

# 強磁場中示差熱分析による Fe-C 二元合金の高温・強磁場中特性評価 Characterization of Fe-C binary alloys at high temperatures in high magnetic fields by thermal analysis

小山佳一<sup>1</sup>, 池原佑基<sup>2</sup>, 高橋弘紀<sup>2</sup>, 木村尚次郎<sup>2</sup>, 宮本吾郎<sup>2</sup>, 古原忠<sup>2</sup>, 渡辺和雄<sup>2</sup>  
 鹿児島大・理<sup>1</sup>, 東北大・金研<sup>2</sup>  
 K. Koyama<sup>1</sup>, Y. Ikehara<sup>2</sup>, K. Takahashi<sup>2</sup>, S. Kimura<sup>2</sup>, G. Miyamoto<sup>2</sup>, T. Furuhashi<sup>2</sup> and K. Watanabe<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> Faculty of Science, Kagoshima University  
<sup>2</sup> Institute for Materials Research, Tohoku University

## 1. はじめに

炭素鋼 Fe-C 二元合金における磁場中熱処理の研究は古くから行われており、磁場を印加することで、オーステナイト( $\alpha$  鉄) $\rightarrow$ フェライト( $\gamma$  鉄)変態が促進されることが報告されている[1]。また、Choi 等は分子場近似によって鉄の磁化率を計算し、磁場による磁気エネルギーの変化を考慮して、Fe-C 二元合金の磁場中状態図の計算を行った[2]。 $\alpha \rightleftharpoons \alpha + \gamma$  変態が起きる温度を  $A_1$  点、 $\alpha + \gamma \rightleftharpoons \gamma$  変態が起きる温度を  $A_3$  点とすると、彼らは磁場によってこれらの温度が上昇することを報告した。これらの結果は、Fe-C 平衡状態図が磁場によって大きく変化していることを示唆している。しかし、これまで Fe-C 二元合金の強磁場における詳しい平衡状態図を実験によって明らかにした報告は無かった。

前年度に我々はハイブリッドマグネットを用いた強磁場中で温度約 1200 K まで測定できる強磁場中示差熱分析 (HF-DTA) 装置を開発し、市販の炭素鋼を用いた実験を行った。その結果、 $A_1$  点は磁場に比例して 1.29K/T の割合で増加することを明らかにした[3]。今回我々は東北大学金属材料研究所古原研究室から提供された純良な炭素鋼を用いて HF-DTA 測定を行った。

## 2. 実験方法

Table.1 に実験に用いた純良炭素鋼の C の量と、試料に含まれる不純物 Si および Mn の量を示す。

HF-DTA 測定は、東北大金研強磁場センターに設置されている 10 T 無冷媒超伝導マグネット、18 T 無冷媒超伝導マグネット、25 T 無冷媒ハイブリッドマグネット、28 T ハイブリッドマグネットを使用して最大磁場 26T まで行われた。実験温度は室温から 1200 K まで、昇温速度は 10 K/min のもとで行った。実験装置と測定方法は文献[3]に詳しく記述されている。

## 3. 実験結果と考察

炭素鋼の HF-DTA の代表例として、Fig.1 に Fe-0.18wt%C の結果を示す。 $A_1$  点は DTA 曲線の吸熱ピークのオンセットから見積もった。オンセットは、DTA 曲線のベースラインと吸熱反応開始後の

Table 1. Composition of Fe-C binary alloys.

Sample	Si(wt%)	Mn(wt%)
Fe-0.18wt%C	0.006	0.02
Fe-0.38wt%C	0.006	0.01
Fe-0.61wt%C	0.014	0.01
Fe-0.74wt%C	0.01	< 0.003
Fe-0.91wt%C	0.01	< 0.003
Fe-1.06wt%C	0.01	< 0.003

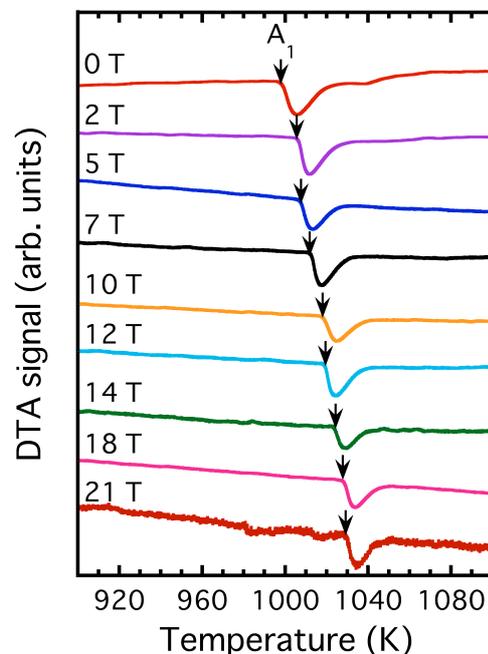


Fig.1. DTA curves for Fe-0.18wt%C in various magnetic fields up to 21 T.

DTA 曲線の傾きの交点とした。図から分かるように、磁場の増加とともに  $A_1$  点は上昇する。

Fig.2 に全ての試料における Fe-C 二元合金の  $A_1$  点と  $A_3$  点の磁場依存性を示す。Fe-0.38wt%C の試料においては  $A_3$  点の磁場依存性の観測にも成功した。なお、このグラフには比較のために、市販品炭素鋼(JFE スチール社製)を用いた測定結果[3]も記載している。純良 Fe-C 二元合金の  $A_1$  点は磁場印加により、1.4-1.7K/T の割合で直線的に上昇する。我々がこれまでに測定した市販の Fe-C 二元合金の  $A_1$  点の磁場依存性 (1.3 K/T) と大きな違いは無い。 $A_3$  点は磁場印加により 1.7 K/T の割合で上昇する。その他の合金については、 $\alpha + \gamma$  二相領域における反応速度が、今回の測定条件に適しておらず、 $A_3$  点を見積もることができなかった。

Fig. 3 に  $A_1$  と  $A_3$  点の磁場変化もとに作成した強磁場中での Fe-C 二元合金状態図を示す。この図の中に純鉄 ( $\alpha$ -Fe) の  $\alpha \rightarrow \gamma$  転移温度の結果も記載する[3]。各転移温度が過去の Choi らの計算[2]から予想されたように、磁場印加にともない上昇することが分かった。これは各転移温度において、 $\alpha$  相と  $\gamma$  相が磁化を持ち、それぞれの相の磁気エネルギーの大きさに差があることに起因していると考えられる。 $\alpha$  相の方が  $\gamma$  相より磁化が大きく、磁気エネルギーの利得も大きいため、磁場中で  $\alpha$  相がより安定になったことが転移温度上昇の原因であると考えられる。磁場印加により、純鉄の  $\alpha \rightarrow \gamma$  転移温度は磁場の 2 乗に比例して上昇する[3]。一方、 $A_1$  点は磁場に比例して上昇する。Fe-0.38wt%C の  $A_3$  点も磁場に比例して上昇することが明らかになった。純鉄の  $\alpha \rightarrow \gamma$  転移温度と  $A_1$ ,  $A_3$  点の磁場に対する振る舞いの違いは、 $\alpha$  相の磁化の温度依存性に関係していると考えられる。

純鉄の  $\alpha \rightarrow \gamma$  転移温度は、 $\alpha$  相のキュリー温度 1043K よりも十分に高い。そのため、常磁性体の磁化の磁場に対する変化がほぼキュリーの法則に従い、磁化  $M$ , 磁化率  $\chi$ , 磁場  $B$  とすると、

$$M \cong \chi B$$

と表される。このため、磁場によるエネルギーが磁場の 2 乗に比例して増加し、純鉄の  $\alpha \rightarrow \gamma$  転移温度も磁場の 2 乗に比例して増加するものと考えられる。 $A_1$  点は  $\alpha$  相のキュリー温度より低いいため、その転移温度付近での  $\alpha$  相の磁化の磁場による変化は小さい。このため、磁気エネルギーは磁化と磁場の積で表され、ほぼ磁場に比例して増加する形になり、転移温度も磁場に比例して増加するものと考えられる。

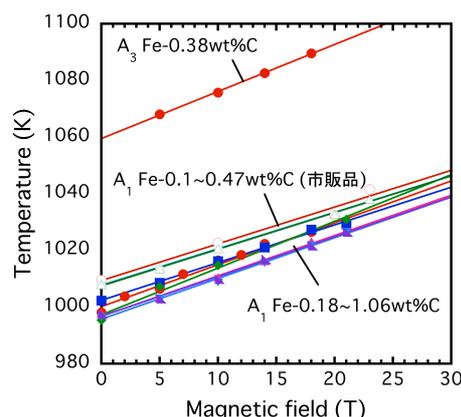


Fig. 2. Magnetic field dependence of  $A_1$  and  $A_3$ . The data [3] for commercial carbon steels are also presented.

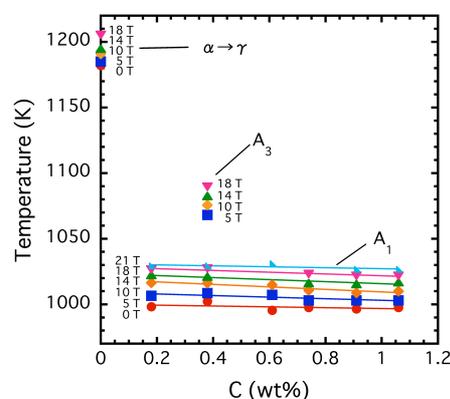


Fig.3. Fe-C phase diagrams in magnetic fields up to 21 T.

#### 4. まとめ

純良 Fe-C 二元合金の強磁場中 DTA 測定を行い、 $A_1$  点は磁場に比例して 1.4-1.7 K/T の割合で増加し、 $A_3$  点は 1.7 K/T の割合で上昇する。本研究によって炭素鋼の磁場中状態図を実験的に初めて明らかにした。

#### 謝辞

本研究の一部は科研費 22360285 の及び日本鉄鋼協会鉄鋼研究振興助成を受けて行いました。

#### 参考文献

- [1] M. Shimotomai and K. Maruta, Scripta Mater. **42** (2000) 499-503.
- [2] J-K. Choi et al., Scripta Mater. **43** (2000) 221-226.
- [3] 小山佳一ら, 東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センター平成 22 年度年次報告書。