

エコマシニングの現状と課題

Current Status and Issues of Eco-Machining



中村 隆*

Prof. Takashi NAKAMURA

Environmentally-friendly technologies have been developed for manufacturing processes to reduce burden to the environment. Especially in machining, the measures called “Eco-Machining” were progressed; these were reduction of cutting fluid usage, use of energy-saving devices and improvement on tools. There was, however, a low estimation left on the reduction of cutting fluid usage, where the existing production equipment was used for the eco-machining, because many malfunctions occurred in these machines. Improvement must be made on handling of cutting chips in order to realize the environmentally-friendly machining.

Key Words: eco-machining, cutting fluid, energy-saving, tool, cutting chips

1. はじめに

本年当初に「タイトル：エコマシニングとトライボロジー等ご随意」とのことで原稿執筆を依頼され、いかがしたものかと躊躇いつつ引き受けた。(一社)日本トライボロジー学会の会員提案研究会「エコマシニングとトライボロジー」の主査を筆者が務めていたことが依頼理由の一つと思われたからである。実はこの研究会はここしばらく開催されておらず、本年3月をもって他の研究会「工作機械のトライボロジー」に統合することで解散した。研究会が開催できなかった主な理由は、話題提供者がなかなか見つからないことであった。

2. CO₂ 排出量の推移

図1, 2は環境省が主催する“カーボンプライシングのあり方に関する検討会”の第9回検討会(2018年3月9日)で使われた参考資料1の一部(CO₂の部門別排出量経年変化)である¹⁾。カーボンプライシングとは炭素税などCO₂排出削減を実現するための方策であり、これをエアコンのよく効いた部屋で文系の先生方が長々と議論しているのかと思えば腹立たしくなる。図1は発電所の電力などのCO₂排出量を最終的に消費した部門に振り分けたものであり、この25年間において“業務そ

他部門”でのCO₂排出量増大が顕著で、その内の多くは電力である。家庭部門(自家用車は運輸部門に含まれる)はそれに次いで増大していて、こちらもその2/3が電力である。結果的に発生源で表すと図2に示すように発電所などのエネルギー転換部門のCO₂排出量は増加の一途を辿っている。家庭やオフィスを快適な環境とするため、冷暖房除湿を電力で賄うのが当然となってきたことが原因である。思い返せば、20年前の大学の教室、研究室にはエアコンが無く、夏に実施される大学院入試は、暑さに耐えて一日解答が書き続けられるかが勝負の分かれ目であった。また私自身、半ズボンでも暑い日は「今日は仕事ができない」と、同僚と“ヤナ”でアユを食べに行っていたことを思い出す。一方、世間の目の敵にされる運輸部門はここ20年減少傾向にある。この間も自動車保有台数は増えていることから、燃費向上が寄与していることは明らかである。エコマシニングが関与する産業部門も1990年から一貫して減少していて、図1と図2のCO₂排出量の差は主に電力の使用量によるものであり、その電力使用量も一貫して減少していることがわかる。されど乾いた雑巾を絞るのが日本の産業であり、エコマシニングである。冒頭の研究会で話題提供者が見つからなくなったのは、エコマシニング技術が適用可能な生産現場では利用が広がり、新たな研究テーマとはなりにくくなってきたためであると思われる。

*名古屋大学客員教授(名古屋工業大学名誉教授)

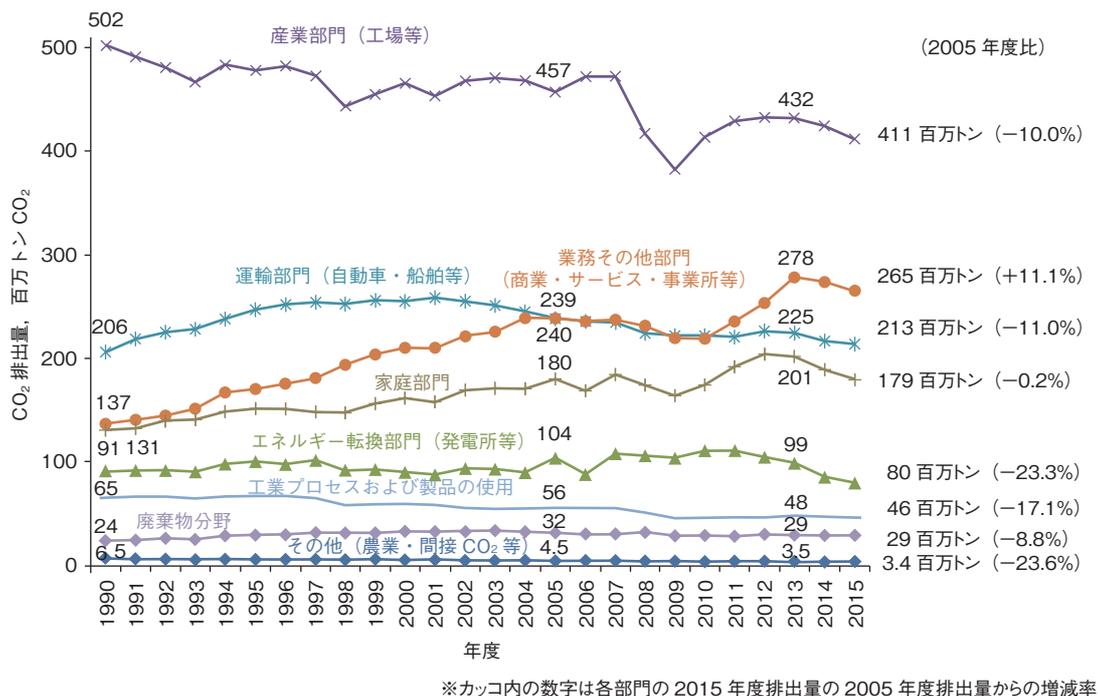


図1 CO₂の部門別排出量（電気・熱配分後）の推移

Trends of CO₂ emissions by sector (after allocation of emissions from power and steam generation)

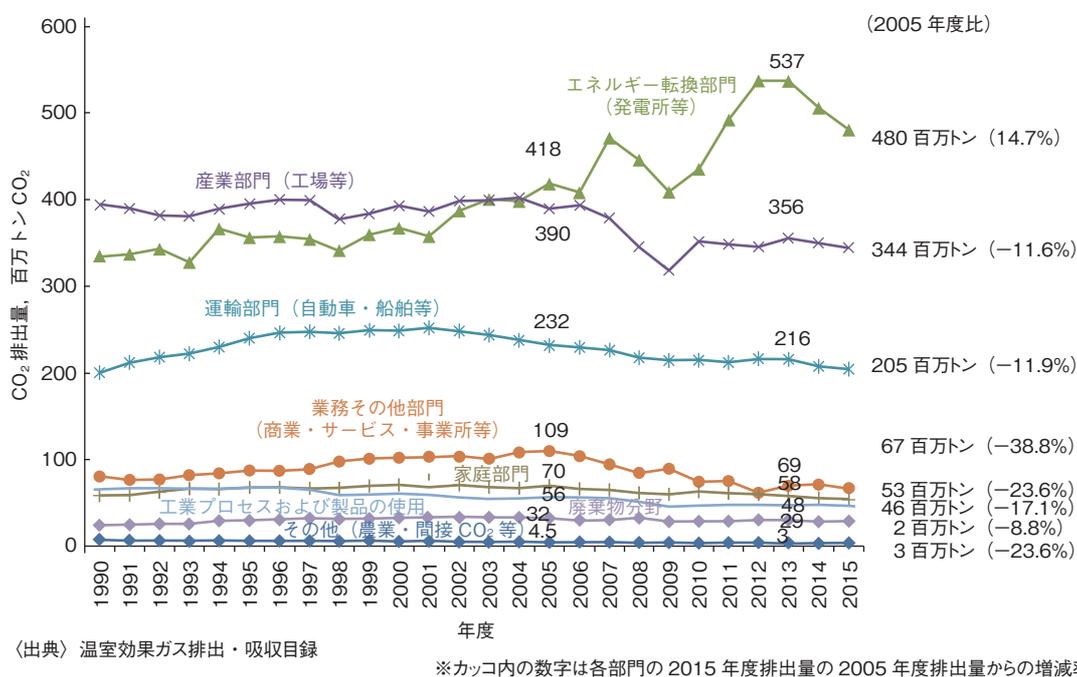


図2 CO₂の部門別排出量（電気・熱配分前）の推移

Trends of CO₂ emissions by sector (before allocation of emissions from power and steam generation)

3. エコマシニングの現状

3.1 MQL 加工法

従来から、切削加工では大量の加工液を加工点に供給していた。切削加工における加工液の役割は、①潤滑、②冷却、③切屑除去であり、これが環境対応のターゲットとなったのはその利用に必要な電力量が大きく、加工内容によっては工場の消費電力の5割以上が加工液関連設備となっている例が示されていた²⁾。鉄鋼材料ではその酸化膜が潤滑性を持つため、広い加工条件で油剤を使わないドライ加工が成立する。しかし、発熱が影響する精密加工やアルミニウム合金などの加工においては、潤滑性能を付与するために油剤の供給が不可欠である。そこで登場したのがMQL (Minimal Quantity Lubrication) であり、ごく微量の油剤 (主に天然由来のエステル) をミスト状にして加工点に供給する環境対応加工 (エコマシニング) の一手法である。

MQL 加工は、超高速加工においても油剤を加工点に供給する手法として NASA で始められ、環境意識が高いドイツで発展した技術である。著者は 1995 年アーヘン工科大学に滞在し、MQL に関する研究現場に立ち会うことができた。そこではすでに MQL 加工の適用限界を確かめていて、冷風を併用した MQL でもアルミニウム合金の重切削加工 (エンドミルによるランピング加工) は無理との結論であった。Laboratory for Machine Tools and Production Engineering (WZL) を統括する Prof. F. Klocke に、「重切削では少しでも水を使う必要があるのでは？」と提案したが、「水は使えない」の一言で否定された。他国にも流れていくライン川に廃液が漏れることを極端に恐れていると聞いた。

環境対応加工での新たな技術開発の必要性を認識して帰国した著者は、廃液を漏らさなければいいし、我が国は他国に流れる川も持たないので、水を少量使う MQL の研究を開始した。当初は水のみと MQL を別々に加工点に供給したが全く不調で、MQL 単体よりも加工力が大きくなる結果にもなった。MQL に使う油剤も種々を試み、水ミストと油剤ミストを一つのノズルから供給する器具も開発したが、尽く失敗した。ところが、卒業研究で学生が実験していると、突然良好な実験結果が得られたのである。何が原因かと調べてみると、学生が水と油剤の供給を間違えて配管していた。当初は一つのノズルの中で水ミストを前、油ミストを後ろから吹いていた。水を加工点に確実に到達させる意識からである

が、気持ちの上ではどちらにしろ同じことだと思っていた。しかし、水の表面張力は大きくミストの粒径が油剤よりも大きい水滴となり、先に単体で加工点に到達していた。これを学生が間違えて前後逆にしたため、水滴は油ミストの中を通過し油を付着して加工点に到達することになる。ここで、その時使用していた油剤が菜種油であったことも幸いした。油ミストは大気中にも漂うため、学生の健康を害せず、また学生が家に帰った時に奇異な匂いがしないように、親心いや教員心で台所と同じ匂いの菜種油を使わせていた。菜種油と水との界面張力が低く、菜種油は水面に素早く広がることも私は知らなかった。結果的には油ミストの中を通過する水滴に油が付着し、素早く広がることで図3の構造となった。

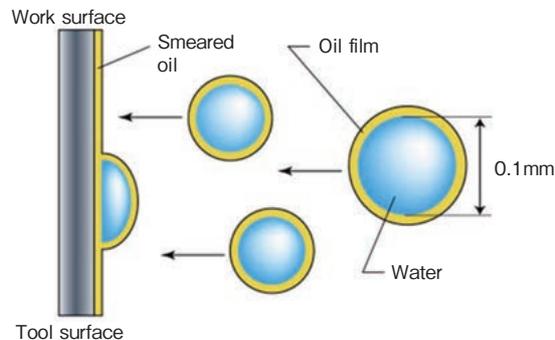


図3 油膜付き水滴加工液 (OoW: Oil on Water) の概念図

Conceptual diagram of OoW (Oil on Water) cutting fluid

図3は著者らが提案³⁾してきた油膜付き水滴加工液 (OoW: Oil on Water) であり、油剤を微量しか使わないことでは MQL の一種であるといえる。水滴は直径を比較的大きくし、工作物への到達率を高めている。この水滴の表面を油剤が覆っているが、油膜厚さが同じならば水滴の直径が大きいほど水に対する油の体積割合は小さくなる。実験では水：油が100：1を標準とした。油剤としてはトリ脂肪酸エステルを主成分とする植物油、あるいは合成エステルに界面活性剤を添加した油が適している。植物油や動物油は古くから加工油として使われており、バクテリアによる分解が良好な生分解性油剤である。実験ではオリーブオイルからひまし油まで様々な植物油を試し、アルミニウム合金に対しての加工性能および匂い、価格から菜種油を標準油とした。ちなみにステンレス鋼に対しては燃料として処分している「しょうゆ油」が最も高性能であったが、醤油の匂いが学生に不

評であり、また工作機械テーブルなどの錆発生で不適と判断した。

アルミニウム合金に対しエンドミルによる重切削を行い、種々の加工液供給条件で OoW の性能を試験した結果を図 4 に示す⁴⁾。グラフ最下段に示すエマルジョン・フラッドクーラントの加工力測定結果 (200N) を基準として、グラフ最上段の精製菜種油のみをミスト供給した場合は加工力が大きくなっている。これがアーヘン工科大学で確かめられた「MQL の適用限界」であり、良好な切削状態とは言えない。ちなみにドライ切削では切屑が全て工具に溶着し摩擦攪拌接合状態となる。グラフ 2 段目は水滴のみを供給した場合で、これも切屑が仕上げ面に溶着し、切削は成立していない。3 段目からは油剤と水を供給する OoW (水:1 000mL/h, 油:10mL/h) であり、油剤の種類を替えた。一つ目は通常の鉱油切削油剤であり、切削は成立するものの加工力は大きい。鉱油は水面に広がらないため図 3 の構造にはならないことによる。二つ目は食用てんぷら油であり、エマルジョンよりも低い加工力を示し、仕上げ面も良好であった。三つ目は合成エステルに界面活性剤を添加した油で、最も低い加工力を示した。四つ目は精製菜種油であり 2 番目に低い加工力を示したが、これら 3 件の加工力に大差はない。油剤メーカーには申し訳ないが、スーパーで売られているてんぷら油で十分であることが分かった。ただし、植物油では台所と同じで油の酸化劣化、重合により長期的にはベタツキが避けられず、定期的な清掃が必要である。

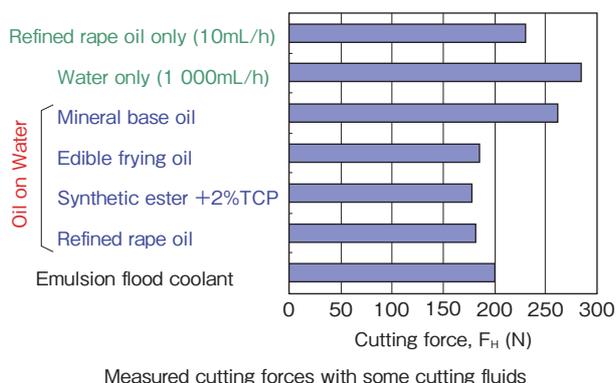


図 4 加工液供給方法、油剤種類を替えた時の加工力の変化

Change in cutting force when using different supply methods and oil types

OoW に使う水も考慮する必要がある。名古屋市内の大学実験室では良好な OoW を他地域で試すと、思いのほか性能が出ないことがあった。名古屋市水は木曽川の軟水であり、地下水を使う他地域は硬水であったため、油剤との界面張力バランスが崩れていたのが原因である。油剤に界面活性剤を適量加えることで、この問題は解決した。

OoW の場合もエアーを使用する。コンプレッサによる圧縮空気の供給は、電力消費の観点からできるだけ控えたい。そこで、水圧と油剤圧力だけで油膜付き水滴を加工点に吹き付けることを試みた。結果は、鉄鋼材料に対してはエアーを使う OoW と比べて大差はなかったが、油剤の効果が顕著なアルミニウム合金に対しては大きな差が生まれた。鉄鋼材料では加工温度が高く、水が沸騰することで加工点を冷却している。一方アルミニウム合金では加工温度が比較的低温で水の気化熱で冷却するため、周りが飽和水蒸気状態となると気化できなくなり、冷却性能が低下する。新鮮な乾燥空気の供給が必要であることが分かった。被削材料によって使い分ける必要がある。

3.2 MQL は失敗

MQL が環境負荷低減に効果的であることが知られるようになり、10～15 年前には自動車メーカーや部品供給会社を中心として、専用加工ラインに MQL を導入することが試みられた。著者は、MQL を導入するにあたり工具を特注、工作物の上下を反転して穴加工の切屑排出性を改善、切屑排出システムの構築により、アルミニウム合金素材に対し良好な環境対応生産を実現した工場を知っている。しかしこれは新設の工場であり、多くの工場に出入りする某設備メーカー社員の話によると、従来の生産ラインをそのままに、加工液だけを MQL に替えて、失敗の評価だけが残った所が多いとのことである。

- (1)穴加工における切屑排出性の低下。
- (2)油剤ミストのみでは冷却性が無く、構成刃先制御不足による面あらかの低下。
- (3)切屑除去機能の低下により、治具着座部での切屑噛みが多発し品質不良。
- (4)MQL をスピンドル内から供給すると、油剤ミストが遠心分離され供給量が不安定。

切屑問題は後述するとして、(2)については著者らが提案する OoW、あるいはエマルジョンをミスト状にして

吹き付けることで冷却性を付与することができる。また(4)については、油剤と空気を別々にスピンドルに供給し、工具の近くでミキシングする方法(内部ミキシング方式)が開発されている⁵⁾。

切屑処理については OoW 開発当初から懸念していた。エマルションなどの加工液は加工点で発生する切屑を加工点から遠ざけるだけでなく、適度に切屑飛散を抑えていた。MQL やドライ加工では切屑が宙を舞い、MQL では油剤のベタツキにより工作機械天井に切屑が張り付くことがある。また工作機械の思わぬ所まで切屑が入り込みトラブルの原因となる。そこで、**図5**のシステムを開発した。特別に作製したエンドミル、ドリル、タップは工具先端で切屑を吸引し⁶⁾、工具、ホルダ、主軸の中空を通じて切屑回収・圧縮装置に送られる。加工液は OoW を外掛けで供給し上記(4)の課題を解決した。切屑の吸引とともに加工液も吸引するため、外掛けでも効果的に加工点に加工液が供給された。しかし、本システムが成立するのは切屑が工具内を通過する程度に小さいことが前提であり、重切削は不可能である。

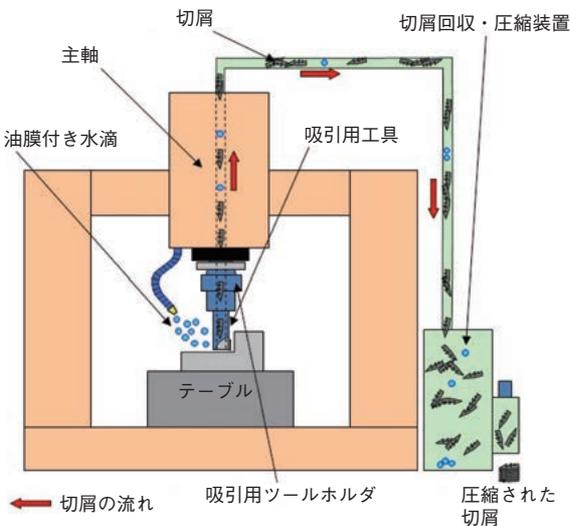


図5 開発した切屑吸引加工システム
Developed chip sucking machining system

3.3 新たな MQL 時代

MQL は失敗の評価の後にも工場における電力消費削減の要求は続き、既存設備で上記(2)の課題を解決する方法として、エマルション加工液をミスト状に供給する手法(エマルション MQL と呼ぶことにする)が広まりつつある。エマルション加工液は油剤に界面活性剤を添加して水の中でミセルを形成し、油剤を水に分散させたも

のであり、ミセルが可視光の波長よりも大きいいため白く乳化したものになる。油剤濃度が一定以上であれば水と空気との界面にも油剤の膜を形成することから、エマルションをミスト状に噴霧すると、**図3**と同様の構造となる。ただし、水滴の中にもミセルが存在するため、水：油剤の体積が OoW では 100 : 1 であるのに対しエマルション MQL では 100 : 5 程度の油剤が必要となる。通常加工におけるエマルション MQL の供給量は 100 mL/h 程度であり、OoW と比べるならば、水も油剤も少なめとなっている。

いずれにしても MQL には切屑除去・排出の能力はないことから、工作機械内壁面に洗浄液を滴のように流すことや、エアーをパルス状に吹き付けてエアー消費を抑えながら切屑を除去・排出する試みがなされている。また、**図5**に示す吸引方法や、工具メーカーが開発した吸引工具(例えば http://carbide.mmc.co.jp/magazine/article/cut_vol06)の利用が進めば上記(1),(3)の課題が解決し、またスピンドルスルーに対しては内部ミキシングで(4)の課題が解決するならば、新たな MQL 時代となることが期待される。

4. おわりに

この 10 ~ 15 年前に、既存設備のままで MQL を導入した工場では失敗の評価が残っていると思われる。ここでもう一度、最小限の油剤で切削を行う MQL を見直してほしい。冷却性が課題となるところではエマルション MQL でもよいが、筆者としては OoW をお勧めしたい。MQL のスピンドル内供給では応答性の観点から内部ミキシング方式が優れている。いずれの技術もそろそろ特許が切れるころであり、著者は広範囲な切削加工で切屑を吸引する技術開発を再開するつもりである。世界の中で我が国が環境対応加工の先進国となることを強く望み筆を置く。

参考文献

- 1) https://www.env.go.jp/earth/ondanka/cp/arikata/conf09/cp09_ref01.pdf, 44-45.
- 2) 井川正治, 平坪正隆, 宮崎匡利: 環境対応のためのドライ加工への取組み, 機械技術, 47, 5(1999)18.
- 3) 中村 隆, 松原十三生, 糸魚川文広, 丹羽小三郎: 環境を重視した微量油膜付水滴加工液の研究, 1999年度精密工学会春季大会学術講演論文集, (1999)550.
- 4) T. NAKAMURA, T. MATSUBARA, F. ITOIGAWA, K. KAWATA: Oil Film on Water Fog Metalworking Fluid, Proc. Of 10th International Conference on Precision Engineering, (2001)269.
- 5) T. MAKIYAMA: Near-dry Machining Technology for High Capability Machining Center, Society of Manufacturing Engineers IMTS 2000 Manufacturing Conference, (2000), CD-ROM, Session #210.
- 6) 中村 隆: 新規工具の必要性と波及効果, 機械と工具, 54, 3(2010)10.