

過共析鋼の高靱性化技術の開発

Technological development of high-toughness hyper-eutectoid steel

平塚 悠輔*1、山本 幸治*2、南埜 宜俊*3

Yusuke HIRATSUKA, Koji YAMAMOTO, Yoritoshi MINAMINO

1. 緒言

過共析鋼とは、共析組成以上の炭素を含有する鋼を指し、JIS規格鋼の範疇では高炭素クロム軸受鋼SUJ2が良く知られている。この鋼は工業的な条件下での硬化熱処理状態では、数%の残留オーステナイトを含む高硬度のマルテンサイト組織を基地として直径1 μm 以下程度の球状炭化物が分散した組織となる。工具鋼分野でも高硬度と耐摩耗性の要求から過共析鋼が使用され、硬質炭化物を分散させた合金工具鋼（例えばJIS SKD11）が使用されている。これらの高硬度鋼では硬さと靱性（粘り強さ）との間にトレードオフの関係が有り、過共析鋼は高硬度が得やすい反面、脆いという弱点を持つ。そこで、部品や工具の損壊を防止するために、硬度を下げて靱性を確保する、Ni、Mo等の合金元素を添加・増量して靱性向上を図る、炭素含有量の低い強靱な鋼をベース材料として表層のみを浸炭で硬化するといった方策が採られる。このような現状を打破し、合金元素に頼らずに硬度と靱性を高いレベルで両立する過共析鋼を実現することができれば、工業上の適用範囲が格段に広がることを期待される。本報では、当社－大阪大学殿－コマツ殿において共同研究・開発を行っている過共析鋼の高靱性化技術¹⁾について紹介する。

2. 過共析鋼の高靱性化のためのキー技術

概ねピッカース硬さ700HV以上を有する高硬度鋼では、衝撃的な荷重負荷により粒界破壊（旧オーステナイト粒界に沿った割れ）やへき開破壊（結晶のへき開面に沿った割れ）を呈し、その靱性値は低い。特に過共析鋼の焼入れ組織に散見される粒界上の炭化物は粒界破壊を促進する。このような粒界上の炭化物の除去は粒界の無害化に非常に有効と考えられる。そこで、過共析鋼を加熱した際の炭化物の消失過程を詳細に調べたところ、粒内炭化物は残したままで粒界の炭化物を優先的に固溶・消失させることが可能な画期的な熱処理条件が見出された。また、その条件のもとで

加熱焼入れすることにより強靱化手法として有効な結晶粒（旧オーステナイト粒）の大幅な微細化も同時に達成される。この一連の粒界改質強化と結晶粒微細化のための熱処理をGBA処理（GBAはGrain Boundary Ameliorationの略）と称する。Fig.1には、一般的な過共析鋼の焼入れ組織と対比させてGBA処理を施した焼入れ組織の特徴を模式的に示した。Fig.2はGBA処理を施したSUJ2鋼のミクロ組織を電解エッチングしてSEM観察したものであり、粒界上の炭化物がほぼ消失していること、ならびに旧オーステナイト粒径が平均4 μm 程度に微細化していることが確認できる。

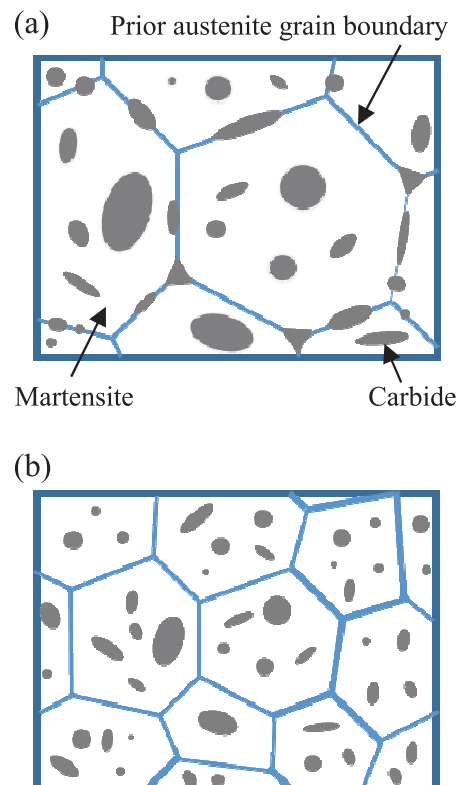


Fig.1 Schematic illustrations of microstructure of hyper-eutectoid steel by (a) conventional quenching and by (b) GBA with carbide free grain boundary and refined grain.

*1：研究・開発センター 軸受・構造用鋼G（現 軸受営業部 軸受CS室）
 *2：コマツ 生産本部 生産技術開発センタ パワートレイングループ
 *3：大阪大学大学院工学研究科 知能・機能創成工学専攻 工学博士

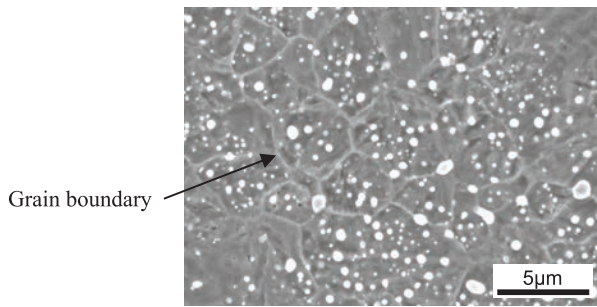


Fig.2 Scanning electron micrograph of SUJ2 after GBA.
(大阪大学 南埜宜俊教授 ご提供)

3. 実験方法

GBA処理による靱性改善効果確認のためのシャルピー衝撃試験用の供試材として、Table1に示すSUJ2鋼ならびにそのC、Mn量を調整したA鋼を100kg真空誘導溶解炉により溶製した。それらの実験鋼塊を熱間鍛造で直径40mmに仕上げ、適切な焼ならしと球状化焼なましを施してからシャルピー衝撃試験片に粗加工した。その後、GBA処理(Fig.3参照)に引き続き低温焼戻し(180℃で180分保持後空冷)を行った後、10RCノッチシャルピー衝撃試験片に仕上げた。なお、Fig.3のGBA処理条件について、今回は鋼種に応じた調整は行わず、両供試材で同じとした。

Table 1 Chemical composition of steels (mass%).

Steel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SUJ2	1.00	0.26	0.40	0.009	0.005	0.07	1.35	0.04
A	0.79	0.26	0.20	0.010	0.005	0.07	1.36	0.04

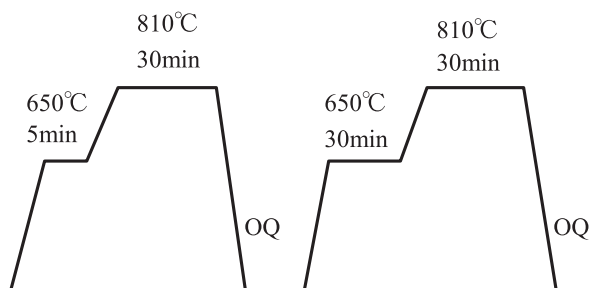


Fig.3 Heat pattern of GBA treatment.

4. 高靱性化効果の検証

シャルピー衝撃試験結果をFig.4に示す。Fig.4中には測定したピッカース硬さ(単位:HV)と旧オーステナイト粒径も併せて示した。GBA処理を施した両鋼はともにロックウェル硬さ換算で60HRC以上の高硬度を有しながら、一般

的なSUJ2焼入焼戻し材(図中点線で示したレベル)と比較して靱性が良好であり、特に成分調整を行ったA鋼においてはGBA処理を施したSUJ2鋼のさらに2倍の高靱性を示した。Fig.5は従来過共析鋼を含めた鋼の硬さと靱性の関係を示すグラフ上に、今回のGBA処理を施したSUJ2とA鋼のデータを任意に指数化してプロットしたものである。この図中におけるGBA処理鋼の位置付けから、700HVクラスの過共析鋼の高靱性化手段として極めて有効であることが確かめられた。今後、適正な鋼種成分とそれに応じたGBA処理を追求することによって、さらなる高靱性化が可能であると考えている。Fig.6にシャルピー衝撃試験時の荷重-変位曲線を示す。通常の硬化熱処理を施したSUJ2に対し、GBA処理を施したSUJ2とA鋼は破断時の荷重が高いとともに破断時に至るまでの変位が顕著に大きく、延性的な破壊挙動を呈していることが分かる。このように過共析鋼のGBA処理材は高硬度でありながら、延性的な破壊挙動を示すことで優れた高靱性を発揮するものと考えている。

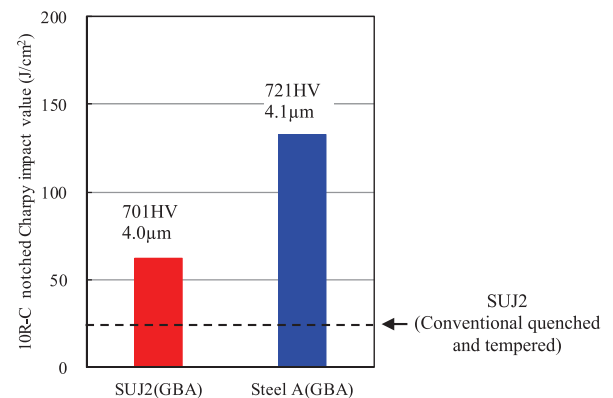


Fig.4 Charpy impact test results.

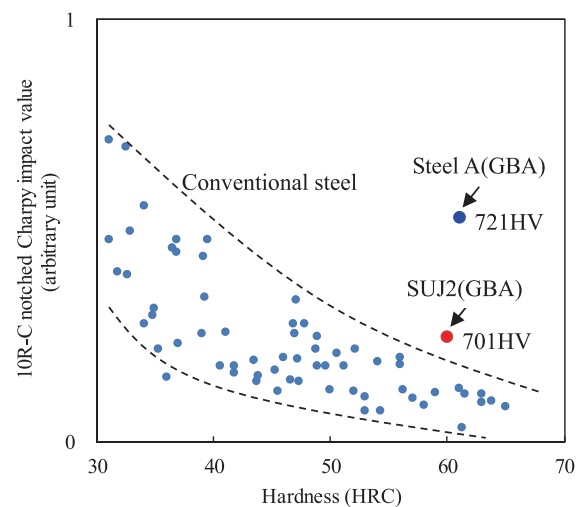


Fig.5 Relationship between hardness and Charpy impact value.

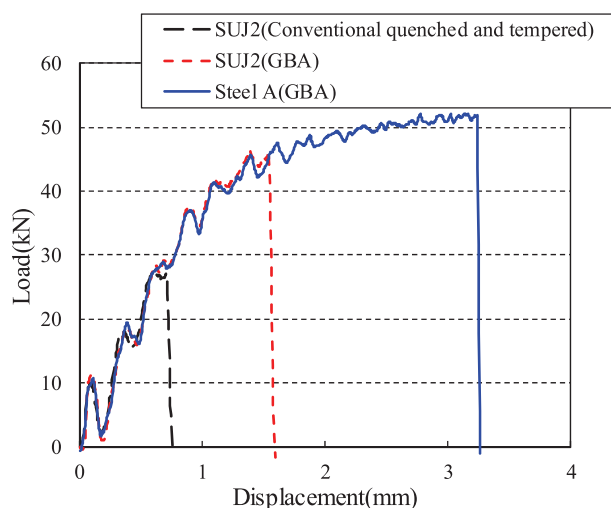


Fig.6 Load-Displacement curves obtained during Charpy test.

5. 結言

本報で紹介した画期的な過共析鋼の高靱性化技術によって、脆さが弱点となっていた高硬度過共析鋼の靱性レベルの飛躍的な改善が実現する。この技術の適用により、これまで過共析鋼が利用されていなかった分野に対しても、過共析鋼を選択肢とした実用化検討が可能になる。以下には、本技術適用により期待されるメリットを示した。

- ・ 部品や金型の諸特性（強度、耐衝撃性、耐摩耗性、寿命、信頼性）の大幅な向上
- ・ 動力伝達部品、軸受等の小型・軽量化の実現
- ・ 省合金型の材料設計による部品コスト低減

2017年2月には本技術に関するプレスリリースを行っており、今後は更なる特性の向上と実用化に向けた開発ならびに実証研究を進めていく予定である。なお、本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託事業「エネルギー・環境新技術先導プログラム」の支援を受けて行っており、ご関係の皆様方に対し、ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 南埜宜俊、鈴木惇一郎、中村公俊、平塚悠輔、常陰典正、山本幸治、宮部一夫：CAMP-ISIJ, 29 (2016), 754.