



## 躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

# チタンに関する研究開発を通じて

Research and Development of Titanium

國枝知徳

Tomonori Kunieda

新日鐵住金（株）

技術開発本部 鉄鋼研究所

チタン・特殊ステンレス研究部 主幹研究員

## 1 はじめに

筆者は2007年に名古屋大学大学院の博士課程を修了し、新日本製鐵株式会社に入社した。それ以来、同社および合併後の新日鐵住金株式会社において、一貫してチタン材料の研究開発に従事してきた。チタンは軽量、高比強度かつ高耐食性を有することから、航空機分野、熱交換器、海水淡水化プラント、建材などの一般工業分野など様々な分野で使用されており、今後、更なる需要拡大が期待されている。チタンは工業的な製造プロセスが確立されてまだ約60年であり、鉄鋼に比べるとまだまだ歴史が浅い分、新しい現象に直面することもあり、興味深い材料だと感じながら日々の研究開発に取り組んでいる。

本稿では筆者が取り組んできたチタン研究開発の一例として、最近新たに見出されたチタン合金の等温変態挙動とそれにより発現する高機能特性について紹介する。

## 2 当社独自開発合金 Ti-5Al-2Fe-3Moの高機能特性

チタンでは常温における構成相の種類に応じ、 $\alpha$ 型チタン合金、 $\alpha + \beta$ 型チタン合金、 $\beta$ 型チタン合金に大別される。その中でもTi-6Al-4Vに代表される $\alpha + \beta$ 型チタン合金は強度と延性のバランスに優れており、多くの合金が開発され、航空機をはじめとして多くの分野で使用されている。一方で、チタン合金では合金元素としてVやMoといったレアメタルが用いられており、高コストの一因となっている。そこで、当社ではこれら合金元素に代わり、安価で汎用なFe、O、N、Cuなどの合金元素を活用した独自合金を開発してきた<sup>14)</sup>。その1つがTi-5Al-2Fe-3Moである。この合金は溶解時の凝固偏析や熱間加工性を考慮し、レアメタルであるMoを3%添加しているが、Ti-6Al-4Vよりも高強度・高延性で、高いコス

トパフォーマンスを有する非常に優れたチタン合金である。これまでに一部の二輪車や高級四輪車の吸気エンジンバルブなどに使用されており、今後のさらなる用途拡大が期待されている<sup>3)</sup>。

本合金は $\beta$ 相を安定化させるいわゆる $\beta$ 安定化元素であるFeやMoを合計5mass%も含有しており、 $\alpha + \beta$ 型チタン合金の中でもnear  $\beta$ 型に属する。そのため、 $\alpha + \beta$ 二相高温域で、Ti-6Al-4Vに比べて、 $\beta$ 相の安定度を高くすることができる。そのため、溶体化処理温度によっては、その後急冷すると、 $\beta$ 相中に $\alpha$ 相を析出させずに $\beta$ 相のまま残留させたり、 $\beta$ 相をマルテンサイト変態させることができる。これら残留 $\beta$ 相やマルテンサイト相の特性を活用することで、筆者らはこれまでに多様な機械的特性<sup>5)</sup>、高速時効硬化<sup>6-9)</sup>、特異形状変化<sup>10)</sup>など特徴ある諸特性を発現させることができることを見出した。下記にこれらの特性のうち、高速時効硬化について、その特性およびその発現原理を担う相変態挙動について簡単に紹介する。

図1に本合金を二相高温域900℃（ $\beta$ 変態温度：約955℃）で溶体化処理水冷した後、450℃で時効処理した際の時効硬化曲線を示す。溶体化処理後、450℃で時効処理すると、数

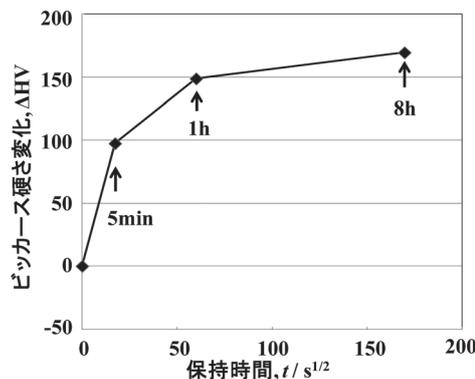


図1 900溶体化処理水冷後、450℃で時効処理した試料のビッカース硬さ変化<sup>9)</sup>

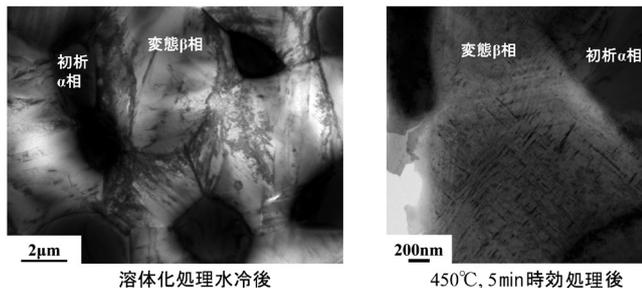


図2 900°C溶体化処理水冷後および450°C、5min時効処理した試料<sup>9)</sup>のTEM組織

分と極めて短時間で急激な時効硬化を示す<sup>6,9)</sup>。一方、一般にnear  $\beta$ 型の $\alpha + \beta$ 型や $\beta$ 型の汎用チタン合金でも高強度を得るために時効処理を施す場合があり、その場合、時効処理時に $\beta$ 相中に $\omega$ 相や $\alpha$ 相が析出することで硬化する<sup>11)</sup>。しかしながら、これら汎用チタン合金の時効硬化は非常に長時間を要し、例えば450°Cでは数～十数時間が必要である<sup>12)</sup>。そのため、本合金で発現する上記時効硬化挙動を筆者らは‘高速時効硬化’と称している。この高速時効硬化現象は、極短時間の時効処理中に $\beta$ 相からhcp相への急激な相変態により生じている。

図2に900°C溶体化処理水冷後および450°C、5min時効処理後のTEM組織を示す。本合金は溶体化処理後では初析 $\alpha$ 相と残留 $\beta$ 相の二相から成っているが、450°C時効処理により残留 $\beta$ 相内に幅2～10nmと著しく微細なhcp構造を有する針状組織へせん断的に変態する。この微細な針状組織の形成が時効硬化の要因である。このような相変態挙動は既存の汎用チタン合金では確認されておらず、本合金は一般的な析出による時効硬化とは異なるメカニズムで硬化している。これまで変態初期の詳細な元素状態解析などから、本変態はスピノーダル分解とせん断変態からなる相変態挙動であり、鋼のベイナイト変態に類似した過程により生じていることを確認している<sup>8)</sup>。

### 3 おわりに

1章で述べたように、チタンはまだ実用化されてからの期間が短いため、本稿で述べた事例のように、まだ十分に解明されていない現象があり、面白い金属材料だと実感している。その一方で、鋼などに比べると、様々な基礎知見が十分に揃っていないとの印象がある。しかしながら、チタンの歴史が浅いとはいえ、多くのチタン合金が開発されてきており、今後、新合金の開発や既存合金の高機能化には数値シミュレーションや組織・特性予測モデルなどの活用が重要となってくると考えられる。そのため、より多くの現象を解明し、知見を蓄えていく必要があると考える。筆者もこれまでの経験を活かし、少しでもこれらに貢献するとともに、更に飛躍できるよう研究開発に取り組んでいきたい。

最後に、これまでの研究開発にご助力、ご助言頂きました関係者の方々に、この場を借りてお礼を申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 藤井秀樹：ふえらむ, 15 (2010), 686.
- 2) 藤井秀樹, 前田尚志：新日鐵住金技報, 396 (2013), 16.
- 3) 森健一, 高橋一浩, 藤井秀樹：チタン誌, 55 (2007), 118.
- 4) 大塚広明, 藤井秀樹, 高橋一浩, 森健一：新日鐵住金技報, 396 (2013), 56.
- 5) 國枝知徳, 森健一, 高橋一浩, 藤井秀樹：新日鐵住金技報, 396 (2013), 50.
- 6) 國枝知徳, 藤井秀樹, 高橋一浩, 和田恵太, 竹元嘉利：CAMP-ISIJ, 26 (2013) 442, CD-ROM.
- 7) 國枝知徳, 藤井秀樹, 高橋一浩, 和田恵太, 竹元嘉利：CAMP-ISIJ, 26 (2013), 443, CD-ROM.
- 8) 國枝知徳, 小東勇亮, 高橋一浩, 藤井秀樹：CAMP-ISIJ, 29 (2016), 889, CD-ROM.
- 9) 國枝知徳：金属学会シンポジウム予稿 チタン合金の研究・開発最前線2016, (2016), 17.
- 10) 竹元嘉利, 和田恵太, 朝倉健太, 瀬沼武秀, 國枝知徳, 藤井秀樹：日本金属学会誌, 78 (2014), 434.
- 11) 小松伸也：軽金属, 41 (1991), 344.
- 12) 藤井秀樹, 鈴木洋夫：日本金属学会誌, 55 (1991), 1063.

(2016年10月21日受付)

## 先輩研究者・技術者からのエール

九州大学 大学院総合理工学研究院 融合創造理工学部門 教授

西田 稔

「躍動」の記事は毎回興味深く拝読させていただいているが、構造材料の研究とは縁遠い小職がコメント役に指名されるとは予想外のこと、締切日ぎりぎり近くまで呻吟することになった。

國枝氏と小職の出会いには2010年新日本製鐵(株)(現:新日鐵住金(株))に在職されていた藤井秀樹博士(現:東邦チタニウム(株))より、同社で開発されたTi合金の電子顕微鏡による微細構造解析をご依頼いただいたことに遡る。以来、同氏には試料の調製等で後述する「チタン愛」に溢れる行き届いた心配りと様々な便宜を図っていただいている。浅学非才の小職が申しあげることでは無いが、材料研究者はすべからず自分が取り組んでいる現象や材料に愛情を注ぐべきであると考えている。これまでの交流を通して、同氏のチタンに対する愛情「チタン愛」が年を追うごとに深まっていることを実感している。

國枝氏の研究姿勢は記事「チタンに関する研究開発を通じて」の冒頭にある「チタンは工業的な製造プロセスが確立されてまだ約60年であり、鉄鋼に比べるとまだまだ歴史が浅い分、新しい現象に直面することもあり、興味深い材料だと感じながら日々の研究開発に取り組んで

いる」に象徴されている。大学では研究開発と実用化の間の壁を回避できるが、企業では実用化と言う使命から逃れることはできないであろう。その中で同氏は高速時効硬化、特異形状変化等の特徴ある諸特性を見出し、それらの基礎学理を確立しつつ、実用化の壁をも突き破る多くの成果を着実に積み上げている。

ご存知の方も多いと思うが、國枝氏は名古屋大学、同大学院で森永正彦先生、村田純教先生のもとで耐熱材料の研究により学位を取得されている。小職は門外漢ではあるが、耐熱材料の研究は高温変形・クリープ等の現象を解明する科学と、それに基づき耐熱性・耐久性等の特性向上を図る工学が直結した領域であると考えられる。同氏は両先生のご薫陶により、科学と工学の両面から課題を解決する能力を身に付けられていると拝察する。このことは、まさに、同氏が企業において歴史が浅いチタンの研究に従事するに相応しい人材であることを意味するものである。同氏の情熱と「チタン愛」により、チタンが示す多様な現象が解明され日本はもとより世界のチタン研究の歴史が深まり、鉄鋼に匹敵、あるいは用途によっては凌駕する様々なチタン材料が開発されることを期待する。

東邦チタニウム(株) 取締役 技術開発本部長

高取 英男

チタンは、第二次大戦後使用されるようになった新しい金属でありながら、その特性が際立っているがために、軍需での使用が先行した。冷戦構造という、軍需材料には恵まれた環境の中で、実用化の速度も早く、1950年代にはTi-6Al-4Vという、今でも、チタン合金の代名詞といってよい合金が開発された。実用への要求が強いために、プロセスが確立されると、厳しい規格化と、工程の承認とその厳密な遵守を義務付けられた。

当初重要視された優れた機械的性質に加え、耐食性の高さも利用され、軍需に続き、民間の航空機や、原子力発電、海水淡水化プラントなど、信頼性を求められる厳しい市場に採用されていった。しかしながら、コストが高く、使用範囲は広がったが、使用量は限られてしまっている。実用への強すぎる要求が、チタン合金の開発を、枠を固定された中での改良にとどめてしまったとも言える。

チタン合金は、実は、國枝さんが書かれているように、結晶構造や組織が多様な金属であり、組成制御、組織制御は、合金の特性を大幅に左右する。日本のチタン開発陣は、この金属は、その可能性が十分に引き出されていないと考え、開発に取り組んでいる。その中でも、國枝さんはじめ、新日鐵住金グループの開発陣は、従来の概念にとらわれず、鋼で積み重ねられてきた知見を視野に入れ、チタンそのものの理解を掘り下げ、独自の視点を得つつある。

國枝さんは、着実に前に進むためには、結果としての現

象を見るだけでなく、その変化をもたらした微細組織まで解析を進めなければいけないと考えている。くまなく現象を見つめ、地道に成果を積み重ねることで、大きな飛躍につながる研究を数多くされ、チタンの今まで限界とされていた範囲を超える歩みを改めて刻みつつある。

今回は、高速時効処理を本文で取り上げられているが、当時、國枝さんの上司は「この実験結果は間違っている。再試験をしなさい。」と指示されたとのことである。それくらい、従来の常識からは考えられない現象であった。國枝さんは間違いでないことを確認するだけでなく、持ち前のバイタリティと熱意で、メカニズムまで解明し、上司を納得させたと聞いている。チタンの研究開発に携わってきたものとして、その研究姿勢は大変心強く感じる。

努力は着実に実を結びつつあり、軍需産業はほとんどないながらも、先端技術を多く有している日本に適した合金を市場に投入し、新市場の創生まで踏み込んでいく。基礎から積み上げた合金開発とプロセス開発は、応用の範囲が広い。自動車の軽量化、IoT社会の発展、グローバルゼーションに伴うアジア・アフリカの発展、そのときに、チタンの可能性を十分に引き出しておくことが、社会の発展につながる。

チタンは、まだまだその能力が掘り起こせるとの國枝さんの言葉は大変力強く、まったく同感である。ぜひ、バイタリティと熱意で、さらに前に進んでほしい。