CO₂削減のために強アルカリ水中に工作機械を浸漬する技術の開発*田辺 郁男^{*1}, ジュニオール ライムンド ダ クルス^{*2}
坂口 暢也^{*2}, 金子 義幸^{*3}Development of Technology Regarding Soaking Machine Tool in Strong Alkaline Water for Reduction of CO₂Ikuo TANABE^{*1}, Junior Raimundo Da CRUZ,
Nobuya SAKAGUCHI and Yoshiyuki KANEKO^{*1} Nagaoka University of Technology, Dept. of Mechanical Engineering
1603-1Kamitomioka-machi, Nagaoka, Nigata, 940-2188 Japan

In the 21st century, as it is important to produce products with care for protecting the earth, a producer must be careful to conserve energy, save resources and reduce waste which pollutes environment. On the other hand, in case of a machine tool, much lubricating oil was used for smooth drive, electrical energy of forced cooling was used for high accuracy, and much cutting oil was also used for lubrication and cooling. This is large problem for protecting the earth. Therefore the soaking machine tool in strong alkaline water were developed and evaluated. Several elements of a machine tool were firstly investigated for alkali-proof. Then the bench lathe was remodeled and soaked in the vessel with strong alkaline water (pH12.5), thermal deformation between the spindle and the tool post was measured for evaluation of accuracy. And turning using the bench lathe was performed for investigating the effect of water evaporation in the strong alkaline water. It is concluded from the results that; (1) Alkali-proof regarding several elements of a machine tool were cleared in the experiment, (2) Thermal deformation of the bench lathe for bathing was very small in spite of no-forced cooling, (3) Accuracy of the machine tool was very good and the tool life was very long in spite of no-cutting oil, (4) The soaking machine tool in strong alkaline water was economical and eco-friendly.

Key Words : Forced Cooling, Machine Tool, Bathing, High Accuracy, Strong Alkaline Water, Cutting

1. 結 言

高精度な加工のために多くの熱変形対策が工作機械に施されている^{(1), (2), (3)}。また、高精度化と生産性向上のために多くの切削発熱強制冷却技術も確立されている^{(4), (5), (6)}。これらの対策の多くが、複数台の冷凍機の強制冷却能力を利用し、発熱量を発熱箇所付近で効率よく除去し、工作機械構造や工具への熱影響を強制的に抑制する手法である。しかし、現在、地球環境保全に配慮したものづくり⁽⁷⁾がごく一般的に要求されるようになってきており、21世紀型加工技術として、高精度、高生産性、高信頼性に加えて、環境保全に配慮したものづくりが必要とされており、先の工作機械熱変形対策や工具強制冷却対策においても、省エネルギーと環境保全に十分に配慮した対策が要求され、それらに対してさらなる対策が必要になってきている。

そこで本研究では、鋼に対して耐食性のある強アルカリ水中に工作機械を浸漬した状態にして、その気化熱冷却効果によって工作機械の熱変形を抑制し、それと同時に浸漬状態になっている加工点付近でも、その気化熱冷却効果によって切削発熱を強制冷却する加工システムを開発する。具体的には、卓上旋盤を pH12.5 の強アルカリ水槽に浸漬状態にし、その機械構造の熱変形特性、加工精度、工具寿命を実験によって明らかにする。また、この技術を確認するために、機械要素の耐強アルカリ特性の解明、強アルカリ水へのマイクロバブルの添加による

* 原稿受付 2012 年 6 月 21 日

^{*1} 正員, 長岡技術科学大学 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)^{*2} 長岡技術科学大学^{*3} 正員, 高松機械工業(株) 技術部
E-mail: tanabe@mech.nagaokaut.ac.jp

冷却能力向上の検討，本加工システムの環境保全特性の簡単な評価も行う．

2. 工作機械要素部品の耐強アルカリ特性

水の気化熱による冷却効果は，切削油剤のそれに比べてきわめて大きい⁽⁸⁾にも関わらず，現状において工場内の工作機械に適用されている例は少ない．それは，水が工作機械，工作物，その周辺の機械要素などの鋼製部品を腐食させるためである．しかし，腐食工学において平衡状態で金属イオン濃度 (mol/l) の対数値が -6 以下のときにその金属は腐食されないとみなされており，そのため，鋼の強アルカリ水に対する腐食特性⁽⁹⁾に関しては，pH 10 以上のアルカリ水中では腐食が起こらないことになる．よって pH12.5 を超える強アルカリ水は，前記の鋼製部品を腐食することはないと考えられる．また，同様に，鋼以外の工作物材料として，ニッケル基合金のベースとなるニッケルの場合は，pH 8.5～pH 13.0 の領域が化学的不動態領域である．さらに，チタン合金のベースとなるチタンの場合は，pH 13.0 以下領域で化学的不動態領域である．これらから，チタン合金やニッケル基合金などの工作物を強アルカリ水中に浸漬状態にして，水の気化熱によって強制冷却しながら，工具への熱影響の軽減を行う場合，その強アルカリ水の pH 値は，pH 10.0～pH 13.0 が適切と考えられる．しかも，強アルカリ水は界面浸透性，剥離分解能力，乳化・分離能力が大きいので，洗浄力が極めて大きく，除菌・腐敗防止作用もあるため，広域におよぶ洗浄剤として最近よく使用されている．また，強アルカリ水を大気中に放置し続けると，pH は 7.0 に漸進しアルカリ性を失いたただの水になるため，環境保全を促進できる洗浄剤として注目されている．

ここでは，工作物や工具のほか，工作機械部品や工作機械関連の機械要素の耐強アルカリ特性を実験で明らかにする．表 1 に実験で使用する強アルカリ水を生成する装置の仕様を示す．小型の生成装置で，極めて容易に pH 12.5 の強アルカリ水を生成することができる．表 2 に示すように，加工関連材料のアルカリ水中における腐食特性を実験で確認した．工作機械構造材料，工作物，工具，工具のコーティング材料，工作機械要素部品，工作機械用電気部品，その他工作機械部品として利用されそうな素材，塗料の強アルカリ耐性を実験で確認するため表 2 に示すように，これらの材料（詳細は表 3 に示す）を pH 12.5 のアルカリ水の入った容器に入れ，温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ，湿度 60 %一定の恒温室に 2 カ月間放置した．アルカリ水は 1 週間に 1 度入れ替えをして pH 値を維持した．

耐強アルカリ特性の実験結果を表 3 に示す．金属では，アルミニウム，アルミニウム合金，銅，銅合金以外は，強アルカリ水中，および強アルカリ水面付近に 2 カ月間放置しても腐食しなかった．そのため，多くの工業材料を強アルカリ水中に浸漬状態にして，切削加工を行うことが可能であると考えられる．近年，工具のコーティング材料として，高硬度と低摩擦係数を特長とする TiAlN や TiAlCr が使用されているが，成分に Al が介在しているため腐食が促進し，とくに Al 含有量が多くなるとその腐食傾向は顕著に表れた．オイルシールは内部に設置されているバネ，排気クリーナは保護用のアルミニウム製金網，その他電気部品の端子台がそれぞれ腐食した．このように，機械要素部品と電気要素部品では組立や梱包等々に使用されているネジ，バネ，端子台等の部品に，アルミニウムや銅を合金材料として含有している場合があり，腐食や変色が起こるので注意が必要である．グリースが封入されている軸受やリニアガイドに関しては，油の流失もなく，強アルカリ水の浸漬前後で駆動特性（軸受は外輪に巻き付けた糸に荷重つけ回転速度測定，リニアガイドは傾斜板上の転がり速度測定）に変化はなかった．浸漬したサーボモータは，2 カ月後に乾燥させた後，NC 旋盤に組込み仕様通りの機能が出ることを確認した．DLC も耐強アルカリ特性があり，工作機械を強アルカリ水中に浸漬させたとき，その摺動面の固体潤滑剤として使用することが可能である．また，卓上旋盤（後述）を pH 12.5 のアルカリ水の入った容器に 2 カ月間浸漬させて継続的に実験を行ったところ，正常な稼働で，その後の目視観察では腐食・変色がなく，浸漬前と全く同等の正常な稼働を確認した．

Table 1 Specification of the system for making strong alkaline water

Method of generation	Closed generation type
Value of pH	pH 12.5
Quantity of generation	10 l/h
Voltage & Power	100 V & 300W
Size	495W×430D×1100H

Table 2 Condition of corrosion test

Medium in the vessel	Strong alkaline water (pH 12.5)
Ambient conditions	Room temp.: $20 \pm 1^\circ\text{C}$, Humidity: 60%
Period	Two months

Table 3 Results of the proof test for two month in alkaline water with pH12.5

Machine tool structure	S45C	○	Changeless condition	Machine element	Rubber bushing	○	Changeless condition
	SUS304	○	Changeless condition		Exhaust cleaner	×	Corrode and discoloration
	Cast iron	○	Changeless condition		Thinned cylinder	△	Only screw corroded
Work piece	Ti	○	Changeless condition	Electrical element	Air chack	○	Changeless condition Same function
	Ti6Al4V	○	Changeless condition		Check valve	△	Only screw corroded
	Inconel 718	○	Changeless condition		Lubricator	○	Changeless condition Same function
	S45C	○	Changeless condition		Regulator	△	Only screw corroded
	Copper	△	Only discoloration		Push-button switch	△	Terminal corroded Screw corroded
	Brass	△	Only discoloration		Command switch	△	Terminal corroded Screw corroded
	Aluminum	×	Corrode		Optoelectronic switch amplifier	△	Terminal corroded Screw corroded
Tool	HSS	○	Changeless condition	Basic material	Servomotor	△	Only screw corroded
	Carbide	○	Changeless condition		Box terminal	○	Changeless condition
	Cermet	○	Changeless condition		Electromagnetic contactor	×	Electromagnet corroded
	Diamond	○	Changeless condition		Solenoid valve	△	Only discoloration
	CBN	○	Changeless condition		Solenoid valve base	△	Only discoloration
	Ceramic	○	Changeless condition		Flat cable	○	Changeless condition
	DLC	○	Changeless condition		Cable connector	○	Changeless condition
Coating material of tool	Ti AlN	×	Discoloration	Paint	Direct acting two port solenoid valve	△	Only screw corroded and discoloration
	TiAlCr	×	Discoloration		Acrylic acid resin	○	Changeless condition
	V-belt	×	Small crack		Vinyl chloride	○	Changeless condition
Machine element	Drive belt	○	Changeless condition Same function	Paint	Nylon	○	Changeless condition
	Timing belt	○	Changeless condition Same function		Polyurethane	○	Changeless condition
	O-ring	○	Changeless condition Same function		Polycarbonate	○	Changeless condition
	Bearing	○	Changeless condition		Nitrile rubber	○	Changeless condition
	Linear guide	○	Changeless condition Same function		Polyurethane rubber	○	Changeless condition
	Ball screw	○	Changeless condition Same function		Fluoro rubber	○	Changeless condition
	Oil seal	△	Spring corroded		Chloroprene rubber	○	Changeless condition
	Oil pump	×	Terminal corroded No work		Chlorosulfonated Polyethylene rubber,	○	Changeless condition
	Wire hose	○	Changeless condition		Oilproof vinyl mixture	○	Changeless condition
	Excel hose	○	Changeless condition		Urethane elastomer	○	Changeless condition
	Cap connector	△	Only screw corroded		Lacquer paint	○	Changeless condition
	Tube fitting	○	Changeless condition		Urethane resin paint	○	Changeless condition
	Oil level gauge	○	Changeless condition		Epoxy resin paint	○	Changeless condition

○ : Enable

△ : Only discoloration or only screw corroded

× : Disable

3. マイクロバブルを添加による強アルカリ水の見かけ上の熱伝達率の向上

ここでは、マイクロバブルを添加した強アルカリ水中の冷却特性を簡単な実験によって明らかにする。まず、マイクロバブルの基本特性として、水中に放出したマイクロバブルの水中における寿命を測定した。30 l の水槽に 8 l/min のマイクロバブル（マイクロバブルの粒径分布を図 1 に示す）を 10 分間供給し、白濁した強アルカリ水（pH12.5）が透明になるまでの時間を測定した。その際、同様に強アルカリ水に 10 l/min の気泡（1~2 mm と 3~5 mm）を供給した場合についても測定を行った。その結果、図 2 に示すとおり、マイクロバブルは強アルカリ水中で 5 分間程度保持されており、容器内の強アルカリ水にマイクロバブルを供給した後、各種工作機械に配管を通して搬送し、加工時の強制冷却に利用することが可能であることが明らかになった。しかし、1~2 mm もしくは 3~5 mm 程度のサイズの気泡になるとその形体は強アルカリ水中で数秒しか保持されず、1 台の工作機械において加工点まで数 mm の気泡入りの強アルカリ水を供給することは困難であると考えられる。

マイクロバブルを供給した強アルカリ水の強制冷却能力を把握するために、見かけ上の熱伝達率を測定した。図 3 に示すようなラバーヒータ（100×100×2mm）を 2 枚の鋼（SPCC, 100×100×1mm）で両側から挟み、それを強アルカリ水の入っている容器（L 1190×W 980×H 790 mm に卓上旋盤を浸漬させたときの水面高さを再現するために高さ 430 mm まで注入）の中央に宙づり状態で配置した。図 3 には示していないが、実験は図 6 に示す卓上旋盤を設置した状態で、主軸回転による対流の影響が上記センサーの両面に同等に作用するように、主軸と直角（X-Y 平面）の状態を設置した。ラバーヒータに電源を入れ（50W）、鋼表面に貼った熱電対の温度が定常状態になった段階で、鋼表面温度と水槽の平均水温から見かけ上の熱伝達率を測定した。実験は、強アルカリ水の自然

Fig. 1 Bubble size distribution of micro bubble ⁽¹⁰⁾

Fig. 2 Relation between bubble size and its life in strong alkaline water

Fig.3 Experimental set-up for measuring heat transfer coefficient of alkaline water with bubbles

Fig. 4 Relationship between alkaline, micro bubble and 3600 min⁻¹ with the heat transfer coefficient

対流状態, 卓上旋盤の主軸回転 (3600min^{-1}) の追加, さらに卓上旋盤の主軸回転 (3600min^{-1}) にマイクロバブル供給 (8 l/min) の追加をパラメータとした.

図4に見かけ上の熱伝達率の測定結果を示す. 強アルカリ水の自然対流中に比べ, 主軸回転による対流の影響で5.5倍に, さらにマイクロバブルを追加すると6倍に熱伝達率が向上した. この結果より, 主軸回転による強制対流の効果が支配的であり, マイクロバブルを添加したときの熱伝達率の改善効果は8.5%程度 ($=2550/2350$, 10%弱) であった.

4. Soaking 卓上旋盤の熱変形特性と浸漬状態の加工特性

4・1 熱変形特性

表4のような仕様の卓上旋盤 (自作) を用い, それを図5の写真のようにマイクロバブルを添加した強アルカ

Table 4 Specification of the bench lathe in the experiment

Head stock	Height of center from bed	177 mm
	Height of center from floor	337 mm
	Spindle speed	Max. 3600 min^{-1}
Bed	Size (W×L×H)	$600 \times 360 \times 660$
Tool post	Stroke of Y axis	30 mm
Table	Stroke of Z axis	200 mm
Motor	Power	0.75 kW
	Speed control	Inverter
Mass		200 kg

Fig. 6 Schematic view of the experiment using the bench lathe in strong alkali water with micro bubble

(a) Without strong alkali water

(b) With strong alkali water

Fig. 5 Photograph of the experimental set-up

Fig. 7 Temperature change of the bench lathe in strong alkali water with micro bubble operated in 3600 min^{-1}

Fig. 8 Thermal deformation of the bench lathe in strong alkali water with micro bubble

リ水を入れた水槽中にモータ部のみを除いて浸漬状態にして、そのときの熱変形特性を実験で調べた。

図6に実験の概略を示す。L 1190×W 980×H 790 mm の容器内に卓上旋盤を搭載し、pH12.5の強アルカリ水 475 ℓを入れ、8 ℓ/minのマイクロバブルを連続的に供給し、アイドリング状態のまま主軸回転数 3600 min⁻¹で連続的に主軸を回転させ、テストバーのX、Y方向各2箇所(図中●印)の熱変形をダイヤルゲージで測定し、図中●印に取付けたT型熱電対で機械構造の温度を測定した。測定は2時間行った。また、比較のために強アルカリ水を注入しない場合、強アルカリ水を注入しマイクロバブルを供給しない場合についても実験を行った。

図7に工作機械(主軸端面①とベッドの端⑫)の温度上昇の測定結果を示す。加工精度に大きく影響する工作機械各部の温度上昇(定常状態の最大値(主軸軸端面①))が、乾式で5.0℃、主軸回転のみで1.4℃、さらにマイクロバブルを添加した強アルカリ水では2.2℃以内に抑制されており、この強制冷却効果によって熱変形がきわめて効果的に抑制できると考えられる。主軸回転のみの場合の温度上昇は主軸軸受の発熱が、また、マイクロバブルを添加した場合は主軸軸受とマイクロバブル発生装置の発熱がそれぞれ影響したものと考える。この2つの場合には機械構造内の温度分布がきわめて小さいと考えられる。

図8にテストバー先端の相対変位(X、Y方向)と相対的傾きの経時変化を示す。乾式では、相対変位が $\Delta X = 7.8 \mu\text{m}$ 、 $\Delta Y = 18.5 \mu\text{m}$ 、相対的傾きが $\alpha = 70 \mu\text{m/m}$ 、 $\beta = 155 \mu\text{m/m}$ に対して、主軸回転やマイクロバブルを添加した場合には、相対変位が2.5 μm 以下、相対的傾きが20 $\mu\text{m/m}$ 以下と熱変形が抑制されていた。主軸回転やマイクロバブルを添加した場合には、図中に20～120分の間の各6データの平均値と標準偏差が示されているが、主軸回転による対流の効果は大きく($\Delta X : 0.7 \mu\text{m}$ 、 $\Delta Y : 1.6 \mu\text{m}$ 、 $\alpha : 5.7 \mu\text{m/m}$ 、 $\beta : 9.3 \mu\text{m/m}$)、マイクロバブルの効果は多少($\Delta X : 0.7 \mu\text{m} \Rightarrow 0.6 \mu\text{m}$ 、 $\Delta Y : 1.6 \mu\text{m} \Rightarrow 1.1 \mu\text{m}$ 、 $\alpha : 5.7 \mu\text{m/m} \Rightarrow 5.4 \mu\text{m/m}$ 、 $\beta : 9.3 \mu\text{m/m} \Rightarrow 7.1 \mu\text{m/m}$)伺える。このように、卓上旋盤を強アルカリ水槽に浸漬状態にすることによって、機械構造の熱変形を効果的に抑制でき、機械の高精度な稼働を安定的に行うことができた。

なお、同様の実験を主軸回転数 996 min⁻¹と 3000 min⁻¹で行ったが、3600 min⁻¹の場合と定性的に同様の実験結果を得た。

4・2 浸漬状態の加工特性

これまで使用した卓上旋盤はZ方向の送りが手動のみであるため、加工後の表面粗さの測定結果に人的誤差が入る恐れがあるため、ここでは、図9に示すようにマシニングセンタを用い、加工関連付近のみを水槽で囲い、その中で強アルカリ水中切削を行った。そのため、卓上旋盤で強制対流源でもあり発熱源でもあった主軸の浸漬の影響因子が除外されことになり、これらの影響が、工具温度、工具寿命、工作物表面粗さの測定結果から除外

されている。ここでは、スローチップタイプのバイトを使用して表5に示す切削条件で加工したときの工具寿命、加工精度（表面粗さ）を測定し、本手法がどの程度の加工特性に効果を示すかを評価した。表5の加工条件はS45C程度の鋼の中仕上げ切削の際によく使用されている加工条件であり、従来のドライ切削や湿式切削で工作物Ti6Al4Vを切削する場合は、工具にとって熱負荷が大き過ぎて不向きな条件である。パラメータとして、ドライ切削、一般的な湿式切削、マイクロバブルを添加した強アルカリ水中での切削の3種類の実験をした。工具寿命試験では逃げ面摩耗量が0.3 mmになったときに寿命と判定した。また、表面粗さは寿命試験開始直後の切削面と寿命に至った際の切削面の2種類について、切削方向に対して直角に測定した。

図10にバイト先端温度の最大値の比較を示す。図9に示すように、バイトをバイスに固定し、工作物を回転させて切削を行い、バイト表面に取り付けた熱電対で温度測定を行い、FEM解析によってバイト先端温度を外挿した。強アルカリ水中で切削した場合、ドライ切削に比べて48%にバイト先端温度が低減していた。さらに、マイクロバブルを8 l/min 混入した強アルカリ水中で切削した場合は、ドライ切削に比べて39 %にバイト先端温度(727℃)が低減していた。使用した超硬バイトの適正使用温度は800℃であり、本システムは実用的に使用できると考える。

Fig. 9 Experimental set-up for measurement of tool temperature

Table 5 Cutting conditions

Cutting conditions		
Cutting speed 80 m/min	Feed speed 0.25 mm/rev	Depth of cut 0.4 mm
Work piece		
Material : Ti6Al4V	Specific cutting force : 3178 N/mm ²	
Tool		
Rake angle: 5°	Coated carbide

Fig. 10 Experimental results for tool tip temperature

Fig. 11 Results of tool life test

Fig. 12 Results of surface roughness

図 11 に工具寿命試験結果を示す。マイクロバブルを加えた強アルカリ水中切削の寿命は、ドライ切削に比べて工具寿命が 3.3 倍程度伸びている。また、湿式切削に比べて工具寿命が 2 倍程度伸びている。これは、マイクロバブルを含む強アルカリ水中切削が、難削材切削時に発生する熱を効率よく除去することができたためと考えられる。これは、本手法の強アルカリ水中切削を使用することによって、S45C 程度の中仕上げ切削条件が Ti6Al4V のような難削材の切削に対しても十分に対応可能な加工条件になったことを示しており、本システムは有効であったと考えられる。なお、工具顕微鏡を用いた観察の結果、チップ先端孔付近での割れやクラックの発生は観察されなかった。

図 12 に表面粗さ（最大高さ） R_z の測定結果を示す。強アルカリ水中切削した場合は、表面粗さ R_z がドライ切削や一般的な湿式切削のそれに比べてそれぞれ 70 %，89 %となっている。これは、本システムの冷却効果で工具温度上昇が抑制されたことにより、工具の熱変形が抑制されたのみではなく、工具の硬度の低下も抑制され工具剛性も維持されたことにより、工具先端位置の変動が抑制されたためと考えられる。

5. 環境保全特性と加工コストの簡単な考察

最後に、排出 CO₂ 量を検討することによって本手法の環境負荷に対する簡単な評価を行った。ここでは、基本的には使用したすべての装置・機器・工作機械の消費電力量を、電力会社が供給するために発電で排出してしまう CO₂ 量に換算して比較するが、さらに稼働中に消費した切削油剤の廃油処理によって排出される CO₂ 量もそこに加算して、従来の湿式切削の場合と本手法を適用した場合の排出 CO₂ 量を比較する。従来の方法では、稼働時における工作機械、オイルポンプ、冷凍機の各消費電力量と、廃油処理時の排出 CO₂ 量から合計排出量を算出した。また、本手法の場合はマイクロバブル発生装置、強アルカリ水生成装置、切屑除去用ポンプ稼働時の消費電力量をもとに排出 CO₂ 量を算出した。

表 6 に従来の湿式切削の排出 CO₂ 量の計算結果を示す。まず、従来の方法では、マシニングセンタ (3.6 kW)，オイルポンプ (1.2 kW)，冷凍機 (2.2 kW) の合計 7.0 kW の電力で、1 日 8 時間、1 年 250 日稼働させた場合を想定した。この場合算出される消費電力量は 14000 kWh (7.0 kW×8 h×250 days) となり、排出 CO₂ 量への換算係数

Table 6 CO₂ emission of conventional wet cutting

Machining center, Oil pump & Cooling unit			Waste oil disposal	
Power consumption	kW	7.0	Cutting oil amount	ℓ/year
Use condition	/year	8 h × 250 days	Refill oil amount	ℓ/year
Consumption electric quantity	kWh	14000		
CO ₂ emission	kg-CO ₂ /year	6552	CO ₂ emission	kg-CO ₂ /year
Total CO ₂ emission	kg-CO ₂ /year	9498		

Table 7 CO₂ emission of cutting in strong alkaline water

Calculation factors	Machining center	Micro bubble device	Pump for removing chip	Strong alkaline water generating unit
Power consumption	kW	3.6	0.56	0.0132
Electric quantity for strong alkaline water	kWh / ℓ			
Amount of strong alkaline water	ℓ	-	-	-
Use condition	/year	8 h × 250 days	8 h × 250 days	8 h × 250 days
Consumption electric quantity	kWh	7200	1120	26.4
CO ₂ emission	kg-CO ₂ /year	3370	524	12
Total CO ₂ emission	kg-CO ₂ /year	4822		

を 0.468 kg-CO₂/kWh とすると、推定される排出 CO₂ 量 CL_{CO_2} (kg-CO₂) は式(1)から求めることができる⁽¹¹⁾。

$$CL_{CO_2} = 0.468 \times W_E \quad (1)$$

ここで、 W_E は消費電力量 (kWh) であり、各装置で発生する消費電力量とする。これよりマシニングセンタ、オイルポンプ、冷凍機の稼働による排出 CO₂ 量は 6552 kg-CO₂ となる。

次に、廃油処理時の排出 CO₂ 量を計算した。ここではオイルタンク容量 340 ℓ を 1 年間で 2 回交換するとし、また 1 カ月に 1 回 30 ℓ を追加するとして 360 ℓ (30 ℓ × 12 month)、合計 1040 ℓ を処理する場合を想定した。推定される排出 CO₂ 量は式(2)から求めることができる^{(12),(13)}。

$$CO_2 \text{ 排出量 kg-CO}_2 = \text{廃油量 kℓ} \times \text{発熱量 GJ/kℓ} \times \text{炭素排出量 t-C/TJ} \times (44 \div 12) \quad (2)$$

ここで発熱量は 40.2 GJ / kℓ、炭素排出量は 19.22 t-C / TJ である^{(13),(14)}。式(2)を用いて廃油処理時の排出 CO₂ 量を求めると 2946.3 kg-CO₂ となる。以上より湿式切削による排出 CO₂ 量は合計 9498.3 kg-CO₂ となる。

表 7 に本手法を適用した場合の排出 CO₂ 量を示す。まず、本報の前半で使用した卓上旋盤ではなく、後半で使用したマシニングセンタを使用した場合について検討した。主電力 3.6 kW のマシニングセンタを 1 日 8 時間、1 年のうち 250 日稼働させた場合を想定した。この場合算出される消費電力量は 7200 kWh (3.6 kW × 8 h × 250 days) となり、排出 CO₂ 量への換算係数 0.468 kg -CO₂/kWh⁽¹¹⁾を用いて、式(1)と同様にして排出 CO₂ 量を求めると 3370 kg-CO₂ となる。同様にしてマイクロバブル発生装置、切屑除去用ポンプの排出 CO₂ 量を求めるとそれぞれ 524 kg-CO₂、12 kg-CO₂ となる。さらに、強アルカリ水生成装置による排出 CO₂ 量を検討する。強アルカリ水の容量は 26094 ℓ は、マシニングセンタの全容積 27000 ℓ (=W3000 mm × D3000 mm × H3000 mm × 10⁻⁶) から全機械部品の体積分 1026 ℓ (=機械全質量 8000 kg ÷ 鋼の密度 7800 kg/m³ × 10³) を引いた値 25974 ℓ を想定し、さらに、年間の強アルカリ水の補充量 120 ℓ (=10 ℓ / 月 × 12 カ月) を加算した値である。使用したアルカリ水生成装置は、電力 0.75 kW を使用し、1 時間で 10 ℓ の pH12.5 の強アルカリ水を生成することができるため、1 ℓ 当たりの強アルカリ水を生成するための消費電力量は 0.075 kWh/ ℓ (0.75 kW × 1 h ÷ 10 ℓ) となる。使用したマシニングセンタを 1 年間 pH12.5 の強アルカリ水中に浸漬させるために必要な消費電力量は 1957 kWh となり、式(1)と同様に排出 CO₂ 量を求めると 916 kg-CO₂ となる。よって本手法適用後の排出 CO₂ 量は合計 4822 kg-CO₂ となる。

図 13 に排出 CO₂ 量の比較を示す。排出 CO₂ 量は今回の条件において 1 年間稼働した場合、4678 kg-CO₂ の削減効果 (49.2%削減) が得られることがわかる。これは、加工中に切削油剤を使用しないため、廃油処理で生じる CO₂ を削減できるためである。このように、本手法は切削発熱除去のための切削油剤を使用せず、また、加工精

Fig. 13 Comparison of CO₂ emission

度維持のための冷凍機による強制冷却も使用することなく、さらに、加工後の洗浄も不要なため、環境負荷の低減に有効でありエコロジーであり、工業的にきわめて有効であると考ええる。

6. 結 言

本研究の結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 強アルカリ水中の熱伝達率が $400 \text{ W/m}^2\text{K}$, 3600min^{-1} で主軸回転を加えると熱伝達率が $2350 \text{ W/m}^2\text{K}$, さらにマイクロバブルを添加すると熱伝達率が $2550\text{W/m}^2\text{K}$ と大きくなり、冷却効率が向上した。
- (2) 強アルカリ水中に卓上旋盤を浸漬させることによって、乾式に比べて温度上昇が $1/2$, 相対的変位が $1/10$, 相対的傾きが $1/12$ にそれぞれ向上した。また、加工領域のみを強アルカリ水中に浸漬させることによって、工具寿命が 3.3 倍、表面粗さが $2/3$ にそれぞれ向上した。なお、工具寿命と表面粗さに関しては、強制対流源・発熱源でもあった主軸台は浸漬されておらず、その影響が除外されている。
- (3) マイクロバブルを添加した強アルカリ水中に工作機械を浸漬させることによって、切削油剤や冷凍機が不要となり、従来の工作機械に比べて年間の CO₂ 排出量を半部以下にすることができ、環境保全の効果があつた。

文 献

- (1) 田辺郁男, 山中邦彦, 水谷淳之介, 山田泰宏, “熱変形抑制のための新しい旋盤構造設計 (三次元零芯設計, セルフ強制冷却, 熱同期設計)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 65, No. 639, (1999), pp.4508-4513.
- (2) 田辺郁男, 池田祥生, 浦野好市, “ニューラルネットワークの逆解法による主軸冷却油最適温度の推定 (再学習の効果)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 69, No. 679, (2003), pp.819-824.
- (3) 金子義幸, 田辺郁男, 磯部稔, 前田充夫, “環境保全を考慮した熱変形対策による高精度旋盤の開発”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 70, No. 700, (2004), pp.3611-3616.
- (4) 田辺郁男, イエー・トット・ソー, 井山徹郎, 阿部洋太郎, “低熱伝導材料加工のためのニューラルネットワークを用いた工具温度管理”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 77, No. 776, (2011), pp.1556-1564.
- (5) 田辺郁男, TRUONG HONG Mihn, 吉井一夫, “環境にやさしい気化熱冷却を用いた切削加工 (第1報, 気化熱冷却の効果と旋盤チップ冷却への適用)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 66, No. 643, (2000), pp.1026-1030.
- (6) 田辺郁男, 松下幸司, TRUONG HONG Mihn, “セルフ強制冷却を用いた工作機械熱変形の抑制 (セルフ強制冷却モデルの構築と応用)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 67, No. 660, (2001), pp.2713-2718.
- (7) 田辺郁男, 折茂竜哉, “三次元測定機の室温変動に対する熱変形抑制対策 (地球環境保全のための省エネルギー対策)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 67, No. 662, (2001), pp.3357-3362.
- (8) 田辺郁男, TRUONG HONG Mihn, “環境にやさしい気化熱冷却を用いた切削加工 (気化熱冷却モデルの確立と最適供給水量の計算)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 67, No. 664, (2001), pp.4011-4016.
- (9) 下平三郎, “腐食・防食の材料科学”, アグネ技術センター, (1995), pp.30-32, 255-257, 287-288.
- (10) 高濃度マイクロバブル発生装置 A-01 型仕様書, 株式会社資源開発研究所, “マイクロナノバブル発生能力”, <http://www.idea-techno.com/pd/micro-bubble/naturan/naturan.html> (参照日 2012 年 1 月 28 日).
- (11) 環境省, “平成 21 年度の電気事業者ごとの実排出係数, 調整後排出係数等の公表について”, 報道発表資料, (2010), <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=13319> (参照日 2012 年 3 月 3 日).
- (12) 環境省, “地球温暖化対策の推進に関する法律施行令”, (1999), 第6条第1項第1号, <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H11/H11SE143.html> (参照日 2012 年 3 月 3 日).
- (13) 環境省, “特定排出者の事業活動に伴う温室効果ガスの排出量の算定に関する省令”, (2006), 第2条, 別表第5, <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H18/H18F15002002003.html> (参照日 2012 年 3 月 3 日).
- (14) 環境省, “温室効果ガス排出量算定に関する検討結果”, 表4 (2006), <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/santeiho/kento/h1808/11energy.pdf> (参照日 2012 年 3 月 3 日).