セラミック工具による炭素鋼の溝入れ切削*

越 智 秋 雄** 鳴 瀧 則 彦*** 津 村 喜 代 治**

Grooving of Plain Carbon Steel with Ceramic Insert Tools

Akio OCHI, Norihiko NARUTAKI and Kiyoharu TSUMURA

In order to investigate the grooving performance of ceramic insert tools, cutting test was conducted on low and medium carbon steel under various conditions. Wear patterns, wear rates and chip shapes were observed precisely and also acoustic emission (AE) signals in grooving were measured and analysed for the recognition of cutting state. Main results obtained were as follows: (1) The failure of ceramic tools in grooving operation largely depends on the generation and disposal of the chip, and segregation of tool rake face near the cutting edge easily occurs on brittle tools. In grooving low carbon steel, side flank face tends to break because of the adhesion of work material. (2) It is possible to use TiC added ceramic tools for grooving medium carbon steel. In this case, emulsion type cutting fluid works effectively to dispose chips and improve the surface roughness, but tends to increase the rake face chipping of the tool. (3) The measurement and analysis of AE signals during grooving operation helps to detect the chip forming condition or tool breakages, and it can be used as the signal of successful cutting.

Key words: ceramic insert tool, grooving, tool wear, plain carbon steel, cutting performance, acoustic emission

1. 緒 言

セラミック工具は、高硬度で耐熱性も高いため被削材の種類や加工方法によっては、極めて有効に使用されている。その反面、工具のじん性が低いことから断続切削等に対しては使用範囲が限られており、特に突切り、溝入れ加工にセラミック工具を用いた例は、若干の報告¹⁾を除いて、ほとんど見られない。セラミック工具を旋削加工のうちでも困難とされているこの種の加工に使用することができれば、加工能率を大いに向上させることが期待できる。本研究では、セラミック工具を用いて低および中炭素鋼の溝入れ切削試験を行い、工具形状、切削油剤、切削条件等と工具の切削性能との関連を調べ、セラミック工具が、どの程度これら被削材の溝入れ切削に適用できるかについて検討した。

2. 実験装置及び方法

実験は、高速旋盤（瀧澤鐵工所製、振り 560 mm、

心間 1 000 mm、主軸動力 DC 11 kW、7~3 000 rpm 無段変速）による丸棒の溝入れ切削で行った。工具は、市販のスローアウェイ型溝入れホルダに専用のセラミックチップを取り付けて使用した。工具材種は、主に鑄鉄切削用として市販されている白セラミック（純 Al_2O_3 ）および特注の黒セラミック（TiC 添加）の 2 種類とした。このチップは市販状態では、すくい角 0° の平面すくい面であるが、本実験では必要に応じて図 1 (a) のように、適宜ダイヤモンドホイールによってチップブレードやチャンファを施して使用した。さらに深溝切削用として、同図 (b) のように、すくい面を傾斜させたものも試作して使用した。被削材は、機械

Fig. 1 Geometries of ceramic grooving tools

* 原稿受付 昭和 62 年 4 月 17 日、昭和 58 年度精機学会春季大会学術講演会（昭和 58 年 3 月 27 日）にて発表

** 正 会 員 広島工業大学工学部（広島市佐伯区五日市町三宅 725）

*** 正 会 員 広島大学工学部（東広島市西条町下見）

Fig. 2 Experimental setup

構造用炭素鋼 S 55 C (HB=202), S 15 C (HB=122) の 2 種類で、大きさは直径 39 mm, 長さ 250 mm のものを用いた。また S 55 C については実用試験用として直径 78 mm, 長さ 500 mm のものも用いた。切削速度は, 125~200 m/min, 送り量は, 0.05~0.10 mm/rev の間で選択し, 図 2 のようにチャック側へ向かって, 直径 39 mm の被削材の場合で 20 回, 直径 78 mm の被削材の場合で 50 回の溝入れ切削を乾式あるいは湿式で繰り返し行った。湿式切削の場合, 油剤は JIS W 1 種 2 号 (エマルジョン型) のものを 10:1 で希釈し, すくい面上部より 2 l/min の割合で普通給油した。このような条件のもとに, 適宜, 工具損傷, 切りくずの形態, 仕上面粗さ等の観察, 測定を実施し, さらに代表的な切削例については, 加工状態を把握するために AE 信号の測定を行った。AE センサは, ジルコン酸チタン酸鉛磁器製, 共振周波数 1 MHz のもので, これを刃物台後部にマグネットホルダで取り付け, 出力をプリアンプ, ディスクリミネータを通してデジタルメモリーに記録, マイクロコンピュータにより周波数解析処理を行い, 結果を比較検討した。

3. 実験結果および検討

3.1 セラミック工具による溝入れ切削時の問題点

まず, 市販の白セラミックの溝入れ工具をそのまま使用して, S 55 C の溝入れ切削試験 (乾式) を行ってみたが, すくい角 0° の平面すくい面の工具では切りくずがほとんどカールせず, 工具両横の逃げ面 (バックテーパ部) に微小な欠損が多く発生しほとんど実用的な切削が不可能であった。こうした欠損は, 切りくずが被削材の溝側面と接触し, この部分で溶着物を形成して, これが溝と横逃げ面の間を通過するときに発生するものと思われる。そこで切りくずが溝に拘束されずに排出されるように, 工具のすくい角, ランド長さ, チャンファ幅, 切削条件を選択して, 深さ 3 mm の溝入れを行った。

Fig. 3 Wear progress curves of tested pure Al_2O_3 ceramic grooving tools
Grooving depth; 3 mm, $v=125$ m/min, $f=0.06$ mm/rev

この場合の工具摩耗進行曲線および損傷形態を図 3, 4 に示すが, 被削材の種類によらず, コーナ部やすくい面に大きな欠損が生じている。また S 15 C の場合には, やはり横逃げ面に明りょうな剝離型チッピングが見られるのが特徴である。さらに, 前逃げ面の工具摩耗幅も同材料を長手旋削した場合の同一切削時間の工具摩耗に比較²⁾して大きい傾向にある。したがって溝入れ切削のように, 切削が繰り返し行われ, 切りくずが溝に拘束されやすい加工では, 工具のじん性は重要な要素となり, 低じん性の白セラミック工具では, 連続型切りくずを生成する炭素鋼の溝入れ切削は, かなり困難であると判断できる。

3.2 黒セラミック工具による実用試験

3.1 節で述べた実験結果をもとにして, ① 工具材種をよりじん性の高い TiC 添加の黒セラミックとし, ② 横切れ刃の欠損を防ぐために, 横切れ刃を含む切れ刃全周にチャンファを施し, ③ カール半径 10 mm 程度の連続型切りくずが生成されるような切削条件, 工具形状を選び, ④ 切削油剤の使用を検討して, さらに実験を行った。

図 5, 6 は, S 15 C 及び S 55 C の直径 39 mm の丸棒

(a) S15C, after cutting 79 grooves (b) S55C, after cutting 51 grooves

Fig. 4 Wear patterns of tested pure Al_2O_3 ceramic grooving tools
Grooving depth; 3 mm, $v=125$ m/min, $f=0.06$ mm/rev

Fig 5 Wear progress curves of tested TiC added ceramic tools in grooving of plain carbon steel under dry and wet cutting conditions
Grooving depth; 3 mm
 $v=150$ m/min, $f=0.07$ mm/rev for 0.15% carbon steel (S 15 C)
 $v=125$ m/min, $f=0.08$ mm/rev for 0.55% carbon steel (S 55 C)

に深さ 3 mm の溝入れ切削を湿式、乾式の両条件のもとで行った場合の工具の前逃げ面摩耗進行曲線、および工具損傷形態の一例である。S 15 C の場合、S 55 C に比較して前逃げ面の摩耗幅は少ないが、乾式でも 104 回、湿式では 35 回ですくい面に欠損が生じている。このような欠損は後にも述べるように切りくずが分断する際に発生する衝撃によるものと思われる。また S 15 C の場合には横逃げ面に摩耗が大きく生じているのが特徴で、これはすでに述べたように、切りくずの両側に生成する溶着物が溝側面と工具横逃げ面とのすきま（バックテーパ部）に入り、これが擦過することにより発生するもので、特に低炭素鋼では切りくずと溝側面との溶着が激しいために起きるものと考え

られる。また S 55 C の場合、乾式ではほとんど工具の損傷は見られず、240 回の切削後でも前逃げ面摩耗幅は 0.2 mm に達しないため引き続き十分切削可能な状態であるのに対し、湿式の場合はその半分の 120 回ですくい面に剝離が集積し、切削不能となっている。

セラミック工具のような熱伝導性の低い工具は水溶性切削油のような冷却効果の高い油剤を使用した場合には、工具表面が急冷されて割れが発生しやすいとされている。黒セラミック工具は一般に油剤の使用が可能とされているが、繰返し溝入れ切削の場合には、切削による加熱、冷却が繰返され、それに油剤の供給、停止が加わるため、工具表面に微細な剝離が発生し、これが集積して、短時間で切削不能になるものと推察できる。また S 15 C の場合には、油剤を使用すると切削自体は円滑になるが、冷却された硬い切りくずが分断する際に衝撃で工具欠損が生じる傾向が強い。S 55 C の場合には、本来ブレーカの効果が少なく、また S 15 C に比較して切りくずの強度が大きいため分断は生じず、油剤の供給によって乾式の場合よりかなり円滑な切りくずの排出が可能となる。

次に、図 7 にこの乾式および湿式切削時の各被削材の溝側面の状態ならびに仕上面粗さを示す。S 15 C の場合、乾式では先に述べた溶着物が多数付着し、 R_{max} も $20 \mu\text{m}$ を超えている。湿式切削の場合、この付着物は減少するが、粗さは乾式の場合と大差無いようである。S 55 C の場合、S 15 C に比較して工具への溶着性が低いことから、付着物はほとんど見られない。乾式ではそれでもところどころに $10 \mu\text{m}$ 程度の凹凸が存在するが、湿式では $R_{max} 2\sim3 \mu\text{m}$ 程度の良好な仕上面が得られ、この点でも湿式切削が有利となる。

以上のように、セラミック工具による炭素鋼の溝入れ切削では、切りくずの形態が工具欠損の最大の要因となるので、カール半径が 10 mm 程度の連続型切りくずを生成させることが重要である。またセラミック工具で低炭素鋼の溝入れ切削を行うためには切りくずの形態、溶着物等、多くの問題があることが明らかになった。

そこで、比較的良好な結果が得られた S 55 C を被削材として、さらに溝深さを増した実用切削試験を行った。被削材直径は 78 mm、溝深さは 10 mm で、乾式切削では切りくずの排出が困難と思われた

Fig 6 Wear patterns of tested TiC added ceramic grooving tools
Grooving depth; 3 mm
 $v=150$ m/min, $f=0.07$ mm/rev for 0.15% carbon steel (S 15 C)
 $v=125$ m/min, $f=0.08$ mm/rev for 0.55% carbon steel (S 55 C)

Fig. 7 Comparison of surface finish and roughness of groove side after cutting 5 grooves

Grooving depth; 3 mm

$v=150$ m/min, $f=0.07$ mm/rev for 0.15% carbon steel (S 15 C)

$v=125$ m/min, $f=0.08$ mm/rev for 0.55% carbon steel (S 55 C)

ので、湿式切削を主とした。その場合の工具摩耗進行曲線を図8に、損傷形態を図9に示す。しかし図8, 9 (a) よりわかるように、溝深さ5 mm 程度を超えると切りくずの安定した排出が困難となり、切削終了後溝に残存した切りくずや他の溝にからみつけた切りくずが、工具を溝から離脱させる間にすくい面に衝突して大きな欠損が生じてしまう。そこで、切りくずを積極的に排出させるための一手段として、切れ刃およびすくい面を水平より2° 傾斜させた工具を試作して実験を行った。この工具では、切りくずが同心円状にカールせず、またその切りくずが心押台側あるいは主軸側へ導かれるので、この実験のように丸棒に多数の溝が入った被削材形状の場合には、切りくずがその溝に巻き付くことや逆にチャックのつめに巻き付くことが積極的に防止できる。しかし、この工具形状の場合でも乾式切削では切りくず半径が大きくなることが時々みられ、先に述べたような切りくずの衝突が発生し図9 (b) のような欠損が生じやすいので、やはり湿式切削

Fig. 8 Wear progress curves of slanted rake TiC added ceramic tools in grooving of 0.55% carbon steel (S 55 C) under practical condition

Work diameter; 78 mm, Grooving depth; 10 mm, $v=125$ m/min, $f=0.08$ mm/rev

を行った。その結果、図8のように70~90回の切削が十分可能となった。この場合、前逃げ面の摩耗幅は0.15 mm 前後であり、全く問題とならないが、図9 (c), (d) からわかるように、すくい面には微小な剝離が多数観察される。これは水溶性切削油剤の供給によりすくい面が冷却されることにより生じるものと思われるが、図7の場合と比較すると溝1回あたりの切削時間が長く、加熱、冷却のサイクルがゆるやかとなり、剝離の大きさが減っているものと思われる。したがってこのような条件設定のもとではセラミック工具による溝入れ切削の可能性が残されているといえる。

Fig. 9 Wear patterns of TiC added ceramic tools in practical grooving test of 0.55% carbon steel

Work diameter; 78 mm, Grooving depth; 10 mm, $v=125$ m/min, $f=0.08$ mm/rev

Fig. 10 Power spectrum of AE signal measured in typical grooving test of plain carbon steel
Vertical axes are arbitrary scale for comparison

3.3 AE 信号による溝入れ切削状態の把握および総括

これまで述べたように、セラミック工具による炭素鋼の溝入れ切削は、工具の性格上、通常の超硬工具では問題とならないような、切りくずの生成状態や形態を十二分に考慮する必要がある。この点については、実際に工具を試作して切削試験を行い、切りくずを観察する必要があるが、さらに積極的に切削状態の認識³⁾を行うことができれば、より有利な工具や切削条件の選択が可能になる。ところが、比較的簡便なひずみゲージ式の切削動力計による切削抵抗の測定では、溝と切りくずの摩擦状態や湿式、乾式切削の差異等は明確に観察しにくい。そこで、近年工具の欠損検出に利用されている AE 信号を利用して、溝入れ切削状態の認識を行うことを試みた。

図 10 に代表的な切削例について測定した AE 信号を周波数解析した結果を示す。

まず、最も切削困難な S15C の乾式切削の場合、10~100 kHz 程度のところに数か所のピークが見られ、切りくずと溝との接触や堆積物と工具との摩擦が激しいことが推察できる。この S15C を湿式切削した

場合が (b) であるが、20~100 kHz のピーク数やパワーが減少し、切りくずの生成排出状態が変化していることがわかる。さらに、(c) は最も円滑に切削できる S55C の湿式切削の場合であるが、20~100 kHz のパワーがほとんど見られず、良好な切削状態を示しているものと考えられる。また、100~300 kHz のバンドパスフィルタを用いて工具が欠損したときの突発的な信号を解析した場合には、(d) のように 100 kHz 以上の高域のピークが多数観察され、一般的な工具欠損検出時の状態とよく一致している。

このように、溝入れ切削の場合には、加工中の AE 信号の周波数解析を行うことによってある程度切削状態を認識でき、円滑な切削が可能かどうかを判定し、工具試作の一助とすることができるものと思われるが、切りくず、工具、被削材が複雑に接触しあう加工状態であるため、この方法を確立さ

せるためには信号測定法、分析手法、ノイズ対策などさらに検討を加える必要も残されている。

以上の実験結果から、セラミックのような高硬度低じん性の工具を炭素鋼の溝入れ切削に使用するには、工具材種、工具形状、切削油剤等、多くの問題があることが明らかとなったが、それでも S55C のような比較的炭素量の多い、つまり長手旋削でも良い結果が得られるような被削材の場合には、ある程度セラミック工具を活用できるものと考えられる。しかし、本実験の範囲では、超硬工具と比較して必ずしも有利であるとはいえず、セラミック工具がこの分野に適応していくためには、工具材種として、① 切りくず衝突による欠損に耐えるだけのじん性、② 水溶性切削油剤の使用に十二分に耐え得る特性、③ 積極的に切りくず排出を行うための曲面すくい面工具が焼結成形できること等の改善が必要と思われる。また切削条件の面では、工具の特性を活かす 200 m/min 以上の切削速度の利用と、その際の切りくず処理を検討することが必要となる。

4. 結 論

セラミック工具による炭素鋼の溝入れ切削試験を行い、工具損傷、仕上面粗さ等について検討した結果、次のようなことが明らかになった。

- (1) 溝入れ時のセラミック工具の損傷は切りくずの生成状態と密接な関連があり、じん性の低い工具ではすくい面の欠損が生じやすく、また低炭素鋼では溶着物による横逃げ面の損傷が発生する。
- (2) じん性の高い黒セラミック工具を用いれば、S55Cのような中炭素鋼では溝入れ切削が可能となる。この場合、水溶性切削油剤を用いれば安定した切りくずの排出や、仕上面粗さの向上が可能になるが、工具すくい面には剥離型チップングが発生する。
- (3) 溝入れ切削中の AE 信号を測定することにより、切削状態の認識や工具欠損の検出がある程度

可能となり、切削可否の判断の一手段として利用できる可能性がある。

謝 辞

本実験に使用した被削材は川崎製鉄(株)に御提供いただいたもので、関係各位に御礼申し上げます。また実験に熱心に協力された、当時の広島工業大学4年生、秋山治彦、古川耕三、中原修二、香川彰彦、三宅学、佐藤誠各君に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 上神謙次郎, 玉村謙太郎: セラミック工具の溝入れ, 突切り切削における気体噴射効果, 昭和56年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集(1981)103.
- 2) 鳴瀧則彦, 村越昭男: セラミック工具の摩耗に及ぼす鋼材中の微量介在物の影響, 精密機械, 42, 3 (1976) 221.
- 3) 上原邦雄, 神田雄一: アコースティックエミッションによる切削状態の認識, 昭和57年度精機学会春季大会学術講演会論文集(1982)746.

(p.358より続く)

このように、わが国の科学技術の国際化の現状について、全体を通じてみると、国際化を促進するための仕組みはさまざまな形で存在しているものの、研究者交流、情報交流などの面での施策を一層充実させる必要がある。

なお、企業のみた日本の科学技術の国際化への対応では外国との人材交流の拡大、国際公共財としての先端基礎科学の産出をあげた企業がそれぞれ40%を超え、次いで国際的に魅力ある国内研究機関の整備が35%を占めた。

第4章 わが国科学技術の国際化へ向けての課題と展望＝基礎的研究の強化などを通じて、科学技術水準の向上に努め、海外の研究者が日本で研究活動に従事することを希望するような状況をつくり出す必要がある。

それと同時に、一層開かれた仕組みや制度を確立し、国際化時代にふさわしい科学技術推進体制を築き上げることが望まれる。さらにこれを実現させるためには、研究者交流の充実、研究環境の改善、研究機関情報の提供、外国人研究者用宿舍の整備などの充実を図らなければならない。

そのうえで、公共財的性格を有する基礎的研究の強化に基づく国際的レベルの成果の創出、人類にとつての共通課題や地球規模の課題への科学技術面での貢献、発展途上国への技術移転の促進など、世界的な科学技術の安定かつ健全な発展に寄与していくことが肝要となっている。

第2部、第3部省略。

(服部 敏夫)

企業がみた日本の科学技術の国際化への対応