軽金属 第71巻 第8号 (2021), 400-405 DOI: 10.2464/jilm.71.400
© 2021 The Japan Institute of Light Metals

爆発圧着による各種軽金属合金と異種金属材料の接合

Explosive welding of dissimilar metals for various light metals

外本 和幸

Kazuyuki HOKAMOTO

1. はじめに

現在, 「マルチマテリアル化」という用語が流行しており, 異材の接合は接合研究者にとっても重要な課題となっている。爆発圧着法は金属の異材接合法として工業的利用技術が確立されており, 広範な利用がなされている。特に金属同士の異材接合に関しては, 接合強度に優位性があることが知られている¹⁾⁻⁵⁾。本稿は「軽金属」誌での講座なので, 内容を各種の軽金属の異材接合を中心として, 生じている現象・接合メカニズムや接合性の改善手法, 工業的応用例を紹介することに加えて, 関連する各種の高速材料加工技術の動向も含めて研究の現状について解説する。

2. 爆発圧着法の概要と関連技術の紹介

爆発圧着の方法については多くの解説記事¹⁾⁻⁵⁾があるが, 基本的には数百 m/s の高速度で2枚の金属板が傾斜衝突をすることで両材料を強固に接合する技術である。接合に寄与するのは衝突点前方に生じる高速流れ(金属ジェット)であり, 材料表面の酸化物や汚染を排除した後, 新生面同士が高压で圧接されることによって良好な接合が得られる。溶接分野における位置付けとしては, 熱影響が少ない冷間圧接に分類されるものの, 微視的にみると, 接合境界の近傍では液相からの超急冷に起因して生じるアモルファスや準結晶組織がみられたりする⁶⁾⁻⁹⁾。金属ジェットの多くは衝突点前方に排出さ

れるものの, 材料表面のごく薄い部分が高温にさらされることで両金属の接合に寄与していると思われる。

一般に爆轟ガスの瞬時の広がりによって, 金属ジェットの光学観察は難しい。図1は, 火薬銃を用いて爆発圧着が達成可能な数百 m/s の速度に加速した40 mm 径の金属板を, 15°~20°の角度で高速加速・衝突させて高速度ビデオカメラで連続撮影した結果を示す¹⁰⁾。金属ジェットの状態については多くの議論はあるが, 衝突点前方に別の金属ブロックを置いて金属ジェットをトラップした実験によると, 数百 μm 以下の微細な粒子になって分散しているようである¹¹⁾。

爆発圧着した接合界面は, 後述のように規則的な波状組織を呈することが多い。爆発圧着時の衝突圧力は, おおむね数~数十 GPa と見込まれる。このような高い圧力下の材料は塑性流動状態にあると考えられ, 高速下で流体力学的な不安定現象を生じて波が形成されると説明されている¹²⁾。最近では数値シミュレーションによって, 波の形状予測が多く行われている¹³⁾⁻¹⁵⁾。波の形成を良好な接合の指標とみなす場合も多いが, 平滑な境界でも接合条件が良好であれば高い接合強度を示す場合もあるので注意が必要である¹⁶⁾。特に接合する材料間で密度や強度(硬度)が異なる場合には, 平滑な接合界面を示す場合が多い¹⁶⁾。

接合可能な条件に関しては, 水平方向への衝突点移動速度と接合時の衝突角が重要な因子であり, このことに基づいた Welding Window が提案されている^{17), 18)}。接合可能な条件範

図1 火薬銃を用いた銅板同士およびアルミ・銅の傾斜衝突による金属ジェットの発生状況の光学観察結果¹⁰⁾

囲については、最近Bataevら¹⁹⁾によって詳細な議論がなされているので、ここでは割愛する。

良好な接合を得るためには、いずれにしても衝突点におけるエネルギーの制御が必要であり、特に難接合の材料組合せの場合、接合しようとする材料の組合せごとに実験条件の適正値を調整する必要がある。特にエネルギー過剰で接合境界に溶融や化合物を厚く形成する場合に接合不良が生じることから、衝突点（接合境界）がエネルギー過剰な状態にならないようにすることが肝要である。

3. 各種軽金属の接合事例

3.1 中間材を用いる爆発圧着法

通常の爆発圧着法の模式図を図2(a)に示す。通常法を用いる場合、前述したようにエネルギー過剰で接合不良が生じる場合が時折生じる。著者は以前、アルミニウムとステンレス鋼の接合に際して図2(b)のようなステンレス鋼の中間材を挿入した接合法を提案してアルミニウム/ステンレス鋼境界のエネルギー低減効果の有効性を明らかにした¹⁶⁾ほか、最近ではアルミニウム/2相ステンレス鋼の接合にも成果を挙げている²⁰⁾。同様の方法は他の材料の組合せにも応用が可能なので、ここではチタン（TP340）とステンレス鋼（SUS304）に関する接合事例を紹介する²¹⁾。

中間材を用いる方法で得られた接合境界組織の一例を図3に示す²¹⁾。図3の(a)、(b)は光学顕微鏡組織、(c)は接合境界のSEM像、(d)、(e)はチタンと鉄の元素マッピング像である。チタンとステンレス鋼の接合境界はわずかに波打っている程度で、接合境界に化合物の形成はあまり認められな

いことから、エネルギーの低減効果は明らかであった。また、ステンレス鋼同士は規則的で大きな波を形成して、良好に接合されていた。

中間材を用いる場合であっても、条件によってはエネルギー過剰で化合物を多少形成するような場合も生じる。そこで、エネルギーを抑制した試験片とエネルギー過剰で化合物を形成している試験片に対して、もう1枚チタン板を別途爆発圧着すること（動的試験）を行った時の接合境界組織を図4に示す。図4(a)に示すエネルギーを抑制して化合物が無い場合には良好な接合が維持される。図4(a)の矢印は、中間材と母材の境界を示す。一方、図4(b)のようにエネルギー過剰で化合物が存在する場合には化合物を起点とした割れ（図中矢印）が生じることが知られた²¹⁾。

3.2 水中衝撃波を用いる方法

アルミニウムとマグネシウムの爆発圧着に関しては、純アルミニウムとマグネシウム合金（AZ31）の接合は通常法を用いた場合でも、比較的容易であった²²⁾。しかしながら、それ以外のアルミニウム合金とマグネシウム合金の爆発圧着は、マグネシウムの低い融点と反応性に加えて、延性が低く容易にせん断帯を形成するようなことも生じやすく、良好な接合を得るにはさらに工法の工夫が必要であった。

そのために独自に開発した装置の模式図を図5に示す²³⁾。図に示すように、本実験では装置全体を水中に設置し、爆薬を傾斜させて行う水中衝撃波を利用する方法を使用した。この時使用した爆薬（SEP）は、爆轟速度が7 km/s程度と比較的高爆速で強力な爆薬であり、傾斜させて水平方向への衝突点移動速度を遅くすることが必要であった^{1), 17), 18)}。本方法は、媒質（水）を介することによって、薄板材料を均一に高速加速できるとともに、回収された材料の表面も元の材料の表面形状を維持してほとんど変化しないのが特徴である。薄板の高速加速が可能であれば、運動エネルギーそのものを低減することが可能で、接合条件の改善に大きく寄与することが期待される。

ここでは、水中衝撃波を利用する方法を用いて実施したチタン（TP270）とマグネシウム合金（AZ31）の実験結果について紹介する²³⁾。ここで、チタンとマグネシウム合金の接合は水中衝撃波を用いる方法だけでは実現が困難であったので、前述と同様に母材と同じ材質の0.3 mm厚さの中間材（AZ31）を挿入して回収実験を行った。

図6に、0.3 mm厚さのAZ31板を挿入した時の接合界面の組織写真を示す。この場合、起爆側の界面（X=5 mm）には薄いチタンとマグネシウムの混合組織を形成し、終端側に向かうにつれて（X=30, 60 mm）混合組織はなくなる状況であったが、全体にわたる両者の接合は良好であった。ここでみられた水平方向への組織の変化は、一定厚さの爆薬を使用したことによる。すなわち、起爆側では水中衝撃波の減衰が少なく強い圧力作用があるのに対して、終端側では圧力が弱まることに起因している。別の研究では、この種の圧力減衰を改善する手法として、爆薬の厚さを起爆側から遠ざかるにつれて次第に厚くすることを提案し、実際に圧力の均一化を実現できることが確認されている²⁴⁾。

図6の一部で見られた接合界面の混合組織は、マグネシウ

図2 爆発圧着法の模式図 (a) 通常法, (b) 中間材を用いる方法

5

図3 ステンレス鋼中間材を用いる方法で接合されたチタン/ステンレス鋼接合境界の微細組織²¹⁾
(a), (b) 光学顕微鏡組織, (c) SEM像, (d) Ti分布, (e) Fe分布

図4 動的試験結果²¹⁾ (a) エネルギーを制御した場合, (b) エネルギー過剰の場合

ムに溶融が生じた後、そこにチタンが溶け込んで生じたものと思われた。幸いなことにこの合金系の場合には金属間化合物を形成せず2相分離となるので、硬脆な境界層を生じないのが特徴である。境界層の硬度は141～144 HV程度 (Ti: 157～170 HV, AZ31: 74-106 HV)²³⁾で、この層が両者の緩和層として寄与することも期待できる。曲げ試験でも剥離するよ

うなこともなく、接合境界の良好な接合が確認されている²³⁾。今回用いたのと同じ水中衝撃波を用いる方法で作製したW-Cu接合体も、上記と同じく状態図が2相分離であり、同様の2相混合組織が接合境界に生じる場合があることが確認されている²⁵⁾。

図5 水中衝撃波を用いる爆発圧着法の模式図（中間材を用いる場合）²³⁾

図7 媒質中を伝播する衝撃波の光学観察装置の模式図²⁹⁾

図6 光学顕微鏡を用いたチタン/AZ31の接合界面組織 ($\alpha = 20^\circ$, $D = 35$ mm)²³⁾

3.3 各種の爆薬・媒質を利用する方法

これまで使用する爆薬については詳しく紹介しなかったが、一般に爆発圧着には硝酸アンモニウムを主成分とするANFO系の爆薬を利用することが多い。この爆薬は爆轟速度が2~3 km/s程度と比較的遅く、衝撃波による材料の損傷を抑制することができる。また、平行法を用いた場合でも前述の水平方向への衝突点の移動速度が十分に遅いので、良好な接合条件を比較的容易に実現できる。したがって、ANFO系の爆薬で水中衝撃波による方法を利用できればよいが、この爆薬は水溶性で、水を介する場合には確実な防水措置が必要である。また、水の利用は種々の観点から施工上の制約が多く、代替の手法も検討が必要であると考えて、水に代えてゼラチンを利用することの着想を得た。ゼラチンは生体組織中の衝撃波の伝播を模擬することもあり²⁶⁾、水と衝撃波特性が比較的類似していることもかねてから知られていた^{27), 28)}。

まずは媒質中の衝撃波の伝播挙動を知ることが必要であることから、高速度カメラを利用した光学計測実験を実施した。ここでは低爆速のANFO系爆薬と高爆速のSEP爆薬を利用して、水およびゼラチン中を伝播する衝撃波の挙動を観測した。使用した光学系の模式図を図7²⁹⁾に、爆薬と媒体の設置状況を図8²⁹⁾に示す。図8の左はANFO系爆薬、右はSEP爆薬を水もしくはゼラチンの上に配置し、右上端に設置した雷

図8 ANFO系爆薬とSEP爆薬を用いた場合の水中およびゼラチン中を伝播する衝撃波伝播観測装置の模式図²⁹⁾

管で起爆した時に生じる衝撃波の伝播状況を模式的に示す。

光学観察結果を図9²⁹⁾に示す。図9(a), (b)はSEP爆薬の水中とゼラチン中の衝撃波伝播挙動の光学観察結果であり、図9(c)は両者の衝撃波面を重ねて示したものである。図9(e)~(f)はANFO系爆薬について同様の結果を示す。光学観察結果から明らかなように、水とゼラチンを利用した場合の衝撃波伝播挙動は2種類の爆薬を用いたいずれの場合もほぼ同じで、水に関してこれまで得られている接合条件をそのまま利用してゼラチンの実験を実施できることが確認された。現

5

図9 ANFO系爆薬とSEP爆薬を用いた場合の水中およびゼラチン中を伝播する衝撃波の光学観察結果²⁹⁾

在，このゼラチンを媒質として用いる方法による爆発圧着実験を鋭意試みている³⁰⁾。

4. 各種応用の可能性

本稿では工業的な応用例についても紹介しておく。現在，最大で4.2 m×7 mの大型のステンレスクラッド鋼が国内で生産されており，異材の接合強度に高い信頼性が必要な継手部材として広く使用されている。例えば，アルミニウム/中間材/ステンレス鋼からなる極低温用管状継手，アルミニウム/鋼からなる構造用異材継手のほか，導電用の異材継手（アルミニウム/銅，アルミニウム/銅）などが多く生産されている³¹⁾。また，マグネシウム合金の利用についても検討が進んでいる²⁾。

通常の方法では難しい異種材料の接合には，本稿で紹介した媒質を介する方法が有効であり，今後，軽金属に限らず，多様な材料の組み合わせに対して広範囲に利用されることを期待している。これまでの研究では，水中衝撃波を利用してアルミニウムとジルコニアセラミック³²⁾の接合に成功しているほか，工具鋼³³⁾の接合にも成果が上がっており，実験条件を調整することで鋳鉄などの硬脆材に対しても接合が可能ではないかと考えている。

水中衝撃波等を利用する方法の問題点は，接合可能な面積に限られることである。著者らは，大面積化に必要な技術である「金属薄板を重ねて爆発圧着する方法」についても検討し，比較的良好な重ね爆着が可能であることを示している³⁴⁾。接合する板の厚さが板を重ねることで急変する部分の近傍では，接合界面の波長が大きく変化したり，金属ジェットがトラップされて生じた溶融組織が確認されたが，接合状態はおおむね均一で良好な接合を得ることが可能であった³⁴⁾。

接合可能な材料形状に関しては，板の接合だけでなく棒や管の接合も可能である。本稿の主題から少し外れるが，著者

らは最近，金属細管にろうを封入して束ねた多数管を大きな金属管に詰めて周囲から爆薬で圧縮することで，均一に伸長された多数穴構造を持つ多孔質材の創製を試みている。銅³⁵⁾やアルミニウム³⁶⁾のほか，複合素材からなる一方向多孔質材³⁷⁾も製造可能である。管に流体を流した時の圧力損失が小さく，伝熱特性にも優れており，熱交換器等への応用を期待している³⁸⁾。

5. 関連技術

爆発圧着技術と関連の深い技術としては，電磁圧接技術が挙げられる。詳細は，本連載講座³⁹⁾や文献⁴⁰⁾を参照していただきたい。この方法によると接合境界に波状界面の形成が認められることから，爆発圧着と同様に高速傾斜衝突による金属ジェットの形成と流体的挙動に基づく機構で接合していると思われる，主に軽金属の異材接合に対して高い接合強度を達成できる。爆発圧着と異なる点は，大容量コンデンサーに蓄積したエネルギーを瞬間的に開放してコイルに沿って電磁加速を行い，線状もしくは点の接合が可能なことである。工場内で異材接合を実施する場合には，この方法が有力な手法になり得ると思われる。線状の接合は導爆線（ひも状の爆薬）の利用でも可能である¹⁾が，安全の観点からすると，爆発が利用可能な特殊な施設か，人のいない遠隔地での施工に限られる。

上記で紹介した点接合に関しては，個人的には今後の技術開発に関する新しい展開を期待している。局所領域（点）の加速であれば，多様な方法によって圧力作用を高めることは可能で，接合に十分な高速加速が達成できると思われる，異材の点接合を行う新しい装置の開発ができないかと考えている。かなり以前だが，SalamとAl-Hassaniは弾丸を水に衝突させて水の高速噴流を生じさせ，点接合が実現可能なことを示している⁴¹⁾。利用するエネルギー源（加速方法）を含めた研

究の進展を期待したい。

また最近では、レーザーアブレーションによる加速を用いた点接合に関する研究報告^{42)~45)}も増えている。ただし現状では、レーザーの均一性の問題や板を加速するためのエネルギーが不足しているといった印象を持っている。

6. おわりに

ここでは軽金属の異材接合を中心に、爆発圧着技術の基礎と接合性改善の手法や関連技術の可能性について紹介した。軽金属は軽いので比較的加速されやすいものの、エネルギーが過剰になると、溶融や化合物が形成されて接合が妨げられるので、エネルギー制御の観点での工夫が必要であった。本稿では特に、中間材を利用する方法や、水中衝撃波などを利用して薄板を加速する方法の有効性を紹介した。さらに、ここで紹介した各種の高速材料加工技術が、広範に利用されるようになることを期待したい。

本稿では紹介できなかった技術としては、コールドスプレーといった粉末の高速投射被覆技術⁴⁶⁾のほか、水中衝撃波による超微細形状の打抜き⁴⁷⁾・成形加工^{48), 49)}など、いくつか実現の可能性が高い技術も存在する。これらについても、今後の新展開を期待している。

謝 辞

本稿の執筆にあたっては、旭化成株式会社の和田直之博士から爆発圧着に関する最近の生産状況の情報を頂戴した。ここに記して深謝申し上げる。

参 考 文 献

- 1) B. Crossland: Explosive Welding and Its Application, Oxford Univ. Press, (1982).
- 2) 花野嘉紀：溶接学会誌, **87** (2018), 76-79.
- 3) 外本和幸：溶接学会誌, **87** (2018), 43-47.
- 4) 大塚誠彦：圧力技術, **53** (2015), 42-45.
- 5) 藤田昌大, 千葉 昂, 立川逸郎：日本金属学会会報, **20** (1981), 385-393.
- 6) M. Nishida, A. Chiba, Y. Morizono, M. Matsumoto, T. Murakami and A. Inoue: Mater. Trans., JIM, **36** (1995), 1338-1343.
- 7) P.K. Parchuri, S. Kotegawa, K. Ito, H. Yamamoto, A. Mori and K. Hokamoto: Mater. Des., **166** (2019), 107610.
- 8) I.A. Bataev, D.V. Lazurenko, S. Tanaka, K. Hokamoto, A.A. Bataev, Y. Guo and A.M. Jorge Jr.: Acta Mater., **135** (2017), 277-289.
- 9) I.A. Bataev, K. Hokamoto, H. Keno, A.A. Bataev, I.A. Balagansky and A.V. Vinogradov: Metals and Mater. Int., **21** (2015), 713-718.0
- 10) A. Mori, S. Tanaka and K. Hokamoto: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, (2017), 10328Q DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2270473>
- 11) A. Kira, K. Hokamoto, Y. Ujimoto, S. Kai and M. Fujita: Int. J. Modern Phys. B, **22** (2008), 1653-1638.
- 12) X. Zeng, X. Li, X. Chen, X. Wang and H. Yan: Welding in the World, **63** (2019), 967-974.
- 13) 西脇淳人, 熊井真次：溶接学会論文集, **34** (2016), 274-284.
- 14) 熊井真次：溶接学会誌, **87** (2018), 48-56.
- 15) J. Feng, P. Chen, Q. Zhou, K. Dai, E. An and Y. Yuan: Int. J. of Multiphysics, **11** (2017), 315-325.
- 16) K. Hokamoto, T. Izuma and M. Fujita: Metall. Trans., **24A-19** (1993), 2289-2297.
- 17) R.H. Wittman: Proc. 2nd Symposium on Use of Explosive Energy in Manufacturing Metallic Materials of New Properties of Application thereof in the Chemical Industry, (1973), 153-168.
- 18) A.A. Deribas, V.A. Simonov and I.D. Zakcharenko: Proc. 5th Int. Conf. on High Rate Fabrication, (1975), 4.2.1-4.2.16.
- 19) I. Bataev, S. Tanaka, Q. Zhou, D.V. Lazurenko, A.M. Jorge Jr., A.A. Bataev, K. Hokamoto, A. Mori and P. Chen: Mater. Des., **169** (2019), 107649.
- 20) X. Chen, D. Inao, S. Tanaka, A. Mori, X. Li and K. Hokamoto: J. Manufacturing Processes, **58** (2020), 1318-1333.
- 21) P. Manikandan, K. Hokamoto, M. Fujita, K. Raghukandan and R. Tomoshige: J. Mater. Process. Technol., **195** (2008), 232-240.
- 22) S.H. Ghaderi, A. Mori and K. Hokamoto: Mater. Trans., **49** (2008), 1142-1147.
- 23) M.A. Habib, H. Keno, R. Uchida, A. Mori and K. Hokamoto: J. Mater. Process. Technol., **217** (2015), 310-316.
- 24) K. Hokamoto, K. Nakata, A. Mori, S. Tsuda, T. Tsumura and A. Inoue: J. Alloys Compd., **472** (2009), 507-511.
- 25) P. Manikandan, J.O. Lee, K. Mizumachi, A. Mori, K. Raghukandan and K. Hokamoto: J. Nucl. Mater., **418** (2011), 281-285.
- 26) 早川 理, 龍野 正, 高山和喜：医用電子と生体工学, 34 秋季特別号, (1996), 147.
- 27) K. Nagayama, Y. Mori, Y. Motegi and M. Nakahara: Shock Waves., **15** (2006), 267-275.
- 28) C.J. Shepherd, G.J. Appleby-Thomas, P.J. Hazell and D.F. Allsop: AIP Conf. Proc., (2009), 1399-1402.
- 29) D. Inao, S. Tanaka, T. Yamashita and K. Hokamoto: Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, **148** (2019), 106929.
- 30) D. Inao, A. Mori, S. Tanaka and K. Hokamoto: Metals, **10** (2020), 106.
- 31) <https://www.asahi-kasei.co.jp/baclad/jp/index.html> (2021年1月29日)
- 32) K. Hokamoto, M. Fujita, H. Shimokawa and H. Okugawa: J. Mater. Process. Technol., **85** (1999), 175-179.
- 33) W. Sun, X. Li, H. Yan and K. Hokamoto: J. Mater. Eng. & Performance, **23-2** (2014), 421-428.
- 34) K. Hokamoto, A. Mori and M. Fujita: Int. J. Modern Phys. B, **22** (2008), 1647-1652.
- 35) K. Hokamoto, M. Vesjenjak and Z. Ren: Materials Letters, **137** (2014), 323-327.
- 36) K. Hokamoto, K. Shimomiya, M. Nishi, L. Krstulović-opara, M. Vesjenjak and Z. Ren: J. Mater. Process. Technol., **251** (2018), 262-266.
- 37) M. Nishi, S. Tanaka, M. Vesjenjak, Z. Ren and K. Hokamoto: Metals, **10-2** (2020), 193.
- 38) Y. Sato, K. Yuki, Y. Abe, R. Kibushi, N. Unno, K. Hokamoto, S. Tanaka and T. Tomimura: International Heat Transfer Conference, (2018), 8189-8193.
- 39) 糸井貴臣：軽金属, **71** (2021), 掲載予定.
- 40) 岡川啓悟：ぷらすとす, **1-4** (2018), 247-252.
- 41) S.A.L. Salam and S.T.S. Al-Hassani: Metallurgical Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena, Dekker, (1986), 943-959.
- 42) X. Wang, C.X. Gu, Y.Y. Zheng, Z.B. Shen and H.X. Liu: Mater. Des., **56** (2014), 26-30.
- 43) S.Y. Yang and J.W. Bao: J. Mater. Eng. Perform., **27** (2018), 1177-1184.
- 44) X. Wang, F. Li, T. Huang, X.J. Wang and H.X. Liu: Opt. Lasers Eng., **115** (2019), 74-85.
- 45) F. Li, X. Wang, X. Wang and H. Liu: J. Mater. Eng. Perform., **29** (2020), 1336-1345.
- 46) V.K. Champagne: The Cold Spray Materials Deposition Process, Fundamentals and Applications, Woodhead, (2007).
- 47) S. Tanaka, I. Bataev, M. Nishi, I. Balagansky and K. Hokamoto: Int. J. Mach. Tools Manuf., **147** (2019), 103457.
- 48) S. Tanaka, K. Hasegawa, I. Bataev, A. Kubota and K. Hokamoto: Mater. Des., **198** (2021), 109341.
- 49) S. Tanaka, D. Inao, I. Bataev, A. Kubota and K. Hokamoto: Manuf. Lett., **27** (2021), 8-12.