

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月20日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2011～2012

課題番号：23686103

研究課題名（和文） VCナノ析出物を分散させたフェライト・マルテンサイト二相鋼の引張変形挙動

研究課題名（英文） Tensile behavior of ferrite-martensite dual phase steels with dispersion of nano-sized VC particles

研究代表者

紙川 尚也（KAMIKAWA NAOYA）

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号：30530894

研究成果の概要（和文）： VC微細合金炭化物の相界面析出組織を有するフェライトとマルテンサイトから成る二相(dual phase; DP)鋼を作製し、その引張変形挙動を系統的に調べた。VC微細炭化物の相界面析出によるフェライト部の強化は、強度・均一伸びバランスを維持したまま材料の強度は大きく向上させることができると同時に、強度・局部伸びバランスを改善できることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）： Tensile behavior of ferrite-martensite dual phase steels with interphase boundary precipitation was systematically investigated. Dispersion of nano-sized VC particles in the ferrite phase in the DP steels led to an increase in the strength without degrading strength-uniform elongation balance, and to an improvement of strength-post uniform elongation balance.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	11,800,000	3,540,000	15,340,000
2012年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	13,000,000	3,900,000	16,900,000

研究分野：材料組織学、材料強度学、塑性加工学

科研費の分科・細目：材料加工・処理

キーワード：析出、力学特性、強化機構

### 1. 研究開始当初の背景

フェライト・マルテンサイト二相鋼(dual phase 鋼; DP 鋼)は、高い強度と優れた加工性を示す実用鋼として知られており、特に、加工硬化が大きく非常に大きな均一伸びを示す反面、局部伸びは比較的小さいという特徴を有している。一方、フェライト単一組織に直径数ナノメートルの微細合金炭化物が分散した相界面析出鋼も、高強度で加工性に優れた実用鋼として知られている。相界面析出鋼の特徴は、フェライト・

マルテンサイト DP 鋼とは対照的に、加工硬化は比較的小さいが、大きな局部伸びを示すという点である。したがって、フェライト・マルテンサイト DP 鋼のフェライト中に相界面析出によりナノ析出物を分散させると、両者の鋼の特長を兼ね備えた高強度・高延性を示す材料特性を実現できる可能性がある。

### 2. 研究の目的

本研究では、V 添加低炭素鋼を用いて、フェライト・マルテンサイト DP 鋼のフェ

ライト中に VC ナノ炭化物を微細に分散させた鋼を作製し、その力学特性を系統的に調べ、フェライト・マルテンサイト DP 鋼の強度と延性に及ぼすナノ析出組織の影響を明らかにしていくことを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では、Fe-0.095%C-1.49%Mn-0.43%V (mass%) (0.1C-0.4V 鋼)を用いて実験を行った。1100°C で 600s のオーステナイト化処理後、相界面析出を伴うフェライトが生成する 690°C で種々の時間等温保持後水冷した試料を作製した。これにより、フェライト部に直径 10 nm 程度の VC 炭化物が分散したフェライト・マルテンサイト体積率を有する DP 鋼を得ることができた。一方、Fe-0.098%C-1.50%Mn(0.1C 鋼)を用いて同様の熱処理を行い、VC 析出のない通常のフェライト・マルテンサイト DP 鋼を作製した。さらに、1.50%Mn を含有する極低炭素 IF 鋼(IF 鋼)に対して 690°C 変態を施し、VC 析出組織のないフェライト単相組織を作製した。これ以降、0.1C-0.4V 鋼試料を V 添加鋼、0.1C 鋼および IF 鋼試料を V 無添加鋼と呼ぶ。得られた試料に対して、光学顕微鏡組織観察、透過電子顕微鏡(TEM)組織観察、後方散乱電子線回折(EBSD)測定を行った。また、初期ひずみ速度  $8.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  の条件で室温引張試験を行った。

### 4. 研究成果

種々のフェライト体積率を有する V 無添加鋼および V 添加鋼試料に対して室温で引張試験を行った。得られた公称応力・公称ひずみ曲線から各試料の 0.2%耐力、引張強さ、均一伸び、および局部伸びを求め、フェライト体積率に対してプロットしたものを図 1 に示している。マルテンサイト単一組織を有する焼入れまま材の強度と延性は両鋼で非常に良く似ており、焼入れまま材の力学特性に及ぼす V の添加の影響は小さいことがわかる。いずれの場合も、引張強さが約 1.1 GPa の高い強度を示し、均一伸びは 2%程度と小さいが、比較的大きな局部伸びを示している。0.2%耐力および引張強さ(図 1a)は、両鋼ともに、フェライト体積率の増加に伴って単調に減少していくが、V 無添加鋼に比べて V 添加鋼の方が強度が高くなっている。これは、V 添加鋼において、相界面析出によりフェライト中に形成された微細 VC 炭化物によって、フェライ

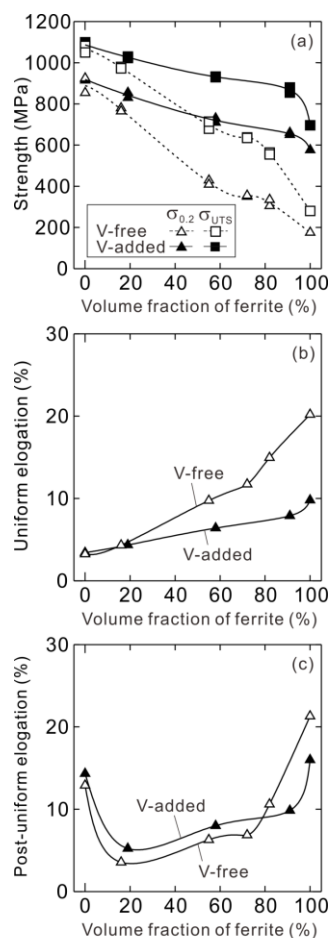


図 1 室温引張試験における強度と延性。

ト部が析出強化されているためである。均一伸び(図 1b)は、両鋼ともにフェライト率の増加に伴って増加していく傾向があるが、フェライト・マルテンサイト DP 材およびフェライト単相材では V 添加により均一伸びが減少していることがわかる。一方で、局部伸び(図 1c)はフェライト体積率の増加に対して非常に特徴的な変化を示している。両鋼ともに、フェライト体積率が 20%程度の 60 s 保持材で一旦減少しているが、その後、フェライト率の増加とともに大きく増加するという傾向を示す。フェライト率が約 80%程度までの領域では、V 無添加鋼よりも V 添加鋼の方がわずかに大きな局部伸びを示しているが、フェライト率が 80%以上になると逆に、V 添加鋼よりも V 無添加鋼の方が局部伸びが大きくなっている。

以上の結果より、フェライト・マルテンサイト DP 鋼のフェライト部に VC 炭化物を分散させた場合、フェライト部の析出強

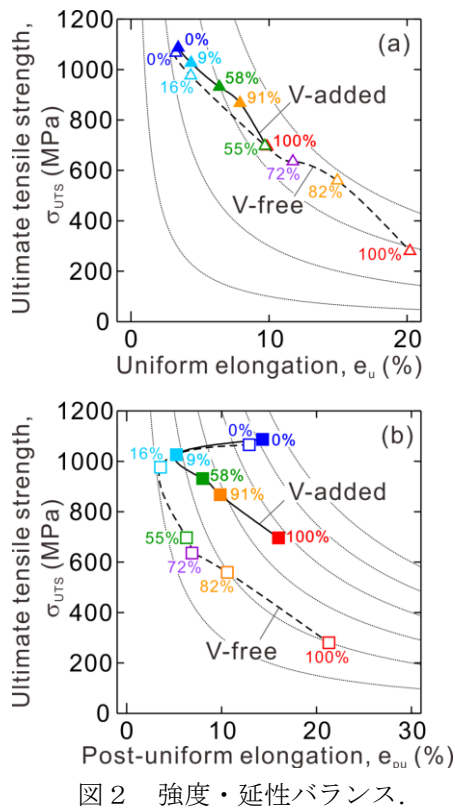


図2 強度・延性バランス。

化により材料の強度は向上するものの、均一伸びが低下してしまうことが明らかになった。一方、DP 試料の局部伸びは V 添加に伴いわずかに増加したが、フェライト単相材では逆に V 添加により低下することがわかった。ここで、得られた試料の強度・延性バランスを比較してみる。図 2a,b には、引張強さ・均一伸びバランス、および引張強さ・局部伸びバランスをそれぞれ示している。引張強さ・均一伸びバランスを見ると、V 添加鋼のプロット点は V 無添加鋼に比べて高強度・低延性側へと移動しているものの、両鋼のデータ点は同一の帯状領域に位置しており、強度・延性バランスに大きな違いは見られない。しかしながら、引張強さ・局部伸びバランスでは、フェライト体積率が約 50% 以上の試料において、V 添加鋼のプロット点が V 無添加鋼に比べて高強度・高延性側に位置していることが見てとれる。以上の結果は、フェライト・マルテンサイト DP 鋼のフェライト中に微細合金炭化物を分散することは、強度・均一伸びバランスを維持したまま、材料の局部伸びを改善する方法として有効であることを意味している。

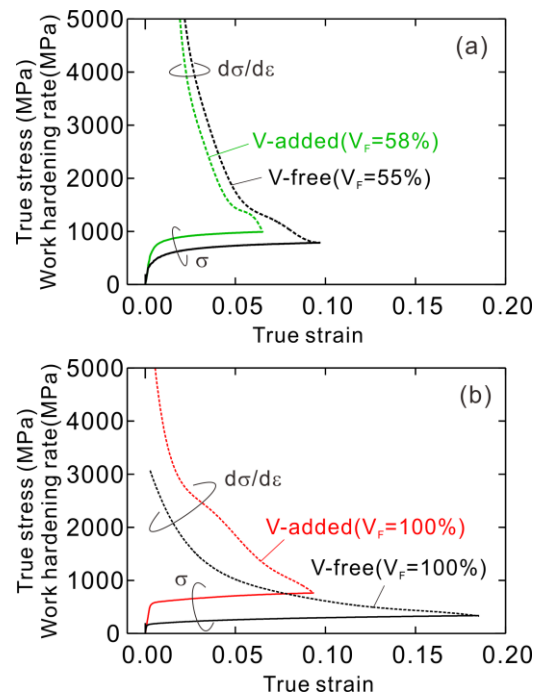


図3 加工硬化率曲線。

フェライト・マルテンサイト DP 鋼の延性に及ぼすナノ析出組織の影響を理解するため、材料の加工硬化挙動について議論していく。図 3a, b にはそれぞれ、フェライト体積率が約 50% のフェライト・マルテンサイト DP 材およびフェライト単相材の加工硬化率に及ぼす V 添加の影響を示している。フェライト・マルテンサイト DP 材(図 3a)では、V 添加により材料の強度が増加する一方、加工硬化率が低下することにより、均一伸びが低下している。これに対して、フェライト単相材(図 3b)では、V 添加により加工硬化率が大きく向上しているものの、材料の強度も著しく増加する結果、塑性不安定を早期に発現して均一伸びが低下していることがわかる。すなわち、フェライト中への VC 炭化物の分散は、フェライト単相材では加工硬化を大きく向上させる効果があるのに対して、フェライト・マルテンサイト DP 材では逆に材料の加工硬化を低下させる働きがあることが明らかになった。フェライト単相材とフェライト・マルテンサイト DP 材で、加工硬化挙動に及ぼす VC 炭化物の影響が逆転するという結果は非常に興味深い。

これらの原因を明らかにするため、まず、フェライト単相材の引張変形中に形成され

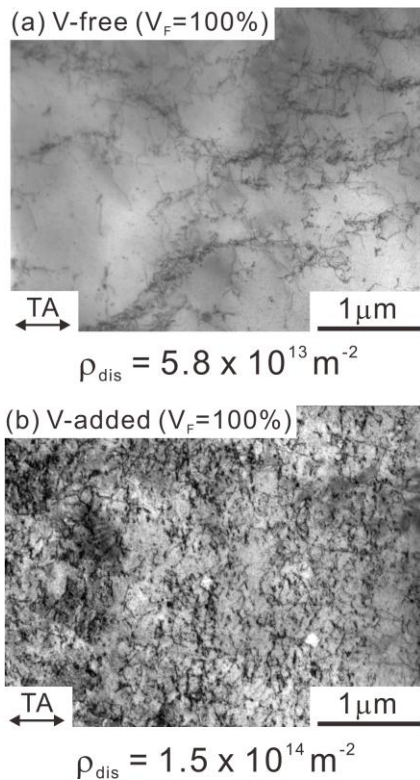


図4 TEMによる転位組織観察.

る転位組織を観察した。図4a,bは、V無添加鋼およびV添加鋼のフェライト単相材に対して、1%の引張ひずみを与えた試料のTEM組織をである。V無添加鋼(図4a)では、非常に不均一に転位が分布しており、一部に転位が絡み合っセル境界を形成している領域が観察される。ところがV添加鋼(図4b)では、高密度の転位が形成されており、それらが視野全体に均一に分布している様子が観察できる。この結果は、V添加鋼のフェライト中に均一微細に分散されたVC炭化物が転位の増殖源として働いていることを示唆している[3]。炭化物周りで増殖した転位同士が切り合い、その結果、変形初期に大きな加工硬化を引き起こしていると考えられる。しかしながら、微細合金炭化物は材料の強度を著しく増加させるため、塑性不安定条件を早期に満足し、材料の均一伸びは小さくなったと考えられる。

一方で、フェライト・マルテンサイト DP鋼において、V添加により加工硬化率が低下し、均一伸びが減少した原因を理解するために、デジタル画像相関法を用いて、引張試験中に生じる局所ひずみ解析を行った。フェライト体積率が約50%のV無添加鋼

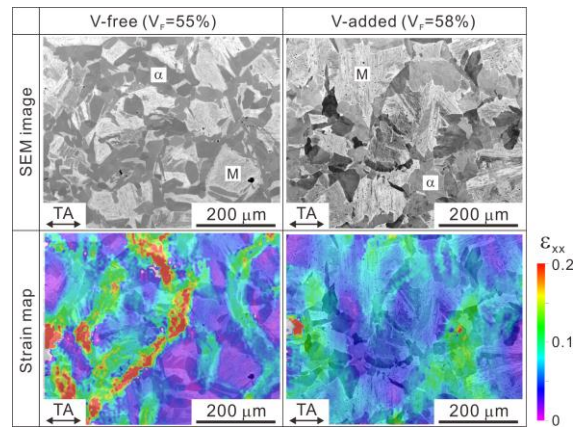


図5 デジタル画像相関法により得られた局所ひずみ分布.

およびV添加鋼のフェライト・マルテンサイト DP材の引張試験片を作製し、試験片表面を鏡面研磨した後、腐食し組織を現出してSEM観察を行った。その後、室温引張試験により、5%の引張ひずみを与え、引張変形後の試料表面における同一視野のSEM観察を行った。得られた変形前後のSEM写真を用いて、デジタル画像相関法解析ソフトMoire Softwareにより局所ひずみ分布を求めた。図5には、5%引張変形後のSEM写真とそれに対応する局所ひずみ分布を示している。ひずみ分布図では、引張方向の垂直ひずみを示している。V無添加材では、測定視野内のひずみ分布は非常に不均一であり、特に軟質相であるフェライトに塑性変形が集中している様子がわかる。一方で、V添加鋼においても、やはり、フェライト部におけるひずみの集中は観察されるものの、硬質相であるマルテンサイトにおいても塑性変形が進み、V無添加鋼に比べてより均一な塑性変形が進行している。これは、VC炭化物の相界面析出によってフェライト相が析出強化されたため、フェライト相とマルテンサイト相の強度差が小さくなり、軟質相と硬質相の間のひずみ分配が緩和されたものと理解できる。DP鋼においては、軟質相と硬質相の強度差が大きいほど不均一変形が促進され、大きな加工硬化を引き起こすことが知られている。すなわち、VC炭化物の分散によるDP鋼のフェライト部の強化は、より均一変形を引き起こすため加工硬化をむしろ低下させ、その結果、均一伸びの低下を示したものと考えられる。しかしながら、こうした不均一変形の抑制は、変形後期において、軟質相と硬質相の異相界面におけるボイドや亀裂の形成を抑制する効果があると考えられ、むしろDP鋼の局所変形の向上に有効に働いている可能性がある。

V添加低炭素鋼を用いて、フェライト・

マルテンサイト DP 鋼のフェライト部に相界面析出により VC 炭化物を分散させた鋼を作製し、その強度と延性を調べた。通常の DP 鋼に比べて、V 添加により材料の強度は増加する一方、均一伸びは低下するが、局部伸びがわずかに大きくなる傾向が見られた。微細合金炭化物による DP 鋼のフェライト部の析出強化は、軟質相と硬質相の間の不均一変形を抑制し、加工硬化を低下させる一方、局部伸びの向上に有効であることが示唆された。

#### 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 0 件)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 紙川尚也、廣橋正博、宮本吾郎、古原忠、相界面析出組織を有するフェライト・マルテンサイト二相鋼の強度と延性、鉄鋼材料の組織と延性研究会シンポジウム、2013 年 3 月 28 日、東京電機大学
- ② 廣橋正博、紙川尚也、宮本吾郎、古原忠、VC ナノ析出物を有するフェライト・マルテンサイト二相鋼の引張変形挙動、2012 年 日本鉄鋼協会 第 164 回 秋季講演大会学生ポスターセッション、2012 年 9 月 18 日、愛媛大学

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

紙川 尚也 (KAMIKAWA NAOYA)  
東北大学・金属材料研究所・助教  
研究者番号：30530894

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：