

鉄鋼材料の 高強度化研究の動向

■はじめに

現在の鉄鋼の材料では、自動車等輸送機器の軽量化・安全性、建築物や道路・鉄道等の高架物の安全性等からあらゆる面での高強度化、長寿命化が図られています。一般に強度が上昇すると延性や靱性は低下することから、実用上はそのバランスを改善するような材料設計が行われます。

鉄鋼材料の性質はミクロ組織の状態により大きく変化するため、化学組成や製造プロセス条件を適切に選択することで、組織の最適化が図られています。ミクロ組織の構成要素としては、結晶中の化学的欠陥である溶質元素(不純物/合金元素)や構造的欠陥である原子空孔および転位、多結晶体や構造/組成の異なる第二相が含まれる場合に形成される結晶粒界および異相界面があります。これらの組織因子は、塑性変形時に転位の移動の障害となり、材料を強化することができます¹⁾。表1に、これらの障害による強化発現の因子と強化の手段を示します。障害の数を多くすることが強化の基本原理ですが、鉄鋼材料の高強度化では塑性加工と熱処理を組み合わせた加工熱処理により、相変態・析出・再結晶をうまく結合させて微細組織の制御が行われています。

本稿では、最近の高強度鋼板を中心とした鉄鋼材料の高強度-高延性化の設計の動向について紹介します。

■近年の高強度-高延性鋼板の開発

自動車用薄鋼板の高強度化は、70年代のオイルショック、90年代以降のさらなる燃費向上と衝突安全性への要求を受けて、現在もたゆまず追求されています²⁾。しかしながら、薄鋼板は、通常複雑な形状にプレス加工されるため、高強度と高加工性の両方を満足することが必要です。図1に示した材料試験(例えば引張り試験)で得られる応力-歪み曲線は、強度と延性の指針を与える重要なデータです。強度については材料が塑性変形を始める応力として表される降伏強度(YS)と材料が支えられる最大応力である引張強度(TS)があります。一方、延性については、材料の断面積が均一に減少しながら変形する限界の歪みを表す均一伸び、変形が集中して断面収縮が局部的に起こるネッキング現象が開始してから破断するまでの変形量である局部伸び、その和である破断伸び(EL)が重要なパラメータとなります。ネッキングの開始は、変形応力 σ が加工硬化率($d\sigma/d\varepsilon$)を上回る塑性不安定条件に達するところで起こる³⁾ことから、加工硬化率を上げることが延性向上の1つの手法です。

鉄鋼製造プロセスにおける加工熱処理の温度範囲(およそ1300°C以下)で考えると、純物質としての鉄は、910°C以上の高温では結晶構造がfcc(オーステナイト: γ)、低温ではbcc(フェライト: α)です。図2は、低炭素鋼を高温から冷却した時に得られる種々の相変態組織の透過型電子顕微鏡写真です。(a)のフェ

表1 金属材料の強化因子と手段

強化因子	重要なパラメータ	強化の手段
溶質元素	・溶質元素量 ・溶質元素との原子サイズの差	・溶質元素量の増加 ・原子サイズの差が大きな溶質元素の添加
転位	・転位密度(単位面積と交差する転位の本数)	・転位密度(塑性変形量)の増加
結晶粒界	・結晶粒径 ・結晶間方位差	・結晶粒径の微細化 ・結晶間方位差の増大
第二相	・第二相の強度、粒子サイズ、量	・第二相の量の増加 ・粒子サイズの増大(切断機構) ・粒子サイズの微細化(バイパス機構)

ライトは熱処理のままでは転位密度が低く、強度は低いですが高加工性を要求される自動車の外板などに用いられます。(b)のパールライトは、鉄道レールや冷間伸線したピアノ線、スチールコードとして用います。(c)のベイナイトや(d)のマルテンサイト(α' : bcc or bct)は、転位密度が高く、第二相としてセメント粒子を含むため、フェライトに比べて高い強度を示します。従来、マルテンサイト鋼は焼き入れ焼戻しを行う機械構造用鋼、ベイナイトは高強度厚鋼板に主に用いられていましたが、自動車用高強度薄鋼板ではフェライト地に硬質相であるマルテンサイトやベイナイトを含む複相組織が広く用いられるようになってきました。

図3は、種々の微細組織を持つ低合金鋼の引張強度と破断伸び量との関係を表しています。実用の高強度鋼板(ハイテン)であるフェライト+マルテンサイト二相組織を持つDP鋼(Dual Phase)鋼やフェライト+ベイナイト+残留オーステナイト三相組織からなるTRIP鋼(Transformation-Induced Plasticity)鋼は、高強度に加えて大きな延性を示します。図4は、これらの鋼種の変形時の組織変化を模式的に示しています。ともに、0.1-0.2重量%程度の炭素を含む低炭素低合金鋼ですが、DP鋼はフェライト+オーステナイト二相域に昇温後そのまま急冷して、未変態オーステナイトを硬質

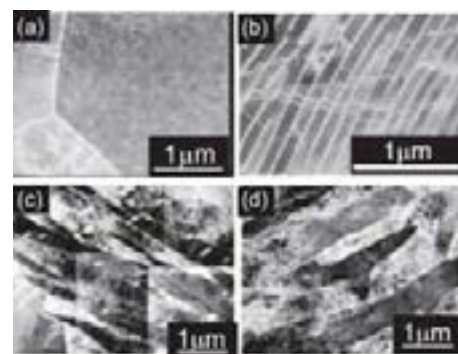


図2 低炭素鋼の変態組織。(a)フェライト(TS:0.3~0.8MPa)、(b)パールライト(TS:0.8~1.2MPa)、(c)ベイナイト(TS:0.5~1.6MPa)、(d)ラスマルテンサイト(TS:0.6~4.4MPa)

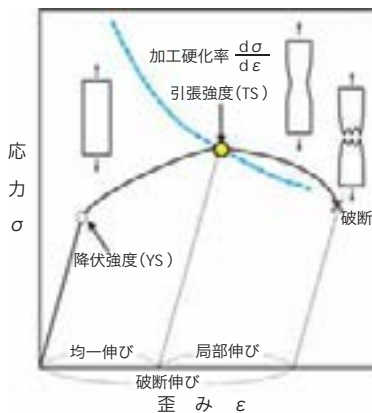


図1 応力-歪み曲線における強度と延性を表す重要パラメータ

な高炭素マルテンサイトとします。これを変形すると、軟質相であるフェライトが優先的に変形し加工硬化が大きくなります。一方、TRIP鋼は、DP鋼と同様の二相域加熱後 A_1 温度以下でのオーステナイト処理を行い、未変態オーステナイトに炭素をより濃縮させて安定化した後室温に冷却します。TRIP鋼では、Siを1.5重量%程度添加することでオーステナイト処理中のベイナイト変態時にセメントの生成を抑制し、炭化物フリーで転位密度の高いベイニティックフェライトを生成させ、未変態オーステナイトへの炭素濃縮をさらに大きくし、残留オーステナイトを得ています。塑性加工時に残留オーステナイトがマルテンサイト変態する変態誘起塑性(TRIP)現象が起こると、生成した硬質マルテンサイトが周囲の軟らかいフェライト中にたくさんの転位を導入し加工硬化が向上します。大きな歪み領域でも加工硬化率を高く維持することができると、均一伸びがより大きくなります。このため、図4のように、変形にともなって徐々にTRIP現象が起こる組織制御が行われ、高い強度-延性バランスが実現されています。自動車用薄鋼板では、このような第二相粒子の分散状態の精緻な制御により、高加工性と高強度を兼ね備え、衝撃時のエネルギー吸収も大きい材料が開発され、燃費や安全性の向上に貢献しています。

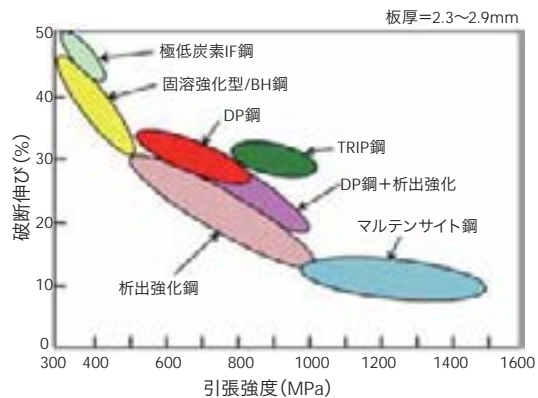


図3 種々の薄鋼板の強度-延性バランス

●シリーズ● 材料の素顔に迫る

東北大学金属材料研究所

副所長 教授Ph.D 古原 忠

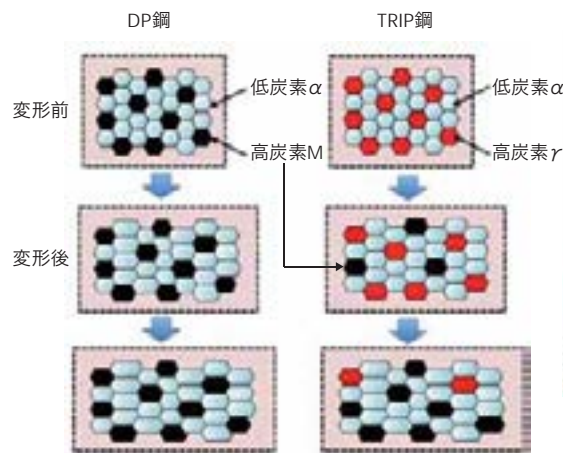


図4 DP鋼とTRIP鋼の変形時の組織変化

■更なる高強度-高延性化に向けて

図3に挙げた現在の薄鋼板の強度-延性バランスの指標としては、 $TS \times EL = 20000 \text{MPa} \cdot \%$ が上限ですが、最近これを大きく上回る新合金の開発研究が欧米および韓国を中心に行われています。

Q&P(Quench & Partitioning)プロセス⁴⁾は、オーステナイト化後マルテンサイト変態の開始温度(M_s 点)と終了温度(M_f 点)との間に焼き入れ、さらにTRIP鋼のオーステナイト処理と同様の温度に昇温することでマルテンサイトから未変態オーステナイトへの炭素分配を促進させるものです。このプロセスではTRIP鋼よりも高強度であるにも関わらず十分な延性が得られます。ただし、合金成分としては焼き入れ性の確保のために比較的Mn添加量が高めで、TRIP鋼と同様にセメント析出を抑制するためにSiも添加されています。

もう1つの高強度-高延性化の新たな方向は、高Mnオーステナイト鋼の利用です⁵⁾。図5はオーステナイトの塑性変形様式を示したものです。通常は転位によるすべりで変形しますが、準安定オーステナイト合金では先に述べた $\gamma \rightarrow \alpha'$ 応力誘起マルテンサイト変態も起こります。しかし、積層欠陥エネルギーが低下し転位の拡張がしやすくなると、最密六方晶(hcp)である ϵ マルテンサイトへの応力誘起変態やfccの双晶変形が起こるようになります。Mnはオーステナイトを安定にする元素ですが、同時に積層欠陥エネルギーを下げて $\gamma \rightarrow \epsilon$ マルテンサイト変態や双晶変形を起こしやすくなります。塑性変形時に微細に変形双晶が導入されると加工硬化が大きくなり、双晶誘起塑性(TWIP: TWinning-Induced Plasticity)による高強度-高延性が発現します。変形で導入された格子欠陥を炭素が固着する動的歪時効が起こると加工硬化が向上するため、合金の高炭素化も指向されています。高Mn鋼はまだ製造が容易ではありませんが、その優れた機械的特性は注目すべきものです。

近年の日本における国家プロジェクトでは、実用プロセスに重きを置いた鉄鋼の組織と特性に関する研究が推進されました。表2はこれ

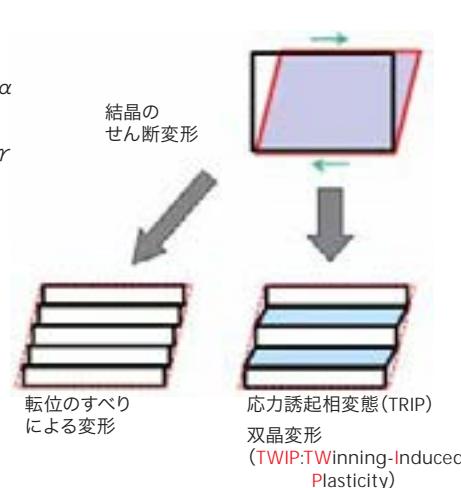


図5 鉄合金オーステナイトの変形様式

らをまとめたものです。初期のプロジェクトでは、加工熱処理の極限を追求した大歪み加工プロセスによる結晶粒微細化が追求されました。最近では、超強加工プロセスを用いた超微細粒鋼創製の研究が盛んです⁶⁾。バルク材として数百ナノメートル以下までのフェライトの結晶粒微細化を行うと、著しい強度上昇と延性脆性遷移温度の低下が起こります。しかし、フェライト単相の超微細粒化は加工硬化の低下による均一伸びの減少や吸収エネルギーの低下をもたらす、強度-延性バランスを考慮すると最適径があることが明らかになっています。一方で、超微細フェライト鋼の延性改善のために、粗大粒と超微細粒の混粒組織や、鉄炭化物など硬質第二相の微細分散組織の利用が行われています。

一方、表2に挙げた最近のプロジェクトでは、ナノサイズの析出物の分散制御が高強度化、高延性化の観点から追求されています⁷⁾⁸⁾。フェライト変態時の相界面析出によりナノサイズの合金炭化物を分散させると大きな析出強力が得られ、これを利用して高強度-高延性の低炭素薄鋼板も実用化されています。このようなナノ析出物は転位の障害として動くと共に、転位の分布の均一化により動的回復を促進しマイルドな加工硬化状態を達成できる

可能性があります。理想的には高強度と大きな均一伸びに加えて、局所的に変形が集中せずポイド形成が抑制されることで優れた局部延性も期待されます。今後も、ナノサイズのクラスタリング・析出組織の更なる制御による高強度化-高延性化が望まれます。

第二相の形状制御も大変興味ある研究課題です。パーライト鋼のような硬質相と軟質相が層状になった複相組織では、加工硬化が大きく優れた強度-延性バランスが得られます。近年の研究では、200°C程度の今までにない低温で起こる炭化物生成を伴わないベイナイト変態を利用すると、ベイニティックフェライトとオーステナイトの二相が数十ナノメートル程度の厚さで積層した層状二相組織が得られ、2GPaも超える高強度と20%を超える高延性が両立できることが明らかになっています⁹⁾。また、最近日本で行われている複層鋼板研究プロジェクト¹⁰⁾では、高強度層と高延性層を幾何学的に組合わせた材料が研究されていますが、各層の強度比や靱性、高延性層の加工硬化特性、界面強度などを制御し、高い強度-延性バランスを得ようと試みられています。

■最後に

以上のように、鉄鋼材料における高い力学的機能の研究開発はたゆまなく行われています。今後は高強度化-高延性化の更なる追求とともに、持続可能社会に適した高リサイクル・低環境負荷鋼の利用、バルク全体の特性を向上させるのではなく傾斜機能化や複合化技術の追求によって更なる高機能化を図ることも重要です。そのためには、特性を支配する原理原則の解明とそれに基づいた材料開発および先端プロセス技術と密接に連携した材料設計がますます必要とされています。

参考文献

- 1)加藤雅治:入門転位論、裳華房、(1999)、139-154
- 2)自動車用材料共同調査研究会編:ハイテンハンドブック、日本鉄鋼協会、(2008)
- 3)駒井謙治郎編:機械材料学、日本材料学会、(1991)p73
- 4)J. G. Speerら:Acta Mater. 51(2003)、2611
- 5)Ujooon Kwon:Proc. of the 1st Int. Conf. on High Manganese Steels (HMnS2011)、2011
- 6)辻伸泰:鉄と鋼、94(2008)、582-589
- 7)長瀬康伸ら:鉄と鋼、94(2008)、553-561
- 8)鉄鋼材料の革新的効用度:高機能化基盤研究開発プロジェクト第1回シンポジウム講演予稿集、(2009)
- 9)C. Garcia-Mateosら:ISIJ Int. 43(2003)、1821
- 10)文科省「ナノテクノロジー-材料を中心とした融合新興分野研究開発」組織制御構造体開発プロジェクト成果報告資料、(2011)

表2 近年の鉄鋼研究プロジェクト

プロジェクト	期間(年度)	主な研究内容
超鉄鋼材料研究(STX-21)	1997~2006	超微細粒鋼、高靱性高強度鋼 高効率発電用耐熱鋼、高耐食性鋼
メソスコピック組織制御材料創製技術の研究開発(鉄系)	1997~2001	超微細粒鋼創製による高強度-高延性化
環境調和型超微細粒鋼創製基盤技術の開発(PROTEUS)	2002~2006	超微細粒鋼板の工業製造基盤技術および革新的接合技術
ナノメタル技術(鉄系)	2001~2005	Cu析出制御による高強度・高延性化
鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発	2007~2012	厚板溶接部の信頼性・寿命向上のための溶接基盤技術 特性の最適傾斜機能を付与する機械部品鍛造技術