

鉄鋼厚板製造プロセスにおける一貫最適化に向けて

— 生産管理に関するマルチスケール階層モデルの提案 —

西岡 潔^{1, 4*}、水谷 泰²、上野 博則³、川崎 博史¹、馬場 靖憲⁴

鉄鋼業において、製造工期の短縮と能率向上を両立する生産の一貫最適化は、どのように可能であろうか。先行例としてのリーン生産方式では、生産の時間スケールをメインラインのそれに同期化したのに対して、鉄鋼業では自動車と同水準の製造の同期性と時間スケールの圧縮は本質的に難しい。この事例は、生産管理を時間に関するマルチスケール階層構造としてモデル化することにより、鉄鋼産業において工場単位の最適一貫生産がどのように探究されたか、そのプロセスを明らかにした。この論文は、幅広いキャリアを積んだ現場の技術者の生きた知識を構成学的にモデル化し、産業界からの製造知識の体系化を目指した試みである。

キーワード: 鉄鋼、一貫最適化、生産管理システム、マルチスケール階層モデル、リーン生産方式

Toward the integrated optimization of steel plate production process

– A proposal for production control by multi-scale hierarchical modeling –

Kiyoshi NISHIOKA^{1,4*}, Yasushi MIZUTANI², Hironori UENO³, Hirofumi KAWASAKI¹ and Yasunori BABA⁴

Integrated optimization of production in the steel industry to simultaneously minimize lead time and improve productivity is a real challenge. Lean manufacturing, recognized as a leading successful example of such optimization, is characterized by synchronization of time scale of production with that of the mainline. However, in the steel industry, it is inherently difficult to implement synchronization and reduction of production time to the same degree as in the automobile industry. This difficulty motivated our method for integrated optimization of production at the plant level in the steel industry, by modeling the production control as a multi-scale hierarchical structure in time. This paper describes an attempt to systematize production knowledge in industry by a synthesis of practical knowledge (of shop-floor engineers) and company experiences.

Keywords: Steel industry, integrated optimization, production control system, multi-scale hierarchically structured model, lean production system

1 はじめに

最小の資源で、無限のバリエーションをもつ製品を、欠陥ゼロ、在庫ゼロ、最小の製造工期^{[1][2]}で製造する生産管理における一貫最適化は、ものづくりの究極の目標である。一般に、生産管理はプル型とプッシュ型に大別される^{[1][2]}。下流である顧客の要求に合わせて上流が最適な部品や中間財を順次提供するプル型は自動車で代表される組み立て産業に適用され、20世紀を代表する成功事例としてのリーン生産方式を生んだ。一方、プッシュ型は、下流工程の要求とは関係なく、プロセスの入口を起点に上流から下流に部品や中間財を流しながら生産を指示する方式であり、鉄鋼また化学産業のようなプロセス産業を含む多くの産業に

適用されてきた。プッシュ型の生産管理において、製造工期の短縮と能率向上を両立する生産の一貫最適化はどのように可能になるのだろうか。

この論文は新日鉄君津製鉄所における事例に注目し、プッシュ型生産管理に適した工程構造を有する鉄鋼業の製造プロセスにおいて、元来はプル型生産管理を起源とするリーン生産方式の概念また手法がどのように利用できるか考察する。君津製鉄所厚板工場においてプロセス産業における一貫最適化実現のための生産管理が革新され、その結果、中国経済の急拡大によって需要が急増した2000年代初頭において、仕掛品の削減による大幅な製造工期の短縮と(図1)、国内他厚板工場と比較して迅速な生産

1 新日本製鐵株式会社 〒100-8071 千代田区丸の内2-6-1, 2 新日本製鐵株式会社 君津製鐵所厚板工場 〒299-1141 君津市君津1, 3 新日本製鐵株式会社 名古屋製鐵所厚板工場 〒476-8686 東海市東海町5-3, 4 東京大学先端科学技術研究センター 〒153-8904 目黒区駒場4-6-1

1. Nippon Steel Corporation 2-6-1 Marunouchi, Chiyoda-ku 100-8071, Japan * E-mail: knishi@hyper.rcast.u-tokyo.ac.jp, 2. Nippon Steel Corporation Kimitsu Works 1 Kimitsu, Kimitsu 299-1141, Japan, 3. Nippon Steel Corporation Nagoya Works 5-3 Toukai, Toukai 476-8686, Japan, 4. Research Center for Advanced Science and Technology (RCAST), The University of Tokyo 4-6-1 Komaba, Meguro-ku 153-8904, Japan

Original manuscript received November 11, 2011, Revisions received January 27, 2012, Accepted January 31, 2012

量の拡大が実現された（図2）。複雑な製造フローをもち生産における制約条件のハードルが高い厚板製造において、工場単位の全体最適はどのように可能になったのであろうか。この論文は、製造現場においてどのように生産管理が革新されていったのかを紹介し、実現された生産管理システムを時間に関するマルチスケール階層構造として把握し、モデル化することにより、プロセス産業である鉄鋼業がリーン生産方式から何が学べるかを明らかにする。

2 鉄鋼厚板製造について

製鉄所の製造プロセス^{用語2}は、鉄鉱石、石炭等の原料を高炉で銑鉄とし、転炉、精錬を経て鋼を得る。その後の連続鋳造においてスラブ（長方形の鋼片）を造り、圧延され製品である厚板となる。厚板製造は綿密な生産計画による受注生産であり、転炉一鍋300～400トンの大ロットから3トン程度の厚板を細分化して製造する。製品としての厚板は船やビル、橋、建設・産業機械、液化天然ガス・海底油田掘削用の海洋構造物等多岐にわたる構造物の重

要部材として広く使われており、規格が多種多様である、使用か所が厳密に決まっている、一品一葉ごとのスケッチサイズである等、他の鉄鋼品種とは異なる特徴をもつ。

厚板は多品種小ロットの受注生産であり、用途が多岐にわたるために、その製造プロセスは複雑である。まず、圧延プロセスで多種多様なサイズの厚板を製造するとともに、金属組織を制御して材質を造り分ける。次に、精整プロセスでは、上流工程で生じた不具合の修正や、用途や必要特性に応じてさまざまな付加的な処理（熱処理、塗装等）を行う。

圧延工程における材質の造り込み、とりわけ水冷型のオンライン加工熱処理プロセス（TMCP: Thermo-Mechanical Control Process）は1980年代に日本で開発され、その後30年間にわたり、高級厚板製造の最先端技術として日本の厚板製造の根幹技術となっている。厚板圧延プロセスの概括を図3に示す。

TMCPでは圧延後の加工組織に対して冷却速度制御を行うことによって、必要になる金属組織と特性を自由に作り

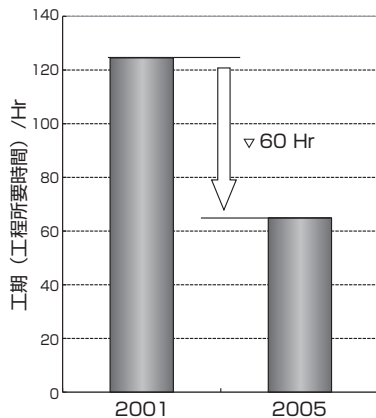


図1 君津厚板工場における製造工期の短縮

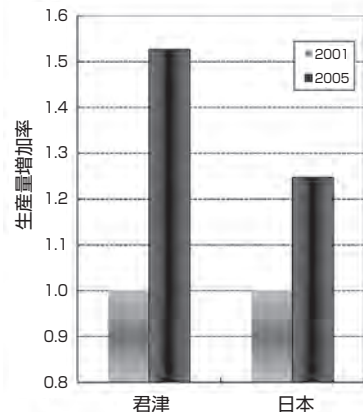


図2 日本の厚板工場の生産量増加率の比較
(出典：日本鉄鋼連盟 鉄鋼用途別受注統計月報（普通鋼/特殊鋼）)

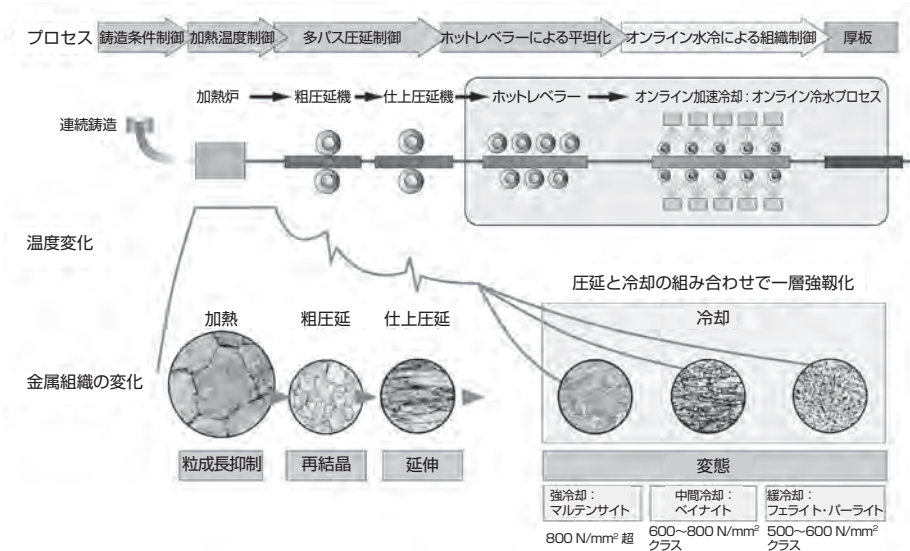


図3 厚板における金属組織制御とTMCP技術¹³⁾

分けることが可能になり、近年の厚板における新鋼材開発において基盤技術の役割を果たしている。しかし、TMCP鋼は形状確保が難しく、数メートルオーダーの幅と長さを持つ巨大な厚板を均質に冷却することは容易ではない。さらに、高級鋼の製造では付加価値を付けるための熱処理、塗装等の一連の工程が増加するため、精整工程における負荷（処理能力に対する処理すべき量）の増大、一貫生産能力の低下、製造工期延長、在庫増大といった問題が顕在化した。

3 自動車業におけるリーン生産方式との比較

自動車業におけるリーン生産方式とはどのような生産管理であったのであろう。まず、自動車業の特徴として、組み立てラインにおける時間の有効活用が目標とされた。目標の実現のために、自動化やジャスト・イン・タイムという形で概念化されたさまざまな手法が援用され、製造現場における無駄の排除が徹底され、市場動向と生産工程の変動に柔軟に対応できる生産方式が完成した^{[4][7]}。同生産方式の本質は、最終マーケットに向けて下流工程が必要なものを必要なだけ最適のタイミングで上流工程が提供するプル型生産管理にある^{[2][8]}。組み立て産業では、電気機器メーカーを中心に、流れ作業でない例えばセル生産方式が導入されているが^[9]、同方式も時間を有効に管理する点でその目的はリーン生産方式と等しい。

組み立て産業で大きな成功をあげた生産方式が、鉄鋼業において、これまで大きな成功をみななかったのはなぜであろうか。その理由を考える上で、組み立て産業とプロセス産業の工程構造は本質的に異なることを認識する必要がある。リーン生産方式はメインラインの徹底的な平準化を前提として、サブラインと同期を図ることにより成立する。一方、鉄鋼業は高炉－転炉－圧延という一貫工程を所与とし、設備の大規模化による能率向上を追求してきた。厚板工場は上流工程において規模を追求するプッシュ型工程構造の中に位置付けられるため、下流工程に合わせて各作業工程が連動しながら在庫と製造工期の最小化を追求するプル型工程構造を前提とするリーン生産方式を適用することは困難であった。

鉄鋼業における能率向上においては、一品一品の注文から半製品－出鋼といった、関連する上流工程において生産ロットを大きくすることが重要であり、その結果、上流工程で大きく造って下流工程で小さく造り分ける「ロットをまとめる」プロセスが不可欠と考えられてきた。上流工程における規模の追求は品種やサイズの等しい中間財を生産することであり、通常は必要とされる生産ロットは製品の出荷ロットと比較すると大きいいため、納期の異なる製品の中

間財が混在するとともに、跛行性をもって下流工程を流れることになる。このような工程構造が仕掛品を増大させる原因であり、単純にリーン生産方式から学ぶことによる製造工期の短縮は困難であった。

4 厚板製造における一貫最適化の取り組み

4.1 これまでの取り組み

日本の鉄鋼業は、1973年のオイルショック以降の長期にわたる構造的な不況の中で、縮小再生産と合理化を進め、労働生産性の向上に注力してきた。一方、厚板の主要ユーザーである造船、建築、橋梁、タンク、ラインパイプ等の分野では軽量化、高機能化、複合特性化が進み、厚板には高強度化、高靱性化、高耐環境性化等の製品特性が求められた。新機能材はTMCP技術を利用して開発されたが、加速冷却材には一般材に比較して圧延能率^[用語3]が低下するという問題があった。さらに、TMCP技術の適用が進むにつれて、形状を確保するための矯正工程^[用語4]の負荷が高くなった結果、品種構成の高度化とともに精整工程の高負荷化が進展した。このような状況のもと、精整能力向上の必要性が次第に認識されていったが、厚板生産において工場全体の一貫能率を向上することは難しいとされ、生産システムのボトルネックの解消は、製造工期短縮による短期的な収益向上効果が見えない中では優先して取り組む経営目標ではなかった。

さらに、製鉄－製鋼という上流工程は一貫製鉄所のコスト構造で大きな比重を占めるため、コスト視点からの製鉄所マネジメントの関心は上流工程に偏りがちであった。その結果、製品品種の高度化とともに発生する仕掛品の増加やロットの細分化への対応は遅れがちとなった。現場に慢性的な仕掛品の滞留を許容する操業体制が定着化する中で、需要の増大時には精整工程のボトルネックが顕在化し、大幅な製造工期の延長による納期遅れや受注調整を必要とする事態が発生したが、現場ではボトルネック工程への人員投入等の対症療法的な対応が常態であった。

4.2 一貫最適化を可能にした経営革新

工場単位での全体最適を可能にする生産管理の実現のためには、それを可能にする一連の経営革新が存在しなければならない。日本の粗鋼生産が長期低迷する中で、新日鉄は長期にわたり経営の合理化を進めてきたが、1990年代に入り、経営トップの強力なリーダーシップのもとで鉄鋼事業の競争力強化を目的に組織・経営体制の改革が進められた。中心になったのが製販一体化を含む品種別経営であり^[10]、本社機能のスリム化と階層の圧縮による組織の大幅な統合・改編である^[11]。1997年に行われた全社規模の組織改革によって、現場の経営に対して工場長等のミ

ドル層に一元的意思決定の権限が与えられ、ミドル層が企業家として活動する機会が与えられた。君津製鉄所では、それまでは、工程管理等の共通部門が個別製品を生産する各製造部門を支援する組織体制であったが、組織改編の結果、それまでは共通部門にあった工程管理、品質管理、設備整備という厚板の製造にかかわるすべての機能が厚板工場に統合された。新体制のもとで、厚板工場長は工場経営に対する一元的権限を活用し、厚板生産に関する管理体制の革新に着手した。工場を単位とする一貫最適化こそが、長期にわたる製品競争力の源泉であるという視点から、これまでの設備単位の生産性向上を目指す生産管理から、仕掛品削減による製造工期短縮を目指す生産管理へと経営パラダイムを大きくシフトした。そして、本来はプッシュ型に適した工程構造をもつ厚板製造に対して、プル型構造を起源にもつリーン生産方式を適用するという挑戦が始まった。

4.3 現場ミドルマネジメントの対応

圧延工程は厚板工場の品質・コストに大きな影響を与えるため、工場長は圧延能率の向上をまず目標にして、生産管理に対する支援モデルの開発とその適用に取り組んだ。次に、圧延能率の向上による精整工程の能力不足に対応するために、ボトルネック工程（矯正工程等）に加え、精整全工程にわたる各工程の能率の向上に取り組んだ。これまで、精整工程は圧延のサブ工程として位置付けられていたため、設備保全に関する対応はブレイクダウン・メンテナンス(BDM)が中心となっていたが、設備・装置を必要ときに必要な状態で稼働することを目的に、厚板工場に統合された設備整備部門とラインが一体となってトータル・プロダクティブ・メンテナンス(TPM)活動を開始した。

さらに、工場経営の全体最適化のためには、現場の製造ラインの一貫最適化に関連したスタッフによる一連のバックアップが必要になった。なによりも、精整工程における仕掛品削減は、前工程の生産ロットの拡大を制約することにより、短期的なコストプッシュ要因となる可能性があるため、精整工程における仕掛削減は個別設備の能率向上だけでは解決できず、計画レベルにおける工程負荷の平準化が必要であった。生産ロットの設計(材料設計)は工程管理スタッフの業務であるが、精整負荷の平準化を考慮した材料設計を行う仕組みは当時存在していなかった。この問題に対処するために、現場操業を熟知し、システム開発にも優れた技術スタッフを工程管理グループに投入し、コスト・能率・製造工期の視点から精整負荷を平準化する支援システムを構築した。以上の作業が時系列的にどのように進展したかについて、技術的な詳細を次節に述べる。

5 厚板工場における生産管理システムの革新

5.1 支援システム開発の歴史

生産管理の体系および日程計画の類型に関しては、自動車業における観察をもとに、計画のタイプを大日程(全般的生産)計画、中日程(基準生産)計画、小日程(順序)計画に分類し、それぞれのタイプについて、計画期間、日程の単位、計画修正の頻度、製品カテゴリー、計画対象といった計画要素が整理される^[12]。

生産管理の支援システムについては、MRP(Material Requirement Planning: 資材所要量計画)が1950年代半ばにゼネラル・エレクトリック社で導入されて以来、当初のMRPの弱点を克服するために、MRP II、ERP(Enterprise Resource Planning)、また、APS(Advanced Planning and Scheduling)といった生産計画支援システムが開発された。その利用と普及に関しては、MRPとAPSについて単純かつ安定的な製造工程に対する適用事例が報告されているのに対して、複雑かつ生産変動が頻繁に発生する製造工程に対する適用事例はいまだ報告されていない^{[12][21]}。この現状は、リーン生産方式に代表されるプル型の生産管理が効果的な組み立て産業においては多段階で計画の見直しを行うので、実着工に近づくのに伴って部品発注等の計画精度が必然的に高くなるため^[12]、異なった時間スケールの計画間を動的かつ有機的に連結する包括的なモデル/支援システムを構築するニーズが必ずしも高くなかったことを反映している。

一方、代表的なプロセス産業である鉄鋼業では、一貫連続する大規模設備の操業のために、膨大な制御情報、生産管理情報が必要となることから、他産業に先駆けて大規模計算機援用による生産管理システムを導入してきた^[13]。鉄鋼業の生産管理システムは、本質的にはプッシュ型の生産管理に対応し、高熱・高温プロセス工程の最適制御、上流工程の生産変動への対応、および注文情報の集約による製造ロットの極大化の実現を重視してきた。そのため、中間財工程の製造工期と在庫を検討する一貫最適化のための計画立案、スケジューリング支援への対応は極めて限定的であった。さらに、近年の製品の高度化と仕様の多様化によって、厚板製造では生産管理の複雑性が増大した。通過工程が異なる多品種の製品を組み合わせる大規模生産を行うため、製造開始段階において個別中間財の通過工程を確定することはできず、製造工期の予測、制御は極めて困難であった。

このような環境下でプル型生産管理を実現するためには、製造ロットのサイズが各工程の能率および製造工期に及ぼす影響を包括的に把握できるモデルを構築し、支援システムを活用することにより、製造ロットサイズと全工程に

における製造工期の最適化を動的に実現する必要がある。生産変動・ばらつきが大きい鉄鋼業において、これまで利用可能なMRP、APS等がなかったため、筆者らは、一連のモデルを順次構築し、現場に導入した。

5.2 新しい生産管理システム構築の経緯

(1) 能率モデル

これまで、厚板生産において、メインラインである圧延工程の能率（圧延工程の場合は、時間当たりの処理スラブ量）向上は一貫して最重要の課題であった。これまでは、個別設備の増強がその主たる対策であったが、短周期での設備増強投資は経営上の負担が大きいことから容易ではない。TMCP技術の拡大に伴う圧延の高負荷化、多品種化による能率低下を克服することを目的に、筆者らは、連続、直結、直列に配置された圧延工程全体の能率向上への取り組みを開始した。圧延各工程の能率は、製品仕様に応じて大きく変動する。また、工程間のバッファが小さいため、前後材料の処理の干渉（前後の処理の時間が異なることで生じる無駄な待ち時間）が頻繁に発生し、材料ごとにプロセス中のボトルネック工程が逐次変化する。ボトルネック対策の重要性はTOC理論（Theory of Constraint）^[14]に明らかだが、圧延工程に対して単純なボトルネック対策を適用することは困難であることから、圧延各工程間の干渉に起因する能率低下を定量的に評価可能とする新たな能率モデルの構築に取り組んだ。能率モデルの構築の背景にはTOC理論が圧延工程のような連続かつ複雑な工程における問題解決にも適用可能であるという仮説があった。

(2) 製造工期モデル

能率モデルの活用による工程設計の最適化とボトルネック工程への適切な設備増強により、圧延工程の生産能率は飛躍的に向上したが、それに伴い精整工程の能力不足が顕在化し、処理すべき量の変動に由来する仕掛品の増大を招いた。これに対処するため、精整全工程にわたる各工程の能率向上に取り組むとともに、研究開発部隊の協力を得て、離散事象システムをモデル化するシミュレーションツールによる物流シミュレーターを開発し、仕掛品の削減と工期短縮に取り組んだが、十分な成果をあげるには至らなかった。シミュレーターは、日ごとの製造ロットや品種構成、各精整工程の処理能力、稼働率等のパラメーターを所与の条件としており、処理優先順位の微調整を目的としていた点に、本来的な問題があったと考えられる。

筆者らは、先事例であるリーン生産方式の学習を通して、物流シミュレーターの限界も踏まえ、ボトルネック工程への適切な設備投資を実行するとともに、平準化生産が最重要であることをあらためて認識した。そこで、製造ロットの拡大と精整負荷の平準化の両立を図ることを目的に、製

造工期のばらつきと納期達成率の関係、さらには、品種構成、製造ロットサイズと、製造工期、在庫の関係を包括的に記述可能な製造工期モデルの構築に取り組んだ。

(3) 所要時間 / 仕掛モデル

上記の取り組みによって、これまで予測が困難であった品種ごとの製造工期と、それに対する工程ごとの通過所要時間の関係が明らかになった。しかし、各工程の通過所要時間がどのように決まるのか、またその制御因子は何か、ということは明確には理解されていなかった。一方、厚板の精整工程のように事象発生の頻度および間隔、処理の間隔にばらつきがある場合の待ち時間の解析に関しては待ち行列理論（Queuing System Theory）^[12]が存在しており、工程ごとの通過所要時間と仕掛量を記述可能なモデルの開発が、待ち行列理論に基づく所要時間 / 仕掛モデルの構築によって可能となった。

5.3 能率モデルの構築

厚板生産は、上流の圧延工程と下流の精整工程に大別されることはすでに述べた。圧延工程は、加熱、圧延、冷却等により構成され、各工程は、連続、直結、直列に配置されている。一方、精整工程は、熱処理、超音波探傷、塗装、ガス、矯正、手入等により構成され、各工程は、独立、並列に配置されている。

厚板の圧延工程のように多品種が混流することによって各工程の能率が大きく変動し、なおかつ工程が連続、直結、直列配置される場合、材料ごとのプロセス条件に応じて各工程の能率が変動してボトルネック工程が逐次変化する。それに伴い、前後材料の処理の干渉が頻繁に発生し、工程全体としての能率が大きく変動する。一方、工程が独立配置の場合、工程間に十分なバッファとしての仕掛をもつことが可能なため、工程間の処理が干渉することはまれで、各工程の能率は材料ごとのプロセス条件によりおおよそ一意に決定される。

筆者らは、TMCP・加速冷却技術の適用拡大による高負荷化、多品種化を克服し、圧延能率の向上を図るためには、材料の多品種化に伴うプロセス条件の多様化と処理ロットサイズの低下に起因する圧延各工程間の干渉の低減が、最重要の課題であると考えた。そこで、材料仕様に応じたプロセス条件および処理ロットサイズから各工程の能率を定めるとともに、ボトルネック工程を特定し、工程間の干渉に起因する能率の低下を定量的に評価可能とする能率モデルの構築を試みた。

圧延各工程には、能率に影響を与える異なる因子が存在する。例えば、加熱工程では、加熱開始温度、加熱条件等、粗圧延工程では、加熱抽出温度、圧延サイズ等、仕上げ圧延工程では、TMCP温度、圧延スラブ重量等があげられ

る。筆者らは、各工程の能率影響因子を適正に抽出し、これらの影響因子が有意な差異をもつ製品群に分類し、製品群ごとに能率を統計的に算出するとともに、製品群ごとに各工程の能率を比較することにより、直列、直結のサブ工程中のボトルネック工程を特定して、製品群ごとの固有の圧延工程全体能率を決定する圧延能率モデルを構築した。製品群サイズを適正に調整すると、圧延工程全体では一貫能率の実績値と製品群の固有の一貫能率の誤差が相殺され、生産順列に起因する変動にかかわらず、圧延能率を高精度に予測することが可能となる^{注1)}。また、この圧延能率モデルによって、品種ごとに下流工程で発生する工程の発生率を推定することができる。

能率モデルは、各工程の能率および負荷を決定することを目的としているが、上記に示したようなこのモデルの適用により、圧延工程における大幅な圧延能率の向上を達成した。

5.4 製造工期モデルの構築

筆者らは、圧延工程の大幅な能率向上を達成したが、この結果、プッシュ型の構造がさらに強化され、ロットサイズ拡大に起因する精整工程の所要変動（処理すべき量の変動）が増大した。すなわち、上流工程である製鋼から圧延のロットサイズ拡大と下流工程である精整負荷の平準化を両立させる最適化の必要性が顕在化した。

中間仕掛製品総量は、日当たりの平均生産量と製造工期（日数）の積におよそ等しく、適正な製品在庫量は製造工期のばらつきと、狙いとする納期達成率から定まる。しかし、これまでは、両者の影響因子と連関を定量的に把握し、精密かつ最適に制御する生産スケジューリングがなされているとは言い難かった。したがって、製造工期を短縮し在庫削減を実現するためには、製造工期のばらつきと納期達成率の連関を明らかにするとともに、注文品種構成や製造ロットサイズが、各工程および一貫での製造工期や在庫に及ぼす影響を包括的かつ定量的に記述可能なモデルを構築する必要がある。

製造工期は、短ければ短いほど良い変数であり、負にはならない値であるが、日数の平均と標準偏差にはある程度の線形関係がみられる。この事象を表す最も単純なモデルはばらつきの大さが瞬時値に比例するというものであるが、この場合、ばらつきの分布は対数正規分布となるので、製造工期分布を対数正規分布にて近似することとした（図4）。製造工期分布が対数正規分布に従うとすると、目標とする納期を達成するのに必要とされる日数を簡便に算出可能となり、製造工期モデルの構築あるいは評価を行う上で極めて有用である。対数正規分布は次式のように表される。ここで μ は x の対数平均、 σ は x の対数標準偏差である。

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left[-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases}$$

納期に対する製造完了の余裕日数の実績値はおよそ正規的に分布しており、その平均値および標準偏差が定めれば、納期達成率、すなわち、納期余裕日数（製造完了～納期）が0日以上となる確率は、次式に示す累積確率分布関数を用いて簡易に算出される。

納期達成率:

$$P(x > 0; \mu, \sigma) = 1 - \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dt$$

ここで、 x : 納期余裕日数 μ : 納期余裕日数平均値
 σ : 納期余裕日数標準偏差

次に、納期余裕日数のばらつきの要因について検討した。注文により納期が設定され、輸送機関や品種ごとの仕様に基づき圧延開始タイミングが決まる。このとき、注文された多様な製品をまとめてロットとして出荷するために、納期余裕と個別の製造工期は独立的になる。また、圧延開始タイミングはさらに上流である製鋼工程の変動の影響を受ける。納期余裕日数のばらつきに対しては、圧延開始のタイミング（圧延開始納期余裕日数：圧延開始～納期）のばらつきと製造工期（圧延開始～製造完了）のばらつきが影響する。構成する事象が独立に発生する場合、各独立事象の

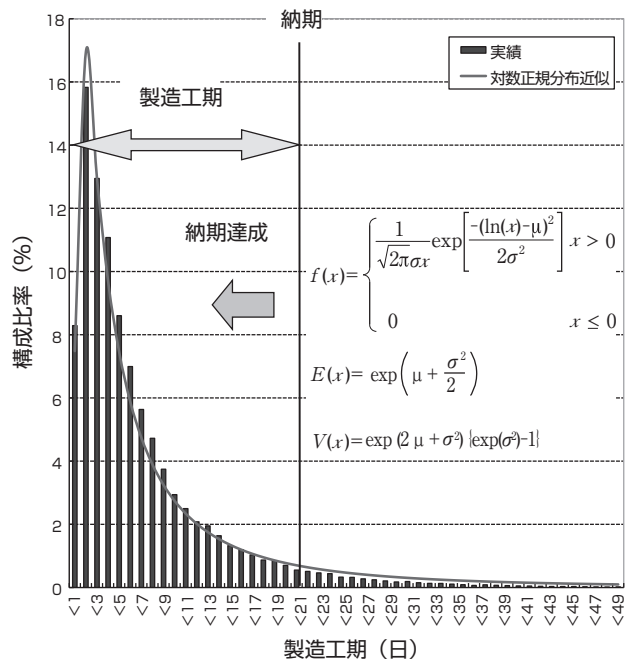


図4 製造工期分布

分散の和は全体の分散の和に等しくなる。すなわち、それぞれのばらつきが独立に決まるものとする、納期余裕日数の標準偏差は下式にて推定される。

$$\sigma_{\text{納期余裕日数}} = (\sigma_{\text{圧延開始納期余裕}}^2 + \sigma_{\text{製造工期}}^2)^{1/2}$$

ここで、 $\sigma_{\text{納期余裕日数}}$ ：納期余裕日数（製造完了～納期）

の標準偏差

$\sigma_{\text{圧延開始納期余裕}}$ ：圧延開始納期余裕日数（圧延開始～納期）の標準偏差

$\sigma_{\text{製造工期}}$ ：製造工期（圧延開始～製造完了）の標準偏差

納期余裕日数の予測値は実績値とよく一致しており、それぞれが独立事象と仮定することの妥当性が確認された。上式により納期余裕日数の標準偏差に対する各項の寄与を算出したところ、納期余裕日数の標準偏差に対する圧延開始納期余裕日数、製造工期のばらつき寄与は、それぞれ約70%、30%であり、前者の寄与が支配的であることが確認された。したがって、納期余裕日数の標準偏差の低減のためには、納期に対する圧延開始タイミングの標準偏差を減少させることが重要である。これは、在庫量低減のためには、圧延/製鋼製造のロットサイズの制御が不可欠であることを意味する^{注2)}。

5.5 製造工期～工程毎工期の寄与に関する分析

次に、製造工期のばらつきに及ぼす厚板各工程の寄与について検討した。精整各工程の通過所要時間がそれぞれ独立に決まるとすると、全体製造工期の分散は、各工程通過所要時間の分散の和として、下式のように表現される。厚板工程全体製造工期の標準偏差と、精整各工程の通過所要時間がそれぞれ独立に定まるものとして次式にて算出した圧延+剪断+精整工期の標準偏差はおおよそ一致しており、各工程の通過所要時間が独立であるとの仮定が妥当であることが確認された。したがって、当式を用いれば、各工程の所要と能力の変動が厚板製造全体の製造工期に及ぼす影響を簡易に推定可能となる。

$$\sigma_{\text{圧延+剪断+精整}} = (\sigma_{\text{圧延+剪断}}^2 + \sum \sigma_{\text{精整各工程}}^2)^{1/2}$$

ただし $\sigma_{\text{圧延+剪断+精整}}$ ：圧延+剪断+精整工期の標準偏差

$\sigma_{\text{圧延+剪断}}$ ：圧延+剪断工期の標準偏差

$\sigma_{\text{精整各工程}}$ ：精整各工程（手入、冷間矯正、油圧プレス矯正、ガス、塗装、超音波探傷、電溶、マーキング、ショット、焼準、焼入、焼戻）の通過所要時間標準偏差

上記の評価の結果、圧延+剪断工程の全工程の製造工期に対する寄与は20%に過ぎず、製造工期短縮に対する圧延能率の向上効果は限定されることがわかった。一方、

精整工程の工期については、大部分は作業待ち時間であり、必要作業時間の寄与はたかだか5%に留まる。すなわち、納期に対する圧延開始タイミングのばらつきを低減し、適正なロットサイズに制御するとともに、各工程の所要時間と仕掛量を最小化する操業を実現するならば、製造工期が大幅に短縮される可能性が高いと考えられた。

品種ごとの通過工程数および製造工期を図5に示す。品種により、通過工程数および製造工期は大きく異なること、製造工期は通過工程数におよそ依存していることが分かる。したがって、各工程の負荷平準化のためには、品種ごとの投入量の平準化が必要であり、さらには投入量の跛行性を予防する観点から、ロットサイズの制御が重要であることが理解される。

筆者らは、通過パターンごとに製造工期分布を求め、それらを製造品種ごとの通過パターンの構成比率で按分することで、製造品種ごとの製造工期分布を求める方式を採用した^{注3)}。製造工期を本製造工期モデルにて予測した結果、予測値は実績とよく一致しており、本モデルの妥当性が確認された。したがって、通過工程と各工程での所要時間が分かれば、製造工期が予測できることになる。

5.6 所要時間/仕掛モデルの構築

工程が独立配置の場合、工程間に十分な仕掛をもつことが可能な場合は、各工程の能率が他工程の影響を受けることは少ない。一方、十分な仕掛がない場合には、他工程の処理待ちの発生や段取り替え時間が増加する等の能率が低下する「リスク」がある。そのため、置場能力が許す範囲内にある限りは仕掛を低減しようとする動機が働かず、精整工程のボトルネック工程への設備増強後も仕掛の最小化はなかなか進展しなかった。精整工程の工期は、前述のように必要作業時間の寄与はたかだか5%であり、大部分が作業待ち時間であることから、各工程の所要時間と仕掛量を最小化する操業が製造工期の短縮へ向けての課題であった。

厚板の精整工程のように、発生の頻度および間隔、処理の間隔にばらつきがある場合の待ち時間の解析には待ち行列理論の適用が有効であることが知られている。そこで筆者らは、工程ごとの通過所要時間を記述可能なモデルを構築することを目的として、待ち行列理論を厚板製造へ適用し、各工程の製品の通過所要時間と仕掛量の予測モデル（所要時間/仕掛モデル）を構築するとともに、その妥当性（各工程仕掛量と通過所要時間の精度良い予測が可能）を検証した。

時間ごとの発生頻度と処理頻度が一般分布で変動するとともに、設備故障等に起因する休止の頻度および時間が変動する場合、ある工程の所要時間および仕掛は待ち行

列理論を用いて下式のように導出される^[22]。

$$W = \frac{1}{1 - \rho_X(1 + \rho_Y)} \left[\frac{1}{2} \rho_X (1 + \rho_Y)^2 (1 + C_{SX}^2) E_X + \frac{1}{2} \frac{\rho_Y}{1 + \rho_Y} (1 + C_{SY}^2) E_Y \right]$$

$$= \frac{1}{1 - \rho_B} \left[\frac{1}{2} \rho_X (1 + \rho_Y)^2 (1 + C_{SX}^2) E_X + \frac{1}{2} \frac{\rho_Y}{1 + \rho_Y} (1 + C_{SY}^2) E_Y \right]$$

$$N = \lambda W$$

ただし、待ち時間 W および仕掛 N が安定的に定まるための必要条件は

$$\rho_B = \rho_X(1 + \rho_Y) < 1$$

$$\rho_Y = 1 - \rho_L \rho_X$$

である。

ここで、 W :平均待ち時間、 N :平均仕掛数、 E_X :平均処理時間、 E_Y :平均休止時間、 C_{SX} :処理時間の標準偏差と平均の比、 C_{SY} :休止時間の標準偏差と平均の比、 P_B :総合利用率、 ρ_X :利用率、 ρ_Y :休止率、 $1 - \rho_Y$:稼働率、 λ :平均発生率、 μ :平均処理率、 δ :休止発生率、 γ :休止終了率、 ρ_L :前工程稼働率、 ρ_0 :作業率、 μ_0 :上限処理率

この所要時間 / 仕掛モデルを厚板精整工程へ適用し、所要時間および仕掛を予測した結果、発生、処理、休止の頻度にばらつきがある場合においても、所要時間、仕掛量とも実績とよく一致しており、待ち行列理論を適用した本モデルの妥当性が確認された。

6 製造知識の体系化に向けて

6.1 生産管理に関するマルチスケール階層モデルの提案

前章では、生産管理において個別課題の解決のためにどのように支援システムが構築されたかについて、君津製鉄所厚板工場の事例を時系列的に示した。この章においては、実現された生産管理システムをどのような視点から概念的にモデル化すれば、プロセス産業における一貫最適化に対する理解を深化することができるか考察する。筆者らが経験した個別の技術課題に対する一連の問題解決活動から得られた知見を構成化（シンセシス）し、以下に概念モデルを提案する。

この論文が先行例とするリーン生産方式では、これまで

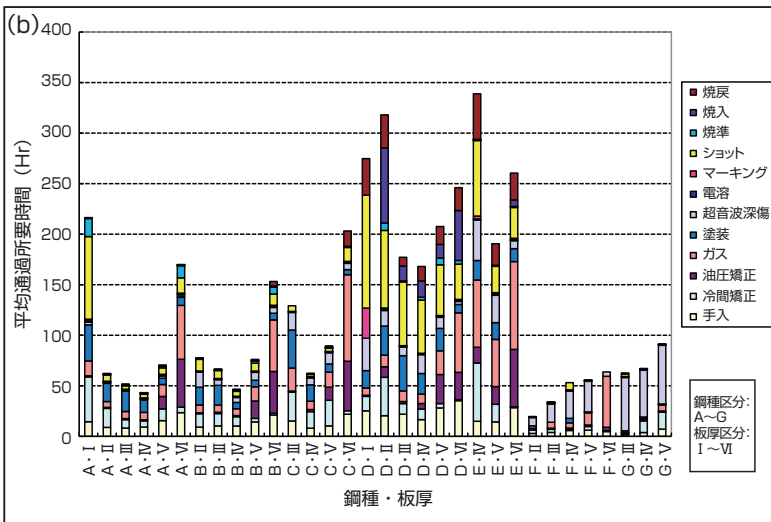
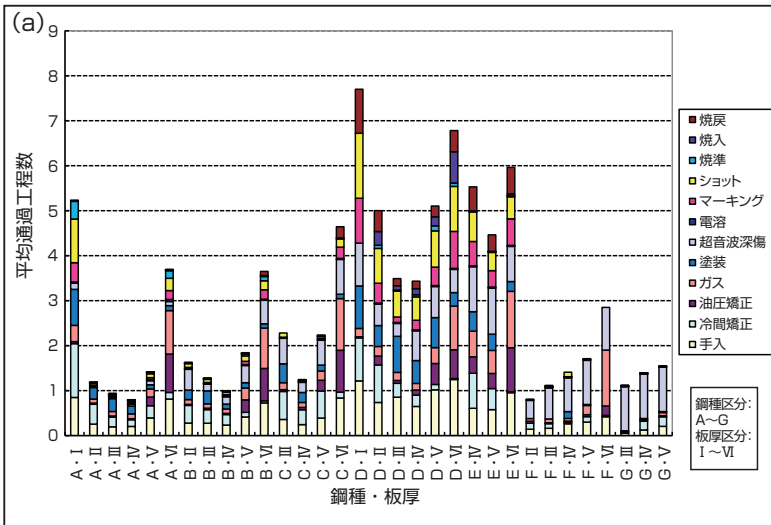


図5 品種ごと平均通過工程数と平均通過所要時間
(a) 品種ごと平均通過工程数
(b) 品種ごと平均通過所要時間

の生産管理における常識であった、秒単位の製造ライン・月単位の生産計画・長大な製造工期・在庫という時間的プロセス構造が、在庫の流れを製造ラインの流れと同期化（ジャスト・イン・タイム）することによって、生産管理における時間スケールはメインラインのそれに同期化される。一方、厚板製造に関する生産管理の時間プロセス構造に注目すると、それはプロセッシング（秒単位）、ロット計画（時単位）、日計画（日単位）、週計画（週単位）、月次計画（月単位）という時間的なマルチスケール階層構造として成立しており、現場の操業とスタッフによる生産管理はこのような階層構造を与件として行われてきた。これまで、月次計画において想定される品種構成に基づき、各工程の能力を表計算にて算定するマクロ能力モデルが存在したが、筆者らは、厚板製造の一貫最適化を実現する過程において、能率モデル、所要時間/仕掛モデル、製造工期モデル、という3モデルを構築した。これらのモデルは、厚板製造における時間的なマルチスケール階層構造に対応している。すなわち、能率モデルは秒（プロセッシング）～時（ロット）計画～日計画に、所要時間/仕掛モデルは、時（ロット）計画～日計画～週計画に、製造工期モデルは、日計画～週計画～月計画に関するものであり、3モデルはそれぞれ相互に関連する。能率モデルによって、能率や処理負荷が分かるだけでなく、プロセスパラメータやロット計画等の変数から、品種ごとに下流工程で発生する工程の発生率（品種毎工程発生率）が得られる。この処理負荷および品種毎工程発生率を日/週計画とともに所要時間/仕掛モデルに入れることで、工程の所要時間と仕掛量が求められる。日/週計画および月次計画で決められた品種に対して、能率モデルから得られる品種毎工程発生率と所要時間/仕掛モデルから得られる所要時間を製造工期モデルに入力することで製造工期が求められる（図6）。

前章に示したように、現場での試行錯誤は、複雑な工程と製品仕様を有する厚板製造に対して、異なる時間スケール（階層）をまたがり、要求される計画精度と生産/注文の変動への対応力を両立する生産管理システムを成立させるに至った。筆者らは、同システムを時間に関するマルチスケール階層構造の視点から把握し、生産管理に関するマルチスケール階層モデルとして概念化することを提案する。

複雑な組織構造を有する鉄鋼材料に関する材料研究の分野において、Olson は、空間的なマルチスケール階層モデルを提案し、階層ごとに独立に構築した物理モデルの有機的な結合により、サブナノスケールの電子レベルの量子力学的現象、ナノスケールの転位を含む原子配列構造、ミクロンスケールの変態現象、ミリ～メートルレベルの実用鋼の組織と特性を包括的に記述可能であることを示した^[23]。

筆者らは、この空間的なマルチスケール階層モデルを、時間的なマルチスケール構造の記述に適用する。すなわち、生産管理の時間スケールを3階層に分割し、それぞれの階層ごとに能率モデル、所要時間/仕掛モデル、製造工期モデルを対応させるとともに、これらを有機的に連結する一貫生産管理に関する時間的なマルチスケール階層モデルを提案する（図6）。本モデルは、厚板製造における時間に関するマルチスケール性を明らかにし、ミクロ（個別工程におけるプロセッシング）からマクロ（製造工期の管理）に至る意思決定に関する定量的な評価と最適点の探索を可能とする一貫モデルである。本モデルにより、プッシュ型の生産管理手法による上流工程におけるプロセス条件の最適化と、出荷を基軸としたプル型の生産管理を志向する下流工程における製造工期の短縮という両立が難しい要請を、バランスよく調整するための最適スケジュールの探索が可能となった。

生産管理モデルの難しさは時間スケールの階層性にあるが、階層構造を有する複雑な物理現象を記述することは、鉄冶金学の研究開発における最も基本的な研究テーマである。筆者の一人（水谷）は、米国における博士研究において、物理現象を発現させるメカニズムをモデル化する際に構造を階層ごとに分割することによる単純化が有効であることを学習し、身に付けていた。さらに、当該技術者は、理論を理論として机上で学習することに加え、知識の活用を製造の現場に移した。そこで、先行事例としてのリーン生産方式に関する知見と技術者が体得していた研究の進め方のノウハウを現場の活動を通じて融合することにより、複雑現象を階層構造として分析することを可能にしたと考えられる。

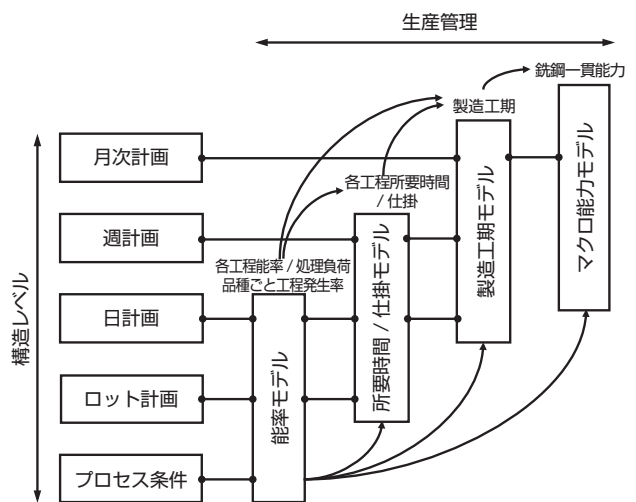


図6 生産管理マルチスケール階層モデル

6.2 マルチスケール階層モデルの意義

鉄鋼製造の生産管理のルーチンは、業務効率性の観点から各タスク階層に分断されており、各ルーチンに関する熟練を形成しても、製造における生産管理システムの全体像をとらえることは極めて難しい。マルチスケール階層モデルの最大の意義は、システムの全体像を俯瞰的に提示することによって、生産管理を通じた工場単位の一貫最適化という経営課題を技術的に詳細に検討できるフレームワークを提供することにある。そもそも、製造システムの設計と再設計による継続的改善を使命とする技術者にとって、生産管理システムの全体像の俯瞰的な把握は業務推進のための大前提であり、提案モデルの果たす役割は大きい。

しかし、今回提案のモデルは全体最適を実現する最適化評価関数を有するものではなく、理論的、定量的に全体最適を保証するものではない。最適化の探索には種々のモデルが不可欠だが、自動車に代表される組み立て産業と比較すると、鉄鋼業では特に上流工程である製銑、製鋼工程における日々の生産操業変動が極めて大きく、計画の変更も頻繁に発生する。このような状況の中で、モデルは外乱を含む実績に基づき構築されることから高精度な予測は困難であり、その信頼性にはおのずと限界がある。完全情報を前提として最適解を探る決定論的アプローチは明らかに適しておらず、トップダウンの分析によって得られるモデルをシステムに組み込んで膨大な計算を精緻に行うことは、時間的にも、また有効性の観点からも現実的ではない。

対照的に、提案モデルの構築の経緯を振り返ると、この研究が対象とした生産管理システムにおいては、(i) システムを構成する個別要素は局所的に組織化され、システムに要求された機能を実現する構造は、試行錯誤（仮説形成と検証）を通じて、順次、決定され、(ii) 導出された適応解は（最適解ではないとしても）、これまでの方法では解けない複雑な問題に対して予想を超えた解答を与え、動的環境で活動する製造現場の意思決定を実効的に支援していることが判る。筆者らの観察は、提案モデルを構築するプロセスが創発的プロセスであったことを強く示唆するものである^[24]。

それでは、本事例でみられた創発現象はどのように誘発されたと考えるべきなのであろう。組織の戦略展開を創発的プロセスとして理解する経営学者は、企業活動に適切な「場」（環境）を設定することによって、組織を構成する個人間での創発現象を誘発することが促進可能であると主張する^{[25]-[27]}。筆者らは、4章で示したように、本事例においては、本社レベルでの経営革新、また、工場レベルでのミドルマネジメントのリーダーシップのもと、現場で創発現象を誘発するための基本的環境設定が行われたと

考える^{[26]-[27]}。さらに、生産管理システムがどうして可能になったかという観点からは、当該企業において、ボトムアップ型シンセシスを担える中核的人材が組織的に育成され、そのような人材が現場における創発活動を推進する役割を果たした事実が重要である。

提案モデルの構築に貢献した技術者が所属する「技術グループ」の役割を紹介すれば、同グループは製造現場とスタッフ部門をつなぐ中継点に位置し、工場運営に関し単に製造技術に限定されない広範な調整機能を持ち、生産システムの運用と革新に中核的役割を果たす^[註4]。技術系スタッフは、入社時に、「技術グループ」に配属されることが一般的であり、新入社員時には3交代勤務の現場経験を積む。その後、技術系スタッフはさまざまなキャリアを経験するが、工場長他、製鉄所の幹部の候補となる優秀な人材が「技術グループ」に定着する傾向がある。このようなキャリア・パスは、企業が、「技術グループ」のスタッフに対して、幅広いOJTを経験させることによって調整や問題解決手段についての知識を身体化させ（ブルデューのハビトゥス^[用語5]にあたる^[28]）、創発的プロセスにおける主要なイネプラー^[29]（創発活動において他者に目的の実現を可能にする人材）として育成することを志向してきたことを示唆する。

システムインテグレーターとしての技術者には、設備・操業技術の高度化による技術的優位性と経済合理性を両立する使命がある。鉄鋼業に対してリーン生産方式を自動車業レベルで導入するときには発生するコストとリスクは、現場の工場経営に許される許容範囲を大きく超えると想定される。生産プロセスの一貫最適化は、工場経営における全体最適化の視点から評価する必要があり、提案モデルは、現場のマネジメントが技術と経営からの相反する要請をどのようにバランスするか、具体的に検討するための定量的指針を提供する。例えば、リーン生産方式の推進のために必要になるボトルネック工程の解消のために、どの程度の設備投資が最適なのかを検討する際、これまでは、精整工程の設備増強による一貫能率向上が定量的に評価できなかったために、精整工程に対する適切な投資判断が難しかった。提案モデルは、一貫最適化の効果と必要性を、厚板工場内はもとより、君津製鉄所の経営層や営業部門に対して効果的に提示する可能性を開いた。また、現場の操業改善やスタッフによる生産管理業務の改善を目的とした材料設計や出鋼スケジュールの最適化およびサプライチェーンマネジメント基盤整備等の生産管理システムを順次開発したが、その過程においてマルチスケールモデルを用いた定量的な解析は大きな効果を発揮した。

このようにこの研究が提案するマルチスケールモデルの形成の経緯には、以下のような二面性がある。まず、モデ

ルをその形成プロセスから観察すれば、同モデルの構造が開発を担当した技術者の有する研究の進め方のノウハウ、具体的には、複雑な現象に対する階層構造アプローチによって主導されたという側面が認められる。他方、筆者らは、紹介してきた一連のモデルが整備され一つの生産管理システムとして出現したとき、同システムを広く産業社会に普及することの価値を認めるに至った。そして、同システムの形式化を進めるにあたって、それを相互作用のあるマルチスケールモデルとして体系化することから得られる利点を再認識したのである。

7 まとめと展望

製造業の本質が「情報を材料に転写する」ことにあるならば、材料のフローを創り出すとともに、情報のフローを同期させるリーン生産方式は、製造業の本質を追究した「目指すべき姿」の一つである^[30]。フォードに始まる大量生産方式による規模経済性の追求は、秒単位の製造ラインと、月単位の生産計画、長大な工期・在庫という生産管理の時間的マルチスケール階層を生み出したが、リーン生産方式を主導した大野は脱規模を旗印に製造ロットサイズの制御と製造のラインへの同期の追求によりこれを克服した^[4]。リーン生産方式を時間マルチスケールのフレームでとらえると、製造の時間スケールをメインラインのそれに一本化したものと理解できる。一方、プロセス産業である鉄鋼では、製造ロットサイズが生産性および品質に及ぼす影響が組み立て産業である自動車と比較してより大きいことから、自動車と同水準の製造の同期性や時間スケールの圧縮を実現することは本質的に困難である。しかし、この論文の事例は、鉄鋼以外の他産業においても、生産システム全体を時間的なマルチスケール階層構造として把握し、支援システムによって各階層を適切に連結することによって一貫最適化が実現される可能性を示している。

多くの産業において、製造に要する時間の短縮は、多岐にわたる付加価値製品を開発し、これを競争力ある製品として製造するために不可欠の要素である。例えば、鉄鋼業とは一見対極にあるように思われる医薬分野においても、製品の競争力が価格とスピードで決まる時代が始まっている。これまで、医薬品の分野においては、特許によって差別化された製品を有することが競争力を決定付けていた。しかし、ジェネリック医薬品の普及に伴い、多品種にわたる薬をいかに価格競争力ある製品として製造できるかが重要な経営課題となりつつある。例えば、錠剤は、混合～造粒～篩過～混合～打錠～コーティングといった一連の設備、製造プロセスを用いて多種多様な製品に造り分けられるが^[31]、このプロセスは鉄鋼製造プロセスと同様にコンピュー

ターによって精緻に管理されている。すなわち、工程構造的にも、多様な品種への対応が必要とされる点でも、鉄鋼業と類似の課題を有しており、この論文で提案するモデル化によるアプローチは医薬分野を含む多くのプロセス産業に今後横展開される可能性があるものと考えられる。

日本の製造業では、一連の技術スタッフが現場において着実に製造技術と生産管理の革新にあたってきた。その過程で生まれた製造知識は、本来、教科書化され実学としての工学は学問として体系化を進めることが期待されていた^[32]。もとより、製造の現場における一貫最適化を実現するためには、ミクロからマクロに至る各階層における現象を理解し、モデル化を進め、構築したフレームワークにおいて他業種・他企業におけるベストプラクティスと比較・対照する必要がある。この論文が提案する生産管理に関するマルチスケール階層モデルは、キャリアを通じて幅広く深いOJTを経験した現場エンジニアの生きた知識をモデル化したものであり、この論文は、産業界からの製造知識の体系化の必要性を強く示唆する。

謝辞

この研究は科学研究費補助金 基盤研究 (B) 17330082 の支援を受けて実施された。

この研究に関し、学術的視点から助言をいただいた、清家彰敏、藤本隆宏、新宅純二郎、桑嶋健一各氏に感謝する。また一貫最適化を推進するにあたり、ご指導ご支援をいただいた三村明夫、宗岡正二、王寺陸満、萬谷興亜、市瀬圭次各氏に感謝する。

注1) 実際の生産においては、複数種の製品群を組み合わせ製造するため、ネック工程が逐次変化し、当該製品群の固有のネック工程とは異なる状況が頻繁に発生する。そのため、実際の生産で観測される圧延工程の能率の実績値は、同一製品群を連続して製造する場合の固有の一貫能率とは異なり、期間ごとに変動する生産順列の組み合わせの影響を受け、実績を集計した期間ごとに変動する。この能率モデルでは、実際の圧延工程全体の能率が固有の一貫能率を中央値として分布するように、各工程の処理能率影響因子を適正に抽出し製品群を定義するとともに、圧延工程プロセス全体では生産順列にかかわらず一貫能率の実績値と製品群の固有の一貫能率の誤差が相殺されるように製品群サイズを適正に調整することにより、上記の問題を回避し、圧延工程の全体能率をこれまでのモデルと比較してより高精度に予測することに成功した。

注2) 鉄鋼厚板の生産は多様な製品注文（注文当たり同一仕様の製品は約3 t）を、ロットで製造して（同一の製鋼製造条件：最低300 t、生産性を考慮すると2,000 t超が望ましい）、ロットで出荷する（同一の需要家、納期、輸送機関ごとに）点に特徴がある。納期は同一の出荷ロットに対して設定されるが、需要家のニーズにより、多様な製品注文が同一の出荷ロットに含まれるため、製造ロットは出荷ロットとは一致しないことが一般的である。そのため、圧延開始のタイミングは、納期から想定される製造工期をさかのぼって決定はされるものの、製造ロットをまとめるためのばらつきを不可避的にもつ。

注3 精整工程の通過工程数と製造工期に相関があることを活用し、①製造仕様から精整工程の通過パターン（通過有無を表す01の並び）を予測した後、②この通過パターンに大きくり品種を表す分類コードを付加した文字列（製造品種）を一つのグループとし、この製造品種ごとに工期分布を予測する方式を採用した。分類コードを付加した理由は、同じ通過パターンでも発生工程の通過頻度（発生率）が異なることで、工期分布が異なるケースがあること、通過パターンと通過頻度が同じであっても、品種によっては納期達成率の設定値が異なるケースがあるためである。

厚板の製造では、手入やガス切断、矯正工程等、注文仕様決定の時点では通過有無が未定であり、圧延後に通過有無が決まる発生工程があるため、注文の製造仕様から単純なロジックで精整工程の通過パターンを算出することはできない。そこで、データマイニングの汎用的手法である決定木 (Decision Tree) を用いて、通過パターン予測モデルを構築した。

製造品種ごとの工期分布を求める際には、実績データから同じ製造品種のプレートを集めて、それらの実績工期のヒストグラムを工期分布とする方法が単純である。しかし、稀にしか製造されない製造品種も存在し、このようなデータ母数の少ない製造品種の工期分布は、信頼性が低くなる問題がある。そこで、筆者らは、通過パターンごとに工期分布を求め、それらを製造品種ごとの通過パターンの構成比率で按分することで、製造品種ごとの工期分布を求める方式を採用した。

注4 さらに、製鉄所トップマネジメントへの情報発信（ライン代弁者としての、あるいは技術責任部門としての説明責任）、ライン経営に関連した短期的課題にかかわる関係スタッフ部門（生産技術、生産業務、総務、人事、労働、設備）との調整、中長期計画の企画・立案、研究開発部門との研究開発戦略の策定、本社関連スタッフ部門との調整等々、職務が必ずしも明快でない領域も含めて、ライン部門を中心として発生する諸問題に対する総合調整的な役割を担う。

用語説明

用語1：製造工期：鉄鋼用語。リードタイムと同義。製造に要する時間をいう。その定義は受注～納品、製造着手～製造完了等、さまざまであるが、この論文では、厚板圧延開始～製造完了までに要する時間をいう。

用語2：製鉄所の製造プロセス：鉄鉱石から一貫して鉄鋼製品を製造する製鉄所を銑鋼一貫製鉄所と呼び、その工程は、高炉で鉄鉱石を還元して銑鉄を製造する製鉄工程、転炉で銑鉄から炭素分を除去し必要な合金元素を付与して鋼を製造する製鋼工程、製鋼工程で製造された半製品を圧延してさまざまな製品を造り分ける圧延工程の3つに大別される。厚板は圧延工程の一つであり、厚板製品を圧延、製造する。

用語3：圧延能率：能率は、一定時間内にできる仕事の割合を示す。圧延工程は、加熱、圧延、冷却等の工程が連続、直列、直結されているため、これらの設備群を連続処理する能率を圧延能率と呼ぶ。

用語4：矯正工程：厚板の圧延工程で生じた形状 (flatness) の不良をローラー矯正機やプレスで形状修正する工程。

用語5：ハビトゥス：ハビトゥスに類似する概念として暗黙知 [Polanyi, M.: *The Tacit Dimension*, Doubleday Anchor, N.Y. (1967)] がある。ハビトゥスは科学活動における暗黙知とみなすことができ、研究をどのように進めるかに関する広義のノウハウである。

参考文献

- [1] J. P. ウォーマック and D. T. ジョーンズ: *リーン・シンキング*, 日経BP社, 東京 (2008).
- [2] 圓川隆夫, 黒田充, 福田好朗: *生産管理の事典*, 朝倉書店, 東京 (1999).
- [3] 吉江淳彦: 厚板・2, *Nippon Steel Monthly*, 6 (169), 7-10 (2007).
- [4] 大野耐一: *トヨタ生産方式*, ダイアモンド社, 東京 (1978).
- [5] J.P. Womack, D.T. Jones and D. Roos: *The machine that changed the world*, Donna Sammons Carpenter, NewYork (1990).
- [6] 清家彰敏: *日本型組織間関係のマネジメント*, 白桃書房, 東京 (1995).
- [7] 下川浩一: フォード・システムからジャスト・イン・タイム生産システムへ, *企業経営の歴史的研究*, 中川敬一郎編, 岩波書店, 東京 (1990).
- [8] 門田安弘: *新トヨタシステム*, 講談社, 東京 (1991).
- [9] 坂爪裕: セル生産方式と分業の新展開, 導入企業8社の事例研究, *日本経営学会誌*, 16, 95-110 (2006).
- [10] 新日鉄: 「しんにつてつ」(*新日本製鐵社内報*), 81, 2-5 (1994).
- [11] 新日鉄: 「しんにつてつ」(*新日本製鐵社内報*), 117, 6-9 (1997).
- [12] 藤本隆宏: *生産マネジメント入門I: 生産システム編*, 日本経済新聞社, 東京 (2001).
- [13] 夏目大介: *鉄鋼業における生産管理の展開*, 同文館出版, 東京 (2005).
- [14] S.J. Balderstone and V.J. Mabin: A review of goldratt's theory of constraints (TOC) - lessons from the international literature, *Operations Research Society of New Zealand 33rd Annual Conference*, University of Auckland, New Zealand (1998).
- [15] J. Ashayeri, R.J.M. Heuts, H.G.L. Lansdaal and L.W.G. Srijbosch: Cyclic production-inventory planning and control in the pre-Deco industry: A case study, *International Journal of Production Economics*, 103 (2), 715-725 (2006).
- [16] M. Gupta and A. Kohli: Enterprise resource planning systems and its implications for operations function, *Technovation*, 26 (5-6), 687-696 (2006).
- [17] K.J. Watson, J.H. Blackstone and S.C. Gardiner: The evolution of a management philosophy: The theory of constraints, *Journal of Operations Management*, 25 (2), 387-402 (2007).
- [18] Z. Li and M. Ierapetritou: Process scheduling under uncertainty: Review and challenges, *Computers and Chemical Engineering*, 32 (4-5), 715-727 (2008).
- [19] C.T. Maravelias and C. Sung: Integration of production planning and scheduling: Overview, challenges and opportunities, *Computers and Chemical Engineering*, 33 (12), 1919-1930 (2009).
- [20] J.M. Framinan and R. Ruiz: Architecture of manufacturing scheduling systems: Literature review and an integrated proposal, *European Journal of Operational Research*, 205 (2), 237-246 (2010).
- [21] Y.-W. Chen, Y.-Z. Lu, M. Ge, G.-K. Yang and C.-C. Pan: Development of hybrid evolutionary algorithms for production scheduling of hot strip mill, *Computers and Operations Research*, 39 (2), 339-349 (2012).
- [22] T. Altiok: Performance analysis of manufacturing systems, *Springer Series in Operations Research*, ed. P. Glynn, Springer (1996).
- [23] G.B. Olson: Transformation plasticity and toughening, *Journal de Phys. IV, Colloque C1*, 407-418 (1996).
- [24] 上田完次: *創発とマルチエージェントシステム*, 培風館, 東京 (2007).
- [25] 野中郁次郎, 竹内弘高: *知識創造企業*, 東洋経済新報社, 東京 (1996).
- [26] D.J. Teece: *Dynamic Capabilities and Strategic Management*, Oxford University Press, Oxford (2009).

- [27] C.E. Helfat, S. Finkelstein, W. Mitchell, M. Peteraf, H. Singh, D. Teece and S.G. Winter: *Dynamic capabilities, Understanding Strategic Change in Organization*, Blackwell Publishing (2007).
- [28] ピエール・プルデュール: *科学の科学: コレージュ・ド・フランス 最終講義*, 藤原書店, 東京 (2010).
- [29] ゲオルク・フォン・クロー, 一條和生, 野中郁次郎: *ナレッジ・イネーブリング*, 東洋経済新報社, 東京 (2001).
- [30] 藤本隆宏: *日本のものづくり哲学*, 日本経済新聞社, 東京 (2004).
- [31] 邊見公雄, 武藤正樹: *ジェネリック医薬品講座*, ぎょうせい, 東京 (2011).
- [32] 吉川弘之: *テクノグローバリズム*, *日本機械学会誌*, 94 (868), 200-204 (1991).

事業部参与。2008年日本鉄鋼協会渡辺義介記念賞受賞。この論文では、2001年に厚板工場長に就任し、工期短縮と生産拡大を実現。

馬場 靖憲 (ばば やすのり)

1977年東京大学経済学部卒業。1986年サセックス大学博士課程修了 Ph.D., SPRU フェロー、科学技術政策研究所主任研究官等を経て、1993年4月より東京大学人工物工学研究センター助教授、1997年同教授。2001年7月以降、同先端科学技術研究センター教授。2007年4月より同大学院工学系研究科先端学際工学専攻。この論文では、知見の構成化、体系化を担当。



執筆者略歴

西岡 潔 (にしおか きよし)

1977年大阪大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了。1977年新日本製鐵株式会社に入社。厚板の製造、研究、本社技術行政、役員として本社技術開発企画を担当。1997年君津製鐵所厚板工場長(部長)、2001年本社厚板営業部部長、2005年取締役、2006年執行役員、2009年顧問、東京大学先端科学技術センター客員研究員、現在に至る。2005年日本鉄鋼協会技術貢献賞、2007年谷川熱技術振興基金粉生熟技術振興賞受賞。この論文では、1997年に厚板工場長として厚板生産管理の革新に着手、一貫最適化の実現を主導。



水谷 泰 (みずたに やすし)

1991年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了。2006年ノースウエスタン大学博士課程修了 Ph.D (Materials Science and Engineering)。1991年新日本製鐵株式会社に入社。技術開発本部君津技術研究部主任研究員、君津製鐵所厚板工場厚板技術グループリーダー、厚板課長等を経て、現厚板工場マネージャー。これまでに、厚板製造における生産性向上、TMCP技術の開発、一貫最適化に従事。この論文では、技術スタッフとして、一貫最適化の企画、実行推進とともに、生産管理マルチスケール階層モデルの構築を主導。



上野 博則 (うえの ひろのり)

1996年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。1996年新日本製鐵株式会社入社。君津製鐵所厚板工場にて主に高効率化やTMCP技術開発等、操業技術改善ならびに設備企画・開発、厚板製造プロセスの抜本的改善に従事。2005年国際鉄鋼協会(World Steel Association)への派遣等を経て、現名古屋製鐵所厚板工場厚板技術グループマネージャー。この論文では、技術スタッフとして現場改革、操業改善に貢献。



川崎 博史 (かわさき ひろふみ)

1980年大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了。1980年新日本製鐵株式会社入社。君津製鐵所厚板工場配属後技術スタッフとして工場操業技術改善、商品技術開発に従事。本社技術本部厚板技術室掛長、君津製鐵所厚板工場長(部長)等を経て、現本社厚板



査読者との議論

議論1 鉄鋼厚板製造プロセスの生産性

コメント(上田 完次:産業技術総合研究所)

プロセス産業の最適一貫生産という重要で困難な問題を取り上げ、実践的な取り組みにより解決課題項目を明らかにしてモデル化を行い、具体的な鉄鋼厚板製造プロセスでの実績の事例をまとめた論文であり、構成学にふさわしい内容と言えます。この研究のシナリオでは、リードタイム最小化と生産性向上の両立の困難さの認識を根拠にしていますが、この論文での生産性向上とは何を意味するかを明確に記述してください。

回答(西岡 潔)

生産性は、時間当たりの生産量、すなわち、「能率」を意味しております。鉄鋼業におけるプロセス改革・改善は、メインラインの能率向上に重点がおかれてきました。しかし、個別の設備あるいは設備群の能率向上は製造工期の最小化には繋がらず、逆にこれを悪化させる原因にもなります。この両者をいかに両立させるかがこの研究の主題とするところです。

議論2 ミドルマネジメント

質問(上田 完次)

この論文の主張の一つとして、経営革新におけるミドルマネジメントの役割の重要性が記述されていますが、ミドル層の意味を明確にできませんでしょうか。

回答(西岡 潔)

この論文におけるミドル層は、現場の工場長クラスを念頭においています。トップマネジメントは、会社全体の組織と制度を変える権限を有するのに対し、ミドルマネジメントは制度と構造の範囲の中で、運用と評価を変える権限を有しています。経営トップの強力なリーダーシップによる全社的な組織、業務構造の改革と、現場経営を担当するミドル層による革新活動が同期化することによって、本来変わりにくい組織活動が一新され、変化する市場環境に対して能動的に対応することが可能となることを、この論文は示唆しています。

議論3 マルチスケール階層モデルが得られた経緯と今後の展開

コメント(上田 完次)

6章は、製造知識の体系化に向けて、あらたなモデルの提案をするという主張です。興味深い内容ですが、どのようにしてこのモデルが得られたかが明確ではありません。また、このモデル提案が、今後どのような産業やプロセスに横展開されるべきか等、展望を述べてください。

回答(西岡 潔)

提案モデルは、演繹的に導出されたものではなく、試行錯誤を経て作成したモデルを帰納的に理解すれば、時間階層に跨るモデル構

造を有しているということが理解されることを示しています。これまでの製造実績に基づく結果系の生産管理に対して、マルチスケール階層モデルは時間的に生じる現象の原因と結果を繋ぐ視点を付加することによって、より適切な時間管理、生産管理が可能になることを示唆しています。リーン生産管理は、プロセッシングというラインの運動性の中で一貫最適化の極限を追求できるという画期的な生産管理を生み出しました。一方、既存設備の更新やレイアウトの変更が困難な設備産業およびプロセス産業においては、プロセッシングという時間範囲の最適化のみで、全体としての一貫最適化を実現するのは困難です。すなわち、多くの産業において、ものづくりの時間構造がマイクロからマクロに亘る中での一貫最適化を図るためには、時間階層を越えた現象の理解、すなわち原因-結果系に関わるモデル化が必要であると考えられます。その階層区分は、今回の事例においては3階層ですが、これは、プロセスに応じて2階層であったり4階層であったりすることも当然考えられます。重要なことは、どのような階層に跨って、またどのような形でモデル化することが、そのプロセスの現象の適切な理解と、一貫的な生産管理に資することになるかということで、今回の事例はその一例を提示しています。

多くの産業において、製造に要する時間の短縮は、多岐にわたる付加価値製品を開発し、これを競争力ある製品として製造するために不可欠の要素であり、今回のモデル提案を通じた生産管理における時間構造の体系的な理解は、その一助となるものと考えられます。今後の展望については7章に記載しました。

議論4 マルチスケール階層モデルの適用範囲

コメント（上田 完次）

論文中に部分最適化ではなく全体最適化という趣旨が表明されていますが、この論文の手法は、理論的に全体最適を求めたものではないので、全体最適を保証するものではないと思われまます。したがって、今回の手法の有効性あるいは適用限界についても言及するのが良いと思います。

質問（赤松 幹之：産業技術総合研究所ヒューマンライフテクノロジー研究部門）

3つの異なる時間スケールのモデルによる構成がこの論文の主張点であり、これらによってマイクロからマクロまでの定量的評価ができ、最適点を見出すことができると主張されていますが、マルチスケールのモデルをどのように統合あるいは連関させて利用するのでしょうか。

回答（西岡 潔）

今回提案のモデルは、全体最適を実現する最適化評価関数を有するものではないので、理論的、定量的に全体最適を保証するものではなく、また生産管理システムにそのまま実装されて使用されるものではありません。

プロセス産業の代表的な事例である鉄鋼業、とくに鉄鋼高炉メーカーでは、その象徴である高炉が、天然資源を原材料とすること、高温・高熱プロセスであること、原材料ヤード等が屋外設備であり、天候・気候の影響を受け易いこと等のプロセス固有の物理的な制約を有しており、これらを克服する手段として、設備の一貫連続化、大規模化による生産性および高熱プロセスのエネルギー効率の向上を歴史的に追及してきました。

このような一貫連続な大規模生産設備において、円滑な生産活動を行うためには、膨大な制御情報、生産管理情報が必要となることから、製鉄産業の一貫製鉄所では、他産業に先駆けて大規模計算機援用による生産管理システムを導入してきました。一貫製鉄所の生産管理システムは、上流工程である原料、製鉄、製鋼が、前述のような制約を有し、生産変動やばらつきがある程度大きくなるを得ないこと、高熱・高温プロセスの中では時間的制約が大きく中間仕掛がないこと、したがって本質的にプッシュ型の生産構造を有すること、上流工程である原料から製鉄工程の「製品」はモノグレードであること、一貫製鉄所建設当初は最終製品の品種も限定されており、

現在のような複雑な要求が少なかったこと等の事由により、高熱・高温プロセス工程の最適制御、さらには、上工程の生産変動・ばらつきへの対応および注文製品情報の集約により上工程の製造ロットサイズを極大化することを重視する一方、注文製品の品質管理とデリバリーを連結した視点から、熱延や厚板等の中間製品工程の製造工期および在庫を検討する製造一貫の全体最適計画立案、スケジューリング支援への対応は極めて限定的となっていました。

最適化の探索には、種々なモデルが不可欠ですが、鉄鋼生産では、特に上流工程である製鉄、製鋼において、自動車に代表される組立産業と比較すると、生産／プロセスの日々の生産操作における変動が大きく計画の変更が頻繁に発生すること、さらに、モデルは外乱を含む実績に基づき構築されることを鑑みると、現状では、モデルによる高精度な予測が困難であること、したがって、誤差を多く含むモデルに依存する最適解には、自ずとその信頼性に限界があることが理解されます。

このような状況では、全体最適解を厳密に探索する精緻なスケジューリングを日常のルーティンの中で行うことは、有効性および計算・業務負荷の観点から現実的なものではなく、最適解に近づくためのアプローチは、この論文で例示したような継続的、漸近的なものとならざるをえないと考えられます。

提案モデルは、期間毎に実績を把握し、その実績に基づいて管理を行う結果系の生産管理に加えて、その実績が生まれる原因系を明らかにし、より適切な管理を行うためのツールと位置付けられます。現実的な問題として、個別工程におけるプロセッシングという短時間に生じるマイクロな事象から、圧延開始から製造完了に至る製造工期という長時間にわたるマクロな事象に至る全ての時間階層に至る総合モデルの作成は、極めて大きな困難を伴います。試行錯誤を重ねる中で構築されたモデルを全体として俯瞰すれば、それぞれのモデルが時間階層を越えて全体を繋ぐ構造となっており、これをマルチスケール階層モデルと名付けました。すなわち、提案モデルは、あるレベルの時間階層を跨ぐ原因-結果系のモデルであり、構造的にマイクロからマクロに至る現象の理解に寄与するものの、最適解を保証するものではありませんが、継続的、漸近的により最適解に近づくための一つのアプローチの手段を提供するものと理解できます。上記の趣旨を、6.2「マルチスケール階層モデルの意義」を新設し、追記いたしました。

議論5 能率モデル

質問（赤松 幹之）

能率モデルとこれまでの生産計画の手法との違いはどこにあるのでしょうか。

回答（水谷 泰）

処理能率は、圧延工程においては時間当りの処理スラブ重量、精整工程においては、時間当りの処理製品枚数として定義されます。

圧延工程は、連続、直列、直結に配置されたスラブヤード工程、加熱工程、粗圧延工程、仕上圧延工程、加速冷却工程、剪断工程から構成されており、スラブヤード工程では製鋼から受け入れた鋼片の切断、加熱工程では鋼片の再加熱、粗圧延工程では再加熱された鋼片の幅出し圧延、仕上圧延工程では幅出し後の鋼片の厚みおよび長さ制御圧延による材質の造り込み、加速冷却工程では仕上圧延後のスラブの大水量冷却による焼入れ組織の造り込み、剪断工程では、圧延/冷却後のスラブの分割切断、をそれぞれ行います。厚板製品は、厚さ、幅、長さのサイズ及び規格仕様が多岐にわたり、各工程のプロセス条件も不可避的に多様となるため、製品仕様に応じて各工程の処理能率は大きく変動します。すなわち、圧延工程は、大規模であるとともに多品種の混流生産であり、工程間のバッファが小さいため、前後材料の処理の干渉が頻繁に発生します。このため、材料毎にプロセス中のネック工程が逐次変化するのに伴い、圧延工程全体としての能率が大きく変動することとなるため、これを高精度かつ簡易に予測することは、技術的に難しい課題でした。既存の生産、製造、処理計画立案は、さまざまな条件を仮定し、それぞれの

条件に応じた個別の事象を逐次算定、積算し、その結果を評価関数により評価、比較して最適値をとる条件を選択する方案が大半でしたが、大規模かつ多品種の混流生産において、生産順列、すなわちシミュレーションの計算条件の組合せが膨大となる場合、計算機の負荷が過大となり、実用に適さない問題がありました。

圧延各工程には、処理能率に影響を与える異なる因子が存在します。例えばスラブヤード工程では、スラブ切断速度、スラブ重量等、加熱工程では、加熱炉装入温度、加熱条件（加熱炉抽出温度、保持時間）等、粗圧延工程では、加熱炉抽出温度、スラブサイズ等、仕上圧延工程では、圧延速度、圧延組織制御のための圧延パス間の待ち時間、圧延長さ等、剪断工程では、切断速度、切断精度等が挙げられます。

この能率モデルでは、各工程の処理能率に影響を与えるこれらのパラメータを抽出するとともに、これらのパラメータが有意な差異をもつ製品群に分類し、製品群毎に処理能率を統計的に算出しました。さらに、品種、サイズ、加熱炉装入温度等により分類された製品群毎に各工程の処理能率を比較することにより、製品群毎に直列、直結、多段の複数サブ工程中のネック工程を特定して、製品群毎の固有の一貫能率を求める手法を採用しています。

議論6 一貫工期モデル

質問（赤松 幹之）

圧延工程の能率向上によって、精整工程の所要変動が増大した、とありますが、能率向上がロットサイズの拡大につながり、ロットサイズが大きくなると、精整工程が多様であるために精整工程に取りかかれずに仕掛品が多くなるという理解で良いのでしょうか。

納期余裕日数の分散に関して、圧延開始納期余裕と製造工期とが独立であることから、それぞれの分散の和で求められるとしていますが、しかし、圧延開始から製造完了は、圧延開始から納期に含まれ

ており、互いに依存性があるように想像されます。圧延開始納期余裕と製造工期とがなぜ独立とみなせるのでしょうか。

回答（水谷 泰）

圧延工程の能率向上によって、日当りの圧延量が增大すると、不可避免的に精整工程への流入量、すなわち、精整工程の所要量が增大し、それに伴い所要変動も増大します。「能率向上によってロットサイズが大きくなった」とのご指摘のとおりです。精整工程への発生量のばらつきが大きくなると、待ち時間の延長、仕掛の増大につながります。

鉄鋼厚板の生産は論文中に述べておりますように、多様な製品注文（注文当たり同一仕様の製品は約3 t）を、ロットで製造して（同一の製鋼製造条件：最低 300 t、生産性を考慮すると 2,000 t 超が望ましい）、ロットで出荷する（同一の需要家、納期、輸送機関毎に）点に特徴があります。納期は同一の出荷ロットに対して設定されますが、需要家のニーズにより、多様な製品注文が同一の出荷ロットに含まれるため、製造ロットは出荷ロットとは一致しないことが一般的です。そのため、圧延開始のタイミングは、納期から想定される製造工期を遡って決定はされるものの、製造ロットをまとめるためのばらつきを不可避免的にもつとともに、厚板とは独立の、上流工程である製鋼工程の操業変動に伴うばらつきをもつこととなります。一方、製造工期は発生工程の有無や操業の変動に依存して、やはりばらつきをもつこととなります。したがって、納期余裕日数は、圧延開始納期余裕日数（圧延開始～納期）と製造工期の差として求められます。

納期余裕日数 = 圧延開始納期余裕日数（圧延開始～納期） - 製造工期
右辺の 2 項が独立である場合は、この論文中にある

$$\sigma_{\text{納期余裕日数}} = (\sigma_{\text{圧延開始納期余裕}}^2 + \sigma_{\text{製造工期}}^2)^{1/2}$$

が成り立ちます。実績により検証したところ、ほぼ上記式の関係が成り立つことが確認されたことから、「右辺の2項は独立」との仮定がほぼ妥当なものであると結論しております。