

TOC 思考法による戦略的な造船経営計画に関する研究

正会員 土井 裕 文* 正会員 篠田 岳 思**

Study on Planning a Management Strategy for Shipbuilding by TOC thinking Method

by Hirofumi Doi, Member Takeshi Shinoda, Member

Key Words: TOC, Thinking Process, Meyer Werft, flow production line

1. 緒言

日本の造船業は建造隻数を決定する制約である建造ドック期間の最大活用を狙ったブロック建造法を開発し戦後9年で世界シェア第1を実現した。その後、1956年から約40年間世界1のシェアを維持した。しかし、1980年代からの韓国造船業の隆盛、2000年代における中国造船業の台頭が起こり現在では世界第3位の建造量になった。Fig. 1は2016年の世界の造船所の売り上げトップ10を示したものである。日本の造船業の停滞が浮き彫りになっている。一方で、一時は造船業が撤退状態と考えられていたヨーロッパの造船所の隆盛に注目しなくてはならない。ヨーロッパ造船所の成功は市場を大型客船市場に絞り込み、生産効率を高めることで市場を獲得するというオーソドックスな経営戦略と考えられる。特にドイツのマイヤー・ベルフト造船所は大型客船に特化した最高効率化を国家戦略プロジェクトであるインダストリアル4.0の導入を図りハイテク造船所として生まれ変わっている。マイヤー・ベルフト造船所は1999年には倒産の危機にあった造船所であるが、確かな戦略と戦術は大きなIT化設備投資を実現し見事に再生に成功している。

本研究では、ヨーロッパの造船所の経営戦略と戦術を分析し、日本の造船業において経営革新・生産革新をいかに進めるべきかをTOC¹⁾²⁾の思考法を活用して提言を行う。

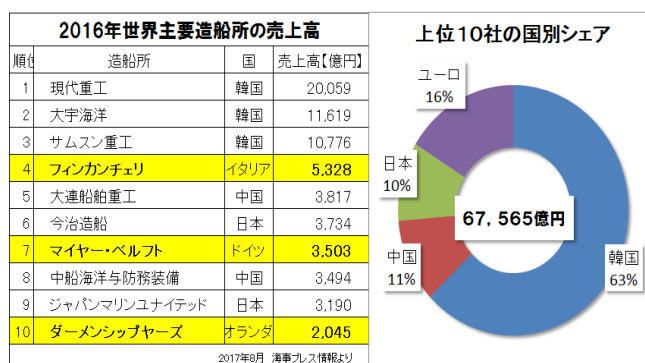


Fig. 1 World Top 10th shipyard in 2016

* 三井 E&S 造船株式会社 / 九州大学大学院工学府

** 九州大学大学院工学研究院

原稿受付 平成30年3月23日

春季講演会において講演 平成30年5月21, 22日

©日本船舶海洋工学会

2. マイヤー・ベルフト造船所の強さの分析

2.1 大型客船市場と収益を左右する生産技術

現在大型客船市場は10兆円超とも言われており、この市場に対応できる造船所は世界ではイタリアのフィンカンチェリとマイヤー・ベルフト造船所と言われている。日本の造船所も参入を試みたが高い品質で完工したが工期が延びて大きな損失を発生し企業経営に大きな打撃を与えた。つまり工期短縮技術は収益に直結する極めて重要な技術であることが明らかになった事例である。

2.2 大型客船を年間3隻建造する生産効率

大型客船の市場価格は1,000~1,200億円と言われている。現在年間3隻建造するマイヤー・ベルフト造船所の売上は3,600億円規模の売上世界7位の造船所である。売上規模は日本のJMUを超える規模である。大型客船の変動費（材料費）を船価の7割と仮定すると限界利益は1,080億円(=3,600億円×0.3)である、マイヤー造船所は雇用数が本工約3,000人、協力工を合わせると21,000人であることから、一人当たり約514万円の固定費を必要とする計算になる。生産効率を向上させるための年間投資額を100億円のフリーキャッシュを作るとしても一人当たりの約467万円の固定費を生み出すことができる。生産効率への設備投資が1,000億と仮定し、無利息金利として計算すると10年で回収できることになる。1999年に倒産の危機あったマイヤー・ベルフト造船所の目覚ましい成長は高い生産回転率向上に集中した結果と考えられる。回転率向上は企業再生・発展の核となる生産改革であると考えられる。Fig. 2は市場をレッドオーシャン（コスト競争）

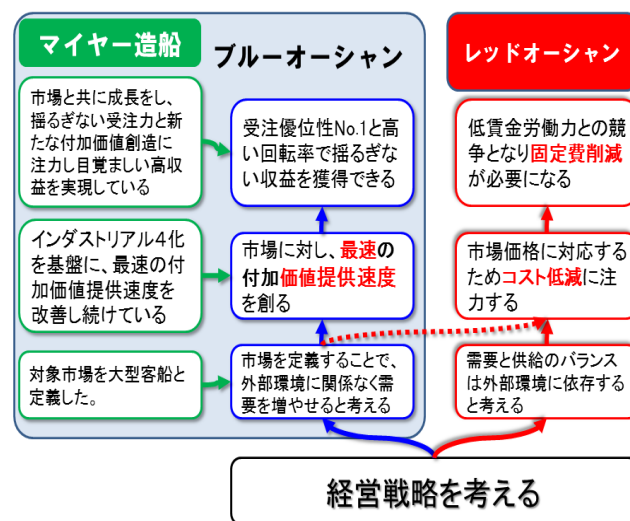


Fig. 2 Analysis on revival management policy of Meyer Werft

とブルーオーシャン（付加価値競争）と分けて考え、マイヤー・ベルフト造船所の再生経営戦略をまとめたものである。市場を大型客船に絞り込み、他を寄せ付けけない高いフロー生産システムが、一般的にレッドオーシャンと言われる造船業界の中にブルーオーシャン化を実現したことが分かる。

2.3 マイヤー造船の生産設計

現在マイヤー・ベルフト造船所の高い生産ポテンシャルは、パペンベルグ市が有料見学会としてビジネスとして成功させ市の重要収益源にもなっている。マイヤー造船の資料によると大型客船は Fig. 3 に示すように設計開始から 35 ヶ月間という極めて短いリードタイム（以下 LT と略す）で建造している。また、Fig. 4 は生産システムの特徴をまとめたものである。主要工程のタクトタイムを 2 時間として同期されており、フロー重視の生産工程を計画し整備してきたと考えられる。

3. 日本の造船業に於ける経営戦略

3.1 収益のモデル化

船体性能の向上を考えるとときには数学的なモデル化を行い改善の対象を明らかにし研究開発がなされる。収益も同様に数学的なモデル化をすると合理的に改善ができる。造船の収益 P を簡易的に表すと(1)式となる。

$$P = S - VC - FC \quad (1)$$

ここで、期間損益で考えると、各項はある期間で発生した金額になる。S は期間売上、VC は変動費、FC は固定費である。FC は一定であるが VC は先の予定のプロジェクト（以下 PJT 略す）の材料を早く購入すると増える。期間中に出荷する材料を VC1、先の予定の PJT の材料費を VC2 とすると(1)式は次式のように表せる。

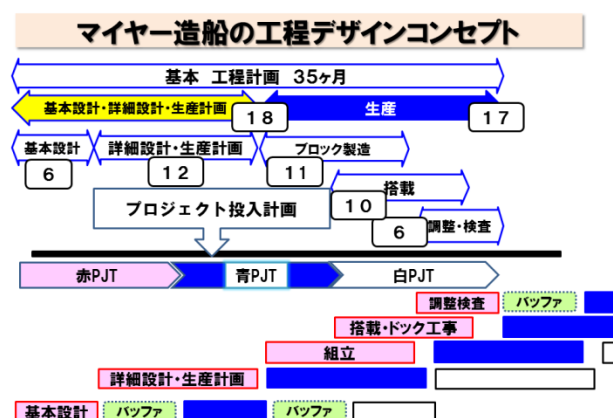


Fig. 3 Production planning design policy

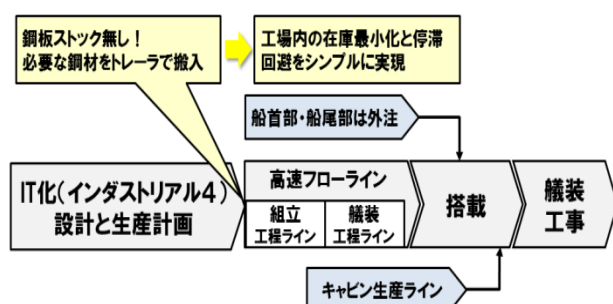


Fig.4 Assumed production system of Meyer Werft

$$P = S - (VC1 + VC2) - FC \quad (2)$$

ここで VC1 は一定である。VC2 は早めに製作をすれば増大することになる。しかし、なるべく遅く作り始めても工程が守れば小さくできる。つまり、工期短縮をすると VC2 が最小化され収益を向上する。また、VC1+VC2 は期間内にシステムの中に発生する材料の量と相関する。このため、VC2 を小さくすることは材料の総量を減らすことになる。このことから、仕掛品が少なくなると工期が短縮できることに一致する。

(1) TOC の仕掛品と収益の相関を学ぶダイスシミュレーション

生産現場では日々の生産量・進捗には外乱等により揺らぎが常に発生している。生産現場は仕事の「繋がり」と「揺らぎ」が存在している。この二つの前提条件を網羅した TOC (Theory of constrain) によるダイスシミュレーション³⁾ 概要を Fig. 5 に示す。Fig. 6 は 20 日の生産活動のシミュレーション結果のキャッシュ、材料投入数、生産数と仕掛品の変化を示したものである。ダイスシミュレーションでは前半の 10 日終了時点で業績を振り返り、収益に表れた問題を 1) 仕掛品の増大、2) キャッシュが増えない現象と特定し、残り 10 日の改善策を「投入を停止」とし仕掛品を減少させキャッシュ増大を実現した。出荷数は溜まった仕掛品を生産することで減少していない。キャッシュは仕掛品が増えると減り仕掛品を減らすとキャッシュが増大する。これは、(2)式をシミュレーションで確認できたことに相当する。

また、Fig. 7 には、ダイスシミュレーションでの仕掛品の数と LT を示しているが、カーブを比較すると、工期が相関していることを表している。

Fig. 8 は TOC 思考プロセス・ブランチを使って投入を絞ることで仕掛品が減少することが何を引起すのかを分析した結果を示している。収益を向上に有効な仕掛品の低減がシステムのリスクヘッジに繋がる重要なことを表している。

(2) 生産数を固定した時のコスト低減活動への注意点について

No	項目	記述
1	繋がり	投入 → 工程 A → 工程 B → 工程 C → 工程 D → 出荷
2	仕事の揺らぎ	サイコロの目 ⇒ 生産の揺らぎをサイコロ目/乱数で表現 (サイコロの目の期待値は 3.5)
3	ボトルネック	ダイスを 1 個 (最小のダイスの数) (example) ボトルネック 投入 → 工程 A → 工程 B → 工程 C → 工程 D → 出荷
4	キャッシュフロー	金額 タイミング 材料費(出金) ¥ 1,000 投入時 売上 (入金) ¥ 2,000 出荷時
5	生産のモデル化	仕掛品 次工程へ 加工 7 サイコロの目 7

Fig. 5 Feature of dice simulation

多くの造船では線表を決定した後に、コスト削減という改善活動を行っている。低迷する日本の造船業を考えると我々が通常取り組むコスト改善活動について検討する必要もある。

$$\begin{aligned}
 P &= \sum Si - (\sum VCi + VC2) - \sum FCi - FC2 \\
 &= \sum Si - (\sum VCi + \sum FCi) - (VC2 + FC2) \\
 &= \sum Si - \sum MCi - MC2 \quad (3)
 \end{aligned}$$

また、Pは次式のようにも表せる。

$$P = \sum Tpi - MC2 \quad (4)$$

ここに、(3)、(4)式中の変数は以下の通りである。

S：期間売上、Si：期間売上分の個別 PJT 売上
VC1：期間完了 PJT の変動費
VC2：期間未完了 PJT の変動費
FC：固定費、FC1：期間完了分 PJT に要した固定費
FC2：期間未完了分 PJT に充当した固定費
FCi：期間完了 PJT に充当した個別 PJT 固定費
MCi：期間完了分 PJT の製造原価
MC2：期間未完了分 PJT の製造原価
Tpi：期間完了分 PJT の限界利益/スループット

(3)式によると、出荷数を固定として個別 PJT の製造原価を下げると MC2 は大きくなることを示している。つまりシステム内の仕掛品の数量を増やすことが必要になる。結果、期間における材料費が増大し収益の悪化と工期の増大を引起すことになる。製造原価低減が収益向上に繋がるとは限らないことに注意しなければならない。

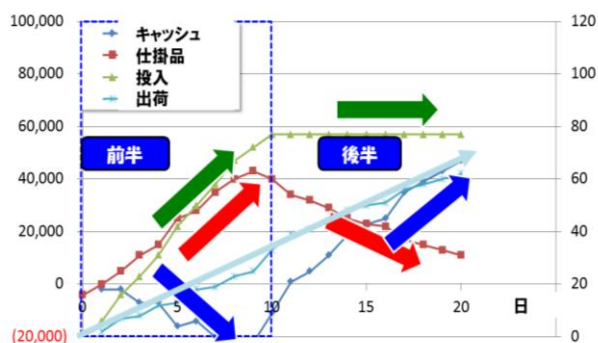


Fig. 6 Relationship among Injection, Output and Cash

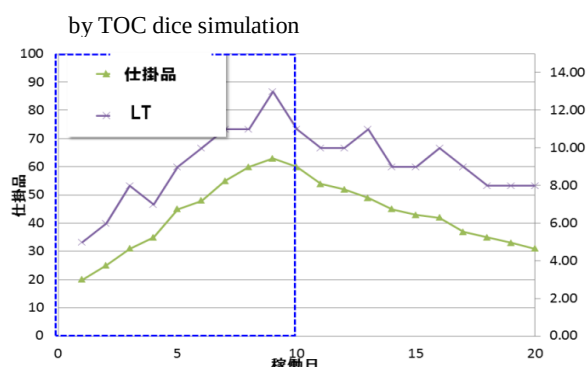


Fig. 7 Relationship between WIP and LT by dice simulation (Part 2)

また、(4)式によると、収益を向上することは限界利益の総和を増やすこととシステムの仕掛品を少なくすることであることが分かる。

つまり企業が収益を目指すのであれば、(3)式および(4)式が示す2点が経営課題になる。限界利益の総和を増やすことは回転率を上げることであり、工期短縮が不可欠な技術である。また、仕掛品を少なくすると工期は自然と短縮されることから、経営方針は工期短縮を目指すと言っている。

3.2 TOC による仕掛品最小化方法

TOC ではシステムに仕掛品を少なくする効果的な方法は投入を絞ることを提唱している。ダイスシミュレーション結果でも投入を絞るだけで早期にシステムの流れが改善し収益も改善している。TOC では絞るとは今はやる必要のない作業を止めるという表現をしている。今は作業をやらなくすることで仕掛品が減り、システムの流れが改善され結果収益向上に繋がることになる。

3.3 仕掛品を少なくする生産システムの構築

出荷数を減らすことなく仕掛品を減らすことは作業場所を低減し LT を短縮することである。Fig. 9 では A システムでは 6 定盤製作、B システムでは 1 定盤製作した場合の同時製作ブロック数と配員計画を示している。仕掛品を 1/6 に低減するため LT も 1/6 に低減する必要がある。リソースの投入状況のように従来よりも、より多くのリソースが投入できる。工期短縮をするときには人を多く掛けるというのは我々の通常感覚と同じである。

Fig. 10 はインドネシアの造船所で同時製作予定のブロックを TOC の凍結実験を実施した結果を示している。同時進行作業を半分にすることで工期が 1/3、工数が 2/3 に瞬時に削減できた事例を示している。このことから先の図での A システムから B システムへの移行は合理的であることを裏付ける実験例である。

3.4 TOC の改善サイクルに依る生産ライン構築思想

マイヤー・ベルフト造船所の生産システムを TOC の改善手法に添って分析した結果を Table 1 に示す。また、Fig. 11 は Table 1 の各項目の改善により工期が短縮できた時の収益増分を式に表した。改善はボトルネック（建造ドック工事）を対象に実施されるためドック期間の短縮を生み出す、短縮化により回転率が向上し獲得限界利益を増大し収益が改善されるロジックである。これらの改善による収益増分 ΔP をまとめると次式により表せる。

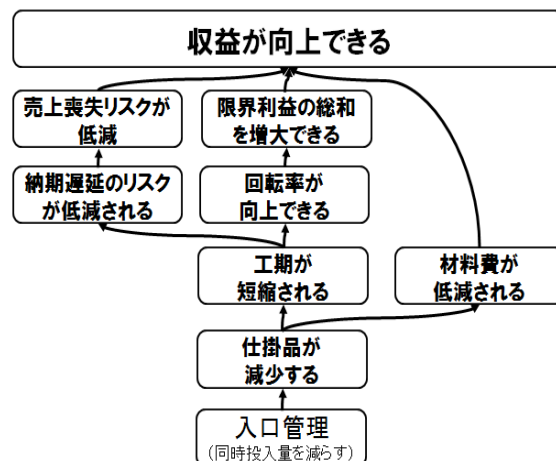


Fig. 8 TOC Logic analysis of increasing profit by decreasing WIP

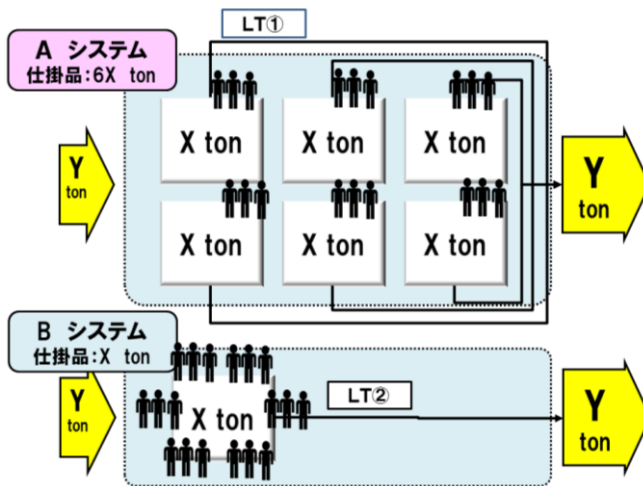


Fig.9 System improvement direction for reducing WIP in system

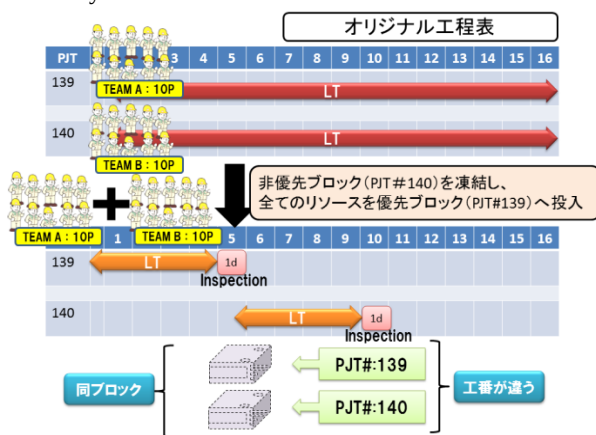


Fig.10 Experiment result with Reduction of LT & Manhor by choking

$$\Delta P = \sum T_{pi} \times \left\{ \Delta \text{日数 A} / \text{総稼働日数} + (\Delta \text{日数 B} + \Delta \text{日数 C} + \Delta \text{日数 D}) / \text{船台期間} \right\}$$

これらのことから、収益改善は工期の改善であることが分かる。

3.5 システムの平準化と回転率向上

マイヤー・ベルフト造船所の高速生産ラインは組立期間をライン化によりドック期間と同じ長さとなるように改善されており、PJT 間での生産の重なりを解消し負荷の平準化を実現している。つまり、組立生産ライン化は安定した生産回転率を実現する重要な改善と考えられる。更に、設計期間も詳細設計はドック期間と同じとなっており設計の平準化も実現している。基本計画は短くなっており、基本計画間には 4 ヶ月のバッファを実現しており安定受注活動が可能となる経営スケジュールが構築されていると理解できる。平準化は工期短縮で実現することが分かる。システムの制約の回転率が収益を向上のパラメータとなっており、他の工程は十分な高速処理パターンを具備し制約期間の変動に合わせることができることが肝要と考えられる。TOC の改善のステップでいう第 3 段階の制約に合わせることの重要性が理解できる。また、高速生産ラインの構築はシステムの仕掛品の最小化による収益向上と工期短縮の二つを同時実現する重要な改善ステップとなっていることが分かる。

Table 1 TOC improvement analysis on Meyer Werft by TOC

	TOCの改善サイクル	マイヤー造船の対応(分析)
ST.1	ボトルネックを見つける	屋根付き建造ドック(2本)
ST.2	ボトルネックの最大活用	・屋根を設け、天候影響を抑える ・搭載工事のための適切な仕掛品の確保 ・不良品の投入防止
ST.3	全ての工程をボトルネックに合わせる	・搭載工事のための適切な仕掛品を確保するための高速生産ラインの構築 ・キャビン生産ライン工場の建設
ST.4	ボトルネックを改善する	建造ドック工事の工期短縮改善
ST.5	情性に囚われず、ボトルネックを見直す	建造ドックの改修

ST5	建造ドック以外が回転率を決定づけていないか確認をする	$\sum T_{pi} \times \Delta \text{日数 D}^* / \text{船台期間}$
ST4	建造ドック工事の工期短縮改善	* 船台艀装期間削減改善による船台期間短縮日数
ST3	キャビン生産ラインの構築	$\sum T_{pi} \times \Delta \text{日数 C}^* / \text{船台期間}$
ST3	高速ライン生産システムの構築	* キャビン生産ラインによる船台艀装期間日数の削減による船台期間短縮日数
ST2	ドック工事投入前検査ブロック精度向上	$\sum T_{pi} \times \Delta \text{日数 B}^* / \text{船台期間}$
ST2	搭載工事を計画通り実施できる建造工程構築	* 後戻り期間低減による船台期間短縮日数
ST2	建造ドックに屋根を設ける	$\sum T_{pi} \times \Delta \text{日数 A}^* / \text{総稼働日}$
ST1	建造ドックの回転率を中心に全体効率向上を進めることに決めた	* 天候制約解除による稼働日数増

Fig. 11 Estimated profit improvement on TOC improvement step

4. 結言

本論文では、ドイツのマイヤー・ベルフト造船所の目覚ましい成長を TOC の思考方法で分析を行い、日本造船業が将来的に成長を実現するうえでの実践すべき戦略・戦術についての考察を行い、以下を明らかにした。

- 1) 市場を絞り、工期短縮化による高回転生産を目指す
- 2) 仕掛品の削減は収益向上と工期短縮を実現する重要な経営課題である。
- 3) 仕掛品の削減には入り口を絞る方法が簡単かつ有効な方法である。
- 4) 生産の一個 (PJT) 流しをするためには高速生産ラインの構築が有効である。
- 5) 収益向上額は制約期間の関数であるため、制約期間の短縮に集中する活動が収益向上に繋がる。

参考文献

- 1) 土井裕文、篠田岳思：TOC 制約理論による造船業の改善計画に関する研究、日本船舶海洋工学会講演会論文集，vol.24, pp.545-548, 2017.
- 2) 土井裕文、篠田岳思：TOC 制約理論による造船ビジネスの針路策定に関する研究、日本船舶海洋工学会講演会論文集，vol.25, pp.577-580, 2017.
- 3) Cox, J., Bergland S. and Jacob, D. *Velocity: Combining Lean, Six Sigma, and the Theory of Constraints to Achieve Breakthrough Performance*, Free Press, USA, December 2009, 310 pages,