

---

自律分散システムの鉄鋼プロセスへの適用と評価

Application and Evaluation of Autonomous Decentralized System for Iron and Steel Processes

鳥越 英俊(Hidetoshi Torigoe) 岩村 忠明(Tadaaki Iwamura) 尾脇 林太郎(Rintaro Owaki) 長山 栄之(Eishi Nagayama)

---

要旨：

水島製鉄所ならびに千葉製鉄所の冷延プロセスに自律分散コンセプトに基づく新しい計算機システムを導入した。この拡張性にすぐれたハードウェアおよびソフトウェアを有した自律分散システムは、従来システムに比べて開発性にすぐれていること、安価なマイクロコンピュータを利用しているため経済的であること、増改造が容易であることなどの利点を有していることがわかった。ピーク負荷時に応答性が下がること、メモリ効率がよくないこと、などの欠点があるものの、鉄鋼プロセスにおいて自律分散システムが有効に機能することが確認できた。

---

Synopsis：

Kawasaki Steel has recently introduced several new computer systems, based on an autonomous decentralized concept, into the cold rolling processes at its Mizushima and Chiba Works. The autonomous decentralized system, which is featured by easily-extensible hardware and software, has many advantages such as superior system developability, lower investment cost because of the adoption of inexpensive microcomputers, and easier reconstruction, compared with conventional systems ; while it also has some disadvantages like low performance at the peak of load and low efficiency of memory usage. The authors have constructed the process computer systems considering these properties and confirmed the effectiveness of the autonomous decentralized system in iron and steel processes.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

## Application and Evaluation of Autonomous Decentralized System for Iron and Steel Processes



鳥越 英俊  
Hidetoshi Torikoshi  
水島製鉄所 電気計装  
部電気計装技術室 主  
査(課長)



岩村 忠昭  
Tadaaki Iwamura  
水島製鉄所 電気計装  
部電気計装技術室 主  
査(部長補)



尾脇 林太郎  
Rintaro Owaki  
水島製鉄所 電気計装  
部電気計装技術室



長山 栄之  
Eishi Nagayama  
水島製鉄所 電気計装  
部電気計装技術室

### 要旨

水島製鉄所ならびに千葉製鉄所の冷延プロセスに自律分散コンセプトに基づく新しい計算機システムを導入した。この拡張性にすぐれたハードウェアおよびソフトウェアを有した自律分散システムは、従来システムに比べて開発性にすぐれていること、安価なマイクロコンピュータを利用しているため経済的であること、増改造が容易であることなどの利点を有していることがわかった。ピーク負荷時に応答性が下がること、メモリ効率がよくないこと、などの欠点があるものの、鉄鋼プロセスにおいて自律分散システムが有効に機能することが確認できた。

### Synopsis:

Kawasaki Steel has recently introduced several new computer systems, based on an autonomous decentralized concept, into the cold rolling processes at its Mizushima and Chiba Works.

The autonomous decentralized system, which is featured by easily-extensible hardware and software, has many advantages such as superior system developability, lower investment cost because of the adoption of inexpensive microcomputers, and easier reconstruction, compared with conventional systems; while it also has some disadvantages like low performance at the peak of load and low efficiency of memory usage. The authors have constructed the process computer systems considering these properties and confirmed the effectiveness of the autonomous decentralized system in iron and steel processes.

## 1 緒 言

鉄鋼業では従来よりプロセスコンピュータの利用が進んでおり、各種製造ラインのプロセス制御に適用され、品質向上、生産能率向上等に果たしている役割は大きい。一方、昨今の経済情勢、社会情勢から、要求される品質のものをより安価に、また個々のニーズに対応してよりきめ細かな製品を作り出すことが要請されてきている。すなわち、計算機制御システムでは導入当初は必要最小限の構成から出発し、操業の変化に合わせて必要時にハードウェアならびにソフトウェアを追加、変更するといった成長できるアーキテクチャを有することが望まれる。しかし、従来の中央集中形コンピュータ制御システムアーキテクチャでは必ずしもこうした要請にはこたえられないのが現状である。近年、安価で高性能なマイクロコンピュータの出現と光通信技術の開発により、中央集中処理システムから分散処理システムへの展開が可能となつて、生産形態の変化に対応して柔軟にシステム変更ができるようになってきており、これ

らを実現するものとして自律分散コンセプト<sup>1)</sup>による新しい計算機システムが提案されている<sup>2,3)</sup>。

本稿ではこの自律分散システムを鉄鋼冷延プロセスに適用し、いくつかの知見を得たので、ここに報告する。

## 2 プロセスコンピュータの構成と特質

### 2.1 現状のシステム構成と特質

プロセスコンピュータのシステム構成はLSI技術および通信技術の進歩とともに変遷してきた。現状のシステム構成とその特徴は次のようである。

#### 2.1.1 シンプレックス・システム

1プロセスに1コンピュータの対応で設備全体を管理する方式である。Fig. 1にシンプレックス・システムの例を示す。

現状稼働しているシステムは、数少なくなり、古いシステムが多い。シンプレックス・システムの特徴は次のとおりである。

(1) 小規模のプロセスが対象である。

\* 昭和63年4月11日原稿受付

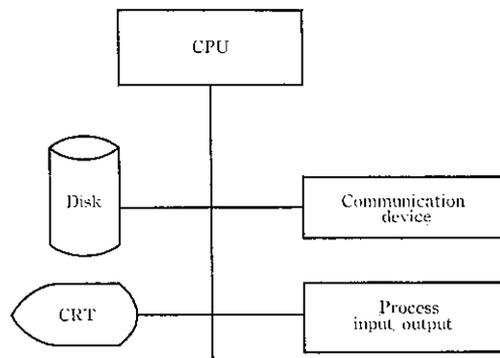


Fig. 1 An example of the simplex system

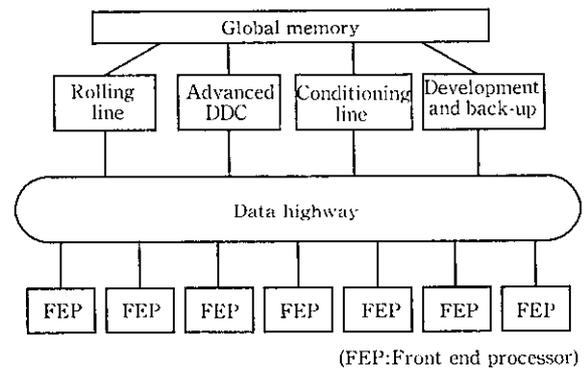


Fig. 3 An example of the decentralized system

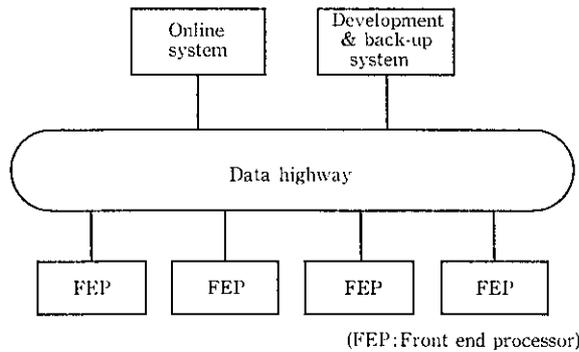


Fig. 2 An example of the centralized system

Fig. 3に水島製鉄所鋼片工場の例を示す。ここでは、複数の計算機で複数のプロセスの制御を行っている。また、複数の計算機に対して1台の計算機でバックアップ、およびソフトウェア開発を行うようにしている。

### 2.2 現状システムの問題点

製鉄所のメインプロセスに採用されているプロセスコンピュータのシステム構成は、集中形と分散形に大別される。製鉄、製鋼といった上流プロセスでは集中形が多く採用され、圧延プロセスでは分散形が多く採用されている。両システムの特徴はすでに表したが、いずれも以下に示すような問題が存在している。

- (2) 2重系に比べて信頼性が低い。
- (3) ソフトウェアの改造は頻繁に行えない。

#### 2.1.2 集中形システム

大型のプロセスコンピュータや汎用計算機などを導入し、複数のプロセスを1台のプロセスコンピュータで管理する方式である。集中形のシステムの特徴は次のとおりである。

- (1) 複数プロセスが対象であり、論理の共有化が可能である。
- (2) プロセスコンピュータのダウン時は、下位 DDC (Direct digital controller) レベルにより、プラントの運転を継続する。
- (3) 高速の応答が要求されるシステムには向かない。
- (4) 通常、予備機を1台用意し、バックアップとソフトウェア開発の両機能を持たせるが、オンライン機と同機種が必要であり、高価な構成となる。

Fig. 2に水島製鉄所製鋼工場の例を示す、ここでは、1台の計算機で複数のプロセスの制御を行っている。また、1台の計算機に対して1台のバックアップ、およびソフトウェア開発を行うための計算機を持っている。

#### 2.1.3 分散形システム

複数プロセスで構成される一つのプラントを複数台のプロセスコンピュータで管理する方式である。この分散形システムは、圧延システムに多く採用されている構成であり、複数のプロセスコンピュータによって負荷分散を図りつつ高度な制御を行うことが目的である。分散形システムの特徴は次のとおりである。

- (1) 高い信頼性が要求されるので、通常は1:Nのバックアップ方式を採用する。
- (2) ソフトウェアの作成・変更を容易にするために、オンラインシミュレーションの環境を構築することが多い。
- (3) 負荷分散をはかり、高速応答処理を可能としている。
- (4) 十分とは言えないが、新しい計算機をデータウェイに接続することにより、システムを拡張することができる。

- (1) 分散形システムではホスト計算機 (SCC: Supervisory computer control) に主要処理が集中するため十分な負荷分散が図れず、応答遅れが発生することがある。
- (2) 集中形システムでは複数プロセスを1台のプロセスコンピュータで管理するため、計算機の保守時間の確保が困難である。
- (3) 分散形、集中形システムのいずれも入出力等のハードウェアに依存するソフトウェア構造であり、ソフトウェアの移植性がよくない。
- (4) 集中形に限らず分散形にあっても、システム内の一部に障害が発生すると、システムの全停止につながることが多い。このため、ハードウェアの多重化等の対策がとられており、このことで信頼性は向上するが、反面、ハードウェアコストが上昇するといった欠点を有している。
- (5) 分散形、集中形のいずれにおいても現状のシステム開発アプローチでは、将来構想を明確にしたうえで計画的にシステム拡張を図ることが多い。逆に言えば、計画的に進めない拡張が困難な場合が多く、システム変更に対して長期間のシステム停止を必要とすることが少なくない。

## 3 自律分散システムの特徴と構造

### 3.1 拡張性のよいシステム構造

#### 3.1.1 ハードウェアの仕組

自律分散システムの適用にあたってシステムの拡張・改造を容易にする自律性について、まず検討を行い、次のように定義した。すなわち、自律性とは「システム全体についての構造を知らなくても自らの判断で自分の責任領域の制御を実行し、その変更や修正に対しても自らの責任で対応する。したがってほかからの指令で働くこともなくほかへ1対1の指令を出すこともない」と定義できる。

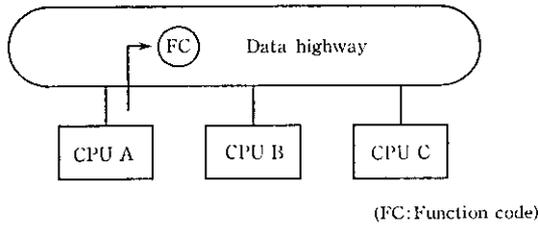
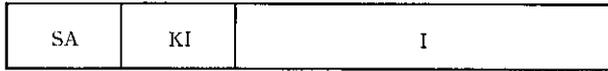


Fig. 4 Autonomous decentralized system



SA: Sender address  
 KI: Kind of information  
 I: Information

Fig. 5 Format of transmission data

情報交換の際、送信側が主導権をもつのではなく、受信側が主導権をもつ。すなわち、伝えられた情報を解読して、自らが必要とする情報を取り込み利用する。概念図を Fig. 4 に示す。CPU A から発信させられる情報 FC (Function code) は、Fig. 5 のようなフォーマットになっている。

CPU B および C は、情報種別を調べノード (計算機) 内に取り込むべきか否かの判断を行う。CPU B および C は、システム全体の構成や状態を知らなくてもよく、自ノードに必要な情報種別だけを知り、受信すればよいことになる。

3.1.2 ソフトウェアの仕様

また、自律性のあるプログラム構造は、「1 プログラム 1 ファイルの構造とし、共有ファイルを持たずデータの授受は、すべてデータフローにより行う」と定義できる。

Fig. 6 に示すように、プログラム A が管理するファイル (データ) をプログラム B が必要とした場合、プログラム A と同じ方法でプログラム B もファイルを持ちデータの蓄積を行う。これにより、プログラム単位の独立性が確保される。これは、従来システムと異なりプログラム単位ごとのデータフローで閉じているため、他ノード (計算機) への移行がスムーズである。また、ファイルアクセスにおいて従来のような複雑な排他制御が不要となり、プログラムのリンケージが単純化される。

この結果、従来システムにおいて、プログラム起動の方法と共有ファイル保有の問題で、計算機間のプログラム移植が困難であった点が解消される。

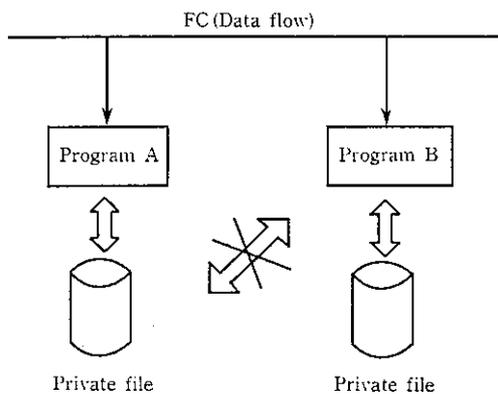


Fig. 6 Basic structure of the file system

3.2 開発性のよいプログラム構造

自律分散システムが、拡張性に優れていることはすでに述べた。一方、年々増加の一途をたどっているソフトウェア開発費の低減化の要求も強い。これに対して従来のプロセスコンピュータのプログラムは、入出力装置に依存した部分が多く、共通化設計とかプログラムの再利用などによる効率化が十分に図られていない。そこで、データフローの考え方を入出力装置のインタフェースにまで拡張し、アプリケーションプログラムの入出力処理部を統一インタフェースにすることによって、プログラムの移植性、流用性を向上させることができる (Fig. 7)。

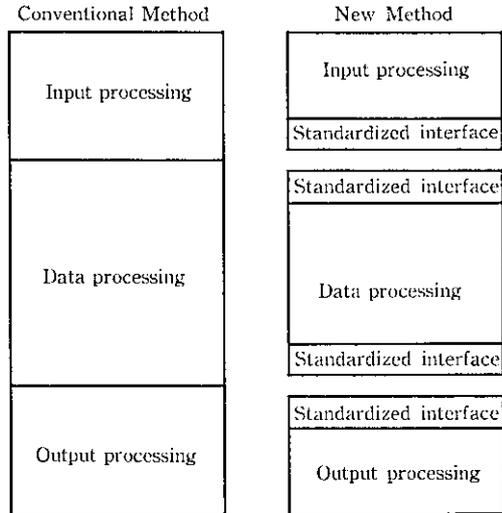


Fig. 7 Structure of the software

3.3 保守性のよいシステム構造

データ処理部が入出力処理から独立していることにより、計算機がダウンした場合のバックアップ機への置換が容易である。Fig. 7 にそのソフトウェア構造を示す。また、入出力データを開発用計算機 (バックアップ兼用の場合もある) に取り込むことによってオンラインシミュレーションが可能であり、効率的なプログラム改造が実施できる。

4 実システムへの適用事例

自律分散システムを適用し構築したプロセスコンピュータシステムは、現在水島および千葉両製鉄所で9システムが稼働している<sup>4)</sup>。ここでは、適用事例として焼鈍プロセスコンピュータシステムについて表す (Fig. 8)。

4.1 システム構成の特徴

従来、システム構築を行う場合、プログラムサイズ、処理速度および将来の増設分を考慮した能力を有するプロセスコンピュータシステムを導入してきた。今回は、自律分散システムを適用することによりシステム能力に対する安全率を最小限におさえた構成が可能となった。Fig. 8 に示すように、当初スタート時は、2プロセスの制御を行うためモデル専用機を1台で構築し、能力不足と判断した時点で増設することとした。現状ではピーク時の負荷を考慮しても1台で十分で、制御上での不具合は発生しておらず、コスト低減を

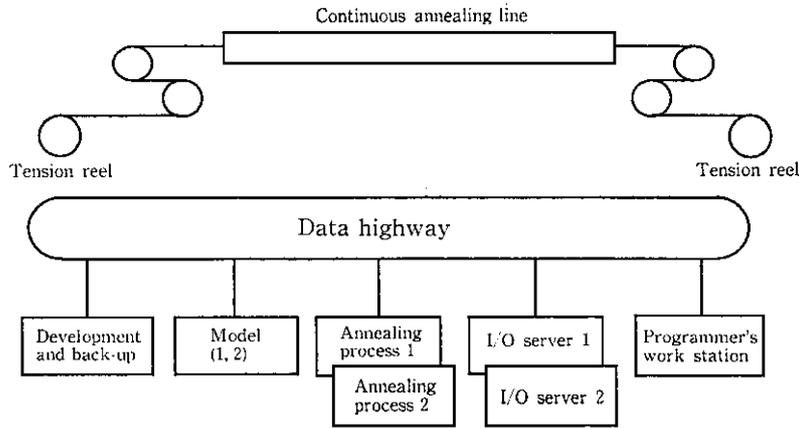


Fig. 8 System configuration of the annealing process

図ることができた。

システム構成での主な特徴は次のとおりである。

- (1) シンプルな構成  
各計算機はデータウェイだけで接続されており、バックアップ機は  $N$  対 1 の切替が可能である。
- (2) オンラインシミュレーションの容易性  
バックアップ機でオンライン機との並行シミュレーションが可能である。また、FC (データフロー情報) のテストモード機能を有していることにより、随意にテストデータを作成することができる。これによってシステム開発、改造の場面で十分に結合テストが実施され、ソフトウェアの品質を高めることができる。
- (3) 管理の集中化と制御の分散化の実現  
開発用計算機でソースプログラムを一元管理し、データウェイを使用して各計算機へプログラムのローディングを行う。制御は各計算機で行う。
- (4) マイクロコンピュータの採用  
マイクロコンピュータによる均質な分散システムである。

4.2 アプリケーションプログラムの構成

自律分散システムによりプログラムの自律性が高まり、各機能を明確に分離することができた。

Fig. 9 および 10 に従来の集中システムと自律分散システムの構成を示す。集中システムは各プログラムが共有ファイルを使用するのに対し、自律分散システムは、プライベートファイルを使用する。プライベートファイルを管理するために必要な格納・検索機能

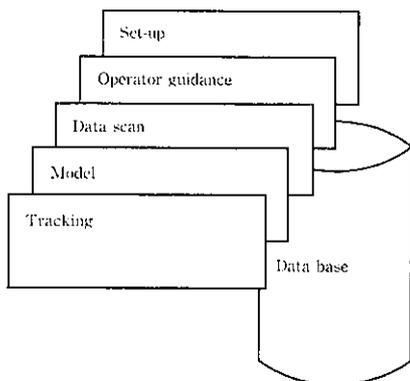


Fig. 9 Diagram of the centralized file system

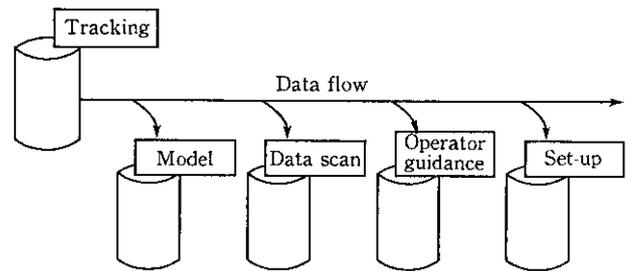


Fig. 10 Diagram of the autonomous decentralized system

は、Fig. 11 に示すようにアプリケーションプログラムとのリンケージ方法においてさまざまな構成が考えられる。現在マイクロコンピュータの能力の制限により、あまり多くのFCを発生させることができないため、ケース3の格納・検索+アプリケーションの結合型を採用している。

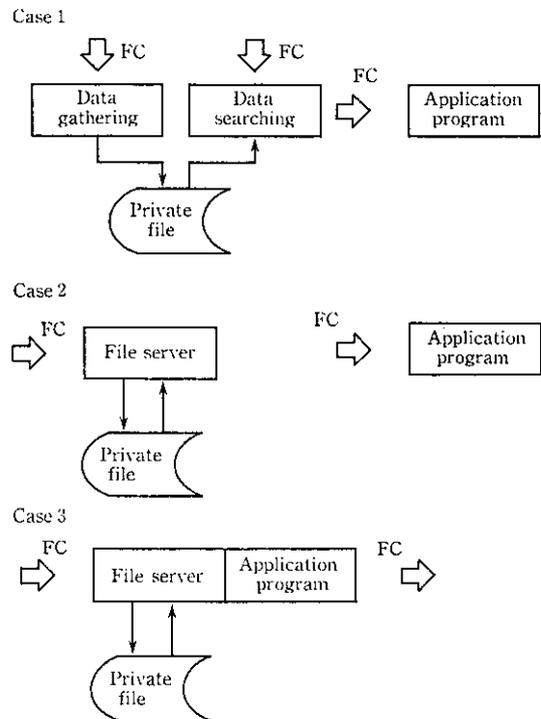


Fig. 11 Structure of the application program

5 自律分散システムの評価

5.1 システム評価

5.1.1 拡張性

稼働後のシステムに対し、設備の変更にもなって Fig. 12 に示すように CPU 3 を部分リプレースした。その時、アプリケーションプログラムをまったく変更することなく新しい CPU 3' へ移植することができ、その移行期間は、事前準備と切替後の確認を含めてわずか3日間であった。このことで自律分散システムが拡張性に優れていることを十分確認できた。

5.1.2 開発性

ソフトウェア開発における自律分散システムの特徴は次のとおりである。

- (1) 従来の集中方式と違い、プログラム単位に独立のファイルを確認することで、自己完結的に設計が進められる。
- (2) 単体テストおよび結合テストの開発途中の段階で、ハードウェア環境の影響を受けることなく、テストを実施することができるため、効率のよい作業が行える。
- (3) 情報の入出力が、データフローのため、結果の確認が容易に行える。具体的なソフトウェアの生産性について従来方式を基準とした自律分散方式の生産性を Table 1 に示す。

なお、従来方式については、当社の標準値を用いた。

5.1.3 経済性

自律分散システムは、安価なマイクロコンピュータによる分散システムを構築し、従来の大型プロセスコンピュータと同等の業務を行わせるといった経済的効果をねらいとしている。ところが、Fig. 13 に示すように、ほぼ同程度の能力 (MIPS: Million instructions per second) の構成で比較すると、あまり価格に差がなくマイクロコンピュータがやや有利な程度である。この原因としては以下のような点が考えられる。

- (1) 現段階では、周辺装置があまり安価とはいえず、マイクロコンピュータの構成は、より多くの CPU 構成となることから、ステーションなどの費用が多く発生する。
- (2) 分散化が進むことで、OS (Operating system) や支援ソフトウェアの費用が、CPU 台数に比例して必要となり、価格アップの要因となっている。

5.1.4 保守性

自律分散システムでは、情報が全部の計算機へブロードキャストされるため、開発用計算機で特別な処置を講ずることなく、オンラインシミュレーションが実施できる。

具体的な効果としては次のような点があげられる。

- (1) オンラインシミュレーション機能により、被テスト機能を開発用計算機に登録することで、容易にテストできる (Fig. 14)。
- (2) 計算機資源に余裕がなくなった時には、従来は該当計算機にメモリを増設する等の処置を講じてきた。自律分散システムでは、その時点で余裕のある計算機へ容易にプログラムを移植することができる。
- (3) システム全体のインタフェースが、すべて FC 方式のため全情報が開発用計算機で収集でき、トラブルの解析が容易に実施できる。
- (4) システムの分散化を十分図っていれば、部分的な CPU ダウンが発生しても残りの CPU で制御を継続することができる。

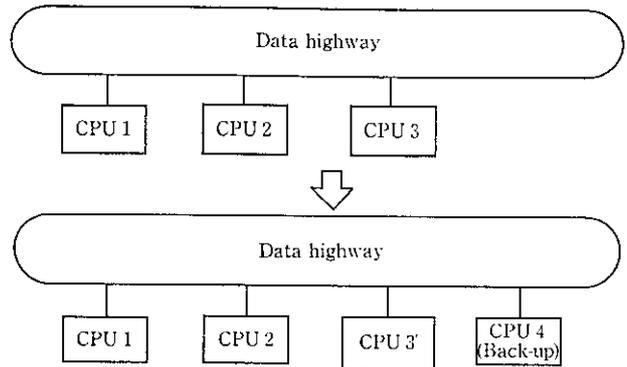


Fig. 12 Enhancement of the system

Table 1 Productivity of the new method in system development

Phase	Functional design	Program design	Programming	Single test	Integration test	System test
Ratio of man-months $\alpha^{*1}$	0.9	1.0	1.0	0.9	0.8	0.9

$$*1 \alpha = \frac{\text{Productivity of autonomous decentralized system (man-months)}}{\text{Productivity of conventional system (man-months)}}$$

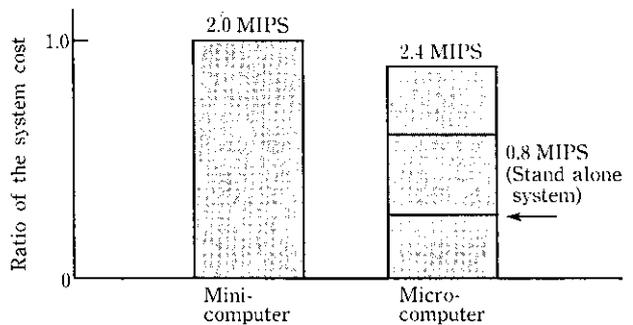


Fig. 13 Comparison of the system cost

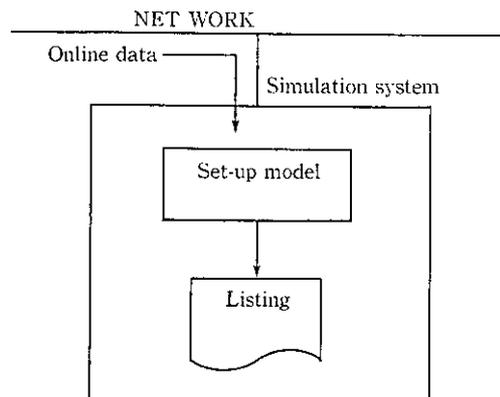


Fig. 14 Outline of the online simulation system

## 5.2 適用対象プロセス

従来から圧延プロセスには、応答性重視の観点から分散システムが多く採用されてきた。自律分散システムもこうした思想を踏襲する形で、適用範囲を拡大しているところである。

一方、上流プロセスはDDCシステムによる分散化が進んでおり、応答性の点や資源の共有化を考えた場合、集中形のメリットが大きくなり、今後も集中システムが採用されるであろう。すなわち、自律分散システムも一つの理想のスタイルではあるが、すべてが自律分散システムに適しているとはいえず、プロセスの性格に合わせたシステム構築を行っていくべきである。

## 5.3 自律分散システムの問題点

### 5.3.1 マイクロコンピュータの能力の限界

一般のプロセスコンピュータシステムでは、ある事象によって処理が集中し、ピーク負荷が発生することがある。自律分散システムにとっては、その時多くのFCが流れ、計算機内のFCバッファがオーバーフローするケースがある。具体例をFig. 15に示す。

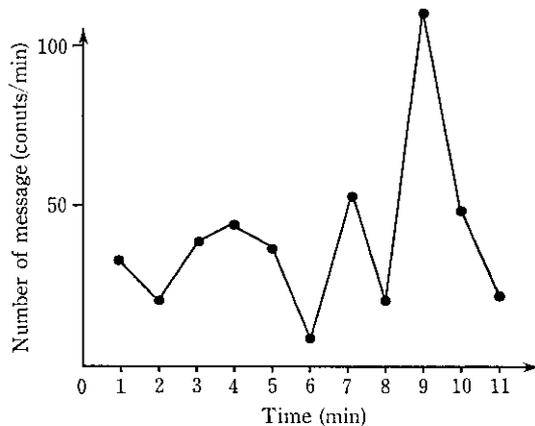


Fig. 15 An example of message generation

この問題点に対しては次に示すような対策が考えられる。

- (1) 計算機間の負荷バランスを調整し、ピーク負荷の発生を防止する。
- (2) 一部のアプリケーションプログラムに時間遅れの要素を組み込み、処理が集中することを防止する。

### 5.3.2 メモリ効率の問題

自律分散システムでは、各アプリケーションプログラム単位にファイルを確保することが基本原則である。しかし、メモリ効率といった観点で評価すると、同一情報が計算機内部でいくつも重複して存在することになり、共有方式に比べ効率が悪くなる。しかし、メモリコストはLSI技術の発達とともに安価になってきており、今後その傾向はますます強くなると予想される。システムの増改造の容易性を考慮したシステム全体のライフサイクルコストを考えると、決して不利益な面ばかりではないと言える。

## 6 今後の課題

今回の自律分散システムの導入では、拡張性、開発性、保全性といった面で効果が認められた。計算機システムには、さらに、プロセスの変革に対応した柔軟なシステム変更、ソフトウェア開発効率

の向上、信頼性向上、また自動化の推進による製品品質向上、省力化等の要請が強くあり、これらの達成のためにはまだ数多くの課題が残されている。自律分散システムについての課題としては次の2つがあげられる。

- (1) 自律分散思想に基づくシステムを構築する上で、いまだハードウェアの能力が不十分であり、周辺装置を含めたコストパフォーマンスの向上が必要である。
- (2) 自律性の高いソフトウェアとすることにより、移植性、流用性を高め、ソフトウェア開発の生産性を向上させる。  
また、上記要請にこたえるためには、自律分散システムによるだけでなく、以下のようなアプローチも必要である。
- (1) 計画に見られるように、ソフトウェア開発ツールを導入することによって、ソフトウェア開発の生産性を向上させる。
- (2) MAPに見られるような効率的な通信手段の確保によってCIMを達成し、生産効率を向上させる。
- (3) AI、制御理論等の適用によってより品質のすぐれた製品を高能率で生産する。  
こうした課題に対して今後、検討を進めていきたい。

## 7 結 言

従来の集中処理システムと異なって、プロセスの変革に柔軟に対応できる自律分散処理システムを水島および千葉両製鉄所の冷間圧延プロセスに導入した。その結果は以下のとおりである。

- (1) 自律分散システムは、分散配置された計算機が自律的に情報を持つシステム構造であるためシステムの増改造が容易であり、拡張性に富んでいる。一事例として計算機能力アップのリプレースを実施したが、わずか3日間ですべての作業を行うことができた。
- (2) 本システムはプログラムの入出力インタフェースが統一されており、ハードウェアに依存しない構造である。このためソフトウェアの移植性に富み、開発性がすぐれている。適用した結果、10~20%程度の開発工数の削減効果が得られた。
- (3) また、上記理由によりシステムダウン時のバックアップ機への置換が容易であり、保守性にすぐれている。
- (4) コストパフォーマンスという観点からはメモリ効率が良くないという欠点を持っているため不利であるが、これはハードウェアの進歩に伴って解消される。

自律分散システムは、いまだハードウェア、ソフトウェア両面において確立された技術ではないが、システム開発担当者が持っている問題点を解決する上での有効な手段であり、今後のシステム開発における方向の一つを示唆していると言える。

おわりに、本システムの構築に当たって御協力いただいた株式会社日立製作所の関係各位に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 森 欣司, 宮本捷二, 井原廣一: 「自律分散概念の提案」, 電気学会論文誌, 104 (1984) 12, 303-310
- 2) 井原廣一: 「自律分散制御の交通システムへの応用」, 日立評論, 63 (1981) 11, 49-54
- 3) 森 淳, 鳥越英俊, 中井耕三, 森 欣司, 増田崇雄: 「鉄鋼計算機制御システムにおける自律分散システムの適用」, 日立評論, 70 (1988) 5, 77-82
- 4) 岩村忠昭, 鳥越英俊, 尾脇林太郎: 鉄と鋼, 73 (1987) 12, S1118