

地域戦略研究所紀要

第 2 号

生産スケジューリングの今日的課題

野村 利則、吉村 英俊 …… 39

北九州市立大学
地域戦略研究所
2017.3

生産スケジューリングの今日的課題

Recent issues of production scheduling

野村 利則、吉村 英俊

- I はじめに
- II 生産スケジューリングの実際
- III 生産スケジューリングの研究状況
- IV 生産スケジューリング活用の課題

<要旨>

第4次産業革命は、企業を超えた工場間の生産連動や自動生産を求めている。この次世代生産システムの要は、生産意思決定としての生産スケジューリング（生産順序、生産日時）である。しかし、現状は人による状況判断と意思決定に頼らざるを得ない状況にある。本研究は、生産条件の網羅性¹⁾を高めつつ、スケジューリング結果への納得性²⁾も得られるような生産条件間の調停処理機能の必要性に言及し、課題解決を目指すものである。

<キーワード>

生産意思決定、生産スケジューリング、網羅性、納得性、調停機能

Production decision-making, Production scheduling, Comprehensibility of production conditions, Acceptability of scheduling result, A function of mediation

I はじめに

筆者は、これまでの調査研究において工場が企業を越えてつながる次世代生産システムの実現のためには情報通信技術だけでなく、工場間の生産情報から確実な生産実行につなげるための生産スケジューリングの役割がより重要となることを見出した。この生産スケジューリングは、製造工程における生産意思決定として生産実施計画を立案するものである。本研究においては、これを工程計画と呼ぶこととする。また、この生産スケジューリングは情報通信技術を利用してOR（operations research）に代表される経営工学的アプローチによりシステム化され、一般に生産スケジューラと呼ばれている。

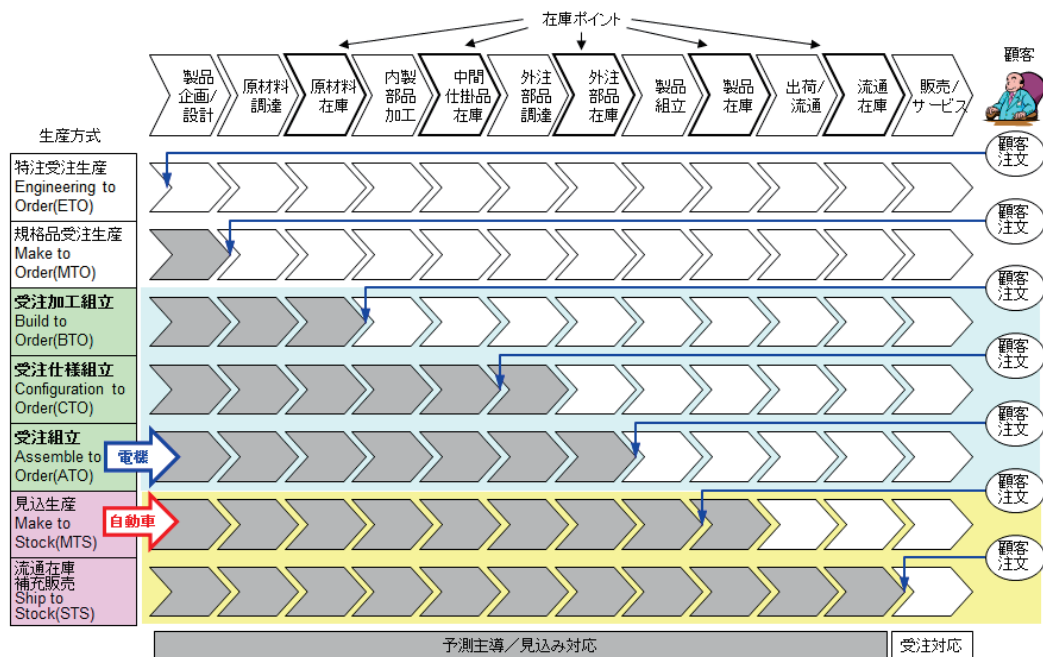
立案された工程計画は、正しい工程管理の「ものさし」（基準）として要求納期を守り、経営資源を効率的に利用するために「どの順番で着手し生産するか」という生産順序と「いつ生産するか」という生産着工日時（タイミング）が重要な機能要素となる。この一見簡

単そうに見える生産順序と生産着工日時の決定は、顧客または営業の要求納期に対して、生産工程とその数、保有設備能力、持てる人員とその作業編成に基づく工程能力、調達済または納入予定の材料・部品などの広範な条件を扱いながら問題解決を図る必要がある。また、生産順序と生産着工日時の最適解を求めるためには、膨大な生産条件のインプットとその演算処理をとらなう。これまで、工程能力などの利用可能な経営資源に余裕があれば条件選択にも自由度があり比較的容易に計画立案できていた。しかし、近年の生産環境の変化にともない考慮すべき生産制約条件は増加する一方であり、実現可能な工程計画を満足させる成立条件は減少している。このため、条件探索という複雑な問題を人手によってのみ解決することは、ますます困難となっている。

これらの状況を踏まえ、本研究においては自動車と電機の実用生産スケジューリングの実用状況調査とその課題を探る。さらに、学術研究の状況を調査し、課題解決の可能性や新たな生産スケジューリングの必要性について研究する。研究事例の調査に当たっては、国立情報学研究所（NII、National institute of informatics）が提供する文献情報・学術情報検索サービス（CiNii Articles）の学術論文や図書・雑誌などの学術情報データベースから生産スケジューリング問題に係る研究を把握・分析し、そこから課題解決の可能性を探った。

II 生産スケジューリングの実際

実際に企業で実行される生産スケジューリングは、その生産方式としての受注と材料部品調達および生産着手タイミングの差異に大きく依存する。ここでは、企業と個人（消費者）間の商取引により主として流通在庫販売を含む見込生産方式を採用する自動車と、企業間取引により主として受注加工組立や受注仕様組立、受注組立などの受注生産方式を採用する電機を比較する（図II.a）。



出所) 中央職業能力開発協会 (2008) 『生産管理プランニング (生産システム・生産計画) 2 級』株式会社社会保険研究所,26.に筆者加筆

図II.a 受注と材料部品調達および生産着手タイミング

自動車は、販社オーダーと需要予測から立案、確定した見込生産計画にしたがって必要な材料部品を調達のうえ、その計画に基づく生産スケジューリングにより立案した工程計画にしたがって生産実行する。その生産実行結果が製品在庫または流通在庫となり、販売会社より顧客注文を受けた時点で流通在庫または製品在庫から適合する仕様の製品を引当てる。ただし、適合する仕様の製品が流通在庫または製品在庫の中になければ、次の期間の生産計画にオーダー紐付き計画として織り込まれることになる。

一方、電機は市場の需要予測や顧客企業の生産計画による内示情報に基づき材料部品の調達計画を立案し、必要な材料部品を調達する。また、必要な内製部品を生産し、先行して準備を図る。さらに、顧客企業からの正規注文オーダーを受けて材料部品の調達計画との乖離分の材料部品の調達調整を図るとともに確定生産計画を立案し、その計画に基づく

生産スケジューリングによって立案した工程計画に沿って生産実行後、完成した製品を出荷する。

このように、自動車は自動車という高付加価値商品を大量、安価に生産するために材料部品の調達と生産計画が同期する見込み生産方式が採られ、電機は産業用電気機械器具を市場ニーズと市況変化に合わせて柔軟かつ迅速に生産するために材料部品の調達と生産計画が非同期の受注生産方式が採られている（図 II.b）。

	自動車	電機
特徴	高付加価値商品を大量、安価に生産	市場ニーズと市況変化へ柔軟に生産対応
製品特性	<ul style="list-style-type: none"> ・比較的大きな高額製品 ・主として見込み生産 ・1個流し 	<ul style="list-style-type: none"> ・比較的小さな小額の一般耐久消費財 ・主として受注生産 ・受注オーダー単位にまとめてロット生産
製造工程レイアウト	<p>主としてライン生産</p> <ul style="list-style-type: none"> ・広大な敷地と建屋 ・大型設備と大規模作業場 ・多人数で分業作業 ・作業編成の組み替えが困難 ・ワークのラインからの取り外しが困難 <p>需要予測 注文 → 同期 材料調達 生産計画 → 着工 → 仕掛引当 → 完成</p>	<p>主としてセル生産</p> <ul style="list-style-type: none"> ・相対的に狭い敷地と建屋 ・小型設備とコンパクトな作業場 ・1人または数人で作業 ・作業編成の組み替えが容易 ・ワークの作業工程からの取り外しが容易 <p>需要予測 内示 → 注文 → 生産計画 → 着工 → 完成</p>

（筆者作成）

図 II.b 自動車と電機の生産比較

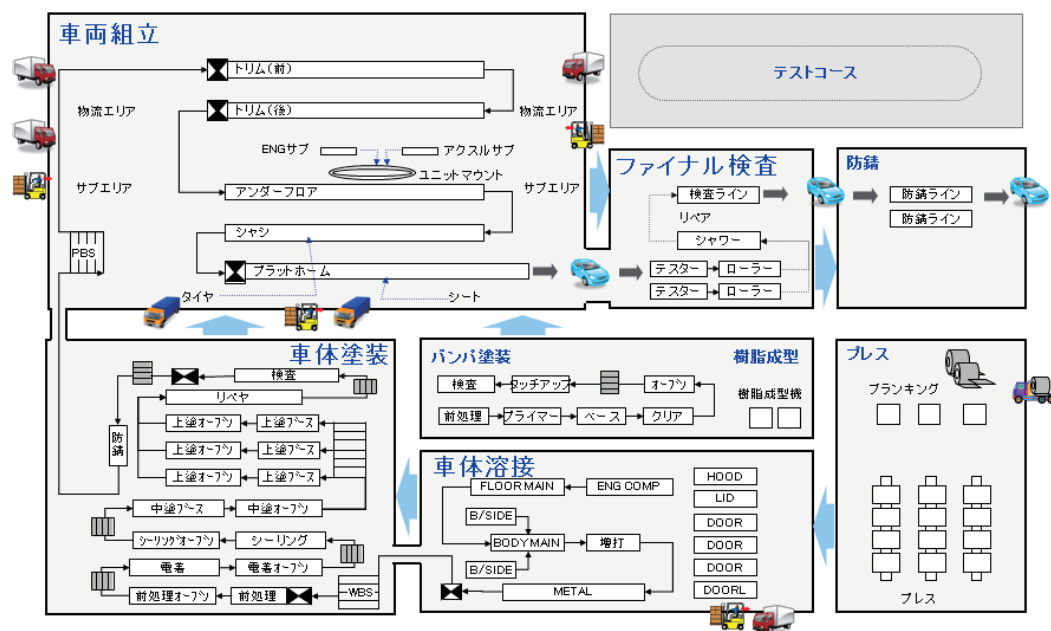
1 自動車産業における生産スケジューリング

(1) 自動車製造工程の概要

日本国内における4輪乗用車月産20,000台（生産タクトタイム³⁾1分:1本の車両組立ラインとして、ほぼ上限の生産規模）の量産工場を生産モデルとして例示する。製造工程はライン生産方式を採り、混流生産可能な1本のフレキシブルラインを持つ車体溶接工程、下塗り、中塗りライン1本と3本の上塗りラインから成る車体塗装工程、1本の組立ラインから成る車両組立工程より構成する。

生産は、車体溶接工程のENG COMP（Engine Compartment）と呼ばれるボディのエンジンルーム部位の接合工程から始まり、工程計画の順序どおりに着工する。車種の違いはNC ロケーター⁴⁾によって鋼板パネル部品の接合位置を制御し、それをロボットでスポット溶接⁵⁾することによって自動化を図っている。また、着工時点において、ボディに

RFID⁶⁾を取り付け、この RFID に該当ボディの生産計画情報と仕様情報などのボディの管理情報を記録する。これ以降、後工程の作業ステーションへの到着時点において RFID に記録されている情報を自動的に読み取り、その情報に基づいて溶接ロボットをはじめとする生産設備を自動制御し、省人化を実現している。



(筆者作成)

図 II.1.(1) 自動車製造工程の生産モデル

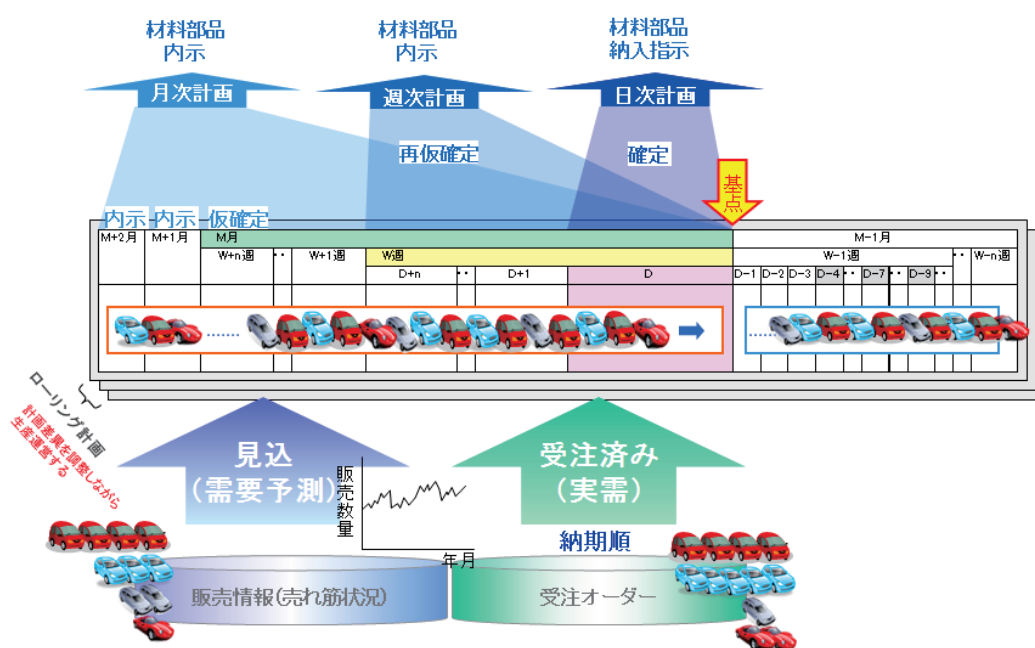
その後、完成した WHITE BODY (塗装していないボディ状態) は車体溶接工程から次の塗装工程へと自動搬送する。まず前処理ラインにおいてパネル部品の防錆油を洗い落とし、下塗りライン (電着)、中塗りラインを経て色別の上塗りラインへと搬送のうえ、スケジュール指示どおりの色に塗装され PAINTED BODY (塗装済みのボディ状態) となる。なお、近年の新鋭工場においては、省エネルギー目的により中塗り工程を廃して上塗り工程において中塗りと上塗りをする場合もある。また、塗装工程における塗装ロボットへの塗装色の指示などは RFID に記録されている情報を自動的に読み取り、人手を介さず設備を自動制御する。

さらに、塗装を終えた PAINTED BODY は塗装工程から次の車両組立工程へと自動搬送し、一旦 PBS (Painted Body Storage) へ収容する。PBS においては、塗装工程の品質不良とその手直し等によって生じた遅れを挽回したり、組立ラインのネック作業を緩和するための車種仕様の平準化のための生産順序の入れ替えを行う。これらは、工程管理システム (コンピュータシステム) によって制御し、その結果にしたがい組立ラインへ投入する。すなわち、生産の遅れを取り戻し当初の生産スケジュールリングで立案されたオリジナルの工程計画へ可能な限り復元させつつ、製造工程における実際の作業効率の最適化を図るための最終ともいべき生産スケジュールリング機能がここへ組み込まれている。そして、

投入順序にしたがって車両組立工程内の生産指示端末に作業指示を出力し、計画仕様どおりの生産を可能とする生産システムが構築されている（図Ⅱ.1.(1)）。

(2) 自動車の生産計画

自動車生産モデルの製造工程は見込生産方式が採られ、月次計画、週次計画、日次計画の手順で生産計画が立案される。まず、販売会社からのオーダー分と市場の需要予測に基づいて月次計画を立案する。この月次計画は、生産月の前月中旬に生産当月（M月）分、翌月（M+1月）分、翌々月（M+2月）分の3ヶ月分の車種仕様別計画台数として立案する。その中の当月分は日別車種仕様別計画台数まで立案する。また、当月分は仮確定計画として月間の総台数および車系（ex.アコード、フィットといった車種系統）、エンジン仕様（型式や排気量、ハイブリッド機構など）別の台数は確定され、週次計画や日次計画においても日別の生産計画台数が変更されることはない。しかし、LEDヘッドランプや自動ブレーキなどのオプション装備仕様については、週次計画または日次計画までに販売会社から受けたオーダーのうち、生産能力上対応可能なものは車種仕様を変更する。ただし、変更変動幅には制限を設けている。立案した月次計画は、必要とする材料部品に展開され、その所要量を材料部品の内示情報として部品メーカーへ情報伝達する。



(筆者作成)

図Ⅱ.1.(2) 自動車の確定生産計画までの流れ

週次計画は、週次計画期間初日のおおよそ1週間前、それまでに販売店から受けたオーダーのうち生産能力上対応可能なオプション仕様変更を反映して該当1週間分の日別車種仕様別計画台数を立案する。立案した週次計画も月次計画と同じように必要とする材料部

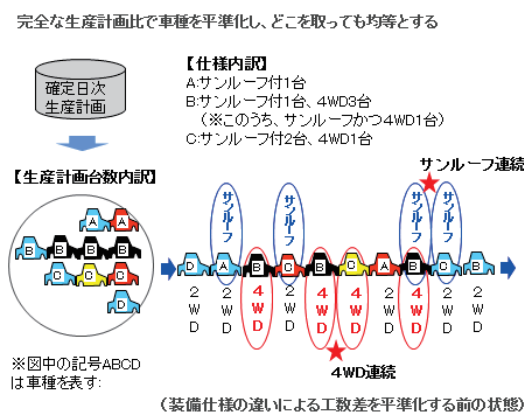
品に展開され、その所要量を材料部品の内示情報として部品メーカーへ情報伝達する。なお、週次計画に代って10日単位の旬次計画とする自動車メーカーも存在する。

日次計画は、通常完成予定日の稼働日3~6日前に、それまでに販売会社から受けたオーダーのうち生産能力上対応可能なものを反映して該当日分の日別車種仕様別計画台数を確定し、さらにそれを8バケット⁷⁾に分配する。立案した日次計画の各バケットは必要とする材料部品に展開され、その所要量と各バケットに対応する納入日時⁸⁾を材料部品の納入指示情報として部品メーカーへ情報伝達する。ただし、日次計画を立案せず、週次計画までとする自動車メーカーも存在する。また、実際の部品納入指示を電子かんばん⁹⁾により指示伝達する自動車メーカーも存在する(図II.1.(2))。

(3) 自動車の生産スケジューリング

自動車製造工程の生産スケジューリングは、生産計画にて確定した日別バケット別車種仕様別計画台数を与件とする。その生産モデルとする4輪乗用車生産工場の車両組立工程は労働集約型であり、たくさんの部品組み付け作業を複数の作業員で分業するため、車種仕様による作業工数差が問題となる。作業工程においては、車種が平準化して投入されることを前提として、生産計画における車種ごとの必要工数を平準化した工数分の人員しか編成配置していない。このため、多くの工数が必要な車種のとときには作業が遅れ、少ない工数の車種のとときに作業挽回することによって全体としての帳尻が合うことになる。したがって、ある作業員が分担する生産タクトを超える作業を必要とする車種が連続して投入されると、作業員は大幅な作業遅れとなって自分の作業域を越えて下流の作業員の作業を妨げ、生産ラインの停止に至り、生産性を低下させてしまう。このような状況に陥らないように平準化され金太郎飴のように均質な工程計画とすることが生産スケジューリングの最重要命題となっている。この生産スケジューリングは、いずれの自動車メーカーにおいてもコンピュータシステムによって処理している。例えば、「車種平準化」(図II.1.(3).a)に示した4車種(図中ABCD記号で示す製品型式別区分)、合計計画台数10台、その内4WD¹⁰⁾仕様4台、サンルーフ¹¹⁾仕様4台の生産スケジューリングの場合、まず日次計画または週次計画において確定した該当生産日の各バケットの車種の分布が一様となるよう車種別の生産計画台数比にしたがい、その出現確率に基づくタリー計算¹²⁾によって車種別の生産順序を決める手法により車種平準化を実現している。ただし、一部の自動車メーカーにおいては、平準化よりも品質を重視し、逆に同じ車種が連続することによって同じ作業が繰り返されるようにスケジューリングを行っている場合もある。

なお、この段階においては4WDなどの機能仕様やサンルーフなどのオプション装備仕様について、平準化が図られている訳ではない。「車種平準化」(図II.1.3.a)に示した生産スケジューリングの場合、4WD仕様とサンルーフ仕様ともに計画台数の割合が40%であり、両者とも連続しないことが期待される。しかし、その処理結果を見てみると4WD仕様とサンルーフ仕様ともに連続が発生してしまう。そして、これらの個別仕様の実際の生産における作業工数は大きく、十分な投入間隔台数が確保できない場合、作業遅れによる生産ラインの停止につながる。このため、これら作業工数負荷の大きい仕様については、一定の投入間隔となるように生産順序の入れ替えを行う必要がある。具体的には、それぞれの製品型式に設定された機能仕様やオプション装備仕様などの個別仕様について投入間隔台数を何台にすべきかをルールデータベース化し、割付けた生産順序の中にルールを満たせない箇所があれば、同一車種の中から条件を満たすことのできる他の計画を見つけ、それらを入れ替えることによって実現する。ただし、車種平準化を満たしつつ個別仕様の投入間隔台数をも満足することは、現実的に難しく、車種平準化の処理結果生じた4WD仕様の連続については、車種Bの生産順序を入れ替えることによって連続を回避することが可能となるものの、サンルーフ仕様の連続については、車種Bまたは車種Cの入れ替えを試みても連続を回避することができないか、サンルーフ仕様の連続を回避できても代わりに4WD仕様の連続が生じてしまう(図II.1.3.a)。

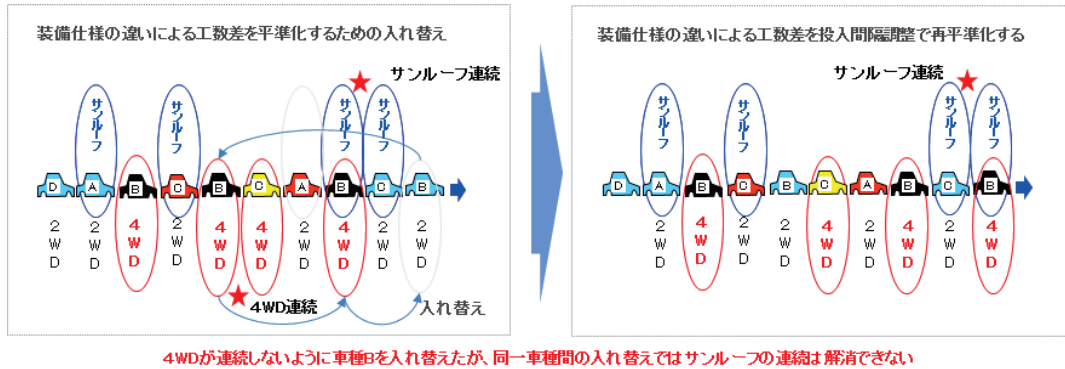


(筆者作成)

図II.1.3.a 車種平準化

ここまで、簡便化のために4WD仕様とサンルーフ仕様の2つの個別仕様に絞って投入間隔調整について見てきた。しかし、実際の生産においては自動ブレーキシステム¹³⁾やサイドエアバッグ¹⁴⁾などといった、さらに多くの仕様について投入間隔調整が必要となる。装備しない自動車と比較して多くの作業工数を必要とするこれら個別仕様装着車は、その生産計画台数比に見合う投入間隔(例えば、生産比率が20%であれば投入間隔4台以上)が期待されるものの、他の個別仕様の投入間隔台数条件を損なうことなく、かつ車種別生産比率も維持した状態において、期待どおりの投入間隔台数を実現することはさらに困難となり、不可能であると言わざるを得ない。また、「投入間隔調整」(図II.1.3.b)に例示の4WD仕様とサンルーフ仕様のように複数の仕様を同時に持つ場合、その間隔調整関係は複雑となり困難の度合いがさらに増してしまう。すなわち、投入間隔調整を必要とする対象の個別仕様を増やすことによって、その網羅性を高めれば高めるほど投入間隔調整結果の満足度の低下を招き、結果的には投入間隔台数条件を満たせず妥協せねばならない状

況が頻繁に発生することとなる。



(筆者作成)

図 II.1.(3).b 投入間隔調整

最後は、同じ仕様のもを連続させた方が効率のよいものを入れ替えて、なるべく連続するように組み替えを行う。例えば車体塗装工程の上塗りラインのように、異なる色を塗る場合に塗料を切替えるだけでなく塗装装置の洗浄が必要となったり、赤や黒といった濃い色の後で白のような淡い色を塗装する場合など、混色しないように1台分の空席が必要となる場合がある。これらのロスを低減するためには、なるべく同じ色を連続させて色替え回数を少なくすることが求められる。具体的には、設備的に限定された塗装可能な塗装色にしたがって上塗りラインごとに分類し、塗装色の不連続な部分は同一塗装色が連続するように順序を入れ替えたうえで、各上塗りラインの計画をマージ（併合）して一本のスケジュールとして纏め直し、このマージ後計画を車体溶接工程の着工計画としている（図 II.1.(3).c）。そして、車体溶接工程がその生産順序で生産着工することにより、各上塗りラインには塗装色のまとまった順序でボディが供給される。

なお、近年の新鋭工場においては、塗装ロボット導入などの自動化が進み、脱着式塗装スプレーおよび塗料カートリッジをワンタッチで交換可能な塗装装置とすることにより塗装スプレーや塗料配管などの塗装装置の洗浄が不要となり、1台ごとに色替え可能な設備となっている。このため、塗装色の連続まとめは必須ではなくなりつつある。

生産スケジューリング最後の仕上げは、1台毎の各工程の着工と完成日時（分単位）の設定である。各工程は、下流工程が求める生産順序どおりに一個流しで生産することが求められるため、最終製品工程の生産順序

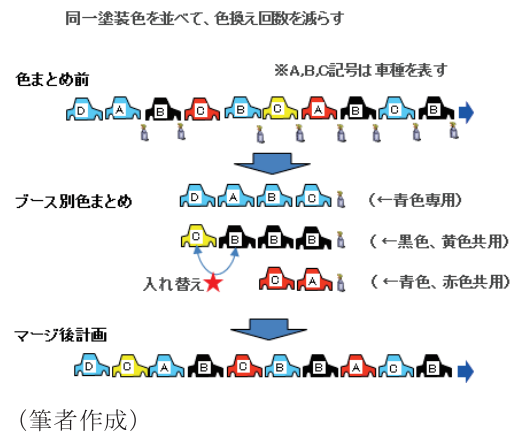
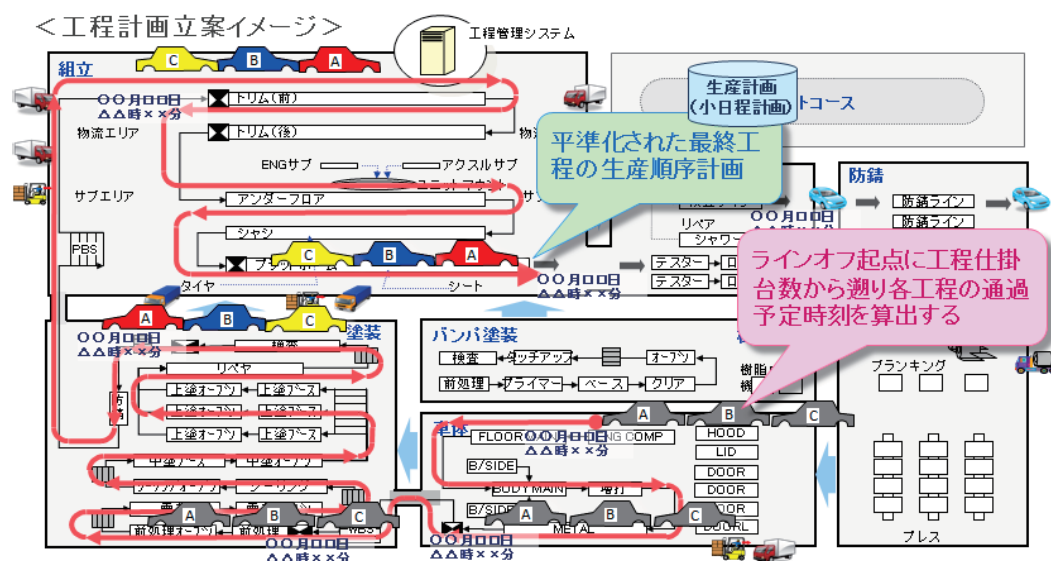


図 II.1.(3).c 塗装色による連続まとめ

と完成日時を担保する順番で、途中工程の標準仕掛¹⁵⁾台数分のリードタイム（先行時間）をもって生産着工または完成するように製造工程を遡る方向で工程ごとにスケジューリングする必要がある。工程に複数のラインが存在し、複数ラインへの分岐や複数ラインからの合流がある場合、それぞれのラインの生産比率とタクトタイムにしたがった標準仕掛台数分のリードタイム（先行時間）によりスケジューリングする（図Ⅱ.1.(3).d）。なお、自動車メーカーによっては、生産順序計画を生産の源流工程の着工計画として与え、そこから製造工程を下る方向で1台毎の各工程の着工と完成日時を算出し、設定する方式をとる場合がある。この場合、途中の工程において分岐または合流がある場合、当初の目論みどおりの順番で最終完成とならない可能性がある。



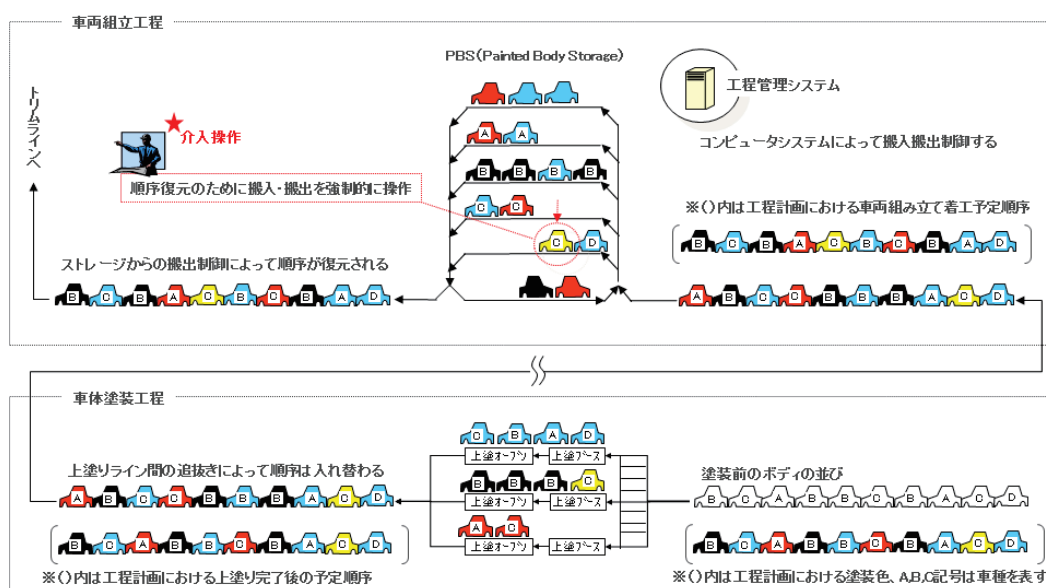
(筆者作成)

図Ⅱ.1.(3).d 着工／完成日時計画の考え方

最終的に、確定した工程計画は工程管理のためのコンピュータシステムへ渡され、生産初工程に対して計画された生産順序にしたがって着工指示される。また生産着工後、各生産工程の通過タイミングにより着工および完成実績日時を把握し、工程計画の着工または完成予定日時との乖離を把握することによって、車両の生産進捗管理を可能としている。

このように緻密な工程計画を立案してもなお、実際の生産活動においては定常的に例外事象が発生する。例えば、塗装工程の上塗りラインは、それぞれ独立した上塗りブース¹⁶⁾とオープン¹⁷⁾より構成される。このため、上塗りに到着したボディは該当塗装色のラインへと自動搬送され、それぞれが独立した非同期の設備で塗装することにより追越しが発生し、上塗りラインへ入る順序と出てくる順序は保証されない。その結果、工程計画に対し並び順が乱れてしまった上塗り塗装後のボディは、塗装工程と車両組立工程との間に存在する PBS (Painted Body Storage) へ一旦収容され、工程管理システム (コンピュータシステム) によって搬入・搬出制御することにより、可能な限りオリジナルの工程計画の並

び順に復元する機構と、乱れた並び順に対する個別仕様の平準化のための投入間隔調整機能が準備されている。この PBS は複数のレーンで構成され、車種仕様別に割り付けられたレーンに収容する。しかし、復元するうえで不都合な並び順の場合はオペレータが介入し、割り付け指定以外のレーンへ強制的に搬入操作したり、搬出順序を妨げるボディを回送操作したり、投入間隔調整の禁止則を無視して強制搬出したり、工程管理システムへ指示する必要がある。結局のところ人間の意思決定（遅れているボディを待つべきか否か、どのレーンに対して搬入または搬出すべきかなど空間移動するボディとその時間見込みを立て、調整を図る）抜きでは、生産オペレーションは成り立たない（図 II.1.(3).e）。



(筆者作成)

図 II.1.(3).e 上塗りラインの順序入れ替わりと PBS における順序の復元操作

また、この PBS は車両組立ラインにおいて組立作業に必要な部品の未納など、生産できない事象が発生した場合の対象ボディの一時保留場所としての機能も果たすものとなっている。その場合、どのボディを保留対象とし留め置くか、または保留解除するかという操作はオペレータに委ねられ、最終的には人間の意思決定に依存しなければならない。

(4) 自動車における生産スケジューリングの課題

自動車は、基本的には見込生産であるから生産計画時に日別製品別の生産数量とともに必要な材料部品が手配され、生産時点には必要なすべての資源が揃うようにオペレーションされている。そして、作業工程は効率化（人員ロスをなくす）のために基本的に期間の総生産台数の所要工数を平均化した作業人員のみを配しており、車種および仕様が平準化されてライン投入されることを前提としている。したがって、生産スケジューリングは生産を効率的に実行することのできる生産順序の立案を核機能とし、それを実現するための

タイムスケジュールとして各生産工程の着手および完成日時計画の立案が工程計画の主目的となる。

この核となる生産順序を決めるうえで重要な車種平準化については、車種の分布が一樣となるよう車種別の生産計画台数比と、その出現確率に基づく数学的解法によって平準化された車種別の生産順序を容易に求めることができている。しかしながら、4WDなどの機能仕様やサンルーフなどのオプション装備仕様については、これら個別仕様の生産計画に占める台数比に見合う投入間隔（例えば、生産比率が20%であれば投入間隔4台以上）が期待されるものの、他の個別仕様の投入間隔台数条件を損なうことなく、かつ車種別生産比率も維持し、期待どおりの投入間隔台数を実現することは極めて困難な作業となる。それは、個別仕様が複数の車種に共通する条件である場合、車種平準化によって車種仕様別の生産順序が確定しており、その順序に制約されて期待される投入間隔台数の位置に割り付けることが不可能であること。1台で4WDやサンルーフなどの複数の個別仕様を持つものは、単一の個別仕様に比べて割り付けされにくく、また割り付けた場合は複数の条件の割り付けを規制してしまうなど二律背反に陥り、そもそも成り立たない結果を求めてしまうことに起因する。

さらに、平準化のレベルを高めるために投入間隔調整対象の個別仕様を増やし、例えば「投入間隔調整」(図II.1.(3).b)に例示した4WDとサンルーフの投入間隔条件のように、その網羅性を高めれば高めるほど投入間隔調整結果の満足度の低下を招き、結果的には投入間隔台数条件を満たせず妥協せねばならない状況が頻繁に発生することとなる。その場合、条件を満たせない（条件未満の投入間隔）まま放置し進むか、人の意思決定を仰ぐかの対応が必要となる。車体塗装と車両組立間のPBSがその関所として、最後の人の意思決定介入のポイントとして必要とされている。

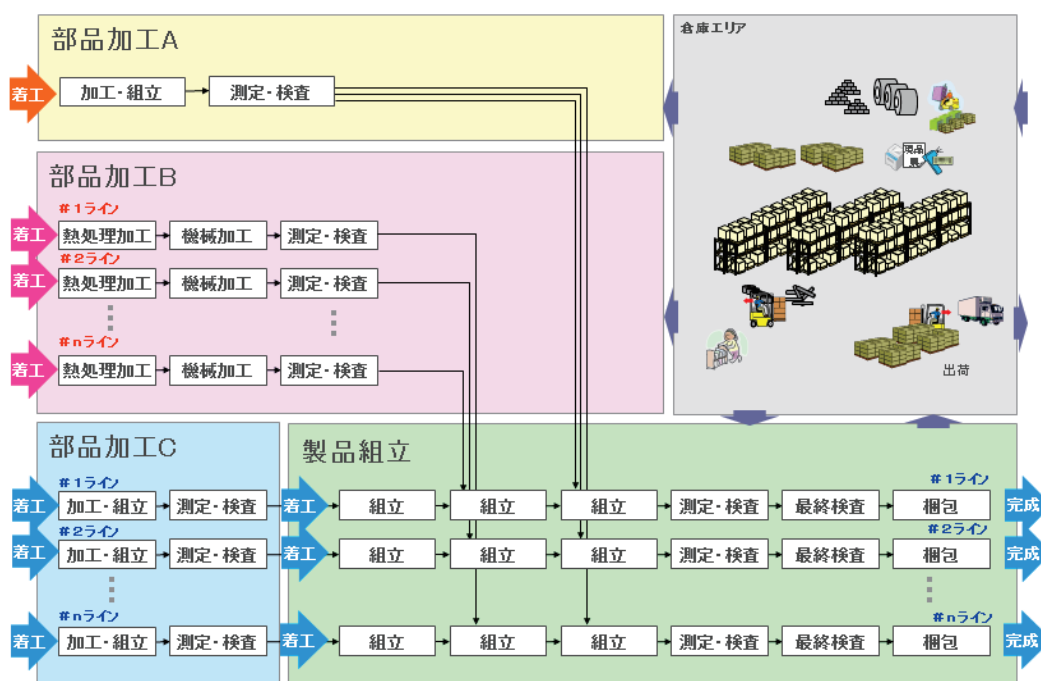
また、実際の生産においては、塗装工程の上塗りラインのように工程内の分岐と合流によって工程計画の生産順序に対して並び順が乱れる事象が発生してしまう。この問題についても、車体塗装と車両組立間のPBSが乱れた並び順に対し、人が意思決定介入しながらオリジナルの工程計画の並び順に復元したり、個別仕様の平準化のための投入間隔調整機能を持たせ車両組立工程の工程計画を組み替える再スケジューリング機能を果たすように生産システムとして組み込まれている。

このように、最終的には担当者による状況判断とその意思決定に基づく操作オペレーションによって実現されており、人の介在なしに生産実行することは現実的には難しい状況にある。この問題解決には、平準化レベル向上のための網羅性を高めつつ、人の介在をいかに減らすことができるか。また、人による意思決定をいかにうまく生産に係る情報システムと連携、協調させるか。そして、解決しえない平準化レベルの問題が存在する場合は、それを受容するための納得性のある工程計画と、その背景としての車種仕様別台数比率などの生産情報の提供が自動車における生産スケジューリングの課題であると考えられる。

2 電機産業における生産スケジューリング

(1) 電気機械生産工程の概要

電動機などの電気機械器具製品を生産するライン生産方式の製造工程を生産モデルとして例示する（図Ⅱ.2.(1)）。この製造工程は、製品の最終組立を行う製品組立工程と必要な内製部品を生産する複数の部品加工工程から構成される。生産は、各製造オーダー指図数量単位にロットで処理される。



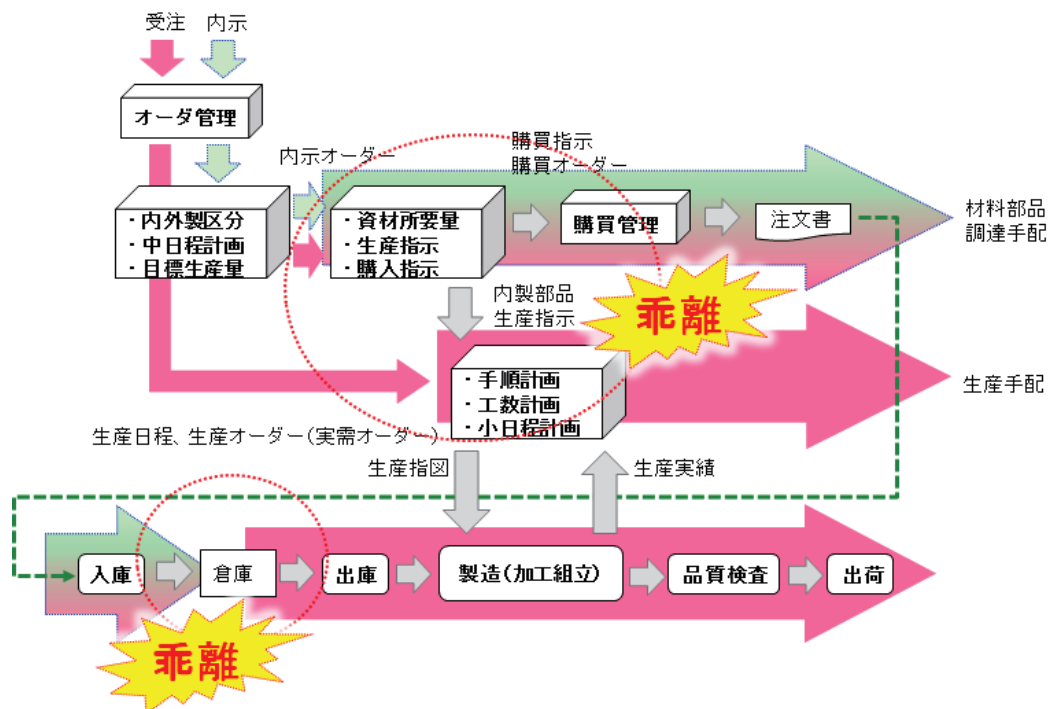
(筆者作成)

図Ⅱ.2.(1) 電気機械製造工程の生産モデル

製品組立工程は n (複数) ライン存在し、各ラインは製品の種類によって生産分担が決まっているものの、それぞれの製品は生産量の変動に対応して複数のラインで生産可能となっている。部品加工 A 工程は、一つのラインですべての製品組立工程に必要な部品を製品組立工程に非同期かつ先行して生産し、供給する。部品加工 B 工程は、製品組立工程と同じ本数のラインにより構成される。ただし、製品部品の荷姿数量の違いにより製品組立工程とは生産数量が異なるため、製品組立工程に非同期かつ先行して生産し、供給する。部品加工 C 工程は、製品組立工程と同じ本数の n ラインより構成される。生産リードタイムが短いことと、製品部品の荷姿数量を製品組立工程に合わせて生産することができるため、製品組立工程に同期して生産する。

(2) 電気機械の生産計画

この生産モデルの製造工程は受注組立方式が採られ、調達に時間がかかる材料・部品は、顧客からの内示オーダーや需要予測にしたがって計画し、事後的に受注した確定オーダーとの乖離調整をしながら調達される（図Ⅱ.2.(2)）。したがって、確定前に調達手配した材料部品について、確定後に生産手配された生産オーダーが生産指図されて製造工程において着工するまでに乖離分の調整手配を行い、材料部品の必要量を揃えなければならない。逆の捉え方をすると、乖離分の調整手配により必要量が揃った分だけが着工できる。

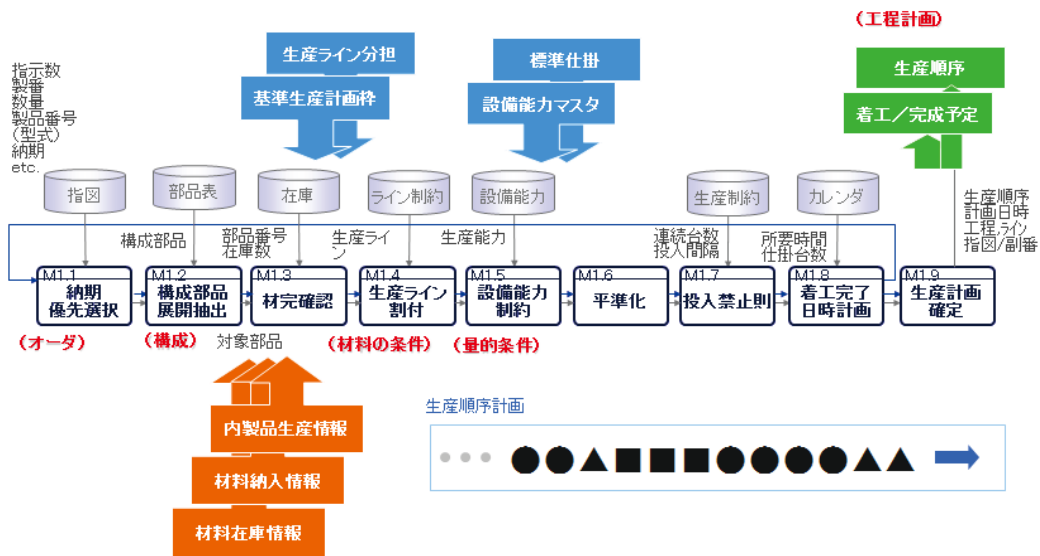


(筆者作成)

図Ⅱ.2.(2) 材料部品と確定生産計画との乖離

(3) 電気機械の生産スケジューリング

製品組立工程の生産スケジューリングは、これまでに示した電気機械の製造工程と生産計画を与件として、概ね次のような手順で実行される。この手順（フロー図）は、情報通信技術を活用、試行するために2012年に人手による生産スケジューリングを再現した¹⁸⁾ものである。計画期間（1日～1週間）単位に行い、製品完成する各ラインの最終製造工程から開始し、各ラインの着工工程まで溯りながらその期間の対象製造オーダー全数について処理を行うバックワードスケジューリング（backward scheduling）方式により実行している（図Ⅱ.2.(3).a）。



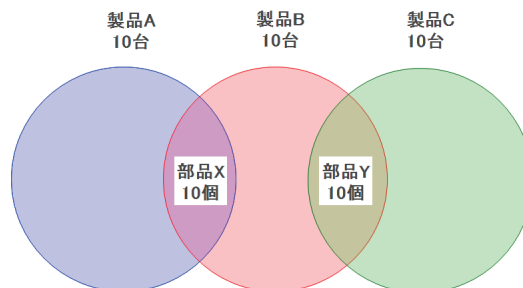
(筆者作成)

図 II.2.(3).a 電気機械製造工程の生産スケジューリング

まず、最初に「納期優先選択」を実行する。最終製造工程から処理を開始し、納期優先順に従い完成させる順序を決めて抽出する。最終工程以外の工程は先行して処理した1つ後工程の着工予定日時を前工程の完成予定日時と見なし、抽出する(図中の処理 M1.1)。抽出した製造オーダーは、部品表にしたがってその製品を構成する内製部品を含む部品に展開する(M1.2)。展開した部品がすべて揃っているか材完確認(材料準備完了の意味)し、着工可能であることを確認する(M1.3)。次に、該当製品が生産可能なラインの条件を規定したライン制約条件を基に実際に生産可能なライン見つけ出し、割り付ける(M1.4)。そして、該当工程ラインの設備能力制約を確認し、生産能力を超えていないことを確認する(M1.5)。さらに、製品仕様毎に平準化されていることを確認する(M1.6)。また、生産制約条件に基づいて製品の連続生産禁止や逆に連続生産条件の確認を行う(M1.7)。これまでの条件を満たした製造オーダーについて該当製造工程の生産taktと製造数量により所要時間(工程内の滞留時間)を求め、所要時間分先行する形で該当工程の着工予定日時を算出する(M1.8)。これらの処理により条件を満たしたものについては、それを工程計画として記録する。ここまでの条件を満たせなかった場合は、処理対象を次の候補となる製造オーダーとし、条件を満たすものを探索し続け、処理を繰り返す(M1.9)。

この生産スケジューリングにおいて、一番重要なポイントは材完確認である。実際の人手によるオペレーションにおいても最も苦勞している部分でもある。内示オーダーや需要予測にしたがって計画し材料調達手配した後、オーダー受注し確定した計画との乖離調整分を含めた材料部品が納入された結果、どの製造オーダーが材料準備完了となり生産可能となるかの判断とその意思決定が難しいことがその理由にある。

電動機のような電気機械は、おおよそ 200～300 点の部品から構成される。材料の準備完了確認のためには、それぞれの製造オーダーの製品を構成する材料部品に展開し、材料部品の在庫数量から必要な材料部品数量分を引当てる必要がある。これを単純化し示す。今、製品 A、製品 B、製品 C の 10 台ずつ 3 件の製造オーダーがあり、それぞれの間に共通して使用する部品 X、部品 Y の在庫がそれぞれ 10 個あるとき、製品 B に部品を引当て生産意思決定した場合、この 10 台しか生産できない。しかし、製品 B を生産せずに製品 A と製品 C を生産意思決定した場合は、合計 20 台の製品が生産可能となる (図 II.2.(3).b)。



(筆者作成)

図 II.2.(3).b 材完確認と部品引当概念

一見簡単そうな理論的単純な処理も、実際にはたくさんの製品数と構成部品点数による構成の組み合わせは複雑となり、単純に解を導き出すことはかなりのコスト (時間) をと

表 II.2.(3).c 材料部品引当可否リスト

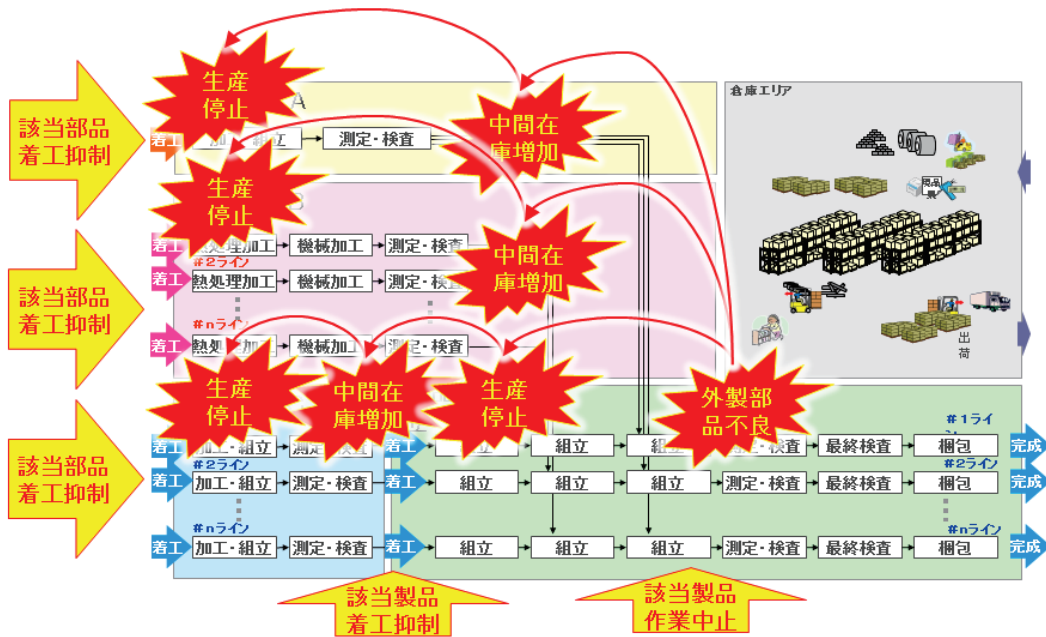
連番	指図番号	部品A	部品B	部品C	部品D	在庫		
		132	86	156	30	88	65	
		GO	GO	GO	NOGO	GO	GO	
1	●●●●	GO	5	3	10	10	8	5
2	□□□□	GO	10	3	10	10	8	5
3	▲▲▲▲	GO	10	6	15	10	8	5
4	○○○○	NOGO	5	3	15	-10	8	5
n	■ ■ ■ ■	GO	5	6	5	0	4	5

(筆者作成)

引当不可の場合は不足数量 (構成数量) を表示した (表 II.2.(3).c)。

このように生産スケジューリングによって様々な生産条件を確認し、緻密な工程計画を立案してもなお、実際の生産活動においては例外事象が発生する。例えば、製品組立工程において外製部品の不良が発生した場合、当然ながら製品組立工程における該当部品を使用する製品の生産は途中で中止され、保留される。そして、該当部品を使用するすべての製品について製品組立工程における新たな着工が抑制され、該当部品を使用しない他の製品を着工することとなる。上流の部品加工 A 工程～C 工程は、すでに生産保留となった製品で使用する内製部品の生産を終えており、工程間の中間在庫の増加となって在庫場所を占有してしまう。その結果、部品加工 A 工程～C 工程では、それ以上該当内製部品を生産することができないため、その生産を抑制しなければならなくなり、代わりに他の内製部

品を生産しなければならなくなる。このようにして、製品組立工程の外製部品不良という例外事象の影響が工程全体へ波及してしまい、生産活動が混乱してしまう(図Ⅱ.2.(3).d)。この生産モデルとして示した工程においては、これらの例外事象を把握し調整するようなしくみが構築されていなければ、その対応調整は、製造現場の生産統制担当者の情報収集と調整能力といった経験に頼ることとなる。



(筆者作成)

図Ⅱ.2.(3).d 例外事象と工程内への波及

(4) 電気機械における生産スケジューリングの課題

受注組立方式を採る電機は、フォーキャスト（先行オーダーまたは顧客生産計画）を基に材料部品をあらかじめ調達・貯蔵し、正式に受注した時点で生産指図する。フォーキャストは内示情報であって確定情報ではないため、材料部品の調達と受注との間に乖離が生じ、その差分の材料部品を手当・準備したうえで生産着手する必要がある。したがって、電機における生産スケジューリングは生産しようとする製品の材料部品が調達され、すべて揃っていることがそのポイントとなる。

しかし、必ずしも生産計画に従って材料部品を調達・準備し、生産時点における材料部品が担保できているわけではない。正式に受注した時点の生産指図においても、必要となる材料部品を事前に標準設定された調達リードタイム（調達所要日数）で調達できるものとしてフォーキャストとの乖離調整分の材料部品の納入日が決められ納入指示される。そして、その納入日から製品の生産日が決められる。ただし、この納入指示日は確約されたものではないため、納入指示日までに材料部品を調達できない場合もある。内製部品につ

いても、同様の理由により必要とする期日までに生産を完了し、在庫として貯蔵しておくことができない場合が発生する。このため、生産統制の担当者によって必要な材料部品など、生産資源の準備が整っているか確認し、生産着工可能か判断のうえ生産意思決定する必要がある。この一連の生産管理オペレーションは、定型化が困難であり、人の介在なしに生産実行することは現実的には難しい。

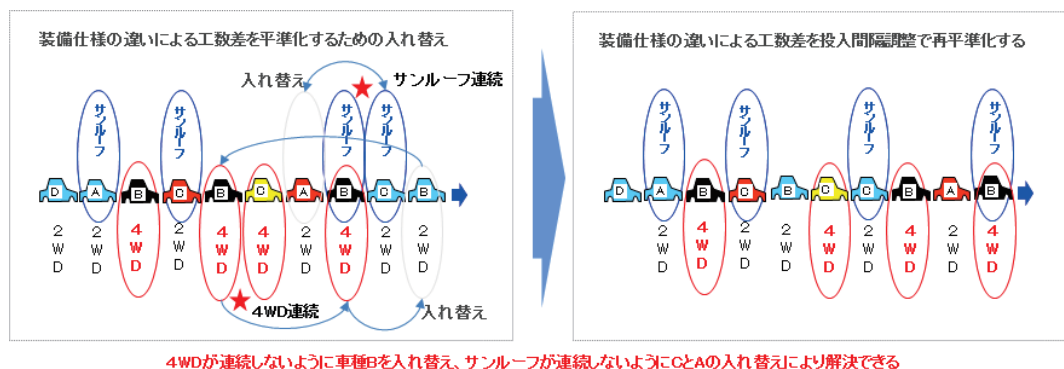
このように、電機の実業オペレーションは材料部品の調達や内製部品の準備など、不確定要素を抱えたまま生産手配されるため、製造部門に生産資源の準備確認と生産意思決定が任せられ、成り行き的な生産にならざるを得ない面もある。ここに、電機における生産意思決定と生産スケジューリングの難しさがある。この問題解決には、生産資源の準備状況確認のために、例えば製品を構成するすべての材料部品の納入状況や在庫状況、内製部品の完成状況や在庫状況について正確かつ漏れなく把握することによって情報収集の網羅性を高め、人による意思決定を迅速に行い、これをいかにうまく生産に係る情報システムと連携、反映させるか。そして、生産スケジューリング結果の情報提供にあたっては、その情報から受容可能な工程計画案として選択するための納得性と、その背景にある生産情報の提供が電機における生産スケジューリングの課題であると考えられる。

3 生産意思決定としての生産スケジューリングの限界

自動車および電機における実際の生産スケジューリングとそれに関連する生産オペレーションに共通する点は、生産着手に至る最終的な生産意思決定における人の介在の必要性であった。自動車では、生産順序を決めるうえでの車種平準化が重要な要因であり、計画段階で網羅できなかった条件について、最終的に車両組立工程への投入順序を決める再スケジューリング過程において、担当者（人の介在）による状況判断と意思決定が必要となる。電機では、生産着手可否判断が重要な要因であり、生産着手時点における材料部品をはじめとする生産資源の準備状況を確認し、生産意思決定するために人の介在が必要であった。これらの状況から、自動車、電機のいずれの生産においても人による状況判断と意思決定が必要であり、生産意思決定としての生産スケジューリングを人の介在なしに実現することは困難であることが分かる。

まず自動車においては、生産スケジューリングの要である生産順序を決めるうえで、その平準化のレベルを高めるために投入間隔調整対象条件としての個別仕様を増やし、その網羅性を高めれば高めるほど投入間隔調整結果の満足度の低下を招き、結果的には投入間隔台数条件を満たせず妥協せねばならない状況が生じていた。このため、生産スケジューリングの処理結果としての工程計画は、条件を満たせない（条件未満の投入間隔）状況を包含したものとなっていた。この問題は、最終的には車体塗装と車両組立間の PBS（Painted Body Storage）が関所となり、車両組立工程への投入直前の生産順序再スケジューリングタイミングにおいて、人による意思決定介入の下、生産順序操作オペレーションによって現実解を選択し生産順序を補正している。例えば、「II.1.(3) 自動車の生産スケジューリン

グ」における「投入間隔調整」(図 II.1.(3).b) では、平準化した車種の配列のままでは、すべての投入間隔を満足することができず、サンルーフ仕様の連続が残ったままとなっていた。これを PBS (Painted Body Storage) に搬送されてきた時点で、人による意思決定によって現実解として車種の入替えを行いサンルーフの連続を回避している。これは人間には調整する能力があり、関連部署や関連者との連携調整によって最適解とならずとも、納得解というものを見出すことができるからである (図 II.3)。



(筆者作成)

図 II.3 車種の入替えによる投入間隔調整問題の解決

しかし、これを人の介在なしに生産実行することは現実的には難しい。この問題解決にあたっては、人の介在を減らしつつ、平準化レベル向上のための網羅性を高め、なおかつ生産スケジューリング結果として納得性のある工程計画と、その背景としての生産情報の提供をいかにして両立させるかが自動車における生産スケジューリングの課題となる。

一方電機の場合、生産オペレーションには材料部品の調達や内製部品の準備など、不確実要素が存在し、不確実な状況下において生産意思決定しなければならない。そのためには、材料部品や内製部品などの生産資源の準備状況確認に必要となる情報収集の網羅性を高め、確定的となった瞬間において情報を峻別し、選択可能な選択肢をいち早く見つけ出すことのできる生産スケジューリング方法と、また生産スケジューリング結果から人による生産意思決定が迅速にできる、また受容可能な計画案を選択できる納得性のある工程計画と、その背景にある生産情報の提供が必要であり、電機における生産スケジューリングの課題となっている。

これまで見てきた自動車や電機は、一般に製造現場への情報通信技術の導入が進んでおり、高度な生産技術および生産管理技術も保有している。また、生産に至るまでの手配業務は標準化され、製造工程における標準作業¹⁹⁾および、その標準時間²⁰⁾も規定し、整備されている。生産計画によって生産数量と日限さえ決まれば、これらを活用し、すぐにでも精度の高い工程計画を得られはすである。しかし、その自動車や電機でさえも、事例に示すような生産意思決定における人の介在なしには、生産スケジューリングを実現することのできない事実がある。

ましてや、自動車や電機のような大企業に比べて生産技術や生産管理技術が相対的に劣る中小企業においては、作業標準および標準時間が十分に整備できておらず、生産スケジューリングは、ほぼ人に頼らざるを得ない状況にある。最近行った個別受注に基づき電機製品を加工する中小企業へのインタビュー調査においても、最終的な生産スケジューリング業務を人手による製造工程の臨機応変的な対応に委ねている状況を確認することができた。この企業の場合、個別受注生産のために個々の受注オーダーの要求仕様、生産条件が毎回異なり、生産スケジューリングに必要な条件をあらかじめ準備、設定することが困難な状況にあった。このため、それは生産の都度これら生産条件を確認し、過去の経験値に基づき生産現場の状況に合わせて臨機応変的に処理せざるを得ないものであった。

Ⅲ. 生産スケジューリングの研究状況

諸理論、研究事例を通じて経営工学視点から生産スケジューリングの今日的課題を探る。

1 生産スケジューリングの目的

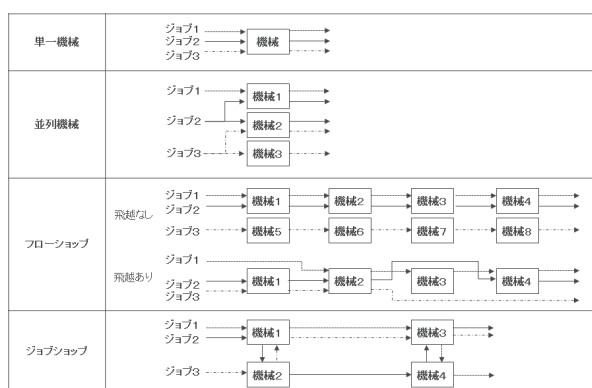
前章において、主として流通在庫販売を含む見込生産方式を採る自動車と、企業間取引により主として受注加工組立、受注仕様組立または受注組立などの受注生産方式を採る電機における生産スケジューリングを比較しながら実際の処理過程を見てきた。そこで見た生産スケジューリングの目的は、確定した生産計画を実行に移す段階において生産組織が保有する人材や設備などの資源を効率良く利用し、顧客または後工程が求める納期を遵守して生産できるように実現可能な工程計画を立案することにあつた。そして、立案された工程計画は、各生産工程が生産意思決定するときの判断基準となるものであり、生産着手のタイミングや生産順序は生産の効率性や納期遵守にも大きく影響する。

これら生産スケジューリングの目的を黒田は「製品の製造に必要な一連の作業を実施するうえで欠かせない主要生産資源の使用日程や使用順序を計画したり、決定することである」[黒田他、2002：7-8]と述べている。

2 生産スケジューリングの分類

生産スケジューリングを実行するうえで最も大きな影響を与えるものは、生産環境としての生産対象物や設備、工程手順などの生産工程の構成条件である。例えば、対象工程が単一機械で構成されているか、複数機械で構成されているかによってスケジューリング方法が異なってくる。具体的には実行すべき複数のジョブ（目的の製品を加工するために必要な仕事）があるとき、それを1台の機械で加工する場合は1台の機械で納期を守って効率的な順序で生産することだけを考慮すればよい。しかし、複数の機械がある場合は、その仕事に必要な加工能力を保有する機械はどれか、該当機械は利用可能か、使用状況や効率的な順序と納期を考慮して割当配分する必要がある。前者を「単一機械スケジューリング」、後者を「並列機械スケジューリング」という。

また、生産工程に機能の異なる複数の機械があり、実行すべきジョブが複数の加工作業



出所) 黒田充、村松健児(2002)『経営科学のニューフロンティア 11 生産スケジューリング』に筆者加筆

図Ⅲ.2 生産スケジューリングの分類

からなる場合、それぞれのジョブをどのように機械に割当てるかによってもスケジューリング方法は異なってくる。具体的には、複数の加工作業から成るジョブごとに加工作業順序に対する機械の割当が固定的に決まっている場合、機械はジョブの系統別に配置される。この場合、効率的な順序と納期のみを考慮して加工順序が決定される。一方、各ジョブが必要とする加工作業に対する機械割当が決まっていない場合、加工作業順に加工条件を満たす機械の中から使用可能な機械を動的に選択し、効率的な順序と納期を考慮して割当配分することになる。前者を「フローショップスケジューリング」、後者を「ジョブショップスケジューリング」という（図Ⅲ.2）。

そのほかに、加工対象に対する生産資源の条件がすべて与えられているか否かによる静的問題または動的問題としての区分や、条件データの取り扱い方によって確率論的スケジューリングやボトルネックに着目した TOC スケジューリングなどがある。

3 生産スケジューリングの方法

解法として採られる生産スケジューリング方法を分類し、その特徴を「表Ⅲ.3 生産スケジューリングの方法」に整理する〔黒田他、2002：19-34〕。

まず、最初に生産スケジューリング問題の伝統的解法として、OR (Operations Research) 的アプローチが挙げられる。OR は軍事的関心の研究から生まれたもので、数学的・統計的モデルとアルゴリズムの利用によって、さまざまな問題に対して効率的解法を決定する科学的技法である。その一般的な特徴は、スケジューリング問題をその目的関数と制約式（定式化した制約条件）、評価関数を用いて解を求めるものである。

OR 的アプローチには、生産に用いる設備とその能力やジョブ（作業）数などの生産条件によって問題を構成し、解を求めるためのアルゴリズムを定めて最適解を導き出す構成的アルゴリズムという手法がある。しかし、設備やジョブ数などの生産条件の増加とともにスケジューリングにかかる計算処理時間の増加に難点があり、問題の構造によっては処理時間が指数的に増加する場合がある。

計算処理時間の増大を抑制するために最適解を得る前に処理を打ち切り、近似解を求めることによって問題解決を図る手法として分岐限定法やラグランジュ緩和法などの数理計画法がある。分岐限定法は1つのスケジューリング問題を複数の子問題へと展開し、それをさらに子問題へと展開する過程で定められた条件のもとに処理を打ち切り、子問題の探

表Ⅲ.3 生産スケジューリングの方法

手法区分	技法分類	技法
OR的手法	構成的アルゴリズム	ジョンソンのアルゴリズム
		分岐限定法
	数理計画法	ダイナミック・プログラミング
		ラグランジュ緩和法
		メタヒューリスティクス
	発見的方法	遺伝的アルゴリズム
		シミュレーテッド・アニーリング
		タブーサーチ
		拡張ジョンソンアルゴリズム
	シミュレーション	サイクリック・スケジューリング
ボトルネック・スケジューリング		
フォワード・シミュレーション		
バックワード・シミュレーション		
上記の両方を併用する方法		
AI的アプローチ	複合規則の利用	
	優先規則の動的選択	
	制約誘導推論	
	ルールベースシステム	
	事例ベース推論	

出所) 黒田充、村松健児(2002)『経営科学のニューフロンティア 11 生産スケジューリング』19-34.に筆者加筆

索過程において、それまでに求めた最良スケジュールを近似解とするものである。ラグランジュ緩和法は、スケジューリング問題を目的関数と制約条件で表し、ラグランジュ乗数に基づいてラグランジュ関数を作り、ラグランジュ乗数を定数と見なしてジョブごとに最小化問題を定義し、それぞれの最適解を求める。

しかし、構成的アルゴリズムや数理計画法などの数理的解決手法は、網羅的な解の探索のため、その解法を数式によってモデル化するものであるから、考慮すべき生産条件が多くなる場合はその数式が複雑となり、その条件をすべて網羅することは困難となる。その解決方法として採られるのが、非網羅的または確率的な解の探索方法としての生物の進化過程をシミュレートして近似的な最適解を求める方法としての遺伝的アルゴリズムなどのメタヒューリスティクス手法がある。

他方、OR 的アプローチに対して、人間が持つ特定の問題領域の知識を活用してスケジュールを作成する AI (Artificial Intelligence) 的アプローチとしてルールベース・システムや事例ベース推論がある。このうち、ルールベース・システムは意思決定に関する専門家の知識を形式化してスケジューリングに利用するものである。事例ベース推論はルールベース・システムの知識獲得が難しいという難点を回避するために、解決処理しようとする問題と専門家が作成したスケジュール（解決した問題）との間の関係性を利用してスケジューリングを行うものである。

これら生産スケジューリング方法の実例として「II.1.3) 自動車の生産スケジューリング」において取り上げた自動車に当てはめて見た場合、OR 的手法の中の数理計画法のタリー計算によって平準化後、AI 的アプローチのルールベース・システムによって投入間隔を制御し、OR 的手法のシミュレーションによって各生産工程の着工・完成日時を求めるなど、それぞれの局面においては部分的解決が図られるものの満足解を得るに至らず、複数の手法を適用して総合的な問題解決を試みていることがそこから見えてくる。それでも、実際には満足解が得られず、人の介入とその意思決定によって最終的な解決が図られている。それは、個々の生産スケジューリング手法、技法の限界を示すものであり、総合的に解決するための新しいアプローチ方法の必要性を示すものであると考える。

4 生産スケジューリングの研究

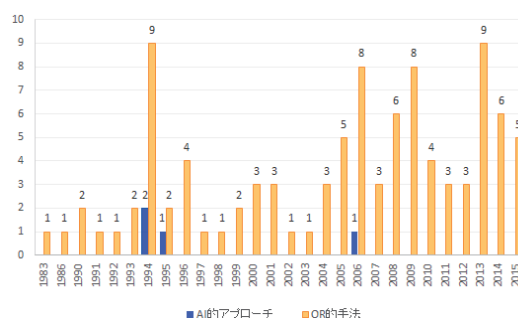
これまでに公表されている生産スケジューリング論文を抽出し、先の分類に従い整理のうち現状の生産スケジューリングの限界および課題に対する解決の可能性を探る。検索先は国立情報学研究所論文検索サイト (CiNii Articles) とし、検索・抽出することができた 1986 年～2015 年の論文 329 件の内、参照可能な 302 件について先の分類に整理し、生産スケジューリング手法分析を試みた。

まず、手法について明確に区分可能な論文は OR 的手法が 98 件、AI 的アプローチが 4 件であった。その年代別推移を「手法区分別論文数推移」(グラフ III.4.a) に示す。そこから、OR 的手法については 2000 年以降、活発な研究が続いていることが分かる。一方、

AI 的アプローチは 1990 年代中盤および 2000 年代中盤に合計 4 件の研究がみられるが、人工知能の生産スケジューリングへの適用研究が本格的な段階を迎えていると言える状況にはない。人工知能の活用には、知識情報をコンピュータへ与えるためのコスト（時間と労力）がネックとなるが、機械学習²¹⁾やディープラーニング²²⁾などの知能情報の獲得技術が発展し、その獲得が容易となれば生産スケジューリングへの適用研究事例も多くなると考える。

次に、大多数を占める OR 的手法の処理方法として取られた技法を整理分類し、「技法別論文数推」（表 III.4.b）に示す。この中で最も多く研究対象とされたものは、メタヒューリスティクスに分類される技法である。たとえば、遺伝的アルゴリズムの場合、厳密な処理によって最適解を求めるためにかかる多大なコスト（時間）を回避するために生物の進化過程を模して処理し、近似解を求めるものである。この研究事例として、長尾らは多目的遺伝的アルゴリズム²³⁾による解法を提案し、「納期遅れ指数と段取り作業者の負荷指数を評価関数とすることで、顧客と作業従事者の視点に立った最適化が可能になった。提案手法により短時間で生産スケジュールを作成することができ、実生産データを用いた場合においても、適用可能なスケジュールを導出することができた」[長尾他、2015 : 1-12] と述べている。

2 番目に多い技法分類としての数理計画法は、スケジューリング問題を数学的解法によって処理するもので、スケジュール結果を得るための目的関数と設備条件や材料部品在庫条件などの制約式、スケジューリング結果の良否や満足度を測る評価関数などにより構成し、解を求めるものである。このため、生産条件が増えるに従い生産モデルが複雑化し、演算による最適解を導き出すことが困難となる。このことは、貝原らが「近年の製造業では、大規模化やグローバル化により生産の流れを改善するポイントを抽出し操業改善につなげることが課題となっているが、段取り替えやロット編成を有する生産ラインではその抽出が困難となっている」[貝原他、2015 : 83-84] と述べ、ラグランジュ緩和法の採用によって近似解を求める手法提案していることから、それをうかがい知ることができる。実際、「技法別論文数推」（表 III.4.b）に示すように、数理計画法に



(筆者作成)

グラフ III.4.a 手法区別論文数推移 (日本国内)

表 III.4.b 技法別論文数推

技法分類	技法	論文件数
メタヒューリスティクス	遺伝的アルゴリズム	21
	シミュレーテッド・アニーリング	7
	タブーサーチ	1
数理計画法	ラグランジュ緩和法	12
	分枝限定法	3
	ダイナミック・プログラミング	2
	バックワード・シミュレーション	3
シミュレーション	フォワード・シミュレーション	3
	上記の両方を併用する方法	2
	優先規則の動的選取	1
	発見的方法	3
発見的方法	ボトルネック・スケジューリング	3
	サイクリック・スケジューリング	2

(筆者作成)

よる生産スケジューリング研究の大多数がラグランジュ緩和法に関連するものとなっている。

3 番目の技法分類としてのシミュレーションは、生産工程をモデル化して実際に流してみたかのように疑似的に生産設備の割り付けや滞留を処理することによってスケジュールを立案するものである。この研究事例として、和田らは多目的遺伝的アルゴリズムとシミュレーションから構成する提案法によって数値実験を行い、「生産性向上を目的とする工程設計法と単純モデルを用いた工程設計例、数値実験からバッファの導入効果を示すとともに混流生産が生産性に及ぼす影響や問題点を示した」[和田他、2014：15-16]としている。しかし、今後の課題として「混流生産に対して全製品の作業を工程に均一に行うための方法の開発が必要と思われる」[和田他、2014：15-16]とも述べており、すべての条件を網羅するまでには至っていないことも認めている。なお、シミュレーションの具体的実用事例としては、「II.1.(3) 自動車の生産スケジューリング」において示した自動車の着工および完成日時計画立案がこれにあたる。

そして、研究事例が一番少なかった技法分類として発見的方法がある。そのひとつ、ボトルネック・スケジューリングは工程全体の中で能力的に一番ネックとなる工程に着目し、そのネック工程が最大限能力を発揮できるスケジュールを立案することによって、工程全体の効率を上げようという制約理論²⁴⁾に基づくものである。他方、サイクリック・スケジューリングは、樹脂成型加工や金属塑性加工などのロット・スケジューリングや投入順序計画が、あるパターンの繰り返し処理であることに着目した処理技法である。このうちのボトルネック・スケジューリングの研究事例において江口は、迅速に問題解決するうえでボトルネック・スケジューリングは有用であると、次のように述べている [江口、2006：500-506]。

プラントの生産計画は、顧客からの追加注文や注文の取り消しに合わせて繰り返したてなおされるので、必ずしも最適計画を求める必要はなく、実行可能計画で十分なことが多い。しかし生産スケジューリングを自動化するにあたって、解決すべき問題がある。まずスケジューリングの過程を定式化できなければならず、実用的な時間の範囲内で解を見つけなければならない。またシステム化の主な利点は生産スケジューリングのための労力を減らせることと、制約条件をみたす実行可能解を迅速に見つけられることであり、これまで生産スケジューリングに従事してきた熟練者でなくても計画が作成できることである。この問題を解くために、ここでは制約論理プログラミング (CLP) を使用した。このシステムは実プラントで使用して十分に実用性があることが明らかになった。

ここまでに見てきた研究事例は、生産スケジューリング問題の解決手段として生産環境をモデル化し、OR 的手法など主として数学的解法によって生産条件を満足するスケジュール解を見出そうとするものである。もし、実際の生産環境のようにたくさんの生産条件

を取り込み、その網羅性を高めようとするればモデルが複雑となり、モデル構築が困難となり、また解決のためのコスト（処理時間）がかかってしまう。そこで、遺伝的アルゴリズムなどのメタヒューリスティックスの手法が採られたり、数理計画法においてはラグランジュ緩和法が採られ、近似解を求めることによって問題解決を試みている。しかしながら、モデル化したすべての生産条件を網羅した最適解ではないので、その近似解には処理結果に対して人間側が納得できるかという納得性の問題が残る。また、これらの研究事例はいずれも条件が成立し生産スケジューリング結果として解が得られることを前提としたものであり、「II.1.(3) 自動車の生産スケジューリング」で示した自動車の平準化処理問題および投入間隔問題のように、二律背反的な条件によって、解が見出せないような条件下においては問題解決を図ることができない。

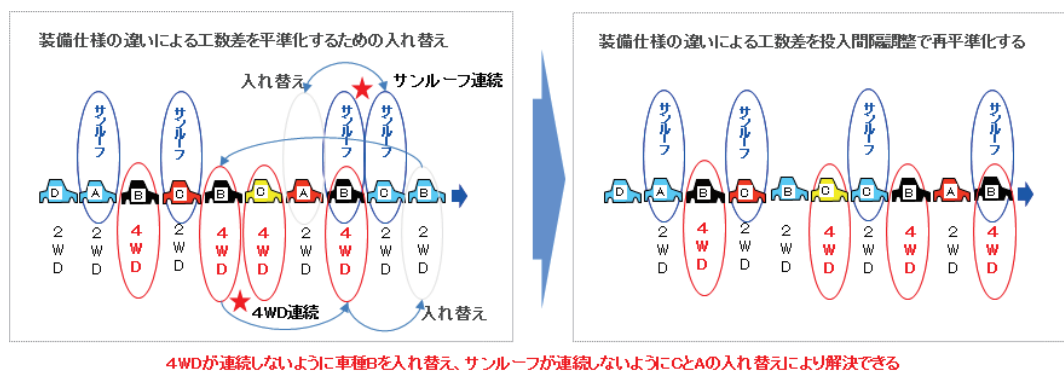
しかし、これらは既存の生産スケジューリング技法の限界を示すものであると解すべきではない。そもそも研究事例の OR に代表される既存の生産スケジューリング技法は、与えられた前提条件下における満足解を導き出すことをその命題としたものである。しかるに、与件以上の満足解や他の異なる条件下における満足解を期待すべきではないと考える。

IV. 生産スケジューリング活用の課題

実際に行われている自動車や電機の生産スケジューリングと生産スケジューリング技法の研究の状況を比較することによって、生産スケジューリング活用の課題を探る。

まず、自動車の生産スケジューリングにおいては、設備や生産要員などの保有資源を無駄なく効率的に活用し、生産停止などの生産ロスが発生しないように平準化を図ることに重点が置かれている。そのために、生産スケジューリング立案時点において、1日の生産計画を8等分したバケットを、まず生産車種単位に出現率にしたがってどこをとっても金太郎飴のように均等に平準化を行う。そのうえで、作業工数が平準化し偏らないように作業負荷の高い4WDなどの機能仕様やサンルーフなどのオプション装備仕様について、一定の投入間隔となるように同一車種内で計画の入れ替えを行う。ここでは、投入間隔調整対象条件を増やし網羅性を高め、さらなる作業工数の平準化を目論む。しかし、網羅性を高めれば高めるほど投入間隔調整条件同士が干渉し合い、結局のところ仕様の連続を阻止できないため、満足できるスケジューリング結果としての工程計画が得られず、納得性は低下してしまう（図IV 左側の状態）。

しかしながら、納得性が確保されない工程計画では、生産ラインの作業遅れという形の生産ロスが確実に発生するため、塗装完成後の車体塗装と車両組立間の PBS (Painted Body Storage) において再スケジューリングを行い、場合によってはオペレータの介入によって順番の入れ替えを行い、納得性の確保を図っている（図IV右側の状態）。この例の場



(筆者作成)

図IV 投入間隔調整

合、サンルーフと4WDは車両組立ラインのそれぞれ異なる工程の作業工数にかかる問題である。この状況において、サンルーフと4WDのどちらの条件を優先すべきか、入れ替えた場合の影響はどの程度か、それは許される範囲なのか、状況によっては直接工程へ確認するなど、人による判断行動と意思決定、ある種調停機能のような役割の実行によって生産スケジューリングが実現されている。

一方の電機では、材料部品がすべて揃い生産可能となったものから生産着工するよう意思決定して行く。その過程において、同じ材料部品を使用する生産計画の中のどの計画に割り当てることが問題となった。「Ⅱ.2.(3) 電気機械の生産スケジューリング」において「材料準備完了確認における部品引当概念」(図Ⅱ.2.(3).b)に示したように、材料部品の割り当て方によって生産可能な製品数が異なり、場合によっては材料部品切れとなって生産が停止してしまうことも考えられる。また、生産状況にゆとりがあつて先に材料部品を使用してしまった場合、後で飛び込み受注の特急オーダーが割り込んできたときに、すでに材料部品が使用されてしまつていて、要望に応えられないという事態もあり得る。

この電機のような受注組立型の生産モデルにおいては、材料部品在庫など現有の生産資源の状況を網羅し、その状況において何が生産可能なのか、どれから生産すべきかを意思決定したうえで、生産可能な量と納期遵守について納得性の得られるスケジューリング結果が求められる。ここにおいても、同じ材料部品を必要とする生産計画のうち、どれを優先させるか、どちらの受注オーダー(顧客)を優先しなければならないか、納期の遅延調整は可能かなど、計画だけでは判断できない情報も含め、人によるある種調停機能のような役割の実行によって生産スケジューリングが実現されている。

翻つて、現在の学術的研究の状況を見た場合、網羅性が高まり複雑化する生産条件に対して、ヒューリスティックスやラグランジュ緩和法など、解法の近道を探る研究が中心となっている。それは必ずしも納得性の向上につながるものではない。むしろ、複数の生産スケジューリング手法、技法により問題解決を試みている自動車の生産スケジューリング事例が示すように、個々の生産スケジューリング手法、技法だけでは解決できない問題を複数の手法、技法の組み合わせにより総合的に解決するアプローチ方法が納得性を得るためには有効であると考えられる。

しかし、それでも人間が意思決定介入しなければならない局面は存在している。この課題に対しては、まず人間の介入を最小限かつ的確に実行するために意思決定判断しやすい意思決定に係る利得と損失が分かる(見える)生産情報を示すことが重要であると考えられる。そして、さらに迅速にこの課題を解決するためには、人間の介入とその意思決定判断に代わって、生産条件の網羅性とスケジューリング結果の納得性を両立させるための新たなアプローチ方法として生産条件間の調整を執り、総合的に解決するある種の調停機能が生産スケジューリングに必要であると考えられる。

(本学 大学院社会システム研究科 院生)

(本学 地域戦略研究所 教授)

〔注〕

- 1) 本論文においては、投入間隔調整にあたり必要となる製品型式に設定された4WDなどの機能仕様やサンルーフなどのオプション装備仕様のような個別仕様条件のうち、実際に投入間隔調整に反映できる（できた）機能仕様や個別仕様条件数の割合（度合い）を網羅性と定義する。
- 2) 本論文においては、スケジューリング担当者が個々の工程の利害調整と調停の権限を与えられているという前提下において、投入間隔調整結果、製品型式に設定された機能仕様やオプション装備仕様の個別仕様条件の投入間隔が円滑に作業を実行するに足ると判断できることを納得性という。ただし、個々の工程作業員または工程責任者が納得できるということではなく、スケジューリング担当者が他の条件を含め総合的に判断して、その時の状況下において現実解として納得できる程度の状態を指す。
- 3) タクトタイムとは、生産工程の各作業ステーションにおいて一つのワークに対する作業を完了する時間。タクトタイム＝1日の稼働時間／1日当たりの生産数量。
- 4) Numerical Control(数値制御)式位置決め装置のこと。車種によって異なるパネル部品の位置決め穴にロケートピンを挿入して正しく溶接できるようにする。
- 5) 2枚以上の薄板鋼板を重ね、加圧しながら銅合金でできた電極に高電流を短時間流し、ジュール発熱によって接合界面を熔融・凝固させて接合する金属の溶接方式。
- 6) RFID (Radio Frequency Identifier : 無線式タグ) とは、識別情報や管理情報を記録する電子化された情報媒体から電波などを用いて、近接または近距離（周波数帯によって数cm～数m）無線通信によって情報を読み書きできるタグおよび技術全般を指す。
- 7) バケット (bucket) は計画を分割する入れものを指す。1バケットは稼働時間のおおよそ2時間に相当し、各バケットへ車種別に均等となるように配分する。
- 8) 2時間相当のバケットサイズが材料部品の納入時間帯の区分となる。組み付けられるまでの時間、すなわち在庫相当分の先行時間をもって納入時刻を指定する。
- 9) 計画にしたがって納入指示せず、自社内生産工程における部品使用量を把握（理論的に算出）し、次に部品メーカーから引き取るべき材料部品の種類と数量を電子かんばん（電子メッセージ）として送信する。部品メーカーは電子かんばんを印刷して材料部品に添付し、指定日時、指定納入場所へ納入する方式およびその情報をいう。
- 10) 4WD (four wheel drive : 4輪駆動車) とは、4輪自動車の4輪すべてが駆動輪の自動車、またはその駆動方式をいう。2輪駆動車に比べて機構が複雑になり作業工数が多くかかる。
- 11) サンルーフ (sunroof) とは、車体屋根部分に開閉式開口部を持つ自動車の仕様、またはその装置をいう。製造ライン内で装着作業をするため、他と比べて作業工数が多くかかる。
- 12) 対象をグループ化し、下記式により平準化グループ毎のタリー値を求め、その中の最大値の平準化グループを序列として割当を繰り返して平準化された順列を生成する手法。
※平準化グループのタリー値＝（平準化グループ毎の合計台数）×（序列発生回数）
－（各平準化グループの既発生回数）×（全平準化グループの総合掲題数）
- 13) 正式名称を衝突被害軽減制動制御装置 (AEBS : Autonomous Emergency Braking System) という。カメラやレーダーなどで前の自動車を検知して、追突するおそれがある場合には、音や警告灯などでドライバーに警告してブレーキ操作による衝突回避を促し、さらにブレーキ操作が無くこのままでは追突が避けられないとシステムが判断した場合には、被害を軽減するため自動的にブレーキが作動する。
- 14) サイドエアバッグ (side airbag) とは、側面衝突時に瞬時に膨らみ、頭や胸などの上体への衝撃を軽減するための安全装置をいう。
- 15) 標準仕掛とは、生産計画台数を達成するために必要な工程、ラインごとの在席台数をいう。ラインのように、生産計画台数には関係なく一定のステージ数が物理的に決まって

いるものや工程間バッファのように仕掛台数が可変で、生産計画台数によって変化するものがある。

- 16) ロボットや塗装スプレーなどの塗布装置および換気装置が設置された塗装設備区画。
- 17) 塗料塗布後、焼き付け塗装のための乾燥設備。140～170℃の温度で乾燥させる。
- 18) 新型製品の生産立上り期、生産能力を超える受注オーダーを受ける中で、製造工程の生産スケジューリング担当者は生産能力をフルに発揮できる生産着手順序の策定に苦慮していた。その作業支援のために、担当者のスケジューリング作業の生産意思決定手順を情報技術（パソコン）の活用により筆者が再現し、ツールとして作成した。
- 19) 標準作業（standard operation）とは、「製品または部品の製造工程全体を対象にした作業条件、作業順序、作業方法、管理方法、使用材料、使用設備、作業要領などに関する基準の規定」（JIS Z 8141-5501）とされ、製造企業等において、誰もが実施可能な現時点の最善の作業方法を標準化し、定めたものをいう。また、これを文書化したものを作業標準という。
- 20) 標準時間（standard time）とは、「その仕事に適性をもち、習熟した作業者が、所定の作業条件のもとに必要な余裕をもち、正常な作業ペースによって仕事を遂行するために必要な時間」（JIS Z 8141-5502）とされ、製造企業等において標準的な作業時間を定めたものをいう。
- 21) 人工知能のプログラム自身が意味を考えず、単に機械的に確率によって判断し、学習することで知能として必要な情報を獲得するしくみ。
- 22) ディープラーニング(深層学習)とは、機械学習の手法の一種で、機械が自分で特徴抽出ができる学習技術のことをいう。人間の脳神経回路（ニューロン）を真似して情報分類する考えに基づいた技術である。
- 23) 多目的遺伝的アルゴリズム（MOGA：Multi-Objective Genetic Algorithm）とは、生物の進化の過程を模倣して作られたアルゴリズムで、複数の目的関数から解の優劣関係に基づいて同時に複数のパレート最適による近似解を求める手法。
- 24) 制約理論（TOC：theory of constraints）とは、イスラエルの物理学者エリヤフ・ゴールドラット（Eliyahu Moshe Goldratt）が提唱者した、その著書『ザ・ゴール』で説明した生産管理の手法で、生産管理やサプライチェーン・マネジメントに大きな影響を与えた。

〔引用文献〕

- 江口 元(2006)「化学工学論文集」『組合せ最適化によるバッチ反応機生産スケジューリング』The Society of Chemical Engineers, Japan,500-506
- 貝原 俊也,藤井 信忠,酒井 響平,梅田 豊裕(2015)「生産システム部門講演会講演論文集」『209 フレキシブル・フローショップを対象としたラグランジュ分解・調整法を用いたスケジューリング手法:機械割付アルゴリズムの一提案(生産スケジューリング・生産管理(2))』一般社団法人日本機械学会,83-84.
- 黒田充,村松健児(2002)『経営科学のニューフロンティア 11 生産スケジューリング』朝倉書店
- 長尾 征洋,杉本 拓弥,森永 泰彦,佐野 充(2015)「人間環境学研究」『段取り作業者を考慮した生産スケジューリングへの多様性指向型多目的 GA の適用』Society for Human Environmental Studies,1-12
- 和田 拓己,荒川 雅裕(2014)「生産システム部門講演会講演論文集」『101 混流生産に対する生産性向上を目的とする工程設計法の開発:作業時間のバラツキとバッファ量による影響(OS4:生産スケジューリング・生産管理(1))』一般社団法人日本機械学会,15-16

STUDIES
OF
INSTITUTE FOR
REGIONAL STRATEGY
CONTENTS

Recent issues of production scheduling

Toshinori NOMURA, Hidetoshi YOSHIMURA..... 39

No.2
March 2017
INSTITUTE FOR REGIONAL, STRATEGY
THE UNIVERSITY OF KITAKYUSHU
KITAKYUSHU CITY, JAPAN