入門講座

状態図（相変態編）―自信を持って使うための熱力学的基礎-13

# 計算状態図に基づいた特殊鋼棒線開発の現状

Current Progress in Application of Calculated Phase Diagram to Development of Bar and Wire Rod

越智達朗
Tatsuro Ochi
新日本製鐵（株） 技術開発本部
室蘭技術研究部　部長

## 1 はじめに

特殊鋼棒鋼・線材の主な用途は自動車用のエンジン部品、駆動系部品、足回り部品であり、「走る、曲がる、止まる」という自動車の基本性能を支えている。これらの自動車部品は、通常、棒鋼・線材から鍛造や切削加工により所定の形状に加工された後、熱処理により必要な強度を付与する工程で製造される。そのため、特殊鋼棒鋼・線材の要求特性としては、最終的な機械部品としての「部品性能」の確保と同時に、上記の種々の加工工程に耐え得る「加工性能」が求められる[1]。自動車用特殊鋼棒鋼・線材に要求されている現在の課題は、高強度化、工程省略、環境負荷物質の低減（非鉛化等）の三点である。特に高強度化の指向が強い。これは、地球環境保全の観点からの自動車軽量化による燃費向上、自動車エンジンの高出力化、ユニット共通化による部品点数の削減やコスト低減等の多様なニーズによる。また、コスト削減、省エネルギー、環境負荷低減の視点から熱処理省略・切削省略（ニアネットシェイプ化・チップレス化）の指向も強い。これらの需要家の多様な指向に応えるべく、新鋼材の開発が取組まれている。

ここで、自動車部品の製造工程において、上記した特殊鋼棒鋼・線材の要求特性「部品性能」と「加工性能」を確保するために種々の熱処理が行われる。すなわち、鍛造、切削等の成形加工の前に、加工性を付与するために焼きなましや焼きならし処理が、また、成形加工後は、必要な材質を付与するために焼入れ焼戻し処理が行われる。このように、特殊鋼棒鋼・線材として用いられる構造用鋼は、熱処理によって加工性や最終部品としての性能が獲得される鋼であり、熱処理によって活かされる典型的な鋼であると言える。逆に言うと、適切な条件で熱処理を行わないと鋼の持っている特性を十分に引き出せないばかりか、かえってトラブルの原因となることが多く、特殊鋼棒鋼・線材を取り扱うためには、状態図に基づく熱処理の冶金的意義を理解しておくことが重要である。焼きなまし、焼きならし処理は、加熱後炉冷または空冷する熱処理であり、一方、焼入れ処理は、加熱後油等に焼入れて急冷する熱処理であるが、いずれの場合にも、基本的な加熱条件は、$A_{c3}$点＋約50℃のオーステナイト温度域に一旦加熱・保定し、完全に溶体化することである。したがって、焼きなまし、焼きならし或いは焼入れの熱処理条件を設定するためには、変態温度$A_3$点を知る必要があり、従来は変態温度予測のための種々の回帰式[2]が用いられてきたが、近年は計算状態図が普及するに至って、回帰式の代替として計算状態図が日常的に用いられるようになってきている。

また、近年、特殊鋼棒鋼・線材分野における高強度化等を狙いとした新鋼材には、結晶粒制御、析出強化が一般的に活用されるようになってきたが、それらの機能を最大限に発現するためには、析出物の溶体化・析出挙動を含めた冶金的意義を理解しておくことが重要であり、そのため、これらの鋼材開発において、近年、計算状態図は益々有用になってきている。

本報告では、特殊鋼棒鋼・線材の鋼材開発に対するThermo-Calcによる計算状態図の活用状況に関して、最近のトピックスを交えて概説する。

## 2 組織微細化、異常粒防止

特殊鋼棒鋼・線材製品においては、ほとんどの製品が、強靭化、高疲労強度化、低歪化、遅れ破壊特性改善等を目的として、オーステナイト粒の細粒化が指向されている。結晶粒の微細化の基本は、粒成長を抑制するピン止め粒子を微細分散することである。図1に特殊鋼棒鋼・線材分野における析出物制御によるオーステナイト粒制御活用の一例を示す。熱鍛非調質鋼は1200℃の高温域での粒制御が必要であり、ピン止め粒子として通常TiNやMnSが活用される。浸炭歯車

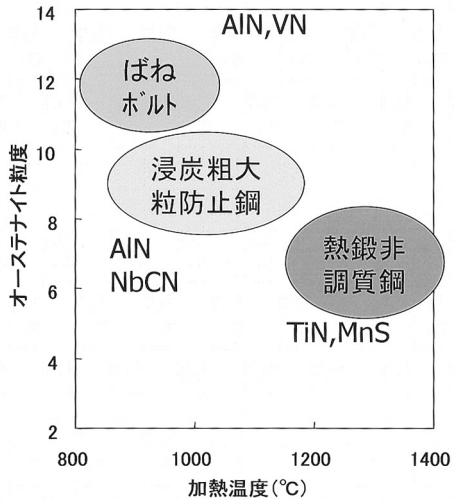


図1　特殊鋼棒線商品でオーステナイト粒制御に用いられる析出物

用鋼、ばね、ボルトでは850～1000℃での粒制御が必要であり、ピン止め粒子として通常AlNやNbCNが活用される。

ここで、粒成長には定常粒成長と異常粒成長の2種類がある。定常粒成長における結晶粒半径とピン止め粒子との関係は（1）式で表され（$\beta=4/3$のとき、Zenerの関係）[3]、ピン止め粒子を多量微細分散することにより、細粒化が可能である。

$$R=\beta r/f \quad \cdots\cdots(1)$$

R：結晶粒半径、r：析出物半径、
f：析出物の体積分率

定常粒成長に比較して異常粒成長の方が、初期の混粒度が駆動力として寄与する分、より粒成長の駆動力が大きくなり、ピン止めにはより多くの微細析出物が必要である。特殊鋼棒鋼・線材の分野で異常粒が問題になるのは、ギヤ、シャフト部品等の浸炭用鋼である。ギヤ、シャフト部品の多くは図2-Aに示したように、熱間鍛造後に切削と浸炭焼入れによって製造されている。しかし、切削レスを狙い図2-Bに示したような冷間鍛造化が要望されるとともに、一層の工程省略を狙って図2-Cのように冷間鍛造後の焼準省略も指向され、その際、浸炭時の粗大粒の発生が顕著化しやすい。図3に粗大粒の一例を示す[4]。

粗大粒が発生すると疲労強度や衝撃値が低下するとともに、熱処理歪が大きくなり部品精度を損ねるなどの弊害が生じてしまう。粗大粒に関しては、Gladman[5]によってその発生温度の臨界条件が（2）式のように提案されている。

$$Tcrit=A/[\ln\{(3/2)-(2/Z)\}-\ln(R_0)-\ln(f)+B] \quad \cdots\cdots(2)$$

Tcrit：粗大粒発生温度　　A、B：常数（A＞0）

A　棒鋼－熱間鍛造－焼準－切削－浸炭
B　棒鋼－球状化焼鈍－冷間鍛造－焼準－浸炭
C　棒鋼－球状化焼鈍－冷間鍛造　－　浸炭

図2　浸炭部品の製造工程

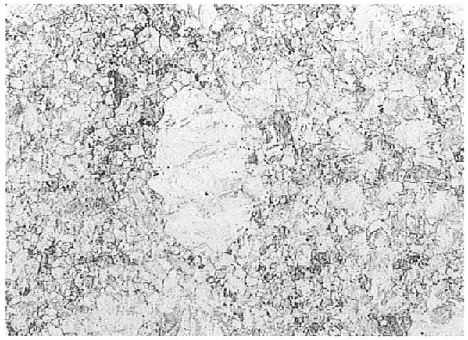


図3　浸炭時に発生した粗大粒の例

$R_0$：マトリックス粒半径　f：析出物の体積分率
Z：初期混粒度（成長粒半径（R）/マトリックス粒半径（$R_0$））

（2）式より、Z：大、$R_0$：小、f：小の場合にTcritが低下して粗大粒が発生しやすくなる。浸炭焼入れによって粗大粒が発生するのは、長時間加熱によって析出物が粗大化し結晶粒のピン止めに有効な析出物量fが少なくなるため、および表層では浸炭による炭窒化物のピン止め力が増加し、未浸炭部との間で粒度に差が生じ、つまり（2）式のZが大きくなるためである。冷間鍛造により粗大粒が発生しやすくなるのは、加工によって初期オーステナイト粒が微細化し、$R_0$が小さくなるためである。また、球状化焼鈍等の長時間加熱によって粗大粒が発生しやすくなるのは、析出物が粗大化し結晶粒のピン止めとして有効な析出物量fが少なくなるためである。冷間鍛造後の焼準省略が難しいのはこのような理由による。

粗大粒の発生を防止するためのポイントは、鋼成分、製造条件、二次加工条件を制御することによって、浸炭処理の段階での析出物の多量・微細分散を図ることである。析出物の多量・微細分散のための指針を図4に示す[6]。

（1）熱鍛等の加熱時に、それ以前に析出している粗大な析出物を一旦完全に溶体化させる。
（2）その後、二次加工工程における焼鈍、焼準、または浸炭加熱の昇温過程で析出物を微細析出させる。

熱鍛等の加熱条件を設定するために、加熱ー保定後急冷したサンプルの析出物量を調査することにより、AlN、NbCNの溶体化挙動を実験的に調べた結果を図5に示す。図5より析出物の完全溶体化温度を決めることができる。また、浸炭

温度における析出物量を読み取ることにより、浸炭時にピン止め粒子として有効に機能する析出物量を求めることができる。同一材料についてThermo-Calcで計算状態図により求めた結果を図6に示すが、図5とよく一致しており、計算状態図により、析出物の溶解、析出挙動を精度よく推定可能であることがわかる。図7は、このような考え方に基づき、鋼成分、製造条件、二次加工条件を最適化し、析出物の微細分散を図った時のAlN、NbCNの分散状態の一例である[6]。

## 3 析出強化鋼

特殊鋼棒鋼・線材分野においても、高強度化等の視点から、その最終製品の強化手法として析出強化が活用されるようになってきている。棒鋼・線材各製品ごとに、析出強化に活用されている析出物とその析出温度を図8に示す。析出強化の発現形態としては、熱鍛非調質鋼のように、熱鍛後の冷却過程での$\gamma/\alpha$相界面析出による析出強化[7]と、ボルト鋼、ばね鋼の焼戻し過程での析出強化の二つのケースがある[8]。特に、後者については、近年の高強度化ニーズの高まりにより、ばね鋼における焼戻し軟化抑制、ボルト鋼における遅れ破壊特性改善のための水素トラップサイト等、析出強化の活用が普及するとともに、さらに適用技術の高度化が進んでいる。析出強化を活用するためには、焼入れ加熱時に、析出物を一旦溶体化する必要がある。しかしながら、析出物が完全に溶

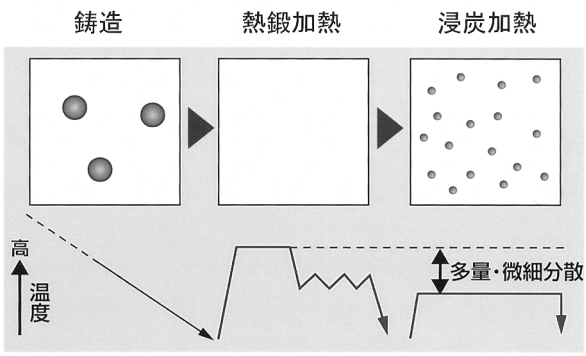


図4　析出物の多量微細分散の考え方

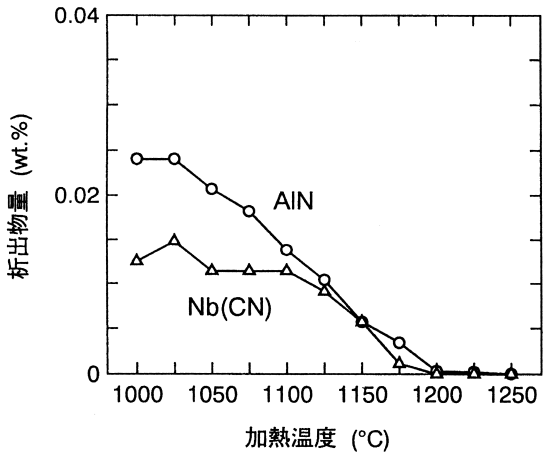


図5　AlN、NbCNの溶体化挙動

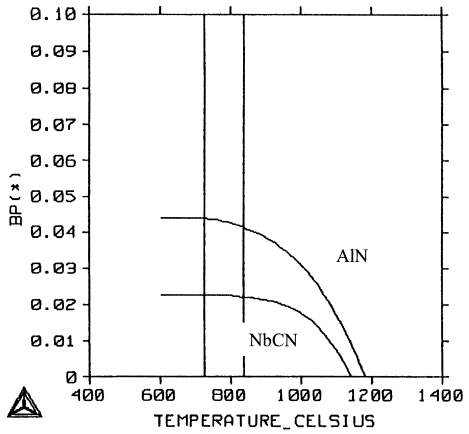


図6　AlN、NbCNの溶体化挙動；T/Cによる計算

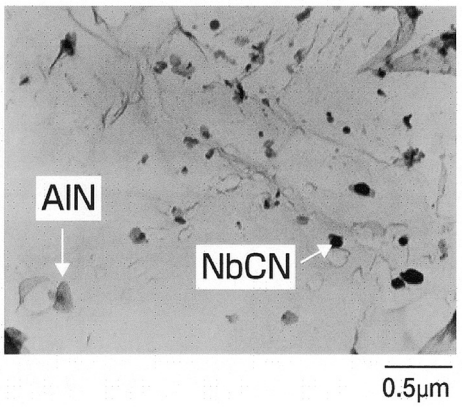


図7　AlN、NbCNの微細分散の一例

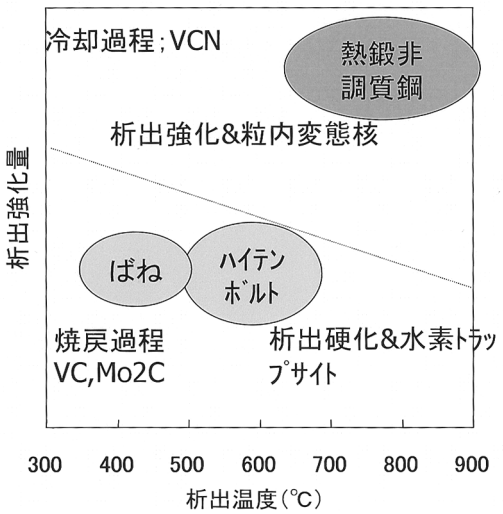


図8　特殊鋼棒線商品で析出強化に用いられる析出物

体化すると、結晶粒が粗大化する。そのため、実用材で用いられている方法は、焼入れ加熱時に一部の析出物を溶け残らせて、オーステナイト粒の微細化に活用し、溶体化した分は、その後の焼戻し過程で析出強化に寄与させている。そのためには、焼入れ加熱温度と析出物生成元素の添加量の微妙な調整が必要になり、そのためのツールとしてThermo-Calcによる計算状態図が有効に活用されている。V、Moを含有したハイテンボルト用鋼のV、Mo炭化物の溶体化挙動のThermo-Calcによる計算結果を一例として図9に示す。焼入れ加熱温度が900℃前後と仮定すると、炭化物の一部がオーステナイト粒制御に寄与、残りが析出強化、水素のトラップサイトとして機能していることを示している[9]。

## 4 真空浸炭

真空浸炭法は従来のガス浸炭法に比べて、作業環境がクリーンであること等の理由により欧州で普及しつつある。真空浸炭法は、減圧下で炭化水素系のガスを導入し、表層に一旦セメンタイトを生成させた後、拡散処理により必要な炭素分布を得る方法である。従来のガス浸炭法に比べて粒界酸化を生じないことなどの長所があるものの、図10に示すように、旧オーステナイト粒界に沿って、初析セメンタイトが生成しやすいことが課題の一つである[10]。図11に示す典型的な真空浸炭のパターンにおいて、途中で焼入れし表層の炭素濃度を分析した結果を図12に示す。Aでは初析セメンタイトが生成、B、C、Dでは初析セメンタイトは消失、Eでは初析セメンタイトが生成している。図13にThermo-Calcにより計算した状態図上に図12の表層炭素量の測定値を記入した結果を示すが、初析セメンタイトの生成、消失挙動は、状態図により明快に説明可能である。図13より浸炭期においては、炭素濃度は概ね$A_{cm}$線上にあり、その後拡散期において、初析セメンタイトは消失して一旦オーステナイト単相域に入り、焼入れ前保持温度において、オーステナイト＋セメンタイト域に入るために、再び初析セメンタイトが析出し、最終的に残存することがわかる。したがって、初析セメンタイトの生成を防止するには、拡散時間を適切に設定すること、焼入れ前保持温度を適切に設定することが最大のポイントである。このような視点に基づいて、操業条件を適正化することにより、近年初析セメンタイト生成の課題が解消され、我が国においても真空浸炭法が普及しつつある。このように、浸炭熱処理時における初析セメンタイトの生成、消失挙動の推定とそれに基づく、鋼材、熱処理設計の適正化の分野においても、計算状態図が有効に活用されている。

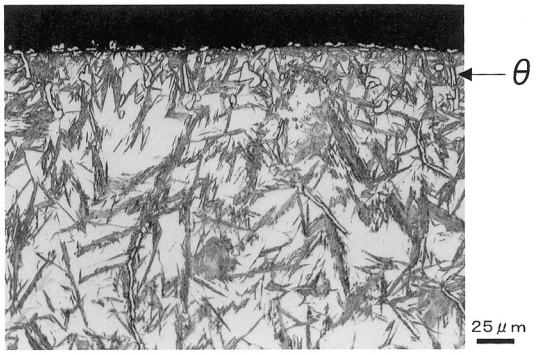


図10　真空浸炭時に生成した初析セメンタイト

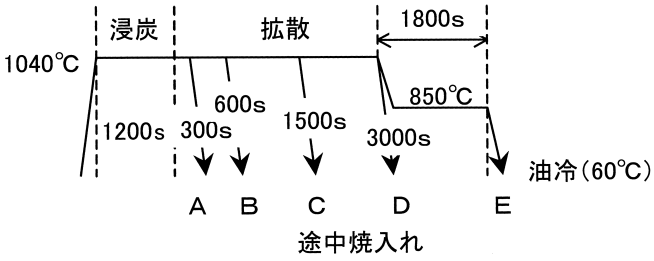


図11　真空浸炭パターン

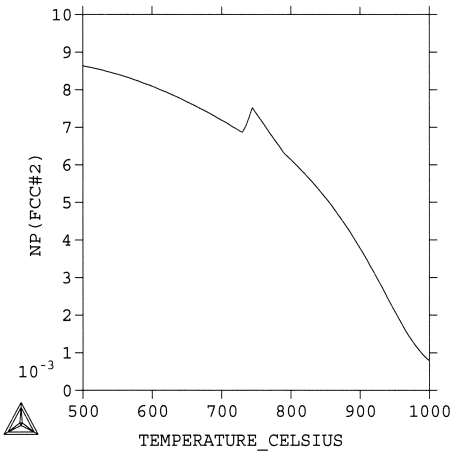


図9　Mo-V鋼のMX炭化物（fcc）の溶体化挙動

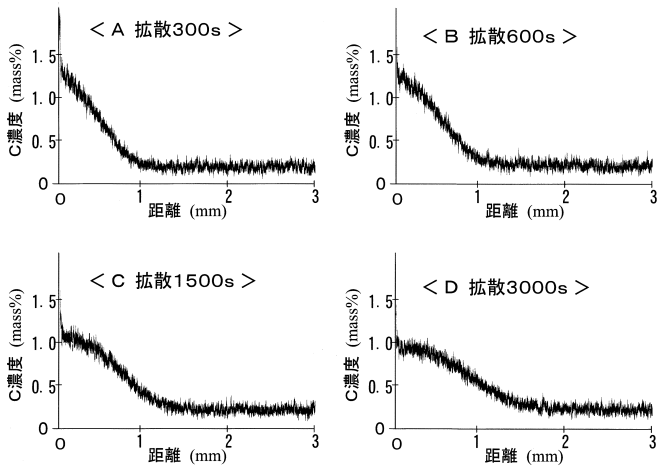


図12　浸炭途中焼入れ材の炭素濃度分布

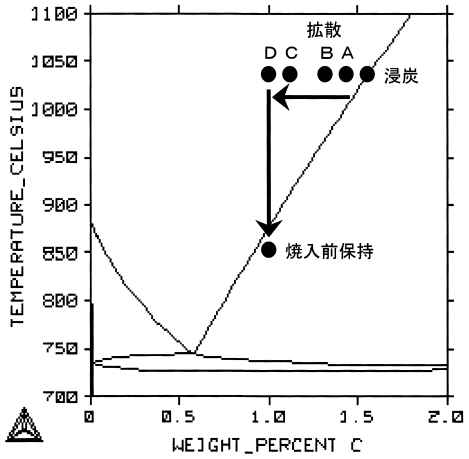


図13　供試材成分でのFe-C疑二元系状態図と表面C濃度

## 5 炭化物分散鋼

軸受部品は自動車、産業機械などに使用される主要な機械部品の一つであり、その必要特性は転動疲労特性である。軸受部品がより厳しい高面圧下の条件で使われるケースが増えてきており[11]、軸受部品においても耐熱性、耐摩耗性の確保が重要になってきているが、このような場合の用途として、炭化物を分散した鋼材が用いられることがある。炭化物分散鋼の設計、すなわちマルテンサイト組織中に分散させるべき炭化物の種類、量の設計には、Thermo-Calc計算による計算状態図が有効に活用できる。一例として、代表的な耐熱軸受鋼であるM50（Cr-Mo-V鋼）の状態図計算の例を図14に示す。耐熱性確保に活用している炭化物は、VC、MoC、$Mo_2C$、$M_{23}C_6$である。

## 6 その他

特殊鋼棒線の重要な所要特性の一つに被削性がある。被削性向上を目的として、鉛添加鋼が普及しているが、近年の環境問題の高まりとともに、鉛は環境汚染物質の一つとされ、鋼から除くことが指向されている[12]。そのため、鉛を用いずに被削性を確保した鋼材の開発が要求されている。被削性の改善はSの増量によるMnSの増量が一つの方向ではあるが、この際に、MnSの形態制御（微細化を指向する場合[13]と粗大化を指向する場合[14]がある）が重要な課題となる。この際にも、計算状態図は非常に有用である。

その他、表面硬化処理の一つ窒化処理は、熱処理歪が少ないことから近年適用が広がっているが、窒化にともなう$A_1$点の低下や、表面に生成する化合物層の特定等に、計算状態図は活用されている。

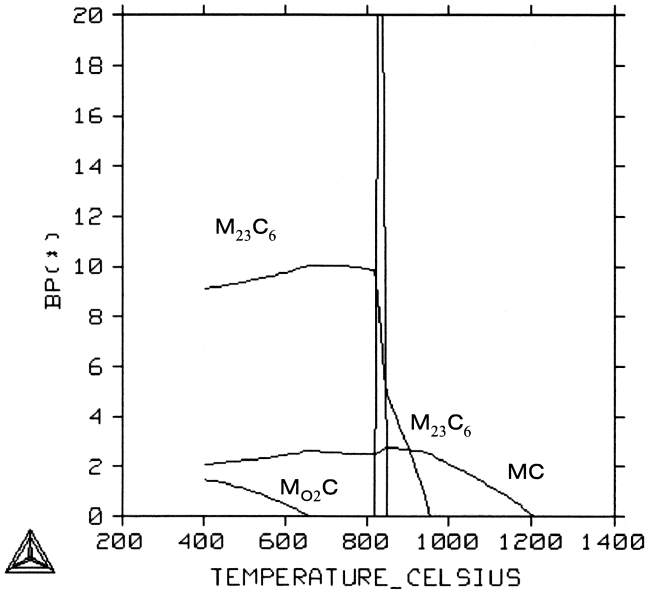


図14　M50の炭化物生成挙動

## 7 おわりに

特殊鋼棒鋼・線材分野の鋼材開発における計算状態図の活用状況について紹介した。特殊鋼棒鋼・線材の鋼材開発のポイントは、鋼材の本来持っている特性を熱処理によって最大限に引き出すことであり、そのためには、介在物、析出物の挙動も含めて、状態図に基づく熱処理の冶金的意義を理解しておくことが必須である。本報で述べたように計算状態図は特殊鋼棒鋼・線材の鋼材開発のツールとして極めて有用である。需要家からの鋼材に対する要求は、年々高度化してきており、鋼素材の製造から二次加工、最終部品の製造までの一貫した工程の中で、鋼材の特性を最大限に引き出す取り組みが、今後益々重要になってきているが、計算状態図のさらなる精度向上により、鋼材開発の深化とスピードアップが図られることを期待している。

**参考文献**

1）越智達朗，高田啓督，久保田学，蟹澤秀雄，内藤賢一郎：新日鐵技報，370（1999），11.
2）例えば，邦武立郎：熱処理，43（2003），99.
3）西澤泰二：鉄と鋼，70（1984），1984.
4）戸田正弘，蟹澤秀雄，越智達朗：鍛造技報，83（2000），1.
5）Gladman. T：Proc. Roy. Soc. A，（1966），294.
6）久保田学，越智達朗：新日鐵技報，378（2003），72.
7）Ishikawa. F， Takahashi. T and Ochi. T： Metall. Mater. Trans. 25A，（1994），929.
8）山崎真吾，久保田学，樽井敏三：新日鐵技報，370

(1999), 51.
9) 久保田学, 樽井敏三, 山崎真吾, 越智達朗：新日鐵技報, 381 (2004), 57.
10) 小澤修司, 越智達朗：CAMP-ISIJ, 16 (2003), 1439.
11) 越智達朗, 大木光一, 蟹澤秀雄, 草野祥昌：新日鐵技報, 370 (1999), 20.
12) 橋村雅之, 平田浩, 蟹澤秀雄, 内藤賢一郎：新日鐵技報, 378 (2003), 68.
13) 橋村雅之, 宮本健一郎, 広角太朗, 宮西慶：まてりあ, 46 (2007), 105.
14) 村上俊之, 白神哲夫, 及川勝成, 石田清仁：CAMP-ISIJ, 17 (2004), 1418.

(2007年2月26日受付)

## ブックレビュー

**高温融体の界面物理化学**
**向井楠宏　著**
**2007年1月　アグネ技術センター発行(Tel. 03-3409-5329)**
**A5判　168頁　定価3,360円(消費税込)**

本書は「界面物理化学」の高温プロセス分野における第一人者である著者による一級の学術書である。第1章の序論に続き、第2章では「界面の取り扱いの基礎」と題して、「界面物理化学」の基礎の部分が詳しく述べられている。第3章では「高温融体の界面性質」について、溶融金属、溶融スラグの表面張力、両相間の界面張力、高温融体とセラミックス、耐火物間の濡れ性などが、豊富なデータとともに解説されている。第4章では「高温融体の界面現象と材料プロセッシング」について、鉄鋼精錬プロセスを中心とした過去20年あまりの著者の研究をもとに、高温融体におけるマランゴニ効果などの界面現象が取り上げられている。さらに、4章で説明されている現象のその場観察映像が筆者らの研究グループによって撮影されており、付録のDVDに収められている。その内容は本書の帯に“Seeing is believing”と書かれているとおり、材料科学を志す若い人たちに、ぜひ一度は見ていただきたい映像である。高温界面現象の面白さを見出すだけでなく、例えばジェット機を用いた放物線飛行による無重力状態での撮影など、困難な高温融体のその場観察に掛けた筆者とその共同研究者の方々の情熱と努力に心打たれるであろう。しかし、本書の特徴は高温界面現象の具体的記述やその場観察だけにあるのではない。むしろ本書の真価は、全体のほぼ半分のページが費やされている第2章にあるといえる。界面の基礎的な取り扱いが精緻に説明されており、他に類を見ない界面熱力学の最良の教科書となっている。「表面張力一つをとりあげてみても(中略)材料工学分野の多くの研究者、技術者の間で十分な理解が得られておらず」と著者が述べているように、「界面物理化学」の正しい理解なしに沢山の研究が進められているのが現状であるが、確かな学問の理解こそが研究の必要条件であることを本書は語っているように思われる。鉄鋼研究に携わる者にとって、必読の一冊であろう。

(早稲田大学　基幹理工学部応用数理学科　教授　伊藤公久)