動的超高压力の発生と応用(2)材料合成と粉体の加工

澤 岡 昭*

1. 衝 撃 加 工

一定のエネルギーを使って、物体を加工したり物質の合成を行うとき、できるだけ短時間にエネルギーを集中して与えることが効果的である場合がある。この方法によって、普通の方法では不可能な加工や新物質を創ることができる。その代表的な方法が衝撃超高压力を利用する方法である。衝撃波は物体のなかを伝播する音速を超える速さで伝わる縦波のことである。この縦波のなかでは、物体は一方向に強く圧縮された状態になっていることは、すでに述べたとおりである。金属板に爆発衝撃波を与えて塑性変形させたり、2枚の異種の金属板を接合させる方法が、工業的に行われており、すぐれた解説もあるので、ここでは述べないこととする⁽¹⁾。

物体に衝撃波が作用するとき、その圧力が低い場合、物体は塑性変形せずに弾性体として振る舞う。ある限界の圧力を超えると、あたかも流体のように振る舞う。この限界値をウゴニオ弾性限界値(HEL)と呼んでいる。無機物質のHELは一般に、金属よりはるかに高い。たとえば、サファイアのHELは15 GPaである。この圧力をサファイア同士の衝突によって得ようとするならば、秒速0.8 kmが必要である。このように硬いセラミックスの衝撃加工や合成を行うためには、かなり高い衝撃圧力を必要とする。本解説では、衝撃超高压力を利用する物質合成と、最近、急速に注目されている粉体の加工について述べることとする。

2. 衝 撃 合 成

衝突や爆薬の爆発による衝撃合成の歴史は古い。この種の研究は軍事研究と平行して、細々と行われてきた

ではない。文献で見ると、始めての本格的な実験は60年以上も前に行われたParsonによるダイヤモンド合成実験であった(図1)⁽²⁾。現在でも戦車砲の弾丸として使われている成形弾は爆薬の先端に先開きのロート状の金属ライナーを取付けたものである。ライナーの反対側の爆薬を爆発させると、爆薬中を伝わる衝撃波(爆轟波)によってライナーはロートの中心軸に向かって飛び出し、衝突してさらに速度を増し、高速の金属ジェットとなって噴き出す。この金属ジェットによって戦車の鋼板に穴をあけようというものである。この弾丸にヒントを得たParsonは金属ライナーの代りに、黒鉛のライナーを張って、炭素のジェットを噴き出させた。それを鉄製の台に噴き付け回収した。秒速6 km以上で噴き出した炭素ジェットのすべてを回収することは難しく、ほとんどが吹き飛んでしまったが、わずかに回収された部分のなかから、ダイヤモンドを見い出したと報告している。しかし、この報告は現在から見れば不備が多く、信じられるに至っていない。類似の実験を熊本大学の清田らが行った結果、わずかでであるがダイヤモンドを見い出している。彼らの実験は炭素ジェットを金属板に噴き付けるのではなく、水中に噴き出して回収に成功している。この技術は回収されるダイヤモンドの量がきわめて少ないので、工業的に利用されるには至っていない。

衝突によって新物質が合成できる可能性を最初に示し

図1 Parsonのダイヤモンド合成実験。

* 東京工業大学教授；工業材料研究所
Production and Application of Dynamic Very High Pressure (2)Material Synthesis and Dynamic Compaction of Powders: Akira Sawaoka (Research Lab. of Eng. Materials, Tokyo Institute of Technology, Yokohama)
Keywords: dynamic high pressure, shock, impact, synthesis, compaction, material, powder
1984年3月12日受理

たのは隕石が落下して出来た隕石孔から、さまざまな高密度型鉱物が発見されたことによる。その代表的なものが高密度石英である。石英の結晶構造は温度とともに、さまざまな形に変化する。さらに圧力によっても変化する。隕石孔から発見された石英のなかに、従来、知られていなかった2種類の高密度型のものがあった。 α -石英(水晶)より密度が10%高いものと、さらにそれより45%高密度なものであった。前者は α -石英と同じように1個のシリコン原子の周りを4個の酸素原子が取り囲んでいる4配位のものであったが、後者は6つの酸素原子に取り囲まれているという特異なものであった。さらに後者の石英はフッ酸でも溶かすことが出来ないという強い化学結合を持ったものであった。これらの鉱物と同じ結晶構造を持った石英が、すでに静的超高压力技術を使って合成されており、始めて合成した研究者の名前を取って、隕石孔から発見された鉱物は、それぞれコーサイトとスティショバイトと名付けられた。このことは、きわめて短時間の衝撃圧縮によって、高密度型の物質が生成することを示している。静的超高压力の実験では、これらの高密度型石英の生成には、比較的長い時間を必要としており、衝撃合成を志す者にとっては、大変力づけられる発見であった。ダイヤモンドも隕石孔から発見された。天体で生まれたダイヤモンドが隕石に乗って地上に辿り着いたものか、隕石の衝突の際、生成したものであるかについての議論が永い間なされて来たが、衝突によってダイヤモンドが生じたという考えは、ほぼ間違いないように思われる。なぜならば、隕石孔から発見されたダイヤモンドのなかに、密度が普通の立方晶ダイヤモンドとほとんど同じで、六方晶の対称性を持つ六方晶ダイヤが発見されたからである。ダイヤモンドは工業的にも有用な物質である。静的な方法によって、ダイヤモンド合成の努力がなされると同時に、衝撃によるダイヤモンド合成の研究が精力的に行われた。1961年アメリカ、スタンフォード研究所のDeCarliとJamiesonは、爆薬レンズを使ってダイヤモンド合成に成功した⁽³⁾。爆薬レンズを使うと、平面衝撃波を発生することができる。この衝撃波によって鉄板を吹き飛ばし、鉄のブロックに埋め込んだ黒鉛に衝突させると黒鉛も鉄ブロックもバラバラに飛び散ってしまうが、水中のタンクの中で回収し、炭素をアルカリ溶融法によって精製した結果、炭素の9%以上をダイヤモンドとして回収している。この実験によって工業的にダイヤモンドが合成できる見通しが得られた。この後、この分野で最も成功を取めたのはデュボン社であった。同社は現在も衝撃ダイヤモンドの製造をほぼ独占的に行っており、特許やコストの点で他の企業が対抗できる状態にはない。デュボン社のダイヤモンド製造に関する特許のうち、最も大事なポイントは

原料の黒鉛を金属粉と混ぜて衝撃する点である。金属粉には鉄粉や銅粉を使う。黒鉛に比べて、これらの金属の衝撃インピーダンスは、はるかに大きい。これらの混合物のなかに衝撃波が侵入すると金属の粒のなかに衝撃波が容易に通って抜けて、黒鉛のなかに伝ばする。黒鉛と金属の境界で衝撃波は反射される。金属との粒界で反射を繰り返しながら圧力は階段状に増加する。前に述べたように到達衝撃圧力値が同じでも1回の衝撃圧縮による場合と、反射を繰り返しながら徐々に圧力が上昇した場合では、後者の方がはるかに衝撃温度が低く、衝撃波が抜けた後の残留温度も低い。残留温度が高ければ折角生成したダイヤモンドが元の黒鉛に逆転換してしまう。

これを防ぐためには衝撃温度を出来るだけ低くおさえないといけない。そのためには金属粉と黒鉛を混合することが大変有効である。デュボン社の特許の説明では、黒鉛に混合する金属の役割は衝撃波の通過の後、高温のダイヤモンドから、低温の金属へ熱が伝達されて、急冷されると説明している。もちろん、この効果も無視することが出来ないが、混合の効果は衝撃温度を低下させ、残留温度を低下させるということに尽きると筆者は考えている。

3. 高压型窒化ホウ素

窒化ホウ素は炭素によく似た性質を持っている。周期律表では炭素の両側に、ホウ素と窒素が位置している。炭素の低压型の結晶構造は黒鉛である。これに相当する窒化ホウ素の結晶構造が黒鉛類似のもの(以下、g-BN)で、六角の網目構造の面のの上に、窒素とホウ素が配置している。面と面の間隔は、面内の原子間距離に比べて大きく、ファンデルワールスの力で結合されている。したがって圧力をかけると面間の方がはるかに容易に縮む。炭素との類似性からダイヤモンドに相当する高密度型の窒化ホウ素が存在すると予想された。プレスを使った静的な方法によって、ダイヤモンドの製造技術を確立したGEのWentorf, Jr.らは、高密度型の窒化ホウ素の合成に始めて成功した。ダイヤモンドの静的合成には、ニッケルやコバルトのような遷移金属を溶媒として使用することが大切な点であった。窒化ホウ素の場合、窒化リチウムのようなアルカリ金属の窒化物が触媒として選ばれた。ダイヤモンドに相当する高密度型窒化ホウ素はジंकブレンド型(以下 z-BN)である。z-BNは結晶の対称性が立方晶(cubic)であることより、c-BNとも呼ばれている。z-BNはダイヤモンドに次ぐ硬さを持っており、高温での鉄との反応性がダイヤモンドより乏しいために、鋼材の研削材としてすぐれた性能を持っている。静的方法によって1mm程度のz-BNを合成することが出来るが、コストが非常に高くなり、工業的には0.2

mm 程度が限度である。この事情はダイヤモンドについても同じであり、現在では 0.1 mm 程度の粒径の粉末ダイヤモンドと z-BN が 1 カラット (0.2 g) 500 円程度で生産されている。

ダイヤモンドが衝撃によって合成できたように、z-BN も衝撃によって合成することができる。1960 年代に窒化ホウ素を衝撃圧縮する実験が、ソ連とアメリカにおいて精力的に行われた。その結果六方晶ダイヤモンドに相当するウルツ鉱型 (以下、w-BN) が生成したという報告⁽⁴⁾と z-BN が生成したという報告がなされた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。ソ連の報告の多くは実験方法についての詳細な記述がないために、正確な論評を行うことが出来ないが、筆者らの実験では少なくとも出発原料に g-BN を使う限りにおいて、衝撃によって生成するものは w-BN であるという結論が得られた⁽⁷⁾。g-BN に圧力がかかると層状構造の面間隔が著しく縮まり、ファンデルワールス結合から共有結合へと変化する。この転換は拡散を伴わないマルテンサイト型の転換であるので、きわめて短時間のうちに進行する。衝撃圧縮のようなきわめて短い時間のうちに起こる現象として都合がよい。衝撃合成された w-BN の X 線回折パターンは大変ブロードである。これは w-BN の結晶子の大きさが小さいばかりではなく、そのなかに高密度の欠陥を有していることを意味している。

衝撃温度を抑制しながら、黒鉛を衝撃圧縮すると通常の立方晶ダイヤとともに 15% 程度の六方晶ダイヤが同時に生成する。一方、さまざまな衝撃温度になるような条件で、g-BN を衝撃圧縮してみたが、遂に z-BN を見出すことが出来なかった。図 2 に g-BN を繰り返し衝撃圧縮して得られた X 線回折パターンを示す。g-BN と銅粉を質量比 5 : 95 になるように混合し、カプセルのなかに圧入したものに 40 GPa 程度の衝撃波を通過させると、g-BN の 60% 程度が w-BN に転換する。これを、もう一度カプセルに封入し衝撃処理を行うと、未知の回折線を示す物質とともに z-BN らしい回折線が現われてくる。さらに、この試料をもう一度衝撃圧縮すると、未知のピークは小さくなり、明らかに z-BN と思われる回折線が強く現われてくる。このことより窒化ホウ素の場合、衝撃圧縮により、まず w-BN へのマルテンサイト型転移が起こり、次に拡散を伴う z-BN への転移が徐々に進行してゆくものと考えられる。アメリカから報告された z-BN が生成したという報告⁽⁵⁾を次のように解釈した。Coleburn と Forbes は g-BN を銅のチューブの中に封入し、周囲に爆薬をおいて衝撃処理を行なっている。回収した BN を X 線回折によって調べたところ、z-BN を見出したと述べている。筆者らの実験においても、銅と混ぜたり、銅のチューブに入れて衝撃波を

図 2 低圧型窒化ホウ素の衝撃圧縮による X 線回折パターンの変化。(a) 出発物質、(b) 1 回衝撃、(c) 2 回衝撃、(d) 3 回衝撃。
g : g-BN, w : w-BN, z : z-BN, u : unknown

通過させると粉末との境界で銅の金属ジェットが BN の結晶粒界に進入し、X 線回折パターンのなかに銅の回折線が現われてくる。この銅は硝酸で処理する程度では、なかなか取ることが出来ない。銅の回折パターンの位置は不幸にも z-BN の位置と、ほぼよい一致をしており、銅の回折ピークを z-BN と誤まったのではないかと推定した。筆者らの実験においても初期のころは同様の誤りをして z-BN が出来たと大喜びしたこともあった。衝撃回収物を加熱した王水で長時間処理すると銅をほぼ完全に取り除くことが出来た。

黒鉛からダイヤモンドが衝撃によって生成する転換率は、出発原料の黒鉛に強く依存する。天然の黒鉛のなかには菱面体型構造のものが含まれている場合がある。スリランカやマダガスカルから産出する黒鉛には十数%の菱面体構造が黒鉛のなかに混在している。菱面体構造の炭素を単純に圧縮するだけでダイヤモンド類似構造になる。単純な結晶構造の比較から菱面体構造の炭素がダイヤモンドに転換し易いと想像することが出来る。事実、スリランカやマダガスカルの黒鉛が衝撃によってダイヤモンドになり易い。菱面体型 BN (r-BN) を衝撃圧縮すれば、黒鉛と同様に z-BN になり易いであろうという予想の下に r-BN の入手、または合成を計画した。文献によると r-BN の製造にはシアン化合物を必要とすることが分かり、危険なために特別の設備を持たない筆者らは、その合成を諦めた。1981 年、無機材質研究所の瀬高らは g-BN を窒素ガス中で長時間熱処理するだけで、一種の化学輸送法によって r-BN の合成に成功し、その衝撃圧

縮を行った結果、予想どおり見事に α -BN への転換に成功した。衝撃圧縮による物質の合成は、物質にかかる応力がきわめて大きな一方向性のものであり、時間が短いという特徴のため、出発物質の結晶構造がその転移に強く反映するものと理解できる。この考え方は、現在でも衝撃合成における基本となっている。しかし、最近の無機材質研究所や筆者らの研究によって、もう 1 つの新しい物質生成の機構が衝撃圧縮下で存在することが分かってきた。衝撃圧縮による高温によって、超高密度ガス状態になった物質から、圧力減衰過程で新物質が生成するという可能性であるが、これを立証するデータは十分でない。

4. 衝撃による超硬質材料の製造

衝撃ダイヤモンドがデュポン社によって工業生産され販売されている。市販されているダイヤモンド粉末は $1\mu\text{m}$ 以下の微粒子から数十 μm までのものがある(図 3)。数十 μm のダイヤモンド粉末を電子顕微鏡で観察すると、 $1\mu\text{m}$ 以下の粒が凝集したものであることが分かる。このような粉末状のダイヤモンドをデュポン社は、どのようにして製造しているのだろうか。

衝撃による物質合成の最も標準的な方法は、金属製のカプセルのなかに衝撃したい物質を詰め込み、カプセルに金属板を平面衝突させる方法である。黒鉛からダイヤモンドへ転換を行うためには、最低 30 GPa 程度の衝撃圧縮を行わなければならない。原料の黒鉛と金属粉を混合した場合でも、最低 2.5 km の速度で飛ばす板をカプセルに衝突させなければならない。火薬を使った銃によってこの速度を得るのは難しい。軽ガス銃では容易であるが、大きな飛ばす板を加速することができない。爆薬を使えばかなり大きな金属板を秒速 3 km でカプセルに衝突させることが出来る。日本油脂の荒木らの改良したモーメントトラップ法では、厚さ 3.2 mm の鉄板を約 500 g の高性能爆薬を使用して、秒速 3 km に加速することが出来る。このような平面衝突法による衝撃処理は、得られる試料の量に対する製造コストがかなり高

図 3 衝撃ダイヤモンドの走査型電子顕微鏡写真。

いので、工業的な方法としては適当ではない。大量に粉末を衝撃処理できるという点においては、既に述べた円筒法が優れている。

円筒法は円筒の中に衝撃したい物質を入れて、外に高性能爆薬をおき、その一端より電気雷管を使って爆発させる方法である。爆轟波の伝ばに伴い銅製のチューブは、丁度周囲から絞込まれるように圧縮され、粉体の中には衝撃波が伝ばする。円筒の周囲から衝撃波が侵入し、中心部分で衝突して干渉を起こす。衝撃圧力が小さいうちは、円筒は無事に回収できるが衝撃圧力を高めていくと、円筒の中心軸に向かって進行してきた衝撃波がそこで干渉し合い、中心部の圧力が非常に高くなり、次に強力な膨張波に変るために円筒がバラバラに破壊されてしまう。荒木らは図 4 に示すように、円筒の中心に直径 5~10 mm の銅製のロッドを挿入することで回収できる衝撃圧力の上限を高めることに成功した⁽⁸⁾。円筒の周囲から中心軸に向かって進行してきた衝撃波が、試料混合物とロッドの境界で反射し、後続して侵入してくる衝撃波との干渉によって衝撃圧力は高まってゆく。この方法によって到達できる圧力は、25 GPa 程度なので w -BN の製造には適しているが、ダイヤモンドの衝撃合成には圧力が少し足りない。デュポン社がダイヤモンド製造に使用している方法は、この方法を一步、進めたものと考えることができる。筆者は最近、デュポン社のダイヤモンド製造の技術開発を行った Bergmann 博士に逢う機会があった。彼の話を総合すると、デュポン社では大型の円筒法を使用して、ダイヤモンドを製造している。最もキーポイントとなっている点は図 5 に示すように、三重の金属円筒を使っている点であろう。内側の金属円筒には金属粉と混合した黒鉛が詰め込まれる。この内筒の外に直接に爆薬を詰め込まないで、直径が数 cm の大きな

図 4 衝撃合成用円筒法アセンブリー。

図5 デュポン社がダイヤモンド製造に使用していると推定される衝撃アセンブリー。

中間筒を外側におき、2つの円筒の間に僅かの隙間を作ってやる。中間筒の周囲には、スラリー状の爆薬を流し込んで、その一端より電気雷管を使用して爆発させる。爆発衝撃波によって中間筒が内側に向かって吹き飛ばされ、1 cm 程度の距離を飛んだ後、内側の円筒の外壁に衝突する。このことによって爆薬中に発生した爆轟波を直接に内筒に伝えるよりはるかに高い衝撃圧力を発生させることができる。この方法によって黒鉛中に発生する衝撃圧力は 30 GPa 程度と見積ることができる。円筒法を用いて 30 GPa の圧力処理を行った場合、衝撃波が円筒の中心に収束するために、その反作用として円筒がバラバラになって回収できないことについては、すでに述べたとおりである。デュポン社では外径が 20 cm、長さが 5 m 以上の大きな円筒アセンブリーを使用して、ダイヤモンド生産を行っている。このような大型のアセンブリーを使用することによって回収がうまくゆくのか、円筒の中心部にロッドを埋め込むような方法を採用しているのか詳細については、不明である。

日本油脂では g-BN を衝撃処理して w-BN の粉末を生産している。デュポンほど大きなものではないが、一種の円筒法を使用して w-BN の生産を行っている。w-BN は g-BN に 20 GPa 程度の衝撃波を通過させることによって生成するものである。生成した w-BN 粉末は通常のものでは 1 μm 以下の微粉末であるが、特別な工夫

を衝撃圧縮の際、行うことによって数十 μm の粉末を合成することができる。特別な工夫というのは、出発原料に使用する g-BN の粉末として、結晶がよく発達した、なるべく大型の単結晶粉末を使うことと、金属粉末との配合に注意することである。しかし、詳細についてはデュポン社と同様企業のノウハウとなっており、知ることはできない。デュポン社の衝撃ダイヤの製法についても、w-BN と同様に結晶がよく発達した黒鉛を出発原料として使い、金属粉との配合に工夫を行っていると推定することができる。衝撃によって作られたダイヤモンドと w-BN は、静的な方法によって作られたものとは違い、結晶粒が角ばっていないために、金属の切削には適していないが、研磨や石材の切断に優れた性能を発揮している。

w-BN は超高压高温下でも準安定な物質であり、超高压高温下におくと安定な z-BN に転換する。この転換と同時に焼結が促進されるので、緻密な高压型 BN の焼結体をつくることができる。筆者らは衝撃合成 w-BN 粉末を原料にした超高压焼結の研究を行なっている⁽⁹⁾。

5. 粉末のダイナミックコンパクション

最近、急速に注目されている衝撃圧力の利用方法に、粉末のダイナミックコンパクションがある⁽¹⁰⁾。衝撃波によって粉末を緻密に固めようとするものである。衝撃圧縮時間がきわめて短いので、アモルファス金属のような安定でない物質の緻密化にも有効であると期待されている⁽¹¹⁾。粉体を衝撃圧縮によって固める実験はすでに 1966 年にデュポン社によって行なわれた⁽¹²⁾。

各種の金属粉末やセラミックス粉末を、金属製のチューブに詰めて、その外に爆薬を置き、爆発衝撃波によってチューブを絞り込むという、いわゆる円筒法によって、粉末を緻密化する実験を行った。デュポン社がこの実験を行ったのは、恐らくダイヤモンド製造を研究する過程で円筒に詰めた黒鉛と金属の混合物が、ほとんど真比重にまで緻密化された現象を見て、粉体の緻密化に利用できると考えたからであろう。実験の結果は大変事なものであった。ほとんどの粉末を理論密度の 96% 以上にまで緻密化することができた。

粉末を金型の中に入れてプレスを使って成形する方法では、意外と粉末は緻密化しない。最近、セラミックスエンジン材料として注目されている窒化ケイ素や炭化ケイ素の粉末の緻密化は非常に難しく、通常の金型を使用して得られる最高密度は、60~70% である。粉末の焼結性を高めるためには、出発原料に 1 μm 以下の微粉末を使うことが有効である。微粉末になるほど粉体の緻密化は難かしくなる。1 μm 以下の窒化ケイ素の場合、4 GPa

の超高压力をかけても粉体の密度は80%程度にしか達しない。粉体の密度を高めることは、特に難焼結性セラミックスの製造プロセスにおいて重要なポイントである。ソ連では過去10年間、粉体のダイナミックコンパクションの研究が大がかりに行われているらしいが詳細は不明である。

セラミックスのダイナミックコンパクションがクローズアップされたのは、1981年に行われたアメリカ・ローレンスリバモア国立研究所の成果による⁽¹³⁾。1982年には窒化アルミニウムの粉末をダイナミックコンパクションして、密度が99%以上で、しかもクラックの全く入らない圧粉体を得ている。この圧粉体を研磨したところ、焼結体のような金属光沢を示し、粉末粒と粉末粒の粒界がアモルファス状になっており、しっかりと結合されていることが分かった。この実験結果によって、衝撃波を使ったセラミックスのダイナミックコンパクションは粉末冶金やセラミックスプロセスとして、役に立つのではないかと期待が持たれるようになり、一種のブームが起きた。過去10年間、筆者らもほぼそであるが、粉体の衝撃圧縮に関する研究を行っていたので、このアメリカのブームに便乗することになったわけである。セラミックスと共にダイナミックコンパクションによるメリットが大きな材料はアモルファス金属と複合材料であろう。アライド社製のアモルファス合金シートを直径12mmに打ち抜き、100枚程度重ねてカプセルに詰め、衝撃波を通過させてみた。特定の条件で処理したものは、完全に一体化し、しかも、X線で調べた限りでは、アモルファス状態が保たれていた。ある圧力を超えると衝撃温度と残留温度が原因と思われる結晶化が始まり、X線回折ピークが現われた。

最近、この種の研究がアメリカや西ドイツ、日本などで一斉に始められている。さらにアモルファス金属だけではなく、最近、注目されている急速冷却した準安定相を持つ金属粉末のコンパクションにも、この技術が使われ始めている。

衝撃波の通過によって、何故、粉体がこのように緻密化され、しかも粒と粒が結合するのであろうか。粉体に衝撃波が通過すると衝撃波の進行方向に向かって粉末粒は動き始める。粉体のなかには粒と粒の間に沢山の隙間が存在している。粉体の空隙に気体が存在すると、その気体は強く圧縮されて、非常に高温になる。粉体を丁寧に脱気して、空隙のなかを真空にしても、粉末粒の表面を衝撃波が通り抜けるときに空隙の部分に向かって、表面から剥がれた原子がジェット状に噴き出し、空隙は一種のプラズマに近い状態になる。この事情は空隙に気体があっても同様である。さらに粉末粒が高速で移動するので、粒と粒の衝突や、粒と粒の摩擦によって粒界に高温

が発生する。つまり瞬間的に粉末粒の表面が加熱されるわけである。粉末の状態にもよるが、理論密度近くの圧粉体をダイナミックコンパクションによって実現するためには、粒の表面が融解する程度の衝撃圧縮を行わなければならないことが経験的に分かっている。更に粉末粒は高い応力を、しかも短時間のうちに受け、容易に塑性変形し、さらに緻密化は進行する。粉体の中を衝撃波面が通過するに従って、粉体が圧縮されてゆく様子を図6に示す。最近、筆者らはTiN-TiC系固溶体粉末の衝撃圧縮実験を行った。結果の一例を図7に示す。

粉体のダイナミックコンパクションの実用化にはいくつかの難関がある。92~93%程度の圧粉体をつくる上では、ほとんど問題にならなかったクラックの生成が95%以上の圧粉体の場合に生じてくることである。クラックには顕微鏡で見える程度の微細なものも肉眼で、はっきり見ることが出来るような大きなものに分けられる。衝撃波は一種の波であるので、カプセルや円筒の形状によっては衝撃波の干渉による膨張部分が生じ、粉体のなかに大きなクラックを生んでしまう。この問題を解決しない限り、粉体のダイナミックコンパクションは実

図6 粉体のダイナミックコンパクション。

図7 TiN-TiC系固溶体粉末のダイナミックコンパクション。

用化することは難しいであろう。工業的に見て一番実用化に短距離の位置にあるダイナミックコンパクションの方法は、円筒型のアセンブリーを使う方法である。この形状で衝撃処理をする技術はデュポン社の特許になっているが、その特許はもうじき有効期限を終えようとしている。そのような事情もあって、特にアメリカを中心としてセラミックス粉末のダイナミックコンパクションによる工業化を目指した研究が盛んに行われている。たとえば、ローレンスリバモア国立研究所では、塩化ビニール性のチューブの中に水を入れ、その外側にセラミックス粉末を置き、その外より爆薬を使って全体を衝撃圧縮する方法によって、全くクラックのない大型のパイプ状のセラミックスの製造に成功したということである。この詳細については残念ながら、まだ公表されてはいない。工業化にとって、もう1つ厄介な問題はコストの問題である。特にわが国では大量の爆薬を使う施設がほとんどない。アメリカでは、ほとんどの衝撃実験が野外で行われている。日本では騒音や振動の問題のため、特別の消音室を作り、そのなかで実験を行っている。設備のコストばかりではなく、爆薬のコストの占める割合もかなり大きい。デュポン社では価格がきわめて安いスラリー爆薬を大量に使用することによって、衝撃処理のコストの低減を計っているように見える。以上のような理由によって、粉体のダイナミックコンパクションが単なる研究に終わるか、見事、工業化に成功するかは専門家の間でも意見が分かれている処である。

〔謝 辞〕 本解説を終えるにあたり、10年間の永きに

わたり始終、勇気をもって衝撃研究を行なうことを励まして下さった齋藤進六長岡技術科学大学学長、研究協力を惜まなかった近藤建一東京工業大学助教授に感謝します。

文 献

- (1) 藤田昌大, 千葉 昂, 立川逸郎: 日本金属学会会報, **20**(1981), 385.
- (2) G.A.Parson: Roy. Soc., **220A**(1920), 67.
- (3) P.S.DeCarli and J.C.Jamieson: Science, **133**(1961), 1821.
- (4) G.A.Adadurov, Z.G.Aliev, L.O.Atovmyan, T.V.Bavina, Yu.G.Borod'ko, O.N.Breusov, A.N.Dremin, A.Kh.Muranevich and S.V.Pershin: Soviet Physics-Doklady, **12**(1967), 173.
- (5) N.L.Coleburn and J.W.Forbes: J.Chem.Phys., **48**(1968), 555.
- (6) I.N.Dulin, L.V.Al'tshuler, V.Ya.Vashchenko and V.N.Zubarev: Soviet Physics-Solid State, **11**(1969), 1016.
- (7) T.Akashi, A.Sawaoka, S.Saito and M.Araki: Japan. J. Appl. Phys., **15**(1976), 891.
- (8) 荒木正任, 澤岡 昭: 工業火薬協会誌, **44**(1983), 230.
- (9) A.Sawaoka: J. Am. Cer. Soc., **24**(1984), 1379.
- (10) 近藤建一, 澤岡 昭: セラミックスデータブック, 工業製品協会, (1983), 143.
- (11) C.F.Cline: Report California University, UCRL-85796, (1981).
- (12) O.R.Bergmann and J.Barrington: J. Am. Cer. Soc., **49**(1966), 502.
- (13) C.L.Hoenig and C.S.Yust: Ceram. Bull., **60**(1981), 1175.

(完)

<新刊案内>

材 料 強 度 学 総 論

大南正瑛 編

植村幸生 原 善四郎 大南正瑛 横堀武夫 著

本書は、材料強度学を工学と基礎科学との関係、学際的な立場、ミクロとマクロの両面というように、総合的な視野からアプローチしようとの試みで編集が企画されている総合材料強度学講座の第1巻であり、全編6章より成る。序論(第1章)について、材料強度学の特徴と必然性(第2章)、材料強度研究で用いられる基礎概念と研究手法(第3章)、材料強度研究の歴史(第4章)、材料強度研究の歴史こぼれ話(第5章)、材料強度研究の日本の特質(第6章)の各章から構成されている。これらの章の題名から分かるように、本書は総論ということで、材料強度学の特徴、基礎概念、歴史、日本における研究の特色など肩の凝らない話を織

りまぜて読者の興味を引くよう配慮しており、材料強度学の入門書として工夫されているが、その内容は用語の定義を含めて事典的な色彩をもち、あまりにも盛だくさんで、初学者が一つひとつを理解して読み進むことはたいへんである。完全に理解しようとする、483に及ぶ莫大な引用文献をひもとく、かなりの勉強量が必要である。分からないところはそのままに、全体を一応終りまで読み通すのも一方法である。そのことは、総体的に材料強度学の内容を把握するのに役立つであろう。

(S.M.)

〔A5判 262頁 1984年 4,300円 (株)オーエム社〕