生産システムの設計プロセス支援に関する研究*

(第1報, 設計プロセスの記述と支援ツールの開発)

谷 水 義 隆^{*1}, 永 田 智 一^{*2}, 杉 村 延 広^{*1}
光 行 恵 司^{*3}, 由 良 佳 之^{*4}, 徳 永 尚 彦^{*5}A Study on Engineering Process Support for Manufacturing Systems
(1st Report, Description of Manufacturing System Engineering Process
and Development of Support Tool)Yoshitaka TANIMIZU^{*6}, Tomokazu NAGATA, Nobuhiro SUGIMURA,
Keiji MITSUYUKI, Yoshiyuki YURA and Naohiko TOKUNAGA^{*6} Osaka Prefecture University, Graduate School of Engineering,
1-1 Gakuen-cho, Sakai-shi, Osaka, 599-8531 Japan

Manufacturing system engineering process (MSE process) is investigated to establish a systematic and computerized support system for planning, design and evaluation processes of the manufacturing systems. A description method is proposed to describe the MSE process. The proposed method is applied to description of the MSE process for the automotive parts manufacturing system. According to the analysis of the description, a prototype of a computerized support system is developed for MSE processes in order to support the manufacturing engineering processes.

Key Words: Manufacturing System, Model, Engineering Process, Engineering Activity

1. 結 言

製造企業には, 市場の要求を満たす製品を素早く製造し, 迅速に市場へ供給することが求められる。そのため, 製品の設計プロセスおよび生産プロセスをサポートするための CAD/CAM/CAE システムが活用されている。しかし, 製品を製造する工場, すなわち生産システムの設計プロセスをサポートするための研究は, あまり行われていない。

生産システムの要求定義から詳細設計までの設計過程を, ここでは, MSE プロセス (Manufacturing System Engineering Process) と呼ぶ。MSE プロセスを合理的, 系統的に行うには, MSE プロセスにおける設計情報の記録, 参照および適切な設計手順の指示などを, 計算機を用いて統合的に支援するための MSE プロセス支援ツールが必要である。MSE プロセス支援ツールの開発には, 実際の MSE プロセスの特徴や問題点の分析が必要である。しかし, MSE プロセスにおける問題点を分析した研究は数少なく, その特徴や問題点は十分には明らかにされていない。

そこで, 本研究では, ある製品を製造する生産システムの設計実験を行い, その MSE プロセスを記述する。次に, その結果を分析して, MSE プロセスの問題点を明らかにするとともに, MSE プロセス支援ツールの開発を試みる。

2. MSE プロセス

2.1 MSE プロセスの定義 本研究では, MSE プロセスを, 生産すべき製品品種, 各品種の生産量および生産工程を入力として, 生産設備, 搬送設備, 貯蔵設備および作業員などの必要なリソースの種類, 数, 配置を設計し, 各リソースの詳細設計を行うための要求仕様を作成するものとする。ひとつの設計活動において, 生産システムの設計者は, 生産システム全体またはその構成要素の仕様の分析, 設計案の作成, 評価を行い, 設計対象となる生産システム全体またはその構成要素の属性値を決定する。したがって, 図 1 に示すように, これら複数の設計活動の連鎖により, 生産システム全体の設計を行う。

2.2 MSE プロセスの記述に関する研究 機械製品の設計プロセスの記述に関する研究は, これまでにいくつか行われている。田浦ら⁽¹⁾⁽²⁾や岡田ら⁽³⁾は, 設

* 原稿受付 2001 年 2 月 1 日。

^{*1} 正員, 大阪府立大学大学院工学研究科(☎ 599-8531 堺市学園町1-1)。^{*2} (株)日立製作所金融システム事業部(☎ 212-0058 川崎市鹿島田 890)。^{*3} 正員, (株)デンソー生産技術部(☎ 448-8661 刈谷市昭和町1-1)。^{*4} 清水建設(株)エンジニアリング事業本部(☎ 105-8007 東京都港区芝浦 1-2-3)。^{*5} (株)牧野フライス製作所取締役(☎ 243-0303 神奈川県愛甲郡愛川町中津 4023)。

E-mail: tanimizu@mecha.osakafu-u.ac.jp

計意図の伝達を目的として、製品およびその設計プロセスのモデルを提案した。仲ら⁽⁴⁾⁽⁵⁾は、設計行為のモデルを提案した。また、菊地ら⁽⁶⁾⁽⁷⁾は、設計および生産活動における情報の入出力関係を形式的に表現する形式仕様言語を提案した。機械製品の設計では、3次元空間上での構成部品の形状、寸法および配置の設計が重要であるのに対し、生産システムの設計では、構成するリソースの種類と数の決定および2次元平面内でのリソースの配置の設計が重要である。特に、生産システムの場合、リソースの詳細設計を別の部門あるいは企業で行うことが多く、MSEプロセスでは詳細設計に必要な要求仕様を策定するものと考えている。以上のことから、機械製品の設計プロセスの流れと本研究で検討しているMSEプロセスの流れは異なると考える。

一方、MSEプロセスの記述に関する研究としては、Mertinsら⁽⁸⁾や小島ら⁽⁹⁾の研究を挙げることができる。Mertinsらは、生産システムの製造プロセスにおける2種類のモデルを提案した。しかし、実際のMSEプロセスの記述や分析は、十分に行われていない。小島らは、生産システム設計の経験から、MSEプロセスの課題として、設計情報の共有と一元化が困難であることを挙げ、生産システムおよびその設計プロセスの記述法を提案した。しかし、設計事例における具体的なMSEプロセスの表現、設計者間での情報の授受およびフィードバックなどに関する記述が少なく、統一された具体的な支援ツールの開発にはいたっていない。

実際のMSEプロセスを正確かつ十分に記述するためには、生産システムの設計を行うとともに、そのMSEプロセスを記述する必要があると考える。そこで、本研究では、ある製品を製造する生産システムの設計を実際に行い、その設計の進行と同時に、MSEプロセスの記述を行う。次に、これを分析して、現状のMSEプロセスにおける問題点を明らかにし、MSEプロセス支援ツールを開発する。

3. MSEプロセスの記述方法

MSEプロセスのモデルは、生産システムの設計活動を表現するモデル（これを設計活動モデルと呼ぶ）と、設計対象となる生産システム全体またはその構成要素を表現するモデル（これを生産システムモデルと呼ぶ）の2種類のモデルがあると考えられる。

3.1 設計活動モデル MSEプロセスにおいて、生産システム全体またはその構成要素の仕様の分析、

Fig. 1 Manufacturing system engineering process

設計案の作成、評価および決定からなるひとつの設計活動をエンジニアリングアクティビティ (Engineering Activity) と定義し、以下、これを EA と表す。EA では、入力情報と評価手法に基づき、生産システム全体またはその構成要素の属性値を決定し、これが EA の出力情報になる。

本研究では、EA を以下の情報により記述する。

- (1) ID 番号および名称：EA を特定するための情報。
- (2) 設計者名または組織名：EA で出力情報を決定した人物、または組織の名称。
- (3) 設計の開始および終了時刻：EA において設計を開始した時刻および終了した時刻。
- (4) 入力情報：EA の入力情報。これは、MSE プロセスの開始時に与えられる初期仕様、あるいは他の EA の出力情報である。
- (5) 出力情報：EA の出力情報。すなわち、この EA で決定した生産システム全体またはその構成要素の属性値を表す。
- (6) 評価手法：設計案である生産システム全体またはその構成要素の属性値を評価するための計算式やルールなど。

複数の EA を考える場合、ある EA の出力情報が他の EA の入力情報となる関係、すなわち情報授受の関係を記述することが必要である。情報授受の関係を記述するために、入力情報には、その情報を出力した EA の ID 番号を与える。

3.2 生産システムモデル 工作機械やライン等、EA で設計対象となる生産システム全体またはその構成要素のモデルを、生産システムモデル (Manufacturing System Model) と呼ぶ。生産システムモデルには、生産システム全体またはその構成要素の状態や特性を表す属性値を記述する。これは、EA の入出力情報となる。生産システムモデルの構造および内容について

は、別報⁽¹⁰⁾で報告している。

4. MSE プロセスの分析

4.1 MSE プロセスの記述対象および記述の手順

実際の生産システムの設計を想定したテストケースとして、図2に示す自動車のオルタネータやスタータ等の回転機器部品を製造する加工および組立工場の設計を行い、そのMSEプロセスの記述を試みた。この工場は、複数の加工および組立ラインで構成される。本テストケースでは、加工ライン設計、組立ライン設計、搬送システムおよびラインレイアウト設計が、異なる企業の設計者により行われると考え、設計の進行と同時に、そのMSEプロセスを記述した。以下に、その記述手順を示す。

- (1) 各設計者は、他の設計者の設計結果を利用しながら、生産システムの各構成要素の設計を行う。なお、ここで参加した設計者は、企業において生産システムの計画および設計に関与している技術者である。
- (2) 後日、会議を開き、設計者はMSEプロセスの記述者に、設計の経過を報告する。特に、個々のEAの出力情報を決定する際に利用した入力情報、その入力情報を出力情報として生成したEAのID番号、および評価手法について詳細に報告する。
- (3) 会議終了後、設計者の報告により得られた情報と、会議を録画したVTRをもとにして、記述者は、MSEプロセスを記述する。その際、入出力情報と評価手法の内容に矛盾がないかを確認する。
- (4) 後日、全員でその記述内容を確認し、不足事項や誤りを追加、修正する。

以上の手順を数週間の間隔で繰返し、設計の進行と同時に、MSEプロセスを記述した。その結果、約180個のEA、およびEA間における情報授受の関係性を記述した。EA間では約930項目の出力情報が授受され、そのうちの約250

項目が異なる設計者間で授受された。

EA間における情報授受の関係性の概略を図3に示す。横軸は時間を、縦軸は各EAを示す。四角は個々のEAを、矢印はEA間で授受される情報を表す。

図3に示すように、MSEプロセスでは、異なる設計者が実行しているEA間で多くの情報が授受されている。また、設計変更、すなわち既に設計が終了したEAと同じ設計活動が繰返し行われている。これには、以下の原因があると考えられる。

- (1) あるEAにおいて、評価手法の条件を満たす出力情報を生成できない場合、入力情報として利用した他のEAの出力情報の値を変更する必要がある。そのため、図3(a)のように、同一のEA(EA-1.2およびEA-1.3)が繰返し行われている。
- (2) MSEプロセスの進行に伴い、精度の高い入力情報が得られるようになる。そのため、初期のEAで生成された出力情報の見直しが行われる。例えば、図3(b)の場合、EA-2.1の入力情報が時間の経過に伴い、精度が高くなるため、EA-2.1からEA-3.3までのEAが繰返し行われている。
- (3) 入出力情報の転記ミスや、制約条件を考慮していないことがあった場合、同じEAを再度、実行する必要がある。

Fig. 2 Target manufacturing systems

Fig. 3 Example of MSE processes

Fig. 4 Interface to describe data of engineering activities

設計対象が同じであっても、その MSE プロセスに必要な時間は、設計者の能力により異なる。例えば、熟練の設計者は、経験に基づき、重要な出力情報から決定することで、設計変更を少なくしている。

4.2 現状の MSE プロセスの問題点 製品ライフサイクルの短縮化に伴い、製品だけでなく、生産システムの設計期間も短縮化しなければならない。具体的な生産システム設計における MSE プロセスの記述に基づいて、MSE プロセスを分析した結果、生産システムの設計期間の短縮化にとって、以下の問題が重要であることが明らかになった。

(1) 複数の設計者間での情報授受

複数の設計者で設計を行う場合、設計者は、互いに入出力情報を授受する。設計の終了や変更にあわせて迅速かつ正確に情報を授受することは容易ではない。

(2) 設計変更による出力情報の値の変更

複数の EA は、入出力情報の授受の関係による連鎖を形成する。そのため、ある EA での設計変更による出力情報の値の変更は、既に設計が終了した他の EA の出力情報に影響を及ぼす。設計変更があった場合、変更された情報の授受や出力情報の再評価が、MSE プロセスの広い範囲にわたって必要になるため、設計期間は長期化する。

(3) 事例の蓄積と利用

熟練の設計者は、経験に基づき、過去の設計事例から適切な生産システムモデルの属性値や設計活

Fig. 5 Interface to search output data

動モデルを参照して設計を行う。過去の設計事例を、設計者間で共有することは容易でない。そのため、経験の浅い設計者は、試行錯誤が多くなり、設計期間は長期化する。

4.3 MSE プロセス支援ツールの基本機能 以上の MSE プロセスの分析より、MSE プロセス支援ツールには、まず、設計者が、MSE プロセスを十分に記述できる機能が必要である。さらに、設計変更に伴う EA の繰返しを短縮するためのサポート機能が必要である。すなわち、ある EA の出力情報の値を変更しなければいけない場合に、同一の EA の繰返しを減少させるためのサポート機能が必要である。

5. MSE プロセス支援ツールの開発

本研究では、オブジェクト指向言語の Smalltalk を用いて、MSE プロセス支援ツールのプロトタイプを開発した。この支援ツールは、MSE プロセスを記述する機能、および設計変更を支援する機能を持つ。

5.1 MSE プロセスの記述 図 4 に例示する入力インタフェースを用いて、3 節で定義した EA の ID 番号と名称、設計者名、設計の開始および終了時刻、入出力情報、および評価手法を記述する。

入力情報は、初期仕様または他の EA の出力情報である生産システムモデルである。本支援ツールは、複数の設計者がネットワーク上の異なる計算機を用いて同時かつ並列に MSE プロセスを記述することができる。図 5 に例示するインタフェースは、全ての EA の出力情報を検索し、表示する。設計者が、このインタ

フェースから選択した情報は、図4のインタフェースの入力情報へ自動的に挿入される。これにより、設計者間での情報授受を、迅速かつ正確に行うことができる。

評価手法として、設計者がルールやコメントを自由に記述することができる。また、出力情報の属性に関連する計算式をデータベースから選択することができる。支援ツールは、選択された計算式と入力情報を用いて自動的に計算を行い、その結果を図4のインタフェースの出力情報に表示する。

これらのEAの情報は全て、本支援ツールに保存される。これを全てのEAにおいて繰返すことで、MSEプロセスの全体を記述する。これにより、設計事例を蓄積し、それを他の設計者が参照できるようになる。

5.2 設計変更の支援 あるEAにおいて、評価手法の条件を満たす出力情報を生成できない場合、これまでのMSEプロセスにおいて決定した設計案の変更が必要である。設計変更においては、修正する情報を適切に選択することが求められるが、その選択基準としてはいくつかの基準を考えることができる。本研究では、設計変更による設計期間の長期化を抑制するために、入力情報として利用した他のEAの出力情報の中で、既に設計が終了したEAの出力情報に及ぼす影響が少ない情報を変更することが望ましいと考える。そこで、ここでは、各EAにおける情報の入出力関係に対してISM (Interpretive Structural Modeling)の手法⁽¹¹⁾を適用し、あるEAの出力情報の値の変更が影響を与える他のEAの出力情報の総数を計算することで、出力情報の値の変更がMSEプロセス全般にわたって及ぼす影響を求める。以下に、その手順を示す。

STEP1: 2値行列Aの作成

まず、MSEプロセスにおいて、EA間で授受される全ての情報にID番号を割り振り、それら全てをAの行と列に配置する。次に、EA毎に入力情報と出力情報を見て、入力情報のID番号がある行と、出力情報のID番号がある列の行列成分を1にする。すなわち、あるEAにおいて、情報iが入力情報、情報jが出力情報になっている場合、 $a_{ij} = 1$ とする。これを全てのEAに対して行い、2値行列Aを作成する。

STEP2: 隣接行列Bの作成

Aに単位行列Iを加えて、隣接行列Bを作成する。なお、行列の各要素の計算には、ブール演算を用いる。

STEP3: 可到達行列Tの作成

ブール演算に基づき、 $B^2, B^3, \dots$ とBを掛け合わせていくと、行列の要素の値が変化しなくなる。すなわち、 $B^{p-1} = B^p$ となる。その B^p を可到達行列Tと呼ぶ。

STEP4: 影響を受ける出力情報の総数rの計算

Tのi行j列目に1がある場合、i行目の情報の変更により、j列目の情報が影響を受けることを表す。i行目の情報の変更により影響を受ける情報の総数 r_i を以下の式で計算する。

$$r_i = a_{i1} + a_{i2} + \dots + a_{in} - 1 \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

例えば、評価手法の条件を満たすことができないEAが複数の入力情報を持つ場合には、この値 r_i が小さい入力情報から設計変更を検討すればよい。

図6(a)のインタフェースは、設計変更が影響を及ぼす出力情報の総数を計算した結果の一例を示す。図6(b)のインタフェースは、影響を受ける全ての出力情報を表示する。設計者は、これらを参照して、できるだけ影響の小さい情報から設計変更を検討することが可能になる。

5.3 ケーススタディ 図7に示すMSEプロセスの例に対して、この支援ツールを適用した。まず、5.1節で示したインタフェースを用いて、5つのEAにおける設計を行った。

5つ目のEA(EA-i.5)において、出力情報 X_{18} (編成効率)が評価手法の要求を満たすことができない。そこで、3つの入力情報に対して、5.2節で示した方法を適用し、設計変更が及ぼす影響を計算した。その結果、図6(a)に示すように、 X_{17} (作業者の最大作業時間)が他のEAの出力情報に及ぼす影響が最も小さいことがわかった。そこで、 X_{17} の値を決定したEA(EA-i.4)において、この値の変更を検討し、各作業者の作業工程の割当てを変更した。これにより、 X_{18} は評価手法の要求を満たすことができた。 X_{17} の変更は、 X_{18} 以外に影響を及ぼさないため、設計変更の作業を終了することができた。

6. 結 言

本研究は、実際のMSEプロセスを分析して、MSEプロセス支援ツールを開発した。以下に本研究の内容をまとめる。

(1) 自動車のオルタネータやスタータ等の回転機器部

(a) Total number of output data affected by re-design (b) List of all output data affected by re-design

Fig. 6 Effects of designed data

Fig. 7 MSE process for case study

品を製造する加工および組立工場の設計の進行と同時に、その MSE プロセスを記述し、分析した。

- (2) (1)の結果として、生産システムの設計期間の短縮化には、複数の設計者間での情報授受、設計変更による出力情報の値の変更、および事例の蓄積と利用における問題を解決することが必要であることが明らかとなった。
- (3) MSE プロセスを記述する機能と、設計変更を支援する機能を持つ MSE プロセス支援ツールのプロトタイプを開発し、簡単な例に適用した。設計変更の及ぼす影響が小さい情報から設計変更を検討することで、設計変更による設計期間の長期化を抑制できることを示した。

なお、4 節で示した MSE プロセスの記述は、(財)製造科学技術センターIMS センターの委託による IMS 国際共同研究プログラムの MISSION プロジェクト (IMS9910) の一部として行われた。

文 献

- (1) 窪田・田浦, 精密工学会誌, **62**, 3 (1996), 377-382.
- (2) 田浦・他 7 名, 精密工学会誌, **65**, 2 (1999), 272-278.
- (3) 岡田・荒井, 機論, **57**, 544 (1991), 283-288.
- (4) 仲・小野里・岩田, 機論, **63**, 616 (1997), 332-338.
- (5) 仲・他 3 名, 機論, **63**, 616 (1997), 339-345.
- (6) 菊地・岸浪, 精密工学会誌, **61**, 5 (1995), 712-716.
- (7) 菊地・岸浪, 精密工学会誌, **62**, 3 (1996), 388-392.
- (8) Mertins, K., et al, *Journal of Material Processing Technology*, **76** (1998), 82-87.
- (9) 小島・他 3 名, 機論, **62**, 597 (1996), 410-417.
- (10) 谷水・他 3 名, 機論, **63**, 615, C (1997), 4065-4070.
- (11) Warfield, J.N., *IEEE Trans., Sys., Man and Cyb.*, **3**, 5 (1973), 441.