

自動車用鋼材の評価・適用技術（加工） 軽量化，衝突特性向上と開発期間短縮に貢献する 鋼材の加工・利用・評価技術

Application Technologies for Weight Reduction, Improving Crashworthiness and Shortening of Development Period for Automobiles

吉武 明英 YOSHITAKE Akihide JFE スチール スチール研究所 薄板加工技術研究部長・工博
小野 守章 ONO Moriaki JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員(副部長)・工博

要旨

自動車用鋼材の加工技術と接合技術研究開発の一部を紹介した。自動車メーカーの車造りの多様化と開発期間短縮に貢献し、さらに部品の共同開発体制を構築するために、有限要素法を中心とした加工・衝撃・耐久予測技術を整備、設計段階から材料提案・提供ができる体制を構築している。これら予測技術の精度は、各種評価技術に支えられソリューションの信頼性を確保している。

Abstract:

Evaluation of formability of materials and estimation of crashworthiness and endurance limit of automotive parts by utilizing finite element method (FEM) analysis are very important issues for improving the automotive structure. In order to collaborate with automotive makers and parts makers for developing new products, JFE Steel have prepared new R&D systems for fulfilling customers needs.

1. はじめに

1994年4月から開始された世界15ヶ国32鉄鋼メーカーが共同で主催したULSAB(Ultra Light Steel Auto Body)では、自動車ホワイトボディ(BIW: body in white)の軽量化のために、(1)ハイテン材料の採用、(2)テイラードブランク(TWB: tailored welded blank)の採用、(3)ハイドロフォーミング部材の採用、(4)レーザ溶接方法の積極的使用、(5)補強材の省略を試みた。その結果、BIWで20%程度の軽量化の可能性を示唆し、また具体的にDH(demonstration hardware)を製作し成果をPRした¹⁻⁷⁾。本プロジェクトの成果はタイミング的にも国産車でのTWB, hydroforming 部材の採用に拍車をかけ、自動車軽量化の方向性を示すことになった。その後の自動車軽量化プロジェクトULSAB-AVC(Ultra Light Steel Auto Body-Advanced Vehicle Concepts Project)では、さらに使用鋼材の高強度化が進み衝突安全性の要求が高くなるのに対応しTS980MPa級までの構造材料が提案された。一方

高強度薄板の加工性は素材強度の上昇にともない低下することが知られており、高強度鋼板を今後さらに適用拡大するためには、薄板を使用する立場での部材加工評価、特性評価技術の開発が重要である。本報告ではこのような背景の下、充実した研究所評価装置、強力な解析技術の整備により自動車・部品メーカーとの部品協力開発体制が整い基本構造コンセプトに材料選定から加工技術、さらには部品特性評価まで幅広く課題解決型のソリューションを提供できる体制が確立したことを述べる。

2. 試験評価技術

現在、自動車用材料のハイテン化傾向が鮮明になっている中、ハイテンのプレス成形性および成形された部材の特性評価技術を保有していることで、お客様に適切な材料を提供できる。ここでは、ハイテンならびに表面処理鋼板のプレス成形性を実機レベルで評価することのできる大型プレス装置と、衝突安全性を左右する動的特性を試験部材レベルで調査出来る大型変形試験装置の概要を述べる。

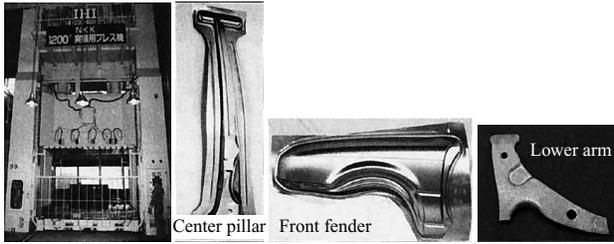


Photo 1 1200 t single action mechanical press machine and pressed samples

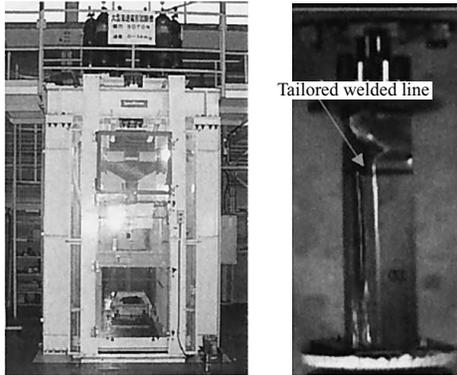


Photo 2 Dynamic testing machine and crashed specimen

〔1〕 1200 t 実験用プレス機

自動車メーカーで量産に使われている，シングルアクションのメカニカルプレス機に成形過程のクッション力，ストローク，成形荷重などの変化を計測できる装置を装備した。能力は1200 tで，クッション力は最大300 tである。フロントフェンダ，ドアアウトセクタピラアウト，ローアームなどのモデル金型を使用し，実部品の成形挙動の研究と新規開発材料の実部品成形性評価が可能である。また，NCダイクッション装置が内蔵されており，成形過程でのクッション力制御も可能である（Photo 1）。

〔2〕 大型変形試験装置

自動車部材の衝突吸収エネルギーおよび変形挙動を調査可能な動的荷重50 tの衝撃変形試験装置を装備した。高さ500 mm，幅300 mm × 300 mmまでの部材の圧壊特性と，長さ1200 mm，幅200 mm × 100 mmまでの部材の衝撃曲げ特性を調査することが可能である。速度は，0.1 m/s から14 m/s まで変えることができる。本装置の特徴は，試験過程での速度を一定に保つことができる点であり，ひずみ速度依存性を持つ材料の衝撃特性に及ぼす材料強度，板厚の影響を系統的な調査が可能である。また，高速度ビデオカメラが設置されており，荷重-変位挙動と部材の変形挙動の関連を詳細に調査することができる。さらに本装置には低温環境下でも変形特性が調査できる装置も具備されており，低温環境を考慮した適切なハイテン材料の提案が可能である（Photo 2）。

3. テイラードブランク技術

TWB はプレス成形前に，レーザ，シーム，プラズマなどの溶接方法により接合されたブランク材である。本技術は，開発当初は，使用材料の歩留改善を目的として使用される場合もあったが，少ないプレス金型で，材料を最適に配置した部品の製造が可能となるため，自動車の高性能化，軽量化に欠かせない生産技術となっている（Fig. 1）。TWB の成形性，外観などの観点から，溶接方法としてはレーザ溶接が最適である。健全な溶接部を得るためには溶接素材の突き合わせ端面の精度，レーザ照射位置を0.1 mm の精度で管理する必要がある。Fig. 2 は，板隙間量 W に対して TWB 溶接部の引張強度と破断特性に及ぼす溶接部形状の影響を調査した結果である。 T_{av} は差厚継手の板厚の平均値を示す。図より，隙間の増加とともに溶接部厚さ比は低下し T_{av} および材質によらず溶接部厚さ比が約0.8 以上で良好な品質を有していることが分かる。

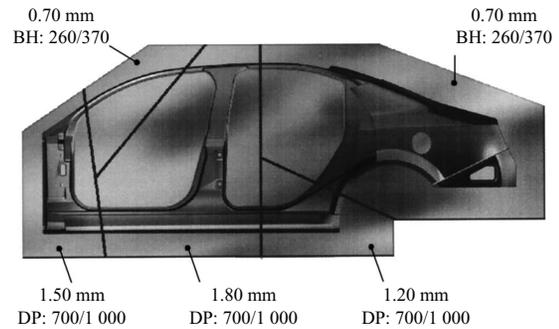


Fig.1 Application of tailored welded blanks to automotive body (ULSAB-AVC project (ultra light steel auto body-advanced vehicle concepts project))

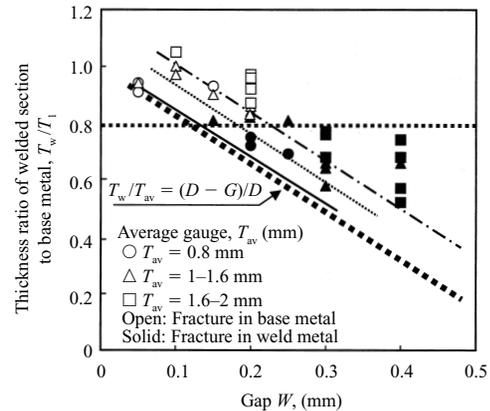
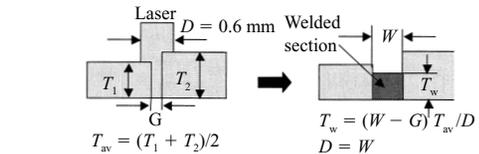


Fig.2 Relationship between configuration and quality of laser welds

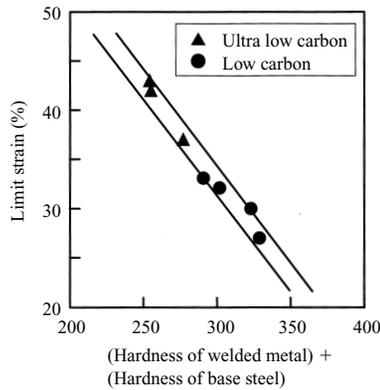


Fig. 3 Relationship between limit strain and hardness of welded metal and base metal

また，その時 TWB 材の隙間 G は 0.1 mm 以内に厳格管理することが重要であることを示している。一方，プレス成形段階では，TWB 材の成形挙動は基本的に溶接線方向に大きなひずみが発生する場合と，溶接線に対して直角方向に大きなひずみが発生する場合に分類できる。溶接線方向に大きなひずみが発生する場合では，溶接部の延性と素材の延性（ひずみ分散能： n 値）が成形性を支配するため溶接部の硬度と素材の硬度の和をパラメータとしてその限界伸びひずみは整理される⁸⁾ [Fig. 3]。また，溶接部の延性は素材の成分（C 当量）により整理できる。溶接線に直角方向に大きなひずみが発生するケースでは，素材の強度と板厚のバランスが成形性を決定する⁹⁾。このような考え方をベースに，有限要素法（FEM）による TWB 材の実部品成形シミュレーションを活用した結合位置の適正化を行っている。以上の TWB 材に関する知見を基礎として当社では 2004 年 8 月に技術提携先のドイツ ThyssenKrupp AG から TWB 装置を導入し，高付加価値 TWB 製造を行うための研究開発を開始する予定である。

TWB で製造された部品の剛性，高速変形強度などの事前予測技術に関しては，後述する CAD-CAE システムが必要不可欠であるが，解析結果の精度検証のためには前述した試験評価装置を駆使している。このような体制により素材配置の最適化技術を確立するとともに，当社製造の TWB の溶接部の成形限界線図（FLD）など，成形シミュレーションに必要な材料データベースも構築している。

4. ハイドロフォーミング技術^{10,11)}

ハイドロフォーミング（HF）技術は，鋼管を金型内に装入し管軸方向に力を付与しながら管内部から液圧をかけ所定の形状に馴染ませて成形する加工技術である。HF によって製造された部品は，板金・溶接法部品と比べて一体構造であるため強度と剛性が高く，溶接フランジレスと合理的断面設計により軽量化が可能であり，部品統合・金型費用削減，溶接工数削減によりコストを削減できるなど

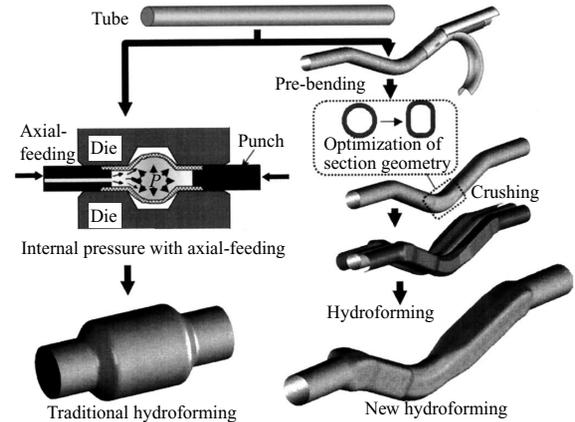


Fig. 4 Manufacturing process of hydroforming tubes

多くの利点がある。

近年，HF 技術の適用では Fig. 4 に示すように，液圧による拡管成形の前段階として管を最終製品形状に類似した形状に曲げ，プレス潰し，縮径などの予成形を行うことが一般的である。したがって，液圧による拡管成形の技術に加えて，予成形をどのように設計するかも重要である。検討する項目としては，(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) 潤滑などがあげられる。

HF に適する鋼管特性の解明と開発も着実に進んでいる。欧米では，薄板を巻いてレーザ溶接した鋼管を用いた HF がさかんに採用され始めているが，国内では電縫鋼管を用いるのが主流である。必要強度に対して伸びの大きな材料が望まれ，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高い r 値が望まれる。また，予成形曲げ部の円周方向偏肉を緩和するためにも高い n 値 r 値が望まれる。当社が開発した低ひずみ造管方法である CBR および HISTORY プロセスは，この点からも HF 用途に適している。特に HISTORY 鋼管は，電縫溶接した管を温間で縮径するものであり，高 n 値，高 r 値の材料特性に加え，シーム部の硬化がないという特徴もあり，高いハイドロフォーム性，曲げ性が確認されている。

本技術が国内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る。最近 HF マシンが種々開発され，サイクルタイムも 20 s を切るレベルが実現しており，今後の展開が期待される。

5. プレス成形における高強度鋼板適用技術¹²⁻¹⁵⁾

プレス成形での主な不具合である破断・しわ・面ひずみの対策として，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剤の開発を続けている。同時に，成形技術面では，対向液圧成形，張力制御成形のような新成

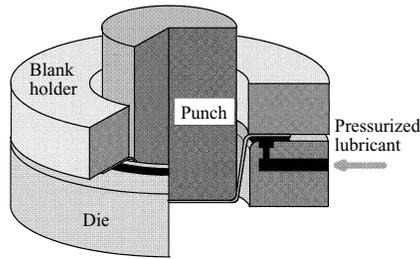


Fig. 5 High pressure liquid lubrication method

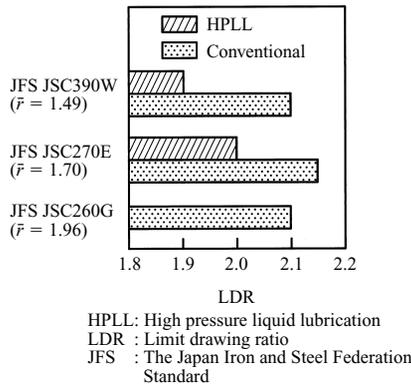


Fig. 6 Effect of high pressure liquid lubrication method on limit drawing ratio in cylindrical deep drawing

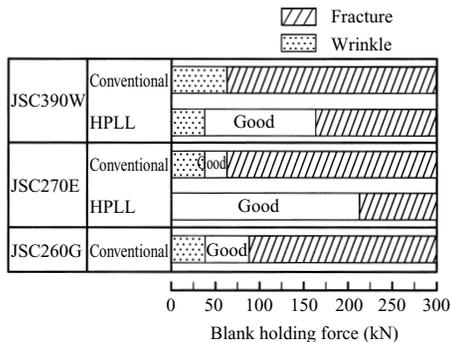


Fig. 7 Effect of high pressure liquid lubrication method on formable range in cylindrical deep drawing

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を進めている。Fig. 5 に，当社が新成形技術として提案した液圧潤滑成形を示す。金型と材料との間に金型から高圧の液を供給しながら成形を行う方法である。Fig. 6 は液圧潤滑成形の効果の一例で，ダイ側のみに適用した場合でも，限界絞り比は材料の r 値で 0.4 相当の効果が得られている。また Fig. 7 に絞り比 2.0 の場合の成形可能範囲を示す。液圧潤滑成形を用いることにより成形可能範囲が著しく拡大し，材料の r 値で 0.4 以上の増大に相当する。以下に，フロントドインナ成形への適用検討事例を示す。Fig. 8 に金型形状と液圧供給部位を示す。図中の A, B 部における液圧潤滑の効果を Table 1 示す。変形様式の異なる両部位で効果が確認された。また，縮みフランジ変形部である B 部では，フランジしわの抑制効果が現れた (Fig. 9)。なお，上記の成形では，液の供給

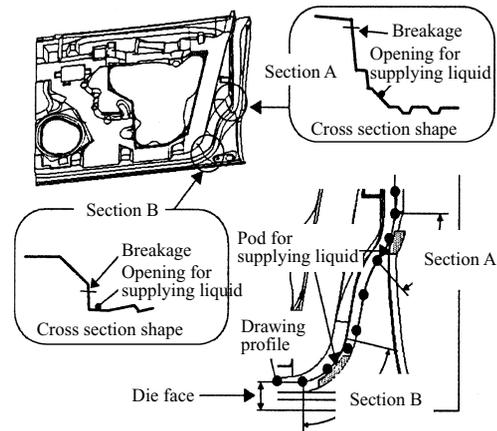


Fig. 8 Application of high pressure liquid lubricant in door inner panel

Table 1 High pressure liquid lubrication method on the limit cushion force in the door inner press forming

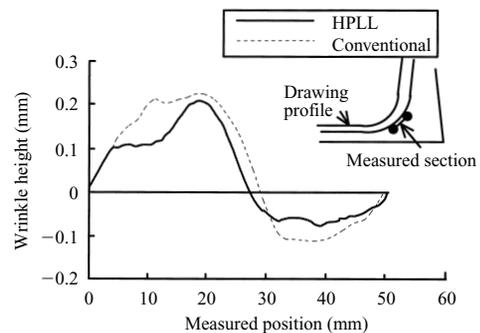
(a) Section A

| | Cushion force ($\times 10$ kN) | | | | | | |
|--------------|---------------------------------|----|----|----|----|----|----|
| | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 | 80 |
| HPLL | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | △ | × |
| Conventional | ○ | × | | | | | |

(b) Section B

| | Cushion force ($\times 10$ kN) | | | | | | |
|--------------|---------------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 90 | 95 | 100 | 105 | 110 | 115 | 120 |
| HPLL | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | × |
| Conventional | ○ | × | | | | | |

HPLL: High pressure liquid lubrication,
 ○ : Good, △ : Necking, × : Fracture



HPLL: High pressure liquid lubrication

Fig. 9 Comparison of the profile of cross section at the wrinkle generated by the high pressure liquid lubricant method and the conventional process

に市販の小型高圧ポンプ（最高液圧：53.9 MPa，吐出量：1.9 l/min）を使用した。また，成形はメカニカルプレス機を使用し，平均的な量産速度である 10 SPM（1 min あたりの加工数）で行った。

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，成形品の寸法精度である。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

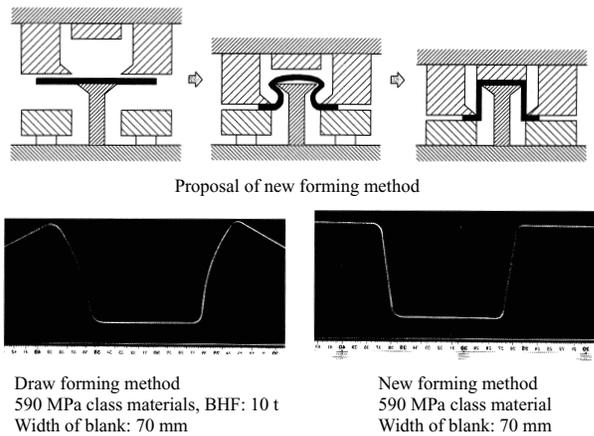


Fig. 10 Proposal of new forming method for improving shape fixability

成形技術からの対策や，数値シミュレーションを利用して金型形状を最適化する方法などが検討されている。金型断面形状を適正化した張力制御成形技術の例（1997年提案）を Fig. 10 に示す。単純形状であれば TS980 MPa 材でも軟鋼と同等の寸法精度が得られることが確認されている。現在複雑形状部品への展開を進めている。

6. CAD-CAE システムの活用技術⁶⁾

コンピュータによるシミュレーション技術は，FEM の高度化とコンピュータの性能向上により，近年飛躍的に発展し，従来難しいとされたプレス成形解析などへの適用が進んでいる。自動車メーカーにおいても，自動車車体の開発過程において，部品の機能やプレス成形性を検討するツールとして多用されるようになった。当社においても，自動車車体の初期開発段階からの自動車メーカーへの協力体制を強化すべく，CAD データの加工，FEM による計算，計算前後の処理を充実させ，自動車メーカーと共有のデータベースが利用できる環境を整備してきた。これにより，車体開発のリードタイム短縮，高強度鋼板の適用拡大などに貢献している。FEM の活用により，プレス成形に関しては割れ，しわの予測はほぼ可能になったと同時に，スプリングバックに関しても材料構成式を含め精度向上が図られた。

また，衝突関係では，高ひずみ速度における応力-ひずみ曲線のデータベース化により精度の高い計算が可能となり，成形時の変形，およびその後の塗装・焼付けによる応力変化を考慮した衝突解析も行うことが可能である。Fig. 11 は，変形後に塗装焼付けを施すと強度が大幅に増加する新開発鋼板と従来鋼板に対し，成形時の変形を考慮した衝突解析を行った事例を示す。

一方，パネル表面のわずかな凹凸問題（面ひずみ），板厚方向の応力をともなうかじり解析などについても検討を進めている。

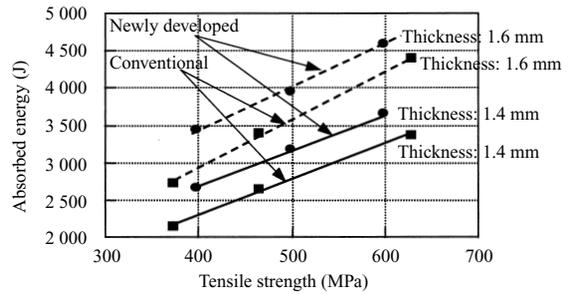


Fig. 11 Improving crashworthiness of hat square column by using new developed material

7. 薄板接合技術^{16,17)}

自動車を軽量化するために，ハイテンを使用するのは強度上昇に見合う板厚減少が期待できるからであるが，それとともない部材剛性は低下し，何らかの手法による剛性の確保が重要な課題となる。連続溶接はこのような剛性低下を補う有効な手法であり，レーザ溶接がその代表と言え，最近では欧州の自動車メーカーを中心に積極的に採用されている。しかし，一般に，レーザ溶接では板間の隙間を 0.1 mm 程度以下に厳格に管理する必要があるため，国内での採用は最近になってからである。また，亜鉛めっき鋼板の重ね溶接においてもレーザ溶接は課題を残している。レーザ溶接では板間の隙間を狭くして溶接するため，ブローホールが発生しやすい。この問題を解決するためレーザ・アークハイブリッド溶接法（laser focussed arc welding method）を開発した。

7.1 レーザ・アークハイブリッド溶接法

レーザ・アークハイブリッド溶接は，YAG レーザとアーク溶接とを複合したもので，レーザ溶接と比べて，重ね溶接における隙間余裕度が大きく，亜鉛めっき鋼板の重ね溶接においてもブローホールの発生が少ない。このため，重ね溶接における隙間の厳密な管理が必要なく実用化が容易である。また，レーザ溶接とほぼ同等の溶接速度が得られ，レーザ溶接の高効率というメリットを享受できる。

Fig. 12 にレーザ・アークハイブリッド溶接の装置構成を示す。レーザには YAG レーザを用い，レーザ照射点の後方にアーク溶接電極を配置し，アークを発生させる。レーザ照射点とアークの狙い位置の間隔は 1-3 mm で管理される。YAG レーザを用いる理由は，YAG レーザのエネルギーがプラズマにほとんど吸収されず鋼板に到達して溶接できるからである。ハイブリッド溶接における溶接ワイヤと鋼板間のアーク電圧の時間変化を Fig. 13 に示す。比較例として，アーク溶接の電圧変化を合わせて示す。ハイブリッド溶接では電圧が 0 から約 20 V の範囲を高い周波数で振動しており，約 10 ms 周期でワイヤから溶滴が短絡移行していることが分かる。このようにワイヤからの

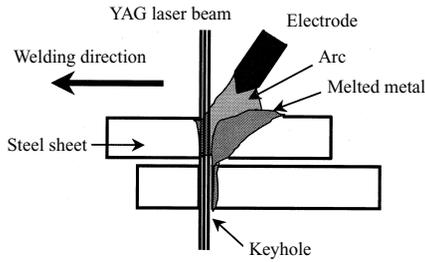


Fig. 12 Configuration of laser beam and arc electrode in laser-arc hybrid welding

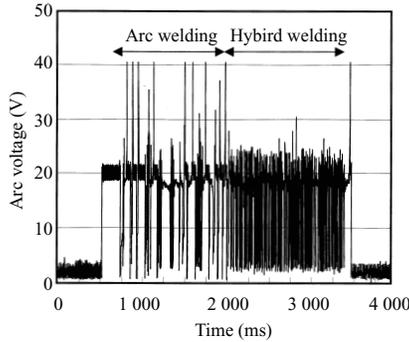
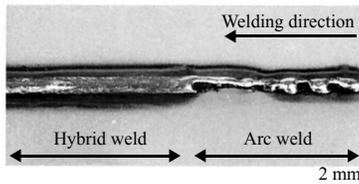


Fig. 13 Time dependence of arc voltage with and without laser radiation



Fillet joint: Upper thickness = 0.8 mm, Lower thickness = 1.2 mm
Welding condition: Laser output = 2 kW, Arc current = 100 A, Speed = 2 m/min
Photo 3 Appearances of hybrid and arc welded bead surface

溶滴移行が極めて短い間隔で起こるため，溶接速度が早い場合でも，均一なビードが形成されることが期待できる。Photo 3は，ハイブリッド溶接とアーク溶接における隅肉溶接ビードの外観を示す。アーク溶接ビードは不連続的であるが，ハイブリッド溶接ビードは均一に形成されている。

7.2 重ね溶接における隙間許容量の拡大

ハイブリッド溶接による重ね溶接における隙間許容量を調べるため，種々の板厚の鋼板を重ねて，上下の鋼板間の隙間を変化させて溶接を行った。結果を Fig. 14 に示す。比較のためレーザー単独溶接の調査結果を合わせて示す。レーザー溶接に比較してハイブリッド溶接の隙間許容量は大きく，板厚と同程度の隙間があっても健全な溶接ビードが形成される。ハイブリッド溶接で，重ね溶接の隙間の許容量がレーザー溶接と比べ大幅に大きいのは，ハイブリッド溶接ではフィラワイヤを供給しているため，隙間を埋めるだけの溶接金属が供給されるからである。

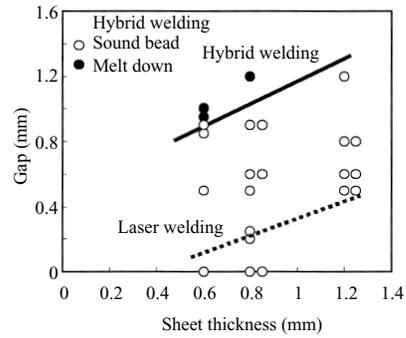


Fig. 14 Gap tolerance of lap joint in hybrid and laser welding

7.3 亜鉛めっき鋼板の溶接性

亜鉛の沸点は約 900 と鉄の融点（約 1500 ）より大幅に低いため，亜鉛めっき鋼板の重ね溶接では亜鉛が蒸発し，亜鉛蒸気が溶融金属内に入ってブローホールを形成したり，溶融金属を吹き飛ばして穴状の欠陥を形成させたりする。Photo 4 に合金化溶融亜鉛めっき鋼板（目付け量：45 g/m²，両面めっき）をハイブリッド溶接により重ね溶接したビード表面の外観写真を示す。ビームが未貫通あるいは部分貫通の溶接条件では，ビード表面にスパッタやピットが多数発生している。ビームが貫通する溶接条件（レーザー出力：3.2, 3.7 kW，アーク電流：100 A，溶接速度：2 m/min）を選択することで，スパッタおよびピットが大幅に抑制された。

今後，本溶接方法の拡大により自動車構造部材のハイテン化と高剛性化が達成できるものと考えられる。

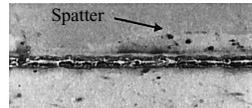
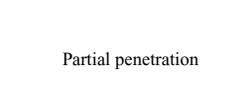
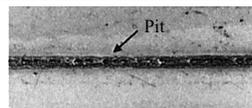
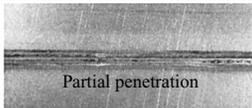
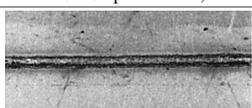
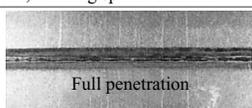
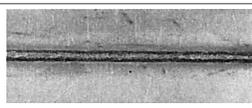
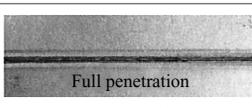
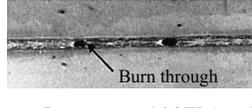
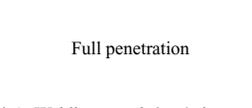
| Surface bead | Back bead |
|--|--|
|  Spatter |  Partial penetration |
| Laser output: 2.5 kW, Arc: 100 A, Welding speed: 2 m/min | |
|  Pit |  Partial penetration |
| Laser output: 2.7 kW, Arc: 100 A, Welding speed: 2 m/min | |
|  Full penetration |  Full penetration |
| Laser output: 3.2 kW, Arc: 100 A, Welding speed: 2 m/min | |
|  Full penetration |  Full penetration |
| Laser output: 3.7 kW, Arc: 100 A, Welding speed: 2 m/min | |
|  Burn through |  Full penetration |
| Laser output: 4.2 kW, Arc: 100 A, Welding speed: 2 m/min | |

Photo 4 Appearances of lap joint of GA steel sheet welded by hybrid welding

8. おわりに

JFE スチールの設立と同時に自動車構造部材の設計に対し，積極的に提案のできる評価設備ならびに予測解析技術の充実を図った。本報告では，軽量化，衝突特性向上と開発期間短縮に貢献する鋼材の加工・利用・評価技術の一端を紹介した。現状の保有技術を有効かつ効果的に活用するとともに，さらに技術を改善することで新たな自動車造りに貢献していきたい。

参考文献

1. 吉武明英，岩瀬耕二．“自動車軽量化プロジェクト（ULSAB, ULSAC, ULSAS）”．Proc. of the 2000 Annual Meeting of JSME/MMD. WS (2)-4, 2000.
2. 滝田道夫，橋本浩二，栗山幸久．“ULSAB プロジェクトの全貌” 9835168．材料フォーラム．JSAE．1998
3. Koehr, R. “ULSAB project overview and results.” 9835177. 材料フォーラム．JSAE. 1998.
4. Denner, S. G.; Liu, S.-D. et al. “Forming simulation of selected ULSAB components.” 9835186. 材料フォーラム．JSAE. 1998.
5. Drewes, E. et al. “Materials for ULSAB and a review of high strength steel application.” 9835195．材料フォーラム．JSAE. 1998.
6. Schneider, C. et al. “Tailored blanks for ULSAB and a review of tailored blanks application.” 9835203．材料フォーラム．JSAE. 1998.
7. ULSAB Final Report. Porsche Engineering Service, Inc. 1998.
8. Yamasaki, Y. et al. “Effect of chemical composition, mechanical and thickness of base steel on formability of laser-welded blanks.” Proc. of the IDDRG Cong. 1996, p. 501.
9. 小野守章，吉武明英，大村雅紀．テーラードブランク製造における高強度薄鋼板のレーザー溶接性．溶接学会論文集．vol. 21, no. 4 2003, p. 560
10. 阿部英夫．日本におけるチューブハイドロフォーミング技術の現状

- と課題．塑性と加工．日本塑性加工学会誌．vol. 45, no. 517, 2004-02
11. Sonobe, O.; Hashimoto, Y.; Iguchi, T.; Abe, H. “Effect of mechanical properties on formability in hydroforming of ERW tubes.” IBEC2003. 20037010. 2003.
 12. 山崎雄司，由田征史．“液圧潤滑円筒深絞り成形におけるわれ及びフランジしわの抑制効果” 第48回塑性加工連合講演会 1997-11 p. 341
 13. 山崎雄司，由田征史．“液圧潤滑円筒深絞り成形における液圧付加位置の影響”．第48回塑性加工連合講演会．1997-11, p. 343
 14. 山崎雄司，由田征史．“液圧潤滑成形法の四角筒深絞り成形への適用” 第49回塑性加工連合講演会．1998-11, p. 347
 15. 内山善裕，佐藤章仁，山崎雄司，由田征史．“液圧潤滑成形法の実部品成形評価”．第49回塑性加工連合講演会．1998-11, p. 349
 16. 平本治郎，金子真次郎，比良隆明，坂田敬，阿部英夫．“歪み時効硬化を活用した新高強熱延鋼板の開発”．自動車技術会講演論文 20015138．2001
 17. 小野守章，真保幸雄，吉武明英，大村雅紀．レーザークハイクブリッド溶接法による薄鋼板重ね溶接特性．溶接学会論文集．vol. 21 no. 4, 2003, p. 515



吉武 明英



小野 守章