特集 — 衝撃超高圧力研究の新展開 —

爆薬を利用した衝撃材料プロセッシングの
現状と将来展望Dynamic Processing of Materials Using Explosives
— Current Research Trends and Its Future —

外本 和幸

Kazuyuki HOKAMOTO

In this article, current research trends and the future in dynamic processing of materials are reviewed. Some fundamentals and recent topics in the related issues are introduced for explosive welding, explosive powder compaction and shock-induced reaction synthesis, which are mainly based on some research works made at the Shock Wave and Condensed Matter Research Center, Kumamoto University.

[*explosive materials processing, explosive welding, explosive powder compaction, shock synthesis, shock wave*]

1. はじめに

爆薬はトンネル・鉱山での発破など、物質を破壊する目的に使われるのが一般的である。これとは逆の発想で、爆薬によって得られる衝撃超高圧状態を「ものづくり」に利用しようという試みについてもこれまで精力的に検討され、後述する衝撃材料プロセッシング技術が実際の生産技術として実用化されるなど、一定の成果を挙げている。筆者はこれまで、この衝撃材料プロセッシングに関する研究に携ってきた。通常とは極めて異なる手法による材料加工（プロセッシング）を行うことで、従来とは極端に性能（機能）の異なる材料が得られることを期待して各種の研究を実施している。本稿ではまず、著者の所属する熊本大学衝撃・極限環境研究センターの爆発衝撃実験施設を簡単に紹介する。さらに爆発圧接、粉末衝撃成形、衝撃誘起反応などを中心として、関連する技術の基礎事項や生産活動の現状、最近の研究トピックスなどについて、筆者の最近の成果も交えて紹介することで、研究の現状を概説してみたい。

2. 熊本大学衝撃・極限環境研究センターの爆発衝撃実験施設

熊本大学衝撃・極限環境研究センターは、国立大学法人で唯一、総合的な爆発衝撃実験施設を有している。熊本大学では、このセンターが1999年に設置される以前から、材料の衝撃圧縮に関わる研究が、工学部附属衝撃エネルギー実験所（1971年に設置）を中心に活発に推進されてきた。衝撃材料物性の分野では、本特集号を取りまとめられた真下茂氏が著名であるが、これとは別に熊本大学では、1960年代頃から爆薬を利用した衝撃材料プロセッシング（当時は爆発加工といわれた）に関連する研究のアクティビティーがあり、爆発現象の平和利用に関してユニークな研究成果を挙げてきた。特に爆発実験に際しての安全確保のためには、企業で経験を積んだ専任の教員を配置しており、爆薬の専門家だけでなく施設を安全に利用できるように配慮されている。世界的に見ても爆薬の平和利用に特化した類似の施設は少なく、海外の関連研究者などからも注目されていることをここで強調しておきたい[1]。

爆発衝撃実験施設は、センター棟（ベンチャービジネスラボと合築）の工事に際して別棟実験棟（平

〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1 熊本大学衝撃・極限環境研究センター

Shock Wave and Condensed Matter Research Center, Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto 860-8555

Electronic address: hokamoto@mech.kumamoto-u.ac.jp

屋、一部2階建；335 m²）として建てられ、2001年に竣工した。Fig. 1(a)に実験棟の外観、Fig. 1(b)に断面図を示すが、建物内には爆発ピット2基（最大使用爆薬量 10 kg）、と水中爆発実験用水槽が整備されている。ピットのうちひとつは計測実験用（内径 6 m）であり、高速度カメラによる光学計測実験の実施も可能である。もう1基のピット（内径 5 m）は主に試料回収実験に用いる。

3. 各種衝撃材料プロセッシング技術の概要と課題

3.1 爆発圧接

爆発圧接は、関連技術の中で最も確固たる工業的地位を築いており、内外で活発な生産活動が行われている。この技術の基礎的事項については多くの解

(a)

(b)

Fig. 1. An outer view (a) and a vertical section (b) of the Research building for explosion experiments in Shock Wave and Condensed Matter Research Center, Kumamoto University.

説記事があるので[2, 3]，詳しくはそちらを参照していただきたいが，数百 m/s 程度での金属板同士の傾斜衝突によって生じる衝突点前方への材料流動（金属ジェット）の作用によって，接合される材料の表面同士が活性化され，両者は強固に接合する。この技術は，溶接分野では冷間圧接に分類されるが，接合境界について TEM などを用いて微視的に観察すると，液体金属の超急冷に起因して生じるアモルファスや，超微細結晶，準結晶などの非平衡組織が認められることが報告されている[4-6]。しかしながら高温の作用する時間は極めて短時間で，熱影響の及ぶ範囲は接合境界近傍の極表層に限られるため，異材継手の製造などにおいて最も問題となる硬脆な化合物層の生成を最小限にとどめることができる。このため，他の方法で得られる異材継手と比較して接合強度に対する高い信頼性を有しているのが特徴である。塑性流動応力をはるかに超える状態下で材料が高速変形することにより，Fig. 2に示すように接合境界は規則的な波状組織を呈することが知られている。この波状組織の生成原因については長く議論が続いているが，最近では数値シミュレーション技術の進展によって波の成長の様子や形成条件などが明らかにされつつある[7, 8]。

我々の研究室では，水中衝撃波を用いる新しい方法を提案し，研究を推進中である。この方法では，Fig. 3に示すような装置を用い，爆薬が反応してきた爆轟ガスの直接の作用ではなく，水を介することで比較的薄い金属板を均一かつ急速に加速・接合できるのが特徴である。著者らはこの方法を用いて，

Fig. 2. Optical micrograph of the explosively welded interface between titanium and 304 stainless steel clad (Courtesy by Dr. P. Manikandan).

金属薄板とセラミックスの全面接合に成功した[9]ほか、アモルファス箔の接合[10]も可能であることをすでに示している。大面積を接合するためには、水中衝撃波の作用圧力をコントロールすること[11]や、薄板のサイズに制限がある場合を考慮して部分的に薄板を重ねて接合する技術の開発[12]も必要になる。現在、この方法を用いる場合の技術的な限界を探索している。前にも述べたような強い接合強度に対する信頼性から、希少金属の有効利用などにも役立てられればと考えている。特に最近では、高い反応性のために接合が困難と思われていた Mg 合金に関しても、この水中衝撃波を利用して薄い金属板を加速することで、良好な接合体が得られることも示している[13]。このとき、飛翔体の持つ運動エネルギーは通常法の場合と比較してかなり低減できるので、接合境界での溶融や硬脆な反応化合物の形成はかなり抑制される。このことにより、接合条件範囲が狭い難接合の材料組合せに対する応用展開が開けることを期待している。

3.2 粉末衝撃成形・合成

各種高機能性を有する粉末は、その製造過程から熱的非平衡材料である場合が多く、熱が加わる通常の焼結法では良好な性質を有するバルク体が得がたいような場合が多い。このような材料には、爆発による衝撃波を作用させる方法や、衝撃銃を用いた高

速衝突による方法を用いて、固化成形（バルク化）の試みが多くなされている[14-17]。通常の静的プレスでは得がたい 95%以上の充填密度が比較的容易に得られるとともに、強い粒子間結合も期待できる。粒子間の接合機構は、粒子間の相対速度に起因するせん断摩擦や粒子接触点での激しい塑性変形によるとされるが、特に変形しやすい金属粒子が傾斜角を有しながら衝突するような場合には、爆発圧接と類似の金属ジェットの痕跡や波状の接合境界が見られるようなこともある[18]。ただし一般に供給される粉末には粒子形状、サイズにばらつきがあるために、全ての粒子間結合の状況を均一にすることが難しいという問題もある。

衝撃波負荷の方法についても各種の方法が提案されており、円筒内に粉末を充填し、その周りに置いた爆薬を起爆する方法（円筒法）が最も一般的である。ただしこの方法では、円筒の中心部でマッハ軸を形成して中心部に空洞を生じるなどの難点がある。これとは別に高速飛翔体を高速衝突させる方法や、爆薬の爆轟圧力を直接作用させる方法の他、水中衝撃波を介して一方向に粉末を衝撃圧縮する手法も提案されているが、装置は個々にやや複雑である。ロシアには、火薬を用いたピストンの高速駆動による衝撃プレス装置 Hydrodynamic machine が工業的に実用化されたようであるが[19]、到達可能圧力は比較的低く、生産規模に関する情報は不明である。

粉末の衝撃成形を可能にするための条件は、基本的には粉末の硬度に比例して作用圧力を高めてやればよく、ダイヤモンド粉末を固化成形するためには 100 GPa 程度の圧力が必要であると見込まれる[20]。衝撃超高压を用いた報告はいくつかある[21, 22]が、一般に圧力を高めすぎると良好な状態での成形体の回収が困難になるので、粉末を加熱して衝撃圧縮するホット・ダイナミック・コンパクション法の利用が有効な場合もある。ダイヤモンドは 1000℃以上の高温で軟化（塑性変形）することが知られており[23]、我々のこれまでの研究では、水中収束衝撃波を用いる方法[24]や円筒型装置を用いる方法[25]で、グラファイト化を生じることなしに、高硬度のダイヤモンド粉末成形体が回収できることが示されている。回収された成形体は、多結晶体であることによって高い破壊靱性値が期待される他、多くの格子歪が導入されており、激しく変形を受けた状況が観察されている[25]。

粉末衝撃成形に使用するのと同様の装置を用いて、

Fig. 3. Set-up diagram for explosive welding using underwater shock wave. Standard sample size; 40 mm in width and 60 mm in length. For welding, parameters were normally set at $\alpha = 20^\circ$, $D = 40 - 60$ mm for a high-explosive with detonation velocity of 7 km/s.

衝撃合成も可能である。グラファイト構造を持つ原料物質を衝撃圧縮して合成されたダイヤモンドおよび w-BN 粉末は、それらの優れた特性から国内でも生産活動が行われている。これとは別に、ロシアや中国では、特定の爆薬の爆轟で生じた煤から超微粉末として回収されるクラスタータイプのダイヤモンド粉末が生産されている。ナノサイズのダイヤモンド粉末は、高い潤滑特性など多くの機能性を有しており、多方面での用途開拓が待たれている。この他、最近になって立方晶 Si_3N_4 が衝撃圧縮法によって回収されることが示される[26] など、将来衝撃圧縮技術が未踏新物質の探索技術として広く利用されるようになることを期待する。

燃焼合成 (SHS; Self-propagating High-temperature Synthesis) に関連した技術としては、元素粉末混合体から衝撃波で反応を誘起して化合物を形成する技術[27-29] や、元素粉末混合体を予め燃焼合成させ、その直後に衝撃圧を作用させて固化成形する研究などが行われている[30]。

最近、筆者らは、材料の表面処理技術としての衝撃圧縮技術の応用に注目し、いくつかの成果を挙げつつある。Fig. 4 はダイヤモンド粒子を水中衝撃波によって加速して Al 基板に打ち込んだ材料表面の SEM 写真であるが、ダイヤモンド粒子が多数、基板表面に埋め込まれている状況がわかる。このとき、直径 $10\sim 20\mu\text{m}$ 程度のダイヤモンド粒子が、数百 μm 程度の深さにまで浸透したことが確認されている[31]。このような表面被覆を施すことによって、材料表面の耐摩耗性や熱伝導性が改善されることを

Fig. 4. SEM image of diamond particles on an aluminum plate obtained by the acceleration of powders through underwater shock wave.

期待している。類似の方法で、均一な被覆層を得ることも可能である。Fig. 5 は軟鋼基板上に WC-Co 粉末を設置した後、粉末衝撃成形した場合に得られた被覆層の外観 (Fig. 5(a)) と、断面組織 (Fig. 5(b)) を示す[32]。この時、粉末と隣り合わせに自己反応性物質であるニトロセルロースを薄く併置して、これが衝撃波の作用によって分解するときの熱エネルギーの効果によって粒子間結合を改善することをもくろみ、この配置を用いたことによる効果が明らかに認められた。この材料の場合には、粒子間結合を改善するためにさらに最終熱処理を行った結果、WC-Co 層は高い硬度値と良好な耐摩耗性を示すことが確認された[32]。

3.3 その他

板材の爆発成形技術は多品種・少量生産には都合の良い技術といえそうである。Fig. 6 にレリーフ製品の作成例を示す。施工に際しては雌型だけしか必要がなく、しかも型は紙やプラスチックなどでよく[33]、各種の応用展開が広がることを期待している。金属材料には、高速変形に伴う延性増大の効果[34] が報告されており、この高速現象の効果を活用するためには、各種材料の高速変形特性に関するデータの蓄積と、それに基づく製造条件・方法の検討が

Fig. 5. Appearance (a) and cross-sectional microstructure (b) of WC-Co coating layer on mild steel substrate through the powder compaction method using underwater shock wave[32].

Fig. 6. Explosively formed example of a copper relief plate (~400 mm×~140 mm). (Courtesy of Prof. S. Itoh).

さらに必要になるであろう。

この他にも、粉末を爆発による衝撃力によって気体中に飛散させ、金属酸化物（セラミックス）のナノパウダーを回収することも可能である[35]。本技術にとどまらず、上記で述べてきたいずれの事項に関しても、衝撃による瞬間的な状態量の変化に基づいて、特に材料の下部組織の微細化を中心に、各種の特殊な効果をもたらしてくれる可能性を期待している。

また、各種の技術を確立することについては、単に爆薬の利用だけではなく、衝撃大電流をはじめとする各種のエネルギー源を利用することも可能であると思われる[36-38]。爆薬は発生エネルギーが大きく、急峻な反応をするのが特徴であるが、今後、各種の衝撃的手法による加工法の開発についても、広く検討する時期が来ているように感じている。

4. おわりに

筆者はこれまで、材料の生産・加工技術に関する応用研究を行い、旨く加工するためにどのように方法を改善するかということを中心に研究を広く実施してきた。このため、やや雑駁な各種技術の紹介記事になった点をご容赦いただきたい。関連する重要な研究分野としては、材料の高速変形や破壊の問題に関連して、スペースデブリ・航空機の高速衝突問題や、自動車の衝突安全性の他、爆発安全保安（テロ対策や地雷処理）など、社会的に緊急性のあるテーマも増えているように思われる。本稿を通じて、ぜひ広く爆薬利用関連の分野にも、関心を持っていたいただければと考えている次第である。

謝 辞

本稿を執筆するに際し、写真をご提供いただいた伊東繁氏（熊本大学衝撃・極限環境研究センター・センター長）および P. Manikandan 氏（同・研究員）に深く謝意を表します。

参考文献

- [1] http://www.shocomarec.kumamoto-u.ac.jp/index_j.htm
- [2] 藤田昌大, 千葉昂, 立川逸郎: 日本金属学会報, **20**, 385 (1981).
- [3] 外本和幸, 柿本悦二: 塑性と加工, **44**, 906 (2003).
- [4] M. Nishida, A. Chiba, K. Imamura, H. Minato, J. Shudo: Metall. Trans., **24A**, 735 (1993).
- [5] A. Chiba, M. Nishida, M. Morizono, K. Imamura: J. Phase Equilibria, **16**, 411 (1995).
- [6] M. Nishida, A. Chiba, Y. Morizono, M. Matsumoto, T. Murakami, A. Inoue: Mater. Trans. JIM, **36**, 1338 (1995).
- [7] 田中克己: 第 46 回高圧討論会講演要旨集, 3D09, p. 244 (2005).
- [8] A.A.A. Mousavi, S.T.S. Al-Hassani: J. Mech. and Phys. of Solids, **52**, 2501 (2005).
- [9] K. Hokamoto, M. Fujita, H. Shimokawa, H. Okugawa: J. Mater. Process. Technol., **85**, 175 (1999).
- [10] K. Hokamoto, M. Fujita, T. Ono, B. Shao, Z. Liu: in *Metallurgical and Materials Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena*, eds. L.E. Murr, K.P. Staudhammer, M.A. Meyers (Elsevier, New York, 1995), Chap. 99, pp. 831-837.
- [11] 森昭寿, 外本和幸, 藤田昌大: 塑性と加工, **47**, 195 (2006).
- [12] 森昭寿, 外本和幸, 藤田昌大: 第 57 回塑性加工連合講演会講演論文集, p. 109 (2006).
- [13] 森昭寿, 外本和幸, 藤田昌大: 第 47 回高圧討論会講演要旨集, 3P44, p. 356 (2006).
- [14] R. Pruemmer: Mater. Sci. Eng., **98**, 461 (1988).
- [15] D.G. Morris: Metal Powder Report, **38**, 405 (1983).
- [16] Z.-Q. Jin, C. Rockett, J.P. Liu, K. Hokamoto, N.N. Thadhani: Mater. Trans., **46**, 372 (2005).
- [17] A. Chiba, K. Hokamoto, S. Sugimoto, T. Kozuka, A. Mori, E. Kakimoto: J. Magnetism and Magnetic Mater., **310**, e881 (2007).
- [18] R. Pruemmer: in *Explosivverdichtung pulvriger Substanzen* (Springer-Verlag, Berlin, 1987).
- [19] O.V. Roman, V.G. Gorobtsov: in *Shock Wave for Industrial Applications*, ed. L.E. Murr (Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, USA, 1988), Chap. 9, pp. 335-379.
- [20] M.A. Meyers, N.N. Thadhani, L.-H. Yu: in *Shock Wave for Industrial Applications*, ed. L.E. Murr (Noyes

- Publications, Park Ridge, New Jersey, USA, 1988), Chap. 8, pp. 265-334.
- [21] T. Akashi, A.B. Sawaoka: *J. Mater. Sci.* **22**, 3276 (1992).
- [22] K. Kondo: *J. Amer. Ceram. Soc.*, **75**, 253 (1992).
- [23] R.C. De Vries: *Mater. Res. Bull.*, **10**, 1193 (1975).
- [24] K. Hokamoto, M. Fujita, S. Tanaka, T. Kodama, Y. Ujimoto, *Scripta Mater.*, **39**, 1383 (1998).
- [25] 外本和幸, 平和也, R. Pruemmer, R. Knitter: 第46回高圧討論会講演要旨集, 3D11, p. 246 (2005).
- [26] T. Sekine: *J. Amer. Ceram. Soc.*, **85**, 113 (2002).
- [27] L.-H. Yu, M.A. Meyers: *J. Mater. Sci.*, **26**, 601 (1991).
- [28] N.N. Thadhani, R.A. Graham, T. Royal, E. Dunbar, M.U. Anderson, G.T. Holman: *J. Appl. Phys.*, **82**, 1113 (1997).
- [29] K. Hokamoto, J.S. Lee, M. Fujita, S. Itoh, K. Raghukandan: *J. Mater. Sci.*, **37**, 4073 (2002).
- [30] R. Tomoshige, Y. Kakoki, K. Imamura, A. Chiba: *J. Mater. Process. Technol.*, **85**, 105 (1999).
- [31] K. Hokamoto, S. Tanaka, S. Torii, M. Touge, S. Itoh: in *Proc. 2nd JSME/ASME International Conference on Materials and Processing* (JSME No. 05-203, IMP-03, 2005).
- [32] S.H. Lee, K. Hokamoto: *Mater. Trans.*, **48**, 80 (2007).
- [33] 藤田昌大: まてりあ, **36**, 464 (1997).
- [34] 日向猛, 井山裕文, 伊東繁: *Science and Technology of Energetic Materials*, **66**, 301 (2005).
- [35] A.A. Bukaemskii, A.G. Beloshapko: *Combustion, Explosion and Shock Waves*, **37**, 594 (2001).
- [36] K. Okagawa, T. Aizawa: *Mater. Sci. Forum*, **465-466**, 231 (2004).
- [37] 横井真, 桐村剛, 長谷部忠司, 今井田豊: *材料*, **44**, 602 (1995).
- [38] F. Tepper: *Metal Powder Report*, **53**, 31(1998).

[2007年5月31日受理]

© 2007 日本高圧力学会