

ヘテロ構造制御が拓く 新たな鉄鋼材料の可能性

最近、新しいアプローチで取り組まれている構造用材料の研究プログラムが話題を呼んでいる。これまでの材料研究では、いかに均一、均質な組織をつくり込むかに重点がおかれてきた。しかしその新しい研究では、発想を転換し、不均一性 (heterogeneity) に着目し、材料の大幅な特性向上をねらう。

不均一性 (ヘテロ構造) を積極的に利用することで、どのような可能性が広がるのか。科学技術振興機構 (JST) のプログラム「ヘテロ構造制御」*1 のプログラムオフィサー、加藤教授 (東京工業大学大学院総合理工学研究科) に話をうかがった。

*1 正式名は JST 研究成果展開事業 産学共創基礎基盤研究プログラム「革新的構造用金属材料創製を目指したヘテロ構造制御に基づく新指導原理の構築」



ナノミクロスケールでヘテロ構造制御された超微細結晶粒材料は常識を超えた優れた力学特性を示す。しかし特性発現のメカニズムははまだ解明されていない。写真は焼戻マルテンサイト組織の温間加工 (温間テンプレフォーミング) で形成した超微細繊維状結晶粒組織。

資料提供:物質・材料研究機構 元素戦略材料センター 木村勇次 氏

これからのキーワードは「ヘテロ構造制御」

Q. そもそもヘテロ構造とはどんなものですか。

加藤 不均一性 (heterogeneity) に着目して新たな金属材料の開発を目指すものですが、材料分野ではヘテロ構造は必ずしも新しい概念ではなく、さまざまなヘテロ構造を持つ材料が存在し、利用されてきました。例えば明石海峡大橋のケーブルや鉄道レールなどに使用されているパーライト鋼は強度と靱性を兼ね備えるため広く利用されていますが、これは非常に薄い板状のフェライトとセメンタイトが交互に並んでいます。つまり均一ではない、ヘテロ構造なのです。

しかし経験的に用いられてきたこれらの材料を、ヘテロ構造という視点で改めて整理してみることはこれまでにありませんでした。

Q. ヘテロという視点でみると、どのような研究課題がありますか。

加藤 さまざまなスケールでヘテロが存在し、それらを積極的に利用することが考えられます。例えば原子オーダーの世界では、鋼中のさまざまな固溶元素は均一に存在しているわけではなく、ペアを組むなど、不均一に存在しています。例として炭素とマンガンは結びつきが強く、炭素1個であれば鋼中で常温でも非常に早く動きますが、横にマンガンが

あると炭素の動きが抑えられます。炭素は一般的に鋼の特性を大きく変えるものですから、ペアを組んでいるかいないかで特性変化に影響があるかもしれません。

ナノスケールにおいては、鋼中に不均一な介在物 (酸化物) があると、割れの起点となったりします。つまりヘテロは悪者というイメージでした。しかしこの不均一性を追求して研究すれば、逆に生かすことができるかもしれません。

メゾスケールにおいては、硬相と軟相を持つ二相鋼がありますが、整然と並んだ硬相のサイズや形状、硬相と軟相の強度の差、分散状態等が変わると性質はどう変化するのか、詳しくわかっていないのが現状です。

Q. これまでのアプローチとの違いはどのような点ですか。

加藤 これまで材料の特性向上で企業が行ってきた手法は「絨毯爆撃的」と表現されるように、考えられる方法を一通り試してみて、その範囲内のデータのなかから経験的に最も適した手法を見出してきました。非常に複雑な現象のため、そうせざるを得ないところがありますが、多くの場合、試行錯誤しながらやっています。

ヘテロ構造による複雑な現象の普遍的な原理、指導原理が見つければ、材料の最適化や、新材料の設計が効率的に行えたり、材料の飛躍的な特性向上も望めるようになるでしょう。

鉄鋼材料はいまだに謎だらけ。
研究者は好奇心とロマンを持って
取り組んでほしい



プログラムオフィサー

加藤 雅治 氏

東京工業大学大学院総合理工学研究科 教授

最近では分析機器や観測機器、シミュレーション技術などが向上したおかげで物理解析や計算科学が著しく進歩しました。昔なら何十年も時間がかかったかもしれませんが、今では一つ一つの結晶粒がどのように分布し、お互いにどのような関係であるかということが瞬時にわかります。詳しく調べることが可能になると、精度の高いシミュレーションができるようになり、計算式で材料の最適化が行えるようになってきます。

まさに今、ヘテロ構造制御の研究を始めるのに良い時代なのです。

ヘテロ構造制御を理解し、つくり出す

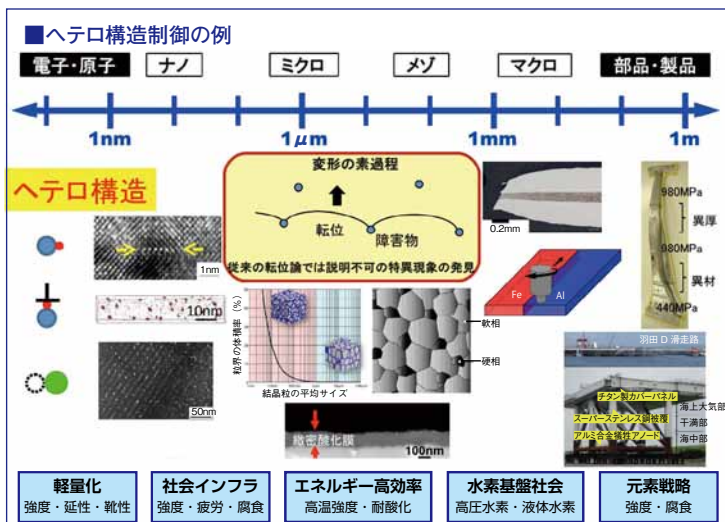
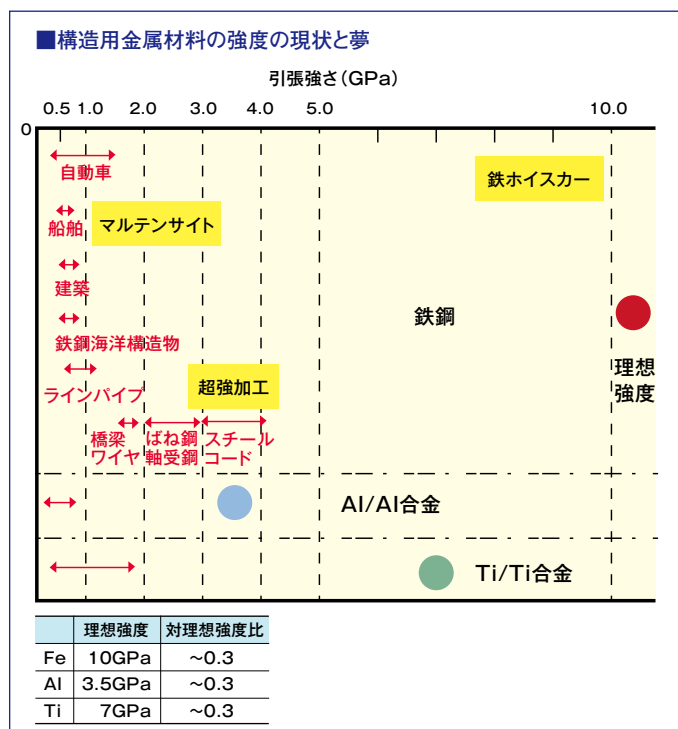
Q. ヘテロ構造制御研究で鉄鋼材料の可能性はどうか広がりますか。

加藤 例えば超微細結晶粒材料は、結晶粒が細くなればなるほど結晶粒界が全体に占める割合が高くなります。すなわち、結晶粒よりも、結晶粒界が新たな役割を果たすようになるのです。こうなると、これまでの材料とまったく違う性質が見えてきます。非常に強度が増すことはもちろんのこと、強度が温度に強く依存するようになるなど、面白い性質が出てきます。その一部は解明されてきていますが、大部分はまだわかっていません。

これまでの理解は結果の中で転位がどの程度動きやすいか、動きにくいかに材料の強度が決まっていたのですが、これからは粒界が重要となります。粒と粒の境目である粒界は原子の並びがばらばらで、このばらばらで不均一なところが材料の性質を左右するのです。つまり、強さを支配する因子が変わってくる可能性があります。このように、これまでの視点を180度変えなければいけません。理解できない現象がたくさんあり、謎だらけです。だからこそ、研究者は好奇心とロマンを持って取り組んでほしいと思います。

Q. ヘテロ構造をつくり出すことも可能に？

加藤 結晶中には析出物が多く存在しますが、これもヘテロ構造です。析出強化は従来より材料の高強度化で用いられてきた手法ですが、析出物をコントロールし、より効率的につくり出す研究が進められています。近年は製造技術の進歩により未知の領域にも挑戦できるようになっています。例えば積層材の積み重ねがどう



いう状態であれば強度と延性、靱性のバランスが良くなるかといった指導原理ができれば、工業的にその組織がつかれるようになるかもしれません。

追い風が吹き始めた構造用材料研究

Q. 今回、JSTのプログラム「ヘテロ構造制御」^{*1}では、初めて構造用材料が研究対象に採択されました。構造用材料が研究対象となることで、どのようなことが期待できますか。

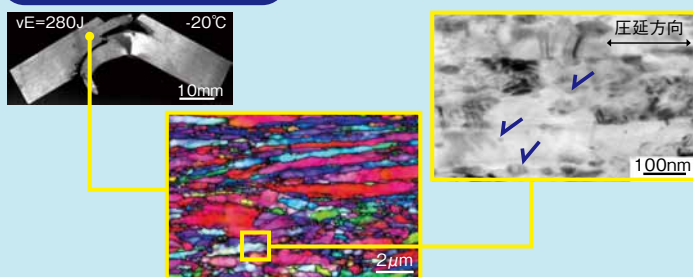
加藤 これまで一般構造用金属材料を扱った国の大きな研究支援プロジェクトはほとんどありませんでした。なぜなら機能材料、例えば磁性材料などは一般の人にアピールしやすく、強い磁石ができれば人にその威力を目の前で見せることができますが、構造用材料は大きなビルができたといっても、誰もその中の鉄骨までは見ないでしょう。しかし地味ではありますが日本の産業をかなりの割合で支えているのが構造用材料なのです。だからこそ、このようなテーマで若手研究者の育成を含め、研究が成功すればとても意味のあることだと思います。実用化や応用

を重視するあまり、即戦力となる成果を求め、学術的に深くない課題は基礎研究にはそぐわないです。学術的に基礎がしっかりした課題は、広範囲の応用、成果も望めるでしょう。ヘテロという視点があって、構造用材料に追い風が吹き始めたのです。

Q. ヘテロ構造制御研究がめざす構造用材料とはどのようなものですか。

加藤 強さと壊れにくさを兼ね備えた構造用材料をつくるのが研究の一つの大きな柱です。強いものは脆いし、変形できるものは弱い。強度と靱性、強度と延性という相反する特性をどう両立するかは、組織をいかにコントロールできるかにかかってきます。強さや壊れにくさは組織に強く依存し、組織の大きさや分布をわずかに変えると性質が大きく変化します。それを制御できるかどうか、我々の究極の目的だと思います。絨毯爆撃的に行ってきた経験的な研究手法を、システムチックに転換する時代がやってきています。まずは、指導原理のような普遍的なルールを見出し、その知識が新しい材料開発に役立てられれば嬉しく思います。

ヘテロ構造制御の研究例①

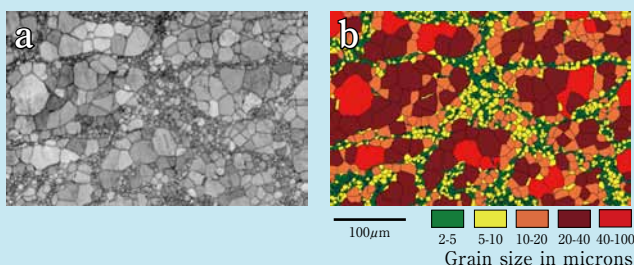


「フェールセーフ機能を付与した強くて壊れにくい超微細組織状結晶粒鋼の力学特性解明」

研究代表者: 木村勇次 (物質・材料研究機構 元素戦略材料センター主幹研究員)

超微細組織状結晶粒組織は、 $\langle 110 \rangle$ // 圧延方向繊維集合組織を有する伸長粒の基地中にナノサイズの炭化物が分散したヘテロ構造から成り、1800MPaを超える降伏強度でも壊れにくい。本プログラムでは、超微細組織状結晶粒組織の力学特性発現のメカニズムを解明し、ヘテロ構造の最適化を図る。

ヘテロ構造制御の研究例②

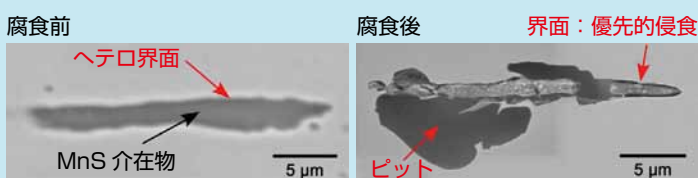


「調和組織制御による革新的力学特性を有する金属材料の創製とその特性発現機構の解明」

研究代表者: 飴山恵 (立命館大学理工学部教授)

調和組織制御法により作製された純チタン粉末焼結体。(a)はEBSD (Image Quality) 像、(b)はEBSD粒径分布像。(初期粉末粒子径: 約120μm、焼結条件: 圧力50MPa、800℃、保持時間600s) 純チタンのみならず、種々の金属材料において調和組織材料は高強度と高延性を両立するが、その理由は、このような、微細結晶粒組織が網目状に三次元配置したヘテロ構造ができるためである。

ヘテロ構造制御の研究例③



「鋼/介在物ヘテロ界面のマイクロ電気化学特性解明と界面ナノ構造制御による高耐食化原理の導出」

研究代表者: 武藤泉 (東北大学大学院工学研究科准教授)

実用ステンレス鋼にはMnS系介在物などの非金属系介在物が点在している。そして、ステンレス鋼の腐食起点が、非金属系介在物の界面領域の優先的侵食であることがわかってきた。そこで本研究では界面領域に特定の相(層)を形成させる技術を開発し、耐食性の高い界面を導入することをめざす。

「産」のニーズを「学」が解決 画期的な取り組みが注目される「ヘテロ構造制御」プログラム

2010年11月にスタートしたJST産学共創基礎基盤研究プログラム「ヘテロ構造制御」*1は、企業では解決できない技術課題を、大学などの研究者が解決にあたるという、これまでにない連携スタイルが特徴的である。

なぜ「ヘテロ構造制御」が産業界から技術テーマとして提案されたのか、プログラムのアドバイザーの一人である潮田浩作氏（新日鐵住金（株）技術開発本部フェロー）にお話をうかがった。

「鉄鋼材料は成熟し、やることはもうないと思われがちだが、けっしてそうではない。強度を例にとると、現実の材料強度は最も高いスチールコードで理想強度の30%程度、自動車用材料に至っては10%程度と、まだまだ達成できていない領域がある。しかも強度を上げると、伸びなくなる、割れやすくなるなど、特性が悪化する。これらの両立にはヘテロという概念が非常に魅力的と考えた。今後の国際競争力確保のためにも、従来のレベルを飛躍的に超えた鉄鋼材料が必要となっている」

近年では、中国の粗鋼生産量は著しく増大し、我が国が得意とする高級鋼材においても、中国や韓国の追い上げが目覚ましい。今後素材産業の国際競争は激化すると考えられる。

「これまで鉄鋼材料は世界のトップを走り続けてきたが、2番手、3番手との差は僅差になってきており、危機

感を感じている。国際競争力確保のためには、新たな材料開発を行わなければならない。JSTのプログラムは企業ではできない基礎基盤研究を徹底的に行うことができるため、大いに期待している。ぜひ研究成果を産業用に発展させていきたい」

現在、同プログラムは大学・公的研究機関の研究者により12の研究課題が進められている。将来有望な若手研究者が中心となって研究が進められていることや、産業界として日本鉄鋼協会だけでなく、日本アルミニウム協会や日本チタン協会など、金属材料業界が一体となって参画していること等も話題となっている。これまでにない画期的な取り組みが、今後どのように実を結んでいくのか。大きな期待が集まっている。

（2012年8月8日収録）



アドバイザー

潮田 浩作 氏

日本鉄鋼協会学会部門副部門長、
新日鐵住金（株）技術開発本部フェロー

■「ヘテロ構造制御」研究代表者と研究課題一覧

採択年度	研究代表者	研究課題
2010	飴山恵（立命館大学理工学部教授）	調和組織制御による革新的力学特性を有する金属材料の創製とその特性発現機構の解明
	木村勇次（物質・材料研究機構元素戦略材料センター主幹研究員）	フェールセーフ機能を付与した強くて壊れにくい超微細繊維状結晶粒鋼の力学特性解明
	里達雄（東京工業大学精密工学研究所教授）	鉄を活用した新規ナノヘテロ構造アルミニウム合金の創製と3D構造解析
	下川智嗣（金沢大学理工研究域准教授）	材料科学と固体力学の融合によるヘテロナノ構造金属における高強度・高靱性両立の指導原理確立
	瀬沼武秀（岡山大学自然科学研究科教授）	超微細マルテンサイト相を母相としたヘテロ組織の創成とその特性の解明
	土山聡宏（九州大学大学院工学研究院准教授）	高強度鋼板の塑性変形に伴う軟質分散粒子のヘテロ→ホモ構造変化の有用性評価
	藤井英俊（大阪大学接合科学研究所教授）	摩擦撹拌現象を用いたインプロセス組織制御によるマクロヘテロ構造化技術の確立
	毛利哲夫（北海道大学大学院工学研究院教授）	ハミルトニアンからの材料強度設計
	柳本潤（東京大学生産技術研究所教授）	幅拘束大圧下制御圧延による易成形高強度パイモールド薄鋼板の製造基盤研究
2011	鳥塚史郎（物質・材料研究機構材料創製・加工ステーション ステーション長）	10000GPa%J高強度・高延性・高靱性鋼を実現できる5%Mn組成を利用した超微細ヘテロ変態組織の生成とその機構解明
	廣澤渉一（横浜国立大学大学院工学研究院准教授）	超微細粒強化と時効析出強化を並立させる新規アルミニウム合金展伸材の開発とその合金設計指導原理の確立
	武藤泉（東北大学大学院工学研究科准教授）	鋼/介在物ヘテロ界面のマイクロ電気化学特性解明と界面ナノ構造制御による高耐食化原理の導出