

# 特殊鋼

2022 **5**  
Vol.71 No.3  
The Special Steel

特集

特殊鋼と窒化

# 特殊鋼

5

## 目次

2022

### 【編集委員】

委員長	井上幸一郎	(大同特殊鋼)
副委員長	白神 哲夫	(中川特殊鋼)
委員	宇田川毅志	(愛知製鋼)
〃	吉原 直	(神戸製鋼所)
〃	西森 博	(山陽特殊製鋼)
〃	深瀬美紀子	(大同特殊鋼)
〃	青山 敦司	(日本製鉄)
〃	正能 久晴	(日本金属)
〃	谷井 一也	(日本高周波鋼業)
〃	吉田 統樹	(日本冶金工業)
〃	酒寄 一志	(日立金属)
〃	大石 裕之	(三菱製鋼)
〃	阿部 泰	(青山特殊鋼)
〃	高橋 秀幸	(伊藤忠丸紅特殊鋼)
〃	番場 義信	(UEX)
〃	池田 祐司	(三興鋼材)
〃	関谷 篤	(竹内ハガネ商行)
〃	平井 義人	(平井)

### 《 需要部門の動向 》

産業機械…………… 一般社団法人日本産業機械工業会 片岡 功一 1

## 【特集／特殊鋼と窒化】

### I. 概 論

1. 窒化処理技術の位置づけ (現状・進歩・動向)  
……………日本パーカライジング(株) 渡邊 陽一 5
2. 窒化の基礎…………… 東北大学 宮本 吾郎 10

### II. 窒化方法

1. ガス窒化法……………(株)オーネックス 清水 郁 14
2. ガス軟窒化法…………… DOWAサーモテック(株) 清水 克成 18
3. プラズマ窒化法 (イオン窒化法)  
……………日本電子工業(株) 大沼 一平 22
4. 塩浴軟窒化法……………日本パーカライジング(株) 石塚はる菜 26

### III. 窒化の適用例

1. 乗用車部品 (クランクシャフト)  
…………… 日本製鉄(株) 祐谷 将人 29
2. トラック部品 (クランクシャフト)  
…………… いすゞ自動車(株) 山田 明德 32  
…………… いすゞ自動車(株) 政家 弘樹  
…………… いすゞ自動車(株) 衛藤 洋仁
3. 乗用車 (歯車) ①…………… 日本製鉄(株) 木口 海 35
4. 乗用車 (歯車) ②…………… 大同特殊鋼(株) 田中 優樹 38

5. 建設機械部品の窒化処理による摺動性向上	日立建機(株) 孟 凡輝	42
6. 金 型	日立金属工具鋼(株) 小林 寛和	46
7. 射出成形部品	東洋機械金属(株) 田中 博子	50
“特集”編集後記	中川特殊鋼(株) 白神 哲夫	67

■業界のうごき	54
▲特殊鋼統計資料	57
★倶楽部だより (2022年2月1日～3月31日)	61
☆特殊鋼倶楽部の動き	63
☆一般社団法人特殊鋼倶楽部 会員会社一覧	66

特集／「特殊鋼と窒化」編集小委員会構成メンバー (2021年11月29日現在)

役名	氏名	会社名	役職名
小委員長	白神 哲夫	中川特殊鋼(株)	フェロー
委員	宇田川毅志	愛知製鋼(株)	品質保証部 お客様品質・技術室 主任職
〃	吉原 直	(株)神戸製鋼所	鉄鋼アルミ事業部門 線材条鋼ユニット線材条鋼商品技術部グループ長
〃	西森 博	山陽特殊製鋼(株)	東京支社部長 市場開拓・CS
〃	小川 道治	大同特殊鋼(株)	技術開発研究所 ソリューション支援室 兼企画室 副主席部員
〃	青山 敦司	日本製鉄(株)	棒線事業部 棒線技術部 棒線技術室 室長
〃	谷井 一也	日本高周波鋼業(株)	富山製造所 技術部 開発室 課長
〃	吉田 統樹	日本冶金工業(株)	ソリューション営業部 課長
〃	酒寄 一志	日立金属(株)	金属材料事業本部 技術部長
〃	大石 裕之	三菱製鋼(株)	技術開発センター 製品評価グループ マネージャー
〃	高橋 秀幸	伊藤忠丸紅特殊鋼(株)	特殊鋼本部 前橋支店 支店長
〃	番場 義信	(株) U E X	仕入部長 兼 仕入部 仕入チームリーダー
〃	関谷 篤	(株)竹内ハガネ商行	技術部長

## 産業機械

## 産業機械の2021年の回顧と2022年の展望

一般社団法人日本産業機械工業会 企画調査部 調査課長 片岡 功一

## ま え が き

産業機械とは、生産システムから社会インフラまで、ありとあらゆる経済社会を支える資本財の総称であり、その範囲は膨大である。

ここでは、表1にある日本産業機械工業会の取扱機種について、当工業会の自主統計を元に2021年1～12月の実績、2022年の受注見込みを以下に述べる。

- 注1) 表1は「産業機械受注状況」を加工したものであり、調査対象は当工業会の会員企業である。
- 注2) 化学機械の中に、パルプ・製紙機械、冷凍機械及び環境装置の大気汚染防止装置・水質汚濁防止装置受注分を含む。
- 注3) その他機械の中に、環境装置のごみ処理装置受注分を含む。
- 注4) 製造業の「旧一般機械」は、2011年3月までの旧分類での「一般機械」+「精密機械」であり、新分類の「はん用・生産用機械」+「業務用機械」に対応する。

## ◇ 最近の受注動向

## 1. 概況

2021年1～12月の産業機械の受注総額は、内需・外需とも増加し、対前年比（以下同様）119.9%の5兆5,175億円となり、3年ぶりに前年を上回った。

内需は、製造業の増加により、101.7%の3兆2,757億円となり2年ぶりに前年を上回った。

外需は、アジア、中東、ヨーロッパ、アフリカ、ロシア・東欧の増加により、162.2%の2兆2,417億円となり、3年ぶりに前年を上回った。

（ご参考）四半期の推移

需要部門別の四半期推移をみると、合計については、2021年1～3月期に129.0%の1兆9,107億円と3四半期ぶりに増加へ転じた。

内需については、製造業が4四半期連続で先行して回復し、10～12月期には製造業、非製造業、

表 1 2021年1月～12月 主な需要部門別の受注状況

上段：金額（百万円） 下段：前年同期比（%）

一般社団法人日本産業機械工業会

	製造業							非製造業		民需計	官公需	代理店	内需	外需	合計
	化学工業	石油・石炭	鉄鋼	旧一般機械	電気機械	自動車	その他を含む小計	電力	その他を含む小計						
ボイラ・原動機	16,895 72.5	3,898 65.0	17,029 128.7	4,698 247.7	36,709 173.0	3,539 68.5	218,497 140.7	516,354 79.8	569,556 81.7	788,053 92.4	55,511 101.8	5,301 86.8	848,865 92.9	295,028 79.9	1,143,893 89.2
鉱山機械	58 128.9	0 —	593 212.5	38 65.5	0 —	0 —	8,833 102.7	77 197.4	17,297 171.8	26,130 140.0	10 —	466 123.0	26,606 139.7	2,220 213.9	28,826 143.5
化学機械 (冷凍を含む)	111,892 126.1	22,579 71.4	6,906 97.4	85,908 98.0	42,947 95.1	17,405 108.5	400,264 111.7	37,978 99.9	120,118 101.4	520,382 109.1	187,313 113.6	166,056 107.7	873,751 109.8	995,418 241.2	1,869,169 154.6
タンク	669 88.3	12,427 78.9	185 —	0 —	0 —	0 —	13,281 80.5	298 91.4	608 20.4	13,889 71.3	48 72.7	0 —	13,937 71.3	375 5.8	14,312 55.1
プラスチック 加工機械	10,836 123.2	282 39.0	28 112.0	1,830 112.5	2,862 164.9	18,338 155.0	68,713 108.0	0 —	181 149.6	68,894 108.1	59 78.7	3,640 192.1	72,593 110.5	251,790 195.2	324,383 166.6
ポンプ	5,891 107.4	3,693 155.7	4,181 110.2	396 118.9	377 91.5	153 143.0	32,192 115.3	11,259 94.7	39,397 99.8	71,589 106.2	134,891 104.2	107,123 104.4	313,603 104.7	113,140 157.7	426,743 115.0
圧縮機	8,303 108.9	3,943 172.6	2,477 96.8	47,017 119.9	1,158 154.6	468 127.9	70,805 117.5	3,263 101.0	15,230 105.1	86,035 115.1	4,364 131.6	44,505 99.4	134,904 109.8	139,685 114.0	274,589 111.9
送風機	619 125.1	137 88.4	2,638 74.9	355 116.8	16 27.6	1,682 108.6	6,678 95.1	1,856 106.2	4,046 108.0	10,724 99.6	10,724 49.5	3,896 105.0	5,656 84.4	20,276 55.6	22,147 80.9
運搬機械	8,399 98.3	1,989 332.6	11,127 108.4	15,392 206.4	6,217 66.0	19,063 121.1	109,867 106.0	15,546 45.3	185,619 99.7	295,486 101.9	10,125 209.7	19,826 103.0	325,437 103.7	154,347 143.8	479,784 113.9
変速機	1,771 105.2	188 138.2	2,456 108.3	2,993 158.9	464 116.6	2,678 126.6	31,655 125.7	1,392 96.0	5,008 111.1	36,663 123.5	4,592 104.9	1,394 101.3	42,649 120.3	9,431 169.6	52,080 127.0
金属加工 機 械	745 197.1	1 4.8	52,720 179.5	1,603 48.6	2,046 200.4	7,351 102.87	80,123 149.3	20 333.3	2,369 101.5	82,492 147.3	208 163.8	1,464 114.4	84,164 146.6	65,808 223.4	149,972 172.7
その他機械	5,974 105.8	1,003 51.1	3,290 108.8	13,991 181.7	480 111.1	1,358 410.3	97,117 125.2	7,354 240.6	65,624 86.0	162,741 105.8	349,807 88.6	6,423 152.4	518,971 93.8	212,684 171.6	731,655 108.1
合計	172,052 113.5	50,140 81.4	103,630 137.4	174,221 115.1	93,276 115.8	72,035 119.3	1,138,025 118.9	595,397 80.3	1,025,053 88.7	2,163,078 102.3	750,824 98.2	361,854 106.0	3,275,756 101.7	2,241,797 162.2	5,517,553 119.9

※網掛け部分は前年同期を上回ったところ

表 2 需要部門別四半期推移

上段：金額（百万円） 下段：前年同期比（%）

	2021年			
	1～3月	4～6月	7～9月	10～12月
製造業	278,839	268,118	305,046	286,022
	108.5	124.2	131.6	113.1
非製造業	296,527	201,578	205,734	321,214
	76.7	70.1	87.9	129.5
民需計	575,366	469,696	510,780	607,236
	89.4	93.3	109.7	121.2
官公需	156,602	159,707	257,602	176,913
	72.1	86.2	111.8	134.3
代理店	88,643	88,028	88,437	96,746
	101.5	112.3	103.3	107.3
内需	820,611	717,431	856,819	880,895
	86.6	93.5	109.6	121.9
外需	1,090,179	318,307	376,156	457,155
	204.6	178.0	96.9	161.7
合計	1,910,790	1,035,738	1,232,975	1,338,050
	129.0	109.5	105.4	133.1

※網掛け部分は前年同期を上回ったところ

官公需、代理店の全てがプラスとなった。

外需については、中東が天然ガスの大型プロジェクトの受注で1～3月期に大幅増し、中国が2020年7～9月期より6四半期連続で増加するなど、堅調に推移した。なお、ロシア・東欧は、2021年の外需に占める割合が4.9%であり、6四半期連続で増加した。

注5) 表3は「産業機械輸出契約状況」を加工したものであり、調査対象は会員企業のうち大手のみである。

## 2. 需要部門別受注状況（2021年1～12月）

- ①製造業：化学、鉄鋼、非鉄金属、はん用・生産用、電気機械、情報通信機械、自動車の増加により、前年比118.9%の1兆1,380億円となり、5年ぶりに前年を上回った。
- ②非製造業：電力、その他非製造業の減少により、前年比88.7%の1兆250億円となり、2年連続で前年を下回った。
- ③官公需：地方公務の減少により、前年比98.2%の7,508億円となり、2年ぶりに前年を下回った。
- ④外需：アジア、中東、ヨーロッパ、アフリカ、ロシア・東欧の増加により、前年比162.2%の2兆2,417億円となり、3年ぶりに前年を上回った。

- 1) アジア：プラスチック加工機械、風水力機械、運搬機械、変速機、金属加工機械の増加により、110.5%となった。
- 2) アジアのうち中国：ボイラ・原動機、化学

表 3 世界州別受注状況

単位：前年比（%）

	2021年					構成比 2021年 1～12月
	1～3月	4～6月	7～9月	10～12月	1～12月	
アジア	46.8	187.8	144.6	179.9	110.5	42.6%
うち、中国	104.8	186.7	153.7	111.6	135.4	15.2%
中国除くアジア	35.3	188.7	138.8	226.6	100.3	27.4%
中東	5,761.2	182.8	7.1	269.3	457.9	39.4%
欧州	76.1	179.9	165.7	163.3	135.0	4.6%
北米	80.2	97.3	179.9	109.9	107.1	5.9%
南米	6.5	310.6	94.2	360.4	63.1	0.4%
アフリカ	253.1	216.2	213.8	379.1	282.4	1.0%
オセアニア	79.2	173.6	539.5	52.3	153.8	1.1%
ロシア・東欧	185.2	514.7	195.2	106.8	175.5	4.9%

※網掛け部分は前年を上回ったところ

機械、プラスチック加工機械、風水力機械、運搬機械、変速機、金属加工機械の増加により、135.4%となった。

- 3) 中国除くアジア：ボイラ・原動機、化学機械が減少したものの、プラスチック加工機械、風水力機械、運搬機械、金属加工機械の増加により、100.3%となった。
- 4) 中東：天然ガスの大型プロジェクトの受注により化学機械が大幅に増加したほか、風水力機械も増加し、457.9%となった。
- 5) 欧州：ボイラ・原動機、風水力機械、運搬機械、変速機の増加により、135.0%となった。
- 6) 北米：プラスチック加工機械、風水力機械、運搬機械、金属加工機械の増加により、107.1%となった。
- 7) 南米：ボイラ・原動機の減少により、63.1%となった。
- 8) アフリカ：化学機械、風水力機械の増加により、282.4%となった。
- 9) オセアニア：ボイラ・原動機、風水力機械の増加により、153.8%となった。
- 10) ロシア・東欧：ボイラ・原動機、プラスチック加工機械の増加により、175.5%となった。

注6) ④外需の「風水力機械」は、ポンプ・圧縮機・送風機を合計したもの。

## 3. 機種別受注状況（2021年1～12月）

- ①ボイラ・原動機：電力、外需の減少により、前年比89.2%の1兆1,438億円となり、2年連続で前年を下回った。

- ② 鉱山機械：建設、外需の増加により、前年比143.5%の288億円となり、2年ぶりに前年を上回った。
- ③ 化学機械（冷凍機械を含む）：情報通信機械、運輸・郵便、官公需、外需の増加により、前年比154.6%の1兆8,691億円となり、3年ぶりに前年を上回った。
- ④ タンク：石油・石炭、その他非製造業（ガスを含む）、外需の減少により、前年比55.1%の143億円となり、2年ぶりに前年を下回った。
- ⑤ プラスチック加工機械：自動車、外需の増加により、前年比166.6%の3,243億円となり、4年ぶりに前年を上回った。
- ⑥ ポンプ：石油・石炭、情報通信機械、官公需、外需、代理店の増加により、前年比115.0%の4,267億円となり、3年ぶりに前年を上回った。
- ⑦ 圧縮機：石油・石炭、はん用・生産用、官公需、外需の増加により、前年比111.9%の2,745億円となり、3年ぶりに前年を上回った。
- ⑧ 送風機：官公需、外需の減少により、前年比80.9%の221億円となり、3年ぶりに前年を下回った。
- ⑨ 運搬機械：はん用・生産用、卸売・小売、官公需、外需の増加により、前年比113.9%の4,797億円となり、3年ぶりに前年を上回った。
- ⑩ 変速機：はん用・生産用、その他製造業、外需の増加により、前年比127.0%の520億円となり、2年連続で前年を上回った。
- ⑪ 金属加工機械：鉄鋼、外需の増加により、前年比172.7%の1,499億円となり、3年ぶりに前年を上回った。
- ⑫ その他機械：情報通信機械、外需の増加により、前年比108.1%の7,316億円となり、2年連続で前年を上回った。

#### ◇ 今後の受注の展望

この受注の展望は、2022年1月下旬から2月上旬の各種調査をもとに作成しているため、ロシアがウクライナへの軍事行動を2月24日に開始し、その後発生したロシアに対する経済制裁やサプライチェーンの混乱等の不確定要素の影響は織り込

んでいない。

なお、ロシアのウクライナ侵攻及び対露経済制裁等による影響度合いは、現時点で不明であり、数量的な予測をすることは困難であるが、見通しに関する今後の下振れ要因、上振れ要因は次の通り想定する。

#### 【下振れ要因】

- ・物流や金融の混乱等ロシア事業停止による受注キャンセル
- ・ロシアで契約を見込んでいた案件の消滅
- ・エンドユーザが不明となる汎用機の受注見合わせ
- ・ロシアでプラントを建設する欧州や中国のエンジニアリング会社等からのコンポーネント発注停止
- ・産業機械と共に使用される欧州の電気機械等の輸出停止による事業見直し
- ・産業機械の据え付け・補修・メンテナンス等の人員手配の影響
- ・ロシア事業に対するレピュテーションリスクによる輸出停止
- ・国内・海外の産業機械ユーザの生産計画の見直しによる設備投資の縮小

#### 【上振れ要因】

- ・欧州のLNG案件やパイプライン関連の需要の増加
- ・天然ガス開発で既に計画されているプロジェクトの投資判断が早まり、前倒し発注されるケース

#### 【2022年の受注の展望】

2022年の産業機械受注総額は前年比95%と減少を見込んだ。

内需は、民需の減少を官公需が補う形となり、受注金額としてはほぼ前年並みの前年比100%と見込んだ。

民需は、自動車産業や半導体関連、その上流となる素材産業などの製造業を中心とした省エネ化・高効率化対応や、物流拠点の自動化・省力化に向けた搬送システム等の需要が増加するものの、電力業からの石炭火力の休止・廃止に伴うリブレース縮小や大型バイオマス発電設備の新規案件の減少により、前年を下回るものと見込んだ。

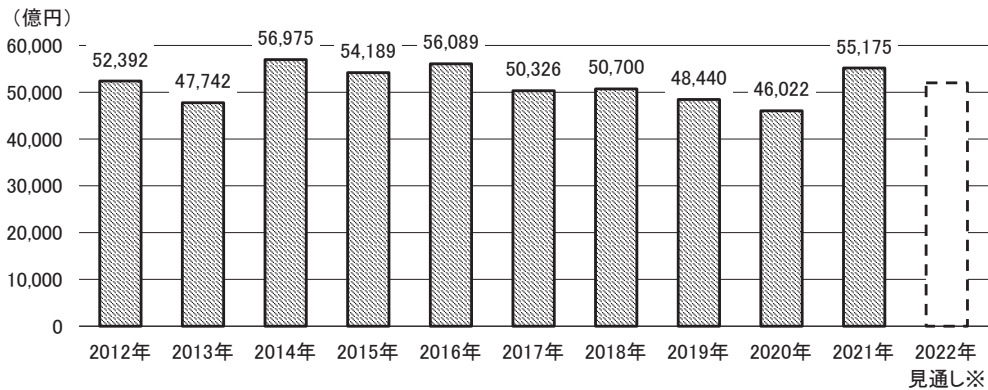
官公需は、国土強靱化に向けた洪水対策等が堅

調に推移し、下水汚泥の燃料化等の高効率処理への対応、清掃工場の改良工事の増加により、前年を上回るものと見込んだ。

外需は、各国のポストコロナの成長戦略の加速等により、世界経済の回復が続く中、全世界的に普及が加速している電気自動車のバッテリーやセンサー等の生産能力の増強の他、世界的な半導体関連産業の工場新設、上下水処理や海水淡水化の

民営化案件等の水インフラプロジェクトの増加、クリーンエネルギーとして条件付きでカテゴライズされた天然ガス開発の再開等による増加を見込むものの、世界規模での石炭火力の段階的削減がCOP26で表明される中、老朽火力発電設備の維持・更新の減少に加えて、前年に中東で天然ガスの大型プロジェクトを受注した反動減により、前年比90%と見込んだ。

(グラフ)産業機械の受注総額の推移



※2022年見通しには、2月24日にロシアがウクライナへの軍事行動を開始し、その後発生したロシアに対する経済制裁やサプライチェーンの混乱等の不確定要素の影響を織り込んでいない

## 特集

# 特殊鋼と窒化

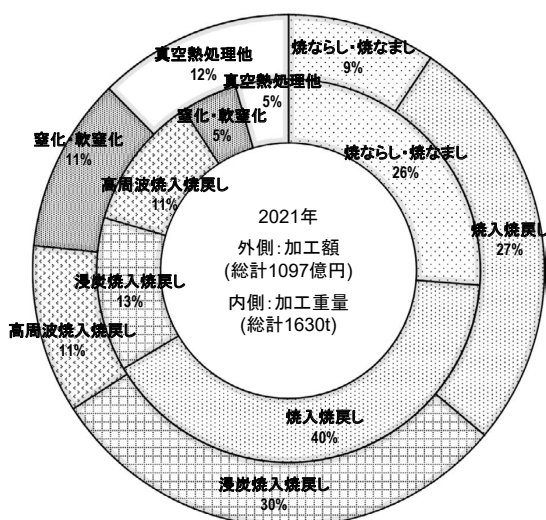
## I. 概 論

### 1. 窒化処理技術の位置づけ (現状・進歩・動向)

日本パーカライジング(株) わた なべ よう いち  
総合技術研究所 副所長 渡 邊 陽 一

#### ◇ 窒化の現状と認識

日本の窒化・軟窒化の受託加工市場は、約120億円と加工市場全体の11%程度を占め、2013年から新型コロナ禍の影響がない2018年度までの5年間で約33%増と顕著な伸びを示している。図1は、日本の2021年の受託加工全体の加工重量と加工額の内訳比率を示している。窒化・軟窒化は、加工重量



出典: (一社)日本金属熱処理工業会

図 1 日本の金属熱処理加工内訳 (2021年)

では約5%であるが、加工額では11%も占める。すなわち単純平均単価(加工額を加工重量で除した値)では、真空系熱処理に次いで高く、非常に付加価値の高い表面硬化熱処理と言えるかもしれない。

この窒化・軟窒化処理は、浸炭系熱処理や高周波焼入れ処理と共に、鋼を主とした金属部材の機能、すなわち耐疲れ強さ、耐摩擦摩耗性や耐食性などを必要とする表面層のみに効率的に付与する高付加価値技術の雄として、地味ながらも自動車、建機および各種機械製品などの進歩・発展に大きく貢献してきた。

Fe-N系 $A_1$ 変態点(592℃)未満の温度で処理する窒化・軟窒化は、900℃~980℃で処理し焼入れを伴う浸炭系熱処理に比較し低ひずみという利点のみならず、省エネに加え $NH_3$ と $N_2$ および $H_2$ ガスからなる雰囲気ガスからは $CO_2$ ガスをほとんど排出させない。都市ガスやLPガスなどによるガス炊き(燃焼加熱)方式の処理であっても、発生する $CO_2$ 量は従来のガス浸炭処理の1/3以下(重量比)である。

表1は、窒化・軟窒化について、主要項目を浸炭・浸炭窒化および高周波焼入れ技術と比較整理したもので、図2はその現状の位置づけを示すイメージ図である。各熱処理の特徴がよく分かるように敢えて強調して描いた。窒化・軟窒化は、表面硬さやひずみにおいて優位にあるが、硬化層深



表 1 窒化系熱処理の浸炭系及び高周波焼入れとの比較

大分類	主な小分類	目的	主な適用材	窒素 / 炭素供給源	硬化機構	特徴
窒化	・ガス窒化 ・真空(減圧/低圧)窒化 ・プラズマ(イオン)窒化	・耐摩耗・耐焼付き ・耐疲れ強さ ・耐食性	・低合金鋼 ・合金鋼・窒化用鋼 (JIS-SACM645など) ・合金工具鋼・金型用鋼	NH <sub>3</sub> およびN <sub>2</sub> ガス	・表面の窒素化合物層 (ε, γ'相) ・固溶窒素による固溶強化 ・合金窒化物による析出/分散強化	・窒化元素 (Cr, Al, V, Ti, Moなど) により高い表面硬さ ・低ひずみ ・省エネ省資源・低CO <sub>2</sub> 排出 (低温処理、焼戻し不要)、 塩浴は廃液処理必要
軟窒化	・ガス軟窒化 ・塩浴軟窒化	・耐疲れ強さ ・耐摩耗・耐焼付き ・耐食性 ・意匠性	・低級鋼/軟鋼板 ・炭素鋼・低合金鋼 ・合金鋼・窒化用鋼 ・合金工具鋼・金型用鋼 ・ステンレス鋼、耐熱鋼	・NH <sub>3</sub> 、N <sub>2</sub> および CO、CO <sub>2</sub> ガス ・CNOイオン(塩浴中)	同上	同上
浸炭焼入れ焼戻し	・ガス浸炭焼入れ焼戻し ・真空(減圧/低圧)浸炭焼入れ焼戻し ・プラズマ(イオン)浸炭	・耐疲れ強さ ・耐摩耗・耐焼付き	・低炭素鋼 ・低合金肌焼き鋼 ・合金鋼	炭化水素系ガス (CH <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> 、C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> 、 C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> など)、キャリア ガス中のCOガス	・高炭素マルテンサイト相 ・炭化物の分散強化	・高い表面硬さ ・十分な硬化層深さ ・高い圧縮残留応力
浸炭窒化焼入れ焼戻し	・ガス浸炭窒化焼入れ焼戻し ・真空(低圧・減圧)浸炭窒化焼入れ焼戻し	・耐疲れ強さ ・耐焼戻軟化 ・耐摩耗・耐焼付き	同上	炭化水素系ガス (CH <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> 、C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> 、 C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> など)、キャリア ガス中のCOガス、 NH <sub>3</sub> 、N <sub>2</sub> ガス	・高炭素-高窒素固溶 マルテンサイト相 ・炭化物の分散強化	・少ない粒界酸化異常組織 ・十分な硬化層深さ ・優れた耐焼戻軟化性 ・安定残留オーステナイト相
高周波焼入れ(+焼戻し)		・耐疲れ強さ ・耐衝撃 ・耐摩耗	・中炭素鋼 ・低合金鋼 ・炭素工具鋼	—	・焼入れマルテンサイト相 ・高い圧縮残留応力	・深い硬化層 ・定ひずみ ・省エネ省資源・低CO <sub>2</sub> 排出

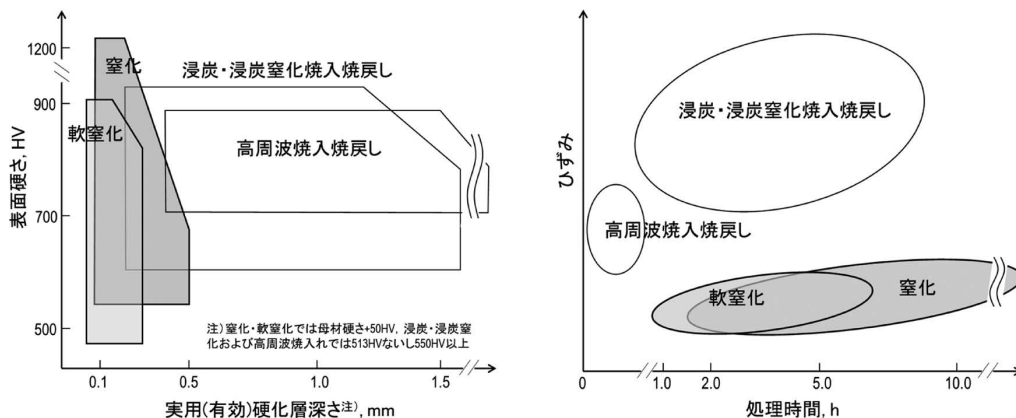


図 2 代表的な表面硬化熱処理における窒化・軟窒化の位置づけイメージ

さにおいては、浸炭・浸炭窒化や高周波焼入れ処理に明らかに劣る。この点については、後述する雰囲気制御の最適化や温度と窒化ポテンシャル値を段階的に変化させる多段化処理、そして近年開発が進んでいる窒化用鋼との併用による表面組織制御によって、機能面ではかなり改善できることも分かってきた。

今後2050年のカーボンニュートラル実現に向け、この窒化・軟窒化(以下単に窒化)を軸に窒素を積極利用する窒化系熱処理技術が真空(減圧)系技術と共に新時代の熱処理生産技術としてさらに進歩を遂げ、次世代の自動車や各種産業機械の実現に大きく貢献できるものと期待されている。

### ◇ 窒化の種類と歴史的進歩

窒化の歴史については、当誌2021年70巻3号でも一部紹介したが改めてもう少し詳しく説明する。重複する部分のあることをお許しいただきたい。

#### 1. ガス窒化の種類とその進歩

窒化は、1906年H<sub>2</sub>とN<sub>2</sub>からNH<sub>3</sub>を合成するHaber-Bosch法が開発<sup>1)</sup>され1913年ドイツでの工業生産開始以降、ドイツKrupp社の冶金技術者Fry<sup>2)</sup>が1923年に行った鋼のNH<sub>3</sub>ガスによる方法が最初とされる。約500℃でNH<sub>3</sub>ガスの分解および解離を利用、すなわち分解前のNH<sub>3</sub>分子が鋼表面に吸着して鋼の触媒作用によって解離しN<sub>2</sub>分子になる前の

発生期Nが鋼表面から侵入する、 $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 3\text{H}_2$ なる反応によって、Al及びCr添加鋼に窒素を浸入拡散させる処理である。その後、後述する溶融塩浴法と同様な軟窒化（当時は炭窒化とも呼び、窒素と共に僅かの炭素も浸入拡散させる）をガスで実現する研究がなされ、吸熱反応型変性（RX； $\text{N}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ ガスから成る）ガスと $\text{NH}_3$ ガスの混合ガスを使うガス軟窒化法（1962年）や発熱反応型変性ガス（NX； $\text{N}_2$ ガスを主にわずかに $\text{CO}$ と $\text{H}_2$ ガスを含む）と $\text{NH}_3$ ガスを使う方法（1969年）が開発され、日本でも多く採用された。その他、1953年フランスで開発され以降実用化が進んだガス浸流窒化、すなわち硫化水素（ $\text{H}_2\text{S}$ ）ガスを添加してSをも浸透させ優れた潤滑作用により摩擦係数を下げ耐摩擦摩耗性及耐焼付性を改善する処理法、1974年日産自動車の宮田・伏見らが開発したNN法と呼ばれる酸窒化<sup>3)</sup>、すなわち雰囲気中に5～8vol%程度の空気あるいは $\text{O}_2$ を添加して、 $4\text{NH}_3 + 3\text{O}_2 \rightarrow 4\text{N} + 6\text{H}_2\text{O}$ なる反応によって窒化を迅速化する迅速窒化法で $\gamma$ 系ステンレス鋼や耐熱鋼への窒化も可能とした処理法などがある。複合処理による酸窒化としては、イギリスのLUCAS社が開発し1979年に発表したNITROTECがある。 $\text{NH}_3$ とRXガスによるガス軟窒化に、空気による酸化（ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 形成）さらに表層のポーラス層（主に $\varepsilon$ 相表層部に形成するポイド）にワックスを含浸させる方法である<sup>4)</sup>。後述する塩浴法では、軟窒化後に研磨、続いて塩浴酸化を行うQPQ法が複合処理の酸窒化であり、現在も広く使われている。また、ステンレス鋼・耐熱鋼や高合金工具鋼など軟窒化材の窒化では、酸洗などの前処理の他、窒化の際、塩化物系化合物、ハロゲンガスあるいは炭化水素系ガスが表面活性化剤として使われる。1990年代、エア・ウォーター社によって開発されたNV窒化は、フッ素ガスを含むガス雰囲気により、表面の不動態被膜をフッ化膜に置換することで低温窒化をも可能にする特殊な活性化窒化法であり実用化されている。1985年に開発されたカナック処理は、韌性に劣る窒素化合物層（単に化合物層、白色層あるいは外部窒化層とも呼び $\zeta$ - $\text{Fe}_2\text{N}$ 、 $\varepsilon$ - $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ 、 $\gamma'$ - $\text{F}_4\text{N}$ 相から成る）を形成させず窒素拡散のみの窒化法であり、韌性や面粗さを劣化させず寸法変化も小さいなどの利点を有する。詳細は本誌各論の項に譲るが、プラ

ズマ法（NHラジカルを利用）で開発されたラジカル窒化も同じように化合物層を有しない窒化として良く知られている。

## 2. 雰囲気制御

ガス窒化やガス軟窒化における雰囲気ガスの基礎研究は、1970年代から欧州で行われた。1990年代後半には欧州を中心に、高精度な $\text{H}_2$ や $\text{O}_2$ センサー（軟窒化の場合）を用いて窒化ポテンシャル $K_N = (\text{NH}_3\text{分圧}) / (\text{H}_2\text{分圧})^{3/2} \text{ atm}^{-1/2}$ を制御する雰囲気制御窒化技術が発展した。日本でも2000年以降徐々に関心が高まり、現在では、窒化ポテンシャル $K_N$ -温度 $T$ 線図（純鉄の場合はレーラー図と呼ぶ）を利用して、化合物層、ポーラス層、窒素拡散層から成る窒化組織の高精度な制御が可能となっている。これを利用して、現在では、高い寸法・曲がり精度が要求されるエンジンのクランクシャフト、自動車や建機の大径・薄物部品例えばインターナルギアやカウンターギアといった変速機や減速機用ギアおよび油圧シヨベルの油圧ポンプピストンなどに適用が進んでおり、適正な化合物層および硬さ分布を確保すると共に、 $\text{NH}_3$ ガス使用量の削減<sup>5)</sup>にもつながっている。

## 3. 塩浴軟窒化

1929年、Kinzelらによって、シアン化物の溶融塩による優れた液体窒化法が初めて報告された。その後の1940年代、ドイツDegussa社において基礎研究が開始され、1955年Muller<sup>6)</sup>によってTUFFTRIDE法が開発された。以降工業化が進められ1970年頃までは、原料としてシアン塩を用い空気を導入する方法のTUFFTRIDEの他TENIFER法もよく知られている。しかし窒化にはシアン化物イオンではなく、空気中の $\text{O}_2$ によって酸化したシアン酸イオンが重要であることが分かり、1980年以降は、シアン酸塩と炭酸塩から成る溶融塩が用いられる新TUFFTRIDE法が実用化された。初期のTUFFTRIDE法が日本に導入された1963年以降、日本パーカラライジンググループによって改良が重ねられ、環境対応と高機能化を両立したISONITE法がシリーズ開発された。2001年以降、H. E. Fグループでは、TUFFTRIDEの他、新たにCLIN処理と称するARCORシリーズが開発された。これら塩浴軟窒化法は、耐疲れ強さや耐摩耗性・耐焼付性の他、耐電食や耐溶損を含めた耐食性や独特な黒色外観を活かしての意匠性が

要求される部品や金型など多方面で適用されている。

#### 4. プラズマ窒化

放電プラズマを利用するプラズマ（イオン）窒化は、1930年代のドイツ特許が起源とされるが、本格的に実用化されたのは1970代以降である。数十～数百Paの減圧炉内で $N_2$ と $H_2$ の混合ガスを使い、被処理材を陰極、炉壁を陽極に数百ボルトの直流電圧をかけ、グロー放電によって発生させたガス分子、原子の励起すなわちプラズマ状態の窒素を試料表面から浸入させる直流プラズマ法が現在最もよく工業利用されている。しかし、加速された高速の $N^+$ の陰極（試料）表面での衝突エネルギーにより発生する350～600℃の温度はムラが生じやすい。また、エッジ効果あるいはホローカソード効果などの問題が生じる。2000年以降、被処理物には通電せずそれを囲むケージにグロー放電を起こさせ発生した反応活性種によって処理するスルーケージプラズマ法<sup>7)</sup>が発表された。その後、Bellら、Plasma Metals社やNitruvid社によって、アクティブスクリーンプラズマ法として開発が進められ主にヨーロッパで実用化され、日本でも独自に研究<sup>8)</sup>が進められている。1985年にはBellらが、オーステナイト系ステンレス鋼への低温(300℃～450℃)プラズマ窒化法<sup>9)</sup>を発表している。CrNの析出がなくNが過飽和に固溶したいわゆる拡張オーステナイト相(S相<sup>10)</sup>とも呼ばれ、1,400～1,600HVもの硬さを有する)が形成するため、耐食性を劣化させることなく優れた耐摩耗性を付与できる。近年、オーステナイト系ステンレス鋼の優れた耐食性をそのままにさらに耐摩擦摩耗をも要求される分野、例えば食品・薬品製造や医療分野へ利用が期待されている。

#### ◇ 窒化の技術動向

2016年度から2021年度までの5年間、(一社)日本熱処理技術協会での研究発表221件の内容を見れば、表面硬化分野では、ガス窒化・軟窒化系とプラズマ窒化系が59件、約27%と窒化系の研究が最も高い比率を占めている。大学などの研究機関での窒素の挙動や機能に関する基礎研究の高まりも特徴の一つである。世界的に最も信頼の高いIFHTSE(国際熱処理表面工学連盟)やASM-HTS(米国材料熱処理学会)などの講演発表でも同様の傾向にある。

#### 1. 高温窒化・浸窒焼入れ

すでに古くから知られているが近年関心の高まっている技術として、 $A_1$ 点を超える高温(640～780℃)で窒化した後に急冷して、窒素を過飽和に固溶させた硬く焼戻軟化抵抗に優れたマルテンサイト(窒素マルテンサイトと呼ぶ)を形成させる浸窒焼入れ(窒化焼入れとも言う)<sup>11)</sup>がある。すでに一部で実用化されており、例えばSPCCやSPHCなどの冷間/熱間圧延軟鋼板で製作される自動車用クラッチプレートなど高精度・高信頼性が要求される内燃機関用可変バルブタイミング機構のアクチュエータ部品<sup>12)</sup>などがある。これら浸窒焼入れ後に200～280℃の焼戻しを行えば、窒素過飽和 $\gamma$ やベイナイト相からの鉄窒化物(主に $\gamma$ -Fe<sub>4</sub>N)の析出によって著しく硬化する。しかし、浸炭焼入れに比較して、表面硬さ特に硬化深さは未だ十分とは言えず、そのため低温処理と高温処理を多段階に組み合わせて浸窒焼入れする研究もなされている。700℃、800℃最後に再び700℃処理によってS20C鋼の窒素濃度や硬さ分布が改善されたと報告している<sup>13)</sup>。今後、雰囲気制御窒化技術と共に低CO<sub>2</sub>排出・低ひずみ熱処理という利点を活かして浸炭歯車とは異なる次世代高機能歯車として開発・適用拡大が進むかもしれない。

#### 2. 高面圧すべり接触疲れに優れた窒化鋼

以上述べてきた窒化の特性を一層活かせる窒化用鋼の開発が、窒化組織の冶金的基礎研究の進展を背景に活発化している。特に硬化層深さが重要とされ、これまで浸炭系や高周波系熱処理での対応が主であった高面圧すべり接触疲れ(以下単に面圧疲れ)強さの改善を目的とした開発が注目される。詳細は本誌の各論に譲るが、例えば既存JIS鋼(金型用の合金工具鋼は勿論、機械構造用鋼としてS45C、SCr420HやSCM435鋼など)への適用に加え、最近では、加工性の改善目的で低C化し、窒化元素(窒化物形成元素)としてCrを増量しVを添加した高強度窒化歯車用鋼が開発<sup>14)</sup>されている。さらに窒化の際の $\epsilon$ 相の安定化を抑えための低C化に加え、窒化後の硬化層および芯部の硬さ担保を目的にMn、Moの増量とV添加した鋼について研究され、面圧疲れ強さが向上する<sup>15)</sup>と報告している。また、Al、V複合添加による合金窒化物の析出形態から硬さ向上効果を調べた研究<sup>16)</sup>も行われている。

### 3. プロセスシミュレーション

DX化が叫ばれる中、窒化プロセス開発のIT化として、各種データベースを利用した計算機シミュレーション技術にも関心が高まっている。計算機予測に関する理論的研究は、1980年代初期から行われている<sup>17)</sup>。1990年代は、Bellらによる低合金鋼のプラズマ窒化のシミュレーション<sup>18)</sup>、2000年以降ではSomersらのグループによる $\gamma$ 系ステンレスのガス窒化（S相形成）における窒素濃度分布シミュレーション<sup>19)</sup>などが研究されている。日本でも2000年以降に実用性を重視した研究開発が行われ、現在JIS鋼など実用鋼のガス窒化について、化合物層構造、窒素濃度分布、硬さ分布などの予測や目標品質を得る最適窒化条件の算出などが可能なソフトが独自開発<sup>20)</sup>されている。また、最近では、EV化で特に重視されている熱処理ひずみ低減ニーズの高まりから、窒化のひずみ制御にも関心が高まりつつある。窒化プロセスのシミュレーションにより、組織変化に伴う残留応力やひずみの発生機構の解明など、理論的アプローチによる研究開発に期待が寄せられている。

### 4. 複合化による高機能化

窒化との複合化による新機能発現を狙った多彩な研究が行われている。前述した窒化後酸化処理は、両処理の高精度な制御により進化している。その他、クロマイジングやクロムメッキ後の窒化、塩浴軟窒化後のNi-Cr/Ni-Pメッキ、ガス軟窒化と真空浸炭との複合、ガス窒化と塩浴酸軟窒化との複合、塩浴軟窒化と高周波急速加熱焼入れとの複合などの研究開発<sup>21)</sup>が行われ、一部は実用化されている。最近では、ショットピーニング処理との複合処理に関する研究が活発化している。雰囲気制御による化合物層レス窒化後に微粒子ピーニングを行う複合処理<sup>22)</sup>、微粒子ピーニング後にガス窒化を行い厚く緻密な化合物層形成させる複合処理<sup>23)</sup>などが報告されている。非常にユニークな例として、雰囲気制御下で高周波加熱により被処理材を高温に保持した状態でCr粒子ピーニングを行った後窒化を施す研究<sup>24)</sup>などがある。

## むすび

窒化・軟窒化に関して、現状を述べ進化の歴史

を概観した上で、最近の研究開発動向を簡単に紹介した。本稿が、窒化系熱処理技術への関心の高まりや理解に向けての一助になれば幸いである。

## 参考文献

- 1) 例えば、栗山常吉：化学と教育、66、11（2018）、p. 531
- 2) Ad. Fry: Stahl und Eisen、43、40（1923）、p. 1271
- 3) 宮田武、伏見慎二：熱処理、16、3（1976）、p. 140
- 4) 石井彌：工業加熱、22、6（1985）、p. 39
- 5) 梅田孝彰、宮部一夫：KOMATSU TECHNICAL REPORT、60（2014）、p. 17
- 6) J. Muller: Metalloberfläche、Heft 4（1955）、p. 52
- 7) J. Georges: Heat Treat. Met.、28（2001）、p. 33
- 8) 例えば、A. Nishimoto、A. Tokuda and K. Akamatsu: Materials Transactions、50、5（2009）、p. 1169
- 9) Z. L. Zhang and T. Bell: Surf. Eng.、1、2（1985）、p. 131
- 10) K. Ichii、K. Fujimura and T. Takase: Technology Reports of Kansai University、27（1986）、p. 135
- 11) 例えば、M. Okumiya and K. Inaba: Proc. 4<sup>th</sup> Asian Conf. on Heat Treatment and Surface Engineering、Beijing、China、（2009）、p. 30
- 12) K. Nakamura、T. Shimizu、Y. Kinoshita、M. Masuda、Y. Umebayashi and H. Kabasawa: TOYOTA Technical Review、56、2、Aug.（2009）、p. 113
- 13) 水谷想、奥宮正洋、南部紘一郎：第92回日本熱処理技術協会講演大会講演概要集、（2021年11月）、p. 19
- 14) 今高秀樹、裕谷将人、田中康介、小林厚、前田晋：新日鉄住金技報、406（2016）、p. 8
- 15) 梅原崇秀、裕谷将人、富松宏太：第92回日本熱処理技術協会講演大会講演概要集、（2021年11月）、p. 21
- 16) 安達巧、浅田格、熊谷進、渡邊陽一：第92回日本熱処理技術協会講演大会講演概要集、（2021年11月）、p. 23
- 17) 例えば、H. C. F. Rozendaal、E. J. Mittemeijer、P. F. Colijn and P. J. van der Schaaf: Metallurgical Transactions A、14A（1983）、p. 395
- 18) Y. Sun and T. Bell: Material Science and Engineering A224（1997）、p. 33
- 19) T. Christiansen、K. V. Dahl and M. A. Somers: Materials Science and Technology、24、2（2008）、p. 159
- 20) 例えば、平岡泰、渡邊陽一、梅澤修：日本金属学会誌、80、4（2016）、p. 259
- 21) K. Fukazawa、Y. Misaka、K. Kawasaki、Y. Ikezawa、T. Konishi and M. Beppu: Proc. European Conference on Heat Treatment and 21<sup>st</sup> IFHTSE Congress、12-15 May 2014、Munich、Germany、p. 81
- 22) B. Wang、X. Zhao、M. Qin and J. Gu: Proc. 25<sup>th</sup> Congress of IFHTSE、11-14 Sep. 2018、Xi'an、China、p. 115
- 23) S. Kikuchi and J. Komotori: Materials Transactions、56、4（2015）、p. 556
- 24) 福岡隆弘、菊池将一、小茂鳥潤、深沢剣吾、三阪佳孝、川崎一博：日本金属学会誌、76、7（2012）、p. 422

## 2. 窒化の基礎

東 北 大 学 宮 本 吾 郎  
 金属材料研究所 准教授

### まえがき

窒化は、鉄鋼材料の主要な表面硬化処理の一つであり、浸炭処理や高周波焼き入れに比べると、加熱温度が低くマルテンサイト変態が生じないため熱処理ひずみが小さく、さらに、マルテンサイトによる硬化とは異なり温度上昇に伴う軟化も小さいという特長を持つ。窒化は、Fry<sup>1)</sup>の研究に端を発すると言われ100年の歴史を有するが、最近の自動車部材に求められる高い形状精度や疲労強度、軟化抵抗を達成するため、改めて窒化に注目が集まっている。本稿では、窒化で形成される化合物層と拡散層それぞれに対する組織と特性の関係について概説する。より詳しく知りたい方は、成書を参照されたい<sup>2)~4)</sup>。

### ◇ 窒化組織とその特性との関係

図1<sup>3)</sup>に、窒化材の断面組織の模式図を示す。窒化中に表面から窒素が吸収、拡散することで、表面には鉄窒化物 ( $\epsilon$ -窒化物 ( $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ ; 六方晶構造)、 $\gamma'$  ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ; 立方晶構造)) からなる化合物層と、その内側に鉄母相中に窒素が拡散した拡散層が形成される。また、化合物層中にポイド (ポアやポーラスとも呼ばれる) が生成する場合がある。窒化温度では、拡散層のフェライト中に窒素が固溶しており、窒化後の冷却速度によっては、 $\gamma'$ や

準安定な  $\alpha''\text{-Fe}_{16}\text{N}_2$  が析出する場合もある。また、Cr、Al、Vといった窒化物生成元素を含んだ鋼の場合には、後述するように拡散層中にナノメートルオーダーの合金窒化物が微細分散して大きく硬度が上昇する。図1右にまとめられているように、化合物層は主に摩耗や腐食特性に、拡散層は接触疲労強度や曲げ疲労強度と密接に関係する<sup>3)</sup>。

図2(a)にFe-N 2元系の状態図を示す。窒素は炭素と同様にオーステナイト安定化元素であり共析型状態図となるが、Fe-C系の共析温度727°Cと比べてFe-N系の共析温度は590°Cと低い。通常の窒化では、オーステナイト生成を避けるため590°C以下で窒化することが多い。バルク材の熱処理では、状態図に基づいて合金組成や処理条件を設計するが、窒化を始めとする雰囲気処理では雰囲気ポテンシャルを制御するため、温度-ポテンシャル相図 (図2(b)) を用いて表面組織を制御する。特に、Fe-N系における温度-ポテンシャル相図をLehrer図と呼ぶ。

ここでは、 $\text{NH}_3$  ガスを用いたガス窒化における窒化ポテンシャルについて説明する。炉内の  $\text{NH}_3$  は試料表面で水素と活性な窒素に  $[\text{N}]$  分解し、分解によって生じた窒素が鋼に固溶する。

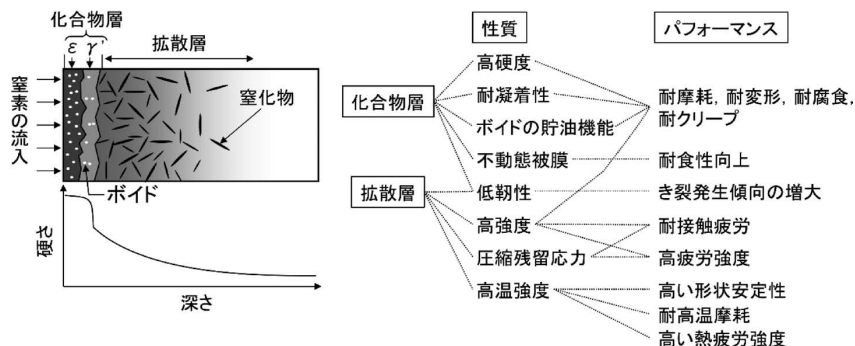


図 1 窒化材の組織模式図と硬さ分布の模式図および、化合物層と拡散層の性質とパフォーマンスの関係<sup>3)</sup>

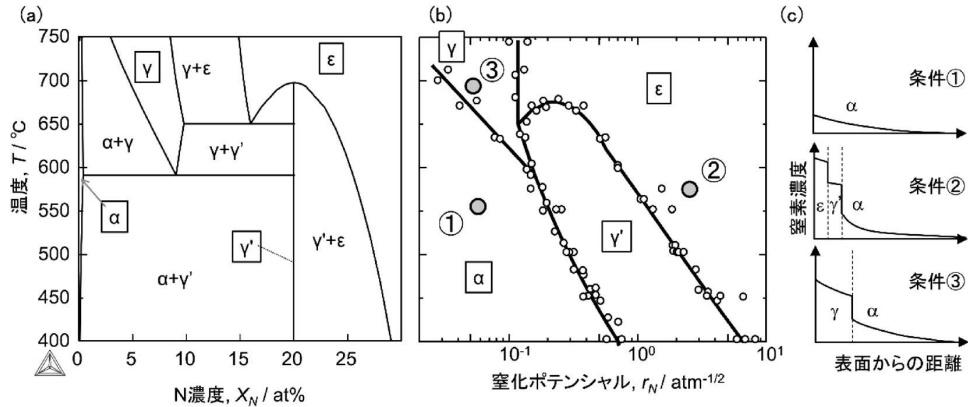


図 2 (a) Fe-N二元系状態図、(b) Lehrer図、(c) (b) 中で示した3条件における表面組織の模式図：  
①化合物レス窒化、②化合物層 ( $\epsilon + \gamma'$ ) あり窒化、③オーステナイト域窒化 (浸窒焼入れ)

式 (1) の反応において鋼に固溶する窒素の活量  $a_{[N]}$  は式 (2) で表される。

$$a_{[N]} = K_N(T) \frac{P_{NH_3}}{(P_{H_2})^{3/2}} \quad \text{式 (2)}$$

$P$  は各ガスの分圧、 $K_N(T)$  は式 (1) の平衡定数である。式 (2) 右辺の分圧の項を、窒化ポテンシャル  $r_N$  と呼ぶ。

$$r_N = \frac{P_{NH_3}}{(P_{H_2})^{3/2}} \quad \text{式 (3)}$$

$r_N$  は窒素活量に比例し、 $r_N$  と温度から Lehrer 図を用いて表面組織が制御される。なお、高温に加熱した炉内で試料に達する前に一部の  $NH_3$  は分解するため、炉内の  $NH_3$  分圧は導入時の分圧よりも低下する。従って、炉内の  $NH_3$  分圧を用いて窒化ポテンシャルを制御することが必要である。従来、炉内  $NH_3$  分圧は、デソシオメーターや赤外線アンモニウム分析計により測定されてきたが、近年、連続測定が可能な水素センサーが海外で開発され、国内でも窒化ポテンシャル制御による正確な化合物組織制御法が報告されている<sup>5)</sup>。

Lehrer 図を用いると、窒化ポテンシャルと温度より表面組織を予測することができる。例えば、図 2 (b) の①の窒化条件は、フェライト ( $\alpha$ ) 領域に位置しているため化合物層レスの窒化が可能となる。一方、②の条件は  $\epsilon$  領域であり、試料内部では窒素ポテンシャルが低いことを考えると、表面

から内部に  $\epsilon$ 、 $\gamma'$ 、 $\alpha$  と層状に相構造が変化することが予想される。③はオーステナイト ( $\gamma$ ) 領域であり、この条件で窒化した後急冷することで、表面で生成した高窒素オーステナイトをマルテンサイト変態して表面を硬化する浸窒焼入れ処理が可能となる。このように Lehrer 図に基づき表面組織が設計できるが、Lehrer 図は Fe-N 二元系の相図であるため、炭素や添加元素によって相境界条件が変わることに十分注意しなければならない<sup>2), 6)</sup>。

#### ◇ 化合物層の組織と特性

試料表面から固溶した窒素が表面から内部に拡散することで化合物層は成長する。その成長は窒素の拡散に律速されるため、化合物層厚さと窒化時間の  $1/2$  乗が比例する放物線則が成り立つ<sup>3)</sup>。化合物層生成に及ぼす添加元素の影響については、炭素を中心に調査されている<sup>6), 7)</sup>。鋼材に炭素が含まれる場合には、窒化中の表面からの脱炭に加えて、炭素が  $\epsilon$  相を安定にするため鋼材内部から化合物層への炭素拡散が生じ、化合物層では  $\epsilon$  と  $\gamma'$  が複雑に形成される。一方、炭素と窒素を同時に鋼材表面から流入させる軟窒化の場合には、窒化ポテンシャルと浸炭ポテンシャルに応じた表面化合物層の形成過程が詳細に調査されている<sup>8)</sup>。化合物生成に及ぼす置換型元素添加の影響としては、Al や V、Ti、場合によっては Si 添加により  $\gamma'$  が形成しやすくなり、Al 添加では  $\gamma'$  が針状に成長するようになることが報告されている<sup>9)</sup>。

通常的气体窒化に対応する窒化ポテンシャルを

$N_2$ ガス圧力に変換すると、 $10^4$ 気圧以上の極めて高い圧力になる。したがって、鉄中に固溶した窒素は不安定であり、固相中で $N_2$ ガスとして生成してポイドを形成し、ポイドが表面まで連結することで安定状態の1気圧の $N_2$ ガスとなる。ポイドは、化合物層で生成し特に $\varepsilon$ 相中や化合物層の粒界に沿って生成しやすい。前述したように、化合物層の成長は窒化時間の1/2乗に比例する<sup>3), 9)</sup>のに対して、ポイド生成領域厚さは窒化時間に比例して厚くなるため<sup>3)</sup>、窒化時間が長くなるほどポイド領域割合は増加することになる。

化合物層を構成する $\varepsilon$ や $\gamma'$ は硬質なセラミックであり、ポイドを含まない化合物層の硬さは、炭素鋼や低合金鋼では約700–800HV、合金鋼では1,000–1,500HVに達する<sup>3)</sup>。また、 $\varepsilon$ 、 $\gamma'$ 単体の硬さとしては、 $\varepsilon$ は7.1GPa、 $\gamma'$ は6.6GPaと報告され、 $\varepsilon$ の方がやや硬い<sup>10)</sup>。化合物層が生成することで耐摩耗性は向上するが<sup>11)</sup>、疲労強度については化合物層がある方が良いという結果<sup>12)</sup>と、ない方が良いという結果<sup>13)</sup>の両方が最近でも報告され、疲労強度に及ぼす $\varepsilon$ と $\gamma'$ の優劣についても食い違っており<sup>12), 13)</sup>、今後の系統的な解明が待たれる。化合物層中のポイドは各種特性に大きく影響し、ポイドが多いと表面軟化による耐摩耗性の劣化<sup>11)</sup>や変形時のクラック生成を引き起こす<sup>14)</sup>。一方、潤滑環境での摩擦摩耗では、適度な量のポイドが存在するとポイドに潤滑油がたまり、摩擦係数が低下するという効果も報告されている<sup>3), 11)</sup>。

### ◇ 拡散層の組織と特性

化合物層の内部に窒素が拡散することで、拡散層が形成される(図1)。炭素鋼や低合金鋼では、拡散層は固溶窒素による固溶強化や窒化後の冷却中に析出する $\alpha''$ や $\gamma'$ によりやや硬化する。一方、鋼にCrやAl、V、Tiなどの窒化物生成元素が含まれる場合には、微細な合金窒化物が析出して拡散層硬さは大きく増加する。図3(a)に拡散層中の表面硬さに及ぼす添加元素の影響を示す<sup>15)</sup>。Alは窒化材の表面硬さを顕著に増加させ、次いでTiやCrの効果が大きい。一方、窒化物生成元素を多く添加すると、表面から拡散してきた窒素が合金窒化物を形成するために消費されて内側に拡散できなくなるため、図3(b)に示すように硬化層厚さ

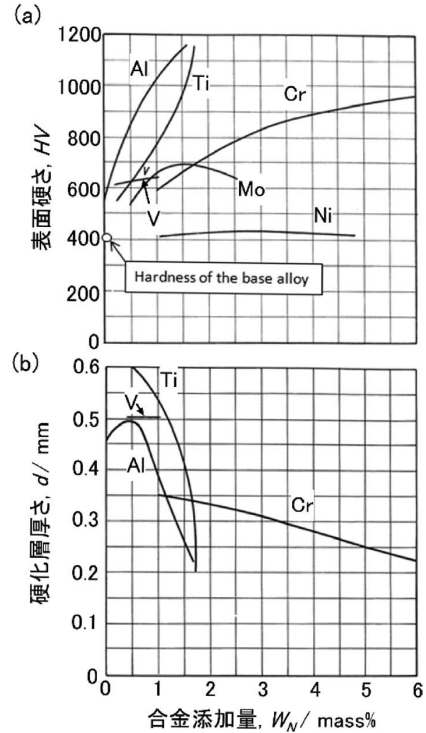


図 3 520°Cで8h窒化したFe-0.35C-0.3Si-0.7Mn合金の (a) 表面硬さ、(b) 硬化層厚さに及ぼす添加元素の影響<sup>15)</sup>

は薄くなる。Al、Cr複合添加の影響についても系統的な調査により、添加量の増大に伴う表面硬さの増加と、硬化層厚さの減少が報告されている<sup>16)</sup>。また、窒化温度を上げると、硬化層厚さは増加するものの、表面硬さは低下する<sup>16)</sup>。疲労強度については、表面硬さを上げるほど疲労強度が上昇するが、硬化層が薄く硬化層の内部が破壊の起点となる場合には表面硬さを上げて疲労強度の向上は小さい<sup>17)</sup>。

拡散層における合金窒化物の析出挙動については、Fe-M 2元合金を対象にこれまで多く研究されている<sup>4)</sup>。図4に窒化したFe-1Cr合金の拡散層で観察されたCrN析出の例を示す<sup>18)</sup>。CrNはB1構造(NaCl構造)であり、フェライト母相とBaker-Nutting ( $(001)_\alpha // (001)_{B1}$ ,  $[010]_\alpha // [110]_{B1}$ )の方位関係をもって、 $\{001\}_\alpha$ 面に沿った板形状で生成する。AlやTi、V添加材についても、CrNと同様のB1型構造の板状窒化物の析出により拡散層が硬化することが報告されている。一方、TiやV添加材では窒化物の生成前に、準安定なM-Nクラスターが生成

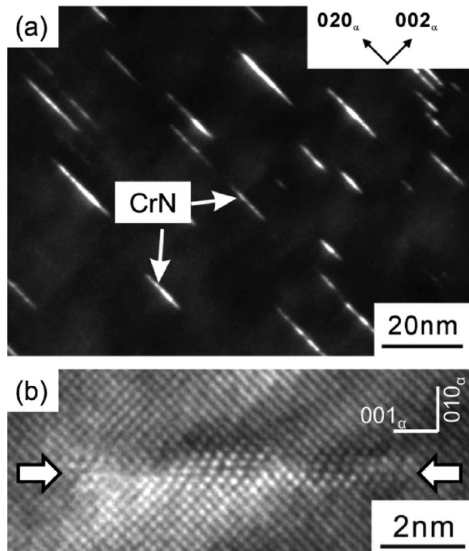


図 4 550°Cで16h窒化したFe-1Cr合金の拡散層で生成する板状CrN窒化物、(a) CrNの暗視野像、(b) 高分解能像<sup>3)</sup>

して拡散層が顕著に硬化する場合もある<sup>18)</sup>。窒化前組織の影響としては、AlN析出は転位の存在によって促進されるため窒化前加工やフェライト組織に比べてマルテンサイト組織により表面硬化は大きくなる<sup>19)、20)</sup>。また、熱間鍛造まま材および焼入れ焼き戻し材を窒化すると同じ合金でも硬さ分布は異なり<sup>17)</sup>、その差は窒化前組織におけるセメントナイト/母相間での元素分配に起因することが指摘されている<sup>21)</sup>。

拡散層の成長は窒素の拡散によって律速されるため、化合物層と同じように放物線則に従い、拡散層厚さは保持時間の1/2乗に比例する。窒化温度が上昇すると窒素の拡散が早くなるため、より厚い硬化層が得られ、添加元素量が増えると硬化層厚さは減少する。このような硬化層の成長速度に及ぼす各因子の影響は、内部酸化理論<sup>22)</sup>を拡散層における合金窒化物の析出現象に適用することで説明される。式(4)に内部酸化理論から導かれる硬化層厚さの成長速度を表す<sup>23)</sup>。

$$d^2 = 2 \frac{C_N D_N}{n C_M} t \quad \text{式(4)}$$

ここで、 $d$ は硬化層厚さ、 $C_N$ 、 $D_N$ は表面での固溶窒素濃度と窒素の拡散係数、 $C_M$ 、 $n$ は窒化物生成元素の添加量と窒化物中の合金元素と窒素の比

率、 $t$ は窒化時間である。式(4)により、窒化層の窒化時間や窒化温度、元素添加量に依存した硬化層厚さを見積もることができる。

## むすび

窒化は、歴史のある熱処理技術ではあるが、海外に比べて国内での研究は比較的少なくその能力を十分には活用しているとは言い難い。今後の窒化の有効性が注目され研究が進むことで、窒化がさらに発展することを期待している。

## 参考文献

- 1) A. Fry: Stahl u Eisen, 34 (1923)、1271
- 2) 河田一喜: 窒化・浸炭・プラズマCVD、日刊工業新聞社、(2012)
- 3) ディーター・リートケ著、宮本吾郎、石田憲孝監訳: 鉄の窒化と軟窒化、アグネ技術センター、(2011)
- 4) E. J. Mittemeijer, M. A. J. Somers: Thermochemical Surface Engineering of Steels: Improving Materials Performance, Woodhead Publishing、(2014)
- 5) 河田一喜: 熱処理、49 (2009)、64
- 6) 平岡泰、渡邊陽一、梅澤修: 熱処理、54 (2014)、313
- 7) 梅原崇秀、祐谷将人: 熱処理、59 (2019)、61
- 8) H. Du, M. A. J. Somers, J. Agren: Metall. Mater. Trans. A, 31 (2000)、195
- 9) 孟凡輝、宮本吾郎、古原忠: 熱処理、59 (2019)、336
- 10) T. Weber, L. De Wit, F. W. Saris, A. Königer, B. Rauschenbach, G. K. Wolf, S. Krauss: Mater. Sci. Eng. A-Struct. Mater. Prop. Microstruct. Process., 199 (1995)、205
- 11) 孟凡輝: 東北大学博士論文、(2015)
- 12) 高木眞一、殿塚易行、中村紀夫、伊藤経教: 鉄と鋼、104 (2018)、594
- 13) 平岡泰、石田暁丈、梅澤修: 熱処理、57 (2017)、64
- 14) N. Koga, S. Saito, O. Umezawa: J. Mater. Sci., 57 (2022)、2194
- 15) K.-E. Thelning: Steel and its heat treatment, 2nd ed., Butterworths、(1984)
- 16) 佐藤忠雄編: 鋼の熱処理、丸善、(1974)、98
- 17) 祐谷将人: 熱処理、61 (2021)、91
- 18) G. Miyamoto, Y. Tomio, H. Aota, K. Oh-ishi, K. Hono, T. Furuha: Mater. Sci. Tech., 27 (2011)、742
- 19) M. H. Biglari, C. M. Brakman, E. J. Mittemeijer: Philos Mag A, 72 (1995)、1281
- 20) Y. Tomio, S. Kitsuya, K. Oh-Ishi, K. Hono, G. Miyamoto, T. Furuha: Metall. Mater. Trans. A, 45a (2014)、239
- 21) 祐谷将人、東北大学博士論文、(2022)
- 22) C. Wagner: Zeitschrift für Elektrochemie, Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie, 63 (1959)、772
- 23) G. Miyamoto, A. Yonemoto, Y. Tanaka, T. Maki, T. Furuha: ISIJ Int., 47 (2007)、1491



# Ⅱ．窒化方法

## 1．ガス窒化法

（株）オーネックス しみず かのる  
技術研究所 清水 郁

### まえがき

ガス窒化法は、鉄鋼材料から加工された機械部品に適用される表面熱処理の一種類である。浸炭焼入れのようにマルテンサイト変態を利用しないために、処理に伴う変形を抑制できること、表面硬さの上昇によって疲労強度が改善されること、表面に生成する窒化鉄化合物層に起因する摩擦摩耗特性・耐食性等に特徴がある。一方、処理時間が長いこと、処理雰囲気として使用するアンモニア消費量などが欠点としてあげられる。

### ◇ 原理

ガス窒化は窒化処理炉内にアンモニアガスを導入することによって行われる。処理温度は通常500℃

以上、Fe-N状態図の共析温度以下である。大気圧下400℃以上の平衡状態で、アンモニアは水素と窒素にほぼ完全に分解（ $\text{NH}_3 \rightarrow 1/2\text{N}_2 + 2/3\text{H}_2$ ）するが、気相中での分解は緩慢で速やかに平衡状態に到達することはない。一方、鉄表面ではアンモニア分解が促進されるため鉄の窒化が可能となる<sup>1)</sup>。鉄表面でアンモニアが分解する際に発生する原子状窒素が鉄格子間に侵入し、内部に拡散すると考えられている。ガス窒化処理された部品表面に生成する窒化層は、最表面の窒化鉄化合物層（白層、または単に化合物層と呼ばれる）とその下部に隣接する拡散層と呼ばれる領域から構成される。

### ◇ Fe-N平衡状態図

図1にFe-N平衡状態図を示す。気体窒素 $\text{N}_2$ は図

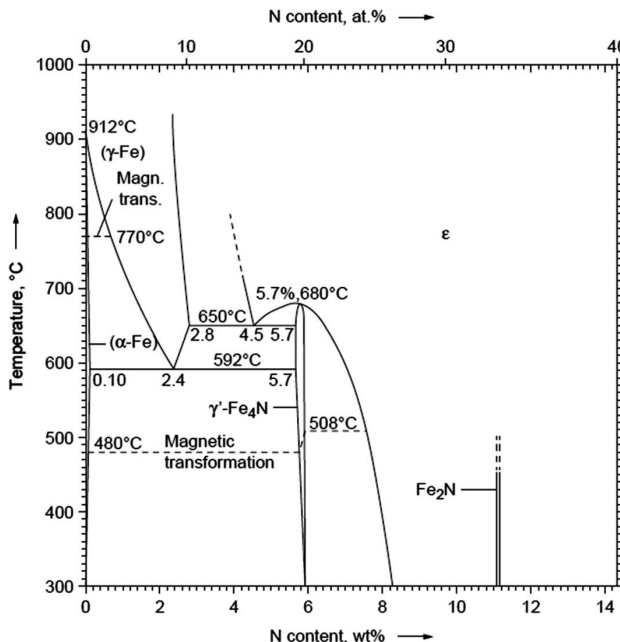


図 1 Fe-N状態図<sup>1)</sup>

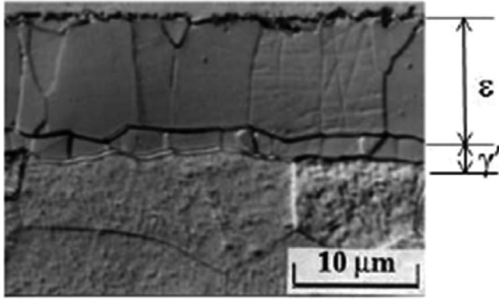
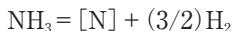


図 2 550°Cで得られた純鉄の窒化層  
 $K_N = 8 \times 3$  時間<sup>12)</sup>

の温度範囲、常圧下でFeにほとんど固溶しないため、 $NH_3-H_2$ 混合気体との平衡実験から得られる。実際、ガス窒化処理は同様の雰囲気下で行われる。ガス窒化が行われる温度範囲、すなわち共析温度592°C以下では、Fe側から $\alpha$ -Fe単相領域、 $\alpha$ -Feと $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>Nの2相領域、 $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N単相領域、 $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>Nと $\epsilon$ -Fe<sub>2-3</sub>Nの2相領域、 $\epsilon$ -Fe<sub>2-3</sub>N単相領域が平衡相として存在する。窒素は $\alpha$ -Feに侵入型で固溶し鉄体心立方構造の八面体サイトを占め、その固溶限は共析温度で0.1wt.%である。 $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>NはFe原子が面心立方構造をもちN原子がその8面体サイトに配置する。 $\epsilon$ -Fe<sub>2-3</sub>NはFe原子が六方最密構造をもちN原子はその8面体サイトに配置する。図2に純鉄窒化層のマイクロ組織を示す。状態図に対応するように表面から $\epsilon$ 化合物層、 $\gamma'$ 化合物層、 $\alpha$ -Feが観察される。窒化鋼においては、化合物層直下、N原子が固溶した拡散層の $\alpha$ -Fe相中に鉄または合金元素として添加される窒化物形成元素Cr、V、Alなどの炭窒化物が析出して分布する。

### ◇ 窒化ポテンシャル、レーラー図 (Lehrer diagram)

状態図に示すFe固相と $NH_3-H_2$ 混合気相の熱力学的平衡状態で次式が成立していると考える。 $[N]$ は固相中に固溶した窒素を表す。



この反応の温度Tにおける平衡定数は次式であらわされる。

$$K_T = a_N \cdot p_{H_2}^{3/2} / p_{NH_3}$$

ここで、 $a_N$ は固相中の窒素の活量、 $p_{H_2}$ は水素分圧、 $p_{NH_3}$ はアンモニア分圧を示す。

窒化ポテンシャル (Nitrierkennzahl) を $K_N \equiv$

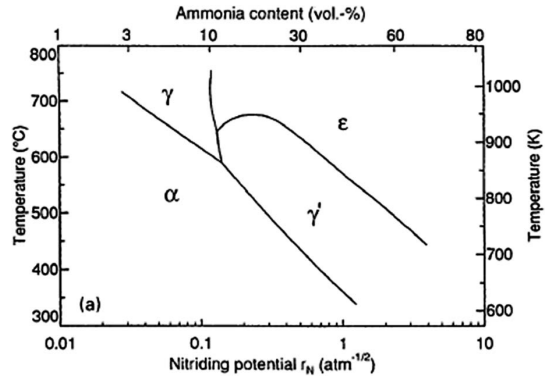


図 3 レーラー図<sup>1)</sup>

$p_{NH_3}/p_{H_2}^{3/2}$ のように定義すると、上式から

$$K_N = a_N / K_T \propto a_N$$

窒化ポテンシャル $K_N$ は、窒化雰囲気中のガス組成と固相表面における窒素の活量とを関連付ける。

Fe-N系の状態図は図1に示す温度-組成図だけでなく、温度- $K_N$ 図としてあらわすこともできる(図3)。図3はレーラー図 (Lehrer diagram) と呼ばれ、ガス窒化条件の主要なパラメータである温度と窒化ポテンシャル $K_N$ を両軸にとるため有用である。レーラー図では単相領域が面に、2相共存領域が線に対応する。

ガス窒化を効果的に適用するためには、窒化プロセスの平衡論的な、また速度論的な理解にもとづいて、化合物層の構造と深さ、拡散層深さ、硬さ分布など要求仕様を満足するようにプロセスを制御できることが望ましい。1930年代に純鉄について確立されたレーラー図は、合金鋼に対してもその組成にもとづいてカスタマイズされている。また、窒化プロセスのシミュレーション技術も開発されている。平岡らは、Cr含有低合金鋼の3鋼種、SCM435鋼、SACM645鋼、31CrMoV9鋼について、拡散層における硬さと窒素濃度の関係の評価結果にもとづいて、硬さ増加量は窒素濃度に比例することを明らかにし、その比例係数を鋼種毎に温度の関数として得た。さらに、拡散層の窒素濃度分布を窒化物CrN、AlNの生成を考慮しつつ数値解法によって求め、前述の硬さ増加量の実験式から拡散層の硬さ分布が良い精度で予測できることを示した<sup>2), 3)</sup>。

一方、実際の操業を通じて得られた経験則のいくつかが、次のようにまとめられている<sup>4)</sup>。

- ①化合物層が生成可能な雰囲気下で、窒化温度を上げると硬化層深さと化合物層深さが増加する。
- ②レーラー図を利用して、目標とする表面組織に応じた窒化ポテンシャルを設定することができる。鋼中の炭素濃度の増加は $\epsilon$ 相領域を低窒化ポテンシャル側に、窒化物形成元素の増加は高窒化ポテンシャル側にそれぞれシフトする。
- ③窒化物形成元素は組織を飽和するために必要な窒素量に大きな影響を持つ。窒化雰囲気を窒素で希釈する、あるいは低圧下で部品を処理すると、高合金鋼の窒化は低合金鋼や炭素鋼に比べて、はるかに遅くなる。
- ④炉内圧力（全圧）を上げると、化合物層の成長が増加するが、窒化物形成元素を増加するところの効果は小さくなる。

#### ◇ ガス窒化加工

鉄鋼材料のガス窒化加工は、日本産業規格JIS B 6915「鉄鋼の窒化及び軟窒化加工」に規定されている。窒化処理する機械部品は適当な治具に装着し洗浄後、熱処理炉に装入する。爆発防止（ガス窒化はアンモニアの発火点651℃以下で操業する）、処理部品の酸化防止のために炉内を窒素ガスで置換後、窒化処理温度に昇温、雰囲気ガスを炉内に導入して窒化する。

##### 前処理

窒化処理に先立って部品内部の機械的性質を調整するために焼入焼戻しを行う場合がある。この場合、窒化の際に温度の影響で内部の性質が変化しないように、焼戻温度は窒化温度より高い温度に設定する。一般的に、部品加工の全工程は、荒加工⇒焼入焼戻し⇒仕上げ加工⇒窒化、の順に進められる。前述のように、ガス窒化は鉄鋼材料表面でのアンモニアガスの分解によって進行するため、その品質は処理部品の表面状態に敏感であり、窒化処理前の洗浄は重要な工程である。部品表面の切削油剤の残渣や防錆剤を完全に除去できるよう、適切な洗浄剤と洗浄方法が選択されなければならない。洗浄後は速やかに窒化処理を行うことが望ましい。

##### 部分的な窒化防止

予め余肉を付けておいて窒化処理後に機械加工

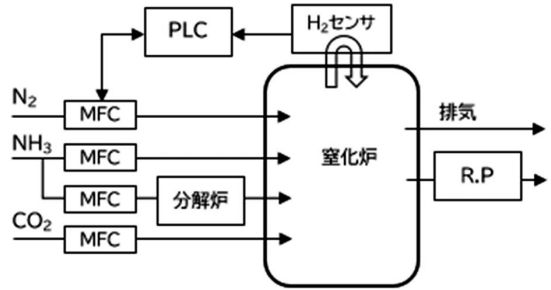


図 4 窒化雰囲気制御の概略

によって除去するか、防錆剤ペーストや銅、ニッケルまたは亜鉛の電気めっき被膜によって部分的にガス窒化を防止できる<sup>9)</sup>。防錆剤ペーストは合成エマルジョン中にスズ (Sn) 微粉末を含み、溶融スズ層が部品表面に広がって窒素の拡散を防ぐ<sup>10)</sup>。

##### ガス窒化設備

ガス窒化炉としてピット炉、バッチ炉、連続炉が使用される。雰囲気制御システムの例を図4に示す。図の場合には、アンモニアガス、窒素ガス、炭酸ガス（軟窒化用）およびアンモニア分解ガス（希釈用、予め炉外で分解して供給）が供給可能で、それらの炉内への流量はマスフローコントローラーで制御される。炉内のガス置換を効率的に行うために真空ポンプを接続している。窒化雰囲気制御は、気体熱伝導式センサーによる水素濃度測定値から窒化ポテンシャル $K_N$ 値を演算し、供給ガス流量を増減して予め設定した $K_N$ 値に自動的に調整される。

##### 品質欠陥

JIS B 6915はガス窒化加工品の品質として、外観、表面硬さ、窒化層深さ、金属組織、変形などを取り上げ、それぞれの試験方法を規定している。代表的な欠陥は、部品の表面状態によって窒化が阻害される場合で、除去すべき汚れと採用した洗浄方法の組み合わせ、または実施方法が原因と考えられる。窒化した鋼の表面は通常、光沢のない灰色であるが、金属光沢を帯びるときは窒化が阻害された可能性を示している。参考文献<sup>4)</sup>の序文は、コンピュータ技術者がトラブルに際して、電源は入っているのかと問うように、冶金学者や専門家は、窒化処理がうまくいかないときに前処理を適切に実施したか問う、と述べている。

## ◇ 窒化用鋼

機械構造用鋼、工具鋼、ステンレス鋼を含む様々な鋼種に適用されるが、窒化物形成元素Al、Cr、V、Moなどを含有する中炭素鋼への適用が多い。Mo添加は窒化温度での高温焼戻ぜい性のリスクを低減する。代表的な鋼種として機械構造用アルミニウムクロムモリブデン鋼JIS-SACM645(0.40~0.50C、1.30~1.70Cr、10.15~0.30Mo、0.70~1.20Al、単位はwt.%)がある。後述するように、素材メーカーによる商品開発も進められている。

## ◇ 技術動向

最近報告されている研究事例をいくつか紹介する。

従来、表面化合物層は疲労強度に対して必ずしも効果的でないと考えられているが、高木らは、化合物層の結晶構造と化合物層の有無が窒化材の疲労強度に及ぼす影響を評価するために、窒化ポテンシャル制御によって化合物層の結晶構造を調整したSCM435調質材を用いた切欠き試験片の軸荷重疲労試験(応力比 $R = -1$ および $0$ )を実施した。この結果から、 $\epsilon$ 相を主体とする試験片よりも $\gamma'$ 相を主体とする試験片の疲労強度が高く、窒化材の疲労強度が化合物層の破壊強度に依存することを示した。また、表面に生成したき裂の拡散層への進展挙動について破壊力学的に検討を加えた<sup>5)</sup>。

今高らは、小型・軽量化が進む自動車用トランスミッションギヤ用に、被削性に考慮しつつ低ひずみとSCr420Hガス浸炭焼入れ鋼相当の疲労強度を有する窒化用鋼を開発した。合金成分(C、Mn、Cr、V)が表層硬さと窒化での熱処理ひずみに及ぼす影響を評価し含有量を最適化した。開発鋼に $600^{\circ}\text{C} \times 2$ 時間のガス窒化処理を施し、応力集中度 $\alpha = 2.0$ のV状切欠き試験片を用いた回転曲げ疲労試験とローラーピッチング試験を行った。TEM観察の結果から表層硬さの向上はCrとVの複合炭窒化物の微細析出によると推定した<sup>6)</sup>。

石川らは、SACM645鋼を用いてガス窒化特性に及ぼす窒化温度の影響を調査し、優れた窒化特性(高い表面硬さ、深い硬化層、浅い化合物層深さ)を得るために、低温度域で窒化を開始して高温度域まで連続的に昇温する傾斜窒化法が効果的であることを示した。また、SACM645鋼の窒化による

拡散層の硬化機構について、TEM観察により(Al、Cr)N複合窒化物の微細析出によるものと述べている<sup>7)</sup>。

梅田らは、トランスミッションギヤを製造するガス窒化工程に、レーザー図による窒化層の予測と水素センサーを用いた雰囲気制御技術を適用した。SCM435H鋼ベースの窒化用鋼について窒化条件を最適化することによってアンモニア使用量を削減した<sup>8)</sup>。

## むすび

ガス窒化について概説した。詳細な情報は参照文献等で補っていただきたい。表面熱処理には様々な選択肢があるが、機械部品が要求する耐疲労特性、耐摩耗特性、寸法精度等に相応しい材料と熱処理の組み合わせが大切と考えられる。ガス窒化の現象と窒化された鋼の疲労などの諸特性については多くの研究があるが、現在もさらに行われている。

## 参考文献

- 1) E. J. Mittemeijer, M. A. J. Somers: Thermodynamics, kinetics, and process control of nitriding, Surf. Eng., 13 (1997), p. 483
- 2) 平岡泰、渡邊陽一、梅澤修: ガス窒化処理したクロム含有低合金鋼の拡散層硬さに及ぼす窒化温度と合金成分の影響、日本金属学会誌, 80 (2016), p. 253
- 3) 平岡泰、渡邊陽一、梅澤修: ガス窒化処理したクロム含有低合金における拡散層硬さ分布予測の実用モデル、日本金属学会誌, 80 (2016), p. 259
- 4) K. M. Winter: Gaseous Nitriding: In Theory and In Real Life" United Process Controls (2009)
- 5) 高木眞一、殿塚易行、中村紀夫、伊藤経教: 窒化処理したSCM435鋼の疲労強度特性に及ぼす表面化合物層の結晶構造の影響、鉄と鋼, 104 (2018), p. 594
- 6) 今高秀樹、祐谷将人、田中康介、小林厚、前田晋: 高強度窒化ギヤ用鋼の開発、新日鉄住金技報, 第406号 (2016), p. 8
- 7) 石川信行、白神哲夫、佐藤馨、石黒守幸、梶澤均、桑原美博: 窒化用鋼のガス窒化特性に及ぼす処理温度の影響、鉄と鋼, 82 (1996), p. 164
- 8) 梅田孝彰、宮部一夫: 窒化ポテンシャル制御を適用した窒化処理の生産技術開発、小松技報, 60 (2014), p. 17
- 9) D. Liedtke著、宮本吾郎監訳、石田憲孝訳: 鉄の窒化と軟窒化、アグネ技術センター (2011), p. 120
- 10) D. H. Herring, Masking techniques (part1), INDUSTRIAL HEATING, 2013
- 11) ASM Handbook, Volume 4A (2013), p. 620
- 12) M. A. J. Somers: Nitriding and Nitrocarburizing: Status and Future Challenges (2013), DTU Library

## 2. ガス軟窒化法

DOWAサーモテック(株) し みず かつ しげ  
新 商 品 開 発 室 清 水 克 成

### まえがき

窒化処理とは材料表面から侵入させた窒素によって、表面部を硬化し耐摩耗性や耐疲労性、耐食性などの特性を向上させる表面硬化処理の総称である。アンモニアガスによる窒化処理とそのための窒化鋼種の発明が今から約100年前の1923年にA. Fryによって報告された<sup>1)</sup>。

窒化に対する軟窒化という呼称であるが、鉄鋼に窒素を侵入させる熱処理のことを窒化と呼び、窒素と炭素を同時に侵入させる場合の熱処理を軟窒化と呼んでいる<sup>2)</sup>。

軟窒化が工業的に広く利用されるようになったのは、塩浴による窒化法、塩浴軟窒化が開発され、普及したことによる。アンモニアガスと吸熱型変成ガスの混合気や、アンモニアガスと炭酸ガスなど炭素を含んだガスを用いた窒化法、ガス軟窒化は、

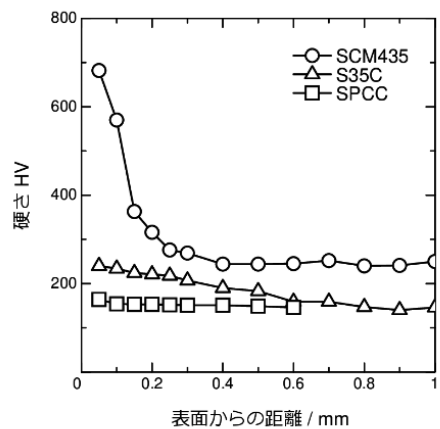
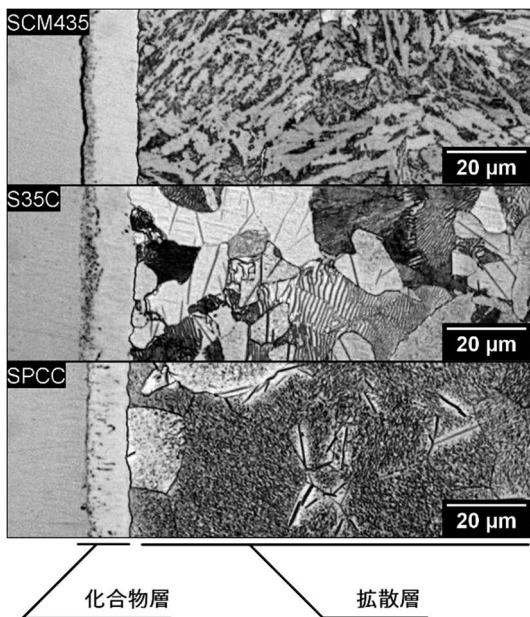
塩浴軟窒化の代替技術として開発され<sup>3)</sup>普及した。

近年、ガス窒化・ガス軟窒化において、水素センサに代表される雰囲気計測技術、計算状態図などの予測技術が発展し、その工業的な応用は制御窒化と呼ばれ、窒化工程の自動化や安定化、ガス使用量の削減が実現されている<sup>4)</sup>。また、表面の窒素化合物層を選択的に生成することで、機械的特性の改善が可能であることが示されている<sup>5)~8)</sup>。

本稿では、雰囲気制御を実施した軟窒化処理において、いくつかの実用鋼種における事例を紹介し、鋼種別の硬さ分布や化合物層の相構成など留意事項について取り上げる。

### ◇ ガス軟窒化の組織及び硬さ

ガス軟窒化が対象とする鋼種は軟鋼や炭素鋼、低合金鋼などである。図1(a)にガス軟窒化における各鋼種の金属組織の一例を、図1(b)に硬さ



(a) 金属組織

(b) 硬さ分布

図 1 ガス軟窒化の硬さ分布と金属組織の一例

分布の一例を示す。金属組織観察の際に用いる腐食液に腐食されず白く見える層は、化合物層と呼ばれ、数 $\mu\text{m}$ から十数 $\mu\text{m}$ 程度の厚みであり、主として $\epsilon$ 相 ( $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ ) と $\gamma'$ 相 ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ) の鉄・窒素化合物によって構成されている。化合物層のさらに内部は合金成分のうち窒化物形成傾向が強い合金元素 (Crなど) が形成する微細合金窒化物を含んだ拡散層からなっている。拡散層の硬さは窒化物形成元素が添加された鋼種では増加する。硬さの発現はこうした微細な合金窒化物による析出強化機構によるものである<sup>9)</sup>。一方、炭素鋼では、固溶硬化によって硬化するが、合金鋼ほどの硬化は示さない。化合物層の硬さも合金成分によって変化し、炭素鋼では500HV程度、低合金鋼では800HV程度となる。

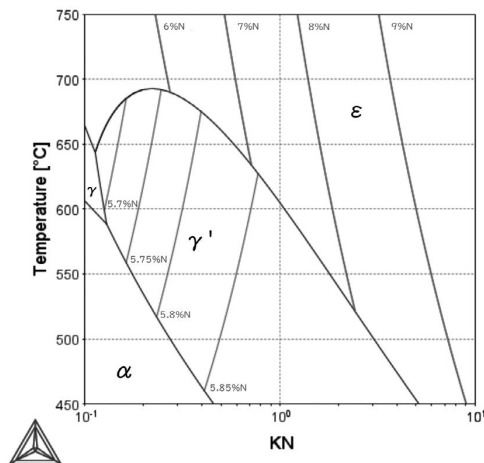
また、炭素鋼では窒化処理後の冷却が遅いと固溶していた窒素が冷却中に窒化物として析出することにより、疲労限が低下する場合があります、析出防止のために急冷する場合があります。合金鋼においては、合金元素の窒化物が析出しているため、冷却速度および温度の影響はないとされている<sup>10)</sup>。このような薄く硬い化合物層と拡散層の組み合わせによって、耐摩耗性、耐焼き付き性、耐腐食性、耐疲労性が向上する。

#### ◇ ガス軟窒化における雰囲気管理

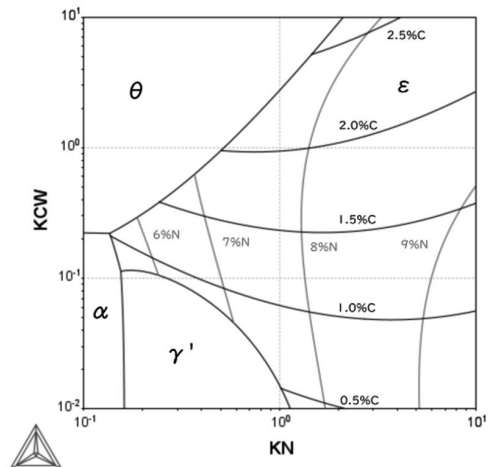
ガス軟窒化の雰囲気管理は、アンモニアガスの

水への高い溶解度を利用した、ピュレットによるアンモニアガス濃度の測定が長らく利用されていたが、2000年代以降、水素ガス濃度を連続的に分析する水素センサが利用されるようになった<sup>11)</sup>。このシステムは、炉内の加熱帯と非加熱帯の温度差によって発生する熱対流を利用して炉壁外部に設置した熱伝導センサ部にガスを導入するため、引き込み配管が不要となり、作動部のない簡素な構成となっている。また、炉内の水素分圧と参照ガスの水素分圧の差を起電力として取り出す固体電解質水素センサも実用化された<sup>12)</sup>、これはセンサ部自体が加熱帯に設置されるため、高速に応答する特徴がある。

窒化ポテンシャルKNは ( $\text{KN} = P_{\text{NH}_3}/P_{\text{H}_2}^{1.5}$ ) で表され、窒化の作用の強さの指数である。ある温度における窒化の安定相はKNを用いて、Fe-N系のポテンシャル図 (Lehrer図) から読み取ることができる。図2 (a) にThemo-Calc (SSOL6/SSUB5) で求めたFe-N系のポテンシャル図 (Lehrer図) を示す。高温・高KNで安定な相は $\epsilon$ 相で、広い組成幅を持つことが分かる。 $\gamma'$ 相は低温・低KNで安定な相で、組成の幅は狭く、化学量論組成の5.88%N付近である。KNの決定のためには、炉内の水素分圧 ( $P_{\text{H}_2}$ ) とアンモニア分圧 ( $P_{\text{NH}_3}$ ) が必要であるが、多くのシステムでは、アンモニア分圧は炉内に導入したガス流量比とガス成分と計測した炉内水素分圧から演算・推定している。この演算は炉



(a) Fe-N ポテンシャル図(Lehrer 図)



(b) 560°C Fe-N-C 等温ポテンシャル図

図 2 計算状態図

内の元素構成比が不変であることと炉内のガス同士の反応が正確に記述できていることを仮定しているから、ワーク搬送時の外乱や不活性ガスによるパーシなどにより、構成比が変化した場合には誤差が生じるため注意が必要である。

軟窒化では炭素を含むガスを添加するため、雰囲気は浸炭作用を生じる。この浸炭作用の大きさを炭素ポテンシャルKCW、KCBで表す。KCWは水性ガス反応基準で ( $KCW = P_{H_2} P_{CO} / P_{H_2O}$ )、KCBはブドワ反応基準で ( $KCB = P_{CO}^2 / P_{CO_2}$ ) で定義される。KCWもKCBもKNの演算同様、水素分圧が決まれば一意に決まることになるが、実際は外部から混入する酸化性ガスの影響がある。このため、炉内の水素分圧と酸化性ガス成分を測定し、組成を修正する方法が提案されている<sup>11)、13)</sup>。

KN、KCW (またはKCB) および温度から、ガス軟窒化における安定相が推定できる。図2 (b) に Thermo-Calc (SSOL6/SSUB5) で求めた560℃におけるFe-N-C系等温ポテンシャル図を示す。特徴的なのはε相が広い安定域を持っていることであり、炭素ポテンシャルが与えられると、ε相の安定域は低KN側まで広がる、逆にγ相は高炭素ポテンシャル側では存在できない。さらに高い炭素ポテンシャルにはθ相、セメントタイトの安定域がある。吸熱型変成ガスの比率を高めると、表面に薄いセメントタイトの層ができる場合があるが、これは高い炭素ポテンシャルのためである。

ガス軟窒化雰囲気におけるKCWは吸熱型変成ガスを用いた軟窒化では0.5～3程度、炭酸ガスを用いた軟窒化では0.05～0.5程度、KNは2～5程度で実施されている場合が多い。

#### ◇ ガス軟窒化の化合物層の相構成

EBSDは、電子線回折を利用し、電子線を照射した部位の結晶構造を知ることができ、通常SEMに取り付けて使用される。窒化で現れる相のうちγ相 (Fe<sub>4</sub>N) は鉄原子の配置はFCC構造であり、ε相 (Fe<sub>2-3</sub>N) はHCP、母材のα相 (フェライト) はBCC構造でそれぞれ異なるため、EBSDにより結晶構造を解析することで識別することが可能である。

各鋼種を同一条件 (560℃ : KN3.5) でガス軟窒化したときのEBSD相マップを図3 (a) に示す。

SPCCでは、表面から、ε、γ、αの順に並んでおり、ε相と母材の間に薄いγ相が生成していることが特徴的である。Duらが純鉄に対する窒化・軟窒化の化合物層の成長過程を解析や数値計算で求められている<sup>14)</sup> が、SPCCで得られた相構成はそれに近い。

S35Cでは表面はε相となっているが、母材と化合物層の界面はεとγ相の混相となっており、ε相とα相が隣接している場所もある。SCM435ではほぼε相単相となっており、γ相はまばらな点として分布しているだけである。

このような、同一窒化条件の下での化合物層の相構成の鋼種による相違は、KNが低いとより顕著に表れる。同様の鋼種を低KN条件 (560℃ : KN1.0) でガス軟窒化したときのEBSDによる相マップを図3 (b) に示す。SPCCではγ単相になっており、Fe-N系ポテンシャル図が示す結果と同様の結果となっている。化合物層の厚さはKN3.5の場合の半分程度になっている。γ相は組成の幅が狭く濃度差がつきづらいため、化合物層の成長はε相よりも遅いためである。またS35CとSCM435では化合物層の相構成が大きく異なっている、S35Cではほぼγ相が主体であるのに対して、SCM435ではKN3.5の時と変わらず、ほぼε相単相となっている。

上記の結果から、SPCCよりもS35C、S35CよりもSCM435の方が、ε相が安定する鋼種であることがわかる。このような傾向は化合物層へ窒素の侵入・拡散だけでなく、炭素の侵入・拡散も考慮して理解する必要がある。梅原らは窒化中の炭素鋼の化合物層の相構成の時間変化が、表面から雰囲気への脱炭と、母材から化合物層への炭素供給による化学ポテンシャル勾配の変化によって生じていること<sup>15)</sup> を報告している。KN3.5のS35Cにおいては母材が持つ炭素が化合物層に供給されることで、ε相が安定化していたため、母材と化合物層の界面にε相が存在できていると考えられる。KN1.0では化合物層への炭素の供給よりも化合物層表面から雰囲気への脱炭が多く、γ主体の化合物層になっていると考えられる。また、S35CとSCM435の母材炭素濃度はほぼ同等であるから、SCM435での結果はさらに合金元素の影響が考えられる。浅田らは、Fe-Cr-0.2C合金において、Cr濃度が高くなると化合物層と母材界面側におけるε相が増加

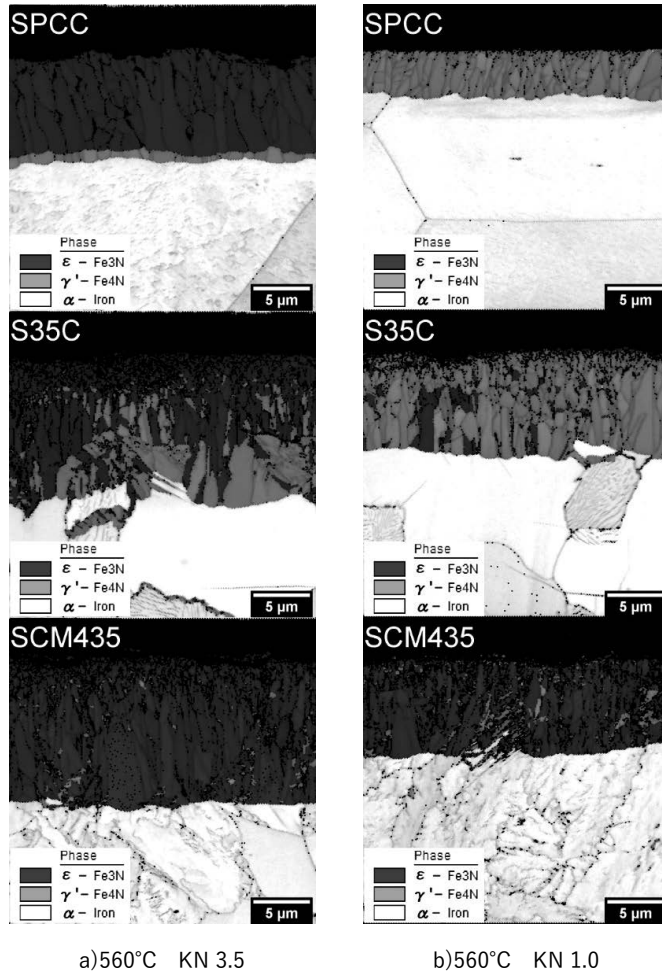


図 3 EBSD相マップ

することを報告しており<sup>16)</sup>、SCM435では母材からの炭素供給に加え、合金成分が何らかの形で炭素供給速度、もしくは、 $\epsilon$ 相の相安定性自体に影響していると考えられる。

### むすび

ガス軟窒化処理において、同一の窒化条件でも、炭素含有量の違い、合金成分の違いなど鋼種の違いによって、化合物層の相構成が異なる例を示した。ガス軟窒化処理は選択できる条件の幅が広く、得られる機械的特性も多様である。また、低温での熱処理である窒化処理は、エネルギーの消費が少ないことも大きな特徴となっている。窒化処理を活用することは、持続可能な社会の発展に対する取り組みとしても一層重要となるであろう。

### 参考文献

- 1) A. Fry: Stahl und Eisen, 43 (1923)、1271
- 2) JIS B6905: 1995
- 3) 中村勝郎: 石川島播磨技報、13 (1973)、151
- 4) 梅田孝彰ら: KOMATSU TECHNICAL REPORT、Vol. 60 No. 167 (2015)、17
- 5) 小林厚ら: 自動車技術会論文集、45 (2014)、1153
- 6) 平岡泰ら: 熱処理、57 (2017)、64
- 7) 高木眞一ら: 鉄と鋼、104 (2018)、594
- 8) 山田明徳ら: 熱処理、60 (2020)、193
- 9) 宮本吾郎ら: 熱処理、51 (2011)、128
- 10) 高瀬孝夫: 鉄と鋼、66 (1980)、1423
- 11) H. J Spiesら: Metal Science and Heat Treatment、46 (2004)
- 12) 常吉孝治: 工業加熱、56 (2019)、7
- 13) K. M. Winterら: HTM、66 (2011)、68
- 14) H. Duら: Metall. Mater. Trans. A、27 (1996)、1073
- 15) 梅原崇秀ら: 熱処理、59 (2019)、61
- 16) 浅田格ら: 熱処理、58 (2018)、43



### 3. プラズマ窒化法（イオン窒化法）

日本電子工業(株) 技術開発部 おお ぬま いっ べい  
大 沼 一 平

#### まえがき

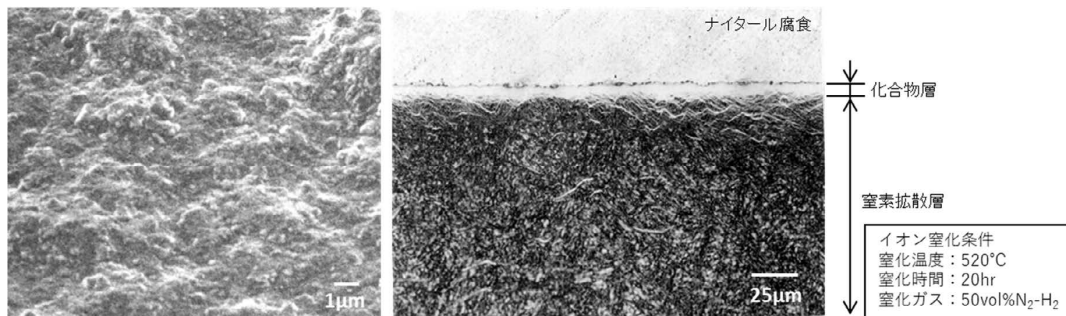
プラズマ窒化法は、1932年にドイツのBerghausによって実用化された技術である<sup>1)</sup>。当初は軍事を中心に利用されてきたが1967年に西ドイツのクレックナーイオン社において工業化された<sup>2)</sup>。日本国においては1972年から工業化が進み、時を同じくして学術的な研究も盛んに行われ現在に至る<sup>3)~5)</sup>。プラズマ窒化法は窒素及び水素を主体としたプロセスガスを電離して得られたプラズマを用いる。当初、本法はこのプラズマ中の窒素イオンを積極的に活用してきたため、“イオン窒化”と呼称されていた。近年ではプラズマにより励起される電気的に中性な活性種を活用する手法も開発されるようになってきたことから広義的に“プラズマ窒化”と呼称することが一般的になってきている。本稿では現在広く産業利用が進んでいる直流グロー放電を用いたプラズマ窒化法であるイオン窒化の原理と適用例について述べ、最後に本法を応用した複合表面改質技術について紹介する。

#### ◇ イオン窒化法の原理と特徴

イオン窒化法は、真空炉内に窒素及び水素を主体とした混合ガスを133Paから1,330Paの低圧雰囲気中に保ち、同炉内に設置した加工品を陰極、炉壁

を陽極として、この間に数百ボルトの直流電圧を印可することで生成させた直流グロー放電を用いる。これにより真空炉内に満たされた混合ガスの一部は電離され、窒素イオン、水素イオンなどの各種イオンや窒素ラジカルなどが生成される。また、陰極とした加工品表面近傍には陰極降下部と呼ばれる数百ボルトの電場が生じている為、生成されたイオンはこの電場により加速されて高速で加工品表面へ衝突し、加工品は衝突したイオンの運動エネルギーが熱エネルギーに変換されることで加熱される。この加熱と同時に加工品表面では窒素イオン或いは窒素化合物イオンの吸着と鉄窒化物の分解が生じることで窒素が鋼内部へ拡散浸透する<sup>6)</sup>。このようにイオン窒化法では加工品表面が常にイオンでスパッタリングされるので、**図1**に示すような加工品表面に微細な凹凸が形成され、清浄で活性状態が保たれるという特徴がある。また真空プロセスであるので粒界酸化を含む酸化が生じない、N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>混合ガス組成の調整で化合物層の相制御が容易という特徴もある。

この本法特有の原理の利用として、古くからオーステナイト系ステンレス鋼が容易に窒化できることが知られている<sup>7)</sup>。オーステナイト系ステンレス鋼は表面が緻密で安定な不動態皮膜で覆われているため、ガス窒化などの他の窒化法では特



[処理表面形態]

[断面組織]

図 1 イオン窒化したSKD61材の処理表面形態及び断面組織

殊なガスを用いること等をしない限り、窒素の鋼内部への侵入は阻害される。しかし、本法ではイオンの衝突により鉄鋼表面の元素が叩き出される為、不動態皮膜が容易に除去され窒化が可能となる。

また、窒化に作用する窒素イオンを防ぐ簡易な遮蔽物を加工品表面に設ければ、所望の部分のみ窒化が可能となるといった利用方法もある。他の窒化法では、このような部分的な窒化を施す場合、銅粉末を主体とした塗料を隙間なく窒化防止部へ密着させる必要がある。ところが、この窒化防止塗料の乾燥に際しては工程中に発生する揮発性ガスによる作業環境の悪化、作業員による塗布の品質ばらつきなどの不具合が生じる可能性があり、この利用方法の適用メリットは大きいといえる。更に、近年では機械部品の歪みに対する要求が高く、この部分的な窒化を適正に運用できれば歪みを必要最小限に抑えることも可能となる。

図2にイオン窒化装置構成概略を示す。イオン窒化装置は、加工品を設置する試料台を中心に配置した真空炉、真空排気系、ガス供給系、制御盤及び電源盤で構成される。これら真空炉、真空ポンプ、プラズマ電源等の主要な構成部品は他の窒化法に使用される構成部品より製造コストが掛かることが課題とされる。一方でランニングに掛かる消費ガス量、電力量は真空プロセスである為、他の窒化法に比べて格段に小さい。また、原料ガスにアンモニアを使用する必要がなく、加熱された

加工品の熱は真空で遮断されるため、熱の外部放出は小さく作業環境はとても良い。このように他の窒化法と比べて導入コストかかるが、環境負荷はとても小さい処理方法であることが特長である。他に、本法では一度に処理できる加工量が真空炉のサイズで制限される為、他の窒化法と比べて大量に生産するには不向きとされる。しかしながら近年では真空炉のサイズアップや、加工品を装填する工夫を重ねてきたことで高い生産性が求められる大量生産の産業機器部品への適用も増えてきている。

### ◇ イオン窒化法の適用例

表1にイオン窒化法の適用例を示す。当初、イオン窒化の対象品は、熱間鍛造型や大型の機械部品が主であったが、近年ではイオン窒化の特長である窒化防止の容易さから自動車部品や弱電機械部品へ広く採用されるようになってきた。以下に、各々の適用例を挙げる。

温熱間鍛造型及び治工具では、その使用環境に応じて化合物層及び拡散層厚さを選定する必要がある。化合物層には $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$ 相が展延性のある相であることから選定されることが多く、特に熱間鍛造型のような激しい熱衝撃を繰返し受ける場面においても高い耐久性を発揮し、型寿命を大きく延長させることが可能となる。一方でヒートクラックの進展で型寿命が決定されるような場合は、 $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$ 相の形成はむしろ有害で拡散層深さのみを

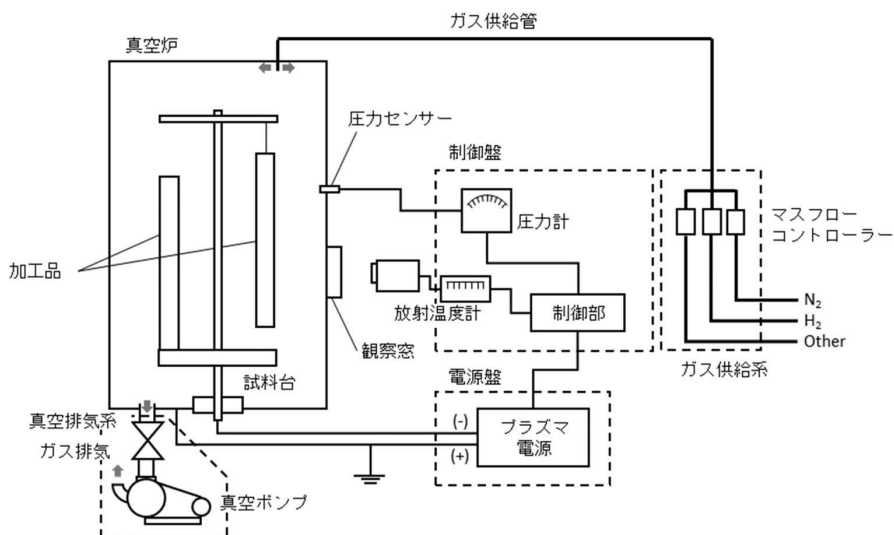


図 2 イオン窒化装置構成概略

表 1 イオン窒化の適用例

分類	適用例	材質
金型 治工具	温間鍛造型	SKD61、YXR33 <sup>1)</sup> 他
	熱間鍛造型	SKD61、SKD64、YXR33 <sup>1)</sup> 、DHA1 <sup>2)</sup> 他
	アルミダイキャスト型及び治工具	SKD61
	樹脂成型型	NAK55 <sup>2)</sup> 、NAK80 <sup>2)</sup> 、DH2F <sup>2)</sup> 、HPM1 <sup>1)</sup> 、HPM50 <sup>1)</sup> 他
工作機械部品	カム、ギヤ、シャフト等動力伝達部品	SACM645
自動車部品	ギヤ、AT関連部品、駆動系部品、他	SC材、SPCC材、SUS材 他
その他	弱電部品、船舶関連部品、他	SKH51、SCM645、他

1) 日立金属(株)、2) 大同特殊鋼(株)

形成する必要がある。

アルミダイキャスト型、ピン及びキャピティ等の治工具には、耐摩耗性要求とともにアルミ溶湯に対して化学的に安定であることも要求される。化合物層には $\epsilon$ -Fe<sub>2-3</sub>N相を選定することで金型治工具の溶損を減じ良好な湯流れが得られる。

樹脂成型型では近年、成形品表面の意匠性を得るためシボ加工、鏡面加工或いは様々な機能性を有した意匠パターンを形成することがある。このため樹脂成型型表面へ施される熱処理への要求には前工程の機械加工等で形成したこれら表面形状を保持しながら耐摩耗性を得ることが重要となる。そこで本法では金型表面を荒らす原因となるイオン衝撃をなるべく抑えられるようN<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>混合ガス組成の調整、或いは低温のプロセス条件が選定される。

炭素鋼、構造用鋼では、その使用用途によって様々なプロセス条件が選定される。一例として次のような適用事例を挙げる。自動車のトランスミッションを構成するプレス部品では、トランスミッションの省スペース化に伴いこれら部材の板厚は薄くなり、従来の摺動部の耐摩耗性能付与のみならず熱処理変形を低く抑える要求が高まっている。このような観点から本法は部分窒化が容易で熱処理後の変形を抑えながら、耐摩耗性に良質な $\gamma$ -Fe<sub>4</sub>N層を形成させることができる。熱処理による歪みは後加工での機械加工及び研磨の工程削減に繋がることから適用されている。

#### ◇ プラズマ窒化を利用した複合表面改質技術

冷間プレス金型は、金型の耐摩耗性能の要求からPVD (Physical Vapor Deposition) 法及びCVD (Chemical Vapor Deposition) 法などによる硬質

被膜が広く適用されている。中でもPVD法及びプラズマを利用するCVD法では金型の焼戻し温度以下での硬質被膜形成が可能となす、処理後の変寸が小さく、後熱処理も不要で精密な金型への適用が進んでいる<sup>8)</sup>。一方でこれら硬質被膜の課題の一つとして、低温プロセスで成膜される為、被膜と基材の間に相互拡散層が形成されず密着性の確保が難しいことが挙げられる。そこで、金型基材を高強度化させるプラズマ窒化とPVD及びプラズマCVD硬質被膜を組み合わせる複合表面改質処理の適用が進んできている。このような複合表面改質処理に求められる窒化特性においては、窒化後の表面清浄、脆弱な構造を有する化合物層である例えば $\epsilon$ -Fe<sub>2-3</sub>N相の生成防止が求められる。イオン窒化ではN<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>混合ガスの窒素混合比を20vol%以下とすることで、安定な $\gamma$ -Fe<sub>4</sub>N相または拡散層のみを選択的に形成ができる事と、真空プロセスであるので酸素による汚染防止が可能でこのような複合表面改質処理に適している。以下に、弊社が開発した複合表面改質処理の適用例を2例紹介する。

#### NEO C<sup>®</sup>コーティング

NEO Cコーティングプロセスは、プラズマ窒化工程後にプロセスガスを不活性なアルゴンガスに切り替えて、化合物層の分解と表面への凹凸形成を施し、連続して炭化水素ガスに切り替えることで硬質なDLC (Diamond-like carbon) 膜を成膜する手法である。これにより窒化による基材強化と清浄な界面及び凹凸形成による投錨効果によるDLC膜の密着性向上が認められ、2000年4月に(株)豊田中央研究所と弊社が開発したNEO C<sup>®</sup>コーティングとして受注加工を開始し、自動車部品への量産適用などの実用化に至った<sup>9)</sup>。

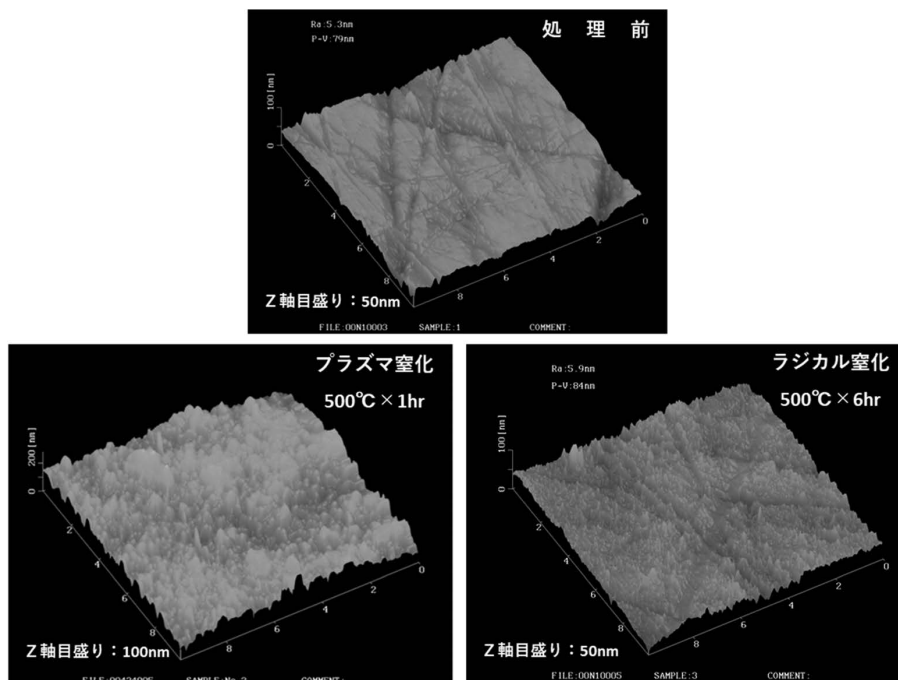


図 3 原子間力顕微鏡によるラジカル窒化後の表面形状像  
走査範囲10nm、材料：SKH51

### ラジカル窒化法

ラジカル窒化法は従来のイオン窒化のイオン衝撃作用を抑えて、鋼表面の性状を保持することを目指した新しい窒化処理法である。1993年に住友金属鉱山(株)中央研究所と弊社が開発に成功した<sup>10)</sup>。イオン衝撃が伴うイオン窒化法では表面粗さが増加してしまい、適用品によっては課題となることがあった。そこで原料ガスを分子量の大きい窒素ガスから分子量の小さいアンモニアガスへ変更し、最適化した電離条件で得られるNHラジカルを積極的に活用することで鋼表面の表面粗さを図3に示すように極めて小さくすることに成功した。本法では最適なNHラジカルが得られる電離条件に調整するために、窒化温度までの加熱は真空容器の外に設けた電気ヒータにより制御し、プラズマ状態を独立に制御する必要があるが、精密に表面を磨いた例えばラップ面なども表面粗さ増加を抑えながら硬化することが可能となる。これまでに、精密金型やPVDコーティングの基材強化として適用が広がっている。

### むすび

本稿では、本法の発明から90年が経ったイオン

窒化法の原理、適用例及び硬質被膜との複合表面改質技術への応用について紹介した。現在、我々を取り巻く社会は1960年代の大量生産大量消費社会から持続可能な消費社会へと舵を切り始めた。2015年に国連が採択した持続可能な開発目標 (SDGs) の目標には、「つくる責任つかう責任」が設定され、熱処理業界にも大きな変革が求められている。その中でプラズマを活用する窒化法は省エネルギー・環境負荷の小さい手法として今後も注目を集め、適用拡大が進んでいくものと確信する。

### 参考文献

- 1) Berghaus, B: DRP 668 639 (1932)
- 2) B. Edenhofer: Heat Treatment of Metals 2 (1974) 59-67
- 3) 千早 正：日本金属学会誌、36 (1972) 519-524
- 4) 網沢、曾根、山中：大阪工業技術研究所報告、65 (1975) 1
- 5) 高瀬、中村、住友、喜多、苧野：日本金属学会誌、7 (1976) 663-669
- 6) F. Hombeck: Ber. Hüttenmän Mon. 116 (1971) 487
- 7) 広瀬、長田、市川：熱処理、14、1 (1974) 15
- 8) 近藤、池永：自動車技術、72、6 (2018) 93-97
- 9) 太刀川、森、中西、長谷川、舟木：まてりあ、44、3 (2005) 245-247
- 10) 石井：中研所報、住友金属鉱山(株)、10 (1995) 51

## 4. 塩浴軟窒化法

日本パーカライジング(株) いしづか 石塚 はる菜  
総合技術研究所

### まえがき

溶融塩とは塩が融解してできた液体の総称を指し、高温でも蒸気圧が低い、各種の塩に対する溶解度が大きい、さらに化学的に安定で熱伝達率が高いといった特徴<sup>1)</sup>をもつ。したがって、溶融塩は熱媒体および化学反応媒体として非常に優れており、金属の熱処理にも用いられている。

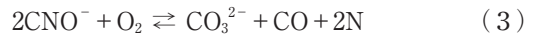
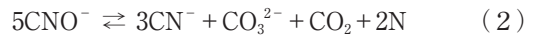
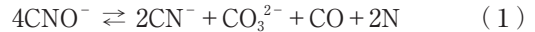
金属熱処理のひとつである窒化は、表面から窒素を侵入および拡散させて材料の表面を硬化させる処理であり、窒素の供給源として溶融塩を用いた窒化処理の手法が塩浴窒化である。この溶融塩中には拡散源となる窒素および炭素が存在するため、以降は塩浴軟窒化と呼ぶ。なお、国内では、塩浴軟窒化処理はHEFグループのTUFFTRIDE®(タフトライド)や、パーカライジンググループのISONITE®(イソナイト)などの商標で呼ばれることもある。塩浴軟窒化の長所は、簡素な前洗浄で均一な窒化組織が得られる点である。窒化を阻害する不動態膜を除去する工程が不要であるため、ステンレス鋼やニッケル基合金などの難窒化材にも適している。さらに、溶融塩による軟窒化では、溶融塩と材料の界面における窒素の化学ポテンシャルが高いため、前述した溶融塩の特徴も合わせて、短時間で均一な窒化組織を得ることができる。

### ◇ 一般的な塩浴軟窒化

#### 1. 歴史と原理

1920年代に開発されたアンモニアガスを用いた窒化処理は、処理に長時間を要し、窒化鋼のみに適用可能であった。そこで、生産性の向上および適用鋼種の拡大を目的とし、溶融塩を用いた窒化処理が開発された。その後、1950年代にシアン化物を主な組成とした溶融塩が工業化されると、1980年代には無毒なシアン酸塩および炭酸塩を主な組成とした溶融塩が開発され、工業化された。

この溶融塩中では以下の式(1)~(4)の反応がおこる。



この中で窒化反応に寄与するのは式(1)および式(2)のシアン酸イオンの分解反応、ならびに式(3)のシアン酸イオンの酸化反応であり、浸炭反応に寄与するのは式(4)のブードア反応である。また、溶融塩に含まれるカチオン成分はナトリウムおよびカリウムである。

#### 2. 処理工程

処理工程は、前洗浄、予熱、窒化、冷却および後洗浄の5つの工程からなる。窒化前には、油や付着物を除去する目的で前洗浄が行われ、その後、水分の除去および溶融塩の温度低下を予防することを目的とし、400℃以下で予熱が行われる。一般に、窒化処理の温度は530℃から580℃の範囲で、その時間は30minから120minである。窒化後には、水、油または酸化性溶融塩での冷却が行われる。

#### 3. 組織および特性

鋼に塩浴軟窒化処理を施すと、表面には六方最密格子構造の $\epsilon\text{-Fe}_3(\text{N}, \text{C})_{1+x}$ 相と面心立方格子構造の $\gamma'\text{-Fe}_4(\text{N}, \text{C})_{1-y}$ 相からなる窒素化合物層が形成され、その直下には基材に窒素が固溶した高い圧縮残留応力をもつ窒素拡散層が形成される。基材に合金窒化物を形成する元素が多く含まれるほど、窒化組織の硬さは増大し、硬化層は浅くなる。窒素化合物層により耐摩耗性や耐食性が向上し、直下の窒素拡散層の圧縮残留応力などによって疲れ強さが向上する。このように塩浴軟窒化の組織およびその特性は、基本的には他の窒化処理と同様である。しかし、塩浴軟窒化により形成される窒素化合物層の組織は、さらなる特徴をもつ。図1に塩浴軟窒化処理した鋼の組織を示す。他の手法と比べ、窒素化合物層は $\epsilon$ 相の割合が多く、表面の

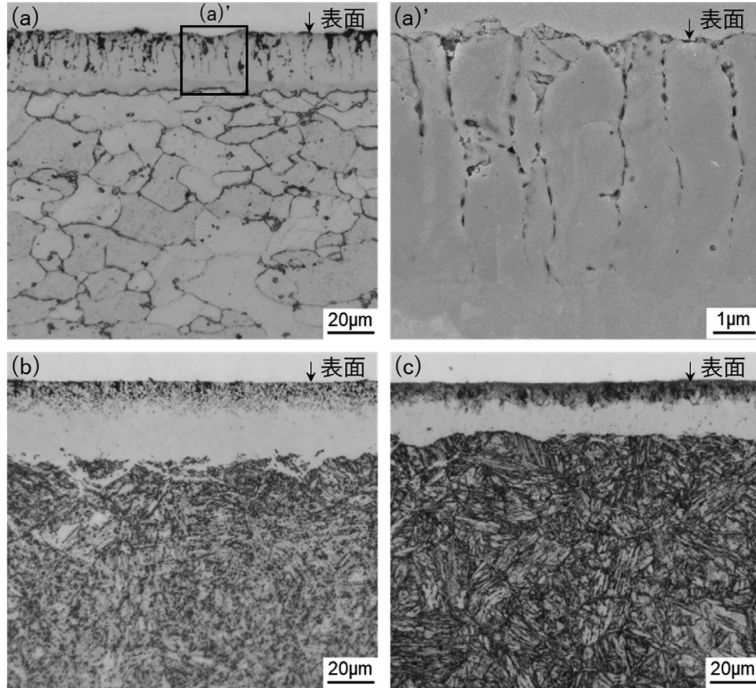


図 1 同条件で塩浴軟窒化処理後の (a) SPCC、(b) S45Cおよび (c) SKD61の組織

数 $\mu\text{m}$ はポーラスな構造となりやすい。これは、溶融塩における窒素の化学ポテンシャルが高いことと、窒素と炭素を拡散させる軟窒化処理では $\epsilon$ 相が形成されやすいことが理由である。この窒素化合物層のポイドには油が保持されやすく、潤滑油下でのしゅう動特性に優れる<sup>2)</sup>。また、異種材料との接着用途にも使用され、このポーラスな構造がアンカー効果をもたらし、優れた密着性を示す。また、酸化性溶融塩で冷却する場合、最表面には $\text{Fe}_3\text{O}_4$ からなる $1\mu\text{m}$ 以下の酸化層が形成される。この酸化層は下地との密着性に優れており、耐食性やしゅう動特性の向上が期待できる。

#### 4. 適用部品例

塩浴軟窒化は、安価な材料である低炭素鋼や低合金鋼への適用はもちろん、合金が多く含まれる工具鋼やステンレス鋼、鋳鉄、そしてニッケル合金にも適用されている。適用部品の多くは自動車関連であり、例えば、エンジン部品ではエンジンバルブやクランクシャフト、駆動系部品では各種ギア、ブレーキのバックプレートやガイドレールなどに適用されている。また、製鉄設備部品や電気部品など、産業界に幅広く採用されている。

#### ◇ 特殊な塩浴軟窒化

溶融塩中ではイオンが安定に共存することから、さまざまなイオンが混合した広範囲の組成をつくることことができる。以下に工業的に利用されている塩浴軟窒化の例を挙げる。

##### 1. 塩浴酸軟窒化

従来の塩浴軟窒化と同様の条件で酸軟窒化ができる処理であり、カチオンとしてナトリウムおよびカリウムの他にリチウムを含む溶融塩が用いられる。ここでの酸軟窒化は、軟窒化処理と酸化処理の二工程に分かれた処理ではなく、窒化と酸化が同時におこる一工程での処理を指す。塩浴酸軟窒化処理を鋼に施すと、表面からリチウム含有酸化層、窒素化合物層および窒素拡散層が形成される。このリチウム含有酸化層は数十 $\mu\text{m}$ まで厚膜化が可能であり、しゅう動特性や耐食性を向上させる<sup>3)</sup>。図2に680 $^{\circ}\text{C}$ の溶融アルミニウム合金中に200rpmにて回転させながら浸漬したときの試験片の溶損体積の経時変化を示す。表面のリチウム含有酸化層がアルミ合金との反応を抑制するため、塩浴酸軟窒化処理により試験片の耐溶損性が著し

く向上することがわかる。この特性を活かし、溶融金属に対する溶損性が求められるダイカスト金型などにも適用されている。

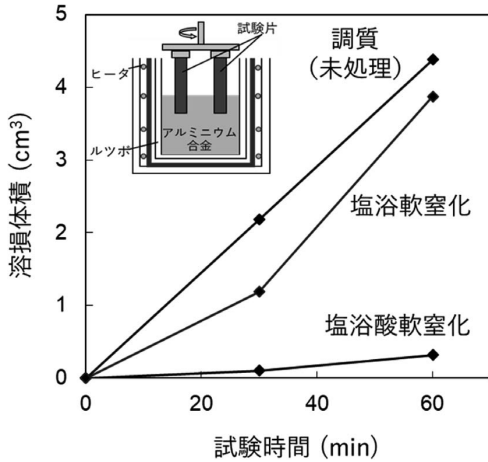


図 2 溶融アルミニウム合金に対する溶損性

## 2. 低温塩浴軟窒化

特殊な組成の溶融塩が用いられており、430℃から490℃での処理が可能である。得られる組織は窒素化合物層および窒素拡散層と、一般的な塩浴軟窒化の組織と同様であるが、通常の処理温度と比べて100℃以上も低温であるため、処理によるひずみが非常に小さいことが特徴である。図3に低温塩浴軟窒化浴にて処理したSUS304の硬さ分布および元素濃度の分布を示す<sup>4)</sup>。通常の窒化温度でステンレス鋼を処理すると、クロム窒化物の形成により耐食性は低下する。しかし、この低温塩浴軟窒化では、形成されるクロム窒化物は微量であるため、耐食性を大きく損なうことなく表面の硬さを増大できる。

## 3. 塩浴浸硫窒化

硫黄が含まれる溶融塩を用いた処理であり、鋼に塩浴浸硫窒化処理を施すと、表面から硫化物層、窒素化合物層および窒素拡散層が形成される。この最表面に形成する数 $\mu\text{m}$ の硫化物層がしゅう動特性の向上に寄与することが報告されている<sup>5)</sup>。

## むすび

本稿では塩浴軟窒化処理の概要および代表的な処理の例について紹介した。現在では、高周波熱処理や浸炭焼入れなど、窒化と他の表面改質処理との複合処理により、さまざまな特性が向上することがわかっている。本分野においても脱炭素や省エネルギーを念頭に置いた研究開発が進んでおり、完全に無害な塩浴軟窒化処理の開発や、電気自動車部品などへの適応とともに、今後の発展に期待したい。

## 参考文献

- 1) 伊藤靖彦：溶融塩の化学、アイピーシー (2005)
- 2) 竹内栄一：潤滑、30、5 (1985) 341-346
- 3) 石塚はる菜、平井勇也、青木智幸、渡邊陽一：熱処理、55、3 (2015) 196-204
- 4) 東正丈、米山義康、新川誠、永楽宏：日本パーカライジング技報、12 (2000) 62-72
- 5) 大黒貴、兼崎昭士：日本機械学会論文集、30、220 (1964) 1493-1507

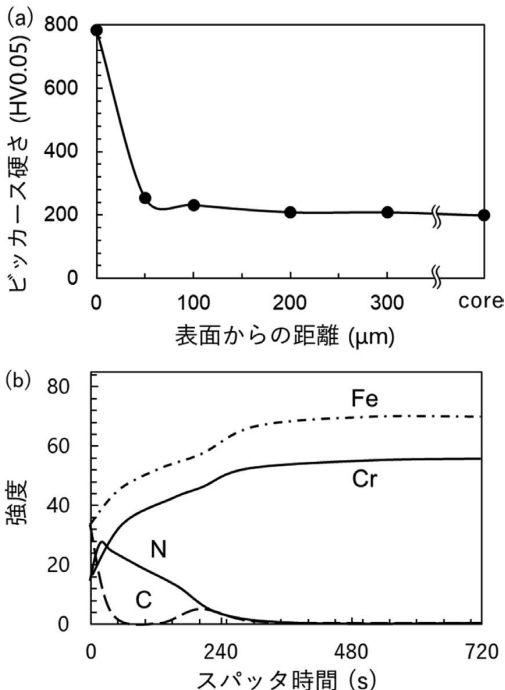


図 3 低温塩浴軟窒化処理したSUS304の (a) 硬さ分布および (b) 元素分布

# Ⅲ. 窒化の適用例

## 1. 乗用車部品（クランクシャフト）

日本製鉄㈱ 技術開発本部 技術開発部長 祐 谷 将 人  
高炭素鋼材研究部 課長

### まえがき

クランクシャフトは、エンジンの主要部品の一つであり、ピストンの直線運動を回転運動に変化させる働きを持つ。ピストンから伝わる荷重は、コンロッドを通してピンジャーナル（軸）を回転させる。その際に、ジャーナルのフィレット部（隅部）には曲げ応力が加わる。クランクシャフトにはメタル（軸受）との摺動部に潤滑油を供給するための油孔が備えられているが、ねじりが曲げと重畳することで、油孔の縁には応力集中による高い応力が加わる。これらの種々の負荷に対する疲労強度を高めるために、クランクシャフトにはガス窒化・軟窒化、高周波焼入れといった表面硬化処理、またはフィレット部へのロール加工が施される。クランクシャフトには窒化、軟窒化のいずれも用いられる。以降では、窒化と軟窒化を区別せず、それら両方をまとめて窒化と記載する。

### ◇ 窒化クランクシャフトの製造工程

クランクシャフトには鍛造品と鋳造品があるが、表面硬化処理として窒化処理を選択する場合は鍛造品が用いられる。まず、素材となる棒鋼を熱間鍛造で粗く成型し、その後、切削加工で精密に成形する。熱間鍛造と切削加工の間には、微細組織を作りこむために、焼ならしや焼入焼戻し処理が施される場合もある。切削加工後のクランクシャフトは550～600℃程度の温度で窒化される。複雑な形状を均一に窒化する必要があるため、窒化にはガス窒化、または塩浴窒化が用いられる。窒化時にクランクシャフトに曲がりが生じた場合は、後述する曲げ矯正を行う場合がある。窒化処理を施すと、最表面にボイドを含む化合物層が生じるため、表面近傍は膨張し、表面粗さはわずかに大

きくなる。これらの膨張や表面粗さの変化の影響を除くために、メタルとしゅう動するジャーナルの平行部は窒化後にラップ研磨で仕上げられる。

### ◇ 窒化クランクシャフトの必要特性

エンジンを小型化、高効率化するためにはクランクシャフトも小型・軽量であることが望ましい。そのため、クランクシャフトには高い曲げ疲労強度とねじり疲労強度が求められる。また、しゅう動を受けるジャーナル部には、耐摩耗性や耐焼付き性が求められる。ガス窒化におけるアンモニアガス、塩浴窒化におけるソルトは細孔にも入り込むため、ジャーナルのフィレット部、平行部のみならず、油孔の内部を同時に均質に強化することができる。

窒化処理は比較的低温で行われる処理であるため、高周波焼入れと比べるとクランクシャフトに生じるひずみは小さく、窒化後の部品をそのまま使用できる場合もある。ただし、エンジン内で高速で回転するクランクシャフトには、高い寸法精度が求められており、窒化で生じるわずかな曲がり変形が問題となる場合もある。この場合は、窒化後のクランクシャフトを押し曲げることで曲がりを矯正する。窒化層は延靱性が低いいため、塑性変形が加わると、化合物層から拡散層にかけてき裂が発生する場合がある<sup>1)</sup>。図1に曲がりの矯正時に生じたき裂の一例を示す。このようなき裂は疲労破壊の起点となり得るため、発生を抑制する必要がある。き裂を発生させずに曲がりを矯正するための特性には種々の呼び名があるが、本報では曲げ矯正性と呼称する。

クランクシャフトに必要な疲労強度を高めるためには、拡散層を硬くすればよいが、硬くし過ぎると曲げ矯正性が劣化する。したがって、窒化ク



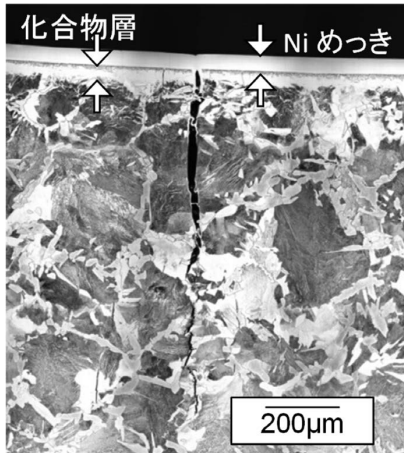


図 1 曲げ矯正を模擬した曲げ試験で生じたき裂の光学顕微鏡像<sup>1)</sup>  
(表面保護のためにNiめっき処理)

ランクシャフト用鋼は疲労強度と曲げ矯正性を両立できるように、拡散層の硬さを適切に制御する必要がある。

#### ◇ クランクシャフト用鋼

窒化クランクシャフトには、内部起点の疲労破壊を抑制するために適度な芯部硬さが求められる。そのため、窒化クランクシャフト用の鋼材としては0.3~0.6%程度のCを含む中炭素鋼が用いられることが多い。一般的に、高強度が必要とされる窒化部品には、強力な窒化物形成元素であるCrが含有された鋼が用いられる。ところが、上述した通り、クランクシャフトは疲労強度と曲げ矯正性を両立させる必要があるため、拡散層の硬さが高くなりすぎないように、使用する鋼の化学成分を制御する必要がある。

Mn、Moは合金窒化物を形成し、拡散層の硬化に寄与する元素であるが、単位重量あたりの硬化能はCr等の強力な窒化物形成元素と比べて低い。特に、MnはJISに規定される機械構造用鋼に必ず含まれている元素であり、合金元素としては比較的安価であるため含有量を調整しやすく、窒化クランクシャフトの表層硬さの調整に使われることがある<sup>2)</sup>。

クランクシャフトに曲げ矯正を行わない場合は、CrやVを含有させ、表層硬さを高める場合もある<sup>3)、4)</sup>。

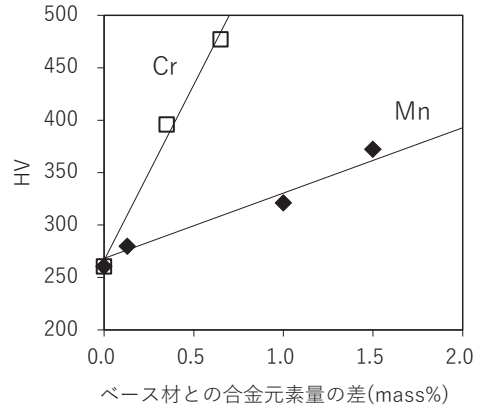


図 2 表面から50μm位置の硬さに及ぼすMn、Cr量の影響<sup>5)</sup>  
(ベース成分：0.3%C-0.2%Si-0.5%Mn-0.05%Cr)

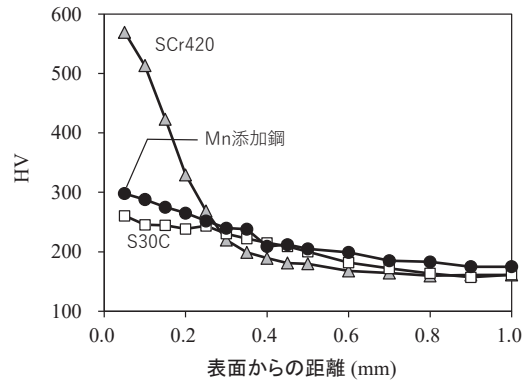


図 3 各鋼種の拡散層の硬さ分布<sup>5)</sup>

図2にFe-0.3%C-0.2%Si-Mn合金を窒化した場合の拡散層の硬さに及ぼすMn、Cr量の影響を示す。Mn、Crはその含有量が増えるほど拡散層の硬さを高めるが、Mnの単位重量あたりの硬化能はCrと比べて数分の一であることが分かる<sup>5)</sup>。Mn量を調整したクランクシャフト用鋼の硬さ分布の一例<sup>5)</sup>を図3に示す。Mn量を増加させた鋼は、一般的な機械構造用炭素鋼であるS30Cと比べて表層の硬さが増加している。1.0%前後のCrを含むSCr420の表層は500HV以上に硬化するが、硬化層は浅い。これは強力な窒化物形成元素が多量に含有されていると、固溶窒素の一部が合金窒化物として消費されるために、芯部方向へ拡散する固溶窒素量が低下するためである。MnはCrと比べて窒化物の形成能が低いため、固溶窒素の拡散が阻害されにくく、硬さ分布はなだらかな形状になる。

一般的にクランクシャフトのような比較的大型の部品では、曲げにより加わる表面近傍の応力の勾配が小さいため、最表層のみを硬化させても、内部起点の破壊が生じやすく、疲労強度は十分に向上しない場合がある。

クランクシャフトは軸部の旋削加工や、油孔のドリル加工等の種々の機械加工によって成形されるため、高い被削性も求められる。そのため、C等量を上げ過ぎないように合金元素量を調整するとともに、S、Ca等の快削元素を含有させる場合もある。これらの快削元素は窒化物を形成しないため、窒化特性には影響しない。

#### ◇ クランクシャフト用鋼の窒化特性

図4にクランクシャフトに必要な特性の一例として、曲げ矯正性と曲げ矯正しない場合の疲労強度を試験片で評価した結果を示す。図中には合金元素を少量しか含まないS30C、Mnを含有させたMn添加鋼、窒化部品に汎用的に用いられるSCr420の結果を示している。曲げ矯正性の評価には種々の方法があるが、ここでは、切欠き付きの

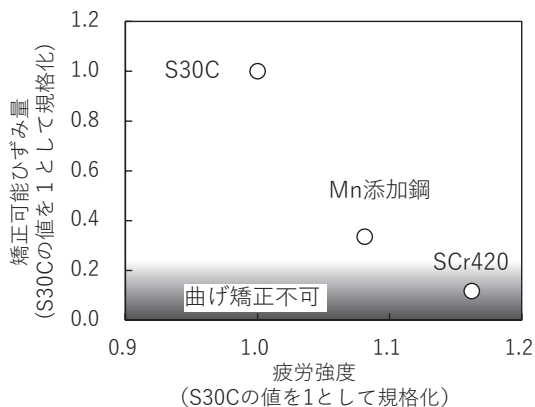


図 4 試験片で評価した各鋼種の疲労強度と曲げ矯正性

角棒試験片を曲げた際に、切欠き底にき裂が発生する直前の切欠き底のひずみ量を矯正可能ひずみ量と定義し、その値を比較に用いた<sup>6)</sup>。

疲労強度が高くなるほど、矯正可能ひずみ量は小さくなっており、両特性がトレードオフの関係にあることが分かる。最も疲労強度の高いSCr420は、曲げ矯正ができない程度に矯正可能ひずみ量が小さい。このように、表層硬さが高くなる鋼は、窒化後の曲げ矯正が必須となるクランクシャフトには用いることができない。

クランクシャフト用鋼の窒化特性には合金成分だけでなく、鋼の微細組織も影響する<sup>7)</sup>。熱処理を追加したり、熱間鍛造条件を最適化することで、クランクシャフトの特性を最大限に引き出すことができる。

#### むすび

クランクシャフトには、曲げ、ねじり、しゅう動等の多様な負荷に対する疲労強度と、高い寸法精度が要求される。クランクシャフトに窒化処理を適用する場合、使用する鋼材の化学成分を適切に選定・制御することで、クランクシャフトの性能を大きく向上させることができる。

#### 参考文献

- 1) 祐谷将人、多比良裕章、大川 暁、西原基成：日本製鉄技報、412 (2019)、161
- 2) 高橋宏昌、増田大樹、西谷成史、高須賀 幹：Honda R&D Tech. Rev.、25 (2013)、138
- 3) P. Citti, A. Giorgetti, U. Millefanti: Procedia Structural Integrity 8 (2018)、486
- 4) 増田大樹、松田英樹、山崎歩見：Honda R&D Tech. Rev.、24 (2012)、111
- 5) 祐谷将人：熱処理、vol. 61 (2021)、91
- 6) 高須賀 幹、西谷成史、高橋宏昌、増田大樹、松本 齊、佐野直幸、中山英介：新日鉄住金技報、406 (2016)、2-7
- 7) 祐谷将人、江頭 誠、梅原崇秀：日本製鉄技報、No. 412 (2019)、116

## 2. トラック部品（クランクシャフト）

い す ゞ 自 動 車 (株) やま だ よし とみ  
車両審査実験第2部 材料開発第1課 山 田 明 徳

い す ゞ 自 動 車 (株) まさ か ひろ き  
車両審査実験第2部 材料開発第1課 政 家 弘 樹

い す ゞ 自 動 車 (株) え とう ひろ ひと  
車両審査実験第2部 材料開発第1課 衛 藤 洋 仁

### まえがき

トラックなどの商用車に求められることの一つは、効率よい物資の輸送である。そのため、車両の軽量化やエンジンの高効率化などが重要な課題となっている。これら課題には、部品の軽量化や小型化、エンジン筒内圧の向上、燃料噴射圧の向上などで対応する必要があるため、部品の高強度化を進めてきた。また、価格を抑えた商用車の提供も重要な課題であるため、各部品の製造コスト低減を進めてきた。

自動車部品などの構造部品において、部品への負荷により発生する曲げやねじりの最大応力は主に部品表面に発生するため、高周波焼入れ、浸炭焼入れおよび軟窒化処理などの表面硬化処理が部品の疲労強度向上手法として広く使用されている。その中で軟窒化処理は、Fe-N系において変態点以下である500-590℃程度で処理をおこなうため、焼き入れによるマルテンサイト変態をとまなう高周波焼入れや浸炭焼入れと比べ熱処理ひずみが小さいというメリットを有している。弊社では疲労強度向上と熱処理ひずみが小さいというメリットからエンジン構成部品の一つであり、強度特性と曲りに対する生産要求が厳しいクランクシャフトに軟窒化処理を施している。

本稿では部品へのガス軟窒化処理適用例として、軟窒化クランクシャフトについて記す。

### ◇ クランクシャフトについて

クランクシャフトはエンジンを構成する回転部品であり、燃料の燃焼により発生したエネルギー伝達するために、ピストンとコネクティングロッドの上下運動から回転運動に変換する役割を担っ

ている。図1にクランクシャフトの外観図と各種名称を示す。クランクシャフトは中心軸となるクランクジャーナル、コネクティングロッドと接続するクランクピン、回転時の振動を抑えるカウンターウェイト、クランクピンとクランクジャーナルをつなぐクランクアームから構成されている。クランクシャフトの中心軸から偏心した位置にあるクランクピンに、コネクティングロッドからの入力作用するため、クランクジャーナルとクランクピンのフィレット部に曲げ入力が発生するとともに、クランクシャフト全体にねじり入力が発生する。そのため、フィレット部とオイル穴など非フィレット部の応力集中部において、曲げとねじり入力に対する疲労強度が要求される。また、エンジンの高効率化に対応するために筒内圧の向上などを行う場合は、従来よりもクランクシャフトに対する曲げとねじり入力が大きくなるので、曲げとねじり疲労強度向上については鋼材成分の調整や形状の最適化を行い対応している。

また、ディーゼルエンジンはガソリンエンジンに比べて筒内圧が高いため、クランクシャフトのクランクピン部、クランクジャーナル部の摺動面

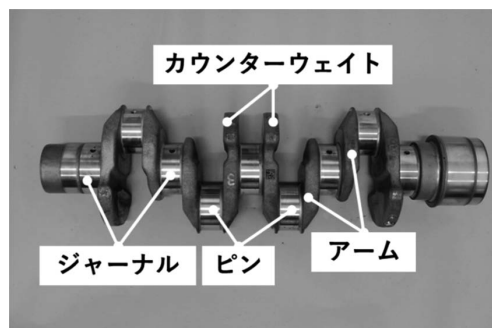


図 1 クランクシャフト外観図

には、高い耐摩耗性が要求されるため、表面の硬さを大きくしておく必要がある。

クランクシャフトに軟窒化処理を施すことで、部品の表面近傍の硬さが向上し、かつ圧縮残留応力が付与されるため、曲げ疲労強度、ねじり疲労強度および耐摩耗性への要求を満足することができる。

更に、回転部品であるクランクシャフトは、振れに対する要求が高いため、厳しい真直度が要求される。図1に示すようにクランクシャフトは、長尺異型の複雑形状であることから、軟窒化処理の際に矯正が必要になる程の曲りが発生することがある。そのため、生産要件として曲りを矯正して真直度を確保できることが要求される。真直度の規格を超える曲りが発生した際に、3点曲げの要領で、クランクシャフトの両端ジャーナルを支持した状態で中央のジャーナルに荷重を加え塑性変形させて全体の曲りを矯正する。曲りを矯正する際は、き裂を発生させないことが要求されており、この要求特性が曲げ矯正性である。

曲げ矯正はクランクシャフトを塑性変形させるため、矯正を行うと軟窒化処理により導入されていた圧縮残留応力が減衰または引張残留応力に転ずるため疲労強度が低下する。そこで、開発時に曲げ矯正量と疲労強度の関係を把握し、曲げ矯正後の疲労強度が部品の設計応力を下回る場合は、矯正後に再度軟窒化処理を行う。

曲げ矯正性は、き裂を発生させることなく矯正できる量が多いほど良い矯正性である。一般的に、窒化化合物層、拡散層の硬さが高くなるほど、低

荷重の負荷でき裂が発生してしまうため、曲げ矯正性は悪くなるため、曲げ矯正性を良くするには窒化化合物層と拡散層の硬さを低くする必要がある。硬さに対して曲げ矯正性と疲労強度は相反する特性であることから、部品全体の要求特性として、双方のバランスをとる必要がある。このことからクランクシャフトの材質には炭素鋼をベースとしている。

#### ◇ 調質ベースの高強度軟窒化クランクシャフト

エンジンの高効率化を目的として筒内圧の向上をするうえで、炭素鋼（JIS-S50C）を用いた調質軟窒化クランクシャフトに比べて曲げ疲労強度が向上した高強度軟窒化クランクシャフトを開発した。軟窒化処理を施したクランクシャフトの曲げ疲労強度は図2に示すように拡散層最高硬さと相関があり、拡散層最高硬さが370HV以上となっても曲げ疲労強度は向上しないことが確認できている。また、曲げ矯正性も拡散層最高硬さと相関があり、曲げ矯正が可能な拡散層最高硬さは390HVであることが確認できている。そこで、曲げ疲労強度と曲げ矯正性を両立したクランクシャフトを開発するために、軟窒化処理後の拡散層最高硬さに対して目標硬さ範囲を350～380HVとし、拡散層深さは従来と同等となることを調質ベースの高強度軟窒化クランクシャフトの開発の方針とした。

高強度鋼の開発は炭素鋼をベースに各成分（C、Si、Mn、Ni、Cr、Mo、V、Al）を振りパラメータ設計（JIS Z 9061）にて最適化した。自社開発した高強度鋼の成分量（wt%）はC：0.50、Si：

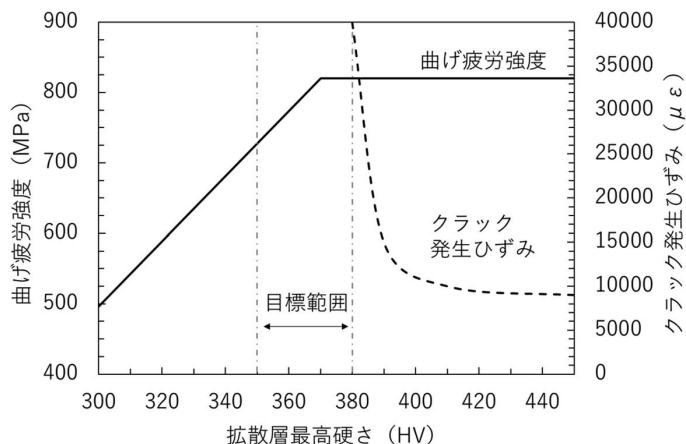


図 2 拡散層最高硬さと曲げ疲労強度およびクラック発生ひずみの関係

0.15、Ni : 0.00、Cr : 0.10、Mo : 0.00、V : 0.02およびAl : 0.00である。軟窒化処理後の拡散層最高硬さは380HVであり、拡散層深さは0.6mmとなり、拡散層最高硬さと拡散層深さは曲げ疲労強度と曲げ矯正性を両立できる開発方針に沿ったものであることを確認した。

高強度鋼と炭素鋼を用いて作製した調質軟窒化クランクシャフトを用いて、実体曲げ疲労試験と曲げ矯正試験を行った。疲労試験の結果より、高強度鋼の曲げ疲労限度は炭素鋼の曲げ疲労限度より15%向上していることが確認できた。また、曲げ矯正試験から、クランクシャフトのフィレット部に評価基準の130%となるひずみを付加してもき裂が発生しなかったことから、高強度鋼を用いた調質軟窒化クランクシャフトは十分な曲げ矯正性を有することが確認できた。

本章で示させていただいた高強度鋼はすでに量産クランクシャフトに実装されており、エンジンの高効率化に寄与している。

#### ◇ 非調質軟窒化クランクシャフト

製造コスト低減のために、熱間鍛造後の調質処理を省略可能な非調質鋼軟窒化クランクシャフトを開発した。なお、クランクシャフトの開発に際して日本製鉄株式会社殿が成分設計した。非調質鋼は、調質鋼とは異なり前章で記した拡散層最高硬さが390HVより低くても、曲げ矯正時にき裂が発生してしまうことが確認されている。そこで、非調質クランクシャフトの開発では生産性を確保できることを開発要求の中で一番重要な項目として開発を進めた。この方針は、疲労限度に関しては調質軟窒化クランクシャフトに対して低下を許容することであり、エンジンへの展開は、疲労試験により確認した疲労限度内で設計を成立させることとなる。また、現行の調質軟窒化クランクシャフトにおいて要求強度が比較的低いものについては水平展開を行った。

非調質鋼の代表成分を表1に示す。クランクシャフトの疲労強度と曲げ矯正性への影響が大きいと考えられる化学成分であるC、SiおよびMnの添加量を最適化した。CとSiの添加量にてクランクシャフト熱間鍛造後の冷却工程における素地の硬さを調整し、ここでは曲げ矯正性を確保するため、

表 1 化学成分 (wt%)

C	Si	Mn	Cr
0.37	0.19	0.55	0.06

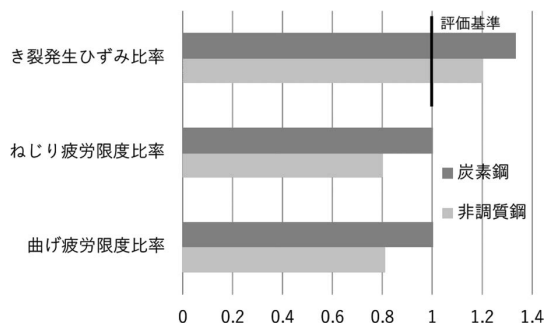


図 3 疲労限度およびき裂発生ひずみ比較結果

炭素鋼調質の素地硬さより25%程度低い硬さを狙い値とした。また、Mnの添加量を適正化することで拡散層の硬さを調整した。

図3に疲労限度およびき裂発生ひずみ比較結果を示す。これより、開発した非調質鋼は十分な曲げ矯正性を有することが確認できた。また、疲労試験結果、曲げ疲労限度、ねじり疲労限度共に20%程度の低下であることが確認できた。

このように開発された非調質軟窒化クランクシャフトは量産化されており、部品の低コスト化および製造工程におけるCO<sub>2</sub>排出量の削減に寄与している。

#### むすび

近年、地球規模でカーボンニュートラルが進められており、これは乗用車や商用車のような輸送機器の使用時に排出されるCO<sub>2</sub>にだけでなく、製造時におけるCO<sub>2</sub>排出も抑えていく必要があるため、今後は工程省略ということも重要になってくると思われる。そのために、クランクシャフトでは調質工程や曲げ矯正工程の省略などがこれまで以上に求められると考える。

非調質鋼における疲労強度向上のメカニズム解明やクランクシャフトに軟窒化処理を施した場合に曲りが発生する要因など強度や生産性に関わる因子を明らかにし、シミュレーション解析を活用しながら、疲労強度を低下させない非調質鋼や曲り矯正工程省略を可能としたクランクシャフトの量産が実現でできるようになることを望む。

### 3. 乗用車（歯車）①

日本製鉄(株)九州製鉄所 木口海  
品質管理部 棒線管理第一室 主査

#### まえがき

2016年11月に発効された、2020年以降の温室効果ガス排出削減等のための新たな国際枠組み「パリ協定」に基づき、カーボンニュートラルに関する様々な取り組みが実施されている。日本製鉄では国際社会の一員としてCO2排出削減シナリオである「カーボンニュートラルビジョン2050」を発表し、この実現のための取組を強化している。私たちの取組は主に鉄鋼製造におけるCO2排出削減を目的としたものであるが、棒線商品では最終製品となるまでに複数の加工を経ることから、易加工性の付与、熱処理省略、高強度・強靭化等の手法でCO2排出量を削減することが必要である。

自動車の歯車製造においては、高温処理が必要な浸炭工程でCO2排出が多く、この代替技術が求められてきた。本稿で紹介する窒化処理は、浸炭処理に比べて低温化が可能であるため、CO2排出量を削減できる上、熱処理ひずみを小さく抑えることにより仕上げ加工の省略メリットも享受できることから、浸炭代替技術として注目されている。

#### ◇ 窒化による浸炭代替

自動車のトランスミッションに用いられる歯車は、エンジンまたはモーターの駆動力を伝達する部品であり、大きな負荷がかかるため、歯元の曲げ疲労強度と歯面の耐ピッチング強度が必要とされる。そのため、一般的にはSCR420やSCM420等の肌焼鋼に表面硬化処理として浸炭焼入れ・焼戻

しを施して製造される。

図1に浸炭歯車と窒化歯車の製造工程例を示す。一般的に浸炭処理は930℃程度で処理されるのに対し、窒化は570～600℃で行われることが多い。また、要求される部品精度にもよるが、浸炭処理は仕上げ加工が必要であるのに対し、窒化処理は仕上げ加工を省略可能である。浸炭処理は鋼材をオーステナイト単相となる約930℃の高温に保持した後、焼入れてマルテンサイト変態させるため、CO2の排出量が多いことが課題である。一方、窒化処理は、A1変態点以下の570～600℃での低温処理であるため、浸炭に比べてCO2排出量を抑えることが出来る。また浸炭処理は、相変態を伴う処理であるため熱処理ひずみが大きいのに対し、窒化は相変態を伴わないため熱処理ひずみが小さい。このため、窒化処理部品は熱処理後の仕上げ加工を省略しても高い部品精度の確保が可能である。電動化に伴い、静粛性への要求が高まっており、高い部品精度が必要な部品が増えると予想されるが、窒化であれば仕上げ加工によるコスト増加を避けることができる。以上の点から、環境負荷低減や電動化対応を考慮して、浸炭を窒化に置き換える動きが活発になっている。

しかし、窒化品は浸炭品に比べると強度が低い傾向にあり、浸炭代替の課題となっている。現在、JIS G4053で規定されている SACM645（中C-Cr-Mo-Al系）は、窒化での高強度化のため、Cr、Mo、Alといった合金元素が添加されている。しかし、高強度である一方で、母材組織がベイナイト組織

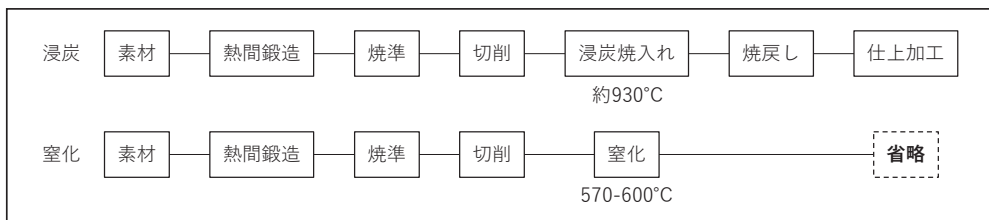


図 1 浸炭歯車と窒化歯車の製造工程例

主体であるため硬さが高く、被削性に課題がある。そこで当社は、浸炭品同等の強度を有し、且つ被削性に優れた窒化歯車用鋼の開発を行った。

### ◇ 高強度窒化歯車用鋼

#### (1) 化学成分

表1に、窒化鋼の高強度化のために添加される主な合金元素と、その合金元素が窒化特性に及ぼす影響を示す<sup>1)、2)</sup>。Cr、Mo及びVは、表面硬さと硬化層深さの両方に寄与し、特にCrは表面硬さ、Vは硬化層深さへの影響が大きい。Alは、表面硬さを大幅に向上させるが、硬化層が浅くなるという特徴がある。窒化は、窒化物の微細析出による析出強化と、窒素の固溶強化を利用した表面硬化処理であるが、表面硬さは主に前者、硬化層深さは主に後者による影響が大きい。Moは、窒素の鋼材内部への拡散を促進し、窒素の固溶強化により硬さを向上させる。Alは、合金窒化物の形成により表面硬さを大幅に向上させるが、表層に合金窒化物が多量析出し窒素の鋼材内部への拡散を阻害するため、硬化層が浅くなる<sup>1)</sup>。Cr及びVは、合金窒化物の形成と窒素の鋼材内部への拡散促進の両方の効果を持ち、窒化特性を向上させる<sup>2)</sup>。

当社の開発した高強度窒化歯車用鋼は、一般的な浸炭歯車用鋼であるSCR420と同等の疲労強度と被削性を有するよう設計している。高強度化のため、CrとVの2つの元素を利用して窒化特性を向上させている。CrとVを選んだ理由は、両元素とも表面硬さと硬化層深さの両方に寄与することに加え、Crは表面硬さ、Vは硬化層深さへの効果が大きいというそれぞれの元素の作用によって、バランスよく窒化特性を向上させるためである。Alは、表面硬さ向上には大きく寄与するが硬化層が浅くなる上、靱性が低下する懸念がある。Moは、

表面硬さと硬化層深さの両方に寄与するが、それぞれへの効果はCr及びVの方が大きい。また、被削性確保のため、母材組織がベイナイト組織を含まないフェライト+パーライト組織となるように低炭素としている。

図2に低炭素鋼、低炭素鋼にCrを添加した鋼及び低炭素鋼にCrとVを添加した鋼の窒化後の硬さ分布を示す。Cr添加により、表面硬さが大きく向上している。さらに、V添加により、表面硬さの向上に加え硬化層が深くなっている。

図3に、上記3鋼種の窒化後の窒素濃度分布を示す。

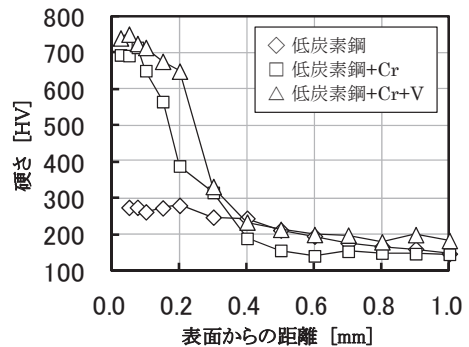


図 2 Cr、Vが硬さ分布に与える影響

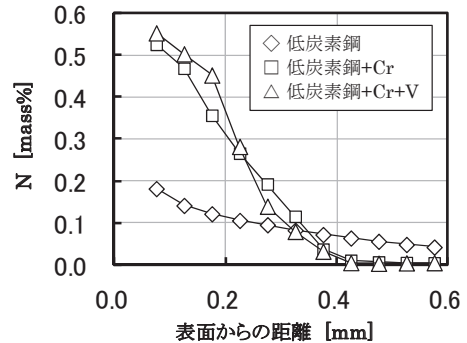


図 3 Cr、Vが窒素濃度分布に与える影響

表 1 合金添加元素が窒化特性に与える影響

添加元素	表面硬さ	硬化層深さ	窒化層の強化機構	
			窒化物の析出強化	窒素の固溶強化
Cr	↑↑	↑	○	○
Mo	↑	↑	—	○
V	↑	↑↑	○	○
Al	↑↑↑	↓	○	—

↑：効果有り（数が多い程大）、↓：逆効果

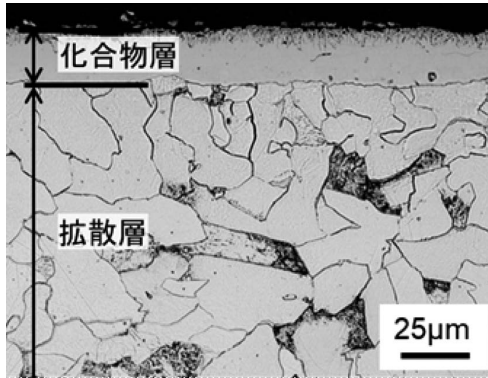


写真1 開発鋼の窒化後の表層マイクロ組織  
(ナイタル腐食)

示す。窒素と親和性の高いCr及びVの添加によって、表面から約0.3mm位置までの窒素濃度がCr及びVを添加していない低炭素鋼よりも高くなっている。表面から約0.3mm以降の窒素濃度がCr、V非添加の低炭素鋼の方が高くなっている理由については、CrとVはともに窒素の鋼材への侵入を促進するが、合金窒化物の形成にも窒素が使われ、内部の深いところまで拡散するには時間を要するためと推定される。

以上から、Cr、V非添加の低炭素鋼は窒素の固溶強化が主な強化機構であるのに対し、Cr、Vを添加した低炭素鋼は窒素の固溶強化に加え、Cr及びVの合金窒化物による析出強化が大きく寄与しており、且つ窒素濃度も高く固溶強化、析出強化の効果が大きくなっているため、高い表面硬さと深い硬化層が得られている。

写真1に開発鋼の窒化後の表層マイクロ組織を示す。最表面には約20μmの化合物層が形成されており、その直下が窒素の拡散層となっている。拡散層はフェライト+パーライト組織であるが、Cr及びVの合金窒化物による析出強化、窒素による固溶強化により大きく硬化している。また、表層と同様に、内部もフェライト+パーライト組織である<sup>2)</sup>。

## (2) 開発鋼の特徴

表2に、低炭素鋼にCr及びVを添加し成分調整

表 2 開発鋼の疲労強度

	曲げ疲労強度	耐ピッチング強度
開発鋼+窒化	○	○
炭素鋼+窒化	×	×
SCR420+浸炭	ベース	ベース

○：ベース同等、×：ベースに劣る

した当社開発鋼+窒化品、比較の炭素鋼+窒化品及びベースのSCR420+浸炭品の小野式回転曲げ疲労試験による曲げ疲労強度及びローラーピッチング試験による耐ピッチング強度を示す<sup>3)</sup>。開発鋼+窒化品は、曲げ疲労強度及び耐ピッチング強度ともに、炭素鋼+窒化品よりも高く、ベースのSCR420+浸炭品同等となっている。Cr及びVの添加によって表面硬さが向上し、硬化層が深くなったことにより、高強度化していると考えられる。ローラーピッチング試験中には、試験部の繰り返し接触により試験片表面温度が上昇し、焼戻し軟化が生じるが、開発鋼+窒化品は、表層の固溶窒素濃度の上昇により、焼戻し軟化抵抗が向上したことも耐ピッチング強度向上の要因と考えられる。また、母材組織はフェライト+パーライト組織であるため、被削性も良好である。

## むすび

当社の高強度窒化歯車用鋼は、低炭素鋼をベースとして、Cr及びVを添加し、その他元素を調整することにより、浸炭品と同等の強度と被削性を有し、浸炭代替鋼として適用可能である。今後、CO2排出量削減を目的とした工程省略ニーズがより一層強くなると想定されることから、社会の要請に貢献すべく、更なる技術開発を推進する。

## 参考文献

- 1) 渡辺ら、三菱製鋼技報、34 (2000)、1-9
- 2) 行徳ら、材料とプロセス、Vol. 27、No. 1 (2014)、504
- 3) 今高ら、新日鉄住金技報、第406号 (2016)、8-12



## 4. 乗用車（歯車）②

大同特殊鋼(株) 技術開発研究所 田中優樹  
構造材料研究室 室長

### まえがき

自動車で使用される動力伝達部品の多くは、疲労強度や耐摩耗性などの機能を高める目的で、浸炭焼入れ、窒化・軟窒化、高周波焼入れなどの表面硬化処理が施される。中でも窒化・軟窒化処理は、低歪と優れた耐摩耗性が得られる特徴を活かし、歯車やクランクシャフト、シャフト部品等に広く適用されている<sup>1)、2)</sup>。最近では、電動化に伴う静粛性の要望から、浸炭品で施される熱処理歪除去のための仕上げ加工を省略、あるいは大幅な削減が期待できることから、さらなる適用拡大が見込まれている。

一方、自動車部品では、製造コスト低減、あるいはCO<sub>2</sub>排出抑制といった環境負荷低減から、成形工程を熱間鍛造から冷間鍛造への切り替えが指向されている。部品を冷間鍛造するには、通常は素材の室温付近の変形抵抗が低く、また複雑形状に成形するための高い変形能が求められる。しかしながら、JIS-SACM645に代表される従来の窒化用鋼では、C量が比較的高いため、冷間鍛造が可能な変形抵抗や変形能が得られにくいという問題があった。また従来の窒化鋼では、浸炭部品に比べて硬化深さが浅いために、高い強度が必要な部品への適用には制約があった。

大同特殊鋼(株)では、このような問題を解決するために、冷間鍛造が可能で、かつ高強度が得られる窒化・軟窒化用鋼『DNSC™』を開発した<sup>3)</sup>。本開発鋼は、実際に自動車用の歯車に実用化されている。本稿では、歯車に必要な特性を概説した上で、DNSC™の諸特性について紹介する。

### ◇ 歯車の損傷形態と求められる特性

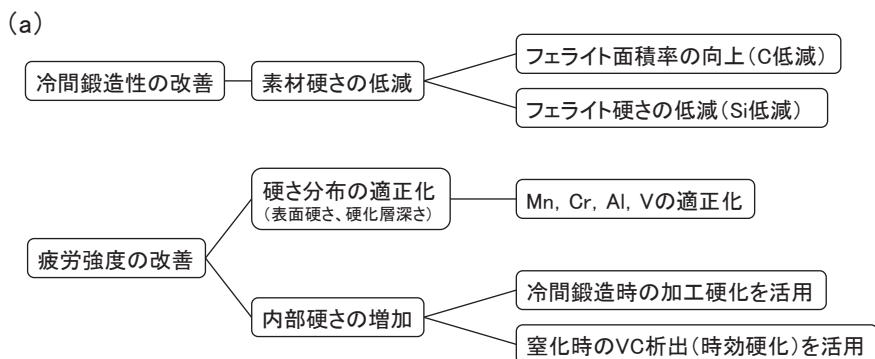
歯車の損傷形態は、歯車の形状や使用環境によって大きく異なり、歯車の歯元部の破壊損傷と歯面の破壊損傷に大別される。歯元部の破壊は、衝撃的な荷重による衝撃破壊（脆性破壊）と繰返

し応力による疲労破壊に区分されるが、いずれも歯底部に作用する曲げ応力によって生じる破壊である。つまり、歯車には高い曲げ疲労特性が必要である。これに対して、歯面の損傷は、歯面の接触による面疲労現象によって生じるものであり、ピッチング、スポーリング、ケースクラッシング、スコーリング、摩耗などの損傷に区分される。これら損傷は、歯面間の相対すべり速度と負荷面圧に依存し、抑制に必要な特性は各損傷で異なるが、硬化層品質（表面硬さ、硬化層深さ）や鋼材の軟化抵抗などが主として挙げられる。窒化・軟窒化された歯車では、浸炭歯車と比べて硬化層深さが浅いため、特に高い面圧がかかった場合、窒化層の内部ひずみに起因したケースクラッシングが発生し低寿命となることがある。

### ◇ DNSC™の概要

図1(a)(b)にDNSC™における冷間鍛造性と疲労強度改善の考え方、および代表成分を示す。DNSC™では、冷間鍛造を可能にするため、フェライトの面積率向上と硬さ低減を指向しており、素材の成分としてC、Si量の低減を図っている。尚、窒化・軟窒化後の硬化層品質に関しては、従来より表面硬さは、Al、Cr、V添加が大きく向上させ、硬化層深さについては、V、Mo添加が深くするのに対し、Al、Mn、Si、Crの添加は逆に浅くすることが知られている<sup>4)</sup>。DNSC™では、歯車の代表である浸炭品以上の表層硬さを有しつつ、従来の窒化・軟窒化鋼よりも深い硬化層が得られるよう、Mn、Al、Cr、V添加量を調整している。ここで、V添加については、VCによる析出硬化現象を利用して窒化・軟窒化時に内部硬さを増加させるといった目的も兼ねている。以上のような合金設計より、従来の窒化・軟窒化用鋼では難しかった冷間鍛造性と強度の両立を図っている。

図2にDNSC™を用いた歯車製造工程の一例を示す。熱間鍛造（粗成形）－軟化熱処理－冷間鍛造



(b)

鋼種	C	Si	Mn	Cr	Mo	Al	V
DNSC™ <sup>3)</sup>	0.2	<0.1	0.8	1.0	-	0.15	0.15
JIS SACM645	0.40~ 0.50	0.15~ 0.50	≤0.60	1.30~ 1.70	0.15~ 0.30	0.70~ 1.20	-
JIS SCr420H	0.17~ 0.23	0.15~ 0.35	0.55~ 0.95	0.85~ 1.25	-	-	-

[mass%]

図 1 (a) DNSC™における冷間鍛造性と疲労強度改善の考え方、(b) 代表成分

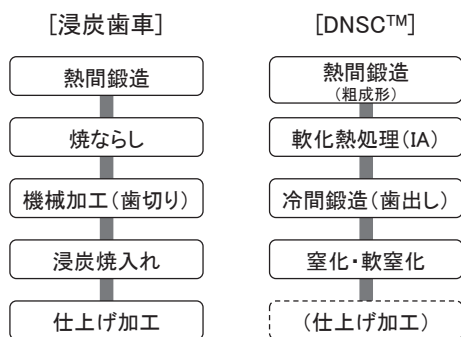


図 2 歯車製造工程の一例

(歯出し)によって所望の形状に加工した後、窒化・軟窒化処理を施して歯車に供される。DNSC™では、冷間鍛造により機械加工を省略、あるいは大幅に削減することが可能である。また、窒化処理による熱処理歪みは非常に小さいため、仕上げ加工(歯研)も省略できれば、浸炭歯車対比、さらにコストメリットが大きくなる。

### ◇ DNSC™の特徴

#### (1) 製造性

DNSC™は、VCの析出により窒化・軟窒化時に

内部硬さが増加することが特徴の一つであるが、冷間鍛造前の軟化処理時にVCが析出すると窒化・軟窒化時の内部硬さの増加が期待できなくなる。図3(a)に等温焼なまし(以下、IA)および球状化焼なまし(以下、SA)を行った後に、冷間加工-軟窒化処理を施した場合の心部硬さ変化を示す。IAおよびSAともに処理後の硬さはHRB80を下回っており、冷間鍛造が可能なレベルの硬さが得られている。これら処理後に冷間加工すると加工硬化により内部硬さは大幅に増加するが、IAの場合は、軟窒化処理後にVC析出によってさらに内部硬さが増加する。一方で、SAの場合は軟窒化処理により硬さは低下していることが分かる。このようにDNSC™では、比較的短時間で軟化可能なIAのような処理を行い、VCの析出をできるだけ抑えることで、窒化・軟窒化後により高い内部硬さを得ることができる。

図3(b)に浸炭肌焼鋼の代表であるJIS-SCr420Hの焼なまし材とDNSC™のIA材を圧縮率80%で冷間圧縮した際の変形抵抗(最大発生応力)を示す。DNSC™のIA材は、JIS-SCr420Hと同等の変形抵抗が得られている。また、図3(c)には、同材の

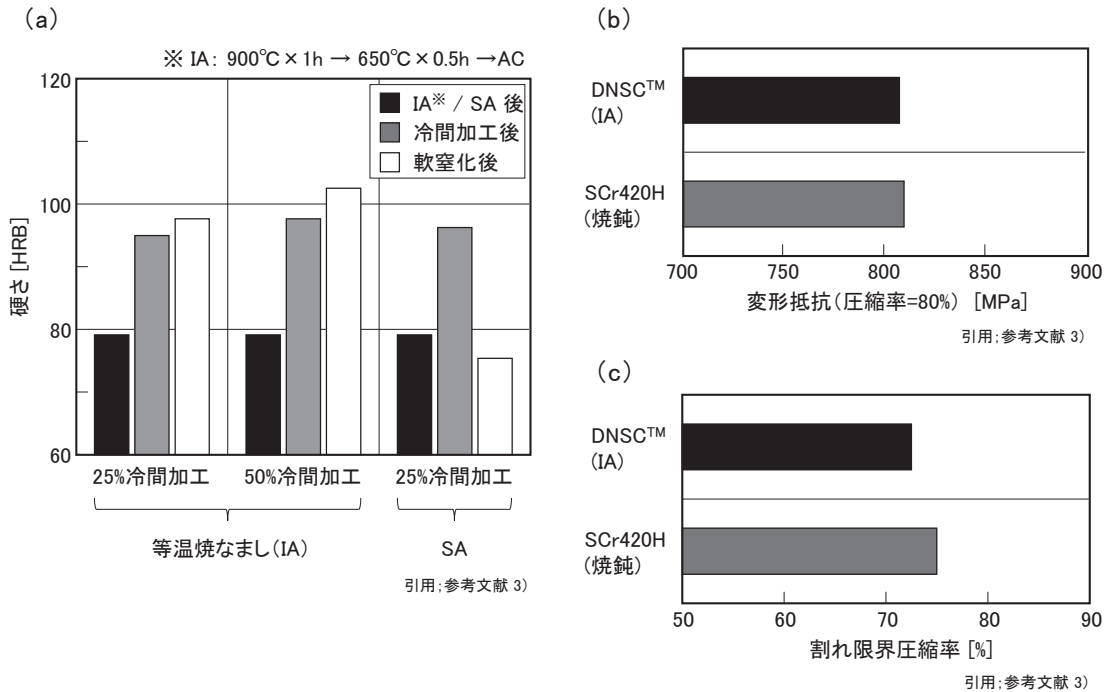


図 3 (a) DNSC™の各工程における硬さ、(b) 変形抵抗、(c) 割れ限界圧縮率

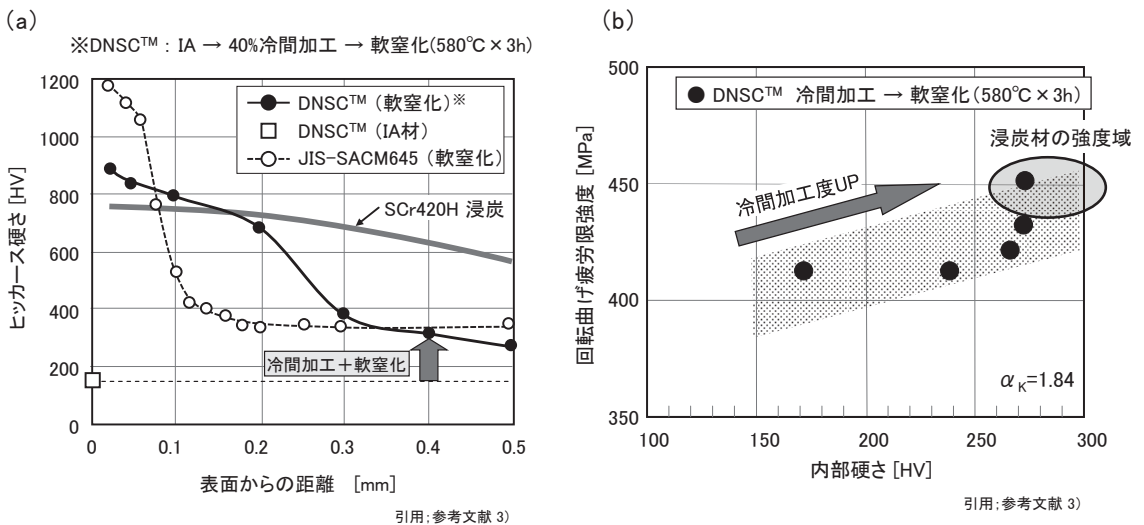


図 4 (a) 軟室化後の硬さ分布、(b) 軟室化後の回転曲げ疲労限強度と内部硬さの関係

冷間圧縮における割れ限界率を示すが、DNSC™のIA材は、JIS-SCr420Hと同等の冷間変形能を有している。

## (2) 強度特性

図4(a)にDNSC™のIA後に40%冷間加工を施したものとJIS-SACM645の軟室化処理後の硬さ分布を

JIS-SCr420Hの浸炭材と併せて示す。JIS-SACM645はAlが多量に添加されているため、1,000HV以上の非常に高い表面硬さが得られるが、硬化層深さが浅いため高い疲労強度を得難い。一方、DNSC™は、Al、Cr、Vを調整することで、JIS-SACN645よりも深い硬化層が得られ、従来の窒化・軟室化

鋼の欠点が改善されている。また、表面硬さについては、JIS-SACM645には及ばないもののJIS-SCr420Hよりもはるかに高い900HV程度の硬さが得られる。

図4(b)にDNSC™の内部硬さと軟窒化後の回転曲げ疲労限度の関係を示す。ここでの内部硬さは、冷間加工度により調整している。また、回転曲げ試験片の切欠係数は1.84であり、モジュール2の歯車の歯底における応力集中を考慮している。本図が示すように、内部硬さが増加するに伴い疲労限度は上昇し、約250HV以上の内部硬さとする事で浸炭品と同等の疲労強度を得ることができる。また、処理時間を延ばして硬化層を深くすることにより、更なる高強度化も可能である。一方、歯面強度に関しては、浸炭歯車ほどの硬化層深さは得られにくいことから、高い面圧のかかる歯車では浸炭品よりもケースクラッシングが発生しやすく低寿命となる場合がある。しかし、ケースクラッシングが起らない面圧レベルの歯車の場合は、通常はピッチングによる歯面損傷となるが、DNSC™では、浸炭品と同等以上の歯面損傷寿命を得ることができる。

## むすび

冷間鍛造可能な高強度窒化・窒化用鋼DNSC™の主要特性について紹介した。DNSC™は、一部の自動車用歯車で実用化されており、ユーザーのコスト低減に貢献している。今後は、仕上げ加工の省略、あるいは大幅な低減が可能といった点か

ら、電動車を中心に低コスト歯車用鋼としてさらなる適用拡大が期待できる。

窒化・軟窒化が適用される自動車用部品は、これまで小型軽量化、低コスト化が指向されてきた。これら要望に応えるべく、DNSC™を始め、様々な高強度材、低廉材<sup>5)~8)</sup>が開発されてきた。一方、プロセス側でも、窒化ポテンシャル制御を一例に高強度化<sup>9)</sup>やランニングコスト低減<sup>10)</sup>技術が開発されてきた。自動車部品における小型軽量化、低コスト化は、今後より一層求められると想定されるが、窒化・軟窒化技術はこれを実現するに十分なポテンシャルを有していると考える。鋼材、プロセス両面からの継続的な技術進展と共に、自動車部品の進化へのさらなる寄与を期待する。

## 参考文献

- 1) 宮本吾郎監訳：鉄の窒化と軟窒化、(株)アグネ技術センター (2011)
- 2) 渡辺陽一：第59回 日本熱処理技術協会講演大会 講演概要集、p. 81 (2004)
- 3) 製品紹介：電気製鋼、vol. 75、p. 69 (2004)
- 4) 渡辺幹、上野英生、福住達夫：三菱製鋼技術報、Vol. 34、p. 1 (2000)
- 5) 加藤公輔、木村和良、諏方悟、川口大二、村上敦：電気製鋼、vol. 81、p. 133 (2010)
- 6) 山崎歩見、宮崎貴大、増田大樹：電気製鋼、vol. 84、p. 39 (2013)
- 7) 今高秀樹、祐谷将人、田中康介、小林厚、前田晋：日本製鉄技報、vol. 406、p. 8 (2016)
- 8) 製品紹介：JFE技報、vol. 39、p. 64 (2017)
- 9) 平岡泰、石田暁丈、梅澤修：熱処理、Vol. 57、P64 (2017)
- 10) 河田一喜：熱処理、Vol. 49、P64 (2009)

# 5. 建設機械部品の窒化処理による摺動性向上

日立建機(株) パワー・情報制御プラットフォーム ほうき  
フォーム事業部 機器生産技術部 主任技師 孟 凡輝

## まえがき

建設機械の油圧機器部品では、多くの場合、表面硬化処理が施され、疲労強度、耐摩耗性の向上により、使用寿命、信頼性の向上が図られている。表面硬化処理には大きく分けて、マルテンサイト変態を伴う高周波焼入れ、浸炭焼入れや浸炭窒化焼入れと、マルテンサイト変態を伴わない窒化処理、加工硬化を用いるショットピーニングやショットプラストに分けられる。

マルテンサイト変態を伴う方法のうち、高周波焼入れは、誘導加熱により部品表面のみを加熱してオーステナイト化し、直ちに焼入れることで表面層のみを硬質なマルテンサイト相とする。浸炭焼入れは、処理品をFe-C二元状態図におけるオーステナイト域(約1,123~1,223K)に昇温後、種々の手段を用いて表面から炭素を浸透拡散させ、表面部を高炭素濃度のオーステナイト相とした後、焼入れすることで表面に高硬さの高炭素マルテンサイト相を形成させる。浸炭窒化焼入れは、浸炭焼入れと同様に、オーステナイト域に昇温後、炭素と同時に窒素を浸透拡散させるものであり、窒素の浸入によって表面付近のマルテンサイトの変態開始温度が低下するため、焼入れ温度を低くすることができ、ひずみの低減が図られる<sup>1)</sup>。また、ショットピーニング、ショットプラストは常温において鋼表面に鋼球を高速で衝突させることにより、その表面部を加工硬化させるものである<sup>2)</sup>。

これらの表面硬化処理に対して、窒化処理はFe-N二元状態図におけるフェライト温度域(約773~873K)で、表面より窒素を浸透拡散させ、表面部に鉄窒化物からなる化合物層、その内部に窒素の固溶強化や合金窒化物の析出強化によって硬化した拡散層を形成させる<sup>3)</sup>。化合物層の形成により高い表面硬さ、耐焼戻し軟化抵抗、およびマルテンサイト変態を伴わないための低ひずみといった特性を得られる窒化処理では、建設機械の

油圧機器部品の求める特性とよく合うため、ほかの表面硬化処理よりも多く適用されている。

## ◇ 窒化組織とその特性

ドイツKrupp Steel WorksのFry博士は、1923年に窒化に関する最初の論文を発表し、高温において窒素は非常に鉄中に溶けやすいこと、合金元素の添加が冶金学的、また機械的性質に大きく影響を与えることを発見した<sup>4)</sup>。1930年に、ドイツのLehrerは、種々の分圧比のアンモニア-水素混合ガスと鉄の微粉末を平衡させ、Fe-N系における各種の相と温度の関係を磁気的な方法によって分析した結果、温度とアンモニア、水素の分圧により、 $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\gamma'$ および $\epsilon$ の各相の領域が明瞭に区分できることを明らかにした<sup>5)</sup>。現在では、アンモニアと水素の分圧から算出する窒化ポテンシャルにより、純鉄の窒化において、各温度で生成する相がまとめられ、これはLehrer図と呼ばれている<sup>6)</sup>。窒化ポテンシャル算出のもとになるアンモニア分解の反応式を式1に、窒化ポテンシャルの算出式を式2に示す。ここで、 $K_N$ は窒化ポテンシャル、 $P_{NH_3}$ はアンモニアの分圧、 $P_{H_2}$ は水素の分圧である。



$$K_N = \frac{P_{NH_3}^3}{(P_{H_2})^2} \quad (式 2)$$

図1に窒化物生成元素を含む鋼を窒化した際の窒化組織とその特性および機能の模式図を示す<sup>7)</sup>。窒化処理時における窒化ポテンシャルが十分に高い際には、処理品の最表面に、主に鉄窒化物( $\gamma'$ 、 $\epsilon$ )からなる化合物層が形成され、その内側には光学顕微鏡レベルで観察できない微細な窒化物が母相中に析出し、硬さが大きく上昇する拡散層が形成される。さらに内部は窒素が未だ拡散していない未窒化領域である。材料および窒化条件によって、化合物の中にボイドが生成する場合もある。

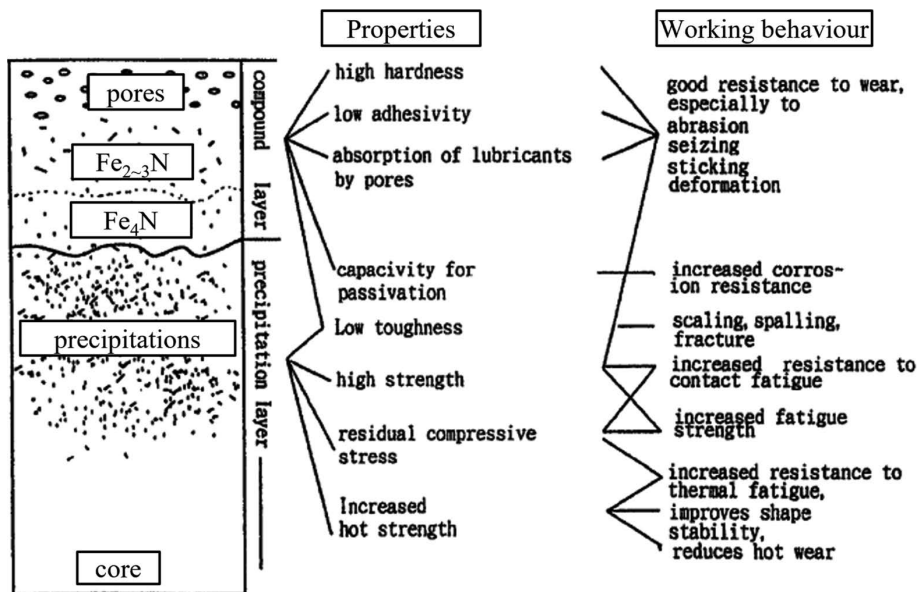


図 1 窒化組織とその特性および機能の模式図

最表面に生成する数 $\mu\text{m}$ ～数 $10\mu\text{m}$ の化合物層の高い硬さ、低い凝着性、不動態機能およびボイドによる貯油機能により、処理品の耐焼付き性、耐摩擦摩耗性および耐腐食特性が向上する。その内部に生成する拡散層は、高い強度、高い圧縮残留応力および耐焼戻し軟化抵抗により、疲労強度と高温強度が向上する。

#### ◇ 建設機械部品の摺動性向上

建設機械に搭載される油圧ポンプと油圧モータの部品であるシリンダブロック（以下シリンダ）とピストンなどは窒化処理が適用されている。近年のますます高くなる摺動性の要求に応えるため、窒化処理プロセスの高度化開発を行っている。

##### 1. 基礎検討

窒化処理は、浸炭焼入れや高周波焼入れなどの他の表面硬化処理と異なり、部材の表面に化合物層が形成される。化合物層は硬いうえ、セラミックスに類する物性を有することから、相手材料との間では、凝着や焼付きが発生しにくく、摩擦摩耗特性に優れることが知られている<sup>8)</sup>。

これまでに、窒化処理により形成される化合物層の摩擦摩耗特性に関する研究が多くなされた<sup>9)~12)</sup>。しかし、これらの研究は、化合物層の有無、窒化処理におけるプロセスパラメータおよび化合物層

の厚さの影響について検討されているが、化合物層を構成するそれぞれの相 ( $\gamma'$ ,  $\epsilon$ ) およびボイドが摩擦摩耗特性に及ぼす影響はよく調べられていない。一方、2006年ごろに、従来アンモニアガスの強腐食性のため、測定が難しいとされてきた窒化中の雰囲気測定可能なセンサー<sup>13), 14)</sup>が開発された。このようなセンサーを用いることで、レーラー図<sup>15)</sup>を参照しながら、部材表面の化合物層を作り分けることができるようになるため、鉄窒化物からなる化合物層の特性に再び注目が集まっている<sup>16)</sup>。

そこで、基礎検討として、純鉄や純鉄の中にCr、Al、Moなどを含まれる二元合金を用いて、上記センサーを適用したうえで、ガス窒化処理におけるアンモニアガスと水素ガスの流量を変えることにより窒化ポテンシャルを制御することで、化合物層の制御を試みた。さらに、作成した種々な化合物層構成の一部に対して、摩擦摩耗特性を評価した。その結果、窒化ポテンシャルを変えることで化合物層組織が大きく異なる $\gamma'$ 単層、ボイドの少ない $\epsilon+\gamma'$ およびボイドの多い $\epsilon+\gamma'$ の試料を作成することができた。表面硬さは、 $\gamma'$ はボイド量低減とCr添加によって、 $\epsilon$ はボイド量の低減によって増加する。さらに、摩擦摩耗特性を評価した結果、特にボイドの影響が大きいことが分かつ

た。ポイド面積率が少ない場合には、ポイド量が增大するほど摩擦係数は低減する。これはポイドの貯油効果によるものと考えられる。一方、ポイド面積率が一定以上では逆にポイド面積量が増加するほど摩擦係数が增大する。これはポイド剥離が促進されるためと考えられる<sup>17)</sup>。

## 2. 油圧ポンプと油圧モータの部品への適用

基礎検討の結果をもとに、図2に示すような油圧ショベルに備えられる油圧ポンプと油圧モータの部品の化合物層制御に取り組んだ。この図は可変容量型斜板式アキシャルピストンポンプ（以下、斜板式ポンプという）である。斜板式ポンプは、外殻を形成するケーシングとケーシングの中央部において軸線周りに回転可能に設けられた回転軸、および回転軸の回転に伴って回転するシリンダブロック（以下シリンダという）と、それに收容されるピストンを備えている。ピストンがシリンダ内で往復移動する間、ピストンには回転軸から遠心方向側（半径方向外側）へ向かう遠心力が作用することにより、ピストンがシリンダ内側の円筒面に片当たりしながら摺動するので、シリンダとピストンの摺動面に対して高負荷がかかった状態となっている。

シリンダとピストンの製作工程では、図3に示

すように、シリンダとピストンの母材に対して鍛造及び機械加工を行った後、窒化処理を施す前に洗浄及び酸化などの工程を経て窒化処理を実施する。シリンダとピストンの母材はいずれも0.35重量（wt）%以上の炭素（C）と約1%のCrを含有

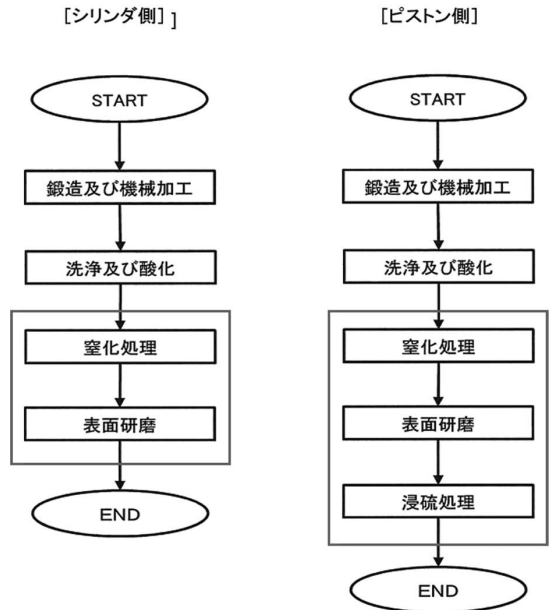


図 3 シリンダとピストンの製作工程（従来）

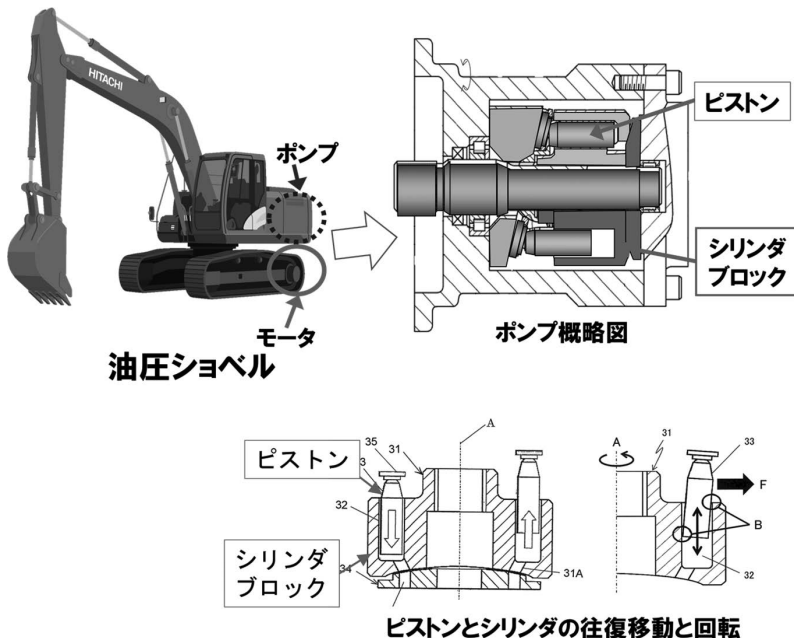


図 2 油圧ショベルに備えられる斜板式ポンプの模式図

する合金鋼である。よい摺動性を得るためには、シリンダは窒化後に表面研磨を行い、表面の窒素の過固溶によって形成される多孔質な層を除去することで緻密な化合物層だけを残し（強靱層）、ピストンは窒化後に低温浸硫を行い、表面に馴染み層を設ける。しかし、このような工程では複雑になっているうえ、原価アップにもつながっている。

そこで、前項の基礎検討をもとに、シリンダとピストンの窒化処理プロセスを高度化することで、表面研磨や低温浸硫のような後工程がなくても、強靱層と馴染み層を窒化処理工程で設けるように取り組んだ。

図4の左図に示すように、シリンダでは最表面に強靱層を形成するために、炉内の窒化ポテンシャルを0.3以上1.0未満に設定し、表面側から緻密な構造を有する $\gamma'$ 層と拡散層を形成する。一方、図4の右図に示すように、ピストンは最表面に馴染

み層を形成するため、炉内の窒化ポテンシャルの範囲を1.0以上4.0未満に設定し、表面側から多孔質構造を有する $\epsilon$ 層、緻密な構造を有する $\epsilon$ 層および $\gamma'$ 層ならびに拡散層を形成する。これにより、シリンダの $\gamma'$ 層が強靱性層として機能し、ピストンの $\epsilon$ 層が馴染み層として機能する。

## むすび

建設機械部品の窒化処理による摺動性向上の取り組みを紹介した。部品の高機能化、高寿命化および高信頼性化は今後とも強く求められる。加えて、素材および製造過程の省資源化や省エネルギー化に対応するためには、窒化処理のさらなる高度化および材料面からの対応が必要である。

## 参考文献

- 1) G. Krauss, STEELS Processing, Structure, and Performance, ASM International, Materials Park, Ohio, pp. 427-466 (2005)
- 2) ショットピーニング技術協会、金属疲労とショットピーニング、現代工学社、pp. 6-8 (2004)
- 3) K-E Thelning, Steel and its heat treatment, 2<sup>nd</sup> ed., Butterworths, London, pp. 494-543 (1984)
- 4) A. Fry, Stahl and Eisen, 43, p. 1271 (1923)
- 5) E. Lehrer, Über das Eisen-Wasserstoff-Ammoniak-Gleichgewicht, Zeitschrift für Elektrochemie, 36, p. 383 (1930)
- 6) E. Lehrer, Z. Elektrochem, 36, pp. 383-392 (1931)
- 7) Spies, H.-J., Einfluss des Gasnitrierens auf die Eigenschaften der Randschicht von Eisenwerkstoffen, Freiburger Forschungshefte B 249, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, pp. 8-21 (1986)
- 8) 竹内栄一：材料技術者のためのトライボロジー、横書店、p. 29 (2002)
- 9) G. Straffelini, G. Avi and M. Pellizzari, Wear, 252, p. 870 (2002)
- 10) 石塚はる菜、渡邊陽一、竹山雅夫：トライボロジスト、65、pp. 440-449 (2020)
- 11) 石塚はる菜、平井勇也、青木智幸 [他]、渡邊陽一：熱処理、55、pp. 196-204 (2015)
- 12) 古君修、片淵絃希、荒牧正俊、KOZIN Muhammad、大上悟、吉田幸樹、成田一人、山田直矢：熱処理、55、pp. 172-180 (2015)
- 13) Lohrmann, M., Der Einsatz neuer Ofen-und Verfahrenssensoren in Wärmebehandlungsofen, IPSEN-Kundentagung 23/24. Mai, Düsseldorf (2002)
- 14) 藤原雅彦：熱処理、45、p. 311 (2005)
- 15) E. Lehrer, Z. Elektrochem, 36, p. 383-392 (1931)
- 16) 河田一喜：熱処理、49、pp. 64-68 (2009)
- 17) 孟凡輝：東北大学博士論文 (2015)

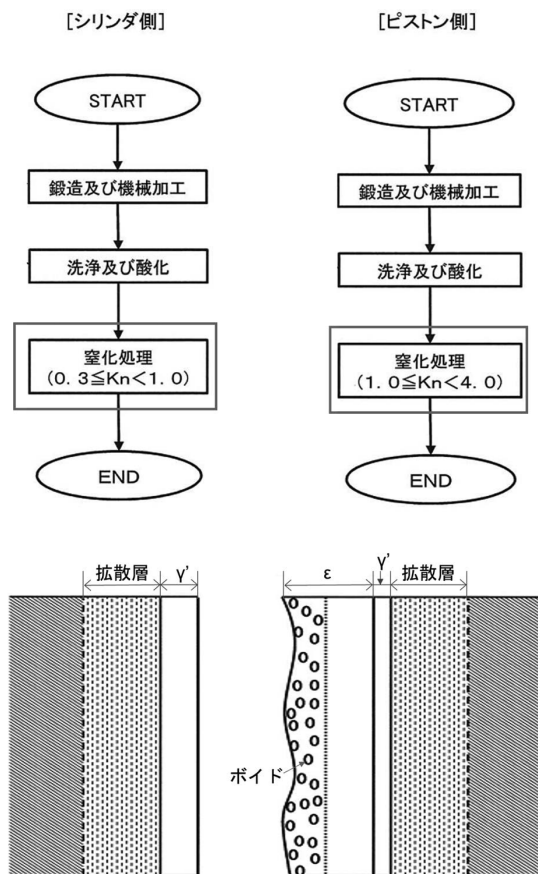


図4 シリンダとピストンの製作工程とその窒化組織（開発）



# 6. 金 型

日立金属工具鋼(株) 小 林 寛 和  
技術部 熱処理技術グループ

## ま え が き

ダイカスト製品の製造現場では生産性向上が命題となっている。中でもサイクルタイム短縮化は最も重要視されており、各社共様々な手段を講じてサイクルタイム短縮化の活動を実施している。この様な活動の中でダイカスト金型・製造設備等に加わる負荷は徐々に大きくなり、サイクルタイム短縮化に比例して金型・設備の寿命は低下傾向にある。加えて昨今のEV化によるアルミ材強度向上等、より過酷な casting 条件となる事で早期寿命を迎える可能性が出てきている。こういった寿命低下の問題に対し、構造変更や使用中の鋼材の材質・表面処理の変更等にて金型・設備の寿命維持・向上を図っているが、本稿ではダイカスト製品製造設備の一つであるダイカストスリーブ・チップにおける窒化の適用事例と、窒化との組合せによる寿命向上効果について紹介する。

### ◇ ダイカストスリーブ

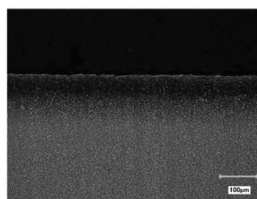
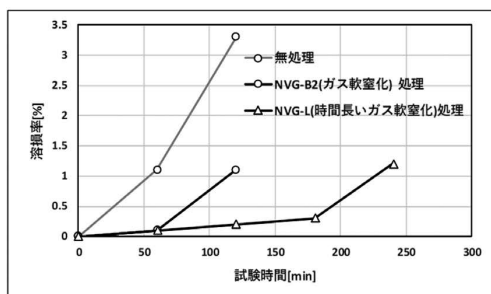
ダイカスト casting において溶けたアルミ等の溶湯を金型の中に casting する際、一度円筒形状の中に溶湯を入れ、その後注射器の要領で投入した溶湯を押し出し金型内に casting するが、この円筒形状の構造物をスリーブと言う。スリーブは溶融した金属を湯口と言われる部分にて受けるが、温度が最も高い状態の溶融金属を受けるため、湯口下で溶損が発生

し寿命となる事が多い。この溶損を抑制する事がスリーブの寿命向上につながる。

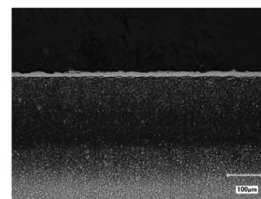
### ◇ ダイカストスリーブへの窒化処理（一般）

図1に母材DAC<sup>®</sup> (SKD61相当) で表面処理無の試験片と、ガス軟窒化処理(弊社処理名: NVG-B2処理、窒化化合物層 1 $\mu$ m $\sim$ 、窒化拡散層 0.1mm $\sim$ 、表層最高硬さ 1,000HV $\sim$ )、処理時間が長いガス軟窒化処理(弊社処理名: NVG-L処理、窒化化合物層 8 $\mu$ m $\sim$ 、窒化拡散層 0.25mm $\sim$ 、表層最高硬さ 1,000HV $\sim$ ) それぞれを施工した各試験片にて、アルミ溶損試験を実施した結果を示す。加えてNVG-B2処理とNVG-L処理後の断面マイクロ組織写真についても示す。

アルミ溶損試験(溶湯: AC4C、温度: 700 $^{\circ}$ C、動作: 上下ストローク30mm 90回/min)の結果から、無処理と比較しガス窒化処理を実施する事で、試験時間が長時間側へ移動した際、溶損率が低下している事が分かる。また、窒化処理時間を長くし窒化化合物層を厚く、窒化拡散層を深くしたガス軟窒化であるNVG-L処理では、通常のガス軟窒化より更に溶損率が低下し、耐溶損性が向上している事が分かる。また、図1に各窒化処理後の断面マイクロ組織写真を比較掲載しているが、NVG-L処理の窒化化合物層はNVG-B2処理と比較し、約5倍前後、窒化拡散層は約2倍以上となっており、耐アルミ溶損対策として、窒化化合物層や拡散層が、厚い



NVG-B2処理 (ガス軟窒化処理)



NVG-L処理 (時間長いガス軟窒化処理)

図 1 無処理、NVG-B2処理、NVG-L処理 溶損試験結果とNVG-B2処理とNVG-L処理断面マイクロ組織写真

窒化処理の方が有効であることが分かる。これらの結果から湯口下の溶損対策として、弊社ではスリーブに対してNVG-L処理を採用し施工をしている。

#### ◇ ダイカストスリーブへの窒化処理（応用）

弊社ではガス軟窒化以外にもガス浸硫窒化処理も実施しており、これらの処理を組み合わせる事による耐溶損性向上の取組みも行っている。図2にNVG-L処理とガス軟窒化と、浸硫窒化処理とを組み合わせた断面マイクロ組織写真を示す。ガス軟窒化と浸硫窒化処理を組み合わせた処理ではNVG-L処理と比較し、窒化合物層、窒化拡散層共に増えていることが分かる。前述図1で示した様に、窒化合物層や窒化拡散層が増える事で耐溶損性が向上していることから、ガス軟窒化とガス浸硫窒化処理を組み合わせる事で、NVG-L処理よりも高い耐溶損性効果が期待出来る。

他にも窒化処理とは異なるがNVG-L処理後に耐アルミ凝着性・耐アルミ溶損性のあるガス雰囲気での処理（弊社処理名：EX-G処理）を組み合わせる事で、通常のNVG-L処理スリーブでの溶損寿命に対して2倍以上の耐溶損効果が得られることが実証されており、『EXスリーブ』として販売をしている。図3に母材DAC<sup>®</sup>へNVG-L+EX-G処理を実施した試験片にてアルミ溶損試験を実施した結果

と、NVG-L処理したスリーブとNVG-L処理+EX-G処理したスリーブで実際に使用した1,650tスリーブ（寸法：φ300×1,020mm）の40,000ショット製造後の湯口下の溶損状態を比較した写真を示す。

溶損試験結果においてNVG-L処理を実施した試験片よりも、NVG-L+EX-G処理を実施した試験片において、試験時間が長時間となっても溶損率が低い状態のまま、継続している事が分かる。これはEX処理がより耐アルミ溶損性を向上させている事を示している。

また、図3の写真で示す様に、試験片による評価だけでなく、実際のスリーブの使用においても同じ製造条件（溶湯：ADC12、溶湯温度：670～680℃、冷却：湯口直下水冷無し）で使用しNVG-L処理と比較した場合も、NVG-L+EX-G処理の方が明らかに耐溶損性による差が確認できた。上記結果から、スリーブ長寿命化の観点で現在多くのお客様に『EXスリーブ』をご使用していただいている。

上記以外にも今後、EV化におけるアルミの高強度化や、複雑形状のダイカスト製品への対応による溶湯温度上昇等、より過酷な製造条件下でのスリーブ使用の可能性が高まる事が予想されるため、弊社ではNVG-L処理（時間の長いガス軟窒化）と特殊合金といった素材との組み合わせによる耐溶損スリーブも製作している。

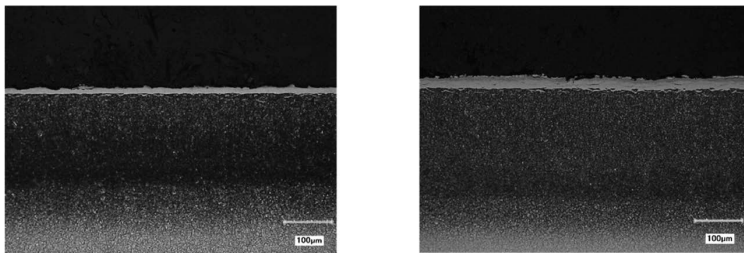


図 2 NVG-L処理（左）とNVG-L処理と浸硫窒化の組み合わせ処理（右）断面マイクロ写真

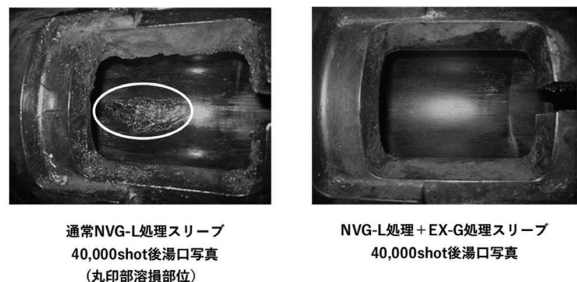
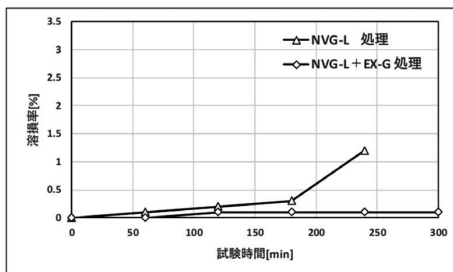


図 3 NVG-L処理、NVG-L+EX-G処理 溶損試験結果と各表面処理におけるスリーブ使用後の湯口写真

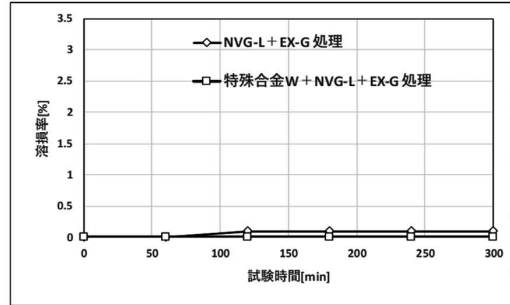
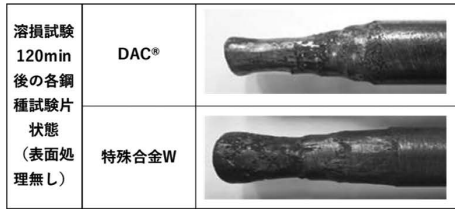


図 4 DAC®、特殊合金W 各鋼種における溶損試験後試験片写真とDAC®、特殊合金Wの各母材へNVG-L+EX-G処理した試験片の溶損試験結果

図4に各鋼種における耐溶損性試験後の結果と、特殊合金Wと表面処理とを組み合わせた際の溶損率の結果を示す。

写真は通常スリーブに使用している鋼材DAC®(SKD61相当)と特殊合金Wにて試験片を製作し、表面処理無しにてアルミ溶損試験(溶湯:AC4C、温度:700℃、動作:上下ストローク30mm 90回/min)を実施し、120min後の試験片の状態を示している。DAC®と比較し特殊合金Wでは耐アルミ溶損性がより良好になっている事が分かる。

また、この特殊合金WにNVG-L処理(処理時間が長いガス軟窒化処理)と、耐アルミ凝着性・耐アルミ溶損性のあるガス雰囲気処理(弊社処理名:EX-G処理)を組み合わせた表面処理を実施し、試験時間毎の溶損率を比較した溶損試験結果では、DAC®にNVG-L+EX-G処理した試験片よりも特殊合金WにNVG-L+EX-G処理した試験片の方が、より溶損率が減少し、耐溶損性が向上している事が分かる。この試験結果より、弊社では通常のアルミダイカストの鑄造条件より、更に厳しい鑄造条件下での使用を想定したアルミダイカストスリーブ製品として、ガス軟窒化処理と特殊合金Wを組合せた『Wスリーブ』を製造している。

#### ◇ チップ

スリーブ内の溶融アルミ等を金型内に押出して鑄込む際、スリーブ内径に沿って摺動する円筒形状の構造物をいう。スリーブ内径を摺動する為、耐摩耗性だけでなく摺動性も要求される。

#### ◇ チップへの窒化処理(一般)

チップはスリーブ内を繰り返し摺動する為、スリー

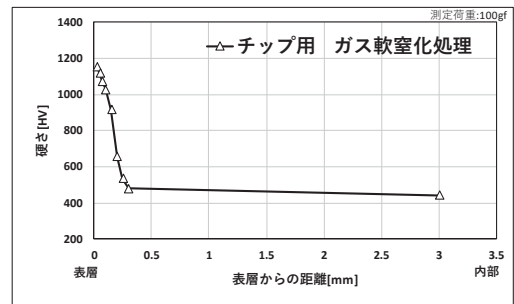


図 5 チップ用 ガス軟窒化処理における表層から内部へ向かっての断面硬さ分布測定結果

ブ内径とチップ外周側が擦れて摩耗が発生する。その部分に溶湯が差し込み・焼付き等が生じることで抵抗となりカジリが発生する場合がある。このカジリの発生原因となる摩耗を抑制するため、弊社では基本的にスリーブと同等程度のガス軟窒化処理を実施している。図5にDAC®(試験片硬さ:45±1HRC)へチップ用ガス軟窒化処理を実施した際の、断面表層から内部に向かって測定をした硬さ分布結果を示す。最表層近傍は1,000HV以上となっており、母材硬さよりも硬さを上げる事で摺動による耐摩耗性を向上させている。

#### ◇ チップへの窒化処理(応用)

前述でも述べたようにチップはスリーブ内を繰り返し摺動するが、摩耗によるカジリだけでなく、摺動によるカジリも発生する事から、耐摩耗性だけでなく、摺動を出来る限り潤滑にする必要性がある。通常はチップ潤滑剤が塗布される事で摺動によるカジリを抑制しているが、潤滑剤が上手くチップとスリーブとの間に付着・保持されない等の問題でカジリが発生する事がある。この潤滑剤

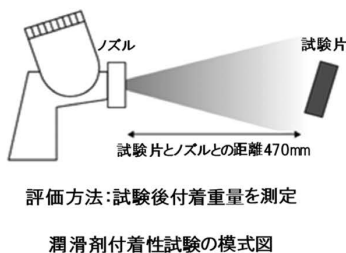
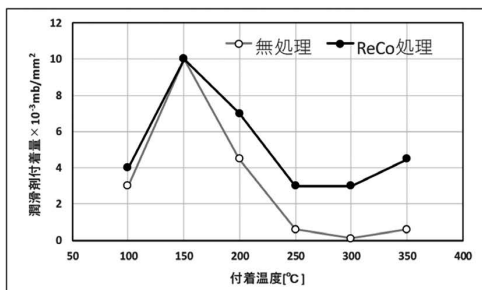


図 6 潤滑剤付着性試験結果

付着不足によるカジリ問題に対して弊社では潤滑剤付着性が良くなる様にガス窒化処理（弊社処理名：ReCo処理、窒化合物層 10 $\mu$ m～、窒化拡散層 0.2mm～、表層最高硬さ 1,000HV～）をチップに処理し『ReCoチップ』として製品化している。図6に各試験温度での潤滑剤付着性試験の結果を示す（潤滑剤：白色系高分子潤滑剤 10%水溶液、噴霧量：2.0ml/s、噴霧時間：2s、評価方法：試験前後での付着重量測定）。低温側では無処理とReCo処理した試験片で大きな差は見られないが、200 $^{\circ}$ Cを超える温度域でReCo処理において潤滑剤の付着量が多くなり差が見られた。この結果は潤滑剤が使用される高温域でも潤滑剤がしっかりと保持される事を示しており、摺動によるカジリに対して有効である事を示している。

また、この摺動によるカジリは特にスリーブ・チップの使い始めの初期段階で発生することが多いが、ReCo処理は潤滑剤の保持だけでなく、表面に自己潤滑性のある層が存在しており、初期の摩擦係数を低くする特性がある。図7に無処理とReCo処理を実施した試験片にて摩擦係数を比較したグラフを示す（試験：ピンオンディスク摩擦摩耗試験、試験温度：常温、潤滑剤：無、荷重：200g、回転半径：5mm、相手材：SCM435）。無処理の静摩擦係数を1とした場合、ReCo処理を実施した試験片では0.6と約4割程度低い事が分かる。この結果はチップの動き出し時の抵抗が小さくなる事を示し、ReCo処理をする事で初期のカジリを抑制出来る可能性がある事を示している。

上記より、潤滑剤の付着性の向上と自己潤滑特性の2つの効果によるカジリ不良対策として是非『ReCoチップ』をご評価ご使用いただければと考える。

また今後チップにおいてもスリーブ同様窒化処

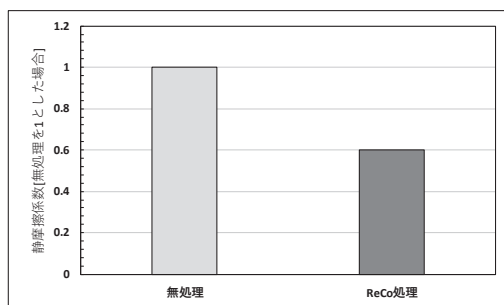


図 7 無処理、ReCo処理における静摩擦係数の比較結果

理の改善や材料・構造等様々なアプローチから、お客様のお困り事を改善出来る製品ラインナップを取り揃える予定としている。

## むすび

今回、ダイカストスリーブ・チップへの、弊社ガス軟窒化の適用事例についてご紹介させていただいた。また、ガス軟窒化の応用として、ガス軟窒化と他表面処理との組合せや、ガス軟窒化と鋼材との組合せで各種特性について向上する事も述べさせていただいたが、冒頭でも記載したように、近年は casting 条件だけでなく、 casting する材質や製品構造等、日々刻々と変化しており、そういった中でお客様が抱えている問題や、お困り事も多種多様化してきている。この様な問題に対して、さまざまな視点から適切でスピード感のある対応が出来るような、ものづくりが必要であり、弊社においても、お客様のご要望・ご要求をしっかりと聞きし、今後も窒化処理含め、様々な改善・改良を実施してより良い製品のご提案が出来る様、取り組んでいきたいと考えている。

\*DACは日立金属株式会社の登録商標です。

# 7. 射出成形部品

東洋機械金属(株) 技術本部 田中博子  
基盤技術開発部 開発グループ 主任技師

## まえがき

射出成形機における部材への窒化処理は、高分子物質を主原料とする樹脂材料（プラスチック）を可塑化する部品であるスクリュウ加熱シリンダに適用されており、主に耐摩耗性の向上を目的としている。樹脂材料は、加工性に優れることから様々な用途開発が進み、今日までに目覚ましい発展を遂げてきた。近年では製品の軽量化を目的とした成形品の高強度化や高機能化が求められ、各種添加剤が配合された樹脂材料が一般的に用いられるようになってきているが、その添加剤には金属の摩耗や腐食の要因となるものも多い。射出成形機における可塑化部品は、高温・高圧環境下で回転や前後運動により互いに摺動し、溶融樹脂が流動しながら接触するため、機械的特性に加えて耐摩耗性と耐腐食性が重要な機能となる。そのため、部品の機能性向上のためには表面処理や改質技術の活用が有効となる。

そこで本稿では、射出成形機における窒化処理を用いた部品について、その目的や適用事例を以下に紹介する。

## ◇ 射出成形機と窒化適用部品

射出成形機とは、プラスチック製品を成形加工する機械であり、①樹脂材料をホッパに供給し、②ヒータにより加熱された筒（加熱シリンダ）の中をスクリュウを回転させて前方に送りながら溶融し（可塑化）、③溶融樹脂を所定量計量した後金型に流し込み（射出）、④冷却固化させ、⑤金型を開いて製品を取出す、という一連の動作を繰り返す行うものである（図1）。射出成形機は、同じ製品の大量生産を目的とするため、繰り返しの安定性が求められる。溶融樹脂を安定して計量し、射出するためには、溶融樹脂が逆流しないよう部品同士の隙間が最小限かつ一定した状態を保つことが必要となる。しかし、樹脂材料の可塑化に使用される部品においては、溶融樹脂による腐食摩耗のほか、可塑化と射出のたびにスクリュウおよび先端部品が回転、前後に動く構造により加熱シリンダとの摩擦による摺動面の摩耗やかじりといった問題の発生も懸念される。部品が摩耗すると部品同士の隙間が増えることで溶融樹脂の逆流量も増えるため、一定した樹脂量を計量することが出来ず、計量時間が延びるなどといった状況が発生し、安

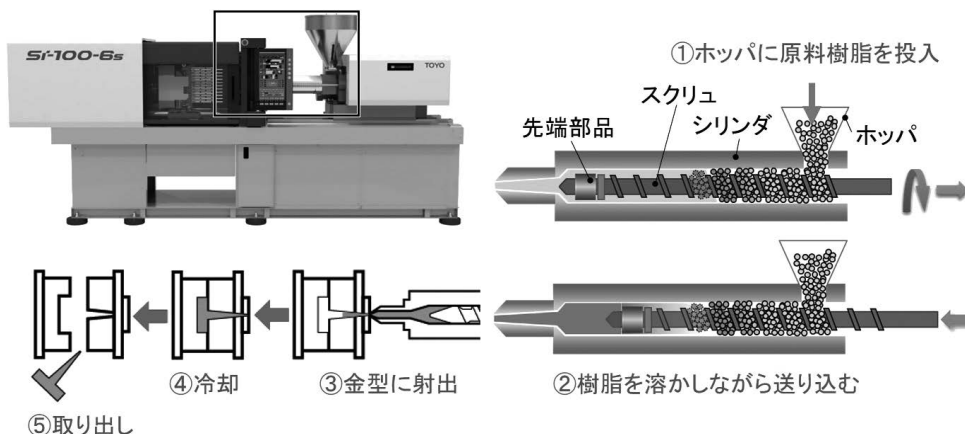


図 1 射出成形機の動作

定した成形が困難となる。また、部品がかじることによって製品への金属粉混入や、かじりが発生した部品の交換が必要となる場合もある。かじりとは金属同士の接触圧が高く、擦れた際に発生する摩擦熱により局部的に金属同士が凝着する現象で、多くの場合でどちらか一方の部品だけでなく両部品の交換が必要となるため、その損失は大きくなる。そこで、摩耗やかじり対策のひとつとして、安価で耐摩耗性や摺動性といった特性を持ち、低温処理のため変形が少なく加工面でもメリットのある窒化処理が加熱シリンダ、スクリュなどの部品に採用されている。窒化処理は炭素鋼など様々な鋼材に処理可能だが、鋼材表面をHv1,000程度に硬化させ、焼き戻し脆性を生じないようにするには窒素と相性良く結びつくアルミニウムのほかクロム、モリブデンといった合金元素が含まれた鋼材が適しているため、JIS規格にもあるSACM645が採用されている。

#### ◇ 窒化処理の種類

加熱シリンダ、スクリュの窒化処理にはイオン窒化（プラズマ窒化）を採用している。イオン窒化はガス窒化よりも処理時間が短く、使用する原料ガスも少なく無公害であるため、地球環境にも優しい処理方法である。また、加熱シリンダやスクリュのネジ部分の韌性低下や寸法変化を防ぐために窒化防止治具を用いることでグローを遮断することが可能で、容易に部分的な窒化防止が可能なのも大きなメリットである。さらには、製品の材質や用途に応じた最適な窒化処理条件の自由度が高く、酸化の影響を受けることなく表面硬化が可能であり品質の安定性も優れることから、処理材質の適用範囲が広いことも特徴である。

しかし一方で、最硬化層が数十ミクロンと浅く、下層には表面から製品中心部に向けた硬さ勾配が生じるため、最硬化層の摩耗が進行した後は摩耗の加速が早くなることがデメリットである。また、硬化表層には一般的に白層と呼ばれる鉄と窒素の化合物層が20 $\mu$ m程度形成される。この白層は硬度が高く耐腐食性もあるものの、脆く剥離しやすい性質をもつため、射出成形機の部品に使用するためには窒化処理後に研磨によって除去する必要があり、白層除去後に部品の最終寸法に仕上げられ

る。仮に白層を除去せずに部品を使用した場合は、成形中の衝撃、摩擦などにより欠けた白層の破片が製品に異物として混入したり、他の部品を摩耗させる要因ともなる。また、欠けた部品表面には凹凸が発生するため、樹脂の付着が発生しやすくなり、それが可塑化中に熔融樹脂に混入することで焼けや黒点といった成形不良につながることも考えられる。そのため、射出成形機の部品として使用するにはイオン窒化後の白層除去は必須となる。

#### ◇ 窒化処理部品の製造工程

##### ・加熱シリンダ（図2）

- 1) 素材：素材は熱処理された黒皮（製造過程で生成された酸化被膜がついた状態）の丸棒（SACM645）を使用。
- 2) 荒加工：黒皮で購入された丸棒の外径は、表面硬度や組織が一定ではなく不純物が多いことが考えられるため、まずは外径および端面を荒加工する。このとき、後で行う熱処理後の仕上げなどを考慮し、図面寸法より数ミリ残した状態としておく。
- 3) 焼鈍：残留応力の除去、組織の均一化のため熱処理を行う。ここで、部品を炉に入れる際には処理中に曲がりが出ないように立て置きが厳守となる。また、焼鈍には昇温から冷却時間までを含めると約1日かかる。
- 4) 穴加工：BTA方式（金属に深穴をあける切削加工方式のひとつ）で加熱シリンダの中心に穴を明け、ホーニング（表面仕上げ機械の一種）を用いて真円度および寸法を目標値に近づける。このとき、窒化処理後の白層除去のため研磨代を残した寸法とする。
- 5) 芯出し加工：BTAの加工製法上、穴には1,000mmごとに約1mmの曲がりが発生するため、穴が部品の中心となるよう穴を基準に外径の振れを取る。
- 6) 仕上げ加工：外径、ネジ部、ホッパ口、タップ穴などを仕上げ加工。ただし、外径は窒化処理後に寸法を整えるための研磨代を残した寸法とする。
- 7) イオン窒化：前処理として、ネジ部やタップ穴などは韌性低下や寸法変化を防ぐため

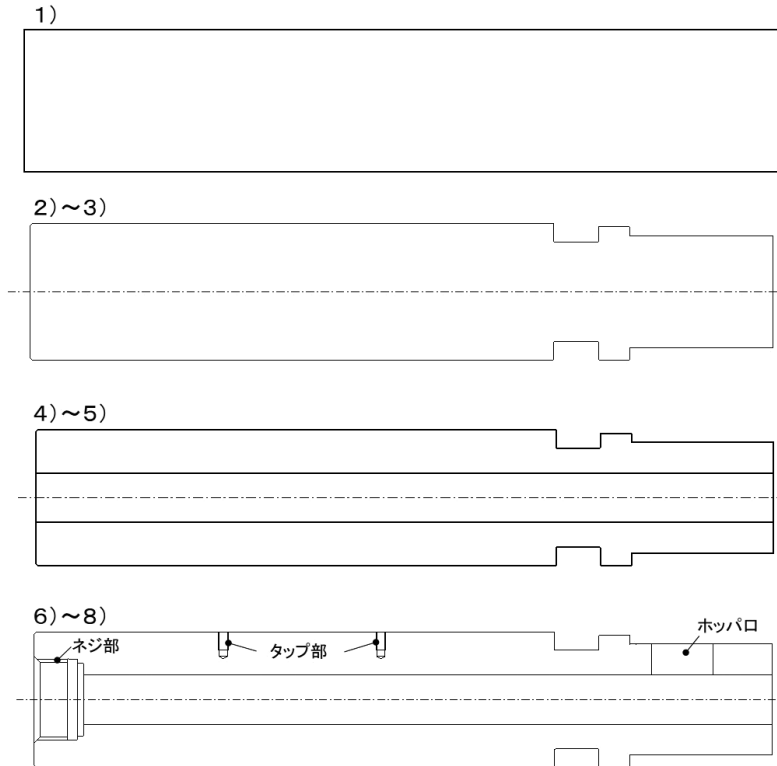


図 2 シリンダ加工 形状変化 (断面図)

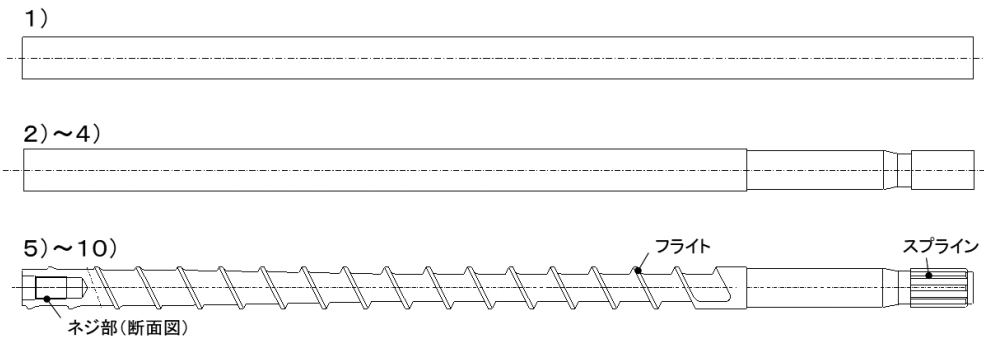


図 3 スクリュ加工 形状変化

窒化防止処理を行う。熱処理条件は窒化硬度Hv1,050以上となるよう設定。窒化処理に使用するガスはN<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>を1：1の割合で行っている。ここで、炉に部品を入れる際には曲がり防ぐために立て吊り厳守、部品同士の隙間が0.2mm以上ないとグロウが発生せず窒化が入らないため窒化防止治具を含め隙間を考慮してセッティングする、など注意が必要となる。この工程では窒化

処理開始から炉冷完了まで約3日かかる。

8) 窒化処理後の加工：窒化防止処理を除去後、白層を除去するため内径はホーニング、外径は研磨により最終寸法に仕上げる。

・スクリュ (図3)

スクリュの加工工程も大きくは加熱シリンダと同じだが、スクリュの加工では特に各工程で曲がりが出ないように進めていくことがポイントとなる。

- 1) 素材：素材は熱処理された黒皮の丸棒（SACM645）を使用。
- 2) 荒加工：黒皮を除去後、まずは外径を図面寸法より数ミリ残した状態で加工。
- 3) 焼鈍：残留応力の除去、組織の均一化のため熱処理を行う。
- 4) 1次加工：上記3)までの工程で発生した曲がりを取るため、旋盤にて外径、全長を加工後、研磨を行う。
- 5) 2次加工：旋盤にてスクリュの後部、先端部分を加工後、先端部品を取付けるネジ部の加工を行う。スクリュは可塑化時に右回転の動作を行うため、ネジは左ネジとなっている。
- 6) フライト加工：ネジ研削盤によりフライトを加工後、曲がりを取るため外径の研磨を行う。この時、外径は窒化処理後の白層除去のため研磨代を残した寸法とする。
- 7) スプライン加工：スプライン加工専用機にてスクリュ取付け部を等分に加工。
- 8) イオン窒化：前処理として、ネジ部は韌性低下や寸法変化を防ぐため窒化防止処理を行う。熱処理条件は加熱シリンダ同様に、窒化硬度Hv1,050以上となるよう設定。使用するガスはN<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>を1：1の割合で行っている。
- 9) 窒化処理後の加工：窒化防止処理を除去後、白層を除去するため外径を研磨で仕上げ、最終寸法に仕上げる。
- 10) 面粗度：バフ仕上げにて面粗度を整える。

#### ◇ 課題と展望

近年、金属材料から樹脂材料への置き換えが期待される製品が増え、成形品の高機能化が進んでいる。また、電気・電子機器の処分の際に人や環境に影響を与えず、リサイクルも容易にするため有害物質を規制したRoHS指令に対応した樹脂材料も増えている。そういった樹脂材料は溶融環境下では金属に対して腐食性を有することも多いため、樹脂流路に使用される部品には耐腐食性も必要となる。しかし、射出成形機に用いる窒化処理では、表層の化合物層を除去して使用することから十分な耐腐食性は発揮出来ないため、耐摩耗性と共に耐腐食性もあり、安価な硬化処理が求められる。

そのような中、最近では化合物層のない窒化処理技術（ラジカル窒化）の検討も進んでいる。窒化処理により化合物層が形成されないことで窒化処理後の後加工が不要となり、PVD法やCVD法などによる硬質皮膜を組み合わせた複合処理が可能となる。今後、窒化処理品と様々な被膜を組み合わせることで、部品の耐久性向上をはじめ、より付加価値の高い製品開発につながることを期待される。



# 業界のうごき

## サハシ特殊鋼、輸送機・食品分野で初受注 廃棄物の摩擦乾燥設備

サハシ特殊鋼は、産業廃棄物を処理し再資源化する摩擦乾燥設備を開発し、この採用拡大を図っている。医療機関向けに続いて大手輸送機器メーカー、食品処理工場への導入が決定。SDGs推進に向けた資源循環への注目が集まる市場環境も追い風に、今後も採用分野拡大に注力する。

世界的な環境意識の高まりを受けて2年前に環境関連事業へ参入。産業廃棄物を粉碎、摩擦熱を活用して乾燥・滅菌し、粉体をペレット化して燃料化する摩擦乾燥設備を開発した。NIPPON紙おむつリサイクル推進協会とともに高齢者施設や医療機関で使用済み紙おむつのリサイクルに乗り出し、2020年に愛知環境賞の優秀賞を受賞した。

大手輸送機器メーカーの採用に続き、3月に食品関連工場に納入し、玄米のもみ殻の乾燥粉末化、再利用に活用される計画。食品向けではフードロス・廃棄低減を狙った食品残渣処理の引き合いが強い。

(3月2日)

## 三和特殊鋼、健康経営優良法人に認定 3年連続、中期計画もスタート

三和特殊鋼は、経済産業省と日本健康会議が共同で顕彰する「健康経営優良法人2022（中小規模法人部門）」の認定を3年連続で受けた。勝野茂社長は「今年から新卒採用を再開した。3年連続の認定を求職者にアピールしていきたい」とする。

今回の認定に当たり過去2年間の取り組みを徹底。新たにコロナワクチン接種の当日と翌日の特別休暇制度を設けた。勝野社長は「社員の意識を高め、喫煙率をさらに下げるなど健康への取り組みを進めていきたい。コロナはまだ予断を許さないが、

収束に向かえば、ボウリングやゴルフなどの社内イベントを再開させ、コミュニケーションの向上を図り、社員が心身ともに健全な会社生活を送れるようにしたい」とする。

今期（2022年12月期）は3カ年の第5次中期計画をスタート。新卒者採用にも注力し、営業力強化、加工品販売強化を進め、利益率向上を図る。

(3月18日)

## テクノタジマ、ガス溶断機を更新 大物製品の一貫加工体制を強化

テクノタジマは、大物製品の一貫加工体制を目的とする設備増強を行った。本社工場のガス溶断機1台をリプレースし、本稼働をスタートした。極厚品の対応力を高めた溶断工程だけでなく各部門の強化や再構築、人材育成を中長期的に進めながら、ワンストップでの製品生産・供給体制に磨きをかける。

同社は主に本社工場で一次加工を、江南工場で機械加工、塗装・組立の下工程を手掛け、2拠点で一貫体制で年々生産実績を伸ばしている。本社工場はガス溶断設備6台、プラズマ切断機2台などで切板加工を行っているが、ガス溶断機の1基が導入から20年ほど経過、老朽化が進行していたため、新鋭機（小池酸素工業製）へ切り替えた。

有効切断範囲は幅2,600ミリ×長さ5,000ミリで、6～250ミリの板厚に対応する。極厚仕様の特性を生かして100ミリ以上の厚物切板を量産する方針。

(3月3日)

## 中島特殊鋼、車向け切断能力増強 北崎IC工場、設備4台増設へ

中島特殊鋼は、自動車向け棒鋼切断品の加工能力を引き上げる。主力拠点・北崎IC工場で今年度（2022年8月期）内に超硬丸鋸切断機4台を追加導入する方針を固めた。今後自

動車の挽回生産が始まり切断数量が増加した局面でも安定供給体制を維持するとともに、新規案件の獲得にも注力してさらなる実績拡大を目指す構えだ。

北崎IC工場は足元、自動車の生産調整に伴いフル稼働状態ではない。まだ部品調達難解消のめどは立っていないが、自動車メーカーが生産ピッチを上げた場合、能力が不足し残業対応が必要となる見通し。一方、これまで受注の増加に合わせて段階的に能力増強を進めたためスペースは手狭となっている。そこで一部機械の移設、レイアウト変更で設置場所を確保した上で、切断ラインを増設することを決めた。8月末にかけて3段階に分けて増強を進める。

(3月16日)

## ノボル鋼鉄、静岡支店に熱処理設備増設 真空熱処理炉3基など導入

ノボル鋼鉄は、静岡支店（静岡市駿河区）に真空熱処理炉3基を増設し、1月末に稼働を開始した。静岡市内の中小熱処理メーカーが廃業し、設備の一部を譲り受けた。移設・工事費を含む総投資額は約5,000万円。メインの商権も引き継いでいる。

同社は特殊鋼販売、機械加工、熱処理加工を3本柱とする。静岡支店・熱処理センターは熱処理加工の中核拠点で、大型リフレッシュ計画では、新熱処理工場を2019年12月に着工する予定で新工場用地の更地化を完了していた。米中貿易摩擦の影響など市場環境の変化を踏まえ、着工寸前で投資計画を一時凍結し、その後は新型コロナの感染拡大などの影響で凍結状態が続いている。

今回はリフレッシュ計画とは別に真空熱処理炉を増設したもので、鋼材倉庫のレイアウトを変更して移設し、1月に試運転を行った。

(2月24日)

# 業界のうごき

## ハヤカワカンパニーの鍛造子会社 金型販売事業に参入

ハヤカワカンパニーの子会社で熱間鍛造品の製造販売を手掛けるハヤカワフォーミング（埼玉県桶川市）は、金型販売に本格参入する方針を固めた。かねて自社内で使用する金型の製造を行っていたが、外部の引き合いにも対応する形で事業を多角化。熱間鍛造品生産、金型販売を両輪に、持続的成長を目指す。

ハヤカワフォーミングは農機具、トラック向けなどの精密熱間鍛造品を量産する。鍛造後にコイニング（冷間鍛造による面粗さの向上）を施すことで品質向上、コスト削減を図る工程が評価され、年々生産実績を伸ばしている。熱鍛品需要が底堅く推移する一方、さらなる業容拡大を狙う上で新たな事業の柱を模索していた。

マシニングセンタなどの設備を導入し、高度なノウハウの下で金型販売について事業化することを決めた。2022年7月をめどに金型販売を始動する計画だ。（3月30日）

## 堀田ハガネ、健康経営優良法人に初認定 福利厚生を充実、ブライツ500目指す

堀田ハガネは、経済産業省と日本健康会議が共同で顕彰する「健康経営優良法人2022（中小規模法人部門）」で初めて認定を受けた。堀田靖社長は「さらに健康経営に努め、上位500法人が認定される“ブライツ500”を目指していきたい」とする。

今回の認定に向け福利厚生を充実させた。ウェブによる産業医制度を創設。パソコンや語学、各種資格を学べる講座や保養施設、旅行、映画などが格安で利用できる総合福利厚生サービス、ベネフィットステーションに加入した。タバコをやめた人やもともと吸わない人には禁煙手

当を支給している。

同認定は、従業員の健康保持・増進の取り組みが将来的に収益性などを高める投資であるという経営的視点で捉え、戦略的に実践する企業や各種法人を認定する制度。今年は中小規模法人部門で1万2,255法人が認定を受けている。（3月17日）

## リントツ、半田のレベラー能力増強 厚物・狭幅加工ニーズを捕捉

リントツは、ステンレス鋼板のレベラー加工能力を増強した。主力拠点、半田ステンレス加工センター（愛知県半田市）第一工場に厚物・狭幅用のレベラーシャーラインを導入し、4月から本稼働を始める。一部業務を内製化することにより短納期化やコストダウン、歩留まり向上を図るとともに、厚物・狭幅レベラー加工ニーズの捕捉を狙う。総投資額は約1億2千万円。

同社は半田センター、潮干コイル流通センターに合計4台のレベラーシャーラインを置き、月間4千トン強のペースで加工してきた。近年は大手ユーザーによる厚物加工の引き合いが増加。スリットを自社で行う一方、レベラー加工は他社に委託していた。

第一工場の製品置場だったスペースに5機目のレベラー加工機を導入した。板厚3～10.5ミリ、幅90～400ミリ、長さ500～4,100ミリの製品に対応し、月間加工能力は1直体制で約400トン。（3月29日）

## 愛知製鋼、脱炭素を本格化 国内4工場向け「再エネ電気」調達

愛知製鋼は、国内の生産工場でカーボンニュートラル推進に向けた活動を本格化する。JEPX（日本卸電力取引所）の非化石価値取引市場でFIT非化石証書を購入し、再エネ電気を導入する。購入量は、刈谷工

場（ステンレス製品、チタン材の生産）を中心に、関工場（磁石関連）、岐阜工場（コールドプレートの生産）、東浦工場（電磁品、ステンレス構造部材の生産）の4工場分に相当し、年間で合計約1万トンのCO2削減につながる。同時に、太陽光発電システムの導入や使用エネルギーの脱炭素化を推進する。

今回の再エネ電気導入により、刈谷工場では、従来から実施する「重油から都市ガスへの燃料転換」を進め、2022年度中にカーボンニュートラルを実現する計画。関・岐阜・東浦の3工場は、今回の再エネ電気導入でカーボンニュートラルを実現する。（2月24日）

## JFEスチール、3カ月単位に統一 特殊鋼棒線の原料価格連動方式

JFEスチールは、特殊鋼棒鋼・線材の原料価格連動方式の適用期間短縮について、多くの顧客から了承を得た。「原料参照期間が3カ月単位であり、かつ原料価格指標改定を3カ月後の鋼材価格改定に反映する」パターンは、納入シェアの高い顧客のほぼ全てで了承を受け、移行が進んでいる。シェアの低い顧客を含め、原料価格連動方式を適用する取引量の8割強に相当する。

原料価格変動と鋼材価格改定を連動させる値決め方式で、大手ユーザーなどとの間で運用している。従来は、原料参照期間は6カ月単位と3カ月単位の2パターンがあり、原料価格指標改定を鋼材価格改定に反映するタイミングも6カ月後と3カ月後の2パターンがあった。原料価格変動をタイムリーに販価に反映し合理的な運用とするため、いずれも3カ月にそろえることを目指してきた。（2月21日）

## 磁歪材料の振動で害虫防除 東北特殊鋼が特許取得

東北特殊鋼や電気通信大学などで

## 業界のうごき

構成する研究グループは、磁歪材料を用いた振動装置による害虫防除技術で昨年12月に特許を取得した。

トマト栽培施設において、振動が害虫のコナジラミ類の密度を低減させる防除効果を持つことを確認。トマトの受粉を促進させる効果もあったため、栽培と害虫防除のダブル効果を持つ可能性がある。化学農薬だけに頼らない新たな害虫防除技術を用いた環境保全型農業が望まれる中、振動による防除技術は化学農薬への依存からの脱却につながり、さまざまな農林業害虫への応用が期待される。

現在、振動の周波数などの条件最適化を進めており、2023年度をめどに東北特殊鋼が磁歪振動装置を製品化する予定。振動による害虫防除技術は、粘着板や防虫ネットなどの技術と組み合わせることで、環境保全と省力化が可能な栽培体系への発展も期待できる。(2月2日)

### 日本金属・板橋、第三圧延工場が稼働 冷間圧延機、原料切断機など

日本金属は板橋工場・第三圧延工場の復旧工事を完了し、稼働を開始した。主要設備は2フィート幅冷間圧延機、4フィート幅原料切断機(スリッター)、コイルビルドアップラインで、30日に竣工式と各ライン始動式を行った。下川康志社長は竣工式で「二度と火災を起こさない決意のもとに、圧延機としては初めて消火剤噴射ノズルをミル本体に直接設置するなど、安全設備の強化を徹底した。加速する技術や環境の変化に対応し事業構造の変革を目指す長期計画において、今回の新設備導入は重要な位置付けにある」と挨拶した。

第三圧延工場は2019年11月19日の火災発生以来、2年4カ月ぶりに稼働を開始した。復旧工事では、1980年代に量的拡大志向で構成した4

フィート幅冷間圧延機中心の設備体制を踏襲せず、高品質・高精度・高機能の製品供給に適し、安全で働きやすく効率的な生産体制を構築した。

(3月31日)

### 日本製鉄が環境ラベル「エコリーフ」 棒鋼・線材製品でも取得

日本製鉄は、「棒鋼製品」「線材製品」「棒鋼製品(建材)」「線材製品(建材)」でサステナブル経営推進機構(SuMPO)の認証する「エコリーフ」環境ラベルを取得した。棒鋼・線材製品で品種包括的なエコリーフ認証を取得したのは国内初。自動車、建設機械、産業機械、エネルギー、建築・土木用を対象しており、同社が製造する棒鋼・線材製品を網羅する。

同社は、棒鋼・線材製品の事業ブランドである「SteelInC」のもと、環境データを明らかにした豊富なラインアップの「ハイエンド鋼材」と「工法」の提案で、顧客のCO2削減、環境負荷低減に貢献する。

「エコリーフ」はLCA手法を用いて資源採取から製造、物流、使用、廃棄・リサイクルまでの製品のライフサイクル全体を考えた環境情報を定量的に開示するEPD認証制度の一つ。同社のエコリーフ環境ラベル取得は、H形鋼をはじめ21件となった。

(2月3日)

### 日本冶金がフェロニッケルで新技術 カーボンレス・ニッケル製錬へ挑戦

日本冶金工業は、2030年度に向けて「カーボンレス・ニッケル製錬」の実現を目指す。大江山製造所(京都府宮津市)のフェロニッケル生産に関して、輸入ニッケル鉱石と石炭を主体としたニッケル製錬から脱却し、リサイクル原料を主体とした生産体制に移行する。

施策は①エネルギー転換(エネル

ギー源を石炭からLNG、再生燃料などへシフト)②カーボン代替(ニッケル還元材を無煙炭から廃プラなどへシフト)③リサイクル原料の多様化と使用拡大④副産物の再利用と廃棄物低減。4施策で約20億円の戦略設備投資を計画し、半分はエネルギー転換に充てる。

大江山はリサイクル原料の使用比率をすでに約4割に高めている。脱炭素化に対する社会的要請や輸入鉱石・石炭をめぐる調達環境の悪化を踏まえ、本格的な転換を進める。30年度の大江山のCO2排出原単位は13年度比7割減を目指す。(3月28日)

### 日立金属、高付加価値製品にシフト ダイカスト金型用鋼、25年度3割超へ

日立金属は国内外の工具鋼事業で高付加価値製品へのシフトを進める。独自の鋼種開発で顧客ニーズを捕捉し、機械加工・熱処理・表面処理などの加工ソリューション、販社の高度な物流・加工機能と組み合わせ、販売を強化する。現在は高温強度と靱性を兼ね備えるダイカスト金型用鋼「DAC-X」「DAC-i」、被削性・靱性に優れた冷間ダイス鋼「SLD-f」にとくに注力している。自動車関連中心のダイカスト金型用鋼は2025年度に同社の工具鋼の3割超に拡大する見通し。

「DAC-X」は、優れた高温強度により初期クラックの発生を抑制するとともに、量産可能な組織制御技術の開発により靱性を改善し、クラックの進展を抑制する。「DAC-i」はダイカスト製品や金型の大型化に対応する。「SLD-f」は顧客の切削速度向上や加工時間短縮に貢献し、耐久性や加工時の耐チップング性も優れる。2025年度には冷間ダイス鋼の2割を置き換える方針。(3月23日)

文責:(株)鉄鋼新聞社

# 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	工具鋼	構造用鋼				特殊用途鋼						計	合計
		機械構造用炭素鋼	合金鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ステンレス鋼	快削鋼	高抗張力	その他			
'20 暦年	155,917	3,419,635	2,861,119	6,280,754	294,388	646,096	2,172,096	421,126	4,140,987	388,543	8,063,236	14,499,923	
'21 暦年	221,395	4,709,058	3,726,591	8,435,649	374,891	987,441	2,578,832	580,434	4,875,054	493,548	9,890,200	18,547,244	
'19 年度	208,719	4,424,471	3,684,293	8,108,764	371,016	858,786	2,648,575	548,062	5,236,485	483,150	10,146,074	18,463,557	
'20 年度	161,061	3,578,698	2,956,593	6,535,291	309,316	702,538	2,114,557	428,594	4,153,666	397,469	8,106,140	14,802,492	
'21. 1-3月	52,198	1,172,883	945,404	2,118,287	97,499	232,582	616,132	140,585	1,261,801	128,589	2,477,188	4,647,673	
4-6月	56,296	1,201,876	965,482	2,167,358	96,546	260,367	611,090	145,767	1,229,889	120,022	2,463,681	4,687,335	
7-9月	53,928	1,214,051	924,956	2,139,007	97,316	245,647	689,982	154,403	1,223,104	128,188	2,538,640	4,731,575	
10-12月	58,973	1,120,248	890,749	2,010,997	83,530	248,845	661,628	139,679	1,160,260	116,749	2,410,691	4,480,661	
'21年 1月	15,682	372,859	296,328	669,187	30,002	66,332	204,565	41,230	416,562	40,591	799,282	1,484,151	
2月	16,845	374,034	309,346	683,380	32,617	80,647	199,435	46,797	381,683	41,284	782,463	1,482,688	
3月	19,671	425,990	339,730	765,720	34,880	85,603	212,132	52,558	463,556	46,714	895,443	1,680,834	
4月	18,294	408,808	340,632	749,440	29,946	80,297	212,529	48,060	381,395	37,097	789,324	1,557,058	
5月	19,668	392,952	316,676	709,628	29,719	90,410	180,326	49,210	434,132	45,174	828,971	1,558,267	
6月	18,334	400,116	308,174	708,290	36,881	89,660	218,235	48,497	414,362	37,751	845,386	1,572,010	
7月	18,960	417,239	325,237	742,476	34,012	76,642	220,538	54,553	422,541	34,939	843,225	1,604,661	
8月	16,959	398,938	295,879	694,817	28,703	81,025	229,439	45,315	417,534	44,886	846,902	1,558,678	
9月	18,009	397,874	303,840	701,714	34,601	87,980	240,005	54,535	383,029	48,363	848,513	1,568,236	
10月	20,208	369,718	308,766	678,484	27,164	87,684	203,862	44,520	402,259	42,705	808,194	1,506,886	
11月	19,551	388,574	298,018	686,592	28,799	85,188	222,985	51,302	390,490	32,633	811,397	1,517,540	
12月	19,214	361,956	283,965	645,921	27,567	75,973	234,781	43,857	367,511	41,411	791,100	1,456,235	
'22年 1月	18,209	378,351	298,237	676,588	25,175	76,825	204,627	40,835	403,226	40,020	790,708	1,485,505	
2月	22,658	362,211	300,079	662,290	28,144	71,123	205,466	42,810	348,389	34,340	730,272	1,415,220	
前月比	124.4	95.7	100.6	97.9	111.8	92.6	100.4	104.8	86.4	85.8	92.4	95.3	
前年同月比	134.5	96.8	97.0	96.9	86.3	88.2	103.0	91.5	91.3	83.2	93.3	95.4	

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
'20 暦年	236,085	4,263,744	846,580	2,974,323	1,048,015	5,137,647	14,506,394
'21 暦年	278,898	6,065,226	856,955	3,846,183	1,081,675	r 6,422,384	r 18,551,321
'19 年度	293,237	5,497,480	1,202,234	3,709,327	1,333,238	6,433,580	18,469,096
'20 年度	237,286	4,512,899	780,205	3,099,528	935,791	r 5,241,093	r 14,806,802
'21. 1-3月	63,404	1,475,409	223,330	994,566	233,533	r 1,656,743	r 4,646,985
4-6月	69,455	1,540,053	217,539	980,346	268,361	1,613,248	4,689,002
7-9月	66,937	1,556,494	199,286	990,216	280,504	1,639,676	4,733,113
10-12月	79,102	1,493,270	216,800	881,055	299,277	1,512,717	4,482,221
'21年 1月	21,061	441,608	71,368	322,516	68,734	r 557,017	r 1,482,304
2月	19,947	483,262	76,603	319,688	69,074	514,532	1,483,106
3月	22,396	550,539	75,359	352,362	95,725	585,194	1,681,575
4月	26,225	496,073	92,222	331,137	87,015	524,889	1,557,561
5月	22,294	511,388	62,109	325,551	92,043	545,306	1,558,691
6月	20,936	532,592	63,208	323,658	89,303	543,053	1,572,750
7月	26,389	529,891	66,699	332,383	77,079	572,669	1,605,110
8月	14,364	490,628	77,787	324,291	102,620	549,717	1,559,407
9月	26,184	535,975	54,800	333,542	100,805	517,290	1,568,596
10月	27,778	505,105	91,285	281,251	104,337	497,663	1,507,419
11月	29,975	524,016	55,264	291,930	101,076	515,593	1,517,854
12月	21,349	464,149	70,251	307,874	93,864	499,461	1,456,948
'22年 1月	21,233	472,269	85,072	299,898	85,549	521,885	1,485,906
2月	21,597	484,203	87,412	275,110	83,726	463,906	1,415,954
前月比	101.7	102.5	102.8	91.7	97.9	88.9	95.3
前年同月比	108.3	100.2	114.1	86.1	121.2	90.2	95.5

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:t)

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		
'20 曆年	209,727	2,198,378	1,185,987	3,384,365	56,123	314,764	1,229,083	109,383	64,711	85,442	1,859,506	5,453,598
'21 曆年	245,486	2,716,911	1,455,748	4,172,659	49,883	399,243	1,459,480	124,703	61,853	95,991	2,191,153	6,609,298
'19 年度	259,702	2,759,143	1,499,742	4,258,885	52,877	356,356	1,413,730	132,161	90,062	96,935	2,142,121	6,660,708
'20 年度	211,779	2,240,670	1,213,083	3,453,753	55,083	328,523	1,232,187	108,689	56,572	82,995	1,864,049	5,529,581
'21年 6月	23,261	241,012	132,470	373,482	4,388	36,439	127,265	12,066	5,106	9,209	194,473	591,216
7月	21,522	247,803	124,178	371,981	4,448	36,507	135,351	11,116	5,523	9,450	202,395	595,898
8月	18,116	212,990	112,670	325,660	3,169	29,515	118,938	9,570	4,331	8,185	173,708	517,484
9月	20,985	227,116	120,779	347,895	3,781	32,954	128,476	9,386	6,033	9,117	189,747	558,627
10月	19,072	218,261	113,035	331,296	3,874	32,989	126,427	8,717	5,490	8,061	185,558	535,926
11月	20,489	225,683	120,299	345,982	4,001	33,090	129,595	10,715	4,807	7,766	189,974	556,445
12月	19,449	230,330	120,228	350,558	4,147	33,935	134,227	10,219	5,469	7,779	195,776	565,783
'22年 1月	19,728	221,808	117,764	339,572	3,959	31,322	123,204	10,110	4,267	7,353	180,215	539,515
2月	20,368	223,047	115,749	338,796	4,037	30,503	126,216	12,385	6,646	7,315	187,102	546,266
前月比	103.2	100.6	99.3	99.8	102.0	97.4	102.4	122.5	155.8	99.5	103.8	101.3
前年同月比	102.5	103.9	98.6	102.4	101.6	95.9	116.5	125.4	119.6	102.2	112.3	105.6

出所: 一般社団法人特殊鋼倶楽部『特殊鋼材需給月報調査』から作成。

(注) 2018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:t)

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		
'20 曆年	7,121	227,632	138,579	366,211	23,123	34,242	122,999	27,331	143,334	23,014	374,043	747,375
'21 曆年	8,055	246,632	158,245	404,877	24,939	38,834	144,605	29,563	168,305	22,668	428,914	841,846
'19 年度	10,477	244,436	157,976	402,412	22,405	31,778	132,154	28,139	140,036	25,484	379,996	792,885
'20 年度	6,109	225,231	149,743	374,974	25,103	34,654	118,733	24,034	145,894	22,503	370,921	752,004
'21年 6月	6,023	243,170	146,891	390,061	22,064	36,397	121,106	27,447	155,693	23,875	386,582	782,666
7月	7,148	247,866	147,957	395,823	24,513	33,689	116,749	27,736	153,976	21,057	377,720	780,691
8月	7,641	253,595	164,384	417,979	25,740	40,086	139,926	29,602	193,634	26,938	455,926	881,546
9月	6,073	243,728	147,664	391,392	25,537	39,600	160,821	27,789	171,710	27,676	453,133	850,598
10月	7,814	237,083	150,207	387,290	22,841	39,610	132,122	26,371	175,837	22,638	419,419	814,523
11月	7,528	245,739	153,174	398,913	23,423	39,517	139,226	30,425	184,589	17,560	434,740	841,181
12月	8,055	246,632	158,245	404,877	24,939	38,834	144,605	29,563	168,305	22,668	428,914	841,846
'22年 1月	8,678	250,569	158,205	408,774	26,881	41,374	144,605	27,331	170,705	25,513	422,165	839,617
2月	9,554	250,933	151,757	402,690	26,839	39,934	136,991	30,502	153,702	21,866	409,834	822,078
前月比	110.1	100.1	95.9	98.5	99.8	96.5	105.1	111.6	90.0	85.7	97.1	97.9
前年同月比	145.8	104.7	96.8	101.6	103.9	109.1	106.0	98.5	117.8	98.1	109.2	105.6

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:t)

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		
'20 曆年	65,383	253,328	167,185	420,513	11,503	54,038	203,455	12,278	13,904	6,544	301,722	787,618
'21 曆年	78,090	352,845	202,875	555,720	11,864	65,865	261,863	14,113	18,074	7,971	379,750	1,013,560
'19 年度	78,320	240,274	184,120	424,394	12,436	52,625	178,599	14,953	9,126	9,668	277,407	780,121
'20 年度	64,494	277,040	177,841	454,881	11,736	53,793	217,355	14,206	16,535	5,470	319,095	838,470
'21年 6月	64,955	305,205	188,693	493,898	12,206	59,161	233,477	11,492	19,138	6,172	341,646	900,499
7月	66,794	314,980	188,484	503,464	12,050	58,150	237,478	11,217	19,413	6,339	344,647	914,905
8月	69,325	334,251	196,255	530,506	11,890	62,703	242,242	10,994	19,740	7,018	354,587	954,418
9月	72,710	349,674	197,482	547,156	11,773	62,794	247,590	13,659	19,613	7,066	362,495	982,361
10月	75,162	368,533	202,570	571,103	11,712	65,074	260,217	14,519	19,328	7,935	378,785	1,025,050
11月	75,441	359,128	195,371	554,499	12,075	59,161	259,914	14,606	18,347	7,182	371,285	1,001,225
12月	78,090	352,845	202,875	555,720	11,864	65,865	261,863	14,113	18,074	7,971	379,750	1,013,560
'22年 1月	76,504	343,019	209,833	552,852	13,060	65,488	265,324	14,664	18,771	8,793	386,100	1,015,456
2月	76,018	330,301	210,798	541,099	13,031	62,121	254,202	14,989	17,835	9,166	371,344	988,461
前月比	99.4	96.3	100.5	97.9	99.8	94.9	95.8	102.2	95.0	104.2	96.2	97.3
前年同月比	118.5	127.3	123.0	125.6	112.1	113.9	124.0	118.7	117.4	160.2	121.9	123.6

出所: 一般社団法人特殊鋼倶楽部『特殊鋼材需給月報調査』から作成。

(注) 2018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	合金鋼	計	
'20 暦年	29,024	265,564	383,431	648,995	130,574	777,330	83,044	59,199	1,050,147	3,072	4,101,391	4,104,463	5,832,629
'21 暦年	41,270	437,028	558,747	995,775	198,944	846,814	122,324	73,541	1,241,624	2,866	5,394,962	5,397,827	7,676,496
'19 年度	35,063	353,608	527,588	881,195	174,665	925,925	95,132	74,822	1,270,544	3,858	5,014,950	5,018,808	7,205,611
'20 年度	30,661	286,158	400,957	687,115	139,795	757,172	88,335	64,008	1,049,310	2,961	4,065,480	4,068,440	5,835,525
'21年 5月	3,363	32,257	44,283	76,540	15,818	61,222	5,746	6,285	89,070	137	439,396	439,533	608,507
6月	5,848	47,347	48,046	95,394	18,711	74,503	14,425	5,122	112,761	212	460,517	460,729	674,732
7月	3,546	35,819	47,719	83,538	19,063	67,642	9,126	6,325	102,156	274	493,546	493,820	683,060
8月	2,588	36,713	42,721	79,434	15,501	65,556	10,709	7,953	99,720	258	482,599	482,857	664,600
9月	3,047	40,018	52,272	92,290	19,512	79,370	11,178	5,856	115,917	360	459,791	460,151	671,405
10月	3,449	35,615	47,791	83,406	18,586	69,343	12,617	5,938	106,484	194	466,887	467,081	660,420
11月	3,721	37,313	37,809	75,122	15,320	70,895	8,252	5,641	100,108	316	427,025	427,341	606,292
12月	3,488	33,521	47,089	80,610	14,266	76,112	12,263	3,763	106,404	240	410,537	410,778	601,279
'22年 1月	2,555	31,716	39,486	71,202	12,868	54,740	9,192	3,907	80,707	253	357,922	358,175	512,639
2月	3,613	28,032	43,549	71,581	12,476	72,718	6,634	5,520	97,348	209	361,889	362,099	534,640
前月比	141.4	88.4	110.3	100.5	97.0	132.8	72.2	141.3	120.6	82.8	101.1	101.1	104.3
前年同月比	140.9	73.4	90.5	82.9	77.5	107.2	65.3	66.7	95.1	130.2	82.0	82.1	84.5

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	ばね鋼	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
'20 暦年	4,425	8,681	481	11,582	7,806	182,037	15,644	217,550	226	5,508	378,421	383,929	614,813
'21 暦年	3,425	7,333	282	12,394	11,674	237,726	18,602	280,679	323	7,765	274,257	282,022	573,782
'19 年度	4,566	8,270	575	14,214	7,762	198,515	15,501	236,568	283	8,259	476,144	484,403	734,090
'20 年度	3,570	8,042	435	11,445	8,396	188,470	15,730	224,477	250	6,395	358,609	365,004	601,343
'21年 5月		321	45	878	1,011	21,077	1,378	24,389	62	1,019	22,771	23,790	48,898
6月	332	732	15	1,256	1,026	18,514	1,450	22,260	-	758	20,181	20,939	44,263
7月	256	519	27	1,156	1,091	18,514	1,626	22,413	51	503	12,597	13,100	36,339
8月	245	354	26	778	717	18,001	1,724	21,246	18	1,065	20,811	21,876	43,739
9月	447	396	16	1,579	1,008	20,378	1,746	24,727	41	432	17,529	17,961	43,572
10月	164	641	25	979	937	21,309	1,370	24,620	13	128	20,057	20,185	45,623
11月	313	788	16	840	1,283	17,525	1,782	21,446	-	772	16,357	17,130	39,677
12月	438	1,069	17	1,220	1,387	24,700	1,799	29,123	29	225	15,406	15,641	46,300
'22年 1月	413	861	29	1,010	1,553	26,806	1,747	31,145	21	359	13,281	13,639	46,079
2月	235	1,318	14	1,009	919	24,046	1,287	27,275	15	1,096	15,777	16,873	45,717
前月比	57.0	153.1	50.2	99.9	59.2	89.7	73.7	87.6	-	305.5	118.8	123.7	99.2
前年同月比	98.8	217.9	45.3	100.7	179.5	133.1	105.2	130.9	26.8	177.3	56.0	58.6	90.5

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		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			
'20 暦年	8,067,943	1,037,731	3,740,832	259,879	4,598,615	779,300	-	180,833	108,419	8,267	95,570	46,022	9,018
'21 暦年	7,846,958	1,154,054	3,818,910	379,007	4,448,340	765,762	-	222,252	119,477	11,205	102,086	55,176	15,414
'19 年度	9,489,302	1,196,578	4,714,027	318,555	5,038,727	852,328	-	190,374	111,917	9,935	104,036	47,879	10,995
'20 年度	7,969,529	1,064,697	3,670,709	275,189	4,656,632	790,406	-	184,423	105,357	8,732	94,870	50,322	9,885
'21年 5月	502,828	77,156	267,079	27,841	319,318	57,439	-	16,105	9,293	775	r 8,583	2,822	1,239
6月	737,420	106,980	360,669	32,794	365,631	68,520	-	20,474	11,479	959	r 8,521	4,123	1,321
7月	730,340	111,045	374,889	38,038	377,448	67,514	-	18,960	10,951	1,077	r 8,550	3,661	1,350
8月	480,613	71,028	252,154	27,390	319,697	55,517	-	15,161	7,901	911	r 8,432	4,041	1,259
9月	430,593	79,263	200,025	25,999	318,371	60,879	-	18,945	10,481	1,115	r 8,478	4,628	1,446
10月	515,250	80,603	246,189	29,289	279,341	48,366	-	20,078	10,708	1,115	r 8,688	3,777	1,492
11月	756,625	103,409	342,078	32,028	352,455	60,404	-	20,134	11,332	1,195	r 8,899	4,044	1,454
12月	710,070	101,249	381,925	37,617	336,442	55,806	-	19,619	10,218	1,053	r 9,178	5,559	1,392
'22年 1月	546,951	80,195	269,439	29,019	329,699	56,794	-	17,963	9,292	909	8,996	2,934	1,429
2月	-	-	312,462	32,569	354,668	64,347	-	19,486	10,280	796	8,114	3,351	1,390
前月比	-	-	116.0	112.2	107.6	113.3	-	108.5	110.6	87.6	90.2	114.2	97.3
前年同月比	-	-	92.6	100.6	82.0	92.3	-	109.7	114.8	109.0	104.4	33.9	131.6

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

2022年2月分

鋼種別	項目	月別					
		実数 (t)	前月比 (%)	前年同月比(%)	2015年基準指数(%)		
工 具 鋼	熱間圧延鋼材生産	22,658	124.4	134.5	109.9		
	鋼材輸入実績	235	57.0	98.8	76.3		
	販売業者	受入計	19,882	109.6	101.2	73.7	
		販売計	20,368	103.2	102.5	77.5	
		うち消費者向	17,014	105.0	103.4	89.9	
		在庫計	76,018	99.4	118.5	128.7	
	鋼材輸出船積実績	3,613	141.4	140.9	75.8		
	生産者工場在庫	9,554	110.1	145.8	115.2		
	総在庫	85,572	100.5	121.0	127.0		
	構 造 用 鋼	熱間圧延鋼材生産	662,290	97.9	96.9	96.8	
販売業者		受入計	327,043	97.1	96.6	50.0	
		販売計	338,796	99.8	102.4	51.8	
		うち消費者向	262,778	98.6	97.7	59.8	
		在庫計	541,099	97.9	125.6	153.8	
鋼材輸出船積実績		71,581	100.5	82.9	87.1		
生産者工場在庫		402,690	98.5	101.6	115.1		
総在庫		943,789	98.1	114.1	134.5		
ば ね 鋼		熱間圧延鋼材生産	28,144	111.8	86.3	78.3	
		鋼材輸入実績	1,318	153.1	217.9	323.4	
	販売業者	受入計	4,008	77.7	88.7	18.9	
		販売計	4,037	102.0	101.6	19.2	
		うち消費者向	2,776	106.2	103.9	59.7	
		在庫計	13,031	99.8	112.1	106.8	
	鋼材輸出船積実績	12,476	97.0	77.5	79.3		
	生産者工場在庫	26,839	99.8	103.9	103.9		
	総在庫	39,870	99.8	106.5	104.8		
	ス テ ン レ ス 鋼	熱間圧延鋼材生産	205,466	100.4	103.0	89.5	
鋼材輸入実績		27,275	87.6	130.9	188.5		
販売業者		受入計	115,094	90.9	105.4	45.9	
		販売計	126,216	102.4	116.5	50.2	
		うち消費者向	63,372	104.5	105.3	113.3	
		在庫計	254,202	95.8	124.0	186.0	
鋼材輸出船積実績		72,718	132.8	107.2	82.9		
生産者工場在庫		136,991	105.1	106.0	118.9		
総在庫		391,193	98.9	117.0	155.3		
快 削 鋼		熱間圧延鋼材生産	42,810	104.8	91.5	83.4	
	販売業者	受入計	12,710	119.2	126.0	89.9	
		販売計	12,385	122.5	125.4	86.1	
		うち消費者向	9,182	94.5	94.0	65.9	
		在庫計	14,989	102.2	118.7	110.7	
	鋼材輸出船積実績	6,634	72.2	65.3	69.3		
	生産者工場在庫	30,502	111.6	98.5	109.9		
	総在庫	45,491	108.3	104.4	110.2		
	高 抗 張 力 鋼	熱間圧延鋼材生産	348,389	86.4	91.3	84.4	
		販売業者	受入計	5,710	115.0	93.0	55.5
販売計			6,646	155.8	119.6	65.3	
うち消費者向			5,748	164.7	127.4	85.8	
在庫計			17,835	95.0	117.4	162.7	
生産者工場在庫		153,702	90.0	117.8	81.0		
総在庫		171,537	90.5	117.8	85.5		
そ の 他		熱間圧延鋼材生産	105,463	90.3	86.5	76.2	
		販売業者	受入計	34,824	89.0	85.3	85.9
			販売計	37,818	97.8	97.0	93.3
	うち消費者向		35,446	97.8	94.1	96.5	
	在庫計		71,287	96.0	118.3	134.2	
	生産者工場在庫	61,800	92.4	104.9	89.3		
	総在庫	133,087	94.3	111.7	108.8		
	特 殊 鋼 鋼 材 合 計	熱間圧延鋼材生産合計	1,415,220	95.3	95.4	90.0	
		鋼材輸入実績計	45,717	99.2	90.5	56.3	
		販売業者	受入計	519,271	95.9	98.2	51.0
販売計			546,266	101.3	105.6	53.7	
うち消費者向			396,316	100.2	99.0	68.8	
在庫計			988,461	97.3	123.6	155.1	
鋼材輸出船積実績計		534,640	104.3	84.5	83.1		
生産者工場在庫		822,078	97.9	105.6	104.6		
総在庫		1,810,539	97.6	114.7	127.2		

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) 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に含まない。

# 倶楽部だより

(2022年2月1日～3月31日)

## 理事会 (3月29日・Web会議+対面会議)

- ①2021年度事業報告について
- ②2021年度決算見込について
- ③2022年度事業計画案について
- ④一般社団法人移行後の事業収支及び2022年度会費案について
- ⑤2022年度予算案について
- ⑥2022年度貿易一般保険包括保険特約の締結について
- ⑦会員区分の異動について
- ⑧各委員会の委員長及び委員変更について
- ⑨会長・専務理事の業務執行状況報告について
- ⑩人事異動について
- ⑪会長挨拶

## 運営委員会

### 本委員会 (3月24日・Web会議+対面会議)

- ①2021年度事業報告について
- ②2021年度決算見込について
- ③2022年度事業計画案について
- ④一般社団法人移行後の事業収支及び2022年度会費案について
- ⑤2022年度予算案について
- ⑥会員区分の異動について
- ⑦各委員会の委員長及び委員変更について
- ⑧会長・専務理事の業務執行状況報告について
- ⑨人事異動について

### 総務分科会・財務分科会 (3月22日・Web会議)

- ①2021年度事業報告について
- ②2021年度決算見込について
- ③2022年度事業計画案について
- ④2022年度予算案について
- ⑤2022年度入会金及び会費・賦課金徴収方法について
- ⑥会員区分の異動について
- ⑦各委員会の委員長及び委員変更について
- ⑧会長・専務理事の業務執行状況報告について
- ⑨人事異動について

## 海外委員会

### 本委員会 (3月16日・Web会議+対面会議)

- ①2021年度事業報告(案)について

- ②2021年度決算見込み(案)について
- ③2022年度事業計画(案)について
- ④2022年度予算(案)について
- ⑤2022年度賦課金徴収方法について
- ⑥2022年度WTO負担金について
- ⑦2022年度海外調査事業(案)について
- ⑧2022年度貿易一般保険包括保険特約の締結について

### 専門部会 (2月17日・Web会議+対面会議)

#### 海外委員会調査事業最終報告について

### 専門部会 (3月10日・Web会議+対面会議)

- ①2021年度事業報告(案)について
- ②2021年度決算見込み(案)について
- ③2022年度事業計画(案)について
- ④2022年度予算(案)について
- ⑤2022年度賦課金徴収方法について
- ⑥2022年度WTO負担金について
- ⑦2022年度海外調査事業(案)について
- ⑧2022年度貿易一般保険包括保険特約の締結について

### 商社分科会 (3月4日・Web会議)

#### 2022年度貿易一般保険包括保険特約の締結について

## 市場開拓調査委員会

### 調査WG (3月18日・Web会議+対面会議)

#### 2021年度調査事業「主要自動車企業の調達戦略の見直し等を織り込んだ特殊鋼の需要量予測」最終報告

## 編集委員会

### 本委員会 (2月8日・Web会議)

- ①2022年7月号特集「機械学習による特殊鋼の進化(仮題)」の編集方針、内容の確認
- ②「特殊鋼」原稿の校正回数等について
- ③一般社団法人日本鉄鋼協会記念講座協賛について

### 小委員会 (3月24日・Web会議)

- ①委員交代の報告



②2022年9月号特集「特殊鋼の基礎（仮題）」  
の編集内容の検討

#### 人材確保育成委員会

2021年度ビジネスパーソン研修講座（2月15日、  
16日・全特協と共催）

テーマ：マーケティング

講師：日鉄総研(株) 野田 一臣氏

方式：Web研修方式

受講者：33名、内 特殊鋼倶楽部27名

#### 流通海外展開委員会

講演会（3月23日）

演題：①住友商事グローバルメタルズご紹介  
②日本を取り巻く世界経済情勢  
～世界経済情勢について、鋼材に  
関する影響などを踏まえて～

講師：①住友商事グローバルメタルズ(株)  
線材特殊鋼鑄鍛事業部長  
岡本 康資氏

②住友商事グローバルリサーチ(株)  
チーフエコノミスト  
本間 隆行氏

方式：オンライン配信（東京・名古屋・大  
阪地区同時）

聴講者：174名（3地区全体）

#### カーボンニュートラルWG

第8回会合（2月21日・Web会議）

#### [大阪支部]

運営委員会（2月18日）

- ①2021年度事業実績
- ②2021年度収支見込
- ③2022年度事業計画
- ④2022年度収支予算

「ビジネスパーソン研修講座」（3月8日、9  
日・名古屋支部及び二団体共催）

テーマ：マーケティング

講師：日鉄総研(株) 野田 一臣氏

方式：Web研修方式

参加者：14名（大阪地区）

講演会（3月23日・二団体共催）再掲

演題：①住友商事グローバルメタルズご紹介  
②日本を取り巻く世界経済情勢  
～世界経済情勢について、鋼材に関  
する影響などを踏まえて～

講師：①住友商事グローバルメタルズ(株)  
線材特殊鋼鑄鍛事業部長  
岡本 康資氏

②住友商事グローバルリサーチ(株)  
チーフエコノミスト  
本間 隆行氏

方式：オンライン配信（東京・名古屋・大  
阪地区同時）

聴講者：53名（大阪地区）

#### [名古屋支部]

部会（Web会議）

工具鋼部会（2月24日）

構造用鋼部会（2月22日）

ステンレス鋼部会（2月16日）

三団体共催「中堅社員研修フォローアップ研修」  
（2月15日）

テーマ：中堅社員に求められるコミュニケー  
ション向上

講師：(株)名南経営コンサルティング  
三軒 佳氏

方式：Web研修方式

参加者：29名

「ビジネスパーソン研修講座」（3月8日、9  
日・大阪支部共催）

テーマ：マーケティング

講師：日鉄総研(株) 野田 一臣氏

方式：Web研修方式

参加者：19名（名古屋地区）

三団体共催「技術講演会」（2月17日）

演題：日本冶金工業の高機能材について

講師：日本冶金工業(株) 部長 及川氏

方式：オンライン配信

申込者：70名

# 特殊鋼倶楽部の動き

## 「2021年度ビジネスパーソン研修講座」を開催しました

本講座は、一般社団法人特殊鋼倶楽部人材確保育成委員会が人材育成事業の一環として一般社団法人全日本特殊鋼流通協会東京支部との共催により、会員各社の社員育成計画に役立つべく毎年度タイムリーなテーマを選定し実施しています。

2020年に入って、世界的な規模で新型コロナウイルス感染症が蔓延し、有効対策とされる3蜜を避ける観点から、2020年度講座は、残念ながら中止せざるを得ませんでした。

今回、2021年度では、依然として新型コロナウイルス感染症による厳しい状況を踏まえ、受講上の感染対策を講じるとして、従来の対面集合型からオンライン・Web型に切替え実施可能なテーマを考慮に入れ、「マーケティング」と題する内容といたしました。

講座方式は従来通りスクール形式の座学ではなく、講義とグループディスカッションを織り交ぜた聴講参画型を取り入れ、受講者の皆様は、野田講師の説明に神経を集中して耳を傾け、それを演習により習得する反復作用で即実務に役立られるよう学びとっている様子でした。今回の特色は、1日目の冒頭に、本講座テーマに絡めた1時間程度の導入講演を実施し、その後の研修を受講しやすくした点にあります。

受講者からの受講後アンケートでは、研修全体、テーマ、難易度、説明振りのいずれも大方適切と、研修時間は適切と長いが折半との評価を得られました。また、「B to Cに関する例題の他B to Bもあれば尚可」「Webでも不都合はなかった」「マーケットを絞り込み自社の強みを活かすことの重要性」「グループワークは有効だが、発言のタイミングが難しい」「日常業務に活かせる内容」などのご意見をいただきました。

受講されました皆様には、一日半大変お疲れさまでした。

日 時：2022年2月15日（火）13時00分～17時15分

2月16日（水）9時00分～16時30分

方 式：オンライン（Zoom）

講 師：日鉄総研株式会社 中小企業診断士 野田一臣 氏

ねらい：①マーケティングを身近なスキルとして捉え、業務遂行への試行に繋げる。

②マーケティングの必要性、事業戦略との関係、基礎的概念などを確認する。

③基礎編とはいいながら、時代の潮流に合わせ、今後のマーケティングの在り方も情報交換、思考する。

④会員の交流を通じて営業秘密に留意しながら、様々な思考、意見を交わし気づきを促進する。

受講者：33名

## 「住友商事グローバルメタルズご紹介」「日本を取り巻く世界経済情勢」 講演会の開催

流通海外展開委員会では、特殊鋼流通の海外展開に関する課題に資する事業の一環として、特殊鋼倶楽部ならではの特殊鋼・鉄鋼に関連した情報提供を目的に、会員商社の方々に商社鉄鋼部門の海外展開状況の紹介を内容とする講演を2019年度から実施しています。

今回は、その3回目として、住友商事グローバルメタルズ(株)殿、住友商事グローバルリサーチ(株)殿から講師をお招きし、お話を伺うことといたしました。

住友商事グローバルメタルズのご紹介、日本を取り巻く世界経済情勢について、分かり易い説明と資料により、最後まで熱心に講師の話に耳を傾け、講演後の質疑応答も活発に行われ、盛会の内に終了いたしました。

また、講演会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。今後の講演会などに反映させていきたいと思っております。

多数のご参加を賜り、厚く御礼申し上げます。

日 時：2022年3月23日（水）14時00分～15時30分

方 式：オンラインによる東京・名古屋・大阪同時配信

演 題：「住友商事グローバルメタルズご紹介」

「日本を取り巻く世界経済情勢」

講 師：住友商事グローバルメタルズ株式会社 線材特殊鋼鑄鍛事業部長 岡本康資 氏  
住友商事グローバルリサーチ株式会社 チーフエコノミスト 本間隆行 氏

聴講者：174名

## 「2022年度 特殊鋼教養講座（1回目）」を開催しました

本講座は、一般社団法人特殊鋼倶楽部 人材確保育成委員会において、2018年度より鉄鋼業界（特殊鋼業界）の全体像、取り巻く環境、今後の課題と展望、求められる人物像をテーマに、新人、若手社員を対象として実施しています。

2021年度からは、それまでの座学とグループディスカッションを織り交ぜた内容を一新し、聴講のみの講義として、コロナ禍の厳しい状況を踏まえ、オンライン開催としました。

今回、4月開催ということもあり、鉄鋼業界に初めて入られた新入社員の方には基礎知識を習得し、業務への知見を深められる絶好の機会になったと思います。

受講者からの受講後アンケートでは、鉄と宇宙の成り立ち、製造方法の進化、身の回りにある製品との深い関係、将来の展望など歴史的背景や社会への役割について、初心者でもわかる内容と説明で理解しやすく勉強になったと総じて好評価が得られました。

受講されました皆様には、大変お疲れさまでした。

日 時：2022年4月15日（金）15時00分～17時00分

方 式：オンライン配信（東京、名古屋、大阪地区同時配信）

テーマ：鉄鋼業の歴史と先端技術による未来への挑戦

- 内 容：1. 鉄の生い立ち  
2. 「たたら」による鉄づくり  
3. 現代の鉄づくり  
4. 鉄鋼業の現状  
5. 日本鉄鋼業の挑戦  
6. 鉄鋼業を担う皆様方へ

講 師：一般社団法人特殊鋼倶楽部 専務理事 脇本眞也

受講者：186名

# 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 25社</p> <p>販売業者 101社</p> <p>合 計 126社</p>	【販売業者会員】		
<p><b>【製造業者会員】</b></p> <p>愛 知 製 鋼 (株)</p> <p>秋 山 精 鋼 (株)</p> <p>(株)川口金属加工</p> <p>高 周 波 熱 錬 (株)</p> <p>(株)神 戸 製 鋼 所</p> <p>合 同 製 鐵 (株)</p> <p>山 陽 特 殊 製 鋼 (株)</p> <p>J F E ス チ ー ル (株)</p> <p>J X 金 属 (株)</p> <p>下 村 特 殊 精 工 (株)</p> <p>大 同 特 殊 鋼 (株)</p> <p>高 砂 鐵 工 (株)</p> <p>東 北 特 殊 鋼 (株)</p> <p>日 鉄 ス テ ン レ ス (株)</p> <p>日 本 金 属 (株)</p> <p>日 本 高 周 波 鋼 業 (株)</p> <p>日 本 精 線 (株)</p> <p>日 本 製 鉄 (株)</p> <p>日 本 冶 金 工 業 (株)</p> <p>日 立 金 属 (株)</p> <p>(株)広島メタル&amp;マシナリー</p> <p>(株)不 二 越</p> <p>三 菱 製 鋼 (株)</p> <p>ヤ マ シ ン ス チ ー ル (株)</p> <p>理 研 製 鋼 (株)</p>	<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>(株)ISSリアライズ</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>小 山 鋼 材 (株)</p> <p>佐 久 間 特 殊 鋼 (株)</p> <p>櫻 井 鋼 鐵 (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 鐵 (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 鐵 (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 特 殊 鋼 (株)</p> <p>(株)竹内ハガネ商行</p> <p>孟 鋼 鉄 (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>デルタスチール(株)</p> <p>東京貿易マテリアル(株)</p> <p>(株)東 信 鋼 鉄</p> <p>(株)ト ー キ ン</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 島 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 物 産 (株)</p> <p>日 鉄 物 産 特 殊 鋼 (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>(株)日 立 ハ イ テ ク</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>平 和 鋼 材 (株)</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「特殊鋼と窒化」を企画しました。特殊鋼の表面硬化処理の一つとして、窒化がありますが、従来は耐摩耗性を主とした適用であったものの、近年は疲労強度向上対応も行われつつあります。また、直近では、自動車のEV化に伴い、部品においても、静粛性という特性も要求され、歯車などで、熱処理後のひずみの小さい窒化が着目されつつあります。

過去の特集内容では、「窒化」に限定したものは、1992年6月の「窒化用鋼」のみであり、その他では、「表面改質」の題目の特集号では、表面改質技術の一つとして、窒化が取り上げられています。更には、表面改質の適用例で、各種部品などが取り上げられていますが、その中には、窒化を適用した部品もあります。その他に、個別の部品（歯車やばねなど）の特集号でも、同様に、窒化を適用した例の紹介もされています。

今回は、まず、窒化の位置づけや基礎について紹介し、次に、窒化の種類毎の原理や課題などを紹介、その後、窒化を適用した部品毎（自動車部品、金型など）の例を窒化用開発鋼を含めた内容で紹介していただきました。

本特集により、窒化の全般を習得していただくことも可能ですし、新たな部品・分野に窒化を適用しようという試みに対する一助にもなるのではと思っています。読者の皆様にお役に立つことができれば幸いです。

本特集号に対しまして、ご多忙中にもかかわらず、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の皆様および事務局の皆様にこの場をお借りして厚く御礼申し上げます。

〔中川特殊鋼(株) しらが てつお〕  
フェロー 白神 哲夫

## 特 集 / DXと鉄鋼業への適用

- I. 総論
- II. デジタルデータ技術
- III. デジタルデータ技術の鉄鋼業への活用事例
- IV. DXに対する会員メーカーの取り組み

9月号特集予定…特殊鋼の基礎

## 特 殊 鋼

第 71 卷 第 3 号  
© 2 0 2 2 年 5 月  
2022年4月25日 印 刷  
2022年5月1日 発 行

定 価 1,252円 送 料 200円  
1年 国内7,434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 脇 本 眞 也  
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。