

中性子回折による予ひずみ鋼板の疲労特性評価

研究代表者 茨城大学大学院理工学研究科 講師 西野創一郎

1. 緒言

近年、自動車軽量化と衝突安全性向上の両立を目的として590MPa級以上の高張力鋼板の適用が拡大している⁽¹⁾。この強度レベルでは、析出強化鋼(単相組織)、DP鋼(二相組織)、TRIP鋼(三相組織)の三種類の鋼板がある。特に、成形性および吸収エネルギーの向上からDP鋼およびTRIP鋼が注目されている。

鋼板はプレス成形によって自動車部品に加工される。その際に、加工時に生じた塑性ひずみが素材内部に残留して、硬度和微視組織が変化する。ところが、現在の自動車設計では、冷間加工製品は疲労過程で軟化する⁽²⁾⁽³⁾とされており、加工前の鋼板の引張強度(T_S)を基準とした強度設計がなされている。しかし、実際には組織や機械的性質の異なる高張力鋼板に塑性ひずみ(予ひずみ)が付与されて使用されている。以上より高張力鋼板をより効果的に活用するためには、組織と塑性ひずみが疲労強度におよぼす影響を明確にすることが重要である。

現在までに、このような予ひずみ疲労に関する研究は数多く報告⁽⁴⁾⁽⁵⁾されているが、自動車用高張力鋼板に関する研究は皆無である。特に、疲労過程での硬度変化や組織変化の観点からの検討は詳細には行われていない。著者らは、前報⁽⁷⁾⁽⁸⁾で予ひずみを与えた高張力鋼板の曲げ疲労試験を行い、疲労強度の相違について報告した。本報では、590MPa級自動車用高張力鋼板としてDP鋼およびTRIP鋼を選定し、予ひずみ材の疲労特性について、特に繰り返し負荷による硬度和微視組織の変化に注目して検討した。

2. 供試材および実験方法

2.1 供試材および試験片

供試材は表1に示す機械的性質を有する二種類の590MPa級高張力鋼板である。DP鋼はフェライトとマルテンサイトの二相組織、TRIP鋼はフェライト、ベイナイトおよび残留オーステナイトの三相組織である。図1にそれぞれの組織写真を示す。

これらの鋼板から図2に示す疲労試験片を切り出して処女材(図中V材)とした。一方、プレス成形を想定して鋼板に引張負荷によって10%の塑性ひずみを与えた。この鋼板から同一形状の疲労試験片を切り出し、予ひずみ材(図中P材)とした。

表1 機械的性質

Material	Yield strength YP [MPa]	Tensile strength TS [MPa]	Work-hardening exponent	Elongation %
DP	346	655	0.22	31
TRIP	394	637	0.19	39

2.2 実験方法

実験装置は、図3に示す小型曲げ疲労試験機を用いた。この試験機では、ステッピングモータによって試験片に1パルスあたり0.072°という高い分解能で曲げの変位を与えることが可能である。実験条件を表2に示す。なお、本試験では試験時に試験片に負荷される曲げモーメントを測定して疲労強度とした。また、本研究では実機における応力集中部の破壊に注目して低サイクル疲労試験を実施した。

表面き裂観察にはFE-SEMを、硬度測定にはビッカース硬度試験機(荷重100g)を、TRIP鋼の残留オーステナイト量測定にはX線回折装置および中性子回折装置(後述)をそれぞれ使用した。

3. 実験結果および考察

3.1 疲労試験結果

図4にDP鋼とTRIP鋼の疲労試験結果を示す。図5に 10^4 cycles 疲労強度(曲げモーメント)と予ひずみ量の関係を示す。両図よりDP鋼、TRIP鋼とも予ひずみ付与によって疲労強度が向上している。また、予ひずみを付与する前の処女材の時点で、TRIP鋼の疲労強度はDP鋼に比べて高い。以上の結果より、同一の引張強度であっても微視組織の相違によって疲労強度に差が生じることが分かった。

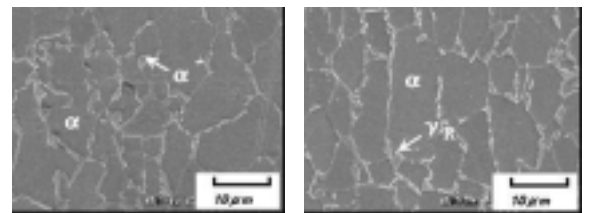


図1 微視組織

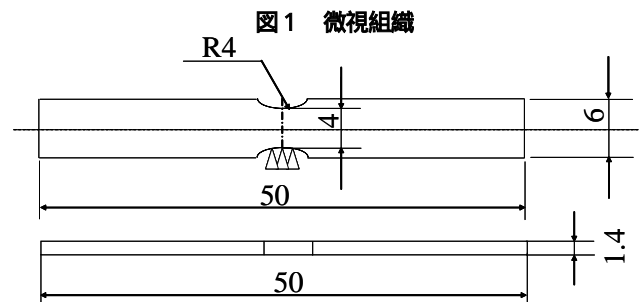


図2 疲労試験片



図3 疲労試験機

3.2 破壊形態

DP 鋼と TRIP 鋼の疲労き裂発生寿命について調べた結果、処女材、予ひずみ材共に全寿命の 90%以上に及ぶことが判明した。したがって、590MPa 級高張力鋼板（DP 鋼および TRIP 鋼）の疲労強度はき裂発生抵抗によって決まる。

図 6 に DP 鋼および TRIP 鋼の試験片表面に発生したき裂の様相を示す。DP 鋼では、処女材、予ひずみ材ともにフェライト相のすべり帯に沿ってき裂が発生している。一方、TRIP 鋼では、処女材、予ひずみ材ともにフェライトの結晶粒界からき裂が発生しており、フェライト粒内のすべり帯は観察されなかった。TRIP 鋼の微視組織はフェライト粒を取り囲む結晶粒界に残留オーステナイトおよびベイナイトが存在する。したがって、負荷によって変態したマルテンサイトがフェライト粒内のすべりを抑制したと考えられる。

3.3 繰返し負荷による硬度変化

図 7 に DP 鋼および TRIP 鋼の繰返し負荷による硬度変化を示す。DP 鋼では予ひずみによって硬度が上昇している。しかし、予ひずみ材の硬度は疲労負荷とともに減少しており、疲労軟化が認められる。処女材でも同様の傾向がみられるが、予ひずみ材よりは減少傾向が小さい。破断寿命付近では、両者の硬度は近づくが、予ひずみ材の硬度が高い。したがって、DP 鋼の疲労強度は、予ひずみによるフェライトの加工硬化と疲労軟化によって支配されている。TRIP 鋼においても、予ひずみによって硬度が上昇する。しかし、疲労負荷による硬度変化は DP 鋼の場合と異なる。予ひずみ材では疲労軟化が認められるが、DP 鋼の予ひずみ材よりは軟化の程度が小さい。また、処女材では疲労軟化が起こらない。

TRIP 鋼の処女材は DP 鋼に比べて疲労強度が高い。これは、TRIP 鋼の処女材が疲労試験中の繰返し負荷によって塑性変形し、加工誘起マルテンサイト変態をしているからであるとされる。TRIP 鋼・予ひずみ材の疲労軟化の程度は DP 鋼・予ひずみ材に比べて小さい。これは軟質層を取り囲む硬質相が変形を負担しており、主に軟化が大きいフェライトの変形が抑制されたためである。

表 2 疲労試験条件

Bending Waveform	Sin wave
Bending moment Ratio	R = - 1
Environment	Room temperature

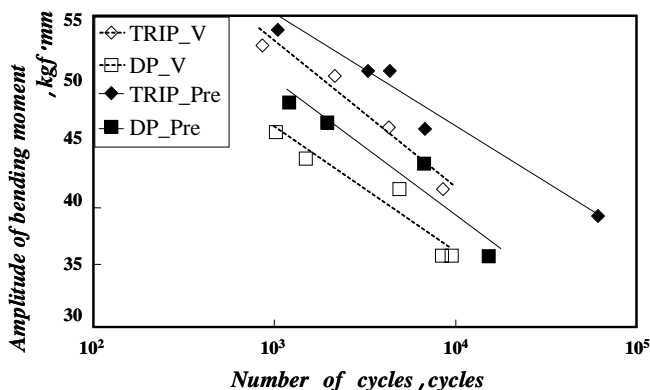


図 4 疲労試験結果

一方、処女材の硬度が変化しないことは残留オーステナイトの変態挙動と関係していると考えられる。そこで、X 線回折装置を用いて、繰返し負荷による残留オーステナイトの変態挙動について調べた。

3.4 繰返し負荷によるマルテンサイト変態

繰返し負荷による残留オーステナイトの変態挙動を図 8 に示す。処女材では繰返し負荷によって、疲労寿命の初期段階、200cycles 程度にてマルテンサイト変態が起こるために残留オーステナイト量が減少している。この曲げモーメントで試験片表面に生じるひずみは約 1%であった。したがって、微小ひずみでも繰返し負荷されることによって、マルテンサイト変態が進行することがわかった。このことより、変態による硬化と疲労軟化が平衡するために硬度が変化しないとされる。予ひずみ材では 10%の塑性ひずみを負荷した後疲労試験を行っているために変態は起こらない。

繰返し負荷による変態挙動についてさらに詳細に検討するために、繰返し負荷に伴う残留オーステナイト相の残留応力を測定した。その結果を図 9 に示す。同図よりオーステナイト相の残留応力は繰返し負荷によって引張側に増大することが確認できた。一方向へのひずみの蓄積は、フェライト相と残留オーステナイト相の間に微視組織レベルでの応力差が生じたことに起因している。このことによって、残留オーステナイトのマルテンサイト変態が助長されたと考えられる。

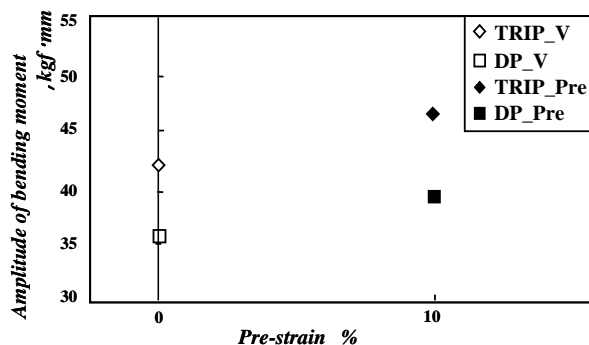


図 5 10⁴回疲労強度

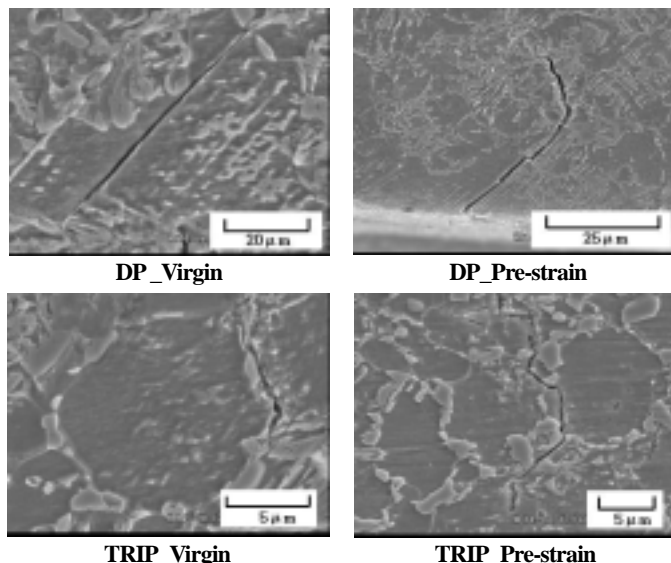


図 6 き裂発生および進展挙動

3.5 中性子回折による微視組織変化挙動の把握

中性子回折は中性子線を利用して素材や部品内部の組織変化・残留応力分布の状況を調べる技術であり、X線や放射光に比べて比較的深い部分から情報を得ることができる。本研究においても予ひずみ負荷後の素材表面だけではなく、内部の残留相の変態状況について調査した。

V材およびP材から約15mm角のサンプルを切り出し、試験片とした。中性子回折測定は、日本原子力研究開発機構・研究3号炉付設の残留応力測定装置 (RESA) を用いて実施した。測定は最も回折強度が高かった (211)・(220) を用いた。また、今回使用したスリットは測定範囲に鋼板全体が含むように入射スリット、回折スリットともに 15mm×8mm のサイズのものを使用した。測定状況を図10に示す。

残留オーステナイト量の体積率評価は、3軸(RD: 圧延、TD: 圧延に垂直、ND: 板厚方向) 方向において相および相の回折プロファイルを調査して積分強度の比から算出した。

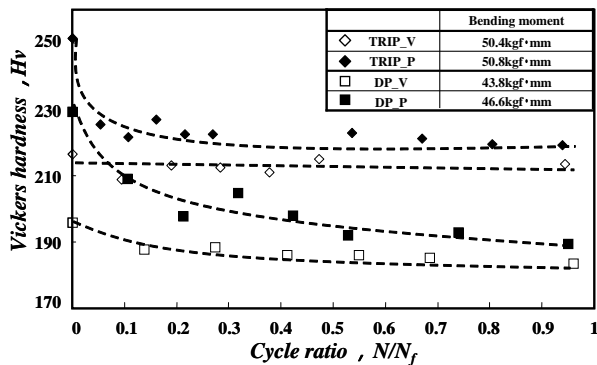


図7 繰返し負荷による硬度変化

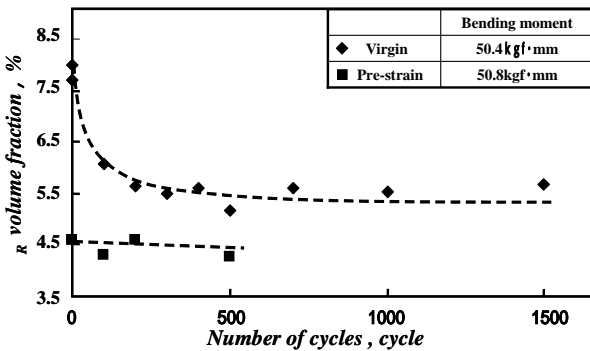


図8 繰返し負荷による残留量の变化

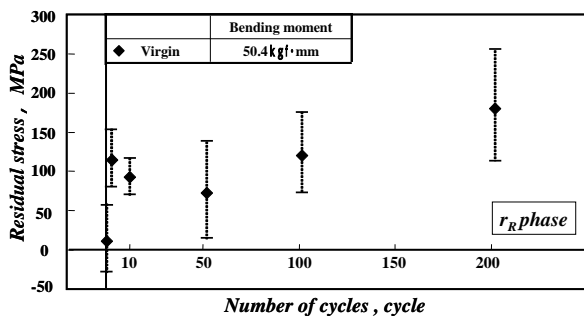
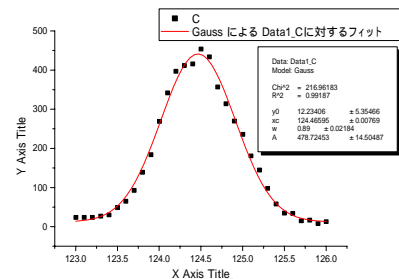


図9 繰返し負荷による残留相残留応力の変化

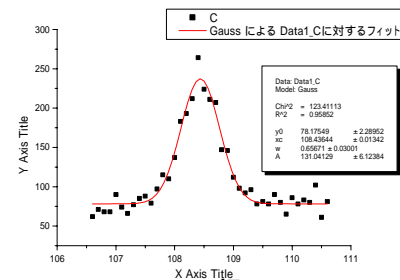
V材とP材のRD方向の(211)、(220)の回折プロファイル例を図11および12に示す。また、それぞれのプロファイル積分強度の比較から、V材およびP材の残留オーステナイト量を計算した。表3に示す解析結果より、素材内部においても残留相が変態しており、予ひずみが負荷されたTRIP鋼板の疲労強度向上の要因であると考えられる。



図10 中性子回折実験装置 (RESA)

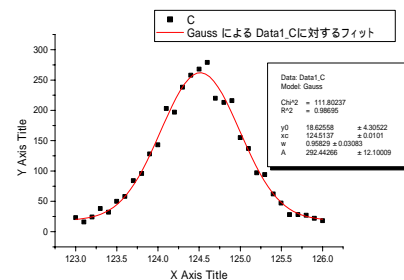


(a) 相

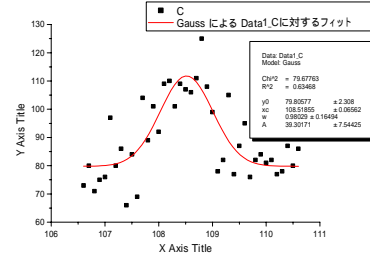


(b) 相

図11 V材における回折プロファイル



(a) 相



(b) 相

図12 P材における回折プロファイル

4. 結言

本研究では、590MPa 級自動車用高張力鋼板(DP 鋼, TRIP 鋼)の疲労強度におよぼす予ひずみの影響について、疲労負荷による硬度、マルテンサイト変態量および残留応力の変化に注目して検討した。得られた結果を以下に示す。

(1) 10%の予ひずみを与えることによって DP 鋼も TRIP 鋼も疲労強度は処女材に比べて向上する。また、同一引張強度であっても組織形態の相違によって疲労強度に差が生じる。

(2) DP 鋼・予ひずみ材の疲労強度向上は、予ひずみによるフェライト相の加工硬化によって粒内すべりが抑制され、疲労き裂発生抵抗が増大したことに起因する。

(3) TRIP 鋼・予ひずみ材の疲労強度向上は、予ひずみを与えることによって残留オーステナイトが硬質なマルテンサイトに変態し、軟質相であるフェライト粒内のき裂発生が抑制されることに起因する。また、処女材では繰り返し負荷に伴ってフェライトとオーステナイト間に生じる相応力によって変態が進行するために DP 鋼に比べて疲労強度が向上する。

表3 残留 相の体積率

		Virgin材		Pre-strain材	
残留オーステナイト 体積率 (%)	TD	5.73	4.83 (平均)	1.32	1.72 (平均)
	RD	2.95		1.10	
	ND	5.80		2.75	

(4) 予ひずみ負荷による TRIP 鋼・残留 相の変態挙動を中性子回折によって調査した結果、素材内部まで組織変化が起こっていることを確認した。素材内部の変態挙動は疲労強度向上に影響を与えていると考えられる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、ご協力して頂いた JFE21 世紀財団、茨城県工業技術センター、福島県ハイテクプラザ、日本原子力研究開発機構の皆様に対し、深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 向井陽一・由利司, 金属, Vol.73, No.2 (2003)
- (2) ヴィ・エス・イワノフ, ヴィ・エフ・テレンシェフ, 金属疲労の基礎と破壊力学, 現代工学社 (1979)
- (3) A.S.テテルマン・A.J.マッケピリー・宮本 博, 構造材料の強度と破壊 2, 培風館 (1970)
- (4) 西谷弘信・寺西高広・竹野哲也・山田繁治・田中哲志 機論, 64 626 (1998)
- (5) 苗徳華・西田新一・服部信祐, 機論, 67 654 (2001)
- (6) 宋星武・杉本公一・神高信介・ニタ村朝比古・小林光征・増田雪也, 材料, Vol.50, No.10 (2001)
- (7) 豊田慎・西野創一郎・大屋邦雄, 自動車技術会 2003 年春季大会, No.10-03
- (8) 飯泉克章・西野創一郎・大屋邦雄, 自動車技術会 2004 年秋季大会, No.83-04