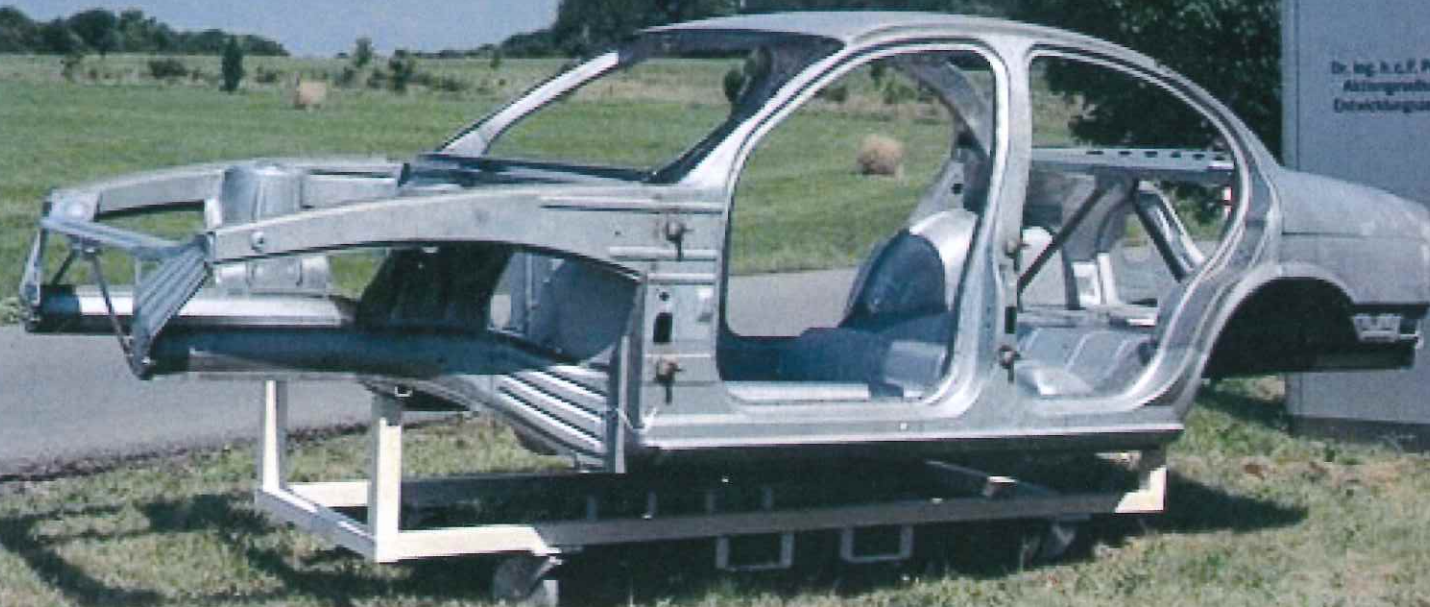
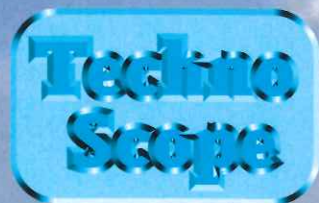




強度と加工性への挑戦

自動車はここまで軽量化できる

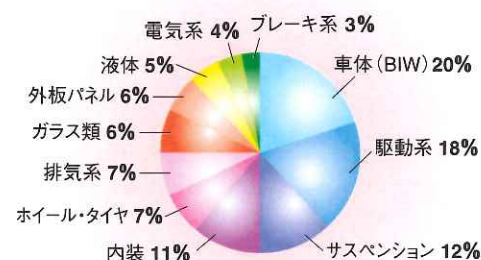
環境負荷の小さな自動車の実現を目指して、低燃費車やクリーンエネルギー車の開発による環境対策が今自動車メーカーに強く求められている。その有効な手段の一つが軽量化である。自動車用材料の半分以上を占めるのは鉄鋼材料（鋼材）であり、21世紀においても鉄鋼技術の発展が必要不可欠である。

燃費向上を実現する自動車軽量化

環境問題の深刻化にともない、地球温暖化の原因の一つであるCO₂の排出量を削減する動きが世界各国で具体化している。環境省資料（1999年度の温室効果ガス排出量について）によると、地球上のCO₂総排出量の2割を運輸部門が占めるが、その大半は自動車からのものとされている。

アメリカでは、1993年にクリントン大統領提案によるPNGV（Partnership for New Generation of Vehicle）プロジェクトが始まり、80mile/USgallon（33.8km/L）を目標とする低燃費車の開発が求められた。一方、ヨーロッパでは、特定車種でなく

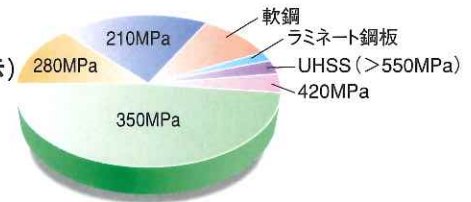
■自動車の部位別の重量



各自動車メーカー全車種平均で、2008年までにCO₂排出量140g/km以下（燃費に換算すると17km/L以上）の目標を定めた規制が打ち出され、3L車（燃費換算100km/3L）の開発が求められた。このきわめて厳しい条件に合格するためには、自動車軽量化の推進が必要である。

また安全性能確保を目的とした自動車アセスメントが世界各国で公表されているが、この衝突安全性能基準に合格するために、安全性能の向上による車体重量の増加分がある。この観点からも、自動車軽量化が強く要請されている。

■ULSABに使用された
鋼板グレード(降伏応力表示)



アルミニウム、プラスチック等の軽量材料を鋼材の代替材料として採用する取り組みは、1980年代から活発に行われるようになった。しかし実用化に際しては、製造原価、生産技術、環境負荷等の面で多くの問題があり、すべての車種に普及させることは困難であった。

自動車工業会が行った2001年の調査結果によると、普通車・小型車における自動車原材料構成比は鋼材が54.8wt%で最も大きくなっている。また、鋼材が自動車の中で最も多く使用されるのは車体(ホワイトボディ)と称する部分であり、全重量の約20wt%を占めている。

世界の鉄鋼メーカーが集結した ULSABプロジェクト

社会的な自動車軽量化の要請を受け、1994～98年にULSAB(UltraLight Steel Auto Body)プロジェクトが実施された。ULSABは、国際鉄鋼協会(IISI)を中心として世界18カ国の鉄鋼メーカー35社が共同で推進したプロジェクトで、車体性能や衝突安全性を確保し、同時に価格の上昇を抑えた軽量鋼製車体が可能であることを実証した。設計・試作はボルシェ・エンジニアリングに委託され、第一段階ではホワイトボディの設計を行い、第二段階では詳細設計および試作・評価が行われた。北米の代表的な9車種に基づき目標車仕様を設定し、25%の軽量化に成功した。この成果はその後自動車メーカーの低燃費車の開発に影響を与えることになった。

ULSABにおける設計・製造技術における主な特徴は、①テラードブランク材の徹底採用、②ハイドロフォーミング材の採用、③レーザー溶接の多用、④高張力鋼板(ハイテン)の積極的採用、である。

テラードブランクとは、レーザー溶接またはマッシュシーム溶接により、部位の要求に応じた複数の鋼板を事前に結合し、一体成形する技術である。この技術はすでに市販車でも比較的簡単な部位に実用化されていたが、ULSABでは、サイドパネルアウトヒンジ部に厚さ1.5mmの鋼板を使用し、Bピラー部に厚さ2.0mmの鋼板を組み合わせて使用する手法を実現した。この手

法を用いると、衝突安全の確保と部品点数の削減を両立させることができる。このようにテラードブランクでは、使用箇所に応じて細かく鋼板の種類が選択できるため、重量削減が容易であるという特徴もある。この手法の適用部品は、外板のサイドパネルも含めて16部品に達し、重量比で約45%に相当する。

ハイドロフォーミングはパイプに軸力と内圧をかけて成形する手法で、中空閉じ断面構造の部品(フレームなど)を製造する技術である。この手法を用いると、部品材料を薄肉化および高強度化することができる。ULSABでは、レールやフレームの成形ばかりでなく、プレス加工法に変わる技術としてパネル成形にも適用している。

組立工程では、三次元レーザー溶接を用いた連続溶接法により、剛性向上が図られている。ちなみに、車一台あたりの溶接部の全長は約18mに及ぶ。

鋼板にはハイテンが多用された。降伏応力が210MPaを超えるハイテンの占める割合は重量比90%以上に達している。なかには550MPa以上のものも含まれ、クロスメンバーなどに適用されている。このようなハイテンの多用は、衝突対策に主眼がある。年々厳しくなる安全基準の評価では、車体には正面衝突のほか、斜めからのオフセット衝突や側面衝突への対応が求められる。これに合格するために、ULSABは検討段階でハイテンの高強度化や使用比率向上を検討し、1998年に当初目標の25%の軽量化を達成した。

そのほか、対向液圧成形の採用や軽量ラミネート鋼板の使用など、種々の製造技術が利用され、また有限要素法(FEM)による構造解析により最適な設計が進められた。

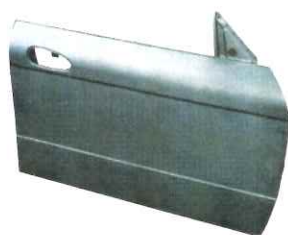
クローシャーおよび サスペンションへの適用を検討

前述のようにULSABプロジェクトは車体が対象だが、自動車の主要な構成要素である外板やサスペンションに対する軽量化を提案するため、ULSAC(UltraLight Steel Auto Closure)およびULSAS(UltraLight Steel Auto Suspension)の2つのプロジェクトが実施された。

ULSACプロジェクト(1997年5月～2000年5月)は、ドア、フード、デックリッドおよびハッチを対象とし、世界の代表的な15車種に対して19～32%の軽量化を図ることを目標とした。設計段階では、ハイテンを採用し、テラードブランク、ハイドロフォーミング等の加工技術を用いることにより、22～32%の軽量化を図ることができた。実証段階では、さらにフレームレスドアを試作し性能評価を行ったところ、目標値である21%を大きく上回る33%の軽量化を達成した。

■ULSABの成果

区 分	ULSAB 目標	ULSAB 実績	ベンチマーク 平均	比較(%)
質量(kg)	≦200	203	271	-25
静的ねじり剛性(Nm/deg)	≧13,000	20,800	11,531	+8
静的曲げ剛性(Nmm)	≧12,200	18,100	11,902	0
一次固有振動数(Hz)	≧40	60	38	+5



ULSACによるフレームレスドア



ULSASによるサスペンション

この後2001年5月には、厚さ0.6mmの降伏応力600MPaのDP (Dual Phase) 鋼板を用いてシートハイドロフォームにより製造された軽量化ドアの試作品が発表され、注目を集めている。

一方、ULSASプロジェクト(1997年7月～2000年5月)は、サスペンションを対象としている。サスペンションは自動車総重量の約12%を占めているが、バネ下重量の軽量化は運動性能の向上に大きく貢献するものと期待される。ULSASでは、鋼製の代表的な4種類のサスペンション形式に対して20%軽量化すること、またアルミニウム製サスペンションに対して重量が同等で製造原価を20%低減することを目標とした。そのため設計においては、①構成する部品の大きさや断面形状の最適化、②部品の一体化の追求、③500MPa級以上のハイテンや鍛造品を用いることにより、高強度や高耐久性を実現した。また、アルミニウム製サスペンションに対しても、重量同等で30%の製造原価低減が可能との結果も得られている。

先進的な自動車コンセプトを目指して

ULSABプロジェクトが1998年に終了した後も、環境対策、衝突安全性の向上等に対する要求がさらに高まった。この要求に応えるために、車体ばかりでなく、外板、シャシー、駆動機構等を含む自動車全体の総合的な検討を行い、鋼材の利用を推進させるULSAB-AVC (Advance Vehicle Concept) プロジェクトが1999年1



ULSAB-AVCの検討による車のスタイリング (上) 1,500ccクラス (下) 2,500ccクラス



月に結成された(2002年1月に成果報告予定)。このプロジェクトには、前記のULSACおよびULSASの成果も継承されている。

ULSAB-AVCでは、2004年の実車化を前提として、排気量1,500ccおよび2,500cc相当の自動車の設計を行い、20～30%の軽量化を目標としている。この目標値は、2008年までにCO₂排出量を140g/km以下に削減するヨーロッパ基準に基づいて設定されたものである。

また、衝突安全性については、ULSABより一段と厳しい目標が設定された。これにより約25kgの重量増加をとまうが、その増加分を相殺して軽量化しなければならない。このような軽量化の要求に対しては、構成材料の高速変形特性を考慮したFEMによる構造解析の活用が期待されている。現在、衝突時の歪速度依存性を考慮した構造の検討が進行中である。

ULSAB-AVCプロジェクトの成果は2002年1月に発表される予定であるが、ハイテンを多用した新しい自動車がどのようなものなのか興味深いところである。

機械強度特性、成形加工性および衝撃吸収性の両立

ULSABプロジェクトで多用されたハイテンは、優れた機械強度特性を生かして構成部品の軽量化に貢献している。しかし自動車用鋼材は、機械強度特性ばかりでなく高い成形加工性や衝撃吸収性を兼ね備えた構造材料であることが要求されている。炭素鋼ではよく知られているように、炭素濃度が高くなると引張り強さは増加するが延性は低下する。このように、機械強度特性と成形加工性を両立させるのは通常困難である。

この問題に対し、3つの解決法が検討されている。第一は析出強化であり、HSLA (High Strength Low Alloy) と呼ばれている。第二は変態強化であり、DP鋼やTRIP (Transformation Induced Plasticity) 鋼である。特にTRIP鋼は、プレス成形性が良く、高い衝突エネルギー吸収特性を有し、注目されている。このような優れた成形加工性は、熱力学的に安定なオーステナイト軟質相が塑性加工に誘起されてマルテンサイト硬質相に変態し、加工硬化率を増大させ均一変形能を向上させている。最近では、低炭素鋼のTRIP鋼が開発されるようになり、価格やリサイクル性の観点から注目されている。第三は結晶粒の微細化であり、これは現在世界



結晶粒を微細分散化した高強度鋼板のプレス成形



590MPa級TRIP鋼の成形加工性比較

鉄鋼材料による自動車軽量化はLCAからも有利か

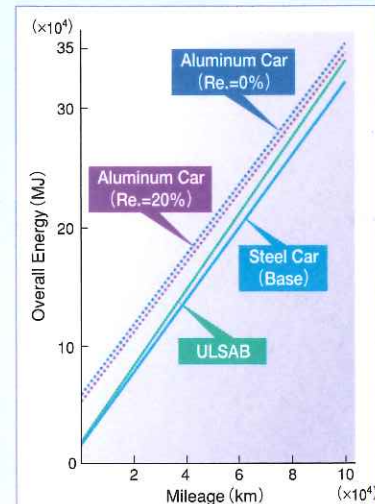
材料の環境負荷を客観的に判断する基準として、LCA (Life Cycle Assessment) 法が広く用いられている。LCA法の概念は、製品の製造時ばかりでなく、素材原料の採掘、素材の製造、製品の組立・使用・リサイクル・廃棄に至るライフサイクル全体における燃料や電力の消費量を考慮して、環境負荷に対する製品製造の影響を可能な限り定量的に評価しようとするものである。

ULSAB車体ではハイテン材の多用などにより、価格や安全性を維持した上で25%の軽量化を達成した。「鉄鋼業から見た自動車のLCA」として、ULSAB車体、通常の鋼材製車体およびアルミニウム製車体を製造する際のエネルギー

消費量を比較検討した記事がある*。この記事で紹介されている米国鉄鋼協会 (AISI) の最近の研究によると、10%の軽量化によって走行時の燃費が約5%向上する等の前提を仮定した際には、ULSAB車体に対するエネルギー消費量が最も小さい。また、10万km走行時における燃料消費量を加算した全エネルギー消費量は、ULSAB車体や鋼材製車体の方がアルミニウム車体よりも小さく、鋼材を用いた車体の環境負荷に対する優位性が示されている。

*システムと融合した材料の選択—「鉄鋼業から見た自動車のLCA」を事例にした一考察 (高松、大橋、日本金属学会誌Vol.65, No.7 (2001)、pp.557-563)

■ライフサイクルから見たエネルギー消費量



各国において研究開発が進められている。

一方、防錆鋼板として知られる合金化溶融亜鉛めっき鋼板では、優れた機械強度特性、めっき特性および成形加工性を兼ねさせるために、合金化処理後、めっき表面に潤滑皮膜を付与しプレス成形性を向上させている。

鋳造品を鍛造品に交換すると、機械強度特性が改善される場合がある。例えば、従来型のクランクシャフトは鋳鉄製である。これを鍛鋼品に換えると、剛性が30%高くなり、疲労強度が20%向上する。その結果、自動車の軽量化や性能向上に大きく貢献することになる。

パワーステアリングやオルタネータ等の電動機構の装備にともない、電動モータの利用個数が劇的に増加している。このような電動モータを高トルク化、小型化および高効率化するためには、鉄芯の飽和磁束密度を高くし鉄損を小さくすることが重要である。優れた磁気特性と成形加工性を兼ね備えた電磁鋼板を鉄

芯用材料に用いた高性能小型モータは、自動車の軽量化に大いに貢献することになる。

着々と進む軽量化技術の実用化

2001年9月に開催されたフランクフルトのモーターショー (IAA2001) では、次世代車が数多く発表された。そのうち小型車では、衝突安全性等を考慮した丸い形状のスタイリングに共通点がある。また、シャシーフレームをハイドロフォーム材で構成した例も数多く見られる。ハイドロフォーム材は、すでに多くのメーカーが採用しており、今後さらに多用されるものと考えられる。

このように、最近発表される新車には、ULSAB等のプロジェクトにおける一連の成果がさまざまな形で生かされている。今後の研究開発により、21世紀においても鋼材は、自動車用材料としての重要性がさらに高まると期待される。

続々と登場したスモールクラスの新型車は、いずれも低燃費、衝突安全性の向上が図られている
(上) フォード・フィエスタ (下) ホンダ・フィット



2.7L/100kmの超低燃費で注目されたトヨタ・ES³ (コンセプトカー) は、基本骨格はアルミニウム、合成樹脂、マグネシウム等の軽量材料を用いている

© AUTOMOTIVE TECHNOLOGY

フレームにハイドロフォーム材を採用したGM・シボレートレイルブレイザー



●取材協力
ULSAB日本委員会、新日本製鐵 (株)、日本鋼管 (株)、フォード・ジャパン・リミテッド、本田技研工業 (株)、トヨタ自動車 (株)、日本ゼネラルモーターズ (株)



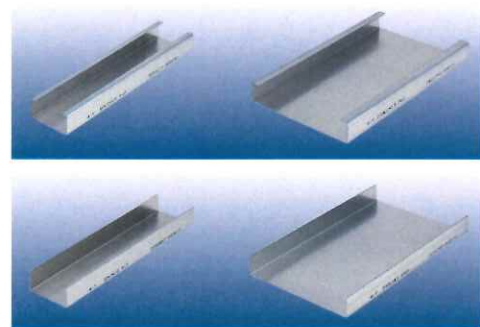
耐食性と耐震性への挑戦 住宅はここまで丈夫にできる

地震国・日本では、耐震性の向上を最重要課題として建築構造材が進化してきた。最近では、住宅性能表示制度が始り、快適性や安全性の住宅性能を明確化することによって住宅の品質を見きわめようとする動きが各方面で進んでいる。たゆまぬ研究開発により、スチールハウスや建築構造用の鉄鋼材料（鋼材）において、建築材料としての実力が再認識されている。

薄板軽量形鋼で構成されるスチールハウス

アメリカでは、軽量形鋼は19世紀の半ば頃建物の一部に使用される程度であったが、第二次大戦中から本格的に使用されだした。さらに森林資源保護運動等に起因した木材価格の高騰がスチールハウスの普及を促進させた。

一方、日本における鋼材を用いた住宅の本格的な建設は、昭和30年代初頭に鉄鋼各社が生産を開始した軽量形鋼の用途を開発する事業の一環として始まった。当時建設された建物の90%は木造であるが、戦災の経験を踏まえた緊急の課題



スチールハウスに使われるリッパ形鋼（上）と軽量形鋼（下）

である不燃化の目標に向って産官学が一丸となり、鉄骨造住宅の開発および普及に邁進した。その結果生まれたのが、鉄骨プレハブ建築である。これは、従来型の木造の軸組構造（柱・梁構造）を軽量形鋼によって鉄骨化したものである。日本建築学会の「軽鋼構造設計施工指針」によると、構造用鋼材の最低板厚は主要部材で2.3mm、2次部材で1.6mmと規定されている。この規定は、わが国の高温多湿な気候条件を考慮して、構造用鋼材の耐久性に配慮した制限である。このような鋼材



用が挙げられるという。

スチールハウスの大きな特長は構造的性能に優れ地震や台風に強いことである。使用される鋼製枠材は、同じ断面形状の木製枠材よりも機械強度が数倍大きくなっている。また、適用される耐力壁は、壁倍率（耐力壁の水平力に対する設計強度）の比較において、木造2×4の1.5倍以上の値となっている。超高層建築と同様の手法を用いて行った地震に対する応答解析によると、住宅には厳しすぎると言われる短周期卓越型地震波（TAFT EW）を用いた兵庫県南部地震相当の地震に対して、層間変形角（壁頂部の水平変位÷階高）が最大でも1/300となっている。このように小さな層間変形角では、建物は地震による損傷をほとんど受けないことになる。このような機械強度に優れた耐力壁を用いると、最大72m²の大型の耐力壁区画を作ることができ、人気の高い大空間の実現が可能となる。

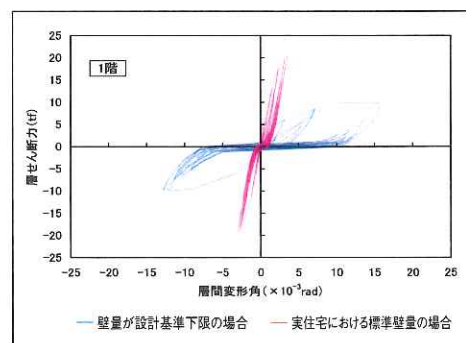
「丈夫で長持ち」もスチールハウスの大きな特徴である。木造に見られるような乾燥や収縮による変形の心配がなく、プレめっき処理によって最長100年の耐食性が確保できる。スチールハウス委員会では、全国6箇所のモニターハウスに対して壁内や床下等に使用されている軽量形鋼の腐食状況を調査している。調査結果によると、これらの軽量形鋼は100年以上の耐久性を有するものと判断される。

さらにスチールハウスでは、建物全体を断熱材ですっぽり覆う外張断熱方式が標準採用されている。この断熱方式は、断熱性能を自由に制御でき、次世代省エネ基準に対応可能という特長がある。また、高い気密性、遮音性、防・耐火性等に優れている。

このような数々の特長を有するスチールハウスは、高い住宅性能が要求されるこれからの時代に最適な住宅であると考えられる。



耐力壁加振試験（（社）鋼材倶楽部（当時）と建築研究所の共同開発）



スチールハウスの地震の応答解析結果例

には電着塗装による防錆処理が施されており、溶接あるいは高力ボルトを用いて接合される。

これに対してスチールハウスは、鋼材を利用した住宅として広く知られているが、通常の本造ツーバイフォー（2×4）住宅の枠材を木材から薄板軽量形鋼に置き換えた住宅である。

2×4工法は、アメリカにおける伝統的な建築技術であり、2×4インチの長方形断面の木材で枠を作り、枠材に合板等を釘打ちして壁や床を構成し、箱のような構造の住宅を組み立てる工法である。この工法は「枠組み壁工法」とも呼ばれている。

スチールハウスで使用される鉄製枠材は、厚さが1mm程度の表面処理（亜鉛めっき）鋼板を冷間成形した薄板軽量形鋼である。スチールハウスでは枠材と壁材で荷重を分散し、かつ枠材の間隔が狭く荷重の分散効果が大きいので、このような軽量形鋼の使用が可能となるのである。この軽量形鋼は板厚が薄いので、先穴がなくてもドリルねじで簡単に接合でき、電動鋸等を用いて容易に切断することができる。このため、現場での接合作業や切断作業が容易となり、現場施工中心の2×4工法の特長を生かすことができる。さらに、切断部や接合部は、ジンクリッチペイント等の補修作業がなくても、めっき層の犠牲防食効果が期待できる。

スチールハウスは、このような優れた材料特性のおかげで、木造住宅と同様の手法を用いて建設できるのが大きな特長であり、鉄骨プレハブ建築とはまったく異なる構造となっている。

構造的な性能や耐久性に優れたスチールハウス

1994年、通商産業省基礎産業局製鉄課（当時）の主催によるアーバンスチール研究会においてスチールハウスが研究題目に取り上げられ、（社）鋼材倶楽部（当時）を事務局とし鉄鋼6社が参加して研究に着手した。その後、兵庫県南部地震後の仮設住宅としてスチールハウスが建設されたり、1996年に設置されたスチールハウス委員会によって「スチールハウス構造設計指針」が作成された。鋼材倶楽部は、このような活動を通じて1997年には一戸建住宅（平屋および2階建て）に関する設計法の一般認定（システム認定）を取得し、品質管理体制を構築した。これによって、工務店等はこのような仕組みを利用することにより、従来の住宅と同様に建築確認申請のみでスチールハウスの設計および施工が可能となり、本格的な普及の基盤が整備された。

1996～2000年度の5年間に建設されたスチールハウスは526棟である。鋼材倶楽部の予測によると2001年度には1,260棟、4,002戸の建築が見込まれている。このような建築増が期待される要因として、部材供給工場の増加や集合住宅への適



安全を守る建築用鋼材の特性

住宅や建築物の安全を守るために、鋼材のもつ特性は重要である。

建築構造用鋼材であるSN(Steel New Structure)材は、鉄骨建築専用に耐震設計の理念に基づき規格化されたものである。SN規格では、用途や施工に応じてA種、B種およびC種に区分され、シャルピー吸収エネルギーの規定値が異なる。さらに、単純な引張り強さばかりでなく、降伏応力や降伏比の上限値、板厚方向の特性、溶接性等、建築構造用の鋼材に求められる特性が規定されている。このようなSN規格化により、中低層ビルや集合住宅に対しても、耐震性に優れた鋼材の使用が容易となった。なかでも、兵庫県南部地震以降クロズアップされた鉄骨破断に関連して、高温でも安定な酸化物や硫化物の微細粒子を分散させた高靱性鋼は、大入熱溶接の際にもある程度の靱性が保証される鋼材として注目されている。

建築構造用鋼材には、所定の低い応力で降伏し優れた延性を発揮する変形挙動が期待される場合がある。このような挙動を示すのが低降伏点鋼である。これを履歴減衰型ダンパーとして用いると、柱や梁よりも低い降伏応力で塑性変形するので地震の際に振動エネルギーを吸収することができる。この履歴減衰型ダンパーは、耐震デバイスとして広く使用されるようになってきた。

駐車棟等の耐火建築物で活躍しているのが耐火鋼である。耐火鋼は、耐熱性を向上させるためMoやCrのような元素を添加した合金鋼である。耐火鋼を用いると、耐火被覆を省略したり軽減ができるので工期が短縮される。また、美観にも優れていることから需要が増加している。

建築構造用鋼材の耐食性向上には、表面処理技術の役割が重要である。特に最近では、Zn-Al-Mgなどの合金層をめっきした高耐食性めっき鋼板が注目されている。この新しいめっき鋼板は、同程度の耐食性を有する従来型のめっき鋼板よりもめっき層を薄くできる。また、後めっきや後塗装を省略することも可能であるという。

21世紀を迎え、住宅建築に対する社会の要求は徐々に変化している。ストック型社会への大きな転換期を迎え、「よい物を長く使う」意識が芽生えている。このような時代では、社会資本の一部ともいえる建築にいっそう高い性能が求められることになる。



低降伏点鋼による制振ダンパーの例



駐車場に耐火鋼を適用した例

鉄骨系サポートによる21世紀のまちづくり

日本の大都市圏における木造密集市街地では、地震や火災に対して効果的な対策が講じられていないといわれている。このような状況に対し、「鉄骨系サポートを用いたサポート・インフィル集合住宅を使用した再開発手法をモデル地域に適用した提案を行う」ことを目標に、鉄鋼メーカー、ゼネコン、研究者等を中心に「次世代街区フォーラム」が1997年11月に結成された。2001年3月に開催された同フォーラムのシンポジウムでは、鉄骨によるフレームを用いて実際に住居を搭載させた場合に対する検討が行われ、高層建築には大スパンが有効であり低層建築には吹き寄せ張りが有効であるとの成果が発表された。また、ケーススタディとして、実際の木造密集市街地における建て替え法がシミュレートされた。このような検討の積重ねによって今後の集合住宅に鉄骨系サポートがどのように生かされていくかが注目されている。

鉄を使ったスケルトン1スパン内に展開するインフィルイメージ



「次世代街区」による街並み

