

特集記事・8

鉄の環境との共生

環境負荷低減に向けた高強度鋼の開発展望

Perspectives for Higher Strength Steels in Pursuit of Reduced Environmental Load

長井 寿

(独) 物質・材料研究機構

Kotobu Nagai



環境先進国における 素材産業の重要性

経済が右肩上がりの時代はるか昔に終わった。企業が生産拠点を海外展開する意味での「グローバル化時代」は過ぎた。21世紀は、個人と世界の距離が極めて近くなる「フラット・グローバル化時代」と考えるべきではないか。過去のどんな世代も経験したことのない社会であり、人類共通の課題である地球規模での環境との共生を考える時代に既に突入しているとも言える。

すべての変化には逆方向の現象も現れる。筆者が勝手に考えるフラット・グローバル化現象の作用・反作用例を表1に付記した。この中で、科学・技術専門家の社会的責任に特に注目する。科学・技術の最前線を真っ先に理解できて、その功罪を評価できるのは、現場の専門家しかありえないという状況になる。専門家集団として、高い倫理感を持って、自立

的・自律的な貢献責任が果たせるか。市民の科学リテラシー・技術リテラシー向上にも直接的な責任が伴う。

「加工貿易国」という自己規定は的外れになる。21世紀を展望して材料のライフサイクルを見ると、世界の尊敬を集める「環境先進国」と自己規定し、日本の活路を見出すべきだろう。なかでも素材分野の役割が重要かつ難題であり、挑戦的になると信じる。そしておそらく素材分野はそれだけで外貨を稼ぐ重要産業分野として存在感を増すだろう。表2に、主に鉄鋼とそれによる製品を念頭に、21世紀のライフサイクルの様子を推論した。表1、2を通じて、重要だと筆者が考えるのは、以下の5点である。

- ①資源、エネルギーの自給率を高める技術を不断に追求する（高温化学プロセス領域を発展させなくてはならない。スクラップ利用率向上が不可避になる。）
- ②環境負荷とコストをミニマム化するためのシステム転換

表1 世界は「フラット・グローバル化」時代へ

現象	背景技術	境界条件	作用	反作用例	対応例
人類にとって地球は狭くなる	交通手段、通信手段などの発達	地球寸法は有限	・ひと、もの、かね、情報の自由往来	・疾病、犯罪、不況などが短時間に世界拡大する危険度が増大 ・情報過多によるリテラシー低下懸念	→事業の世界展開 →情報の交換と共有ネットワークの構築 環境先進国を国是に、エミッシヨン・ミニマム目標と自給率向上目標を提示
人類にとって地球は小さくなる	工業技術の規模拡大 →人類の増殖	地球資源は有限	・資源とエネルギーの必要量の桁違いな増加 ・人類増殖がさらに加速	・地球温暖化ガス排出量の増大 ・資源、エネルギーの枯渇懸念の増大	→省資源・省エネルギーの追求 →新資源・新エネルギーの開発 協調と競争の世界ネットワーク
人類はより賢くなる	科学と並行した技術発展	知恵は無限	・知識ストックが自己増殖的に増大 ・技術が格段に、しかも急速に発展	・行政や司法などの社会システムの即応力に懸念 ・市民のリテラシー低下懸念	→専門家の社会的責任の増大 世界的超技術と地域技術の並立
人類は老いる	・安全安心技術の進歩 ・医療・保健技術の進歩	地球寸法・地球資源は有限	・人工的社会基盤が拡大・飽和し、かつ老化 ・世界人口は21世紀半ばを待たずピーク、平均寿命は伸び、人類の平均年齢は確実に上昇	・成熟した社会基盤が市民の豊かさの安定基盤に	→女性や高齢者などの社会進出促進

とそれを支える技術開発を進める（学問領域、産業を超えたネットワーク形成ができるかどうかが鍵。もしくは新しい工学そのものかもしれない）

- ③省資源、省エネルギーを基礎とした抜本的な高付加価値化を追求する（加工プロセスで材質を造り込むという認識を前提とした学問領域の展開が必要）
- ④世界をリードする理解技術（計算、データベース、解析、分析などを総称）の不断の開発
- ⑤グローバルに「協調と競合」ができる科学者、技術者の育成（世界のどこでもトップレベルで働ける「日本人」に）

高強度鋼は、直接、上記の③に関する重要事項であるが、他の項目と切り離して存立し得ない命題であることは賢明な読者には自明と思う。

2 高強度鋼は、相反性質のブレークスルーへの挑戦

鉄鋼は万能選手なので社会の期待は尽きない。素材によってはシーズがあってもニーズがないこともある。ニーズが尽きないのは喜ばしいが、鉄鋼への要求は高い。しかも特定の

性質だけ単純に高いということではなく、複数性質の総合的合格を求める。100m 走だけでなく、マラソンも、走り幅跳びも、柔道も…みんなに強い選手が欲しいということだ。言わずもがな、複数性質の両立は大変難しい。そこで、それらを相反性質と呼ぶ。

さて、技術発展の制約には、①原理的な制約、②製造技術による制約、③社会ニーズ制約などがある。原理的な制約を解明するのは科学の役割である。だが皮肉なことに科学は「常識の壁」に弱く、それを破るところか時には強固な守り手となる。しかし、「何故？」という素朴な疑問に、明快な原理的回答ができない「常識」には、どこか危うさがあると疑ってよい。「常識」の壁を破る技術が予期せず生まれ、新しい「常識」を後追いで考察するのが科学の役割と揶揄する向きもある。

製造技術による制約は、これはある意味致し方ない。だが、作れないものを作れないのは道理としても、これを原理的制約とするのは困る。世界最高技術が「セレンディピティ＝予期せぬ好機」を見逃す確率を高くしたり、全く新しいニーズへの対応を鈍くしたりする懸念も高い。三番手以下の競争者が往々にして「常識」を破る。

歴史的、世界的に見て超技術で、日本だけが先駆けできるものを狙うには、誰も解決できていないし、誰も不可能と信

表 2 鉄鋼ライフサイクルの動向予測

フェーズ	項目	21世紀中の動向		日本動向の注目点
		世界	日本	
原料	鉄鉱石・採鉱	・採掘量は1.5倍化するも、資源量には余裕、価格変動性 ・20年単位で低品位化(+価格高)基調	・世紀後半の資源確保戦略の選択 ・国内鉱山が無く、資源に関する学術、技術の継承に懸念	・資源の安定確保のための戦略(外交・技術) ・粉鉱の高品位化選別技術、効率的還元技術
	石炭・コークス	・使用・製造量は、1.5倍化するも、資源量には余裕、価格変動性 ・20年単位で低品位化(+価格高)基調	・世紀後半の立地を含む戦略の選択 ・コークス製造技術の更なる改善	・二酸化炭素を発生しない還元技術の達成度に左右される
	製鉄	・製造量の1.5倍化 ・製鉄基地のグローバルな観点での配置	・国内消費量の低下に比例するか、世界需要の増加に比例するかの対極的選択	・二酸化炭素をどう固定するか ・高炉スラグの用途新規開拓
	合金資源	・需要増大、資源の偏在、価格変動性 ・資源資本の統合へ	・重要資源の国内精錬産業の確保	・非鉄精錬技術を核として、国内の学術、技術の発展と継承を実現できるか
	スクラップ	・発生量、需要とも増大、価格変動性 ・少なくとも前半は高値含みの貿易商品	・発生量の増加基調は継続 ・内需拡大の力強さに懸念	・スクラップ利用拡大技術の達成度に左右される
	製鋼	・製造量の1.5倍化 ・製鋼基地のグローバル観点での配置	・内需低下に比例するか、外需増加に比例するかの対極的選択へ	・製鋼スラグの有用資源化
価値賦与	製鋼(鑄造)	・低コスト化を狙ったコンパクトミルの比率が高まる	・鑄造-圧延プロセスで高付加価値化する技術開発を推進 ・単純組成+単純工程で高付加価値化	・小規模鑄造設備の役割の見直し ・「加工」技術の役割の見直し
	部品製造	・需要地での低コストかつ安定供給体制の構築	・国内生産量の減少と海外展開	・重要保安部品、高付加価値部品の独自製造技術の開発
	組立	・需要地立地の比率増大	・国内生産量の減少と海外展開	・国内ニーズに見合った製品開発
価値利用	販売	・需要地ニーズに対応した商品	・内需の現象と輸出量の減少	・リース型商品の拡大
	消費	・省資源、省エネルギー、低環境負荷商品 ・低価格商品	・省資源、省エネルギー、低環境負荷商品	
	リサイクル	・リユース、リサイクルがグローバル課題となる	・安心保障もした部品リサイクル ・素材の再利用技術の進展	
	(運搬)	・総輸送量、輸送コストのミニマム化		・サプライチェーンにおける国内製品比率の向上

じている、相反性質のブレークスルーに挑戦することが、最も効率的であり効果的である。幸い自動車からの具体的なニーズがある高強度高加工性鋼板^{1,2)}(図1)を対象にして、その原理的限界について考察してみる。この論考の基礎となるのは公表知見である。ここで取り上げる課題が、どこかで既に技術解決しているが未公表かもしれない、もしくは世界のどこかで公表済みかもしれない、という情報貧乏性に怯えながらの論考である。

3 1180MPa 超級高強度高加工性鋼板の課題

快適性の追求以外に、環境・エネルギー問題への対応、安全性の保障の観点から、自動車の様々な未来像があるが、早期普及が声高になってきた電気自動車も含めて、軽量で強靱な車体の実現は共通課題である。種々の車体用競合材料が鋳を削る中で、依然として鉄鋼への期待値は高い³⁾。だが、要求は過酷で、強度、延性(加工性)は言うに及ばず、溶接性、耐遅れ破壊性等多岐にわたる⁴⁻⁶⁾。鉄鋼が車体骨格の基幹材料として生き残るための第一のキーワードは、より高強度の実現である。

候補素材が得られると、成形、溶接、破壊などの多岐にわたる試験を受ける。苛酷な試験のすべてに合格しない限り高強度鋼は採用できないが、合格すれば直ちに実用化検討に入ることになる。この意味で、高強度鋼の開発は、素材製造で終わらない⁷⁾。もし素材提供で役割果たすと考える人がいれば、これからの時代、何の産業力にもならない。

3.1 1180MPa 超級高強度高加工性鋼板の仮想目標

課題解決のためにはニーズに合わせた明確な目標が必要である。しかし、以下に想定する目標は代表的なものに過ぎ

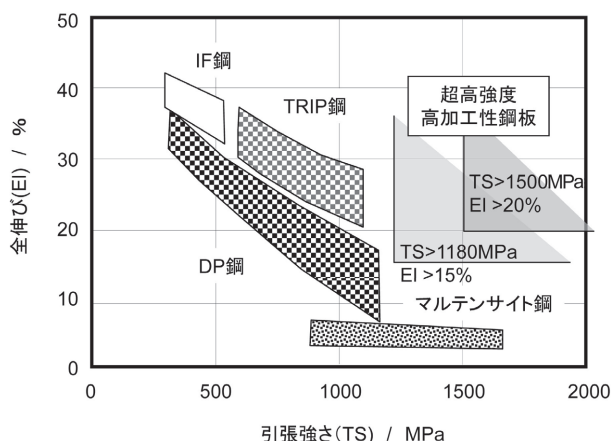


図1 1180MPa 超級高強度高加工性鋼板への期待

ず、第一関門の入口に過ぎないことを断っておこう。

①強度目標：引張強さ 1180MPa 以上

1180MPaは最低要求であり、望ましくは1470MPa以上となる。1470MPaは、オーステナイト域でプレス成形後急冷した焼入れままマルテンサイト組織を使い、既に自動車用部品で実用化されている⁵⁾ので、この強度水準で室温成形が可能な鋼板が次の目標となる。

フェライト組織をベースにこの水準の高強度を狙うには、微細粒化しかない。しかし1 μ mでは1180MPaに及ばないだろう。必然的にベイナイト、マルテンサイト組織を利用することになる^{8,9)}。そのためには、一定量以上の炭素の添加が必須となる。

②延性目標(成形性)：全伸び 15%以上

プレス部品の一部などでは相当ひずみが1.0近くに及ぶので、引張試験の全伸びで指標化する科学的保証はない。しかし、簡便な方法で判定できる指標が望ましい。簡便な目標として、全伸びで15%以上、望ましくは20%以上とする。

様々な変形拘束状態での加工限界(しかも加工限界の変形経路依存性を含めて)に及ぼすマイクロ組織の影響を知るべきであるが、その道のりは長い。とりあえずは、単軸引張における変形限界を正確に把握すべきと筆者は考えている。さらに、ひずみ速度によってどう変化するかも正確に知りたいが、我々の知識はその明快な解答を得る水準には到達していないと思う。

③スポット溶接性：980MPa 鋼相当の継手性能の維持

おそらくこの課題が最難関だと思う。周知のように、炭素当量(例えば $Ceq = C + Si/30 + Mn/20 + 2P + 4S$)に閾値(例えば0.24以下)⁵⁾がある。母材の強度要求を満たすために高炭素化が必要だが、この閾値は低炭素化を期待している。したがってこれが最大の矛盾となる。破壊強度としては、実用例のある980MPa 鋼相当以上の性能がひとつの目安となる。

④耐遅れ破壊特性：遅れ破壊しない

この課題も難問である。これも周知のように、引張強さが1180MPaを超えると遅れ破壊の心配が顕在化する⁵⁾。遅れ破壊発生はあってはならないので、慎重な成分選択、マイクロ組織設計が求められる。

3.2 強度—延性バランスの実現

フェライトベースでは、結晶粒微細化、固溶強化、析出強化を組み合わせても、薄板では1180MPa前後が到達限界だ

ろう。また、オーステナイトベースは実現可能でも、コスト面等で問題がある⁶⁾。したがって、図1にも現れているように、強度確保のためには変態組織(マルテンサイト、ベイナイト)ベースに向かわざるを得ない。そして既に、0.2C-1.5Si-2.5Mn-0.05Nb-0.2Mo組成のオーステンパー材¹⁰⁾で1500MPa-15%、0.8C-1.5Si-2Mn-1Al-0.24Mo-1.01Cr-1.51Co組成の二段オーステンパー材¹¹⁾で1500MPa-40%などと、ベイナイトベースで強度—延性目標が達成可能なことが既に実証されている。

様々な成形モードを考慮すると、最高荷重点伸び、いわゆる「一様伸び」を一定量以上確保することが不可欠なので、高強度ほどよりいっそう高いひずみ硬化率の付与が必須となる。フェライトベースでの従来の知見によると、①粒径微細化はひずみ硬化率を低下させる、②第二相(析出粒子、残留オーステナイト、変態組織など)の微細分散が有効にひずみ硬化率を上昇させる¹²⁾。

従来、様々な鋼種で加工硬化挙動を精力的に研究してきたが、特に低温変態相についてひずみ硬化率に着目した研究は必ずしも系統的になされていない。著者らの焼もどしマルテンサイト組織での研究では、逆変態オーステナイトが冷却中に変態したままのマルテンサイトは必ずしもひずみ硬化率を上昇させない¹³⁾、残留オーステナイトも安定度によってはひずみ硬化率を向上させる効果がない¹⁴⁾、また、安定な残留オーステナイトであってもそれらが連結するようになると靱性には悪影響を及ぼすことが判っている¹⁵⁾。連結を避けるためには、残留オーステナイトの体積率を10%程度以下に抑えるのが目安となる。

絞り値も重要である。最高荷重点までの伸びはせいぜい30%程度なので、相当ひずみで1.0近くまで加工できることをこれだけでは説明できない。したがって、最高荷重点以降も破断せずに変形し続けることが重要である。引張試験における成形限界指標の直接評価は未だできていないが、絞り値が一定の目安を与える。高絞り値を得るための制御因子に関する研究も十分ではないが、粗大な第二相を排除し、かつ組織微細化と第二相の微細分散を図ることが効果的なことが経験的に明らかになっている。国重は、成形時の総合的なパフォーマンスを実現する組織を「ミクロ不均一硬化組織・マクロ均一硬化組織」と表現している¹⁶⁾。著者は、かねてより「超微細複相組織」¹⁷⁾としているが、両者の思いはほぼ同じである。このような立場からは、高絞り値を変態組織で得るには微細な前 γ 粒径が望ましいと類推される。

3.3 高い破壊強度の実現

Griffithの理論(1920):破壊応力 $\sigma_f = (4\gamma E/\pi)^{1/2} \cdot r^{-1/2}$ (γ :破壊の表面エネルギー、 E :ヤング率、 r :クラック寸法)に立脚すれば、破壊応力を上げるには、クラック寸法を

小さくするか、破壊の表面エネルギーを上げるか、の二つしかない。

周知のように、1180MPaは「遅れ破壊」発生を抑制できる上限強度として理解されてきた。遅れ破壊は水素脆性化現象として長年の研究があるが、その機構についての定説が未だ確定していないのが現状である¹⁸⁾。しかし、ナノ析出物による水素トラップ機構の解析など、脆化現象に関する科学的理解の進歩は顕著である¹⁹⁾。水素侵入を抑制できれば発生しないのは当然だが、止む無き現象とすれば、破壊論的には上述の式におけるクラック寸法の微細化が最も優先させるべき対策となる。実際に、前 γ 粒径の微細化が遅れ破壊抑制に有効なことも既に確かめられている²⁰⁾。また、破壊の表面エネルギーを上昇させる方策があればそれを利用することもできる。複雑な現象であるからこそ、水素の拡散を主に考慮する速度論、確率論的な機構と、破壊論のような熱力学的、決定論的な機構を区別・整理して研究を進めるべきである。

東郷らが0.13C-0.04Si-2.57Mn組成を有するJSC980Y鋼を対象にスポット溶接材の疲労強度を調べた研究²¹⁾によれば、ナゲット部硬さはHv450であり、熱影響部で最高硬さHv500となる特異なプロファイルを示している(図2)。これでは、耐遅れ破壊の強度目安(硬さに換算すると約Hv350)をはるかに越えており、ナゲットおよび一部の熱影響部は焼入れままマルテンサイト組織である可能性が高い。焼入れままマルテンサイトは脆い組織の代表格として理解されてきたが、その脆さは何に起因するのか?

SM490(0.15C)からは、マルテンサイト、フェライト—パーライト、超微細粒フェライト—セメンタイトなどの多様なミクロ組織ができる。これを利用しHanamuraらはこれら組織の脆性破壊応力をGriffith理論から推定した²²⁾。図3で明らかのように、確かに焼入れマルテンサイト(Q)は最も「脆

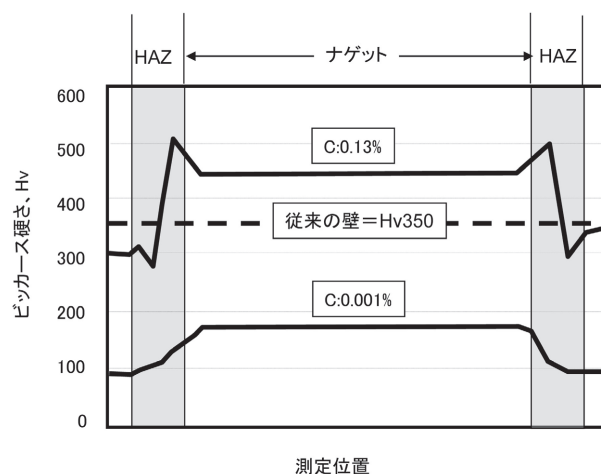


図2 スポット溶接材の継手部の硬さ分布(文献21を参考に作図)

い」。そこで、まず低温で破断して得られる脆性破面の有効破面単位とマイクロ組織を対応させた。それによると、フェライト＋パーライト (F/P) ではフェライト粒、焼もどしマルテンサイト (QT) ではパケット、そして焼入れままマルテンサイト (Q) では前 γ 粒に対応している。次に、上述の Griffith の理論に基づき、各組織の破壊応力を推定した (図4)。図中の 4.52J/m^2 、 100J/m^2 はそれぞれへき開破壊、擬へき開破壊の表面エネルギーとして提案されている値である。このように整理すると、焼入れままマルテンサイトは後者に属することが判る。

すなわち、焼入れままマルテンサイトの破壊の表面エネルギーは高いのだが、クラック寸法が大きく、強度レベルに比べて破壊応力が低いため、「脆い」と解釈できる。すなわち、前 γ 粒径を微細化すれば、焼入れままマルテンサイトの強度

がほとんど変化しないのに対して、破壊応力が大幅に上昇するので、「脆さ」を克服できることになる。

さて、スポット溶接のナゲット部は、鍛造まま組織である。鍛造まま γ 粒径を 0.15C 鋼で求めた Yoshida ら²³⁾、Kim ら²⁴⁾ は、mm 単位で、

$$d_{\gamma}^2 = 0.138 \times (\text{凝固時冷却速度})^{-0.658} + 0.449 \times (\text{固相中冷却速度})^{-1}$$

の経験式を報告している。スポット溶接の際の冷却速度を 10000K/s と仮定すると、鍛造まま γ 粒径は、約 $20\mu\text{m}$ となる。このクラック寸法が実現されるとすると図4から外挿して得られる破壊応力は 1300MPa 程度まで上昇する。 $100\mu\text{m}$ では 600MPa だったので、微細化による効果の大きさが判る。高強度に見合った高破壊応力を保証するには十分な微細 γ 粒を得たい。

急冷した鍛造－焼入れままマルテンサイトでも本当に「脆く」なくなるのだろうか？ この疑問に対して、次の溶接研究が興味深い結果を提供している。平岡ら^{25,26)}は室温でマルテンサイト変態が完了するように組成設計された低変態点溶接ワイヤーを開発する過程で、溶接金属に含まれる酸素を数十 ppm 水準に下げること成功した。その結果、溶接金属のシャルピー試験では、図5に示すように、 -196°C に至っても全く脆性破壊せず、吸収エネルギーも高水準を保つことを見出した。硬さは $\text{Hv}380\sim 400$ なので確かにマイクロ組織は焼入れままマルテンサイトと思われる。冷却速度はスポット溶接より少し遅い程度だろう。この溶接材は高 Cr、高 Ni 組成なので即断はできないが、急冷した鍛造－焼入れままマルテンサイトが脆くない実績は確かにある。

以上は、ナゲットに関する考察だが、熱影響部、母材についても高い破壊応力を保証する必要がある。母材自体の硬さ

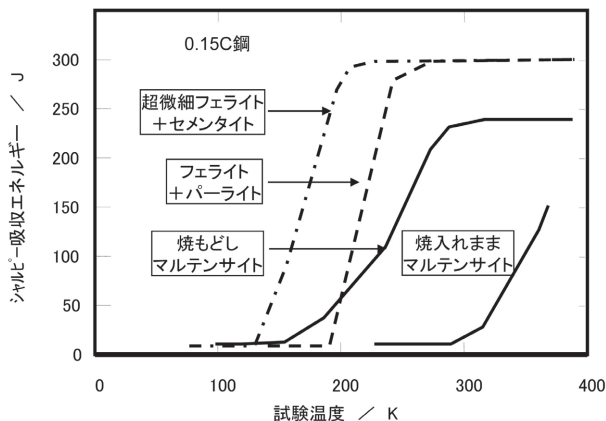


図3 同じ化学組成鋼でのマイクロ組織の違いによる衝撃特性の比較 (文献22を参考に作図)

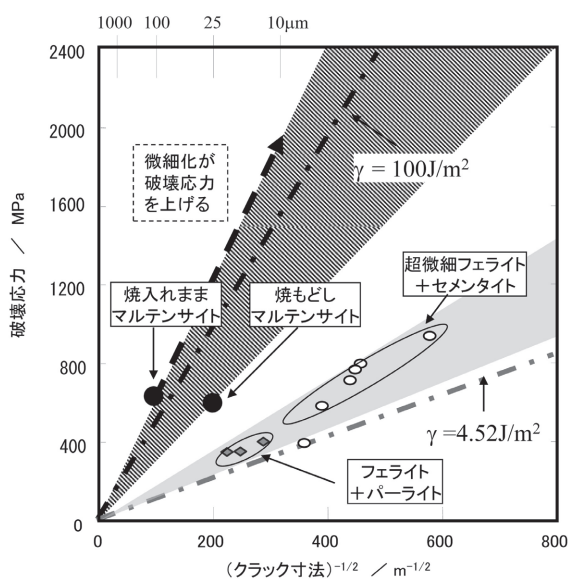


図4 同じ化学組成鋼でのマイクロ組織の違いによる破壊応力の比較 (文献22を参考に作図)

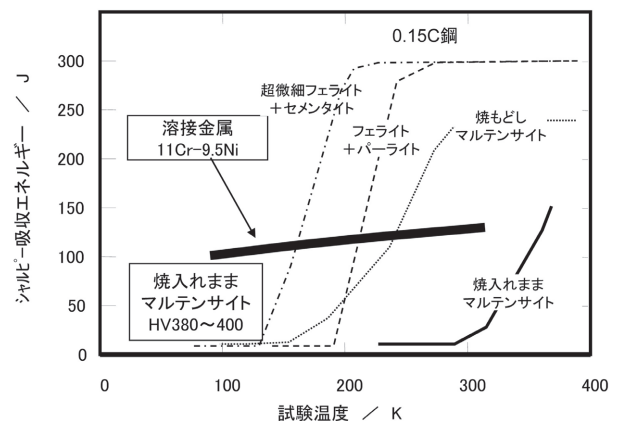


図5 溶接金属のシャルピー衝撃特性 (文献26を参考に作図) 図3の結果に上書きした

がHv350以上となるので、高い破壊応力を実現するためには、母材の前 γ 粒径も微細でなくてはならない。

以上のような考察から、強度、延性、耐遅れ破壊性を考慮した、母材の理想組織のひとつとして、まずは、微細複相組織＝等軸微細前 γ 粒($<10\mu\text{m}$)＋微細変態生成物・析出物＋微細分散残留 γ ($<10\%$)のようなイメージができあがる(図6)。等軸 γ 粒は、組織異方性を避けて、良好な成形性確保のために必要であろう。

ただ、この母材理想組織であるからと言って、自動的に良好なスポット溶接性を得られるとは限らない。溶接方法に遡った検討を含めて、新しいアイデアの挑戦が必要となると思う。

3.4 鋼板製造プロセスイメージについて

牧が指摘するように、目標強度の鋼板(薄板)を造り込む工業プロセスは未開発だが、オーステナイト域加工＋ベイナイト変態利用プロセスが最も近いと考えられる⁸⁾。

等軸微細 γ 粒組織を作るプロセスとしては、熱間圧延における大ひずみ加工で動的再結晶による等軸微細 γ 粒組織の造り込みをまず思いつく。粒径の達成目標($<10\mu\text{m}$)を実現するための熱間加工条件(温度、ひずみ、ひずみ速度など)は従来の基礎知見から一定の精度で推定できる。それらは通常の熱延ミルで容易に達成できる条件ではないが、現有設備で全く達成不可能という訳でもない。もしくはわずかな改良で達成可能な目標と推定している。

微細変態生成物・析出物＋微細分散残留 γ ($<10\%$)を連続冷却で実現することも容易ではない。ベイナイト変態を前提にすると、 γ 域強加工後、直ちに適切なオーステンパー温度に急冷して一定時間保持する必要がある。低温保持ほど長時間が必要となるので、適切な保持温度を選択しなくてはならない。連続熱延ミルを想定すれば、コイルリング前の変態完

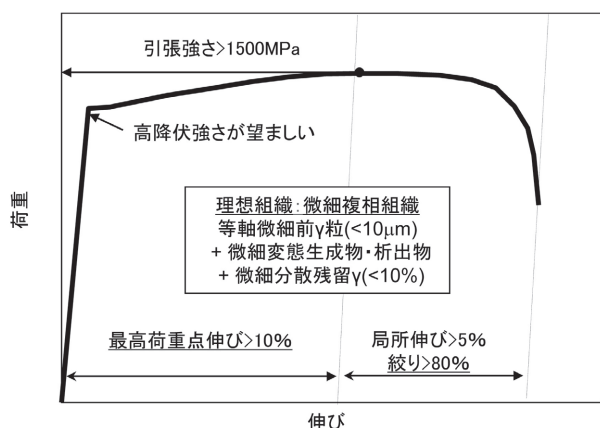


図6 理想組織とそれから得られる荷重—伸び曲線の形状イメージ

遂はほぼ不可能だろう。「コイルリング後の変態制御」になる。熱延工程で理想組織が造り込めたととしても、表面性状の調整やメッキ工程などの後工程による組織変化も予め把握しなくてはならない。

以上、単なる机上議論として本稿をまとめたが、上記と全く異なったルートで理想組織が実現できるかもしれない²⁷⁾。また、キーポイントの「微細 γ 粒」は、本稿の対象以外の様々な課題へ応用展開できる。「相反性質のブレイクスルー」への挑戦は、好奇心に満ちた新しい研究展開の宝庫となることは間違いない。安易に「原理的限界がある」と諦めたり、居直ったりしてはいけない。

4 若者が夢を実現できる日本に

人類は夢を現実化できる唯一の動物である。「解らないことを知りたい」という好奇心が生まれ、「こういうものがあつたらいい」という夢を持ち、周りにあるものを使い、しまいには目的物を実現する能力を持っている。これは人類だけの特質である。昨今の若者の「理科離れ」、「さらば工学部」などの現象が本当だとすると、それは人類だけの特質をありのままに伸ばす力、社会や大人の力が落ちたことを意味する。

夢を現実化しても、何から何まで社会が歓迎するとは限らない。技術には負の側面もある。また「正解は唯一」ではない。だが、次代を担う若者にとって、「答えはひとつ」の受験勉強よりも、これからの社会をどうするかという難題に取り組む方が、格段に建設的で意欲的な挑戦となるはずだ。自動車の社会的影響の大きさを考えれば、環境と共生する超高強度鋼板の開発は、若者たちが挑戦するに足る大きなテーマであることは疑いない。

謝辞

第1章と第4章は、玖野峰也、大来雄二、杉田州男などの先輩諸氏との議論に負うところが大きい。第2章と第3章は、大学、民間、研究所の数多くの共同研究者等との研究成果とここ数年来の意見交換の賜物である。具体的な氏名紹介を省く失礼を詫びつつ、関係諸氏に心から感謝申し上げたい。

参考文献

- 1) 鈴木正美：ふえらむ, 10 (2005), 716.
- 2) 潮田浩作：未来材料, 7 (2007), 14.
- 3) 佐藤紀男：Sanyo Technical Report, 8 (2001), 68.
- 4) 細谷佳弘：ふえらむ, 11 (2006), 773.
- 5) 潮田浩作, 高橋学：ふえらむ, 11 (2006), 779.
- 6) 高橋学：自動車技術, 63 (2009), 76.
- 7) 澤田靖士：ふえらむ, 14 (2009), 453.

- 8) 牧正志：まてりあ, 46 (2007), 321.
- 9) 吉永直樹, 高橋学：ふえらむ, 14 (2009), 81.
- 10) 赤水宏, 上妻伸二, 中屋道治, 向井陽一, 湯瀬文雄, 衣笠潤一郎, 杉本宏一：CAMP-ISIJ, 18 (2005), 1479.
- 11) 長谷和邦, C.Garcia-Mateo and H.K.D.H.Bhadeshia：CAMP-ISIJ, 18 (2005), 1603.
- 12) A.Ohmori, S.Torizuka, and K.Nagai：ISIJ Int., 44, 6 (2004), 1063.
- 13) 長井寿, 柴田浩司, 藤田利夫：鉄と鋼, 65 (1979), 1896.
- 14) K.Nagai, K.Shibata, T.Fujita, and Y.Ujiie：Transactions ISIJ, 22 (1982), 696.
- 15) 長井寿, 高橋博喜, 柴田浩司, 藤田利夫：鉄と鋼, 68 (1982), 799.
- 16) 国重和俊, 上路林太郎, 富田俊郎：ふえらむ, 11 (2006), 784.
- 17) 長井寿：ふえらむ, 4 (1999), 741.
- 18) 南雲道彦：ふえらむ, 14 (2009), 222.
- 19) 韋富高, 津崎兼彰：ふえらむ, 12 (2007), 766.
- 20) Y.Kimura, T.Kouchi, and K.Tsuzaki：第7回超鉄鋼ワークショップ, 物質・材料研究機構, (2003), 384.
- 21) 東郷敬一郎, 安富涼, 荒木弘保, 庄子和裕, 田中英敬, 薄田茂, 島村佳伸：材料, 55, 12 (2006), 1095.
- 22) T.Hanamura, F.Yin, and K.Nagai：ISIJ Int., 44, 3 (2004), 610.
- 23) N.Yoshida, O.Umezawa and K.Nagai：ISIJ Int., 44, 3 (2004), 547.
- 24) Han S.Kim, Y.Kobayashi and K.Nagai：Acta Materialia, 54 (2006), 2441.
- 25) 平岡和雄：溶接技術, 2 (2006), 64.
- 26) 銭谷哲, 中村哲美, 平岡和雄, 篠崎賢二：溶接学会論文集, 25, 1 (2007), 187.
- 27) 越智達郎：ふえらむ, 12 (2007), 776.

(2009年9月2日受付)