〔基調講演 OS2〕

大型構造物の安全設計における IT の活用 (大型構造物の組立作業における作業安全情報マネジメントシステムの構築)

Practical use of Information Technology in the safety design of a large-scaled structure
(Development of Safety Information Management System in Assembly Stage of Large-scaled Structure)

○正 青山 和浩 (東京大) 学 古賀 毅 (東京大)

Kazuhiro AOYAMA and Tsuyoshi KOGA, The University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo

In order to carry out manufacturing activities more safely, it is necessary to acquire the safety information at the manufacturing design stage. However, it is very difficult to acquire the safety information considering the industrial accident cases relevant to the assembling work on the factory. Therefore, in this paper, the authors develop the framework of safety information management system to assess the risk based on simulation. In this system, the industrial accident cases are represented as the information network model, and integrated with the virtual assembling simulation. This system can show a designer the work direction documents to reflect the safety information on assembling process, and also make the assembling design safer.

Key Words: Risk Assessment, Industry Accident, Assemble Simulation, CAPE (Computer Aided Production Engineering)

1. はじめに

人間の欲求は 生理的欲求／安全の欲求／親和の欲求／自我の欲求／自己実現の欲求 からなる 5 段階の欲求のピラミッド構造をしており、人間は一段目の欲求が満たされると一段上の階層の欲求を志すと A. H. Maslow は述べている¹⁾。この階層構造は、安全に対する欲求は人間の根本的な欲求であることを示しており、製造活動においても作業者の安全確保が最優先事項であり、製造環境での“安全の確保”は製造業の永遠の課題であると言われる。

ところで日本の製造業では、日々激化する国際競争で勝ち残るために、生産コストの削減やリードタイムの短縮、さらには多品種少量生産への対応などが検討され、強い製造技術の確立を目標に情報技術 (IT: Information Technology) の積極的な活用が試みられている。しかしながら“安全の確保”に関しては、労働災害死亡者数はここ数年 2000 人前後で推移しており、実際の製造現場では、産業構造の変革による未熟練労働者や外国人労働者などの就労率が高くなり、従来では普通に回避できた労働災害が多発しているといった多くの問題が存在する。

一方で、ISO-12100 (機械類の安全性—基本概念, 設計のため一般原則) の発効にともない、グローバルな安全に対する意識やリスクアセスメントの重要性が高まり、“安全教育”や“安全訓練”による日本の労働安全衛生に対する考え方の見直しが迫られている²⁾。その結果、製造現場における適切な安全管理および安全指導が要求されている。そこで本報では、ISO-12100 が規定するリスクアセスメントに対するシステム・アプローチを実現することを目指し、IT による高度生産システムを基盤とした製造環境を前提に、就労者の多様化など製造環境の多様化において安全管理やリスクの評価、および対策の提示などを統合的に支援する安全設計支援システムに関して報告する。

2. 研究の背景と目的

2.1 製造活動における IT 利用環境の現状

現在、積極的な IT の活用が製造業では試みられ、CIM

(Computer Integrated Manufacturing system) や PLM (Product Lifecycle Management) に代表される統合化生産システムの構築が進められている。この統合化生産システムは、業務部門ごとの横の連携を強め、企画から設計、生産、さらには営業、保守部門まで、製品のライフサイクルに携わるすべての部署でデータを共有し、統合化されたシステム環境で強力に生産の効率化を図ろうとするものである。この流れにおいては、3D-CAD の導入を基盤とするデジタル・モックアップと呼ばれる設計・製造活動の新しいパラダイムが提案され、効果的に活用されつつある。

デジタル・モックアップは、計算機内部の仮想環境における製品 (Product) の三次元データベースを生成、利用することによって、試作レスで設計から製造までを高度かつ円滑に進める概念である。これには、設計における CAE (Computer Aided Engineering) 利用や、製造における CAPE (Computer Aided Production Engineering) 利用などがベースとなり、コンピュータ・シミュレーション技術を駆使した設計・製造環境が整備されつつある。

2.2 作業安全計画支援に対する期待

製造におけるシミュレーション技術に関しては、ロボット・シミュレータやライン・シミュレータなどのシミュレーション・ソフトウェアの高性能化に伴い、製造活動のシミュレーション技術は非常に高いレベルに達している。さらに、製造設備だけでなく作業者もデジタル表現し、仮想工場で Digital Human が作業するシミュレーションも可能となっている。この作業者のシミュレーション技術により腕や腰、脚にかかる負荷を力学的に評価し、作業者の疲労度の推定や標準作業時間の算出などが試みられている³⁾。

このように作業者のシミュレーション技術を利用して、作業の安全衛生を事前に検討する試みは始められているが、シミュレーションを実行するために必要なモデル生成の労力や過去の労働災害情報の有効活用など、様々な課題は残されており、今後の展開が期待されるところである。また後述するリスクアセスメントにおける残留リスクへの対策として製造現場での作業者に対して適切な安全対策の指示を出す必要があり、従来の作業指示との連携を考慮する必

要もある。そこで本研究では、計算機シミュレーションによる組立作業の検討において作業の安全性を評価し、適切な対策を講じ、安全対策の指示情報を提供できるシステムの枠組みに着目し研究を進めることとする。

2.3 研究の目的

製造活動での高い安全性を確保するためには、製造計画段階における安全衛生情報の獲得が必要不可欠である。しかしながら計画段階において、様々な工程や作業を想定し、過去の事故事例などを考慮し、安全に関する情報を獲得するのは多大な労力が要求される。

ところで著者らは、大規模鋼構造物である船舶を対象に、製品モデル (Product Model) を中核とした CIM (Computer Integrated Manufacturing system) を研究開発している。構築しているシステムは SODAS (System Of Design and Assembly for Shipbuilding) ⁴⁾ と呼び、船体構造の組立作業のシミュレーション機能を有している。そこで本研究では、この組立シミュレーション機能を利用し、計画段階における作業安全のリスクアセスメントを支援することができるとするプロトタイプシステムを構築することを目指す。具体的には、以下の二つの研究目的を挙げる。

- 1) 大型構造物の組立作業の特徴を考慮し、災害発生のプロセスを整理する。次に作業に伴う危険源の指摘、効果的な対策の提案などを可能とする、安全管理情報の記述方法の検討とナレッジサーバを構築する。
- 2) 組立シミュレーション機能を利用し、作業者の安全確保のための安全対策指示情報の生成支援を可能とするシステムを構築し検証する。

3. 大規模構造物の組立作業とリスクアセスメント

3.1 リスクアセスメント

危険または有害要因を特定するリスクアセスメントは、危険な状況下で起こりうる障害または健康障害の可能性と、その程度の組み合わせであるという立場から、人、財産、社会、環境にリスクを与える潜在的なハザードを確認し、ハザードの発生確率を推定してリスクを推定し評価する分析作業である。ISO-12100 で規定されるリスクアセスメントの手順の概要は Fig.1 の様に示される ⁵⁾。この図から、リスクアセスメントにおいては、『ハザードの特定 → リスクの見積り → 安全対策』の一連の流れが存在すると理解できる。ハザードの特定においては、ISO-12100 や ISO-14121 の付属書 A に定められたもの、さらには過去の災害事例などが活用される。本研究では、過去の災害事例を基にハザードを整理し、労働安全データベースの枠組みを検討する。

Fig.1 Flow of the Risk Assessment

Fig.2 Flow of the Risk Assessment using IT

3.2 大規模構造物に起因する作業環境

大型船舶や橋梁、鉄骨構造物など大型の構造物を対象とする造船業や建設業は、受注生産型の製造業と類別される。つまり、製造対象の製品が常に変化することが特徴であり、現場作業の作業環境が流れる製品に応じてダイナミックに変化する。また、製品の大型性によりその製造作業（建造作業／建設作業）は製品の内部や上、および下など製品自体が作業環境を支配することが特徴である。これらの特徴は、家電や自動車などの小型・中型の製品を対象とし、作業の繰返しが多い大量生産型の製造業とは大きく異なり、安全計画を立案する際に十分に考慮すべき点である。

3.3 組立シミュレーションを利用したリスクアセスメント

既に述べたように、本研究では製造活動における労働災害のリスクアセスメントに対して、計算機による組立シミュレーションを利用することを検討している。組立シミュレーションを高度に実現するためには、製造活動に関係する様々な情報が十分にモデル化されている必要がある。

著者らのシステムでは、製品情報は製品モデル、生産資源の情報は工場モデル、さらには、作業自体に関する情報も定義されている。これらの情報から、労働災害に関係する情報を抽出し、労働安全データベースを組合せて利用することで、安全対策に役立てることを検討する。Fig.2 に本研究における IT を利用したリスクアセスメントの構成を示す。過去の災害事例を基にリスクを定量化し、労働安全データベースを構築する。組立シミュレーションから獲得される作業情報を基に、事前に作業のリスクを見積り、ハザードの指摘、対策の提案を可能とすることを目標とする。これらを実現するためには、以下の検討課題が重要となる。

- 1) 過去の労働災害事例情報などから得られる安全知識を如何に記述するか。
- 2) 作業に生じると考えられるハザードをどのような仕組みで検索するか。

4. 安全情報の構造化

4.1 労働災害事例データの記述手法の検討

IT の普及に伴い、現在では様々な労働災害事例のデータベースが企業内で構築され、労働災害事例データを比較的容易に計算機ネットワーク上で閲覧できるなどの環境が整備されつつある ⁶⁾。しかし、それらの事例データの記述形式はテキストが主であり、また、検索主体の利用方法であるため「業界間の共有化が難しい」「検索によって得られる結果が検索者の意図に沿ったものではないことが少なく

い」などといった問題点が指摘されている。

ところで、情報や知識の記述モデルとして様々な記述モデルが提案されている。例えば、複雑に絡みあった複合問題に対する個人あるいはグループの持つ因果連鎖の立場から見た認知構造を符号付有効グラフによって表現するモデルとして **Cognitive Map** が提案されている⁷⁾。また、**key** と **value** と定義される要素に対して、「**key** が与えられると **value** が想起される」というゆるやかな関連を表す連想構造のモデルも提案されている⁸⁾。

本研究では、後述する労働災害の発生プロセスの特徴から、ある要素が他の要素にどのように影響を与えるかという因果関係を表現する記述モデルを検討する。さらに、正確な因果関係が不明確な場合でも入力することが許されるというメリットを活用し、弱連想の考え方も導入する。

4.2 労働災害の発生プロセスとハザード

造船業における災害の傾向を概観すると、墜落や転落による災害は全体の約 4 割を占め、高所という作業環境により生じる。また、挟まれや巻き込まれといったものは使用する生産資源によるところが大きい。このように、労働災害の発生には要因が必ず存在するが、「ハザードは何から生じるか」という視点で作業を分析し、作業のハザードを次に示す様に分類整理する。

- 1) 生産資源に付随するハザード：生産資源は、作業に関わる機械・装置・用具などである。例えば、アーク溶接機は感電のハザードを伴う。使用する機械、装置、用具などに対して、ISO に定められたハザード源などを参考にリスクを推定することができる。
- 2) 作業環境に付随するハザード：どのような場所・環境で作業を行うのかなど、場所による特性、気候、など生産資源の特性以外のものにより生じるハザードである。例えば、墜落・転落のハザードとしての高所の作業環境、酸欠などのハザードとしての閉鎖空間である。
- 3) 製品（作業対象）の特性に付随するハザード：製品自体が爆発の可能性を持っている場合は容易に想像できるが、大型構造物の場合、不安定な状態で置かれている場合は、倒壊などのハザードとなる。
- 4) 作業に関わるその他の要因に付随するハザード：上記の分類に当てはまらないものをその他の要因によるハザードと定義する。これらは未知の物が多く、モデリングされた作業情報から抽出することは困難である。

以上の整理より、本研究ではハザード要因として「Ⅰ：生産資源、Ⅱ：作業環境、Ⅲ：製品特性」を考える。これらⅠ～Ⅲのハザード要因からハザードが生じ、そのハザードと人が接触する現象として災害を位置付け、災害発生のプロセスを定義する (Fig.3)。

ここで一般には、ヒューマンファクタはハザード要因として非常に重要であるが、災害におけるその特定は非常に

Fig.3 The Process of the Industrial Accident

Sample of Unit)

Fig.4 The Representation of an Accident Unit

Fig.5 Jointing each Accident Units

難しい。本研究では、適切な安全対策指示に関する情報を作業員に対して提供することにより、作業員のヒューマンファクタによる労働災害の発生を抑制するというアプローチを選択している。

4.3 労働災害発生プロセスの情報記述ユニット

本研究では、因果関係に着目した情報の構造化手法により、労働災害の過去事例などを分析し労働安全データベースを構築する。この時、作業における情報を安全面から分類してみると、次の二つの情報に分類することができる。

- ①災害の直接的原因となる「ハザード」
- ②そのハザードに影響を与える他の「要素」

さらに要素とは、具体的に、

- ・ ハザードを生み出す要素である「要因」
- ・ ハザードを打ち消す要素である「対策」

の二つに分類できる。過去の災害事例などをもとに、そのハザードの要因と対策を考慮して、情報の一単位として Fig.4 のように表現し、労働安全ユニットと呼ぶ。このように表現することにより、作業に含まれるハザード要因（生産資源、作業環境、製品特性）を知ることにより、作業に伴うハザードの情報を得ることができる。また、ハザードの情報よりハザードの対策の情報を得ることができる。

4.4 労働安全ユニットの結合

例えば、高所作業に対して足場を設置することで高所からの落下のリスクは減少するが、足場を組み立てるために新たなハザードが生じてしまう。この様にあるハザードに対して、そのハザードを打ち消す要素である「対策」は、新たなハザードを生み出す危険性を併せ持つ。

本研究では、過去の災害事例から得られた情報から労働安全ユニットを作成するが、対策は新たなハザードの要因となることを考慮してユニット情報を結合し、安全情報のネットワークを生成する (Fig.5)。このようにユニットを結合することにより、あるハザードに対する対策が新たにどのようなリスクを生じるのかを知る。

5. システムの構築

本研究では、オブジェクト指向言語である **smalltalk** (**VisualWorks2.5**) によってプロトタイプ・システムを構

築しており、二つのサブシステムから構成している。本章では、各サブシステムの概要および、その統合化によるリスクアセスメントに関して述べる。

5.1 労働安全データベース・システム

過去の事故事例などより得られた情報を基に、基本単位である労働安全ユニットの情報を入力する。具体的にはハザードを中心として、その要因、ハザードの内容、その対策に関する情報を入力する。要因および対策は AND/OR 構造によりハザードと関係付ける。また、各内容にはテキストや図、写真などのマルチメディア情報を添付することを可能としている (Fig.7 (A))。

リスクアセスメントにおいては、ハザードに対する対策前のリスク、対策後のリスク (残存リスク) を定量化する必要がある。本データベースでは、ハザードにリスクを設定する。リスクの設定には、リスクアセスメントマトリクスを用いる^{9),10)}。リスクアセスメントマトリクスは、許容できないリスクおよび許容できるリスクを Aa-Cc で評価、定量化するものである。また、対策を検討する際にはそのコストは重要な指標となる。そこで対策に要するコストを対策に関連付けて入力する。本システムでは、0-5 の相対的な値で設定している。

以上のように個々のハザードに関して情報が入力されると、本データベース・システムは自動的に Fig.7 (B) に示すように個々のユニットの情報を結合し、ハザードのネットワークを生成する。ユニットを結合する際に同一の名称

(A) Input Accident Unit

(B) Generate Accident Network

Fig.6 The Industrial Accident Information Database

の要素 (要因, ハザード, 対策) が既に存在する場合は、要素の追加およびリンクの情報が付加される。

5.2 組立シミュレーション・システム

計画者が組立シミュレーション・システムを対話的に実行することによって、使用する生産設備、生産対象のブロックに関する情報が作業情報として入力され表示される (Fig.7 (A))。また、組立の各段階における作業名、作業内容などの詳細な情報が Fig.7 (B) のように表示される。具体的には、例えば溶接作業の場合では、計画者は溶接方法、使用する溶接機器の情報を指定する。これらの情報は、システム内に定義された作業情報モデル内に管理される。

この作業情報モデルに記述される情報より、作業環境に作業にどのようなハザードが存在するかを判断する。このためには、作業にどのような機械・装置・用具が用いられるのか、また作業環境はどのようにになっているか、さらには製品の特性を知ることが重要となる。本組立シミュレータは製品情報として製品モデルを中核にしているの、中間製品の重量・重心、および溶接箇所、閉鎖空間など製品特性に関する情報を容易に抽出することが可能である。例えば、高所に対しては、作業箇所に対して、作業空間を生成し、高さ 2 m 以上の場合を高所として抽出することや (Fig.8), 中間製品の形状および重心より設置状態の安定性を評価することができる¹¹⁾。

5.3 システムの統合化によるリスクアセスメント

労働安全データベースと組立シミュレーションを統合的に利用することによって組立作業のリスクアセスメントを実行する。以下に具体的な流れを示す。

Fig.7 Assembling Simulation Tool for shipbuilding (AST)

Fig.8 Recognition of Working Environment

Causes extracted from work

Fig.9 Search of safety information

(A) Tree of Candidate Actions

(B) Sorted Actions by Cost and Risk

Fig.10 Making Tree of Candidate Actions and Selection

Step_1: 作業情報モデルより、作業空間を生成する。安全管理に関わる要素を抽出。生産資源の情報も抽出する。

Step_2: 抽出された情報を基にハザードを検索する (Fig.9)。

Step_3: 対策とそれに伴い生じるハザードをツリー表示し、構造を明らかにする (Fig.10(A))。

Step_4: リストアップされた対策のツリーから、コスト順、リスクの大きさ順のリストを表示する。また、費用対効果の最も高い対策の組み合わせを得るため、対策案を横軸にコスト、縦軸にリスクをとりプロットし、評価関数 ($1/\text{Risk} \times \text{Cost}$) が最大になる対策案を提案する。評価関数は、「機能=1/Risk」とすると価値工学における「Function / Cost」に相当する (Fig.10(B))。

Step_5: 選択された対策を要因とする新たなハザードが検索される。ここで再び対策を検討し、選択する。この対策の選択により、また新たなハザードが発生する。Step_2 にしたがってハザードの検索、対策の検討、採用を繰り返す。例えば、作業に伴うリスクを許容リスク以下まで低減させる事を目標にアセスメントを進め、最終的に作業情報に、安全情報を出力する。もし、許容リスクまで下がらない場合は、工程を変更する必要があるという結果を得る。

Step_6: 上記 Step_5 まででは、安全情報のネットワークを利用し、想定できるハザードを順方向で漏れなくチェックすることができる。しかしながら、この処理には確実に要因が想定できていることが条件となる。そこで、現在想定している作業に加え、他の要因が重なることによって新たなハザードが発生してしまうような要因を検索し、チェックリストを作成する機能を利用する。上記の処理が順方向であることに対して、逆方向の情報検索に相当する。工程設計者は、逆引きによって示された要因のリストと実際の作業を想定し、これらの要因が作業に存在するかチェックする。

Fig.11 The Work Directions Document including Safety Information

Step_7：生成された安全情報，作業情報を基に作業指示書
を出力し，最終的な検討のアウトプットを得る (Fig.11)。

6. 結 言

6.1 結 論

グローバルな安全に対する意識の高まり，生産活動への
計算機の積極的な導入を踏まえ，生産活動において，安全
管理の観点から作業の危険性を認識し，現場作業者に適切
な安全指示情報を提供することが重要であるとの立場から
研究を行った。

災害防止の観点から，災害発生の情報記述のモデル化を
検討するが重要であると考え，労働安全情報の記述形式を
検討した。具体的には，災害を実作業に伴う要素（生産資
源，作業環境，製品特性）によりハザードが発生し，ハザ
ードと人の接触が災害を生じるとして整理し，記述モデル
を提案した。Cognitive Map や連想構造などの構造化手法
を参考に，労働災害の要素（要因／対策）とハザードの因
果関係を用いて労働安全ユニットを提案し，それら複数を
結合することによって労働安全データベースの枠組みを提
案した。

さらに，データベースを構築しただけでは活きた情報と
して利用することが出来ないと考え，組立シミュレーショ
ン・システムを有効活用した労働安全のリスクアセスメン
ト手法を検討した。具体的には，組立シミュレータを用い
て実作業より安全に関わる要素を抽出し，労働安全データ
ベースから対話的に危険源や対策を知ることができるプロ
トタイプ・システムを構築し，現場作業者に適切な安全情
報を付加した作業指示情報を提供することができる可能性
を示した。

6.2 今後の課題

今回，構築したシステムでは，労働災害情報の構造化は
人の手で行うことを前提とした。しかしながら，実際に，
システムの利用者がその因果関係を考慮し，構造化して多
くの情報を入力するには多大な困難が伴うことが容易に予
想される。近年，広域ネットワークからの情報収集などの
データマイニングやテキストマイニングに関する研究など
が進んでいる。これらの研究成果を利用して，WEB 上の膨
大な情報から必要な情報を効率よく収集，分類，統合化を
行うことも可能になってきている。将来的には，これらの
技術を利用し，世界中に散在する情報から安全に関する情
報を半自動的に収集，体系化することが期待される。

また，本研究の安全情報はフラットな構造を基本として
いる。しかしながら，ハザード情報には階層が存在し¹²⁾，
階層構造を用いたネットワークを検討する必要性は否定で
きない。階層構造を陽に利用することで，検索条件のレベ
ルに応じた検索結果の出力を可能とすることが期待できる。
本システムでは，作業環境に関するハザードの抽出は，高

所作業空間や閉所作業空間の判定のみとなっており，製品
モデルの情報を十分に活用していない。生産資源における
通路，設備配置等を含めた，作業環境のより詳細なモデル
化を行うことが重要であると認識している。

今後，実際の労働災害事例を入力し，実際の製造現場で
の利用を通して本システムを評価しながら，研究を進める
予定である。

謝 辞

本研究は，長谷真太郎 君の平成 12 年度 東京大学工学部
卒業論文を基にその成果を纏めたものである。氏の真摯な
努力に敬意を表する。また，本研究で利用した組立シミュ
レーション・システムは株式会社 名村造船の開発成果で
ある AST (Assembling Simulation Tool for Shipbuilding)
を利用させていただいたことを付記する。このシステムは
著者らの研究成果をベースに，科学技術振興事業団の独創
的研究成果育成事業における助成金制度を受け造船所で
実用可能なレベルに研究開発されたシステムである。最後
に，本研究を進めるにあたり様々な有益な助言を頂いた東
京大学 野本敏治 教授に御礼を申し上げる。

参考文献

- 1) A.H.マズロー著・小口忠彦訳：人間性の心理学－モチベー
ションとパーソナリティ，産業能率大学出版部
(1987)
- 2) 向殿政男：リスク認識と安全目標，第 31 回安全工学シ
ンポジウム 講演予稿集 pp.57-60 (2001)
- 3) 有澤 博：人間－機械協調システム最適設計のための人
体シミュレータの構築に関する研究，平成 12 年度 IMS
研究成果講演論文集 pp.177-180 (2001)
- 4) 例えば，青山和浩 他：生産計画情報の段階的詳細化の
表現に関する研究，日本造船学会論文集 Vol.188，(印刷
中 2001)
- 5) 萩原博之：黒船来襲！「安全」が開国迫る，日経メカニ
カル No538 (1999)
- 6) 安全衛生情報センター：http://www.jaish.gr.jp/
- 7) 寺野寿郎：システム工学入門，共立出版 (1985)
- 8) 前田晴美・髙谷和人・西田豊明：連想構造を用いた情報
整理システム，情報処理学会論文誌 Vol.38 No.3
- 9) Nic W. Hurst，花井莊輔訳：リスクアセスメント，丸善
- 10) 松本俊次：安全設計のためのリスクアセスメント手法，
新技術開発センター (1997)
- 11) 杉原海太：造船 CIM における製造性評価に関する基礎
的研究，東京大学修士論文 (1996)
- 12) 労働省安全課編：労働災害分類の手引き，中央労働災害
防止協会 (1999)