機械構造用炭素鋼の切りくず形態に及ぼす鉛の影響*

渡 里 宏 二** 藤 原 順 介*** 岩 見 潤†

Effect of Lead Inclusion on Chip Formation of Carbon Steels for Machine Structural Uses

Koji WATARI, Junsuke FUJIWARA and Jun IWAMI

The orthogonal cutting test was carried out on two structural steels, namely Fe-0.5%C-0.2%Si-0.8%Mn-0.1%Cr containing 0.16%Pb or non-Pb. The chip formation was transferred from shear type to flow type and the cutting force was reduced by the addition of Pb. The lead observed in the shear zone of the chip exhibited a thin string-like morphology, suggesting the ductile and very deformable characteristic of Pb. Those results indicate the major cause of the flow type chip formation. The shear angle can be maintained in the Pb-added steel because of the deformation concentrated on lead particles at the primary shear zone. In the case of low cutting speed conditions, the effect of Pb on machinability mainly reduces shear force in the primary shear zone. As for the lower friction coefficient between tool and chip, the effect of decreasing the cutting force is small.

Key words: orthogonal cutting, lead inclusion, chip formation, carbon steel, machinability

1. 緒 言

鋼材に添加される代表的な快削元素として、「鉛(Pb)」や鋼中でマンガン硫化物(MnS)を形成させるための「硫黄(S)」が挙げられ、それぞれ「鉛快削鋼」、「硫黄快削鋼」と呼ばれ機械構造部品の加工性改善の目的で広く使用されている。これら快削元素が被削性におよぼす役割についてはこれまで多くの研究が行われ、その被削性改善機構について報告されてきている¹⁾。また、近年製造現場においては環境問題の観点から、鉛の使用が制限される傾向にあり、鉛快削鋼に代わる環境に優しい快削鋼、いわゆる「鉛フリー快削鋼」の開発が求められている。新しい快削鋼を開発する上で、鋼材における鉛の被削性改善効果について詳細に調査することが必要と思われる。

これまで鉛の被削性改善効果については、鉛の融点が600Kと低いことに関連づけて、主に低速切削域の加工においては、切りくずと工具すくい面の間で軟化もしくは溶融し潤滑作用が発生することで切削抵抗が低減されるといわれている²⁾⁵⁾。また、切削速度が高まるような切削条件では、加工中に切りくずの温度が上昇することで切りくず内の鉛介在物が溶融し、その結果切りくずが脆くなる、いわゆる「溶融金属脆化」によって切りくず処理性が改善する⁶⁾ともいわれている。また、鉛と同程度の低融点金属であるビスマス(Bi: 融点544K)を鋼中の介在物として含ませた場合でも、同様の脆化効果で切りくず処理性が改善されるものと考えられている。このように鉛の被削性改善効果について様々な面から提唱されているが、その本質については未だに議論されており、完全に明確化されたものではないのが現状である。そこで本研究では、機械構造用炭素鋼を対象に鉛の被削性改善効果について近年の新しい観察手法を活用することでその改善機構を明確にすることを目的として実験を行った。すなわち、鉛添加による切りくず変形挙動の変化を、高速度ビデオカメラを用いてその場観察を行い、また走査電子顕微鏡(SEM)内での切削実験や切りくず中の鉛の形態を詳細にエネルギー分散型X線分光法(EDX)

Table 1 Chemical composition of tested steels

	C	Si	Mn	S	Cr	Pb
Steel A	0.53	0.20	0.76	0.001	0.11	-
Steel B	0.52	0.21	0.78	0.001	0.10	0.14

Table 2 Cutting conditions in orthogonal cutting

Cutting speed	16.7 mm/s
Depth of cut	0.2 mm
Width of cut	2.0 mm
Cutting length	30 mm
Tool material	Cemented carbide (P20), TiAlN coated carbide tool
Rake angle	10°
Clearance angle	6°
Lubricant	Dry

により観察し、切削中の鉛の変形挙動を詳細に検討した。以下にその結果について報告する。

2. 実験方法

供試した被削材の化学成分を表1に示す。被削材には、機械構造用炭素鋼のS50C(Steel A)と、これに鉛を添加したSteel Bをそれぞれ50kg真空溶解炉にて溶製した。得られた鋼塊を1473K加熱1373K仕上げの条件でφ60の丸棒に鍛造し、その後被削材の硬さとマイクロ組織を揃えるため1123Kで1時間加熱後放冷とする熱処理を実施した。被削材の硬さとマイクロ組織については、丸棒のR/2部におけるロックウェルB硬さと丸棒長手方向断面の組織観察によって確認した。被削性試験は、表2に示す切削条件で二次元切削を実施し、加工中の切削抵抗の測定及び、生成された切りくずを観察した。工具には超硬合金P20種と超硬合金にTiAlNコーティングが施されたものの2種を使用した。被削材の厚さ2mmに対し、工具切れ刃の幅は4mmで、切れ刃のほぼ中央部を使って被削材を切削した。本検討で使用した工具の刃先先端のR形状は切り込み0.2mmに対して十分に小さいことから被削性に及ぼす刃先の影響は無視できるものとした。二次元切削中の工具刃先近傍の変形挙動や切りくず生成機構を観察するため

* 原稿受付 平成20年11月27日

** 正会員 住友金属工業株式会社(兵庫県尼崎市扶桑町1-8)

*** 正会員 大阪大学大学院(大阪府吹田市山田丘2-1)

† 大阪大学大学院(現、大阪ガス(株)); 神戸市中央区港島中町4-5-3)

Fig.1 Schematic diagram for orthogonal cutting

Table 3 Cutting conditions in SEM	
Cutting speed	0.1 mm/s
Depth of cut	0.02 mm
Width of cut	1.0 mm
Tool material	Sintered diamond
Rake angle	10°
Clearance angle	5°
Lubricant	Dry

Fig.2 Optical micrographs and Rockwell hardness(HRB) of tested steels

に図1に示すようにモノクロ高速度ビデオカメラを設置し切削中のその場観察を実施した。録画速度は3000コマ/秒とし、デジタル画像として撮影した。切削抵抗の測定には、KISTLER製の4成分動力計「9272」を使用し、この動力計の上に被削材試験片を固定した状態で切削実験を実施した。切削によって得られた切りくずについて、内部の鉛の形態を観察するために光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡(SEM)及びエネルギー分散型X線分光法(EDX)を用いた。SEM及びEDXの観察は加速電圧15kVで実施した。また、SEM内の切削実験については、表3に示すような一定の切削条件で二次元切削を実施し切削加工中の一次せん断域における鉛の変形挙動を観察した。

3. 結 果

3.1 ミクロ組織と硬さ

図2に各供試鋼のミクロ組織と硬さを示す。ロックウェルB硬さは両鋼種ともに大差なく、またミクロ組織はパーライトと旧オーステナイト粒界に生成したと考えられる初析フェライトで構成されており、その形態も同等であることがわかる。よって、以下では鋼材間の硬さおよびミクロ組織による被削性への影響は無視できるものとする。

3.2 切りくず形態と切削抵抗に及ぼす鉛の影響

図3にP種超硬による二次元切削時の高速度カメラによる動画の1コマ及び得られた切りくずの外観を示す。鉛を添加していないSteel Aに対し鉛を添加したSteel Bでは切りくずのカール径が小さくなっている。また切りくず外観の観察からは、Steel Aの切りくずは周期的に切りくずの厚さが変化していることがわ

Fig.3 In-situ observation of orthogonal cutting and chips on tested steels (V=16.7mm/s, d=0.2mm, Tool:P20, Dry)

Fig.4 Cutting forces of tested steels by orthogonal cutting (V=16.7mm/s, d=0.2mm, Tool:P20, Dry)

かる。この切りくずの生成過程は高速度カメラによる観察から次の通りと判明した。まず、工具の切れ刃が被削材に食い込みその後切りくずがすくい面上で堆積し盛り上がるように形成される。その過程でせん断角が連続的に小さくなり、最終的に刃先先端から切りくずの一次せん断域に沿って破断に至る。これが繰り返されることで図3のような切りくずが形成された。これは、いわゆるせん断型切削機構に類似していると考えられ、本検討ではこれを「せん断型切りくず」とする。一方、鉛を添加したSteel Bでは切りくずの厚さがSteel Aに比べ小さく、その厚さの変化もほとんどみられない。このように、ほぼ一定のせん断角を保ちながら切りくずが形成されていることから、流れ型切りくずを形成していると言ってよい。このように鋼中における鉛含有の有無により切りくずの形態が大きく変化することが判明した。これらのような切りくずが形成される際の切削抵抗の変化を図4に示す。図中の数字は、加工が安定している加工距離10mmから25mmまでの切削抵抗値の平均値で、括弧内はその範囲での切削抵抗値の変動幅を標準偏差σとして示したものである。鉛を含有したSteel B(太線)の主分力(黒線:Principal force)が185N、背分力(灰色線:Thrust force)が160NほどSteel A(細線)より低くなっており、またσで表される加工中の変動も小さくなっていることがわかる。このSteel Aの切削抵抗値の変動は、図3の切りくず厚さの変化の周期にほぼ対応していることも高速度カメラの観察により確認している。これらのことから、鉛を添加したときの被削性に及ぼす効果としては、切りくずの形態をせん断型から流れ型へ変化させること、切削抵抗を小さくし、切りくず厚みの変

Fig.5 Effect of TiAlN coated tool on cutting forces of steel A
(V=16.7mm/s, d=0.2mm, Tool:P20, Dry)

化に対応して加工中の切削力の変動を小さく安定化させる効果があると言える。本検討が 16.7mm/s の低速切削であることから、従来の知見より本効果が鉛によるすくい面での潤滑作用によるものと推察される。このような鉛が与える切りくず形状及び切削抵抗(以下、総じて加工性とする)への効果について、工具すくい面上での潤滑性向上ということから、鉛非添加鋼について摩擦係数の異なる工具を使うことによっても加工性が変化するものと考えた。そこで工具材質を超硬母材に TiAlN コーティングをした同形状の工具で二次元切削を実施し、コーティング材質による Steel A の加工性の変化を調査した。なお、それぞれの工具材質と Steel A との摩擦係数の測定については、あらかじめ Falex 製のブロックオンリング試験機を使用して測定した。摩擦条件は、荷重 100N で摩擦速度が初速 16.7mm/s から 2 分間で 167mm/s まで加速し、そのまま 2 分間保持した状態とした。摩擦係数は保持時の最後の 1 分間の平均値とした。その結果、P 超硬および TiAlN の摩擦係数はそれぞれ 0.62, 0.71 であり TiAlN の方が約 15% 大きいことがわかった。TiAlN による Steel A の切削抵抗の結果を図 5 に示す。TiAlN 工具に変えることで加工中の切削抵抗の変動 σ は小さくなるが、主分力はほとんど変化せず背分力もわずかに 80N 程度しか減少していないことがわかる。このことから鉛の被削性改善効果が、すくい面上の摩擦状態を変化させるというよりも、本試験のような切削温度の上昇が小さい低速切削領域であっても一次せん断域のせん断応力の低下に寄与しているものと推察される。そこで Steel B について切りくず内の鉛の形態について詳細に調査した。切りくずの長手方向に平行な断面のミクロ組織の SEM 像と EDX 分析結果を図 6 に示す。ここで、試料の表面は通電性を確保するために金蒸着を施した。また、(b) の図の縦軸は、分析箇所 60 秒電子線を曝した時に検出された特性 X 線の強度を示している。切りくず内の鉛含有物は、ほとんどがせん断変形方向に沿って長く伸ばされた状態であり、加工前の形態とはまったく異なっている様子が観察された。これは鉛が切りくず形成時にせん断変形方向に沿って極めて薄く引き伸ばされるように変形したためと考えられる。

以上のことから鉛の被削性改善効果について次のような仮説をたてた。鉛の被削性改善効果は、「切りくず内部の切りくず生成時の一次せん断域で鉛に変形が集中することでせん断すべりを助長し、母材への負荷ひずみが小さくなることで切削抵抗、特に主分力を低下させるものである。」とした。以下にこの仮説を明確にすべく考察する。

Fig.6 SEM image of a lead inclusion in the chip of steel B (a) and corresponding EDX spectrum (b)

4. 考 察

4.1 切りくず形態と切削抵抗に及ぼす加工面性状の影響

従来から固体の表面にある種の液体が付着していると、その表面は塑性変形を起こしやすくなり、押し込み硬さが減少する場合があることが知られている。これは吸着した液体分子が金属の表面エネルギーを減少させたために新表面ができやすくなり、また一度発生したクラックの表面に液体分子が吸着すると再溶着、ができなくなるためと解釈されている。このような界面効果はその発見者の名にちなんで「レビンダー効果」と呼ばれてきている。切削加工において本効果が当てはまる場合があり、それは加工面に油剤などを塗布することで、加工中に生じる被削材表面の微細なクラックから油剤が切りくず内部に深く浸透し表面エネルギーを減少させ、また一度発生したクラックの再溶着を防止し切りくず生成時の塑性変形を起こしやすくなることになるとされている。実際に金属の切削加工において本効果と考えられる切削抵抗の減少や切りくず形態変化が、中山⁸⁾や榊田⁹⁾によって「塗布効果」と称して確認されている。また金枝¹⁰⁾らはこの塗布効果を純 Al によって確認しているがレビンダー効果とは異なるものとしている。いずれにしても、この塗布効果が鉛を添加していない Steel A においても発生するかを検討した。実験方法は、中山の研究と同様に、被削材の加工面に油性の速乾性インキを塗布後、乾燥させた状態でこれまでと同様の二次元切削を実施し、そのときの切削抵抗変化と切りくずの形態を調査した。切削抵抗の変化と得られた切りくずを図 7 に示す。自由面へのインキの塗布によって主分力が約 100N 減少することがわかった。背分力の変化はほとんど見られないが、先の TiAlN 工具の結果に対し 2 成分の合力という点では、塗布効果の方が大きくなっていることは明確である。また加工中の変動の変化もほとんどなく切りくずの形態についても、カール径や厚さが図 3 に示したものとほとんど差が見られない。このことは、鋼材の切削抵抗の抑制には工具の摩擦係数を小さくするより加工面のインキの塗布によってせん断ひずみを抑制することの方が有効であることを示唆するものである。そこで、これまでの切削抵抗の結果を古典的な流れ型二次元切削モデルを適用し、それぞれの一次せん断域におけるせん断

Fig. 7 Effect of environment of work surface on cutting forces of steel A (a) and chips configuration of Steel A applied ink (b) ($V=16.7\text{mm/s}$, $d=0.2\text{mm}$, Tool:P20, Dry)

Fig. 8 Relationship between friction force and shear force ($V=16.7\text{mm/s}$, $d=0.2\text{mm}$, Tool:P20, Dry)

面での平均せん断力とすくい面上の摩擦力について計算した。その結果を整理したものを図8に示す。それぞれの矢印は、実線が鉛添加、点線がTiAlNコーティング、そして二重線がインクの塗布効果によって平均せん断力と摩擦力が変化した方向を示す。また、括弧の数は、切削力と切りくず厚さから計算されるすくい面上での見かけの摩擦係数である。鉛添加による平均せん断力とすくい面摩擦力の変化量(○から□, ●から■への変化)は、工具材質にかかわらず同等である事がわかる。一方でコーティング工具の効果(●から○, ■から□への変化)は、鉛による切削抵抗の改善効果とはまったく異なっている。見かけの摩擦係数は、鉛添加と同様に工具材質の変化で約12%小さくなっているが、その改善傾向は全く異なっており、特にせん断力の減少はまったく見られないことから工具材質の変化が鉛の効果を再現しているものとは考えにくい。このことは、先のブロックオン試験で測定した摩擦係数が本質的ではないことも示唆している。一方で、インクの塗布効果(●から◎への変化)については、鉛の効果ほどではないがせん断力の低下が大きく、両力の変化の方向が少なくとも工具材質の変化の場合より、鉛の効果に近い状態を再現していると考えられる。これらのことから鉛介在物の加工性改善効果は、一次せん断域で鉛にひずみが集中することによるせん断力の低下が主要因であると解釈できる。

図9に両供試鋼のすくい面側の切りくず表面のSEM観察結果を示す。鉛を添加しているSteel Bのほうが微細なき裂が多く発生している様子がわかる。また図10にSteel Bの切りくず表面

Fig. 9 SEM image on the chip surface by orthogonal cutting of tested steels ($V=16.7\text{mm/s}$, $d=0.2\text{mm}$, Tool:P20, Dry)

Fig. 10 SEM image of lead inclusion on the chip surface by orthogonal cutting of steel B ($V=16.7\text{mm/s}$, $d=0.2\text{mm}$, Tool:P20, Dry)

で観察されたき裂近傍の拡大写真とそのEDX分析結果を示すが、微細なき裂には鉛が変形して開口部からはみ出してきていることがわかる。またその鉛は、すくい面での擦過方向に引き延ばされておらず、き裂以外の箇所にも点状に存在している様子も観察されなかった。

このことから鋼中の鉛は、一次せん断域において母相に比べてひずみが集中しせん断方向に大きく変形することで、鉛介在物周辺でのせん断方向に沿ったすべり変形を容易にし、その結果として切削抵抗が減少する。同時に、鉛によってすべり変形が連続して頻度よく起こることで加工中の切削力の変動を抑制していると考えられる。これは、加工中におけるせん断角の変化が小さくなることを示すものであり、すくい面で切りくずが形成される際の自由面側の凹凸を抑制していると解釈できる。

4.2 鉛のせん断域におけるひずみ抑制効果

Steel Bについて、更に詳細に切りくず形成中の鉛の挙動を調査するためにSEM内による切削実験をした。その結果を図11に示す。工具が進むにつれて鉛介在物が一次せん断域でせん断方向に沿って変形し、これを起点にき裂あるいはすべり線が発生していることがわかる。また、観察部が被削材の側面であることから鉛が紙面手前にはみ出してきている様子も見取れる。このように鉛はせん断域で母材以上に変形しやすくなりこれを起点にせん断すべりを助長し、ひいてはき裂の発生に繋がり母材のひずみを抑制していると判断できる。

図12に加工前の母材に対する切りくずの硬さ上昇量を示す。調査した切りくずはP種超硬で加工したときの両供試鋼とSteel Aにインク塗布したものである。Steel Aに対しSteel BとSteel Aのインク塗布で硬化量が小さくなっていることがわかる。このことから鉛が切りくず形成時に一次せん断域でひずみが集中することで母材の負荷ひずみを小さくし、ひいては切りくずの加工硬化が小さくなったと言える。また加工面へのインクの塗布についても同様の効果が出ていることがわかる。

以上のことから本検討における低速二次元切削での鉛の被削性改善効果を以下のように考えることができる。加工中に切りくずを形成する際、一次せん断域を通過する鉛は、せん断変形方向に引き延ばされるように変形する。このことは被削材の自由面表

Fig.11 Crack initiation at the primary shear zone by orthogonal cutting in SEM on Steel B ($V=0.1\text{mm/s}$, $d=0.02\text{mm}$, Tool:Sinterd diamond, Dry)

Fig.12 Effect of chip hardness increment for Pb bearing and environment of work surface ($V=16.7\text{mm/s}$, $d=0.2\text{mm}$, Tool:P20, Dry)

面に存在する鉛も同様であり、切りくずの自由面側から内部にかけて、その周辺で起こるせん断変形に対してすべり変形を助長し、せん断力を低下させる。この一連の現象が、せん断力そのものとその変動を小さくし、切りくずの形成に対しても切りくず厚さの変動も小さくし、最終的にほぼ理想的にカールしながら流れ型切りくずを形成させる効果をもたらすと結論づけることができる。このような流れ型切りくずの形成は、M.E.Merchant¹¹⁾やPiispanen¹²⁾のいわゆる「カードモデル」としてよく知られており、このモデルにおいて流れ型切りくずは一次せん断面で間欠的にせん断が起こることに起因している。また、Inamura¹³⁾らは金属材料の切りくず形成において、せん断すべりがせん断域で間欠的に発生することを分子動力学 (MD)によって検討している。これは材料中の欠陥を起点にそこで原子レベルの交差すべりが集積しながらせん断方向に成長することにより、我々がよく観察するようなマクロなせん断すべりが初めて発生するとし、このような転位の集積過程があつて間欠的なせん断すべりが起こるとしている。両知見から、今回の鉛添加鋼の流れ型切りくずの形成は、一次せん断域で鋼中に分散している鉛介在物を起点として発生するき裂やすべり線によって間欠的なせん断すべりを引き起こすものと解釈できる。我々のこれまでの研究¹⁴⁾において、高速切削においても鉛添加鋼の切りくずは非添加のものよりその硬さが小さくなっており、このことはせん断域で鉛に変形が集中することで母材への負荷ひずみが小さくなるとしているが、更に切削条件による鉛の被削性改善効果の変化については精緻な検討が必要である。一方で、硫黄快削鋼に含まれる硫化物(MnS)にも、せん断変形抵抗を下げる効果を有するとも言われているが、鉛と MnS では、発現する被削性に明確な差があることも事実である。今後、両介在物が被削性に作用する効果の大きさの差を把握することが重要であり、そうすることにより、鉛フリー快削鋼

の開発に繋げていくことができるものとする。

5. 結 言

機械構造用炭素鋼の低速二次元切削における切りくず形成に及ぼす鉛の効果について、以下のことが判明した。

- (1) 鉛を添加することによって、切削抵抗が減少し、非鉛添加鋼でのせん断型切りくずを流れ型切りくずに変化した。
- (2) 非鉛添加鋼において切削加工面の塗布効果によって切削抵抗が低減し、切りくずも流れ型に変化することが判明した。このことは一次せん断域でのせん断力の抑制が切削抵抗低減に対する主たる要因であり、同時に形成される切りくずの厚さの変動を小さくするものである。
- (3) 鉛の主たる被削性改善効果は、加工中に鉛が一次せん断域を通過する際に、その周辺で起こるせん断変形に対してすべり変形を助長し、またこれが間欠的に頻度良く起こることによってせん断力とその力の変動を小さくすることにある。

参 考 文 献

- 1) 例えば 伊藤哲朗,加藤剛志,山田博之: 各種快削鋼の被削性,電気製鋼,38,5,(1967)237 (in Japanese).
- 2) M.C.Shaw, P.A.Smith, E.G.Loewen and N.H.Cook: The Influence of Lead on Metal-Cutting Forces and Temperature, Trans. ASME, 79, July, (1957) 1143.
- 3) M.C.Shaw, P.A.Smith, N.H.Cook and E.G.Loewen: Lead Steel and Real Area of Contact in metal cutting, Trans. ASME, 79, July, (1957) 1155.
- 4) F.L.Bagley and R.Mennell: Machining Characteristics of Lead Steel, Trans. ASME Journal of Basic Engineering, : 82, June, (1960) 347.
- 5) K.Okuhima and K.Iwata: Machinability of Metals (Chip formation of Lead Steels), Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., 28, 187, (1962) 404 (in Japanese).
- 6) H.Yaguchi: The Role of Liquid Metal Embrittlement on the Chip Disposability of Steel, Iron and Steel, 77, 5 (1991) 683 (in Japanese).
- 7) 中山一雄: 機械工学大系 36 切削加工論, コロナ社 (1978), 58 (in Japanese)
- 8) K.Nakayama: On the Formation of "Saw-toothed Chip" in Metal Cutting, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 43, 1 (1977) 117 (in Japanese).
- 9) K.Sakakida, Z.Watanabe and M.Masuko: Some Effects of Environment of Work Surface in Metal Cutting: 1st Report, The Effects on Cutting Force, Citing Ratio and Surface Roughness in Machining of Copper, Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., 38, 316 (1972) 3246 (in Japanese).
- 10) T.Kaneeda and H.Kohsaka: Lubricant Applying Effect in Ductile Metal Cutting (1st Report) - Generating Conditions and Boundary Lubrication Effects of Applied Material-, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 61, 5 (1995) 702 (in Japanese).
- 11) M.E.Merchant: Mechanics of the Metal Cutting Process. I. Orthogonal Cutting and a Type 2 Chip, Journal of Applied Physics, 16, 5 (1945) 267.
- 12) V.Piispanen: Theory of Formation of Metal Chips, Journal of Applied Physics, 19, 10 (1948) 876.
- 13) T.Inamura, N.Takezawa, K.Yamada, K.Shibuya: Molecular Dynamics Simulation of Micro Mechanisms in Slip Deformation Theory of Crystals, Annals of the CIRP, 55, 1 (2006) 51.
- 14) K.Watari: Effect of Inclusions on Machinability of Carbon Steels for Machine Structural Uses, 2006 JSPE Spring Meeting, (2006) 285 (in Japanese).