



操業技術としての工程間調整に関する考察： オペレーターと一貫品質管理部門を中心に

辺 成 祐

要旨 これまでの生産管理論、技術経営論では、自動車産業を代表とする組立産業において、部品間の相互依存関係とそのマネジメントに関する学術的蓄積はあるものの、鉄鋼産業など、いわゆるプロセス産業における工程間の相互依存関係とそのマネジメントはあまり注目されてこなかった。本稿では、生産工程間の依存関係に注目しながら、操業技術としての工程間調整を説明した上で、工程内調整を担当するオペレーターと工程間調整を担当する一貫品質管理部門について分析する。

Abstract Extant literature in production management and technology management addresses managing the interdependence of components in assembly industry such as automobile industry. This study examines managing the interdependence among successive stages of production processes, focusing on operators and integrated quality control department.

キーワード 工程間調整, 操業技術, オペレーター, 一貫品質管理部門

原稿受理日 2021年1月31日

1. はじめに

1台の乗用車は、ボルト、ナットから数えて約3万点の部品で完成される。これらの部品は、加工済みの単体部品、集成部品（サブアセンブリー）、明確な機能をもつ機能部品、集成度の高い機能面で完結しているモジュールの順に仕上がる（藤本，2001）。自動車という複雑な製品を構造面から理解するためには、大きな部品から小さな部品までを逐次分解して、階層の上位部品がいくつの下位部品で構成されているかを理解する必要がある。自動車を含む人工物は階層性を持っており、相互に繋がるサブシステムで構成されている（Simon, 1969）。しかし、‘相互に繋がっている’技術的な特性が、マネジメントの負荷になる場合がある。部品間の複雑な相互作用とそのマネジメント、特に、調整コスト削減のための取り組みは、製品設計論の重要な研究ストリームに位置する。

製品アーキテクチャは、部品と部品のつなぎ方に関する基本設計思想であり、企業間で分業や協調が起きるパターンを分析するための枠組みを提供した（Ulrich, 1995；Baldwin and Clark, 2000；藤本・武石・青島，2001）。

製品アーキテクチャ分析は、製品を機能完結のモジュールから単体部分まで、分解の粒度を決めた上で、分解された部品間の相互依存を明らかにすることに注目する。高い相互依存関係には調整作業が求められる意味で、調整のための時間とコストを伴い、マネジメントの負荷となる。これを緩和あるいは回避するために、部品間インターフェースの標準化など、設計の見直しを通じてものづくりの簡素化が進められてきた事例が多く観察された。部品と部品間の相互依存関係は、‘空間的’依存関係としてみなすことができる。

空間的依存関係に関連する研究蓄積は豊富である一方、工程間依存関係の‘時間的’依存関係とそのマネジメントは、あまり注目されてこなかった。生産工程はフローの概念であり、電車のダイヤのように時間制約の下で管理される（辺，2018）。一連の工程が流れる順番（例：前工程，後工程）で依存関係にあるのは当然のことであるが、工程間依存関係のマネジメント、つまり調整作業における課題はあまり注目されてこなかった。

本稿では、生産工程間の依存関係に注目しながら、操業技術としての工程間調整を説明した上で、工程内調整を担当するオペレーターと工程間調整を担当する一貫品質管理部門について分析する。

2. 部品間の相互依存関係とマネジメント

相互依存関係は、製品アーキテクチャ論に限られた概念ではない。一般システム理論 (Bertalanffy, 1968)、経営組織論 (Thompson, 1967)、経営戦略論 (Teece, 1976) などでも、複雑な相互依存関係をもたらす課題とそのマネジメントについて分析されてきた。

例えば、Thompson (1967) の研究では、異なった相互依存性のタイプには、異なった組織対応が必要であると主張する。つまり、個々の組織要素が独立的に全体に貢献する共振的相互依存の場合は標準化による調整が、一方が他方に影響を与える逐次的依存の場合には計画による調整が必要であると主張した。これを援用した研究では、部品ないし子部品同士の関わりの程度を相互依存性として規定し、ある部品が他の周辺部品と関わりを持つ程度を外的相互依存性と呼び、ある部品の内部において、子部品同士が関わりをもつ程度を内的相互依存性と呼んでいる (韓, 2002)。相互依存関係には調整作業が求められるため、企業は調整にかかる負荷を少しでも軽くするために、設計の標準化と調整のための計画で対応する。

経営組織論では、組織デザインの基本として、分業と調整の原理を提示し、事前調整方法として標準化について説明する。複雑な組織設計に関しては、情報処理負荷と情報処理能力のバランス化を示した (Galbraith, 1973)。

一方、Teece (1976) は、部品と部品の間に複雑な相互依存関係があるとしても、その相互依存のパターンが分かり、かつ、そのパターンが固定、安定されていれば、マネジメントは難しくないと主張した。

しかし、本稿で後述するように、工程間依存関係のパターンを分析するためには、部品間依存関係のパターンとは異なるアプローチが必要となる。工程分析には、Thompson の指摘のように逐次的依存関係、つまり時間軸が存在しているからである。

ここでパターン知識とは、工程の場合、操作するパラメーターが工程ごとに複数ある状況の下で、パラメーター間の因果知識を持っていることを意味する。以下では、時間軸で流れる生産工程間の依存関係に注目しながら、操業パラメーターの組み合わせとパターン知識について説明する。

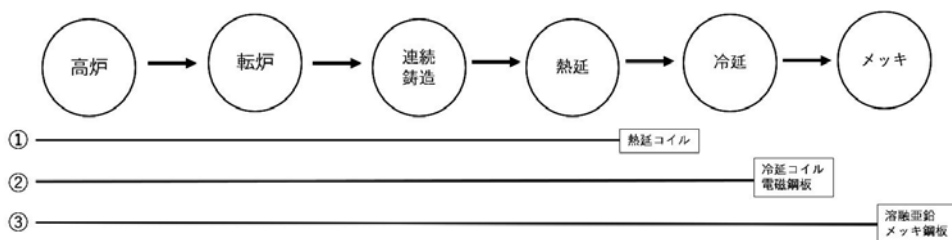
3. 工程間の相互依存関係とマネジメント

鉄鋼産業は、製品の品質グレードによってはそこまで高い技術能力を求めない製品もある一方、自動車用鋼板と電磁鋼板のように、巨大装置産業でありながら複数工程に跨った繊細な制御が必要な製品もある。いわゆる‘高級鋼’を生産できる鉄鋼メーカーも最初からうまくつくれたわけではなく、多くの試行錯誤を通じて生産に成功した。

鉄鋼産業の歴史は、技術移転と導入の歴史である。米国はヨーロッパから、日本はヨーロッパと米国から、韓国と中国は日本から製鉄技術を導入し、国家資本として鉄鋼業に乗り出した。製鉄技術として欠かせないのが、製造設備と操業技術である。技術導入する企業は、海外で開発された設備を輸入して迅速な稼働に入る (Byun, 2016)。

海外から技術を導入した新興国の鉄鋼メーカーは、製鉄所の象徴である溶鉱炉 (高炉) の建設から始め、転炉と連続鋳造までの生産工程をつくる。これだけでもスラブなど普通鋼の製品を生産できるが、その後、熱延工程を追加接続して、熱延コイルを生産する。さらに、より付加価値の高い冷延コイルを生産するためには、熱延工程に冷延工程、焼鈍工程などを追加接続していく。このように、鉄鋼メーカーは、生産工程を順に、追加接続することで鉄鋼製品の種類 (鋼種) を増やしていく。以下の図1は、生産プロセスの拡張を見せている。

図1 製鉄プロセス拡張と生産鋼種



〈出所：新日鉄住金株式会社 (2004, 2007, 2009) を参考に筆者作成〉

鉄鋼メーカーは、稼働初期に高炉から熱延までの工程を整え、主に熱間圧延鋼板 (熱延コイル) を生産する (①)。この段階までは、導入設備を並べて生産することは比較的簡単である。つまり、そこまで高い技術能力を求めないレベルになる。その後、冷間圧延工程、メッキ工程まで追加接続されると、途端に難しくなる。

操業技術としての工程間調整に関する考察：オペレーターと一貫品質管理部門を中心に（辺）

家電製品用の冷延コイルを生産するために、冷延工程を追加設置する（②）。電磁鋼板を生産するには、冷延工程の次に焼鈍工程も追加接続しなければならない。溶融亜鉛メッキ鋼板を生産するためには、さらに最後の溶融亜鉛メッキラインを追加設置して稼働する（③）。

以上のように、熱延まで設備を並べて生産できる製品は、比較的簡単かも知れないが、生産工程が①から②へ、②から③へと追加接続されると、追加された工程だけではなく、既存の工程も含めて、操業パラメーターを新たに調整する必要がある。それによってパラメーター間の因果知識を持つようになる（Byun, 2020）。

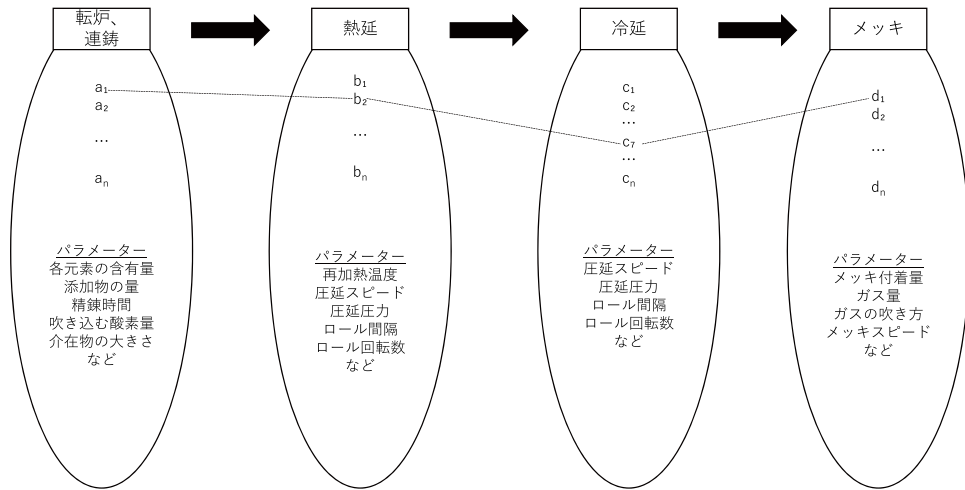
生産ラインの工程間には相互依存関係があり、各工程ではオペレーターが最終的に完成される製品に必要な成分などを意識しながら操業パラメーターを微調整する。例えば、転炉での成分調整、熱延工程の再加熱温度と熱延スピード、冷延スピード、メッキ量といった操業パラメーターは、処理・加工条件に合わせて変更される。また、各工程での作業にバラツキが発生するため、その後の工程でも前工程の作業結果に合わせて操業パラメーターを微調整する必要がある。この場合、前工程のバラツキに対する後処理の性格が強い。

以上の理由から、鉄鋼メーカーが生産工程を拡張するときは、操業パラメーターの組合せに関連する新しい操業技術、新しいパターン知識を獲得しなければならない。レシピと呼ばれる知識である。

例えば、溶融亜鉛メッキ鋼板を生産するために、転炉で調整すべき5大元素 C, Si, Mn, P, S の含有量を変えて、それに合わせて、以降の圧延工程でも再加熱温度と圧延の力加減などを調整する。そして、作業結果にバラツキが存在するため、これまでの工程の公差情報も共有しながら、工程間調整を行う（Byun, 2019）。このような因果知識を持って調整することが工程間調整である。以下の図2は、各工程の代表的な操業パラメーターの例と、その組合せのイメージを示している。

工程間の相互依存関係のパターンが固定されていれば、事前計画性を持って対応できる。鉄鋼メーカーは、いかにパターン知識を獲得するか、さらにはパターン化を通じて、調整に必要な工程間のコミュニケーションをいかに減らすことができるかに注目する。

図2 操業パラメーター組み合わせのイメージ



〈出所：筆者作成〉

4. パターン知識の蓄積

鉄鋼メーカーは、生産工程の追加接続によって、つながりを管理する操業技術とパターン知識を蓄積していく（辺，2019；Byun，2020）。まず、パターン知識がない場合には、生産工程を追加接続する際、新しい操業パターンの組合せの知識がないため、まずは既存のパラメーターの組合せを守って新工程のパラメーターだけを操作するが、既存のパラメーターの調整まで必要だと気づくまでには時間がかかる。

試行錯誤でパターンが理解できたら、新工程のパラメーターだけでなく、既存工程の情報も参考に、複数の操業パラメーターの組合せを試してみても生産に成功する。調整のことも理解できており、工程間調整にかかる負荷も予想できる。最後に、パターン知識を活用して、工程間調整の負荷を軽減させるために、標準化、自動化まで進んだ段階に至る。各工程の操業パラメーターの組合せを生産システム上に入れて、前工程の操業条件に合わせて、後工程のパラメーターも変更していく。さらに、この作業をいちいち手作業で行うのではなく、自動化する。どうしても調整が必要になる場合、計画的に調整作業を行う。

電磁鋼板は、鉄鋼製品の中でも特に機能性の高い素材であり、発電機、電圧変換器、モーターなどに使われる。電磁鋼板の一つである方向性電磁鋼板は、一方向に磁化しやすい特性を持たせた電磁鋼板で、電圧変換器に必須の材料である。方向性電磁鋼板を製造するためには、製鋼、熱延、冷延、焼鈍工程まで揃える必要がある。ただし、一般の冷延製

操業技術としての工程間調整に関する考察：オペレーターと一貫品質管理部門を中心に（辺）

品とは異なり、前工程からの調整作業が欠かせない。製品の微細な組織である結晶が、すべて整然と同じ圧延方向に並ぶように制御する技術が必要になる。

日本の鉄鋼メーカーは、約50年前に米国より同技術を導入して製造を開始し、技術の高度化と変換ロスの低減を進めてきた（新日鉄住金株式会社，2009）。これを実現するためには、製鋼工程で手間をかけて不純物を徹底的に取り除く作業と、熱延、冷延工程で製品の板厚をさらに薄くする作業が必要である。板厚を薄くすればするほど、方向性電磁鋼板がもつ性質が良くなる効果がある。シリコンとアルミを添加すれば高い効果が得られるが、添加しすぎると悪影響を及ぼすため、結晶制御を緻密に行うことで性能を補完するなど、そのバランスを求められる特性に応じて高度に制御する。既存の冷延製品とは異なるパラメーター組合せを探る必要がある。

5. ‘工程内調整’のオペレーターと‘工程間調整’の一貫品質管理部門

これまでの分析では、操業技術として操業パラメーターのパターン知識の獲得プロセスについては検討してきたものの、実際に技術と知識を開発、活用する組織体制については言及してこなかった。ここでは、生産現場における操業技術の開発と活用の側面に注目する。つまり、操業パラメーターに関する知識を開発し、その知識を日々のオペレーションで活用しながら、目標とする品質、コスト、納期を実現する‘組織’のことについて説明する。

鉄鋼メーカーの生産現場は、大きく操業を担当する組織と整備を担当する組織、そしてこれらを支援する組織に分けられる。製鉄所は、設備の群になっているため、整備組織も生産工程ごとに分業することが一般的である。例えば、製鉄工程には高炉の整備を担当する組織が存在し、製鋼工程には転炉の整備を担当する組織が存在している。24時間稼働する一貫製鉄所の操業特性上、整備組織も24時間勤務体制になっていることが多い。操業を担当する組織と整備を担当する組織間のジョブローテーションが難しいため、一部の鉄鋼メーカーでは、両組織が持つ知識とノウハウの共有に力を入れている。

操業組織は、基本的に製造工程ごとに分かれており、各工程にはオペレーターと呼ばれる作業員がいる。製鉄所では機械化、自動化が進み、工程全般をモニタリングしながら異常を探知する作業内容がよくマスコミなどでも取り上げられる。生産統制室と呼ばれる大部屋に集まって、たくさんのモニターで埋まった壁に向いて作業員たちがモニタリング業務にあたる。例えば、高炉操業をモニタリングするために、羽口から高炉内部に吹き込ま

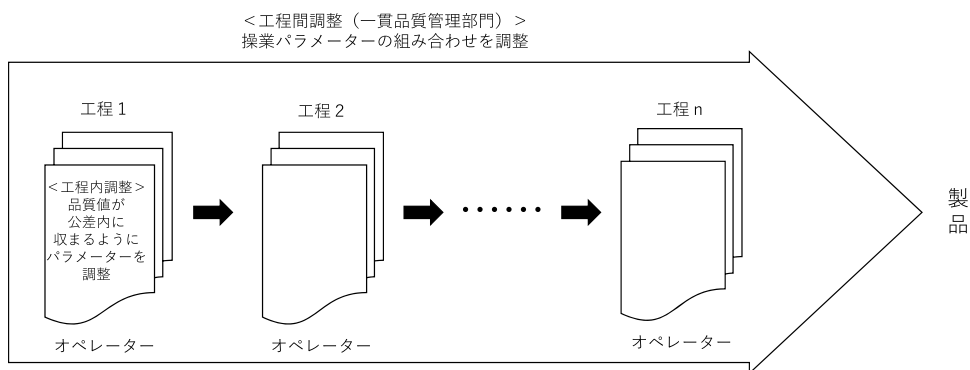
れる熱風温度のモニタリング，出銑作業のモニタリング，原料ヤードから高炉に装入される原料のモニタリングが必要となる。

オペレーターは，操作盤を操作しながら，操業パラメーターをコントロールする。直接，製品を処理，加工する仕事を担当するため，オペレーターの熟練が求められる。自動化とともに，最近は人工知能の導入と活用も急ピッチで進んでいる製鉄所だが，未だにオペレーターの知識とノウハウに依存する部分は少なくない。このオペレーターの作業は，担当工程内で微細な生産調整を行う作業として理解できる。

製品の化学的成分を決める製鋼工程では，自動化による作業とオペレーターによる作業によって製品を生産している。オペレーターは，高炉から運ばれてきた溶銑に含まれている不純物を取り除き，最終的に仕上げる製品の成分スペックに合わせて成分を調整する。特に，自動車用鋼板などの高級鋼の成分は，顧客ごとに微妙に異なることがあるため，限られた時間内に吹き込む酸素の量，添加物の量，投入タイミングと処理時間などを判断する。もちろん量と温度の計測，時間測定などについては，操業用ソフトウェアも利用するが，最終的な判断はオペレーターに任せている。

同様の工程内調整作業は，圧延工程でもみられる。厚板を生産する工程では，オペレーターが，顧客が要求する最終スペックに合わせて圧延作業を行う製品がある。オペレーターは，加熱炉から出された厚板を，横方向，縦方向に回転させながら，圧延時間と力加減を調整する。製鋼工程で化学的成分調整が済んだ厚板を，今度は熱延工程のオペレーターが機械的成分を調整する。このオペレーターの作業も，担当工程内で微細な生産調整を行う作業として理解できる。以下の図3は，工程内調整と工程間調整のイメージを見ている。

図3 工程内調整と工程間調整のイメージ



〈出所：筆者作成〉

操業技術としての工程間調整に関する考察：オペレーターと一貫品質管理部門を中心に（辺）

一方、工程間の調整を担う組織もある。この組織は複数工程を跨る調整業務にあたるため、別組織になっている場合が一般的である。製鉄所には、品質管理部門が存在し、品質向上と品質保証に取り組んでいる。この品質管理部門も確かに複数工程を対象にしているが、これとは別に、レシピの開発と一貫管理に深く関わる部門を持つ場合がある。鉄鋼メーカーごとに名称は異なるが、一貫品質管理部門、通貫品質管理部門などがそれにあたる。

一貫品質管理部門は、レシピの開発から、そのレシピによる作業のモニタリングと指示業務にあたる組織であり、上述したオペレーターたちを束ねるコーディネーターの役割をもつ。オペレーターが工程内調整役とえば、一貫品質管理部門は、工程間調整役といえる。

顧客ニーズに合わせるためのレシピを開発するためには、操業パラメーターを開発する必要がある。その際には、研究開発部門、一貫品質管理部門、各工程が連携して、既存の操業パラメーター・プールの再利用、新しい操業パラメーター開発に取り組む。一貫品質管理部門は、製品ごとに分かれていて、工程間調整による一貫品質管理が重要となる高級鋼を中心に組織される。例えば、余裕亜鉛メッキ鋼板を担当する一貫品質管理チーム、電磁鋼板を担当する一貫品質管理チームのように、専門領域を設けている。

操業の段階では、オペレーターの作業をモニタリングしながら、適宜指示をする。工程を跨った操業パラメーターの操作とモニタリングは、各オペレーターには見えにくいので、一貫品質管理部門とチームがそれを可視化する。また、各工程内の調整は、オペレーターの能力によるものであっても、調整範囲は、公差の制約を受ける。複数工程における公差管理からくる累積公差効果を緩和あるいは回避のためにも、一貫品質管理部門とチームが貢献する。

一貫品質管理部門の組織メンバーは、各工程のベテラン出身が多い特徴がある。工程内の調整に詳しいだけでなく、工程間調整の課題発見と解決にも知識と経験をもつ。

6. お わ り に

本稿では、生産工程間の依存関係に注目しながら、操業技術としての工程間調整を説明した上で、工程内調整を担当するオペレーターと工程間調整を担当する一貫品質管理部門について分析した。

工程間調整は、工程と工程の相互依存関係に注目する。一般システム理論、製品開発論、

製品アーキテクチャ論など、多岐に渡る分野では、相互依存性に起因する課題とそのマネジメントについて分析されてきた。しかし、‘空間的’依存関係に関連する研究の蓄積は豊富である一方、工程間依存関係といった‘時間的’依存関係とそのマネジメントは、あまり注目されてこなかった。

本稿では、時間軸で流れる生産工程間の依存関係に焦点を当てて、操業パラメーターの組み合わせとそのパターン知識について説明することで、時間的依存関係の説明を試みた。空間的依存関係も、時間的依存関係も、相互依存性は調整作業を必要とする。その作業負荷を緩和するために、標準化、計画などで対応する。最後に、工程内調整役を担うオペレーターと工程間調整を担う一貫品質管理部門について説明した。

部品と部品の上に複雑な相互依存関係があっても、その相互依存関係のパターンが分かり、かつ、そのパターンが固定、安定されていれば、マネジメントは難しくないと(Teece, 1976)。工程間調整も、つながりを管理する操業技術にかかっているといえよう。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費17K03921の助成を受けたものです。

参 考 文 献

- Baldwin, C. Y. and Clark, K. B. (2000) *Design rules: the power of modularity (Vol. 1)*. MIT press.
- Bertalanffy, V. (1968) *General system theory: foundations, development, applications*. New York.
- Byun, S. (2016) "Hyundai Steel's ramp-up strategy and the learning effect," *Annals of Business Administrative Science*, 15(4), 163-174.
- Byun, S. (2019) "Managing tolerance stack-up through process integration team in steel industry," *Annals of Business Administrative Science*, 18(6), 223-236.
- Byun, S. (2020) "Managing the interdependence among successive stages of production in steel industry," *Annals of Business Administrative Science*, 19(6), 293-306.
- 辺成祐 (2018) 「鉄鋼産業における工程間調整に関する考察」商経学叢第64巻第3号, 近畿大学.
- 辺成祐 (2019) 「工程間・組織間調整能力の構築プロセス: 鉄鋼産業を中心に」商経学叢第66巻第1号, 近畿大学.
- 藤本隆宏 (2001) 『生産マネジメント入門 (I) 生産システム編』日本経済新聞出版社.
- 藤本隆宏・武石彰・青島矢一編 (2001) 『ビジネス・アーキテクチャー-製品・組織・プロセスの戦略的設計』有斐閣.
- Galbraith, J. (1973) *Designing complex organizations*. Reading, MA.
- 韓美京 (2002) 『製品アーキテクチャと製品開発: 自動車部品開発のケース』信山社.
- Simon, H. A. (1969) *The sciences of the artificial*. Cambridge, MA.
- 新日鉄住金株式会社 (2004) 『鉄と鉄鋼がわかる本』日本実業出版社.

操業技術としての工程間調整に関する考察：オペレーターと一貫品質管理部門を中心に（辺）

新日鉄住金株式会社（2007）『鉄の未来が見える本』日本実業出版社。

新日鉄住金株式会社（2009）『鉄の薄板・厚板がわかる本』日本実業出版社。

Teece, D. (1976). Vertical integration and vertical divestiture in the US petroleum industry. Research paper, No. 300, Stanford University Graduate School of Business, pp. 1-165.

Thompson, J. (1967). D. (1967) Organizations in action. NY.

Ulrich, K. (1995). The role of product architecture in the manufacturing firm. *Research Policy*, 24(3), 419-440.