ジョイント統合設計支援システムの情報構造と情報処理手法の検討*

－ジョイント統合設計支援システムの開発－

濱田 邦裕**, 武市 祥司***, M. Arif. Wibisono****, 青山 和浩***

Definitions of Data Models and Data Processing Functions for the Joint Design Supporting System*

－ Development of Joint Design Supporting System －

by HAMADA Kunihiro**, TAKECHI Shoji***, M. Arif. Wibisono**** and AOYAMA Kazuhiro***

Authors proposed "Joint Design Supporting System" in the previous paper. In our system, both data of welding and joint is clearly and explicitly defined as product data, and a lot of feasible plans are created semi-automatically in every design stages and evaluations of each plan are calculated automatically by the computer system. Because of managing a lot of data involved, our system needs not only data processing functions but also total framework to integrate and handling data.

In this paper, therefore, the implementation of "Joint Design Supporting System" is discussed from viewpoints of followings:

- (1) Data models for welding and joint.
- (2) Data processing functions to generate and evaluate data models for welding and joint.
- (3) Data processing functions to generate a lot of design plans based on the designer's intents.
- (4) Frameworks to describe and reuse generation flow and evaluation flow of joint design and welding design.
- (5) Frameworks to manage and utilize design plans and evaluation results.

Based on these discussions, two "Joint Design Supporting Systems" which are intended for different products are developed, and validities of the proposed implementation method are shown.

Key Words: Joint design, Welding design, Product model, Process model, Component, Data structure

1. 緒 言

著者らは、溶接部・接合部の情報を陽に製品の情報として定義し、その設計を総合的に支援するジョイント統合設計支援システムを提案した¹⁾。このシステムでは、「良い溶接部・接合部を設計する」という問題を「溶接部・接合部の複数の設計案の中から最も良い案を選定する」という問題に置き換え、設計者とシステムが協調して設計案の生成・評価・選択を繰り返しながら、溶接・接合情報を多段階的に検討して確定する仕組みを採用している。

本システムでは、溶接・接合部の設計案の生成・評価・管理などを総合的に支援することを目的としており、以下に示す内容をシステム上に実装する必要がある。

- a) 溶接・接合部に関する情報を記述する情報モデル
- b) 溶接・接合部の情報を生成・評価する情報処理機能
- c) 多様な設計案を生成する情報処理機能

d) 多様な設計案を管理・利用するための情報管理構造

e) 設計案の生成・評価の流れをシステム上に記述し、その再利用を可能にする情報構造と情報処理手法

ところで、特定の製品、溶接・接合部およびその評価などに特化してシステムを構築してしまうと、社会環境の変化や他の製品の設計に柔軟に適應できないことが懸念される。複雑に関係付けられる膨大な情報や情報処理機能を柔軟に操作し、目的に応じたシステムを構築できる仕組みが望まれる²⁾。そこで本研究では、ジョイント統合設計支援システムの計算機上への実装方針を整理し、システムの実装におけるフレームワークを提案する。このフレームワークを利用することによって、溶接・接合部の情報モデル、および各種情報処理機能を柔軟に統合化することを実現する。

本論文では、このフレームワークの提案を中心に、ジョイント統合設計支援システムの情報構造と情報処理手法について具体的に議論する。さらに、鉄道車両台車とクロスメンバーという異なる二種類の製品のプロトタイプ・システムを構築することによって、提案するフレームワークの情報構造と情報処理手法の妥当性を評価・考察する。

2. ジョイント統合設計支援システムの実装のために

著者らは既研究において、造船のための設計・生産支援システム³⁾および溶接作業情報の生成手法⁴⁾について報告しており、これらの研究成果の一部を利用する。そこで本章

*受付日 平成19年1月9日 受理日 平成19年4月11日 平成14、16年度秋季全国大会で発表、平成16年11月溶接構造シンポジウムで発表

**正 員 広島大学大学院工学研究科 Member, Graduate School of Engineering, Hiroshima University

***正 員 東京大学大学院工学系研究科 Member, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

**** 広島大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Hiroshima University

Fig. 1 Joint Information³⁾.

では、関連する研究成果の概要を示しながら、システムの実装要件を明確にする。

2.1 接合情報の情報モデル

一般的な CAD システムにおける製品情報の表現では、部品形状や材質などを利用している場合が多い。しかし、設計・生産過程における計算機の支援を実現するためには、形状や材質などを計算機内部に表現するのみでは十分ではなく、設計・生産の過程で考慮される様々な情報を計算機内部に記述する必要がある。この製品に関する幅広い情報を記述するモデルは製品モデルと定義されている³⁾。

溶接構造物の設計・生産活動では、部品や中間製品のような目に見える物のみではなく、それらの間の接合部を十分に認識することが重要であり、接合部を溶接構造物の製品モデルの重要な情報として計算機内部に表現する必要がある。著者らは既研究において、下記に示すように、製品の接合部を表現するための接合情報を提案している³⁾。

(1) 部材間の接合情報

部材間の接合部を製品情報として陽に認識するために接合情報を定義する。Fig. 1 に示すように、接合情報は、接合関係にある部材情報へのポインタを有し、接合部の形状は線分によって表現される。また、各部材と関係する接合部を容易に抽出できるように、部材情報にも接合情報へのポインタを記述する。

(2) 中間製品間の接合情報

中間製品間の接合部を一つの情報として取り扱うために、中間製品間の接合情報を定義する。中間製品間の接合情報は、部材間の接合情報の集合によって表現する。また、部材間の接合情報と同様に、接合関係にある中間製品の情報へのポインタを記述する。

2.2 設計機能による情報生成のモデル化

実際の設計活動に着目すると、接合部の生成プロセスを以下に示すように考えることができる。

Fig. 2 Cutting Function³⁾.

- 新たな構造要素の追加に伴う接合部の生成：新たな部材を設計する場合には、その部材と隣接する部材との間に接合部が必要である。
- 構造要素の分割に伴う接合部の生成：例えば部材を分割する場合には、分割された部材間に接合部が必要である。分割された部材と隣接部材との接合部の整合性も保証する必要がある。

このような設計行為の特徴を計算機上に取り込むことが可能となれば、システムの利用者は接合情報の生成を特に意識することなく設計することができる。そこで、上述の設計行為を情報処理機能としてモデル化し、部材情報や接合情報の生成を支援する。この情報処理機能を設計機能と呼ぶ。

このような設計機能の一つとして、上記 b) に対応するカット機能があげられる。カット機能は、システムの利用者が分割位置を指定することにより、既に生成されている部材情報や接合情報を物理的に分割すると同時に、分割された部材間に新たな接合情報を生成する機能である (Fig. 2)。

設計機能は各設計段階における製品情報の生成行為のモデルであり、その設計段階の特徴に応じて定義する必要がある。また、製品モデルの情報は、設計機能を用いることにより段階的に詳細化される。つまり、製品モデルと設計機能には相関があり、設計機能は、上流の製品モデルと下流の製品モデルとの差分を生成する機能として定義される。

このように、設計・生産活動の進展に伴い、設計機能によってその情報量を成長させる製品モデル全体（設計機能を含む）を「成長する製品モデル」と呼ぶ。

2.3 接合情報から溶接作業情報へ

上述の「成長する製品モデル」の概念に基づくと、溶接情報は、様々な設計・生産ステージを経て、接合情報が詳細化されることにより、生成されるものと認識できる。

溶接学会特別研究会「生産・加工システムと最適化」では、溶接作業を実施するために必要十分な情報モデルを「溶接作業モデル」として整理した (Fig. 3)⁴⁾。Fig. 3 に示すように、溶接作業モデルは、溶接法、開先形状、設備、作業順序等の情報が接合情報に段階的に付加されることにより生成される。この溶接作業モデルの生成のための情報生成フローと情報処理機能も「溶接作業の成長プロセスのモデル」として定義され、システム上に実装されている⁴⁾。

Fig. 3 Flow Model for Generation of Welding Operation Model⁶⁾.

2.4 接合情報・溶接作業情報の利用

製品モデルに接合情報および溶接作業情報が記述されることによって、それらの情報を利用した種々の検討が可能になる。接合情報および溶接作業情報の利用例として、以下の項目が挙げられる^{6, 7)}。

- 溶接および切断に関する管理物量の収集
- 溶接ロボットのオフライン・ティーチングなどに代表される CAM への応用
- 有限要素法における解析モデルの生成と整合性保持
- 溶接構造物の溶接変形の推定
- 溶接開先情報・溶接変形を加味した一品図の作成
- 溶接構造物の運用時における溶接部の腐食や衰耗の推定

2.5 システムの実装における要件の明確化

以上に示した著者らの研究成果を踏まえ、システムの実装上の要件を明確にする。第1章で述べたが、システムの実装のためには、以下の項目に関する検討が必要である。

- a) 溶接・接合部に関する情報を記述する情報モデル
- b) 溶接・接合部の情報を生成・評価する情報処理機能
- c) 多様な設計案を生成する情報処理機能
- d) 多様な設計案を管理・利用するための情報管理構造
- e) 設計案の生成・評価の流れをシステム上に記述し、その再利用を可能にする情報構造と情報処理手法

これらの項目の内、「a) 溶接・接合部に関する情報を記述する情報モデル」については、2.1 節に示した接合情報の情報モデルおよび2.3 節に示した溶接作業モデルに関する研究成果を利用することが有効である。また、「b) 溶接・接合部の情報を生成・評価するための情報処理機能」についても、2.2～2.4 節に示した研究成果の活用が期待できる。以上より、本システムを実現するための実装上の要件を以下の三項目に整理し、その実現のための情報構造と情報処理手法を本論文において検討する。

Fig. 4 Configurations of a Component.

- 1) 文献⁷⁾で整理した設計案の生成・評価・選択の連鎖により構成される設計プロセスを、システム上に記述し再利用するための情報構造と情報処理手法の実現。
- 2) 設計者の意図にしたがって多様な設計案を生成するための情報処理機能の定義。
- 3) 上記2) で生成された多様な設計案の管理・利用のための情報構造と情報処理手法の検討。

3. 設計プロセスの記述・利用のためのフレームワーク

3.1 IDEF0

情報の流れや処理を整理して記述するための構造記述言語の一つとして IDEF0 が存在する⁸⁾。IDEF0 では、業務は以下の五種類の構成要素によって表現され、各要素を組み合わせることでダイアグラムを作成することで、業務における複雑な情報の成長プロセスを形式的に記述することが可能となる。

- 1) アクティビティ：作業や業務を表現する処理機能。
- 2) インプット：アクティビティで処理・操作される基となる情報。
- 3) アウトプット：アクティビティで処理・操作された結果、生成される情報。
- 4) コントロール：アクティビティの挙動に影響を与える条件。
- 5) メカニズム：アクティビティを行うための手段。

3.2 設計プロセスの記述・利用の基本方針

溶接・接合情報の生成・利用過程を、設計者が IDEF0 の形式でシステム上に自由に定義し、それを再利用できるシステム環境を提供することにより、設計プロセスの記述・利用が期待できる。一方、2.2 節および2.3 節で述べたように、著者らが提案する設計・生産支援システムでは、接合情報や溶接作業情報は、設計機能を用いることによって、上流の情報を利用しつつ段階的に詳細化される。また、2.4 節において述べた評価に必要な情報も同様に扱うことができる。

以上から、「入力情報（インプット）、制御情報（コントロール）、情報処理機能（メカニズム）、出力情報（アウトプット）」により構成される基本単位（アクティビティ）をコンポーネントとして定義し（Fig. 4）、コンポーネントを

組み合わせることによって溶接・接合情報の生成・評価の流れを表現することを提案する。なお、制御情報は省略されることもあることを付記しておく。

3.3 コンポーネントの明確化

コンポーネントの組合せによる設計プロセスの表現を実現するためには、コンポーネントを構成する入力情報、制御情報、出力情報および情報処理機能を具体的に定義する必要がある。

3.3.1 設計機能コンポーネント

溶接・接合情報の生成を司るコンポーネントとして、設計機能コンポーネントを定義する。設計機能コンポーネントは、以下の要素によって構成される。(なお、括弧内はカット機能のコンポーネントの具体例を示している。)

- 入力情報：上流の製品モデル(分割前の製品情報)
- 出力情報：下流の製品モデル(分割後の製品情報)
- 制御情報：設計情報(分割位置)
- 情報処理機能：カット機能

設計機能コンポーネントは、文献¹⁾に示した溶接・接合設計のプロセスモデルに基づき、各ステージで検討すべき製品情報を生成するためのコンポーネントを個別に定義する。これらのコンポーネントの構成要素となる情報や情報処理機能は、文献^{3, 4)}の成果を利用している。

3.3.2 解析・評価のためのコンポーネント

設計・生産活動では、構造解析システムや、生産計画の立案を支援するシステムなど、製品の要求機能や生産性を評価するための数多くのシステムが利用されている。本研究では、これらのシステムを総称してアプリケーション・システムと呼ぶ。

設計案の解析・評価に利用されるアプリケーション・システムは製品毎に異なる。そこで、解析・評価の流れを記述するために、解析・評価のためのコンポーネントを以下の五種類に整理し、提案する。

(1) 抽出コンポーネント

一般的にアプリケーション・システムには様々な計算モデルが要求される。解析システムでは、解析問題に対応した様々な解析モデルが必要であり、生産計画システムでは、PERT(Program Evaluation and Review Technique)などのスケジュール・モデルが必要である。これらの計算モデルを評価対象モデルと呼ぶ。

本研究では、製品モデルから評価対象モデルを生成するまでの過程を一つの情報処理の単位と考え、その情報処理を司る抽出コンポーネントを定義する。抽出コンポーネントの構成要素を以下に示す。

- 入力情報：製品モデル
- 出力情報：評価対象モデル
- 情報処理機能：評価対象モデルの生成機能

様々なアプリケーション・システムを用いる場合には複数の評価対象モデルが必要となるため、その各々に対応す

る抽出コンポーネントが必要である。たとえば、有限要素分割を行う際などは、有限要素の代表サイズを入力する必要がある、このサイズの値は制御情報として取り扱う。また、製品モデルから接合情報を抽出する行為も、抽出コンポーネントにより実施すると考える。

(2) 解析コンポーネント

アプリケーション・システムへの入力情報から、解析結果を求めるための基本単位として、解析コンポーネントは定義される。解析コンポーネントは評価活動の中核となる部分であり、以下の要素によって構成される。

- 入力情報：評価対象モデル
- 制御情報：解析条件等
- 出力情報：解析結果
- 情報処理機能：解析機能

解析コンポーネントは評価の目的に応じて、様々に定義される必要がある、その処理を担う解析機能には、個別の処理プログラムを記述する必要がある。

(3) 評価コンポーネント

個々の設計案の妥当性を評価する際には、様々な解析結果を総合的に判断することが必要である。本研究ではこの過程を多目標最適化問題としてモデル化し、解析結果に基づいて制約条件の確認や、目的関数の評価を行う。この処理を司るコンポーネントは、評価コンポーネントとして定義される。設計者は、制御情報として、各々の解析結果が制約条件であるか、あるいは目的関数であるかを指定し、制約条件の場合は閾値を、目的関数の場合は、解析結果を目的関数へと変換するための計算式を入力する。システムはこれらの条件に基づいて計算を行い、その結果が評価モデルとして出力される。

- 入力情報：解析結果
- 出力情報：評価モデル
- 情報処理機能：評価機能

(4) 比較・選択コンポーネント

上記(3)で得られた評価モデルに基づき、多様な設計案の中から適切な設計案を選択するためのコンポーネントは比較・選択コンポーネントとして定義される。この比較・選択コンポーネントにより、評価モデルによる評価結果が集計され、パレート最適解および制約条件・目的関数の計算結果が表示される。その結果から設計者が判断して選択した設計案(製品モデル)を出力情報として出力する。

- 入力情報：評価モデル、製品モデル(多数)
- 制御情報：目的関数の重み、設計者による選択
- 出力情報：選択された製品モデル
- 情報処理機能：比較・選択機能

なお、実際の設計では、短時間で行える解析と時間を要する解析が混在する場合もある。このような場合は、短時間で行える解析を用いて評価を行うことにより設計案を絞り込み、その後時間時間を要する解析を実施して再評価を行うことが現実的である。つまり、必ずしも全ての解析を実

施した後に評価および比較・選択が行われる訳ではなく、状況によっては、一部の解析に基づき評価、比較・選択を行い、その後に別の解析を実施して、再評価および比較・選択が行われる場合もある。

本研究では、この問題は、解析、評価および比較・選択の手順の問題と捉え、後者の場合は解析コンポーネント、評価コンポーネントおよび比較・選択コンポーネントによる処理が二段階で行われるものとする。つまり、コンポーネントを適切に組み合わせることにより、このような時系列を伴った処理手順をシステム上に記述し、その処理手順に基づいて意思決定を行うことも可能である。

(5) 置換コンポーネント

実際の設計・生産活動では、あるアプリケーション・システムの解析結果を、他のアプリケーション・システムの解析条件として利用するケースがある。この場合には、評価対象モデルの差異を補完するための情報変換が必要となる。この処理を司る置換コンポーネントを定義する。

- 入力情報：解析結果
- 出力情報：解析条件
- 情報処理機能：置換機能

3.4 コンポーネントの実装

以上の整理に基づき、コンポーネントを具体的に実装する。オブジェクト指向言語である Smalltalk (Visualworks 2.5J) を用いて、以下に示すように実装する (Fig. 5)。

- 1) 情報部品と機能部品の実装：コンポーネントの構成要素となる、各ステージの製品モデル、各評価対象モデル、設計機能、解析機能等は、クラスとして実装する。これらを情報部品および機能部品と呼ぶ。
- 2) 組み合わせのためのフレームワークの実装：上記 1) の情報部品と機能部品を組み合わせるためのフレームワークとして、情報ノード、機能ノード、制約リンク、およびそれらの複合体であるコンポーネントを定義する。
- 3) コンポーネントの登録：情報部品を情報ノードに、機能部品を機能ノードに格納する。そして、ノードとリンクを組み合わせることにより、コンポーネントを登録する。

Fig. 5 Definitions of Components.

録する。Fig. 5 に示すように、情報ノードや機能ノードには接続端子が用意されている。この接続端子に制約リンクが結線されることにより、ノードとリンクが組み合わされる。

3.5 コンポーネントの統合

コンポーネントを組み合わせることで、設計プロセスを記述する際には、情報ノードを節点としてリンクを結線することによって対応する。具体的には、組み合わせるコンポーネントの情報ノードが同じ種類である時に、一つの情報ノードと認識する (Fig. 6)。また、複数のコンポーネントの組合せを一つのコンポーネントとして縮約して登録することも可能である。この際には、縮約したコンポーネントに縮約前のコンポーネントへのポインタを記述する。この縮約したコンポーネントを他の縮約したコンポーネントと組み合わせることで更に縮約したコンポーネントを定義することも可能である。このように、コンポーネントの縮約を利用した階層構造を構成することによって、様々な粒度で設計プロセスを捉えることが可能となる。

4. 設計案の増幅機能と設計機能による製品情報の生成

4.1 多様な製品情報の生成のために

本研究では、設計者が指定する条件を基に、システムが総当り的に設計案を生成することを基盤としている。したがって、多様な設計案は製品モデルの情報として生成される必要があり、部品情報および溶接・接合情報等を矛盾無く生成する必要がある。また一方で、3.3 節で述べたように、製品モデルの情報は、上流の製品モデルと設計情報を基に、設計機能によって生成される。したがって、様々な設計情報を生成することができれば、その後は設計機能を繰り返し適用することによって、多様な製品情報を生成できる。

そこで、設計者の指定する条件を基に、多様な設計情報を生成する機能を、設計案の増幅機能として定義する。設計案の増幅機能と設計機能の連携によって、多様な製品モデルの情報を生成する。設計案の増幅機能は、各ステージで利用される設計機能の特徴を考慮して個別に定義する。

Fig. 6 New Component defined by assembling Components.

Fig. 7 Generations of Design Plans by the Concept of Cut-Set.

4.2 設計案の増幅機能の定義

本研究で定義した設計案の増幅機能は、組立グラフを利用した機能と、設計者の知識を利用した機能に大別でき、何れの場合も部品情報および溶接・接合情報の両者を利用して多様な設計案を生成する。以下にその具体例を示す。

4.2.1 組立グラフを利用した設計案の増幅機能

設計案の増幅機能として、最初の設計ステージにおける設計案の増幅機能である分割案の生成機能を取り上げる。ここでは、設計者は継手を設定する可能性がある位置を、分割候補線としてシステムに入力する。その後、システムが継手の有無、接合位置、部品形状等を、以下の手順で総当りの生成する (Fig. 7)。

- 1) システムの利用者により分割候補線が入力される。
- 2) 分割候補線によって製品を分割したと仮定し、その部品となる部分をノード、接合部となる部分 (分割候補線) をリンクとして捉え、グラフを作成する。
- 3) グラフを二つに分割するカット・セット⁹⁾を求める。この分割を繰り返し実行することにより、三分割や四分割のカット・セットを求める。
- 4) このように作成された個々のカット・セットを利用して、様々な分割案を生成する。

なお、本機能は文献^{10), 11)}の研究成果を利用している。また、Fig. 7の分割の流れを逆に辿ることによって、部品から完成品を製造するまでの組立手順に関する設計案を作成することも可能である。

4.2.2 知識を利用した設計案の増幅機能

吉川・富山らの一般設計学では、設計対象を表現する情報には、実体と属性があると定義されている¹²⁾。

Table 1 Description of the Joint Zone and the Equipment.

Entity	Attribute	Attribute Data
JointZone A	Direction	Flat
	Length	250mm
	Thickness	6mm
	...	...
Equipment 1	Correspondence Direction	Flat
	Correspondence Thickness	5-12mm
	Range of Operation	Max:700mm
	...	...

- 実体 (Entity) : 「もの」を認識する単位であり、過去・現在・未来を通じて存在するものは全て「実体」である。「実体」は「属性」によって認識あるいは記述することが可能である。
- 属性 (Attribute) : 物理的、科学的、その他何らかの手段によって認識 (測定) できる実体の性質である。その属性は「値」を持つことができるが、それは属性値 (Attribute Data) であって属性ではない。

この実体と属性による対象の表現手法を用いると、接合部 (Joint Zone) および設備 (Equipment) は、例えば Table 1 のように表現できる。この整理に基づいて、各接合部に対する設備の選択問題を捉えると、以下のようにモデル化することができる。

- 実体レベルの関係 : ある接合部の溶接に、ある設備を用いることを決定するという、解決すべき問題そのものに相当する。
- 属性レベルの関係 : 例えば、設備を選択する際に、接合部の長さや設備の稼動範囲を考慮する必要がある等の関係は、属性レベルの関係と捉えられる。
- 属性値レベル : このレベルでは、属性レベルの関係に基づき、設備と接合部の属性値を定量的に比較する。つまり、設備選択の際に考慮すべき属性レベルの関係を設計者の知識としてシステムに記述すれば、その知識を利用して、対象となる設備と接合部の属性値とを比較することにより、その実現可能性を判断することができる。

本研究で提案する知識を利用した設計案の増幅機能は上記の考え方に基いており、溶接方法に関する設計案の生成と、設備に関する設計案の生成に用いられる。例えば、設備案の生成手法は以下の通りである。

- 個々の設備 (実体) およびその能力を属性と属性値を用いて記述する。設備毎に、溶接可能な板厚や材質、対応する溶接姿勢等の情報を記述したものを設備データベースとして予め用意する。
- 設備を決定する際に比較検討すべき、接合部と設備との実体と属性および属性間関係を有向グラフの形式で記述する (Fig. 8)。この関係を記述したものを制約データベースと呼ぶ。本研究では、溶接部の形状、溶接姿勢、接合する部材の板厚・材質、および設備の稼動範囲を考慮して、利用可能な設備がすべて選択される。

Fig. 8 Descriptions of Attribute Relations.

- 制約データベースを利用し、製品モデルから、接合箇所毎に必要な情報（属性値）を抽出する。これらの情報と設備データベースに記述される情報とを比較することによって、設備の候補がさらに絞り込まれる。

この手法を用いると、接合箇所毎に制約を満足する設備は全て候補として選定される。このため、製品の製造効率・時間・コスト、設備や工場の稼働率等を表現する情報を、設計案の評価プロセスにおいて算出し、これらを基に適切な設備を最終的に選定する。

4.3 設計案増幅コンポーネントの定義

設計案の増幅機能は、設計案増幅コンポーネントとしてシステムに実装される。設計案増幅コンポーネントの構成要素を以下に示す。

- 入力情報：上流の製品モデル
- 制御情報：設計者が指定するキーとなる情報
- 出力情報：設計情報
- 情報処理機能：設計案の増幅機能

設計案増幅コンポーネントの具体例を、設計機能コンポーネントとの関係も含めて、Fig. 9に示す。Fig. 9では、4.2.1項に示した分割案の生成を例として取り上げている。入力情報は分割前の製品モデル、制御情報は分割候補線（Practicable Dividing Lines）となっている。設計案の増幅機能（Generating Function for Alternative Plans）が用いられることにより、複数の分割案（設計情報、Design Info.）が出力情報として生成される。その後、個々の設計情報に対して、設計機能コンポーネント（Design Function Components）を組み合わせ、設計機能が繰り返し実行されることにより、分割後の製品モデルが矛盾なく生成される。

Fig. 9 Generations of Plans by two Kinds of Components.

Fig. 10 Process Layer and Product Layer.

5. 多様な設計案の管理・利用のためのフレームワーク

5.1 多様な設計案の管理・利用のために

第3章および第4章で定義したコンポーネントによって、製品情報の生成・解析の流れはコンポーネントの連鎖として表現可能となり、製品情報や解析情報はコンポーネントに記述される。しかし、これまでに定義したコンポーネントは、個々の製品情報の生成や評価の流れを記述することを目的にしているため、多様な設計案を生成・解析する際には、その個々の設計案に対して、コンポーネントの組合せを行う必要がある。つまり、設計プロセスと製品情報や解析結果とを同一のレベルで管理するだけでは十分ではない。製品情報の生成や評価の流れは複数の設計案に共通するプロセスとして表現され、なおかつ設計者の思考法に沿って管理することが要求される。

そこで、設計プロセスを記述するためのプロセス層と、製品情報や解析結果の管理を行うためのプロダクト層を区別して考える。Fig. 10に情報管理構造を示し、その概要は以下のように整理できる。

- プロセス層およびプロダクト層のそれぞれにおいて、コンポーネントの連鎖によって設計プロセスが記述される。
- プロセス層は情報の生成・利用のためのフローを示しており、システムの利用者はプロセス層において設計プロセスを記述する。
- プロセス層のコンポーネントを利用することにより、プロダクト層のコンポーネント、製品情報および解析結果をシステムによって自動生成する。
- 生成された製品情報や解析結果などのデータはプロダクト層の情報ノードに記述され、管理される。
- プロセス層の情報ノードはそれぞれに対応するプロダクト層の情報ノードとリンクによって関係付けられている。

つまり、プロセス層を新たに設けることにより、設計過程における複数の設計案を並立して管理・利用することが可能となり、これによって、複数の設計案を対象とした情報処理（設計案の生成や解析）が実現される。また、第3章および第4章で定義したコンポーネントは、プロダクト層のコンポーネントと位置づける。

5.2 プロセス層のコンポーネントの情報構造

前5.1節の考察に基づき、プロセス層のコンポーネントをFig. 11のように定義する。プロセス層のコンポーネントもプロダクト層のコンポーネントと同様にノードとリンクによって構成されているが、以下の点がプロダクト層のコンポーネントと異なる。

- 層の違いを明確に区別するため、情報ノード、機能ノード、制約リンク、およびコンポーネント自体は、プロダクト層とプロセス層で別のクラスとして定義する。
- プロセス層とプロダクト層の情報ノードを繋ぐリンクを層間リンクとして新たに定義する。
- プロセス層のコンポーネントには、それに対応するプロダクト層のコンポーネントの雛形が記述される。

Fig. 11 Data Structure of Process Components.

- プロセス層の情報ノードには、具体的なデータは記述されず、プロダクト層の情報ノードへのポインタ（層間リンク）が記述される。

5.3 プロセス層のコンポーネントの情報処理機能

3.3節においてプロダクト層のコンポーネントを六種類に整理したが、これらに対応するプロセス層のコンポーネントの情報処理も同一であるように定義する。具体的には、プロセス層のコンポーネントを基に、プロダクト層のコンポーネントを生成し、Fig. 10に示した情報管理構造を矛盾無く生成する機能が記述される。以下にその概要を示す(Fig. 12)。

- 1) 初期状態では、入力となる情報ノードのみにプロダクト層のデータが記述される。
- 2) プロセス層のコンポーネントの入力情報ノードに対応するプロダクト層の入力情報ノードを判別する。次に、自身に記述されているプロダクト層のコンポーネントの雛形のコピーをプロダクト層に生成する。
- 3) 生成したプロダクト層のコンポーネントを実行し、出力情報を得る。
- 4) プロダクト層の出力情報ノードとプロセス層の出力情報ノードとの間に層間リンクを生成する。

以上の情報処理を行う機能を、プロダクト層の生成機能として定義し、プロセス層の機能ノードに記述する。

6. ジョイント統合設計支援システムの実装例

6.1 システム実装の基本方針

本システムの実装とは、対象とする製品の溶接・接合設計において必要となるコンポーネントをシステム上（後述するツールボックス）に用意することである。第3章で述べたように、情報部品および機能部品はオブジェクト指向言語である Smalltalk の環境を直接的に利用して、それぞれ

Fig. 12 Generations of Product Layer Data.

オブジェクトのクラスとして定義する。一方、それらのシステム部品を組み合わせるためのノード、リンク、コンポーネントは、システムのフレームワークとして提供する。このようなシステム開発を実現するために、以下に示すツール群を提供する (Fig. 13)。

(1) システム開発者用のツール群

- 1) 要素コンポーネント登録ツール (Registration Tool of Element Component)：情報部品や機能部品を組み合わせ、コンポーネントを登録するためのツールである。
- 2) 複合コンポーネント登録ツール 1 (Registration Tool of Combined Component (1))：複数のコンポーネントを組み合わせ、より大きなコンポーネントを登録する。
- 3) コンポーネントリスト (Component List)：上記 1), 2) によって登録されたコンポーネントが管理される。これらの中から、設計者が利用すべきコンポーネントを登録する。
- (2) 設計者・技術者用のツール群
- 4) ツールボックス (Tool Box)：設計者が利用可能なコンポーネントを管理する。
- 5) 複合コンポーネント登録ツール 2 (Registration Tool of Combined Component (2))：設計者が複数のコンポーネントを組み合わせ、より大きなコンポーネントを登録する。登録されたコンポーネントはツールボックスに管理される。
- 6) ワークシート (Work Sheet)：ツールボックスに管理されているコンポーネントを組み合わせ、設計プロセスを作成する。なおワークシートには、プロセス層のワークシートとプロダクト層のワークシートがある。設計者はプロセス層において設計の流れを記述し、操作を行う。個々の設計案の生成・評価の詳細な流れはプロダクト層のワークシートに記述される。

Fig. 13 System Architecture.

製品によって評価項目は異なるため、その製品に特化した機能部品や情報部品は、必要に応じて個別に定義する必要がある。但し、それらをコンポーネントとして登録・利用するための仕組はシステムの環境として準備されている。以上の方針を採用することによって、本研究の検討結果に基づくシステムの実装を実現する。

6.2 鉄道台車用プロトタイプ・システムの実装

(1) 情報部品・機能部品の実装

システムにおいて必要となる情報部品や機能部品を Smalltalk 上でクラスとして定義する。システムには、情報部品のためのライブラリが用意されており、定義されたクラスをライブラリに登録することにより、情報部品・機能部品として認識される。つまり、各ステージの製品モデル、設計機能、解析機能等を、情報部品または機能部品として最初に登録する。

(2) 要素コンポーネントの登録

要素コンポーネント登録ツールを用いて、コンポーネントの入力情報、出力情報、制御情報および情報処理機能となるクラスを入力すると (Fig. 14(1)), それらに対応するノードやリンクが自動的に生成され、コンポーネントリストに新たなコンポーネントが登録される (Fig. 14(2))。この際には、プロダクト層のコンポーネントの雛形とプロセス層のコンポーネントが同時に生成され、コンポーネントリストには、プロセス層のコンポーネントが登録される。

(3) 複合コンポーネントの登録

より大きなコンポーネントを作成したい場合には、コンポーネントを組合せて、複合コンポーネントを登録する。

(4) 設計者に提供するコンポーネントの選定

上記 (1)~(3) を繰り返すことによって、コンポーネントリストには、様々なコンポーネントが登録される。これらの中から設計者に提供するコンポーネントを選択する。なお、鉄道台車のプロトタイプ・システムでは、以下に示す a)~e) の五種類のコンポーネントを実装し、設計者に提供している。これらの五種類のコンポーネントの内、特に a), d), e) は、汎用的なコンポーネントであると考えられるため、様々な製品で利用できるように、汎用性を持つように配慮

Fig. 14 Definitions of the Components.

して定義されている。

- 各ステージの設計案生成コンポーネント（設計機能コンポーネントと設計案増幅コンポーネントを組み合わせた複合コンポーネント）
 - 鉄道台車の設計案の評価において必要となる各種の解析コンポーネント
 - 上記 b) の評価対象モデルを生成するための各種抽出コンポーネント
 - 評価コンポーネント
 - 比較選択コンポーネント
- (5) システムの実行

以上の流れで実装されたシステムの実行方法と実行結果は文献⁹⁾に示した通りであり、多様な設計案の生成・評価・管理、および設計プロセスの記述と再利用ができることは検証済みである。そこで、情報構造の妥当性を確認するために、システム実行後の情報構造を Fig. 15 に示す。Fig. 15(a) はシステムの利用者がプロセス層において指定した設計の流れであり、ここでは製品モデルから接合部と部品情報を抽出した後に7種類の解析を実施し評価する流れとなっている。一方、Fig. 15(b) はシステムによって自動生成されたプロダクト層の情報構造である。複数の製品モデルに対して、プロセス層で指定された設計の流れが適切に組み合わせられており、その流れに基づいて解析・評価が実施されていることが理解できる。以上より、本研究で検討した情報管理構造が矛盾なく生成されていることが確認できた。

6.3 クロスメンバー用プロトタイプ・システムの実装

クロスメンバー用のシステムの実装方針を以下に示す。

- 提案したフレームワークが鉄道台車のみでなく他の製品に対して適用可能であることを確認するためにクロ

スメンバーを対象とする。クロスメンバーとは自動車のサスペンション部の強度や剛性を高めるために用いられる横方向の構造部材である。

- 開発の対象ステージは、最上流の接合設計のみとし、その接合設計に必要な解析機能のみを実装する。
- 鉄道台車用のシステムは全て Smalltalk のみで構築しているが、システムが拡張性を有するためには、他の言語で構築されているツールとの接続が可能であることを確認する必要がある。そこで、システムの形状処理および形状に関連する物量収集を外部プログラムとする。この外部プログラムとして Smalltalk ではなく GHY¹³⁾を用いることにより、接続性を検証する。
- システム部品やコンポーネントの変更に対するロバスト性を確認するために、4.2.1 項に示した設計案の増幅機能に変更を加え、機能部品の変更に対する柔軟性を検証する。

実装されたシステムの実行例を Fig. 16 に示す。Fig. 16(a) はプロセス層の情報構造を示している。対象とした設計ステージは Fig. 9 と同一であるが、ここでは設計案の増幅機能に変更を加え、分割数の上限および下限等を設計者が指定できるように拡張している。一方、Fig. 16(b) はシステムによって自動生成されたプロダクト層の情報構造である。製品の形状表現および形状処理は外部プログラムである GHY を用いて行われているが、図に示すように様々な分割案が矛盾なく生成され管理されている。以上より、各種情報や情報管理構造は問題なく生成されていると判断できる。

Fig. 15 Data Architectures of Process Layer and Product Layer.

Fig. 16 Examples of Prototype for Cross-Member.

6.4 フレームワークの有効性の評価

ここでは、システムの実装結果に基づきフレームワークの有効性を評価する。

本研究では、コンポーネントの結合として設計プロセスの記述・利用を実現することを試み、各種コンポーネントの基本構成を明確化するとともに、コンポーネントを実装するための開発環境を構築した。本研究で定義したコンポーネントは、設計案増幅、設計機能、抽出、解析、評価、比較・選択、置換、およびそれらの組合せである複合コンポーネントの八種類に大別され、プロダクト層とプロセス層のそれぞれで定義されている。システムの実装によって、異なる製品の設計プロセスを定義したコンポーネントの結合によって表現できること、および製品の評価等において利用する解析機能は異なるものの、フレームワークとして提供されるコンポーネント自体は共通して利用できることを確認できた。

一方、本システムにおいては多様な設計案の管理・利用の実現が必要不可欠な課題である。本研究では、プロセス層とプロダクト層による情報管理構造を提案し、設計者が指定するプロセス層の処理の流れに基づき、システムがプロダクト層の情報を自動生成する仕組みをフレームワークとして提供した。この情報管理構造も、異なる製品に対して適用可能であることを確認できた。

以上より、提案したフレームワークにより、本システムの実装上の要件となる「設計プロセスの記述と利用の仕組み」および「多様な設計案の管理・利用のための仕組み」が提供されているものと考えられる。したがって、他の製品を対象として本システムを構築する際には、システムの基盤となる部分はフレームワークにより提供されるため、その製品固有の解析機能等のみの実装が必要となる。

7. 結 論

本研究では、ジョイント統合設計支援システムの計算機への実装方針を整理し、システムの情報構造と情報処理手法を具体的に検討した。得られた結果は以下の通りである。

- 1) 入力情報、出力情報、情報処理機能、制御情報によって構成されるコンポーネントを基本単位とし、その組合せによって設計プロセスを記述・利用する仕組みを提案した。また、システムに必要なコンポーネントについて具体的に検討した。
- 2) 設計案の増幅機能と設計機能の組合せによって、多様な設計案を生成する仕組みを提案した。さらに設計案の増幅機能における具体的な情報処理手法を示した。
- 3) 多様な設計案を総合的に生成・管理・利用するために、プロセス層とプロダクト層による情報管理構造を提案した。また、この情報管理構造を実現するために、各々の層のコンポーネントの情報構造と情報処理手法を具体的に示した。

- 4) 上述した実装の基本方針に基づき、本システムの開発環境を構築するとともに、二種類の製品のプロトタイプ・システムを構築・実行した。以上によって、本研究で示した情報構造および情報処理手法によって、ジョイント統合設計支援システムを実装できることを示した。

謝 辞

本論文は、矢島由章君、木戸浩貴君、馬場智史君の広島大学修士論文の成果を基に、総合的にまとめたものである。彼らの真摯な努力に敬意を表する。また、本研究を実施するにあたり、様々な面でご指導・ご協力をいただいたアドホック研究会委員各位、貴重な情報を提供いただいた川崎重工（株）兵庫工場の諸氏および（株）ワイテックの諸氏に心から御礼申し上げる。最後に、本研究は科学研究費（若手研究（A）：14702056）および造船学術研究推進機構の資金援助を受けて実施したことを記し、御礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) K.Hamada, K.Aoyama and S.Takechi: Implementation of the Joint Design Supporting System based on the Demand Analysis and the Design Process Analysis – Development of Joint Design Supporting System –, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 25-2, (2007), pp.286-297. (in Japanese)
- 2) P. P. Texel and C. B. Williams: Use Cases Combined with Booch / OMT / UML, Prentice Hall, (1997).
- 3) 青山：造船における設計・生産情報獲得支援のためのモデリングに関する研究，東京大学博士論文，(1995)。
- 4) K. Hamada, T. Nishinaka and K. Aoyama: Study on Generation Methodology of Welding Operation Information in Manufacturing System, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 17-4, (1999), pp.508-518. (in Japanese)
- 5) 木村：CAD/CAM 統合化のためのプロダクトモデリングと知識処理，Journal of the Japan Society of Mechanical Engineering, vol.89 No.815 (1986).
- 6) S. Takechi: Studies on Product Quality Assessment by using of Joint Information, Preprints of the National Meetings of JWS, 69, (2001), pp.432-433. (in Japanese)
- 7) S. Takechi: Studies on Production Planning and Production Management by using of Joint Information (Part I) Welding Information converted from Joint Information, Preprints of the National Meetings of JWS, 69, (2001), pp.434-435. (in Japanese)
- 8) R. Mayer: IDEF family of Methods for Concurrent Engineering and Business Reengineering Applications, Dorset House Publishing, (1992).
- 9) 小野寺：グラフ理論の基礎，森北出版，(1968)。
- 10) L. Mellow and A. Sanderson: And/or Graph Representation of Assembly Plans, IEEE Trans. Robotics and Automation. Vol.6, No.2, (1990).
- 11) K. Aoyama, S. Takechi and T. Nomoto: Basic Study on the Design Supporting System for Construction Block on CIM in Shipbuilding, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 188, (2000), pp.387-398. (in Japanese)
- 12) 富山：インテリジェント CAD をいかにして作るか，インテリジェント CAD (上)，朝倉書店，(1989), pp.7-52.
- 13) Geometry Handling Library Homepage, <http://www.pml.co.jp/ghl>.