

第3章

— 総論 —

自動制御

日立製作所における自動制御技術の開拓は遠く昭和のはじめにさかのぼるが、戦後世のすう勢に呼応して絶えず推進してきた制御技術のあゆみは、そのまま電機産業の発達歴史を象徴している。大形圧延機用7,000 HP イルグナ設備に急速制御方式を完成したのは昭和8年であるが、昭和十数年ごろにはガラス製格子付水銀整流器をいち早く電動機制御装置に組み込み、本格的なフィードバックコントロールを施した速度制御装置を製作している。戦後国内のあらゆる電気設備の復旧期に当たっても、新時代は制御技術が中心になることに着眼し、単なる復旧に終始することなく、時を同じくして海外から流入してきた制御技術の消化吸収にも努め、今日のオートメーション時代の先駆者としての役責を果たしてきた。現在国内の制御学会の代表的な存在である計測自動制御学会の前身は、自動制御懇談会として、大学研究グループ有志によって昭和22年ごろに発足されたが、初回より唯一の参加メーカーとして日立製作所が加わっていたことは、今では知る人の少ない事実であろう。ここに日立製作所の制御技術開発の回顧と将来の動向をさぐってみよう。

■ 制御用機器と技術開発のあゆみ

制御工学のあゆみと、制御用機器、要素の進歩とは密接な関係がある。特に増幅機器の発達、制御理論の具体化を促進し、新しい制御用機器の開発は制御理論の推進に自信と刺激を与えてきた。表1はおもな制御用機器の開発経過と、その時代の制御装置の概要をまとめたものである。真空管による信号処理技術は、初期の制御技術者に一つの可能性を提供してきたが、特殊分野への適用の域を出がたく、この趣旨が現実に広く活かされるようになったのは、一時代飛んでトランジスタの出現後である。この間に、実用面の要請に応ずるものとして、回転増幅機、磁気増幅器があらわれ、日立製作所でもHTダイナモを開発して、電気機械の本格的な自動制御に一時代を画した。

トランジスタならびにサイリスタの出現は、一挙に応答性能ならびにパワー処理の問題に解決を与えた。また電子計算機分野で発達した種々のハード技術が盛んに制御回路に応用されるようになった。

計算機制御技術は、制御システムにおける信号処理手段に無限の可能性をもたらし、新しいオートメーション時代をつくり出しつつある。日立製作所では、制御用計算機としてHICOM、CODALシリーズについてIC化高性能制御用計算機HITAC 7250

表1 制御用機器の開発と自動制御装置の進歩

年 度	おもな制御用機器の開発	自動制御装置の発展段階
1950	HTD (回転増幅機)	HTDにより制御される各種の回転電機制御装置が完成し、以後長くこの方式が継承されることになった。電子管式平衡計器、自動同期装置、ならい工作機など各方面に制御技術の実用化が始まった。
1955	磁気増幅器 分極形HTD、電子式自動平衡計器	
1960	空気式小形調節計	磁気増幅器の適用が盛んになり、水銀整流器式静止レオナードなど制御設備の静止器化が進められ、無接点、連続制御が強調された。アナログコンピュータの利用も活発になった。
	ヒタグロ (磁気論理素子)	
	全電子式調節計 データ処理装置	
1965	トランジログ (トランジスタ式論理素子) サイリスタ生産開始	無接点スイッチの応用から、デジタル式制御に着目されるようになった。
	マグオベ (磁気演算増幅器) メタローチスイッチ (近接スイッチ) APPS (サイリスタゲート制御器) HITAC 501, 502 (制御用計算機) シリコントランジログ、TRS演算増幅器 サイリスタ素子 (150 A—400 V) HICOM 2100, CODAL 1008 スキヤニングコントローラ サイリスタ素子 (250 A—1,200 V)	
1968	HICOM 2300 (制御用計算機) 薄膜IC素子 HITAC 7250 (大形制御用計算機) ユニットセルサイリスタ (400 A—2,500 V) HIDIC 100, 300 (小形制御用計算機)	トランジスタの実用化が開始されたが、適用はまず論理用であった。圧延機のカードプログラム制御、厚み制御、数値制御工作機、ボイラ自動燃焼制御など各方面にオートメーション化がはじまった。電力関係ではAFCやELDに対しアナログ計算機制御が適用された。
		アナログ、デジタル全面的にトランジスタが活用され、時を同じくしてサイリスタがパワー処理を担当するようになり、従来の制御装置は様相を一変するに至った。計算機制御も先駆的製品が出て来た。
		半導体装置のめざましい進歩、応用が進んでいる。大規模複雑、小規模精密な両面に本格的な計算機制御時代に進んでいる。 制御用計算機ファミリー完成。

および HIDIC 100, 300 のファミリーを完成し、計算機制御技術の普及、浸透を図っている。

サーボシステムの解析、設計にアナログ計算機は不可欠の道具となっているが、日立製作所はいち早くこれの開発に着手し、自社業務に活用する一方、最先端をいくアナログ計算機を内外各方面に提供してきた。最近では全デジタルによる動的システムのシミュレーション言語 (Digital Dynamic Simulator) の開発を終わり、各種制御システムの構成、設計に威力を発揮している。

現在制御用機器としては、サイリスタの大形化、集積回路による小形化、高信頼化が着々と進展中であり、コンピュータに代表される信号処理系の高密度化によって、制御範囲が拡大するとともに、精密なコントローラの普及、浸透は、とどまるところを知らない勢いで進んでいる。

以下各種産業分野の、自動制御設備の回顧と展望について述べることにする。

■ 電力系統および発電所制御装置

電力系統

電力系統における制御の自動化は、比較的早く、1954年に四国電力株式会社松尾川発電所に、わが国初の AFC (自動周波数制御装置) を納入したのをはじめとし、その後、中央制御方式の普及につれて、各電力会社にあいついで納入して、電力の安定供給に大きく貢献している。ELD (経済負荷配合装置) としては、1962年わが国で初めて水火併用系統用のハイブリッド形計算装置を開発し、関西電力株式会社、東北電力株式会社へ納入した。その後、1967年には、HITAC 8300 による自動給電制御システムを関西電力株式会社へ、次いで、1968年9月には、HITAC 7250 による負荷制御システムを中国電力株式会社へ納入した。これらは、いずれも既納の AFC と協調して、系統運用の合理化と、より高度の経済運用の効果をねらいとしている。将来は、これに加えて、電圧一無効電力制御、系統自動操作の計算機制御化をすすめる、より高度な自動給電システムの完成をめざしている。これらの研究用設備として、電力中央研究所納、系統シミュレータ (HITAC 7250) が7月中旬運転を開始した。ALR (自動負荷調整装置) も火力発電所で多数使用され、系統制御の自動化に大きな役割を果たしている。

発電所関係の制御装置

水力ならびに火力発電所関係の主な自動制御の変遷を表2に示した。1956年磁気増幅器式電気ガバナーを開発し、その後トランジスタ式に切替えられ、いずれも数十台製作している。1950年真空管式自動同期化装置を開発し、以後これもトランジスタ式に進みすでに40台以上が稼働している。

ボイラの制御装置に関しては、1962年に全電子式制御装置を完成し、また近年自動バーナ制御装置を開発した。タービン発電機の起動、予熱、加速時には広範囲の速度制御を円滑に行なう必要があるが、このため、1966年には広範囲の自動速度制御装置を開発し、日本国有鉄道川崎発電所をはじめ多数納入している。

同期発電機の励磁制御装置としては、1950年HTD (回転増幅機) 式 AVR を開発している。その後1957年には磁気増幅器式が開発されたが、サイリスタ励磁方式が1967年実用されて以来、小形高性能、低価格などから、急速に需要が伸び、すでに20台納入、20台以上が製作中である。なお整流器を主機に内蔵したブラシレス方式を1966年開発し、ふんい気の悪い発電所など適用される例が増している。

火力発電所の計算機制御は大規模なデータロギングを基本とし

表2 発電所の自動制御装置の変遷

	1956	1960	1965
水力発電	電気ガバナー	速応性磁気増幅器式	トランジスタ式
	揚水発電所制御装置	低減電圧起動方式	同期始動式 直結IM式
電力所	水位調整	1954 リレー式 (オンオフ制御)	サイリスタ式 (連続比例)
	同期化装置	1950 真空管式	トランジスタ式
火力発電所	ボイラ	1955 自動燃焼制御 (空気式)	自動燃焼制御 (電子式) バーナ制御
	タービン	機械式ガバナー	電気式ガバナー 加速制御
水力、火力両用	励磁制御装置	1950 リレー式 (抵抗器式) 磁気増幅器式	HTD式 複巻自動式 サイリスタ式 ブラシレス式

表3 電子計算機納入火力発電所一覧表

No.	発電所名	ユニットNo.	会社名	電算機形式	対象ユニット数	機能					納入年
						a	b	c	d	e	
1	滝川	1	北海道電力	HITAC501B	1	○	○	○			1962
2	滝川	3	北海道電力	HITAC501B	1	○	○	○			1962
3	新江別	1	北海道電力	HITAC501C	1	○	○	○			1963
4	仙台	3	東北電力	HITAC501B	1	○	○	○			1963
5	新潟	2	東北電力	CODAL1018	1	○	○	○			1964
6	新江別	3	北海道電力	HITAC501C	1	○	○	○			1965
7	水島	1	中国電力	CODAL1008	1	○	○				1966
8	堺港	5, 6	関西電力	HITAC7250	2	○	○	○	○		1968
9	新徳島	2	四国電力	CODAL1008	1	○	○	○	○	○	1969
10	海南	1, 2	関西電力	HITAC7250	2	○	○	○	○	○	1970
11	新西条	2	四国電力	HIDIC300	1	○	○	○	○	○	1970
12	秋田	1	東北電力	HITAC7250	1	○	○	○	○	○	1970

記号説明 a: 日誌作表 b: 走査および警報 c: 性能計算
d: 傾向記録 e: 部分自動化またはモニタ

て段階的に進展している。表3は電子計算機納入発電所の一覧表である。最近完成した堺港発電所納性能監視システムは広範なデータロギングを行ないながら、定期的に高精度の性能計算を行なうことで、運転管理の機械化と高効率運転の指標を運転員に示すことを目的としている。

今後の動向

水力発電所の建設地点は今後もますます辺りな山奥にうつるため、大容量のものでも、無人化、遠方制御となる傾向がある。また水系あるいは電力系統単位の集中制御を行なう傾向が強まり、新設発電所だけでなく、既設発電所においても信頼性の高い自動制御装置が要求されてくる。近年、揚水式発電所が増しているが、この種の発電所は短時間に系統を乱すことなく入切りする必要があるため、起動、停止装置にさらに高度な特性が要求される。今後火主水従の電力系統に対し、火力発電所の機能はますますその重要性を増し、高級な運転要員確保の問題にからんで、省力化、無人化火力の開発も急務である。外国技術の導入によりスタートした原子力プラントの当面の急務は、これらをいかに消化し国産

表4 サイリスタ装置納入例

御 納 先	年度	仕 様		用 途, ほ か
		kW	V	
富士製鉄(名古屋)	1964	380	220	2タンデムスキンパスミル DCG励磁用
日立電線(土浦)	1965	250	440	4Hコールドミル 220kW 主ロール用
日本鋼管(福山)	1965	2,565	380	ユニバーサル分塊ミル 励磁用, 補機用延出力
スカイアルミニウム	1966	2,900	750	熱間仕上ミル 1,300kW×2 主ロール用
スカイアルミニウム	1966	2,500	750	コールドミル 2,250kW 主ロール用
富士製鉄(名古屋)	1967	9,000	750	4Hスキンパスミル 主回路用延出力
神戸製鋼(長府)	1967	2,500	750	熱間粗ミル 主ロール用, 界磁逆転方式
川崎製鉄(葦合)	1968	15,900	750	センジマーミル 主回路用延出力
日新製鋼(堺)	1968	18,000	750	2タンデムコールドミル 全設備延出力
八幡製鉄(君津)	1968	約 110,000	750	5タンデムコールドミル 全設備延出力
某 社	1968	約 190,000	750	ホットストリップミル 全設備延出力

1968年3月現在総kW(含製作中)457,715kW

化するかにあるが、エネルギー革命の将来に向かって、原子力発電所にも定常的制御はもちろん、ピークロード運転に備えての各種制御装置の開発研究に着手すべき時期にきている。

■ 各種工業設備の自動制御装置

前述のように、自動制御装置の発達は制御用増幅素子の発展とともに前進しており、その典型的なものはレオナード制御装置の進歩で、圧延機、巻上機、抄紙機などに広く応用されてきた。

レオナード制御装置の発展

HTDは1949年開発に着手、1951年八幡製鉄株式会社納4,000kW鋼塊圧延機用イルグナ設備を皮切りに、圧延機、巻上機、抄紙機などのレオナード設備に広く採用された。1955年400Hz高性能磁気増幅器のシリーズが完成し、HTDに代わり、川崎製鉄株式会社納タンデムコールドミルでは5kWの大形磁気増幅器が採用され、高い制御性能を得ている。

1960年サイリスタの生産に着手したが、頭初16A 200V級の素子から、最近では400A—2,500V素子まで量産されている。その応用は、TOA(トランジスタ演算増幅器)の実用化とともに盛んとなり、1965年日立電線株式会社に冷間可逆圧延機のサイリスタレオナード設備納入を皮切りに大形プラントへ採用され、今日ではすでにその全盛時代に突入している。おもなサイリスタ装置の製作例を示したものが表4である。

圧延設備の自動運転装置

分塊ミルのプログラム運転はトランジログにより構成され、1960年東都製鋼株式会社納分塊ミルをはじめ、多くの設備に採用された。1966年日本鋼管株式会社納分塊ミルにはマニプレーションの自動運転装置を納入し、好成績を得ている。

プリセット運転装置は1967年住友金属工業株式会社和歌山製鉄所にホットストリップミル用を納入以来、多くの設備を製作した。

自動板厚制御装置(AGC)としてはコールドリパスミル用として1960年真空管式を開発し、1963年MOA(磁気演算増幅器)式を、1967年にはTOA(トランジスタ演算増幅器)式をそれぞれ開発し納入している。その後コールドならびにホットタンデムミ

表5 各種産業設備の自動制御装置(初回の製品)

年度	製 品 名	用 途, そ の 他
1951	HTD 制御レオナード巻上機	250kW 日 炭 遠 賀 納
1954	5,500mm クラッチ盤	ならい 制御方式 工作機
1955	2色グラビヤ輪転機	テンション制御, オートペースタ付
1958	交流巻上機	300kW, 低周波制御, 同和花岡納
	バランス形6段圧縮機	1,150kW, ガス組成調節付
1960	全自動レオナード巻上機	800kW, 同和棚原納
1961	10,000Hm ³ /h TOプラント	全電子式工計制御
	数値制御複合工作機	HIDAM 403形
1963	IM1次リアクトル制御クレン	可飽和リアクトル制御
1964	水道ポンプ用クレーマ設備	6,200kW, 流量一定制御, 東京都納
	IM1次サイリスタ制御アンローダ	関 電 尼 東 納
1965	水道配水ポンプ設備	65kW サイリスタセルビウス方式, 青森市納
	数値制御工作機	HIDAM 8060形(現7060形)
1966	熱調用圧縮機	ガスコロリー検出により空気圧自動調節
1967	数値制御工作機	HIDAM 7030形
	水道取水ポンプ設備	2,100kW サイリスタセルビウス方式, 大阪市納
1968	サイリスタレオナード150T/H アンローダ	自動運転装置, 振れ止制御
	精密速度制御付セルビウス装置	精度0.02%アナログ—デジタルASR.

表6 制御用計算機関係製品一覧表(除電力関係)

年 度	特 記 事 項
1962	日産自動車納 ファクトロール生産指示装置
1964	制御用計算機 HICOM 2100 開発 東海製鉄納 転炉計算機制御装置
1965	トランジスタ特性自動測定装置
1966	制御用計算機 HICOM 2300 および周辺機器開発 長崎放送納 自動放送送出装置 日本鋼管納 分塊データ処理装置 十条製紙納 デジタル速度制御装置
1967	制御用計算機 HITAC 7250 および周辺機器完成 八幡製鉄納 分塊工場計算機制御装置 住友金属納 ホットストリップスプレー制御装置
1968	大容量(300Kワード)フローティングヘッド磁気ドラム 記憶装置完成 住友金属納 熱延計算機制御装置 某社納 石油精製プラント計算機制御装置

ル用AGCを八幡製鉄株式会社ならびに住友金属工業株式会社に納入した。そのほか、伸び率制御装置、無接触形A-Dコンバータ式位置決め装置、入力側コイルハンドリングの自動化、自動通板、コイル定位置停止装置などを開発し、各処に納入している。

各種産業設備の自動制御装置

巻上機、抄紙機、クレーン、ポンプ、印刷機、工作機その他各種の電動力応用装置においても、前述のような種々の制御機器、制御方式がとり入れられ、さらに各分野独特の新技术が開発されている。各分野における記録的製品をまとめたのが表5である。

この分野の一つの特長に誘導電動機の制御応用がある。交流巻上機に用いられる低周波制御、クレーンなどのリアクトル制御、一次サイリスタ制御などがあり、近年クレーマ方式、セルビウス方式などにサイリスタを導入した静止二次励磁方式が水道用ポンプに賞用されている。速度制御機能を生かして、流量一定制御、末端圧一定制御、流量プログラム制御、水位一定制御などが適宜用いられている。

また近年油圧制御技術は新しい進展をみせ、工作機におけるサーボ装置、産業車両の自動変速装置、建設機械や大形荷役機械などに適用されて、独特の長所を発揮している。

工業計器の発展

われわれは戦前ボイラ(火力発電)や石油精製(陸海軍燃料)に自社開発による空気圧式調節装置を使用した計装を行っていた。戦後数年間生産を中断したが今日では、Oリングシール差圧伝送器を初めとして、全電子式では直流電源方式を確立し、トラ

ンジスタチョップを導入して完全ソリッドステート化した。さらに伝送器群ではストレンゲージを変位—電気変換器に使用した独自のものを発表(1963年)するに至った。

最近では計算機からのパルス列で設定できる全電子式調節計、プロセスガスクロマトグラフの開発など計算機制御時代に備えている。

各種工業設備における計算機制御

制御用計算機適用の一面は前記諸制御装置に自動的にかつ適応的に制御目標および制御パラメータを与えることであり、有効なシステム実現のためには数式モデルの研究開発が大きなウェイトを占める。ほかの面は膨大な情報の処理と記憶とであって、実用化に至るには現場の実情、要求のち密な検討が必要である。この関係の製作年譜を表6に示した。

製鉄関係では、製鋼、圧延からプロセッシングラインなどの各工程に計算機制御が続々と入れられつつあり、自動車工業その他の製造工業においても、生産管理から御制へと進んでいる。計算機制御の導入は化学プロセス関係においても盛んであり比較的計装ベースに近いレベルへの導入から、石油精製への応用におけるように最適化制御のレベルに至る広い範囲にわたり導入が進められている。

一方、数値制御工作機は独自の進歩発展を遂げており、HIDAMシリーズはこの結晶である。自由曲面の処理に重点を置いた3次元プログラムの開発も進んでいる。

将来の展望

電動機の制御用出力素子としてはサイリスタが今後ますます広範囲に使用されてゆき、その制御素子として集積回路化が進むであろう。論理素子やデジタル制御装置はすでにIC化されつつある。

コンピュータ制御はここでも測りしれない可能性を秘めている。ハイアラキシステムにより、大は事業所の全工程管理システムに進む一方、高密度化により小形でも、高度の機能を備えた単能計算機が設備のすみずみまで行きわたるであろう。

交通機関の自動制御

自動制御の技術は、車両、エレベータの近代化、保安度の向上のために近年急速に取り入れられ、発展著しいものがある。表7および表8は車両およびエレベータの自動制御関係の特筆すべき製品を示すものである。

車両関係

車両関係では電気車やディーゼル車の制御にはもちろんのこと、自動列車制御装置(ATC)、列車自動運転装置(ATO)、自動列車停止装置(ATS)などに自動制御技術を適用し、好成績をおさめており、ATC、ATO、ATSのみでも年間数百台の完成をみるまでになっている。

今後さらに、車両業界は経営効率の向上を目標の頂点として、運転効率向上のための自動運転、高度な運転技術に代わる自動運転、あるいは、さらに高速化する車両の保安装置など、自動制御技術の進歩が要求せられ、その適用拡大が図られて行くであろう。

エレベータ関係

エレベータ関係では、速度制御はもちろん運転方式を決定する信号回路や安全装置などに、広く自動制御技術が適用されている。

エレベータは交通需要が激しくその応答は秒オーダーであり、この間に迅速でなめらかな加減速特性はもちろん、着床性能も数mm程度の高い精度が要求されている。特に最近では超高層ビルも増加の傾向にあり、エレベータは高速、高行程化し、制御機器

表7 車両における自動制御関係の進歩

年度	特 記 事 項
1960	名古屋市交通局地下鉄でわが国初めての自動運転に成功
1961	日本国有鉄道 東海道新幹線電車で自動列車制御装置納入 日本国有鉄道 試作 TASC 101 形自動列車定位置停車装置納入
1962	東武鉄道 地下乗り入れ車用自動列車制御装置量産 名古屋鉄道 犬山モノレール用自動列車停止装置完成 日本国有鉄道 試作 定速自動運転装置(PID制御式)納入 日本国有鉄道 試作 車上プログラム式自動運転装置納入
1963	日本国有鉄道 東海道新幹線電車で自動列車制御装置量産 名古屋鉄道 犬山モノレール用自動列車運転装置完成
1964	東京モノレール 信号保安システム納入
1965	日本国有鉄道 試作 自動列車間隔制御装置納入 日本国有鉄道 試作 定速自動運転装置(P制御式)納入 日本国有鉄道 試作 TASC 102 形自動列車定位置停車装置納入
1966	名古屋市交通局 地下鉄用自動列車制御装置量産 日本国有鉄道 試作 TASC 103 形自動列車定位置停車装置納入
1967	私鉄(東武、西武、京王、相模、近鉄)向け自動列車停止装置大量生産 大阪ガス 産業車両の無線操縦による自動運転装置製作 日本国有鉄道 入換機用自動運転装置完成
1968	日本国有鉄道 山陽新幹線電車で自動運転、制御装置完成 日本国有鉄道 試作 新形自動列車停止装置納入

表8 エレベータにおける自動制御関係の進歩

年度	特 記 事 項
1955	直流可変電圧制御直流エレベータ(TV形 90m/min)完成 負荷電流帰還制御直流エレベータ(FV形 150 m/min)完成
1956	全自動並列運転方式(Duplex Collective Control)
1958	全自動群管理運転方式(Multiplex Collective Control)
1960	FV形 240 m/min 直流エレベータ完成 Autogram Traffic Pattern System の開発
1962	無接点制御交流エレベータ完成、エレクトロボタン(タッチ式の押しボタン) Computomatic Traffic Programing System の開発
1963	エレクトロドアセフティ(無接触形ドア安全装置)
1964	逆起電力帰還制御直流エレベータ(AV形 150 m/min)
1965	停電時最寄階自動着床方式
1966	サイリスタ式ドア制御装置, Traffic Follow Door Control 方式完成
1967	ステップレス制御形エレベータの開発 超高層ビル用非常および消防運転方式開発
1968	AV形 300 m/min エレベータ完成(霞が関ビル納)

の高信頼性、小形軽量化、安全性、さらにエレベータ群の全自動群管理技術などきわめて高度な技術を必要とする。霞が関ビル納国内最高速度 300 m/min エレベータはビルの主要交通機関としての安全性と快適な乗心地に対して好評を博している。

結 言

今日自動制御技術はほとんどあらゆる工学分野に欠くことのできない基本技術となっている。ここでは製品別に代表的なものの展望を試みたが、これを横にながめるときは全般に通じる制御理論、基本的制御技術がある。われらは基本的課題に対する不断の研さんに努め、新製品にそれを具現して行くことを最大の任務と考え、日夜懸命の努力を重ねている。

本誌に採録した制御関係3編の論文は、最近の成果の一端を述べたものである。「分岐合流システム」は、生産プロセスに今後ますます広く適用されるべき計算機制御システムに新しいバックボーンを提供する理論である。「工業用電子計算機とその応用」については、本文にも再三述べたように、計算機制御時代に備えるわれわれのウォーミングアップをみていただきたい。「最近の圧延機の自動制御」は、電気設備の最近の自動制御技術を紹介する代表者として選んだものである。将来とも電気機械制御の主軸を形成すると思われるサイリスタを中心とする半導体装置の活躍に着目していただきたい。

最近の圧延設備の自動制御

Automatic Control of the Recent Rolling Mill Plant

前川 敏 明*
Toshiaki Maekawa

要 旨

圧延設備の制御装置で最近めざましい発展をみせているものは、次の3項目にまとめられる。第1はサイリスタレオナードの全面的進出である。4種の主回路方式について、その制御系とそれぞれの特長を述べた。第2は自動運転に関するものである。新たな設備計画ごとに新しい装置が意欲的にとり入れられているが、ここではマニプレーションと自動通板について説明した。第3は計算機制御の実用化である。代表的な分塊、ホット、コールドタンデムなどで計算機に何をやらせているかを紹介した。

1. 緒 言

圧延設備と自動制御技術の関係は古くかつ深い、近年まで本質的には圧延機というよりもむしろ、圧延機用電動機の自動制御が主であった。厚み制御があらわれ、カードプログラム制御が開発されるようになって、圧延機そのものがはじめて自動制御系の一構成要員となってきたといえる。

最近の圧延設備の制御でめざましい発展をみせているものを分類すると、次の3項目にまとめられる。第1は、サイリスタレオナードの全面的進出であり、第2は各種の運転作業の自動化、第3は計算機制御の実用化である。

2. 圧延機用電動機のサイリスタ制御

2.1 圧延機駆動用電動機の可逆制御方式

分塊圧延機、厚板圧延機、熱間仕上げ圧延機、冷間圧延機などの主ロール、立てロール、テーブル、圧下などの各電動機は可逆運転されることが多い。このための制御方式を主回路構成の面から大別すると電機子切換制御と界磁切換制御になる。さらに、切換用機器で分類すると単基サイリスタによる切換方式と2基のサイリスタによる切換方式になる。前者は切換時間が大きい、それが問題になる可逆制御にはもっぱら2基のサイリスタを用いた切換方式が用いられる。図1は代表的な圧延電動機用サイリスタ装置の写真である。

2.2 電機子切換制御

可逆静止レオナード制御では電機子切換制御が主流である。逆並列接続されたサイリスタ変換器回路に常時小電流を循環させておく

循環電流方式と循環電流を流さない無循環電流方式がある。後者は前者の欠点である設備容量、定常損失の増加は改善できるが、切換死時間が問題となる。この死時間の問題を解決するため、トランジスタ演算増幅器、トランジスタ切換論理素子を用いた図2の制御方式を開発し使用している。切換死時間は数ミリ秒にすることができる。この時間は電動機側からはほとんど無視できる時間である。

2.3 界磁切換制御

電機子切換えに比べ界磁切換えのほうが変換器が小容量ですむので経済的に有利である。ただし、切換時間が界磁時定数のため大となる。しかし、最近トランジスタ演算増幅器の採用と直流機のラミネート構造の製造技術の向上から、切換死時間が0.1~0.2秒程度にできるようになり熱間厚板圧延機駆動などに界磁切換制御が採用されるようになってきている。

2.4 2セット直列接続サイリスタ変換器による制御

数千kW級の駆動設備には2電機子形モータが用いられるが、この場合、直流電動機およびサイリスタ変換器を2セットずつ交互に直列接続した主回路構成がとられる。このようにすると電動機の負荷平衡が保たれ、サイリスタ変換器および直流電動機1セット当たりの電圧は1/2ですみ、3相電源位相差を30度にするにより12相効果を出すことができる。

2セット直列接続サイリスタ静止レオナード装置の主回路は図3(a)のように構成される。これら各サイリスタ変換器の出力電圧 E_1 および E_2 を同図(b)のように変化させると合成出力電圧 E_0 を得、力率特性は同図(c)になる。このように低出力電圧時の無効電力を減少することができる。

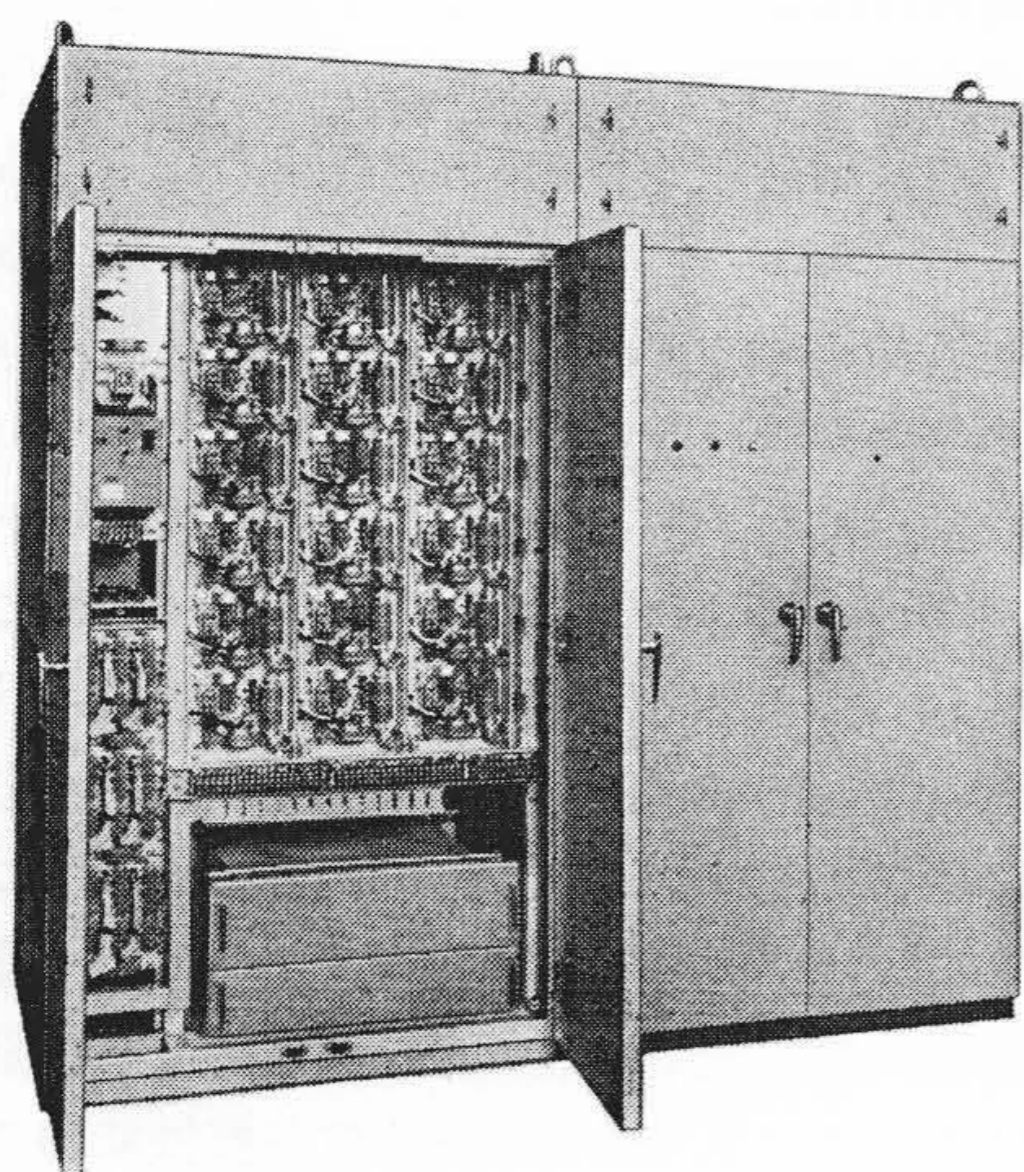
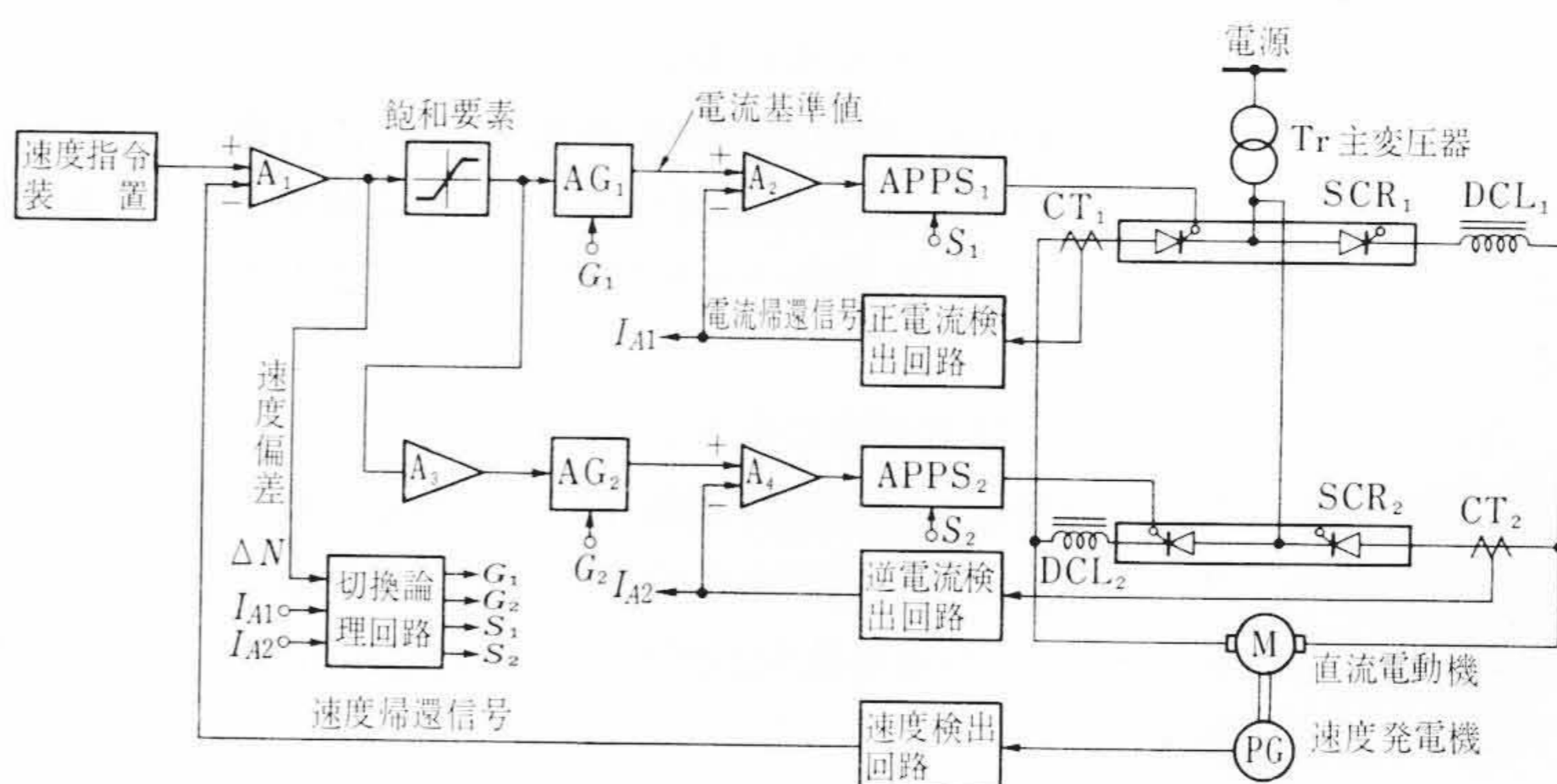


図1 圧延電動機用サイリスタ装置



注： A₁~A₄ : トランジスタ演算増幅器 DCL₁, DCL₂ : 直流リアクタ
AG₁, AG₂ : アナログ・ゲート CT₁, CT₂ : 直流変流器
APPS₁, APPS₂ : 自動パルス移相器 G₁, G₂ : アナログ・ゲート信号
SCR₁, SCR₂ : サイリスタ変換器 S₁, S₂ : ゲート・パルス遮断信号

図2 無循環電流方式可逆静止レオナード制御装置

* 日立製作所日立研究所 工学博士

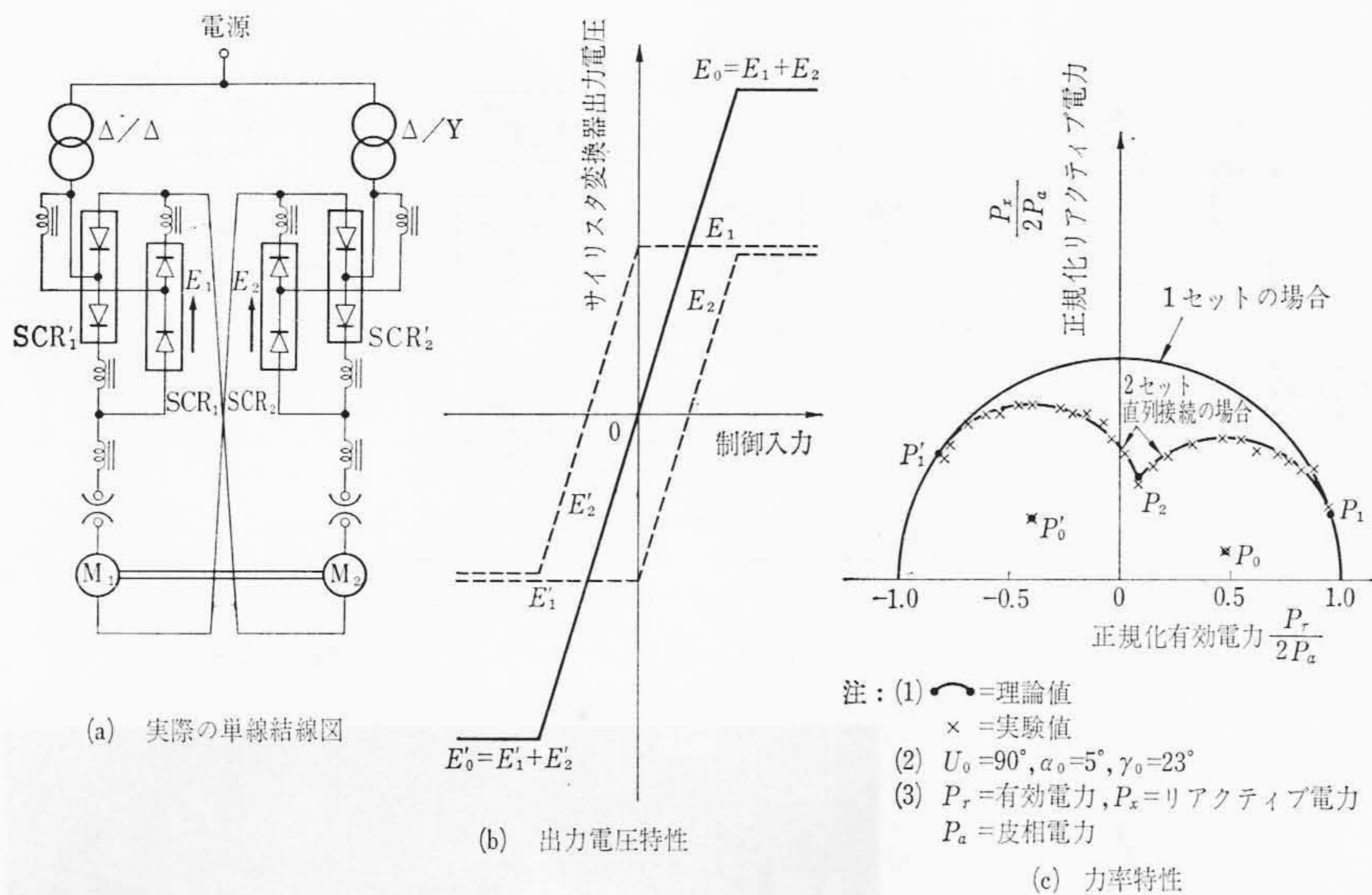
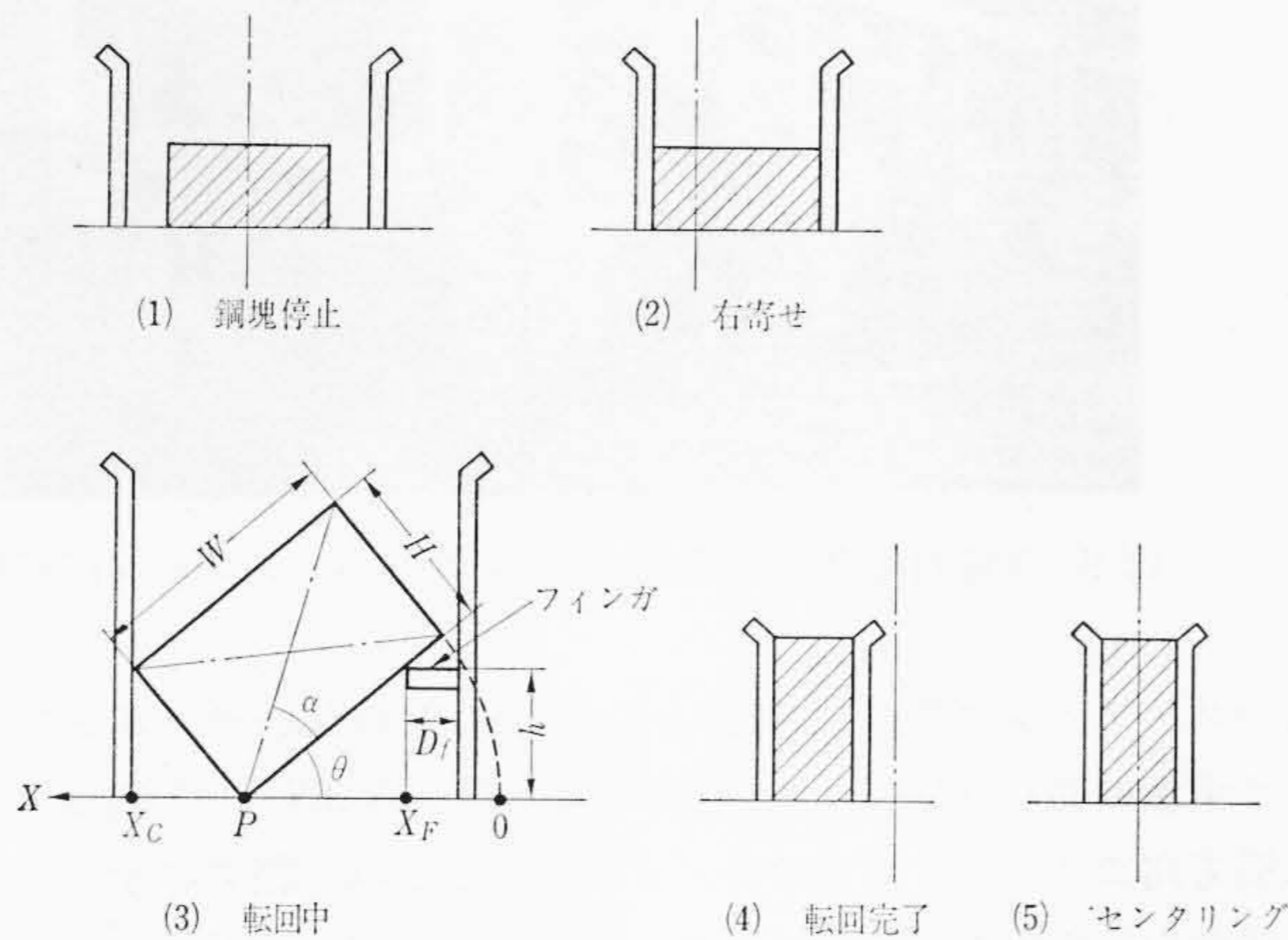


図3 2セット直列接続サイリスタ静止レオナード制御



2.5 誘導電動機の制御

誘導電動機の圧延機への応用に関していえば、誘導電動機は速度制御の必要のない部分に使用されているにすぎないが、半導体を応用した新しい制御方式の発展に伴って、多くの電動機の揃速制御が必要なホット・ラン・テーブルの運転、あるいは高速から微低速に減速して位置決めを行なうサイドガイドの制御などには、誘導電動機の変周波数制御が実用化される気運にある。さらに、圧延機の主電動機の制御に関しても、線材ミルの運転に、誘導電動機の二次励磁方式を適用する場合の問題点が検討されている。

近い将来、誘導電動機の制御技術の発達、制御性能の向上によって、誘導電動機が圧延機の制御に広く普及していくものと考えられる。

3. 圧延設備の自動運転装置

前章に述べたように、圧延機用電動機の自動制御は、全面的なサイリスタの活用により、主機、補機ともに、往時に比べると、その進歩には隔世の感がある。しかし、これらは、「圧延機の制御」というよりも、むしろ「電動機の制御」というべき範ちゅうにとどまるものと言える。しかし、自動厚み制御(AGC)、カードプログラム制御(CPC)などは、すでに相当使われているが、そのほか、圧延工場では多くの作業が、運転員の経験(勘)と労力にたよる部分が多いのが現状である。

近年、人員不足と、生産性増強の要請から、圧延機の運転作業を自動化しようとする意向が強く、新設備計画ごとに、新しい装置が

意欲的にとり入れられている。

自動運転の要望は、種々考えられるが、具体化のために必要な技術は多様である。ロール交換、コイルハンドリングなど、まず、機構的問題の解決だけでも、相当なメリットが期待されるが、自動化のためには、特殊な検出器を要するものが多い。人間の五感に相当し、定量検出できるものがそろえば強力である。

以下、最近の代表的な装置を一、二略述する。

3.1 熱間可逆ミル用自動運転装置(APC)

(特許申請中)

最近の装置には、マニプレータ操作までを含めた全自動化と、計算機能を備え、考える力を持ったAPCが出現している。

(1) マニプレータの自動化

インゴット転回操作を含む全自動運転装置の開発には、まず、転回操作の分析が必要であった。転回動作を 図4 について略述するに、まず鋼塊が後面テーブルで停止したところから操作が始まり、右寄せ→フィンガ上昇→転回完了→センタリングで90度転回を終わる。このフィンガ上昇転回中、フィンガの運動軌跡が支点Pに対し、円周上にあれば、P点の横スベリを生じないことが、摩擦係数そのほかの現場データを用いた力学的解析により明らかにされている。

そこで、自動装置としては、フィンガ、右、左サイドガイドの協調動作を幾何学的に求め、ハードウェア化している。図4(3)において、この協調動作式は、

$$\dot{X}_F : \dot{X}_C : \dot{h} = \dot{h} \tan \theta : \dot{h} \frac{H}{W - D_f} : \dot{h}$$

で、あらわされる。すなわち、右サイドガイド(\dot{X}_F)、左サイドガイド(\dot{X}_C)、フィンガ高さ(\dot{h})の移動速度の間に上式の関係をもたせれば、鋼塊はPを接点として転回できる。これをハード化した協調制御装置をブロック図として示したのが図5である。これは、すべてトランジスタ演算増幅器で構成される。これには、省略したが転回完了信号回路、大幅誤差補正回路などを付加して、制御の万全を期してある。

本装置はプログラム制御装置の中に組み込まれて、関連したシーケンス動作とともに働いている。転回動作時間の実測結果の一例は、表1に示すとおりである。

(2) 計算機制御自動運転装置

APCに演算機能を持たせるメリットは、スケジュール計算をオンラインデータに準拠して、その都度、最適のスケジュールを算出しながら圧延する点にあるが、そのほか高度の状況判断機能を生かして、圧延機各部の操作機構を先行スタートさせたり、decision table 法により、自動操作の合理性をチェックしつつ、運転の万全を期しうる点にある。

分塊工場全体が、管理制御計算機で運転されているときには、その中にミル運転関係のタスクを組み込むこともでき、大形制御用計算機 HITAC 7250 システムでこれを実行している。一般に、APC専用制御システムを用いれば、運用面で機動性が高く、従来のAPCの規模で相当の機能向上ができる。

図6はその構成の一例を示したものであるが、小形制御用計算機、HIDIC シリーズがこれに適している。一般に制御用計算機は、同時処理可能とはいいながら、本質的には、タイムシェアリングによるシリアルな処理を本旨とするものである。ミル運転操作には、同時性を要求する部分が多いので、すべてをプログラム

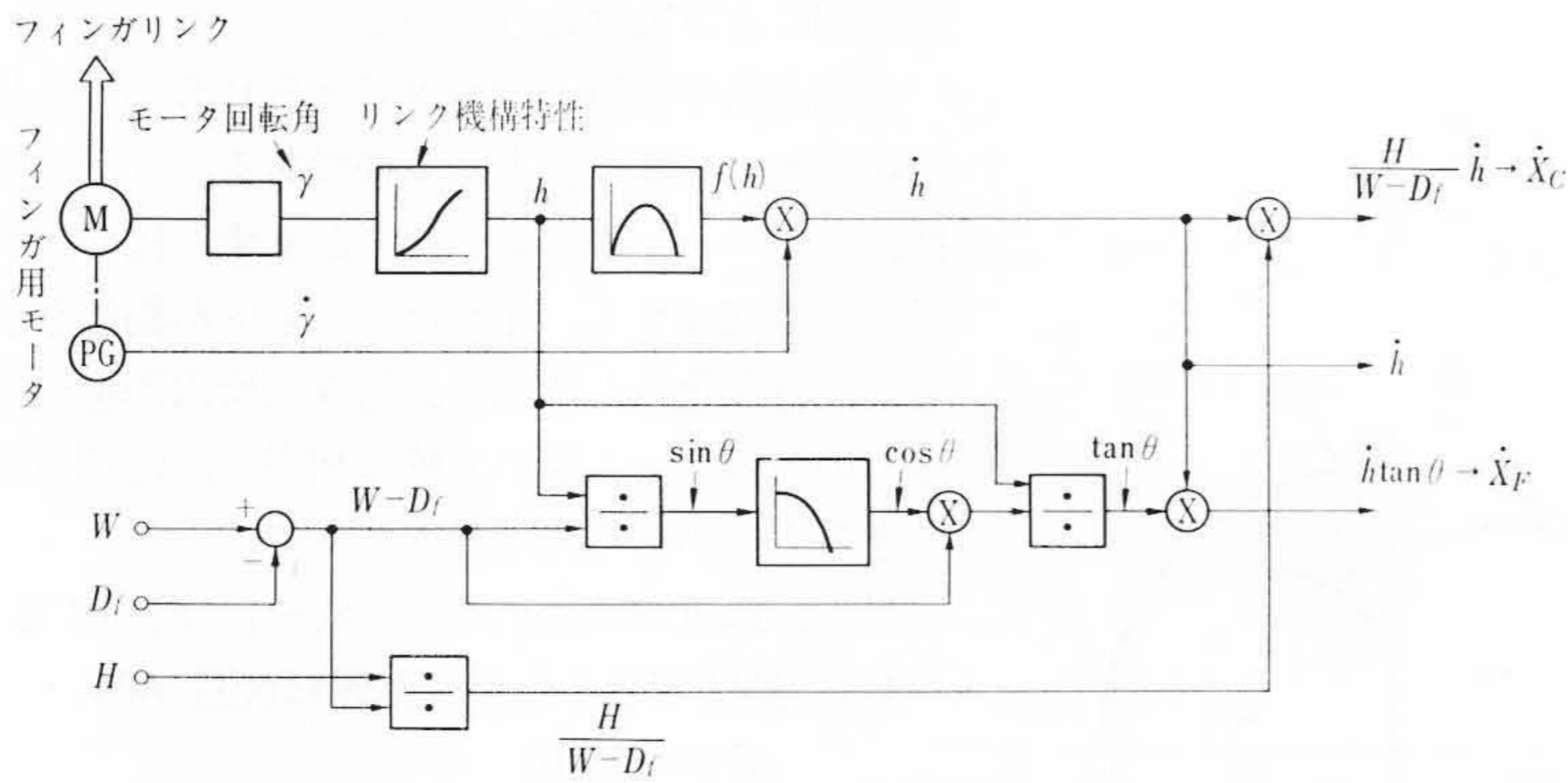


図5 速度協調制御回路ブロック線図

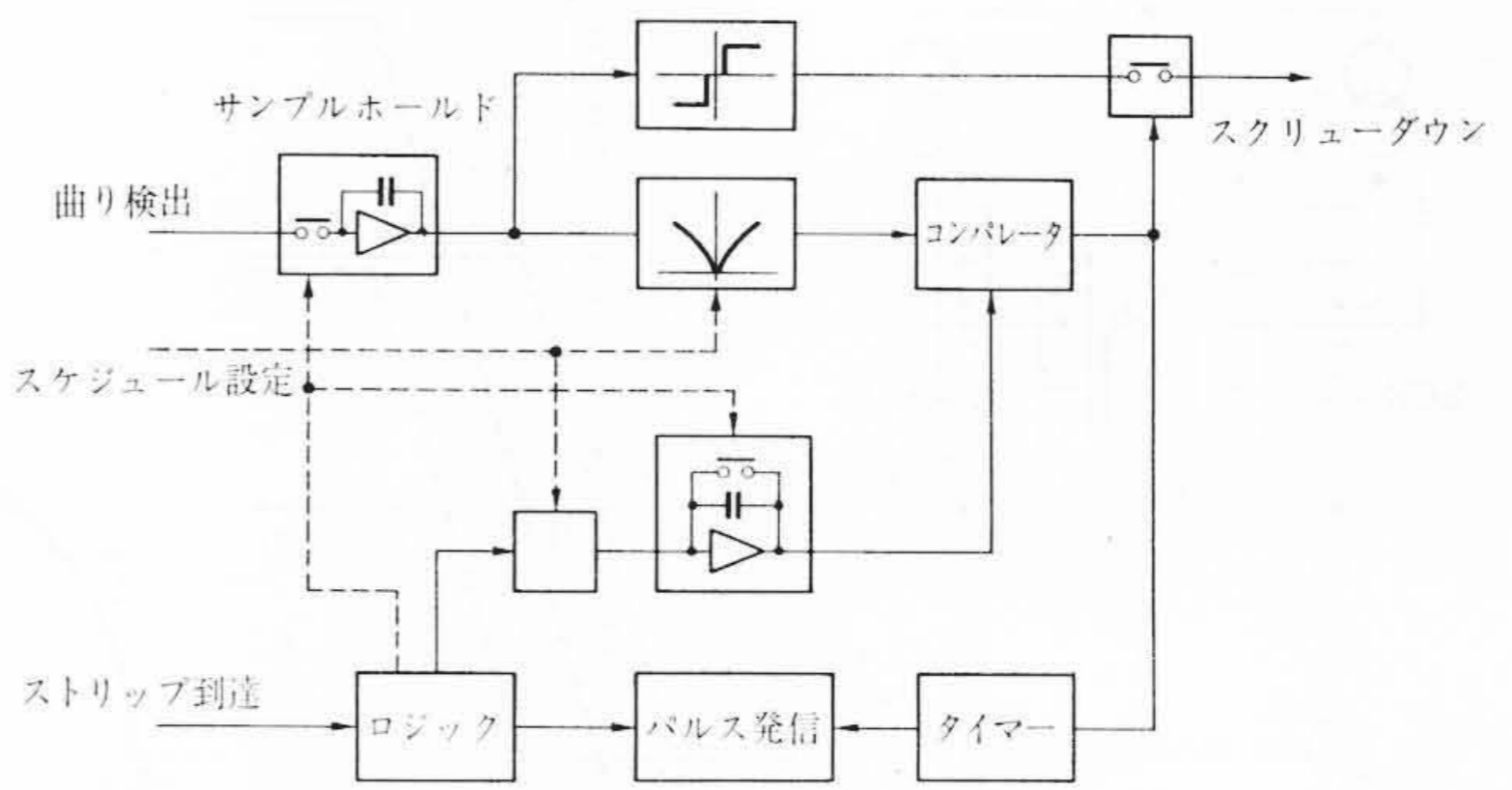


図8 自動ステアリング装置制御回路

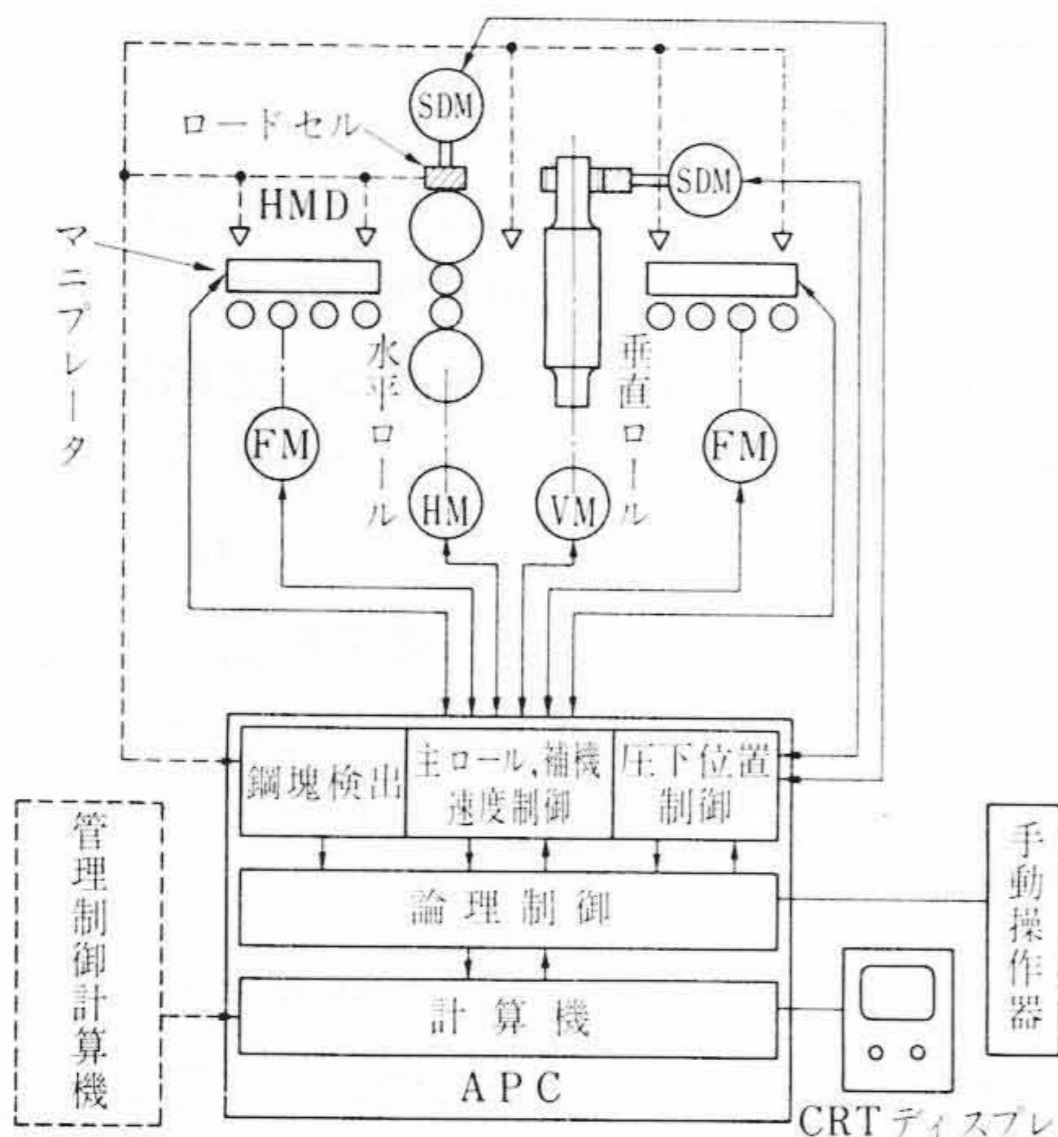


図6 自動運転制御装置 (APC)

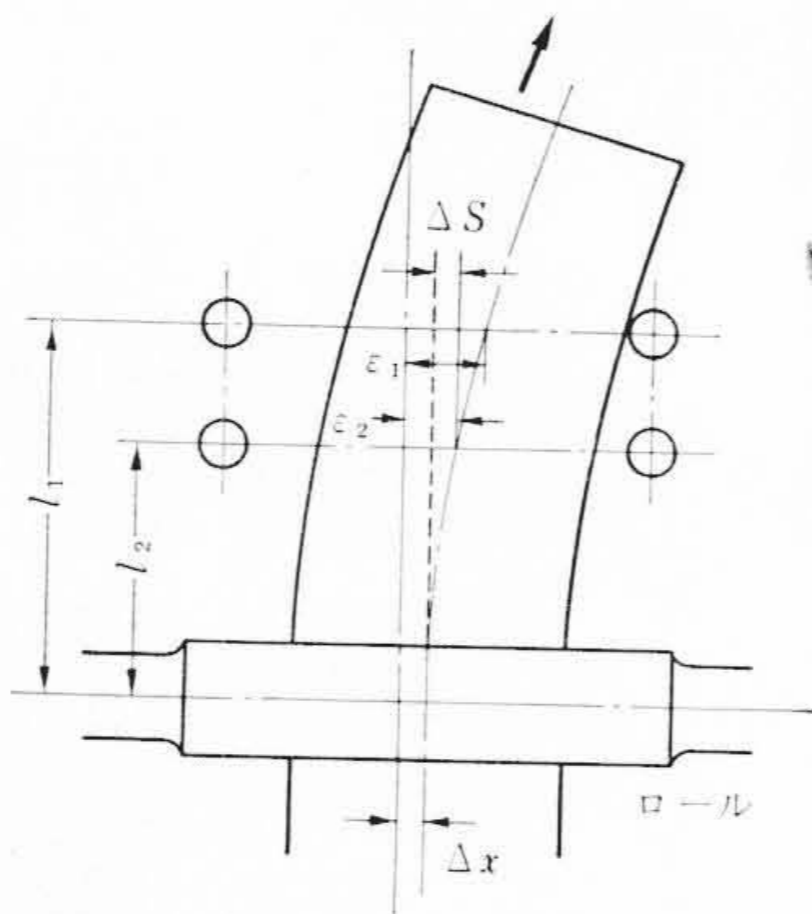


図7 曲がり検出器の位置

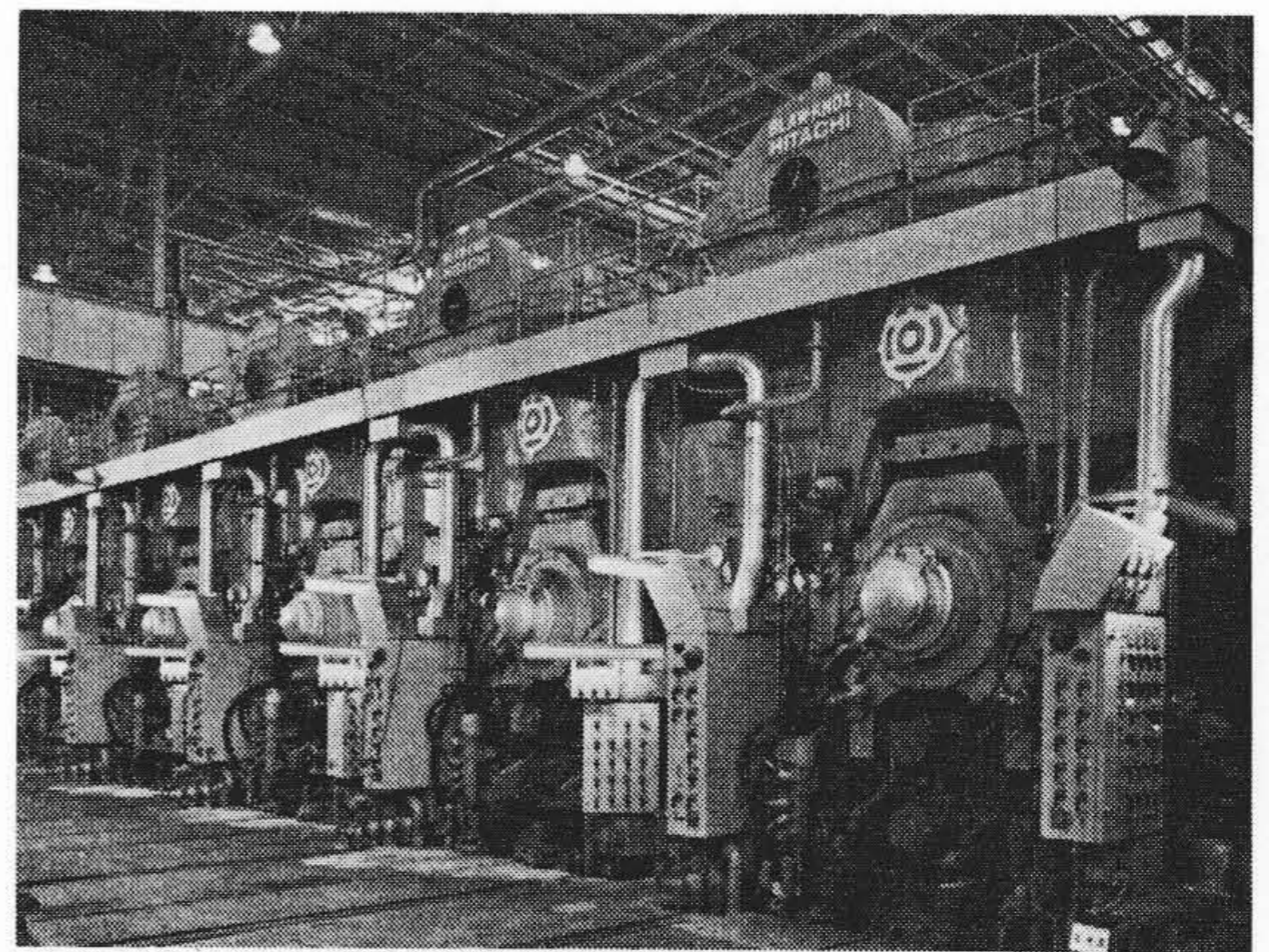


図9 各種自動装置を備えた新鋭コールドタンデム圧延機

表1 転回工程動作時間実測例

転回	第1右寄	第1転回	第2右寄	第2転回	センタリング	転回時間
90度	2.45	4.40			2.00	8.85
180度	2.60	4.65	2.85	4.30	3.50	18.0

(注) (1) 単位: 秒
 (2) 鋼塊重量 12t
 (3) 90度転回 W: 770 mm H: 960 mm
 (4) 180度転回 W: 980 mm H: 620 mm

で処理することは得策でなく、この点、ハード的処理とソフト的処理の均衡を図るべきである。

最適スケジュールの決定には、鋼塊の温度、形状や前パスの圧下力、圧延動力などオンラインデータと、圧下による幅広がり推定値などを考慮して、最終仕上げまでを見通した最適パススケジュールの計算が必要である。この点、従来のカードプログラム制御が事前に予知される平均値的データから、ある程度余裕あるスケジュールしか与えられなかったことと異なり、APCの特長である。

3.2 自動通板 (特許申請中)

コールドタンデムミルの全自動化へのアプローチは、まず、コイルハンドリングと自動通板の達成から始まると言えよう。通板作業は圧下調整によりストリップの蛇行(だこう)を修正する操作と、手で次のスタンドまで導く操作に大別することができる。そこで、ストリップの曲がりを検出して左右圧下量を自動的に修正する自動ステアリング装置、およびストリップを機械的に押えて、強制的に次のスタンドに導く装置の二つで自動通板ができる。後者は、サイドガイドおよび板押えの機構と自動開閉装置によって行なわれる。

前者のステアリング装置は制御としても興味深いサーボ系である。まず板の曲がり検出には、純粋の板の曲がり ΔS と、入側よりすでに横方向に「ずれ」ている分、 Δx を知るため、図7に示すような2組の板検出器を利用している。図において Δx 、 ΔS は、次式により算出される。

$$\Delta x = \frac{1}{1 - \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^2} \left\{ \epsilon_1 - \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^2 \epsilon_2 \right\}$$

$$\Delta S = \epsilon_2 - \Delta x$$

この関係は、演算増幅器により簡単にハード化される。

自動通板の最終目的は、先端の曲がりを次のスタンドの入側サイドガイドの間げき内に収めることである。このため次のロールに到達するまでの限られた時間内に制御を完了する必要がある。また、板の検出値と、制御すべき先端の曲がりが異なった量で与えられるときには、むだ時間に似た特性が含まれるため、制御系は、ほかにみられない特異な性質をもっている。われわれは図8に示すような制御装置を用いてこの問題を解決している。すなわち、応答を速くするため最初に予測制御を行ない、この制御が終わってある時間経過したのち、サンプリング制御を継続して、予測制御誤差を補正するものである。

3.3 そのほかの各種自動運転装置

最近の設備に適用されたものでコールドタンデムミルでは、自動減速装置、コイルの自動停止装置、形状制御装置など、ホットタンデムミルでは、自動 crop cut、形状制御装置、プリセット装置などがある。これらの説明はここでは省略するが、いずれも最近のエレクトロニクス技術に加えて、機械的構造の改良、検出機器としての光電変換、マイクロウェーブ、ITV カメラなどを利用したものである。

図9は従来の設備に比べ面目を一新した各種の自動運転装置を備えた新鋭コールドタンデムミルの外観である。

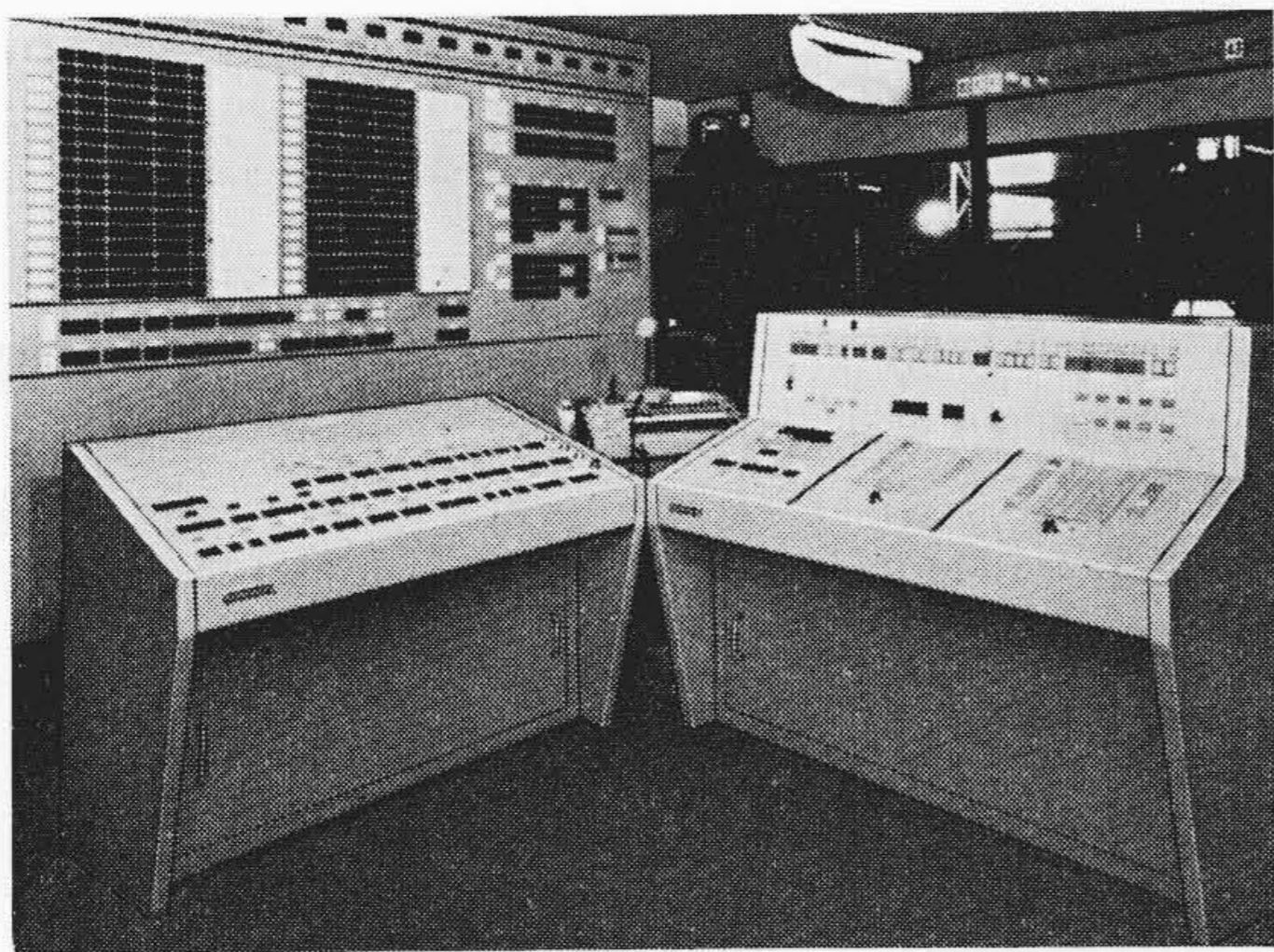


図10 分塊工場を管理、運転する計算機制御装置

4. 圧延機の計算機制御

各種圧延機の制御には、最近計算機が広く導入されている。計算機制御の導入の共通の目的は、(1) 品質の向上、(2) 歩留りの向上、(3) 生産性の向上、(4) 圧延設備の限界使用、ならびに(5) 生産管理体制の合理化、機械化である。圧延作業は一つ一つの圧延機の仕様ならびに属性が異なる場合が多いため、圧延機の計算機制御においては、生産管理の占める比率がかなり高い。

4.1 分塊圧延機

分塊圧延機の計算機制御の処理内容を大別すると、次の4種類に分類される。まず第1は各インゴットを均熱炉のいずれのピットに装入するか、またどのような順序で抽出するかという装入抽出のスケジューリング(段取計画)である。

第2は段取計画に各インゴットの焼上状況を教える焼上予測計算である。焼上予測計算はトラックタイム(搬送時間)を考慮し、ガス流量の減少割合により予測する。

第3はインゴットならびにスラブのトラッキング(スラブ追跡)である。トラッキングは以下のホットストリップミル、厚板圧延機でもきわめて重要で、計算機と圧延ラインとのマッチングをとる。トラッキングは圧延材の通過を、荷重計、熱線検出器、温度計の立上り信号などで検出することにより行なわれる。

第4は分塊圧延機のセットアップである。この部分の任務はAPCとして前章に述べたので省略する。図10は新鋭分塊工場に備えられた計算機制御装置の一部である。

4.2 厚板圧延機

厚板圧延機も可逆圧延機であり、制御も分塊圧延機と類似しているが、処理する厚みが分塊圧延機よりも薄く、しかも最終製品を圧延するので、高精度、良好な形状の製品の製造が必要である。ミルセットアップは分塊圧延機とほぼ同様な方式で行なわれるが、計算機制御の目的は、圧延時間の短縮よりは、ターン圧延による幅出しの精度向上と均一な厚み制御による歩留り向上が主体となる。最適長さのせん断、確実な転回の確保、AGCとのリンケージなどが計算機の主要な任務である。

4.3 ホットストリップミル

計算機制御を導入する圧延機のうちで最も効果的なものはホットストリップミルであると言われている。ホットストリップミル計算機制御の適用範囲は、加熱炉からコイル巻取までの全工程の管理ならびに制御を意味しており、この中には、スラブトラッキング、ミルセットアップ、温度制御などを含んでいる。

スラブトラッキングはスラブが加熱炉に装入されてから、粗圧延機、仕上圧延機、スプレー、ダウンコイラを経て、秤量機に至るまでの材料の流れを確実に捕えるもので、ホットストリップミル計算

機制御の基礎となる。

ミルセットアップは圧延仕様に従って、各スタンドのロール開度、回転数、サイドガイド開度などのほか厚み計、幅計などのオンライン検出器の設定も含み、スケジュールに応じて計算機がダイナミックに自動設定を行なう。これは、単に設定の自動化を図るのみでなく段取変更時間を短縮し、ミスロールなどによる損失時間を少なくすることも含め生産効率を高めるとともに、製品の品質を向上することをねらいとしている。

温度制御は仕上げ圧延機出口温度の制御と巻取温度の制御とを含む。前者は仕上げ圧延機の回転数やスタンド間スプレーにより制御され、上記セットアップの中で実施される。一方後者はスプレーにより巻取温度を定められたモードに従って連続的に制御するもので、冷却機構が分布されていることと、圧延速度が圧延中に変化することから、ハイブリッド形制御用計算機が用いられている。

4.4 コールドストリップミル

最近のコールドストリップミルは各種自動運転装置が導入されてきたため、計算機制御の導入が比較的容易になった。他の圧延機と異なり、冷間圧延機では、計算機が同時に処理するコイル数はたかだか2本しかなく、トラッキングが容易であるため、計算機の余力で従来のワイヤードロジックを計算機に置き換えようとする傾向が強くなりつつある。

計算機制御の目的は、通板時の圧延条件を整え、加速中のAGCの使用時期を早め、加速中からオンゲージを得ようとするオンゲージ率の向上と、張力、荷重バランス、ロールベンディング力の適正化による形状の確保である。これらにより歩留り、品質、生産性の向上が図られる。

4.5 計算機制御導入の条件

制御用計算機も今や第3世代を迎え、ハード的にもIC化されている。日立製作所も制御用としては比較的大形のHITAC7250、ロガー、DDC用の中小形機としてHIDIC300、100を生産している。ソフト面でもノンプロセスモニタシステム(NPMS)、プロセスモニタシステム(PMS)というシステムソフト、各種ユティリティ・プログラム、支援プログラムなどの標準プログラムの準備のほか、鉄鋼関係の広い経験から開発されたオンライン支援プログラムも準備され、有効に活用されている。

計算機制御を効果的に遂行するためには次のような点を考慮しておく必要がある。

- (1) 計算機導入の方針、条件、仕様を明確にする。
- (2) メーカーとユーザーとの協力体制を密にする。
- (3) ドキュメンテーション、フローチャートを双方があらゆる面から検討しておく。
- (4) デバックのためのシステム、ハード、ソフトの先手管理を行なう。
- (5) トラッキング、プロセッシングに最大の努力を払うこと。
- (6) 数式モデルは適応制御を十二分に考慮したものであること。

5. 結 言

圧延設備の制御について最近の進歩を二、三拾ってみたが、同種の圧延機においても新計画ごとに意欲的に新制御方式、装置がとり入れられている。特に自動運転関係の制御と計算機制御は今後互いに相補って長足の進歩をみせるものと思われる。駆動電動機設備はサイリスタレオナードが当分王座を占めるものと思うが、油圧装置やサイリスタ制御された誘導電動機などそれぞれの長所がもっと生かされてしかるべきものと思う。

制御用電子計算機とその応用

Control Computers and Their Applications

藤 木 勝 美* 宅 間 豊*
 Katsumi Fujiki Yutaka Takuma
 森 田 和 夫** 清 水 勝 良**
 Kazuo Morita Katsuyoshi Shimizu

要 旨

制御用計算機の発展は目ざましいものがあり、各種産業の情報処理、制御に広く用いられている。制御用計算機システムはプロセスと直結するため信頼度が高く、かつオンラインリアルタイムでプロセス情報の収集、処理、制御を行なうためのプロセス入出力装置が必要である。日立製作所では制御用計算機 HITAC 7250, HIDIC 300, HIDIC 100 を中心とした各種システムを開発し、大形から小形まで各分野の需要にこたえている。本稿では中心機器および電力、鉄鋼、化学の各種応用について述べている。

1. 緒 言

近年漸く計算機制御装置の需要が本格化し、自動化、品質向上、最高効率運転などに寄与している。プラントの計算機制御システムは

- (1) オンライン運転で、1日24時間連続のフル稼働であり、日ごとの停止時間がない。
- (2) すべて実時間処理である。

このことが大きな特色で、そのため汎用計算機システムと異なる性格が必要である。すなわち、

- (1) プラント操業に支障をきたさないため高信頼度であること。
- (2) 実時間処理に対処するため割込機能が充実していること。
- (3) プラントの諸情報をオンラインで入出力するプロセス入出力装置を具備すること。

などである。日立製作所では、これら機能を具備した工業用計算機 HITAC 7250, HIDIC 300, HIDIC 100 を生産し、大形から小形システムまでを経済的に処理できるようにシリーズ化している。以下その概要を述べる。

2. 制御用計算機の問題点

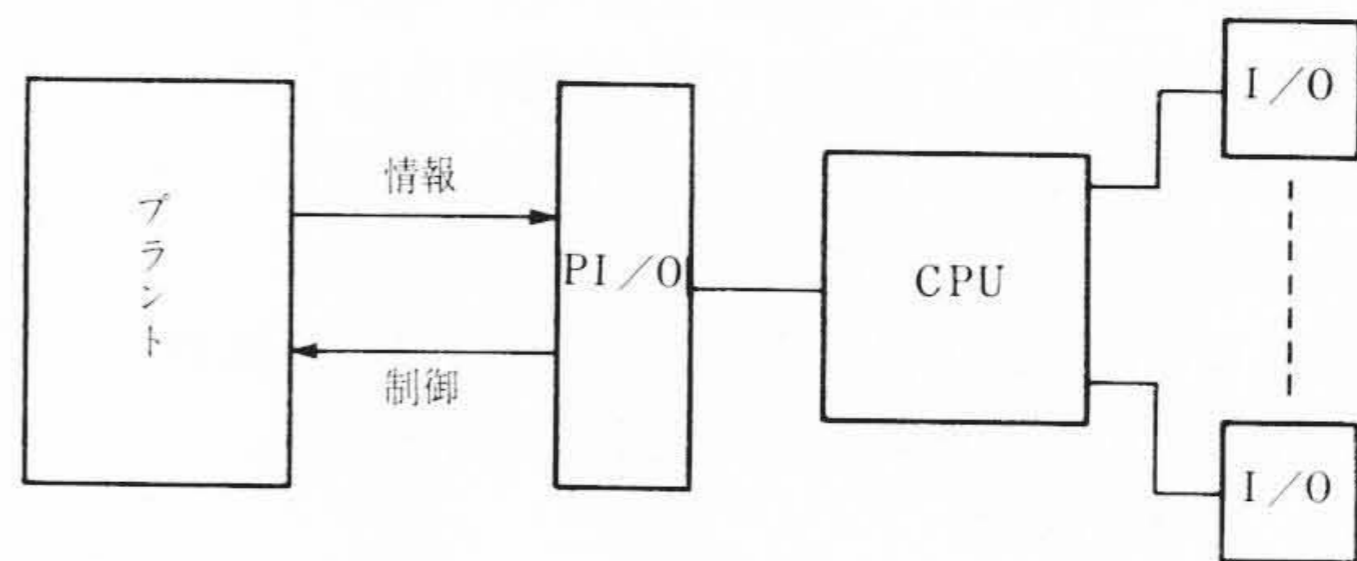
制御用計算機システムの基本構成は図1のとおりで、機器としては

- (1) プラント情報を時分割的に計算機に入力し、また、計算機による処理結果をプラントに指令するプロセス入出力装置
- (2) 計算機本体
- (3) その他入出力機器

があり、すべての入出力機器は、計算機によって動作する。入出力機器はオンラインで使用するものとオフラインで使用するものからなる。図に示すように、プラントと直結して、オンライン実時間処理を行なうため、

- (1) オンライン機器の信頼度が高いこと。
- (2) 周囲条件が変動しても(たとえば空調設備が停止しても)動作に支障のないこと。
- (3) 停電事故時も記憶装置内のデータが破壊されず、再起動が容易であること。
- (4) 緊急事態に応じた割込動作が可能であること。
- (5) 制御システムに指向した命令、プログラム体系の具備

などが必要である。HITAC 7250, HIDIC 300, HIDIC 100 は、これ



PI/O: プロセス入出力装置
 CPU: 中央処理装置(計算機本体)
 I/O: 各種入出力機器

図1 計算機制御システム

らをすべて満足するよう、特にハードウェアに対しては工業用仕様を設定し、所期の成果を得た。プログラム体系は HITAC 7250 では TSES (Time Sharing Executive System) の管理下で PMS (Process Monitor System) と NPMS (Non-Process Monitor System) を同時に動かすことにより、オンラインコンパイルなど幅広い運用が可能となっており、HIDIC 300, HIDIC 100 ではアセンブラと PMS を中心としている。

3. 制御用計算機

前記3機種はいわゆるファミリーを形成するもので、後に述べるように命令体系の共通化のほか、同一ハードウェア技術を使用している。

3.1 ファミリー

計算制御システムは、現状では大部分の適用例が単一計算機を適用する範囲にとどまっているが、順次情報管理システムとの結合によるハイラーキーシステムに移行していくものと考えられる。このような場合には情報伝送形式、およびソフトウェアの共通性などが問題になり、一貫した思想に基づく製品が望まれる。HITAC 7250, HIDIC 300, HIDIC 100 はハイラーキーシステムが経済的に構成できるように考慮したファミリーである。

3.2 HITAC 7250

3.2.1 高信頼性

信頼度は簡単に言うと、使用素子数、素子の固有信頼度、環境係数などによって定まるので、基本回路には集積回路 (Monolithic IC), TMC (Thin Film Microcircuit) を使用し素子数およびはんだ付け個所の低減を図っている。そのほか工業用コア記憶装置の開発を行ない0~50°Cの動作を経済的に実現するなどの考慮を図っている。

* 日立製作所日立工場

** 日立製作所国分工場



(電力中央研究所納電力系統シミュレータ)

図2 HITAC 7250 システムの一例



(某化学会社納 計算制御装置)

図3 HIDIC 300 システムの一例

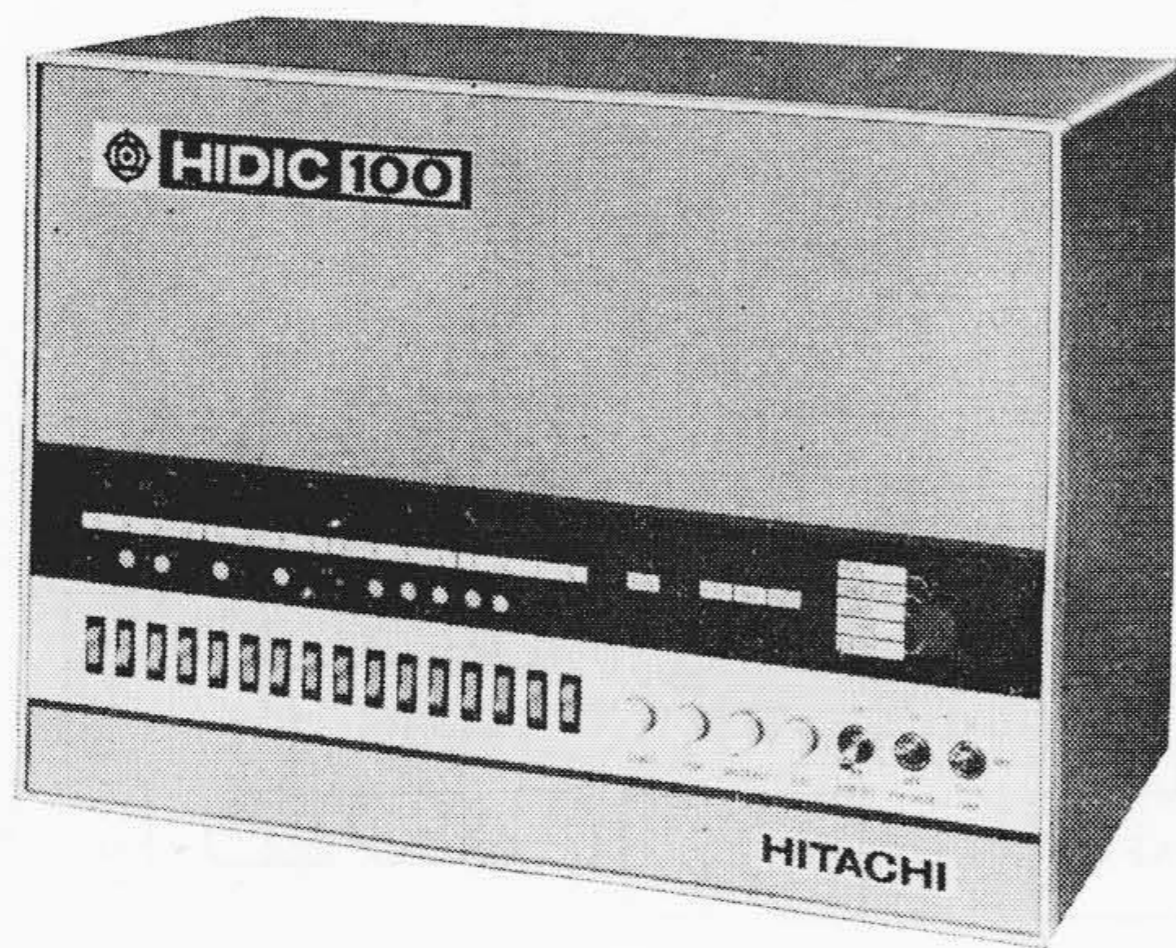


図4 HIDIC 100 処理装置本体

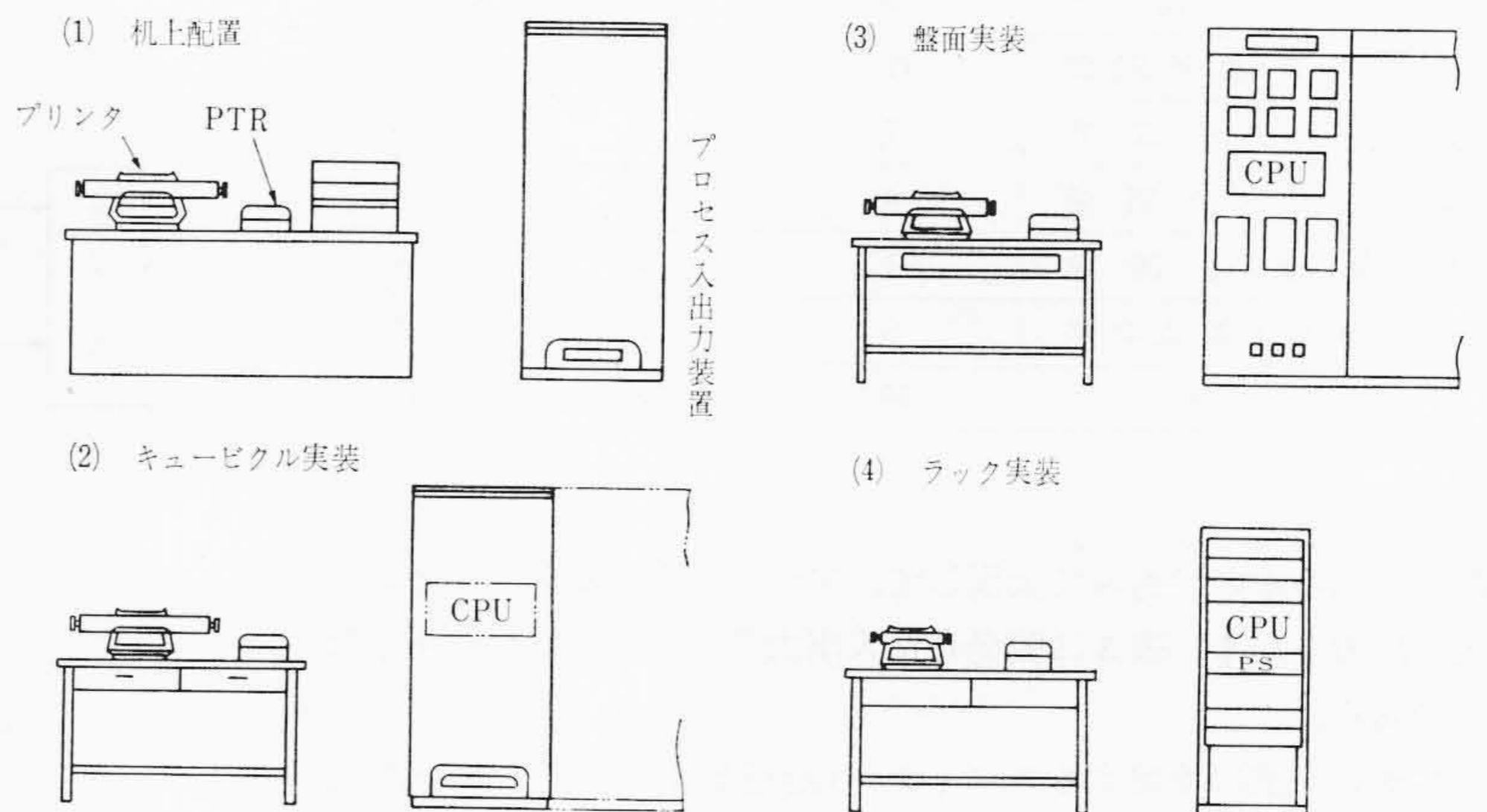


図5 HIDIC 100 実装法

3.2.2 拡張性と多重制御

制御システムは処理装置とプロセス入出力装置を基本形として、データ処理の方法によってはカードシステム、テープシステムなどを結合する必要があり、さらに8000シリーズ計算機を上位計算機とするシステムなどが容易に組めるよう入出力制御にはチャンネル方式を用い、インターフェイスとして8000シリーズ標準インターフェイスを採用している。このため、8000シリーズ用周辺機器が接続可能である。周辺装置は、中央処理装置に比較し処理速度が遅いため、処理装置を効果的に使用するためには複数台の周辺機器を同時に動作させる方式がよく、前記チャンネルがその役目を果たすことになる。

3.2.3 マイクロプログラム方式

本計算機の基本方式はマイクロプログラム方式である。これは一つの命令をさらに細分化したプログラムによって実行するもので、読出し専用の記憶装置 (ROM: Read Only Memory) に細分化プログラムを収納してある。これを使用することによって、論理素子数の低減を図り信頼性向上に資するとともに、チャンネル動作、浮動少数点演算などの処理を容易にすることができる。図2はHITAC 7250 システムの一例を示したものである。

3.3 HIDIC 300

本処理装置は中、小形の計算制御システムを、経済的に実現するため開発したもので、HITAC 7250 と同一技術によっているが、命令の種類を吟味し、小、中形システムに必要かつじゅうぶんな範囲

に絞り、直接制御方式としてある。また、記憶容量も最大16K語で、ソフトウェアシステムも単純な形としてあるが、アセンブラレベルではHITAC 7250 と融通性をもち、デバッグはHITAC 7250 を用いてもできるように考慮してある。図3はHIDIC 300 システムの一例を示したものである。

3.4 HIDIC 100

本処理装置は小形システムを主眼とし、演算速度も経済性を考慮して、たとえば加算は $16.5 \mu s$ とHIDIC 300 の $4 \mu s$ に比べ遅くしてある。

本機の実装上の特長は超小形(中央処理装置本体は $300H \times 436W \times 274D$)で、机上設置、キュービクル化、ラック実装、盤取付を可能にし、広く適用できるようにしてある。図4はHIDIC 100 処理装置本体を、図5は実装例を示したものである。

3.5 機能

前記3機種機能比較を表1に、命令語比較を表2に示す。

4. プロセス入出力装置

プロセスの計算機制御システムは、制御用計算機を中核として、種々の周辺装置が集まった集合体である。周辺機器はオフライン的な性格をもつものと、オンライン的な性格をもつものがあり、プロセス制御システムでは、後者の占める比重が絶対的に大きく、その一つがプロセス入出力装置である。本装置は対象プロセスと計算機(中央処理装置)とが、データ、制御信号などの授受を正確迅速に行

表1 機能比較表

仕様	HITAC 7250	HIDIC 300	HIDIC 100
方式	ストアドプログラム パラレル	ストアドプログラム パラレル	ストアドプログラム パラレル
演算語長	16ビット	16ビット	16ビット
基本命令数	27	16	16
演算速度			
加減算	4.5 μ s	4 μ s	16.5 μ s
乗算	30.5 μ s	900 μ s	2.7 ms
コアメモリ			
サイクルタイム	2 μ s	2 μ s	2 μ s
記憶容量	4/8/16/32	4/8/16	2/4/8
論理素子	IC	IC	IC
周囲温度 (CPU)	0~50°C	0~50°C	0~50°C

表2 命令語比較

No.	種類	命令数 (BASIC)		
		HITAC 7250	HITAC 300	HITAC 100
1	転送関係	8	4	4
2	演算・論理関係	11	4	4
3	シフト関係	7	3	3
4	ブランチ関係	4	4	4
5	入出力関係	1	1	1
6	浮動小数点関係	5	0	0
	計	36	16	16

なうためのものであって大別して、アナログ入、出力、デジタル入、出力となる。表3は開発した入出力装置の概略仕様を示したものである。

アナログ部に使用するスキャナー(走査器)には、リレー式低速用と、半導体(FET:電界効果トランジスタ)使用の高速形とがある。アナログ-デジタル変換器は、逐次比較形と積分形式があり、10 mV~10Vの入力を可変ゲイン前置増幅器を用いて処理できる。

5. 制御用計算機の適用例

5.1 電力系統

電力関係における適用例の代表的なものは、電力系統制御である。

(1) 自動給電システム

電力系統全体の総合的な運用システムである。系統運用業務には運用計画などのオフライン業務と、AFC, FLD, VQC (電圧, 無効電力制御), 系統自動操作など系統と直結してオンラインで行なう業務がある。これらの運用を計算機制御システムで総合的に自動化するのが、自動給電システムで、複雑な運用業務を集中的に処理し、手動ではできなかった運用の合理化と、設備投資の効率化を可能にする。図6は制御システムのブロック図を示したものである。

わが国においては2~3のシステムが実運用にはいっており、いずれもAFC, ELDなど有効電力の制御が中心になっているが、VQC, 系統自動操作も逐次完成するものと思われる。

(2) 電力系統シミュレータ

総合的な自動給電システムを完成するためには、なお多くの研究開発すべき事項がある。制御の性質上、実系統で直接実証することには多くの困難が伴う。電力系統シミュレータは実系統を使わず、あらゆる条件の実証研究をするために開発された画期的な模擬装置である。図2は系統シミュレータの外観である。システムは図6の実系統用と全く同じで、実系統の代わりに模擬送電

表3 プロセス入出力装置仕様

デバイス名	仕様
アナログ入力部	(1) 走査器 水銀リレー形 100点/秒最大 無接点形 5,000点/秒最大
	(2) 増幅器 入力レンジ $\pm 10, 30, 50, 100, 300$ mV, 1, 5, 10V
	(3) A-D変換器 積分形 変換時間 50ms 逐次比較形 変換時間 50 μ s
	(4) 精度 $\pm 0.1\%$
デジタル入力部	(1) 種類 電圧入力, 接点入力
	(2) 読取速度 10,000グループ \times 16点/分最大
アナログ出力部	(1) 種類 電流出力 0~29mA 電圧出力 0~5V
	(2) 精度 $\pm 0.1\%$
	(3) 書込速度 2,500点/秒最大
	(4) 応答時間 500 μ s以下
デジタル出力部	(1) 種類 リレー出力 半導体出力 パルス出力 表示管出力
	(2) 書込速度 リレー式 100グループ \times 16点/秒最大 半導体式10,000グループ \times 16点/秒最大

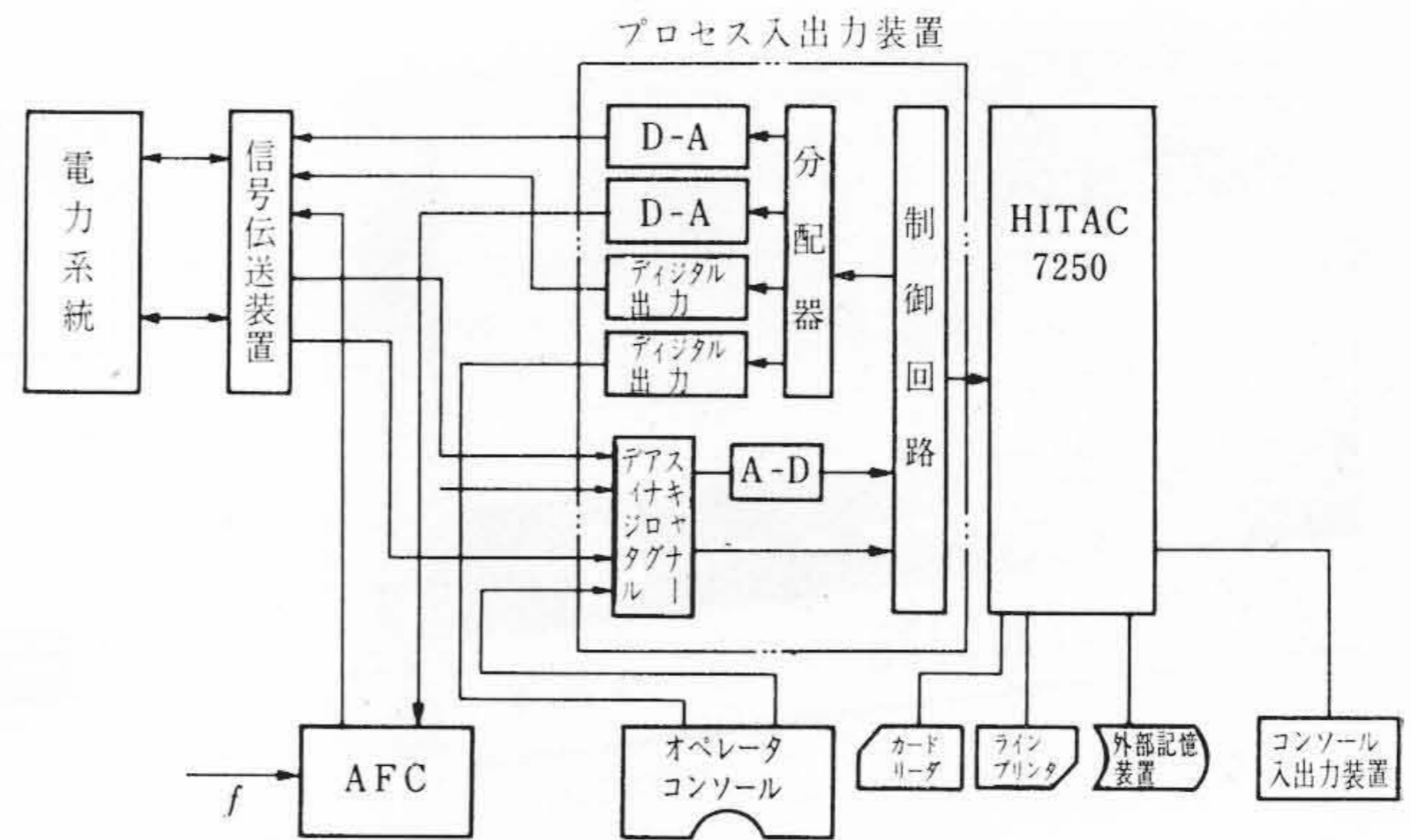


図6 自動給電システムブロック図

線などが使用されている。

5.2 火力プラント

火力発電所における計算機の適用は、データロガーからはじまり、運転性能モニタ、シーケンスモニタを経て、現在はタービン起動停止の直接制御化 (DDC) が行なわれつつある段階である。最適制御を含めたフルオートメーションの完成には、なおかなりの時間を必要とするものと考えられる。図7はHITAC 7250を中心としたシーケンスモニタブロック図である。処理内容はデータロギング、シーケンスモニタリング性能計算などである。なおタービン起動、昇速のDDC化を目的とした計算制御システムも大体同様の構成である。大容量火力発電所、原子力発電所の制御には、HITAC 7250級の制御用計算機が用いられるが、150 MW級の中容量発電所の制御にはHIDIC 300, HIDIC 100が経済的に有利であろう。

5.3 鉄鋼プラント

鉄鋼生産工程における計算機制御は、原料処理から製鋼, 圧延, 仕上処理工程におよび、その応用の方法が多様であり、高度の自動化に進んでいる。1968年前半のわが国における設置台数は、合計70台に達していることが報告されており、最も進んだ応用分野と言える。また各工場のプロセスの計算制御ばかりでなく、全工程の管理を行なう一貫オフライン計算機を有する製鉄所が増加しており、各工程の制御用計算機を接続するトータルシステム化へ向かっている。このように高度段階へ進んでいるが、プロセスの多くがバッチ処理であること、制御に高速性を要求するものが多いこと、プロセ

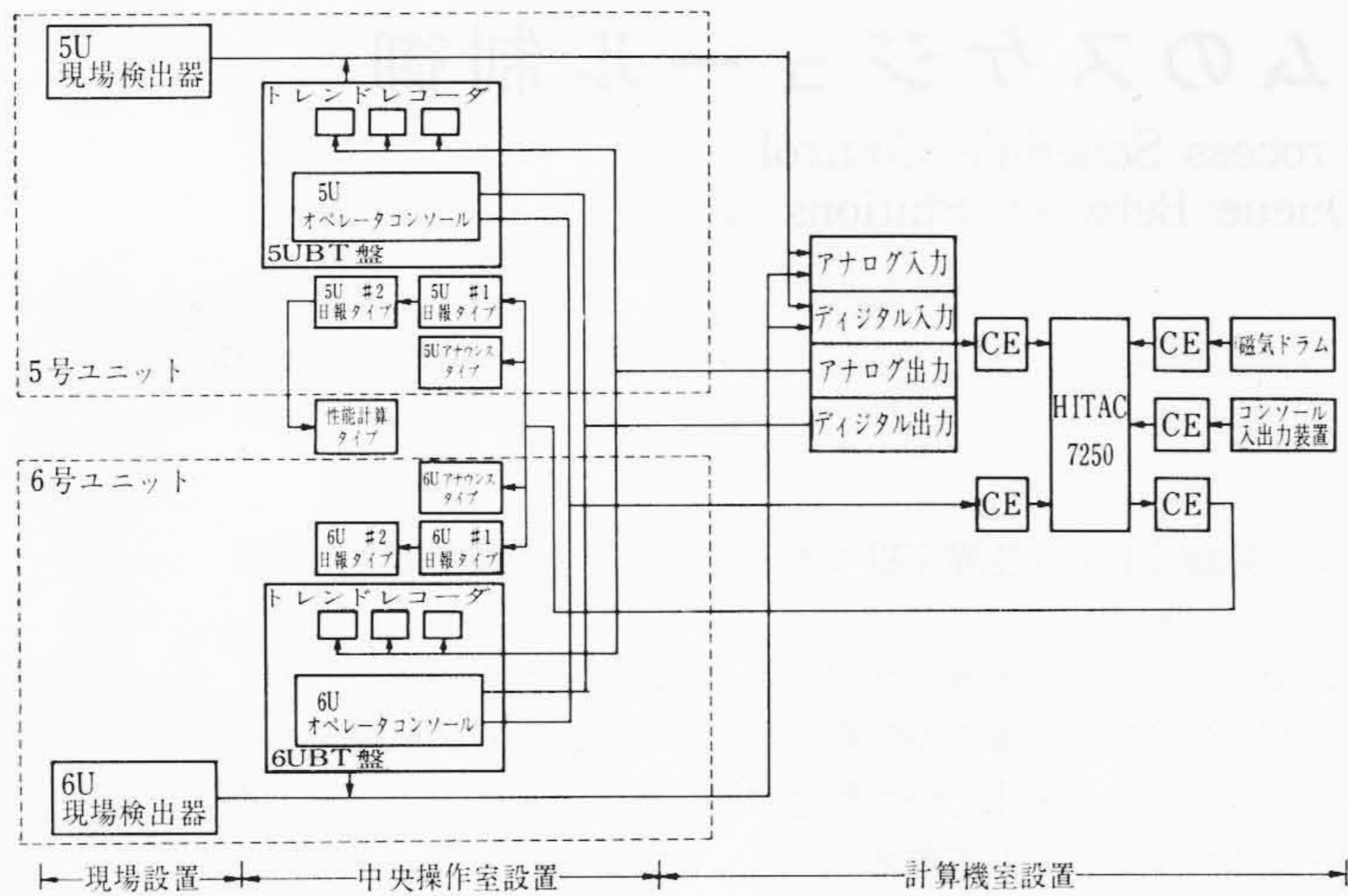


図7 シーケンスモニタシステムブロック図

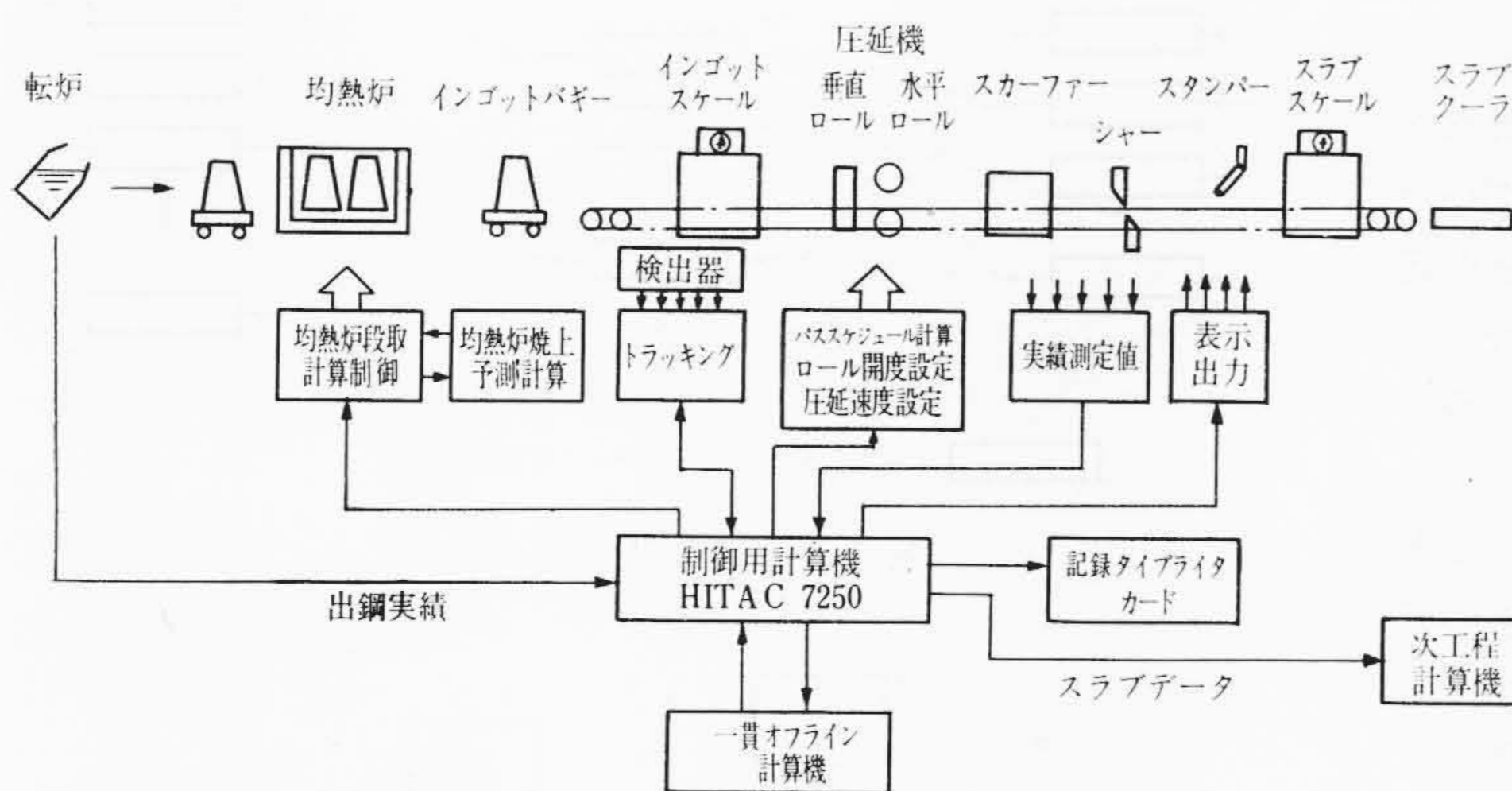


図8 分塊圧延工程の計算制御

ス現象の検出がむずかしいこと、複雑な要素よりなるモデル解析に理論的、経験的なアプローチを要することなど、なお多くの問題を残している。計算制御の応用例としては、

- (1) 原料処理工程では焼結設備の生産性向上のためのベルトスピード制御、水分制御、コンベヤ系列の統括制御など
- (2) 高炉においては、データ処理、逐次制御、総括制御監視、原料配合計算、炉況解析計算などである。
- (3) 転炉では適用例が多く、鋼の温度、成分を定められた範囲に制御することを目的としている。
- (4) 圧延工程では、分塊ミル、プレートミル、ホットストリップミル、コールドストリップミルなどで実用化されている。多数の入出力を扱い、高速の処理を必要とする分野であるが、最近の研究により高精度の数式モデルの開発が進められ、高度の自動化に進んでいる。一例として、分塊圧延工程の計算制御を図8に示す。図において、インゴット情報などから均熱炉における焼上予測、段取計算、均熱炉制御などを行なう。圧延ラインではインゴットの加工に伴いHMD(熱鋼塊検出器)などの自動検出器によりトラッキング(追跡制御)し、関連個所へ情報を提供する。圧延工程では最適パススケジュールを自動計算し、ロール開度、圧延速度、テーブル正逆転など一連の自動運転操作を行なう。処

理情報はタイプライタカードなどに出力されるとともに次工程計算機、あるいはトータルシステムの一貫オフライン計算機への情報として送られる。

ホットストリップミルは鉄鋼の中でも最も早く計算機制御が導入され、ミルの自動設定、コイルの巻取温度制御が行なわれ、わが国でも二、三の実用化例がある。プレートミルは板幅制御と処理ラインにおける情報処理に特長がある。コールドストリップミルは、ミル設定、自動運転、情報処理を目的として開発されつつある。

5.4 化学プラント

化学プラントは千差万別で、企業の秘密性がアプリケーションウェアの開発を困難にし、計算機制御システムの適用をはばむ大きな原因となっている。しかし、プラント規模の拡大と生産合理化の必要性が、計算機制御システムの導入を促進し、最近ではこれを導入するプラントが多くなってきた。特に石油精製プラント、石油化学プラントに多い。多量のデータを処理することによる運用の合理化、精留塔、反応塔における熱回収温度制御のDDC化による生産量の増大、品質の向上、コスト低下、安全性の確保などが一例としてあげられる。

プラントの規模と制御内容が種々雑多であるため、規模と経済性に合わせて、HITAC 7250, HIDIC 300, HIDIC 100が適用されている。

6. 結 言

以上計算機制御システムの概要を述べた。計算機制御は、順次広範囲に適用され、かつ高度化しつつあり、今後ますます発展していくものと考えられるが、そのためにはアプリケーションウェア、ソフトウェア、ハードウェア三者がバランス良く発展しなければならず、ユーザー、メーカーの密接な関係が現在以上に必要である。システムとしては、個々の性能向上はもちろんのこと、LSI採用による高信頼化、マン・マシンコミュニケーションの改良、経営指針との関連付け、バックアップシステムのあり方など、解決すべき問題が多い。これらに対し歩、一步と努力を重ね産業の発展にいささかでも寄与したいと考える。大方のご指導をお願いする次第である。

参 考 文 献

- (1) 森田：火力発電 18, 943 (1967-10)
- (2) 三巻, 三浦：昭和42年連合大会講演論文集 No. 2822
- (3) 藤本, 三巻：昭和42年連合大会講演論文集 No. 2892
- (4) 川崎, 喜田：昭和42年電気学会東京支部大会論文集 No. 45
- (5) 三浦：“制御用計算機 HITAC 7250 について”日本自動制御講演会(昭和42年4月)
- (6) 川崎, 安藤：昭和43年連合大会講演論文集 No. 2747
- (7) 喜田, 川崎：昭和43年連合大会講演論文集 No. 2748
- (8) 高橋ほか：日立評論 49, 373 (昭42-3)
- (9) 大沢, 平井：日立評論 48, 943 (昭41-8)
- (10) 曾我, 大沢ほか：自動制御連合講演会前刷 218, 203(昭42)
- (11) 電力中央研究所技術研究所：技術研究所報告 No. 66081 (1967-3)
- (12) 広島工業会編纂：計算制御講習会資料(昭43-3)
- (13) 宅間, 北之園：日立評論 50, 761 (昭43-8)
- (14) 橋本：制御工学 12, 70 (1968-2)
- (15) 坪井：制御工学 12, 81 (1968-2)

分岐合流システムのスケジュール制御

Production Process Schedule Control Inhibiting Queue Between Stations

三 森 定 道*
Sadamichi Mitsumori

要 旨

現在の多量生産は、消費者要求の多様化に伴い、鉄鋼や自動車生産工程にみられるように多種多量生産の傾向をおびている。

この複雑な工程を効率よく運転するためには、オフライン的な生産スケジュールだけではだめでダイナミックなスケジュール制御が必要となる。多段処理工程の生産量の増加と運転費の削減とは、仕掛り品の減少によって得られるが、本論文ではこれを待行列理論でいうブロック効果という概念で統一的にとらえ、ブロック効果による損失の、製品の処理仕様による重み付き平均の最小化として最適スケジュールをとらえている。

この最適化の問題は、多変数の非線形問題となるが、処理工程の特質をとらえて、数個の線形の割り当て問題に還元してリアルタイムに解く方法を提案している。

1. 緒 言

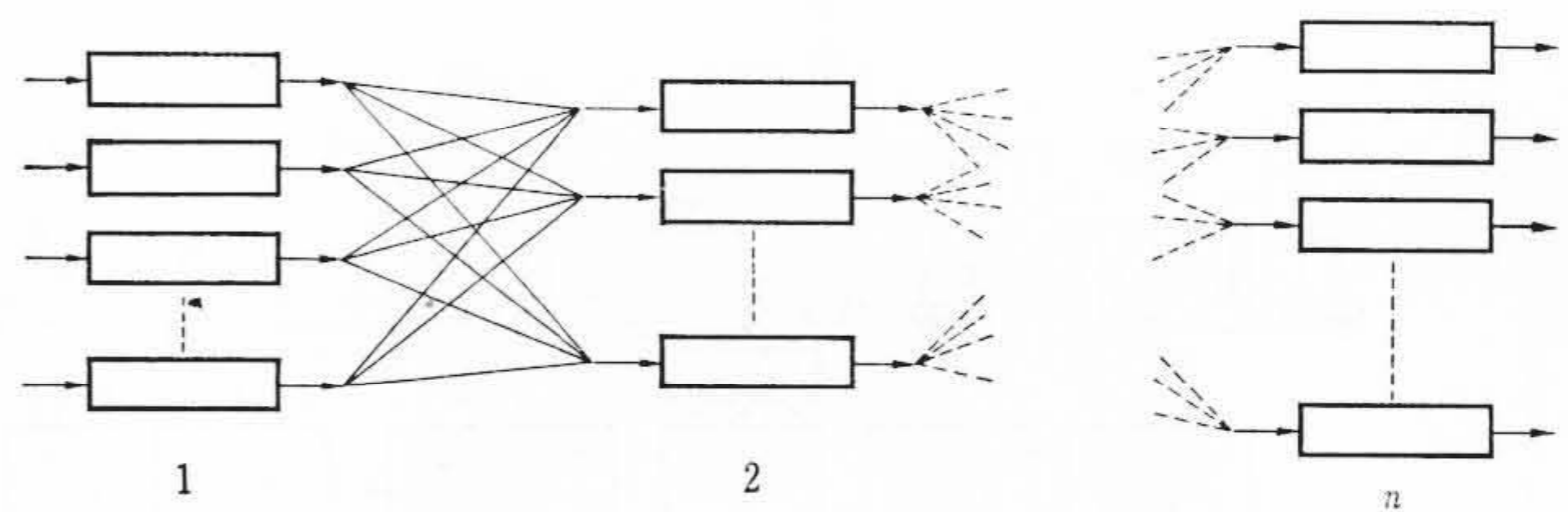
ヘンリ・フォード氏が自動車工業にコンベヤラインを導入したときには、多量生産と多種生産とは相容れないものと考えられていたが、最近の顧客要求の多様化に伴い、同一コンベヤに処理仕様の異なるものを多数流すようになってきている。鉄鋼一貫工程などでも、多種多量生産が行なわれてきている。多種多量生産では工程が複雑化し、生産能率の向上、設備の最適利用を図るためには、材料の処理順序の決定や処理装置の選択など、スケジューリングの問題が重要となる。工程の複雑さのため、種々の作業上のミスなどの予期しない外乱を受けやすく、状況の変化をきたす。したがって、あらかじめ定められたとおりのスケジュールでは効率の良い作業とはならず、ここにリアルタイムなスケジュール変更、スケジュール制御が必要となる。

多段処理工程で段間に仕掛り品の待行列を許せば、それが工程間のバッファとなるため、その相互関係は弱くなる。多段処理工程のスケジュール制御を行なうためには、相互関係の弱い部分で分割し、これら分割点での大まかなスケジュールを作成する。次に、これを規制条件として各部分の精密なスケジュールを定める。分割不能な最小単位が多段処理工程のスケジューリングの基本要素となるため、これを分岐合流システムと呼ぶことにする。分岐合流システムとは、段間に仕掛り品の待行列を許さない多段処理工程であって、各段の処理装置の個数はすべて1ではないものとする(図1参照)。

分岐合流システムのスケジュールの主要問題は、各半製品の各段での処理装置の選択と、各処理装置での装入、抽出時刻の決定とである。本報告では、まず分岐合流システムでの半製品の流れについての分析を行ない、その解析を基にスケジュール計算方法を述べる。

2. 工程の流れの分析

分岐合流システムでは段間に待行列を許さないために、後段の処理装置がすべて使用中であれば、前段の処理装置で処理が完了していても、その装置から半製品を取り出すことはできない。この現象はブロック効果といわれ処理装置の有効利用率を減少させる。また、一般の多段処理工程で経験することは、工程にいったん混乱が生ずるとその回復に予想以上の時間がかかることである。以下に、分岐合流システムのブロック効果と過渡特性とについての分析を行なうことにする。



□ : 処理装置, → : 半製品の流れ

図1 n段分岐合流システム

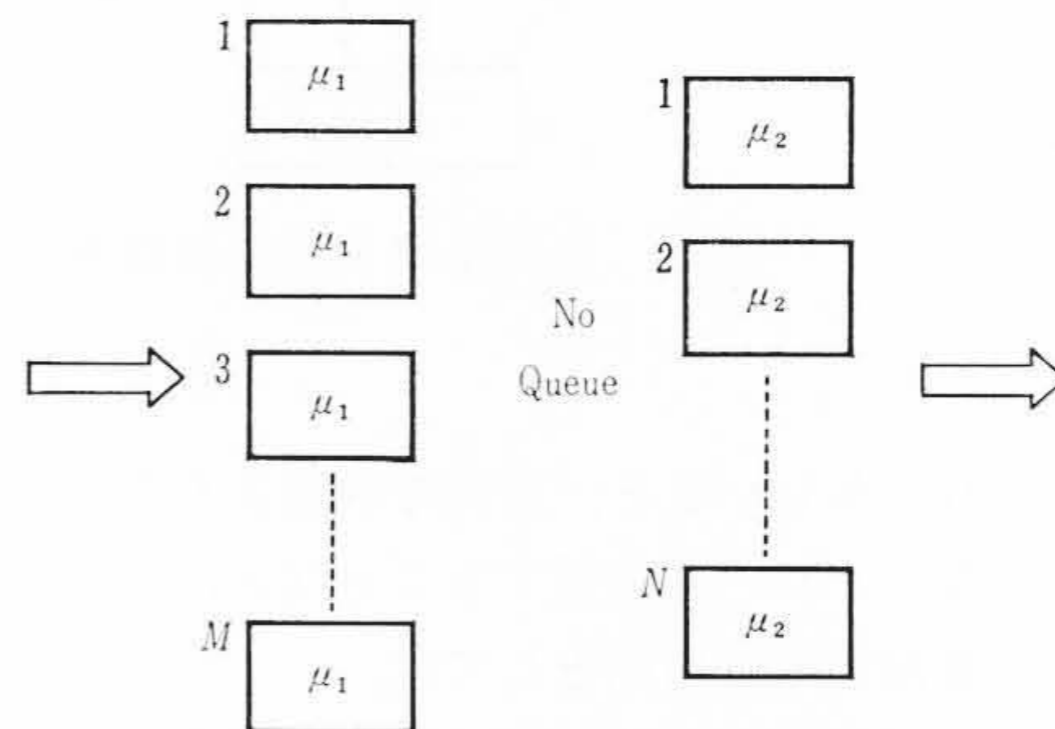


図2 2段分岐合流システム

2.1 ブロック効果

分岐合流システムのブロック効果を分析するために図2のような2段の分岐合流システムを考える。理論的解析を可能にするために、1段目、2段目の各処理装置の処理時間はともに指数分布であると仮定し、そのパラメータを μ_1, μ_2 とする。 μ_1, μ_2 は1段目、2段目の各処理装置の単位時間当たりの平均処理率である。1段目の前には待行列が許され、しかも、1段目のいずれかの処理装置があったときには、処理すべき半製品が常に1段目の前にあるものと仮定する。

上記の仮定のもとで、分岐合流システムの状態は、次の $(M+N+1)$ 個の場合のみを考えればよい。

$(0, j), j=0, 1, 2, \dots, N$: 後段は j 個の処理装置が処理中であり、前段はブロック状態にない。

$(i, N), i=1, 2, \dots, M$: 後段は N 個の処理装置がすべて処理中であり、前段は i 個の処理装置がブロック状態にある。

状態 (i, j) の定常状態での状態確率を $p(i, j)$ とすると、これら状態間の平衡方程式は次のようになる。

$$-N\rho p(0, 0) + p(0, 1) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

* 日立製作所中央研究所

$$N\rho p(0, j-1) - \left(N\rho + \frac{j}{N}\right)p(0, j) + \frac{j+1}{N}p(0, j+1) = 0; \\ j=1, 2, \dots, N-1 \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{M-i+1}{M}\rho p(i-1, N) - \left(\frac{M-i}{M}\rho + 1\right)p(i, N) \\ + p(i+1, N) = 0; i=1, 2, \dots, M-1 \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{1}{M}\rho p(M-1, N) - p(M, N) = 0 \dots\dots\dots (4)$$

ただし, $\rho = \frac{M\mu_1}{N\mu_2} \dots\dots\dots (5)$

ところで, 前段の処理装置の有効利用率 $E(M, N, \rho)$ は, $p(i, j)$ を用いれば次式で定義される。

$$E(M, N, \rho) = \frac{M \sum_{j=0}^N p(0, j) + \sum_{i=1}^M (M-i) p(i, M)}{M} \dots\dots\dots (6)$$

(1)~(5)式より $p(i, j)$ を求めて(6)式に代入すると, 次式をうる。

$$E(M, N, \rho) = \frac{\sum_{j=0}^N \frac{N^j}{j!} \rho^j + \left(\sum_{i=1}^M \binom{M}{i} \frac{i!}{M^i} - 1\right) \frac{N^N}{N!} \rho^{N+i}}{\sum_{j=0}^N \frac{N^j}{j!} \rho^j + \sum_{i=1}^M \binom{M}{i} \frac{i!}{M^i} \frac{N^N}{N!} \rho^{N+i}} \dots\dots\dots (7)$$

$$\sum_{j=0}^N \frac{N^j}{j!} \sim \frac{1}{2} e^N, \quad \sum_{i=0}^M \binom{M}{i} \frac{i!}{M^i} \sim \sqrt{\frac{M\pi}{2}}, \quad N! \sim \sqrt{2\pi N} N^N e^{-N}$$

なる関係式が成立⁽⁴⁾するから, $\rho=1$ の場合には, (7)式より次式をうる。

$$E(M, N, 1) \sim \frac{\sqrt{\frac{\pi}{2}}(\sqrt{M} + \sqrt{N}) - 1}{\sqrt{\frac{\pi}{2}}(\sqrt{M} + \sqrt{N})} \dots\dots\dots (8)$$

(8)式より, ブロック効果による損失がかなり大きいものであることが理解できる。

2.2 過度特性

多段処理工程で, ある状況の変化が起こったときの定常状態に達するまでの時間も重要な問題である。処理工程の段数が増すに従がい, 過度特性の悪くなることを簡単な例について解析してみる。計算を簡単にするために, 1段と2段との処理工程について考え, 1段目の処理装置の前には待行列を許さないとした。

図3(a)で, 時刻 t に処理装置があいている確率を $p_0(t)$, 処理中である確率を $p_1(t)$ とすると, 状態方程式として次式をうる。

$$\frac{dp_0(t)}{dt} = -\rho p_0(t) + p_1(t) \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{dp_1(t)}{dt} = \rho p_0(t) - p_1(t) \dots\dots\dots (10)$$

ただし, 時間は平均処理時間 $1/\mu$ で無次元化している。

(9), (10)式に対する固有値 x は, 次のようにして求められる。

$$x=0, -(1+\rho) \dots\dots\dots (11)$$

一方, 図3(b)での前後段の処理装置の状態を (i, j) で表わし, i, j が0であればあき, 1であれば処理中, b であればブロック状態であるとする。したがって, $(0, 0), (0, 1), (1, 0), (1, 1), (b, 1)$ の5個の状態が考えられる。これら各状態の時刻 t における確率を $p_{ij}(t)$ で表わせば, 状態方程式として次式を得る。

$$\frac{dp_{00}(t)}{dt} = -\rho p_{00}(t) + p_{01}(t) \dots\dots\dots (12)$$

$$\frac{dp_{01}(t)}{dt} = -(\rho+1)p_{01}(t) + p_{10}(t) + p_{b1}(t) \dots\dots\dots (13)$$

$$\frac{dp_{10}(t)}{dt} = \rho p_{00}(t) - p_{10}(t) + p_{11}(t) \dots\dots\dots (14)$$

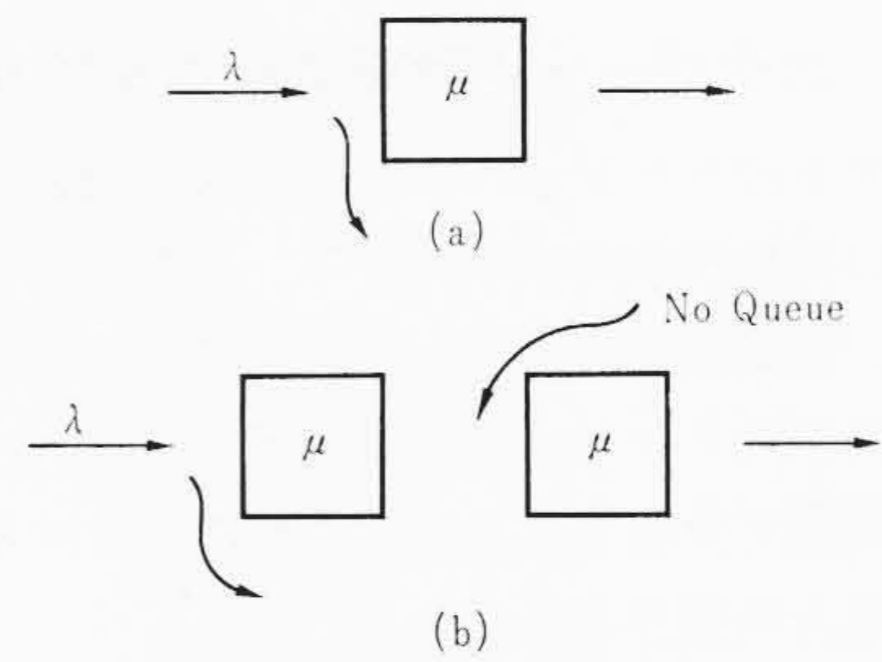


図3 段数と過渡特性

$$\frac{dp_{11}(t)}{dt} = \rho p_{01}(t) - 2p_{11}(t) \dots\dots\dots (15)$$

$$\frac{dp_{b1}(t)}{dt} = p_{11}(t) - p_{b1}(t) \dots\dots\dots (16)$$

ただし, 時間は $1/\mu$ で無次元化している。

(12)~(16)式に対する固有値 x を種々の ρ の値に対して求めてみる。

- (1) $\rho=1$: $x=0, -1, -1.32, -2.34 \pm 1.16i$
- (2) $\rho=0.8$: $x=0, -1, -1.19, -2.21 \pm 1.06i$
- (3) $\rho=0.4$: $x=0, -1, -0.95, -1.93 \pm 0.25i$

支配項のみに着目すれば, 2段の処理工程は1段の場合に比べて, 異常が発生した場合の定常状態への整定時間は, ほぼ2倍近く長い。

3. スケジュール制御

生産工程でのスケジュールには, 次の二つの場合がある。一つは設備容量の制限のもとで, 需要と在庫とを考慮して決定されるマクロな生産計画である。これに対して, 各ユニットの処理順序(時刻), 処理装置の選択といった生産工程でのミクロなスケジュールがある。前者の生産計画も状況の変化に対してその計画は変更されるが, その変化の時定数は日, 月のオーダーである。後者のスケジュールは現場での直接の作業指示を与えるものであるから, 刻々の作業状況と設備状態の変化に対して, スケジュールはたえず修正されるものでなければならない。スケジュール制御であるため, スケジュールはたえず修正されるが, 2.2で述べたように整定時間が長いため, 長時間にわたるスケジュールを作成する必要がある。

スケジュール項目として, 次のものが考えられる。

- (1) 各段の処理装置への各半製品の装入時刻
- (2) 各段の処理装置からの各半製品の抽出時刻
- (3) 各半製品の各段での処理装置の選択

これら分岐合流システムのスケジュール項目を最適に作成制御するためには, まずその最適性を明確にしなければならない。一般的に考えられるものは,

- (1) 生産量の最大化
- (2) 運転費の削減
- (3) 品質の向上
- (4) 境界条件への適合

分岐合流システムでは, 特にブロック効果による生産能率の低下が重要である。したがって, ブロック効果による対処という面から, スケジュール制御の問題を考えることができる。

- (1) ブロック効果による悪影響の最小化……各半製品の処理装置からの抽出時刻の決定
- (2) ブロック効果自体の減少……各半製品に対する処理装置の選択, 休止, 設備切替時刻の決定

最適性の数式表現での問題点として, 次の点が考えられる。

- (1) 各最適要因の換算係数
- (2) 線形化……多変数は問題の本質上避け得ない。
- (3) 問題の分割化……部分的最適化。リアルタイムな計算時間。

4. スケジュール計算アルゴリズム

分岐合流システムのスケジュール制御では、段数が増すに従い、制御変数の個数は指数関数的に増加する。したがって、各段を同等に扱ったのでは、制御計算は実際上不可能になる。ここでは、2段の分岐合流システムのスケジュール計算アルゴリズムを考える。多段の場合には、問題を分割するなどの手法により、2段の場合に還元することが実用上必要である。

4.1 境界条件

2段分岐合流システムは、一般に多段処理工程の一部として存在する。したがって、分岐合流システムの前工程、後工程から与えられる規制を守るように、スケジュールを考えねばならない。境界条件は、以下に示すように与えられるものとする。

- $d_i^{(1)}$: 分岐合流システムへの半製品 i の最適装入時刻
- $d_i^{(2)}$: 分岐合流システムからの半製品 i の最適抽出時刻
- $g_i^{(1)}(d_i^{(1)} - t)$: 分岐合流システムへ半製品 i を時刻 t に装入することによる損失
- $g_i^{(2)}(t - d_i^{(2)})$: 分岐合流システムから半製品 i を時刻 t に抽出することによる損失

ただし、

$$g_i^{(1)}(0) = g_i^{(2)}(0) = 0, \quad g_i^{(s)}(x) \geq 0, \quad \frac{d^2}{dx^2} g_i^{(s)}(x) \geq 0; \quad s=1, 2$$

さらに、できる限り前段への装入時刻は $d_i^{(1)}$ 、後段からの抽出時刻は $d_i^{(2)}$ とすべきものとする。

4.2 割り当て問題

分岐合流システムのスケジュール計算で用いられる線形計画の割り当て問題を一般的に説明する。集合 $A(a_1, a_2, \dots, a_n)$ と集合 $B(b_1, b_2, \dots, b_n)$ とが与えられている場合、ある条件のもとで集合 A の要素と集合 B の要素との最適な n 個の組合せ、

$$(a_{i_1}, b_{j_1}), (a_{i_2}, b_{j_2}), \dots, (a_{i_n}, b_{j_n})$$

$i_1 i_2 \dots i_n, j_1 j_2 \dots j_n$ は $1, 2, \dots, n$ の2つの順列

を求めることである。数式的に表現すれば、組合せ (a_i, b_j) に対する $n \times n$ のコスト行列 $\|R_{ij}\|$ が与えられているとき、

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} x_{ij} \dots \dots \dots (17)$$

を最小にする順列行列 $\|x_{ij}\|$ を求めることである。

ただし、 $x_{ij} = 0$ or 1

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1; \quad j=1, 2, \dots, n, \quad \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1; \quad i=1, 2, \dots, n$$

x_{ij} の値の意味は

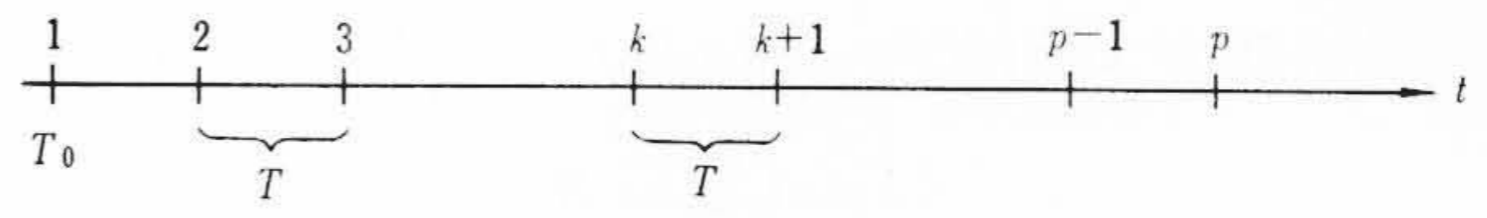
$$x_{ij} = \begin{cases} 0: & a_i \text{ と } b_j \text{ とを組み合わせる。} \\ 1: & a_i \text{ と } b_j \text{ とを組み合わせない。} \end{cases}$$

この問題は Primal-Dual Method を用いれば容易にとける⁽²⁾。

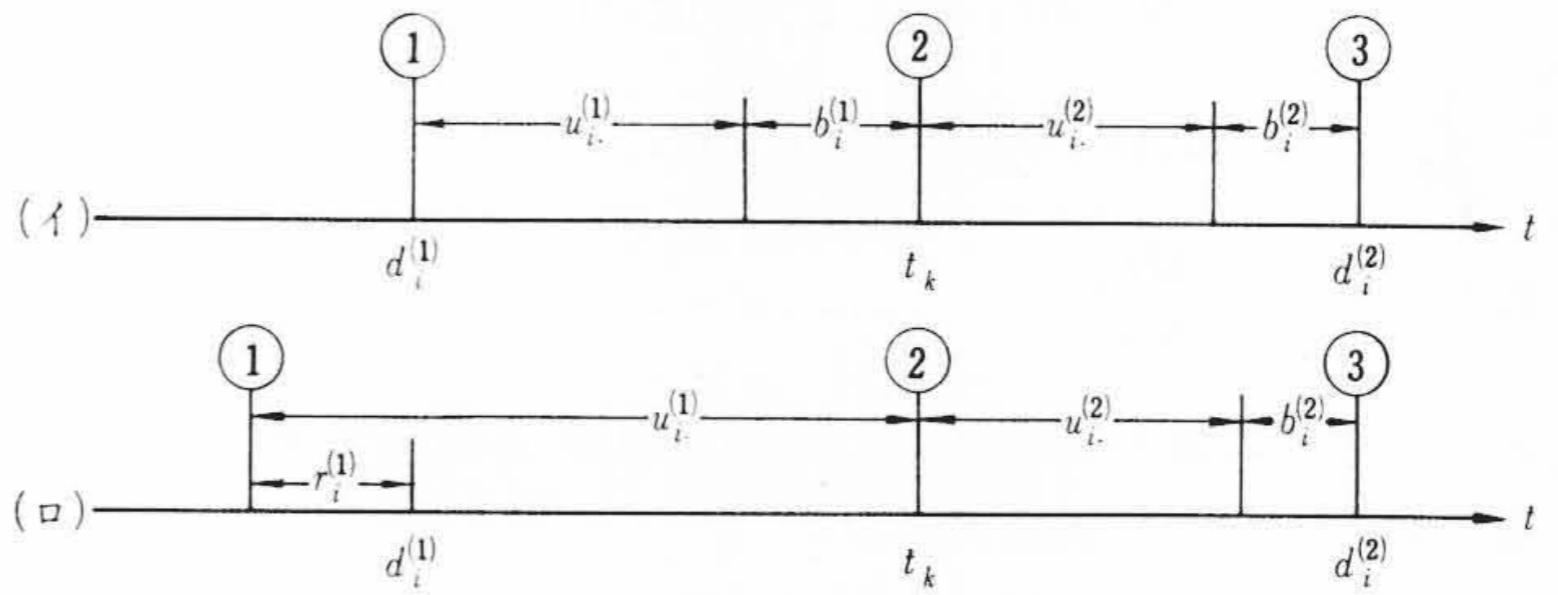
4.3 スケジュール計算

以下の説明に用いる記号を定義する。

- n : スケジュール計算の対象とする半製品の個数
- M : 前段の処理装置の個数
- N : 後段の処理装置の個数
- $u_{ij}^{(s)}$: 半製品 i の s 段目の処理装置 j での処理時間 (ST)
 $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, N(s); N(1)=M, N(2)=N$
- $u_{i.}^{(s)} \equiv \frac{1}{N(s)} \sum_{j=1}^{N(s)} u_{ij}^{(s)}, \quad u_{.j}^{(s)} \equiv \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_{ij}^{(s)}$
- $f_{ij}^{(s)}(t)$: 半製品 i が s 段目の処理装置 j で受けたブロック時間 t による損失
- $f_{i.}^{(s)}(t) \equiv \frac{1}{N(s)} \sum_{j=1}^{N(s)} f_{ij}^{(s)}(t), \quad f_{.j}^{(s)}(t) \equiv \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{ij}^{(s)}(t)$



k : 段間の処理時点 T_0 : 考察初期時刻
(a) 段間の処理時点



t_k : 段間の処理時点 k の時刻 ②: 半製品 i の段間での処理時刻
①: 半製品 i の前段への装入時刻 ③: 半製品 i の後段からの抽出時刻

(b) 半製品 i の処理時点 k への割り当て

図4 段間の処理時刻の決定

次に、2段分岐合流システムのスケジュール計算の主要部分について、2方式を提案する。実際の工程では、その特殊性により種々の肉づけが行なわれるが、ここに述べる方式はその共通部分である。

4.3.1 方式 I

本方式は、各半製品の段間での処理時間(前段からの抽出と後段への装入時刻; 段間に待行列を許さないから、この二つの時刻は等しい)を、半製品の相互関係を考慮して求め、次にこの結果をもとに各段での処理装置の選択と装入抽出時刻の確定を行なうものである。

(1) 段間の処理時刻の暫定

後段全体としての処理能力の逆数を T とすれば、平均的には T 時間ごとに後段としては、半製品を処理することができる。考察対象の半製品が最初に前段から抽出される時刻を T_0 とし、これを考察初期時刻とする。次に図4(a)に示すように、 T_0 から T ごとに時刻を刻み、これを段間での処理時点と呼び、 $1 \sim p$ までの番号をつける。処理時点 k の時刻 t_k は、次式で考えられる。

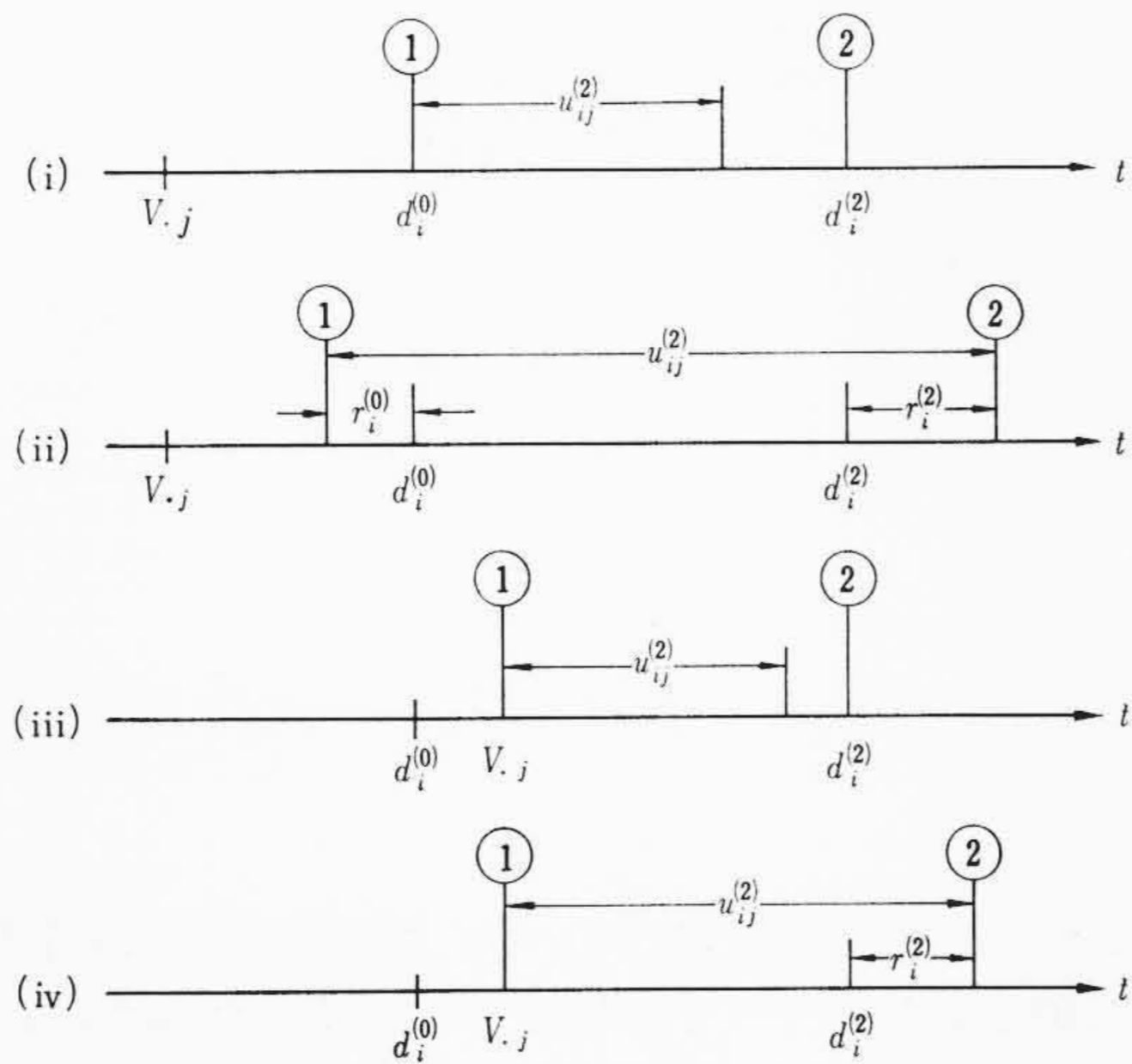
$$t_k = T_0 + (k-1)T; \quad k=1, 2, \dots, p \dots \dots \dots (18)$$

p は少なくとも次の条件を満たすほど大きくとらなければならない。

$$p > n, \quad T_0 + (p-1)T \geq \text{Max}_{i,j} (d_i^{(1)} + u_{ij}^{(1)}) \dots \dots \dots (19)$$

n 個の半製品の段間での処理時刻を暫定するために、これら半製品を p 個の処理時点のいずれかに最適に割りふることを考える。そのためには、 $n \times p$ のコスト行列 $\|R_{ik}\|$ を作らなければならない。 R_{ik} は半製品 i を段間の処理時点 k で前段から抽出した場合の損失である。半製品 i を処理時点 k に割り当てた場合の損失を、図4(b)で説明する。同図(イ)の場合には、 $d_i^{(1)}$ で前段に装入し、 $d_i^{(2)}$ で後段から抽出できるが、(ロ)のように、 $t_k - d_i^{(1)} < u_{i.}^{(1)}$, or/and $d_i^{(2)} - t_k < u_{i.}^{(2)}$ の場合には、 $d_i^{(1)}$ より前での前段への装入、または(かつ) $d_i^{(2)}$ よりあとでの後段からの抽出を行なわねばならない。半製品 i を処理時点 k で前段から抽出し後段に装入することによる損失 R_{ik} は、次のように求められる。

- (i) $t_k - d_i^{(1)} \geq u_{i.}^{(1)}, \quad d_i^{(2)} - t_k \geq u_{i.}^{(2)}$ の場合
 $R_{ik} = f_{i.}^{(1)}(b_i^{(1)}) + f_{i.}^{(2)}(b_i^{(2)})$
ただし、 $b_i^{(1)} = t_k - (d_i^{(1)} + u_{i.}^{(1)}), \quad b_i^{(2)} = d_i^{(2)} - (t_k + u_{i.}^{(2)})$
- (ii) $t_k - d_i^{(1)} < u_{i.}^{(1)}, \quad d_i^{(2)} - t_k \geq u_{i.}^{(2)}$ の場合
 $R_{ik} = g_i^{(1)}(r_i^{(1)}) + f_{i.}^{(2)}(b_i^{(2)})$
ただし、 $r_i^{(1)} = u_{i.}^{(1)} - (t_k - d_i^{(1)})$



① : 半製品*i*の後段への装入時刻
 ② : 半製品*i*の後段からの抽出時刻
 $d_i^{(0)}$: (1)の段階で決定された段階での処理時刻
 V_j : 処理装置*j*のあき時刻

図5 後段での処理装置の選択

(iii) $t_k - d_i^{(1)} \geq u_{i,j}^{(1)}$, $d_i^{(2)} - t_k < u_{i,j}^{(2)}$ の場合

$$R_{ik} = f_{i,j}^{(1)}(b_i^{(1)}) + g_i^{(2)}(r_i^{(2)})$$

ただし, $r_i^{(2)} = u_{i,j}^{(2)} - (d_i^{(2)} - t_k)$

(iv) $t_k - d_i^{(1)} < u_{i,j}^{(1)}$, $d_i^{(2)} - t_k < u_{i,j}^{(2)}$ の場合

$$R_{ik} = g_i^{(1)}(r_i^{(1)}) + g_i^{(2)}(r_i^{(2)})$$

半製品*i*がすでに前段に装入されていれば, $g_i^{(1)}(r_i^{(1)})$ は $r_i^{(1)}=0$ であれば0, $r_i^{(1)}>0$ であれば ∞ とすべきである。

この $\|R_{ik}\|$ は $n \times p$ の矩形行列である。しかし, $(p-n)$ 個の仮空の半製品と考え, これら半製品に対するコストをすべてゼロとすれば, $p \times p$ の正方形行列を得ることができる。したがって割り当て問題として段階の処理時刻を求めることができる。

(2) 処理装置の選択と装入抽出時刻の確定

(1)の段階では処理装置を直接的には無視しているが, 前後段でのブロック時間の最適配分を半製品の相互関係を考慮して行なっている。したがって, 処理装置の選択は, この段階の処理時刻を守ることを前提として行なわれるべきである。処理装置の選択については, 前後段とも本質的に同一であるので, 後段の処理装置の選択についてのみ説明する。(1)で求めた半製品*i*の段階での処理時刻を $d_i^{(0)}$ とする。

割り当て問題として処理装置の選択問題を解くため, 1処理装置に2個以上の半製品を対応させることはできない。したがって, $\text{Min}_{i,j} u_{i,j}^{(s)}$ 時間内に装入される半製品についてしか同時に考察し得ない。この時間を越えると, 1処理装置に2個以上の半製品を対応させる必要が出てくるため, この時間分ずつ処理装置の選択を行なわねばならない。

半製品*i*を処理装置*j*に装入する場合のコスト R_{ij} は, $u_{i,j}, V_j$ (処理装置*j*のあき時刻), $d_i^{(0)}, d_i^{(2)}$ との相互関係から, 図5の4とおりに分けて求める。

(i) $V_j \leq d_i^{(0)}$, $u_{i,j}^{(2)} \leq d_i^{(2)} - d_i^{(0)}$ の場合

$$R_{ij} = f_{i,j}^{(2)}(d_i^{(2)} - d_i^{(0)} - u_{i,j}^{(2)})$$

(ii) $V_j \leq d_i^{(0)}$, $u_{i,j}^{(2)} > d_i^{(2)} - d_i^{(0)}$ の場合

$$R_{ij} = \text{Min}_{0 \leq \lambda \leq \lambda_0} [g_i^{(0)}(\lambda r) + g_i^{(2)}(1 - \lambda r)]$$

ただし, $r = u_{i,j}^{(2)} - (d_i^{(2)} - d_i^{(0)})$, $\lambda_0 = \text{Min} \left[1, \frac{1}{r}(d_i^{(0)} - V_j) \right]$

(iii) $V_j > d_i^{(0)}$, $u_{i,j} \leq d_i^{(2)} - d_i^{(0)}$ の場合

$$R_{ij} = g_i^{(0)}(d_i^{(0)} - V_j) + f_{i,j}^{(2)}(d_i^{(2)} - d_i^{(0)} - u_{i,j}^{(2)})$$

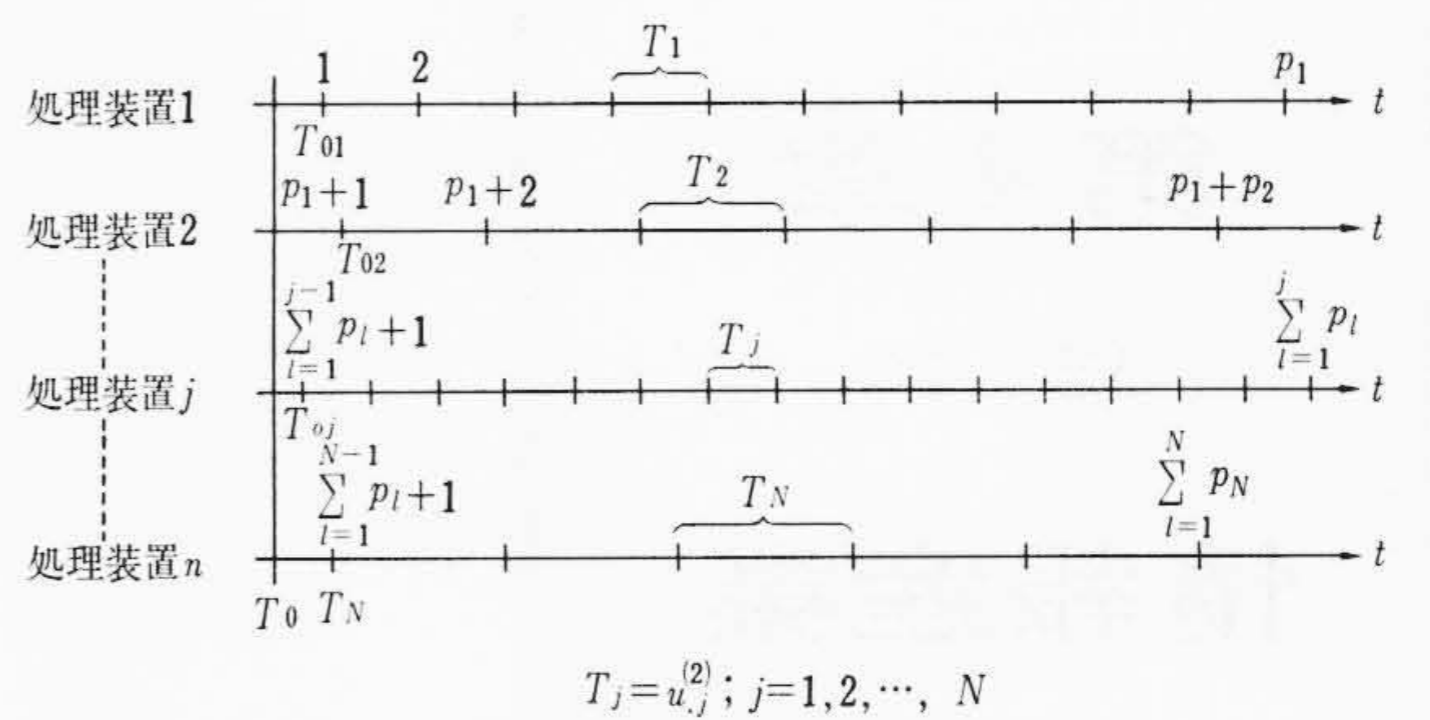


図6 処理装置別の段階での処理時点

(iv) $V_j > d_i^{(0)}$, $u_{i,j}^{(2)} > d_i^{(2)} - d_i^{(0)}$ の場合

$$R_{ij} = g_i^{(0)}(d_i^{(0)} - V_j) + g_i^{(2)}(V_j + u_{i,j}^{(2)} - d_i^{(2)})$$

上で用いた $g_i^{(0)}$ は $d_i^{(0)}$ より装入時刻がずれることによる損失を表わす関数である。

$$g_i^{(0)}(0) = 0, g_i^{(0)}(x) \geq 0, \frac{d^2}{dx^2} g_i^{(0)}(x) \geq 0$$

であって, できる限り(ii)~(iv)のような処理装置が選ばれないように, $g_i^{(0)}(x)$ は決められるべきである。

処理装置の選択では, $\text{Min}_{i,j} u_{i,j}^{(s)}$; ($s=1, 2$) の範囲内では, 半製品の相互関係は考慮できないが, 段階の処理時刻の暫定には, このような制限はない。したがって, 処理装置の選択で, 図5(i)に示したような処理装置を選ぶことができれば, この方式は理想的である。このようにして, 処理装置の選択ができれば, それにより装入抽出時刻を確定することができる。

4.3.2 方式 II

後段での半製品の処理時間が処理装置によって大幅に異なる場合には, 処理装置の選択の結果が図5(ii)~(iv)の場合となりやすい。後段での半製品の処理時間が処理装置によってほぼ定まる場合に, 本方式が用いられる。方式Iと異なる点は(1)であって, その相違点のみ述べる。

後段の処理装置*j*の平均処理時間 $u_{i,j}^{(2)}$ を T_j とする。考察初期時刻を T_0 とし, 処理装置*j*の T_0 以降の最初のあき時刻を T_{0j} とする。処理装置*j*がいまあいていれば, T_{0j} は T_0 である。図6のように, T_{0j} から T_j で時刻を刻み, 処理装置1から*N*までについて通し番号をつける。

方式Iの場合と同様, 半製品*i*を段階の処理時点*k*に対応させた場合の損失 R_{ik} が求めれば, 後段の処理装置の選択と段階での処理時刻の暫定とが行なわれる。前段での処理装置の選択と装入抽出時刻の決定とは, 方式Iの(1)と同様に行なわれる。

5. 結 言

多段処理工程で段階の相互関係が強い場合を分岐合流システムと呼び, そのスケジュール制御方式を述べた。分岐合流システムでは, ブロック効果の大きいこと, 過渡特性の悪いことを示し, スケジュール計算を行なうときに考察すべき基本的事項を明確にした。

本報告で述べたスケジュール制御方式は, 鉄鋼一貫工程や自動車生産工程への適用が図られてきている。

本研究にあたって終始懇切なご指導をいただいた日立製作所中央研究所三浦部長に対し深謝する。

参 考 文 献

(1) 森口ほか: 数学公式II 岩波全書
 (2) Dantzig, G. B.: Linear Programming and Extensions, Princeton Univ. Press. (1963)