超微細粒熱延鋼板の自動車部材への適用

竹 士 伊知郎*

1. はじめに

地球環境保護の立場から、地球温暖化ガスであるCO₂排出量の削減が強く望まれている。こういった背景のもと、自動車分野においては燃費を向上すべく燃焼効率の改良とともに、車体質量の軽量化が重要な課題となってきた。しかし一方では安全性に対する基準も厳格化の一途をたどっており、これらの両立は極めて重要な命題となっている。近年、自動車の構造部材やシャシー部品などへの高強度熱延鋼板の適用が確実に進展してきており、今後さらに加工性や疲労特性に優れた各種高強度熱延鋼板⁽¹⁾の開発が望まれている。

希少な合金元素の使用をおさえ、結晶粒微細化により高強度を達成する超微細粒鋼は、こういった課題に応えうる材料として、最近特に注目を集めている。本報告では、わが国が世界に先駆け開発中の超微細粒熱延鋼板の自動車用材料としての可能性、製造技術ならびに特性等について概括する。

2. 超微細粒鋼板の特徴

超微細粒鋼は、結晶粒微細化強化により高強度を達成する材料であり、希少な合金元素をなるべく使わずに高強度化が図れることは、環境問題の点から考えても極めて魅力のある材料といえる。将来、この材料が自動車用の材料として、すでに実績のある各種の高強度鋼板とともに実用化が実現していくには、超微細粒特有の魅力的な特性が具備されていることが必須要件である。

(1) 高降伏比

変形を防止するため、弾性設計される自動車部品・部材では、多くの場合、降伏強度が設計上の強度となる。一方、部品を加工する際の成形性については引張強度が低い方がよい。

ところで、結晶粒微細化による強化は、一般にHall-Petchの関係⁽²⁾として知られるように、強度の増加分は粒径の $-1/2$ 乗に比例する。この関係は引張強度よりも降伏強度に対しより大きく現れる(図1⁽³⁾)。すなわち、結晶粒微細化により降伏比(降伏強度/引張強度)が高くなる訳で、弾性設計される部品には、好ましい材料であるといえる。

(2) 高疲労強度

耐久性を考慮した自動車部材・部品用の材料としては、疲労強度が設計の基準となる場合も多い。一般に引張強度(σ_B)が上昇すると疲労限(σ_W)もそれに伴い上昇する。この性能を表す指標として疲労限度比($k=\sigma_W/\sigma_B$)がある。疲労限が同じでも、疲労限度比が大きい材料は引張強度が低いといえ、加工性を考慮する場合などで好ましいといえる。

一般に非調質の高強度材では疲労限度比は0.4程度である

図1 フェライト結晶粒径と鋼板強度の関係⁽³⁾。

* 株式会社 中山製鋼所商品開発部部長(〒551-8551 大阪市大正区船町1-1-66)

Application of Ultra Fine Grained Steel Sheets for Automotive; Ichiro Chikushi(Nakayama Steel Works, LTD., Osaka)

Keywords: steel sheets, hot rolled, high tensile strength steel, automotive parts, ultra fine grained steel (UFG), grain refinement, mechanical property, fatigue

2004年6月17日受理

とされているが、超微細粒鋼では、これを超える特性が報告されている(図2)⁽⁴⁾⁽⁵⁾。超微細粒鋼が高い疲労限度比を示す理由については、不明な点も多く今後の検討が必要であるが、自動車部材としての耐久性に対する大きな期待を抱かせるものといえる。

(3) 衝突安全部材としての特性

衝突の際の安全部材として必要な特性として、 10^3 s^{-1} といったレベルの超高速ひずみ速度における大きい変形抵抗が

図2 超微細粒鋼の疲労特性.

あげられる。しかしながら、部材に加工する際の低速変形時の加工においては、変形抵抗が小さいことが好ましい。したがって、これを両立するためには、いわゆる変形抵抗の静動比または静動差が大きい材料が望ましい。

最近の研究⁽⁶⁾⁽⁷⁾によれば、結晶粒微細化は、変形応力の熱的成分には影響せず、非熱的成分に寄与することが明らかになりつつあり、変形温度やひずみ速度に影響されない非熱的成分の効果により、超微細粒鋼は、高ひずみ速度域でも高い変形抵抗を示すことが期待される。

この結果、 10^3 s^{-1} の高速変形においても、高い吸収エネルギーをうることができ、衝突安全性という重要課題の解決に寄与できる可能性があるといえる。

3. 超微細粒鋼の実用化

わが国における代表的な超微細粒鋼開発プロジェクトの概要を表1に示す。いずれのプロジェクトも当初の目標を達成し、新たなフェーズに入ってきており、その成果に期待が集まっている。

こういったプロジェクトに先駆け、薄板分野で梯中山製鋼所は、結晶粒径を従来材の1/3とした微細粒熱延鋼板を工業的に製造することを可能とした⁽⁸⁾。本技術は、仕上圧延での連続大圧下と強冷却を組合せた独自の技術で、前述の国

表1 超微細粒鋼国家プロジェクト.

プロジェクト名	期 間	主な実施機関	開発目標
新世紀構造材料「超鉄鋼材料」(略称: STX-21)	第1期: 1997~2001年度 第2期: 2002~2006年度	科学技術庁金属材料研究所フロンティア構造材料研究センター 物質・材料研究機構(NIMS)超鉄鋼研究センター	第1期: 「強度2倍、寿命2倍」の鉄鋼材料の開発 第2期: 「都市新基盤用構造物」と「高効率石炭火力発電プラント」用ファクター4超鉄鋼材料の創製(強度と寿命を同時に2倍にする)
スーパーメタルの技術開発(鉄系)	1997~2001年度 (1995~1996年度スーパーメタル先導研究)	財金属系材料研究開発センター	均一な複相組織化によって、結晶粒径1μm以下でかつ形状的に1mm以上の厚さをもつ微細組織鋼の創製技術の開発

図3 微細粒熱延鋼板製造設備.

家プロジェクトが目指す $1\mu\text{m}$ には及ばないものの、超微細粒鋼の実用化、工業規模での製造に道を拓いたものといえる。以下に、微細粒熱延鋼板の製造技術と鋼板の特性について紹介する。

(1) 微細粒熱延鋼板の製造技術

実際に熱間圧延プロセスで微細粒熱延鋼板を製造するためには、従来圧延機の操業可能範囲を大きく越えた、各段40%以上の圧下率を連続的に付与することで結晶粒微細化を具現化する大圧下圧延技術と、鋼材の結晶粒成長を抑制するための強冷却技術が必要である。これら技術を盛り込んだ圧延機の全体レイアウトを図3に示す。

大圧下に伴う圧延荷重と圧延トルクを軽減するため、後段スタンドでは小径異径片駆動圧延(Single roll drive with different diameter: SRDD)⁽⁹⁾を採用している。小径効果による荷重・トルクの軽減とともに、図4に示すように上下ロールのロール径差による中立点のずれによりせん断力が働くことで、荷重を低減することができ、従来圧延方式と比較して、圧延荷重を30%、圧延トルクを20%低減することに成功している。

強冷却技術としては、後段スタンド出側に大流量整流冷却装置を備えている(図3)。仕上後段の連続大圧下による加工発熱を抑制するとともに、結晶粒成長を抑制するのに十分な冷却能力を有している。

(2) 微細粒熱延鋼板の特徴

前節で述べた連続熱間圧延設備を使用して、特殊な添加元素を含まない単純組成成分の微細粒熱延鋼板の製造に成功している。図5に示すのは、従来の熱延鋼板の組織と、実用化した微細粒熱延鋼板の組織である。低炭素鋼で代表的な組織であるフェライトの平均結晶粒径は、従来の工業生産材では $10\sim 20\mu\text{m}$ で、 $5\mu\text{m}$ が限界とされていたが、大圧下・強冷却技術により $3\mu\text{m}$ と大幅な結晶粒微細化に成功した。平均結晶粒径 $3\mu\text{m}$ の微細粒熱延鋼板では微細粒強化の有効活用により、同一化学成分で従来圧延を行った材料に比べて

$30\sim 50\%$ の強度上昇を達成した。これは、図6に示すように工業製品として粒径 $5\mu\text{m}$ 以下の領域でも Hall-Petch の関係を実証するものである。

結晶粒の微細化により向上が期待される特性として、低温靱性が上げられる。衝撃試験を様々な温度で実施した結果を図7に示す。微細粒熱延鋼板は従来材と比較して、延性-脆性遷移温度が低温側に移行している。微細粒熱延鋼板は氷点下でも粘り強く、低温環境下での使用に適していることが明らかとなった。

図6 微細粒熱延鋼板の結晶粒径と強度。

図7 微細粒熱延鋼板の低温靱性。

図4 小径異径片駆動圧延機。

図5 微細粒熱延鋼板の組織。

表2 超微細粒鋼実用化プロジェクト.

プロジェクト名	期 間	主な実施機関	開発目標
「環境調和型超微細粒鋼創製基盤技術の開発」	2002～2006年度	(財)金属系材料研究開発センター 住友金属工業(株)、JFE スチール(株)、(株)神戸製鋼所、新日本製鉄(株)、(株)日立製作所	自動車材料等として広く使用されている鋼材への適用を目指し、1 μ m 超微細粒鋼について、製造技術・利用技術等の基盤技術の開発を行う。
産官学共同研究の効率的な推進「超微細粒薄板の創製とその自動車への利用」	2002～2004年度	物質・材料研究機構(NIMS)超鉄鋼研究センター (株)中山製鋼所、川崎重工業(株)、(株)本田技術研究所	2 μ m 超微細粒薄板の創製と、その自動車部材としての加工技術・部品評価技術の研究開発

4. 超微細粒鋼の自動車への利用

超微細粒鋼の製造技術が実用化されつつある現状を踏まえ、その自動車材料としての魅力的な特性を生かし確実に実用化に結びつけるべく、新たな研究プロジェクトが開始されている。その一つは、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)が鈷金属系材料研究開発センター(JRCM)に委託し進める「環境調和型超微細粒鋼創製基盤技術の開発」プロジェクトであり、今ひとつは、物質・材料研究機構(NIMS)が進める科学技術振興調整費の産官学共同研究の効果的な推進プログラムの一課題である「超微細粒薄板の創製とその自動車への利用」プロジェクトである(表2)。いずれも、超微細粒鋼の製造技術とその自動車等への適用をめざし実用化研究を主体としたプロジェクトとなっている。

後者のプロジェクトの枠組みを図8に示すが、これまで述べた超微細粒鋼の研究成果をもとに、NIMSがコーディネイトし、材料メーカー、機械メーカー、ならびに自動車メーカーの参加のもとに、自動車の軽量化に寄与する高強度部品への利用技術開発を行うものである。超微細粒薄板の部品加工においては、近年、自動車用中空部品の製造技術として注目を集めているハイドロフォームによる加工技術を検討し、高強度薄板の加工技術の最適化を行っている。また部品特性評価においては、自動車の衝突安全性評価に不可欠な高速圧潰試験評価技術の確立をめざしている。これらの活動により、超微細粒鋼の高強度中空部品への適用技術を確立するものである。

5. おわりに

わが国において超微細粒鋼の研究が本格的に開始されて7年余り、その研究成果は世界をリードするものであることは、異論のないところであろう。しかしながら、「使われてこそ材料」の見地からいえば、本格的な実用化への道のりは、まだ緒についたばかりともいえよう。

超微細粒鋼は低環境負荷の時代の要請に応える材料であることを広く認識することにより、本格的な自動車への適用を進めることこそが、わが国発の技術が世界に広く普及するきっかけとなるはずである。

図8 「超微細粒薄板の創製とその自動車への利用」の共同研究体制。

今後、鉄鋼の製造と需要業界である自動車に関連した産官学の研究者・技術者のいっそうの研鑽・努力が求められているといえる。

文 献

- (1) 例えば, T. Senuma: ISIJ Int., **41**(2001), 520-532.
- (2) 林 透, 長井 寿, 花村年裕, 中嶋 宏, 三井達郎: CAMP-ISIJ, **13**(2000), 473-476.
- (3) N. B. Morrison and R. L. Miller: *Ultrafine Grain metals*, ed. by J. J. Burk, Syracuse Univ. Press, (1970), 183.
- (4) 松岡三郎, 長島伸夫, 西島 敏: NRIM 材料強度データシート資料 No. 17, (1997).
- (5) 沢井達明, 松岡三郎, 津崎兼彰: 鉄と鋼, **89**(2003), 726.
- (6) N. Tsuchida, Y. Tomota and K. Nagai: ISIJ Int., **42**(2002), 1594-1596.
- (7) 土田紀之, 小野 匠, 友田 陽, 長井 寿: 日本機械学会論文集 A 編, **68**(2002), 1547.
- (8) 倉橋隆郎, 竹土伊知郎, 高橋昌範, 高岡真司: 塑性と加工, **44**(2003), 106-111.
- (9) 神居詮正, 寺門良二: 塑性と加工, **17**(1976), 966-972.

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
竹土伊知郎
1979年 京都大学工学部冶金学科卒業
2003年 1月現職
専門分野：塑性加工(薄鋼板圧延)
新熱延工場の建設プロジェクトに参画，2001年，同設備において微細粒熱延鋼板の工業生産に成功。(同技術で、榊山中製鋼所 神崎昌久とともに2003年度大河内記念技術賞を受賞)以来，微細粒熱延鋼板関連の種々の研究・開発業務に従事し活動中。
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★