



H. Nishimura

ものづくりにおける軽量化技術

東京都立大学 名誉教授
西村 尚

1. はじめに

機械構造物の軽量化は、材料等資源の節約、人力・動力エネルギーの節約、商品価値の向上の観点から留まるところを知らず未来永劫のテーマである。最近では、自動車の燃費向上が最大のテーマであるが、古くから鉄道車両、航空機機体、飲料容器、スポーツ用品等で大きな課題となっていた。軽量化は軽い材料を用いることが最大の効果をもたらすことは論を待たないが、それだけでは目的を達成できない。設計段階で、強度、剛性、耐食性などを考慮した上で材料を選定するが、さらに大切なことは、塑性加工等の加工法、溶接等の組立て方法も考慮する必要がある。設計及び生産技術部門が良く整合を取って最適な条件を選ばなければ高度な軽量化技術は達成できない。本稿では、最近の軽量化が重要な技術要素となる、自動車、飲料缶、鉄道車両構体の事例を紹介しながら、軽量化設計の基本的な事項について解説する。

2. 軽量化の目的

軽量化は自動車の燃費向上、産業における省エネルギー化が最近では最大の目的になっている。表1は我が国におけるエネルギー消費量を用途別に示してある。運輸部門は増加の傾向にあり、より燃費向上が必要になっている。自動車の省エネ即ち燃費向上は表2のように多くの技術要素があり

表1 日本国内エネルギー消費量

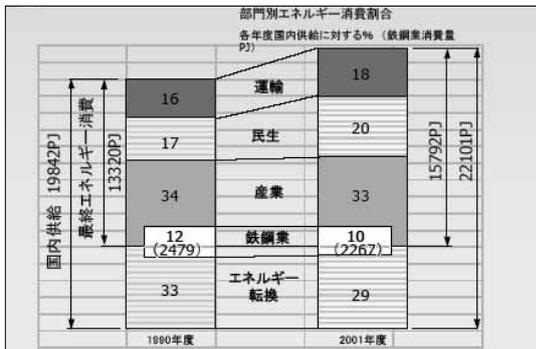
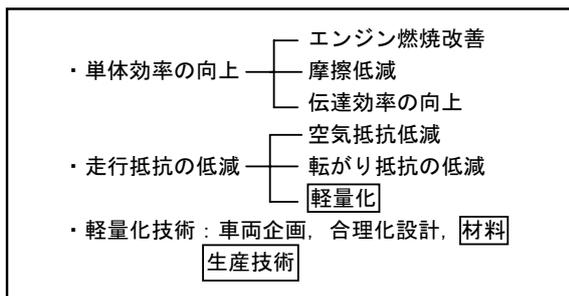


表2 燃費向上



各部門で最大限の努力を払ってきたが、軽量化は重要な技術要素になっている。産業では鉄鋼業が我が国エネルギー消費量の10%を占めており、省エネはコストダウンにもつながるため過去数十年最大限の努力を払ってきた。その甲斐あって我が国製鉄業は世界一の省エネ生産技術を確立した。現在では省エネが注目されているが、古くから軽量化に多くの努力を払ってきた目的はコストダウンであった。プレス加工のコストは材料費が40~70%と大きく軽量化即ち材料費の節減にあった。飲料缶ではコストの70%が材料費であり、素材の薄肉化、形状の最適化、接合法の改良など、軽量化は最大の技術課題である。またコストや価格に関係なく性能アップを目的とした製品にスポーツ用品がある。自転車、水泳用着衣、陸上用スパイク、ゴルフクラブ、テニスラケットなどは、素材の開発、流体・材料力学・振動工学的な解析を駆使して成し遂げられた製品である。野球用のスパイクは以前は1kgくらいあったものがイチロー選手の靴は400gまで落ちてきている。表3は構造物の軽量化の目的を一覧にしたものである。

表3 構造物軽量化の目的

- ・省エネルギー（動力、燃費向上等）
～車体を100kg軽くすると燃費が1.2km/ 向上する～
- ・省力（人力機器、自転車）
- ・性能の向上（機動性、スポーツ用品、衣類）
- ・材料の節約（省資源、コストダウン）
- ・コストダウン（飲料缶）

3. 軽量化の手法

軽量化の手法は表4に示すように単に軽い材料を使えばよい訳ではない。以下に各項目毎の軽量化手法を述べる。

3.1 軽い材料の使用

比重の小さい材料を使用することは最も大切な条件になる。軽金属、樹脂、複合材料がその対象になるがこれらの材料の比強度、比剛性が選定条件になる。また、加工性、溶接性なども重要な選定条件になる。軽い材料の代表はアルミニウム、マグネシウム、チタンであるが、これらの材料は構造材として最も多く使われる軟鋼板に比べると加工性が

表4 軽量化の方策

- 1) 軽い材料を用いる：アルミニウムチタンマグネシウム
- 2) 高強度材を用いる：ハイテン材
- 3) 高剛性（ヤング率）材：鋼材
- 4) 断面係数の大きな材料を用いる：管材、形材、ポラス材、ハニカム、トラスコアパネル
- 5) だ肉の少ない構造にする：変肉、変断面、適材適所
- 6) 接合技術による軽量化
- 7) 熱処理による強化、部分強化
- 8) 部品点数の減少

劣る欠点がある。比強度で見るとFRPが優れている。加工性、耐久性、再修理性が向上すれば将来ボディ材としてつかれるであろう。現状では航空機機体、船舶に一部使われている。以下に軽金属材料の特性を示す。

3.1.1 アルミニウム材

アルミニウム板は純アルミの1000系, Mnを含む3000系, Mgを含む5000系, Mg-Siを含む6000系合金が多く用いられている。その他に航空機機体に用いられる2000, 7000系の高力アルミも使われている。自動車車体には、引張強さが300MPa程度の5000系と6000系が用いられるが最近ではベークハード性が優れている6000系合金の方が有利になってきている。3000系は缶胴材としての使用が多いがこれは強度と供にしごき加工性に優れているので薄肉化が可能なのである。A3004H19材は超硬材で伸びは5%しかないがDI缶材として用いられる。しごき性がよく100 μ m以下の厚さまで薄くできる。現在350ml缶ボディは15grまで軽量化されている。2000系合金は耐食性等に問題があり、自動車ボディ材には使われない。高強度アルミニウムとしては300MPa以上の強度が必要である。5000系, 6000系合金が使われるが、最強の7000系合金は加工性等に問題があり自動車には使われないが航空機機体、新幹線車体には使われている。

アルミニウム独特の材料形状として押出し材がある。板と違って断面2次モーメントが大きくとれるので軽量化に対して効果が大きい。押出し材は6000系合金が使われる。自動車車体ではスペースフレーム構造の骨格をなす素材である。高速鉄道車両での構体は大型材材を使用している。表5にアルミニウム材の得失を示しておく。塑性加工性、溶接性、耐食性などを考慮して材種を選ぶべきである。

3.1.2 マグネシウム材

表5 自動車用アルミニウムの得失

<ul style="list-style-type: none"> ・比重：2.7 ヤング率：70GPa ・引張強さ：300MPa 耐力：130MPa 降伏比：0.4 ・伸び：30% 局部伸び：5% n値：0.25 r値：0.6 ・平面ひずみ引張りにおける伸びが下がる ・形状：板 管 型材 ポーラス体 ・温間成形、超塑性成形：わずかな温度差で変形抵抗、伸びの改善効果が大きい ・板鍛造：FCF FF成形に優れている ・絞り性、張出し性、特に伸びフランジ性が劣る ・スプリングバックが大きい ・再絞り性がよい(n値の小さな材料を用いる) ・加工速度は速い方がよい(18m/min以上)早くなると伸びが増える ・極低温(-196)で伸びが増え成形性が向上する

マグネシウムは比重が1.7と軽く、携帯用の機器類の材料として脚光を浴びている。亜鉛を含むAZ31合金が引張強度で250MPa程度あり、板材としてもっとも多く用いられているが、耐食性が劣ること、常温での塑性加工が不可能なことなど解決すべき技術課題は多く存在している。現状ではダイカストによる成形法が一般的である。まだ、材料の供給体制が十分ではなく材料の選択の余地が小さいことが欠点でありこれから期待される材料である。比強度はアルミよりも大き

く有利である。

3.1.3 チタン材

純チタンは加工性、耐食性とともによく価格を除けば優れた材料である。チタン合金は6Al-4V合金が最もポピュラーであるがゴルフクラブのヘッドに用いられる β チタンは鍛造あるいは鋳造品が用いられる。スポーツ用品のように高価な製品では優位に立っている。合金になると難加工性になる。超塑性成形、精密鋳造などの方法がとられる。

3.2 高強度材の使用

自動車車体では成形性のよい軟鋼程度の強度を有する材料を使うことが普通であったが、軽量化を狙ってそれ以上の強度を有する材料を使うことが多くなってきた。引張強さが300MPa以上の鋼材を高張力鋼と呼ぶ。その他、強度で設計される部材には高強度材を使うことが勧められる。しかし、高強度材は多くの場合加工性が劣る。その分を加工技術で補わなければならない。高強度材には、ハイテン鋼、ステンレス鋼、高力アルミ合金がある。

3.2.1 高張力(ハイテン)鋼

自動車ボディ材には340MPaから440MPa級ハイテン材が多く使われる1)。300MPa級の軟鋼版に比べて強度が上がり薄肉化は可能である。380MPa級のハイテン材が全鋼材中に占める割合は車種によっては50%を超えている。弾性係数は変わらないので剛性は向上しない。加工性は、r値が小さくなり、降伏点が上がるのでn値が下がり、かなり低下する。また、スプリングバックも大きくなる。その分成形技術によってカバーしなければならない。ドアインパクトビームなどの衝突安全部材には1.2GPa級ハイテン材が使われる。曲げ加工でも極めて困難である。表6にハイテン材の種類を一覧として示す。BHは焼付け硬化、TRIPは残留オーステナイト型複合組織型、DPは二相複合組織型を表す。1GPa以上のウルトラハイテン材は室温における加工が難しく800 $^{\circ}$ C程度の高温加工を強いられる。

3.3 高剛性材の使用

表6 自動車用ハイテン鋼板

強度レベル	鋼板の種類
340MPa級	固溶強化型+BH
370MPa級	固溶強化型
440MPa級	固溶強化型
590MPa級	析出強化+TRIP+DP
780MPa級	TRIP+DP
780MPa級以上	TRIP+DP

BH:ベークハード DP:二相複合組織 TRIP:残留オーステナイト型複合組織

ヤング率の大きな材料は多くの構造材で期待されているが、鋼(E=210GPa)以上の高剛性構造材は開発されていない。アルミニウムの欠点はヤング率が低いことである。比剛性で見ると鋼よりも優れているのはエンジニアリングセラミックスであるが靱性値が低く、機械構造物には使えない。高剛性材と言えば鋼であろう。

3.4 断面2次モーメントの大きな素材形状の使用

曲げ剛性はEIで決まるのでEが大きくなければIを大きくしなければならぬ。板よりは管、型材の方が剛性は高い。ア

アルミニウムは押し出しによって型材が容易に作れるので骨格材として、航空機、鉄道車両、自動車車体、船舶などに多く用いられている。また、ハニカム構造という蜂の巣のような構造体も航空機、鉄道車両に用いる。鋼材では管材を液圧で膨らますハイドロフォームが使われているがこれも断面2次モーメントを大きくするための手法として有効である。航空機では大きな断面のアルミ材を削り出しによって3次元の断面材に仕上げている。これは墮肉を省くと同時に比剛性を向上させる手段として行われている。飲料缶では座屈強度を向上させるために、管胴部にひし形の凹凸をつけている缶がある。単なる模様ではなく強度向上の機能を有している。最近では、縦ビード、斜めビードの模様をつけた缶が缶耐ハイに使われている。同様に縦方向の座屈強度が向上している。ビード、フランジ、リップなどは剛性を上げる手法として古くから多くの製品に応用されている。古くからハニカムなどサンドイッチ構造の素材が使われて来たが最近ではポーラスアルミと言う比重0.3程度の発泡アルミが注目されている。アルミの溶湯の中に発泡剤を注入して発泡させ凝固させたもので、衝撃エネルギー吸収能、断熱性能、遮音性能に優れており、自動車、スポーツ用品、建材への利用が期待されている。図1にポーラスアルミの製造法とセンターピラーへの適用例を示す。ハニカムと競合する素材としてトラスコアパネルを紹介しておく、図2に示すようなアルミコアパネルを超塑性ブロー成形で製造し、両側にスキン材を貼り付けるものでコアの高さが高い方が剛性は向上する。

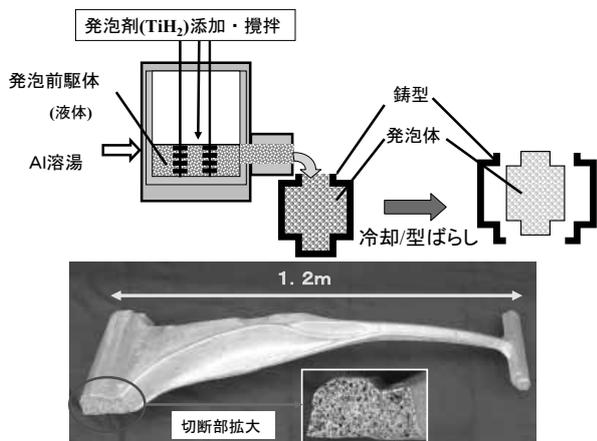


図1 ポーラスアルミニウム生産技術開発(型発砲法)

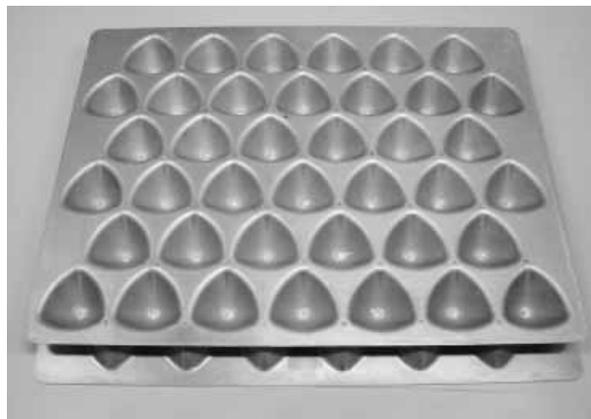


図2 トラスコアパネル 城山工業(株) アルミ超塑性ブロー成形(三角錐高さ: 23mm)

3.5 墮肉の少ない構造にする

平等強さ、平等剛性を目標として墮肉を省く方法は古くから多く用いられている。最近ではテーラードブランク材がある。チューブフォーミングで変肉、変断面加工がよく用いられる。自動車の軽量化に欠かせない技術としてチューブハイドロフォームがある。図3はチューブハイドロフォーム成形した例である。曲げた管をハイドロフォーム機に入れ、内圧と軸圧縮を加えてバルジ加工とピアシングを行い、プレスで部分的につぶし、他部品と溶接したエンジンクレードルと言う製品である。この他、自動車車体には図4のような部位にハイドロフォーム製品が使われている。無駄な肉の無い軽量化部品である。図5は冷間鍛造と精密打ち抜きを組み合わせた精密部品が自動車に良く使われている。これなども墮肉を少なくした部品である。構造物の軽量化には平等強さ、平等剛性が最も好ましいが実際にそのような部材を作ることは難しい。テーパー付きのワイヤーが作られればつり橋、エレベーター



図3 チューブハイドロ製品例

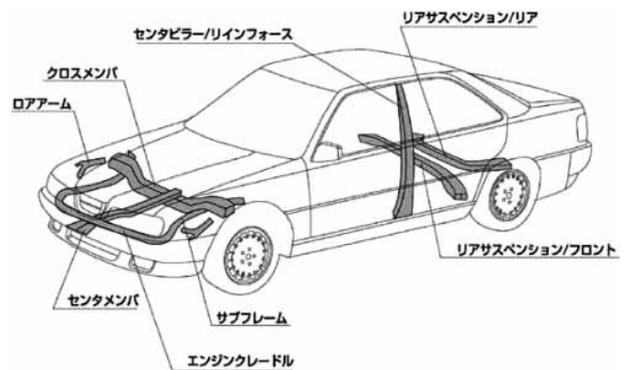


図4 ハイドロフォーム製品適用部位



図5 冷間鍛造とファンインブランキングを組み合わせ た自動車部品 (株)秦野精密

ターなど自重を支える製品ではロープの重量を半減できると言われている。ゴルフクラブ等スポーツ用品にこの手法を用いた製品が多い。随肉ではないが、内圧を受ける飲料缶（図6）において開口部径と底部径（接地径）が胴部よりも小さくなっているのは受圧部面積を小さくして軽量化を図る設計によるものである。缶胴部と開口部、接地部とで肉厚は異なる。これは内圧に対する平等強さを図った結果である。缶胴部は内圧強度上はさらに薄肉化が可能であるが、外部からの異物の衝突による強度（突き刺し強度と呼ぶ）を確保するために、スチールでは90 μ m、アルミでは110 μ m程度にしてある。

3.6 接合部の改善による軽量化

部品を接合して構造物を組立てる場合、この接合部の重量増加はばかにできない大きさになる。接合方法を工夫する

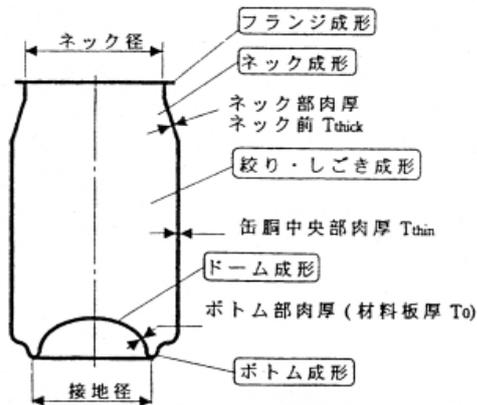


図6 飲料缶（陽圧缶）の構造

ことで軽量化が図られる。重ね合わせ接合では重ねた部分が重量増加につながるのなるべく少くしたい。飲料缶ではダブルシーミングと呼ばれる機械的結合では、蓋と胴をつなぐ重ね部を1mm程度にすることにより軽量化を図った。また、重ね合わせ接合となるシーム溶接、接着は別の意味もあるが段々減ってきた。溶接はつき合わせ溶接に変化して来た。アルミニウムにはFSW（摩擦攪拌溶接）と呼ばれる独特の方法が鉄道車両、自動車に使われ始めた。ねじ、ボルトなど機械要素接合では異物を挿入するので重量が増えやすい。塑性加工による接合は重量軽減に効果があることが多い。焼きばめ、圧入も軽量化に効果がある。

3.7 部品点数の減少による軽量化

3.6の接合による軽量化の極限を行くと1部品による構造物を作ることが軽量化に効果がある。なるべく大きなパネルを作ることが自動車車体では行われている。ハイドロフォーミング部品、テーラード blanks 部品、超塑性成形部品なども同じ考え方に立った成形法である。FRP製品の得意とするところは3次元形状の大きなパネルが成形できることである。

3.8 熱処理による高強度化

成形するときは柔らかくて加工しやすく、製品になったら硬くて丈夫な材料が理想である。加工硬化はこの原理にかなっているのでn値の大きな材料は優れた材料である。BH（バークハード）は塗装焼付け時180 $^{\circ}$ C程度の温度で時効を促進させる方法で自動車車体に良く使われている。鋼材はもとより、6000系アルミニウムでもこの効果が期待できる。降伏点強度が上り、耐デント性が向上する。その他必要などころだけを焼入れする部分焼入れ法2）も使われる。プ

レス加工後、必要な部分に高周波焼入れをして強度を増す方法がセンターピラーやフロアクロス部材に使われている。さらに複数の自動車部品メーカーではウルトラハイテン材を800 $^{\circ}$ Cでホットプレスをして型内で急冷して焼入れ強化する例がある。1タクト40秒ほど掛かるが小型の補強材として使われている。

4. 自動車車体の軽量化³⁾

自動車車体の軽量化は燃費向上に効果があるため、各社ともに熱心に取り組んでいる。軽量化を進める一方で衝突安全性向上のための部品が増加するため重量が増えることも生じている。

4.1 車体構造

乗用車の車体構造は、モノコック構造、スペースフレーム構造、両者のハイブリッド構造に別けられる。現状では板構造のモノコック構造が圧倒的に多いが、アルミニウムを使用するようになってきてからはスペースフレーム構造の車も出現するようになってきた。モノコックのオールアルミボディ車はホンダのNSXが画期的な開発として注目されたがその後は同種の車は現れて来っていない。板のプレス加工品、形材、鍛造品、鋳造品を使い分けた構造となっている。塑性加工技術以外に、鋼部品との間の電食、糸錆び、溶接が大きな技術問題になっていた。スペースフレームではアルミニウム押出し形材を多用してきているが、形材の曲げ加工と溶接が難しく、最近の車では、形材は直線で接合部にはノードと呼ばれる鋳物を使用している例が増えてきている。図7に形材の接合法の例を示す。ハイブリッド構造は板構造と骨格構造の複合化した構造となっている。いずれの構造とも軽量化と安全性を配慮した設計がなされている。

4.2 ボディ部材の板厚決定要因

車体部位の板厚は表7のように剛性と強度により決定する。以前は外板は剛性設計がなされていた。デント、張り剛性（ベコつき）などが問題となっていたのでBH（バークハード）によって降伏点を上げる方法を講じていた。しかし、近年では側面からの衝突安全から剛性と併に、強度を重視する設計に変わってきた。同様にメンバー類も剛性から強度へと設計変更がなされている。表8は強度、剛性が一定で300MPa級を1としたときの重量比を示す。アルミ、FRPは耐デント性、圧壊強度に優れていることが分かる。

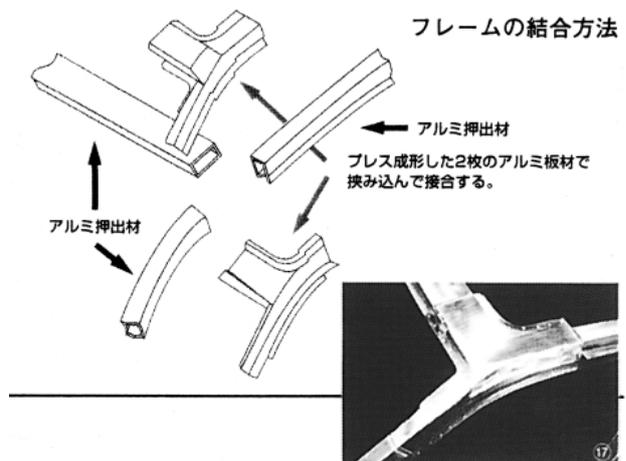


図7 形材フレームの接合例

表7 部位ごとの板厚決定要因の変化

	部材剛性	張り剛性	デント性	圧壊強度	部品例
外板					OUTER
内板					INNER
構造部材A					メンバー類
構造部材B					バンパー、ドアガード

表8 強度・剛性一定で鋼 300MPa 級を1としたときの重量比

	E (GPa)	σ_B (MPa)	比重 (ρ)	部材剛性 (E/ρ)	張剛性 ($\sqrt{E/\rho}$)	デント性 ($\sqrt{\sigma/\rho}$)	圧壊強度 ($\sqrt{\sigma/\rho}$)
鋼 300MPa 級	21	300	7.9	1	1	1	1
鋼 15GPa 級	21	1500	7.9	1	1	0.4	0.6
A5000 級アルミ	7	300	2.7	0.5	0.5	0.4	0.4
FRP	0.83	9	1.6	5	0.6	0.4	0.3

4.3 スペースフレームボディ (図8)

ボディ軽量化のための構造として、コスト的には問題があるがスペースフレーム構造が注目されている。押し出し形材、鍛造品、鋳造品、板材を組み合わせて骨組み構造を作るもので構造的には高強度、高剛性のフレームとなる。側面からの衝突に威力を発揮するといわれている。ドイツ車、日本ではハイブリッド車に使われていたが最近姿を消している。将来、燃料電池車、電気車には欠かせない構造となるものと思われる。

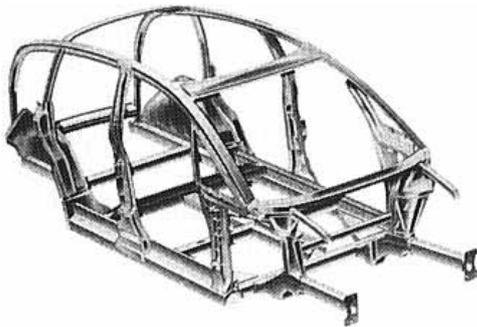


図8 アルミ製スペースフレームの例

5. 飲料缶の軽量化

飲料缶の歴史は軽量化の歴史でもある。飲料缶の場合、軽量化の目的はコストダウンにある。材料費がコストの70%を占める製品であるので材料を節約することはその分コストダウンに直に効いてくる。図9は使用するスチール、アルミニウム素版の板厚減少の歴史を示している。図10はアルミDI缶ボディ及び蓋の軽量化の変遷を示している。ともに薄肉化は極限にまで達している。缶の軽量化は、1) 缶蓋、胴部に使用する板厚の薄肉化、2) 缶胴部側壁の薄肉化、3) 開口部の縮径化、4) 缶底部の縮径化(接地径)、5) 缶胴接合部の軽量化、6) 缶蓋接合部の軽量化、7) 胴部の構造による薄肉化、8) 補強リブなどの付加、などに別けられる。補強リブの例として図11に示すように缶胴部にビードを入れた缶が見られる。本来は強度向上を目的として設計されたのであるが飲料メーカーが採用した理由は意匠性であった。ダイヤカットの缶は内外圧に強く、液体窒素を入れないでもお茶のような陰圧(内容物が冷えて内圧が大気圧より低くなる)になる内容物を対称にして開発された。その他、缶自身の軽量化ではないが内容物の充填方法によって軽量

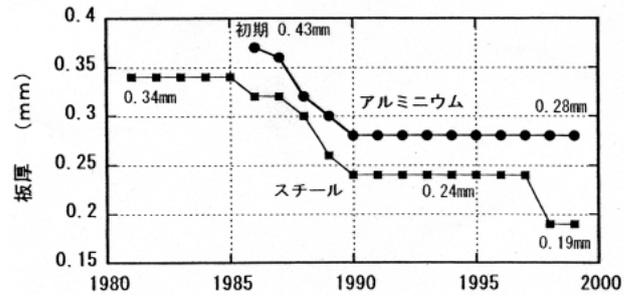


図9 DI缶素材板厚の変遷

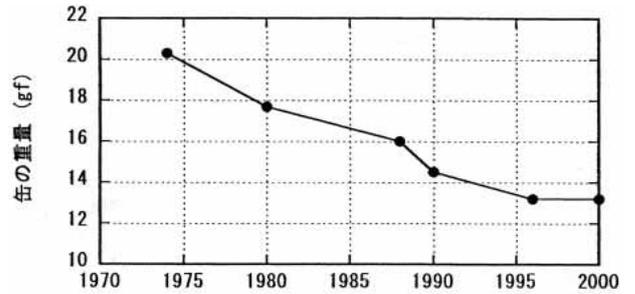


図10 a) アルミDI缶胴部の軽量化

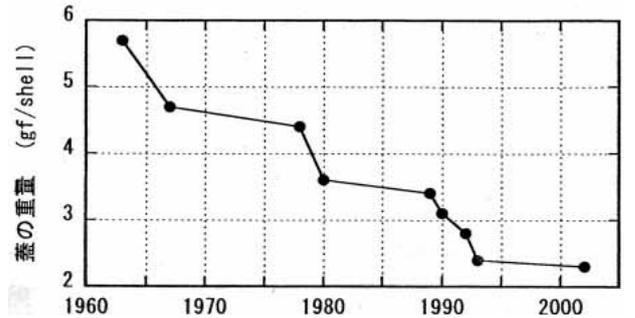


図10 b) アルミ缶蓋の軽量化

化を図る方法が取られている。これは、内容物を充填するときに、チッソガスを封入することにより陰圧缶を陽圧(内圧のかかる)缶に変える方法である。内圧を適度に受ける容器は薄肉化が可能である。タイヤ、自然物では竹、イネ、ネギなど薄肉管構造物は一様に薄肉化が図られている。自然に学



図11 ビードで補強した缶

ぶ材料力学が構造物の設計においても大切である。

6. 鉄道車両構体の軽量化

ここでは新幹線車両の構体を中心に述べる。高速化に伴い車両重量を軽減するために大型断面アルミニウム押出し形材が用いられている。700系車両には図12のような大型断面形材をFSW(摩擦攪拌溶接)により接合した床材が用いられている^{4, 5)}。大型形材の利用として展開加工材がある。これは中空形材の一部を切断し展開したもので、通常の形材よりも広幅の製品が製造できる。製品形状に合わせて曲面パネルが作りやすい。車両に適用した場合には部材の大型化により工数低減、部品点数の低減、薄肉化による軽量化が可能になる。図13は秋田新幹線「こまち」の床下部分のふさぎ板に展開加工曲面パネルが使われている例である。500系車両にはろう付けハニカム構造体が床と側壁板に使われ剛性を上げていたがコスト的に問題があり、700系では形材に戻った。図14は新幹線車体の構造の例である。将来的には航空機機体と同じ構造になるものと思われる。在来線でも高速車両である「スーパーひたち」

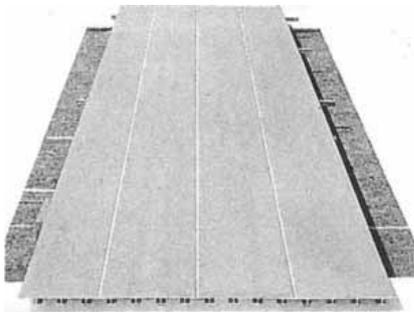
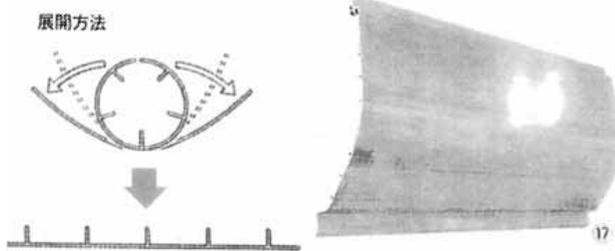


図12 FSWで接合した700系新幹線車両床材

E3系車両には幅1mのパネル材料が使用されたが、これは量産車両としては初めての採用である。



E3系車両のふさぎ板に使われた曲面パネル

図13 アルミ形材の展開とこまちに適用した例

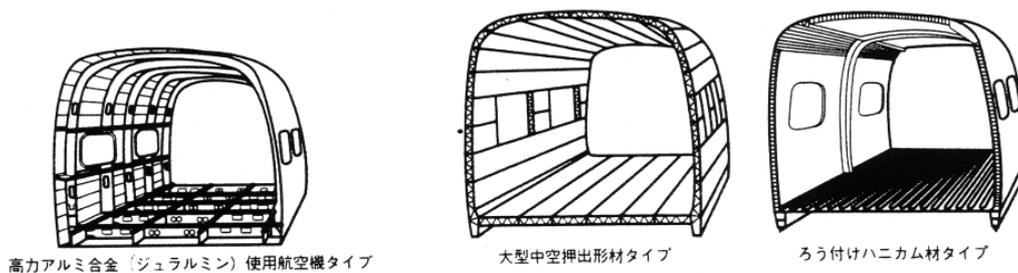


図14 次世代新幹線車体構造の例

は新幹線と同じアルミ形材のダブルスキン構造体になっている。高速車両はアルミ、通勤電車はステンレス鋼を中心にして一部アルミ車体が使われている。ステンレス車は塗装回帰が無いので有利である。鉄道車両では貨車の軽量化も興味を引くものがある。石油類を輸送するタンク車は古くはシャーシ付きの台車の上にタンクを載せる構造であったが、新しいタンク車は図15のようにシャーシをなくしモノコック構造にし、タンクの間中部を太くし剛性を上げ、たわみを減らすとともに、タンク容量を大きくしている。このような構造はオートバイの燃料タンクの設計にも取り入れられており、タンクは意匠性、強度部材、燃料の貯蔵と言う3つの機能を持たせている。軽量化には部材の多機能化が設計時に取り入れられることが大切である。



図15 シャーシをなくしモノコック構造にしたタンク車

7. あとがき

機械構造物の軽量化は、性能向上、動力費低減(燃費向上)、材料費節約、人が持ち歩くものに付いては単純に軽量化、スポーツ用品では性能向上などの目的を持って総合的に推進している。単に軽い材料を使用するだけでは軽量化は達成できない。構造設計、加工・組立でも含めて検討すべきである。

参考文献

1. 山崎雄司: 塑性と加工, 44-506(2003), 240.
2. 柴田真志・榎野浩司・大西昌澄: まてりあ, 37-6(1998), 525.
3. 林央: 素形材, 44-5(2003), 9.
4. 高井英夫・戸取征二郎・福寄一成: 軽金属溶接, 39-1(2001), 29.
5. 熊谷正樹・田中直: 同上, 22.