

特集 需要の変機種変量に対応した生産システムの設計

Production System Design Adapted to Production Volume and Product Variety Change in Market Demand

山崎 康彦

Yasuhiko YAMAZAKI

山中 智晴

Tomoharu YAMANAKA

岩松 亮二

Ryouji IWAMATU

北野 晶之

Masayuki KITANO

It has been difficult with an automated production system to achieve compatibility between productivity and adaptability to market demand fluctuation, where production volume and product variety are uncertain. Recently we have introduced a new production system design concept to solve this problem. The concept leads to a production system with multiple lines, whereby each line consists of similar processes. A machine can be plugged in or out of each line to easily adapt to production volume and product variety changes. By connecting each line to a flexible buffer, the total production system can be controlled like a transfer line, maintaining high productivity. We have applied this concept to assembly processes for automotive ABS (Anti-lock Braking System), and realized a new automated production system with high productivity and adaptability to market demand.

Key words : Production system, Productivity, Adaptability to market demand fluctuation, Production volume, Product variety, Design concept, Transfer line

1. はじめに

成熟型消費社会の到来による消費者ニーズの多様化、グローバル規模での激しい製品開発競争の進展などにより、予期しえない需要変化が発生する時代が訪れている。“市場は絶えず多様に進化し続け”、“市場の変化や現象を将来予測することは不可能”と言われていた中、この市場の変化への対応能力が事業存亡の一つのキーワードになりつつある。従来安定した需要が確保されてきた自動車部品市場においても例外ではなく製品の動向予測が益々困難になりつつあり、市場の変化にダイナミックに追従可能な生産システムが不可欠となっている。

これまでの右肩上がりの成長期における量産製品への投資は、規模による経済性を指向し生産量・品種が確かである前提で自動化設計を行い、いわゆるトランスファライン（以下TRライン）の高度化を追求してきた。これに対し近年のような生産動向が不透明である環境においては、投資リスクの伴うTRラインよりも生産性を犠牲にしてでも手作業を主体とした柔軟性の高い生産システムにて対応している例が多い。特に人の持つ柔軟性や改善能力に着目したセル型・一人生産方式などは家電やパソコンなど需要が不透明で生産期間も数ヶ月と短い製品には効果を発揮している。しかし将来の予測が難しい中でもある程度数量や生産期間がまとまっている自動車部品の分野では、自動車メーカーからの厳しいコストダウン要求に対し手作業では

到底コストを満足することができず、また、中国に代表される低労務費国に対し、日本のモノづくりの競争力を維持するためにも、従来以上の経済性追求を行った手作業に勝るフレキシブルな自動化システムが求められている。

さらにTRライン構築の歴史的な過程において確立されてきた高品質・少在庫・短リードタイムなどの特長は、自動車部品メーカーとして生産の根幹の一部を成すと言っても過言ではなく、市場変動が激しく生産システムのフレキシブル性の重要性が求められる近年の状況においても従来以上のレベルが求められている。

このような背景の中、高生産性などの特長を持ったTRラインをベースとして生産量・品種の変動に追従可能な新たな自動化組立ラインを開発した。

以下2章にて新しい生産システムを成立させる必要要件と構築の考え方、3章にて具体的な設計手法、そして4章にて今回適用した自動車用ブレーキ部品であるABS (Anti-lock Braking System) 組立工程に適用した事例について説明し、5章にてまとめを述べる。

2. 新たな生産システム構築の考え方

2.1 システム検討の考え方

生産システムのフレキシブル性は生産性と相反する性質を持っているのが一般的である。生産性とフレキシブル性という切り口で既存の代表システムをまとめたものをFig. 1に示した。自由度が最も高いシステム

*日本インダストリアル・エンジニアリング協会の了解を得て、「IEレビュー」223号 Vol.42, No.5より一部加筆転載

事例としてはセルと呼ばれる一人生産方式やJOB-SHOPなどが上げられる。これらのシステムはライン化されていなく設備が独立している点で共通であるが、自由度に対する性格という意味ではその目的は大きく異なる。JOB-SHOPは名のごとくSHOPとして多種に対応するシステムである一方、一人セルは生産量に対するフレキシブル性を向上させた究極の姿と言える。これらのシステムが、整流化や少品種化、あるいは多量化・混流化というプロセスを経て、工程の自動化と共に搬送の自動化を行い極限まで生産効率を追求した究極の姿がTRラインと言えよう。

このTRラインに至る過程は作業をフロー化したフォード式システムから始まった過去の歴史的なシステムの進化プロセスそのものであり、近年のセル化の風潮は過去へ回帰し、そこを原点として生産性を向上させるという思考プロセスで開発されていると言える。

当社においてもこのようなセルを出発点として自由度を落とすことなく生産性を上げるという検討例は多くある。例えば移動ロボットを用いたAPSシステム¹⁾や一人セルをコンパクトに自動化したCACシステム²⁾などがあげられ、これらのシステムは社外からも高い評価を得ている。またJOB-SHOPの高生産性化においてはGTやスケジューリングシステムなどの手法が一般的に知られているのは周知のとおりである。これに対し今回の試みは、高度に自動化されたTRラインをベースに生産量・品種の変化に対する自由度を向上させるという方針を掲げ開発に取り組んだ。

検討のプロセスとしては、まずTRラインを分析することによりその特長が生み出されている要件を明確にした上で、その要件を満たしつつシステム自由度を

上げるための方法を模索し、さらにそのシステム設計手法を確立して具体的に実ラインに展開を行った。以下検討の過程に沿って説明する。

2.2 TRラインの分析

TRラインは高い生産性を持つと同時に、品質管理や生産管理の容易性、少在庫という特長を持つ。Fig. 2に示すようにこれらの特長はTRラインの工程設計の過程を通して作り込まれている基本要件から生み出されているものであり、その基本要件とは次の三つであると考えられる。

- (a) 工程の平準化（サイクルタイムの均一化）
- (b) 流れ生産（シンプルな流れ）
- (c) ラインバラシング（最小バッファによる干渉防止）

一方でこれらの三つの基本要件は与えられた生産量・品種そして固定されたレイアウトの前提に決定されるものであり、この生産量やレイアウトの固定もTRラインの基本要件となっている。つまりFig. 2の概念図に示すようにTRラインが持つさまざまなメリットは生産能力やレイアウトを固定するからこそ成り立つものであって、フレキシブルなTRラインを追求するという課題を解決するには従来とは異なる新たな考え方・検討手法が必要となる。

2.3 新たなシステムを支える要件

課題解決のポイントは、TRラインのメリットを生み出す三つの基本要件に対し、生産能力・レイアウトの固定条件を取り払った状態でこれらの要件を成立させることが可能な概念や検討手法を確立することであ

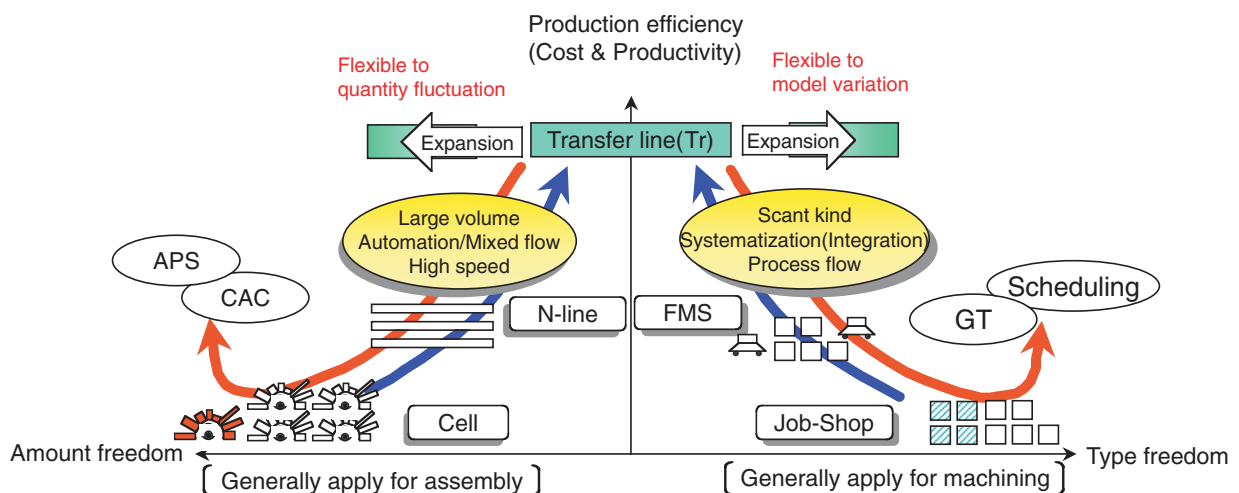


Fig. 1 Freedom and productivity of production system

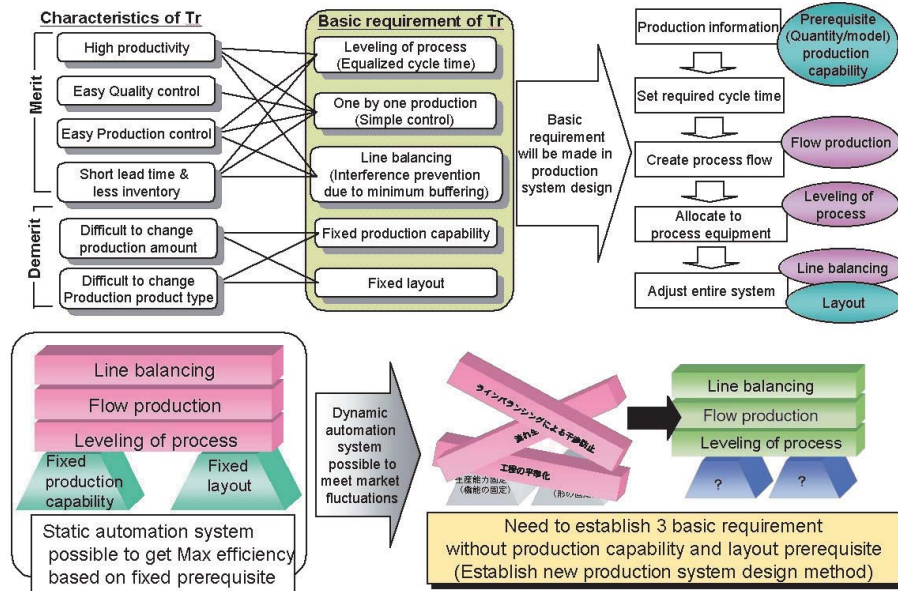


Fig. 2 Transfer line characteristic analysis and point aimed at new production system

る。以下三つの要件についてその考え方をまとめる。なお、生産品種の変化は0からの量の変化と捉えることが可能なため、ここで簡易的に量の変化にまとめて表現するものとする。

2.3.1 生産量の変動を前提とした工程の平準化

工程の平準化とは、設備の能力を最大限活用可能な状態において、その設備の負荷状態が一定に保たれている状態をいう。固定の生産能力を持つ生産システムにおいて生産量が変動すれば、その変動に従い設備の負荷が変動し、この負荷の変動そのものが製造原価に

おける加工費の変動をもたらす。従って生産量の変動を前提とした工程平準化のあるべき姿とは、生産量の変動が起きようとも設備負荷率の変動が生じない状態、すなわち需要に応じて設備の増減を行い、それによりシステムのサイクルタイムが変更できることであり、具体的に取り得る方法として次の三つに集約することができる (Fig. 3)。

- ① 設備増減時に各設備への工程要素再割付によるシステム能力変更
- ② 工程集約度向上による基本投資単位の小型化

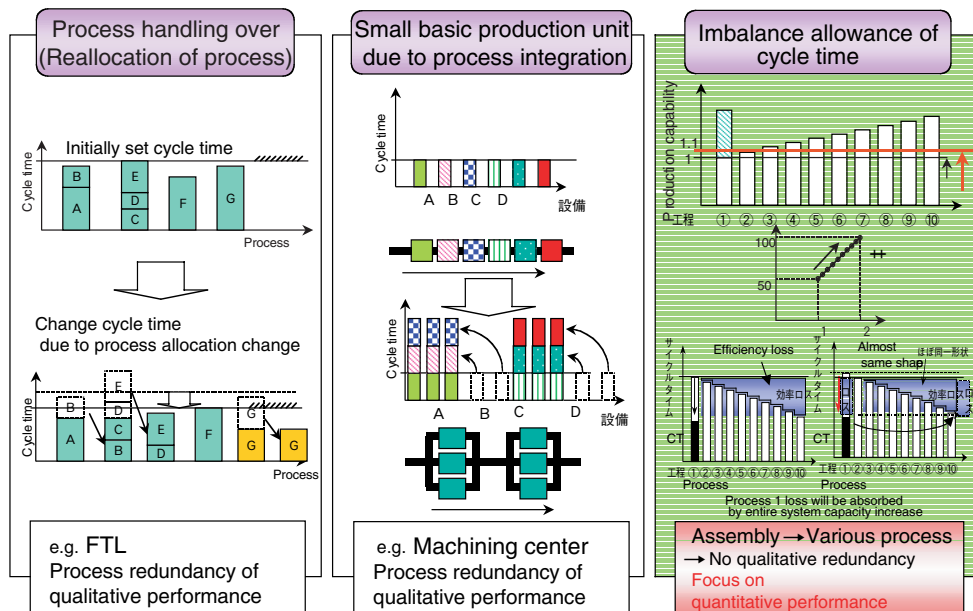


Fig. 3 Equalized and maximized efficiency without quantity prerequisite

③ サイクルタイム（以下CT）アンバランスを許容した上で能力の不足する工程から順次能力増強（ボトルネックコントロール）

①、②については機械加工においては工程が汎用的である理由より一般的に適用される方法である。代表的な例として①については小型マシニングセンタ（以下MC）をライン化したFTL、②については工程集約型のMCそのものなどがある。これらの機械加工においてフレキシブル性が保持できる本質的な理由は、設備の質的能力に冗長性があるためである。

例えば①の事例の場合はCTを変更する時に設備間において工程の一部を受け渡す必要があるが、その時工程を受け渡す設備間には同一機能が求められる。FTLの場合ATCを搭載し複数の刃具を持ち、多面加工ができるなどの機能がそれにあたる。またスタンドアロンのMCにおいても同様であり、工程を集約して小刻みな投資を可能とする一方で工程集約に求められる多機能化により設備は豪華仕様になりがちで結果として機能（質）の冗長性を持つことになる。

これらの工程は数が少ないうちは効率的に生産が可能であるが、数量が増加するに従い、設備として無駄な機能が増え、結果投資額としてのロスが発生する。が、しかしそれらの投資ロスを考えても数量動向が不透明で変化に対するリスクの方が大きい場合にこれらの生産システムを敢えて選択する。一方組立において同様の考察を試みると、工程種が千差万別の組立においては、そのような機能の冗長性を付与することは不可能に近い。

今回の研究では冗長性を一つのキーワードとして、質に対して量の冗長性に着眼した。前記③で表したCTのアンバランスは、設備の量的能力の無駄を許容しているが、ひとたびこれを許容すると能力の自在変更などさまざまな可能性が広がる。問題はCTのアンバランスにより発生する設備効率の無駄に対する評価であるが、これについては想定する生産量変動の確率分布から設備費の期待値を求めれば、生産量ばらつき値をパラメータとして達成しなければならない設備負荷率が設定可能である。また、一般的に個別設備のCTは製作段階において仕様の時間に入ればそこで調整を止めてしまうため、TRラインのように結果として個別設備のCTがそろっていることとそれらの設備の限界能力は別問題であって、CTのアンバランスがそのまま投資ロスに直結するわけでもない。

以上の①～③の方法については、工程の性質によ

てそれぞれ適する方法を選択すればよく、最終的にシステム全体はすべての方法が混在した形で構成され、それによりシステムとして需要の変化がおきても一定の負荷状態を維持することが可能となる。

2.3.2 流れ生産

流れ生産確保のためには、机上のプロセスフローチャートに沿った形で物が流れることが必要であり、生産能力変更時の設備増減はそのチャート上と同じ位置に容易に設備の抜き差し可能であることが必要である。そのための要件としては

- ① 自由に設備を増減しやすいシステムレイアウト
- ② 設備単体がソフト・ハード共に自立していることが必要となる。

2.3.3 ラインバランシング

生産量変動を前提に考えれば個別設備のサイクルタイムは常に変動するため、ラインバランスを保つためには膨大なバッファを必要とする。大量のバッファがシステム内に存在する場合、実質上はバッファの前後でラインが分割されていることに等しく、従って最適システムの検討は最適ライン分割の検討と見なすことができる。一方当初の狙いであるTRラインの特長を生かすためには物の流れはコンベアのようにつながっていることが必要であり、そのためには変動に対応可能なバッファを兼ねた搬送装置が必要となる。

このような搬送装置を含めた最適ラインバランスについては基本的にコストに換算して評価が可能である。生産量や品種の変動を前提とした工程編成の変動の中でシミュレーションを繰り返しコストがミニマムとなるポイントを見出し、変動対応が必要の無いコンベアに代表される最小の固定バッファと変動に対応すべく搬送能力・容量がフレキシブルなバッファの組合せによるバランス確保をすればよい。これは言い方を変えれば、システム的能力変更時におけるボトルネック箇所の影響度合いの範囲を設備費と搬送費のコストバランスにて決定するということである。検討時における最も重要なことは、想定した変化において選択した生産システム方式が常にコスト最小でなければならないことである。生産の前提条件が変化した時に、それに対応する生産システムの基本的構成が大きく変更を求められるようなシステムでは役に立たない。さらにコスト最小と目標コストを達成することは別問題であるので、導き出したシステム構想においてコスト目標を達成するためのハード開発が重要となる。

以上の三つの要件をFig. 4にまとめた。

	Current TR-line	New TR-line Flexible to the fluctuations	Action item
Leveling of process	All process has same CT in TR-line	<p>Max. Utilization of equip. efficiency (Cost min)</p> <p>Process design that the efficiency is consistent & maximized regardless of the amount</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ Create process design method
Flow production	Fix layout at design stage (Straight layout)	<p>Max. area efficiency</p> <p>Easy to move/change layout system, according to amount/model change (Equipment mechanism layout method)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ Layout w/high expansion freedom ■ Stand alone equipment ■ Mixed flow technology ■ Flow production control method
Line balancing	Leveling of process maintain line balance w/ min buffering between equipments	<p>Min buffering to get max efficiency</p> <p>Flexible buffer to maintain line balance against continuously changing cycle time</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ Concrete buffer setting method ■ Buffering hardware development ■ Buffering control technology

Fig. 4 Necessary requirement for new production system

3. 具体的工程設計

次に現実にライン全体の設計から個別設備の仕様に至るまでの具体的方法について述べる。

普通の工程設計の場合、検討の前提条件として生産情報（生産量、寿命など）が与えられ、その条件に基づき最適解を導き出す。すなわち全体の枠組みが決まってから各設備までの個別の条件が決定される。ところが生産情報が不透明で全体が決まらない場合、同様のプロセスで個々を決めることはできず、この場合当然の帰結として個々の寄せ集めの結果として全体が決定されるという方法しか残らない。いかにも場当たり的に思えるが、この方法こそが結果的にCTをアンバランスにし、システムとしてフレキシブル性を付与することを可能ならしめる。その検討手順を下にまとめた。

- ① 対象全製品の工程系図作成
- ② 同種の共通工程をくくる
- ③ 設備の単位として適正な単位を仮決定
(基本は異種の工程は集約しない)
- ④ 設備の連結に関係なく各設備の負荷100%となるCT設定と設備費見積り実施
- ⑤ 個別単体設備連結方法を平均CTの同質性を基準にグループ化した時の設備費試算実施
- ⑥ 基準数量をベースとして生産量・品種が変動した場合も⑤同様計算
- ⑦ グループ間をつなぐバッファ案を製品の特徴や生産量から基本方式を決定
- ⑧ 基準数量をベースとして生産量・品種が変動した場合のバッファコスト試算
- ⑨ 工程グループ化の複数案とグループ間のバッフ

アの最適組合せ決定

- ⑩ レイアウト検討
- ⑪ 全体バランスを考え調整
- ⑫ 個別設備仕様に展開

以上が一連の作業手順である。やや分かりづらい点もあるので次章にて具体例を交えて説明する。

4. ABS組立ラインへの適用

4.1 対象製品の特徴

以上のような考え方を適用して実用化した、当社自動車用製品ABS (Anti-lock Braking System) 組立ラインの事例を紹介する。ABSは自動車部品の中では数量変動が激しく、また新しい品種が次々と出てくる製品である。Fig. 5には製品構造と特徴を示すが、最も大きな特徴は製品ごとに組立てる部品の共通性は高いが、その部品の使用数が製品間で大きく異なることである。効率化のために数をまとめて混合で流すには極めてバランスが取りづらく、かつ数量や種の変動対応が求められる。

4.2 個別工程検討例

Fig. 6に個別検討例を示した。まずは対象製品の工程を横に並べ共通の工程でくくる。各工程種に応じた変動対応の基本的対応方法（2章参照）の検討をあらかじめ決めた上で、それらの個別工程で必要十分なCTを設定する。そうした上で異なるCTの設備間において、つないだ場合の追加費用を試算し、その費用が最も安い所から順次つないでいき設備費の試算を行う。Fig. 6の事例では異なるCTの工程1-2の間でつなげた場合のCTの詳細設定方法について表した。

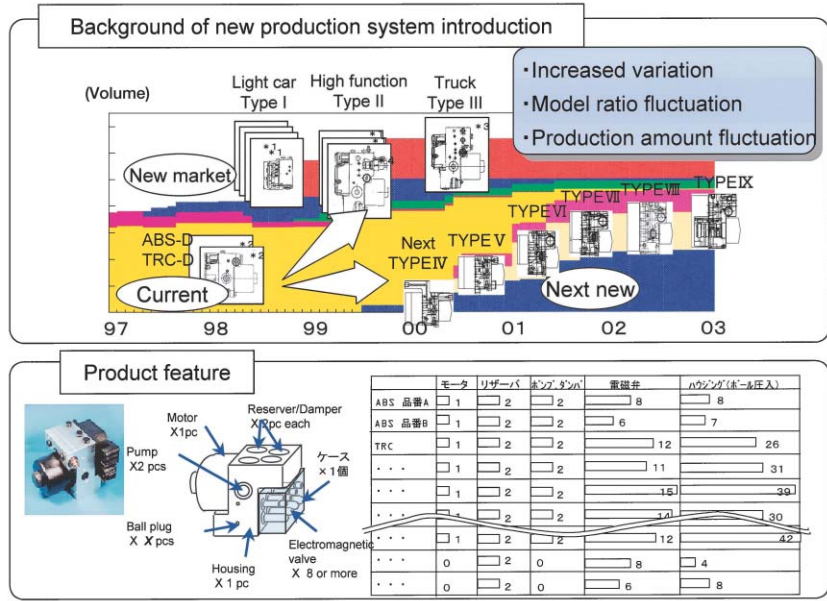


Fig. 5 ABS production history and product feature

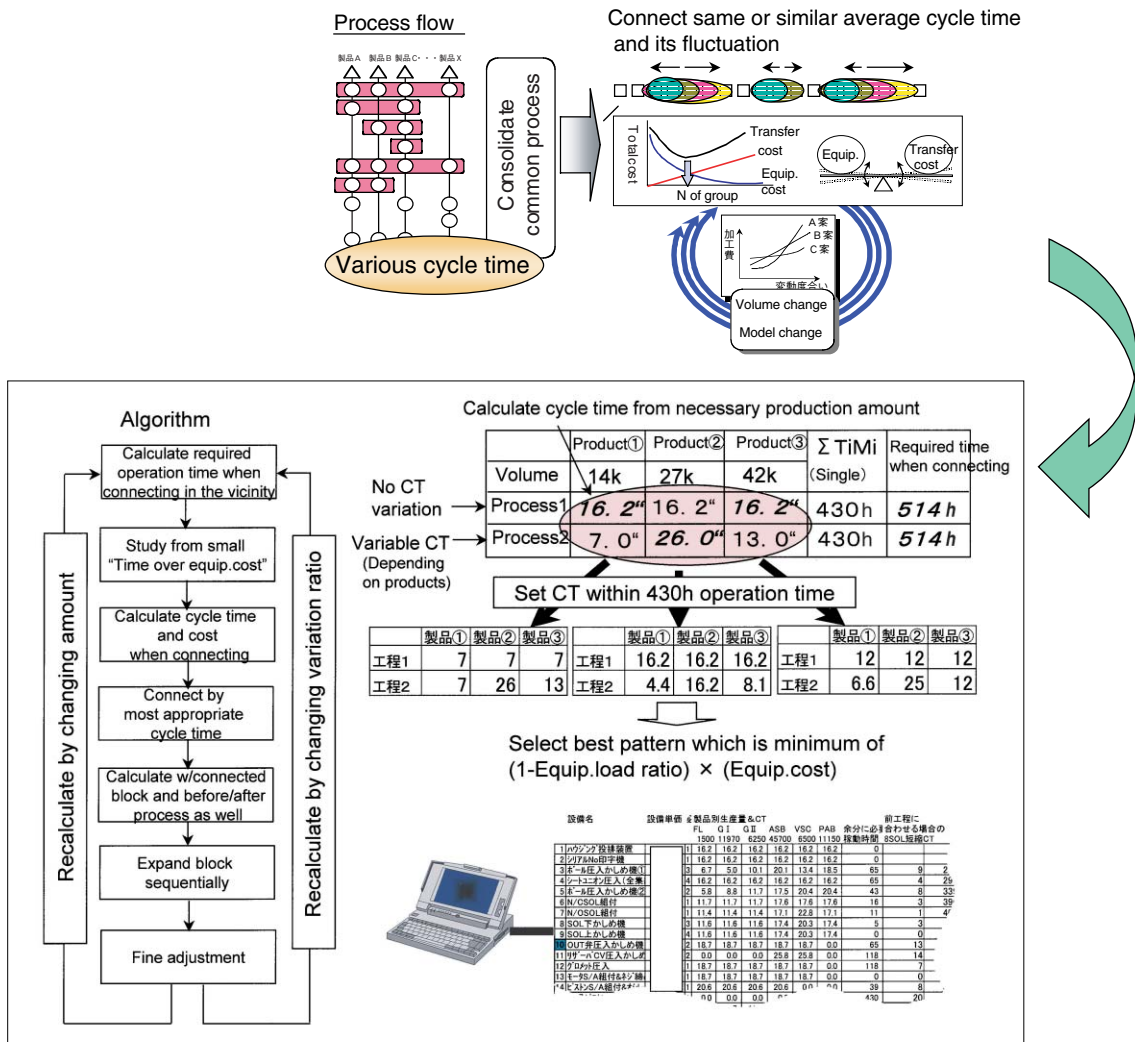


Fig. 6 Study example (1)

一方でラインが分割された状態でのライン間の搬送装置の見積もりを分割数に応じて見積もりを実施し、その組合せにおいて最適解を選択する。この一連の試算を生産量・品種といった前提条件を想定する範囲内で変更して繰り返し行う。これらの試算結果をFig. 7に示した。図に示すように当ラインについては六つに分割する方法が最も安くかつ想定される変動に対していずれも最適であるという結論となった。最終的にはこれらの計算により導き出された結論に対し、設備の負荷率を検討しその値に対する投資効率を検証した上で決定する必要がある。

4.3 レイアウトと設備開発

変動に対応するためには拡張自由度の高いレイアウトと自由に追加削除可能な完全スタンドアロンの設備が必要である。今回のラインではFig. 8に示すようにダイナミックバッファに自動倉庫を用い、システムレイアウトはこの自動倉庫を中心として拡張性の高い2次元レイアウトとした。また、個別設備に関しては、Fig. 8に示す汎用標準機を開発し、よりフレキシブルへの対応を迅速に行える環境を整えた。

4.4 モノの流れ

分割された各個別ラインへは通い箱に箱詰めされた

状態（6個/箱）で供給され、ラインにて加工が終わると同様に通い箱に投入され自動倉庫に搬送され次のラインに供給される。ラインによってはすべての製品が通るものもあれば1製品しか投入されないラインもある。また、自動倉庫に物理的に直結されていなく離れた場所に設置されたラインからAGVを用いて投排されるものもある。このように見掛け上は複雑な経路を通っていくように見えるが、個々のラインにおいてはモノが到着した順番に加工・組立を行っていくだけであり、また個々の製品にとっては一筆書きのシンプルな流れとなっている。すなわちTRラインと全く同様の流れであって、それにより生産指示や品質管理の容易性などを兼ね添えている。

4.5 個別ライン事例

システム内の個別ラインについての事例をFig. 9に示す。当ラインはハウジングと呼ばれる部材に油路を形成するために捨て穴にボールを圧入かきめると同時に電磁弁（SOL）を組立かきめを行う。ライン内では一つの製品に対して数十カ所のかきめを行うという特徴がある。この対応として、加工機はロボットを使ってフレキシブル性を持たせ、流れる品種によって加工面・位置などの振り分けを行い加工負荷を平準化して流れるようになっている。ラインとしてはあくまで

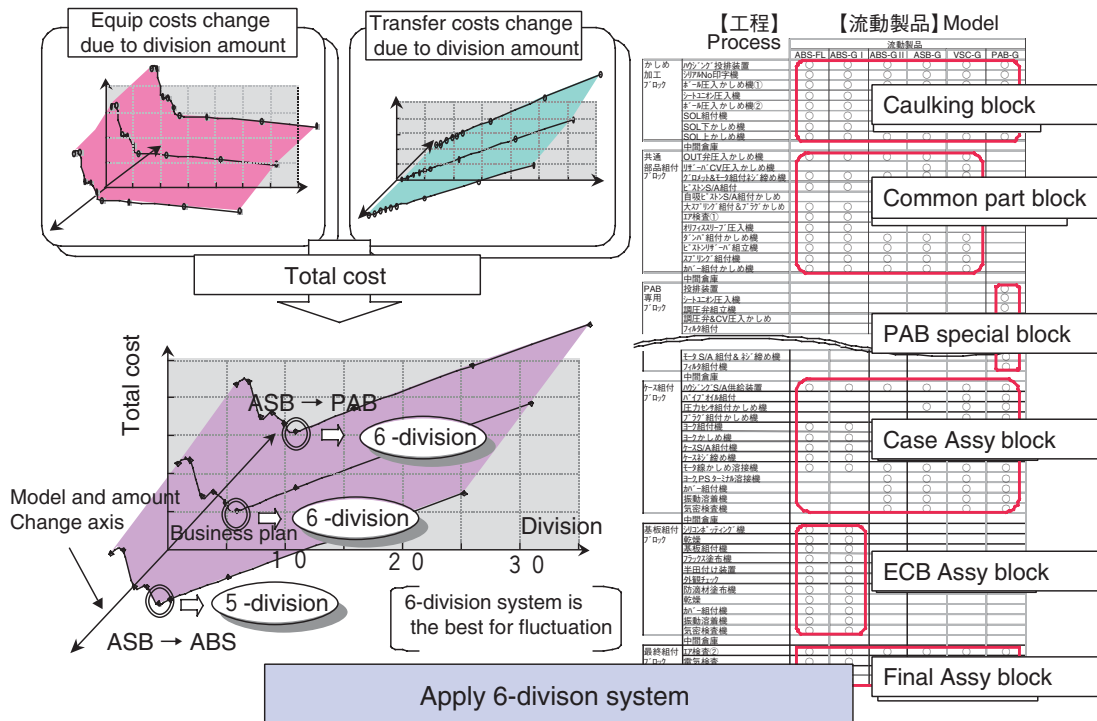


Fig. 7 Study example (2)

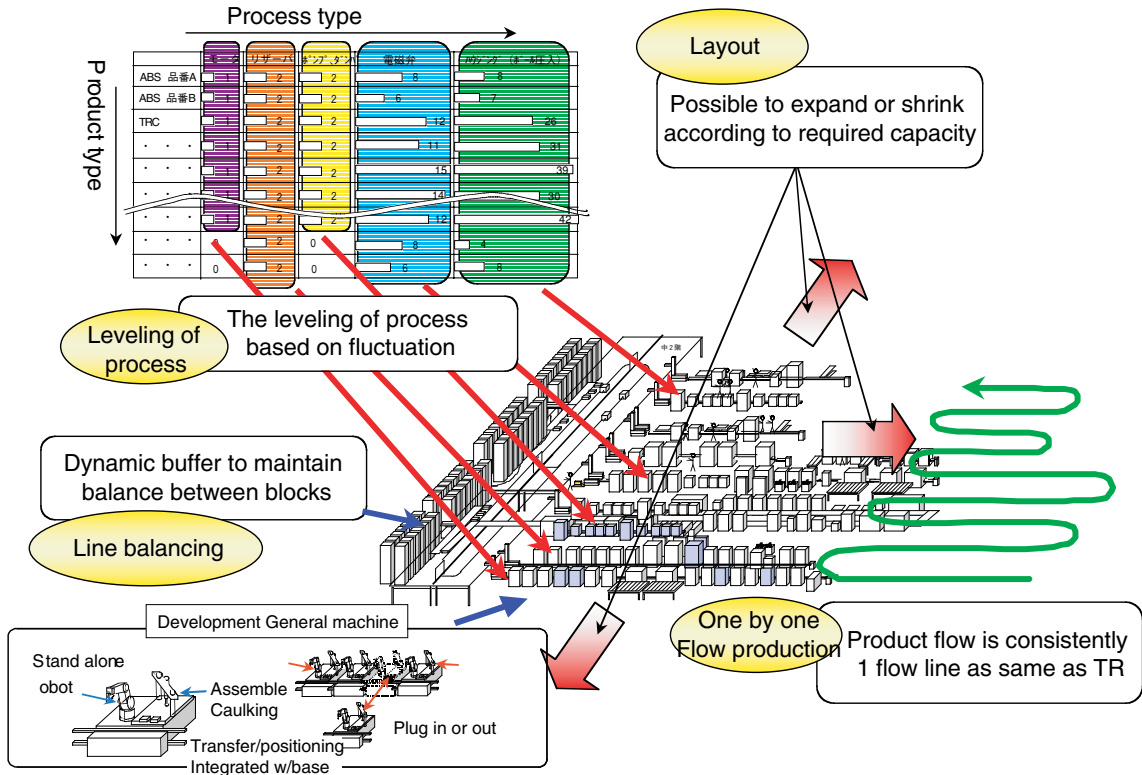


Fig. 8 The feature of new production system

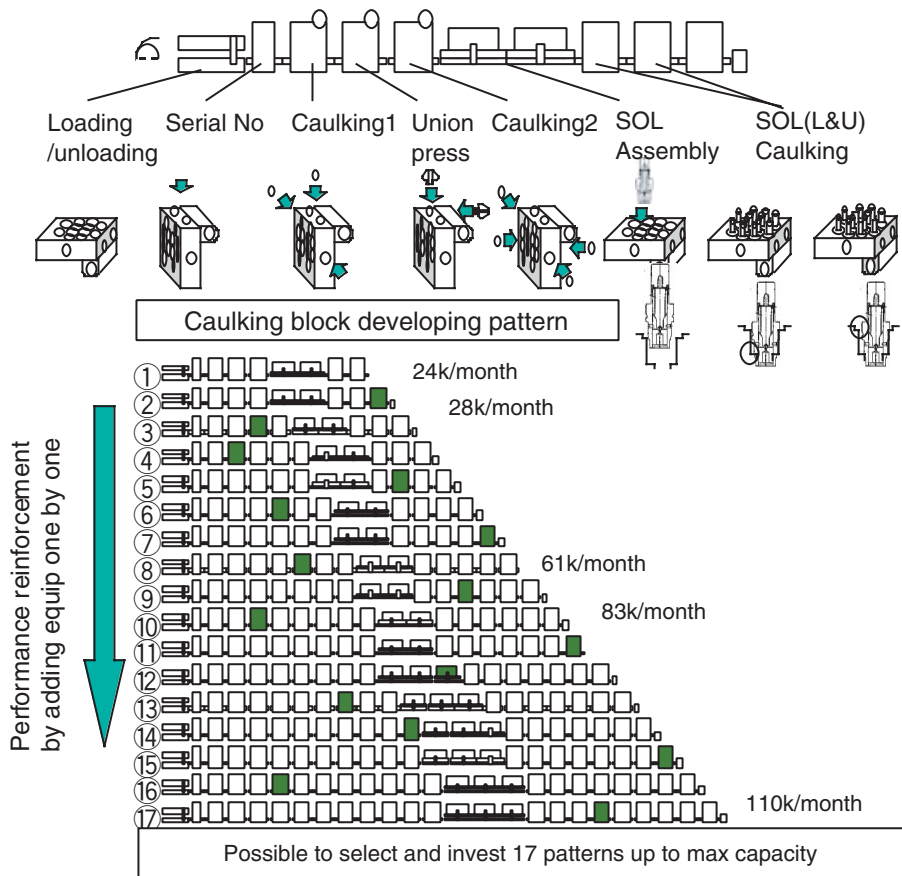


Fig. 9 Specific example

ボトルネックとなる設備が存在し、その設備の能力によってライン能力が制約される（ボトルネック工程は流れる品種によって移り変わる）。図にラインの成長パターンを示したが、このラインは不足する工程を順次継ぎ足して行くことにより2.4万台/月～11万台/月まで、およそ5千台きざみで17パターンの投資が選択可能となっている。

4.6 主な個別技術

主な個別技術開発としては搬送装置のハード&制御技術が上げられる。当システムにおいて自動倉庫を用いた搬送装置が止まるとシステム全体が止まってしまうため、この搬送装置の信頼性が最も重要となる。一般的にこのような搬送システムはその制御においてかなり複雑なスケジュールを組むことが多く、チョコ停や人間の介入も含めてシステム停止を0にすることは不可能であるといっても過言ではない。今回の場合止まることを前提として、止まった時でもより早く復帰することに主眼を置き、各種装置の自律分散化、装置間のデータの相互監視システム&情報ずれ修正制御などの機能を開発し、結果的には稼働率99%以上を達成している。また生産指示方法については後工程（製品出庫）の引きに応じてシステムの先頭に生産指示を出し、システム内は押し込み生産となっている（システム上は小規模ライン間で後補充生産も選択可能なようにできている）。各個別ラインは稼働時間が異なるが、システム全体の制御は自動倉庫内の在庫量をコントロールして制御している。

4.7 開発ラインの効果と運用

新たに開発したシステムの効果としては、従来のTRラインと同等の生産性や品質管理の容易性を保ちつつ飛躍的に製品種の混流度合いを高めると共に、生産量変動に対する柔軟性も実現した。柔軟性の評価として売上高に対する設備償却費の変動を試算してみると、今回想定した数量5万～11万台/月の間の変動に対し、従来のTRラインと比較して、数量変動の影響を1/10以下にすることができ、加工費の変動をほとんど0に押さえることができた。また現実の数量変動の対応としては、以下ステップで実施している。

- ・ 3ヶ月前最新生産動向を元に設備生産能力を検証
- ・ 生産能力増強が必要な場合直ぐに設備手配実施
- ・ 設備完成（約5カ月程度）までの2～3ヶ月は稼働時間延長にて生産対応

- ・ 完成した設備を土日で入れ込み実施（メインラインの稼働日における停止なし）

当ラインは1998年に当社大安工場にて流動を開始した。現在でも着々と能力を上げつつあり、フレキシブルに対するシステムの有効性を実ラインにて証明済みである。能力増強の段階で当初予定していなかった変動に幾度か遭遇したが、その都度その時点での最適な工程編成を考え直し、常に最適となるよう生産システムとして進化を遂げている。一般的に言われるフレキシブル生産システムには、想定した変化に対するフレキシブル性ではその効果を発揮するものの、想定していない状況においては追従できない例も多くある。結局システムのフレキシブル性というものは、変化に対する対応策としていかに多くの選択肢を持つか？ということでそのフレキシブル性を測ることができるが、今回のシステムにおいては、そのような選択肢という意味で非常に許容範囲が広いシステムと言える。

また、当システムは中間にバッファを持つことから、その特質を生かしてシステムを最大限に活用すべく次のような運用も行っている。

- ・ 手作業ゾーンと自動化ゾーンの完全分離
- ・ 各ラインの実力に応じた稼働時間設定
(EX. 人は320h, 機械は430h)

さらにシステムのメリットを付け加えると

- ・ 稼働率向上（バッファ効果）
- ・ 生産しながら小ライン単位で改善や改造が可能
- ・ 量、種の変動によっては設備の組み替えにより1本の専用TRライン化などのダイナミックな工程編成も可能

など多くの効果が上げられる。

5. まとめ

従来のTRラインの分析を通じて新たなシステム構築の要件を見出し、その効果を実ラインにて証明することができた。今回開発した設計手法は製品種や生産量に依存することなくあらゆる状態で適用することが可能な汎用的方法であり、これまで閉塞感のあったTRラインの新しい発展の方向を示すことができたと考えている。

<参考文献>

- 1) 花井嶺郎ほか，“市場の不確実性に順応する生産システム（APS）の開発” 精密工学会誌Vol.65, No.8 (1999)
- 2) 瀧口昌之ほか，“ミニ組立工場CACの開発” 日本ロボット学会誌19巻1号



<著 者>



山崎 康彦
(やまざき やすひこ)
生産技術部
ディーゼルコモンレールシステム工
程設計に従事



山中 智晴
(やまなか ともはる)
安全走行製造部
ABS工程設計に従事



岩松 亮二
(いわまつ りょうじ)
安全走行製造部
エアバッグセンサ，車輪速度センサ製
造およびTIE活動の管理業務に従事



北野 晶之
(きたの まさゆき)
DENSO MANUFACTURING
MICHIGAN, INC. 購買技術
現地調達活動推進