621.9.011:539.386:620.186.4

金属材料の被削性に関する研究*

(組織と切削機構の関連性)

奥島 啓 式**, 岩田 一 明**

A Study of Machinability of Metals

(Effect of Microstructure of Materials on Cutting Mechanism)

by Keiji OKUSHIMA and Kazuaki IWATA

Cutting mechanism of materials accompanying strain-hardening was analysed on the basis of the flow region concept.

The effect of microstructure of materials on machinability of carbon steels (S15C, S40C, and SK4) was investigated from the viewpoint of chip formation.

The effect of microstructure of materials on the cutting force, the location and the size of the flow region, the mean friction angle on the tool face, the conventional shear angle were discussed. The effects of feed and side rake angle on cutting process were also discussed.

It was found out that inclination of the starting boundary line of the flow region was almost constant, and inclination of the end boundary line and the size of the flow region showed a maximum value at the lamellar portion of pearlite of 20 to 30 %.

Shear stress in the flow region and the conventional shear stress showed a tendency to decrease with an increase in the lamellar portion of pearlite.

1. 緒 言

金属材料の被削性は、従来より多くの研究者によって取上げられ、最近においても、被削性全般にわたる体系づけのために、多くの努力がなされているが、影響する因子が多く、かつ複雑であるために、いまだ十分に体系づけられていない。被削性の研究は、最終的には被削材と工具の化学成分、機械的性質と切削条件から、工具寿命、仕上面あらさ、切削動力(切削抵抗)、切りくず生成ならびに切りくず形態等を知ることを目的とするのであるが、その解明の第1段階は、金属切削理論の解析と被削性に影響する因子に関する詳細な検討であると考えられる。

このため、本研究はまず金属切削理論として、流れ領域の概念に基いて加工硬化を考慮した場合の解析を試み、次いで、被削性に影響する因子として重要と考えられる顕微鏡組織を取り上げ、詳細な検討を加えた。すなわち、被削材料として、低、中、高3種類の炭素鋼を取り上げ、それぞれに種々の熱処理をほどこして、4段階の組織に変化させ、顕微鏡組織の被削性に及ぼ

す影響を切削機構の立場から、実験、考察を行なったものである***。

2. 加工硬化を考慮した場合の
二次元切削機構の解析

流れ領域の概念に基いた切削機構の解析において、被削材が完全塑性体であると仮定した場合については、すでに詳細なる報告がなされている⁽¹⁾。

ここでは、被削材の加工硬化を考慮して、せん断応力と、せん断ひずみの関係が、第1図のごとくであると仮定した場合について解析を行なった。

まず、せん断応力とせん断ひずみとの間には、仮定により、次の関係式を得る。

$$\tau = \tau_y + k\gamma \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 τ_y は、被削材の降伏せん断応力、 k は加工硬化の定数である。

次に、流れ領域の概念に基いた切削模型(第2図)において、切削が始まると、被削材は過渡的変形領域をへて、切りくずを流出するのであるが、流れ領域開始境界線 $\overline{OA}$ 上において、材料は降伏状態となるため、

* 昭和37年4月2日 第39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36年11月28日。

** 正員、京都大学工学部(京都市左京区吉田本町)。

*** 被削性の他の重要な要因である工具寿命および仕上面あらさの観点からみた金属材料の組織の影響については、本研究の続報として報告する予定である。

この線上のせん断応力は、降伏せん断応力となり、次いで、材料が流れ領域を通過するにもなって加工硬化を生じて、流れ領域終了境界線 $\overline{OB}$ 上において、ある程度硬化され、その状態で切りくずとなる。さらに、すくい面上切りくず接触面 $\overline{OD}$ 上では、この状態の切りくずが、二次塑性流れによって硬化されるが、この面上のせん断応力 τ_{OD} は、近似的に OB 上のせん断応力と等しく、かつ、 OA, OB, OD 各面上では、せん断応力が均一に分布しているものと仮定する。なお流れ領域の開始境界線 $\overline{OA}$ および終了境界線 $\overline{OB}$ は、実際には、 OA', A, OB', B に示すごとく、下および上にとつの状態を呈しているが、いずれも直線と仮定している。

するとこれらの関係式は次式のごとく表わされる。

$$\tau_{OA} = \frac{R \cdot \sin \phi_1 \cdot \cos(\phi_1 - \alpha + \beta)}{t_1} = \tau_y \quad \cdots (2)$$

$$\tau_{OB} = \frac{R \cdot \cos(\phi_2 - \alpha) \cos(\phi_2 - \alpha + \beta)}{t_2} = \tau_y + k\gamma \quad \cdots (3)$$

$$\tau_{OD} = \frac{R \cdot \sin \beta}{l} = \tau_y + k\gamma \quad \cdots (4)$$

ここで、

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

α : すくい角 deg

t_1 : 切込み mm

t_2 : 切りくず厚さ mm

$$\beta = \tan^{-1} \left\{ \frac{F_v + F_h \tan \alpha}{F_h - F_v \tan \alpha} \right\} \quad \cdots (5)$$

すくい面上平均摩擦角 deg

R : 切削に要する全切削力 kg

F_h : 主分力 kg

F_v : 背分力 kg

l : 接触長さ mm

そこで、 ϕ_2 は (3), (4) 式より次のように求められる。

$$\phi_2 = \frac{1}{2}(K_1 - \beta + 2\alpha) \quad \cdots (6)$$

第1図 せん断応力-せん断ひずみ線図

$$K_1 = \cos^{-1} \left\{ \frac{2}{k_1} \sin \beta - \cos \beta \right\} \quad \cdots (7)$$

$$k_1 = l/t_2 \quad \cdots (8)$$

次に、 OB 上のせん断応力を τ_{OB} 、せん断ひずみを γ_2 とすると、

$$\tau_{OB} = \tau_y + k\gamma_2 \quad \cdots (9)$$

$$\gamma_2 = \cot \phi_2 + \tan(\phi_2 - \alpha) \quad \cdots (10)$$

の関係が成立する。この関係を用いて、 ϕ_1 を求めると

$$\phi_1 = \frac{1}{2} [\sin^{-1} \{2K_3 - \sin K_2\} + K_2] \quad \cdots (11)$$

$$K_2 = \alpha - \beta \quad \cdots (12)$$

$$K_3 = \frac{\sin \beta}{k_2} - \frac{k\gamma_2 t_1}{R} \quad \cdots (13)$$

$$k_2 = l/t_1 \quad \cdots (14)$$

をうる。

さらに、流れ領域広がり角 ϕ は、

$$\phi = \phi_2 - \phi_1 = \frac{1}{2} \{K_1 + \alpha - \sin^{-1} (2K_3 - \sin K_2)\} \quad \cdots (15)$$

となる。

以上は、加工硬化を考慮した場合であるが、金属切削では實際上、切削時のひずみ速度が非常に大であることと、切削時の熱の作用のため、現段階では (1), (13) 式の k の値を材料試験の結果より直接に求めることができない。さらに、奥島・人見の実験結果⁽²⁾, Drucker⁽³⁾ の見解によると、ひずみ速度が非常に大である場合、加工硬化の影響は非常に小であるとのべている。そこで、組織を変化させた金属材料の被削性については、加工硬化をいちおう考慮外において検討を加えることとする。

加工硬化を考慮しない場合は、 $k=0$ において、 ϕ_1 を求めると (11)~(15) 式に相当する次式が得られる。

$$\phi_1 = \frac{1}{2}(K_4 + K_2) \quad \cdots (16)$$

$$K_4 = \sin^{-1} \left\{ \frac{2}{k_2} \sin \beta + \sin(\beta - \alpha) \right\} \quad \cdots (17)$$

$$k_2 = l/t_1 \quad \cdots (18)$$

第2図 切削模型

$$\phi = \phi_2 - \phi_1 = \frac{1}{2}(\alpha - K_4 + K_1) \dots\dots\dots (19)$$

3. 流れ領域におけるせん断応力, 圧縮応力, せん断ひずみの関係式

切削が単一せん断面で行なわれていると考えた場合のせん断長さ, せん断応力等の関係式はすでに導かれ, せん断応力に及ぼす影響についても, Kececioglu⁽⁴⁾, Chao & Trigger⁽⁵⁾, Merchant⁽⁶⁾らによって考察されている. しかしながら, 切削現象は, すでにのべてきたように, 単一せん断面様式によるよりも, 流れ領域を考慮することが, より近似性を増大するものと考えられる. そこで, 流れ領域を考慮した場合におけるせん断応力, 圧縮応力, せん断ひずみを求めると, 次の関係式が得られる.

(i) せん断応力 切削模型で, OA 上のせん断

応力を τ_1 , OB 上のせん断応力を τ_2 とする.

$$\tau_1 = \frac{(F_h \cos \phi_1 - F_v \sin \phi_1) \sin \phi_1}{bt_1} \dots\dots\dots (20)$$

$$\tau_2 = \frac{(F_h \cos \phi_2 - F_v \sin \phi_2) \cos (\phi_2 - \alpha)}{bt_2} \dots\dots (21)$$

(ii) 圧縮応力 OA 上に作用する圧縮応力を σ_1 , OB 面上に作用する圧縮応力を σ_2 とすると

$$\sigma_1 = \frac{(F_h \sin \phi_1 + F_v \cos \phi_1) \sin \phi_1}{bt_1} \dots\dots\dots (22)$$

$$\sigma_2 = \frac{(F_h \sin \phi_2 + F_v \cos \phi_2) \cos (\phi_2 - \alpha)}{bt_2} \dots\dots (23)$$

(iii) せん断ひずみ 流れ領域開始境界線におけるせん断ひずみ γ_1 は 0 であり, 切削に伴ってせん断ひずみはしだいに多くなり, 終了境界線上においてその値は最大となる. 終了境界線 OB 上のせん断ひずみは, (10) 式で求められる.

(a) パーライト中の層状量 90~100%

(c) パーライト中の層状量 20~30%

(b) パーライト中の層状量 50~60%

(d) パーライト中の層状量 0~10%

第 3 図 被削材 (S40C) の典型的な顕微鏡写真 (×400)

第 1 表 被削材の化学成分ならびにかたさ

化学成分 鋼種	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
S15C	0.17	0.23	0.36	0.008	0.016	0.15	0.09	0.07
S40C	0.41	0.22	0.70	0.024	0.010	0.26	0.11	0.20
SK4	0.99	0.19	0.37	0.018	0.011	0.19	0.08	0.10

鋼 種 層状 量の割合 (%)	S15C	S40C	SK4
90~100	119	169	229
50~60	120	179	223
20~30	130	201	293
0~10	131	201	293

以上 (20)~(27) 式に加工硬化を考慮した場合は, (6), (11) 式を代入することにより, 考慮しない場合は, (6), (16) 式を代入することによって, その関係を得て, 各種金属材料の切削機構の様式を検討することができる。

4. 切削機構の立場からみた被削性に及ぼす組織の影響

金属材料の被削性に影響を及ぼす因子は数多く存在するのであるが⁽⁷⁾, 被削材料を対象とした場合, 最も大きな影響を与えると考えられる因子は, 化学成分, 顕微鏡組織, 熱処理である。このうち, 化学成分については, かなり詳細な研究がなされているが, 顕微鏡組織の被削性への影響については, 工具寿命, 仕上面あらさの観点から定性的な説明がなされているのみである⁽⁸⁾。

そこで, 顕微鏡組織が被削性におよぼす影響を詳細に検討するため, 被削材料として, 第 1 表に示す高, 中, 低 3 種類の炭素鋼をとり上げ, それぞれに種々の熱処理をほどこして, パーライト組織中の層状部分の割合を変化させた。すなわち, パーライト中の層状量の割合を, 90~100%, 50~60%, 20~30%, 0~10% の 4 段階に変化させてあり, その典型的な例を第 3 図に示す。

なお, パーライト中の層状量の割合 0% の状態は, 球状パーライト 100%, またはソルバイト 100%, またはその混合である。

4.1 被削材の性質ならびに実験方法 使用した被削材の化学成分ならびにかたさを第 1 表に示す。

表より明らかなように, パーライト中の層状量の割合を大にするに従ってかたさは低下し, しかも, 高炭素鋼ほど差異が大きくなる傾向を示している。

実験方法としては, 新潟鉄工所製 45SD 高速旋盤を使用して, 二次元乾切削を行なった。

使用工具は超硬工具 JIS 33-3 形 ST-1 種で, 工具形状は, 送り (二次元切削では, 切込みに相当する) を変化させた場合には, (0-5-5-5-5-0-0.1 mm) の一定とし, 横すくい角を変化させた場合には, この角度のみ -20° , -10° , 0° , 10° , 20° の 5 段階を用いた。

なお, 切削力の測定は, 抵抗線ひずみ計を利用した切削動力計⁽⁹⁾を使用している。

切削条件としては, 送り量を変化させ, 削り速度は 150 m/min の一定に, 切込み (二次元切削においては切削幅に相当する) を 2.0 mm の一定に保った。

4.2 実験結果 上述の 12 種類の被削材の切削力 (主分力, 背分力), 切りくず厚さ, 接触長さを送り

被削材 S15C
工具形状 (0-5-5-5-0-0.1 mm)
削り速度 150 m/min
切込み 2 mm

(a) $\phi_1, \phi_2, \phi, \phi_0, \beta$ に及ぼす送りの影響

被削材 S40C
工具形状・切削条件 (a) 図に同じ

(b) $\phi_1, \phi_2, \phi, \phi_0, \beta$ に及ぼす送りの影響

被削材 SK4
工具形状・切削条件 (a) 図に同じ

(c) $\phi_1, \phi_2, \phi, \phi_0$ に及ぼす送りの影響

第 4 図

被削材 S15C
 工具形状 (0-var-5-5-5-0-0.1 mm)
 削り速度 150 m/min
 送り 0.18 mm/rev
 切込み 2 mm

(a) $\phi_1, \phi_2, \phi, \phi_0, \beta$ に及ぼす横すくい角の影響

被削材 S40C
 工具形状・切削条件 (a) 図に同じ

(b) $\phi_1, \phi_2, \phi, \phi_0, \beta$ に及ぼす横すくい角の影響

被削材 SK4
 工具形状・切削条件 (a) 図に同じ

(c) $\phi_1, \phi_2, \phi, \phi_0$ に及ぼす横すくい角の影響

第5図

量, すくい角変化の場合について, それぞれ測定を行なった. そのデータに基づいて, (5), (6), (16), (19) 式より, 流れ領域開始・終了境界線傾斜角 ϕ_1, ϕ_2 , 流れ領域広がり角 ϕ , 平均摩擦角 β , さらに, 単一せん断面理論によるせん断角 ϕ_0 を計算した結果が第4図, 第5図である.

(i) 送り量の影響 (二次元切削の切込みに相当)

送り量を 0.1, 0.18, 0.28, 0.4 mm/rev の4段階に変化させた場合, $\phi_1, \phi_2, \phi, \phi_0, \beta$ の変化を第4図に示す. (a) 図は S15C, (b) 図は S40C, (c) 図は SK4 について, それぞれ4種類 (ただし, SK4 は図面の煩雑さを避けるため, 3種類で, β も除いてある) に関してまとめたものである. これによるといづれの炭素鋼においても, 送りの増加に伴って ϕ_2, ϕ, ϕ_0 は増加し, 逆に β は減少している. この傾向は, 送り量が小なる範囲において顕著であり, 送りが大となるに従って一定値に近づく. これらのことは, すでに著者らが行なっている合金鋼についても同様であるので, 鋼一般に共通の傾向であると考えられる. なお, ϕ_1 は送り量にかかわらず, ほとんど一定であるが, S15C のみ, 漸増の傾向を示している.

(ii) 横すくい角の影響 横すくい角を $-20^\circ, -10^\circ, 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ に変化させた場合の計算結果をまとめると, 第5図に示すごとくなる. すくい角の影響としては, $\phi_1, \phi_2, \phi, \phi_0, \beta$ すべてすくい角の増大とともに増大する傾向を示している. 特に, 摩擦角 β は急激に増大する. しかしながら, 広がり角 ϕ は, すくい角変化に対して敏感でなく, やや増加の傾向を示す程度である.

(iii) 組織 (パーライト中の層状量の割合を変化させた組織) の影響 (a) 切削力 (主分力, 背分力) について 削り速度 150 m/min, 送り 0.18 mm/rev,

第6図 パーライト中の層状量を変化させた組織と切削力の関係

切込み 2 mm 一定の切削条件における切削力(主分力, 背分力)と組織との関係を第 6 図に示す. 図より明らかなように, 低炭素鋼 (S15C) においてはパーライト中の層状量の割合が増大するに従って, 主分力は約 10%, 背分力は約 15% 増大する傾向を示し, 中炭素鋼 (S40C) では, 層状量の割合 50~60% で主分力が最大値を示し, 層状量の割合 0~10% の場合に比べて約 6% 大となるが, 背分力はさほど変化を示さない. 高炭素鋼 (SK4) となると, 主分力は層状量の割合 20~30% 付近で最大値を示して, 層状量の割合 50~60% の場合に比べて, 約 14% 大となるが, 背分力は層状量の割合 50~60% で最大値を示し, 最小値とは約 12% の差異を示している. このように, 含有炭素量によって, 層状量の割合を変化する場合影響が異なるのは, 次のように考えられる.

すなわち, 高炭素鋼においては, 組織中に炭化物が多く, 組織自体のかたさが高くなっている. そこで, このかたい炭化物を層状化して, かたさを低下させることによって, 切削が容易となり, 切削力の減少をもたらす. そこで, 層状化によって, パーライトの部分のかたさが変化するようすを調べてみると, 第 2 表に示すようになり, 層状量の割合をますことによって, 明らかに, パーライトの部分のかたさが減少している. なお, 測定はマイクロビッカースかたさ計 (50 g) で, 二点あて測定し, その平均値を示している. 低炭素鋼においては, フェライト成分が多く, 組織中の炭

第 2 表

層状量の割合 %	0~10	20~30	50~60	90~100
か た さ	327	317	239	248

第 7 図 パーライト中の層状量を変化させた組織と平均せん断角 ϕ_0 , 平均摩擦角 β の関係

化物が少ない. 一般に, フェライト組織はやわらかいが, 粘着性その他の原因のため, 切削が困難である. したがって, 少ない炭化物を層状化によって軟化することは, この傾向をさらに助長することになって, 結局, 切削力の上昇をきたすものと考えられる. さらに, 中炭素鋼は, 高炭素鋼と低炭素鋼の中間の傾向を示すものと考えられる.

これらの結果から, 切削力の立場からみると, 高炭素鋼では, パーライト中の層状量の割合を増大させることが切削力の減少に望ましく, 低炭素鋼では, 逆にパーライトの層状化は望ましくないといえる. また, 中炭素鋼においては, 切削力への層状量変化の影響は, ほとんどないと考えられるので, 後に詳述する予定である工具寿命, 仕上面あらさとの関係を十分に考慮して処理すべきであると考えられる.

(b) 平均せん断角 ϕ_0 , 平均摩擦角 β について 第 7 図は, 組織による平均せん断角 ϕ_0 , 平均摩擦角 β の変化を図示したものである. 図より明らかなように, 平均せん断角 ϕ_0 は, 炭素量の増大に伴って増加を示しているが, パーライト中の層状量変化による差異は, 低, 中炭素鋼では少なく, 高炭素鋼となるとかなり大となる.

一方, 平均摩擦角 β は, 炭素量の増大, パーライト中の層状量の割合の減少に伴って減少する傾向を示しているが, パーライト組織変化の及ぼす影響は高炭素鋼になるにつれて顕著となっている.

(c) 流れ領域開始・終了境界線傾斜角 ϕ_1 , ϕ_2 , 広がり角 ϕ について 流れ領域開始・終了境界線傾斜角 ϕ_1 , ϕ_2 , 広がり角 ϕ の計算結果と組織との関係を図示したのが第 8 図である.

第 8 図 パーライト中の層状量を変化させた組織と ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ の関係

ϕ_1 は、炭素量の増大とともに増加して、SK4 では S15C の約2倍の角度を示す。また、これは層状量の割合が少ないほど、わずかではあるが増加の傾向を示している。一方 ϕ_2 , ϕ は、低、高炭素鋼において、パーライト組織の変化による影響が顕著に現われている。また、 ϕ は炭素量によってその大きさが異なり、中炭素鋼で最も広い。このことは、切削に伴う過渡的変形が中炭素鋼において最もなめらかに行なわれていることを示しているものと考えられる。

5. 流れ領域におけるせん断応力、圧縮応力、せん断ひずみに及ぼすパーライト組織の影響

(i) 流れ領域におけるせん断応力、圧縮応力について 流れ領域におけるせん断応力 $\tau_1 (= \tau_2)$ 、圧縮応力 σ_1 , σ_2 と単一せん断面理論によるせん断応力 τ_0 、

圧縮応力 σ_0 の計算結果を S40C について図示すると、第9図に示すごとくなる。組織の影響としてはパーライト中の層状量の割合が増大するほど、せん断応力、圧縮応力の減少する傾向が見られる。このことは、パーライト中の層状量の割合が大なるほど、工具寿命も良好になることに関連をもつ。

次に、第10図は炭素量変化による流れ領域におけるせん断応力、圧縮応力を示したもので、本実験範囲内においては、含有炭素量の多くなるほど、せん断応力、圧縮応力は増加し、かつ、送り量の低いほど大である。送り量が大となるほど、せん断応力が漸減するのは、送り量の増大に従って、一般に、切削温度が上昇するから、材料のせん断応力の減少に寄与するのであると考えられる。すくい角の減少に伴うせん断応力の減少、削り速度の上昇に伴うせん断応力の減少も同様に説明することができる。

被削材 S40C (層状量の割合 90~100%)
切削条件} 第4図(a)に同じ
工具形状}

(a) 送り変化に伴う各種応力の計算値

被削材 S40C (層状量の割合 20~30%)
切削条件} 第4図(a)に同じ
工具形状}

(c) 送り変化に伴う各種応力の計算値

被削材 S40C (層状量の割合 50~60%)
切削条件} 第4図(a)に同じ
工具形状}

(b) 送り変化に伴う各種応力の計算値

被削材 S40C (層状量の割合 0~10%)
切削条件} 第4図(a)に同じ
工具形状}

(d) 送り変化に伴う各種応力の計算値

* この点に関しては、後報で詳述の予定である。

単一せん断面理論によるせん断応力 τ_0 ならびに圧縮応力 σ_0 と τ_1 , τ_2 ならびに σ_1 , σ_2 を第 9 図, 第 10 図から比較すると, 次のようになる. すなわち, S40C においては, τ_1 は τ_0 の約 1/2 の値を示しており, また σ_2 は σ_0 よりやや大きく, σ_1 は σ_0 よりはるかに小さい. このことは, 切削によってせん断が開始されるときに小さい圧縮応力が徐々に増加して, せん断の終了する付近で, σ_0 とほぼ等しい σ_2 となって切りくずを流出するものと考えられる.

(ii) せん断ひずみについて せん断ひずみ γ_2 を (10) 式より求め, 組織との関連において図示したのが第 11 図である. 図は, S40C の結果で, 単一せん断面理論に基づくせん断ひずみ γ_0 の値をも比較のため示してある. 図より明らかなように, γ_2 はパーライト中の層状量の影響がほとんど認められない.

これを γ_0 と比較すると, 炭素量が增大するにつれて γ_0/γ_2 の値は小さくなって, 1 に近づいてくる. また, γ_0 においては組織による影響が認められる.

6. 結 言

金属材料の被削性に関する詳細な検討を行なうため, 流れ領域の概念に基づいて加工硬化を考慮した場合の切削機構の解析を行ない, 次いで, 大きな影響を与えと考えられる組織について, 切削機構の立場から実験, 検討を行ない, 次の結論を得た.

1. 流れ領域を考慮した切削機構に基づいて, まず送り量, 横すくい角の変化による流れ領域開始・終了境界線傾斜角 ϕ_1 , ϕ_2 , 流れ領域広がり角 θ , 平均摩擦

角 β , 平均せん断角 ϕ_0 の変化を広範囲に求め, この結果, 送り量の増大に伴って ϕ_2 , θ , ϕ_0 は増大し, β は減少, ϕ_1 はほぼ一定の傾向を示すことがわかった. これは, 多くの実験結果を総合して, 鋼材全般に共通の傾向であると考えられる.

次に, すくい角の影響に関しては, すくい角の増大に伴って, ϕ_1 , ϕ_2 , θ , ϕ_0 , β はそれぞれ増大を示し, 特に, β の増大は顕著であるが, θ は漸増の傾向を示す程度である.

2. 組織による切削力の変化は, 高, 中, 低炭素鋼によって傾向を異にしている. すなわち, 高炭素鋼ではパーライト中の層状量の割合を増大して, パーライト部分のかたさを減少させることが, 切削力の減少にあずかり, 逆に低炭素鋼では, パーライトの層状化は切削力の上昇, 摩擦角の上昇を伴って望ましくない.

ϕ_1 , ϕ_2 , θ へのパーライト組織変化の影響は ϕ_1 はほとんど変化を示さないが, ϕ_2 , θ は低, 高炭素鋼において顕著で, とくにパーライト層状量 20~30% で最大を示すことがわかった.

3. 流れ領域におけるせん断応力, 圧縮応力に及ぼす組織変化の影響は, S40C では, パーライト中の層状量が増大するに伴ってせん断応力, 圧縮応力がともに漸減する傾向が見られる. 単一せん断面理論によるせん断応力 τ_0 は, 流れ領域理論によるせん断応力 τ_1 の約 2 倍を示しており, 単一せん断面理論による圧縮応力 σ_0 は, 流れ領域開始圧縮応力 σ_1 より, はるかに大きく, 流れ領域終了圧縮応力 σ_2 より, やや低い値を示している.

終りに, 本研究に多大の御援助をいただいた大同製鋼会社, 住友金属工業会社の両社に, また実験に協力された伊藤哲朗氏, 栗本 武君, 田中弘一君に深じん

第 10 図 炭素量, 送り変化に伴う各種応力の比較

第 11 図 送り変化に伴うせん断ひずみの計算値

の謝意を表する次第である。

文 献

- (1) 奥島・人見, 機械学会論文集, 25-150 (昭 34-2), 54.
- (2) K. Okushima, & K. Hitomi, *ASME Paper*, No. 60-WA-79.
- (3) Drucker, *J. Appl. Phys.*, 20-11 (1949-11).

- (4) D. Kececioglu, *Trans. ASME, Ser. B*, 82-1 (1960), 79.
- (5) B.T. Chao, K.J. Trigger, & L.B. Zylstra, *Trans. ASME*, 74 (1952), 1039.
- (6) Merchant, *J. Appl. Phys.*, 16 (1945), 318.
- (7) たとえば Woldman & Gibbons, *Machinability and Maching of Metals*, (1951), 7, McGraw-Hill.
- (8) たとえば精密工学便覧 (昭36-8), 79, コロナ社.
- (9) 奥島・ほか2名, 機械学会論文集, 21-110 (昭 30), 709.

討 論

〔質問〕 (10)式で示されたせん断ひずみ γ_2 が理解しにくい, 次のように考えたほうが自然ではないか。付図1で, 被削材の表面にあった長さ S なる線素は流れ領域通過中に漸次方向と長さを変え, 最後にはすくい面と平行になり, 長さは S' になったとする。切りくずはカールしない。すなわち等速直進運動するものとする, 体積不変の条件から次式が成立する。

$$\frac{S'}{S} = \frac{V_f}{V} = \frac{t_1}{t_2} = \frac{\sin \phi_0}{\cos(\phi_0 - \alpha)}$$

ここで V は削り速度, V_f は切りくずの速度, ϕ_0 は流れ領域を一つの平面 (せん断面) で近似した場合のせん断角, 他の符号は本論文と同じ。これは付図2でA点に対してBにあった点がCに移ったことを意味し, 上式をみたすためには $\angle ABC = \phi_0$ でなければならないから, この結果うけるせん断ひずみ γ は

$$\gamma = \cot \phi_0 + \tan(\phi_0 - \alpha)$$

となり, 流れ領域を一つの平面で近似した従来のものと一致する。結局流れ領域の存在は, B点からC点への移行にある時間を要することの結果であって, ひずみ速度は低下させるが究極のせん断ひずみには影響を与えないのではないか。 (中山一雄)

〔回答〕 切削時に生じるせん断ひずみの理論解としては, 流れ領域の開始線から終了線までの自由表面上のひずみの総和を求めるべきであるので解析を試みたのであるが, 厳密解を求めることはできない。(10)

付 図 1

付 図 2

式はその近似解である。お説のように求めることは, 格子の変形を考えた場合, 付図3に示すように流れ領域の存在によって格子の形が ABCD から A'B'C'D' のように変わってくるので, 単一せん断面理論の場合と同一であると考えることには疑問を感じる。なお流れ領域内のひずみは, 単にせん断のみでなく, 回転, 圧縮等の複雑な作用を受けているものと考えられるので, 今後これらの因子をも含めて解析することが必要であると考え。

〔質問〕 単純せん断だけではないという貴説には全く同感である。さらに, すくい面近傍での二次流れをもあわせ考える必要があるのではないかと思う。回転を生ずればひずみが少ないのは当然と思うが, 単純せん断として求められた (10) 式に示すひずみが, 単一せん断面理論によるものより非常に小さいことは了解し難い。付図3の ABCE と A'B'C'D' とにはあまり差がないように見えるが, (10)式で計算すると, この両者のせん断ひずみには約 30% もの差があるはずである。

(10)式を求めたさきの論文〔文献(1)〕から推察すると, 付図4で, A→Bの移動が起る時に, もし変形を受けなければ A→Cと移動するはずであるとの仮定が使われているようだが, 実際にはCよりもっと先のある点Dまで移動しなければ, 体積不変の条件に反することになる。かかる仮定を使ったために(10)式が過小になったのではないか。 (中山一雄)

〔回答〕 流れ領域内の塑性ひずみを求める場合に, 刃先近傍における局所の変形を考慮する必要があるのではないかという点に関しては, 同感であるが, この場合には解析がきわめて複雑になり, 現段階にお

(a) 単一せん断面の場合 (b) 流れ領域の自由表面が円弧状の場合

付図3 網目状格子の変形の模様

いては考慮外としたい。

ところで、筆者等(1)の切削機構の理論解析において、流れ領域内の塑性ひずみの誘導に際しては、刃先から扇状に広がる流れ領域を考慮して、すべりが、その内部で刃先から流れの自由表面に向かって放射状に起ると仮定しており、先の解析においては簡単に粒子の流れ方向から塑性せん断ひずみの式を求めた。このため、お説のごとく、一見体積不変の法則が満足されていないような感があるが、実際には、体積不変の法則は流れ領域の自由表面の形状を知ることなくして論じることができない。この点に関しては、別の論文(答1)で論議したとおりで、現段階においては、実際に格子変形の様子を観察して明らかにする以外にない。これは、切削において生ずるひずみが単純せん断のみで定式化し得ないからで、せん断とともに圧縮ならびに回転を考慮すべきであるからである。この点については、単一せん断すべり様式に基く従来の切削機構の解析においても同様なことがいえ、さらに、今後検討すべき問題であると思われる。なお、流れ領域を考慮した場合のせん断ひずみを厳密に求めるためには、付図5のごとく流れ領域内を微小扇状区域に分けて、この微小区域を通過する際の粒子の微小変形を流れ領域の全体にわたって積分するとよい。この時、厳密にいえば、積分値を得ることができないが、ごく近似的には、先に与えた式に一致することがわかった。

付 図 4

付図 5 流れ領域内の塑性せん断ひずみの解析

文献(1)では、これをさらに簡単に考えて同じ式を得たのである。

なお、流れ領域を考慮した場合の切削機構の解析は、単一せん断面様式に比べて、被削材自由表面と切りくず表面の交点で示される特異点は取除くことができたが、なお刃先が特異点である。その上、すべりは、流れ領域内において刃先から放射線上に広がると仮定している。これらを是正するためには、付図6のごとき流れ領域の形状ならびにすべり線模様を考慮して切削機構を論議すべきであり、この場合には、切りくず塑性ひずみも異なったものとなるであろう。

【質問】 パーライト層状量というのは Billigmann の「Perlitwertzahlen」に該当する用語かと思うが、文献(問1)によるとセメントタイトが完全に粒状化して地鉄中一面に分散した場合が 90~100% となっている。第3図(a)のセメントタイト球状化程度はまだ不足ではないか。切削にとって実用的でないかも知れないが、冷間圧造部品の一部を切削加工ということもあるので、もっと完全球状化した場合についても実験を行なってみる必要はないか。(山本 晃)

【回答】 本研究は金属材料の被削性に大きな影響を及ぼす因子と考えられる顕微鏡組織をとりあげ、そのうちパーライト中の層状量の割合変化の影響を究明したわけである。だから本実験の対象としては、第3図(a)のような組織の状態で適当であると考え。もちろん御指摘のように完全球状化の場合についての詳細な検討が必要であることは痛感している。このためすでに実験の手はずを整えつつある。なおこの他、顕微鏡組織変化の対象としては、フェライト、マルテンサイト、ソルバイト、ツルースタイト、ペーナイト、球状炭化物、ビードマンシュテッテン各組織を準備し、実験をすすめてつある。

(答1) 奥島・人見, 機械学会論文集, 26-163 (昭 35-3), 423.

(問1) J. Billigmann, *Stahl u. Eisen*, 71-16 (1951), 828. または J. Billigmann, *Stauchen u. Pressen*, (1953), 78, Car Hanser Verlag, München.

付 図 6