



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

鉄鋼との10年

10 Years with Iron and Steel

南部将一

Shoichi Nambu

東京大学工学系研究科
マテリアル工学専攻

講師

1 はじめに

今回、躍動の記事を執筆するにあたりこれまでの鉄鋼研究を振り返ってみるとちょうど10年が経過していた。2007年に東京大学工学系研究科マテリアル工学専攻、榎研究室（信頼性材料工学研究室）で学位を取得後、当時の小関・井上研究室（材料組織工学研究室）に「複層鋼板プロジェクト」の産学官連携研究員として加入したときに初めて鉄鋼研究と向き合うことになった。その後10年間、様々なプロジェクトや研究課題に関わることを通じて、鉄鋼の奥深さの一端に触れることができた。今回はこれまでの研究のいくつかをピックアップして簡単に紹介させていただく。

2 高強度と高延性を両立する複層鋼板

複層鋼板を簡単に言ってみれば高強度鋼と高延性鋼を積層させた複層型の鉄鋼材料である。このような積層材料については昔から多くの研究が行われていたが、力学特性としては強度と靱性の両立を目指したものが多く、特に延性についての検討は限られていた。「複層鋼板プロジェクト」の目的は引張強度1200MPa、伸び20%以上の実現であり、溶接性などの観点から低炭素鋼を構成鋼としたため、高強度鋼は必然的に低靱性のマルテンサイト鋼となる。このような脆性的な材料を複層化する場合、複層材の延性は強度とは異なり、複合則に従わず脆性層と同程度の非常に低い値となることが知られている¹⁾。これに対して筆者らは複層材の変形における破壊形態について検討し、脆性な層が単独で破断するTunnel crack やはく離を伴って破断するH-shape crackについて理論的なアプローチを行うとともに実験的な検証を試みた。これら検討により、一様変形を阻害する破断を抑止するための設計指針として、脆性な構成層つまりマルテンサイト鋼の破

壊靱性と層厚との関係²⁾、界面強度との関係³⁾が重要であることを示した。他にも構成鋼の特性や溶質元素の相互拡散、界面近傍の組織などを制御することによって、ステンレス鋼ベース、低合金鋼ベースでそれぞれ目標の強度延性バランスを達成した（図1）。さらには加工性、溶接性、耐水素特性など様々な評価を行い、高強度鋼では問題であったこれら特性についても優れていることを示すことができた^{4,5)}。このプロジェクトが鉄鋼材料についての初めての研究であったが、鉄鋼の合金設計・作製プロセスから特性・性能評価まで全て筆者自身で考えて実行できたことは、それまで全く未知の鉄鋼を知るうえで非常に有意義な経験であったといえる。複層鋼板のメリットの一つとして、構成鋼の体積分率を変えることによって強度延性バランスを簡単に変化させることが出来ることが挙げられる。この複層材ならではのメリットを生かすことで、高強度で脆性なマルテンサイトを引張負荷で容易に50%以上変形させることが出来る。これは非常に面白いということで、次章で述べるようなマルテンサイト鋼の大変形挙動を研究するに至った。

複層鋼板に関連する研究はプロジェクト終了後も継続して

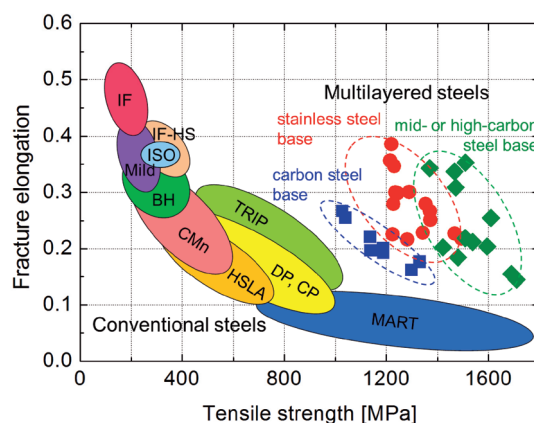


図1 従来の自動車用鋼板と開発した複層鋼板の強度・延性プロット

おり、スクラップ鋼を高強度層に使用した複層鋼板 (ALCA)、中・高炭素鋼ベースの複層鋼板 (ISMA) の開発などを行っている。複層鋼板では高強度鋼と高延性鋼を同時かつ隣接状態で熱処理しなければならないため、変態温度や炭素活量を考慮した成分設計、熱処理条件設定が必要不可欠となる。中・高炭素鋼ベースでは焼戻しマルテンサイト鋼/TRIP鋼という構成に至ったため、それぞれに必要な強度、破壊靱性、延性を組織制御によって最適化を試みた。その結果、図1に示すような強度延性バランスを達成できているが、マルテンサイト鋼の強度と破壊靱性の両立、TRIP鋼の加工硬化特性つまり残留オーステナイトの制御については更なる検討が必要であり、構成材料の特性向上における組織制御指針の構築を目指して現在も研究している。

複層鋼板の展開例として、比強度に優れるが加工性の低いMg合金と延性に優れたオーステナイト系ステンレス鋼の複層金属材料の開発が挙げられる。この研究での鍵は鋼とMg合金の界面設計である。従来、その融点差、相互固溶しないといった問題から鋼とMg合金の接合は困難であった。そこで筆者らはMg合金中の添加元素に着目し、Mnの界面への偏析を利用したInfiltration法⁶⁾や、界面にインサートした金属とMgの共晶液相を介してFe-Al系金属間化合物を微細かつ均一に形成させるReactive-TLP法⁷⁾によって強固な界面を有する複層金属材料の創成に成功した。この研究はスイス連邦工科大学ローザンヌ校 (EPFL) のProf. A. Mortensenのグループと共同で行ったため、EPFLにも滞在して研究を進める機会を得ることができ、日本の大学とは異なる文化を感じることができたことは良い経験であった。

③ ラスマルテンサイトの大変形挙動

鋼で最も高強度であるマルテンサイトは低延性、低靱性であるため、これまで単体では変形させることが非常に困難であった。そのため、変形挙動についての検討は、数%程度の引張ひずみ域や圧延など複雑な応力場におけるものなど非常に限られていた。筆者らは複層化という手法を用いることで、図2に示すように引張で50%以上の一様変形を可能にしたため、これまで未知の領域であったマルテンサイトの大変形挙動を世界で初めて検討できた。引張変形中におけるラスマルテンサイトの組織変化については、SEMによる変形のその場観察⁸⁾、デジタル画像相関法 (DIC) によるひずみ分布^{9,10)}、SEM/EBSDによるマルテンサイトブロックにおける結晶方位回転¹¹⁾やサブバウンダリーの形成^{10,12)}などを評価してきた。フェライトと比較してみるとBCC構造起因のすべり系は同じであるが、変形過程におけるその選択性は全く異なっており、ラスマルテンサイト特有なものがあるのではな

いかと考えている。それを筆者らはラス形態に依存したすべり系、ラス面内すべり系とラス面外すべり系に分けて検討している。またこれらすべり系には活動しやすさに差があり、さらに変形が進むとラスマルテンサイトの微細組織に起因してすべり系の遷移が生じていると、ひずみ分布や結晶方位回転の結果から推察した。しかしながらマルテンサイトの変形挙動は非常に複雑であり、一つのブロック内部においても場所によって回転は異なる、つまり変形に伴い活動するすべり系は異なる。これはブロックの複雑な形態や隣接ブロックとの相互作用などの影響が考えられるが、解明には至っていない。これまで様々な手法を用いて、異なる炭素量を有するマルテンサイトについて調査してきたが、変形全体の理解、力学特性との関連性を明らかにするためには更なる検討が必要である。

④ せん断型変態における組織形成機構

マルテンサイトやベイナイトを高強度相とした複相鋼に関してはこれまで多くの研究が行われており、最近でもQ & P processやTRIP鋼の延性向上の鍵である残留オーステナイトの制御が注目を集めている。マルテンサイトやベイナイトの特性向上だけでなく、残留オーステナイトの制御という点からもせん断型変態であるマルテンサイトやベイナイトの組織形成機構の解明は非常に重要であるといえる。筆者らは共焦点型レーザ顕微鏡による変態のその場観察とSEM/EBSDによる結晶学的解析を組合せることで、せん断型変態の組織形成機構の解明を目指している。低炭素低合金鋼でのマルテンサイト変態においては、まずオーステナイト粒を分割するようにブロックが形成し、その後は先に生じたブロックと最密面を共有するパケットグループに属するバリエントを持つブロックがまとまって生成する様子が観察された (図3)。初期のオーステナイトを分割する段階では、表面での観察のため外形変形方向が表面と垂直になるようなバリエントが選択されており、その後のマルテンサイトに囲まれたオーステナイト領域では、同じパケットグループに属するバリエント

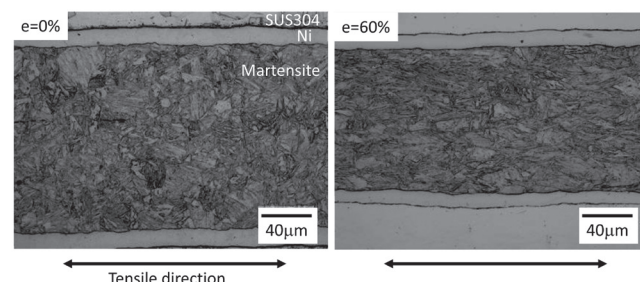


図2 マルテンサイトの引張前と60%変形後の光学顕微鏡写真

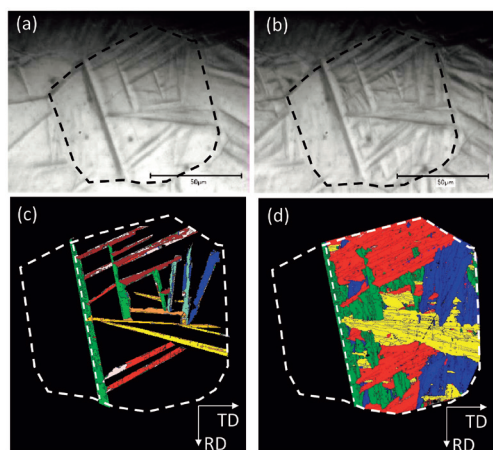


図3 マルテンサイト変態のその場観察結果；(a) 変態直後 (1/2000 s で生成したマルテンサイト)、(b) 変態終了付近、および結晶方位解析結果；(c) 変態直後のブロック、(d) 最終組織 (パケットグループで色分け)。

が同時に生成することで自己緩和しているようであり、どちらも緩和機構としてエネルギー的に有利なものが選択されていることが分かった¹³⁾。炭素量が異なる場合や、応力や組成濃度の勾配がある条件下でのマルテンサイト変態についても検討を行っており、これらを通じてマルテンサイト変態の組織制御を目指していきたいと思っている。このマルテンサイト変態の結晶学的な解析を行う際、ケンブリッジ大学の Prof. Harry Bhadeshia の研究室に半年間滞在する機会を得た。Harry をはじめ他のポスドクたちと多くの議論ができたことは筆者にとって非常に大きいものであった。ベイナイト変態についても同様な検討に加えて、Genus_3D と EBSD を組合せた3次元組織解析を行っており、ベイナイト組織の形成過程や形態における変態温度や炭素量の影響を明らかにするとともに、残留オーステナイトの制御指針を確立すべく研究を進めていきたい。

5 おわりに

鉄鋼と向き合ったときの課題が鉄鋼材料の高強度化、高性能化であったため、この10年間はその実現に向けて突き進んできたように思える。更なる高強度化にはマルテンサイトやベイナイトの利用が不可欠であるが、その変態についてはまだまだ分からないところも多く、その制御は非常に難しいと

実感している。先人達の膨大な知見に基づき、最先端の測定機器やシミュレーションなどを有効に活用して少しでも明らかにすることが出来ればと思っている。この10年間で様々な研究に関われたのは、小関教授、榎教授、井上准教授をはじめ、多くの関係者のおかげである。これまでに得た知見を活かしつつ、研究に邁進し、社会に貢献できるよう努めていきたい。今後ともご指導ご鞭撻をいただければ幸いである。

参考文献

- 1) D.R.Lesuer, C.K.Syn, O.D.Sherby, J.Wadsworth, J.J.Lewandowski and W.H.Hunt Jr, : Int. Mater. Rev., 41 (1996), 169.
- 2) J.Inoue, S.Nambu, Y.Ishimoto and T.Koseki : Scr. Mater., 59 (2008), 1055.
- 3) S.Nambu, M.Michiuchi, J.Inoue and T.Koseki : Compos. Sci. Technol., 69 (2009), 1936.
- 4) T.Koseki, J.Inoue and S.Nambu : Mater. Trans., 55 (2014), 227.
- 5) J.Taendl, S.Nambu, J.Inoue, N.Enzinger and T.Koseki : Sci. Technol. Weld. Join., 17 (2012), 244.
- 6) A.Cetin, J.Krebs, A.Durussel, A.Rossoll, J.Inoue, T.Koseki, S.Nambu and A.Mortensen : Metall. Mater. Trans., 42A (2011), 3509.
- 7) T.Araki, M.Koba, S.Nambu, J.Inoue and T.Koseki : Mater. Trans., 52 (2011), 568.
- 8) S.Nambu, M.Michiuchi, Y.Ishimoto, K.Asakura, J.Inoue and T.Koseki : Scr. Mater., 60 (2009), 221.
- 9) 石元良武, 道内真人, 南部将一, 朝倉健太郎, 井上純哉, 小関敏彦 : 日本金属学会誌, 73 (2009), 720.
- 10) H.Na, S.Nambu, M.Ojima, J.Inoue and T.Koseki : Scr. Mater., 69 (2013), 793.
- 11) M.Michiuchi, S.Nambu, Y.Ishimoto, J.Inoue and T.Koseki : Acta Mater., 57 (2009), 5283.
- 12) H.Na, S.Nambu, M.Ojima, J.Inoue and T.Koseki : Metall. Mater. Trans., 45A (2014), 5029.
- 13) S.Nambu, N.Shibuta, M.Ojima, J.Inoue, T.Koseki and H.K.D.H Bhadeshia : Acta Mater., 61 (2013), 4831.

(2017年1月25日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

鹿児島大学 教授

南 部将一氏は、これまで硬質なマルテンサイト層と延性に富む軟質なオーステナイト層を積層した複層鋼板の変形及び破壊挙動を調査するとともに、介在物からのフェライトの核生成挙動を詳細に検討してきた。これらの研究では、中性子線回折による応力分配挙動の解明や、3D観察、詳細な結晶塑性理論を適用して解析を行っている。複層鋼板の研究では、硬質なマルテンサイトが軟質なオーステナイトと協調して変形することにより、驚異的な延性を示すことを明らかにするとともに、そのことを使って大変形時のマルテンサイトの変形挙動を詳細に調べてきた。この研究はマルテンサイトの延性を革新的に向上するための重要な指針を示している。また、近年では介在物からの核生成挙動を3D観察し、優先核生成サイトの特徴を明確にする研究に取り組んでいる。日本鉄鋼協会をはじめ他の学会の委員も務め、学協会の発展にも大いに寄与している。学内においても、多忙な上司の先生方に代わり、学生を親身になって指導しており、学生からの信頼も厚い。研究の主目的は強化や

足立 吉隆

延性・靱性の向上など不変であっても、その時その時で技術や知見は刷新されており、新しい手法、知見を取り入れてその目的達成のために真摯に取り組んでいる南部氏への期待は大きい。鉄鋼材料分野における若手、中堅のリーダーとして、南部先生の今後の一層のご活躍を祈念しています。



JFEスチール(株) スチール研究所 薄板研究部長

船川 義正

鉄 鋼材料に携わって10年と一つの区切りを迎えた南部先生は、若手の中でも着実に鉄鋼材料研究に足跡を残しており、さらなる発展を期待しています。

鉄鋼材料は組織を複合化することで優れた機能/特性を実現してきました。特に構造材料としての用途は他の金属材料の見本となるものです。実用化の進んだ鉄鋼材料をさらに高機能化する、すなわちさらなる組織複合化の制御が複層鋼板と考えられます。南部先生がこの10年をかけて切り開いてきた道は、鉄鋼材料の組織制御とその特性の発展の可能性を示してくれました。複層鋼板はシンプルな熱処理と比べて組織構造に重度が高い上に、非鉄金属との複層化で全体の性能は飛躍的に向上することも示してくれました。鉄鋼材料の新たな発展の可能性を示したと考えられます。これは、鉄鋼材料に限らず他の金属にも応用できることから構造用金属材料全般に展開できる基礎知識です。

南部先生の扱われてきた複層鋼板は、金属学的にも新たな発見をもたらしました。延性の高くはないマルテンサイトは、加工中に早期に塑性不安定によりネッキングをおこすため、変形挙動は金属学の興味の対象にはなりにくかったのですが、複層鋼板での塑性不安定の抑制に

より、マルテンサイトの塑性変形挙動がわかるようになってきました。マルテンサイト加工性向上についての手がかりが得られています。

高延性化に可能性が出てくると高強度のマルテンサイトに対する新たな研究が進み出しました。変形機構からどの組織が塑性変形に適しているかわかるとその変態過程を制御してより高延性の素材をつくりたいという、必然的にでてくる考えを南部先生は突き進んでいます。マルテンサイトの組織のどの部分が集団で変態していくのか、これらがどの順番で変態して行くのかをみれば、高延性化する組織を見いだすことが出来ます。この過程で海外の新進気鋭の研究者と交流してさらに鉄鋼材料研究者としての感性を高めています。

日本の社会インフラが代わるタイミングにあり、過去に日本を形作ってきた鉄鋼材料を超える鉄鋼材料で新たな日本が掲載されるようになるとうとするタイミングで、従来の壁を破りつつ最先端の知識で研究を進める南部先生はおそらく未来の鉄鋼材料を感覚的に感じているのかもしれませんが。南部先生の今後の研究で生み出される鉄鋼材料および基礎現象に鉄鋼材料の発展を強く感じ、南部先生の躍動に期待が膨らみます。