# 水中衝撃波と自己伝播高温合成によるTiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系 導電性セラミックの合成同時成形

# 友重竜一\*, 大隈蕉正\*\*, 片桐正崇\*, 松下 徹\* 今村喜八郎\*\*. 千葉 昂\*\*

原料に酸化チタン,チタン,黒鉛,アルミニウムの粉末を用いて,高い発熱反応を伴う自己 伝播高温合成(SHS)法で多孔質TiC-10~40 mol%Al2O3を合成し、その直後に爆薬の爆発に より発生する水中衝撃波を利用した熱間衝撃圧縮を行い、級密なTiC-Al2O3複合材の合成同 時成形を試みた。銜撃圧縮後の複合材の相対密度は、TiCおよびAl2O3が共に超硬材料であ るにも拘わらず、約93%以上の高密度を示した。このことから、SHS法による高い熱量と衝 整波による超高圧を同時期に作用させることにより,通常の焼結法では困難であった難成形性 材料の緻密化に効果があることを明らかにした。また、衝撃圧縮後に得られたTiC-Al2O3複 合材の電気抵抗値は、良電気伝導性であるグラファイトとほぼ同じ値を示し、伝導性セラミッ クスとして用いることのできる良好な試料が、本方法により作製できることを明らかにした。

1. 緒 論

遷移元案の炭化物は高融点、高硬度であるため各種 研削材料及び高強度材料として使われている。しかし ながら、炭化物単体では焼結が困難であるため、熱間 静水圧プレス(HIP)やホットプレス(HP)のような方 法を用いて、TiC-NiやWC-Coのように金属を加え たサーメットの形で作製されることが多い<sup>1)</sup>。一方, 高い発熱反応を伴う自己伝播高温合成(SHS)法は各 **瓶金属間化合物やセラミックス材料を容易に合成でき** ることから盛んに研究が行われているが<sup>2)~4)</sup>,それに より得られる物質は多孔質体であるため、緻密化のた めの後工程を設ける必要があった。ところで、我々の グループはこれまでに水中を伝播する衝撃波、いわゆ る水中衝撃波による粉末の衝撃圧縮、および水中衝撃 波とSHS法の両者を組み合わせたプロセスによる各 稲難成形性粉末の緻密な成形体の作製を試みてきた。 この水中衝撃圧縮法に関しては装置内における衝撃波 の流れのシミュレーション解析5)および衝撃圧縮後の

1996年7月19日受理 \* 熊本工菜大学工学部工菜化学科 〒860 熊本市池田4-22-1 TEL 096-326-3111(内線2134) FAX 096-326-3000 \*\*熊本大学工学部知能生産システム工学科 〒860 熊本市黒髪2-39-1 TEL 096-342-3718 FAX 096-342-3710

成形体の機械的性質について詳細な報告がされてい る<sup>6)~9)</sup>。また、 最近の水中衝撃波とSHSを組み合わ せた方法では、Ti+C→TiCの合成反応熱を利用し、 高融点セラミック粉末を熱間固化できること<sup>10)</sup>や、 自らの反応熱を利用し、高密度でマクロクラックのな い炭化チタン成形体が得られることを報告した<sup>11),12)</sup>。 このように、従来の焼結方法だけでは困難であった硬 質材料の成形や緻密化が本方法により短時間で、容易 に成し得ることを明らかにし、また、SHS法は異な る特長を兼ね備えた複合材を、その場で合成し得るこ とから、本復合プロセスが特殊な複合材の作製に対す る有効な手段となることが期待される。

本研究では、このような複合材の合成同時成形に 関する基礎的実験として、 SHS 法と水中衝撃波を 組み合わせ、第2相として高融点酸化物のアルミナ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)を分散させた炭化チタン(TiC)基複合材の 作製を試みた。

2. 実験方法

本実験で用いた粉末は酸化チタン(関東化学製,平 均粒径:0.1~0.3µm,純度:99%),チタン(住友シ チックス製, 粒径:約45µm, 純度99.4%以上), ア ルミニウム(東洋アルミニウム製、粒径:約20µm、 純度:99.87%)、酸化アルミニウム(AKP-15:住友化 学工業社製, 粒径:0.64µm, 純度99.99%)および 黒鉛(Aldrich社製,粒径:1~2μm,純度:99%) の粉末である。これらの粉末を(1)式に示すように、

Kayaku Gakkaishi, Vol. 57, No. 6, 1996

-231-



Fig. 1 A schematic illustration of underwater-shock compaction assembly

燃焼合成後、TiCに対してAl₂O₃の含有量が10~40 mol%になるように秤量し、エタノール中でボールミ ル混合した。ボールミル用の容器およびボールはプラ スチック製のものを用いた。

1.5 xTiO<sub>2</sub> + 2 xAl + (1 − x) C + (1 − 2.5 x) Ti  

$$\rightarrow$$
(1 − x) TiC + xAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [x = 0.1~0.4] (1)

複合材中で第2相となるAl2O3は、上記反応過程中 にTiCと同時に生成する。一方、これと比較するため、 次の(2)式に示すよりにα-Al2O3粉末を直接添加し、 TiCだけを反応により生成させた複合材も作製した。

 $(1-x) Ti + (1-x) C + xAl_2O_3$  $\rightarrow (1-x) TiC + xAl_2O_3 [x=0.1 \sim 0.15] (2)$ 

(2)式の合成反応は予備実験において15 mol%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の組成までしか反応が進行しなかったため, TiC-10 mol% および15 mol%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の組成についてのみ衝撃 圧縮実験を行った。上記の各種混合粉を充分乾燥した 後, Fig.1 に示す実験装置中の粉末充填容器(内径20 mm, 深さ40 mm)にタッピング充填し,容器上部に埋設 したコイル状のタングステンヒーター(タングステン 線径:0.5 mm)に20 Vの電圧をかけて通電し, 着火し た。粉末充填容器の内側には粉末と軟鋼製容器が直接 接触しないように厚さ約1 mmの耐熱シート(日本 Valqua 製)を内張りした。上記実験装置は頂角を約45度 に加工した水槽と粉末充填容器(いずれも軟鋼製), お



3 19 29 21 22 23 24 23

Fig. 2 Outer views of combustion synthesized composite(left), and SHSed specimens followed by underwater-shock compaction(right)

よび爆薬容器(塩化ビニール製)の3つで櫛成されてい る。爆薬には旭化成工業製の硝酸エステルを主成分と する爆轟速度約6900 m/sのSEP爆楽を用い、直径50 …, 高さ25…の円盤状に成形した。起爆は電気留管 により行った。本実験装置により得られる、試料に入 射する直前の水の衝撃圧力は、以前著者らが本研究と 同様な条件下でイオンギャップ法によって測定した衝 撃波の速度から、およそ3~4 GPaであると見積も られる<sup>10), 12)</sup>。また、SHS法による合成開始から起爆 までの時間は、反応時に発生する不純物ガスを試料か ら自然に放出させるために60秒後とした。Fig.2に SHS 反応後の圧力を負荷していない試料(左側)と、 SHS 反応後に衝撃圧縮した複合材(右側)の外観を示 す。銜撃圧縮した試料は、圧力を負荷していないもの に比べ、高さがおよそ1/4にまで圧縮されており、本 実験装置を用いることにより難成形性の多孔質材料の 緻密化に効果があることが明らかになった。このよう にして得られた試料についてX線回折,密度測定,硬 度試験,走査型電子顕微鏡(SEM,日本電子(株)製: JSM-6100)による破面観察および電気抵抗測定を行 った。密度測定は電子比重計(増田理化製: ED-120 T)を用いて測定した。マイクロビッカース硬度は、 ダイヤモンドペーストで研磨した試料の同一面内で5 点測定を行い,それらの平均値を測定値とした。硬度 **測定のために負荷した荷重は4.9N,また,負荷時間** を15秒とした。電気抵抗の測定は約2×3×4m3の 大きさの直方体に切り出した試料の両端に銅線を銀 ペーストで固定したものを用いて、常温で四端子抵抗 計(HIOKI-3224)により測定した。また、SHS法に よる合成の速さ、すなわち、各混合粉末の燃焼波の進 行速度についても測定した。測定方法は文献11)と同 じ方法を用いた。

—*232*—

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> content /mol%	Distance / mm	Required time /s	Combustion velocity / mm · s <sup>-1</sup>
À 10	29.2	2.01	14.53
20	33.7	3.44	9.79
30	29.8	3.32	8.97
40	32.5	10.70	3.04
B 10	30.0	3.31	9.06
15	25.9	8.15	3.18

 Table 1 Results of measurement of combustion velocity for various mixed powders

### 3. 結果および考察

### 3.1 燃焼波の進行速度

Table 1 に各混合粉末の燃焼波の速度の測定結果を 示す。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を合成反応間に生成させる方式(以下A 方式と略記する)及び直接Al2O3粉末を添加した方式 (以下B方式と略記する)、ともにAl2O3の含有量が多 くなるにつれて燃焼波の進行速度は遅くなった。特に、 A方式では含有量がTiC-10 mol%Al2O3の時の14.53 m/sから、40 mol%の時の約3.04mm/sへと大きく低 下している。このように燃焼速度が遅い系では燃焼合 成時の反応熱が低いことが知られている<sup>13)</sup>。以上のこ とから、Al2O3の含有量の増大に伴い合成時の反応 熱が低下していることが伺われる。また、B方式の場 合も同様に10 mol%から15 mol%にAl2O3が増大す ると速度が低下しているが、その程度はA方式のも のよりも大きい。これはA方式では、マトリックス である TiC 及び第2相である Al2O3の両方が反応に より生成するのに対し、B方式ではAl2O3粉末が直 接反応に関与していないだけでなく、逆に Ti+C→ TiCの反応の進行を妨げる方に作用しているものと考 えられる。

# 3.2 衝撃圧縮体の各種性質と微細組織観察

### 3.2.1 X線回折

Fig. 3 に本実験で作製した A 方式による衝撃圧縮 後の試料の X 線回折パターンを示す。下から順に TiC-10 mol%, 20 mol%, 30 mol% そして 40 mol% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の試料の回折パターンである。各種Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含有 量の試料とも,原料の未反応ピークは観察されず, TiC と Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>のみが生成していることが分かる。この 様に反応が反応式(1)の通りに進行したことはFig. 4 に示した,文献<sup>(4)</sup>から引用した TiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>および TiO<sub>2</sub>の標準生成自由エネルギー,  $\Delta$ G<sup>\*</sup>の値から理解 される。A 方式の場合,式(1)の右辺に示される生成 系のAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は,Fig. 4 のいずれの温度域においても, 反応系のTiO<sub>2</sub>の $\Delta$ G<sup>\*</sup>の値より低くなっている。これ  $\frac{1100}{100}$ 

TiC-40%Al 203

O TIC

Al 203



は、いわゆるテルミット反応のように、TiO2がAlに より還元され、Al2O3を生成する方が反応を進行さ せる上でより安定であることを示唆している。また、 これに伴い還元されたTiは、TiCのΔG<sup>®</sup>の値から考

Kayaku Gakkaishi, Vol. 57, No. 6, 1996 —233—



Fig. 4 Calculated standard formation free energy of TiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



Fig. 5 Variation in density of TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> shock compacts as a function of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content

えると金属単体として存在するよりは、むしろTiCを 形成する方が自由エネルギー的に安定になると思われ る。一方、B方式の場合も15 mol%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の組成まで はTiCとAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>だけが観察され、Ti+C→TiCの反応 が添加したAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉末に阻害されることなく進行し たことを確認した。

#### 3.2.2 密度測定

Fig. 5 にA, B両方式で作製した試料の密度測定結 果を示した。各組成における複合材の理論密度はTiC とAl2O3の理論密度を用いて,次式に示す複合則か ら計算して求めた。

$$\rho_{\text{Comp}} = \rho_{\text{TiC}} V_{\text{TiC}} + \rho_{\text{Al}_2\text{O}_3} V_{\text{Al}_2\text{O}_3}$$
(3)

ここで, ρ<sub>Comp</sub>, ρ<sub>Tic</sub> およびρAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>はそれぞれ複合材, TiC および Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の理論密度(各々ρ<sub>Tic</sub> = 4.91 Mg/㎡,



Fig. 6 Variation in micro Vickers hardness of TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> shock compacts as a function of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content

 $\rho_{Al_2O_3} = 3.987 \text{ Mg/m}^{15).16}$  であり、 $V_{\text{Tic}}$  および VAl203はTiCおよびAl2O3の複合材中の体積分率で ある。図から分かるように、Al2O3含有量の増大と ともに密度値は低下しているが、その程度はAl2O3 添加量が0~30 mol%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>までと、40 mol%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> では異なっている。各々相対密度に換算すると30 mol%Al2O3までの圧縮材では約93~96%TD(TD: Theoretical Density)であるのに対し、40 mol%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> では約85%TDと少し低下の程度が大きい。この密度 低下の原因は3.1節で述べたように、Al2O3添加量の 増大に伴う反応熱の抑制が考えられる。すなわち、反 応後の生成物の温度が下がり、複合材中の粒子間の結 合力や粒子自体の塑性変形能が相対的に低下したと考 えられる。また、40 mol%Al2O3では反応時の原料に 活性金属であるチタン粉末が入っていないことも要因 になると考えられるが、この結果との関係は不明であ る。

一方、 $Al_2O_3$ を直接添加した試料(B方式)につい ては $10 \mod 8Al_2O_3$ でA方式とほぼ同じ値を示したが、  $15 \mod 8Al_2O_3$ では急激に低下した。この傾向は Table 1 の燃焼波の進行速度の傾向と同様であること から、反応に寄与しない $Al_2O_3$ 粉末の存在に起因し た発熱量の低下と、 $Al_2O_3$ セラミック粉末自体の加 工性の悪さにより、緻密化が阻害されたものと思われ る。

## 3.2.3 硬度試験

Fig. 6 に硬度試験の結果を示す。以前に著者らが 報告したチタンと活性炭素の混合粉末から得たTiCの 硬度値はおよそ32 GPaであったのに対し<sup>12)</sup>,本実験で 作製したTiC-10 mol%Al2O3では約20 GPaの値で



Fig. 7 Scanning electron micrographs of various specimens: (a, b) TiC-10 mol%, (c, d) 20 mol%, (e, f) 30 mol% and (g, h) 40 mol%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. (a, c, e, g) low and (b, d, f, h) high magnification

あった。さらに、40 mol%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>になると14 GPaま で低下しており、密度の値と同様な傾向を示した。こ のことは、原料の炭素粉末の違い(活性炭索と黒鉛)が あるので直接比較はできないが、文献12)における TiC単体の試料では同種(TiC)の結晶粒による結合で あり、そして反応時の断熱燃焼温度もTiCの融点 (T<sub>mp</sub>=3413 K)とほぼ同じの3343 Kまで上昇すること から<sup>13)</sup>、粒子間結合が良好に行われたものと考えられ る。しかしながら、今回の場合はTiCとAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の異 種粒子間の結合であり、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の合成反応時に発生 する熱量はAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>融点(T<sub>mp</sub>=2303 K)から推察する とTiCよりかなり低いことが予想されることから、結 晶粒の界面における結合力がTiC単体と比べて多少弱 くなっていると考えられる。

#### 3.2.4 電子顕微鏡観察

各試料の破壊表面のSEM観察結果をFig.7に示す。

Fig. 7 (a)のTiC-10 mol%Al2O3の圧縮体については 暗色のTiC相と白色のAl2O3相が均一に分布し、強 **固に結合している様子が観察される。また、両相と** も平均粒径が約1µmからサブミクロンオーダーの非 常に微細な結晶粒で構成されている。さらに、Al2O3 の添加量が増大するとTiC相の微細な組織は見られな くなり(Fig.7(c, e, g)), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粒子が粗大化する傾 向が観察された。本試料における両相の体積比を計算 で求めるとAl2O3含有量が30 mol%を超えると複合 材中のAl2O3の量の方がTiCを上回る。このため、 Al2O3相によるTiC相の微細化の効果が薄れ、Al2O3 粒子の粗大化が優先的に生じるようになったと考えら れる。一方, 各相の拡大写真(Fig.7(b,d,f,h)), 特 にFig.7(b)の中央部に見られる灰色のTiC粒子に密 着した白色のAl2O3粒子が反応中の熱により溶融し た様子が観察される。このように、破面観察結果も

Kayaku Gakkaishi, Vol. 57, No. 6, 1996 -235-



Fig. 8 Resistivity of TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites produced by SHS/Shock-compaction method as a function of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content

SHS 法による高熱と**衒撃**波を組み合わせた本方法が 複合材の作製に効果があることを示唆している。

# 3.2.5 電気抵抗

室温における複合材の電気抵抗の測定結果をFig. 8に示す。図中には文献17)より引用したTiC単体の 抵抗値も記した。A, B両方式で作製した複合材とも Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の添加量の増大に対して抵抗値が直線的に上昇 しており、絶縁性のAl2O3の存在に起因した上昇で あることが分かる。TiC単体の抵抗値と比べると、10 mol%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>では、ほぼ同じ値の約6.20×10<sup>-7</sup>Q·m, また, 40 mol%では22.6×10<sup>-7</sup>Ω·mと約4倍の値に なっている。一方、直接Al2O3を添加した試料につ いても抵抗を測定したが、10 mol%Al2O3ではA方式 のものとほぼ同じ値の約7.73×10<sup>-7</sup>Q·mであったが、 15 mol%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>では約26.5×10<sup>-7</sup>Ω·mとA方式で作 製した40 mol%のものより若干高い値となった。こ れは3.2.2節でも述べたように、B方式の試料におけ るAl2O3添加量の増大に伴う密度値の低下、すなわち 試料中のTiCとAl₂O₃の粒子間結合が密接でなかっ たために導電性を低下させたものと思われる。しかし ながら、これらの値は放電加工用電極として良く用い られるグラファイトと比べても多少高い程度であり、 本系複合材は放電加工が可能な導電性セラミックスと しての使用が期待される。

#### 4. 結 論

SHS反応により多孔質TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を生成させ、そ の直後に衝撃波による超高圧力を負荷し、高い硬度値 を持つ緻密なTiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>複合材を作製した。以下に 本研究で得られた結果をまとめる。

1. 合成中に進行する燃焼波の速度はAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含有量

が増えると共に遅くなる。これより,合成時の発 熱量は相対的に低下していると思われる。

- 2. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>添加量の増大に伴い密度値及び硬度値は 次第に低下する傾向があった。
- 3. 破面観察の結果, TiC-10 mol%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>では, 両 相の結晶粒の大きさは約1µmであり, 両者と も強固に結合しているのが観察された。また, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含有量の増大と共に, 両結晶粒は粗大化 し, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>によるTiC結晶粒の微細化の効果は 低下した。
- 4. 得られた複合材の電気抵抗の値は低く、TiC-40 mol%Al2O3においても22.6×10<sup>-7</sup>Ω·mの値を 示し、放電加工が可能な導電性セラミックスに なると期待される。

#### 谢辞

本研究は平成7年度の文部省科学研究費補助金(奨 励研究(A),課題番号:07855083)の補助を受けて行 われた。

また、本研究を遂行するに当たりAl2O3粉末(AKP-15)を住友化学工業株式会社より御提供頂いた。また、 衝撃圧縮実験では熊本大学工学部衝撃エネルギー実験 所の石谷幸保助手、熊本工業大学学生の後反田雅章君、 後藤貴史君に御協力頂いた。ここに記して感謝の意を 表します。

#### 文 献

- 1) 庄司啓一郎,永井宏,秋山敏彦,「粉末冶金概論」,
   p.75-78(1984),共立出版
- S. Adachi, T. Wada, T. Mihara, Y. Miyamoto and M. Koizumi, J. Am. Ceram. Soc., 73, C-1451-C-1452 (1990)
- L. J. Kecskes, T. Kottke and A. Niiler, J. Am. Ceram. Soc., 73, 1274-1282 (1990)
- L. J. Kecskes, A. Niiler and T. Kottk, J. Am. Ceram. Soc., 76, 2961-2970 (1993)
- A. Chiba, S. Itoh, R. Tomoshige, K. Miyazaki and M. Fujita, Proc. 2nd Int'l Symp. on Intense Dynamic Loading and Its Effect, p. 768-771 (1992) Sichuan University Press.
- A. Chiba, M. Fujita, M. Nishida, K. Imamura and R. Tomoshige, Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena in Materials, p. 415 (1992), Marcel Dekker. Inc.
- 7) 友重竜一,千葉昂,西田稔,今村喜八郎,松下微, 小玉正雄,火薬学会誌,55,166 (1994)
- 8) 友重竜一,千葉昂,西田稔,今村喜八郎,藤田昌
   大,日本セラミックス協会学術論文誌,100,1230
   -1234 (1992)

- R. Tomoshige, A. Chiba, M. Nishida and T. Matsushita, Advanced Materials '93, I/A: Ceramics, Powders, Corrosion and Advanced Processing, edited by N. Mizutani et al., Trans. Mat. Res. Soc. Jpn., Vol. 14 A, 643-646 (1994) Elsevier Science B. V.
- 10)千葉昂,友重竜一,鹿子木陽二郎,原浩一,今村 喜八郎,孟昭,松下徽,火薬学会誌,55,237 (1994)
- 11) 友重竜一, 鹿子木陽二郎, 千葉昂, 今村喜八郎, 松下徹, J. Ceram. Soc. Japan, 103, 634-638 (1995)
- 12) R. Tomoshige, Y. Kakoki, A. Chiba, K. Imamura and T. Matsushita, Metallurgical and Materials Applications of Shock-Wave and

High-Strain-Rate Phenomena, L. E. Murr, K. P. Staudhammer and M. A. Meyers (Editors), 67-74 (1995) Elsevier Science B. V.

- 13) 燃焼合成研究会編,「燃焼合成の化学」, p.5-36 (1992), ティー・アイ・シー
- 14) 日本金属学会編,「金属データブック」, p.96-99(1993), 丸善
- 15) Powder Diffraction File, SET 31-32, p. 975 (1988), JPCDS
- 16) Powder Diffraction File, SET 6-10, p. 609 (1980), JPCDS
- 17) Г.В.Самсонов, И.М.Виницкий (日 · ソ通信社翻 駅部翻訳),「データブック高融点化合物便覧」, p.236 (1977),日・ソ通信社

Fabrication of TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> electric conductive ceramics by utilizing explosive dynamic compaction and self-propagating high temperature synthesis

by Ryuichi TOMOSHIGE\*, Shigemasa OKUMA\*\*, Masataka KATAGIRI\* Toru MATSUSHITA\*, Kihachiro IMAMURA\*\* and Akira CHIBA\*\*

In the present study, it was attempted to fabricate TiC-10 to 40 mol% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite by self-propagating high temperature synthesis (SHS) followed by underwatershock compaction using titanium oxide, titanium, graphite and aluminum powders as starting materials. The priority in this study is a small amount of energy to serve and a short period from synthesis to hot-compaction. The relative density of the obtained composites, which is consisted of TiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> of difficult-to-consolidate materials, attained high value of 93% or more. Also, we could get the shock-compacted specimens with excellent electric conductivity compared with graphite, so it is expected that the specimens are applied to conductive ceramics. As a result, it was indicated to be effective to the densification of difficult-to-consolidate materials which are hard to produce by conventional sintering method, when the shock wave is applied to porous material synthesized by SHS reaction accompanied with much higher heat of reaction.

(\*Department of Industrial Chemistry, Kumamoto Institute of Technology, 4-

22-1 Ikeda, Kumamoto 860, Japan

\*\*Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto 860, Japan)