

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 21 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560133

研究課題名(和文) 切削加工における凝着の安定性

研究課題名(英文) Stability of material adhered to the cutting edge in metal cutting

研究代表者

關谷 克彦 (Sekiya, Katsuhiko)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：80226662

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：切削加工で生じる被削材の切削工具への凝着は加工仕上げ面の品位や工具寿命に大きな影響を与えることから、この凝着の挙動について切削仕上げ面形状と工具幾何形状に注目して実験的な調査検討を行った。凝着物は成長・脱落を繰り返す不安定な挙動を示すと一般的に言われてきたが、本研究の結果、凝着が激しく生じるとされるオーステナイト系ステンレス鋼、Ti6Al4V合金、Ni基耐熱合金の切削では、工具に直接凝着している安定層とその表面に不安定層が生成され、高切削速度下でも安定層は消滅しないことが分かった。仕上げ面の劣化は不安定層が厚い場合に起こる。また、安定層の存在が工具の劣化をもたらしている可能性が高い。

研究成果の概要(英文)：The behavior of the material adhered to the cutting edge of inserts was evaluated based on the comparison of the profiles of the surfaces machined in turning with the shapes and sizes of the inserts. The turning tests of an austenitic stainless steel SUS304, a titanium alloy Ti6Al4V, and a Ni based super alloy were conducted. The behavior of the adhered material was more stable than we expected. The adhered layer near the cutting edge was very stable, while the growth or breakage of the adhered material happened on the surface of the stable layer. This unstable layer was responsible for the deterioration of surface finish. The thicker the unstable layer is, the higher the surface roughness is. The adhered layer did not vanish even in high cutting speed.

研究分野：切削加工

キーワード：凝着 構成刃先 切削工具

### 1. 研究開始当初の背景

切削加工における工具 被削材間の凝着は、構成刃先の成長・脱落による仕上げ面品位の劣化や、切れ刃のチッピングなどによる工具寿命の短命化などを招く場合があるため、加工に際しては著しい凝着が生じない工具材種および切削条件の選定が必要とされており、これまでに様々な報告がなされてきた。

中山は鋼材の切削加工における構成刃先について詳細に検討を行い、構成刃先は周期的に成長・脱落を繰り返すため、過切削や脱落片により仕上げ面形状を著しく悪化させることを示した(精密機械, (1957)). この報告以降、構成刃先は凝着の起点から成長した結果であり、凝着の一形態であるときみなせることから、凝着もまた仕上げ面形状を劣化させるものとみなす傾向があり、しばしば工具 - 被削材間の凝着発生と仕上げ面形状の劣化が同一視されている。一方、竹山らは工具と被削材の親和性が高く激しい凝着を呈する純チタンの切削において、工具刃先形状の転写性が極めて良好となる結果を示している(Transactions of ASME, Series B, (1968)). 申請者らも凝着が激しいアルミニウム合金の旋削加工において、工具刃先丸味が数十 $\mu\text{m}$ に及び非鋭利な工具を用いても工具形状が切削仕上げ面に転写されることを報告(CIRP Annals, vol. 57, (2008)89-92)した。更に、切削時に凝着を生じる典型的な被削材として知られているステンレス鋼 SUS304 を各種工具を用いて切削し、得られた表面粗さに対して工作機械運動精度、工具表面粗さ、及び凝着の影響について要因分析を行い、通常切削されている条件下では、凝着による仕上げ面粗さ劣化は 1-2 $\mu\text{m}$ 程度でしかないことを示した(ASPEN2009, 2B5-1-5, (2009)).

凝着が工具寿命を短命化することについては、一般に凝着物が工具表面から脱落する際に工具母材をも持ち去る事だとされている(藤村著, 実用切削加工法, コロナ社(1980)). 工具と被削材との凝着は、工具表面への被削材構成物質の物理吸着ないしは化学吸着、吸着物質と工具構成物質との化学反応が素過程として考えられるが、前二者が相互の接近のみで生じるのに対して、化学反応のためには活性化エネルギーが必要となる上、凝着物脱落時に工具母材まで持ち去るためには、ある程度の深さに反応層が達している必要がある。活性化エネルギーの供給は切削時に生じる加工熱で十分と考えられる。しかしながら、反応層の厚さについては、反応層が構成元素の相互拡散により生じる(篠崎ら, 精密工学会誌, vol.66, (2000))とすると、拡散係数の大きさに比べ工具表面を切りくずが擦過する速度が速すぎるため、凝着したものが工具表面である程度の時間留まらなければ反応層は厚くなることができず、凝着物脱落時において大規模に工具損傷が生じるとは考え難い。このような事から、凝着物の安定性

が工具寿命を決定づけることが示唆される。

申請者らは、図1のように激しく凝着を呈する加工条件下でニッケル合金の連続旋削を行っても、図2のように加工仕上げ面は

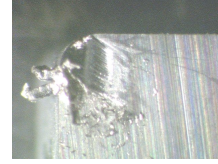


図1 激しい凝着の例(ニッケル合金旋削時)

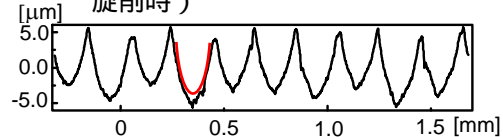


図2 仕上げ面断面曲線(図1と同一条件下で旋削)

極めて規則正しくなるという結果を得た。旋削における仕上げ面断面形状のそれぞれの谷部は旋削用工具が被削材を擦過しつつ削り取った後の形状を示すことになる。工具形状は図1の縦倍率・横倍率から考えると赤線で示した楕円形状となり、工具形状と仕上げ面断面形状を比べると、谷部は楕円より曲率が小さくなっており、この谷底部は工具刃先に某かが凝着し、この凝着物で削り取られた部分であると判断される。

これらのことから申請者は、切削仕上げ面断面形状と工具幾何形状との比較から凝着物の安定性を評価することを着想した。

### 2. 研究の目的

上記の様に凝着による加工仕上げ面劣化メカニズム及び工具寿命短命化のメカニズムを明らかにするためには、切削加工時に生じる凝着の挙動を明らかにすることが重要である。

このことから本研究では、仕上げ面形状と工具形状との相互相関ならびに仕上げ面形状同士の相互相関を求め、工具刃先に付着した凝着物の安定性(どのような条件下で凝着物が脱落するのか、成長・脱落過程)を実験的に調査検討することを目的とした。

### 3. 研究の方法

外周旋削加工を実施し仕上げ面を粗さ測定機で測定すると、上で示した図2のような断面曲線が得られる。通常、旋削加工では単一の工具刃先で被削材外周がらせん状に順次除去され切りくずが排出されるため、送り(被削材一回転あたりの工具移動量)に同期した山谷形状が出現する。このため、隣り合う谷形状は一回転ごとに工具によって形成された加工仕上げ面であり、ある箇所谷形状が隣の形状と異なる場合は、被削材一回転の間に仕上げ面生成に關与する工具刃先の形状が変化したことを示すことになる。今、工具刃先形状が楕円弧とすると、工具が摩耗等で損傷すると工具の先端が減るのであるから、その曲率半径は大きくなり、したがって得られる仕上げ面の谷部の曲率も大きく

なる。逆に、工具の刃先になんらかの凝着物が生じ、この先端が構成刃先のように実際の工具刃先に代わり被削材料を削り取るとすると、工具とその凝着物からなる先端は曲率が小さくなり、その結果仕上げ面の谷部も曲率が小さく尖った形状を呈することになる。このような考え方に従い以下のような手順で仕上げ面の断面形状を解析した。

旋削加工で得られる断面形状は上述のように一本のらせんになっているので、被削材の回転角度と切削開始点が判明すれば、どの部分が切削開始後何時切削されたかを同定することが可能となる。このため、被削材底面には分度器を貼り付け、被削材外周には回転方向に溝をあらかじめ設けておいた。溝の深さは、径方向切り込み量より深く設けられており、溝の壁を頼りに工具侵入点、離脱点を判定した。切削加工後、仕上げ面の断面プロファイルを被削材軸方向に測定した。

得られた断面プロファイルから図3に示す手順で凝着物の大きさを評価した。山の頂上部分は切りくずの分離や分離した切りくずの擦過等で変形する可能性があるため、断面プロファイルの山の頂上部分を除き、それぞれの谷に分割した。分割されたプロファイルと工具幾何形状とを最小二乗法を用いてフィッティングさせると同時にこれらの相互相関係数も求めた。工具のすくい角に応じて円弧切刃は楕円弧になるが、本研究ではこれも考慮に入れている。また、工具ホルダが切削抵抗によって撓むことにより、すくい角に変化が生じるが、たとえ $1^\circ$ すくい角が変化したとしても切刃形状の変化は数十ナノメートル程度しか変化しないことも計算で確かめている。フィッティング直後の仕上げ面谷部形状と工具の幾何形状は図3(2)で示されているように工具内部に仕上げ面が入り込むこととなるが、本研究では切削時間が短く、工具摩耗が生じない範囲で切削実験を行っており、工具の内部に仕上げ面が入り込むことは起こり得ないため、工具幾何形状が仕上げ面形状に内接するように工具幾何形状を上方へ移動させた(図3(3))。谷部の送り方向側の斜面は、一回転後、次の谷形成時に工具から送り方向と逆側に押され、倒れる可能

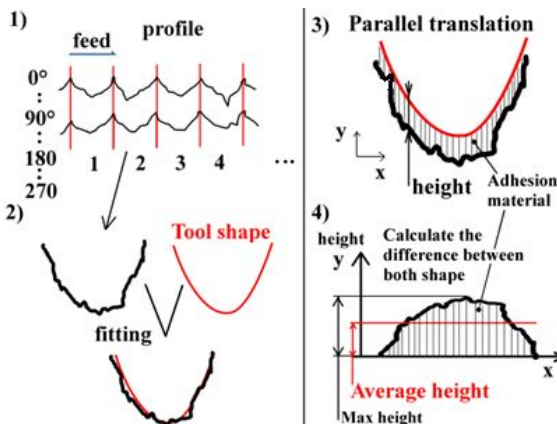


図3 断面プロファイルに基づく凝着量の評価

性があるが、本研究の範囲ではそのような結果は起こらなかった。また、工具形状との接点は殆どの場合において、送り方向と反対側の斜面であった。工具幾何形状を平行移動後、工具幾何形状の外側を凝着物と見なし、この差を求め凝着物の平均高さ、最大高さを求めた。各切削実験毎に実験後、工具を光学顕微鏡下で観察し、工具摩耗が生じていないことを確認した。

切削中に凝着物が脱落する際には、上記の方法で得られた断面プロファイル谷部同士の間隔を求めれば良い。一つの断面プロファイルには1回転ごとの谷形状が記録されているので、凝着物が不安定なものであるならば、各回転ごとの谷形状は大きく変化するはずであり、図2で示したような安定した谷部形状は切削中に凝着物の成長や大規模な脱落が起こっていないことを示すことになる。したがって、数本の断面プロファイルを取得し、一回転ごとの谷部形状が大きく異なる場合のみ、その間を細かく取得するようにして研究の効率化を図った。

断続切削では切削抵抗が断続的に働き、この衝撃によって凝着物が脱落することが十分に考えられる。このため、別途4分の3円柱形状(円柱の4分の1を除去した)被削材を作成し、これを外周旋削することにより断続旋削時の凝着物安定性を調査した。断面プロファイル等のデータ整理は前述のものと同じの方法で行った。

対象被削材は、凝着が生じ易いとされているオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)を中心に、一部、Ti6Al4V合金やニッケル基耐熱合金を用いて実験を行った。使用工具については、工具メーカー等で推奨されている工具を用いた。

#### 4. 研究成果

一般にオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)の切削には凝着が少なく仕上げ面も光沢が得られるサーメット工具やコーティング工具の使用が推奨されている。図4はサーメット工具(SNMN120408, チャンファ $0.110 \times 23^\circ$ )を用いてオーステナイト系

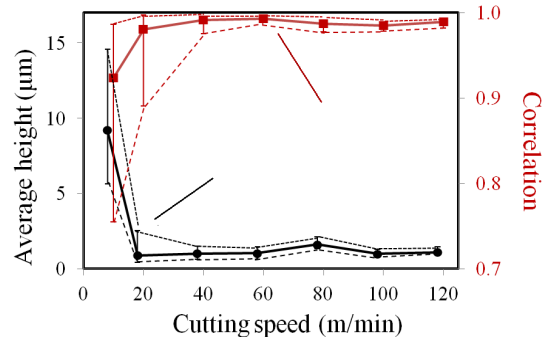


図4 オーステナイト系ステンレス鋼の旋削における凝着物平均高さ、工具幾何形状と仕上げ面谷部形状の相互相関係数



ステンレス鋼 (SUS304) を切削速度 10-120m/min で連続旋削した場合における工具幾何形状と仕上げ面谷部プロファイルの相互相関係数 (赤線) と凝着物平均高さ (黒線) を示したグラフである。いずれも四分の一等配した外周面の仕上げ面断面プロファイル測定し、10 周分の谷部を抽出して得られたものであり、グラフ中のエラーバーは 40 か所中の最大値と最小値を示している。

切削速度 10m/min の場合、大きな凝着物が観察され、工具幾何形状との相関も低くなった。切削速度が上昇するにつれ、凝着物は小規模のものとなり、結果、工具幾何形状と仕上げ面谷部形状との相関も増加し 1 に近づいているが、本実験の範囲では凝着物は小さくなるものの約 1 $\mu$ m より小さくはならず、このため工具幾何形状と一致するような仕上げ面谷部形状は得られなかった。

そこで再確認のために、工具の幾何学形状を測定し、この工具を用いて切削速度 100m/min にて再度切削実験を行い、谷部形状

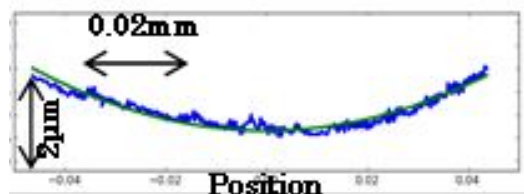


図 5 工具切れ刃の形状

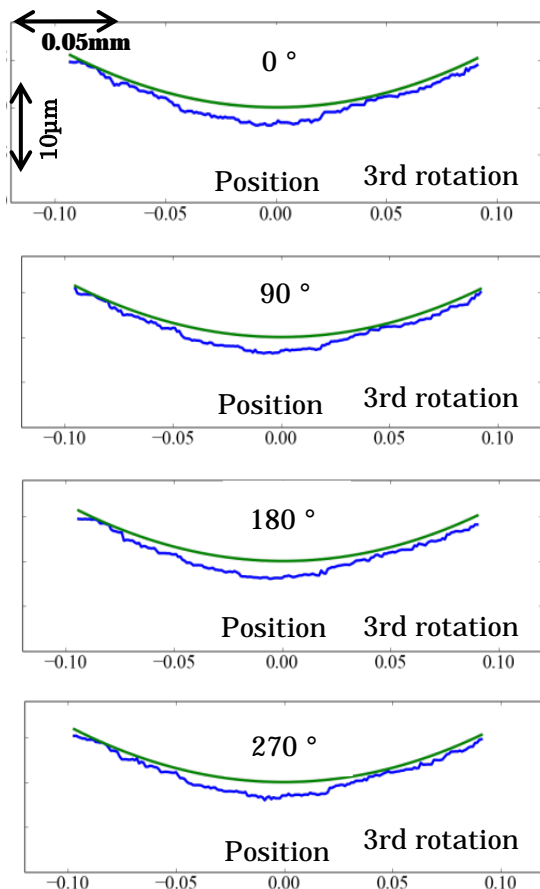


図 6 被削材 1 回転中の仕上げ面谷部プロファイルの変化

と幾何形状とを比較する確認実験を行った。図 5 に工具切れ刃の形状を示す。本工具はコーナ半径 0.8mm のものであり、幾何学的形状は緑線で示されている。実形状はこの幾何学的形状から最大で数百ナノメートルずれており、粗さと思われる短周期の凹凸と共に粒界と思われるやや長周期の凹凸の存在が窺われる。図 6 は、本工具を用いて切削速度 100m/min で旋削した場合の被削材 3 回点目で除去された仕上げ面谷部形状を被削材回転角度 90° 毎に示したものである。緑の曲線は工具幾何形状、青線が仕上げ面プロファイルである。仕上げ面プロファイルが幾何学形状と最大で 2 $\mu$ m 程度ずれていることが判る。図 5 と図 6 を比較すると、得られた仕上げ面プロファイルは工具の形状を忠実に転写しているとは判断できず、工具の表面に凝着物が存在し、この凝着物の先端が刃先の切削作用を代替していることになる。

以上のことから、本研究の範囲では切削速度が上昇しても凝着物はその大きさを減少させるものの工具表面からは消滅せず、切刃の代替として切削するいわゆる構成刃先として存在していることが新たに判明した。切削加工の教科書の多くは、炭素鋼切削における構成刃先は被削材の再結晶温度を超えると被削材の加工硬化性が失われ構成刃先も消失すると記載されている (例えば、中山、上原共著・機械加工、朝倉書店(1983)) が、本実験の範囲において、これとは異なる事実が判明し、切削加工における凝着ないしは構成刃先にたいするこれまでの知見を修正する必要が生じている。

図 7 に 40 か所 (4 か所  $\times$  10 回転分) の谷部プロファイル (青線) を重ね合わせて表示した図を示す。重ね合わせは工具幾何形状 (緑線) を基に行った。注目すべきは緑の工具幾何形状を示す曲線と谷部プロファイルを示す曲線群の間に挟まれた白色領域である。青の細線は各谷形状を示しているの、この白色領域は工具表面に凝着したものを示しており、規模は変化するものの各切削速度ともこの白色領域が存在するため、凝着物の成長や脱落は凝着物全体で行われるのではなく、凝着層のごく表面に近い部分の狭

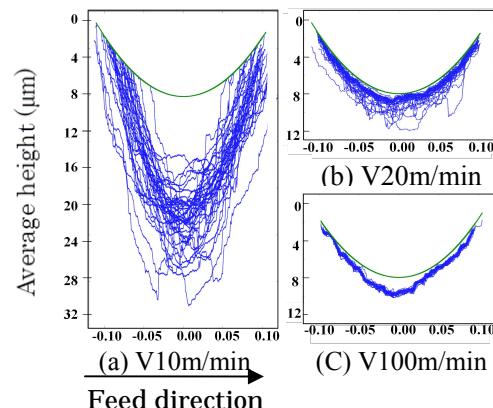


図 7 仕上げ面プロファイルの安定性

い領域で起こることが新たにわかった。切削速度順に見ると低切削速度である10m/minの場合は図4に示した結果と同様、工具に比較的大規模な凝着物が存在しており、谷部中央部から周辺に安定した凝着領域が広がっている。その上に不安定な凝着領域があり、この不安定領域内で凝着物の成長や脱落が生じていることがわかる。切削速度が上昇すると凝着層の安定領域は薄くなり、各プロファイルが狭い範囲で重なりあっているため、安定した凝着層が生じることが判る。このように凝着物の成長、脱落が比較的狭い範囲で生じる現象は、Ti6Al4V合金やNi基耐熱合金の旋削加工でも確認することができた。

断続旋削加工を行った場合、工具が被削材から離脱しても、切りくず端が工具に付着したままで、工具が再度被削材に侵入した際に工具から切りくずが離脱する様子が観察された。まれに工具が再侵入しても切りくずがそのまま工具に付着したままで新たに生成された切りくずとつながったまま排出される場合も生じた。動画撮影による観察の結果、断続旋削において切りくずは工具が再侵入した際に被削材と干渉し、この時働く外力で切りくずが工具から離れることがわかった。また、工具に付着している切りくずを工具が被削材から離脱し再侵入する間に強制的に排除し、断続旋削を実施したところ、切りくずが排除された場合、工具再侵入直後に生成される仕上げ面は乱れが少なく、切りくずが付着したまま切削が開始されると仕上げ面の乱れが多くなった。このことから凝着が生じても切りくずの排除がうまく実施されれば仕上げ面は劣化しないことがわかった。

図8に切削速度10m/minで断続旋削加工したときに得られた切りくず端部の裏面写真を示す。切りくず裏面は工具すくい面と接触している部分であり、観察部位は切削終了点で生成されたものである。図8を見ると工具に施されたチャンファと接触していた部分および工具すくい面に接触していた部分が明瞭に区別できる。本実験で使用した工具には、チャンファやすくい面に工具製造過程で付けられた筋状の研削痕が観察された。切りくずのチャンファ接触部及びチャンファ近傍のすくい面接触部を拡大観察した結果、工

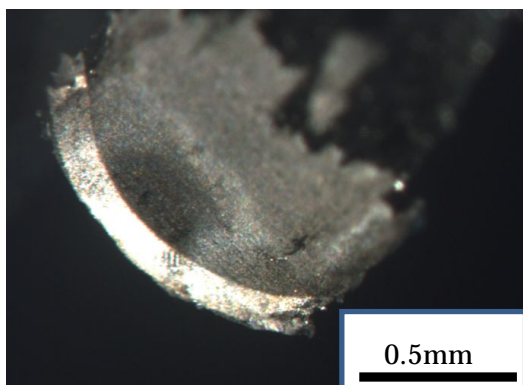


図8 切りくず裏面(切削終了端)写真

具の研削痕が転写されていることが確認された。したがって、工具に凝着している部分は切削中に工具すくい面上を滑ることなく、固着状態のままであることが判った。更に、この切りくずを樹脂埋め後、切りくず端部の断面を観察したところ、切りくずは凝着物の表面と分離しており、工具すくい面や切刃先端で分離していなかった。このことから、工具と凝着した材料は工具表面を擦過しておらず、切りくず生成は凝着物の先端で行われていることが示唆される。切削速度を上昇させた場合の切りくず端部も凝着物の大きさは小さくなるものの同様の様相を呈しており、凝着物を介して切りくずと工具が接触している可能性が高い。

上記のように本研究の結果、仕上げ面と工具幾何形状の差異に着目した切削中の凝着物の挙動は、従来行われた炭素鋼における構成刃先等の国内外の研究結果からイメージされているような、短周期で成長・脱落を繰り返すものではなかった。オーステナイト系ステンレス鋼、Ti6Al4V合金、Ni基耐熱合金の切削では、安定的に工具表面に凝着層が形成されており、この層の表面近傍が成長・脱落していることが新たに判明した。仕上げ面断面プロファイルの乱れは、不安定層の厚さに起因し、不安定層が薄くなれば良好な仕上げ面が得られることから、凝着の発生と仕上げ面の劣化は等価ではなく、不安定層の厚さと等価であることが判明した。凝着による工具寿命の低下は、凝着物が切りくず生成中も工具表面に留まり、切りくず生成にともなう切削温度をエネルギー源として滞留した凝着物と工具の相互拡散が起こることに起因することが判明した。また、従来切削モデルでは工具と切りくずが直接接触しており、接触界面の摩擦力を考えているが、工具と切りくずの間に凝着層の存在を考え、この凝着層と切りくずの摩擦を考える必要があるように示唆される。

本研究で実施した断続旋削実験から、断続旋削を行い、切りくず末端部の観察を詳細に行えば、凝着物の大きさや形状を把握することが可能であることが新たに判明したので、今後、この方法で各種材料の切削加工を行い、凝着物の大きさ形状と切削条件等の関連について調査する予定である。

##### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1件)

1. Katsuhiko Sekiya, Sachio Watanabe, Keiji Yamada, Ryutaro Tanaka, Yasuo Yamane, Stability of Adhered Material to the Cutting Edge of a Cermet Insert in Turning of an Austenitic Stainless Steel, Key Engineering Materials, vol. 656-657, 査読 有, 2015, pp363-368,

〔学会発表〕(計 7件)

- 1.渡辺祥央, 關谷克彦, 田中隆太郎, 山田啓司, 山根八洲男, チャンファが凝着物の大きさ・安定性に与える影響, 日本機械学会第10回生産加工・工作機械部門講演会, 2014年11月15-16日, 徳島大学工学部(徳島県・徳島市)
- 2.渡辺祥央, 關谷克彦, 山田啓司, 田中隆太郎, 山根八洲男, 断続切削における衝撃が凝着物の安定性に与える影響, 2014年度精密工学会秋季学術講演会, 2014年9月16-18日, 鳥取大学(鳥取県, 鳥取市)
- 3.Katsuhiko Sekiya, Sachio Watanabe, Keiji Yamada, Ryutaro Tanaka, Yasuo Yamane, Stability of Adhered Material to the Cutting Edge of a Cermet Insert in Turning of an Austenitic Stainless Steel, Int. Conf. on Machining, Materials, and Mechanical Technologies, 31th Aug. - 5th Sep. 2014, Taipei(Taiwan)
- 4.渡辺祥央, 關谷克彦, 田中隆太郎, 山田啓司, 山根八洲男, SUS304の連続旋削における凝着物の安定性, 2014年度精密工学会学術講演会, 2014年3月18-20日, 東京大学(東京都, 文京区)
- 5.關谷克彦, SUS304連続旋削時の凝着とその安定性, 第87回精密工学会難削材加工専門委員会, 2014年2月21日, ホテルチューリッヒ東方2001(広島県, 広島市)
- 6.渡辺祥央, 關谷克彦, 田中隆太郎, 山田啓司, 山根八洲男, SUS304の連続旋削における凝着物の安定性, 精密工学会中国四国支部学術講演会, 2013年11月30日, 広島県民センター福山(広島県, 福山市)
- 7.關谷克彦, 武田哲夫, 山田啓司, 山根八洲男, インコネル718旋削時における凝着物の安定性, 第9回日本機械学会生産加工・工作機械部門講演会, 2012年10月27-28日, 秋田県立大学本荘キャンパス(秋田県, 由利本荘市)

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

關谷 克彦 (SEKIYA KATSUHIKO)

広島大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号: 80226662