
中径シームレス鋼管精整工場の物流制御システム

Pipe Flow Control System in Finishing Line for Medium Diameter Seamless pipe

船生 豊(Yutaka Funyu) 藤原 高矩(Takanori Fujiwara) 桜田 和之(Kazuyuki Sakurada) 新玉 幹夫(Mikio Aratama) 山本 清美(Kiyomi Yamamoto) 荘司 吉信(Yoshinobu Shoji)

要旨：

中径シームレス鋼管精整工場は、各設備を連続化することにより、徹底した省力と生産性向上を図っている。このためには、全ラインを直接に制御するプロセスコンピュータシステムが不可欠である。精整工場では、他品種、小ロットのパイプが連続して流れることを前提とした品質保証体制を確立する必要がある。したがって、プロセスコンピュータには、信頼性の高いピーストラッキングシステムと、物流制御システムを付加している。物流制御システムでは、評価関数方式に基づくモデルを独自に開発し、シミュレーション実験によりそのモデルの妥当性を検証した。システムは、現在、順調に稼働しており、品質保証、生産性向上、省力に大きく寄与している。

Synopsis：

Kawasaki Steel Corporation (Chita Works) has installed a process computer system at the finishing line of medium diameter seamless pipe, aimed at process control throughout the line. The new finishing line is characterized by the layout of facilities connected with the automatic warehouse and conveyor systems. At the finishing line high quality assurance should be give, because many pipes of various specifications flow into the line. Therefore, the process computer system has been designed to function as a piece tracking system and an automatic pipe flow control system. Evaluating function method based on the linear programming is applied to the pipe flow control system. This logic was first introduced as material flow control in the steel industry and was verificated by computer simulations. The above-mentioned system is now operating satisfactorily and greatly contributing to high quality control, improvement in productivity and a decrease in operators' labor.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

船生 豊*² 藤原 高矩*³ 桜田 和之*³ 新玉 幹夫*⁴ 山本 清美*⁵ 荘司 吉信*⁶

Pipe Flow Control System in Finishing Line for Medium Diameter Seamless Pipe

Yutaka Funyu, Takanori Fujiwara, Kazuyuki Sakurada, Mikio Aratama, Kiyomi Yamamoto, Yoshinobu Shoji

要旨

中径シームレス鋼管精整工場は、各設備を連続化することにより、徹底した省力と生産性向上を図っている。このためには、全ラインを直接に制御するプロセスコンピュータシステムが不可欠である。精整工場では、多品種、小ロットのパイプが連続して流れることを前提とした品質保証体制を確立する必要がある。したがって、プロセスコンピュータには、信頼性の高いピーストラッキングシステムと、物流制御システムを付加している。物流制御システムでは、評価関数方式に基づくモデルを独自に開発し、シミュレーション実験によりそのモデルの妥当性を検証した。

システムは、現在、順調に稼動しており、品質保証、生産性向上、省力に大きく寄与している。

Synopsis:

Kawasaki Steel Corporation (Chita Works) has installed a process computer system at the finishing line of medium diameter seamless pipe, aimed at process control throughout the line. The new finishing line is characterized by the layout of facilities connected with the automatic warehouse and conveyor systems. At the finishing line high quality assurance should be given, because many pipes of various specifications flow into the line. Therefore, the process computer system has been designed to function as a piece tracking system and an automatic pipe flow control system. Evaluating function method based on the linear programming is applied to the pipe flow control system. This logic was first introduced as material flow control in the steel industry and was verified by computer simulations. The above-mentioned system is now operating satisfactorily and greatly contributing to high quality control, improvement in productivity and a decrease in operators' labor.

1. 緒 言

シームレス鋼管製造工程のプロセスコンピュータによる制御システムの開発は、すでに中径シームレス鋼管圧延工場において、「数値管理による圧延制御技術」として完成され、大河内賞生産特賞を得ている。

今回、中径シームレス鋼管精整工場の建設を機会に、新しく精整工場全域を直接制御するプロセスコンピュータシステムを導入した。本システムは、生産性向上、省力、品質保証、歩留向上などを目的として、精整工場の生産、品質、検査情報の自動収集およびデータ処理、各種オペレータガイダンス、機械設備および搬送の自動セットアップなどの重要な機能を有しているが、精整工場で特にニーズの高い物流制御に関して、新しく制御モデルを開発し、実用化した。これにより、圧延工場、精整工場を含むプロセスコンピュータによる一貫した直接制御システムを構築することができた。

ここでは、本システムで最も重要な物流制御システムに的をしぼって報告する。

2. 精整工場の特徴

シームレス鋼管の用途は、そのすぐれた強度から、油井管、

ラインパイプ、ボイラチューブ、機械構造用鋼管など多岐にわたっている。エネルギー危機後は、特に石油や天然ガス用油井管やラインパイプの比重が高くなってきているのが現状である。これらは、材質、強度、寸法精度の各面において高い品質を要求されており、精整工場は、最終製品工程として十分にその要求に対応しなければならない。精整工場にどのような機能を与えるかは、最終製品の種類と、重点のおき方によって異なってくるが、今回建設した中径シームレス鋼管精整工場は、Fig. 1 に示すように、次の工程から構成される。

- (1) 圧延工程と精整工程間、および精整工程内のバッファ工程（鋼管自動倉庫）
- (2) 鋼管の熱処理工程
- (3) 品質保証のための NDI（非破壊検査）と寸法検査工程
- (4) 管端切断と検査手入の工程
- (5) ネジ切工程（ネジ切、水圧検査、ドリフト検査、検尺秤量印字、塗油）

すべての鋼管が、これらすべての工程を通過するのではなく、種類によってはバイパスすることもあり、その物流は複雑である。さらに、他の鉄鋼設備と比較すると次の特徴を有する。

- (1) 製品の用途が多岐にわたるため、多様な熱処理やネジ仕様を満足する必要がある、多品種少量生産である。
- (2) したがって、ラインも多種多様な設備から構成されている。

* 1 昭和58年7月14日原稿受付

* 2 知多製造所設備部設備技術室主任（課長）

* 3 知多製造所設備部設備技術室主任（掛長）

* 4 知多製造所設備部設備技術室

* 5 知多製造所第2造管部中径シームレス管課掛長

* 6 知多製造所管理部検査課課長補

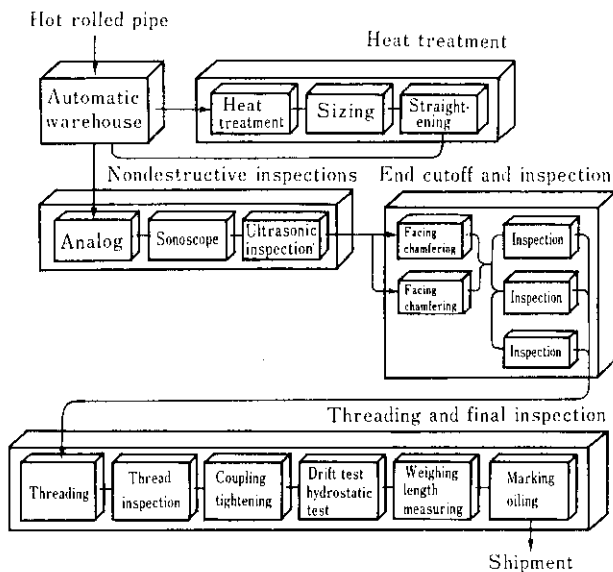


Fig. 1 Schematic flow of medium diameter seamless pipe finishing factory

その中にはネジ切機のような複雑で高精度の機械加工設備も存在する。

- (3) さらに、精整工程は広範にわたるためトラッキングの対象となる鋼管の本数は、精整ライン全体で平均約8 000本と非常に多い。
- (4) 製造する鋼管は銅板類と異なり、ユーザーで加工処理されることなく、工場出荷のまま使用されることが多い。
- (5) したがって、厳しい品質管理と品質保証が要求され、品質情報、製造履歴のトレーサビリティ確立のため、パイプ1本毎の管理が必要である。
- (6) そのために鋼管1本につき1 500データにのぼる膨大な情報を処理しなければならない。

このような特徴をもった精整工場を人力で正確かつ効率的に管理することは不可能に近く、我々は、ツールとしてプロセスコンピュータを導入し、広範な精整工場の自動化と総合的管理による生産性向上を指向した。

3. プロセスコンピュータシステムの概要

3.1 導入の目的

精整工場へのプロセスコンピュータシステムの導入に際し、次の基本方針を設定した。

- (1) 機械設備の操作、物流、データ処理を含めた完全自動化を指向する。(省力、生産性向上)
- (2) 機械設備の操作に関しては、プラントコントローラ、シーケンサ等を積極的に導入し、プロセスコンピュータの下位のマイクロコンピュータレベルで自動化を図る。(省力)
- (3) 物流を円滑にし、圧延→精整→出荷までの工程の短縮を図り、仕掛品在庫を減少させ、オーダー受注から出荷までの期間短縮に結びつける。(生産性向上)
- (4) 精整での検査・手入れ・管端切断状況を総合的に把握し圧延工程にフィードバックする。(歩留向上)
- (5) 精整各設備の生産状況を常時監視し、かつ、センターコンピュータとのオンラインリンクにより、精整生産計画の最適

化を図る。(生産性向上)

これらの基本方針に基づいた品質保証や生産性向上などの目的とコンピュータシステムでの具体的な達成手段をまとめてFig. 2に示す。

3.2 プロセスコンピュータシステムの構成

プロセスコンピュータシステムの構成をFig. 3に示す。前に述べた精整工場の特徴から、次の考慮をしている。

- (1) 精整工場の多様な要求機能に対応するため、精整工場を区分し、マルチコンピュータ構成とした。
- (2) 各コンピュータ間には、広範なデータのやりとりがあるた

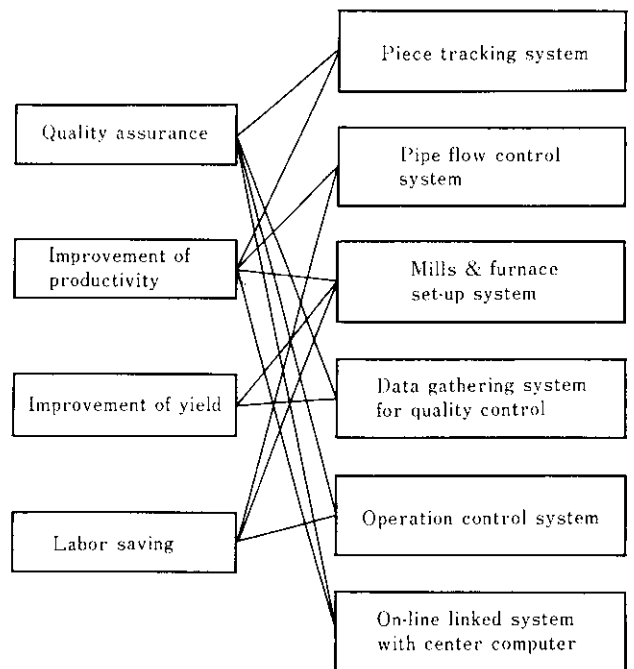


Fig. 2 Purpose of process computer installation in seamless pipe finishing factory

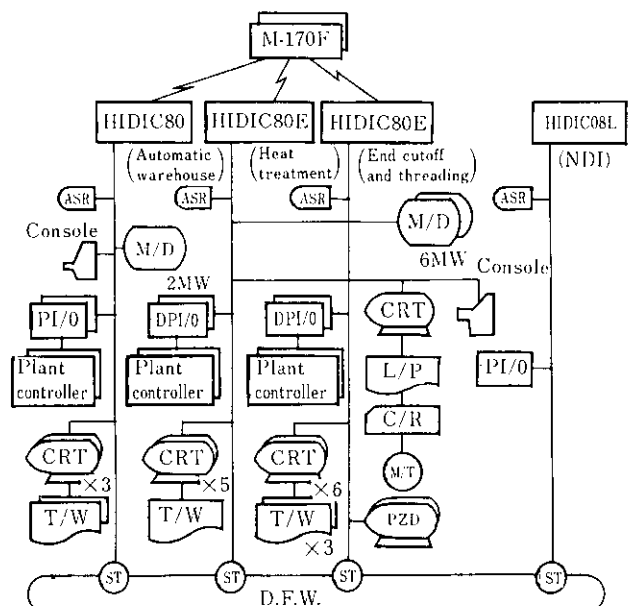


Fig. 3 Configuration of control system

- め、高速のデータフリーウェイで相互に結合した。
- (3) 下位のプラントコントローラとの信号授受のために、分散型 PI/O を業界で初めて採用した。
 - (4) センターコンピュータとの接続は、モデム回線 (9 600 BPS) とし、プロセスコンピュータでの応答性を高めるために、コンピュータ毎に回線を設けた。
 - (5) NDI の品質情報を高速に処理するため、専用のデータプロセッサを採用した。

Fig. 4 に、本システムの機能概要を示す。

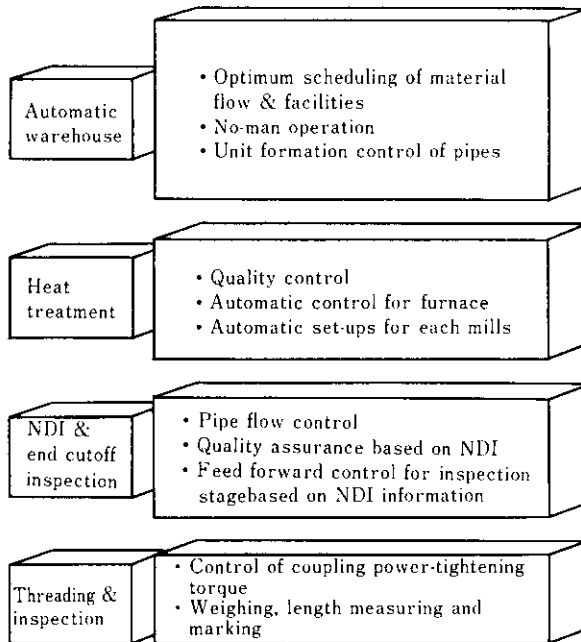


Fig. 4 Schematic functional diagram of process computer control system

4. 物流制御

精整工場は、Fig. 1 に示す各ラインより構成されるが、ここでは、そのうち、管端切断と検査手入の工程（以下、管切・検査ラインと略称する。）において実施中の物流制御について、その詳細を述べる。

4.1 管切・検査ラインの概要

管切・検査ラインの物流を Fig. 5 に示す。本ラインは、NDI ラインにおける疵検査、寸法測定の実施後、パイプ管端の切断・面取りを行い、検査手入を実施するラインである。

中径シームレス鋼管工場の精整設備としては、従来、1 基の管端切断機（以下、管切機と略称する。）と 1 面の検査ラインを有するのみであった。今回の建設において、管切機を 1 基、検査ラインを 2 面増設した。既設のラインへの増設という制約下で、レイアウトの検討を行い、複雑な物流とはなるものの、プロセスコンピュータの活用を前提として、Fig. 5 に示す設備配置が決定された。本ラインの配置では、管切機へのパイプの物流、管切機から検査ラインへの物流、検査ラインからクレードルへの物流の 3 点で、パイプの分岐合流が発生し、この物流を円滑に行うことが、本ラインの生産性を向上させるポイントとなる。そのためには、プロセスコンピュータによる、ビーストラッキング、物流制御、および、オペレータガイダンスを実施することが不可欠である。逆に、この複雑な物流を制御することにより、同一仕様パイプの並行処理が可能となり、サイズ替えによる停機をずらせることによる相互バックアップが可能となる。

また、管切・検査ラインの生産能力に追従させるため、NDI ラインでの高速処理を行う必要がある。そのため、NDI の全自動化を行い、サイズ替段取時間の短縮、および、測定アイドル時間の短縮を図っている。

4.2 物流制御方式の検討

物流制御は、ラインを流れる一本一本のパイプを、「どの設備へ搬入するか」、もしくは、「どの設備から搬出するか」を決定するロジックである。同様の物流制御を適用している代表的な例としては、列車運行制御や交通管制制御を挙げることができる。

しかし、列車運行制御はあらかじめ決められた運行時刻表に従うことを基本としており、当制御の主旨に適さない。交通管制制御は、人や車の流れというランダムな事象を信号機等によって制御するシステムであるが、工場特有の、異ロットの混入防止やオペレータの作業性改善といった要件を満足することはできない。したがって、精整ラインにおける物流制御の最適化を図るために、独自の物流制御モデルを開発する必要がある。

精整工場の物流制御において考慮すべき主なファクタは、以下のとおりである。

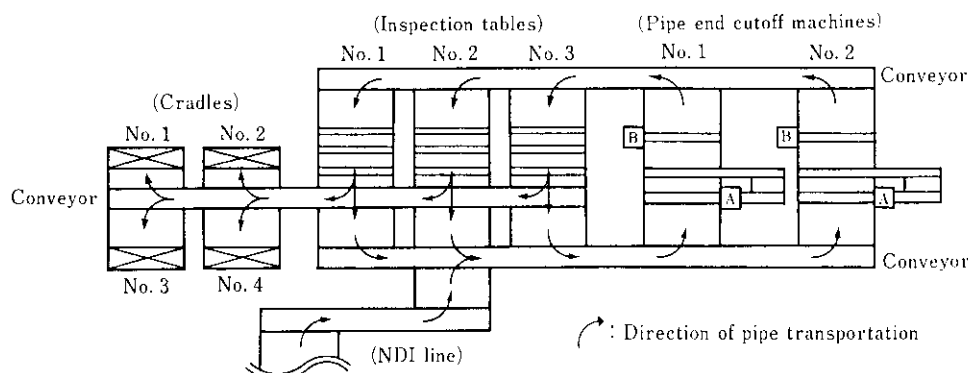


Fig. 5 Pipe end cutoff and inspection line

- (1) 主要設備のアイドル時間最小
- (2) 複数設備の最適負荷配分
- (3) バッファテーブル内処理待ちパイプの待ち行列最小
- (4) ロットのまとまりの維持

各ファクタの評価を行う方法として、次の方式を検討した。

方式1：各項単独評価方式

評価対象となるファクタをひとつだけ選択して単一ファクタの大小の評価のみで、物流を決定する。

方式2：多数決方式

各個別ファクタの優劣を評価して、その多数決により物流を決定する。

方式3：評価関数方式

各ファクタに重みづけした関数を導入して総合的评价で物流を決定する。

方式1は、評価ファクタ選択のためのオペレータ介入が必要である。方式2は、各ファクタの重みが考慮されないという欠点がある。そこで、方式3に示した評価関数方式を採用することとした。

評価関数方式とは、ベクトル $\mathbf{X}$ について、制約条件、

$$\mathbf{A}\mathbf{X} \geq \mathbf{b} \quad \text{.....(1)}$$

および、非負条件

$$\mathbf{X} \geq 0 \quad \text{.....(2)}$$

からなる制約のもとで、評価関数 Z 、

$$Z = \mathbf{C}^T \cdot \mathbf{X} + C \quad \text{.....(3)}$$

を最大にする $\mathbf{X}$ を求めることを目的とするものである。ここで、 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{b}$ 、 $\mathbf{C}$ は定数である。

$\mathbf{X}$ は、物流順序も考慮した物流ルートの意味し、物理的に考え得る物流ルートが n 個あれば、各物流ルートは、 $\mathbf{X}_k$ ($k=1, \dots, n$) として表現できる。ここで、 $\mathbf{X}$ の各要素を評価項目と称する。 $\mathbf{C}^T$ の各要素を評価係数と称する。

最適な物流ルート $\mathbf{X}_m$ は、各 $\mathbf{X}_k$ ごとに定められた制約条件のもとで、評価関数 Z が最大となるような $\mathbf{X}$ である。

開発のポイントは、適切な評価項目の選定と最適な評価係数の決定にある。評価項目の選定は、設備レイアウト、設備能力、および、オペレータ配置等を考慮して行った。評価係数の最適化は、シミュレーションによって決定した。

4.3 評価項目の決定

Fig. 5 に示す管切・検査ラインに対して物流制御を適用する場合、前記の評価ファクタに対応した評価項目として、下記を選定した。

(1) 管切機仕分制御評価項目

- ① 管切機能力
- ② 管切機入側テーブルの空き容量
- ③ パイプのロット替り
- ④ パイプ管端形状替り
- ⑤ パイプ外径替り
- ⑥ パイプ肉厚替り

(2) 管切機合流・検査ライン仕分制御評価項目

- ① パイプのロット替り
- ② 管切機出側テーブルの占有量
- ③ 検査ライン入側テーブルの空き容量

(3) 検査ライン合流・クレードル仕分制御評価項目

- ① パイプのロット替り

- ② 検査ライン出側テーブルの占有量
- ③ クレードル入側テーブルの空き容量

5. シミュレーション実験

5.1 シミュレーションモデル

前章に示した評価関数方式を実際のラインに適用するにあたって、計算機シミュレーションを行い、本方式の妥当性の検証と、評価係数の最適値の確定を行った。

シミュレーションは、モデル化された管切・検査ラインのマテリアルフローに物流制御モデルを組み合わせて実行した。Fig. 6 に、モデル化された管切・検査ラインのマテリアルフローを示す。シミュレーション言語としては、標準化された出力形式の完備した GPSS/X¹⁾ を採用した。

GPSS/X は、モデル化にあたって、システムの構成要素を「施設」と「トランザクション」に分類する。施設は、シミュレーション実行中に個数の変わらない固定的なものであり、実ラインにおいては、各設備や、バッファテーブルに相当する。施設は、同時にはひとつのトランザクションしか処理できないファシリティと複数個のトランザクションを処理できるストレージに分類できる。トランザクションは、その施設を動いて各設備のサービスを受けるものであり、ここでは、一本一本のパイプに相当する。このトランザクションが各種施設で処理される様子を記述することにより、GPSS/X のプログラミングを行う。

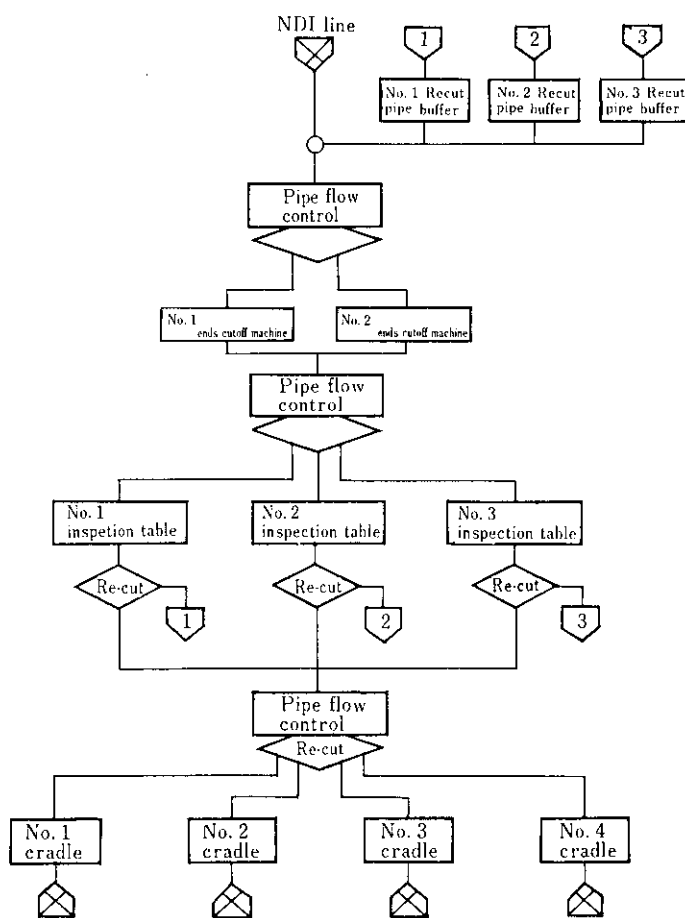


Fig. 6 Schematic flow model of end cutoff and inspection line

各施設のモデル化に必要なファクタを以下に示す。

(1) 管切機

- a. 入側テーブル容量
- b. パイプ管端変更に伴うサイズ替時間
- c. パイプ肉厚変更に伴うサイズ替時間
- d. パイプ外径変更に伴うサイズ替時間
- e. 管切機稼働率
- f. 故障による停機時間
- g. 出側テーブル容量

(2) 検査台

- a. 入側テーブル容量
- b. パイプ手入れ率
- c. パイプ手入れ時間の平均と標準偏差
- d. 出側テーブル容量

(3) クレードル

- a. 入側テーブル容量
- b. パイプ搬出処理時間

トランザクションのモデル化においては、予想される精整処理スケジュールを使用し、肉厚、外径、長さ、管端形状を考慮した。また、ロットによっては、中間切断して1本の原管を2本のパイプにする場合もあり、そのモデルも組み入れている。トランザクション発生は、パイプが一定時間間隔ごとにラインに搬入されるという仮定のもとで規定した。

GPSS/X で記述したシミュレーションモデルを Fig. 7 に示す。

5.2 シミュレーション結果

シミュレーションに使用したトランザクション数（パイプ本数）は、2000である。シミュレーション実験には、M-170Fを用いた。シミュレーションは、評価係数の各種組み合わせについて実行したが、ここでは、管切ライン仕分、管切・検査ライン仕分について、Table 1 に示す各ケースについて紹介するに

Table 1 Simulation conditions of pipe flow control

Evaluation factors	Weight (%)		
	Case 1	Case 2	Case 3
(for end cutoff line)			
Capacity of ends cutoff machine	5	5	5
Unfilled area's volume of ends cutoff machine's entrance buffer table	30	30	0
Change of pipe lot	40	0	40
Change of pipe diameter	10	10	10
Change of pipe thickness	5	5	5
Change of pipe end shape	10	10	10
(for inspection line)			
Change of pipe lot	60	0	40
Filled area's volume of ends cutoff machine's delivering buffer table	20	20	0
Unfilled area's volume of inspection stage's entrance buffer table	20	20	0

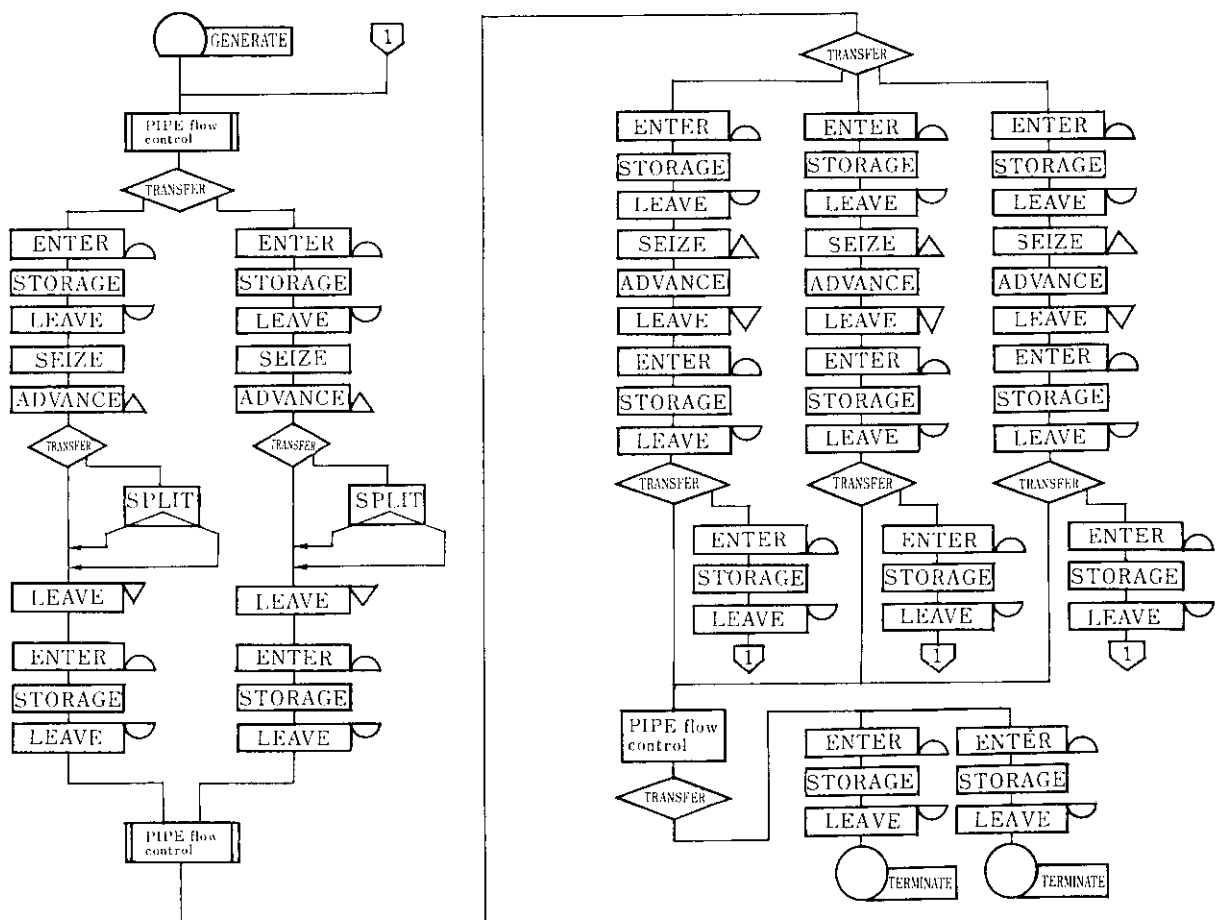


Fig. 7 Simulation model according to GPSS/X

と定める。ケース1は、すべての評価を行う場合で、ウェイト配分は、シミュレーションにより最終的に得られた最適配分である。ケース2、ケース3は、比較のために、それぞれ、ロット替りについて、テーブル空き容量についての評価を行わない場合を示したものである。

Fig. 8 (a) は、シミュレーション実行中に、各テーブル（ストレージ）に滞留していたパイプ（トランザクション）本数の最大および平均を示したものである。ここで、横軸は各テーブルに対応した番号であり、縦軸は、滞留したパイプ本数である。Fig. 8 (b) は、シミュレーション実行中に各テーブルを通過したパイプの積算本数を示している。

Fig. 9 は、各設備に仕分けられたパイプの、テーブル間のバランスを示したものである。横軸は、ロットの大きさ（ロット内のパイプ本数）であり、縦軸は、当該ロットでの仕分パイプ本数比、 n/N を示している。ここで、 n は各テーブルに仕分けられた本数のうち大きい方の値で、 N は当該ロット内のパイプ総本数である。

ケース1では、大きなロットにおいて、各ラインを流れるパイプ本数がほぼ2分割されている。また、30本以下の小さいロットでは、ロットのまとまりが保たれている。ケース2では、各設備へのパイプ配分がさらに平滑化されているが、小さいロットでも分割してしまうので操作上好ましくない。なぜなら、後工程でのロットのまとまりの維持が困難となるからである。ケース3では、シミュレーションがタイムオーバーで途中で停止してしまった。これは、バッファテーブルが満杯となっているにもかかわらず、そのバッファテーブルにパイプを搬送しよ

うとして、ラインの渋滞が頻発したためである。このことは、物流制御においてテーブル空き容量の評価が必要不可欠であることを示すものである。

小さいロットでロットをまとめておくためには、ロットの評価配分を大きくすることを考えるべきである。しかし、その場合、テーブル空き容量の評価が相対的に小さくなって渋滞発生の原因となるので注意すべきである。

以上のようにして、シミュレーションの実行によって、本稿で述べた物流制御方式の妥当性を確認した。また、管切・検査ラインのレイアウトが、物流制御システムを適用するうえで、妥当であることも併せて確認できた。

6. オンラインへの適用と成果

上記シミュレーションにより、オンラインへの適用の可能性を見出し、精整工場の営業運転とほぼ同期して、プロセスコンピュータによる物流制御を実施した。

調整試運転での評価係数のファインチューニングにおいては、シミュレーションで得られた成果を最大限に活用し、さらに、実操業に対する最適化を図った。これにより、試運転調整期間を約3割短縮することができた。

現在、本制御は有効に活用されており、そのオンライン適用率は100%を継続中である。

Fig. 10 は、プロセスコンピュータによる物流制御の実施例と、オペレータによる手動運転の実施例を示したものである。物流制御の実施により、管切・検査ライン上のパイプ搬送サイ

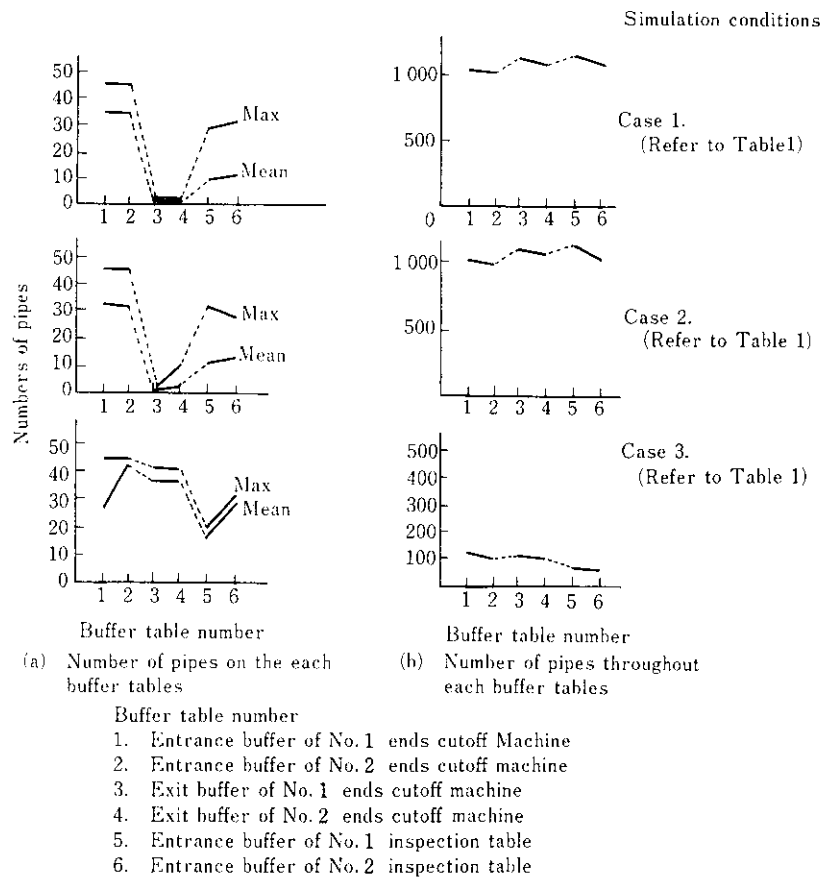


Fig. 8 Results of the computer simulation (transit pipes through each buffer tables)

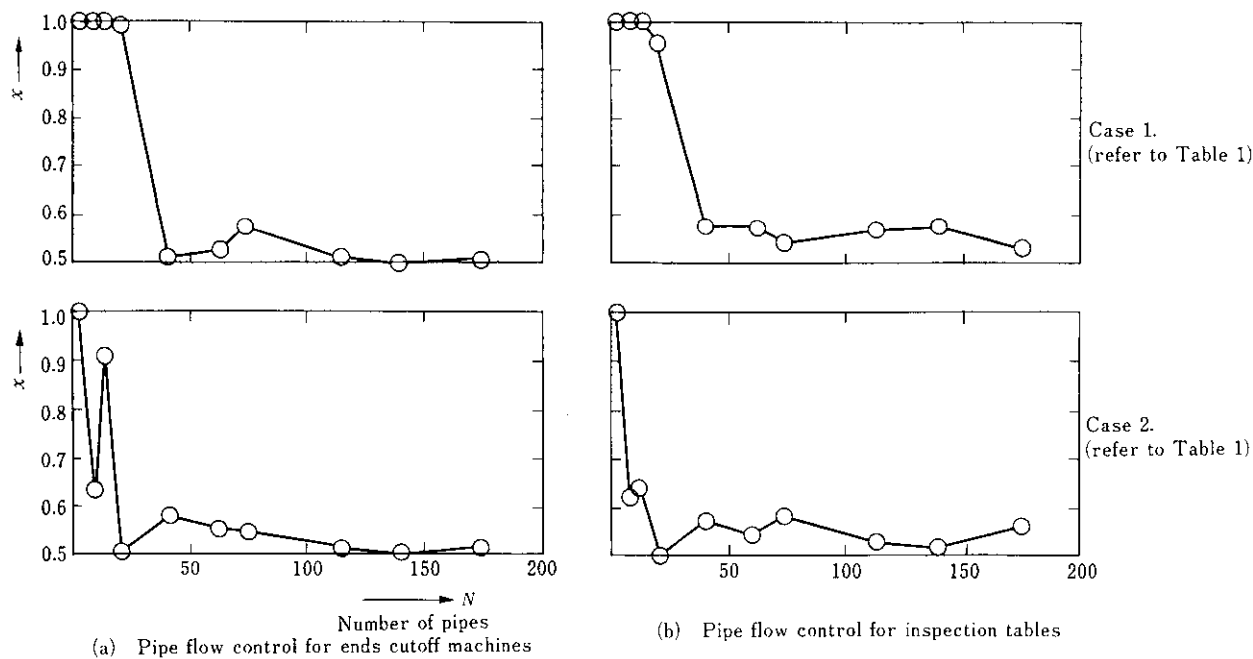


Fig.9 Results of the computer simulation
(a balance of pipe lots divided)
by "Pipe flow control"

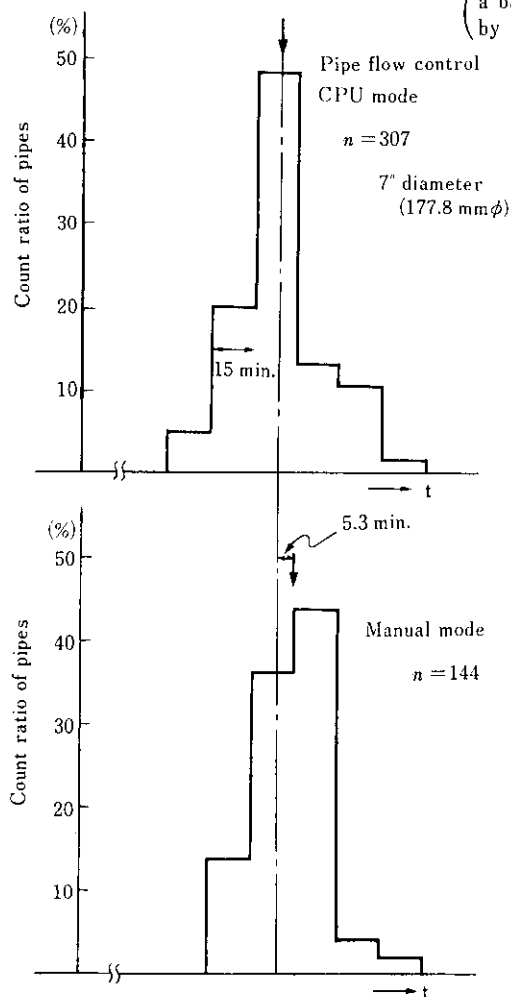


Fig.10 Improvement of lead time by pipe flow control

クルタイムが約8%短縮されている。(対象材は、177.8 mm 径のパイプであり、検査手入れ率はほぼ同率であった。)

当物流制御以外にも、自動倉庫では、機械設備の最適化を狙った物流制御等も開発しており、徹底した省力を図っている。それらを総合した省力効果を Table 2 に示す。

Table 2 Operators' labor saving in finishing factory

Line	Labor saving
Automatic warehouse	42 persons
Heat treatment	12 persons
End cutoff and inspection	24 persons
Threading	8 persons
(Total)	86 persons

7. 結 言

中径シームレス鋼管精整工場の物流制御システムについて、プロセスコンピュータシステム、物流制御モデル、そのシミュレーション結果および実操業での成果について述べた。

計画時点において、広大な鋼管精整工場をコンピュータで直接制御することは、世界的に例がなく、多くの問題点を解決しなければならなかったが、基本となるトラッキング技術と物流の効率化を指向した独創的な制御モデルを新たに開発し、精整工場の自動化に成功した。

これにより、中径シームレス鋼管工場では、すでに開発の完了した圧延工場の完全自動化とあわせて、圧延から精整までのプロセスコンピュータによる広範な自動化システムが完成した。その結果、品質保証体制の強化、省力、生産性の向上等の多くの成果を得ることができた。

ひきつづき、いくつかの制御と、センターコンピュータ側での実績収集、及び、工程計画機能を開発中であり、今後、さらに大きな成果が期待されている。また、本システムで開発され蓄積された技術は、他のプロセスにも適用可能であり、漸次拡

大してゆく予定である。

おわりに、本システムの開発に御協力をいただいた㈱日立製作所、安川電機㈱、ならびに関係各位に深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 「FACOM GPSS/X 解説書」〔㈱富士通〕