工作機械による加工の環境負荷予測システムの開発*

(第2報, 環境効率指標の提案)

成田 浩久^{*1}, 河村 浩志^{*2}, 陳 連 怡^{*3}
藤本 英雄^{*4}, 則 久 孝 志^{*5}, 長谷部 孝男^{*5}

Development of Prediction System of Environmental Burden for Machine Tool Operation

(2nd Report, Proposal of Evaluation Indicator for Eco-Efficiency)

Hirohisa NARITA^{*6}, Hiroshi KAWAMURA, Lian-yi CHEN,
Hideo FUJIMOTO, Takashi NORIHISA and Takao HASEBE

^{*6} Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology,
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 466-8555 Japan

The reduction of environmental burdens is required in recent years to mitigate global warming, ozone layer depletion and etc. in manufacturing fields. Hence, prediction system of environmental burden for machining operation has been developed so far. Hence, the evaluation indicator for eco-efficiency of process and operation planning is also proposed with considering the environmental burden, manufacturing time and total number of work piece setup times in this research. Global warming is selected as impact category and the feasibility of the developed system and evaluation indicator for eco-efficiency is demonstrated in this paper.

Key Words: Eco-Efficiency, Machine Tool, Environmental Burden, Process Planning

1. 結 言

本研究では, 工作機械による加工の環境側面評価を目的として, LCA (Life Cycle Assessment) のコンセプトに基づいた環境負荷算出システムの開発を行った^①。また, マシニングセンタによるエンドミル加工を対象に様々な解析を試みた。そこで本報では, まずマシニングセンタによるエンドミル加工だけでなく, 様々な加工工程の, 環境負荷を評価することができるシステムへの拡張を試みる。

次に, 開発したシステムを用いて, 生産プロセスの評価を行う。しかし通常, LCA に基づく評価では, 対象とする工業製品などの環境負荷のみを評価すれば良いわけではない。即ち, 本来は製品の「機能」が評価対象である。従って, 対象製品の比較を行う場合は, 機能単位を設定し, 機能を同一にして評価することが

必須とされている^②。例えば, 同じ洗濯機でも, 一度に洗うことができる量が違えば, 同じ年数使用しても環境負荷が異なるのは当たり前である。この考え方は, 単純に環境負荷が小さければ性能が悪くても良いという判断を避けるためであり, 持続的発展可能な社会構築を目指す基本コンセプトといってよい。今回の場合, 生産に係わる能力と環境負荷を同時に評価する必要があることを意味している。

そこで本研究では, 生産プロセスに関して機能を定義し, それと環境負荷の双方を同時に評価する環境効率指標を提案する。また, その指標の有効性について紹介する。

2. 環境負荷の算出システム

2.1 システムの概要

図1に提案する評価システムの処理の流れを示す^③。被削材と工具データ, CAM で生成された NC プログラムが入力され, 工作機械の挙動と加工工程が評価される。その際に工作機械の電力量消費やクーラント量, 潤滑油量, 工具状態, 切屑, その他の項目から, 加工ごとの環境負荷を自動的に算出する。ここでその他の項目とは, 工場の照明

* 原稿受付 2005年5月16日。

^{*1} 正員, 名古屋工業大学大学院つくり領域(☎466-8555 名古屋市昭和区御器所町)。

^{*2} 名古屋工業大学大学院情報工学専攻[現: プラザ工業(株)]。

^{*3} 正員, 名古屋工業大学大学院おもひ領域。

^{*4} 正員, フェロー, 名古屋工業大学大学院おもひ領域。

^{*5} オークマ(株)(☎480-0193 愛知県丹羽郡大口町下小口5-25-1)。

E-mail: narita@vier.mech.nitech.ac.jp

や AGV による電力量消費などで、ユーザが別に入力するものである。これらの値から、バックグラウンドデータ (排出原単位) や工具などの仕様に関するリソースデータを用いて、製品を加工する際の環境負荷を算出するものである。

Fig.1 Processing flow of prediction system of environmental burden for machine tool operations

第一報で述べたように、エンドミル加工を対象にした評価システムは既に完成している。基本的に加工に起因する環境負荷は、同じアルゴリズムで評価することが可能であるが、加工工程の評価モデルが異なる。そこでエンドミル加工以外の各加工工程を評価するモデルについて、次節で説明する。

2.2 加工工程の評価手法 各加工工程の評価モデルを以下に示す。

旋削加工

旋削加工の切削抵抗の実験式は、数多く公表されているが、ここでは、(1)と(2)に示す M. Kronenberg の実験式を基に切削力と切削動力を求めることとした⁽³⁾。

$$F_H = f \times d \times k_S \quad (1)$$

F_H : 切削抵抗主成分[N]

f : 送り速度[mm/rev]

d : 切り込み[mm]

k_S : 比切削抵抗[N/mm²]

$$N = \frac{f \times d \times v \times k_S}{60 \times 1000 \times \eta} = \frac{F_H \times v}{60 \times 1000 \times \eta} \quad (2)$$

N : 消費電力[kW]

v : 切削速度[m/min]

η : 機械効率

研削加工

研削加工の研削抵抗は、切れ刃一個に働く接線方向研削抵抗が、平均切屑断面積に比例するものとして、以下の式から求めることとした⁽⁴⁾。

$$F_T = K_S a_m \frac{IB}{a^2} \quad (3)$$

F_T : 接線研削抵抗[N]

K_S : 比研削抵抗[N/mm²]

a_m : 平均切屑断面積[mm²]

B : 研削幅[mm]

I : 接触弧の長さ[mm]

a : 平均切れ刃間隔[mm]

所用動力は、式(2)より求めることができる。

ドリル加工

ドリル加工の切削抵抗と切削動力は、以下の実験式から求めることとした⁽⁵⁾。

$$M = 0.098 \times 0.0318 H_B f^{0.8} d^{1.8} \quad (4)$$

$$T = 0.098 (0.751 H_B f^{0.8} d^{0.8} + 0.0022 H_B d^2) \quad (5)$$

$$N = \frac{2\pi MT}{60 \times 1000 \times \eta} \quad (6)$$

M : トルク[J]

T : スラスト力[N]

N : 切削動力

H_B : 被削材のブリネル硬さ

d : 工具直径[mm]

f : 送り速度[mm/rev]

n : 回転数[rev/min]

これらの式により、切削条件の違いを考慮した環境負荷の算出が可能になる。図2に開発した評価システムの実行例を示す。このシステムを用いれば、様々な工作機械による加工工程の環境負荷を算出することができる。

Fig.2 Output example of environmental burden analyzer

3. 環境効率指標

緒言で述べた通り, LCAに基づく環境側面の評価では, 異なる機能を有する対象を評価するための指標が必要である. この場合, 環境効率⁷⁾を用いて評価する方が分かり易い.

まず, 一般的な環境効率の概念を式(7)に示す.

$$\text{環境効率} = \frac{\text{製品・サービスの価値 (機能)}}{\text{環境負荷}} \quad (7)$$

式からも分かるように, 対象物が環境へ与える負荷を規準として, そのものの価値 (機能) と比較する考え方である. これを上位概念として生産プロセスを対象とした環境効率指標を新たに提案する. 一般的には, 生産は, 精度の良いものを如何に早く作り出すかが評価される. そこで本研究では, 生産効率と段取り効率を生産における付加価値 (サービス) と定める事とした. 生産効率指標は, 生産効率に対する環境負荷の評価を行うものである. また, 段取り効率指標は, 加工工程における製品の段取り効率に対する環境負荷の評価を行うものである. 段取り効率を評価する目的は, 段取りを行うたびに製品の基準位置がずれ, 精度に影響を及ぼすためである. この形状誤差は予測することができないため, このような指標を設けた. また, 加工中の切削力に起因する形状誤差は, 著者らにより予測システムの開発が試みられており^{8,9)}, このシステムを用いれば, 将来的には要求する精度を満たす切削条件を生産効率 (加工時間) の立場から評価することが可能であると考えている.

以下に, 生産効率指標 (EeT) と段取り効率指標 (EeS) について説明する. 生産効率指標は, 以下の式から求めることができる.

$$\text{環境効率 (EeT)} = \frac{\text{生産効率}}{\text{環境負荷の総和}} \quad (8)$$

$$\text{生産効率} = \frac{1}{\sum \text{各機械の稼働時間}} \quad (9)$$

次に, 段取り効率指標は, 以下の式から求めることができる.

$$\text{環境効率 (EeS)} = \frac{\text{段取り効率}}{\text{環境負荷の総和}} \quad (10)$$

$$\text{段取り効率} = \frac{1}{\text{段取り回数}} \quad (11)$$

次に, 改善指標として, 以下に示す式のように, これらの結果を統合し, これらの環境効率が正であれば, 改善されているものと判断することとした.

$$w1 \times \frac{\Delta EeT}{EeT_0} + w2 \times \frac{\Delta EeS}{EeS_0} > 0 \quad (12)$$

ΔEeT : EeT 値の変化量

ΔEeS : EeS 値の変化量

EeT_0 : 基準となる EeT 値

EeS_0 : 基準となる EeT 値

$w1, w2$: 重み係数

式(12)において, 重み係数は, ユーザが設定する値である. この評価指標により, 生産の能力を活かしつつ, 環境負荷を極力少なくするための評価が可能になると考えられ, 環境負荷を意識した生産ラインの構築, 設備計画などに適用することが可能である. 実際には, 環境負荷の上限値を予め定め, その中で, 最適と考えられる生産方法を決定するというプロセスになると考えられる. また, 指標にファクター¹⁰⁾の考え方を導入し, 生産プロセス改善の目標を設定することで, 持続的発展可能な, ものづくりシステム構築の目標を設定することも想定できる.

4. ケーススタディ

図3に示す形状を加工する場合の工程の違いによる環境負荷の比較を行う. 図3の左側は概略図を, 右側は, 詳細な寸法を記入した図である. この形状を旋盤と縦型マシニングセンタ (Plan 1), 旋盤と5軸マシニングセンタ (Plan 2), 複合加工機 (Plan 3) で加工した際の比較を行うこととした. ここで旋盤はSPACE TURNLB200, 縦型マシニングセンタはMB-46VA, 5軸マシニングセンタはMU-400VA, 複合機はMAC TURN250 (いずれもオークマ(株)製) を使用し, 被削材の種類は, 炭素鋼 (S50C) として解析を行った.

Plan 1の被削材形状の変化を図4に示す. 図を見れば分かるように, 部品を二つに分けて製作し, 後で一つに組み上げることとした. また Plan 2, Plan 3の被削材の形状変化を図5に示す. これは一つの被削材から削りだすこととした. これらの製品は機能的に同じものであると仮定し, それぞれの場合の環境負荷を算出した.

Fig. 3 Product shape used in case study

ただし、ここでは前報同様、環境影響項目を地球温暖化に設定し、影響を及ぼす因子である CO_2 (二酸化炭素)、 CH_4 (メタン)、 N_2O (一酸化二窒素) の排出量を評価することとした。その他の地球温暖化物質は、調査の過程で見当たらなかったため、評価対象から除外した。

また、インパクト評価の際に使用する特性化係数は、表 1 に示すように、100 年間の影響度を示す地球温暖化指標 (GWP) を用い⁽¹⁾、全ての排出量を CO_2 に換算した等価 CO_2 排出量を環境負荷として求めることとした。

Table 1 Characterization factors of global warming⁽¹⁾

	CO_2	CH_4	N_2O
Global warming potential (GWP)	1	21	310

各加工工程の解析結果を表 2, 3, 4 にそれぞれ示す。これらのデータを基に、環境効率の比較を行う。ここでは、式(12)における重み係数 w_1 と w_2 は、簡単のために、それぞれ 1 とする。

まず Plan 1 と Plan 2 の比較を行う。表に示されている環境負荷と総加工時間、段取り回数から EeT 、 EeS はそれぞれ次のようになる。ただし、環境負荷の単位は $\text{kg}\cdot\text{CO}_2$ 、時間の単位は h で計算した。

Plan1: $EeT=0.777$, $EeS=0.156$

Plan2: $EeT=3.227$, $EeS=0.563$

これを式(12)に代入すると 5.762 となり、Plan 1 より Plan 2 の方が、大幅に環境効率が良いことが分かる。また、表 1 に示される値から、Plan 2 の方が、環境負荷も少なく、段取りの際に発生する誤差が少なくなることも分かった。次に Plan 3 の関する EeT 、 EeS を求めるとそれぞれ次のようになる

Plan3: $EeT=2.46$, $EeS=0.843$

このデータを用いて Plan 2 との比較を式(12)により行った。生産効率の指標は、-0.238 と Plan 2 の方がよいが段取り効率の指標は 0.497 と Plan 3 の方がよく、最終的な結果としては 0.259 と Plan 3 の方が、環境効率が良くなった。詳細に見てみると、表 3 と表 4 を見れば分かるように、加工時間では、Plan 3 の方が短い、環境負荷では Plan 2 の方が少ない。

このようにトレードオフが発生する場合には、環境影響に関して十分な知識がなくても、迅速な評価を行うための指標が必要であり、本研究で提案した指標はそれを満たすものであることが分かる。

ちなみに、 $w_1=3$ として生産効率指標の重み付けを大きくする場合、すなわち、生産効率に対する環境負荷が小さい、あるいは環境負荷に対して生産効率が大きい場合を優先させる場合は、評価指標の比較結果が -0.217 となり、Plan 2 の方が Plan 3 より良くなる。このように対象とする製品に応じて、重み係数を決定していくことで、様々な産業への応用が期待できる。

Fig. 4 Manufacturing process of Plan 1

Fig. 5 Manufacturing process of Plans 2 and 3

Table 2 Analyzed results of Plan 1

Part No.	Machine tool	Running time [s]	Process	Number of work piece setup	Environmental burden [equiv. g-CO ₂]
1	Lathe Machining center	98.56	(a)->(b) Lathe cutting tool	1	220.94
		1862.52	(b)->(c) flat end mill(φ12)	1	961.2
		103.7	(c)->(d) Drill (φ4.9)		41.83
		163.7	(c)->(d) Threading tap (M6)		63.51
		271.41	(c)->(d) flat end mill(φ10)	1	151.47
2	Machining center	27.1	(e)->(f) flat end mill(φ10)	1	13.9
		51.68	(e)->(f) flat end mill(φ12)		28.87
		105.3	(e)->(f) Drill (φ4.9)		42.06
		205.3	(e)->(f) Threading tap (M6)		79.56
Total		2889.27		4	1603.34

Table 3 Analyzed results of Plan 2

Part No.	Machine tool	Running time [s]	Process	Number of work piece setup	Environmental burden [equiv. g- CO ₂]
1	Lathe	98.56	(a)->(b) Lathe cutting tool	1	220.94
	5-axis Machining center	1103.78	(b)->(c) flat end mill(φ12)	1	637.72
		53.9	(c)->(d) flat end mill(φ10)		29.27
	Total	1256.24		2	887.93

Table 4 Analyzed results of Plan 3

Part No.	Machine tool	Running Time [s]	Process	Number of work piece setup	Environmental burden [equiv. g-CO ₂]
1	Multi-tasking Machine tool	30.62	(a)->(b) Lathe cutting tool	1	181.97
		28.62(*1)	(a)->(b) Lathe cutting tool		
		1103.78	(b)->(c) flat end mill(φ12)		933
		53.9	(c)->(d) flat end mill(φ10)		42.25
Total		1188.3		1	1157.22

*1: machining operation is carried out simultaneously

本例題では地球温暖化を環境影響項目として評価したが、オゾン層破壊や人間への毒性影響、生態への毒性影響、酸性化、富栄養化など他の影響項目でも同様の評価が可能である。

また、この指標を用いれば生産ラインを環境効率の立場から改善するための情報を提供することも可能になる。

実際には、京都議定書⁽¹²⁾に代表されるように、環境負荷は目標値を掲げて、それを達成する範囲で高い生産性と精度を実現することになる。本研究で提案した環境効率による評価は、生産工程に起因して排出される環境負荷の上限値を定め、それを満たす範囲内で、実施する方が望ましいと考えられる。この上限値は、工場での排出量を調査し、ある製品の生産工程で許容

される、おおよその環境負荷量を推測し、目標として設定するべきものである。

理想的には、大気中の温暖化物質の増加の結果として起こる気候変動の機構までを考慮したモデルと併せて⁽¹³⁾、生産工場全体で許容される排出量から生産工程で許容される排出量を決定すべきであり、関連する研究の今後の成果と統合していくことも必要であると思われる。

このように使用していけば、製品の設計段階や工程設計、作業設計を行う際に、環境効率の立場から環境負荷評価に関して知識が乏しいユーザであっても、トレードオフを意識することなく迅速な判断を下せるようになり、環境負荷の低減と生産技術の発展を両立させ、持続的発展が可能な社会の一助になるものと期待している。

5. 結 言

本研究では, LCA (Life Cycle Assessment) のコンセプトに基づいて, 単に環境負荷だけでなく, 対象とする生産工程の機能を含めて評価することが可能な指標の提案を試みた。

得られた結論は以下の通りである。

1. これまでマシニングセンタによるエンドミル加工の環境影響評価が可能であったシステムを, 様々な加工工程と工作機械を評価できるように拡張した。
2. 一般的な環境効率の考え方を上位概念として, 生産効率と段取り効率に対する環境負荷を考慮した生産加工用の指標を提案した。これにより, 製品を加工する際に, 環境効率という立場から評価できるようになった。
3. 提案した環境効率指標を用いて, ある製品を加工する際の生産工程の評価を行い, その有効性について述べた。

謝 辞

本研究を進めるにあたり, ご助言ならびに情報をご提供して頂きましたオークマ (株) 関係各位に, 深く感謝いたします。

文 献

- (1) Nania, H., et al., Development of Prediction System of Environmental Burden for Machine Tool Operation (1st Report, Proposal of Calculation Method of Environmental Burden) (in Japanese), *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series C, Vol.71, No.704, pp.1392-1399 (2005).
- (2) e.g., Desaki, T., et al., Application of Environmental Impact Assessment to Tribocomponents-A Case Study on Plain Bearings for Automotive Engines -, *Journal of Japanese Society of Tribologists*, Vol.47, No.2, pp.129-135 (2002).
- (3) Fujimura, Y., Practical Cutting Operation (2nd Revision) (In Japanese), Kyoritsu Shuppan Co. Ltd. (1995).
- (4) Ono, K., et al., Theory of Cutting Engineering (in Japanese), Gendai-Kogaku Co. Ltd. (1979).
- (5) Ido, M. and Yumoto, S., Basic Machine work (II), Nikkan Kogyo Shinbun Ltd. (1980).
- (6) Fujimura, Y. and Yasui, T., Machine Tools and Manufacturing System (in Japanese), Kyoritsu Shuppan Co. Ltd. (1994).
- (7) Inaba, A., Leading-Edge Trend of Environmental Impact Assessment (in Japanese), *The Symposium Materials of "Leading-Edge Trend of Environmental Impact Assessment for Recycle-Oriented Design and Manufacturing"*, pp.25-30 (2002).
- (8) e.g., Nania, H., et al., Real-Time Cutting Simulation System of a Milling Operation for Autonomous and Intelligent Machine Tools, *International Journal of Production Research*, Vol.40, No.15, pp.3791-3805, (2002).
- (9) e.g., Nania, H., et al., Trial of accuracy prediction for ball end milling operation (in Japanese), *Proceeding of the 3rd Manufacturing & Machine Tool Conference*, pp.257-258 (2004).
- (10) e.g., Aoe, T., Efforts to Improve Factor in Matsushita Electric Group (in Japanese), *Proceedings of Eco-Design 2002, Japan Symposium*, pp.38-41.
- (11) Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC), Climate Change 1995: The Science of Climate Change, Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of IPCC (1995).
- (12) Ministry of the Environment, Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change <<http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>> (Accessed 2005/5/10)
- (13) e.g., Yoshida, Y., Maruyama, K., Tsutsui, J., Nakashiki, N., Bryan, F. O., Blackmon, M., Boville, B. A. and Smith, R. D., Multi-century ensemble global warming projections using the Community Climate System Model (CCSM3), *Journal of the Earth Simulator*, 3 (2005).

- (1) Nania, H., et al., Development of Prediction System of Environmental Burden for Machine Tool Operation (1st Report, Proposal of Calculation Method of