

鉄鋼材料の高強度化技術

Recent Activities in Research of High Tensile Strength Steels

九州大学 大学院 工学研究院
材料工学部門
教授古君 修
Osamu Furukimi

1. はじめに

鉄は全世界の金属生産量の94%を占め、その実用性はゆるぎないものである。しかし、この鉄鋼材料が日々進歩を続け、いかに環境や安全に寄与しているかの認識度は、決して高くない。高強度の鉄鋼材料を開発することにより、自動車の軽量化が図られ、環境浄化を押し進めている。また耐衝突安全性向上により、2003年度で400人もの人が、死亡事故から逃れられているとの試算が報告されているが¹⁾、この安全を支えているのは、様々な高強度鋼板の開発である。自動車用鋼板のみならず、現在、鉄鋼材料開発研究の大半は、高強度化に向けられ、強度だけを見ると、4000MPa級の線材の実用化が検討されている²⁾。

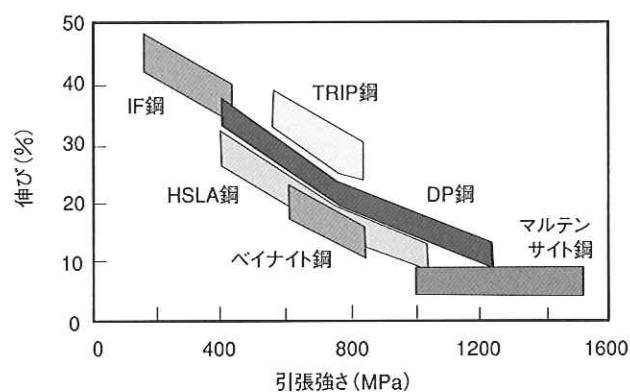
材料の強化機構は、①粒界強化、②析出強化、③転移強化、および④固溶強化に分類されるが、その中で粒界強化が唯一、強度と靱性をともに向上させる。しかしその他の機構では、強度が増加するに伴い、靱性や延性が低下するという大きな問題を抱えている。この破壊抵抗性の低下は、厚鋼板でいえば、脆性破壊の危険性を高め、薄鋼板では成形性を損なう。また粒界強化による結晶粒の微細化で、強度と靱性を向上しても、溶接施工では1400℃以上の高熱にさらされるため、結晶粒の粗大化を、現地施工も含め抑制する技術の開発が欠かせない。したがって高強度鋼板は、各用途や部材で必要な、強度-靱性あるいは延性バランスを見積もり、コストも考慮して開発していく必要性があり、多くの研究開発力を要する。

本解説では、最近の高強度鋼板開発に関する研究トピックスをまとめる。

2. 強度と延性、靱性の関係

高強度鋼板として、低合金高張力鋼 (HSLA鋼: High Strength Low Alloyed Steel)、マルテンサイト鋼、ベイナイト鋼、フェライト-マルテンサイトあるいはベイナイト2相組織鋼 (DP鋼: Dual Phase Steel)、加工誘起変態鋼 (TRIP鋼: TRansformation Induced Plasticity Steel)、微細粒鋼など多くの種類が開発されてきた。これらの鋼板は、前節で述べた強化機

構を組み合わせて高強度化を図っている。代表的鋼種の引張強さと伸びとの関係を図1に示す³⁾。伸びは延性の一つの指標であり、薄鋼板ではプレス成形性、とくに張出し成形性との相関性が強い。いずれの高強度鋼板でも、強度の増加に従い伸びは低下するが、しかし同じ強度レベルで見ると、TRIP鋼の伸びがもっとも高く、HSLA鋼やベイナイト鋼の伸びが低い。

図1. 各種高強度鋼板の引張強さと伸びの関係³⁾

つぎに各種厚鋼板の強度とシャルピー試験で評価した、50%延性-脆性破面遷移温度 (50%DBTT) との関係を図2に示す。やはり加工誘起変態 (TRIP) 効果に起因し、9%Ni鋼は他の高強度鋼に比較して靱性が高い。なおこの鋼種においては、Niによる靱性向上も靱性向上の要因であることを付け加えておく。

以上述べたように、組織制御することにより高強度材でありながら、延性および靱性を確保することが可能であり、その中でTRIP現象を活用することが極めて有効な手段であるといえる。次節では、このTRIP鋼について述べる。

3. TRIP鋼

1960年代初頭にZackayらによって、オーステナイト相が加工されるときにマルテンサイト相に変態

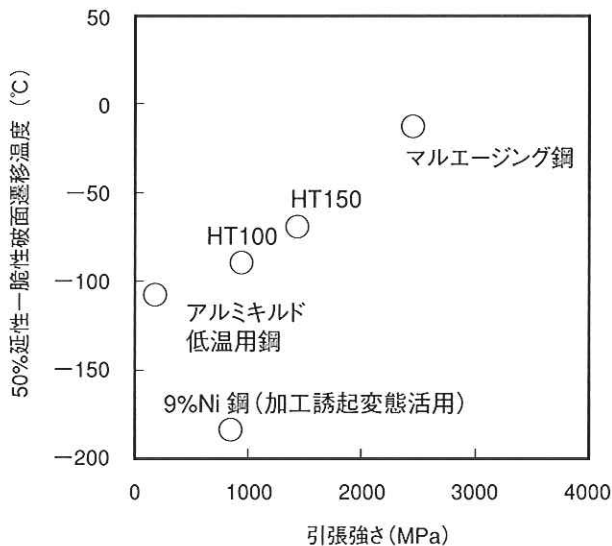


図2. 各種高強度鋼板の引張強さとシャルピー試験による50%脆性-延性破面遷移温度の関係

すると、強度と靱性がともに向上する現象が見いだされた⁴⁾。これがTRIP鋼の幕開けである。1970年代に厚板分野で、さかんに工業化研究が行われたが、組織制御の困難さとコスト高のために成功しなかった。

一方、焼結鋼の分野では、このTRIP現象を活用した引張強さ約2000MPa級の材料が開発され、実用化に到った⁵⁾。粉末冶金では鋼板の製造と比較すると、組織制御が比較的容易であり、その利点を活かしたものである。表1には、1500MPaおよび2000MPa級で高靱性のTRIP型焼結材料における組成と機械的特性を示すが、2%Ni-1%Mo組成の部分合金化鋼粉に黒鉛無添加で成形・焼結し、浸炭焼入れ-焼もどし、あるいは0.6%の黒鉛を添加し、2回成形・2回焼結-焼入れ焼もどしプロセスで製造されている。なお部分合金化粉の概念と焼結体の製造プロセスを図3に示すが、Niの濃化相部が熱処理後には、オーステナイト相となり、この相の加工誘起変態により高強度と高靱性をもたらす。

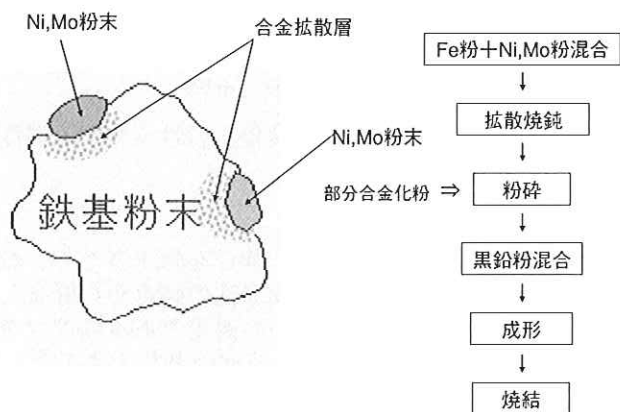


図3. 部分合金化鋼粉および焼結体の製造方法

1980年代になると、自動車用薄鋼板の高強度化の要求が高まり、成形性の良好なTRIP鋼板の開発が進んだ。自動車用途のTRIP鋼板の代表的な機械的特性を表2に示すが、極めて優れた強度-伸びバランスを有する⁶⁾。現在、自動車の車体構造部材などに用いられている。

表1. 2%Ni-1%Mo部分合金化鋼粉の焼結-熱処理体の機械的特性

	引張強さ (MPa)	ノッチなしシャルピー衝撃値 (J)
2回成形2回焼結 光輝焼入れ-焼もどし (0.6%黒鉛添加)	1920	53
1回成形1回焼結 浸炭焼入れ-焼もどし	1500	39

表2. TRIP鋼の機械的特性例⁶⁾

	降伏強さ (MPa)	引張強さ (MPa)	全伸び (%)
熱延鋼板 (板厚2.5mm)	660	810	39

以上TRIP鋼について述べたが、この鋼種の特徴は、加工に対してある程度不安定なオーステナイト相を生成することであり、Si、MnあるいはNiなどの元素の添加が必須で、かつ、圧延・熱処理プロセスの高度な制御が必要である。そのため、コストが高くなるという問題を有する。現在、窒素の活用などが研究されているが、さらなる発展に期待がかかる。

4. 超微細粒鋼

本節では最近、さかんに研究されている超微細粒鋼について述べる。

超微細粒鋼は、粒界強化機構を活用した高強度鋼板である。結晶粒径の微細化により、強度とくに降伏強さが増加することが知られている。結晶粒径と降伏強さの関係は、(1)式のHall-Petchの式で表され、図4に示すように、この関係はナノオーダーまで成立する⁷⁾。

$$\sigma_y = \sigma_0 + K_y \cdot d^{-1/2} \quad (1)$$

ここで、 σ_y : 降伏強さ
 σ_0 : 定数
 K_y : Hall-Petch係数
 d : 結晶粒径 である。

また靱性の指標の一つである50%延性-脆性破面遷移温度 (50% Ductile-Brittle Transition Temperature:50%DBTT)と、結晶粒の関係は、(2)式に示すCottrell-Petchの式で表され、結晶粒を微細化することにより、50%DBTTが低温化、すなわち靱性が向上することも明らかにされている。

$$50\%DBTT=A+K \cdot d^{-1/2} \quad (2)$$

ここで、A：定数

K：Cottrell-Petch係数

d：結晶粒径 である。

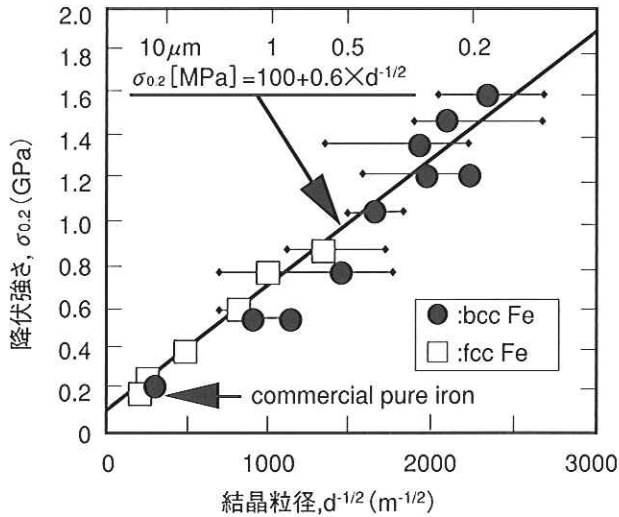


図4. 降伏強さと結晶粒径の関係⁷⁾

以上述べたように、結晶粒の微細化は、強度とともに靱性を向上させるメタラジーである。しかし、この微細化技術を構造物に適用するには、溶接部の靱性を考慮する必要がある。微細粒鋼は粒界エネルギーが高いために、高温に再加熱されると結晶は、逆に粗大化し、靱性を損なう結果となる。現在、摩擦攪拌接合法などの微細粒鋼に対応した接合技術が開発中⁸⁾であるが、現地溶接も含めた工業化が待たれる。

ここで、微細粒鋼のLNG貯槽への適用に関する一つの提言を紹介する。LNG貯槽は、液化天然ガスを -163°C で貯蔵する容器であり、強度とともに溶接部も含めた優れた靱性が要求される。したがって微細粒鋼は、溶接部靱性の点で適用が難しい。しかし図5に示すような、二重安全性を備えた貯槽構造が開発されたことにより⁹⁾、微細粒鋼の適用が可能になると考えられる。この構造の特徴は、鋼板を市松模様に配することにある。まず構造物として、もっとも脆い溶接部での脆性破壊発生を抑制し、つぎに万が一溶接部で、脆性破壊が発生しても、母材部でその亀裂を停止させることで、被害を最小限に留めることが出来る。溶接部靱性は組成で決まることから、例えば炭素や窒素を低減すれば良く、その上で組織を細粒化し、脆性破壊伝播停止特性を向上すれば、LNG貯槽として安全性の高い材料が供給できる。ここで問題となるのが、細粒化により実際に、脆性亀裂伝播停止特性が向上するかである。溶接部靱性が良好な極低C(0.01mass%)-0.03%Nb-2.5%Ni鋼について、応力140MPa(貯槽の設計応力)の条件で、3000mm(貯槽の側板幅)の亀裂を停止できる温度と結晶粒

径の関係を図6に示すが、結晶粒の微細化により、この温度が低下することが明らかである¹⁰⁾。ここで3000mmの亀裂を停止できる温度とは、この亀裂長さから設計応力から計算された応力拡大係数、K_{IC}値を有する温度である。応力拡大係数については、線形破壊力学の教科書に記載されているので、参照されたい。

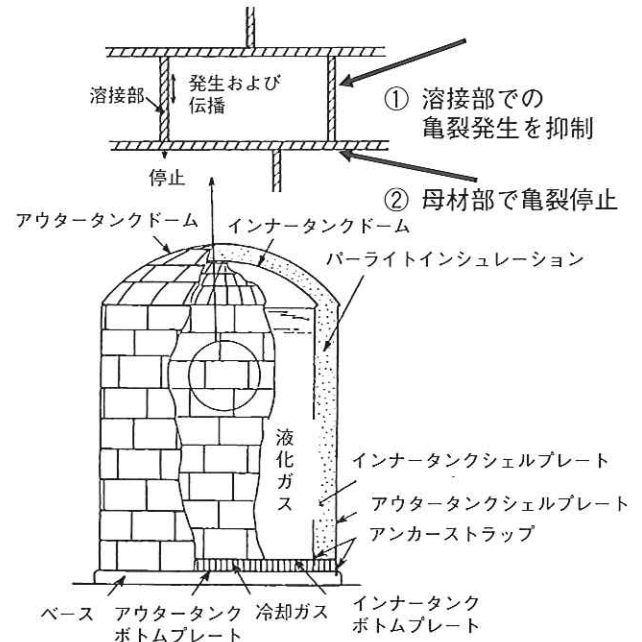


図5. 二重安全性を備えた液化ガスタンクの構造例⁹⁾

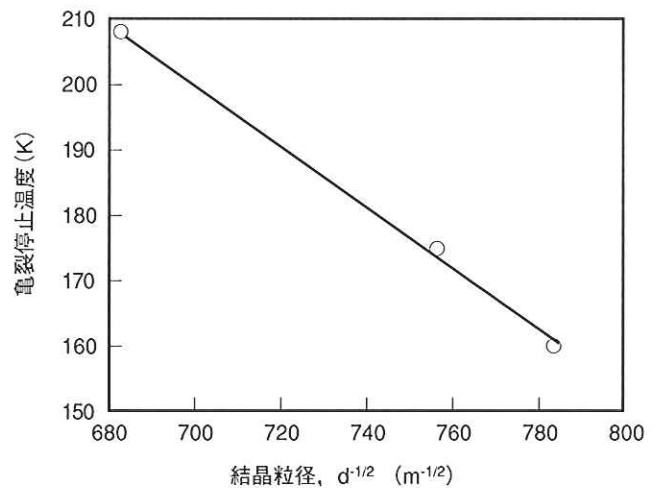


図6. $K_{IC}=304\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ の亀裂停止特性を有する温度と結晶粒径の関係¹⁰⁾

一方、結晶粒微細化は均一伸びを低下させ⁶⁾、絞り、曲げ、または張り出し成形性の観点から好ましくない。しかし成形性の一つの要素である伸びフランジ成形性を向上させるという研究報告もある¹¹⁾。

このように、微細粒鋼の特徴を十分に活かすためには、適用部材の構造開発、あるいは成形法の開発と一体となる必要がある。

5. おわりに

鋼材の高強度化は、自動車や構造物を初め多くの分野で要求され、様々な新製品を生み出してきた。鉄は日々進歩し、世界の環境保護や安心・安全を支えている。数多くの優れた研究が、もっとも期待される分野である。

参考文献

- 1) 大野祐司：自動車技術,59(2005)12, p.21
- 2) 樽井敏三：第188,189回西山技術記念講座,(2006), p.141
- 3) 自動車軽量材料の開発技術：シーエムシー出版,(2006), p.10
- 4) V. F. Zackay, E. R. Parker, D. Fahr and R. Busch：Transactions of the ASM,60(1967), p.252
- 5) 古君修、丸田慶一、阿部輝宜、高城重彰：粉体および粉末冶金,37(1990), p.225
- 6) 河野治、江坂一彬、加藤征四郎、阿部博、脇田淳一、高橋学、片上幹史、原田慎三：製鉄研究, 329 (1988), p.15
- 7) S. Takaki, K. Kawasaki and Y. Kimura：Journal of Materials Processing Technology, 117(2001), p.359
- 8) 藤井英俊、高田豊、辻伸泰、中田一博、野城清：CAMP-ISIJ,19(2006), p.438
- 9) M. Fukagawa, T. Kohno, T. Murayama and S. Kaihara：Proc. of an Int' l conf. on the Transport and Storage of LPG and LNG, Bruges, (1984), p.243
- 10) 古君修、荒牧正俊：熱処理,47(2007), p.66
- 11) 安原英子、坂田敬、古君修、古角文雄、菱沼至：まてりあ、40(2001), p.82