

産業用高速光ループネットワーク 「トランクネットワーク」

High-Speed Optical Network for Industrial Systems "TRUNK NETWORK"

近年、産業システムは大形・分散・高度化し、更に個別設備としての電気・計装・計算機システムを、有機的かつ効率的に集約する統合化システムに進展する傾向にある。このような状況の中で、システムの核となるネットワークには伝送の大容量化、多様な通信機能の統合化、高信頼化が求められている。

本稿は、このような要請を受けて開発した32Mビット/秒光ループネットワーク「トランクネットワーク」のねらい、課題及び特長について述べる。

具体的には、計算機間でのパケット・機能コード通信とコントローラ間のサイクリック通信を統合できる伝送方式、光バイパスとループバックの併用が安定かつ高速に実行できる網構成制御方式などを開発することによって、産業用基幹ネットワークを実現した。

浜田卓志* *Takuji Hamada*
岡田政和** *Masakazu Okada*
山本敏文** *Toshifumi Yamamoto*
小山行雄*** *Yukio Koyama*

1 緒 言

鉄鋼、電力、上下水、交通、FA(Factory Automation)など大規模な産業用システムでは、プロセス単位に分散配置された複数の制御用計算機やデジタルコントローラ、プロセス入出力装置などを、高速のネットワークで結合した分散制御システムを構築することがますます要求されつつある。更に、個別設備としての電気・計装・計算機システムを、有機的かつ効率的に集約する統合化システムに進展する方向にある。これに伴って、ネットワークシステムにはデータ伝送の大容量化、多様な通信機能の統合化、及び従来以上の高信頼化が要求され、分散制御システム内で幹線系として位置づけられつつある¹⁾。

以上のような背景のもとに、光伝送技術、ネットワーク技術を駆使した32Mビット/秒トランクネットワークを開発した。以下、開発のねらい、課題及び技術的特長を中心に、その内容について述べる。

2 トランクネットワークの概要

2.1 分散制御システムの統合化

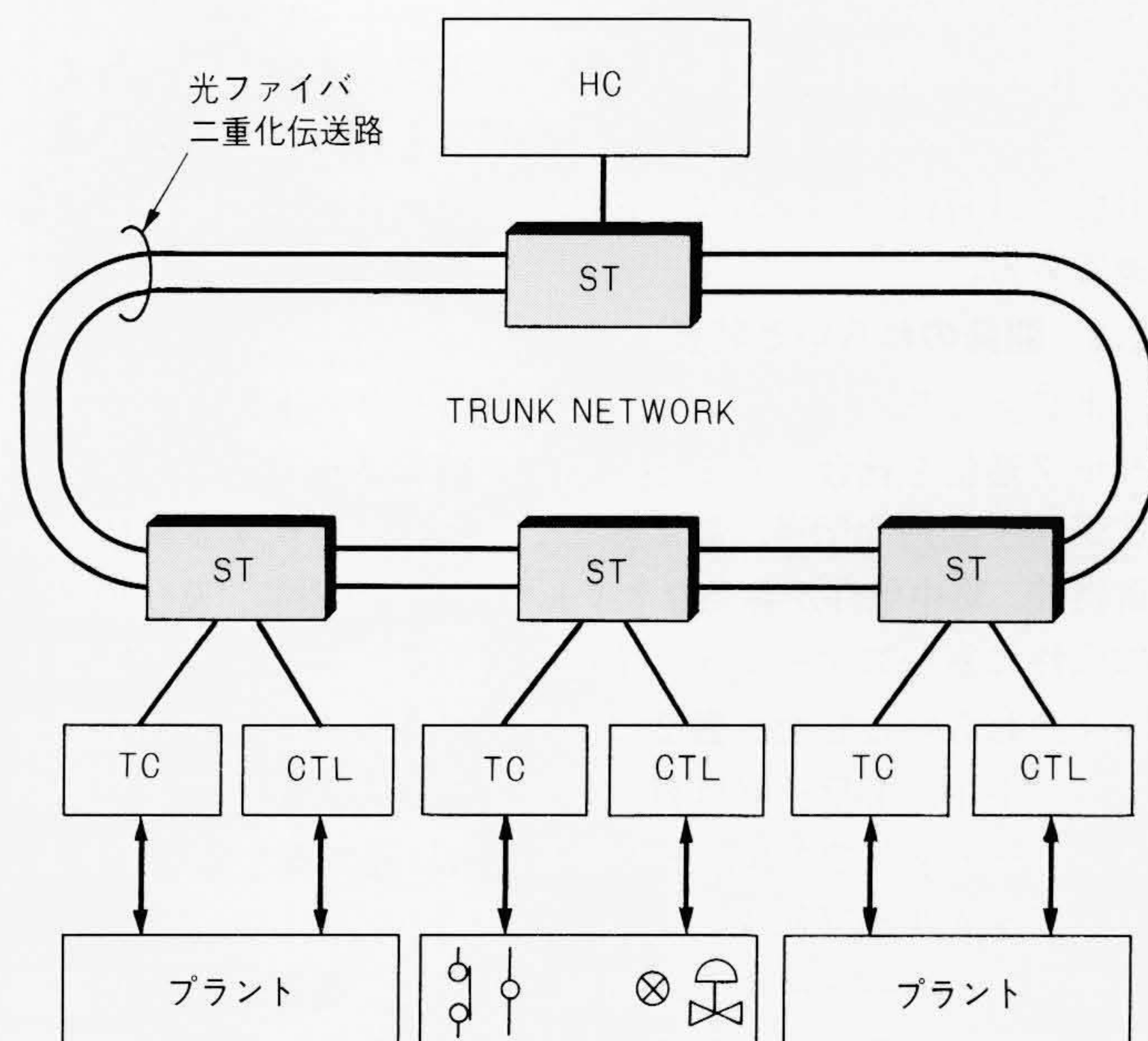
トランクネットワークを用いて構成した分散制御システムの具体的な構成例を図1に示す。プラントに近接して、制御用計算機やコントローラを設置してローカルな制御を実行させるとともに、ホスト計算機がネットワークを介してこれらを統括管理・制御する。伝送路は光ファイバケーブルによってループを形成し、各機器はステーションと呼ばれる伝送装置を介してネットワークに加入する。

このようなトランクネットワークに要求される通信機能に

は、表1に示す2種類がある。

(1) パケット・機能コード通信

計算機間あるいは計算機とコントローラ間で管理・制御のメッセージを転送する。転送要求発生ごとにバースト的な送



注：略語説明 HC(ホスト計算機) CTL(コントローラ)
TC(端末計算機) ST(ステーション)

図1 トランクネットワークシステム構成 トランクネットワークは、プロセス制御のような一般産業分野に適用される。

* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所大みか工場 *** 日立電線株式会社日高工場

表1 パケット通信とサイクリック通信の伝送特性比較
パケット・機能コード通信では、バースト発生データを高スループットに、一方、サイクリック通信では、データを連続的に高レスポンスで伝送する。

通信種類	パケット及び機能コード	サイクリック
特 性		
応 用 例	計算機ネットワーク	高速DDC
転 送 形 態	個別あて若しくは同報	同 報
トラヒック	バースト	連 続 (周期1〜512ms)
性 能	スループット (数十キロバイト/秒以上)	レスポンス (数ミリ秒以下)

注：略語説明 DDC(Direct Digital Control)

信を行うが、通信ソフトウェアの誤り制御によって高信頼な通信を実現している。なお、パケット通信ではデータに個別のあて先を付けるが、機能コード通信ではデータにその内容を示す機能コードを付け、各ステーションが自分に必要なデータだけを選択受信するグループ同報を特長とする。

(2) サイクリック通信

コントローラ相互間でプロセス入出力データを周期的に同報転送する。本通信はデータ転送に際し、広帯域な伝送性能を利用して通信ソフトウェアの介在を不要としたので、高速DDC(Direct Digital Control)などで必要とされる数ミリ秒の応答性を実現できる²⁾。

これらの通信は、従来別々のネットワークで構築されていたが、一つのネットワーク上に実現することによって電気・計装・計算機システムなどの個別設備システムの統合化を推進できる。

2.2 開発のねらいと特長

トランクネットワークでは、上記のパケット通信とサイクリック通信を統合することに加え、基幹ネットワークとして広帯域・高速な伝送、高信頼化システムを実現する網構成制御機能、集中保守が容易なネットワーク管理機能、及び増設・拡張性に富むステーション構造を持つネットワークの実現を開発のねらいとした。表2にトランクネットワークの仕様を示す。本ネットワークは自律分散システムを実現するためのコンポーネントであり、その特長は次に述べるとおりである。

(1) 高速光ループ伝送

光ファイバケーブルの適用によって、悪環境下でも高品質な伝送を実現するとともに、高性能な光リピータを開発することによって基幹ネットワークとして必要な32Mビット/秒の高速・長距離伝送を実現した。

(2) 統合伝送機能

バースト発生する計算機データを高効率に伝送(パケット・機能コード通信)する機能と、連続発生するリアルタイムデータを低遅延に伝送(サイクリック通信)する機能の両方を実現

表2 トランクネットワークの基本仕様
トランクネットワークは高速の光ループネットワークで、統合通信能力と高度なネットワークRASが特長である。

項 目	仕 様
伝 送 路 構 成	ループ
伝 送 速 度	32Mビット/秒
伝 送 線 路	光ファイバケーブル
ステーション間距離	最長2 km(バイパス時4 km)
ステーション台数	最大64
通 信 機 能 (アクセス制御)	・パケット・機能コード(スロットアクセス) ・サイクリック(FA-TDMA)
R A S	・網構成制御 (バイパス, ループバック, マスタ交替ほか) ・ネットワーク管理 (障害探索, 網操作, 運転管理)
接 続 機 器	・計算機(HIDIC V90シリーズ) ・コントローラ(HISEC 04M) ・インテリジェントI/Oコントローラ

注：略語説明
FA-TDMA(固定割付形時分割多重アクセス)
RAS(信頼性, 可用性, 保守性)

した。

(3) 高度な網構成制御

バイパス, ループバックによって障害の切離し, 再結合を高速かつ自動的に行う。また, マスタステーション機能の対等分散化, 孤立時のローカルループ機能も実現し, 高信頼化システムを実現した。

(4) ネットワーク管理機能の充実

保守を容易にするため, 各種の障害探索機能, ネットワークの監視・運用の手助けを行う運転管理機能, 点検・試験を容易にするための網操作機能など多数のメニューがある。

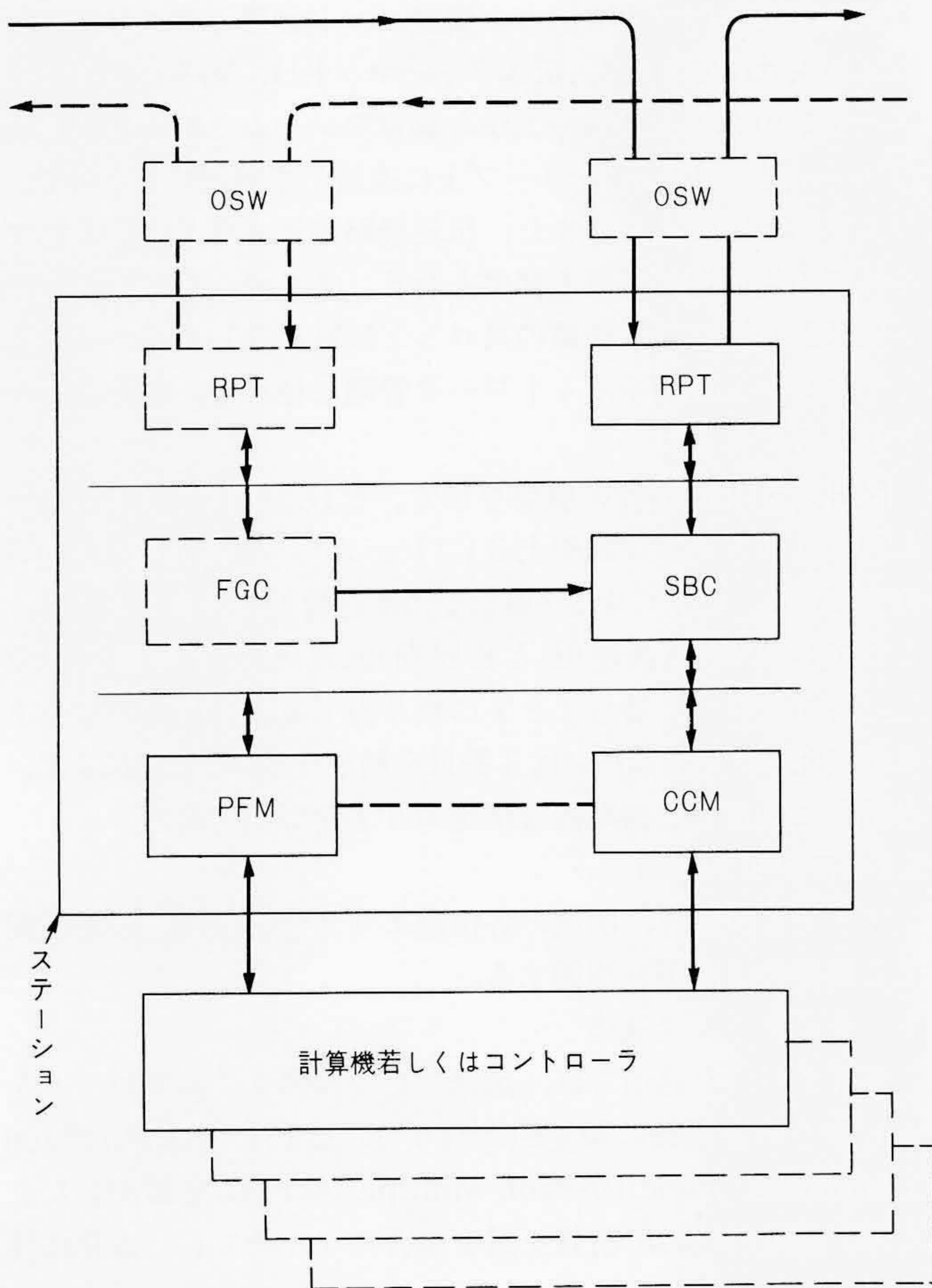
(5) 増設・拡張性に富むステーション構造

ステーションは二階層のバス構造として, 複数機器の接続を可能とし機器当たりの伝送コスト低減, 機器増設性の向上を図った。また, ユーザーの要求信頼度に応じた機能モジュールの組み合わせが容易で, システムへの適用性に優れている。

2.3 ステーションハードウェア構造

図2に, トランクネットワークのステーションのハードウェア構成を示す。本装置は二階層のバスを中心にしたモジュラ構造を特長としている。各モジュールは, 同一サイズのプリント板で実現され, 実線は基本機能部を, 点線はオプション機能部を各々表す。各モジュールの機能は次に述べるとおりである。

(1) OSW(光スイッチ)



注：略語説明 OSW（光スイッチ） PFM（パケット・機能コード通信インタフェース部）
RPT（リピータ）
FGC（フレーム生成部） CCM（サイクリック通信インタフェース部）
SBC（ステーション制御部）

図2 ステーションハードウェア構成 二つのバスを持ったモジュラ構造により、機器の増設、ステーション機能の拡張が容易である。

2入力×2出力形の光スイッチから成り、ステーションの障害時に光バイパスを行う。

(2) RPT(リピータ)

光—電気・電気—光変換機能、中継機能、符号—復号機能、及び網構成制御ハードウェアから成る。

(3) FGC(フレーム生成部)

伝送フレームの生成、周回遅延時間の補償、及びフレーム同期制御を実行する。マスタとなるステーションは、本モジュールを必要とする。

(4) SBC(ステーション制御部)

伝送タイミング生成・制御、網構成制御、及びネットワーク監視を実行する。

(5) PFM(パケット・機能コード通信インタフェース部)

多重スロットアクセス制御、計算機・コントローラとのインタフェースを実行する。

(6) CCM(サイクリック通信インタフェース部)

固定スロットアクセス制御、コントローラとのインタフェースを実行する。

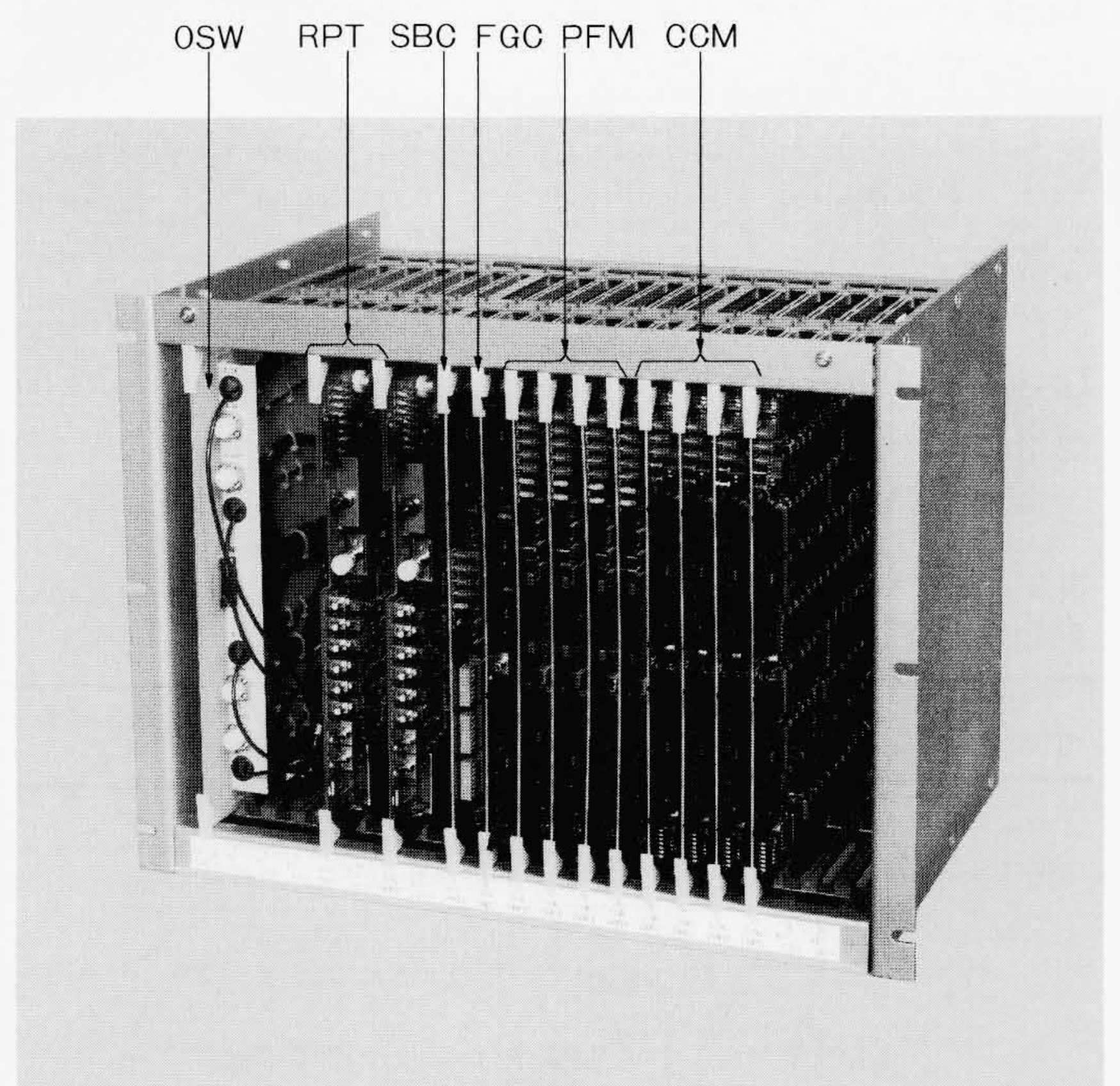


図3 ステーションユニットの外観 機能モジュールを全実装した場合のステーションユニットの外観を示す。

本ステーションは、オープンエンドなバスによって種類の異なる複数の機器を接続できるだけでなく、光スイッチ、リピータ、フレーム生成などのモジュールを選択することで、ステーション自体の機能もプリント板の挿抜で簡単に変更できる。

図3に、各機能モジュールを実装したステーションユニットの外観を示す。本ユニットは、電源及びファンとともにキュービクルに実装される。

3 統合伝送方式

3.1 光伝送系

構内用基幹ネットワークであるトランクネットワークでは、高性能な光デバイスを開発することによって、32Mビット/秒の高速・大容量な伝送系を実現している。

表3に光デバイスの主要諸元を示す。伝送路は光ファイバケーブルによるループ構成をとり、必要に応じ光スイッチを伝送路とステーションとの間に挿入し、ステーション装置故障時にこれをバイパスさせる。発光素子には長波長LED(発光ダイオード)を、受光素子にはAPD(アバランシェホトダイオード)を採用する。受信系は3R(Reshaping, Retiming, Regenerating)中継のためのタイミング抽出機能を持つ。伝送路符号には、入力信号列が変わっても符号の持つ性質が変わらないBSI(Bit Sequence Independence)性があり、直流分の変動が少なく、タイミングの安定再生が行え、かつ動作クロック周波数を低く抑えられるという高速伝送に向いた性質を持つ8B10B(8Binary to 10Binary)を採用した。

図4にリピータボードの外観を示す。本ボードには光送受信部、タイミング抽出部、符号・復号化部などが内蔵されている。ここで符号・復号化部にはLSI〔ECL(Emitter Coupled

Logic)ゲートアレー]を採用して小形化を図った³⁾。

3.2 多重化方式

トランクネットワークでは、前節で述べた高速伝送路上でパケット・機能コードとサイクリックの各通信に適した伝送を同時に実現することが必要である。このため、多重化方式はタイムスロットをベースとしたSTDM(Synchronous Time Division Multiplexing)とした。これにより、サイクリック通信用に連続・周期的な転送が容易にできるとともに、バース

表3 光デバイス仕様 32Mビット/秒トランクネットワークに用いる光デバイスの仕様をまとめてある。

項 目		製 品	TRUNK NETWORK32
光ファイバ	種 類		石英系GI形50/125
	損 失		1dB/km以下
	帯 域		400MHz・km以上
光スイッチ	機 能		2インプット×2アウトプット ブロックスライド式
	損 失		2dB以下
	動 作 時 間		Max.25ms
光送信器	発 光 素 子		長波長LED
	最大送信レベル		-20dBm
光受信器	受 光 素 子		APD
	最小受信レベル		-39dBm

注：略語説明
GI(グレーデッドインデックス) APD(アバランシェホトダイオード)
LED(発光ダイオード)

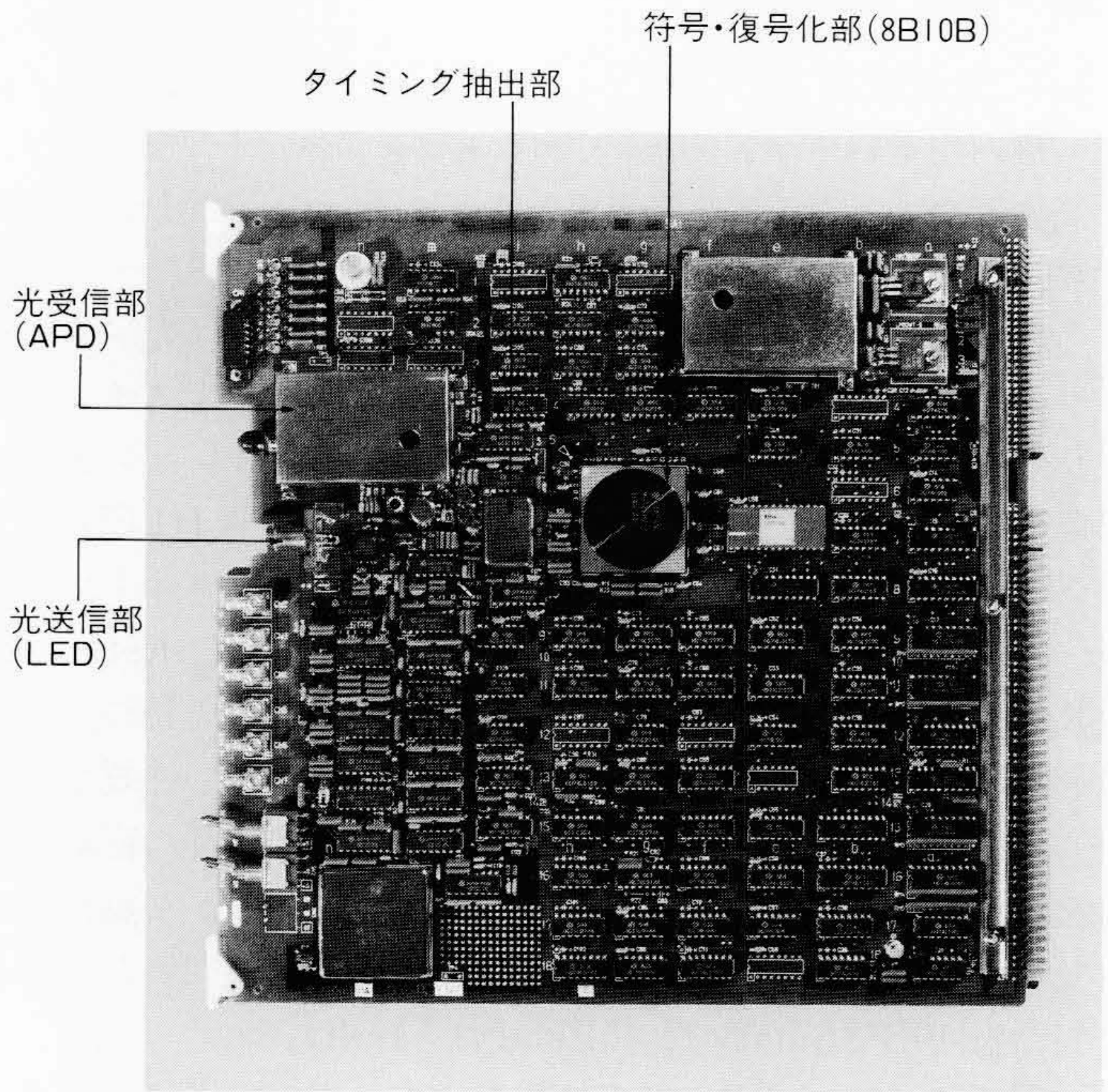


図4 32Mビット/秒リピータの外観 本プリント板には、光送受信、タイミング抽出、符号・復号、網構成制御用ロジックなどが含まれている。

ト的な転送を行うパケット・機能コード通信とのエリアの割当てが柔軟にできる⁴⁾。伝送フォーマットは、図5に示すように一定数のタイムスロットから成るフレームと呼ぶ伝送単位(フレーム長：125μs)をループ上に連続して形成するもので、マスタ局が実行する。また、伝送経路中にメモリを挿入してループの周回遅延時間の補償も行う。各スロットはすべて同一長(32バイト)で、先頭のスロットは特にフレームヘッダとしてフレーム同期やネットワーク管理に使用し、残りがデータ伝送用である。

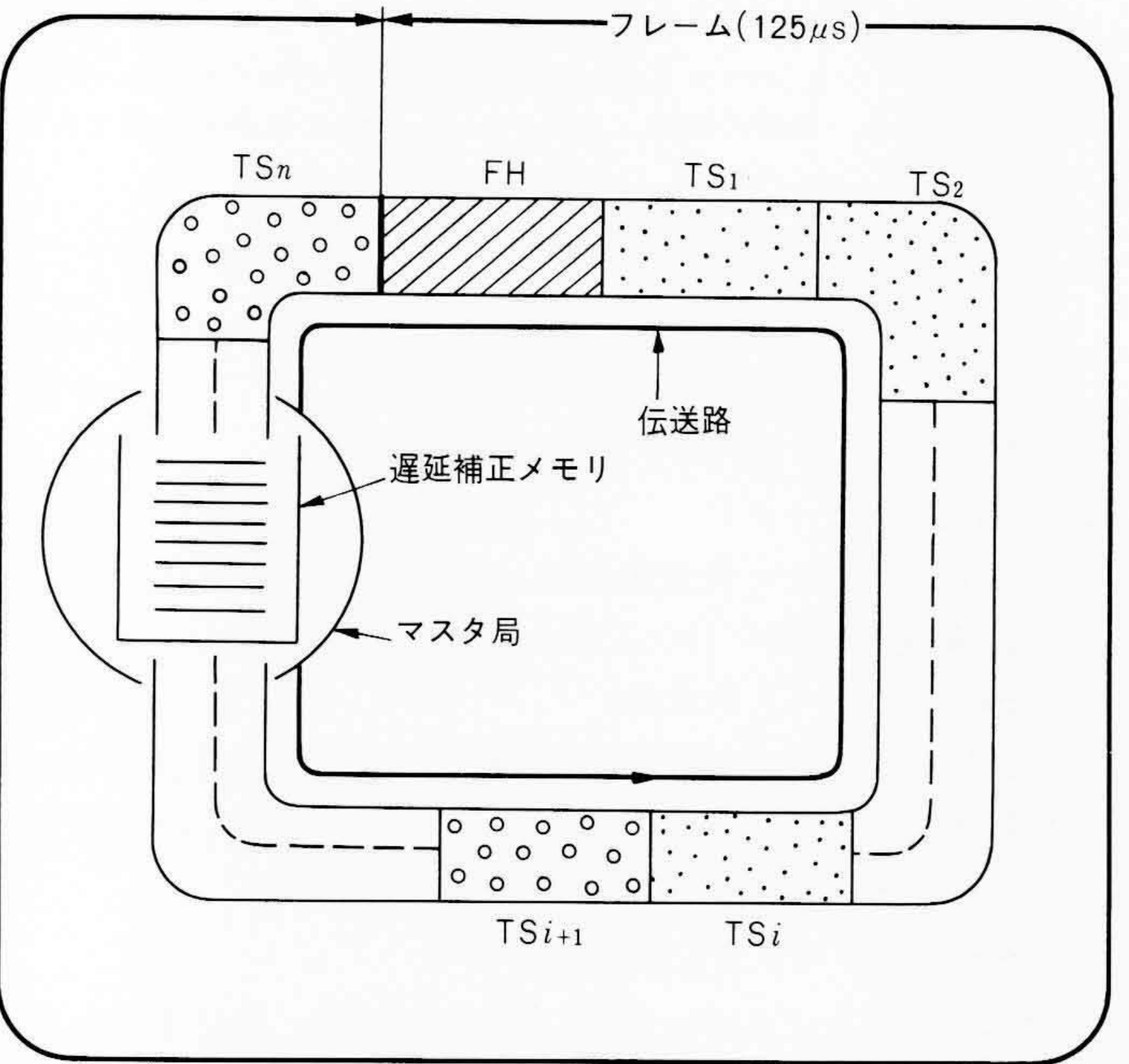
図6にSTDM動作の概要を示す。なお、同図では1フレーム内のスロット数は説明上3(フレームヘッダも省略)と簡単化している。サイクリック通信での転送周期は多様であるが、ここでは短周期(高速用)と長周期(低速用)の2種類で代表し、各々スロット番号1と2に割り当てる。同様にパケット及び機能コード通信には3番目を割り当てる。これにより、各通信に独立した周期的な伝送エリアが形成できる。

3.3 アクセス制御

アクセス制御は、前述の各伝送エリアを複数の機器が使用する場合の送信権を制御する。

(1) サイクリック通信

サイクリック通信では、伝送フレーム内タイムスロットをあらかじめ各機器に固定的に割り付けるFA-TDMA(Fixed Assignment-Time Division Multiple Access)を採用した。ただ、低速(長周期)情報を送る場合のマルチフレーム化に伴



注：略語説明など FH(フレームヘッダ), TS(タイムスロット)

- フレームヘッダ
- サイクリック通信エリア
- パケット・機能コード通信エリア

図5 伝送フォーマット マスタ局からタイムスロットをベースとするSTDM(Synchronous Time Division Multiplexing)フレームを生成する。

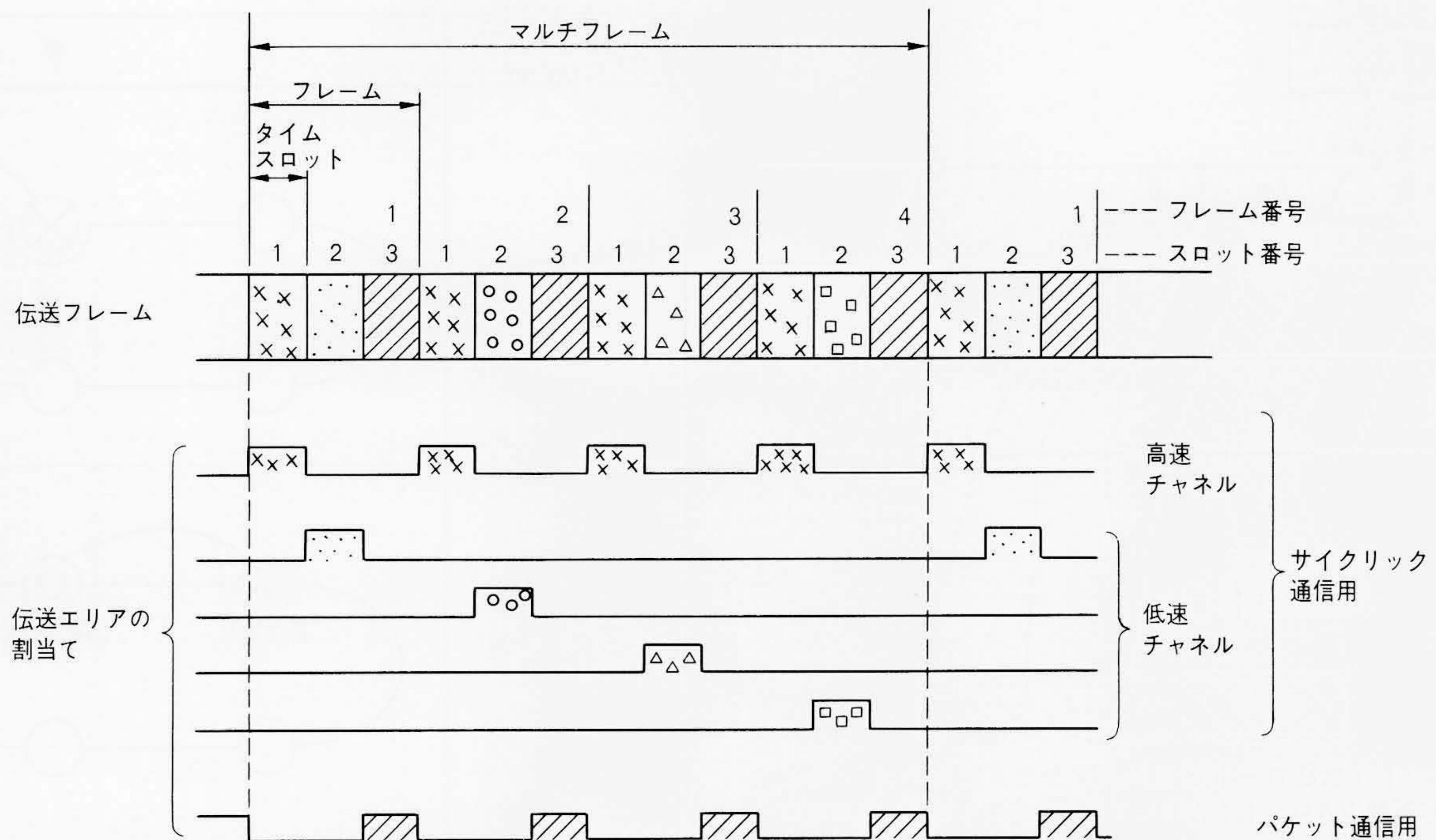


図6 STDM(Synchronous Time Division Multiplexing)の原理 高速用サイクリックと低速用サイクリック及びパケットの各通信に、タイムスロットを割り付けた場合を示している。

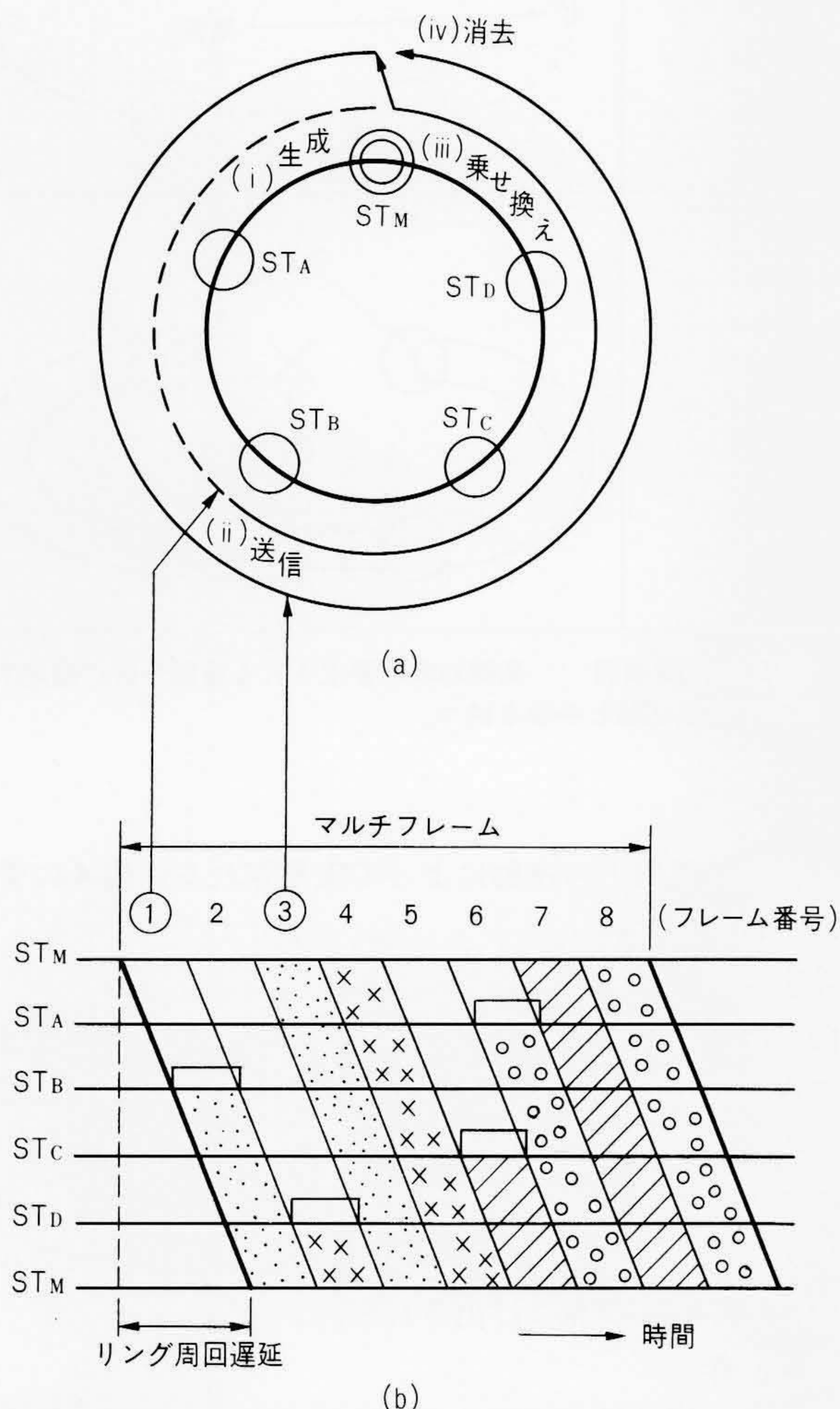


図7 低速サイクリック通信向きアクセス制御方式 本方式では、マルチフレームを形成して低速データの伝送点数を増加する場合にも、伝送遅延の増加は防止できる。

う伝送遅延の増加は防止する必要がある。これに対し日立製作所は、図7に示すようにマルチフレーム構成法に工夫を加え、マスタ局で転送周期に相当する伝送遅延の挿入を不要とした⁵⁾。

図7(b)は物理的なループ遅延が2フレーム分、情報の転送周期が8フレーム分に相当する例で、説明を簡単化するためフレーム内の情報は低速サイクリックデータだけとした。本例では、フレーム1, 2, 5, 6を送信用とし、3, 4, 7, 8はそれらに対応する受信用とすることで、伝送遅延を物理的なループ遅延分(2)以上にしない。伝送局2の転送動作に着目すると、本方式は同図(a)のように伝送路を2周回する伝送チャンネルを形成していることが分かる。

(2) パケット・機能コード通信

パケット及び機能コード通信では、データブロックを一度に転送するため、割り当てられたすべての伝送エリアを各機器が使用できるように、図8に示す多重スロットアクセスを採用した⁶⁾。機器側からの転送要求はパケット単位であるので、ステーション内のPFM(パケット・機能コード通信インタフェース部)モジュールではこれを複数のタイムスロット単位に分割し、割り当てられた伝送エリアが空のときに伝送路上に送信する。その際、同一モジュールからのデータは他モジュールのデータと混在しないように、空タイムスロットを連続占有できるアクセス方式を開発した。これにより、複数モジュールから同報データの送信が同時に発生した場合の余分なデータ再送を不要とした。なお、上位層の処理については計算機あるいはコントローラで実行されるが、これらは従来のデータフリーウェイ、 $\mu\Sigma$ ネットワークなどで開発されたハードウェア、ネットワークオペレーティングシステムなどのソフトウェアがそのまま使用できるようにしている^{7), 8)}。

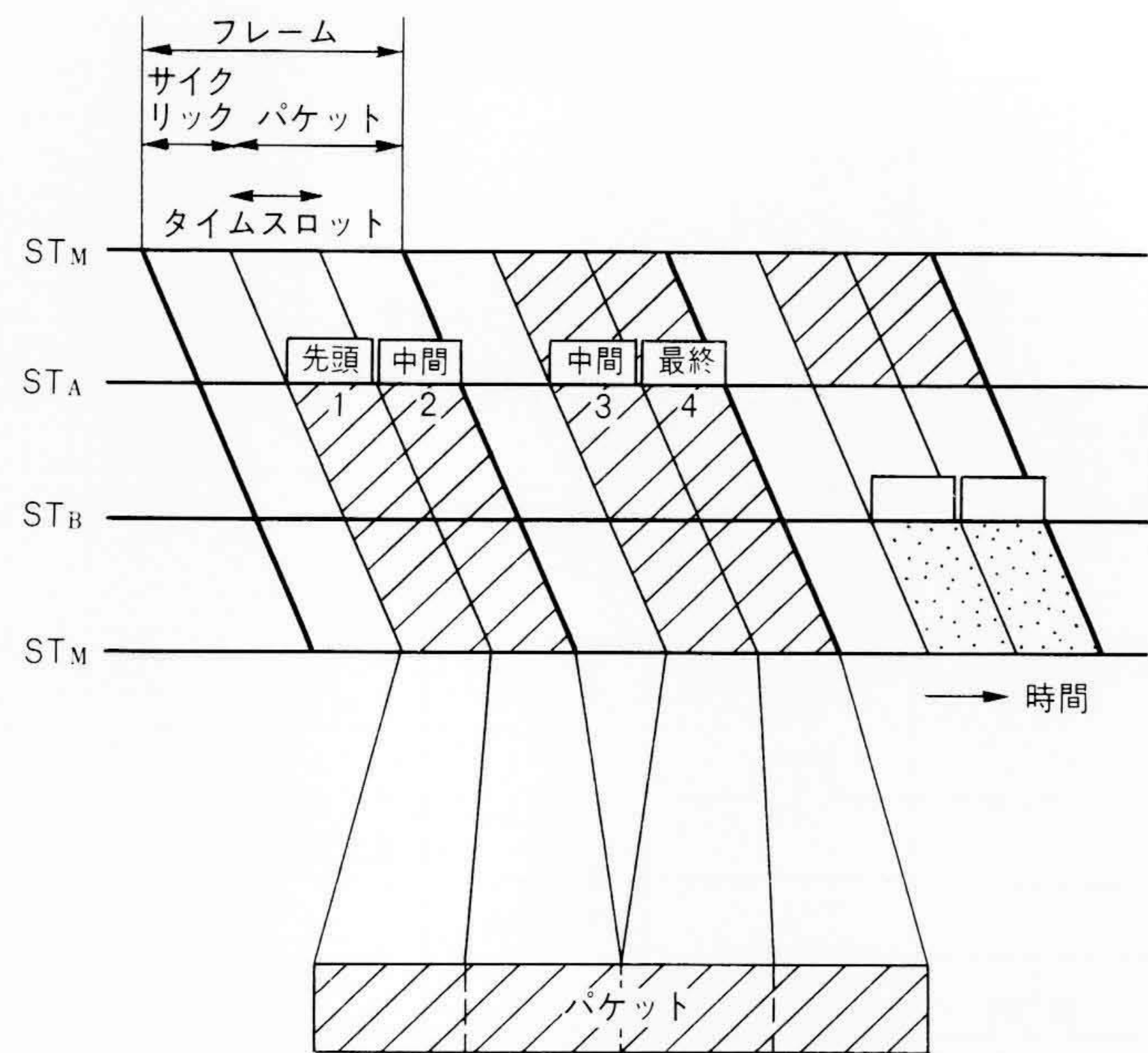


図8 パケット・機能コード通信向きアクセス制御方式 本方式では、一度に複数のスロットを占有して同報伝送する場合、受信確認が容易である。

4 ネットワーク高信頼化方式

4.1 網構成制御

本機能は、ネットワーク障害部位の切離しと回復部位の再結合を自動的に行うもの⁹⁾である。トランクネットワークでは自律分散思想を取り入れ、ネットワークの稼働率向上を図った。制御項目を図9に示す。ここでバイパスは光と電気レベルの2種類を可能とし、前者が電源断、後者が制御論理故障で作動する。マスタ交替については、各ステーションがFGCモジュールを持つことでマスタ機能のN重バックアップ構成を可能とした。ローカルループは、ステーションがネットワークから孤立した場合でも、該当する装置内の機器間では情報転送を可能とする。ループバックは二重ループ構成で片系障害の発生又は両系障害の発生で作動する。

本機能の特長は、最も複雑なループバックも1秒以内に構成を完了でき、伝送じょう(擾)乱時間を最小に抑えられるという高速性と、図10に示す光バイパスとループバック併用で代表される安定性にある。同図(a)は併用の利点を示しており、複数の障害(本例では局1と4で電源断)が発生した場合にネットワークの細分化を防止する。しかし、バイパス箇所が連続した場合、この区間が規定の伝送ロスを超え不安定なネットワーク構成動作を引き起こす危険性がある。本問題点に対して、日立製作所は同図(b)に示すように連続バイパス箇所を確実に検知し、これをループバックで切り離す方法を開発して、併用のメリットを生かしながらネットワークの安定動作も実現した。

4.2 ネットワーク管理

ネットワーク管理は、ネットワークの保守・運用・管理のためのマンマシンインタフェースを提供するもので、各ステーション〔主にSBC(ステーション制御部)モジュール〕とシ

項 目	概 要
バ イ パ ス	
マ ス タ 交 替	
ロ ー カ ル ル ー プ	
ル ー プ バ ッ ク	

図9 網構成制御項目 高稼働率が要求される産業分野に適用するため、多様な障害切離し手段を持つ。

ステム管理計算機との連動によって実現される。表4に管理項目の一覧を示す。

(1) 障害探索

本機能は、ネットワーク内での障害の有無及びその部位を指示する。伝送路障害は、マスタ局からの網構成制御情報を収集することで障害に隣接するステーションが判明する。バイパスステーションは定期問合せでの未応答によって、不正アドレスステーションはアドレス収集結果と登録テーブルとの比較によって各々見つけ出される。

(2) 網 操 作

障害箇所の切分け・試験のため、ローカルな操作手段としてバイパスやローカルループ操作、折返しテスト機能がある。また、リモートからの操作手順として、指令によるマスタ交

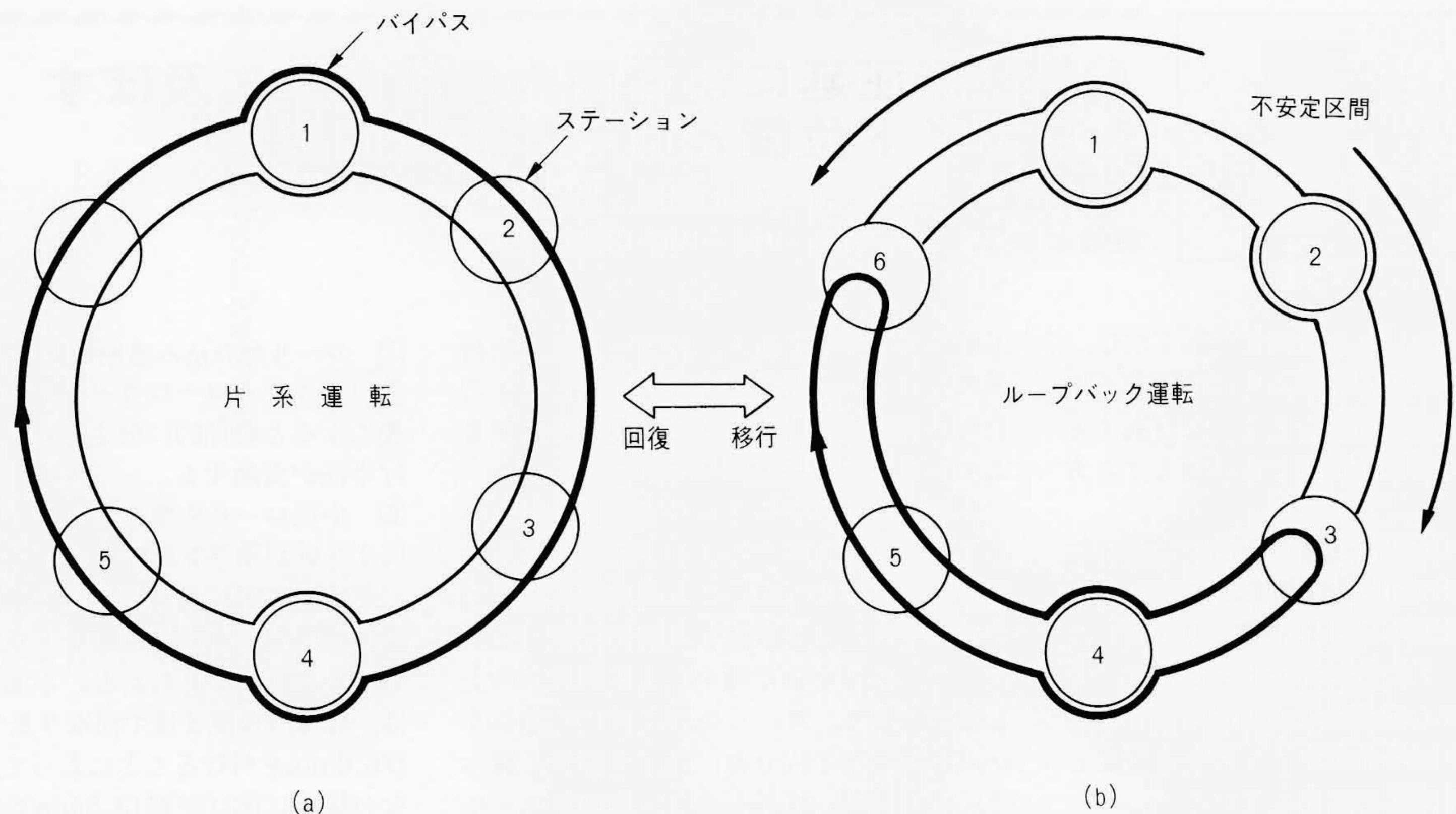


図10 光バイパスとループバック併用時の網構成制御法
ループバックにより切り離す。

連続しない障害箇所はバイパスで、連続する障害箇所は

表4 ネットワーク管理項目 各種の項目によって、ネットワークの保守・運用・管理のためのマンマシンインタフェースを提供している。

分類	項目
障害探索	• 伝送路障害 • バイパス局 • 不正アドレス局
網操作	• バイパス・ローカルループ • 折返しテスト • マスタ立上げ • ループバック指令・解除
運転管理	• 伝送経路表示 • 運用局・モジュール表示 • 負荷率測定 • トレース・メモリダンプ • 障害情報積算・収集

替、指定ループバック制御がある。

(3) 運転管理

現状の伝送経路、運用中ステーション、運用モジュールの表示を行う。負荷率は指定時間内のパケット及び機能コード通信用スロットの利用率計数によって行う。また、各ステーションで網構成状況、プログラム動作記録やメモリダンプができる。更に、各種のエラー情報も収集、積算する。

5 結 言

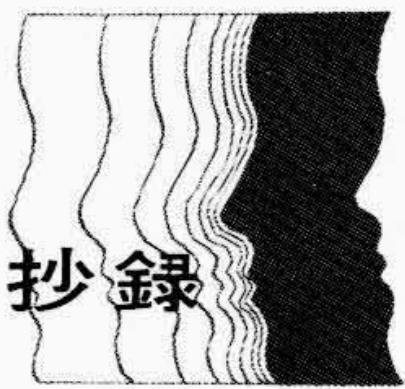
以上、産業用基幹ネットワークとして開発した32Mビット/秒トランクネットワークの開発技術とその成果について述べ

た。本ネットワークは、計算機間通信でのパケット・機能コード通信と、コントローラ間でのサイクリック通信を統合化するとともに、自律分散思想による網構成制御、集中保守のためのネットワーク管理など高度なRAS (Reliability, Availability, Serviceability)機能を持つ。これにより、新しいシステムニーズに対応できるネットワークシステムの実現を可能にした。

今後、いっそうの高速化・高性能化を図るとともに多様な機器との接続性の向上、広域網接続などの検討を進める考えである。

参考文献

- 1) M.Takahashi, et al.: High-Speed Optical Fiber Loop Network System for Distributed Computer Control, Hitachi Review, 35, 183~188(1986-8)
- 2) 川崎, 外: マイクロコンピュータ応用を中心とした圧延プラント制御システム, 日立評論, 65, 2, 147~152(昭58-2)
- 3) 伊地知, 外: 高速光LAN用8B10B符号変換LSIの開発, 電子情報通信学会全国大会, 2406(昭62-3)
- 4) 浜田, 外: 高速マルチメディア統合LANの検討, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.85, No.111, CS85-51(昭60-8)
- 5) 浜田, 外: 高速リング型LANでの伝送方法の一検討, 情報処理学会, 第33回全国大会, 4U-1(昭61-10)
- 6) 浜田, 外: スロットリングLANにおけるスロットヘッダ軽減の一方策, 電子情報通信学会全国大会, 1846(昭61-3)
- 7) 満岡, 外: 高性能光データウェイシステムの開発, 日立評論, 63, 3, 173~178(昭56-3)
- 8) 安元, 外: HIDIC V90/50入出力システム, 日立評論, 63, 12, 857~862(昭56-12)
- 9) 高橋, 外: 分散プロセス制御用光ループ伝送システム, 日立評論, 65, 10, 681~686(昭58-10)



くさび形圧延による面内曲げ加工に及ぼす 入口ガイド位置とロール形状の影響

日立製作所 山田 収・村上碩哉・他1名
塑性と加工 28—313, 194~199 (昭62-2)

くさび形圧延による面内曲げ加工法は、長方形断面薄板素材を幅方向に圧下率を変えて、くさび形断面となるように圧延することによって薄板を面内で曲げ加工する方法である。

この加工方法は、通常の方法では曲げ加工困難な薄板の面内曲げ加工に適しており、(1)打抜きに比較して材料歩留まりが高いことから、リング状製品の加工法として、また、(2)高能率な連続加工が可能であることから、熱交換器用冷却フィンの製造方法として最近応用範囲が広がっている。

しかし、このくさび形圧延による面内曲げ加工法は、曲げ半径の小径化、素材の薄肉化、加工速度の高速化に伴って、曲げ半径がばらついたり、縁波、割れなどの成形

不良が生じやすくなり、安定した加工が行われないという問題点がある。そこで、これらの問題点を解決して応用範囲を広げることが重要な課題となっている。

本論文では、アルミニウム薄板を対象として、片持ち支持した大小2本のロールを用いたくさび形圧延による面内曲げ加工での成形不良の発生原因を実験的に調べた。次いで、曲げ半径に関する成形限界の向上を目的として、ロール先端に設けた面取りが成形後のひずみ分布に及ぼす影響を調べた。その結果、成形不良は、素材がロールにかみ込まれる直前に発生するしわ、及び曲げ変形以外の素材の変形(二次変形)に起因していることを明らかにし、次の結論を得た。

(1) ロールかみ込み直前に発生するしわは、入口ガイドとロールギャップ中心間の距離が長くなると周期的に発生し、それに伴い曲げ半径が変動する。

(2) 小径ロール先端に面取りを付けることにより成形限界が向上する。この理由は、くさび形圧延による面内曲げ加工の基本変形の肉厚分布が直線ではなく双曲線となることにあると考えられる。本実験の範囲では、面取り角度2度で面取り長さ4.5mm及び6.0mmを付けることによって、面取りがない場合に曲げ半径12.5mmで成形不良が発生するのに対して、7.5mmまでほとんど成形不良がなく安定した成形が可能となり成形限界が向上した。

ステンレス鋼の抵抗圧接法における接合条件と接 合部品質の関連 —インサート材を用いた抵抗圧接法の研究(2)—

日立製作所 梶原良一・志田朝彦・他3名
溶接学会論文集 5—1, 59~64 (昭62-2)

通常の突合せ抵抗溶接は、被溶接材の突合せ端面が溶融する高入熱条件でないと、突合せ面全面を均一かつ高強度に接合できないため、接合後の変形が大きく精密部品の接合に適さない。これに対して、適当な材質のインサート材を用いる抵抗圧接法は接合面を集中的に加熱でき、しかも被接合材の母材とインサート材のや金的反応を利用して低い温度で接合できるため、小さい変形で高強度の継手が得られる可能性がある。ただし、初期のインサート材がそのまま接合部に残存した場合は、強度や耐食性の面で品質の低下が考えられるため、インサート材をできるだけ接合部から排出して、接合層と母材を均質化することが重要と考えられる。

第1報の論文で、SUS304の被接合材に対しNiろう、SUS304、Agろうの各粉末をインサート材に用いて抵抗圧接現象を検討し、(1)硬さの高いインサート材を用いることによって、接合面をより集中的に加熱できる、(2) SUS304材に対してNiろう粉末をインサ

ート材に用いると、被接合材を直接抵抗圧接する方法に比べて、低い接合電流で高強度かつ低ひずみの継手が得られる、(3)インサート材を用いる抵抗圧接法は、被接合材とは異質な接合層を数マイクロメートル以下と薄くでき、かつ母材のインサート材中への溶解による希釈効果が大きいので、1秒以下の短時間に均質化を行える、などの点を明らかにした。

本論文では、SUS304の被接合材に対してNiろう粉末をインサート材に選び、接合電流、加圧力、入熱形態などの接合条件が継手の機械的及びや金的性質に与える影響について検討を行った。

被接合材の形状は突合せ面が直径8mmの丸棒とし、インサート材は最大粒径が150 μ mで平均粒径100 μ mのBNi-2ろう材粉末を用いた。ろう材の液相線は970 $^{\circ}$ C、固相線は1,000 $^{\circ}$ C、硬さ H_V 700である。接合装置には、最大電流60kA、最大加圧力19.6kNの単相交流スポット溶接機を用いた。

検討の結果、(1)加圧力密度を98MPaから

49MPaと下げることによって、150A/mm²以上の接合電流条件域で引張強度及びひずみ量の改善が図れ、電流密度157A/mm²、接合時間0.2秒の条件で変形量が0.1mm、引張強度が600MPa以上(母材並み強度)の継手が得られること、(2)被接合材の変形量が0.2mm一定となる条件で、接合時間0.08秒電流密度254A/mm²、加圧力密度49MPaの短時間大電流形入熱条件では、接合層中の融点低下元素Siが完全に母材レベルに達して均質化するのに対し、長時間小電流形の5.0秒、58A/mm²の条件では、接合層中央部に高濃度のSiを含む共晶組成物が、フィルム状に濃縮されて残存すること、すなわち長時間加熱より瞬間加熱のほうが接合部の品質に優れること、(3)上記の理由は、瞬間加熱方式のほうが界面を集中的に加熱できるため、変形量を同一に設定した場合、接合層の温度をより高く加熱できることに頼ること、などの点を明らかにした。