621. 941. 011:620. 179. 52:669. 13-8

ノ ジ ュ ラ ー 鋳 鉄 の 被 削 性*

(第 1 報. 切削力と工具逃げ面における凝着現象)

人見勝人**, 威 仁英***, G. L. Thuerling***

Machinability of Nodular Cast Irons

(Part I, Tool Forces and Flank Adhesion)

by Katsundo Hitomi, Inyong Ham,
and George L. Thuerling

Three grades of nodular cast iron (60, 80, and 100) were tested to determine the cutting force and net horsepower required to machine the materials, to determine the performance of several grades of carbide and ceramic cutting tools, and to investigate the flank adhesion phenomenon. Cutting force required to machine 80 and 100 grades decreased smoothly with an increase in cutting speed. It was found that the effect of feed rate on cutting force was larger than that of depth of cut. When grade 60 was machined with carbide tools, flank adhesion was encountered with accompanying sharp increases in cutting force values at speeds above a critical cutting speed. This critical cutting speed and the increase in cutting force decreased as the titanium content of the cutting tool increased. No flank build-up occurred with ceramic tools. This phenomenon was explained by the oxide film theory.

1. 緒 言

ノジュラー鋳鉄 (nodular cast iron) は 1948 年に初めて作られた比較的新しい材料で、普通鋳鉄と同様製法が容易であるのみならず、鋳鋼と同程度の機械的性質を有しているため、工業用材料としての使用度は年々増大している。

一般的にいて、ノジュラー鋳鉄の切削は困難ではない。1950 年にアメリカ空軍が発表した被削性報告書⁽¹⁾にも、この材料の工具寿命はその強さによって異なるが、比較的引張強さの小さいグレイ鋳鉄と同等またはそれ以上、同程度のかたさをもつ鋳鋼と同等であると記されている。ノジュラー鋳鉄は比較的新しい材料であるため、その被削性に関する研究は少なく、1952 年 Trigger-Zylstra-Chao⁽²⁾ が切削力を測定し、工具逃げ面と被削材との間に流出する逃げ面付着物 (flank build-up) を認め、この逃げ面凝着現象 (flank adhesion phenomenon) のため切削力が急に増大することを発表しており、また 1958 年 Hug⁽³⁾ が広範囲の工具寿命試験の結果について報告している程度である。

そこで本研究においては、3 種類のノジュラー鋳鉄

の被削性に関して、特に旋削作業における切削力と所要動力の測定とともに、種々の超硬工具およびセラミック工具の切削性能を調べた実験結果について述べ、あわせて工具逃げ面における凝着現象について考察を行なった。

2. 実験方法

工作機械としては、旋盤 (Lodge & Shipley 製、無段変速、動力 15HP) を用い、三次元切削を行なった。

被削材として用いたノジュラー鋳鉄は長さ 48 cm、直径 16 cm で、径 8 cm の中空を有する。実験に使用した 3 種類のノジュラー鋳鉄 (60-45-10, 80-60-03 および 100-70-03, 以下それぞれ 60 種, 80 種および 100 種と略称する) の成分、かたさおよび熱処理を第 1 表に示す。第 1 図に顕微鏡写真を示すが、これから明らかなように、黒鉛はこの鋳鉄特有の球状をなし、母体は 60 種ではフェライト組織、100 種ではパーライト組織で、80 種では両者の中間のフェライト・パーライト混合組織をなしている。

工具としては、スローアウェイ形クランプ式のものを使用し、インサートとしては、超硬およびセラミックを用いた。それらの成分、密度およびかたさを第 2 表に示す。工具の形状は、前および横すくい角 -5° 、前および横逃げ角 5° 、前および横切刃角 15° であり、

* 昭和 36 年 4 月 4 日 第 38 期通常総会講演会において論文講演として講演、原稿受付 昭和 35 年 11 月 26 日。

** 准員、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。

刃先半径は 0.79 mm (超硬 C-1, C-2, C-3, C-4, C-7, C-8, セラミック O-1) または 1.58 mm (超硬 C-5, C-6, セラミック O-2) である。

切削条件としては, 切込み 1.27~3.05 mm, 送り 0.076~0.381 mm/rev, および削り速度 31~305 m/min の範囲で変化した。

切削力については, 切削主分力と送り分力とを抵抗線ひずみ計を利用した工具動力計により測定した。

切削はすべて乾式で行ない, 通常 15~30 秒の短時間切削によったが, 工具逃げ面凝着現象の観察に際しては, 数分におよぶ切削を行なったこともある。

3. ノジュラー-鋳鉄 100 種の切削

球状黒鉛がパーライト組織に分布しているノジュラ

第1表 ノジュラー-鋳鉄の成分, かたさおよび熱処理

種 類	60-45-10	80-60-03	100-70-03
成 分			
黒 鉛	3.02	3.06	2.66
炭 素	0.16	0.46	0.70
全 炭 素	3.18	3.52	3.36
シ リ コ ン	2.34	2.23	2.35
マ ン ガ ン	0.33	0.40	0.84
リ ン	0.040	0.059	0.058
い お う	0.019	0.022	0.018
銅	0.06	0.08	0.44
ニ ッ ケ ル	0.04	0.42	0.05
ク ロ ム	0.02	0.03	0.03
モ リ ブ デ ン	0.03	0.09	0.01
バ ナ ジ ン	0.01	0.01	0.01
マ グ ネ シ ウ ム	0.036	0.033	0.059
ブリネルかたさ 範 囲	145-156	204-232	229-248
平 均	150	214	237
熱 処 理	885°C 2h保 持後炉冷	885°C 2h保 持後空冷 582°C 4h保 持後炉冷	582°C 2h保 持後炉冷

ー鋳鉄 100 種の切削に関しては, 2 種類の超硬工具 C-1, C-2 および 2 種類のセラミック工具 O-1, O-2 により広範囲の実験を行ない, その結果を第 2~7 図に示す。

第 2 図および第 3 図はそれぞれ超硬工具 C-1 およびセラミック工具 O-1 によって, 切込み 2.54 mm, 送り 0.127, 0.254, 0.381 mm/rev にて切削した場合, 削り速度の変化に伴う切削力の変動を示す。超硬 C-2 およびセラミック O-2 についても, ほぼ同様の結果が得られた。これによると, 送り分力は主分力のだいたい 40~60% であり, 切削主分力も送り分力も削り速度の増加に伴って減少している。ただし超硬工具の場合, 送りが 0.127 mm/rev の際, 削り速度が 31~69 m/min の範囲で, わずかに増大の傾向が認められた。同様の傾向は, Trigger-Zylstra-Chao⁽²⁾ および Ham-Roubik-Bunce⁽⁴⁾ によっても報告されている。

第2表 切削工具の化学的成分および物理的性質

工 具	密 度 g/cm ³	かたさ (ロックウエールA)	成 分 (重 量 %)						
超 硬			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	
C-3	11.1	92.0	65.5	8.75	10.5	2.9	4.6	7.7	
C-4	14.4	91.3	69.5	6.0	—	17.7	1.0	5.8	
C-7	9.9	95.0	69.1	2.0	19.6	—	—	9.3	
C-8*	5.5	93.5	—	—	64.0	—	—	16.0	
超 硬			W	Co	TiC	TaC			
C-5	11.98	92.2	70.7	4.5	12.6	12.2			
C-6	14.95	92.0	94.0	6.0	—	—			
セラミ ック			主 成 分						
O-1	—	92.1	酸化アルミニウム						
O-2	3.95	92.0	酸化アルミニウム						

* 他に Ni 10%, Mo 10% を含む

(a) 60-45-10 種

(b) 80-60-03 種

(c) 100-70-03 種

第1図 ノジュラー-鋳鉄の顕微鏡組織 (×300)

そこで、超硬 C-1、C-2 およびセラミック O-1 について、削り送度の変化に伴う主分力の変動を図示すると第4図のごとくなる。これによると、セラミック O-1 では超硬 C-1、C-2 に比べて、切削力は小であるが、その差はわずかで、したがってこの種のノジュ

第2図 超硬 C-1 によるノジュラー
鋳鉄100種の切削における削り
速度と切削力との関係

第3図 セラミックO-1によるノジュ
ラー鋳鉄100種の切削における削り
速度と切削力との関係

第4図 ノジュラー鋳鉄100種の切削
における削り速度と切削力との関係

ラー鋳鉄の切削に際しては、工具材料の影響は少ないといえる。

次に、切削力に及ぼす送りおよび切込みの影響を第5図および第6図に示す。いずれも超硬 C-1、C-2 では削り速度 91.5 m/min, セラミック O-1 では削り速度 152.5 m/min における実験結果で、第5図では切込みを 2.54 mm の一定に保って送りを変化し、第6図では送りを 0.254 mm/rev の一定に保って切込みを変化した場合の切削力の変動を示す。セラミック O-1 は、超硬 C-1、C-2 に比べて、切削主分力は小さく、送り分力は大きい、その差はわずかである。また、切込みあるいは送りの増加に伴う切削力の増大はほぼ直線的であるが、その割合は主分力では大きく送り分力では小さい。

そこで、切込み d mm および送り f mm と切削主分力 F_c kg との関係を表わすと、次のようになる。

$$\text{超 硬 C-1: } F_c = 139 d^{0.92} f^{0.61}$$

(削り速度 91.5 m/min)

第5図 ノジュラー鋳鉄100種の切削
における送りと切削力との関係

第6図 ノジュラー鋳鉄100種の
切削における切込みと切削力と
の関係

超 硬 C-2 : $F_c = 135 d^{0.92} f^{0.61}$
(削り速度 91.5 m/min)

セラミック O-1 : $F_c = 134 d^{0.93} f^{0.65}$
(削り速度 152.5 m/min)

これより、切込みまたは送りをそれぞれ100%増加した場合の切削主分力の増分を求めると、次のようである。

工 具 材 料	切込み 100% 増加	送り 100% 増加
超 硬 工 具	89%	53%
セラミック 工 具	90%	57%

したがって、切削主分力に及ぼす影響は、送りよりも切込みのほうがはるかに大であるといえる。

次に、超硬C-1, C-2 およびセラミックO-1, O-2により、切込み2.54 mm, 送り0.127, 0.254, 0.381 mm/rev の場合について、削り速度と切削所要動力との関係を求めると第7図のようになる。切削動力は削り速度や送りの増加につれて増大するが、その割合は高速になるほど少ない。送り0.381 mm/revの重切削に際して、セラミックO-1は比較的安定な値を示す

第7図 ノジュラー鋳鉄100種の切削における削り速度と切削動力との関係

第8図 ノジュラー鋳鉄80種の切削における削り速度と切削力との関係

が、セラミックO-2は急速に損傷することがあり、したがって高速において不安定な値を示している。

4. ノジュラー鋳鉄80種の切削

球状黒鉛がフェライト・パーライト混合組織に分布しているノジュラー鋳鉄80種に関しては、超硬工具C-1, C-2 およびセラミック工具O-1により、切込み2.54 mm, 送り0.254 mm/revにて切削した場合削り速度の変化に伴う切削力の変動を第8図に示す。

このように切削力は、削り速度の変化に伴って、ノジュラー鋳鉄100種と同様の変動を示すが、その値は5~10%低い。セラミックO-1は超硬C-1, C-2に比べて、切削主分力はわずかに小さく、送り分力は大

第9図 ノジュラー鋳鉄60種の切削における削り速度と切削力との関係

第10図 8種類の超硬工具によるノジュラー鋳鉄60種の切削における削り速度と切削力との関係

きいが、その差は無視できる程度である。送り分力は主分力の 50% 程度である。

5. ノジュラー鋳鉄 60 種の切削

球状黒鉛がフェライト組織に分布しているノジュラー鋳鉄 60 種の切削の結果を第 9 図および第 10 図に示す。第 9 図は 2 種類の超硬工具 C-1, C-2 および 1 種類のセラミック工具 O-1 について、第 10 図は 8 種類の超硬工具 C-1~C-8 について、いずれも切込み 2.54 mm, 送り 0.254 mm/rev にて切削した際の削り速度の変化に伴う切削力の変動を示したものである。このように超硬工具による切削では、前の 80 種や 100 種のノジュラー鋳鉄の場合と異なり、切削力は削り速度の変化につれて不規則な変動をすることが観察

された。これは超硬工具の横逃げ面に起る凝着現象あるいは付着物のために生じたものである。同様な結果は、Trigger-Zylstra-Chao⁽²⁾ の研究にもみられる。

この逃げ面付着物は、工具すくい面にみられるいわゆる構成刃先 (built-up edge) とは異なって、ある限界削り速度以上において、工具の横逃げ面上に発生して急激に成長し、リボン状に連なって工具の横逃げ面と被削材との間を流出するものである。その発生の限界削り速度は、後に詳述するように、工具材種によって異なり、付着物の大きさは削り速度により異なるが、時には数センチに達することもある。しかもこの現象は超硬工具に特有なもので、その例を第 11~13 図に示す。第 11 図は鋳鉄切削用超硬 C-1 について、第 12 図および第 13 図は鋼切削用超硬 C-2 および C-3 に

第 11 図 超硬 C-1 によるノジュラー鋳鉄 60 種の切削

について、切込み 2.54 mm、送り 0.254 mm/rev の場合、削り速度の変化に伴う工具逃げ面凝着現象の状況を示したものである。このように工具逃げ面に付着物が発生すると、送り分力はもちろんのこと、主分力も急激に増大する。すなわち第 9 図のごとく、鋳鉄切削用超硬 C-1 では削り速度 115.9 m/min において、鋼切削用超硬 C-2 では削り速度 100.7 m/min において凝着現象が認められ、その結果切削力は急激に増加しており、その後すぐに切削力は最大値に達する。それ以後削り速度の増加につれて、やはり逃げ面付着物を生ずるが、切削力はしだいに減少している。このように、逃げ面付着物は高速域において発生する。ただし全体にわたって、工具すくい面にいわゆる構成刃先が認められるが、これは低速域において著しい。

このような工具逃げ面における凝着現象は、セラミック工具 O-1 および O-2 では、第 14 図に示すごとく全然認められなかった。したがって第 9 図に併記するように、切削力の変動も他のノジュラー鋳鉄切削の場合と同様なめらかで、その値も超硬工具の場合に比べて小さい。しかも、超硬工具で逃げ面凝着現象の起る削り速度域において、その程度が著しい。

ノジュラー鋳鉄 60 種の切削に際しては、使用した超硬工具のすべての材種 C-1~C-8 にわたって、大なり小なりこのような逃げ面付着物が観察された。したがって第 10 図に示すごとく、切削力はある限界削り速度において急激に増加するが、このように逃げ面付着物が発生して切削力が最大値を示す限界削り速度、ならびにそれに伴う切削力の増大の程度は、超硬

第 12 図 超硬 C-2 によるノジュラー鋳鉄 60 種の切削

工具の材種によって異なることがわかる。その順序は限界削り速度の低いものから、C-7, C-8, C-3, C-5, C-2, C-4, C-1, C-6 であり、これはまた、凝着現象に伴う切削力の増大の程度の少ないものから多いものへの順序にもなっている。C-8 はいわゆるチタンカーバイドで、C-7 はチタン含有量の多い鋼切削用カーバイドであり、両者はほぼ同様の傾向を示している。C-1 および C-6 は鋳鉄切削用カーバイドで、これも同様の傾向を持つ。C-4 も鋳鉄切削用カーバイドであるが、タンタルを多く含むため、傾向は C-1 や C-6 と少し異なる。他の C-2, C-3 および C-5 はすべて鋼切削用カーバイドである。切削力が最大となる削り速度において、鋳鉄切削用カーバイド C-1 および C-6 では、送り分力のほうが主分力よりも大きい値を

示しているが、他の材種では、全体にわたって送り分力は主分力よりも小さい。工具逃げ面に発生する付着物については、限界削り速度以上に削り速度を増加した場合、鋳鉄切削用カーバイド (C-1, C-4, C-6) では、付着物の大きさは増すか、または同程度であるのに対し、鋼切削用カーバイド (C-2, C-3, C-5, C-7, C-8) では、高速域 (284 および 305 m/min) において、きわめて小さくなるか、時には消失してしまうこともある。

6. 3 種類のノジュラー鋳鉄切削における所要動力

60, 80 および 100 種のノジュラー鋳鉄について、2 種類の超硬工具 C-1, C-2 および 2 種類のセラミ

第 13 図 超硬 C-3 によるノジュラー鋳鉄 60 種の切削

ック工具 O-1, O-2 を用い, 切込み 2.54 mm, 送り 0.254 mm/rev にて切削した場合, 所要動力に及ぼす削り速度の影響を第 15 図に示す. ノジュラー鋳鉄 60 種においては, 中速域で乱れた値を示しているが, これは超硬工具を用いた際, 逃げ面に付着物が発生したための影響である. 第 15 図によれば, 一般に切削所要動力は, ノジュラー鋳鉄 100 種に比べて, 80 種では 5%, 60 種では 10% 程度少ないことがわかる.

なお, 3 種類のノジュラー鋳鉄とも, 低速域では C 形の切りくずを生じ, 高速域では細かい不連続形切りくずを生じた.

7. 工具逃げ面凝着現象の考察

ノジュラー鋳鉄 60 種を超硬工具にて切削する場合, ある限界削り速度で, 逃げ面に付着物が発生し, 切削力は急に増大する. この限界削り速度および切削力の増加量は超硬工具の材種に関係する.

そこで詳細に観察すると, この逃げ面凝着現象の起る削り速度域においても, 切削のごく初期にはまだ付

着物の発生しない期間があり, この間では切削力は, 限界削り速度以下の速度域における切削力の値と同等である. このようすを, 超硬 C-1 および C-2 について, 第 16 図に点線で示してある. しかし一度工具逃げ面に凝着現象が起ると, 付着物が生じて, 切削力は急に増大する. 限界削り速度以上において, 付着物発生後の切削力変動の模様を, 第 16 図に, 主分力については実線で, 送り分力については破線で示してある. 切削初期において, 工具逃げ面に付着物が発生して切削力が急増するまでの過渡的な期間は, 削り速度の増加につれて減少する. たとえば鋼切削用超硬 C-2 については, この期間は削り速度とともに次のように変化した.

前述のごとく, 逃げ面付着物の発生は, 超硬工具材

削り速度 m/min	過渡期間 s
100.7	9
106.8	5
114.4	3.5
122.0 以上	0

第 14 図 セラミック工具によるノジュラー鋳鉄 60 種の切削

種と削り速度による。チタンまたは炭化チタンを含む工具 (C-2, C-3, C-5, C-7, C-8) では、含まない工具 (C-1, C-4, C-6) に比べて、付着物発生の傾向が少なく、したがって切削力も低い。第 2 表および第 9, 10 図から明らかなように、チタンまたは炭化チタンの含有量が多いほど、逃げ面凝着現象の起る傾向が少なく、かつ切削力も小さい。したがって、チタンまたは炭化チタンは、逃げ面凝着現象の制御に重要な役割を果たすといえる。タンタル (超硬 C-4 参照) もこの凝着現象阻止に役立つようであるが、チタンほど効果的ではない。

工具材質ごとにチタンまたは炭化チタンが、逃げ面凝着現象に及ぼす影響については、Trigger-Zylstra-Chao⁽²⁾ は、Skaupy⁽⁵⁾ や Metcalfe⁽⁶⁾ によって提案され、Dawahl⁽⁷⁾ の実験によって確認された酸化膜説 (oxide film theory) によって、論議している。

酸化膜説によれば、酸化チタン (TiO_2) 膜は容易に形成され、その酸化層は粘着性があり、強固でかつ緻密である。しかしこの膜は、低温では、空孔状のち密

でない酸化タングステン (WO_2) 膜よりも保護する力が小さく、高温では大きい。

したがって、チタンを含まない超硬工具と種々の量のチタンを含む超硬工具によって、ノジュラー鋳鉄 60 種を切削した際の逃げ面凝着現象発生については、次のように説明される。

工具逃げ面付着物が生ずる限界削り速度以下では、切削温度は、逃げ面に凝着現象が起るにはあまりにも低く、かつ十分な量の酸化膜を生ずるほど高くない。

多量のチタンを含む超硬工具では、少量のチタンを含むかまたは全然チタンを含まない超硬工具に比べて、逃げ面凝着現象の起る限界削り速度が低い。これは、常温または低い切削温度の下に存在する酸化チタン膜は、この比較的低温で生ずる酸化タングステン膜ほど、逃げ面凝着現象を阻止するのに効果的でないことを暗示する。

限界削り速度以上の高温では、切削温度は高くなって、チタンを含む超硬工具では、多量の酸化チタンを生ずる。この酸化膜が逃げ面凝着現象を阻止し、その結果逃げ面付着物も切削力も減少する。その程度は、工具に含まれるチタンまたは炭化チタンの量に関係する。

チタンを含まない超硬工具、または少量のチタンを含む超硬工具では、高速でも引続いて逃げ面付着物の発生が見られる。しかしそれにもかかわらず、削り速度の増加に伴って、切削力の減少が認められる。これは速度効果の大きいことを意味している。

第 11~13 図から明らかなように、工具逃げ面に発生する付着物の大きさは、削り速度によって異なる。ある場合には、数センチの長さになるまで成長し続けることもある。Trigger-Zylstra-Chao⁽²⁾ は、逃げ面付着物の形成を、熱機械的作用 (thermo-mechanical action) として説明している。確かに、切削温度が十分高い場合には、被削材または切りくずの中の軟質組織 (フェライト) の一部が、工具逃げ面と被削材との間のすきまに押出され、これが工具逃げ面に凝着し、リボン状に流出する原因になると考えられる。本実験においては、Trigger-Zylstra-Chao⁽²⁾ の結果と異なり、一度逃げ面に付着物が発生すると、新しい保護酸化膜が形成されない限り、付着物は決して消失せず、切削の進行に伴って引続き成長し、工具逃げ面と被削材との間をリボン状に流出した。5~10 min にわたる長い切削でも、付着物は消失しなかった。

工具逃げ面付着物の断面の顕微鏡写真を第 17 図に示す。図中にみられる流れの線は、付着物生成の際、逃げ面と被削材との間に起る押出し効果によるものである。

第 15 図 ノジュラー鋳鉄切削における削り速度と切削動力との関係

第 16 図 ノジュラー鋳鉄 60 種の切削における初期切削力と定常期切削力

(a) 縦断面

(b) 横断面

第 17 図 ノジュラー鋳鉄 60 種の切削にみられる超硬工具
逃げ面付着物の顕微鏡写真 (×300)

ところで, この逃げ面付着物を化学分析した結果は, 次のとおりである.

成	分	含	有	量	%
黒	鉛	1.15			
化	炭	1.18			
全	炭	2.33			
マ	ン	0.31			
リ	ン	0.040			

これと, 第 1 表におけるノジュラー鋳鉄 60 種の化学成分とを比較すると, 付着物では, 母材に比べて炭素量が減少している. かつ化合物炭素量が, 0.16% から 1.18% へと, 大幅に増大している. この増加は, 付着物形成域において発生する高温によるものと考えられる.

8. 結 言

3 種類のノジュラー鋳鉄(60 種, 80 種および 100 種)について, 超硬工具およびセラミック工具にて, 旋盤による切削試験をした結果, 次の結論を得た.

1) ノジュラー鋳鉄 100 種の旋削においては, 切削力は切込みまたは送りの増加につれてほぼ直線的に増大するが, 切込みの影響のほうが送りの影響よりはるかに大である.

2) ノジュラー鋳鉄 80 種および 100 種の切削においては, セラミック工具による場合, 超硬工具による場合に比べて, 切削力はわずかに小さいが, その差は無視できる程度である.

3) 3 種類のノジュラー鋳鉄旋削に要する切削力および切削動力を比較すると, 100 種に比べて, 80 種では 5% 程度, 60 種では 10% 程度少ない.

4) ノジュラー鋳鉄 60 種を超硬工具にて切削する際, ある限界削り速度に達すると, 工具横逃げ面に凝着現象が起って, 付着物が発生する. このため, 切削

力は限界削り速度で急に増大する. それ以上の削り速度では, 増加に伴って逃げ面付着物は, 鋳鉄切削用超硬の場合, より大きく成長するか同程度に保ち, 鋼切削用超硬の場合, 一定に保つか時には高速域において消滅してしまうこともあるが, いずれの場合も切削力はしだいに減少する. 工具すくい面上のいわゆる構成刃先は, 全削り速度域にわたって認められるが, 逃げ面凝着現象の起る限界削り速度以下において, 特に顕著である.

5) 逃げ面凝着現象の起る限界削り速度, ならびにそれに伴う切削力の増加量は, 超硬工具材種によって異なり, チタンまたは炭化チタンの含有量の増加につれて減少する. 多量のチタンを含む超硬工具では, 高速域において, 逃げ面付着物が消失してしまうこともある.

6) ノジュラー鋳鉄 60 種をセラミック工具で切削する場合には, 逃げ面凝着現象は認められない.

7) ノジュラー鋳鉄 60 種を超硬工具で切削する際, 逃げ面に凝着現象が起ること, ならびに超硬工具に含まれるチタン含有量の増加につれて, この現象の発生する限界削り速度および切削力の増加量が減少すること, またセラミック工具による切削では, この現象が全くみられないことなどは酸化膜説 (oxide film theory) によって説明される. このことは逆に, この説を確証することにもなる.

文 献

- (1) *United States Air Force Machinability Report*, Vol. I (1950).
- (2) K.J. Trigger, L.B. Zylstra, & B.T. Chao, *Trans. ASME*, **74** (1952), 1017.
- (3) G. Hug, *Tool Engr.*, **41** (1958-5), 97.
- (4) I. Ham, J.R. Roubik, & J.P. Bunce, *ASME Paper*, No. 57-A-239 (1957).
- (5) F. Skaupy, *Kolloid Z.*, **102** (1943), 127.
- (6) A.G. Metcalfe, *Metal Treatment*, **13** (1946), 127.
- (7) W. Dawihl, *Z. Tech. Phys.*, **21** (1940), 337.

討

論

〔質問〕 (1) 第 6 図における実験により、セラミックの主分力が小さいにもかかわらず送り分力が大きいという現象は、見掛け上のすくい面摩擦力の増大を意味することになり、セラミックが凝着性にとぼしい事実と相反する。

これは、セラミックがもろいため切刃の先鋭度が劣化し、押込力が増大したためと考えられるがどうか。

(2) 1917 ページ右欄 9 行めに“チタンを含まない超硬工具が、逃げ面付着物の発生が見られるにもかかわらず、削り速度が大きいところで切削力が減少するのは速度効果の大きいことを意味する”とあるが、速度効果とは何を意味するのか具体的な説明が必要と思われる。

(益子 正巳)

〔回答〕 (1) セラミックバイトでは超硬バイトに比べて切削主分力が小さく送り分力が大きいという現象は常に観察されたことで、お説のようにセラミックバイトの切刃の先鋭度が劣るために押込力が増加したゆえと考えることもある程度できる。しかし第 4 報で論議する予定であるが、ある程度逃げ面摩耗が生じた後でも同様なことがいえること、また超硬バイトの場合にはすくい面上に構成刃先を生じて見掛けのすくい角が増大するのに対し、セラミックバイトではむしろ切刃が鈍化するから、超硬バイトの場合のほうが切削主分力も送り分力も小さくてよいと思われることなどより考えて、このようにセラミックバイトにおいて切削主分力が小さく送り分力が大きいという現象は、超硬バイトとセラミックバイトの切削性能の比較試験を広範囲の条件で行なって、両者の根本的な差異を明らかにしなければ、簡単には説明できない問題であろうと思われる。なお、この問題については筆者らが昭和 34 年 3 月関西支部で発表した「鋼切削における工具材質と切削機構との関係」を論文集に投稿予定であるから参照されたい。

(2) ここで速度効果が著しいといったのは、削り速度の増加につれて切削力が減少するという一般通則がはなはだしいという意味で、換言すれば、第 9 図および第 10 図において、逃げ面凝着現象の起る限界削り速度で切削力が急に増大しているが、それ以上の削り速度域において、切削力はしだいに減少し、しかもその減少率が通常の場合に比べて著しく大きいということである。

〔質問〕 これまであまり研究の行なわれていないノジュラー鋳鉄の被削性に関し、興味ある研究をされましたことに敬意を表します。なおノジュラー鋳鉄 60 種の切削に関し下記についておたずねしたい。

(1) 逃げ面における凝着面積はどのくらいであったのか。第 9 図で、限界削り速度の前後での主分力 F_t

の差は、それ以前における送り分力 F_f の値にほぼ四敵するが、もしお説のごとく逃げ面凝着現象のみが切削力増加の原因であるとすれば、この事実は逃げ面凝着面積とすくい面凝着面積とがほぼ等しいであろうことを推測させるが。

(2) 限界削り速度の前後で切りくず厚さは変化しなかったのか。第 9, 10 図の傾向は、鋼類の切削で、削り速度がある限界速度以下になると構成刃先が発生し、実質的すくい角が増し、切削力(とくに送り分力)が減少するのによく似てみえる。ただし、この場合にはその限界削り速度以下で切りくずは薄くなり、切りくずの摩擦面にむしろを生ずるから(問 1)、それで判断できる。

(3) 低速域で特に構成刃先の発生が著しかったと記しておられるが、これは切削力を低下させたのではないか。

(4) 低速域で構成刃先が発生したことは、低速域でもすくい面上では凝着を生じたものと考えられる。刃先近傍ではすくい面と逃げ面とあまり温度差はないと思われるが、そうだとすると、低速域でも逃げ面凝着を起してもよいように思われるがどうか。

(中山 一雄)

〔回答〕 (1) 逃げ面における凝着面積については、工具逃げ面と付着物とが強固に凝着しており、むりに取り去れば工具側を損傷することになるため、簡単には測定できない。断面を研磨して調べる方法が最も信頼性があるわけであるが、凝着長さが切刃に沿って一様でない場合には容易ではない。そこで簡単にしかも工具を損傷することなく付着物を取り去る方法として、本研究の第 2 報で報告する予定の切削剤を用いる方法があり、これより推定すると、付図 1 のごとく、凝着は切刃に沿って一様ではなく、かつその大きさも切削条件によって異なるが、切刃の長さ 2.5 mm に対し逃げ面の凝着平均長さは 1.5 mm 程度と思われる。

逃げ面凝着が起る限界削り速度前後における切削力の差から考えて、逃げ面凝着面積がすくい面上切りくず接触面積に等しいのではないかというお説に対しては、逃げ面凝着の根本的な性格を明らかにし、それと切削力増大との関連性を広範囲の切削条件について調査しなければ一概には結論できないことであるが、お説のごときことがいえるかも知れない。

(2) 本報告は実験方法の項で述べたように、通常の三次元切削であり、かつ切りく

付 図 1

(問 1) 中山, 井口, 精密機械, 23, 3 (昭 31-3), 104.

ずはC形または片状となり、切りくず厚さの測定が困難であった。ただ肉眼および金属顕微鏡による観察では、そんなに著しい変化はないと思われる。この点に関しては後報において二次元切削機構と関連して詳しく論議したいと思う。

限界削り速度前後における切削力の変化が、すくい面上のいわゆる構成刃先によるかどうかについては、もちろんその影響も多少あろうが、この切削力の変化は数十%に及ぶ大きいものであって、かつそれに伴って必ず逃げ面付着物が逃げ面と切削面との間にリボン状に連なって流出するのが観察されたことから考えて、切削力の急増は工具逃げ面凝着現象による原因が大部分であろうと考えられる。しかも考察の項で述べたように、切削の初期において、この凝着現象が起っていないときには切削力は小さく、ある時間経過して凝着現象が起ると直ちに切削力が増大することも切削力の増大がこの現象のためであることを裏付けているわけである。

(3) 第9図および第10図において逃げ面凝着現象が起る限界削り速度以下で削り速度の増加につれて切削力がわずかに増加しているのは、お説のように考えられると思う。

(4) 工具すくい面に生ずるいわゆる構成刃先は、切りくずが流出する側のいわば生成に適する箇所が生ずるのに対し、逃げ面付着物は工具逃げ面と切削面との間、いわば発生条件のきびしいところに生じ、しかも構成刃先のように切りくずや切削面に付着して一体となって脱落するのではなくて、逃げ面付着物自体独立してリボン状に連なって流出することから考えて、両者の性格が全く同じものであると結論することはできない。しかも考察の項で論議したように、付着物の成分は母材と異なり、ことに全炭素量の著しい減少が認められる。なお第2報において詳しく論議する予定であるが、この付着物のや金学的考察によれば、母材が黒鉛とフェライトであったのに対し、付着物はマルテンサイトまたはベイナイトに類する組織、黒鉛および若干のフェライトからなっており、この逃げ面凝着現象の起る温度は異常に高いと考えられる。これらのことから、すくい面で構成刃先が生じた場合、同時に逃げ面に凝着現象を起さなければならないと一概にはいえず、さらに詳しい検討を要すると思われる。

【質問】 ノジュラー鋳鉄切削における特異現象を追求していることは大変興味深い。以下若干気のついたことを述べる。

(1) 凝着に影響を及ぼす因子は多く、かつ複雑である。ゆえにそれを単に酸化膜だけで説明するためには、よほど決め手となる実験が必要である。この他に考えられる因子は、A. 温度(工具材の熱伝導率にも関係)、B. 超硬中のCoの量の相違、C. 金属と工具材との間の work of adhesion (Trentの実験によ

ればWCはTiCに比しフェライトに対しより溶着しやすい)などである。

(2) いわゆるフランクは過酷な条件にあるために酸化膜が metallic contact を阻止するということはちょっと考えられない。もしそういうことがありとすればフランクの縁部においてである。だいたい溶着が発達するのは上記縁部であることより、その発達の原因として考えられるものは、お説の酸化膜と適度な温度というもののようと思われる。機械的に酸化膜を破るチャンスを有し、かつそこで適当な温度を保てる場合(WCはTiCより熱伝導率が高い)には高速になっても、溶着が成長しつづけると思われる。

(3) 高速になると溶着が“消滅”するという言葉が用いられているが、温度が高くなっても無くなるということではなく、薄い temperature welding の膜として残り、温度がある程度まで下がると厚みを増し、pressure welding となって pile up すると考えられる。

(4) 結論(7)でセラミック工具において溶着がみられないことは酸化膜説でよりむしろ work of adhesion の大小あるいは熱伝導率の悪いことに基く高温(界面の温度こう配が大)ということの説明のほうがしやすいと思われる。(竹山 秀彦)

【回答】 (1) お説のように逃げ面凝着に及ぼす因子は多くあるが、この第1報では、ことに超硬バイトに含有されるチタンの量と逃げ面凝着現象との関係を詳しく論議し(第9, 10図および考察の項参照)、逃げ面凝着現象の起る限界削り速度と切削力の増加量がチタン含有量によってどのような影響を受けるかということが酸化膜説によっていちおう説明できることを示しただけで、酸化膜説によってすべての凝着現象が説明できるという意味ではない。なお第2報で論議するように、逃げ面凝着現象に及ぼす最も重要な因子は切削温度である。

(2) 酸化膜が工具逃げ面全体にわたって発生して凝着現象を阻止するかどうかについては、さらに詳しい資料が必要で、現段階においては一概にはいえない。お説のごとく、適度の切削温度が逃げ面凝着現象に重要な役割を持つことは第2報において論議するとおりである。これがまた低速および超高速域において、この現象が認められない原因と考えられる。

(3) 本研究において、凝着現象が起ったかどうかは、工具逃げ面と切削面との間にリボン状の付着物が流出するのが観察されたかどうか、また切削力およびその振幅が増大したかどうかによって判定した。チタン含有量の多いある種の超硬バイトによる場合、超高速域において凝着現象が見られなかったと述べたのはその意味である。リボン状のものが流出しなくても工具逃げ面に薄膜として存在していることもあると考えられるが、一般的にいて、顕微鏡で観察してもはっ

きりとは認められなかった。ただし、第 4 報で論議するが、リボン状ではなくて単なる付着物が工具逃げ面に存在することは、時に観察された。

(4) セラミックバイトでは超硬バイトに比べて金属材料との溶着性が少ないという事実によって、逃げ面凝着現象がセラミックバイトで認められないことをある程度説明できるわけであるが、本報では超硬バイトの場合と関連して酸化膜説によって説明を試みた。

セラミックでは超硬に比べて熱伝導率が小さいために高温になるから凝着現象が起らないのではないかという点については、単にこれだけの理由ならば、超硬バイトで凝着現象の起ると同程度の温度に達するセラミックバイトの削り速度域 (超硬バイトの場合より低速側と考えられる) では逃げ面凝着が起ってもよいわけで、やはり酸化膜説のほうが説明しやすいと考えられる。

539. 432:621. 992. 7

転造条件が転造ねじの疲れ強さに及ぼす影響*

(第 2 報, 転造 V みぞ付試験片の回転曲げ疲れ強さ)

吉 本 勇**

The Effect of the Thread Rolling Conditions on the Fatigue Strength of the Rolled Screw Threads (2nd Report, Rotating Bending Fatigue Strength of the Specimens with Rolled V Groove)

by Isamu YOSHIMOTO

In order to clarify the effect of rolling conditions on the fatigue strength of the rolled screw threads, the V grooves were rolled on the cylindrical specimens and the rotating bending fatigue tests were carried out on these specimens. For this purpose the simple rolling attachment was designed and manufactured. The rolling pressure in the case where the V grooves were rolled by this attachment, was measured. This rolling process was analysed, and compared with the process of thread rolling. In the experiment the rolling conditions of the V groove were changed by varying the number of revolutions of the specimen during rolling process. The specimen materials were medium carbon steel cold worked and Cr-Mo steel quenched and tempered. As a result it was found that the endurance limits of the specimens with the rolled V groove were 2.5~2.8 times higher than those of the specimens with the cut V groove. Statistical analysis has shown that there exists a definite relationship between the rolling condition and the endurance limit.

1. 緒 言

第 1 報⁽¹⁾においては転造ねじの疲れ強さに関する従来の研究を解析し、転造ねじの疲れ強さはそのねじが転造されたときの条件に影響されるのではないかということを経験した。次に転造条件をどのように表現すればよいかということについて考察を行ない、転造条件を転造の始めからねじ山が完成するまでの素材のころがり数および転造圧力曲線の形式によって表現することを提案した。

転造ねじの疲れ強さにはボルト、ナットの精度とか締付け力の大きさなどが大きな影響を及ぼすので、考察を簡単にするため本報では丸棒に V みぞを転造し、これを試験片として回転曲げ疲れ試験を行なうことにした。V みぞを転造する際の条件をいろいろ変えることに對し、本報では転造圧力曲線の形式を一定にし、転造中の試験片のころがり数だけを変化させることにした。

転造 V みぞ付試験片の回転曲げ疲れ強さについては川田・中沢⁽²⁾の研究があるが、川田らの研究における V みぞの転造条件は現在使用されているねじ転造の条件とかなりかけはなれている。ここに報告する研究では現在使用されているねじ転造の条件に對する範圍

* 昭和 36 年 4 月 4 日 第 38 期通常総会講演会において論文講演として講演, 原稿受付 昭和 35 年 11 月 30 日。

** 正員, 東京工業大学精密工学研究所 (東京都目黒区大岡山 1)。