

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔平成30年度研究進捗評価用〕

平成27年度採択分
平成30年3月7日現在

鉄鋼材料の結晶粒微細化強化に関する学術基盤の体系化

Systematization of academic background
in grain refinement strengthening of steel

課題番号：15H05768

高木 節雄 (TAKAKI SETSUO)

九州大学・大学院工学研究院・教授



研究の概要

本研究では、多結晶のフェライト鋼における降伏点の発現機構を明らかにするとともに、固溶強化や k_y に及ぼす各種合金元素の影響を系統的に調査して、鉄鋼材料の降伏強度に関するデータベースの再構築、ならびに新たな材料開発のための強度設計指針を示すことを目的としている。

研究分野：工学、材料工学、無機材料・物性

キーワード：結晶構造・組織制御

1. 研究開始当初の背景

α 鋼では、明確な降伏点が発現することが特徴的であり、CやNによる転位の Cottrell 固着がその原因と考えられてきた。その根拠として、純度を上げてCやNの総量を少なくすると降伏点が低下する事実が挙げられているが、申請者らは、高純化によってホールペッチの関係における結晶粒微細化強化係数(k_y)が小さくなり、同じ結晶粒径でも降伏応力が低くなるという事実を明らかにした。つまり、降伏点の発現は本質的に結晶粒微細化強化に関連しており、 k_y の値が固溶炭素量に依存して変動するわけである。これは、高純度鉄の k_y に及ぼす極微量炭素の影響を詳細に調査して初めて明らかになった事実であり、教科書の記述を書き変えるほどの画期的な発見である。また、結晶粒微細化強化は材料強化の観点から最も重要な手段であるため、 k_y に及ぼす合金元素の影響についても過去に多くの研究がなされてきたが、極微量の炭素が k_y に多大の影響を及ぼすことなど想定外であり、 k_y に及ぼす合金元素の影響を調査した研究では、微量炭素の影響を合金元素の影響として誤認された例も少なくない。

2. 研究の目的

本研究では、多結晶のフェライト (α) 鋼における降伏現象のメカニズムを明らかにするとともに、固溶強化や k_y に及ぼす各種合金元素の影響を系統的に調査して、鉄鋼材料の強度設計に関するデータベースを再構築

することを目的とする。

3. 研究の方法

強化機構解明に関する研究については、分子動力学による計算、ナノインデントによる粒界強度の評価、引張り試験による降伏挙動の解明という3つのグループに分けて研究を行っている。

合金元素の影響については、Mn, Si, Cr, Ni, Cu, Al を添加したフェライト鋼を作製し、 k_y 値ならびに固溶強化に及ぼす影響を分離して、信頼できるデータベースを構築する。

4. これまでの成果

1) フェライト鋼の降伏点発現機構に関する研究（強化機構解明）
微量の炭素 (60 ppm C) および窒素 (60 ppm N) を含有するフェライト鋼について、種々の熱処理により粒界偏析量を変化させた試料における Hall-Petch の関係を取得し、 k_y 値と粒界偏析量の関係を明らかにした (図 1)。

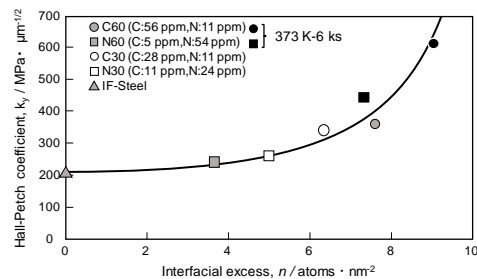


図 1 ホールペッチ係数 k_y と粒界偏析量の関係

本結果から明らかのように、粒界偏析量と k_y 値の間には明瞭な相関関係があり、炭素と窒素は粒界偏析することによって結晶粒微細化強化量を著しく強めることが明らかとなった。

パイラップ理論に基づけば、実験的に得られた k_y 値から、粒界から転位が放出される臨界の強度（臨界粒界剪断応力： τ^* ）を間接的に推定することができる。一方、粒界上でのナノインデンテーション試験により得られる Pop-in 荷重から、Hertz の接触弾性理論を適用することで、臨界粒界剪断応力を直接実測する手法を確立した。両者の結果を比較すると、全く異なるアプローチで求めた臨界粒界剪断応力が 4~7GPa という同じオーダーで一致しており、これはパイラップ理論が妥当であることを示唆している。

2) フェライト鋼の結晶粒微細化強化係数に及ぼす置換型合金元素の影響（合金元素の影響）

本研究で明らかとなった Cr, Ni, Si, Mn, Cu に関する調査結果を図 2 に示す。この結果より、Cr は k_y 値にほとんど影響を及ぼさないこと、その他の元素は k_y 値を大きくすることが明らかとなった。とくに Mn, Ni, Si の影響が顕著である。これらの元素添加による k_y 値の変化には、上記実験 1) の炭素や窒素の場合と同様に、置換型元素の粒界偏析挙動が関連していると考えられるため、 k_y 値と (A) McLean の平衡粒界偏析理論に基づいて計算した偏析量および、(B) 偏析量から粒内濃度を差し引いた値、すなわち相対偏析量との関係をそれぞれ調査した結果、明らかに後者の場合に k_y との対応が良い。この結果からわかることは、(1) 置換型元素が k_y を増大させる傾向は、元素の種類そのものの効果というより、偏析傾向が強い元素の効果が大きいということ、また (2) 置換型元素の場合は、上記の侵入型元素の時ほど粒界と粒内の濃度差が大きくないため、単に粒界での溶質濃度ではなく、粒内との差分（相対偏析量）が k_y 値の増大に直結していることが挙げられる。

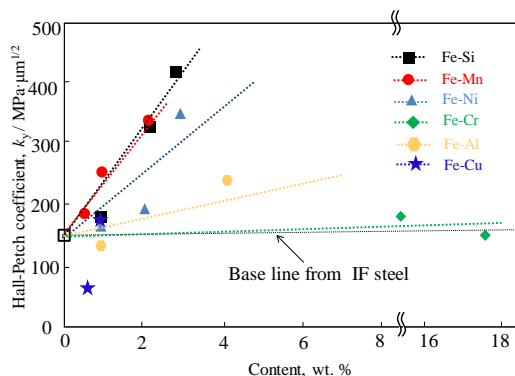


図 2 置換型元素の添加量と k_y の関係

5. 今後の計画

4-1 で求めた臨界粒界剪断応力の値は 4GPa ~ 7GPa となっており、これは実際の降伏強度よりも著しく高い値であるが、鉄の理想強度 (10.4GPa) より小さな値である。この結果は、転位のパイラップにより粒界では極めて大きな応力集中が起こっていること、また粒界での転位生成は無欠陥の粒内からの転位生成に比べると小さな値であるということを示している。さらにこの現象を分子動力学法によって原子レベルで再現するため現在計算モデルを検討中であるが、既に平成 28 年度には運動転位と炭素・窒素の相互作用の計算について、また純鉄の粒界での転位のパイラップと転位放出についてはシミュレーションに成功している。平成 30~31 年度には炭素および窒素が偏析した粒界モデルの作成、ならびに臨界粒界剪断応力の実測を行っていく予定である。

6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

- (1) 冷間加工した鉄の降伏応力に及ぼす結晶粒径の影響: 田中友基, 高木節雄, 土山聡宏, 植森龍治, 鉄と鋼, Vol.104, pp.284-291, 2018.
- (2) Correction of elastic anisotropy in Williamson-Hall plots by diffraction Young's modulus and direct fitting method: Setsuo Takaki, Fulin Jiang, Takuro Masumura and Toshihiro Tsuchiyama, ISIJ International, Vol.58, pp.769-775, 2018.
- (3) 冷間加工した鉄の転位強化に関する理論的検討: 高木節雄, 土山聡宏, 鉄と鋼, Vol.104, pp.117-120, 2018.
- (4) 微量炭素・窒素を添加したフェライト鋼の Hall-Patch 係数に及ぼす低温時効処理の影響: 荒木理, 藤井浩平, 赤間大地, 土山聡宏, 高木節雄, 大村孝仁, 高橋淳, 鉄と鋼, Vol.103, pp.491-497, 2017.
- (5) X 線回析法を用いた純鉄加工材の転位密度評価: 赤間大地, 土山聡宏, 高木節雄, 材料, Vol.66, pp.522-527, 2017.
- (6) 鉄の転位強化に及ぼす Ni の影響: 赤間大地, 土山聡宏, 高木節雄, 鉄と鋼, Vol.103, pp.230-235, 2017.
- (7) Change in Dislocation Characteristics with Cold Working in Ultralow-carbon Martensitic Steel: Daichi Akama, Toshihiro Tsuchiyama and Setsuo Takaki, ISIJ International, Vol.56, pp.1675-1680, 2016.

ホームページ等

<http://www.kyushu-u.ac.jp>

takaki@zaiko.kyushu-u.ac.jp