爆発衝撃による高速現象の可視化とシミュレーションによる検証*

Visualization of High-velocity Phenomena under Explosion and Impulsive Pressure Assisted by Numerical Simulation

外本和幸** 森 昭寿***

Kazuyuki HOKAMOTO and Akihisa MORI

Key words

explosion, impulsive pressure, high-velocity deformation, visualization, numerical analysis, simulation

1. はじめに

著者らはこれまで、主に爆薬を用いた材料加工に関して研究を行ってきた。この種の加工は爆発加工と呼ばれ、かつては板材の爆発成形や爆発硬化などの技術が実用化され、現在は爆発圧接技術が工業的に広く利用されている¹⁾。高速の材料加工を実現するために用いるエネルギー源は爆薬に限る必要はなく、大容量のコンデンサーにためた電気を瞬間的に放出する衝撃大電流を用いて電磁成形²⁾や放電成形³⁾といった技術に利用することもできる。これらの技術を総称して、高エネルギー速度加工と呼ばれることもある。この技術で用いられる速度は最低でも数十 m/s 程度であり、爆発圧接では数百 m/s の速度が必要である。250 m/s が 900 km/h であるから、爆発圧接はジェット旅客機の最高速度かそれ以上の速度での現象を利用しているといえる。地球物理、宇宙工学の分野ではさらに高い速度が要求されるので、2段衝撃銃といった特殊な超高压発生装置を用いることになる。

このような超高速現象は撮影のタイミングがずれると現象を撮影できないので光学計測には経験と忍耐を要し、直接現象を観察することが難しい場合も多い。そこでわれわれは、超高速で生じている現象を解明するために、光学計測による可視化と数値シミュレーションを併用しながら研究を行っている。ここでは、われわれがこれまで行ってきた研究の例をいくつか紹介することを通じて、高エネルギー速度加工に関連する可視化の状況を理解していただくとともに、この特殊な加工技術の可能性についても解説してみたい。

2. 光学計測法

爆薬の爆轟過程そのものや爆轟ガスによる金属の変形過程の光学計測は、熊本大学パルスパワー科学研究所（従来

の衝撃・極限環境研究センターが他センターと融合して2013年4月に設置）にある爆発ピットを利用して実験を行っている。光学計測は、図1に示すようなシステムを用いて実施される。われわれが主に実施している計測はシャドウグラフ法といわれ、物体の移動によって背光が遮られた部分の影を観察していることになる。光学計測には、主に1 μ sごとに100コマの連続撮影（モノクロ）が可能な高速度ビデオカメラを使用しており、関連する現象の可視化には極めて有効な装置である。最近はもう少しスペックが改良された機種も存在するようである。

爆薬の爆轟に伴う金属の変形を撮影するときによく生じる問題として、爆薬の爆轟ガスの膨張が変形より極めて早く、可視化が難しいことがある。このためわれわれは十分に大きな金属板を用意して、爆轟ガスの先行による遮光を防ぎながら光学計測を行うなどの工夫をして実験を行っている。図2に、金属板の中心部上方に一定厚さの爆薬を設置して、板の中心から起爆したときに生じる金属板の変形形状を光学観察した結果を示す。この場合、起爆された中心から金属板が円錐形状を呈しながら高速変形している状況が観察されている。

図1 爆薬による諸現象の計測システムの概要

*原稿受付 平成25年4月11日

**熊本大学パルスパワー科学研究所（熊本市中央区黒髪2-39-1）

***崇城大学工学部（熊本市西区池田4-22-1）

図2 広い金属円板を爆薬によって中心から起爆・変形させた際の板形状の光学観測結果 (15 μ s ごと; 観測窓の直径 200 mm)

3. 数値シミュレーション法

数値シミュレーションは、衝撃問題解析コードとして LS-DYNA や AUTODYN などがよく知られており、われわれは主に AUTODYN を利用して数値解析を実施している。解析に必要な基礎データのいくつかはプログラム中にかなり蓄積されているものの、データのない新素材や、温度等の条件によって状態変化する材料に関しては、使用するデータの妥当性を十分に吟味する必要がある。また、得られた計算結果については光学計測を併用しながら、妥当な値が得られているかについて注意しなければならない。詳しくは、例えば片山⁴⁾による解説記事を参考にしたい。

4. いくつかの実験例の紹介

4.1 水中衝撃波の伝播挙動の観測例

水などの光透過性を有する液体中を伝播する衝撃波の挙動の撮影は、爆轟ガスによる遮光の問題がないので、空気中での諸現象の撮影と比べると比較的容易である。われわれはこれまでに水中衝撃波を用いる爆発圧接法を提案して、金属とセラミックスの接合⁵⁾や超急冷箔材料の接合⁶⁾⁷⁾、タングステン薄板の接合⁸⁾などに成果を挙げている。図3に水中衝撃波を用いた爆発圧接法の模式図を示す。ここで接合される金属板間の間隙は 0.5 mm 以下と極めて小さく可視化は難しいので、金属板上方に作用する水中衝撃波の伝播挙動のデータに基づいて接合に重要なパラメータ (金属板の衝突速度と衝突角度) を数値シミュレーションで求めている。

図4は水中衝撃波の光学撮影結果⁹⁾であるが、水中衝撃波は爆薬近傍では高速に伝播するため傾斜が急峻で、爆薬から離れるにつれて伝播速度が低下して次第にゆるやかな

図3 水中衝撃波を用いた爆発圧接法の模式図

図4 水中衝撃波の伝播挙動に関する光学計測結果および数値解析結果 (5 μ s ごと)

勾配へと変化する。図4の右側に AUTODYN を用いて計算した数値解析結果を示すが、両者は良好な一致を示している。

実は図3の爆薬を傾斜させた装置は、水中で使用可能な爆薬に制約があり、爆轟速度の速い高性能爆薬 (爆轟速度約 7 km/s, 密度 1310 kg/m³) を使用しなければならなかったことによる。爆薬を傾斜させることで、接合条件を満たすように水平方向への衝突点移動速度を低下させている。このとき爆薬厚さを一定にすると起爆側と反対側で作用圧力に大きな差が生じるため、板の衝突速度が水平方向の位置によって大きく変化する。作用圧力を均一にすることは爆薬を次第に厚くすることで実現可能で、簡単な理論的考察から爆薬の厚さと爆薬と試料間の距離の比を一定にすることで作用圧力を一定にすることができる⁹⁾¹⁰⁾。図5に、爆薬の厚さを次第に増加させた場合について、水平方向位置 (x) の変化に対する圧力の時間履歴のシミュレーション結果を示す。計算結果は予想されたように、水平方向の位置に対して均一な圧力作用が得られることが確認されている。

図5 数値解析による圧力の時間履歴に関する解析結果⁶⁾ (x は水平方向座標；爆薬の厚さを増加させた場合の結果)

4.2 火薬衝撃銃を用いた金属ジェットの観測

爆薬の爆発現象は爆発ピット外部の4 m ぐらい離れた位置から望遠レンズを用いて撮影するが、衝撃銃装置を用いる場合には、現象が直近から観察可能である。施設内には口径40 mmの火薬衝撃銃が設置されており、これを利用した高速現象の観測も可能である。著者らはかねてより爆発圧接において接合に大きく寄与する金属ジェットの観察に興味をもっていたものの、前述したように爆轟ガスの先行による遮光に阻まれて、これを実現することが長くできなかった。この種の観測実験は、フラッシュX線装置¹¹⁾があれば爆発ピット内でも実施可能であるが、高額な機器であるために実現することはできていない。金属ジェットは、金属板の傾斜衝突の際に衝突点前方に生じる高速の材料流動であり、材料表面の清浄化と活性化に大きく寄与し、爆発圧接の特徴である強い異材接合を可能にする。その状態は、高温でプラズマ化しているという解説もある¹²⁾。著者の一人は以前、ジョージア工科大の協力で80 mm口径のガス銃装置を用いて観測実験を行い、衝突点前方に細く伸ばされたジェットや霧状に飛散したジェットを確認している¹³⁾。そのときの実験では、衝突速度が速いほど、金属ジェットが広がって飛散する結果であった¹³⁾。コンカルシューブドチャージと呼ばれる方法で、円錐金属板を収束衝突させて金属ジェットを生じさせる方法もあり、この場合にジェットは衝突点前方に細長く伸ばされて生じることが知られている¹⁴⁾。

図6に、熊本大学の火薬衝撃銃を用いて最近撮影に成功した3 mmの銅板同士を傾斜衝突(傾斜角25°、衝突速度495 m/s)させたときの金属ジェットの観察結果を示す。この場合には金属ジェットが衝突点前方に広がって形成されていた。このとき金属ジェットに自発光は認められないことから、ジェット自体がプラズマ化していることは

図6 火薬衝撃銃を用いた金属板同士の傾斜衝突の光学観測結果(5 μs ごと)

ないように思われた。ただ空気中での観測例ではハレーションが観察されている¹⁵⁾ので、自発光が生じないことは実験が真空中であったことに起因しているのかもしれない。

金属ジェットの生成以外にも、爆発圧接した材料に特有な組織として知られている波状界面の形成も可視化できればよいのであるが、材料内部の流動現象なので直接の可視化は難しい。最近では、波状界面形成の数値シミュレーションも多く試みられており、波の形成過程は示しているものの^{16)~18)}、波のサイズや形状に対する定量的な予測は現状では難しいようである。ここで図7に水中衝撃波によって接合されたタングステンと銅の接合境界の組織写真を示す⁸⁾が、図8(b)に示すようにほとんど延性のないタングステンに非常に大きな流動(渦巻状に伸長された組織)が生じていることは、興味深い実験結果である。

4.3 水中に生じるバブルの観察

水中爆発で重要な現象として、爆轟ガスの膨張・収縮運動によるバブルパルスが知られている。水中で行う金属板の爆発成形では、型への高速衝突の後、このバブルパルスの作用によって精密な型転写の効果があるといわれている¹⁹⁾²⁰⁾。この現象は、爆発で生じたガス体がまず膨張した後、膨張のための慣性力を失って周囲の水からの圧縮作用を受けて1点に収束し、収束することで圧力が上昇して再び膨張し始めるので、数回の繰り返し作用があることが知られている。このとき、初回の圧力が最も高く、現象が繰り返されるたびに浮力などの影響を受けてその後の作用は急激に小さくなる¹⁹⁾。この現象は、衝撃波の通過と比較すると遅い現象である。

図8に、前述のカメラより撮影時間間隔の長いカメラを用いて、水中放電によって生じたバブルパルスの運動を観察した結果を示す²¹⁾。この場合の充電エネルギーは10 kJであり、水中放電時に生じる電極のギャップ間での放電によって水が気化してバブルを形成することになる。バブルの収縮に伴ってそれが完全に1点に収束する場合には、極

図7 水中衝撃波によって接合されたタンゲステンと銅の接合界面⁸⁾

図8 水中放電爆発で生じたバブルパルスの光学計測結果（電極間距離：3 mm）²¹⁾

めて高い圧力を作用させることができるが、実際に得られる圧力は収束の程度に依存することになる。爆薬や放電を用いなくても、ナノ秒高出力レーザを利用して、水中に数mm径のバブルの運動が生じることも観察されている^{22)~24)}。著者の一人は、水中でTiにレーザを照射してアブレーションを生じさせ、結晶性の高いアナターゼ構造のTiO₂の合成に成功している²⁴⁾。この他にも、液体窒素中で衝撃大電流をTi金属細線に作用させることでTiN粉末を反応合成する方法を開発することにも成功している²⁵⁾。液体が光透過性を有している限り、光学計測を通じて衝撃波の伝播速度や圧力の推定も可能であるが、極低温下での現象の観測は現状ではできていない。

通常の爆発合成によって回収されるダイヤモンド粉末はナノメートルサイズの一次粒子の凝集体であることが知ら

れており、半導体などの硬質材料の精密研磨に使用されてきた²⁶⁾。他にも、CVDダイヤモンド薄膜作製用の種結晶、塗膜の強度や熱伝導性向上用のフィラーなど、多様な用途開発が進みつつある。今後、液中での合成も含めて、爆発衝撃による手法が新素材創製技術のひとつとして広く実用化されることを期待している。

4.4 その他の光学計測の可能性について

金属の変形挙動については、紙面の都合で今回はあまり示すことができなかったが、高速変形に伴う延性増大の効果が多く報告されている^{27)~29)}。著者らはマグネシウム合金(AZ31)の管を内部から爆発させて膨張試験を行ったが、引張力が作用するためか延性増大の効果は認められなかった。一方、平板状歯車型への成形試験では、材料が圧縮力の作用を受けながら成形されるためにクラックが形成しにくくなる結果が示された³⁰⁾。このときの断面組織には再結晶が生じたと思われる超微細結晶粒が材料表面に観察され、生じている現象は温度の局在化の影響も多いと思われる。今後、光学計測や数値シミュレーションを通じて、材料の高速変形や付随する各種現象の解明が進めばと考えている。

5. ま と め

本文中にも述べたが、著者の一人（外本）が所属するパルスパワー科学研究所はこの4月に発足したばかりで、爆薬をはじめとする各種のパルスパワー応用技術開発を実現させることが使命となっている。光学計測を含めた総合的な爆発衝撃現象に関わる研究の実施が可能な国内では唯一の大学関連施設であることから、興味をもたれた多くの読者の皆様に積極的に利用を検討していただければと考えている。

謝 辞

本研究は、濱嶋英樹博士（熊本県産業技術センター）、Dr. P. Manikandan（熊本大学 COE リサーチアソシエイト；現在（株）タダノ）などと実施した研究の成果をまとめたものである。実験を支援された田中茂博士、前原弘法博士（熊本大学）も含めた関係各位に、この場を借りて感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 外本和幸：高エネルギー速度現象の材料加工への応用，セラミックス，**46**, 5 (2011) 400.
- 2) 相沢友勝，岡川啓吾：金属薄板の電磁圧接，塑性と加工，**52**, 603 (2011) 424.
- 3) 今井田豊：放電時の現象の圧力の発生，塑性と加工，**25**, 283 (1984) 687.
- 4) 片山雅英：爆発を中心とした衝撃問題の数値解析法，Explosion, **14**, 2 (2004) 60.
- 5) K. Hokamoto, M. Fujita, H. Shimokawa and H. Okugawa: A New Method for Explosive Welding of Al/ZrO₂ Joint Using Regulated Underwater Shock Wave, J. Mater. Process. Technol., **85** (1999) 175.
- 6) K. Hokamoto, K. Nakata, A. Mori, S. Tsuda, T. Tsumura and A.

- Inoue : Dissimilar Material Welding of Rapidly Solidified Foil and Stainless Steel Plate Using Underwater Explosive Welding Technique, *J. Alloys Compounds*, **472** (2009) 507.
- 7) K. Hokamoto, K. Nakata, A. Mori, S. Ii, R. Tomoshige, S. Tsuda, T. Tsumura and A. Inoue : Microstructural Characterization of Explosively Welded Rapidly Solidified Foil and Stainless Steel Plate through the Acceleration Employing Underwater Shock Wave, *J. Alloys Compounds*, **485** (2009) 817.
 - 8) P. Manikandan, J.O. Lee, K. Mizumachi, A. Mori, K. Raghukandan and K. Hokamoto : Underwater Explosive Welding of Thin Tungsten Foils and Copper, *J. Nuclear Mater.*, **418** (2011) 281.
 - 9) 森昭寿 : 水中衝撃波の制御による金属薄板の爆発圧接法に関する研究, 熊本大学博士論文, (2006).
 - 10) 森昭寿, 外本和幸, 藤田昌大 : 水中衝撃波を利用する爆発圧接法における衝撃圧力の制御法, 塑性と加工, **19**, 542 (2006) 195.
 - 11) 藤田昌大, 千葉昂, 立川逸郎 : 爆発圧接法とその応用, 日本金属学会会報, **20**, 5 (1981) 385.
 - 12) 野村順一 : 爆発加工について, 塑性と加工, **25**, 283 (1984) 680.
 - 13) S.H. Ghaderi, M. Palavesamuthu, K. Hokamoto, N. Thadhani and M. Fujita : Effect of Strength of the Flyer Plate Material on the Collision Parameters in Explosive Welding, *Sci. Technol. Energetic Materials*, **70** (2009) 81.
 - 14) M.A. Meyers : Dynamic Behavior of Materials, John Wiley & Sons, Inc., (1994) 570.
 - 15) A. Kira, D. Takaenoki, H. Hamashima, R. Tomoshige, M. Fujita, K. Hokamoto and S. Itoh : Optical Observation of Extremely High Impulsive Pressure Generator Using Collision of High Velocity Metal Jets, *Mater. Sci. Forum*, **465-466** (2004) 265.
 - 16) K. Tanaka : Numerical Studies of Explosive Welding by SHP, *Mater. Sci. Forum*, **566** (2008) 61.
 - 17) A.A. Akbari Mousavi and S.T.S. Al-Hassani : Numerical and Experimental Studies of the Mechanism of the Wavy Interface Formations in Explosive/Impact Welding, *J. Mechanics Phys. Solids*, **53**, 11 (2005) 2501.
 - 18) S.P. Kiselev : Numerical Simulation of Wave Formation in an Oblique Impact of Plates by the Method of Molecular Dynamics, *J. Appl. Mech. Technical Phys.*, **53**, 6 (2012) 907.
 - 19) 井上卓 : 爆発成形法, 塑性と加工, **7**, 71 (1966) 644.
 - 20) 藤田昌大 : 高エネルギー速度成形法における相似則, 塑性と加工, **13**, 141 (1972) 776.
 - 21) 濱嶋英樹, 和田直之, 外本和幸, 伊東繁 : 火薬学会 2011 年度年会講演要旨集, (2011) 141.
 - 22) N. Wada, C. -H. Kim, J.J. Yoh, H. Hamashima and K. Hokamoto : Synthesis of Anatase Phase Titanium Dioxide Using High-Power Nd : YAG Laser Focused on Titanium Wire in Water, *Mater. Trans*, **53**, 1 (2012) 244.
 - 23) S.C. Singh, R.K. Swarnkar and R. Gopal : Synthesis of Titanium Dioxide Nanomaterial by Pulsed Laser Ablation in Water, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **9** (2009) 5367.
 - 24) K. Sasaki and N. Takada : Liquid-phase Laser Ablation, *Pure Appl. Chem.*, **82** (2010) 1317.
 - 25) K. Hokamoto, N. Wada, R. Tomoshige, S. Kai and Y. Ujimoto : Synthesis of TiN Powders through Electrical Wire Explosion in Liquid Nitrogen, *J. Alloys and Compounds*, **485** (2009) 573.
 - 26) 高山和喜編 : 衝撃波ハンドブック, Springer, (1995) 830.
 - 27) M. Kiritani : Dislocation-free Plastic Deformation under High Stress, *Mater. Sci. Eng.*, **350A** (2003) 1.
 - 28) 向井敏司, 東健司, 土田信, 谷村眞治 : 各種アルミニウム合金の引張特性に及ぼすひずみ速度の影響, 軽金属, **43** (1993) 252.
 - 29) 日向毅, 井山裕文, 伊東繁 : 水中衝撃波を利用したアルミニウム合金の自由張り出し成形に関する研究, *Sci. Technol. Energetic Mater.*, **66** (2005) 301.
 - 30) L. Ruan, K. Hokamoto, Y. Marumo and I. Yahiro : Tests on High-velocity Forming of AZ31 Magnesium Alloy by Explosive-impulsive Pressure, *Advanced Mater. Res.*, **154-155** (2011) 1077.

外本和幸

1987 年九州大学大学院単位取得退学, 工学博士。爆薬等を用いた各種材料加工技術開発に長年従事。著書「Explosive Compaction of Powders & Composites」(共著)他。

森 昭寿

2006 年熊本大学大学院博士課程修了, 博士(工学)。2009 年から崇城大学工学部において爆発加工法とその数値解析に関する研究に従事。