

形状記憶・耐疲労合金の研究を通じて

筑波大学大学院 数理物質科学研究科
物質・材料工学専攻；三年制博士課程
田崎 亘

1. はじめに

私は、2016年3月に筑波大学 数理物質科学研究科 物性・分子工学専攻の博士前期課程を修了し、現在は三年制博士課程である同研究科 物質・材料工学専攻に所属しています。このたび「はばたく」への寄稿という大変貴重な機会を賜りましたので、これまでの研究内容をご紹介させて頂くとともに、現在行っている研究について述べさせていただきます。

2. これまでの研究活動

私は博士前期課程より筑波大学大学院 土谷浩一教授のもとでFe-Mn-Si系形状記憶合金およびFe-Mn-Si系耐疲労合金の研究に携わっています。Fe-Mn-Si系合金は変形に際し母相 γ -オーステナイト(FCC相)から ϵ -マルテンサイト(HCP相)への変形誘起マルテンサイト変態を示し、加熱によるHCP相の逆変態に伴って形状記憶効果を示すことが知られています⁽¹⁾。Fe-Mn-Si系形状記憶合金はその加工性の高さやコストの低さから大型の締結用材料として利用されています。また近年ではこれらの合金が引張・圧縮変形下で可逆的なFCC圧縮変形変態を示すこと、および大ひずみ変形下において非常に優れた疲労特性を示すことが明らかとなり、大型地震やそれらに付随して発生する長周期地震動に対応可能な制振ダンパー部材としての新たな用途も拓かれています⁽²⁾。

Fe-Mn-Si系形状記憶合金をベースとした耐疲労合金の開発に際し、FCC相とHCP相の相安定性が重要な役割を担うことが示されましたが⁽³⁾、相安定性は組成のみならず変形温度によっても変化します。そこで博士前期課程では実用Fe-Mn-Si系形状記憶合金の相安定性を変形温度によって制御し、相安定性が疲労特性に及ぼす影響について変形モードとFCC相の積層欠陥エネルギーを用いて評価しました。変形

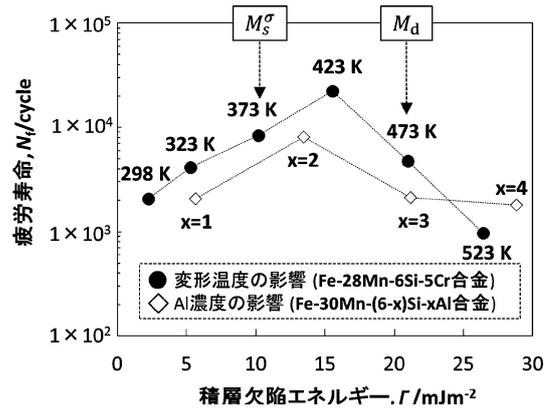


図1 Fe-Mn-Si系合金における積層欠陥エネルギーと疲労寿命 ($\epsilon = \pm 0.01$) の関係⁽⁴⁾。

温度の上昇に伴いFCC相は安定化し、また積層欠陥エネルギーは上昇します。これに伴いFe-Mn-Si系合金の変形モードは変形誘起FCC→HCP変態からFCC変形双晶、FCC完全転位すべりと変化していきます。熱力学的な観点から積層欠陥エネルギーは組成と温度の関数として与えられるため、異なる合金系・変形温度について整理をすることが可能です。調査の結果から、低サイクル疲労寿命はひずみ誘起FCC→HCP変態からFCC双晶変形へ推移する境の温度である M_d 点の直下で最長となること、また温度制御・組成制御共にFCC相の積層欠陥エネルギーを約15 mJm⁻²とすることで疲労寿命が向上することを明らかにしました(図1)⁽⁴⁾。

このようにFCC/HCP相の可逆性には両相の相安定性が非常に重要な役割を担っています。相安定性の指標として広く用いられている変態温度についてですが、非熱弾性型であるFe-Mn-Si系合金では与ひずみ等の処理に伴う組織変化によって変態温度が大きく変化することが知られています。しかしながら組織因子の調査は主にTEMによって行われてきた経緯があり、広い観察視野で調査された例はこれまでにありませんでした。そこで博士後期課程では冷却誘起HCP相・変形誘起HCP相が異なる変態温度を示すことに着目し、*In-situ*加熱XRDとEBSDを用いた冷却・変形誘起HCP相の逆変態温度と組織の調査を行いました。その結果、変形誘起されたHCP相は冷却誘起のものと比較して逆変態開始は低下する一方で逆変態終了温度は上昇すること、変形試料における完全転位すべりやHCP双晶の導入に伴う組織の不均一性に起因して局所的なHCP相/FCC相の安定化が生じる結果として逆変態ヒステリシスが增大しうること示しました⁽⁵⁾。

これらの研究から、形状記憶合金の最終的な材料特性である形状回復や疲労特性などのマクロな材料特性を改善するためには、熱力学や弾塑性力学、結晶学・組織学・転位論などの広い分野を横断した知識が求められること、また様々な手法を用いた多面的な解析が必要とされることを学びました。私がこれらの研究に携わる上で非常に幸運だったことは、大学-研究所の連携のもとで試料作製から解析まで産官学の専

門家の方々と密な議論を交わすことができたことでした。あまりに多くの情報を前に研究が苦しく感じられたこともありましたが、多くの方々からアドバイスやご指導を頂いたことで基礎と応用の両面から理解を深めることができ、研究の楽しさをより一層感じられるようになりました。

3. これからの研究活動

Fe-Mn-Si系合金における相変態の可逆性には相安定性や組織因子が大きな寄与をしていることは前述の通りですが、母相の強度や両相の格子体積差などの因子も複雑に作用しています。例えばFe-Mn-Si系形状記憶合金、耐疲労合金のどちらにも非金属であるSiの添加が特性の向上に大きな役割を担っており、固溶強化、ネール点の変化、短距離秩序化、HCP相の c/a 軸比の変化等の影響があることが示唆されています⁽³⁾⁽⁶⁾。原子サイズや電子状態が大きく異なる元素の添加に際して変化するこれらの多様な因子が相変態の可逆性に及ぼす影響とその定量化は現在非常に関心のある対象です。一方でFe-Mn-Si系合金と同じ変形・相変態機構を有する合金系としてCo-Ni系合金が知られており、こちらの合金もFCC/HCP変態に起因した形状記憶効果が現れることが報告されています⁽⁷⁾。Fe基との類似性と差異は学術上非常に魅力があり、またCo系合金は生体用インプラント材料や航空宇宙用のスーパーアロイとしての用途もあることから応用の面でも有望な合金です。今後も相変態を利用した魅力的な機能性金属材料の開発を中心として勉強を重ねながら研究に邁進したいと考えております。

4. おわりに

博士前期課程より現在に至るまでご指導・ご鞭撻を頂いております筑波大学 土谷浩一教授、物質・材料研究機構(NIMS) 澤口孝宏様、金属研究のきっかけを下さりご指導頂いた芝浦工業大学 下条雅幸教授、NIMS 御手洗容子様、本稿執筆の機会を頂きましたNIMS 土井康太郎様をはじめ、これまでお世話になった多くの方々にこの場を借りて深く御礼申し上げます。また、試料作製に際しNIMS 材料創成・加工ステーションの皆様には多大なご助力を頂きました。ここに深謝いたします。

文 献

- (1) A. Sato, E. Chishima, K. Soma and T. Mori: *Acta Metall.*, **30** (1982), 1177-1183.
- (2) T. Sawaguchi, T. Maruyama, H. Otsuka, A. Kushibe, Y. Inoue and K. Tsuzaki: *Mater. Trans.*, **57** (2016), 283-293.
- (3) T. Sawaguchi, I. Nikulin, K. Ogawa, K. Sekido, S. Takamori, T. Maruyama, Y. Shiba, A. Kushibe, Y. Inoue and K. Tsuzaki: *Scr. Mater.*, **99** (2015), 49-52.
- (4) W. Tasaki, T. Sawaguchi, I. Nikulin, K. Sekido and K. Tsuchiya: *Mater. Trans.*, **57** (2016), 639-646.
- (5) W. Tasaki, K. Tsuchiya, T. Sawaguchi and S. Takamori: *Mater. Trans.*, **57** (2016), 707-713.
- (6) M. Koyama, T. Sawaguchi and K. Tsuzaki: *Mater. Sci. Eng. A*, **528** (2011), 2882-2888.
- (7) A. Nagasawa: *Phys. Status. Solidi (a)*, **8** (1971), 531-538.
(2018年1月11日受理) [doi:10.2320/materia.57.121]
(連絡先: 〒305-8573 つくば市天王台1-1-1)