

特殊鋼棒線の最近の進歩-3

表面硬化処理技術と高強度鋼材の動向

Recent Trends of Surface Hardening Technology and
High Strength Steel

紅林 豊

Yutaka Kurebayashi

大同特殊鋼(株) 東京本社
特殊鋼事業部 特殊鋼商品開発部

1 はじめに

多種多様の表面硬化処理技術が開発され実部品に適用されているが、工業的な適用領域の広さの観点からは、浸炭処理、高周波焼入れ処理、および、窒化・軟窒化処理などが代表的な表面硬化処理技術として挙げられる¹⁻³⁾。

いずれの処理も鋼の表層部を硬化させ、疲労強度や耐摩耗性などの特性を改善するものであるが、適用される鋼や処理条件などは全く異なっており、それぞれに一長一短がある。

本稿では、これらの表面硬化処理技術の特徴や実部品への適用事例を紹介するとともに、浸炭処理を主体とした、材料開発や処理技術の変遷と今後の動向について展望する。

2 各種の表面硬化処理の特徴と実部品への適用事例

表1に代表的な表面処理法の分類を示すが、表面処理法の区分は多岐に渡っており、実際の自動車部品では、部品に要求される強度特性や部品の生産性を考慮して、最適な表面硬化処理法が選定されている。工業的には浸炭処理、高周波焼入れ処理、窒化・軟窒化処理が代表的な表面硬化処理と言えるが、その硬化機構や硬化特性に得失があるため、用途に応じて使い分けられている⁴⁻⁶⁾。

高周波焼入れ処理の最大の特長は、他の表面硬化処理に比べて処理時間が短いことであり、機械加工に連動した生産が可能とされる点である。一方、高周波焼入れ処理は加熱コイルによって部品の表層部を加熱するため適用可能な部品の形状に制約があり、ドライブシャフトやクランクシャフトなどのように軸物部品に適用される場合が多い⁷⁻¹⁰⁾。また、他の表面硬化処理に比べて内部まで硬化させることができるので、曲げ応力やねじり応力の作用する部品の処理に適しており、圧縮の残留応力が得られるため疲労強度にも有利である。

高周波焼入れ処理に用いられる鋼材は、炭素含有量が0.3%~0.5%程度の中炭素鋼が一般的だが、表層硬さや硬化深さの安定化と同時に低廉化を図る目的でBやMnなどを添加した鋼材が適用されている^{11,12)}。また、高周波焼入れ処理は短時間の加熱であるために、硬化特性は前組織の影響を受けやすく、熱処理前の組織形態に注意することが必要である。高周波焼入れ処理後の最大表層硬さは素材の炭素量に依存して上昇するが、実用的な炭素量の上限は0.6%程度であり、得られる硬さも700Hv程度が上限で、他の処理に比べると低めである。

窒化・軟窒化処理の特長は、他の表面硬化処理に比べて処理後の残留ひずみが小さいことと表層硬さが高いことである。窒化・軟窒化処理はA₁変態点以下の温度域で処理され、窒化物の析出や窒素の固溶による強化を利用したものである。

表1 表面処理法の分類

浸炭	常圧	固体浸炭
		液体浸炭
		ガス浸炭
	減圧	真空浸炭 プラズマ浸炭
窒化 軟窒化	常圧	ガス窒化 ガス軟窒化 液体軟窒化(タフト)
		イオン窒化
浸炭窒化	常圧	液体浸炭窒化 ガス浸炭窒化
表面焼入れ	高周波焼入れ	
	火炎焼入れ	
	レーザー焼入れ	
その他	浸硫、浸硫窒化	
	浸硼(ボロナイジング)	
	PVD,CVD, めっき	
	溶着、溶射	

り、高周波焼入れ処理や浸炭処理のようにマルテンサイト変態による強化ではないため変態によるひずみは発生せず、部品の変形が抑制されることが特長の一つである。また、処理後の表層硬さはAl、Cr、Vなどの合金元素を添加することで1000Hv以上の高硬度を得ることも可能であり、耐摩耗性が要求される部品などに適用されている。なお、軟窒化処理とは、窒素と炭素を共存させることによって窒素の拡散を促進させて短時間の窒化処理を行うものであり、窒素のみを用いる窒化処理と区別され、実部品に広く適用されている処理である。

JISで規格化された窒化鋼はSACM645の一鋼種のみであるが、Cr-Mo系、Cr-Mo-V系、Cr-Al系などの窒化鋼も開発されており¹³⁾、クランクシャフト、歯車、シャフトなどの自動車部品として実用化されている。

窒化・軟窒化処理は、400℃～600℃程度の温度域で処理されるが、硬化層深さが浅く、内部硬さも他の表面硬化処理に比べて低いので、これまでは強度特性が重視される部品への適用は見送られてきた。近年では、低ひずみに着目して歯車などへの適用事例も見られ、窒化と同時に時効硬化によって高強度化を図ることが試みられているなど、今後の拡大が期待される。

浸炭処理は、歯車や軸受けなどの部品に幅広く適用されており、材料開発のみならず、処理技術や設備技術開発なども積極的に取り組まれている。これらの詳細について以下に紹介する。

3 浸炭用鋼開発の変遷

これまでの浸炭用鋼の開発の変遷を振り返ると、1980年代、1990年代、2000年代に特徴的な開発事例が見られる。

1980年以前のこの領域の研究事例を見ると、新鋼種の開発よりも鋼材の品質安定に向けた製造技術に関する研究開発が主体的に実施されており、焼入性コントロールに関する研究が盛んに行われた¹⁴⁻¹⁶⁾。浸炭処理ではオーステナイト域から急冷してマルテンサイト組織を得るため、マルテンサイト変態に起因するひずみ発生が不可避である。ひずみ発生の原因は、加熱条件、部品の置き方、冷却条件などの熱処理条件に起因するものと、成分変動や偏析などの材料に起因するものに大別される。とくに、鋼材の焼入性がひずみ発生の重要な因子として取り上げられ、焼入性の制御技術に関する研究開発が実施された。

1980年代に入ると自動車の燃費改善が加速され、部品の小型軽量化が推し進められてきた。このために部品には高強度化が要求され、歯車の分野でも新たな浸炭用鋼の開発が積極的に実施された。

図1に、歯車の損傷形態の分類を示す。歯車の損傷は歯元と歯面の破壊損傷に大別されるが、歯元歯元の損傷は歯根部に作用する曲げ応力に起因するものであり、歯面の損傷は歯面間の接触に起因するものである。実際の自動車の歯車では、使用される環境によって負荷応力条件や接触条件も異なるので、損傷の形態もさまざまである。

図2に、歯車の損傷形態におよぼす相対すべり速度と負荷応力の影響を示す。歯車の損傷形態は歯車間の接触によって生じる相対すべり速度と負荷応力によって変化し、いずれかの強度が改善されると損傷形態は別の形態へ変化する。1980年以前は、磨耗と歯元曲げ破壊が歯車損傷の主体であったが、高強度鋼やショットピーニング技術などが実用化されたことによって歯元曲げ強度が改善され、歯車の損傷はピitting損傷へ変化した。

1980年代の歯車の最弱部は歯元であり、歯車の高強度化において最初に要求された特性は歯元強度の改善であった。並木らは、高強度鋼の研究開発において、浸炭表層に存在する粒界酸化と不完全焼入れ層が歯元強度低下の要因であるとして、粒界酸化の無害化に向けた材料開発を行い、新たな高強度材料を提案した¹⁷⁻²⁰⁾。浸炭処理の多くはガス浸炭処理が適用されているが、ガス浸炭処理後の表層近傍を詳細に観察すると、図3に示すように結晶粒界に沿って酸化層の生成が確認され、同時に、酸化層の近傍は不完全焼入れが生じてい

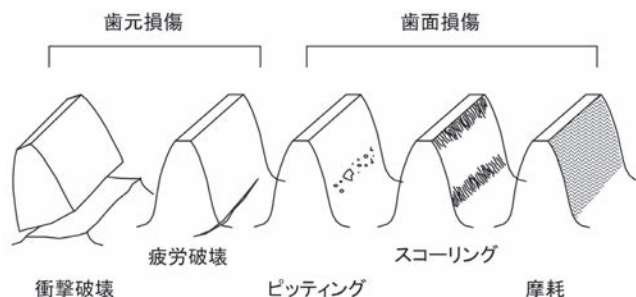


図1 歯車の損傷形態の分類

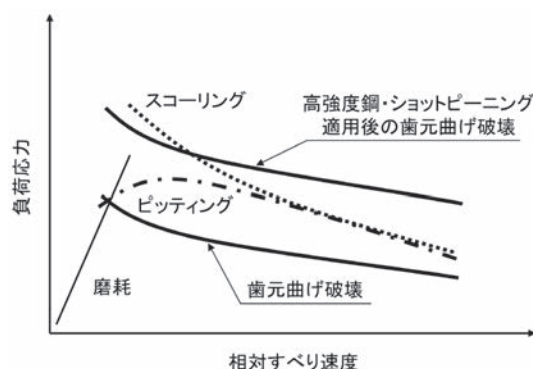


図2 歯車の損傷形態におよぼす相対すべり速度と負荷応力の関係

ることも確認されている。また、結晶粒界では図4に示すようにSiなどの酸化物生成傾向の強い合金元素の濃化が観察され、同様に、MnやCrなどの濃化が生じることも確認されている。この結果、粒界酸化層の近傍は局部的な焼入性の低下が生じ、不完全焼入れを引き起して強度が低下すると考えられる。これらの解析から、粒界酸化の発生を抑制するための合金設計としてSi、Crなどの元素を低減する対策がとられ、それにとまなう焼入性の低下を補完するためにMo、Niなどを添加した高強度歯車用鋼が開発された。

また、これらの開発と前後してショットピーニング処理の適用が試みられ^{21,22)}、歯元部への圧縮残留応力の付与と、有害な浸炭層を研削することが検討されている。図5にSCr420の浸炭処理ままとショットピーニング処理を施した場合の疲労強度を示す。ショットピーニング処理を行うことによって、高強度材と同程度の高強度化が得られており、実部品への適用も開始されてきた。

高強度歯車用鋼とショットピーニング処理の適用によっ

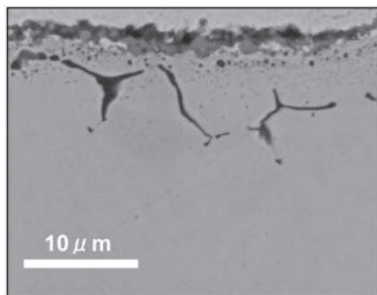


図3 ガス浸炭処理後の表層部断面のミクロ組織観察例

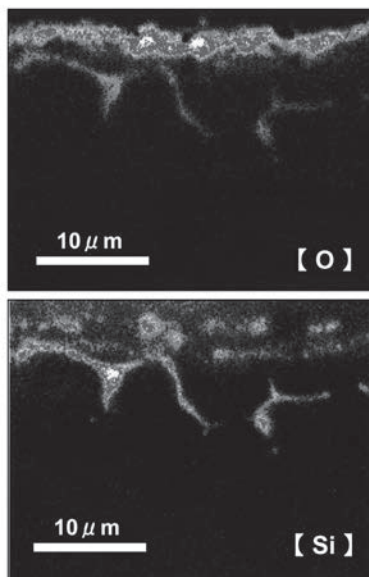


図4 表層部断面における粒界酸化層のEPMA分析結果

て、歯車の最弱部は歯元から歯面へと変化し、1990年代の材料開発では歯面強度の改善に向けた開発に主眼が置かれ、ピitting損傷に関する研究開発が行われるようになった²³⁻²⁶⁾。

歯車は繰り返し接触する際にすべりによって摩擦が生じ、接触部の温度上昇を引き起こすことから、高温域における材料強度がピitting強度に影響すると考えられる。実際の歯車では、歯面表層近傍の温度は200℃～300℃に上昇するので、300℃近傍の温度域での強度の低下防止が有効な手法である。図6に、材料の高温特性の指標として300℃焼戻し後の硬さでピitting特性を整理した結果を示す。図に示すように、300℃焼戻し硬さが高いほどピitting寿命は向上しており、高温強度の改善がピitting寿命の改善に有効であることがわかる。

高温強度の改善に関しては、合金元素添加の観点からのアプローチと浸炭窒化処理によるアプローチに大別される。図7に、300℃焼戻し硬さの実測値と予測値の関係を示すが、軟

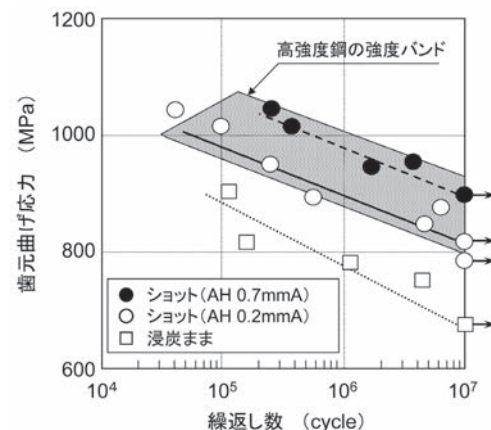


図5 疲労強度におよぼすショットピーニングの効果

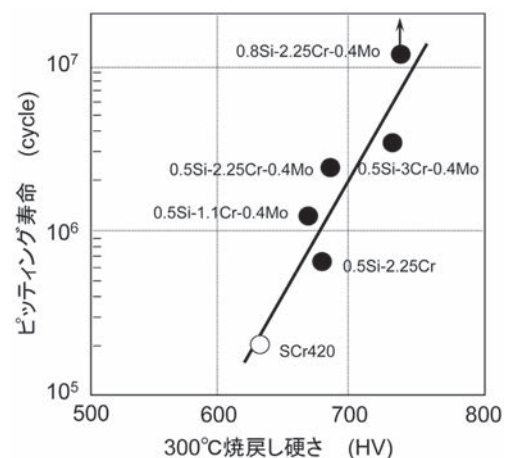


図6 300℃焼戻し硬さとピitting寿命の関係

化抵抗性の改善にはSi、Mo、Crなどの合金元素の添加が有効であることがわかる。この解析結果などから、Si、Cr、Moを添加した高面圧歯車用鋼が実用化されてきた。

浸炭窒化処理²⁷⁻²⁹⁾は、炭素と窒素を鋼表面に侵入させる手法であり、窒素によって軟化抵抗性が改善される。図8に浸炭窒化処理後の硬さ分布とローラピットティング試験後の試験片表層近傍の硬さ分布を示す。浸炭窒化処理ままの試験片表層の硬さは、残留 γ の存在により浸炭処理材に比べて低い値を示しているが、試験後の硬さ分布を見ると試験前よりも硬さが上昇していることがわかる。これは、残留 γ の加工誘起変態に起因するものとされているが、窒素の固溶による改善効果と合わせ、軟化抵抗性の改善に有効であることがわかる。

2000年代に入ると、歯元強度と歯面強度の双方を改善するための研究開発が展開されてきている。1980年代に開発された高強度歯車用鋼は低Si、Cr系の合金設計であったのに対し、1990年代に開発された高面圧歯車用鋼は高Si、Cr系の

合金設計であり、全く異なった合金設計のために歯元強度と歯面強度を両立するに至っておらず、歯元強度と歯面強度の両立が重要な研究開発課題となったためである。

高濃度浸炭処理は、歯元強度と歯面強度を両立する技術の一つであり、1980年代にも研究されてきたが^{30,31)}、プラズマ浸炭炉や真空浸炭炉などの設備の進歩にともなって、新たな取り組みが行われてきている。高濃度浸炭処理は、通常の共析浸炭に比べて高めの炭素濃度を狙い、共析点を越す過剰の炭素によって浸炭表層部に微細な炭化物を析出させる処理である。

図9に、高濃度浸炭処理後の炭化物量と300℃焼戻し硬さの関係を示した。また、図10には、炭化物量とピットティング寿命比の関係を示す。ピットティング寿命比とはSCr420共析浸炭材のピットティング寿命を基準として、炭化物面積率の異なる高濃度浸炭材のピットティング寿命の比率を求めたものである。図9および図10に示したように、炭化物量の増加にともなって300℃焼も度硬さが上昇しており、ピットティング寿命

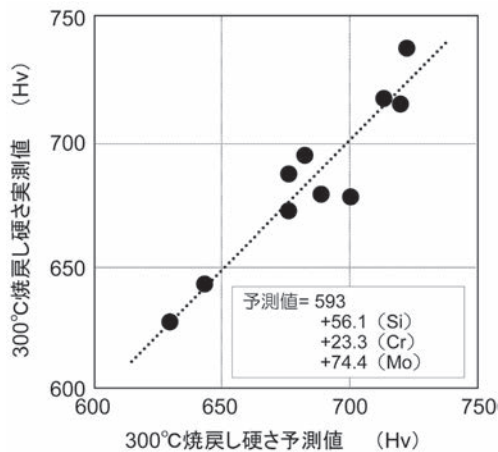


図7 軟化抵抗性におよぼす合金元素の影響

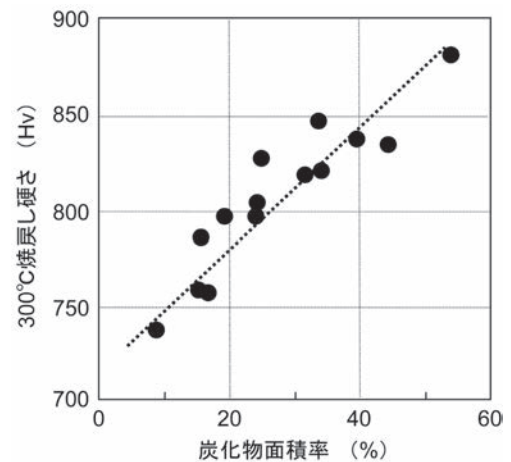


図9 炭化物量と300℃焼戻し硬さの関係

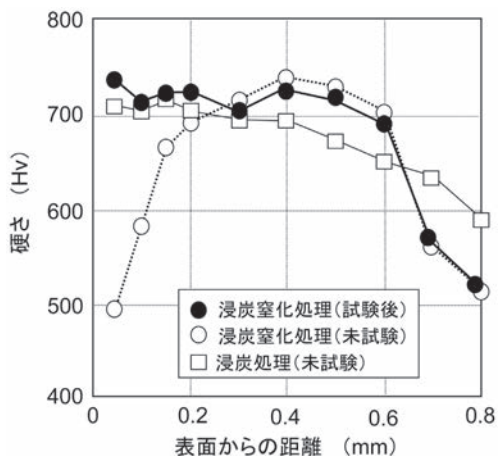


図8 浸炭窒化処理材の表層からの硬さ分布

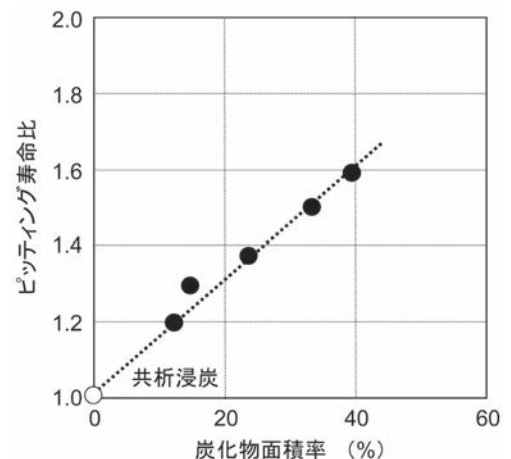


図10 炭化物量とピットティング寿命比の関係

比も向上していることがわかる。汎用の浸炭用鋼では焼入性に配慮した合金設計がなされているが、これらの鋼に高濃度浸炭処理を適用すると、炭化物を生成した領域ではCrやMoなどの合金元素が炭化物中に分配されて焼入性が低下するので、不完全焼入れ層を生成する場合がある。このために、目標とする炭化物量に応じてCr、Moなどの合金元素量を制御する必要があり、高濃度浸炭処理の適用には注意が必要である。また、図11に高濃度浸炭処理後の炭化物の観察例を示すが、適正な処理条件下では1μm～数μmの微細な炭化物が得られているが、炭素量の管理や冷却条件が不適切な場合には、結晶粒界に網目状の炭化物を生成することもあり、強度低下の要因となるために処理条件の適正化が必要である。

4 表面硬化処理技術の今後の動向

浸炭用鋼は、1980年代から種々の変遷を遂げてきたが、近年では浸炭処理技術も大きな変革期を迎えている。1950年代後半にガス浸炭が導入され、自動車の大量生産と連動して進歩してきたが、CO₂の削減や生産性の向上などの観点から、真空浸炭処理技術が着目されるようになってきた。真空浸炭技術は1980年代以前から開発されているが、品質の安定性に欠け、設備としても十分な状況に無かったため普及には至っていなかったが、2000年代に入り、真空浸炭の原理解明が進み設備面での大幅な改善が達成されたことから、ガス浸炭に変わる技術として着目されている^{32,33)}。

表2に、真空浸炭処理の長所と短所を示す。真空浸炭の最大の特長は、ガス浸炭の課題とされてきた酸化が生じないことであり、材料開発に大きな影響を与えたと言える。また、設備構造面からガス浸炭に比べて高温の処理が可能で処理時間が短縮できるため、生産性の改善が期待される。

先述したように、これまでの高強度材の材料設計では粒界酸化を抑制するために低Si、低Cr化を行う一方で、軟化抵抗性を向上させる目的で高Si、高Cr化の対策が取られてお

り、全く異なった合金設計が実施されてきたが、真空浸炭の適用によって合金設計面から粒界酸化への対策が不要となり、歯元強度と面強度を両立させる新たな材料開発の可能性が見出されたと言える。

一方、真空浸炭ではガス浸炭処理に用いられる炉内のカーボンポテンシャル制御が適用できないため、品質の安定化に向けた新たな制御技術が必要とされている。現在では、各種の制御法が提案されており、品質面の問題も解決されてきている。

真空浸炭におけるもう一つの課題は過剰浸炭が生じることであり、実部品を処理した際に見られる部位による炭素濃度の差異である。図12に、汎用の浸炭用鋼であるSCr420で製造した試験片のエッジ角度と表層炭素濃度の関係を示す。同一条件化ではエッジ角度が鋭利なほど表層の炭素濃度は高く、平坦部（エッジ角度180°）の炭素量を0.8%狙いで処理した場合、90°の部位では1.2%以上の炭素量であることがわかる。実際の部品では必ず鋭角部が存在するので、全ての部位を均一な炭素濃度に調整することは不可能であり、強度特性を低下させないためには炭素濃度の差を極力小さくすることが望まれる。

表2 真空浸炭処理の長所と短所

長所	酸化しない(粒界酸化の抑制)	⇒ 高強度化が期待できる
	酸化・浸炭阻害が発生しない	⇒ 合金設計の自由度が大きい
	高温処理が容易にできる	⇒ 処理時間を短縮できる
	表層C濃度が高い	⇒ 処理時間を短縮できる ⇒ 炭化物析出が容易にできる
	熱効率が良い	⇒ CO ₂ 排出削減が期待できる
	排気ガスが少ない	⇒ クリーン環境で作業できる
短所	部位によってC分布が異なる	⇒ 強度低下が生じる場合がある
	作業条件が複雑である	⇒ 処理別に条件設定が必要である
	焼入れ温度が低下する場合がある	⇒ 品質が安定しない

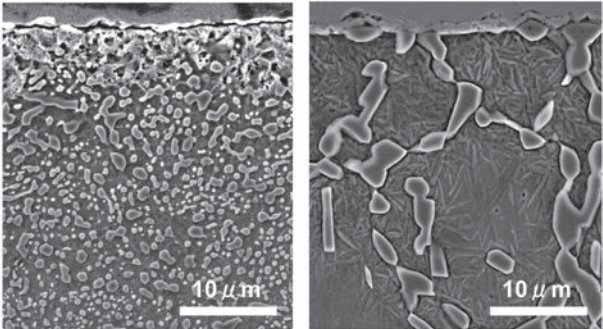


図11 高濃度浸炭処理材の炭化物のSEM観察例

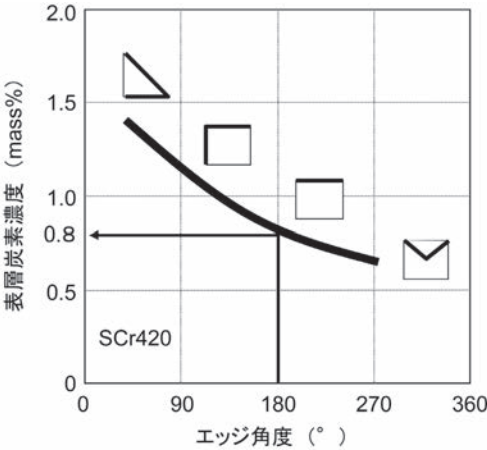


図12 真空浸炭処理における表層炭素濃度におよぼすエッジ角度の影響

このような過剰浸炭の防止の観点から材料開発が試みられ、森田らによって新たな真空浸炭用鋼が提案されており、歯元曲げ疲労強度と面疲労強度を両立した真空浸炭用鋼が実用化されている。また、森田らは、過剰浸炭の発生メカニズム解明に取り組み、計算状態図による考察と実験的な手法によって、真空浸炭時の鋼表層部に侵入する炭素量が鋼の成分組成によって異なることを見出しており、新たな材料開発を提案している^{34,35)}。

一方、近年では環境対策の観点からあらゆる分野でCO₂削減の取り組みが実施されているが、真空浸炭技術に対して熱処理分野でのCO₂削減の期待が寄せられている。一般のガス浸炭では、炉内の雰囲気管理を行うため、部品を処理していない間も浸炭ガスを消費しているのに対し、真空浸炭処理では部品処理時にのみガスを使用するので、CO₂の発生を大幅に削減することが可能である。また、実際の浸炭に必要とされるガス量も真空浸炭処理の方が少ないので、CO₂の削減効果が大きいと言える。

近年、浸炭処理の領域へ窒化・軟窒化処理の適用が拡大しつつある。窒化・軟窒化処理の最大の特長は、先にも述べたように部品の変形(ひずみ)が小さいことであり、この特性に着目したものである。変形を生じた歯車は局部接触のために騒音や振動発生の要因となり、強度も低下することがある。一般には、変形を防止するために、熱処理後の変形を考慮して機械加工がなされている。また、浸炭処理後に歯形修正の工程を追加するなどの対策が実施されており、工程削減の観点からもひずみに有利な窒化・軟窒化処理が見直されている。

部品の小型化の進行も、窒化・軟窒化処理拡大の背景にあると言える。歯車の小型化は小モジュール化を意味するが、同時に、必要とされる硬化深さが浅くなることも意味している。窒化・軟窒化処理の課題は硬化層が浅いことであり、強度改善に向けた研究開発が行われてきたが、要求される硬化深さの変化によって窒化・軟窒化処理の適用可能な範囲が拡大してきた。現在では、遊星変速機構の歯車などに適用された事例が見られ、今後更に適用が拡大されると思われる。

窒化・軟窒化処理も、ガス窒化、塩浴窒化、イオン・ラジカル窒化などの処理を主体に、設備開発や材料開発が継続されているが、高強度化に向けたさらなる開発が必要とされている。

5 まとめ

本稿では、表面硬化処理に関する変遷を振り返り、これまでに実用化されてきた各種の高強度材料を解説するとともに、今後の表面硬化処理技術の動向について述べた。

表面硬化処理技術は自動車産業の進歩に連動して進歩してきており、従来は強度改善を主眼に置いた開発が展開されてきたが、近年では、強度に加え環境対策も視野に入れた開発が実施されていることに注目したい。

また、浸炭処理領域の材料開発では、ショットピーニング処理などの表面改質技術や真空浸炭処理技術などの処理技術が材料開発にも大きく影響していることが特徴であり、材料開発と熱処理技術の開発が複合して進行していることにも注目したい。

本稿で紹介したように、これまでに各種の高強度鋼が開発され、同時に、新たな表面硬化処理技術が開発されることによって、部品の高強度化や低コスト化に寄与してきたが、今後も継続した研究開発が必要とされることは言うまでも無い。

自動車産業も、従来のガソリンエンジン車からハイブリッド車、電気自動車へと大きく変化してきており、各種の部品に要求される特性も大きく変化しつつある。材料開発、熱処理技術開発の領域も、この変化に追従した新たな開発が進行することを期待したい。

参考文献

- 1) 例えば内藤武志：浸炭焼入れの実際 第2版，日刊工業新聞社，(1999)
- 2) 例えば(社)日本熱処理技術協会：熱処理技術便覧，日刊工業新聞社，(2000)，788.
- 3) 例えば(社)金属表面処理技術協会：金属表面処理技術便覧，(1981)，1124.
- 4) 紅林豊：第188、189回 西山記念技術講座，(2006)，83.
- 5) 例えば(社)日本熱処理技術協会：サーモ・スタディ 2008 広島
- 6) 例えば(社)日本熱処理技術協会：サーモ・スタディ 2009 静岡
- 7) 川寄一博：電気製鋼，67 (1996)，44.
- 8) 水馬克久，川寄一博：熱処理，27 (1987)，162.
- 9) 福田達：特殊鋼，46 (1997)，35.
- 10) 高田勝典：特殊鋼，46 (1997)，11.
- 11) 瓜田龍実，並木邦夫：電気製鋼，63 (1992)，59.
- 12) 瓜田龍実，並木邦夫：電気製鋼，61 (1990)，14.
- 13) 例えば(社)日本鉄鋼協会 自動車用材料検討部会(社)自動車技術会 材料部門委員会：表面硬化処理の新しい技術と特性第Ⅱ期 WG 活動報告書，(1998)
- 14) 葛西靖正，大田久司，成瀬隆：電気製鋼，52 (1982)，58.
- 15) R.A.Granger：Met. Trans., 4 (1973)，2231.
- 16) J.S.Karkaldy：Met. Trans., 4 (1973)，2327.

- 17) 並木邦夫, 磯川憲二: 鉄と鋼, 72 (1986), 2117.
 - 18) 磯川憲二, 並木邦夫: 電気製鋼, 57 (19886), 4.
 - 19) 磯川憲二, 並木邦夫: 電気製鋼, 57 (19886), 13.
 - 20) 並木邦夫, 飯久保知人: 電気製鋼, 59 (19888), 5.
 - 21) 久松定興, 金沢孝: 自動車技術, 41 (1987), 722.
 - 22) 秦野敦臣, 並木邦夫: 電気製鋼, 63 (1992), 22.
 - 23) 羽生田智紀, 紅林豊: 電気製鋼, 75 (2202), 73.
 - 24) 羽生田智紀, 中村貞行: 電気製鋼, 73 (2200), 59.
 - 25) 坂本和夫, 福住達夫, 上野英生: 三菱製鋼技術報, 30 (1996), 1.
 - 26) 平井学, 宇野光男, 中里福和: 住友金属, 41 (1989), 455.
 - 27) 渡辺陽一, 荒田晃, 鈴木信一, 三島良直: 熱処理, 39 (1999), 98.
 - 28) 渡辺陽一, 成田直樹, 梅垣俊造, 三島良直: 鉄と鋼, 84 (1998), 66.
 - 29) 伊藤樹一, 羽生田智紀, 中村貞行: CAMP-ISIJ, 13 (2000), 543.
 - 30) 木村利光, 並木邦夫: 日本熱処理技術協会講演大会概要集, 30 (1990), 30.
 - 31) 木村利光, 並木邦夫: 電気製鋼, 63 (1992), 4.
 - 32) 河田一喜: 特殊鋼, 58 (2009), 29.
 - 33) 大林巧治: Automotive Technorgy, 11 (2007), 160.
 - 34) 森田敏之, 井上幸一郎, 羽生田智紀: 電気製鋼, 77 (2006), 4.
 - 35) 森田敏之, 羽生田智紀: 鉄と鋼, 92 (2006), 268.
- (2010年5月6日受付)