

川崎製鉄技報

KAWASAKI STEEL GIHO

Vol. 34 (2002) No.2

自動車用鋼材特集号

薄鋼板の加工技術における最近の動向と川崎製鉄の研究開発体制

The Latest Trend in Development of Steel Sheet Forming Technology and R&D Activities in Kawasaki Steel

阿部 英夫 (Hideo Abe)

要旨：

自動車の軽量化，衝突安全性，デザイン自由度，耐食性などの要求に応える多くの高強度鋼板，超加工性鋼板，表面処理鋼板が開発されまた現在もさらなる開発競争の渦中にある。新しい鋼板の採用には加工技術上の課題も多く，また材料の特徴を最大限に生かした工法や加工条件の設定が重要である。自動車の構造や工法の面でもさまざまな工夫が試みられている。一方自動車の開発期間の大幅な短縮が強く望まれており，材料と加工技術の両面からの技術融合が大切である。本報ではこのよう視点から薄鋼板の加工技術における最近の動向と課題を展望し，川崎製鉄における本技術分野における研究開発体制を紹介する。CAD-CAE を活用した計算機シミュレーション技術の高度化と普及と残された課題，高強度鋼板の加工上の問題と解決方法，ハイドロフォーミング技術を成功させるための鍵，テーラードブランク技術の活用，安定量産成形のための評価技術などについて展望し，合わせて素材メーカーと自動車会社・部品加工メーカーとの密なる研究開発の必要性和，それにこたえる川崎製鉄の研究開発体制を紹介する。

Synopsis：

Synopsis: Many kinds of formable high-strength, coated steel sheets and ultra formable mild steels have been developed and now further efforts are being made to meet the demand for weight reduction, crashworthiness, corrosion resistance and freedom of body design under global competition. There remain a lot of subjects in forming and application technology for newly developed steel sheets, and it is important to select or develop a suitable working method and conditions for the full utilization of the potential of steel. Some developments in working method and body structures can be recognized. Furthermore, drastically shortened development period for a new car is required. Technology fusion between material and metalworking technology is highly effective to meet these demands. This paper reviews the latest trends in forming and application technology of steel sheets and introduces the organization and activities of Kawasaki Steel in this field, namely: (1) Sophisticated and popular computer simulation technology making the best use of CAD-CAE, and subjects to be solved., (2) Problems

and solution in using high strength steel sheets, (3) Some key-points to achieve success in the adaptation of tube hydroforming technology, (4) Tailored welded blank application, (5) Importance of close cooperated studies with car makers and parts makers in the early stage of the development of car body, parts design and die design.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

薄鋼板の加工技術における最近の動向と 川崎製鉄の研究開発体制*

川崎製鉄技報
34 (2002) 2, 47-53

The Latest Trend in Development of Steel Sheet Forming Technology and R&D Activities in Kawasaki Steel



阿部 英夫
Hideo Abe
技術研究所 加工技術
開発センター長

要旨

自動車の軽量化、衝突安全性、デザイン自由度、耐食性などの要求に応える多くの高強度鋼板、超加工性鋼板、表面処理鋼板が開発されまた現在もさらなる開発競争の渦中にある。新しい鋼板の採用には加工技術上の課題も多く、また材料の特徴を最大限に生かした工法や加工条件の設定が重要である。自動車の構造や工法の面でもさまざまな工夫が試みられている。一方自動車の開発期間の大幅な短縮が強く望まれており、材料と加工技術の両面からの技術融合が大切である。本報ではこのよう視点から薄鋼板の加工技術における最近の動向と課題を展望し、川崎製鉄における本技術分野における研究開発体制を紹介する。CAD-CAEを活用した計算機シミュレーション技術の高度化と普及と残された課題、高強度鋼板の加工上の問題と解決方法、ハイドロフォーミング技術を成功させるための鍵、テーラードブランク技術の活用、安定量産成形のための評価技術などについて展望し、合わせて素材メーカーと自動車会社・部品加工メーカーとの密なる研究開発の必要性と、それにこたえる川崎製鉄の研究開発体制を紹介する。

Synopsis:

Many kinds of formable high-strength, coated steel sheets and ultra formable mild steels have been developed and now further efforts are being made to meet the demand for weight reduction, crashworthiness, corrosion resistance and freedom of body design under global competition. There remain a lot of subjects in forming and application technology for newly developed steel sheets, and it is important to select or develop a suitable working method and conditions for the full utilization of the potential of steel. Some developments in working method and body structures can be recognized. Furthermore, drastically shortened development period for a new car is required. Technology fusion between material and metalworking technology is highly effective to meet these demands. This paper reviews the latest trends in forming and application technology of steel sheets and introduces the organization and activities of Kawasaki Steel in this field, namely: (1) Sophisticated and popular computer simulation technology making the best use of CAD-CAE, and subjects to be solved., (2) Problems and solution in using high strength steel sheets, (3) Some key-points to achieve success in the adaptation of tube hydroforming technology, (4) Tailored welded blank application, (5) Importance of close cooperated studies with car makers and parts makers in the early stage of the development of car body, parts design and die design.

1 はじめに

薄鋼板は自動車、電機、建材など社会基盤や消費社会で使用されている構造材料の中で最も重要な基盤的な材料としての役割を果たしている。軽量化の視点から非鉄金属材料あるいは非金属材料への注目度が高まり競合関係にあるが、鉄鋼メーカーは鉄鋼材料の優れた

材料特性、経済性、大量安定供給性、リサイクル性の点でためみな技術革新を重ね、お客様や社会の要請にこたえてきた。お客様のニーズにこたえるべく、さまざまな優れた鋼の特性を創り出すことは素材メーカーの研究開発の中心となる課題であるが、最近の鉄鋼市場はお客様の商品あるいは部品としての高い機能の創出と大幅な開発期間の短縮に対しても素材メーカーの寄与を期待している。川崎製鉄は、単に優れた特性を有する材料を開発提供するだけでなく、お客様の製品開発において初期段階から参画させていただいて、設計・加工方法・部品機能評価などについても「お客様とともに考え

* 平成14年3月8日原稿受付

迅速で価値ある提案をすべく研究開発機能を拡充・強化している
本報では薄鋼板の加工技術における最近の動向と課題を展望し、川崎製鉄の本技術分野における研究開発体制を紹介する

2 薄鋼板の加工技術における最近の動向

2.1 CAD-CAE 技術の活用および今後の課題

有限要素法（以下 FEM）解析技術の高度化と電子計算機の高速度化、低廉化とが相まって、塑性加工における材料変形を計算機でシミュレーションし、成形の可否の判断や型修正の効果を確認することがすでに実用レベルに達している。薄鋼板のプレス成形の技術分野では、プレス品の形状が3次元的に複雑なために、材料の変形を定量的に予測しにくい上に、型費が大変高価なので、FEM による仮想プレス実験の経済的効果は大変大きい。FEM 解析技術の歴史は古いですが、最近、急速に実用普及したのは、衝突変形解析を目的に開発された動的陽解法 FEM が（準）静的な塑性加工問題にも適用が可能であり、解の収斂性がよく、形状が複雑な問題で座屈現象・しわのような形状不良問題も視覚的に実際のプレス実験結果と極めて類似した計算結果が得られることが確かめられたからである¹⁾。今では、自動車メーカ、部品メーカ、型メーカで不可欠なものとして普及しているが、素材メーカとしても極めて有効な解析ツールとして活用している。FEM 解析によって、材料特性の改善効果、型形状の修正や成形条件の変更の効果を定量的に評価でき、材料と成形技術に起因する成形不良が合理的に議論ができるようになった。最近ではさらに積極的な活用法として型設計段階からお客様と素材メーカが部品あるいは金型の形状に関する CAD データを共有して FEM 計算シミュレーションで評価し材質設計・選択、型形状変更を迅速に行うことができるようになった。動的陽解法 FEM はもちろん本来の衝突変形解析にも有効に活用され、高価を投じて自動車を試作して衝突実験を実施する回数を減らし、大幅な開発期間の短縮を可能にした²⁾。特に衝突安全性に対する法的な要求水準ならびにお客様の関心が高まってからその期待が大きい。素材メーカはそれに対応したさまざまな特徴のある高強度鋼板の開発競争の最中にあるが、FEM 解析を高強度鋼板と部品構造の効果を定量的かつ合理的に評価できるツールとして活用している。さらに進んだ活用事例として、成形解析と衝突変形解析の連成解析がある。最近、Fig. 1 に示すような、塑性変形後の塗装焼き付け処理により引張強度まで上昇する新しいタイプの高強度鋼板（BHT 鋼板）が開発されたが、連成解析でその全プロセスの効果を合理的に評価できる。Fig. 2 に示すようにプレスの工法、形状、条件に依存する変形量と分布を計算し、それに対応した焼付け硬化後の強度の変化およびひずみ速度依存性を考慮した上で衝突変形解析を実施し、BHT 鋼板のひずみ時効硬化の効果が評価できる³⁾。

動的陽解法に偏って FEM 技術の動向を述べたが、下記するよう

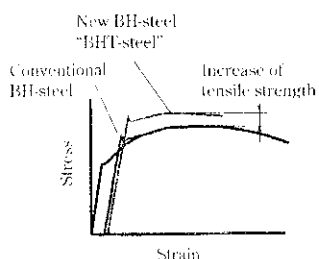


Fig. 1 Newly developed bake-hardenable steel “BHT-steel”⁴⁾

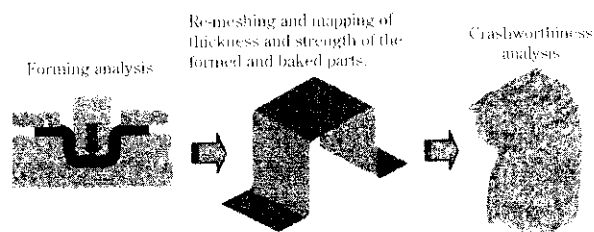


Fig. 2 Multi-stage simulation for evaluation of part strength using BHT-steel⁵⁾

に他の有限要素法とその市販汎用ソフトも普及している⁶⁾

動的陽解法：LS-DYNA (USA)、PAMSTAMP (仏)、OPTRIS (仏) など

静的陽解法：ITAS3D

静的陰解法

微小増分法：MTI-FRM (USA)、INDEED (独)、NIKE3D (USA) など

大增分法：AUTOFORM-INCREMENT (スイス) など

One-Step 法：Autoform-Onestep, Fastform3D (加) など

使用目的に応じて使用するソフトウェアが選ばれる。たとえば、部品設計で粗い成形可否の判断をする段階では One-Step 法が、型設計でも必要な精度に応じて大增分静的陰解法 FEM あるいは動的陽解法 FEM が、鋼板の自重による撓み変形やスプリングバックの解析には静的陰解法 FEM が使用されることが多い。川崎製鉄では、その目的、要求精度、許容計算時間に対応できるように、またお客様と使用ソフトウェアを共有できるように、上記ソフトウェアの多くを導入して活用している。

このような計算機シミュレーション技術の高度化・活用の究極の姿として、型試作レス、型の主製（高度な技能職人による型の磨き仕上げ）レス、車体試作・衝突実験のミニマム化が期待される。しかしこれを現実のものにできるかという技術展望をみると、まだ重要かつ難しい課題も多く残っている。ここでは紙面の都合で課題と関連するキーワードを列記するに留める。

- (1) 破断限界の判定：板厚減少率判定、FLD: forming limit diagram、くびれの理論⁷⁾、Void 理論に基づく破断限界式⁸⁾などの適用限界と改良
- (2) しわ限界の判定：視覚的判断から数値による判断
- (3) 材料構成式：提案されている各種構成式の精度とハルメータ同定⁹⁾
- (4) 形状凍結解析精度：動的陽解法と静的陰解法の組合せ、静的陽解法と改良¹⁰⁾、材料構成式の高精度化と FEM-code への導入¹¹⁾
- (5) 絞りピードモデリング：初等解析応用¹²⁾、実験式、数値ピード
- (6) 摩擦係数のモデリング：圧力、相対すべり速度、すべり距離依存性など因子のモデル化と潤滑材、表面粗度、材種・表面処理などによる摩擦係数データベース

上記課題の中には単にデータベースが不足しているレベルから、理論やモデル式がまだ確立できていない、現象が正確に把握できていないレベルまでさまざまなものである。また計算機速度と容量が今より数桁大きくなれば現実的になる課題もある。たとえば金型温度上昇とそれによる金型局部膨張や金型磨耗、金型やプレス機械の弾性変形¹³⁾に起因する成形不良問題の解析も夢ではなくなる時代がくるであろう。あせらず着実な技術の進歩に対する努力により現状よりさらに大きな経済効果が得られ、上記夢に近づくことができるを期待

する。筆者のここ 30 数年の体験を測れば、今の本技術分野はまさに夢のレベルであったと実感するからである。

CAD/CAE/CAM システムを通してデジタルデータを共有することは常識的なことと認識されるが、さらに玉製した金型や成形した部品の寸法形状をも迅速に測定し、デジタルデータとして共有することは極めて有用である。最近光学的な測定でしかも可搬の測定機が開発されており、川崎製鉄もこれを導入して有効に使用している。3 次元形状（点、面、ソリッド）に関するデジタルデータのソフトウェア間の互換性においてまだ問題があるが、近い将来解決されるものと期待される。

2.2 高強度鋼板の開発状況と加工技術

自動車車体の軽量化、衝突安全性を目的に高強度鋼板の使用が強度レベルおよび適用部品の点で拡大されている。川崎製鉄では超軽量鋼製自動車車体の開発を目的とした ULSAB、ULSAC、ULSUS プロジェクトに参画するのに加えて、最新の開発販売された自動車を解体し詳細に調査し車体構造の変革の動向を把握している。1999～2001 年に開発された乗用車の構造と使用材料の調査結果から、その傾向を展望すると

- (1) 強度・剛性を強化し衝突安全性を確保する骨格部品を明確にし、断面サイズ、板厚、強度が増大している。Fig. 3 に 1 例を示す。モノコック・シェル構造から Hybrid 構造への転換が伺える。
- (2) 強度・剛性を担う部品に対しての強度レベルとして世界的に材料調達が比較的容易な 440 MPa を標準的な強度レベルとして、それを確実に使いこなす方向性と超高強度鋼板とよばれるさらなる強度レベルの鋼板を効果的に適用する方向性がある。
- (3) 成形性のよい高強度鋼板の開発が強く要請される一方、分割も辞さず部品形状を単純化して高強度鋼板を実用部品に適用している。

上述のトレンドの中で多種類の高強度鋼板が開発され今もその開発競争の中にある。すべての要求特性を 1 種類の鋼板で満足することが理想であろうが、鋼の強化原理と金属組織により特長とされる特性（絞り性、焼き付け硬化型、低降伏点型、高延性型、高バールンク性など）には差異がある。開発した、または開発中の鋼板の一覧については別資料にゆずるが¹⁰⁾、適材適所の材質設計・材料選択が肝要である。加えて形状の簡単化など成形難度の軽減と形状凍結のための工法・成形条件などの改善工夫の合わせ技が重要である¹¹⁾¹⁰⁾。高強度鋼板とその利用技術として溶接性、加工後あるいは溶接部の疲労強度も重要であることは言うまでもない¹⁰⁾。

複合組織高強度鋼板、加工誘起変態強化高強度鋼板の実用化が 2000 年までの話題の 1 つであったが、2001 年にひずみ焼き付け硬

化型の高強度鋼板が強度骨格部品へ実用化されたことは新たな話題として紹介できよう⁹⁾。従来の焼き付け硬化型鋼板は降伏点の上昇のみに限られていたためにその適用はデント特性向上を目的とした外板に限られていた。塗装焼き付け温度での熱履歴で引張り強度も向上する鋼板が開発され、骨格強度部材への適用が有効であることが実証され実用化された¹⁰⁾。本鋼の焼き付け硬化特性はブレンク成形により導入される変形量にも影響されるので、工法や成形条件にも注意が必要であるが、2.1 節で述べたように CAE によりその効果を定量的に評価でき、その適性化ができる。また従来型の焼き付け硬化型鋼板も進化している¹⁰⁾。適切な成分設計と高温連続焼鈍技術を駆使して常温時効への不安もなく高い成形性（伸び、 r 値）を有する鋼板は安定量産されており、赤道を越えての地域への輸出も実現している。骨格部材へは高強度鋼板を使用しながらなお大断面の設計がなされているために重量は若干増加している傾向にある。これを補って車体全体の軽量化を図るためには外板パネル類へ進化した従来型の焼き付け硬化型高強度鋼板（たとえば 340～400 MPa 級 BH 鋼板）の適用ニーズは高い。

2.3 プレス成形における形状凍結技術

高強度鋼板のプレス成形においては、割れ、しわ、面ひずみに加えて、スプリングバックと総称される曲げ角度変化、壁そり、長手方向の反り、曲がりおよび捩れなどの寸法精度不良が問題視される。寸法精度不良は、成形の最終状態（除荷直前）での曲げ変形による板厚方向の応力不均一分布（すなわち曲げモーメント）とその分布が面方向に不均一に分布すること、および面内応力が面的に不均一に分布することにより発生する。材料強度が高いほど応力レベルが高いのでその不均一量に比例して形状不良が大きくなることは避けられない。したがって形状変化を予測しそれを補う成形形状に型設計変更するか、応力不均一分布を均一化する何らかの対策が原理的に必須である¹⁰⁾。具体的な対策法として多くの手法が提案されている。実際に適用できるか否かは成形形状、プレス機械の仕様、金型構造、経済性など種々制約によるが、単にしわ押え力や、ダイ型半径などの単純な最適化だけでは解決が難しく付加的な機能の工夫が必要である。代表的な対策法を列記すると、(1) しわ押えを高くして張力を付与する。曲げた後に張力を付与する方が効果的なので、(2) しわ押え力制御により成形末期に高いしわ押え力を付与する、(3) 構造的にビード高さを可変にし、成形末期にビード張力を高める¹⁰⁾、(4) 成形末期にフランジ部の材料移動を拘束する型構造とする¹⁰⁾、(5) リストライクなど工程数を増やす、しわ押え力とダイ型半径、ダイ・ポンチ間の空隙幅を適正にすることにより (6) 空隙部での逆曲げ変形を利用して壁そりを軽減する¹⁰⁾、(7) 除荷時の弾性回復量をキャンセルする分の曲率を壁部に付与する (Fig. 4)¹⁶⁾、(8) ホンチ底を予め拘束する背圧ハッドを付加する、(9) 成

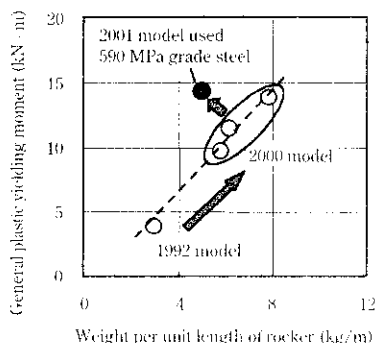


Fig. 3 Variation of strength and weight of the assembled sill part from 1992 to 2001 model of small size vehicles

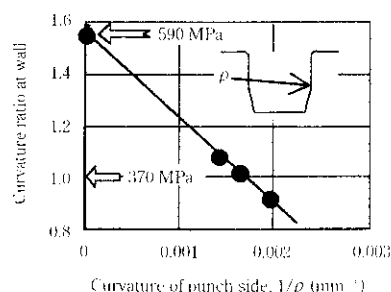


Fig. 4 Improvement of wall curl by reverse moment at punch side¹⁶⁾

形末期での決め押しによりボンチ底およびボンチ肩部の変形を制御する (10) 壁部に形状ヒードを付与し弾性回復時の変形剛性を増す²⁹⁾などの方法が報告されている。これらは実験室レベルから実現場で採用されている方法までさまざまである。素材メーカーとしても、積極的に原理に則った斬新な工夫と提案を試みている。

成形除荷時の形状変化を精度よく予測計算する技術が強く要請されている。曲げ形状や張力などが既知の場合は板厚方向に有限要素法に分割した層毎にひずみ増分理論に基づき解析的な数値計算で高精度に解を求めることができる²⁹⁾。しかし一般的に成形過程で3次元の形状が未知の場合は有限要素法に頼らざるを得ない。現在計算時間の実用的な点で、成形過程を動的陽解法 FEM で解き、除荷過程を静的陰解法 FEM で計算する手法が広く用いられる。本手法においてメッシュサイズ、積分点数、計算成形速度、ダンピングパラメータなどの影響を詳細に検討し、またバウシinger 効果や移動硬化を考慮した材料構成式やヤング率のひずみ依存性を考慮することにより精度を向上する試みがなされている²⁹⁾。しかし、まだ満足できる精度ではなく、精度向上の研究が精力的になされている^{30,31)}。動的陽解法 FEM では本質的に力の釣り合いが保証されないの点でその点では静的陰解法が優れているが、解の収束性で実用まで課題が多い³²⁾。静的陽解法で釣り合い力の誤差の累積を補正するアルゴリズムが提案され³³⁾、その有効性が期待される。精度と解の収束性と計算時間の点でその実用性の検証が進められている。しかし解法によらず上述の材料構成式とヤング率の問題は本質的な課題であり、材料パラメータの特定法を含め基盤的に精力的に研究すべき今後の課題である。

2.4 テーラードブランク (TWB) の成形技術

TWB は複数の切り板を CO₂、YAG レーザ、プラズマ、あるいはマッシュシーム溶接で接合したもので、これをプレス成形して強度機能上必要な板厚と強度の最適な組合せで構成された部品をつくることができる²⁸⁾。溶接方式それぞれにおける溶接部品質を確保するための溶接条件の管理と品質保証が大切なことはいままでもないが、Photo 1 に示すように、TWB の成形性は成形する時の主応力方向と溶接ライン方向の角度関係で異なった挙動を示す¹²⁾。溶接ラインの位置は、場所ごとに必要な強度・機能によって大略決定されるが、ひずみが集中する個所に溶接ラインを設定せず、高強度側にひずみ集中部をずらし低強度側の過度なひずみの集中を避けることなどを原則に設計することがポイントになる。FEM が溶接ラインの設計や成形可否の判断に有効なツールとして活用できる^{36,38)}。また TWB 製の部品の剛性や衝突変形特性の評価にも FEM が活用されている。

TWB 技術の今後の展望として、超高強度鋼板を活用した TWB、

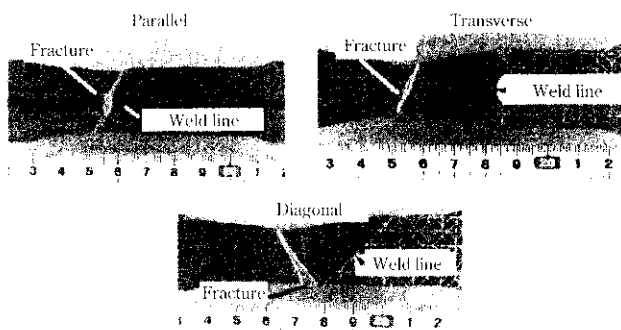


Photo 1 Fracture behaviors of tailored welded blank depending on the tensile testing direction to weld line¹²⁾

溶接ラインが非直線の TWB³⁹⁾、強度・板厚差の大きな TWB など適用部位と量の拡大および技術と信頼度の向上が期待される。高強度鋼板の TWB では溶接熱影響部の軟化が成形上大きな課題となる。軟化の少ない材質設計とともに溶接条件の適正化で軟化の程度と軟化幅を制御することも TWB の成形性向上に大切である。欧米では TWB を供給するビジネスが定着しているが、日本でもその動きが始まっている。

2.5 ハイドロフォーミング (HF) 技術

Fig. 5 に示すように新しい HF 技術は鋼管を最終製品形状に類似した形状に曲げ加工、プレス潰し加工、縮径加工など予成形をした後、金型に装着し管端のシールと高圧水の供給口を兼ねた軸押しヘッドにより軸力を付与しながら内圧をかけて所定の金型形状に馴染ませつつ押し付け成形する加工技術である^{30,31)}。板金・溶接法部品に比して一体構造なので部品の強度と剛性が高い、溶接フランジレスと合理的断面設計により軽量化ができる、部品統合・金型費用削減、溶接工数削減などによりコストが削減できるなど多くの利点がある³⁰⁾。本技術は 1970 年代日本で本格的な実用化研究がなされ自転車工業などで多く採用されたが、大型自動車部品への本格的な採用はドイツで先行し欧米で普及した³⁰⁾。採用されている部品は多岐にわたるが、エンジンクレードル、サスペンション、エキゾーストマニホールド、ピックアップトラックのフレームが量的にも多い。日本では 1999 年にサスペンション・サブフレームとセンタービラー・リンフォースに採用されて以来³⁰⁾、少しずつ適用事例が増えているが、その市場はまだ欧米に比し 1 桁以上小さい現状である。しかし、ULSAB、ULSAC、ULSAS、ULSAB-AVC プロジェクトでも HF 技術は重要なコア技術として位置付けられ多くの部品でその有効性と実現性が検証されている^{35,39)}。本技術が日本で欧米並みに普及するための最大の課題は設備コストの低減とサイクルタイムの大幅な短縮であろう³⁰⁾。最近 HF マシンが種々開発され確実な進化が見られ、サイクルタイムとしても 20s を切るレベルが実現している^{30,39)}。HF を技術的に成功させる鍵としては (1) 予成形 HF 工程の最適化と成形難易評価システム、(2) loading path の最適化と制御技術、(3) HF 加工性の評価法の確立と加工性に優れた鋼管の開発、(4) 潤滑が重要であろう。

予成形 HF 工程の最適化について、実験・経験の蓄積と CAE の両面から取り組まれている。予成形としての曲げや潰し加工および HF での型締めによる材料の変形の結果としての肉厚分布、予変形量・材料強度分布および金型と材料の接触状態が HF での変形挙動

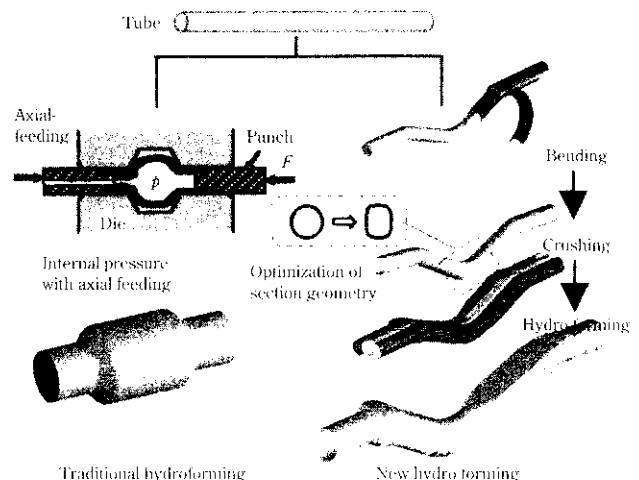


Fig. 5 Outline of hydro-forming process³⁰⁾

と加工限界に極めて大きな影響を及ぼすことが理解されてきた^{32,39)}。たとえばわずかの潰し方の差が金型と材料の接触状態を変え、摩擦拘束を介して、HF における変形の局所化をもたらす。加工限界を大幅に低下させる。このような過程を実験・経験的なデータとして蓄積して工程設計、型設計基準を構築することが必要になる。一方この工程設計・型設計に対して計算機シミュレーションが有力なツールとして活用できるものとする。曲げ潰し-HF の多工程における変形の履歴を考慮した解析が可能であり、HF 工程の解析に使いやすい形にカスタマイズされたソフトウェアの開発も進んでいる。

軸押しと内圧をいかに調和・同期させて成形させるか、すなわち loading path (LP) の設定が HF の加工限界を向上させる鍵である³⁹⁾。基本的形状の場合の適性 LP に関する実験データが報告されている⁴⁰⁾。形状、材質や潤滑状態によっても最適 LP が影響されるので合理的、定量的に設定することは意外と難しい。当該部品について潤滑、材料特性の影響を考慮して計算機シミュレーションで最適 LP を求め、これをベースに現場的に修正して、HF を短期間に成功させることが近い将来実現できるものと展望する。適性 LP の範囲が広いことと機械の圧力・軸押し制御精度の確保が、安定して生産するために重要である。制御対象の軸押し量と成形内圧が相互に干渉関係にあることにも着目する必要がある。

鋼管の HF 性の評価方法も種々試みられているが、加工条件、変形様式により各種鋼管特性の影響度が異なることも明らかになりつつある⁴¹⁾。HF の変形様式に関する系統的な分類とそれぞれに対する鋼管の材料特性の影響を評価する方法の確立と標準化が望まれる^{30,32)}。前述したように適性 LP の範囲が広いことも現場的には重要であり、成形余裕度という概念の成形性の評価も必要である。HF 用に適する鋼管特性の解明と開発も着実に進んでいる。必要強度に対して伸びの大きな材料が望まれるが、既述した横断面の変形の局所化を緩和するために高い n 値が、軸押しの強い条件下では r 値の影響度が増し、また予成形曲げ部の円周方向偏肉を緩和するために高い r 値が望まれる⁴²⁾。HF 用の電縫鋼管用素材として自動車プレス用に開発された加工性の優れた薄鋼板素材を用い、電縫鋼管製造工程のロール成形において付加的な変形を可能な限り小さくして素材特性の劣化を防ぐことが必要である。川崎製鉄が開発した低ひずみ造管 CBR ミルはこの点からも HF 用途に適したプロセスと言える⁴³⁾。さらに新しい鋼管製造プロセスも開発されており⁴⁴⁾、本用途の鋼管はまだ進化すると期待される。

繰り返し述べたように HF 工程における金型と材料間の摩擦は変形を局所化し、長手方向軸押し効果の伝達を妨げるので極めて重要な成形条件である。優れた性能をもつ潤滑材の使用はコストと環境の両面で不都合な面もあるが、その影響は大きいことは認識すべきである³⁴⁾。この難点を克服すべく部品・型を設計することと HF 性の優れた鋼管の開発に努力が払われている。また加工限界を向上できるハンマリング HF 工法の提案もされている⁴⁵⁾。摩擦の低減効果の視点からも興味深い。まだまだ工法の点からも進化が期待できる技術分野である。

2.4 節で述べた TWB の考え方は鋼管分野でも応用でき、TWT (tailored welded tube) として⁴⁶⁾、欧州を中心に検討が進められている。TWT は技術的に高いポテンシャルを有しているが、コスト面でのブレークスルーが普及のための鍵と思われる。

2.6 新しい成形技術

前節までに主要な薄鋼板の加工技術に関して最近の動向を展望したが、加えて注目すべき新しい技術が開発されている。少量生産方

式や試作に適するもの、軸対称形状に限定されるもの、経済性・設備仕様の点でまだ普及していないものなどがあるが、高いポテンシャルを有するものと判断されるので筆者が注目する技術を紹介する。

インクリメンタルフォーミングは球頭の棒状工具を用いて逐次的に局部張出し変形を与え所定の3次元的な全体形状を創形する技術である⁴⁷⁾。職人が鍋釜やかんなどを叩き出し手作業で作っていた手法を機械と NC 制御で近代的技術としてよみがえらせたとも言える技術である。張出だけでなくショットピーニング、高圧水や圧縮加工を利用する方法も試みられている。材料的には引張り試験における局部伸び領域まで材料の塑性を活かすことができ、またプレス法では難しい形状をダイレスで成形できるなど魅力的な加工法である。階段状の表面が本質的に残るが送りピッチなど成形条件の設定でこれを微細にし、商品や目的によっては十分実用的に価値を有する。生産性が難点であるが、高速化、多点化などの工夫がなされ開発初期に比べれば数段の改良がなされている。しかし本質的に板金プレス法に比べ少量生産に適する加工法である。試作用や極少量生産用には経済的価値が十分出てくると期待される。

スピニング加工、へら絞りといった回転成形も変形過程から見ればインクリメンタルフォーミングと言える。回転成形も最近著しい進化を遂げている⁴⁸⁾。従来鍛造、鋳造法や粉末成形法で作っていた部品を板金成形と回転成形の組み合わせで各種形状の溝や歯車、ネジ形状の断面に成形することが広く採用されている。減肉あるいは整形するだけでなく増肉や積極的なメタルフローを与え所定の形状に加工する。自動車の各種フーリや回転トルクを伝えるAT部品などに広く利用されている。増肉、盛り上げ、分流、偏芯・傾斜などメタルフローをフルに活用して、従来の複数部品を一体化し、一層複雑な断面形状の回転成形部品が実用化している。このような用途には従来のプレス用途とは異なる鋼板特性や厳しい寸法精度が要求される。本技術分野での CAE 活用はまだ報告例がなく今後の取り組みべき課題である。

プレス成形の範疇でもメタルフローを積極的に活用する工法が提案されている⁴⁹⁾。従来のプレス法での容器の成形と冷間鍛造技術の複合加工とも言える技術分野である。材料の歩留まり、加工品の強度特性・寸法精度の点でも優れる点が多く、今後、適用が拡大するものと期待できる。

液圧成形を板材成形に適用する技術が注目されている。古くは強制潤滑成形法、対向液圧成形法などがあるが、ULSAB プロジェクトでは液圧で逆張出し予成形して全面に均一な変形を与えることにより張り剛性やデント特性を向上させる技術が提案されている³⁹⁾。また板を2枚重ねてその内部に液圧を負荷して成形する技術も試みられている⁴⁰⁾。いずれもサイクルタイムの短縮が大きな課題であり、少量生産に有効な加工技術として注目される。

成形中のしわ押さえ力と位置、ボンチ力と位置・速度、板の変形、移動などを積極的にセンシングして制御に使う研究が継続的に行われている⁵⁰⁾。実生産の現場でも NC クッションが普及して、プレス成形における制御技術の進化が期待された時期があったが、その活用・効果の報告が少ないのが現状である。本技術分野を将来展望することは難しいが、1つの向かうべき道と認識する。

既述の技術はすべて常温での加工であるが、その温度範囲を温間、熱間に拡大し、また加工後の冷却速度を制御すると、色々な期待が膨らむ。ステンレス鋼の温間成形は工業的規模で実施されているが、普通鋼板への適用の検討も進んでいる。ダイクエンチ技術も 1960 年代に実施された例もあるが、最近の軽量化、安全性の視点から見直されるべき技術と言える。

3 川崎製鉄における加工・利用技術の開発体制

薄鋼板は素材メーカーからお客様にわたってプレス加工、ロール成形、押出成形、鍛造成形などさまざまな塑性加工や機械加工され、溶接・接合・組み立て、必要に応じ熱処理をされ表面処理、塗装され最終的な製品・商品となり最終消費者に供される。お客様での鋼板の加工性、溶接性を評価する方法を確立し、その性能を熟知すること、さらに優れた性能の鋼板を開発することは、素材メーカーとしての核となる仕事である。しかしその範囲だけでは新しい薄鋼板の用途の開発、市場の開拓やそのスピードに対するお客様の要望に十分こたえられない。前章で繰り返し述べた軽量化、衝突安全性、コストに対するお客様の要望にこたえるためには、自動車やその部品の開発段階から素材メーカーも参画して、材料加工技術・部品構造・車体構造と一貫したシステムの中でベストな解を求めることが重要であると再認識されている。これはまさに simultaneous engineering とか concurrent engineering といった概念の実践である。川崎製鉄ではさらに新しいコンセプト「お客様と夢を語り、その夢を『材料と加工』で実現する—Dream and Delight with the World—」活動を展開している。これはマーケティング活動そのものでもあるが、素材メーカーとして加工・利用技術をもう一つの軸足としてマーケティング活動をすることを意味する。必ずしも部品ビジネスの展開を意味するものではなく、材料の特徴を生かした加工法や部品構造の組み合わせで軽量化、衝突安全性・コストのベストな解を追求するものである。このような機能は今まで材料開発を担当する研究部門でも果たしてきたが、この役割の重要性と位置付けを明確にするために、技術研究所内に「加工技術開発センター」を組織した。加工技術開発センターはお客様のニーズと材料シーズを加工技術の視点から結び付け、高い価値の部品を創造する役割を担う。そのためには、お客様の部品設計段階、型設計段階といった上流段階にまで参画させていただき、材料の特性を活かす技術提案をしていきたいと考えている。またこのようなお客様と一体となった活動でお客様と夢を語りながら次の開発すべき材料提案を材料開発部隊にフィードバックする機能も果たす。営業、技術サービス、市場開発、品質管理・保証、製造分野など社内の組織と有機的に一体となった活動により、この機能は充分発揮している。また自動車用鋼材として薄鋼板のほかにステンレス鋼、銅管、鉄粉、電磁鋼板、線材・棒鋼、溶接材料などフルに揃っているが、多くの製品にまたがる課題を横断的に扱う仕組みも構築できている。

加工技術開発センターの活動の概要を一部紹介すると、(1) CAD-CAE を活用した薄鋼板および銅管の加工・利用技術開発、(2) 高強度鋼板の特性を生かした成形技術・部品機能開発、(3)

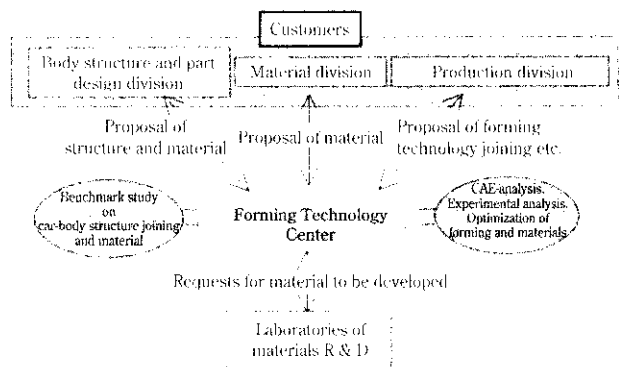


Fig. 6 Activity of Forming Technology Center in Kawasaki Steel

国内外の最新自動車車体の解体調査に基づく材料、工法、部品構造の提案と steel car body structure concept の構築、(4) プレス加工性に関わるメタラジーとトライボロジーの基礎的研究とその応用、(5) ハイドロフォーミングに関わる銅管特性と成形技術の開発などである。各論については直接のお問合せを期待したいが、これらをスピーディーに開発するための道具としての CAD-CAE の計算機環境とソフト群、また成形性評価、部品試作、部品機能評価を実現する加工機械と各種評価試験機を拡充しつつある。また設備と専門知識・経験として不足する点では外部の力をお借りして柔軟な体制を組んでニーズにこたえている。また加工技術開発センターは技術研究所（千葉市）に本拠地を置くが、中部地域および西日本のお客様にそれぞれ対応する知多分室と本島分室も拠点として活動している。

4 む す び

自動車と鉄鋼材料は、地球環境問題とグローバルな大競争時代そして人に優しい車作りなど大きな環境の変化の中、多くの緊急かつ重要な課題に直面している。車体に関わる具体的なキーワードは軽量化、衝突安全性、開発期間の大幅短縮そしてコストである。これらキーワードに対して最も現実的かつベストな解を提供できるのは鉄鋼材料とその加工技術であり、自動車メーカーあるいは部品メーカーと素材メーカーの開発段階からの技術の協力と融合が不可欠である。本資料では薄鋼板の加工技術に関して最近の動向をレビューし川崎製鉄の取り組み体制を紹介した。川崎製鉄技報の本自動車用鋼材特集号や既報の薄鋼板特集号、銅管特集号などで紹介した材料と合わせて参考にしていただき、加工技術と合わせて自動車の進化に少しでも貢献できればと願っている。

参 考 文 献

- 1) A. Honecker and K. Mattiasson: Proc. NUMIFORM '89, (1989), 457
- 2) 藤谷克郎：自動車技術，**55**(2001)6, 4-8
- 3) 金子真次郎，登坂章男，坂田 敬，古角文雄，菱沼 一平：までりあ，**41**(2002), 48
- 4) 平本治郎，金子真次郎：自動車技術会学術講演会前刷集，(2001)11-01, 5
- 5) 牧野内昭武：175・176 回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会，(2001), 33-54
- 6) S. Storen and J.R. Rice: *J. Mech. Phys. Solids*, **23**(1975), 421-441
- 7) 岩田徳利，松居正夫，後藤 学：塑性加工，**33**(1992)381, 1302
- 8) 大久根守哉：日本機械学会誌，**75**(1972)639, 596
- 9) 後藤 学：塑性加工，**19**(1978)208, 377-385, **19**(1978)210, 598-605
- 10) 岩田徳利，葛森秀夫：平成 13 年度塑性加工春季講演会論文集，(2001), 5-6
- 11) 須長秀行：塑性加工，**39**(1998)444, 62-66, **39**(1998)444, 67-71
- 12) 葛森秀夫，岩田徳利：平成 13 年度塑性加工春季講演会論文集，(2001), 7-8
- 13) 薄鋼板新製品特集号：川崎製鉄技報，**31**(1999)3, 自動車用材料特集号，**32**(2000)1, 自動車用銅管特集号，**33**(2001)4
- 14) 橋本 浩：自動車技術会シンポジウム，「車両軽量化技術の最新動向」，

- (2001), 41-46
- 15) 岩谷二郎：材料とプロセス，**14**(2001)，1106-1107
 - 16) 比良隆明，平本治郎，坂田 敬：川崎製鉄技報，**33**(2001)2，66-71
 - 17) 比良隆明，本谷 靖：46 回塑性加工連合講演会論文集，(1995)，219-220
 - 18) 中川憲彦，伊倉 真，夏見文章，岩田徳利：塑性と加工，**35**(1994)404，1115-1121
 - 19) 平井更之右：自動車技術会秋季講演大会前刷集，87(2001)90-01，9
 - 20) 佐藤 進，岡田 靖，加藤俊之，橋本 修：川崎製鉄技報，**23**(1991)4，293-299
 - 21) 戸沢康壽：千葉大学工学部研究報告，**14**(1963)26，1
 - 22) J.R. Michler and K.J. Weinmann: SAE Paper 950698
 - 23) 広瀬洋二：第 179 回塑性加工シンポジウム，(1998)，37
 - 24) 林 豊，高木美智雄：鉄と鋼，**68**(1982)9，1236
 - 25) 森下忠晃：第 201 回塑性加工シンポジウム，(2001)，63-70
 - 26) 比良隆明，飯塚栄治，加藤俊之：自動車技術会学術講演会，942(1994)，65
 - 27) 上森 武，岡田達夫：平成 13 年度塑性加工春季講演会論文集，(2001)，11-12
 - 28) 夏見文章，小原昌弘：塑性と加工，**38**(1997)432，45-51
 - 29) 辻 正和：プレス技術，**39**(2001)8，40-45
 - 30) 淵澤定克：175/176 西山記念講座，(2001)，55-77
 - 31) 阿部英夫，岡部 治：プレス技術，**39**(2001)7，24-27
 - 32) 阿部英夫：自動車技術会材料フォーラム，(2001)，16-22
 - 33) D. Schmoeckel, C. Hielscher, and M. Pier: Proc. 6th ICTP, (1999), 1171-1182
 - 34) 石川 茂，高橋 進，寺田耕輔，森田 司，早坂順信：日産技報，**45**(1999)，63-67
 - 35) 橋本浩二：自動車技術会材料フォーラム，(1998)，1
 - 36) 福井清之，小松原望：自動車技術会材料フォーラム，(2000)，12-16
 - 37) 栗山幸久，橋本浩二，大橋 浩：自動車技術会材料フォーラム，(2000)，17-23
 - 38) T. Altan: Hydroforming 101 Workshop, International Conf. in Tube Hydroforming Technology, SME(2000)，1
 - 39) J. Liu: SAE 2001 Congress 2001-01-1134, (2001)，137
 - 40) 岡部 治，橋本裕二，阿部英夫：川崎製鉄技報，**33**(2001)4，15-20
 - 41) 豊岡高明，橋本裕二，小林邦彦，板谷 進：川崎製鉄技報，**22**(1990)4，236-244
 - 42) 豊岡高明，板谷元晶，依藤 章：川崎製鉄技報，**33**(2001)4，145-150
 - 43) 力丸徳仁，伊藤道郎：プレス技術，**39**(2000)7，58-65
 - 44) A. Eichhorn: Innenhochdruckumformen und Loehen von Tailored Tubes, Blech Rohre Profile, **98**(1998)12，26-31
 - 45) 塑性加工学会：塑性と加工インクリメンタル成形特集号，塑性と加工，**42**(2001)489，1-68
 - 46) 塑性加工学会：第 204 回塑性加工シンポジウム，(2001)，1-68
 - 47) 中野隆志：型技術，**11**(1996)13，74-75
 - 48) E. Bickert, E. Griesbach, and T. Mende: Hydroforming of Tubes, Extrusion and Sheet Metals, **1**(1999)，283
 - 49) 小山 寛，吉原正一郎，真鍋 健：第52回塑性加工連合講演会論文集，(2001)，215-216