

## 鉄鋼副産物が地球温暖化を防ぐ



JFE ミネラル株式会社  
代表取締役専務 林 明夫

最近マスコミで、スラグと腐植土の混合物から溶出する腐植酸鉄が、磯やけ対策に有効なことが、取り上げられている。新日鉄が大学等と共同で進めている研究開発で、海中に溶け出した2価の鉄イオンがコンブの復活に大きな効果があると紹介されている。また、JFE スチールが協力している石垣島でのサンゴ再生についても、スラグから作られた土台の上で育てられたサンゴが3年で15cm以上に成長したことが報道され、海洋生物とスラグの相性の良さが、幅広く認知されつつある。

このようにスラグの海洋利用への関心が高まる中、9月に大阪で「鉄鋼スラグの海域利用に関する研究開発」の成果発表が行われた。この研究開発は、日本鉄鋼連盟と鉄鋼メーカー等が平成16年～19年の4年間に亘り、経済産業省から9億円の補助金を受け、大学、港湾空港技術研究所、水産総合研究センター、産業技術総合研究所、国・自治体、漁連等の協力をもとに進めたものである。

主な成果を紹介すると、浚渫土と製鋼スラグを混合することで、化学的には、①軟弱浚渫土の強度が改善される②浚渫土から水中に溶出するリンや硫化物の濃度が下がる③pHが9以下に低下し、

海水が白濁しない等の効果が発表された。更に、魚貝藻等の生物への影響については、①毒性のないこと②藻類の生育が、スラグパネルではコンクリートパネルに比べ2～3倍速かったことが発表された。

また、10月には、日本水産工学会秋季シンポジウムで国土交通省中部地方整備局が三河湾で行った「スラグと浚渫土混合による浅場造成実証実験」の途中経過が発表されるなど、スラグと浚渫土の相互作用により、新たな海洋修復材が生み出されようとしている。

ところで、最近話題になっている本に「鉄が地球温暖化を防ぐ(畠山重篤著)」がある。海中に2価鉄を溶かすことで、プランクトンの生育を促進し、光合成増加によりCO<sub>2</sub>の海中への吸収を進めるという話である。10月の新聞紙上でも、「プランクトン増へ『海へ鉄粉』」という見出しで、2001年の北太平洋実験で350kgの鉄散布により570トンのCO<sub>2</sub>が吸収されたことが伝えられている。

経済産業省、国土交通省のプロジェクトでは、スラグの海洋土木材料としての効果に焦点が当てられていたが、最近の報道では、海洋生物の増殖効果、更にはそれによるCO<sub>2</sub>吸収という「海の植林」事業の可能性が示唆されている。

製鋼スラグには、20%弱の金属鉄や酸化鉄が含まれている。2価の鉄イオンが徐々に海中に溶け出し、藻類の成長に寄与していく製鋼スラグは、『海肥』といえるものである。

『スラグが地球温暖化を防ぐ』といわれる日も間近ではなかろうか。モデル事業の実施に向け、大学、独立法人、産業界、国・自治体による、速やかな農水工連携の取組みが求められている。

**NEDO「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」**  
 における先端的制御鍛造技術開発サブグループの活動  
 大同特殊鋼(株) 五十川幸宏 (先端的制御鍛造技術開発サブグループリーダー)

**1. 鍛造部材における高強度化ニーズ**

日本における鍛工品の生産量は、平成19年度265万トン、生産金額は6338億円を記録している。そのうち鉄系熱間型鍛造は201万8千トン、前年度比3.4%増加している。熱間・冷間を併せたアルミ系鍛造品は4万6千トン、前年度比2.5%増加している。

鉄鋼材料の高機能化や長寿命化については、日本が最先端の技術を維持し、世界を牽引してきた。国内における輸送機器分野等での軽量化による高効率化、省エネルギー化、安全・安心等にむけた鋼材に対する社会的ニーズは益々強くなっている。

自動車を始めとする、輸送用機器等の軽量化として、アルミ合金等がかなり採用されつつあるが、自動車の大型、高出力、あるいは小型化による部品への負担増から、鋼材での一層の高強度化が望まれている。アンケート調査によると、高強度化の対象としては、自動車のエンジン周り部品、歯車等のミッション部品、軸受け、バネ等における疲労寿命向上への要求が強い。高強度化の目標レベルとしては、既存レベルの20~30%向上が強く要望されている。ただし、高強度化と相反する特性劣化が生じることの無いように、特に切削性は現状のままが前提である。

図1は、鉄鋼材料の高強度化に関する研究開発状況を示したもの

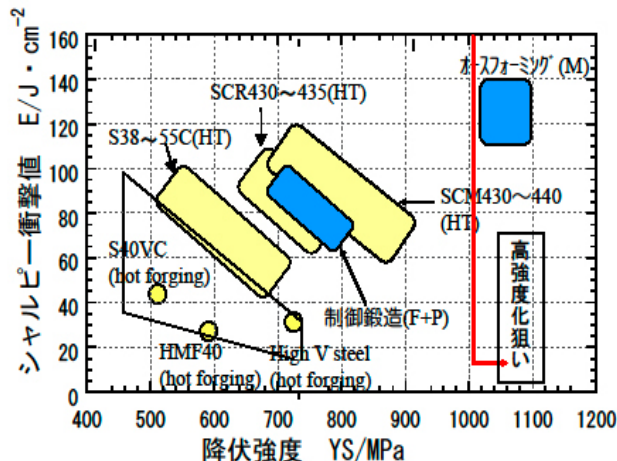


図1 高強度化の現状 (降伏強度と衝撃値の関係)

であり、鍛造部品で800MPaの降伏応力を達成している。しかし、今後、部品の必要な箇所には1000MPa以上の強度を付与し、他の箇所には、900MPa以下の相応しい特性を付与することにより、切削性の低下、コスト上昇を招くことなく部品の小型化、軽量化が可能と考えられる。

ような技術は見あたらない。

図2に、先端的制御鍛造技術開発における、官・学による高強度化の指導原理とバーチャルラボのモジュール開発などの基盤研究成果を企業の実用化技術開発に結びつけるための技術マップを示す。鍛造部材の軽量化と加工性(成形加工性と切削性)を両立させるために、合

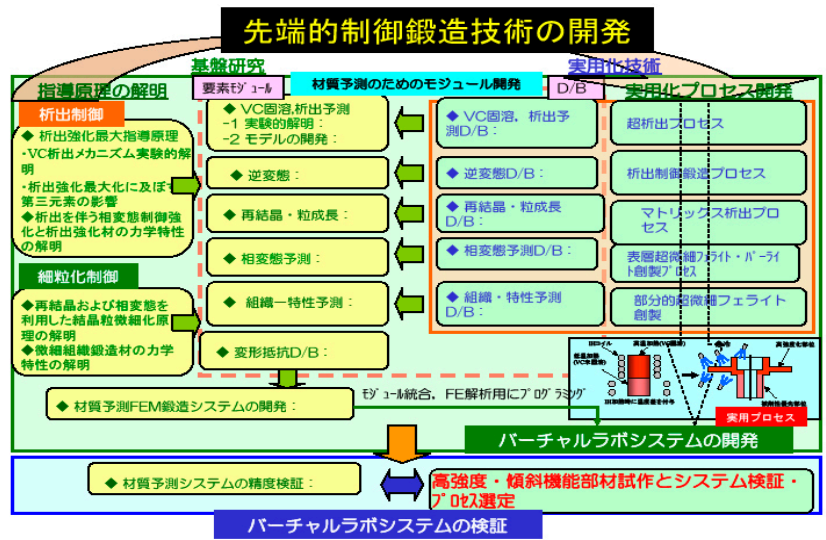


図2 制御鍛造技術開発のための技術マップ

**2. 先端的制御鍛造技術の考え方**

自動車用特殊鋼部材は、部材の高強度化の余地は大きい、被削性などの低下が高強度化に対する課題である。

鉄鋼材料の組織を制御して強度分布を出す有望な手法の一つとして、析出制御が考えられるが、フェライト+パーライト(F+P)組織で1000MPaを超える強度を達成するためには、新たな析出制御指導原理が求められている。他の方法として、結晶粒の微細化が考えられるが、熱間鍛造の工程において細粒化を図り1000MPaを超える高強度を付与する

金設計の最適化と加工熱処理プロセスの最適化を行い、同一部品内において高強度部と軟質部を部位ごとに作り分ける傾斜機能(表面強化、局部強化、部分強化)付与技術を確立して、鍛造部材の軽量化と加工性の両立を図る。

また、部材の特定部位を高強度化するためには、数工程にわたる鍛造成形加工工程の狙った強化部位の温度、ひずみ、ひずみ速度、冷却速度などを適切に制御する必要がある。そこで、素材から最終製品にいたる加工パラメータの変化を正確に予測可能なFEMベースのバーチャルラボシステム(VLS)を構築し、部材の強度予測を行う。

**3. 高強度化・傾斜機能付与のための基本原理**

本研究開発では鍛造における鋼の析出制御メタラジーと細粒化メタラジーを基礎的に解明し、現実的か

つ効率的な鍛造部品の析出制御と細粒化の指導原理を確立する。

### 3.1 析出強化最大化方案及び強度制御可能な指導原理の提示

低炭素の析出強化鋼の析出挙動については既に多くの研究がなされているが、中炭素鋼で析出物形成元素を大量に添加した鋼の析出挙動については十分な研究がなされていない。析出強化最大化によりF+P組織で1000MPa級の高強度化を実現するには相界面析出を含む中炭素鋼で析出メカニズムを明確にし、定量的にその挙動を把握することが必要不可欠である。

図3は、S45C鋼に、Vを0.3mass%添加した材料を973Kおよび923Kで恒温変態させた初析フェライト( $\alpha$ )中のVC相界面析出組織のTEM写真(文献1)を示す。

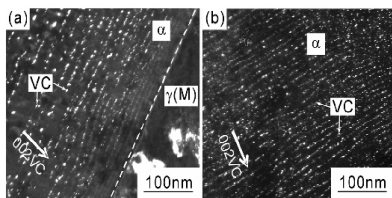


図3 (a)973Kで120秒保持, (b)923Kで60秒保持により変態させた0.3%V添加鋼の初析 $\alpha$ 中に析出したVCの暗視野像, a: フェライト,  $\gamma$  (M): オーステナイトから変態したマルテンサイト

変態の低温化によりVCのシート間隔および粒子径は小さくなり、硬さも上昇している。組織観察による $\alpha$ 中のVC析出形態および析出量の定量評価も可能となっている。中炭素鋼ではパーライト(P)組織の占める割合が大きいことから、P中でのVC析出強化の寄与も大きいと考えられる。そこで共析炭素鋼に、Vを微量添加した合金を作製し、種々の熱処理条件での硬度およびVC分布を調べ、効果的な析出強化のための熱処理温度の解明を進めている。

### 3.2 逆変態・動的再結晶・動的変態による細粒化指導原理の確立

中炭素鋼においても $\alpha$ 組織の細粒化が実現できれば、析出強化を重畳させる前のベース強度向上という点で極めて望ましい。鍛造品では薄板のような多段の加工を採用せずに大圧下により超細粒化を図る必要があり、細粒化のメカニズムを明らかにした上で、鋼組成、析出分散相の組み合わせなどにより細粒化を達成できる加工熱処理の指導原

理を確立する。

最終の $\alpha$ 組織を細粒化するためには、まずオーステナイト( $\gamma$ )結晶粒を微細化することが必要である。本研究項目では、一旦 $\alpha$ を組織とする低温相に相変態した材料が、復熱あるいは加工発熱によって $\gamma$ への逆変態による $\gamma$ 細粒化に関する研究を進めている。これまでに中炭素マルテンサイト鋼にひずみ1程度の温間加工を加えることにより、平均粒径1 $\mu$ m以下のほぼ等軸晶の超微細組織と数十～数百nmの微細な球状炭化物との混合組織(文献2)が得られている。

### 3.3 熱間・温間鍛造組織形成と力学的特性の関係検討

本研究では、動的再結晶・相変態を利用する微細化プロセスを対象とし、(1)逆変態を利用した微細 $\gamma$ から微細(F+P)組織を得て高強度化を狙う逆変態加工急冷プロセス、および(2)局部急冷により得られたマルテンサイトもしくはベイナイトの温間鍛造により微細 $\alpha$ を得る温間鍛造微細化プロセスを用いて広範囲な組織を作り分け、機械的性質に及ぼす $\alpha$ 分率、 $\alpha$ 粒径、Pのラメラ間隔、セメンタイト体積率の影響、およびVC析出の影響を明らかにする。

図4は、炭素Cを0.45、0.60、0.75mass%とした鋼を、温間溝圧延にて90%以上の加工ひずみを与え、その後熱処理にて微細フェライ

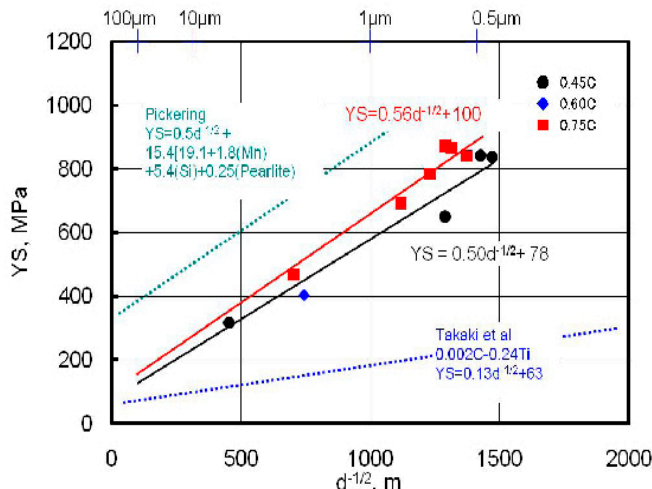


図4 炭素量が0.45～0.75mass%範囲での炭素鋼のフェライト粒径と降伏強度の関係

ト+セメンタイト(F+C)組織を創製し、 $\alpha$ 結晶粒と降伏応力の関係を調査した結果(文献3)である。その他、応力-ひずみ曲線からは、(F+C)鋼に比べて(F+P)鋼の降伏比が圧倒的に小さい事がわかっている。

### 3.4 高強度化・傾斜機能付与のための合金設計・プロセス開発

本研究開発では、鍛造部材の軽量化と加工性(切削性)を両立させるために、合金成分の最適化と加工熱処理プロセスの最適化を行う。

ここでは、3.1、3.2で得られた知見をもとに、中型部材を想定したプロトタイプで、高強度部の0.2%耐力が1000MPa以上、軟質部の0.2%耐力が800MPa以下を達成するための合金設計・プロセス技術の例を紹介する。図5は、VC相界面析出を最大活用することで0.2%耐力1000MPaを達成できる成分、プロセスを見出すための実験結果で

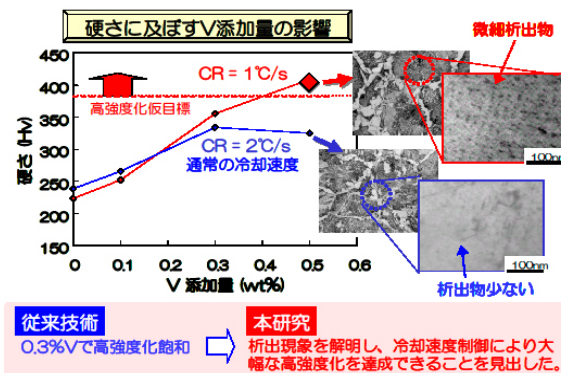


図5 中炭素鋼の冷却制御による高強度化

ある。従来は、VCによる析出強化量は0.3～0.4%V以上では飽和するため、それ以上の析出強化は不可能と考えられていたが、析出強化

現象の解明により高強度化の目標値硬度HV400以上を達成できることを示している。

その他、実用化研究のために500トン油圧制御プレスを導入してめがねコンロッド等のプロトタイプ試作の準備を進めている。

#### 4. 組織・特性分布を予測する鍛造プロセスのバーチャルラボシステム基盤技術の開発

制御鍛造では、加熱温度、加工温度、ひずみ、冷却速度などを制御して、目標とする強度分布を得る必要がある。本研究では、目標とする部品の強度分布を得るための最適工程設計を可能とするシミュレーションシステム基盤技術の開発を行う。これにより、さまざまな鍛造部品に対して、目標とする強度分布を得るための工程設計を簡便に行うことが可能となる。

シミュレーションシステムの構築に際し、基本プログラムは市販の汎用有限要素法プログラムとし、本研究にて新たに開発する6つの基本モジュール、(1)VC固溶・析出モジュール、(2)逆変態モジュール、(3)再結晶・粒成長モジュール、(4)相変態モジュール、(5)組織-特性予測モジュール、(6)変形抵抗モジュールのユーザサブルーチンを介して使用可能とする。使用材料はベース材としての中炭素鋼と実用合金として降伏強度が1000MPaを超える材料とするが、本モジュールは、熱力学ベースで開発されているの

でデータベース構築時の負荷軽減が期待される。

また、具体的な鍛造工程設計に際しては、工具-素材間の摩擦係数や熱伝達係数などが実鍛造条件にあわせて同定され、鍛造製品の結晶粒度、強度などを正確に予測可能とする。

図6は、組織と特性予測D/Bを構築するための前方押し試験プロセスを、開発中のVLSにてシミュレーションした結果である。VC固溶・析出モジュールの適用は初めての試みであり、本VLSの成果は、各種実験の事前検証にも使用できるため、早期の開発が期待される。

#### 5. 終わりに

現在プロジェクトは一年半を経過し、順調に当初の計画を確認、検証しつつある。特に革新的制御鍛造技術の研究開発の成

否をにぎるF+P組織で1000MPaを超える高強度化に対するプロセスの開発に目処がついたことは、今後の実用化研究およびバーチャルラボの開発に弾みとなる。

#### 参考文献

- (1) 堀亮太、B.Poorganji、宮本吾郎、古原忠：CAMP-ISIJ Vol.21(2008)-1367
- (2) 長谷和邦、岩本隆、辻伸泰：CAMP-ISIJ Vol.21(2008)-1365
- (3) 花村年裕、鳥塚史郎：CAMP-ISIJ Vol.21(2008)-1362

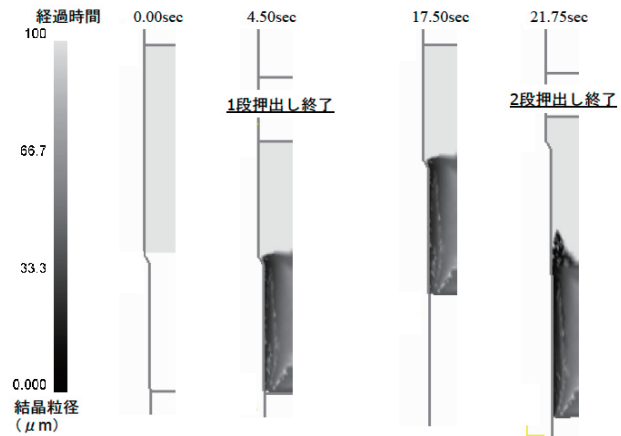


図6 バーチャルラボによる前方押し試験時の動的再結晶粒径の予測例

## 活動報告

### ■総務企画部産学官連携グループ 第2回事業委員会報告

平成20年9月30日に長岡の(株)ナノテムにおいて「超大型・軽量多孔質セラミックス定盤開発プロジェクト」の委員会が開催され、目標であったG6サイズ(1900×1550mm)の超大型セラミックスの焼成に成功したという報告がなされた。研磨加工を施したセラミックス定盤ができたことを現場で確認した。

### 【人事異動】

○平成20年10月1日付  
 深川 信  
 [旧] 住友金属工業株式会社  
 [新] 鉄鋼材料研究部 主任研究員  
 [新人紹介]  
 ①出生地②生年月日③最終学歴④職歴⑤仕事に対する期待⑥趣味、特技、資格等

深川 信 (ふかがわ しん)



- ①福井県敦賀市
- ②1952年生まれ
- ③東京大学大学院工学系金属工学専攻修士課程
- ④1977年住友金属工業(株)入社、

和歌山製鉄所勤務。以降総合技術研究所と和歌山製鉄所にて、上工程主に製鋼精錬に関する研究開発と現場技術開発を担当。2003年より本社製鋼技術室にて全社製鋼技術開発の企画・行政を担当。  
 ⑤「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」の高温クリープと内部起点疲労破壊関係、並びに「水素用材料基礎物性の研究」「低コスト型70MPa級水素ガス充填対応ステーション機器に係る研究開発」「産学人材育成パートナーシッププロジェクト」の一部を担当。  
 ⑥テニス。他に旅行と絵画鑑賞。Ph.D.(スウェーデン王立工科大学)

### ●お知らせ

【分科会シンポジウム】  
 [鉄鋼材料における元素機能]  
 原料としての資源問題や、特性制御に用いる添加元素、プロセス・環境から入り込む元素などの個々の機能・影響を解明するという観点から、鉄鋼材料における課題を提起・整理し、今後の研究開発の方向を探ります。  
 日時 2008年12月8日(月)  
 9:30～17:00  
 場所 科学技術館 第1会議室  
 (東京都千代田区北の丸公園2-1、地下鉄「竹橋」あるいは「九段下」)  
 問合先 〒980-8544  
 仙台市青葉区一番町1-14-32  
 フライハイトビル2階  
 (社)日本金属学会 シンポジウム参加係  
 E-mail: meeting@jim.or.jp  
 TEL: 022-223-3685  
 FAX: 022-223-6312

The Japan Research and Development Center for Metals 発行 2008年11月1日  
 JRCM NEWS / 第265号 発行人 小紫正樹  
 発行所 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 東洋海産ビル6階  
 TEL (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

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。  
 本誌は地球環境保全を考慮し再生紙を使用しています。  
 本書の内容を無断で複写・複製・転載することを禁じます。