

名誉会員からのメッセージ

鉄に魅せられて

Fascinated by Iron

東北大学
名誉教授

石田清仁



1 はじめに

筆者が鉄鋼に関する講義を初めて受けたのは、大学3年生の時であり今から50年以上前になる。鉄鋼の製錬、材料、熱処理、加工などについて週3回以上の科目があったように記憶している。当時は「鉄は国家なり」に代表されるように重厚長大の鉄鋼業が高度成長を牽引する状況下でのカリキュラムだった。鉄鋼材料の講義ではFe-C系状態図が毎回示され、それに基づいた熱処理、組織、各種特性変化についての説明がなされ、Fe-C系状態図は試験に必ず出題されるとの事で最初に暗記したものである。鉄鋼材料に出現する相については、 α 、 β ¹⁾ (現在は使用されていないが)、 γ 、 δ 、 ϵ 各種相があり、組織についても実に多種多様であり、レーデブライト、パーライト、ペーナイト、マルテンサイトを始め現在は殆ど使用されていないが、ソルバイトとトルースタイトがあった。変態点については、 A_0 から A_4 点まで5つの変態点、さらにこれらの変化を利用した機械的性質を始め各種性質を制御する方法など他の金属には見られない特異な性質についての講義であった。

鉄鋼材料との関わり合いは、卒業論文、修士、博士論文、それに続く社会人として鉄鋼メーカーにおける研究所と製造現場、さらに大学での教育・研究を通して50年以上続けている。特に鉄鋼材料の相安定性や組織制御についての基礎研究とそれを利用した開発研究を対象として、多くの合金系を取り扱ったが鉄の多様性と奥の深さを感じている。その例を2、3紹介しよう。

卒業論文では、Fe-Cr系の γ ループに関する研究であったが、この系は A_3 点の910℃近傍ではCrはオーステナイト γ 相を安定にするが、 A_4 点1390℃近傍ではフェライト α 相を安定にする特異な系であり、CrのFeに対する安定性が大きな温度依存性を有する事を意味している。この原因は、幻の β 鉄が深く関与する A_2 点770℃近傍における強磁性→常磁性

の磁気変態に因るものである。Mnは代表的なオーステナイト安定化元素として知られているが、融点より高い温度ではフェライトを安定化する事が熱力学的な考察により推定される。Mnを多量に含むステンレス鋼の溶接部では、Mnはオーステナイトよりフェライトを安定化し、 δ フェライト量も増加する事が知られており、この特異な性質も相安定性に磁性が深く関与しているのである。この様に α 相と γ 相の相安定性は温度に対して大きく依存し、例えばFe-Mn基多元合金では、Fe-Cr2元合金と同様の γ ループを形成し、合金組成によっては母相bcc α 相がfcc γ 相へマルテンサイト変態する²⁾。通常我々が観察するのはオーステナイト γ 相からbccあるいはbctへのマルテンサイト変態であるが、全く逆の相転移が起こる。これを上手く利用すると鉄系の超弾性特性をも得る事が出来³⁾、構造材料だけでなく機能材料としても魅力ある鉄鋼なのである。ちなみにハッドフィールド鋼として知られるFe-Mn基合金はTWIP鋼として高延性、高強度を示し⁴⁾、自動車用材料として一部実用化されているが、電気抵抗が高く、高抵抗材としても魅力があるので、現在商品化を目指して研究推進中である。

以上の様に α 相の磁性は相安定性に大きな影響を及ぼすが γ 相もまた不思議な特性を有している。その最大の特異性は、熱膨張係数が大きい事であり、 α 相の約1.4倍でありまた電気抵抗も大きい。この原因の一説として鉄の γ 相には反強磁性 γ_1 と強磁性 γ_2 の二種類の状態があり、温度や合金元素によって γ_1 と γ_2 の割合は大きく変化するというものである⁵⁾。Niの添加によって γ_2 の割合が増え、それがインバー特性に結び付くという。

ϵ 鉄として知られる稠密六方構造のhcp相は高压で存在する。地球の中心である内核は5000～6000℃の超高温で360GPa以上の極めて高い圧力のため鉄が固体として存在すると考えられている。この内核の鉄の結晶構造はエネルギーの比較からhcp構造の ϵ 鉄が最有力と考えられているが、内

核の弾性的異方性はhcp構造では説明出来ないため、二重六方最密充填 (dhcp) 構造や斜方晶に加えてfcc構造あるいはbcc構造も提唱されており非常に混沌としている。さらに鉄に固溶するSiやSなどの軽元素が固溶した事でも異方性が大きくなる事が提唱されているが、未だ不明な点が多い。この様に地球の内核は謎だらけであるが、地球以外の惑星についても同様である。例えば火星については隕石が南極やサハラ砂漠で発見されているので最近多くの知見が得られているが、火星の内核はFe-11~17wt% Sの組成の液体であると考えられており、Fe-FeS系の高圧下での状態図 (相図)、特に液相線が重要であると報告されている⁶⁾。筆者らのグループは、Fe-S基合金の熱力学・状態図データベースを構築し⁷⁾、これを利用してPbフリー快削鋼の商品化に成功しているが⁸⁾、さらに圧力の影響を考慮したシステム開発は、今後惑星の内部構造の解明に不可欠な情報になると確信する。

さて高温高圧において1955年にGEグループが人工ダイヤモンドの合成に成功したが⁹⁾、その際鉄は触媒の役割を果たした事は有名な話である。「鉄の神様」と言われた本多光太郎先生は、晩年「物質の変態に現れる巨大内部歪力の挙動に就いて」という論文を発表しているが、鉄の変態に伴う内部圧力を利用した人工ダイヤモンド合成について頭の中に描き、亡くなる直前までうわ言でつぶやいていたという¹⁰⁾。現在はFe-C系の高温高圧での状態図も明らかにされつつあるので、この鉄の変態を利用したダイヤモンド合成に挑戦する価値は十分あるかと思う。この様に鉄は機能性材料としても魅力にあふれている。磁性材料は言うまでもないが、他にも例えば形状記憶合金としても極めて有望である^{3,11)}。Fe-Ni基合金で約800MPaの高強度で約13%の超弾性が出現するの

である¹¹⁾。

以上の様に鉄は構造材料、機能材料だけでなく宇宙の起源にもせまるキーマテリアルである。やはり“鉄は金属の王なる哉”である。

参考文献

- 1) 西澤泰二：日本金属学会会報, 17 (1978), 790.
- 2) K.Ando, T.Omori, I. Ohnuma, R. Kainuma and K. Ishida : Appl. Phys. Lett., 95 (2009), 212504-1.
- 3) T.Omori, K.Ando, M. Okano, X.Xu, Y.Tanaka, I. Ohnuma, R. Kainuma and K. Ishida : Science, 333 (2011), 68.
- 4) Y. Sutou, N. Kamiya, R. Umino, I. Ohnuma and K. Ishida : ISIJ Int., 50 (2010), 893.
- 5) R.J.Weiss and K.J.Tauer : Phys. Rev., 102 (1956), 1490.
- 6) G. Helffrich : Prog. Earth, Planetary Sci., 4 (2017), 24.
- 7) K. Oikawa, H. Mitsui and K. Ishida : Mater. Sci. Forum, 500-501 (2005), 711.
- 8) K. Oikawa, H. Mitsui, T. Ebata, T. Takiguchi, T. Shimizu, K. Ishikawa, T. Noda, M. Okabe and K. Ishida : ISIJ Int., 42 (2002), 806.
- 9) F.P.Bundy, H. T. Hall, H. M. Strong and R. H. Wentorf : Nature, 176 (1955), 55.
- 10) 石川悌次郎：本多光太郎傳, 本多記念会.
- 11) Y. Tanaka, Y. Himuro, R. Kainuma, Y. Sutou, T. Omori and K. Ishida : Science, 327 (2010), 1488.

(2020年6月23日受付)