

工具材料の基礎

東北大学 金属材料研究所

正橋直哉

『金属の魅力をみなおそう 機能編 第6回 工具材料』

クリエイション・コア東大阪 南館3階 技術交流室

2024/Jan./17/Wed. 14:05~14:40



高速度工具鋼

<http://www.daido-100th.com/topics/446/>



超硬工具
富士ダイスより



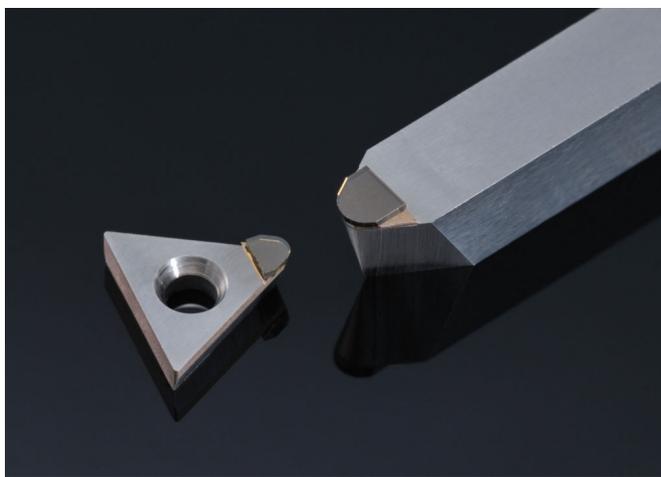
サーメット製チップ

<https://toolnavi.jp/machinenews/newslst/3189>



セラミック切削工具

http://www.etoh-syoji.jp/?page_id=143



ダイヤモンド超精密切削工具 https://www.allied-material.co.jp/products_search/turning/item_1011

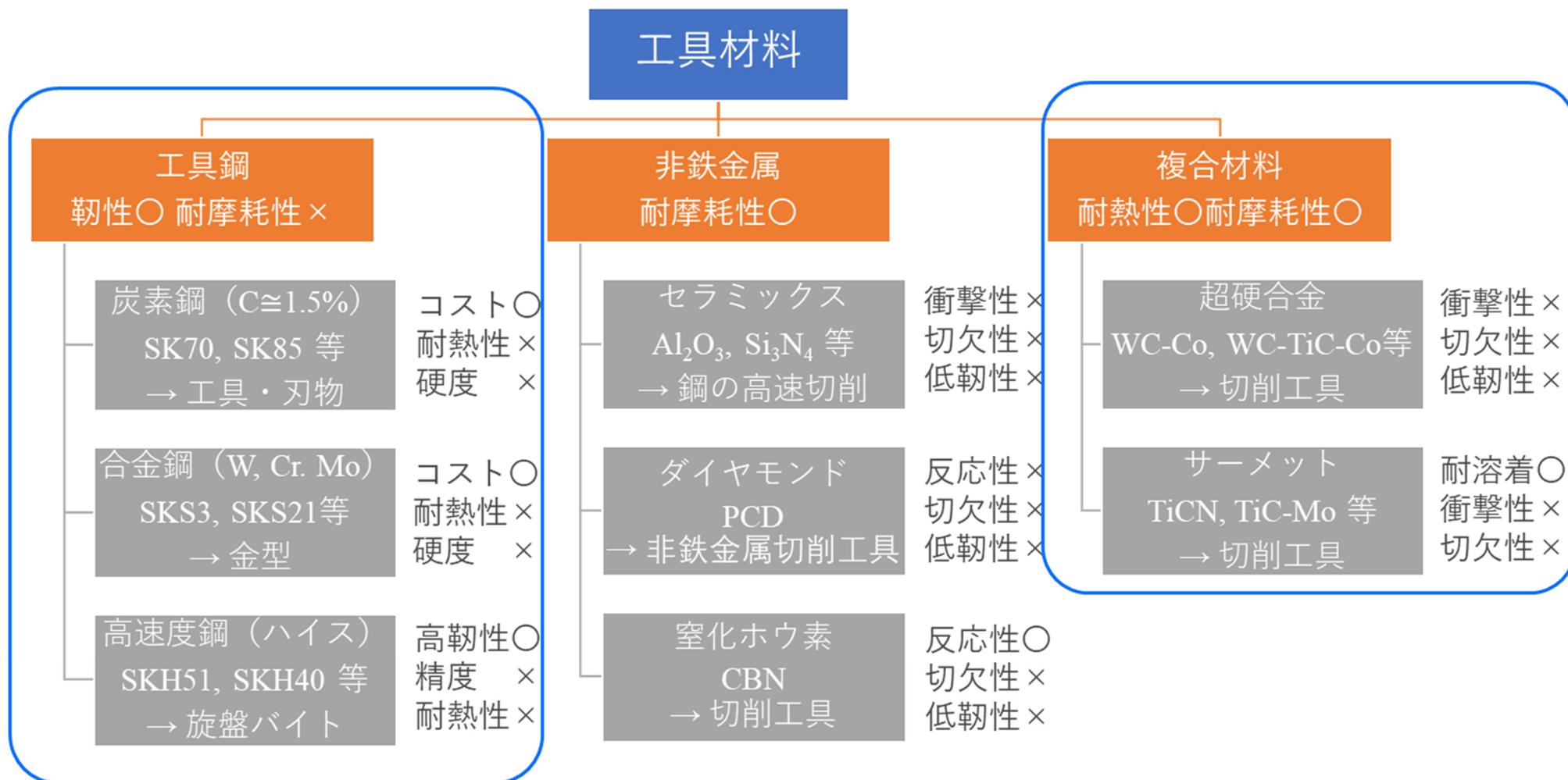


PVD コーティング

https://cloud-parts.com/pvd_coating.html

工具とは、バイトやドリルなど切削工具、ペンチやドライバーなど作業工具、プレス金型やダイカスト金型など成形用工具、各種治工具などの総称を称する。

鋼材をはじめとした金属の加工を行なう場合、同類の金属工具が用いるため、工具材料には**硬度**が要求されるが、切削工具やプレス型などでは**靱性**を要求され、熱間鍛造型などのように急熱・急冷の繰り返しでは、**高温摩耗**に耐える必要がある。



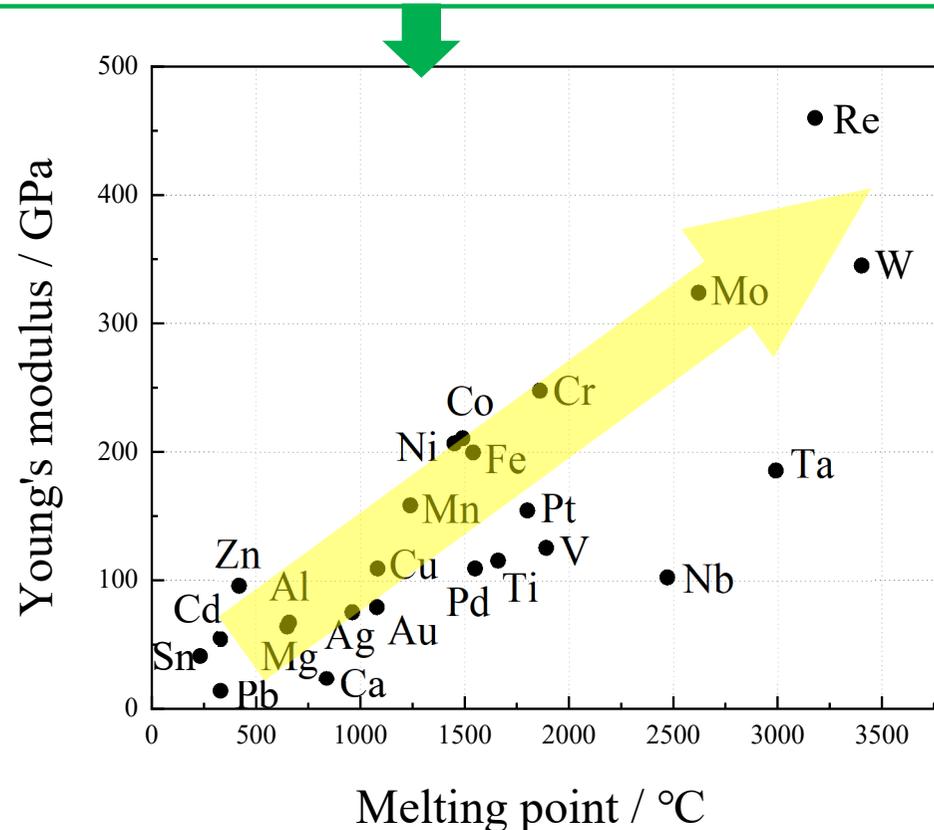
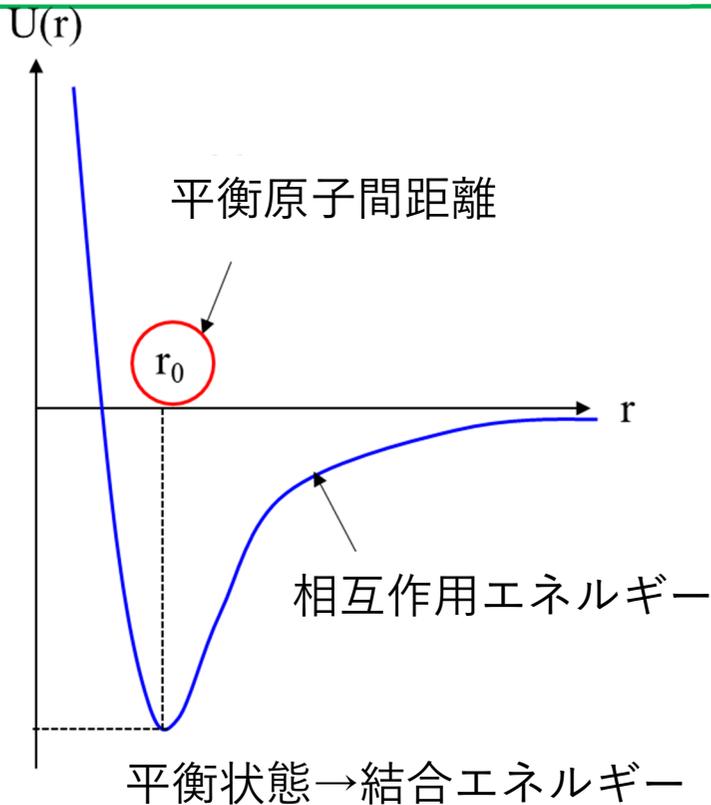
強度 s は弾性定数 E とひずみ e の積で (フックの法則)、 相互作用エネルギーと距離は下図

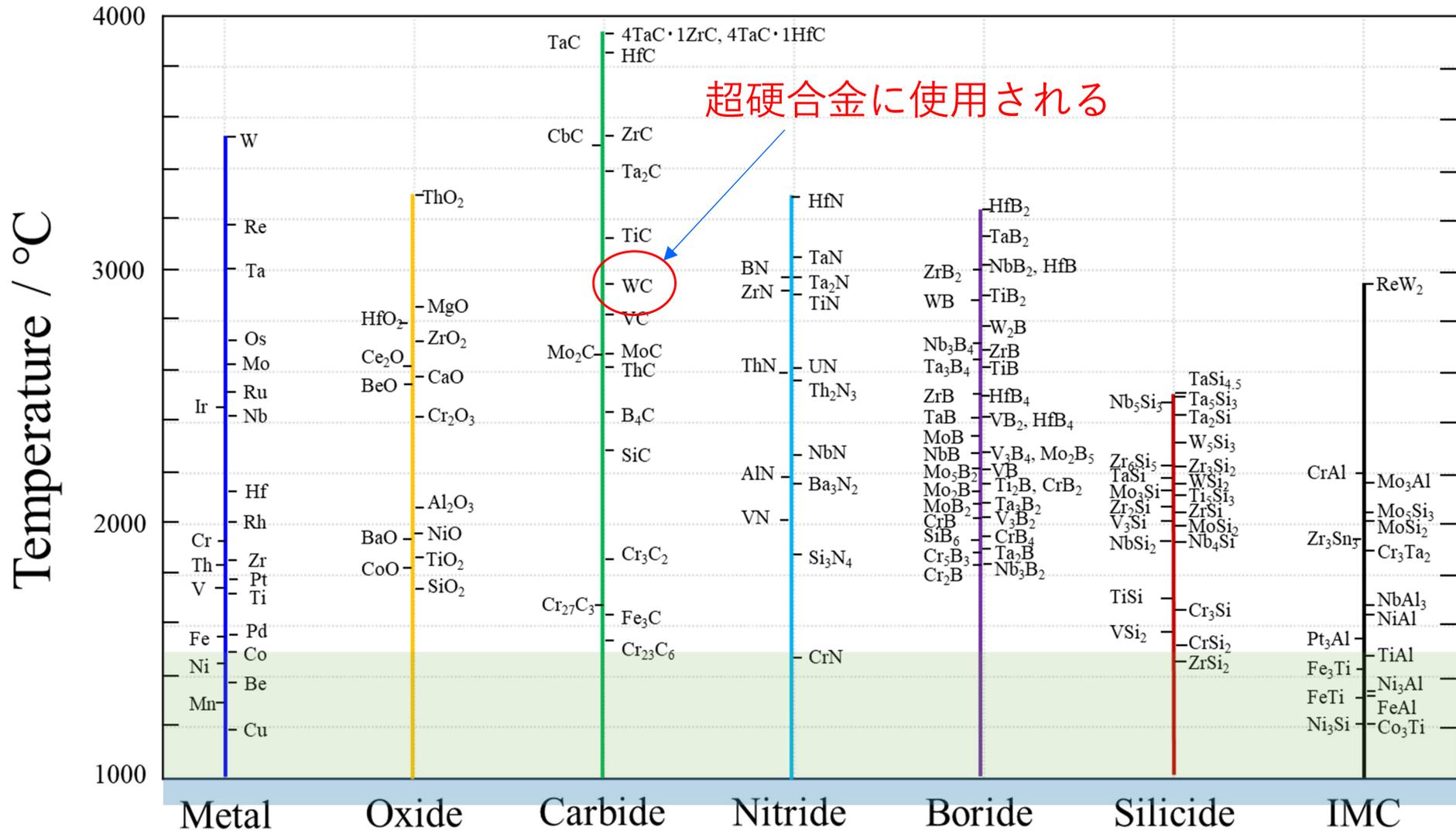
$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad F = -dU(r)/dr \quad F(\Delta r) \approx -\left(\frac{dU(r)}{dr}\right)_{r_0} - (d^2U(r)/dr^2)_{r_0} \cdot \Delta r$$

$$\sigma = F(\Delta r)/r_0^2 = (d^2U(r)/dr^2)_{r_0} \cdot \frac{\Delta r}{r_0^2} = \left(\frac{1}{r_0}\right) \cdot (d^2U(r)/dr^2)_{r_0} \cdot \frac{\Delta r}{r_0} = \left(\frac{1}{r_0}\right) \cdot (d^2U(r)/dr^2)_{r_0} \cdot \varepsilon$$



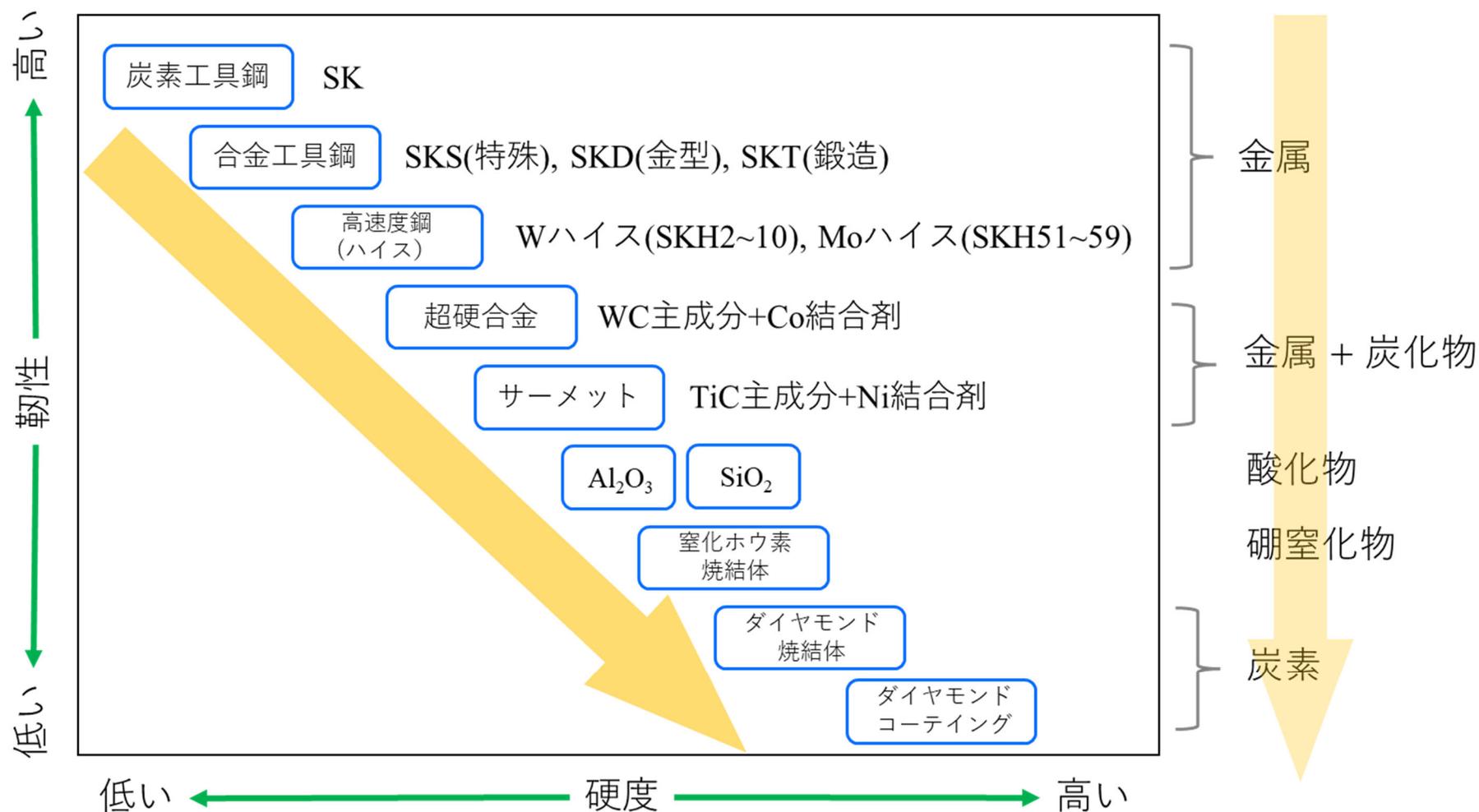
ヤング率 E は、原子間距離 r_0 および相互作用エネルギー $U(r)$ 曲線の曲率によって依存する → 高融点金属ほど高い





清重正典 生産と技術 25(1973) 24-36 を加筆

物質の硬度は強度や摩耗性と正の相関があり、強度は原子間ポテンシャルと相互エネルギーの極小点における原子間距離に依存し、高融点ほど高い。

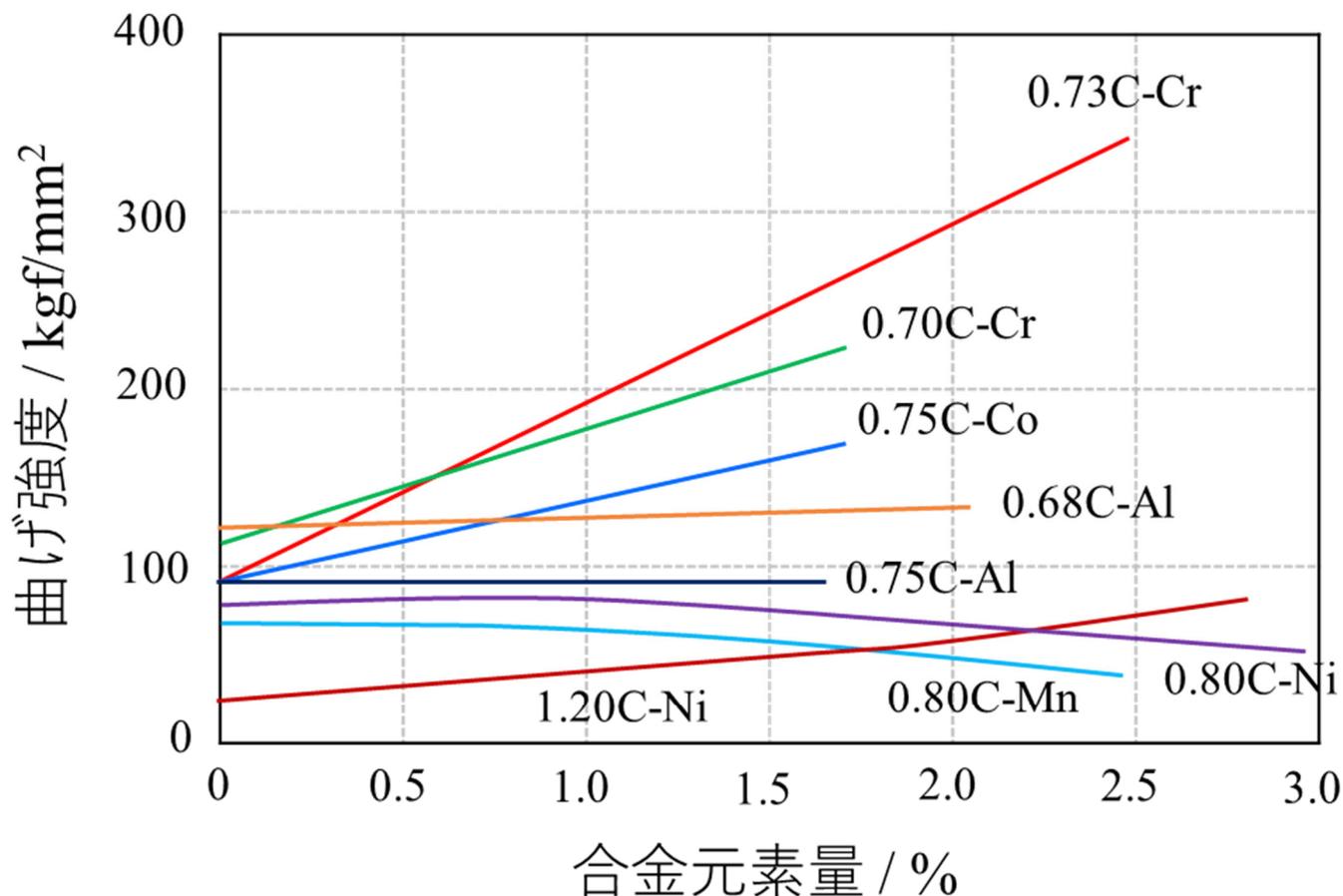


- (1) 硬度と靱性はトレードオフの関係にあり、耐摩耗性は硬度と正の相関がある。
- (2) 靱性を高めるには金属が、硬度を高めるにはカーボンが有効で、その両方の機能を期待するのであれば「金属+炭化物」の超鋼合金かサーメットとなる。

記号	材料の分類
HW	金属及び硬質の金属化合物から成り、 硬質相中の主成分がWCで硬質相粒の平均粒径が1 μm以上 。一般に 超硬合金 という。
HF	金属及び硬質の金属化合物から成り、その 硬質相中の主成分がWCであり、硬質相粒の平均粒径が1 μm未満 であるもの。一般に、 超微粒超硬合金 という。
HT	金属及び硬質の金属化合物から成り、その 硬質相中の主成分がTi、Ta (Nb) の炭化物、炭窒化物、窒化物であって、WCの成分が少ないもの 。一般に、 サーメット という。
HC	上記超硬合金表面に炭化物、炭窒化物、窒化物（TiCやTiN等）、酸化物（Al ₂ O ₃ 等）、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボン等を 1層又は多層に化学的又は物理的に被覆 。一般に 被覆超硬合金 という。

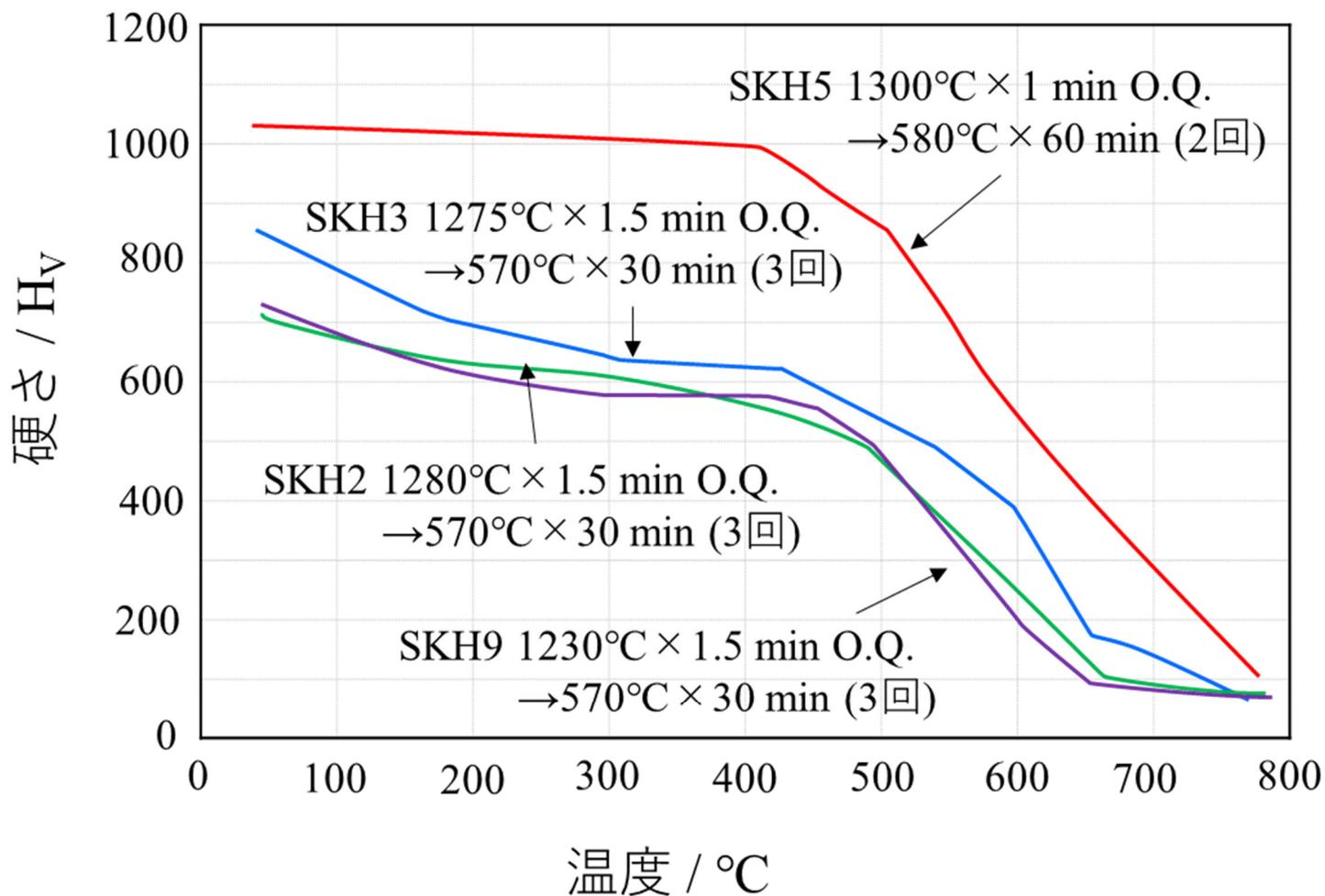
大分類			使用分類 a)		
識別記号	識別色	被削材	使用分類記号	切削条件：高速 工具材料：高耐摩耗性	切削条件：高送り 工具材料：高靱性
P	青色	鋼 ：鋼、鋳鋼（オーステナイト鋼を除く）	P01, P05, P10, P15, P20, P25, P30, P35, P40, P45, P50	↑	↓
M	黄色	ステンレス鋼 ：オーステナイト系、二相系、ステンレス鋳鋼	M01, M05, M10, M15, M20, M25, M30, M35, M40	↑	↓
K	赤色	鋳鉄 ：ネズミ鋳鉄、球状黒鉛鋳鉄、可鍛鋳鉄	K01, K05, K10, K15, K20, K25, M30, K35, K40	↑	↓
N	緑色	非鉄金属 ：Al、その他の非鉄金属、非鉄金属材料	N01, N05, N10, N15, N20, N25, N30	↑	↓
S	茶色	耐熱合金・Ti ：Fe、Ni、Co基耐熱合金、Ti合金	S01, S05, S10, S15, S20, S25, S30	↑	↓
H	灰色	高硬度材料 ：高硬度鋼、高硬度鋳鉄、チルド鋳鉄	H01, H05, H10, H15, H20, H25, H30	↑	↓

注a) 使用分類の矢印方向となるほど切削条件は高速又は高送り、工具材料については高耐摩耗性又は高じん（靱）性となる。



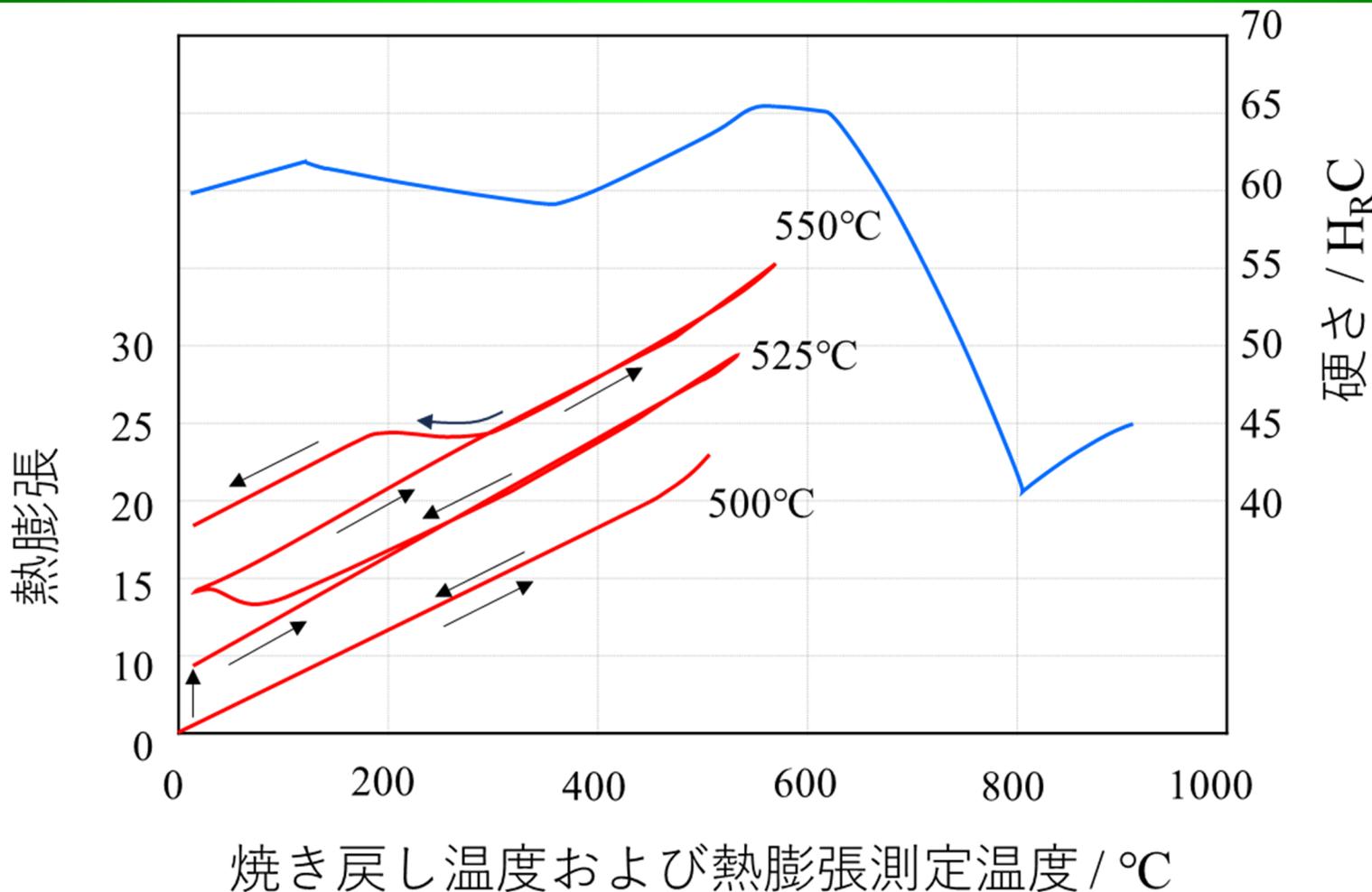
マルテンサイト (200°C焼き戻し) の曲げ強度に及ぼす合金元素添加依存性

- (1) Crは焼き入れ性に優れ、セメンタイトに固溶してマルテンサイトを硬化する。
- (2) Mnはマルテンサイトの靱性を低下させるが、焼入れ変寸量が小さく人生が関与しない場合はゲージに使用する。



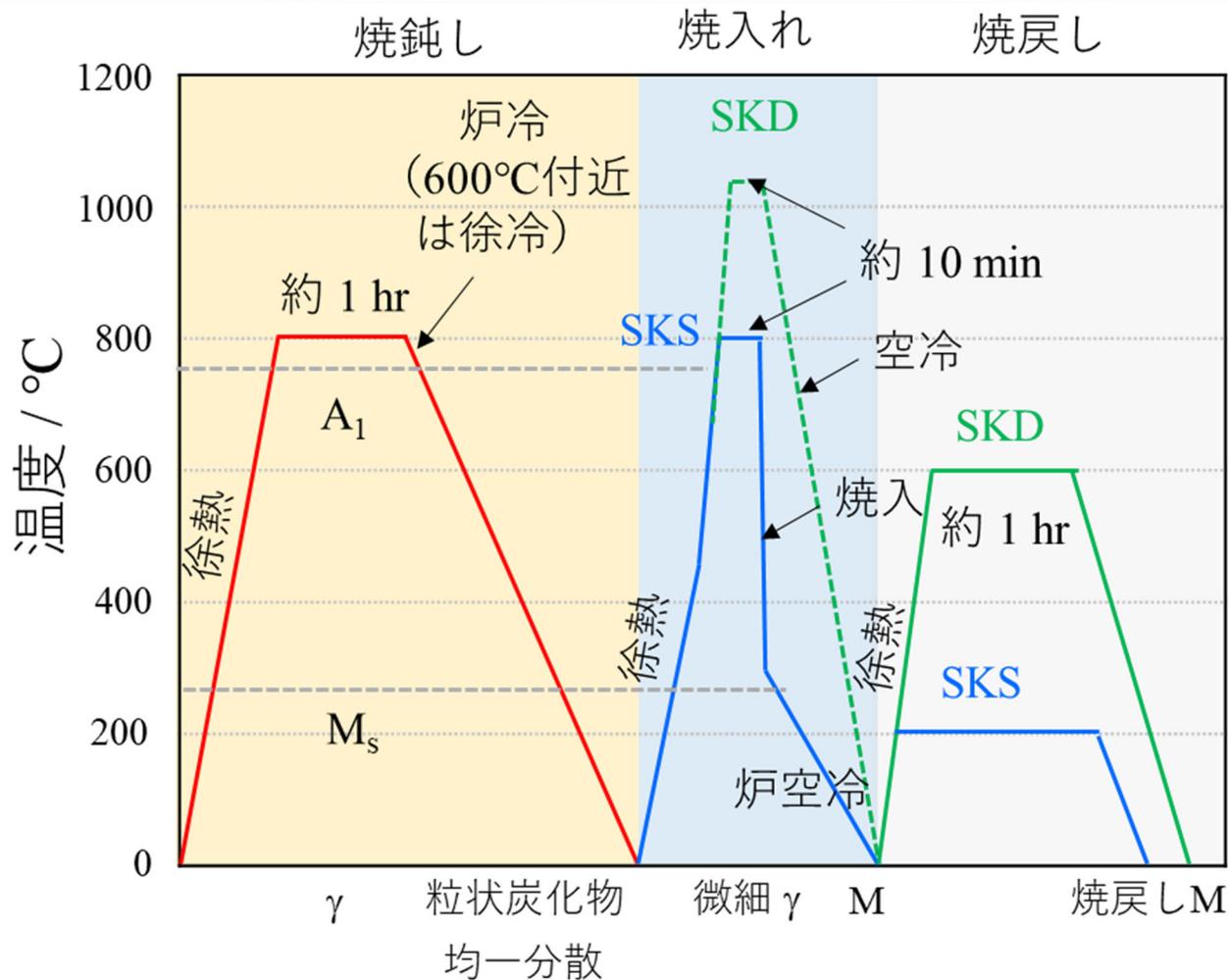
高速度鋼 (High-speed steel) の高温硬さ

- (1) 高速度鋼は1200°C以上の高温から焼き入れて、WCやMo₂CやV₄C₃を多量に固溶させてから二次硬化で高温強度を得る。
- (2) Co添加鋼のSKH5は二次硬化量が大きいため、硬度が高い。



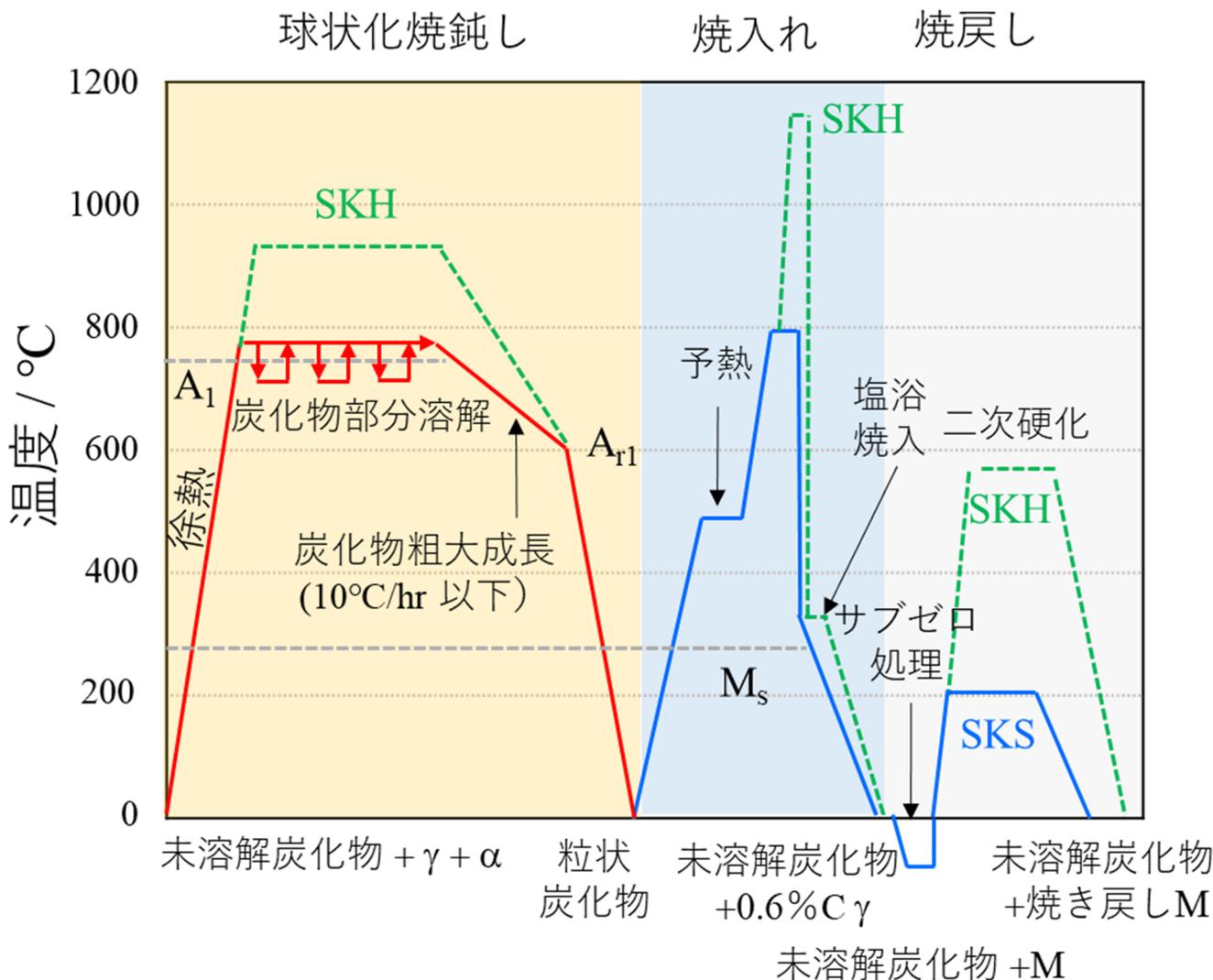
高速度鋼の二次硬化挙動と熱膨張曲線

- (1) 525°Cと550°Cに加熱後冷却時の大きな膨張は残留オーステナイト中に炭化物が析出しオーステナイトのMs点をあげてマルテンサイト変態を起こしたため。
- (2) 残留オーステナイト量を十分に低くするために数回の焼き戻しが必要。



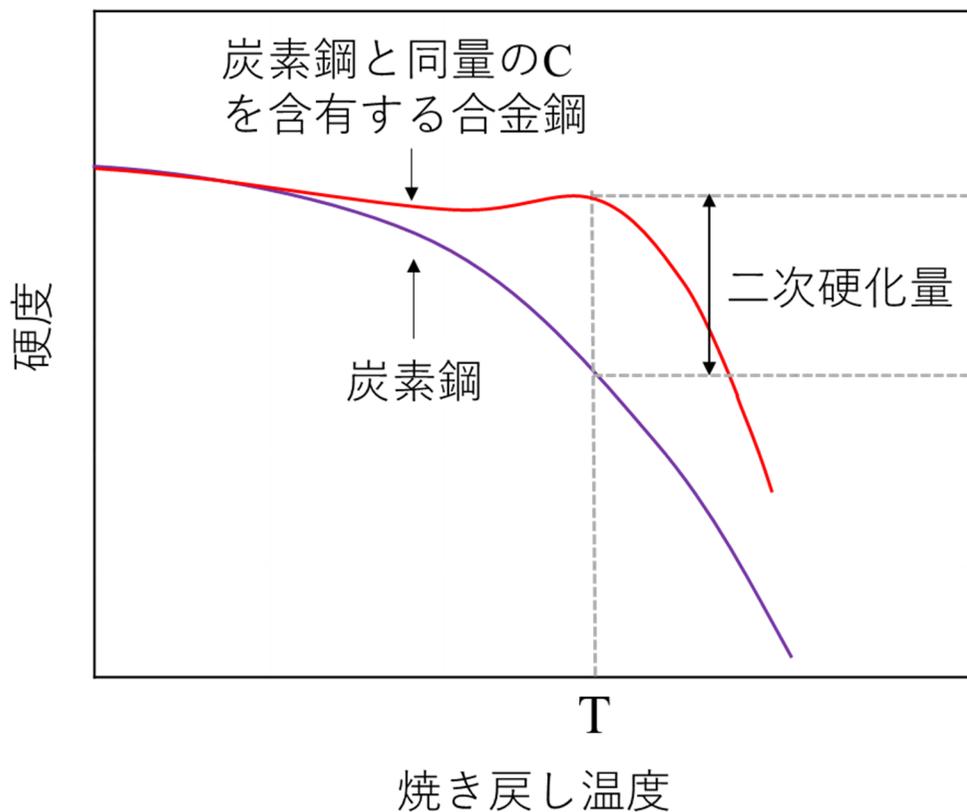
熱間工具鋼 (SKD) と耐衝撃鋼 (SKS) の熱処理の概要

- (1) 焼鈍しはTTT図のnose付近を徐冷しないと焼きが入ってしまう。
- (2) γ 単相からSKSは水冷か油冷し400°Cで空冷し、SKSは γ から空冷焼入れをする。
- (3) 熱間用SKDは二次硬化のために600°Cで、冷間衝撃用SKSは200°Cで焼戻す。

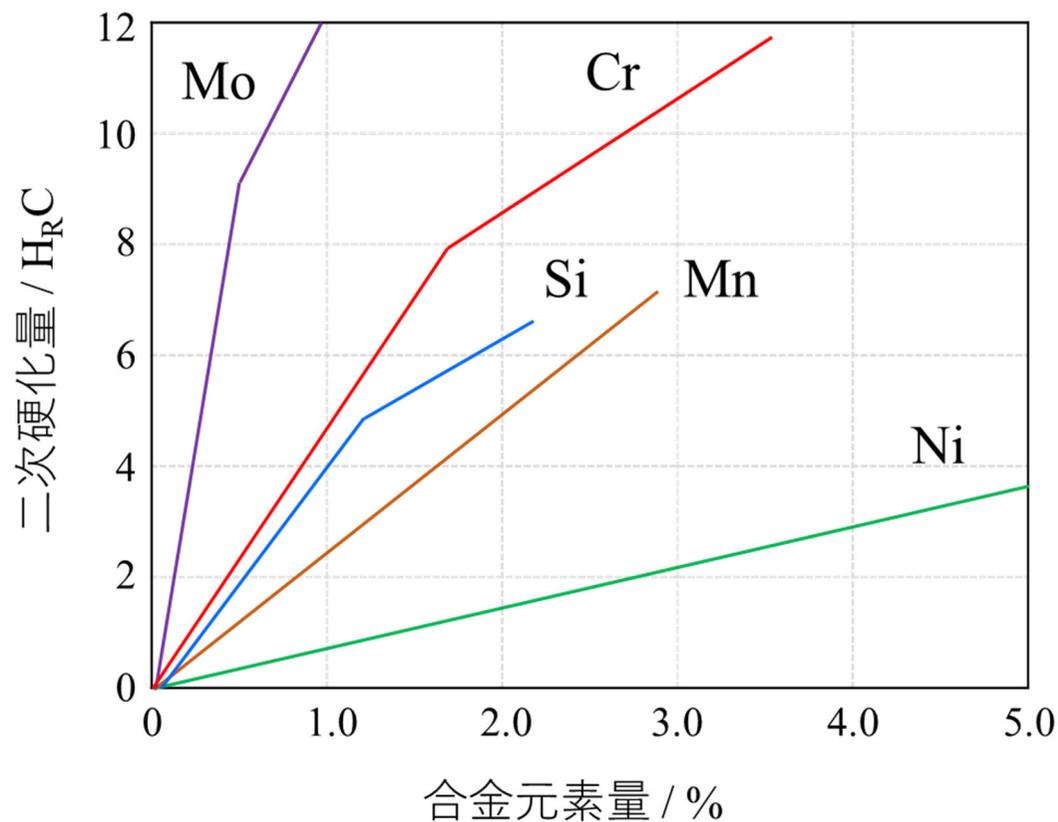


冷間工具鋼 (SKS)
と高速度鋼 (SKH)
の熱処理の概要

- (1) 球状化焼鈍し後に予熱で γ 中のCが0.6%になったら焼入れ炭化物を微細化する。
- (2) 高C鋼の焼割れ抑制のため塩浴焼入れや油焼入れ後に引き上げる。
- (3) 残留 γ が多い場合はサブゼロ処理を行い、焼き戻しは500° F脆化以下で行う。



合金元素による焼き戻しの二次硬化量の模式図

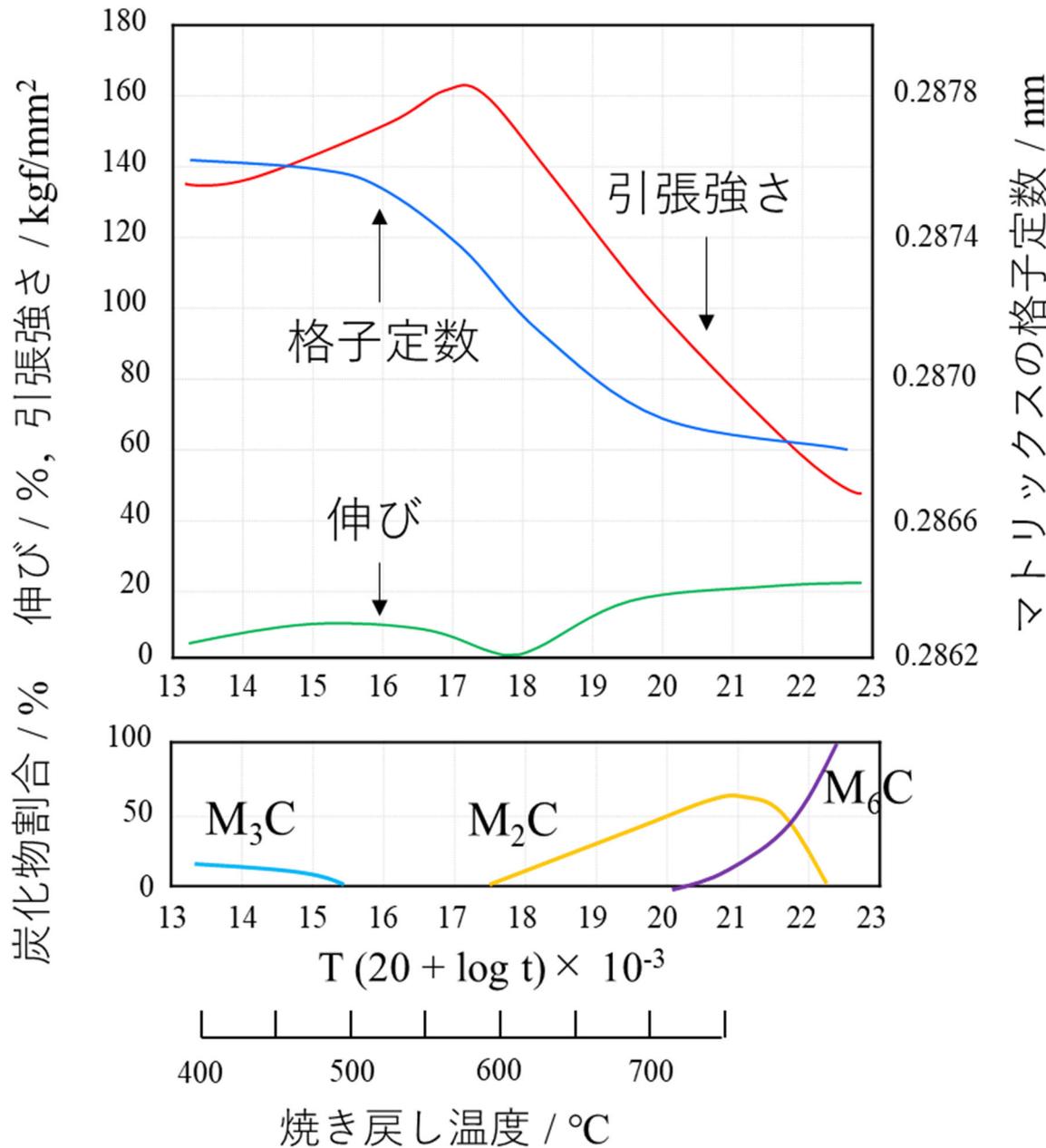


合金元素の600°Cにおける焼き戻し二次硬化量

- (1) 二次硬化量はCとの親和力の大きい元素は高く、中でもMoが最も高い。
- (2) 二次硬化量の大きい元素は高温強度が高いが、機械加工を行いやすいように軟化させることはできない。

炭化物	結晶系	融点 / °C	硬度 / GPa
TiC	fcc	3140	31.4
V ₄ C ₃	fcc	2830	27.4
NbC	fcc	3506	23.5
Cr ₃ C ₂	orthorhombic	1890	12.7
Cr ₇ C ₃	trigonal	1665	14.2
Cr ₂₃ C ₆	fcc	1550	9.8
Mn ₃ C	orthorhombic	1520	15.7
Mo ₂ C	hcp	2687	17.6
WC	hcp	2867	23.5
Fe ₃ C	orthorhombic	1650	13.1
M ₆ C	fcc	~1400	13.2

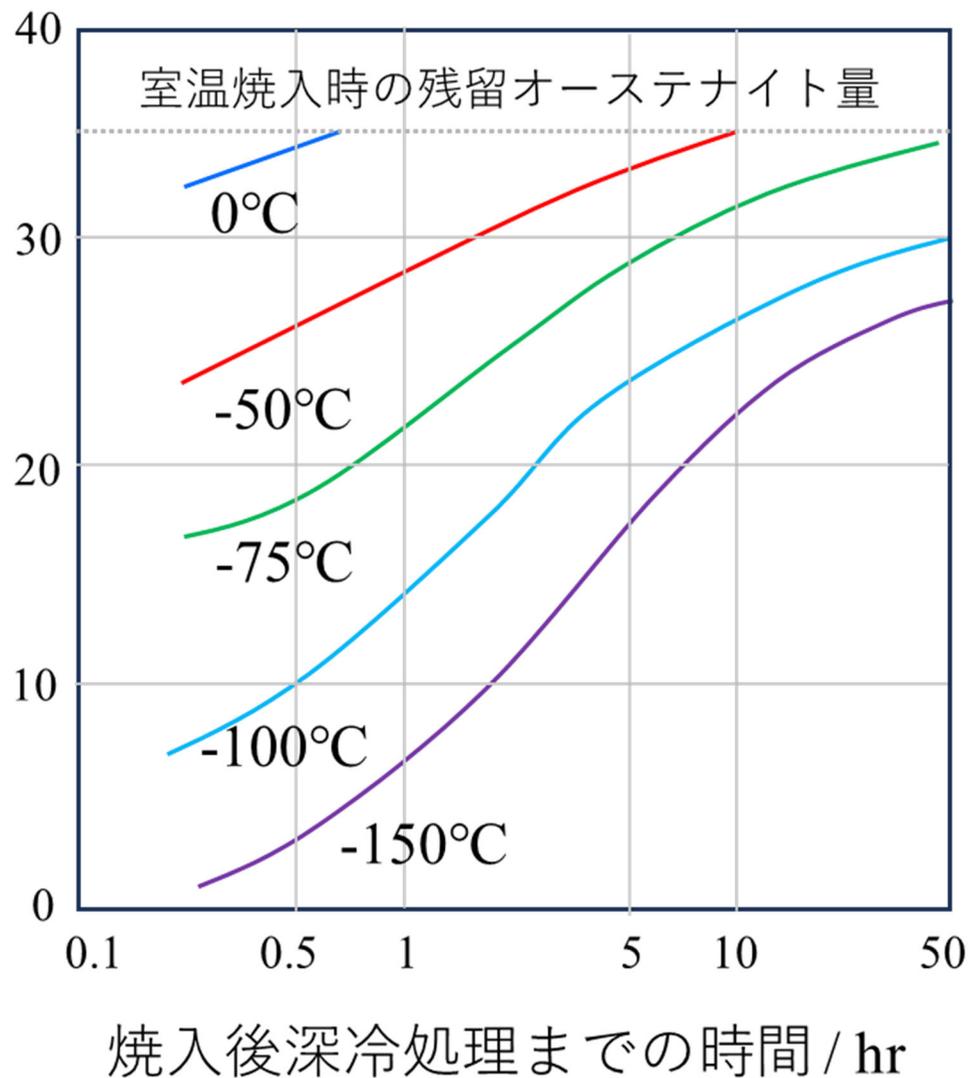
- (1) 炭化物の硬度は融点が高いほど高く、表中オレンジ色の炭化物が硬化が大きい。
- (2) 硬度が高いほど耐摩耗性に優れるため、工具材料に利用される。



Fe-0.23C-0.64Mn-2.76Ni-3.35Mo
機械的性質と炭化物の焼き戻し
温度依存性

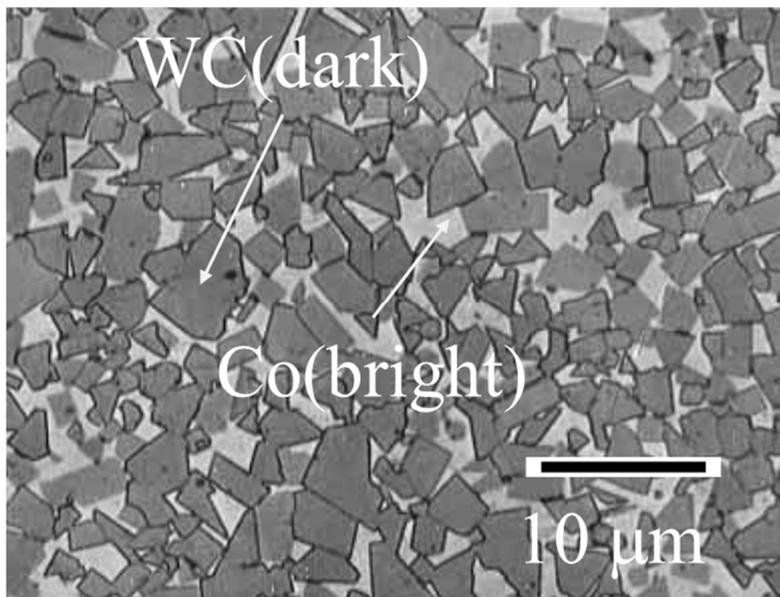
- (1) 550°Cの硬化 (二次硬化)
はMo₂C等炭化物析出に起因。
- (2) Mo₂Cは高温にするほど、
Mo₆Cを形成し、粒界に析出
し強化に寄与しない。
- (3) 二次硬化を起こす鋼は高温
強度や耐摩耗性に優れ、熱
間工具鋼や耐熱鋼に利用。
→ W (W₂C, WC), Mo (Mo₂C), V
(V₄C₃), NbC, TiC, TaCが有効。

深冷処理後の残留オーステナイト

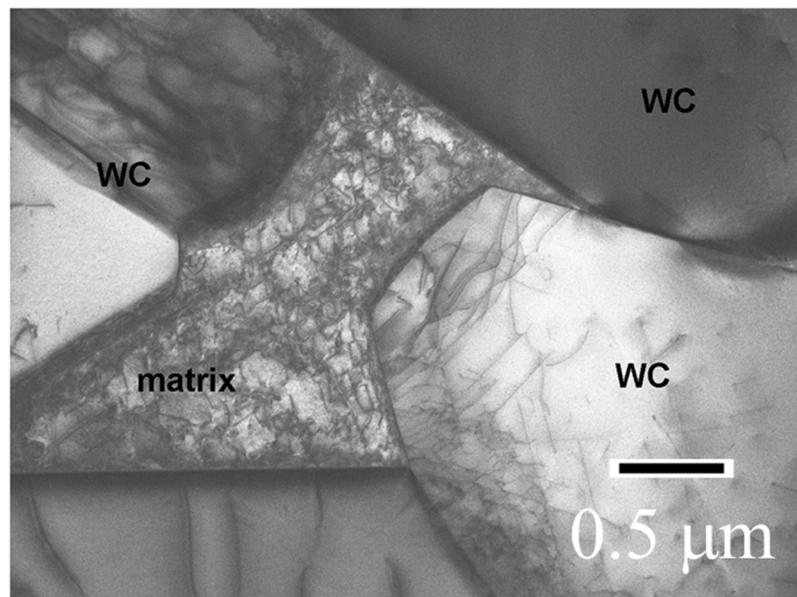


残留オーステナイトは焼入鋼の硬度低下や寸法変化を起こすので、室温以下にマルテンサイト変態を起こさせるが、これをサブゼロ処理、あるいは深冷処理と称する。
→残留オーステナイトを安定化させないために、マルテンサイトを安定化させる。

焼入後の室温放置時間と深冷処理後の残留オーステナイト

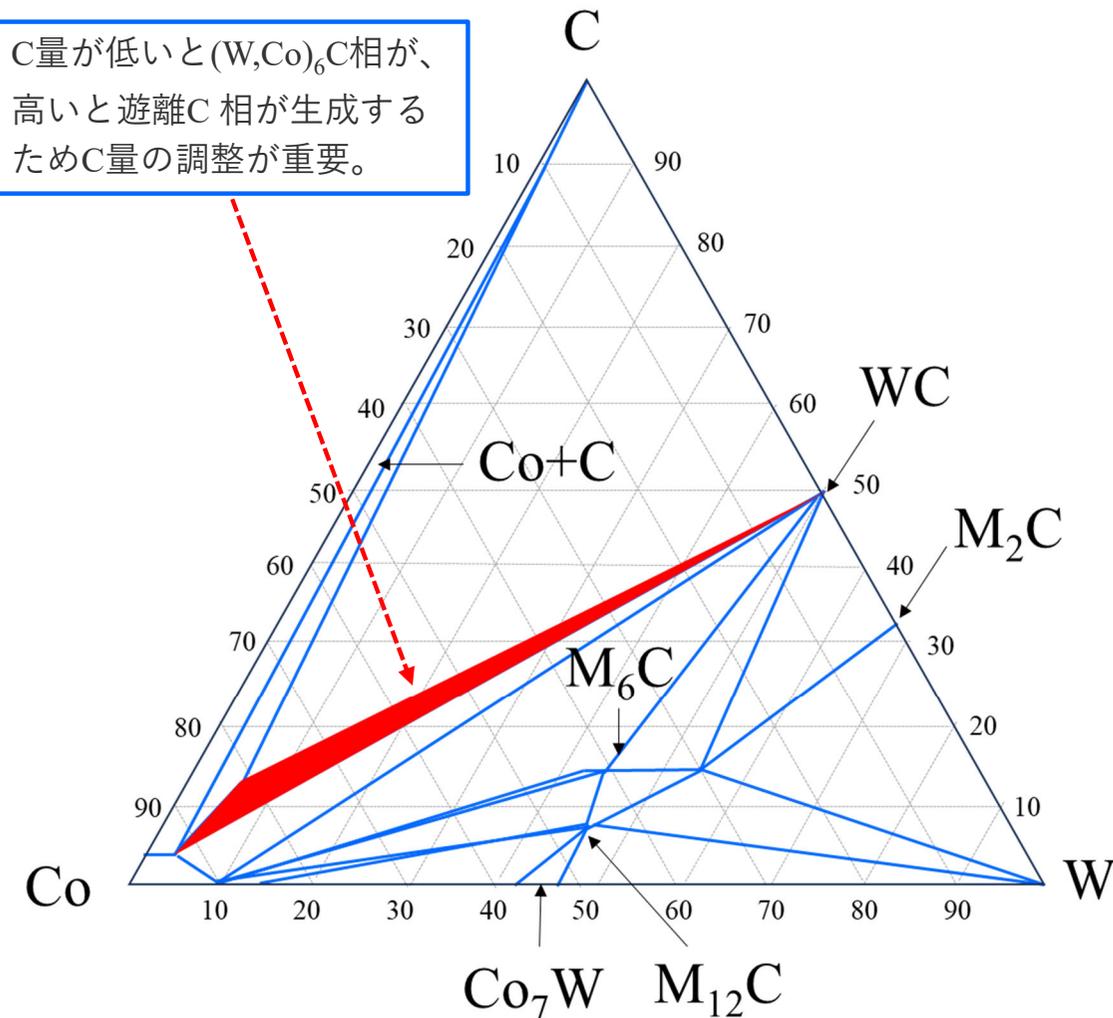


WC-Co 基超硬合金のSEM組織



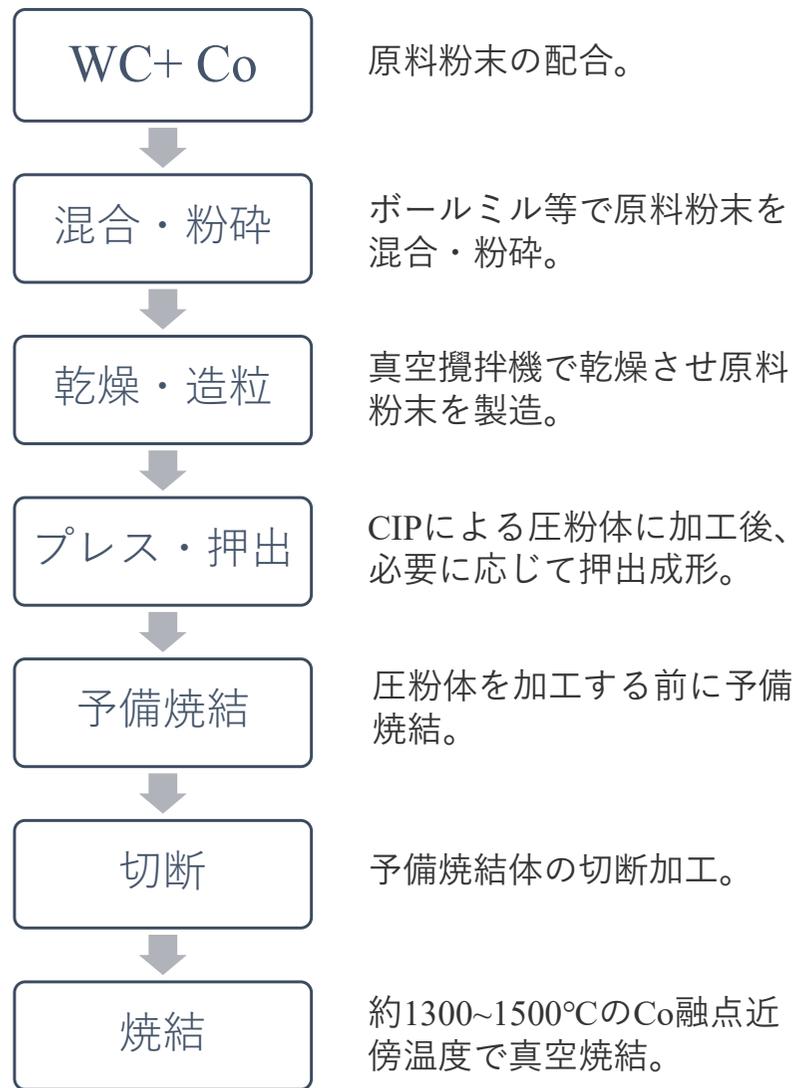
WC-Co基超合金のTEM組織
INT. J. REFRACT. MET. HARD MAT 75 (2018)163

- 1923年：ドイツの化学者シュロッターが開発 → オスラムランプ社特許化
- 1927年：ドイツクルップ社「WIDIA」という商品名で切削工具として発売。
ハイスの鋼加工時の切削速度が約4倍
- 1928年：イゲタロイ®となる超硬合金製線引きダイスの試作成功。
- 1929年：東京芝浦電気がタンガロイを開発
- 1931年：切削工具用超硬バイトの商品化



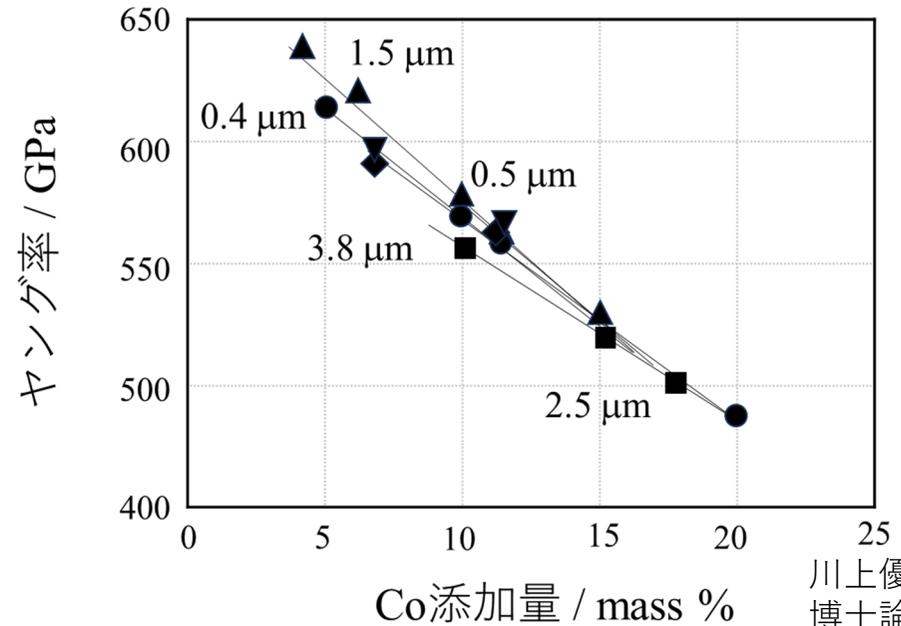
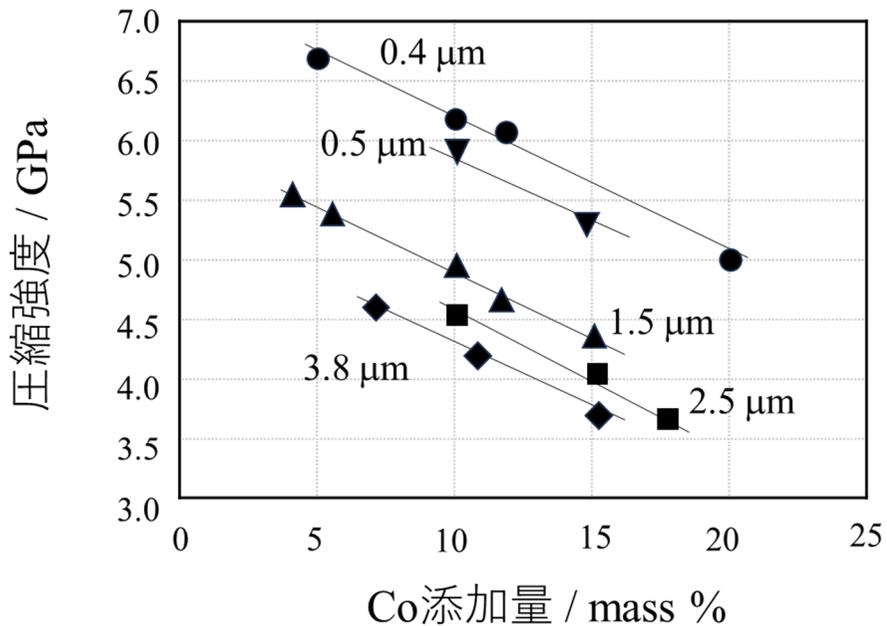
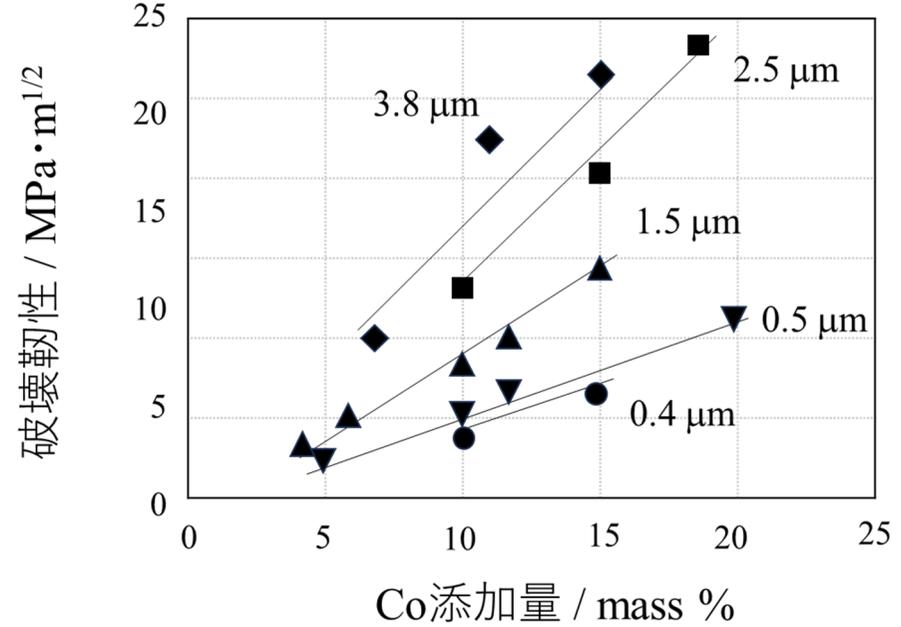
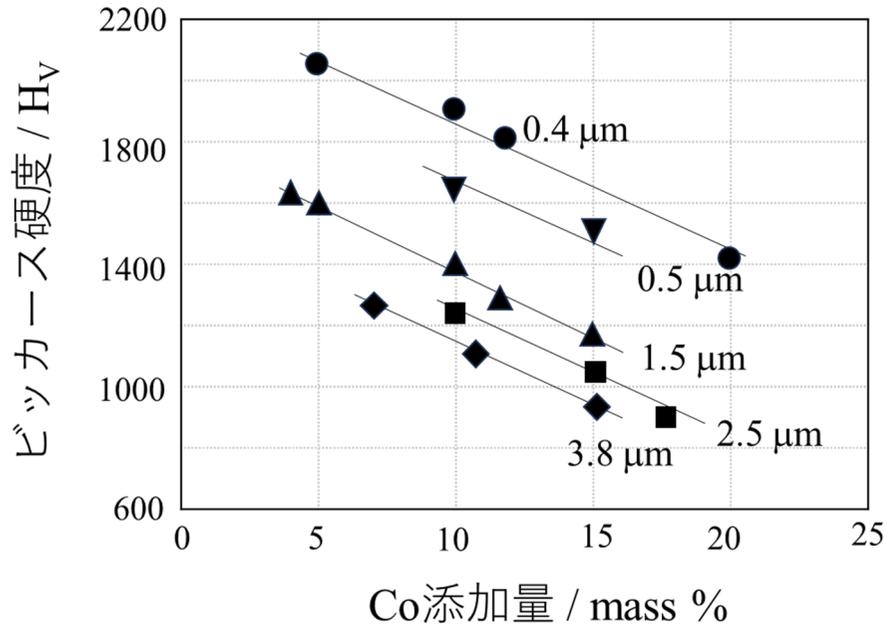
C-Co-W 三元状態図 (1275°C)

C量が低いと $(W,Co)_6C$ 相が、高いと遊離C相が生成するためC量の調整が重要。



超硬合金は高融点 (2870°C) のWCと低融点 (1495°C) のCoからなる複合材料で、軟質のCoが硬質のWC粒子を結合させる。粉末冶金法で製造する。

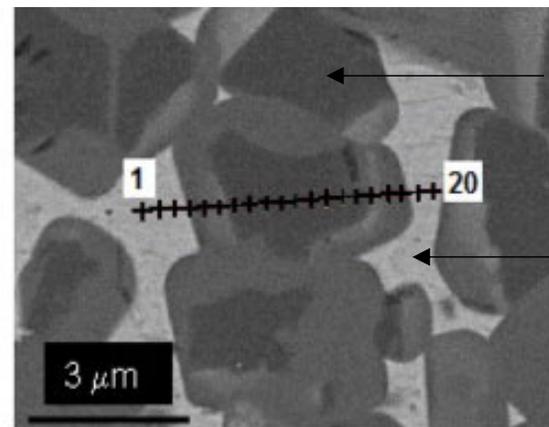
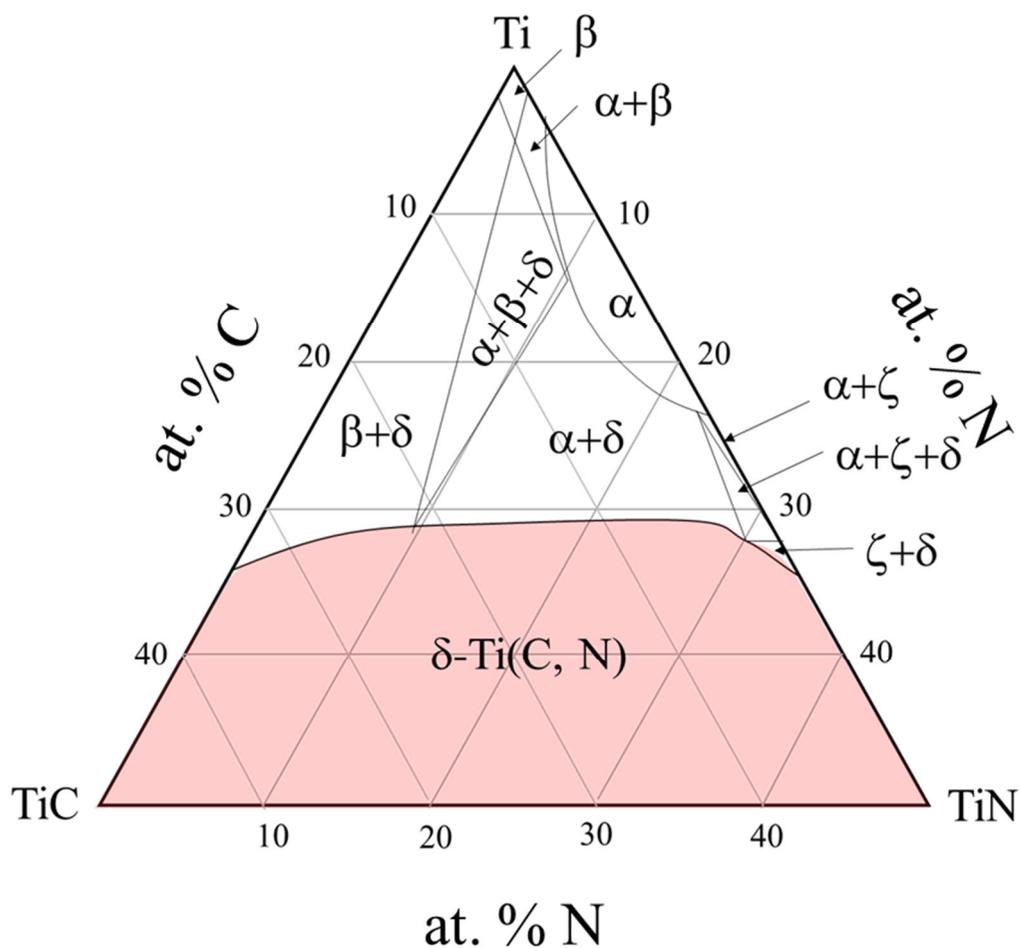
超硬合金の機械的性質



川上優 東北大学
博士論文(2016)

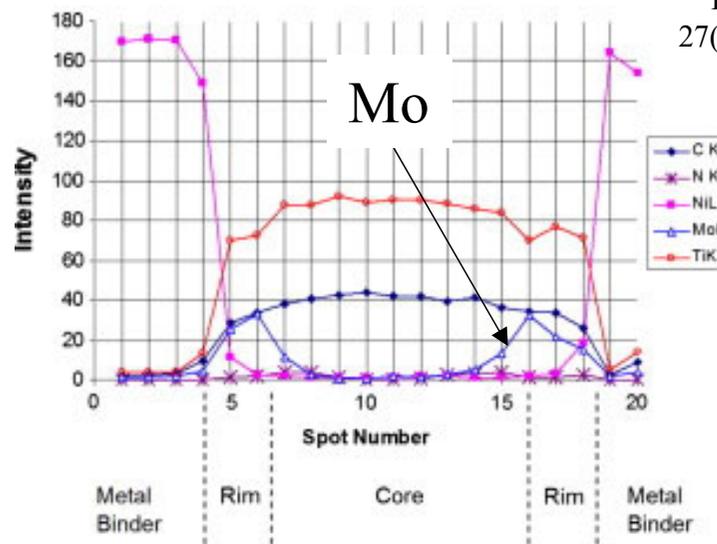
WCの粒径が小さいほど硬度・強度は優れ、破壊靱性は劣りCo依存性が強い。

サーメット (cermet) は、硬いセラミック (ceramic) と靱性のある金属 (metal) の複合材料を称し、TiCとNiの高硬度の複合材にMoを添加して靱性を付与する。



Ni
Ti(C,N)

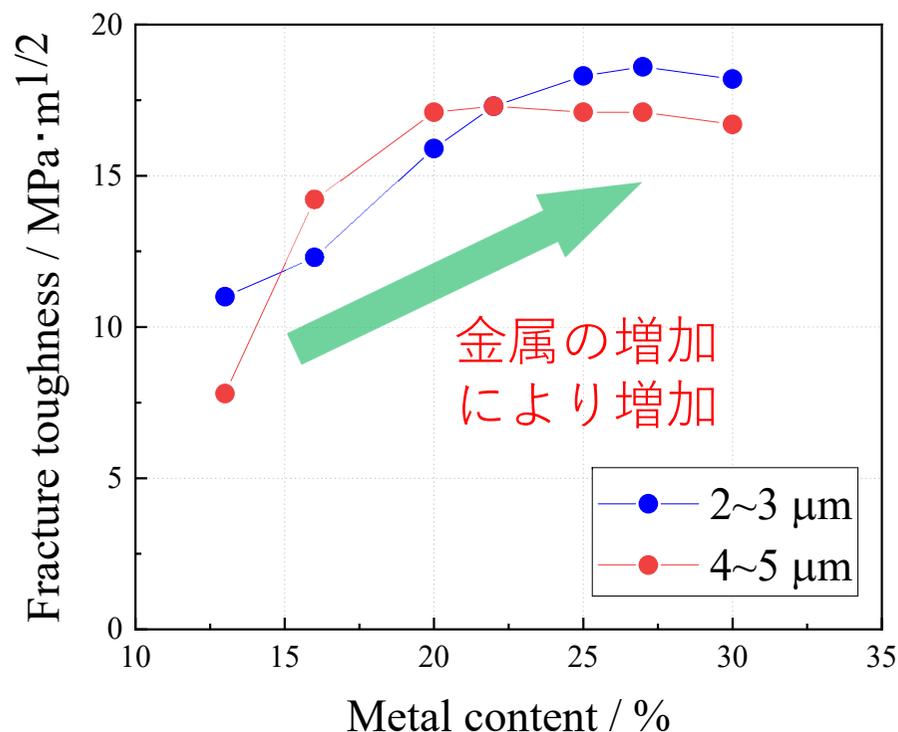
Int. J. Refract. Met
Hard Mater.
27(2009)521-527



TiCとTiNは連続固溶体で安定な化合物を形成

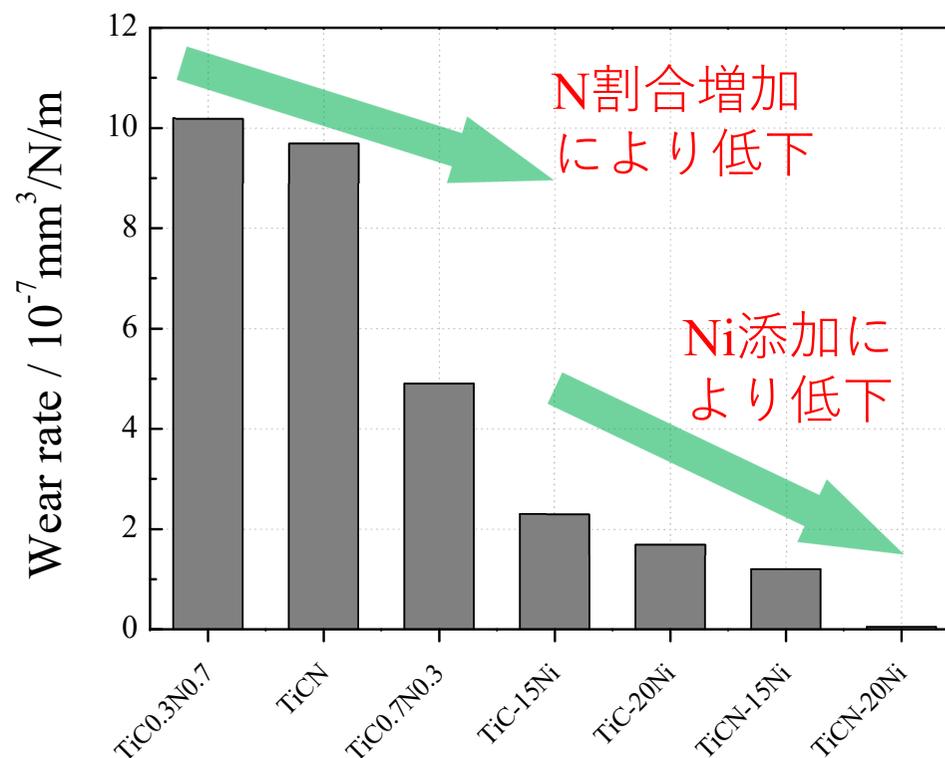
Niの周りにMoを分散させ靱性を確保

破壊靱性



Ceramics Inter. 45 (2019) 21077-21090

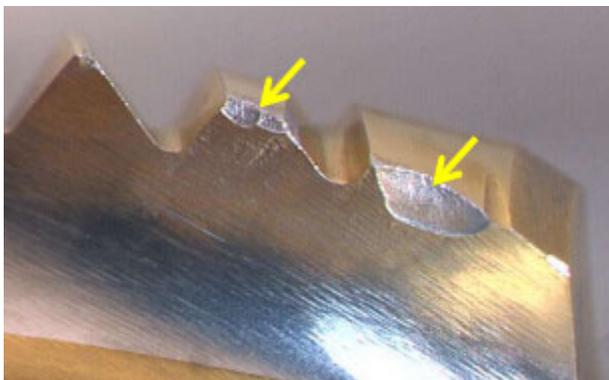
耐摩耗性



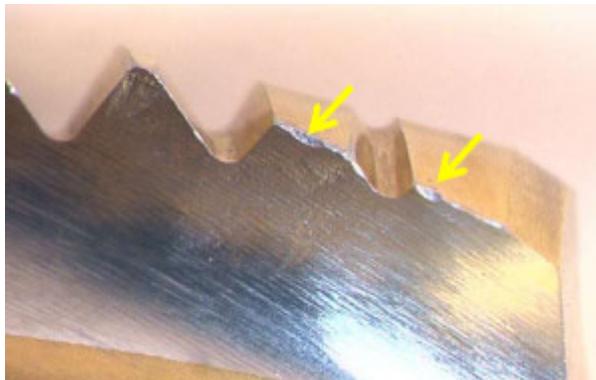
Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 27 (2009) 521-527

硬質 δ 相が多いと靱性は低いが、結合相の金属量を増加させることで靱性が上昇し、微細粒組織ほど高い。

硬質 δ 相だけでは耐摩耗性が低い（摩耗速度が速い）が、結合相のNiを添加すると耐摩耗性を改善できる。



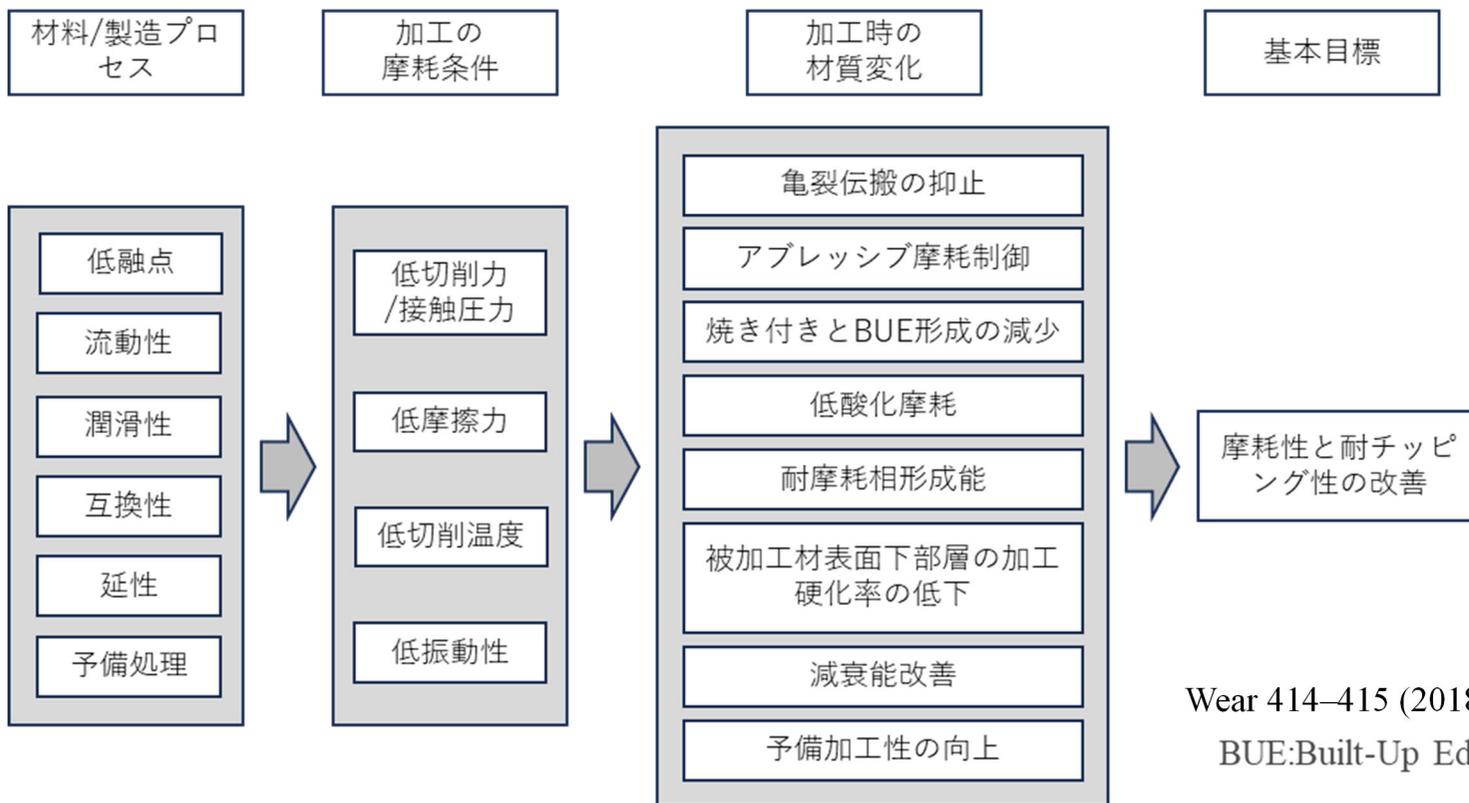
食付部刃先に発生した刃欠け



食付部刃先に発生したチッピング

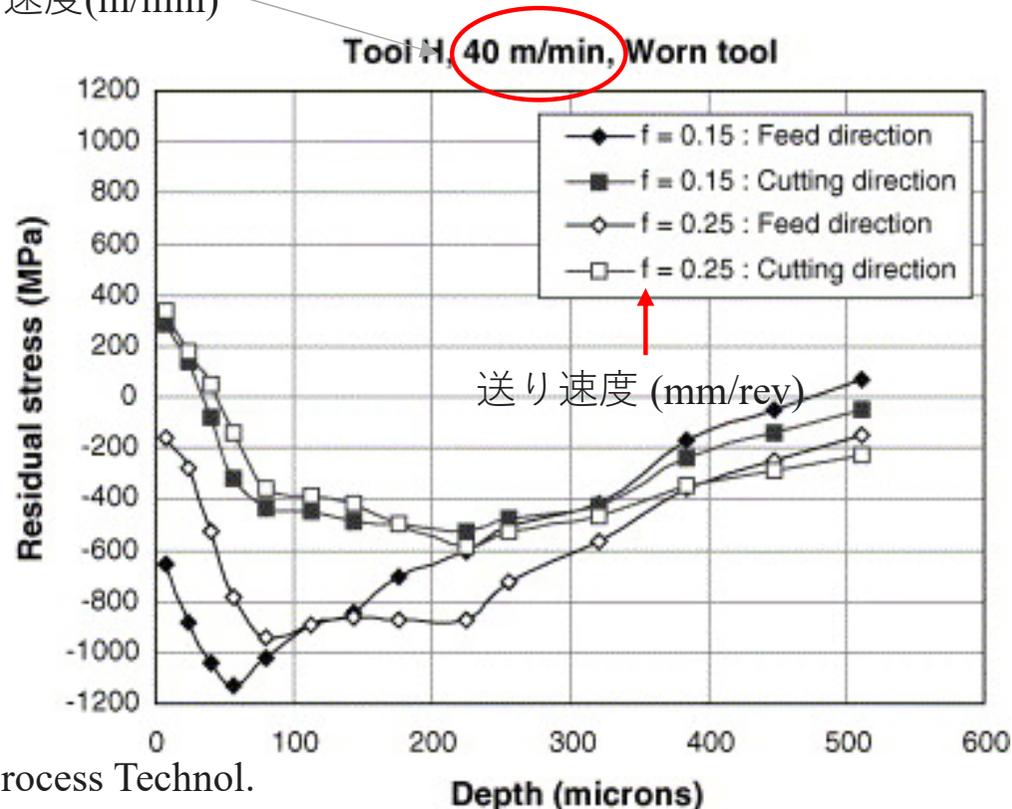
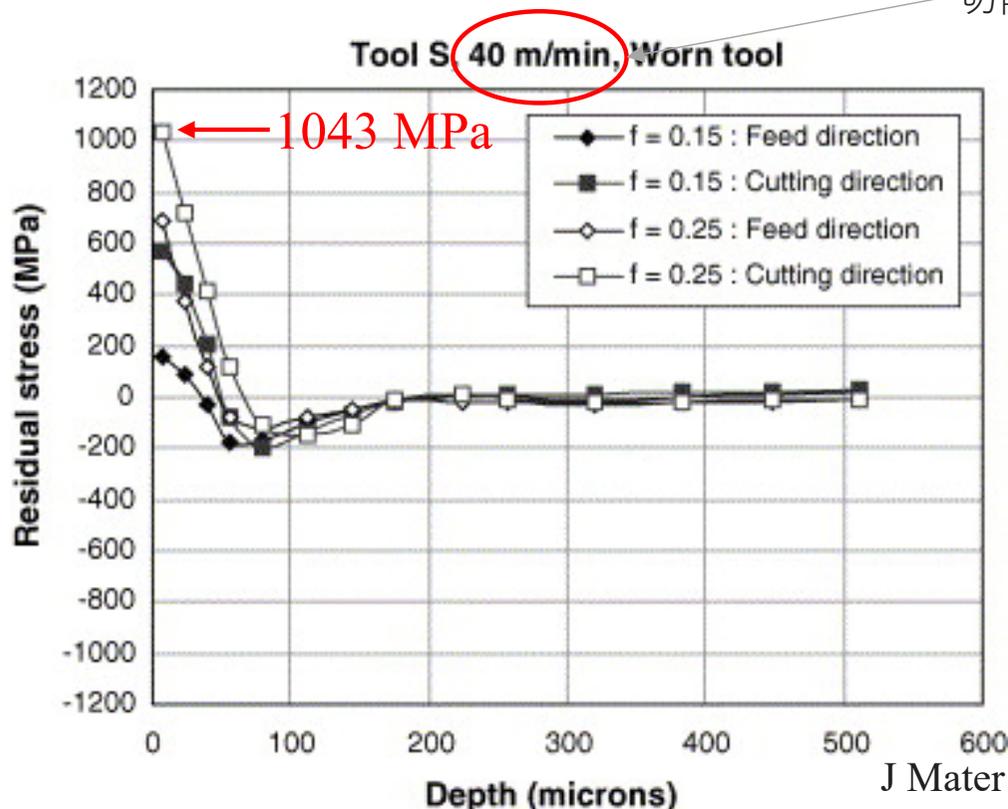
刃欠けはタップのねじ部や食付き部に生じた大きな欠けで、チッピングは小さな欠けとされるが、感覚的な意味合いが強い

<chrome-extension://efaidnbmninnibpcapjpcglclefindmkaj/https://www.yamawa.com/Portals/0/resource/jp/tips/pdf/tips-061.pdf>

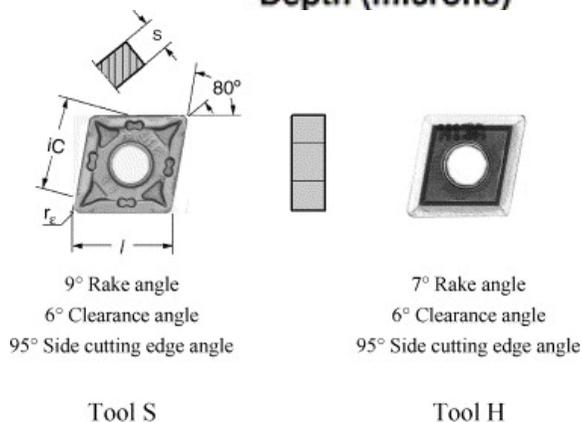


Wear 414–415 (2018) 79-88を和訳
BUE: Built-Up Edge

切削速度(m/min)



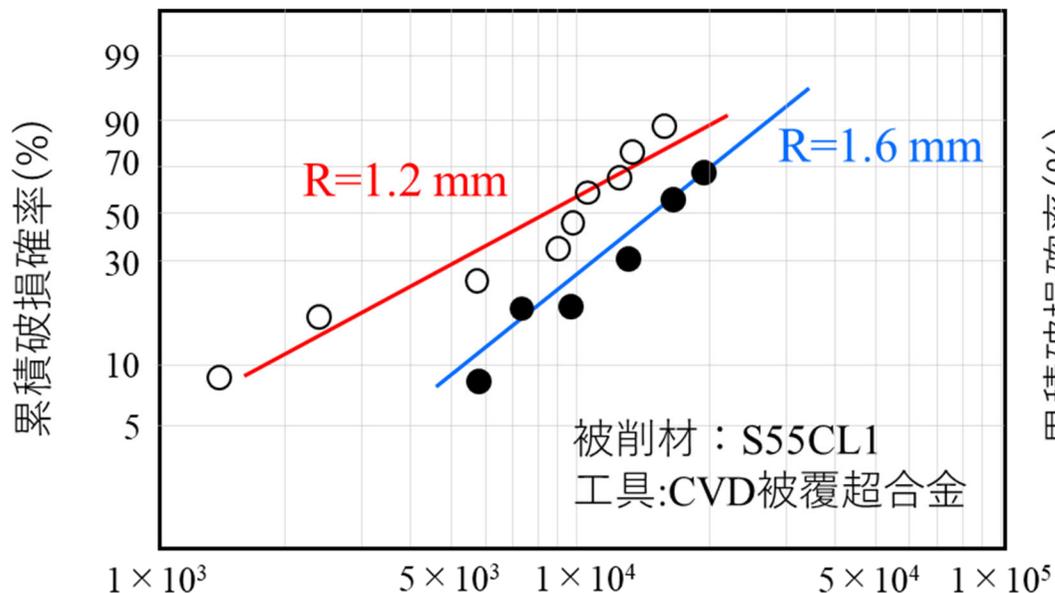
J Mater Process Technol.
173 (2006)359-367



Tool S (TiCN/Al₂O₃/TiN coated WC)
Tool S (uncoated WC)

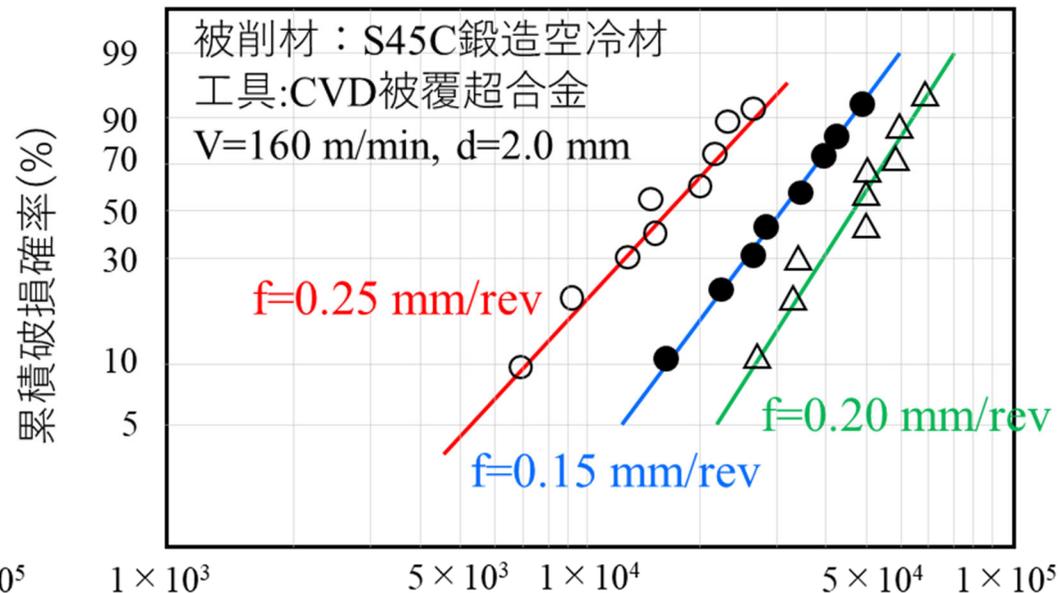
ピエゾ素子（圧電効果）で応力を測定した結果、コーティングWC材には引張残留応力が高く、未処理WC材は圧縮応力が高い
→ 摩耗は塑性変形を促進するため残留応力を増やし、チッピングが起こり易い。

工具刃先半径の効果



工具寿命 (刃先と被削材溝との衝突回数)

送り速度の効果



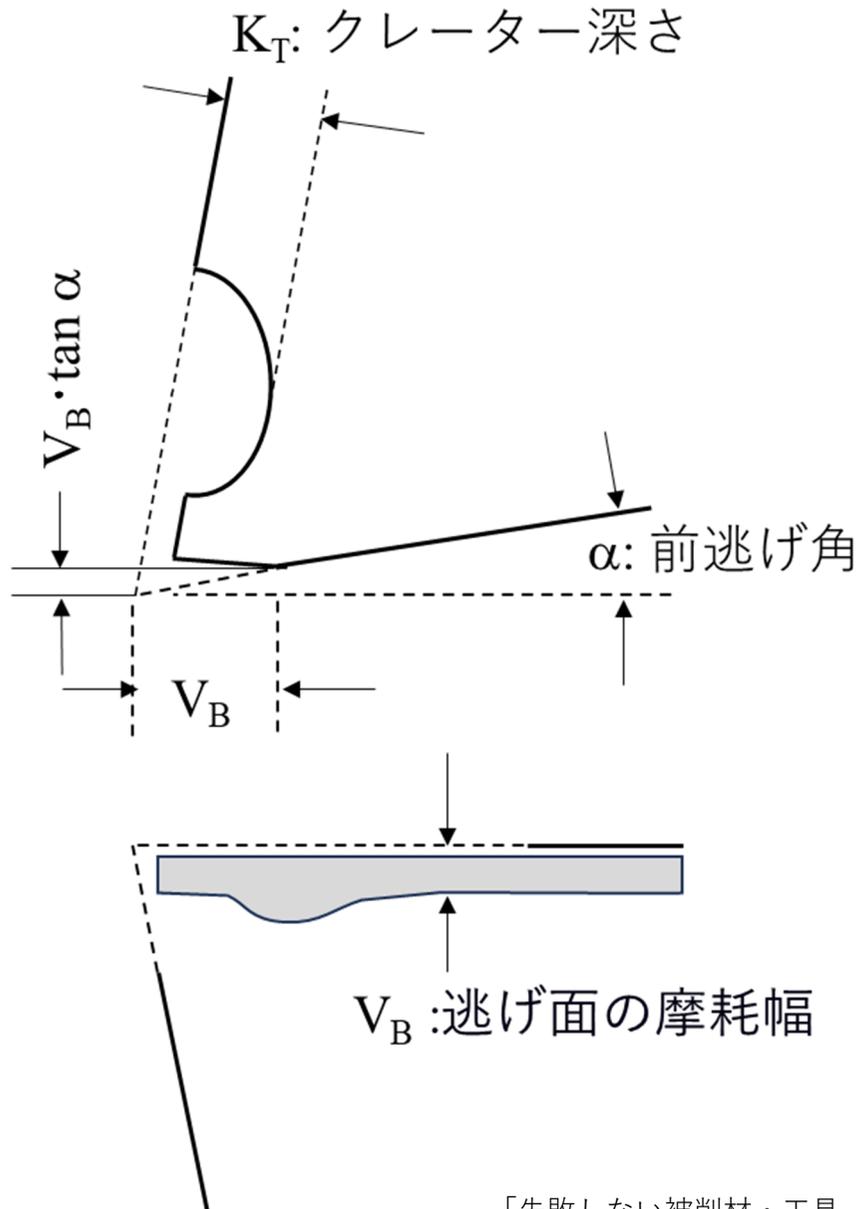
工具寿命 (刃先と被削材溝との衝突回数)

「失敗しない被削材・工具材の見方・選び方」より

- ✓ 工具刃先半径R=1.2mmから1.6mmにすると、工具寿命平均値 (累積破損確率=50%) は、 1.0×10^4 から 1.5×10^4 となり最短寿命は 1.5×10^3 から 6×10^3 とほぼ4倍向上する。
- ✓ 送り量を0.25mm/revから0.15~0.20mm/revに低減すると、送り量が0.20mm/revが最適となり、これより小さくすると工具チッピング寿命は劣化

工具寿命判定基準（旧JIS B 4011-1959）

寿命判定基準	適用
$V_B=0.2 \text{ mm}$	精密切削、仕上げ切削
$V_B=0.4 \text{ mm}$	特殊鋼などの切削
$V_B=0.7 \text{ mm}$	鋳鉄・鋼等の一般切削
$V_B=1 \sim 1.25 \text{ mm}$	普通鋳鉄等の一般切削
$K_T=0.05 \sim 0.1 \text{ mm}$	再研削の経済性 切れ刃破壊への安全度



「失敗しない被削材・工具材の見方・選び方」より

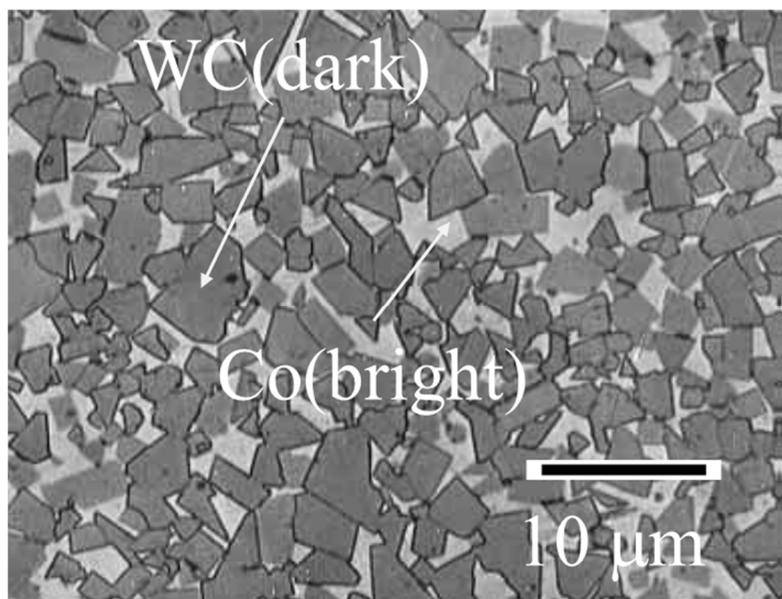
前逃げ面側に摩耗 V_B が生じると、切れ刃が $V_B \cdot \tan \alpha$ だけ後退して部品の径が大きくなり、寸法精度が低下。
すくい面摩耗の進行が逃げ面摩耗に先行する場合、寿命基準となる摩耗はクレーター摩耗深さ K_T が採用され、 $0.05 \sim 0.1 \text{ mm}$ に設定。すくい面摩耗の先行は、高速切削、鉛快削鋼の切削などの場合に見られる。

現象：硬度200のS45Cが、硬度1600の超硬合金工具を摩耗損傷させる



炭化物の硬度はTiCが約3200でWCとTaCは約1800

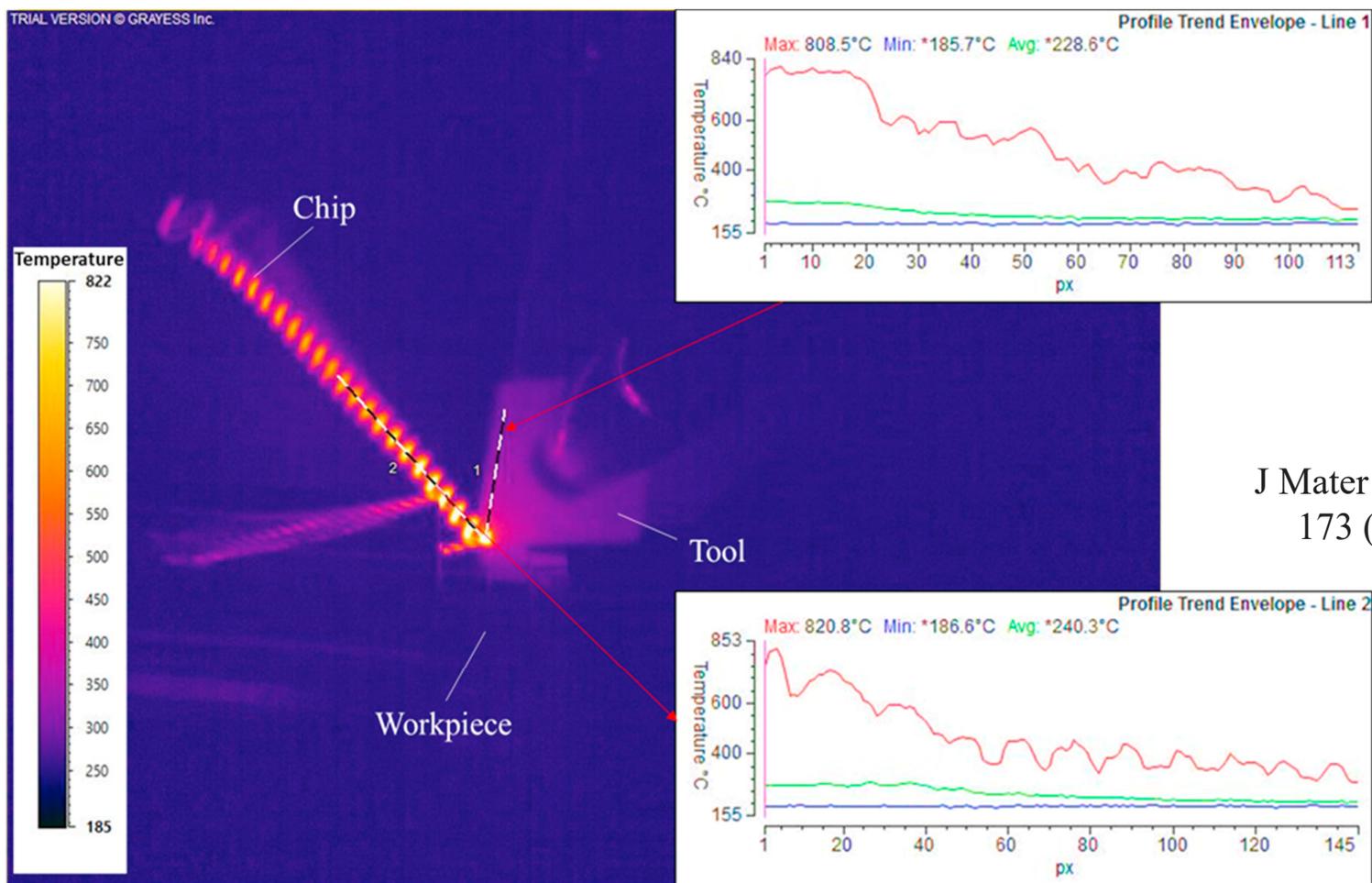
摩耗損傷は、(1) 炭化物の硬さ、(2) 結合材（超硬合金の場合はCo）の厚みと機械的性質、(3) 炭化物と結合材の結合力、が主要な要因



✓ 切削では結合相が多いと、切り屑が被削材と凝着して持ち去られるため炭化物が欠け落ち耐摩耗性は劣化する。

✓ 耐チップング性は耐摩耗性とトレードオフで、結合相が多いと靱性が改善される。

✓ ただし、チップングは送り量に大きく影響し、工具への負荷や摩擦熱は要注意。



J Mater Process Technol.
173 (2006)359-367

Inconelの切削加工時に発生するchipと工具の温度の経時変化

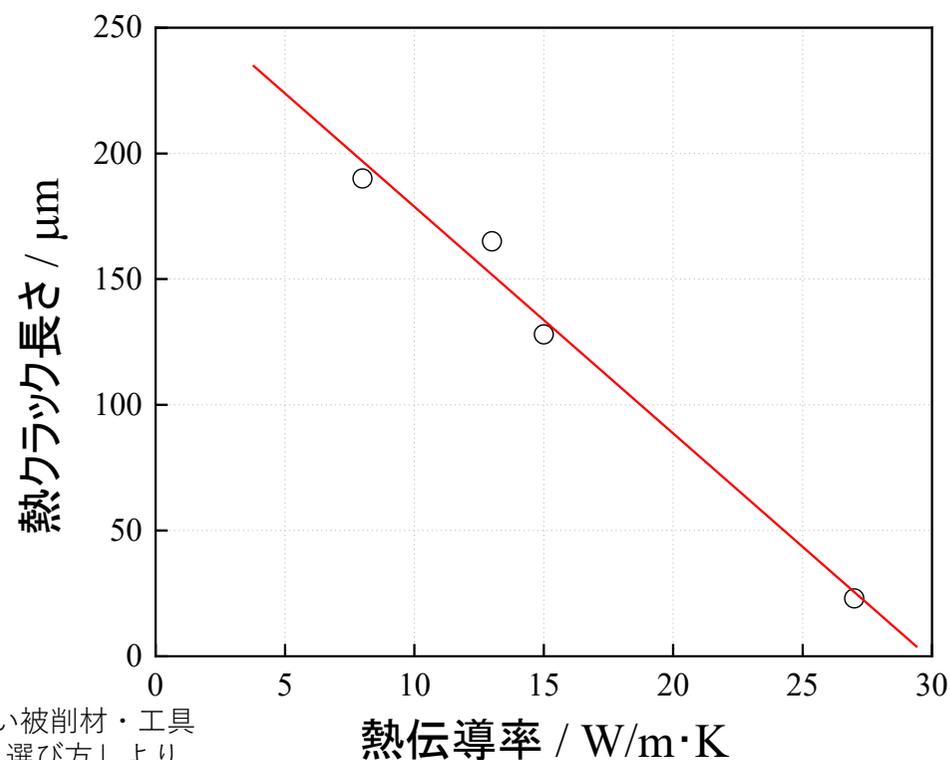
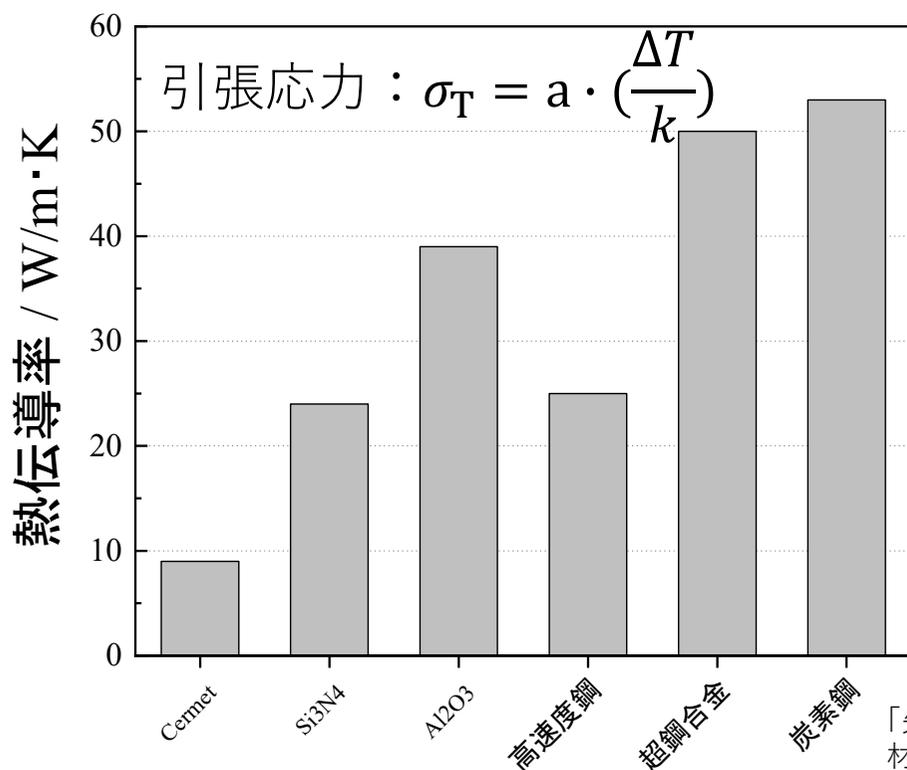
チッピングはさまざまな欠陥、特に工具表面の微小亀裂から発生し、加工中に伝播する可能性があり、最終的な工具破損につながることもある。そのためチッピングを抑制することは工具の寿命を延ばすためにも重要である。

チッピング：工具に係る応力に起因した機械的作用で発生



熱クラック：工具に蓄積する熱に起因した物理的作用で発生

工具刃先は被切削材と接触時は熱が発生し、接触しない時は熱が発生しないため、ミクロでは工具は急速加熱と冷却を繰り返す。工具表面に発生する引張応力 σ_T は加熱冷却の温度差 ΔT に比例し、工具の材料の熱伝導率 k に反比例する。



「失敗しない被削材・工具材の見方・選び方」より

- (1) 金属加工に使用する工具には、主としてトレードオフの関係にある硬度と靱性が求められる。工具材料には鋼、超鋼合金、セラミックス、ダイヤモンドなどが使用される。
- (2) 金属加工には高速度鋼が多用されるが、難加工性材料ほど、炭化物や窒化物を微細分散させた超鋼合金が使用され、さらに高硬度材の加工には炭窒化物の量比が100%のサーメットが使用されるが、靱性は劣化する。
- (3) 超鋼合金は結合相である金属と単窒化物の分率や単窒化物のサイズによって機械的性質を大きくコントロールできる。
- (4) 工具寿命の改善には、工具材料（炭化物硬さ、結合材の量比等）因子と加工条件（刃先形状、送り速度）因子の最適化が必要。

A nighttime photograph of a dense urban skyline. The foreground shows a mix of residential and commercial buildings, some with warm interior lights glowing through the windows. In the middle ground, several taller apartment or office buildings are visible, some with balconies lit up. The background features a prominent skyscraper with a red-lit top and a construction crane. The sky is dark, and the overall scene is illuminated by the city's lights.

Thank you for attentions.