

新セラミック工具

New Ceramic Tools

山田宏秀* Hirohide Yamada

石井敏夫* Toshio Ishii

原久雄* Hisao Hara

材料強度の増大に伴い難削材加工用工具の要求が高まっており、一方、加工能率向上の面から切削速度の高速化が望まれている。こうした要求に応じられる工具材料として、最近 Al_2O_3 -TiC系複合材料のホットプレス品が実用されているが、特に難削材切削時に刃先欠損の生ずる問題があり、強度及び熱的特性を改善したより高性能材料の出現が期待されている。

日立金属株式会社ではTiCよりも硬く、かつ耐熱衝撃性に優れる TiB_2 を使った Al_2O_3 - TiB_2 系新工具材料を開発した。

原料 TiB_2 粉末の粒度、焼結助剤及びホットプレス条件について検討し、高密度かつ微細結晶粒組織を達成した。

実際に工具形状に加工し、高硬度難削材の切削試験を行なった結果、現用工具材よりも工具寿命を長くすることができた。

1 緒言

最近、工作機械業界や航空機業界で機械部品の強度を上げるために、引張強度や硬さの大きな材料を使用する傾向にある。それに伴って、切削加工面からみると難削材が増加し、生産現場からは加工能率が低下しない新しい切削工具が要求されている。

難削材の加工能率を上げるために切削速度を大きくすると、それだけ工具刃先の温度が上昇し、工具の摩耗及び変形が促進される。図1¹⁾に汎用切削工具として使用されている材料の高温硬度を示す。この点から難削材用切削工具材として Al_2O_3 -TiC(アルミナ-炭化チタン)系セラミックスが期待されている

が、日立金属株式会社は工具性能として更に高温硬度、耐熱衝撃性に優れたアルミナ-化合物系材料の探索を行なった。

本稿では新たに開発した Al_2O_3 - TiB_2 (アルミナ-ホウ化チタン)系セラミック工具について、その製造条件及び特性について概説する。

2 新材料の探索

2.1 セラミック工具の開発動向

1955年ごろから Al_2O_3 (アルミナ)焼結体がセラミック工具として実用化されて以来現在に至るまで、抗折力の向上が開発の重点となっている。 Al_2O_3 焼結体の抗折力は気孔率の小さいほうが大きい、図2²⁾に示すように結晶粒径にも依存する。開発初期のセラミック工具は、 Al_2O_3 粉末を常温で成形したあと焼結するコールドプレス法であったため、抗折力の向上は主として Al_2O_3 の焼結を促進し、かつ結晶粒を微細化する添加

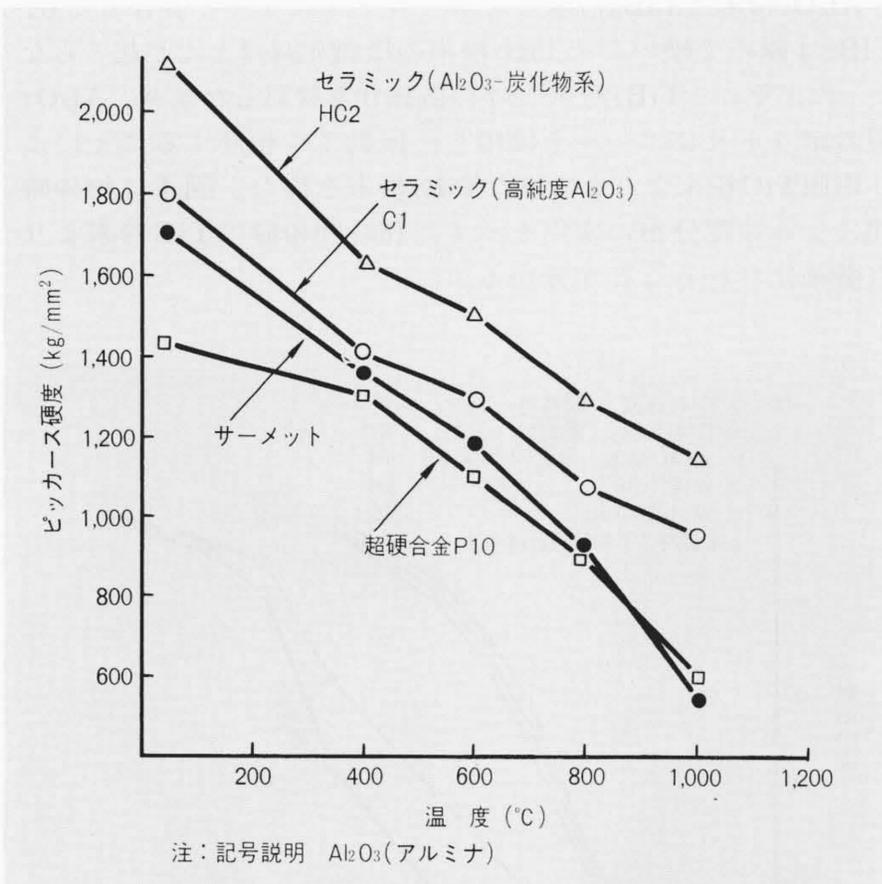


図1 各種工具材料の高温硬度¹⁾ 従来の超硬、サーメット系工具に比べて、アルミナ-炭化物系セラミック工具は高温硬度が高く、難削材用切削工具として使用されている。

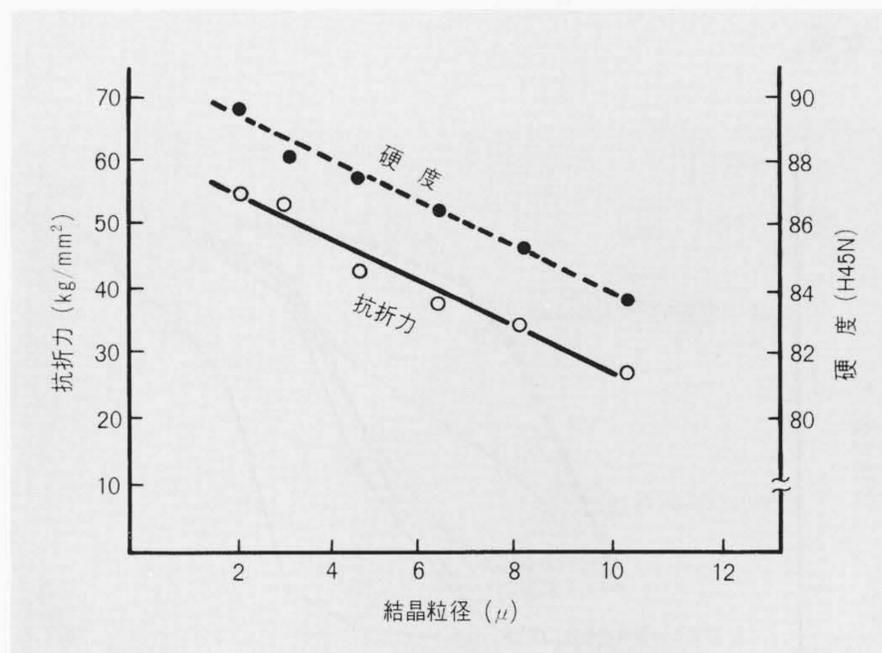


図2 アルミナセラミックの粒径と抗折力、硬度の関係²⁾ 結晶粒の成長とともに抗折力、硬度が低下する。そのため、結晶粒成長の抑制が重要である。

* 日立金属株式会社磁性材料研究所

物が探索された。その結果、MgO(酸化マグネシウム)を約0.5 wt%添加したAl₂O₃焼結体が開発され、Al₂O₃系セラミック工具として現在実用されている。

Al₂O₃焼結体の抗折力改善のあと、熱衝撃による工具損耗がクローズアップされ、1965年以降はAl₂O₃の耐熱衝撃性を向上させる添加物の検討が盛んに行なわれた。その結果、TiC(炭化チタン)粉末を添加してAl₂O₃の高温での熱伝導性を良くすると同時に、Al₂O₃母相を分散強化して耐熱衝撃性を向上したAl₂O₃-30wt%TiC複合材料系工具がホットプレス法によって開発された。

現在セラミック工具は、上記の2材種であり、Al₂O₃系は主として鋳鉄の仕上げ旋削加工用に、Al₂O₃-TiC系複合材料は主として高硬度難削材の仕上げ旋削加工用に使用されている。しかし、難削材の高効率加工の要求が増すにつれ、耐摩耗性、耐欠損性の改善が望まれ、強度、熱的性質に優れた工具材料の開発が期待されている。

2.2 新しいセラミック工具材料の探索

Al₂O₃-TiC系に代わる材料を開発するに当たり、工具性能を左右する主な因子として高温硬度と耐熱衝撃性に注目し、TiCよりも優れている化合物の探索を行なった。各種炭化物、窒化物、ホウ化物の硬さ、熱伝導度及び熱膨脹係数を比較³⁾し最も有望な化合物としてTiB₂を選定した。表1にTiB₂、TiC及びAl₂O₃の物性値を示す。同表から常温硬度及び高温硬度はTiB₂のほうがTiCよりも大きい。また耐熱衝撃性は、次式で定義される係数Rで比較できる⁴⁾。

$$R = \frac{K\sigma_B(1-\mu)}{E\alpha} \left(\frac{\text{cal}}{\text{cm}\cdot\text{s}} \right) \dots\dots\dots(1)$$

- ここに K: 熱伝導率
- σ_B: 引張強さ
- μ: ポアソン比
- E: ヤング率
- α: 熱膨脹係数

一般に、Eの大きい材料ほど、それに比例してσ_Bも大きくなるから、

$$\frac{\sigma_B(1-\mu)}{E} = \text{一定と仮定すれば(1)式は、}$$

$$R = (\text{定数}) \times \frac{K}{\alpha} \dots\dots\dots(2)$$

となる。

表1 TiB₂とTiCの基本物性比較³⁾ TiB₂はTiCに比べて高温硬度及びK/αが大きく、耐熱衝撃性に優れることを示している。

	密度 (g/cm ³)	融 解 温 度 (°C)	酸化開 始温度 (°C)	硬 度 (kg/mm ²)		圧 縮 強 度 (MN/ m ²)	K 熱伝導度 (W/m°C)	α 熱膨脹 係数 10 ⁻⁶ /°C	K/α
				RT	730°C				
TiB ₂	4.52	2,920	1,327	3,300	1,070	1,650	30	6.2	4.8
TiC	4.92	3,070	1,417	2,730	640	1,350	33	7.2	4.6
(Al ₂ O ₃)	3.99	2,050	—	2,700	—	—	29	8.0	3.6

表1からK/αの値はTiB₂のほうがTiCよりも大きい。以上により、新しい工具材料として高温硬度及び耐熱衝撃性がTiCよりも優れている、TiB₂を使用したAl₂O₃-TiB₂系を選定した。

3 製造プロセス

選定したAl₂O₃-TiB₂系材料を工具として、理想的な組織である高密度、微細結晶粒焼結体とするための製造プロセスを検討した。以下、主な検討項目について概説する。

3.1 原料粉末及び焼結助剤

まず、焼結性の良い原料粉末及び焼結を促進し、かつ結晶粒径を微細にする添加物の検討を行なった。

3.1.1 Al₂O₃粉末

数種類の市販粉末を用いて焼結実験を行なった結果、高密度微細組織を得るためには原料粉末の純度及び粒度が重要であることが分かった。Al₂O₃粉末として純度99.99%、平均粒径0.5μmの高純度微粉末を使用することにした。

3.1.2 TiB₂粉末

現在市販されているTiB₂粉末の粒度分布の測定結果を、TiC粉末と対比して図3に示す。超硬工具用として多量に使用されているTiCに比較して、TiB₂粉末は粗粉である。

Al₂O₃粉末とTiB₂粉末とをボールミルによって混合しても、TiB₂は極めて硬いためTiB₂粉末の微細化はほとんど起こらなかった。そこでTiB₂粉末だけの微細化を検討した結果、Al₂O₃製のポット及びボールを使用し、振動ミル粉砕することにより市販TiC粉末よりも微細なTiB₂粉末を得た。図4に粉砕時間による粒度分布の変化を示す。16時間粉砕でTiC粉末よりも微細化されることが分かる。

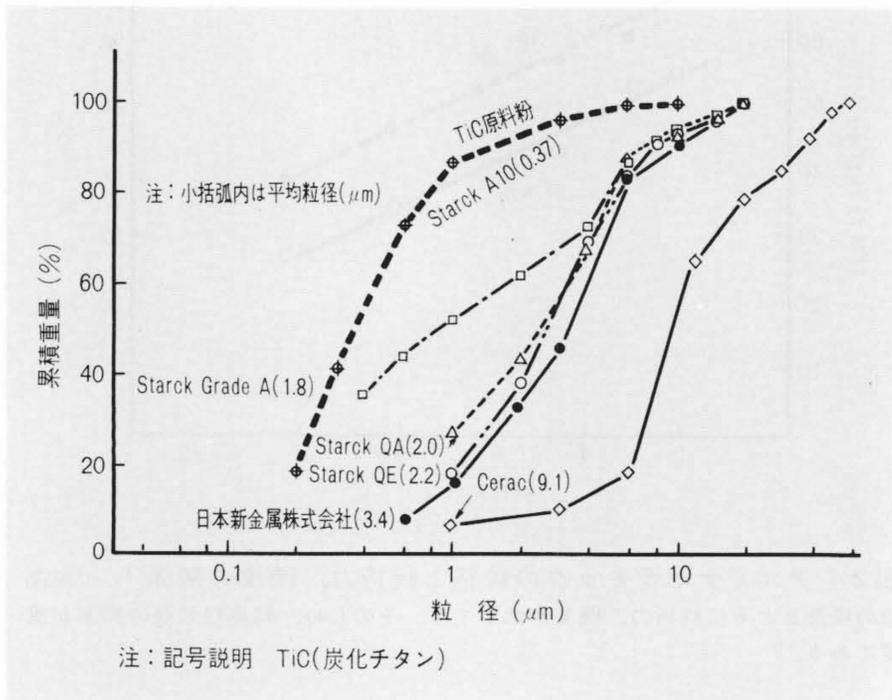


図3 各種TiB₂原料粉の粒度分布(TiCと比較) 市販のTiB₂粉末はTiC粉末に比べて粗粉である。

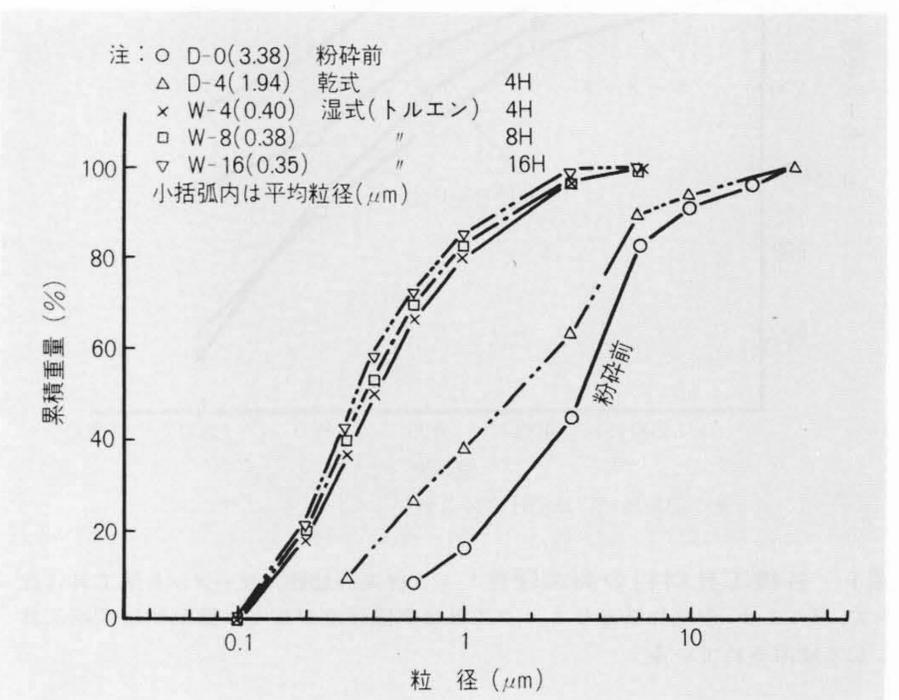


図4 振動ミルによるTiB₂原料粉の微粉化効果 16時間の振動ミル粉砕により、TiB₂粉末は市販TiC粉末よりも細くなる。

3.1.3 焼結助剤及びTiB₂含有量

一般にホウ化物の焼結性は悪いので、Al₂O₃-TiB₂系はAl₂O₃-TiC系よりも高密度微細組織は得にくい。このため、焼結助剤の検討が重要となる。Al₂O₃-8.5wt%TiB₂系に、焼結助剤と考えられる数種の化合物を0.5wt%添加し、その効果を調べた。焼結温度1,500°Cで真空中焼結した焼結体の結晶粒及び密度を図5に示す。MgOは焼結体の密度向上に効果があるが、同時に結晶粒は成長する。NiO(酸化ニッケル)及びH₃BO₃(ホウ酸)の場合、結晶粒は成長するが、密度は比較的小さい。結晶粒成長抑制に最も効果があったのはAlN(窒化アルミニウム)であり、焼結密度もかなり向上する。

これら一連の検討結果から焼結助剤としてMgO及びAlNを同時添加することにした。次に分散相であるTiB₂量を、現状Al₂O₃-TiC系とほぼ同じレベルの25wt%とした系でMgO及びAlNの最適含有量を調べた。図6にAlN添加量を変化させ真空中ホットプレスを行なった材料の相対密度を示す。AlN 1~2%で最大密度が得られる。

更に、TiB₂含有量による相対密度の変化を図7に示す。

TiB₂量が25wt%までは、ほぼ100%の密度が得られるが、30wt%では密度は低下する。

以上の結果をもとに新セラミック工具材の組成をAl₂O₃-25wt%TiB₂-1wt%AlN-0.5wt%MgOと決定した。

3.2 ホットプレス条件

Al₂O₃-TiB₂系焼結体の高密度、微細化を達成するため一連

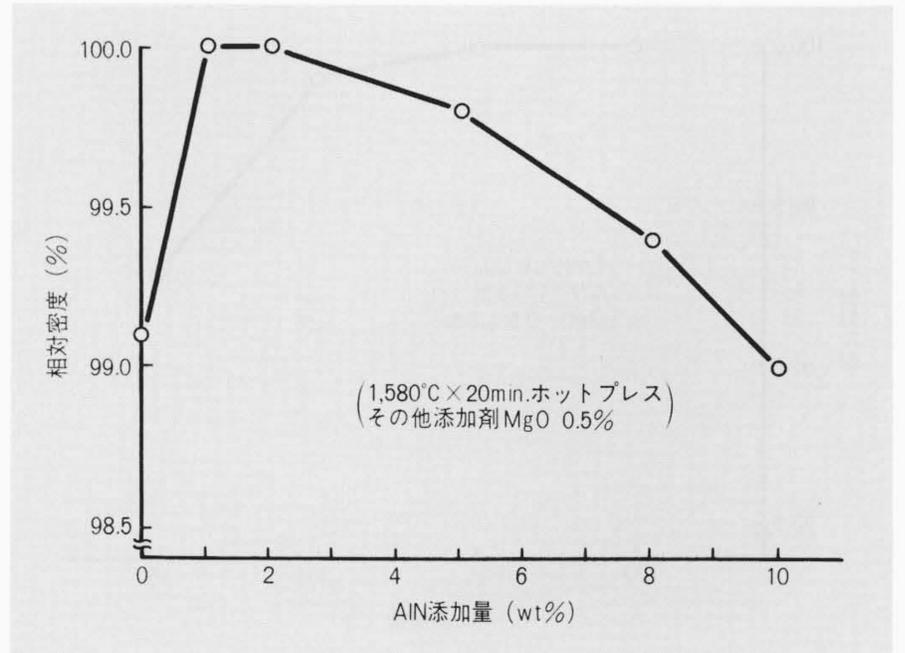


図6 Al₂O₃-25%TiB₂ホットプレス材のAlN添加効果 AlN 1~2%添加により、結晶粒成長抑制とともに最大密度が得られる。

のホットプレス条件につき検討を行なった。図8にホットプレス温度による相対密度及び結晶粒径の変化を示す。ホットプレス温度1,580°Cで最大密度となり、かつ結晶粒径は約1μと微細である。更に高温になると密度は低下し、結晶粒径も更に大きくなる。これらの結果からホットプレス最適温度は1,580°Cと決定した。

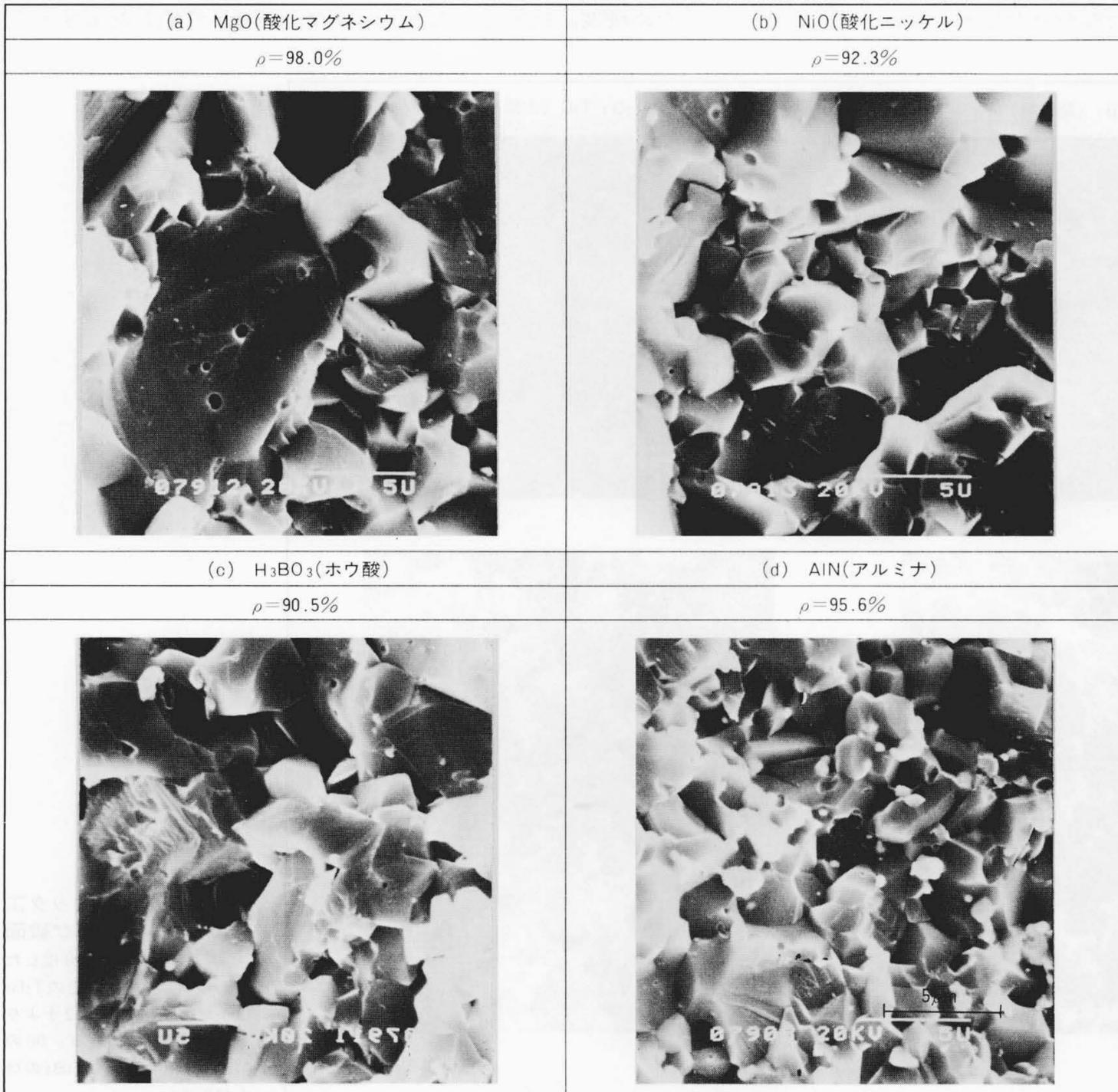


図5 Al₂O₃-TiB₂焼結体における添加物の効果 MgO添加は密度上昇に効果があるが、結晶粒は粗い。AlN添加により、結晶成長抑制とともに密度も向上する。

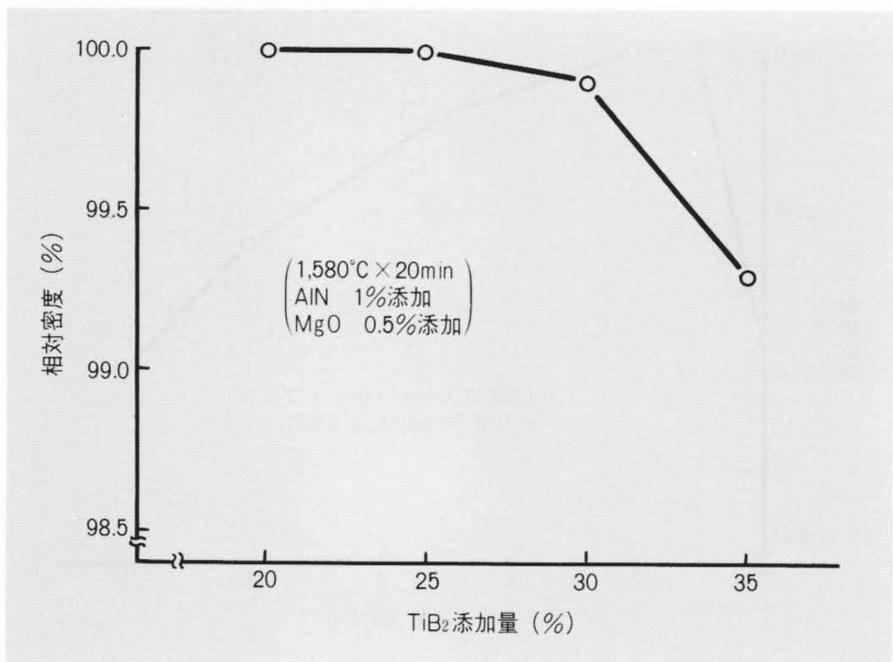


図7 Al₂O₃のTiB₂添加による相対密度変化 TiB₂30%以上になると密度は低下する。

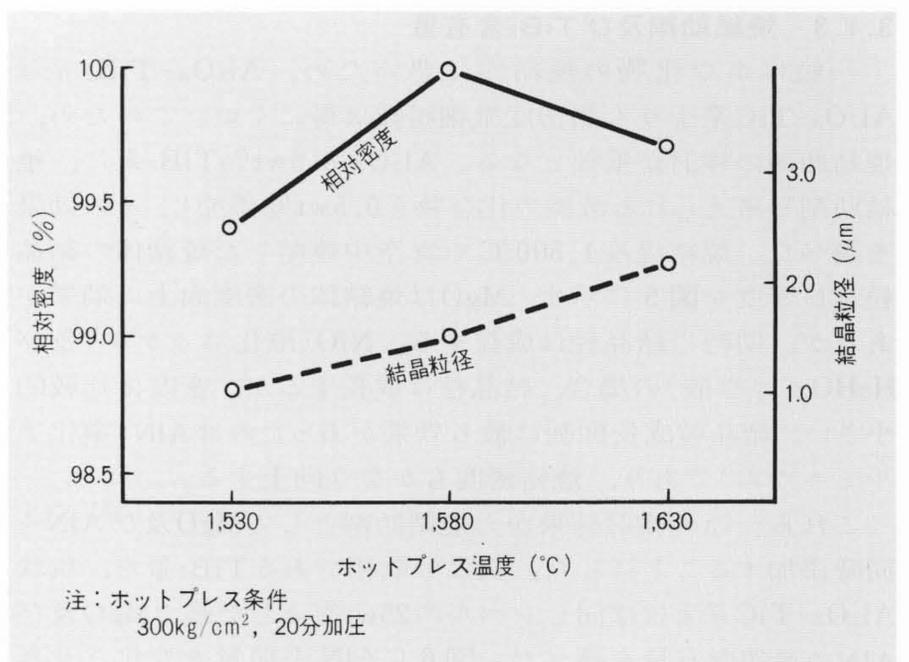


図8 Al₂O₃-25%TiB₂のホットプレス温度による相対密度と結晶粒径の変化 1,580°Cで最大密度となり、結晶粒径も1μmと微細である。

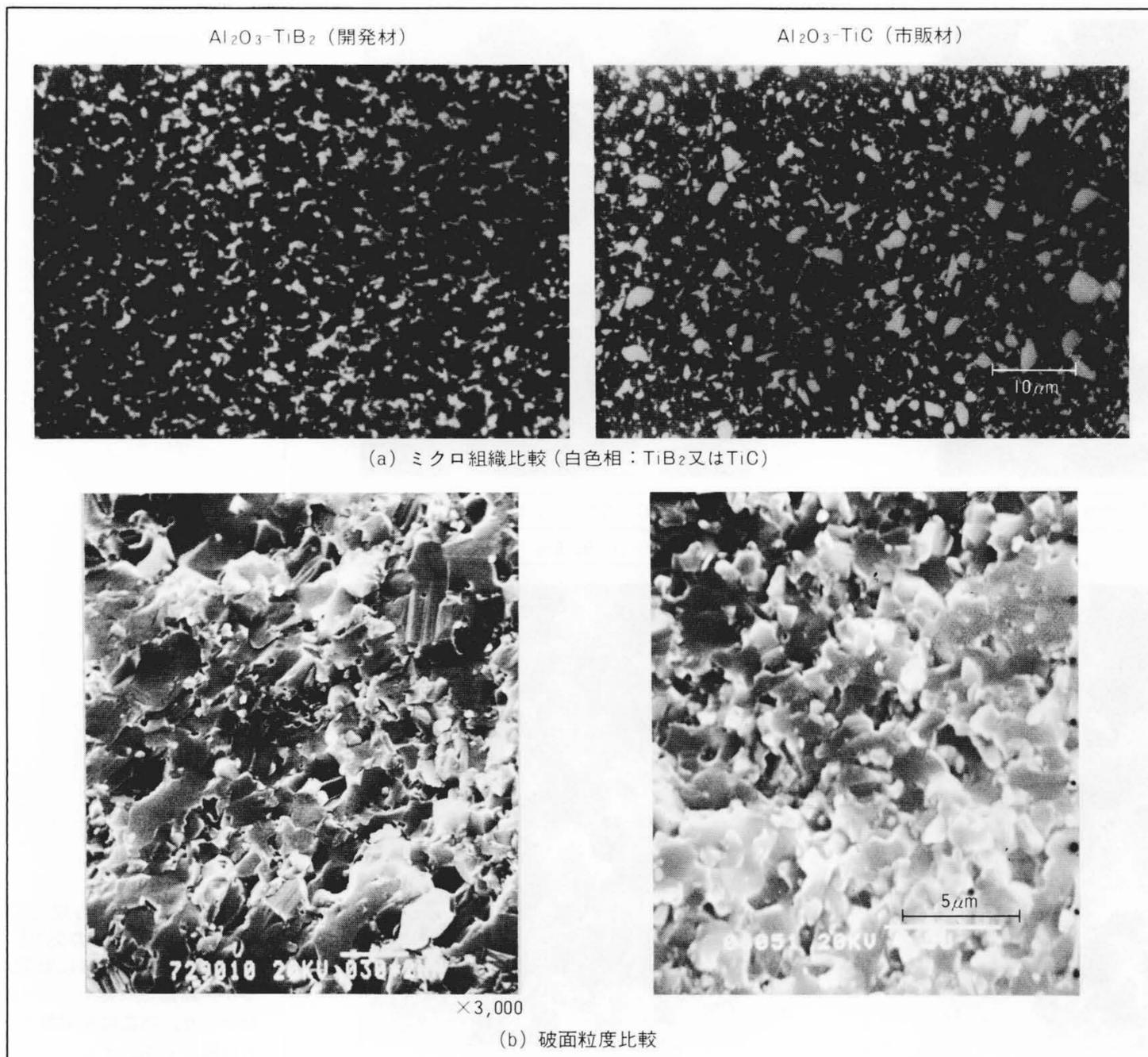
4 特性評価

4.1 工具材料特性

本開発によるAl₂O₃-TiB₂系工具材料の組織構造を、市販材のAl₂O₃-TiC系材料と比較して図9に示す。開発材は市販材よりも気孔が少なく、かつAl₂O₃母相の結晶粒径が小さいことが分かる。主として焼結助剤であるAlNの効果及びホットプレス条件の設定が適切に行なわれた結果である。また、開発

材は市販材よりも分散相(写真の白色相)の粒子が小さく、しかも市販材に存在する約数ミクロンの大きな分散粒子も見当たらず、TiB₂粒子の振動ミル粉碎による微粒子化の効果が確かめられた。

次に、開発材の特性を市販材と比較して表2に示す。開発材は市販材よりも気孔率が少なく、しかも結晶粒径が小さいため硬度、抗折力大きい。また、破壊靱性値に対応するク



(a) ミクロ組織比較 (白色相: TiB₂又はTiC)

(b) 破面粒度比較

図9 開発セラミック工具のミクロ組織及び破面比較 (a)では微粉化したTiB₂使用により、白色のTiB₂粒子が市販材のTiC粒子よりも微細分布している。(b)のAl₂O₃母相の粒径もTiB₂のほうが小さい。

表2 開発セラミック工具の特性比較 開発材は市販材よりも硬度、抗折力、クラック長などの機械的特性、熱的特性が優れ、切削試験結果の傾向と一致する。

物 性	開 発 材	市 販 材
	Al ₂ O ₃ -25%TiB ₂	Al ₂ O ₃ -30%TiC
理論密度(g/cm ³)	4.095	4.270
実測密度(g/cm ³)	4.095	4.261
相対密度(%)	100	99.8
硬 度(HRA)	94.0	93.1
クラック長(mm, 10kg荷重)	0.16	0.20
抗 折 力(kg/mm ²)	75	64
熱伝導度(cal/cm·s·°C)	0.061	0.043
熱膨脹率(10 ⁻⁶ /°C)	7.6	7.5

クラック長*)は開発材のほうが市販材よりも短く、靱性に優れている。これは、分散粒子であるTiB₂の粒径がTiCよりも小さく、それだけクラック伝搬に対する抵抗が大きいためと考えられる。更に、熱膨脹係数は同等であるが、熱伝導度は開発材のほうが大きく、2.2で述べたように耐熱衝撃性に優れている。以上、開発材は市販材と比較して、硬度、抗折力、クラック長などの機械的性質及び熱的性質が優れており、工具材料として有望であることが分かる。

4.2 切削試験

開発材及び他社材で難削材である高硬度鋼YSS-DAC(SKD-61)を切削速度70m/min, 切り込み1.5mm, 送り速度0.3mm/rev.

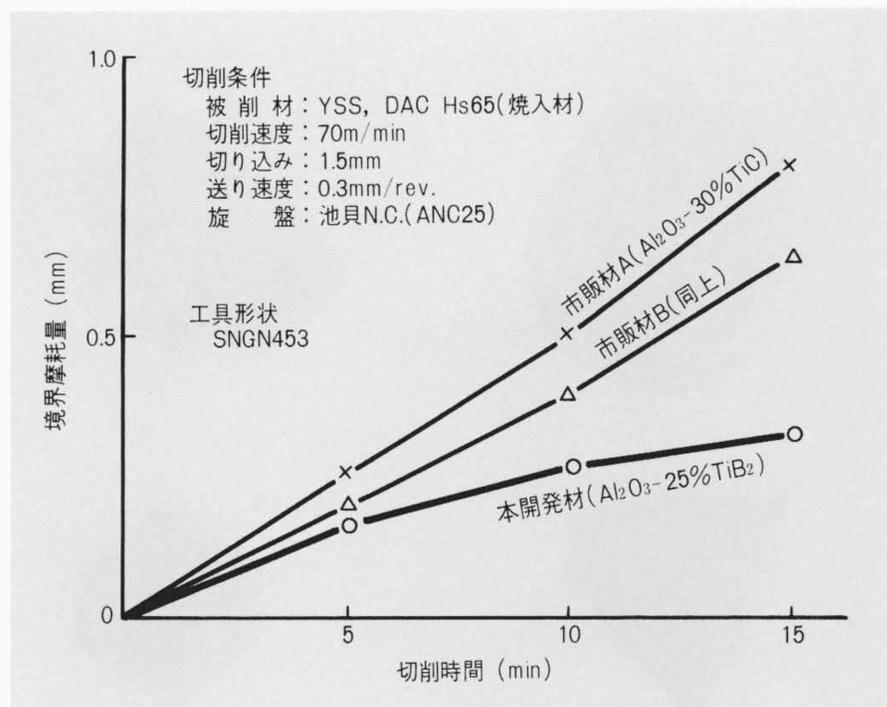


図10 開発工具の切削試験結果 焼入れした高硬度の難削材を開発した工具で切削すると、従来市販工具よりも工具寿命が長い。

で連続切削したときの切削時間と工具境界摩耗量の関係を図10に示す。開発材のほうがいずれの他社材よりも境界摩耗量が少なく、工具寿命が長いことが分かる。図11に切削試験後の工具刃先の摩耗状況を示す。工具刃先のクレータ面に生ずる摩耗(平面写真)及びフランク摩耗(側面写真)は市販材とはほぼ同等であり、正常な摩耗形態を示している。切削片が排出するときに工具と接する境界部の摩耗は、開発材では小さいのに対して、市販材はある程度摩耗が進行した段階で大きな

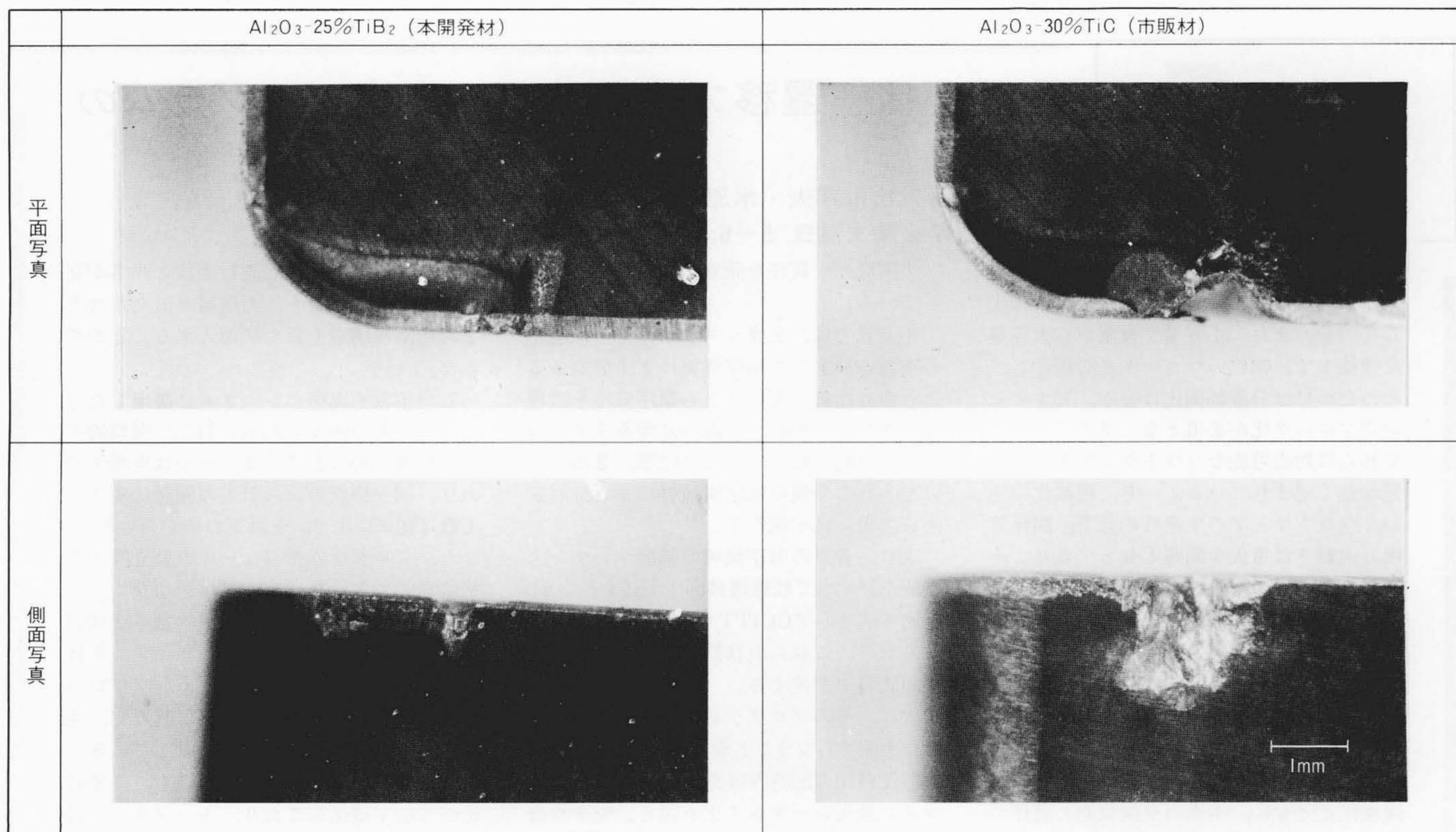


図11 開発SNP形セラミックチップの刃先損傷度比較 切削試験結果、開発チップの刃先損傷度は軽度で、摩耗損傷の少ないことが分かる。

※) ビッカース硬度計による圧痕の周辺に生じたクラックの長さを測定し、材料の強靱性を示す値で、超硬合金の評価によく用いられる。

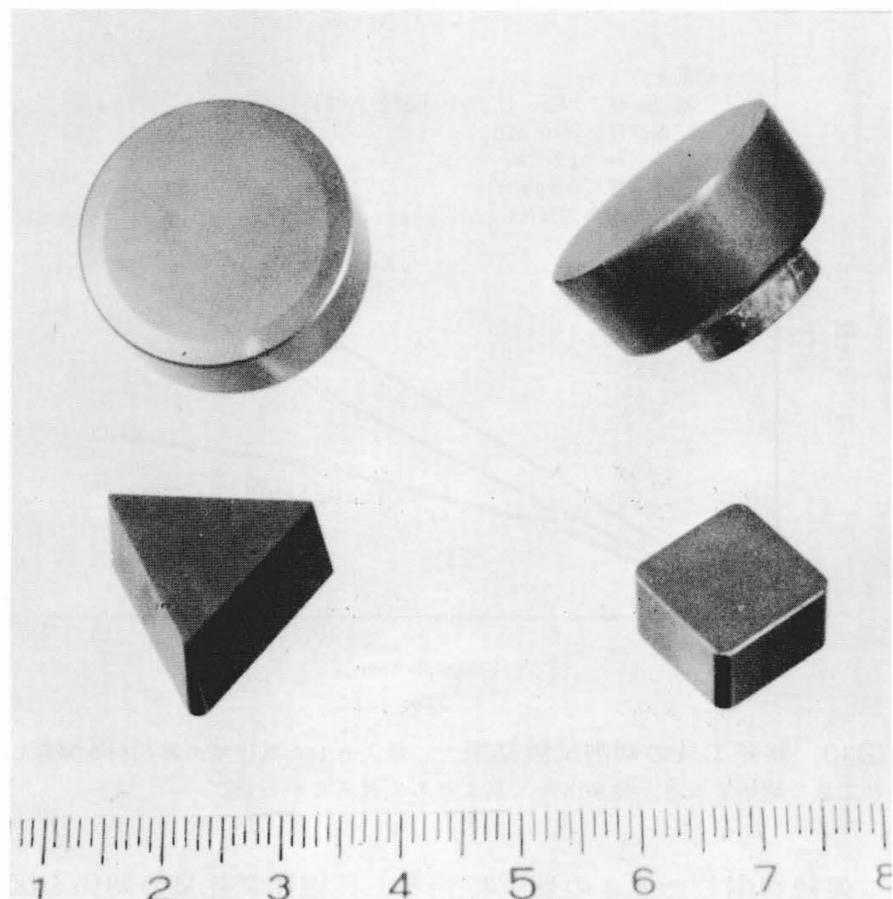


図12 開発セラミック工具の試作品 丸形は主として圧延ロール切削用に、角形は種々の機械部品の切削用に使われるスローアウェイ工具である。

チップングが生じていることが分かる。以上のことから、開発材の耐熱衝撃性の改善効果が確かめられた。

図12に本開発による各種ホットプレス試作品を示す。同図中の上部の丸形工具はR形状をもつ部品の切削用で、主とし

て圧延ロール切削用に使われるいわゆる丸駒チップである。同図中下部の角形状のスローアウェイチップは、種々の機械部品切削用として使用される。

5 結 言

難削材用セラミック工具として実用されている従来の Al_2O_3 -TiC系セラミック工具に代わる新しいセラミック工具の開発を行ない、その材料設計、プロセス及び切削性能について検討を行なった。その結果、次のように要約される。

- (1) 工具性能として重要な因子である高温硬度及び耐熱衝撃性がTiCよりも優れている化合物を探索し、 TiB_2 を選定した。
- (2) TiB_2 粉末の微粉碎、焼結助剤としてのMgO及びAlN添加、ホットプレス条件の検討により工具性能として望ましい高密度微細結晶粒組織を得た。
- (3) 新たに開発した切削工具材料の組成は、 Al_2O_3 -25wt% TiB_2 -1wt%AlN-0.5wt%MgOである。
- (4) 難削材の一種である高硬度YSS-DAC(SKD-61)の旋削試験で、開発したセラミック工具は市販工具よりも寿命が優れている。

参考文献

- 1) '82特殊セラミック製品の現状と将来性、総合技研株式会社(1981)
- 2) 田中：セミナーテキスト、超硬強度セラミックス、日刊工業新聞(昭53)
- 3) エレ・ベ・カテリニコフ：超高融点材料便覧、日ソ通信社(1977)
- 4) W. D. Kingery: J. Am. Ceram. Soc., 38, 1, 3 (1955)

論文抄録

分散型状態遷移方式に基づく交換プログラムの構成法

日立製作所 桧山邦夫・水原 登・他2名
電子通信学会論文誌B 5-6, 785-792(昭57-6)

電子交換機の制御ソフトウェアは、サービス機能の高度化などにより複雑大規模化している。また、小容量交換機から大容量交換機まで、幅広いサポートを必要とし、そのためには分散制御化による、ビルディングブロック化が必須となってきており、それらに対応可能なソフトウェア方式の開発が強く望まれている。一方、複雑化に伴い、ソフトウェアの生産性の低下、開発管理の困難さは重大な問題となってきた。そこで、それらの解決をねらって、新しい交換ソフトウェアの開発手法として、「分散型状態遷移方式」を開発、提案した。

交換ソフトウェア方式として、従来から順序機械の概念を活用した状態遷移図による機能仕様記述、それに基づくソフトウェア構造が用いられている。しかし、機能の複雑化とともに、本来の交換機能の動作の理解容易性、また表現容易性が失われてしまった。

それに対し、本方式は状態遷移方式の良さを生かし、その適用範囲を全体に対して拡大させ、統一的设计手法によるソフトウ

ェア開発の一貫性を確立させることをねらっている。

本方式では、交換システムをその機能から複数の独立した順序機械にまず分割することから始め、更にそれら順序機械を論理的な部分から物理的な部分に至るまで、各各階層分割を行なう。この結果、2次元に分割された多数の順序機械群による分散制御システム化が図れる。

次に、各々の順序機械の制御シーケンス機能を、すべて状態遷移図で記述を行なう。記述方式としてCCITTでの勧告のサブセットを用い、これらの状態、入出力を状態遷移図表現で記述する。

次に、そのプログラム化を機械的な統一した手法で行なうことが第2の特徴である。状態遷移図の記述内容をテーブル論理化し、マクロ命令シーケンス化を図る。マクロ命令は状態遷移図の記述内容と対応を明確にもち、また、これら実行制御を行なう制御ソフトウェアを共通化して設ける。この結果、実行処理を行なうプログラム構造も前述3段階の階層分割化を明確に行なえる。

その結果、機能表現と実行手段と両者が互いに独立なことから、両階層を直交させた2次元階層構造を新たに導入することができた。

この手法を実際のシステムに適用したところ、従来の種々の問題に対し、画期的な改善結果が得られている。一つは生産性であり、同一機能のシステムの開発に要する工数は従来に比べ、 $\frac{1}{3}$ 以下の値が得られた。また、プログラムモジュールの独立性を非常に高くでき、共通データは一切なく、インタフェースパラメータの平均数も2個以下と非常に少なくなった。この結果、単体モジュールデバッグ、ビルディングブロック方式の結合デバッグが容易に行なえ、生産性、信頼性の大幅向上に貢献している。また、全体のソフトウェア規模も、従来に比べて約半減化しており、トップダウン設計による機能モジュール化により、冗長さの削減が図れている。また、多数のマикроコンピュータを用いた分散制御方式にも容易に対応可能な構造をもっている。