切削加工におけるジェット注液による潤滑， 冷却効果および清浄作用の若干の考察*

貴志浩三** 江田 弘** 古沢利明*** 市田良夫**

Some Considerations of the Lubrication, Cooling Effects and Cleaning Action
by Jet Infusion Method in the Cutting Process

Kozo KISHI, Hiroshi EDA, Toshiaki FURUSAWA, Yoshio ICHIDA

This paper studies the lubrication, the cooling effect and the cleaning action by the jet infusion (jet pressure $P_j=0-30 \text{ kg/cm}^2\text{G}$) of various cutting fluids. The kinds of fluids tested are the emulsion and soluble types (with 20 : 1 dilution) of the spindle and machine oil base, containing various combinations of the extreme pressure additives, such as active chlorinated type (No. 2), active sulfurized type (No. 3) and active sulpho-chlorinated type (No. 4), and also containing the interface activator (No. 1, 2, 3, 4). The main results obtained are summarized as follows:

(1) By using the smallest nozzle having a jet diameter $0.8 \text{ mm}\phi$, the lubrication, cooling effects and cleaning action were conducted with superior results as compared with the conventional infusion apparatus of the cutting fluids.

(2) In some range of the jet pressure around $P_j=25 \text{ kg/cm}^2\text{G}$, the cutting force and the cutting temperature decrease by about 15% in using the active type sulfurized emulsion (No. 3) as compared with No. 1 and 2 oils.

(3) The lubrication effect and cleaning action of the active type chlorinated emulsion (No. 2) increase with increasing jet pressure of the cutting fluids. And their effects for the machined surface lead to the excellently fine surface finish.

1. 緒 言

本研究はジェット注液法を切削加工に導入し，工具-切りくず接触部の深部に強制的に切削液を浸入到達せしめ，さらにこの領域での冷却と潤滑効果および切削領域の清浄作用の増大をねらって，以前研削加工において用いた¹⁾ジェット注液による切削加工を実施した．一般に用いられている切削用の工作機械の注液圧は約 $1 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ 程度であるから，切削液が切削領域の高熱発生源で一部蒸気膜になった場合，それを素速く除去する注液圧に至っていないとみなせる．実験は極圧添加剤と界面活性剤を含んだ4種の切削液を用い，かつ非常に少ない流量で高圧ジェット注液した場合に，切削抵抗や切削温度

および仕上面あらさに最適ジェット注液圧の存在する範囲が見い出せるかどうかを検討する．また切削領域に液を衝突させるジェット注液法はその近傍の熱伝導された熱を奪うことも同時に目的としているから，熱伝導度の高い被削材の場合には，熱伝導領域を拘束することも

1: トロコイドポンプ, 2: 圧力制御弁, 3: サージタンク, 4: ジェットノズル, 5: ジェット液飛散防止おおい, 8: 止切弁

図1 実験装置

* 原稿受付 昭和49年4月5日. 昭和49年度精機学会春季大会学術講演会(昭和49年4月5日)にて発表.

** 正 会 員 宇都宮大学工学部 (宇都宮市石井町 2753)

*** 正 会 員 栃木県中央工業指導所 (鹿沼市白桑田 516-1)

表 1 各種油剤の化学組成

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
化学組成	アルカノールアミド 5% スルホネート化合物 15% 非イオン系活性剤 5% スピンドル油 ベース	塩素化合物 10% アルカノールアミド 5% スルホネート化合物 7% 脂肪酸アミン石けん 5% 非イオン系活性剤 3% 防 腐 剤 2% スピンドル油 ベース	硫化脂油 6% アルカノールアミド 5% スルホネート化合物 15% 脂肪酸アミン石けん 5% 防 腐 剤 2% スピンドル油 ベース	硫化エステル 20% 塩素化合物 13% アルカノールアミド 7% スルホネート化合物 15% 非イオン系活性剤 15% 防 腐 剤 4% マシン油 ベース	鉱物油 10% 酸 化 4.5 けん化価 33.9 塩 素 分 3.1% 乳化剤 14% 酸 化 6.4 けん化価 18.0 Ash 14.9% スピンドル油 ベース
	界面活性剤を含むエマルジョンタイプ	界面活性剤を含むエマルジョンタイプ	界面活性剤を含むエマルジョンタイプ	界面活性剤を含むソリューションタイプ	界面活性剤を含むエマルジョンタイプ (研削のジェット注液に使用した研削油で比較のため用いた)

可能である。この目的で，熱伝導度の非常に差のある被削材を用い，ジェット注液の効果を比較する。

2. 実験装置と方法

被削材は直径 75.0 mm ϕ の 0.35% C 鋼，200 mm ϕ の 99.978% Al および 100 mm ϕ の SUS 27 B，SUS 51 B の JIS 標準材である。また，99.978% Al，0.35% C 鋼，SUS 27 B および SUS 51 B の熱伝導率 k とかたさ H_V は順に， $k=0.57, 0.124, 0.036$ および $0.057 \text{ cal/cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$ と $H_V=20, 123, 160$ および 165 である。次に，工具は P 20 を用い，長手削りに対しては，横すくい角 $\alpha=6^\circ$ ，前逃げ角 $\gamma=6^\circ$ とし，突切り切削の場合は，0.35% C 鋼では， $\alpha=6^\circ, \gamma=6^\circ$ ，切削幅 $w=2.07 \text{ mm}$ ，99.978% Al では， $\alpha=20^\circ, \gamma=10^\circ, w=1.40 \text{ mm}$ とした。他の諸元は JIS 33-2 型相当である。ただし，ノーズ半径 $R \approx 0.2 \text{ mm}$ である。また切削速度 $V=50 \sim 500 \text{ m/min}$ ，送り速度 $f=0.04 \sim 0.16 \text{ mm/rev}$ ，切込み $d=0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$ とした。

ジェット注液装置は，昌運カズスーパ旋盤 (HB-500 型) 既設の切削液装置および工具台上のならい装置を取りはずし，図 1 の ⑦ に示すジェットノズル取付台を設定し，注液方向を可変設定できるようにした。また切削液槽 ⑥ を独自に作製し，内部に金網のフィルタとマグネットを付設して，液を浄化，整流した。その他ジェット注液に必要な回路は，研削に用いた¹⁾ と同一系統の循環閉ループを構成したが，ポンプのみは歯車ポンプから小形で高圧，流量増大可能なトロコイドポンプ ① (常用最大圧力 50 kg/cm² G) に換えた。この場合の注入角度の設定の根拠は別にないが，ジェット注入角度は，長手削りの場合，主分力，送り分力および背分力方向に対して各 45°，突切りの場合，突切り方向すなわち主分力と背分力方向に対し 45°，送り方向に対し 90° で，ともに上方か

ら注入した。ジェットノズル先端と工具ノーズ端の距離は 10 mm とし，ジェットノズル内径は 0.8 mm ϕ である。また，注液量 Q_0 は，注液圧 $P_j=5, 20, 30 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ に対して順に， $Q_0=0.93, 3.8, 5.6 \text{ l/min}$ と非常に少ない。

切削液は表 1 に示す油剤を，No. 1~4 に対しては 20 倍，No. 5 に対しては 30 倍の希釈水として使用した。No. 5 油剤は研削に使用した組成¹⁾ と同一のエマルジョンタイプで，研削のジェット注液との関連のために用いたものであり，切削における切削液種による効果は，No. 1~4 の油剤について比較検討される。次に，切削温度は工具-被削材熱電対法によって測定した。また，工具すくい面の摩擦力は主分力，送り分力とすくい角から求めた。

3. 実験結果と考察

3.1 切削抵抗，切削温度，仕上面あらさおよび摩擦力による検討

切削抵抗，切削温度，仕上面あらさおよび工具すくい面の摩擦力の変化を注液圧 P_j に対して整理すると図 2 の例に示すようになる。切削温度はこの切削条件の場合 $P_j \approx 10 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ 付近において最小となり， $P_j=2 \sim 3 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ と比べると約 100°C 程度の減少となる。さらに P_j が増大すると，切削温度は上昇する。この一種の臨界値の存在については，現在のところ各液種の物性値を考慮してまで計算された理論的裏付けはもたないが，平田ら²⁾ の衝突噴流に関する一連の研究結果から，衝突噴流速に対する熱伝達率に臨界値が認められること，あるいは計算された絶対値には，かなりの差があるが Jens-Lotte ら³⁾ の円管内強制対流核沸騰の実験式から得た P_j の変化に対する値にもまたその存在が確認される。いま抜山⁴⁾ らが著した沸騰負荷曲線を背景に定性的な考察を加えると，まず [第 I 段階] の減少過程は室温のジェッ

$V=180 \text{ m/min}$, $f=0.16 \text{ mm/rev}$, $d=1.0 \text{ mm}$,
0.35% C 鋼, 長手削り, No.5 液

図2 ジェット注液圧 P_j による被削性因子の変化

ト液の連続衝突噴流作用とジェット注液により蒸気膜を破りつつ逐次切削領域の冷却作用が行われる。〔第Ⅱ段階〕の臨界値の領域は工具・切りくず近傍の熱源域に液が浸入されやすい、しかも核沸騰が膜沸騰よりも確率的に増大した範囲と思われ、蒸気が著しく起こりジェット液による熱の抽出作用（第Ⅰ段階の作用）とともに沸騰熱伝達的作用による二重の効果が存在する最適ジェット液圧の領域であるとみなされる。さらに〔第Ⅲ段階〕の温度の上昇あるいは飽和する範囲は第Ⅰ段階でみられるような室温ジェット液流による衝突噴流作用が沸騰による熱伝達をおさえてしまい、液体による強制対流熱伝達が大部分を占めることによるとみなされる。このような臨界液圧 P_{jc} の存在は、同じ No.5 液を使用した研削の場合¹⁾には認められなかった。

一般に潤滑効果は、摩擦力にも現れるが、図2において $P_j=5 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ 近傍に至るとほとんど工具すくい面の摩擦力が一定となっている。このような熱的・力学的因子の変化は切りくず裏面にも顕著に現れる。いま切りくず裏面の形状変化が著しい構成刃先の存在する切削条

$V=60 \text{ m/min}$, $f=0.16 \text{ mm/rev}$, $d=1.0 \text{ mm}$,
0.35% C 鋼, 長手削り, No.5 液

図3 切りくず裏面の変化

件のもとで比較すると、例えば図3はこの例で、 $P_j=3 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ で脱落片が大形に生じ、 $P_j=10 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ になると小形で平滑な裏面となる。さらに P_j が増大すると再び大形の脱落片が一部にみられるようになる。

潤滑効果は、仕上面あらさ R_{max} にもあらわれるはずである。しかし、 R_{max} は $P_j=15 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ とさらに高圧 P_j 付近で臨界値を呈している。一義的解釈かも知れないが、この理由はジェット液の浸入領域が工具すくい面の最高温度をとる領域に最も近づくのが $P_j=15 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ 付近であり、そこで上限で飽和に達し、しかもこの領域では高温のため、核沸騰による熱伝達がこの極微小部で行われるので相変換⁹⁾ による潤滑効果が非常に大になるためと推論される。

3.2 ジェット液種による検討

切削液 No.1~4 を用いて長手削りした場合の切削抵抗、切削温度および仕上面あらさは、 P_j の増大に伴って変化が著しく現れ、また主分力などにみられるように、一部では図2の No.5 エマルジョンタイプ研削液のように飽和値に達する例もみられる。図4~5 はその一例である。しかし、No.3~4 のイオウ系エマルジョンと硫酸素系ソリューションタイプは $P_j=25 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ に至っても減

$V=60 \text{ m/min}$, $d=0.5 \text{ mm}$, $f=0.08 \text{ mm/rev}$,
0.35% C 鋼, 長手削り

図4 切削液種とジェット液圧の関係

$V=60 \text{ m/min}$, $d=0.5 \text{ mm}$, $f=0.08 \text{ mm/rev}$,
0.35% C 鋼, 長手削り

図5 ジェット液圧と液種による仕上面あらさの変化

少の傾向をとる。No. 3の硫化脂肪酸は高級脂肪酸のグリセリンエステルであるから、常温付近では液状となり、

の化学式で表される。破線の矩形わくのSが浸入領域のFeと反溶着性のFeSを作り、潤滑効果になる。これに対して、No. 4の硫化エステルは硫化脂肪酸と本質的に同様で酸の水素原子をアルキル基で置換したものであ

$V=160 \text{ m/min}$, $d=1.0 \text{ mm}$, $f=0.16 \text{ mm/rev}$,
0.35% C 鋼, 長手削り

図6 ジェット液圧と液種による摩擦力の変化

り、やはり同様の機構でFeS生成物を作る。しかも極圧添加剤の塩素化合物との間に相乗効果をもち、触媒作用によって、より活発に反応が促進されるため潤滑効果はさらに優れる。さらに非イオン系活性剤が15%と他の液種より多いため、原液安定性(水-油のカップリングが強い)を維持させる。これはスルホネート化合物とともに界面活性化をより促進させる。このようにみると図5におけるNo. 4の仕上面あらさ $R_{\max}$ が FeCl_2 、FeSの潤滑効果に優れた因子が入っているにもかかわらずNo. 3に劣っている理由の一つには、基油がマシン油でしかもソリュブルタイプであるために表面張力が著しく低いことと浸透性に富んでいるため表面損傷が他より著しく大になるためと考えられる。また、図4におけるNo. 2の切削抵抗が高い主な理由は、FeSより融点が高い FeCl_2 主体の生成物を含む例であるから接触面での極圧に耐えきれず、一様にかじり発生をひきおこす確率が高くなる性質をもつためとみられ、その結果No. 3の切削抵抗と切削温度の減少が最も大きく現れてくるものと考えられる。この変化は $V=160 \text{ m/min}$ とさらに高速になった場合にも現れ、特に工具すくい面の摩擦力の変化は0.35% C 鋼の長手削りした図6にみられるように、No. 3について $P_j=15 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ から著しく現れる。一方、図5においてNo. 2の塩素系エマルジョンタイプは、 $P_j=15 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ 付近から $R_{\max}$ をより減少させてくる。これは低融点の FeCl_2 の効果と脂肪酸アミン石けんの添加により、油性と界面活性化がより持続し、かつ大なる P_j の範囲のためと、低切削速度のため切削温度がより減少できるために、仕上面精度を保証できるというNo. 2の特性がより強くでてくるものとみられる。脂肪酸アミン石けんは熱安定性が悪いので、切込み、送り速度の小なる

$P_j=20 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$, $V=60 \text{ m/min}$, $f=0.16 \text{ mm/rev}$, $d=1.0 \text{ mm}$,
0.35% C 鋼, 長手削り

図7 No.1~No.4液による切削表面

軽切削ほど, P_j の大なる範囲での効果がでてくるし, エステル結合した非イオン系の界面活性剤アルカノールアマイドは金属-液体の界面活性があるため, FeCl_2 の反応をより助長することにもなる. したがって, この意味から切削表面の清浄作用は No.2 において P_j 大なる範囲で他より著しく大になると思われる. 特に, No.1 と No.2 液のアルカノールアマイド, スルホネート化合物および非イオン系活性剤などにはいずれも界面活性作用が強く, しかも浸透性に優れている液全体としての作用もその性質が積極的に現れ, 仕上面あらさは No.4 よりは一貫して減少することになると思う.

3.3 切削表面の電顕観察

延性に富む被削材ほど切削面と切りくずの分離領域で盛上がりが発生し, この部分が切りくずから引き裂かれる時に, dimple pattern に代表される延性破面がよく現れる. dimple pattern の生成は切削条件によらずこの盛上がり領域に比較的多く認められる. また, $P_j=20 \sim 25 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ の高圧範囲における仕上面あらさは, No.2, No.1, No.3, No.4 の順に一応大となっているが, 図7の0.35% C 鋼の長手削りにみられるように, 表面の清浄性は No.2, No.1, No.4, No.3 となっている. しかし, 全体的に No.2 が優れた清浄作用を受けたとみなせる程

$V=160 \text{ m/min}$, 0.35% C 鋼, No.2 液
図8 突切り切削に及ぼすジェット液圧の影響

度で, 他の液種については大差はない. またこのときの dimple の大きさは, No.1, No.2, No.4 あるいは No.3 となって, これもじんあいの少ない清浄な表面と一応の対応を示している.

3.4 突切り切削におけるジェット注液の効果

図8に0.35% C 鋼の突切り切削の例を示す. 切削抵抗の臨界値の存在が明確に現れ, $f=0.08 \text{ mm/rev}$ の場合, $P_j=5 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ で送り速度が低下するにつれてジェット液圧の大なる側に漸次移行する. この変化は切削温度にも現れ, その傾向も切削抵抗に対応したものとなる. 長手削りに対して切削抵抗の減少は少ないが, 切削温度は著しい減少を示す. 例えば, $V=160 \text{ m/min}$, $f=0.08 \text{ mm/rev}$, $d=2.08 \text{ mm}$, No.2 液, 0.35% C 鋼を $P_j=5 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ で突切りの切削条件と合わせて長手削りを行うと, 切削温度は約 650°C で, 突切りの場合約 450°C であるから約 30% の減少を示す.

鋼に比べ著しく熱伝導度が高い純アルミニウムを被削材として用いて突切りを行うと, 図9のように切削抵抗と切削温度の変化を示す. 切削抵抗は $P_j=10 \sim 20 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ の範囲に臨界値をもつようになるが, 低切削速度になるにつれて, P_j の大なる側に漸次移行し, 例えば, $V=190 \text{ m/min}$ の場合には $P_j=40 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ 近傍で一

図9 アルミニウムの突切り切削に及ぼすジェット液圧の影響
 $f=0.08$ mm/rev, 99.978% Al, No.2液

定値 55°C に近づいている。これに対して、0.35% C 鋼に比べてさらに熱伝導度が約 70% と 50% も低いオーステナイト系 (18 Ni-8 Cr, SUS 27 B) とマルテンサイト系 (12Cr, SUS 51 B) ステンレス鋼になると、図 10 にみられるように $P_j=3$ kg/cm² G 近傍で臨界値がわずかに認められる程度である。したがって、ジェット注液の効果を最大限に活用するためには、被削材内部への熱停留が少なく、切削点深部までいかにジェット液を大量に近づけるかにある。

4. 結 言

本切削条件の範囲で次のような結果を得た。

- (1) 内径 0.8 mm ϕ のジェットノズルでも、研削と同様に、切削抵抗、切削温度および仕上面あらさは、あるジェット液圧 P_j で、飽和あるいは臨界値を示す場合がある。
- (2) No.3 のような極圧添加剤 および界面活性剤を多

図10 ステンレス鋼のジェット注液による切削
 $V=150$ m/min, $d=1.0$ mm, $f=0.16$ mm/rev, 長手削り, No.2液

- 量に含む液種は、 P_j が大なるほど切削抵抗、切削温度および摩擦力を減じ、潤滑効果と冷却効果も高い。
 - (3) 切削表面の清浄性は FeCl_2 の潤滑効果と高い界面活性度をもつ特性と対応して、No.2 液が他液種に比べ最も優れている。
 - (4) 突切りは、長手削りに比べ切削温度が減少し、例えば、 $V=160$ m/min, $f=0.08$ mm/rev の場合約 650°C から約 450°C と約 30% も減少する例があり、他効果に比べ、冷却効果に最も大きな差異を示す。
- 終わりに、実験の考察に加わっていただいた日本グリース株式会社・鈴木音作取締役部長に対し感謝致します。

参 考 文 献

- 1) H. Eda & K. Kishi: Improvement of Grinding Process for Difficult-to-grind Materials by Acting the Jet Infusion of Grinding Fluid, Proc. Int. Conf. Prod. Engg. Tokyo (1974) Part 1, 665.
- 2) 例えば、熊田雅弥、仲戸川哲人、平田 賢：衝突噴流による熱および物質熱伝達について、日本機械学会誌, 76, 665 (1973) 882.
- 3) 沸騰熱伝達に関する調査研究分科会報告；沸騰熱伝達，日本機械学会 (1954) 222.
- 4) 精機学会切削油専門委員会編：切削油剤，機械工作油懇話会 (1961) 5.