



難削材加工に適した次世代超硬合金

Next-Generation Cemented Carbide for Machining Difficult-to-Cut Materials

木村 好博*
Yoshihiro Kimura

城戸 保樹
Yasuki Kido

パサート アノンサック
Anongsack Paseuth

岡村 克己
Katsumi Okamura

田中 佑樹
Yuki Tanaka

津田 圭一
Keiichi Tsuda

チタン合金や耐熱合金等の高強度材は加工が難しいことから難削材に分類される。難削材は航空機や医療等の様々な市場で使用され、加工需要の高まりと同時に加工面品位や高能率化が求められている。これらのニーズに応えるため、当社では難削材加工に適した次世代の超微粒超硬合金を開発した。硬質相粒子の界面強度を向上させる技術により粒子脱落による損傷を抑制し、結合相の強度を向上させる技術により高能率加工における摩耗を低減することに成功した。この二つの技術を組み合わせることで難削材加工において工具の長寿命化を実現した。

Difficult-to-cut materials like titanium alloys and heat-resistant alloys are difficult-to-cut materials. They are used in industries such as aerospace and medical, where the demand for high-quality processing and efficiency is increasing. For these needs, we have developed next-generation ultrafine-grained cemented carbide for high-strength materials. We successfully improved the interface strength between hard phase particles to prevent damage from particle detachment and reduce wear in high-efficiency machining by enhancing the binder phase strength. By combining these two technologies, we have achieved longer tool life in cutting difficult-to-cut materials.

キーワード：難削材、チタン合金、耐熱合金、超硬合金、切削工具

1. 緒言

チタン合金やインコネル等の耐熱合金^{*1}は優れた耐食性、機械的性質を持つ材料であり、航空機のエンジン部品や医療用のインプラント等に幅広く使用される。これらの合金は高い強度と硬度のため、切削時に工具が摩耗しやすい。また熱伝導率が低いことから切削熱が刃先に集中し、工具の寿命が短くなるため難削材に分類される⁽¹⁾。

近年、航空機や医療市場の成長が見込まれる中、難削材を加工する切削工具に対して、面品位の向上や高能率化が求められている。

当社ではこれらの市場ニーズに応えるため、難削材加工に特化した工具材料の研究開発に取り組んだ。本稿では難削材加工に特有の損傷メカニズムに基づいて開発した新たな超硬合金^{*2}を紹介する。

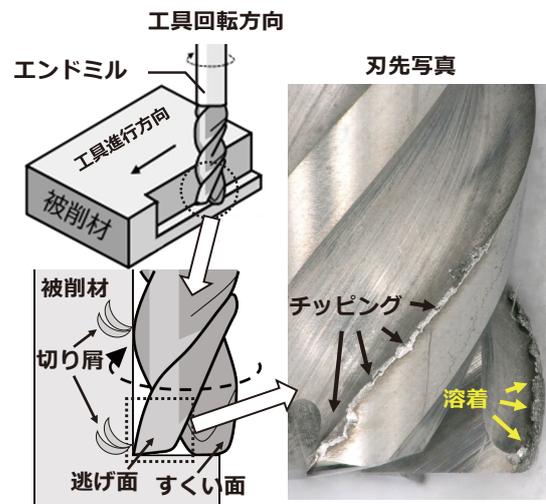


図1 難削材金属のエンドミル加工における工具の損傷

2. 難削材加工における課題

2-1 難削材を加工した工具の損傷形態

難削材加工ではその被削性から工具の損傷が激しく、また被削材自体も高価であるため、長寿命で安定した工具性能が求められる。そのため工具材質として、高い硬度や耐熱性、耐摩耗性を持ち、信頼性の高い加工が可能である超硬合金が用いられる。図1に難削材金属をエンドミルで加工した際の超硬工具の代表的な刃先損傷形態を示す。被削材の熱伝導率が低いと切削熱が工具の刃先に蓄積され被削材の溶着^{*3}が多く見られる。この溶着により切削抵抗が上昇し、チップング^{*4}が生じることで損傷が加速し工具寿

命を迎える。

2-2 超硬合金の損傷メカニズム

超硬合金は硬質相の炭化タングステン (WC) と結合相のコバルト (Co) で構成される。その中で、主に1 μ m以下のWC粒子からなる超微粒超硬合金は一般的な超硬合金と比べて硬度・強度に優れることから、ドリルやエンドミル等に用いられる。超微粒超硬合金を用いた切削工具の損傷過程を図2に示す。まず切削面から摩耗が進行し、硬質相に比べて硬度の低い結合相が選択的に摩耗する。硬質相で

ある WC 粒子は結合相による支えがなくなったことで脱落が進み、切削抵抗の上昇に伴い溶着が発生し大規模なチッピングに至る。

そこで、損傷の主要因である WC 粒子の脱落を抑制するための WC 粒子間の界面強度の向上と、摩耗を抑制するための結合相の強度向上に取り組んだ。

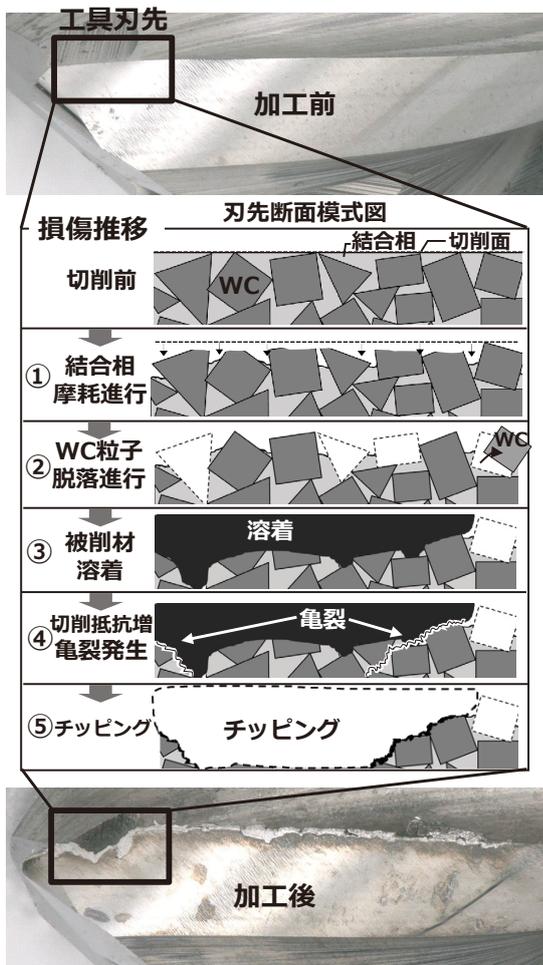


図2 難削材金属加工における工具損傷の推移

3. 硬質相粒子界面の強化

3-1 超微粒超硬合金の WC-WC 界面の状態

超硬合金中の WC 粒子と WC 粒子の接触面（以下 WC-WC 界面）を走査型透過電子顕微鏡（STEM-EDX）で観察した結果、図3に示すように WC-WC 界面に結合相である Co と炭化バナジウム（以下 VC）の偏析を捉えた。

超微粒超硬合金の内部組織は均一かつ微細であることが重要であり、超硬合金焼結時の粒成長抑制剤として VC を添加することが一般的である。この VC の存在が WC と WC の結合力に影響すると推測し、WC 粒子間の界面強度の向上が必要と考えた。ところが超微粒超硬合金の WC 粒子は

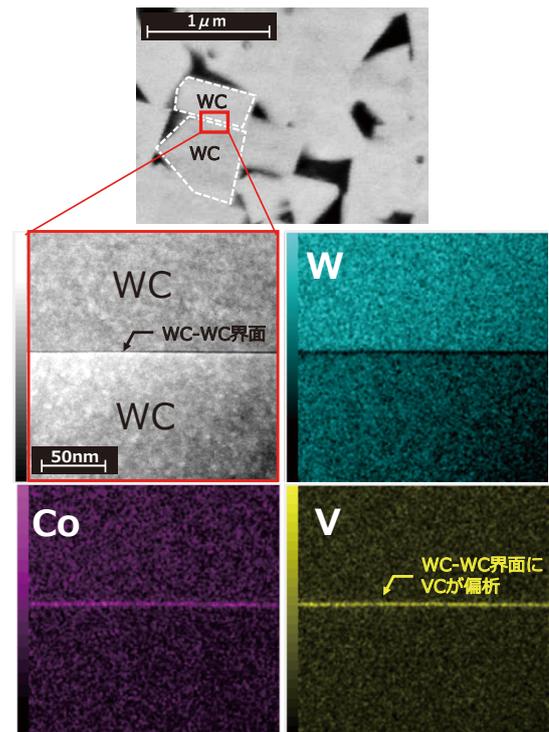


図3 超硬合金中 WC-WC 界面の STEM 観察

1 μm 以下と微粒であり、WC-WC 界面もまた微細なことから界面強度を直接測定することは困難と判断し、新たな界面強度測定手法を開発した。

3-2 WC 粒子界面強度の測定

界面の強度を測定する試験として、界面で折るカンチレバー試験を採用した。WC の粒子径が 50 μm を超える粗粒 WC の超硬合金を用いて、図4に示すように FIB^{*5}を用いて WC-WC 粒子界面を根元に1つ含む微小カンチレバーを作製した。このレバーの先端にナノインデント^{*6}で荷重を

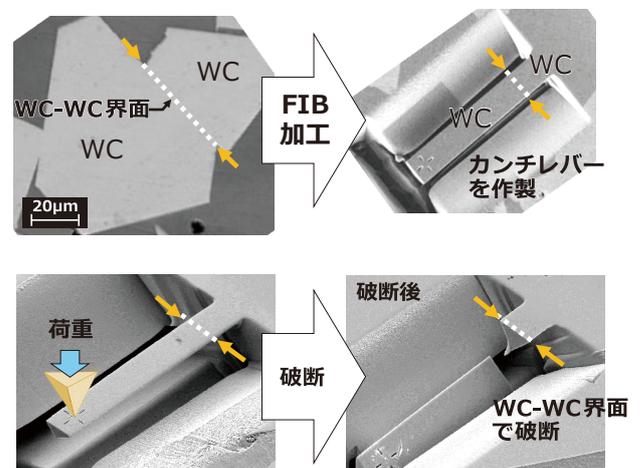


図4 WC-WC 粒子界面での微小曲げ試験

掛け、WC-WC粒子界面で破断させる微小曲げ試験^{*7}を行うことにより、界面強度の直接測定を可能にした。

界面強度測定結果の一例を図5に示す。レバーの形状と破断荷重から応力-歪み曲線を作成し、破断応力をWC-WC界面強度とした。VCを添加した超硬合金と無添加超硬合金のWC-WC界面強度を比較した結果を図6に示す。VCを添加することでWC-WC界面強度は約20%低下する結果を得た。このことからWC-WC界面に偏析するVCが界面強度を低下させることを初めて定量的に実証した⁽²⁾。

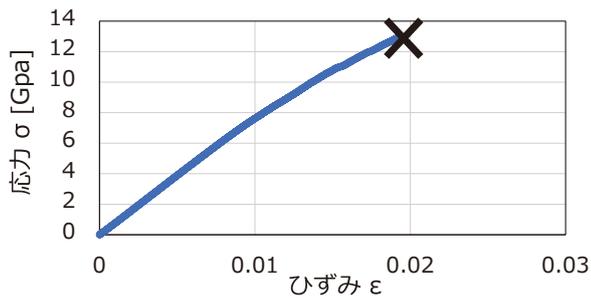


図5 微小試験片を用いた曲げ試験の応力-ひずみ曲線の例

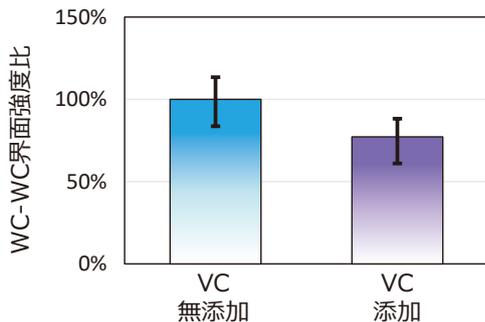


図6 超硬合金中WC-WC界面強度測定結果

3-3 硬質相粒子界面を強化した超硬合金の特性

WC-WC界面に偏析したVCが界面強度の低下を招くことから、VCの偏析を抑制する手法を検討した。超硬合金製造時、VCは結合相に溶解し、WC粒子表面に作用することで粒成長抑制剤として働き、WC粒子間に析出するとされている。WC粒子上の微細構造を制御するために、原料や混合・焼結等、製造プロセス全般の最適化に取り組んだ。その結果、界面の微細構造を原子レベルで制御した新たな超硬合金を開発した。開発した超硬合金のWC-WC界面強度を測定した結果、図7に示すように従来のVC添加超硬合金に比べて約25%強度が向上し、超微粒超硬合金においてWC-WC界面強度の向上に成功した。

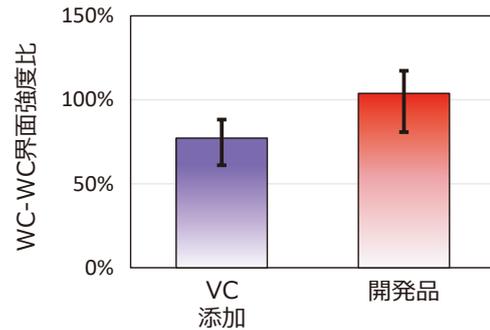


図7 開発品の超硬合金中WC-WC界面強度測定結果

4. 結合相の強化

4-1 高能率加工における課題

図8に難削材を高能率条件下で加工した際の超硬工具の代表的な刃先損傷写真を示す。溶着と共に、稜線が大きく後退し、摩耗が進んでいる様子が見える。これは強度の高い難削材を加工する際に、結合相が選択的に摩耗していくことに加え、高能率加工条件下ではより刃先温度が上昇し、結合相の硬度が低下することに起因する⁽³⁾。

そこで、高能率加工のような高温、高負荷環境下においても摩耗しにくい特性を発揮する新たな結合相材料を開発した。

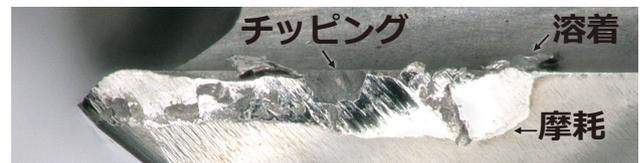


図8 難削材高能率加工における工具の損傷

4-2 高強度結合相の特性

開発した結合相の物理特性を詳細に分析するために、ナノインデントを用いて超硬合金組織内における結合相箇所の室温・高温での強度を測定した。図9に示すように、開発した結合相は現行の結合相に比べ、硬度が室温で1.4倍、600℃では6.1倍に向上した。この特性により、難削材加工時に発生する切削熱による結合相の軟化を抑制し、摩耗抑制の効果が得られた。

図10に開発した結合相を適用した超硬合金と現行超硬合金の高温圧縮試験の結果を示す。開発品の圧縮破断強度は現行品に比べて600℃で1.1倍に向上し、この特性により高負荷環境において塑性変形、チップングを抑制することができ、高能率加工において優れた工具性能を実現した。

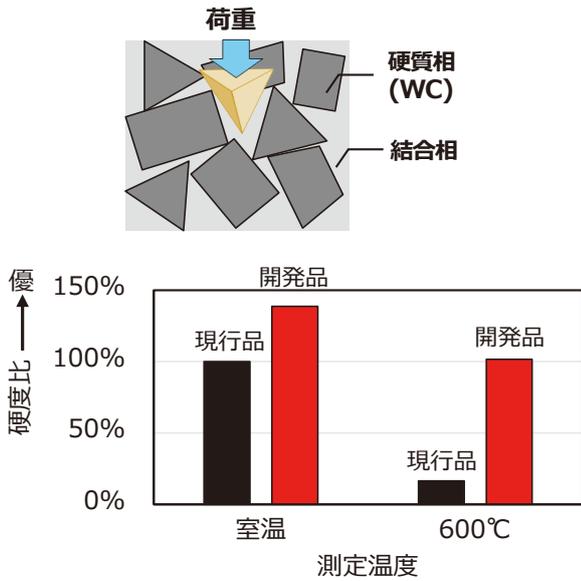
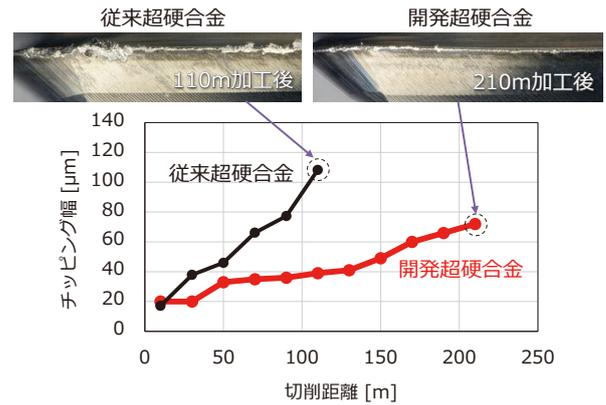


図9 結合相の硬度測定結果



被削材 Ti-6Al-4V, 工具形状 ラジウスエンドミル:φ6mm, 4枚刃, R:0.2mm, ノンコート
 切削速度 $v_c=120\text{m/min}$, 送り $F=0.05\text{mm/t}$
 $a_p=2.0\text{mm}$, $a_e=1.0\text{mm}$, wet

図11 チタン合金切削評価結果

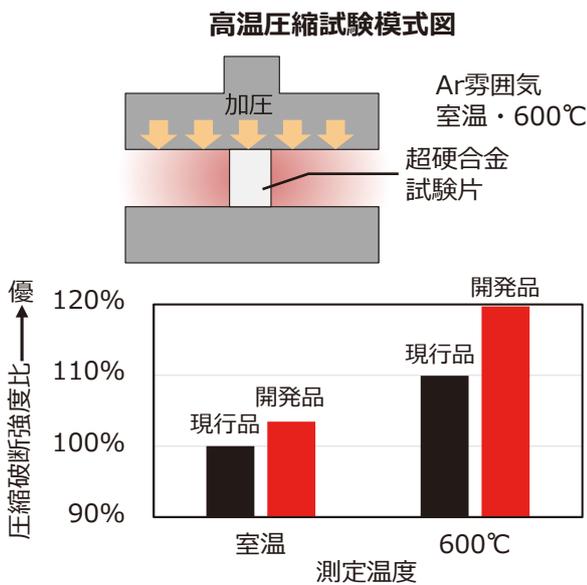


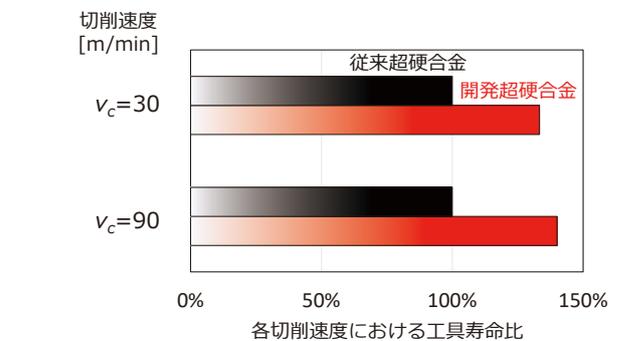
図10 高温圧縮試験結果

5. 難削材加工に適した超硬合金の性能

前述の超硬合金中WC-WC粒子界面強化技術と結合相強化技術を組み合わせ、難削材に適した超硬合金を開発した。チタン合金のエンドミル加工での工具寿命評価結果を図11に示す。工具損傷写真から従来の超硬合金では溶着、チップングが多く見られることに対して、開発した超硬合金は損傷が大きく抑制されており、工具寿命が2.0倍に向上した。

インコネルのエンドミル加工での工具寿命評価結果を図12に示す。切削速度 $v_c=30\text{m/min}$ の条件において、開発超硬合金は従来の超硬合金に比べて摩耗を抑制し、工具寿命が1.3倍に向上した。また切削速度を上げた $v_c=90\text{m/min}$ の高能率加工条件では開発超硬合金は顕著に摩耗が抑制され、工具寿命が1.4倍に向上した。

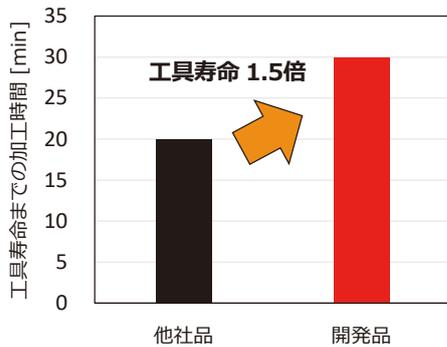
開発した次世代の超硬合金はチタン合金、インコネルの加工において従来の超硬合金比べ工具の長寿命化を実現し、高能率加工においても優れた効果を発揮した。



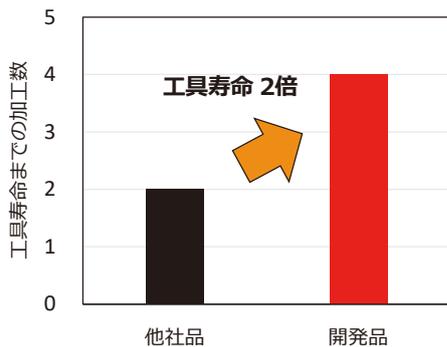
被削材 INCONEL718, 工具形状 ラジウスエンドミル:φ3.0mm, 4枚刃, R:0.2mm, ノンコート
 送り $F=0.04\text{mm/t}$, $a_p=1.0\text{mm}$, $a_e=0.5\text{mm}$, wet

図12 インコネル切削評価結果

図13に実際の加工ユーザーでの評価結果を示す。事例 (a) はチタン合金のエンドミル切削結果であり、開発品は刃先のチッピングが抑制されたことにより、工具寿命までの加工時間が他社品の1.5倍向上した。事例 (b) はインコネルのエンドミル切削結果であり、開発品は刃先の欠損、摩耗が大きく抑制されたことで加工数が他社品の2倍に向上した。



評価事例(a)：ブロック材粗加工
被削材：Ti-6Al-4V
工具形状：φ6 ラジアルエンドミル



評価事例(b)：航空機エンジン部品粗加工
被削材：INCONEL718 (AG)
工具形状：φ8 スクエアエンドミル

図13 開発品のユーザーでの評価事例

6. 結 言

超硬合金中の硬質相粒子間の界面強度、及び結合相の高温特性を向上させる技術を開発し、超微粒超硬合金に適用した。開発した超微粒超硬合金を用いた工具は従来品と比べ、チタン合金やインコネル等の難削材の加工において長寿命化、高能率化を達成した。本技術は難削材をはじめ一般的な超硬合金全般にも活用できる基盤技術と期待でき、工具性能良化による安定した面品位や加工能率向上につながり、ユーザーでの製造能率向上とコスト削減に貢献できると確信する。

用語集

※1 耐熱合金

1000℃を超える高温環境下での耐食性、耐酸化性、強度に優れている合金。ジェットエンジンやガスタービンなどに使用される材料。

※2 超硬合金

主たる成分が硬質相である炭化タングステン (WC) と結合相であるコバルト (Co) からなる、セラミックスと金属の複合材料。

※3 溶着

切削工具の切れ刃と被削材の間で生じる切削熱により、被削材が溶解し、刃先に金属が付着すること。溶着が多くなると加工精度の低下や工具寿命の短縮を引き起こし、工具の交換頻度を増やす必要がある。

※4 チッピング

切削工具の刃先に発生する微小な欠けのこと。

※5 FIB

集中イオンビーム (Focused Ion Beam) 装置のこと。イオンビームを試料に照射することで微細な加工を行うことができる。

※6 ナノインデント

非常に小さな荷重を用いて、ナノスケールの硬度や弾性率を測定する装置。

※7 曲げ試験

試験片に力を加え、破断する時の荷重を測定することで、試験片の曲げに対する強度 (抗折強度) を測定する試験。

・INCONEL、インコネルはHuntington Alloys Corporationの商標又は登録商標です。

参 考 文 献

- (1) 狩野勝吉、「難削材・新素材の切削加工ハンドブック」、工業調査会 (2002年)
- (2) Yasuki Kido, Yoshihiro Kimura, Anongsack Paseuth and Katsumi Okamura, "Evaluation of bonding strength between WC grains in WC-Co and WC-VC-Co cemented carbides," Proceedings of 2024 Powder Metallurgy World Congress & Exhibition, pp.1484-1488 (2024)
- (3) 小池さち子、濱木健成、山西貴翔、津田圭一、「航空機部品加工用超硬工具の最新材質」、住友電工テクニカルレビュー第198号、pp.4-8 (2021年1月)

執 筆 者

木村 好博* : アドバンストマテリアル研究所



城戸 保樹 : アドバンストマテリアル研究所 主査



パサート アノンサック : アドバンストマテリアル研究所
グループ長
博士 (工学)



岡村 克己 : アドバンストマテリアル研究所 部長



田中 佑樹 : 住友電工ハードメタル株



津田 圭一 : 住友電工ハードメタル株 取締役



* 主執筆者