

設計・生産活動のモデリングに基づく モデル駆動型の統合 DfX(Design for X)支援

Model Driven Integrated Design for X based on Product and Production Modeling

古賀 毅¹ 丹羽 隆¹ 青山 和浩¹

Tsuyoshi Koga¹, Takashi Niwa¹, and Kazuhiro Aoyama¹

¹ 東京大学大学院 工学系研究科 システム創成学専攻

¹Dept. of Systems Innovation, School of Engineering, The Univ. of Tokyo

Abstract: Recent years, the product development process in the manufacturing industry is becoming more and more complex and multi-domain, because the product data is growing and parallel international process is accelerated. A product and project model play a important role in managing very complex product such as a vehicle that has more than one hundred ECUs (Electric Control Device). In complex and cross-domain product development process, the impact analysis of the design change is very difficult because a design change in some system component could have adverse effects on another system component. Because of such difficulties in the design changes in the complex product development, a strategic decision across whole product development process and DfX (Design for X) strategies is very difficult to achieve. Hence this paper proposes a model-driven integrated DfX system in order to solve the difficulties in complex and cross-functional product development process. Integrated product and production model which contribute to integrate total engineering life-cycle from design stage to the production stage is proposed. The integrated product design and production model enables engineers to share, access, and visualize the function, behavior and structure of the product and production process from early design stage to the detailed design stage.

1. はじめに

1.1. 複雑化する製品開発における課題

製造業では近年、製造業の国際多拠点開発や、100個を越える ECU (Electronic Control Unit) を搭載する自動車の登場に象徴されるように、製品や開発プロセスの複雑化・多領域化が顕著である。設計の対象が、モノから複雑なシステムへと変容しているため、単独で対象とする問題を解決しようとしても、異なる別の問題を誘発してしまうといった状況が多々発生している。製品開発プロセスという視点からも、グローバル化やモジュール化・分業化、必要ソフトウェアの大規模化により、エンジニアが開発全体の情報を把握することが難しくなりつつあり、領域や組織を横断する情報を容易に変更できない・すり合わせが困難、という問題が発生している。この結果、モジュール化に代表されるような設計プロセス全体に関わる開発ロジックや DfX(Design for X) 戦略を反映させることが困難、といった課題が指摘される。

これらはシステムの問題であると認識できるため、システム思考や、システム設計の重要性が高まって

いる。そこで、製品や生産システムを表現し、記述可能なモデルを提案することで、設計から生産・リサイクル、解体・廃棄に至る全体プロセス戦略の実現のための意思決定を支援することが求められている。その上で、エンジニアリング・ライフサイクルにおいて、価値向上やコストダウン、環境適合、安全安心の実現などといったトータルな戦略を実現するための、製品開発における情報の可視化と意思決定の支援手法が必要とされている。

1.2. 本研究の目的

以上の背景から、製品開発の流れをモデル化し、製品のシステムとしての機能・挙動・構造情報を記述・共有し、検証による手戻り低減などに繋げる、モデル駆動型のシステムズ・エンジニアリング手法を構築する。複雑化する製品や企業組織をシステムとして捉え、開発の可能な限り上流工程から明示的に記述・共有できるモデリングを行う。開発したモデリング・ツールを用いて、情報を一元管理し、多段階で整合性を確保することで、網羅性の確認や、上流からの机上での機能検証による手戻り低減などに繋げる。

さらに、開発ロジックやDfX(Design for X)戦略の反映といった課題を「システムとして」解決する仕組みを実現するため、モデル駆動型の統合DfX支援システムの開発を提案する。設計・生産から廃棄に至る一連のエンジニアリング・ライフサイクルをモデル化し、統合モデルを中核としてモデル検証を行いながら開発を進めることで、「ものづくりの高度化」を実現することを、本研究の目的とする。

2. モデル駆動型の統合DfXコンセプト

2.1 設計・生産活動のモデリング

設計においては、製品システムがどのような目的で設計され、どのように振舞って目的を達成するか、という設計意図の情報を詳細設計や生産部署へと伝達することは、非常に重要である。しかしながら設計意図の情報は、生産の段階で失われやすいため、不必要な部位の品質を作りこんでしまう、あるいは必要な品質を十分なコストをかけずに生産してしまう、という事態が発生しており、例えば自動車リコールなどに繋がっている。また逆に、生産工程でどのような作業が行われどのような品質が形成していくのかといった情報が、設計時点で十分考慮できなかったため、素晴らしい製品となるはずの設計図面は完成したものの、実際には作れない構造であったり、品質がばらつきコスト的に見合わないといった設計ミスが発生するケースが多々存在する。

このため、設計と生産において用いられる情報を一元管理し、多段階で整合性をはかり、多くのエンジニアが開発において協調することを支援するシステムが有効である。そこで、このような設計者と生産担当者が目線のあった対話を支援するべく、設

計・生産情報の多段階写像を表現・記述するシステムを構築した。その概要図を、Fig.1に示す。このシステムを用いることで、製品を構成する各要素がどのような振る舞いや機能を持つのか、といった製品情報を生産担当に伝え、その情報をもとに生産で決めるべきパラメータを決定することが可能となる。その結果、設計と生産におけるエンジニア間の情報のキャッチボール、意思疎通を、開発の各段階で行いながら、製品の情報も生産の情報も次第に無理なく確定していくプロセスを支援できると言える。

特に設計の変更や、生産工程の改変を行った際に、このようなエンジニア全員で設計意図や根拠の情報を共有できる枠組みは、威力を発揮する。このシステムを用いることによって、製品や製造工程自体をモデルとして明示的に表現し、品質や不具合などのノウハウに関わる情報を共有することで、情報の水平展開を加速し、連携を支援することが可能になると言える^[1,2]。

2.2 モデル駆動型の統合DfX(Design for X)

DfXとは、「生産性を考えた設計(Design for Manufacturing)」「分解・リサイクル性を考えた設計(Design for Disassembling)」に代表されるように、設計段階で検討しなければならない開発思想・ロジックを、開発上流から製品定義に陽に定義していく手法を意味する。ここで注意すべき点は、製品が満足すべきロジックに当たるXの部分は、多領域となることである。製品開発が複雑化・多領域化すると、専門化が進み領域をまたぐ変更が困難となり、その結果、多様な開発ロジックであるXの視点が増加するにつれ、製品定義へと織り込むことが困難になる。

そこで、マスター・モデルの考え方が必要となる。プロダクトやプロセスの情報をマスターとして定義

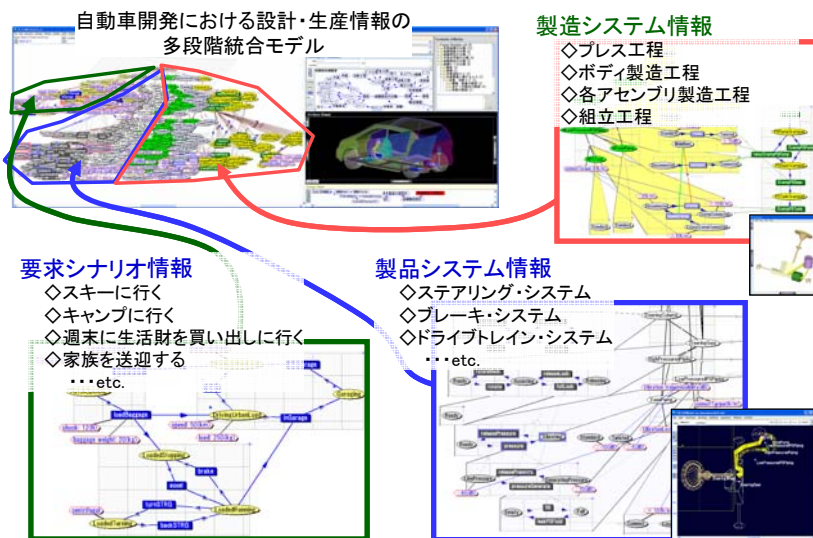


Fig.1 設計・生産情報の多段階統合モデル (自動車開発の例)

し、中核として概念設計から基本設計、詳細設計へと使いまわすことで、開発を繋げ、多様な設計ロジックを俯瞰的に理解し、各分野や専門領域での決定事項を他部署で使えることが実現する。

そこで、製品情報および工程情報を多段階的に表現するモデルを中核として、設計から生産、解体までの一連のプロセスを検討し、支援可能な、統合 DfX システムを構築した。統合 DfX システムの概要を、Fig.2 に示す。概念から詳細まで、ライトなモデルからヘビーなモデルへと、製品開発の流れに沿って情報をスパイラル的に成長させることによって、全体プロセス戦略を明確に製品定義へと織り込むためのアーキテクトの試行錯誤を支援し、エンジニアの意思決定に繋げる。さらに、設計の根拠や失敗の情報を、設計案の分岐や不具合情報とともに記述蓄積することによって、失敗ができるエンジニアリング環境を実現している。設計と生産のモデルを中核に、統合を実現したシステムを以下①～⑥に示す。

- ①製品挙動の設計支援
- ②繋がり情報を利用した設計プロセスガイド
- ③モジュール化およびライフサイクル設計支援
- ④生産プロセス設計支援
- ⑤工場安全情報システム
- ⑥大規模構造物の解体支援

3. マスターモデルを中核とした DfX

3.1 フロント・ローディングを可能とする多段階設計支援

限りない顧客の要求への同期は、製造業の使命である。また、製品の製品設計の起点は、顧客の要求把握である。製品の競争力を確保するためには、要求仕様を満足する設計解を得るだけでは十分でなく、製品の使い方使われ方をも含めて、顧客へ提案していく設計が求められる。



Fig.2 モデル駆動型の統合 DfX(Design for X)

設計とは機能空間の属性（実体）空間への写像であると整理され、設計プロセスは、設計者が要求仕様を認識し、解概念へと変換することと定義された^[3,4]。それは、機能空間から属性空間への写像行為であるということができる。

一方、顧客はその製品自体を求めているのではなく、製品によって何が可能になるのか、何がなされるかを求めているという部分が存在する。そのため設計者は、単に仕様を満たす製品を作るというだけでなく、製品が使われる状況を想定し、これを展開することによって設計する行為を行っている。このような設計活動は、仕様から属性への写像だけではモデル化することができない。そこで、「製品挙動の設計」の概念を導入することによって、目的とする製品挙動を満たすような設計案を創出する手法が必要であると言える。

そこで、製品の使用状況を想定し記述しながら製品挙動を設計し、できるだけ無駄な動作が少なく簡単な機構で実現する製品構造へと、多段階的に詳細

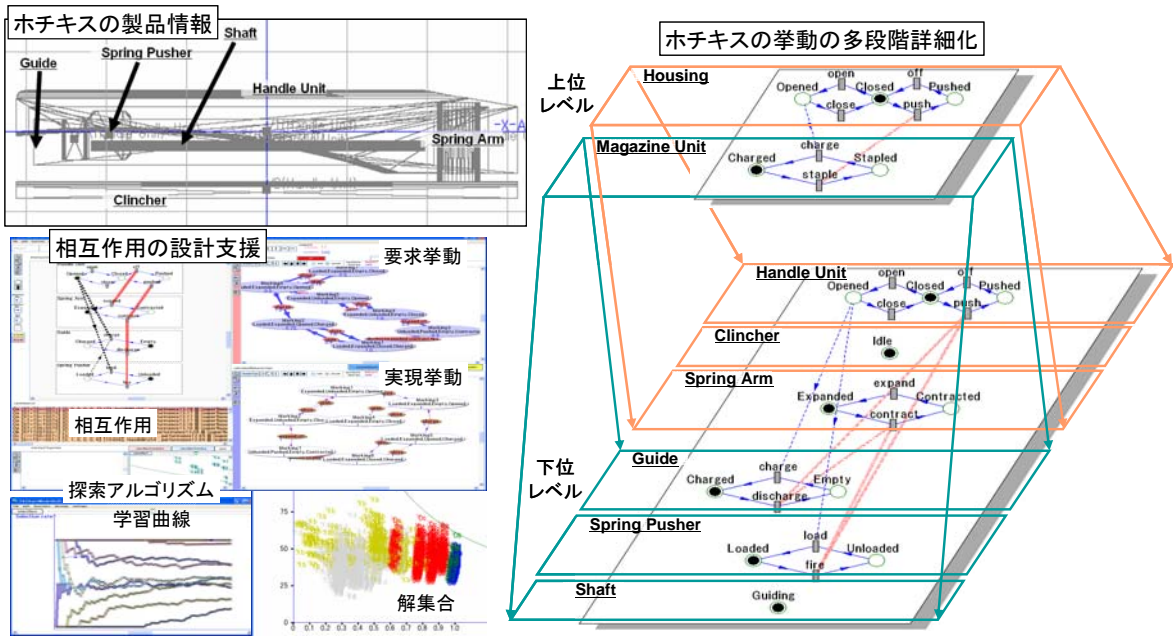


Fig.3 製品システム挙動の多段階設計手法

化することで設計を支援する手法の構築を行った。このためには、概略から詳細まで、システムレベル・コンポーネントレベルの挙動の整合性を確保しながら設計を進める手法を構築した。さらに、意図した製品挙動を実現する製品構造を論理的に求める、相互作用の解探索の支援を実装した。プロトタイプ・システムを実装し、ホチキスの設計へと適用した結果を、Fig.3 に示す。要求として、「綴じる・芯の交換が容易にできる」を使用シナリオとして表現し入力すると、ホチキス内部のスプリングやガイド・プッシャが連携して動作することにより、機能を実現することを確認しながら、製品情報を定義できることを示した。

3.2 設計プロセスガイド

製品設計において、設計手順を適切にガイドすることは重要である。時として設計順序の違いによって結果が変わるなど、設計者はどこから設計を開始すれば良いのか悩む場合が多いためである。QFD (Quality Function Deployment) などの適用からも理解できるように、設計手順は、重要な要求項目を出発点とし、影響が大きい製品仕様を正確にコントロールすることができるように、決定されることが望

ましい。しかしながら、この決定過程は暗黙的であり、多くの場合、経験や勘に頼って行われる。現在、スケジューラなどを用いた設計の時間的管理は積極的に行われているが、設計手順に大きく関与する製品内部の制約を考慮できないため、大きな設計の手戻りが発生したり、部品の設計を積み重ねた結果、既存の技術では製品の要求をどうしても満足できないような困難な状況に行き詰ったりする。

そこで、設計者には見難い設計の手順を、製品全体を見渡してガイドすることが可能な、設計プロセスのガイド・システムを構築した^[5]。このシステムを実現するためには、設計プロセスを決定支援する

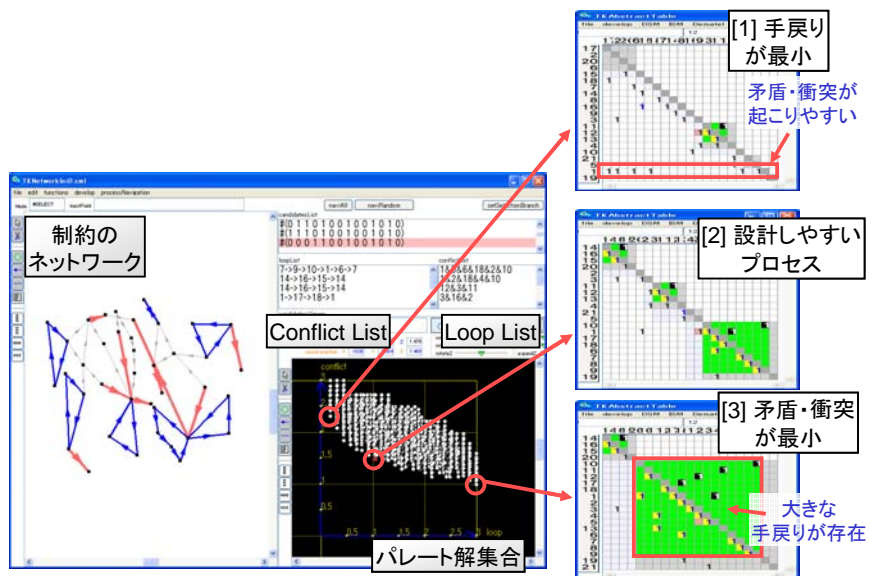


Fig.4 制約のネットワークを用いた設計プロセスガイドシステム

ために必要な情報を計算機上で管理し、適切に設計者へと提供することが求められる。

設計における手戻りやパラメータの相互参照などといったループと、衝突や矛盾などのコンフリクトは、互いにトレードオフの関係にあると認識できる。提案システムは、トレードオフに基づいて、双方が高いレベルでバランスが取れた、「設計しやすい」設計プロセスを提案する手法を計算する。つまり、設計者の効率的な試行錯誤を支援するために、設計しやすい設計プロセスをガイドする仕組みを構築し、設計プロセスを適切にナビゲーションすることによって、設計手戻りのリスクや解決困難な設計問題の出現をシステムティックに回避することを可能とする、設計プロセスのガイドを行う。

Fig.4 は、ある製品の制約ネットワークに対して、ループとコンフリクトのバランスが取れた、設計しやすいプロセスを取り出した結果 (Fig.4 中[2]) を表している。Fig.4 中[1]に示すループ最小案は、ループは最小であるが、設計の最下流 (設計が 95% 終了した段階) で、多重度が大きい (困難な) コンフリクトを解決しなければならない設計プロセス案である。

Fig.4 中[3]に示すコンフリクト最小案は、コンフリクトが最小であるが、大きなループが存在するため、終了直前まで設計の初期に立ち戻るリスクを抱えたまま設計を行わなければならないプロセス案である。Fig.4 中[2]に示す設計プロセスは、困難なコンフリクトやループが存在しないことが、計画段階で保障されており、設計しやすいと考えられるプロセス案を意味している。

3.3 モジュラー設計

多様なユーザーニーズに対しきめ細かくフレキシブルに対応するためには、ニッチな市場からメインストリームまで対応可能な多種多様な製品群を、リーズナブルな価格で市場へと投入することが必要である。一般的には、開発や製造のコストは、製品群の種類 (バラエティ) の増加に比例して増加するため、双方の両立は難しい。バラエティとコストを両立するためには、展開する製品群において、共通して用いられるモジュールを設計することが有効である。共通モジュールを決定することで、開発や生産のコストを抑えながら、各製品に固有の部分の独自

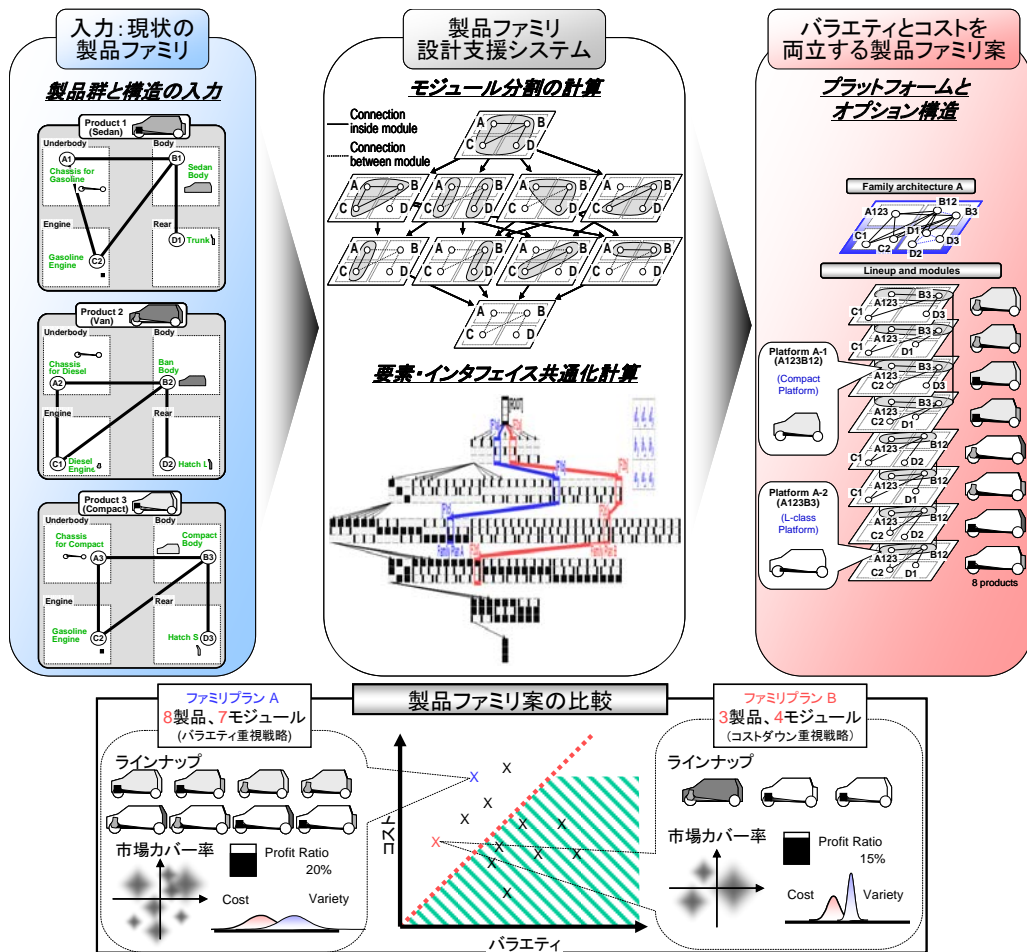


Fig.5 製品ファミリー展開におけるモジュラー構造の設計の概要

に開発し、製品の多様性を確保することが可能となる。

このような多様な製品を市場へと投入する製品ファミリー展開において、製品間で共用しコストダウンや信頼性向上を担う共通モジュール部分と、製品毎の差別化を担うオプション部分を切り分ける構造を決定することは、重要な設計行為であると言える。なぜなら、切り分けの構造によって、共通して用いることが可能なモジュールが定まり、標準化やコストダウンに貢献するだけでなく、共通インタフェースの仕様が決定し、オプションも定まるため、製品群として組み合わせ可能なバラエティも決定されるからである。

この問題を解決するため、製品の構造をグラフによって表現し、製品構造に由来する組み合わせの可否を考慮可能とすることによって、最適なモジュールを設計する手法^{6,7)}の概要を Fig.5 に示す。この設計システムでは、製品ファミリーのグラフ表現に基づいて、製品ファミリーを構成する共通モジュールとオプション構造を表現可能なアーキテクチャのモデルを記述する。記述したモデルを用いて、計算機の解探索により、組み合わせ最大かつ構成要素点数が最小となるような共通モジュールとオプション構造を設計できるようにする。Fig.5 は、自動車の戦略レベルでの製品ファミリー設計を例題に、共通モジュールとオプション構造の切り分けを設計するシステムの概要を表している。共通モジュールを適切に設計することで、製品ファミリーのバラエティを増やし、なおかつ製品ファミリー全体として必要なモジュール数を削減する検討が行える。

3.4 ライフサイクル設計

多様な製品展開と環境調和の両立のためには、ライフサイクル循環を考えたモジュール化設計が有効である。製品ファミリー内でモジュールを共用化することによって、スペアパーツの準備が容易となったり、共用モジュールのための分解やリビルドなどといったリサイクル施設を十分に用意できたり、メンテナンス・サービスの適正化によってモジュールや製品がロングライフ化したり、究極的にはモジュールを幅広く（異なる世代や、多様な種類の製品において）再利用することによって、廃棄されるモジュールの総量を減らすことが可能となるからである。

ところが設計者にとって、製品の破棄や回収・再利用という観点を考えた上で、モジュール構造の良否を判断することは、容易ではない。そのひとつの大きな要因として、ライフサイクル循環が機能しだすまでには長い時間が必要であり、その間に市場は変動することが多い、という将来の予測不可能性が

存在する。時間が経過する間には、競合する製品や技術が出現し、消費者の要求も変化し、場合によって法律まで変化することも考えられる。このことは、設計者にとって、モジュール構造の良否を判断することが、簡単ではない一つの大きな理由となっている。

製品ファミリー内や、世代間で共用化されるモジュールの構造は、長い時間のスケールにおける市場の変化を考慮し、メンテナンスされリユース・リサイクルされるモジュールの種類や量を予測した上で、効率的なライフサイクル循環を可能とするように設計されるべきである、と言える。しかしながら、ライフサイクルという長いスパンにおける市場を決定づける要因は、非常に複雑多岐にわたり、予測することは、容易ではないことが多い。つまり、製品ファミリー全体で共通して用いられるモジュールを決定するためには、市場の変化を予測した上で、その構造の良し悪しを判断する必要があるが、製品ファミリーのライフタイムにわたる市場の変化の予測が困難なため、簡単に判断することはできない、と言える。この問題を解決するために、予測された市場変化に対して、破綻しないライフサイクル循環を設計し、そのために最適な共用モジュールの構造を決定する手法を提案した。ライフサイクルを前提としたモジュール設計によって、循環を考えたモジュール構造を折り込んだ最適な製品ファミリーの構成を設計し、その結果として製品ファミリーを構成する各ラインナップのコストを下げ、なおかつ環境負荷を低減することが実現できるようになる。

3.5 高品質の実現のための生産プロセス設計

工程における品質知識は、重要な知識であるため、様々な表現と記述および活用方法が提案されており、日々生産現場での知識は積み重ねられている。工程知識の表現として一般的なものに、PFMEA や QC 工程表(Process FMEA, Quality Control Chart)が存在する。しかしながら、積み重ねられた工程知識は有効に活用できておらず、多くの情報が無駄に埋もれている状況にある。そこで、将来の工程変更や計画時に、計算機によってある程度自動的に活用されることが保障されたスキーム上で、品質不良の発生の因果構造のモデル化し、知識化することを考える。その結果、蓄積された品質知識は、ダイレクトに工程において活用することが可能となる。

工程はどのような機能を持つのか、どのような作用によってものができるのか、という品質の変化を、客観的な状態の遷移として整理し、記述するモデルに基づくことにより、工程の変更や計画において有効に活用できる品質知識のマネジメントを実現する

手法を提案した。提案手法を用い、工程の計画時や工程の変更時に、計算機が工程情報と品質知識情報を組み合わせた状態遷移空間を計算し、予測する品質不良をチェックシートの形でリストアップしたり、品質の観点から望ましい工程案を提示したり、といった支援が可能であることを示した^[8]。

ブレーカーを構成するアセンブリの製造ラインにおいて、品質知識を活用し、高品質を実現しやすい工程を提案した結果を、Fig.6 に示す。Fig.6 中の生産工程 B は、ロウ付けによって発生するそりが、最終品質として形成される危険性がある工程である。それに比べて、Fig.6 中の生産工程 A は、プレス工程によってそりは打ち消され、最終品質に至る危険性が少ない工程であると言える。

3.6 安全・経済的・環境にやさしい解体支援

タンカーや商船などといった巨大人工物の多くは、解体時を考えた設計とはなっていない現状にある。その要因として、耐用年数が長いこと採算を重視する開発元のコスト計算に乗りにくいことや、製造と解体で手がける業者が異なることが挙げられる。特に商船の解体などは、人海戦術によるものであり、安全・衛生の観点から労働者にとって過酷な条件でなされている。環境に適合したグリーン解体産業を実現するためには、環境面だけからの評価だけでは

なく、産業としての経済的な実現性を配慮するために、解撤作業の省力化・自動化が必須である。

そこで、安全で環境にやさしく経済的な解体を計画することが可能な、解体作業計画支援システムを構築することに取り組んだ。計算機上に再現された仮想工場において、部材情報や接続情報、塗装情報などが製品情報として記述・管理されているシステムから、解体の作業の情報を抽出し、解体のシミュレーションを行うシステムを開発した。抽出した作業に対して、その作業がすべき対象（切断線、ブロック重量、塗装面積など）の情報を付与することによって、解体手順案をその安全性や経済性、環境負荷の観点から比較検討できる機能を持つ。

大規模人工物の解体作業にあたって、切断箇所、切断順序、解体で取り出すブロック（塊）の大きさを、設備の能力に応じて最適にプランニングすることが可能である。廃油やアスベストなどといったさまざまな危険物が残存する状況下を想定し、大きなブロックの解体工程を計画した上で、出力として得られたブロックに対し、最適な中小レベルの解体工程の計画を立てることが可能である^[9]。

3.7 製品情報を活用した工場安全化

生産活動の現場では、危険がつきものであり、適切なリスクアセスメントの実施と、作業者に対する

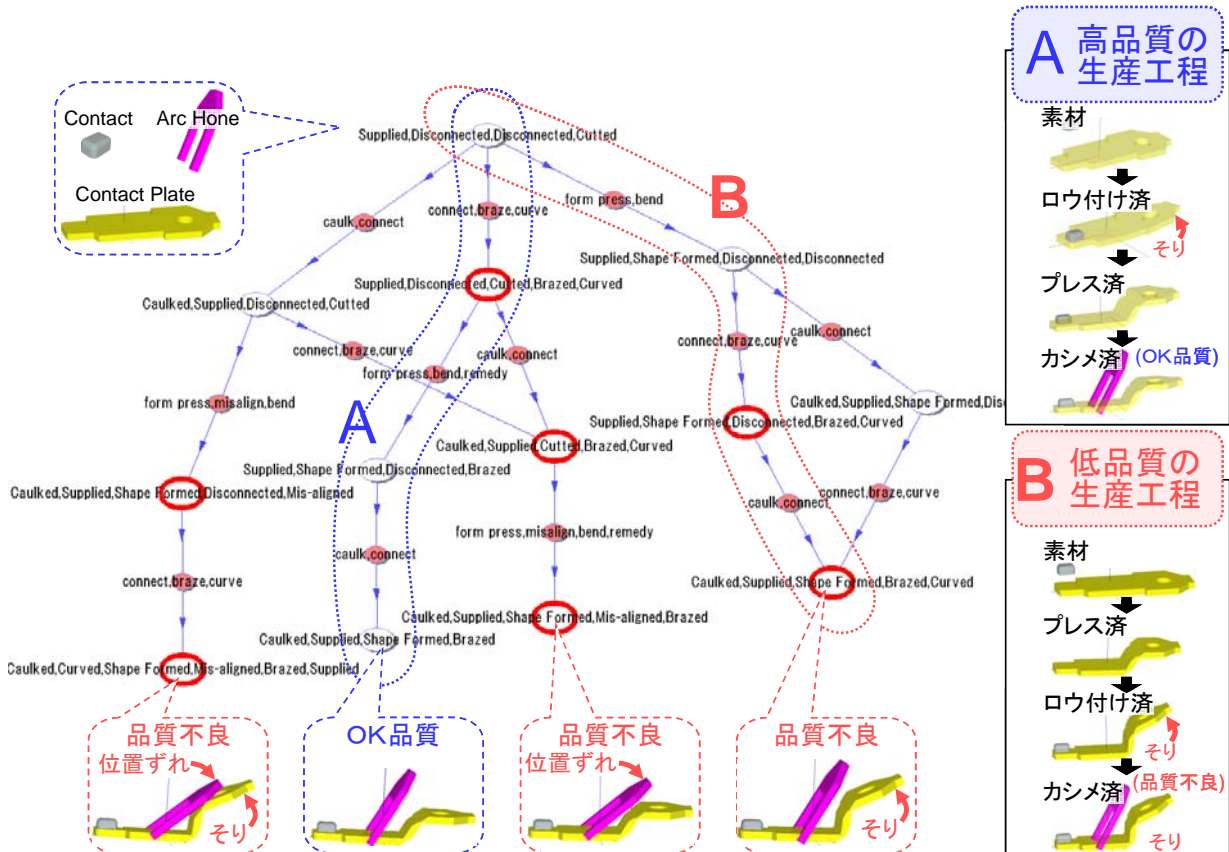


Fig.6 高品質の実現のための生産プロセス設計

安全指示の生成が求められている。そこで、計算機による仮想工場において、製造シミュレーションを行い、安全の知識を組み合わせることによって、組み立て作業の安全性を評価し、適切な対策を講じ、安全のための指示情報を獲得するシステムを構築した。安全情報の獲得のために、実作業に伴う要素（生産資源、作業環境、製品特性）に基づいて、安全情報の構造化を行い、安全情報ネットワークを生成した。また、計算機における仮想工場から、組み立てシミュレーションを用いて、作業環境と作業情報を抽出した。この作業環境と作業情報、および安全情報ネットワークから獲得できる安全情報によって、安全対策を講じる必要がある状況を適切に抽出し、その状況に応じた安全対策指示を作業者に提供することを可能とした。また、安全対策にはさまざまな選択肢があり、リスクやコストなどの定量的な比較を可能とする情報を付加して作業者に提示することによって、望ましい安全対策の支援を可能とする情報システムの枠組みを実現した^[10]。

4. おわりに

4.1 結論

複雑化・多領域が進む近年の製品開発において、設計プロセス全体に関わる開発ロジックやDfX(Design for X)戦略を反映させるための、統合DfX支援システムを構築した。設計・生産活動のモデリングによって、各分野や専門領域での決定事項を他部署で利用可能とすることで開発を繋げるためのマスターモデルとして、製品と生産プロセスの多段階モデルを提案した。提案したマスターモデルを中核として、設計プロセスガイドや、モジュール化設計、ライフサイクル設計、製造を考えた設計などといったDfX支援が可能であることが示された。この結果は、概念から詳細まで、全体プロセス戦略を明確に製品定義へと織り込む過程において、設計の変更を容易化することでエンジニアやアーキテクトの試行錯誤を支援し、多様な設計ロジックの俯瞰的な理解を助けることでエンジニアの意思決定に貢献できることを意味している。以上の結果により、モデル駆動型の統合DfXシステムの有効性が示されたと言える。

4.2 今後の課題

提案した設計と生産の統合モデルを用いれば、現在SysML(System Modeling Language)等で議論されている製品やプロセスの標準記述言語の仕様策定に向

けて、仕様や機能の提示に繋げることが期待できる。

参考文献

- [1] Koga T. and Aoyama K., 'Integrated Product-Process-Causality Model To Prospect Failure Propagation', Proceedings of the ASME 2005 IDETC, 85459 Long Beach, California, USA, September, 2005
- [2] Aoyama K. and Koga T., (2006). 'Supporting System for Design and Production with Sharing and Access of Product Failure', LEADING THE WEB IN CONCURRENT ENGINEERING, IOS Press, ISBN:1-58603-651-3, ISSN: 0922-6389, pp. 25-31.
- [3] 吉川弘之: 一般設計学序説, 精密機械, Vol.45, No.8 (1979), pp. 20-26.
- [4] Suh, N.P.: The Principles of Design, Oxford University Press (1990), Oxford, New York.
- [5] 古賀 毅, 青山 和浩, '製品設計における試行錯誤の支援のための矛盾とループを考慮した設計プロセス・ガイド', Design Symposium 2006, 東京
- [6] Koga T. Aoyama K. and Namba T., (2006). 'Platform Module Design for Variety and Cost of Product Family', LEADING THE WEB IN CONCURRENT ENGINEERING, IOS Press, ISBN:1-58603-651-3, ISSN: 0922-6389, pp. 523-530.
- [7] T.Koga and K.Aoyama, 'MODULAR DESIGN METHOD FOR SUSTAINABLE LIFE-CYCLE OF PRODUCT FAMILY CONSIDERING FUTURE MARKET CHANGES, and Economic Efficiency', Proceedings of the ASME 2008 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, DETC2008-49379, August 3-6, 2008, Brooklyn, New York, USA
- [8] Koga T. and Aoyama K., 'Process Planning Support System Considering Product Quality', Proceedings of the ASME 2006 IDETC, September 10-13, 2006, Philadelphia, Pennsylvania, USA
- [9] T. Koga, M. Matsubara, and K. Aoyama, 'Disassembling System of Large Scaled Structure considering Safety, Environmental Impact, and Economic Efficiency', Proceedings of the ASME 2008 IDETC, 49379, August 3-6, 2008, Brooklyn, New York, USA
- [10] 青山和浩, 古賀 毅, 武市祥司, 野本敏治, '建造工程の作業安全情報マネジメントシステムの構築', 日本造船学会論文集 195 号, PP.131-139, 2004