



私の論文

今振り返ってみて、行間にこめた思い、エピソード

低比重高強度 Fe-20Mn-Al-C 系合金の開発

High-strength Fe-20Mn-Al-C-based Alloys with Low Density

須藤祐司

Yuji Sutou

東北大学

大学院工学研究科

教授

1 緒言

本英文タイトル論文は、ISIJ International, 50 (2010) pp.893-899. に掲載された論文でございますが、大変光栄なことに2019年に卓越論文に選出していただきました。当該論文は、日本鉄鋼協会殿の2007年鉄鋼研究振興助成よりご支援いただき遂行した研究成果をまとめた論文でございました。この場をお借りして御礼申し上げます。このたび、「私の論文」に寄稿させていただく機会を頂戴しましたので、共著者（当時東北大学所属）である神谷尚秀博士、海野玲子氏、大沼郁雄先生、石田清仁先生を代表して、当該論文の研究のきっかけや当時の研究動向、また、現在の展開などについて簡単に紹介させていただきたいと思います。

2 本研究の背景

Fe-Mn-Al-C合金自体は新しい鋼ではなく、1950年代より、高価なFe-Cr-Ni合金の代替材料として研究開発されてきました。Fe-Mn-Al-C鋼は耐食用途以外に、低温用途や高温耐酸化用途への鋼として研究されてきましたが、特に最近では、環境問題に対するニーズの高まりから、その合金系の“軽量化”に注目が集まり、自動車産業などの構造部品用途への適用可能性に関心が高まっています^{1,2)}。実際、検索項目（タイトル、抄録、キーワード）を“Fe-Mn-Al-C”のみに絞ってSCOPUSにより文献数を調査すると約300の論文がヒットしますが、2010年辺りから公開論文数は増え、2015年以降はほぼ毎年20報以上の論文が出版されています。軽元素であるAlを添加することで鋼を軽くできるため、延性を損なうことなく高強度化できれば、マグネシウム合金やアルミニウム合

金、またチタン合金といった高比強度材料に対しても競争力のある材料の創成が期待できるため、今尚、世界中で様々な研究開発がなされています。

私達のグループにおける「低比重鉄鋼の創成」に向けた研究のベースは、1990年にISIJ International誌上に石田先生らが発表したFe-Mn-Al-C合金の平衡状態図にあります³⁾。当時、Fe-Al-Mn-C合金において析出強化により高強度化が可能である事が報告されていましたが、その要因がL1₂構造を持つγ'相によるものなのか、ペロブスカイト構造を持つκ相に起因するのか議論がなされていたようです。というのも、それら相は、その構造類似性から電子回折パターンからのみでは区別し難かったようです。それを明らかにするため、Fe-(20-30) wt.% Mn- (2-16) wt.% Al- (0.5-3.0) wt.% C合金を用いて900℃～1200℃における等温平衡状態図を決定し、バルク材ではγ相は存在せず、κ相が存在する事が明らかにされました。その状態図の知見を基に、当時の低比重鋼のニーズの高まりから、Fe-Mn-Al-C系鋼についてどこまで低比重化が可能なのかについて本格的に研究を開始しました。

通常、FeにAlを添加するとbcc構造を持つα相が規則化し、極めて脆くなってしまいます。それ故、fcc構造のγ相を高Al側までいかに張り出させるかが低比重かつ高靱性を兼ね備える鋼実現のカギとなります。平衡状態図の情報より、Cを1wt.%以上添加することでAl濃度を11～13wt.%程度まで添加してもγ相を得ることが可能な事が分かっていました³⁾。実際、比重が6.7程度と見積もられるFe-20wt.% Mn-11at.% Al-1.0wt.% C合金は、引張強度：950MPa程度、引張伸び：36%程度と高強度・高延性を示します⁴⁾。（因みに、それ以上Alを添加するとα相及びκ相が多量に形成されるため極めて脆くなります。）ただし、冒頭にてFe-Mn-Al-C鋼は

* [今回の対象論文]

須藤祐司, 神谷尚秀, 海野玲子, 大沼郁雄, 石田清仁 : 「High-strength Fe-20Mn-Al-C-based Alloys with Low Density」, ISIJ International, Vol.50(2010) No.6, pp.893-899 (第1回卓越論文賞受賞)

高耐食鋼としても期待されていたと述べましたが、実際に作製した高Mn、高Alおよび高C濃度合金の耐食性は決して良いと言えるものではありませんでした。そんな事を議論していた時、石田先生より「耐食性を上げるためCrを入れたらどうか？」とアドバイスいただいたのを覚えています。定量的なデータはありませんが、5wt.%程度のCrを添加すると腐食が難しく、光学顕微鏡での組織観察がかなり難しくなったことは実際に耐食性が向上した証拠であろうと思います。更に、Cr添加合金は無添加合金に比較して低比重化かつ高強度・高延性化が可能である事が分かりました。この新合金創成についても、等温状態図が大きな武器となりました。Cr添加により、 γ 相が高C濃度側に拡がると共に、 γ 相、 κ 相、 α 相の三相領域が高Al側にシフトする事が分かりました(図1)⁵⁾。端的に言えば、Cr添加により脆い κ 相の高温域での存在範囲を高Al側にシフトさせる事ができる、つまり、更に低比重な鋼を得る事が可能になります。実際、Cr添加合金は、Al濃度を13wt.%まで増やしても高い延性を維持できます。例えば、Fe-20wt.% Mn-13wt.% Al-1.3wt.% C-5wt.% Cr合金(比重6.4)は、10%以上の引張伸びを維持しつつ、約200 MPa·cm³/gもの高比強度(引張強度/密度)を示します⁴⁾。冒頭でも触れましたが、この高塑性特性は、高温からの冷却過程において γ マトリクス中にナノスケールサイズの κ 相が析出することに依るところが大きいです。図2は、Fe-20wt.% Mn-10wt.% Al-1.5wt.% C-5wt.% Cr合金を1100℃から炉冷したサンプルの透過電子顕微鏡観察により得られた暗視野像を示していますが、ナノスケールサイズのサイコロ状の κ 相がfcc構造の γ 相マトリクス中に析出している事が分かります。パッと見るとNi基超合金の γ (fcc) + γ' (L1₂)二相組織かと思うほど類似しています。

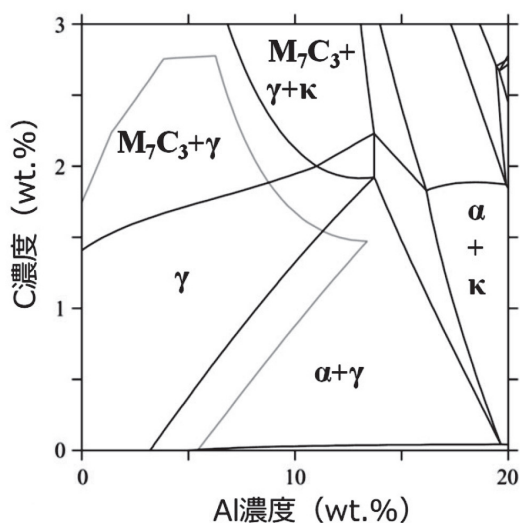


図1 Fe-20wt.%Mn-Al-Cr-C合金の1100℃における等温計算状態図。黒色線は5wt.%Cr合金の状態図を示し、灰色線は0wt.%Cr合金の γ 単相領域を示している

この低比重高強度鉄合金については、その当時、ゴルフクラブのヘッドへの適用や免震ダンパー装置の芯材としても検討しました。免震ダンパーの芯材には鋼や鉛などが利用されていますが、それら材料の弾塑性変形により地震の振動を減衰させることで免震性能が得られます。この時、芯材は変形により過度の加工硬化を示さない方が免震効果の安定性に優れると言えます。実は、この低比重鉄合金は、熱処理の最適化により加工硬化が極めて小さくなります(図3)。そこで、その低加工硬化性という特徴を生かして免震ダンパーの芯材に利用できるのでは?と考えたわけです、が、残念ながら実際の利用には至っておりません。この低加工硬化性については、加工後サンプルの透過電子顕微鏡観察より、加工後でも転位が非常に少ない、即ち、変形による転位の増殖が極めて少ないこと⁵⁾などを実験的事実として把握しておりますが、そのメカニズムについてはまだ未解明であり今後の研究が望まれます。

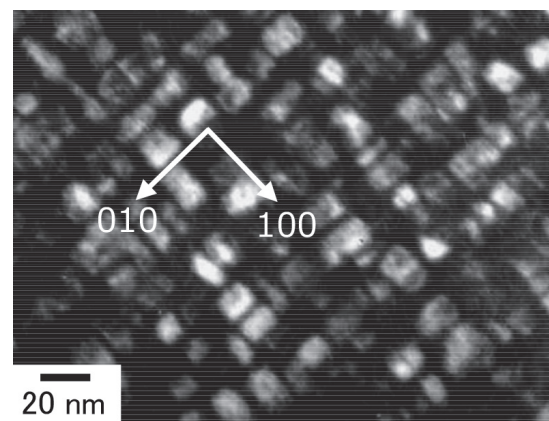


図2 炉冷したサンプルの透過電子顕微鏡暗視野像。図中の白矢印はfccマトリクスの結晶方位を示している

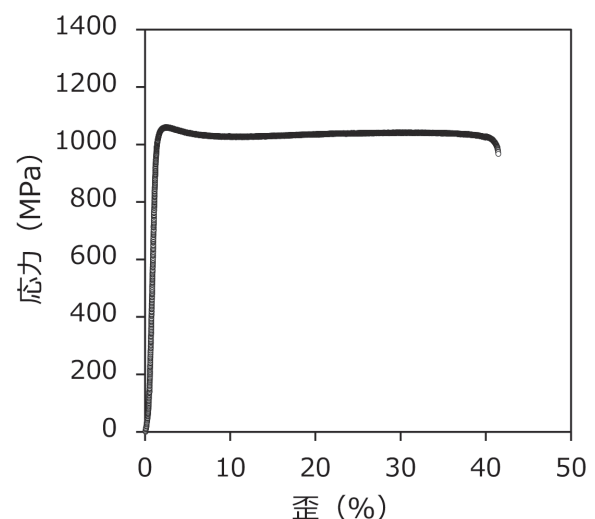


図3 1100℃から空冷されたFe-20wt.%Mn-10wt.%Al-1.5wt.%C-5wt.%Cr合金サンプルの室温における応力-歪み曲線

3 その後の展開

本研究の開始当初は、鉄合金をいかに軽くして高比強度化するかが一番のモチベーションであり、規則-不規則変態も含めた合金の相安定性について電気抵抗測定などを用いて実験を行っておりました。そんな中、ある時、この合金の比抵抗値はニクロム線も含めた他の鉄合金に比べて随分と高い値ではないか？といったことが我々の間で議論になりました。そこで実際に比抵抗値を正確に測定してみると、Alを多く含む殆どの合金組成で $160\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 以上の高い比抵抗値を示すことが分かりました。ここで少し、チップ抵抗器について触れたいと思います。Society 5.0や次世代IoT社会に向け、自動車から産業機器、また、センサーやポータブルデバイス、更にはそれらを動作させるためのバッテリーに至るまで、様々な製品は電圧/電流により制御されるため、その内部電気回路には必ず“抵抗器”が使われています。抵抗器は電気の流れを調節するバルブのようなものであり、各回路へ適切に電圧を分圧したり、大小様々な電流の精密測定など、製品のあらゆる駆動制御やパワーマネジメントに必要不可欠な部品となっています。即ち、電子機器・デバイスを更に革新するためには、それを実現する高信頼な抵抗器が必要となります。抵抗器の信頼性にとっては、適切な抵抗値と共に、その抵抗値が温度によって変化しない、即ち、抵抗値の温度係数が極めて小さなことが重要となります。高抵抗材に話を絞りますが、通称FCHと呼ばれるFe-Cr-Al合金が高抵抗材として現在広く実用されています。この材料は $140\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 程度の比抵抗値を示し、その温度係数は $100\text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 以下と小さく、高信頼なチップ抵抗器を実現しています。その一方で、電子機器・デバイスの更なる革新に向け、電気回路の改良も日々行われており、FCHよりも更に高い比抵抗値を有

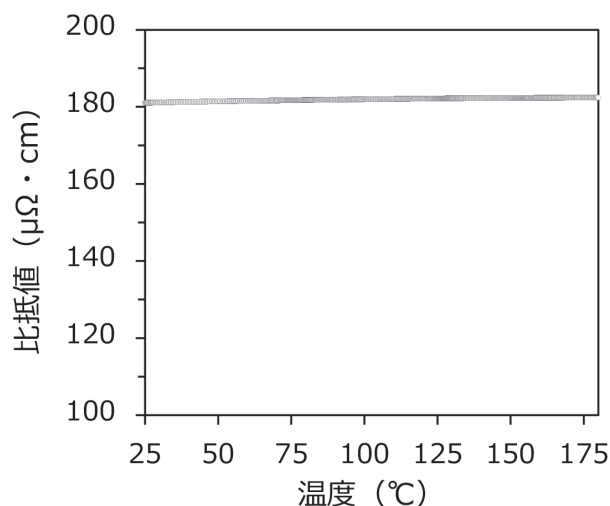


図4 Fe-Mn-Al-C系合金の比抵抗値の温度依存性

する抵抗材の登場が期待されています。勿論、その温度係数はFCH同様に小さくなければなりません。このようなニーズに対して、本Fe-Mn-Al-C系合金は極めて有望な高抵抗材になるのではと考えています。図4に、Fe-Mn-Al-C系合金の比抵抗の温度依存性の一例を示します。合金組成によっては $180\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 以上の高い比抵抗値を示し、かつ、その温度係数は $100\text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 以下と、FCHと同様な温度係数を示すことが分かってきております。現在、チップ抵抗器への応用を目指して、合金組成の最適化や、比抵抗値及び温度係数に及ぼす組織の影響について調査を継続しています。

4 おわりに

ここに紹介しましたFe-Mn-Al-C系合金は、鉄合金の低比重化、高比強度化といった構造材料の観点からの研究がその出発点であり、今なお、世界中で“low density steel”の視点から研究されています。その一方で、私達の実験研究の過程で、図らずとも本合金の高抵抗材としての可能性が浮かび上がってきました。特に、比抵抗の温度係数が組織によっても大きく変動することも分かってきました。合金の比抵抗値やその温度係数については、専ら合金の“組成”に殆ど支配されてしまうと思っておりましたがどうも違うようです。合金の温度係数を限りなくゼロにする材料設計指針についても未だこれといった理論や基準は無いようにも思います。それら物性が材料組織にも大きく影響されるとすると、やはり合金状態図が新抵抗材料開発に向けても大きな武器になります。研究の入口は構造材料としてのアプローチでしたが、現在では、電子電気材料としてのアプローチに主軸が変わってきています。ただし、その根本は材料組織制御、即ち、状態図による合金設計であることには変わらなそうです。本合金系が、高比強度材のみならず電気電子材料としても社会に役に立つように、学生達と共に引き続き研究を進めていきたいと思っています。

参考文献

- 1) H. Kim, D-W. Suh and N.J. Kim : Sci. Technol. Adv. Mater., 14 (2013), 014205.
- 2) S. Chen, R. Rana, A. Haldar and R. K. Ray : Prog. in Mater. Sci., 89 (2017), 345.
- 3) K. Ishida, H. Ohtani, N. Satoh, R. Kainuma and T. Nishizawa : ISIJ Int., 30 (1990), 680.
- 4) Y. Sutou, N. Kamiya, R. Umino, I. Ohnuma and K. Ishida : ISIJ Int., 50 (2010), 893.
- 5) 神谷尚秀 : 東北大学博士論文, (2007).

(2021年4月30日受付)