鑄鉄の被削性*

奥 島 啓 式** 岩 田 一 明** 中 富 逸 郎**

Machinability of Cast Iron

Keiji OKUSHIMA, Kazuaki IWATA, Itsuro NAKATOMI

Machinability of cast iron was investigated from the viewpoint of chip formation, tool life, and surface finish.

Cutting mechanism of cast iron was analysed based upon the flow region concept. The effects of depth of cut and rake angle on the cutting process were discussed.

The most suitable tool material for cutting cast iron was selected and effects of cutting conditions on tool life were investigated over a wide range.

Machinability based upon surface finish was discussed in connection with tool wear.

1. 結 言

鑄鉄は、グラファイト、フェライト、パーライト、ソルバイト、セメントライト、ステダイト、非金属介在物等が、複雑に構成されて各種の組織を形成しているために被削性もかなり複雑である。このため、従来から多くの研究がなされて来たが、その結果、組織、結晶粒子の大きさ等が被削性に影響する最も大きな因子であることが明らかにされた。¹⁾²⁾そして、被削性も組織毎に——例えば、普通鑄鉄、高級鑄鉄、チルド鑄鉄、ノジュラー鑄鉄等——実験検討が加えられている。³⁾⁴⁾鑄鉄切削においては、切りくずの脆性が大で、常に不連続切りくずを生じること、切削力が鋼にくらべて小さいこと、工具一切りくず接触面におけるグラファイトの作用等、鋼切削の場合とその切削機構を非常にことにしている。

そこで、本研究は、まず、切りくず生成の立場からみた被削性について、流れ領域の概念にもとづいて、切削機構的に検討を加え、ついで、切削時の種々の工具寿命試験結果についてのべ、さらに、仕上げ面あらさについては、工具寿命との関連性において、実験結果に考察、検討を加え、総合的に鑄鉄の被削性を明らかにせんとしたものである。

2. 実験装置および方法

試験被削材として、表1に示す化学成分を有する普通鑄鉄を使用し、切りくず生成、工具寿命、仕上げ面あらさの立場からみた被削性を検討するために、二次元切削および三次元切削を実施した。

表1 被削材の化学成分

成 分	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo
含有量	2.78	1.28	0.53	0.17	0.094	Nil	Nil	Trace	0.04

(I) 使用工作機械……新潟鉄工所製 45 SD 高速な
らい旋盤

(II) 使用工具および刃部形状

(a) 二次元切削……超硬工具 (H-1 種) JIS 33-3
型右勝手(ろう付完成バイト)
(0-5-5-5-5-0-0.1 mm)

(b) 三次元切削

(i) 最適工具材種選択実験……超硬工具 G-1 F,
G-2 F, H-1, H-2,
U-2 の 5 種類,
サーメット工具
(タイカット)
JIS 31-3 形右勝
手(ろう付完成)
バイト (0-5-5-
5-15-15-0.3 mm)

(ii) 切削条件の影響………超硬工具 H-1
(送り, 切り込み変化) (0-5-5-5-15-15-
-0.3 mm) '
送り 0.16, 0.28.
0.4 mm/rev
切り込み 1, 3 mm

(c) 試験法 (i) 鑄鉄の黒皮は、スケール、砂
などが、噛み込まれており、
鑄鉄そのものの性質とは異な
つているので、実験に先だつ

* 昭和36年10月26日精機学会秋季大会で講演。

** 京都大学工学部 正会員

てこの黒皮除去の切削を行なつた。

(ii) 切削力の測定は、抵抗線ひずみ計を利用した切削動力計を使用した。

(iii) 仕上げ面あらさと工具摩耗との関連性についての実験では、工具寿命試験を行なつた被削材の表面あらさが測定出来るように、補助装置を製作してあらさ検査機を旋盤上にセットした。なお、あらさ検査機は、大越式触針あらさ検査機を使用した。

3. 切りくず生成の立場からみた被削性

(A) 不連続切りくず生成における流れ領域面積の解析
切削が過渡的な変形領域内で、逐次すべりを生じるとの考え方による切削機構の解析において、切りくずが不連続である場合、図1のような切削模型を考える。

図1 切削模型

ここで、不連続形切りくずは、流れ領域終了境界線上におけるせん断応力が、破かい限に達するために生じると考えられる。

不連続切りくず生成における流れ領域面積 S は、 AB が直線であると近似すると、次式のようになる。

$$S = \frac{1}{2} \cdot \frac{t_1 \cdot t_2}{\sin \phi_1 \cos (\phi_2 - \alpha)} \sin \phi \quad (1)$$

ここで、 t_1 : 切り込み mm

t_2 : 切りくず厚さ mm

α : すくい角 deg

ϕ : 流れ領域広がり角 deg

ϕ_1 : 流れ領域開始境界線傾斜角 deg

ϕ_2 : 流れ領域終了境界線傾斜角 deg

ここで流れ領域開始・終了境界線 ϕ_1 , ϕ_2 及び広がり角 ϕ

は、次式で求められる⁵⁾。

$$\phi_1 = \frac{1}{2} (K_1 - \beta + \alpha) \quad (2)$$

$$\phi_2 = \frac{1}{2} (K_2 - \beta + 2\alpha) \quad (3)$$

$$K_1 = \sin^{-1} \left\{ \frac{2}{k_1} \sin \beta + \sin (\beta - \alpha) \right\} \quad (4)$$

$$K_2 = \cos^{-1} \left\{ \frac{2}{k_2} \sin \beta - \cos \beta \right\} \quad (5)$$

$$k_1 = l/t_1, k_2 = l/t_2, l: \text{接触長さ mm} \quad (6)$$

$$\phi = \phi_2 - \phi_1 = \frac{1}{2} (\alpha - K_1 + K_2) \quad (7)$$

つぎに、 OP 上のせん断応力 τ_{op} は

$$\tau_{op} = \frac{R \sin \phi \cos (\phi - \alpha + \beta)}{bx} \quad (8)$$

R : 切削力 kg, b : 切削巾 mm で求められる。

(B) 実験結果ならびに考察

超硬工具 H-1 種を用いて、普通鋳鉄の切削力 (主分力, 背分力) を測定した結果が、図2(a)(b)である。
(a)図は切削速度 95 m/min, 切り込み 2 mm, 横すくい角 5° と一定にして、送りを変化させた場合、(b)は切削

図2 送り並びに横すくい角による切削力の変化

速度 95 m/min, 切り込み 2 mm, 送り 0.18 mm/rev と一定にして, 横すくい角を変化させた場合について, それぞれ求めたものである。

つぎに, 図 3(a)(b) は, 切りくず厚さおよび接触長さの測定結果を示している。

図 3 送り並びに横すくい角による接触長さ切りくず厚さの変化

(a) 送りの影響……送りを 0.1, 0.18, 0.28, 0.4 mm/rev と変化させた場合の流れ領域開始・終了境界線傾斜角 ϕ_1, ϕ_2 , 広がり角 Φ , 平均摩擦角 β , 平均せん断応力 τ , 開始および終了圧縮応力 σ_1, σ_2 , 平均せん断応力 τ_0 , 平均圧縮応力 σ_0 , 更に, 流れ領域面積 S の計算結果を図 4(b) に示す。図より明らかなように, ϕ_1 は送りの大ききにかかわらずほぼ一定であるが, ϕ_0, ϕ_2, Φ は, 送りの増加にともなつて増大し, β は逆に, 減少の傾向を示す。つぎに, τ_0 は, 約 44 kg/mm² で, ほぼ一定値を示しているが, $\tau_1, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_0$ は, 送りの増加と共に減少の傾向を示している。 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_0$ の関係を見ると, 切削開始後, 圧縮応力は次第に増大して, 終了境界圧縮応力 σ_2 となり, σ_0 は σ_2 より, やや低い値と

なっている。一方, 流れ領域面積 S は, 送りの増大にともなつて増加していくことが図より明らかである。

図 4a 送りを変えた場合の計算値
被削材: 普通鑄鉄
工 具: H-1 (JIS 33-3 型)
工具形状: (0-5-5-5-0-0.1 mm)
切削速度: 95 m/min
切り込み: 2 mm

図 4b 送りを変えた場合の計算値
切削条件: 図 4a に同じ

(b) 横すくい角の影響……横すくい角を $-20^\circ, -10^\circ, 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ と変化させた場合の計算結果を, 図 5(a)(b) に示す。横すくい角の増加にともなつて, ϕ_1, ϕ_2, ϕ_0 及び β が増大し, Φ もまた, 漸増の傾向を示す。つぎに, τ_1 は, 横すくい角の影響をほとんど示さないが, σ_1, σ_2 は, 横すくい角の増加にともなつて減少する。また, S も, すくい角の増加とともに減少することが明らかである。

(c) 切削模型図……上述の計算結果により, 切削模型を画くと, 図 6(a)(b) の如くなる。(a)図は, 送りを変え

図 5 a 横すくい角を変えた場合の計算値
 工 具 : H-1 (JIS 33-3 型)
 工具形状 : (0-Var. 5-5-5-0-0.1 mm)
 切削速度 : 95 m/min
 送り : 0.18 mm/rev
 切り込み : 2 mm

図 5 b 横すくい角を変えた場合の計算値
 切削条件 : 図 5 a に同じ

図 6 a 送りを変えた場合の切削模型

図 6 b すくい角を変えた場合の切削模型
 工 具 : H-1, 切削速度 : 95 m/min
 切削巾 : 2 mm

た場合であり、(b)図は、すくい角変化の場合を示している。この図より、鋳鉄切削機構の概観を知ることが出来ると思われる。

4. 工具寿命の立場からみた被削性

普通鋳鉄の工具寿命の立場からみた被削性を検討するために、ここでは、最適工具材種選択ならびに、切削条件の影響についての実験を行なった。

A. 最適工具材種選択実験……普通鋳鉄切削における最適工具材種を選択するために、超硬工具 5 種類、サーメット工具 1 種類の合計 6 種類を用いて、送り 0.28 mm/rev、切り込み 1 mm、切削速度 65~140 m/min の条件のもとで長手切削を行なった。その結果が、図 7 (a)(b) である。(a)図は、フランク摩耗を基準 ($V_B' = 0.3$ mm) とした場合の寿命曲線であり、(b)図は、すくい面摩耗 ($K_T = 0.05$ mm) を基準とした場合の寿命曲線である。なお、ここで、サーメット工具を用

図7a 工具寿命曲線 (逃げ面摩耗基準)

被 削 材 : 普通鋳鉄

工具形状 : (0-5-5-5-15-15-0.3 mm)

切削条件 : 送り 0.28 mm/rev, 切り込み 1 mm

図7b 工具寿命曲線 (クレタ摩耗基準)

被 削 材 : 普通鋳鉄

工具形状 : (0-5-5-5-15-15-0.3 mm)

切削条件 : 送り 0.28 mm/rev, 切り込み 1 mm

いているのは、サーメット工具の鋳鉄への適応性について検討する目的をもっていたからである。

図より明らかなように、鋳鉄切削に最も適している工具は、フランク摩耗では、U-2 (汎用種) が良好で、低速になると、サーメット工具も良好な工具寿命を有している。鋳鉄切削用工具の中では、H-1 種が最もよく、G1F, G2F 種は低い寿命を示している。一方、すくい面摩耗の立場より見ると、サーメット工具が最も良好な寿命を示し、最も悪いのは、H-2 種である。しかし、鋳鉄切削においては、すくい面摩耗が工具の寿命を支配すること

が一般であるから、すくい面摩耗で、工具寿命を判定するのが適当である。

つぎに、工具摩耗形態を詳細に観察すると、工具材種によつて、摩耗形態がことなつているのが見出される。

すなわち、鋳鉄切削用工具 (例えば、H-1, G-1 等) で鋳鉄を切削すると、図8(a)に示すように、ノーズ部摩耗が平均部摩耗に比して著しく大きく、境界フランク摩耗がほとんど生成しないのに反して、汎用種 (例えば、U-2) 鋼切削用 (例えばST-1, 特に、摩耗形態を知る為に実験を行なつた) では、境界フランク摩耗の生成が観察され、図8(b)のような摩耗形態を示す。この現象の原因については、なお結論を下しえないが、特に、かえり現象と関係があるようである。

サーメット工具の鋳鉄切削への適応性については、工具寿命の立場からみれば、その性質は、若干改善されるようであるが、鋼切削の場合のように顕著なる傾向は現われない。また、この際、一般にフランク摩耗が、クレタ摩耗よりも大であり、同一切削速度でも、その寿命にかな

りのバラツキが存在することを留意すべきである。

B. 切削条件の工具寿命への影響

図9は、送りの工具寿命への影響を図示したものである。ここで、フランク摩耗の基準として、 $V_B' = 0.4 \text{ mm}$ を採用したのは、送りが 0.4 mm/rev となると、フランク摩耗は、初期摩耗で 0.3 mm 以上となるため、基準として、0.3 mm を採用出来なかつたためである。図より明らかなように、送りが 0.28 mm/rev では、寿命は、すくい面摩耗によつて決められるが、送りが 0.16 mm/rev となると、寿命はフランク摩耗によつて左右される。

次に、切り込みの影響についての結果が、図10である。切り込みの増大は、寿命に悪影響を示し、この場合切り込み 1 mm から 3 mm にすると、20分寿命切削速度で、約30%寿命が低下することが認められた。

図8 鋳鉄切削摩耗形態

図 9 工具寿命に及ぼす送りの影響

被 削 材：普通鋳鉄

工 具：JIS 31-3 型 H-1 種

刃部形状：(0-5-5-5-15-15-0.3 mm)

切削条件：切り込み 1 mm 一定

寿命基準： $V_B' = 0.4$ mm $K_T = 0.05$ mm (黒くぬりつぶし)

図 10 工具寿命に及ぼす切り込みの影響

被 削 材：普通鋳鉄

工 具：JIS 31-3 型 H-1

刃部形状：(0-5-5-5-15-15-0.3 mm)

切削条件：送り 0.28 mm/rev

寿命基準： $V_B' = 0.3$ mm $K_T = 0.05$ mm

5. 仕上げ面あらさの立場からみた被削性

(特に、工具摩耗との関連について)

仕上げ面あらさの立場からみた被削性を検討するにあたって、従来では、研摩直後のバイトを用いて切削を行ない、生じたところの最大あらさによつて良否を判定して来た。しかしながら、実際には、常時、研摩直後のバイトを使用するのでなく、必ず工具の摩耗をともなつたものを使用しているのである。このため、切削加工上の精度等を問題とする被削性を検討するにあたっては、工具摩耗との関連において、十分吟味しなければならない。この問題については、すでに佐田・天野⁶⁾が、高炭素鋼、クロム・モリブデン鋼について報告を行なっているが、ここでは、鋼の場合と性質をかなりこととする鋳鉄の場合について、実験、考察を行なつた。

まず、図11は、研摩直後のバイトを使用した場合の最大仕上げ面あらさと切削速度との関係を示したもので

切削速度の上昇とともに、仕上げ面あらさは改善される。

図 11 仕上げ面あらさに及ぼす切削速度の影響

次に、図12(a)(b)は、バイトの平均部摩耗量と、最大仕上げ面あらさの関係を示したものである。即ち、(a)図は、切削速度を5段階に変えた場合の鋳鉄の実験結果であり、(b)図は、鋼切削の場合の結果を(a)図との比較のために示したものであり、又、(b)図中、記号Sの曲線は参考として、佐田氏のデータを示したものである。

鋼の場合は、工具の平均部摩耗量の増大とともに最大仕上げ面あらさが単調に増大するのが明らかであるが、鋳鉄の場合は、切削速度が低い程、摩耗量の増加に伴うあらさの増加が著しいことが認められる。そして、ある限界摩耗量(この摩耗量は、切削速度によつて変化するが、それを結んだ線を仕上げ面あらさ減少境界線と呼ぶこととする)に達すると、逆に、摩耗の増大とともに仕上げ面あらさが減少し、更にある限界摩耗量以

図 12 a 工具摩耗と仕上げ面あらさの関係

被 削 材：普通鋳鉄

工 具：JIS 31-3 型 H-1

工具形状：(0-5-5-5-15-15-0.3 mm)

上となると、再び増大の傾向を示す。

上述のような傾向を示す理由としては、次のように考えられる。当初、切削の進行とともに、仕上げ面あ

らさが増大する主な原因としては、工具刃部のあらしの変化が考えられる。即ち、切削前に良好に仕上げられていた工具の切れ刃部分が切削開始直後より微細な欠けの現象を生じて、切れ刃部分のあらしが増大し、これが仕上げ面に影響して、仕上げ面あらしが増大するものと考えられる。

次いで、工具摩耗

図 12b 工具摩耗と仕上げ面あらしの関係
被 削 材 : S 45 C
工 具 : JIS 31-3 型 ST-1
工具形状 : (0-5-5-5-15-15-0.3 mm)

が、仕上げ面あらし減少境界線を越えたところで、仕上げ面あらしが改善される原因としては、工具摩耗の進行にともなう工具刃先形状の変化が考えられる。一般に、切削に際して工具のフランク摩耗はノーズ部、前逃げ面、横逃げ面の平行部および境界で生じるが、鋳鉄切削では、工具寿命の項でのべたように、境界摩耗は、ほとんど問題でなく、仕上げ面あらしに影響を及ぼす工具摩耗は、主としてノーズ部及び前逃げ面の平行部となると考えられる。ところで、本実験で採用した条件に従えば、最大仕上げ面あらしは、ノーズ半径、送りの他に前切れ刃角も影響を与えて、理論的には、次式で表わされる。

$$H_{\max} = r(1 - \cos \varphi) + S \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi - \sin \varphi \sqrt{S \cdot \sin \varphi (2r - S \cdot \sin \varphi)} \quad (9)$$

ただし $S \geq 2r \tan \varphi$

r : ノーズ半径 mm φ : 前切れ刃角 deg

S : 送り mm/rev

(9) 式の関係を図示すれば、図 13 のごとくなる。図は横軸に前切れ刃角を、縦軸に最大あらしをとり、ノーズ半径をパラメータとして表わしているが、図より仕上げ面あらしは、前切れ刃角が減少しノーズ半径が大となるに従って減少することが分かる。実験結果によれば工具摩耗が進行するに従い、ノーズ半径が増大し前切れ刃角が減少する傾向が認められ、この結果上に示した関係により、仕上げ面あらしが良好になるものと考えられる。

図 13

6. 結 論

普通鋳鉄の被削性について、切りくず生成、工具寿命、仕上げ面あらしの立場から検討した結果、次の結論を得た。

(1) 鋳鉄切削時の現象を流れ領域を考慮した二次元切削機構にもとづいて調べ、切削機構を明らかにし、更に、不連続切りくず生成における流れ領域面積を求めて、すくい角、送りの影響について検討を行なった。

(2) 工具寿命の立場からみた場合の鋳鉄切削用の最適工具材種は、U-2 種であり、鋳鉄用工具の中では、H-1 種が最もよい。又、サーメット工具も、鋳鉄切削に良好な工具寿命を示すことが明らかとなつた。

(3) 鋳鉄においては、仕上げ面あらしは、工具摩耗が増大すると、当初は、それにとまって増大するが、仕上げ面あらし減少境界線以上の摩耗となると仕上げ面あらしは減少し、次いで再び上昇する。これらの原因としては、ノーズ部及び前逃げ面摩耗による工具形状の変化が主なる原因と考えられる。(1961, 11月14日受付)

文 献

- 1) Woldman & Gibbons: Machinability and machining of metals (1951) p.228—260.
- 2) Michael Field & E.E. Stansbury: Trans. A.S.M.E. (1947) p.664.
- 3) 竹山, 糟谷, 谷戸, 吉川: 精密機械, 27巻2号 (1961) p.39—44.
- 4) Hitomi & Thuring: Trans. A.S.M.E. S. B. Vol.83 (1961) p.142—154.
- 5) 奥島, 人見: 日本機械学会論文集 25, 150 (昭和34) p.54—60.
- 6) 佐田, 天野: 精密機械, 26巻11号 (1960).

最後に、再び仕上げ面あらしが増大するのは、工具が摩耗して切れ味が低下し、刃先が荒れてくること及び被削材、工具の振動が大きくなることによるものと考えられる。