

# 数理最適化とマイクロシミュレーションの融合技術による大規模工場における搬送の効率化

Improvement of Transportation Efficiency in Large-Scale Factories Using Technology Integrating Mathematical Optimization and Microsimulation

吉田 琢史

■ YOSHIDA Takufumi

近年、大規模なジョブショップ型工場には、搬送車による自動搬送システムが導入されている。このような工場では、搬送車がショップ間をネットワークでつなぎ数多くの加工中の製品を自動的に運搬するが、搬送車の渋滞が発生すると生産効率を悪化させるリスクがあり、搬送車の流れを効率的に制御する必要がある。

東芝は、工場内の搬送車の状況を可視化し、複数の搬送車に対する車間制御則に基づきモデル化してシミュレーションし、搬送効率が向上するよう制御則を最適化する技術を開発した。渋滞学の知見に基づいたモデルを用いて、数理最適化とマイクロシミュレーションを融合した技術であり、実際の自動搬送システムのデータを用いて検証し、この技術の有効性を確認した。

Automated transportation systems with automatically controlled vehicles have been introduced into large-scale factories equipped with job shop type manufacturing lines in recent years. In such factories, large quantities of semifinished products are delivered to and from the shops by vehicles. Efficient movement of these vehicles is essential because vehicular congestion may lower the production efficiency of the shops. It is therefore necessary to efficiently control the speed of each vehicle according to the flow of movement in relation to the preceding vehicles.

Toshiba has developed a technology integrating mathematical optimization and microsimulation based on traffic congestion theory that incorporates the following processes: (1) visualization of the traffic condition of each vehicle in the factory, (2) modeling and microsimulation using the "Intrafab Transport Simulator," a transportation simulator based on control rules applied to multiple vehicles, and (3) optimization of the control rules to improve transportation efficiency. We have conducted simulation experiments on the "Intrafab Transport Optimizer," a newly developed transportation optimizer applying this technology using actual data of an automated transportation system, and confirmed the effectiveness of this technology.

## 1 まえがき

ものづくりの現場において、生産効率を高めて製造コストを抑えることは、顧客に低価格で商品を提供し続けるために重要である。近年、スマートフォンなどIT（情報技術）機器の普及や市場のグローバル化による生産規模の拡大に伴い、製造現場も大規模化しており、従来の、人の経験に頼った改善活動だけでは限界に近づきつつある。そこでオペレーションズリサーチ（OR）の分野では、数理最適化や待ち行列理論などの数学的技法を改善活動に活用するための実務レベルの研究開発が盛んに行われている<sup>(1), (2)</sup>。

工場の生産方式は、設備配置に着目すると、装置を製品の工程順に従って配置するフローショップ型と、同種の装置をまとめて配置するジョブショップ型に大別される。ジョブショップ型は、高価な装置を導入し複数の工程や製品で共有して使用する場合に適しており、様々な工場で用いられている生産方式である。

近年、大規模なジョブショップ型工場では、搬送車による自動搬送システムの導入が進んでいる。そのような工場では、搬送車は自動制御されて、ショップ内やショップ間を縫うように動き回り、加工中の製品（以下、半製品と呼ぶ）を運搬する。搬送車が渋滞した場合、適切なタイミングで半製品を装置に

供給できなかつたり、装置から引き取れなかつたりして、納期遅れや品質トラブルなどを引き起こすことがある。したがって、搬送車の流れを効率化し、渋滞の発生を抑えることが、ジョブショップ型工場の生産性向上に必要となる。

そこで東芝は、工場内の搬送車の渋滞状況を可視化し（検出）、搬送車間の制御則に基づき1台1台をマイクロな視点でモデル化してシミュレーションし（予測）、搬送効率が向上するよう制御則を最適化する（最適化）技術を開発した。制御則の最適化は、シミュレーションとメタヒューリスティックス<sup>(3)</sup>を融合した手法で、数理最適化の応用として開発した。これらの可視化、モデル化、及び最適化手法については、現場の意見を参考にして開発するとともに、実際の搬送データを用いて有効性を評価した。

ここでは、搬送車の車間制御による搬送効率の改善という課題を例に、前述の検出→予測→最適化の流れに沿って、数理最適化とマイクロシミュレーションの融合技術開発の取組みと評価結果について述べる。

## 2 搬送渋滞の可視化（検出）

搬送車は工場内に敷設された搬送軌道上を自律走行するが、軌道には直線や、カーブ、合流点、分岐点など様々な種類

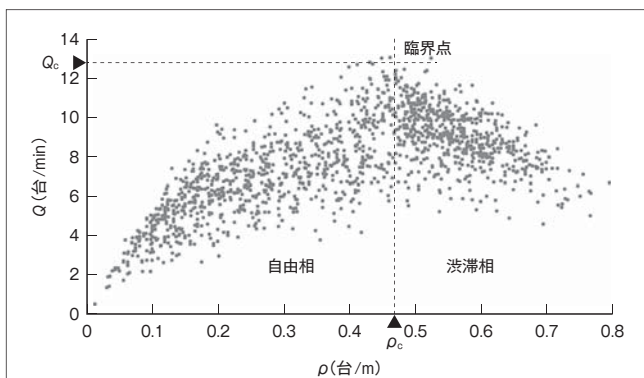


図1. 搬送車の観測データに基づく基本図 — 臨界密度を境に自由相と渋滞相に分かれるが、分布のばらつきは大きい。

Flow-density diagram showing relationship between vehicle flow and density in analyzed area

が混在する。搬送車の交通流特性はこれら軌道の種類に大きく依存するため、軌道全体を数m単位ブロックに分割してそれぞれの交通流を分析するほうがよい。全体の交通流特性は、個々のブロックをネットワークで接続した系のふるまいを分析することによって得られる。

当社は、工場内の分析対象エリアを複数のブロックに分割し、各ブロックで搬送車の位置を秒間隔で観測した。そして観測データから、図1に示すような各ブロックの密度-流量グラフ(以下、基本図と呼ぶ)を作成した。基本図の横軸は搬送車の密度  $\rho$  (台/m) を、縦軸は流量  $Q$  (台/min) を表し、渋滞学研究<sup>(4)</sup>によって得られた高速道路などの交通流特性と同様に、 $Q$ が最大となる点(臨界点)が存在する。臨界点の流量  $Q_c$ はそのブロックの搬送能力を表し、また臨界点の密度  $\rho_c$ を境に自由相と渋滞相とに分かれる。このようにして各ブロックの交通流特性を可視化できる。図1は典型的なブロックの基本図であるが、搬送車の観測データは分布のばらつきが大きいことを示している。

### 3 搬送車のモデル化とシミュレーション(予測)

前述した搬送車の基本図において臨界点のようすや分布のばらつきを調べるため、搬送車の制御則をモデル化し、基本図を予測する技術を開発した。

搬送車は、距離センサを用いて前方車との車間距離  $h$  (m) を検知し、 $h$ に応じて段階的に変化する目標速度  $V$  (m/s) に追従するよう自動制御される。例えば、段階数  $K=5$  の場合を図2に示す。ここで、 $h_{\min}$ は最小車間距離、 $h_{\max}$ は最大車間距離、 $V_{\max}$ は最大目標速度である。

まず簡単のため、全ての搬送車の速度が常に  $V$  と一致する理想状態を考える。この場合、式(1)で示す変数変換によって図2から図3に示す基本図が得られる。

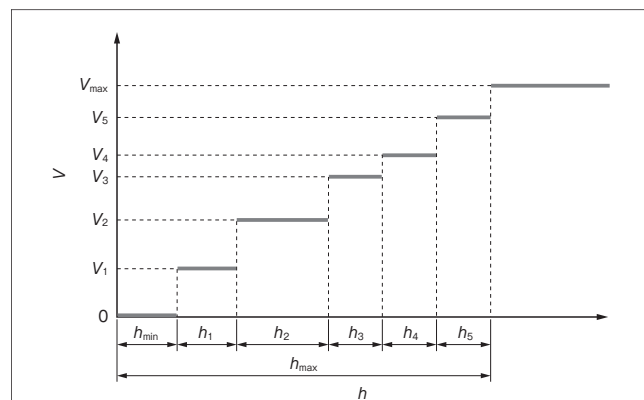


図2. 搬送車の目標速度関数 —  $K=5$  の場合の例。 $h$ に応じて追従すべき  $V$  が階段型に変わる。

Target velocity function depending on distance between vehicles

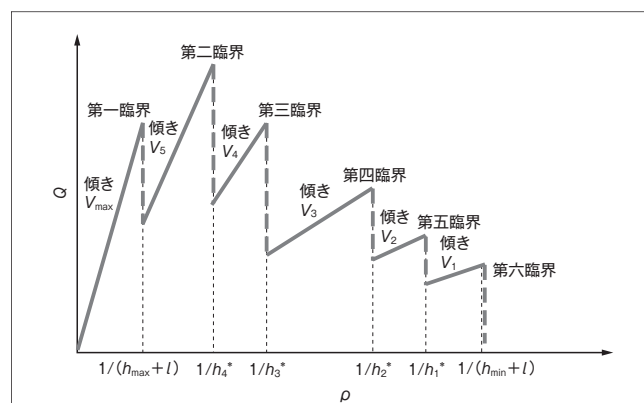


図3. 常に  $V$  で走行する場合の基本図 —  $K=5$  の場合の例。階段型の  $V$  に対応した複数の臨界点を持つ。

Flow-density diagram in case of vehicles running at target velocity

$$\rho = \frac{1}{h+l}, \quad Q = 60\rho V \quad (1)$$

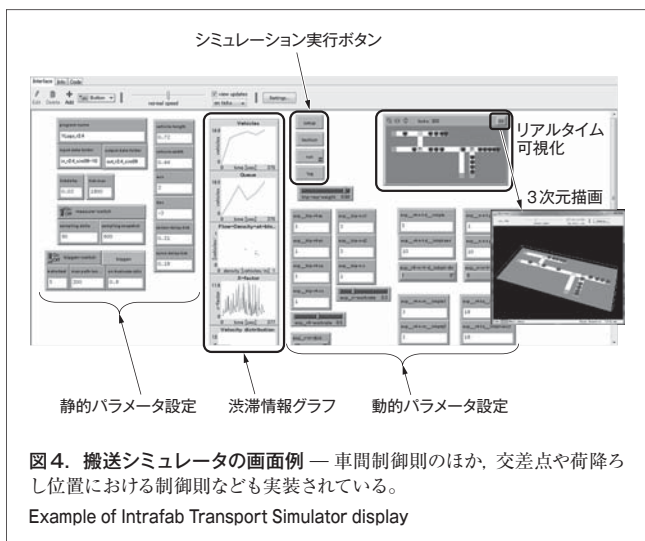
ここで、 $l$ は車長(m)である。

図3の基本図には、階段型の  $V$  に対応した複数の臨界点が存在する。また図3を図1の観測データと見比べると、図3の複数の臨界点における  $Q$  のふるまいが図1の分布のばらつきが大きい主な原因であることがわかる。

実際の搬送車は常に  $V$  で走行するわけではないが、できるだけ  $V$  に追従するように、式(2)の運動方程式に従う。

$$\frac{d^2x_i(t+\tau_1+\tau_2)}{dt^2} = A \left( V(x_{i-1}(t) - x_i(t) - l) - \frac{dx_i(t+\tau_1)}{dt} \right) \quad (2)$$

ここで、 $x_i(t)$  は時刻  $t$  における搬送車  $i$  の位置、 $\tau_1$  と  $\tau_2$  はそれぞれ距離センサとサーボ系の時定数、 $A(z)$  は加速度関数 ( $z > 0$  で一定加速、 $z < 0$  で一定減速、 $z = 0$  で加減速なし) である。式(2)は搬送車  $i$  について独立でなく、時定数を含み、 $A$



や $V$ が微分不可能な関数である点から、解析的に解を求めるのは困難である。

そこで当社は、数値的に式(2)を解き、交通流特性を予測するための搬送シミュレータ“Intrafab Transport Simulator”を開発した。実装はマルチエージェントシミュレータであるNetLogo<sup>(5)</sup>を用いた。NetLogoのインタフェースタブでは、 $V$ や $A$ などのパラメータ変更や、基本図をはじめとする交通流特性のグラフ表示が可能である(図4)。また搬送シミュレータには、式(2)で表される車間制御則のほか、合流や分岐のある交差点軌道での停止/優先通過則や、荷降ろし位置における搬送車の停止則なども機能追加されており、現実に即した幅広い対応が可能である。

#### 4 搬送車の車間制御(最適化)

3章で図2から図3の基本図を導いたように、 $V$ を決めると搬送シミュレータを用いて基本図を得ることができる。そこで当社は、交通流特性上で最良な基本図を定義し、最良な基本図を与える $V$ を求めるために搬送シミュレータと数理最適化を融合した技術を開発した。

まず基本図における諸量を定義する。考慮する $\rho$ の変域を $[0, \eta \rho_{st}]$ とする。ここで、 $\rho_{st}$ は $h_{min}$ における搬送車の密度で、理論的な上限である。これに定数 $\eta$  ( $0 < \eta < 1$ )を乗じた $\eta \rho_{st}$ は実効的な密度上限を表している。 $[0, \eta \rho_{st}]$ における $Q$ の最大値を $Q_{max}$ 、 $Q_{max}$ に対応する密度を $\rho_{cr}$ 、及び $[\rho_{cr}, \eta \rho_{st}]$ における $Q$ の最小値を $Q_{min}$ とする。

これらを基に、“搬送能力を表す $Q_{max}$ ができるだけ大きい”かつ“渋滞相における流量ばらつきを表す $Q_{max}/Q_{min}$ が大きすぎない”という両方の条件を満たすものを最良な基本図と定義する。このようにすると $V$ の最適化問題では、目的関数が式(3)で、その制約条件が式(4)~(6)により表される。

$$\max_{\{h_k\}} Q_{max}(\{h_k\}) \quad (3)$$

$$\frac{Q_{max}(\{h_k\})}{Q_{min}(\{h_k\})} \leq \gamma \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^K h_k = h_{max} - h_{min} \quad (5)$$

$$h_k \geq 0 \quad (k=1, \dots, K) \quad (6)$$

ここで $\{h_k\}$  ( $k=1, \dots, K$ )は図2に示されるような階段型の車間距離設定を表す決定変数であり、各々 $\{V_k\}$  ( $k=1, \dots, K$ )に対応している。式(4)の定数 $\gamma$  ( $0 < \gamma < 1$ )は流量ばらつきの上限である。また、式(3)と式(4)の $Q_{max}$ と $Q_{min}$ は、 $\{h_k\}$ を決めると搬送シミュレータから得られる量という意味で $\{h_k\}$ を引数として表す。

当社は、式(3)~(6)で表される最適化問題を解くため、最適化手法と搬送シミュレータを組み合わせた搬送最適化エンジン“Intrafab Transport Optimizer”を開発した。そのシステム構成を図5に示す。

式(3)~(6)は、“関数式で表現できずシミュレーション結果を用いる”、“単峰性の保証がない”、及び“決定変数が連続値”という性質を持つことから、最適化手法として粒子群最適化(PSO: Particle Swarm Optimization)<sup>(3)</sup>を採用した。PSOとは、解の探索点を複数配置し(粒子群)、“群全体のベストな位置(社会認識)”、“各粒子の過去履歴でのベストな位置(自己認識)”、及び“各粒子の前回位置からの変位(慣性)”の三つのベクトル和から、各粒子の次の位置を更新するメタヒューリスティックス手法である。微分情報を使わない点、粒子群による多点探索である点、及び慣性項を用いた連続性の高い更新手法である点を考慮すると、今回の目的に適して

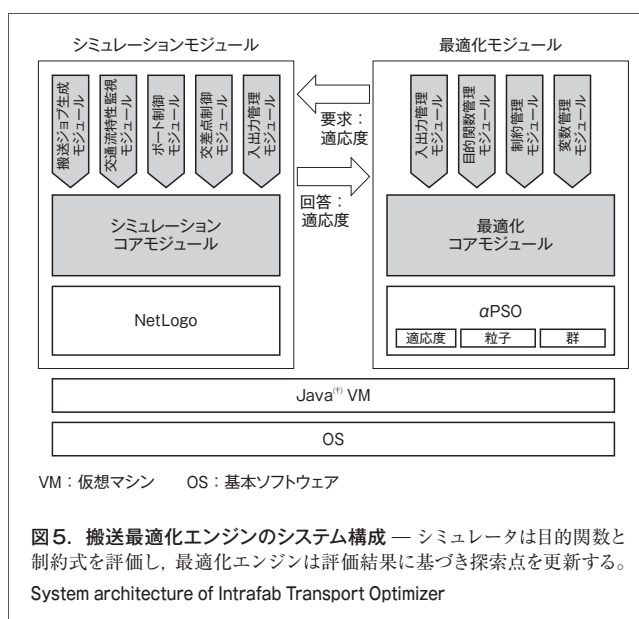


図5. 搬送最適化エンジンのシステム構成 — シミュレータは目的関数と制約式を評価し、最適化エンジンは評価結果に基づき探索点を更新する。  
System architecture of Intrafab Transport Optimizer

いる。しかしPSOは、そのままでは式(4)と式(5)のような上下制限約以外の制約式を含む場合にはうまく機能しないため、そのような場合でも機能するように拡張した $\alpha$ 制約粒子群最適化( $\alpha$ PSO)<sup>6)</sup>という手法を用いた。

搬送最適化エンジンを用いて行った数値実験の結果を図6に示す。 $\{h_k\}$  ( $k=1, \dots, K$ )の $K$ は変更可能とし、1から5まで変化させて各々の最適解を求めた。各 $K$ での実験では、 $\alpha$ PSOの粒子数を10、最大反復回数を100として計算し、基本図の各プロットは搬送シミュレータを5回実行して平均値を取った。搬送シミュレータの諸元や式(3)~(6)における定数は、実際の工場での典型的な値を用いた。

ここでは、工場の技術者が等間隔車間距離( $h_1=\dots=h_K$ )から始めてうまく設定を調整することをイメージし、等間隔車間距離を基準解として最適解と比較する。図6では基準解の $K=1$ での $Q_{\max}$ が1となるよう正規化して、 $K$ を変えた場合の最適解と基準解の $Q_{\max}$ をプロットした。これより、基準解では $K$ を増やしても $Q_{\max}$ はすぐ頭打ちになるのに対し、最適解では $K=5$ 程度までほぼ線形に増加することがわかる。また

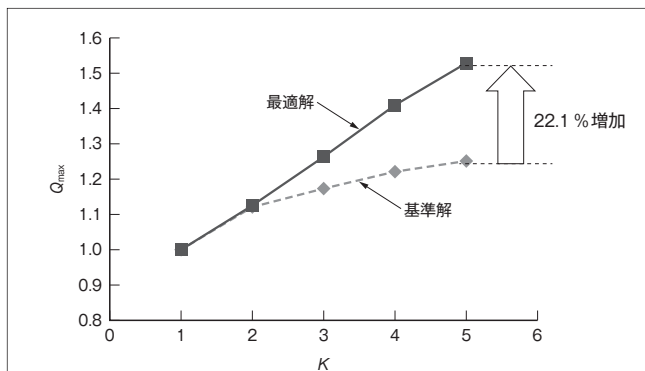


図6. 搬送最適化エンジンによって得られた $Q_{\max}$  —  $K$ が多いほど最適解と基準解の $Q_{\max}$ の差が大きい。

Maximum flow rate obtained by Intrafab Transport Optimizer

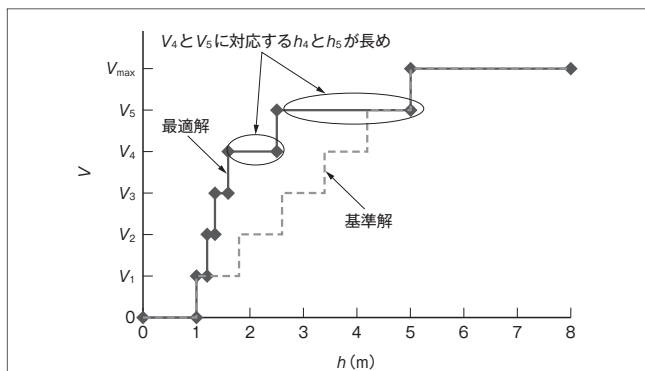


図7. 搬送最適化エンジンによって得られた最適解の例 —  $K=5$ の場合の最適解と基準解であるが、最適解は高速側の $h$ を長めに取って $Q$ を稼いでいる。

Example of optimal solution obtained by Intrafab Transport Optimizer

$K=5$ では、最適解と基準解の $Q_{\max}$ の差は約22.1%まで広がることを確認できる。参考までに $K=5$ の場合の最適解と基準解を図7に示すが、最適解では $h_4$ と $h_5$  (高速側の $V_4$ と $V_5$ に対応)が長めであり、高速域での渋滞を起こりにくくすることで $Q$ を稼いでいることがわかる。

## 5 あとがき

当社は、工場内の自動搬送システムにおける搬送車の車間制御による搬送効率改善という課題に対し、数理最適化とマイクロシミュレーションの融合技術の研究開発に取り組んでいる。今回、搬送シミュレータと $\alpha$ PSOを融合した技術を開発し、実際の工場での設定を模擬した数値実験による検証を行った。自動搬送の交通流特性に基づいた研究は、従来の工場の搬送効率化を別の新しい視点から見直すことにつながり、今後も幅広い活用が期待されている。

車間制御則の最適化は搬送システム全体としての輸送能力向上に寄与すると考えられ、今後は、交差点や荷降ろし位置付近の渋滞にも今回の手法を応用できないか検討を進めるとともに、この手法を更に改良し、より大規模で計算コストが大きいシミュレーションにも適用できるアルゴリズムの開発に取り組んでいく。

この研究の一部は、国立大学法人 東京大学との共同研究により実施したものである。

## 文献

- (1) Ramirez-Hernandez, J.A. et al. "A Simulation-based Approximate Dynamic Programming Approach for the Control of the Intel Mini-Fab Benchmark Model". Proc. of the 2009 Winter Simulation Conference. Austin, TX, USA, 2009-12, IEEE, 2009, p.1634 - 1645.
- (2) Hopp, W.J.; Spearman, M.L. Factory Physics. New York, McGraw-Hill, 2008, 720p.
- (3) 相吉英太郎 他. メタヒューリスティクスと応用. 東京, 電気学会, 2007, 432p.
- (4) 西成活裕. 渋滞学. 東京, 新潮社, 2006, 252p.
- (5) Wilensky, U. NetLogo Home Page. <<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>>, (accessed 2014-09-17).
- (6) 阪井節子 他.  $\alpha$ 制約パーティクルスウォーム最適化  $\alpha$ PSOによる制約付き最適化. 数理解析研究所講究録. 1457, 2005, p.233 - 240.

• Javaは、Oracle Corporation及びその子会社、関係会社の米国及びその他の国における登録商標。



吉田 琢史 YOSHIDA Takufumi, Ph.D.

研究開発センター システム技術ラボラトリー主任研究員, 博士(理学)。数理最適化技術の研究・開発に従事。日本オペレーションズ・リサーチ学会, 日本物理学会会員。  
System Engineering Lab.