

.....
 論 文

荷電ミスト吹付け給油による高効率切削加工と作業環境改善

—さらなるエコマシニングをめざして—

岡本将之^{*,1}, 畠中 豊*, 中野道彦**, 糸魚川文広***, 水野 彰**

(2005年8月1日受付; 2005年11月11日受理)

Feeding of Electrically Charged Cutting-fluid Mist for Efficient and Clean Machining

Masayuki OKAMOTO,^{*,1} Yutaka HATANAKA,*

Michihiko NAKANO,** Humihiro ITOIGAWA*** and Akira MIZUNO**

(Received August 1, 2005; Accepted November 11, 2005)

In a conventional machining process using mist type cutting oil, the efficiency of cutting oil applied to the cutting tip of the tool is low, therefore excessive cutting oil mist is required. This results in an oil fume problem in the workshop atmosphere, and also increases oil costs. By processing with an oil mist which is collected by electrostatic precipitation to the tool cutting tip, we tried to reduce the oil mist consumption and oil fume generation. For the mist collection, a negative corona discharge was applied, which created by an average field intensity of 7.5 kV/cm between the tool and the needle electrode. Through a series of tests by measuring cutting force, when compared to the conventional mist type, we found a maximum 3.2% decrease in the coefficient of friction between the cutter and the work piece which results in less cutting power required and less oil consumption. Furthermore, we measured the atmospheric mist density of the electrically charged mist in an enclosed workshop and evaluated the effect of the oil fume reduction. It showed the tendency where the adhesion effect of electrically charged oil fume improves as mist diffusion is decreased. We could reduce by 74% the oil fume generation at the minimum oil supply volume of 3 mL/min. This resulted in a mist density of 2.6 mg/m³ around the machine area immediately after the test which is less than the recommended maximum mist density of 3 mg/m³.

1. はじめに

日本が目覚ましい産業の発展を遂げた背景には、生産の合理化と共に革新的に成長を遂げた工作機械産業がある。機械の高速化に対応し、付随する切削工具や周辺機器も飛躍的な技術進歩を遂げている。その中で、金属加工における切削液においては、高速重切削に対応するため、水溶性化が進み、切

削点に大量の切削液を流しこむことで機能させているが、一方ではこの加工法が、環境負荷、コストの面から見直されつつある^{1,2)}。

著者らは、環境汚染や吸引による人体への害を引き起こす恐れのある界面活性剤を使用しない水溶性切削液を実現するために、超音波乳化を利用し、逐次に水溶性切削液を生成する装置を開発した³⁾。この手法は、特にアルミ合金の加工において、植物油系エマルジョンをミスト状にして切削点に吹き付ける加工にその優位性が認められる。植物油ベースの切削油は、生分解スピードが速く作業環境の汚染を軽減できるが、油剤の循環使用によって生ずる腐敗の問題を無視できるミストでの適用が最適である。さらに、鉱物油と比較し、高級脂肪酸の直鎖末端にカルボキシル基を有するため、金属表面への付着力が大きく、高い潤滑性能が得られる。

このように、近年、切削油のセミドライ化が積極的に導入され、より少量の切削油で加工を行う MQL (Minimum Quantity Lubrication) という概念が生まれた。

キーワード: コロナ放電, 切削加工, 潤滑

* 榎本ビーエー株式会社 (504-8551 岐阜県各務原市蘇原興亜町 5-10)

EnomotoBeA Co.,Ltd.(5-10 Sohara Koacho, Kagamigahara, Gihu 504-8551, Japan)

** 名古屋工業大学 (466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町)

Nagoya Institute of Technology (Gokiso, Showa, Nagoya 466-8555, Japan)

*** 豊橋技術科学大学 (441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

Toyohashi University of Technology (Tenpaku, Toyohashi 441-8580, Japan)

¹ okamoto@enomotoweb.com

しかし、ミスト加工における問題点として、油煙発生の問題がある。多量の圧縮エアで油剤を霧化するため、その大半が機械周辺に浮遊し、結果としてミスト集塵機等を追加設置してその対策をする必要性が生じる。さらに、油剤が刃先に付着する効率が低いと、必要量以上に油剤を供給している現状が、油剤コストの向上を引き起こしている。

著者らは、更なるエコマシニングを追求すべく、工具刃先へ効率的に油剤を供給するため、切削油ミストを荷電し、接地電極とした工具、被削材へ積極的に付着させながら加工を行う、これまでに報告例のない工法を考案した。

2. ミスト加工の現状

2.1 切削加工における油剤の役割

切削加工における切削油には、潤滑、冷却、切り屑除去等の機能がある。潤滑性能は油種及び濃度、油剤の供給方法が大きく関係し、冷却性能、特にアルミ合金など展延性に富み融点の低い材料を加工する際には、構成刃先（刃先への金属溶着）の抑制に重要なファクターとなる。多量に切削熱の生じる高速重切削においては、この潤滑性、冷却性を兼ね備える水溶性切削油液が、フラッド給油という大量の切削液を切削点に流し込みながら加工する工法に用いられてきた。しかしながら、加工性能の向上⁴⁾ および、加工コスト、環境汚染物質排出量の低減のためミスト吹きつけによる加工に置き換えられるようになってきた。

2.2 ミスト供給方法及びその問題点

ミスト加工におけるミスト供給には、切削点に向けてミストを放出する外掛けミストタイプと、ミスト化した油剤を主軸および刃物中心の孔を通過させ、直接切削点まで供給するスピンドルスルータイプの2つの方式がある。従来型の外がけのミスト給油方式は、設備上の制約が少ないため導入が容易であるが、いくつかの問題点がある。以下にその問題点を列挙する。

- 刃先への油剤付着率が低いと、ミスト供給量を増す必要があり、油剤ロスが非常に大きい
- 油煙が発生し、作業環境が悪化する。
- 圧縮エアを用いるため、供給量の増加に伴い、大量に電力を消費する。

一方、スピンドルスルータイプのミスト供給方法は、油剤が切削点へ効率的に供給され、同時に主軸の冷却も達成し得るため、外がけタイプのミスト装置に置き換わりつつある。しかし、このシステムを導入するには、これに対応した機械への更新が必要となるため、普及率は低い。

即ち、既存設備へミスト加工の導入を考えた場合、刃先への高効率ミスト供給方法を確立する潜在的なニーズが存在する。

3. 断続切削における荷電ミストの刃先への付着原理

切削加工における切削油には切削境界面の摩擦抵抗を低下させ、切削に要する動力を軽減させることが求められ、これは、切削点へ切削油が浸透し工具と被削材の境界面に油膜を形成することで得られる。2次元切削における油剤の侵入経路を図1のA～Dに示す⁵⁾。

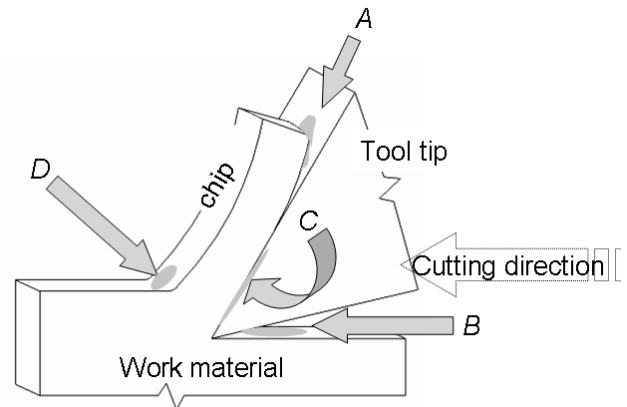


図1 加工点への切削油剤の侵入経路

Fig.1 Invasion route of cutting oil to cutting point.

- A: 工具すくい面と高圧で押し付けられる切り屑との境界（切り屑排出方向からの侵入）
- B: 工具逃げ面と加工面との境界
- C: 工具すくい面と切り屑との境界（切り屑排出方向に対し、側面側からの侵入）
- D: 被削材表面への付着

ここで、Dの被削材表面に付着する油剤は、レビンダー効果⁶⁾により、切り屑が塑性変形する際の降伏応力を低下することで切削抵抗を軽減させることが知られている。これらの面への油剤供給を効果的に行うことで、使用油剤の軽減を図ることが可能である。図2に本研究で用いた荷電ミストの供給方法を示す。

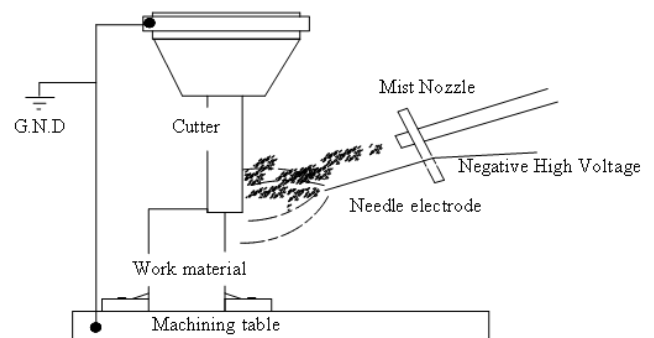


図2. 工具への荷電ミスト供給方法

Fig.2 The method of supplying electric discharged cutting oil mist to cutting tool.

断続切削加工（エンドミル加工）においては、半径切り込み深さに応じ工具刃先が大気開放される際、切削油が工具刃先に付着し油膜を形成する。しかし、この油膜は擦過する切り屑によって剥離され、再度大気開放される際には接触した工具刃先はドライ状態になる。

図2は工作機械のテーブル及び主軸を接地電極とし、放電電極として針状電極をミスト吹きつけ方向に対し平行に固定設置したものであり、コロナ放電によりミストを荷電させながら、工具刃先へ吹き付けることにより、油膜コーティングが剥ぎ取られた工具刃先へ荷電ミストが集じんされ、吹き付けるミストの損失を軽減できる可能性がある。

本システムで吹き付けた水溶性切削油の平均ミスト径は100 μ m付近にあることから、ミストの荷電は電界荷電により与えられる。

電界荷電によって t (s)後に球形ミストに与えられる荷電量 q_f は⁷⁾

$$q_f = q_\infty (t/\tau) / \{1 + (t/\tau)\} \quad (1)$$

ただし

$$q_\infty = 4\pi\epsilon_0 \{3\epsilon_s / (\epsilon_s + 2)\} a^2 E_c \quad (2)$$

$$\tau = 4\epsilon_0 E_c / i \quad (3)$$

である。ここでは q_∞ 飽和電荷量 (C)、 τ は荷電時定数 (s) であり、 ϵ_s 、 a 、 E_c 、 i はそれぞれミストの比誘電率、粒子半径(m)、荷電空間の平均電界強度(V/m)、イオン電流密度 (A/m²) である。

図2において、電極間隔3cm、平均電荷強度が10kV/cmとなるよう設定した場合、場合、単ミストの荷電量 q_f はおよそ 3.4×10^{-15} Cである。

ここで、ミスト径 a を 10×10^{-6} m、 i を 3.1×10^{-2} A/m²としている。

このとき τ は1.14msの値をとる。荷電時間 $3\tau \sim 10\tau$ において粒子荷電量が荷電飽和量の75~91%である⁷⁾。このとき、吹き付けるミストの流速が80NL/minにおいて、平均流速2.3m/sを選定することで、放電間の滞留時間は13.1msとなる。

これは、荷電時定数にたいし11.5倍であることから、荷電飽和するに十分な滞留時間である。

さらに、この荷電ミストが電界 E_p によるクーロン力を受けて集じん極に向かう速度 ω は、⁸⁾

$$\omega = qE_p / 6\pi\eta a \quad (4)$$

により表すことができる。ここで η はガスの粘性係数であり、

大気圧下、20 $^{\circ}$ Cの条件で 1.808×10^{-5} N \cdot s/m²である。

工具付近の平均電界強度を3kV/cmと仮定すれば、荷電ミストの工具への理論的移動流速は約0.5m/sとなる。

これらのことから、電界中へ効率的にミスト噴射するよう、ミスト噴出角が小さい（ミストが無駄に広がらない）ノズルを選定することで、工具刃先への荷電ミスト吸着が期待でき、少ないミスト量においても工具刃先への油剤コーティングが期待できる。

4. 荷電ミスト供給加工における潤滑性評価

荷電ミストの効果を実証することで、より微量の切削油剤による切削加工を実現する。加工時の潤滑性を評価するために、加工時の主軸動力を計測し、切削抵抗を導くことができる。実際の切削加工を想定し、汎用フライス盤によるエンドミル加工にて荷電ミストの効果を検証する。

4.1 実験方法及び結果

図2の実験系を用いエンドミル加工を行う。

ミストの噴霧量、流速が調節可能なミスト供給装置(c-ミスト:扶桑精機株)を使用し、切削点に切削液ミストを供給する。切削液には、超音波乳化により作成した、植物油ベースのO/Wエマルション(油濃度10%)を使用する。

表1 切削条件

Table 1 Milling condition.

Machine	Milling Machine Hitachi,Ltd.
Tool	Grain Carbide End Mills (CA-RG-EDS),2-Flutes
Radial Rake Angle	15 $^{\circ}$
Cutter diameter	ϕ 20 mm
Work material	Aluminum alloy (7050 type)
Speed	α :950 min ⁻¹ β :1800 min ⁻¹
Milling depth(axial)	3 mm
Milling depth(radial)	10 mm
Milling distance	250 mm

切削条件を表1に示す。

切削はDry, Mist, Mist+H.V. (High Voltage)の給油形態にて主軸の回転数(表中の α , β)を変化させながら切削加工を行った。切削動力の計測にはクランプ電力計(横河 M&C:C W121)を用い主軸の動力(消費電力)を計測した。主軸動力を測定することで、刃先における油剤の潤滑性を評価する。

ミストノズルの先端は、エンドミル側端より150mmはなれた場所に位置させる。このとき刃物を接地電極とし、放電

電極（針形状）をミスト搬送方向と平行になるよう設置し負性高電圧（D.C.）を印加する。平均電界強度は7.5kV/cm（工具-針電極間隔：3.0cm）で、主軸を回転させてもスパークが起こらない値に設定した。

切削実験で使用したエンドミルはねじれ刃であるが、直刃において有効なすくい角が大きくなったとみなせば、主軸動力に直接影響する加工抵抗は2次元切削として十分近似しうる。図3にエンドミルにて切削を行う際の各分力を示す。⁹⁾

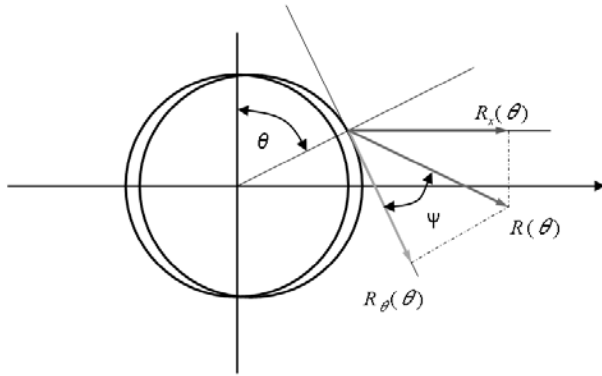


図3 エンドミル加工における加工分力

Fig.3 The process force component in end mill processing.

切削点とエンドミル中心とのなす角を θ 、接線方向の加工分力を $R_{\theta}(\theta)$ 、 x 方向の加工分力を $R_x(\theta)$ 、 $R_{\theta}(\theta)$ の加工合力を $R(\theta)$ 、合力が工具先端線速度となす方向を ψ とする。

$R_{\theta}(\theta)$ は式 (5) のように表すことができることから¹⁰⁾,

$$R_{\theta}(\theta) = \frac{2bkf}{1 - \tan \psi} \cdot \sin \theta \tag{5}$$

切削動力 W は工具直径を d 、回転数を N とすれば、2 枚刃のエンドミルの場合、式 (6) のように表すことができる。

$$W = 2 \int_0^{\phi} R_{\theta}(\theta) \cdot \frac{d}{2} \cdot \frac{N}{60} \cdot d\theta \tag{6}$$

ここで b, k, f はそれぞれ、切り込み深さ、被削材の降伏せん断応力、一刃あたりの工具送り量である。また、 ϕ は切削長さに対応する回転角であり半径切り込みで決まる。

ψ は摩擦係数 μ とエンドミルのすくい角 α を用い式 (7) のように表すことができることから、

$$\psi = \tan^{-1}(\mu - \alpha) \tag{7}$$

主軸の消費電力を測定することで、潤滑性がどのように加工へ寄与しているのか求めることができる。

実験では表 1 に示す α, β の主軸回転数において、ミストの供給量を 3mL/min, 5mL/min, 10mL/min と変化させ、電圧印加の有無における主軸動力の変化を調査した。主軸回転数を変化させた際、 x 方向の送り速度は、一刃当りの切り込み量が 0.075mm/rev の同等値となるよう調整した。

図 4 に主軸回転数 α 、図 5 に主軸回転数 β の条件にて各給油量別の Dry, Mist, Mist+H.V. の給油形態における 1 加工当たりの主軸の消費電力量を示す。

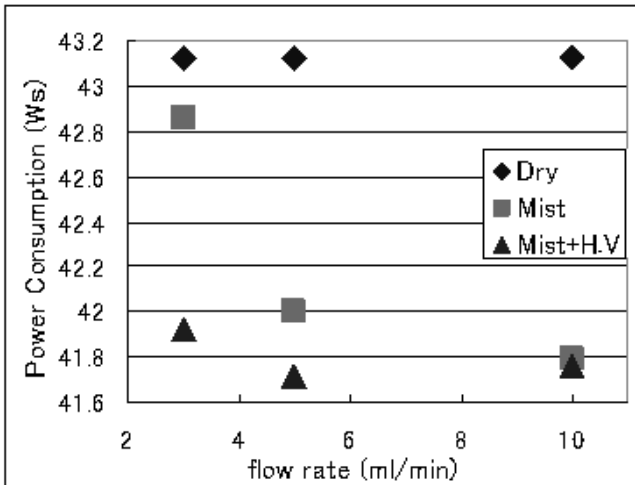


図4 各給油形態における1加工当たりの消費電力量
(主軸回転数 $\alpha: 950 \text{ min}^{-1}$)

Fig.4 Power consumption related to each cutting oil form (speed $\alpha : 950 \text{ min}^{-1}$).

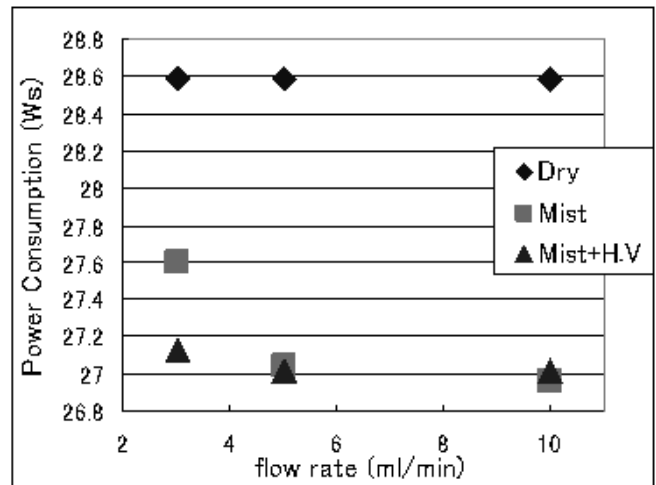


図5 各給油形態における1加工当たりの消費電力量
(主軸回転数 $\beta: 1800 \text{ min}^{-1}$)

Fig.5 Power consumption related to each cutting oil form (speed $\beta : 1800 \text{ min}^{-1}$).

図4, 5のグラフより, 刃先へ荷電ミストを供給した際, 主軸動力に若干の減少が見られた。また, 回転数を小さくし, ミスト供給量を最小限 (3mL/min) に抑えた条件においてもっとも高い効果を示した。

最小限のミスト量では, 電圧印加無しの場合, 刃先に到達する油剤が不十分であるため切削動力が Dry Cut の条件に近づく。荷電ミストを使用した際に切削動力が低下したことは, 刃先に効率的にミストが付着したことを示す。特に断続切削において, 工具表面の油膜が剥離した面に静電塗装¹¹⁾のごとく選択的に荷電ミストが付着し潤滑性を得た差異が顕著に表れたと考えられる。また, 回転数の低い条件で, より高い効果が得られた原因として, ミストの付着を阻害する工具回転による気流の影響が小さくなったことがあげられる。

最も効果の表れた, ミスト供給量 3mL/min (主軸回転数 α) での工具すくい面における摩擦係数は式(5),(6),(7)より, Mist : 0.954, Mist+H.V. : 0.924 であった。これは, 荷電ミストを用いない場合の 5mL/min の 0.930 より小さい。工具消耗量や加工品質など実測データの積み重ねが必要であるが, 少ない供給油量において荷電ミスト吹き付け工法による潤滑性の向上効果が得られたことは, 油剤使用量が削減できる可能性を示唆する。

5. 荷電ミスト供給加工による油煙抑制効果の検証

労働環境下における油剤ミスト濃度の規制は, 日本産業衛生学会が 3mg/m³ 以下の勧告を出しているが¹²⁾, その他関係省庁からの指定は無い。

ミスト加工における問題点である, 油煙の発生を供給ミストの荷電により選択的に工具, 被削材, 機械側壁面に吸着することで抑制し, 作業環境の清浄化が可能であると考え, 実験的に評価を行った。

5.1 切削点へのミスト吸着

切削点に供給したミストがどの程度, 工具, 被削材に付着しているか検討する。実験系を図6に示す。

4項で行った実験系において, ミスト吹きつけ方向の対向に吸引ファンを設置し, ミスト吸着カラムを吸気管内に取り付けることで, 電圧印加の有無における, 被削点からのミスト通過量を調査する。ここで, 吸着剤として絶乾状態の木粉を使用し, 加工前後の吸着剤の重量差を計測する。

吸引ファンは 3.2m³/min (佐藤工業所:10SRT) の吸引能を持つシロッコファンを使用した。

流速を一定に保持しながらミスト供給量 3, 5, 10mL/min において, それぞれ 10 分間被削点へ吹きつけ処理を行った。このときの荷電条件は 4 項と同様とした。

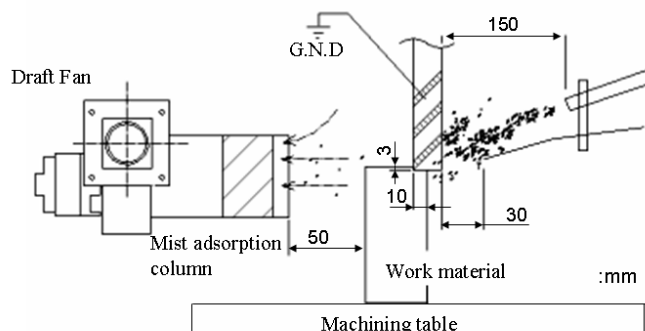


図6 加工点へのミスト吸着量測定システム

Fig6. Mist adsorption quantity measurement system to cutting point.

表2 荷電ミスト使用時の切削点後段におけるミスト浮遊量

Table 2 Amount of Oil mist behind the milling point.

Flow rate(mL/min)	3	5	10
H.V.none*	3.5 / 30	8.5 / 56	17.5 / 100
H.V.apply*	1.2 / 30	4.5 / 56	15 / 100
Improved adsorption rate (%)	65.7	47.1	14.3

* adsorption mist weight(g) / total used mist weight(g).

表2に各ミスト供給量における電圧印加有無による被削点からのミスト通過量を示す。

表2より, より少ないミスト供給量 (3mL/min) において, 荷電ミストの被削点近傍への付着効果が表れた。ミスト流量が多くなるに従い, 加工面への衝突によるミストの再飛散量が多くなる。

5.2 機械側壁面へのミスト吸着

5.1の実験では, 切削点通過直後のミスト捕集であるため, 機械内壁面やテーブルへ浮遊するミストの付着を考慮していない。工作機械は静電容量が大きいため, 荷電ミストの付着が考えられる。そこで, 実際の密閉型 NC 工作機械 (Matsuura Fx-5) を使用し, 工作機械筐体内部で一定時間ミストを噴霧し続け, 電圧印加の有無による機械筐体内部のミスト量を測定した。浮遊ミストの測定には, レーザー粉塵計 (LD-1: 柴田科学株式会社) を使用し, 電界強度および実験系の条件は 5.1 の実験と同様 7.5kV/cm とした。

実験系を図7に示す。

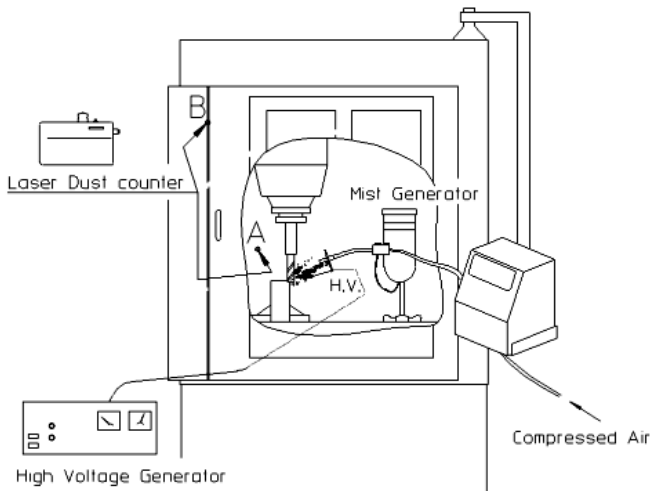


図7 密閉型 NC マシニング内におけるミスト濃度測定システム

Fig.7 The oil mist density measurement system in box type NC machining center.

表3 NC マシニング内における荷電ミスト適用時のミスト濃度

Table 3 Specific oil fume density applying High Voltage in machining case.

	Sampling Point		Flow rate (mL/min)		
	High Voltage		3	5	10
Oil fume concentration (mg/m ³)	A	Apply	4.4	6.2	7.9
		None	14.7	20.4	25.8
	B	Apply	2.6	3.6	5.8
		None	9.8	11.3	17.6

実験では、ミスト供給量を 3mL/min, 5mL/min, 10mL/min と変化させた場合の電圧印加有無における筐体内部のミスト濃度を計測する。測定ポイントを A: 切削点近傍, B: 機械作業扉付近とし、筐体内部に十分ミストが蔓延するよう、筐体内部でのミスト吹き付け時間を 90 秒とした。また、吹き付け終了後 10 秒間待機し、機械内壁面へのミスト付着を促した後、測定を開始する。測定結果を表 3 に示す。

測定結果より、油煙濃度はミスト供給量の減少に伴い荷電ミストの効果が増し、最大で 74% の油煙発生を抑制することが可能となった。

密閉型の工作機械では、筐体内部にミストが蔓延し続け、加工終了後、扉を開けた際に作業者が多量にそのミストを吸引することが問題となっている。自動運転中にミストの荷電

処理をし続けることで、作業者の高濃度ミストの吸引を抑止することができ、作業環境の改善に大きな効果を示すことを明らかにした。

6. 結言

MLQ 加工において、コストメリットを見出すためには、刃先へのミスト供給の高効率化が不可欠である。本テストを通じて以下の結論を得た。

- (1) アルミ合金の切削テストより、刃先に荷電した水溶性エマルジョンのミストを集じんさせながら切削加工を行うことで、加工に寄与しない油剤ロスを軽減させることが可能となった。
- (2) 本テストにおいて低速切削域に限定はされるが、供給量 3mL/min の荷電ミストを用いた加工で、従来型ミスト供給方法による供給量 5mL/min とほぼ同等の潤滑性能を得た。
- (3) 本法の使用により工作機械外部に放出される浮遊ミストを軽減させることが可能となった。特に、MLQ 加工 (3mL/min) において作業環境のミスト濃度規定値である 3mg/m³ を下回る結果を得たことは大きな意味を持つ。

安全性の高い荷電システムを構築する必要があるが、より理想的なエコマシニングが、本工法の使用により実現できる可能性がある。

参考文献

- 1) 全国工作油剤工業組合技術部会: 機械技術, **50**(2002) 33
- 2) 新井実: 潤滑経済, **445**(2003) 2
- 3) 榎本尚浩: 特開 2005-097454
- 4) 龍田貢二: 潤滑経済, **445**(2003) 15
- 5) 臼井英治, 水原和行: 潤滑, **25**(1958) 136
- 6) 正野崎友信: 不二越技報, **30**(1974) 7
- 7) H.J.White: AIEE Trans. Pt. **1,70**(1951) 1186
- 8) 電気工学ハンドブック改版委員会編: 電気工学ハンドブック, p.1853, 電気学会(1988)
- 9) L.V.Colwell: Trans.ASME, **76-2**(1954) 199
- 10) たとえば新機械工学便覧編集委員会編: 新機械工学便覧, 3 編 5-1, 理工学社 (1991)
- 11) P.Barmuta and K.Cywinski: J.Electrostat., **51-52**(2001) 239
- 12) The Japan Society for Occupational Health: J.Occup. Health, **46**(2004) 329