

## 高硬度・高靱性過共析鋼 TOUGHFIT™

## 1. はじめに

カーボンニュートラル社会の実現に向けて、自動車や建設機械、産業機械業界では、部品の小型・軽量化による燃費・電費の改善、さらには部品製造工程における熱処理の簡素化など、CO<sub>2</sub> 排出量削減に繋がる様々な取り組みが進められている。

これらの取り組み対象の一例である耐摩耗部品や高い疲労強度が求められる部品は、高硬度であることが前提となり、更には稼働中の突発的な衝撃に対応するため、靱性と両立が必要となる。

鋼の硬度と靱性はトレードオフの関係にあることが一般的に知られており、高硬度が求められる部品に使用される過共析鋼は粒界に析出した初析炭化物が弱点となり、粒界破壊が生じ易いため低靱性となる<sup>1)</sup>(図1)。したがって、高靱性化のためには、その弱点を克服する鋼種成分設計と熱処理技術の確立が課題であった。

当社、コマツ、ならびに国立大学法人 大阪大学(注：現在は本テーマを国立大学法人 名古屋工業大学へ引継ぎ研究中)からなる産学連携チームはこの課題に取り組み、高炭素鋼の弱点であった結晶粒界を強化し、さらに結晶粒内の組織状態を適正化する合金成分と熱処理条件を見出した<sup>1)</sup>。その成果を用いて量産化した高硬度・高靱性過共析鋼がTOUGHFIT™(タフフィット)である。以下にその特徴を紹介する。

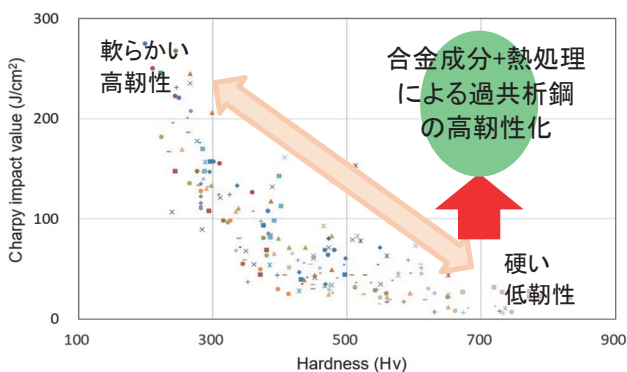


図1 一般的な硬さと靱性の関係ならびにTOUGHFITの狙い

## 2. TOUGHFIT™の特徴

## 2.1. TOUGHFIT™の合金成分

表1にTOUGHFIT™の概略成分を示す。TOUGHFIT™は硬化熱処理後に700Hvクラスの高硬度とするため、

0.6mass%Cを添加した過共析組成を基本とする。その他の特徴的な添加元素として、焼入性の確保のためCr,Moを添加し、焼戻し軟化抵抗性確保のためにSi,Cr,Moを添加している。Vは後述する高靱性化熱処理のキーとなる元素であり、その詳細は2.3で記述する。

表1 TOUGHFIT™の概略成分 (mass%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0.6	添加	0.4	添加	0.3	添加

## 2.2. 高靱性化熱処理

TOUGHFIT™の高靱性化熱処理方法を図2に示す。熱処理は、鋼中の粗大な炭化物の固溶化と組織のパーライト化を目的とした前処理と900℃～950℃のオーステナイト域からのずぶ焼入れであるFM(Full Martensite)処理からなる<sup>2),3)</sup>。また、加工性の確保を目的に前処理と焼入れの間に追加で焼鈍を行うことも可能である。焼戻しを含めたこれらの熱処理条件はユーザーの狙いとする硬度・靱性に応じて適宜調整することが必要である。

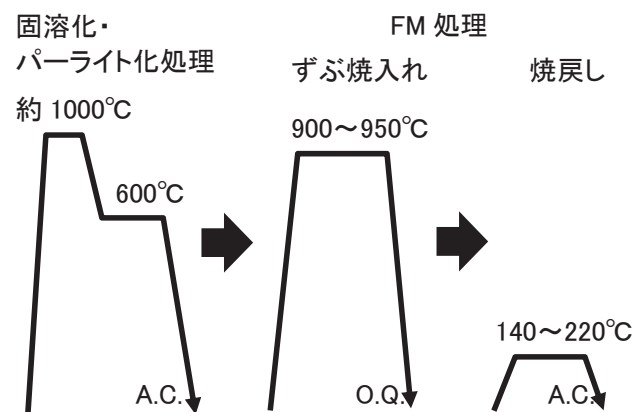


図2 高靱性化熱処理パターン

## 2.3. TOUGHFIT™の高靱性化メカニズム

TOUGHFIT™では、一般的に選定されるずぶ焼入れ温度に比べて、高温とすることで粒界に析出した初析炭化物を固溶させている。ただし、この場合には、旧オーステナイト粒径が粗大となる。そこでTOUGHFIT™は、Vを添加することで、図3で示されるようにVCを微細分散させた。図4にV添加の有無による結晶粒の違いを示す。TOUGHFIT™は、微細分散したVCによるピン止め効果から整細粒化していることがわかる。

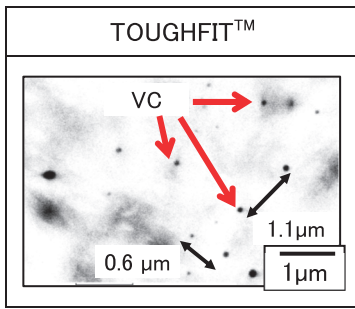


図3 VCの微細分散を示す反射電子像

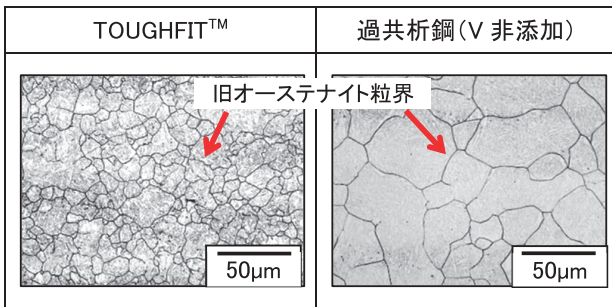


図4 旧オーステナイト粒径を示す光学顕微鏡写真 (飽和ピクリン酸腐食)

#### 2.4. TOUGHFIT™の靱性(シャルピー衝撃試験)

TOUGHFIT™の靱性を評価するためにシャルピー衝撃試験を実施した。図5にTOUGHFIT™(高靱性化熱処理)と同硬さレベルである過共析鋼JIS SUJ2(ずぶ焼入れ)を比較としてその結果を示す。TOUGHFIT™は、60HRCの硬度で約160J/cm<sup>2</sup>の衝撃値を示し、これはSUJ2のずぶ焼き材と比較して10倍以上である。

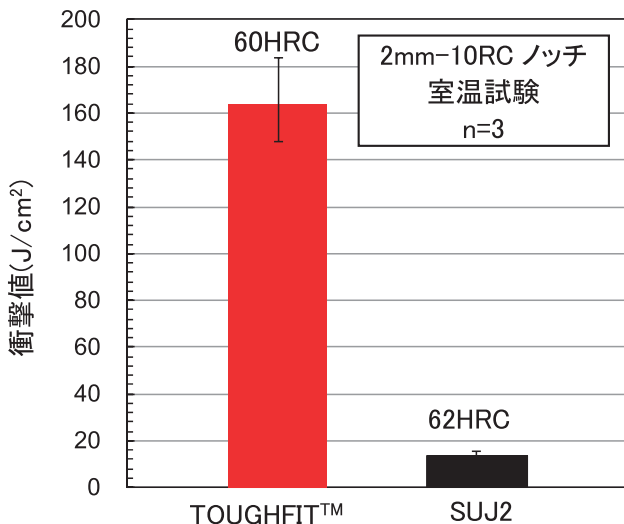


図5 シャルピー衝撃値の比較

### 3. 建設機械用耐摩耗部品への適用による市場実績

産学連携共同研究の成果を基に開発されたTOUGHFIT™は、共同研究機関であるコマツ殿にて様々な試験・検証が実施され、高い耐摩耗性と耐衝撃性が要求されるトンネル掘削機のカッタリング用鋼として実用化されている(図6)。TOUGHFIT™が採用されたトンネル掘削機は市場にて良好な使用実績が得られている。

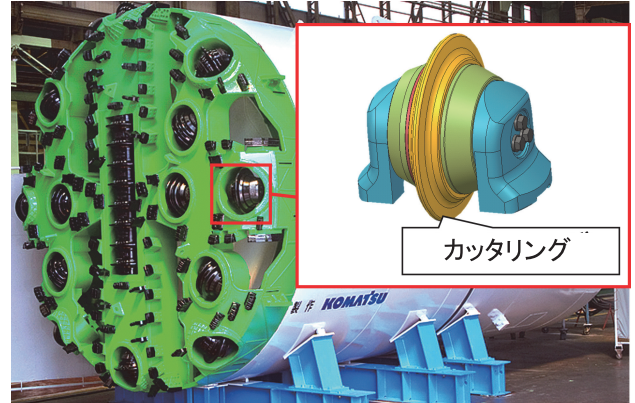


図6 コマツ製トンネル掘削機の外観とカッタリングの形状

### 4. TOUGHFIT™のさらなる展開

自動車や建設機械、産業機械で使用される軸受やギヤ・シャフトなどの駆動系部品では、部品の表面硬さと耐衝撃性の確保を目的に、ガス浸炭焼入れが多用される。ところが、ガス浸炭処理は浸炭ガスと部品表面の平衡反応によって炭素を侵入させる際に多量のCO<sub>2</sub>が排出されるため、カーボンニュートラルの観点からガス浸炭に依らない熱処理方法が望まれている。

TOUGHFIT™は、ずぶ焼入れにて高硬度と高靱性の両立が可能であり、本鋼と高靱性化熱処理を適用することで部品製造工程におけるCO<sub>2</sub>排出量の削減が期待される。そこで、ガス浸炭からの代替を前提に高靱性化熱処理を施したTOUGHFIT™とSCM420のガス浸炭材との強度特性を比較した。

#### 4.1. 耐ピッチング特性(ローラーピッチング試験)

ギヤに要求される面疲労強度を評価するため、ローラーピッチング試験を実施した。図7にローラーピッチング試験の模式図を示し、図8に寿命試験結果を示す。TOUGHFIT™はSCM420ガス浸炭材と比べおよそ2倍のピッチング寿命を示す。TOUGHFIT™が長寿命となる理由として、高Si, CrかつMoが添加された組成であることから高い焼戻軟化抵抗を有することが考えられる。

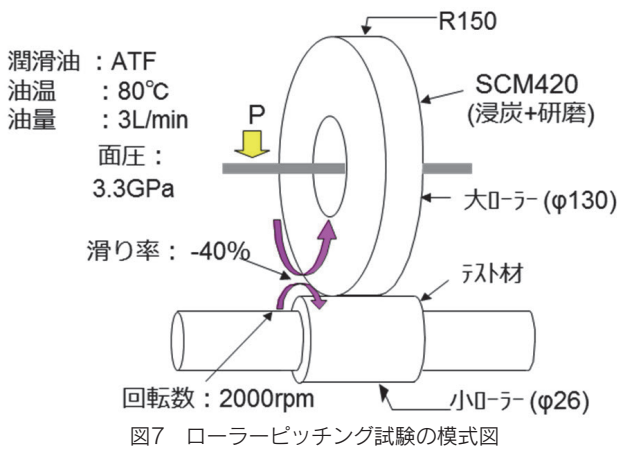


図7 ローラーピッチング試験の模式図

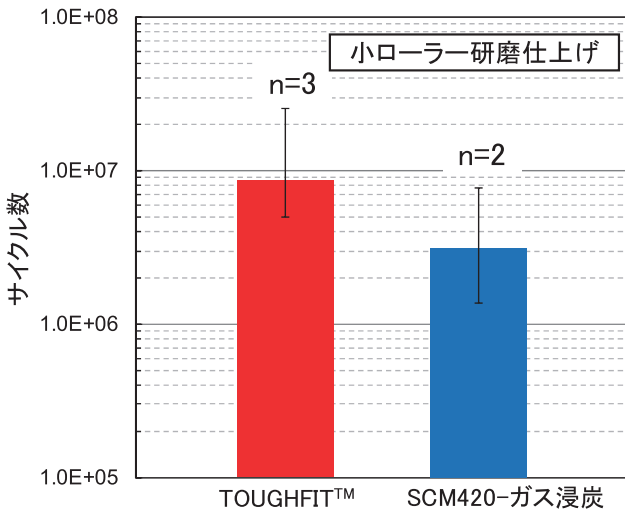


図8 ローラーピッチング寿命の比較

4.2. 耐ねじり強度 (ねじり試験)

シャフトに要求される特性として、静ねじり強度ならびにねじり疲労強度の評価を実施した。図9にTOUGHFIT™とSCM420 ガス浸炭材の静ねじり試験結果を示し、図10に平滑ねじり疲労試験結果を示す。TOUGHFIT™は

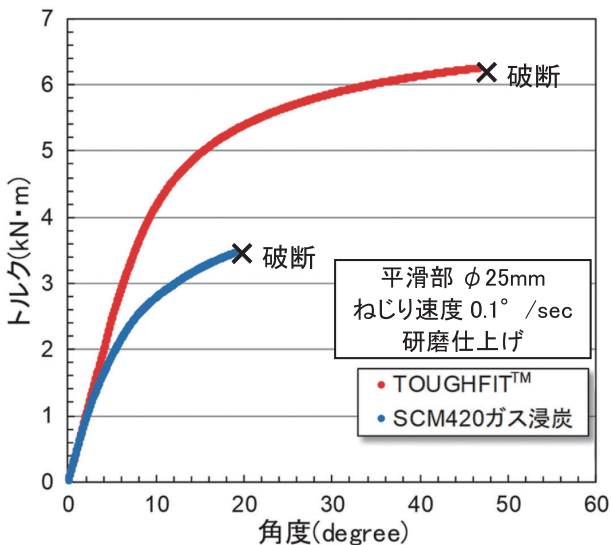


図9 静ねじり強度の比較

SCM420 ガス浸炭材と比べて高い静ねじり強度とねじり疲労強度を示す。TOUGHFIT™は高靱性化熱処理によって粒界破壊が抑制されたこと、そして、ずぶ焼入れで高い平均断面硬さが得られることから優れた耐ねじり強度を示すとみられる。

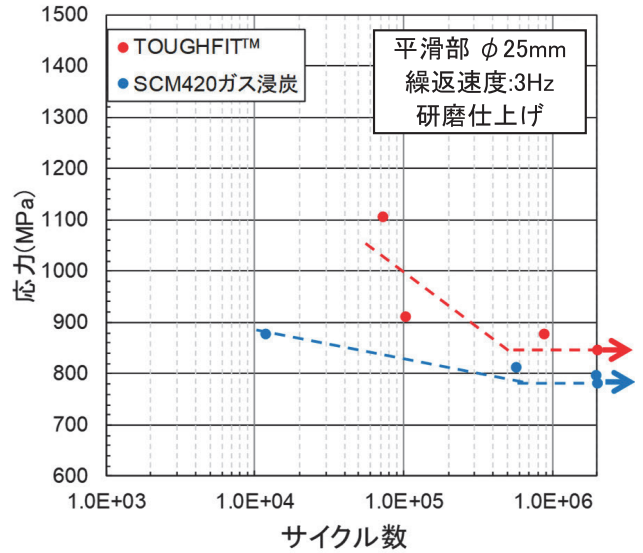


図10 平滑ねじり疲労寿命の比較

5. おわりに

本稿で紹介したTOUGHFIT™は、ずぶ焼入れを基本とした高靱性化熱処理により、高硬度と高靱性の両立を可能とした過共析鋼である。

これまでガス浸炭焼入れが行われていた部品へTOUGHFIT™を適用した場合、部品製造工程におけるCO<sub>2</sub>排出量削減が見込まれる。また、各種動力伝達部品へ適用した場合、疲労寿命向上に繋がることから、部品の小型・軽量化設計による燃費向上を通じたCO<sub>2</sub>排出量削減が見込まれ、カーボンニュートラルへの貢献が期待される。

参考文献

- 1) 南埜宜俊, 萩原幸司, 山本幸治, 杉本隼之: 熱処理 第62号 第3号 (2022) 79-87.
- 2) 南埜宜俊, 萩原幸司, 相原巧, 平岡和彦, 藤松威史, 杉本隼之, 宮部一夫, 浜坂直治, 山本幸治: 山陽特殊製鋼技報, Vol.26(2019)No1, 36-42.
- 3) 高橋春香, 常陰典正, 藤松威史: 山陽特殊製鋼技報, Vol.28(2021)No.1, 2-13.