

ものづくりを支える最新の溶接材料と技術

(その2 自動車編 前編)

State-of-the Art Welding Consumables and Developments in Contribution to Steel Fabrication (Part 2, First Part)

野瀬哲郎*¹、宮崎康信*¹、崎山達也*¹、村山 元*¹、古迫誠司*¹、
内藤恭章*¹、渡辺史徳*¹、川崎 薫*²、佐賀 誠*²

1 はじめに

自動車は、乗員用のシート、タイヤ、燃料タンクなど大物部品から、ボルトやナットまで小物部品を含め、約30,000点の部品で構成されている¹⁾。約300～350点の薄板プレス品からなるボディが約3,500～5,000点の抵抗スポット溶接で組み立てられている他、これら部品には多種類の溶接・接合技術が使われている。2008年9月のリーマンショックを契機とした金融危機と世界同時不況、2011年3月11日の東日本大震災と現在も続いている超円高、2009年に日本の自動車生産台数を上回った中国の台頭など、自動車を巡る外的環境の変化は著しい。こうした外的環境変化と相まって地球環境保護の観点から、地球温暖化の原因とされるCO₂排出量抑制のために、自動車の燃費改善や化石燃料依存度低減に向けた取り組みとして、HV車やEV車の生産が増加しつつあり、部品メーカーや素材メーカーを巻き込んで産業構造が変化しつつある。しかしこうした大きな時代変化の中にあっても、要素技術としての溶接・接合技術は、ゆっくりと進化しながらも重要性を保ち続けていくと考えられる。そこで、自動車に使われている溶接・接合技術について、ここ10年間の文献を中心に紹介しつつ、現在の姿を提示することを試みた。

なお、本記事はふえらむVol.17No.1(1月号)に掲載されたTechnoscope連携・解説記事「ものづくりを支える最新の溶接材料と技術(その1 中厚板編)」の続編であり、中厚板の鋼板を溶接する材料と加工法の最新の技術動向については同号をご覧ください。

2 自動車用鋼板とアルミニウム合金板の動向

2.1 自動車用鋼板の最新動向

自動車業界においては、燃費向上による排出ガス削減を通じた地球環境保護対策に加え、乗員及び歩行者保護に伴う衝突安全性基準の厳格化に伴い、より一層の車体軽量化による燃費向上と、衝突時のエネルギー吸収特性向上を両立させるニーズが益々高まっている。こうしたニーズに応えるためには、車体に使用される鉄鋼材料の強度をより一層高める必要がある。これまでに開発されてきた高強度鋼板(ハイテン)とその適用部品を図1(ボディ部品)及び図2(シャシー部品)に示す。多くの部品に対してハイテンが適用・実用化されている。一般的には鋼板強度の増加に伴いプレス成形性が低下するが、鋼成分と組織制御による最適化により、高い成形性を兼ね備えた鋼板として、DP鋼やTRIP鋼が開発された。合わせてFEM解析による最適形状を自動車会社へ提案し、実用化されてきた。

これまでは成形性の指標として、引張試験で求められる伸びが使用されてきたが、実部品におけるプレス成形時の変形挙動を詳細に調べていくと、伸びだけではなく、局部変形能として穴拡張性(λ)²⁾も重要な特性であることがわかってきた。そのため、特に自動車用鋼板に対する最近の必要特性として、強度と λ のバランス向上に着目した組織制御が益々重要となっている。図3及び4には、これまでに開発・実用化された冷延及び熱延ハイテンにおける各鋼板強度における伸び- λ バランスを示す。特にミクロ組織の微細均一化により、強度-延性- λ バランスの優れた鋼板の提供が可能となる。

*1 新日本製鐵(株)技術開発本部 鉄鋼研究所 接合研究センター

*2 新日本製鐵(株)技術開発本部 鉄鋼研究所 薄板材料研究部

さらに欧州を中心に実用化されているホットスタンプ材³⁾もその適用が検討されている。この技術は鋼板を加熱し、プレス成形と同時に焼入れを行って1470MPa程度の強度を得ることに特徴がある。ただし、生産性に課題があることに加え、適用部品拡大に対しては溶接性、靱性及び水素脆化に対する配慮が必要である。

2.2 自動車用アルミニウム合金の動向

Alの比重はFeの1/3であることから、アルミニウム合金は高強度鋼板、マグネシウム合金、樹脂と並び、有力な自動車車体の軽量化素材となっている。アルミニウム合金は、従来よりエンジン部品等にはダイキャストや鋳造品として多用されてきたが、近年はボディパネルへの適用が着実に進展し

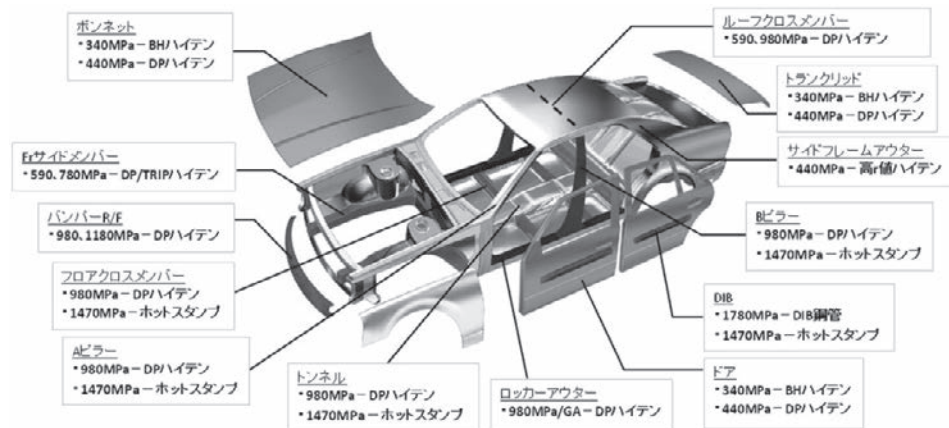


図1 ボディ部品への適用例

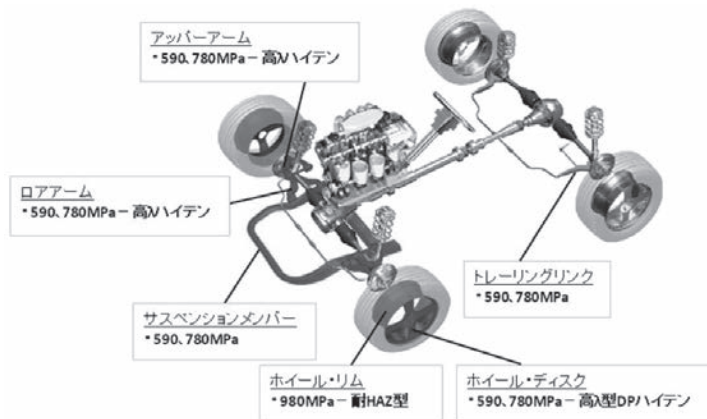


図2 シャシー部品への適用例

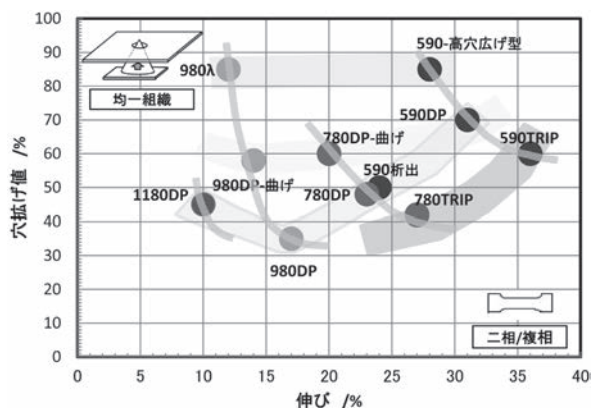


図3 冷延鋼板の強度－延性－穴拡大性バランス

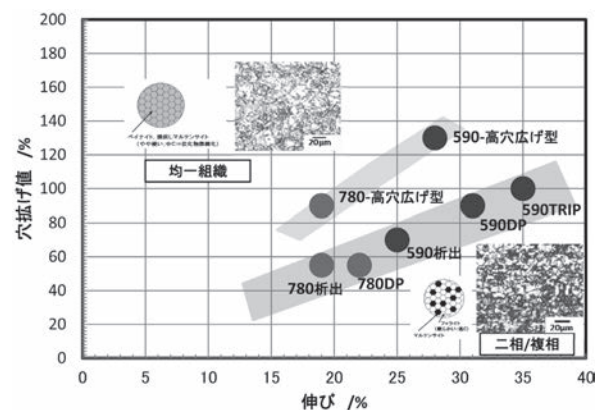


図4 熱延鋼板の強度－延性－穴拡大性バランス

てきており、今後もその傾向は続くものと予想される⁴⁾。

ボディパネル用アルミニウム合金板は、強度、加工性、接合性、耐食性等の諸特性を満足する必要がある、現在は5000系 (Al-Mg系) 合金と6000系 (Al-Mg-Si系) 合金の二種類が主に使用されており、日本国内ならびに欧米ともに6000系合金が主流である。これは6000系合金が自動車ボディの製造工程で施される塗装焼付け処理において高強度化が図れるという特長を有しているために5000系合金に比べて薄肉化が可能であること、また5000系合金ではプレス成形時にストレッチャー・ストreinマークが発生する場合があるが、6000系合金では発生せず、アウターパネル用素材としての優れた適性を有しているためである。一方、複雑な形状が多いインナーパネルには成形性に優る5000系合金の方が適しているものの、リサイクル性の観点からインナーパネルにも6000系合金が多用されている。

アルミニウム合金は、材料特性ならびに材料コストの点で鋼板に対して劣位にあり、適用部品や適用車種の拡大を図っていくためには、材料特性の向上に加えて、成形方法や接合方法等の利用技術を含めた総合的なソリューション開発が重要である。

取り組み例としては、5000系合金の優れた高温変形能を活用した高温高速ブロー成形技術が挙げられ、規格成分範囲内で最適化された5182合金という安価な素材を用い、かつ従来の超塑性成形に比べて高い生産性で複雑形状部品の製造を実現している⁵⁾。

また、温間異周速圧延技術を用いた集合組織制御によって、通常圧延材と比較してランクフォード値の大幅な向上が確認されている⁶⁾。

さらに近年では鋳造段階で多層の鋳塊を製造するクラッド鋳造法が開発され、単一板では両立が困難な複数の性能付与が可能となり、欧州車に採用されている⁷⁾。

将来は高強度鋼板を多用した鋼板製の車体をベースに、アルミニウム合金をはじめとする軽量材料を適材適所に用いる車体のマルチマテリアル化が一層進展するものと考えられ、鋼板／アルミニウム合金板等の異種材料の接合技術の開発もさらに重要になると予想される。

3 自動車に使われている接合技術の動向

自動車ボディは、ベースとなるアンダーボディにサイドメンバーを組み合わせた骨格に、ドア、フードなどの外板蓋物部品をボルトで締結し、塗装前のホワイトボディが作られる。ボディの組み付けには、抵抗スポット溶接、レーザ溶接、FSWが、ユニット部品の組み立てには、アーク溶接、抵抗

シーム溶接、電子ビーム溶接などが使われている。アルミニウム車体や一部にアルミニウム合金を用いるハイブリッド構造では、上記の他、機械的接合やレーザ・アークハイブリッド溶接が適用されている^{8,9)}。

以下、最近の溶接・接合技術について、本号にて前編としてスポット溶接技術の動向を、また、次号にて後編として、アーク溶接技術、接着技術などの各技術の動向について紹介する。なお、レーザ溶接、テラードブランクのアーク溶接、FSW及びFSSW、機械的接合については、ふえらむ入門講座「鋼を接合する」(Vol.16No.5～Vol.17No.1) シリーズを参照頂きたい。

4 抵抗スポット溶接

4.1 自動車分野における抵抗スポット溶接の課題

スポット溶接は被接合材を挟み加圧・通電するという単純なプロセスであるため、溶接技能者によるばらつきがなく大量生産に適しており、また他の接合方法に比べ安価であるため、車体溶接技術として広く用いられている。

しかし、高強度鋼板化に伴う剥離方向の継手強度の低下、めっき鋼板やアルミニウム合金板での電極寿命(連続打点性)、鋼-アルミニウム合金の接合技術、溶接部品質管理方法などが課題として挙げられる。

高強度鋼板における継手強度は図5に示すように、鋼板強度の増加に対し、TSS (Tensile shear strength: 引張せん断強度) は増加するが、CTS (Cross tension strength: 十字引張強度) は鋼板強度に対し比例関係を示さず、鋼板強度が高くなるとむしろ低下する傾向が報告されている¹⁰⁾。

また、高強度鋼板のプレス成形品を重ね合わせた際には隙間が生じやすい。この隙間は溶接時に加圧しても被接合材の

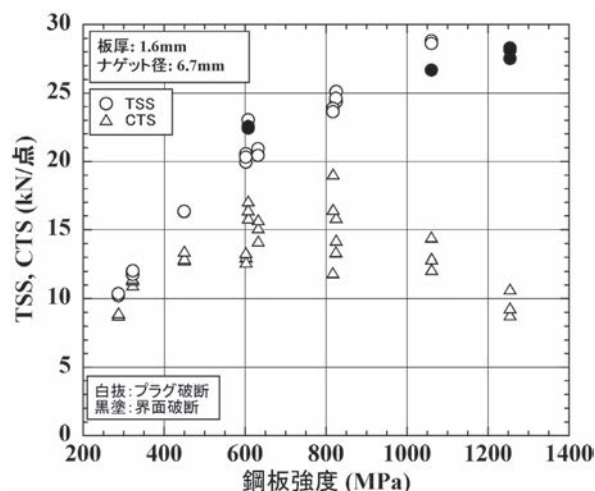


図5 CTS、TSSに及ぼす母材強度

面が十分に重ね合わせられず、通電時の電流経路が集中しやすくなり散り発生につながる。大きく飛散した散りが車体や部材に付着すると外観等に影響を与えるため散り発生少ない方が望ましい。このため軟鋼板に比べ高強度鋼板では高加圧力が用いられる。

めっき鋼板やアルミニウム合金板において一組の電極で繰り返し溶接を行うと、電極とめっき金属、電極とアルミニウムにおいて電極先端での合金層の形成と、剥離・脱落が生じる（図6、図7）¹¹⁾。

この合金層形成と剥離・脱落が繰り返されると電極先端径が拡大するため、溶接部に必要な強度を得る最小ナゲット径が形成されなくなる。このような状態に至ることを電極寿命（連続打点性）という（図8）¹²⁾。

鋼とアルミニウム合金を直接溶接すると、脆弱な界面反応層（Fe-Al 系金属間化合物）の形成により、継手強度が劣化することが知られており、改善方法が提案されている¹³⁾。

スポット溶接は他の溶融溶接などと異なり、溶融凝固が被接材内部で進行するためナゲット形成状況の外部からの良否判定が難しく、現場管理として一般的には破壊試験が行われている。この破壊試験は製品ロスや作業者負担につながるため、非破壊試験方法が切望されるとともに、スポット溶接シミュレーション技術を活用したフィードバック制御技術の発展が期待されている。

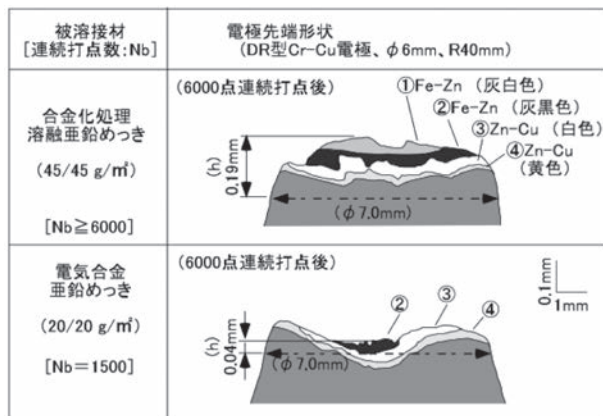


図6 電極先端の損耗状況

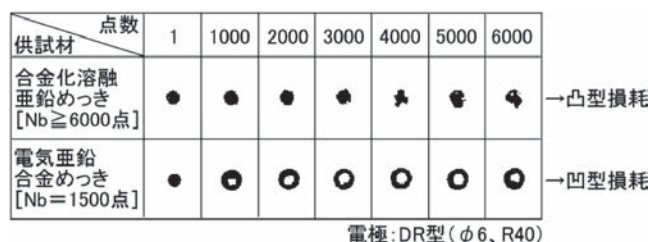


図7 連続打点数と電極先端径の変化

4.2 抵抗スポット溶接機の動向

近年、スポット溶接機においては、溶接シーケンスの多様化などからインバータ式電源、電動サーボ駆動型ガンの普及が広がっている。

抵抗溶接機用溶接電源としては単相交流式電源が多く用いられている。これはトランスそのものが安価であるため、溶接機が低価格となり、溶接ラインでの投資コストが抑えられる。しかし、ロボットを用いた溶接方法が広く普及しており、ロボットに搭載可能な体積が小型で軽量の溶接ガンが要求されている。直流インバータ式電源はトランス小型・軽量化が可能であるとともに、電源とトランス付溶接ガンをつなぐ一次ケーブルを細くできるためロボット溶接工程へ適用しやすい点、また実効溶接電流が同じであっても、最大ピーク電流が低く抑えられるため散りも発生しにくい点、さらには細かな溶接電流パターンが得やすい点などもあり広く普及しているようである。

スポット溶接機の加圧機構としては、空圧式ガンが多用されているが、サーボモータをアクチュエータとして利用するサーボガン方式の利用が拡大している。ロボットとの組み合わせではロボット移動時間中にガン開閉による電極間隔の短縮ができ、タクトタイムの短縮につながる。また電極加圧速度をコントロールすることが容易で、低速度で電極を板に接触させることで加圧音の減少が可能であり作業環境の改善につながる。さらにはスポット溶接用多関節ロボットの一軸としてサーボ式ガンと一体化で溶接ロボットとしての軽量化も可能となる¹⁴⁾ など種々のメリットが得られる。

熱影響や溶接ひずみを回避するため短時間通電を要する溶接方法に対してはパルス電流方式が用いられるが、プロジェクト溶接が代表的である。電界コンデンサに蓄えた電荷を溶接トランスを介して瞬時に放電し、短時間溶接を行うコンデンサ方式がある。通電開始をサイリスタで制御するサイ

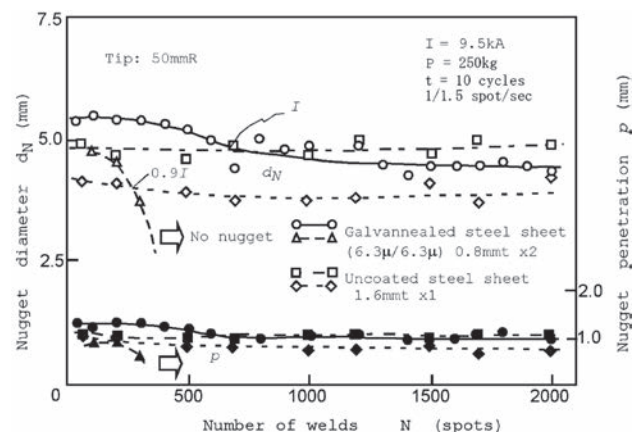


図8 スポット溶接における連続打点性評価例¹²⁾

リスタ制御コンデンサ式が一般的であるが、トランジスタを利用して通電のオン・オフ時間を高速に制御して一定の溶接電流で溶接できるインバータ制御コンデンサ式を用いたものが商品化された。サイリスタ制御では通電時間や電流波形が回路定数で決まるのに対し、インバータ制御では通電時間と通電パターンの制御が可能であり、ナット等のソリッドプロジェクション溶接で溶接部外観も美しく安定な破断強度が得られることが報告されている¹⁵⁾。

4.3 電極寿命 (連続打点性) 改善技術

4.3.1 新しい電極

通常、スポット溶接の電極にはCr-Cu合金等が使用されるが、異種材をインサートした複合型電極による電極寿命の改善技術が古くから検討されている (タングステン等)。電極寿命に対して凸型の電極損耗形態が有利であることに着目したもので、電極本体 (外周部) よりも芯材 (中心部) の方が高温硬さの高い材料を使用して、溶接中つねに凸型損耗を促進・維持することが期待される (図9、10)¹⁶⁾。

タングステンと溶融した銅の凝固時に一体化したものを加

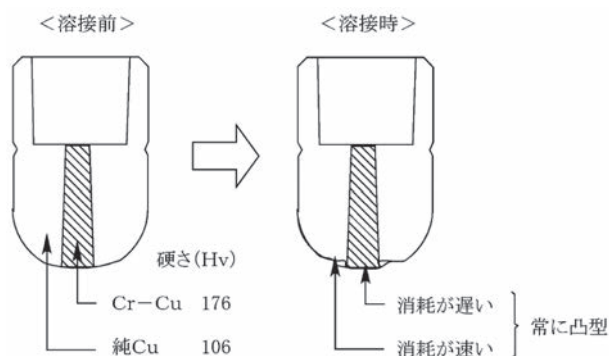


図9 複合型電極の例¹⁶⁾

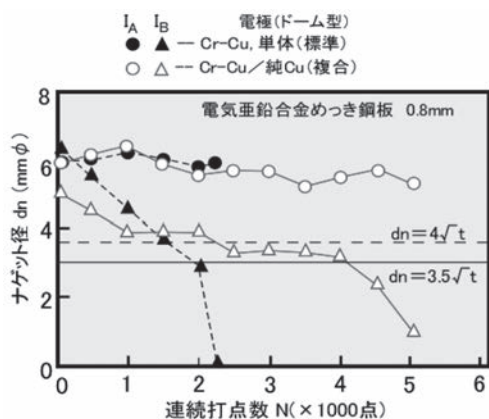


図10 複合型電極による連続打点性の改善例¹⁶⁾

工して電極¹⁷⁾としたものを用いてZn-Al-Mgめっき鋼板での電極寿命が検討されている。電極先端のタングステンとめっき金属の合金層が形成されないことから従来電極に比べ10倍以上もの連続打点性を得たと報告されている¹⁸⁾。

アルミニウム合金板の電極寿命に対しては、Cu-Ag-O系合金電極による連続打点性も検討されている。導電率が97%IACSと純銅並に高く、電極先端部の温度上昇が抑制され、電極寿命がCu-Cr合金の3～10倍に向上したと報告されている¹⁹⁾。

4.3.2 電極ドレッシング技術

めっき鋼板やアルミニウム合金板の連続打点時にみられる電極損耗が進むと所定のナゲット径寸法を下回るため、必要な時点で電極の先端径を初期寸法に戻すことが必要になる。

この初期値に戻す作業として電極を外し取り替える電極交換を行う方法と電極を外さず先端だけ再整形する方法とがある。電極交換は初期値に戻す方法としては確実な方法であるが、完全に生産ラインをストップさせ、作業要員と一定の交換時間が必要である。

それに比べ再整形する方法はチップドレッサを使って先端を所定の形状に研削するもので、簡便な方法ではあるがやや確実性にかけるところもあり、それぞれの設備、工程に合わせて使い分けられている。最近ではチップドレッサの改良が進みまたロボットが原点に戻った時に自動的に研削する設備も開発され、再整形のレベルアップが図られつつある。

また、電極先端を凸型に整形するピンペル・ドレッサもある。ピンペルの高さは低いものの、ピンペル形状の効果を持たせるものであり、ウレタンゴムの反発力を利用して、実際の溶接加圧をかけて整形できる特徴を持つ (図11)²⁰⁾。

さらには、最近では切削を要しない鍛圧方式でピンペル形状を整形するものもある。これはこま状の回転ローラを用い

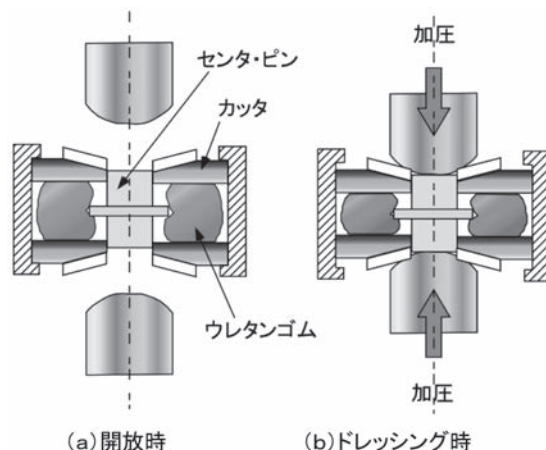


図11 電極先端のドレッシングの例²⁰⁾

て鍛圧成形することにより電極の削り代を少なくできるため、溶接可能点数を大幅に延長できるものである²¹⁾。

いずれの再整形方法を取る場合もスポット溶接では電極先端形状の維持が直接品質を左右するため、生産ラインでは重要な管理項目である。一般的に実施される管理方法としては溶接ガンごとに電極の再整形時期を明示しフォローするとともに、先端形状をゲージ等により測定することが行われている。また、チップドレッサによる切削後の電極先端形状を光学的に自動検査する方法も開発されている²²⁾。

4.3.3 連続打点に対する溶接電流制御

連続打点により適正電流範囲が高電流側に徐々にシフトする。従って、連続打点電流がその時の適正電流の下限に達したときに電極寿命となるといえる。そこで連続打点電流を任意の打点時の適正電流範囲内に常に維持するように、電流を増加させることで連続打点性を向上することが可能であり、この方法として打点数に対する電流増加があらかじめプログラムのプリセットされたりニアアップ、ステップアップという手段（図12）²³⁾がある。しかし、溶接電流条件はプリセットのため量産開始前にこの電流アップパターンを決める必要がある。

このため、打点数に応じて制御するニアアップ、ステップアップに対し、インラインでのリアルタイムのモニタリング制御の検討が行われている。これは溶接中の溶接電流、電極間電圧変化、温度、電極変位などの計測結果から、溶接品質をモニタし、それに応じて電流増加を行う方法である²⁴⁻²⁷⁾。特に先進的技術の例としては、数値計算によりナゲット形成状況を推定し、通電時間や溶接電流を制御しできるだけ少入熱とすることで、電極への熱負荷を低減し連続打点性を向上させる方法^{26,27)}で、近年一部が実用化されている。

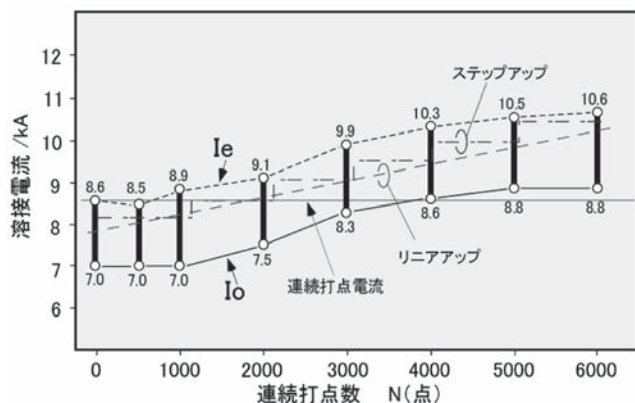


図12 連続打点時の能動的電流変化の例²³⁾

4.4 ハイテンへのスポット溶接技術適用

車体の安全基準への対応と環境負荷低減、即ち高強度化と軽量化という相反する性能を両立するため、590MPa以上の高強度鋼板（ハイテン）の採用が拡大しつつある。現在では引張強さが1500MPa級の鋼板も適用されており、その工法は熱間プレスが主流である²⁸⁾。ここでは、ハイテンのスポット溶接に焦点を当て、主な課題と対応について述べる。

まず溶接条件の適正化が挙げられる。ハイテンと軟鋼における溶接条件の相違は固有抵抗や強度といった物性の違いに起因する。ハイテンは軟鋼よりも固有抵抗が高いため、たとえ同電流であってもジュール発熱量は大きい。またハイテンの溶接では、電極の加圧力を増し鋼板間に隙間が存在する場合これを潰し、鋼板間の接触面積を確保する必要がある。これは溶融部径が接触径を超えることで発生する散りを抑制するためである。結果、ハイテンでは通常、軟鋼に比較し加圧力は高め、電流値は低めに設定し、適正電流範囲（所定の径のナゲット形成から散り発生するまでの電流範囲）を確保する。こうしたハイテン向けに溶接条件を検討した例は多く²⁹⁻³²⁾、量産に適した溶接条件の確立が進んでいるものと考えられる。

形成された溶接部の健全性を生産現場で評価するため、これまで溶接サンプルを破壊した上でナゲット径を測定したり（ピール試験）、あるいは板間にたがねを差し込んでナゲット径を測定する手法（たがね試験）が採用されてきた。しかし、ハイテンに対してはたがねの差し込みが困難であること、無理にたがねを差し込むとナゲットが破壊してしまうことから、非破壊検査への期待が高まっている。非破壊検査法には例えば直流磁場の過渡現象を利用した手法があり、測定した溶接部の磁気抵抗分布をナゲット径に変換することで実ナゲット径を精度良く推定できる³³⁾。一方、従来の超音波法（多重反射波利用）では圧接部とナゲットを識別できなかったが、高田らはナゲットの一端から超音波（板波）を斜入射させ反対側で受波することで識別可能とした³⁴⁾。超音波はナゲット内のデンドライト組織で大きく減衰し、ナゲット径に比例した減衰を受けることを利用している。今後、ハイテンの適用拡大に伴い、このような非破壊検査の実用は増加すると見込まれる。

スポット溶接継手の引張せん断強さ（TSS）は鋼板強度の上昇に伴い増加傾向を示す。一方、十字引張強度（CTS）は、前述の通り、鋼板強度が780MPa程度でピーク値を示し、それ以上の強度では低下する¹⁰⁾。この原因として、高強度化に伴いナゲット端部への応力集中が増すこと³⁵⁾、そのナゲット端の延性や靱性が低いことが考えられる。継手強度の低下はハイテンの適用部位を制限してしまうため、様々な継手強度向上技術が検討されている。まず、ナゲット径の拡大はCTS

向上の基本的な手法である。また溶接条件に工夫がなされ、例えば谷口らは、板厚1.6mmの1180MPa級鋼を用い、ナゲット形成のために通電した後に無通電と短時間（パルス）通電を繰り返すことでCTSを改善した³⁶⁾。この改善メカニズムとして、パルス通電によるHAZ軟化幅の拡大と荷重負荷時の応力拡大係数低減が推測された³⁷⁾。一方、浜谷らは、板厚2.0mmの1500MPa級熱間プレス材を用い、同様にナゲット形成する通電の後に無通電と後通電を実施しCTSを向上したが、CTSを最高にできる最適な無通電時間が存在する結果を図13に示す³⁸⁾。CTSが向上する理由としては、HAZ軟化やナゲット端部の凝固偏析（例えば、P）の緩和を挙げた。今後も継手強度向上に向けた検討が進むものと期待される。

鋼板の成分設計により溶接部強度を改善する試みもなされている。佐久間らは、鋼板強度が同等でもC量の減少やSi量の増加に伴い溶接部強度が上昇することを報告している³⁹⁾。C量が増加すると溶接部硬さが増し、ナゲット端の応力集中に対する破壊の感度が増すため、CTSが低下すると推定した。Siは焼入れ性元素であり、Siを増加すると焼き入れ硬化する領域が拡大し、即ちナゲットから母材に掛けての硬さ変化が緩やかになることに起因しCTSが向上すると推定されている。

他方、スポット溶接継手の疲労強度は鋼材強度が変化しても殆ど一定となること⁴⁰⁻⁴²⁾、板厚やナゲット径の増加に対しては増大すること^{40,43)}が知られている。また、ハイテンの疲労強度は塗装焼き付けを想定した焼鈍によって最大20%程度改善するが、その効果は鋼種によって異なることが報告されている⁴⁴⁾。

スポット溶接部は焼入れ硬化し、ナゲットの一部に引張残留応力が分布している。従って、腐食環境など溶接部に水素が侵入する条件では遅れ破壊の発生が懸念される。幾つかの実験結果が報告されており、例えば、板厚1.2～2.3mmの

1500MPa級熱間プレス材を用い、板間隙間を最大2mmまでとし溶接した継手を塩酸浸漬（pH＝1、30℃×100時間）しても溶接部破断は発生しなかった²⁹⁾。また、780MPa級鋼を用いた継手の引張強度が溶接後の時間経過に伴い増減する現象が報告されており、これは鋼板表面の塗油や湿気を起源とした拡散性水素がナゲット内に導入されることで発生する可能性が示唆された^{45,46)}。以上は実験に関する知見であり、実際の走行環境にある自動車の溶接部が遅れ破壊したという報告はなされていない。

4.5 高板厚比3枚板組の溶接技術

板組によってはスポット溶接の実現が困難な場合がある。例えば、自動車車体では、センターピラーが挙げられる。強度・剛性を担保するピラーアウトとインナには2.0mm前後の590MPa以上のハイテンが、その外側に配される意匠部材のサイドメンバには0.7mm程度の軟鋼が用いられる。即ち、高板厚比（＝総板厚／外側の最小板厚）の板組では、溶融部が板組中央に形成されるため、薄板－厚板間を溶融し難い。従って、板厚比には「5以下」などの制限が設けられる。この制限を溶接条件でクリアする試みがなされており、池田ら⁴⁷⁾は「2段加圧・2段通電」を検討した。初期に低加圧・高電流とし薄板－厚板間の接触径を減少し電流密度を上昇させることで薄板－厚板間に溶融部を形成させる。後期には高加圧・低電流とし、薄板－厚板間の接触面積を拡大し発熱を抑制しつつ、厚板－厚板間は時間を掛けて発熱・温度上昇させ溶融させる。本技術で板厚比10以上の条件でも溶融溶接を可能にしている。また、溶接機の制約等から通電中の可変加圧ができない時等は、内藤ら^{48,49)}が提案するスポット溶接後に薄板側から円状のレーザー溶接を行い、薄板－厚板間の溶接を補強する方法が挙げられる。

4.6 中空部材との溶接技術

車体の組み付けでは、2枚以上の鋼板を溶接電極で挟み加圧しつつ通電する、いわゆるダイレクトスポット溶接が主流である。部位によっては部材に電極を通過させる作業穴を設け、被溶接部を加圧通電する。穴部の剛性低下を補うため、部材の板厚増加や補強部材の溶接などの対策が必要な場合が発生する。こうした対策は車体の重量増加を招く。そこで野間らは、部材の穴を無くすことで剛性の確保を試みている⁵⁰⁾。このとき部材は閉じ断面構造となるため、2つの電極は一方の鋼板面から加圧するインダイレクトスポット溶接が検討された。片側から電極加圧するため、板厚が薄い場合に加圧力が過大だと、溶接部が沈み込んで鋼板同士の接触面積が増大（電流密度は低下）し、溶融溶接が困難となる。一方、電流を増加すると分流に伴い電極間局所の電流密度が上昇

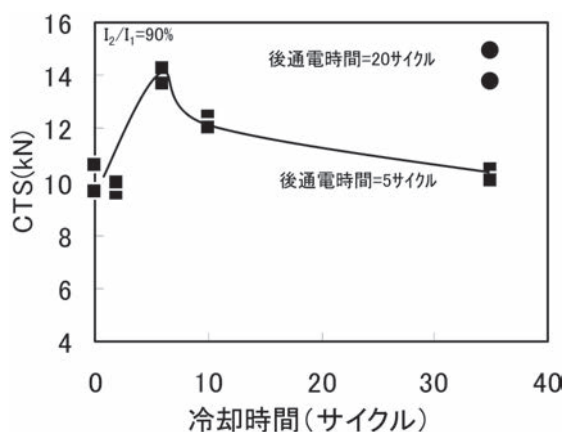


図13 本通電後の冷却時間がCTSに及ぼす影響

し、割れや爆飛に至る。有効策として、一方の鋼板に凸状の座面を設け、その部位に通電パスを限定して低電流でも電流密度は高め、溶融溶接を実現した。他にも、加圧や通電パターンの工夫で溶融溶接が達成され、松下ら⁵¹⁾は溶接条件を2段階に分け、初期を低電流—高加圧（鋼板同士の接触促進）、後期を高電流—低加圧（沈み込み抑制）とすることで散り無く溶融溶接を可能にしている。

その他の因子として、電源には直流の利用が報告されている⁵¹⁻⁵³⁾。直流は電流が増減する交流よりも効率的に鋼板を加熱でき、かつピーク電流が低いため散りが発生しにくいと考えられる。電極形状はR形が有効との報告があり^{51,52)}、R形状とDR形状のナゲット径への影響を図14に比較する。電極先端に電流が集中し発熱効率が優れるものと推定される。一方、閉じ断面のハイドロフォーム部材をフロントピラーに適用した例では⁵⁴⁾、既存設備を用いて溶接条件、アース電極の位置及び打点順序を最適化し、安定した溶接品質を確保している。中空部材の溶接の難易は部材の板厚や剛性に大きく依存するものと推定される。

4.7 スポット溶接部の品質保証技術

スポット溶接部の現場での簡易試験方法として、たがね試験等の破壊試験が多く行われている。たがね試験は、溶接部近傍にたがねを打ち込んでナゲットの有無をチェックし、溶接が正常に行われていることを確認する。しかしたがね試験にはその作業工数に加えて、作業のためのライン停止や抜き取り工程が必要になる。また異常発生時には、前回のたがね試験を行った製品から異常の発生した溶接工程までの工程数分の製品の品質確認が必要となり、不良品に対しては廃棄や手直し作業が発生する。さらには、高強度鋼板のスポット溶接部において、この試験ではたがねを打ち込む際に管理値以上に打ち込むとナゲットに亀裂が発生する懸念が増える。このような課題や懸念を回避し、品質保証の精度を向上する手段

の一つとして、非破壊試験方法が切望され、超音波探傷もしくは磁気特性等を利用したものが提案されている。

超音波探傷法としては、溶接完了後の溶接部板面上に斜角探触子、集束探触子、リニアアレイあるいはマトリックスアレイ探触子、遅延材などを組み合わせた探触子などを用いた方法が提案されてきた^{55,56)}。しかし、ナゲット部（溶融凝固部）とコロナボンド部（圧接部）の判別パラメータが確立しておらず、正確なナゲット径判定は難しいと国内では理解されている。

これに対し、スポット溶接電極に超音波検出端子を埋設し、せん断超音波を用いて溶接中にインラインで検出する方法も実用化されている。溶接中に成長する溶融部と未溶融状態の母材部での超音波の反射特性の差異を利用したものである。溶接完了後のオフラインで検出する超音波検出法と異なり、判別が難しいコロナボンド部の影響を受けないため、ナゲット部の検出が可能とされている⁵⁷⁾。

磁気特性を利用する方法としては、直流磁場の過渡現象に着目し、測定した溶接部の磁気抵抗分布をナゲット径に変換することで実ナゲット径を精度良く推定可能とされている^{58,59)}。

上記のような非破壊試験方法とは別に溶接時に得られる情報からナゲット形成状況を判定する検討も行われている。

例えば、電極間抵抗（電圧）をモニタリングすることで判定に応用する方法⁶⁰⁾や、サーボ溶接ガンの位置制御機能を活用して溶接中の電極変位を検出しチリ発生時期や大きさの違いを検出する方法⁶¹⁾を開発し、ラインへの適用を検討したとの報告もある。

4.8 スポット溶接継手強度の数値解析

スポット溶接継手の静的強度については、古くから様々な報告があり、簡便な予測式の導出のために弾塑性解析が古くから行われてきた。近年では、数値解析に用いる物性値の直接測定及び破壊力学の導入という流れがあった。

物性値の直接測定では、ナゲット内やHAZから直接超小型の引張試験片を切出して引張試験を行うことで、溶接部の応力—ひずみ関係を明確化して、その物性値を用いた弾塑性解析で継手破断強度予測⁶²⁾が報告されている。

破壊力学の導入は、従来から疲労破壊解析に導入⁶³⁾されていたが、近年では破壊力学を用いて局所応力パラメータを導出する方法⁶⁴⁾が報告されている。さらに、ハイテンのCTS向上というニーズから、スポット溶接部のナゲット周囲のき裂の進展を、弾塑性FEMを用いた弾塑性破壊力学パラメータJの解析結果と超小型CT試験片による破壊靱性測定の組み合わせで議論した報告⁶⁵⁾や応力拡大係数と相当塑性ひずみを用いる方法⁶⁶⁾も報告されており、今後は破壊力学を採り入れ

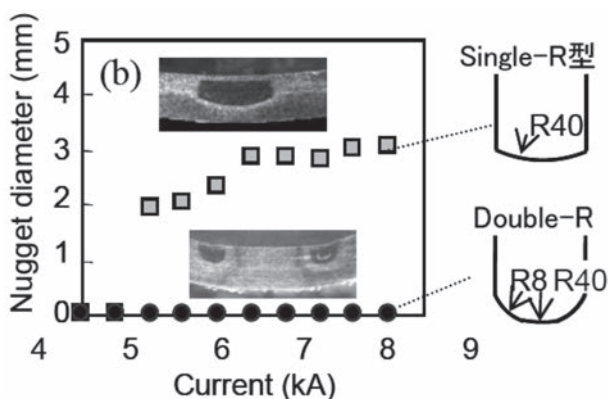


図14 電極形状がナゲット径に及ぼす影響⁵²⁾

た解析が主流になっていくと考えられる。

5 おわりに

自動車製造を支える最新の溶接材料と技術について、まず前編として、スポット溶接技術を中心に歴史的経緯、関連技術動向も踏まえて概説した。

次号の後編では、本編に引続き、自動車製造を支えるアーケ溶接技術、接着技術などの各技術の動向について紹介する。

参考文献

- 1) 近藤正恒：溶接学会誌, 79 (2010) 8, 750.
- 2) 高橋学, 河野治, 林田輝樹, 岡本力, 谷口裕一：新日鉄技報, 378 (2003) , 7.
- 3) 3rd International Conference of Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, (2011)
- 4) 日本アルミニウム協会ホームページ：
<http://www.aluminum.or.jp/jidosya/japanese/02/02Localindex.htm>
- 5) 福地文亮, 林登, 小川努, 横山鎮, 堀出：軽金属, 55 (2005) 3, 147.
- 6) Y.Miki, K.Koyama, O.Noguchi, Y.Ueno and T.Komatsubara：Materials Science Forum, 539-543 (2007) , 333.
- 7) The Aluminum Association ホームページ：
<http://www.aluminum.org/AM/Template.cfm?Section=Home&TEMPLATE=/CM/ContentDisplay.cfm&CONTENTID=29529>
- 8) 佐藤千明：組成と加工, 46 (2005) 533, 436.
- 9) 廣瀬明夫, 小林紘二郎：軽金属, 56 (2006) 3, 184.
- 10) 及川初彦, 村山元, 崎山達也, 石川忠, 高橋靖雄：新日鉄技報, 385 (2006) , 36.
- 11) 斉藤亨：溶接学会誌, 60 (1991) 6, 484.
- 12) 薄鋼板及びアルミニウム合金板の抵抗スポット溶接, 溶接学会軽構造接合加工研究委員会編, 産報出版, (2008) , 153.
- 13) 武田実佳子, 漆原亘, 松本克史, 加藤淳：神戸製鋼技報, 57 (2007) , 69.
- 14) 中村真人：溶接技術, 57 (2009) 3, 58.
- 15) 三野政信：溶接学会誌, 78 (2009) 4, 254.
- 16) 薄鋼板及びアルミニウム合金板の抵抗スポット溶接, 溶接学会軽構造接合加工研究委員会編, 産報出版, (2008) , 168.
- 17) 向江信悟：ニッタン技報, (2010) 40, 6.
- 18) 桜田康弘：溶接学会軽構造接合加工研究委員会資料, MP-481-2010, (2010)
- 19) 熊谷正樹：軽金属溶接, 40 (2002) 7, 304.
- 20) 中村孝：溶接技術, 35 (1987) 8, 110.
- 21) H.Kusano：Proc. of Sheet Metal Welding Conference XIV, Detroit Section, (2010) , 3.
- 22) Connie Reichert and Warren Peterson：Welding Journal, (2007) 2, 38.
- 23) 薄鋼板及びアルミニウム合金板の抵抗スポット溶接, 溶接学会軽構造接合加工研究委員会編, 産報出版, (2008) , 171.
- 24) 西田順紀, 藤井孝治, 上玉利康博：溶接学会軽構造接合研究委員会, MP-151-95, (1995)
- 25) 鈴木幹治, 長谷川博：溶接学会軽構造接合研究委員会, MP-150-95, (1995)
- 26) 松山欽一：溶接学会軽構造接合研究委員会, MP-289-01, (2001)
- 27) 森田直樹, 加治伸也, 中根豊, 森田幸弘：溶接学会軽構造接合研究委員会, MP-387-2005, (2005)
- 28) EuroCarBody2008, VW 資料, (2008)
- 29) 富士本博紀, 岡田徹：溶接技術, 59 (2011) 3, 48.
- 30) 椋本厚司, 新明高史, 菊池陵, 福本学, 内原正人, 福井清之：自動車技術会学術講演会前刷集, (2007) 72-07, 23.
- 31) 堂前祐樹：スバル技報, (2005) 32, 159.
- 32) SUBRAMANIAM S., KOGANTI R., JOAQUIN A., ELLIOTT A., COON T. and WEXLER A.：Spec Publ Soc Automot Eng, (2006) SP-2034, 1.
- 33) 木村孝：検査技術, 15 (2010) 2, 70.
- 34) 高田一, 北濱正法, 広瀬智行, 池田倫正, 西村恵次：まてりあ, 48 (2009) 2, 79.
- 35) 山崎一正, 佐藤浩一, 徳永良邦：溶接学会論文集, 17 (1999) 4, 553.
- 36) 谷口公一, 沖田泰明, 池田倫正, 遠藤茂：溶接学会全国大会概要, 87 (2010) , 96.
- 37) 谷口公一, 貞木照輝, 伊木聡, 池田倫正, 遠藤茂：溶接学会全国大会概要, 89 (2011) , 4.
- 38) 浜谷秀樹, 渡辺史徳, 宮崎康信, 田中智仁, 真木純, 及川初彦, 野瀬哲郎：溶接学会全国大会概要, 89 (2011) , 44.
- 39) 佐久間康治, 及川初彦：新日鉄技報, 378 (2003) , 30.
- 40) 新井勇人, 源島賢佑, 小池朗靖, 菅原翔, 高須健史, 松本拓也, 稲生博紀, 富岡昇, 岡部顕史：日本大学理工学部学術講演会予稿集, 53 (2009) , ROMBUNNO.K5-41.
- 41) OIKAWA H., MURAYAMA G., HIWATASHI S. (Nippon Steel Corp., JPN) and MATSUYAMA K. (Smart Welding Technol., USA)：Weld World, 51 (2007) 3-4, 7.
- 42) 富士本博紀, 岡田徹：溶接技術, 59 (2011) 3, 48.

- 43) 小野守章：溶接技術, (2003) 3, 77.
- 44) LINK T M : Mech Work Steel Process, 41 (2003) , 345.
- 45) SMITH S., DEN UIJL N. J., VAN DER VELDT T., OKADA T., UCHIHARA M. and FUKUI K. : Weld World, 54 (2010) 1-2, R12
- 46) 岡田徹, 西畑敏伸, 内原正人, 福井清之：溶接学会全国大会講演概要, 85 (2009) , 40.
- 47) 池田倫正, 沖田泰明, 小野守章, 安田功一：自動車技術, 61 (2007) 4, 36.
- 48) 内藤恭章, 村山元, 宮崎康信：溶接学会全国大会講演概要, 88 (2011) , 152.
- 49) 内藤恭章, 村山元, 宮崎康信：溶接学会全国大会講演概要, 89 (2011) , 52.
- 50) 野間一浩, 加藤慎也：溶接技術, (2004) 1, 110.
- 51) 松下宗生, 池田倫正, 遠藤茂：溶接学会全国大会概要, 88 (2011) , 154.
- 52) 西畑ひとみ, 福本学, 内原正人：溶接学会全国大会講演概要, 82 (2008) , 58.
- 53) Colin Lews and Matthew Gleave : Welding & Metal Fabrication, (1999) , 14.
- 54) 長谷川芳春, 藤田浩史, 遠藤岳晴, 藤本雅昭, 田辺順也, 吉田正樹：Honda R&D Technical Review, 20 (2008 Oct) 2, 106.
- 55) 藤田昌幸, 植野薫文, 里中忍, 岩本知宏：溶接学会軽構造接合加工研究委員会, MP-396-2006, (2006)
- 56) 里中忍, 岩本知宏：溶接技術, 59 (2011) 3, 44.
- 57) 伊賀上光隆, 柴田薫, 青木裕志：溶接学会軽構造接合加工研究委員会, MP-478-2010, (2010)
- 58) 木村孝：溶接学会軽構造接合加工研究委員会, MP-205-97, (1997)
- 59) 木村孝：検査技術, 15 (2010) 2, 70.
- 60) 小田修二, 山北恭司, 村重滋男：マツダ技報, (2004) 22, 188.
- 61) 神定光憲：溶接学会軽構造接合加工研究委員会, MP-288-01 (2001)
- 62) 中山英介：溶接学会誌, 75 (2006) , 461.
- 63) L. P. Pook : Int. J. Fracture, 11 (1975) , 173.
- 64) S. Zhang : Int. J. Fracture, 11 (2001) , 247.
- 65) 渡辺史徳, 古迫誠司, 浜谷秀樹, 宮崎康信, 野瀬哲郎：溶接構造シンポジウム2011講演論文集, (2011) , 271.
- 66) 貞末照輝, 谷口公一, 森影康, 伊木聡, 池田倫正, 遠藤茂：溶接学会全国大会概要, 89 (2011) , 48.

(2012年2月13日受付)