

平成 21 年 5 月 22 日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2006～2008 年度
 課題番号：18360332
 研究課題名（和文） 炭化物とナノ Cu 粒子を複合利用したハイブリッド鋼の提案
 研究課題名（英文） Proposal of Hybrid Steel strengthen by multiple-precipitation of carbide and nano Cu particles
 研究代表者
 高木 節雄（TAKAKI SETSUO）
 九州大学・大学院工学研究院・教授
 研究者番号：90150490

研究成果の概要： 粒子分散強化は金属材料の基本的な強化機構の一つであり、鉄鋼材料の場合、セメントイトを代表とする炭化物が一般的に強化分散粒子として使用されている。一方、近年ではナノテクノロジーによる鉄鋼材料の高機能化研究が盛んに行われており、数 nm～数十 nm の非常に微細な分散粒子（ナノ分散粒子）を利用して鉄鋼材料の高強度化を図ろうとする試みがなされ、その一つとしてナノ Cu 粒子が注目されている。ただし、ナノ Cu 粒子分散鋼の優れた機械的性質は、単に分散粒子のサイズが微細であることだけでなく、「分散 Cu 粒子自体が鉄基地に比べて十分軟質である」という Cu 粒子の特徴によってもたらされている事実も示唆されている。今後、大きな降伏強度と加工硬化率を有し高強度・高延性を兼ね備えた材料を得るためには、炭化物と Cu 粒子を同時に最適な状態で分散させ、それぞれの特長を融合させてやること（ハイブリッド化）が有効であると考えられる。そのような鉄鋼材料、「ハイブリッド鋼」の有効性を証明することを本研究の最大の目的とし研究を遂行した。その結果、様々なハイブリッド鋼（フェライト型ハイブリッド鋼、マルテンサイト型ハイブリッド鋼、パーライト型ハイブリッド鋼など）の創製に成功し、炭化物と Cu 粒子の複合析出により鋼の強度 - 延性バランスが大幅に改善することが明らかとなった。さらに、炭化物と Cu 粒子それぞれの分散状態を制御することにより鋼の降伏強度と加工硬化率を独立して任意にコントロールできる可能性が示唆された。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	15,200,000	4,560,000	19,760,000
2007 年度	400,000	120,000	520,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	16,100,000	4,830,000	20,930,000

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：鉄鋼、粒子分散強化、銅、ハイブリッド、高強度・高延性

1. 研究開始当初の背景

粒子分散強化は鉄鋼材料の基本的な強化機構の一つであり、一般的にセメンタイトを始めとしてNb系やV系、Ti系などの様々な炭化物が分散強化粒子として使用されている。近年ではそれらのサイズをナノレベルで制御することにより鉄鋼材料の特性をさらに向上させようとする試みがなされており、数nm～数十nmの微細な炭化物粒子を加工熱処理によりフェライト基地中に均一分散させる技術が開発されている。一方、炭化物系ナノ粒子と共にCuナノ粒子の利用も最近注目されている。鉄鋼材料中のCuはセメンタイトよりも極めてオストワルド成長が遅いため、数nmの微細粒子を時効処理により容易に析出させることができる。またCuはオーステナイト中へ最大で10mass%ほど固溶することから、フェライト中に高濃度に過飽和固溶させた後に析出させることで、数vol.%の多量の粒子を緻密に分散できる特徴も有する。Cu粒子のもうひとつの特徴として、粒子自体が鉄基地に比べて軟質であり、硬質な炭化物粒子とは異なった特性を鋼に与える点が挙げられる。一般的に、硬質粒子は、ある臨界粒子径以上であれば、転位が粒子の周りにループを形成して通過するため(Orowan機構)、降伏後の塑性変形域において後続転位の障害として働き、大きな加工硬化を生み出す。それに対して、Cu粒子は転位とあまり大きな相互作用を示さず、転位が粒子内部を通過する(Cutting機構)と考えられており、高歪域において粒子近傍に生じた応力集中の緩和効果が期待できる。つまり、Cu粒子は鋼の延性をあまり損なわずに降伏強度を高めるには有効と考えられるが、加工硬化率の観点からは硬質粒子に比べてその増大効果が小さいために、引張強度はあまり上昇させないと言える。

しかしながら、硬質炭化物粒子と軟質Cu粒子を併用し、両者の特長を同時に引き出すことができれば、従来の特性を大幅に向上させることが可能となる。つまり、降伏強度をCu粒子で、加工硬化率を硬質炭化物粒子でそれぞれ上昇させれば、延性を大きく損なわずに高降伏強度かつ高加工硬化率を有した鋼を創製することができると期待される。そして、このような性質の異なる両分散粒子を複合析出させた鋼(ハイブリッド鋼)は、フェライト組織のみならず、マルテンサイト組織やパーライト組織など鉄鋼材料の様々な組織にも応用できると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、まず、硬質炭化物粒子と軟質Cu粒子が鋼の降伏強度や加工硬化率などの機械的特性にどのように影響するかを定量的に評価するため、同一の分散状態にある

炭化物およびナノCu粒子単分散材の引張特性を評価する。次いで、両分散粒子を同時に分散させた鋼を作製し、「ハイブリッド鋼」の有用性を検証する。その際に、マルテンサイト変態、パーライト変態、ベイナイト変態等の各種相変態を利用して、様々なタイプのハイブリッド鋼を創製することも目標とする。

3. 研究の方法

炭化物およびナノCu粒子

単分散材の引張特性評価

ナノCu粒子と炭化物粒子では機械的性質に及ぼす影響が大きく異なることが明らかになっているが、これまでの代表者の研究では両分散粒子のサイズや体積率が異なっていたため、純粋に軟質粒子と硬質粒子の効果の違いは評価されていなかった。本研究では、サイズ、形態、体積率が全く等しい硬質炭化物分散材と軟質Cu粒子分散材を作製し、引張試験によりそれぞれが応力歪み曲線へ及ぼす影響を調査した。同時に透過電子顕微鏡(TEM)を用いて、変形に伴う転位組織発達過程の相違についても明らかにした。ただし、一般的な炭化物であるセメンタイトをCu粒子と同様にナノサイズに分散させることは困難であるため、本実験では合金炭化物であるVCを利用し、加工熱処理によって1.5vol%程度の析出粒子を分散させた鋼で実験を実施する。

ハイブリッド鋼の創製とその有用性評価

Fe-C-Cu系合金を中心に、様々な組織を持つハイブリッド鋼を製造する。その種類と期待される性質は以下の通りである。

(1)フェライト型ハイブリッド鋼

転位密度の低いフェライト組織中に炭化物とCu粒子を複合的に分散させた基本的ハイブリッド鋼。得られる単分散材の引張特性と比較することで、ハイブリッド化の有用性を吟味する。

(2)パーライト型ハイブリッド鋼

フェライトとセメンタイトの層状組織であるパーライトのフェライト中に微細なCu粒子を分散させたハイブリッド鋼。Cu粒子の析出により延性を確保しつつ高強度化を図ることが出来るため、伸線加工を実施することで超高強度ハイブリッドピアノ線の創製も期待される。

(3)ベイナイト型ハイブリッド鋼

低合金Fe-C-Cu合金において連続冷却あるいは500以下の低温での恒温変態処理で得られるハイブリッド鋼。とくにSiを添加することでセメンタイトの析出を抑制すれば、オーステナイトが一部残留したハイブリッドTRIP鋼が得られる。固溶したCuはオーステナイトを安定化する効

果もあるため、従来の TRIP 鋼よりも優れた強度 - 延性バランスを示す可能性がある。

(4) マルテンサイト型ハイブリッド鋼
マルテンサイト鋼がもともと有している高い転位強化と炭化物の析出強化に加えて、ナノ Cu 粒子による強化も加算することで極めて高い強度を有するハイブリッド鋼。

4. 研究成果

炭化物およびナノ Cu 粒子

単分散材の引張特性評価

加工熱処理を駆使して、結晶粒径、転位密度などを揃えたフェライト組織中に、同等のサイズ、形態、体積率(1.5vol.%)を有した VC 粒子と Cu 粒子をそれぞれ単分散させた VC 鋼と Cu 鋼を作製し、その引張特性を評価・比較した。その結果、同等の分散状態であるにもかかわらず、図 1 に示すように Cu 鋼は VC 鋼よりも著しく小さな加工硬化挙動を示し、「加工硬化挙動は、粒子の分散状態のみに依存する」という Ashby の理論が軟質 Cu 粒子分散鋼では適用できないことを明らかにした。しかも、分散粒子を含まない同質のフェライト鋼についても同様の試験を実施したところ、この鋼と Cu 鋼の加工硬化挙動に大きな違いがなく、軟質 Cu 粒子は降伏強度を大きく上昇させるものの、加工硬化の向上にはほとんど寄与しないことを見出した。そして、TEM を用いた詳細な組織観察(図 2)から、圧延加工を施した際に Cu 粒子が母相であるフェライトと同調して大きく伸長する実験事実を明らかにし、転位が Cu 粒子内部を通過し(Cutting 機構)、塑性変形することを間接的に証明した。さらに、Cu 粒子の塑性変形により、粒子近傍での転位の絡み合いが抑制され、粒子分散に起因した転位密度の上昇や転位組織の発達が起こり難くなることを指摘し、その結果として、加工硬化率が小さくなることを矛盾なく説明した。

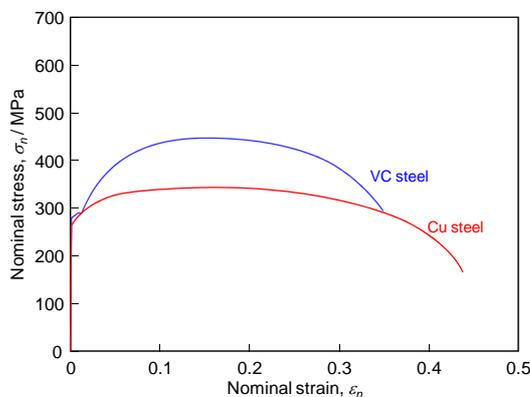


図 1. VC 粒子および Cu 粒子単分散材の公称応力 - 歪曲線

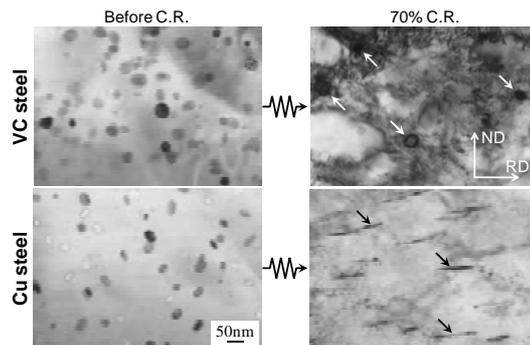


図 2. VC 粒子および Cu 粒子単分散材の 70%冷間圧延に伴う組織変化

ハイブリッド鋼の創製とその有用性評価

フェライト組織中にそれぞれ 1.5vol.%の VC 粒子と Cu 粒子を複合的に析出させたフェライト型ハイブリッド鋼の応力 - 歪曲線を図 3 に示す。図中には、で説明した VC 粒子、Cu 粒子の単分散材の結果も併示しているが、三鋼種の引張特性を比較すると、ハイブリッド鋼は他の二鋼種より大きな降伏強度を有しているが、加工硬化率はさほど小さくなく VC 粒子単分散材と同程度であることがわかる。これは、降伏強度においては VC 粒子と Cu 粒子の複合効果が発現しているのに対して、加工硬化挙動については VC 粒子のみに依存していることを指示している。以上の結果を踏まえて、硬質炭化物粒子と軟質 Cu 粒子を併用することで、鋼の降伏強度と加工硬化特性を独立して制御するハイブリッド鋼が実現可能であることが証明された。

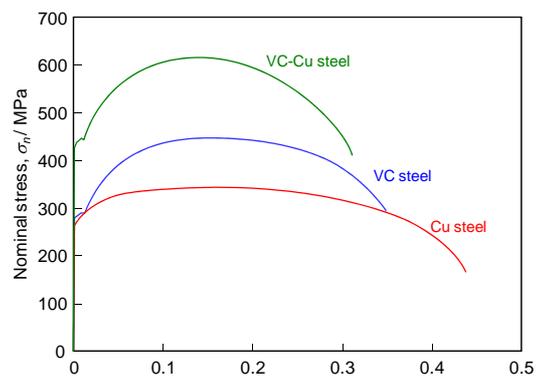


図 3. フェライト型ハイブリッド鋼の公称応力 - 歪曲線

なお、フェライト型ハイブリッド鋼以外にもパーライト型ハイブリッド鋼、マルテンサイト型ハイブリッド鋼の創製にも成功し、いずれのタイプのハイブリッド鋼においても強度 - 延性バランスの改善が確認され、ハイブリッド化による利点が見出された。とくにパーライト型ハイブリッド鋼においては、Cu 粒

子の分散強化と塑性変形を利用して、高い強度と十分な加工性を満足した超高強度ハイブリッドピアノ線実現の可能性が示唆された(図4, 5)。

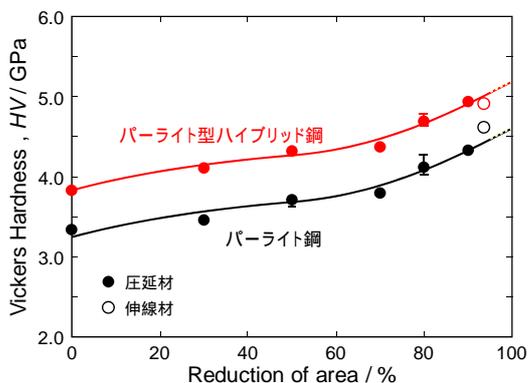


図4. パーライト型ハイブリッド鋼および通常のパーライト鋼の冷間加工に伴う硬度変化

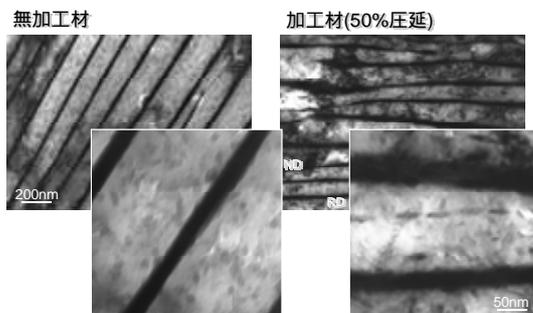


図5. パーライト型ハイブリッド鋼の50%冷間圧延に伴う組織変化

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5件)

- (1) M. Murakami, Y. Takanaga, N. Nakada, T. Tsuchiyama and S. Takaki, Microstructure and Mechanical Property of Copper Bearing Eutectoid Steel, ISIJ International, vol.48(2008), 1467-1472, 査読有
- (2) 今浪祐太、村上真宏、中田伸生、土山聡宏、高木節雄, Fe-Cu合金の冷間圧延に伴う分散Cu粒子の塑性変形と転位組織発達, 熱処理, 48巻(2008), 299-300, 査読有
- (3) Y. Imanami, M. Murakami, N. Nakada, T. Tsuchiyama and S. Takaki, Contribution of Soft Cu Particles on Tensile Deformation Behavior in Iron, special issue of Netsusyori, 掲載決定, 査読有

- (4) M. Murakami, Y. Takanaga, N. Nakada, T. Tsuchiyama and S. Takaki, Precipitation of Copper Particles during Pearlite Transformation, special issue of Netsusyori, 掲載決定, 査読有
- (5) Y. Imanami, M. Murakami, N. Nakada, T. Tsuchiyama and S. Takaki, Contribution of Soft Cu particles on Work Hardening Behavior in Ferritic iron, ISIJ International, 掲載決定, 査読有

〔学会発表〕(計5件)

- (1) 高永洋平、中田伸生、土山聡宏、高木節雄, Cu粒子分散型パーライト鋼の組織と強度特性, (社)日本鉄鋼協会・第154回秋季講演大会, 2007年9月19日
- (2) 村上真宏、中田伸生、土山聡宏、高木節雄、足立吉隆, マルテンサイト鋼における硬質炭化物粒子と軟質Cu粒子の複合析出挙動, 2007年9月19日
- (3) Y. Imanami, M. Murakami, N. Nakada, T. Tsuchiyama and S. Takaki, Contribution of Soft Cu Particles on Tensile Deformation Behavior in Iron, 17th IFHTSE Congress, 2008年10月30日
- (4) M. Murakami, Y. Takanaga, N. Nakada, T. Tsuchiyama and S. Takaki, Precipitation of Copper Particles during Pearlite Transformation, 17th IFHTSE Congress, 2008年10月30日
- (5) 今浪祐太、村上真宏、中田伸生、土山聡宏、高木節雄, 硬質および軟質粒子分散フェライト鋼における加工硬化挙動の相違, (社)日本鉄鋼協会・春季講演大会, 2009年3月29日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高木 節雄 (TAKAKI SETSUO)
九州大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 90150490

(2) 研究分担者

土山 聡宏 (TSUCHIYAMA TOSHIHIRO)
九州大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 40315106

中田 伸生 (NAKADA NOBUO)
九州大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号: 50380580