0.37	0.15 ~0.40	0.40 ~0.70	0.85 ~1.15	1.50 ~1.80	0.15 ~0.25	0.80 ~1.20	—

と、表3に示すようにCr-Mo系、Cr-Mo-Al系、Cr-Mo-V系、Cr-Al系、Cr-Ni-Al系の5種類に大別される<sup>8)</sup>。JISにはSACM645の一鋼種しか規格化されていないが、海外規格鋼や各種開発鋼から鋼材を選択することも可能である<sup>25)~28)</sup>。

## 2. 最近の研究事例

窒化鋼の強度は硬さだけでなく、化合物層の相(構造)によっても変化するため、化合物層の相制御は強度制御の有効な手段となる。

従来のはガス窒化は炉内残留NH<sub>3</sub>量で制御しているが、近年では水素センサーを用いて炉内のH<sub>2</sub>量を測定することによって窒化ポテンシャルを制御する技術が開発されている。具体的には、窒化ポテンシャル図(レーラー図)<sup>29)</sup>を用いて制御される。一般に窒化処理を行う温度域では、窒化ポテンシャルが高くなるとα相よりもγ'(Fe<sub>4</sub>N)相が安定となり、さらに窒化ポテンシャルを高めるとε(Fe<sub>2-3</sub>N)相が生成する。一方、窒化ポテンシャルを低く制御することにより、化合物層を生成さ

せないことも可能となる。

平岡らの研究によると、SCM435鋼に窒化した場合の疲労強度は、化合物層を形成した方が疲労限強度が高く、かつ化合物層はε層よりもγ'相を選択する方が疲労限強度が高い結果が得られており、化合物層の相制御の有効性を示唆している<sup>30)</sup>。

### ◇ 浸窒焼入れ

浸窒焼入れ処理とはFe-N二元系のA<sub>1</sub>点(863K)以上の温度域でオーステナイト相を表層部で得た後、焼入れて窒素マルテンサイトを生成させる表面硬化法である。浸窒焼入れ処理法の特徴としては浸炭(900~1050℃)に比べ低温で処理可能<sup>31)</sup>なことから熱処理ひずみが小さい<sup>32)</sup>。また、通常の窒化(500~600℃)に比べると処理温度が高いことから、処理時間が短くすることができることが期待され近年研究が進んでいるが、浸炭に比べ浸窒焼入れは現時点では研究が少ないことから不明点はまだ多い。今後の研究の進歩が期待される。

## むすび

表面硬化処理は、合金コスト、加工性など経済性に優れた高強度部材を製造可能な重要プロセスであり、製造プロセスとしての工業的価値は極めて高く益々の発展が期待される。今後、自動車をはじめ機械部品の一層の高機能化や製造コスト低減ニーズに応えるためには、各熱処理の硬化機構や特徴をよく理解する必要があるため、本稿では、一部の主要表面処理に関するの基本から最近の開発事例について概説した。詳しく知りたい方は、西山記念技術講座（日本鉄鋼協会主催）<sup>8)</sup>、<sup>32)</sup>や引用文献を参照していただきたい。

## 参考文献

- 1) 例えば 内藤武志：浸炭焼入れの実際 第2版、日刊工業新聞社、(1999)
- 2) 例えば (社) 金属表面処理技術協会：金属表面処理技術便覧、(1981)、1124
- 3) 例えば (社) 日本熱処理技術協会：熱処理技術便覧、日刊工業新聞社、(2000)、788
- 4) JIS G4053、機械構造用合金鋼鋼材 (2008)
- 5) 並木邦夫：博士論文
- 6) 磯川憲二、並木邦夫：電気製鋼、57 (1986)、13
- 7) 羽生田智紀、中村貞行：電気製鋼、71 (2000)、59
- 8) 紅林豊：第188・189回西山記念技術講座、日本鉄鋼協会、(2006)
- 9) 森田敏之、梅本実：鉄と鋼、96 (2010)、400
- 10) 森田敏之、松村康志、梅本実：電気製鋼、79 (2008)、15
- 11) 森田敏之、羽生田智紀：鉄と鋼、92 (2006)、268
- 12) 製品紹介、電気製鋼、79 (2008)、83
- 13) 瓜田龍実、並木邦夫、飲久保知人：電気製鋼、59 (1988)、33
- 14) 紅林豊、中村貞行：電気製鋼、65 (1994)、67
- 15) 久保田学、越智達朗：新日鉄技報、378 (2003)、72
- 16) 村上俊夫、畑野等、家口浩：神戸製鋼技報、56 (2006)、59
- 17) 井口誠、長岡享、小林一博：山陽特殊製鋼技報、6 (1999)、41
- 18) 岡本成朗、新堂陽介、永濱睦久：神戸製鋼技報、61 (2011)、66
- 19) 中山恭平、宮崎貴大、井上圭介：電気製鋼、85 (2014)、133
- 20) 高田勝典：特殊鋼、41 (1992)、7
- 21) 本間利彦：特殊鋼、41 (1992)、34
- 22) 川村敏行：特殊鋼、41 (1992)、38
- 23) 長田幸雄：特殊鋼、41 (1992)、42
- 24) 別府正昭：特殊鋼、41 (1992)、46
- 25) 三野匡之：住友金属、45 (1993)、123
- 26) 小林一博、細田賢一、坪田一一、有見幸夫、山岡孝：山陽特殊製鋼技報、1 (1994) 19
- 27) 井上圭介、紅林豊：熱処理技術協会講演大会概要集、50 (2000)、45
- 28) 大同特殊鋼：電気製鋼、75 (2004)、69
- 29) E. Lehrer：Z. Electrochem.、36 (1930)、383
- 30) 平岡泰：熱処理、57、(2017)、64
- 31) 築山訓明：学位論文、九州大学学術情報リポジトリ (2014)
- 32) 奥宮正洋、稲葉孝二郎、藤田理：工業加熱、51 (2014)、2
- 33) 井上圭介：第235・236回西山記念技術講座、日本鉄鋼協会 (2018)

# Ⅲ. 歯車の加工技術

## 1. 鍛造成形

トヨタ自動車(株) 先進技術開発カンパニー 森 下 弘 一  
先進生産技術部 開発技術室 主査

### まえがき

鍛造成形は、材料を金型に押し当てたり、押し込んだりして形状を付与する加工方法であり、切削加工や研削加工などの後仕上げ加工を前提とした素形材加工に分類されている。しかし近年、材料や鍛造工法、金型、設備、熱処理などの高度化により、後仕上げ加工を省略、或いは簡略化できるネットシェイプ化、ニヤネットシェイプ化技術が進歩している。ネットシェイプ化、ニヤネットシェイプ化は製造コストの削減だけでなく、製品品質向上、製造エネルギー削減、生産リードタイム短縮にも貢献できる合理的な工法である。歯車の鍛造成形の歴史としては、1980年代に量産化した自動車用差動ギヤのかさ歯車を始めとし、現代ではすぐば歯車やはすば歯車など数多くの歯車部品がネットシェイプ加工されている。

### ◇ 歯車鍛造の加工事例

#### 1. 組合せ鍛造

素形材加工からネットシェイプ加工へと進歩した代表的な歯車部品として、前述した差動ギヤ(かさ歯車)がある。従来は、熱間鍛造または冷間鍛造でかさ歯車部外形に相当する円錐形状に加工し、歯車部と輪郭部は切削加工で仕上げていたが、熱間鍛造と冷間鍛造(コイニング)の組み合わせ鍛造技術の開発によって歯車部を切削加工なしで仕上げることができるようになった。その後、鍛造工程の合理化(工程短縮)を狙いとして冷間閉塞鍛造技術が開発され、一層生産効率の良い鍛造工法を実現した<sup>1)</sup>。

また、自動車の後退時に使用される歯車部品であるギヤ・リバース・アイドラは歯先にチャンファを、走行中のギヤ抜け防止のために歯側面に微



図 1 スプロケット

小な逆勾配を有しているが、この製品の平歯車部とチャンファ部を熱間鍛造と冷間しごき加工の組合せ鍛造でネットシェイプ加工している<sup>2)</sup>。さらに、四輪駆動車用トランスファ装置の中に、チェーンを噛み合わせて動力を伝えるスプロケットを有する部品があるが、このスプロケット部を熱間鍛造でおおよその形状に加工し、冷間しごき加工で精度を確保してネットシェイプを実現している。単純な冷間しごき加工では精度確保が困難なため、スプロケット部を上下から金型で挟み込んで一定の圧力で保持しながらしごき加工を行っている。図1にスプロケットの製品を示す<sup>3)</sup>。

#### 2. 冷間鍛造

冷間鍛造は熱間鍛造に比べて高精度化が可能であるが、金型や鍛造機械に大きな負荷が掛かるため、より高度な工程設計、工具設計、設備設計が必要である。

四輪駆動車用トランスファ装置の差動部に使用されるギヤ・プラネタリ・リングは、従来スプライン部と円盤状カバー部分との二部品をそれぞれ切削加工しスナップリングで締結していたが、鍛造工法に加えて材料・熱処理方法を改善し、部品

の一体化とともに内すば歯車のネットシェイプ化を実現している。図2にギヤ・プラネタリ・リングの製品を示す。材料は精度と強度の両立を考えて開発したガス軟窒化用鋼を用い、熱間鍛造、恒温焼なまし（IA）処理を行い、切削加工、潤滑処理を施して、冷間鍛造で内すば歯車を成形する。熱処理はガス軟窒化処理を行っている<sup>4)</sup>。

また、外はすば歯車部品の鍛造方法として、軸が長いシャフト形状のものには押出し成形が、平たいギヤ形状のものは密閉鍛造や閉塞鍛造が用いられる。

自動車用ラックアンドピニオン式ステアリングに使用されているステアリングピニオンはシャフト形状なので、冷間押し出し成形によって外はすば歯車部のネットシェイプ化を実現している<sup>5)</sup>。冷間で鍛造成形すると材料とダイとの接触面圧が大きく、製品の表面粗さが良好になるので、ステアリングの操舵感が研削加工品並みに向上する。近年では、サーボプレスを用いて加工速度を制御することにより、製品や金型への熱影響を鍛造加工の途中で安定化させることができるようになった。その結果、メカニカルプレスに比べて歯すじ誤差が大幅に向上している<sup>6)</sup>。サーボプレスの長所は、加工速度や加工位置を任意に設定することができたり、プレス下死点での位置制御が優れているところなどであり、製品精度向上、加工限界向上、生産性向上などに大きく貢献している。

さらに、金型の弾性変形を利用する冷間鍛造法で外はすば歯車の加工に加えクラウニング形状まで付与することが可能などところまで開発が進んできている<sup>7)</sup>。

### 3. 新加工法

近年では逐次成形や他の加工技術との融合などさまざまな新加工法が提案され、歯車鍛造の対象部品が徐々に拡大している。

たとえば、ラックアンドピニオン式ステアリングのラックバーの直歯部を中空部材を用いて冷間逐次成形している事例がある。歯形部を成形する前に中空部材の一部を平潰した後、平らな面にギヤ形状を付与した金型を押し当て、パイプ内にマンドレルを繰り返し挿入しながら金型との隙間を埋めるように材料を変形させて歯形部を成形する。この技術により、従来の中実ラックバーに対して40%程度の軽量化が可能になっている<sup>8)</sup>。

また、より複雑形状で高精度な外はすば歯車部品のネットシェイプ化技術として、合金設計の自由度や高い寸法精度を有する粉末冶金と高い生産性や優れた機械的特性を持つ冷間鍛造の特徴を融合した焼結冷間鍛造技術の開発が行われている。この技術は、サーボプレスを組み合わせることによって加工形状の自由度が一層拡大しており、大きな外径の外はすば歯車の成形が可能である。図3に製品を示す<sup>9)</sup>。

#### ◇ 歯車鍛造における被加工材料、金型材料への期待

##### 1. 被加工材料

熱間鍛造では使用される材料は特に制約はないが、冷間鍛造は材料の変形能（延性、割れにくさ）が大幅に低減し変形抵抗が高くなるので、材料選定に制限がある。低炭素鋼や肌焼鋼（0.1~0.3% C）を用いて冷間鍛造で歯車を成形する場合は、鍛造

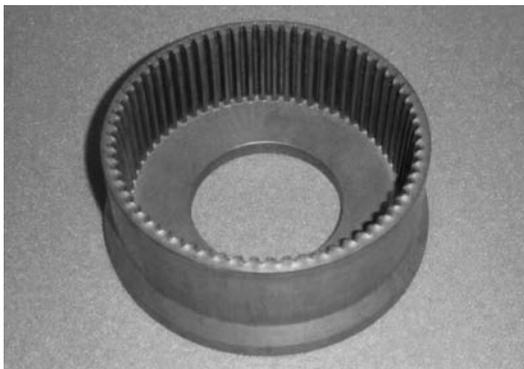


図 2 ギヤ・プラネタリ・リング



図 3 焼結冷間鍛造による外はすば歯車部品

前に球状化焼なましを施して軟質化することが一般的である。また、いくつかの工程に分けて鍛造する際には、各工程での加工硬化を緩和するための軟質化やひずみ除去のために、鍛造工程間において焼なましを実施するが、コストが掛かってしまう。その対策として近年の歯車鍛造用材料では、鍛造工程の短縮、または熱処理工程の省略を狙った材料開発が進められている<sup>10)、11)</sup>。

今後の材料開発の方向性に期待するところとしては、はずば歯車のような複雑形状の歯車鍛造の可能性を拡大させるために、鍛造成形時には変形抵抗が小さく、熱処理後にはより高強度でより精度バラツキが小さい材料の開発を期待する。

## 2. 金型材料、及び表面処理

鍛造用金型材料は、熱間鍛造用にはSKD61が、冷間鍛造用にはSKD11が多く使用されている。近年は歯車のような複雑形状部品に対応するために、じん性を改善したマトリックスハイスや粉末ハイスの適用が拡大している。さらに、冷間鍛造では耐摩耗性を重視して超硬合金を使用することも多い<sup>12)、13)</sup>。また、金型寿命向上の観点から表面処理の使用も拡大している。熱間鍛造用金型には高温域で耐摩耗性が高い窒化処理が、冷間鍛造用金型には摩擦係数を低減する目的でCVD処理やPVD処理が適用されている。近年は表面処理前後の寸法変化が小さいPVD処理が多く用いられるようになってきている。

今後、より複雑な形状の歯車部品を適正なコストで鍛造成形するには金型寿命の向上が不可欠である。そのためには、金型材料では表面は硬度が高く内部は剛性・靱性が高い傾斜機能金型の実現が期待される。また表面処理では、耐摩耗性に優れ、且つ金型母材との密着強度が優れたものが開発されることを期待している。

## むすび

最近の研究で歯車の鍛造成形技術の高度化のた

めに重点的に取り組まれているのが、いかに加工圧力を低減して金型や設備に対する機械的負荷を小さくするかということである。そのために有効な方法として「分流鍛造」が挙げられる。分流鍛造は、第一段階で密閉方式により可能な限り加圧し、第二段階で逃がし穴あるいは捨て軸を利用して材料を内外に分流させて充填性を向上させる加工法である<sup>14)</sup>。この加工法はずいぶん以前からその効果を謳われていたが、金型や設備の動作追従性が不十分でなかなか拡大していかなかった、ところが、近年前述した鍛造プレスのサーボ化によって金型動作や加工速度を自由に操ることができるようになり、分流鍛造の効果を思う存分発揮できるようになってきた<sup>15)~17)</sup>。

鍛造成形しやすい材料と歯車加工に適した鍛造工法、その工法を実現するサーボプレスの三位一体の取り組みを進めていけば、歯車の鍛造成形には明るい未来が待っていると確信している。

## 参考文献

- 1) 石川 博：第255回塑性加工シンポジウム、(2007)、41-46
- 2) 長谷川平一：第227回塑性加工シンポジウム、(2004)、11-18
- 3) 三瓶勝巳：日本塑性加工学会鍛造分科会 第27回鍛造実務講座、(2000)、21-30
- 4) 森下弘一：第294回塑性加工シンポジウム、(2012)、11-18
- 5) 石川 博：第227回塑性加工シンポジウム、(2004)、19-24
- 6) 安藤弘行：日本塑性加工学会鍛造分科会 第38回鍛造実務講座、(2011)、57-63
- 7) 石田 均：プレス技術、49-3、(2011)、46-50
- 8) 川寄一博・山脇 崇・生田文昭：素形材、53-3、(2012)、2-7
- 9) 有馬達男・小比田智之：プレス技術、49-3、(2011)、51-55
- 10) 越智達朗・齋藤 肇：日本塑性加工学会鍛造分科会 第35回実務講座、(2008)、7-11
- 11) 加田 修・門田 淳：プレス技術、52-7 (2014)、48-51
- 12) 加田善裕：素形材、51、(2010)、23-27
- 13) 福元志保・小畑克洋：塑性と加工、54-630、(2013)、2-6
- 14) 近藤一義：日本塑性加工学会鍛造分科会 第27回鍛造実務講座、(2000)、1-8
- 15) 中島将木・新井慎二：プレス技術、52-7 (2014)、56-59
- 16) 安藤弘行：プレス技術、54-8、2016、20-24
- 17) 有馬達男：プレス技術、54-8、2016、34-38

## 2. 切削加工

三菱マテリアル(株) 明石製作所 工場のけんすけ  
精密工具製造部 開発設計グループGL 河野賢祐

### まえがき

2010年以降、地域的な格差はあるものの世界の自動車生産台数は中国・米国の二大市場の堅調と、インド等の新興国やアジア地域での販売増が世界市場を牽引し、順調な拡大を続けている。

一方、温室効果ガス排出量削減のために各国地域での燃費規制・排ガス規制が強化される方向であり、厳しい環境規制に対応するべく自動車の原動機、変速機の構造は大きく変わろうとしている。

日本国内では、2017年実績でHV（ハイブリッド自動車）を中心とする次世代自動車が乗用車の新車販売台数に占める割合は35%を超え、さらに2030年には50%以上とする普及目標が掲げられており、今後もHVを中心に環境対応が進められる予定である。

それに対し、中国、米国、欧州、インドではいずれも2040年までにガソリン車、ディーゼル車の販売を禁止もしくは廃止する方針が打ち出されており、日本以外の主要国ではEV（電気自動車）やPHV（プラグインハイブリッド自動車）への急激な移行が予想されている。

EV化により自動車の原動機が電動化された場合、従来のような幅広い速度比を有する変速機構は不要となるが、その代わりにすべての速度域で最適な効率と十分なトルクを得られるモーター回

転数を維持するための減速機構が必要となる。

この場合、自動車に使用される歯車の総数は減少するが、その状況にあっても現在のステップAT（自動変速トランスミッション）やCVT（連続可変トランスミッション）で使われている遊星歯車機構はその特徴と優位性から引き続き使用されるものと思われる。

原動機がエンジンからモーターへ変わって静かになると、それに連結される減速機構にはより一層の静粛性が必要となり、そのため使用される歯車にはさらなる高精度化が要求される。

今回、この遊星歯車機構で最も加工が難しい遊星歯車リングギヤ（ヘリカル内歯車）の代表的な加工方法である大径ヘリカルブローチ加工（写真1参照）と新しい加工方法として近年注目されているスカイピング加工について、その現状と今後の展望について報告したい。

### ◇ 大径ヘリカルブローチ加工

大径ヘリカルブローチ加工は遊星歯車リングギヤ（ヘリカル内歯車）をワンストロークで歯切り加工する切削方法であり、切削速度は3～10m/minと低いが加工時間は10数秒程度と非常に短く、他のどのような歯車加工方法よりも生産性は高い。

また基本的にブローチの歯形形状がそのまま被削歯車へ転写されるため、高精度のブローチを使



写真1 一体形大径ヘリカルブローチと遊星歯車リングギヤ（拡大）

用することで、それに対応した高い歯車精度を得ることが出来る。

このため自動車メーカー、トランスミッションメーカーなどの量産加工ラインを中心に大径ヘリカルブローチ加工が広く採用されている。

遊星歯車リングギヤは自動車用変速機に使われている歯車の中で現在でも唯一熱処理後の仕上げ加工が出来ていない歯車であり、大径ヘリカルブローチ加工が最終仕上げ加工となるために要求される加工精度は非常に厳しい。

この厳しいユーザー要求に対応するため工具メーカー各社は、大径ヘリカルブローチ単体精度を厳しく管理し製作を行っているが、最大直径180mm、最大全長2,500mmともなる非常に大きな工具のため作り込み精度の改善にも限界があり、これ以上の精度向上は困難な状況である。

このため、さらなる歯車精度向上の施策として熱処理歪低減取り組みが行われているが、そのひとつとして処理温度が低く熱処理歪が小さい合金鋼のガス軟窒化処理の展開が進められている。

このガス軟窒化処理では歯車疲労強度を向上させるためにブローチ加工前の被削材に熱処理を行って組織調整が行われる場合があり、高硬度で粘り強い被削材となるため被削性が悪化し大径ヘリカルブローチの寿命低下を生じさせる。

当社では工具寿命向上のための新製品としてGV61 (AlCr系) コーティングブローチの展開を進めており、従来のTiNコーティングブローチに対し2倍以上の寿命延長が達成できている。

今後のEV化によるさらなる歯車精度向上を達成する手段としては、やはり熱処理後の仕上げ加工の実現が必要ではないかと考えている。

大径ヘリカルブローチが他の一般ブローチと異なる大きな特徴は、外径上り刃 (本体部) に続いて被削歯車の歯面を仕上げるための歯厚上がり刃 (シェル部) を有していることであり、本体部軸後方へシェル部を挿入してロックリングで組付けた組立形の構造のものがある。

非常に大きな工具のためブローチ全体を超硬化することは困難であるが、部分的に超硬化を図り、熱処理後の遊星歯車リングギヤの仕上げ加工実現のための取り組みを進めたい。

## ◇ スカイピング加工

遊星歯車リングギヤの加工方法として、従来は大径ヘリカルブローチ加工もしくはギヤシェーパー加工が行われてきたが、近年の加工技術の進歩とラインのダウンサイジング化要求や加工時間の短縮要求などからスカイピング加工への置き換えが試みられている。

スカイピング加工およびその技術は古くから知られていたが、近年の加工設備の同期精度・剛性の向上に加え、刃先である工具の耐熱性・耐摩耗性の飛躍的な進歩があり、ようやく実用化された新しい歯車加工方法である。

その切削機構は図1に示すように、歯車形状のカッタを被削ワークと軸交差させて配置し、シェーピング加工同様にカッタ軸と被削ワーク軸とが軸交差することで生じる切れ刃の滑り運動によって切削を行う加工方法である。

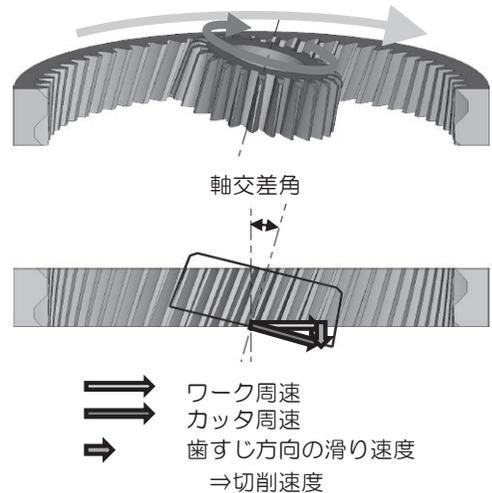


図 1 スカイピング加工の切削機構

現在、このスカイピング加工では次のような取り組みが進められている。

- ①ギヤシェーパー加工からの置き換えによる加工時間短縮
- ②複合旋盤を用い、旋削から歯切りへの連続加工実施による工程集約
- ③専用機を用い、大径ヘリカルブローチ加工からの置き換えによる小ロット化、加工ラインのダウンサイジング化

④超硬スカイピングカッタによる熱処理後内歯車の仕上げ加工実現

スカイピング加工は新しい歯車加工方法として注目されているが、今時点その生産性は大径ヘリカルブローチ加工には及ばず、また工具寿命が短

く工具費が高くなるため、量産ラインでは①のギヤシェーバー加工からの置き換えを中心に進められている。

②は少量生産ラインの工程集約のため、主に量産ライン以外で検討されており、③は新たに設置する新設ラインなどで戦略的にダウンサイジングを図るために進められる。

一方、④の超硬スカイピングカッタによる熱処理後内歯車の仕上げ加工は、内歯車を熱処理後に仕上げ加工できる方法として注目しており、これも今後の自動車EV化で高まる歯車精度向上のための有効な解決策ではないかと考えている。

当社では超硬素材メーカーとして、量産ラインで使用可能な歯車精度、工具寿命を実現できる超硬スカイピングカッタの開発を進めている。

図2 (c) に熱処理後遊星歯車リングギヤを超硬スカイピングカッタで仕上げ加工したときの歯形測定結果の一例を示す。

ブローチ加工後では良好な歯形 (a) が熱処理により悪化 (b) し、従来はこのまま完成品として使用されていたが、熱処理後に超硬スカイピングカッタによる仕上げ加工を行うことで、若干の創成分割うねりは見られるが、熱処理前同等の歯車精度へ改善 (c) できることがわかった。

### むすび

今後、自動車の原動機、変速機の構造が大きく変化するにつれて、その中で使用される歯車の種類・数量や要求精度が変化し、それに対応して歯車加工方法及び切削工具も大きく変化していく。

工具メーカーとして、今まで経験したことの無い大きな変革期を迎え、今後の動向を注視し、その変化に遅れることなくニーズに対応した歯車加工用工具を提供していかなければならない。

これからも当社が国内歯車産業の一翼を担っていけるよう技術革新を進めていきたい。

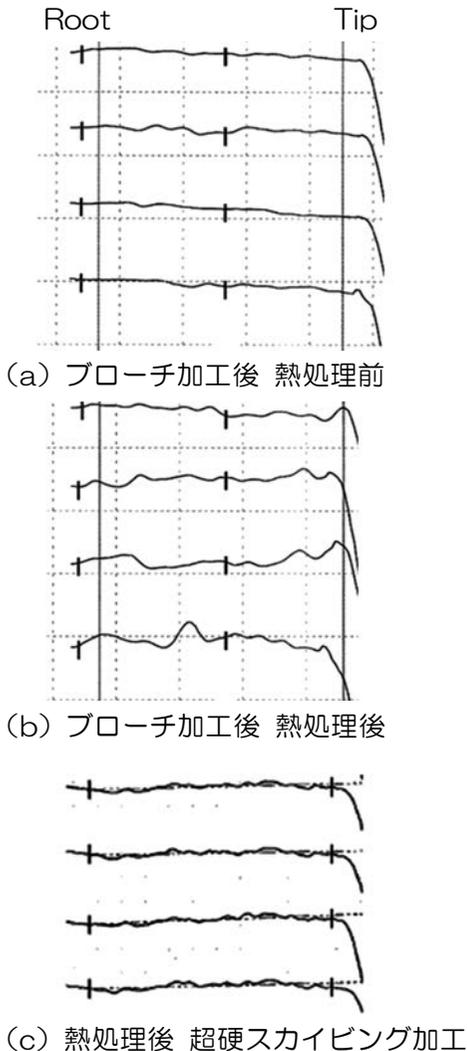


図 2 超硬スカイピングカッタによる熱処理後内歯車の仕上げ加工事例 (対角4歯の歯形形状)

### 3. 熱処理（制御ガス窒化）

パーカー熱処理工業(株) ひら おか やすし  
 設備事業本部 設備営業部 平岡 泰

#### まえがき

自動車用など歯車部品の表面硬化処理には、浸炭焼入れの適用が一般的である。しかし、高い寸法精度を要求される部品では、熱処理ひずみが振動や騒音の原因となり、熱処理ひずみ低減が課題となっている<sup>1)</sup>。一方、熱処理ひずみが小さい表面硬化処理として窒化処理が知られている。窒化処理は母材がオーステナイト化しない温度で処理されるため、焼入れを伴わないが、低温処理のため硬化層が浅い。ゆえに窒化処理の歯車適用は限定的であるが、リングギアなど薄肉部品の一部には適用されている<sup>1)~2)</sup>。

本稿では、歯車適用を想定し、低合金鋼を対象としたガス窒化処理を紹介する。まず、ガス窒化処理方法と得られる窒化組織の概略を説明する。次に、代表的な表面層とその耐疲労性について、当社で実施した回転曲げ疲労試験結果を中心に紹介する。

#### ◇ ガス窒化処理方法

ガス窒化処理は、500℃～580℃に昇温した炉内にNH<sub>3</sub>ガスのみ、あるいはNH<sub>3</sub>ガスとAXガス（N<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>が1：3の混合ガス）などの複数種類のガスを継続的に流し続けながら行われる。炉内の試料表面では、式（1）で示される窒化反応<sup>3)</sup>が起

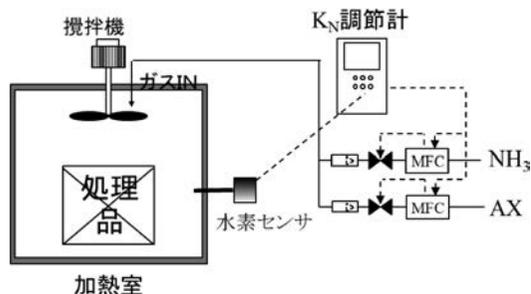


図 1 K<sub>N</sub>制御装置の概要

の窒化ポテンシャル（K<sub>N</sub>）<sup>3)</sup>を制御し、所望の窒化組織が得られる様に雰囲気制御する。



$$K_N = P_{\text{NH}_3} / (P_{\text{H}_2})^{3/2} \quad (2)$$

ここで、[N]はα鉄に吸収されたN原子、P<sub>NH<sub>3</sub></sub>とP<sub>H<sub>2</sub></sub>は、炉内のNH<sub>3</sub>分圧とH<sub>2</sub>分圧である。雰囲気制御は、図1で示す様に水素センサからの値をもとに自動制御が行われる。

#### ◇ ガス窒化組織

ガス窒化した低合金鋼表面に形成される一般的な窒化層および硬さ分布の模式図を図2に示す。鋼表面にはγ'-Fe<sub>4</sub>N（以下γ'相という）やε-Fe<sub>2-3</sub>N（以下ε相という）からなる化合物層、またそれより内部は母相（α-Fe）に固溶した窒素と母材成分中のクロムなどの窒化物形成元素が微細な合金窒化物を形成した拡散層が形成される<sup>4)</sup>。所望の窒化層を得る条件設定方法について、本稿では詳しく説明しないが、例えば、表面相の決定にはLehrer図<sup>5)</sup>と呼ばれる純鉄のK<sub>N</sub>-T線図（T：温度）が参考にされている（図3）。グラフ両軸が窒化条件のパラメータとなっているため、事前に窒化条件と生成相のすり合わせが可能だが、低合金鋼へLehrer図を適用するには合金成分の考慮が必要で

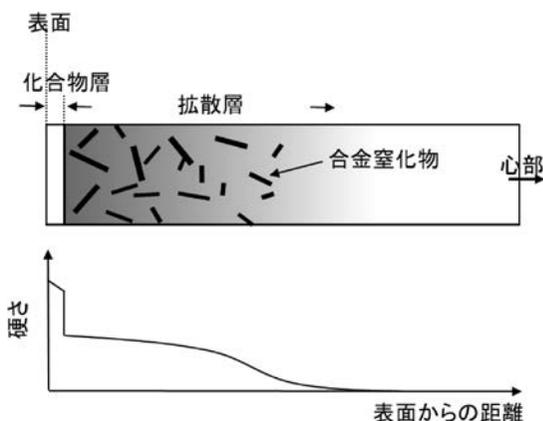


図 2 低合金鋼の窒化組織と硬さ分布の模式図

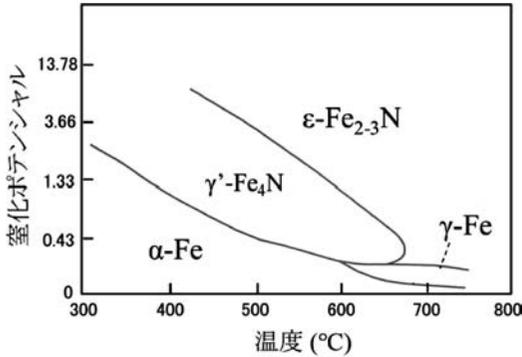


図 3 Lehrer図<sup>5)</sup>

ある。その他、各窒化層の厚さ・相分布、および硬さ分布などを総合的に考慮した上で実際の窒化条件が決定される。

◇  $\gamma$ 相制御による耐疲労性向上<sup>6)~8)</sup>

低合金鋼においては、表面化合物層を $\gamma$ 相に制御し、耐疲労性を向上させることが可能である。例えば、図4は、580°Cのガス窒化処理で表面化合物層を $\epsilon$ 相、 $\gamma$ 相、また化合物層レス（拡散層のみが形成）としたSCM435鋼の窒化組織である。また、図4の顕微鏡組織からは、化合物層内の相分布を確認することはできないが、EBSD法などの分析結果から知ることができる。回転曲げ疲労試験の結果、 $\gamma$ 相に制御した方が $\epsilon$ 相や化合物層レスに制御するよりも顕著な疲労強度の向上が確認されている。 $\gamma$ 相の化合物層が高い疲労強度を示す理由については、 $\gamma$ 相は $\epsilon$ 相と比べると塑性変形しやすい結晶構造であり、靱性が高いことが一つの理由である。図5はビッカース圧痕試験による化合物層の靱性評価結果である。 $\epsilon$ 相は圧痕四隅から亀裂が生成するのに対して、 $\gamma$ 相では亀裂がほとんど見られない。このように $\gamma$ 相と $\epsilon$ 相の靱性に顕著な差異がみられる。また、 $\gamma$ 相内の微細結晶粒、高い圧縮残留応力なども疲労強度向上要因として考えられている。

化合物層厚さを厚くすると疲労強度はさらに向上することが確認されている。図6は、回転曲げ疲労試験による疲労限と $\gamma$ 化合物層厚さの関係を示したグラフである。疲労限は約10 $\mu$ mの化合物層厚さまでは顕著に増加するが、約10 $\mu$ m以上ではゆるやかな増加傾向を示す。一般的な窒化層表面近

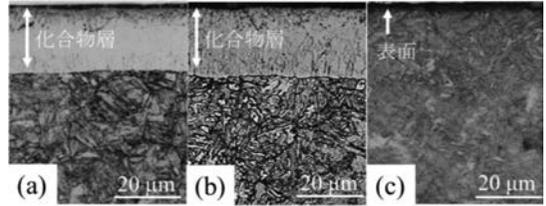


図 4 制御ガス窒化したSCM435鋼の窒化組織：(a)  $\epsilon$ 相の化合物層、(b)  $\gamma$ 相の化合物層、(c) 化合物層レス

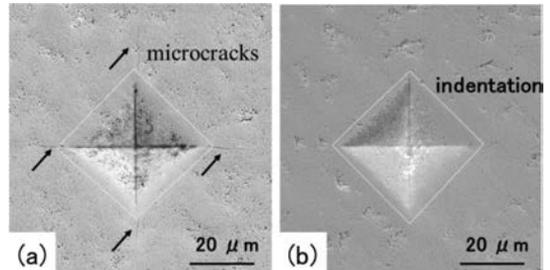


図 5 ビッカース痕（荷重：9.8N）：(a)  $\epsilon$ 相、(b)  $\gamma$ 相

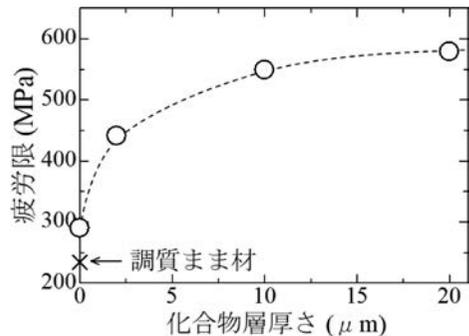


図 6 化合物層厚さと疲労限の関係（SCM435鋼）

傍には、化合物層中の窒素原子が窒素分子（ガス）となって形成されたボイドが多数存在する（例えば、図4の(b)と(c)の表層部）。この領域はポーラス層と呼ばれ、き裂発生の起点になると考えられている。このポーラス層厚さは、化合物層厚さが増加するほど増加する傾向がみられる。一方、図6の結果では化合物層厚さの増加に伴う表面圧縮残留応力の低下も確認されている。したがって、図6の結果では、化合物層厚さ増加に伴うポーラス層厚さの増加と表面圧縮残留応力の低下が、化合物層厚さが10 $\mu$ m以上で疲労限が顕著に増加しなくなる原因である。こうした結果から、

ポーラス層の改質と圧縮残留応力の向上を目的としたショットピーニングの適用がさらなる高強度化手法として考えられる。また、 $\gamma'$ 相は $\epsilon$ 相と比べ塑性変形能が高いため、ショットピーニングとの相性は $\epsilon$ 相よりも良いと考えられる。 $\gamma'$ 相とショットピーニングの組合せは、未だ実用化されていないが、今後の展開に期待したい。

回転曲げ疲労強度は、ギアの歯元疲労強度を模擬したものであるが、ギアの破面疲労を模擬したローラピッチング試験も歯車適用には重要な評価試験である。 $\gamma'$ 相に制御したガス窒化処理材は、ローラピッチング試験でも $\epsilon$ 相よりも高い疲労強度であることが報告されている<sup>9)</sup>。

### ◇ $\epsilon$ 相制御による耐疲労性向上

約590℃～720℃で行われる窒化処理 (Austenitic nitriding)<sup>10)</sup> も今後歯車への適用が期待される。前項の窒化処理と区別するため、以下この処理を浸窒処理と呼ぶ。浸窒処理温度では、特殊な $\epsilon$ 相を利用した耐疲労性向上が可能となっている。この特殊な $\epsilon$ 相を利用した浸窒組織<sup>11)</sup>の例を図7(b)に示す。浸窒処理では、化合物層下部にオーステナイト ( $\gamma$ ) が生成するが、表面化合物層は、図7に示すとおり $\gamma'$ 相と $\epsilon$ 相を $K_N$ 制御により選択可能である。図3のLehrer図が示すとおり、 $\epsilon$ 相は窒化温度が高くなるほど、その生成領域が低 $K_N$ 側へ拡大する (※この傾向は低合金鋼 (多元系) へ拡張しても同様である)。この低 $K_N$ 側で生成する $\epsilon$ 相は、ポーラス層が形成されず (図4と比較すれば明らか)、従来の軟窒化 (化合物層を $\epsilon$ 相にするために少量の浸炭性ガスを添加した窒化処理法) で生成する $\epsilon$ 相よりも硬さが低いため高靱性、かつ

高い圧縮残留応力を化合物層全域にわたって形成することを特徴とする。例えば、図8は化合物層内の残留応力分布であるが、570℃処理の軟窒化した試験材の化合物層 ( $\epsilon$ 相) では表面側に引張残留応力が形成されるが、浸窒材 ( $\epsilon$ 相) は化合物層全般にわたって、均等な圧縮残留応力が得られている。また、下部層の $\gamma$ は、拡散層と同等以上の硬さであり、圧縮残留応力は低いが微細結晶粒を有することが確認されている。一方、処理温度が高いため、拡散層硬さは窒化や軟窒化で得られる硬さよりも表面側は低くなるが、深い硬化層が得られる。図9は、570℃×2hの軟窒化処理と640℃×2hで浸窒処理したSCM415鋼とS45C鋼の拡散層硬さ分布の比較結果である。S45C鋼では浸窒材と軟窒化材で差異はあまりみられないが、SCM415鋼では、浸窒材表面側の硬さが軟窒化材よりも低くなる。ただし、軟窒化材よりも深い硬化層が浸窒材では得られている。図10はS45C鋼を使った回転曲げ疲労試験結果の一例である。図7の(a)と(b)と同等の組織を有する浸窒 ( $\gamma'$ ) と浸窒 ( $\epsilon$ ) は、570℃処理の軟窒化材 ( $\epsilon$ ) よりも高い疲労強度であり、かつ浸窒 ( $\epsilon$ ) の方が浸窒 ( $\gamma'$ ) よりも高い

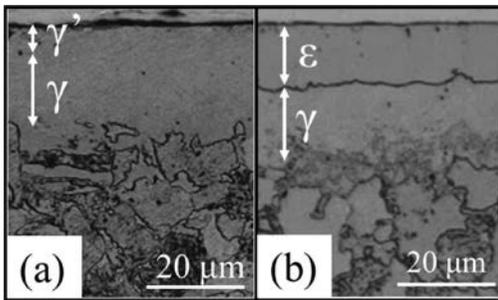


図 7 浸窒組織 (640℃×2h, S45C鋼) の例: (a)  $\gamma'$ 相、(b)  $\epsilon$ 相

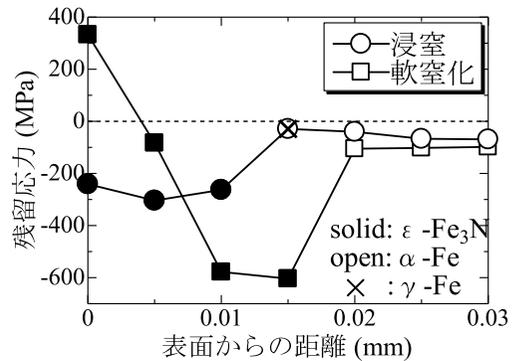


図 8 残留応力分布の比較 (S45C鋼)

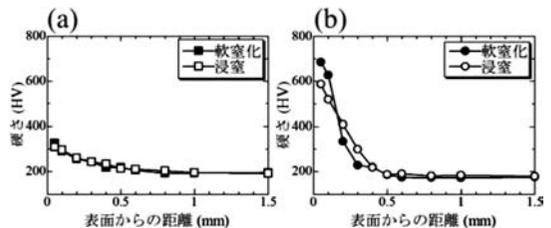


図 9 硬さ分布の比較: (a) S45C鋼、(b) SCM415鋼

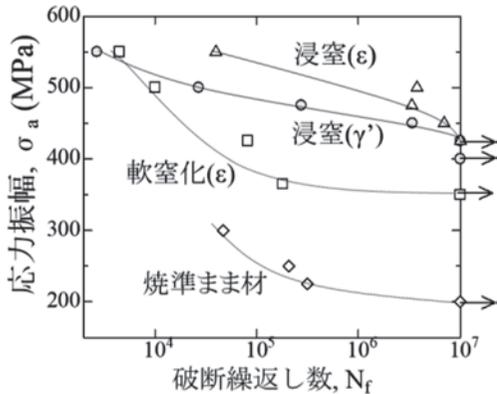


図 10 回転曲げ疲労試験結果 (S45C鋼、 $K_t=1.85$ )

疲労強度を示すことが明らかとなっている。

### むすび

窒化した低合金鋼は、拡散層に加え、鉄窒化物や $\gamma'$ などが表面に形成されるユニークな組織を有する。本文で詳細な説明は行っていないが、これら

表面層の特性は鋼材成分・母材組織の影響も大きく受ける。したがって、鋼材自体が窒化層の特性を決める重要なファクターの一つである。今後さらなる窒化処理の市場拡大に向け、鋼材開発と熱処理技術双方の組合せによる発展を期待する。

### 参考文献

- 1) 今高秀樹ら：新日鉄住金技報、406号 (2016) p. 8
- 2) 三輪能久ら：マツダ技報、8 (1990) p. 130
- 3) Mittemeijer, E.J.: ASM Handbook, 4A, (2013) p. 619
- 4) 宮本吾郎ら：熱処理、51, p. 128 (2011)
- 5) Lehrer, E.: Zeitschrift fur Elektrochemie, 36, (1930) p. 383
- 6) 平岡泰ら：熱処理、57 p. 64 (2017)
- 7) Y. Hiraoka et al.: Materials Transactions, 58, 7 p. 993 (2017)
- 8) パーカー熱処理工業株式会社：社内資料
- 9) 小林厚ら：自動車技術会学術講演会前刷集, No. 14-14 (2014) p. 21
- 10) R.S.E.Schneider; Thermochemical Surface Engineering of Steels (Woodhead Publishing, 2015) pp. 373
- 11) 特許出願中



## 4. 最近のショットピーニング処理の 動向と開発の方向性

新東工業(株) サーフェステックカンパニー 小 林 祐 次  
開 発 グ ル ー プ 開 発 チ ー ム

### ◇ 緒 言

ショットピーニングは、硬さの向上や圧縮残留応力の付与により、金属の疲労強度を向上させる手法である。ショットピーニングの名前は、加工方法そのものを表しており、直径0.05mm～1mm程度の金属あるいは非金属の球（ショット：shot）を対象となる金属の表面に高速で打ちつける（ピーン：peen）ことである。1930年代から工業的に利用されている技術である。

いわゆる特殊鋼は、自動車部品に多用されるが、ショットピーニングも自動車部品に多用される。例えば、サスペンション用コイルばねに代表されるばね類、駆動系の歯車全般、CVTプーリやコンロッドなどが挙げられる。

図1は、自動車用トランスミッションギヤの製造工程の例であるが、ショットピーニングは熱処理などの内質の変化を伴う工程後に実施されることになるが、必然的に部品製造の最終工程に近い。

日本の製鋼メーカーの長年にわたる技術開発によって、内部介在物のない非常にきれいな素材が自動車メーカーおよび部品の製造メーカーに提供されている。また、熱処理工程も進化を続け、より強度の高い機械的性質が得られるようになってきた。このような綺麗で強い材料は内部介在物による疲労破壊の可能性は少ない。

例えば、自動車用歯車には浸炭焼入れが多用さ

れるが、過去はガス浸炭が適用されてきた。ガス浸炭は粒界酸化層が形成される為、表面からある程度内部は焼入れ性が悪化し、その部分の機械的性質は低下している。当時の自動車業界向けのショットピーニング技術の固有名称で恐縮だが、ハードショットピーニングと呼ばれる条件がある。この条件を今現在考察すると、ガス浸炭により機械的性質が低下している粒界酸化層付近の強度を向上させるような条件であると判断している。

近年、二酸化炭素排出量低減要求や、熱処理後の様々なパラメータのばらつきを抑制する目的で、浸炭方法がガス浸炭から真空浸炭へ置き換わってきている。真空浸炭では、粒界酸化層が発生しないので、ハードショットピーニング条件が真空浸炭材に対して最適なショットピーニング条件とは考えづらい。本稿では、ガス浸炭材と真空浸炭材に対するショットピーニングの作用の違いについて報告するとともに、真空浸炭材における疲労強度を向上させるショットピーニング条件としてどのような点に注意すべきか検討する。

### ◇ ガス浸炭材と真空浸炭材におけるショットピーニング後の残留応力分布

前述のように、ガス浸炭材の表面には粒界酸化層が存在するため、表面近傍の硬さ、特に粒界酸化層の部分は550HV程度となっている。一方、真空浸炭材には粒界酸化層が存在しないため、表面

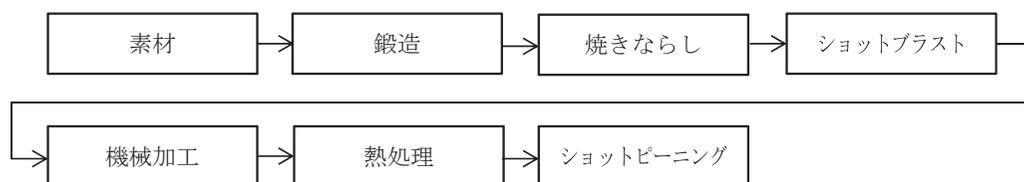


図 1 自動車用トランスミッションギヤの製造工程の例

近傍の硬さ分布はガス浸炭材と大きく異なる。ショットピーニング後に得られる残留応力分布で考慮すべきは、①表面残留応力、②最大残留応力、③最大残留応力の発生深さ、④残留応力がなくなる深さが挙げられる。ショットの粒径が小さいほど表面残留応力は大きくなるが、最大圧縮残留応力の発生深さは浅くなることが知られている。ショットピーニングにより得られる圧縮残留応力はショットが衝突したことによる痕の生成を、下層組織が拘束している為と理解される。ショットピーニングにより付与される最大残留応力は、材料の耐力に比例するとされる研究成果がある。一般に、鋼の耐力は硬さに比例するが、粒界酸化層の硬さは内部に比べ硬さが低い為最大圧縮残留応力値が低くなると思われる。まず、各種ショットピーニングが残留応力分布に与える影響を検討する。試験片として材料はSCM420Hが用意され、熱処理は一般的なガス浸炭と真空浸炭が適用された。

ショットピーニング加工は、直径0.05mm、0.6mm、1.0mmの硬さが同じショットを同じエア圧で行われた。表1に加工条件と符合をまとめた。残留応力はX線を用い格子面間隔のずれから算出した。図2は得られた残留応力分布を示す。直径0.6mm、1.0mmの条件において、ガス浸炭材と真空浸炭材の残留応力分布に大きな差はない。しかし、直径0.05mmでは、表面残留応力に大きな差がみられる。ガス浸炭材の粒界酸化層は、硬さが低

く材料の耐力が低下しているためショットピーニングにより発生する残留応力が小さくなるのが推測される。したがって、ガス浸炭材には直径が小さいショットは用いない方が良いと考えている。

前述のように、近年の鋼は非常な清浄な材料である。そのような材料に対して表面欠陥の発生しづらい真空浸炭を適用した場合、内部起点破壊は想定しづらい。したがって、如何に表面を強くするかに焦点を当てるべきだが、その場合、直径の小さなショットを用いることが有効であると考えている。

#### ◇ 真空浸炭材に直径の小さなショットを適用したときの疲労強度

真空浸炭は、歯車に適用される事が多いが、歯車における疲労強度を検討するうえで必要な疲労形態は「曲げ」と「接触（すべり）」である。歯車の歯面同士が接触する場合、その表面粗さが疲労強度に及ぼす悪影響は、容易に想像できる。この疲労を評価する場合、すべりを伴う疲労試験であるローラーピッチング試験を行うのが適切ではあるが、試験片の製作と疲労試験を行う事自身が高額となるので、残念ながら弊社では紹介できる事例がない。今回は、接触疲労の一種である転動疲労試験結果について紹介する。（転動疲労試験の方法についての解説は省く。）

前述のとおり、接触疲労の場合表面粗さを低くする必要がある。しかし、ショットピーニングの

表 1 直径0.05mm-1.0mmのショット使用条件

熱処理	符号	ショット直径 mm	硬さ HV	エア圧力 MPa	アークハイト
G：ガス浸炭材 V：真空浸炭材	50-8-2	0.05	800	0.3	0.22mmA
	6-8-3	0.6	800	0.3	0.48mmA
	10-8-3	1.0	800	0.3	0.15mmN

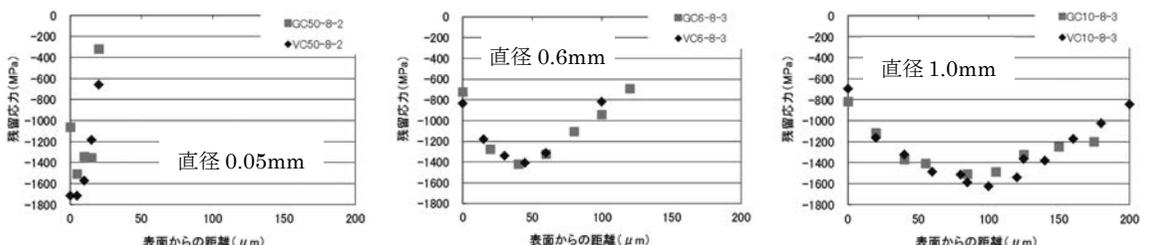


図 2 直径を変えた時の残留応力分布（直径大）

場合、痕の生成が残留応力の生成の要因である為、痕の生成、言い換えると表面粗さの悪化は避けられない。今回紹介する事例では、可能な限り、表面粗さの悪化を防いだ場合の疲労試験結果を報告する。

用意した試験片は、平板状であり、材質はSCM420H。機械加工後、研磨をしてある程度の粗さは残した。熱処理は、真空浸炭とし、表面硬さは800HVだった。相手材はSUJ2の鋼球を用いた。試験片の表面硬さがかなり高いので、硬さが1,200HVのかなり硬い投射材を用意した。今回の目的は、ショットピーニング後の表面粗さを如何に小さくするかとしているので、ショットの直径は0.08mmとした。ショットピーニング方法は直圧のエア式ショットピーニングとした。表面粗さを変える目的で、エア圧を0.1、0.2、0.3MPaと3水準ふった。図3は、ショットピーニング前後の表面粗さ比較である。圧力0.1MPaではショットピーニングしていないものと比較し、若干粗さを改善させることができた。図4に残留応力分布を示す。表面粗さが最も低かった0.1MPaで加工した試験片の残留応力分布は、ほかに比べると最大残留応力値は若干低い。しかし、表面残留応力はほぼ同じとなった。図5に疲労試験後のワイブル分布を示す。表面粗さが最も悪い0.5MPaで加工した試験片のワイブル分布は未加工材とほとんど変わらない結果となった。したがって、接触疲労を考える場合、表面粗さの悪化は避けたほうが良いことがわかる。一方、表面粗さが最も低かった0.1MPaで加工した試験片は未加工材に対し疲労特性が大幅に改善できたことがわかる。ショットピーニングで

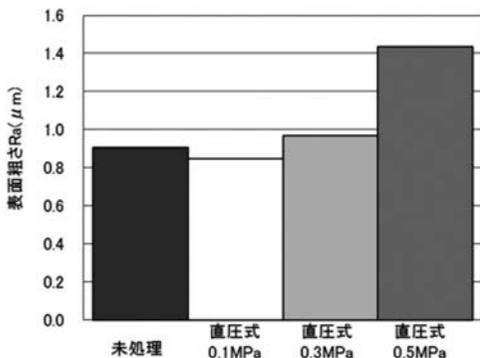


図 3 表面粗さ

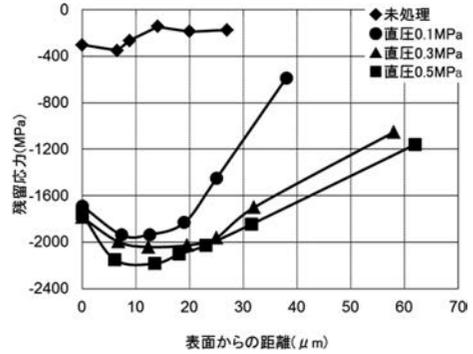


図 4 残留応力分布

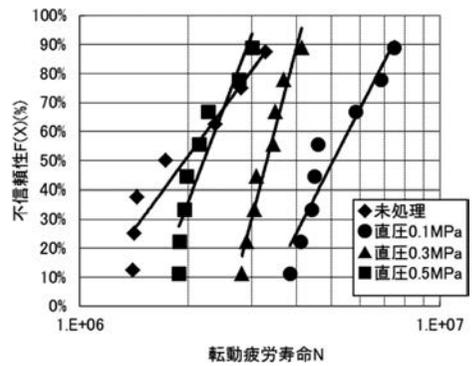


図 5 ワイブル分布

は、痕の生成により表面粗さが悪化するため疲労強度にマイナスの影響を与えることが述べられることが多い。ショットピーニング前の表面粗さにもよるが、ショットピーニングすることにより表面粗さを改善したうえで、疲労強度も改善できることがわかる。

## むすび

本報では、変化してきた材料、熱処理に対応するショットピーニングの在り方について解説した。一方、最近の弊社の研究では、硬さが同じ鋼材でも付与できる最大残留応力に違いがあることがわかってきている。疲労を受ける部品として考えると、内部と表面で機械的性質が異なる材料が好ましい。これまで弊社では、鋼材や熱処理合わせたショットピーニング条件を追い求めてきたが、ショットピーニング効果を最大に発揮できるような材料の検討を行うことも一つの考え方もかもしれない。

# IV. 歯車の強度評価・シミュレーション

## 1. 歯車強度評価の現状と今後の課題 ～日本機械学会研究協力分科会RC268／RC275 での取り組みから～

岡 山 大 学 藤 井 正 浩  
大学院自然科学研究科 教授

### まえがき

一般社団法人日本機械学会では、RC (Research Committee) 分科会と呼称される研究協力分科会が設置され、機械工業の各専門分野の共通課題に関して共同研究を実施している。中でも歯車技術に関するRC分科会は過去50余年にわたって継続されており、わが国の歯車研究を主導してきた。本稿では、歯車分野の最近のRC268分科会「歯車装置に対する設計・製造及び評価に関する革新的技術探究の調査研究分科会 (2015.4～2017.3)」およびRC275分科会「歯車装置の設計・製造・評価に関する技術革新のための調査研究分科会 (2017.4～2019.3)」で実施した調査研究の中から、歯車の強度評価およびシミュレーションについて紹介する。

### ◇ RC分科会

RC分科会の活動目的は、産業界において現に当面している数多くの重要研究課題の中から、『機械工業各専門分野における比較的共通な問題で、各社が単独で研究するよりは、学会が採り上げて共同研究を行うほうが適切である』と考えられる課題を選定し、その分野における関係各社の参加ならびに学識経験者の協力を得て、課題ごとに分科会を設置して、解決を図ろうとするものである<sup>1)</sup>。このRC分科会は、1958年から現在までに280件以上設置されている。

歯車技術は、主要先進国では基幹機械技術として、地道ながらも確固たる地位を築いている。一方、わが国では、いわゆる先端と呼ばれる分野に目が行き、工業の基幹機械技術は必ずしも重要視

されず、大学等からの人材供給が途絶えがちである。その結果として現実の課題解決に支障が出る事態も生じつつある。そこで、限られた数の技術者で、本分野(技術)の維持発展を進めるためには、これまで以上に、関連する技術者への的確な情報提供や共通課題の解決のための活動とともに、技術者同士が連携できるオール日本の技術者コミュニティを提供することが重要である。RC268分科会では、世界トップレベルの歯車装置技術であることを目的に、現状の技術レベルをグローバルにベンチマークし、その結果を基に16年前のRC156分科会で設定した各分野の世界一ターゲットモデルの実現状況とその達成のための技術的対応や開発された新技術を示すとともに、今後も世界一であり続けるために必要な技術課題を明らかにした。RC275分科会では、RC268分科会で示したブレークスルー技術を基に試験研究を行い、世界を凌駕する歯車装置を実現・発展させるために必要となる設計・製造・評価に関する最新の革新技術を調査研究し、そこで得られた技術情報をタイムリーに参加会社に提供して、共有し、日本の歯車の基盤技術のレベルアップに資することを目的としている。

RC275分科会では、設置目的に賛同された71社の参加の下、企業側委員11名と大学・高専の教員を中心とした中立側委員13名で構成される研究者側委員会を設置している。研究者側委員会では月1回の頻度で会議を開催し、調査研究を実施している。また、全参加会社が参加する全体分科会を8回開催している。表1にRC275分科会で開催した全体分科会の一覧を示す。最新のトピックスや

表 1 RC275の全体分科会

	主な内容
第1回分科会 (2017.5.19)	発足会：調査研究活動概要・研究計画説明 特別講演「実機の疲労解析の基本と表面損傷を伴う場合への適用：小林英男氏（東京工業大学名誉教授）」
第2回分科会 (2017.10.20)	見学会：いすゞ自動車（株）藤沢工場 技術講演「いすゞ自動車トランスミッション工場における生産性改善のための新技術導入について：宮澤忠彦氏（いすゞ自動車（株）」
第3回分科会 (2018.1.19)	テーマ「電気モータ駆動における変速機の最近の問題とその対応」 技術講演「VSDモータ駆動回転機の機械・電気連成トルク変動問題について：坂口順一氏（ターボ機械協会VSD分科会主査、東芝三菱電機産業システム（株）」 技術講演「VSD駆動モータに起因したトラブル事例と設計上の留意点：福島康雄氏（（株）日立製作所インダストリアルプロダクツ社）」 「冷却塔ファンの振り不安定振動による減速機の損傷：足立章氏（東洋エンジニアリング（株）」 技術講演「グローバルにおけるEVトレンドと、そのスピード感：平塚龍氏（ローマックス・テクノロジー・ジャパン（株）」
第4回分科会 (2018.4.20)	研究活動中間報告 技術講演「面性状による歯車かみあい損失低減についての検討：岡本大典氏（トヨタ自動車（株）」 技術講演「DLCコーティングした歯車の疲労寿命と摺動特性：森口秀樹氏（日本アイ・ティ・エフ（株）」 技術講演「二液分離型潤滑油の実用化に向けた、粘度および分離温度の同時制御：鎌田久美子氏（シェル ルブリカンツ ジャパン（株）」
第5回分科会 (2018.7.20)	見学会：三菱重工工作機械（株） 技術講演「最新の歯車仕上加工技術について：柳瀬吉言氏（三菱重工工作機械（株）」 技術講演「レーザ溶接技術のご紹介：山下貢丸氏（三菱重工工作機械（株）」
第6回分科会 (2018.10.19)	テーマ：歯車の壊れ方、そのメカニズムの新たな解釈 技術講演「高強度合金の疲労強度と内部疲労き裂発生メカニズム：梅澤修氏（横浜国立大学）」 技術講演「多点測定硬さのパラッキと鋼材品質：久保愛三委員（（公財）応用科学研究所）」 歯車損傷大全の紹介
第7回分科会 (2019.1.25)	テーマ：歯車製造に関する最新の取り組み 技術講演「ホブ加工精度向上への取り組み：松尾浩司氏（ジヤトコ（株）」 技術講演「駆動系歯車のスカイピング加工：栗田信明氏（アイシン精機（株）」 技術講演「旋盤、マシニングセンターによる歯車加工の事例紹介：安井義輝氏（オークマ（株）」 技術講演「Current trends in generating gear grinding: optimized gear design for increasing load capacity and noise reduction: Maximilian Zimmer 氏（Reishauer AG）」 技術講演「Ni-Mo 系低合金粉を適用した焼結浸炭歯車の特性：西田智氏（（株）神戸製鋼所）」
第8回分科会 (2019.4.19)	最終報告会

その分野の権威者の技術講演会では毎回100～200名の参加があり、関連技術者同士の交流や情報交換の場としても機能している。

## ◇ 歯車の強度評価およびシミュレーション

### 1. 歯車材料の強度評価

歯車材料の疲労強度評価には、回転曲げ試験などの基礎的な材料評価試験に加えて、面圧疲労評価には円筒試験や歯車試験が用いられるが、実機歯車装置との相関が十分に出ない場合がある。とくに、図1に示すような高強度歯車で発生する損傷モード<sup>2)</sup>は、接触の繰返しにより発生する表面または表面下のき裂ならびに剝離損傷を起点とし

て歯が折損する損傷モードである。この損傷モードに対する材料や熱処理の評価は、材料疲労試験の回転曲げ試験や転動疲労試験のローラピッチング試験では困難である。RC分科会では図2に示す接触・回転曲げ疲労試験機（CBF試験機）<sup>3)</sup>を開発して、図1のような損傷モードに対する材料や熱処理の評価法としての有用性を検討している。本試験は回転曲げ試験と同様に試験片に曲げ応力を加えるとともにローラを接触させており、接触により生じるピッチングを起点として曲げにより折損することを想定している。

図3は、破断した試験片の一例である。回転曲げ試験で見られるのと同様な形態を示しているが、

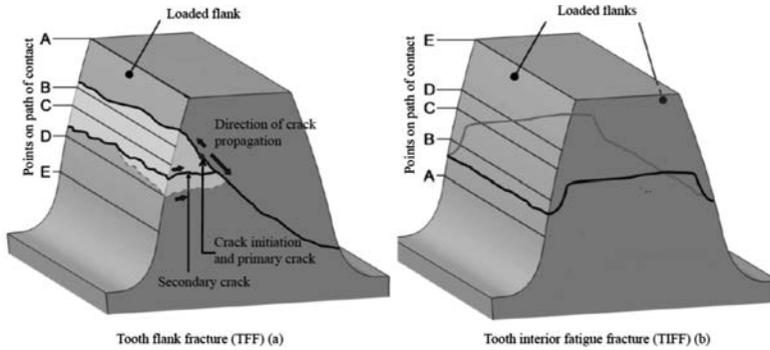


図 1 高強度歯車に見られる歯面損傷に起因する歯の折損<sup>2)</sup>

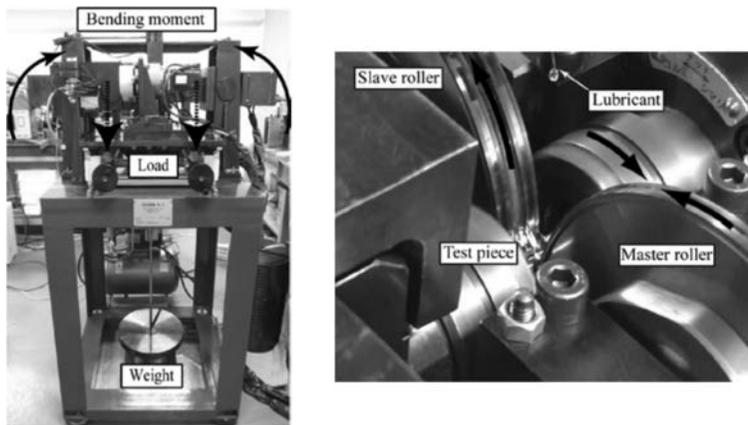


図 2 CBF試験機外観<sup>3)</sup>

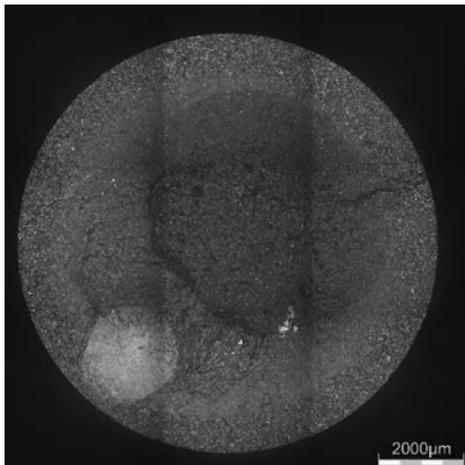


図 3 接触・回転曲げ疲労試験により破断した試験片

接触応力を加えることにより、接触応力を加えない（いわゆる回転曲げ試験と同じ）場合に比べて寿命が短くなっている。また、試験片とローラの

接触に角度を持たせて軸方向にスキューを与えることにより表面損傷が生じやすい結果も出ているが、回転曲げ試験でも見られる所謂フィッシュアイと称される内部起点型の損傷が生じる場合もある（図3の右下の7時の方向は、フィッシュアイ）。本試験の有用性を示すためにはさらなる試験の継続が必要であるものの、表面硬度や表面粗さといった表面性状に比較的敏感な試験となっているようで、今後の表面加工法や表面改質などの評価にも応用できる可能性を感じている。

## 2. トロコイド干渉

図4は歯先の強い接触により歯面に発生したき裂を示す<sup>4)</sup>。このような損傷は、かみあい始めおよびかみあい終わりで発生する幾何学的かみあい外の接触によるものであり、トロコイド干渉として知られ、現状では程度の差はあるものの回避困難である。干渉を避けるために過度な修整を加えると歯面の接触領域が小さくなり早期に歯面損傷

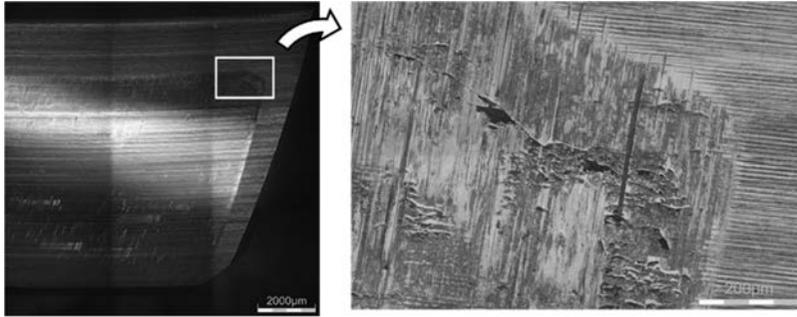


図 4 歯元面に発生したき裂の様態<sup>4)</sup>

が生じる場合がある。歯面温度と歯面のヘルツ圧力の関係を用いた歯面強度の評価法も提案されている<sup>5)</sup>が、干渉の許容量やトロコイド干渉起因の損傷予測法を明らかにすることが歯車設計上求められている。トロコイド干渉部や歯側端の接触応力は非常に大きい。これらの位置の接触応力解析は、歯面膜要素<sup>6)</sup>のような方法を用いることで可能であるが、実際の歯車のトロコイド干渉部や歯側端の形状は運転に伴い変化することに加えて、高い応力が発生する領域が小さいこともあり、これらの位置の応力と歯車の歯面損傷との定量的な関係は明らかではない。RC分科会では、特別な歯形修整を成形研削により施した歯車を用いて耐久試験を実施し、干渉部での損傷の様態と解析に基づく検討を行っている。

### 3. 歯車対・軸・軸受・歯車箱系のCAE解析

近年の計算機処理能力の飛躍的な向上と、CAE技術の高機能化、高精度化により、計算機上で歯車装置の詳細な形状の考慮や、実現象に近い状態で評価することが可能になり開発期間の短縮などに大きく貢献している。RC268では、歯車対・軸・軸受・歯車箱系を代表的なCAE技術でどこまで解析できるようになったかを明らかにする目的でその特徴と留意点を整理した。

図5は、歯車箱の詳細形状を考慮したFEMモデルの一例である。このモデルでは、任意の歯面修整を与えられた歯車対に対して、ミスアライメント、かみあい伝達誤差、およびこれを起振力としたときの歯車箱の振動応答などを計算できる。ミスアライメントの計算では、歯車対や軸受の非線形な剛性の与え方に注意を要す。歯車対の剛性は、歯の曲げ剛性、歯のせん断剛性、およびヘルツの

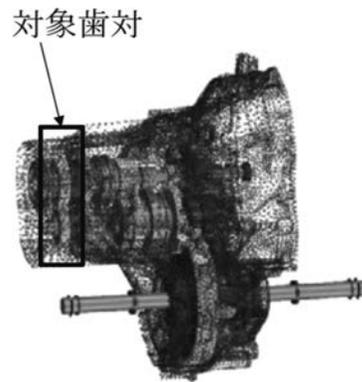


図 5 歯車箱の詳細形状を考慮したFEMモデルの例<sup>4)</sup>

近寄り剛性を厳密に解くことで実現象を再現することができるが、図5のようなモデルでは、近似値を用いる場合がある。また、軸・軸受・歯車箱系の振動伝達特性を評価する場合は、歯車対の剛性を近似モデルとして簡易化し、構造系の変更による振動レベルの定性的な変化を簡便に評価することもある。次に、上記のミスアライメントが発生した時のかみあい伝達誤差を計算し、起振力の変化を計算する。例えば、ミスアライメントの有無によって起振力がどの程度変化するかを知ることは、軸・軸受・歯車箱系の形状を設計するうえで重要な情報となる。図6は、計算された歯あたりとかみあい伝達誤差の一例である。この解析例では、かみあい伝達誤差に与えるミスアライメントによる歯当たりの変化の影響が大きいといった定性的な結果が示されている。次に、振動低減を行った事例を図7に示す。歯車諸元と歯面修整の調整により、かみあい伝達誤差を小さくし、結果として歯車箱の振動が低減したものである。

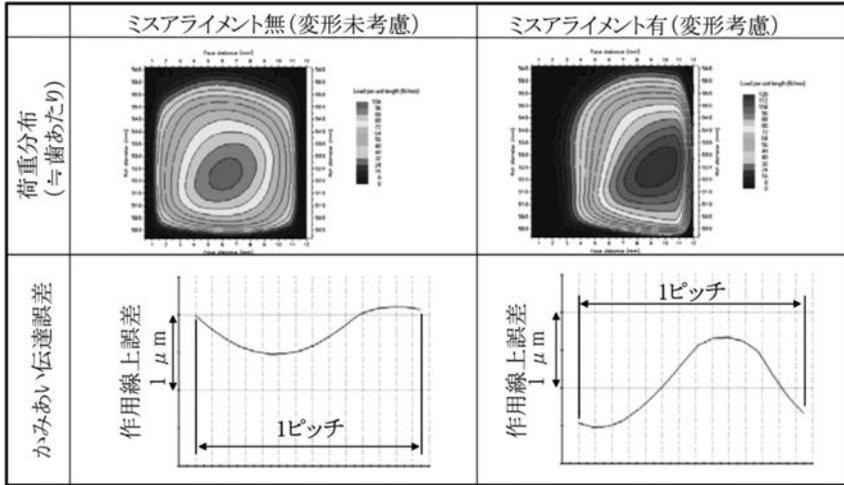


図 6 ミスアライメントによる歯あたりとかみ合い伝達誤差の解析例<sup>4)</sup>

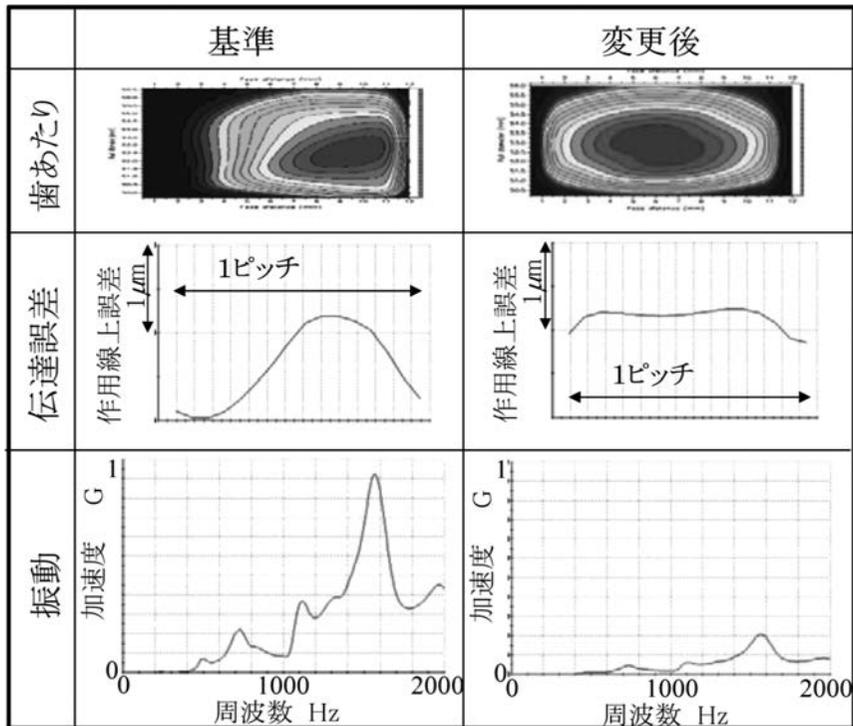


図 7 歯車諸元変更による振動低減の検討事例<sup>4)</sup>

以上の事例のように、歯面修整、軸形状、軸受剛性、すきま、および歯車箱形状などの数多くの情報を考慮して様々な設計変更を検討でき、歯車装置の設計・評価技術の向上に貢献している。一方で、数多くの入力データの中に根拠なく入力したデータがあると、いたずらに結果を変化させて

しまうこともある。定量的な評価には、例えば、歯面形状、軸・軸受・歯車箱系の剛性値の評価などの精査が必要であり、計算結果を鵜呑みにするのではなく、各部のモデル化方法や入力値に対する結果の精度ならびに物理的な意味を常に考えることが重要となる。

計算機処理能力の向上による計算自由度の拡大だけでなく、歯車装置専用のCAE技術そのものの進歩により、ミスアライメントを含む振動や面圧の計算が可能になっている。一方で、考慮する自由度や成分が多くなることで、より詳細な現象を計算できるようになるものの、根拠なくモデル化を進めてしまうと意図しない結果を導出してしまうこともある。歯車対・軸・軸受・歯車箱系の連成挙動を計算する場合、そのモデルには構造物の形状だけでなく結合部のモデルや特性値を入力する必要がある。この結合部の特性はすきまを含めた非線形特性を持つことが多く、その取扱いに注意を要すると予想される。また、商用のCAE技術の場合、その中で取り扱われるモデル化やアルゴリズム自身がノウハウであり、その詳細を知ることにはほぼ不可能である。高度化されたCAE技術によって多くの有益な情報を簡便に得られる環境が整ってきた一方で、「どのような考え方に基いてCAE技術が成り立っているか」、「入力値はどのように決めることが大事なのか」、「入力したデータに対する結果の精度はどの程度なのか」など、解析者は実験検証などを通じてこれらの考察力をより一層蓄えていくことが、高度なCAE技術を使いこなす上で大事である。

#### 4. 歯車装置の攪拌損失

歯車装置には従来にも増して損失の低減が求められており、歯面摩擦低減（潤滑性向上）技術評価、および歯車装置の風損や攪拌損失評価技術の確立が必要である。RC分科会では、歯車装置の低損失化に寄与する高粘度指数・低粘度潤滑油の低摩擦性能を動力循環式歯車試験によって実証するとともに、歯面摩擦係数予測手法の確立を進めている。また、CFD（Computational Fluid Dynamics）解析による攪拌損失評価を実施し、従来の実験式とCFD解析との比較により従来の実験式の限界や粒子法解析の有用性も評価し、現状のCFD解析での限界と今後の課題について検討している。

## むすび

歯車装置に求められる要求は以前にも増して高くなっている。RC分科会では、引き続き、わが国の歯車技術が世界一であるために必要な試験・調査研究を実施し、その成果を参加企業と共有することで、日本の歯車の基盤技術のレベルアップに資するとともに、技術者間の技術交流の場を提供してオール日本の技術力と活力の向上を図っている。

2019年4月より2年間の新たなRC分科会の活動が始まる。RC分科会の活動を理解いただき、わが国の歯車技術の発展のため協力いただけることを期待する。

RC283「歯車装置の設計・製造・評価に関する技術革新のための試験・調査研究分科会」

（一般社団法人ホームページ：<https://www.jsme.or.jp/organization/subcommittee/cooperation-subcommittee/rc-and-rc-d-subcommittee-list/rc283/>）

## 参考文献

- 1) 一般社団法人日本機械学会ホームページ：<https://www.jsme.or.jp/organization/subcommittee/cooperation-subcommittee/rc-and-rc-d-subcommittee/>
- 2) M. Hein, et al: Parameter Study on the Calculated Risk of Tooth Flank Fracture of Case Hardened Gears, Proceedings of MPT2017-Kyoto, p. 324-329 (2017)
- 3) I. Moriwaki, et al: Contact-bending-fatigue (CBF) Tests on High Strength Steels for Gears -Effects of Bending Stress on Propagation of Cracks Initiated at Pits due to Contact-, Proceedings of MPT2017-Kyoto, p. 330-335 (2017)
- 4) 一般社団法人日本機械学会：RC268歯車装置に対する設計・製造及び評価に関する革新的技術探究の調査研究分科会 研究報告書 (2017)
- 5) 吉崎正敏：はすば歯車のトロコイド干渉が歯面強度に及ぼす影響（歯すじ誤差、クラウニング及び歯先修整の影響）、Vol. 82, No. 842, p. 1-20 (2016)
- 6) 森脇一郎ほか：歯面膜要素を用いた動力伝達用歯車の角当たり解析、Vol. 84, No. 863, p. 1-13 (2018)

## 2. 浸炭焼入時の熱処理ひずみ解析技術の動向

日産自動車 すぎもと つよし  
 材料技術部 杉本 剛  
 日産自動車 ふじかわ しんいちろう  
 成形技術部 藤川 真一郎

### ◇ 熱処理製品に求められる動向

昨今の鋼材熱処理では国際的な競争力・商品性の更なる向上を求められており、従来にない熱処理品質の高精度な制御が必要になってきている。自動車においては電動化の流れが急速に加速しており、駆動系部品等の被熱処理部品に求められる静粛性から来る形状精度、強度要求は高まる一方である。図1に示すように自動車の構成部品は2040年頃まで増加傾向となるため、部品小型化、一個の部品の発生するノイズの量の削減等の要求は高まりつつある<sup>1)</sup>。一方で熱処理工程にて発生する熱処理歪みは様々な損失を生んでおり、これらの課題を解決するために様々な実験的・実生産上の対策が行われている。

### ◇ 熱処理ひずみとその対策

表1は歯車に関する熱処理ひずみの要因を熱処理シミュレーションを実施する際の入力因子として示したものである。熱処理工程内に起因するものを多数ある一方、材料に起因する要素も多数あることが見て取れる。

このような熱処理ひずみを対策するために、熱処理現場では日々、熱処理荷姿の改善、焼入条件の改善、部品形状の工夫等が行われている。しかしながらその条件出しは複雑でカンコツに頼る部分も多く効率的に行われているとはいえない。また、熱処理現場単独ではできない材料の仕様変更による低ひずみ化、品質対策は材料変更の困難さもさることながら、荷姿等の熱処理条件との切

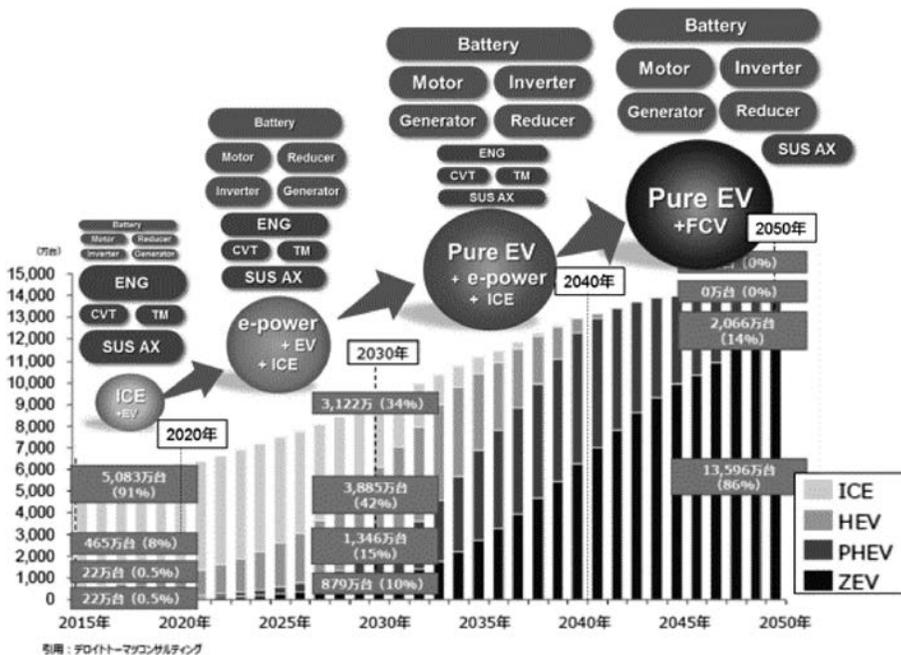


図 1 自動車ユニット構成の複雑化—熱処理要求複雑化の背景—

表 1 歯車の熱処理ひずみに対する要因

入力パラメータ		変形の要因			
		熱変形	変態変形	クリープ	浸炭
浸炭・拡散及び保持温度		○	○	○	○
境界条件	熱境界条件	冷却材	◎	◎	
		冷媒の流速	◎	◎	
		液面圧力	○	○	
		部品の表面粗さ	○	○	
	放射	部品の表面粗さ	○		
		炉壁材質	○		
機械的境界条件	冶具と荷姿	○	○	○	
	重力			○	
化学的境界条件	雰囲気のカarbonポテンシャル		○	○	
	炭素反応係数		○	○	
材料特性	炭素拡散係数	○	○	○	
	変態特性		○		
	機械的特性	○	○	○	
	熱特性	○	○		
前工程影響	残留応力	○			
	前組織		○		

◎本報告で重点的に考察した因子      ◻冷却に関連する因子  
○影響のある因子

り分けが困難なため従来より非常に多くの手間がかかることとなっており、積極的に行われてきたとは言い難い実情がある。

#### ◇ 熱処理シミュレーションのバックグラウンド

近年、コンピュータの進歩に伴いコンピュータシミュレーションで処理可能な情報量、数値解析技術が著しく進歩している。古くは18ヶ月でCPUの処理能力が2倍になるというムーアの法則<sup>2)</sup>が説かれ、コンピュータシミュレーションによる複雑な問題の解決は時間を待てばできるようになると考えられていた。このCPU進歩は2000年代には回路集積の物理的限界から一時期陰りが見えたが、シミュレーションの世界では並列計算であるGPUコンピューティングが提案され、再び計算速度の進歩は日進月歩の状態に戻っている<sup>3)</sup>。

これらの様にシミュレーションに対するニーズ・シーズとも高まる中、熱処理シミュレーションによる熱処理歪・品質の予測手法については多くの研究がなされている<sup>4)</sup>。本報ではこのような日進月歩のシミュレーション技術進歩の中、

①熱処理シミュレーションがどう進歩してきた

のか、また、その周辺技術と適用例の解説  
②進歩に伴って拡大してきたシミュレーションを活用する際の懸念事項とその対策  
③熱処理シミュレーションの将来の進化の展望  
④これらの進化が特殊鋼の進化にどのように影響するか  
について解説する。

#### ◇ 熱処理シミュレーションの概要

熱処理工程では多くの条件に対して多くの品質が決まる。図2は主要な熱処理シミュレーションの入力因子と出力因子、その計算の構成を示したものである。部品の形状や浸炭・焼入れの状態を入力条件とし、これを流体解析や沸騰解析を用いて解いたうえで、これらを境界条件として左に示す熱処理シミュレーションを実施する。熱処理シミュレーションではこれら境界条件を元に熱伝導解析・弾塑性応力解析・炭素濃度拡散解析・金属相変態解析を強連成にて計算し、熱処理品質を結果として得る。

油焼入であれば焼入時にワークの表面は時間を追って蒸気膜段階、沸騰段階、対流段階と冷却状態が変化し、それぞれの部位で冷却速度が異なる。

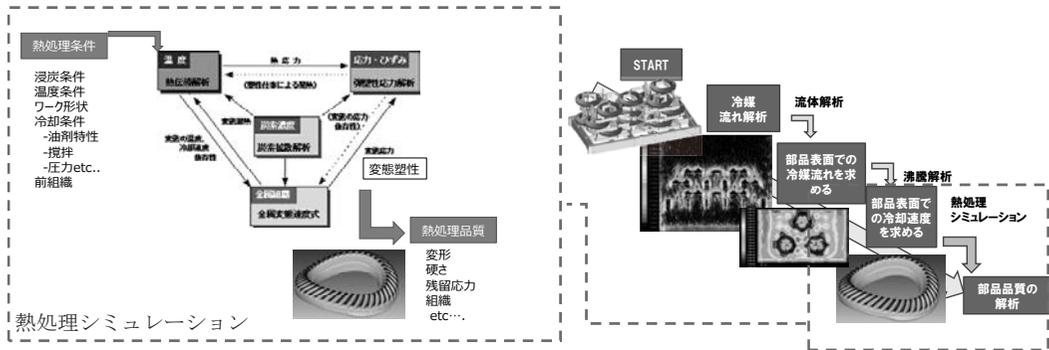


図 2 浸炭熱処理シミュレーションの構成

計算機上ではこれらの冷却速度分布を求め、熱処理シミュレーションの境界条件に付与する必要がある。

#### ◇ 熱処理シミュレーションの歴史

熱処理ひずみは、熱処理工程での工業的な問題となっており、その解決には種々の実験的、実生産的な対策が講じられてきた。日本の伝統的なモノづくりである刀鍛冶において焼入れによるそりを見込んで焼入れ前の形状修正の工程が採用されているのもその一つの例である。熱処理シミュレーションは、この熱処理ひずみの予測に端を発し、年々改良が加えられている。

古くは、1961年にSachsら<sup>5)</sup>がリングギヤの焼入れひずみについて線膨張係数の違いや形状的な因子による簡易的なモデルでメカニズムを説明した。

1973年には、井上らが有限要素法を用いて、熱収縮、変態膨張、組織の違いによる応力差を総合的に解析してひずみを求め丸棒試験片を用いた実験値との比較を行った<sup>6)</sup>。これは近年の熱処理シミュレーションソフトウェアの起源と呼べる。1976年には、利岡が有限要素法を用いて、マルテンサイト一相、マルテンサイトとベイナイトの二相のケースについて焼入れひずみを有限要素法で解析しその有効性を検証した<sup>7)</sup>。同年に橋本らは有限要素法を用いて円柱の焼入れ後の残留応力と変形の解析を行った<sup>8)</sup>。

1990年代になると、多様な熱処理変形に関する解析が紹介されている<sup>9)~11)</sup>。リング形状に関する高周波焼入れ、クランクシャフトの高周波焼入れシミュレーション、また加熱工程での磁場解析に

もシミュレーションが適用されるようになった。2000年代になるとTTT (Time-Temperature-Transformation) 曲線をデータベースとしたシミュレーション、同様に様々な材料の特性をデータベース化したシミュレーションも提案された<sup>12)~15)</sup>。

また昨今では熱流体解析を組み合わせた熱処理シミュレーションも報告されている<sup>16)</sup>。有本らは2002年に、キー溝の付いた丸棒の変形について、塑性ひずみ、弾性ひずみに分解したひずみ解析を提案している。そのほか近年では、焼き割れに関するシミュレーション手法も提案されている<sup>16)、17)</sup>。このように複雑な焼入れ現象を解析する技術は年々複雑な解析手法が組み合わせられた形で進化してきている。しかしながら実際に複雑な形状の部品を量産で焼入れする工程について、現象及び変形を精度よく解析するに至っていない。これは前段および後述で示すように冷却条件の複雑性によるところが大きい。

#### ◇ 熱処理シミュレーションの適用

油焼入れは雰囲気熱処理における最も一般的な焼入れ方法であり、広く実施されている。しかし、焼入れ時の冷却現象は蒸気膜崩落現象を含んでいるため複雑かつ繰返し再現性が低く、完全には解明されていない。このため、現在も油焼入れでのひずみ低減や安定化に関する多数の研究がおこなわれている。ひずみ低減をする場合、主要なひずみ制御因子である油の熱伝達率を明確にする必要がある。油焼入れ時の熱伝達率は部品の形状、積載方法、油剤の種類、焼入れ攪拌条件及び油温等によって大きく変化するため、シミュレーションにて熱

処理ひずみを予測するにはこれらの因子と熱伝達率を紐付ける必要がある。近年では油剤や流速によって熱伝達率をデータベース化する活動や<sup>14)</sup>、混相流解析にて焼入時沸騰現象を考慮して熱伝達率を導出が始まっている<sup>18)</sup>。初期に実施された熱処理シミュレーションでは全体が均一に冷却されると仮定した境界条件を付与した解析がなされていた。しかし、図2内に示すような不等方な変形は均一な冷却条件では再現することはできず、実作業での現象には、荷姿内のひずみバラツキ、不等方変形等、不均一な熱伝達率でないと再現できない現象がある。

この様な熱伝達率の複雑性を反映し、簡便に熱処理シミュレーションを用いる為、熱伝達率をカタログ化し、容易に焼入時の熱伝達率分布を与える取組みがなされている。2018年より熱処理技術協会では一般的な焼入れ冷却材のデータを収集しWebサイト上に公開しており、シミュレーションに容易に取り組み始めることができる環境が整ってきた<sup>19)</sup>。

熱処理ひずみには多くの要因があるが、すべての要因を反映したシミュレーションを実現するためには、浸炭雰囲気流体解析、材料物性データベースの精度向上や材料物性値予測シミュレーション等の技術が必要であり、技術的、また計算機能力の観点からまだ可能とはなっていない。しかし、表1でも示したようにこの中でも焼入れ条件・焼入れ設備及びジグの影響は比較的大きいと考えられ、これらを考慮したシミュレーションの研究が始まっている<sup>20)</sup>。

図3はリング形状の歯車で、その熱処理歪を流体解析との組み合わせにて予測した事例である。焼入時油流れの解析結果と熱処理歪の方向は一致し、また、実際の熱処理ひずみと解析で求めた熱処理歪は定量的に一致した。

これより、熱処理シミュレーションを実施する際に、熱伝達率を精度よく与える事で熱処理シミュレーションの品質が改善することが分かる。

#### ◇ 熱処理シミュレーションの品質について

以上の様に、近年熱処理シミュレーションに実ラインで起きている現象を与えることが可能になりつつあり実務での活用が始まっている。しかしながら実用上にはまだ解析精度保証等に問題があり信頼性向上が望まれている。解析の品質の評価の為には、ASME V&V 10-2006<sup>21)</sup>において、PIRT (the Phenomena Identification and Ranking Table) により考慮する物理現象と入力データとの関連を明確にする手法が提案されている。本項では浸炭焼入れ熱処理の熱処理シミュレーションにおける、特に焼入れ工程のPIRTの例について示す。PIRTでは、焼入れ工程で生じる種々のプロセスパラメータと形状、材料等の設計パラメータに分け、それに対する、実ラインで管理するパラメータ、入力データ等につき評価をした。表2にその事例について示す。

この中では環境とワーク内部の現象を仲立ちする因子である熱伝達係数、炭素反応係数は重要性が非常に高く、調査の必要性が高いことが分かる。このようなPIRTを用い、熱処理シミュレーション

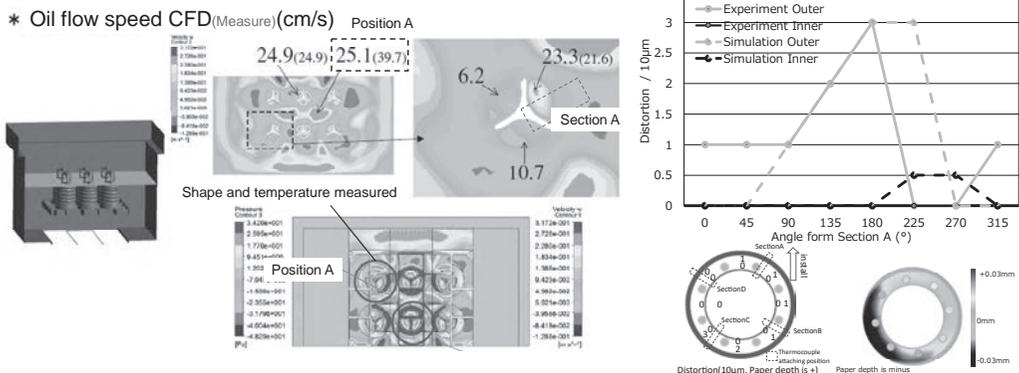


図 3 リングギヤ部品での焼入時冷却状態予測とそれを用いた歪解析結果

表 2 熱処理PIRT（一部抜粋）

実ラインで管理するパラメータ				入力データ						初期条件		境界条件		物性値		
分類	工程	因子	現象への影響	入力データ	測定対象	計測難易度	変換難易度	測定難易度	入力データ信頼性	解析精度依存性(感度)	温度分布	残留応力	熱伝達係数		拘束条件	
プロセスパラメータ (Px)	加熱(均熱)	ヒーター配置	温度	熱伝達係数	温度分布	易	易	易	高	高	○		○			
		ヒーター表面状態	温度	熱伝達係数	温度変化	易	易	易	高	中	○		○			
		ヒータPID制御	温度	熱伝達係数	温度変化	易	易	易	高	中	○		○			
		雰囲気ガス流量	温度	熱伝達係数	温度変化	易	易	中	中	中	○		○			
		ワーク表面状態	温度	熱伝達係数	面粗度	易	中	中	中	中	○		○			
		焼入れ温度(加熱過程)	相変態粒径	焼入れ温度	温度	強度	観察	易	易	易	高	高				○
	浸炭	加熱時間(保持時間)	相変態粒径	加熱時間	時間	強度	観察	易	易	易	高	高				○
		炭素雰囲気濃度	強度	炭素濃度	濃度	強度	観察	易	易	易	高	高				○
		浸炭温度	強度	浸炭温度	温度	強度	観察	易	易	易	高	高				○
		浸炭時間	強度	浸炭時間	時間	強度	観察	易	易	易	高	高				○
		冷媒種	温度	熱伝達係数	温度変化	強度	観察	易	中	中	中	高		○		
		冷媒量	温度	熱伝達係数	温度変化	強度	観察	易	中	中	中	高		○		
	焼入れ(冷却)	冷媒不純物	温度	熱伝達係数	温度変化	強度	観察	易	中	中	中	低		○		
		冷媒劣化	温度	熱伝達係数	温度変化	強度	観察	易	中	中	中	低		○		
		冷媒温度	温度	熱伝達係数	温度	強度	観察	易	中	中	中	高	○			
		冷媒冷却方法	温度	熱伝達係数	温度変化	強度	観察	易	中	中	中	低		○		
		冷媒冷却材温度	温度	熱伝達係数	温度	強度	観察	易	易	易	中	低	○			
		冷媒冷却効率	温度	熱伝達係数	温度変化	強度	観察	易	中	中	中	低		○		
		焼入れ室容量	温度	熱伝達係数	温度変化	強度	観察	易	中	中	中	中		○		
		焼入れ室流路構造	温度	熱伝達係数	温度変化	強度	観察	易	中	中	中	中		○		
攪拌方法	温度	熱伝達係数	温度変化	強度	観察	易	中	中	中	高		○				
	雰囲気圧	温度	熱伝達係数	温度変化	強度	観察	易	中	中	高		○				

で用いる因子の内、何が保証されているかを確認しつつシミュレーションを進める事は、工業的な品質保証の観点で重要である。

#### ◇ 熱処理シミュレーションの発展

旧来のシミュレーションでは閉じた計算機空間上でより精密に実現象を再現する取り組みがなされてきた。しかし、近年、インターネットの普及により流通可能な情報の量が増大するに従い、実験的に得る事が容易な情報は実際の観測によって入手し、シミュレーション構成式を実験結果で補正することでより容易に高精度な「現象予測」を行う、「データ同化」技術の活用が進んでいる。

例えば気象予報では気象衛星ひまわりの観測結果を気象シミュレーションのモデルに反映させることで予報精度が大幅に増加している<sup>22)</sup>。

同様に熱処理シミュレーションに置いても工程情報をシミュレーションに取りこみ解析に用いる応答曲面モデルを改善していく事で、熱処理シミュレーションの精度向上させていく事が考えられる。図4は熱処理シミュレーションにおけるデータ同化の例で、左下の様に収集したデータを統計処理しシミュレーションと連携する原始的なデータ同化から、IoTと呼ばれる広く工程から

データを収集するシステムで熱処理シミュレーションの品質を改善する研究が始まっている。

#### ◇ 熱処理シミュレーションの進化と特殊鋼

特殊鋼の特性改善による熱処理ひずみの改善は非常に有益である(たとえば<sup>23)</sup>)にも関わらず、その実ラインでの実証にかかる手間が膨大なため、広く実用に供されているとはいいがたい。熱処理シミュレーションを用いると、鋼材メーカーで材料モデルを構築し、それをユーザーが自社の熱処理炉モデル上でシミュレーションにてひずみを検証することで容易にその効果を実証できる。また、鋼材成分とその熱処理履歴より鋼材特性を予測するソフトウェアも実用化されており<sup>24)</sup>、前述の熱処理シミュレーション技術の進歩と相まって鋼材適用による低歪化の先行調査レベルであれば非常に簡便に結果を予測できるようになってきている。複雑なシステムを有する自動車ではシミュレーション上で概略検討を進めるモデルベース開発が進歩を遂げているが、同様に複雑な現象を有する「熱処理」においてもシミュレーションの親和性は高いと思われ、今後、シミュレーションの進歩とともに特殊鋼、熱処理の品質も日進月歩で向上していく事を期待したい。

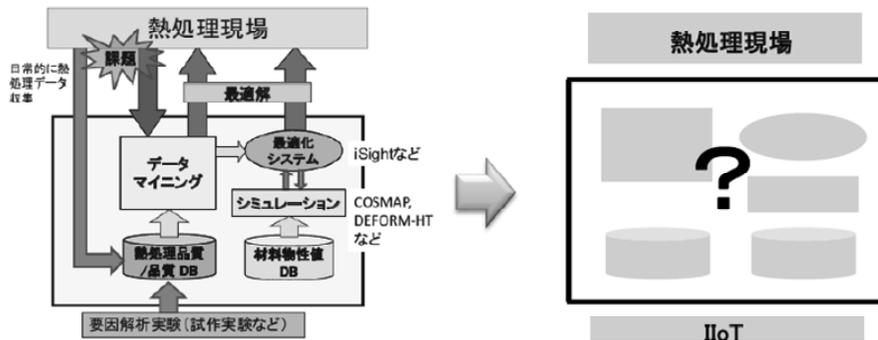
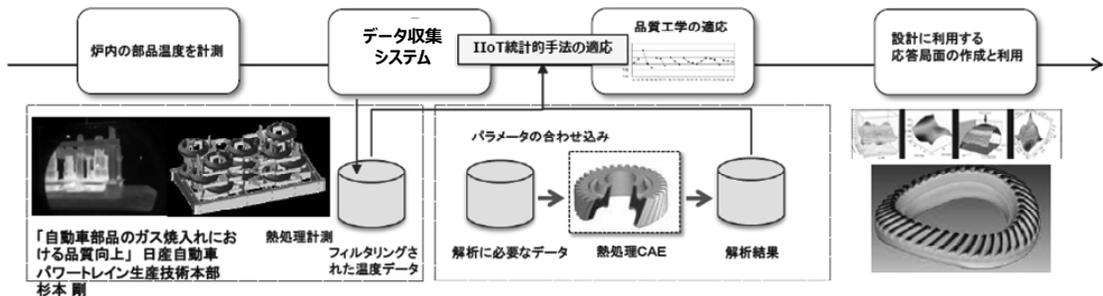


図 4 熱処理のIoTとシミュレーションの事例

## 参考文献

- 塩飽紀之：電動化による商品の変革とGame Changeを起こす生産技術、第16回 表面改質技術研究会概要集、pp. 50-104
- <https://ja.wikipedia.org/wiki/ムーアの法則>
- 林憲一：ディープラーニング：新しいコンピューティングモデル、第5回 自動車技術に関するCAEフォーラム in 東京講演資料
- Sugimoto, T. and Ju, D. Y.: Influence of Thermal Boundary Conditions on the Results of Heat Treatment Simulation, Material Transactions, 2018, 59 (6), pp. 950-956
- Sachs, K., Metal Treat. Drop Forg.: 28, 281 (1961), pp. 281-287
- 井上達雄、田中喜久昭：材料、22-218 (1973), pp. 218-223
- 利岡靖継：鉄と鋼、62-13 (1976), pp. 1756-1766
- 橋本真一、井上達雄、山田敏弘：材料、27-296 (1977), 422-426
- 有本享三、生田文昭、井上達雄：熱処理、34-6 (1994), 332-338
- 猪狩敏秀、紀博徳、森田鴻司、下河内寛子：三菱重工技報、35-4 (1998), 306-309
- 生田文昭、堀野孝、井上達雄：材料、47-9 (1998), 892-898
- Arimoto, K., Huang, D., Lambert, D. and Wu, W. T.: Proc. of the 20th ASM Heat Treating Society Conference, 1 (2000), 737-746
- 岡村和夫：溶接学会誌、72-8 (2003), 603
- 井上達雄、森本吉浩：材料、52-10 (2003), 1192-1197
- 大木力：NTN Technical Review, 69 (2001), 61-68
- 有本享三、奈良崎道治：熱処理、42-5 (2002), 346-352
- Arimoto, K., Ikuta, F., Horino, T., Tamura, S., Narazaki, M. and Mikita, Y.: Trans. Mater. And Heat Treat., 25-5 (2004), 486-493
- 杉本剛、渡邊陽一：46th日本熱処理技術協会講演大会講演概要集、(2005)、3-4<sup>7)</sup>
- 住田雅樹、杉本剛：熱処理シミュレーション実用化研究部会最終報告会 概要集、pp.36-40
- 杉本剛、谷口光一、山田茂則、松野俊之、園部勝：熱処理シミュレーション実用化研究部会最終報告会 概要集、pp. 4-8
- 工学シミュレーションの品質マネジメント JSCES S-HQC001: 2017, 日本計算工学会
- 三好建正：[https://www.jma-net.go.jp/sat/himawari/news/20170722\\_symposiumreport/siryoku/kouen4.pdf](https://www.jma-net.go.jp/sat/himawari/news/20170722_symposiumreport/siryoku/kouen4.pdf), 気象衛星ひまわりシンポジウム 講演資料
- [http://www.sanyo-steel.co.jp/technology/images/pdf/25/25\\_09.steampdf](http://www.sanyo-steel.co.jp/technology/images/pdf/25/25_09.steampdf)
- N. Saunders, Z. Guo, X. Li, A. P. Miodownik, and J-Ph. Schillé, Modeling of Thermo-Physical Properties Relevant to Solidification (TMS) (2003) 669

## V. 各社の歯車用鋼

### マイルド浸炭用鋼MSB20

愛知製鋼(株)

#### まえがき

近年では環境問題を背景に、自動車のCO<sub>2</sub>排出量の低減が求められ、車両の小型・軽量化による燃費向上や、生産プロセスにおいてもCO<sub>2</sub>排出量低減ニーズが高まっている。このようなニーズに対応するため、アイシン・エイ・ダブリュ株式会社に新浸炭プロセス「マイルド浸炭」<sup>1)</sup>、<sup>2)</sup>が開発された。

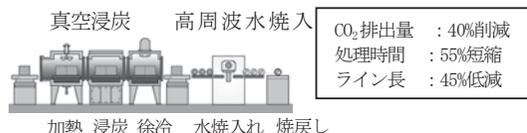
本稿では、「マイルド浸炭」の特長を活用し、歯車の省資源化、高強度化を実現するマイルド浸炭用鋼「MSB20」<sup>3)</sup>を開発したので、その概要について紹介する。

#### ◇ マイルド浸炭の概要

マイルド浸炭とは、真空浸炭と高周波水焼入れを複合した、新浸炭プロセスである(図1)。大きな特徴として、浸炭時のCO<sub>2</sub>排出量が従来のガス浸炭と比べ40%程度削減となる<sup>1)</sup>。これは、真空浸炭活用と冷却能力の高い水焼入れを活用することで、硬さを得るための必要炭素量が低減でき、浸炭時間が大幅に短縮されるためである。更に、ライン長も短縮され、火災も出ない、工場環境にも配慮されたプロセスである。

マイルド浸炭は生産面以外に部材の高強度化、

#### マイルド浸炭



#### ガス浸炭



図1 マイルド浸炭の概要<sup>1)</sup>

省合金化にも有利である。従来のガス浸炭は浸炭異常層と呼ばれる組織が浸炭処理表面に生成する。これは浸炭炉内の微量酸素により鋼材の添加元素が酸化され鋼中の固溶元素が低減し、焼入性が低下することで生じる不完全焼入組織である。この組織は軟質で鋭角な形状を呈するため亀裂の起点になりやすく、強度低下要因となる。一方、マイルド浸炭は真空中で浸炭処理するため浸炭異常層が生成しない。また、高周波水焼入れにより表層に亀裂の発生・進展を抑制する圧縮残留応力が得られ、この点からも強度向上に有効である。さらに、水焼入れすることにより高い冷却能力を得られるため、素材の焼入性を低く設計することが可能である。

#### ◇ 化学成分設計の考え方

マイルド浸炭用鋼MSB20の省合金化、高強度化の考えについて以下に示す。

##### 1) 省合金化

従来の歯車用鋼は、焼入性確保、高強度化のため、JIS SCM420を代表とする、Cr、Mo等の合金元素を添加した材料が使用されてきたが、合金元素価格の高騰、資源枯渇、産出地域の偏在が問題になり、部材の省資源化が求められている。マイルド浸炭は素材の焼入性を低減できるため、MSB20はCr、Moを無添加とすることにより、上記ニーズへ対応した。

##### 2) 高強度化

歯車には、主に歯面強度(ピッチング強度)と歯元曲げ強度(静的、低サイクル疲労、高サイクル疲労)が必要である。高サイクル曲げ疲労強度向上に有効である浸炭異常層の生成抑制、圧縮残留応力の付与はマイルド浸炭で得られるため、ピッチング強度と静曲げ強度、低サイクル曲げ疲労強度の高強度化を材料化学成分から検討した。

ピッチング強度向上には歯面の熱軟化抵抗性向上が有効であることが知られている<sup>4)</sup>。熱軟化抵抗性を向上させる元素としてSi、Cr、Moが挙げられるが、省合金化、低コスト化の観点から安価で効果の高いSiを選定した。また、Si添加、Cr無添

加とすることは真空浸炭時の課題の一つである、炭化物（主にセメンタイト）が浸炭表層近傍のオーステナイト粒界に析出する過剰浸炭組織による強度低下への対応としても有効となる<sup>5)</sup>。

従来のCr-Mo鋼（JIS SCM420等）の静曲げ試験、低サイクル曲げ疲労試験における破面は、脆性的な粒界破面を呈することが多い。粒界破壊を抑制するためには粒界脆化元素であるPの低減や、粒界強化、結晶粒の微細化が挙げられる。MSB20では、粒界強化の方策として、マイルド浸炭プロセスの高周波焼入れにより、結晶粒を微細化することに加え、B添加による粒界強化方策を選定した。BはPの粒界偏析を低減し、B自体も粒界を強化する効果がある。

このように、上記のコンセプトに沿って、MSB20を開発した。MSB20はCr、Mo無添加、かつ高Si-B添加を特徴とする鋼材である。

### ◇ MSB20の特長

開発したMSB20の特長を、表1に示す。JIS S20C（Cr、Mo無添加）とマイルド浸炭の組み合わせでは、省合金化、高サイクル曲げ疲労強度向上は達成できるが、ピッチング強度、静曲げ、低サイクル曲げ疲労強度の高強度化は得られない。一方、MSB20は、マイルド浸炭と組み合わせることで、

省合金でありながら、従来のSCM420ガス浸炭部品と比べ、ピッチング強度（20%UP）、曲げ強度（静的：30%UP、低サイクル曲げ疲労：20%UP）ともに、強度が向上する。

### むすび

マイルド浸炭用鋼「MSB20」について紹介した。MSB20はアイシン・エイ・ダブリュ株式会社、新日鐵住金株式会社と共同開発した鋼材であり、2012年11月より量産されている。

最後に、本開発にあたりご協力を頂いたアイシン・エイ・ダブリュ株式会社、新日鐵住金株式会社の関係者各位に、厚く御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 大林巧治：Automotive Technology、2007、11、p 160-165  
実用新案第2593071号
- 2) 大林巧治：第76回日本熱処理技術協会講演大会講演概要集、p 25-26
- 3) 杉浦孝佳、佐藤裕和、安達裕司：愛知製鋼技報、vol. 33 (2016)、No. 1、p 3-9
- 4) 安達裕司、福田康弘、笠松千尋、住田庸：愛知製鋼技報、vol. 22 (2004)、No. 1、p 19-24
- 5) 島田岳幸、安達裕司、水野浩行、池田秀哲、田中浩司：愛知製鋼技報、vol. 28 (2011)、No. 1、p 6

〔愛知製鋼(株) 鋼(ハガネ)カンパニー すぎうら たかよし 鋼部品開発部 特殊鋼部品開発室 杉浦 孝佳〕

表 1 鋼種・浸炭プロセス別にみた各種特長

項目		SCM420 ガス浸炭	S20C ガス浸炭	S20C ガス浸炭 → マイルド浸炭	MSB20 マイルド浸炭
歯元曲げ 強度	静的曲げ強度	□	×	×	◎(30%UP)
	低サイクル 曲げ疲労強度	□	×	×	◎(20%UP)
	高サイクル 曲げ疲労強度	□	×	◎	◎(30%UP)
歯面強度	ピッチング強度	□	×	△	◎(20%UP)
省合金 (Cr、Mo低減量)		□	◎	◎	◎
浸炭時CO <sub>2</sub> 排出量		□	□	◎	◎

SCM420 ガス浸炭比  
◎:優れる  
□:同等  
△:やや劣る  
×:劣る

# 神戸製鋼所の歯車用鋼

(株)神戸製鋼所

## まえがき

自動車の燃費改善、部品の小型・軽量化のニーズを背景に、変速機や差動装置に使用される歯車の高強度化が強く望まれてきました。歯車は繰り返し負荷を受けることにより、歯元が曲げ疲労折損する場合や歯面がピッチング損傷する場合があります。また、高負荷の差動装置用歯車においてはケースクラッシュと呼ばれる塑性変形を伴う破壊が問題となることがあります。これらの課題を解決するため、当社では下記のような鋼材の開発をおこなって参りましたので紹介させていただきます。なお、鋼材の化学成分は表1に示します。

### ◇ 高靱性歯車用鋼 [KKGシリーズ]

歯車は耐摩耗性を確保するため、一般的にガス浸炭処理により表面の炭素濃度を増大させてから焼入れを行い高い表面硬さを得ていますが、歯元で発生する曲げ疲労折損には表面硬さの影響が大

きいことが知られています。これにはガス浸炭時に発生する異常組織（不完全焼入れ層や粒界酸化層）の生成が関わっています。歯車用の鋼材には焼入性を向上させるためにSi、Mn、Cr等の合金元素が添加されていますが、これらの元素は酸素に対してFeよりも卑な元素であることから浸炭処理中に酸化物を形成して粒界酸化層が生成します。これにより焼入性に寄与する合金元素が減少するため、歯車表層に不完全焼入れ層が生成し、表面硬さを低下させます。

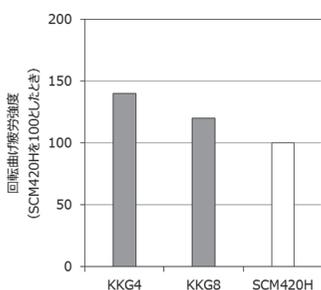
この問題を解決するため、本開発鋼は特に酸素と結びつき易いSiを低減し、Feよりも貴な元素であるMoを添加して鋼材の焼入性を確保しています。また、不純物元素であるPを低減することによっても鋼材の靱性を確保し、強度改善を図りました（図1a）。

### ◇ 高強度省合金型歯車用鋼 [KMNC418H]

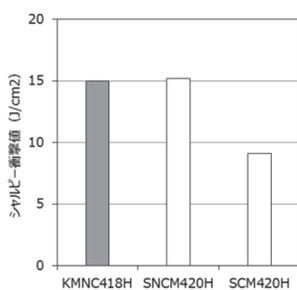
歯車用の鋼材には焼入れ後の硬さを確保するために、Si、Mn、Cr、Ni、Moなどの合金元素が添加されていますが、このうちNi、Moは産出量の少ないレアメタルに分類され、調達性、価格の安定性に懸念があると示唆されています。

表 1 当社の歯車用鋼の化学成分（代表値） wt%

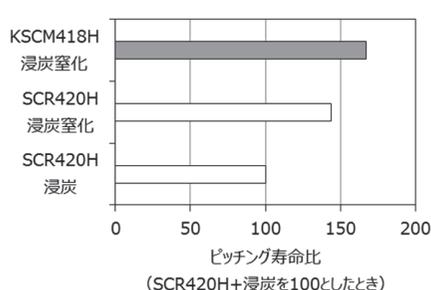
鋼種名称	鋼種規格名	C	Si	Mn	Cr	Mo
高靱性歯車用鋼	KKG3	0.16	0.1	0.7	1.1	0.4
	KKG4	0.20	0.1	0.7	1.1	0.4
	KKG8	0.20	0.1	0.7	1.1	0.8
高強度省合金型歯車用鋼	KMNC418H	0.18	0.1	1.5	1.1	-
耐高面圧歯車用鋼	KSCM418H	0.18	0.5	0.4	1.4	0.4



a) 高靱性歯車用鋼の疲労強度



b) 高強度省合金型歯車用鋼の衝撃強度



c) 耐高面圧歯車用鋼の耐ピッチング性

図 1 当社の歯車用鋼の代表特性

この問題を解決するため、本開発鋼はNi、Moの無添加をベースとしており、Mnを増量することで浸炭後の残留オーステナイト組織を一定量確保して強度を確保しています。残留オーステナイト組織はマルテンサイト組織よりも低硬度ですが強靱であるため、一定量を確保することで硬さと靱性の両立を図ることが可能です。また、不純物元素であるPを低減することによっても強度の改善を図っています（図1b）。以上のような成分調整により、代表的なNi、Mo添加鋼であるSNCM420Hと同等の衝撃特性、曲げ疲労特性が得られています。

#### ◇ 耐高面圧歯車用鋼 [KSCM418H]

歯車の歯面で発生するピッチング損傷の抑制には表面硬さの向上が有効ですが、歯車は使用中に摺動面が300℃程度まで上昇し、表面が軟化して強度が低下する問題があります。一般的に、歯車には浸炭処理にて表面を硬化させますが、耐ピッチング性を高めるためにはより高硬度が得られる高濃度浸炭処理や浸炭窒化処理などの特殊熱処理の利用が考えられています。

これらの処理は浸炭や浸窒によって硬質な炭化物、窒化物を鋼材表面に析出させる方法ですが、同時に不完全焼入れ層などの異常組織が生成する問題もあります。開発鋼は異常組織の生成を抑制し、かつ、素材の軟化抵抗性を向上させるためSi、Cr、Moの添加量を調整し、耐ピッチング性を大幅に改善しています（図1c）。

浸炭窒化処理においては、浸窒によって表層組織にCrNが析出し、素地中のCr量低下に伴って焼入性が低下して、不完全焼入れ組織が生成することがあります。これによって硬さが下がり、耐ピッチング性が低下しますが、開発鋼ではMo添加により焼入性低下を抑制し、さらにSi増量で素材の軟化抵抗性を向上させています。また、焼戻し時に微細析出する鉄窒化物による析出強化と併せて硬さ低下を抑制しました。

高濃度浸炭処理においては、炭素を過飽和に浸炭させるため比較的大きな炭化物が析出しますが、これによって歯車の歯元曲げ疲労強度の低下が起ります。また、素地中のCrが炭化物へ分配されて不完全焼入れ組織が生成します。曲げ疲労強度の低下に対しては、炭化物を微細分散させる熱処理技術と鋼材成分設計の組合せにより、曲げ疲労強度の低下を抑制しています。また、Cr量に応じてMo量を適正化し、不完全焼入れ組織の生成を抑制しました。

#### むずび

上記で紹介しました開発鋼は自動車や二輪車の変速機や差動装置の歯車にご採用いただいております。今後も歯車の小型化、高負荷化の要望に併せて、適用範囲も広がるものと考えます。

〔株神戸製鋼所 鉄鋼事業部門 技術開発センター しんどう ようすけ〕  
〔線材条鋼開発部 線材条鋼開発室 室長 新堂 陽介〕

# 高強度肌焼鋼ECOMAXシリーズ

山陽特殊製鋼(株)

## まえがき

ECOMAX鋼は、Ni・Moフリーの高強度肌焼鋼である。狙いとする主な用途は、JIS規格鋼であるCr肌焼鋼（SCr420）やCrMo肌焼鋼（SCM420）、NiCrMo肌焼鋼（SNCM420）等が用いられる自動車や建設機械、産業機械の歯車・シャフト等の動力伝達部品である。現在、ECOMAXシリーズとして3種類の鋼をラインナップし、商品展開している。

従来、高強度が要求される部品には、その大きさや必要強度レベルを考慮して冒頭に述べたSCM420やSNCM420、更にはNiやMoを増量した開発鋼が使用されてきた。しかしNiやMoを添加することは、加工性劣化による生産性の阻害、生産条件の制約、鋼材コストの上昇を招くことになる。特に部品生産方法の点では、熱間鍛造工法に比べてニヤネットシェイプ化による歩留り向上に有利な冷間鍛造工法への適合を可能にすることが重視される。そのためには、冷間鍛造性に加えて、冷間鍛造後に焼ならしを行わずに浸炭焼入れを行っても、オーステナイト粒の粗大化を抑制することが必要となる。この背景のもと、NiやMoに頼ることなくSiやMn、Crを主体として、その量を最適化する成分設計により、高強度で部品製造性にも優れたECOMAXシリーズを開発してきた。以下にECOMAX鋼の特徴を紹介する。

## ◇ ECOMAX鋼の特徴

### 1. ECOMAX鋼の概要

ECOMAX鋼は、JIS規格鋼であるSCM420に比べて、高Si-低Mn-高Cr組成に成分設計され、かつ少量のNbを含有する。この成分に至った主な理由は、昨今の歯車用鋼として特に求められている耐ピッチング性と耐結晶粒粗大化特性を向上させるためである。更にECOMAXシリーズの3鋼種には、それぞれ以下に示す特徴も兼ね備える。焼入れ性は、SCM420HのJIS規格レベルに位置することから、SCM420Hを使用していた部品サイズに概ね適用可能である。

### <ECOMAX1とECOMAX2>

B添加しており、特に強靭性を重視する対象に適用している。ECOMAX2は、ECOMAX1と比べてCr量が異なる。

### <ECOMAX4>

従来にはない浸炭焼入れ後の熱処理変形の軽減を狙った鋼である。熱処理変形特性に関する詳細は、本誌2019年1月号を参照されたい。

## 2. 耐ピッチング特性

自動車用をはじめとする歯車ユニットにおいて、使用する潤滑油は低燃費化を図るために低粘度指向にある。それに伴い、歯面における耐ピッチング特性の向上が必要となっており、鋼材に対する期待も大きい。図1にECOMAX鋼のローラーピッチング試験による疲労寿命の概念図を示す。ECOMAX鋼は、SCM420Hに比べて5倍以上の高い疲労寿命を有する。

ECOMAX鋼の耐ピッチング特性が向上した理由は、SiやCrの増量により焼戻軟化抵抗がSCM420Hに比べて優れることと図2に示すとおり、浸炭最表面に母地組織に比べて軟質な浸炭異常層（粒界酸化と合金元素の欠乏によって形成した不完全焼入れ組織）が浅く、かつ表面全体に均一に広がることにある。特に後者の状態は、早期に浸炭異常層が摩耗し、粒界酸化を起点とするき裂長さを短くする、あるいはき裂生成自体を抑制することに寄与すると推定している。

この浸炭異常層と耐ピッチング特性との関係について、更に解説する。歯車同士がかみ合う際には、歯面において金属すべりによる摩擦力が生じ

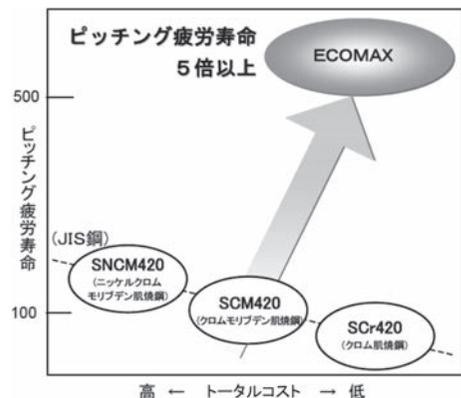


図 1 ECOMAX鋼の疲労寿命に関する位置づけ

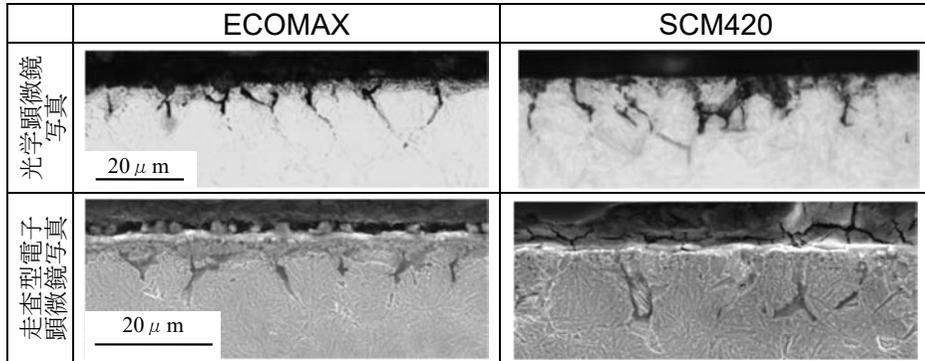


図 2 ECOMAX鋼のガス浸炭後の浸炭異常層<sup>1)</sup>

る。ピッチングは、その摩擦力の作用を受けて表面からき裂が生成し、伝ばする過程を経て生じる。この過程に従うと表面に形成する浸炭異常層の性状は、き裂生成の点から、耐ピッチング特性に影響する重要な因子となる。浸炭異常層は、ガス浸炭焼入れ時に雰囲気中の微量酸素と酸素との親和性が高い合金元素が優先的に結合することで表面酸化や粒界酸化が進行し、その近傍が合金欠乏により焼入れ時にベイナイト等の不完全焼入れ組織に変態することで生じる。粒界酸化は欠陥としてピッチングの起点になり、その深さ低減は耐ピッチング特性を向上させることが知られている。ECOMAX鋼は、酸素と親和力の高いSiやCrを高めており、浸炭異常層の性状が変化することで、疲労初期に粒界酸化深さの低減をもたらしたと考える。

### 3. 耐結晶粒粗大化特性

浸炭焼入れ中にオーステナイト粒の粗大化が生じると、部品強度の低下や熱処理歪の増加による部品精度の悪化等に影響を及ぼす。特に冷間鍛造で製造した部品を、追加熱処理を行わず、そのまま浸炭する場合には、昇温時変態直後のオーステナイト粒が微細化するために、他の工法に比べて、引き続きの昇温や保持過程において結晶粒粗大化が生じ易い。ECOMAX鋼は、少量のNbを添加することで、汎用のJIS鋼に比べて結晶粒界の移動をピン止めする微細析出物（炭・窒化物）を増量分散させて、耐結晶粒粗大化特性を向上させた。更にJIS鋼に比べて高Crとすることで、冷間鍛造前に軟化目的で実施される焼鈍後ミクロ組織の均質化を図っている。このことで耐結晶粒粗大化特性は一段と向上した。JIS鋼の成分系では、軟化焼鈍中に、

フェライトと球状炭化物が分散した組織に加えてラメラ状炭化物が不可避に生成する。ラメラ状炭化物は、結晶粒粗大化を促進する原因となることを明らかにしており、その抑制策が高Cr化である<sup>2)</sup>。以上の成分設計により、例えばECOMAX4で冷間鍛造-浸炭工程の模擬として、70%冷間据え込み後に一般的な浸炭温度以上となる950℃で保持し焼入れた場合でも、結晶粒が粗大化しなかったことを確認している。SCM420では900℃保持で結晶粒粗大化が発生したことに比べると、大幅に耐結晶粒粗大化特性が向上した<sup>3)</sup>。ECOMAX鋼は、JIS鋼で必要とされる冷間鍛造後の焼ならし省略が期待できる。

### むすび

ECOMAX鋼は、優れた耐ピッチング特性を有するだけでなく、耐結晶粒粗大化特性や熱処理変形特性（ECOMAX4）、冷間加工性を兼ね備える。これら特性が、部品の製造工程省略・簡略化によるトータルコストダウンや部品形状の高精度化による静粛性・快適性の向上、部品高強度化による小型・軽量化をもたらすことが期待される。

### 参考文献

- 1) 丸山貴史、藤松成史、常陰典正：山陽特殊製鋼技報、Vol. 22、No. 1 (2015)、21-28
- 2) 藤松成史、橋本和弥、平岡和彦、福本信次、山本厚之：鉄と鋼、Vol. 95、No. 2 (2009)、169-175
- 3) 藤松成史、丸山貴史、中崎盛彦：まてりあ、Vol. 56、No. 2 (2017)、79-81

〔山陽特殊製鋼(株) 研究・開発センター 新商品・技術開発室 商品開発1グループ グループ長 橋本 和弥〕

# 表面硬化鋼の製造工程省略を可能とするJFEスチールの歯車用鋼

JFEスチール(株)

## まえがき

歯車などに使用される、浸炭をはじめとする表面硬化用鋼材は、自動車機械部品としての優れた強度、疲労特性をはじめ、部品製造工程でも様々な特性を要求される。

例えば鍛造後の形状精度に優れる冷間鍛造を活用した浸炭部品製造においては、冷間鍛造前に鋼材変形抵抗低減目的で軟化焼鈍が施される。また、鍛造後の浸炭焼入れは、高温長時間処理のため、結晶粒の粗大化が生じるケースがある。特に冷間鍛造後は不均一な歪分布の影響で、結晶粒が粗大化しやすい。結晶粒の粗大化は疲労特性を低下させるため、その防止が重要である。汎用JIS規格鋼(SCR420/SCM420等)では結晶粒粗大化防止のため、冷鍛歪の除去を目的とした浸炭前焼ならしを余儀なくされている。近年の部品価格競争激化を背景に、冷間鍛造前の焼鈍や浸炭前の焼ならしを省略可能な肌焼鋼のニーズの高まりを受け、JFEスチールでは、鋼の変形抵抗および浸炭時の結晶粒成長を検討し、冷間鍛造前の焼鈍と浸炭前の焼ならしを省略可能な鋼(JECF<sup>®</sup>)を開発した。

また、昨今部品への高精度化ニーズの高まる中、熱処理時のひずみ発生低減により、後工程で歯面の仕上げ研磨などの修正を省略可能な軟窒化処理の適用拡大が望まれている。しかしながら軟窒化処理は浸炭焼入れと比較して硬化層が浅く、疲労強度の観点から適用拡大への課題を有する。疲労強度向上のためには、表層のみでなく心部、すなわち素材硬度の上昇が有効だが、素材硬度の上昇は被削性低下を招くジレンマを有する。JFEスチールでは部品の低ひずみ化と低コスト化に貢献すべく、疲労強度と被削性を両立した高強度軟窒化用鋼を開発した。

本稿ではこれら開発鋼を紹介する。

## ◇ 冷間鍛造前焼鈍と浸炭前焼準の省略が可能な浸炭用鋼

### 1. 冷間鍛造前焼鈍の省略

低変形抵抗と十分な焼入れ性の両立のため、これらに及ぼす合金元素の影響を調査した。CrはSiやMnと比較して、圧延材硬度を上昇させず、焼入れ性を向上させる。JECF<sup>®</sup>では、JIS規格鋼に対して、

Si、Mnを低減し、Crを増加させた。ここで、Si低減は浸炭時表層の粒界酸化抑制により、疲労特性も向上させる。また、Crの増加は焼戻軟化抵抗性を上昇させ面疲労強度を向上させる作用もある。合金元素の適正化に加え、棒線圧延の温度制御により、比較的軟質な組織であるフェライトの分率を向上させた。これらの技術により、変形抵抗は、JIS鋼の焼鈍材よりも、JECF<sup>®</sup>圧延まま材の方が低く、冷間鍛造前の焼鈍省略が可能である(図1-(a))。

### 2. 浸炭前焼準の省略

一般に、結晶粒成長の抑制には、微細析出粒子による結晶粒界のピン止め効果が有効である。析出粒子によるピン止め効果はその数密度が増大するほど向上する。すなわち、析出粒子体積率の増大および析出粒子の微細化が重要である。JFEスチールでは、析出物の熱力学安定性を熟慮し、最適な合金添加量および圧延加熱温度を導出することで、Nb炭化物の微細分散技術を開発した。JECF<sup>®</sup>とSCM420を歯車に冷間鍛造し、焼ならしを施さずに、930℃で3時間保持後に急冷する浸炭模擬熱処理を行った結果を図1-(b)に示す。SCM420では、粒径100μmを越える顕著な結晶粒の粗大化が認められた。一方、JECF<sup>®</sup>の結晶粒は微細で、粗大化が認められず、良好な組織を呈した。このように、JECF<sup>®</sup>は焼ならしを省略しても浸炭時の結晶粒粗大化を抑制可能である。

## ◇ 熱処理後歯研省略が可能で高強度を両立する高強度軟窒化用鋼

### 1. 開発鋼の設計コンセプト

本開発鋼の適用ターゲットは、JIS機械構造用鋼のクロム鋼(SCR420)等を素材として熱間鍛造、切削加工を経て、表面硬化処理(浸炭焼入れ、軟窒化等)を施す部品である。この工程では被削性

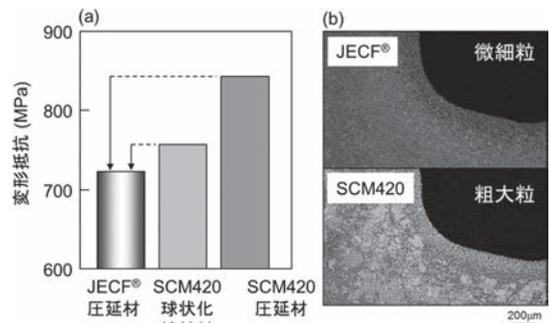


図1 開発浸炭用鋼の特性 (a) 冷間鍛造時の変形抵抗、(b) 浸炭焼入れ時のオーステナイト粒径粗大化挙動

と疲労強度が求められるタイミングは異なる。本開発鋼では軟窒化処理時の加熱温度に着目した。鋼の強化機構の一つに鋼中に微細な炭化物や窒化物の粒子を析出させる析出強化があるが、軟窒化時の加熱温度は、これら炭窒化物の微細析出に適した温度である。軟窒化前の切削時点では析出元素の固溶を保ち析出物を低減させ、これを軟窒化時に析出させることで、被削性と疲労強度の両立が可能と考え、以下のコンセプトで成分設計を行った。

①微細炭窒化物形成元素の添加

V等、軟窒化中に炭窒化物として析出する元素を添加した。これらの元素は表面においても軟窒化中に拡散した窒素と窒化物を形成し、表面硬度の向上にも寄与する。

②軟窒化前切削加工時の硬度上昇抑制

Vはオーステナイト中では多くが固溶状態にあり、母相のフェライトへの変態時に変態相界面に析出する。Cr、Mn、Moなどの合金元素添加による母相変態温度の低温化、すなわちベイナイト化により、V炭窒化物の熱鍛後冷却時の析出を抑制し、切削時の硬度を低下させる。その後軟窒化時の加熱保持により、炭窒化物微細析出による心部硬度上昇を達成する。

③ベイナイト硬さ低下

ベイナイト組織はフェライト・パーライト組織と比較して一般に高硬度なため、硬質析出物が少

なくても被削性の悪化が想定される。そこでC、Siの添加量を低減し、硬さを低く抑えている。

2. 開発鋼の特長

図2に示す通り、上記コンセプトで設計した開発鋼を用いて製造された部品は以下の特長を有する。

- ・軟窒化処理のため低ひずみ (図2-a)
- ・浸炭鋼並の高い疲労強度を有する (図2-b)
- ・熱間鍛造ままで優れた被削性を有するため、焼ならしなどの熱処理が不要で製造コスト低減が図れる。

むすび

JECF<sup>®</sup>は冷間鍛造前の焼鈍と、浸炭前の焼ならしとを省略可能とし、浸炭後疲労特性はJIS規格鋼と同等以上である。

また、高強度軟窒化用鋼は、自動車を含む輸送機器等のギアやシャフトに適用可能である。従来鋼の浸炭焼入れ材と比べ、より低ひずみ・低コストとなり、今後の適用部材拡大が期待できる。

JFEスチールはこれら開発鋼を部品価格競争力の向上手段として、また、熱エネルギー消費を抑制し、環境にやさしいものづくりの推進手段として貢献したい。

〔JFEスチール(株) スチール研究所 いわもと たかし  
棒鋼・線材研究部 岩本 隆〕

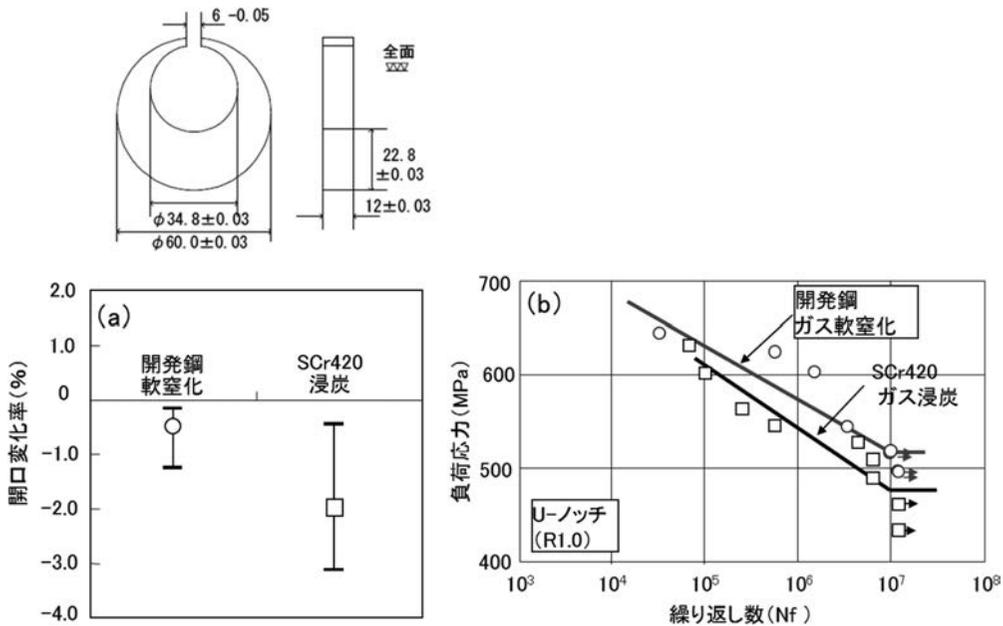


図2 開発高強度軟窒化用鋼の特性  
(a) 熱処理時の変形特性、(b) 熱処理後の疲労特性

# 新日鐵住金の齒車用鋼

新日鐵住金(株)

## まえがき

近年、地球環境保護の観点から自動車の燃費向上と二酸化炭素排出量低減に対するニーズが高く、変速機においても骨格の小型軽量化、それに伴う部品形状の複雑化への対応が要求されています。一方、電気自動車ではモータから発生する音がエンジンに比較して小さいことから、従来に以上に変速機の静粛性が求められます。これらの要求に対応するために自動車各社では種々の表面硬化熱処理を施した高強度の駆動部品を製造する必要があります。新日鐵住金(株)では各表面硬化熱処理および駆動部品の要求特性に応じた肌焼鋼を開発し、商品化しています。ここではその一端として高強度窒化齒車用鋼、耐摩耗CVT用鋼を紹介します。

### ◇ 高強度窒化齒車用鋼

齒車の高強度化手法として一般的な浸炭焼入れはマルテンサイト変態を利用しており、変態膨張による熱処理変形を避けることができません。熱処理変形は齒車噛合い騒音の原因となることから、浸炭焼入れ後に、齒研などの齒形修正を施してこの影響を低減することが一般的ですが、齒研はコ

スタップの要因となるうえ、そもそも齒車形状によっては齒研が難しい場合もあります。そこで新日鐵住金(株)では疲労強度と低熱処理変形、更に部品製造性を満足すべく、低温処理で熱処理変形が小さい窒化技術に着目し、高強度窒化齒車用鋼を開発しました。

窒化は鋼材を500~600℃程度に保持して鋼材の表面から窒素原子を侵入、拡散させて部品の表層を硬化する処理で、鋼中に溶解した窒素原子による固溶強化や、合金窒化物生成による析出強化を利用しています。特に齒車では齒元や齒面などの表層で高い応力を受けることから、窒化処理時に効率的に窒素拡散層の硬さを増大させることが要望されます。一方、齒車芯部が軟らかすぎると作動時に齒車芯部に塑性変形が生じてしまうため、芯部には窒化処理温度で軟化しにくいことが要望されます。更に、齒車は切削加工で成形されることから被削性が重要であり、窒化前には硬すぎないことが要望されます。

高強度窒化齒車用鋼の開発では、まず表層硬さ増大効果の大きい元素としてCrおよびV含有量を増大するとともに、表層硬さの増大を阻害するC含有量を低減させました。CrとVはFCC型の複合炭窒化物(Cr、V)(C、N)を形成しており、母材のフェライトとBaker-Nuttingの方位関係で析出することで硬化に寄与しています。更に被削性を考慮し、焼準後の組織にベイナイト組織を含ま

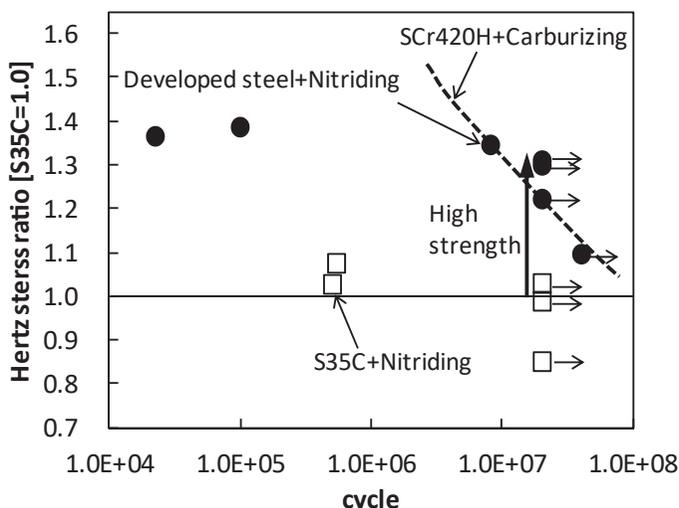


図 1 高強度窒化齒車用鋼のローラピッチング試験結果

ずフェライト、パーライトの混合組織になるように他の合金成分を調整しています。

現用鋼S35Cに比較して開発鋼は優れた空化特性を有し、回転曲げ疲労強度で3.2倍、図1に示すようにローラピッチング試験で1.3倍の高疲労強度を呈しており、JIS-SCr420のガス浸炭品と同等の強度を示しました。現在、自動変速機用の内歯車として使用されています。

#### ◇ 耐摩耗CVT用鋼

ベルト式CVTは浸炭鋼のプーリで共析鋼のベルト（エレメント+リング）を挟み込み、両部品の間に生じる摩擦力を介して動力を伝達します。この時、ベルトから押付け力と摩擦力を繰返し受けることでプーリ表面には深さ数 $\mu\text{m}$ ~数十 $\mu\text{m}$ 程度の微小摩耗が生じることがあります。微小摩耗が生じると、段差によりベルト式CVTの特徴である滑らかな無段変速を阻害したり、ベルトとプーリ面の摩擦力が低下したりするなどの影響が生じます。この影響を最小化するため、新日鐵住金（株）では耐摩耗性を増大できる耐摩耗性CVTプーリ用鋼を開発しました。

CVTプーリの微小摩耗は、微小き裂の連結による疲労摩耗です。ベルトの部品であるエレメント側面には微小溝が付いており、ヘルツ接触と仮定すると表面から10 $\mu\text{m}$ 程度の深さにせん断応力の影響を受けることが弾性解析から分かります。このせん断応力の繰返しにより、微小き裂が生じ摩耗に至るわけです。裏を返すと、耐摩耗性を増大するためには、このせん断応力が繰返される範囲を強化する必要があります。

ところで、炭素鋼を焼入れすることでマルテン

サイト組織に変態します。その硬さは、一般的に炭素濃度の増加に応じて増大しますが、炭素濃度が0.7%程度以上になるとになると未変態のオーステナイトが残留するため、硬さの増大傾向が緩和されます。もし、この残留オーステナイトを後からマルテンサイト変態させることができれば、周囲よりも高炭素のマルテンサイトが生じ、硬さを増大することができると考えられます。

耐摩耗CVT用鋼は、ユニット作動中に繰り返されるせん断応力を利用して、表層の残留オーステナイトを応力誘起マルテンサイト変態させて表層硬さの増大を狙ったものです。この効果を利用するために、耐摩耗CVT用鋼の開発ではCrの含有量を調整し、ガス浸炭焼入れで生じる残留オーステナイト量を増大しました。具体的には、浸炭焼入れ後の硬さ分布はSCM420と同程度でしたが、初期の残留オーステナイト量は1.5倍に増加しました。ユニット作動により表層の残留応力、硬さは大幅に上昇し、その結果、摩耗深さは37%低減しました。

#### むすび

自動車用歯車の最新動向ということで、2つの開発鋼を紹介しました。一方、新日鐵住金（株）ではこれまでに開発した、耐高面圧歯車用鋼XG5、高強度歯車用鋼CM201、耐衝撃疲労用鋼NT-B、耐粗粒化用鋼ACEシリーズなど、数多くの歯車用鋼のメニューを保有しています。今後もお客様のニーズ・工程に即した歯車用鋼をご提案し、お客様とともに歩んで参ります。

〔新日鐵住金(株) 技術開発本部 ほりもと まさゆき〕  
〔鉄鋼研究所 棒線研究部 (上席主幹研究員) 堀本 雅之〕

## 大同特殊鋼の歯車用鋼

大同特殊鋼(株)

大同特殊鋼（以下、大同）は自動車用歯車の設計と工法の進化を先取りして、種々の歯車用鋼を開発してきました。自動車部品の小型軽量化や低廉化などの様々なニーズに対応する歯車用鋼についてその特長を紹介します。

### ◇ 高強度歯車用鋼

#### 1. DSG™シリーズ<sup>1)</sup>

自動車用ミッション歯車にはガス浸炭処理が施され、0.2%の炭素を含むJIS-SCr420材の歯車の表面炭素濃度は約0.8%にまで高められます。これを焼入れ、焼戻し処理後の表層硬さは約60HRCまで硬くなり、耐摩耗性と疲労強度に優れた歯車が得られます。ところが、ガス浸炭は900℃以上の熱処理であるために、処理雰囲気中のごく微量の残存酸素が歯車の表面で酸化物を形成して、これが歯車の強度低下を招くことがありました。大同では、酸化物の生成を抑制できる合金設計に成功し、1980年代後半からDSGシリーズとして実用化しています。

#### 2. 高面圧用鋼DPG®、DCDG®シリーズ<sup>1)、2)</sup>、高靱性DSGB®シリーズ<sup>3)</sup>

エンジンで発生した回転力を足回りへ伝達する役目を果たす歯車には、様々な機能が求められています。例えば高速道路をミッションオイルにさらされながら高速で負荷を伝達する機能、ワインディングロードでは地面の凹凸や急峻なカーブからの衝撃に耐えられる機能などです。歯車の設計と加工技術の進歩は、これら歯車機能の向上をもたらしてきましたが、さらにギア機能の差別化をお客さま向けには、高い負荷面圧がかかっても歯面が損傷しにくくするため、高Si化などにより焼戻し軟化しにくいDPGシリーズや表層炭素濃度を約1%以上として硬い炭化物を利用する高濃度浸炭用鋼DCDGシリーズを開発しています。また、DSGシリーズにボロンを添加することで粒界を強化してギア数を減らしてもなお衝撃負荷に耐えるDSGB鋼も開発しており、2000年代前後に

はいずれも実用化されています。

#### 3. 真空浸炭用鋼DEG®シリーズ<sup>4)</sup>

真空浸炭は表面硬化熱処理の一種で排出されるCO<sub>2</sub>排出量が少なく、近年、普及が進んでいる工法です。この真空浸炭に適したDEGシリーズは、当社が独自に解明した真空浸炭の炭素浸入機構をもとに、成分最適化を図ることで真空浸炭中の炭化物生成量を減少させます。そのため歯車と言うところの歯先などのエッジ部で強度低下の原因となる過剰浸炭を抑制し、真空浸炭工法の利点である表面の酸化物抑制による強度向上効果を生かすことが可能です。

さらなる高強度化をご要望のお客さまには、最適なショットピーニング工法と組み合わせたDASP®を開発しています<sup>5)</sup>。本開発鋼と真空浸炭処理で表層は750HV以上に硬化させることができますが、ここに硬いショットピーニング粒を投射することで表層硬さを1,000HV以上、最大圧縮残留応力を1,800MPa以上が実現でき、曲げ疲労強度はJIS鋼の1.8倍、歯面疲労強度では1.5倍にすることができます。

### ◇ 製造性に優れた歯車用鋼

#### 1. 結晶粒粗大化防止鋼ATOM®<sup>6)</sup>

浸炭は高温で非常に長い時間を要する工程であるため、省エネルギー化、タクトタイム短縮のために処理時間の短時間化のニーズが大きいと言われています。処理温度を高温にするほど炭素の拡散速度は速く、たとえば1020℃では920℃の3倍になるため高温化により浸炭時間を短縮できます。また、ガス浸炭炉がホットウォールで構成されているのに対し、真空浸炭炉はコールドウォールで構成され耐久性が向上しているため、その普及に伴って、高温迅速浸炭は容易になります。

しかしながら、浸炭温度を高温化すると結晶粒の成長が加速され粗大化しやすくなります。一般には結晶粒が大きくなる（＝結晶粒度番号が小さくなる）と疲労強度や靱性が低下するとされるため、一般に利用されるAl窒化物以外に高温で安定なNb炭窒化物をピンニング粒子として利用した結晶粒粗大化防止鋼ATOM鋼を開発しています。

#### 2. 冷間鍛造用歯車用鋼ALFA™<sup>7)</sup>、Super-ALFA™<sup>8)</sup>

冷間鍛造は熱間鍛造に比べて加熱に要するエネ

ルギーが不要となるだけでなく、加工精度が高いため鋼材歩留りが高く環境負荷の小さい工法です。この工法に適した材料を開発しています。

歯車部品を冷間成形するため、一般に素材には室温付近での変形抵抗が低く、複雑形状に加工するべく変形能が高いことが求められます。そのため、冷間鍛造用粗材には球状化焼鈍を施されることが多いが、ALFA鋼は圧延段階の硬さを下げることができ、球状化焼鈍処理の省略が可能になります。

さらに前述の結晶粒粗大化防止機能も兼ね備えたSuper-ALFA鋼も開発しており、冷間加工後の焼準を省略して浸炭を行うこともできます。

近年には、さらなる高温で浸炭しても結晶粒の異常成長を抑制することが可能な省合金肌焼鋼を開発しています<sup>9)</sup>。本開発鋼は、これまでの肌焼鋼とは発想を転換させ、結晶粒界をピン止めするAINを析出させないことで、浸炭時にオーステナイト粒を均一に成長させ、異常粒成長の発生を抑制します。また、本開発鋼は、従来の肌焼鋼よりも浸炭焼入れ時の平均結晶粒径が大きくなることで焼入れ性が向上しているため、合金元素の低減が可能であり、優れた冷間加工性も有しています。

### むすび

大同では、これまで述べてきたような高強度材や製造性に優れた浸炭用材料開発することで歯車の高機能化や低廉化に貢献してきました。紙面の都合で割愛しましたが工法の異なる冷鍛ガス軟空化鋼DN<sup>SC</sup>™<sup>10)</sup>の開発もしています。また弊社では世界最大級の特殊溶解設備を始め特異な生産技術を有することから、航空機用歯車用鋼M50NiL™<sup>11)</sup>の製造が可能で歯車用鋼のラインナップに加えています。これら各種表面処理を施した歯車用鋼の強度マップは図1をご参照ください。

今後、歯車用鋼の代表的な用途である自動車の機構はエンジン駆動からモータ駆動へとますます変化し、歯車にはこれまで以上に静粛性や高回転への対応が求められることが想定されます。大同では新しい時代に適した歯車用鋼の開発にも取り組んでいく予定です。ご期待ください(図2)。

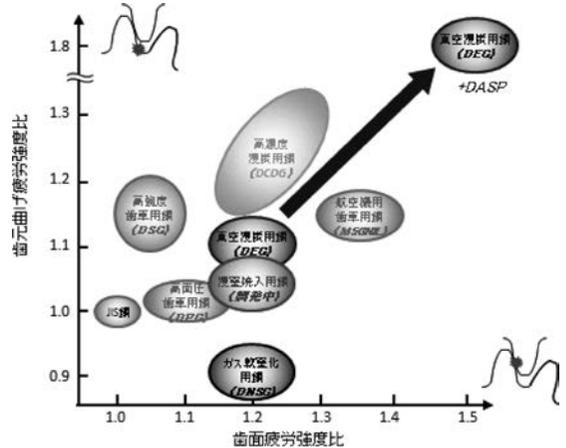


図 1 大同の代表的な歯車用鋼の強度マップ

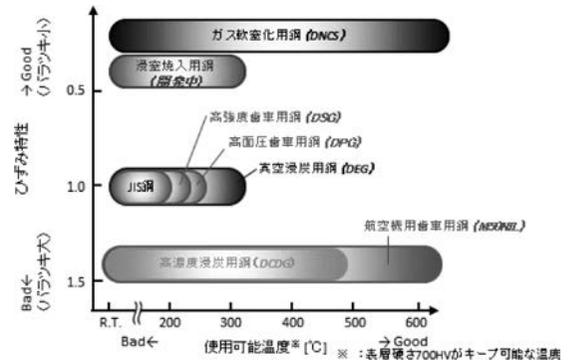


図 2 大同の代表的な歯車用鋼の熱処理ひずみと使用可能温度イメージ

### 参考文献

- 1) たとえば羽生田：電気製鋼、73 (2002)、p. 73
- 2) 製品紹介「高濃度浸炭用鋼」：電気製鋼、77 (2006)、p. 89
- 3) 本田ら：電気製鋼、75 (2004)、p. 61
- 4) 製品紹介「真空浸炭用鋼」：電気製鋼、79 (2008)、p. 83
- 5) 製品紹介「DASP」：電気製鋼、81 (2010)、p. 165
- 6) 紅林ら：電気製鋼、65 (1994)、p. 67
- 7) 紅林ら：電気製鋼、69 (1998)、p. 57
- 8) 紅林ら：電気製鋼、71 (2000)、p. 65
- 9) 中山ら：電気製鋼技報、85 (2014)、p. 133
- 10) 冷鍛軟空化用鋼「DN<sup>SC</sup>」：電気製鋼、75 (2004)、p. 69
- 11) 製品紹介「航空機用エンジン軸受素材 M50NiL」、電気製鋼技報、86 (2015)、p. 67

〔大同特殊鋼株 ソリューションパートナー部 みやざき たかひろ〕  
〔東京第一ソリューションパートナー 室長 宮崎 貴大〕

# 業界のうごき

## 浅井産業、 テクノカットを子会社化

総合金属商社の浅井産業（本社＝東京都港区、増井平社長）は、12月3日付でテクノカット（本社＝群馬県佐波郡玉村町、佐藤佳巳社長）を完全子会社化した。テクノカットは、自動車向けで神戸製鋼所材を中心とした構造用棒鋼の切断加工を行っており、同社を子会社化することで北関東エリアでの顧客サービスを強化する。営業機能を持たせ在庫販売も行う。同社にとって北関東の拠点は初。買収額は約3,000万円。

テクノカットは1975年創業で主に構造用棒鋼の賃加工を行ってきた。浅井産業は従来から取引があった中で、後継者の問題があった同社の事業を承継することを決めた。資本金は1,000万円で、社員5人の体制。敷地面積は約2,750平方メートル、事務所や倉庫、工場など建屋面積は約1,500平方メートルとなっている。

（12月6日）

## 岡谷鋼機、 米金型用鋼材工場を移転拡張

岡谷鋼機は米国岡谷鋼機、大同特殊鋼グループとの米国合弁子会社で、金型用鋼材の加工販売を手掛ける「インターナショナル・モールド・スチール」（IMS、本社＝ケンタッキー州）の本社工場の移転拡張と設備増強を決めた。現在のケンタッキー州フローレンスから同州ヘブロンに移転し、フライス盤など加工設備を増強するもので、投資額は土地・建物に315万ドル、設備に209万ドルの計620万ドル（約7億1,000万円）。2019年8月末の稼働開始を予定する。

IMSは、北米の鉄鋼流通や金型メーカーに金型用鋼材の加工販売を行っているが、さらなる拡販による業容拡大と北米顧客向けサービス向上を

図るため、工場移転する。移転先の総面積は2万6,510平方メートルで、現在の約6割増。新工場は既存の建屋を利用し、新たにフライス盤3基、パルスソー1基を増設する。2019年1月から順次移転作業に入り、8月末の稼働開始を目指す。（12月11日）

## 三悦、 部署間の相互理解促進

地区特殊鋼流通大手の三悦（本社＝名古屋市港区、樋田浩三社長）は、社員に横断的に他部署の業務を体験させる取り組みで部署間の相互理解を深め業務の円滑化につなげている。1月26日には、主に事務全般を担う業務課と、加工を担う鋼材切断課の人員がそれぞれの現場で業務を体験。意外な気付きが多く好評を博したことから、社員の多能工化なども視野に、今後社内で活動を広げていく考えだ。

同社では年に4回「環境整備デー」を設け、職場環境の改善を目的とする5S活動を行っているが、新たに普段の5S活動ではできない取り組みをテーマにしたところ、社内部署間の相互理解を促進する企画が進んだ。背景には、繁忙期に営業スタッフが加工現場を手伝うようなケースで互いに業務上の理解が深まり、業務の円滑化につながっていたことで、社内でそうした取り組みの展開を求める声があがっていたことがある。

（1月31日）

## 住商・メタルワン、 国内鋼管事業を4月統合

住友商事とメタルワンは、両社グループの国内鋼管事業に関する統合期日を2019年4月1日とした。両社は19年2月1日の統合に向け会社法などの必要手続きを進めていたが、自然災害に遭った一部拠点の復旧作業を優先したことの影響など、統合実行に必要な準備作業の進捗状

況を勘案し、関係各社の必要な機関決定を経たうえで来年4月に統合することを決定した。国内外の競争法上の承認手続きは終了している。

統合新会社の商号は住商メタルワン鋼管株式会社（本社＝東京都千代田区丸の内）。資本金は13億円、議決権比率は住友商事が50%、メタルワンが50%。人員規模は約890人、売上規模は約1,900億円。代表者は関係各社で協議のうえ決定する。（12月27日）

## 大和興業、 基幹システム更新

みがき特殊帯鋼・電磁軟鉄（純鉄）など高品質な各種特殊帯鋼の販売を手掛ける大和興業（愛知県東海市浅山1-108、遠藤定道社長）はこのほど、全社的な基幹システムの更新を実施した。新システムは、業務管理体制を一段と効率化しながらトレーサビリティの強化や各種コストの低減も見込める仕様で、今後多岐にわたる効果の創出を図っていく。

従前のシステムの運用開始時から、加工体系や扱い商品、需要家ニーズなどの環境変化が大きくなっていったことに加え、今後のIoT対応なども視野に新システムへの移行を決めた。新システムはプロジェクトチームを結成のうえでその構築に約1年半をかけ、この2019年10月期からスタートした。

新システムではまず、昨年組織統合した長野支店と本社の2拠点間をVPNで接続し、入庫データをリアルタイムに反映しつつ在庫の一元管理を行う。これに同社の配送システムを掛け合わせ、強みとする納期管理と適正な在庫量のコントロールに磨きをかける。（12月12日）

## 阪和興業、 インドネシア新工場起工

阪和興業は、8%出資する二次電

# 業界のうごき

池向けニッケル・コバルト化合物製造会社「QMBニュー・エナジー・マテリアルズ」の起工式が1月11日、インドネシアのスラウェシ島で行われたと発表した。古川弘成社長が、共同出資者の青山控股集团、寧徳時代新能源科技（CATL）、格美林（GEM）の首脳陣や現地政府高官らとともに出席した。HPAL（高圧硫酸浸出）法で現地の酸化鉱を処理し、硫酸ニッケルや硫酸コバルトを生産する。

青山の頂光達董事長、CATLの潘健副董事長、GEMの許開華董事長、阪和の古川社長のほか、インドネシアの工業大臣や調整大臣（海洋担当）が列席した。CATLは世界最大の車載用リチウムイオン電池メーカー、GEMは中国最大の電池リサイクラー、二次電池部材メーカーと目される。

（1月15日）

## リントツ、 前9月期で増収増益

ステンレス流通大手のリントツ（本社＝名古屋市中区、山下良隆社長）が発表した2018年9月期決算は、売上高が前期比15.4%増の672億9,122万円、当期純利益が同24.6%増の18億7,115万円の増収増益で、リーマン・ショック後では売り上げ、純利益ともに最高となった。

増収は着実な販価の値戻しとその堅持による収益性の改善が主な要因。年度単位では、数量ベースの出荷量を約1割増加。単価は15%弱引き上げた。主要な需要家環境としては、自動車、電機、工作機械、業厨関連分野が総じて好調に推移した。そして今期は「足元の市況は鋼板に軟化材料も見られるが、棒鋼、条鋼類は値上げ局面。ボリュームを確保できるひも付きを強化しながらコスト転嫁をしっかりと行くとともに、前期に続き、加工品分野などで新鋼種のPR

を含め新規需要の掘り起しに努めていく」（山下社長）方針だ。（12月2日）

## 愛知製鋼、 羽田空港で自動運転の実証実験

愛知製鋼など6社は1月25日まで羽田空港制限区域内での自動運転バスの実証実験を行い、同22日には報道関係者を集めバスが空港内を自動運転で走行する様子を公開した。愛知製鋼は磁気マーカおよび磁気マーカシステムの制御で参画しており、同システムは遮蔽物でGPSが使えない約240メートルの走行区間で適用されている。

空港は利用者の利便性確保のため、地上の走行道路にかぶさる形で構造物が張り出す箇所が多い。そうしたGPSが遮蔽され使用できないエリアでも高精度で自動走行するため、愛知製鋼の磁気マーカを道路に埋設、それを車両底部に取り付けた高感度磁気センサ（MIセンサ）で検知する磁気マーカシステムを用いている。走行距離600メートルのうち約240メートルが適用区間で、約200個の磁気マーカ（3センチ径・20ミリ厚）が埋設。マーカは基本的に2メートル間隔で置かれるが、カーブなどの箇所は精度を確保するため1メートル間隔となっている。（1月22日）

## 高周波熱錬、 神戸工場で積極投資

高周波熱錬は、油圧ショベル用旋回輪の一貫製造を行う神戸工場（神戸市北区）で、積極投資を継続している。前中計の2015-17年度の3年間で計10億円程度の設備投資を実施し、18-19年度にかけては建屋増築および設備増設により、旋削工程の能力増強と品質向上につなげる。建設機械向け需要の波に柔軟に対応するため、生産の上方弾力性を確保する。神戸工場は、大手建設機械メーカー向けに、油圧ショベル用旋回輪

（スイングサークル）を一貫製造しており、鍛造協力会社などから仕入れた素材を、歯切り、熱処理、穴開け、旋削、組立、塗装などを行っている。製造する製品は小型・中型のベアリング形状で、年間約2万5,000台（18年度見通し）を供給している。

北米やアセアン向けの需要好調を背景に、高水準の受注が続いており、増産対応の必要から、生産性向上に向けた設備の老朽更新や新設に着手。15年度に第1次加工機増強として約6億円、16年度には第2次加工機増強として3億円強を投資しており、18-19年度には第3次の加工機増強および建屋増築を実施する。（1月21日）

## 神戸製鋼所、 中国線材加工拠点の能力増強

神戸製鋼所は、出資する中国浙江省の特殊鋼線材二次加工拠点「神戸特殊鋼線（平湖）」（KSP）について、生産能力を現行比3割拡大し、月5,500トンに増強する。伸線機3機、熱処理炉（STC炉）2基を増設するもので、設備投資額は約9億円。日系自動車向けを中心に伸長する現地の特殊鋼線材需要に応えるため、二次加工能力を増やす。

KSPは、冷間圧造用（CH）鋼線や軸受鋼線を生産しており、自動車用ボルト・ナットなどファスナー製品や軸受製品の素材として使用。主な向け先は現地の日系自動車関連で、同分野における高級CH鋼線のシェアでは過半を占める。

今回の能力増強は第5期投資にあたり、伸線機は11機、熱処理炉は8基に増える。伸線機は2020年3月、熱処理炉は同6月に稼働を開始する見通しとなっている。（12月17日）

## JFEスチール・千葉/ コークス炉2基体制に移行

JFEスチール東日本製鉄所（千葉

# 業界のうごき

地区)は、2018年末に第5コークス炉の操業を停止し、第6・7コークス炉の2基体制に移行した。従来の3基体制による生産量を、第6・7コークス炉で安定的に生産できる体制となっている。

千葉地区は昨年6月に第6コークス炉B団の更新工事を完了。生産効率の向上、粉塵飛散の抑制、CO2削減などの環境対策を施した新たな炉が稼働を開始した。こうした中、1964年から稼働していた第5コークス炉を同12月27日に停止。

市街地寄りに位置した第5コークス炉の停止は、粉じん発生・飛散量の一段の抑制につながるなど、周辺環境への有効な対策となっている。第6・7コークス炉更新では、更新された設備による生産工程における粉じん発生量の低減に加え、老朽化による設備の歪みなどもなくなることで外への飛散量も減っている。

(1月29日)

## 新日鉄住金、 山特子会社化で公取委の承認

新日鉄住金と山陽特殊製鋼は、新日鉄住金による山陽特殊製鋼の子会社化について、新日鉄住金が申し出た国内向け軸受用小径シームレス鋼管に関する問題解消措置の実施を条件に、公正取引委員会から排除措置命令を行わないとの審査結果を得た。海外競争当局の承認はすべて取得済み。山陽特殊製鋼は新日鉄住金を引受人とする第三者割当増資に関する臨時株主総会を2月28日に開催する予定で、ここで承認されれば3月28日付で増資を実施して新日鉄住金の子会社になる。

新日鉄住金が申し出た問題解消措置は、国内向け軸受用小径シームレス鋼管に関して(1)山陽特殊製鋼が所有する圧延設備に係る持分の神戸製鋼所への一部譲渡(2)新日

鉄住金、山陽特殊製鋼の商権の神戸製鋼に対する一部譲渡の2点。

(1月18日)

## 高砂鉄工、 滑り防止鋼板で二相鋼タイプ開発

高砂鉄工は、二相ステンレス鋼に滑り防止機能を付加した「二相ステンレス鋼すべらんなー」を開発、商品化し、1月28日から販売を開始した。従来製品と比較して強度は約2倍、耐食性も同等以上で、薄肉軽量化と長寿命化による大幅なコスト削減が可能となる。母材を供給する新日鉄住金ステンレス(NSSC)および同社グループのNSステンレス、高砂鉄工子会社のタカサゴスチールの4社で連携し、優れた製品特性を訴求し拡販を狙う。

高砂鉄工はこれまでも滑り防止機能を持つ「すべらんなー1」「すべらんなー2」を販売してきたが、これらの進化形として新製品を開発した。NSSC製の省合金二相ステンレス鋼「SUS821L1」を使い、素材の高強度特性により3-4割程度の薄肉化が図れることに加え、耐食性も同等以上でライフサイクルコストを低減できるため、SUS304を使用した従来製品よりトータルコストを削減できる。

(1月28日)

## 東北特殊鋼、 クラッド鋼板の用途拡大へ

東北特殊鋼は、FeCo(鉄・コバルト)系磁歪材料とニッケル板を熱拡散接合したクラッド鋼板について、振動発電機能を応用した新たな活用に向け、開発と試験を進めている。電流を通すことで振動するという逆プロセスを生かし、工場内生産ラインでの振動台といった用途をはじめ幅広く探っている。用途開発に向け需要家側での実証実験を2018年春から開始しており、IoTセンサー用電

源や輸送機関連での振動発電と併せて、実用化へ取り組む。

同社は大きな逆磁歪効果による優れた振動発電機能を持つクラッド鋼板を東北大学と共同開発し、18年2月に発表した。冷間圧延板とFeCo系磁歪材料によるクラッド鋼板で、従来の振動発電素子である圧電素子と比較し、微小な振動では25倍以上の出力を確認。さらに、ニッケル板とのクラッド構造では、圧電素子の50倍以上という大出力が得られる。生活振動や工場設備の振動を利用するIoTセンサー用電源のほか、鉄道車両や自動車の走行振動などへの適用を目指し、営業を展開している。(12月7日)

## 日本金属、 ステンレス樹脂複合管が採用

日本金属がこのほど開発したステンレス鋼製溶接引抜き管と樹脂との複合パイプが、分析機器メーカーで高速液体クロマトグラフィー(HPLC)用カラム(試料の分離を行う容器)に採用された。高強度材の適用によりHPLCカラムを小径・軽量化するとともに、従来材と比較して高い寸法精度により分析機器の高速・高精度化に貢献する。2019年秋から量産化を開始し、今後3年をめどに国内製複合パイプの国内市場シェア100%を目指す。

同社は「マルチ&ハイブリッドマテリアル」研究の一環として、生体物質、医療などの分析機器分野およびその配管などの部品開発を推進。岐阜工場(岐阜県可児市)で生産する溶接引抜き鋼管ブランド「ファインパイプ」製品として、昨年末にステンレス・樹脂複合パイプを開発した。秋の量産化に向け、今夏をめどに製造設備の設置を完了する見通し。

(1月29日)

文責：(株)産業新聞社

# 特殊鋼統計資料

## 特殊鋼熱間圧延鋼材の鋼種別生産の推移

鋼種別

(単位：t)

年月	構造用鋼				特殊用途鋼						計	合計
	工具鋼	機械構造用炭素鋼	構造用合金鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ステンレス鋼	快削鋼	高抗張力鋼	その他		
'17 暦年	262,744	5,014,549	3,947,953	8,962,502	438,097	1,011,176	2,850,849	629,459	5,562,736	609,458	11,101,775	20,327,021
'18 暦年	265,850	5,232,401	4,055,787	9,288,188	428,588	1,029,788	2,954,588	651,312	5,616,124	552,701	11,233,101	20,787,139
'16 年度	246,763	4,786,841	3,677,564	8,464,405	424,465	951,774	2,803,875	602,844	5,496,896	657,374	10,937,228	19,648,396
'17 年度	268,659	5,058,907	4,010,098	9,069,005	434,231	1,025,656	2,898,689	637,160	5,672,002	575,660	11,243,398	20,581,062
'18. 1-3月	70,870	1,285,892	1,016,164	2,302,056	106,812	254,213	765,443	159,122	1,465,352	131,191	2,882,133	5,255,059
4-6月	69,786	1,325,708	1,025,402	2,351,110	111,727	259,731	736,597	168,272	1,459,353	139,793	2,875,473	5,296,369
7-9月	65,487	1,278,114	980,947	2,259,061	102,331	245,192	739,295	157,371	1,303,340	141,240	2,688,769	5,013,317
10-12月	59,707	1,342,687	1,033,274	2,375,961	107,718	270,652	713,253	166,547	1,388,079	140,477	2,786,726	5,222,394
'17年 11月	23,484	414,568	339,914	754,482	35,577	82,482	230,464	54,755	505,672	45,594	954,544	1,732,510
12月	23,883	421,412	321,200	742,612	40,011	86,023	251,839	48,652	446,426	50,420	923,371	1,689,866
'18年 1月	25,405	416,166	330,912	747,078	32,645	80,134	254,983	48,909	490,017	41,920	948,608	1,721,091
2月	22,269	413,700	329,122	742,822	34,205	84,183	246,564	52,284	466,132	42,438	925,806	1,690,897
3月	23,196	456,026	356,130	812,156	39,962	89,896	263,896	57,929	509,203	46,833	1,007,719	1,843,071
4月	24,591	431,808	346,133	777,941	35,531	85,313	242,146	52,231	470,100	51,271	936,592	1,739,124
5月	21,223	451,591	349,683	801,274	37,301	90,588	245,014	58,280	509,651	40,077	980,911	1,803,408
6月	23,972	442,309	329,586	771,895	38,895	83,830	249,437	57,761	479,602	48,445	957,970	1,753,837
7月	20,555	431,726	349,361	781,087	37,727	81,011	242,273	59,279	396,927	49,094	866,311	1,667,953
8月	20,048	422,671	310,377	733,048	33,536	79,855	246,448	47,506	474,025	50,823	932,193	1,685,289
9月	24,884	423,717	321,209	744,926	31,068	84,326	250,574	50,586	432,388	41,323	890,265	1,660,075
10月	19,299	450,796	355,754	806,550	36,898	91,578	238,598	52,734	492,624	53,380	965,812	1,791,661
11月	20,280	442,033	339,996	782,029	34,331	85,646	232,145	58,757	458,521	43,379	912,779	1,715,088
12月	20,128	449,858	337,524	787,382	36,489	93,428	242,510	55,056	436,934	43,718	908,135	1,715,645
前月比	99.3	101.8	99.3	100.7	106.3	109.1	104.5	93.7	95.3	100.8	99.5	100.0
前年同月比	84.3	106.8	105.1	106.0	91.2	108.6	96.3	113.2	97.9	86.7	98.3	101.5

出所：経済産業省『鉄鋼生産内訳月報』から作成。

形状別

(単位：t)

年月	形鋼	棒鋼	管材	線材	鋼板	鋼帯	合計
'17 暦年	345,018	6,272,447	1,112,835	4,249,655	1,716,315	6,648,155	20,344,425
'18 暦年	374,683	6,454,293	1,188,873	4,260,461	1,647,479	6,868,340	20,794,129
'16 年度	313,559	5,917,546	984,067	4,202,470	1,954,496	6,287,894	19,660,032
'17 年度	347,415	6,340,621	1,168,193	4,199,478	1,780,457	6,761,726	20,597,890
'18. 1-3月	88,262	1,601,854	302,465	1,040,570	474,671	1,749,574	5,257,396
4-6月	103,104	1,648,385	299,488	1,073,417	445,767	1,728,159	5,298,320
7-9月	89,994	1,558,119	287,903	1,054,854	351,482	1,672,547	5,014,899
10-12月	93,323	1,645,935	299,017	1,091,620	375,559	1,718,060	5,223,514
'17年 11月	26,488	543,097	92,161	340,262	173,474	557,999	1,733,481
12月	38,724	520,075	91,489	347,113	158,791	534,997	1,691,189
'18年 1月	24,783	503,655	106,730	336,364	161,704	588,826	1,722,062
2月	38,239	522,438	93,448	334,540	148,568	554,635	1,691,868
3月	25,240	575,761	102,287	369,666	164,399	606,113	1,843,466
4月	41,111	525,948	113,196	359,675	154,446	545,719	1,740,095
5月	23,311	562,037	101,462	361,223	154,804	601,090	1,803,927
6月	38,682	560,400	84,830	352,519	136,517	581,350	1,754,298
7月	29,835	548,334	93,366	365,812	105,218	526,157	1,668,722
8月	26,322	483,072	105,550	352,595	127,862	590,339	1,685,740
9月	33,837	526,713	88,987	336,447	118,402	556,051	1,660,437
10月	30,886	553,298	103,018	366,668	145,165	592,787	1,791,822
11月	31,573	554,793	93,687	357,968	114,486	563,321	1,715,828
12月	30,864	537,844	102,312	366,984	115,908	561,952	1,715,864
前月比	97.8	96.9	109.2	102.5	101.2	99.8	100.0
前年同月比	79.7	103.4	111.8	105.7	73.0	105.0	101.5

出所：『経済産業省生産動態統計』から作成。

### 特殊鋼鋼材の鋼種別販売(商社+問屋)の推移 (同業者+消費者向け)

(単位: 十)

年月	工具鋼	構造用鋼			特殊用途鋼						計	合計
		機械構造用炭素鋼	構造用合金鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ステンレス鋼	快削鋼	高抗張力鋼	その他		
'17 暦年	328,624	3,662,276	3,174,867	6,837,143	209,980	558,894	2,401,141	182,809	98,145	56,347	3,507,316	10,673,083
'18 暦年	330,317	3,525,290	2,049,316	5,574,606	122,660	581,255	1,703,148	181,436	95,234	49,039	2,732,772	8,637,695
'16 年度	317,816	3,843,693	4,224,447	8,068,140	255,982	531,825	3,063,505	170,660	95,118	43,717	4,160,807	12,546,763
'17 年度	328,965	3,482,828	2,582,257	6,065,085	169,371	561,237	2,045,095	180,396	100,874	56,424	3,113,397	9,507,447
'18年 4月	26,906	286,104	165,514	451,618	9,821	47,220	138,136	14,591	8,954	3,939	222,661	701,185
5月	29,596	292,375	172,082	464,457	10,997	48,547	141,527	16,921	8,123	3,898	230,013	724,066
6月	27,900	305,901	188,982	494,883	10,983	54,654	143,329	16,821	6,755	4,480	237,022	759,805
7月	28,094	306,418	184,137	490,555	11,281	51,063	136,912	16,583	8,457	4,446	228,742	747,391
8月	25,643	290,235	160,495	450,730	9,324	46,112	137,312	13,274	6,616	3,912	216,550	692,923
9月	27,216	309,598	163,885	473,483	10,004	56,424	134,952	15,800	7,220	4,068	228,468	729,167
10月	29,600	316,767	185,519	502,286	11,558	52,812	157,772	15,755	9,186	4,474	251,557	783,443
11月	27,902	317,700	179,189	496,889	11,020	47,505	147,140	15,125	8,386	3,840	233,016	757,807
12月	25,884	277,922	160,372	438,294	9,741	36,448	139,276	12,978	7,634	3,727	209,804	673,982
前月比	92.8	87.5	89.5	88.2	88.4	76.7	94.7	85.8	91.0	97.1	90.0	88.9
前年同月比	88.5	104.8	99.9	102.9	113.3	79.7	104.7	86.8	84.1	41.1	95.2	99.8

出所: 一般社団法人特殊鋼倶楽部『特殊鋼鋼材需給月報調査』から作成。

(注) 平成30年3月より経済産業省『鉄鋼需給動態統計調査』から特殊鋼倶楽部業界自主統計化へ変更した。

### 特殊鋼熱間圧延鋼材の鋼種別メーカー在庫の推移

(単位: 十)

年月	工具鋼	構造用鋼			特殊用途鋼						計	合計
		機械構造用炭素鋼	構造用合金鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ステンレス鋼	快削鋼	高抗張力鋼	その他		
'17 暦年	7,366	231,844	127,052	358,896	33,141	32,395	122,991	26,401	188,923	21,699	425,550	791,812
'18 暦年	9,022	265,513	163,666	429,179	30,989	37,438	132,754	28,173	163,433	19,784	412,571	850,772
'16 年度	7,525	214,217	129,129	343,346	27,751	31,790	109,641	27,312	185,309	31,761	413,564	764,435
'17 年度	6,776	223,466	121,672	345,138	32,300	31,384	119,951	28,451	175,114	21,424	408,624	760,538
'18年 4月	7,481	231,844	158,570	390,414	27,674	33,572	132,261	29,696	190,760	24,359	438,322	836,217
5月	6,384	251,722	164,620	416,342	30,037	33,345	128,110	32,255	199,089	21,979	444,815	867,541
6月	6,667	254,300	161,259	415,559	28,738	32,628	132,706	28,830	204,968	21,604	449,474	871,700
7月	5,832	241,363	155,816	397,179	26,513	28,753	133,459	30,166	172,446	24,884	416,221	819,232
8月	7,012	259,265	167,599	426,864	29,224	31,147	137,406	30,284	208,069	31,690	467,820	901,696
9月	10,598	273,664	165,889	439,553	29,226	35,289	143,651	31,958	212,036	29,537	481,697	931,848
10月	8,063	253,996	156,714	410,710	29,757	31,375	135,129	31,878	211,544	22,764	462,447	881,220
11月	9,540	241,817	151,622	393,439	29,236	31,470	130,083	29,512	176,395	20,515	417,211	820,190
12月	9,022	265,513	163,666	429,179	30,989	37,438	132,754	28,173	163,433	19,784	412,571	850,772
前月比	94.6	109.8	107.9	109.1	106.0	119.0	102.1	95.5	92.7	96.4	98.9	103.7
前年同月比	122.5	114.5	128.8	119.6	93.5	115.6	107.9	106.7	86.5	91.2	97.0	107.4

出所: 経済産業省『鉄鋼生産内訳月報』から作成。

### 特殊鋼鋼材の流通在庫の推移 (商社+問屋)

(単位: 十)

年月	工具鋼	構造用鋼			特殊用途鋼						計	合計
		機械構造用炭素鋼	構造用合金鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ステンレス鋼	快削鋼	高抗張力鋼	その他		
'17 暦年	55,932	183,466	146,595	330,061	12,917	53,973	144,088	9,965	10,293	2,213	233,449	619,442
'18 暦年	65,783	207,930	157,295	365,225	13,020	47,754	170,896	9,657	10,264	2,925	254,516	685,524
'16 年度	57,869	190,684	145,813	336,497	20,955	59,768	141,859	11,460	10,537	2,252	246,831	641,197
'17 年度	65,001	195,049	149,069	344,118	12,899	52,740	161,067	10,837	10,373	2,192	250,108	659,227
'18年 4月	66,117	195,937	151,534	347,471	12,865	55,010	160,781	9,373	10,848	2,019	250,896	664,484
5月	66,347	195,003	153,283	348,286	13,384	60,366	163,202	9,677	10,831	2,545	260,005	674,638
6月	72,119	201,314	151,821	353,135	13,916	55,336	162,784	10,490	10,661	2,697	255,884	681,138
7月	67,907	199,880	152,514	352,394	13,389	48,717	155,228	9,788	10,066	2,812	240,000	660,301
8月	67,383	204,256	156,134	360,390	13,994	48,611	163,695	10,810	9,810	2,602	249,522	677,295
9月	67,543	201,335	152,839	354,174	13,358	47,303	163,706	10,131	9,794	2,681	246,973	668,690
10月	66,380	200,872	150,347	351,219	13,275	46,570	165,188	8,421	9,694	2,806	245,954	663,553
11月	66,013	201,985	153,821	355,806	13,296	46,987	166,273	9,567	9,585	3,006	248,714	670,533
12月	65,783	207,930	157,295	365,225	13,020	47,754	170,896	9,657	10,264	2,925	254,516	685,524
前月比	99.7	102.9	102.3	102.6	97.9	101.6	102.8	100.9	107.1	97.3	102.3	102.2
前年同月比	117.6	113.3	107.3	110.7	100.8	88.5	118.6	96.9	99.7	132.2	109.0	110.7

出所: 一般社団法人特殊鋼倶楽部『特殊鋼鋼材需給月報調査』から作成。

(注) 平成30年3月より経済産業省『鉄鋼需給動態統計調査』から特殊鋼倶楽部業界自主統計化へ変更した。

## 特殊鋼鋼材の輸出入推移

### 輸 出

(単位：t)

年 月	工具鋼	構造用鋼			特殊用途鋼					その他の鋼			特殊鋼鋼材合計
		機械構造用炭素鋼	構造用合金鋼	計	ばね鋼	ステンレス鋼	快削鋼	ピアノ線 材	計	高炭素鋼	その他合金鋼	計	
'17 暦年	42,292	453,298	604,953	1,058,252	187,297	991,116	111,512	120,960	1,410,884	5,337	5,760,691	5,766,028	8,277,455
'18 暦年	42,373	471,767	598,686	1,070,453	189,872	975,993	118,025	92,901	1,376,791	3,582	5,508,701	5,512,283	8,001,900
'16 年度	44,566	429,850	558,646	988,496	188,175	1,022,853	106,550	137,846	1,455,424	9,298	6,047,147	6,056,445	8,544,931
'17 年度	42,058	459,167	611,145	1,070,312	187,017	986,796	109,512	110,363	1,393,689	5,038	5,624,584	5,629,622	8,135,682
'18年 3月	4,096	45,894	60,333	106,227	17,200	92,492	11,694	6,894	116,586	462	470,967	483,123	710,031
4月	4,117	35,893	49,877	85,770	17,248	78,116	6,004	6,427	101,790	285	417,251	433,539	615,216
5月	3,822	39,822	45,678	85,500	16,404	82,642	12,013	7,324	106,370	244	516,636	528,893	724,584
6月	3,991	42,104	52,775	94,880	16,925	83,559	13,729	7,985	108,470	285	461,680	475,695	683,035
7月	3,456	40,709	52,914	93,623	19,419	78,743	12,174	5,440	103,602	180	458,007	470,362	671,043
8月	3,134	38,313	45,464	83,777	14,704	77,545	9,674	9,493	101,742	277	501,590	511,540	700,193
9月	3,140	34,848	46,414	81,262	11,860	79,861	6,339	9,377	101,099	186	425,400	431,926	617,426
10月	3,644	44,946	53,726	98,672	14,499	87,744	7,966	9,115	111,357	294	482,237	490,497	704,170
11月	3,302	37,270	44,858	82,129	15,227	85,209	11,696	8,684	120,817	250	439,336	439,587	645,834
12月	3,068	40,332	52,223	92,555	15,831	75,118	15,298	6,514	112,761	424	406,495	406,919	615,304
前月比	92.9	108.2	116.4	112.7	104.0	88.2	130.8	75.0	93.3	169.5	92.5	92.6	95.3
前年同月比	89.5	95.1	92.6	93.7	87.1	83.3	112.7	79.6	86.7	79.6	85.9	85.9	87.1

出所：財務省関税局『貿易統計』から作成。

### 輸 入

(単位：t)

年 月	工具鋼	ステンレス鋼						快削鋼	その他の鋼			特殊鋼鋼材合計	
		形鋼	棒鋼	線材	鋼板類	鋼管	計		高炭素鋼	合金鋼	計		
'17 暦年	3,597	3,665	779	12,136	12,315	206,740	16,077	248,047	127	10,199	599,044	609,243	864,679
'18 暦年	3,821	4,446	1,071	11,731	9,183	222,159	16,704	260,857	297	5,724	444,745	450,469	719,891
'16 年度	3,179	3,551	643	11,306	11,294	173,146	14,752	211,141	64	15,748	767,618	783,366	1,001,302
'17 年度	3,720	3,649	896	11,567	11,437	216,687	16,435	257,022	125	8,434	544,543	552,977	817,491
'18年 3月	345	357	59	875	774	17,742	1,548	20,999	8	230	30,088	30,318	52,027
4月	274	302	131	828	932	22,867	1,284	26,042	1	97	43,272	43,369	69,987
5月	470	185	100	1,072	719	20,648	1,523	24,061	67	1,007	29,158	30,165	54,947
6月	300	361	307	922	893	21,052	1,269	24,443	18	99	27,221	27,320	52,442
7月	350	508	93	1,036	1,030	19,356	1,441	22,956	31	976	41,187	42,163	66,007
8月	345	365	4	922	340	18,603	1,410	21,278	116	194	19,548	19,742	41,846
9月	185	463	31	845	1,104	12,599	1,267	15,846	6	621	54,323	54,944	71,444
10月	298	468	75	1,106	457	15,995	1,586	19,219	18	223	52,320	52,543	72,546
11月	356	456	20	1,298	861	15,762	1,557	19,498	•	187	49,391	49,578	69,888
p 12月	335	390	35	1,071	695	18,490	1,349	21,640	31	1,123	43,160	44,283	66,679
前月比	94.1	85.6	174.3	82.5	80.7	117.3	86.7	111.0	18,169.6	599.0	87.4	89.3	95.4
前年同月比	184.2	99.5	29.3	126.5	58.3	127.6	95.1	119.8	363.2	110.5	161.4	159.6	143.7

出所：財務省関税局『貿易統計』から作成。

(注) p:速報値

## 関連産業指標推移

(単位：台)

(単位：億円)

年 月	四輪自動車生産		四輪完成車輸出		新車登録・軽自動車販売		建設機械生産		産業車輛生産		機 械受注額	産業機械受注額	工作機械受注額
	うちトラック	うちトラック	うちトラック	うちトラック	ブルドーザ	パワーショベル	フォークリフト	ショベルトラック					
'17 暦年	9,690,674	1,219,741	4,705,848	368,407	5,234,165	832,195	-	178,930	113,932	11,460	101,431	50,328	16,456
'18 暦年	-	-	4,817,470	350,091	5,272,067	867,205	-	192,130	121,971	12,099	105,091	50,701	18,158
'16 年度	9,357,382	1,192,689	4,636,390	373,097	5,077,903	818,858	-	159,765	109,887	10,553	102,314	50,944	12,893
'17 年度	9,683,262	1,224,728	4,786,909	362,966	5,197,109	832,361	-	182,533	116,204	11,544	101,451	49,284	17,803
'18年 3月	939,120	118,735	441,675	34,435	667,277	102,142	-	17,140	11,070	1,004	8,566	6,639	1,829
4月	777,670	100,438	432,137	29,268	366,156	60,094	-	15,483	9,693	736	9,431	3,393	1,631
5月	725,216	97,561	344,875	26,140	371,864	63,352	-	14,968	9,388	896	9,079	3,759	1,492
6月	822,272	108,659	412,156	34,540	453,765	77,522	-	16,112	10,741	1,064	8,276	4,944	1,593
7月	801,778	107,009	380,307	29,955	441,533	71,628	-	15,440	11,138	1,018	9,186	4,276	1,511
8月	693,977	88,672	371,612	24,629	364,218	60,907	-	14,919	8,980	982	9,815	3,499	1,404
9月	809,884	108,120	392,020	30,136	485,377	80,042	-	14,714	9,760	1,087	8,022	4,261	1,535
10月	883,751	115,765	427,073	32,136	r 418,993	71,176	-	18,877	11,578	1,456	8,632	3,142	1,396
11月	886,966	113,202	430,553	28,053	441,943	83,612	-	18,751	11,163	1,222	8,631	5,655	1,316
12月	-	-	434,349	27,743	387,525	66,636	-	16,759	9,756	1,078	8,626	3,977	1,355
前月比	-	-	100.9	98.9	87.7	79.7	-	89.4	87.4	88.2	99.9	70.3	103.0
前年同月比	-	-	100.2	93.4	98.3	105.7	-	104.6	102.0	126.7	107.0	90.7	81.7

出所：四輪自動車生産、四輪完成車輸出は(一社)日本自動車工業会『自動車統計月報』、  
 新車登録は(一社)日本自動車販売協会連合会『新車・月別販売台数(登録車)』、  
 軽自動車販売は(一社)全国軽自動車協会連合会『軽四輪車新車販売確報』、  
 建設機械生産、産業車輛生産は『経済産業省生産動態統計』、  
 機械受注額は内閣府『機械受注統計調査』、産業機械受注額は(一社)日本産業機械工業会『産業機械受注状況』、  
 工作機械受注額は(一社)日本工作機械工業会『受注実績調査』

(注) r:訂正値

特殊鋼需給統計総括表

2018年12月分

鋼種別	月別		実数 (t)	前月比 (%)	前年 同月比(%)	2015年基準 指数(%)	
	項目						
工 具 鋼	熱間圧延鋼材生産		20,128	99.3	84.3	97.7	
	鋼材輸入実績		335	94.1	184.2	108.6	
	販売業者	受入計	25,654	93.2	85.1	95.0	
		販売計	25,884	92.8	88.5	98.5	
		うち消費者向	19,796	91.2	89.5	104.6	
		在庫計	65,783	99.7	117.6	111.4	
	鋼材輸出船積実績		3,068	92.9	89.5	64.4	
	生産者工場在庫		9,022	94.6	122.5	108.8	
	総在庫		74,805	99.0	118.2	111.1	
	構 造 用 鋼	熱間圧延鋼材生産		787,382	100.7	106.0	115.1
鋼材輸入実績		17,311	133.3	73.4	49.9		
販売業者		受入計	447,713	89.3	100.9	68.5	
		販売計	438,294	88.2	102.9	67.0	
		うち消費者向	337,780	92.0	109.3	76.9	
		在庫計	365,225	102.6	110.7	103.8	
鋼材輸出船積実績		92,555	112.7	93.7	112.6		
生産者工場在庫		429,179	109.1	119.6	122.7		
総在庫		794,404	106.0	115.3	113.2		
ば ね 鋼		熱間圧延鋼材生産		36,489	106.3	91.2	101.5
	鋼材輸入実績		390	85.6	99.5	95.7	
	販売業者	受入計	9,465	85.7	106.0	44.7	
		販売計	9,741	88.4	113.3	46.4	
		うち消費者向	3,536	86.6	78.6	76.0	
		在庫計	13,020	97.9	100.8	106.7	
	鋼材輸出船積実績		15,831	104.0	87.1	100.7	
	生産者工場在庫		30,989	106.0	93.5	120.0	
	総在庫		44,009	103.5	95.6	115.7	
	ス テ ン レ ス 鋼	熱間圧延鋼材生産		242,510	104.5	96.3	105.6
鋼材輸入実績		21,640	111.0	119.8	149.6		
販売業者		受入計	143,899	97.1	106.5	57.4	
		販売計	139,276	94.7	104.7	55.4	
		うち消費者向	69,472	98.4	109.6	124.2	
		在庫計	170,896	102.8	118.6	125.0	
鋼材輸出船積実績		75,118	88.2	83.3	85.7		
生産者工場在庫		132,754	102.1	107.9	115.2		
総在庫		303,650	102.5	113.7	120.5		
快 削 鋼		熱間圧延鋼材生産		55,056	93.7	113.2	107.3
	販売業者	受入計	13,068	80.3	100.0	92.4	
		販売計	12,978	85.8	86.8	90.2	
		うち消費者向	12,353	85.6	85.5	88.7	
		在庫計	9,657	100.9	96.9	71.3	
	鋼材輸出船積実績		15,298	130.8	112.7	159.9	
	生産者工場在庫		28,173	95.5	106.7	101.5	
	総在庫		37,830	96.8	104.0	91.6	
	高 抗 張 力 鋼	熱間圧延鋼材生産		436,934	95.3	97.9	105.8
		販売業者	受入計	8,313	100.4	87.4	80.8
販売計			7,634	91.0	84.1	75.0	
うち消費者向			5,642	90.7	82.3	84.2	
在庫計			10,264	107.1	99.7	93.6	
生産者工場在庫		163,433	92.7	86.5	86.2		
総在庫		173,697	93.4	87.2	86.6		
そ の 他		熱間圧延鋼材生産		137,146	106.3	100.5	99.1
		販売業者	受入計	40,861	78.6	73.7	100.8
			販売計	40,175	78.2	73.3	99.1
	うち消費者向		36,841	100.7	89.4	100.3	
	在庫計		50,679	101.4	90.2	95.4	
	生産者工場在庫		57,222	110.1	105.8	82.7	
	総在庫		107,901	105.8	97.8	88.2	
	特 殊 鋼 鋼 材 合 計	熱間圧延鋼材生産合計		1,715,645	100.0	101.5	109.1
		鋼材輸入実績計		66,679	95.4	143.7	82.1
		販売業者	受入計	688,973	90.1	99.0	67.7
販売計			673,982	88.9	99.8	66.2	
うち消費者向			485,420	93.2	105.1	84.3	
在庫計			685,524	102.2	110.7	107.5	
鋼材輸出船積実績計		615,304	95.3	87.1	95.7		
生産者工場在庫		850,772	103.7	107.4	108.3		
総在庫		1,536,296	103.1	108.9	107.9		

出所: 鋼材輸入実績及び鋼材輸出船積実績は財務省関税局『貿易統計』。

それ以外は経済産業省『経済産業省生産動態統計』、『鉄鋼生産内訳月報』、但し総在庫は特殊鋼倶楽部で計算

- (注) 1. 鋼材輸入実績は速報値を掲載。構造物用鋼の鋼材輸入実績とは高炭素鋼の棒鋼及び合金鋼の棒鋼、線材を加算したもの。  
2. 総在庫とは販売業者在庫に生産者工場在庫を加算したもの。生産者工場在庫は熱間圧延鋼材のみで、冷間圧延鋼材及び鋼管を含まない。また、工場以外の置場にあるものは、生産者所有品であってもこれを含まない。

# 倶楽部だより

(平成30年12月1日～平成31年1月31日)

## 平成31年新年賀詞交換会 (1月7日)

場 所：東京・ホテルニューオータニ

参加者：約700名

## 海外委員会

TPP11原産地証明制度説明会 (12月26日)

## 市場開拓調査委員会

特殊鋼PR展示WG

高機能金属展に協賛すると共にブースを出展  
(12月5～7日)

講演会 (12月27日)

演 題：Ni及びCo

講 師：ニッケル協会 東京事務所長  
江崎 慎二 氏

参加者：28名

## 編集委員会

本委員会 (1月11日)

5月号特集「工作機械の種類と加工方法に関するやさしい解説 (仮題)」の編集方針、内容の確認

小委員会 (12月17日)

5月号特集「工作機械の種類と加工方法に関するやさしい解説 (仮題)」の編集内容の検討

## 人材確保育成委員会

実務者セミナー (12月14日、全特協と共催)

演 題：「待ったなし！流通の原価管理」

講 師：中小企業診断士 水口 和美 氏

参加者：22名

## 流通委員会

説明会 (12月27日)

演 題：平成30年度第4・四半期特殊鋼需要見通し

講 師：経済産業省製造産業局金属課計画係長  
中村 純也 氏

参加者：26名

## [大阪支部]

平成31年新年賀詞交換会 (三団体共催、1月7日)

場 所：リーガロイヤルホテル

参加者：約780名

三団体責任者会議 (12月10日)

①平成31年賀詞交換会他、共催事業検討

②事務局運営改善検討

三団体共催講演会 (12月10日)

演 題：「チームリーダーの役割」

講 師：永島 昭浩 氏

参加者：85名

人材確保育成委員会

実務者セミナー (1月29日)

演 題：「待ったなし！流通の原価管理」

講 師：中小企業診断士 水口 和美 氏

参加者：16名

## [名古屋支部]

平成31年新年賀詞交換会 (三団体共催、1月9日)

場 所：名古屋観光ホテル

参加者：450名

部会

第1回企画部会 (12月11日)

①企画部会、人材確保育成委員会規程の制定

②新規部会員の選出

第2回企画部会 (1月28日)

①新旧部会員顔合わせ

②総会後の講演会講師選定

③正副部会長選出

④定時総会時の役割分担

## 特殊鋼倶楽部の動き

### 実務者セミナー「待ったなし！流通の原価管理」を開催しました

全日本特殊鋼流通協会及び当倶楽部 人材確保育成委員会共催で、実務者セミナー「待ったなし！流通の原価管理」を下記の通り開催しました。

当セミナーは、本年度上期に開催しました経営者セミナー「価格交渉に強い会社の作り方」の実務者向けセミナーとして、流通の営業マネージャークラスを対象にパソコンを持ち込んでの実践演習を取り入れ実施しました。

当日、セミナーに参加された方々にはアンケートを実施させていただき、貴重なご意見をありがとうございました。今後の活動に反映させていきたいと思っております。

なお、当日資料は、特殊鋼倶楽部ホームページ-会員専用ページ-イベントに掲載しています。

- 日時 平成30年12月14日（金） 10時00分～16時30分 参加者22名  
場所 東京都中央区日本橋茅場町「鉄鋼会館」705号室  
講師 株式会社ARU 代表取締役 水口和美 氏（中小企業診断士 ITコーディネーター）  
内容 1. 基礎編（流通が求める原価管理とは？）  
2. 応用編（原価表作成・EXCELを使った演習）  
3. 自社での実践に向けて（原価管理の仕組みづくり・EXCELを使った演習）  
4. その他  
他開催 名古屋会場：平成30年11月20日（火）  
「オフィスパーク名駅カンファレンスセンター」501 参加者20名  
大阪会場：平成31年1月29日（火）「鉄鋼会館」5・6会議室

以下に、会場写真を掲載いたします。



【会場の様子（東京・鉄鋼会館）】

## 「Ni及びCo」講演会開催

当倶楽部・市場開拓調査委員会は、特殊鋼の需要開拓事業の一環として、需要産業から見た材料の動向・展望について講演会を実施しております。

11月1日に開催しました「EVとメタル」講演会で、ニッケル協会東京事務所長 江崎慎二 様のご講演について、講演会に参加された方々からは、「資料は分かりやすかったが、大分短縮されていたので残念だった。各テーマ深掘での講演も聞いてみたい。」「極めて有用な情報ばかりで感心いたしました。EVブームには疑問を持っていたのでよく理解できました。今後もNi/Mo/Li/Co関連の情報が欲しいです。」等のご意見を頂きました。

ニッケル協会東京事務所長 江崎慎二 様を再度、講師にお招きして、Ni資源とプロセスの詳細説明に加えて、Co資源とプロセスの説明も併せ、標記講演会を下記の通り開催いたしました。

当日、説明会に参加された方々にはアンケートを実施し、お聞かせいただいた貴重なご意見は今後の説明会に是非とも反映させたいと思います。多数のご参加を頂き、誠にありがとうございました。

なお、当日資料（「①Ni資源とプロセス」のみ）を、特殊鋼倶楽部ホームページ-会員専用ページ-イベントに掲載しています。

日 時 平成30年12月27日（木） 16時00分～17時30分 参加者28名

場 所 東京都中央区日本橋茅場町「鉄鋼会館」811号室

講 師 ニッケル協会

東京事務所長 江崎 慎二 氏

内 容 「Ni及びCo」

①Ni資源とプロセス

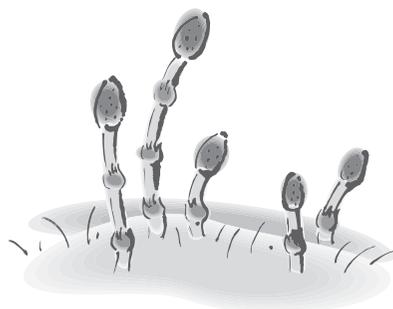
②Co資源とプロセス

以下に、会場写真を掲載いたします。





【会場の様子（東京・鉄鋼会館）】



## 一般社団法人特殊鋼倶楽部 新年賀詞交換会開催

一般社団法人特殊鋼倶楽部の平成31年新年賀詞交換会は、1月7日（月）午前10時から東京・ホテルニューオータニ“鶴の間”にて開催しました。

当日はメーカー、商社、流通業者など業界関係者約700名が出席。

挨拶に立った石黒会長は「我々特殊鋼業界は、日本のものづくりを今後も支え続けるという使命を果たすために、しっかりと足元を固め更に飛躍出来る1年にしようではありませんか！」と強調、続いて経済産業省製造産業局 井上局長が来賓を代表して祝辞を述べ、佐久間副会長の音頭で乾杯いたしました。

乾杯の後、交換に移るとともに、当倶楽部で作成した業界紹介映像の上映を行い、盛況のうちに閉会しました。

以下に、写真を掲載いたします。



【石黒会長】



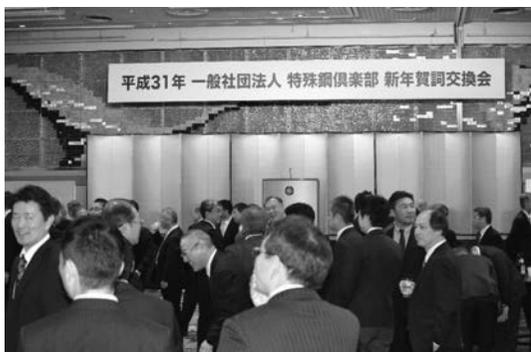
【経済産業省 製造産業局 井上局長】



【佐久間副会長】



【会場風景】



【会場風景】



【業界紹介映像】



# 一般社団法人特殊鋼倶楽部 会員会社一覽

(社名は50音順)

<p>[会 員 数]</p> <p>(正 会 員)</p> <p>製造業者 26社</p> <p>販売業者 103社</p> <p>合 計 129社</p>	【販売業者会員】		
【製造業者会員】	<p>愛 鋼 (株)</p> <p>青 山 特 殊 鋼 (株)</p> <p>浅 井 産 業 (株)</p> <p>東 金 属 (株)</p> <p>新 井 ハ ガ ネ (株)</p> <p>粟 井 鋼 商 事 (株)</p> <p>伊 藤 忠 丸 紅 鉄 鋼 (株)</p> <p>伊 藤 忠 丸 紅 特 殊 鋼 (株)</p> <p>井 上 特 殊 鋼 (株)</p> <p>(株) U E X</p> <p>確 井 鋼 材 (株)</p> <p>ウ メ ト ク (株)</p> <p>扇 鋼 材 (株)</p> <p>岡 谷 鋼 機 (株)</p> <p>カ ネ ヒ ラ 鉄 鋼 (株)</p> <p>兼 松 (株)</p> <p>兼松トレーディング(株)</p> <p>(株) カ ム ス</p> <p>(株) カ ワ イ ス チ ー ル</p> <p>川 本 鋼 材 (株)</p> <p>北 島 鋼 材 (株)</p> <p>ク マ ガ イ 特 殊 鋼 (株)</p> <p>ケ ー ・ ア ン ド ・ アイ 特 殊 管 販 売 (株)</p> <p>小 山 鋼 材 (株)</p> <p>佐 久 間 特 殊 鋼 (株)</p> <p>櫻 井 鋼 鉄 (株)</p> <p>佐 藤 商 事 (株)</p> <p>サ ハ シ 特 殊 鋼 (株)</p> <p>(株) 三 悦</p> <p>三 協 鋼 鉄 (株)</p> <p>三 京 物 産 (株)</p> <p>三 興 鋼 材 (株)</p> <p>三 和 特 殊 鋼 (株)</p> <p>J F E 商 事 (株)</p> <p>芝 本 産 業 (株)</p> <p>清 水 金 属 (株)</p> <p>清 水 鋼 鉄 (株)</p> <p>神 鋼 商 事 (株)</p> <p>住 友 商 事 (株)</p>	<p>住友商事グローバルメタルズ(株)</p> <p>大 同 興 業 (株)</p> <p>大同DMソリューション(株)</p> <p>大 洋 商 事 (株)</p> <p>大 和 興 業 (株)</p> <p>大 和 特 殊 鋼 (株)</p> <p>(株)竹内ハガネ商行</p> <p>孟 鋼 鉄 (株)</p> <p>田 島 ス チ ー ル (株)</p> <p>辰 巳 屋 興 業 (株)</p> <p>千 曲 鋼 材 (株)</p> <p>(株) テ ク ノ タ ジ マ</p> <p>(株) 鐵 鋼 社</p> <p>デルタステール(株)</p> <p>(株) ト ー キ ン</p> <p>東京貿易マテリアル(株)</p> <p>(株) 東 信 鋼 鉄</p> <p>特 殊 鋼 機 (株)</p> <p>豊 田 通 商 (株)</p> <p>中 川 特 殊 鋼 (株)</p> <p>中 野 ハ ガ ネ (株)</p> <p>永 田 鋼 材 (株)</p> <p>名 古 屋 特 殊 鋼 (株)</p> <p>ナ ス 物 産 (株)</p> <p>南 海 鋼 材 (株)</p> <p>日 金 ス チ ー ル (株)</p> <p>日 鉄 住 金 物 産 (株)</p> <p>日鉄住金物産特殊鋼西日本(株)</p> <p>日 本 金 型 材 (株)</p> <p>ノ ボ ル 鋼 鉄 (株)</p> <p>野 村 鋼 機 (株)</p> <p>白 鷺 特 殊 鋼 (株)</p> <p>橋 本 鋼 (株)</p> <p>(株)長谷川ハガネ店</p> <p>(株)ハヤカワカンパニー</p> <p>林 田 特 殊 鋼 材 (株)</p> <p>阪 神 特 殊 鋼 (株)</p> <p>阪 和 興 業 (株)</p> <p>日 立 金 属 工 具 鋼 (株)</p>	<p>日 立 金 属 商 事 (株)</p> <p>(株)日立ハイテクノロジーズ</p> <p>(株) 平 井</p> <p>(株) フ ク オ カ</p> <p>藤 田 商 事 (株)</p> <p>古 池 鋼 業 (株)</p> <p>(株) プ ル ー タ ス</p> <p>(株) 堀 田 ハ ガ ネ</p> <p>(株)マクスコーポレーション</p> <p>松 井 鋼 材 (株)</p> <p>三 沢 興 産 (株)</p> <p>三 井 物 産 (株)</p> <p>三井物産スチール(株)</p> <p>(株) メ タ ル ワ ン</p> <p>(株)メタルワンチューブラー</p> <p>(株)メタルワン特殊鋼</p> <p>森 寅 鋼 業 (株)</p> <p>(株) 山 一 ハ ガ ネ</p> <p>山 進 産 業 (株)</p> <p>ヤ マ ト 特 殊 鋼 (株)</p> <p>山 野 鋼 材 (株)</p> <p>陽 鋼 物 産 (株)</p> <p>菱 光 特 殊 鋼 (株)</p> <p>リ ン タ ツ (株)</p> <p>渡 辺 ハ ガ ネ (株)</p>

## “特集” 編集後記

今月は「自動車用歯車の最新動向」を企画いたしました。過去の類似特集としては、2000年5月号「最新の歯車用材料の加工技術と動向」や2005年3月号「こう変わる自動車用歯車－利用および加工技術」が挙げられます。つまり、14年ぶりの歯車特集となります。

第一章では、特別寄稿として、アムテック(有)様に「和時計から日本の歯車の源流を探る」を執筆いただきました。1688年に作られた和時計に使われた歯車の歯形、材料及び精度等の調査結果や現代に繋がる技術の源流について述べていただきました。

第二章では、総論／技術解説として、①歯車設計の現状と将来、②歯車のものづくりの現状と将来、及び③表面硬化処理用鋼の研究開発動向と将来について、わかりやすく解説いただきました。

第三章では、加工技術の視点から、①鍛造成形、②切削加工、③熱処理（制御ガス窒化）、及び④ショットピーニングをとりあげ解説いただきました。

た。今後も材料に対する期待の高さを感じることができます。

第四章では、歯車の強度評価・シミュレーションの視点から、①歯車強度評価の現状と今後の課題及び②浸炭焼入れ時の熱処理ひずみ解析技術の動向を解説いただきました。

第五章では、従来同様に、鉄鋼各社の歯車用材料をご紹介いただきました。

読者の皆様が本特集をご覧になり、自動車用歯車を支える最新技術と歴史を再認識いただければ幸甚です。極めて興味深い特集になったものと思います。

最後になりましたが、本特集号にご寄稿いただきました執筆者の皆様、ご協力いただきました編集委員および事務局の皆様がこの場を借りて厚く御礼申し上げます。

〔新日鐵住金(株) はまだ たかなり〕  
棒線技術部 棒線技術室 浜田 貴成〕

## 特 集／工作機械の種類と加工方法の基礎および最新の動向

- I. 総論
- II. 工作機械の種類と加工方法
- III. 最新の工作機械の動向
- IV. 最新の加工工具の動向
- V. 会員メーカーの商品紹介

7月号特集予定…特殊鋼の合金元素の役割

## 特 殊 鋼

第 68 卷 第 2 号  
© 2 0 1 9 年 3 月  
平成31年2月25日 印刷  
平成31年3月1日 発行

定 価 1,230円 送 料 100円  
1年 国内7,300円 (送料共)

発 行 所  
一般社団法人 特殊鋼倶楽部  
Special Steel Association of Japan

〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町3丁目2番10号 鉄鋼会館  
電 話 03(3669)2081・2082  
ホームページURL <http://www.tokushuko.or.jp>

編集発行人 小 澤 純 夫  
印刷人 増 田 達 朗  
印刷所 レタープレス株式会社

本誌に掲載されたすべての内容は、一般社団法人 特殊鋼倶楽部の許可なく転載・複写することはできません。