



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

材料設計と人生設計

Materials Design and Life Design

紙川尚也

Naoya Kamikawa

弘前大学大学院理工学研究科
(理工学部 機械科学科 併任)

准教授

1 はじめに

2016年12月末に、九州大学の田中將己先生（田中さん）よりメールでご連絡をいただき、本企画「私の論文」の執筆のご依頼をいただいた。「私の論文」の企画の趣旨は、日本鉄鋼協会の学術論文誌「鉄と鋼」または「ISIJ International」に掲載された論文について、研究のきっかけ、読みどころ、行間を埋める解説、裏話など、論文中には書き切れなかった内容を紹介し、論文をより楽しく読んでもらうということだそうである。私自身、企画の趣旨に沿うような楽しく面白い記事が書けるかどうか自信がなかったので、お引き受けすべきかどうか迷ったが、田中さんには学生時代から事あるごとに良くしていただいているので、その恩を仇で返すようなことはできないと思い、お引き受けすることにした。

本記事では、ISIJ Internationalの第55巻、第8号に掲載された拙著「Tensile Behavior of Ferrite-martensite Dual Phase Steels with Nano-precipitation of Vanadium Carbides¹⁾」に関して、研究のきっかけや経緯などを紹介させていただく。ただし、研究の内容について細かな解説をしているわけではないので、本来の企画の趣旨とは異なっていると思うが、ご了解いただきたい。

2 研究のきっかけ

当該論文は、合金炭化物のナノ析出組織を有するフェライト相とマルテンサイト相の二相組織を有する鋼（DP鋼）の引張変形挙動を解明する目的で行った研究の成果である。こ

の研究は、当該研究を行う前に実施していた、相界面析出組織を有するフェライト単一組織鋼の力学特性の解明に関する研究^{2,3)}に端を発している。

私は現在、弘前大学に勤務しているが、その前は、東北大学金属材料研究所（金研）の古原忠先生の下で助教として勤務していた。2008年9月に金研の古原研究室に助教として着任後、最初に与えられた研究テーマが、相界面析出組織を有する低炭素鋼の力学特性に関するものであった。当時、古原研究室では、TiとMoを複合添加した低炭素鋼を用いて製造した相界面析出組織を有するフェライト単一組織鋼の力学特性の解明に関する研究を、大学院生の修士論文研究として進めていた。着任後間もなく、その研究に従事する大学院生の研究指導をするように命じられたため、一緒に研究を進めることになった。私自身、学生時代から東北大金研に着任するまでの間は、主に、塑性加工による金属材料の組織・特性制御に関する研究を行っていたため、それまでに、相変態・析出を駆使した鉄鋼材料の組織・特性制御という鉄鋼材料研究の王道を通った経験がなかった。そのため、「相界面析出」という現象自体、古原研究室に着任して初めて知ったほどであるからお恥ずかしい限りである。鉄鋼材料に関して全く無知であった私は、教員という立場ではあったが、古原研究室の学生さんから逆に色々と教わりながら研究を進めていた。

研究の対象である、平均直径数ナノメートルの合金炭化物がフェライト中に分散した鋼を得るためには、強炭化物形成元素を添加した低炭素鋼を高温のオーステナイト単相組織にした後、フェライト域まで冷却して等温変態をさせ、フェライト変態中にオーステナイトとフェライトの相界面にお

* [今回の対象論文]

紙川尚也, 廣橋正博, 佐藤悠, Elango Chandiran, 宮本吾郎, 古原忠: 「Tensile Behavior of Ferrite-martensite Dual Phase Steels with Nano-precipitation of Vanadium Carbides」, ISIJ International, Vol.55 (2015), No.8, pp.1781~1790 (第27回澤村論文賞受賞論文)

いて合金炭化物を析出させる熱処理を施す必要がある。このとき、オーステナイト単相域からのフェライト等温変態の保持時間を種々変化させて水冷をすることにより、フェライト変態が完了し、全面がフェライトの単一組織を形成させるための最適保持時間を調べるという実験を行った。Fig.1に、Ti,Mo添加低炭素鋼に対して行った実験により得られた光学顕微鏡組織写真を示している²⁾。この実験の本来の目的は、フェライト単相組織を得るために必要な等温保持時間を明らかにすることではあったが、その過程で、フェライト変態率の種々異なるフェライト・マルテンサイトDP鋼も結果的に得ることができたわけである。ここで得られたフェライト・マルテンサイトDP鋼は、通常のDP鋼とは異なり、フェライト相中に相界面析出により得られた直径数ナノメートルの合金炭化物が微細に分散しているという特徴を有している非常に面白い材料であった。相界面析出フェライト鋼の研究を行っていた当初は、この「ナノ析出フェライト・マルテンサイトDP鋼」については、それほど気に留めていなかったのだが、後々、このDP鋼は非常に面白い組織を持っている材料であると認識した。この材料を利用して、DP鋼のさらなる高強度化・高延性化を実現できないか、と思ったのが研究を始めるに至ったきっかけである。

3 DP鋼のさらなる高強度化と高延性化を目指して

通常のフェライト・マルテンサイトDP鋼の組織と応力ひずみ曲線の特徴を模式的に示すとFig.2aのようになる。降伏応力が比較的小さいが、降伏後の加工硬化が非常に大きい

め、均一伸びが大きい。ただし、局部変形能が乏しく、くびれ変形発生後の局部伸びが非常に小さいという欠点がある。これは、軟質のフェライト相と硬質のマルテンサイト相の強度差に起因して生じる不均一変形によるものである。一方で、相界面析出組織を有するフェライト単一組織鋼は、高い降伏応力を示すが、降伏後の加工硬化は比較的小さいのに対して、くびれ変形後の局部伸びが非常に大きいという特徴を有している (Fig.2b)。相界面析出フェライト鋼は、フェライト中に合金炭化物が微細に分散しているものの、母相組織はフェライト単一組織であるため、フェライト・マルテンサイトDP鋼のように、局部変形領域において破壊の起点となるマクロな異相界面がないため、局部延性に優れた特性を持っている。Fig.2aとFig.2bの応力ひずみ曲線を比較すると、フェライト・マルテンサイトDP鋼と、相界面析出フェライト鋼は、それぞれ互いに相反する特徴を有していることがわかる。そこで、これらの組織的特徴を組み合わせれば、両者の長を兼ね備えた優れた特性を有する高強度・高延性鋼の製造を実現できるのではないかと (Fig.2c)、と安易に考えたわけである。それが正に、前節で述べた実験において棚から牡丹餅のように得られていた、相界面析出組織を有するフェライトとマルテンサイトの二相鋼であった。

とりあえず、やってみたら面白いのではないかと、という思いつきに近い極めて安直な発想で研究を始めてみることにした。本研究では、Vを添加した低炭素鋼を用いて、相界面析出組織を有するフェライトとマルテンサイトDP鋼の引張変形挙動を解明することを目的として研究を進めていた。ところが、研究を本格的に開始した後に、フェライト中にナノ炭化物を分散させたフェライト・マルテンサイトDP鋼という

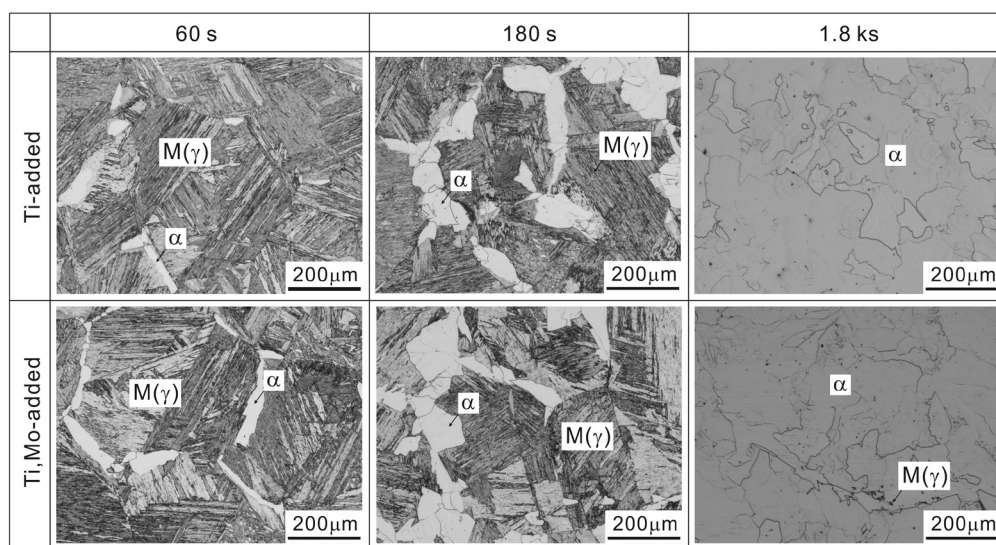


Fig.1 Optical microstructures of the Ti-added and Ti,Mo-added steels isothermally transformed at 700°C for different holding periods.²⁾

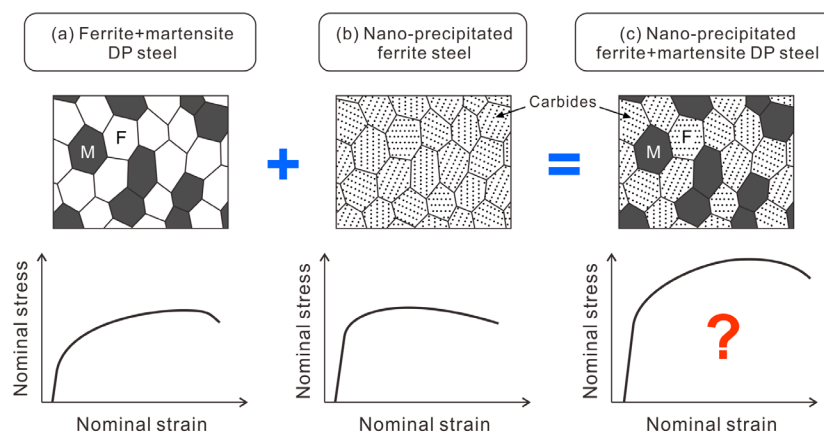


Fig.2 Schematic illustration showing the concept of nano-precipitated DP steel. Microstructural and mechanical features of (a) ferrite-martensite DP steel, (b) nano-precipitated ferrite steel and (c) nano-precipitated ferrite-martensite DP steel.

材料が、一部の鋼種において既に実用化され、自動車用高強度ホイールに使用されていることに遅ればせながら気が付いた^{4,5)}。その事実に気が付いたとき、今行っている研究には新規性がないのではと一瞬焦ったが、過去の研究論文を調べてみたところ、ナノ析出フェライト・マルテンサイトDP鋼の引張変形挙動を定量的に詳細に調べたという研究は運良くなかったもので、そのまま研究を継続することにした。

そこで、どのように本研究に新規性を持たせるかということについて悩んだ。この材料の面白味は、フェライトの析出強化を利用してDP鋼の特性を改善することにあるので、やはり、軟質相フェライトと硬質相マルテンサイトの強度差に着目し、その違いの影響を明確に示す実験結果を得られれば価値があるものになると考えた。そのためには、フェライト相とマルテンサイトの不均一変形の様子を定量化して示す必要があると考え、それを実現するために何か良い手法はないかと探していた。ちょうどそのころ、日本鉄鋼協会の延性破壊研究会でお世話になっていた九州大学の土山聡宏先生、中田伸生先生（現：東京工業大学）がデジタル画像相関法を用いて、DP鋼の不均一変形の解析を行っていらっしやったので^{6,7)}、その手法が使えると思い、私の研究でもデジタル画像相関法を用いて、フェライトとマルテンサイトの変形の不均一性を定量化してみることにした。そうすると、変形初期からくびれ変形開始までの均一変形領域において、フェライト相とマルテンサイト相の間に生じるひずみ分配挙動を明らかにすることができ、ミクロスケールで生じるフェライト・マルテンサイト各相の不均一変形挙動と、引張試験により測定されるマクロスケールでの引張変形挙動をうまく関連付けることに成功し、無事論文にまとめることができた。

ただ、研究のそもそもの狙いは、本節の冒頭でも述べたように、DP鋼のさらなる高強度化と高延性化を実現できない

か、ということであったが、それを達成できたかというとは必ずしもそうではない。フェライトの析出強化により材料の強度は確かに大きく増加させることはできたが、延性も同時に大幅に改善するということは実現できておらず、高強度化と高延性化を両立するというところまでには至っていないのが現状であり、課題は山積みである。今後は、ナノ析出フェライト・マルテンサイトDP鋼の変形機構をより詳細に明らかにすべく、構成相の体積率、サイズ、形状、連結性、強度・加工性などの組織の諸因子の影響について、系統的に明らかにしていく必要がある。特に、当該論文の研究では、ナノ析出DP鋼の引張変形挙動のうち、くびれ変形発生までの加工硬化領域におけるひずみ分配挙動について示すことができていたが、くびれ変形発生後の局部変形領域における不均一変形とポイド・亀裂の形成過程とを関連付けるところまでには至っていない。降伏挙動から加工硬化挙動、くびれ変形後のポイド発生とその成長・連結過程を含めた延性破壊挙動を広く明らかにしていくことによって、材料組織の設計指針を明確にすることができれば、DP鋼のさらなる高強度化と高延性化を両立できるのではと期待する。

4 材料設計と人生設計の共通点

とはいえ、材料の高強度化と高延性化の両立というのは、そんなに簡単ではないことは重々承知している。一般に、材料の強度と延性には、あちらを立てればこちらが立たず、トレードオフの関係があることが経験的に知られている。この関係を打開し、より高強度で高延性な材料を作り出すことが構造材料研究に携わる者の一つの大きな夢であり使命であると私は常々考えているが、現実はそう甘くはないのである。

私は今年で39歳になる。人生80年とすると、もう人生の

半分を生きたことになり、残された命はあと半分しかない。残りの人生をどのように生きていくかを考えていく中で、人間の生き方を材料の振る舞いに置き換えてみたところ、両者は実に良く似ており、多くの共通点があることに気が付いた。

材料の強度を縦軸、延性（伸び）を横軸として示すのが、応力ひずみ曲線である（Fig.3）。ここで、応力ひずみ曲線の縦軸を人間の心と体の強さ、横軸を柔軟性に置き換えてみる。そうすると、面白いように両者を関連付けて説明することができる。材料に変形を加えると、材料は加工硬化をして強度が増加していく。work hardeningである。一方、人間は、仕事（勉強）を一生懸命すると人間的に大きく成長していく。一生懸命働くことを、work hardという。材料が加工硬化をするということは、材料に付加される応力が高くなっていくことを意味する。人間が一生懸命仕事をすると、それだけ大きなストレス（stress）を受けることになる。材料では、付加される応力をできるだけ抑制するように回復等の緩和機構が働く。人間の生活でも、できるだけストレスが蓄積されないように、適度に息抜きをしてストレスを解消する。材料の変形中に加工硬化が大きすぎると材料は早期に破断してしまうため、強度だけではなく、ある程度の延性も必要である。人間も同じで、体力的や精神的な強さを向上させることは重要ではあるが、ストレスが掛かりすぎてしまうと体や心の健康を害してしまうため、仕事ばかりに精を出すことは決して良いことではなく、家族との時間や趣味の時間を大切にしながら、適度に柔軟性のある生き方をしないといけないということである。さらに、材料の応力ひずみ曲線が描く面積を靱性（じんせい）の指標をすることがある。一方で、人間社会では、仕事と私生活のバランスをうまく取りながら生きていくことが大切になる。それが正に人生（じんせい）そのものである。

このようなことを色々考えていくと、材料設計と人生設計は全く同じ考え方で理解できるのではないかという結論に至った。人間の人生には、十人十色の生き方があるけれども、人生の価値は皆同じであろう。すなわち、人生における強さ・柔軟性曲線が描く面積は、誰しも皆同じであるということである。これを材料に当てはめて考えると、材料設計において、強度と延性の両立を目指すという大きな目標を掲げたとしても、そんなに簡単に実現できないのは、ある意味、納得がいく。何かを得ようとすれば、何かを失うというのは、自然の摂理なのだと感じる。材料設計も人生設計も、結局のところ、過ぎたるは及ばざるが如し、バランスが大切だ、ということではないだろうか。この期に及んで、改めて、材料研究の面白さを再認識した次第である。

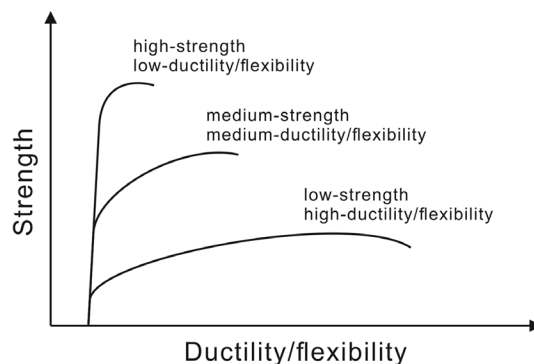


Fig.3 Strength-ductility/flexibility curve in materials or life of human beings.

5 おわりに

「私の論文」として、当該の研究論文の解説をしてくれるようにとのご依頼を受けたが、企画の趣旨から少し外れた内容になっていることをご了解いただきたい。私は、今後も引き続き、構造物金属材料の力学特性の改善に関する研究を続けていくつもりではあるが、決して欲張ることなく、無理のない範囲で、材料設計と人生設計の指針を確立していきたい。これが私の夢であり使命である。

参考文献

- 1) N.Kamikawa, M.Hirohashi, Y.Sato, E.Chandiran, G.Miyamoto and T.Furuhara : ISIJ Int., 55 (2015), 1781.
- 2) N.Kamikawa, Y.Abe, G.Miyamoto, Y.Funakawa and T.Furuhara : ISIJ Int., 54 (2014), 212.
- 3) N.Kamikawa, K.Sato, G.Miyamoto, M.Murayama, N.Sekido, K.Tsuzaki and T.Furuhara : Acta Mater., 83 (2015), 383.
- 4) I.Machida, M.Narita, R.Kureura, M.Morita, N.Aoyagi and M.Sano : SAE paper, 940536, (1994)
- 5) M.Morita, T.Shimizu, O.Furukimi, N.Aoyagi and T.Kato : Materia Japan, 37 (1998), 513.
- 6) K.Park, M.Nishiyama, N.Nakada, T.Tsuchiyama and S.Takaki : Mater. Sci. Eng. A, 604 (2014), 135.
- 7) N.Nakada, M.Nishiyama, N.Koga, T.Tsuchiyama and S.Takaki : Tetsu-to-Hagané, 100 (2014), 1238.

(2017年8月2日受付)