

機関番号：13601  
 研究種目：基盤研究 (B)  
 研究期間：2008年～2010年  
 課題番号：20360311  
 研究課題名 (和文) ディーゼルエンジン用コモンレールの超高压化を可能とする低合金 TRIP 鋼の開発  
 研究課題名 (英文) Development of TRIP-aided Steels for Diesel Engine Common Rail Enduring Ultra High Pressure  
 研究代表者 杉本公一 (SUGIMOTO KOH-ICHI)  
 信州大学・工学部・教授  
 研究者番号：50094272

## 研究成果の概要 (和文)：

超高压コモンレール用の材料として、3000 気圧の使用に耐える焼入れ性を高めた 0.2-0.4%C-1.5%Si-1.5%Mn-0.05%Nb-Cr-Mo-Ni-B 系低合金 TRIP 型ベイニティックフェライト鋼 (TBF 鋼) と TRIP 型マルテンサイト鋼 (TM 鋼) を開発した。また、それら TRIP 鋼の強靱性と切欠き疲労強度に対して、①最適な合金組成、②熱間鍛造熱処理による超微細粒化技術、③ベイニティックフェライト/マルテンサイト (BF/M) 組織率の同定法と残留オーステナイト ( $\gamma_R$ ) への炭素の濃化機構、を提案した。

## 研究成果の概要 (英文)：

For application to diesel engine common rail enduring ultra high-pressure of 3000 bar, 0.2-0.4%C-1.5%Si-1.5%Mn-0.05%Nb-Cr-Mo-Ni-B TRIP-aided bainitic ferrite steels (TBF steels) and TRIP-aided martensitic steels (TM steels) were developed. In addition, the followings were proposed to achieve high combination of strength and toughness and high notch-fatigue strength.

- (1) optimum chemical composition for the TBF and TM steels.
- (2) ultra-fine graining by hot-forging and consequent austempering or isothermal transformation holding
- (3) optimum ratio (BF/M) of bainitic ferrite and martensite and carbon-enrichment mechanism

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
2009年度	6,700,000	2,010,000	8,710,000
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・構造・機能材料

キーワード：低合金 TRIP 鋼，熱間鍛造，化学組成，強靱性，残留オーステナイト，引張特性，炭素濃化処理，オーステンパー

## 1. 研究開始当初の背景

近年、CO<sub>2</sub> 排出量の低減は世界的な技術課題となっている。自動車の分野では、排出ガス量の低いディーゼルエンジンが見直され、大型貨物、バスに加え、乗用車へも搭載される傾向にある。

ディーゼルエンジンの排出ガスの低減と燃費改善はコモンレールシステムの導入により促進されたが、より一層の排出ガス削減には使用圧力の増加が必要とされる (現状最高圧：1800～2000 気圧→目標：3000 気圧)。これを達成するためには、特に「切欠き疲労

強度」と「強靱性」の優れた材料が必要とされるが、このような超高压環境下に耐えうる材料が見当たらない。

研究代表者はこれまでに乗用車のボデー薄鋼板への適用を目的として、超々高強度鋼（超々ハイテン低合金 TRIP 鋼）を開発してきた。この低合金 TRIP 鋼（以下では TBF 鋼と呼ぶ）はベイネティックフェライトとフィルム状残留オーステナイト（ $\gamma_R$ ）からなり、この準安定  $\gamma_R$  の変態誘起塑性（TRIP）効果により、冷間プレス成形性ばかりでなく、疲労強度、衝撃特性及び遅れ破壊特性も改善されるので、コモンレール及び噴射管への適用が期待できる。

TBF 鋼の強靱性、疲労強度などをさらに高める方法として、組織制御による「超微細粒化」が挙げられる。研究代表者は既に新しく開発した「熱間鍛造熱処理」により、 $\gamma_R$  の TRIP 効果に加えて、TBF 鋼の結晶粒を 1~2 $\mu$ m まで微細化できること、及び強靱性も大幅に高められることを報告している。この TBF 鋼をコモンレールなどに使用する場合、焼入れ性を向上し、かつ疲労強度、遅れ破壊強度、切削性、溶接性を調査することが必要となる。しかし、この種の研究はほとんど報告例がなく、この方面の系統的かつ早急の研究が求められている。

## 2. 研究の目的

本研究では、自動車ディーゼルエンジンの排出ガス（CO・NO<sub>x</sub>・NMHC・PM）を 50% 以上削減するとともに、燃費を 20% 以上改善することを目指し、コモンレール及び噴射管の超高压化（現状 1600 気圧~2000 気圧→本研究目標 3000 気圧）を可能とする超強靱・超高切欠き疲労強度を有する低合金 TRIP 鋼（TBF 鋼）の開発を行なう。また、その開発鋼の組織変化のメカニズムと強化機構について学術的検討を行う。

本研究で明らかにしたい項目は以下の通りである。

### (1)新規 TBF 鋼の最適合金組成の提案:

- ① TBF 鋼の強靱性（衝撃特性と破壊靱性）と切欠き疲労強度に対して、焼入れ性改善元素 Cr, Mo, Ni, B の影響と最適な添加条件を明らかにする。
- ② 焼入れ性改善元素添加による残留  $\gamma$  特性の影響調査と、強靱性、切欠き疲労強度の関係性を明らかにする。

### (2)熱間鍛造熱処理による超微細粒化技術の検討

- ① TBF 鋼の各種特性（結晶粒径、残留  $\gamma$  特性、引張特性、強靱性、疲労強度）に対して、熱間鍛造加工の効果を明らかにする。
- ② 従来開発した TAM 鋼、及び新規に開発する TM 鋼についても熱間加工の影響を調査し、応用拡大を進める。

### (3) BF/M 組織率の同定法の確立と $\gamma_R$ への炭素の濃化機構の検討

- ①  $M_s$ ~ $M_f$  温度間でオーステナイト処理を施したとき、強靱性が高められる可能性がある。その場合、母相は BF と M の混合相となる。そこで、このような BF/M 混合母相組織において、その組織率を同定する方法を確立するとともに、その最適混合比率を明らかにする。
- ②  $M_s$  温度以下で等温変態処理を施した時の組織・ $\gamma_R$  特性の変化と機械的性質の変化を調査する。
- ③ 上記①と②の母相組織の変態及び炭素濃化メカニズムを提案する。

## 3. 研究の方法

### (1)新規 TBF 鋼の最適合金組成の提案:

- ① 供試鋼の合金設計と製造: 小型試験片を用いたこれまでの研究で、0.4%C-1.5%Si-1.5%Mn-0.05Nb 鋼が優れた強靱性を示した。そこで、この組成を基本鋼として、一般の構造用鋼などで焼入れ性を高めるために添加されている Cr, Mo, Ni, B の合金元素を添加した 5 種類の棒鋼、線材、板材を製造する。この他、 $\gamma_R$  特性を改善するために N を添加した板材も製造した。製造は外部企業に委託する。比較材として、市販の SCM440 鋼, SCM435 鋼, SCM420 鋼を用いる。
- ② 衝撃特性: オーステナイト温度・時間を変化させた場合の上部棚衝撃値と延性・脆性遷移温度を測定し、最適合金組成を明らかにする。
- ③ 破壊靱性: コンパクト試験片を用いた引張試験とアコースティックエミッション (AE) 測定を組み合わせた実験によって、平面ひずみ破壊靱性値を測定する。また、焼入れ性合金元素の関係を調査する。
- ④ 切欠き疲労強度: 応力集中係数  $K_t=1.7$  の切欠き疲労試験片と平滑疲労試験片を用い、それぞれの疲労限、切欠き感受性を求め、最適合金組成を明らかにする。また、コモンレールを用いた内圧疲労試験結果との相関を見出す。

### (2)熱間鍛造熱処理による超微細粒化技術の検討

- ① 熱間鍛造装置と塩浴炉を用いて、 $\gamma$  域加熱後、最大 70% ひずみの熱間鍛造を行う。その後、供試鋼の  $M_s$  点を挟んだ温度 ( $T_A=200^\circ\text{C}\sim 500^\circ\text{C}$ ) で  $t_A=0\sim 10000\text{s}$  保持のオーステナイト処理を施す (図 1)。
- ② 鍛造熱処理材より、引張試験片、衝撃試験片を切り出し、室温での強靱性に対する最適合金組成と最適熱間鍛造条件を見出す。

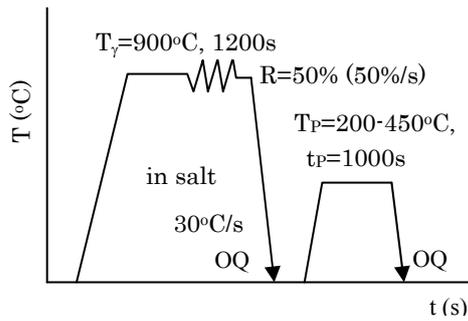


図1 熱間鍛造熱処理線図

### (3) BF/M 組織率の同定法の確立と $\gamma_R$ への炭素の濃化機構の検討

- ①超々高強度領域では、微細組織は非常に複雑となる。とくに、母相組織にはベイニティックフェライトとマルテンサイトが混在し、それらの混合比を正確に測定する必要がある。
- ②そこで、熱間鍛造材から、観察用試験片 ( $\gamma_R$  測定試験片) を切り出し、主に SEM-EBSP を用い、補助的に TEM を用いることによって、ベイニティックフェライトとマルテンサイトの体積率の測定法を確立する。また、 $\gamma_R$  の存在位置と形状などを調査する。
- ③また、BF/M 比率に及ぼすオーステナイト温度依存性を調査し、 $M_s$  温度 (マルテンサイト変態開始温度) と BF/M 組織比率の関係を明らかにするとともに、その変態メカニズムを提案する。
- ④さらに、 $\gamma_R$  の体積率と炭素濃度のオーステナイト温度とオーステナイト時間依存性を調査する。これらの結果を基に、 $\gamma_R$  への炭素濃化メカニズムを提案する。

## 4. 研究成果

### (1)新規 TBF 鋼の最適合金組成の提案:

- ①0.4%C-1.5%Si-1.5%Mn 鋼をベース鋼としたとき、0.5%Cr-0.2%Mo の複合添加が最も優れた  $\gamma_R$  特性とベイニティックフェライト組織を生じた。20ppm%B 添加も同様な組織を得ることが出来るが、100ppmN 添加鋼の効果は認められなかった。
- ②強靱性に対しては、Cr または B の添加は高い衝撃値と低い遷移温度をもたらせた (図2)。また、TBF 鋼において、マルエージング鋼と同等レベルの破壊靱性値を示した (図3)。
- ③母相組織をベイニティックフェライトとした 0.4%C-1.5%Si-1.5%Mn-TBF 鋼において、1%Cr-0.2%Mo を添加したとき、高い切欠き疲労強度と低い切欠き感受性が達成できた (図4a)。しかし、使用できる硬さは HV360 程度であった。また、母相組織を焼鈍マルテンサイト組織とした TAM 鋼では、TBF 鋼に比較して切欠き疲労限は高いが、使用できる硬さ範囲は

HV300 以下であった。

- ④ 0.2%C-1.5%Si-1.5%Mn-TBF 鋼では、1.0%Cr または 1.0%Cr-0.2%Mo 添加により、HV420 以上でも高い切欠き疲労限が達成できた。B 添加鋼では、残留オーステナイトが結晶粒界に粗大に存在するため、改善効果は小さかった。

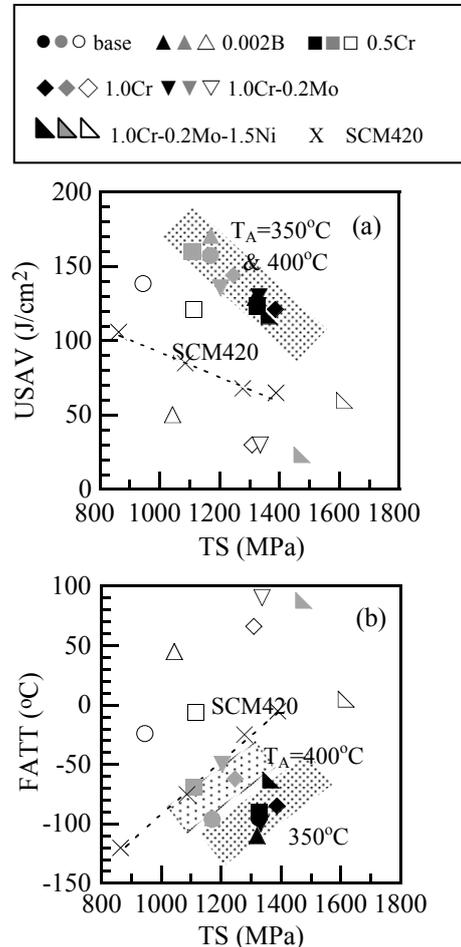


図2 TBF 鋼の上部棚衝撃値 (USAV) と延性・脆性破面遷移温度 (FATT) と引張強さ (TS) の関係

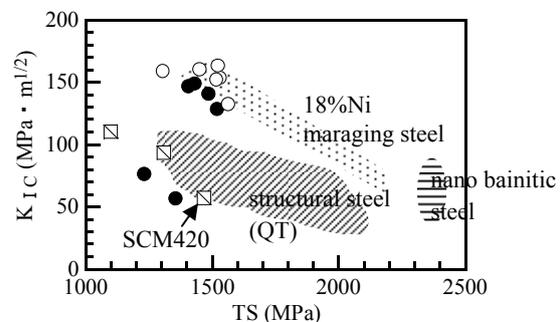


図3 TBF 鋼(●)と TM 鋼(○)の破壊靱性値

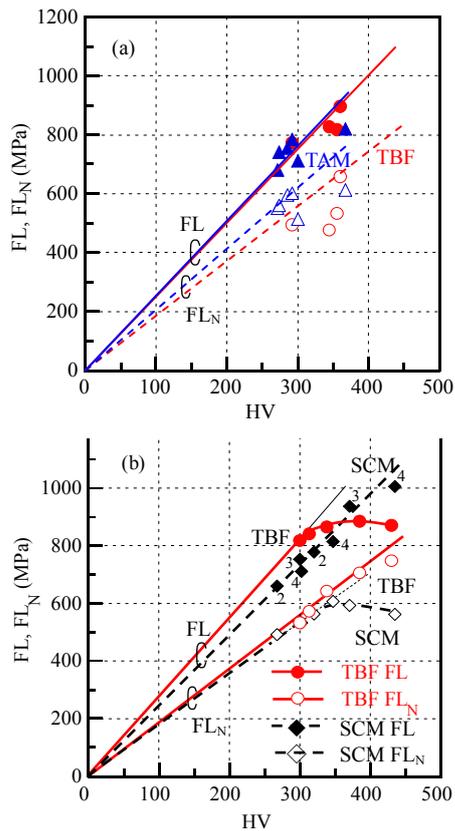


図4 TBF鋼の切欠き疲労強度. (a): 0.4%C鋼, (b) 0.2%C鋼

### (2) 熱間鍛造熱処理による超微細粒化技術の検討

- ① 0.4C-1.5%Si-1.5%Mn-0.05%Nb-0-1.0%Cr-0-0.2%Mo-0.002%B の化学組成を有する TBF 鋼において、熱間鍛造+オーステナイト処理（熱間鍛造熱処理）は組織の微細化と  $\gamma_R$  特性の改善を達成し、結果的に靱性を改善した（図5）。
- ② 合金元素添加は焼入れ性を高める反面、 $\gamma_R$  特性を低下させる。このトレードオフの関係より、強靱性に及ぼす合金元素添加の効果は小さかった。

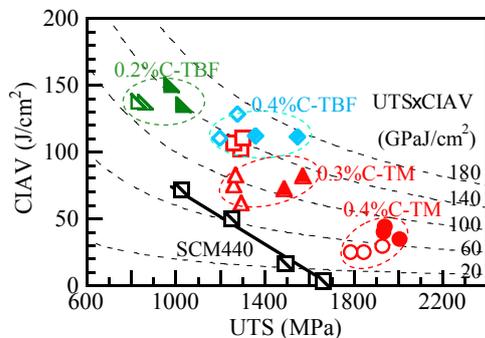


図5 鍛造熱処理による TBF 鋼と TM 鋼の強靱性の改善. open marks: without forging, solid marks: with forging.

- ③ 0.20-0.40C-1.5%Si-1.5%Mn-0.05%Nb-0.002%B の化学組成を有する TM 鋼において、熱間鍛造+焼き入れ+炭素濃化処理（熱間鍛造熱処理）により、組織の微細化と  $\gamma_R$  特性の改善を達成し、結果的に靱性を改善した。
- ④ この TM 鋼の強靱性は、TBF 鋼の強靱性と同等、またはそれ以上であり、コモンレール以外への応用が期待できた。

### (3) BF/M 組織率の同定法の確立と $\gamma_R$ への炭素濃化機構の検討

- ① EBSD 解析における Phase map distribution によって、ベイニティックフェライトとマルテンサイト、または初期に生成した炭化物を含むマルテンサイトを分類することが出来ることを明らかにした（図6）。
- ②  $M_s$  点以下でオーステナイト処理を施し、BF/M 組織率を低くすることにより、変形強度は著しく増加したが、残留  $\gamma$  中の炭素濃度は低下した。BF/M 組織率が 0.5~0.9 の範囲において、シャルピー衝撃吸収値は高く、衝撃遷移温度は低くなった。このとき、残留  $\gamma$  の安定性が高いことが重要であった。
- ③  $M_s$  温度と  $M_f$  温度の間の温度でオーステナイト処理を施した TBF 鋼、及び  $M_f$  温度以下まで冷却し、パーティショニング処理を施した TM 鋼の破壊靱性は、既存の高強度鋼の中で最も高い破壊靱性値を示すマルエージ鋼と同等の値を示した。この破壊靱性値は、既存の構造用低合金鋼の約 2 倍であった（図3）。
- ④  $M_f$  温度以下に冷却して TM 鋼を製造する際、 $M_s$  温度直上まで急冷したのち、 $M_s$  温度と  $M_f$  温度の間での冷却速度を遅くすることにより、残留オーステナイト体積率を高め、かつ炭素を濃化できることを見出した。これらの、変態機構と  $\gamma_R$  への炭素濃化機構を提案した。

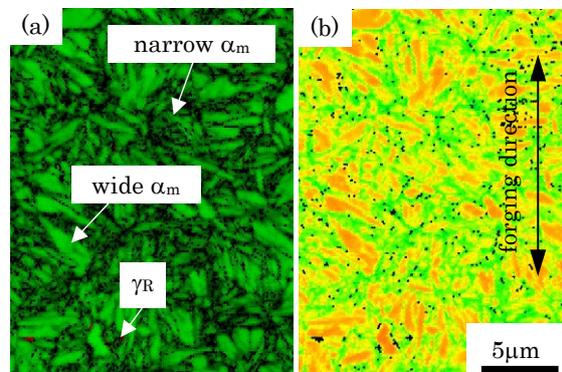


図6 鍛造熱処理後の 0.4%C-1.5%Si-1.5%Mn-0.002%B 鋼の組織

- ⑤さらに、その後のパーティショニング処理により、さらに残留オーステナイトの安定性を高め、成形性、強靱性を高めることができることを見出した。

#### (4) その他

- ①協力企業で実施したコモンレールの内圧疲労試験において、HV=320 で 3000 気圧が達成できることが明らかとなった (図 7)。  
 ②安全率を 1.3 と考えたとき、HV425 であれば 3900 気圧が可能である予想がされた。  
 ③今後、HV425 の TBF 鋼または TM 鋼によってコモンレールを試作し、最終確認を行う予定である。

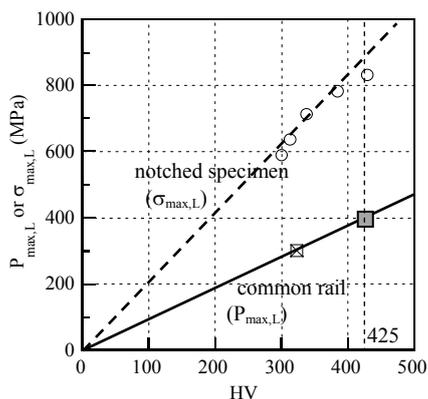


図 7 4000 気圧 (400MPa) を達成するために必要なピッカース硬さと切欠き疲労限

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 17 件)

- ① Nobuo Yoshikawa, Daiki Fuji, Koh-ichi Sugimoto, Notch Fatigue Properties of TRIP-Aided Annealed Martensitic Steels, Advanced Materials Research, Vol. 146-147, 2011, 437-440.  
 ② Koh-ichi Sugimoto, Junya Kobayashi and Goro Arai, Development of Low Alloy TRIP-Aided Steel for Hot-Forging Parts with Excellent Toughness, Steel Research International (Special Edition), Vol.81, 2010, 254-257.

[学会発表] (計 25 件)

- ① 小林純也, 伊奈大輝, 杉本公一, 高い焼入れ性を有する超高強度 TRIP 型ベイニティックフェライト鋼の開発 - 第 1 報 組織と残留オーステナイト( $\gamma_R$ )特性に及ぼす焼入れ性改善元素の影響 -, 日本鉄鋼協会第 161 回講演大会 (CAMP-ISIJ), Vol.23, 2011, 1326.  
 ② 伊奈大輝, 小林純也, 杉本公一, 高い焼入

れ性を有する超高強度 TRIP 型ベイニティックフェライト鋼の開発 - 第 2 報 強靱性に及ぼす焼入れ性改善元素の影響 -, 日本鉄鋼協会第 161 回講演大会 (CAMP-ISIJ), Vol.23, 2011, 1327.

[産業財産権]

○出願状況 (計 8 件)

- ① 名称: 切欠き疲労強度に優れた高強度鋼製加工品とその製造方法  
 発明者: 杉本公一, 藤 大貴, 吉川伸麻, 高橋輝久, 荒井五郎  
 権利者: 信州大学 (株信州 TLO), 臼井国際産業(株), 野村エソソ(株)  
 種類: 特許  
 番号: 特願 2010-206956  
 出願年月日: 2010 年 9 月 15 日  
 国内外の別: 国内

- ② 名称: 焼入れ性に優れた高強度鋼製加工品及びその製造方法、並びに高強度かつ耐衝撃特性及び耐内圧疲労強度に優れたディーゼルエンジン用燃料噴射管およびコモンレールの製造方法  
 発明者: 杉本公一, 佐藤祥平, 高橋輝久, 荒井五郎  
 権利者: 信州大学 (株信州 TLO), 臼井国際産業(株), 野村エソソ(株)  
 種類: 特許  
 番号: PCT/JP2009/068941  
 出願年月日: 2009 年 10 月 29 日  
 国内外の別: 国外

[その他]

ホームページ等

<http://mech.shinshu-u.ac.jp/~sugimoto-lab/index.htm>  
<http://soar-rd.shinshu-u.ac.jp/profile/ja.jCAnpjekV.html>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉本 公一 (SUGIMOTO KOH-ICHI)  
 信州大学・工学部・教授  
 研究者番号: 50094272

以上