

一方1980年代後半から、エネルギー効率化、環境低負荷、高速輸送・駆動化、軽量化等の観点より、超高温機器部材としてのセラミックス系複合材料(CMC)が注目されるようになった。1993年から始まった先進複合材料利用ガスジェネレータ研究開発プロジェクトなどの研究は、セラミックス材料の欠点である靱性、低熱衝撃性を大幅に改善しCMC部材を高信頼性部材とするための本格的な開発研究である。実用化試験、エンジン組み込み試験などが今後の計画である。CMCの高耐熱性・高強度・高靱性材料化の要求に伴い、強化繊維に対してはより高い比強度・比弾性、優れた耐酸化性が要求されている。さらに細くしなやかであることも必要である。そのためこの10年間は強化繊維自身の研究開発が活発に行われてきた。その結果、1,500Kから1,700K、さらに1,900K以上の温度に耐える耐熱性の炭化珪素系繊維が工業化されつつある。さらに直径が10 μm 以下の極細炭化珪素繊維の開発も行われており、今後の発展が大いに期待されている。

繊維強化プラスチック(FRP)は、平成15年度の総合科学技術会議のナノテクノロジー・材料分野の推進にも挙げられているように、我が国が優位性を持つ材料分野である。その用途は建築土木をはじめ、自動車・車輛、スポーツ・レジャー、医療・福祉、農林・水産業、機械・電子機器産業などのあらゆる産業分野にわたっている。また最近は、より過酷な環境での使用の要請に伴い、高耐熱・高靱性樹脂そのものの開発、それをマトリックスとするFRPの開発、異方性を積極的に利用した最適構造設計技術の開発、損傷許容設計技術や健全性評価技術の開発等の研究が盛んに行われている。2000年のFRP生産量は約60万トンであり、年々増加の一途を示していることから、地球環境保全に伴う廃棄性・リサイクル技術開発も重要な課題となっている。

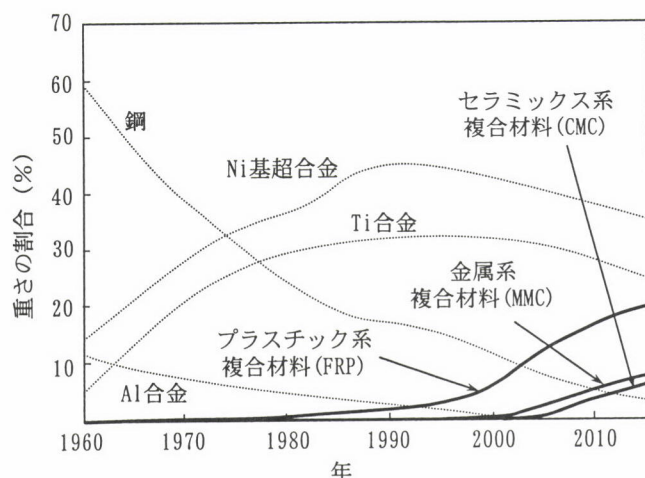


図4.11 航空機エンジン材料の将来予測
(第8回チタン国際会議プロシーディングより引用)

図4.11に航空機エンジン材料を一例に将来予想を示すが、近未来における複合材料の重要性が伺える。すなわち1990年代はNi基超合金が全構成材料の約半数の質量を占めているが、今後は、CMC、FRPもエンジン材料として大いに期待されている。GE社はB777用の超大型エンジンにFRPファンブレードを搭載することを決め、既に実用化に成功した。

以上のようにこの10年で、複合材料の開発・応用研究が活発に進められてきた、解決すべき最大の課題はやはり製造コストの低減であろう。更には最適構造設計手法の確立、信頼性高い設計データ知的基盤整備なども重要である。

4.3 利用、評価技術の進歩、発展

4.3.1 プレス成形・数値シミュレーション

(1) 研究開発の背景と動向

地球温暖化に対する環境規制(例えば京都議定書、欧州CO₂排出規制等)並びに化石化燃料の節約に対して、社会生活に最も密接に関連のある自動車産業では、燃費向上がその重要な役割を担っている。近年自動車業界では、自動車軽量化による燃費向上が大きな課題である。一方、自動車登録台数の増加に伴い交通事故発生率も年間1万件程度に達し、人命保護の観点から衝突安全性を維持、向上しながら自動車車体重量を軽量化する努力が積極的に行われている。鉄鋼材料の観点から自動車軽量化目標を達成するためには、出来るだけ薄い材料を使用することが望まれ、部材の衝突特性の維持、向上には出来るだけ引張強度の高い材料の採用が必要不可欠である。従って、高強度薄鋼板のプレス成形性の向上技術、並びにその数値シミュレーション技術、衝突特性の維持、向上を予測するための数値シミュレーションが、自動車部材開発の面で重要であり従来から積極的に研究されている。本節では、高強度薄鋼板のプレス成形性向上技術と衝突特性予測の精度向上に係わる最近の動向を紹介する。

(2) プレス成形性

プレス成形での主な成形不具合である、破断・しわ・面ひずみに対して、材料面では鋼板材質の高性能化や成形性の低下を補完する高潤滑材料の開発が続けられている。同時に成形技術面では、張力制御成形、対向液圧成形といった新成形技術や、数値シミュレーションを利用した成形不良事前予測技術の開発が進められている。

自動車構造用部材にハイテン材料を採用した際の成形における最大の課題は成形品寸法精度である。この課題に対しては、張力制御成形や成形様式を絞りから曲げに変更しスプリングバックや壁反りを減少させる方法など、成形技術からの

対策が、数値シミュレーションを利用した金型形状の最適化方法などと併行して検討されている。張力制御成形に関しては、張力の上昇によりスプリングバック量を低減させる事が可能であるが、過度の張力制御は材料の破断に結びつく。最近、成形様式を通常のドロー成形からフォームドロー成形に変更することにより、スプリングバックを劇的に減少させることが明らかになった。この成形法による形状凍結性の向上効果を利用して、従来ドロー成形されていた部品もフォームドローを採用する傾向が多く見られる。

スプリングバック抑制技術の一例として、図4.12に金型断面形状を適正化した張力制御成形法を示した。本方法は、成形時に材料を金型内部に十分流れ込ませプレス課程の下死点近傍で材料に張力を付与しスプリングバック開口量を抑制する方法である。単純形状であれば980 MPa材でも軟質材と同等の寸法精度が得られることが確認されており、現在複雑形状部品への展開を検討している。

高強度鋼板の新しい成形加工技術として液压潤滑成形がある。金型と素材との間から高压の液を供給しながら成形を行う方法である。この液压潤滑成形によれば成形可能範囲が著しく拡大し、素材 r 値換算で0.4以上に相当することが確認されている。また本方法ではダイスまたはポンチの片側のみからの潤滑液の供給でも大きな成形向上効果が発揮できることも明らかになった。この液压潤滑成形法は既に実物のフロントドインナーで試験的に試みられており、予想通りの成形面での優れた効果が認められている。特に縮みフランジ変形部でのフランジしわの抑制効果に大なるものがある。

(3) 数値シミュレーション

プレス成形に関する数値シミュレーション技術の最近の進歩は目覚ましいものがあり、プレス成形上の割れ、しわの状況

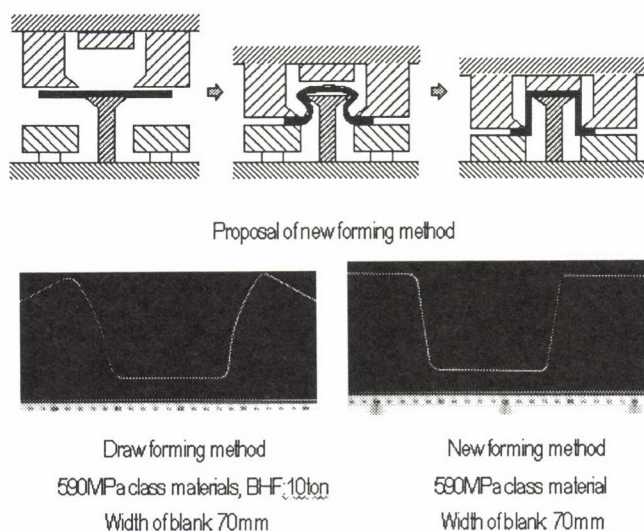


図4.12 スプリングバック制御に対する新しい加工方法

に関してはほぼ予測出来ると考えられる。ここで重要となるのは、プレス成形される材料の成形限界曲線 (FLD) がいかに正確に求められているかであり、材料メーカーでは数値シミュレーションソフトに具備されているFLDとは別に独自にこの成形限界曲線をData Base化しプレス成形シミュレーションの精度向上に寄与している。一方、自動車部材の衝突シミュレーションの精度向上に関しては、特に材料のひずみ速度依存性の正確なData Base化に加え、部材の加工時のひずみ分布と板厚減少率が衝突特性の予測には大きく影響を与える。従って、こうした連成解析の駆使が動的挙動の精度の良否を左右する。

近年、こうした知見から数値シミュレーションには独自のData Baseを用いた解析が実部品開発に使用されるようになってきた。衝撃曲げ及び衝撃圧潰挙動の数値解析に大事な応力-ひずみ曲線の一例を図4.13に示すが、通常、応力-ひずみ曲線はひずみ速度の上昇に伴い比例して上昇せず、低ひずみ領域での上昇量が大きい傾向がある。高強度薄鋼板の場合も同様な傾向を示すが、軟質鋼ほど顕著ではない。一般に材料のひずみ速度依存性を論じる場合、Coper-Symondsのような近似式を採用すると高ひずみ領域での応力を過大評価することになり、衝撃特性の推定に大きな誤差が生じる。従って、実際の測定結果を基に応力-ひずみ曲線を決定することが大事である。

これら基礎データを用いての数値解析において、ハット型部材 (断面60×80、高さ60 mmの台形断面) の衝撃試験では、衝撃曲げ及び圧潰変形挙動の実際を精度良くシミュレーションできることが明らかになっている。図4.14にそれらの結果の一部を示したが、ひずみ速度依存性の導入の有無による解析と実際の精度の差は歴然であり、応力のひずみ速度依存性を考慮することの重要性が再認識される。

最近ではハット部材のプレス成形時に導入されるひずみ分布を考慮した数値シミュレーション (連成解析) が特筆される。本解析ではプレス成形によるひずみ量、板厚減少量を部

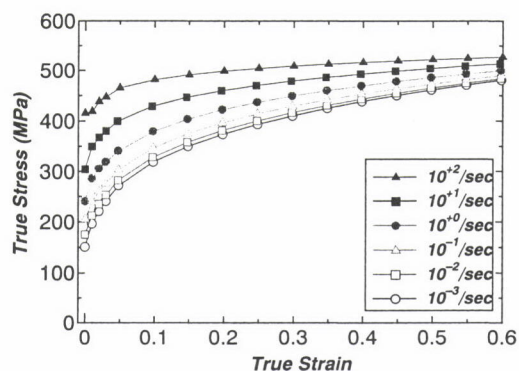


図4.13 引張強度300MPa級材料の引張特性のひずみ速度依存性

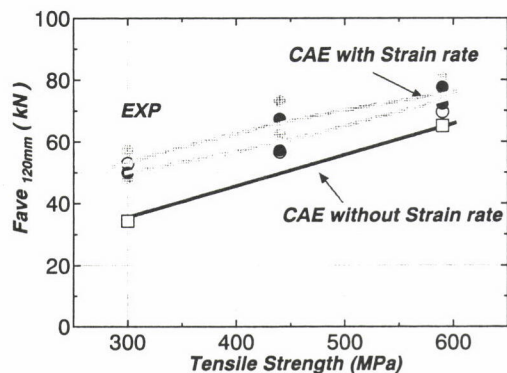


図4.14 圧縮崩壊試験時の平均崩壊荷重のと解析結果との比較

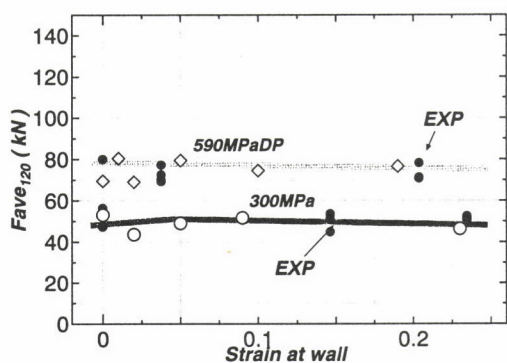


図4.15 連成解析結果と衝撃試験結果との比較

材内部で分布させ、加工ひずみレベル、板厚減少レベルにより材料特性を変化させながら解析するものである。図4.15はこのような連成解析により得られた結果と実験との比較を示した。実験と数値解析との間には極めて良い相関があり、連成解析により自動車部材の衝突特性を上手に推定することが可能である。実車の強度、衝撃挙動に関しても、こうした解析技術の駆使が精度向上と変形モードの予測に重要となると考えられる。

(4) 今後の展望

自動車の軽量化を主目的としたハイテン材料の使用の増加を背景に、ハイテン化による材料特性の劣化を補完する成形加工技術、ならびに成形限界や衝突時の変形挙動を予測する数値解析技術の最近の動向をトピック的に記述した。割愛したところも多いが、これらは自動車の新しい姿への進化とそれを支える主要材料としてのハイテン材の普及にとって、今後必要不可欠な技術と認識される。業界協同での生産技術の革新とそれを支援できるデジタル技術の研究開発はますます発展すると思われる。

4.3.2 溶接、接合技術

(1) 研究開発の動向

この10年間の溶接関連の進捗としては、阪神淡路大震災

を契機とした鉄骨建築物の溶接部の特性向上と、高強度化や大入熱化の要求に対応した溶接用鋼の開発が特筆される。前者は、震災後に建設省(現国土交通省)のプロジェクトを起点として広く取り組まれたもので、鉄骨柱梁溶接部の必要靱性の検討に基づき脆性破断防止のガイドラインが策定された。また都市の再生や再開発に向けて多様な構造や大スパンを有する高層ビルが計画・建設される中、耐震性のためには柱梁溶接部に加え柱材溶接部にも高靱性が求められ、大入熱溶接用の建築用鋼の開発が進められた。さらに建築物の耐火性向上に向けて耐火鋼の開発と溶接性の検討が行われ、実用化された。一方、後者に関しては、建築のSA440、橋梁のSM570や高性能YP500 MPa鋼、造船のEH390やEH460、海構のYP500 MPa鋼、ラインパイプのX80～100など、多くの分野で高強度鋼の適用や開発が進むとともに、溶接施工効率の向上や施工コスト改善の点から、既存溶接の大入熱化や、入熱50～100 kJ/mmに及ぶ大入熱のエレクトログラスアーク溶接(EGW)やエレクトロスラグ溶接の採用が増した。いずれの場合も、鋼の溶接性と溶接部の靱性の確保が実適用の鍵である。特に橋梁分野では溶接の予熱フリーの要求が強く、制御圧延、制御冷却を駆使した低炭素当量(Ceq.)の高強度鋼が開発された。他方、溶接構造物の高寿命化に向け、橋梁、造船、産業機械の分野を中心に、溶接部高疲労強度鋼の検討や低温変態溶接材料を用いた溶接部疲労強度の改善検討などが行われた。薄板の分野でも自動車ボディ軽量化に向けて鋼板の高強度化が進みつつあり、溶接性の検討が活発化してきた。

(2) 溶接法、および溶接部の課題

溶接法に関しては、様々な分野における溶接の自動化、多電極高速化、自動車用鋼板のテーラードブランクの製造に向けたレーザー溶接やマッシュシーム溶接の検討、超細粒鋼の溶接に向けたレーザー溶接や狭開先溶接の検討などが進められた。Al合金で既に実用化され、薄鋼板の溶接歪や超細粒鋼の熱影響が少ない接合法として期待される摩擦攪拌溶接(Friction Stir Welding)は、鋼用の高強度耐熱ツール(回転工具)の探索が進められ多結晶c-BNツールなどの有効性が提案されているが、未だ実用化途上である。

鋼の溶接においては、溶接部の靱性劣化と低温割れ等の溶接欠陥が常に懸念すべき課題であり、そのいずれもが鋼の高強度化で顕在化する。靱性の低下は、高強度化に伴って、溶接過程で粗大化したオーステナイト(γ)から上部ベイナイトなどの粗く低靱性のプレート状組織が発達しやすいためであり、ラス間の島状マルテンサイト(MA)の生成もこれを加速する。この改善に向け溶接部で採られる組織制御は、①粗大 γ 粒内に介在物を核とした微細粒内フェライトを生成さ