

## TODAY



## 「鉄は国家なり？」

JFE スチール株式会社  
スチール研究所長 専務執行役員  
瀬戸 一洋

「鉄は国家なり」という言葉を日本で最初に使ったのは1901年、八幡製鉄の高炉火入れに立ち会った伊藤博文だと言われている。ようやく近代製鉄の夜明けを迎えられた高揚感と富国強兵を急ぐ危機感が感じられる。そして、このような考え方は先んじて近代製鉄をものしていた欧米でも当然共有されていたであろう。実際、伊藤の発言の約50年前にドイツの鉄血宰相ビスマルクが「国家は血なり、鉄なり」と議会で演説したことはよく知られている。すなわち、18世紀後半の英国に端を発する産業革命以降、鉄によって船を作り、あるいは大砲を作って覇権を築いていくことが国家存亡に関わる大事と認識されていたことがわかる。

さて、ではそれ以前はどうだったのだろうか。鉄の生産量は世界史における重要な指標と思うのだが、調べてみると関連する文献は意外と少ない。まとまったものとしては新井宏氏が歴史書をもとに欧州は古代ローマ以降、中国は前漢以降の一人当たりの錬鉄生産量を推定したものが唯一かと思われる(BOUNDARY、1999年1月号、p.38)。それによると紀元後産業革命に至るまで、中国における鉄の一人当たり生産量はおよそ200～400gで欧州を常に上回っていたという。やはり常に歴史の中で大きな役割を果たしてきた中国は鉄の生産技術でも世界でトップクラスにいたのである。ちなみに日本は江戸時代に至るまで100gを下回り、刀剣を除けば鉄に関して貧しい国だったらしい。

そして産業革命が起きる。現在に比べると情報伝達の遅かったこの時代、いち早くその技術を産業に結び付け、また軍備拡張につなげた英国が再び世界の中心となり、これを仏独が追随した。産業革命の嚆矢から百年後、1870年の粗鋼生産量(カッコ内は世界におけるシェア)は英23万t(33%)、独17万t(24%)、米7万t(10%)であり、黒船を送り込

んだ米国もまだこの頃は英独の後塵を拝する状態であったが、1900年には英479万t(17%)、独664万t(23%)、米1035万t(36%)と形勢が逆転する。1901年、八幡製鉄の火入れをした頃の日本は0.1万tで世界シェアはゼロと言ってよい。伊藤博文が近代化を焦ったのも無理はない。

その後はご存知の通り、粗鋼生産量は二つの大戦をはさんで米国が他国の一桁上をいく圧倒的な強さを誇ったのに続いて1970年代以降の20年は米ソ日が年産1億t前後で拮抗、21世紀に入ると中国が瞬く間にこれを抜き去り、現在では8億tと戦前の米国と似た強さを示している。ただ、戦前と異なるのはインド、韓国、トルコ、ブラジル、メキシコ、ベトナムを始めとして1千万t以上の国が19ヶ国も存在することである。そして、インド(人口比では少ない)や韓国(逆に多い)といった例外を除くと中国も含め概ね生産量は人口に比例していることがわかる。すなわち、情報化が世界に浸透する中で産業革命を契機とする国力格差は人口規模に応じて平準化しつつあり、人口規模を反映するという意味で現在も「鉄は国家なり」と言えそうである。一方で世界の鉄鋼生産に応じた鉄鉱石・石炭の確保は困難になりつつある。

上記の議論を踏まえ敢えて日本鉄鋼業の将来を考えるなら、①人口減少に抗って鉄鋼生産を維持するには最先端の高級鋼を製造し必要な国に輸出すること、②人口に対して鉄鋼生産が少なく今後伸びると思われる国に投資して日本に類する高級鋼を製造すること、③石炭を極力使わない革新的な製鉄プロセスを開発すること、などが必要というありきたりの結論が得られる。

鉄鋼業が日本からなくなることはないであろうが、上記①～③の対応に失敗した場合には「生き残った少数の企業により人口に見合った少量の鉄が細々と生産されるが研究開発を遂行する体力はなく、大学で鉄を研究する先生も学生もいなくなって企業はさらに先細りする」ことが想定される。そうならないよう、我々鉄鋼研究者が一層奮起するのは勿論、JRCMには研究開発プロジェクトの企画・立案や産官学連携などこれまで以上のご支援を期待・お願いする次第である。

NEDO エネルギー・環境新技術先導プログラム

「三次元金属積層造形における新合金開発の合金設計シミュレーション技術の研究開発」  
の急冷凝固プロセスにおける各種金属組織とシミュレーション技術等の調査

日鉄住金総研株式会社 調査研究事業部 産業技術部 特別研究主幹  
(一財) 金属系材料研究開発センター 環境・プロセス研究部 主席研究員  
宮前 収

JRCM と日鉄住金総研株式会社 (NSRI) は共同して、標記の調査を実施しましたので、概要を次のとおりご報告いたします。この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務の結果得られたものです。

金属三次元積層造形における急冷凝固で実現が期待される新材料について、計算科学の手法等を文献等で調査するものです。

(1) 金属三次元積層造形のシミュレーションに不可欠な以下の計算科学の研究状況の調査

近年の計算機の発達もあり材料分野でも計算科学による材料設計を目指すデータ駆動型物質材料学であるマテリアルズインフォマティクスの研究が進んできました。量子力学に基づき電子状態のレベルを対象とする第一原理計算、原子や分子の集団運動を扱う分子動力学法 (MD) やモンテカルロシミュレーション (MC)、実用的なバルク材料のレベルを対象とする有限要素法 (FEM) や統計熱力学計算、ミクロとマクロの間でその間を繋ぐメゾスケールを扱う Phase-field 法 (PFM)、セルオートマトン法 (CA) などがあります。

Suzuki らは周期境界条件の不要なクラスターを対象として、原子間相互作用としては 8-4 型の L-J ポテンシャルを用いて TiNi 合金の B2 (bcc 規則相) / L10 (fcc 規則相) マルテンサイト変態の挙動を MD 法で解析し、図 1 に示すようにクラスターサイズ (原子数) の減少によりマルテンサイト変態開始温度 (昇温時  $A_s$ 、降温時  $M_s$ ) と融点 ( $T_m$ ) が降下することが確かめられています。

Koyama and Onodera は、Fe-C 二成分系における多結晶の  $\alpha$  相と  $\gamma$  相の二相組織で、外部磁場にて組織形態に異方性が生じる場合の組織変

化を PFM でモデル化し、この組織に上下方向の引張りを加えた時の応力-歪曲線を、フェーズフィールド微視的弾性論を活用した改良型セカント法に基づき算出しています (図 2)。

金属三次元積層造形の際には急冷凝固プロセスを経ることが多く、類似の凝固プロセスを経る溶接の熱流体解析の研究を調査しました。一例を図 3 に示します。プラズマ気流および表面張力の測定値を用いて、SIMPLE 解法 (圧力方程式にリンクした準陰解法) により溶融池内の対流に関して、プラズマ気流によるドラッグフォース (Drag)、浮力 (Buoyancy)、電磁

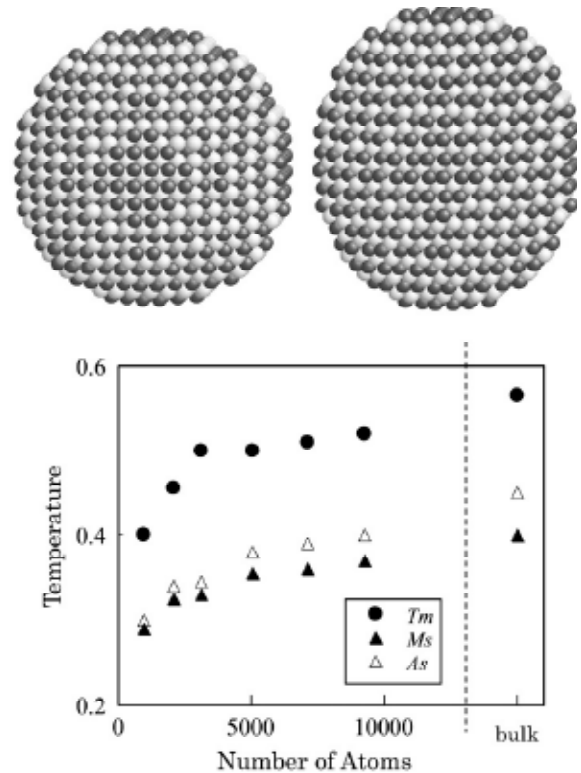


図 1 分子動力学法で計算された Ti-Nb 合金の B2 (bcc 規則相) ナノクラスター (上図) と L10 (fcc 規則相) ナノクラスター (下図) およびクラスターサイズと融点・マルテンサイト開始温度との関係

出典：小野寺、阿部、下野、小山、計算材料科学の進展と展望、鉄と鋼 Vol.100(2014)No.10

気力 (Electromagnetic)、表面張力による対流 (Marangoni) の4つの駆動力について、個別に数値計算が行われています。マランゴニー対流および電磁気力が対流を変化させる支配的因子となることがわかります。

## (2) 金属三次元積層造形で実現が期待される新材料の金属組織等に関する調査

金属三次元積層造形は急冷凝固プロセスであり、バルク金属ガラスを作製しやすい傾向にあると予想されます。バルク金属ガラスは、様々な多元系合金で研究がなされ、物理的、化学的、機械的、磁氣的、光学的などの様々な機能特性があることが見出されている。応用分野として、構造材料、精密機械材料、センサー材料、ばね

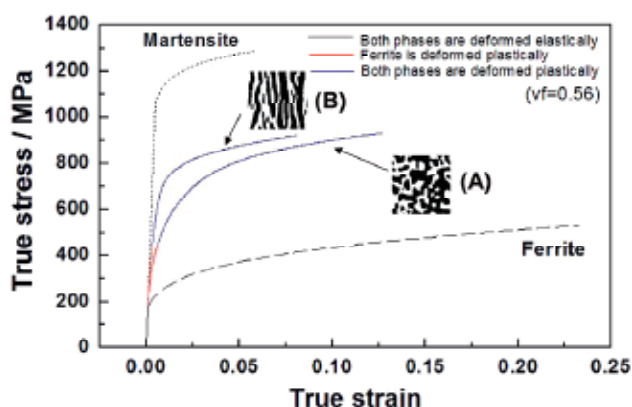
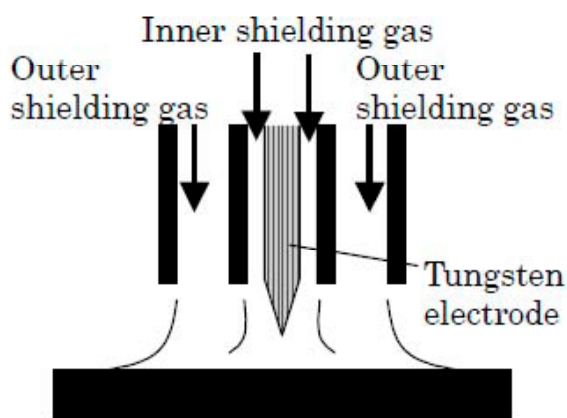


図2 フェーズフィールド微視的弾性論を活用した改良型セカント法により算出した二相微細組織のモルフォロジーに基づくSSカーブ

出典：小野寺、阿部、下野、小山、計算材料科学の進展と展望、鉄と鋼 Vol.100(2014)No.10



材料、スポーツ用具材料、耐磨耗材料、耐食材料、磁性材料、マイクロ・ナノテクノロジー材料、情報記録材料、生体・医療機器材料、燃料電池セパレータ材料などが期待されています。

また、ハイエントロピー合金は、多元系合金であることはバルク金属ガラスと共通ですが、等原子分率またはそれに近い原子分率で表現される合金組成であり、かつ、多元系でありながら固溶体の結晶相である性質を有する点でバルク金属ガラスと異なります。ここではハイエントロピー合金の計算科学に関する調査結果を示します。「竹内、高エントロピー合金、バルク金属ガラスおよび高エントロピーバルク金属ガラスの合金設計、金属学会誌 Vo79.No.4(2014)」に詳しいので主にこの文献から引用しています。

混合熱の評価の際に用いる  $\Delta H_{mix}$  は、Miedema の手法に準拠しており、半経験的要素に基づく不正確さを認めれば、きわめて汎用性が高い特長を生かすことが可能となります。さらに、Miedema の手法で算出可能な熱力学量としては、 $\Delta H_{mix}$  の他に、構造エンタルピー ( $\Delta H_{struct}$ ) も提唱されており、遷移金属に対して fcc、bcc、

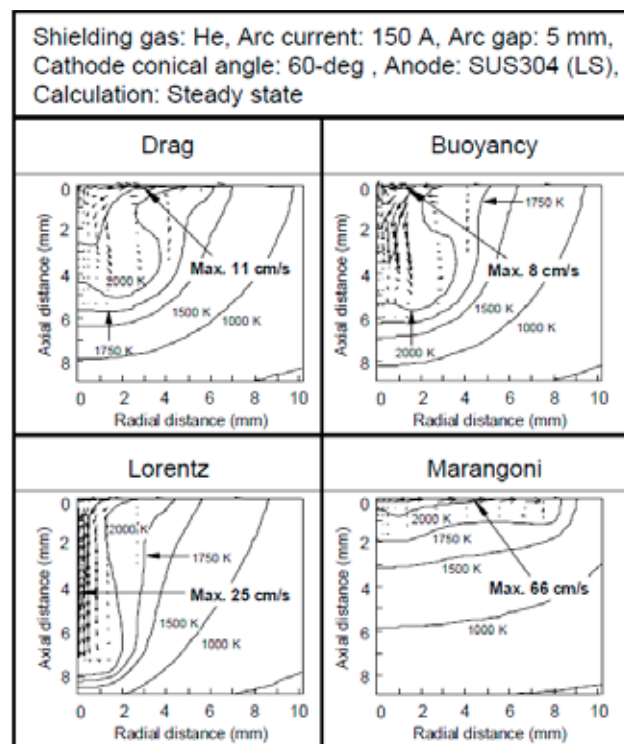


図3 (左) He ガスシールドガスを用いた二重シールドガストーチ TIG 溶接のモデル

(右) He ガスシールドガスを用いた二重シールドガストーチ TIG 溶接の4つの対流の速度の計算値

出典：新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 平成19年度 産業技術研究助成事業研究成果報告書 (最終)「対流制御による革新的高効率 TIG 溶接法の開発」

hcp 構造を定義できる点において、ハイエントロピー合金への適用に道を開いています。

しかしながら、Miedema の手法による  $\Delta H_{\text{struct}}$  は、周期律表の族に対応する価電子 (Z) の関数で与えられているものの、3d、4d および 5d 周期に対しては縮退しており、実用性に欠けるのが実情です。致命的な問題として、Fe の強磁性による bcc 構造の安定性を取り扱うことができないなどの欠点を有します。これらの欠点を克服するため、 $\Delta H_{\text{struct}}$  を 3d、4d および 5d の遷移金属ごとに計算する方法が Zhao らにより報告されています。さらに、Wang らは CALPHAD 法による格子安定性を第一原理計算で求めると

ともに、SGTE(ScientificGroupThermodataEurope) データとの比較を行っています。これらのアプローチにより、周期律表の元素に対応した fcc、bcc、hcp 構造の安定性が判明すれば、今後、ハイエントロピー合金の開発が強力に支援されるものと考えられます。

Takeuchi らが行っている試みの例を図 4 に示します。手法としては、Wang らが示した SGTE データを基に、fcc、bcc および hcp の構造別の  $\Delta H_{\text{struct}}$  を元素ごとに計算して、周期律表を底面とする垂直縦軸にプロットされた後、関数近似で各元素間の  $\Delta H_{\text{struct}}$  値を補間して図 4 が作成されています。

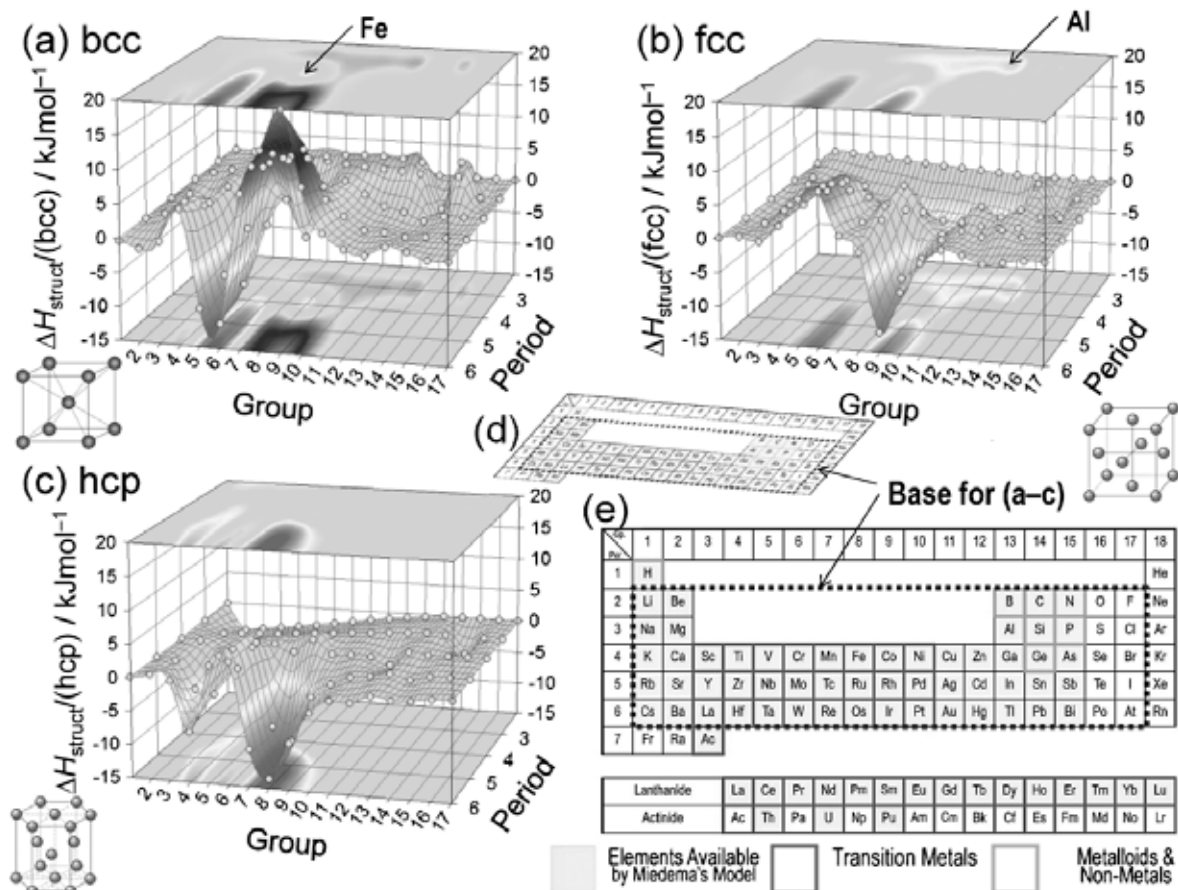


図 4 fcc、bcc および hcp の構造別の  $\Delta H_{\text{struct}}$  を元素ごとに計算し、周期律表を底面とする垂直縦軸にプロットし関数近似したもの

出典：竹内、高エントロピー合金、バルク金属ガラスおよび高エントロピーバルク金属ガラスの合金設計、金属学会誌 Vo79.No.4(2014)

The Japan Research and Development Center for Metals  
JRCM NEWS / 第 383 号

内容に関するご意見、ご質問は JRCM 総務企画部までお寄せください。  
本書の内容を無断で複写・複製・転載することを禁じます。

発行 2018年9月1日

発行人 小紫 正樹

発行所 一般財団法人 金属系材料研究開発センター

〒105-0003 東京都港区西新橋一丁目5番11号 第11 東洋海事ビル6階

T E L (03)3592-1282 (代) / FAX (03)3592-1285

ホームページ URL <http://www.jrcm.or.jp/>

E-mail [jrcm@oak.ocn.ne.jp](mailto:jrcm@oak.ocn.ne.jp)