

課題番号 07-34-002

**平成18年度シーズ発掘試験研究報告書**

報告日：平成19年3月23日

課題名：エンジン効率の改善と排気ガス低減を可能とする超強靱性 TRIP 鍛造鋼の開発と応用

研究期間：平成18年8月18日～平成19年2月28日

## 1. 担当コーディネータ

氏名(役職)	藤井 國久 (文科省コーディネータ)		印
所属機関名	信州大学 地域共同研究センター		
連絡先	所在地	〒380-8553 長野市若里4-17-1	
	TEL/FAX	026-269-5627 / 026-269-5630	
	E-mail	fujii@crc.shinshu-u.ac.jp	

## 2. 代表研究者 (代表研究者のみ記入してください。)

氏名(役職)	杉本 公一 (教授)		印
所属機関名	信州大学 工学部		
連絡先	所在地	〒380-8553 長野市若里4-17-1	
	TEL/FAX	026-269-5114 / 026-269-5109	
	E-mail	sugimot@shinshu-u.ac.jp	

## 3. 共同研究者 (受託研究契約を締結した共同研究機関の場合のみ記入してください。)

氏名(役職)			印
所属機関名			
連絡先	所在地		
	TEL/FAX		
	E-mail		

## 5. 試験研究の結果報告

## (1) 試験内容

## 1. 目的

低合金 TRIP 鋼は残留オーステナイトの変態誘起塑性 (TRIP) 効果を利用してプレス成形性を飛躍的に高めた超高強度鋼である。近年、この鋼板を乗用車のボデーに適用することにより、車体重量と燃費を 50% 低減させる取組が活発に行われている。この材料をエンジン部品に用い、軽量化を果たすことにより、更なる燃費の改善と排気ガスの低減を進めることが出来る。

これまでに研究代表者は低合金 TRIP 鋼の強靭性を高めることのできる「 $\gamma$  域鍛造熱処理」を開発し、エンジン用鍛造部品に適用することを提案してきた。本研究は、この TRIP 鍛造鋼をエンジン及びその周辺部品に適用する際に必要とされる (i) 強靭性に及ぼす鍛造熱処理条件と化学組成の影響、及び (ii) 疲労強度特性を調査することを目的とする。

## 2. 試験項目と試験内容

## (1) 鋼材試作

- ・ 0.4%C-1.5%Si-1.5%Mn-0.5%Al-0.05%Nb 鋼 (C 鋼; 直径 35mm と 13mm) の試作 (材料試作費で外注)。
- ・ この他、別予算で試作した基本鋼 (A 鋼; 0.4%C-1.5%Si-1.5%Mn) 及び 0.4%C-0.5%Si-1.5%Mn-1.0%Al-0.02Nb-0.10Mo 鋼 (B 鋼) も使用した。

## (2) 熱間鍛造

- ・ 熱間鍛造装置を用い、直径 13mm の線材 (小型試験片) を用いて図 1 の条件で鍛造熱処理を施し、母相組織をベイニティックフェライトとした TRIP 鋼 (TBF 鋼) を製造した。
- ・ サイズ効果を確認するため、直径 35mm 丸棒鋼 (大型試験片) の熱間鍛造を実施し、鍛造後の組織と強靭性を調査した。

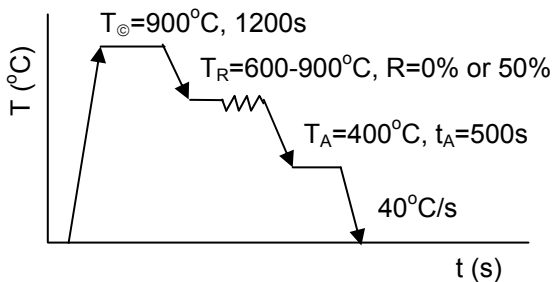


図1 鍛造熱処理線図.  $T_\gamma$ : 焼鈍温度,  $T_R$ : 鍛造温度,  $T_A$ : オーステンパー温度,  $t_A$ : オーステンパー保持時間

## (3) 疲労試験

- ・ 当初、熱間鍛造材から、平滑試験片及び切欠き試験片を切り出し、室温での疲労限及び切欠き感受性を調査する予定であったが、本年では、熱処理材の疲労試験の調査しか達成できなかった。
- ・ 上記の最適熱間鍛造条件でディーゼルエンジンの中枢部品を製造し、内圧疲労強度特性 (最大 2500 気圧) を調査した。ただし、この部分の実験は、共同研究を実施する企業にお願いした。

## (4) まとめ

- ・ 当該年度の結果をまとめるとともに、実用化に向けた今後の課題について整理する。

## (2) 得られた成果

### 1. 強靭性

#### [論文]

- (1) M. Ito, T. Hojo, K. Sugimoto, S. Hashimoto, S. Ikeda and G. Arai: The Effects of Thermo-Mechanical Processing on Strength and Toughness of Al-Nb-Mo Bearing Ultra High-Strength TRIP-aided Steels, Third Int. Conf. on Advanced Structural Steels (ICASS2006), Gyeongju, Korea (2006), pp.910-915.
- (2) Koh-chi Sugimoto, Mitsuhiro Ito, Shun-ichi Hashimoto and Shushi Ikeda: Microstructure and Mechanical Properties of Ausformed Ultra High-Strength TRIP-Aided Steels, Materials Science Forum, Vols. 539-543 (2007), pp.4309-4314.

#### [発表]

- (3) 伊藤満大, 北條智彦, 杉本公一, 荒井五郎, 池田周之, 橋本俊一: 自動車部品用高強度低合金 TRIP 鋼の  $\gamma$  域鍛造熱処理, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.45-06, (2006), pp.5-8. 論文番号 20065162.
- (4) 佐藤祥平, 伊藤満大, 杉本公一, 荒井五郎: 鍛造熱処理を施した Si-Al-Nb 添加 TRIP 鋼の強靭性, 日本金属学会・日本鉄鋼協会北陸信越支部平成 18 年度連合講演会概要集, (2006), P.65.

#### [主要な結果]

- (1) A 鋼と B 鋼の小型試験片を用いて図 1 のような熱間鍛造熱処理を施したところ, 図 2 に示すように, B 鋼において非常に大きい全伸びと高い衝撃値が達成できた. これらの特性は, これまでの調質鋼 (焼戻マルテンサイト鋼) ははるかに凌ぐものであった.
- (2) この優れた強靭性と延性は, (i) Nb 添加と加工熱処理による結晶粒微細化と (ii) Al 添加による安定な残留オーステナイト ( $\gamma_R$ ) に起因すると考えられた. その組織変化を図 3 に示す.
- (3) C 鋼の大型試験片では, 熱間鍛造後に 375°C でオーステンパー処理を施すことにより, B 鋼に匹敵する優れた強靭性が得られることがわかった (図 4).
- (4) その強靭性は調質鋼小型試験片の強靭性と同等レベルであるが, 当初の目標値をクリアしている.

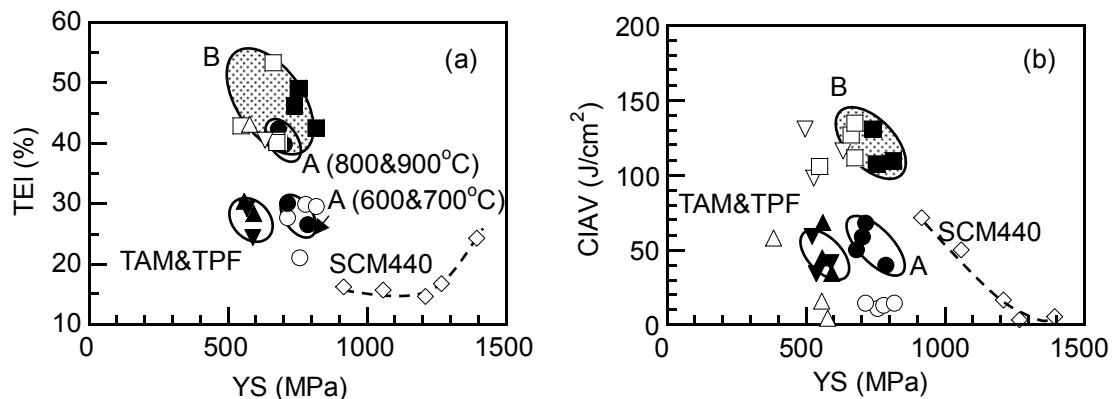


図2 鍛造熱処理後のA鋼とB鋼小型試験片の(a)全伸びー降伏応力バランス, (b)シャルピー衝撃値ー降伏応力バランス. 図中の TAMと TPF は母相組織をそれぞれ焼鈍マルテンサイト, ホリコナルフェライトとした A 鋼と同じ化学組成を有する TRIP 鋼.

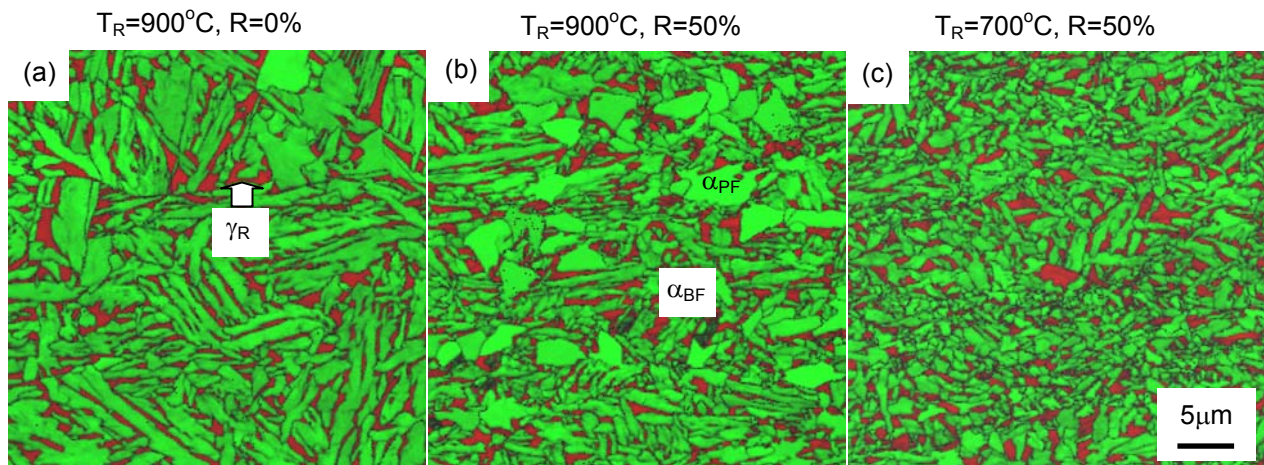


図3 鍛造熱処理後のB鋼小型試験片の微細組織. TR:鍛造温度, R:鍛造ひずみ.  
 緑:母相組織, 赤:残留オーステナイト

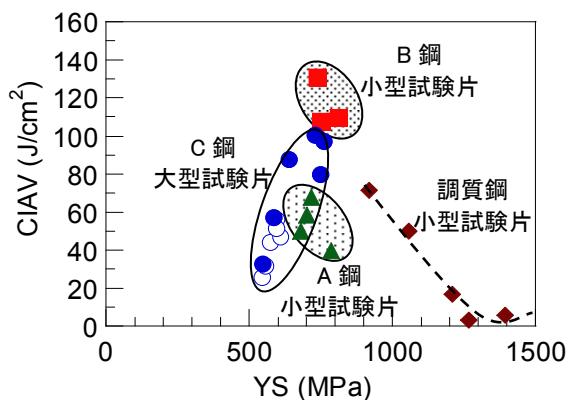


図4 C鋼大型試験片の衝撃値－降伏応力バランスの関係

## 2. 疲労強度特性

### [論文]

- (1) K. Sugimoto: Advanced High- and Ultra High-Strength TRIP-aided Steels (Review), Trans. Indian Inst. Met., Vol.59, No.5 (2006), pp.725-738.
- (2) Koh-ichi Sugimoto, Junji Tsuruta and Sung-Moo Song: Fatigue Strength of Formable High-Strength TRIP-Aided Steels with Bainitic Ferrite Matrix, Key Engineering Materials, Vols. 345-346 (2007), pp.247-250.
- (3) Koh-ichi Sugimoto: Symposium on Fatigue, Fracture and Integrity Assessment (FFIA-2007), 6-7 March 2007, Center for Excellence, Jamshedpur, India (2007), 12 頁(印刷中).

### [主要な結果]

- (1) 鍛造熱処理材の疲労試験に先立ち、熱処理のみ施した TBF 鋼を用いて、平滑材と切欠き材の高サイクル疲労試験を行った。その TBF 鋼 (E 鋼と F 鋼) の化学組成を表 1 に示す。また、熱処理後の TBF 鋼の SEM 写真を図 5 に示す。
- (2) TBF 鋼の疲労限 (FL) は主に比例限に支配されること、及び引張強さが 1300MPa 以上では、疲労限はかえって低下することがわかった (図 6)。
- (3) 疲労の切欠き感受性を次式の  $q$  で定義したとき、TBF 鋼の疲労限の切欠き感受性はマルテンサイト鋼 (G 鋼) よりかなり低く、切欠きに対して鈍感であることがわかった (図 7)。さらに Al と Nb を複合添加することにより、切欠き感受性はさらに低くなることがわかった。

$$q = (K_f - 1) / (K_t - 1) \quad (1)$$

$K_f$ : 疲労切欠き係数,  $K_t$ : 応力集中係数

- (4) 全体的に、疲労強度の当初の目標値をクリアした。

表 1 疲労試験に用いた供試鋼の化学組成 (mass%) と Ms 点.

Steel	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	Mo	N	O	Ms
E	0.20	1.50	1.50	0.015	0.0008	0.041	—	—	0.0005	0.0008	421
F	0.20	0.98	1.48	0.014	0.0024	0.470	0.046	0.20	0.0015	0.0015	433
G	0.14	0.19	1.69	0.010	0.0040	0.032	—	—	0.0050		435

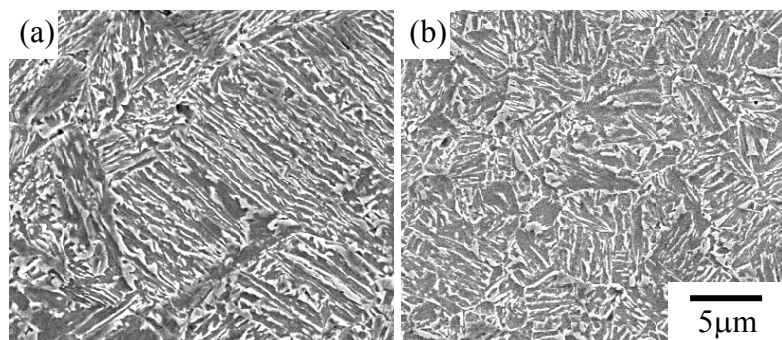


図 5 E 鋼と F 鋼の SEM 像. オーステンパー温度: 425°C, 時間: 200s.

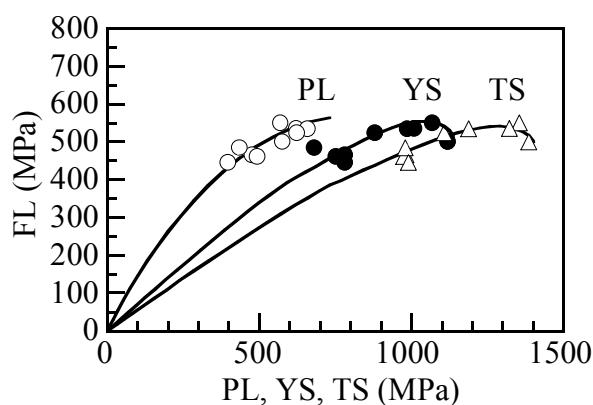


図 6 E 鋼の疲労限 (FL) と比例限 (PL), 降伏応力 (YS), 引張強さ (TS) との関係

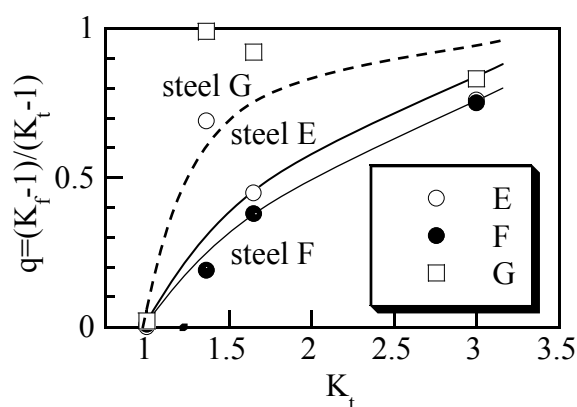


図 7 応力集中係数を変化させた時の疲労限の切欠き感受性の変化

### 3. 実用化の見通しについて

- [1] 鍛造熱処理を施した C 鋼大型試験片の強靭性は期待したほどには高くなかった. これは主に, C 鋼の焼入れ性の不足に因ると考えられる. 現在, C 鋼の焼入れ性が改善するため Cr, Ni を添加した棒鋼 (D 鋼) を別予算で試作し, 鍛造熱処理を既に施した. この D 鋼の強靭性が優れるようであれば, D 鋼を中心に据えて, 実用化に対して必要となる冷間鍛造性 (据え込み性), 疲労強度特性, 遅れ破壊性, レーザー溶接性を詳細に調査をする予定である.
- [2] 実用化研究の協力を頂いている企業の戦略にもよるが, 長期的には 2500 気圧対応 (現在 1400 気圧) のディーゼルエンジンのコモンレール及び燃料噴射管への適用は十分に可能と考える. ただし, 実際の製造ラインの中で, 低コストで鍛造熱処理を施す技術を開発することが, 今後の課題となる.

### (3) 今後の展開

#### [1] 他制度への応募

本研究の遂行には、研究費、マンパワーがとも必要であるので、文部省科学研究費補助金への申請を行って行きたい。また、可能であれば JST「シーズ顕在化試験」、「シーズ展開事業」の助成を頂きたい。

#### [2] 学会発表など

得られた結果は、学会発表、論文投稿などにより、社会に発信していく予定である。とくに、外国での発表に重点を置きたいと考えている。

#### [3] 共同研究について

ディーゼルエンジンのコモンレール及び燃料噴射管への適用研究については、企業との共同研究を継続し、実用化に目処をつけたい。可能であれば、複数の企業との実用化研究も適宜、進めたいと考えている。

#### [4] 長期的な展望

- ① 鍛造熱処理を施した TBF 鋼は、将来的には自動車の駆動部品へ展開される可能性が高い。このとき、表面及び内部を硬化させる必要がある。通常は浸炭または窒化などの表面処理を行うが、最初から TRIP 鋼の窒素含有量を高めることにより、表面硬さ及び内部硬さを高めることが可能かもしれない。
- ② そこで、次年度以降では、ステンレス鋼などで耐食性改善に効果を挙げている高窒素化を TBF 鋼にも適用し、新たな TRIP 鋼の開発を進める予定である。

### (4) 知的財産権について

[1] 平成 18 年 7 月以降では、特許出願の実績は無い。

[2] 今後、ディーゼルエンジン周辺部品以外の製品への適用が考えられれば、企業との共同出願の可能性もある。

[3] 高窒素 TRIP 鋼の開発により、特許出願の可能性が大いに拓けると考えられる。

### (5) 今後のフォローアップ等について（コーディネータ記載）

代表研究者が提案している鍛造熱処理により C 鋼の強靭性は当初の目標値をクリアしたが、目標値の最低レベルにとどまった。代表研究者らは強靭性の更なる改善を目標として C 鋼を改良した D 鋼を試作し、強靭性をはじめとする試験の準備に入っている。D 鋼の試験結果が満足できるものであるならば、従来の調質鋼に比べて機械的強度が極めて高いので、素材使用量の低減（50%）・軽量化によるランニングコストの低減が期待できる。実用化を是非とも図りたい素材であるので、今後もシーズ顕在化試験をはじめとする研究費の獲得など、あらゆる面で支援していく予定である。

