

TODAY

材料科学・素材産業でのもう一つのグローバル化



学校法人 立命館
副総長 村上正紀

20世紀が終わりに近づく頃から、わが国では、「グローバル化」が日常些事に用いられ、今では、「つるつる言葉」（使われ過ぎ、擦り切れた言葉）と化している。しかし、材料科学・素材産業でのグローバル化とは「何か」を真剣に考える時期である。素材産業では、原料・燃料の輸入国の拡大、市場の海外展開でのグローバル化がグローバル化として一般に用いられているが、もう一つ違った観点でのグローバル化が日本の素材産業の生き残り・活性化に必要と思われる。

ここ20年近く、アジア諸国を始めとした開発途上国の人口増加と生活水準の向上は顕著であり、エネルギーのみならず、あらゆる物資の消費が、年々、増加し、今世紀の終焉には、地球上の資源の枯渇が懸念されてきている。特に、地下資源を殆ど有しない日本が、21世紀でも、ものづくり大国として世界に君臨するためには、ものづくりの基盤となる高品質の新素材の開発が不可欠である。新素材開発には、もはや希少元素を用いる事は出来ない。希少元素不在での素材開発は容易ではない。「探求心旺盛な人材」の出番であるが、日本人は一般的には、挑戦には不得意な国民と言われている。「遺伝子的に日本人とは？」を考えてみる。

人間の気質（新奇性の探求、危険回避、報酬依存、粘り強さ）は、Cloningerのモデルによると、「アドレナリン」「セロトニン」「ドーパミン」といった神経伝達物質の活性の高低によって決定される。即ち、人間は生まれながらにして、人間の気質、個性、行動、価値観、生き方が遺伝子的にほぼ決定されるとのことである。希少元素不在の

新素材開発に不可欠な人材は、「新奇性の探求心旺盛な人材」であるが、このような探究心の高揚には「ドーパミン」が、脳にある「受容体」と呼ばれる部分に結合しなければならないが、高木美也子（日本大学教授）の研究で、ドーパミンが結合する受容体に長さの違う三つのタイプ（長、中間、短）があり、民族により異なる事が解明された。南北アメリカ大陸に住む民族は、長いのが約50%、東アジア、南アジアに住む民族は、長いのがたった2%、日本人では、長いのが殆んど皆無でほぼ全員が中間であるとの調査結果である。

長い受容体を保有する南北アメリカ大陸に住む民族は、刺激を求める衝動が強く、十分な情報が無くても、決断してしまう大胆な気質であり、結果的に、新奇な事に挑戦する可能性が大きい。一方、短い受容体を保有する日本人を始めとするアジア人は、長時間、集中し、自分で起業するよりは、既存の生活に満足し、現状に満足し、挑戦の可能性が小さいかも知れない。

昨年、文部科学省でも、国際化拠点整備事業（グローバル30）を発足させた。主な目的は、選ばれた30の大学で、多くの留学生の受け入れ体制の整備を支援して、留学生と切磋琢磨する環境の中で国際的に活躍できる高度な人材を養成する事である。限られた財政支援での体制整備は大変である。本学だけでも2020年には、4,000名の留学生の受け入れ体制の整備を始めている。

しかし、この「グローバル30」事業が、「大変」で終わらせるのではなく、米国のような多様な人種（即ち、新奇性追求遺伝子ドーパミンが結合する受容体に長さの違う留学生）を受け入れ、素材産業だけでなく新しい産業で国家を支えるきっかけにすべきである。日本企業がグローバル化に必要な人材像を各業種が明確にして、産業界が積極的この事業を支援すれば、日本産業の活性化に寄与すると思う。日本の素材産業では、新奇性追求遺伝子の受容体の長い民族が研究開発に携わってくれるようなメカニズムを作ることが、もう一つのグローバル化ではないか？

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の開発サブグループの活動 (2)
 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. はじめに

自動車などの軽量化・燃費改善のための鍛造部品の更なる高強度化が求められている。本研究開発では、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、VC析出強化をベースにした化学成分の最適化(合金設計)と加工熱処理条件の最適化(プロセス開発)を行い、図1に示す部品例のように、同一部材内において高強度部(降伏強度 1000MPa 以上)と軟質部(降伏強度 900MPa 以下)を部位ごとに作り分ける傾斜機能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、

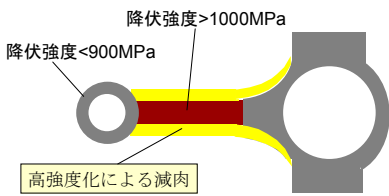


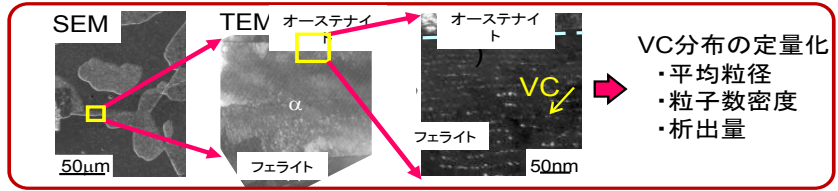
図1 傾斜機能付与部品例

部材の特定部位を造り分けるためには、多数工程にわたる鍛造加工工程において、狙いとする強化部位の温度、ひずみ、ひずみ速度、冷却速度などの加工パラメータの変化と組織を予測可能なFEMベースのバーチャルラボシステムを構築し、部材の強度予測を行う。今回は、制御鍛造サブグループにおける本プロジェクトの研究の狙い(JRCM NEWS No.265 参照)に対して、その後の約3年間の進捗とその成果の一部を紹介する。

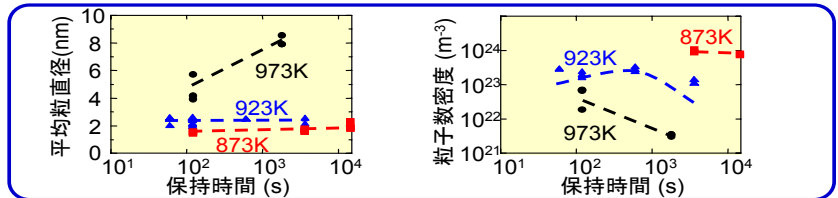
2. VC析出制御による高強度化

2.1 VC相界面析出の定量化技術の確立と強化量最大化原理の解明

VCの相界面析出挙動の解明には中炭素鋼S45Cを基本組成として0.1%、0.3%、0.5wt% Vを添加した合金を用い、添加した全V量が完全固溶する温度においてそれぞれの試料をオーステナイト化した後、723~973Kで等温変態させた。



(a) 相界面析出VCの定量化技術の確立



(b) V添加中炭素鋼での相界面析出VCの定量化

図2 VC相界面析出の定量化と強化量最大化原理

図2(a)に示すように、973Kでの変態途中で焼き入れたV添加鋼のSEM/EBSD/FIBおよびTEM観察を複合的に組み合わせた組織解析手法を確立し、VC粒子の数密度、粒径分布およびVCの体積率を定量的に評価することができる。図2(b)に873、923および973K変態材でのVC粒子の(a)平均粒径、(b)粒子数密度を示す。変態温度が低下するほどVC粒子サイズが減少し、数密度が著しく増加する傾向がみられる。変態直後とその後の保持に伴う硬度変化との比較により、微細なVCを高密度で析出させることで硬度上昇量が最大化し、V添加量の増加により同一熱処理条件においてもVC析出の粒子密度が高くなることを確認され、降伏強度1000MPaを越える高強度化のための最適な保持温度と時間が明らかにされた。

2.2 相変態制御による析出強化量最大化

V添加S45C材をオーステナイト域まで加熱後、50%圧縮加工し、所定の温度まで制御冷却した後、等温変態させた材料のビッカース硬さを図3に示す。S45Cの無加工材の高温での強度の低下は、50HV程度であり、0.3wt% V添加による析出強化量約200HVと比較すると小さ

く、V添加鋼の強度確保には析出強化による制御が効率的であることを示している。V添加鋼の無加工材では高温保持で明らかに析出強化量が減少しているが、加工付与により変態が促進されることで保持時間を短縮することが可能となり結果としてVC析出物の粗大化が抑制されたためであると考えられる。

3. 高強度化・傾斜機能付与のための合金設計・プロセス開発

3.1 大型・中型・小型部品における高強度化・傾斜機能化の考え方

VCの相界面析出による強化機構の活用ルートとして、(1)大型部品想定として、低温での加工(+保持)を加える強化・軟化ルート、(2)中型部品想定として、加熱温度差を利用した強化・軟化ルート、(3)小型部品想定として、低温保持による強化・軟化ルート、の3ルートの

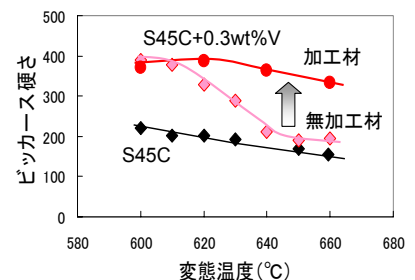


図3 加工後の相変態制御による析出強化

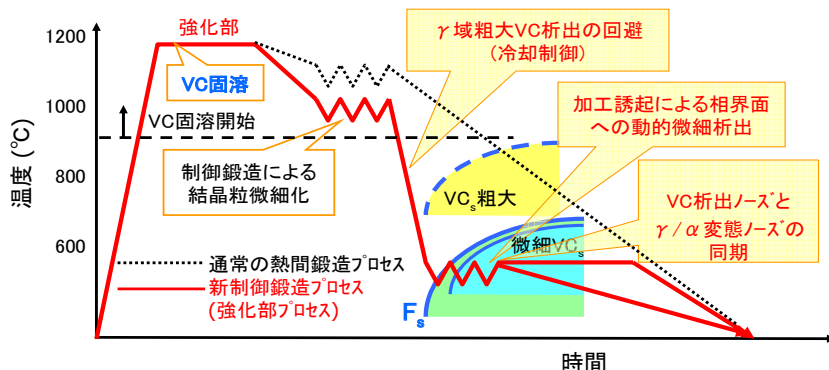


図4 大型部品想定の開発プロセスイメージ

強化機構の開発を行い、実験室規模では、それぞれの想定部品に対する降伏強度が1000MPaを越える高強度化と900MPa以下の軟質部を得ている。

(1)のルートの研究では、図4に示す強化したい部位のみを低温で加工付与することにより、VC析出の核を多量に作り、その結果変態が促進され、同時に生じる相界面に超微細なVCを析出させて強化することを狙いとする。大型部品の傾斜機能化の方法として、軟質部は、高温にて成形後徐冷を行い、高温で変態させることで、粗大なVCを析出させ、析出強化量を抑えて強度上昇を抑制し、機械加工性を確保する。

鍛造用非調質鋼として用いられるS40VCのV添加量を0.45wt%とした材料を用いて、図4に従うプロセスを模擬した横打ち圧縮試験を行い、引張試験で得られた降伏強度を図5に示す。当初の予定通り中間目標値を達成しており、VC析出による高強度化のメタラジ的解析を進めている。

(2)、(3)のプロセスでは、加熱温度差付与技術により同一部材での高強度化部位と軟質部を作り分けることに特徴がある。(2)では、V添加量が0.15wt%を超えると強化の程度が飽和するという課題に対して、VCの析出温度と変態を同期

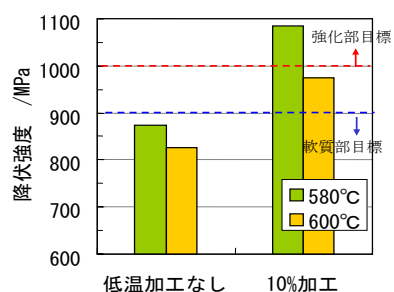


図5 開発プロセスにおける降伏強度

させるような冷却条件を見出すことにより、V添加量に比例したVCの相界面析出を最大化させ、降伏強度が1000MPaを越える高強度化レベルを達成している。(3)のプロセスでは、中炭素鋼の主要な組織であるパーライトのラメラ間隔を狭めることによる強化とラメラ間隔中のフェライトへのVC相界面析出強化法により、1000MPaを大幅に越える降伏強度を達成している。

3.2 プロトタイプの試作研究

これまでに開発した3つの高強度化プロセスを実用化するための研究として、それぞれの加工ルートについてプロトタイプ部品を試作研究する、実プロセスに近い条件での性能評価を進めている。プロトタイプ試作に先立ち、加工条件に適した鍛造プレス、素材ビレットの高周波加熱装置、加工前後の制御冷却装置を導入済みであり、平成22年度以降の実用化研究の準備は整っている。

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構築

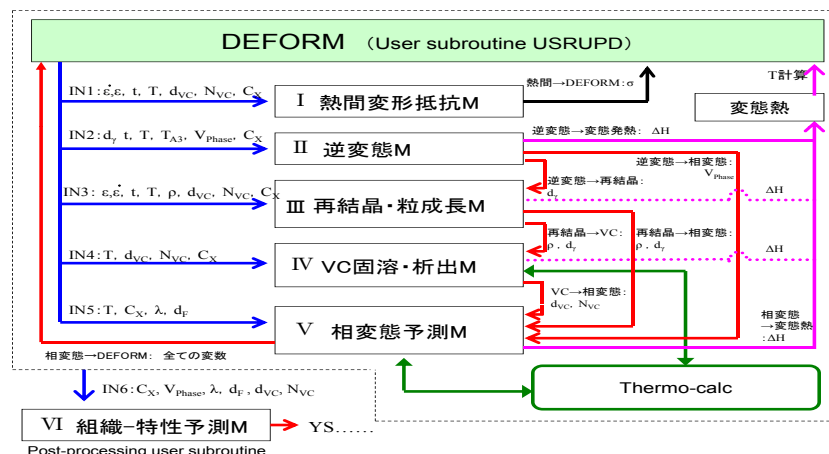


図6 バーチャルラボシステムの構成

本研究では再結晶・粒成長、VC固溶・析出、相変態といった冶金現象を予測可能な各モジュールを開発し、それらのモジュールを有機的に連携させることで、V添加中炭素鋼を鍛造する場合のビレットの初期加熱時から鍛造部品の組織、強度分布を一貫してシミュレーション出来るシステムを構築する。

4.1 精査予測モジュール

図6は、市販のプログラムをベースに冶金現象の影響を盛り込んだ各種モジュールをサブルーチンとして取り込み計算をする全体のシステムを示す。各モジュールでは、組織変化を支配する各種熱力学ならびに冶金学的支配方程式をすべて満たす解を理論的に厳密に求められる。

4.1.1 VC固溶・析出予測モジュール

本モジュールは(1)析出物溶解モデル、(2)オーステナイト域析出モデル、(3)フェライト・パーライト変態時相界面析出モデル、(4)フェライト域析出モデル、の4モデルから構成される。中炭素鋼でのVC析出モジュールは、①析出現象の物理に基づいたモデルであること、②析出強化量の評価に必要な析出量、密度、サイズが出力できること、③析出サイト(γ粒界/粒内、初析フェライト中/パーライト中)ごとの析出挙動の違いを考慮できること、④加熱冷却時の連続的な温度変化の中での析出を取り扱えることが必要である。このような条件を満たすモデルとして、バルク材での析出現象を扱う際に利用されるNモデルをベースとして開発を行った。

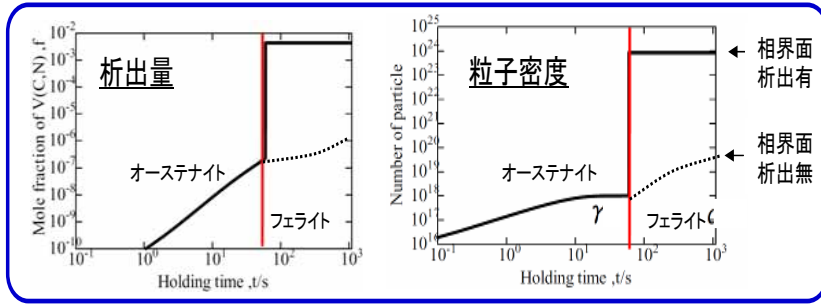


図7 フェライト中VC析出量の計算結果 (600°Cでの計算結果)

図7はフェライト変態を考慮した条件でS45C+0.3wt%V鋼の873K等温保持中のVC分布を計算した結果である。オーステナイトおよびフェライト中でのVC析出のみを考慮した場合(図中破線)では、フェライト変態後も連続的に析出量およびサイズが増加しているが、フェライト変態時の相界面析出を考慮すると(図中実線)フェライト生成に伴う不連続なVC分布の変化を扱うことが可能である。

4.1.2 相変態予測モジュール

フェライトの核生成は均一核生成を仮定し、成長はパラボリックレートコンスタントから計算し、粒径は核生成数とフェライト体積率から算出し、フェライト成長速度はThermo-calcを用いた熱力学計算で平衡濃度を計算した。フェライト核生成速度は等温変態実験で得られたフェライト変態時間から算出し、加工付与によるオーステナイト粒微細化による核生成促進の影響を考慮した。予測精度の確

認のために相変態予測プログラムを作成し、ベース鋼である、S45CとS45C+0.3wt%V鋼について等温変態過程の計算を行った。変態完了時間の計算予測結果と実験結果の比較を図8に示す。無加工材、加工材ともに実験値とよく一致した結果が得られている。その他、フェライト分率やフェライト粒径についても予測値と実験値とよい一致を示している。

4.2 材質予測 FEM 鍛造システム

解析システムは、精査モデルをもとに、使用パラメータの制限と、時間に対する偏微分式化によって得られた簡易増分型予測式を用い、市販の有限要素による変形解析より得た負荷経路に沿った各種組織変化量を積算することによって組織予測を行う弱連成予測式群の簡易モデルを用いている。今年度中にはベース鋼であるS45C鋼、S45C+0.3wt%V鋼のオーステナイト域加工後に冷却するという一般

鍛造プロセスについて適用可能なシステムを完成予定である。

強度予測例として軸対称剛塑性解析にて、大気温度30°C、材料S45C+0.3wt%V鋼を1200°Cで均熱した状態から1000°Cまで放冷したのちにパンチ速度200mm/s(等速)で黒鉛潤滑の条件下で前方押出加工し、その後室温まで放冷する条件で解析した。図9は変態終了後70,110秒経過したときの押出し縦断面右半分の(a)VC析出量の変化と、室温での(b)降伏強度分布を示す。降伏強度の実測値との誤差は約+100MPa程度であった。従来の低炭素鋼の材質予測は、圧延分野で進められ成果は報告されているが、本研究のようなVC析出を伴う中炭素鋼の熱間鍛造における組織・材質予測は例がなく、今後さらに変態時の潜熱の考慮、VC析出モジュールの適正化、各モジュール間の連携強化により予測精度の向上を図る。

5. おわりに

現在プロジェクトは、開始後約三年を経過し、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して、実験室的規模ではあるが最終目標値を達成している。また、実用化研究に必要な設備等も導入済みであり、今後二年間のプロトタイプ部品の試作を通じて開発プロセスの有効性を実証していく。

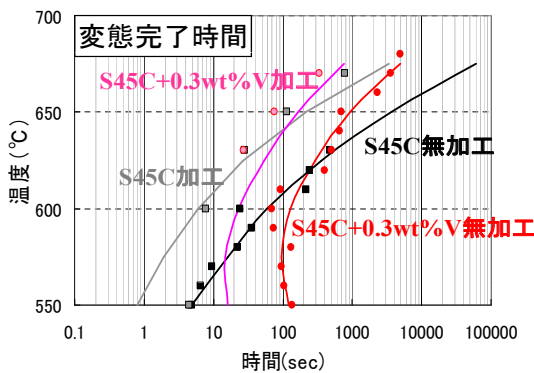


図8 等温変態材の変態完了時間の計算と実験結果の比較

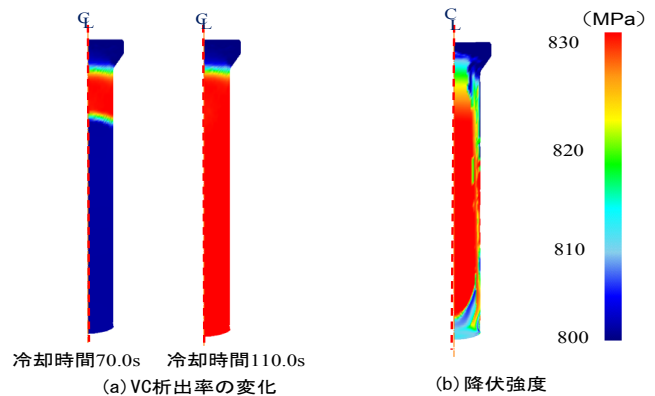


図9 S45C+0.3wt%V添加鋼の前方押出し時のVC析出量と降伏強度の予測

The Japan Research and Development Center for Metals
JRCM NEWS / 第 281 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 2010年3月1日
 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 東洋海事ビル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