

特集 変化に対応し長期間使える循環型生産方式*

The Protean Production System as a Method of Improving Production System Responsiveness

杉戸克彦

Katsuhiko SUGITO

横井俊之

Toshiyuki YOKOI

井上 保

Tamotsu INOUE

上島益美

Masumi KAMIJIMA

竹田修二

Shuji TAKEDA

In the keen competition between industries worldwide, the products' improvement cycle and the model-change cycle have become shorter and shorter. In such circumstances, the facility life cycle also becomes shorter in automated production lines. In consequence, the facility life cycle cost increases. This type of problem is common to many industries.

To cope with this, we have developed a so called 'Protean Production System (PPS)', which can accommodate itself to the frequent improvement and model-change of the product. It is thus possible for the system to have longer life and lower facility life cycle cost than a flexible assembly system or cell. Several unique features such as 'Lot Circulation Flow System', 'Function Divided Modules' and 'Plug and Play techniques' are PPS attributes. By utilizing these techniques, the facility can be rearranged and reused throughout the whole plant.

PPS has been in use in our automotive air-conditioner assembly plant since 1998. The result of the utilization of PPS has proven the swift adaptability to changes, the equipment's reusability in a different line, the increased productivity by adopting Kaizen ideas on the line, and the equipment's updatibility to keep up with technological advances; thus, the life-cycle cost of the facility has been reduced by 50%.

Key words : Flexible Manufacturing System (FMS), Life cycle cost, Module, Plug and Play

1. はじめに

今日、生き残りをかけた企業間競争はますます熾烈となりグローバルに展開されている。競争力確保のために新製品の開発や改良が頻繁に繰り返されると、対応できない製造部門においては、自動化設備の大きな新規投資や改造費用が発生し、製造ライフサイクルコストが上昇する。逆に、自動化を断念し手作業にしまうと、低労務費国への生産移転（国内空洞化）を招くことになる。これは高度自動化を主体にしてきた日本のモノづくりの危機といっても過言ではない。そこで我々は、高品質と高生産性のポテンシャルが高い自動化生産システムをベースに、激しい変化に対応しつつ製造ライフサイクルコストを著しく低減できる新しいフレキシブル生産システムの開発に取り組んだ。

目標達成のために、これまでのフレキシブルな自動化生産システム（フレキシブル・マニュファクチャリング・システム、以下 FMS と略す）の、生産量や製品の変化に対する長所・短所を分析した。一方で、変化に強いと言われるセル生産方式の特徴も合わせて分析した。そして、製造ライフサイクルコスト低減のための新しい生産システムに求められる要件を整理し、

開発に取り組んだ。

今回我々が開発した「循環型生産方式」は、長期間にわたり設備を再使用し続けることにより、製造ライフサイクルコストを著しく低減する新しい概念のフレキシブル生産システムである。

当社では1998年より、カーエアコン組立ラインを対象に「循環型生産方式」を適用している。現在、工場では9本のラインが稼働中であり、ライン間でのダイナミックな設備の再利用等で大きな効果が確認されている。

2. 予測を超えた変化とスピードの時代における生産システムの課題

今日の激しいグローバル競争の中で、自動車部品業界各社は、自動車メーカーからの様々なニーズに応えながら売上と収益の確保により競争を勝ち抜き努力が必要となっている。Fig. 1に示すように、競争力を増すために製品は頻繁に改良やモデルチェンジをするようになってきている。その変化に対応するために生産システムにはフレキシビリティが求められる。

Table 1に生産に影響を及ぼす製品の四つの変化と

*2004年2月27日 原稿受理

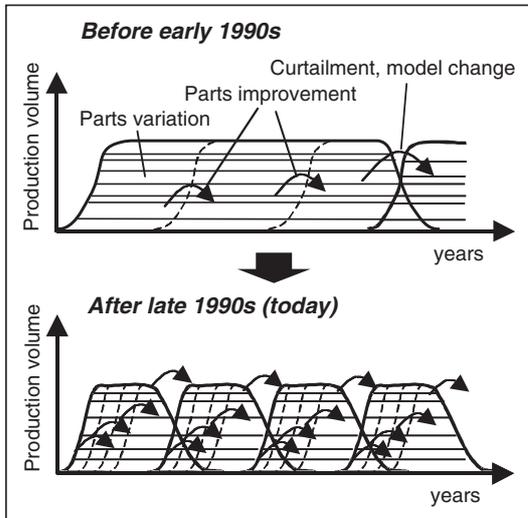


Fig. 1 Change of production in industries

その発生の頻度の移り変わりを示す。その変化は、①バリエーションの追加、②製品改良、③減産・製品の世代交代、④売価低減（車両メーカーからの売価低減要求）、に大別される。これまでの生産システムは、①バリエーション追加への対応に主眼が置かれており、それに対応するためにFMSが構築されてきた¹⁾しか

し、近年の頻繁な製品改良や製品の世代交代に対して、これまでのFMSでは度重なる改造や新規ライン投資の費用がかさむという問題が顕著になってきた。さらに、予想を超える売価低減要求に対して設備能力が固定であることも重なり、ライフサイクルコストが上昇するとともに、収益の大幅悪化が懸念された。

このような頻繁な製品の変化への対応性に優れた生産システムとして、セル生産方式と呼ばれる手作業システムが、近年盛んに報告されている²⁾。しかし、このシステムは手作業が主体であるために、生産性とヒューマンエラーによる品質低下を犠牲にしていることは否めない。また、このような労務費主体の生産システムでは賃金のより低い海外生産との競争で厳しい状況におかれ、いずれ国内空洞化を招くことは明らかである。

そこで、我々は生産性に優れた自動化システムをベースに、当社で直接作業員の40%を占める組立ラインを対象に、変化への高い対応性を具備した新しい生産システムの開発に取り組んだ。

その開発システムの位置づけをFig. 2に示す。変化に対する柔軟性を高めるために、生産性を犠牲にして

Table 1 Four types of product change that influence on production

Types of product's changes	Influences for production system	Frequency of changes	
		Before early 1990s	After late 1990s
1. Addition of parts variation	Change parts kinds	Always	Always
2. Parts improvement	Change of processing conditions	Once / 3 years	Once / 0.5 year
3. Production curtailment, model changes	Change of process sequences	Once / 8 - 12 years	Once / 2 - 4 years
4. Marketing price reduction	Improvement of productivity	Constantly	Irregular

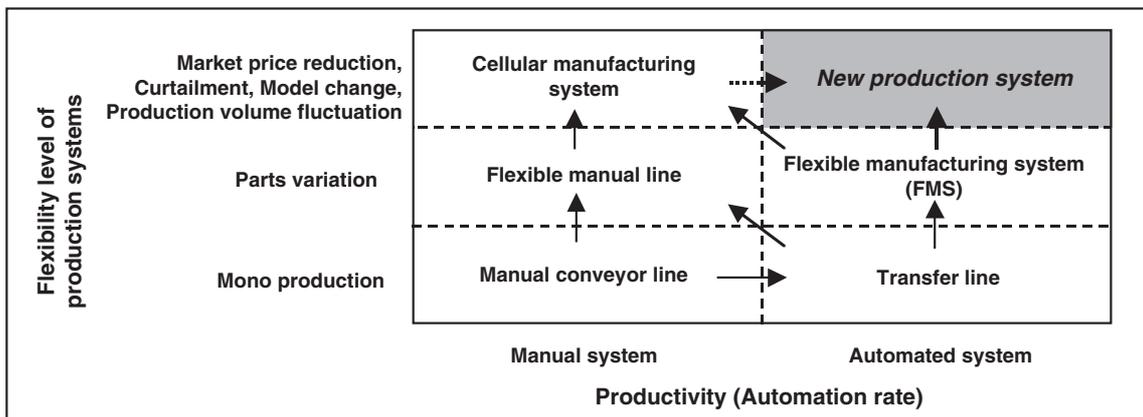


Fig. 2 Position of the new production line

手作業に戻ろうとする近年の流れを断ち切り、生産性の高い自動化をベースとしてより柔軟性の高い生産システムの実現を目指すのが今回の開発の方向である。

3. 新生産システムの要件とコンセプト

3.1 必要とされる要件

今回求められている変化への対応を想定し、これまでのFMSの長所・短所を分析した。次に、このような変化への対応性に優れていると言われる手作業システム^{3)~5)}の変化対応の仕方を分析した。そして、両者の分析結果を下に以下のように、新生産システムに必要な要件を抽出した。Table 2にその詳細な関係を示す。

①バリエーション追加

要件：あらかじめ汎用性を付与（FMSの継承）

②製品改良

要件：素早くムダのない改造（手作業の反映）

③減産・製品世代交代

要件：負荷に合わせた設備台数の増減（手作業の反映）

④売価低減

要件：稼働後の能力向上（手作業の反映）

3.2 新生産システムのコンセプト

Fig. 3に今回開発を目指した新しい生産システムのコンセプトを示す。製品の変化に素早く対応できる自動化設備技術と、設備をより良くするために創出される現場の改善力の活用性を併せ持つことで、設備を長期間にわたり使い切ることができ、結果として製造ライフサイクルコストの著しい低減を目指すものである。設備が変化に合わせて形態を変えながら使い続けられるという特長からこのシステムを「循環型生産方式」と命名した。

Table 2 Requirement of adaptability to changes for new production system

Types of changes	Existing FMS	New Production System	Manual production system
1. Addition of parts variation	Versatility given in advance	Versatility given in advance	Human skill
2. Parts improvement	Reconstruction taken several months	Swift reconstruction taken several days	Swift rearrangement taken several days
3. Production curtailment, model changes	Disposition and new construction	Change of the number of machines, and reuse of the surplus machines	Change of the number of associates, and reuse of the surplus machines
4. Marketing price reduction	High productivity from the beginning	Continuous improvement of productivity	Continuous improvement of productivity

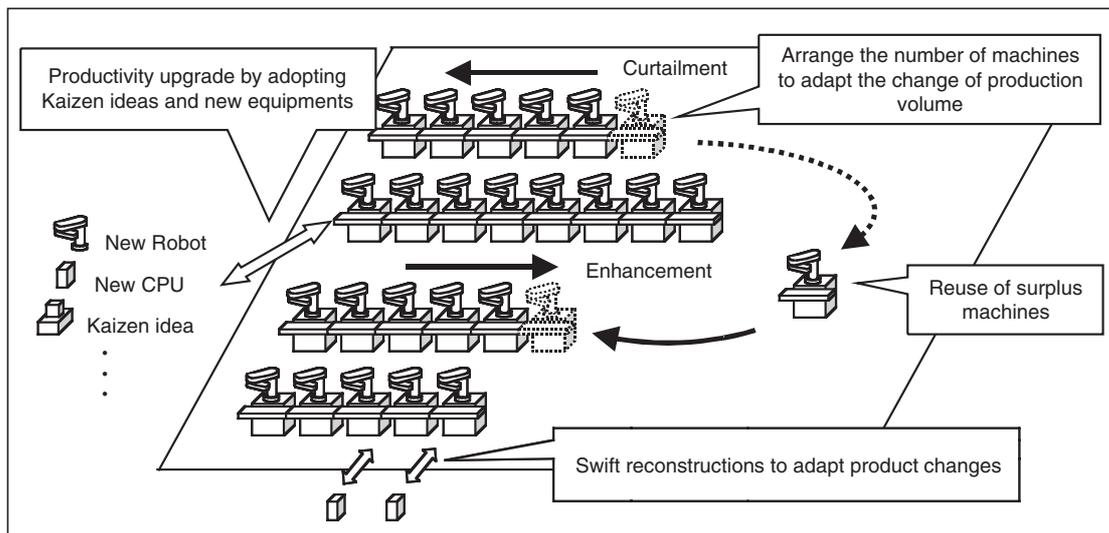


Fig. 3 Concept of the new production system 'Protean Production System (PPS)'

4. 循環型生産方式の構成技術

循環型生産方式を構成する主要な開発技術について記す。

4.1 ロット周回式工程集約度可変システム

Fig. 4は、世の中にある生産システム：① TR (トランスファー・ライン)、② FMS (フレキシブル・マニファクチャリング・システム)、③ AC (アッセンブリ・センタ)を、生産量と工程集約度(1台の設備あたりで受け持つ工程数)で整理したものである。これまでの生産量変動への対応は、AC または FMS を負荷に応じて複数台並べるという上図の水平方向の矢印で示される。この方法では、独立した AC や FMS を他の AC や FMS に影響を与えずに追加・削除できるため、そのシステムの変態は容易であるが、量産時には右下の領域に見られるように、同じ機能が複数の設備に重複する状態となり、TR に対して経済的に劣る。そこで我々は、どの生産量においても経済的に最大効率となる生産システムを目指して、下図の斜め方向の矢印で示される TR ⇔ FMS ⇔ AC の間をムダなく変態できる「工程集約度可変型」システムの実現を目指した。

この実現にあたり、今回考案した「ロット循環流動式工程集約度可変システム」について説明する。これまでの AC では、1台の設備がワーク 1 台に対して一度に複数の工程を連続して行うという工程集約形態が取られていた。一方、TR では、1台の設備はワーク 1 台に対して一つの工程を行うという形態であるため、AC から TR への切り替え時には設備で用いるロボットの作業プログラム等の大幅な変更が必要になり、そのための改造期間と追加投資が問題であった。今回開発したロット周回式工程集約度可変システムの特長は、Fig. 5に示すように、工程集約形態であるAC

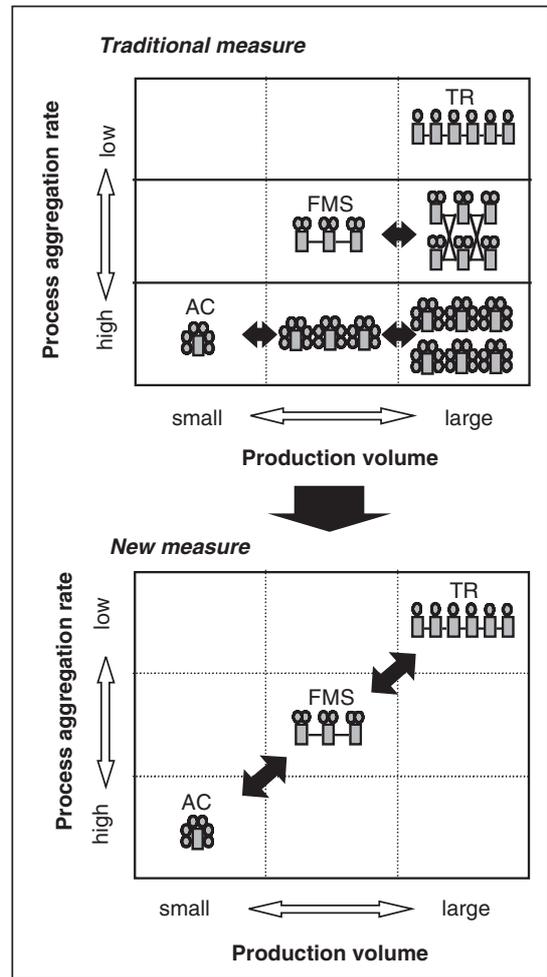


Fig. 4 Measure for production volume fluctuation

においても、設備は TR 同様に 1 度の一つの工程しか行わず、集約する工程数だけ周回コンベア上をワークパレットが周回し、最終的に複数の工程を行うというものである。周回するコンベア上を複数のワークパレットを「ロット」として流すことによりこの方式が実現できる。この流動方式であれば、TR ⇔ FMS ⇔ AC という生産システム形態を通じて同一のロボットプロ

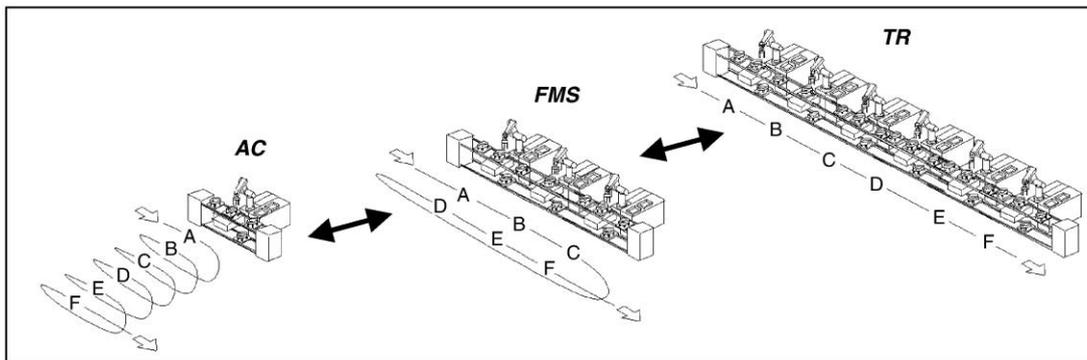


Fig. 5 Quickly shift between AC, FMS, and TR by utilization of the lot circulation flow system

グラムが利用可能であり、素早くムダなくシステム形態の変更が可能になる。工程数に合わせて設備台数とロット周回数との組み合わせにより幾つかのラインの生産能力が選択できることになる。

この、ロット周回式工程集約度可変システムにより実現できる設備の循環再利用構造をFig. 6に示す。製品の誕生に伴い生まれた少量生産向けのACは、生産量の増加に伴い設備台数を増やしFMS → TRへと成長、その後減産期を迎えると設備台数を減らしFMS → ACと縮小、最終的にその製品寿命と共に生涯を終える。工場内では一方で、新たな製品の誕生により新たな設備が必要となるため、先のラインで余剰となった設備を再利用して新しいラインを形成するという繰り返しである。

近年の自動車の国内生産台数が総量では安定していることを考えると、減産した製品があれば増産となる製品もある。つまり、以上述べた方策が実現できれば、様々な製品の変化に対応し変態を重ねながら、減産で不要となった設備を工場内の増産のラインで再使用することができる。その結果、設備が長期間使い続けられることでライフサイクルコストが著しく低減できるはずである。

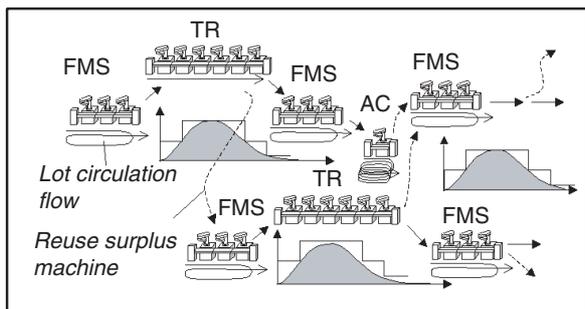


Fig. 6 Overview of the equipment's reuse by lot circulation flow system

4.2 機能分割型モジュール

以下の三つの変化への対応を果たすために、設備のモジュール化を行った。

- ・ 製品の変化に応じて必要な設備機能のみが他の機能に影響を与えず素早く交換が可能（製品変化対応）
- ・ 現場の作業員から提案される設備の改善案件を採り入れ、より生産性の高い設備へと容易に向上可能（改善力活用）
- ・ 世の中の設備技術の進化をタイムリーに取り入れ

てより生産性の高い設備へと更新可能（設備更新）以下、今回のモジュール化の特徴を紹介する。

4.2.1 モジュール化の考え方

一般的に考えると、設備を細かなモジュールの組み合わせで構成すれば、変化に応じた設備の改造部分は関係するモジュールのみに絞られるので、改造時に必要となる追加投資は抑えられる。しかしながら、本来一体で製作すればコストが抑えられる部分までモジュール構成とすることで初期投資（イニシャルコスト）は高騰する。すなわち、起こるべき変化を想定したモジュール分割の最適化を検討することが必要である。

最終的な目的は、設備生涯にかかる費用すなわちライフサイクルコスト（LCC）の最小化である。LCCは以下に示す項目の合計値である。

$$LCC = \Sigma [\text{イニシャルコスト} + \text{ランニングコスト} + \text{改造コスト} - \text{転用効果} - \text{設備進化効果}]$$

そこで、LCCの最小化のために、組立設備の機能分析を行い⁹⁾、想定される変化と影響を受ける設備機能との関係を整理した。そして、以下のような三つの観点で設備の必要最小限のモジュール分割を実施した。このモジュールを「機能分割型モジュール設備」と呼ぶ（Fig. 7）。

- (1)モノに触れる部分は極力モジュール化
 - ・・・ロボットハンド、パレット、部品供給など
- (2)変化の影響を受けない部分は一体化
 - ・・・ベースマシン、コンベアなど
- (3)設備進化が期待できる部分は交換可能なユニット化
 - ・・・ロボット、コントローラなど

今回、カーエアコンユニットの組立設備向けに開発した機能分割型モジュール設備をFig. 8に示す。

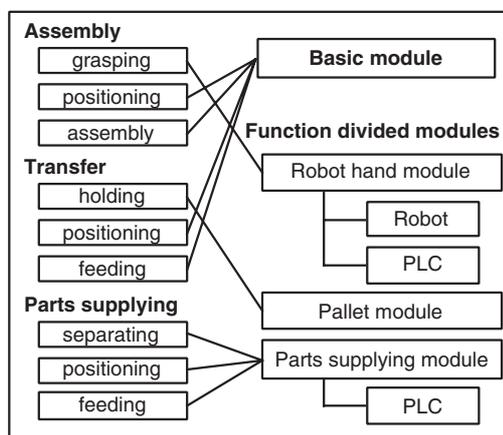


Fig. 7 Function divided modules

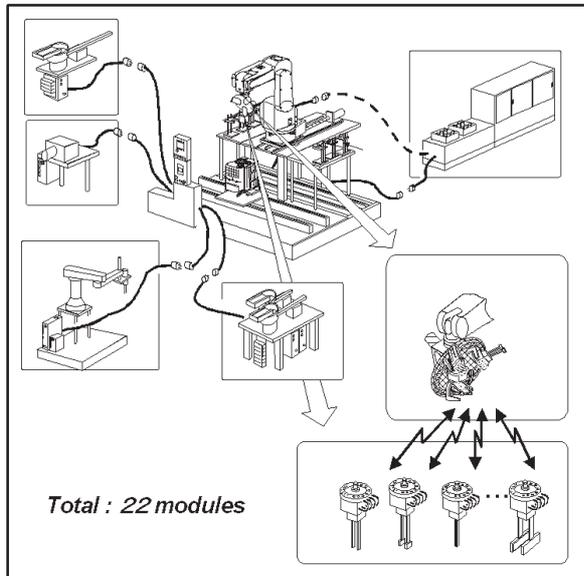


Fig. 8 Function divided modules in practice

4.3 設備モジュール間プラグ・アンド・プレイ

素早くムダなく変態できるシステム実現のためには、モジュールの組替えが生産に支障をきたさぬように素早くできることも重要である。この課題に対しては、パソコンで提唱され普及し始めていた「人を介在させずに、ハードウェアを差し込む（Plug）だけで使用（Play）可能な環境となる仕組み」であるプラグ・アンド・プレイ（PnP）技術⁷⁾に着目し、この環境を設備の世界でも実現する「設備モジュール間プラグ・アンド・プレイ技術」を開発した。PnP成立の条件である以下の三項目を、Fig. 9に示すようにコネクタの標準化と判別フラグの活用、およびラダープログラムの階層化⁸⁾とプログラムのオールインワン化により内製設備で実現した。

- ・機械的電氣的に接続・分離が可能
- ・接続された機器の識別が可能
- ・リソース、デバイスドライバの割り当てが可能

また、急速に進む設備要素技術の進歩に追従し、設備を陳腐化させないようにするために、設備内で用いるネットワークは、Fig. 10に示すように、世界レベルのオープンフィールドネットワーク⁹⁾である Device Net を採用し、世の中の優れた設備機器を積極的に取り入れられる環境を構築した。

以上、循環型生産方式の全体像をまとめるとFig. 11となる。

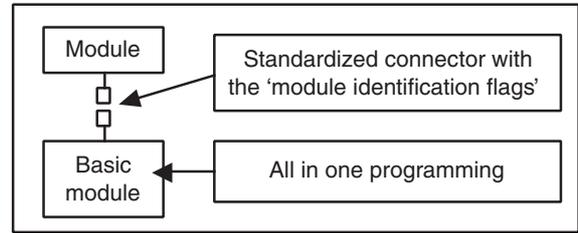


Fig. 9 Plug and play technique between modules

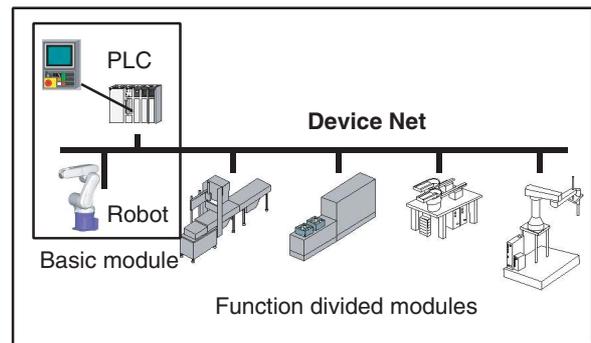


Fig. 10 Utilization of Device Net

5. 効果の検証

開発した「循環型生産方式」は1998年から当社カーエアコン工場にて稼動中である。稼働後6年間で実際に対応した変化の中から、二つの事例を紹介する。

5.1 変化への対応事例

5.1.1 製品の減産・世代交代への対応例

(1) 変化の状況

稼働4年目を迎え、ある構造（横置きタイプ）のカーエアコンユニットが新構造への世代交代となり、ラインA（設備10台構成）の生産量の減少（5→2.5万台/月）が現実となった。一方でそれに代わる次世代カーエアコンユニット向けに、新しくラインH（生産能力2.5万台/月）を新設する必要が生じた。これまでなら、ラインAは低負荷のまま放置され、新規ラインHの設備投資が発生する状況である。

(2) 対応

減産となるラインAから5台の設備を抜き、当初10台の設備に分散されていた工程を5台の設備に集約し、ロット周回の周回数を1→2周回とした。工程の集約に当たっては「ロボット設備間機差補正技術」を適用し、素早い改造を実施した¹⁰⁾。一方、新規ラインのためには、ラインAから抜き取った5台の設備を機能分割型モジュールの付け替えで素早く改造し、新たにラインHとして再使用した（Fig. 12）。

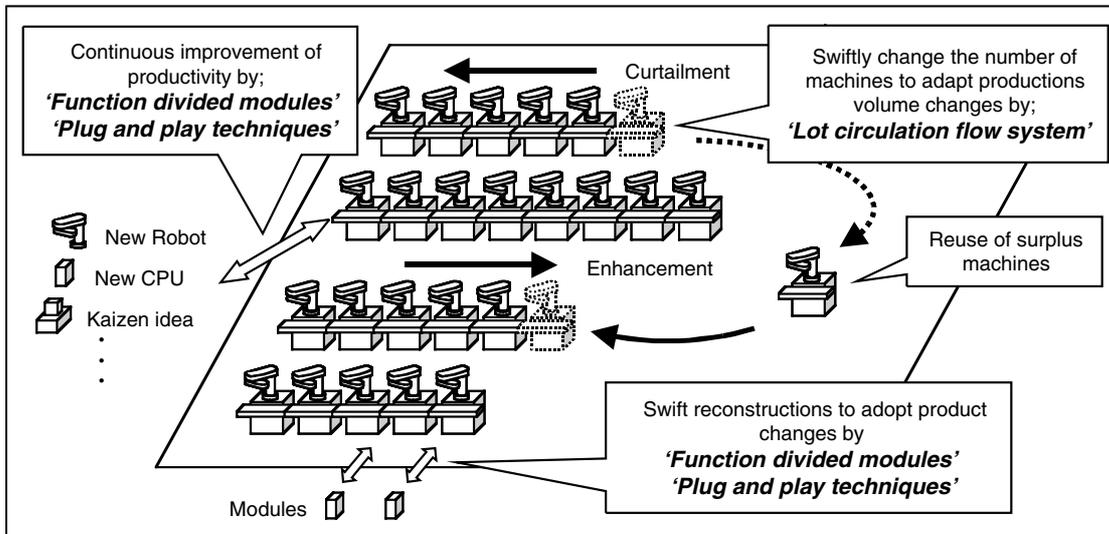


Fig. 11 Overview of the Protean Production System with new technology

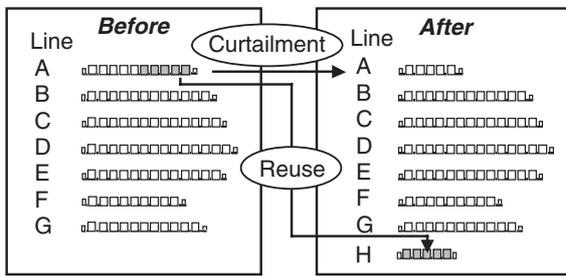


Fig. 12 Response to production curtailment and product model change by PPS

(3) 効果

設備の再使用効果により、新規設備投資はこれまでに比べ50%削減できた。

5.1.2 稼働後の生産性向上

(1) 変化の状況

自動車部品の売価は必ずしも固定ではなく、市場動向や設計変更要因などにより改定がなされる。グローバル競争が激化する中、1998年頃に、車両メーカーからこれまでにない大幅な値下げ要求があった。販売シェアと収益確保のためには要求に応えつつ、一層の生産性向上によるコスト削減が必要であった。当社の従来のラインは、最初から自動化率が高く新たな省人効果を狙うことは困難であり、また生産能力は設置した時点で設備能力の限界近くに設定され、かつその能力は固定となっているため、生産性を大幅に上げて対応することは難しい状況であった。

(2) 対応

生産性向上のために製造現場の作業員や保全員らが

中心となり、改善の知恵を出し合った。ロボット動作経路の短縮やハンドユニットの軽量化などは、現場の作業員からの、また高速の新型ロボットやスキャンタイムが短縮できる新型 PLC への切り替えなどは保全員からの提案である。オープンフィールドネットワークでつながれた機能分割型モジュール構成の長所を生かした対応となった。

(3) 効果

生産性は稼働開始時から平均6.3%/年で向上し、コスト削減に寄与している (Fig. 13)。

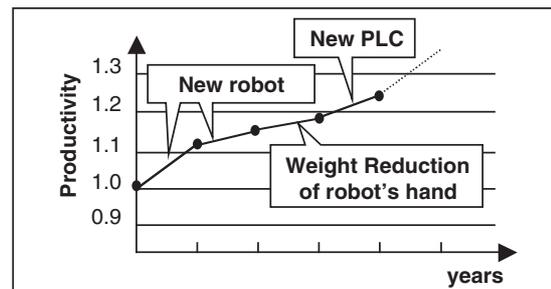


Fig. 13 Trend of productivity by PPS

5.2 ライフサイクルコスト状況

稼働開始から6年目を迎えた現時点までの目標値に対する実績評価をTable 3に示す。既に製品の減産・世代交代を実際に乗り越え、設備の循環再使用が可能であることを確認している。現場の作業員を主体とした生産性向上も順調に推移しており、目標である15年以上の使用についても、実現できる見通しである。

Table 3 Evalation of PPS for six years

Item	Existing system	PPS
Response to production volume fluctuation	150,000 / month (Fixed)	10,000 - 150,000 / month
response to parts improvements, model changes	2 week - 3 months	2 days - 1 week
Improvement of productivity	Fixed	Improving + 6.3 % / year

これまでの製造ライフサイクルコスト状況をFig. 14 に示す。稼働後の6年間に発生した製品の変化を振り返り、これまでの生産システムである FMS や手作業システムで対応したことを想定した試算結果に比べ、著しい収益性の向上が確認できた。

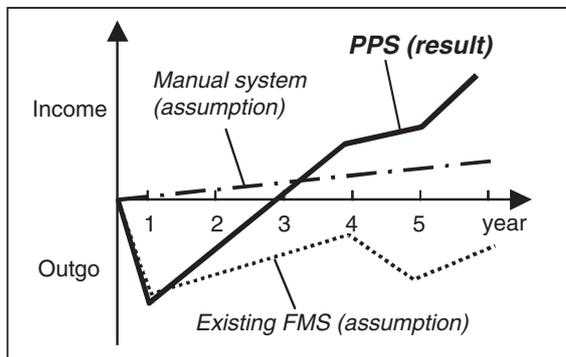


Fig. 14 Trends of life cycle cost

6. おわりに

激しい変化に対応し設備を長期間使用することにより、ライフサイクルコストを著しく低減することを狙った新しい自動化生産システム、「循環型生産方式」を開発した。

本システムは現在、当社カーエアコン工場で9本、他の製品分野で3本稼働中であり、変化への対応性の高さが具体的に確認されている。また、本システムは、日本の製造業の本来の強みであった高度自動化ラインの価値の再認識はもとより、これまで高度自動化ラインとのつながりが弱かった現場の改善力を喚起させることもでき、日本の製造業がグローバル競争の今日においても、決して競争力を失っていないことを示唆しているものと思われる。

<参考文献>

- 1) 精密工学会編：生産システム便覧，コロナ社，1992
- 2) 都留康（編著）：『生産システムの革新と進化』，日本評論社，2000年9月号（2001）
- 3) 篠原司：「コンベア撤去の衝撃走る 一人完結のセル生産」，『日経メカニカル』，7/24号（1995），pp.20-38.
- 4) 篠原司：「設備内製化ノススメ」，『日経メカニカル』，8/5号（1996）
- 5) 藤本隆宏：『生産システムの進化論 トヨタ自動車にみる組織能力と創発プロセス』，有斐閣（1997）
- 6) 精密工学会編：自動組立の基礎，オーム社（1987）
- 7) トム シェンリー，（翻訳）高橋義行，山田勝巳，牛島健雄：『プラグ・アンド・プレイ・システム・アーキテクチャ』，ソフトバンク（1996）
- 8) 青木正夫：『プログラマブルコントローラの新しいプログラミングテクニック』，近代図書（1994）
- 9) 甲斐忠道：『フィールドバス基礎ブック』，オーム社（1995）
- 10) 小山俊彦：「“特集：ロボットコントローラのオープン化” デンソーロボットコントローラ “NetwoRC”」，（社）ロボット工業会，機関紙『ロボット』121号（1998）



<著 者>



杉戸 克彦
(すぎと かつひこ)
生産技術部
生産システムの開発に従事



井上 保
(いのうえ たもつ)
熱機器生産開発部
熱機器分野の生産システム開発に従事



上島 益美
(かみじま ますみ)
工機部
生産設備および生産システムの制御装置の開発・設計に従事



竹田 修二
(たけだ しゅうじ)
工機部
自動組立ライン（専用機）の開発・設計に従事



横井 俊之
(よこい としゆき)
冷暖房製造2部
カーエアコン生産システムおよび設備開発に従事