

NACHI
**TECHNICAL
REPORT**
Machining

Vol. **17A1**
October/2008

マシニング事業

■ 寄稿・論文・報文・解説

近未来技術展望

「エコマシニングの現状と未来予測」

Perspectives on Near-future Technologies
"Current Status and Future Projection
on Eco-machining"

〈キーワード〉 環境対応加工・エコマシニング・エコロジー・
エコノミー・極微量潤滑・切りくず吸引

名古屋工業大学大学院 産業戦略工学専攻

教授 中村 隆

Prof. Takashi Nakamura
Master Course of Techno-Business Administration,
Graduate School of Engineering Nagoya Institute of Technology



要 旨

生産加工では環境負荷の低減を目的とした技術開発が行なわれている。とくに切削加工ではエコマシニングと呼ばれ、加工液の削減、機器の省エネルギー、工具の改良がすすんでいる。しかし、生産現場での環境対応の進展は十分とはいえない。

自動車産業における環境規制と企業競争力を例として、生産加工における環境対応の必要性を説明するとともに、それに必要な技術開発を展望する。

切削・研削加工において加工液の削減を実現するには切りくず、研削くずの処理技術の発展が必須である。

Abstract

Environmentally-friendly technologies have been developed for manufacturing processes to reduce burden to the environment. Especially in machining, the measures called "Eco-machining" is under progress; these are reduction of cutting fluid usage, use of energy-saving devices and improvement on tools. However, the progress of environmental measures made for production areas has not been sufficient. Improvement must be made on handling of grinding swarf and cutting chips in order to reduce cutting fluid in machining.

With the examples of environmental regulations for automobile industry and the impact on corporate competitiveness, necessity of environmental measures for manufacturing processes is explained here and further more the required technological development is surveyed.

1. エコマニア?

多分に誇張された映像とは分かっているが、動物好きの著者にとってはホッキョクグマが行き場を失っている姿は心が痛む。2010年10月には名古屋にてCOP10(生物多様性条約第10回締約国会議)が開催されることもあり、当地域でも環境問題に対する関心が大いに高まりつつある。

一方、当地域はわが国におけるものづくり産業の集積地であり、生産工程での環境対応は喫緊の課題となってきた。もはや環境負荷低減を心がけていない事業所は社会責任を果たしていないとみなされ、これまでは環境問題とは無縁と思われた下請け小企業にも親会社から対応を強要されるようになってきた。

しかしながら技術者がエコマニアになってはいけない(なお、Ecomaniaは医学用語で「家庭嫌忌症」として使われていて、具体的には「隣のご主人は～なのに、あなたは・・・」と発言する症状で、極一般的な病気。よって「環境問題大好き人間」の意味で使うことはできません)。

環境問題に対し辛辣な発言で有名な武田邦彦教授(現中部大学)も、科学的に根拠のある行動を訴えているのであり、技術者は明確な説明ができる環境活動を心がける必要がある。

2. エコマシニングとは何か

エコマシニングとは、Ecological Machining からつくられた和製英語である。記憶は定かではないが、環境対応加工をすすめている日本の多くの研究者が使い出し、現愛知工科大学の松原十三生先生を主査として香川大学の若林利明先生や著者たちが1999年に精密工学会に「高精度、高能率エコマシニング研究会」を立ち上げたのが表立って使いだしたはじまりのようである。

この分野の研究はわが国が世界の中心になりつつあることから「エコマシニング(Eco-machining)」を世界に広めてよいと思われる。マシニングが示すとおり、切削・研削加工などの除去加工が中心であるが、本稿で示すとおり様々な手段があり、製造技術の他の分野に応用が可能である。

3. 自動車産業に見る環境規制と競争力

(環境規制と競争力の歴史)

ここでは自動車産業における環境規制と競争力の変遷を概観し、生産加工分野での環境対応の参考とする。1970年代、世界で最も厳しく達成不可能な排ガス規制と思われた米国^{※1}マスキー法に対し、本田技研工業は総力を注入して画期的なエンジンCVCCを完成した。副燃焼室を巧みに利用した希薄燃焼方式であり、その技術力に世界が驚いた。

(社)日本機械学会では、「この技術が契機となり日本の排出ガス低減技術を世界のトップレベルに引き上げた歴史的な機械である」とし、「機械遺産」の1つに指定している。

日本企業は排出ガス中の有害物質を削減するだけで無く、燃料消費自体の削減に努力し続けた。それではその後日本の自動車産業は米国市場で隆盛を極めたか、否である。これに刺激を受けた米国ビッグ3の合理化、1973年の第1次石油危機、1979年の第2次石油危機の後2002年までの原油安価安定により、ビッグ3は復活した。

一方、日本の自動車企業は70年代の1ドル290円から100円を割り込むまでの円高により、米国市場から撤退したか、これも否である。アメリカ市民、とくに知識層はたとえ安いとはいえガソリン消費の少ない日本車を選び、米国社会における信頼を確保したのである。

歴史とは皮肉なものであり2003年以降の原油高は地道に環境技術開発を続けた日本車に追い風となった。

環境問題と企業の競争力との関係については、(1)環境規制が企業競争力を高める「ポーター仮説」、(2)環境規制が企業にとって経費増加要因となる説、および(3)企業の自主的な環境問題への取り組みがある。

(環境規制が企業競争力を高める「ポーター仮説」)

ハーバード・ビジネススクールのマイケル・ポーター教授が1991年に唱えた(1)の「ポーター仮説」とは、「適切に設計された環境規制は、費用低減、品質向上につながる技術革新を刺激し、その結果国内企業は国際市場において競争上の優位を獲得し、他方で産業の生産性も向上する可能性がある」という仮説である。

前述の日本車成功を説明する説として経済学者がしばしば使うが、実証的検証の結果は否定的なものが多い。規制を凌駕する技術革新が可能でない場合は、競争上の優位を獲得することも生産性の向上も期待できないからである。確かにポーターは「適切に設計された環境規制」を前提にしている。

京都議定書以降の混乱を見れば分かるように、利害を隠すことのできない議論から「適切な設計」は望めず、神様にしかつけれないのかもしれない。

(環境規制の経費増加要因)

日本の企業経営者は(2)の経費増加要因を実感しているようである。欧州における家電製品などのRoHS指令や自動車に対するELV指令がその一例である。ELV指令は欧州連合EUが2000年に施行した自動車のリサイクル指令であり、EU市場で登録される乗用車やバス、トラックについて、Pb、Hg、Cr⁶⁺の使用量を1,000ppm以下、Cdを100ppm以下に削減するものである。

Pbは摩擦・摩耗を低減する安価な素材として軸受などに多用されてきた。また、鉄鋼材料では工具の摩耗を低減し、加工能率を向上する快削鋼として、鉛が添加されてきた。鉛を添加していない鉄鋼材料を従来どおりの能率で加工するには、強力な加工液を利用したいところであるが、その加工液にも有害添加物の削減、さらに加工液自体の削減が求められている。

なお、バッテリーでの鉛の使用は現在のところ認められている。これは、回収率が高いこともあるが、いまだに安価な代替品が無いことが大きい理由であるらしく、軸受けのレッドフリー化で苦勞した企業研究者を知るだけに、自己膠着的な対応といわざるを得ない。

環境規制ではないが、別の例をあげよう。図1は国別の切削工作機械出荷金額の変遷であり^{1,2)}、2007年度の中国の急増に沿うようにドイツの出荷金額が急増しているのに対し、日本の出荷金額はのび悩んでいる。著者が知るメーカーはここ数年フル生産に近い状況が続き、増産する余力が無いのが実際であろうが、社員からは安全保障貿易管理のリスト規制に対する不満をしばしば聞く。「手続きが煩雑で、高性能機械を輸出する気になれない」との意見からの推定では、利益の少ない低中性能機械を日本が中国に輸出し、高性能機械はドイツが図1の結果を招いたとも思われる。

(企業の自主的なとり組み)

(3)の企業の自主的な環境問題へのとり組みは、企業の社会責任、CSR活動として定着し、廃棄物の分別、リサイクルは企業のイメージ戦略ともなりつつある。しかし、本業の製品生産では、生産手法の変更に極めて慎重である。大学教員として感ずるところは、今の若い世代、とくに意識の高い学生は環境問題に敏感なことである。これは大学にとっては優秀な高校生に対する強いアピールになることから、大学経営の1つの戦略となる。企業にとっても優秀な社員を確保するだけでなく、グリーン購入などで商品戦略にも繋がる。

米国市場における日本車の例は、環境規制をきっかけとしたとはいえ、企業の地道な自主的とり組みの成果であると断言できる。

生産加工の分野においても、「適切に設計された規制」が期待できない以上これを待たず、自主的なとり組みで企業競争力に繋げる技術を獲得するのが得策といえる。「きっかけ」は経営者の決断である。手法は様々であるとしてもエネルギー消費を削減すること、環境汚染物質を出さないことが良いことは世界の共通認識となっている。よってこの方向での技術開発は必ず企業競争力を高めるものになると確信する。

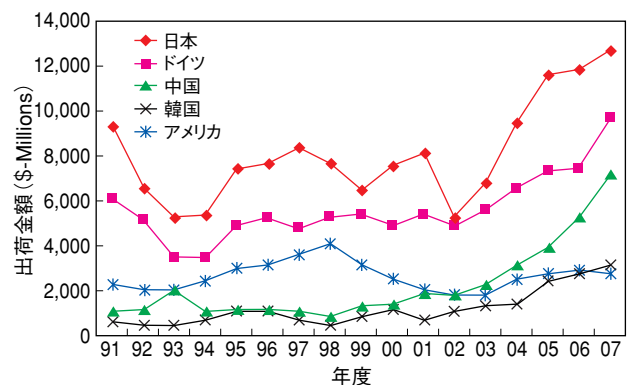


図1 切削工作機械の主要国別出荷金額推移

4. エコマシニングの現状

1) 外的要因による環境対応

エコマシニング技術の多くは、Ecology=Economyの成立を前提として開発がすすめられた。しかし経営者の決断の必要も無く、生産加工の分野で環境対応を行なった例がある。

1998年10月、新聞の3面記事で大学助手が加工液の付いたウエースを焼却するとダイオキシンが発生すると発表して以来、JIS規格から塩素系添加剤を含む加工液が削除されるに至った。ダイオキシン騒動の功罪は別として、健康に良くない物質を無節操に使うことにブレーキをかける「きっかけ」にはなった。

生産を維持するためにはらった生産技術者の努力は、その後の油剤開発、工具材料の発展により報われ、従来以上の生産能率を達成している。その他の外的要因の例はPRTR法による規制で、加工液削減の要因として後述する。

2) 生産機器のエコロジー

国内の工作機械メーカーは、工作機械自体の消費電力削減の努力を続けている。その方法は多岐にわたり、油圧ポンプを必要なときだけ作動させる工夫、油圧を廃止して電動駆動とする、高効率な電源回路利用など、待機電力の削減が最も効果的である(多くの場合、実加工主軸消費電力の割合は僅かである)。待機電力の削減にはサイクルタイムの短縮も効果的であり、リニアモーターによるテーブル送りの高速化が貢献している。

(熱変形抑制によるエコロジー)

異なる手法のエコロジーとして、熱変形抑制の事例を挙げる。工作機械の加工精度を維持するには、工作機械を設置している部屋、あるいは工場全体の温度調整が必要である。長さ100mmの鋼材は1℃の温度上昇で約1 μ m熱膨張する。工作物や機械全体が相似的に熱膨張すれば影響は少ないが、実

際には温度分布もあり、高精度な機械は室温変動が厳しく抑制された恒温室に置かれている。±0.5℃を保障する恒温室は100%の冷房運転と高速応答の暖房制御を組みあわせるため、一般の温調よりも1桁多い電力を消費する。

オークマでは、工作機械の熱変形解析による構造改良と多点での温度測定による補正により、室温変化に対し、加工誤差の少ないマシニングセンターを開発した³⁾。±2℃に制御された部屋に置かれた従来機と比べ、±5℃の一般空調室でも同等以上の加工精度を維持し、電力費用、設備費用を大幅に削減できることを示している。

3) ドライ・ニアドライ(MQL)加工

加工液利用を削減する方向性は3つの要因があった。第1は前述の消費電力削減の効果である。生産工場では加工液を常に循環させているためポンプなどで消費する電力は少なくない。

(加工液の廃液処理コスト)

第2の要因は加工液の廃液処理に膨大なコストを必要とするようになったことである。大学での例で一般的ではないかも知れないが、エマルジョン原液の購入価格よりも体積が増えた分以上に廃液処理には経費がかかる。

第3は1999年に制定されたPRTR法(特定化学物質の環境への排出量の把握などおよび管理の改善の促進に関する法律)である。規制の狙いは危険化学物質の不適切な取り扱いや処理により、環境に流出することを防ぐことにあり、とり扱い事業所ごとに指定化学物質の総量管理を求めた。とくに加工液を問題としたわけではなく、現在では油剤メーカーが第一種指定化学物質を含まない加工液を開発し、多くの問題は解決したが、制定当時のインパクトは大きかった。

(加工液の削減)

このように現在では生産経費の削減を目的に加工液の削減が行なわれている。経費の削減はエネルギー消費の削減、CO₂排出の削減、地球温暖化の抑制に繋がる、といわれている、というのは、著者自身はCO₂地球温暖化論に懐疑的である。しかし無駄なエネルギーは使うべきでなく、資源の無い日本の営みでは創意工夫の原点といえる。そこで、ドライ・ニアドライ加工である。

鉄鋼材料はその酸化膜が潤滑性を持つため、広い条件で油剤を使わないドライ加工が成立する。後述の工具材料改良により、ドライ加工の適用範囲は広がるものと思われる。

(MQL加工の発展)

ドライが成立しない条件では、ニアドライ(極微量潤滑MQL: Minimal Quantity Lubrication)加工が適用されてきた。

MQL加工はNASAを出発点として環境意識の高いドイツで発展した技術である。1995年、著者はアーヘン工科大学に滞在し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、冷風併用MQLもアルミニウム合金の重切削加工は無理との結論であった。Prof.F.Klockeには、「重切削では少しでも水を使う必要があるのでは?」と進言したが、「水は使えない」の一言。その後ドイツでは加工液の管理徹底や、揮発成分の少ない生分解性油剤のフラッド給油の方向にすすんだ。

(水滴加工液の提案)

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、試行錯誤および偶然の結果、図2に示す油膜付き水滴加工液(OoW: Oil on Water)を提案した⁴⁾。Prof.F.Klockeに否定された水(ドイツの水道水は硬水で、通常の植物油ではこのような構造にならない)を使うことで冷却性が付加されたMQLである。

アルミニウム合金のエンドミル重切削で加工力を測定した例を図3に示す⁵⁾。従来のエマルジョンと比べ、OoWは同等の加工力となっているが、油剤に鉱油

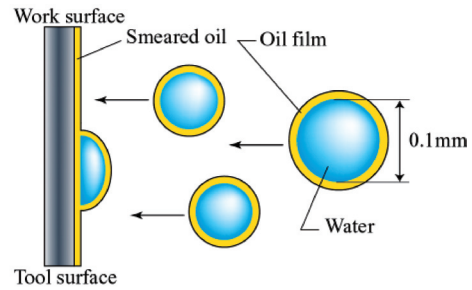


図2 油膜付き水滴加工液の概念図

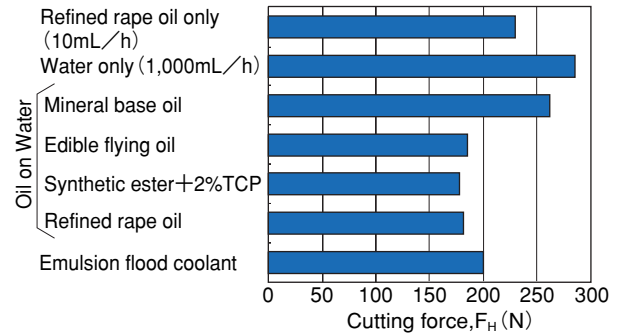


図3 各種加工液でのアルミニウム合金重エンドミル加工における加工力測定結果



図4 MQL旋削工具(フジBC技研提供)

を使った場合は加工力が大きく焼付が発生した。鉱油では図2の構造にならないためである。水を使わず同量の植物油だけを使った場合、逆に水だけを使った場合も加工力が大きく焼付いた。加工液の潤滑性と冷却性が必要なが分かる。

(MQL加工の実用性向上)

MQL加工は国内の油剤メーカーが精力的に性能向上をすすめ、切りくずを流すフラッシュクーラントとの共存性、酸化劣化によるベタツキの防止など、実用性が高められた。OoW用の生分解性油も、国内の工場用水に適合(界面張力の調整)したものを製品化している。

図4は旋削工具の先端にMQL供給ノズルを2箇所設けた例(イメージ図)で、従来からいわれているように、逃げ面側からの油剤供給が効果的である。MQLを適用することで、工場の環境を劇的に改善した例も多いが、まだその普及率は低い(10%以下と推察する)。

生産方法を決定するのは現場の生産技術者であり、従来の加工液をMQLに切り替えるには相当の勇氣が必要である。その理由の1つに第5章で解説する切りくず問題がある。

4) 工具材質、被覆技術

工具被覆は著しく進歩した。母材との密着性向上と、硬質被膜の緻密化により、従来は研削加工を行なったプレハードン鋼も切削加工が可能となってきた。ダイヤモンド被覆も十分実用に耐えるようになり、とくに非鉄合金では切りくずの溶着を防ぐ効果が認められ、ニアドライ加工の適用範囲拡大に貢献している。

母材の工具材質については、焼結粒子の微細化や焼結助剤の改良により、韌性を高めている。しかし、炭素鋼から高速度鋼、超硬合金への革新的な能率向上に匹敵する次の材料は^{※8}いまだに現れていない。

航空機材料の耐熱合金やTi合金、C-FRPの切削加工では一段高性能な工具材料を必要としている。^{※9}イオン注入で改質した単結晶が有望である。

5) 研削加工におけるエコマシニング

研削加工でも加工液を削減する試みが行なわれている。図5は極微量の油剤を砥石に、少量のクーラントを工作物に供給するジェイテクトの例である⁶⁾。研削加工では赤熱した加工くずからも分かるように加工点の発熱が大きく、冷却は不可欠である。

この手法により円筒研削したときの、研削能率増加に対する加工面の硬さ測定結果を図6に示す。

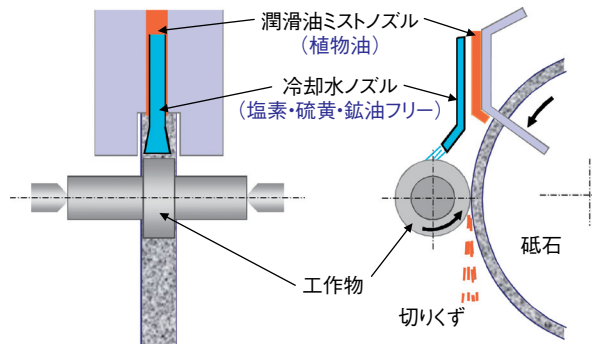


図5 MQL研削加工システム (ジェイテクト提供)

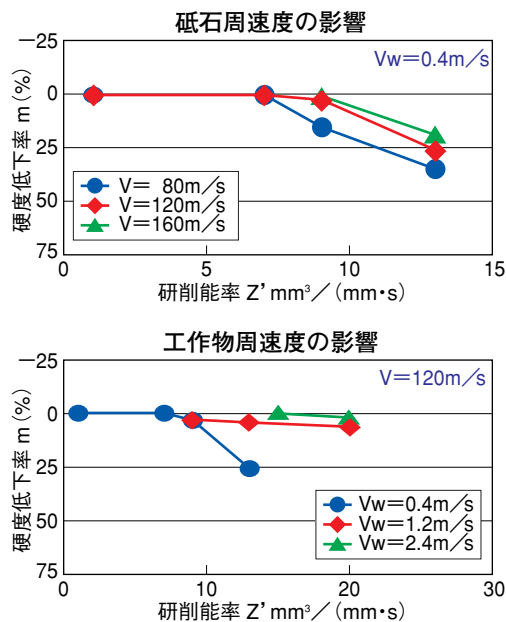


図6 研削性能試験結果 (ジェイテクト提供)

研削能率が $7\text{mm}^3 / (\text{mm} \cdot \text{s})$ までは加工面の硬さに変化は見られず、砥石周速、工作物周速の増加によりその限界研削能率は増大している。

5. エコマシニングの未来予測

上記のようにエコマシニングの技術は様々な方法で進展している。これを生産現場に広く展開するには2つの障壁がある。

(エコマシニングの世界標準)

1つは世界標準である。国内ではエコマシニングの認識は高まりつつあるが、世界的には遅れている。世界のものづくりは中国やインドにシフトし、そこではまだ環境意識は低い。エコマシニングを世界に広めるのは環境対応加工を研究する我々の責務であり、優れた成果を世界に発信していく必要がある。

(切りくずのコントロール)

第2は切りくずのコントロールである。加工液削減はエコマシニングの中心的技術であるが、加工液の役割の1つに切りくずの処理がある。加工液は切りくずの飛散を抑え、コンベアまで洗い流すが、これを削減すると工作物、テーブルの上に切りくずが堆積することになる。加工手法を決定するのは現場であり、切りくず堆積は現場には受け入れられない。工具の周りにフードを設置し吸引する工夫、工作物を逆さづりにして切りくずを落下させる工夫も行なわれているが、加工対象が限定される。

(切りくず吸引システム)

そこで著者らは図7に示すシステムを開発中である⁷⁾。
工具、工作機械の構造を全面的に変更し、工具自体が切りくずを吸引して速やかに処理する。切りくず吸引はBTAドリルに見られたが、エンドミル、タップなどを汎用機械で使うときも切りくずを吸引し、工作物上に切りくずを残さないのが目標である。

OoWやMQLを外掛けで供給した場合も加工点に加工液が集まり、効果的な工具すくい面潤滑が可能なども確かめている。この技術の実現には工具、ホルダー、工作機械メーカーの連携が必要であり、エコマシニングの進展のためにご協力をお願いしたい。

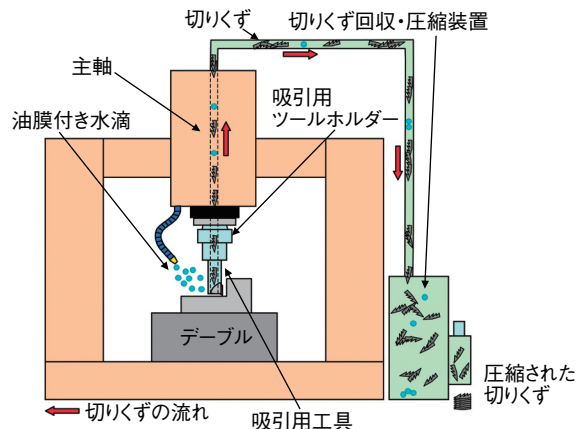


図7 切りくず吸引マシニングセンター

(エコマシニングの道のり)

このようにエコマシニング進展の道のりは険しいが、自動車産業の例に見られるように、地道な技術開発と製品化が企業競争力となる。ここで、図8は著者の同僚(名古屋工業大学建築・デザイン工学科の伊藤孝紀准教授)に「環境対応工場のイメージ図を」だけでコンテを依頼し、即応で描いた「森の中の工場」である。このような環境であればエコマシニングにも励もうというものである。経営者の決断に期待する。

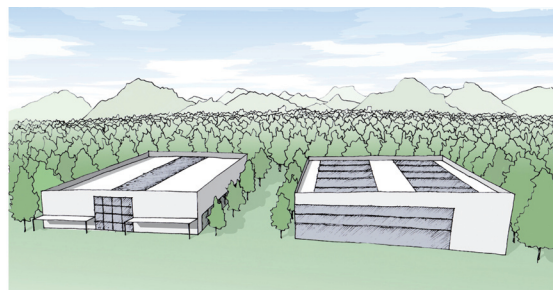


図8 「森の中の工場」(伊藤孝紀氏提供)

用語解説

※1 マスキー法

アメリカ民主党のマスキー上院議員が1971年1月に大気汚染防止法を提出したので、その法案をマスキー法と呼ぶ。とくに窒素酸化物については、当時、世界でもっとも厳しい排気ガス規制法といわれた。

※2 RoHS指令

電子・電気機器における特定有害物質の使用制限についての欧州連合(EU)による指令。2003年2月に公布、2006年7月に施行。Restriction of Hazardous Substances(危険物質に関する制限)の頭文字。

※3 ELV指令

欧州連合(EU)が2000年10月に施行した自転車のリサイクル指令。「廃自動車指令」とも呼ばれる。

※4 レッドフリー化

無鉛 lead-free(レッド・フリー)。

※5 安全保障貿易管理のリスト規制

安全保障貿易管理の国際的枠組みとして、リスト規制対象品目リスト「輸出貿易管理令別表第一輸出許可品目のリスト(A、B、Cグループ)」に定める貨物・技術は全て経済産業省の輸出許可が必要となる。

※6 PRTR法

特定科学物質の環境への排出量の把握などおよび管理の改善の促進に関する法律。Pollutant Release and Transfer Registerの略。

※7 フラッシュクーラント

切りくずを洗い流すために供給する加工液。防錆・洗浄性を付加した水を使用し、間欠的に工作物やテーブル、工作機械内壁に多量にかける場合が多い。

※8 C-FRP

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)。Carbon Fiber Reinforced Plasticsの略。

※9 イオン注入

イオン化した原子を固体に注入し、固体の特性を変化させる技術で、半導体や、金属の表面処理など、さまざまな材料、科学の研究などに適用される。対象の物質と別の元素を注入することにより物質に構造的な変化を与え、物質の拡散性、電気特性、腐食性を制御できる。

※10 BTAドリル

ドイツの工具協会(Boring and Trepanning Association)が開発した深穴用工具で、ガンドリルとは逆に穴とドリルとの隙間から加工液を圧入し、工具先端の穴から工具中空内を通して切りくずを排出する。利用には専用の加工機械が必要。

関連記事

- 1) 工作機械統計要覧2007年
日本工作機械工業会、P.299(2007)
- 2) 特集2007年工作機械国別ランキング
生産財マーケティング、Vol. 45、No.4、pp.60-62(2008)
- 3) 長谷部 孝男:広がるエコマシニングのテーマ
機械と工具、Vol.49、No.8、pp.72-74(2005)
- 4) 中村 隆 ほか3名:環境を重視した微量油膜付水滴加工液の研究
1999年精密工学会春季大会講演論文集、p.550(1999)
- 5) 中村 隆:環境対応加工油剤の動向
機械と工具、Vol.49、No.8、pp.68-71(2005)
- 6) 吉見隆行・森田 浩:環境対応型研削加工技術の動向
砥粒加工学会誌、Vol.51、No.11、pp.647-650(2007)
- 7) 中村 隆・糸魚川文広:環境対応型切削加工法の現状と今後の動向
トライボロジスト、Vol.53、No.1、pp.21-26(2008)