

半導体製造業向け在庫最適化支援システムの開発

Development of WIP Optimization System for Semiconductor Manufacturing

半導体・液晶などの製造ラインは製造工程数の規模が大きく、またリワークや設備故障など製造実施中での不確実な変動要因が多いことから、従来の生産計画システムでは対応が困難であった。(株)日立東日本ソリューションズでは、このような大規模製造ラインの生産効率化技術として、2003 年度より独立行政法人産業技術総合研究所殿と「半導体製造向け高効率生産制御手法」の共同研究を実施し、階層型分散制御手法を開発した。本手法は製造ラインの生産コントロール指標の最適化、および指標に基づくコントロール方法を提供する。計算機評価実験により本手法で大規模製造ラインの生産効率を向上できることを示した。2004 年度に研究成果の事業化に向け「在庫最適化支援システム」の開発を行った。現在、システムの実ライン適用評価と顧客獲得に向けた活動を推進中である。

伊藤 俊明	Ito Toshiaki
若田 航太	Wakada Kota
木村 孝昭	Kimura Takaaki
岡崎 司	Okazaki Tsukasa

1. はじめに

半導体、液晶などの製造業は製造ラインへの投資コストが大きく、情報システムによる作業効率改善への要求が高い。しかし、半導体、液晶などの製造ラインは製造ライン内に滞留する製品数が数十から数百、また製造プロセスの工程数が数百に及ぶなど、他の製造業種に比べて大規模・複雑な製造工程を持つ。また、製造実施中にリワークと呼ばれる作業のやり直しや、品質不良に伴う廃棄、製造装置の停止・故障など、事前に予測できない不確実な変動が多く発生する。このため、製造実施前に詳細な生産計画を作成する従来の小日程計画システムでは、機能・運用の両面で対応が困難であった。

(株)日立東日本ソリューションズでは、これまで、変動要因を持つ製造ラインでの生産コントロールを支援する「分散スケジューリング技術」の研究¹⁾を実施してきた。2003 年度より、大規模製造ラインの生産効率を向上する生産支援技術の開発を目的に、独立行政法人産業技術総合研究所殿と「半導体製造向け高効率生産制御手法」の共同研究を実施し、最適化技術と分散生産コントロールを組み合わせた階層型分散制御手法を開発した²⁾³⁾。

本報告では、上記研究成果である階層型分散制御手法と、研究成果に基づき開発を行った「在庫最適化支援システム」、および今後の展開について述べる。

2. 半導体製造向け高効率生産制御手法

半導体・液晶製造工程のように多くの変動要因を持つ製造工程では、変動の発生を予め考慮に入れた生産の制御が必要となる。これには、他の安定した製造工程を持つ製造業種のように、工程内の在庫を無くすことを目指すのではなく、変動の影響を吸収して安定した生産が実現できる適正な工程内在庫量を設定し、維持することが重要となる。

開発した階層型分散制御手法では、この工程内在庫を生産のコントロール対象とし、製品・工程ごとにコントロール指標となる目標在庫量の決定方法、および目標在庫に基づくコントロール方法を提供する。

2.1 階層型分散制御手法

本手法では、製造ラインの生産コントロール指標となる目標在庫を最適化する階層と、指標に基づくコントロールを提供する階層の、2つの機能階層から成る。

(1) プランニング・レイヤ

製造対象となる各製品の需要量、製品ごとのプロセス情報、ライン内の装置構成情報を考慮した上で、需要量と製品完成量の差が極力小さく、かつ工程内在庫の総量が最小となるような、製品・工程ごとの目標在庫を決定する。

(2) コントロール・レイヤ

製造実施時に適正な生産コントロールを実現するため、目標在庫に基づき、製造ライン内の各ワークセンタ（同種の加工機能を持つ装置群）に仕掛かっている各製品・工程の作業優先度を決定するディスパッチング・ルールを提供する。ワークセンタでの作業着手時に、ディスパッチング・ルールが決定した優先度に基づき作業を行うことで、適正な工程内在庫を維持する生産が可能となる。階層型分散制御システムのモデルを図 1 に示す。

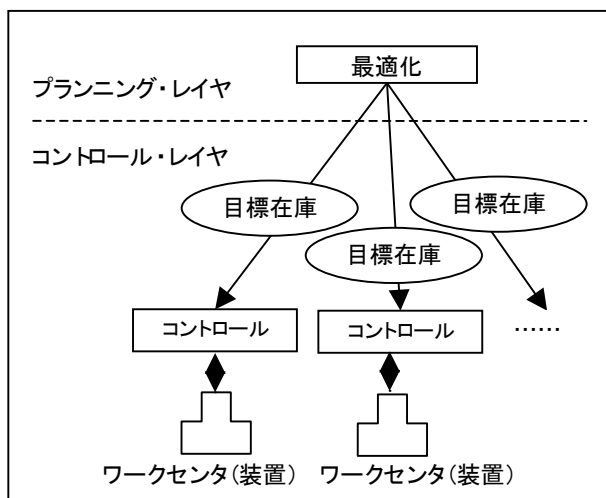


図 1 階層型分散制御手法

2.2 プランニング・レイヤ

プランニング・レイヤでは目標在庫の最適化を行う。目標在庫の最適化には、生物の進化の仕組みに基づく最適化手法である遺伝的アルゴリズム（GA: Genetic Algorithm）を採用している。

GA での 1 つの「個体」が、製品・工程ごとの目標在庫の 1 つの組み合わせとなる。GA ではこの個体を複数個生成し、各個体の評価を行う。そして評価値の優良な個体の遺伝子情報（目標在庫の値）を交叉・突然変異と呼ぶ操作で変更することにより、更に優良な個体の生成を試みる。GA ではこの評価および個体生成（変更）処理を 1 つの「世代」とし、これを複数世代繰り返すことで、最適解の探索を行う。

各個体の評価値の算出には、産業技術総合研究所が開発した高速シミュレーション方式 CONSTIN (CONSTant Time INterval)⁴⁾ を採用している。CONSTIN は、シミュレーションの対象期間をタイムインターバルと呼ぶ一定間隔で分割し、このタイムインターバル単位で各工程内在庫の工程間移動量の変動を計算

するシミュレーション方式である。適正なタイムインターバル値の設定により、イベント・ドリブン型のシミュレーション方式に比べて同精度でありながら計算処理コストを削減でき、高速なシミュレーションが可能となる。

また、CONSTIN の採用に加え、最適化処理の高速化のため、個体評価処理の並列化を行っている。GA では通常、世代ごとに複数の個体の評価が必要になるが、この各個体の評価処理を複数 CPU に割り振り、並列に処理を行う。これにより、処理時間を CPU 数に応じて理論的には最大 1/CPU 数程度まで短縮することが可能となる。最適化アルゴリズムの概略を図 2 に示す。

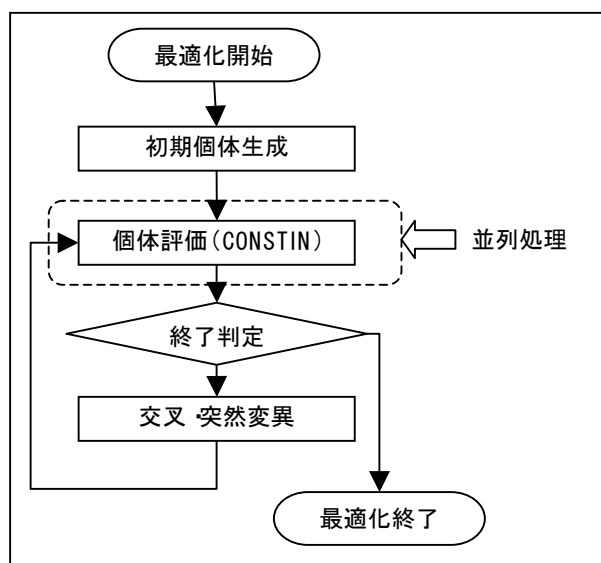


図 2 最適化アルゴリズム

以上の方式により、各個体が持つ目標在庫値に基づいて製造を実施した場合のシミュレーションを行い、最適化指標値を算出する。最適化の指標値には、需要量に対する生産量の過不足、および総工程内在庫量を採用した。これらの値が小さい個体がより良い個体、即ち最適な目標在庫値となる。

2.3 コントロール・レイヤ

コントロール・レイヤでは、製造実施時に、製造ライン内のワークセンタで作業待ちをしている製品・工程を対象とし、目標在庫と実績値に基づき作業優先度を決定するディスパッチング・ルールと、先頭工程への作業の投入量、タイミングを決定する作業投入ルールを提供する。

(1) ディスパッチング・ルール

ここでは目標在庫と実在庫の差分、および需要量に対

するバックオーダーの削減を考慮した基本的なディスパッチング・ルールを紹介する。なお実ラインでのディスパッチングでは製造ライン内の装置などが持つ個別の制約条件の考慮が必要となる場合がある。これには以下に紹介する基本ルールで決定された作業優先度に、制約条件に応じた詳細ルールによる作業優先度の値を加算するなど調整、対応が可能である。

製品 p 工程 j の目標在庫値を w_p^j 、ディスパッチング実施時の実工程内在庫の値を W_p^j とし、目標在庫と実工程内在庫の差 x_p^j を次式で求める。

$$x_p^j = \max(0, w_p^j - W_p^j)$$

また製品 p の需要量を d_p^j 、ディスパッチング実施時までの製品 p 工程 j の総生産数を z_p^j とし、需要に対する生産の不足分 b_p^j を以下で求める。

$$b_p^j = \max(0, d_p^j - z_p^j)$$

上記の x_p^j 、 b_p^j 、および製品 p の単位時間あたりの需要数（需要レート）を D_p とし、製品 p 工程 j の作業優先度値 p_p^j を以下で定義する。なお D_p は製品ごとの需要量の大小による影響を緩和し、優先度を正規化するためのものである。

$$p_p^j = (x_p^j + b_p^j) / D_p$$

以上で求めた p_p^j は、基本的に、目標在庫と実在庫の差が大きいほど大きく、また需要量に対する生産量の不足が大きいほど大きくなる。製造実施時に p_p^j の値が大きい製品・工程の作業を優先的に処理することで、製造ライン内の在庫量を適正な値に維持し、かつ需要を満たす生産コントロールが可能となる。

(2) 作業投入ルール

本手法では作業投入ルールとして CONWIP (CONstant WIP)方式を採用している⁵⁾。CONWIP 方式は、製品 p ごとに製造ライン内に保持すべき工程内在庫の総量 T_p を定め、製品完成やスクラップ発生などで工程内在庫の総量が T_p を下回った際に、その不足分を投入するルールである。本手法では製品 p の全工程の目標在庫値の総和を T_p として設定する。

2.4 計算機実験結果

本手法の効果を確認するため、計算機上での評価実験を行った²⁾³⁾。実験のデータには、米国の官民共同の半導体製造技術コンソーシアムである SEMATECH (SEmiconductor MANufacturing TECHnology Institute)のベンチマークデータを使用した。ベンチマークデータの内容を表 1 に示す。

表 1 SEMATECH ベンチマークデータ

項目	値
製品種別数	2
プロセス種別数	2
工程数	210 (製品 1) 245 (製品 2)
ワークセンタ数	83
装置数	265
プロセスタイム [時間] (全工程の作業時間)	313.4 (製品 1) 358.6 (製品 2)
需要レート[ウエハ枚数/日]	365.72 (製品 1) 182.86 (製品 2)
ロットサイズ [ウエハ枚数]	48 (製品 1, 2 共通)

評価方法として、本手法でコントロール指標の最適化を実施し、その指標に基づくディスパッチングおよび CONWIP 方式での投入を行った場合と、従来手法として実際の製造現場で使用される代表的なルールである FIFO(First In First Out)ルールによるディスパッチングおよび需要レートに基づく定期投入を行った場合の 2 通りのシミュレーションを計算機上で実施し、需要量と完成量の差および総工程内在庫量の平均値を計測し比較を行った。なおシミュレーション期間は 360 日とした。

従来手法、本手法での需要量と生産量の差分を表わしたグラフを図 3-1、図 3-2 に示す。グラフは、横軸がシミュレーション中の日数、縦軸が需要量累計と生産量累計の差分である。グラフ中の折れ線が縦軸の 0 より上にある場合は余剰在庫、0 より下にある場合はバックオーダーの発生を意味する。グラフより、本手法では製品 1、製品 2 とともに生産量累計と需要量累計の差が 0 の近傍に収束しており、従来手法に比べて需要量に対する生産量の過不足を抑制できることが確認できる。

また、シミュレーション期間中の総工程内在庫数の平均値は、従来手法が約 25,000 ウエハ、本手法が約 21,700 ウエハであり、工程内在庫数を約 13%削減できた。

以上より、本手法を適用することで、工程内在庫数を削減し、かつ需要を満たす生産実施が可能であることが確認できた。

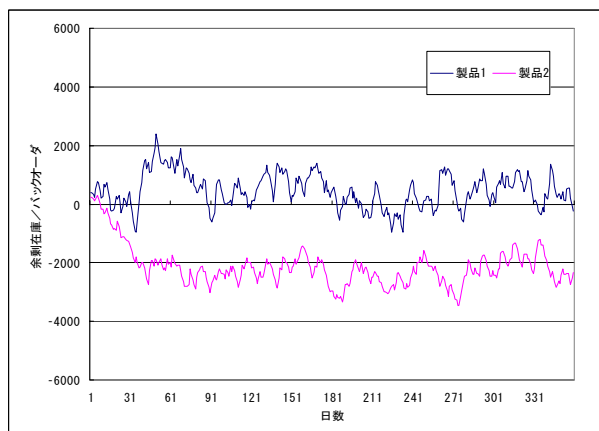


図 3-1 バックオーダーと余剰在庫 (従来手法)

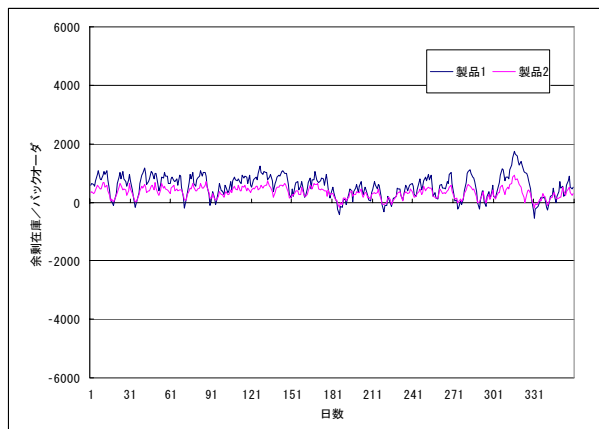


図 3-2 バックオーダーと余剰在庫 (本手法)

3. 在庫最適化支援システム

研究成果の事業化に向け、2004 年度に「在庫最適化支援システム」の開発を行った。在庫最適化支援システムは、2 章で述べた 2 階層の機能のうち、コントロール・レイヤの最適化機能を提供するシステムである。なお、生産のコントロール機能については、適用する製造ラインによってディスパッチングの実行環境 (MES : Manufacturing Execution System) が異なることから、実行環境に応じたディスパッチング・ルール・ライブラリとしての提供を予定している。

3.1 在庫最適化支援システムの機能

在庫最適化支援システムは製造のマスタデータ、製品需要量および在庫実績の実績トランザクションデータを入力データとして読み込み、最適化された目標在庫値を

出力する。最適化処理には、2 章で述べた GA, CONSTIN 方式によるシミュレーション、および並列処理方式を採用している。在庫最適化支援システムでは最適化処理の実行に際し、GUI 上で最適化の各種パラメータの設定が可能である。パラメータには、GA のパラメータである世代数、個体数や、各最適化指標値の重み/優先順位、CONSTIN のタイムインターバル値、最適化の対象期間などがある。図 4 にパラメータ設定の画面例を示す。

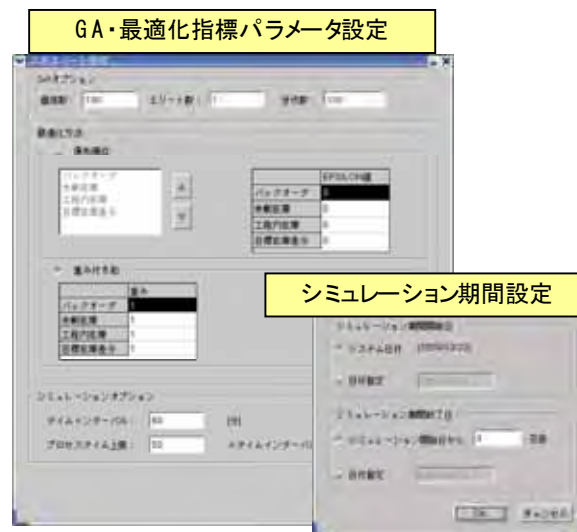


図 4 パラメータ設定画面

また最適化処理実行中には、GA の世代が進むに従ってバックオーダー、総工程内在庫量などの最適化指標が改善される。本システムではこれら最適化指標値の推移をグラフで表示し、最適化の進行度を確認できる。図 5 に最適化指標推移グラフの画面例を示す。

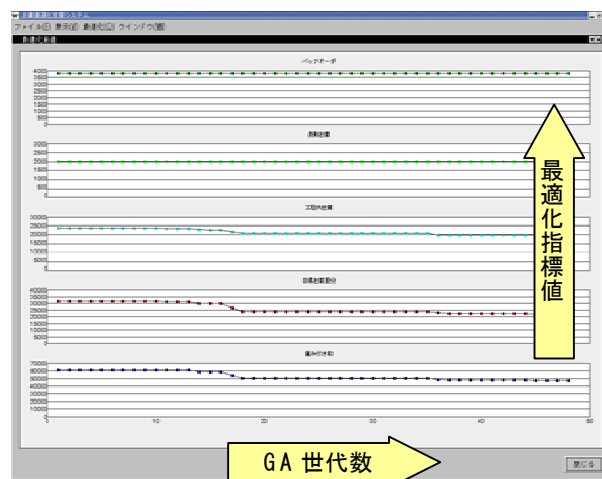


図 5 最適化指標推移グラフ

3.2 動作環境

本システムでは、最適化処理中の GA 個体評価に並列処理を採用している。このため、動作環境は、複数 CPU を持つクラスタマシンが前提となる。また、並列処理時に複数 CPU 間でデータ/メッセージを授受し、同期などの処理を実行するため、MPI (Message Passing Interface) と呼ばれる並列処理用ライブラリを使用している。これらクラスタマシン、MPI ライブラリが安定動作する環境として、OS には Linux を採用している。以下に動作環境の一覧を示す。

表 2 在庫最適化支援システム動作環境

項目	バージョン/スペック
ハードウェア	CPU 数 : 4 以上推奨 メモリ/CPU : 1GByte 以上推奨
OS	Red Hat Linux Release 9
並列処理 ライブラリ	mpich ver 1.2.5
DB	PostgreSQL ver 7.4.5

4. 今後の展開

現在、「在庫最適化支援システム」の実ライン適用評価および顧客獲得に向け、半導体製造メーカーを中心に受注活動を推進している。

在庫最適化支援システムは、半導体・液晶など大規模な製造ラインを持つ製造業種を主なターゲットとする。また対象業務・部門は、工場レベルでの生産計画策定業務、および生産管理部門が対象となる。

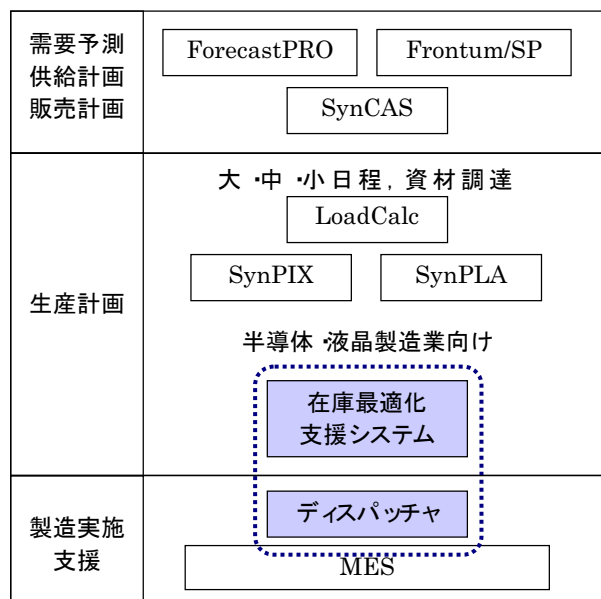


図 6 システムの位置付け

(株)日立東日本ソリューションズでは、現在、製造業の各種業種・業務向けに ForecastPRO, Frontum/SP, SynCAS, LoadCalc, SynPLA, SynPIX などのシステムおよびソリューションを展開している。本システムは、これらのシステムで対応が困難な業種領域の補完、または業務間での連携を行うことで、(株)日立東日本ソリューションズのソリューション領域拡大を目指す。

5. おわりに

半導体・液晶製造工程など大規模・複雑な製造ラインの生産効率を向上する階層型分散制御手法を開発した。本手法は、GA による最適化技術と動的な生産コントロール技術を組み合わせることにより、大規模製造ライン全体の最適化を考慮した適正な生産コントロールを可能とする。計算機実験により、本手法により工程内在庫を適正な値に維持し、かつ需要を満たす高効率生産が可能であることを確認した。研究成果に基づく在庫最適化支援システムの開発を行い、現在、顧客獲得に向けたプレ活動を実施中である。

今後の課題としては、実ラインを持つ個別・詳細な制約条件への対応方法の検討、および適用実績の蓄積が挙げられる。本手法および本システムのデータモデルは、SEMATECH が提供する半導体製造プロセスのデータモデルをベースとしており、半導体製造プロセスが持つ一般的な制約条件の考慮が可能である。しかし、実ラインへの適用に際しては、ライン、装置、あるいは顧客ごとの固有の制約条件の考慮・対応が必要になると考える。今後、システムの適用評価を通してこれらのノウハウを蓄積し、半導体・液晶などの製造業種向けソリューションの確立を目指す。

参考文献

- 1) 伊藤, 他 : 分散スケジューリング技術による生産変動への対応, 日立 TO 技報 6 号, pp.4-9, 2000
- 2) 宮下, 他 : SIMULATION-BASED ADVANCED WIP MANAGEMENT AND CONTROL IN SEMICONDUCTOR MANUFACTURING, Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference, pp.1943-1950, 2004
- 3) 岡崎, 他 : ADVANCED WIP CONTROL METHOD FOR SEMICONDUCTOR MANUFACTURING, Proceedings of International Symposium on Scheduling 2004, pp.38-43, 2004

- 4) 宮下, 他: 大規模ロバスト生産方式と超高速シミュレーション, スケジューリング・シンポジウム 2002 講演論文集, pp.72-77, 2002
- 5) Hopp, W.J. , 他: FACTORY PHISICS 2nd ed., McGraw-Hill, 2000



伊藤 俊明 1993 年入社
研究開発部
生産管理・生産計画システムの研究
ito@hitachi-to.co.jp



若田 航太 2003 年入社
SCM 第 3 グループ
在庫最適化支援システムの開発,
LoadCalc を適用した生産計画システム
の開発
wakada@hitachi-to.co.jp



木村 孝昭 1988 年入社
SCM 第 3 グループ
生産管理/計画システムのシステム・エンジニアリング
t-kimura@hitachi-to.ro.jp



岡崎 司 1985 年入社
研究開発部
生産管理・生産計画システムの研究
okazaki@hitachi-to.co.jp