

朝倉 重顯
S. Asakura井上 研一郎
K. Inoue坂本 英夫
H. Sakamoto

半導体製造工程は、長いものは数百工程の長さになり、工程フローの種類も多く、同一設備を繰り返し使うことも多い。このため、設備バランスや生産工期を予測するのは複雑となる。新規に製造ラインを設計するときや、既存のラインに変更を加えるときなど、製造設備台数とスループット、生産工期の関係を予測する場合の技術としてシミュレーションがある。

ここでは、ラインの設備バランスとスループットの関係を解析した場合と、シミュレーションした結果を製造計画に応用した場合について述べる。

Semiconductor fabrication is a complex process involving as many as several hundred production stages. A product follows a route that is determined according to its product type, passing through the same work center several times at different stages. Given this complexity, it is difficult to predict when a product will be finished or whether the machine load will remain balanced. A standard practice is, therefore, to conduct evaluation by simulation prior to fabricating or modifying a semiconductor. Such simulation clarifies the relationship between the proposed method of production and performance indices such as throughput and product turnaround time.

This paper reports two such case studies: one analyzing the effect of load balancing on throughput, and the other applying simulation results to production planning.

1 まえがき

IC, LSI などの半導体デバイスは、今日の情報社会に欠かせないパソコンやワークステーション、家庭生活の中におけるテレビ、エアコンなどほとんどの電気製品に使われており、その重要性から“産業のこめ”と呼ばれてきた。しかし別の見かたをすると、さまざまな顧客のニーズに合わせた部品を作ることもなり、標準化しにくく品種も多様化し、製造プロセスも複雑なもの扱うことになる。

このような半導体を製造するラインは、製品ごとにラインを形成せず、混合ラインの形をとることが多い。また厳密にいうと、ラインといっているがジョブショップ型の構成をしているところが多い。その複雑なラインの特性を解析し、設計や計画に応用するためにシミュレーションを利用することが考えられ、その活用を進めている。

- (1) 工程の数えかたや品種にもよるが数百工程と長く、同じ装置で繰り返し加工したり、分岐したり複雑である。
- (2) 数千品種を扱う場合もあり、工程フローや工程処理時間も多種類である。
- (3) 生産量の変動、品種・工程の変更が頻繁にある。
- (4) 超清浄な製造環境を必要とするため、装置の増設、入換えは容易に行えない。
- (5) 一般に高精度、高価格の装置が多く、メンテナンス、故障などが生産に大きく影響する。
- (6) 製造装置の種類として、複数ロットを一度に処理するバッチ処理装置と単一ロットを処理する装置の混在に加えて、1ロットの処理が終了しないうちに次のロットを処理できる連続処理装置が混在している。

したがって、製造ラインの能力バランスや、ウェーハのまとまりであるロットの仕掛残の状態を解析したり、予測したりするのは、単純な計算や手計算では困難である。

2.2 シミュレーションの役割

このような特徴をもつラインに対して、能力バランスが悪い場合の施策を検討するときや、製品の製造条件を変える計画がある場合など、その施策を事前に評価する必要がある。その場合、実際に装置を購入したり、製造条件を変えた製品

2 シミュレーションを用いる目的

2.1 半導体製造工程の特徴

半導体製造ライン、特にウェーハを加工する前工程には、次のような特徴がある。

を流したりして評価すると、金も時間も掛かってしまうので、製造ラインをモデル化したシミュレーションによる机上評価が重要になる。

また、新規にラインを構築するときの生産能力に対する装置台数の検討や、ロットを投入してから払出しまでの工期評価など設計評価ツールとしても重要である。

また、工場の生産管理システムとリンクして運用できれば、シミュレーション結果を製造計画や作業指示に応用できる。

最近、この分野にシミュレーションを利用する技術が盛んになっており、半導体専用のシミュレータも市販されている。ここでは、当社で独自に開発した高速なシミュレータ“DEUS”を応用した離散シミュレーションについて述べる。

3 半導体製造ラインシミュレータ

3.1 シミュレータの構造

半導体製造ラインは、もっとも大規模な生産システムの一つである。大規模なシステムの離散シミュレーションを行うために、図1に示すように「離散シミュレーションは状態記述データベースの書換えプロセスである」という考えかたを採用した。シミュレーション対象のシステムの状態をなんらかのデータベースに記述する。このデータベースを状態記述データベースと呼ぶ。

シミュレーション対象のシステムで何かでき事(イベント)が発生すると、システムの状態が変わる。イベントとは、例えば半導体製造工程では、ロット到着、着工、処理終了、装置休止などである。シミュレータでも、現実には発生するイベントを発生させて、現実の状態変化と同じようにシミュレ

タ内部の状態記述データベースを書き換える。状態記述データベースは、対象システムにこれから起きると思われるでき事(イベント)のリスト(イベントリスト)を対象システムの状態の一部としてもっている。そして、イベントリストに登録されているイベントを時系列順に実行していく。

半導体製造工程の場合、生産管理用計算機のデータベース(生産管理データベース)に製造工程の現在の状態のデータが格納されている。これが状態記述データベースの基になる。生産管理データベースからシミュレーションに必要なデータだけ取り出し、イベントリストを加えて状態記述データベースを作成する。

3.2 モデル

半導体製造工程において、ロットは工程フローや処理条件が登録されているプロセスマスタに従って工程を経ていく。各工程では、プロセスマスタに定められた装置群において処理を受ける。ロットは、完成するまでの間、さまざまな装置群を訪れる。つまり、製造工程内の処理の最小単位は、装置群である。装置群を待ち行列モデルで抽象的に表現し、最小単位モデルにする。製造工程全体は、そのモデルが複数つながったものとする。

図2は単位となる装置群モデルである。ロット、装置それぞれの動きを追いながら説明する。

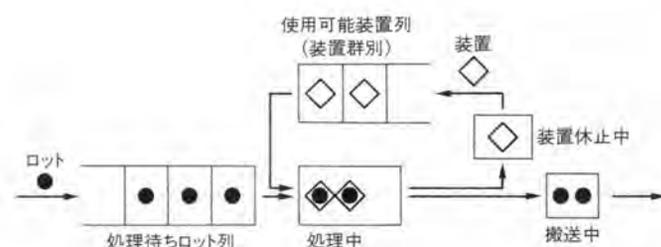


図2. 装置群モデル 単位となる装置群のモデルを示す。

Machine group model

ロットには、三つの状態がある。処理待ち、処理中、搬送中である。ロットは、工程に到着するとその工程を担当する装置群の処理待ちロット列に並び、処理待ちの状態になる。使用可能な装置が装置群内にあれば処理を受け、処理中の状態になる。処理が終了すると、ロットは次の工程へ搬送され、搬送中の状態になる。

装置についても三つの状態がある。使用可能、処理中、休止中である。処理すべきロットがあれば処理できる装置を使用可能であると言う。装置は、使用可能装置列で処理すべきロットを待つ。処理すべきロットが到着すると、すぐに処理を開始し、装置は処理中になる。処理が終了すると、装置は点検などの休止状態になる。装置の休止時間が終ると、装置は使用可能の状態になる。

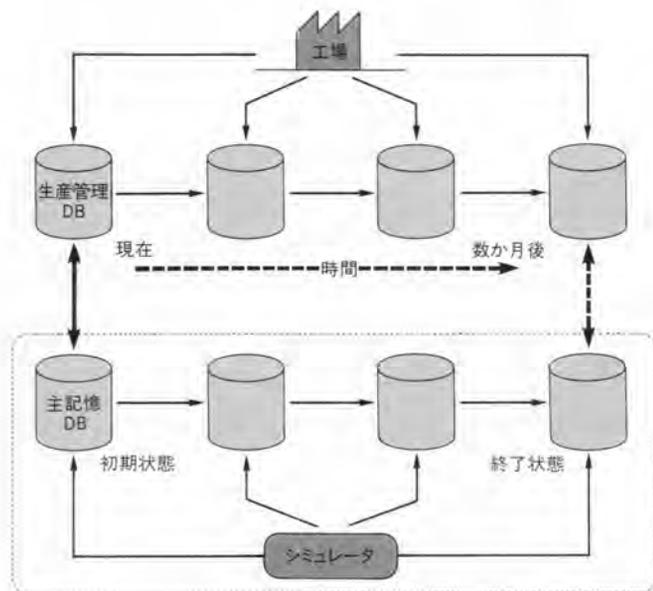


図1. 状態記述の方法 計算機内での状態記述データベースの書換えプロセスを示す。

Status description

一度に、一つの装置が複数のロットを処理できる場合は、一つの装置に複数のロットを対応づけて処理中にする。逆に、一つのロットが複数の装置に分けられて処理される場合は、一つのロットに複数の装置を対応づけることになる。装置群モデルを単位モデルとし、装置群の種類だけをつなげると、**図3**に示す製造工程の全体モデルになる。ロットを工程に投入すると、完成するまでいずれかの装置群を巡り続ける。

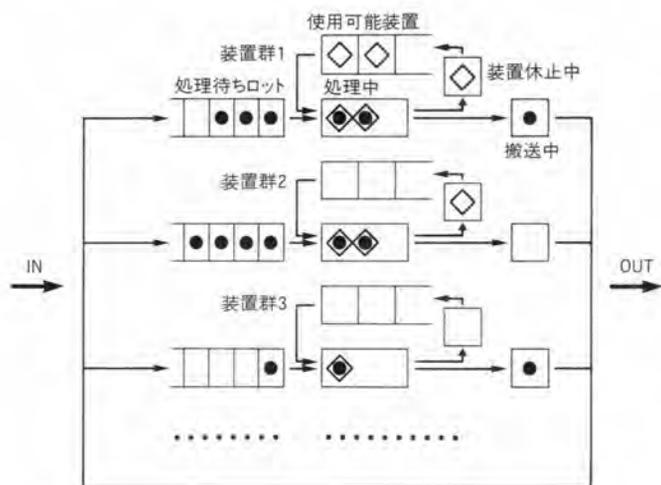


図3 半導体製造ラインモデル 装置群モデルを組み合わせて、ライン全体のモデルを示す。
Semiconductor fabrication model

と工期に関して解析した例を紹介する。スループットを最大にするには、ロットの投入量をどうすればよいか、ボトルネックの装置はどれか、装置を増やしたらどうなるか、工期に対する影響はどうかなど、製造ラインでつねに問題になっていることであるが、なかなか定量的に解析ができなかった。

適用例では、次の入力項目のもとにパラメータを変えてシミュレーションを繰り返し、評価を行った。**図4**はその内容を示したものである。

- (1) 入力条件 品種別工程条件，製造装置条件，初期の工程仕掛残，稼働カレンダー，輸送時間。
- (2) 解析パラメータ 品種別の生産予定，投入ロット数，装置台数，稼働計画。
- (3) 評価項目 品種別スループット，ロットごとの工期，装置稼働率。

評価したラインの例では、ボトルネックのバッチ処理装置が最大能力を発揮しておらず、全体のスループットを落としていた。

そこで、投入数量やプロセス上の施策を盛り込んで、スループット増加の見込みを見てみたが、単純計算によるラインのスループット設計値に満たないことが判明した。

結局ボトルネックの装置を増設する必要があるとの知見を得た。

4.2 製造計画のためのシミュレーション

シミュレーション技術を製造計画に応用した例として、ウェーハ工場向けのディスプレイがある。これはクリーンルームの一つの部屋を管理範囲とし、作業の計画と指示を行うシステムである。

システムは、管理範囲の生産予定と現場の状況を入力し、「どのロットをどの装置でいつ処理するか」といった作業計画

4 適用事例

4.1 ライン解析・設計への適用例

既存の前工程ラインをモチーフに、ロットのスループット

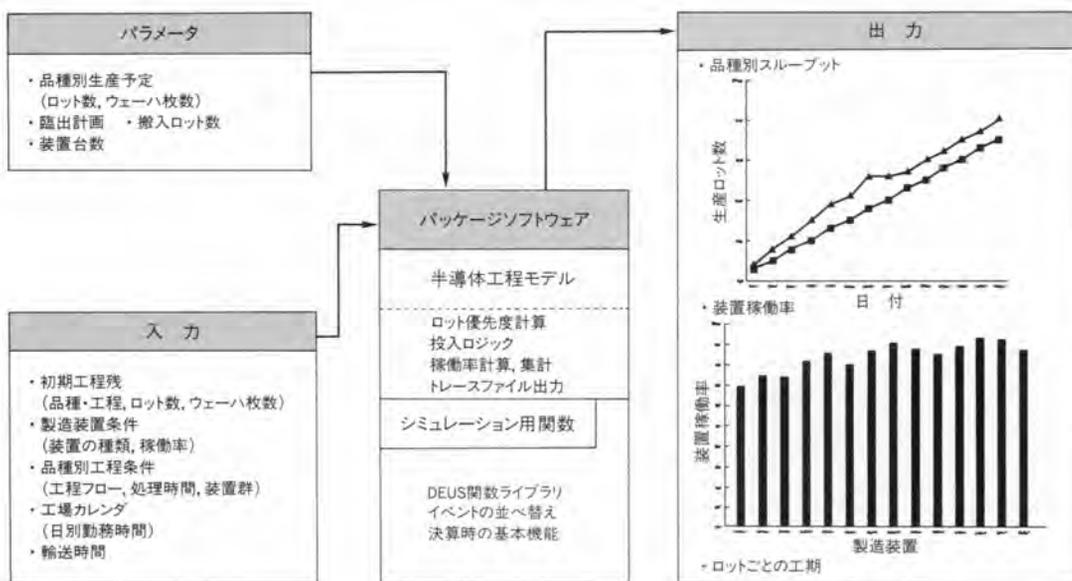


図4 前工程ラインの適用例 入力項目、パラメータ項目とシミュレータの構造を示す。
Example of wafer fabrication

と、段取りや装置保守の指示をする。指示は、シミュレーションにより作成されたスケジュールに基づいている。図5にこれらの情報の流れと現場の関係を簡単に示す。

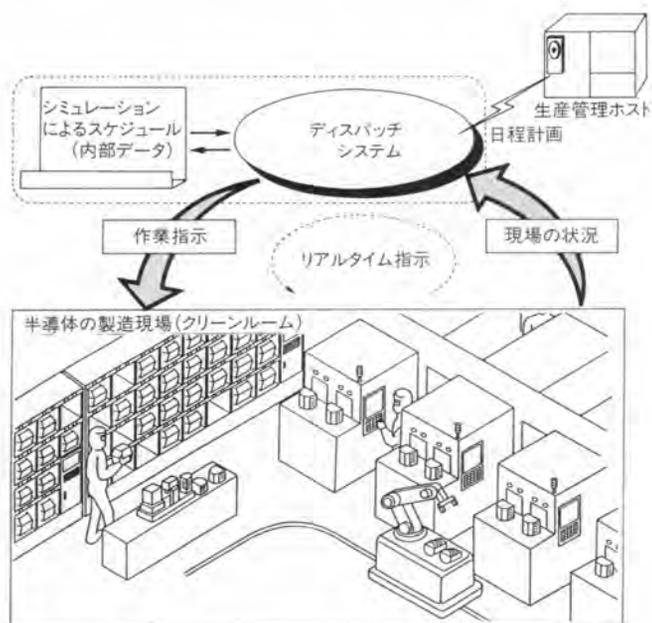


図5. 簡単なデータの流れ 状況変化によりリアルタイムに作業の追加や修正を指示する。

Simplified systems flowchart

シミュレーションは、作業員数やプロセスによる装置の指定などの制約条件を忠実に守り、複数の候補から作業を選定しながら実行する。決定する項目は、ロット処理、段取り、メンテナンスなどの作業の種類と処理するロットである。作業がロット処理であれば、多数の処理待ちロットの集合から複数を選択してバッチ単位に一つの作業とする。決定や選択の基準として、各ロットについて図6のように与えられるロットペナルティ値を用いている。ロットペナルティ値は、ロットがシステムの管理範囲に入った時刻(受入時刻)から時間とともに一定の傾き A で増加し、管理範囲からでることが期待される時刻(払出納期)を過ぎると、傾き B で増加する。 A 、 B は工場がディスパッチシステムに期待する挙動に応じて調整される。すなわち、仕掛りを少なくするには A を大きく取

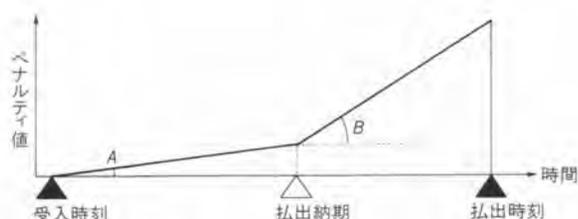


図6. ロットペナルティ値 ロットの滞留時間とペナルティ値の関係。納期を超過すると増加の傾きが大きくなる。

Penalty curve

り、さらに納期遅れを少なくするには、 B を大きくする。一般に $A \leq B$ であり、実際の払出時刻までの直線で囲んだ面積が小さいほど、良いスケジュールであると位置づけている。通常のロット以外に、特急品などロットの固定属性もペナルティ値に換算して考慮している。

ロットペナルティ値の総和が最小になる組合せを求めることは、最適化問題の一種といえるが、厳密な最適解の導出にこだわらず、準最適な組合せを高速に求める方法を採用している。これは、システムがリアルタイム性を重視していることと関連する。すなわち、システムはロットのロケーションや製造装置稼働状態など現場の状態をつねに監視しており、装置故障などの予定外のことが発生すると、速やかにスケジュール表を再作成する。したがって、つねに現状と矛盾しない作業を指示できる。

このように自動で作業の手順を作成するシステムは、熟練したマーシャルマンがいない工場や、作業員でなく自動搬送車でロットが搬送されるような場合に必要不可欠といえる。

現在は、実績データを基に、装置稼働率を落とさずに先入れ先出しの流し化が可能になることを確認している。今後は、さまざまな工程に適用できるように汎用性のある構造にして応用範囲を拡大する予定である。

5 あとがき

実例を用いてシミュレーションの応用について説明してきたが、今後の課題としては次の点がある。

- (1) 解析・設計のための評価ツールとして使いやすくするために、ユーザインタフェースを充実化させる。
- (2) 既存の生産管理システムなどとのインタフェースの汎用化を行う。

これらの点を解決し、生産効率の向上に寄与していきたいと考えている。



朝倉 重顕 Shigeaki Asakura

1978年入社。製造ラインのFA化、CIM化業務に従事。現在、四日市工場生産技術部課長。
Yokkaichi Works



井上 研一郎 Ken'ichirō Inoue

1984年入社。生産システム開発に従事。現在、生産技術研究所生産システム技術研究部研究主務。
Manufacturing Engineering Research Center



坂本 英夫 Hideo Sakamoto

1992年入社。シミュレーション技術の研究に従事。現在、研究開発センターシステム・ソフトウェア生産技術研究所。
Systems & Software Engineering Lab.