

圧延設備のブロック化非干渉最適制御システム

Application of Blocked Non-Interacting Optional Control to the Rolling Mill

鉄鋼圧延制御システムに対するニーズとして多様化への対応と、いっそうの高性能化が強く望まれている。この要求にこたえるため、現代制御理論に基づく新制御技術の開発を進めているが、今回、その一つとしてブロック化非干渉最適制御方式を開発した。本方式によれば、制御対象を複数のブロックに分割し、分割された個々のブロックに対して最適制御を行うため、ブロックごとに最適制御を並列処理できる。そのため、多変数最適制御を制御対象の規模によらず高速で実行することが可能となる。

ブロック化非干渉最適制御方式を、コールドタンデム圧延機の板厚制御に適用した場合についてシミュレーションを行い、本方式を用いた場合、板厚精度を現状の $\pm 0.8\%$ から半分の $\pm 0.4\%$ にでき、優れた制御性能が得られることを確認した。

齊藤 裕* Yutaka Saitō
服部 哲* Satoshi Hattori
片山恭紀** Yasunori Katayama
諸岡泰男** Yasuo Morooka

1 緒 言

鉄鋼圧延プロセスは大規模かつ複雑な系であるため、制御技術の高度化に伴い従来から制御用コンピュータを導入し、デジタル制御を行っている。近年、鉄鋼生産の量から質への転換に伴い、板材の圧延を例にとっても、同一圧延システムで取り扱う材料の寸法はもとより、材質や種類も極めて多くなり、しかも製品精度に対するニーズも更に厳しいものになってきている。このように多様化、高度化するニーズを背景として、制御技術に関しても古典制御理論に基づく従来の制御方式では要求性能を満たすことが困難となり、新しい制御方式が必要となっている。

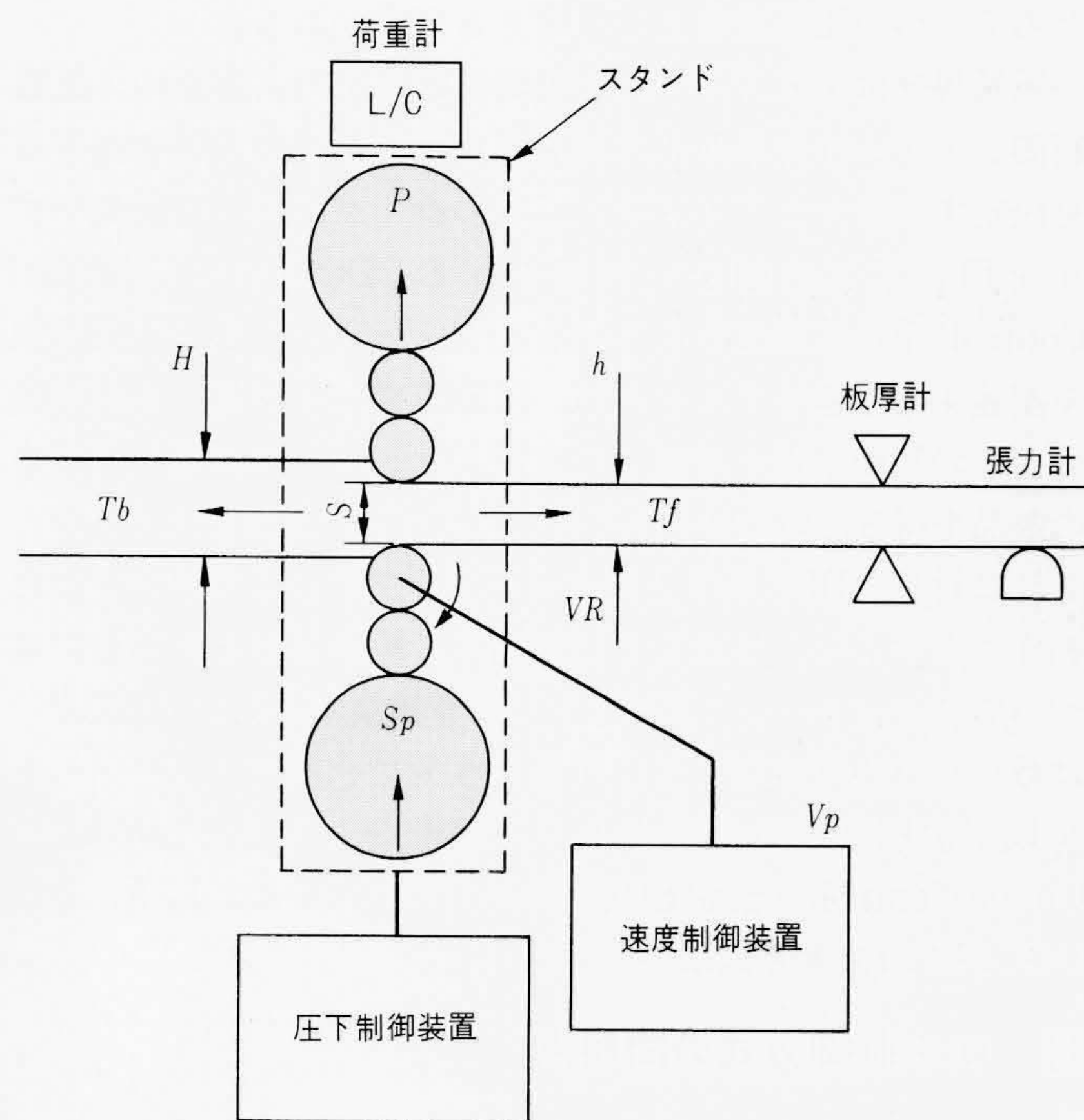
このような背景から、圧延プロセスの制御に最適制御・適応制御・ファジィ制御などの現代制御理論に基づく新制御技術を適用すべく開発を進めている。

ここでは、これらの技術の中で最適制御を適用した例としてコールドタンデム圧延機の板厚制御にスポットを当て、対象プロセス、従来制御方式、新制御方式及びそれらのシミュレーション結果について述べる。

2 対象プロセス

圧延は図1のように複数のロールから構成される圧延機スタンド間を鋼材を通すことによって行われる。スタンドのロールギャップ(圧下位置により決定される。)及びロール速度は、鋼材がスタンド出側で目標の板厚、張力となるようにそれぞれ圧下制御装置、速度制御装置によって制御される。

タンデム圧延機は、2スタンド以上が連続配置された圧延機である。図2に4スタンドコールドタンデム圧延機の一例を示す。タンデム圧延機では、スタンド間張力を介して各ス



注：略語説明 S：ロールギャップ H：入側板厚 h：出側板厚 Tf：前方張力 Tb：後方張力 VR：ロール速度 P：圧延荷重 Sp：ロールギャップ指令 Vp：ロール速度指令

図1 圧延プロセス 圧延は、複数のロールから構成されるスタンドで、ロール間を鋼材を通すことによって行われる。

* 日立製作所大みか工場 ** 日立製作所日立研究所

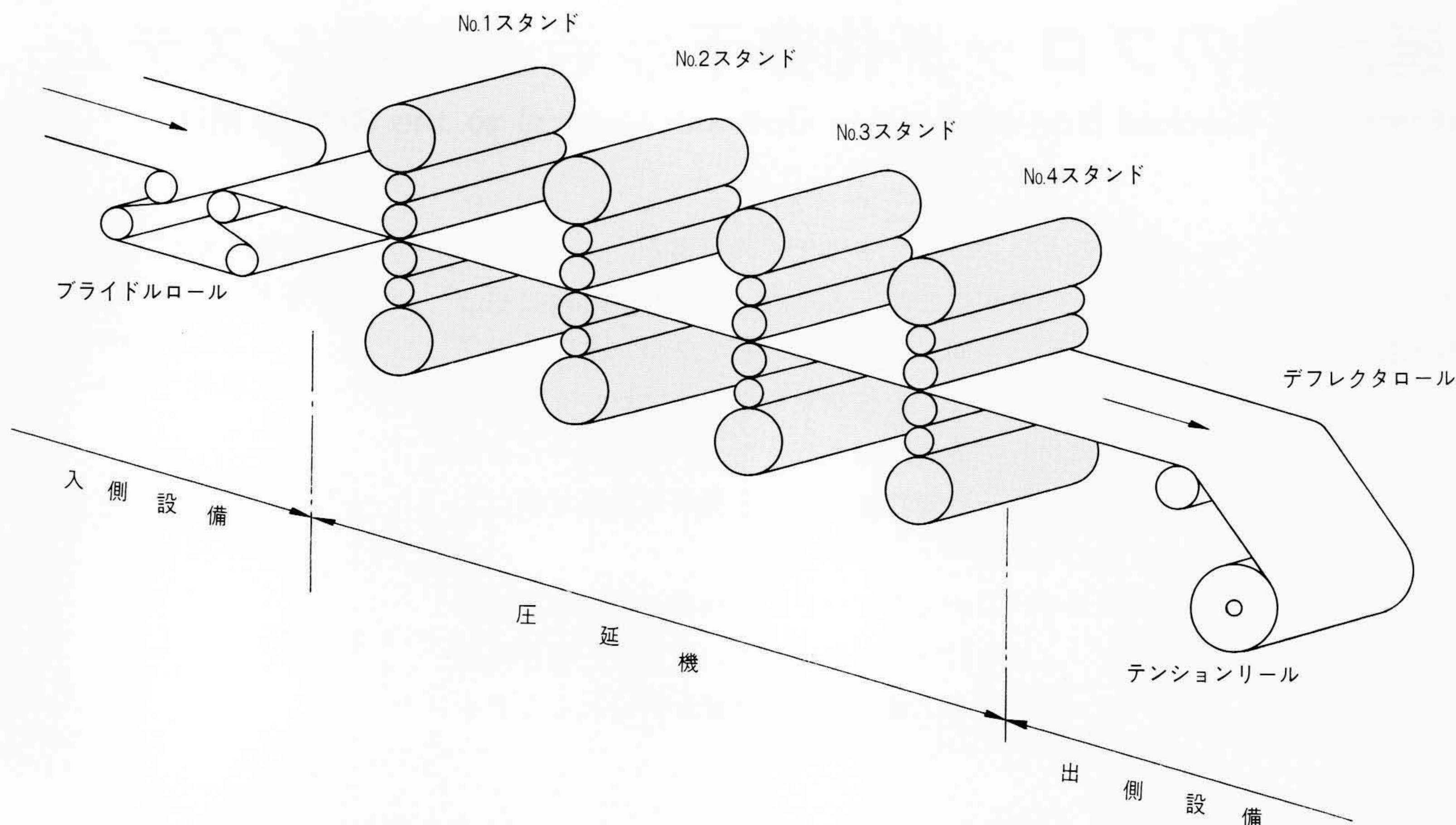


図2 4スタンドコールドタンデム圧延機概略図 タンデム圧延機は、複数のスタンドを連続的に並べたもので、鋼材は各スタンドを通過することによって連続的に圧延される。

タンドの圧延現象が相互に干渉し合うため、全スタンドをまとめて一つの圧延現象として考える必要がある。

圧延現象は多入力、多出力の非線形現象であるため、圧延制御システムは従来から非線形性を考慮して大まかな動作点を決定するセットアップ系と、その動作点の周りで近似モデルを用いてきめ細かい制御をするDDC (Direct Digital Control) 系から構成されている。セットアップ系は圧延現象を記述する圧延モデルを用い、圧延荷重、圧下量、電動機動力などの制約条件を考慮して生産スケジュールに基づき所定の製品を得るためのロールギャップ、ロール速度を決定する。これに対し、DDC系は上記セットアップ系により決定された動作点を中心に、外乱などに起因する制御偏差を実績値に基づいてフィードバック制御などにより補償する。このDDC系では数ヘルツの周波数で変化する板厚変動を数マイクロメートル以下に制御する必要があるため、従来からAGC (Automatic Gauge Control: 自動板厚制御) が行われていた。以下、このDDC系での制御方式について述べる。

3 従来制御方式の問題点

図3に示すように、従来、板厚制御には圧延荷重からロール直下の板厚変動を推定し制御を行うゲージメータAGC、スタンド出側板厚計によって検出される出側板厚変動をもとにフィードバック制御を行うモニタAGC、入側板厚計により検出される入側板厚変動を追跡し、ロール直下を通過する時点でフィードフォワード制御を行うFF AGCがある。また、スタンド間張力を制御する手段としてATL (Automatic Tension Limit: 張力制限制御) がある。

板厚制御は、圧延荷重及びスタンド間張力を変化させるこ

とによって行われる。例えば、ゲージメータAGCでは、板厚変動を荷重変動を用いて推定し、ロールギャップを変えて圧延荷重を変化させ板厚を制御している。ところが、圧延荷重が変化すると板に働くスタンド間張力も変動し、張力変動による板厚変動が発生するため、板厚制御の効果が半減してしまう。このように圧延現象は、圧延荷重、張力、板厚などが複雑に干渉し合う系であるにもかかわらず、従来制御は、1入力1出力の制御系を組み合わせただけのものであり、制御性能の向上には限界があった。

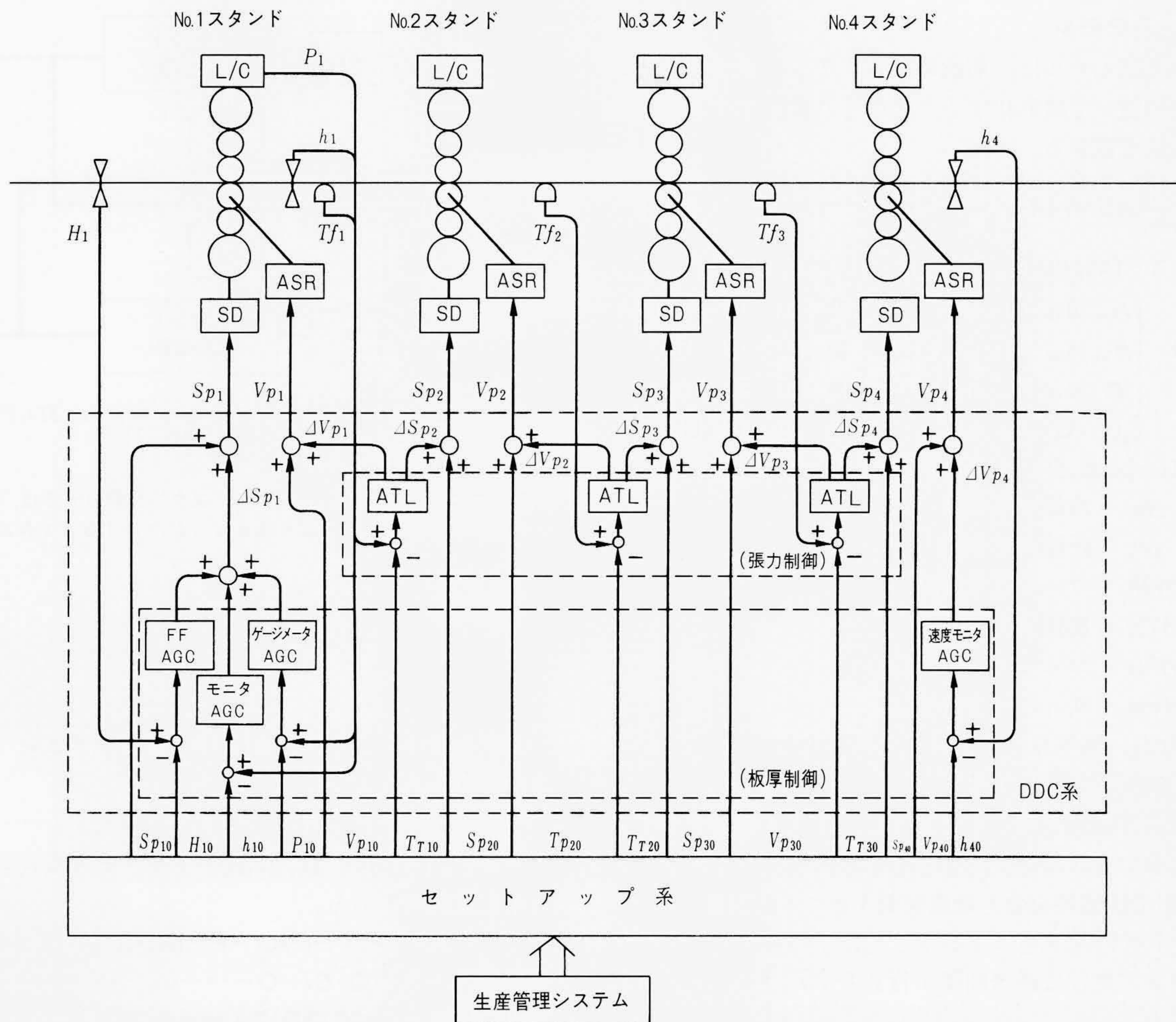
このため多変数最適制御の適用が検討されていたが、タンデム圧延機ではスタンド間張力を介して、各スタンドの圧延現象が相互に干渉し合うため扱う状態変数が多く、10 ms程度の実時間に制御を行うことは極めて困難であった。

4 新制御方式

従来の問題点を解決し、更に経済性と即応性、安定性を向上させ制御性能の極限を実現するため、新制御方式としてブロック化非干渉最適制御方式を開発した。図4に制御構成の概要を示す。本制御構成には次のような特徴がある。

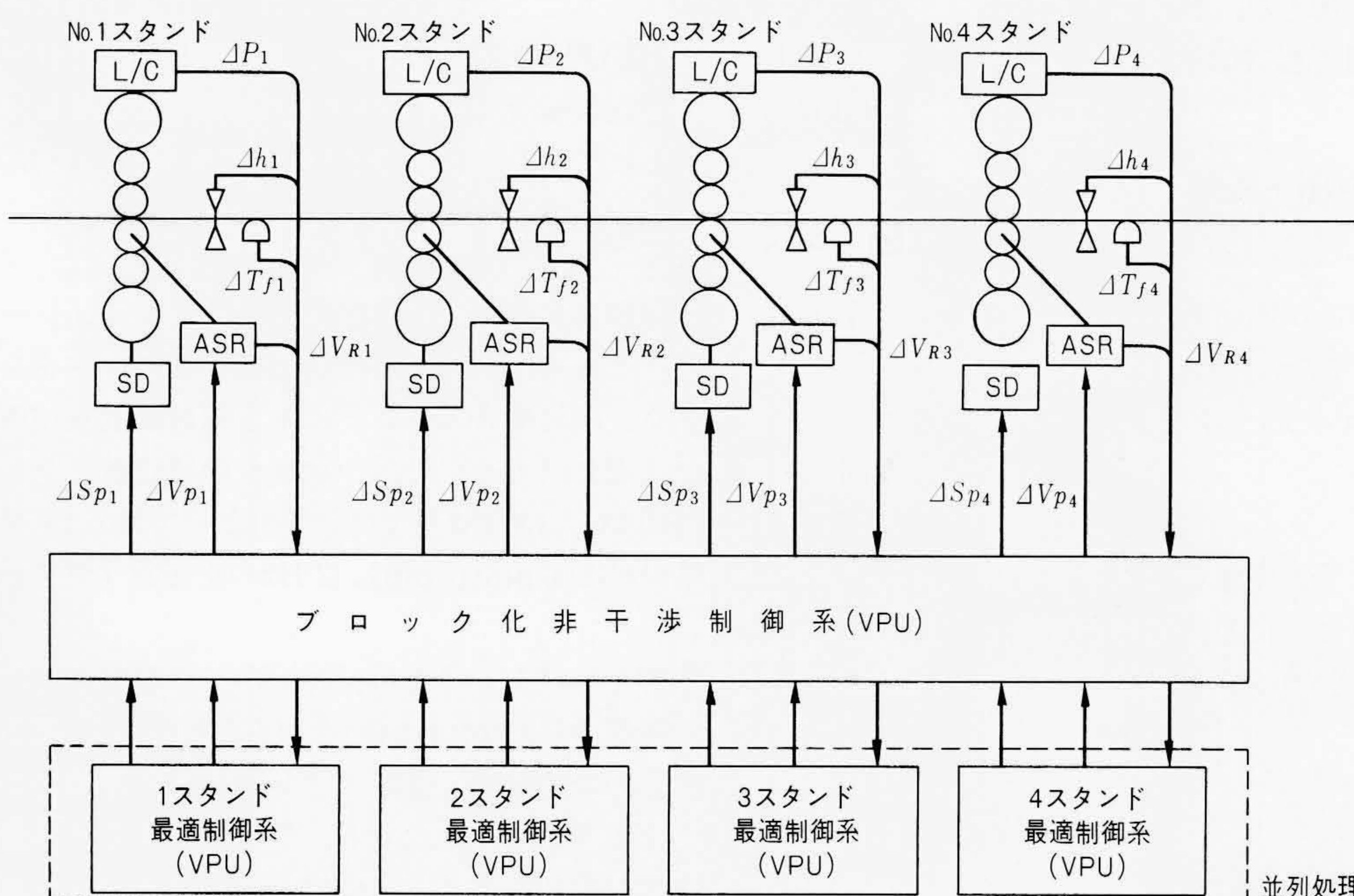
- (1) ブロック化非干渉制御を行い、各スタンドをブロック化し独立して扱う。
- (2) ブロック化したスタンドごとに最適制御を行う。
- (3) 最適制御を高速に実行するため、スタンドごとに専用の小規模なベクトル演算器を用い、並列処理を行う。

以上の結果、各スタンドごとに処理を並列化でき、演算時間を大幅に短縮できるため従来困難であったコールドタンデム圧延機の板厚制御への最適制御の適用が可能となった。以下、その詳細について述べる。



注：略語説明 SD(压下制御装置), ASR(速度制御装置), H_1 (No.1スタンド入側板厚), h_i (No.iスタンド出側板厚), P_i (No.iスタンド圧延荷重)
 T_{fi} (No.iスタンド出側張力), V_{Ri} (No.iスタンド速度), S_{pi} (No.iスタンド压下位置指令), V_{pi} (No.iスタンドロール速度指令)
 S_{pi0} , h_{i0} , H_{i0} , V_{pi0} , T_{fi0} はそれぞれセッアップ値, ATL(Automatic Tension Limit: 張力制限制御), AGC(Automatic Gauge Control: 自動板厚制御)

図3 コールドタンデム圧延機の従来の圧延制御 生産スケジュールに基づき、圧延スケジュールを決定するセッ
 トアップ系、圧延スケジュールに基づき板厚、張力制御を行うDDC系から構成される。



注：略語説明
 VPU(Vector Processor Unit :
 ベクトル演算器)
 ΔP_i (No.iスタンド圧延荷重偏差)
 ΔS_{pi} (No.iスタンドロールギャップ指令)
 Δh_i (No.iスタンド出側板厚偏差)
 ΔV_{pi} (No.iスタンドロール速度指令)
 ΔT_{fi} (No.iスタンド出側張力偏差)
 ΔV_{Ri} (No.iスタンドロール速度偏差)

図4 ブロック化非干渉最適制御構成 4スタンドタンデム圧延機を各スタンドごとに分割するブロック化非干渉制御系、及び各スタンドごと
 に並列処理される最適制御系から構成される。

4.1 プロセスモデル

圧延機の制御モデルは、前述のセットアップ系から与えられる動作点の周りで線形化することにより次に示すような状態方程式として求まる。

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{U} \cdots \cdots (1)$$

ここで、 $\mathbf{X} = [X_1, X_2, X_3, X_4]^T$, $\mathbf{U} = [U_1, U_2, U_3, U_4]^T$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & 0 \\ 0 & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ 0 & 0 & A_{43} & A_{44} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B_{44} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X}_i = [\Delta h_i, \Delta P_i, \Delta V_{Ri}, \Delta T_{fi}]^T, \quad \mathbf{U}_i = [\Delta S_{pi}, \Delta V_{pi}]^T$$

Δh_i : 出側板厚偏差

ΔP_i : 圧延荷重偏差

ΔV_{Ri} : ロール速度偏差

ΔT_{fi} : 出側張力偏差

ΔS_{pi} : ロールギャップ指令値

ΔV_{pi} : ロール速度指令値

(なお、添字*i*は*i*スタンドを意味する。)

$$\mathbf{A}_{ij} \in \mathbf{R}^{4 \times 4}, \quad \mathbf{B}_{ii} \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$$

(1)式の状態方程式で明らかのように、4スタンドタンデム圧延機の場合でも状態変数としては16個あり、リアルタイム(10 ms程度)で圧延機全体を最適制御することは困難である。本解決策として、(1)式をスタンドごとにブロック化して分割し、各スタンド単位に最適制御が行えるブロック化非干渉制御を開発した。

4.2 ブロック化非干渉制御

図5にブロック化非干渉制御の概略を示す。前述の(1)式の中で $\mathbf{A}_{ij} (i \neq j)$ の項は、*j*ブロックの状態が*i*ブロックの状態に与える影響項である。ブロック化非干渉制御では状態の物理的な意味を変えずに、この干渉による状態変化を打ち消すようにフィードバック補償要素 $\mathbf{D} \cdot \mathbf{X}$ を加える。本補償要素を加えることによって、*i*ブロックの状態方程式は以下のように変形される。

$$\frac{d\mathbf{X}_i}{dt} = \mathbf{A}_{ii} \cdot \mathbf{X}_i + \mathbf{A}_{ij} \cdot \mathbf{X}_j + \mathbf{B}_{ii} \cdot \mathbf{U}_i + \mathbf{B}_{ii} \cdot \mathbf{D}_{ij} \cdot \mathbf{X}_j \cdots (2)$$

(2)式で、

$$\mathbf{A}_{ij} + \mathbf{B}_{ii} \cdot \mathbf{D}_{ij} = \mathbf{O} \cdots \cdots (3)$$

が成立するように $\mathbf{D}_{ij}$ を決定すれば、*i*ブロックの状態に対する*j*ブロックの影響は除去され、各ブロック(スタンド)ごとの状態方程式に分割される。

4.3 ブロック内最適制御

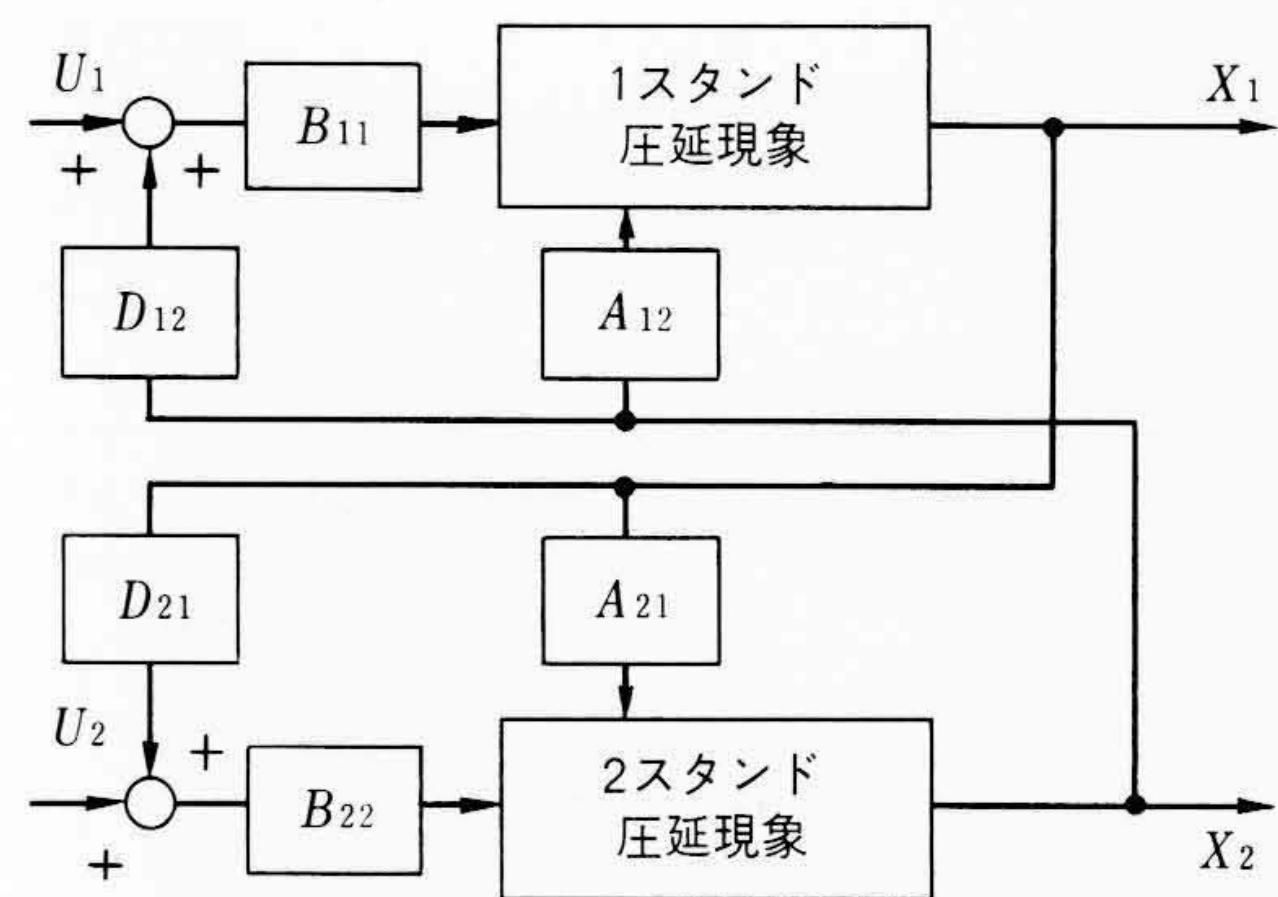
ブロック化非干渉制御によりタンデム圧延機はスタンド単位に制御でき、最適制御もスタンドごとに並列処理が可能となった。ブロック化非干渉制御により*i*スタンドの状態方程式は(4)式ようになる。

$$\frac{d\mathbf{X}_i}{dt} = \mathbf{A}_{ii} \cdot \mathbf{X}_i + \mathbf{B}_{ii} \cdot \mathbf{U}_i \cdots \cdots (4)$$

また、評価関数として(5)式を定義する。

$$J_i = \int_0^\infty [\mathbf{X}_i^T \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{X}_i + \mathbf{U}_i^T \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{U}_i] dt \cdots \cdots (5)$$

ただし、 $\mathbf{Q} \in \mathbf{R}^{4 \times 4}$, $\mathbf{R} \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$ は重み行列である。



注：略語説明

$\mathbf{X}_i$: *i*スタンド状態ベクトル($= [\Delta h_i, \Delta \phi_i, \Delta V_{Ri}, \Delta T_{fi}]^T$)

$\mathbf{U}_i$: *i*スタンド操作量($= [\Delta S_{pi}, \Delta V_{pi}]^T$)

$\mathbf{A}_{ij} \in \mathbf{R}^{4 \times 4}$, $\mathbf{B}_{ii} \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$

図5 ブロック化非干渉制御 スタンド間の干渉は、操作量にブロック化非干渉制御出力 $\mathbf{D} \cdot \mathbf{X}$ を加えることにより除去できる。

(5)式を最小にする操作量 $\mathbf{U}_i$ は、最適レギュレータ理論から次式で与えられる。

$$\mathbf{U}_i = -\mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{B}_{ii}^T \cdot \mathbf{P}_i \cdot \mathbf{X}_i \cdots \cdots (6)$$

ただし、 $\mathbf{P}_i \in \mathbf{R}^{4 \times 4}$ は、(7)式のリカッチ方程式を満足する実対称正定値解である。

$$\mathbf{A}_{ii}^T \cdot \mathbf{P}_i + \mathbf{P}_i \cdot \mathbf{A}_{ii} - \mathbf{P}_i \cdot \mathbf{B}_{ii} \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{B}_{ii}^T \cdot \mathbf{P}_i + \mathbf{C}_i^T \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{C}_i = \mathbf{O} \cdots \cdots (7)$$

制御ゲイン行列 $\mathbf{K} \in \mathbf{R}^{2 \times 4}$ は(6)式から次式となる。

$$\mathbf{K} = -\mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{B}_{ii}^T \cdot \mathbf{P}_i \cdots \cdots (8)$$

(5)式の重み行列を適切に選択することによって、設計目標を満足する制御ゲインを得ることができる。

図6にブロック化非干渉最適制御方式のシステム構成を示す。制御ゲイン演算はセットアップ系計算機、例えばHIDIC V 90、でパススケジュールごとに実施する。ブロック化非干渉最適制御はDDC系のPLC(Plant Controller)、例えばHISEC-04MとVPU(Vector Processor Unit:ベクトル演算器)で演算を並列処理することによって、制御周期10 msで実現している。

5 シミュレーション結果及びその検討

今回開発した制御システムの性能評価のためにシミュレーションを行った。シミュレーションの対象は4スタンドタンデム圧延機とした。圧延機各スタンドの压下制御装置及び速度制御装置を一次遅れ系で近似し、一次遅れの時定数は全スタンドそれぞれ20 ms, 100 msとした。外乱としてNo.1スタンドの入側板厚変動に60 μm (p-p値)、2 Hzの正弦波1サイクルだけを加えた。

図7は板厚制御をかけない場合(自然減衰)で、最終スタンドの出側板厚偏差が、11.1 μm (p-p値)となることを示す。図8は従来制御系を用いた場合で、最終スタンド出側板厚偏差が6.1 μm となることを示す。これに対し、ブロック化非干渉最適制御を加えたのが図9である。この場合、最終スタンド出側板厚偏差は1.9 μm となり、従来制御と比較して制御偏差は約 $\frac{1}{3}$ となった。

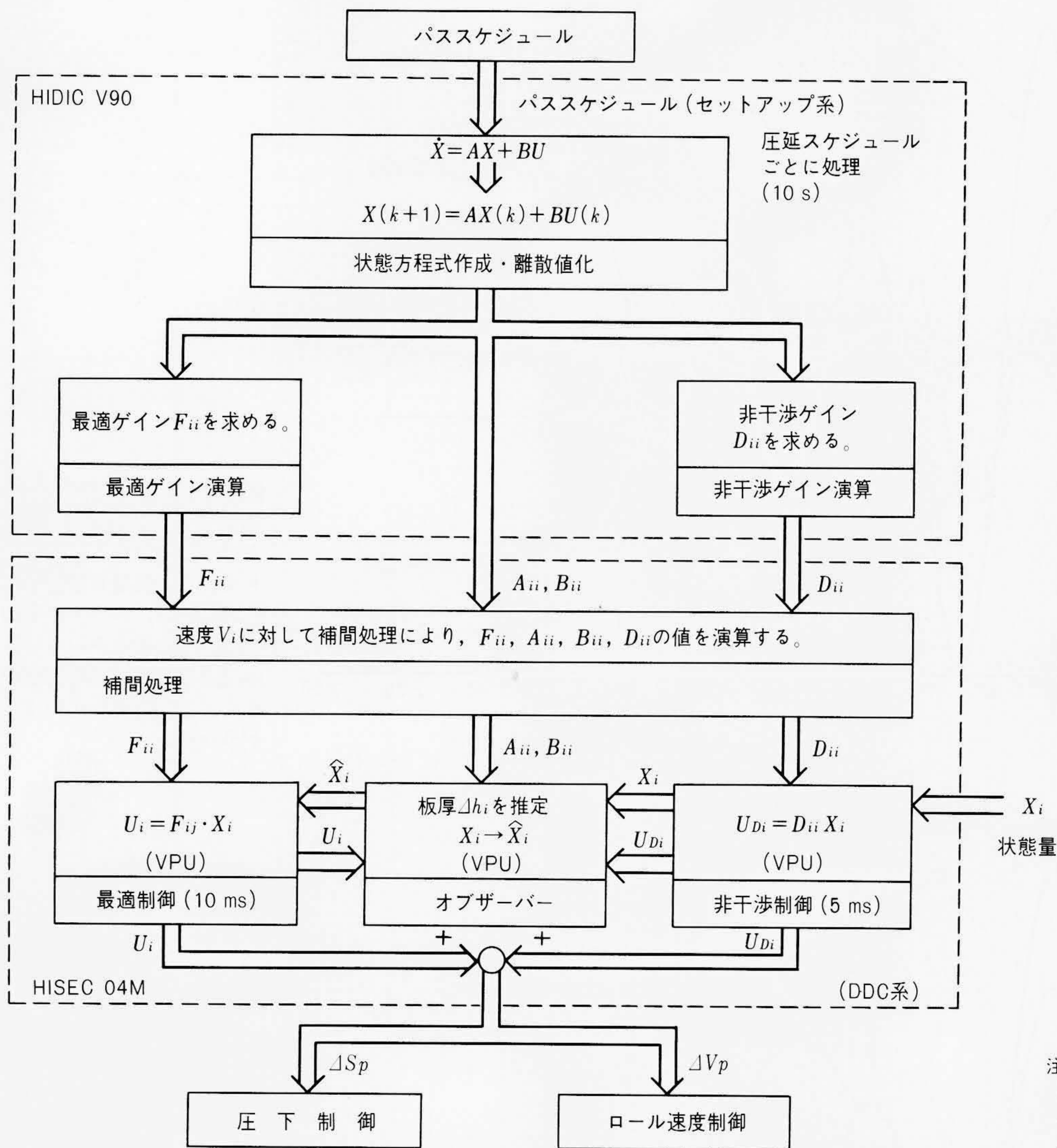
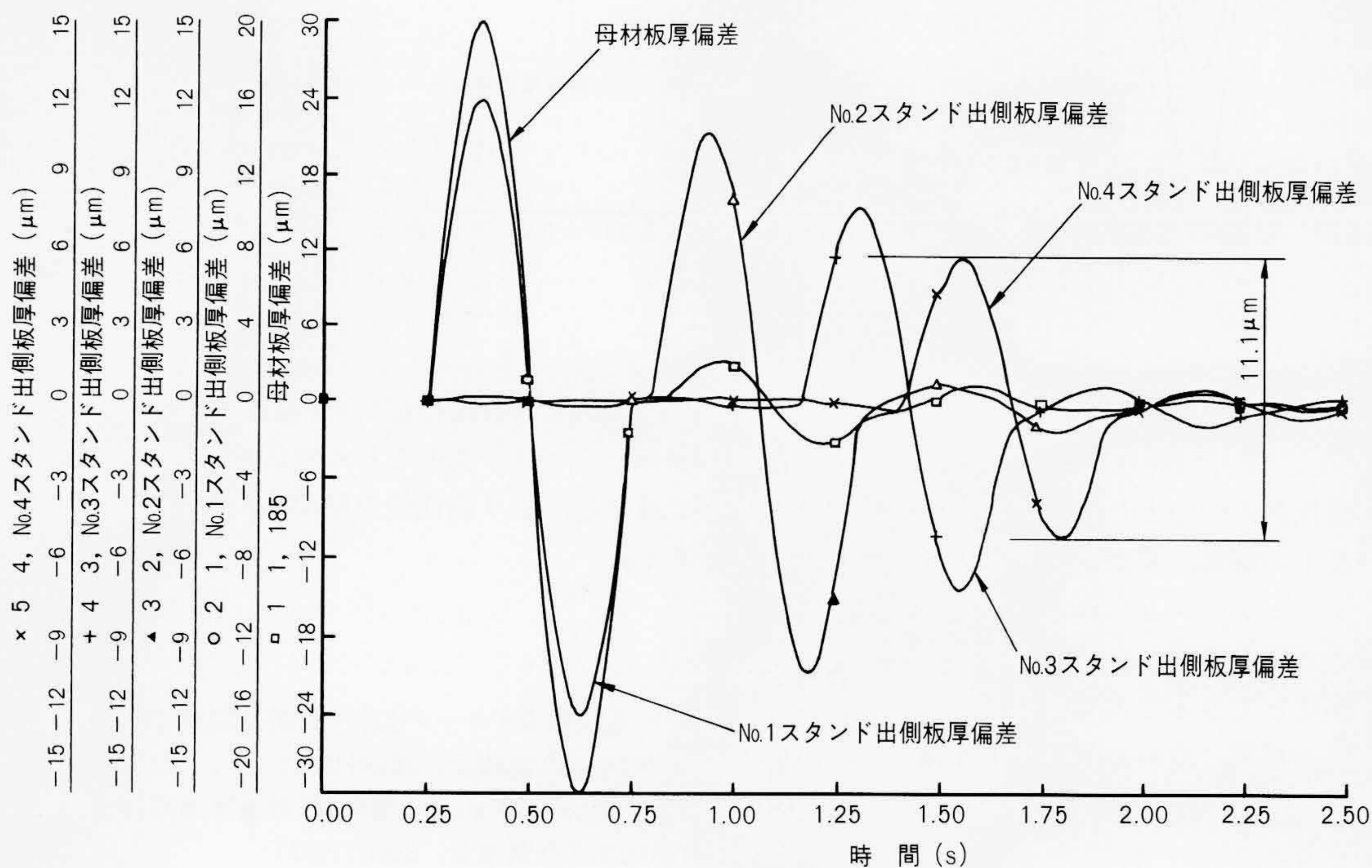


図6 ブロック化非干渉最適制御システム構成 最適ゲイン、非干渉ゲイン演算はセットアップ系、最適制御、非干渉制御はDDC系で行っている。



注：母材板厚偏差 (No.1スタンド入側板厚偏差)

図7 板厚制御なしの場合の出側板厚偏差(自然減衰) 母材板厚偏差60 μmが4スタンドの自然減衰で11.1 μmになることが分かる。

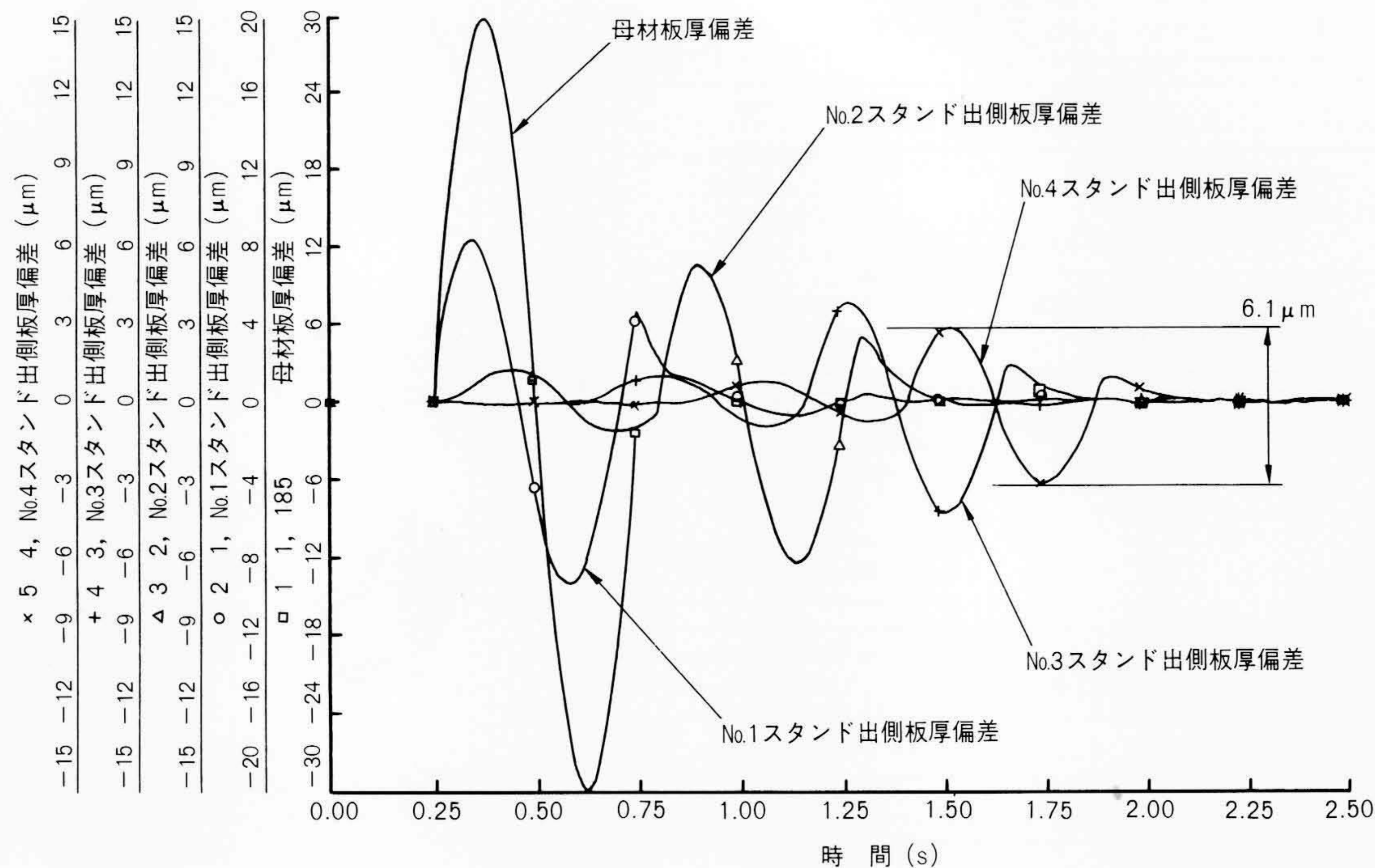


図8 従来制御を適用した場合の出側板厚偏差 従来制御によれば、No.1スタンダム出側板厚偏差は改善されているものの、スタンダム間の干渉により中間スタンダム(No.2, No.3スタンダム)で板厚変動が発生し、波形が乱れていることが分かる。

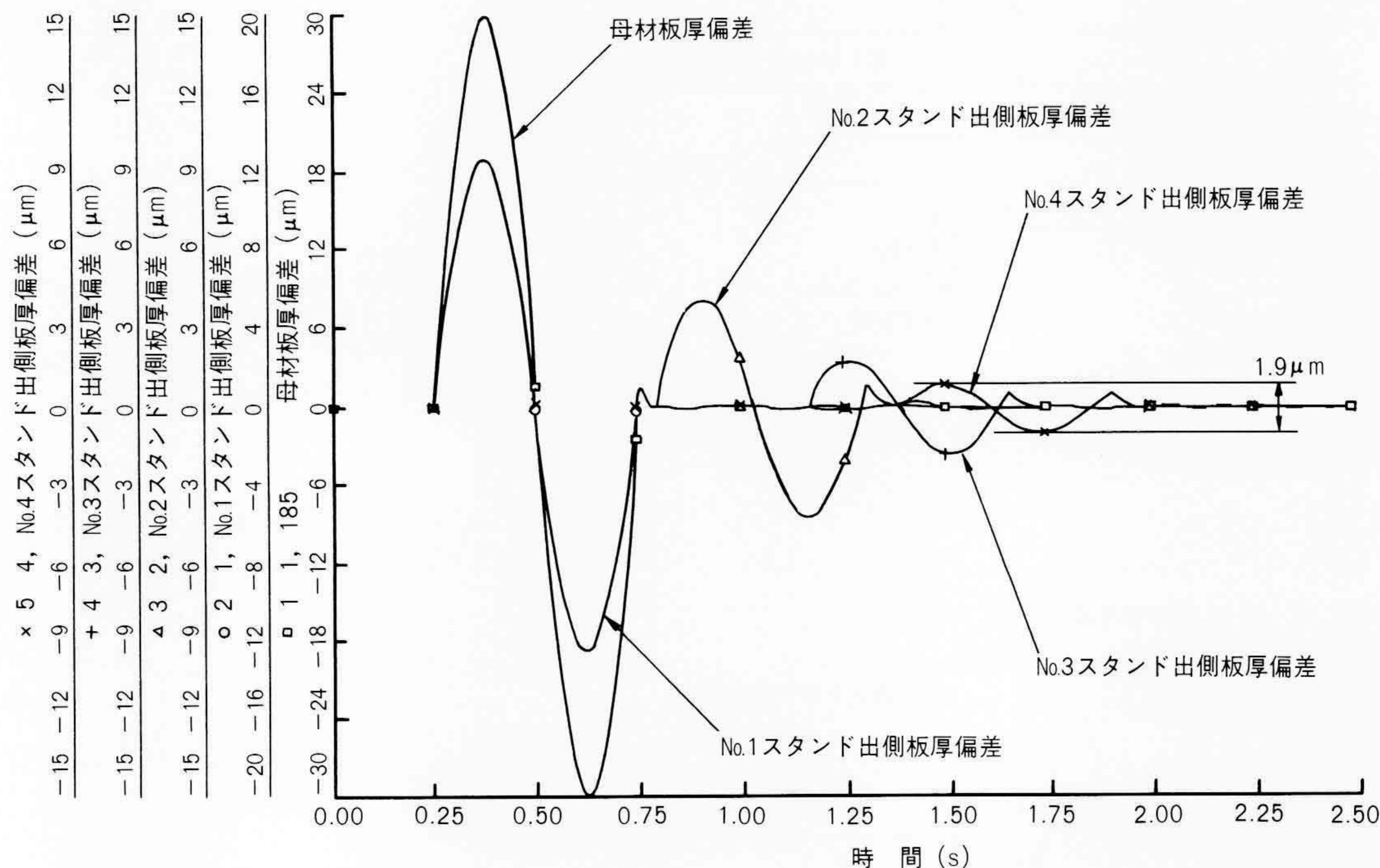


図9 ブロック化非干渉最適制御系を適用した場合の出側板厚偏差 スタンダム間非干渉制御によって、干渉による板厚変動が発生していないことが分かる。

6 結 言

以上、圧延プロセス制御の新技术の一つとして、ブロック化非干渉最適制御方式についてその概要、及びタンデム圧延機に適用した例を紹介した。シミュレーションによって本制御方式は従来制御に比べて性能が優れており、現状の平均的板厚精度 $\pm 0.8\%$ を半分の $\pm 0.4\%$ とできることを確認した。本制御方式によれば、制御対象の規模に合わせてベクトル演算器を用意することによって最適制御が可能となることから柔軟な制御システムが構成できる。

今後は本制御システムを更に広い分野に適用していくとともに、適応制御、ファジィ制御などの現代制御理論を圧延プロセス制御に適用し、より高性能な制御システムを構築していく考えである。

参考文献

- 1) 片山, 外: 圧延制御用ブロック化非干渉最適制御方式の開発, 第30回自動制御連合講演会, 3059(1987)
- 2) 服部, 外: 圧延制御用ブロック化非干渉最適制御方式の開発, 第30回自動制御連合講演会, 3060(1987)