

鋼材の高強度化による車の環境負荷低減

Application of Higher Strength Steels for Reduction in Environmental Impacts of Vehicles

高橋 学

日本製鉄(株) 技術開発本部
顧問

Manabu Takahashi

1 緒言

日本におけるモビリティ社会が確立して既に40年が経過し、人間と車の共存のあり方にも変化がみられる。第一は衝突安全性に対する強い要求である。日本においては、1970年に交通事故死者数が16765人と最大になり、その後低下し、1990年頃の第二のピークを経て2016年以降は4000人以下を継続し、2018年の交通事故死者数3532人は、実に昭和23年時点の交通事故死者数を下回っている。しかしながら、依然として一日平均10人程度の犠牲者が出ている。また、交通事故件数も最大であった2014年の発生件数の半以下になっているとはいえ、年間で約43万件発生し、52万人以上の負傷者を出している。この様な被害を削減するためには、交通インフラの充実や適正な交通規制に加えて、車両の安全性向上も重要な役割を演じる。更に今後は運転のサポートシステムや、IoT、AI等を利用した一層の安全性向上も期待される。

第二の変化は環境との調和である。地球温暖化防止の意識と共に、省資源、省エネルギーの観点から、車の燃費向上、CO₂排出削減が強く指向されるようになった。この要求を満たす車が環境対応車と呼ばれており、動力としてモーターを採用し、電池や発電器を利用する電気自動車(EV)及びハイブリッド自動車(HEV)、水素を利用する燃料電池車(FCV)等が次々と市場へ投入されている。しかしながら、車の動力源に何を採用した場合でも、省エネルギーは重要な意味を持ち、現在進められている燃費向上の為の各種技術開発の多くは今後もその重要性が低下することは無いと考えられる。車体の軽量化は直接的に自動車走行時の消費エネルギー削減につながることから重要な燃費向上対策の一つととらえられており、アルミ合金、マグネシウム合金、樹脂等の低比重材料の採用とともに、鋼材の強度や特性を向上させることによる薄肉化も積極的に進められている。

2 素材から見た車のCO₂排出削減効果

2017年度の日本国内CO₂排出量11.9億トンに占める運輸部門のCO₂直接排出量割合は17.2%、間接排出量割合では17.9%で産業分野に次いで多い。現状のガソリン車からEV車に変更することにより、走行中のCO₂排出量がゼロになることを取り上げてEV車が完璧な環境対応車であると考えられる場合があるが、必ずしも正しいとは言えない。自動車一台の環境負荷の評価はLCA (Life Cycle Assessment) の考え方を適用して総合的に行う必要がある。ここでLCAには、①材料や部品の製造組み立て工程、②自動車走行時(燃料の製造工程も含む)、③廃棄時、のすべてが含まれる。従って、走行時の直接的なCO₂排出量だけの比較では真の環境負荷を評価することはできない¹⁾。

燃料の製造工程に着目すると、欧州平均の電力エネルギーミックスでは2015年には化石燃料による火力発電の比率が43%まで低下しているのに対し、日本では同時期(2016年)に化石燃料による火力発電への依存が81%程度になっており、2030年の見通し(目標)でも再生可能エネルギー比率は最大で24%程度であるとされている²⁾。この条件下では日本国内でのEV車化がすぐにCO₂排出量のゼロ化につながるとは言い難く、EV車化の努力と同時に、今後発電における一層の化石燃料依存度の低減が必須となる。

一方、自動車を構成する素材に目を向けると、上述のように自動車の車体軽量化のために様々な素材や革新的技術の適用が進んでいる。素材が環境に及ぼす影響については、軽量化などによる環境負荷低減効果に加えて、素材製造段階及び廃棄・リサイクルの効果も考慮する必要がある。例として、比較的適用量が多いアルミ合金、2013年発売のBMW-i3に適用されて話題となったCFRP(炭素繊維強化樹脂)を、従来鋼板および高強度鋼板(ハイテン)とLCAの観点から比較して

みる。世界鉄鋼協会の自動車分科会 (WorldAutoSteel) からの公表データを元に製造段階での自動車部品機能等価重量でのCO₂排出量を比較した結果を見ると、図1¹⁾の様にハイテンの適用が最も素材製造時のCO₂排出量が少ないことが分かる。また、使用終了後の再利用を考える場合には、リサイクルの容易性(分別性や再生性)や、リサイクルによる品質低下が重要な指標になる。たとえばアルミ合金の場合にはリサイクルによる環境負荷低減(精錬時の電気使用量低減)効果は大きいものの、比較的多量の合金添加成分(Si, Cu, Mg, Mn, Fe等)を含む(例えば自動車パネル部品等に適用される5000系Al合金5182では、5%以上の合金が添加される³⁾)上に、再生する際に溶融メタル層に残留する元素が多く(図2⁴⁾)、再生地金の品質低下につながり、同一合金系以外へのリサイクルが制限される。その結果性質変化を伴う有限リサイクルが一般的となっている。これに対して鉄鋼材料はリサイクル時の選別が容易であり、添加合金量も微量であることに加えて、精錬中にほとんどの合金成分は溶融メタルから排出されるために性質の劣化が起こりにくく¹⁾、その結果、平均でも5回程度のリサイクルを経験すると考えられ⁵⁾、例えば2005年に日本国内で製造された鉄鋼材料は100年後も廃棄されることなく使われ続けることが予想される⁵⁾。この結果、素材の製造から廃棄・リサイクルまで含めた評価を行うことによって、ガ

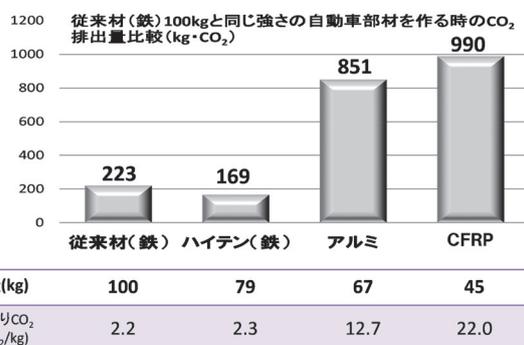


図1 自動車用各種素材の製造時CO₂排出量の比較

ソリン自動車の生涯CO₂排出量を比較すると、アルミ合金適用による自動車車体軽量化に比較して、ハイテン適用による軽量化は約2%程度有利であることが試算されている⁶⁾。走行時のCO₂排出がないEVの場合にこの解析を適用すると、素材製造時とリサイクルの効果が強調されるために、ハイテン適用による軽量化の優位性がより強調される事になる。

3 自動車の衝突安全性向上と軽量化

当然の事ながら、自動車車体の軽量化はCO₂排出削減に大きなインパクトを持つことから、衝突安全性を確保しながら車体軽量化を進める必要がある。自動車車体の各構成部品は、その部位によって担うべき役割が異なる。表1には自動車車体各部位の強度特性と、板厚以外の素材面からの支配因子をまとめた⁷⁾。この中で特に衝突時に働く部品(構造部材等)の圧潰強度は材料の強度の影響を強く受けることから、鋼板のハイテン化による薄手化が最も効果的に利用できる分野である。実際に行われる自動車車体の衝突安全性評価方法

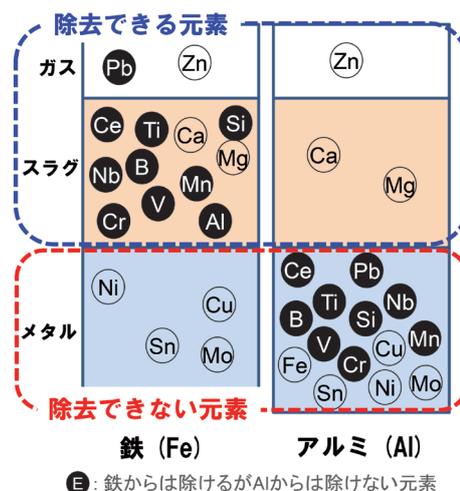


図2 鋼とアルミ合金でのリサイクルプロセスにおける不純物元素除去容易性の比較(参考文献4)を元に作成)

表1 自動車各部位に必要な強度特性と材料要因

部 品	必要特性					
	張り剛性	耐デント性	部材剛性	耐久強度	動的圧潰強度	
外板	◎	○				
内板	◎				○	
構造部材	フロントレール		◎	○	○	
	リアピラー等		◎	○	○	
	フロントサイドメンバー		◎	○	◎	
	サイドシル等		◎	○	◎	
	ドアガードバー等		○	○	◎	
床下部材			◎	◎		
	サスペンションアーム		◎	◎		
	ホイールディスク等		◎	◎		
板厚以外で特性を支配する材料因子		ヤング率	降伏強度	ヤング率	強度	強度

の例を図3に示した⁷⁾。前方もしくは後方からの衝突の場合には比較的大きな変形可能領域が存在するために、車体の骨格構造部材の塑性変形によって衝撃および衝突エネルギーを吸収する。一方側方からの衝突の際には変形距離が確保できないため、できるだけ変形を抑制できるように剛な設計がなされる。

衝突時の材料の変形速度は、最大でひずみ速度が約1000/s (JIS規格による材料評価試験の約百万倍) にも達すると言われている⁸⁾。鋼材は一般的に変形速度の上昇とともに大きく強度が上昇することから、強度の変形速度(ひずみ速度)依存性を定量的に把握することは非常に重要である。高速での変形特性評価方法は種々の試験方法を包含する形で2010年 (ISO 26203-1)、2011年 (ISO 26203-2) に国際的な規格が成立した⁹⁾。

衝突時に軸方向に座屈変形することによって衝突エネルギーを吸収する部材を想定して、角筒サンプルの軸圧潰挙動をFEM (Finite Element Method) により計算評価した (図4)¹⁰⁾。エネルギー吸収量は鋼板強度 (図4では、5%ひずみでの応力) と共に増加し、同一強度レベルでも強化方法によって衝突エネルギー吸収量が異なる場合もある。また同様に曲げ変形が主体となる部品を想定したハット型断面部材の圧潰曲げ落錘試験 (図5)¹¹⁾ でも、吸収エネルギーは鋼板強度と共に上昇す

ることが分かる。これらのハイテン適用効果を利用することで衝突特性を劣化させることなく、鋼板の薄手化、即ち軽量化が可能となる。

この様な効果を楽しむためには、車体各部位へのハイテン適用を可能とする各種利用技術が必要となる。適用される部品形状への成形性、アッセンブルするための溶接性、腐食や疲労に対する耐久性、更には意匠性に関係する表面品位や塗装性等、適用部位に応じて様々な利用特性が要求される。ハイテンを適用する場合は、ほぼ全ての要求特性が低下する傾向であるために、付加的な技術開発が必須となる。特に成形性と溶接性の低下は、部品やモジュール、車体製造で大きな障害となる。プレス成形では近年著しく進歩したCAE (Computer Aided Engineering) 技術の適用と、金型やプレス方法の工夫による新しいプレス技術により、従来では不可能であった強度レベルの鋼板適用が実現している。鋼板の高強度化に伴って増加するスプリングバックに起因して、プレス成形後の部品の形状精度の低下が問題となる。この形状凍結性もCAE技術の適用やプレス成形方法の工夫によって改善されている。曲げ曲げ戻し変形をうける部位では、パウシinger効果や応力除荷時の見かけのヤング率低下現象の考慮も必要であり (図6)、Lemaitre-Chaboche モデルや、吉田一上森モデルに加えて、材料の微視的構造変化を内部状態変数の発展側として記述したTeodosiuモデルのパラメータを単純せん断試験等を利用して決定して汎用FEMプログラムに組み込み、精度の高い形状予測とそれに基づいた対策技術開発も可能としている¹²⁾。

4 自動車用鋼板と利用技術の進歩

自動車車体軽量化に貢献しつつ、衝突安全性の向上や各部位に要求されるその他の特性の維持向上を図るために、様々

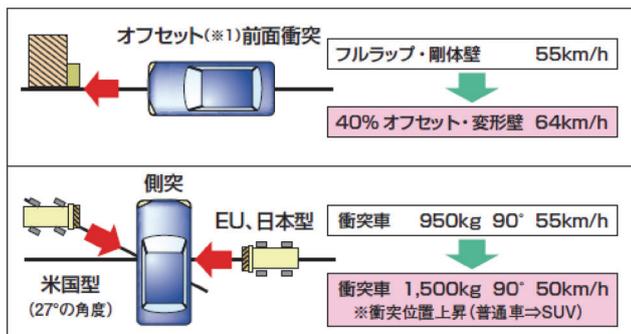


図3 自動車衝突安全性評価方法の例

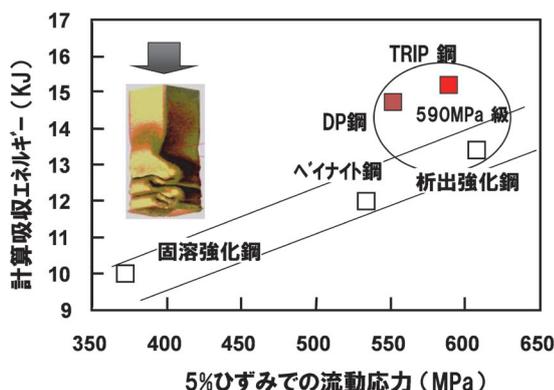


図4 薄肉角筒圧潰時の吸収エネルギー量に及ぼす鋼板強化方法の影響

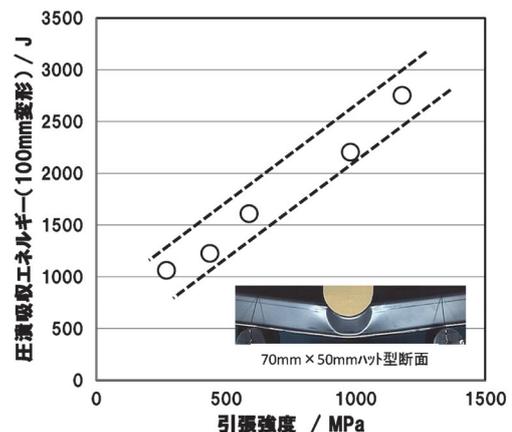


図5 鋼板強度と曲げモードでの衝撃吸収エネルギーの関係

な自動車用鋼材が開発・実用化されてきた。ここでは自動車用薄鋼板にフォーカスし、特に最近の10~20年での自動車用鋼板とその利用技術の進歩について概説する。

薄鋼板が主に適用される自動車車体部位は、内・外板パネル部品、足回りシャシー部品、及び衝突安全性を担う骨格構造部品の3種類に大別される。以下にはそれぞれの部位での薄鋼板と利用技術の進化を紹介する。

4.1 パネル部品用ハイテンとその適用技術

自動車の商品価値を決める一つの要素である車体デザインは複雑な形状の部品をアセンブリすることによって達成される。このデザインを左右する重要な部品の一つが自動車車体外板パネルであり、適用される鋼板には意匠性としての表面品位や複雑形状への良好な成形性に対する要求が非常に厳しい。また、内板も複雑な形状が要求されると同時に特に従来複数の部品をプレス成形し、接合によって製造していた部品を一つのプレス部品として統合することで、金型の個数削減や溶接点数削減等を通じて製造コストを低減しようとする一体成形化の為に、鋼板に対してより一層の成形性向上が望まれてきた。この様な背景から、パネル部品には、深絞り成形性 (r値：Lankford値が支配的) 及び張出し成形性 (n値：加工硬化係数すなわち一様伸びが支配的) が良好な軟鋼板が適用されてきた。表1に示すように、外板パネルに要求される強度特性としては、手で押さえた時のベコツキ感をあらかず張り剛性や、小石の飛来や指の押し付けによって生じる小さな凹み (永久変形) に対する耐力を表す耐デント特性などがある。張り剛性は板厚や形状、構造及び材料のヤング率に依存し、鋼板を高強度化することだけでは改善できない特性である。従って、部品の板厚が張り剛性によって決められている場合には、形状等の工夫なしにはそれ以上の薄手化は困難である。

パネル系部品へは、従来の270MPa級軟鋼板に対して、340MPa級、BH340MPa級 (BH：Bake Hardening、焼付け

硬化)、及び370MPa級が適用された後、大きな進展はなかった。BH鋼板は高い降伏強度に起因するプレス成型時の表面品位劣化を回避しつつ、実使用時には高い降伏強度を持つことから、特に外板パネルの薄手化に貢献した¹³⁾。

この様なパネル系部品の機能を大きく変化させた例として、パネル部品の一部に意匠性でなく耐衝突特性を分担させる動きが挙げられる。2012年にはサイドパネルアウターの下部に590MPa級のハイテンを適用する事でサイドシル部の補強材 (スティフナー) を省略し衝突特性と軽量化を両立させた車が発売され¹⁴⁾、2013年発売車には同じ目的で780MPa級が適用された¹⁴⁾。この様な部分的なハイテン適用ではプレス成形の前に鋼板を溶接でつなぎ合わせたTWB (Tailored Welded Blank) 法が適用される。この部品は直接ユーザーの目に触れることから、接合線部の見栄えや形状、微小なしわ発生を抑制する必要がある。このために、溶接後のローラーによる塑性加工や金型、成型工程の工夫を行うことで、要求品質を確保している。この様な対策と同時に、CAE技術を効果的に適用する事によって成形品のスプリングバックを補正するための金型の見込みも高精度に予測することができ、パネル系部品への一部ハイテン適用が実現している¹⁴⁾。また、実用化はされていないものの、ドア外板へのハイテン適用によって衝突特性と軽量化を両立する可能性も提案されている (図7)¹⁵⁾。従来の0.65mm厚の軟鋼板を0.4mm厚の590MPa級ハイテンにし、後面に特殊な補強材を配置することで、ドアインパクトビームを省略してもパネルの張り剛性と衝突特性を両立しつつ軽量化可能であることをCAEで確認している¹⁵⁾。

4.2 シャシー部品用ハイテン

シャシー足回り部品は重要保安部品であるために、プレス成形性や溶接性に加えて高い耐食性や疲労耐久性が求められる。アーク溶接熱影響部の軟化が問題になる場合にはニオブ (Nb) やチタン (Ti) を添加した析出強化型ハイテンが選択される。しかしながらこれらのハイテンは一般的に成形性や疲労耐久性が高くないため、その適用部位は限られている。これらに対して、高いプレス成形性と疲労耐久性を示すハイテンとして開発されたのがDP (Dual Phase) 鋼である。軟質フェライトをシリコン (Si) 等で固溶強化し、更に硬質相であるマルテンサイトを分散させた540及び590MPa級のDP鋼はホイールディスクの軽量化等に大きく貢献した¹⁶⁾。その後、更に高延性でプレス成形性に優れた熱延鋼板として低合金TRIP (TRansformation Induced Plasticity) 型複合組織鋼が開発された。室温で数%以上の未変態オーステナイトを残留させたこの鋼は大きな一様伸びとDP鋼に匹敵する疲労耐久性を示し¹⁷⁾、780MPa級が最初に実車に適用された。ハイ

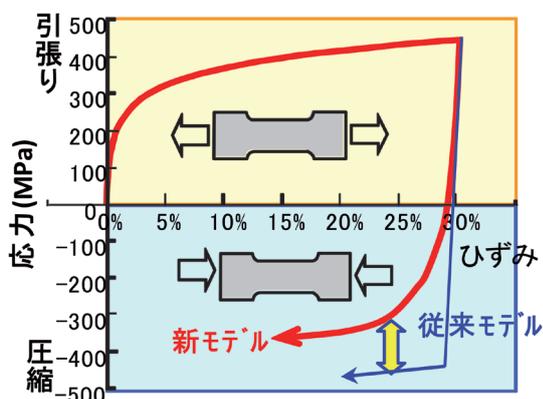


図6 反転負荷時の応力-ひずみ曲線の例



図7 極薄ハイテン外板を適用した新鋼製ドアの試作品

テン化の進展と共に課題となったのが伸びフランジ成形性である。伸びの向上にはマイクロ組織を複合組織化する事が有利だったが、伸びフランジ成形性の向上にはマイクロ組織を極力均一化する事が望ましい。これら相反する要求にこたえるため、複合組織の組織間強度差を低減し、鉄炭化物をほとんどなくすることで良好な疲労強度と高い伸びフランジ成形性を示す780MPa級熱延鋼板が開発され、アーム類やホイールディスクに適用された^{18,19)}。また、ホイールリムには980MPa級熱延鋼板が適用された例も報告されており²⁰⁾、シャシー足回り部品もギガパスカルの世界に突入している。

シャシー部品には比較的板厚が厚い鋼板が適用され、接合方法としてアーク溶接が利用される場合が多い。アーク溶接部は構造上応力が集中することから、走行中の繰り返し応力負荷での疲労亀裂発生部位になることが多い。また、塩害地での走行に対しては塗装不良を伴う溶接部が腐食の起点となり長期の使用において部品の板厚減少につながることもある。ハイテンの重ね継手アーク溶接部の疲労強度は溶接部の形状因子（止端部の曲率半径などで決まる応力集中係数）と溶接金属強度に依存することが確認されている（図8）²¹⁾。溶接金属強度は使用する溶接ワイヤの高強度化で対応可能であり、止端部の形状はシールドガス成分の最適化によって改善可能であることが報告されている²¹⁾。一方溶接部の耐食性低下は熔融池中のSiやMn等の脱酸素素がシールドガスに含まれる酸素と結合することで生成される溶接ビード表面のスラグが塗装不良の原因になることが確認されており、溶接ワイヤや鋼板の化学成分の低Si、低Mn化や、シールドガス成分の最適化によって大きく改善できることが報告されており²¹⁾、シャシー部品へのハイテン適用実現に貢献している。



図8 重ね継手アーク溶接部の断面写真例。rは止端部の曲率半径

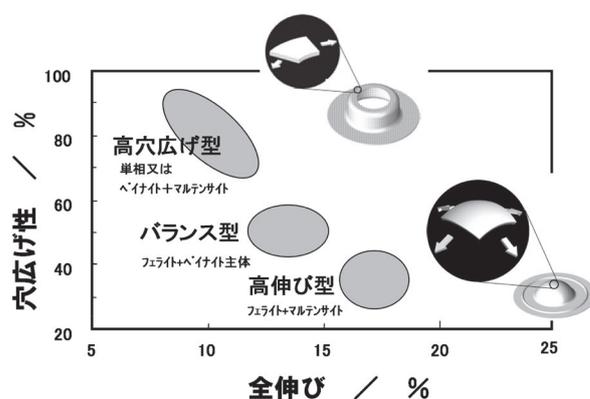


図9 延性と穴広げ性バランスが異なる各種980MPa級ハイテン

4.3 骨格構造部品用ハイテン

骨格構造部品用冷延・めっき鋼板は主に衝突時のエネルギー吸収や力伝達及び変形抑制の役割を担うことから、最も積極的にハイテン適用が進められた。冷間プレス用高成形性ハイテンとして広く適用されているのがDP鋼である。合金化溶解重鉛めっきの適用が可能であったことから、当初は590MPa級が、その後2000年代に入って980MPa級までのDP鋼が実用化された。例えば980MPa級の冷延ハイテンでは図9の3つの楕円で示す様に、部品成形の要求に従って伸び特性と穴広げ特性（伸びフランジ成形性）の異なるバランスを示す鋼板が開発され、適材適所に実用化されている²²⁾。DP鋼よりも伸び特性に優れた鋼として冷延・めっき鋼板でも低合金TRIP型複合組織鋼板が開発され、様々な骨格部品に適用された。最近では冷間プレス骨格構造部品用のハイテンとして1.2GPa級の冷延鋼板の適用が報告されている^{23,24)}。マイクロ組織を比較的硬質なベイナイトとマルテンサイト主体とし、その中に軟質なフェライトと未変態（残留）オーステナイトを分散させたTRIP型複合組織とする事で、高延性と良好な伸びフランジ性を両立させている²⁵⁾。

一方、変形抑制を目的にした部品にはホットスタンプ技術

を適用する例が増加している。ホットスタンプは900℃程度に加熱した鋼板を冷却された金型でプレス成形しつつ金型内で焼入れを行う成形方法で、低い生産性や形状自由度の制限等はあるものの、良好な形状凍結性と容易な高強度化等によってその適用が進められている。当初採用された1.5GPa級のホットスタンプ部品は、加工硬化と焼付け硬化を加味した上記1180MPa級ハイテンの冷間プレス部品に対して衝突特性上の優位性は無いものの、特殊なプレス成形技術や、CAE等を駆使した形状凍結性の改善技術などが不要なため、依然として広く適用されている。これに対して、更に高強度化を目指したホットスタンプ用鋼板も開発され²⁶⁾、バンパー補強材に1.8GPaのホットスタンプ部品が採用された例も報告されている²⁷⁾。

超高強度鋼板を適用する目的は当然の事ながら衝突特性の向上である。衝突時には変形部位毎に広範囲の変形速度を経験する。従って鋼材の変形挙動を支配する材料構成式に変形応力のひずみ速度依存性を精度高く導入する必要がある。アルミ合金ではこの変形応力のひずみ速度依存性は重要ではないが、鋼板の場合には変形速度の増加と共に急速に変形応力が上昇するために、この効果の考慮は必須となる⁸⁾。超高強度鋼板を衝突部位に適用する場合には、このFEMシミュレーションによる変形計算と共に、各部位の破断評価も重要となる。特にスポット溶接部は衝突による変形時にせん断力だけではなく剥離方向の力も働く場合があり、溶接で生成するナゲット端部での応力集中や溶接によるマイクロ組織変化などによって破断の危険性が増加する。スポット溶接部の衝突時の破断挙動は鋼板材質に加えて、板厚、溶接条件、形状、荷重の入力条件等多くの因子に影響を受ける。この現象に対し、ナゲット周りの変形拘束を考慮した応力集中係数を用いて表現する方法を開発した²⁸⁾。この関係は鋼種、板厚、溶接条件、試験片形状等の影響を受けないことが実験的に確認されてお

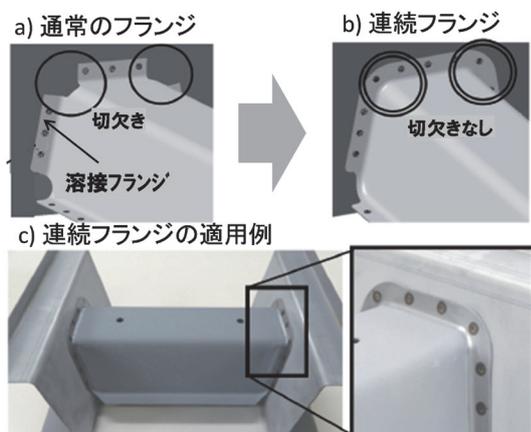


図10 継手部の剛性向上のためのフランジ連続化の例

り、FEM計算に導入することで任意の条件における衝突時のスポット溶接部の破断の有無を計算することが可能となった。

高強度化に伴って発生する部品の形状不良に起因する溶接合わせ面の隙間や、添加元素の増加による溶接性の低下を補償する方法として、溶接後に再度通電する後通電（短時間の凝固偏析緩和型、中時間のオートテンパ型、長時間の焼き戻し型の3種類が提案されている）の様な通電パターンの工夫や、アークスポット、レーザー溶接との併用等による溶接継手の信頼性向上も報告されている²⁹⁾。

超ハイテンを冷間プレス成形する場合には、CAEを駆使して割れやしわの発生回避、形状精度の向上等を行うが、これらに加えてプレス成形方法の工夫や部品の構造最適化を行う必要もある。鋼板を高強度化して薄手化すると、一般的に部品やモジュールの剛性が低下する。特に継手部起因での剛性低下を回避するために、クロスする骨格部品をスポット溶接で接合する際に通常設けられるフランジのコーナー部の切欠きをなくしたフランジ連続化が提案され、剛性向上効果が報告されている（図9）³⁰⁾。一般的にフランジコーナー部に切欠きが設けられる理由は、コーナー部での伸びフランジ成形条件が非常に厳しく、440MPaを超える強度の鋼板では割れなく成形すること自体が困難だからである。これに対して、フランジコーナー部端面近傍のひずみ集中を緩和する新しい成型方法を開発し、超ハイテンでもフランジを連続化できる技術を確認している³⁰⁾。

また、ハイテン化が期待されるピラーは、下部ではサイドシル（ロッカー）と、上部ではルーフレールと結合するために、T字やL字形状に成形することが必要となる。一般的には絞り成形後に一部を切り取る成型方法が採用されるが、絞り成形能が低いためにハイテン化が困難な上に材料歩留りも低かった。これに対して曲げ成形をベースにした自由曲げ工法（図10）が開発され、超ハイテンの適用が可能になったのみならず、材料歩留りも向上させた³⁰⁾。

以上の様に、自動車車体軽量化と衝突安全性向上を両立させるために様々なハイテンとこれらのハイテンを実部品に適

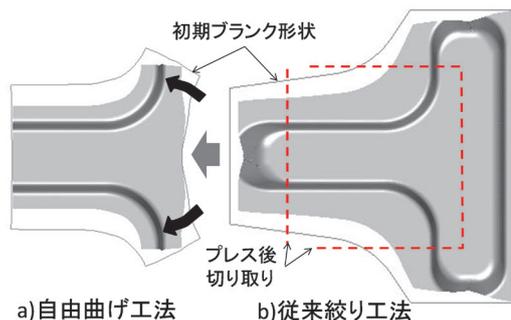


図11 従来の絞り工法と自由曲げ工法の比較

用するための利用技術が開発されたことで、製造コスト増加やLCAの観点からの環境負荷増加につながる低比重材料にたよらない、鋼材による環境調和型のソリューション提案が可能となっている。

5 まとめ

様々な商品・素材の環境負荷に関しては、対象となる商品や技術が、その製造工程から廃棄工程までの間にどのような環境負荷を持っているかを評価することが重要である。たとえば自動車を考える場合、社会的な要求である衝突安全性と、環境調和からの要求であるCO₂排出削減の両立をLCAの観点から評価した上で適正な素材や工法の組み合わせを選択する必要がある。LCAによる評価では鋼材による自動車軽量化は低比重素材の適用に比べて環境負荷が小さい。しかしながら鋼材を用いた車体軽量化と衝突特性向上の両立には様々な高機能高強度鋼材の開発と、その利用技術確立が必須となる。今後も高機能鋼材と新たな構造、工法を組み合わせるトータルソリューション提案が重要であると考えられる。

参考文献

- 1) 季刊 新日鉄住金, 20 (2017), 26.
- 2) 日本エネルギー経済研究所：経済産業省資源エネルギー庁委託調査、諸外国のエネルギー政策動向に関する調査報告書、(平成30年2月)
- 3) 櫻井健夫：神戸製鋼技報, 59 (2009) 1, 121.
- 4) 平木岳人, Xin Lu, 中島謙一, 松八重一代, 中村慎一郎, 長坂徹也：軽金属のリサイクル性に関する熱力学的検討, 第23回廃棄物資源循環学会研究発表会, (2012), 23.
- 5) 醍醐市朗：季刊 新日鉄住金, 20 (2017), 16.
- 6) World Auto Steel：Comparing Material Usage in Production Vehicle Efficient Designs, <https://www.worldautosteel.org/life-cycle-thinking/case-studies/comparing-material-usage-in-production-vehicle-efficient-designs/>
- 7) Nippon Steel Monthly, 184 (2008), 17.
- 8) A.Uenishi, M.Suehiro, Y.Kuriyama and M.Usuda：IBEC'96, Automotive Body Interior & Safety Systems, Automotive Technology Group Inc., Michigan USA, (1996), 89.
- 9) 八木隆義：塑性と加工, 54 (2013) 624, 14.
- 10) 高橋学：新日鉄技報, 378 (2003), 2.
- 11) 藤田展弘, 楠見和久, 松村賢一郎, 野中俊樹, 友清寿雅：新日鉄技報, 393 (2012), 99.
- 12) 高橋学, 末廣正芳, 越智達朗, 宮崎康信：新日鉄技報, 391 (2011), 27.
- 13) K.Yamazaki, T.Horita, Y.Umehara and T.Morishita：Proc. of Conf. on Microalloyed HSLA Steels, World Materials Congress, ASM, (1988), 327.
- 14) 神田寛達, 井上直樹, 横山鎮：自動車技術, 70 (2016), 43.
- 15) 鈴木利哉, 中澤嘉明, 広瀬智史, 吉田亨：日本製鉄技報, 412 (2019), 45.
- 16) 水井正也：材料, 38 (1989), 15.
- 17) T.Yokoi, K.Kawasaki, M.Takahashi, K.Koyama and M.Mizui：JSAE Rev., 17 (1996), 191.
- 18) Y.Funakawa, T.Shiozaki, K.Tomita, T.Yamamoto and E.Maeda：ISIJ Int., 44 (2004), 1945.
- 19) 高橋学, 河野治, 林田輝樹, 岡本力, 谷口裕一：新日鉄技報, 378 (2003), 7.
- 20) トピー工業, News Release, (2009/11/18)
- 21) 児玉真二, 富士本博紀, 石田欽也, 松田和貴, 松葉正寛：日本製鉄技報, 412 (2019), 78.
- 22) 野中俊樹, 後藤貢一, 谷口裕一, 山崎一正：新日鉄技報, 378 (2003), 12.
- 23) 石内健太郎, 近藤隆明, 福原恵美, 岩崎剛, 橋本周, 吉田健, 山口信幸, 吉川暢広：自動車技術会学術講演会前刷集, 20135420 (76-13) (2013), 1.
- 24) 鈴木勝人, 尾崎賢司, 鈴木健太郎, 鈴木孝典, 藤田智大：一般財団法人機械振興協会第12回機械振興賞受賞概要, (2014), n12-2.
- 25) 川田裕之, 丸山直紀, 米村繁, 村里映信, 本田和彦, 若林千智, 濱谷秀樹：自動車技術会学術講演会前刷集, 20145314 (76-13) (2013), 1.
- 26) 匹田和夫, 西畑敏伸, 菊地祐久, 鈴木貴之, 中山伸之：まてりあ, 52 (2013) 2, 68.
- 27) 鈴木貴之, 匹田和夫, 中山伸之：自動車技術, 70 (2016), 49.
- 28) 吉田博司, 上西朗弘, 栗山幸久, 野村成彦：自動車技術会学術講演会前刷集, 49-05 20045205 (2004), 1.
- 29) 古迫誠司, 松井翔, 銭谷佑, 若林千智, 岡田徹, 嶋田直明, 富士本博紀：日本製鉄技報, 412 (2019), 67.
- 30) 西村隆一, 田中康治, 宮城隆司, 小川操, 大塚研一郎, 中澤嘉明：日本製鉄技報, 412 (2019), 14.

(2019年8月29日受付)