

以下の内容は、関西大学工業技術研究所発行の、技苑 第 103 号（2000 年 3 月発行予定）に掲載される同名の解説と同一である。

〔解説〕

‘ Theory of Constraints ’ と生産スケジューリング

工学部管理工学科 冬木正彦

〔解説〕

‘Theory of Constraints’ と生産スケジューリング

工学部管理工学科 冬木正彦

1. はじめに

アメリカの製造業が復活している。復活の第一の原因は、1980年代前半に始まる品質改善への取組みにより製品の品質を向上させてきたこと、1980年代後半から、ジャスト・イン・タイム(JIT)生産方式(アメリカでは1990年のMITの報告書以来‘リーン生産方式’とも呼ばれている)の導入による生産プロセスの改善を進めていることにある。すなわち、日本の生産方式を学び日本にキャッチアップできたことである。第二の原因は、日本にはない独自の取組みによる、生産から販売にまたがる仕組み改革、情報技術の戦略的応用を前提とした企業構造の変革、さらに、アメリカを中心として発展してきた‘Theory of Constraints’(以後TOCと略記)と呼ばれる科学的システム改善法の存在があげられる²⁾。

TOCは、Eliyahu M. Goldrattにより開発された経営についてのコンセプトと手法であり、ロジスティクス、業績測定、論理的思考の三つの分野から構成されている。アメリカ企業の強さの背景に、このTOCがあることがわかり、日本でもTOCに対する関心が急速に高まっているが、TOCに関する日本語文献は少ない。1997年に文献1)が出版され、最近1999年11月にTOCを広くカバーした訳書³⁾が出版されたばかりである。

この解説では、文献3)、4)、5)の記述をもとに、TOCの発展経緯とTOCの構成要素をまず紹介する。ついで、生産管理機能の一つである「生産計画設定とコントロール」に焦点を絞り、TOCのスケジューリング法であるドラム・バッファ・ロープ(drum-buffer-rope)法を紹介する。

2. TOCの発展経緯

TOCは、イスラエルのゴールドラット博士(Eliyahu M. Goldratt, Dr.)が20年にわたって開拓してきた経営管理のコンセプトと手法である。ここでは、1970年代後半に始まる生産スケジューリング手法の開発から問題解決/思考プロセス手法の開発にいたる経緯をまず概観する。表1は、TOCの発展経

緯をまとめたものである。

ゴールドラットが開発した生産スケジューリングソフトウェアOPTは当初コンピュータ化されたスケジューリングを強調し“Optimized Production Timetable”の略称であったが、1982年には略称はそのままで名称を“Optimized Production Technology”に変えた。この変更は、OPTの工場への導入と運用経験を経て、彼が生産管理プロセスに関する基本的な理解を深め、「コンピュータ化されたショップフロア・スケジューリングは、製造会社をうまく経営する(successfully running)という、もっと広い問題の中の小さな事柄のひとつにすぎないと確信するようになった」⁵⁾ことを反映している。

OPTの導入により、

- ・工場内の大部分の資源(設備と作業員)に大きな余剰能力があり、殆どの資源は利用可能な能力を100%使用すると在庫を膨らませることになる。
- ・統計的変動があり従属的な資源がある環境下では、バランスの取れた(加工物)の流れとバランスの取れた能力の間に矛盾がある。
- ・ソフトウェアの優位性はアルゴリズムに由来するのではなく、主としてこれらの基礎になるコンセプトに由来する。

という認識が深まるなかで、ゴールドラットが提唱する生産スケジューリングの方針が9個のOPTルール⁶⁾として定式化された。

OPTは高価であるにもかかわらず、それを導入した工場では生産性が大幅に向上し、生産リードタイムが劇的に短縮されるという効果が出て一躍注目されるようになった。しかし、ゴールドラットはOPTの詳しい仕組みは一切公表しなかったため、生産管理の実務家や研究者の間には、中身のわからないOPTを無視しようとする傾向が強かった。

ゴールドラットは彼の考え方を広めるため、1984年小説「The Goal」⁷⁾を出版した。彼はその小説の中で、OPTの背後にある重要な原理を、ある機械メーカーの工場長が経営上の危機に直面しそれを解決していくストーリーの中で分かりやすく示した。この本では、ボトルネックに焦点を絞って生産改善することの重要性を指摘し、また、従来の伝統的な原価計算に基づく業績測定システムと製造会社の「現在から将来にわたり金を儲け続けること」と彼が主張する真のゴールとの衝突を指摘している。

この本は今までに200万部以上売れ続けている生産関係の本としては空前のベストセラーとなり、OPTソフトウェアを使わないで、この本に書かれているコンセプトを実際に展開する企業が続出した。

表1 TOCの発展経緯

	ソフトウェア	手法など	焦点など
1979	OPT(optimized production timetables)		(ロジック非公開)
1982	OPT(optimized production technology)		(ロジック非公開)
1983		OPT ルールの定式化	“thought ware”
1984		「The Goal」出版	ボトルネック (DBR アプローチ) 業績評価
1985	OPT ver. 56		DBR アプローチ
1986		「The Race」出版 「The Goal」改訂版	DBR アプローチ解説 継続的改善の考え方が入る
1987		TOC の名称 V-A-T 分析 The Theory of Constraints Journal	継続的改善プロセス 生産形態の分類、Product network
1988	OPT		(ほぼ完成)
1990		「The Haystack Syndrome」出版	業績測定とロジスティクス部分の体系化 「スループット会計」
	DISASTER		上記 DBR ロジックの組み込み
1993		「What is the Theory of Constraints?」	問題解決、思考プロセスの体系化
1994		「It's Not Luck」出版	思考プロセスの解説
	GOAL SYSTEM ver. 1.0		スケジューリングロジック公開
1995		APICS で Constraints Management	の SIG が活動始める
1999	GOAL SYSTEM ver. 2.2		スケジューリングロジック(並列)

その結果は、驚いたことに「...多くの場合、ソフトウェアとその教育を用いて行った場合に比べてよい結果を達成でき、すべての場合で、より少ない投資と短い期間ですんでいる」⁵⁾ということが分かった。

ゴールドラットは「The Goal」で議論されているコンセプトを実際に実施した企業が納めた成功を調査し、次の三つの結論に到達した。

- (1) 「The Goal」で記述したプロセスを継続的改善のプロセスに変換する方法を企業に提供するニーズがある。
- (2) 組織を経営する理論の定式化が必要である。
- (3) 大部分の工場では、ドラムは、ボトルネックではない CCR (Capacity Constrained resource : 能力上制約になる資源) であり、...推進力は、時間でなく制約の徹底的活用であるべきである。

以上のような基礎となる製造概念の深化に伴い OPT も洗練され、OPT ver. 56 には翌年に出版される「The Race」⁸⁾で定式化された“ドラム・バッファ・ロープ(DBR)”アプローチも組み込まれた。

その頃、ゴールドラットはスケジューリング方法論の改善よりも、組織運営の一般理論の展開に努力を注ぎ始め、1987年の初めに現在用いている TOC (Theory of Constraints) の名称を採用した。彼は理論を展開するにあたり、ルールや原理の強調から、継続的改善プロセスへ焦点を移した。さらに、会計、

物流、マーケティング、製品設計などへの、この理論が持っている重要な拡がりを考えてこの名称を選んだ⁹⁾。

彼は、1987年の10月から、“制約理論ジャーナル”という一連の研究論文で、一般理論や“Thought ware”の多様な要素について発表し、1990年には、「What is this Thing called Theory of Constraints and How Should It Be Implemented」¹⁰⁾という本を出版した。さらに、同年、「Haystack Syndrome (乾し草症候群)」¹¹⁾を出版し、そこで、組織の一般理論を構成するロジスティック部分と業績測定部分を体系化し、彼が提唱する「スループット会計」も分かり易く説明した。

ゴールドラットの TOC のコンセプトは、彼が率いるゴールドラット協会の行ったワークショップの一部として、コース課題の中で紹介され、改善を加えられた。1993年、TOCの問題解決/思考プロセス構成部分を議論する最初の論文¹²⁾が発表され、1994年には思考プロセスを解説した「It's Not Luck」¹³⁾という小説が出版された。この結果、TOCは製造業だけでなく、サービス業や米軍といった幅広い組織での問題にも活用されるようになった。

以上のように、TOC は「The Goal」や「It's Not Luck」という小説により、アメリカ、英語圏、ヨーロッパで知られるようになったが、さらに詳しい内容は、ゴールドラット協会や TOC センターの教育やコンサルティングでしか知ることができない状態が続

いていた。

しかしながら、実務家/専門家に大きい影響力を持つ APICS(米国生産在庫管理協会)の中に Constraints Management のグループ (SIG) ができ、1995 年から毎年春にシンポジウムが開催されアメリカでは急速に広まりつつある。

一方、スケジューリングのソフトウェアやロジックも徐々に公開されるようになってきた。1990 年に DISASTER という新名称で出されたソフトウェアに採用されている DBR ロジックは企業秘密ではなく、そのアイデアの主要部分が本¹¹⁾に書かれている。さらに、1994 年に GOAL SYSTEM と改名されたソフトウェアは、MS-DOS 上で使え一般にも入手可能となった。しかし詳細なロジックは未公開の状態が続き、客観的な性能評価は遅れていたが、1997 年になって詳細が文献 14) で紹介され、さらに文献 15) では GOAL SYSTEM の新しいバージョンのロジックも提案されている。

3 . TOC の構成

3 . 1 TOC の構成要素

TOC は表 2 に示す 3 つの部分から構成される⁴⁾。第 1 のロジスティクス分枝の 5 段階継続的改善プロセスおよびスケジューリングプロセスは後で述べる。V - A - T 分析¹⁶⁾は、生産プロセスの分類法であり、これにより一般的な製品の製品フロー、コントロール・ポイント、戦略バッファの設定場所を確認できる。V - A - T の用語の起源は、製品、製品ファミリーにたいする生産プロセスを典型的に示す 3 つの図の形状に由来する。

第 2 の分枝は、TOC で用いる業績評価システムである。スループット、在庫、業務費用の定義は従来の定義と異なっている。

スループット : TOC では、システム(会社)が、販売によりキャッシュを産み出す割合を意味する。

在庫 : 在庫は、(加工などをして)再度売却するために購入された品目と定義され、最終製品、仕掛品、原材料を意味する。在庫は、常に購入価格で評価され、付加価値原価を含まない。この点が、伝統的な原価計算会計では、生産プロセスを通して仕掛品が進むにつれ、直接労働費と間接費配賦を追加していくのとは異なる。

業務費用 : TOC では、企業が、特定の期間において、在庫を販売に変換するために費やした金額を意味する。

throughput-dollar-days と inventory-dollar-days は、業

表 2 TOC の構成要素

- | | |
|-----------------|---|
| (1) ロジスティクス | <ul style="list-style-type: none"> ・ 5 段階継続的改善プロセス(the five-focusing step procedure) ・ スケジューリングプロセス
DBR スケジューリング法
バッファ管理 ・ V - A - T 分析 |
| (2) 業績測定システム | <ul style="list-style-type: none"> ・ 定義 : スループット、在庫、業務費用 ・ throughput-dollar-days, inventory-dollar-days ・ 製品ミックスの決定 |
| (3) 問題解決/思考プロセス | <ul style="list-style-type: none"> ・ 因果関係図(ECE 図 : effect-cause-effect diagram) ・ ECE 検証プロセス ・ エバポレイティング・クラウド方法論 (evaporating cloud methodology) |

務的意思決定を容易にする評価基準である。製品ミックスの決定は、間接費を配賦する伝統的な会計方法ではなく、制約プロセスの単位時間あたりの利益を基に行われる。

なお TOC では、‘制約’という言葉は、あるシステムが、そのシステムの目指すゴールに関して、より高いレベルを達成するのを妨げる要素や要因を意味する。制約は、マシンセンター、資材の欠如のような物理的なものだけでなく、方針や手順のような管理的なものも含む広い意味で用いられる。

第 3 の分枝は、思考プロセスと呼ばれる問題解決方法論である。ここでの目的は、

- ・ 何を変更するのか？
- ・ 何に変更するのか？
- ・ どのようにして変更を実現するのか？

という、マネジャーが一般に直面する疑問を解決することである。

この分枝の主要な要素は ECE 図である。この方法論は、観察された結果(effect)を引き起こしたと考えられる原因(cause)を仮説としておき、それを裏付ける二次的な結果(effect)を見つけて因果関係を検証するという科学的な方法に基づいている。もし二次的な結果が確認できると、仮説としておかれた原因が正しいことの証拠があると考えられる。ECE 図は、一連の仮説と確認の関係を示し、こうして観察される好ましくない結果の大部分を説明できる主要原因や中核問題(方針、手続き、その他の非物理的な

制約である場合も多い)の抽出を行い、それらを識別するの使われる。具体的には次の5種類のECE図を用いる：

現状問題構造ツリー：システムが持つ、観察された「好ましくない結果(undesirable effects)を引き起こす根本原因を決定するための、原因・結果関係図

未来問題構造ツリー：実際にアクションをとる前の段階で、(1)解決策を作り、拡張し、完全なものにし、(2)完成した解決策を実行すると起こってしまう新しい問題を事前に識別して解決し、もしくは防止するための論理ベースのツール

マイナス・プランチ制限：実際にアクションする前の段階で、あるアクションが生むインパクトを確認し、そのアクションが引き起こすマイナス効果を認識し、目標状態の実現に必要な追加アクションを確認するためのツール

前提条件ツリー：問題の解決策やアイデアの実行を妨げる障害を突きとめるための論理ベースのツール

移行ツリー：目標を達成するためのアクションを確認し、その順序をつけるための論理ベースのツール

この分枝の二番目の要素であるECE検証プロセスは、ECE図に描かれた関係を検証、強化するために、論理規則(論理条件の種類)を適用するプロセスである。この検証プロセスの主目的は、ECEプロセスで抽出された中核問題の妥当性の確認である。

三番目の要素は、エバポレイティング・クラウド図である。(別名：対立解消図、Conflict Resolution Diagram) 対立を図式化するプロセスにより、問題の根底に潜んでいる仮説を表面に浮かび上げらせ、詳しく調べられるようになる。対立とされていたものも、根底にある仮説を浮上させ、それを打ち破ることで問題が解決される(問題が蒸発する：evaporate)。この図の使用目的は、主に、相互に利益のある合意(win-win 解と呼ぶ)を妨げている、隠れた仮説を確認することである。

3.2 5段階継続的改善ステップ

TOCでは、システム全体を対象とする継続的改善をおこなうために‘the five-focusing step procedure：5段階継続的改善プロセス³⁾’を使う。5段階継続的改善プロセスは表3に示すステップからなる。

この改善プロセスは、生産システムにおける生産管理(生産計画の設定とコントロール)のみならず、プロジェクト、サプライチェーン、会計管理など多

表3 5段階継続的改善プロセス

Step1	制約の同定：全体システムのスループットを制限する資源を見出す。
Step2	制約の活用：システムの制約資源を最大限活用する。全体システムのスループット最大化のために優先付けも行う。
Step3	制約への従属：制約資源以外のすべての決定を Step2 の決定に従属させる。制約でない資源は、制約資源が必要とする以上に活用しない。
Step4	制約の能力向上：制約資源に、全体的スループットを増加させる追加能力を調達する。
Step5	惰性の回避：Step3 と Step4 により制約が他の資源に移る可能性に注意しながら、Step1 に戻る。

くのシステムマネジメントに有効であることが実証されている。

4. ドラム・バッファ・ロープ(DBR)スケジューリング法

TOCでは、生産計画設定とコントロールの方法として、DBR(drum-buffer-rope：ドラム・バッファ・ロープ)スケジューリング法を用いる。

DBRスケジューリング法は、スループットを最大にする目的で、資源を管理するために使われる技法であり、「生産スケジュール作成手順」と生産スケジュールを実行する「バッファ管理」から構成される。ここで、ドラム、バッファ、ロープはDBR法の基本機能を比喩的に表して、

‘ドラム’とは、そのシステムの制約となる工程で設定される生産ペース、

‘バッファ’は、不確実性(生産のゆらぎ)に対する防護のために設けられる時間余裕、

‘ロープ’は、制約工程からシステムの最上流(入口)工程への伝達プロセス、

を表す。‘ロープ’を使って、最上流工程では、システムへの投入量をチェック・制限して、投入量が制約条件の生産ペースに合致するように調整する。

4.1 スケジュール作成手順

TOCの生産計画設定に対するアプローチでは、基準生産計画を作成することを、スケジューリングと呼んでいる。DBR法によるスケジュール作成手順

は、基本的には5段階継続的改善プロセスの最初の3ステップをスケジューリングに適用した手順であり、具体的には表4の通りである³⁾。

4.2 バッファ管理

作成されたスケジュールを実行するにあたって、DBR スケジューリング法では継続的改善の活動を行うことが前提であり、その手段としてバッファの管理が使われる。

バッファは、生産のゆらぎ(統計的変動)からスループットや納期を守るために設定される。バッファは時間的余裕であるのでどれだけの長さにとればよいか問題になるが、それは制約資源での作業がとまらないだけの長さであればよい。これを決めるにはとりあえずのバッファ長を設定し、予定と実績を対比することにより、長さをなるべく短くなるように調整する。

さらにバッファは、その中にあるジョブの進捗状況を分析することにより、全工程の状態を診断することが可能になる。具体的には、バッファの‘穴’を用いる。‘穴’とは、バッファに入っているはずなのにまだ未到着のジョブのことである。これがどこの工程の遅れによって発生したかを調べることにより、非制約資源でスループットに影響する工程とその要因を洗い出すことができる。

この活動が重要なのは、バッファ管理の継続的改善プロセスにより、非制約資源での問題点を解消すれば、バッファを短くしていくことができ、リードタイムの大幅な短縮とシステム全体の在庫削減につなげることができるからである。

このアプローチは、JITを採用している工場で、計画的にカンバンの枚数を減らしていく場合に採っている、継続的改善のアプローチに似ている。従って、DBRのアプローチでも、JITで使われるツールを用いて生産のゆらぎの除去に役立てることもできる。

4.3 DBR スケジューリング法の特長

DBR スケジューリング法や、GOAL SYSTEM で用いられているスケジューリングロジックについて、いくつかの問題点の指摘や批判がなされているが^{17)~19)}、ここでは、従来の生産スケジューリングを前進させたと評価されている点を紹介する¹⁹⁾。
制約ベーススケジューリング：

“最適”スケジュールは、遅れジョブを持つことを計画しないという認識が重要である。同様に、ジョブの納期と能力は不変でないということ

表4 DBR スケジュール作成手順

1. (キャパシティ分析を使い)制約を決定する。
2. 制約を通過する構成部品を確認し、決定する。
3. 各製品の制約資源での1分あたりの貢献利益を使い、制約での優先順位を決める。
4. この優先順位を使い、制約資源の使い方のガントチャートを作成する。
5. 制約資源を通過する構成部品を使わない最終品目(自由財)は、基準生産計画内で平準化してスケジュールする。
6. 制約資源での処理タイミングから、バックワード日程計画により逆戻りして、材料の投入スケジュールを作成する。原材料の投入ポイント(入口工程)から制約でないワークセンターを通り、材料が制約資源に到着するまでの時間が十分であるように制約バッファを設ける。
7. 制約資源での処理タイミングに出荷バッファを加え、フォワード日程計画で出荷スケジュールを作成する。制約バッファや出荷バッファは、待ち行列、段取時間と処理時間、および、制約資源と出荷場所の間の制約でない全作業の通過に必要な時間に、十分な余裕を持たせるものでなければならない。

理解することが重要である。問題の原因をフィードバックしてスケジュールの実行可能性をチェックできるツールを立案者に与えることは、スケジューリングの有効な方法である。

直感的スケジューリングアルゴリズム：

非制約資源を制約資源に従わせ、制約資源をできるだけ効率的にスケジュールする方法は、直感的でありかつ実用的である。このことは、“ブラックボックス”アプローチや数値プログラミング法に比べて、このシステムを実務家に受け容れやすくしている。

バッファの設定：

DBR スケジューリング法は納期とボトルネックの両方に対し時間バッファの利用を求める。これは、多くの決定論的なスケジューリングのアプローチに欠けている余裕時間を与えている。

5. おわりに

継続的改善プロセスの理論としてゴールドドラットが提唱している TOC について、その発展経緯と

構成要素をまず解説した。さらに、TOC のロジスティクス部分に位置する DBR スケジューリング法のアルゴリズムを紹介した。DBR スケジューリング法は、MRP (資材所要量計画) システムが用いられている工場の生産管理改善プロセスの中に比較的容易に導入できるようなのであり、今後さらに導入事例が増えると思われる。

TOC のコンセプトを具体的に展開し成功した企業は、他社との優位性を保つため、具体的方法やシステムの公開に後向きであると書かれているが³⁾、学術的研究のレベルでの検討が今後進められることを期待したい。

参考文献

- 1) 稲垣公夫：“TOC 革命”、日本能率協会マネジメントセンター (1997)。
- 2) 稲垣公夫：“アメリカ生産革命”、日本能率協会マネジメントセンター (1998)。
- 3) ジェームス・F・コックス、マイケル・S・スペンサー：(訳) 小林英三、“制約管理ハンドブック 競争優位の TOC 戦略”、ラッセル社 (1999)。
- 4) M. S. Spencer and J. F. Cox, “Optimum production technology (OPT) and the theory of constraints (TOC): analysis and genealogy”, *International Journal of Production Research*, Vol. 33, No. 6, 1495-1504 (1995).
- 5) E. M. Goldratt, “Computerized Shop Floor Scheduling”, *International Journal of Production Research*, Vol. 26, No. 3, 443-445 (1988).
- 6) F. R. Jacobs, “OPT Uncovered: Many production planning and scheduling concepts can be applied with or without the software”, *Industrial Engineering*, October, 32-41 (1984).
- 7) E. M. Goldratt and J. Cox: “The Goal: The Process of Ongoing Improvement”, North River Press (1984); revised edition (1986), and 2nd revised edition (1992).
- 8) E. M. Goldratt and R. E. Fox: “The Race”, North River Press (1986).
- 9) M. Umble and M. Srikanth: “Synchronous Manufacturing”, Ohio:South-Western Publishing (1990).
- 10) E. M. Goldratt: “What is this Thing called Theory of Constraints and How Should It Be Implemented”, North River Press (1990).
- 11) E. M. Goldratt: “The Haystack Syndrome: Shifting Information Out of Data Ocean”, North River Press (1990).
- 12) E. M. Goldratt: “What is the Theory of Constraints?”, *APICS, The Performance Advantage*, June (1993).
- 13) E. M. Goldratt: “It’s Not Luck”, North River Press (1994).
- 14) J. V. Simons, Jr. and W. P. Simpson III, “An exposition of multiple constraint scheduling as implemented in the GOAL SYSTEM (Formerly DISASTERTM)”, *Production and Operations Management*, Vol. 6, No. 1, 3-22 (1997).
- 15) J. V. Simons, Jr., M. D. Stephens and W. P. Simpson III, “Simultaneous versus sequential scheduling of multiple resources which constrain system throughput”, *International Journal of Production Research*, Vol. 37, No. 1, 21-33 (1999).
- 16) 文献 3) の第 5 章に解説がある。
- 17) R. Conway, “Comments on an Exposition of Multiple Constraint Scheduling”, *Production and Operations Management*, Vol. 6, No. 1, 23-24 (1997).
- 18) M. Pinedo, “Commentary on “An exposition of multiple constraint scheduling as implemented in the GOAL SYSTEM””, 同上, 25-27 (1997).
- 19) M. L. Spearman, “On the Theory of Constraints and the GOAL SYSTEM”, 同上, 28-33 (1997).