

## TODAY

## 観察と感性



古河電気工業株式会社

執行役員常務

中村 一則

池上彰氏のニュース解説番組が人気である。我が家では家内も娘も「分かりやすいねえ」と聞き入っている。『それに比べて、うちの親父の説明は...』という心理もかなり含まれていると想像している。本も出ている。また近々番組の出演を休止すると表明している。時事問題を分かり易く解説する番組が他にも出てきて、フロンティアとしての役割は終わった為だと言う。家内や娘にはそれも評価を高める要素となっている。

しかし私にはずっと、この番組がさほど面白いとは感じられないでいた。国際問題はまだ良いとしても、それ以外の特に科学技術に関する事柄は自分の専門から離れた分野であっても、物足りなさを感じていた。言い表すのが難しいが「何か心に響いてくるものが無い」という感性が存在するのである。決してジェラシーでは無く。

昨年末、すでに会社をリタイヤしたOBの方々を対象にした講演を依頼された。「成熟化社会」というテーマがあらかじめ与えられていた。この言葉は、会議や夜の談義などで私自身も時々発していたが、良い機会なのでこの際、今まで自分が漠然と抱いていた「成熟化社会」なるものについて勉強してみようと考え、調べてみることにした。材料にはまったく事欠かなかった。書店でも「成熟化社会」を題材にした書籍はたくさん並べられていたし、特にWEBでの投稿記事は“わんさと”あった。この言葉がイギリスの物理学者 Dennis Gabor 氏が述べたものであることを恥ずかしながらここで初めて知った。集められた色々な材料を読んで、①現代社

会批判として用いている立場、②肯定的に捉えている立場、あるいは③今まで自分が持っていた考えに近い意見、④離れた考え方を分類し、それらを文章でまとめ直し、これをベースに講演のストーリーを立てた。

出だしはまあまあであった講演は、しばらくして何処となく調子が掴めない状態になり、最後までそのような感じで終わってしまった。講演の後、何名かの方から質問を頂いたあと、一人の方からコメントが来た。「失礼ながら私は今日のようなお話を聞きに来たのではないです。今日のようなお話は本にも書いてあるし、テレビの中でもコメントテーター達が述べています。そうではなくて、演題のような切り口で今の社会を日々観察したときに、講演者自身の眼にはそれがどう見えたのか、心はこれをどう感じたのか、それを語って欲しかった。」

この方を含め多くの聴講者の方々には、恐らく私の話は心に響くものが無かったのだと感じた。至極当然のコメントだった。確かに自身の眼で「成熟化社会」という切り口で社会を観察してみる、という事はしていなかった。私の講演は世の中に転がっている情報をまとめ、他人の意見を整理しただけの内容だったのだ。他人の情報だけで勝負をし、自分の観察と自分の感性を使った内容ではなかった。「研究者は観察力が命である」と若手の技術者達にいつも言っていた言葉を、再度自分に向けねばならないと思った。

池上彰氏は初めての地に赴くと必ずまず地図を購入すると述べていた。私もよくそうする。地図にはその地域をマクロに捉える面とミクロに巡る時の貴重なツールとしての面がある。池上氏もマクロを捉えつつ地域を歩いて自身の感性を大事にされているのだろうか。

今私は、電車やバスに乗っているとき、また歩いているとき、テーマを決めて周囲を観察することを試みている。女性の方が道を歩くとき、道端のまったく目立たない小さな草花をすぐに見つけて、色々とコメントを述べているのを時々見る。関心が高い分野には自然と感性が働くのだと改めて感じている。

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の開発サブグループの活動 (3)

豊橋技術科学大学大学院工学研究科 梅本 実 (制御鍛造分科会リーダー)

1. はじめに

自動車などの軽量化・燃費改善のために鍛造部品の更なる高強度化が求められている。鍛造部品の高強度化にあたっては、被削性との両立が不可欠であり、そのために、同一成分で加工熱処理を駆使して、必要な箇所を高強度化し、切削部位は軟質化する強度の傾斜機能付与技術の開発が期待されている。また、強度傾斜鍛造では、加熱温度、加工温度、ひずみ、冷却速度などの因子を制御して、目標とする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が必要である。本NEDOプロジェクトにおける先端的制御鍛造サブグループの研究開発は図1に示すように以下の3点にまとめられる。

- 1) 非調質組織を有する同一部材内で、VC析出制御により高強度部1000MPa以上、軟質部900MPa以下の傾斜機能を発現できる鍛造技術の開発
- 2) 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の基盤構築
- 3) プロトタイプ鍛造技術を生かした試作 (コンロッド模擬部品等)

「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発プロジェクト」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についてはサブグループリーダーの五十川氏により JRCM NEWS で過去2回 (No265 (2008年11月) と No281 (2010年3月)) 報告がなされている。今回は共通基盤技術 (委託事業) の活動を中心に学術的側面を紹介する。

2. 鍛造部材の組織制御による傾斜機能付与技術の研究  
 2.1 VC析出強化と析出メカニズム

1. 鍛造部材の組織制御による傾斜機能付与技術の研究

⇒高強度化部と軟質部(切削性維持)の造り込み技術の開発による部品軽量化

2. 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研究

⇒成分・プロセス設計に有用なツール開発

3. プロトタイプの試作

⇒先端的制御鍛造指針を具現化するための必要な鍛造技術の開発

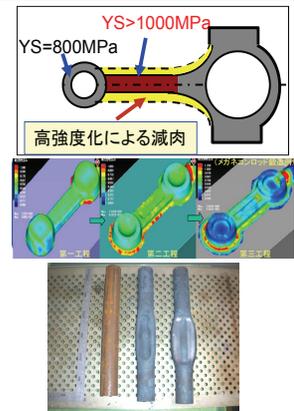


図1 先端的制御鍛造サブグループの研究開発

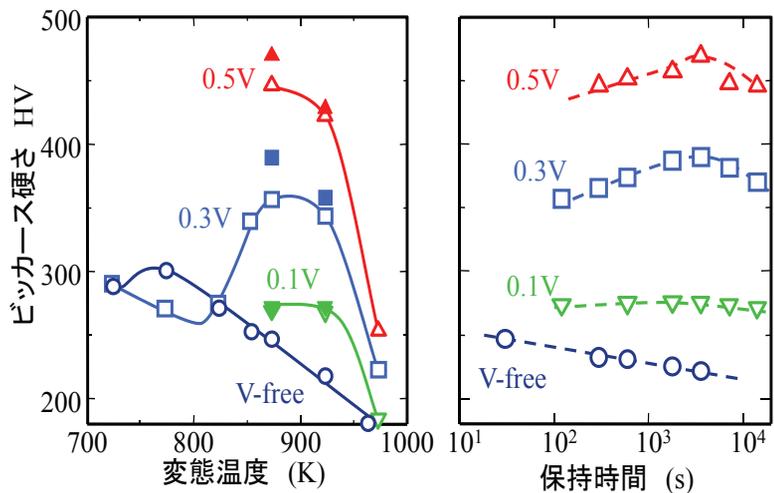


図2 (a) 変態完了直後の硬度の変態温度依存性, (b) 873Kでの変態後の保持時間に伴う硬度変化

図2(a)に、各合金における種々の温度での変態完了直後の硬度を示す。S45C材では773Kまでは変態温度が低下するほど単調に硬度は上昇するが、全面ベイナイト組織となる723Kでは773Kよりも硬度は減少する。一方、0.3V材の硬度は、873K以上ではS45C材に比べて顕著に高く、ベイナイトが生成し始める853K以下で減少し始める。全面ベイナイト組織となる723Kでは、V添加が硬度におよぼす影響は小さい。図2(b)は873Kでの変態完了後に保持を行った際の硬度変

化を表している。いずれの温度でもS45C材の硬度は保持時間が長くなるにつれ単調に減少するのに対して、V添加材では時効による硬度上昇が明瞭に見られる。また、V添加量が増加するほど硬度上昇量も大きくなり、0.5V材は873K時効で最高硬度HV470に達することが明らかとなった。

図3に0.3V材の種々の温度での恒温保持で生成した粒界フェライト中の相界面析出VCの暗視野像を示す。VCはフェライト母相に対して、Baker-Nuttingの方位関係の

うち単一のバリエーションを持って生成している。(a)、(b)に示すように、相界面析出シートはフェライト/オーステナイト界面に平行に配列し、(c)に示すように湾曲したシートもしばしば観察される。図4に0.3V材を種々の温度で保持した際のVC粒子サイズと数密度の変化を示す。変態温度が低下するほど、VC粒子サイズは減少し、数密度は著しく増加する。873Kおよび923Kでは、粒子サイズ、数密度とも保持時間に対して目立った変化は見られない。一方、973Kでは、長時間の保持によりVCサイズは増加するとともに数密度が減少しており、粗大化が起きているのがわかる。VCが最も微細かつ高密度に生成した873Kで添加による硬度上昇が最も大きいことから、有効に析出強化を図るには、VCをより微細に分散させることが重要であることが示唆される。

相界面析出の機構としては図5に示すように、 $\gamma/\alpha$ 両相間に特定の結晶方位関係があり界面易動度の小さい整合界面での析出を考えるレッジ機構と、特定の結晶方位関係がなく易動度の大きい非整合界面での析出を考える擬レッジ機構が提唱されている。V添加材では粒界フェライト、パーライト、粒内フェライトとともに特定の方位関係を持たない相界面の移動によりフェライトが成長するにも関わらず、平滑なシート状の相界面析出が起こることが本プロジェクトで明らかとなった。観察された析出シートの形状が擬レッジ機構で期待される曲面状ではなく、ほとんど平滑であることから、特定の結晶方位関係を持たずとも易動度の小さな界面方位が存在することで、フェライトがレッジ機構により成長し、易動度の小さな相界面でVC析出が起こったものと考えられる。

## 2.2 析出を伴う相変態制御強化と析出強化材の力学特性

中炭素鋼にVを添加すると、相変態に対して種々の影響がある。

1) 恒温変態では拡散変態が高温

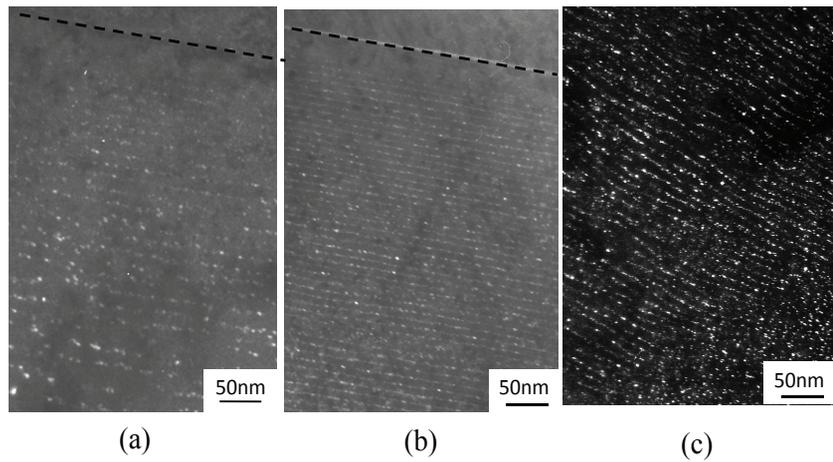


図3 0.3V材における初析フェライト中の相界面析出VCの暗視野像。(a) 973K、120s保持材、(b) 948K、30s保持材、(c) 923K、60s保持材。(a)、(b)中の破線はフェライト/オーステナイト界面

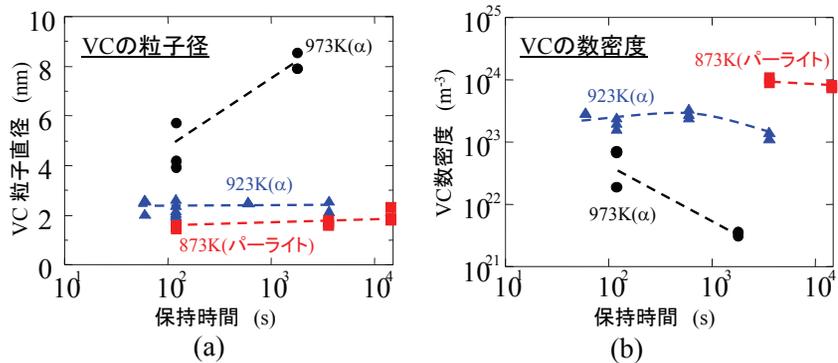


図4 0.3V材における種々の変態温度での保持時間に対するVCの(a)平均粒子直径、(b)数密度の変化

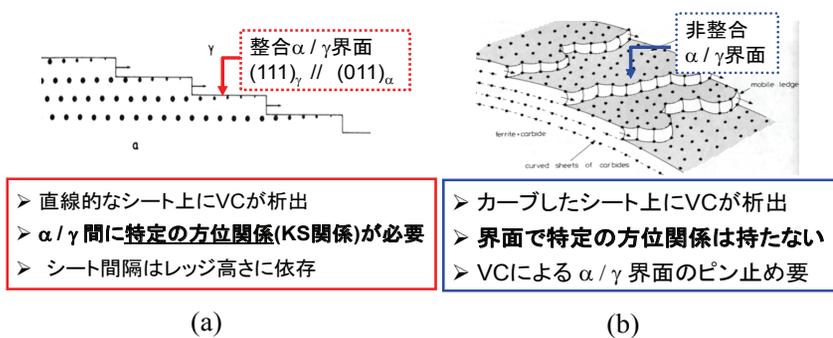


図5 相界面析出の機構。(a) レッジ機構、(b) 擬レッジ機構

側で促進され、低温では抑制される。その結果、ベイナイト変態はより高温側で開始する。

2) 連続冷却変態では遅い冷却の時に拡散変態が抑制され、ベイナイト変態が現れやすくなる。

3) フェライトの成長速度は高温で促進される。

4) フェライト分率はV添加で大きくなる。

5) パーライトのラメラ間隔は、共析鋼では影響が小さいが、亜共析鋼ではV添加でフェライト分率が増加する影響で、小さくなる。

フェライト成長速度の測定結果を図6に示す。625-675℃の温度範囲では0.5%V添加により30%程度の成長速度(パラボリックレートコンスタント)が増加している。フェライト変態促進メカニズムを概念

的に示したものを図7に示す。Vはフェライト安定化元素であるため、フェライト/オーステナイト界面の炭素の平衡濃度に影響を与えることにより、フェライト成長を促進する可能性がある。それとは別に、V添加鋼ではフェライト変態時にVC相界面析出が起こり、炭素がVCとしてフェライト中に取り込まれる。その結果、オーステナイト側へ排出される炭素量が減少し、フェライト変態の速度は増加することになる。以上のV添加によるフェライト成長速度の促進は、これら2つの効果で定量的にも説明される。従って、固溶V元素によるソリュートドラッグ効果やVCによるピン止め効果はフェライト成長速度には大きな影響は無いと判断される。

フェライト単相材(S10C)、パーライト単相材(S75C)について、VC相界面析出による降伏応力の増加量を変態温度とともにプロットしたものを図8に示す。変態温度が高いほど降伏応力の増加量が減少していることが分かる。これは変態中や変態完了後の恒温保持により相界面析出したVC析出物が粗大化することによるものと推測される。図8(a)と(b)を比較するとパーライト中の方がフェライト中に比べて、降伏応力の増加量が小さいことがわかる。このことはフェライト単相材におけるVCとパーライト中のラメラフェライト中のVCの強化への寄与が異なるということで、今後転位論的考察が必要である。

### 3. 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

#### 3.1 VC相界面析出モジュール

初析 $\alpha/\gamma$ およびパーライト $\alpha/\gamma$ 相界面におけるVCの核生成とその後の成長・粗大化過程を界面エネルギーや異相界面上の核生成サイト密度をフィッティングパラメータとしてモデル化した。図9に実測した平均VC半径と数密度を $\Delta$ (初析 $\alpha$ )および $\square$ (パーライト $\alpha$ )で、析出モデルの計算結果を実線(初析 $\alpha$ )と破線(パーライト $\alpha$ )

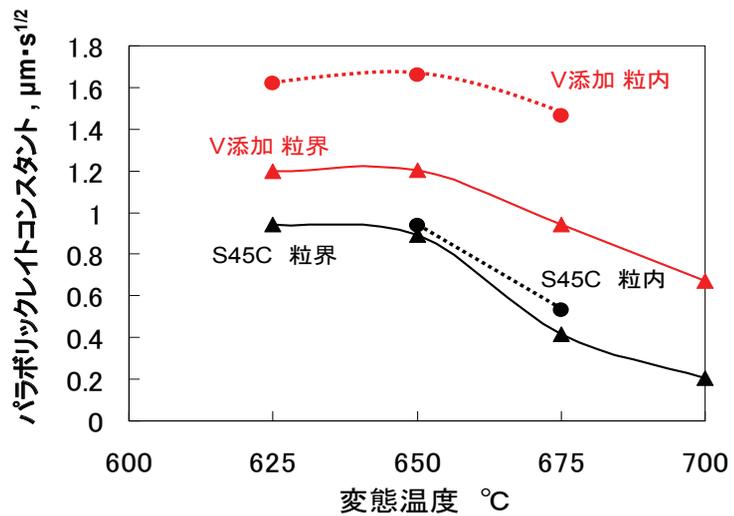
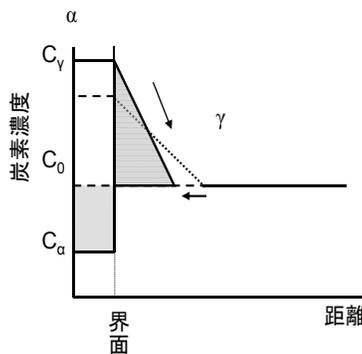


図6 S45CとS45C+0.5V鋼のパラボリックレイトコンスタント(実験値)

#### 熱力学的効果による $A_{e3}$ 点の上昇



#### VC相界面析出の影響

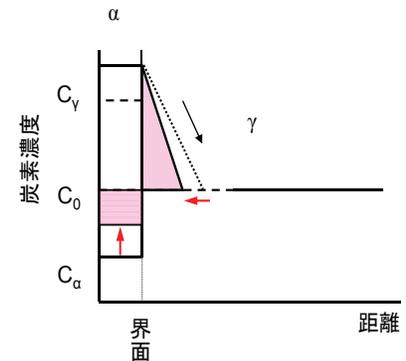
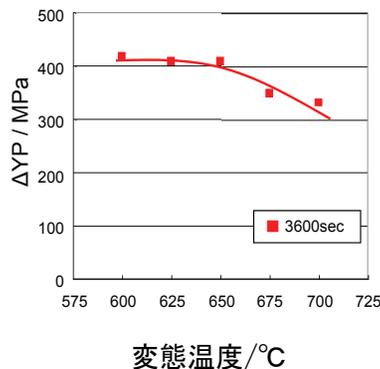


図7 V添加によるフェライト変態促進メカニズムの概念図

#### フェライト単相鋼(S10C+0.3V)



#### パーライト単相鋼(S75C+0.3V)

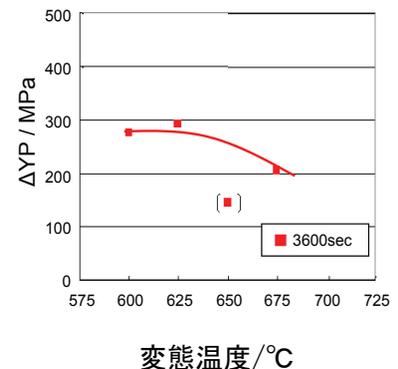


図8 VC相界面析出によるS10C+0.3V、S75C+0.3V鋼の降伏強度上昇量

で示す。変態温度が上昇するにつれて、測定したVC粒子の平均半径は増加し数密度は減少するが、析出モ

デルでもその傾向を再現することができている。

### 3.2 組織-特性予測モジュール

フェライト粒径、パーライトラメラ間隔、セメンタイト率を組織因子として降伏強度と各組織因子のデータを重回帰分析することによって以下のV添加鋼の降伏強度予測式を構築した。フェライトの降伏強度はフェライト粒径と固溶元素に、パーライトの降伏強度はパーライトラメラ間隔とセメンタイト率で表されるという仮定で定式化を行った。フェライト+パーライトの場合の降伏強度はフェライトとパーライトの降伏強度の重み付き平均で表されると仮定した。

$$YS_F = 116 + 53.4Si + 4.28Mn + 580d_F^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$YS_P = 110 + 1730f_\theta + 41.2S^{-1} \quad (2)$$

$$YS_{F+P} = X_F^{1/3}YS_F + (1 - X_F^{1/3})YS_P \quad (3)$$

$$f_\theta = \frac{1.946C}{12.72 + 0.046C} \quad (4)$$

ここでYS：降伏強度 (MPa)、C：炭素量 (wt %)、Si：Si量 (wt %)、Mn：Mn量 (wt %)、 $d_F$ ：フェライト直径 ( $\mu\text{m}$ )、 $X_F$ ：フェライト分率、 $f_\theta$ ：セメンタイト率、S：平均ラメラ間隔 ( $\mu\text{m}$ )であり、各添え字はF：フェライト、P：パーライト、F+P：フェライト・パーライト二相鋼を示す。

上記のV無添加鋼の降伏強度予測式を用いて、V添加による降伏強度上昇量を Ashby-Orowan 型の式で算出した。

これらの式を用いて降伏強度の予測値と実験値を比較したものを **図 10** に示す。降伏強度 100MPa から 1200MPa までの広い範囲で比較的良い予測ができてることがわかる。

### 3.3 材質予測 FEM 鍛造システム

プロジェクトにて開発されたメタラジーを基礎とした再結晶予測モジュールおよび VC 析出挙動予測

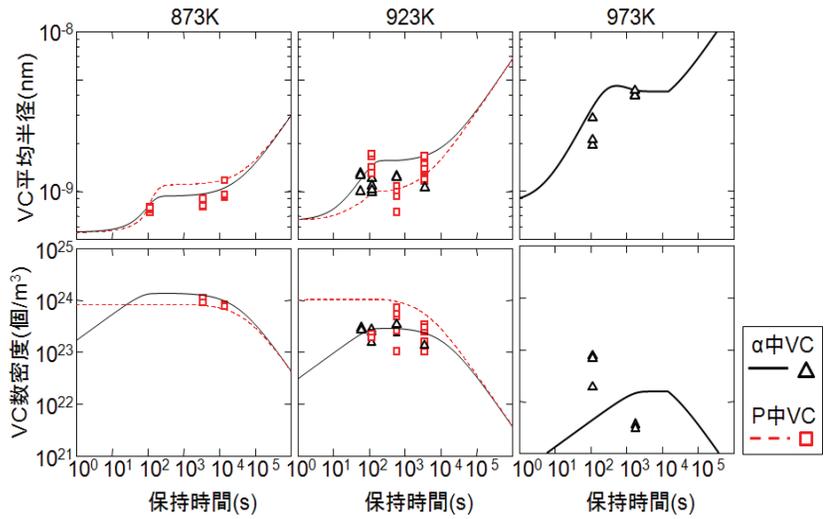


図9 初析 $\alpha$ およびパーライト中における相界面析出VCの平均半径および数密度の測定値と析出モデルの計算結果の比較

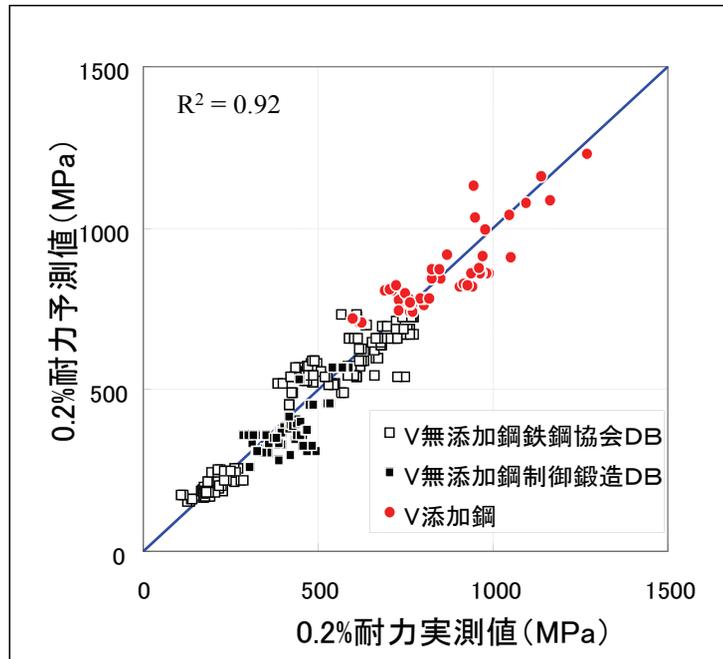


図10 降伏強度の予測値と実測値の比較

モジュールを FEM をベースとしたシステムに統合し、鍛造部材の各場所における材質予測が可能なバーチャルラボシステムの構築を行った。構築したバーチャルラボシステムを用いた解析の例として、円柱の熱間前方押し出しの組織・材料特性予測の結果を **図 11** に示す。解析ソフトとして DEFORM-2D Ver.10.1 を使い、軸対称剛塑性解析として取り扱った。 **図 12** は押し出し後の冷却過程における (a) フェライト分率の時間変化、(b) フェライト中の VC 半

径、(c) 降伏強度 の分布を示している。 **図 12** は S45C+0.3V 押し出し材の解析結果と実測値とを比較したものである。(a) はフェライト中 VC 体積率、(b) は降伏強度である。実測値とよい対応が確認できる。今回開発したバーチャルラボシステムは、熱力学ならびに冶金学に基づいて作成された各種予測モジュールを有機的に連携させたもので、鍛造部材の組織および材料特性を予測することが可能である。

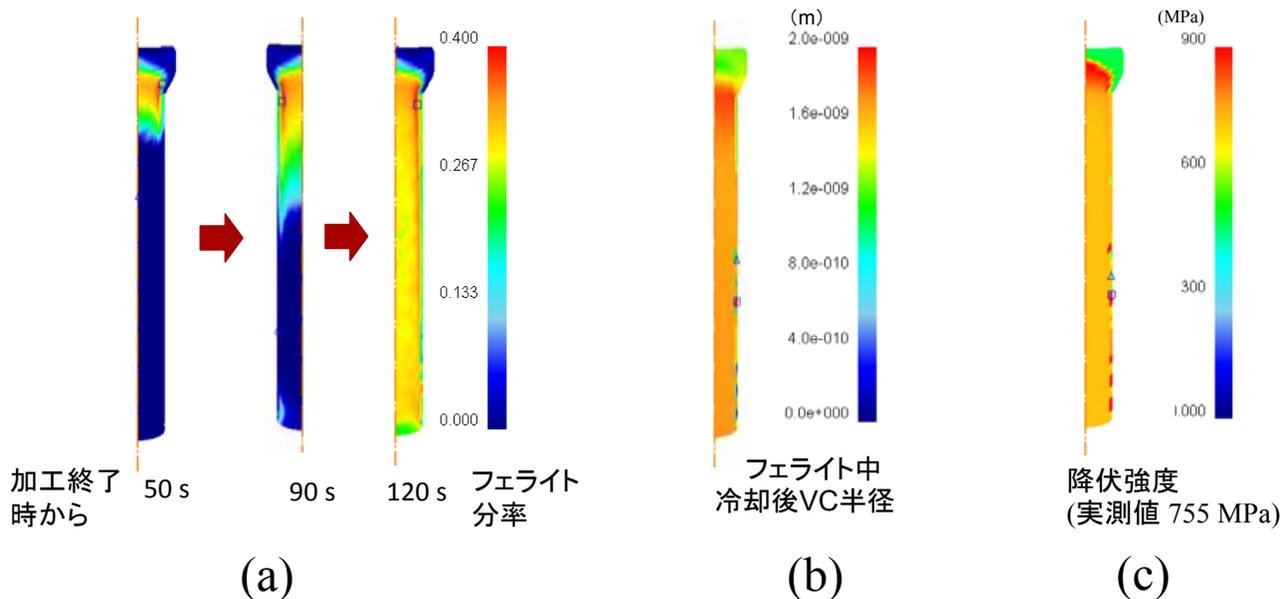


図 11 解析結果の一例 (S45C+0.3V) 1200°C加熱-1100°C鍛造  
(a) フェライト分率、(b) フェライト中 VC 半径、(c) 降伏強度

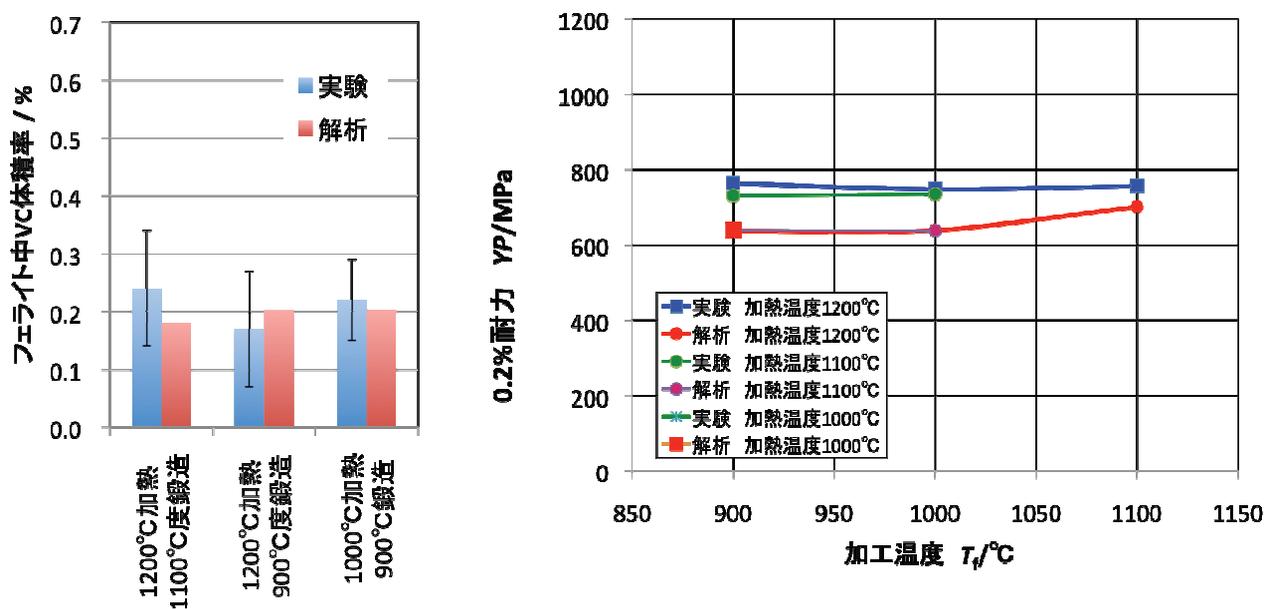


図 12 S45C+0.3V 押し出し材の解析結果と実測値との比較。(a) フェライト中 VC 体積率、(b) 降伏強度

#### 4. おわりに

現在プロジェクトは、開始後約 4 年を経過し、最終目標であった F+P 組織で 1000MPa を越える高強度化を達成した。今後は各社が提案して

いる開発鋼を使った開発プロセスにおいて降伏強度 1000MPa 以上を達成する VC の大きさ、密度の範囲の明確化、VC 析出組織の生成条件の明確化、相割合、各相の組織の大

きさ、強度範囲の明確化、組織形成方法の明確化について研究を進めていく。

The Japan Research and Development Center for Metals

JRCM NEWS / 第 293 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 2011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

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)