

シリーズ 鉄鋼の限界特性

強度に挑む

INTERVIEW

鉄鋼の高強度化の現状と克服すべき課題

鉄鋼は構造用材料として広く使用されているが、理論上の限界強度にはまだ達していないといわれている。これまでの鉄鋼の高強度化研究の経緯や、現在進められている研究、さらに克服すべき課題などについて、長年にわたり鉄鋼の組織制御と高強度化の研究に取り組んでこられた古原忠先生にお話をうかがった。

Q1

「鉄の魅力」とは何だと思いませんか。

最初に挙げたいのは、資源としての豊富さです。私たちの地球の中心は大きな鉄の塊ですから。次に、製錬の容易さ。地球上の金属資源の多くは酸化物として存在していますが、その中でも鉄は比較的容易に還元できます。また、社会的にリサイクルが浸透していて、スクラップ利用が比較的進んでいることも利点ですね。

物質としての鉄の魅力は、多様な構造変化があることです。純物質としての鉄は高温の液体から冷却すると、体心立方

晶から面心立方晶、体心立方晶と2度の固体構造の変化があり、さらに磁気変態が複雑に関与します。さまざまな元素と合金化ができる結果、複雑な相互作用で多彩な微細組織が生まれ、図1に示すような驚くほど幅広い特性が得られます。私自身は、合金としての鉄に最も材料としての魅力を感じており、合金元素の役割を中心に長らく研究をしています。

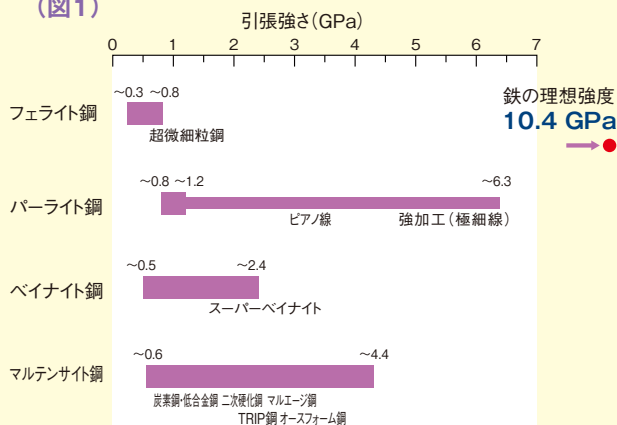
しかし、鉄における添加元素の作用については、わからないところがまだまだたくさんあります。実験でなぜこのような組織変化が起こるのか、なぜ思うような特性が出ないのかなど、悩むことは本当に多いですね。

Q2

鉄鋼材料は理論上の限界強度にまだ達していないといわれています。高強度化が進まないのはなぜですか。

鉄の結晶中に欠陥がない完全結晶を变形させるには、ある面に沿って原子結合をすべて断ち切る必要があります。大変大きな力を必要とします。これが理論上の限界強度、すなわち理想強度です。しかし、実用鋼も含めて通常の金属結晶では転位などの欠陥が存在し、局所的な結合の切断と再結合によって移動するため、非常に小さい強度で塑性変形が起こるわけです。この転位の移動をさまざまな阻害因子の導入により抑制することで、材料強度が上がります。しかし、もともと転位を結晶中で移動させるのに要する力はわずかなので強化量に限界があること、また材料中の弱いところから破壊が起こることが原因となり、利用できる強度が理想強度の何分の1かに留まっているのです。

■ 各種変態組織の強度レベル(実験室データも含む)
(図1)



牧正志:ふえらむ, 13(2008), 544, 図4を元に強度レベルを更新

Q3

鉄の強化機構の効果を加算すれば高強度化できる、という加算則は、どの程度明らかになっているのですか。

鉄の強化機構として、固溶強化、析出強化、転位強化、結晶粒微細化強化、複合組織強化の5つが知られています。これらの強化機構の寄与を高めれば高強度化が図れます。フェライト単相鋼のような単一組織において、比較的強度の低いレベルでは単純加算で強度を議論することはできます。しかし、各機構を複合化し、その極限を追求すると、単純加算則は成り立たないことも知られています。例えば、第二相粒子をナノレベルまで微細に分散させ、転位の移動を阻害しようという析出強化の極限を追求した研究が現在多く行われていますが、その場合は転位強化と析出強化の二乗和平方根で取り扱うという強化理論があります。二相鋼のように構成相の強度が異なる場合には、一つの組織が塑性変形でもう片方は弾性変形に近いという状態も観察されており、複合組織強化の場合ではさらに複雑です。

転位強化を追求する場合、大きな塑性ひずみを加えていくわけですが、ある程度のひずみを加えることで導入された転位は互いに絡み合って結晶中に境界のようなものを形成し、ひずみ量が増えるにつれて、このような転位で形成された境界での結晶方位の違いが大きくなります。このため、強化機構は転位強化から結晶粒微細化強化に移り変わっていきます。90年代半ばから10年にわたって行われた超鉄鋼プロジェクトやスーパーメタルプロジェクトでは、大ひずみ加工を用いた結晶粒微細化手法の実用プロセスへの応用を視野に入れた研究で大きな成果が上がりました。また、材料の形状を変えない塑性ひずみ付加の手法を用いた真ひずみ4を超える超強加工の研究が世界的に注目され、日本でも大型科研費の枠組みで2000年代半ばから10年に渡って推進されました。これらの取り組みによって、鉄鋼や非鉄材料での強ひずみ加工を用いた結晶粒微細化と特性向上の理解が大きく進みました。

構造用金属材料の強度設計は、安全面を考えると転位論ベースになることが多いのです。各種の強化機構の境界領域の研究がさらに進むことで、力学特性をさらに高度なレベルで設計できると期待しています。



東北大学
金属材料研究所長

教授 古原 忠 氏

Q4

さまざまな組織解析手法の利用が進んでいるようですね。

この10～20年の間で大きく進展したのが、量子線を応用した材料解析の研究です。強力X線や中性子線などの量子線は、高エネルギーで結晶の中を透過し、種々の散乱現象を起します。SPring-8*1やJ-PARC*2では、構造材料の研究に適したビームラインも整備されています。近年、変形や熱処理による組織変化を捉えるその場観察実験が可能となり、試料内部の結晶のサイズや方位、構造がどのように変化しているか、などが時系列でわかるようになりました。異なる結晶構造が混在する高強度鋼のような不均一材料においても、構成相の間で応力やひずみがどのように分配さ

*1 SPring-8(スプリングエイト): 兵庫県播磨科学公園にある大型放射光施設。加速された高エネルギー電子ビームから発生する世界最高レベルの放射光を利用して、幅広い科学分野の実験・研究を行う。

*2 J-PARC(ジェイパーク): 茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設。世界最高レベルの強さの陽子ビームを標的にあて、中性子、ミュオン、ニュートリノなどのビームを使って研究を行う。

れ、その結果どのように全体の強度が決まるのか、という理解が急速に進んでいます。大学や企業の多くの研究者が材料設計をする時に、このような施設利用のハードルが下がって、実際に材料中の変化を肌で感じながら研究できるようになってきたことは素晴らしい進歩だと思います。

高強度化のために合金元素を添加する目的として、最初に考えるのは固溶強化、次は結晶構造や組成の異なる化合物などを生成させる析出強化でしょう。添加した元素が、結晶の中で個別の原子として存在する固溶状態か、集合体として析出しているかは、添加元素の種類や量、製造時のプロセス条件によって変わります。アルミニウム合金ではGPゾーンというナノスケールの溶質原子の集団(クラスター)が高密度で生成する状態が見られます。また最近注目されるハイエントロピー合金ですが、これは5種以上の元素を等分量で混ぜ合わせると、エントロピー(乱雑さ)が非常に高くなり、均一固溶状態が安定になるというものです。ただ、多くの種類の元素を混ぜるので、できた合金がどのような特性を持つのか、あるいは得られた特性の起源は何かということが大変わかりにくいです。元素間の相互作用もさまざまで、その相乗作用で単純な加算ではない優れた特性が出るのではないかと期待されています。

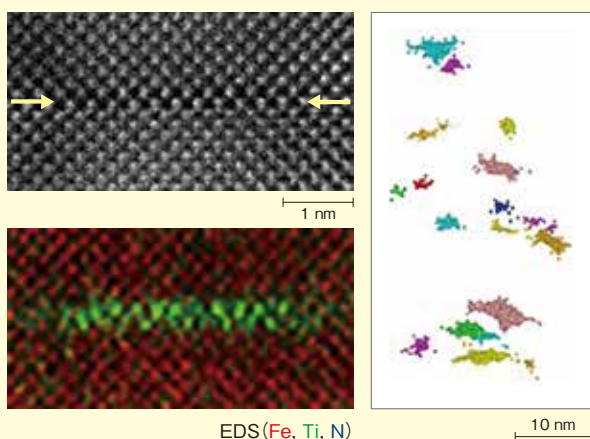
このような固溶と析出の境界領域の状態を解明するため

にナノスケールでの組織解析技術が必要ですが、これについても近年の進展には目覚ましいものがあります。透過電子顕微鏡で結晶の原子構造像が見えるようになって50年になりますが、近年の原子番号に依存する走査透過電子顕微鏡の結像法と、電磁レンズの収差補正技術の発展により、現在では原子の種類と位置までがわかるようになっていきます。また、3次元アトムプローブを用いることで、数百万個の原子を含む領域でのナノレベルの元素分布情報を知ることができます。

私たちの研究グループでは、フェライト鋼における合金炭化物あるいは合金窒化物のナノスケールでの析出状態と高強度化の関係について系統的な研究をしていましたが、先に述べた炭素、窒素および合金元素に関しての固溶、析出の状態はよくわからないところがありました。そこで、マルチスケールでの原子の存在状態をいろいろな解析手法で見てみようと考え、鉄中の元素の相互作用を解明し、固溶・析出の境界領域での高強度化を追求するチーム型研究をJSTの元素戦略プロジェクト*3で行いました。

鉄鋼では耐摩耗性を保証するために表面硬化処理を行うことがあります。例えば、表面から窒素を材料中に導入する窒化処理では、窒化物の析出により表面硬化が起こります。その時に、窒素と強い引力相互作用を持つ合金元素であるチタン、ニオブ、バナジウム、クロムなどを添加すると硬度が一気に向上します。それは、合金窒化物ができる前に、これらの元素が窒素と結合して一原子層あるいは二原子層の厚さのクラスターを作るからです(図2)。窒化鋼ではアルミニウムを添加することが多いのですが、アルミニウム窒化物は転位のような優先的な析出場所がないと微細に析出しにくい特徴があります。しかし、チタンやバナジウムを例えば0.1%程度の微量で添加すると、まずこれらの元素と窒素が結合したクラスターができ、それを起点にアルミニウム窒化物が微細に析出して、大きな表面硬化を効果的に実現できます。このような固溶と析出の境界領域で起こるたいへん面白い現象について、ここまで踏み込んだ研究ができるようになったのは、ナノ解析と計算科学の技術が進展したからです。私たちが行ったチーム型研究でも、電子論を利用

■ フェライト中の合金元素(Ti, N)のナノクラスタリング(図2)



左上:収差補正ABF-STEM像

左下:EDS組成マップ

右図:3DAP解析で検出したTi-Nクラスターの分布

*3 JST(科学技術振興機構)のCREST 戦略的創造研究推進事業「元素戦略を基軸とする物質・材料の革新的機能の創出」における「軽元素戦略に基づく鉄鋼材料のマルチスケール設計原理の創出」(研究期間:平成23年4月～平成28年3月)

した計算科学的手法で、元素のクラスタリング挙動が明確になりました。現在鉄鋼も含めた材料開発の指針を得るために、スーパーコンピュータを使った大規模計算も行われています。鉄鋼材料の特性制御は、すでにナノスケールから、さらに微小な原子、さらには電子のレベルまで進んでおり、今後ますます進展することが期待されます。



Q5 残留オーステナイトの動的加工誘起変態の研究が注目されています。これまでの経緯や現在進んでいる研究についてうかがえますか。

鋼をオーステナイトから焼入れすると、マルテンサイトに変態します。マルテンサイト変態の開始温度 (M_s 点) と終了温度 (M_f 点) は、母相の組成と粒径によって決まりますが、 M_f 点が常温以下になると焼入れしても変態が終わらず、オーステナイトが残留します。この残留オーステナイトには、靱性を向上させ、割れを防ぐ効果があります。

自動車用薄鋼板では、高強度・高延性化のために、フェライト地にマルテンサイトやベイナイトが硬質相として含まれる鋼種が活用されています。その一つがTRIP (Transformation Induced Plasticity) 鋼ですが、残留オーステナイトが動的加工誘起変態することを利用しており、1990年前後に自動車用の高強度・高延性薄鋼板として実用化された画期的な材料です。高温でオーステナイト中に溶けている炭素は、冷却されてフェライト変態が起こると、残りのオーステナイト中に濃縮されます。通常は変態が進むにつれて鉄炭化物が生成するため、固溶した状態の炭素はほとんどなくなります。しかし、炭化物の生成を抑えるシリコンなどを添加するなど合金成分を調整し、熱処理を最適化することにより、冷却後もオーステナイト中に炭素を高い濃度で固溶させたまま常温でもオーステナイトを安定して得ることができます。TRIP鋼では、残留オーステナイトが、常温で大きな荷重がかかった時にマルテンサイトに変態することで適度な変形能と高強度が両立し、プレス成形での加工性や衝突時の安全性の向上に役立ちます。この残留オーステナイトのさらなる活用は、2000年代以降の次世代高強度鋼板の開発でも進められています。

図3は、低合金から高合金に関して実験室レベルも含めて現在得られている高強度鋼の強度－延性バランスを、引張強度と破断までの全伸びの積で表したものです。現在の自動車用鋼板では、幅広い強度レベルのものが用いられて

いますが、実用上はおよそ20,000 MPa・%のラインに沿っています。その中では、残留オーステナイトを利用するTRIP鋼が強度－延性バランスにおいて特に優れています。

次世代の高強度・高延性鋼板の開発では、オーステナイトの変形および加工誘起変態をさらに高度に制御して、より高い特性を得る試みが行われています。スーパーベイナイト鋼は、TRIP鋼でのベイナイト変態 (オーステンパー) 処理温度をより低温化して、フェライトとオーステナイトのナノメートルサイズの二相ラメラ組織を利用した鋼種です。 M_s 点を下げるために元々の炭素濃度を0.6～1.0%と非常に高めるとともに、オーステンパー処理時に炭素濃縮が起こることで、オーステナイトは変形時も安定して存在しています。組織の微細化とオーステナイトの塑性変形による加工硬化で優れた特性を得ています。Q&P鋼は、焼入れ (Quenching) と元素分配 (Partitioning) という2つの熱処理の組み合わせで作られます。自動車用薄鋼板をターゲットとするため、もともと0.1～0.3%の低い炭素量の鋼種です。鋼を M_s 点と M_f 点の間の温度に焼入れた (Quenching) 後、比較的高温で保持して、マルテンサイトから未変態オーステナイトへの炭素分配を促進させること (Partitioning) により、TRIP鋼と同様に常温で得られた残留オーステナイトの加工誘起変態で、優れた強度－延性バランスが得られています。マルテンサイトと残留オーステナイトの混合組織を示すので、マルテンサイトTRIP鋼とも言われます。スーパーベイナイト鋼もQ&P鋼も、ともにオーステナイトから炭化物が生成することを防ぐために、TRIP鋼と同様にシリコンを添加しています。

Q&P鋼では、マンガンの添加量をTRIP鋼で含まれる典型的なマンガン量の約1.5%より多い3%あるいは5%まで増やすことで、強度－延性バランスが向上しました。マンガンは鉄鋼中に含まれる5つの基本元素の一つで、炭素鋼で通常0.3～0.6%程度含まれ、高強度鋼では1～2%程度添加されます。オーステナイトを安定にする効果が大きく、1%加えると M_s 点が約30℃、10%加えると300℃以上下がります。現在の合金設計では、目標とするマルテンサイトの変態温度をマンガン量でコントロールする取り組みが多く用いられています。

高マンガン鋼は、室温でオーステナイト単相組織を示す鋼種で、もともと英国で100年以上前に発明された、13%のマンガンと0.8～1.2%の炭素を含有する最初の合金鋼ともいえるべきものにその端を発しています。炭素による固溶強化と双晶変形 (Twinning) による大きな加工硬化によって、高い

強度－延性バランスを示します。2000年前後にドイツから、変形双晶誘起(Twinning-induced Plasticity: TWIP)を利用したTWIP鋼というカテゴリーが提案され、薄鋼板への応用という点で脚光を浴びました。20 %以上のマンガン添加に加えて、炭素含有量を最大1 %程度まで高めてMs点を室温以下にしています。また、双晶変形を起こすのに必要なオーステナイトの積層欠陥エネルギー(SFE)の制御のために、Si、Alの添加量をコントロールします。これによって、強度－延性バランスが60,000MPa・%と著しく高いものになりました。SFEの大きさによっては、稠密六方格子構造の ϵ マルテンサイトが出ます。このマルテンサイトは形状記憶合金の用途に利用されますが、常温の強度－延性バランスの制御にも使えます。このことから、通常の体心立方あるいは正方晶の α' マルテンサイトによるTRIP、 ϵ マルテンサイトによるTRIP、そして双晶変形によるTWIP、さらには転位のすべり変形の複合化を利用した特性の向上が、最先端研究では目指されています。シリコン、アルミニウムの添加量が多くなると材料の密度が低下するので、低密度鋼(Low density steel)という新しい材料のコンセプトにも発展しています。

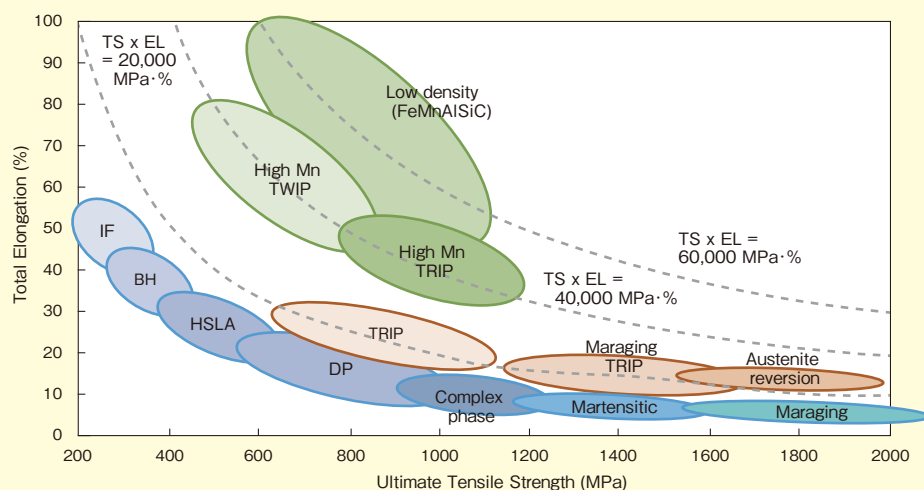
現在の研究の中心は40,000 MPa・%のレベルを目標としたいろいろな複合組織の研究であり、Q&P鋼も含めて3～10 %のマンガンを含む中炭素鋼が注目されています。これらの鋼種は、現在の実用鋼の第一世代、高マンガン鋼や

TWIP鋼の第二世代と対比して、第三世代と呼ばれていますが、残留オーステナイトの利用が必須であり、TRIP鋼、Q&P鋼と同じコンセプトの熱処理が用いられます。現在も合金設計と加工や熱処理を組み合わせた複雑なプロセス提案がされており、高マンガン鋼と同様、残留オーステナイト中のSFE制御により複雑な変形モードが利用されるなど、組織と特性に関する論文が数多く発表されています。ただ、コンセプトは良くても、設備作りなどが難しい場合もあり、どこまで実用につながるかは今後の課題になるでしょう。鋼を高強度化すると、環境中の水素により水素脆化を起こす場合があります。高強度化を進める上での高いハードルの一つになっています。この問題を解決するのに残留オーステナイトの扱いが大事だということは、少しずつわかっていますので、今後の研究進展が望まれます。

Q6 データサイエンスを活用した高強度化のアプローチは、現在どの程度まで進んでいますか。

例えば、合金開発においてどの元素をどのくらい混ぜればよいかを考えたときに、元素の種類が増えることで膨大な数の組み合わせが生まれます。鉄鋼材料の中でも、鋼種や用途が違えば蓄積し活用すべきデータは異なってきます。現在のデータ活用の取り組みでも、経験論に基づいて、

■ 次世代の高強度・高延性鋼板の位置づけ (図3)



(元データの出典: <http://www.dierk-raabe.com/steels-brief-introduction/>)

個々の材料データの種類や、データの取り方を取捨選択する場合があります。そのような部分の妥当性については検討の余地がまだまだあります。一方、データサイエンス側から逆問題として高強度化設計を提案していく試みは、まだ端緒についたばかりではないでしょうか。材料強度を支配する結晶中の欠陥の種類と分布、結晶の多様な構造やサイズの変化が共存する中で、先に述べた強化因子と強度との関係に関する加算則の問題を考えても、構造材料の強度の理解と設計は大変難しい課題であると思います。

今後データサイエンスの活用がもっと進められていくのは間違いありません。コンビナトリアルな実験科学的あるいは計算科学的手法を用いた努力で膨大なデータが得られます。材料特性のようなアウトプットだけでなく、特性が生まれる元となった材料の種類や構造、製造条件、実験や計算で用いた仮定や条件なども、すべてデータです。このような多様な種類のビッグデータを取り扱って研究開発にフィードバックし効率化していくところが、データサイエンスの活躍の場です。これにより、開発のスピードアップが図れ、コストも低減できると思います。



Q7 今後の研究のためには、産官学の強い連携が期待されますね。

各大学では、研究における産学連携の取り組みがどんどん進んでいます。大学や国研の研究シーズや知見を生かした共同研究の推進はもちろんのこと、アカデミアと産業界とが解決すべき社会的課題を見据えた長期ビジョンを共有して、戦略的な連携がさらに進むことを期待しています。

いま政府が進める科学技術政策では、イノベーション力の強化の一環であるマテリアル革新力強化戦略^{*4}の中で、材料開発でのデジタルトランスフォーメーション(DX)を目指す取り組み、いわゆるマテリアルDXプラットフォーム構想が具体化されて進んでいます。この構想は、高品質なデータの収集・蓄積・活用を戦略的に行うとともに、データが効率的かつ継続的に創出・共用化されるためのプラットフォームを整備するというものです。鉄鋼材料は、結晶の中の元素の存在状態やサイズなどさまざまな組織の多様性を持ってい

ます。また、製造プロセスの過程や使用環境下での時間変化があり、取るべきデータは他の材料に比べても非常に多く、その蓄積や活用は容易ではありません。しかし、この取り組みは、鉄鋼材料が今後も構造材料の主役として社会インフラに使われていくためには、避けて通れないものです。まずは、産官学の連携により仕組みの構築および有効な手法の開発が行われて、高精度なデータ取得、集積、活用が今後進められればよいと思います。



Q8 強度の限界に挑むために、大切なことは何だと思いますか。

多くの研究者は通常塑性変形ベースの強化を目指しますが、実際に高強度材の応用を阻むのは「破壊」の問題です。破壊が起これば支えられる荷重は一気にゼロになるわけですから、破壊がどこでどのように起こるのかを突き詰めて考えることが、使用可能な限界強度の向上を図るための重要なポイントです。

破壊には、延性破壊と脆性破壊がありますが、局所的な変形や破壊が集中することで、最終的な材料の破断につながります。破壊形態は材料の種類で異なりますし、使用環境で連続的に様相が変化します。例えば、結晶粒界は、粒内変形の進展の抵抗になることで強化因子になっていますが、元々結合力が弱いので、粒内の変形を過度に止めると粒界が破壊の起点になります。高強度化を図るには、破壊に対する抵抗をどう制御するかが永遠の課題です。

このような困難な課題の解決には、いろいろな分野の人が協力して当たることが必要ですね。私は金属組織の専門家ですが、部材設計面からどのような材料特性が望ましいのか、材料の長寿命化に関わる腐食をどのように抑えるべきなのか、などの問題についてはきちんと答えることは出来ません。課題解決においては、金属工学、機械工学、物理学、化学などいろいろな専門家が協力して、一つ一つの目標をクリアしていく以外にはありません。現在分野毎の研究の広がり、分野間の融合はますます進んでいますので、これからもっと成果が上がっていくと期待しています。

今後の研究がたいへん期待されます。本日はどうもありがとうございました。

^{*4} Society 5.0の実現にデジタル・イノベーションを支えるマテリアル・イノベーションが不可欠との考えから、2020年に「マテリアル革新力強化のための戦略策定に向けた準備会合」が設置され、検討が進められている。