

東京大学大学院新領域創成科学研究科
人間環境学専攻

平成 27 年度
修士論文

船舶建造プロセスシミュレーションを用いた
人員と設備の設計に関する研究

2016 年 2 月 4 日提出

指導教員 稗方 和夫 准教授

松原 洸也

目次

目次.....	I
図目次.....	IV
表目次.....	VI
第1章 序論.....	1
1.1 背景.....	2
1.2 目的.....	2
1.3 本論文の構成.....	3
第2章 関連研究.....	4
2.1 はじめに.....	5
2.2 プロジェクト管理手法.....	5
2.2.1 ガントチャート.....	5
2.2.2 PERT/CPM.....	6
2.2.3 山積み・山崩し法.....	6
2.2.4 フローショップ・ジョブショップスケジューリング問題.....	8
2.3 プロセス評価手法に関する研究.....	10
2.3.1 DSM を用いたプロセス評価に関する研究.....	10
2.3.2 チームのパフォーマンス評価に関する研究.....	11
2.3.3 船舶の建造プロセスシミュレーション.....	15
2.3.4 製造業への新規技術導入効果の評価に関する研究.....	17
2.4 本研究の位置付け.....	18
第3章 提案手法.....	20
3.1 はじめに.....	21
3.2 提案手法の概要.....	21
3.3 生産プロセスのモデル化.....	23
3.3.1 製品モデル.....	23

3.3.2	ワークフローモデル.....	25
3.3.3	組織モデル.....	27
3.4	生産プロセスシミュレーション.....	28
3.4.1	説明に用いる記号.....	28
3.4.2	シミュレーション開始前の設定.....	30
3.4.3	シミュレーションの流れ.....	31
3.4.4	シミュレーションの出力.....	38
3.5	新規生産設備導入効果の評価.....	39
第4章	開発した生産プロセスシミュレータ.....	41
4.1	はじめに.....	42
4.2	シミュレーションモデルの入力.....	42
4.2.1	製品モデルの入力.....	44
4.2.2	ワークフローモデルの入力.....	44
4.2.3	組織モデルの入力.....	45
4.3	生産プロセスシミュレーションの実行と結果の出力.....	46
第5章	開発した生産プロセスシミュレータの検証.....	48
5.1	はじめに.....	49
5.2	シミュレーションの入力.....	49
5.2.1	製品モデルの設定.....	49
5.2.2	ワークフローモデルの設定.....	50
5.2.3	組織モデルの設定.....	51
5.3	検証結果.....	51
5.3.1	シミュレーションの結果.....	51
5.3.2	解析的な計算結果.....	52
5.3.3	検証結果のまとめ.....	54
第6章	ケーススタディ.....	55
6.1	はじめに.....	56
6.2	ケーススタディの対象.....	56
6.2.1	対象とする製品および工程.....	56

6.2.2 導入を検討する生産設備.....	58
6.3 ケーススタディ 1：設備導入効果の検証と導入コストを含めた分析.....	60
6.3.1 シミュレーションの入力.....	61
6.3.2 結果.....	65
6.4 ケーススタディ 2：作業場所制約の違いによる設備導入効果の変化の分析 ..	70
6.4.1 シミュレーションの入力.....	70
6.4.2 結果.....	71
6.5 ケーススタディ 3：技術レベルの違いによる設備導入効果の変化の分析.....	73
6.5.1 シミュレーションの入力.....	73
6.5.2 結果.....	74
第7章 考察.....	77
7.1 はじめに.....	78
7.2 提案手法に関する考察.....	78
7.2.1 部品の誤差の許容値について.....	78
7.2.2 造船業における工数の見積もり.....	78
7.2.3 人員と設備のスキルについて.....	81
7.3 ケーススタディに関する考察.....	81
7.3.1 誤差発生確率と費用の変化による影響.....	81
7.3.2 作業場所の制約の違いによる導入効果の変化.....	82
7.3.3 技術レベルの違いによる導入効果の変化.....	83
7.3.4 実際の生産設備導入結果との比較.....	83
7.4 本研究の課題.....	85
第8章 結論.....	87
8.1 結論.....	88
8.2 今後の展望.....	88
謝辞.....	90
参考文献.....	93

図目次

図 2-1	ガントチャートの例	5
図 2-2	アロー・ダイアグラムの例.....	6
図 2-3	山積み操作の例（文献[7]を参考に作成）	7
図 2-4	山崩し操作の例（文献[7]を参考に作成）	8
図 2-5	フローショップの例	9
図 2-6	ジョブショップの例	9
図 2-7	DSM の例.....	10
図 2-8	VDT (Virtual Design Team)のモデルの概要[16]	12
図 2-9	PMT (Process Management Tool)におけるモデル[17]	13
図 2-10	TeamPort のユーザインタフェース[19]	14
図 2-11	ペトリネットによる造船工場における生産活動の表現[22]	16
図 2-12	造船用バーチャルファクトリーの概要[25]	17
図 3-1	提案手法の概要	22
図 3-2	製品モデルの部品と依存関係の例	24
図 3-3	ワークフローモデルのタスクと依存関係の例.....	25
図 3-4	生産プロセスシミュレーションの流れ	31
図 3-5	部品の誤差値の更新と手直し作業判定の流れ.....	36
図 3-6	設備導入後の組織モデル作成の例	40
図 4-1	シミュレーションモデルの情報を保存した XML ファイルの例	43
図 4-2	製品モデル入力の様子.....	44
図 4-3	ワークフローモデル入力の様子.....	45
図 4-4	組織モデル入力の様子	46
図 4-5	シミュレーション結果の CSV ファイルの例	47
図 5-1	シミュレータ検証用の製品モデル	49
図 5-2	シミュレータの検証用のワークフローモデル.....	50
図 6-1	曲がりブロック [39]	57
図 6-2	ケーススタディで想定する工場のレイアウト.....	58

図 6-3 曲がり外板工作精度評価システムの概要[44]	59
図 6-4 曲がり外板工作精度評価システムの工場導入例[45].....	60
図 6-5 曲がりブロックの部品と部品間の依存関係	61
図 6-6 曲がりブロック製造のワークフロー.....	63
図 6-7 システム導入前および導入後の結果.....	66
図 6-8 システム導入前および導入後の実績工数.....	67
図 6-9 「バーナー」の誤差発生確率を変化させた場合の結果	68
図 6-10 「バーナー」の費用を変化させた場合の結果.....	69
図 6-11 ワークフローの同時実行数の最大値を変化させた場合の結果	71
図 6-12 ぎょう鉄作業者の誤差発生確率を変化させた場合の結果	75
図 7-1 曲がり外板の曲面不適合率の変化[45].....	83
図 7-2 曲がり外板の距離誤差のばらつきの変化[45]	84

表目次

表 3-1	部品の属性	24
表 3-2	タスクの属性	26
表 3-3	リソース（人員および設備）の属性	27
表 3-4	組織モデルの例	28
表 3-5	説明に用いる記号（シミュレーション実行前に定義されるもの）	29
表 3-6	説明に用いる記号（シミュレーション実行中に更新されるもの）	30
表 5-1	シミュレータ検証用の製品モデルの誤差の許容値	50
表 5-2	シミュレータの検証用のワークフローモデルの属性	50
表 5-3	シミュレータの検証用の組織モデル	51
表 5-4	検証用のシミュレーションの結果	52
表 5-5	解析的な計算結果	54
表 5-6	シミュレーション結果と解析的な計算結果の比較	54
表 6-1	曲がりブロックの部品の誤差の許容値	62
表 6-2	曲がりブロック製造のタスクの工数と対象とする部品	63
表 6-3	曲がりブロック製造の人員の情報	64
表 6-4	曲がりブロック製造の設備の情報	64
表 6-5	「バーナー」に設定した誤差発生確率と費用	65
表 6-6	システム導入前および導入後の結果の平均と標準偏差	66
表 6-7	システム導入前および導入後の実績工数の平均と標準偏差	67
表 6-8	「バーナー」の誤差発生確率を変化させた場合の結果の平均と標準偏差	68
表 6-9	ワークフローの同時実行数の最大値が 2 の場合の平均と標準偏差	71
表 6-10	ワークフローの同時実行数の最大値が 3 の場合の平均と標準偏差	72
表 6-11	ワークフローの同時実行数の最大値が 4 の場合の平均と標準偏差	72
表 6-12	ワークフローの同時実行数の最大値が 5 の場合の平均と標準偏差	72
表 6-13	曲がりブロック製造の人員の情報（ケーススタディ 3）	74
表 6-14	ぎょう鉄作業者の誤差発生確率が 0.05 の場合の平均と標準偏差	75
表 6-15	ぎょう鉄作業者の誤差発生確率が 0.10 の場合の平均と標準偏差	75

表 6-16	ぎょう鉄作業者の誤差発生確率が 0.15 の場合の平均と標準偏差.....	76
表 7-1	船舶建造プロセスの作業の種類と管理単位[40].....	80

第1章 序論

1.1 背景.....	2
1.2 目的.....	2
1.3 本論文の構成.....	3

1.1 背景

製造業における生産プロセスでは、基本的にはそのプロセスによって製造される製品の機能・品質(Quality)、価格・原価(Cost)、量・時期・納期(Delivery)の3つの価値の向上が求められ、この3つの価値要件はQCDと呼ばれる[1]。生産管理は、生産プロセスおよび製品のQCDを高めるための手段であり、製品の品質や原価、納期についての計画を実現するように、生産活動全体を効率化させるための管理活動である[2]。生産管理の代表例として、生産計画、日程計画、設備管理などが挙げられる[3]。生産計画は、販売部門が作成した販売計画を基にして、ある一定期間に製造部門が各製品をどれだけ生産するかを計画することである。日程計画はスケジューリングとも呼ばれ、生産設備に割り当てられた一定期間の仕事に対して、人員や設備ごとに作業の開始、終了時刻と作業の順序を決定することである。また、設備管理とは生産設備の運用計画や保守、整備などの処理を行うことである。

設備管理活動の一環として、生産設備への投資がある。設備投資はいくつかの種類に分類することができ、新規に開発した製品を生産するための創業投資、現在の設備能力では需要を満足させることができない場合に行われる増産投資、製品の品質を改良したり、コストの削減を図るための改良投資などが存在する[4]。

船舶の生産プロセスにおいてもQCDの向上が重要視されるが、生産プロセスのQCDを向上させるためには、新規生産設備導入の検討が必要不可欠なものとなっている。しかし、船舶の生産のような個別受注の生産プロセスでは設備導入の効果を適切に見積もることが困難である。プラントや造船、重工業などに代表される個別受注生産の形態をとる生産プロセスでは、部品点数が膨大で工数が大きく複雑であり、後工程で補修・手直し作業が頻繁に発生するという特徴のために、新規生産設備がプロセス全体へ及ぼす影響を評価することが難しくなっているということが原因である。現状では、導入を検討する生産設備が導入対象の工程に与える影響だけが考慮されていたり、設備管理担当者の勘と経験に基づいて判断されていたりする場合があります。生産プロセス全体へ与えるメリット・デメリットを定量的に評価したうえで合理的な設備導入が行われているとは言い難い。

1.2 目的

本研究では、船舶の生産プロセスにおいて、新規生産設備を導入した際の効果を定量的に評価することを目的とする。具体的には、生産プロセスで対象とする製品の製造誤差に基

づく手直し作業を考慮した船舶建造シミュレーションを利用して、新規生産設備導入によるプロセス全体の時間と費用への影響を評価する手法を提案する。

また、造船所における船舶の曲がりブロックの生産プロセスを対象としたケーススタディにおいて、具体的な新規生産設備導入の効果について評価する。

1.3 本論文の構成

本論文の構成について以下に示す。

第1章では、本研究の背景と目的について述べた。

第2章では、製造業における生産プロセスの評価に関連する技術、手法や研究について概観し、本研究の位置づけを示す。

第3章では、本研究の提案手法について述べる。

第4章では、提案手法をもとに開発した生産プロセスシミュレータについて述べる。

第5章では、開発した生産プロセスシミュレータの検証結果について述べる。

第6章では、提案手法を用いた船舶曲がりブロックを対象としたケーススタディについて述べる。

第7章では、提案手法やケーススタディについての考察について述べる。

第8章では、本研究の結論と今後の展望について述べる。

第2章 関連研究

2.1 はじめに.....	5
2.2 プロジェクト管理手法.....	5
2.2.1 ガントチャート.....	5
2.2.2 PERT/CPM.....	6
2.2.3 山積み・山崩し法.....	6
2.2.4 フローシヨップ・ジョブシヨップスケジューリング問題.....	8
2.3 プロセス評価手法に関する研究.....	10
2.3.1 DSM を用いたプロセス評価に関する研究.....	10
2.3.2 チームのパフォーマンス評価に関する研究.....	11
2.3.3 船舶の建造プロセスシミュレーション.....	15
2.3.4 製造業への新規技術導入効果の評価に関する研究.....	17
2.4 本研究の位置付け.....	18

2.1 はじめに

本章では、生産プロセスの評価に関する既存研究について述べる。具体的には、種々のプロジェクト管理手法や、スケジューリングやシミュレーション手法を用いたプロセス評価に関する研究について概観する。本章の最後に、既存研究を踏まえたうえで本研究の位置付けについて示す。

2.2 プロジェクト管理手法

本節では、プロジェクトを管理するための様々な手法について説明する。

2.2.1 ガントチャート

ガントチャート[5]は、プロジェクトにおける作業日程の計画を図示したものである。20 世紀初頭に Henry Gantt によって考案された、スケジューリングに関する最も古典的な手法の 1 つである。図 2-1 にガントチャートの例を示す。ガントチャートの横軸は期間、縦軸は作業項目であり、各作業の開始時期から終了時期までを横棒グラフによって書き込むことによって所要時間を可視化する。

ガントチャートは作業日程の計画や実績を簡単に把握できるため多種多様なプロジェクト管理において広く用いられているが、各作業項目間の依存関係や手戻りなどを表現することはできない。

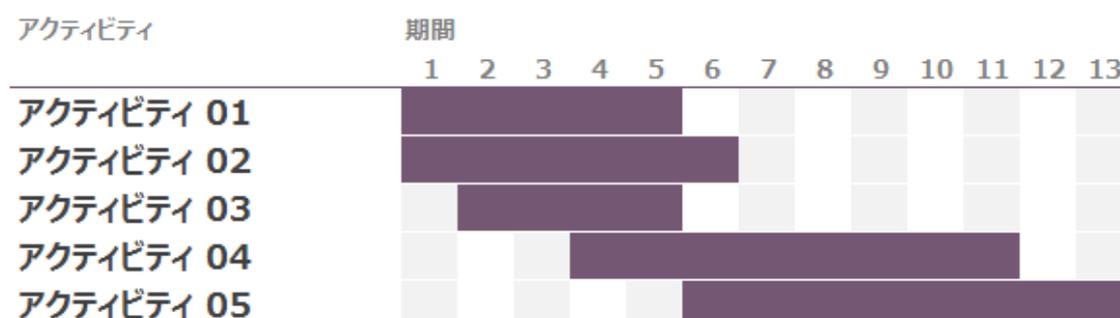


図 2-1 ガントチャートの例

2.2.2 PERT/CPM

PERT (Program Evaluation and Review Technique) と CPM (Critical Path Method) [6] は、大規模なプロジェクトを計画・管理するための技法である。

PERT は、アメリカ海軍における開発スケジュールの管理方式として 1950 年代後半に発明された。PERT では、プロジェクトを達成に必要な作業に分解し、各作業間の依存関係と楽観的・平均的・悲観的な所要時間を定義したうえで、それをアロー・ダイアグラムと呼ばれるネットワーク図で表現する。図 2-2 にアロー・ダイアグラムの例を示す。図中のノードは作業のマイルストーン(開始点および終了点)、リンクは作業、数字は作業の所要時間を表している。各作業の所要時間とネットワークから、プロジェクト全体の所要時間や各作業の開始・完了時刻やクリティカルパス、余裕時間などを計算することができる。

CPM は Du Pont 社のプロジェクト計画手法として PERT とほぼ同時期に開発された。CPM では PERT で求められたクリティカルパス上の所要時間を短縮する必要があるときに用いられる手法であり、短縮に必要な費用を考慮したうえでコスト最適化問題を解決する。

PERT/CPM ではプロジェクトのリソースに関する制限は与えないため、リソースを考慮したプロジェクトの期間について計算することは不可能である。

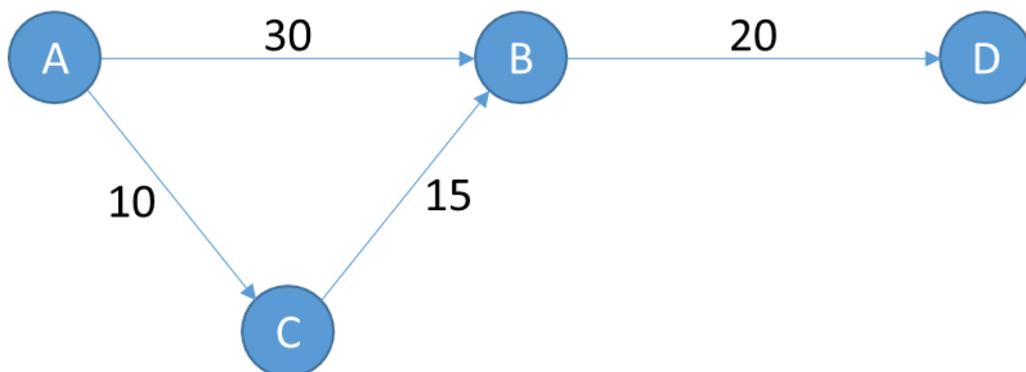


図 2-2 アロー・ダイアグラムの例

2.2.3 山積み・山崩し法

前述のように、PERT の技法では時間以外の人員、設備などのリソースの制約を対象としていない。このような資源制約を考慮した日程計画の検討を行うための手法の 1 つに山積み・山崩し法[7]がある。

アロー・ダイアグラムで記述されたプロジェクトの日程計画をガントチャートのような時間尺度を表す形式で表現し、プロジェクトの全期間にわたって同時に行われる作業に必要な資源の総和を計算する操作を山積みという。山積み操作の例を図 2-3 に示す。図の上側に示されているガントチャートでは、アルファベットは作業項目、括弧内の数字はその作業の所要人数を表している。また、グレーの部分はその作業の余裕時間である。このガントチャートに対応した所要人数の山積みの時系列グラフを描くと、図の下側のグラフになる。このプロジェクトの日程計画では、プロジェクトの中ほどで所要人数がピークをとり、終盤で少なくなることがわかる。

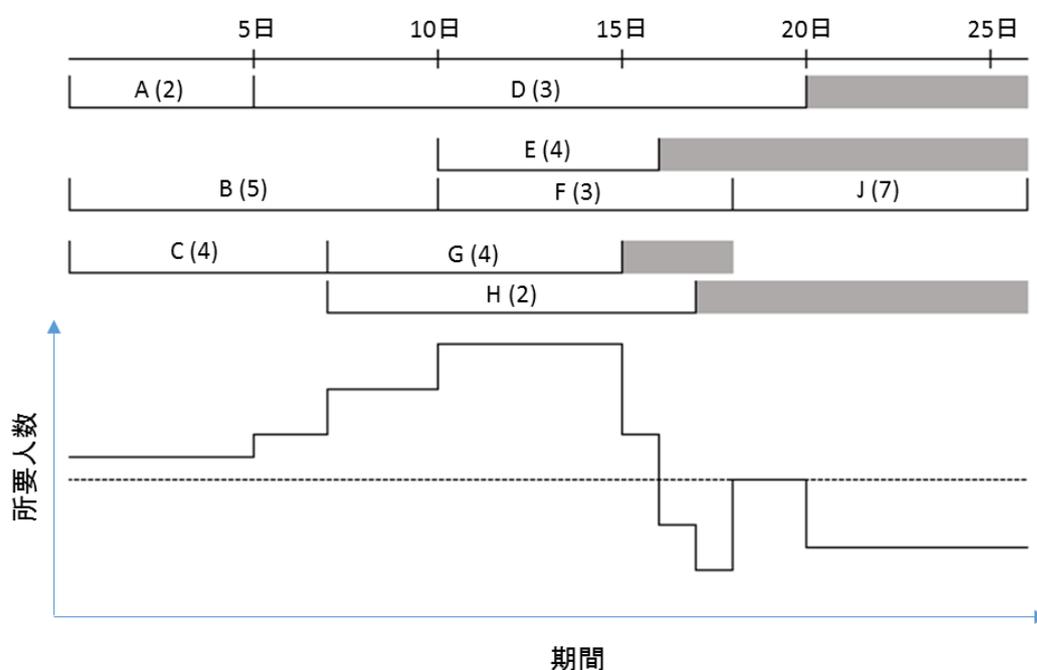


図 2-3 山積み操作の例（文献[7]を参考に作成）

山積み操作を実行した結果に対して、各作業の余裕時間を利用して作業の開始時間を遅らせることによって、必要な資源の総量の時間変動を平準化することが可能かどうかを考察する作業が山崩し操作である。図 2-3 に対して山崩し操作を行った結果の一例を図 2-4 に示す。所要人数の時系列変化が平準化されており、人員の手配が合理的になったことがわかる。

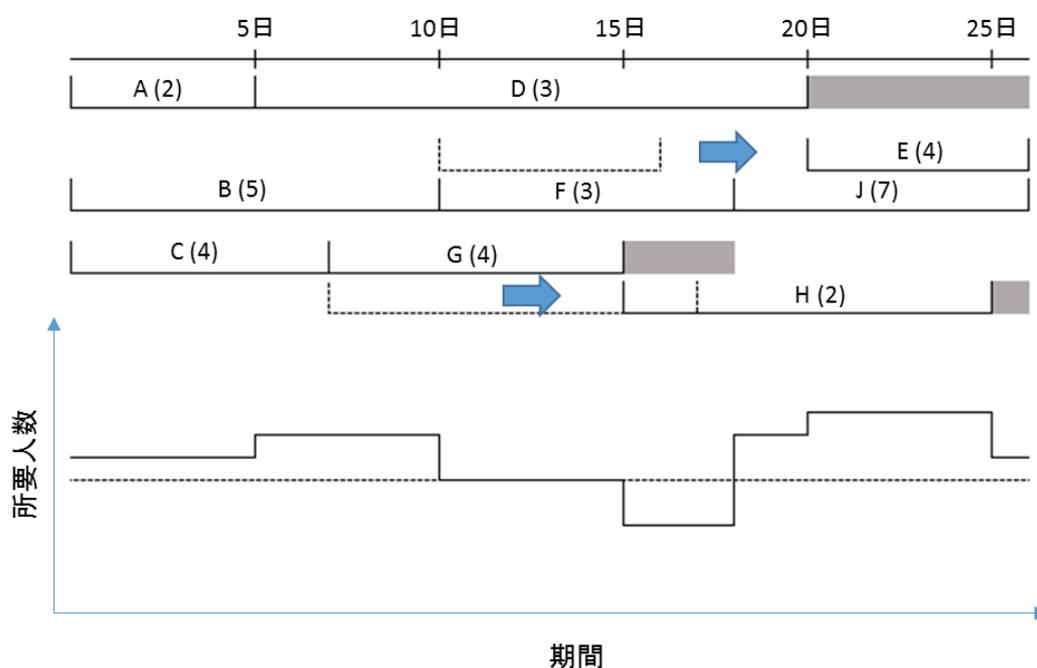


図 2-4 山崩し操作の例（文献[7]を参考に作成）

2.2.4 フローショップ・ジョブショップスケジューリング問題

生産設備がどのようにシステムを構成しているかに応じて、生産プロセスのスケジューリング問題はフローショップスケジューリング問題とジョブショップスケジューリング問題[8]に大別される。

製品の加工順序にしたがって生産設備を配置し、それを用いて製品を生産する場合のシステムの構成をフローショップと呼ぶ。一般的には、ラインを構成して製品の生産を行っている場合がフローショップである。フローショップの典型的な例を図 2-5 に示す。このようなフローショップを構成する生産設備での製品の加工時間を考慮したうえで、加工対象物の投入順序を決定する問題はフローショップスケジューリング問題と呼ばれる。

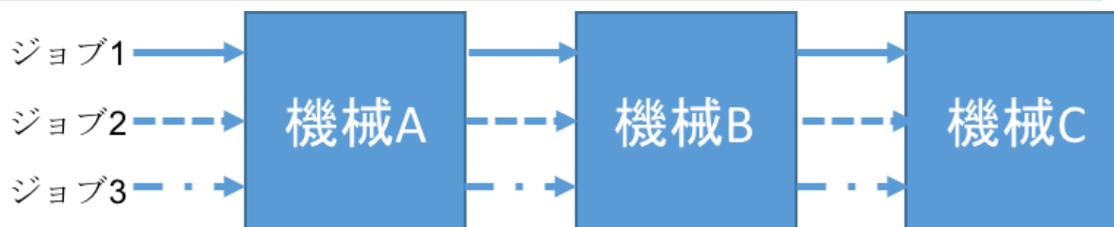


図 2-5 フローショップの例

加工対象物によって加工順序が異なる場合は、フローショップのように生産設備を配列してジョブを流すことによって製品を生産することはできず、ジョブショップと呼ばれる形態をとる。ジョブショップでは、加工対象物はそれぞれの加工順序にしたがって生産設備へ搬送され、加工される。ジョブショップの典型的な例を図 2-6 に示す。このスケジューリング問題はジョブショップスケジューリング問題と呼ばれ、生産設備ごとに生産順序を決定する必要があるためにフローショップスケジューリング問題よりも複雑な問題となる。

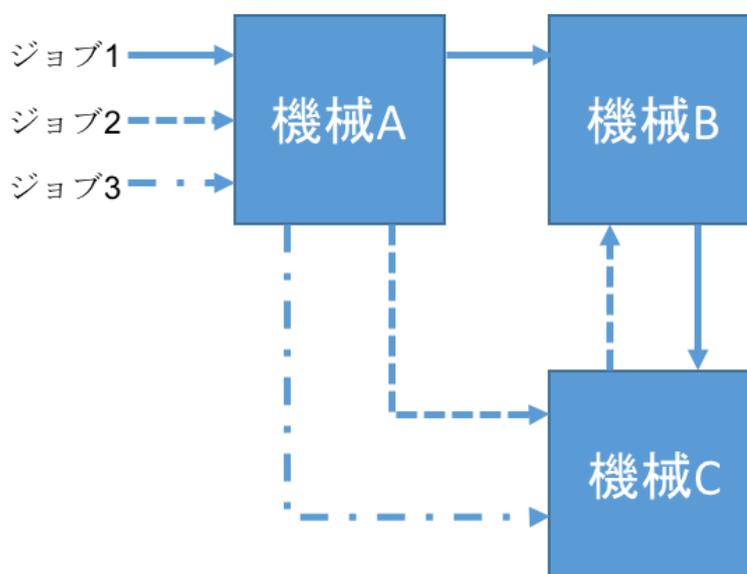


図 2-6 ジョブショップの例

このような人手や機械などの生産資源に関する制約を取り入れたスケジューリング問題は、資源制約付きプロジェクトスケジューリング問題 (Resource-Constrained Project Scheduling Problem; RCPSP) [9][10]としてモデル化されている。RCPSPでは、仕事間の実行順序制約に加えて、ある時刻における仕事のリソース消費量の制限が加わった状態で所要時間が最小となるようなスケジューリングを行う。

2.3 プロセス評価手法に関する研究

生産プロセスは、時々刻々と状態を変え、故障や手戻りなどの不確実性を含んでいるため、スケジューリングやそのパフォーマンスの評価にしばしばシミュレーションが用いられる[11]。本節では、シミュレーションを用いた手法を中心に、プロセスの評価に関する研究について説明する。

2.3.1 DSM を用いたプロセス評価に関する研究

複雑な製品の設計開発プロセスでは、タスク間の関係も組織内の人員の関係も非常に複雑なものとなるが、2.2 で述べた従来のプロジェクト管理手法であるガントチャート、PERT/CPM などでは複雑さに起因する問題を扱うことができない。

このような複雑な問題に対処するための技術の 1 つに DSM (Design Structure Matrix)[12] がある。DSM は Steward[13]によって 1970 年代に考案された。DSM は、システムの構成要素とそれらの相互作用を表す行列であり、システムの構造を明らかにすることができるものである。図 2-7 は 4 つの要素 A, B, C, D を持つシステムの DSM の例を示している。例えば行 B を横方向に観察すると、列 A および列 D に X マークが付けられており、これは要素 B が要素 A, D からの入力を受けることを意味する。また、列 B を縦方向に観察すると、行 C および行 D に X マークが付けられており、これは要素 B が要素 C, D に出力を提供していることを意味する。このように、DSM はシステムの構成要素間の情報のフローを可視化することができる。DSM の要素のパーティショニングや再配置を行うことで、要素間の複雑な依存関係を考慮したシステムの設計を行うことが可能となる。

A			
X	B		X
	X	C	
X	X		D

図 2-7 DSM の例

DSM を利用した様々な分野のプロセスの評価に関する研究が実施されている。

Cho ら[14]は、タスク DSM を利用した製品設計プロセスのシミュレーションを行っている。設計作業の反復プロセスをモデル化し、反復があるプロセスに有効な作業戦略のヒューリスティクスを導入した RCPSP に基づくスケジューリング手法を提案している。提案したシミュレーション手法を UAV の設計プロセスに適用し、設計タスクのスケジューリング結果を得た。

Yang ら[15]は製品開発プロセスにおけるタスクの反復と並列作業のスケジュールへの影響を評価している。タスクの反復と並列作業を製品開発プロセスにおける不確実性ととらえて、その不確実性がプロジェクトのスケジュールに与える影響を定量的に評価するための DSM を用いたモデリングと離散イベントシミュレーションの手法を提案している。提案手法を SIM カードの設計および製造プロセスに適用し、複数の SIM カード開発シナリオのスケジューリングを評価した。

2.3.2 チームのパフォーマンス評価に関する研究

Jin ら[16]は、VDT (Virtual Design Team)と呼ばれるプロジェクトの組織モデルを提案している。VDT のモデルの概要を図 2-8 に示す。VDT では、プロジェクトの対象となる製品データ、プロセスデータ、組織データを基にしてプロジェクトのモデル化を行う。モデル化されたプロジェクトのシミュレーションを実行することで、アクティビティ間の相互依存関係が組織内の調整に与える影響や、組織構造やコミュニケーションツールがチームの調整能力やプロジェクトのパフォーマンスに与える影響を分析することができる。

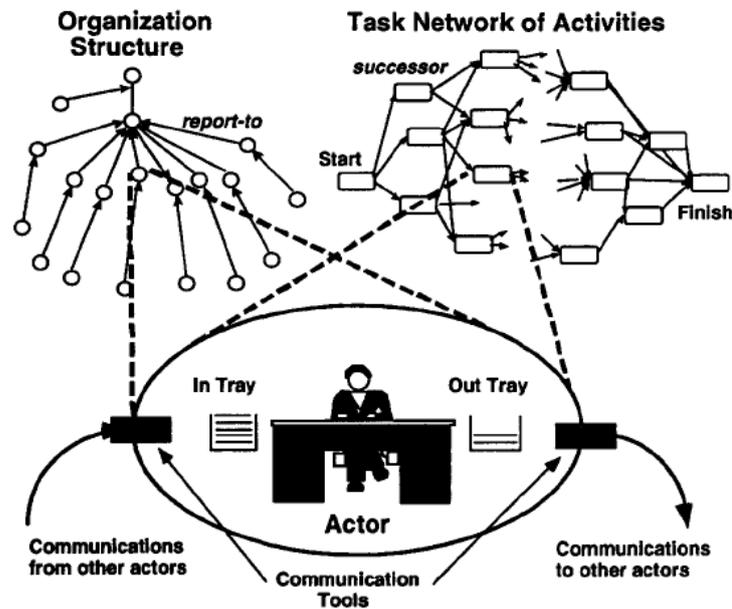


図 2-8 VDT (Virtual Design Team)のモデルの概要[16]

Suzuki ら[17]は、PMT (Process Management Tool)と呼ばれるビジネスプロセスのモデリングおよびシミュレーションのツールを開発している。PMT では企業を「オペレーティングシステム」のようなものとみなし、様々なアプリケーションがリソースを使用してユーザのリクエストを処理するものとして捉えている。PMT はこの観点に基づいて、図 2-9 に示すような「クライアント」、「プロセス」、「組織」、「リソース」の 4 つのモデルを用いて企業活動をモデル化している。PMT は自動車製造のプレス成形プロセスに対するケーススタディに適用された。異なる組織構造を用いてプレス成形プロセスのシミュレーションを行い、それぞれの組織モデルを評価した。

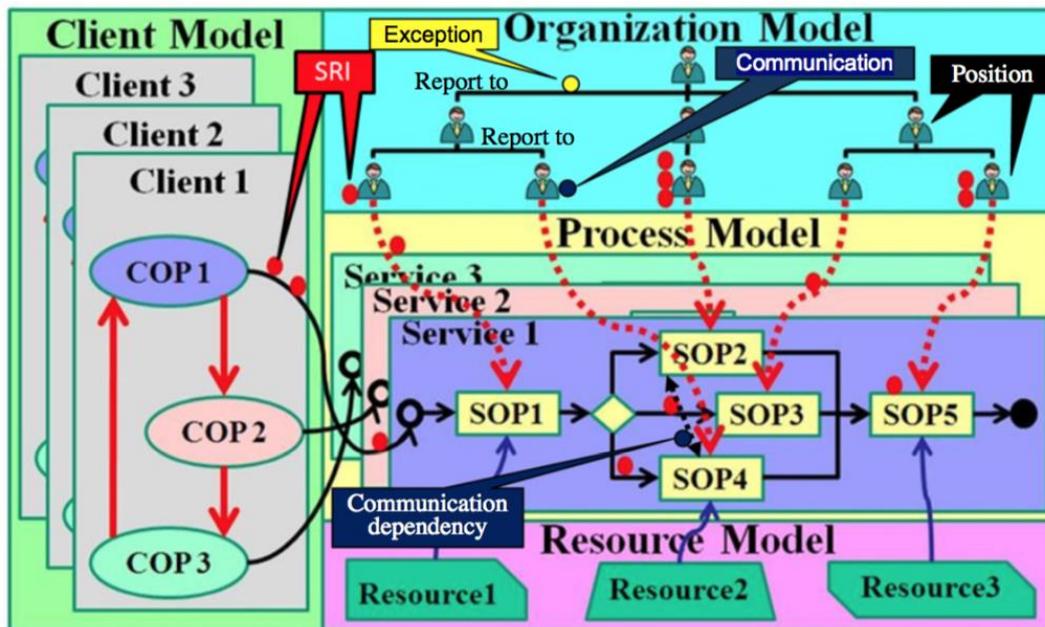


図 2-9 PMT (Process Management Tool)におけるモデル[17]

Moser[18]は、TeamPort[19]を用いて国際共同プロジェクトの設計に関する研究を行っている。TeamPort のユーザインタフェースを図 2-10 に示す。TeamPort では、図 2-10 上側に示す地図上でチームが置かれる位置を定義する。これによって、複数の地域間で協業を行う際に問題となる時差や賃金水準、勤務時間の差などを考慮することが可能となる。また、図 2-10 の下側は TeamPort におけるプロジェクトのモデリングツールのユーザインタフェースを示しているが、TeamPort では「製品」、「アクティビティ」、「フェーズ」、「チーム」の 4 つのモデルを用いてプロジェクトをモデル化する。プロジェクトモデルを利用したシミュレーション機能も実装されており、シミュレーションの結果としてプロジェクトに要する時間と費用を得ることができる。

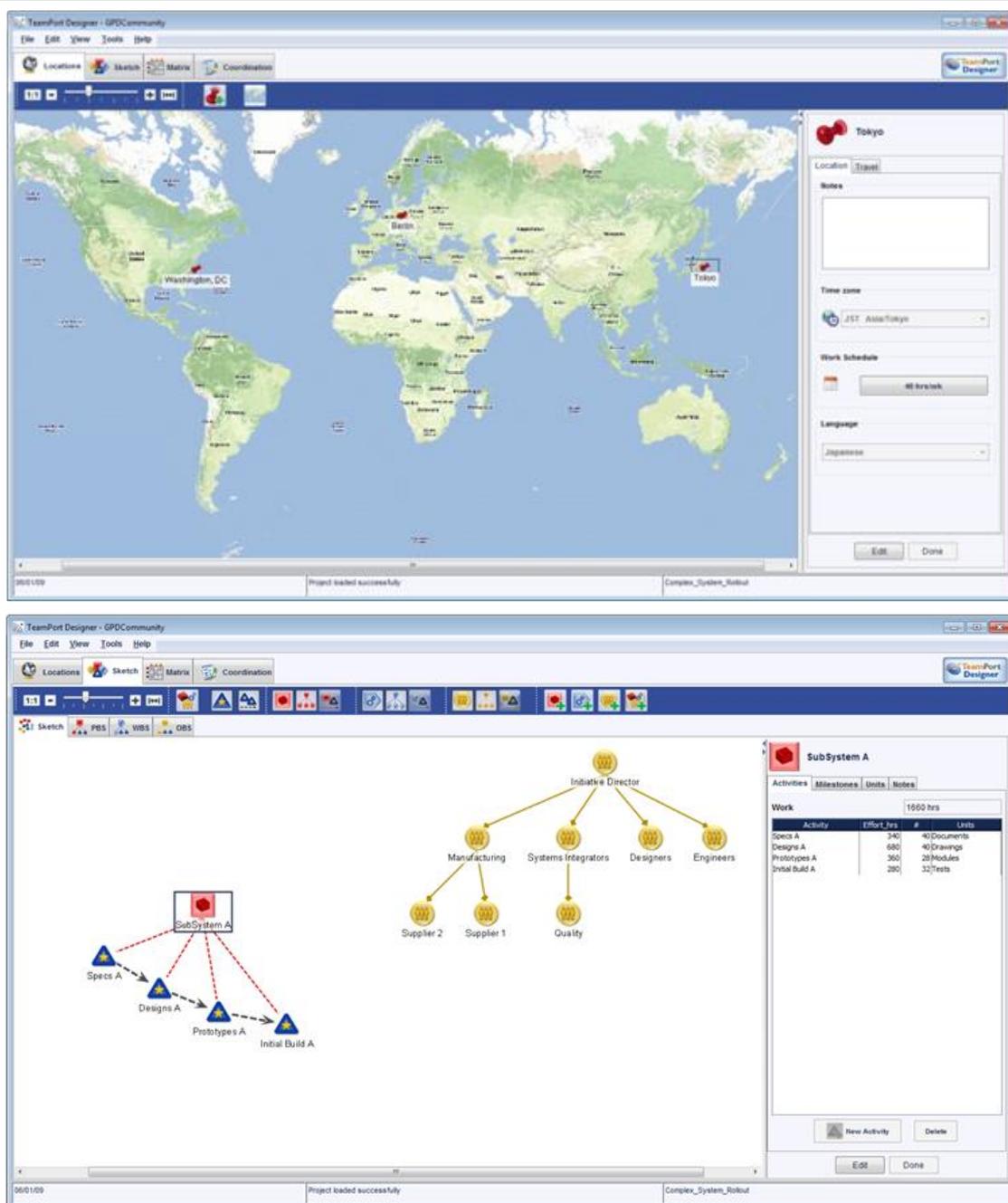


図 2-10 TeamPort のユーザインタフェース[19]

満行ら[20]は、複数の複雑な設計プロジェクトに対して、組織の人員配置を決定する手法を開発している。各設計プロジェクトをワークフロー形式で記述し、組織モデルはワークフロー内の各タスクに対するスキル値と各プロジェクトの作業の進捗量の重みを表す配属率によって定義する。設計プロセスシミュレーションの出力であるプロジェクト終了にかかる時間を

目的関数として、遺伝的アルゴリズムを用いて配属率を最適化する。これによって組織内の人員配置の最適化を行っている。ケーススタディにおいて船舶の基本設計プロセスに開発した手法を適用し、手法の有用性を示した。

2.3.3 船舶の建造プロセスシミュレーション

Mitsuyuki ら[21]は、離散イベントシミュレーションを用いた造船所における生産戦略の設計方法を提案している。この研究では、使用できる電力のピークカットを行うという状況が想定されている。船殻ブロックの建造プロセスに提案手法を適用し、使用最大電力を 15% カットするというシナリオにおいて、人員と工作機械へのタスク割り振りルールを設計を行った。

青山ら[22][23][24]は、造船工場の持つ機能を整理し、ペトリネットを利用してモデル化し、造船工場シミュレータを構築している。ペトリネットによって記述した造船工場における生産活動モデルを図 2-11 に示す。造船工場における生産活動は「変換活動」、「運搬活動」、「停滞活動」の 3 種類であると定め、ペトリネットの各要素を用いてモデル化している。「変換活動」は製品に対して形態変化を加える活動であり、加工、組立、搭載などの工程に相当する。「運搬活動」は製品に対して位置変化を加える活動であり、部品や中間製品を運搬する活動である。「停滞活動」は製品に対して時間変化を加える活動であり、部品や中間製品をストックヤードに一時的に保管する活動が該当する。

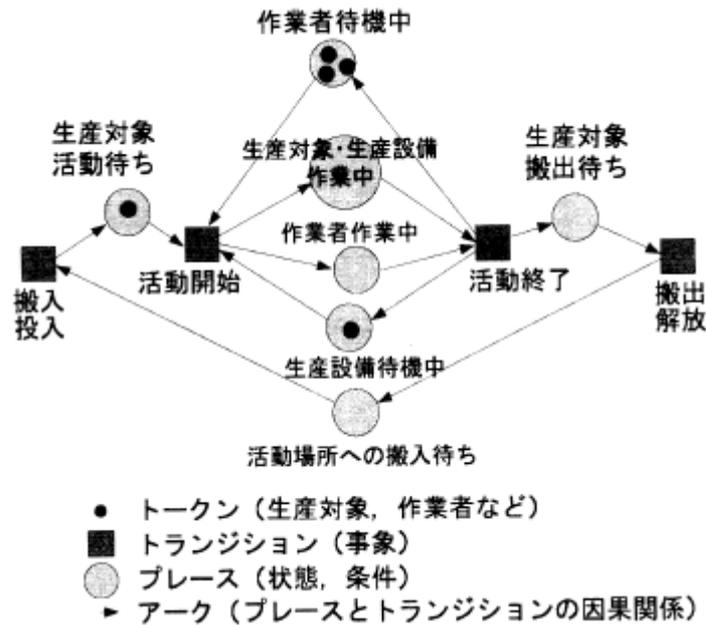


図 2-11 ペトリネットによる造船工場における生産活動の表現[22]

佐々木ら[25]は、バーチャルファクトリーを用いた造船用の生産計画システムを開発している。造船におけるバーチャルファクトリーの概要を図 2-12 に示す。造船生産管理システムの中日程計画データを基にして複数の船を建造するシミュレーションを行う機能と、工場負荷の平準化機能が実装されている。設計が未確定の船に関しては、過去の実績データから中日程データを推定する機能も有している。開発したシステムを利用してLPG 船の生産計画のシミュレーションや VLCC の連続建造能力増加の検討を行い、システムの有用性を示した。

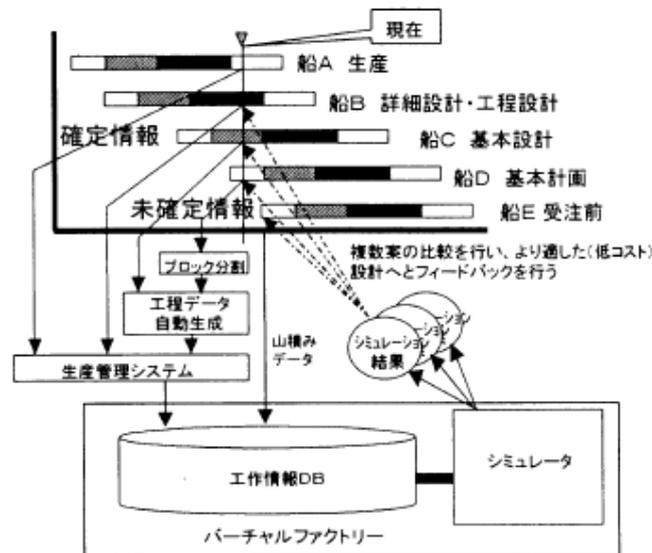


図 2-12 造船用バーチャルファクトリーの概要[25]

梶原ら[26][27]は、船殻ブロックの組立工程を Max-Plus 代数に基づく線形システムでモデル化し、納期に間に合うようにブロック組立工程の開始日を決定する問題を解決する手法を提案している。Max-Plus 代数とは \max 演算を \oplus 演算、通常に加算を \otimes 演算と定義する代数構造であり、離散事象システムへ応用されている。梶原らはツインタンデム建造方式(建造ドック内に船舶 2 隻を横に並べて 1 組とし、これを縦に 2 組並べ、計 4 隻を 1 サイクルとして建造する方式)を採用しているある造船所のブロック組立のコンベアラインとストックヤードをモデル化し、ジャストインタイムでブロック組立工程をスケジューリングする問題の解法を提案している。提案手法を該当の造船所の実データに適用し、ストックヤードにおけるブロック保管期間の無駄の削減やストックヤードのオーバーフローを回避できることを示した。

さらに、梶原らの研究グループ[28][29]は、ブロック組立工程へのプル生産方式の導入の検討も行っている。ブロック組立工程のプル生産スケジューリング手法を提案し、それを用いたブロック組立シミュレーションによって、各工程における無駄な待ち時間が減少することや、ストックヤードに保管するブロックの数が減少することを示した。また、文献[27]にて提案された Max-Plus 法では満足できなかったブロック作成順序の制約条件を克服できることを示した。

2.3.4 製造業への新規技術導入効果の評価に関する研究

三輪ら[30][31][32]は、製品価値フローという指標を用いて、製品モジュールへの新規技

術導入が与える影響の分析を行っている。材料、構造、製造プロセスなどの新規技術の導入に代表される技術的不確実性を伴う新製品開発の初期段階において、製品の構成要素間の相互関係の不確実性を考慮した製品のモジュール化手法を提案している。汎用ヘアードライヤの顧客価値の高い機能について新規技術開発を行うと想定して製品のモジュール化を行い、開発した手法を用いることで、製品開発時のやり直しの原因となるモジュール間のフィードバックを軽減できることを示した。

Zhang ら[33]は、費用を最小化するような生産プロセスの工作機械の最適パラメータの探索手法を提案している。具体的には、工作機械の作業スピード、スクラップ率、メンテナンススピードをコントロール可能であるとして、生産プロセスシミュレーションにおけるユニットコストを目的関数とした各パラメータの最適化手法を開発している。

Mashhadi ら[34]は、AM 技術の導入がサプライチェーンに与える影響を評価した。AM (Additive Manufacturing)技術とは、樹脂などの材料による積層造形を可能とする技術のことで、これを実現する装置として 3 次元プリンタがある。Mashhadi らは AM 技術が導入された際にサプライチェーンに起こる変化(軽量の製品、リソース消費の軽減、リードタイムの縮小など)を整理し、製造業者、小売業者、供給業者、消費者をエージェントとした生産・消費プロセスのエージェントベースシミュレーションとシステムダイナミクス的手法を構築している。提案手法を用いたケーススタディを行い、AM 技術の導入が製品在庫やリードタイムに与える影響を計算した。

2.4 本研究の位置付け

本章では、一般によく用いられるプロジェクト管理に関する技法や、スケジューリングやシミュレーションを用いたプロセス評価に関する研究について概観した。また、船舶の建造プロセスのシミュレーションや、新規技術を導入した際の製品モジュールやサプライチェーンに与える影響について考慮した研究について述べた。

2.3.1 や 2.3.2 で説明した研究では、プロセスの反復や手戻り、トラブルなどの不確実性を考慮したうえでプロセスを詳細にモデル化し、シミュレーションによってプロセスを定量的に評価している。本研究ではこれらの研究と同様の考え方に基づいて船舶の生産プロセスの定量的な評価を行う。しかし、ここで挙げた研究におけるプロセスでの手戻りやトラブルによる追加作業発生モデルでは、船舶建造プロセスにおける部材の工作精度の不良による手直しを表現することが難しい。そこで本研究では、生産プロセスの各工程では製品に製造誤差が

不確かさをもって蓄積されてゆくとして、その誤差に基づく手直し作業を考慮した生産プロセスシミュレーションによって生産プロセスを評価する。

2.3.3 や 2.3.4 で説明した研究では、船舶の建造プロセスのシミュレーションや新規技術導入による製造プロセスへの影響の評価が行われているが、新規生産設備が生産プロセスへ与える影響は様々であり、それを定量的に評価することは難しい。そこで本研究では、生産設備を製造業の QCD(品質・コスト・納期)に影響し得るものとしてとらえ、前述した生産プロセスの評価方法を用いることによって生産設備導入による船舶建造プロセスのパフォーマンスの変化が測れるような枠組みとしている。また、生産設備導入による効果は工場の特徴(作業スペースが広い・狭いなど)や組織の特徴(技術レベルが高い・低いなど)によっても変化すると考えられるが、これらの特徴の違いによる設備導入効果の変化を定量的に示した研究は存在しない。本研究ではこれらの特徴の違いによる効果の変化をケーススタディで定量的に示す。

以上をまとめると、本研究の新規性は以下の 2 つである。

- 船舶建造プロセスにおける部材の工作精度不良による手直しを考慮した、生産プロセスシミュレーションの手法を提案する。
- 工場や組織の特徴の違いによる生産設備導入効果の変化を定量的に示す。

第3章 提案手法

3.1 はじめに	21
3.2 提案手法の概要	21
3.3 生産プロセスのモデル化	23
3.3.1 製品モデル	23
3.3.2 ワークフローモデル	25
3.3.3 組織モデル	27
3.4 生産プロセスシミュレーション	28
3.4.1 説明に用いる記号	28
3.4.2 シミュレーション開始前の設定	30
3.4.3 シミュレーションの流れ	31
3.4.4 シミュレーションの出力	38
3.5 新規生産設備導入効果の評価	39

3.1 はじめに

本章では、本研究における提案手法について述べる。具体的には、生産プロセスの評価を行うための生産プロセスシミュレーションと、それを用いた新規生産設備導入効果の評価の方法について詳細に記述する。

提案手法は、製造業の中でも個別受注生産の形態をとる船舶の生産プロセスを対象としている。個別受注生産ではその生産プロセスが大規模で複雑なものが多く、中間部品の製造誤差などが要因で後工程での手直し作業が発生することが特徴として挙げられる。

また、船舶の生産プロセスにおける生産設備は、以下の 3 つの事項に影響を及ぼすものであると考えられる。

- 作業スピード
(例：溶接作業において、手動溶接機から自動溶接機に変更すると作業スピードが向上する)
- ランニングコスト
(例：溶接作業において、ガス溶接機からレーザー溶接機に変更すると消費電力の増加により単位時間あたりのランニングコストが増加する)
- 部品の製造誤差
(例：切断作業において、ガス切断機からレーザー切断機に変更すると熱影響の軽減により部品の製造誤差が減少する)

よって、提案手法ではこれらの事項を考慮することが可能な船舶の生産プロセスのモデル化と生産プロセスシミュレーションを構築する。

3.2 提案手法の概要

提案手法の概要を図 3-1 に示す。

提案手法では、まず生産プロセスで対象となる製品、ワークフロー、組織の 3 つのモデルを作成する。製品モデルは、生産プロセスで製造する製品 1 つの情報を表し、部品や中間部品とそれらの依存関係から定義される。ワークフローモデルは、その製品 1 つを生産するための作業内容を表し、タスクとタスク間の依存関係によって定義される。また、組織モデルは、

ワークフローを実行する人員および設備の情報を表し、モデル内で単位時間あたりのそのリソースの利用コストやタスクに対するスキル値と誤差の発生確率が定義される。また、定義した組織モデルの設備のパラメータを変化させることにより、新規生産設備導入後の組織モデルを作成する。

以上の入力情報を基に、製品の製造誤差に基づく手直し作業を考慮した生産プロセスのモンテカルロシミュレーションを、各組織モデルについて実行する。各組織モデルについて、シミュレーションの結果として得られる生産プロセスの所要時間と合計費用を比較することによって、新規生産設備導入による生産プロセスへの影響を定量的に評価する。

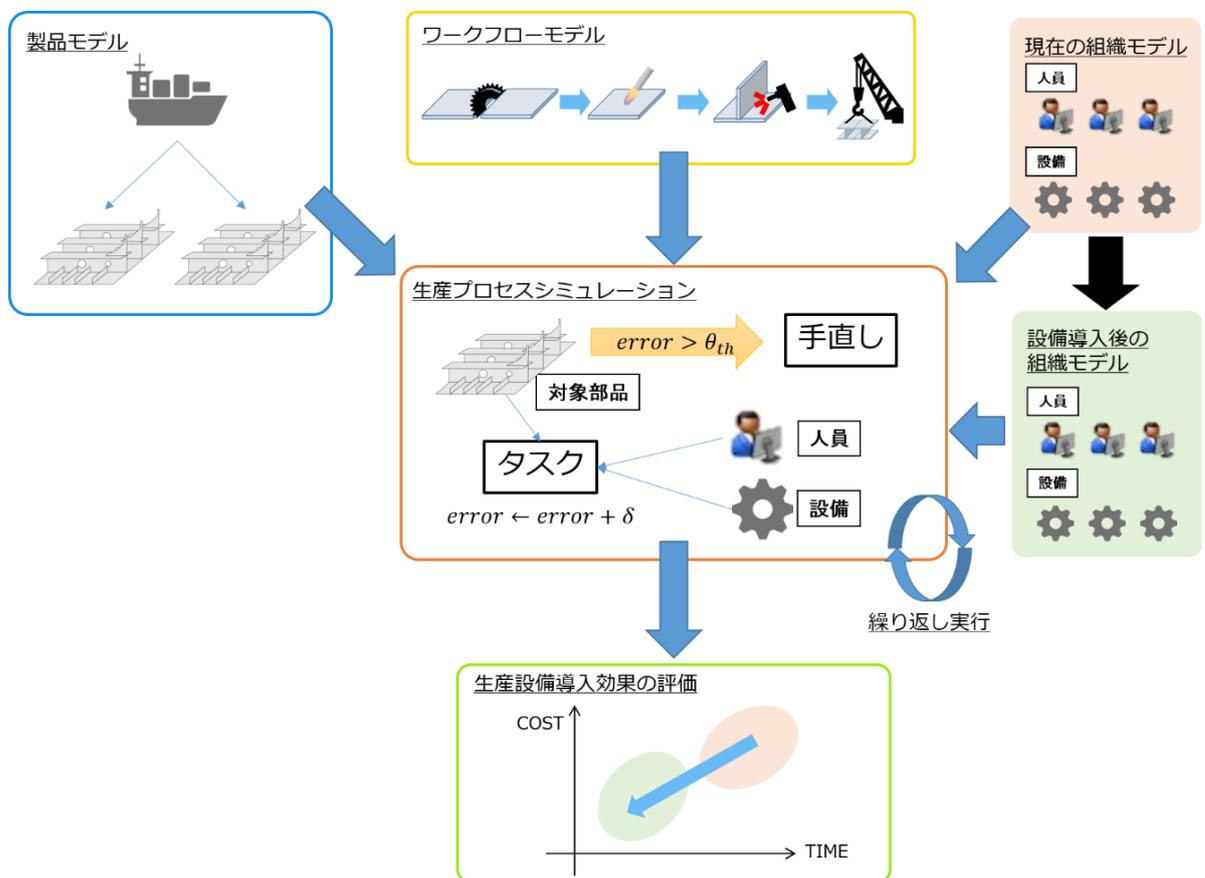


図 3-1 提案手法の概要

3.3 生産プロセスのモデル化

本節では、生産プロセスの評価を行うためのシミュレーションで入力情報として用いる製品、ワークフロー、組織の 3 つモデルの詳細について述べる。それぞれのモデルは、先行研究 [18][20][21]を参考に構築した。

3.3.1 製品モデル

製品モデルは、生産プロセスで製造の対象となる製品 1 つを表すものである。1 つの製品は、複数の部品を要素とする木構造からなり、それぞれの部品間には依存関係が定義される。製品モデルは、文献[18]でも同様の構造を持っている。製品モデルの部品とその依存関係を表した例を図 3-2 に示す。図中に示した「製品 A」は、「鋼板(小)1」と「鋼板(小)2」という 2 つの部品を溶接して製作される「鋼板(大)」という部品と、2つの「小型部品 1」、「小型部品 2」という部品から構成される。本研究の製品モデルでは、生産プロセスの途中で製造される中間部品や最終製品も 1 つの部品として、末端の部品と同一視する。すなわち、図の例で示した 1 つの製品では、「製品 A」、「鋼板(小)1」、「鋼板(小)2」、「鋼板(大)」、「小型部品 1」、「小型部品 2」の 6 つが部品として定義されるということを意味する。

部品間の矢印はそれらの依存関係を表している。図の例では、「製品 A」は「鋼板(大)」、「小型部品 1」、「小型部品 2」に、「鋼板(大)」は「鋼板(小)1」と「鋼板(小)2」に依存していることを示している。部品間の依存関係は、シミュレーションにおける各部品の誤差の総量の計算に用いられる。

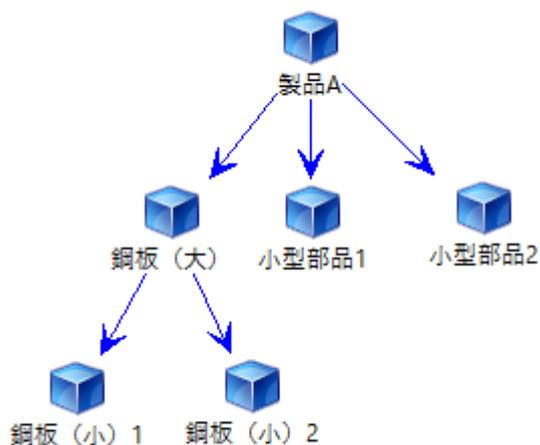


図 3-2 製品モデルの部品と依存関係の例

1 つの部品が持つ属性の一覧を表 3-1 に示す。各部品には依存関係の他に、誤差の許容値という属性が定義される。シミュレーションの実行中には各部品の誤差の値が更新され、これらの値はシミュレーション内での手直し作業発生の判定に用いられる。

表 3-1 部品の属性

	属性	説明
シミュレーション前に 定義される属性	部品番号	各部品に与えられる一意の番号を表す。
	依存する部品の 部品番号群	この部品が依存する部品の部品番号の集合を表す。シミュレーション内での誤差の総量の計算に用いられる。
	誤差の許容値	誤差の許容値を表す。シミュレーション内での手直し作業発生の判定に用いられる。
シミュレーション中に 更新される属性	誤差	現在の誤差の値を表す。シミュレーション内での誤差の総量の計算に用いられる。

3.3.2 ワークフローモデル

ワークフローモデルは、製品1つを生産するための作業内容を表し、製品モデル1つに対してワークフローモデル1つが定義される。1つのワークフローは、複数のタスクとそれらの依存関係から構成され、PERTのアーロ・ダイアグラムの形式で記述する。ワークフローモデルのタスクとその依存関係を表した例を図3-3に示す。図で示したワークフローは「切断」、「取付1」、「取付2」、「溶接1」、「溶接2」、「運搬」の合計6つのタスクからなり、タスク間の矢印はそれらの依存関係を表している。例えば、「取付1」タスクは「切断」タスクに依存しており、「切断」タスクが終了するまでは「取付1」タスクを開始できないということを意味する。

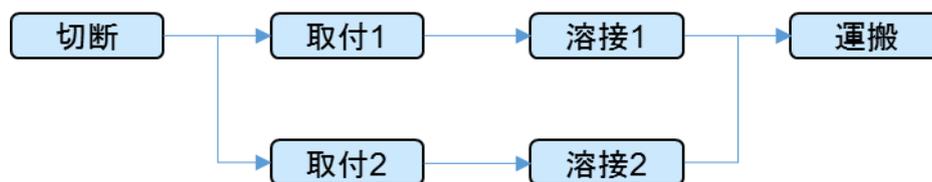


図 3-3 ワークフローモデルのタスクと依存関係の例

1つのタスクが持つ属性の一覧を表3-2に示す。タスクは依存するタスクの情報に加え、工数、手直し作業の工数、対象とする部品の集合といった情報を持つ。シミュレーションの実行中には、タスクに割り当てられた人員と設備のスキル値に基づいて残り工数を減らし、状態の更新が行われることによって、タスクの実行が表現される。

表 3-2 タスクの属性

	属性	説明
シミュレーション前に 定義される属性	ワークフロー 番号	タスクが所属するワークフローの番号を表す。ワークフロー番号は各ワークフローに対して一意に与えられる。
	ワークフローの 優先度	所属するワークフローの優先度を表す。一度のシミュレーションで複数のワークフローを実行する場合は、各ワークフローの優先度を定義する。値が小さいほど優先度が高い。
	タスク番号	各タスクに与えられる一意の番号を表す。
	依存するタスク のタスク番号群	このタスクが依存するタスクのタスク番号の集合を表す。タスクの開始可能判定に用いられる。
	工数	タスク終了に必要な総作業量を表す。
	手直し作業の 工数	手直し作業が発生した場合に追加される作業量を表す。
	対象とする部品 の部品番号群	タスク実行中に誤差が発生した場合に、誤差が増加する部品の部品番号の集合を表す。
シミュレーション中に 更新される属性	状態	タスクの現在の状態を表す。NONE (開始不可)、READY (開始可能)、RUNNING (実行中)、FINISHED (完了) の4つからなる。
	残り工数	タスク終了に必要な残り工数を表す。
	最早開始時刻	タスクが最も早く開始できる時刻を表す。単位時間ごとに PERT によって計算される。
	最遅開始時刻	遅くともタスクを開始しなければならない時刻を表す。単位時間ごとに PERT によって計算される。
	担当人員番号	割り当てられた人員の番号を表す。
	担当設備番号	割り当てられた設備の番号を表す。

3.3.3 組織モデル

組織モデルは、ワークフローを実行するリソース(人員および設備)の情報を表す。1つのリソースが持つ属性の一覧を表 3-3 に示す。人員と設備は、どちらも単位時間あたりの利用コスト、各タスクに対するスキル値、各タスクに対する誤差発生確率といった属性を持つ。

表 3-3 リソース (人員および設備) の属性

	属性	説明
シミュレーション前に 定義される属性	リソース番号	リソースに対して一意に与えられる番号を表す。
	リソースの種類	人員 (h) または設備 (m) を表す。
	単位時間あたりの費用	リソースがタスクを実行した際にかかる単位時間あたりの費用を表す。
	各タスクに対するスキル値	リソースが割り当てられた際の各タスクの単位時間あたりの作業量を表す。
	各タスクに対する誤差発生確率	リソースが割り当てられた際の各タスクで単位時間あたりに誤差が発生する確率を表す。
シミュレーション中に 更新される属性	状態	リソースの現在の状態を表す。FREE (タスク待機中)、WORKING (タスク実行中) の2つからなる。

図 3-2 のワークフローに対して定義した組織モデルの例を表 3-4 に示す。表に示した組織モデルでは、2人の人員と3つの設備が定義されており、それぞれに単位時間あたりの費用が定義され、タスクごとにスキル値と誤差発生確率が設定されている。スキル値が0に設定されている場合は、そのリソースは該当のタスクを実行できないことを表している。これらのパラメータによって、人員であれば技術レベルを、設備であれば機械の特性を表現することが可能である。

表 3-4 組織モデルの例

リソース	種類	費用 [¥/h]	(スキル値, 誤差発生確率)					
			切断	取付 1	取付 2	溶接 1	溶接 2	運搬
作業員 1	h	1,500	(1, 0.1)	(2, 0.1)	(2, 0.1)	(1, 0.2)	(1, 0.2)	(1, 0)
作業員 2	h	2,000	(1, 0.1)	(1, 0.1)	(1, 0.1)	(0, 0)	(0, 0)	(1, 0)
切断機	m	500	(1, 0.1)	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)
溶接機	m	1,000	(0, 0)	(1, 0.1)	(1, 0.1)	(1, 0.1)	(1, 0.1)	(0, 0)
クレーン	m	1,500	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)	(1, 0)

3.4 生産プロセスシミュレーション

本節では、3.3 で説明した製品、ワークフロー、組織の 3 つのモデルを利用して、生産プロセスの評価を行うための生産プロセスシミュレーションの詳細について述べる。本研究における生産プロセスシミュレーションでは、先行研究[20][21]のチーム作業シミュレーションを参考に生産プロセスにおける作業をモデル化し、製品の製造誤差に基づいた手直し作業のモデルを導入した。合計 N 個の製品をリソース(人員と設備)を用いて連続的に製造するとして生産プロセスシミュレーションの説明を行う。

3.4.1 説明に用いる記号

本研究の生産プロセスシミュレーションの説明に用いる記号の一覧を表 3-5 と表 3-6 に示す。

表 3-5 説明に用いる記号 (シミュレーション実行前に定義されるもの)

記号	説明
C	すべての部品の集合
$C_{depend,c}$	部品 $c(\in C)$ が依存する部品の集合
$error_{limit,c}$	部品 $c(\in C)$ の誤差の許容値
W	すべてのワークフローの集合
J	すべてのタスクの集合
w_j	タスク $j(\in J)$ が所属するワークフロー ($w_j \in W$)
$priority_j$	タスク $j(\in J)$ が所属するワークフローの優先度
$J_{depend,j}$	タスク $j(\in J)$ が依存するタスクの集合
$workload_{init,j}$	タスク $j(\in J)$ の工数
$workload_{add,j}$	タスク $j(\in J)$ の手直し作業の工数
$C_{target,j}$	タスク $j(\in J)$ が対象とする部品の集合
H	すべての人員の集合
M	すべての設備の集合
$cost_r$	リソース $r(\in H \cup M)$ の単位時間あたりにかかる費用
$skill_{r,j}$	リソース $r(\in H \cup M)$ のタスク $j(\in J)$ に対するスキル値
$p_{error,r,j}$	リソース $r(\in H \cup M)$ のタスク $j(\in J)$ における誤差発生確率
n_{limit}	単位時間に実行できるワークフローの数の最大値

表 3-6 説明に用いる記号（シミュレーション実行中に更新されるもの）

記号	説明
t	シミュレーションにおける時刻
$error_c(t)$	時刻 t における部品 $c(\in C)$ の誤差
$error_{total,c}(t)$	時刻 t における部品 $c(\in C)$ の誤差の総量
W_{run}	現在の実行中のワークフローの集合
$state_{task,j}$	現在のタスク $j(\in J)$ の状態 ($state_{task,j}(t) \in \{NONE, READY, RUNNING, FINISHED\}$)
$workload_{remain,j}(t)$	時刻 t におけるタスク $j(\in J)$ の残り工数
$est_j(t)$	時刻 t におけるタスク $j(\in J)$ の最早開始時刻
$lst_j(t)$	時刻 t におけるタスク $j(\in J)$ の最遅開始時刻
h_j	タスク j に割り当てられた人員
m_j	タスク j に割り当てられた設備
$state_{resource,r}$	現在のリソース $r(\in H \cup M)$ の状態 ($state_{resource,r}(t) \in \{FREE, WORKING\}$)
T	シミュレーションの終了時刻
$cost_{total}(t)$	時刻 t までにかかった費用の合計

3.4.2 シミュレーション開始前の設定

シミュレーションを開始する前に、 N 個の製品モデルとそれに対応する N 個のワークフローモデルを 3.3.1 および 3.3.2 の記述に基づいて定義する。その後、ワークフローを実行する組織モデルを 3.3.3 の記述に基づいて定義する。

実際の生産現場では、工場や作業場所の制約のために同時並行で製造できる製品の数が制限される場合がある。例えば航空機組立工場や造船所などの大型な製品を製造する現場では、中間部品の一時保管スペースの制限や組立・建造スペースの制限が存在する。以上のような制限をシミュレーションで考慮するために、単位時間に実行できるワークフローの数の最大値 n_{limit} を設定する。

以上のシミュレーション開始前の設定作業は、表 3-5 に示された変数の値を定義することに相当する。

3.4.3 シミュレーションの流れ

生産プロセスシミュレーションの流れを図 3-4 に示す。本項では図 3-4 の各項目について順を追って説明する。

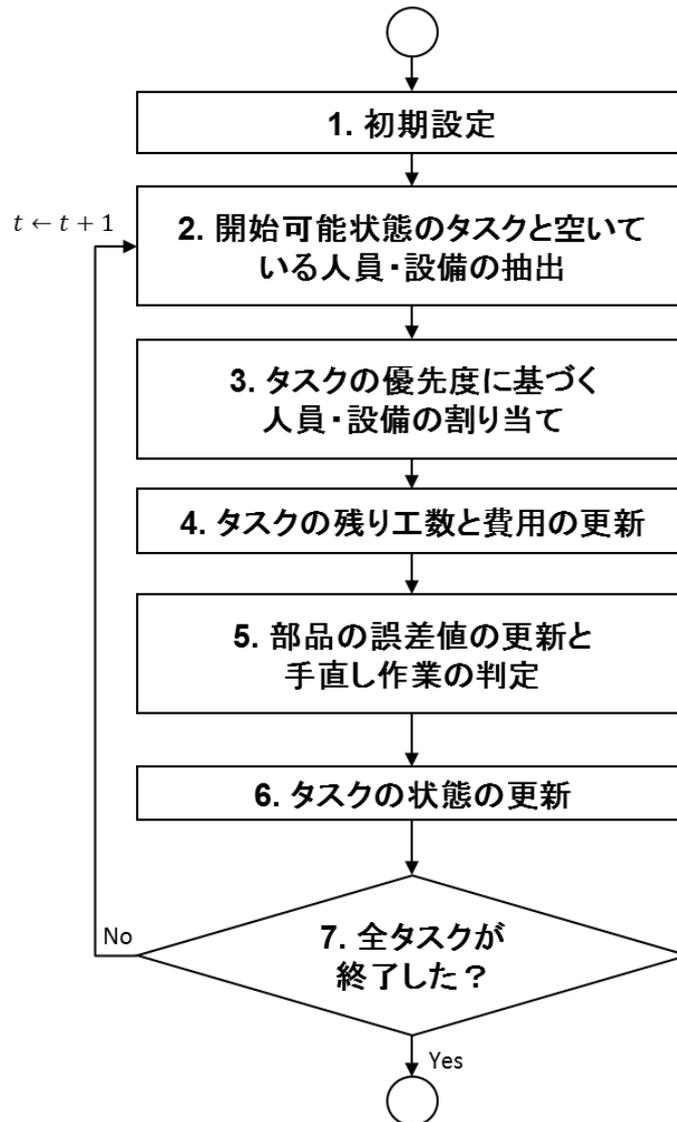


図 3-4 生産プロセスシミュレーションの流れ

1. 初期設定

シミュレーション開始直後に、シミュレーションの現在の時刻 t を $t = 0$ とする。

また、初期化処理として式(3.1), (3.2), (3.3), (3.4), (3.5)のようにそれぞれの値を定める。式

(3.1)はすべての部品の誤差の初期値は 0 であることを示している。式(3.2)は各ワークフローの先頭タスク(依存するタスクが存在しないタスク)の状態を「開始可能」に、それ以外のタスクの状態を「開始不可」にすることを示している。式(3.3)はすべてのタスクの残り工数をタスクの工数で初期化することを示している。式(3.4)はすべてのリソースの状態を「タスク待機中」にすることを示している。式(3.5)はシミュレーション開始直後の合計費用は 0 であることを示している。

$$error_c(0) = 0 \quad (\forall c \in C) \quad (3.1)$$

$$state_{task,j} = \begin{cases} NONE & (J_{depend,j} \neq \emptyset) \\ READY & (J_{depend,j} = \emptyset) \end{cases} \quad (3.2)$$

$$workload_{remain,j}(0) = workload_{init,j} \quad (\forall j \in J) \quad (3.3)$$

$$state_{resource,r} = FREE \quad (\forall r \in H \cup M) \quad (3.4)$$

$$cost_{total}(0) = 0 \quad (3.5)$$

2. 開始可能状態のタスクと空いている人員・設備の抽出

時刻 t において「開始可能」状態のタスクの集合 $J_{ready}(t)$ と「タスク待機中」状態の人員 $H_{free}(t)$ および設備 $M_{free}(t)$ をそれぞれ式(3.6), (3.7), (3.8)により求める。

$$J_{ready}(t) = \{j \in J \mid state_{task,j} = READY\} \quad (3.6)$$

$$H_{free}(t) = \{h \in H \mid state_{resource,h} = FREE\} \quad (3.7)$$

$$M_{free}(t) = \{m \in M \mid state_{resource,m} = FREE\} \quad (3.8)$$

3. タスクの優先度に基づく人員・設備の割り当て

タスクの優先度とリソースの優先度を計算し、集合 $J_{ready}(t)$ に属する各タスクに、優先度が高い順に $H_{free}(t)$ に属する人員および $M_{free}(t)$ に属する設備をそれぞれ 1 つずつ割り当てる操作を行う。

まず、タスクの優先度が高い順に $J_{ready}(t)$ のタスクを並び替える。タスク j^a, j^b の間の優先度の高低は以下のように判定する。つまり、所属するワークフローの優先度が高いタスクの方がより優先度が高く、ワークフローの優先度が等しい場合は PERT における全余裕時間が小さいタスクの方がより優先度が高いと判定する。

- $priority_{j^a} < priority_{j^b}$ のとき、タスク j^a の方が優先度が高い。
- $priority_{j^a} > priority_{j^b}$ のとき、タスク j^b の方が優先度が高い。
- $priority_{j^a} = priority_{j^b}$ のとき、式(3.9)で表される $tf_j(t)$ の値が小さいタスクの方が優先度が高い。

$$tf_j(t) = lst_j(t) - est_j(t) \quad (3.9)$$

次に、リソースの優先度が高い順に $H_{free}(t)$ の人員および $M_{free}(t)$ の設備を並び替える。リソースについては、式(3.10)で表されるスキル値の総和 $skill_{total,r}$ が小さい方がより優先度が高いと判定する。

$$skill_{total,r} = \sum_{j \in J} skill_{r,j} \quad (3.10)$$

並び替え操作終了後の $J_{ready}(t), H_{free}(t), M_{free}(t)$ をそれぞれ $J^* = \{j^1, \dots, j^{n(J^*)}\}, H^* = \{h^1, \dots, h^{n(H^*)}\}, M^* = \{m^1, \dots, m^{n(M^*)}\}$ とすると、タスクに対するリソースの割り当て操作は次に示すアルゴリズムで実行される。単位時間に実行できるワークフローの数の制限の下で、タスクの優先度が高い順にタスクを 1 つずつ取り出し、優先度が高い順に割り当て可能な人員および設備を探索し、両方とも見つければリソースの割り当てを行うという操作を繰り返している。

ここで、タスク j がワークフローの実行数の制限を満たすとは、式(3.11)が成り立つことを意味する。

$$n(\{w_j\} \cup W_{run}) \leq n_{limit} \quad (3.11)$$

また、リソース r がタスク j に対して割り当て可能であるとは、リソースの該当タスクに対するスキル値が 0 より大きいことを指し、式(3.12)が成り立つことを意味する。

$$skill_{r,j} > 0 \quad (3.12)$$

- タスクに対するリソースの割り当てアルゴリズム

$i \leftarrow 1$

while $i \leq n(J^*)$ **and** $H^*, M^* \neq \emptyset$ **do**

if タスク j_i がワークフローの実行数の制限を満たす **then**

$k, l \leftarrow 1, h^*, m^* \leftarrow \text{empty}$

while $k \leq n(H^*)$ **and** $h^* = \text{empty}$ **do**

if 人員 h^k がタスク j^i に対し割り当て可能 **then**

$h^* \leftarrow h^k$

endif

$k \leftarrow k + 1$

endwhile

if $h^* \neq \text{empty}$ **then**

while $l \leq n(M^*)$ **and** $m^* = \text{empty}$ **do**

if 設備 m^l がタスク j^i に対し割り当て可能 **then**

$m^* \leftarrow m^l$

endif

$l \leftarrow l + 1$

endwhile

if $m^* \neq \text{empty}$ **then**

h^*, m^* をタスク j^i に割り当て

$state_{task, j^i} \leftarrow \text{RUNNING}$

$state_{resource, h^*}, state_{resource, m^*} \leftarrow \text{WORKING}$

h^*, m^* をそれぞれ H^*, M^* から取り除く

if $w_{j^i} \notin W_{run}$ **then**

w_{j^i} を W_{run} に含める

endif

endif

endif

endif

$i \leftarrow i + 1$

endwhile

4. タスクの残り工数と費用の更新

式(3.13)によりタスクの残り工数を更新する。「実行中」状態のタスクの残り工数を割り当てられたリソースのスキル値に基づいて減らす。また、式(3.14)により「タスク実行中」状態のリソースの単位時間当たりの費用を合計費用に加算する。ここで、式(3.15)は「実行中」状態のタスクの集合を、式(3.16)は「タスク実行中」状態のリソースの集合を示す。

$$workload_{remain,j}(t) = \begin{cases} workload_{remain,j}(t-1) - skill_{h_j} \cdot skill_{m_j} & (j \in J_{running}(t)) \\ workload_{remain,j}(t-1) & (j \notin J_{running}(t)) \end{cases} \quad (3.13)$$

$$cost_{total}(t) = cost_{total}(t-1) + \sum_{r \in R_{working}(t)} cost_r \quad (3.14)$$

$$J_{running}(t) = \{j \in J | state_{task,j} = RUNNING\} \quad (3.15)$$

$$R_{working}(t) = \{r \in H \cup M | state_{resource,r} = WORKING\} \quad (3.16)$$

5. 部品の誤差値の更新と手直し作業の判定

部品の誤差値の更新と手直し作業判定の流れを図 3-5 に示す。

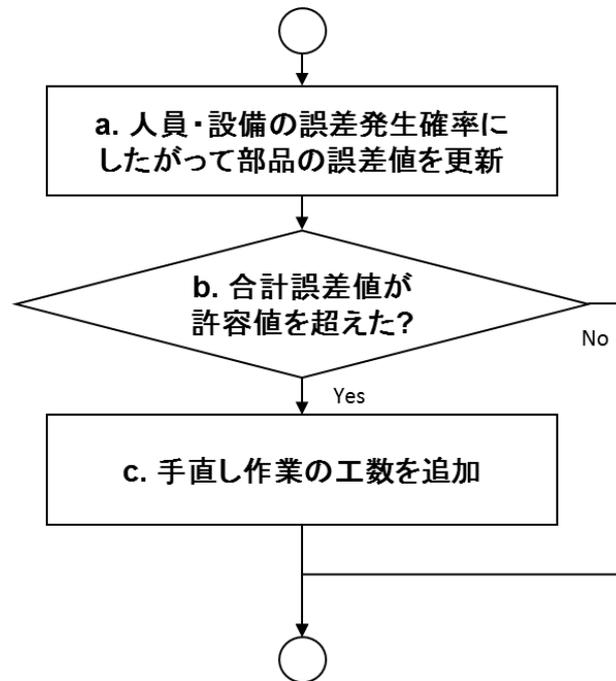


図 3-5 部品の誤差値の更新と手直し作業判定の流れ

まず、対象とする部品の誤差値の更新が式(3.17)で表される「実行中」状態のタスクの集合 $J_{running}(t)$ に対して実行される。タスク j では式(3.18)の確率 p_j で誤差が発生する。つまり、割り当てられた人員・設備の少なくともどちらか一方で誤差が発生した場合にタスク j で誤差が発生したと判定される。

部品の誤差値の更新アルゴリズムを以下に示す。タスク j で誤差が発生した場合、タスク j が対象とする部品の誤差値が 1 単位増加する。

$$J_{running}(t) = \{j \in J \mid state_{task,j} = RUNNING\} \quad (3.17)$$

$$p_j = 1 - (1 - p_{error,h,j}) \cdot (1 - p_{error,m,j}) \quad (3.18)$$

- 部品の誤差値の更新アルゴリズム

$J_{running}(t) = \{j^1, \dots, j^n\}, i \leftarrow 1$

while $i \leq n$ **do**

if タスク j^i で誤差が発生した **then**

$error_c \leftarrow error_c + 1 (\forall c \in C_{target,j^i})$

endif

$i \leftarrow i + 1$

endwhile

続いて、手直し作業発生判定を行う。時刻 t における部品 c の誤差の総量 $error_{total,c}(t)$ は、部品 c 自身の誤差と部品 c が依存する部品の誤差の総量の総和で表され、式(3.19)で計算される。「実行中」状態のタスクの集合 $J_{running}(t)$ 内のタスク j について、式(3.20)が成り立つ場合は手直し作業が発生したと判定し、残り工数 $workload_{remain,j}(t)$ に手直し作業の工数 $workload_{add,j}$ を加算する。つまり、タスクが対象とする部品のうちいずれかの誤差の総量が許容値を超えた場合に、手直し作業が行われる。手直し作業の工数の加算は各タスクについて最大1回である。

$$error_{total,c}(t) = error_c(t) + \sum_{c' \in C_{depend,c}} error_{total,c'}(t) \quad (3.19)$$

$$error_{total,c}(t) > error_{limit,c} (\exists c \in C_{target,j}) \quad (3.20)$$

6. タスクの状態の更新

まず、「実行中」状態のタスクの中で、残り工数が0以下になったタスクの状態を「完了」に変更し、そのタスクに割り当てられているリソースの状態を「タスク待機中」に変更する。これらの操作は式(3.21), (3.22)で表させる。ただし式(3.23)は「実行中」状態のタスクの中で、残り工数が0以下になったタスクの集合を表す。

$$state_{task,j} = FINISHED \left(\forall j \in J_{finish}(t) \right) \quad (3.21)$$

$$state_{resource,h_j}, state_{resource,m_j} = FREE \left(\forall j \in J_{finish}(t) \right) \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} J_{finish}(t) \\ = \{j \in J \mid (workload_{remain,j}(t) \leq 0) \wedge (state_{task,j} = RUNNING)\} \end{aligned} \quad (3.23)$$

所属するタスクの状態がすべて「完了」になったワークフローは、実行中のワークフローの集合 W_{run} から取り除かれる。以上の操作が完了後、「開始不可」状態のタスクの中で、依存するタスクの状態がすべて「完了」状態になったタスクの状態を「開始可能」に変更する。この操作は式(3.24)で表される。ただし、式(3.25)は「開始不可」状態のタスクの中で、依存するタスクの状態がすべて「完了」状態になったタスクの集合を表す。

$$state_{task,j} = READY \left(\forall j \in J_{getready}(t) \right) \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} J_{getready}(t) \\ = \{j \in J \mid (state_{task,\forall j' \in J_{depend,j}} = FINISHED) \wedge (state_{task,j} = NONE)\} \end{aligned} \quad (3.25)$$

7. シミュレーションの終了判定

式(3.26)を満たす場合、つまりすべてのタスクが「終了」状態になった場合、終了時刻 T を $T = t$ としてシミュレーションを終了する。満たさない場合は時刻 t を $t = t + 1$ と更新して 2 に戻る。

$$state_{task,j} = FINISHED \quad (\forall j \in J) \quad (3.26)$$

3.4.4 シミュレーションの出力

シミュレーションの結果として出力される情報は以下の 2 つである。

- シミュレーションの終了時刻 T
- シミュレーション終了までにかかった費用の合計 $cost_{total}(T)$

3.5 新規生産設備導入効果の評価

本研究において、生産設備は生産プロセスにおける QCD(品質・コスト・納期)に影響を与えるものとして考える。3.4 で説明した生産プロセスシミュレーションでは、組織モデルの中の設備が生産設備を表現している。以上を踏まえると、既存の生産プロセスに新規に生産設備を導入することは、それに対応する組織モデル中の設備の品質・コスト・納期に相当するパラメータに変更が生じるということを意味する。つまり、生産設備導入後の組織モデルでは、対象となる設備の単位時間あたりの費用、タスクに対するスキル値と誤差発生確率が変化する。

したがって、既存の生産プロセスに新規に設備導入をしたときの効果の評価の流れは以下ようになる。

1. 既存の生産プロセスの製品モデル P 、ワークフローモデル W 、組織モデル R を作成する。
2. 1 で作成した組織モデル R の中で、生産設備導入の対象となる設備の単位時間あたりの費用、スキル値、誤差発生確率を変更し、設備導入後の組織モデル R' とする。表 3-4 に示した組織モデルの例から設備導入後の組織モデルを作成する例を図 3-6 に示す。既存の組織モデル内の「切断機」を新型のものに変更すると想定する。新型の「切断機」は従来のものよりも単位時間当たりの作業量が2倍になるが、単位時間当たりの費用も2倍になるという場合を考える。この場合は、既存の組織モデル内の「切断機」の費用とスキル値のパラメータをそれぞれ図 3-6 下側のように変更することによって、設備導入後の組織モデルとする。
3. モデルの組 (P, W, R) , (P, W, R') それぞれに対して生産プロセスシミュレーションを N 回実行する。シミュレーションを複数回実行するのは、誤差の発生の判定に乱数が用いられているためである。
4. 3 の結果として、それぞれのモデルの組に対して生産プロセス実行にかかった時間と費用が得られる。得られた時間と費用の平均や標準偏差、分布などの情報を比較することで設備導入による効果を検証する。

リソース	種類	費用 [¥/h]	(スキル値, 誤差発生確率)					
			切断	取付1	取付2	溶接1	溶接2	運搬
作業員1	h	1,500	(1, 0.1)	(2, 0.1)	(2, 0.1)	(1, 0.2)	(1, 0.2)	(1, 0)
作業員2	h	2,000	(1, 0.1)	(1, 0.1)	(1, 0.1)	(0, 0)	(0, 0)	(1, 0)
切断機	m	500	(1, 0.1)	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)
溶接機	m	1,000	(0, 0)	(1, 0.1)	(1, 0.1)	(1, 0.1)	(1, 0.1)	(0, 0)
クレーン	m	1,500	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)	(1, 0)

「切断機」の費用とスキル値を変更

リソース	種類	費用 [¥/h]	(スキル値, 誤差発生確率)					
			切断	取付1	取付2	溶接1	溶接2	運搬
作業員1	h	1,500	(1, 0.1)	(2, 0.1)	(2, 0.1)	(1, 0.2)	(1, 0.2)	(1, 0)
作業員2	h	2,000	(1, 0.1)	(1, 0.1)	(1, 0.1)	(0, 0)	(0, 0)	(1, 0)
切断機	m	1,000	(2, 0.1)	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)
溶接機	m	1,000	(0, 0)	(1, 0.1)	(1, 0.1)	(1, 0.1)	(1, 0.1)	(0, 0)
クレーン	m	1,500	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)	(1, 0)

図 3-6 設備導入後の組織モデル作成の例

第4章 開発した生産プロセスシミュレータ

4.1 はじめに.....	42
4.2 シミュレーションモデルの入力.....	42
4.2.1 製品モデルの入力.....	44
4.2.2 ワークフローモデルの入力.....	44
4.2.3 組織モデルの入力.....	45
4.3 生産プロセスシミュレーションの実行と結果の出力.....	46

4.1 はじめに

本章では、第3章で説明した生産プロセスのモデル化および生産プロセスシミュレーションを実行するための機能を実装した生産プロセスシミュレータについて記述する。

本研究における生産シミュレータは、満行[35]による作業チーム設計支援システムのチーム作業シミュレーション機能を変更することによって開発した。作業チーム設計支援システムおよび本研究の生産プロセスシミュレータは、Java で記述されているオープンソースの統合開発環境 (IDE) である Eclipse[36]をベースとしたリッチクライアントの開発・実行プラットフォーム「Eclipse RCP (Eclipse Rich Client Platform) [37]」上に実装されている。生産プロセスの各モデルの入力機能には、Eclipse 上でモデルをグラフィカルに表示・編集できるフレームワーク「GEF (Graphical Editing Framework) [38]」を利用して開発されている。

4.2 シミュレーションモデルの入力

本節では、シミュレーションでの生産プロセスを表現する製品モデル、ワークフローモデル、組織モデルの入力機能について説明する。入力された各モデルの情報は、図 4-1 に示すような XML 形式のファイルとして保存することができ、シミュレータを終了しても入力データを残しておくことが可能である。

```

<?xml version="1.0"?>
<!--Project Diagram-->
<ProjectDiagram>
  <NodeElementList>
    <ComponentNode id="786060965812" Left="114" Top="22" Width="0" Height="0">
      <Name>サンプル製品</Name>
      <ErrorTolerance>5.0</ErrorTolerance>
    </ComponentNode>
    <ComponentNode id="927296472188" Left="53" Top="111" Width="0" Height="0">
      <Name>部品1</Name>
      <ErrorTolerance>0.0</ErrorTolerance>
    </ComponentNode>
  </NodeElementList>
  <TaskNode id="543435825984" Left="80" Top="214" Width="0" Height="0">
    <Name>材料切断</Name>
    <WorkAmount>10</WorkAmount>
    <AdditionalWorkAmount>0</AdditionalWorkAmount>
    <NeedFacility>true</NeedFacility>
  </TaskNode>
  <TaskNode id="841428926757" Left="197" Top="214" Width="0" Height="0">
    <Name>部品1加工</Name>
    <WorkAmount>10</WorkAmount>
    <AdditionalWorkAmount>0</AdditionalWorkAmount>
    <NeedFacility>true</NeedFacility>
  </TaskNode>
  <TeamNode id="405200778490" Left="371" Top="54" Width="0" Height="0">
    <Name>組織</Name>
    <WorkerList>
      <Worker>
        <Name>作業者A</Name>
        <Cost>2000.0</Cost>
        <WorkAmountSkill name="材料切断" value="1.0"/>
        <WorkAmountSkill name="部品2加工" value="1.5"/>
        <WorkAmountSkill name="部品1加工" value="1.5"/>
        <WorkAmountSkill name="組立" value="1.0"/>
        <QualitySkill name="材料切断" value="0.1"/>
        <QualitySkill name="部品2加工" value="0.1"/>
        <QualitySkill name="部品1加工" value="0.1"/>
        <QualitySkill name="組立" value="0.1"/>
      </Worker>
    </WorkerList>
    <FacilityList>
      <Facility>
        <Name>NC切断機</Name>
        <Cost>1000.0</Cost>
        <WorkAmountSkill name="材料切断" value="1.0"/>
        <QualitySkill name="材料切断" value="0.1"/>
      </Facility>
      <Facility>
        <Name>加工器具</Name>
        <Cost>800.0</Cost>
        <WorkAmountSkill name="部品2加工" value="1.0"/>
        <WorkAmountSkill name="部品1加工" value="1.0"/>
        <QualitySkill name="部品2加工" value="0.2"/>
        <QualitySkill name="部品1加工" value="0.2"/>
      </Facility>
    </FacilityList>
  </TeamNode>
  </NodeElementList>
  <LinkList>
    <Link type="ComponentLink" org="786060965812" dst="927296472188">
    </Link>
    <Link type="ComponentLink" org="786060965812" dst="867169498646">
    </Link>
    <Link type="AllocationLink" org="405200778490" dst="982622300826">
    </Link>
  </LinkList>
</ProjectDiagram>

```

製品モデルの情報

ワークフローモデルの情報

人員の情報

設備の情報

部品・タスクの依存関係の情報

図 4-1 シミュレーションモデルの情報を保存した XML ファイルの例

4.2.1 製品モデルの入力

製品モデルの入力方法を図 4-2 に示す。

製品モデルを構成する部品をアイコンを用いて入力する。部品アイコン間を矢印で結ぶことによって部品間の依存関係を定義する。また、部品の名前と誤差の許容値を画面右側のビューから入力することができる。

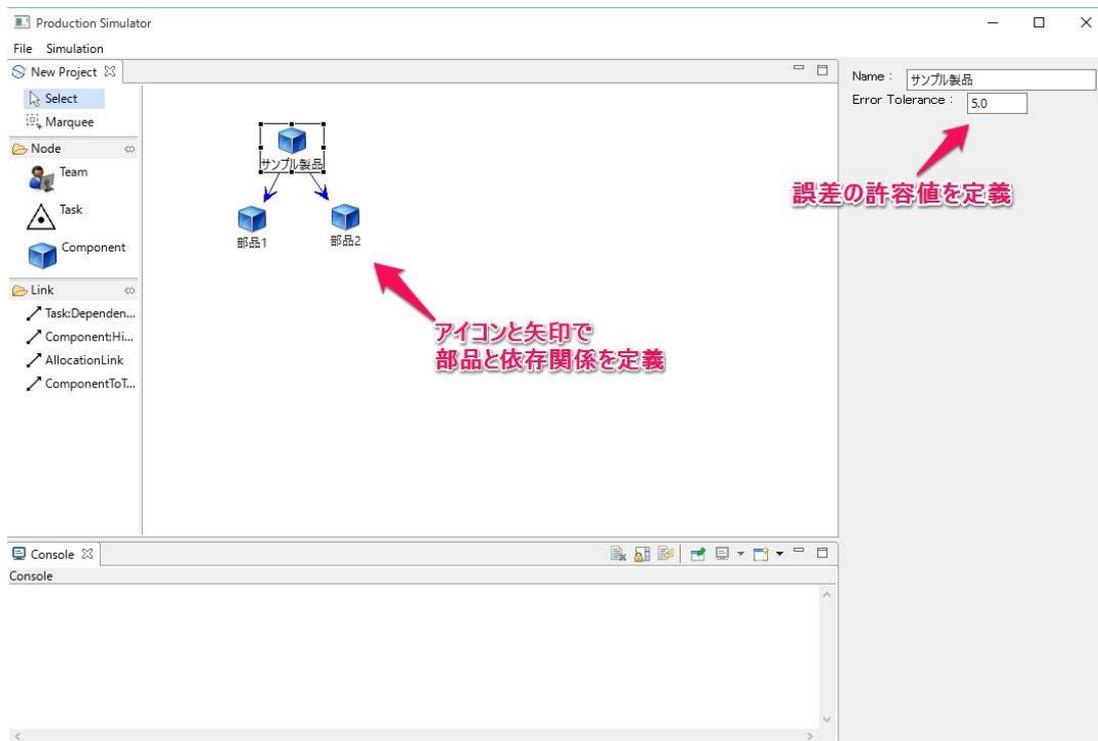


図 4-2 製品モデル入力の様子

4.2.2 ワークフローモデルの入力

ワークフローモデルの入力方法を図 4-3 に示す。

製品モデルの入力と同様に、ワークフローモデルを構成するタスクをアイコンを用いて入力する。タスクアイコン間を矢印で結ぶことによってタスク間の依存関係を定義する。また、タスクと部品の間を矢印で結ぶことによってタスクが対象とする部品の情報を定義する。さらに、タスクの工数および手直し作業の工数を画面右側のビューから入力することができる。

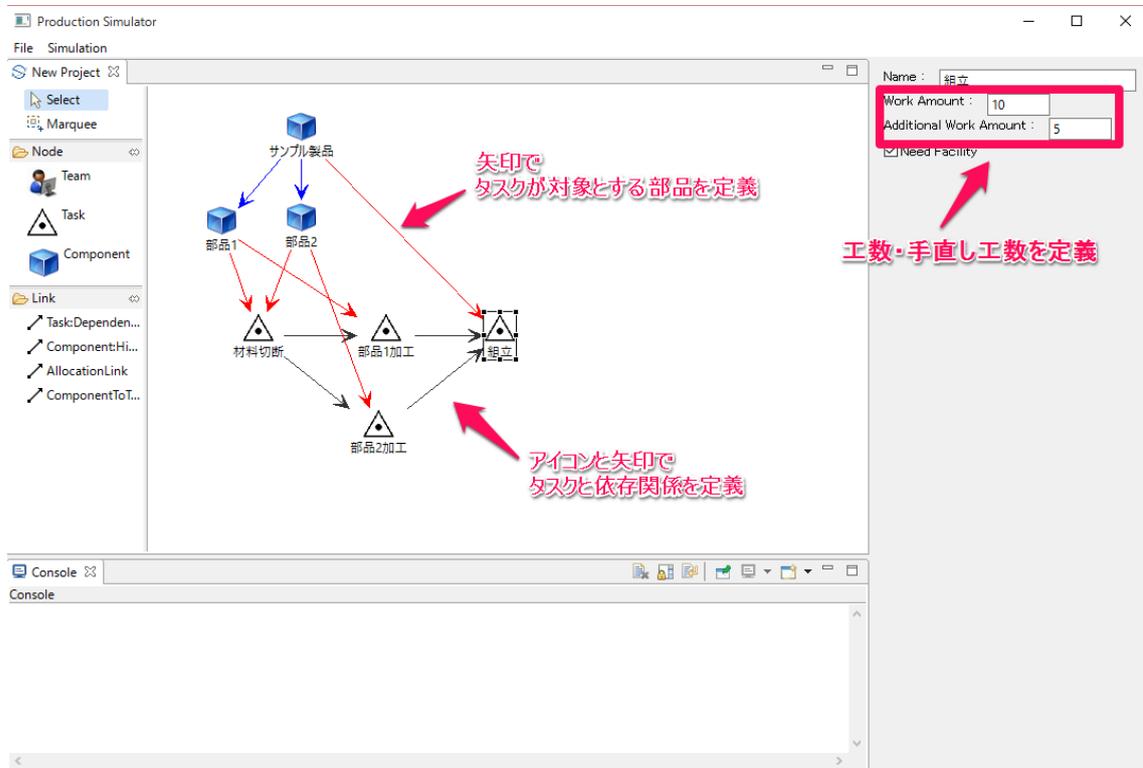


図 4-3 ワークフローモデル入力の様子

4.2.3 組織モデルの入力

組織モデルの入力方法を図 4-4 に示す。

アイコンを用いて組織モデルを追加した後、画面右側のビューから組織モデルに所属する人員と設備を追加する。人員・設備の単位時間あたりの費用、各タスクに対するスキル値、誤差発生確率も同様に右側のビューから入力することができる。

The screenshot shows the 'Production Simulator' interface. On the left, a process flow diagram illustrates the production process. It starts with 'サンプル製品' (Sample Product) at the top, which branches into '部品1' (Part 1) and '部品2' (Part 2). '部品1' leads to '材料切断' (Material Cutting), '部品1加工' (Part 1 Processing), and '部品2加工' (Part 2 Processing). '部品2' leads to '部品2加工'. '材料切断' leads to '部品1加工'. '部品1加工' leads to '組立' (Assembly). '部品2加工' also leads to '組立'. A red arrow points to a '組織' (Organization) icon, with the text 'アイコンで組織モデルを追加' (Add organization model with icon). To the right, there are two data tables. The top table is titled '【メンバー情報】' (Member Information) and the bottom table is '【工作機械・設備情報】' (Work Machine/Equipment Information). Both tables have columns for '名前' (Name), 'Cost', and processing times for '材料切断', '部品1加工', '部品2加工', and '組立'. Red arrows point to the '人員の情報进行定義' (Define personnel information) and '設備の情報进行定義' (Define equipment information) areas.

Figure 4-4 shows the input of the organization model. The interface includes a process flow diagram and two data tables for defining personnel and equipment information.

【メンバー情報】

名前	Cost	材料切断	部品1加工	部品2加工	組立
作業者A	2000.0	1.0/0.1	1.5/0.1	1.5/0.1	1.0/0.1
作業者B	1500.0	0.0/0.0	1.0/0.2	1.0/0.2	1.0/0.1

【工作機械・設備情報】

名前	Cost	材料切断	部品1加工	部品2加工	組立
NC切断機	1000.0	1.0/0.1	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0
加工器具	800.0	0.0/0.0	1.0/0.2	1.0/0.2	0.0/0.0
組立器具	700.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	1.0/0.3

図 4-4 組織モデル入力の様子

4.3 生産プロセスシミュレーションの実行と結果の出力

生産プロセスシミュレーションを実行するには、入力となる製品・ワークフローモデルについて1度のシミュレーションで連続的に生産する製品の個数と、同時に実行できるワークフローの数の最大値、そしてシミュレーションの反復実行回数を入力する。シミュレーションが完了すると、図 4-5 に示すように各シミュレーションにおける所要時間と合計費用の値が CSV 形式のファイルで出力される。

Workflow No	Time	Cost	Repetition	
1	561	9532100		
2	593	9754400		
3	600	9597000		
4	577	9579100		
5	584	9608800		
6	591	9711100		
7	621	9824600		
8	631	9742000		
9	608	9709500		
10	613	9817700		
11	615	9767800		
12	592	9771200		
13	588	9548400		
14	642	9950700		
15	591	9594700		
16	596	9736500		
17	630	9862600		

図 4-5 シミュレーション結果の CSV ファイルの例

第5章 開発した生産プロセスシミュレータの検証

5.1 はじめに.....	49
5.2 シミュレーションの入力.....	49
5.2.1 製品モデルの設定.....	49
5.2.2 ワークフローモデルの設定.....	50
5.2.3 組織モデルの設定.....	51
5.3 検証結果.....	51
5.3.1 シミュレーションの結果.....	51
5.3.2 解析的な計算結果.....	52
5.3.3 検証結果のまとめ.....	54

5.1 はじめに

本章では、提案手法を実装した生産プロセスシミュレータの検証について述べる。単純な生産プロセスの例を用いて、シミュレーションの結果と解析的な計算結果が一致していることを示す。ここでは、船舶部材である 1 枚の単板と 1 つのロンジを製作し、それらを溶接して 1 枚のパネルを作る工程を例にとって検証を行う。

パネル 1 枚のみを製作するため、実行されるワークフローの数はただ 1 つのみである。よって同時に実行できるワークフローの数の制限は考慮しない。また、シミュレーションの繰り返し実行回数は 1000 回とした。

5.2 シミュレーションの入力

本節では、シミュレータの検証に用いる製品モデル、ワークフローモデル、組織モデルについて述べる。

5.2.1 製品モデルの設定

シミュレータの検証に用いる製品モデルを図 5-1 に示す。製品モデルは「Panel」、「Plate」、「Longitudinal」の 3 つの部品から表され、「Panel」は「Plate」および「Longitudinal」に依存している。また、製品モデルの各部品に設定した誤差の許容値を表 5-1 に示す。

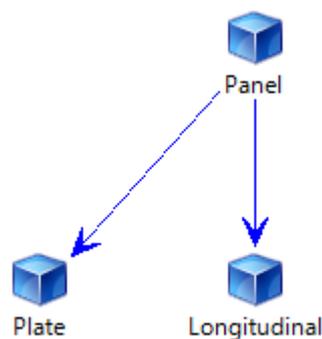


図 5-1 シミュレータ検証用の製品モデル

表 5-1 シミュレータ検証用の製品モデルの誤差の許容値

	許容値
Plate	3
Longitudinal	3
Panel	6

5.2.2 ワークフローモデルの設定

シミュレータの検証に用いるワークフローモデルを図 5-2 に示す。単板の製作、ロンジの製作、溶接によるパネル製作の 3 つのタスクからなり、パネルの溶接タスクは他の 2 つのタスクに依存する。また、各タスクの工数、手直し作業の工数および対象とする部品を図 5-2 に示す。

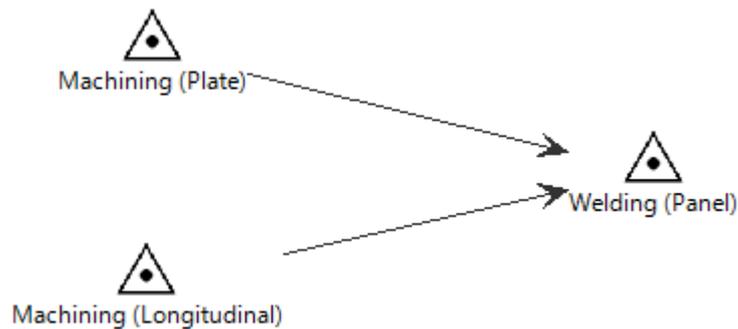


図 5-2 シミュレータの検証用のワークフローモデル

表 5-2 シミュレータの検証用のワークフローモデルの属性

	工数	手直し 作業工数	対象とする 部品
Machining (Plate)	5	2	Plate
Machining (Longitudinal)	5	2	Longitudinal
Welding (Panel)	5	2	Panel

5.2.3 組織モデルの設定

シミュレータの検証に用いる組織モデルを表 5-3 に示す。組織モデルは 1 人の人員と 2 台の設備からなり、スキル値はすべて 1 に、誤差発生確率はすべて 0.2 に設定した。

表 5-3 シミュレータの検証用の組織モデル

	種別	単位時間 当たりの 費用	(スキル値, 誤差発生確率)		
			Machining (Plate)	Machining (Longitudinal)	Welding (Panel)
Worker 1	作業員	1000	(1, 0.2)	(1, 0.2)	(1, 0.2)
Machine 1	工作機械	1000	(1, 0.2)	(1, 0.2)	(0, 0)
Machine 2	工作機械	1000	(0, 0)	(0, 0)	(1, 0.2)

5.3 検証結果

本節では、設定したモデルを用いたシミュレーションの結果と、シミュレーションの内容を解析的に計算した結果を比較する。比較には、手直し作業発生パターンごとの事象の発生回数をを用いる。

5.3.1 シミュレーションの結果

1000回のシミュレーションの結果を、タスクごとの手直し作業発生パターンの組合せに分けて表 5-4 に示した。

表 5-4 検証用のシミュレーションの結果

	手直し作業発生の有無			回数
	Machining (Plate)	Machining (Longitudinal)	Welding (Panel)	
A	無	無	無	698
B	無	無	有	188
C	無	有	無	8
D	無	有	有	47
E	有	無	無	8
F	有	無	有	47
G	有	有	無	0
H	有	有	有	4

5.3.2 解析的な計算結果

すべてのタスクにおいて、単位時間当たりに誤差が発生する確率 p は等しく、式(5.1)で計算できる。

$$p = 1 - (1 - 0.2) \cdot (1 - 0.2) = 0.36 \quad (5.1)$$

すべてのタスクにおいて、通常作業(手直し工数を除いた工数:5)完了時に、それぞれのタスクが対象とする部品の誤差が $e(0 \leq e \leq 5)$ になる確率を $P(E = e)$ とすると、 $P(E = e)$ は式(5.2)で表される。

$$P(E = e) = \binom{5}{e} \cdot p^e \cdot (1 - p)^{5-e} \quad (5.2)$$

タスク「Machining (Plate)」(手直し作業の工数:2 を含む)完了時に、部品「Plate」の誤差 e は $0 \leq e \leq 7$ を満たす。このときの誤差が $e(0 \leq e \leq 7)$ になる確率を $P_{MP}(E = e)$ とすると、 $P_{MP}(E = e)$ は P を用いて式(5.3)で表される。

$$P_{MP}(E = e) \quad (5.3)$$

$$= \begin{cases} P(E = e) & (0 \leq e \leq 3) \\ P(E = 4) \cdot (1 - p)^2 & (e = 4) \\ P(E = 4) \cdot 2 \cdot p \cdot (1 - p) + P(E = 5) \cdot (1 - p)^2 & (e = 5) \\ P(E = 4) \cdot p^2 + P(E = 5) \cdot 2 \cdot p \cdot (1 - p) & (e = 6) \\ P(E = 5) \cdot p^2 & (e = 7) \end{cases}$$

タスク「Machining (Longitudinal)」(手直し作業を含む)完了時に、部品「Longitudinal」の誤差が $e(0 \leq e \leq 7)$ になる確率を $P_{ML}(E = e)$ とすると、手直し作業の発生パターンはタスク「Machining (Plate)」と等しくなるため、 $P_{ML}(E = e)$ は式(5.4)で表される。

$$P_{ML}(E = e) = P_{MP}(E = e) \quad (5.4)$$

タスク「Welding (Panel)」の通常作業(手直し工数を除いた工数:5)完了時に、部品「Panel」の誤差が $e(0 \leq e \leq 5)$ になる確率を $P_{WP}(E = e)$ とすると、 $P_{WP}(E = e)$ は P を用いて式(5.5)で表される。

$$P_{WP}(E = e) = P(E = e) \quad (5.5)$$

表 5-4 の各事象が発生するのは以下のような場合である。ただし、 $e_{plate}, e_{longitudinal}$ はそれぞれタスク「Machining (Plate)」、「Machining (Longitudinal)」(どちらも手直し作業を含む)完了時の部品「Plate」、「Longitudinal」の誤差である。また、 $e_{total,panel}$ はタスク「Welding (Panel)」の通常作業(手直し工数を除いた工数)完了時の部品「Panel」の誤差の総和であり、そのときの部品「Panel」の誤差 e_{panel} を用いて式(5.6)で表される。

- 事象 A: $e_{plate} \leq 3 \cap e_{longitudinal} \leq 3 \cap e_{total,panel} \leq 6$ のとき
- 事象 B: $e_{plate} \leq 3 \cap e_{longitudinal} \leq 3 \cap e_{total,panel} \geq 7$ のとき
- 事象 C: $e_{plate} \leq 3 \cap e_{longitudinal} \geq 4 \cap e_{total,panel} \leq 6$ のとき
- 事象 D: $e_{plate} \leq 3 \cap e_{longitudinal} \geq 4 \cap e_{total,panel} \geq 7$ のとき
- 事象 E: $e_{plate} \geq 4 \cap e_{longitudinal} \leq 3 \cap e_{total,panel} \leq 6$ のとき
- 事象 F: $e_{plate} \geq 4 \cap e_{longitudinal} \leq 3 \cap e_{total,panel} \geq 7$ のとき
- 事象 G: $e_{plate} \geq 4 \cap e_{longitudinal} \geq 4 \cap e_{total,panel} \leq 6$ のとき
- 事象 H: $e_{plate} \geq 4 \cap e_{longitudinal} \geq 4 \cap e_{total,panel} \geq 7$ のとき

$$e_{total,panel} = e_{plate} + e_{longitudinal} + e_{panel} \quad (5.6)$$

以上から、各事象が発生する確率と 1000 回の試行時の事象ごとの発生回数の期待値を求めることができ、計算結果は表 5-5 のようになる。

表 5-5 解析的な計算結果

	確率	期待値
A	0.701	701
B	0.183	183
C	0.007	7
D	0.049	49
E	0.007	7
F	0.000	49
G	0.049	0
H	0.004	4

5.3.3 検証結果のまとめ

表 5-4 の事象の発生回数と表 5-5 の期待値の比較結果を表 5-6 に示す。各事象の発生回数はほぼ等しくなっている。よって、開発したシミュレータの挙動は正しいことが示された。

表 5-6 シミュレーション結果と解析的な計算結果の比較

	回数n1 (シミュレーション)	期待値n2 (解析計算)	差(n2-n1)
A	698	701	3
B	188	183	-5
C	8	7	-1
D	47	49	2
E	8	7	-1
F	47	49	2
G	0	0	0
H	4	4	0

第6章 ケーススタディ

6.1 はじめに.....	56
6.2 ケーススタディの対象.....	56
6.2.1 対象とする製品および工程.....	56
6.2.2 導入を検討する生産設備.....	58
6.3 ケーススタディ 1：設備導入効果の検証と導入コストを含めた分析.....	60
6.3.1 シミュレーションの入力.....	61
6.3.2 結果.....	65
6.4 ケーススタディ 2：作業場所制約の違いによる設備導入効果の変化の分析 ..	70
6.4.1 シミュレーションの入力.....	70
6.4.2 結果.....	71
6.5 ケーススタディ 3：技術レベルの違いによる設備導入効果の変化の分析.....	73
6.5.1 シミュレーションの入力.....	73
6.5.2 結果.....	74

6.1 はじめに

本章では、仮想の船舶曲がりブロックの製造プロセスを対象として、提案手法を用いた生産設備導入前後の生産プロセスの評価を行う。ケーススタディにおけるシミュレーションでは、船舶1隻分の曲がりブロック30個を連続的に生産する。

生産プロセスを導入を検討する生産設備は曲がり外板の工作精度評価システムである。このシステムの詳細については6.2.2で説明する。

ケーススタディ1では、システムの導入によって生産プロセスのシミュレーション結果がどのように変化するかを確認する。また、システム導入による組織モデルのパラメータ変更による結果の感度を分析する。さらに、シミュレーション結果を利用してシステムの導入コストを含めた分析を行う。

ケーススタディ2では、工場の作業場所の制約の違いによってシステムの導入効果がどのように変化するかを確認する。具体的には、工場の作業スペースの広さの変化によるシミュレーション結果の違いを分析する。

ケーススタディ3では、人員の技術レベルの違いによってシステムの導入効果がどのように変化するかを確認する。具体的には、システムの導入対象工程であるぎょう鉄工程の人員の誤差発生確率の変化によるシミュレーション結果の違いを分析する。

本ケーススタディにおける船舶曲がりブロック製造プロセスの製品、ワークフロー、組織の各モデルは、文献[21][39][40][41][42][43]などを参考に作成した。

6.2 ケーススタディの対象

本節では、ケーススタディで取り扱う船舶建造プロセスである曲がりブロックとその製造工程、および想定される工場のレイアウトについて説明する。また、曲がりブロック製造工程を導入を検討する生産設備である曲がり外板の工作精度評価システムについても述べる。

6.2.1 対象とする製品および工程

ケーススタディでは、船舶建造プロセスのうち曲がりブロックの製造工程を対象とする。

ケーススタディの生産プロセスで生産する製品は船舶曲がりブロックである。一般に大型船舶は、船体を適当な大きさに分割した中間製品であるブロックを組み立て、ドックでブロックを搭載して建造するという方法がとられている。これはブロック建造法と呼ばれる。図6-1に示

のような曲がりブロックは、船体の船首尾の曲面で形成される部分を構成するブロックであり、曲がり外板、ロンジ、トランスなどの部材を溶接により接合することによって製造される。

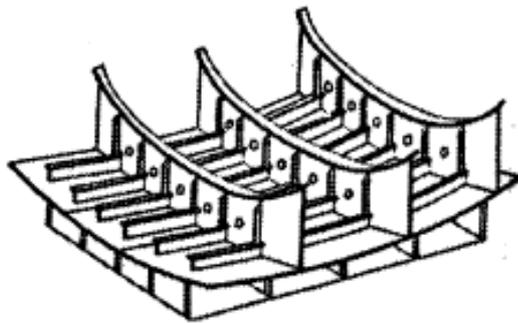


図 6-1 曲がりブロック [39]

対象とする工程は曲がり外板とロンジの加工工程、トランスの小組立工程、ブロックの大組立工程である。

曲がり外板の加工工程は部材の切断、プレス、ぎょう鉄からなる。ロンジの加工工程は部材の切断と、部材の取付・溶接を含むロンジの製作作業からなる。トランスの小組立工程は部材の切断と、部材の取付・溶接を含むトランスの製作作業からなる。ブロックの大組立工程は外板板継の配材・仮付と溶接、ロンジの配材・仮付と溶接、トランスの配材・仮付と溶接からなる。

これらの工程を作業するとした場合に、想定される工場の生産設備のレイアウトを図 6-2 に示す。曲がり外板とロンジの加工工程、トランスの小組立工程、ブロックの大組立工程それぞれにおける作業は、対応するラインの各生産設備を製品が経由することによって実行される。

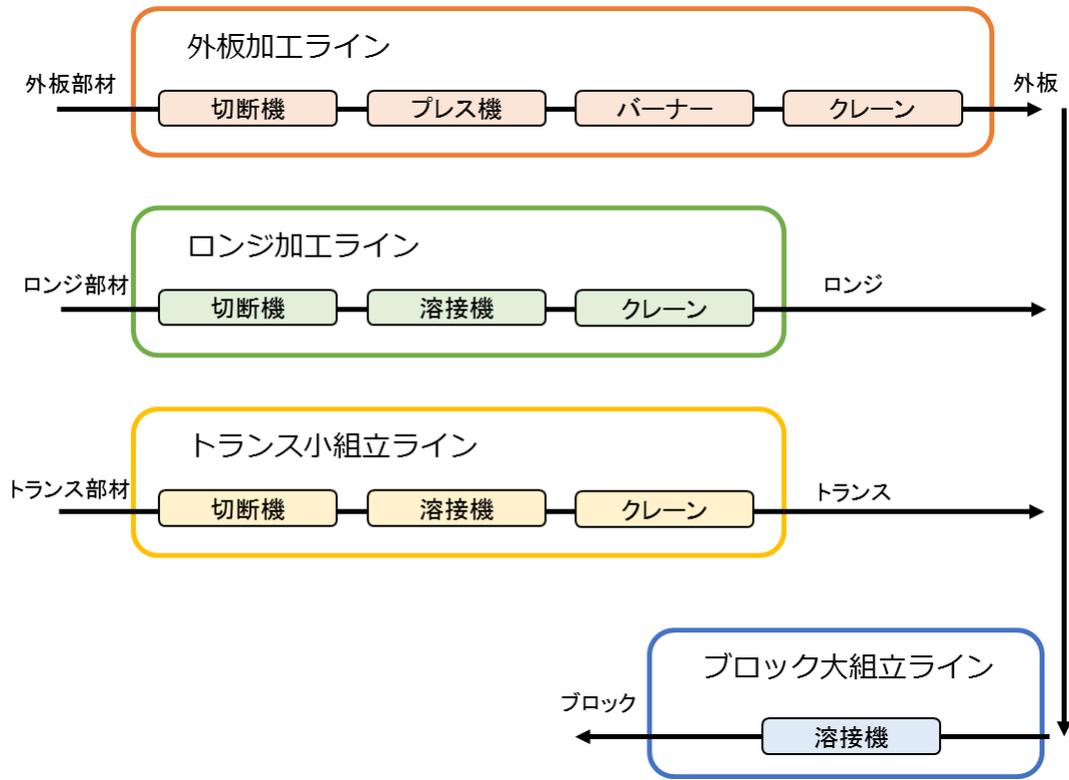


図 6-2 ケーススタディで想定する工場のレイアウト

6.2.2 導入を検討する生産設備

本ケーススタディでは、曲がりブロック製造工程の曲がり外板加工プロセスに、レーザスキャナによる曲がり外板の工作精度評価システム[44][45]の導入を検討する。

曲がり外板とは、船首尾の3次元曲面を構成する鋼板であり、切り出された鋼板をベンディングローラーやプレスを用いた冷間加工によって目標形状に近づけた後、ぎょう鉄と呼ばれる加熱による変形を利用した曲げ加工を経て製作される[39]。ぎょう鉄工程では、曲がり外板の設計形状を表す木型を鋼板にあてがって仕上がり具合を確認しながら、ガスバーナーによる加熱と水による冷却を繰り返して外板を完成形状に仕上げるという作業が行われる。ぎょう鉄は職人による手作業で行われるため、曲がり外板の寸法精度品質のばらつきが問題となっており、後工程での手直し作業発生の原因となる。

以上の問題への対応策として、レーザスキャナによる曲がり外板の工作精度評価システム[44][45]は開発された。システムの概要図を図 6-3 に、システムの工場への導入例を図 6-4

に示す。システムを利用すると、レーザスキャナという3次元計測機器により得られた曲がり外板の計測データと設計形状を表すCADデータを重ね合わせて比較することにより、曲がり外板の曲面形状の誤差を定量的に可視化することができる。したがって、このシステムをぎょう鉄工程に導入することによって、曲がり外板の工作精度のばらつきを低減させることが可能であり、曲がり外板の品質向上によって後工程での手直し作業を減少させることができると考えられる。

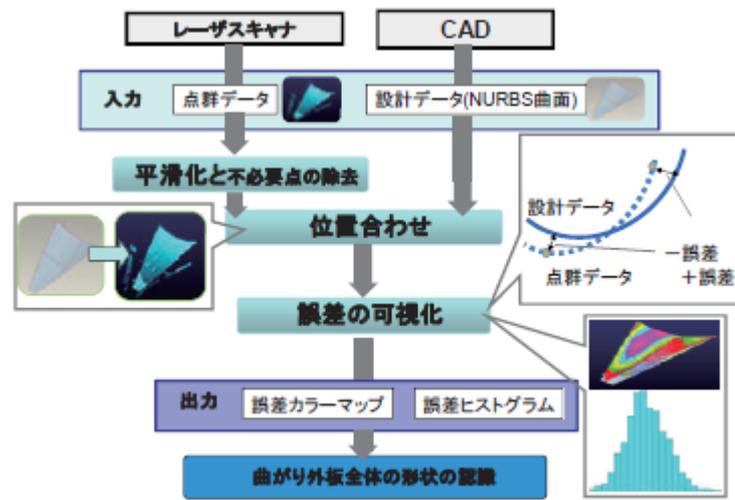


図 6-3 曲がり外板工作精度評価システムの概要[44]

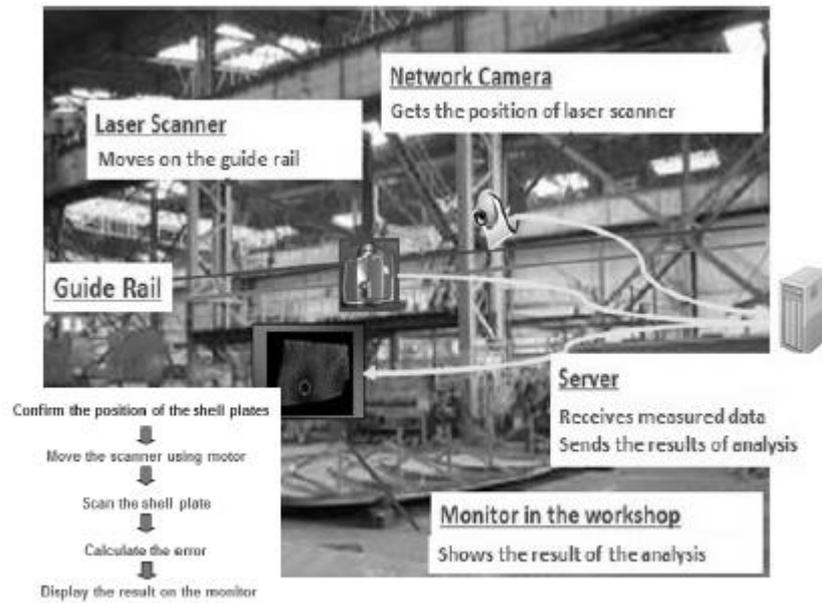


図 6-4 曲がり外板工作精度評価システムの工場導入例[45]

本ケーススタディにおいてシステムを導入する場合には、図 6-2 の外板加工ライン中に示されているバーナーの位置にシステムを導入することになる。

6.3 ケーススタディ 1：設備導入効果の検証と導入コストを含めた分析

本節では、曲がり外板の工作精度評価システムの導入によって、システムの導入前後で曲がりブロック製造プロセスの所要時間と合計費用がどのように変化するかを検証する。同時に、システムの導入によって変化する組織モデルのパラメータ(費用と誤差発生確率)の変動によるシミュレーション結果の感度を分析する。さらに、システムの導入コストを概算し、導入コストを含めたうえで所要時間と合計費用の関係について調べる。

6.3.1 シミュレーションの入力

6.3.1.1 製品モデルの設定

曲がりブロック 1 つの製品モデルにおける部品と部品間の依存関係を図 6-5 に示す。1 つの曲がりブロックは 4 枚の曲がり外板と 6 個のロンジ、2 個のトランスからなる。簡単のために、30 個の曲がりブロックはすべて同じ製品モデルで表されるとする。また、各部品の誤差の許容値を表 6-1 に示す。製品モデル内の末端の部品である曲がり外板、ロンジ、トランスについてそれぞれ誤差の許容値を設定し、各中間製品と曲がりブロックの誤差の許容値については依存する部品の許容値の総和とした。

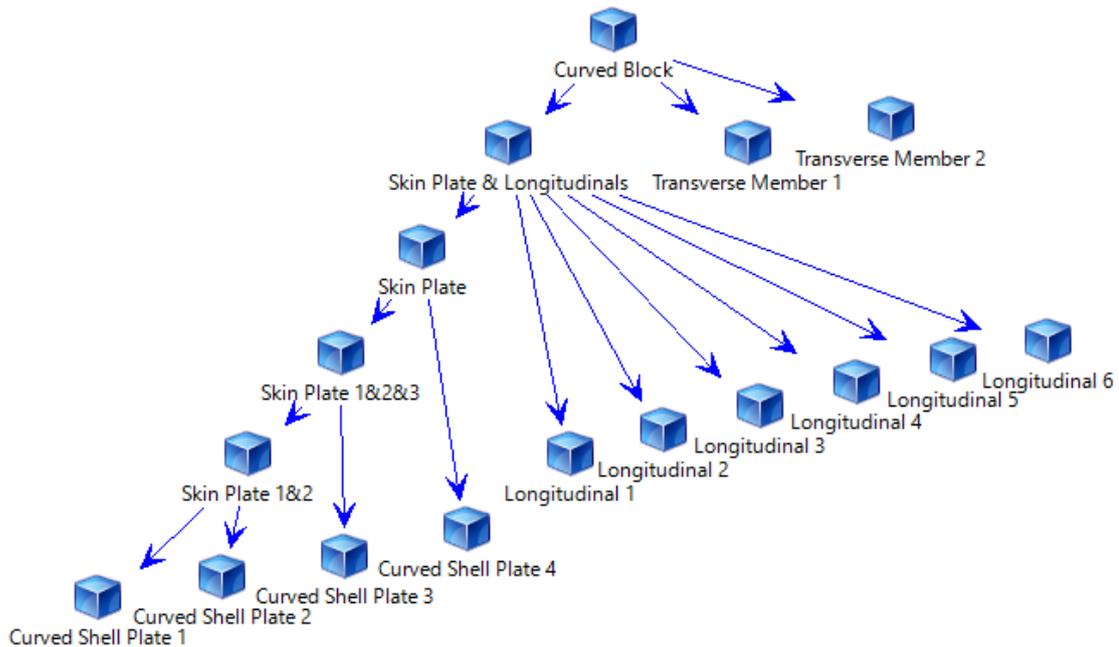


図 6-5 曲がりブロックの部品と部品間の依存関係

表 6-1 曲がりブロックの部品の誤差の許容値

	許容値
Curved Shell Plate 1	5
Curved Shell Plate 2	5
Curved Shell Plate 3	5
Curved Shell Plate 4	5
Skin Plate 1&2	10
Skin Plate 1&2&3	15
Skin Plate	20
Longitudinal 1	2
Longitudinal 2	2
Longitudinal 3	2
Longitudinal 4	2
Longitudinal 5	2
Longitudinal 6	2
Skin Plate & Longitudinals	32
Transverse Member 1	3
Transverse Member 2	3
Curved Block	38

6.3.1.2 ワークフローモデルの設定

曲がりブロック 1 つを製造するワークフローを図 6-6 に示す。ワークフローは曲がり外板加工、ロンジ加工、トランス小組立、ブロック大組立の 4 つの工程からなる。図 6-2 に示した工場のレイアウトとそれぞれの工程の対応関係を色付けして表示している。30 個の曲がりブロックはすべて同じワークフローで製造されるとする。また、各タスクの工数と対象とする部品を表 6-2 に示す。

ケーススタディ

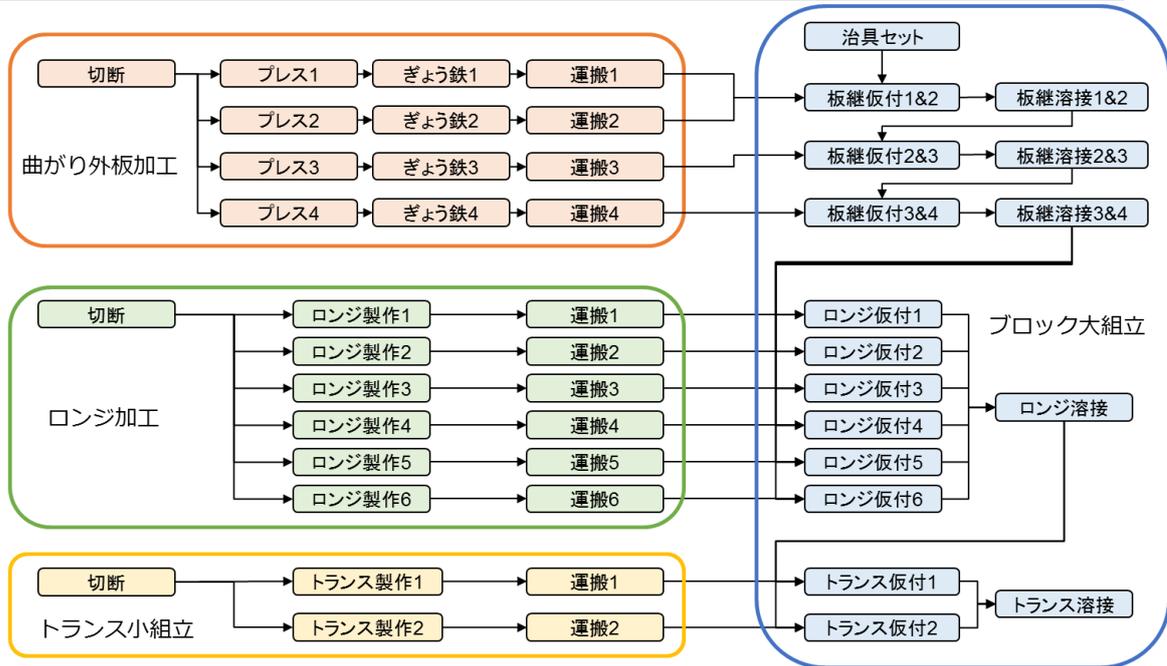


図 6-6 曲がりブロック製造のワークフロー

表 6-2 曲がりブロック製造のタスクの工数と対象とする部品

		工数 [hour]	手直し 工数 [hour]	対象とする部品
曲がり外板加工	切断	4	0	すべてのCurved Shell Plate
	プレス1-4	2	0	番号に対応するCurved Shell Plate
	ぎょう鉄1-4	8	4	番号に対応するCurved Shell Plate
	運搬1-4	1	0	番号に対応するCurved Shell Plate
ロンジ加工	切断	4	0	すべてのLongitudinal
	ロンジ製作1-6	2	1	番号に対応するLongitudinal
	運搬1-6	1	0	番号に対応するLongitudinal
トランス小組立	切断	4	0	すべてのTransverse Member
	トランス製作1,2	6	3	番号に対応するTransverse Member
	運搬1,2	1	0	番号に対応するTransverse Member
ブロック大組立	治具セット	2	0	なし
	板継仮付1&2	2	4	Skin Plate 1&2
	板継溶接1&2	2	4	Skin Plate 1&2
	板継仮付2&3	2	4	Skin Plate 1&2&3
	板継溶接2&3	2	4	Skin Plate 1&2&3
	板継仮付3&4	2	4	Skin Plate
	板継溶接3&4	2	4	Skin Plate
	ロンジ仮付1-6	1	1	Skin Plateと番号に対応するLongitudinal
	ロンジ溶接	6	6	Skin Plate & Longitudinals
	トランス仮付1,2	3	3	Skin Plate & Longitudinalsと番号に対応するTransverse Member
トランス溶接	6	6	Curved Block	

6.3.1.3 組織モデルの設定

設定した組織モデルのうち、人員の情報を表 6-3 に、設備の情報を表 6-4 に示す。組織モデルは 14 人の人員と 21 台の設備からなる。

表 6-3 曲がりブロック製造の人員の情報

	費用 [yen/hour]	スキル													誤差発生確率																				
		曲がり外板加工			ロンジ加工		トランス小組立		ブロック大組立						曲がり外板加工		ロンジ加工		トランス小組立		ブロック大組立														
		切断	プレス	ぎょう鉄	運搬	切断	ロンジ製作	切断	トランス製作	運搬	治具セット	板継げ付	板継溶接	ロンジ板付	ロンジ溶接	トランス板付	トランス溶接	切断	プレス	ぎょう鉄	運搬	切断	ロンジ製作	運搬	切断	トランス製作	運搬	治具セット	板継げ付	板継溶接	ロンジ板付	ロンジ溶接	トランス板付	トランス溶接	
外板加工1	1300	1	1															0.1	0.1																
外板加工2	1300	1	1															0.1	0.1																
外板加工3	1800		1	1	1														0.1	0.1	0														
外板加工4	1800		1	1	1														0.1	0.1	0														
外板加工5	1500			1	1															0.1	0														
ロンジ加工1	1300					1	1	1														0.1	0.1	0											
ロンジ加工2	1300					1	1	1														0.1	0.1	0											
小組立1	1500							1	1	1														0.1	0.1	0									
小組立2	1500							1	1	1														0.1	0.1	0									
小組立3	1500							1	1	1														0.1	0.1	0									
大組立1	1800										1	1	1	1	1	1	1											0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
大組立2	1800										1	1	1	1	1	1	1											0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
大組立3	1300										1	1	1	1	1	1	1											0	0.1						
大組立4	1300										1	1	1	1	1	1	1											0	0.1						

表 6-4 曲がりブロック製造の設備の情報

	費用 [yen/hour]	スキル値													誤差発生確率																				
		曲がり外板加工			ロンジ加工		トランス小組立		ブロック大組立						曲がり外板加工		ロンジ加工		トランス小組立		ブロック大組立														
		切断	プレス	ぎょう鉄	運搬	切断	ロンジ製作	切断	トランス製作	運搬	治具セット	板継げ付	板継溶接	ロンジ板付	ロンジ溶接	トランス板付	トランス溶接	切断	プレス	ぎょう鉄	運搬	切断	ロンジ製作	運搬	切断	トランス製作	運搬	治具セット	板継げ付	板継溶接	ロンジ板付	ロンジ溶接	トランス板付	トランス溶接	
切断機(外板)	1000	1																0.1																	
プレス機1	500		1																0.1																
プレス機2	500		1																0.1																
バーナー1	500			1																0.2															
バーナー2	500			1																0.2															
バーナー3	500			1																0.2															
クレーン(外板)	1000				1																0														
切断機(ロンジ)	1000					1																0.1													
溶接機(ロンジ)1	1000						1																0.1												
溶接機(ロンジ)2	1000						1																0.1												
クレーン(ロンジ)	1000							1																0											
切断機(小組立)	1000								1															0.1											
溶接機(小組立)1	1000									1															0.1										
溶接機(小組立)2	1000										1														0.1										
溶接機(小組立)3	1000											1													0.1										
クレーン(小組立)	1000												1													0									
オフセット治具	0													1													0								
溶接機(大組立)1	1000													1	1	1	1	1	1										0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
溶接機(大組立)2	1000													1	1	1	1	1	1										0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
溶接機(大組立)3	1000													1	1	1	1	1	1										0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
溶接機(大組立)4	1000													1	1	1	1	1	1										0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

6.3.1.4 生産設備導入による組織モデルのパラメータ変更

曲がり外板精度評価システムの導入によって曲がりブロック製造プロセスに及ぼされる影響は、以下の 2 つであると想定される。

- ワークフローの「ぎょう鉄」タスクにおける曲がり外板の誤差の減少
- ワークフローの「ぎょう鉄」タスクにおける設備の単位時間あたりの費用の増加

よって本ケーススタディでは、「ぎょう鉄」タスクに対するスキル値をもつ設備である「バーナー」の誤差発生確率と単位時間あたりの費用が、システム導入後にそれぞれ 0.10 および 900 円になると設定した。また、誤差発生確率と単位時間あたりの費用の変化に関して感度を分析するために、それぞれのパラメータを表 6-5 のように変化させて生産プロセスシミュレーションを実行し、結果を比較する。

表 6-5 「バーナー」に設定した誤差発生確率と費用

	初期値	導入後	その他設定した値
誤差発生確率	0.20	0.10	0.00, 0.05, 0.15
単位時間当たりの費用 [yen]	500	900	700

6.3.1.5 シミュレーションの設定

シミュレーションにおいて工場の作業場所の制約を表現する値である、単位時間に実行できるワークフローの数の最大値は 3 に設定した。また、1 つの生産プロセスのモデルの設定につき 1000 回ずつシミュレーションを実行した。

6.3.2 結果

6.3.2.1 システム導入前後の比較

システム導入前(「バーナー」の誤差発生確率:0.20, 単位時間当たりの費用:500 円)とシステム導入後(「バーナー」の誤差発生確率:0.10, 単位時間当たりの費用:900 円)の生産プロセスシミュレーションの結果をプロットしたグラフを図 6-7 に示す。また、それぞれの生産プロセスの所要時間と合計費用の平均と標準偏差の計算結果を表 6-6 に示す。

グラフと表から、システムの導入によって、曲がりブロックの製造プロセスの所要時間と合計費用の両方について、平均値とばらつきが減少することがわかる。システム導入後は、所要時間の平均値が 88 時間、合計費用の平均値が 15 万円減少した。

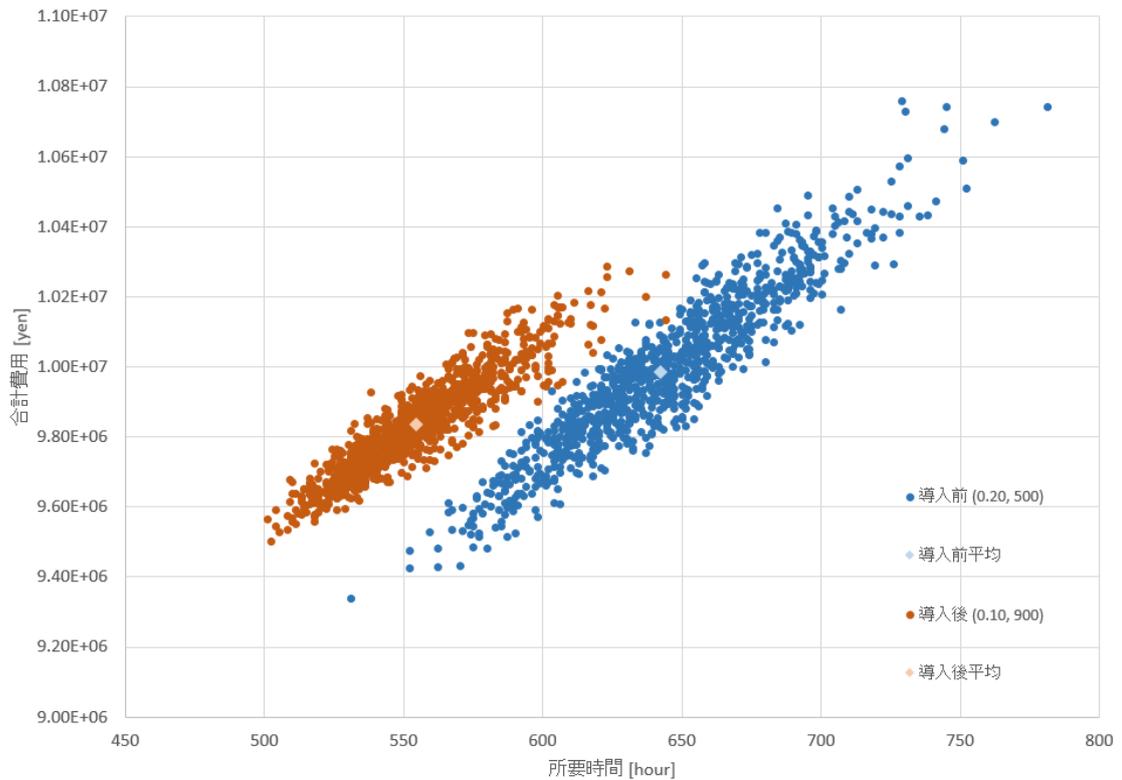


図 6-7 システム導入前および導入後の結果

表 6-6 システム導入前および導入後の結果の平均と標準偏差

	所要時間 [hour]		合計費用 [10 ⁴ yen]	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
導入前	642	35	999	22
導入後	555	24	984	14
差(導入後 - 導入前)	-88	-	-15	-

また、システム導入前後での生産プロセスに要した実績の工数を図 6-8 および表 6-7 に示す。グラフ中には、実績工数の平均値と共に標準偏差の値をエラーバーで表した。

実績工数の値もシステムの導入によって平均値とばらつきが減少していることがわかる。システム導入後は、実績工数の平均値は 219 時間減少した。

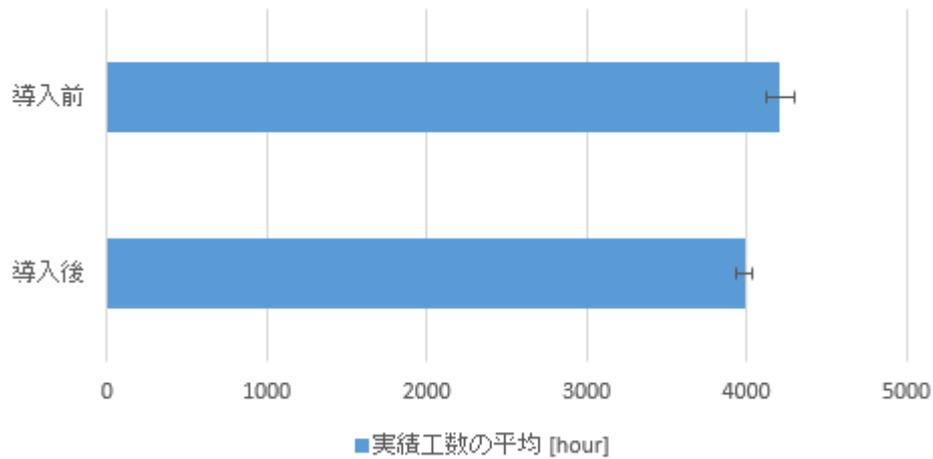


図 6-8 システム導入前および導入後の実績工数

表 6-7 システム導入前および導入後の実績工数の平均と標準偏差

	実績工数[hour]	
	平均	標準偏差
導入前	4208	87
導入後	3989	49
差(導入後 - 導入前)	-219	-

6.3.2.2 誤差発生確率の変化による影響

組織モデルの「バーナー」の単位時間あたりの費用を 500 円(初期値)に固定した場合において、誤差発生確率を表 6-5 のように変化させたときのそれぞれの生産プロセスシミュレーション結果をプロットしたグラフを図 6-9 に示す。また、各設定値について生産プロセスの所要時間と合計費用の平均と標準偏差の計算結果を表 6-8 に示す。

グラフから、「バーナー」の「ぎょう鉄」タスクに対する誤差発生確率が減少するにしたがって、曲がりブロック製造プロセスの所要時間と合計費用の両方について、平均値とばらつきが共に減少することがわかる。

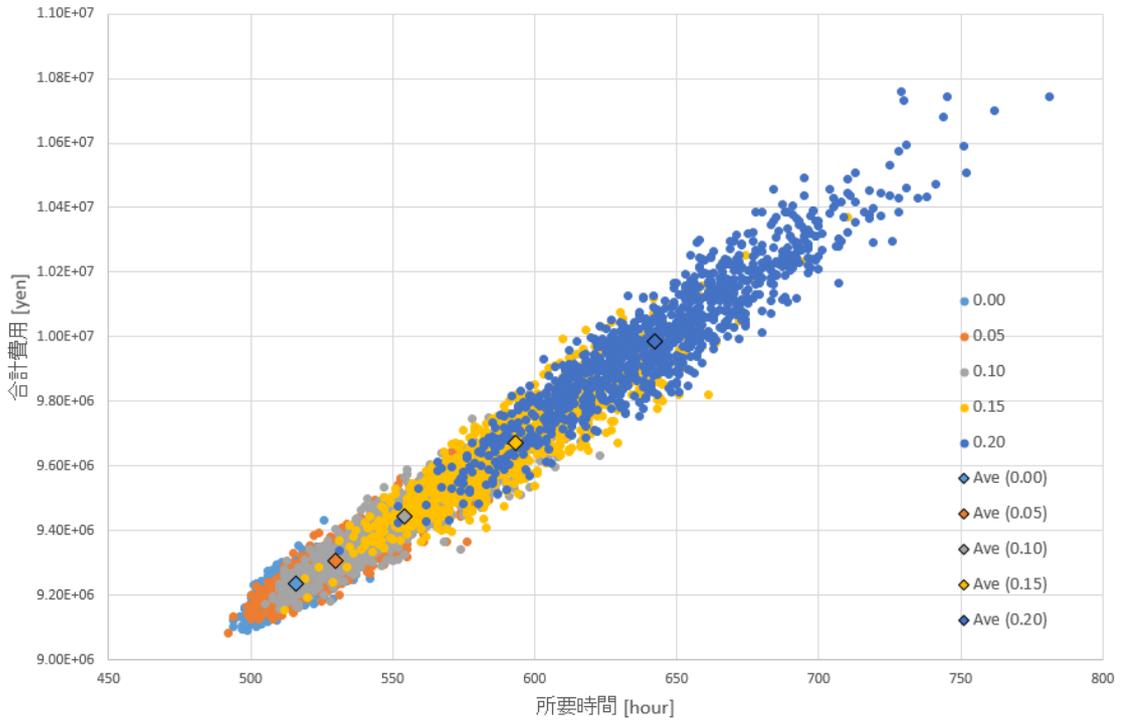


図 6-9 「バーナー」の誤差発生確率を変化させた場合の結果

表 6-8 「バーナー」の誤差発生確率を変化させた場合の結果の平均と標準偏差

誤差発生確率	所要時間 [hour]		合計費用 [10 ⁴ yen]	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
0.00	516	10	924	6
0.05	530	16	931	9
0.10	554	23	944	14
0.15	593	28	967	17
0.20	642	35	999	22

6.3.2.3 費用の変化による影響

組織モデルの「バーナー」の単位時間あたりの費用を表 6-5 に示す 3 つの値に設定した場合の生産プロセスシミュレーションの結果の平均をプロットしたグラフを図 6-10 に示す。それぞれの場合について、誤差発生確率も表 6-5 に示す 5 つの値に変化させてシミュレーションを実行した。

グラフから、設定したすべての誤差発生確率の値において同様の合計費用の増加傾向がみられる。具体的には、誤差発生確率が等しいとき、「バーナー」の単位時間あたりの費用が200円増加すると、生産プロセスにかかる合計費用は約20万円増加することがわかる。

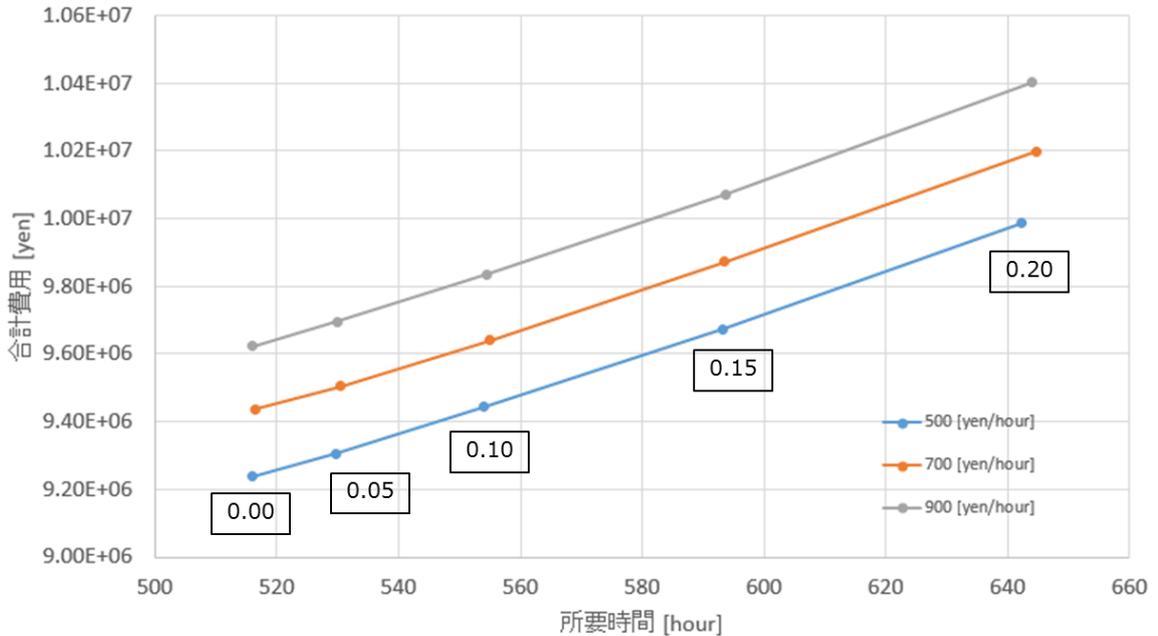


図 6-10 「バーナー」の費用を変化させた場合の結果

6.3.2.4 生産設備導入コストとの比較

曲がり外板の工作精度評価システムの導入により、「バーナー」の単位時間あたりの費用と「ぎょう鉄」タスクに対する誤差発生確率が変化する場合について、生産設備導入コストを考慮したシステム導入前後の結果の比較を行う。

曲がり外板の工作精度評価システムは文献[45]において、3次元レーザスキャナ1台と計測データの解析用のソフトウェア、それを動かす計算機などから構成される。レーザスキャナおよび計算機の耐用年数は5年であり[46]、システム導入によって5年間で生じる固定コストはおよそ2千万円である。本ケーススタディにおける造船所では同一の船舶が年間で3隻建造されると仮定すると、システムの1隻あたりの導入コストはおよそ133万円と計算することができる。

また、シミュレーションで得られた結果より、船舶1隻分の曲がりブロック30個を製造するプロセスの所要時間と合計費用は表6-6に、実績工数は表6-7に示される値となる。

したがって、システムの導入コストを考慮すると、本ケーススタディにおける造船所では、船舶 1 隻あたり約 120 万円の費用の増加によって曲がりブロック製造プロセスの所要時間を約 90 時間、実績工数を約 220 時間削減できるということがわかる。

6.4 ケーススタディ 2：作業場所制約の違いによる設備導

入効果の変化の分析

本節では、工場の作業場所の制約の違いによって、曲がり外板の工作精度評価システムの導入効果がどのように変化するかを確認する。具体的には、工場の作業スペースの広さが変化した場合の、生産プロセスの所要時間と合計費用にシステム導入が与える影響の違いを分析する。工場の作業スペースの制約を表現するパラメータである、単位時間に実行できるワークフローの数を変化させてシミュレーションを実行し、それぞれの結果を比較する。

6.4.1 シミュレーションの入力

6.4.1.1 モデルの設定

シミュレーションに用いる製品モデル、ワークフローモデル、組織モデルはケーススタディ 1 と同様に、それぞれ 6.3.1.1, 6.3.1.2, 6.3.1.3 で示したモデルを用いた。

6.4.1.2 生産設備導入による組織モデルのパラメータ変更

ケーススタディ 1 と同様に、表 6-5 に示すように「ぎょう鉄」タスクに対するスキル値をもつ設備である「バーナー」の誤差発生確率と単位時間あたりの費用が、システム導入前後でそれぞれ 0.20 から 0.10 および 500 円から 900 円に変化するものとして設定した。

6.4.1.3 シミュレーションの設定

工場の作業スペースの広さの違いによるシミュレーション結果の変化を調べるために、単位時間に実行できるワークフローの数の最大値を 2, 3, 4, 5 の 4 種類に設定した。それぞれの値の設定につき、ケーススタディ 1 と同様に 1000 回ずつシミュレーションを実行した。

6.4.2 結果

単位時間に実行できるワークフローの数の最大値のそれぞれの設定値について、生産プロセスシミュレーションの結果をプロットしたグラフを図 6-11 に示す。グラフ中の各点はいずれも 1000 回のシミュレーション結果の平均値を表している。また、それぞれの設定値のシミュレーション結果の平均値と標準偏差をそれぞれ表 6-9, 表 6-10, 表 6-11, 表 6-12 に示す。

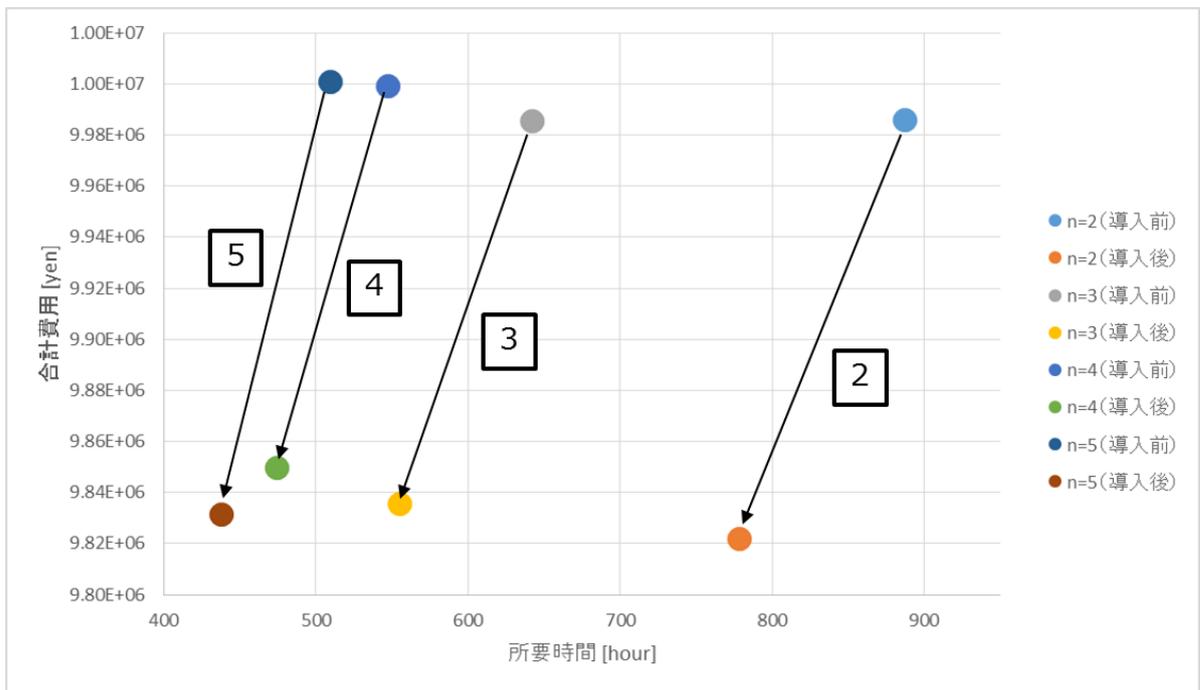


図 6-11 ワークフローの同時実行数の最大値を変化させた場合の結果

表 6-9 ワークフローの同時実行数の最大値が 2 の場合の平均と標準偏差

	所要時間 [hour]		合計費用 [10 ⁴ yen]	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
導入前	887	41	999	21
導入後	778	26	982	13
差(導入後 - 導入前)	-109	-	-16	-

表 6-10 ワークフローの同時実行数の最大値が 3 の場合の平均と標準偏差

	所要時間 [hour]		合計費用 [10 ⁴ yen]	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
導入前	642	35	999	22
導入後	555	24	984	14
差(導入後 - 導入前)	-88	-	-15	-

表 6-11 ワークフローの同時実行数の最大値が 4 の場合の平均と標準偏差

	所要時間 [hour]		合計費用 [10 ⁴ yen]	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
導入前	547	29	1000	21
導入後	474	19	985	14
差(導入後 - 導入前)	-73	-	-15	-

表 6-12 ワークフローの同時実行数の最大値が 5 の場合の平均と標準偏差

	所要時間 [hour]		合計費用 [10 ⁴ yen]	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
導入前	510	28	1000	22
導入後	438	17	983	13
差(導入後 - 導入前)	-72	-	-17	-

すべての単位時間に実行できるワークフローの数の最大値の設定値について、システムの導入によって生産プロセスの所要時間、合計費用の平均およびばらつきが共に減少していることがわかる。

生産プロセスの所要時間に関しては、実行できるワークフローの数の最大値が小さいほど大きな削減効果が出ていることが見受けられる。

生産プロセスの合計費用に関しては、実行できるワークフローの数の最大値の変化による削減効果にほとんど差がないことがわかる。

以上から、工場の作業場所が狭いほど、曲がり外板の工作精度評価システムの所要時間の削減についての導入効果をより大きく得ることができるが、合計費用の削減効果については作業場所の制約の違いによる影響を受けないということがわかる。

6.5 ケーススタディ 3 : 技術レベルの違いによる設備導入

効果の変化の分析

本節では、人員の技術レベルの違いによって、曲がり外板の工作精度評価システムの導入効果がどのように変化するかを確認する。具体的には、システムの導入対象工程であるぎょう鉄工程の人員の技術レベルが変化した場合の、生産プロセスの所要時間と合計費用にシステム導入が与える影響の違いを分析する。ぎょう鉄作業者の技術レベルを表すパラメータである誤差発生確率を変化させてシミュレーションを実行し、それぞれの結果を比較する。

6.5.1 シミュレーションの入力

6.5.1.1 モデルの設定

シミュレーションに用いる製品モデル、ワークフローモデルについては、ケーススタディ 1, 2と同様に、それぞれ 6.3.1.1, 6.3.1.2 で示したモデルを用いた。

組織モデルについては、ぎょう鉄作業者の技術レベルの違いを表現するために、「ぎょう鉄」タスクを担当する人員である「外板加工 3」、「外板加工 4」、「外板加工 5」の「ぎょう鉄」タスクについての誤差発生確率を表 6-13 に示すように 0.05, 0.10, 0.15 の 3 種類の値に設定した。誤差発生確率の設定値が小さいほど、ぎょう鉄作業者は曲がり外板を精度よく曲げ加工することができるということを意味する。

表 6-13 曲がりブロック製造の人員の情報 (ケーススタディ 3)

	費用 [yen/hour]	スキル												誤差発生確率																									
		曲がり外板加工			ロンジ加工			トランス小組立			ブロック大組立			曲がり外板加工			ロンジ加工			トランス小組立			ブロック大組立																
		切 断	ぎ よ う 鉄	運 搬	切 断	運 搬	切 断	運 搬	切 断	運 搬	治 具 セ ット	板 継 仮 付	板 継 溶 接	ロ ン ジ 仮 付	ロ ン ジ 溶 接	ト ラ ン ス 仮 付	ト ラ ン ス 溶 接	切 断	プ レ ス	ぎ よ う 鉄	運 搬	切 断	運 搬	切 断	運 搬	切 断	運 搬	切 断	運 搬	治 具 セ ット	板 継 仮 付	板 継 溶 接	ロ ン ジ 仮 付	ロ ン ジ 溶 接	ト ラ ン ス 仮 付	ト ラ ン ス 溶 接			
外板加工1	1300	1	1														0.1	0.1																					
外板加工2	1300	1	1														0.1	0.1																					
外板加工3	1800	1	1	1													0.1	0.1	0																				
外板加工4	1800	1	1	1													0.1	0.1	0																				
外板加工5	1500		1	1													0.1	0.1	0																				
ロンジ加工1	1300				1	1	1														0.1	0.1	0																
ロンジ加工2	1300				1	1	1														0.1	0.1	0																
小組立1	1500							1	1	1																													
小組立2	1500							1	1	1																													
小組立3	1500							1	1	1																													
大組立1	1800										1	1	1	1	1	1																							
大組立2	1800										1	1	1	1	1	1																							
大組立3	1300										1	1	1	1	1	1																							
大組立4	1300										1	1	1	1	1	1																							

6.5.1.2 生産設備導入による組織モデルのパラメータ変更

ケーススタディ 1, 2 と同様に、表 6-5 に示すように「バーナー」の誤差発生確率と単位時間あたりの費用が変化するものとして設定した。

6.5.1.3 シミュレーションの設定

ケーススタディ 1 と同様に、単位時間に実行できるワークフローの数の最大値を 3 に設定した。それぞれの組織モデルの設定につき、ケーススタディ 1, 2 と同様に 1000 回ずつシミュレーションを実行した。

6.5.2 結果

「外板加工」を担当する人員の「ぎょう鉄」タスクの誤差発生確率のそれぞれの設定値について、生産プロセスシミュレーションの結果をプロットしたグラフを図 6-12 に示す。グラフ中の各点はいずれも 1000 回のシミュレーション結果の平均値を表している。また、それぞれの組織モデルのシミュレーション結果の平均値と標準偏差をそれぞれ表 6-14, 表 6-15, 表 6-16 に示す。

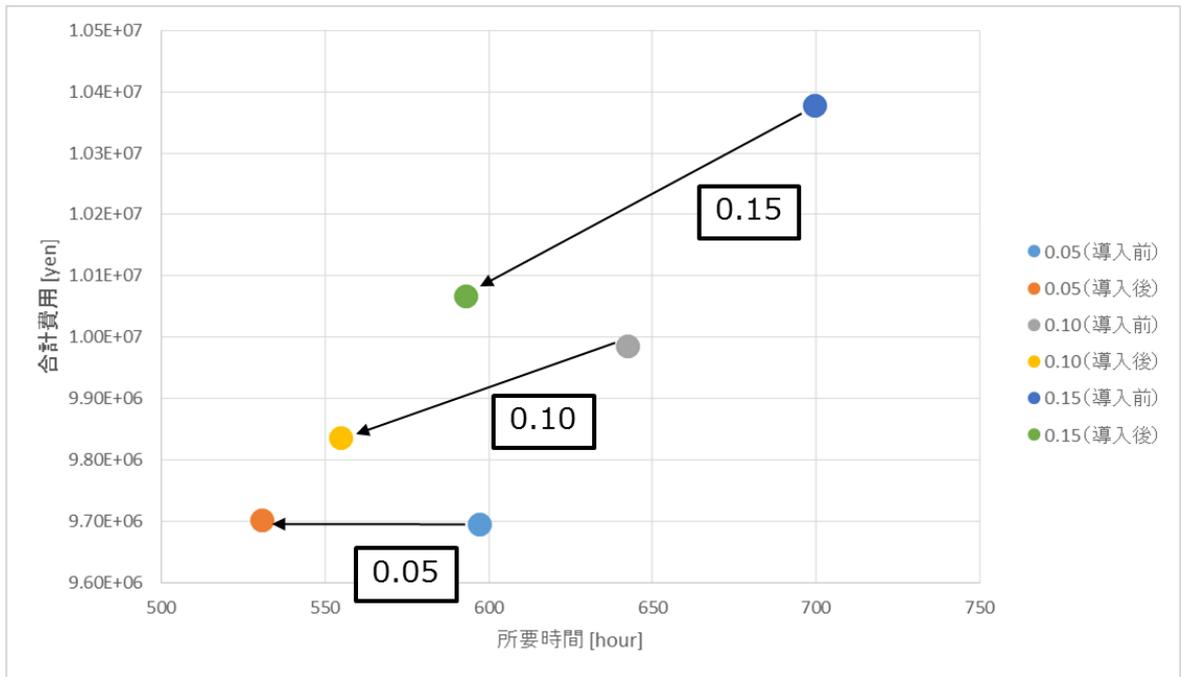


図 6-12 ぎょう鉄作業者の誤差発生確率を変化させた場合の結果

表 6-14 ぎょう鉄作業者の誤差発生確率が 0.05 の場合の平均と標準偏差

	所要時間 [hour]		合計費用 [10^4 yen]	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
導入前	597	29	970	17
導入後	530	17	970	10
差(導入後 - 導入前)	-67	-	0	-

表 6-15 ぎょう鉄作業者の誤差発生確率が 0.10 の場合の平均と標準偏差

	所要時間 [hour]		合計費用 [10^4 yen]	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
導入前	642	35	999	22
導入後	555	24	984	14
差(導入後 - 導入前)	-88	-	-15	-

表 6-16 ぎょう鉄作業者の誤差発生確率が 0.15 の場合の平均と標準偏差

	所要時間 [hour]		合計費用 [10^4 yen]	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
導入前	700	38	1038	25
導入後	593	28	1007	17
差(導入後 - 導入前)	-106	-	-31	-

すべての誤差発生確率の設定値について、システムの導入によって生産プロセスの所要時間の平均およびばらつきと、合計費用のばらつきが共に減少していることがわかる。合計費用の平均については、誤差発生確率が 0.10 と 0.15 の場合では減少効果が見られたが、誤差発生確率が 0.05 の場合ではシステム導入前後の値の差が現れなかった。

生産プロセスの所要時間と合計費用の両方に関して、「ぎょう鉄」タスクを担当する人員の誤差発生確率の値が大きいほど、平均値とばらつきの削減効果が大きく出ていることがわかる。つまり、ぎょう鉄作業者の技術レベルが低い場合の方が、より大きな曲がり外板の工作精度評価システムの導入効果を得ることができるということを意味する。

第7章 考察

7.1 はじめに.....	78
7.2 提案手法に関する考察.....	78
7.2.1 部品の誤差の許容値について.....	78
7.2.2 造船業における工数の見積もり.....	78
7.2.3 人員と設備のスキルについて.....	81
7.3 ケーススタディに関する考察.....	81
7.3.1 誤差発生確率と費用の変化による影響.....	81
7.3.2 作業場所の制約の違いによる導入効果の変化.....	82
7.3.3 技術レベルの違いによる導入効果の変化.....	83
7.3.4 実際の生産設備導入結果との比較.....	83
7.4 本研究の課題.....	85

7.1 はじめに

本章では、本研究における考察について述べる。提案手法に関する考察では、製品モデルにおける誤差、工数や組織のスキルの決定方法について記述する。ケーススタディに関する考察では、ケーススタディ 1, 2, 3 で得られた結果に対して考察を述べ、さらに生産設備を現実の造船所へ導入した結果とケーススタディの結果を比較する。また、本研究の課題についても触れる。

7.2 提案手法に関する考察

本節では、提案手法に関する考察について述べる。提案手法における誤差のモデルについてや、造船業で一般的に利用される工数の見積りの方法、作業者のスキルの標準化の方法について記述する。

7.2.1 部品の誤差の許容値について

本研究の提案手法では、製品モデルの作成時に各部品の誤差の許容値を設定する必要がある。

造船工程では、過去に建造された船舶を対象に工作精度を計測し、その値を基にそれぞれの部材や作業の工作精度の標準範囲と許容限界を定めた「日本鋼船工作法精度基準 (Japan Shipbuilding Quality Standard; JSQS) [47]」が設定されている。また、各造船所では JSQS の標準を参考にした独自の精度基準を設定しており、この基準を満たさない場合に実際に手直し作業が行われている。製品モデル中の部品の誤差の許容値は、これらの工作精度の限界値を参照して設定することが望ましい。

また、パラメータを設定した後で生産プロセスシミュレーションを実行し、シミュレーション結果が該当の造船所での実績値とおよそ一致するかどうかを確認して、パラメータを調整する作業が必要である。

7.2.2 造船業における工数の見積り

本研究の提案手法では、ワークフローモデルの作成時に各タスクごとに工数を定義する必要がある。

一般的に、造船業での工事量 W は人員1人が1時間労働した際の労働量で換算され、これを作業量を時間数 H で表す[40]。作業量は効率を表す換算係数 K を用いて式(7.1)の関係を持つ。

$$H = K \cdot W \quad (7.1)$$

工事量の算定には、その工事量を代表する物量(管理量)を選択し、その物量の大きさを工事量を代表させる。管理量の原単位(メートル、トン、平方メートル、個数など)は管理単位と呼ばれており、代表的な船殻工事の作業の種類と一般に用いられている管理単位の間を関係を表7-1に示す。実際の造船現場で提案手法を運用する際には、製品の設計データから得られる管理量をもとに工数を見積もり、モデルに定義することとなる。例えば、切断作業であれば、切断長を管理量、切断速度を効率として作業量を計算する。

表 7-1 船舶建造プロセスの作業の種類と管理単位[40]

ステージ	作業種類	材料種類	管理単位		M	M ²	M ³	T	枚	本	個
			管理量名称	(長さ)	(広さ)	(体積)	(重さ)	(数)	(数)	(数)	
			溶接長 取付長 切断長 罫書長				鋼材重量 組立重量	鋼板枚数 足場板枚数	型鋼本数	ブロック数 ピース数 タンク数 ホールド数	
倉庫	水切り および 山付け	鋼板					○	○			
		型鋼等					○		○		
加工	ショット ブラスト および プライマー 塗装	鋼板	△	◎			△	○			
		型鋼等	△	◎			△		○		
	罫書	鋼板	△	○			○	◎			
		型鋼等					○		◎		
切断	鋼板	△				○	◎				
	型鋼等					○		◎			
工	鉄機 および 撓鉄	鋼板					○	◎			
		型鋼等					○		◎		
	運搬 および 整理	鋼板					◎	○			
		型鋼等					◎		○		
部品 組立	板継ぎ	◎	△			○				△	
	運搬	○				◎				△	
	組立て	◎	△			○				△	
	溶接	◎	△			○				△	
大組立	板継ぎ	◎	△			○	○			△	
	運搬	○				◎				△	
	組立て	◎	△			○				△	
	溶接	◎	△			○				△	
船 台	位置決め	△				○				◎	
	取付け	◎				○					
	溶接	◎				○					
	運搬					○				◎	
	足場	△	△			△	◎			○	
	盤木		○			△				◎	
	鑽孔、鉸鋸	△				△		◎			
	はつり、水圧	△		○		△				◎	
検査		○			○				◎		

◎ 最も普通に使われる

○ よく使われる

△ ときどき使われる

7.2.3 人員と設備のスキルについて

本研究の提案手法では、組織モデルの作成時に人員および設備のスキル値や誤差発生確率を入力する必要がある。

一般的な製造業の現場では、スキルマップと呼ばれる、人員ごとに保有している技能を可視化するための管理表が利用されている。原口ら[48]は、スキルマップを表現するための「スキルインデックス」という技能指標を提案し、その指標を用いて作業者の不得意なタスクへ優先的に作業割り当てを行うことで、組織の作業の熟練化についてシミュレーションを行っている。製品 j についてのタスク k の標準作業時間を ST_{jk} 、作業者 i の実作業時間を ET_{jki} としたとき、原口らの提案するスキルインデックス s_{jki} は式(7.2)で求められる。

$$s_{jki} = \frac{ST_{jk}}{ET_{jki}} \quad (7.2)$$

作業者の実作業時間が標準作業時間よりも長いかわりに短いかわりによって、訓練が必要な作業者を判定することが可能な指標となっている。

この例のように、種々のスキルの数値化の方法が提案されており、本研究の提案手法においても、これらの指標や造船所でのスキルの標準化の方法を参考にしてパラメータの設定が可能であると考えられる。

設備のスキル値や誤差発生確率については、それぞれの生産設備の仕様に基づいて入力することができる。

また、組織モデルのパラメータも、7.2.1 で述べたようにシミュレーションの結果と実績がおおよそ合致するように調整する必要がある。

7.3 ケーススタディに関する考察

本節では、それぞれのケーススタディで得られた結果に対して考察する。また、現実の造船所での曲がり外板の工作精度評価システムの導入事例とケーススタディの結果を比較する。

7.3.1 誤差発生確率と費用の変化による影響

ケーススタディ1では、ぎょう鉄タスクの誤差発生確率の減少と単位時間あたりの費用の増

加が曲がりブロックの製造プロセスのパフォーマンスに与える影響を調査した。

まず、ぎょう鉄工程での誤差発生確率が減少すると、生産プロセスの所要時間と合計費用の両方について平均とばらつきが共に削減されるという結果が得られたことについて考察する。提案手法における生産プロセスシミュレーションでは、部品の誤差が一定量を超えると手直し作業として工数が増加するという現象がモデル化されている。部品の誤差が減少することは誤差の許容値をオーバーする部品数が減少することにつながり、結果として手直し作業による工数が軽減されることになる。工数の軽減は直接的に所要時間と合計費用の減少につながるため、この結果は妥当であるといえる。

また、誤差発生確率が等しい場合には、ぎょう鉄タスクの単位時間あたりの費用が増加した場合の生産プロセスの合計費用の増加量は一定であるという結果が得られた。誤差発生確率が等しい場合は、すべてのタスクについて手直し作業が発生する割合は平均的に等しくなる。つまり、ケーススタディにおいては、ランニングコストが増加したぎょう鉄タスクの合計の工数は等しいため、一定の割合で合計費用の増加の現象が発生する。

7.3.2 作業場所の制約の違いによる導入効果の変化

ケーススタディ 2 では、工場の作業場所の広さの違いによって、システムの導入効果がどのように変化するかを調べた。

まず、作業スペースが狭い方が、システム導入によって削減される生産プロセスにかかる所要時間が大きいという結果が得られたことについて考察する。システム導入によりぎょう鉄タスクでの誤差の発生が少なくなり、結果としてぎょう鉄タスクやその後続タスクでの手直し作業の発生が軽減される。狭い作業スペースの場合では、1つのブロック製造プロセスにおける手直しによる作業の遅延が、後に製造されるブロックの製造開始時刻に与える影響が広い作業スペースの場合よりも大きい。この理由から、狭い作業スペースでは所要時間に関してシステム導入効果がより大きくなったと考えられる。

また、作業スペースの制約の違いによって、システム導入による合計費用の削減効果は変化が見られなかった。同時に実行可能なワークフロー数の最大値が変化しても、それぞれの場合におけるぎょう鉄タスクでの誤差の発生量の平均は等しくなる。したがって、手直しを含めた工程全体の作業量の平均は各場合において等しくなるため、合計費用の削減効果には変化が現れなかったと考えられる。

7.3.3 技術レベルの違いによる導入効果の変化

ケーススタディ3では、ぎょう鉄作業者の技術レベルの違いによって、システムの導入効果がどのように変化するかを調べた。

ケーススタディの結果から、ぎょう鉄作業者の技術レベルが低い場合の方が、システム導入の効果がより大きいということがわかった。ぎょう鉄の技術レベルがある程度高い場合には、曲がり外板の加工完了時の工作誤差は一定の水準以下に抑えられており、曲がり外板の工作誤差に基づく手直し作業は技術レベルが低い場合に比べて少なくなっていると考えられる。したがって、技術レベルが低い場合の方がシステム導入によって軽減できる手直し作業の量が多いために、より大きなシステム導入効果が得られたといえるだろう。

7.3.4 実際の生産設備導入結果との比較

7.3.4.1 曲がり外板の誤差の減少について

ある造船所 X へ曲がり外板工作精度評価システムを導入したところ、図 7-1 に示すように、システム導入前は外板曲面の仕上がりが許容値に収まらない範囲が 70%以上あったが、導入後は 50%以上が許容値に収まるようになったという結果が得られている。

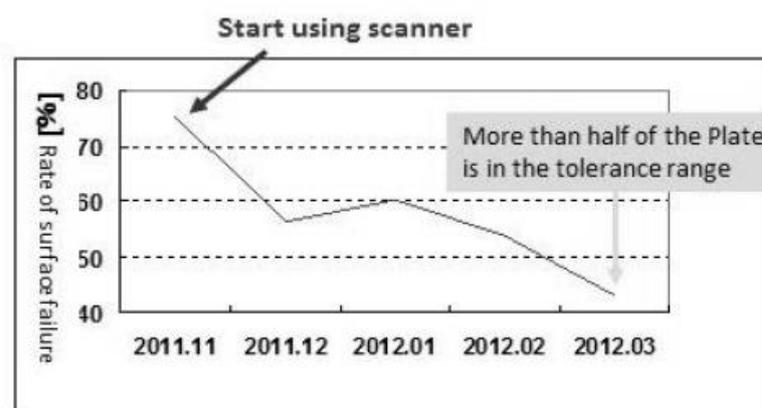


図 7-1 曲がり外板の曲面不適合率の変化[45]

さらに、図 7-2 に示すように、実際に製造された曲がり外板について、設計形状の曲面からの距離誤差のばらつきがシステム導入により小さくなったという結果も得られている。

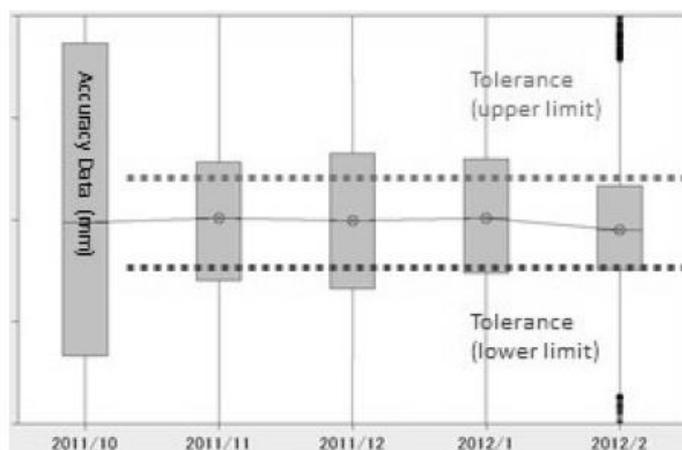


図 7-2 曲がり外板の距離誤差のばらつきの変化[45]

以上のデータから、曲がり外板の工作精度評価システムの導入によって、現実の造船所で実際に曲がり外板の誤差が減少しているということが明らかになっている。ケーススタディでは、システムの導入によって「ぎょう鉄」タスクについての設備の誤差発生確率が減少すると想定したが、この想定は妥当なものであるということがいえる。

7.3.4.2 所要時間の削減について

該当の造船所 X でヒヤリングを行ったところ、以下の事実を確認することができた。

- 曲がり外板の品質不良による手直し作業の工数は、平均すると船舶 1 隻あたり約 200 時間である。
- 曲がり外板のぎょう鉄工程に、実際に曲がり外板工作精度評価システムを導入したところ、船舶 A, B, C について以下の実績が得られた。
 - 船舶 A では、組立工程での曲がり部の焼き手直し時間は約 30 時間であった。このときのシステムの導入率はおよそ 75%であった。
 - 船舶 B では、組立工程での曲がり部の焼き手直し時間は約 10 時間であった。このときのシステムの導入率はおよそ 80%であった。
 - 船舶 C では、組立工程での曲がり部の焼き手直し時間はほぼ 0 になった。このときのシステムの導入率はおよそ 90%であった。

曲がりブロック製造プロセスについてのケーススタディにおいて、6.3.2 のシステム導入前後の比較結果では、システム導入による所要時間の削減効果は約 90 時間、実績工数の削減効果は約 220 時間であった。ケーススタディでの製品、ワークフロー、組織モデルの設定と造船所 X における製品、ワークフロー、組織の実態は異なっている可能性があり、そのためにケーススタディの結果と造船所 X での結果を厳密に比較することはできないが、システム導入による効果のオーダーは一致しているといえる。

したがって、曲がりブロック製造プロセスのケーススタディの結果は妥当なものであると考えることができる。

7.4 本研究の課題

本研究の提案手法では船舶の生産プロセスのモデル化が簡易的であるため、実際の造船現場で提案手法を運用してより現実に近い評価を行うためには、モデルの詳細化が必要となると考えられる。

製品モデルについては、既存の造船生産管理システムや造船 CAD から得られる情報に基づいて作成する必要がある。

また、製品についての管理量などを利用してワークフローモデルの工数は決定されるべきである。溶接工程を例に挙げて説明する。現実の造船所では、各ブロックの溶接工数はブロックの設計データから算出される溶接長と単位溶接長あたりの工数の積に、溶接姿勢(上向き、下向きなど)ごとに定義される溶接の難易度を表す係数を掛けて見積もられる。7.2.2 でも説明したが、造船の各工程には工数の定義方法が存在するため、それらに則った工数定義の方法を採用するとよいだろう。

組織モデルについても、各造船所で作業スキルの標準化がなされている場合があり、そのデータ等を用いてスキルに関するパラメータを定義すべきである。また、組織の人員には入れ替えが発生する。新しい人員は作業の反復を通して作業に習熟し、スキルが向上するという過程を経る。このような人員の入れ替えや作業の習熟曲線なども考慮するとより現実に則したモデルを構築することが可能である。

以上のシミュレーションに用いるデータは既存の造船用の様々なソフトウェアで管理されているものである。これらのデータから自動的に本研究の生産プロセスシミュレータの入力データを作成するソフトウェアがあれば、現場での運用を大いに手助けすることができる。

さらに、本研究の生産プロセスシミュレータを実際の造船現場で運用するためには、現場

の情報を簡単にシミュレータに入力し、所要時間や費用、工数などに限らず、ガントチャートなども含む様々なシミュレーション結果をわかりやすく確認できるようなユーザインタフェースも必要不可欠である。

第8章 結論

8.1 結論	88
8.2 今後の展望	88

8.1 結論

本研究では、船舶の生産プロセスにおいて、新規生産設備を導入した際の効果を定量的に評価した。具体的には、生産プロセスで対象とする製品の製造誤差に基づく手直し作業を考慮した生産プロセスシミュレーションを利用して、新規生産設備導入によるプロセス全体の時間と費用への影響を評価する手法を提案した。

また、船舶の曲がりブロック建造プロセスにおけるぎょう鉄工程に、曲がり外板工作精度評価システムを導入する際の生産プロセスへの影響を提案手法を用いて評価し、以下の知見を得た。

- ぎょう鉄工程にシステムを導入すると、曲がり外板に発生する誤差が減少することによって、曲がりブロック製造プロセス全体にかかる作業時間と費用の平均とばらつきの両方を減少させる効果が得られる。
- 曲がりブロック製造の作業場所が狭い場合は、広い場合と比較してシステム導入による製造プロセス全体の作業時間の削減効果が大きい。
- ぎょう鉄作業者の技術レベルが低い場合は、技術レベルが高い場合と比較してシステム導入による製造プロセス全体にかかる作業時間と費用を減少させる効果が大きい。

以上のように、提案手法を用いて、船舶の生産プロセスにおける生産設備の導入の効果を工場の制約の違いや組織の違いに基づいて定量的に評価できることを示した。

8.2 今後の展望

本研究では曲がり外板の工作精度評価システムの導入についてケーススタディで評価した。近年の造船生産技術で注目を集めているレーザ切断、レーザ溶接の技術や、他のレーザ計測技術の導入に関する評価を行うことも有意義であると考えられる。

また、設備投資に費やせる金額が限られている中でより効果的に生産プロセスのパフォーマンスを向上させるためには、どの生産工程にどのような生産設備を導入すれば最も効果的かを調査できることが望ましい。このような手法を構築することができれば、船舶建造プロセスの改善のためのより効率的な設備投資が可能になるだろう。

さらに、本研究における考え方を船舶建造プロセス以外の製造業においても利用できるか

どうかを検討し、製造業における意思決定を支援したい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、非常に多くの方々にご助力を頂きました。ここに感謝の意を述べさせていただきます。

東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻 教授 大和裕幸先生には、東京大学理事・副学長という大変ご多忙なお立場にもかかわらず、学部4年生の時から研究に対する鋭いご指導をいただきました。それにもまして、日々の生活における身構えや心構えについての厳しくも優しい言葉をかけてくださったことに大変深く感謝しております。ありがとうございました。

本研究の指導教員である、東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻 准教授 稗方和夫先生には、研究の方向性の決め方や組み立て方、アプローチの仕方などのご指導をはじめとして、研究室の業務への取り組み方や技術面など、あらゆる物事をご教示いただきました。稗方先生のおかげさまで、研究室活動を通して他では決してできない様々な経験を得て、私の成長の糧にすることができました。心より深く感謝いたします。

東京大学工学系研究科システム創成学専攻 准教授 白山晋先生には、設計工学研究室大輪講の際に的確なアドバイスをしていただきました。大変感謝いたします。

東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻 特任准教授 Bryan R Moser 先生には、研究についてたくさんの有意義な議論をさせていただきました。また、Global Teamwork Lab の活動にも参加させていただき、グローバルなプロジェクトを遂行するための様々なノウハウを学ぶことができました。ありがとうございました。

東京大学工学系研究科システム創成学専攻 助教 満行泰河先生には、先生というお立場にもかかわらず親しみやすいお人柄で接していただき、研究の方針や具体的な手法までたくさんのご指導をいただきました。満行先生のおかげさまで、私の研究室生活は楽しく充実したものになりました。深く感謝いたします。

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 技術専門員 榎本昌一様には、ネッ

トワークやサーバをはじめとした様々な研究室のインフラに関するサポートを行って頂きました。大変感謝いたします。

秘書の大塚朋子様、鮫島文子様、山田祐子様、山本和子様には、研究室の膨大で煩雑な事務手続きを行っていただきました。また、研究室生活の中で常に優しく接していただき、温かい言葉で励ましていただきました。秘書の皆様なくしては私は研究室生活を全うできませんでした。心から感謝しております。ありがとうございました。

客員共同研究員である石松拓人博士、共同研究員である岡田伊策様、齋藤稔様、笈田佳彰様、本多建様には、研究室の輪講や勉強でのディスカッションで大変お世話になりました。本当にありがとうございました。

株式会社ユニークスの杉山達彦博士、鎌田幹夫様、今村公男様、矢野寿春様、住友重機械マリンエンジニアリング株式会社の中垣憲人様、菅原晃佳様、阿折幸康様には、研究プロジェクトを進めてゆくうえでお世話になりました。ソフトウェア開発および造船の現場での経験は私にとって非常に貴重なものでした。心よりお礼申し上げます。

研究室の先輩である、金載烈博士、孫晶鈺様、中村覚様、石黒慧様、河野裕様、廣井貴彬様、深田直人様には、日頃の研究室活動において大変お世話になりました。孫様、中村様には研究についての細かい相談に乗っていただき、大変助かりました。皆さまのおかげで楽しく実りのある研究室生活を作り上げることができたと感じております。本当にありがとうございました。

研究室の同輩である、安藤早紀様、齋藤智輝様、水林義博様、和中真之介様とは日頃からお互いを励ましあって切磋琢磨しながら研究に取り組むことができました。特に齋藤様、和中様には学部4年生の頃から3年にわたって研究室内外の活動を一緒に楽しむことができたことを大変嬉しく思います。厚く感謝いたします。

研究室の後輩である、磯沼大様、上野隆治様、後藤拓矢様、小山恭平様、馬目信人様、伊藤航大様、岡田航太様には、日頃の研究室活動において多大なサポートをしていただきました。特に上野様、後藤様、馬目様には、研究室を円滑に運営していくためのたくさんの業

務をしていただきました。深く感謝いたします。

留学生の Angel Yang 様、Mengmi Zhang 様、Suthee Ruangwises 様とは、短い期間でしたが私の研究室生活に刺激を与えていただきました。大変感謝いたします。

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 白山研究室の学生の皆様には、他の研究室ならではの観点から、大変貴重な意見をいただきました。ありがとうございました。

最後になりましたが、日々の生活を支えてくれた友人、そして、どんなときも私を支援し見守り続けてくれた家族に感謝します。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1]. 人見勝人, 入門編 生産システム工学 [第 4 版] - 総合生産学への途 - (2009), p. 14, 共立出版.
 - [2]. 秋庭雅夫, 佐久間章行, 高橋弘之, 吉田祐夫, 経営工学シリーズ 13 生産管理 (1987), pp. 3-4, 日本規格協会.
 - [3]. 岩田一明, 中沢弘, 生産工学 (1988), p. 7, コロナ社.
 - [4]. 千住鎮雄, 伏見多美雄, 設備投資計画法 (1974), pp. 3-7, 日科技連出版社.
 - [5]. Clark, W. and Gantt, H. L., The Gantt Chart, a Working Tool of Management (1923), pp. 3-8, New York, Ronald Press.
 - [6]. 関根智明, PERT・CPM (1973), 日科技連出版社.
 - [7]. 徳山博于, 曹徳弼, 熊本和浩, 生産マネジメント (2002), pp. 112-115, 朝倉書店.
 - [8]. 黒田充, 村松健児, 生産スケジューリング (2002), pp. 10-13, 朝倉書店.
 - [9]. Hartmann, S., A Competitive Algorithm for Resource-Constrained Project Scheduling, Naval Research Logistics (NRL), Vol. 45, No. 7 (1998), pp. 733-750.
 - [10]. Brucker, P., Drexl, A., Möhring, R., Neumann, K. and Pesch, E., Resource-Constrained Project Scheduling: Notation, Classification, Models, and Methods, European Journal of Operational Research, Vol. 112, No. 1 (1999), pp. 3-41.
 - [11]. 田中克己, 石井信明, スケジューリングとシミュレーション (1995), pp. 77-78, コロナ社.
 - [12]. Eppinger, S. D. and Browning, T. R., Design Structure Matrix Methods and Applications (2012), The MIT Press.
 - [13]. Steward, D. V., Design Structure System: A Method for Managing the Design of Complex Systems, IEEE Transactions on Engineering Management, Vol. EM-28, No. 3 (1981), pp. 71-74.
 - [14]. Cho, S. H. and Eppinger, S. D., A Simulation-Based Process Model for Managing Complex Design Projects, IEEE Transactions on Engineering Management, Vol. 52, No. 3 (2005), pp. 316-328.
-

-
- [15]. Yang, Q., Lu, T., Yao, T. and Zhang, B., The Impact of Uncertainty and Ambiguity Related to Iteration and Overlapping on Schedule of Product Development Projects, *International Journal of Project Management*, Vol. 32, No. 5 (2014), pp. 827-837.
- [16]. Jin, Y. and Levitt, R. E., The Virtual Design Team: A Computational Model of Project Organizations, *Computational & Mathematical Organization Theory* Vol. 2, No. 3 (1996), pp. 171-196.
- [17]. Suzuki, Y., Yahyaei, M., Jin, Y., Koyama, H. and Kang G., Simulation Based Process Design: Modeling and Applications, *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 26, No. 4 (2012), pp. 763-781.
- [18]. Moser, B. R, The Design of Global Work: Simulation of Performance Including Unexpected Impacts of Coordination across Project Architecture, Ph. D. thesis, The University of Tokyo (2012).
- [19]. Global Project Design, LLC, TeamPort Software (online), available from <<http://www.gpdesign.com/teamportsoftware.html>>, (参照日 2015 年 12 月 19 日).
- [20]. 満行泰河, 大和裕幸, 稗方和夫, 複数設計業務のシミュレーションと組織内人員の最適配置, *日本機械学会論文集 (C 編)*, Vol. 79, No. 806 (2013), pp. 3930-3938.
- [21]. Mitsuyuki, T., Hiekata, K. and Yamato, H., Design of Production Strategy Considering the Cutting Peak Demand of Electricity in the Shipbuilding Industry, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 19, No. 4 (2014), pp. 425-437.
- [22]. 青山和浩, 野本敏治, 渡辺健太郎, ペトリネットを利用した造船工場シミュレータの構築, *日本造船学会論文集*, No. 182 (1997), pp. 795-807.
- [23]. 青山和浩, 野本敏治, 猪上太, ペトリネットを利用した工場シミュレータの構築 – 第 2 報: 作業情報の詳細化に柔軟に対応する工場シミュレータの構築 –, *日本造船学会論文集*, No. 186 (1999), pp. 673-682.
- [24]. 武市祥司, 青山和浩, 小林真, 牧原一昭, ペトリネットを利用した工場シミュレータの構築 – 第 3 報: 定盤モデルを導入した工場シミュレータ –, *日本造船学会論文集*, No. 190 (2001), pp. 449-458.
-

-
- [25]. 佐々木裕一, 三浦正美, 山本郁夫, 伊藤健, 飯田昭男, バーチャルファクトリーを用いた生産計画システムの開発, 日本造船学会論文集, No. 186 (1999), pp. 683-688.
- [26]. 梶原宏之, 中尾洋一, 離散事象システム理論に基づく造船ラインのスケジューリング, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 4 (2006), pp. 89-94.
- [27]. 梶原宏之, 人位康弘, 中尾洋一, 岩下寛弥, Max-Plus 代数に基づくツインタンデム建造方式の組立日程計画, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 20 (2014), pp. 205-220.
- [28]. Hassan, K. and Kajiwara, H., Application of Pull Concept-based Lean Production System in the Ship Building Industry, Journal of Ship Production and Design, Vol. 29, No. 3 (2013), pp. 105-116.
- [29]. 岩下寛弥, 梶原宏之, Heap モデルに基づくツインタンデム建造方式の組立日程計画, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 21 (2015), pp. 83-91.
- [30]. Miwa, T. and Ishii, K., Product Development Task Planning Using Worth Flow Analysis, Journal of Computing and Information Science in Engineering, Vol. 9, No. 3 (2009).
- [31]. 三輪俊晴, 青山英樹, 不確実性を考慮した製品価値フロー分析を用いた製品モジュール化手法の開発, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 77, No. 782 (2011), pp. 3926-3937.
- [32]. 三輪俊晴, 青山英樹, 製品価値フロー分析を用いた開発リスクを伴う製品開発プロセスの評価手法, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 78, No. 785 (2012), pp. 312-326.
- [33]. Zhang, R., Chiang, W. C. and Wu, C., Investigating the Impact of Operational Variables on Manufacturing Cost by Simulation Optimization, International Journal of Production Economics, Vol. 147 (2014), pp. 634-646.
- [34]. Mashhadi, A. R., Esmaeilian, B. and Behdad, S., Impact of Additive Manufacturing Adoption on Future of Supply Chains, Proceedings of the ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC2015) (2015).
- [35]. 満行泰河, 組織構造と作業戦略を考慮した作業チーム設計手法と最適化に
-

-
- 関する研究，東京大学大学院新領域創成科学研究科学学位論文（2014）。
- [36]. Eclipse Foundation, Mars Eclipse (online), available from < <https://eclipse.org/> >, (参照日 2015年12月17日).
- [37]. Eclipse Foundation, GEF (online), available from < <https://eclipse.org/gef/> >, (参照日 2015年12月17日).
- [38]. Eclipse Foundation, Rich Client Platform – Eclipsepedia (online), available from < https://wiki.eclipse.org/Rich_Client_Platform >, (参照日 2015年12月17日).
- [39]. 奥本泰久, 造船技術と生産システム (2009), 成山堂書店.
- [40]. 奥本泰久, 大沢直樹, 青山和浩, 後藤浩二, 尾田逸人, 田崎泰博, 津川博光, 中山祐蔵, 野口千年, 濱田雄二, 船舶海洋工学シリーズ⑨ 造船工作法 (2012), 成山堂書店.
- [41]. Storch, R. L., Hammon, C. P., Bunch, H. M. and Moore, R. C., Ship Production – 2nd ed. (2007), The Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- [42]. Lamb, T. (Ed.), Ship Design and Construction Volume 1 (2003), The Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- [43]. Butler, J. L., Distributed Problem Solving in Engineering Design and Manufacturing, Ph. D. thesis, The University of Tokyo (1991).
- [44]. 稗方和夫, 大和裕幸, 笈田佳彰, 榎本昌一, 古川慈之, 牧野有紀, 杉廣武俊, レーザスキャナによる曲がり外板の工作精度評価システムの開発, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 13 (2011), pp. 231-238.
- [45]. 中垣憲人, 菅原晃佳, 稗方和夫, 大和裕幸, ソンショウギョク, レーザスキャナによる曲がり外板の工作精度評価システムの研究開発 (第2報), 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 17 (2013), pp. 169-176.
- [46]. 国 税 庁 , 耐 用 年 数 表 (online), available from <https://www.keisan.nta.go.jp/survey/publish/34255/faq/34311/faq_34353.php>, (参照日 2015年12月19日).
- [47]. 日本船舶海洋工学会 工作分野研究企画部会, JSQS (Japan Shipbuilding Quality Standard) 日本鋼船工作法制度標準 2010年版 (2010), 日本船舶海洋工学会.
-

- [48]. 原口春海, 貝原俊也, 藤井信忠, セル生産における技能向上を目的とした作業者の配置に関する研究, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 825 (2015), p. 14-00646.