サプライチェーンプランニング（TOC：Theory of Constraint）概説

竹之内　隆

本稿の目的

Advanced Planning & Scheduling[i]（APS）もしくはAdvanced Planning System（APS）やSupply Chain Planning[ii]（SCP）及びEnterprise Resource Planning[iii]（ERP）という概念が世に問われて久しい．これらは，少なからず混乱したまま，ソフトヴェンダー各社の非科学的な説明が混乱に拍車をかける形で紹介されているように思う．また，サプライチェーン・マネジメントの原点にはサプライチェーンを定義し，その範囲内から制約条件を特定し，その制約条件を解消すべく戦略転換，組織変更，情報システムの再構築が行われるべきであるという制約理論（TOC）が影に存在することも否定できない．

本稿ではとりわけAPSのスケジューリング機能とTOCスケジューリングとに着目しつつ，それぞれとSCM，およびERPとの関係を明確にする過程で，各々の位置付けを明らかにしたい．

このことは不況対応力を強化すべくSCMおよびERPへの取り組みを検討している企業関係者には有益な情報となろう．また，APS，TOC，SCMといった三文字のキャラクターにイメージのもてない学生諸氏にも有益な情報となることを願いつつ認めてみる．

SCMヴェンダーはサプライチェーン・マネジメントに要するすべての計画機能を兼ね備えているかのように製品ラインナップを説明し，ERPヴェンダーはSCM機能を充実しつつあると説明する．このことは，現時点ではまことに信憑性の低い発言と受け止めるべきであろう．

APSの出現

APSは従来のスケジューリングツールとは根本的に異なるモノであるといわれている．従来のスケジューリングツールをMRPとすればその差異は明確であろう．

APSとはなにか，ここでは「資材制約と能力制約」を同時に加味しつつ生産スケジューリングをBOMの全レベルを対象に実行する．加えて生産計画策定上のいくつかの制約条件（順序制約，保管制約他）を加味しつつ，いくつかのロジックを適用可能であり，時間刻みの計画が有限負荷山積み方式で高速演算可能な計画ツールをさすことにする．

通常のMRPは，

①負荷無限山積みによる工程能力を無視した負荷山積み

②固定リードタイムによるバックワードスケジュール

③バッチ処理のため変化をきらう計画プロセス

④ラフカット能力計画とMRP展開による資材計画とが同時に行われないので，計画の実行可能性が疑わしい

といった問題を抱えている．従って，MRPは山崩し機能とスケジューリング機能を外部モジュールとして追加してきた歴史がある．しかしながらこのことは本質的な問題解決にはなっていない．

APSとSCMソフトの位置付け

APSとSCMの違いは何か．このことは，生産機能の位置付けに依存しているのではないか．SCMソ

たけのうち　たかし　㈱日本総合研究所
〒102-0082 千代田区一番町16番

[i] APS：Advanced Planning and Sheduling：生産スケジューリングを主機能にし，工程能力と資材の過不足を同時に加味しつつ高速計算を行う．

[ii] SCM：Supply Chain Planning：需要予測，在庫配置，納期回答，生産スケジューリング，資材逆展開，輸送スケジューリング，インターネット活用型コラボレーション支援システム等一連のサプライチェーン・マネジメント活動を支援する情報システムをさす．

[iii] ERP：Enterprise Resource Planning：統合業務パッケージとも称される．販売管理，購買・在庫管理，生産管理

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

フトは需要予測に始まり，在庫配置，生産計画，部材の調達を保証する計画系シミュレーション全般を提供するのが一般的である．ところがAPSは生産機能を中心に据え，生産資源をフル活用する為の情報として受注オーダーや購買発注データ，BOMデータを活用する．SCMソフトは生産機能を持たないサプライチェーンであっても活用余地がある．例えば，需要予測と流通在庫のシミュレーションのみを活用して小売，問屋・商社，工場の在庫最適化を図ることも可能であろう．ここでSCMソフトの基本機能を見ておこう．

(1) サプライチェーン全体のシミュレーション

サプライチェーン全体の統合モデルを作成し，戦略的な意思決定を支援するシミュレーションを行う．主に変動費のみを対象にしており，生産拠点，物流拠点の配置をモノの流れから最適化を促進する．

(2) 需要予測

製品・地域・チャネル毎に過去の実績から統計解析手法を使用し需要予測を実行する．この予測結果を他のモジュールで活用するインターフェイスをもつ．中には，販促情報などの定性情報を予測に取り込めるモノもある．

(3) 流通在庫シミュレーション（DRP）

小売，卸，工場の流通網をモデリングし，末端の需要や需要予測に応じた最適在庫補充計画を策定する．過剰在庫と欠品の発生を同時に回避できる．

(4) 製造スケジューリング

部品制約と能力制約を同時に加味しながら製造スケジュールを最適化する支援ソフト．高速MRPといわれたメモリー展開技術を使用しているので非常に処理速度が早い．

(5) 部品引当シミュレーション

部品点数の多い複雑組立系製造プロセスに特化した製造プランニングモジュールともいえる．今，てもとに存在する部材で何が，どこまで製造可能かをフルペギング技術を活用し，提案する．俗に，「逆展開」機能ともいわれる

(6) インターネット利用のコラボレーション・システム

小売，卸/商社，（加工）製造業，協力工場，原料メーカーをインターネットを利用し，シミュレーション結果を共有しつつコラボレーションを実現する．従来のEDIがバッチ処理中心であったのに対してリアルタイムに情報共有化を促進する．更にEDIは結果を伝達する手段でしかなかったが，これのシステムは予測や計画が確定する前に情報共有し，コラボレーションを促進する性格をもつ．

これらのソフトウエアがSCMソフトやAPSと総称されている．まず，APSやSCMソフトが生まれた時代背景とその役割を検討する．

製造業におけるAPSの役割

かつて，過剰な設備能力，稼動中心の大量生産，製品在庫は売上原価を押し下げる方向で機能した原価計算．さらに安定していた需要，単純化された生産プロセス等はスケジューリングの意味を低下させていた．しかし，製品ライフサイクルの短命化や需要の乱高下，見込み生産による死蔵在庫の増加，キャッシュフローの重要性が高まるにいたって，変化に対しリアルタイムに追随する必要性が高まり，APSの必要性が認識されるに至った．

このことは，単にMRPに置き換わるシステムを意味するのではなく，顧客サービスの具体的な向上を支援すること．ならびに経営マネジメントの観点から生産スケジューリングを捉えなおす必要性が高まっていることを意味する．これらは製造業や生産方式を一括して取り扱うことが危険であることを教えてくれる．

生産計画方式

生産計画方式は，そのアプローチの違いからプッシュ型，プル型，スクイーズ型に分けることができる．TOCの生産計画方式はスクイーズ型に分類される．

(1) プッシュ型生産計画方式

基本的に実受注に加えて需要予測，販売見通しに従って生産計画を策定し，見込み生産を計画する．つまり，あらかじめ完成品需要は計画値として決定されており，この計画需要を満たすために必要な部材の手配と加工・組立など工程能力とリードタイムをふまえた製造指示が発行される．

MRPが使用されるとしばしばプッシュ型生産計画を運用することになる．しかしながらMRPシステムは基本的に資材の所要を算出するのが主目的であり，あらかじめ設定された製造リードタイムとBOM（部品表），手番（工程表）によって製造のスタート日を指示するにとどまり，生産スケジュールとしては日単位の稚拙なものである．しかも工程能力の制約条件を考慮していないので，山崩しを行いながら再度，部材の所要を再計算するという構図になる．実際のところMRPを使用する生産システムは山崩し機能とスケジ

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

ューリング機能を別途追加してきた経緯がある．

(2) プル型生産計画方式

プル型生産とは受注生産方式に近い運用になる．市場での需要に対して出荷工程から上流工程に対して引取りカンバンがまわっていく過程で生産が行われる．カンバンが回ってこなければ生産しないので，より市場に近い下流工程から引っ張られるように生産活動が律せられる．スケジューリング機能はトータルタクトを基本に行われる．従って部材は入手済みを前提に，需要が平準化され，工程間のピッチバランスが保たれた状態での運用が前提になる．季節品のような需要特性では運用しにくく，スケジュールの立案も不安定になる．

(3) スクイーズ型の生産管理方式

スクイーズ型の生産管理方式の代表がTOC生産スケジューリングである．制約工程を捉えてそこをフル活用するスケジュールを策定する．制約工程の稼動を安定化する為にタイムバッファーを算出し，制約工程に同期した資材の投入スケジュールを算出することで全体の同期化を図る．その基本ロジックは工程連鎖の中からボトルネックを捉えそのボトルネック工程に直接影響を蒙る下流工程を「制約工程」とグルーピングし，ボトルネックに直接影響を受けない上流工程を「非制約工程」とグルーピングする．スケジューリングの観点からは「制約工程」にはボトルネック工程からプッシュ型のフォーワードスケジューリングで計算される．「非制約工程」はボトルネック工程に同期するようにバックワードスケジューリングでプル型のスケジューリングが行われる．

生産方式とスケジューリング機能

上述したようにプッシュ型，プル型，スクイーズ型の生産管理方式によってスケジューリング機能の位置付けが変わってくる．プッシュ型MRPシステムにはスケジューリング機能は外付けで必要になる．MRPシステムは通常，日単位～週単位のタイムバケットが最小単位であり，差立ての指示には使用できない．従って別途スケジューラー機能を要求する．

プル型のカンバン・システムは安定したタクトタイムを基準にスケジューリングされているといえる．実行系と計画系が混在している．

スクイーズ型生産方式はスケジューリングを内包している．生産設備や人員に対して具体的なスケジュールをたてる．

ところが，3ヶ月～1年にいたる大日程計画を検討する際にカンバン・システムやスクイーズ型スケジューリングが向いているかといえば否である．大日程計画のような大括りの計画はMRPタイプが向いている．他方で一日を時間刻みに小分けしたスケジューリングはMRPには求めることができない．カンバンやスクイーズ型生産方式は時間刻みのスケジューリングに長けている

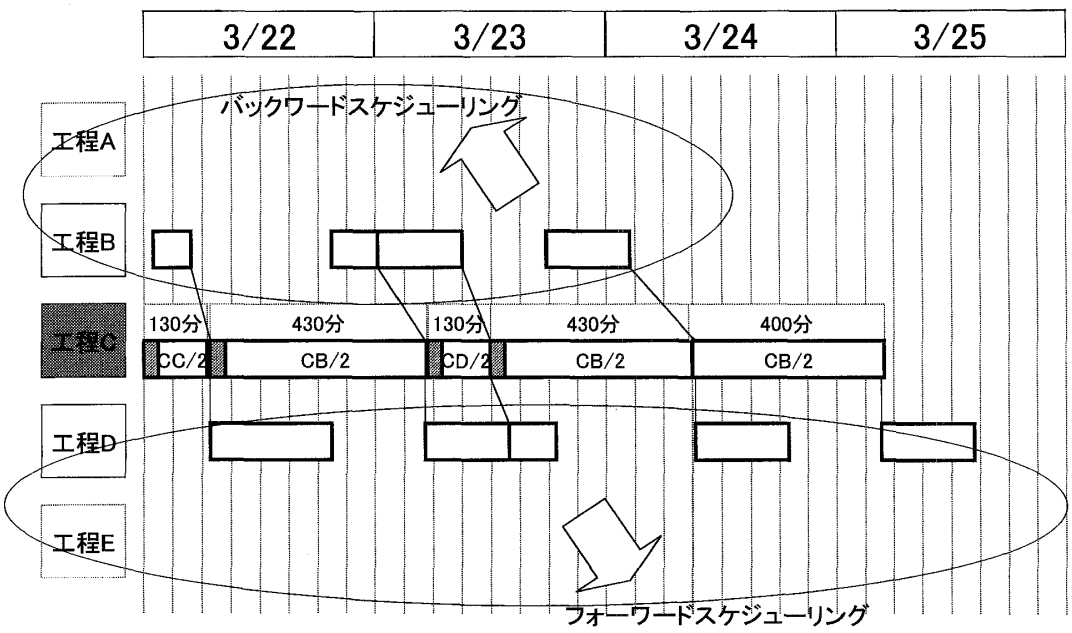

図1 ボトルネック工程（C工程）前後のスケジューリング

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

TOCとは何か？

本稿ではスクイーズ型の典型であるTOC生産方式について言及する．1970年代後半にイスラエルの物理学者エリー・ゴールドラットは物理学の研究でえた発想や知識を使って画期的な生産スケジューリングの方法を編み出し，ソフトウエアに仕立てることに成功した．

そこでゴールドラット博士はその生産スケジューリングソフトウェアをOPT（Optimized Production Technology）と名づけ，米国でこれを販売した．OPTは高価なソフトウェア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改善し，生産リードタイムが劇的に縮むという効果が出て，注目されるようになった．しかしゴールドラット博士はOPTの詳細は一切公表せず，ソフトウェア開発もイスラエルで行っていました．この状況はMRPのように最初に提唱された頃からそのしくみが完全に公表されているものとはまったく違っていた為に，生産管理の専門家からはOPTを無視しようとする傾向があった．

そこでゴールドラット博士はこのOPTの基本的な原理を分かりやすく説明する小説を書くことを思い立ちます．周囲の反対を押し切ってゴールドラット博士は「ザ・ゴール」という企業小説を書きました．この小説は周囲の心配をよそに爆発的な売れ行きをしめし，たちまちミリオンセラーになってしまいました．この「ザ・ゴール」の出版直後に多くの読者からは「ザ・ゴール」は自分の工場と全く同じ状況を描いているとか，自分の工場をモデルにしたのではないかという手紙が舞い込むようになってきました．中には小説にある通りに改善を実施してみたら，小説と全く同じような劇的な成果が出たという手紙もありました．

ゴールドラット博士はOPTの背後にある考え方をTOC（Theory Of Constraints：制約条件の理論）と名づけました．これはOPTのスケジューリングが工場内のボトルネック工程，つまり生産の制約条件に着目しているところから名づけられました．博士はさらにTOCをスケジューリング手法から，制約条件に改善活動を集中させる改善手法へと発展させました．これが生産改善の五ステップです．

TOCスケジューリングの特徴

TOCのスケジューリング手法はDBR（ドラム・バッファー・ロープ）とも呼ばれます．これはTOCスケジューリングの最も重要な三つの要素を分かりやすく表現しています．

①ドラム：制約工程を特定し，その工程をフル活用する生産スケジュールのこと

②バッファー：制約工程が受注変動に左右され無いように保護時間を設定する．

③ロープ：制約工程に同期した部材の配当計画のこと

TOCでよく使用される行進のアナロジーがあります．軍隊の隊列が行進して山道を登っているとします．これを生産と対比すれば，各兵士は生産の各工程設備で，当然工程作業の順序を守らなければならないように兵士も前の兵士を追い越すことはできません．この隊列の隊長の任務はなるべく短時間に頂上に全員を登らせることです．兵士が登山をはじめると何が起こるかを考えてみましょう．まず兵士の体力やその日の体調は一人一人違います．そこで一番遅い兵隊が先頭以外の位置にいると遅い兵士とその前の兵隊の間の距離はどんどん拡大します．この現象は生産工程におけるボトルネックに相当します．

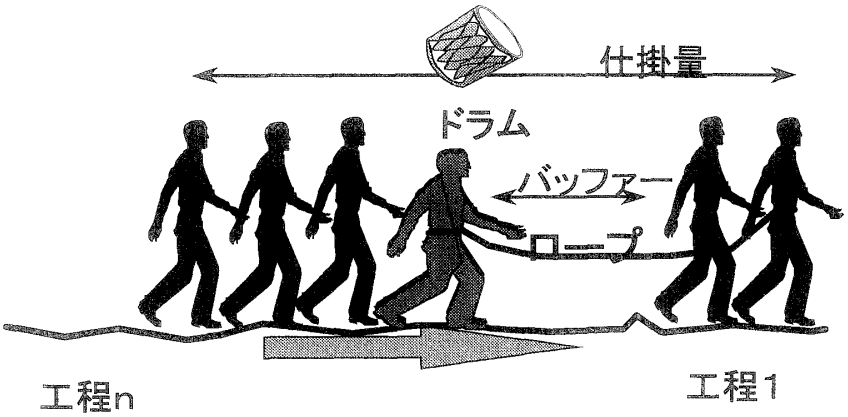

図2　DBR：ドラム・バッファ・ロープの概念

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

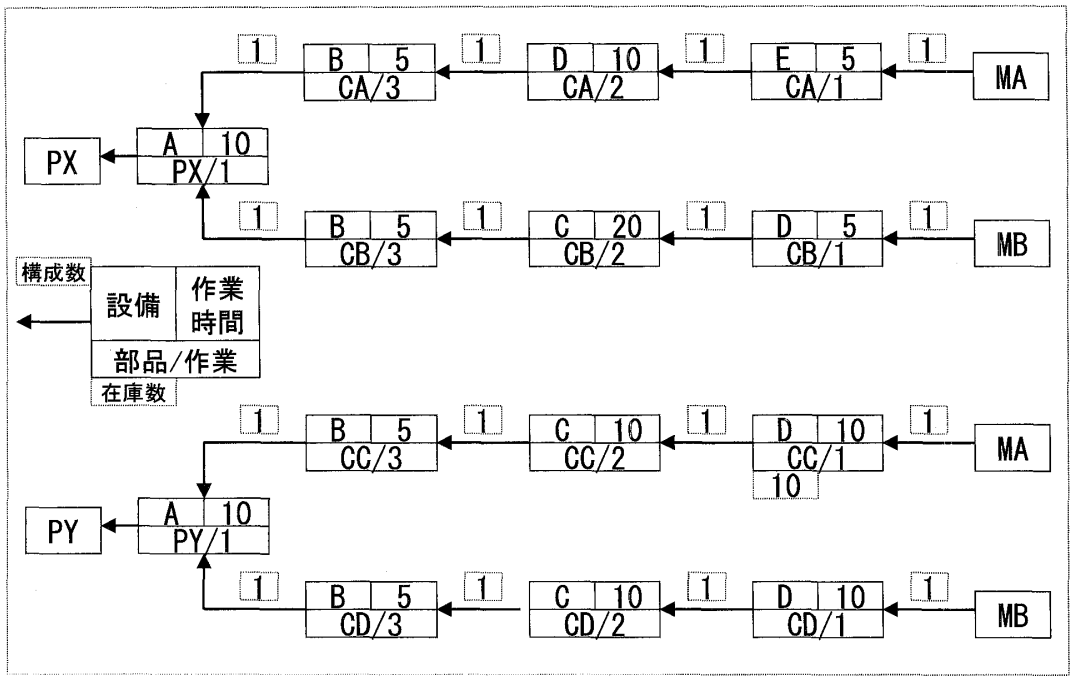

図3　The Net：TOC流のBOM

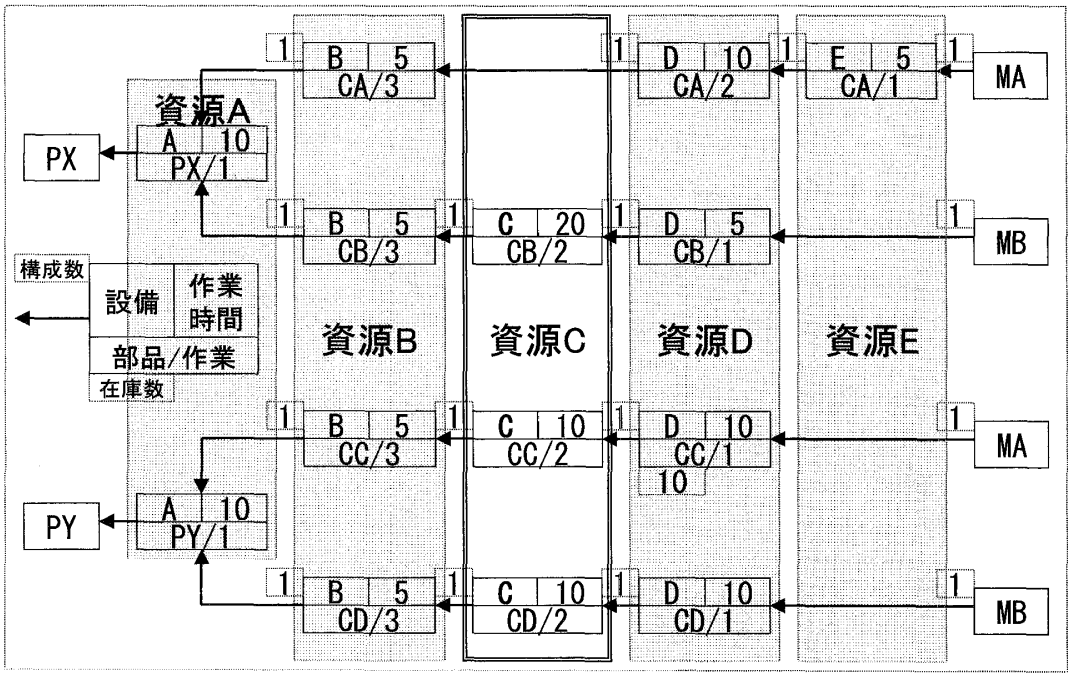

図4　制約工程の特定

また一人一人の兵士は登山途中で，みちのでこぼこにつまずいたり，靴の中にはいった砂利や砂をだすことがしばしば起こります．そのつどその兵士と前の兵士の間にひらきができます．しかし最も遅い兵士の後ろの兵士はギャップができても，最も遅い兵士より早く歩けるので，すぐに追いつくことができます．従ってこのようなばらつきがあっても最も遅い兵士の後ろで，隊列はあまり広がりません．ちょうど各工程の生産活動に必ずゆらぎがあることに相当します．チョコ停，不良品の発生などさまざまな要因があります．そしてこの生産活動のゆらぎが仕掛増大の原因の一つになるのです．

軍隊なら最も遅い兵士を先頭に持ってくれば隊列が広がることを防ぐことができます．しかし生産では工程順序を変えることも，特定の工程の能力を変えることも容易にできるわけではありません．

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

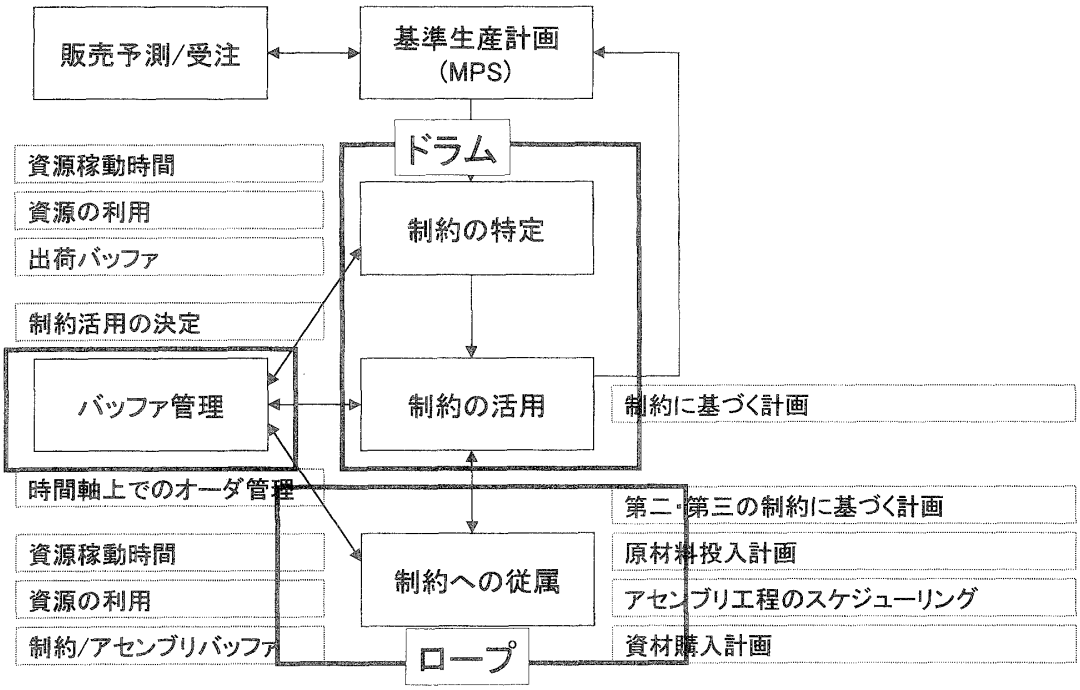

図5　TOCシステムの構成

そこで隊列のアナロジーに戻ると，最も遅い兵士が隊列の途中にいてその位置は変えられなければ，その兵士と先頭の兵士の間をロープでつなげばいいのです．しかもそのロープは兵隊の最少間隔分の距離より長くして余裕を持たせます．この理由は，仮に最も遅い兵士の直前の兵士がつまずいたときに，最も遅い兵士も立ち止まらなければなりません．しかし最も遅い兵士が立ち止まったときに失われた行進距離は永久に取り戻せないのです．しかしそれ以外の兵士が立ち止まっても，隊列の歩行速度は最も遅い兵士の速度なので，すぐに取り戻せます．これにより隊列は最も遅い兵士とその前の兵士の間だけは距離があるが，それ以外はつめた隊列になります．これは生産ラインでは，先頭工程への資材投入をボトルネック工程の生産速度に合わせることと，制約条件のまえにだけは制約条件の活動を保護するバッファーを設置することに相当します．

そこでドラム，バッファー，ロープとは次のことをさしています．ドラムは最も遅い兵士が隊列全体の歩調を決めるため，ちょうど昔の行軍にはドラムをたたいて歩調をあわせたことに相当するのです．ロープは先頭兵士と最も遅い兵士の間に結んだロープのこと，バッファーとは最も遅い兵士が前の兵士に阻害されないようにロープに持たせた余裕のことです．つまり行進のアナロジーは，ボトルネックになる兵士を特定し，その兵士を休ませずに全体を（ロープとバッファーを利用して）ボトルネック兵士のペースに同期させつつ登りきることが最速であることを教えてくれます．これは前述したスクイーズ型の発想です．生産現場でも，一部の工程に機械化投資を施し能力強化を図っても完成品の出荷（軍隊が山を登りきる）はボトルネック工程に規定されているのでスピードアップにはつながらないのです．

TOCスケジューリングシステム

TOCスケジューリングシステムではその骨格に「The Net」という特異なマスターデータを保有する．「The Net」は以下の情報を保持する．スケジューリング対象品のProduct Flow Diagram．製品のProduct Flow Diagramは製品個々のPert/Operationと製造資源（設備，ヒト等）を含んでいる．部品表＋Routing．Pert/Operation．仕掛り品情報，段取時間，作業時間．通常のBOMに比べると，Pert/Operation．仕掛り品情報，段取時間，作業時間等が一元化されているところに特徴がある．The Netは単なる部品構成表ではなく，スケジューリング用に改造されたBOMと捉えることができる．The Netとマスカスタマイゼーションについては本稿ではふれないが，重要なポイントがThe Netによって革新されている．

TOCスケジューリングの第一のステップは，このThe Netを使用して制約工程を特定する．第二のステップは，特定した制約工程をフル活用する生産スケジュールを作成することである．このスケジュールを

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

・ スループット最大化(T)、在庫最小化(I)、業務費用最小化(OE)等の複数シミュレーションから、制約条件工程における生産計画を立案し、部材スケジューリング、能力計画・生産スケジューリングを行う。

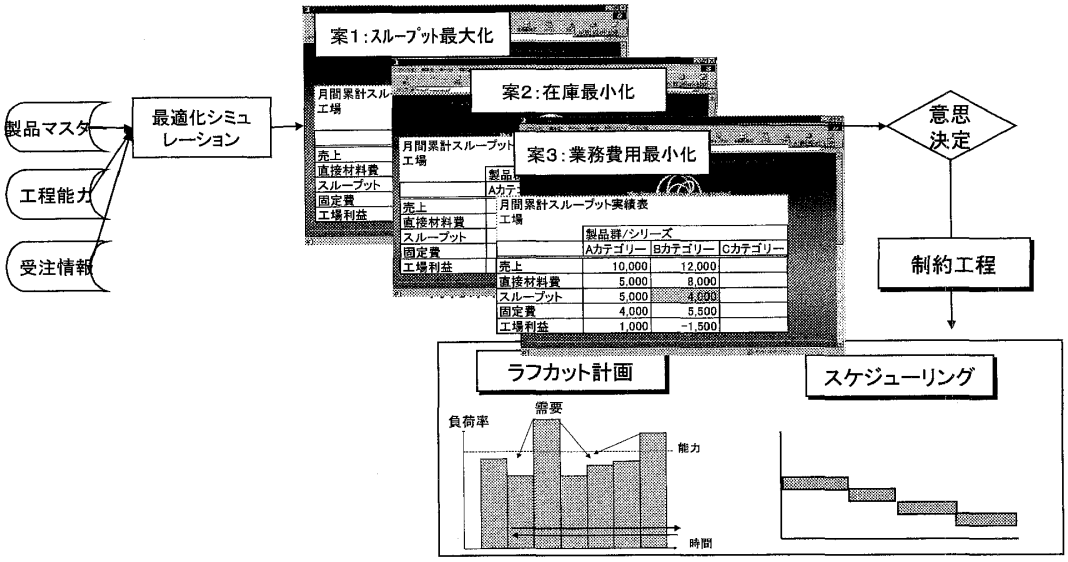

図6 スループットを活用した事業収益構造の把握

“ドラム”と呼ぶ．工程全体の心臓の鼓動に値する．前述した兵隊の行進アナロジーを想起されたい．ここで特徴的なのは，特定した制約工程の直前にタイムバッファーを設定することである．このタイムバッファーの初期値の設定には諸説があり，定かではない．しかしながらこのバッファーはスケジュールを運用する中でダイナミックに変更をかけるプロアクティヴなモノである．TOCスケジューラーにはこのタイムバッファーに食込まれた頻度や度合いを監視するモニタリング機能がある．従って，バッファーの長さは製品によって異なるが，日々の進み遅れによっても変わる．

第三が資材の投入スケジュールを算出する．いわゆる“ロープ”に相当する．これはボトルネック工程のスケジュールに同期させ，前工程を勝手に進ませ無いように制御する為の仕掛けである．

ドラム・バッファー・ロープのシステム機能図をここで紹介する．

マネジメントシステムとスケジューリング

通常スケジューリングの議論は生産量，納期などの情報を与件として実行可能解を求めることに光をあてることになる．このことは，経営マネジメントとスケジューリングをある意味で分離していくことにつながりやすい．生産資源の有効活用と経営目標とが必ずしも比例関係にはないケースが多発するからである．ERP（統合業務パッケージ）とスケジューラー，SCMソフトの連動は生産活動上のアクティビティとして捉えれているように思える．しかしながら，重要なことはERPの会計データ，原価データとスケジューリングの統合であろう．あえて類型化すれば，通常のスケジューリングへのアプローチを生産現場のボトムアップアプローチと称すれば，今求められているのはマネジメントシステムとの統合アプローチであろう．つまり，どの生産スケジュールがもっとも限界利益を向上させるか，どの顧客へのスケジュールを優先するかで経営上のインパクトが異なるということを評価尺度にいれたアプローチが求められる．

TOCではスループット会計とドラムバッファーロープの統合がうたわれている．

現実にTOCスループット会計とスケジューリングを統合しつつ運用するにはERPとTOCスケジューラーを連動させる必要がある．製品群別スループット計画表と実績を比較し，製造日報情報から制約条件を特定し，問題解決を図ることや，複数の小日程シミュレーションから，スループットの比較を行うことで利益直結型の生産スケジューリングへと発展させるアプローチもある．

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．