

イノベーションを支え続ける構造材料であるために

Structural Material, as being the Fundamental Technology for the Realization of the Social Innovations

本間 穂高*
Hotaka HOMMA土井 教史
Takashi DOI

抄 録

官民挙げての科学技術イノベーション創出議論が高まる中で、新技術の社会実装に必須となる構造材料の社会的な存在感が増している。この様に変革し続ける機能ニーズに的確に応えるべく現在の鉄鋼技術を見直すと、原理が十分に解明されていない要素技術が数多いことに気付く。鉄鋼材料の性能を飛躍的に向上させるために、それらの課題に潜んでいる有効な解を見つけ出し商品開発に反映させることが肝要であるとして、社会イノベーションを支えるための鉄鋼材料の今後の研究の方向性について述べた。

Abstract

Among the consecutive arguments for the Science and Technology Innovations by the government and the agencies, the structural materials are recognized as the key factor of their promotions. It is no doubt that when the remarkably unique ideas and technologies are accepted for the actual utilizations possessing their shapes or structures, the steel products are indispensable as the typical material for the purpose. On the other hand, a lot of basic research fields are found to be remained where essential solutions are not obtained yet. It is emphasized that the appropriate research targets ought to be extracted in those field, afterwards their results can achieve the development of the most advanced steel products.

1. 社会イノベーションを支えるために

第五期科学技術基本計画の策定においては、政府のみならず経済団体連合会など民間団体の間でも、我が国におけるイノベーション創出が盛んに議論されてきた^{1,2)}。元より、戦後を振り返るまでもなく、私たちはごく身近な処でいくつものイノベーション創出を体験してきた。そしてこれからも生まれ続けるであろうことを暗黙のうちに予感している。

革新的な科学技術や斬新なアイデアに基づいて世の中が大きく飛躍するとき、最終的にそれを形にする段階で構造材料が求められることは必須である。鉄鋼材料はその代表素材として社会の要請に応じてきたし、また他素材と連携し、時には競合しながら性能向上に努めてきた。もちろん従来にない“もの”が生まれそれを形にする訳であるから、要求される性能も従来の延長線上で片付くことは余りなく、何かこれまでにない性能が発現しないものだろうか悩み抜いた挙句の果てに、漸くニーズに応えられた、といった事例が大半である。

これまでを振り返ってみれば、加工する時は柔らかく形

ができ上がったら硬くなる³⁾、といった性質や、まっ平らな板から細長い缶容器をしごき出す加工を実現する⁴⁾、などが挙げられようか。中には、他の素材の持つ性能を鉄鋼でも実現しようとしたものや、鉄でしか実現できないと要請されてとことん極めた性能などもあり、様々である。

良く言われることであるが、鉄は実にユニークな性質を持つ物質であり、それらを多様に組み合わせて、今日でもまだ新しいニーズに応えるべく新しい特性が見出され続けている。海水中の建造物に使用しても腐食しない鉄⁵⁾や、ユーザーが使用する段階で結晶構造を変える鉄など⁶⁾。なぜこのような現象が生じるのか、これまで気付かなかったことを改めて掘り下げて解明することで達成できたこともあるし、物性諸表を眺めながら誰も気付いていない性能を独自に構築した例もあろう。

端的に言うと、鉄はその物理的な性質も含めて、まだ十分解明されていない基礎的な特性が極めて多い。最も基本である α - γ 相変態の物理機構も明らかにされていないし、引っぱり試験の降伏点挙動も諸説あって定まらない。更には転位など格子欠陥の塑性変形時の動的挙動や、結晶粒界の原子構造などもモデルの域を出ていない。それら全てを

* 技術開発企画部 技術企画室 上席主幹 博士(工学) (先端技術研究所 基盤メタラジー研究部 上席主幹研究員 兼務) 東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071

理解する必要がある訳ではないが、これまで長年積み上げてきた鉄鋼材料の技術体系に、一つでも新しい知見を加えることが、更に新しい性能を持った鋼材を生み出すために必須であろう。

我が国の鉄鋼生産量は約40年に渡って頭打ちとなっているが、世界的に見ればまだ長きに渡って成長が見込まれる市場分野である。現実には、かつて我が国が生産していた品質の製品を中進国が生産して市場の裾野を広げ、我が国は常に、絶えず性能が向上した製品体系の頂点からの一億トン分を生産しているのである。この構図の中で、冒頭述べた様に今後も高まっていく社会のニーズに応え、鉄鋼材料の性能向上を実現するために、まだ解明しきれていない基礎基盤的なメタラジーを明らかにし活用することが、我が国の鉄鋼業には必須となるのである。

2. 形あるもの構造材料, そして鉄鋼材料

構造材料の機能は、形を成すこと、そして形を維持することである。その限界機能を単純に挙げれば、変形への抵抗力としての強度と破壊への抵抗力としての靱性となる。とはいえ、構造材料が曝される実現象は極めて多様である。

変形は一般に、可逆的な弾性変形と非可逆的な塑性変形に大別される。両者は物性に基いて本質的に異なるが、現象論の内で一連のものとして取り扱われることがしばしばあり、それが材料開発における課題となることもある。高強度材の成形における精度課題や、自動車、船舶、建造物などにおける衝撃変形の変形速度依存性、温度依存性など、最先端材料の開発には常に付きまとう問題である(図1⁶⁾)。

破壊はその巨視的挙動が多彩に分類整理され、現象としての理解は随分進んでいるものの、材料の本質に基づいた機構解明が十分進んでいるとは言えない。例えば亀裂の進展は、第一義的には原子結合の断裂であるかもしれないが、いかなる劈開破面といえども原子レベルでの断裂面が観察されることは無く、亀裂先端でのごく微小な塑性変形領域の形成や、新たに現れた表面における何らかの緩和現象を伴っている。もう少しマクロに見ても、破壊応力の及ぶ方向と劈開方向にはある程度の乖離があり、それを緩和するために劈界面間を繋ぐ延性破壊領域が存在することもある。巨視的には脆性破壊であっても、微視的には脆性破壊と延性破壊の複合過程であることが多い(図2⁷⁾)。

構造材料が社会実装において機能を預けられるためには、耐疲労破壊、耐摩耗などの信頼性に基づく特性も重要である。恐らくこれらも、基盤現象に立ち返って解析すれば、上述の弾塑性変形および延性脆性破壊の複合現象と見なすことができる。これらに時間経過や温度履歴などを考慮して、結果としての特性をいかに精緻に記述するか、が課題である。更には、材料のおかれる環境との化学反応を考慮することで、耐食性などの特性も記述されよう。

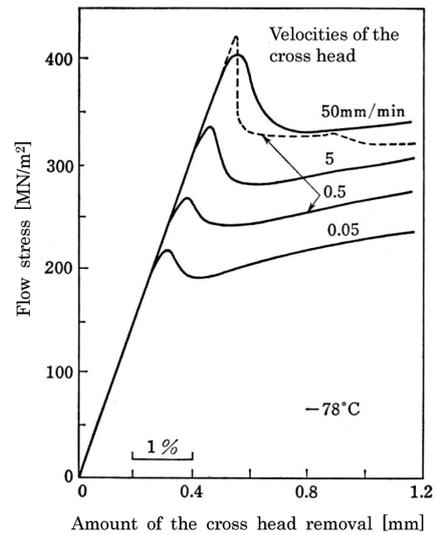


図1 応力歪曲線の例: 脱炭した多結晶鉄の-18°Cにおける降伏応力の歪速度依存性
破線は50ppmのCを含みリュース帯を伴う降伏を示す場合⁶⁾

Strain stress curves of polycrystalline steels at -18°C

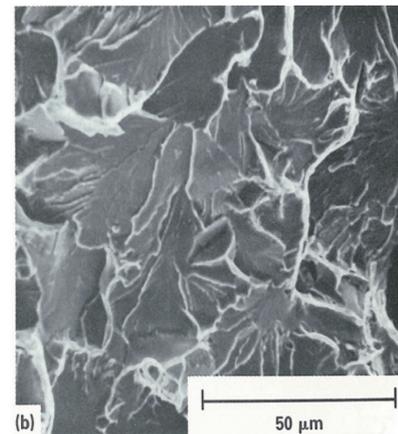


図2 脆性破面の例⁷⁾

River patterns observed on the brittle ruptured surface

鉄鋼材料の特徴は、基本相のBCC:フェライトだけでなくFCC:オーステナイト、炭化物:セメントライト、準安定BCT:マルテンサイトなど、僅かな添加元素や熱処理によって多彩な相構造が混在しうることである。多くの諸特性は、これらの相の単純な物性の足し合わせではなく、各相の分布状態の効果で決まることが多い。従来の研究開発もこの組織制御に関するものに労力の大半が割られてきた。

鉄鋼材料の市場がごく短期間で急激なグローバル化に襲われ、材料研究に対する商品開発への直結化がこれまでになく強く求められている今日、基盤に立ち返った理解を深め、直ちに材料設計にフィードバックすることがこれまで以上に重要である。

3. 弾塑性に立ち返った多結晶材の考察を例に

数mmから数kmまで、大きさだけとっても多彩な鉄鋼材料の用途の中で、ミクロな金属組織は、常に均一な数

μm ～数 $10\mu\text{m}$ の結晶粒組織から成っている。強度、靱性、成型性などの機能はあくまでも多結晶組織によって発現しているものであり、この多結晶という形態の中で生じている弾性変形と塑性変形の役割を改めて考えてみたい。

転位に代表される格子欠陥の動的挙動は、結晶粒内では単結晶的に発現することが期待されるが、隣接粒には、別の結晶方位、場合によっては別の結晶系があって、諸物性は連続しておらず、結晶粒界がその乖離によって生じるストレスを引き受ける。この様にして粒界に局所的に堆積する歪が、結果的に強度、靱性などを向上させていると期待されるが、それを弾性と塑性に切り分けて機構的に説明された例は必ずしも多くはない。

粒界に蓄積される歪は一樣ではないものの(図3)、全く乱雑という訳でもない。粒界近傍の変形組織を観察すると、いくつかの特徴的な形態が見られる。周期的な帯状組織は、明らかな結晶回転関係を維持しながら方位の揺籃を繰り返しており、特定のすべり系が活動していることを示唆する。隣接する結晶粒に同様の変形組織が“侵入”することは、時として観察されることはあるが、決して多くはない。つまりこのような塑性的な歪は幾何学的に整合の取れる方位関係が成立した場合には連続性を形成することができるが、一般にはここで断絶されることが少なくない。この時、塑性変形が実現されなかった隣接粒内には、弾性的な歪が外力として及ぼされていることが想定される。

ここで塑性歪というものを教科書に立ち返って復習してみると^{8,9)}、その基本単位である格子欠陥あるいは転位は、形成された格子の歪みに従って一樣ではない弾性場を形成し、それがエネルギーの蓄積になり、また格子欠陥同士の相互作用を生む。つまり歪場を作るものは弾性であって塑性自体ではない(“弾性場”はあるが“塑性場”はない)。従って粒界に蓄積される歪は一義的には弾性歪であり、塑性歪は幾何学条件が揃った場合に緩和の結果として現れたものであるか、あるいは塑性変形の際の残渣として粒界近傍に溜まった転位群であろう。いずれにせよそこに現れる歪エ

ネルギーは“弾性的”であろう。

もう一つ、粒界に蓄積した弾性的な歪の例を挙げよう。BCC鉄において圧延変形が最も容易な $\{100\}\langle 011\rangle$ 方位粒と、これが圧延方向(RD)軸周りに数度傾いた粒の双結晶を圧延した組織を図4¹⁰⁾に示す。ここで結晶粒界は圧延方向に沿っている。ここでは平面歪が実現されている筈であるにもかかわらず、粒界近傍では圧延直角(TD)方向に緩やかな歪が観察される。双方の結晶粒内でのすべりが粒界で連続せず、その緩和が弾性歪主体でなされた例である。

もう少し詳しく説明すると、 $(100)[011]$ 方位粒は圧延に際して、 $(110)[\bar{1}11]$ 向きと $(\bar{1}\bar{1}0)[111]$ 向きが複合して平面歪が実現され方位が維持される。両向き面を走る転位がらせん転位であることを仮定すれば、交叉向きを介してすれ違えることができるからである。しかし実際の結晶方位が

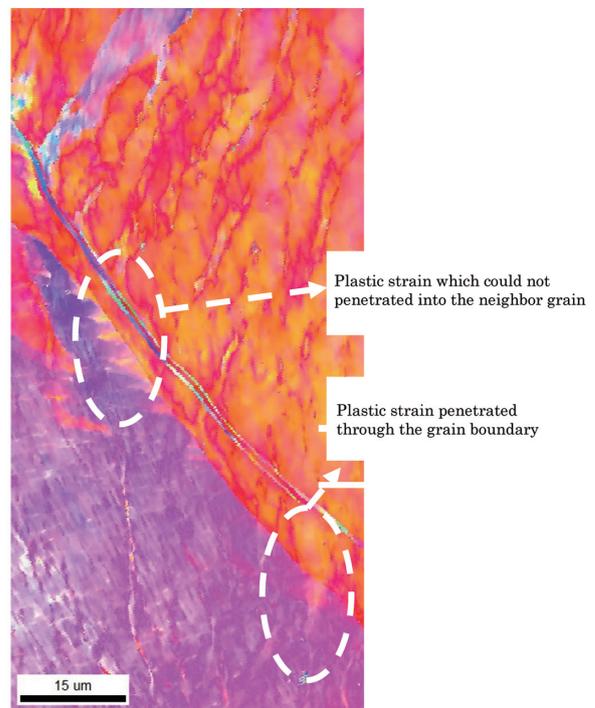


図3 粒界近傍の歪堆積の様子
Microscale strains accumulated at the grain boundary

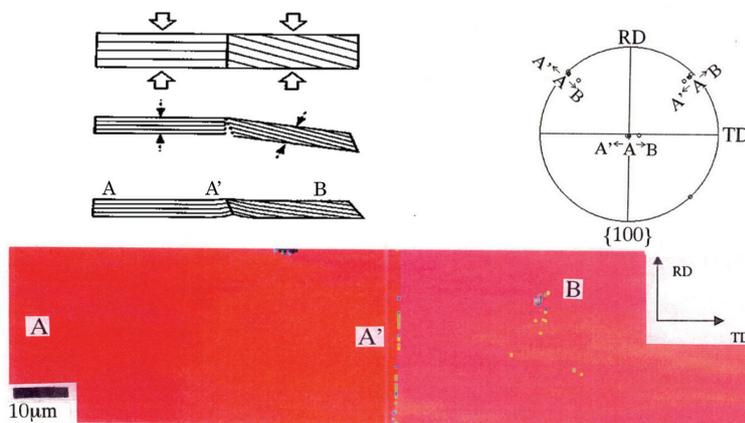


図4 粒界に弾性歪が蓄積された例¹⁰⁾
Observed elastic strain besides the grain boundary

(100)[011] から僅かにずれた場合、板延びの方向が圧延方向から乖離し、これを緩和する方向に導入された別の歪が粒界に蓄積される。この緩和歪を迂りで実現しようとする、図4の場合は(101)[$\bar{1}11$]などが活動する必要があるが、この上を走るらせん転位は交叉迂りによって前述の二つの迂り面上の転位とすれ違うことができない。そのため、弾性が主成分となる歪で体積の連続性を確保する必要が生まれるのである。

この歪組織は熱処理を施すと、すべり系からは予測が困難な結晶方位が再結晶で得られる(図5)。蓄積された歪

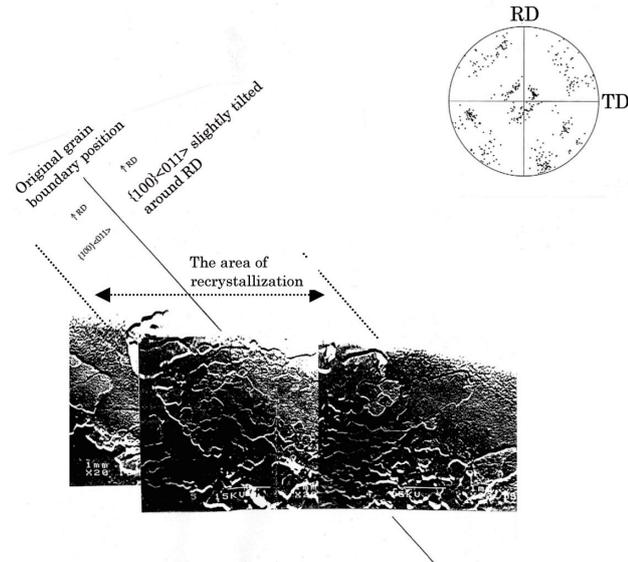


図5 弾性歪が蓄積された結晶粒界からの再結晶¹⁰⁾
Recrystallization at the grain boundary where elastic strain was piled up

が弾性的と仮定した場合、どのような熱解放過程が想定されるだろうか。隣接粒からの拘束で弾性歪が生じているのは、拘束力が降伏強度以下だからである。従って加熱によって降伏強度が低下した場合、拘束力=応力が降伏強度を上回ることがあり得て、その結果“座屈”が生じ、塑性歪状態に移行することが考えられる。もしこの座屈によって生じた新たな方位が低歪組織であれば、周辺の変形組織を蚕食して再結晶に至ることがあり得るかもしれない。以上の機構がこれまでの再結晶研究で議論されたことはほとんどないが、材料変形の基盤に立ち返ればあながち無理な着想とも言えまい。もちろん、この座屈の方位にどのような物があり得るか、十分な検証が必要であるが、ここではそれを論ずる十分な紙面が無いので、別の機会に譲ることとする。

4. 鉄鋼材料は基盤研究の宝庫

これまでの所で、鉄鋼材料の構造材料としての強度、靱性の理解について、弾塑性論を中心に議論してきた。実際には、これらが基礎にあるとはいえ、様々な物性論、反応論が織り重なって材料科学が成り立っている。その中には、材料特性=パフォーマンスを記述するもの、製造工程=プロセスを記述するもの、基礎解析=原理を理解して材料設計に資するもの、などがある。経済産業省、NEDOが主催する革新的新規構造材料等技術開発プロジェクト内の鉄鋼分科会で、私たちが取り組むべき課題を議論したマップを図6に示す。ここに挙げた数十もの課題が全て解決されなければ、一片の鋼板も製造することはできない。またこれらの課題は相互に密接に繋がりが合うものであり、材料特

| characterization : 物性 | Property : 特性 | Performance : 性能 |
|--|--|--|
| 結晶構造 結晶系/結晶異方性 原子結合/電子状態 結晶粒界 双晶 原子空孔/転位 すべり系 整合歪 格子歪 熱力学・自由エネルギー 析出 界面エネルギー/界面反応 相変態 準安定相/応力誘起変態 速度論 拡散 変態速度 析出速度 凝固、粒界移動 応力応答 弾性場 弾性コンプライアンス 降伏/臨界剪断応力 塑性流動 元素機能 軽元素/水素 格子振動/フォノン 磁性 希少元素代替 | 組成 固溶元素 偏析 相分離 非平衡相 侵入型/置換型原子 介在物 組織 結晶粒径 相平衡/相分配 回復/再結晶/粒成長 残留歪/歪分布 集合組織 界面 酸化、窒化、硫化、脱炭 潤滑、摩擦 接合界面 異相界面 界面形状/粗度 破断・亀裂 破断性状 亀裂伝播 応力分布/応力集中 弾性/塑性域分布 | 靱性 低温靱性 衝撃靱性 接合部靱性 切欠き靱性 強度 高温強度 降伏強度 加工硬化 破壊強度 高弾性率 接合強度 加工性 破断伸び プレス成形性 接合性 切削性 鍛造成形性 信頼性 疲労強度 耐食性 耐熱性、クリープ強度 経年劣化 応力腐食割れ |

図6 鉄鋼材料の研究対象となる基盤メタラジー要素
Subjects in the basic metallurgy for the development of the steels

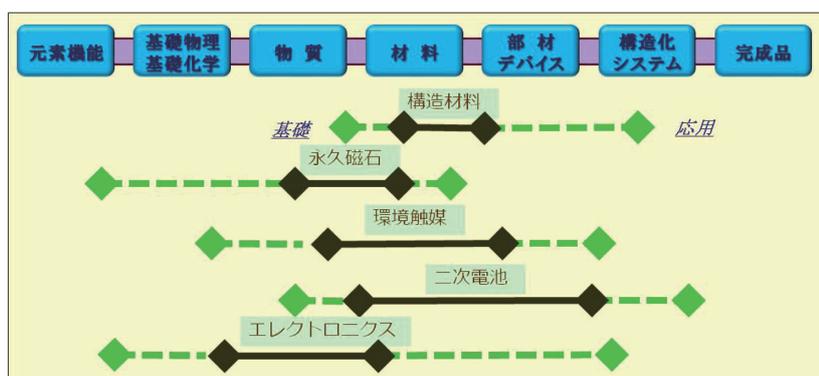


図7 材料開発の視点から見た基礎分野、応用分野の展開¹¹⁾

Both directions towards the basic field and the application field from the materials viewpoint

性の創出には基礎解析による原理解明が不可欠である。すなわち基礎と応用の間での、研究開発成果の淀みない受け渡ししが新商品展開の質と速度を高めるのに必須となる。

一方で、これまで述べてきたように鉄鋼材料は基盤研究に立ち返って追求すべき課題が、今日においても少なくない。この様相について、文部科学省が所轄する元素戦略プロジェクト“研究拠点形成型”¹¹⁾での議論を引用して考えてみる。我が国は素材産業が強く、例えば海外で新しい生活様態が生まれるに伴って新商品市場が創成されたとしても、部素材は日本から供給されることが多い。そのための新規材料開発およびそれをもたす基礎学理との結びつきや、部素材開発から完成品としてエンドユーザーに届くまでのシステム化、構造化の段階などを整理すると、図7の様になる。かつて我が国の産業経済を牽引したエレクトロニクスなどは、基礎物理に基づく新規物質創成がそのまま電子デバイス開発に直結する分野であったが、構造材料は構造部材化との結びつきが比較的強く、基礎学理の成果を結びつけるまでに幾つかの大きなステップを乗り越えなければならない。また意外なことに、エンドユーザーまでの距離も他素材と比べると距離があって、ユーザーニーズの取り込み余地も十分あると言える。

鉄鋼材料においても同様であり、今日の基礎学理への深化の傾向や、ユーザーとの対話の緊密化による様々な商品開発の実績は、この様な基礎と応用への広がり余地の大きさに基づくものである。現に基礎の方向では、強力な量子ビームであるJ-PARCや、放射光による解析施設であるSPring-8など、国家が建設を推進する大型研究施設における産業利用の比率が相当高まっている¹²⁾。確かにこれらによるバルク解析、その場測定は、これまでの構造材料研究に不足しており、かつ今後極めて有効になると考えられている。成型加工解析や実装後の信頼性評価など、従来の研究手法から格段に効率化されていくことが期待される。

5. 結 言

新日鐵住金(株)における基盤メタラジー研究のミッション

ンは、単に基礎基盤研究を掘り下げただけではない。それが材料に対する社会要請にどの様に結びつけられるかを明示し、そのサプライチェーンにも似た一貫の開発ステージ群において注力すべき個所を見出すとともに、抽出された研究課題の解決に邁進することである。その成果を新商品開発に確実にフィードバックして、激化する最先端鉄鋼材料の市場競争に勝ち抜いていかなければならない。

参考文献

- 1) <http://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/kihon5/chukan/honbun.pdf>
- 2) <http://www.keidanren.or.jp/policy/2015/094.html>
- 3) 高橋学：新日鉄技報. (378), 2 (2003)
- 4) 高橋学 ほか：新日鉄技報. (391), 127 (2011)
- 5) 紀平寛 ほか：新日鉄技報. (380), 28 (2004)
- 6) Takeuchi, T. et al.: J. Phys. Soc. Japan. (18), 488 (1963)
- 7) Metals Handbook. Vol.12 Fractography. 9th Ed. Ohio, ASM International, 1987
- 8) 加藤雅治：入門転位論. 第6版. 東京, 裳華房, 2007
- 9) 渋谷陽二：塑性の物理. 初版, 東京, 森北出版(株), 2011
- 10) 本間徳高, 中村修一, 吉永直樹：鉄と鋼. 90 (7), 510 (2004)
- 11) http://scienceportal.jst.go.jp/columns/technofront/20140715_01.html
- 12) 本間徳高：ぶんせき. 5, 274 (2013)



本間徳高 Hotaka HOMMA
技術開発企画部 技術企画室 上席主幹
先端技術研究所 基盤メタラジー研究部
上席主幹研究員 兼務 博士(工学)
東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071



土井教史 Takashi DOI
先端技術研究所 基盤メタラジー研究部
主幹研究員 博士(工学)