切削における刃先での分離作用に関する研究(第1報)*

—分離作用での破壊現象における介在物の役割—

金 枝 敏 明** 津 和 秀 夫***

Study on Separation Process at Tool Tip in Metal Cutting (1st Report)

—The Role of Inclusion on Fracture Phenomena in Separation Process—

Toshiaki KANEEDA, Hideo TSUWA

Surface generation mechanism in metal cutting is composed of two processes. They are separation process at tool tip and burnishing process at clearance face, the former is deeply concerned with surface finish. Therefore, it is very important to analyse the separation process microscopically. In this report, first, the effect of inclusions which initiate ductile fracture on fracture phenomena in the separation process is experimentally investigated. Furthermore, the effect of metallurgical factors such as grain boundary and the second phase, and machining factor such as depth of cut and rake angle are also analysed. The results show that there exist fracture phenomena even in the separation process of continuous chip formation in fine cutting of the ductile materials such as aluminum, low carbon steel, pure iron and armco iron. Inclusions contained in work materials cause micro and macro cracks which propagate along the maximum shear stress direction. The surface finish is damaged by fracture phenomena of various types depending on the relative position of the inclusions to that of the cutting tip.

1. 緒 言

切削機構の研究の歴史は古く、Merchant 以来数々の研究がなされ幾多の成果が得られている。ところがこれらの多くは、切りくず生成機構の立場からの研究であり、加工によって作られる品物を重視する場合には、仕上面生成の観点からの切削機構を明らかにしなければならない。現在までこのような研究¹⁾は少ない。

ところで仕上面生成機構の本質は、工具刃先での分離作用および工具逃げ面でのバニシ作用であり、両者のうち仕上面精度を直接支配すると考えられるのは、分離作用である。したがってこの分離作用について微視的な観点から、その機構を明らかにしなければならない。

分離作用のメカニズムは本質的には一種の破壊現象と考えられ、流れ型切りくず生成の微小切削においても、分離作用における破壊現象の規模やその際のクラックの形状によっては、仕上面が大きく乱れるとも考えられる。そこで本報では、まず流れ型切りくず生成の微小切削時の分離作用での破壊現象を炭素鋼 SS 41 と純アルミニウム A 1070 を被削材に用いて調べた。次いで延性破

壊で主要な役割をなす介在物の破壊現象に及ぼす影響を炭素鋼、アームコ鉄および純鉄を用いて調べ、さらにそれらの結晶粒界、第二相であるパーライト相等を材料学的因子として、また工具-被削材の相互作用の結果生じる応力場、その差異の原因ともなる切込みとすくい角の変化を力学的因子として二次的に取上げた。これらのことを二次元切削の極低速モデル実験を行って実験的に検討した。

なおここで対象とする破壊現象は、微小切削時に生ずるものであり、その規模は $1\ \mu\text{m}$ 以上のもので、転位レベルのオーダーのものではない。

2. 実験装置および方法

実験装置には、切削過程が外乱を受けないような高い剛性を有し、微小で精確なテーブルの位置決めができるフライス盤を用いた。テーブルの駆動は、フライス盤内部のモータからの振動や熱的影響を除くため、本体から分離したモータにより行い、二次元切削を実施した。また切削過程中的変形挙動を把握するため、モータのスイッチ切換えによる発電制動で切削の急停止[†]を行った。

被削材には展延性のよい面心立方金属の純アルミニウム(純度 99.7%) A 1070、介在物を多く有し第二相(パーライト相)が存在する炭素鋼 SS 41、第二相がなく炭

* 原稿受付 昭和 53 年 2 月 13 日。昭和 50 年度 精機学会 関西地方定期学術講演会(昭和 50 年 6 月 19 日)にて発表。

** 正 会 員 岡山理科大学(岡山市理大町 1-1)

*** 正 会 員 大阪大学工学部(吹田市字山田上)

† 急停止までの切削距離は測定の結果 $100\ \mu\text{m}$ であった。

表1 被削材と工具の諸元

被削材	工具材種	刃先丸味半径 (μm)	切れ刀稜の粗さ ($R_{\text{max}}/\mu\text{m}$)	すくい角 ($^\circ$)	逃げ角 ($^\circ$)
炭素鋼 SS 41	高速度鋼	3.5	1.5	15 25 35	5
アームコ鉄	超硬	2.5	1.0	20	5
純鉄 (99.9%)	超硬	2.5	1.0	25	5
純アルミニウム A 1070 (99.7%)	ダイヤモンド	0.1 以下	0.1 以下	20	7

表2 切削条件

被削材	工具材種	切削速度 (mm/min)	切込み (μm)	切削油剤
炭素鋼 SS 41	高速度鋼	30	10~100	一部に CCl_4
アームコ鉄	超硬			
純鉄 (99.9%)	超硬			
純アルミニウム A 1070 (99.7%)	ダイヤモンド		10~60	JIS 2 種

素鋼の主成分である鉄からなる純鉄およびアームコ鉄を使用した。

工具は高速度鋼工具 SKH 4 を主として用い、さらに超硬工具 P 10、ダイヤモンド工具を用いた。高速度鋼工具は大きいすくい角が取りやすいこと、ダイヤモンド工具は、精密加工に適している純アルミニウムの精密切削用として採用した。微小切削では、刃先の丸味および粗

さが重要な影響を及ぼすので、その研摩は特に入念に、しかもその都度一様な仕上になるように留意した。その結果、各工具の切れ刃の状態は表1のようになり、それゆえ高速度鋼工具と超硬工具の幾何学的形状の切削現象に及ぼす影響は、今回の実験条件内ではほぼ同様なものと考えられる。

また切削速度は、熱的およびひずみ速度の影響の少ない極低速²⁾の 30 mm/min で、切削油剤は、すくい角の小さい工具で炭素鋼を切削する際に、構成刃先の発生を防止するため四塩化炭素を、また純アルミニウムに対しては、過切削現象を防止するため不水溶性の極圧油 JIS 2 種を使用した。表2に切削条件を示す。

3. 実験結果ならびに考察

3.1 クラックの発生起源および形態

まず炭素鋼 SS 41 の切削実験を行い、試料の切りくず裏面-仕上面の分岐点の観察を行った。その結果、分岐点にはクラックが認められた。さらにそのクラックの発生状態を調べるため切削部の断面を研摩した結果、図1(a)のように刃先先端近傍からせん断面方向に長さ約 40 μm のクラックが発生しており、クラック先端近くにはほぼ球状の粒子があり、粒子の周りにはボイドが存在していることが明らかとなった。これを詳細に

(a) 切削主要部

(b) クラック拡大図((a)の白枠内)

被削材: SS 41, 工具: SKH 4, すくい角 $\alpha=25^\circ$, 逃げ角 $\delta=5^\circ$, 切込み $t_1=24 \mu\text{m}$, 切削速度 $V=30 \text{ mm/min}$

図1 炭素鋼切削時に発生したクラック(断面図)

(a) 切削主要部

 $t_1 = 35 \mu\text{m}$, 他の切削条件は図1と同じ

図2 炭素鋼切削時に発生したクラック

(b) クラック拡大図((a)の黒枠内)

観察すれば図1(b)に示すようになり、クラックはその先端付近のボイドと刃先先端との間に存在する2,3の微小なボイドらしきものをつなぐような形で階段状になっている。また切りくずの工具すくい面側では、刃先で生じたと考えられる長さ $10 \mu\text{m}$ 以上のクラックが見られ、工具すくい面での摩擦によっていずれも強く弓状に変形している。また切りくず内部にも前述と同様な粒子とボイドが存在し、その周りには強いせん断作用により微小なクラックが発生していることが認められた。

そこで前述のボイド中の粒子の成分をX線マイクロアナライザによって分析した結果、図1(b)のボイド中の粒子はMn-O系の介在物であることが明らかとなった。

また図2(a)でも刃先先端から長さ約 $50 \mu\text{m}$ のクラックが見られる。この場合も図1と同じくクラック先端付近に介在物とその周りにボイドが見られ、形状はやはり階段状になっている(図2(b))。しかし全体の形状は図1の場合と異なり、刃先先端からいったん切削方向に対し斜め下方に向き、その後方向を上向きに変え、せん断面方向に平行している。またクラックの下端は、切削予定面より下方に達している。

なお図1と図2のクラックの形状は異なっているが、観察の時期が違うだけで、ほぼ同様の形状で本質的には同一の機構で発生したものと思われる。すなわち、図1のクラックは図2のような形状で発生した後、さらに切

削が進んだ状態で観察されたものと考えられる。また図2のクラックの方向は、臼井らのすべり線場理論で求められた第二すべり線³⁾の方向と一致している。このことからこれらのクラックは、刃先先端近傍から最大せん断応力方向に発生したものと考えられる。

3.2 力学的要因と材料学的要因による影響

3.1節で述べたクラックは、介在物と応力場という材料学的要因と力学的要因とが重なって発生したものである。そこでこれらの二大要因の影響について検討する。

3.2.1 力学的要因による影響

切込みおよびすくい角の影響について検討した。切込みの影響を $13 \sim 60 \mu\text{m}$ の範囲で調べたところ、切込みが大きいと刃先で生じたと考えられるクラックが多い。これは変形領域での応力の静水圧成分の減少⁴⁾のため、ボイドの増大や破断延性の減少による微小クラックの発生およびクラックへの増大等が顕著になると考えられ、さらにその傾向は、せん断面上の垂直応力が正(引張り)に転化しやすい⁵⁾ということ等により助長されるものと思われる。

またすくい角の大小による影響を $15 \sim 35^\circ$ の範囲で検討した結果、すくい角が小さいものは刃先で生じたと考えられるクラックの多いことが明らかとなった。一般にすくい角が小さいとせん断ひずみが増大することおよびせん断面上の垂直応力が刃先点近傍で正(引張り)になること⁶⁾等により、このような傾向を示すものと思われる。

3.2.2 材料学的要因による影響

炭素鋼の主成分である鉄だけからなる高純度(99.9%)の純鉄の切削実験を行って、介在物の影響について検討した。その結果、純鉄中には介在物が非常に少なく、かつ存在していても非常に小さいため、クラックの核とはなり難く、実験の範囲ではクラックは観察されなかった。

また炭素鋼と第二相がなく介在物を有しており、炭素鋼の主成分である鉄からなるアームコ鉄を切削し、第二相である炭素鋼中のパーライト相および結晶粒界の影響を検討した。

工具: 超硬P 10, $\alpha=20^\circ$, $\delta=5^\circ$, $t_1=25\mu\text{m}$, 他の切削条件は図1と同じ

図3 アームコ鉄の切削部の断面

その結果, 図3に示すようにアームコ鉄の切りくず中の介在物(X線マイクロアナライザによる分析の結果, Al-OおよびSi-Oからなる)の周りには, 転位の集積によるボイドの形成ならびに微小クラックへの進展が見られるが, 炭素鋼の場合のように大きなクラックには進展していないことが明らかとなった. 一方, 図4は炭素鋼の切りくずで, このようにすくい面側のクラックはボイドから進展してパーライト相(第二相)境界および結晶粒界に沿って伝播していることがわかる. このような傾向は他の炭素鋼試料でも確認された.

3.3 介在物を核とするクラックの発生, 成長過程と仕上面生成のモデル

3.1 および3.2節で調べたクラックの発生, 成長過程

図4 炭素鋼の切りくずすくい面側のボイドと微小クラック

の観察結果から, それらの機構とそれの場合の仕上面生成機構とをモデル化したものを図5に示す. まず切削が進行し, 被削材中の介在物が塑性変形領域に入ると(同図(1)→(2)), 介在物がすべりの障害物として働き, 転位の集積によりその周りにボイドが形成される. 介在物がせん断領域に近づくにつれ, 母材との塑性変形能の違いによってボイドが成長し, 両端には強いせん断作用により微小なクラックが発生する. そのときの介在物周辺の応力の方向を(2)にあわせて示す. 介在物がせん断面上に達したとき, 介在物周りの微小なクラックと刃先先端近傍との間に, クラックが第二すべり線に沿って(最大せん断応力方向), (3)のような形状で発生する. もちろんこの場合には, 介在物と刃先との間にはより小さな介

図5 介在物を核とするクラックの発生, 成長過程とそれによる仕上面生成機構

在物もしくは結晶粒界, 第二相との境界等が存在する。切削が進み刃先が(4)の位置になると, クラックは切りくず側の面側と仕上面側に分かれる。次に, 切りくず側のクラックは再溶着と工具側の面での二次変形を受け, また仕上面上のそれはパニシされ(5)のようになり凹部が残る。さらに切削が進むと切りくず側のクラックはいっそう圧縮され, (6)のようになる。

したがってこの場合の仕上面生成機構は, 介在物周りの応力集中→ボイド発生→せん断による微小クラックの発生→刃先までの大きなクラック発生→工具逃げ面でのパニシというパターンをとる。よってこの破壊のメカニズムは面内せん断のき裂モードII型の延性破壊であると考えられる。

3.4 切りくず中のクラックと仕上面上の凹部との対応

クラックは最大せん断応力方向に発生していると考えられるので, 図5-(5)のように当然仕上面上に悪影響を及ぼす。そこで図1(a)で見られた切りくず中のクラックと仕上面上の凹部とでそれらの対応を確認した。図1(a)中のせん断面方向に発生しているクラックは, すべり線場での第二すべり線方向に沿っているので刃先直下に凹部があり, また切りくず側の面側のクラックと仕上面上の凹部とは, 図中の①-①', ②-②', ③-③'のように対応がつく。

また切削実験後に, 切りくず裏面, 仕上面およびそれらの分岐点を観察したところ, 切りくず裏面のクラック(ボイドとも考えられる)と仕上面上の凹部とが対応つくものとつかないものとが存在した。これは介在物, その周りのボイドと工具刃先との相対的位置の違いにより生じたものと思われる。

そこでその相対的位置の違いにより, 仕上面上どのような損傷を与えるかを走査電子顕微鏡写真により分類し, モデル化したものを図6に示す。なお図中(1)は前述の図5の場合である。介在物が図中(3)の切削予定面上にある場合は, 介在物の破砕も行われ仕上面を乱す。また(1), (2), (4)のように切削予定面上に無く, それよりも上もしくは下に存在しても, ボイド発生→クラック発生という過程で仕上面上に凹部を残し, 仕上面が乱れる場合がある。なお図中の(1)→(4)につれて, 介在物の位置が切削予定面上より上から下へとなり, (1)を除き番号が大きくなるほど仕上面上への損傷も大きくなる。そしてこれらの破壊のメカニズムは, (3)はき裂モードI型の開口型で, それ以外の(1), (2), (4)はき裂モードII型の面内せん断型の延性破壊である

図6 介在物と工具刃先との相対的位置の違いによる仕上面損傷形態の差異

被削材: A 1070, 工具: ダイヤモンド, $\alpha=20^\circ$, $\delta=7^\circ$, $t_1=25 \mu\text{m}$

図7 純アルミニウム切削時の分岐点近傍のクラック

と言える。

また, これらのモデル図(図6)による仕上面生成機構は, 炭素鋼はもとよりアームコ鉄, 純鉄さらには純アルミニウム, 七三黄銅, 純銅においても確認された。例えば図7に, 純アルミニウムの分岐点近傍に見られたクラックを示す。分岐点から仕上面にかけて長さ約 $30 \mu\text{m}$ の楕円の連なったような形状のものが見られる。このように展延性のよい面心立方金属である純アルミニウムにおいてもクラックが見られる。この図7の仕上面生成機構は図6の(4)に相当するものと考えられる。

以上の結果は、すべて極低速切削実験によって得られたものである。実用の切削速度領域では、切削温度上昇による被削材の塑性変形能の上昇により、クラックは発生しにくくなるものと考えられる。したがって上述の結果が得られるかどうかは不明であり、今後の検討課題である。

4. 結 論

切削加工の分離作用での破壊現象における介在物の役割を極低速二次元切削のモデル実験により検討した結果、次の結論を得た。

- (1) 面心立方金属の純アルミニウム、体心立方金属の純鉄、アームコ鉄、炭素鋼で流れ型切りくずを生成する微小切削においても分離作用でクラックが生じ、それには介在物が主要な役割をなす。
- (2) 切削厚さやすくい角の介在物周りの破壊現象への影響は、次のように説明できる。切削厚さが増大すると応力の静水圧成分の減少によるボイドの増大および破断延性の減少をもたらす。またすくい角が減少するとせん断ひずみが増大すること等によって、介在物周りのボイドが微小クラックに進展しやすくなる。さらにいずれの場合も刃先点近傍で垂直応力が正(引張り)に転化しやすいため、刃先から大きいクラックが発生しやすくなる。
- (3) 被削材中の第二相と結晶粒界は一種の応力集中源であり、塑性変形能の違いによってできた介在物周

りのボイドやその発展した微小クラックが、大きなクラックとなる場合の伝ば経路となる。

- (4) 介在物が切削予定面上にあれば、介在物が刃先に近づくにつれボイド形成→微小クラックの発生となり、最終的には刃先による介在物の破砕が行われ、さらに仕上面が乱れる。これは開口型のき裂モードI型の延性破壊である。
- (5) 介在物が切削予定面上よりも上もしくは下であってもボイド形成→微小クラックの発生が行われ、応力場によってはさらに刃先からのクラック発生という過程をとり、仕上面を乱す。これは面内せん断型のき裂モードII型の延性破壊である。

終わりに当たり、研究の遂行に終始助言を賜った大阪大学工学部難波義治、大森義市先生に、また実験に協力された清家健夫氏(当時大阪大学学生)に深く感謝の意を表します。また試料の研磨に便宜を計らって頂いたウインゴー株式会社に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 例えば、垣野義昭：京都大学学位論文(1972)。
- 2) 臼井英治、牧野亮哉：低速流れ形切削における応力、ひずみ分布、精密機械、**33**, 4 (1967) 245。
- 3) 臼井英治：切削研削加工学、上、共立出版(1971) 74。
- 4) 3) の p. 24。
- 5) 3) の p. 77。
- 6) 牧野亮哉：低速流れ形切削における応力、ひずみ分布(続報)、精密機械、**39**, 3 (1973) 323。
- 7) 横堀武夫：材料強度学、技報堂(1974) 78。