

令和元年6月25日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06021

研究課題名(和文) 難削材切削時の工具寿命予測のための生成エントロピー重畳法の開発

研究課題名(英文) Tool life prediction of considering adhesion based on the lowest entropy product for difficult-cut materials

研究代表者

井原 透 (IHARA, Tohru)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：80134831

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：難削材は低速切削されるので工具寿命は凝着物の影響を考慮して予測されなければならない。凝着は工具被削材界面の原子が整合する位置で生じ、整合位置は転位のように切削方向に移動するという準転位モデルを提案した。次いで最弱リンクモデルを適用して、準転位が移動できない場合に被削材側で破壊すると凝着物が生じ、工具側で破壊すると摩耗粉が生じるという新しい凝着摩耗理論を構築した。凝着物の脱落をシミュレーションしたところ、凝着物の脱落頻度が高い場合に工具寿命の短いことが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

準転位モデルの提案は国内外において初であり、類似の研究はない。また、最弱リンクモデルによって、工具材摩耗、被削材の凝着等を判定する手法、ならびに凝着物(構成凝着層)によって工具刃先を保護して工具寿命を延ばすという提案も、国内外に類似の研究はない。さらに工具寿命を凝着物の脱落頻度と関連付けた研究は見当たらない。これらの研究成果によって難削材加工時の工具寿命予測は従来よりも高い信頼性を有するようになる。また、構成凝着層によって工具寿命を延ばすという提案は難削材加工において有用であり、社会的意義は高い。

研究成果の概要(英文)：The tool life for difficult-cut materials must be predicted in consideration of influence of adhesion layer due to low cutting speed. The adhesion occurs at the commensurate position where atoms are matched by the tool/work interface. In this paper, the quasi-dislocation model is created of the mechanism of each matching position moving to the cutting direction such as that of dislocation. The adhesion layer is generated with destruction in the work side on the quasi-dislocation from which further movement is not feasible due to increasing of the matched atoms density. A new adhesive wear model is built in that the wear particle is caused with destruction in tool side based on the weakest link theory that the link of the smallest entropy-production proceeds with destruction in 3 links consisting of a work, an interface and a tool. It is found that the tool life is short when adhesive layer is unstable and the falling-off frequency is high from the simulation of adhesive layer.

研究分野：生産工学・加工学、切削加工、ナノ加工学、生産文化

キーワード：準転位 構成凝着層 最小エントロピー生成 工具摩耗 工具欠損 難削材

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景 背景・動機

(1) 近年、航空宇宙産業部品に難削材の利用が増加しているため、加工時の切削速度は平均的に低下し続けている。生産性を高めるために加工現場では工具寿命をフルに使い切る努力を図っているが、難削材切削においては一般的に工具の信頼性が低いので、工具寿命をフルに使い切ることができないでいる。これは現状の工具寿命予測が、高速切削可能な場合の工具摩耗理論に基づいているためである。難削材は高速切削が困難なので、現状の工具摩耗理論とは食い違いが生じ、工具の信頼性は低くなる。それゆえ、無人化工場における工具寿命予測に悩まされる現場は多い。工具寿命の予測を違える原因は、切削速度の低下に伴う工具/被削材界面の凝着物にある。分かり易さのため、凝着物が大きく成長した構成刃先を例にとると、構成刃先は工具刃先を保護して工具寿命を延ばす作用を持つ。しかし同時に、構成刃先は脱落時に工具にチップング/欠損を誘発しやすく、工具寿命を短縮する。工具寿命を延ばしたり、縮めたり、凝着物の工具寿命に及ぼす影響は大きい。高速切削ではこの凝着物を無視できるので、現状の工具摩耗理論は凝着物を考慮しない。そのため工具の信頼性は低く、難削材の低速切削が増えた今日では使えない。凝着物の影響を盛り込んだ工具摩耗理論が必要とされている。

(2) 現状の工具摩耗理論は、バウデンの凝着摩耗の理論を硬い工具材側に適用して、凝着した真実接触面積に比例する体積が一定の確率で欠落することで工具摩耗が生じるとしている。実際の切削では真実接触面積が工具と被削材の見かけの接触面積にほぼ等しいとされるので、凝着すると工具と被削材の接触した全面が相対速度ゼロとなってしまふ。したがって、現状の工具摩耗理論では、一定の切削速度を保ちながら柔らかな被削材側が摩耗する場合や工具と被削材の両者が摩耗しないで真実接触面内を擦過するだけの場合を説明することができない。

一方、近年のトライボロジーの知見によれば、摩擦は界面における整合する原子同士のスティック/スリップ現象であるとされる。これは摩擦が原子レベルの現象であるとの主張であり、これに従えば、上述した真実接触面内全域が凝着するという現状の工具摩耗理論から抜け出して、凝着を真実接触面内の原子レベルの現象として捉え直すことができる。

(3) すなわち、高速切削が可能な被削材を対象にして開発された現状の工具摩耗理論は原子レベルの理論として修正される必要のあることが分かる。もし再モデル化によって新たな凝着摩耗理論が構築されれば、一定の切削速度を保ちながら、柔らかな被削材側が摩耗する場合や両者が摩耗しないで真実接触面内を擦過するだけの場合を説明することができ、そうすれば、構成刃先を考慮した工具摩耗も検討できると考えられる。工具摩耗と欠損を重畳した工具寿命を予測することもできるであろうし、チップング/欠損を誘発せずに構成刃先のような工具刃先の保護効果だけを用いる方策が開発できるかもしれない。さらに、切削開始から定常状態になる迄の工具寿命も予測できそうである。こうした可能性のあることが本研究の動機であった。

2. 研究の目的

(1) バウデンの凝着摩耗の理論を硬い工具材側に適用した工具摩耗理論を原子レベルの理論として修正/再モデル化して新たな凝着摩耗理論を構築する。

(2) 構築した新たな凝着摩耗理論を用いて、以下のことを実現する。

① 柔らかな被削材側が摩耗する場合や両者が摩耗しないで真実接触面内を擦過するだけの場合を説明できること。

② 構成刃先などの凝着物と工具摩耗の関係を見出して両者を同時に考慮できること。

③ 欠損を誘発せずに工具刃先の保護効果を用いる方策を見出すこと。

④ 工具摩耗と欠損を重畳した工具寿命予測法を開発すること。

(3) 切削開始から定常状態になる迄の間の摩耗経過および欠損進展経過の予測法を開発する。

3. 研究の方法

本研究は3年間で行われた。以下、上記の目的に沿った流れで研究方法を述べる。

(1) 現状の工具摩耗理論は真実接触面積の凝着後に工具側が破断すると考えている。切削では真実接触面積が工具と被削材の見かけの接触面積にほぼ等しいとされるので、前節で述べたように凝着時には切削速度が一瞬ゼロになるという矛盾がある。凝着を原子レベルで捉えると真実接触面積のうちの原子対が整合する位置近傍だけが凝着すると考えることができるので、平均切削速度はゼロにはならない。また、リンクモデルを用いたエントロピー生成の極値を取る手法を適用すると、硬い工具材側の破断だけではなく、柔らかな被削材側で破断する場合や両者の界面で破断する、単に擦過するだけの場合も考えることができる。このような思考実験を海外の学者を含めた共同研究者らと繰り返して新たな凝着摩耗理論を構築する。

(2) 新たな凝着摩耗理論が仮構築できたところで、整合する原子対位置の近傍の凝着部で柔らかな被削材側が破断する場合を検討する。柔らかい金属と硬い金属の2種類の金属が界面で接合した場合、界面の接合部は2種類の元素が混じり合っただけでエントロピーが上がるため一般的に界面は柔らかい金属よりも高強度となることが多い。バウデンの凝着摩耗の理論では、柔らかな金属側が破断して摩耗粉が生じると考えるが、切削の場合はその柔らかな被削材摩耗粉は工具に凝着しているので凝着物と判定される。そこで、この凝着物が最初に生じる場所やその成長、脱落を解析的に検討する。また、実験を重ねて、チップングや欠損を誘発せずに工具刃先の保護効果を用いることのできる方策について調べる。

(3) 原子対が整合する位置近傍の凝着部で硬い工具材側が破断する場合を対象とする。工具材

側が破断するとその破断片は凝着した被削材とともに持ち去られるので摩耗粉と判定される。通常、工具材は被削材の3倍以上の強度を持つ。強度の高い工具材は破壊し難い。そのため、もし工具材が破壊するのであれば、その前に工具材は劣化しなければならない。そこで、共同研究者らと材料劣化とその後の工具摩耗、工具欠損のメカニズムについて思考実験を繰り返し、両者を重畳した工具寿命の予測法を開発する。

(4) 切削開始から定常状態になる迄の間の摩耗経過および欠損進展経過については、定常切削中ではない。定常状態を扱うエントロピー生成の極値を取る手法は使えない。そこで、実験的に予測する手法を考察し、エントロピー生成の極値を取る定常切削時の近似手法を開発する。

4. 研究成果、研究の主な成果、得られた成果の国内外における位置づけとインパクト、今後の展望など 当初予期していない新たな知見など

(1) 定常切削時の真実接触面内において、工具材原子と被削材原子の界面垂直方向に並ぶ対が、整合(コメンシュレート)する位置の近傍が凝着するというモデルを提案した。これは真実接触面積内であっても非整合な原子対位置では凝着しないことを意味する。また、整合する位置であってもその整合位置が界面上を切削速度方向に横移動すれば、凝着しないで擦過ができる機構を有する。これは結晶内部の転位がすべり面上を移動するのに類似したメカニズムなので準転位運動と称した。凝着は水平方向原子の相対位置がずれることによって垂直方向の整合原子対の領域が広がって、整合位置が移動できなくなる状態である。発表論文①では、この準転位運動のメカニズムとその結果として生じるスティック/スリップ時の摩擦応力を転位理論の類推から導出している。

なお、同論文①ではFEMによる切削シミュレーションの切削力結果が定性的には合うが、定量的には合わない要因は摩擦条件に原因があると考えられるため、同論文で提案した摩擦応力の導出法を用いた方が良いのではないかと考察結果を示している。

発表論文①で得られた成果、特に準転位運動のメカニズムは国内外において初の提案である。類似の研究はなされていない。

(2) 凝着した場合、引き続き切削過程で、硬い工具材側(Tとする)か、柔らかな被削材側Wか、それとも、両者の界面Bで破断すると考えられる。そこで、T, B, Wがリンクとしてつながった3鎖を考えて、3鎖のうちの最も弱い鎖が切れるという最弱リンクモデルを適用する。発表論文④では、各リンクが破壊すると仮定した場合に各リンクが費やす散逸仕事を導出し比較して、最も散逸仕事の小さいリンクが破壊すると考えて結論を導いた。なお、最小散逸仕事の原理は等温状態におけるエントロピー生成最小の原理である。また、定常切削状態における工具/被削材界面の温度勾配は小さいと仮定した。一般的に界面の接合部は被削材内部よりも高強度となる傾向が高いので、最小散逸仕事の原理によれば被削材内部Wの弱いところで破壊すると推測される。実際、同論文④でも同様の計算結果が示された。また、最初に凝着物の核が形成される位置は切れ刃先端よりも少し擦過した内部であることが分かった。さらに、凝着物が成長しても厚さが20 μm 以下の場合にはチップングや欠損を誘発せずに工具刃先の保護効果の得られることが確認できたので、20 μm 以上に成長する構成刃先とは区別して同凝着物を構成凝着層と判定することとした。こうして、構成凝着層を形成させることによって工具寿命を延ばすという方策を同論文では示した。発表論文②では凝着層を含めた5鎖からなる最弱リンクモデルを検討し、5鎖のうちの散逸仕事が最小となる鎖が切れるとした凝着層形成モデルを構築している。そして、同モデルをステンレス材に適用して、同材の定常切削時における構成凝着層/構成刃先を予測している。

発表論文④②で得られた成果、特に最弱リンクモデルの適用によって、工具材摩耗が生じるか、被削材の凝着が生じるか、あるいは凝着が成長するか、それとも摩耗も凝着も生じないで界面擦過するかを判定する手法、ならびに同モデルの発展から適度に成長した構成凝着層が工具刃先を保護することを示した成果は、国内外において類似の研究が見当たらない。

(3) 最弱リンクモデルを用いた新たな凝着モデルを構築したので、整合する原子対位置の硬い工具材側T近傍で破断する場合、工具摩耗を検討した。1回の切削で排出される超硬K10種工具の摩耗粉サイズは一定ではなくて異なるとの報告(引用文献(1))があるので、摩耗粉はゆらぎ過程だけで排出されるのではなく、エネルギーに応じたサイズで排出されるというような破壊過程を伴うと考察される。そこで工具材の劣化機構を考案することにした。発表論文③は、凝着物が脱落する際のスティック/スリップ時の応力変動が工具材を劣化させると仮定して、凝着物の脱落周波数をシミュレートしたものである。凝着については水平方向原子の相対位置がずれることによって界面垂直方向の整合原子対領域が広がるときに生じるので、これを吸着現象で近似した。また、脱落については凝着領域にポイド状の損傷が広がって生じると考えて、線形損傷力学で近似した。同論文③による計算では脱落周波数は構成刃先の脱落周波数と同程度の値となることが分かった。また、脱落周波数は切削条件によって変化することが分かった。同周波数と実験による工具摩耗量とを比較すると、凝着物が不安定で脱落周波数の高い場合には工具摩耗が多く、逆に凝着物が安定で脱落周波数の低い場合には工具摩耗が少ないということが明らかになった。脱落時の応力振幅が同一と仮定すると、同論文③は脱落頻度が多いほど工具材劣化の程度が大きいのことを示す。なお、工具摩耗と工具欠損を重畳した工具寿命の予測法については今後報告する予定である。

発表論文③で得られた成果は国内外において初の成果と考えられる。凝着物が脱落する際にチ

ッピングや欠損を誘発するという研究はなされているが、摩耗が凝着物の脱落周波数と関連付けられるとした研究はない。

(4) 切削開始から定常状態になる迄の間の摩耗経過および欠損進展経過については、定常切削中ではないため、エントロピー生成の極値を取る手法が使えない。そこで、実験的に予測法を推測し、定常切削時の近似として表現する方法を開発する。学会発表④は、切削初期の過渡切削状態において凝着しやすい炭素鋼とそれほど凝着しない炭素鋼とを比較したもので、前者は早い段階で少なくとも定常状態程度に凝着物が付着するが、後者は定常状態になるまで凝着物が安定に付着しなかった。一方、摩耗量を比較すると前者は初期摩耗が抑制されていたが、後者は初期摩耗が激しかった。この状況は定常状態と同一である。したがって、切削開始から定常状態になる迄の初期摩耗経過に、定常切削時の摩耗傾向を近似して用いることが出来そうであるとの考察結果が得られた。

今後の展望として、同考察結果が初期摩耗の近似法の開発につながると考えている。

(5) なお、研究期間内に多数の難削材の切削実験を遂行した。その成果として、Ni 合金は国際会議論文②⑬と国内学会発表 3 件、Ti 合金は国際会議論文③と国内学会発表 1 件、コバルト合金は国内学会発表 1 件にて公表した。

引用文献

(1) 上原邦雄ほか、超硬工具の摩耗粉の生成機構、精密機械 42 巻 6 号(1976)445-452

5. 主な発表論文等 現在から順に発表年次をさかのぼり、項目ごとに通し番号を付して記入し、研究代表者、研究分担者には下線を引く

[雑誌論文] (計 8 件)

①Tohru Ihara, Xiaoqi Song, and Yukio Takahashi, Frictional Stress Derived on Interface Between Work and Tool Materials on Quasi-Dislocation Model for Cutting Simulations, International Journal of Automation Technology, 査読有, 13/ 1, (2019), 6-12, DOI: 10.20965/ijat.2019.p0006

②Xiaoqi Song, Yukio Takahashi, Tohru Ihara, Prediction of Built-Up Layer and Built-Up Edge Formation in Dry Cutting of SUS304 Stainless Steel, International Journal of Automation Technology, 査読有, 13/ 1, (2019), 13-21, DOI: 10.20965/ijat.2019.p0013

③伊津井裕人, 石川広希, 高橋幸男, 宋 小奇, 井原 透、工具・被削材界面における凝着状態予測のための凝着損傷モデル、精密工学会誌、査読有、85/ 1, (2019), 68-73, DOI: 10.2493/jjspe.85.68

④焼入れ鋼の切削における構成凝着層の核形成メカニズムに関する検討 宋小奇, 高橋幸男, 何偉銘, 井原 透 精密工学会誌 83, 5, (2017) pp.445-452, DOI: 10.2493/jjspe.83.445

⑤Predicting periodic evolution of BUE formation mechanisms during machining Xiaoqi SONG, Weiming HE, Tohru IHARA, Mechanical Engineering Journal, Bulletin of JSME 3, 6, (2016) 15-00534, DOI: 10.1299/mej.15-00534

⑥How to Realize the Self-Protective Tool During Cutting of Difficult-Cut Material? SONG Xiaoqi, Yukio TAKAHASHI and Tohru IHARA, The American Society for Precision Engineering, vol 67, pp.630-635, 国際会議論文 審査有, アドレス: https://www.researchgate.net/publication/325291546_How_to_Realize_the_Self-Protective_Tool_During_Cutting_of_Difficult-Cut_Material

⑦On the Formation Mechanisms of Adhering Layer During Machining Metal Material, SONG Xiaoqi, Yukio TAKAHASHI, HE Weiming and Tohru IHARA, Key Engineering Materials, vol. 749, pp. 39-45, DOI:10.4028/www.Scientific.Net/KEM.749.39

⑧Influence of Built-up layer on the wear of uncoated cemented carbide tool during cutting of Inconel 718, SONG Xiaoqi, Yukio TAKAHASHI and Tohru IHARA, LEM21 2017, 国際会議論文 審査有, DOI: 10.1299/jsmelem.2017.9.056

[学会発表] (計 14 件) 発表者 (代表) 名、発表標題、学会等名、発表年

①宋小奇, 切削雰囲気の違いが構成凝着層の生成に及ぼす影響, 精密工学会春季大会, 2019.

②SONG Xiaoqi, Influence of built-up layer on the wear mechanisms of uncoated and coated carbide tools during dry cutting of Inconel 718, Proceedings of 17th International Conference on Precision Engineering (ICPE2018) JSPE, 2018.1, (2018/11), 1-8

③SONG Xiaoqi, Investigating the Self-protective Tool Formation during Cutting of

Titanium Alloy, Proceedings of 33rd ASPE Annual Meeting American Society for Precision Engineering, 70, (2018/11), 329-334

④宋小奇, Ti-6Al-4V 切削加工における構成凝着層の生成に及ぼすコーティング層の影響, 第12回 日本機械学会 生産加工・工作機械部門講演会, 2018.

⑤宋小奇, 難削材切削における構成凝着層の有用性, 精密工学会春季大会 シンポジウム, 2018.

⑥伊津井裕人, 炭素鋼切削における凝着層生成脱落モデルを用いた凝着状態の予測, 精密工学会春季大会, 3月(2018)

⑦古牧久登, インコネル 600 切削加工時における構成凝着層が工具摩耗に及ぼす影響, 精密工学会春季大会 第25回学生会員卒業研究発表講演会, 3月(2018)

⑧鶴見純花, チタン合金 Ti-6Al-4V の切削における構成凝着層を用いた工具保護効果, 精密工学会春季大会 第25回学生会員卒業研究発表講演会, 3月(2018)

⑨山賀恭介, CCM 合金切削加工における工具損傷機構, 精密工学会春季大会 第25回学生会員卒業研究発表講演会, 3月(2018)

⑩石川広希, 初期摩耗期間における凝着現象の予測のための凝着層生成損傷モデルの提案, 精密工学会秋季大会, 9月(2017)

⑪宋小奇, インコネル 718 切削加工における超硬工具の損傷に及ぼす凝着物の寸法の影響, 精密工学会秋季大会, 9月(2017)

⑫SONG Xiaoqi, Influence of Built-up layer on the wear of uncoated cemented carbide tool during cutting of Inconel 718, Proceedings of International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st century : LEM21 JSME 2017.9, (2018/5), 1-8

⑬齋藤拓, インコネル 600 の構成凝着層を用いた境界摩耗からの保護 精密工学会春季大会 第24回学生会員卒業研究発表講演会, 3月(2017)

⑭石川広希, 炭素鋼切削における初期摩耗機構が工具逃げ面に及ぼす影響 精密工学会春季大会 第24回学生会員卒業研究発表講演会, 3月(2017)

6. 研究組織

(1) 研究協力者

宋小奇, SONG Xiaoqi, 中央大学理工学部 助教、

高橋幸男, TAKAHASHI Yukio, 中央大学理工学部 共同研究員、

何偉銘, HE Weiming, 上海理工大学(中国)准教授、

バンディットサクサワット, Bandit SUKSWAT, キング・モンクット工科大学 北バンコク校(タイ)准教授

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。