

省エネルギー化および脱CO₂化社会へと貢献する 高強度鉄鋼製品の紹介



企業レポート

東 昌史*, 原 卓也**

Environment-Friendly Steel Products for Automobile and Gas Transportation.

Key Words : high strength steel, automobile, linepipe,

1. 緒言

昨年は、これまでに類をみない規模で北極海の氷が溶け出し、人々の大きな関心を集めた。これは地球温暖化に原因があるとする見方が多い。この結果、地球温室効果ガス(CO₂)排出量削減に対する関心が高まっている。一方では、サブプライムローンの崩壊に起因した化石燃料への投機の集中から、原油価格の高騰は、留まるところを知らない。この結果、自動車をはじめとする輸送機関の燃費向上、あるいは、石油や石炭などの化石燃料に代わるクリーンな天然ガスや水素の活用に関する重要性が高まってきている。輸送燃費を向上させるには、自動車などの車体の軽量化、高強度化が重要である。また、天然ガスや水素の輸送効率を向上させるには、輸送鋼管の高強度化が極めて有効である。

本報告では、自動車の構造材料としての高強度鋼板の開発、あるいは、天然ガスの採掘、輸送に欠くことのできない高強度鋼管の開発を通じた鉄鋼業の

社会への貢献に関して述べる。

2. 自動車用鋼板の開発

2-1. 高強度鋼板開発への期待

自動車用鋼板は、自動車の車体重量軽減によるCO₂排出量削減と衝突安全性向上という2つの要求に同時に応える必要がある。しかしながら、この衝突安全性の向上は、車体強化のための構造部材の強化、すなわち、板厚増加など車体重量を増加させることを意味しており、自動車の車体軽量化の動きとは相反するものである。これら相反する問題を解決する、即ち、車体を軽量化して、なおかつ、衝突安全性を向上させるには、自動車部材へ高強度鋼板を適用していくことが考えられ、その適用量は年々増加し、今や車体重量の50%近くを占める。

ここでは、自動車の車体重量の軽減、安全性の向上に必要な不可欠な高強度鋼板の特性とその開発について述べる。

2-2. 自動車用鋼板に求められる特性と新商品開発

自動車の車体の多くは鉄鋼材料により構成されており、その部品には図1で示すようなものが存在する¹⁾。これら部品は、用途によって要求特性が異なり、部材に応じた材料の特性制御が必要である。例えば、ドアやフロア - 等に代表されるパネル部品は、成形性、張り剛性、耐デント性、耐食性が、メンバー等の構造部品には、成形性や部材剛性、衝突エネルギー吸収能、耐久強度が、ホイールやロアアーム(足回り部品)では、部材剛性、疲労耐久性、溶接性が要求されており、これらの特性を具備した鋼板が適用されている。

構造部材への高強度鋼板の適用は、部材の軽量化のみならず、衝突エネルギー吸収能や耐久強度の向



* Masafumi AZUMA

1976年1月生

大阪大学工学部研究科マテリアル科学専攻修士課程修了(2000年)

現在・新日本製鐵株式会社 技術開発本部 君津技術研究部 主任研究員 金属材料学

TEL : 0439-50-2544

FAX : 0439-52-3271

E-mail : ma.azuma@to.kimitsu.nsc.co.jp



** Takuya HARA

1964年11月生

大阪大学工学部金属材料工学専攻修士課程修了(1990年)

現在・新日本製鐵株式会社 技術開発本部 君津技術研究部 主幹研究員 博士(工学) 金属材料学

TEL : 0439-50-2548

FAX : 0439-52-3271

E-mail : hara.takuya@nsc.co.jp

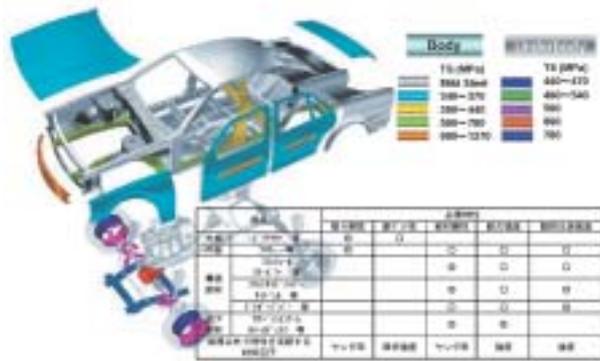


図1 自動車への高強度鋼板の適用と要求特性¹⁾

上といった衝突安全性向上への寄与も大きいことから、非常に大きなメリットがある²⁾³⁾。その結果、構造部材への高強度鋼板の適用の要望は非常に高い。

しかしながら、鋼板に限らず多くの素材は、高強度化するに従い成形性が劣化することが知られている。例えば、図2は、成形性を示す指標の一つである引張試験による全伸びと、引張最大強度の関係を示したものであるが、同一強化機構を用いて強化する場合、強度の増加と共に、伸びは低下する。このため、軟らかい鋼板が使用されている部材に高強度鋼板を適用する場合、成形時に割れが生じる場合がある。そこで、鉄鋼各社は、高強度化を行いながらも、成形性を劣化させない新たな鋼板の開発を推し進めてきた。

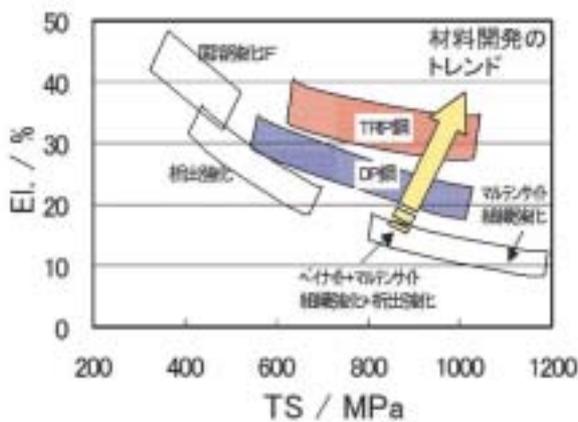


図2 薄鋼板の引張最大強度と伸びの関係

このような要望に応え、我々が世界に先駆けて開発した鋼板として、変態誘起超塑性(Transformation-Introduced Plasticity)を利用したTRIP鋼と呼ばれる鋼板がある。これは、フェライトよりなる素地

中に、ベイナイトと加工変形時にマルテンサイトへと変態するオーステナイトを数%から数十%残存させた鋼板であり、図3に示すように、成形時に、残留オーステナイトをマルテンサイトへと変態させることで優れた延性と変形後の強度を確保している⁴⁾。

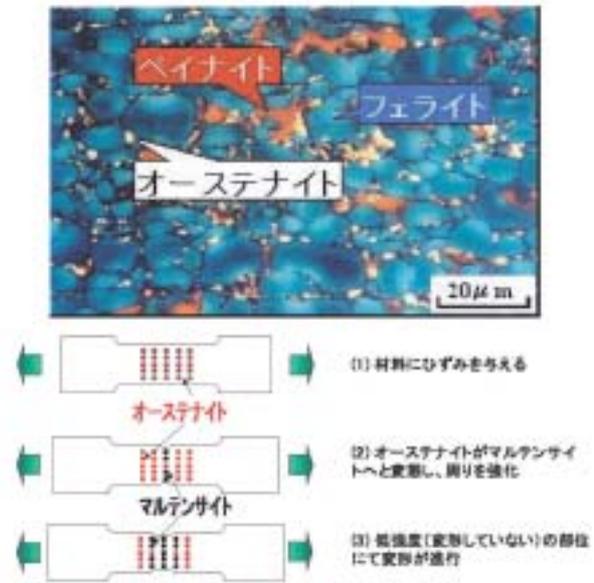


図3 TRIP鋼の組織と変形機構

従来、この効果は、マルエージング鋼(Fe-18%Ni)に代表されるような高合金鋼に利用されていたのに対し、現在薄鋼板で実用化されている鋼板は、C-Si-Mn系の低合金成分で設計されており、他の合金成分をあまり含まないことからリサイクル性に優れている。また、この鋼板は延性に加え、n値(加工硬化指数)が高く張り出し性に優れ、さらには、深絞り性にも優れていることから多くの構造部材へと適用されている⁵⁾。ただし、この鋼板は、鉄よりも酸化し易いSiを含むため、鋼板表面に酸化物を形成し易く、めっき性が劣化することから、主な自動車用防錆鋼板である合金化溶融亜鉛めっき鋼板の製造が難しかった。当社は、高度解析技術を駆使し、ナノレベルの視点から原因究明と対策検討を行った結果、この課題を解決し、めっき可能なTRIP鋼を世界に先駆けて開発し、自動車用鋼板として実用化している⁶⁾。

2-3 . 利用加工技術の開発

同時に、我々は、鉄鋼材料の開発や製造のみならず、利用加工技術を含めたソリューション提案にも

力を注いでいる。特に、高強度鋼板は、強度が高いことから、成形が難しく、部材としての加工精度の確保が難しいため、実用化に時間がかかる。一方では、車体開発の短期間化が要求されており、実験を行わないで、短期間で部材設計や特性評価を行うことが求められている。このような相反する課題を解決する手法として、コンピューターを用いたCAE (Computer Aided Engineering) 技術が、部材の成形条件の確立や特性評価の手法として多くの場面で適用されている。図4は、鋼による衝突安全性と車体軽量化の両立を目的に取り組みされた国際プロジェクト(ULSAB-AVC : Ultra Light Steel Auto Body-Advanced Vehicle Concept)にて提案された車体骨格をベースに、フロントサイドメンバー等への高強度鋼板適用の効果をシミュレートしたものであるが、高強度鋼板を適用することで、衝突後の車体前面の変形が軽減され、衝突特性が向上することが解る⁷⁾。

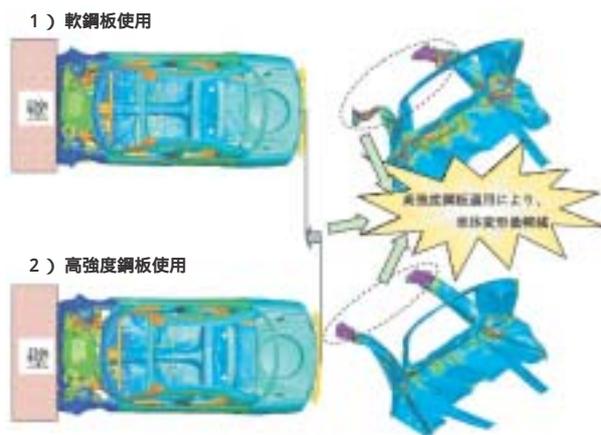


図4 CAEを用いた自動車車体性能評価

このように、これまで実車試験で行われていたことが、試験を行うことなく予測できることから、大幅な開発速度の向上へと繋がる。このように利用技術の発展は材料開発を行っていく上で、必要不可欠なものへと来ており、今後ますますの発展と部材設計への適用が期待されている。

3 高強度X120ラインパイプの開発

3-1 高強度ラインパイプの開発への期待

石油や石炭などの化石資源は、有限であるとともに、燃料として用いると地球温暖化の原因である炭酸ガスを多く排出するという問題があり、これらに代わる資源の活用が望まれている。石油や石炭に代

わる次世代エネルギー資源として、天然ガスや水素が有望である。天然ガスは既に世界中で実用化されている。水素についても、現在世界中でその適用に関する研究が行われ、自動車などでは一部適用を開始した。天然ガスは、主にカナダやロシアなどの北極圏に多く存在するため⁸⁾、極圏などの遠隔地から大消費地まで輸送する必要がある。採取場所近くで天然ガスを液化し、船にて輸送する手法、あるいはパイプラインで遠隔地から大消費地まで輸送する手法がある。一般的に、1500～2500 km以上では、船による輸送の、それ以下ではパイプラインによる輸送の効率が良いので⁹⁾、オイル・ガスカンパニーはそれぞれの地域に併せた輸送方法を選択する。パイプラインを使って天然ガスを輸送する場合、輸送効率をあげるために高強度鋼管を使用する¹⁰⁾。次に、高強度化すると輸送効率上がる理由について説明する。パイプラインにて天然ガスを高圧で輸送する場合、鋼管に負荷されるフープ応力(:円周方向にかかる応力)が一定になるような圧力で操業する。このフープ応力は鋼管の直径(D)、肉厚(t)と操業圧力(P)を用いて式(1)のように表される。

$$\sigma = P \cdot D / 2t \quad (1)$$

フープ応力()は鋼管強度に比例するので、高強度化することが高圧操業するための有効な方法である。もう一つ、高圧操業が可能になると、(1)式のD/tがほぼ一定になるように、鋼管直径と肉厚を小さく(薄く)することができる。小径薄肉にすると鋼管重量が低減できるので、材料コストが下がるとともに、鋼管と鋼管とを結合する円周方向の溶接施工コストが下がる(溶接回数が減ることにより、溶接施工コストが低減する)。さらに、高圧操業すると、輸送ポンプの数も低減できるメリットがある。これらの理由によって、高強度化すると天然ガスの輸送コストが大幅に低減される。詳細については⁹⁾の文献を参照いただきたい。

パイプラインの強度は、例えば、アメリカの石油協会(API : American Petroleum Institute)にて規格が設けられている¹¹⁾。当社は、世界最高強度であるX120ラインパイプ(降伏強度で830MPa)を世界一のオイルカンパニーであるEXXONMOBIL社と一緒に世界で初めて開発し、実際のパイプラインに敷設することに成功した。

本報告では、このX120ラインパイプの開発につ

いて、開発思想、材料開発、鋼管成形開発、鋼管溶接技術の観点から述べる。

3-2 . X120ラインパイプの開発思想

ラインパイプに必要な特性として、強度、低温靱性、溶接性の3つがある。強度は上述したように、操業中に鋼管が破壊(バースト)しないようにするためである。低温靱性については、北極圏から大消費地まで輸送するために、使用温度で鋼管もしくは溶接部から容易に脆性破壊しないことが必要となる。溶接性については、溶接後、多くの欠陥が生じないように、あるいは水素起因の割れが生じないようにする必要がある。これら3つの要求特性を満足するために、EXXONMOBIL社と一緒に1996年から研究開発を開始した。

3-3 . X120ラインパイプの材料開発

高強度鋼管の低温靱性を満足するためには、これまでの知見から、C量を低減し、マイクロ組織を細粒化することが最も有効な手法であることが知られている。このX120ラインパイプは、240mm厚の鋳片と呼ばれる鋼塊を熱間圧延して、鋼板とし、成形機で曲げた後、内面と外面から溶接して鋼管を製造する。X120相当の強度と低温靱性を同時に満足するためには、鋼板組織をミクロンオーダーの微細組織とする必要があった。当社は、熱間圧延技術を駆使することで、鋼管本体のマイクロ組織を、図5に示すような1ミクロン程度の微細組織にすることに成功した¹²⁾。この組織は、下部ベイナイトと呼ばれ、旧オーステナイト粒内に1ミクロン程度のラス(lath)と呼ばれる粒を形成させ、その内部に細かいセメントイトを析出させている。この微細なマイクロ組織を創製することによって、強度・低温靱性バ

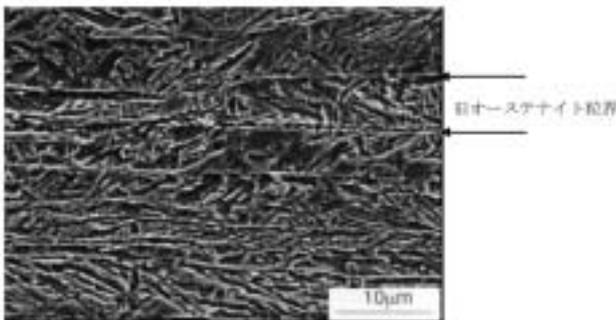


図5 X120ラインパイプのマイクロ組織(電子顕微鏡写真)²⁾

ランスに優れた良好な特性を有することができた。具体的には、-30℃での鋼管母材に必要なエネルギー(200J以上)と-50℃以下の延性・脆性遷移温度を確保できている。

加えて、鋼管を溶接した場合、溶接部の一部が母材に比べ軟化し、所定の強度を得られないという問題が生じる場合がある。これは、鋼板を管に成形後、内外面を溶接した際、溶接によって、鋼板の一部が再熱され(溶接熱影響部と呼ぶ)、圧延によって細粒化された組織が熱によって粗大化することに起因している。そこで、熱影響部の組織を微細化するために、母材と同様、溶接熱影響部の組織が下部ベイナイトになるような最適化学成分と最適溶接条件を導き出した。溶接熱影響部では、鋼管母材にくらべて下部ベイナイトが生成しにくいいため、ホウ素(B)を添加して、この組織を容易に生成させたことが大きな特徴である。

3-4 . X120ラインパイプ溶接技術の開発

高強度ラインパイプを使用する上での課題は、溶接部の低温靱性確保と水素脆性の回避である。ラインパイプは、鋼管に成形した後、内外面をサブマージアーク溶接される。これは、図6に示すように、数本の溶接ワイヤとフラックスを用いて内外面から1層ずつ溶接する手法である¹³⁾。X120ラインパイプは、高強度であるために、低温靱性を確保することが難しいことに加えて、溶接後の水素起因による割れを防止する技術を確立しなければならない。当社は、この2つの大きな課題を解決するために、溶接ワイヤとフラックスを独自に開発した。その結果、-30℃における低温靱性を確保するとともに、水素

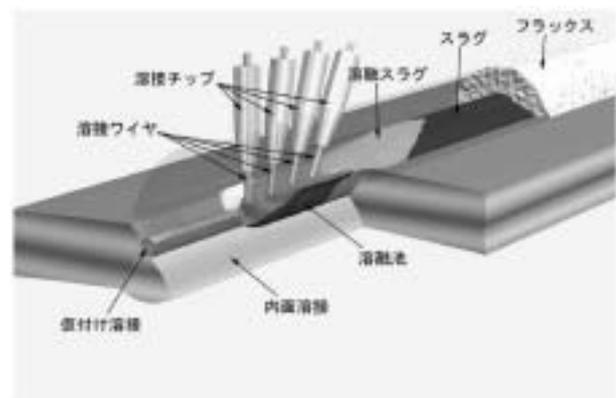


図6 サブマージアーク溶接の概念図

起因の割れが防止する溶接条件を確立した。

3-5 . X120ラインパイプの製造技術の開発

ラインパイプ用鋼管を成形する上で最も重要なことは、成形後の形状の真円度を高めることである。例えば、X120ラインパイプ用鋼管では、図7に示すように、鋼板をC,U,Oの成形機で曲げた後、内面と外面からサブマージーク溶接を行い、その後拡管する¹³⁾。X120ラインパイプは、900MPaを超える高強度のため、拡管時に溶接部より鋼管が破断する場合がある。さらに、Uプレス後の鋼板のスプリングバック（鋼板を曲げたことによってもとに戻ろうとする現象）が生じるため、Oプレス成形機に挿入されない場合がある。この2つの大きな課題を解決するために、有限要素解析(FEA)を用いて、真円に近い形状を得るための鋼管成形条件を確立した。

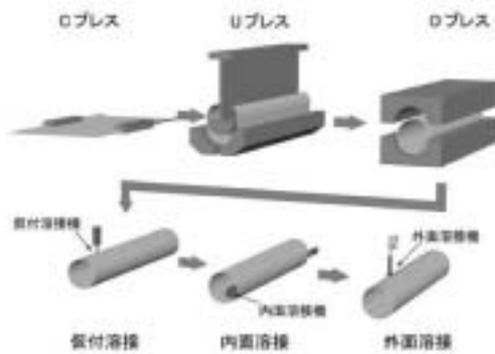


図7 UO鋼管の製造工程¹³⁾

3-6 . 実フィールドパイプラインへの適用

上述したように、鋼板製造技術、溶接技術、鋼管成形技術を駆使して、世界で初めてX120ラインパイプを開発した。そこで、新たに開発したX120ラインパイプの現地溶接性を評価するため、1.6kmのフィールドデモンストレーションラインを敷設した(図8)¹⁴⁾。その結果、鋼管と鋼管とを溶接する円周方向の溶接施工性や水素起因の割れ発生の有無、鋼管の冷間曲げ試験、水圧試験などの種々の試験に合格し、2004年の2月にカナダアルバータ州の天然ガスパイプラインの一部に適用された。現在では、このX120ラインパイプの量産体制の設備投資を完了し、実際のプロジェクトに対応していく予定である。



図8 X120ラインパイプのデモンストレーションライン¹⁴⁾

4 . まとめ

社会の持続的な発展のために、省エネルギー化とCO₂削減は必須である。そのために、より高機能な高強度鋼の開発が求められている。これら課題に対して、当社は、顧客と連携を取りながら、最先端の材料開発と高性能の材料の供給を行い、課題解決に尽力している。今後、更なる省エネルギーと脱CO₂社会化へと貢献するために、当社の優れた製造技術力、高度解析技術、CAEを駆使し、世界をリードする最先端の高機能鉄鋼材料の研究開発を実施し、多くを実用化している。

最後に、当社が供給する高機能鉄鋼材料が社会に大きく貢献できることを強く希望する。

参考文献

- 1) 鉄と鉄鋼がわかる本 新日本製鉄(株)編著
- 2) Uenishi,A., Suehiro,M., Kuriyama,Y., Usuda,M. : IBEC '96, Automotive Body Interior & Safety Systems (1996) 89
- 3) 永井正也, 高橋 学 : CAMP-ISIJ Vol.5 (1992) 1896
- 4) Matsumura,O., Sakuma,Y., Takeuchi,H., : SAE Technical Paper Series910513.1991
- 5) 樋渡俊二, 高橋 学, 佐久間康治, 白田松男, 秋末 治, 伊丹 淳, 池永則夫 : CAMP-ISIJ Vol.5 (1992) 1847
- 6) 種植隆浩, 金子勝吉, 高田良久, 伊丹 淳 : 自動車技術会 秋季大会 No.82-04 (2004) 1
- 7) 栗山幸久等 : 自動車技術会 材料技術フォーラム (2002) 16

- 8) “Sedimentary basins of the world and giant hydrocarbon accumulations” AAPG map and accompanying text.
- 9) 赤崎宏雄：“高性能ラインパイプ用鋼管開発の現状と展望” 異業種交流セミナー “エネルギー資源・その高効率利用技術とそれらを支える材料技術の開発最前線”(2006)
- 10) K.T. Corbett, R.R. Bowen and C.W. Petersen : Proceedings of the Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference Honolulu, Hawaii, USA, May 25-30 2003 p.105.
- 11) Specification for Line Pipe ANSI/API SPECIFICATION 5L Forty-fourth edition, October 1 2007.
- 12) H. Asahi, T. Hara, M. Sugiyama, N. Maruyama, Y. Terada, H. Tamehiro, K. Koyama, S. Okita, H. Morimoto : Proceedings of the Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference Honolulu, Hawaii, USA, May 25-30 2003 p.19.
- 13) 森本裕：溶接技術、第56巻、第3号、p140-145.
- 14) H. Asahi, T. Hara, E. Tsuru, H. Morimoto, Y. Terada, M. Sugiyama, M. Murata, N. Doi, H. Miyazaki, T. Yoshida, N. Ayukawa and H. Akasaki : Proceedings of IPC 2004 International Pipeline Conference October 4-8, 2004, Calgary, Alberta, Canada, IPC04-0230.

