

切削加工における環境影響評価の実験的研究

尾張谷 直 幸*・落 合 雄 二

The Experimental Research of the Environmental Assessment in Cutting

Naoyuki OWARIYA* and Yuji OCHIAI

(2004年11月29日受理)

The purposes of this research is to establish the manufacturing process to make the load to the environment and the manufacturing costs less than usual. Therefore, in this paper, the consumed electric energy is measured in turning processing with the clamp meter and the relation between the processing condition and the consumed electric energy is examined.

The result is as follows. When cutting speed is became quick and the cutting area of one revolution cutting is enlarged, the consumed electric energy became less. This derives from the drive electric energy, which is the most of the reducible consumed electric energy. It is important to extend the life of a tool and to reduce the cutting electric energy efficiently, performing the optimization manufacture process.

1. 緒 言

1.1 背景

従来は、より良いものを迅速にかつ低価格で生産し販売する大量生産・大量消費型社会を対象に製品開発が行われてきた。特に生産過程におけるコスト削減が優先的に行われてきた。これは、製品開発の競争が激しくなり、他社より良い製品を作るために企業同士の競争が激しくなった結果によるものであり、ここ数十年間で目覚ましいほど発展してきている。これにより、低価格で良質な製品の大量生産は実現されたがその反面、生産過程で排出される廃液・廃棄物や製品の廃棄物の量もまた増大した。

このように生産過程の高効率化を優先したことによる廃棄物量は年々増大してきており、近年ではこの廃棄物が原因となり大気汚染、地下水汚染などの公害問題や廃棄物処理場の不足、また処理場の不足からくる不法投棄など、様々な社会環境問題が発生している。そこで近年では廃棄物などの環境負荷を考慮した資源循環型社会を目指し、環境マネジメントシステムを構築し、環境に関する様々な取り組みを進めるようになって来た¹⁾。また、環境基本法をはじめ種々の法律が制定され、ものづくりにおいて

も、製品の設計から製造、使用工程、廃棄工程、リユース・リサイクル工程など製品の全ライフサイクルを考慮した「環境適合製品」の開発手法が製品開発に導入され始めている²⁾。

1.2 LCA³⁾⁴⁾

製造手法の定量的な判断基準の一つにライフサイクルアセスメント (Life Cycle Assessment: 以下、LCA という) がある。LCA とは、地球から原材料を取得することに始まり、すべての廃棄物が地球に戻されるまで、あらゆる行動、活動が環境にどのような影響をもたらすのかを評価しようというものである。LCA の概念は「ゆりかごから墓場まで」というものである。LCA の評価は図1に示すように、目標の設定から始まり、インベントリ分析、インパクト評価という流れで行われる。

インベントリ分析とは、エネルギーと原材料の必要量、大気排出物、液状廃棄物、固形廃棄物、それに製品・包装・プロセス・材料・活動の全ライフサイクルから出るこれら以外の排出物の定量化を目指すデータをもとにした技術的なプロセスである。このインベントリ分析では、対象とする製品の製造・使用・廃棄に係わるデータは一般的に「フォアグラウンドデータ」と呼ばれ、LCA の実施者が自己の責任で収集する。それに対して、使用する原材料、

* 秋田高専専攻科学生

燃料、電気等の採掘、製造及び運搬等のデータは一般に「バックグラウンドデータ」と呼ばれ、文献やLCAの実施例より引用するものである。この二つはインベントリ分析の核となるデータである。

インベントリ分析より得られた結果をもとに、どれだけ環境に負荷を与えているのかを評価するのがインパクト評価である。インパクト評価は通常、分類、特性化、統合化の3段階で実施される。分類では、インベントリ分析の結果を基に、ライフサイクル中に発生した物質を種類別に分類していく。そして、特性化では分類の段階で分けた物質がどのような環境影響を及ぼすかを提示する。最後に、統合化では特性化で提示した環境影響をまとめて数値化することにより、環境影響の大きさを知ることができる。このような流れでLCAの評価は行われる。

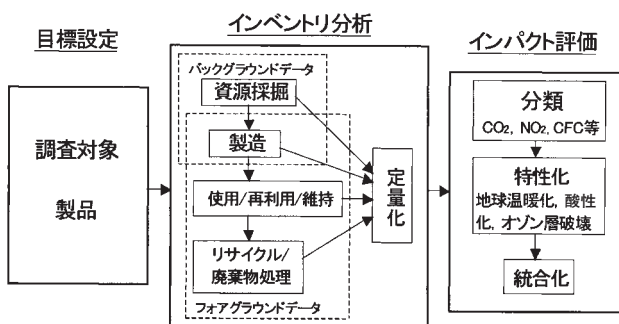


図1 ライフサイクルアセスメント概略図

製造業におけるLCA評価の導入はまだ少ない。その理由としては、LCAで評価するためには、製造工程における膨大なデータの積み重ねが必要であり、それらのデータ収集には、膨大な労力が必要となる。またそのデータは、企業秘密に属するために公表できないものが多くあるためと考える。このように、資金と時間が掛かってしまうので、どうしても環境対応への取り組み順位は低くなってしまふ。これら进行评估するLCAソフトも開発されている^{5) 6)}が、それらのソフトに付随する製造工程のデータはほとんど見当たらないか、限られた情報でしかないのも現状である。

しかしながら、多くの企業で環境報告書を作成しており^{1) 2)}、環境を考えることは当たり前となってきているので、着実にLCAデータの収集・蓄積を行っているものとする。また今後、環境ラベルタイプⅢとしてISO14025におけるLCAラベルの表示が義務付けになる⁷⁾と、製品のライフサイクルにおけるエネルギー評価においては、製造工程も評価する必要があると考える。

1.3 機械加工における環境影響評価について

現在の状況から考えて、工作機械など生産設備に関しても効率優先から環境優先へ移行することが必要であることは明白である。しかし、現在市販されているLCAソフトの多くは、家電メーカーなどで製作されたもので、工作機械や機械加工など、製造工程に関するデータはほとんどないため、それらのデータ収集に取り組む必要がある領域である。

製造業における工作法の70~80%は機械加工であり、そのなかで切削加工が大部分を占めていることを考慮して⁸⁾、本研究では旋削加工を取り上げた。先の報告⁹⁾では、サンプル(資源)の有効活用を図るために、一つの供試材に対して、数種の加工条件で削り評価していたが、異なる加工条件間の実験比較が難しいため、今回は1つの加工条件で直径48mmから36mmまで繰り返し旋削加工を行い、機械加工工程における各加工条件と消費電力量内の駆動電力量、切削電力量の関係を調べることにした。

本研究では、これらの結果をもとにして、トータルコストミニマムとトータル環境負荷ミニマムの両立を図るとともに環境対応の最適化製造プロセスの確立を図ることを目的としている。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材として黄銅(C3604B)、鉄鋼(SS400)、ステンレス鋼(SUS304)、アルミニウム合金(A5052)を選定し、供試材の寸法は直径50mm、長さ90mmとした。なお、供試材の材質は次の理由により選定した。

- 1) 黄銅
鉄鋼やステンレス鋼と比べて切削性が良いという特徴を持つ。熱交換機や船舶部品などに使用されているC3604Bを選定した。
- 2) 鉄鋼
安価で韌性に優れているという特徴を持つ。中でも一般構造物などに最もよく使われる材料の一つであるSS400を選定した。
- 3) ステンレス鋼
強度が高く粘りがあり他の金属材料と比べて加工しづらいという特徴を持つ。一般化学設備や建築部材などの耐腐食性を求められる用途に使用されているSUS304を選定した。
- 4) アルミニウム合金
軽くて柔らかく粘性は高いが切削性は悪いという特徴を持つ。機械部品や飲料缶など広く

使用されている A5052を選定した。

2.2 実験装置及び方法

加工実験には普通旋盤 (TAKISAWA TAL-460) を使用し、主な仕様は表 1 に示す。バイトはスローアウェイ形クランプバイトを使用し、使用チップはノーズ半径 0.4mm の超硬チップ (TOSHIBA TUNGALOY CNMG120404TM) である。消費電力量の測定には、クランプオンセンサ (HIOKI 9298) 及びクランプオンパワーハイテスタ (HIOKI 3168) を使用した。結線方法を図 2 に示す。図のように電圧コードを電線の一部分だけ被覆を剥いだ箇所に接続し、クランプオンセンサを電線の被覆上からクランプさせ、旋盤を作動させた時に流れる電流、電圧を測定して電力量を算出した。

2.3 駆動電力量と切削電力量について

本実験では、加工時の消費電力量を駆動電力量と切削電力量との和として定義した。各加工作業の直前に旋盤を空運転させて電力量を測定し、電力を算出しておき、これに加工時間を乗じて算出された値を駆動電力量とした。また、消費電力量から算出された駆動電力量を引いた値を切削電力量とした。

2.4 供試材の前加工条件及び実験条件

直径 50mm、長さ 1000mm の丸棒から、供試材の所要長さ 90mm に帯のこ盤で切断した。実験条件を揃えるために、供試材の表面を回転数 555rpm、送り速度 0.21mm/rev、切込量 1.0mm の条件で縦方向に 50mm だけ旋削加工して実験に供した。その後、各加工条件で、縦方向に 50mm だけ切削液を使用しないドライ方式で直径 48mm から 36mm まで繰り返し旋削加工した。なお、センタは用いず、供試材の突出し長さは 60mm である。

加工条件は、回転数は 555rpm、バイト突き出し長さは 30mm と一定とし、送り速度を 0.106, 0.21, 0.43mm/rev の 3 段階、切込量は 0.5, 1.0, 2.0mm の 3 段階に変えて実験した。

表 1 旋盤の主な仕様

メーカー・型式	TAKISAWA TAL-460
ベッド上の振り	460mm
横送台上の振り	250mm
両センター間距離	800mm
主軸速度範囲	25~1500min ⁻¹
電動機	3.7kW
正味重量	1950kg

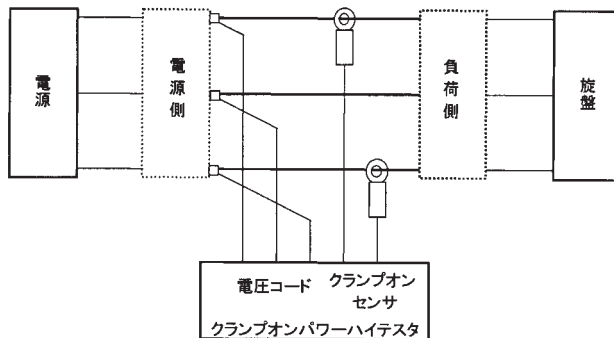


図 2 結線方法

3. 実験結果と検討

3.1 駆動電力量と切削電力量の割合

ステンレス鋼において、送り速度 0.106, 0.21, 0.43mm/rev、切込量 0.5, 1.0, 2.0mm の各加工条件で一定加工量 ($3.96 \times 10^{-5} \text{m}^3$) を加工し、測定した消費電力量内の駆動電力量と切削電力量の割合を図 3~図 5 に示す。

図 3 は送り速度 0.106mm/rev の場合、図 4 は送り速度 0.21mm/rev の場合、図 5 は送り速度 0.43mm/rev の場合の割合を示す。各図において、切込量が電力量に及ぼす影響は切削電力量よりも駆動電力量の方が大きく減少している。全体に占める駆動電力量の割合は、図 3 に示す送り速度 0.106mm/rev の場合は、切込量 0.5mm で 72.1%、切込量 1.0mm で 64.6%、切込量 2.0mm で 49.8% である。図 4 に示す送り速度 0.21mm/rev の場合は、切込量 0.5mm で 62.9%、切込量 1.0mm で 51.3%、切込量 2.0mm で 40.5% であり、図 5 に示す送り速度 0.43mm/rev の場合は、切込量 0.5mm で 46.5%、切込量 1.0mm で 35.2%、切込量 2.0mm で 23.9% となっている。また、送り速度が速いほど消費電力量が低くなっている。送り速度 0.43mm/rev、切込量 2.0mm の場合は、特に駆動電力量について見れば、送り速度 0.106mm/rev、切込量 0.5mm の場合の約 5.3% となっている。これは、駆動電力量は加工時間に比例しているためであり、切込量を増やし、送り速度を速くすることによって、加工時間を短縮し、駆動電力量を大幅に削除できることが分かった。このように、切込量を増加させていくと駆動電力量よりも切削電力量の割合が大きくなり、今後は切削電力量を減少させることが重要になってくることを物語っている。

鉄鋼とアルミニウム合金の駆動電力量と切削電力量の割合はステンレス鋼とほぼ同様の傾向を示したが、黄銅の場合は図 6~図 8 に示すように、切削電力量の割合が特に低かった。これは黄銅は被削性が

良く、切削時の負荷が低くなったことが原因している
と考える。

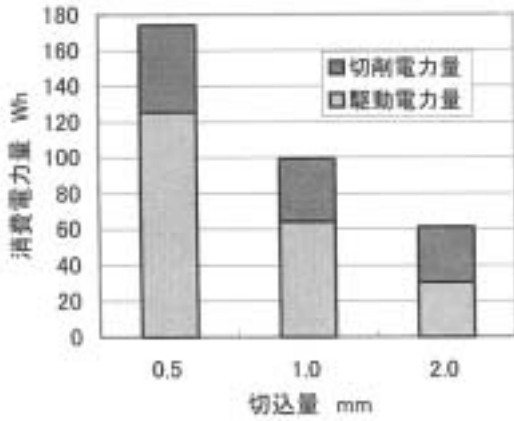


図3 送り速度0.106mm/rev 時の切込量と電力量
(ステンレスの場合)

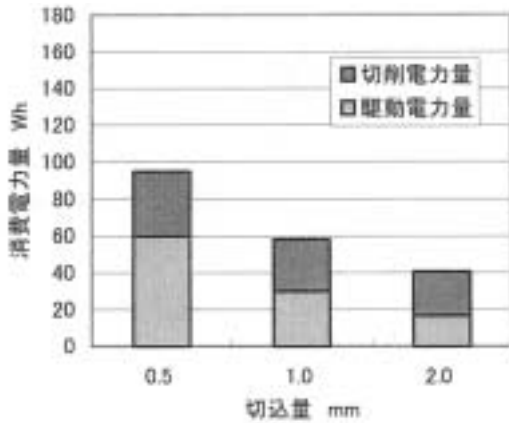


図4 送り速度0.21mm/rev 時の切込量と電力量
(ステンレス鋼の場合)

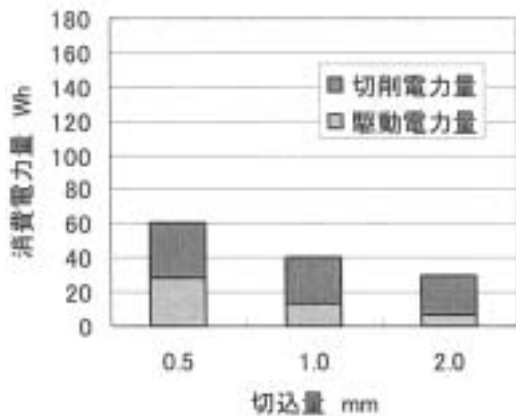


図5 送り速度0.43mm/rev 時の切込量と電力量
(ステンレス鋼の場合)

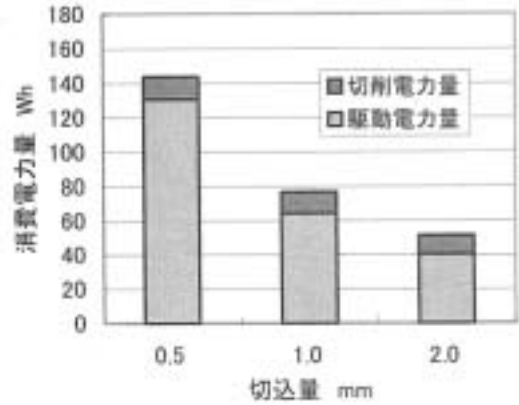


図6 送り速度0.106mm/rev 時の切込量と電力量
(黄銅の場合)

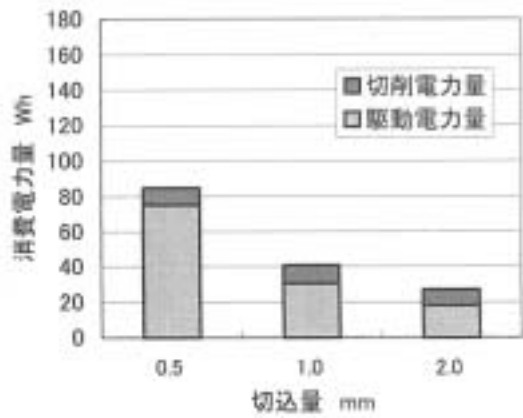


図7 送り速度0.21mm/rev 時の切込量と電力量
(黄銅の場合)

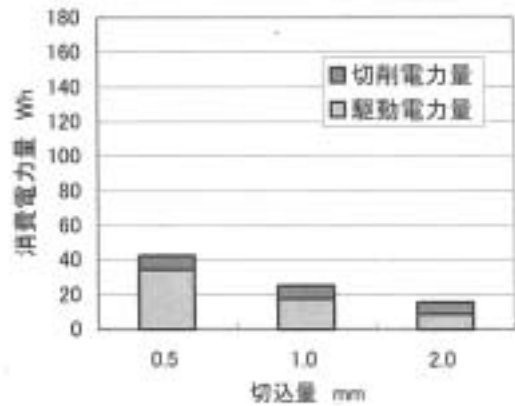


図8 送り速度0.43mm/rev 時の切込量と電力量
(黄銅の場合)

3.2 切削速度と単位体積当たりの切削電力量

ステンレス鋼において、各加工条件での切削速度と単位体積当たりの切削電力量の関係を図9～図11に示す。

図9は送り速度が0.106mm/rev、図10は送り速

度が0.21mm/rev、図11は送り速度が0.43mm/revの場合を示す。各図より、切削速度が増加するにつれて、切削電力量は減少していく傾向が見られた。特に切込量0.5mmの場合が最も顕著に減少している。切削加工においては、一般に切削速度が増加すると切削抵抗は減少する傾向にあり¹⁰⁾、本結果においても同様に単位体積当たりの切削電力量が減少したものとする。また、他の供試材においても、ステンレス鋼と同様の傾向が見られた。

以上の結果より、切削電力量を減少するには切削速度を速くすることが効果的と考える。

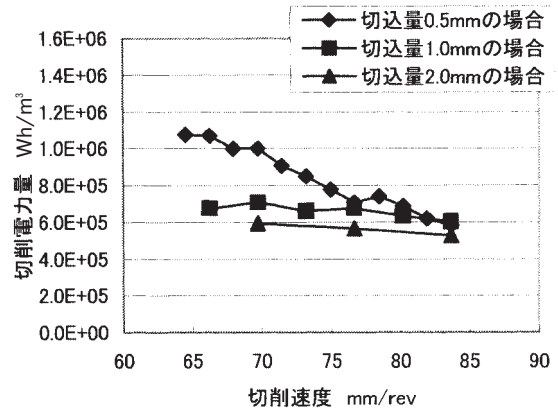


図11 切削速度と単位体積当たりの切削電力量 (送り速度0.43mm/rev；ステンレス鋼)

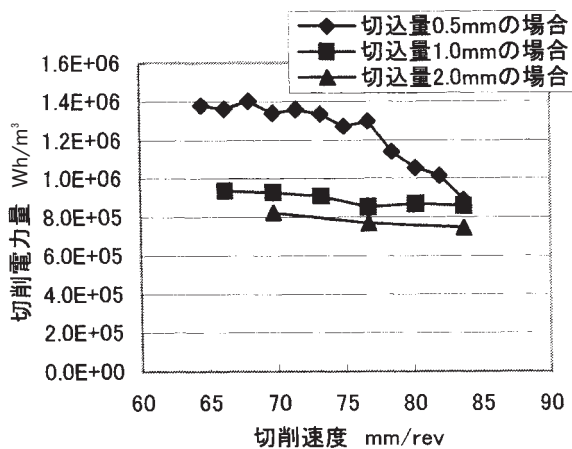


図9 切削速度と単位体積当たりの切削電力量 (送り速度0.106mm/rev；ステンレス鋼)

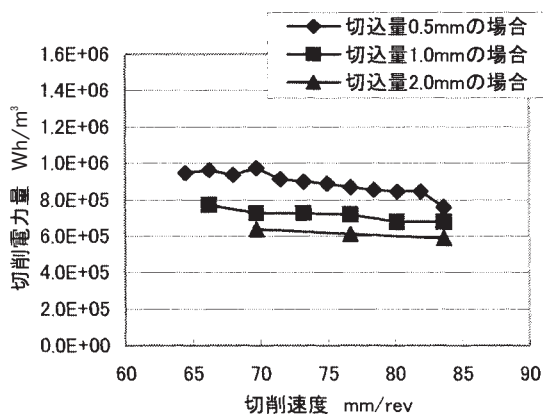


図10 切削速度と単位体積当たりの切削電力量 (送り速度0.21mm/rev；ステンレス鋼)

3.3 切削面積と切削電力量

各供試材において、各加工条件での切削面積を切込量と送り速度の積と定義し、一回転の切削加工における切削面積（以下、切削面積という）と切削電力量の関係を図12～図15に示す。

図12は黄銅、図13は鉄鋼、図14はステンレス鋼、図15はアルミニウム合金の場合を示す。各材料ともに多少の差異が見られるが、いずれも切削面積が大きくなると切削電力量は減少する傾向を示している。これは切削面積を大きくすると、切削回数が減り、面積の増加した割合に比して切削抵抗の増加は少なかったためと考える。また、三本のグラフ線は一本の曲線のように見ることができる。特にステンレス鋼がその特徴がはっきりしている。このように重ねたグラフ線は曲線となっているので、グラフ線はある切削面積の所から、減少傾向が一定また緩やかになっていくと考えられる。これらより、切削面積を大きくすると切削電力量を減少できることが分かったが、切込量や送り速度を増加しすぎると、工具等の寿命は逆に短くなる。このため、切削電力量と工具等の寿命とのバランスを考えることが重要である。

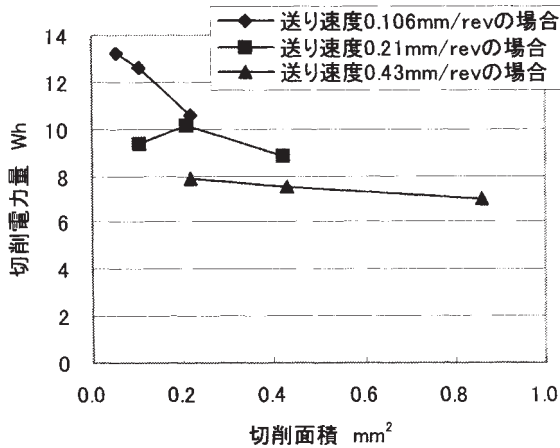


図12 切削電力と切削面積の関係 (黄銅の場合)

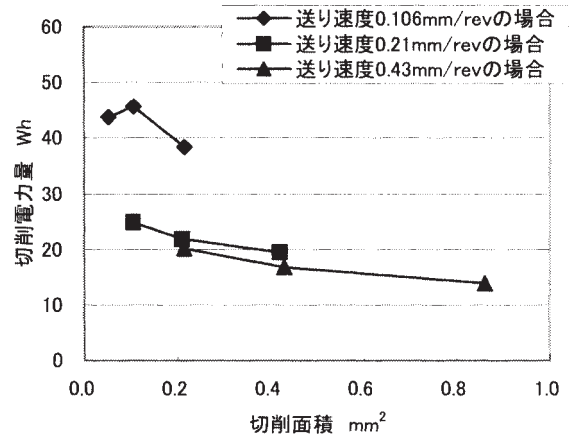


図15 切削電力と切削面積の関係 (アルミニウム合金の場合)

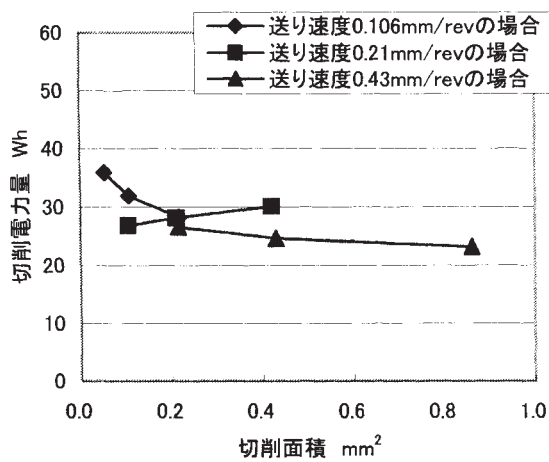


図13 切削電力と切削面積 (鉄鋼の場合)

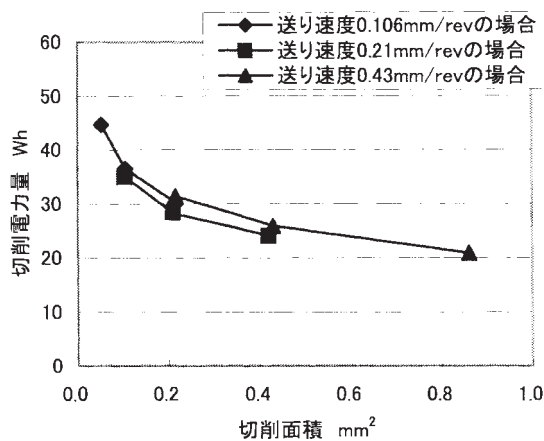


図14 切削電力と切削面積の関係 (ステンレス鋼の場合)

4. 最適化製造プロセスについて

本研究の実験結果より、切削速度を速くして、切削面積を大きくすると消費電力量を低減できることが分かった。しかし、製品の製作では所定の形状を仕様値以上の精度で形成する必要があり、この条件では仕上面粗さの劣化や残留応力の増大など製品に悪影響を及ぼすことも考えられ、必ずしも望ましい条件とは言えない。一方、切込量を少なくして加工すると、少なくした分、切削回数が増えて加工時間は長くなり、駆動電力量が増大してしまう。

そこで一つの方法として、荒仕上げ、中仕上げ、精密仕上げなどの加工段階をとり、荒仕上げでは消費電力量削減を最優先とした高効率な加工をし、中仕上げで精密仕上げ時に面粗さや残留応力の改善が可能な範囲の高効率の加工をする。そして、精密仕上げで製品の表面の品質向上や寸法精度の高度化を図り、効率とコストの両面を考えた製造プロセスの最適化を図ろうとすることが一般的には製作現場等ではとられている^{11) 12)}。

今回の実験により、重切削を行うことによって加工時間は減り、駆動電力量を低減でき、消費電力量を減少できることが分かった。これにより、消費電力量の削減を図る生産プロセスを考える際に、駆動電力量を考慮した条件を設定することが重要であること⁹⁾を確認することができた。

しかし、前述のように削減できる電力量の大部分は駆動電力量であり、消費電力量に占める割合は、切込量と送り速度を増加させると駆動電力量より切削電力量の方が多くなっていく。また、切削速度を速くすると工具寿命が急激に短くなる¹⁰⁾。このように、最適化製造プロセスを行っていく上で、切削電

力量をいかに低減するかということ、いかに工具寿命を延長するか、という問題が重要になってくると考える。

本研究では、トータルコストミニマムとトータル環境負荷ミニマムの両立を図るとともに環境対応の最適化製造プロセスの確立を目指して、今後製造プロセスに環境負荷の評価であるインパクト評価を適用していく予定である。

そこで、2条件についてそれぞれ消費された電力量を生み出すために発電所でどの程度の量の温室効果ガス CO₂ が排出されるのか試算してみる。条件1は本研究における最も消費電力量が多い結果となった加工条件 [送り速度0.106mm/rev, 切込量0.5mm] の場合である。条件2は最も消費電力量が少ない結果となった加工条件 [送り速度0.43mm/rev, 切込量2.0mm] の場合であり、これらにおける温室効果ガス CO₂ の排出量を求めた。結果を以下に示し、条件1と条件2の比較をまとめて図16に示す。この場合の加工量は $3.96 \times 10^{-5} \text{m}^3$ であり、温室効果ガス排出係数は $0.384 \text{kgCO}_2/\text{kWh}^{13)}$ である。

条件1：送り速度0.106mm/rev, 切込量0.5mm

- 1) 黄銅の場合
消費電力量：0.144 kWh
単位加工量に対する消費電力量：
3636.4 kWh/m³
単位加工量に対する温室効果ガス排出量：
1396.4 kgCO₂/m³
- 2) 鉄鋼の場合
消費電力量：0.166 kWh
単位加工量に対する消費電力量：
4191.9 kWh/m³
単位加工量に対する温室効果ガス排出量：
1609.7 kgCO₂/m³
- 3) ステンレス鋼の場合
消費電力量：0.174 kWh
単位加工量に対する消費電力量：
4393.9 kWh/m³
単位加工量に対する温室効果ガス排出量：
1687.3 kgCO₂/m³
- 4) アルミニウム合金の場合
消費電力量：0.162 kWh
単位加工量に対する消費電力量：
4090.9 kWh/m³
単位加工量に対する温室効果ガス排出量：
1570.9 kgCO₂/m³

条件2：送り速度0.43mm/rev, 切込量2.0mm

- 1) 黄銅の場合
消費電力量：0.01566 kWh
単位加工量に対する消費電力量：
395.5 kWh/m³
単位加工量に対する温室効果ガス排出量：
151.9 kgCO₂/m³
- 2) 鉄鋼の場合
消費電力量：0.03041 kWh
単位加工量に対する消費電力量：
767.9 kWh/m³
単位加工量に対する温室効果ガス排出量：
294.9 kgCO₂/m³
- 3) ステンレス鋼の場合
消費電力量：0.0291 kWh
単位加工量に対する消費電力量：
734.9 kWh/m³
単位加工量に対する温室効果ガス排出量：
282.2 kgCO₂/m³
- 4) アルミニウム合金の場合
消費電力量：0.02182 kWh
単位加工量に対する消費電力量：
551.0 kWh/m³
単位加工量に対する温室効果ガス排出量：
211.6 kgCO₂/m³

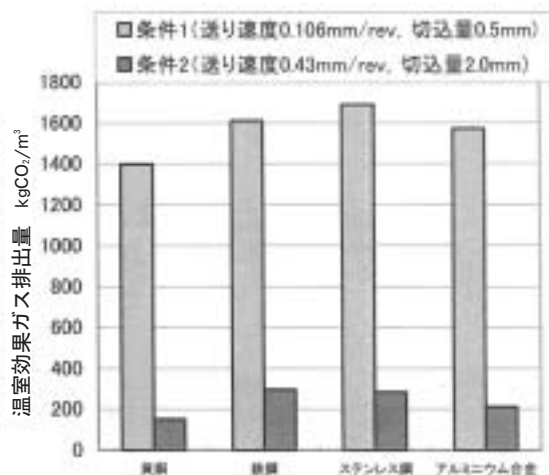


図16 温室効果ガス排出量の比較

以上より、加工条件2の際の温室効果ガス CO₂ 排出量は、加工条件1の場合に比べて、黄銅では約10.8%、鉄鋼では約18.3%、ステンレス鋼では約16.7%、アルミニウム合金では約13.5%と、同じ加工量でも CO₂ の排出量が約82%~90%減少している。このことは、旋削加工における加工条件の選定の重

要性を示すものとする。

日本の2002年（平成14年度）の二酸化炭素排出量は12億4800万トン、1人当たり排出量は9.79トン／人で、基準年である1990年度（平成2年度）と比べて、排出量で11.2%、1人当たりの排出量で7.8%増加した。エネルギー消費による二酸化炭素排出の増加は、地球温暖化の要因の1つとなっており¹⁴⁾、このエネルギー削減を目的とする最適化製造プロセスを推進していくことは重要である。このため、製造工程における加工条件と消費電力量の関係を調べ、さらに加工方法、材料特性、工具等を加味した製造加工データを調査し、より精度の高い理想的な最適化製造プロセスの構築が必要となってくる。

5. 結 言

本研究では、トータルコストミニマムとトータル環境負荷ミニマムの両立を図るとともに環境対応の最適化製造プロセスの確立を目的としている。切削除去量を一定とした本実験範囲内で以下のことが明らかとなった。

- (1) 切込量を増大させ、送り速度を速くすることにより、加工時間を短縮し、駆動電力量を大幅に削減できる。
- (2) 切削速度が増大していくにつれて、切削電力量は減少する傾向が見られた。このため、切削電力量を減少するには、切削速度を速くすることが効果的であるとする。
- (3) 各材料ともに多少の差異が見られるが、いずれも切削速度を速くし、一回転の切削加工における切削面積を大きくすると消費電力量が減少する傾向にある。
- (4) 製造プロセスにおいて削減できる電力量の大部分は駆動電力量であり、最適化製造プロセスを求めていく上で、切削電力量をいかに低減するか、いかに工具寿命を延長できるか、という問題が重要になってくる。
- (5) 各供試材における最も消費電力量が少ない加工条件での温室効果ガス CO₂ 排出量は、最も消

費電力量が多い加工条件の82%～90%削減できることが分かった。

参考文献

- 1) 例えば、松下電器、「環境経営報告書2003」,(2003.6)
- 2) 例えば、HITACHI、「環境経営報告書2003」,(2003.5)
- 3) 米国環境保護庁 作成編集、「ライフサイクルアセスメント—インベントリーのガイドラインとその原則—」, 社団法人環境管理協会, (1994), pp.1-13
- 4) 島津テクノロジーサーチ環境調査部ホームページ, <http://web.kyoto-inet.or.jp/org/eecon/home.htm>
- 5) Eco Assist ホームページ, <http://ecoassist.omika.hitachi.co.jp/>
- 6) NIRE-LCA ホームページ, <http://unit.aist.go.jp/lca-center/>
- 7) 環境省, 「平成16年度版環境白書—広がれ環境のわざと心—」, (2004.5), p.28
- 8) 精密工学会編, 「新版精密工作便覧」, コロナ社, (1992), p.2
- 9) 加藤昇, 「機械加工に関する環境評価の実験的研究」, 平成15年度専攻科特別研究論文集, (2004.3), pp.33-38
- 10) 竹中規雄, 「改訂 機械製作法 (2)」, コロナ社, (1975), pp.34-38
- 11) 津和秀夫, 「機械加工学」, 養賢堂, (1973), pp.8-13
- 12) 安永暢男, 高木純一郎, 「精密機械加工の原理」, 工業調査会, (2002), pp.19-20
- 13) 環境省ホームページ, 「環境パフォーマンス評価—意見募集のための草案— (最終案)」, <http://www.env.go.jp/policy/j-hiroba/PERF/index.html>
- 14) 環境省, 「平成16年度版環境白書—広がれ環境のわざと心—」, (2004.5), pp.2-4