

# 難削材の高効率切削の可能な 超高硬度Ti(C, N)-W系サーメット

産業技術総合研究所    エレクトロニクス・製造領域  
製造技術研究部門    トライボロジー研究グループ  
主任研究員 村上 敬

2021年9月9日

# 従来技術とその問題点

- 航空機（機体やタービンブレード）、発電用大型蒸気タービンなどの分野では、**インコネル、スーパーステンレス鋼、チタン合金**のような高機能材料が使用され、その使用量は増加傾向にある。
- しかしこれらの材料は切削加工時**刃先温度が1000°C近くまで上昇し**、刃先の激しい摩耗が起きやすい**難削材**である。
- 現在切削工具用材料として用いられているダイヤモンド、ハイス、及び**低融点金属バインダー（Ni、Co、Fe等）を用いた超硬合金、サーメットは600°C以上の温度で硬度が急激に低下**するため、上記難削材の切削加工が難しい。またcBN（立方晶窒化ホウ素）は反応性の観点からAl、Ti合金の切削加工が難しい問題がある。
- このため上記難削材に対応できる**新規の切削工具材料**の開発が求められている。

# 新規切削工具材料に求められる特性

○高温で高硬度 ○高靱性 ○熱的・化学的に安定 ○熱伝導率が高い

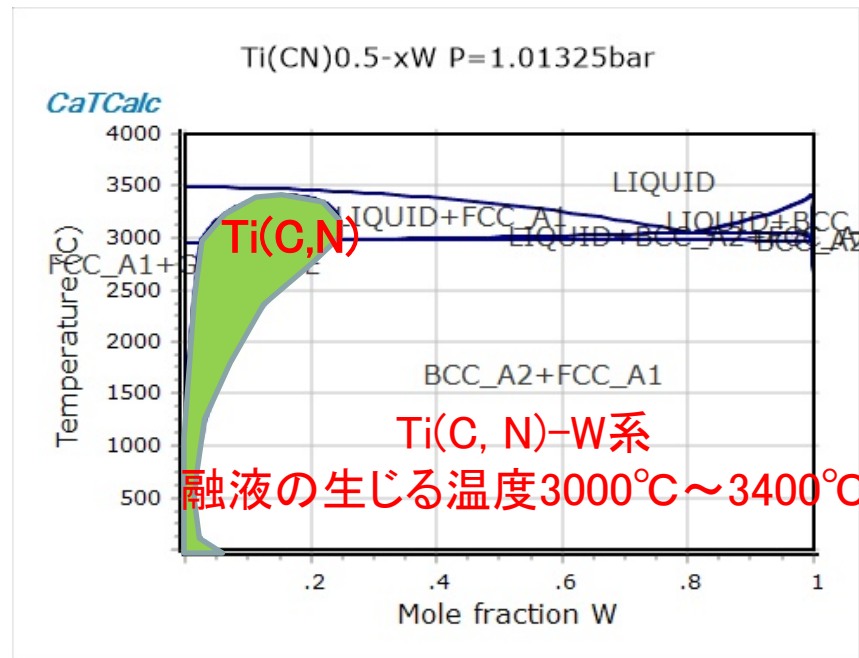
## 現用の切削工具材料とその問題点

材料名	特徴	高温硬度	室温靱性	化学的安定性
ダイヤモンド	天然で最も硬い物質	×	×	× (Fe)
CBN(立方晶窒化ホウ素)	ダイヤモンドに次ぐ硬質材料	△	×	× (Al、Ti)
ハイス(高速度鋼)	歴史の古い切削工具材料、高靱性	×	○	○
<b>超硬合金</b>	WC粒子間をCoバインダーでつないだ複合材料 <b>ハイスより高速の切削が可能</b>	×	○	○
<b>従来型サーメット</b>	セラミック粒子間を低融点金属バインダーでつないだ複合材料。鋼の切削で美しい仕上げ面が得られる。	×	○	○



- 金属バインダーを超高融点金属に置き換えたTi(C, N)-W系やTi(C, N)-Mo系サーメットは、作成した計算状態図では前者の融液の生じる温度が3000°C~3400°Cになるなど、非常に高い高温硬度が期待できる。(※超硬合金は約1300°Cで融液が生じる)
- 従って我々はTi(C,N)-W、Ti(C,N)-Mo系サーメットを放電プラズマ焼結法により作製し、得られたサンプルのTEM組織、高温ビッカース硬度、高温耐酸化性、切削工具としたときの切削特性等について調べてみた。

(a)



(b)

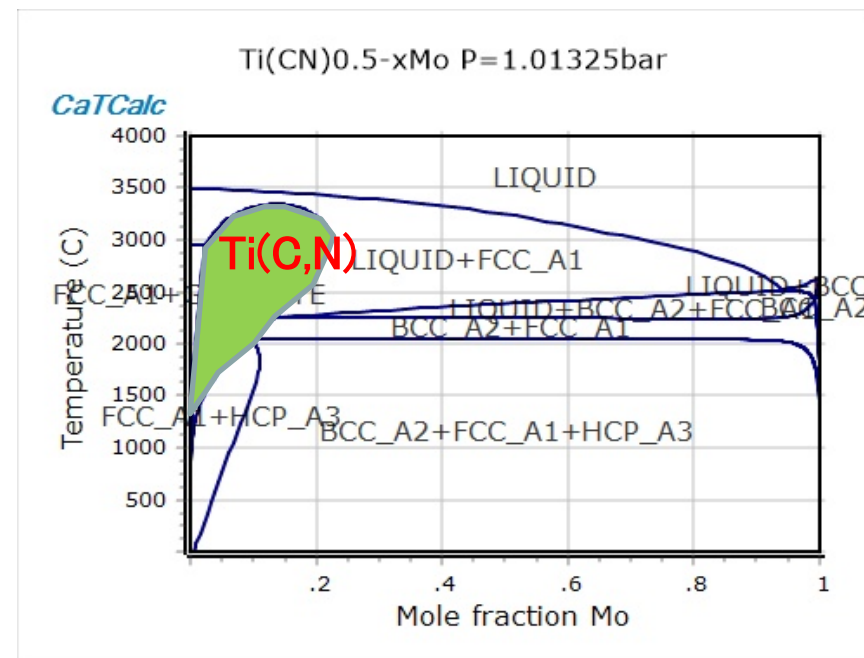


図1 熱力学計算ソフトCatcalcで得られた(a) Ti(C, N)-W及び(b) Ti(C, N)-Mo擬二元系状態図(株計算熱力学研究所作成)。

# 新技術の特徴・従来技術との比較

- 従来型のサーメット・超硬合金で大きな問題点であった、高温（600°C以上）硬度の低下を超高融点金属バインダーの使用や組織制御等で抑制することにより、**室温～1000°Cでの高温硬度を最大で超硬合金K10の約1.8倍程度**にまで上げることに成功した。
- また超硬合金では酸化による劣化が激しくなる700°Cでも開発サーメットは**酸化による劣化が小さい**ことも明らかにした。
- 従来型の超硬合金製**切削工具**より、開発サーメット製工具の方が鋼系及びニッケル合金等の切削加工において工具摩耗が小さくなることを明らかにした。
- 超硬合金のCoバインダーが融解する1300°Cでも**加圧焼結型**として使用できることも明らかにした。

# 新技術の詳細

- ①開発サーメットの高温硬さ、高温耐酸化性、  
及び特異な網目状＋整合結合組織

- 原料粉末: **Ti(C, N) 粉末** ( $\text{TiC}_{0.5}\text{N}_{0.5}$  粉末、粒径 $0.7\sim 0.9\ \mu\text{m}$ )  
**W粉末** (純度99.9%、粒径 $0.6\ \mu\text{m}$ )  
**Mo粉末** (純度99.8%、粒径 $0.50\sim 0.99\ \mu\text{m}$ )
- **Ti(C, N)-Xmass% W** ( $X=0, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 100$ )  
**Ti(C, N)-Ymass% Mo** ( $Y=0, 20, 30, 40, 50, 60, 100$ )

の組成になるよう原料粉末を湿式ボールミルで72hr混合後、

**Ti(C, N)-W系: 焼結温度 $1950^{\circ}\text{C}$ 、加圧力 $40\text{MPa}$ 、保持時間 $1.8\text{ks}$**

**Ti(C, N)-Mo系: 焼結温度 $1800^{\circ}\text{C}$ 、加圧力 $40\text{MPa}$ 、保持時間 $0.3\text{ks}$**

の条件で放電プラズマ焼結を行った。

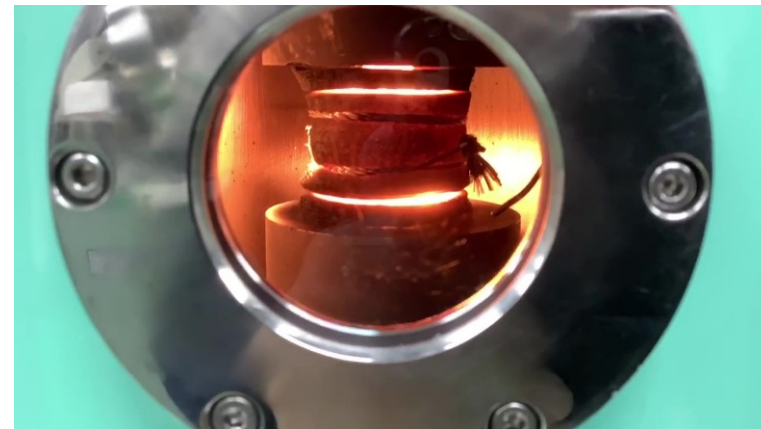


図2 本研究で用いた放電プラズマ焼結機の外観

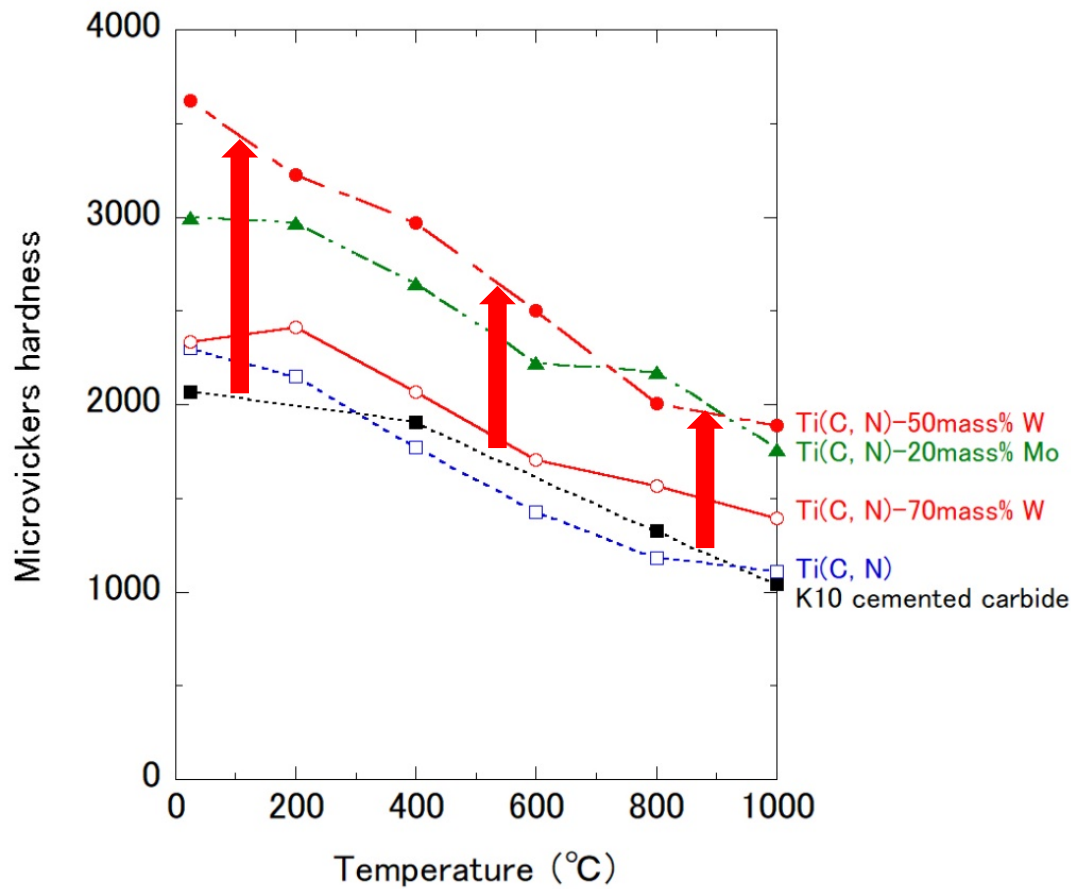


図3 Ti(C, N)-W、Ti(C, N)-Mo系サーメットの高温ビッカース硬さ

- 室温～1000°Cでのビッカース硬さが最大で超硬合金K10の約1.8倍に増大
- Ti(C, N)-W系は50mass%、Ti(C, N)-Mo系は20mass%Moあたりで最も硬さが高くなる。
- Ti(C, N)-W系サーメット、Ti(C, N)-Mo系サーメットの破壊靱性値はWが70mass%以上、Moが40mass%以上の時、 $10\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以上になる。



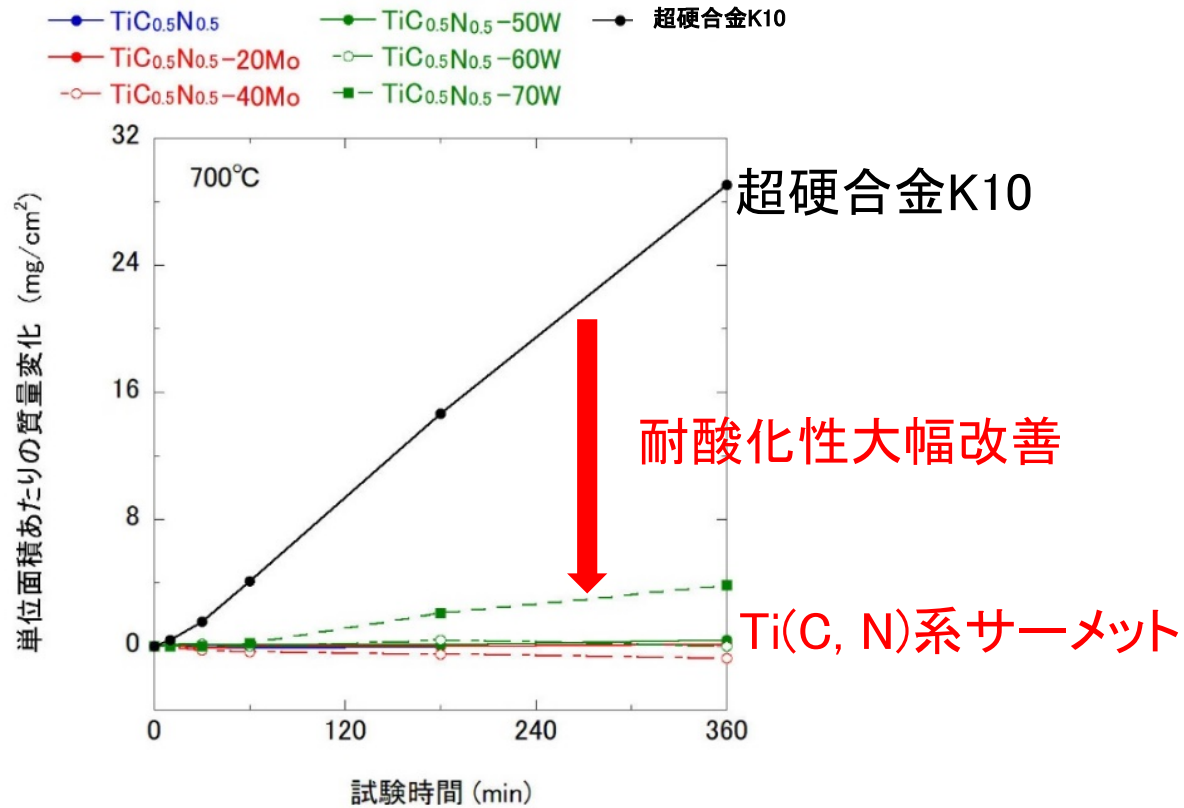


図4 大気中700°CにおけるTi(C, N)-W、Ti(C, N)-Mo系サーメットの質量変化

700°Cでの耐酸化性が超硬合金K10より大幅に上昇

Ti(C, N)焼結体 : 粒径約20-30  $\mu\text{m}$

Ti(C, N)-50mass% Wサーメット  
粒径約0.5  $\mu\text{m}$

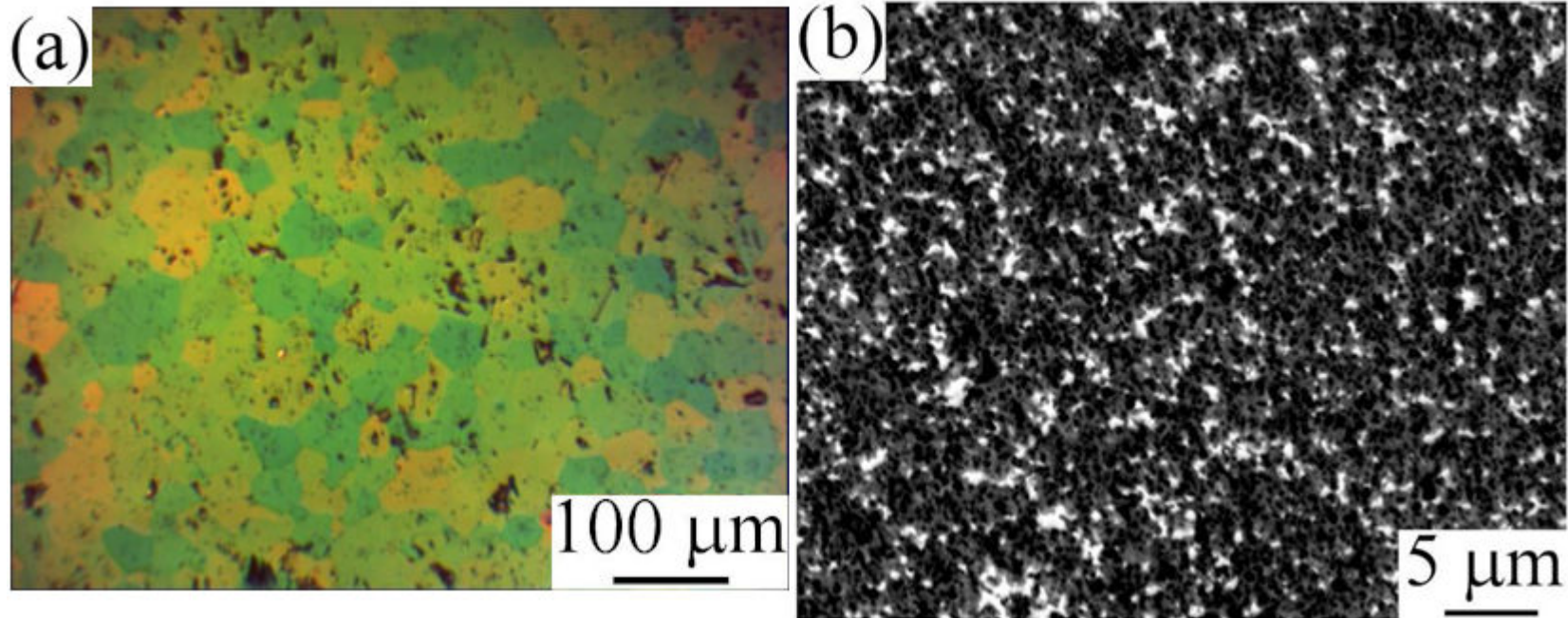
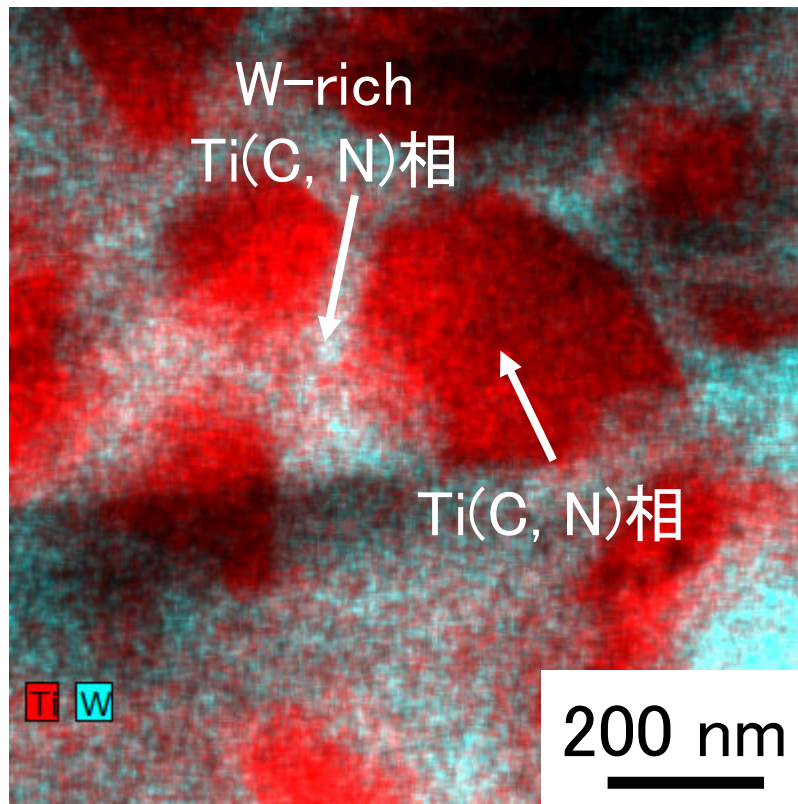


図5 (a) Ti(C, N)焼結体の光学顕微鏡写真及び(b) Ti(C, N)-50mass% WサーメットのSEM-COMPO像

※(b)の白い相:W相、灰色の相:W-rich Ti(C, N)相、黒い相:Ti(C, N)相

WやMoを添加することでTi(C, N)の粒成長が著しく抑制される。

(a) Ti(C, N)-50mass% W



(b) Ti(C, N)-20mass% Mo

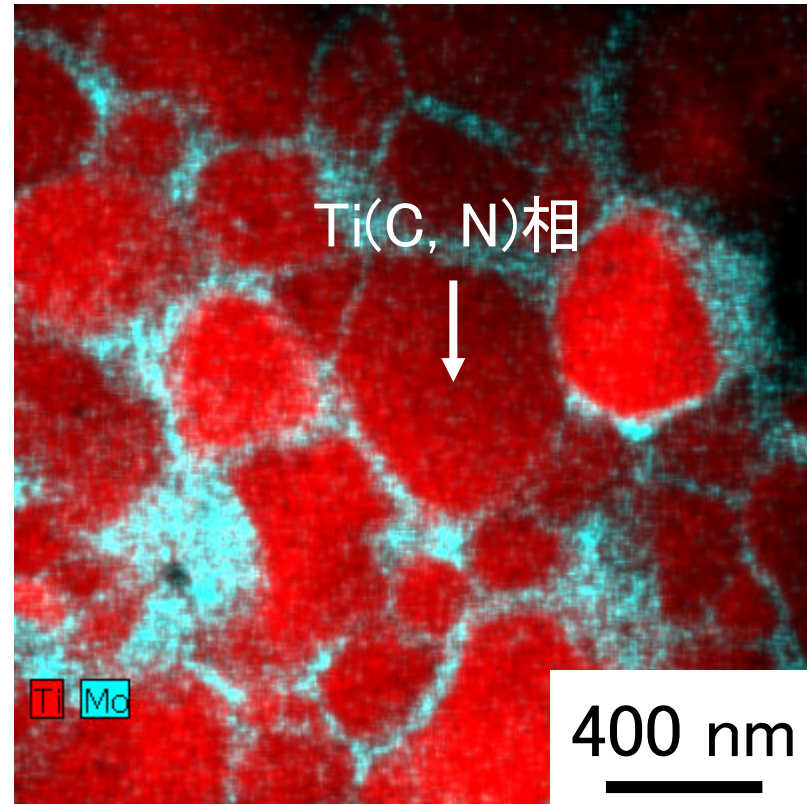


図6 (a) Ti(C, N)-50mass% W、(b) Ti(C, N)-20mass% MoサーメットのTEM-EDS像。赤:Ti(C, N)相、青:W-rich もしくはMo-rich相

Ti(C, N)-50mass% W、Ti(C, N)-20mass% Moサーメット中の各々のTi(C, N)粒子はそれぞれW-rich、Mo-rich相で囲まれた網目状組織になることがわかった。

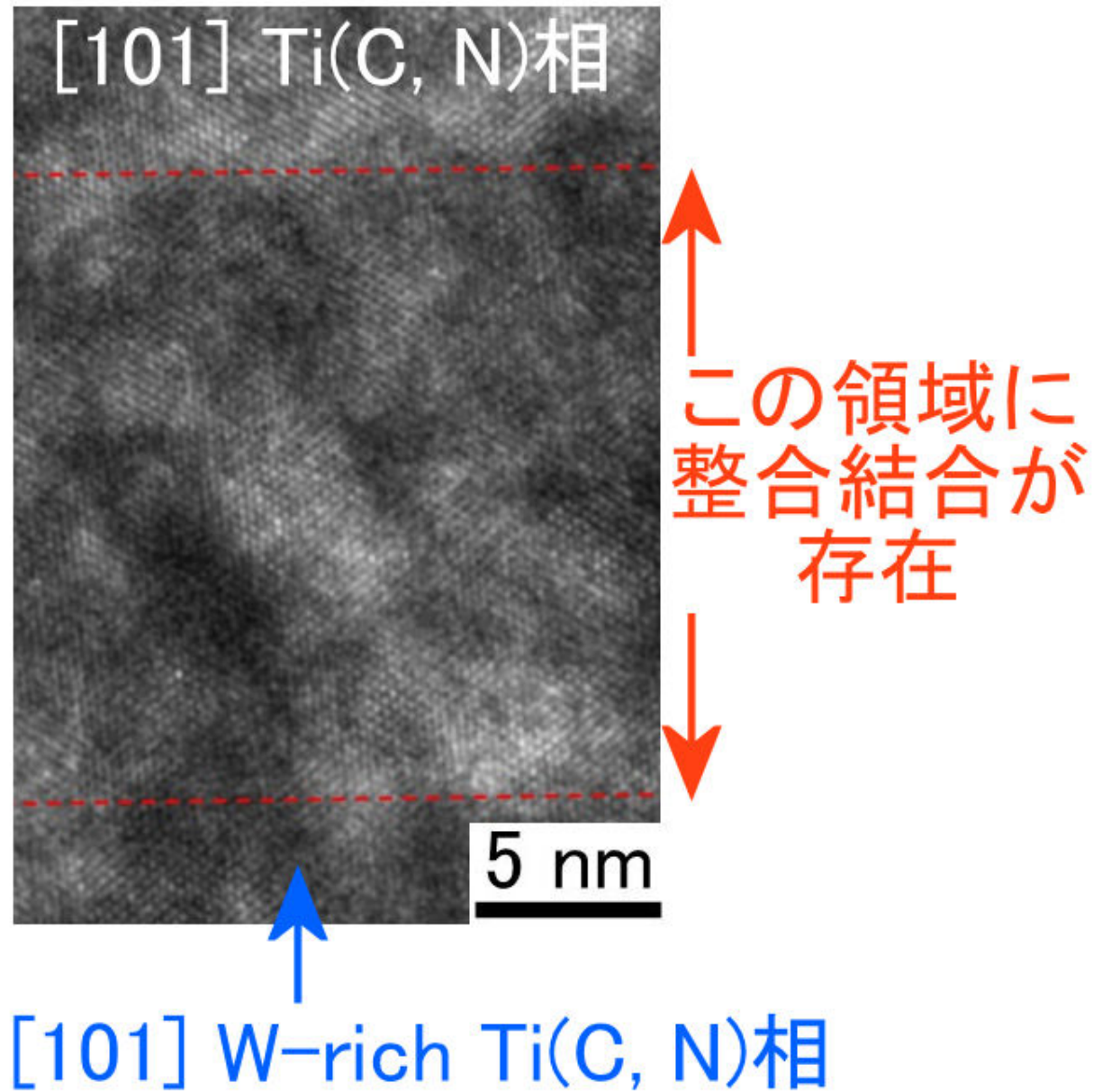


図7 Ti(C, N)-50mass% WサーメットのW-rich Ti(C, N)相/Ti(C, N)相境界付近の格子像。

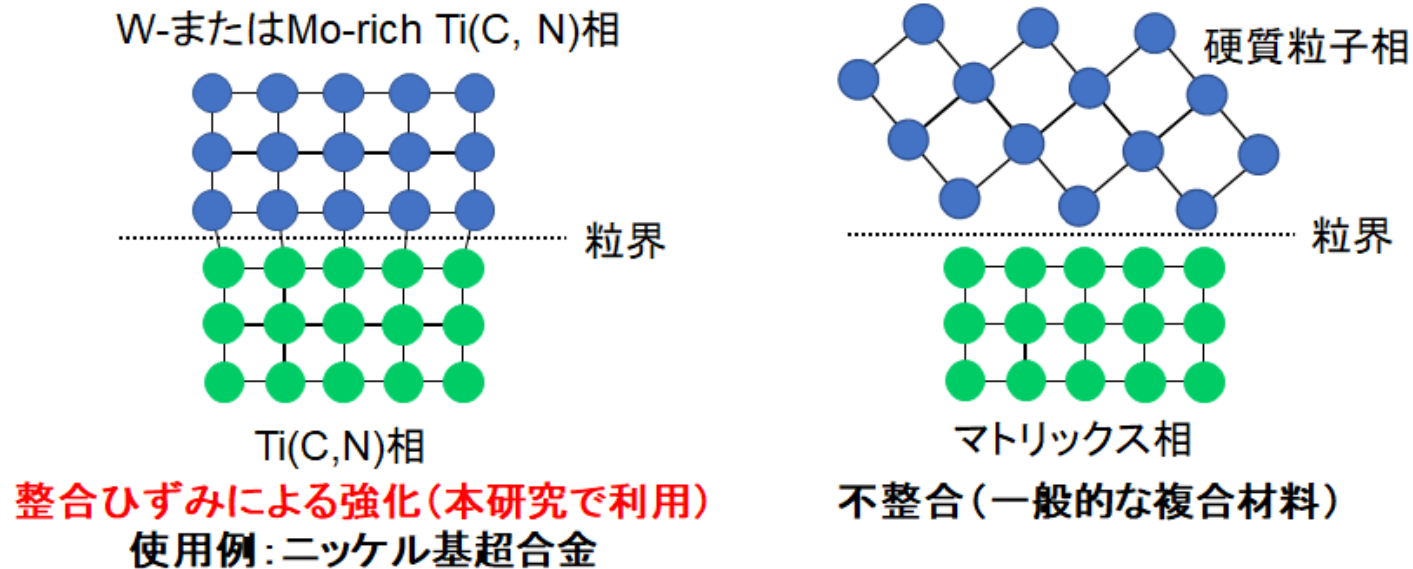


図8 整合結合の概念図

- 結晶粒の結合力が非常に強固で高温硬度が得られやすい。
- 結合する2つの粒子の結晶構造や格子定数が非常に似ていないと得られない。

- W-rich Ti(C, N)相とTi(C, N)相境界は整合結合になっている。
- Ti(C, N)-W系サーメットの硬度向上は①組織微細化②Ti(C, N)相へのWの固溶強化③整合結合の3つから起きていると考えている。

## ②開発サーメットチップを用いた切削試験

## 工具材質

- 超合金K10  
( $H_v(\text{室温})$  2000、 $H_v(1000^\circ\text{C})$  : 1000)
- **Ti(C, N)-70mass%Wサーメット**  
( $H_v(\text{室温})$  : 2300、 $K_{IC}=12\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、 $H_v(1000^\circ\text{C})$  : 1400)

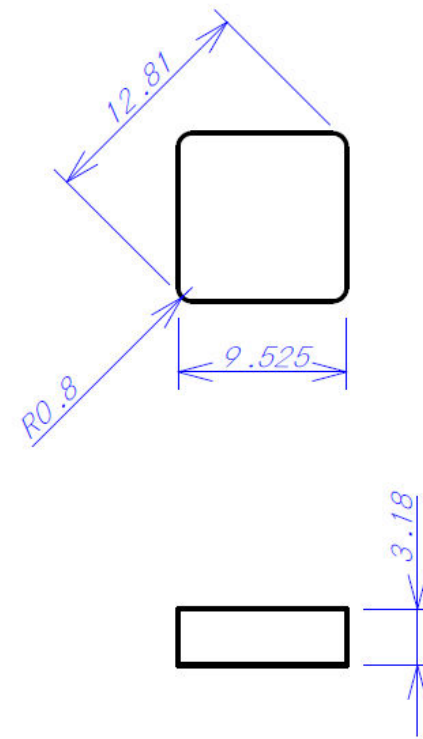
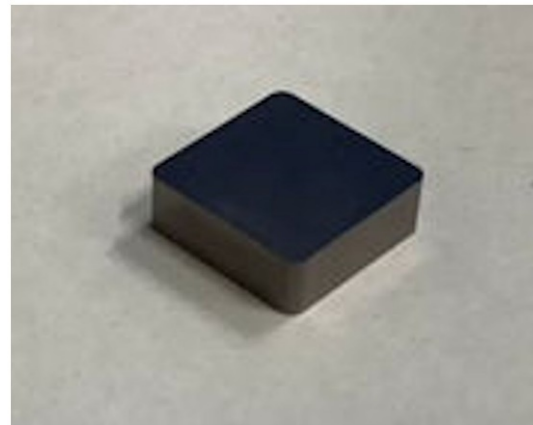


図9 Ti(C, N)-W系サーメット製切削工具の外観及び寸法

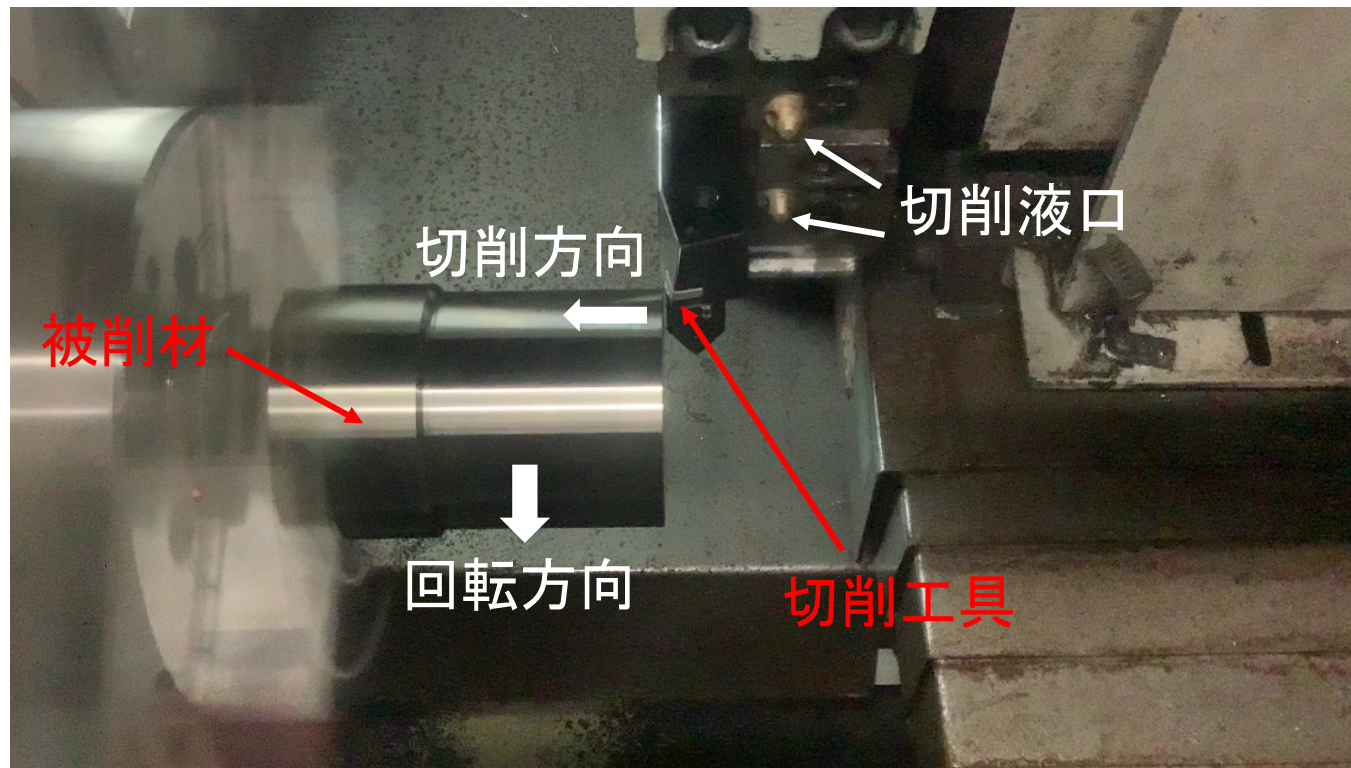


図10 切削加工試験の外観(高速NC旋盤(日立建機TS15))



表1 本研究で行った切削加工試験条件

被削材	切削液	切削速度	送り	切り込み
スーパーステンレス鋼 S32750	有	800m/min	0.1mm/rev	0.25mm
インコネル718	有	800m/min	0.1mm/rev	0.25mm
S45C鋼	無	600m/min	0.1mm/rev	0.50mm

切削距離：全て100m

切削液：FUCHSエコクールSYN430SP希釈液

超硬合金K10工具  
(※工具刃先の摩耗が激しく  
40m程度しか切削できなかった)

Ti(C, N)-70mass%  
Wサーメット工具

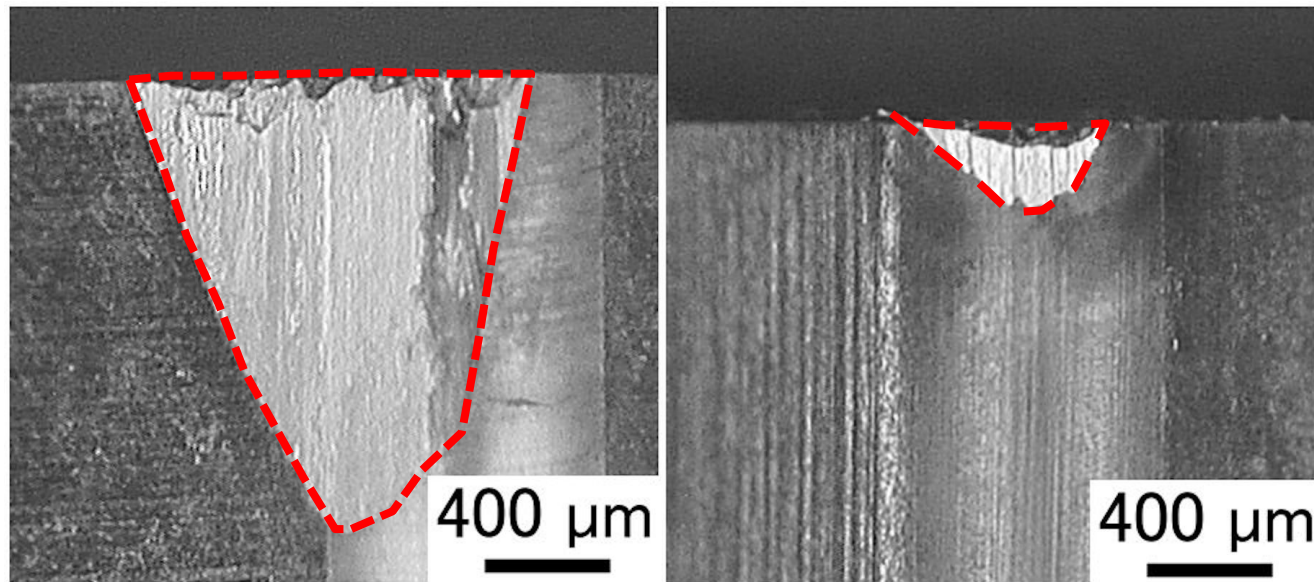


図11 スーパーステンレス鋼S32750相手に切削液有、切削速度800m/minで100m切削試験後の工具刃先(逃げ面)の外観写真。赤の点線で囲った領域は摩耗した部分。

Ti(C, N)-70mass% Wサーメット工具の摩耗量はインコネル718合金、S45C鋼相手に切削加工した際も超硬合金K10より小さくなった。

表2 約100m切削した箇所での被加工材の表面粗さ $R_a$  ( $\mu m$ )

工具材料	スーパーステンレス 鋼S32750	インコネル718	S45C鋼
超硬合金K10	約40mまでしか切削 できず	約70mまでし か切削できず	1.35
Ti(C, N)-70mass% Wサーメット	1.13	0.64	0.41

表3 赤外線カメラで測定した切削加工中の刃先温度  
(被削材スーパーステンレス鋼S32750、切削速度560m/min、  
送り0.05mm/rev、切込み0.25mm、切削液無)

工具材質	温度(°C)
超硬合金K10	600～700
Ti(C, N)-70mass%Wサーメット	490～520

- Ti(C, N)-70mass%Wサーメットの方が超硬合金K10より熱伝導率が高い可能性がある。
- 今後熱伝導率を測定する予定

### ③ 開発サーメット製加圧焼結型を用いた 焼結試験

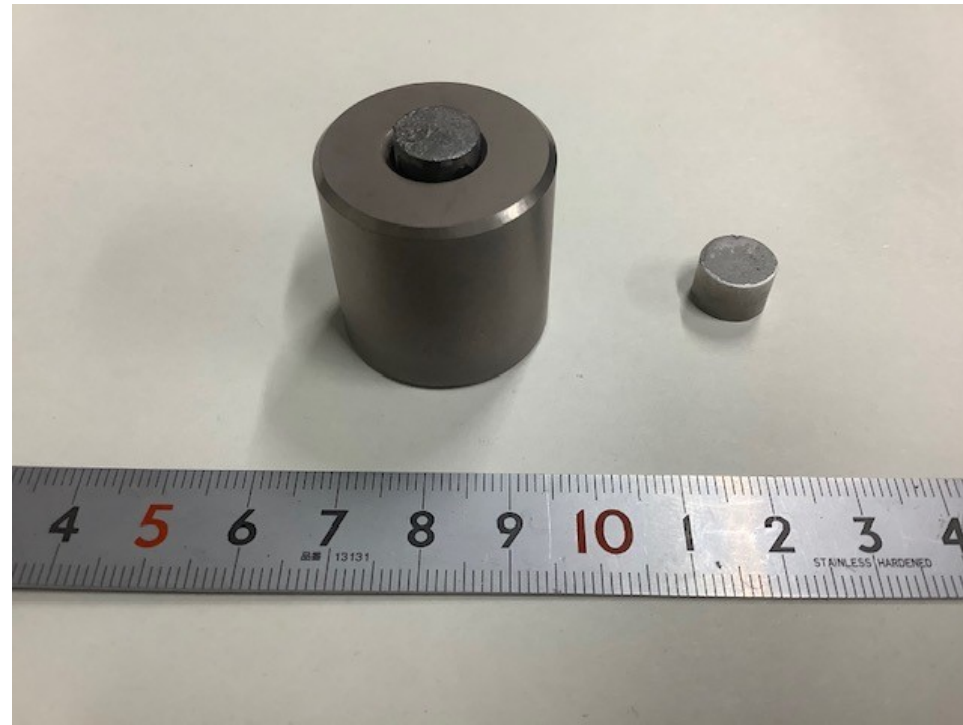


図12 Ti(C, N)-W系サーメット製加圧焼結型、及びこの型を用いて  
焼結温度1300°C、加圧力40MPa、保持時間10minで作製したアル  
ミナ焼結体(相対密度ほぼ100%)の外観

- 開発サーメット製加圧焼結型は超硬合金のCoバインダーが溶解する  
1300°Cでも使用可能

# 想定される用途

- 熱力学解析ソフトCaTCalcによる状態図計算によると開発サーメットの融点は $3000^{\circ}\text{C} \sim 3400^{\circ}\text{C}$ であることから(従来の超硬合金は $1300^{\circ}\text{C}$ )、本技術を生かすためには、従来型サーメット、超硬合金では高温硬度の小さい $1000^{\circ}\text{C}$ 以上になる工具、金型等に適用することが好ましいのではと考えている。
- 今後Ti(C, N)-W系サーメットの室温、高温強度( $1000^{\circ}\text{C} \sim 2000^{\circ}\text{C}$ )を確認しながら、インコネル、TiAl(航空機エンジン部材、自動車のターボチャージャー構成部品)用高温金型などへの応用を検討する予定。
- また開発サーメットは特定化学物質のCoを含まない、超硬合金よりW含有量が小さい利点もあり、これらの点を生かす応用もあるのではと考えている。

## 実用化に向けた課題

- 開発サーメットは融点が3000°C以上あり、1000°Cでも従来の超硬合金に比べてはるかに高硬度であることから、1000°C以上での温度でも充分利用可能と考えている。このため現在、高温工具としての利用に必要と考えられる1000°C～2000°Cでの機械的性質や、熱伝導率等を調査中である。
- 難削材用切削工具への応用については、現在適切な切削条件を確認中である。また高温金型など他の部品への応用の可能性についても、これから詳細に調べていく予定である。



# 企業への期待

従来型の超硬合金・サーメットの部品では室温～1000°Cでの硬度が不十分なため、新規材料製の部品に置き換えたい企業や、特定化学物質のコバルトを使わない硬質材料の利用を考えている企業などとの共同研究を希望。

# 本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 加圧焼結体及びその製造方法
- 出願番号 : 特願2020-051224
- 出願人 : 国立研究開発法人産業技術総合研究所
- 発明者 : 村上 敬、是永 敦、大花 継頼

# お問い合わせ先

**産業技術総合研究所**  
**知的財産部 技術移転室**

**TEL 029-862-6158**

**FAX 029-862-6159**

**e-mail [aist-tlo-ml@aist.go.jp](mailto:aist-tlo-ml@aist.go.jp)**