

木質材料切削における被削材と工具に関する研究

日本大学生物資源科学部

倉 田 洋 平

はじめに

日本の森林面積は2,497万 haで、国土面積のおよそ3分の2が森林で覆われた森林国である。我が国の森林率は、OECD諸国の中で、フィンランドの72.9%、スウェーデンの68.7%に次いで、3番目の68.5%となっている。また、森林蓄積がこの半世紀で2.6倍になり、近年では、約1億 m^3 蓄積量が増加し、総計でおよそ40億 m^3 になっている。そのため、木材の利用拡大が望まれ、「新流通加工システム」や「新生産システム」による加工流通体制の整備、収益性の向上、生産体制の強化がなされている¹⁾。これらの取り組みにより、国産材供給量は平成14年以降増加傾向にあり、木材自給率も回復傾向にある。木材生産の現場では、今後さらに需要の拡大を目指すため、製材工場や合板工場の大規模化、複数工場の連携、乾燥および強度性能の保障などの取り組みがなされている。そのような状況で、材木生産の最適化（材の表面を可能な限り滑らかにする）、能率化（単位時間当たりの切削効率を向上させる）および工具の長寿命化（工具摩耗の抑制）が課題として挙げられる。本稿では、木材加工時に利用される切削工具の摩耗に焦点を当て、新しい研究の結果を踏まえそのメカニズムについて解説する。これにより、耐摩耗性に優れた工具を開発できれば、生産現場での生産能率の向上に寄与できるものと考えている。切

削工具の摩耗は、被削材の種類、木材の含水率などの状態、切削工具の原材料など複数の要因が複雑に関与する。そのため、それらの要因を精査し、どの要因が摩耗に影響を与えるのか考察する。また、摩耗に強い工具として、非金属系のセラミック系工具（金属系の切削工具よりも摩耗耐性に優れるが、欠けやすく靱性が少ないことから今まで切削工具として用いられることが少なかった）とコーティング工具について紹介し、新しい工具開発への着想を示したい。

木材切削工具に生じる色々な摩耗

切削工具に生じる摩耗には、さまざまな形態があり、その電子顕微鏡観察を図1に示す²⁾。図1に示す損傷や欠けが連続的に生じることで、切削工具は摩耗する。

これらの摩耗が生じる原因は、物理的要因（力学的要素）と化学的要因（腐食）とに大別できる。物理的要因は、さらに複数に分けることができ、被削材である木材中に存在するシリカなどによって工具がすり減る場合、加工時の機械的衝撃によって生じる工具の小さな欠けが原因となる場合、切削時に発生する熱（およそ200～800℃）に由来する場合などが挙げられる。一方、化学的要因は2つに分けられ、工具や機械系の間に電位差が生じて低電位の工具から成分がイオンとなり被削材中に溶解し腐食が進行する

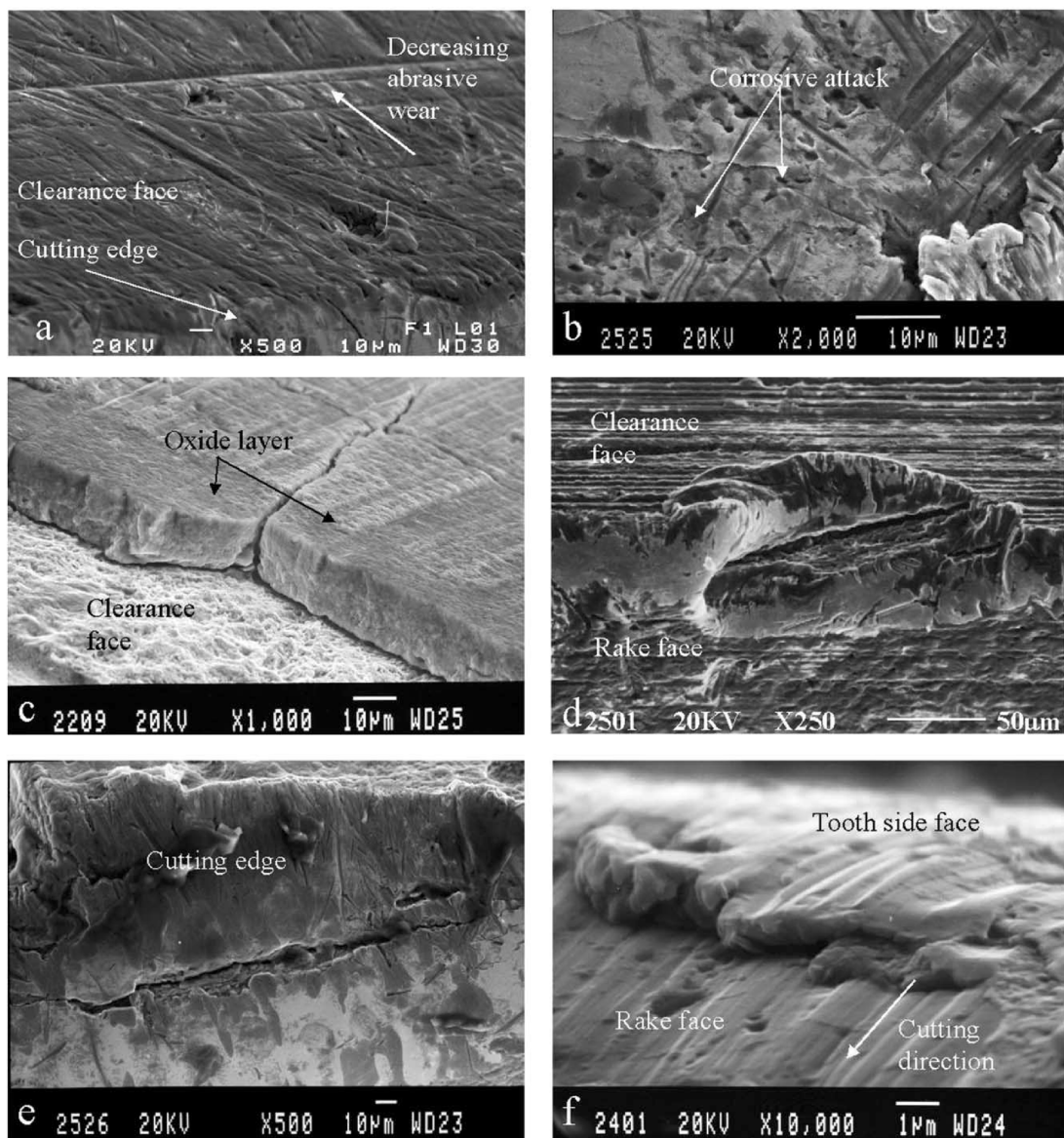


図1、摩耗による刃の損傷の例。(a)はアグレシブ摩耗（工具が引っかかりや切削作用によりすり減る）、(b)腐食摩耗（工具の構成成分と被削材の成分が化学反応をし、その複合物が脱離することで生じる）、(c)酸化膜とクリアランス面の隙間および割れ、(d)チッピング（小さな刃の欠け）、(e)クラッキング（チッピングが連なって大きく損傷）、(f)層間剥離

電気化学的摩耗と、工具の構成元素が被削材成分などと化学反応を起こしその反応成分が除去されて生じる化学的摩耗に分けられる³⁾。次章では物理的要因に焦点をあて、複数ある要因の中で、何が一番工具摩耗に影響を与えるか考察する。

物理的要素による摩耗機構

Nordströmらは、摩耗の要因と工具摩耗量の変化について明らかにするため、以下の2つの実験をした²⁾。実験条件は、①マツおよびスプルス（含水率35～40 %）を被削材として、帯鋸（UHB 15N2、ビッカース硬さ540）を使用し、45～50 m/sの切削速度で、2～50時間連続で切削した場合、②マツ（含水率30 %）を被削材とし、スピンドルに2枚の刃を持つ丸鋸（UHB 15LM、ビッカース硬さ500）を使用し、70 mmの切り込み深さおよび58 m/sの切削速度で、総切削長10000 m切削した場合である。

①実験および②実験ともに、切削工具がすり減り摩耗が生じた。②実験が①実験よりも摩耗量が多く、さらに、①実験では化学的要因による腐食摩耗が起こった。摩耗量が違った要因として、切削に要した切削力の違い、切削時の被削材の木目の相違、被削材の含水率が異なることが挙げられると考察した。②実験で腐食摩耗が起こらなかった理由として、被削材の含水率による影響とした。

今回の実験に使用した木材は、材中にシリカが含まれていなかった。そのため、Nordströmらは、工具摩耗が生じた原因は、木材中のシリカではなく、切削時に生じた熱により鉄鋼が軟化しそれがすり減ることで生じたと結論付けた。

以上の結果から、摩耗に関する物理的要因の中で、シリカよりも熱による鉄鋼の軟化の方が大きな影響を与えると考えられる。次に、木材中に含まれるシリカによる影響に焦点をあて、その影響について説明する。

Porankiewiczらは、コクタン（木材密度が高い）、シデ、ケールイング（シリカ含有量が多い）、タモを被削材として、高速度工具鋼（SKH51）を用いて切削し摩耗量を比較した⁴⁾。これにより、木材中のシリカの含有、木材密度、切削時の工具温度の中で、どの要素が工具摩耗に影響を与えるか検討した。

実験では、高速度工具鋼（SKH51、ロックウェル硬：64）を使用し、切削速度は32 m/s、切り込み深さは1.5 mm、含水率10～13 %（木材の含水率は低く、物理的要因による摩耗のみ起こるとする）の条件で切削した。

その結果、工具温度と工具の摩耗量との間には、相関関係が認められた。一方、シリカの含有および木材密度では、相関関係が認められなかった。

以上2つの報告から、木材中のシリカよりも切削時の工具温度上昇およびそれに伴う工具の軟化が物理的要因として大きな影響を与えることが示された。

Nordströmらの実験では、含水率の高い木材を加工した場合に、化学的摩耗の腐食が起こった。一般的に、生材を切削した方が、気乾材を切削するより工具の摩耗量が多くなる。それは、被削材の含水率が高くなると、物理的要因に加えて化学的要因による摩耗も起こると考えられている。そこで、化学的要因の腐食に焦点をあて、高含水率木材の切削時に腐食はどのように起こるのか。次章では、切削工具と木材成分との反

応に着目し説明する。

腐食摩耗による摩耗機構とそのメカニズム

木材中には、有機酸や特異な抽出成分を含む場合があり、それらの成分が工具摩耗の原因および促進させることが知られている。特にタンニンは、化学的摩耗である腐食を促進させる成分である。タンニンは、木材中で樹皮に多く蓄積し、害虫や害獣および紫外線から自身を守る役割を持つ。樹種により蓄積量は異なるが、ウルシでは70 %におよぶタンニンの蓄積が認められる。タンニンの分子量は、500から3000程度で

あり、動物の生皮を皮革にする性質をもつ水溶性のフェノール性の物質である⁵⁾。水溶性であるため、木材含水率が高いと溶解しやすく、液性は、強い酸性を示す(2 %タンニン溶液でpH = 3.2程度)。タンニンの化学構造を図2に示す。構造の違いから、縮合型と加水分解型の2種類に大別できる。また、加水分解型の方が縮合型より高い反応性を示すことが知られている。さらに、加水分解型には、部分構造に違いがあり、図2中b)のGallic Acid (没食子酸) の部分がエラグ酸の場合もある。図3には、タンニンの部分構造の構造式を示す。

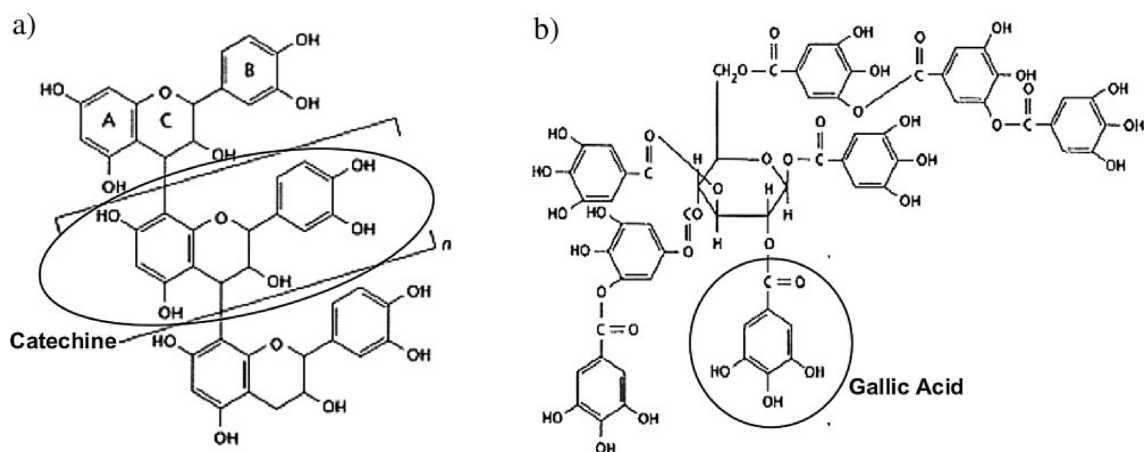


図2、タンニンの化学構造、a) 縮合型タンニン、b) 加水分解型タンニン

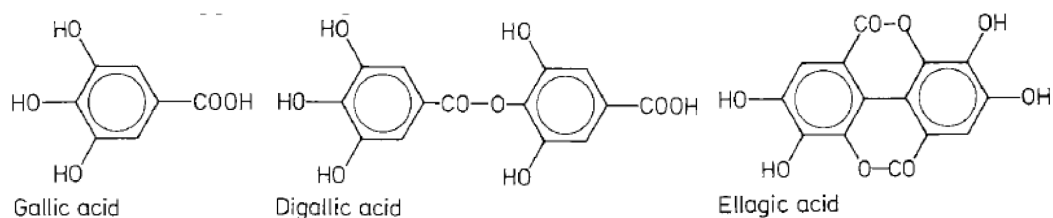
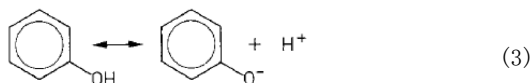
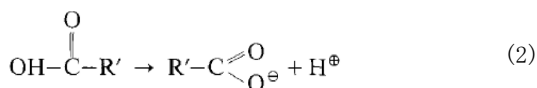
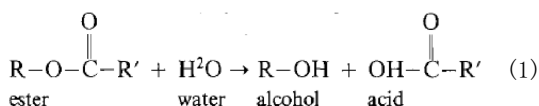
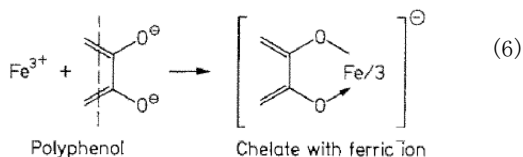
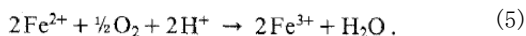
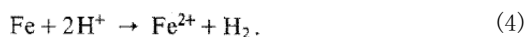


図3、タンニンの部分構造 (左から没食子酸、二没食子酸、エラグ酸)

切削工具とタンニンとの腐食摩耗機構は古くから研究されており、Krilovらにより、切削工具と被削材中に含まれるタンニンによる反応機構が提案されている⁶⁾。その反応機構は、複数の段階に分けられる。反応過程を詳しく述べると、木材中に存在する酢酸や脂肪酸などの有機酸が水と反応してアルコールと酸に分解される（式1）。次に酸が電離することで水素イオンを生じる（式2）。また、フェノール性の物質も水素イオンを発生させる（式3）。



次に、生じた水素イオンが、工具由来の鉄と反応し2価の鉄イオンを作成する（式4）。2価の鉄イオンは、空気と反応し酸化して3価の鉄イオンとなる（式5）。そして、3価の鉄イオンは、タンニンなどに由来するフェノールと結合し、鉄フェノールの複合体を作る（式6）。この複合体の吸着力は弱いため剥がれてしまう。



上記の反応機構の中で、Krilovらは、フェノール性物質は空气中で酸化および重合が起こり最終産物は不活性となり工具の腐食に関わらないとしている。そのため、伐採後時間がたった木材（おがくず）は、酸化が進んでいるため、伐倒後すぐの生材よりも腐食作用が小さいと仮定した⁶⁾。4種類の市販の工具を対象に、新しいトリスタニアと1か月放置した古いトリスタニアとで腐食試験をした。腐食試験では、腐食により減少した工具の質量を比較した。その結果、新しい材は古い材よりも腐食し、腐食による工具の質量減少が認められた。これにより、Krilovらは、タンニンなどのフェノール性物質と鉄との反応機構とフェノール性物質の反応性について示した。

しかし、実際に、工具表面ではタンニン鉄複合体の脱離が生じているのか。次に、工具表面の顕微鏡写真による報告を紹介する。

Winkelmannらは、腐食面を電子顕微鏡に加え、エネルギー分散型分光計で工具表面を構成する元素を調べた⁷⁾。また、切削時に生じる熱により工具温度が上昇することを考慮して、温度によりタンニン溶液の液性がどう変化するかについても検討するため以下の2つの条件で実験をした。①タンニン濃度（10～250 g/l）および溶液温度（25～100 °C）を変えてpHを測定、および、②溶液温度（60 °C、150 °C）が異なるタンニン溶液用いて工具（X52CrMoV8-1）の腐食試験をし、腐食試験前後での溶液のpH変化を測定した。

①実験から、溶液温度が高くなるに従い、pHが下がり、タンニンが分解される温度を超えてもpHは下がった。温度上昇によりタンニンが分解されれば、pHが増加するはずであるが、分解物の一部（没食子酸、エラグ酸等）が酸性を示

し、それがpH低下の要因となると結論付けた。
②実験から、腐食試験前と後のpHを比較した場合、腐食試験後のpHは、試験前のpHより低下が認められた。これは、熱分解により新たに酸性の物質が生じpHを低下させたことが原因であった。

次に、腐食面の電子顕微鏡に加えエネルギー分散型分光計の結果から、工具表面の腐食部にタンニン鉄複合体が認められた（図4）。このタンニン鉄複合体は結合力が弱いため、切削時の機械的応力により剥がれ落ちる可能性がある。さらに、剥がれた部分の鉄が、酸化後、即座に新たなタンニンと反応してタンニン複合体を形成し、再度、剥がれ落ちる。よって、Winkelmannらは、切削部のpHが低い状態に保たれること、および、工具表面にタンニン鉄複合体が形成さ

れ剥離することが化学的摩耗の原因となると提案した。

ここまでのところ、タンニン鉄複合体の形成が化学的摩耗の原因となり、さらに、切削時に生じる熱が摩耗を促進されることが示された。では、腐食はどれほど工具の強度を低下させるのか。次章では、タンニンによる腐食が工具の物理的強度にどの程度影響を与えるか報告する。

腐食摩耗と工具強度との関係

Pugsleyらは、タンニン溶液により工具が腐食した際、どれほど工具強度が低下するか、あらかじめ工具を腐食させた場合と工具使用時に腐食が起こった場合との2つの条件に分け実験した⁸⁾。

①工具（コバルト含有量が異なる2種類の鋼材）

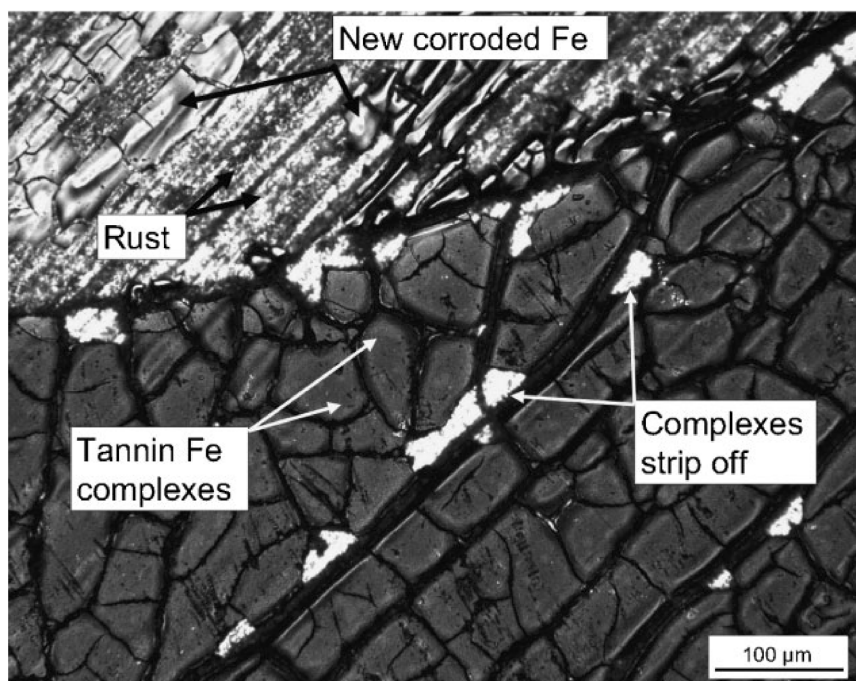


図4、タンニンが腐食した工具の表面写真

をタンニン溶液 (5×10^{-3} M) にいろいろな時間浸漬させ (1~168 時間、工具をあらかじめ腐食させる)、乾燥後、工具の強度試験をした。②工具に一定荷重をかけながら、同時にタンニン溶液を添加し腐食させ、破断するまでの時間を測定した。また、それぞれの工具の表面状況を顕微鏡にて観察をした。

図5は、破壊に要した最大荷重と浸漬時間との関係を表したものである。タンニン溶液の浸漬時間や添加時間が長くなるのに伴い最大荷重が

減少し、最終的には、半分近くまで工具の強度が低下していることが示された。よって、タンニンにさらされる時間が長くなるほど、金属の腐食が進み強度が低下したと考えられた。図6に、破壊試験後の切削工具の表面写真を示す。研磨によって生じた溝にそって、腐食が生じ、部分的には穴があいていることがわかった。工具表面にできた穴の数および深さは、タンニンの浸漬時間に比例して増加していた。このため、タンニンが研磨溝に浸透しそこから腐食が始まり、

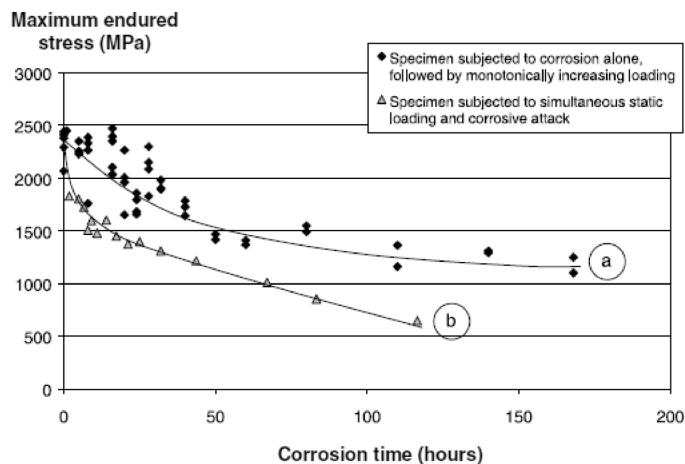


図5、タンニン浸漬時間と最大荷重との関係 (a: 事前に工具をタンニン溶液に浸漬させた場合、b: タンニン溶液を添加しながら荷重をかけた場合)

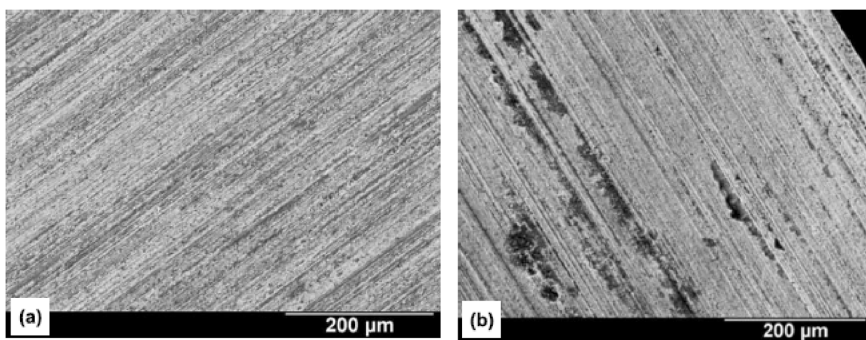


図6、工具表面の顕微鏡写真 (a: タンニン添加前、b: タンニン添加4時間後)

切削工具に小さな欠けを生じさせた。時間の経過とともに、欠けの箇所は増え、また、欠けの深度も深くなった。そして、欠けにより工具強度が低下し破壊に至ったと結論付けた。

工具は鉄鋼を主成分とするため、切削時に生じる熱による軟化による摩耗と、木材中の成分と反応する化学的要因による摩耗を免れない。では、摩耗がおこりにくくするためにはどのような工夫をすればよいのか。次に、鉄を主原料としないセラミック工具について報告する。

工具の原材料の工夫（①セラミック工具と摩耗との関連）

従来の工具用素材は金属が主流で、高熱に弱く錆びやすいといった性質上の限界があり、技術革新の障害となっていた。一方、セラミック工具は、金属性工具と比較して、耐熱性・耐蝕性・耐摩耗性・軽量性・絶縁性・超硬性など、優れた特性を有する。セラミック工具とは、アルミナ、窒化珪素を主原料として微量の金属酸化物や炭化物を加えて焼結した工具を指す。

Beerらは、木材切削時におけるセラミック工具の摩擦学的な特性について、超硬合金工具や多結晶ダイヤモンド工具と比較し実験した⁹⁾。実験に使用した切削工具の種類と硬さならびに強度を表1に示す。

表1、実験に用いた切削工具と各種パラメータの関係

Type	Group	Identifi-cation	Composition	Density (g/cm ³)	Average grain size (μm)	Vickers hardness (HV10)	4-Point-bending strength (MPa)	K _{IC} (MPa√m)
GC	I	E	Al ₂ O ₃ + 300 ppm MgO	3.985	0.59	2082 ± 31	592 ± 86	3.8 ± 0.5
GC		G		3.987	0.53	2084 ± 24	638 ± 73	3.8 ± 0.3
AC	II	K	Al ₂ O ₃ + 10% 3Y-ZrO ₂	4.131	0.47/0.10 ^a	2036 ± 22	700 ± 88	4.0 ± 0.2
AC		L	Al ₂ O ₃ + 10% ZrO ₂	4.141	0.43/0.12 ^a	2014 ± 34	771 ± 99	4.4 ± 0.4
HW K05		HW	+4% Co	15.5	>2	1718	2100	10.5
DP		DP	PCD	Industry standard				

^a Separate particle size given for Al₂O₃/ZrO₂.

GC: セラミックをwet shaping approachで成型した工具

AC: セラミックをcold isostatic pressing（冷間静水圧成形）で成型した工具

HW K05: 超硬合金工具

DP: 多結晶ダイヤモンド工具

上記の工具を用いて、木材板と摩耗させ（移動速度：20 m/min）、その時の摩擦係数および表面の摩耗量を求めた。

木材板として中密度繊維板を使用した際の摩

擦係数は、GCおよびACでは値が小さく、HWで最も大きな値を示した。HW（超合金）では、最も高い摩擦係数を示したが、粒子サイズの大きさと構成する成分の不均一さのためだと考えら

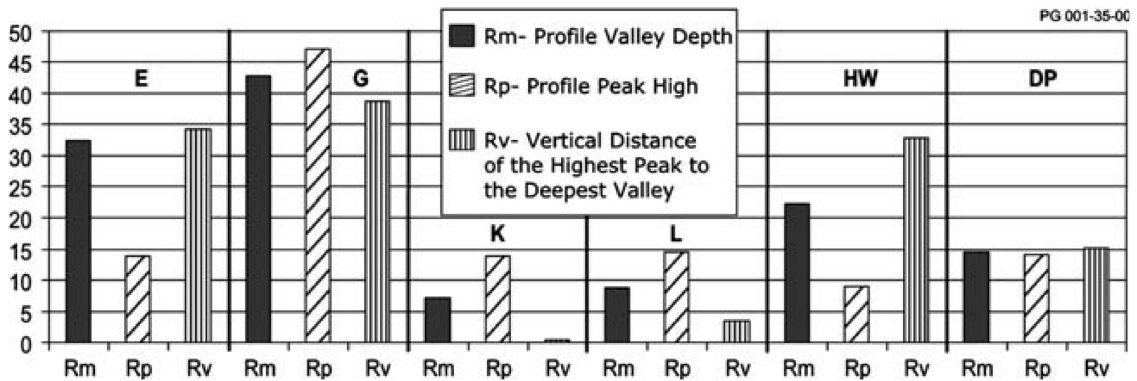


図7、各種工具の表面粗さ（割合）

れる。

パーティクルボードを使用し摩擦による表面粗さの変化について測定した結果を図7に示す。

GC（図中E、G）とAC（図中K、L）で大きな差が認められた。ACのセラミック工具は、超硬合金工具や多結晶ダイヤモンド工具より優れていた。ACとGCが同じくらいの硬度と強さであるため、工具の成型仕方が工具の性能に影響していた。

Beerらは、セラミック工具の成型条件を工夫することで、セラミック工具が超合金工具や多結晶ダイヤモンド工具よりも摩擦学的に優れた特性を有することを示した。

次に、切削部にコーティングを施すことで耐摩耗性を高めたコーティング工具について紹介する。

工具の原材料の工夫（②ダイヤモンドコーティングと摩耗との関連）

コーティング工具とは、高速度工具や超硬合金の切れ刃の鋭利さや耐摩耗性を改善するために数 μm の厚みでコーティング処理したもので

ある。

Moritaらは超硬合金にダイヤモンドをコーティングし、気乾材と生材のメラピ（高シリカ含有）とウエスタンレッドシダー（金属をキレートしやすいトロポロンを含む）を被削材とし切削による摩耗を評価した¹⁰⁾。気乾材と生材を用いることで、物理的要素および化学的要素による摩耗の両方の側面から考察できる。

超硬合金（K05）に20 μm のダイヤモンドフィルムを用いてコーティングした工具、未コーティング工具および合成ダイヤモンド工具をそれぞれ準備し、単軸面取り盤で上向き切削した。切削条件は、スピンドル速度3800 rpm、切り込み速度25.9 m/s、切り込み深さ2 mmとした。最終的に、切削全長は12.2 km、切削時間は200 分となった。

それぞれの工具の試験後の表面状態を電子顕微鏡で観察した（図8）。

コーティング工具は、その特性上、表面に凹凸が認められるが、試験後の表面は、樹種の種類や材の含水率ではあまり変化は認められなかった。PCDでも同様に、変化は認められなかった。一方で、未コーティング工具は、生材を切

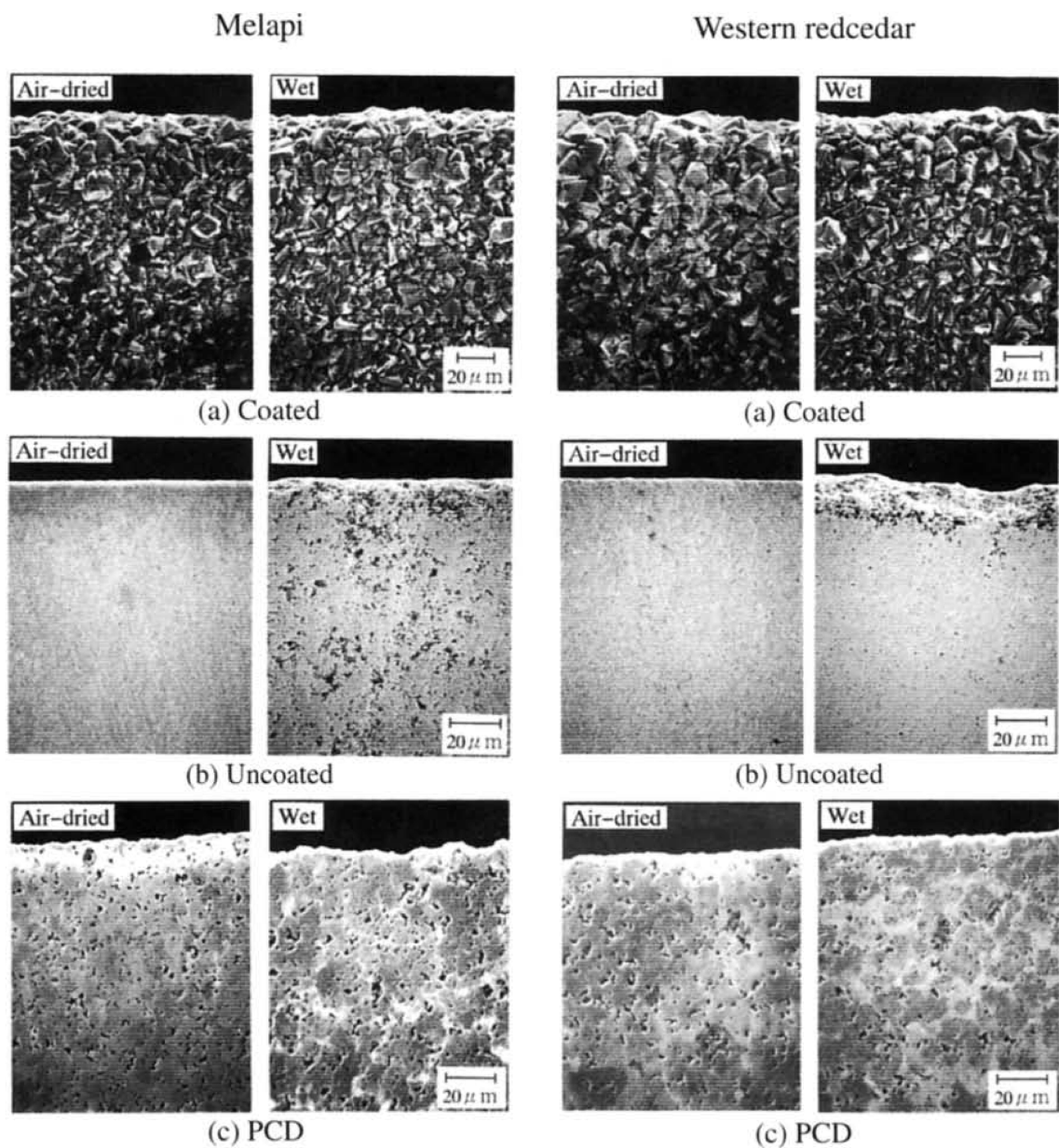


図8、切削後の工具表面の電子顕微鏡写真 (a: コーティング工具、b: 未コーティング工具、
c: 合成ダイヤモンド工具 (PCD)、左: メラピ、右: ウェスタンレッドシダー)

削した場合では化学的摩耗が観察された。

電子顕微鏡の結果では、PCDに目立った摩耗が観察されなかったが、切れ刃プロファイルの結

果から、PCDに摩耗が起こっていることが示された。

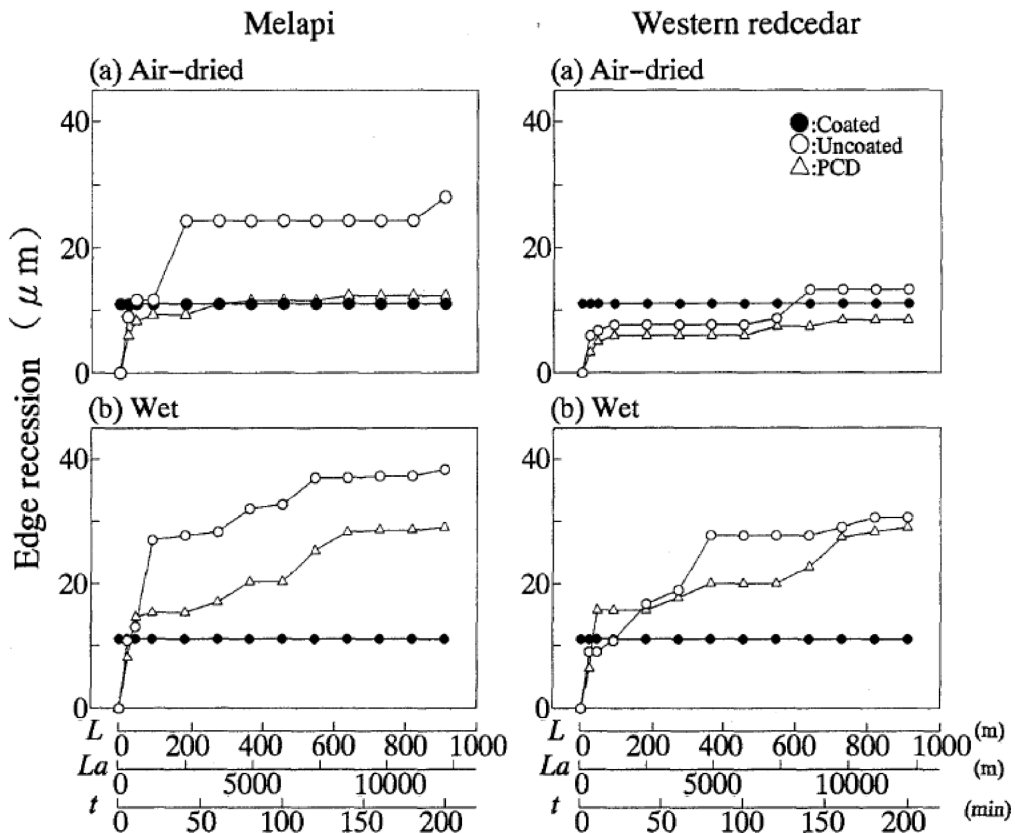


図9、切削による工具摩耗量の変化 (L : 切削長、 La : 切削アーク長、 t : 切削時間)

図9は、生材切削時の工具摩耗量と切削長などとの関係を示す。未コーティング工具では、切削が進むにつれ摩耗量が急激に増加し腐食摩耗が起こった。PCDでも同様の傾向を示したが、摩耗量は未コーティング工具より小さい値となった。PCDは、気乾材の摩耗結果から、物理的要素による摩耗に対しては優れた性能を有するが、生材の摩耗結果から、化学的摩耗には弱いことがわかった。コーティング工具は、気乾材と生材いずれの場合でも腐食摩耗が起こらず、ダイヤモンドコート剥離も起こらなかった。以上のことから、コーティング工具は、物理的要素および化学的要素のいずれに対する摩耗にも高

い抵抗性があることが示された。

おわりに

国産材の安定供給体制に向けた新流通・加工システムの取り組みにより国産材供給が増加している。生産現場では、いろいろな研究・開発をし、生産量増加に努めている。そういった取り組みの中で、木材加工の根本課題といえる工具の長寿命化（摩耗）に焦点をあてた。切削工具の摩耗は、被削材の種類、木材の含水率などの状態、切削工具の原材料など複数の要因があるが、特に、切削時に生じる摩擦熱と材の含水率

が摩耗に大きな影響を与えていることが分かった。また、材の含水率の違いにより摩耗の要因も異なり、含水率が低い場合は物理的要因（特に、切削時に生じる熱）による摩耗が生じ、一方、木材の含水率が高い場合は、物理的要因に加えて化学的要因（腐食）による摩耗も起こることが分かった。また、鉄鋼を主成分とする切削工具では、木材成分との反応による腐食摩耗

が免れない。そのため、非金属系のセラミック系工具や切削面をコーティングした工具が開発され、それらが耐摩耗性に優れることが明らかになった。切削加工は、超高速度で行われるため、材と工具の挙動を正確に把握するのは難しい（切削中の工具温度等）。しかし、今後、工具の原材料や成型方法の研究がさらに進めば、刃が減りにくい夢の工具ができるかもしれない。

参考文献

- 1) : 森林・林業白書 平成26年度版 林野庁
- 2) : Wear testing of saw teeth in timber cutting. , J. Nordström and J. Bergström, *Wear*, 2001, **250**, pp 19-17.
- 3) : 切削加工 番匠谷 薫・奥村正悟・服部順昭・村瀬安英 海青社
- 4) : Factors influencing steel tool wear when milling wood. , B. Porankiewicz, J. Sandak, C. Tanaka, *Wood Science and Technology*, 2005, **39**, pp 225-234.
- Corrosion mechanisms in the wood industry, especially caused by tannins. , H. Winkelmann, E. Badisch, M. Roy and H. Danninger, *Materials and Corrosion*, 2009, **60** (1) , pp 40-48.
- 5) : 木材の化学 原口 隆英ら 文永堂出版
- 6) : Mechanism of sawblade corrosion by polyphenolic compounds. , 1a. Krilov and R. Gref, *Wood Science and Technology*, 1986, **20**, pp 369-375.
- 7) : Corrosion mechanisms in the wood industry, especially caused by tannins. , H. Winkelmann, E. Badisch, M. Roy, H. Danninger, *Materials and Corrosion*, 2009, **60** (1) , pp 40-48.
- 8) : The influence of a corrosive wood-cutting environment on the mechanical properties of hardmetal tools. , V. A. Pugsley, G. Korn, S. Luyckx, H. -G. Sockel, W. Heinrich, M. Wolf, H. Feld and R. Schulte, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2001, **19**, pp 311-318.
- 9) : Triobological behavior of sub-micro cutting-ceramics in contact with wood-based materials. , P. Beer, P. Gogolewski, J. Klimke, A. Krell, *Tribology Letters*, 2007, **27**, pp 155-158.
- 10) : Corrosive-wear characteristics of diamond-coated cemented carbide tools. , T. Morita, K. Banshoya, T. Tsutsumoto, Y. Murase, *Journal of Wood Science*, 1999, **45**, pp 463-469.

倉田洋平先生のプロフィール

2011年 名古屋大学大学院生命農学研究科博士課程修了

2011年 日本大学生物資源科学部助手

2014年 日本大学生物資源科学部助教