

特別講演

□第169回春季講演大会学術功績賞受賞記念特別講演
(平成27年3月19日)

外部設計型の鉄鋼材料 Architected Steel

小関敏彦 東京大学 副学長
工学系研究科 教授
Toshihiko Koseki



*脚注に略歴

1 はじめに

このたび学術功績賞の栄誉にあずかり大変光栄に存じます。これまでご指導・ご支援をいただいた多くの方々にこの場をお借りして心からお礼申し上げます。私は2003年に産業界から大学に移り、学生や同僚教員と共に鉄鋼材料の組織や特性、接合に関する基礎的な研究を続けておりますが、同時に、大学の研究として自由な視点からの鉄鋼材料の検討や提案も重要と考え、探索的な研究にも取り組んできました。ここに機会をいただきましたので、それについて述べさせていただきます。

2 外部設計型鉄鋼材料の試み

鉄鋼材料の進化は今日まで多くの科学技術や産業の進展を支えてきましたが、その進化に対する要求は21世紀に入っても止まることはなく、エネルギーや環境、安全性といった境界条件が変化する中で、更に強まっているといえます。例えば自動車用の鉄鋼材料では、DP鋼やTRIP鋼などの高強度鋼の開発が自動車ボディの軽量化や衝突安全性に寄与してきましたが、更なる軽量化や環境性能の向上に向け、より高いレベルで強度と延性を両立する鋼が求められています。高強度化とそれに相反する特性をいかに高次元で両立するか、これからは鉄鋼材料の重要な課題です。

構造体やデバイスの要求性能や仕様が高度化するに従って、選択される材料はFig.1に示すように変化するといわれています。Brechetらの図¹⁾を改良したものですが、まず、手に

入れやすい・使いやすい (available) 材料が選択され、それで足りなければその材料が改良され (optimized)、それでも不十分であれば別の材料が選択され (selected)、更に足りなければ新たな材料が創製される (architected, tailored)、という流れです。図の縦軸は材料の特性や性能の向上、複数の特性・機能の両立を表し、横軸は材料のコスト上昇や製造性低下などに対応します。鉄鋼材料の場合は、広範な改良や開発を考えれば単独でもこの図が成り立ちますが、自動車のマルチマテリアル化のように広い材料の範囲で考えれば、鉄鋼材料は成分設計や組織制御などによる「optimized」が高度に進められてきた材料と見ることもできます。更なる軽量化や相反特性の両立が求められる中では、Al合金やCFRPなども競合する「selected」の材料として現れ、さらに「architected」の材料の検討も現実的な段階になってきたと考えられます。

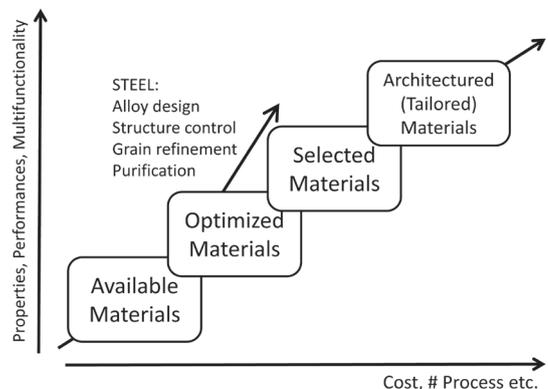


Fig.1 Strategies of development and selection of materials.

* 昭和58年東京大学工学系研究科金属工学専攻修士課程を修了後、新日本製鐵(株)に入社。平成6年米国MIT材料工学科博士課程修了。平成15年東京大学工学系研究科助教授、16年同研究科教授、24年同研究科副研究科長、26年同大学副学長、現在に至る。

このような観点から、Fig.2に概念図を示すような、外部設計型の鉄鋼材料の構想を2004年から進めてきました。外部設計型の鉄鋼材料では、モノリシックな単体の鉄鋼材料で達成できない組織や特性、性能を実現することが重要です。Fig.2 (a) では単体の鉄鋼材料では熱力学的に制約される相分率や組成の組合せを超えて、異なる組成や組織を持つ鋼と鋼、あるいは鋼と他の金属の組合せを可能にし、それらを自由な分率、配置で層状に共存させる材料を目指し、(b) では外部導入の分散化合物を核として放射状に伸びて交差した硬質組織を発達させ、通常の鋼よりより更に複雑な複相の組織を目指しています。最近このような考え方の材料は“architected material”と呼ばれていますので^{1,2)}、私達が取り組む材料も“architected steel”ということができます。

Fig.2 (a) のような複数の構成材の幾何学的な組合せはすでに他の材料では実用化されており、例えばポリマーやガラス、木材では、多層のラミネートポリマーや積層ガラス、板を重ねた合板などによって、単一のシートや板と異なる特性やメリットを創出しています。鉄鋼材料でも古くは鋼の刀剣の積層鍛造³⁾ などがあり、近年も制振性のためのラミネート鋼板やいくつかの積層材の検討例⁴⁾ がありましたが、単体としての鉄鋼材料の目覚ましい進化から、積層材の検討は極めて限定的でした。しかし鉄鋼材料に対する性能の要求が極度に高度化する中で、「microstructure」の制御に加え「superstructure」の制御を新たに取り入れることは鉄鋼材料の設計の自由度と可能性を拓げる点で魅力であり、新たな視点を加えて改めて検討する意味があると考えています。

3 複層鋼板

Fig.2 (a) に示した複層鋼板の主目的は、極めて高強度ながら脆性ゆえに利用が限定されてきたマルテンサイトを活用することであり、それを構成層として、複層化によって高強度と高延性を両立することにあります⁵⁾。通常、マルテンサイトを島状に分散したDP鋼の変形では硬質のマルテンサイトは変形せず、Fig.3 (a) に模式的に示すように、周囲の軟質のフェライトマトリックスにひずみが集中し破断に至りますが⁶⁾、複

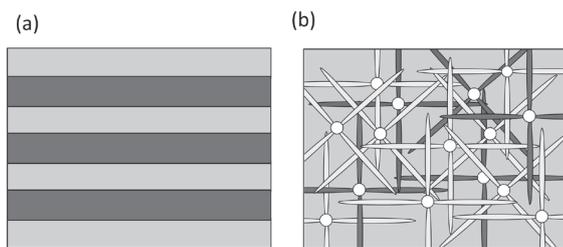


Fig.2 Schematics of architected steels with (a) multilayered and (b) complexly-interlocked structures.

層鋼板では層方向の変形時には硬質層、軟質層に応力が分配され、かつ複層によってネッキングが抑制されるため、軟質層と共に硬質マルテンサイト層も変形します。これは引張試験中のIn-situの中性子線回折によっても確認されました⁷⁾。複層化によって変形するマルテンサイトが可能になり、高強度と高延性の両立を達成することが可能になるのです。

しかし話はそれほど単純ではなく、従来の金属-金属の積層材の検討⁴⁾ では、強度は構成層の混合則に従うものの (Fig.4 (a))、延性は混合則に従わず、特に硬質層の延性が低いほど全体の延性は硬質層のそれに近づくことが報告されていました (Fig.4 (b))。このような極端な延性差の材料の組合せによる低延性は、これまでの複合材料ではそもそも延性を念頭においていないため検討もされませんでした。鋼の場合は延性が重要で、特にマルテンサイトを使う上では不可避の課題であり、その点で複層鋼板はこれまでの複合材料の考え方は異なるといえます。

低延性の原因を検討した結果、複層界面の剥離とともに硬質層の脆性破断に至るH-shapeクラックや硬質層自身がトンネル状に破断するトンネルクラックが変形途上に発生し、伸びを阻害していることを見出し、前者に関しては層界面強度の確保、後者に関しては硬質層の層厚の制御が重要であることを示して、それぞれを定式化し設計指針として確立しました^{8,9)}。後者に関しては、軟質層との隣接を考慮した弾塑性解を新たに提案し、硬質層の破壊靱性や軟質層の加工硬化特性の影響も明確にしました⁹⁾。このsuperstructureの設計指針により、焼入ままマルテンサイト層をオーステナイト鋼やTRIP鋼、TWIP鋼と組み合わせて破断なく高ひずみ域まで変形させることが可能になり、Fig.5に示すように、強度と延性を高いレベルで両立できることを明らかにしてきました^{5,10)}。Fig.6は、これらのうち、比較的初期に作製した複層鋼板の例ですが、マルテンサイト鋼とオーステナイト鋼を交互に25層、圧延法で積層しています。25層もの積層の理由は、ここで硬質層として用いている焼入れままの高炭素-高Crのマルテンサイト系ステンレス鋼の破壊靱性が著しく低いので、層厚を薄くする必要が

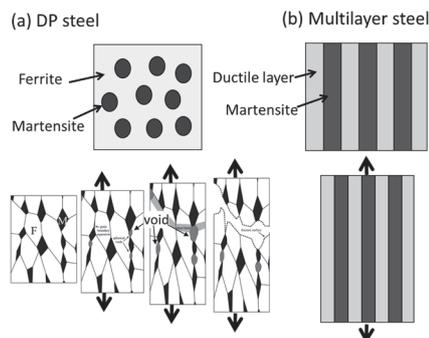


Fig.3 (a) Elongation and fracture of martensite-ferrite DP steel [6] and (b) elongation of multilayer steel.

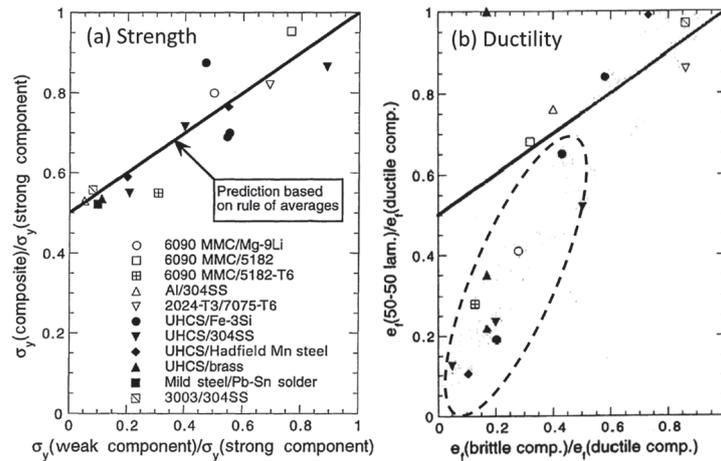


Fig.4 A summary of (a) strength and (b) ductility of different laminate metals⁴⁾.

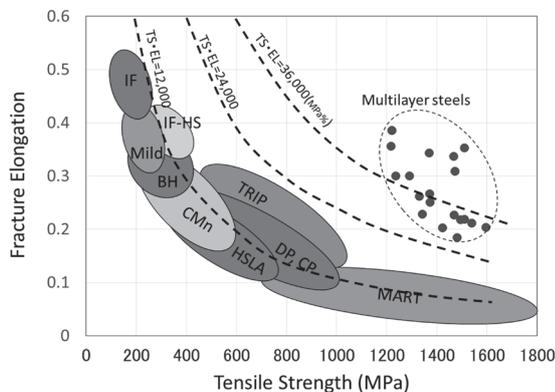


Fig.5 Strength-elongation trends of multilayer steel combining high-strength martensitic steel and high-ductility steels^{5,10)}.

あったからですが^{5,9)}、単体では極めて脆いこの鋼を、層厚を制御した複層化によって20%以上伸ばすことができるのが複層化の効果です。通常の炭素鋼ベースのマルテンサイト鋼の場合は破壊靱性がこれよりも高く、したがって、層厚を厚く層数を少なくすることが可能で、現在は強度1500~1800MPaクラスの複層鋼板を5層程度の複層設計で検討しています。同時に、複層化によって焼入ままマルテンサイトの変形が高ひずみ域まで可能になり、従来限られていたマルテンサイトの変形挙動の基礎的な検討も進んできました¹¹⁻¹³⁾。

複層鋼板の硬質層はマルテンサイト鋼だけでなく多様な材料に置き換えて複層化のメリットを享受することが可能です。例えば結晶構造がhcpゆえに延性の低いMg合金を構成層にして延性鋼と複層化するとモノリシックなMg合金より高延性と高比強度化が同時に達成できること⁵⁾、循環性濃縮元素であるCuやSn濃度が高いスクラップ由来の鋼を高強度層に適用する場合には、高温脆化などの製造性を改善する鋼の成分改質と最終材料の延性改善の両立が可能であること¹⁴⁾、なども明らかにしてきました。Mg合金の場合も、マルテンサイト鋼同様、これまで難しかった高ひずみ域でのMgの変形挙

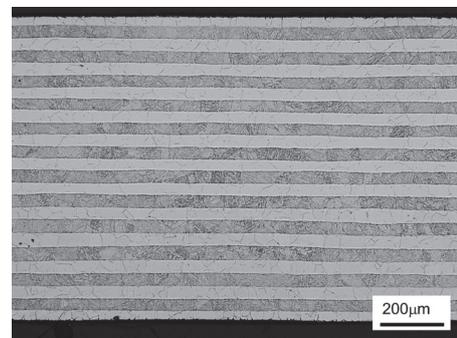


Fig.6 An example of 25-layer multilayer steel, consisting of as-quenched martensitic steel (dark) and austenitic steel (bright)⁵⁾.

動の検討が可能になり進めています。

4 分散化合物を起点とした複雑組織

Fig.2 (b) で示したもう1つの試みは、鋼中に酸化物や窒化物などの化合物粒子を分散し、それを起点に変態組織を複雑化しようとするものです。ベイナイト変態と合わせて、バリエーションの多様化、それによる針状組織の交差や連結の増加、残留オーステナイトの分断・微細化によって、複雑な複相組織の形成を目指します。たとえばFig.7は、いわゆる“スーパーベイナイト”鋼¹⁵⁾の組成を持つ鋼に埋め込んだTiの酸化物周囲の変態組織ですが、酸化物からベイナイトが多方向に成長し、それが二次的な生成も促し、多様なバリエーションの交差したネットワーク状のベイナイト組織が形成されており、酸化物のない場合と比べて、ベイナイト-残留オーステナイトの複相組織が明らかに複雑化します¹⁶⁾。また、スーパーベイナイトの生成は長時間にわたることが課題となっていますが、このような変態の起点の個数密度を増加することによって全体の変態率は向上し時間短縮が可能であることも分かってきました¹⁶⁾。分散化合物種の影響や粒子の個数密度の

影響など粉末冶金の手法によって検討するとともに、溶鋼での粒子分散の可能性も考えた鋼-酸化物間の濡れ性の検討¹⁷⁾も行ってきました。

5 Architectured steelにおける界面制御の必要性

複層鋼板では、異なる鋼同士や鋼と異種金属との複層界面の強度を確保することが、層間剥離を抑えて強度-延性バランスを向上するための鍵であると共に、現実的にこの材料を製造する上でも重要で^{5,8)}。また化合物粒子分散鋼では化合物と鋼の界面の制御が必要で^{17,18)}。

一般に、金属-金属の接合は高温での大圧下によって容易に達成されますが、組成や組織の異なる構成層の組合せによって相反する特性の両立を達する複層鋼板にとっては、層間の溶質拡散は極力抑えるのが望ましく、現状では加熱の温度・時間を抑えながら roll bonding によって製造していますが、更に低温低圧下での界面形成の可能性についても基礎的な検討を継続しています。接合界面の形成や強度発現の過程や機構を表面活性接合などで詳細に調べてみると、より簡便に、温間で低圧下、比較的短時間で複層化できる可能性も見出されつつあります^{14,19)}。また鋼と Mg 合金のように本来接合しない組合せに対しては新たな接合技術の開発が必要で、インサート金属を使った反応型 TLP (Transient Liquid-Phase) bonding²⁰⁾を開発して鋼-Mg 合金複層鋼板を実現しました。

このような界面制御や新たな接合法の開発は、今後の金属材料の組合せや複合化を検討する上で鍵となる技術であり、継続して取り組んでいきたいと考えています。

6 おわりに

鉄鋼材料の更なる高性能化に向けて、基盤となる組成・組織-プロセス-特性-性能の関係の基礎研究を継続する一方で、その検討の過程で鉄鋼材料の解明に役立つ手法やシーズ



Fig.7 Bainite development after 4 hour holding at 300°C in Ti_2O_3 -embedded superbainitic steel (Fe-0.8wt%C-1.6wt%Si-1.9wt%Mn-Cr,Mo)¹⁷⁾

を見出すことも期待しながら Architectured steel のアプローチも継続していきたいと思えます。今後とも本会各位のご指導、ご助言、ご支援のほどお願い申し上げます。

最後に上述の様々な検討を共に進めてきた東京大学工学系研究科、井上純哉博士、南部将一博士、小島真由美博士はじめ、関係各位に改めてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Y.Brechet and J.D.Embury : Scripta Mater., 68 (2013), 1.
- 2) M.Ashby : Scripta Mater., 68 (2013), 4.
- 3) O.D.Sherby : ISIJ Int., 39 (1999), 637.
- 4) D.R.Lesuer, C.K.Syn, O.D.Sherby, J.Wadsworth, J.J.Lewandowski and W.H.Hunt : Int'l Mater.Rev., 41 (1996), 169.
- 5) T.Koseki, J.Inoue and S.Nambu : Mater.Trans., 55 (2014), 227.
- 6) J.Kadkhodapour, A.Butz and S.Ziaei Rad : Acta Mater., 59 (2011), 2575.
- 7) M.Ojima, J.Inoue, S.Nambu, P.Xu, K.Akita, H.Suzuki and T.Koseki : Scripta Mater., 66 (2012), 139.
- 8) S.Nambu, M.Michiuchi, J.Inoue and T.Koseki : Compos. Sci.Technol., 69 (2009), 1936.
- 9) J.Inoue, S.Nambu, Y.Ishimoto and T.Koseki : Scripta Mater., 59 (2008), 1055.
- 10) T.Koseki, J.Inoue and S.Nambu : unpublished work
- 11) S.Nambu, M.Michiuchi, Y.Ishimoto, K.Asakura, J.Inoue and T.Koseki : Scripta Mater., 60 (2009), 221.
- 12) M.Michiuchi, S.Nambu, Y.Ishimoto, J.Inoue and T.Koseki : Acta Mater., 57 (2009), 5283.
- 13) H.Na, S.Nambu, M.Ojima, J.Inoue and T.Koseki : Metall.Mater.Trans.A, 45A (2014), 5029.
- 14) 南部将一, 小島真由美, 長崎千裕, 朝倉健太郎, 井上純哉, 小関敏彦 : 材料とプロセス, 26 (2013), 893
- 15) C.Garcia-Mateo, F.G.Caballero and H.K.D.H.Bhadeshia : Revista de Metal., 41 (2005), 186.
- 16) 小島悠平 : 未発表研究, (2012)
- 17) 鈴木崇久, 小関敏彦 : 鉄と鋼, 92 (2006), 411.
- 18) 河西恵一郎, 李昶準, 南部将一, 井上純哉, 小関敏彦 : 鉄と鋼, 96 (2010), 123.
- 19) 南部将一, 道内真人, 井上純哉, 小関敏彦 : 金属, 80 (2010), 289.
- 20) M.Koba, T.Araki, S.Nambu, J.Inoue and T.Koseki : Metall. Mater. Trans. A, 42A (2012), 592.

(2015年5月1日受付)