組立工程における製造知識の可視化と伝承のための
品質状態の離散的な遷移モデル*古賀 毅^{*1}, 青山 和浩^{*1}Discrete State Change Model of Manufacturing Quality
to Aid Assembly Process DesignTsuyoshi KOGA^{*2} and Kazuhiro AOYAMA^{*2} Department of Systems Innovation, The University of Tokyo,
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

This paper proposes a representation model of the quality state change in an assembly process that can be used in a computer-aided process design system. In order to formalize the state change of the manufacturing quality in the assembly process, the functions, operations, and quality changes in the assembly process are represented as a network model that can simulate discrete events. This paper also develops a design method for the assembly process. The design method calculates the space of quality state change and outputs a better assembly process (better operations and better sequences) that can be used to obtain the intended quality state of the final product. A computational redesigning algorithm of the assembly process that considers the manufacturing quality is developed. The proposed method can be used to design an improved manufacturing process by simulating the quality state change. A prototype system for planning an assembly process is implemented and applied to the design of an auto-breaker assembly process. The result of the design example indicates that the proposed assembly process planning method outputs a better manufacturing scenario based on the simulation of the quality state change.

Key Words: Assembly System, Process Planning, Manufacturing System, Computer Integrated Manufacturing (CIM), Discrete Modeling, Petri-Net

1. 緒 言

1・1 製造知識管理の重要性と困難性 市場に流出する製品の不具合の中で、生産段階を原因とするものは、例えば自動車リコールにおいて全体の約4割を占める⁽²⁾という報告から理解できるように、重要であると言える。このため、製造工程における膨大なノウハウや知識をモデル化し、適切に表現・蓄積・共有・活用することで、品質不良の発生を予見し、回避・再発防止する過程を支援する手法が望まれている。

しかしながら、製造工程における不具合の発生過程は可視化しにくく、表現することが困難であると指摘される。なぜなら製造プロセスは、非常に多くの工程によって構成され、多様な作業を実行する作業員・設備が存在し、その中を素材から最終製品まで形態を変化させつつ製品が流れる、という非常に複雑なシステムとなるからである。現在、製造の現場では、原因系の洗い出しと影響把握を行う手法である PFMEA

(Process Failure Modes and Effects Analysis)⁽³⁾や、工程のフローに着目した QC 工程表 (Quality Control)⁽⁴⁾、近年では SSM (Stress Strength Model)⁽⁵⁾等といった手法が提案され、製造知識を各組織体で蓄積しているものの、利用の視点が不十分であるため、必要な際に参照されない場合があると指摘されている⁽⁶⁾。このため、製造工程自身を表現した上で、不具合に関わる情報を表現し、活用する手法が待望されている⁽⁶⁾。

1・2 離散的な認知モデルへの着眼と研究目的
本論文は、製造工程における不具合や欠陥の発生問題を、一貫した方法により記述し再利用するためには、製造工程自身を表現し、その上で品質や不具合に関わる情報を表現し、活用することが必要なのではないか?と考えた。しかしながら、製造工程は非常に複雑であり、不具合の発生問題を網羅的に記述することは困難である。本論文では、製造工程における品質問題を、正しく網羅的に表現可能な物理モデルを記述することは困難であるが、熟練の製造技術者の認知を「状態」という概念を用いて離散的に捉え、離散モデルによって網羅的に表現し、計算機上に記述することは、

* 原稿受付 2010年5月10日, 英文誌: Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 3, No. 4 (2009), pp. 378-389 (原稿受付 2009年6月12日)。

^{*1} 正員, 東京大学大学院工学系研究科(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)。

E-mail: koga@sys.t.u-tokyo.ac.jp

可能性があるのではないか、と考えた。なぜなら現在、現実として熟練の製造技術者は、膨大な製造知識を保有し有効に利用している、と考えられるからである。なぜ計算機が製造知識を運用することが困難であり、熟練の製造技術者が製造知識を運用できているのか、という要因の一つに、人間の頭脳が持つ認知の特性、つまり計算機より正確性は劣るものの、パターン認識は数段優れているという特性が考えられる。熟練の製造技術者は、この製造工程における様々な事象の離散的な認知を、有機的に組み合わせて活用しているのではないかと推測できる。

そこで本研究の目的として、熟練の製造技術者の認知に基づいて、製造工程における不具合の発生過程を表現可能なモデルを提案する。特に、製造工程を各作業レベルまで分解し、記述することを考える。分解して記述された各作業に対して、不具合に関連する品質情報を、離散的な状態の認知に基づいて記述し、それぞれを統合し結合することにより、網羅的に製造工程の全体を表現したモデル（製造工程モデルと呼ぶ）を構成する手法を提案する。また、記述された製造工程モデルを用いて、品質状態の遷移を計算することにより、製造不具合の発生過程をシミュレーションする手法を提案する。提案する手法を、配線用遮断器（ブレーカー）の製造ラインの組立工程に適用し、確かに工程検討の際に有効な知識が獲得できることを示す。

1・3 既存研究と本研究の位置づけ 製造不具合に関する情報を蓄積し、再利用するための手法として、失敗まんだらやオントロジーなどの知識そのものに着目したアプローチ^{(10) - (12)}が取り組まれ、広く成果を上げている。しかしながら、製造工程自身を表現することで不具合の発生過程をモデル化しよう、という試みは多くない。そこで本研究では、製造手順を導出する手法に対して、製造品質の情報を対応付け、新規に「不具合に関わる認知を、状態を用いて離散的にモデル化する」というアイデアを加えることで、製造工程における不具合の発生過程をモデル化し、シミュレーションすることを試みる。

製造工程自身を表現する手法として、組立対象の接合関係を記述したネットワーク情報から、製造手順を導出する手法^{(7) (8) (13)}を用いる。また、製品の仕様・品質目標と各工程を対応付ける手法として、QFD（Quality Function Diagram）を用いた手法⁽⁹⁾およびTQD（Total Quality Deployment）^{(14) (15)}が提案されているため、これに準拠する。離散的な対象の認知としては、Geroが提案する状態モデル⁽¹⁶⁾を参考に定義することを試みる。

以上に示した既存研究に基づき、本研究の目的を、以下1) - 3)に示すように詳細化する。

- 1) 製造不具合に関する知識を表現可能な、離散的な組立工程のモデルの提案（2章）
- 2) 状態の組み合わせと遷移の計算に基く、製造品質のシミュレーション手法の提案（3章）
- 3) プロトタイプ・システムの構築と、配線用遮断器の製造工程への適用による検証（4章）

なお、適用対象として選定したブレーカー製造ラインは、主に組立工程であるため、提案するモデルは組立工程を対象に検証する。加工工程を中心とする検証は、次報以降で論じる。

2. 製造不具合を表現可能な組立工程モデル

2・1 製造工程の認識 製造知識を管理し活用するためには、製造工程において製品が形成される過程自身を表現し、その上で不具合や品質不良の発生過程を記述することが必要である。ところで製造工程において製品が形成される過程は、どのようにモデル化できるのであろうか。筆者らは、製造工程において行われる作業によって、原材料に対して状態変化や加工が行われ、部品となり、部品が組み合わさり接合されることによって、部品同士が組み立てられ、製品が製造される、と認識する。この認識に基づき、製造の工程を、作業や工作機械によって行われた「作業」が、原材料や部品へと「作用」し、部品や接合部の「状態」を変化させ、最終的に原材料から製品が「つくられる」とモデル化する。

ここで、製造中の状態にある素材や部品および接合箇所を、製造対象と呼ぶ。製造対象は、品質状態を持つ。品質状態は、工程における作業（工程作業と呼ぶ）による作用を受けて変化する、と記述する。つまり製造工程を、作業レベルで分解し、それぞれの作業を以下に示す3つの要素に分解し、モデル化する。第一に、作業を行う主体、第二に、品質を形成する手段である作業、第三に、作業の目的である製造対象の品質状態の遷移、である。製造工程の全体は、多様な工程作業が繋がりがあって構成されると捉える。

2・2 工程作業のモデル 前項の整理に基づいて、工程作業のモデルを、図1に示すように提案する。工程作業（図1 Operation）が、製造対象（図1 Entity in Process）に対して作用することにより、品質状態の遷移（図1 Quality State Change）が発生し、品質状態（図1 Quality State）が形成される、とモデル化する。製造工程は、製造対象のモデル（図1中[A]部）、工程作業のモデル（図1中[B]部）、および製造対象と工程

Fig. 1 Discrete state change model of manufacturing process

作業の相互作用のモデル（図1中[C]部）から構成される。工程作業が手段となり、製造工程の機能である品質状態の形成が実現される。また、工程作業は、入力となる中間部品（Input Part）と、出力となる中間部品（Output Part）によって、前工程・後工程の工程作業と繋がるものとする。

2・3 製造対象の品質状態のモデル 製造対象は、部品やサブアセンブリを表す製品要素（Entity Object in Process）と、組み立てにおいて結合される接合部（Product Interface Object in Process）のネットワークで表現する。製品要素と接合部は、ともに品質状態を持ち、作業の影響を受けて、状態を変化させる。ここで品質状態とは、正常な状態と異常な（不具合と認識される）状態を含めて、製造工程において認知されている製造対象の状態として、定義する。品質状態をどのように獲得し、網羅性を担保するかは、熟練作業員へのインタビューや社内文書のマイニング等という手段が、候補として考えられる。本論文では、熟練作業員へのインタビューによって、品質状態の情報を網羅的に獲得することが可能である、という立場を取る。

加工工程では、主に製品要素の状態が変化するため、工程作業は製品要素に作用すると言える。一方で組立工程では、主に接合部の状態が変化するため、工程作業は接合部に作用すると言える。製品要素と接合部は、作りこまれるべき属性（値）を持ち、製造が終了した段階の品質状態によって、属性が決定される。

2・4 製造工程のモデル 製造工程は、工程作業を一連の順序で適用する過程として定義する。製造工程のモデルの詳細な要素の定義を、表1に表す。

作業のプロセスがどこまで実行されているか、という進捗に関する情報を、図1における品質トークン（Quality Token）、および製造トークン（Production Token）を用いて表す。製造トークンは、工程作業の進

捗を表し、工程作業が終了するたびに、作業の出力となる中間部品（Output Part）へと移動する。

品質トークンは、所在する品質状態によって、製造トークンが所在する工程における、製造対象の品質状態を表現する。品質トークンは、工程作業によって製造対象が作用を受けるたびに移動する。

工程作業は、処理主体である作業員や設備の情報を持つ。品質状態を変化させるために必要な作業員や設

Table 1 Description and definition of PN elements

Symbol	Name	Definition
	Product Entity Object in Process (PEP)	Component and part to be manufactured
	Product Interface Object in Process (PIP)	Assembling connection between PEP
	Attribute in Process	Attribute of entities and interfaces generated by production process
	Quality State	Quality state of entities and interfaces (Place object)
	Quality State Change	Change of quality state (Transition object)
	Operation	Work of worker and machine that can operate product (Transition object)
	Condition	Attribute of worker and machine on operation
	Intermediate Part	Intermediate part or assembly (Place object)
	Quality Token	Qualitl state of product for simulation (Token object)
	Production Token	Progression of production process for simulation (Token object)

備の属性を、作業条件 (Condition) として記述する。

2・5 製造工程における不具合のモデル

製造工程における不具合や欠陥・品質不良 (以下、製造不具合とする) の発生を、望まれない品質状態 (不具合状態とする) への遷移として解釈し、製造工程のモデルを用いて記述する。製造不具合の発生過程のモデルを、図2に示す。例題として、自動車の車体を構成する部品 (Hood Panel) の製造工程を用いている。

製造工程において、不具合状態が発生する要因として、以下に示す2つの要因が考えられる。

- 1) 製造対象に起因する不具合
- 2) 工程作業に起因する不具合

1番目に示す製造対象に起因する不具合とは、例えば原材料や添加剤の不備、あるいは前工程で発生した製造対象の品質不良などといったように、製造対象の内部に起因して発生する不具合である。図2を用いて説明すると、Hood Panelに材料の不揃い (図2 a1) が存在すると、プレス加工 (図2 a2) を経て、製造不具合である「しわ」が発生する (図2 a3) となる。

2番目に示す工程作業に起因する不具合とは、設備の動作不良や作業者のミスといった、工程作業の条件や順序に起因して発生する不具合である。図2を用いて説明すると、原材料が正しい場合 (図2 b1) でも、間違った工程作業 (図2 b2) を行うことで、「しわ」が発生する (図2 b3) となる。

3. 組立シミュレーションに基づく工程計画支援

3・1 組立プロセスのシミュレーションと計画

本章では、第二章で述べた製造工程のモデルを用いて、品質状態の遷移をシミュレーションする方法を述べる。

また、シミュレーションの結果に基づき、工程計画を支援する手法を述べる。

製造工程の計画のためには、製造不具合の発生を考慮して、工程作業の選定と順序の決定を行わなければならない。そのために、シミュレーションにより得られる品質状態の遷移の情報は、有効な情報となる。図3は、以下1)～3)に示す3つのステップから成る製造工程のモデルを用いたシミュレーション手法と、工程計画の支援手法を示している。

- 1) 製造工程の統合モデルの生成
- 2) 品質状態の遷移シミュレーション
- 3) 工程作業の選定と順序の決定

図3に示すポンプアセンブリ (Pump ASSY) は、バルブ (Valve) およびポンプ (Pump) から構成される。上位のポンプ ASSY の品質状態の遷移は、下位の機器であるバルブ (Valve) とポンプ (Pump) の品質状態の組み合わせにより表現される。つまり図3のZ軸方向は、製造工程の階層を表す。以下の節では、1)～3)に該当する情報処理の詳細を述べる。

3・2 モデリングとシミュレーションの情報処理

製造工程のモデリングおよびシミュレーションの詳細な情報処理手順を示す。前節の1)に対してSTEP1およびSTEP2が、2)に対してSTEP3が、3)に対してSTEP4およびSTEP5がそれぞれ該当する。

STEP1 [a] 製造対象の定義 製造対象として、実体および構成要素を定義する。図3では、Pump ASSY, Valve および Pump を定義することに相当する。

STEP1 [b] 可能な工程作業のリストアップ 工場の設備や作業者によって、可能となる工程作業をリストアップする。図3では、3つの工程作業「オイルの封入

Fig. 2 Manufacturing process model of failure quality

Fig. 3 Design method of the assembly process

(fill oil)」「エアを抜く (bleed air)」「バルブを閉める (close)」を定義することに相当する。

STEP1 [C] 想定可能な製造不具合の洗い出し それぞれの工程作業や製造対象に関連する、製造不具合をリストアップし、製造工程モデルに定義する。図3では、オイルの封入に伴いエアが混入する (Air Containing) という品質状態を定義することに相当する。
STEP2 製造工程モデルの定義 STEP1 で定義した各工程作業と品質状態を、ひとつのモデルとして繋ぐことによって、製造工程モデル (図3中1)) を定義する。

STEP3 品質状態の遷移のシミュレーション 製造工程モデルから、品質状態の遷移を計算し、シミュレー

ションする。計算を実行するために、ペトリネットに対する可達木 (Reachable Tree) 解析⁽¹⁷⁾を用いる。ペトリネットと可達木の関係を、図4に整理する。製造工程モデルにおける状態を、ペトリネットのプレース (Place) と解釈し、状態遷移をトランジション (Transition) と解釈すれば、図4に示す可達木は、製造工程における品質状態のシミュレーション結果を表す。可達木における Marking は、製造工程がある時刻におかれた状態を意味する。また、可達木における Firing Sequence は、製造工程のある時刻・状態において可能な工程作業と、品質状態の変化を表す。

ペトリネットでは、トランジションの発火条件を、様々なアークを用いて表現する。オリジナルなペトリ

Fig. 4 Petri net, reachable tree, and arc type

ネットでは、トランジションは、ノーマルアーク (a) で繋がれたすべての入力プレースにトークンが存在するとき、発火可能であると判定する。本研究では、更に発火の件を詳細に記述するため、3種のアーク：発火の必要条件を表すテスト・アーク (図4(b))、発火の同期を表す同期アーク (図4(c))、および発火の許可を表す許可同期アーク (図4(d))を導入する。

STEP4 製造シナリオの指定 製造シミュレーションの結果、図3中2)に示すような、品質状態の遷移シナリオが得られる。様々な品質状態が形成されるが、理想的と判断される最終品質状態 (図4[A])と、そこに至るプロセス (図4[B])を選択することで、期待する製造シナリオを指定する。

STEP5 工程作業の計画結果の出力 指定された製造シナリオは、可達木上のひとつの品質状態の遷移パスを表す。この遷移パスに存在する Firing Sequence の情報は、実施すべき工程作業の種類の情報、および順序の情報を表している。そこで、工程作業の種類と順序を、計画案として設計者に提示する (図3中3))。

4. 実装と配線用遮断機 (ブレーカー) への適用

4.1 プロトタイプ・システムの実装と例題

提案したモデルとアルゴリズムを検証するため、オブジェクト指向言語 Smalltalk を用いて実装し、ブレーカーの構成要素である接点アセンブリ (Contact ASSY) の製造工程へ適用した。接点アセンブリは、3つの部品 (接点: Contact, アークホーン: Arc Hone, 接点板: Contact Plate) から構成される。接点アセンブリの形状と配置・構成を、図5に示す。接点アセンブリは、ブレーカーを構成するひとつのコンポーネントであり、電流の導電と切断を行う重要部位である。なお製造工程における品質状態と遷移の情報は、製造工程のエンジニアに対してインタビューを実施することで抽出した。

4.2 ブレーカーへの適用結果

接点アセンブリの製造工程に対して、3.2節に示すSTEP1~5を適用することで得られる結果を、図6~9に示す。

STEP1 [a] 製造対象の定義 製造対象として、接点アセンブリを構成する3つの要素である、接点・接点板・

Fig. 5 Decomposition of product structure (example of STEP 1 [a])

Fig. 6 Listing feasible operations (example of STEP 1 [b])

アークホーンの情報定義する。

STEP1 [b] 可能な工程作業のリストアップ 可能な工程作業を、以下(1)～(3)に示すように定義する(図6)。

(1)ロウ付け(Brazing) 接点と接点板は、ロウ付けによって接続することができる。工程作業としてロウ付け(braze)を定義し、ロウ付けの実施によって接合部(PIP)の状態が未接合状態(Disconnected)から接合された状態(Brazed)に変化する、と記述する。

(2)カシメ(Calk) 接点板とアークホーンは、カシメによって取り付けることができる。ロウ付けと同様、カシメ(caulk)という工程作業によって接合部が接合される、と記述する。

(3)成型プレス(Form Press) 接点板を成型プレス加工することによって、形状を成型することができる。成型プレスという工程作業により、接点板の状態は切り出し後(Cutted)から成型済み(Shape Formed)に変化する、と記述する。

STEP1 [C] 想定可能な製造不具合の洗い出し 工程作業に付随する製造不具合に関連する状態遷移を、以下(4)～(6)に示すように定義する(図7)。

(4)ロウ付けに伴う反り ロウ付けの際に、熱によって接点板が反る場合がある。工程作業「ロウ付け(braze)」に付随して、接点板が沿った状態(Curved)が発生する、という状態遷移で記述する。

(5)カシメ時の取り付け角度ずれ 接点板とアークホーンを取り付け済みの状態で成型プレスを行うと、取り付け角度がずれる場合がある。成型プレスの際に、接合部がカシメ済み(Caulked)の状態の際に、取り付け角度ずれ(Mis-aligned)が発生する、と記述する。

(6)成型プレスによるそりの矯正 接点板が反っていても、成型プレス加工を行うことで矯正される。成型加工という工程作業によって、接点板の反りという状態を、消滅させることができる、と記述する。

STEP2 製造工程モデルの定義 図8に示すように、STEP1で入力された製造対象の構造(図8(A))、工程作業(図8(B))および製造不具合(図8(C))を相互に接続し、組み立てることで、製造工程の全体を表すモデル(図8(D))を定義する。

STEP3 品質状態の遷移のシミュレーション STEP2で得られた製造工程の全体を表すモデルに対して、可達木解析を適用することにより、計算機が自動的にシミュレーションを行い、品質状態の遷移を出力する。図9は、図8(D)に対して可達木解析を行った結果を表す。最上段のノードは製造開始の状態を表すマーキング、最下段のノードは製造が終了した状態を表すマーキングを意味する。また、上流から下流に至るパスは、

製造のシナリオを意味する。太線で囲まれたノードは、製造不具合と判断される品質を含む状態を表している。

STEP4 製造シナリオの指定 図9に示す可達木における製造シナリオを選択(例として、遷移パス(a)を選択)し、製造シナリオとして指定する。

STEP5 工程作業の計画結果の出力 システムは、指定された製造シナリオに対応する工程作業の順序(図10(a))を出力する。図10(a)は、以下の手順によって製造するシナリオを意味している。

接点台に対し、接点[1]をロウ付け[2]し、成型プレス[3]を行った後、アークホーンをカシメによって接続する[4]

4・3 考察 図10(a)に示した製造工程は、計算機が設計者に対して提案した、品質不良を回避するための工程作業の順序を意味している。一方で、本手法を用いない場合に想定される悪い製造工程を、図9(b)および図10(b)に示す。悪い製造工程とは、品質不良の発生が懸念される工程であり、具体的には以下の手順を表す。悪い製造工程では、ロウ付けの熱による接点板の反りが、最終工程に至り、NG品質となっていることが読み取れる。

接点台に対し、成型プレス[2]を行った後、接点をロウ付け[3]し、アークホーンをカシメによって接続する[4]

図10(b)に示した製造不具合は、図10(a)に示す理想的な製造工程に対して、2つの工程作業(図10中のロウ付け[A]と成型プレス[B])の順序を入れ替えることで発生する。成型プレス加工が、ロウ付けの熱による接点板の反りを回復していることに気づかずに、工程を入れ替えてしまうことで、潜在していた不良が表出化してしまった一例である。なぜロウ付け工程が成型プレス加工の前になければならないか、という設計意図を、計算機上に表現していると言える。得られた結果は、例えばコストダウンなどの要求によって工程を変更する際に、どのような品質不良が発生するか予測できない、という問題に対して、有効な情報を提供できる可能性を示していると考察できる。

5. おわりに

5・1 結論 本論文では、製造工程における知識の蓄積と伝承という課題に対し、不具合や品質情報の離散的な状態の記述という概念を導入することで、熟練の製造エンジニアの認知を計算機上で表現する製造工程のモデルを新しく提案した。提案した手法は、製造工程における品質状態の遷移を計算し、製造不具合の発生過程のシミュレーションを可能とするアルゴリズムを有している。

Fig. 7 Listing possible quality-related causalities (example of Step 1 [c])

Fig. 8 Calculation of integrated model of product-process-quality (example of Step 2)

Fig. 9 Calculation and selection of space of quality state (example of steps 3 and 4)

Fig. 10 Output manufacturing process (example of STEP 5)

提案する手法を配線用遮断機（ブレーカー）の製造工程に適用した結果、確かに品質状態の遷移のシミュレーション結果を用いれば、工程を変更した際に、発生が懸念される製造不具合の発生の可能性を指摘し、さらに発生を回避する製造工程を示唆することが可能であることが検証された。得られた結果は、製造知識の管理において、品質情報を離散的に認知し、状態をモデルとして記述することは有効なのではないか、という仮説を支持するため、提案する手法は有効であると結論した。

5・2 展望 複雑で連続的な現実世界を、離散的な状態の認識に置き換えるプロセスは、人間の脳にとっては得意な過程でありながら、コンピュータで実現するには困難を伴うことが知られている。本研究では、熟練の製造技術者が持っている認知を、離散的な状態認識としてインタビューにより取り出すことが可能である、という立場を取った。今後はインタビューのみに頼るのではなく、例えば膨大に蓄積されているドキュメント類から、ニューラルネットワークやベイズ分類、機械学習などといった手法により抽出することが考えられる。その際に、本研究で提案する製造工程モデルを用いれば、必要な状態情報の種類と関連を明確にすることによって、より高速かつ精度よく状態を抽出する可能性が拓けるのではないかと展望する。

謝 辞

配線用遮断機の事例は、富士電機システムズ株式会社との共同研究により得られたものである。黒谷 憲一氏、王 喜宏氏、飯野 光俊氏、水谷 博成氏、中村 光宏氏、王 喜宏氏、伊藤 秀之氏に頂いた、度重なる会議における実りある議論と貴重なコメントに感謝する。

文 献

- (1) Tsuyoshi KOGA and Kazuhiro AOYAMA, Discrete State Change Model of Manufacturing Quality to Aid Assembly Process Design, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol.3, No.4 (2009), pp.378-389.
- (2) Land Infrastructure and Transportation Ministry, 2002, "The result of analysis on system of automotive recalls," http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha03/09/090801_2/01.pdf (in Japanese).
- (3) Hanamura, K. and Hirose, Y., Obviation Activity of Quality Problem of Processes Corresponding to Production Innovation by Making Use of a Production Process FMEA and FTA (second report) The Case of Production Innovation in Casting Process, *Production management*, Vol.14(1), No. 27 (2007), pp.103-108.
- (4) Iwasaki, H., QC Process Chart (TQM Tool Box)(<Feature>[TQM Tool Box]), *Journal of the Japanese Society for Quality Control*, Vol.32, No.4 (2007), p.312.
- (5) Tamura, Y. and Iizuka, Y., A Study on the Method to Manage Design Knowledge on Failures—Construction of the Knowledge Structure of a Causal Chain of Failures, *The Japanese Society for Quality Control* (in Japanese), Vol.32, No.1 (2002), pp.13-135.
- (6) Fuse, M., Knowledge Base and Improvement of Production Technology, *Journal of The Japan Society for Precision Engineering* (in Japanese), Vol.68, No.4 (2002), pp.507-510.
- (7) Shalaby, M. and Saitou, K., Design for Disassembly with High-Stiffness Heat-Reversible Locator-Snap Systems, *Transactions of ASME, Journal of Mechanical Design*, Vol.130, No.16 (2008), pp.21701 1-7.
- (8) Lyu, N. and Saitou, K., Decomposition-Based Assembly Synthesis of Space Frame Structures using Joint Library, *Transactions of ASME, Journal of Mechanical Design*, Vol.128, No.1(2006), pp.57-65.
- (9) Choe, K., Kondoh, S., Umeda, Y., Togawa, H., Terao, T. and Huse, M., Development of QFD Based Redesign Support System for Production System, *Design & Systems Conference 2002*, No.13 (2002), pp.95-98.
- (10) Vegte, W. et al., Coping with Unintended Behavior of Users and Products: Ontological Modelling of Product Functionality and Use, *Proceedings of the ASME 2004 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, DETC2004-57720 (2004), (CD-ROM).
- (11) Iino, K. and Hatamura, Y., Scenario Expression for Characterizing Failure Cases, *Proceedings of the ASME 2003 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, DETC2003-48789 (2003), (CD-ROM).
- (12) Iino, K. and Hatamura, Y., A Conceptual Design Tool with Error Warning, *Proceedings of ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, DETC2005-84541 (2005), (CD-ROM).
- (13) Mantripragada, R., *Assembly Oriented Design: Concepts, Algorithms and Computational Tools*, Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA.
- (14) Clausing, D., *Total Quality Development: A Step-by-Step Guide to World Class Concurrent Engineering*, (1984), New York: ASME Press.
- (15) Chao, L. and Ishii, K., Design Process Error-Proofing: Project Quality Function Deployment, *Proceedings of the ASME 2004 IDETC/CIE*, 57720 (2004), (CD-ROM).
- (16) Qian, L. and Gero, J. S., Function-Behaviour-Structure Paths and Their Role in Analogy-based Design, *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, Vol.10 (1996), pp.289-312.
- (17) Murata, T., Petri Nets: Properties, Analysis and Applications, *Proceedings of the IEEE*, Vol.77, No.4 (1989), p.541.