③ 自動車用スポット溶接技術の動向と課題*

樺 沢 真 事**

Present and Future of Spot Welding for Automobile*

by Makoto KABASAWA**

キーワード：自動車，スポット溶接，機械締結

1. 結 言

近年，自動車車体には非鉄材料適用の増大，あるいは工程合理化技術の発達により，従来からのスポット溶接，アーク溶接に加えレーザー溶接，接着，機械締結など多様な接合技術が適用されはじめている。この中において，スポット溶接法はボディー組立てにおいて工作容易性，コストから今後とも主要な接合法であると予測される。また代替接合法も，スポット溶接との得失比較が必要になる。そこで，本報では自動車におけるスポット溶接技術の現状を概括し，今後の動向を検討する。併せて，スポット溶接に容易に置換し得るとされる機械締結法についても簡単に言及する。

2. スポット溶接技術の発達における現在の状況

過去 50 年間のスポット溶接技術の発達を見ると，二つの時期に大別される。前期は溶接機器発達の時代である。装置の基本構造・方式が完成され，制御部品が真空管から IC，マイクロプロセッサへと変化し，通電制御素子がイグナイトロンからサイリスタへと変化してきた。最近の特筆される進歩はインバータ式溶接機の登場であろう。ガン重量の軽量化のみならず，電流制御の任意性は溶接最適化の潜在的ツールといえる。

一方，後期のスポット溶接の発達は，自動車用材料の発達と共に歩んできたといっても過言ではない。高張力鋼板，亜鉛系表面処理鋼板，有機系表面処理鋼板，樹脂

複合型制振鋼板，アルミ合金板など次々に新しい材料が取り入れられ，これらを契機として材料技術と溶接技術がともに進歩してきた。また溶接性に劣る新たな材料を安定に溶接すべく，モニタリング，適応制御，これらを支える溶接現象シミュレーション技術が発達してきた。

さて，現在の自動車に求められる大きな課題は衝突安全性の充実，CO₂排出低減のための車体軽量化，それらをミニマムコストで実現する設計・生産技術である。溶接方法についても，多くの選択肢の中から全体最適化の中での特長が求められる。すなわち，スポット溶接はどのように使用するべきか，メリットを最大化する手法が問われる。この意味では，スポット溶接技術は新たな第 3 の発達の時期に入りつつある。

3. スポット溶接技術の現状と課題

3.1 スポット溶接の継手強さ

スポット溶接の継手強さは従来より最大の関心事であり，材料条件，溶接条件などとの関係が調べられてきた。最近では継手強さの代表的指標である引張せん断強さの支配因子の役割が明瞭になった。筆者らは母材でブラグ破断する場合を対象として，破断開始点での最大荷重に着目し，そこでの応力分布を単純モデル化した上で，一般式として (1) 式を得た¹⁾。(1) 式は炭素鋼，ステンレス鋼，チタン，アルミ合金でよく実験結果と一致した。ただし，FD は図 1¹⁾に示す破断寸法(mm)である。

$$TSS = 19.5 t \cdot TS (1 + 0.0059 EL) FD \quad (1)$$

TSS：引張せん断強さ (N)

t：板厚 (mm) TS：引張り強さ (N/mm²)

EL：伸び (%) ND：ナゲット径 (mm)

破断寸法は非硬化性材料ではナゲット径にほぼ一致し

*原稿受付 平成 11 年 4 月 5 日

**正 員 日本鋼管㈱ Member, NKK Corporation

図1 引張せん断試験中の試験片の変形と破断寸法 FD¹⁾

図2 引張せん断強さ推定式の実測結果との比較¹⁾

た。一方、HAZで硬化する炭素鋼では破断が硬化部外縁で生じるため、破断開始点は硬化部径を介してナゲット径と対応づけられた。これらを考慮すると、非硬化性材料と炭素鋼の引張せん断強さは(2)、(3)式でそれぞれ表される。図2¹⁾に(3)式の計算結果と実験結果の比較を示すが、広い範囲で良い対応が見られる。

$$TSS=19.5 t \cdot TS (1+0.0059 EL) ND \quad (2)$$

$$TSS=2.05 t \cdot TS (1+0.0059 EL) (ND+2.09) \quad (3)$$

3.2 継手強さ試験方法

引張せん断と十字引張りが代表的な継手強さ試験方法である。しかし、負荷形式が極端に単純であることから近年、別の試験方法が提案されている。これらは、スポット溶接のみならず、機械締結、接着の継手にも適用されている。

ひとつは接合面に対し負荷方向を任意に変えられる、ダブルカップ (DC) 試験である^{2,3)}。これはカップ状に成形した試験材を2個用意し、底部同士を溶接し、側部を治具で固定して負荷を加える方法である。試験片形状を図3²⁾に、結果の例を図4³⁾に示す。負荷方向によって疲労強度が大きく変化する。ただし、本結果は後述する機械締結での例である。本試験法では、接合部となるカップ底部へのひずみ導入が避けられず、またその量が材料、成形条件により変化することが、一般的試験方法として問題であろう。

図3 ダブルカップ (DC) 試験片の形状と寸法例²⁾

図4 DC試験片によるクリンチ継手疲労強度の負荷方向依存性³⁾

もうひとつの新しい継手強さ試験方法はH形試験である。後掲の図11中に示すように「コ」の字の曲げ成形材の両側面に平板を接合した試験片を使用するもので、多点接合を前提とする。H形の上下を治具で固定して負荷を加える。基本的にせん断負荷型の試験であるが、成形材を2個対向させることで、垂直負荷試験も可能になる。本試験法は平板単点試験片の接合部付近の剛性が、実構造体に比べ低すぎるとの点から考案された。しかし、治具取付け孔の精度上、並列配置された結合点に均等負荷を与えることが困難なこと、結合点上下で部材配置 (剛性) が非対称なことなどから、とくに小荷重で評価する疲労試験には適さないとの指摘もある⁴⁾。

3.3 スポット溶接構造の機械的性能

(1) 溶接継手の衝撃強度

自動車車体の衝突性能に関して、構造モデルを用いた実験、数値解析が多く実施されている。数値解析では材料に速度依存性等、詳細な条件が考慮されているが、スポット溶接は通常、節点の剛体結合として単純化される⁵⁾。鋼板構造の実験においては、スポット溶接部が破断して全体性能に影響したとの報告は少ない。しかし、B. B. Filetaらのアルミの片ハット部材構造を使った実験では、構造形状・寸法によっては、スポット溶接部の

破断が生じて座屈形態が変化するとされる⁶⁾。このケースでは結果として全体の吸収エネルギーに影響しなかったものの、一般に継手強さが低い場合の構造強度には懸念が持たれている。このため、スポット溶接部の衝撃強度を改めて明確にしようとの研究もされている。

H. Zhang らは振り子式試験機を用い、鋼板溶接部の引張せん断吸収エネルギーを調べた。ただし、ばらつきを小さくするため二重振り子式の試験機を新たに開発して使用した⁷⁾。この結果、図5⁷⁾に示すように破断形態により吸収エネルギーが大きく変化すること、衝撃と静的の結果により対応があることが見出された。また、リング状ナゲットにおいても十分な吸収エネルギーの得られることが確認された。

一方、Y. J. Chao は計装化シャルピー試験機により、アルミ溶接部の引張せん断吸収エネルギーを調べた⁸⁾。面状破断の場合であるが、時速 18.2 km での吸収エネルギーは静的性能の約 7 倍となる、大きな速度依存性を見出した。

上記例のごとく、スポット溶接部の衝撃性能については、まだ不明な点が多い。したがって、鋼板とアルミの挙動の違いを含め、衝撃性能は今後明確にすべき課題であろう。

(2) 構造剛性

構造設計においては、構造剛性は最も基本的な性能である。スポット溶接のような部分接合では結合剛性が低く、全体剛性への影響も大きい。このため、スポット溶接構造の剛性を正確に評価しようとの研究がこれまでも行われてきた。しかし、厳しい最適化が求められる場合、FEM では作業負荷が大きいことから、より一般化した形のアプローチが行われている。

藤田らはスポット単点溶接部のねじりに対し理論解を導出した⁹⁾。このような要素毎の理論解の集積が、将来構造解析の簡単化に役立つであろう。一方、岡部らは T 字、L 字部材の構造モデルにおいて、板厚、部材寸法

図5 スポット溶接継手の静的および衝撃吸収エネルギー⁷⁾

を変化させたときの構造剛性推定に、ニューラルネットの適用できることを示した¹⁰⁾。教示条件内での内挿推定には有力なツールといえる。

3.4 スポット溶接品質の安定化技術

構造最適化に対応して、溶接品質により高い信頼性が求められる。H. Powell は目的とする溶接の内容を入力すると、最適な溶接条件を表示する抵抗溶接の支援システムを構築した¹¹⁾。溶接強度期待値、トラブルシューティングなども備えている。一方、L. R. Lehman らは溶接条件のうち 7 因子を取り上げ、その変動による溶接品質への影響を求め、生産安定性から重視すべき因子を議論している¹²⁾。因子間の従属関係、影響の線形仮定など問題点が多いが、生産管理技術としての技術確立が期待される。

これら生産前技術に対し、溶接後の品質モニタ、溶接時の制御技術にも多くの研究が実施されている。溶接後の品質モニタには、超音波法、磁気法、熱伝達法などが報告されているが、信頼性の点でまだ解決すべき問題が多い。

リアルタイム制御技術では、佐橋らは溶接部の膨張速度を散り発生の予測指標とする考え方にに基づき、散りなしで良好な溶接を得る適応制御タイマーを開発した¹³⁾。J. Hess らも溶接部の膨張に着目し、計測手段として光センサーを採用した¹⁴⁾。通電アームのたわみ、すなわち電極加圧力として検出した結果を図6¹⁴⁾に示すが、通電中にも明瞭なデータが得られることがメリットである。干渉因子が多く現時点では実用には問題が多い。しかし、変位を基本とするモニター法は、実現象との関連が明瞭になれば今後、より発展する可能性がある。

図6 スポット溶接中の電極加圧力変化¹⁴⁾

図7 数値解析応用型スポット溶接新制御法の効果¹⁵⁾ 図8 組立て精度に関わる継手形式と継手形式関数 $r^p(i,j)$ ¹⁷⁾

一方、松山らは電流と動抵抗から溶接部の温度分布を数値解析によりリアルタイムで推定し、目標のナゲット形成開始時間とナゲット径を、2段階で適応制御する方式を確立した¹⁵⁾。図7は電極損耗により正常なナゲットの形成が困難な状態で、本制御を適用した例である¹⁵⁾。スポット溶接のような短時間現象に対し、数値解析を取り込むことは画期的なことであり、演算法とハードの開発により実現された。現在、実用に入った段階であり今後の普及が期待される。

3.5 溶接構造の寸法精度管理技術

溶接構造においては機械的性能のみならず、寸法精度も重要な品質である。実溶接では、部材を治具で寸法固定しても、スプリングバック等により期待値からはずれ。岡崎は固定時の部材の反力を治具内で計測し、適正な修正見込み量を加えることで、寸法精度の安定化を図った¹⁶⁾。

一方、構造設計段階で生産時の潜在的寸法誤差を算定する取組みも見られる。D. J. Ceglarek らは、任意の個別部品要素間の寸法誤差に対し不具合度を定量化した¹⁷⁾。ここでは継手の干渉、アセンブリー工程の階層構造に着目し、いくつかの評価値を導入し、最終的には生産設計評価指標値を定義し、異なる設計の精度比較を可能とした。例えば、継手形式として図8¹⁷⁾に示す重ね継手と対向継手を典型とし、中間段階の継手を重ね面と荷重方向との角度 α により継手形式関数 $r^p = \sin \alpha$ として数値化した。本評価法によれば、継手形式、サブアセンブリー手順により、寸法誤差の少ない構造が設計段階で評価できる。定性的には、継手干渉の生じない重ね継手をより多く取込むことで寸法誤差が小となる考え方であ

図9 代表的な機械締結法

図10 リベット継手の荷重変位曲線の例

図11 スポット継手と機械締結継手の疲労強度の比較¹⁸⁾

る。

3.6 機械締結法

近年、クリンチ、リベットが注目されている。点結合であり、かつ両側からの加圧接合であるため、スポット溶接からの置換が容易な接合法とされる。従来の機械締結法と比べ、切り込みが被接合材全部を貫通しない工具の工夫と、リベットの場合には下孔加工不要のセルフピアッシングタイプとしたことで、高い生産性と高い継手強度を得たとされる。クリンチでは Tog-Lock 法、Tox 法などが、リベットでは Henlob 法、Ariel 法などの適用事例が報告されている^{18,19)}。原理の例を図9に示す。これら機械締結法は、被接合材の適用自由度の高いことが特長である。例えばアルミ同士、アルミと鋼板、樹脂部品と鋼板、塗装鋼板なども容易に接合できる。

静的強度は同一接合部寸法のスポット溶接に比べ、同等ないしは小である。とくに図 10 に例示するように結合剛性が低い。また、継手の破壊は材料の破壊以外に、周囲の面外変形により結合部が抜けることでも生ずる。

一方、リベット継手はスポット溶接継手よりも疲労性能に優れる。この特長を積極的に取上げてリベットが使用されるケースも見られる。疲労試験結果の例を図 11¹⁸⁾に示す。ここでは単点試験片よりも面外曲げが少なく、より実構造に近いとの点で H 形試験が適用されている。

機械締結法は板厚毎に適切な寸法の工具を選択する必要がある。リベットではそれ自体のコストも必要である。このため、すべてにおいてスポット溶接から代替可能ではないが、特定の部品においてはそのメリットを活かした適用が今後増大するものと考えられる。

4. 結 言

スポット溶接は自動車組立てにおける主要な接合方法である。しかしながら、今後は他の接合法との比較において、より最適な使い方が問題とされる。生産前段階においては、構造強度との関連におけるスポット溶接の役割の明確化が必要であり、要素から全体にわたるシミュレーションが重要な技術になるであろう。また、生産段階においては、継手品質のモニタおよび制御に一層の高信頼性が求められ、ここでは実用ツールの開発が加速されるものと考えられる。

なお、以上では紙面の都合上、とくに強度、構造に関連する研究状況を紹介し、表面処理鋼板、アルミ合金の溶接性については割愛した。これらではとくに電極寿命が大きな問題であるが、膨大な研究が行われてきた表面処理鋼板の知見が、今後アルミの溶接の研究に活かされるべきであろう。

参 考 文 献

- 1) 樺沢ら：薄鋼板スポット溶接継手の引張せん断強さの推定，本会論文集，14-4 (1996)，754-761。
- 2) D. Radaj et al.: Spot-Welded Double-Cup Specimen, Materialprüfung, 37-1-2 (1995), 10-13.
- 3) O. Hahn et al.: Simulating of the Mechanical Properties of Point Joint Elements, IBEC'97-Advanced Technology & Process, (1997), 116-122.
- 4) A. R. Carr et al.: An Assessment of the "H" Test Specimen as a Possible Screening Geometry for Different Joining Methods, Such as Adhesive Bonding, IBEC'97-Advanced Technology & Process, (1997), 86-93.
- 5) 佐藤ら：衝突時の安全性能に関するボディー構造研究第 3 報，自動車技術会学術講演会前刷集 965, (1996), 1-4.
- 6) B. B. Fileta et al.: Crush Testing of Spotwelded and Weldbonded Aluminum Closed Hat Section Columns, IBEC'96-Body Design & Engineering, (1996), 77-90.
- 7) H. Zhang et al.: Impact Strength Measurement of Spot Welds, AWS Sheet Metal Welding Conference VIII, 1-3 (1998).
- 8) Y. J. Chao et al.: Impact Strength of Resistance Spot Welded Joint, AWS Sheet Metal Welding Conference VIII, (1998).
- 9) 藤田ら：スポット溶接またはウエルドボンディング接合した円板のねじり応力解析，自動車技術会学術講演会前刷集 973, (1997), 141-144.
- 10) 岡部ら：ニューラルネットワークによる車体構造の結合剛性同定，自動車技術会学術講演会前刷集 965, (1996), 149-152.
- 11) H. Powell: Resistance Welding Toolkit, Covering Design and Manufacturing Considerations for Resistance Spot Welding, IBEC'97-Advanced Technology & Processes, (1997), 127-132.
- 12) L. R. Lehman et al.: A Design-of-Experiments Evaluation of Resistance Spot Welding Manufacturability Part 3, IBEC'96-Advanced Technology & Process, (1996), 35-44.
- 13) 佐橋ら：NPT タイマーの制御方法と原理，溶接学会軽構造接合加工研究委員会資料，(1997)，MP-208-97.
- 14) J. Hess et al.: Visualization of the Resistance Spot Welding Process in the Production Line, Weld. J., 77-12 (1998), 495s-502s.
- 15) 龍堂ら：抵抗スポット溶接のナゲット安定確保，本会講概第 57 集，(1995)，222-223.
- 16) 岡崎：自動車構造体における溶接組立て精度自動コントロールシステム，溶接学会軽構造接合加工研究委員会資料，(1996)，MP-187-96.
- 17) D. J. Ceglarek et al.: Design Evaluation of Part-to-Part Joints for Dimensional Integrity of Body-in-White, IBEC'95-Body Design & Engineering, (1995), 11-19.
- 18) N. Bonde et al.: Self-Piercing Riveting in High-Strength Steel - A Way to Increase Fatigue Life, IBEC'96-Advanced Technology & Process, (1996), 16-20.
- 19) D. Zeitzmann: Use of Mechanical Joining Techniques within Mercedes Benz, IBEC'97-Advanced Technology & Process, (1997), 78-81.