621.941.011

ノ ジ ュ ラ ー 鋳 鉄 の 被 削 性*

(第 2 報, 逃げ面凝着現象と切削条件との関係)

人 見 勝 人**, George L. THUERING***

Machinability of Nodular Cast Irons

(Part II. Effect of Cutting Conditions on Flank Adhesion)

by Katsundo HITOMI and George L. THUERING

To determine the effects of cutting conditions on flank adhesion, nodular cast iron grade 60-45-10 was machined dry and wet with carbide cutting tools, cast iron cutting grade and steel cutting grade. Decreasing the feed rate raised the critical cutting speed at which flank build-up occurred and lowered the resultant tool force. For tools with positive rake angle, the critical cutting speed was generally higher and tool forces were lower than for tools with negative rake angle. Large clearance angle eliminated flank adhesion. The use of cutting fluids prevented flank adhesion, and tool force patterns were smooth and smaller than those for dry cutting. Flank build-up was analyzed chemically and metallurgically. Methods to prevent flank adhesion were recommended.

1. 緒 言

本研究の第 1 報⁽¹⁾で述べたように, フェライト系のノジュラー鋳鉄 (nodular cast iron) を超硬工具で切削する際, 工具逃げ面に凝着現象がみられ, 逃げ面と切削面との間に付着物が流出し, それに伴って切削力の急激な上昇が観察される. 同様の現象は Trigger-Zylstra-Chao⁽²⁾によっても報告されているが, この逃げ面凝着現象 (flank adhesion phenomenon) によって生ずる逃げ面付着物 (flank build-up) は, 工具すくい面上にみられるいわゆる構成刃先 (built-up edge) と異なって, 工具逃げ面と切削面との間をリボン状に流出し, ある限界削り速度以上で観察されるものである. その典型的な例を第 1 図に示す.

そこでこの報告では, この逃げ面凝着現象と切削条件との関係, すなわち送り量, 工具すくい角および逃げ角, ならびに切削剤が逃げ面凝着現象に及ぼす影響を調べ, フェライト系ノジュラー鋳鉄を実際に旋削作業する場合に, この逃げ面凝着を回避する方法について述べる. さらに, 逃げ面付着物を化学的に分析し, や金学的に解析した結果について考察する.

2. 実 験 方 法

実験に使用した工作機械は Lodge & Shipley 製旋盤で, Reeves 無段変速装置を備えている. 切削力は抵抗線ひずみ計を利用した工具動力計により主分力と送り分力を測定し, Sanborn 記録器によりオシログラフ紙上に記録した.

被削材はノジュラー鋳鉄 60-45-10 種(ここではフェライト系ノジュラー鋳鉄と称する)で, その成分, かたさおよび熱処理の過程を第 1 表に示す. この材料の顕微鏡組織は第 2 図のようであり, フェライトの素地

第 1 図 超硬工具の横逃げ面上に現われる付着物の典型例

* 昭和 36 年 11 月 11 日 第 39 期全国大会講演会において論文講演として講演, 原稿受付 昭和 36 年 8 月 5 日.

** 正員, 京都大学工学部(京都市左京区吉田本町).

*** ペンシルバニア州立大学.

の中にこの鋳鉄特有の球状グラファイトがみられる。

切削試験はすべてクランプ式切削工具によったが、用いたインサートチップの材質は主として、鋳鉄切削用超硬 C-1 と鋼切削用超硬 C-2 である。これら超硬の成分および物理的性質を第2表に示す。また切削工具の幾何学的形状は第3表に示したとおりである。

切削は主として次のような条件の下で行なった。

切 込 み 2.54 mm

送 り 0.038, 0.064, 0.127, 0.254, 0.508
mm/rev

削り速度 31, 61, 92, 153, 183, 214, 244,
305 m/min

逃げ面付着物の生成に際しては、切込みの影響はそんなに重要ではないと考えられるので、これを一定に保った。送り量は、第1報で論議したように逃げ面凝着現象と重要な関係があると考えられる切削温度に影響を及ぼすので、5段階に変化させた。切削温度と直接関係する削り速度は広範囲に変えた。特に、逃げ面凝着現象が起る限界削り速度近傍では、削り速度を細かく変化させた。

逃げ面凝着現象に及ぼすすくい角の影響をみるために、正および負の2種類のすくい角を選んだ(第3表参照)。また逃げ角の影響を調べるために、通常の負す

くい角用バイトホルダにおける 5° の前および横逃げ角に加えて、このホルダに正すくい角用インサートチップを用い、15° なる大きい前および横逃げ角を得た。この大きい逃げ角の場合を第3表では「特殊」として示した。

大部分の切削試験は乾式で行なったが、切削剤が逃げ面凝着現象におよぼす影響をみるために、水 50 に対して可溶性油 1 の割合で溶かした切削剤を噴霧した場合と、単に水を注入した場合について実験を行なった。

実験は通常 15~30 s 程度の短時間切削によったが、逃げ面凝着現象を観察するために特に数分に及ぶ切削を行なったこともある。

3. 送り量の影響

鋳鉄切削用超硬 C-1 および 鋼切削用超硬 C-2 に

第1表 ノジュラー鋳鉄 65-45-10 種の成分、かたさおよび熱処理過程

化 学 成 分		
グ ラ フ ィ ャ イ ト		3.02%
化 合 炭 素		0.16
全 炭 素		3.18
け い 素		2.34
マ ン ガ ン		0.33
り ん		0.040
い お う		0.019
銅		0.06
ニ ッ ケ ル		0.04
ク ロ ム		0.02
モ リ ブ デ ン		0.03
バ ナ ジ ウ ム		0.01
マ グ ネ シ ウ ム		0.036
ブリネルかたさ		
範 囲	照	145~156
平 均		150
熱 処 理		885°C, 2 h 保持後、炉冷

第2表 使用超硬工具の成分および物理的性質

超硬符号	密 度 g/cm ³	かたさ (ロックウェルA)	成 分 %					
			W	Co	Ti	Ta	Nb	C
C-1	14.9	92.0	86.4	5.75	—	2.0	—	5.8
C-2	12.4	92.0	72.6	6.75	4.7	3.4	5.8	6.9

第3表 使用超硬工具の幾何学的形状

工 具 形 状		種 類	負すくい角	正すくい角	特 殊
前 す くい 角	度		-5	0	-5
横 す くい 角	〃		-5	5	-5
前 逃 げ 角	〃		5	10	15
横 逃 げ 角	〃		5	5	15
前 切 刃 角	〃		15	15	15
横 切 刃 角	〃		15	15	15
ノーズ半径	mm		0.8	0.8	0.8
バイトホルダ寸法	〃		19	19	19
インサートチップ寸法	〃		12.7×3.2	12.7×3.2	12.7×3.2

×60

×300

第2図 ノジュラー鋳鉄 60-45-10 種の顕微鏡組織

よって、フェライト系ノジュラー鋳鉄を種々の送り量で切削した場合の削り速度と切削力との関係を第3図に示す。これは第1報の場合と同様、負すくい角用バイトホルダによったもので、すくい角は前および横とも -5° である。このように、削り速度がある値以上になると、逃げ面凝着現象が起って切削力は急に増大する。この限界削り速度は送り量の減少につれて大きくなり、かつそれに伴う切削力の増加量は減ずる。逃げ面凝着現象が起る限界削り速度およびそれに伴う切削力の増加量は、鋳鉄切削用超硬 C-1 の場合よりも鋼切削用超硬 C-2 の場合のほうが低い。このことは、送り 0.254 mm/rev の場合についてすでに第1報で論議した。

逃げ面凝着現象が起る限界削り速度に及ぼす送り量の影響は、送り量が切削温度に及ぼす影響に関係がある。すなわち、送り量が増加しても、また削り速度が増加しても、切削温度が上昇するから、もし逃げ面凝着を生ずるための臨界切削温度が存在するものと考え、送り量を減少した場合には、逃げ面凝着を生ずる限界削り速度が高速側へ移ることになる。

4. すくい角の影響

第1報および前節で述べた逃げ面凝着現象に伴っ

被削材：フェライト系ノジュラー鋳鉄

工 具：超硬 C-1 (鋳鉄切削用)

C-2 (鋼切削用)

幾何学的形状： $-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8$

切 込 み： 2.54 mm

乾式，ただし×印は切削屑噴霧

第3図 送り，削り速度および切削力
の関係（負すくい角の場合）

て、付着物が逃げ面と切削面との間に流出するのは、実験に際して負すくい角バイトを用いたために切りくずの流出状態が正すくい角の場合に比べて悪くなって生じた現象ではないかと考えられる。これを検討するために、正すくい角用バイトホルダでもって正すくい角の場合について、フェライト系ノジュラー鋳鉄を種々の送りで切削した。この場合、前すくい角 0° ，横すくい角 5° であり、鋳鉄切削用超硬 C-1 と鋼切削用超硬 C-2 を用いた。その結果を第4図に示す。これから明らかなように、すくい角が正の場合にも、C-1、C-2 両種の超硬工具ともに逃げ面凝着現象が発生し、切削力と削り速度との関係は負すくい角の場合と同じ傾向をたどることがわかる。C-1 では、限界削り速度を越える全削り速度域において、この逃げ面凝着現象が観察された。C-2 でもほぼ同様であるが、逃げ面凝着現象が起る限界削り速度およびそれに伴う切削力の増加量は C-1 の場合より小さい。そして C-2 では高速域 (244 および 305 m/min) において逃げ面凝着現象は起らなかった。C-1 および C-2 とともに送り量の減少に伴って限界削り速度が増加し、切削力の増加量が減少するのは、負すくい角の場合と同様である。ただ

被 削 材：フェライト系ノジュラー鋳鉄

工 具：超硬 C-1 (鋳鉄切削用)

C-2 (鋼切削用)

幾何学的形状： $0, 5, 10, 5, 15, 15, 0.8$

切 込 み： 2.5 mm

乾式

第4図 送り，削り速度および切削力
の関係（正すくい角の場合）

し 0.038 mm/rev というきわめて小さい送りの場合, C-2 では全削り速度域において逃げ面凝着現象の発生は観察されなかった。

鋳鉄切削用超硬 C-1 について, 正および負の両すくい角の場合に関して, 種々の送り量に対する削り速度と切削力の関係を総合して描くと第5図のようになる。これによれば, 同じ送り量では, 正すくい角の場合のほうが負すくい角の場合より切削力が低く, また逃げ面凝着現象が起る限界削り速度は, 送り量 0.254 mm/rev の場合を除いて高速側にある。

同様に, 鋼切削用超硬 C-2 についても, 第6図のごとく, 正すくい角の場合のほうが負すくい角の場合より, 切削力がわずかに低く, 限界削り速度は送り量 0.254 mm/rev の場合を除いて高速側にある。

このように 0.254 mm/rev 以下の送り量では, 逃げ面凝着現象が起る限界削り速度は, 鋳鉄切削用および鋼切削用両超硬工具とも, 正すくい角の場合のほうが負すくい角の場合より高速側にある。これは切削温度と関係があり, すくい角の増加につれて, 一般に切削温度が減少するからであると考えられる。しかしこれだけでは, 送り量 0.254 mm/rev の場合に, 両超硬品種とも限界削り速度が正すくい角の場合に低速側に

ある事実を説明することができず, 高送り切削における逃げ面凝着現象については今後の研究課題である。

第3, 5 および6図において, ×印を付したなめらかな曲線は切削剤を噴霧した場合のもので, 後に詳述する。

5. 逃げ角の影響

フェライト系ノジュラー鋳鉄の切削における逃げ面凝着現象に及ぼす工具逃げ角(特に横逃げ角)の影響を調べるために, 鋳鉄切削用超硬 C-1 の場合について, 前および横逃げ角を 5° と 15° に変化して実験を行なった(前および横すくい角はいずれも -5°)。5° の逃げ角は通常の様式で, また 15° の逃げ角は負すくい角用バイトホルダに正すくい角用超硬インサートチップを用いることによって得られた(第3表参照)。この2種類の逃げ角の場合の削り速度と切削力との関係を第7図に示す。逃げ角が 5° の場合には, ある限界削り速度以上において逃げ面凝着現象が起って, 切削力は増加している。これに反して, 逃げ角 15° の場合には, 全削り速度域にわたって逃げ面凝着現象が起らず, 切削力線図はなめらかで, 切削力の値も逃げ角 5° の場合よりずっと低いという結果が得られた。

被削材: フェライト系ノジュラー鋳鉄
幾何学的形状: (正すくい角) 0, 5, 10, 5, 15, 15, 0.8
(負すくい角) -5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8

切込み: 2.54 mm

乾式, ただし×印は切削剤噴霧

第5図 送り, 削り速度および切削力の関係
(鋳鉄切削用超硬 C-1 の場合)

被削材: フェライト系ノジュラー鋳鉄
幾何学的形状: (正すくい角) 0, 5, 10, 5, 15, 15, 0.8
(負すくい角) -5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8

切込み: 2.54 mm

乾式, ただし×印は切削剤噴霧

第6図 送り, 削り速度および切削力の関係
(鋼切削用超硬 C-2 の場合)

このように、大きい逃げ角の場合に逃げ面凝着現象が起らないのは、工具逃げ面と切削面との間の角度が大きくなって接触し難く、凝着が起りにくいという理由によるものと考えられる。

6. 切削剤の影響

鋳鉄切削用超硬 C-1 および鋼切削用超硬 C-2 を用

被削材：フェライト系ノジュラー鋳鉄
工 具：超硬 C-1 (鋳鉄切削用)
幾何学的形状：-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8 (普通)
-5, -5, 15, 15, 15, 15, 0.8 (特殊)
切込み：2.54 mm
送り：0.254 mm/rev
乾式

第 7 図 削り速度と切削力との関係に
及ぼす逃げ角の影響

第 8 図 超硬工具 C-1 および C-2 によるフェ
ライト系ノジュラー鋳鉄の切削における切削剤
の噴霧および中断に伴う切削力の変動状況

いて、切込み 2.54 mm, 送り 0.254 mm/rev の場合について、切削剤が逃げ面凝着現象に及ぼす影響を検討した。工具の形状は (-5°, -5°, 5°, 5°, 15°, 15°, 0.8 mm) である。

用いた切削剤は次のとおりである。

(1) 可溶性油を 2% の割合で水に溶かした液を、工具すくい面または逃げ面、あるいは両方に噴霧する。

(2) 工具すくい面上に水を注入する。

(3) 切削前に被削材表面に水を塗布する。

工具すくい面および逃げ面の両方に 2% 可溶性油液を噴霧した場合、逃げ面凝着現象は阻止された。切削力線図は第 3, 5 および 6 図に×印で示すごとく低く、かつ乾式切削の場合より低い。この効果は乾式切削で逃げ面凝着現象が起る速度範囲で特に著しい。切削力に及ぼす切削剤の効果は、鋳鉄切削用超硬 C-1 と鋼切削用超硬 C-2 とではほとんど変わらない。この場合、切削剤を工具すくい面または逃げ面上単独に噴霧しても、同様に有効であることがわかった。

逃げ面凝着が発生した後も切削剤が効果的であるかどうかをみるために、フェライト系ノジュラー鋳鉄を 92 または 183 m/min の削り速度で乾式切削して、逃げ面凝着を生ぜしめた後、切削部に噴霧した。初めの乾式切削中逃げ面付着物の発生によって増加した切削力は、切削剤の噴霧によって減少した。この状態の工具逃げ面を調べてみると、逃げ面付着物は観察されず、ただわずかに凝着あとがみられただけである。

切削剤の噴霧を切削中に中止したとき、興味ある現象が観察された。第 8 図にこの状態における切削力の変動状況を示す。鋳鉄切削用超硬 C-1 の場合には、(a) に示すごとく、切削剤の噴霧を中断する (図中

“DRY” と記した箇所) と、しばらくの乾式切削の後、逃げ面凝着現象が起って、切削力は増加する。このとき工具逃げ面には付着物が現われているのが観察される。再び切削剤を噴霧する (図中 “WET” と記した箇所) と、逃げ面凝着は消失し、切削力は再び減少する。このように切削剤の噴霧および中断の繰返しによって、逃げ面凝着現象の消失および発生が繰返され、したがって切削力は第 8 図 (a) のように増減を繰返すのが観察された。

以上の結果は予期したとおりで、切削剤の噴霧による切削温度の低下

ならびに潤滑作用から説明することができる。

しかし鋼切削用超硬 C-2 の場合には、全く異なった結果が得られた。第 8 図 (b) に示すように、切削の初期から切削剤を噴霧した場合には、逃げ面凝着現象は起らず、したがって切削力も低いのは当然であるが、噴霧を中断した後も切削力は増加せず、逃げ面凝着現象も全然観察されなかった。さらにこれを確かめるために、C-2 の新しいインサートチップでもって、初め乾式で切削して逃げ面凝着を起さしめて切削力を増大させ、しばらくたって切削剤を噴霧して逃げ面凝着を取除き、切削力を減少させた。その状態で切削剤の噴霧を止めて切削を続けたところ、第 8 図 (c) のように、逃げ面凝着は全然起らず、したがって切削力も低い状態が続いた。

鋼切削用超硬 C-2 について、可溶性油液を噴霧する代りに、単に水をすくい面上に注入した場合にも同様な結果が得られた。また、切削前被削材の表面上わずかに数センチの部分に水を塗布した場合にも、その部分を切削中はもちろんのこと、この部分を切削し終えた後にも逃げ面凝着は全然起らず、切削力も低いことが観察された。この方式で種々の場合について実験を行なった。時には、水を塗布した部分を切削し終って乾いた部分を切削している途中で切削を中断して、数分または数日放置し、再び切削を乾式で続けるという方法をとったこともあり、いずれの場合も逃げ面凝着は起らず、切削力も低いままであった。時には、逃げ面摩耗がみられるほど十分長い時間切削を続けたこともあるが、逃げ面凝着現象は全然観察されなかった。しかしいったん切削を中止し、工具逃げ面をといしで軽くホーニングすると、たちまち逃げ面凝着現象が発生した。

以上の結果から、鋼切削用超硬 C-2 をこのような状態で用いるとき、逃げ面凝着現象が全然認められな

いのは、単に切削剤の冷却作用および潤滑作用だけでは説明できない。明らかに超硬工具の逃げ面に保護膜が形成されて、これが永続するものと考えられる。

7. 逃げ面付着物のや金学的考察

逃げ面付着物は、フェライト系ノジュラー鋳鉄を超硬工具で切削する場合に、ある削り速度以上で観察される。この母材の顕微鏡組織は、第 2 図に示すごとく、フェライトの素地の中に球状グラファイトが存在するものである。第 4 表にこの母材の化学成分と逃げ面付着物の化学分析結果を比較して示す。これから明らかなように、逃げ面付着物の形成過程においては、ある量の炭素が失われる（グラファイトは 3.02% から 1.15% へ、全炭素量は 3.18% から 2.33% へ）が、逆に化合炭素は大きく増加する（0.16% から 1.18% へ）。

そこで、逃げ面付着物をや金学的に考察すると次のとおりである。まず、逃げ面付着物の顕微鏡写真を第 9 図および第 10 図に示す。第 9 図は腐食前、第 10 図は 2% Nital で腐食したものを示す。両図ともにみられる大きい暗黒部はグラファイトである。第 10 図にみられる他の暗黒部は、逃げ面付着物形成時に生じたオーステナイトの変態組織である。同じく第 10 図にみられるしま状白色部はフェライトで、フェライト系ノジュラー鋳鉄素材から変態せずに移行したものと考えられる。

次に、第 4 表に示す逃げ面付着物の化学分析の結果をや金学的見地から確かめるために、逃げ面付着物の試料を水晶管内に封入して 540°C で 30 分間焼もどした。この状態の顕微鏡組織を第 11 図に示す。この写真で暗黒部はグラファイトである。また化合炭素がかなりの量存在し、組織中に小さい白色部として点在している。この化合炭素の存在が、化学分析の結果

×600

第 9 図 逃げ面付着物の顕微鏡写真
(腐食前のもの)

×600

第 10 図 逃げ面付着物の顕微鏡写真
(2% Nital で腐食したもの)

明らかになった化合炭素量の増加となってあらわれているのである。

本実験では切削温度は測定しなかったが、化合炭素量の増大や顕微鏡組織の変化等から考えて、逃げ面付着物の形成に際しては、少なくとも、この母材からオーステナイトが生成される最低温度である 750°C に達しているものと想像される。

逃げ面付着物中の化合炭素は、その形成中に生じたオーステナイトによるものと考えられる。このオーステナイトは母材に存在するグラファイトから炭素を得たのであって、工具逃げ面部分における高温高圧の結果生じたものである。この逃げ面付着物が工具逃げ面と切削面との間をリボン状に流出する際急冷されて、オーステナイトはマルテンサイトまたはベイナイトに類似の組織に変態する。したがって逃げ面付着物の顕微鏡組織は、グラファイト、フェライト、およびマルテンサイトかベイナイトに類似の組織、ならびに母材から移行した若干の化合炭素から成る。

8. 逃げ面凝着現象の阻止法

フェライト系ノジュラー鋳鉄を切削する際に現われる逃げ面凝着現象は、実際の旋削作業に際しては望ましくない。すなわち切削力は増大し、ある場合にはびびりを発生する原因になり、したがってまた仕上面も劣化する。そこで、このような逃げ面凝着を回避する

第 11 図 封入水晶管中 540°C で 30 分間焼もどした 逃げ面付着物の顕微鏡写真

第 4 表 ノジュラー鋳鉄 60-45-10 種素材 および逃げ面付着物の化学成分の比較

成 分	ノジュラー鋳鉄 60-45-10種素材 %	逃げ面付着物 %
グ ラ フ ァ イ ト	3.02	1.15
化 合 炭 素	0.16	1.18
全 炭 素	3.18	2.33
マ ン ガ ン	0.33	0.31
り	0.040	0.040

方法を上記の実験結果および本研究の第 1 報からまとめてみると次のようになる。

a. 低速切削または超高速切削 逃げ面凝着現象はある限界削り速度以上で起る。したがってこの限界削り速度以下の低速で切削すれば、逃げ面凝着を阻止しうる。また鋼切削用超硬工具では、超高速域で逃げ面付着物が消失するから、超高速切削による逃げ面凝着の回避も考えられる。しかしこのような超高速切削では、生産能率は高まるが、工具寿命の点で不利になることもある。

b. 大きい横逃げ角の使用 大きい横逃げ角を有する超硬工具を用いると、逃げ面凝着現象は回避される。しかしこの角度をあまり大きくすると、刃先が弱くなり、工具寿命の点で望ましくない。

c. 切削剤の使用 工具のすくい面または逃げ面、あるいは両方に可溶性油液を噴霧することは、逃げ面凝着現象の阻止に有効である。

鋼切削用超硬 C-2 では、切削前に被削材の表面上切削の初めのわずかに数センチの部分に単に水を塗布しておくだけで、逃げ面付着物の発生は回避される。これは逃げ面凝着現象の最も簡便な阻止法であるが、鋳鉄切削用超硬 C-1 に対しては有効ではない。ノジュラー鋳鉄の切削に際しては、工具寿命は C-1 のほうが C-2 よりずっと大である*。工具寿命の観点からいえば、フェライト系ノジュラー鋳鉄を超硬工具で切削する場合に、逃げ面凝着現象を阻止する最も経済的な方法は、鋳鉄切削用超硬工具によって切削剤を噴霧しながら切削することである。

d. セラミック工具の使用 フェライト系ノジュラー鋳鉄をセラミック工具によって切削する際には逃げ面凝着現象は起らない。しかもセラミック工具による場合、超硬工具の場合より、特に高速域で工具寿命が長い*。したがって逃げ面凝着現象を阻止するのにセラミック工具の使用が推奨される。

9. 結 言

a. フェライト系ノジュラー鋳鉄を超硬工具で切削する際に現われる逃げ面凝着現象に及ぼす切削条件の影響を調べた結果、次の結論を得た。

(1) 削り速度の影響 逃げ面凝着現象はある削り速度以上において生じ、それに伴って切削力は急増する。この逃げ面凝着現象が起る限界削り速度およびそれに伴う切削力の増加量は、鋳鉄切削用超硬工具の

* ノジュラー鋳鉄切削における工具寿命試験結果については本研究の第 3 報および第 4 報で報告する予定である。

場合より, 鋼切削用超硬工具の場合のほうが小さい。

(2) 送り量の影響 送り量の減少につれて, 逃げ面凝着現象が起る限界削り速度は高速側へ移行し, 切削力の増加量は少なくなる。

(3) すくい角の影響 すくい角が正負いずれの超硬工具でも逃げ面凝着現象が起る。送り 0.254 mm/rev 以下では, 正すくい角の場合のほうが負すくい角の場合より, 逃げ面凝着現象が起る限界削り速度は高く, またそれに伴う切削力の増加量は小さい。

(4) 逃げ角の影響 逃げ角(特に横逃げ角)が小さい間は逃げ面凝着現象が起るが, これが大きになると起らなくなり, それにつれて切削力線図もなめらかになる。

(5) 工具材種の影響 鋳鉄切削用超硬工具では限界削り速度以上の速度域で, 逃げ面凝着現象を生ずる。しかし鋼切削用超硬工具では超高速域で逃げ面凝着現象が起らないことがある。さらにこの材種の正すくい角工具によって, きわめて小さい送り量で切削する際には, 全削り速度域にわたってこの現象は全くみられない, なお, セラミック工具による切削に際しては, 逃げ面凝着現象は全然観察されない。

(6) 切削剤の影響 可溶性油液を切削部に噴霧すると, 逃げ面凝着現象は阻止され, 切削力線図はなめらかで, かつ切削力は乾式切削の場合よりはるかに低い。鋼切削用超硬工具の場合には, 切削剤を切削の

初期に少し使用するだけで, 逃げ面凝着現象はその後の全切削にわたって阻止される。切削前に被削材の表面上初めの部分に水を塗布しておくだけで同様な効果がある。

b. 逃げ面付着物の化学分析結果とフェライト系ノジュラー鋳鉄素材の化学成分とを比較してみると, この付着物形成に際して, グラファイトおよび全炭素量が少なくなり, 化合炭素量が大きく増加していることがわかる。逃げ面付着物の顕微鏡組織を検討した結果, これはマルテンサイトかベイナイトに類似の組織, グラファイト, フェライト, および母材から移行した化合炭素から成ることがわかった。この逃げ面付着物の形成に要する温度は少なくとも 750°C には達していると考えられる。

c. 実際の旋削作業に当って不利な逃げ面凝着現象を阻止する方法としては,

- (1) 低速または超高速切削
 - (2) 横逃げ角の増大
 - (3) 切削剤の使用
 - (4) セラミック工具の使用
- 等があげられる。

文 献

- (1) 人見・威・G.L. Thuering, 機械学会論文集, 27-184 (昭36-12), 1909.
- (2) K.J. Trigger, L.B. Zylstra, & B.T. Chao, *Trans. ASME*, 74 (1952), 1017.

討

論

〔質問〕 フェライトと球状グラファイトからなるノジュラー鋳鉄の素材を切削するに当り, 素材と切削工具とは強圧摩擦をするのであるから, 接触部にはいわゆる加工層が急成されると同時に温度上昇を伴うことは疑う余地がない。その工具との接触の最初の瞬間にはフェライトの加工層が生じ, それが凝着を起すものと考えねばならないように思う。そしてその温度は450°C 付近(フェライト再結晶温度)ですでに開始されているのではないか(問1)。

著者は凝着付着物を検することによって, オーステナイトの変態点 750°C 以上に切削温度が達しているとされている。いついかなる場合も付着物はそんな組織なのであるか。切削条件しだいでそのような場合も起るであろうが, その温度(750°C) 以下でも逃げ面凝着現象は起るのではないか。(井形厚臣)

〔回答〕 フェライト系ノジュラー鋳鉄を超硬工具で切削した際に, 限界削り速度以上で起る逃げ面凝着現象に伴う逃げ面付着物はきわめて薄いもので, したがってその顕微鏡組織を得ることが困難なので,

(問1) 井形, 機械学会論文集, 13-44 (昭22-5), 83.

いかなる条件の下で生ずる逃げ面付着物も, 本文7章第9図および第10図に示したとき顕微鏡組織を有するとは断定しかねるが, 顕微鏡組織とともに化学組成を検討して, 逃げ面付着物形成時にオーステナイト組織が生じていることが明らかである点より, いちおう切削温度はオーステナイト組織が形成される最低温度である 750°C 以上になることを暗示した。条件によってはお説のように, この温度以下で, かつフェライトの再結晶温度 450°C 以上で凝着を起す可能性があり, 本研究の第4報で報告する予定である工具寿命試験において認められた, 通常のリボン状逃げ面付着物(flank build-up)ではない単なる付着物(smear)が超硬工具横逃げ面上に形成されるのは, その場合ではないかと思われる。なお, この単なる付着物生成時には切削力はさほど上昇しない。超硬工具横逃げ面と切削面との間に流出する完全なリボン状逃げ面付着物の形成は, このようにただ部分的に凝着を起しただけでは不十分で, 工具横逃げ面全域にわたって強固な凝着を起す必要があり, この場合には切削力の著しい増大と相まって, 切削温度は単に凝着を起すに必要な再結

晶温度よりはるかに高い温度でなければならないと考えられる。事実 Trigger-Zylstra-Chao が行なった切削温度測定結果〔文献 (2) 第 9 図参照〕によれば、逃げ面凝着を起す温度は 1350°F (730°C) 程度以上であり、しかもこの温度の測定は、工具-被削材熱電被削材対法によっているため、工具すくい面および逃げ面上との接触域全体の平均値に過ぎず、したがって逃げ面凝着を起している部分の温度はこれよりはるかに高いと考えられ、このことは筆者らが逃げ面付着物の顕微鏡組織と化学組成の検討の結果推定した切削温度が不合理な値でないことを示している。

〔質問〕 主張される点よくわかりました。

さて、逃げ面付着物が示されたような組織写真であっても、切削開始瞬間のものではなく相当時間の後得られたものであろうと推察する。微量であっても融着を開始する最初の温度はやはり 450°C 付近と考える。その後順次接触面の温度上昇も起り、流動物のフェライトとグラファイト粉とで順次オーステナイト組織が形成され、それがあの組織をもつ flank build-up となるのであろう。それで 750°C までの上昇も考えられるが、この場合は正常融点よりはるかに低い温度の異常融解物中の現象であって、正常な金属変態の平衡図的行動とは異なって、比較的早急に組織変化も行なわれるものとする。結局 750°C よりはるかに低い温度で融着生成物ができるのではないか。もちろんこれにはさらに多くの実験的根拠を必要とするであろう。

(井 形 厚 臣)

〔回答〕 超硬工具横逃げ面上逃げ面付着物形成の過渡期においては、お説のように、オーステナイト組織が形成される最低温度である 750°C より低い温度、たとえば指摘されたフェライト再結晶温度である 450°C くらいでも、凝着が起り始める可能性は十分考えられるが、逃げ面付着物の形成が定常状態になった場合に

については一概に論じられず、さらに多くの実験的考察が必要であると考え。

〔質問〕 (1) 緒言で逃げ面付着物は構成刃先とは異なっているとあるが、構成刃先の流出したものではないか。

(2) 構成刃先の付着状態は各速度でどのようになっているか。

(3) 鋼材切削の場合、付図 1 のように低速では固定した構成刃先のため有効すくい角が増大し ($\alpha_0 \approx 35 \sim 40^{\circ}$)、切削力は小さいが、高速になって、すくい面温度が材料の再結晶温度を越えると構成刃先は軟化し、見掛け上はなくなり、すくい角は工具固有のものになって切削力は増大する。これ以上高速になるほど温度による軟化のためすくい面摩擦が減少し、切削力は小さくなる。しかし切りくずの裏面(すくい面に接する面)には構成刃先をおしつぶしたようなたい積層ができ、この部分の切りくずの流出速度は非常に小さく、すくい面との溶着面積が広がって切削力を増大させている。これから見ると高速でも構成刃先が完全になくなるのではなく、その核は刃先で常に発生していて、高温のためにすくい面を層をなして流出していると考えることができるが、逃げ面付着物もこの一部が逃げ面側に流出しているのではないのか。(益 子 正 己)

〔回答〕 (1) と (3) は関連があるので同時にお答える。

逃げ面付着物は超硬工具の横逃げ面に発生するのに対して、いわゆる構成刃先は通常すくい面に生ずる点で、また逃げ面付着物は逃げ面と切削面との間をリボン状に流出するのみで、いわゆる構成刃先のように切削に関与するものでない点で異なるという意味で、お説のようにいわゆる構成刃先が何らかの原因で流出したものかも知れないが、研究の現段階ではその生因についてははっきりとは結論できない。ただすくい面上

付 図 1

構成刃先が流出する際には、その流出がきわめて困難と思われる横逃げ面と切削面の間を通らなくても、すくい面上切りくず流れ方向に流出するほうが容易であろうし、また SWC 切削法のように横切刃に沿う方向に流出するほうが自然であろうと考えられる。

また高速のため高温になって構成刃先が軟化し、これが横逃げ面と切削面との間に流出する可能性もあり、お説のとおりであるが、これは元来筆者らも逃げ面付着物流出の原因ではないかと考えてはいるけれども、もしそうならば何もフェライト系ノジュラー鋳鉄に限らず、いかなる材料でも切削中構成刃先を生ずるものならば同様な現象が起ってもよいわけである。ただしいわゆる純鉄またはフェライト組織が 100% 近い鋼材では、このような逃げ面凝着現象が起ると聞いたこともあるが、筆者は実際にこのような材料を切削した経験がないので断定しかねる。ただ単にやわらかいフェライト部分だけが流出したのではないことは化学分析の結果より明らかである。この化学分析の結果明らかになったように、母材より炭素量が減っていることは、いわゆる構成刃先が母材よりかたく、おそらく炭素量が増大していることと相反し、このことから逃げ面付着物が単にすくい面上構成刃先の流出したものではないと思われる。さらに逃げ面付着物は条件によってはリボン状にかなりはやく多量に流出することから、いわゆる構成刃先より生成量が多いのではないかとと思われる。とにかく現段階では、このリボン状逃げ面付着物発生流出の原因は不明で、今後の研究課題にしたいと考えている。

切削力増大の点については、お説のようにすくい面上構成刃先の存否によることも材料によっては考えられるが、フェライト系ノジュラー鋳鉄の場合には限界削り速度付近では約 2 m/min の速度差で逃げ面付着物が発生するかしないかがめいりょうであり、切削力はそこで急に増大し、かつ切削力の振動振幅が大となること、それが送り分力に著しいこと等から、切削力増大の原因はすくい面上構成刃先の影響よりも逃げ面付着物によると考えるほうが妥当と思われる。この点に関しては、切りくずの厚さやすくい面上構成刃先の状態等と関連して、今後実験計画中の二次元切削試験によってさらに詳細に検討したいと考えている。

(2) いわゆるすくい面上構成刃先は低速では多

く、高速になるにつれて減少する。その状態は本研究第1報の第 11, 12 および 13 図を参照願いたい。

〔質問〕 工具表面の保護膜の生成に関する実験に非常に興味を感じたが、これに関連した次の二点につき伺いたい。

(1) 購入したままのチップ、すなわち空気中の酸素や水蒸気に長時間さらされたチップには、このような保護膜は存在しないのか。

(2) この保護膜は構成刃先の発生防止には役立たないか。

第 3, 5, 6 図で、70 m/min 以下では乾切削と湿切削とで切削力はだいたい同じであるが、ここでは構成刃先は発生していたのか。 (中山 一 雄)

〔回答〕 (1) 実験ではすべて市販の超硬インサートチップを用いたため、空気中の酸素や水分に長時間さらされているわけであるが、本文の報告のようにリボン状逃げ面付着物が発生したことから考えて、逃げ面凝着を阻止するだけ十分強固な保護膜は存在しないと思われる。ただし、きわめて強い水蒸気ふん囲気中へ故意に超硬インサートチップをさらした場合には、単に水を切削剤として使用した実験からも類推できるように、逃げ面凝着を阻止する保護膜が発生する可能性があると思われるが、この点については現在計画中の二次元切削の実験でさらに検討したいと考えている。

(2) この保護膜は、すくい面上のいわゆる構成刃先の発生防止にもある程度役立つと考えられるが、構成刃先に対しては逃げ面凝着が阻止されるほど強力なものではないことは、切削後超硬インサートチップを観察した結果わかった。もちろん乾式切削の場合の構成刃先とは比較にならないほど少ないものである。

第 3, 5, 6 図において、乾式切削と 2% 可溶性油液を噴霧した湿式切削で切削力がほぼ同程度の低速域では、乾式切削の場合には本研究第1報の第 11, 12 および 13 図で明らかなように、すくい面上に構成刃先が認められるが、湿式切削の場合にはほとんど認められなかった。この速度域では切削力にあまり差異はないが、乾式切削の場合にわずかに低いことがあるのは、構成刃先のために実際のすくい角が増加したためと思われる。