

NEDO/ISMA プロジェクトにおける接合技術開発について



随 筆

平 田 好 則*

Welding and Joining Technologies in Government Project of Research and Development on Innovative Structural Materials operated by NEDO and ISMA

Key Words : Welding and Joining Technologies, Innovative Structural Materials, Automotive Lightweight Technology, Multi-Materials

1. はじめに

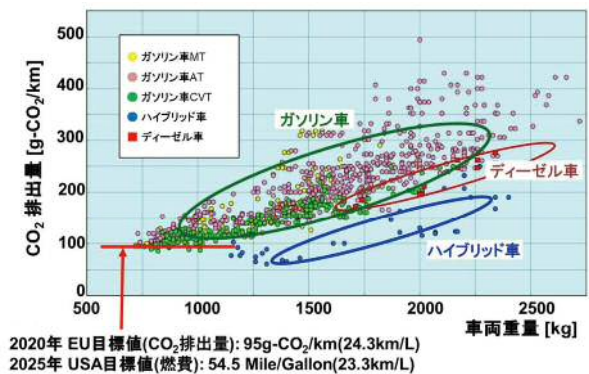
NEDO/ISMA プロジェクトは、経済産業省が未来開拓研究プロジェクト¹⁾の一つとして策定したものである。その目的は、自動車をはじめとする輸送機器の軽量化を通して、エネルギーを節約し、CO₂排出量を削減することであり、2013年度より「革新的新構造材料等研究開発」(PL:岸 輝雄 東京大学名誉教授)としてスタートした。このプロジェクトはNEDO 委託事業として新構造材料技術研究組合 (ISMA) によって運営されており、以後、ISMA プロジェクトと呼ぶ。筆者は ISMA プロジェクトの発足時より接合技術コーディネータとして、接合技術開発に関わってきた。そこで、本稿では ISMA プロジェクトの概要について、接合技術開発の視点から述べることにする。

2. CO₂ 排出量と自動車の軽量化

第4期科学技術基本計画 (2011年度～2015年度) は2010年度に策定されたが、東日本大震災により内容が修正され、グリーンイノベーション、ライフイノベーション、震災からの復旧・復興が3本柱になった。ISMA プロジェクトはグリーンイノベーションのアクションプランの一つとして策定された技術開発課題である。2016年11月にマラケッシュ (モロッコ) で開催された COP22 (第22回国連気候変

動枠組条約会議) では、“21世紀末までに、温室効果ガスの排出をゼロにすることを世界が約束したパリ協定”のルール作りがスタートした。この課題解決に向けて、内閣府をはじめ各省庁で分野横断的な視点から国家プロジェクトが立ち上げられている。

2015年度のデータによると、日本全体のCO₂排出量 (12億2,700万トン) のうち、自動車や航空機などの輸送機器からの排出量 (2億1,300万トン) は17.4%を占めている (国土交通省 HP)。自動車は輸送機器の排出量の90%近くを占めており、地球規模の温暖化対策・緩和策として世界各国でCO₂排出量の規制が行われている。EUでは2020年の目標値を95g CO₂/km (燃費24.4km/l)、アメリカでは2025年の目標値を燃費54.5 mile/gallon (23.3km/l) に設定しており、今後、この基準にしたがってCO₂排出量を下げる、あるいは、燃費を高める必要がある。図1は2012年のデータであるが、車両重量とCO₂排出量との関係を示す。ガソリン車、ディーゼル車、ハイブリッド車のいずれも車両重量が大きくなるとともに、CO₂排出量が多くなること



英、仏、中国、インドなどの政策目標(2017年)
→電気自動車(EV)へのシフト

図1 車両重量とCO₂排出量の関係 (国交省 HP_2012年より作成)



* Yoshinori HIRATA

1951年1月生
大阪大学大学院工学研究科修士課程溶接工学専攻修了 (1976年) (学部1974卒)
現在、大阪大学未来戦略機構第一部門 特任教授 (大阪大学名誉教授)
工学博士 加工物理学、溶接接合工学
TEL : 06-6879-4242
E-mail : hirata@mapse.eng.osaka-u.ac.jp

が分かる。従って、車両の軽量化はCO₂排出量の削減とともに燃費改善によるエネルギーの節減に貢献することになる。一方、EUによる基準は2020年に達成させる必要があり、世界中の自動車メーカー各社では、ハイブリッド車（HEV）をはじめ、電気自動車（EV）や燃料電池車（FCV）など、エンジンの高効率化や電気モーターなどの駆動系の開発により、規制をクリアしようとしてきた。

しかし、今年（2017年）になって、英国では2040年までにガソリン・ディーゼル車の販売を禁止、フランスでは2040年までに温室効果ガスを排出する自動車の販売を終了、中国では2019年から新エネルギー車（NEV）規制を導入する、インドでは2030年までにすべての販売車両をEV化するなど、各国からEV化を加速する政策目標が掲げられた。電気自動車（EV）には、その走行距離がガソリン車に比べて短いことや充電時間、インフラ整備などに課題がある²⁾。走行距離が短くなる理由として、EVに搭載するリチウムイオン電池が重く、大量に搭載できない点が挙げられる。そのため、車載電池の高エネルギー密度化や全固体電池の開発などが行われているが、併せて、車体の軽量化が有効な方策として、その技術開発が急務となっている。

3. 軽量化とマルチマテリアル化

ISMAプロジェクトに先立ち、ヨーロッパでは自動車の軽量化に向けて2005年から2009年まで、Super Light Car（SLC）プロジェクトが実施された。フォルクスワーゲンがプロジェクトコーディネータ

となり、自動車メーカーや素材メーカー、大学など9か国から37機関が参画し、4年間で1900万ユーロが投入され、マルチマテリアルコンセプトが打ち出された。このプロジェクトでは材料をはじめ、接合プロセスや成形プロセスなどの施工方法がすでに確立・実用化されているものを対象として、ケーススタディが行われ、鉄鋼材料やアルミ合金、マグネシウム、ファイバー強化樹脂（FRP）を適材適所に採用することで、1日に1000台以上生産するような量産車の重量を35%軽量化できることを示した^{3,4)}。

図2は本プロジェクトを開始するにあたって検討されたホワイトボディの材料組合せの例である。衝突安全性を確保するため、正突部位や側突部位には超ハイテン鋼などの高強度鋼を採用し、フロアパネルやルーフにはアルミ材、ボンネットやドアには、アルミと炭素繊維強化樹脂（CFRP）の組合せ材の適用などが想定されている。このように、軽量化には、鉄鋼、非鉄、樹脂など様々な材料を適材適所で採用するマルチマテリアル化の取組みが必要となる。

4. ISMAプロジェクトにおける接合技術開発

ISMAプロジェクトには現在39企業、1国研、1大学が研究開発を実施する組合員として参画し、年間約38億円の予算規模で運営されている。さらに組合員が実施する研究テーマを支援する再委託先は、大学を主体に約50団体ある。なお、ISMAホームページに研究開発体制が示されている。図3に各種構造材料の比強度と伸びの関係を示す。一般に高強度の材料は伸びが小さく、変形能が低いため、成形

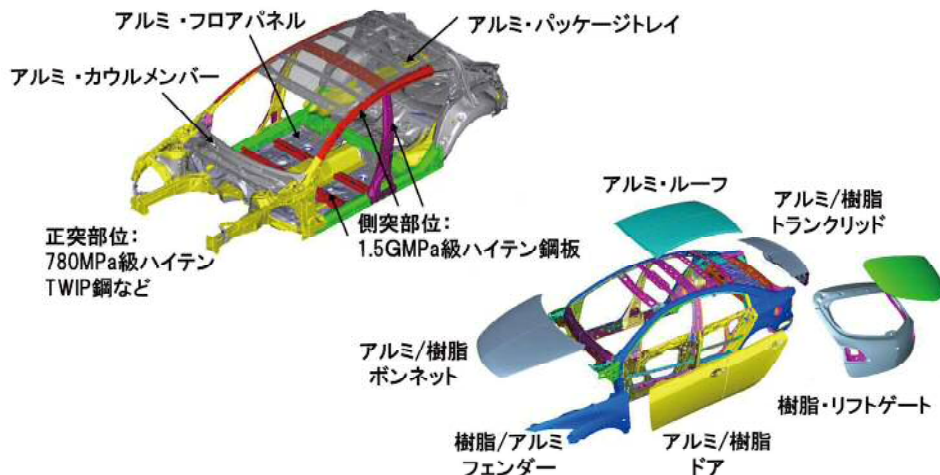


図2 車体の軽量化に向けた材料選択の例（ISMA HPより）

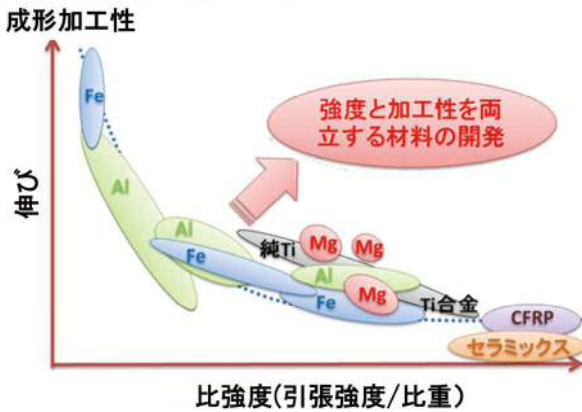


図3 各種構造材料の比強度と伸びの関係

加工性が良くない。そのため、本プロジェクトではマルチマテリアル化を進めるとともに、材料そのものの性能を高め、コストを低減することで、軽量化を達成し、国際競争力を高めようとしている。とりわけ、鉄鋼材料では0.3% C以上の中高炭素鋼で引張強度 1.5 GPa、伸び 20% を目標として高強度・高延性の革新鋼板の開発が進められており、日本の鉄鋼メーカーでしか作ることができない独自の技術開発が行われている。

このプロジェクトでは自動車の生産形態として、量産技術であり、ひとつの生産ラインで車種が異なるものが入り交るような混流生産を想定している。つまり、接合するための設備がラインに据え付けられていて、その接合技術が様々な材料の組み合わせに対応でき、接合時間やコストを低く抑えることができるものを目指している。接合の仕方として、抵抗スポット溶接に代表される点接合とアーク溶接やレーザー溶接などの連続接合の二通りがある。マルチマテリアル化を実現するためには、超ハイテン鋼同士、鋼板/非鉄金属、金属/樹脂などをつなぐ接合技術を開発する必要がある。図4にマルチマテリアル構造に対応した接合技術開発を示す。材料の視点からは中高炭素鋼の超ハイテン材の接合技術と異種材料の接合技術に大別できる。接合プロセスには、様々なエネルギー源やメカニズムを用いた手法が開発・実用化されているが、溶融接合、ろう接、固相接合/界面溶着、接着プロセス、機械的締結に分類される。これらは適用箇所に応じた継手性能が求められ、実用的には生産性が高く、コストが低いプロセスが選択さ

れることになる。

図5に超ハイテン材として開発されている中高炭素鋼の接合技術の課題イメージを示す。横軸は炭素量、縦軸に材料の強度レベルを取っている。もとより、同じ炭素量でも添加元素の種類や量、圧延・熱サイクルの工程によって強度は異なる。一般には炭素量が0.3%以上の中高炭素鋼の溶接では、溶接割れが発生したり、急熱・急冷により熱影響部が硬化し、接合が難しい。本プロジェクトにおいて、抵抗スポット溶接やレーザー溶接、アーク溶接の高度化が進められており、溶融接合の可能性も高くなりつつあるが、母材を溶かさない固相プロセスとして、摩擦接合がテーマとして挙げられている。摩擦攪拌接合 (FSW) は溶接変形が極めて小さく、機械加工に準じた自動接合プロセスのため、自動車や鉄道車輛などのアルミ部材の接合に実用されている。しかし、鋼材やチタン材のように強度や融点が高い材料

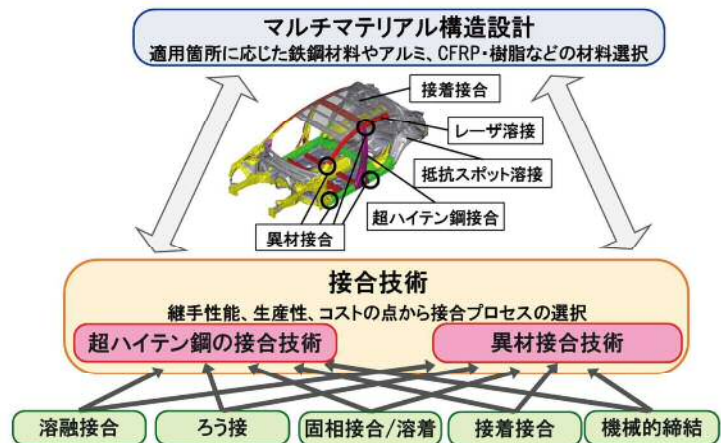


図4 マルチマテリアル構造に対応した接合技術開発

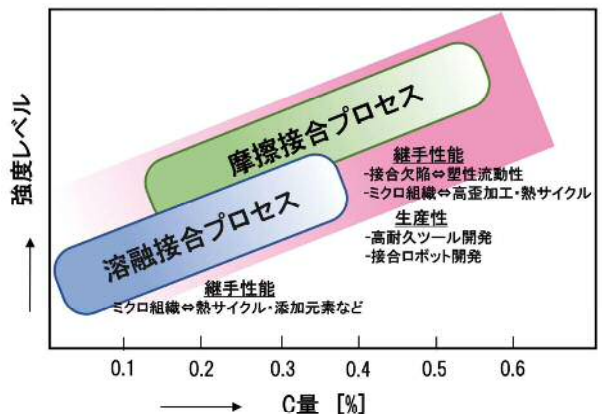


図5 中高炭素鋼の接合技術の課題イメージ

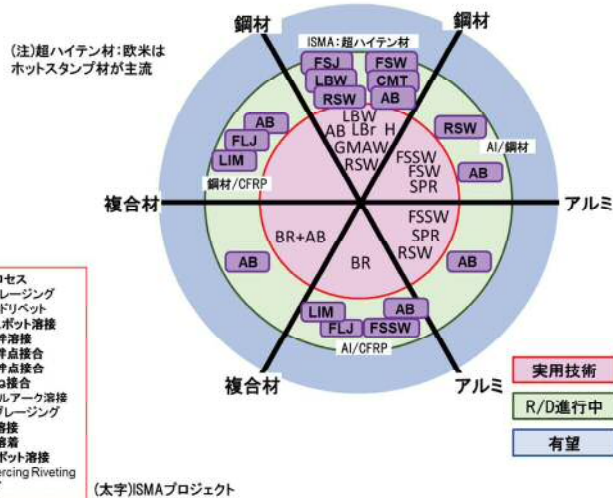
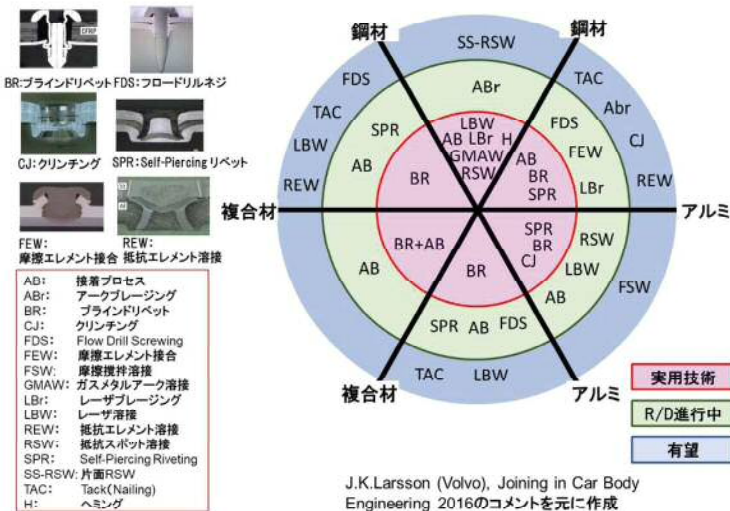
を摩擦熱で加熱し、回転ツールにより塑性流動させるには、ツールの回転トルクや押し込み荷重を大きくする必要がある。従って、摩擦接合の課題として継手性能を確保するとともに、耐熱性と耐摩耗性が高いツールを開発する必要がある。

次に異材接合技術について述べる。マルチマテリアル構造を作製するためには、鋼板-アルミなどの異種金属、アルミ-CFRPなどの金属と非金属の接合を達成する必要がある。しかし、材料の組合せによって線膨張率や弾性率、融点、熱伝導率、比重、腐食電位など物性値の差異が大きくなると、接合や塗装工程などの熱履歴、使用環境によって継手部周辺に応力や変形、腐食が発生するため、接合部の界面構造をいかに制御するかが鍵となる。

図6に自動車製造工程に用いられる接合技術の実用化の現状と開発動向を示す。ここでは構造材料として鋼材、アルミ材、複合材をとりあげている。円を六等分し、それぞれの線分に各材料を当て、例えば鋼材と鋼材の間の領域に鋼材同士の接合プロセスをプロットしている。そして、同心円の内側から実用技術、研究開発技術、将来有望な技術として区分している。(a)には欧米の実用技術と開発技術、将来技術、(b)には日本の実用技術とISMAプロジェクトの開発技術を示している。

まず、内側の円に示される実用技術に着目すると、欧米、日本ともに現状では鋼材が多用されており、主たる接合プロセスは抵抗スポット溶接 (RSW) である。アーク溶接 (GMAW) やレーザ溶接 (LBW)、レーザブレイジング (LBr) も多用されており、剛性を高めるために接着 (AB) が併用されている。次に、鋼材とアルミの異材接合、アルミ同士の接合プロセスでは、欧米では機械的締結のセルフピアシングリベット (SPR) やブラインドリベット (BR)、クリンチング (CJ)、接着 (AB) が適用されているのに対して、日本では SPR とともに摩擦撹拌接合 (FSW、FSSW) が実用されている。なお、複合材と金属の異材接合は欧米、日本ともにブラインドリベット (BR) が適用されている。

(a) 欧米の実用技術と開発技術、将来技術



(b) 日本の実用技術と ISMA プロジェクトの開発技術

図6 欧米の接合技術の動向と ISMA プロジェクトの位置づけ

次に、二番目の円環部分に当たる開発技術に注目する。欧米では鋼材同士の接合にアークブレイジング (ABr)、アルミ同士の接合に抵抗スポット溶接 (RSW) やレーザ溶接 (LBW) などの開発が進められている。一方、異材接合には摩擦エレメント接合 (FEW) やフロードリルネジ (FDS) などの機械的締結、接着 (AB) など室温から 200-300℃までの低温度域で接合できる手法に注力されている。

ISMA プロジェクトでは、鋼材として中高炭素鋼の超ハイテン材が開発されており、その接合プロセスとして、抵抗スポット溶接 (RSW)、レーザ溶接 (LBW)、アークスポット溶接 (CMT)、

摩擦攪拌接合 (FSW, FSJ) が開発されている。一方、異材接合技術では、鋼材-アルミには抵抗スポット溶接 (RSW) と接着 (AB)、アルミ-CFRPには摩擦攪拌点接合 (FSSW) や摩擦重ね接合 (FLJ)、レーザ溶着 (LIM)、接着 (AB) の開発が進められている。また、鋼材-CFRPには摩擦重ね接合 (FLJ) やレーザ溶着 (LIM)、接着 (AB) が取上げられている。

現在、異材接合部の継手性能を調べる方法として、熱サイクル環境 (-40°C×0.5h ~ 100°C×0.5h)、高温高湿環境 (温度 85°C、相対湿度 85%RH)、腐食環境 (JASO M610-92) など接合試験片を暴露し、接合強度の劣化度合を定量化することで、開発中の接合プロセスの特徴を明らかにしようとしている。試験分析結果を踏まえて、異材接合の機構解明が進むと、接合界面の構造を積極的に制御することが可能になるので、上記プロセスの継手性能の向上につながる。これら情報は今後開示されるので、さらに、新しい接合手法の開発が促進されることになると考えている。また、欧米が先行している機械的締結との比較も行うことで、技術的に明確な選択基準を与えることができると考えている。

5. おわりに

2016年度より第5期科学技術基本計画がスタートした。科学技術イノベーション総合戦略2016において、「オープンイノベーションを推進する仕組みの強化」が指摘され、その具体的な施策として、異分野融合の研究領域における産学共同研究の促進、企業におけるオープンイノベーションの推進に向けた意識改革の推進、“組織”対“組織”の強力な産学連携体制の推進、産学官連携の“場”の機能の向上などが挙げられている⁵⁾。今後、国家プロジェクトの実効性を高めるため、オープンイノベーションの推進に向けた検討がなされ、本プロジェクトでも研究開発体制の見直しを行う予定である。

工学・技術系の学協会は、もともと産学官に所属する研究者・技術者個人が様々な目的をもって集う多様性のあるソサエティである。しかし、個々の興味・方向性が一致すると、オープンイノベーションの場として機能する。すでに述べてきたように欧米も含め、異材接合技術は体系的に確立されておらず、今後、接合プロセスの開発とともに、異材界面の材料科学と力学特性、金属/樹脂の界面化学、異材接合部の性能評価、標準化などの課題を解決しなければならない。このため、溶接・接合、接着、複合材料、高分子化学、腐食防食、計算科学など様々な分野から知恵を結集し、使える技術に仕上げていく必要がある。

そこで、ISMAプロジェクトでは、実用・実装に必要な技術開発とともに、その基礎研究を加速するため、溶接学会をはじめ、接合技術に関連する学協会との連携強化を検討している。今まさに我が国のものづくりの国際競争力が問われており、従来の枠組みを超えた産学官によるオープンイノベーションの仕組みを確立する必要があると考えている。

【引用文献】

- 1) 北岡：我が国の産業競争力を支える材料技術開発，溶接学会誌，Vol.83 (2014) No.1, pp.5-10
- 2) EV・PHV ロードマップ検討会報告書 (2016. 3. 23), 経済産業省 HP
- 3) M. Goede, et al.: Super Light Car—lightweight construction thanks to a multi-material design and function integration, Eur. Transp. Res. Rev. (2009) 1:5—10 DOI 10.1007/s12544-008-0001-2
- 4) M. Goede: Sustainable Production Technologies of Emission reduced Lightweight car concepts (SuperLIGHT-CAR) -Publishable Final Activity Report (2009)
- 5) 科学技術イノベーション総合戦略2016，内閣府 HP