

# シミュレーション手法による 最適生産ライン設計の実施例

工藤 聡

## 1. はじめに

ここ数年来の自動車産業をとりまく環境は、めまぐるしく変化しており、お客様の好みの変化と多様化、需要の変化、すなわち生産量の変化、あるいは若年労働者の不足と就労者の高齢化といった労働環境の変化等に表われている。

そこで、時々刻々変わるこれらの環境の変化に対応すべく自動車製造各社は、既存工場の生産システムのFMS化やFMS化工場の新設、そして働く人が楽に作業できるような『人に優しい生産システム』の開発と導入にとりこんでいる。これに伴い生産設備はもちろん、搬送設備もそれ自体に高度で複雑な制御を要求されるだけでなく、各設備相互の連携動作により全体として効率的な運用が要求されるようになってきた。一方、マスプロダクションの旗頭である自動車製造ラインは、多種少量化の気運にあるとはいえ、その規模は巨大である。たとえば、最近竣工した当社の九州新鋭工場の最終組立工場では、ライン全長が約1.8kmにおよび、その中に約200ステージの有人、無人工程が混在している状況である(図1参照)。

したがって、部分的に高性能な設備を導入しても、組立工場全体のシステムとしての調和がとれていなければ、本来の能力を発揮できなくなってしまうことになる。しかしながら、これほどの大規模で複雑なシステムのオペレーションや運営条件(設備の機械的制約や故障率、日々の生産計画における生産比率の変動等)を想定し、最適なラインや設備の設計をするには、従来のベテラン技術員の知識・経験や勘に頼った方法では、その結果を保証することは非常に困難である。そこでわれわれは、これらのシステムの設計および運用案に対する妥当性を検証し、意思決定や戦略を事前に評価するためにはシミュレーションを採用することが有効であり不可欠であると考えている。

くどう さとし 日産自動車㈱ 第3技術部

〒228 座間市広野台2-5000

本稿では、上記工場の設計段階で汎用シミュレーション言語SLAM II[1]を用いて対象工場のモデルを作り、シミュレーションを行なうことにより、設備のポテンシャルを最大に引き出し、建設後のトラブルを未然に対策することを目的とした実施例を紹介する。

## 2. 工程概要

本シミュレーションで評価したシステムは、自動車製造の最終工程にあたる組立ラインであり、以下の3種のラインより構成される。

- ① トリムライン
- ② アンダーフロアライン
- ③ シャシーライン

上記の各ラインは、さらに有人工程、自動化工程、およびそれぞれの工程間のバッファ工程より構成される。塗装を完了した車体は、組立過程のトリム工程、アンダーフロア工程、シャシー工程の順にライン上を電車(電動式インテリジェント台車)によって搬送されながら組み立てられる。各工程の終点でボディを降ろされた電車(以下空電車と呼ぶ)は組立ラインとは別の空電車バッファラインを経て各工程の始点までもどり、再び利用される。概略を図1に示す。

## 3. 本シミュレーションの目的

新組立工場の最終ライン仕様にもとづき、各構成要素の必要な諸元とそれらの組合せが生産高におよぼす影響を検討し、目標生産高を確保できるライン構成を検証することとした。具体的には、以下の項目について検討を行なった。

- ① 有人ラインと自動化ライン間および各工程間のバッファ容量
- ② 各工程の空電車バッファ容量
- ③ 各工程の稼働状況

## 4. 条件

- (1) ライン諸元……20,000台/月
- (2) 投入タクト……0.969分/台
- (3) 稼働時間……1シフト510分

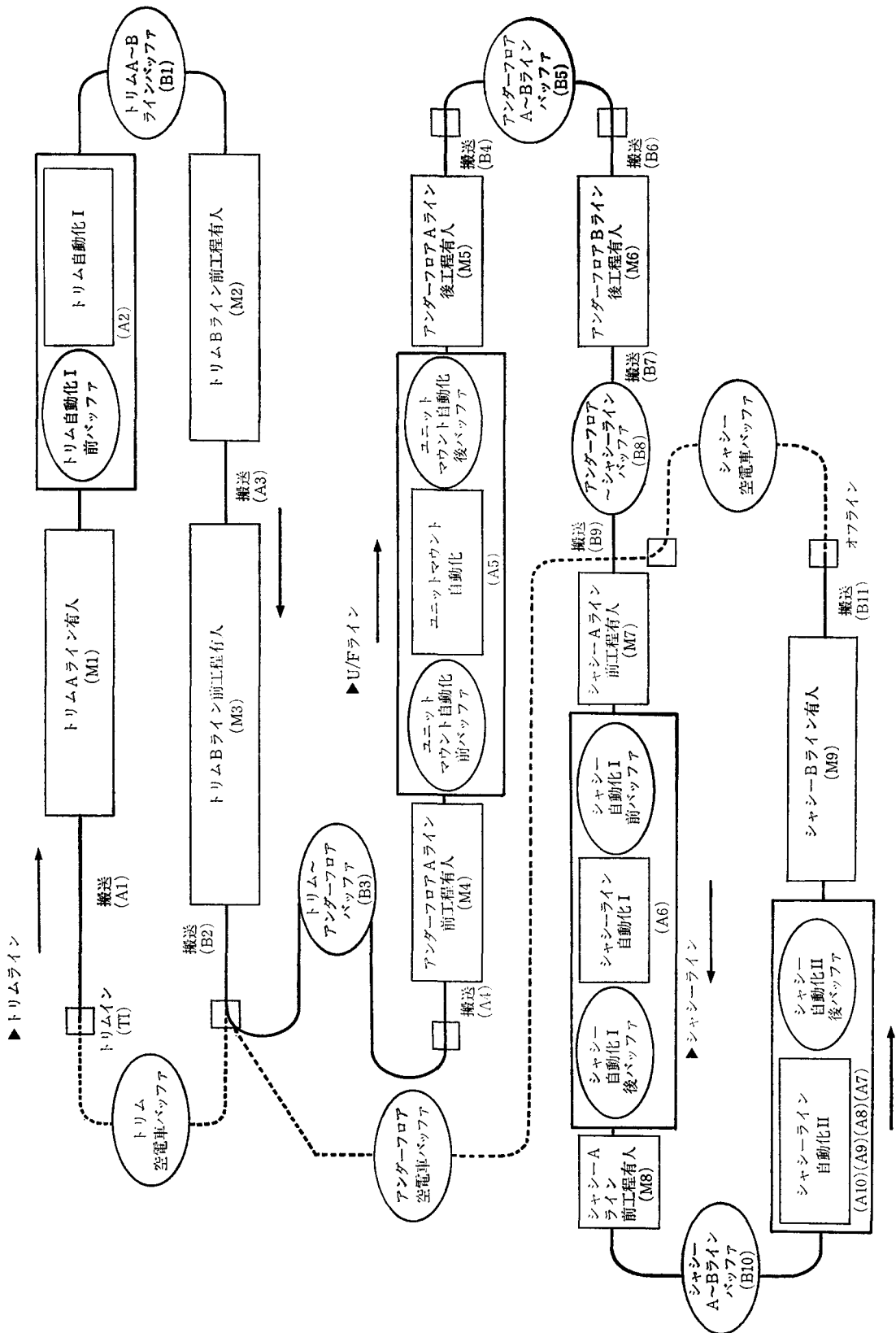


図1 ライン構成概要

表 1 故障頻度

① 有人ライン (稼働率: 98%相当)

1 回当たりの故障時間 (分)	0.2	0.3	0.6	1.0	計	総故障時間
発生頻度 (回)	1	12	6	8	22	10.4分

② 自動化ライン (稼働率: 93%, 95%相当)

1 回当たりの故障時間 (分)	1.0	2.0	3.0	5.0	計	総故障時間
発生頻度パターン 1 (回)	5	6	3	2	16	36.0分
発生頻度パターン 2 (回)	5	5	2	1	13	26.0分

(4) 稼働率……有人ライン (98%)

自動化ライン (93%) (95%)

(5) 故障……有人ライン, 自動化ラインに発生する形態を以下に示す.

① 有人ライン

工程内の車はすべてその位置で停止する.

② 自動化ライン

自動機械の故障によりライン全体が停止する.

③ 1 回当たりの故障時間と発生頻度

1 シフト 510 分とし, シフト内で表 1 に示すパターンにもとづいて発生する. 1 回当たりの故障時間はそれぞれ固定の時間であり, 発生頻度にもとづき確率的に発生する. (表 1)

④ 発生間隔

発生間隔は, 指数分布による乱数にもとづきその平均時間は, シフト時間を各発生パターンの総発生回数で割った値である.

• 有人ライン

23.18 分 (=510 分/16 回)

• 自動化ライン

パターン 1 31.88 分 (=510 分/16 回)

パターン 2 39.23 分 (=510 分/13 回)

## 5. 評価ケース 1

目標生産台数 20,000 台/月, トリムライン投入 0.969 分/台において, ライン構成を全ライン, トリムライン・アンダーフロアライン・シャシーラインのみの単独とし自動化ライン稼働率 93%, 有人ライン稼働率 98% の評価および自動化ライン稼働率 95% とし全ラインの評価を行った. 表 2 にケースを示す.

## 6. 評価ケース 1 結果

### 6.1 生産量

本件では, 故障という確率的要素を含んでいるため, シフト間の稼働状況にばらつきが発生すると考え, シミ

表 2 評価ケース 1

ケース No.	目標月産台数	トリム投入タクト (分/台)	ライン構成	ライン稼働率 (%)	
				自動化	有人
1	20.000	0.969	全ライン	93	98
2			トリムラインのみ		
3			アンダーフロアラインのみ		
4			シャシーラインのみ		
5			全ライン	95	

ュレーションの実行開始より, シミュレーションモデルの状態が定常状態に達した時点から結果収集を始め, 1 シフト毎に 10 シフト分の生産台数を求め, これより顕著な増減傾向が見られないため, 95% の信頼区間を算出した. 表 3, 4, 5 および図 2 より全ライン稼働ケースよりもラインが複合されることにより, ライン数が多くなり故障によるばらつきが大きくなっているが, 信頼区間がもっとも大きい自動化稼働率 93% のケースでも, 生産台数は  $504.7 \pm 3.458$  であり, 平均に対して  $\pm 0.5\%$  の幅で収まっており, ほとんどのケースで 1 シフト 500 台以上の生産台数が見込まれる. 各ライン単独で生産台数に着目すると, シャシーラインは他ラインに比較し 10 台近く

表 3 生産台数 (自動化稼働率: 93%)  
全ライン稼働

シフト No.	トリムライン (台/直)	アンダーフロアライン (台/直)	シャシーライン (台/直)	オフライン (台/直)
1	498	497	502	501
2	508	509	506	506
3	502	500	504	504
4	504	306	504	504
5	508	506	508	508
6	506	508	499	499
7	507	509	513	513
8	506	503	509	509
9	510	511	509	509
10	497	496	494	494
最大	510	511	513	513
平均	504.6	504.5	504.8	504.7
最小	497	496	494	494

表 4 生産台数 (自動化稼働率:93%)  
各ライン単独稼働

シフトNo.	トリム ライン (台/直)	アンダー フロア ライン (台/直)	シャシー ライン (台/直)
1	511	514	510
2	519	516	509
3	516	515	507
4	516	511	498
5	519	518	507
6	511	512	503
7	513	511	504
8	515	514	506
9	513	514	503
10	510	512	498
最 大	519	518	510
平 均	514.3	513.7	504.5
最 小	410	511	498

表 5 生産台数 (自動化稼働率:95%)  
全ライン稼働

シフトNo.	トリム ライン (台/直)	アンダー フロア ライン (台/直)	シャシー ライン (台/直)	オ フ ライン (台/直)
1	493	493	500	499
2	512	510	506	506
3	504	506	503	503
4	500	500	503	503
5	507	507	507	507
6	508	507	510	510
7	508	509	506	506
8	510	509	514	514
9	515	514	511	511
10	510	511	510	510
最 大	515	514	514	514
平 均	506.7	506.6	507.0	506.9
最 小	493	493	500	499

低くなっている。トリム、アンダーフロアラインの生産量は510分間フル稼働したときのおおの最終工程である有人ラインの稼働率98%の生産台数(510分/0.969分/台×0.98=515台)に相当するが、シャシーの生産量はこれらより下まわっており能力が劣っていることがわかる。全ラインの結果は、シャシーラインの結果にほぼ等しくシャシーラインの稼働が全ライン稼働状況を決定していることがわかる。

## 7. 評価ケース 2

評価ケース1よりシャシーラインによりトリム～シャ

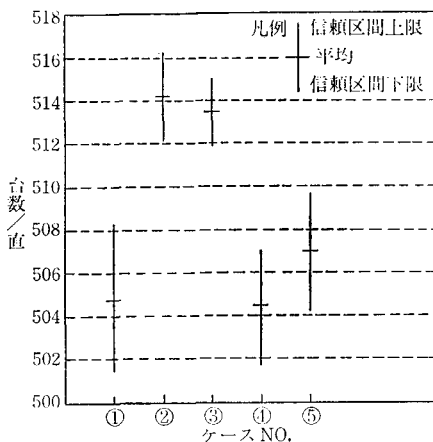


図 2 生産台数の信頼区間 (95%)

シーラインを通した組立ラインの生産能力が抑えられることより以下の項目について再確認を行なった。

- 『シャシーライン自動化 I 前・後』バッファのステージ数の変更による影響
  - 『シャシー空電車』バッファの最大滞留台数の確認
- 表 6 にケースを示す。

## 8. 評価ケース 2 結果

### 8.1 『シャシー自動化 I 後』バッファ容量の影響

表 7 より『シャシー自動化 I』後バッファ容量を3台より4台、5台と増加するに従い生産台数は、2台ずつ増加することがわかる。これは、『シャシー自動化 I』の故障により、後バッファが空となり次の有人ラインへの供給不足状況を少なくすることができ生産量の増加に

ケースNo.	ケ ー ス	MIN~MAX
①	93% 全ライン稼働	501.242~508.158
②	93% トリム ライン稼働	512.296~516.304
③	93% アンダーフロア ライン稼働	512.297~515.103
④	93% シャシー ライン稼働	501.932~507.068
⑤	95% 全ライン稼働	504.121~509.679

表 6 評価ケース2

ケース No.	シャシー自動化 I 前後バッファ容量		シャシー空電車 バッファ容量
	前バッファ	後バッファ	
1	3	3	12
2	3	4	
3	3	5	
4	5	5	
5	3	3	∞
6	5	5	

つながったことを示している。ケース3の場合で、96% (=510.1台/526台) の稼働率の達成が可能となる。

8.2 『シャシー自動化 I 前』バッファ容量の影響

ケース4では、ケース3に対し『シャシー自動化 I 前』バッファ容量を3台より5台に増加させその影響を見ると、平均0.8台の増加となり97.1% (=510.9台/523.6台) の稼働率の達成可能となる。これは、『シャシー自動化 I』の故障の影響を減少させることにつながっていることがわかる。(表7, 図3)

8.3 『シャシー空電車』バッファ容量の影響

ケース1に対するケース5、ケース4に対するケース6は、それぞれ『シャシー自動化 I 前・後』バッファ容量をそのままにし、『シャシー空電車』バッファ必要容量を検証した。それぞれの比較をすると、生産台数(表7, 図3), 『シャシー空電車』バッファの滞留台数(表8)は、ほぼ同じである。ケース5結果より、ケース1での『シャシー空電車』バッファに必要な最大容量は19台となるが、生産台数には、ほとんど影響していない。同様にケース6の結果より、ケース4では14台必要とな

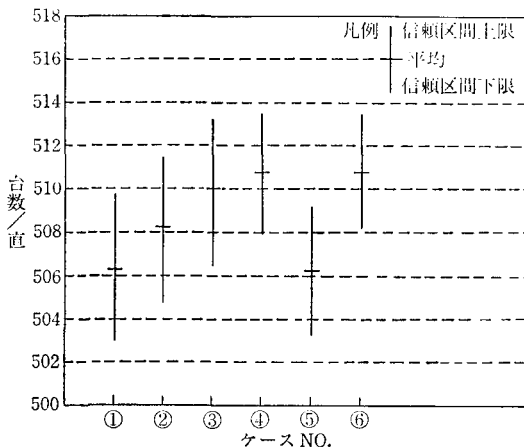


図 3 生産台数の信頼区間 (95%)

表 7 生産台数 (自動化稼働率: 93% (シャシーライン単独稼働))

シフト No.	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4	ケース 5	ケース 6
1	510	512	515	513	513	513
2	511	515	515	515	508	515
3	507	510	512	511	507	511
4	504	504	517	511	505	511
5	513	509	514	504	512	504
6	499	503	502	512	498	512
7	505	506	506	505	506	505
8	508	513	517	507	507	507
9	510	513	511	512	510	512
10	497	497	502	519	499	519
最大	513	515	517	519	513	519
平均	506.4	508.2	510.1	510.9	506.5	510.9
最小	497	497	502	504	498	504

表 8 シャシーライン空電車バッファ滞留台数

ケース No.	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4	ケース 5	ケース 6	
最大台数	12	12	12	12	19	14	
平均台数	8.648	7.933	6.927	4.244	9.607	4.247	
最小台数	1	0	0	0	1	0	
12台以上滞留時間	%	19.7	12.2	6.7	0.6	32.7	0.6
	分	1007.0	620.5	341.2	32.3	1667.7	30.6

るが、12台以上であった時は極小である。このことより、『シャシー空電車』バッファ容量は12台でも十分で

ケース No.	ケース	MIN~MAX
①	ケース 1	503.170~509.630
②	ケース 2	504.709~511.619
③	ケース 3	506.687~513.513
④	ケース 4	508.076~513.724
⑤	ケース 5	503.446~509.554
⑥	ケース 6	508.076~513.724

あり、『シャシー自動化I前・後』バッファを増やすことのみでシャシーラインの生産能力を向上させることが可能となることがわかる。

#### 8.4 ライン上の滞在率

図4, 5において, ケース4は他のケースに比べ、『シャシーA～Bライン』バッファ (B10) に多く車が滞留するようになっている。これは『シャシー自動化I前・後』バッファ容量を増加することにより、『シャシーA前有人』工程の稼働が上がり、『シャシー自動化I』より『シャシーA後有人』工程への供給が順調に行なわれるようになる。また, 図3より『シャシー自動化I後』バッファを増加させることにより、『シャシー空電車』バッファ滞留台数は, 平均的に減少しピークの数もより少ない方にずれていくことがわかる。

### 9. まとめ

当社の九州新鋭工場の繊装組立工場の設計時にシミュレーションを実施することにより, 以下の成果を得た。

- (1) 当初計画のアンバランスが定量的に把握できた。
  - ① シャシー自動化Iライン前後バッファ容量 (3台) の不足
  - ② シャシー空電車 (12台) バッファ容量の不足
  - ③ 上記容量不足によるトリム, アンダーフロアラインの生産能力まで影響
- (2) 上記問題点の対策案をシミュレーションにより検証できた。
  - ① 前後バッファ容量は5台に変更することにより最適化
  - ② 当初計画していた空電車バッファの追加は不要であることが判明 (不要な設備投資の削減)
- (3) ライン全体の最適化により生産性が向上他
  - ① 下流工程の手待ち約 1.3% (3,072台/年)
  - ② 生産計画, 設備稼働率による各ラインおよびライン全体への影響と傾向の定量的把握

『シャシーA後有人』工程の稼働に影響を及ぼさない『シャシー自動化I後バッファ』の容量は5台であり, 『シャシーA前有人』工程は『シャシー自動化I前バッファ』の容量を5台と設定することで『シャシー自動化I』の故障に影響されない運用が可能であり, 『シャシーライン空電車バッファ』の容量12台でも十分となり, ラインの稼働率は約97%が保証されることが確認できた。

最後に本シミュレーション検討にあたり多大なるご支援ご指導いただいた物構造計画研究所中野一夫氏, 相沢

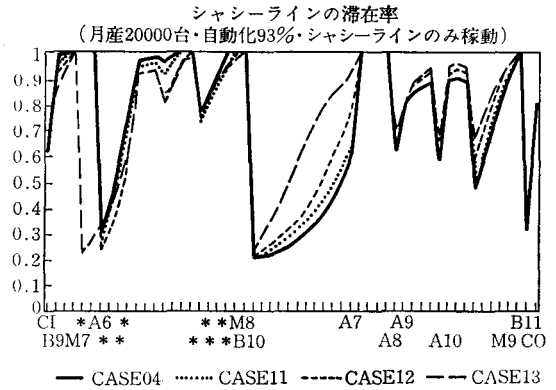


図4 シャシーラインの滞在率

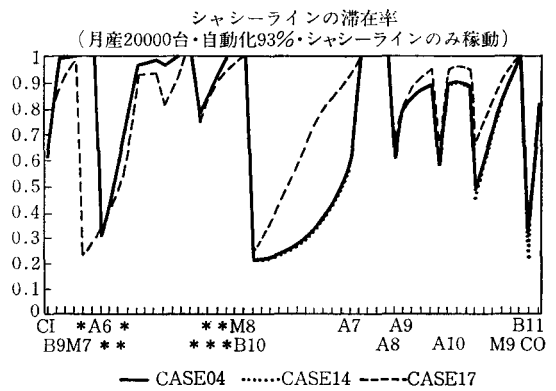


図5 シャシーラインの滞在率

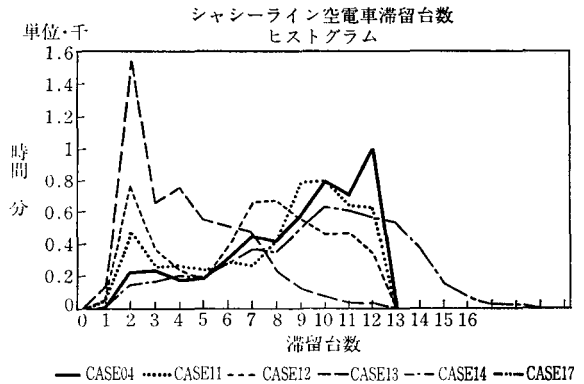


図6 シャシーライン空電車バッファの滞留台数のヒストグラム

りえ子氏, 久木野誠氏, および当社九州新組立工場プロジェクトの関係各位に厚くお礼申し上げます。

#### 参考文献

- [1] 森戸 晋, 相沢りえ子共著: S LAMIIによるシステム・シミュレーション入門, 構造計画研究所, 1986.