情報制御用ループ型 ATM-LAN のシステム構成と信頼度評価の検討

正 員 高橋 正弘 ((株)日立製作所 日立研究所)
 正 員 大倉 敬規 ((株)日立製作所 日立研究所)
 非会員 浜田 卓志 ((株)日立製作所 大みか工場)

System Configuration and Reliability Evaluation of Loop-type ATM-LAN for Information and Control Systems

Masahiro Takahashi and Yoshinori Ohkura (Hitachi Res. Labo., Hitachi, LTd.,)
 Takuji Hamada (Omika Works, Hitachi, Ltd.,)

In a network for an information and control systems, real time communication of large volume data and transmitting multimedia information such as video and voice has been required. In response to realize these requirements, adaption of an ATM(Asynchronous Transfer Mode)-LAN have been investigated. This paper describes a loop-type ATM-LAN for control use. In two kinds of system configuration, such as a dedicated ATM-switch with a loop mechanism and a general ATM-switch on the market, reliability evaluation of system reconfiguration is investigated. As a result, the loop-type ATM-LAN using the dedicated ATM-switch with a loop mechanism is found to be higher reliability and lower connection cost.

キーワード：情報制御システム、制御 LAN、ループ型 ATM-LAN、システム再構成制御、不稼働率

1. はじめに

情報処理と制御を統合した情報制御システムは、産業・社会生活を支える基盤として定着し着実に発展している。その適用範囲は、電力、交通、上下水、鉄鋼、一般産業の F A ・物流、非製造業の情報サービスと広範囲にわたる。

このような情報制御システムを支える通信ネットワークに対しては、情報制御の高度化・高精度化の要求を受けて、更なる高速化とリアルタイム性の向上が要求されると共に、画像・音声などのマルチメディア通信、オープン化、構内・広域にわたるシームレス化、低価格化が強く求められている。(1)

一方、汎用ネットワークの世界では、ATM (Asynchronous Transfer Mode: 非同期転送モード) が次世代の WAN, LAN, インターネット構築の基幹ネットワーク技術として、ATM Forum (参加企業700社以上) において標準化がほぼ完成しつつあり、また各分野でその実用化が急速に立ち上がりつつある。(2)(3)

従来の情報制御システム分野のネットワークは、一つの伝送メディアを共有した(ループ、バス型)同報通信を主体としたネットワークであった。(4)これに対して ATM-LAN は、スイッチングハブを中心としたメディア非共有のコネ

クションオリエント、トラヒック制御/帯域保証が可能などの特徴を有したネットワークであるが、そのまま情報制御システム、特に制御分野に適用することは、コスト、障害時のシステム再構成制御、制御 LAN の通信機能の収容などの点で十分とは言えない。そこで、ATM方式の特徴、機能等を失うことなく、ループ型のシンプル性を導入した ATM-LAN が検討されている。(5)(6) (7)ループ型の ATM-LAN を構築する方法として、

(a) 標準、汎用の ATM スイッチを利用して、ループ接続を行い、コネクションの設定により通信路を確保すると共に障害発生時のシステム再構成制御としてはコネクションの変更、あるいは二重化 ATM スイッチ/光ファイバー伝送路の切換えにより通信を継続する(汎用 ATM スイッチ利用のループ接続型 ATM-LAN)

(b) FDDI と同様にループ型アクセスプロトコルを有するシェアードメディア型の専用 ATM-LAN で、障害発生時のシステム再構成制御としてループバック、光バイパスによりシステム全体の通信を継続する(ループ機構組み込み型専用スイッチ ATM-LAN) の二通りが考えられる。

本稿では、情報制御システム、特に制御 LAN にループ型 ATM-LAN を導入する時のシステム構成方法について検討し

た。具体的には、上記した二通りのシステム構成方法、汎用ATMスイッチ利用のループ接続型ATM-LANとループ機構組み込み型専用スイッチATM-LANについて、障害発生時のシステム再構成制御方式の信頼度評価、比較を行うと共に、この信頼度を確保するための接続コストについても比較評価した。

2. 情報制御システム分野へのATM-LAN適用

〈2.1〉制御LANにおける要求条件

図1に情報制御システムのシステム構成例を示す。システムは、広域ネットワーク、イーサネットなどの情報LAN、FDDIをベースとした制御LAN、及びフィールドLANの4階層に分類される。この中で、制御LANに要求される機能、特性は次のようである。

(1) 大容量リアルタイム通信

プロセス制御の高速応答性を可能とするため、大量プロセス情報を一定周期（1ミリ秒程度）でブロードキャスト、メモリに転写するサイクリック通信、或いは機能コード通信、パケット通信等の多様なトラフィック条件下でリアルタイム性を確保する必要がある。

(2) 高信頼ネットワーク

ネットワークの障害に対しては、二重化、障害時自動交替等のシステム再構成を高速に行い情報制御システム全体停止の回避と迅速なシステム回復が必須である。

(3) 産業用ネットワークの特性

プラント、プロセス単位にサブシステムを構成するためサブシステムでの伝送容量は画像情報が入らない限り155Mbps程度で十分である。かつ産業分野では接続すべき装置（コントローラ、サーバ等）は比較的広域にかつまばらに配置（装置間は百m～2km程度）されており、また一つの通信ノードに装置が少数（大半は、1ノード1装置）で

ある。

また、今後はさらに情報LANと制御LANの統合、マルチメディア通信、構内・広域にわたるシームレス化等を実現していくことが求められている。

従来、上記した制御LANでは厳しいリアルタイム性と信頼性の点から独自の制御LANが使用されていた。しかし、最近ではオープン化、低コスト性の点から標準化されたFDDIが制御LANとして使用されている。FDDIでは、トークン周回時間保証メカニズムに基づくパケットの優先転送、転送帯域保証が可能であり、これを利用してリアルタイム通信を実現している。

しかし、今後の情報制御システムの通信ネットワークは、更なる大容量リアルタイム通信、マルチメディア統合、構内／広域シームレス化の要求に応えるため、高速（～622Mbps、2.4Gbps）、QOS(Quality of Service)制御可能、スケラブル等の観点からATM-LANが導入されると予想される。そこで、産業分野での情報制御システム、特に制御用ネットワークへのATM-LANを適用する場合のシステム構成について以下検討を進める。

〈2.2〉評価対象のATM-LAN システム構成

上記した情報制御システム分野へのATM-LAN導入要求に対して、汎用ATM-LANをそのまま適用できることが、開発投資、制御／情報融合の点から望ましい。前節の産業用ネットワークの特性で述べたように、システム全体の伝送容量が限られている、接続すべき装置が広域に、疎に配置されている点などから、ループ状構成、シェアードメディア的な使い方がシステムの初期投資／拡張性、ケーブルリングコストから有利である。そこで、表1に示すように、ATM-LANの適用形態として、ループ状構成の3つのシステム形態を考える。

図1 産業用情報制御システムの構成
Fig.1 Configuration of Information and control systems for industrial use

表 1 ATM-LANシステム構成の比較
Table 1. Comparison of ATM-LAN system configuration

方式 項目	I. 汎用ATMスイッチ利用(一重系) (ループ+スター構成)	II. 汎用ATMスイッチ利用(二重系) (ループ+スター構成)	III. ループ機構組み込み型専用 ATMスイッチ利用 (ループ構成)
形態			
高信頼化 方式	予備VCへの切り替え	ATM-SWと光ファイバーの二重化	光バイパス+高速ループバック

- (1) 汎用ATMスイッチ利用 (一重系、ループ+スター構成)
市販の汎用のATMスイッチ (4、あるいは16ポートの小、中規模ATMスイッチ) をループ接続を行い、コネクションの設定で通信路を確保すると共に、障害発生時にはコネクションを変更し、障害部を切り離し通信を続行する方式であり、基本的にはループバックと同一である。コネクション変更をソフトで実行するため数十秒程度再構成に時間がかかる。
- (2) 汎用ATMスイッチ利用 (二重系、ループ+スター構成)
上記と同様に、標準、汎用のATMスイッチをループ接続を行うが、ATMスイッチ、光ファイバー伝送路とも二重化し、障害発生時に高速に切替えることにより、高速システム再構成を行う。二重化したATMスイッチと光ファイバー伝送路は、回線対応部で接続切り換えるができ、単純な二重化ループ切り換えより高信頼化を図ったシステム構成とする。
- (3) ループ機構組み込み型専用ATMスイッチ(ループ構成)
FDDIなどと同様なループアクセス機構を組み込むと共に、ATMスイッチ機能とネットワークインタフェース(NIC)機能を1ボードに一体化した、分散スイッチを構成し、これをループ接続することにより実現する。障害発生時には、ループバック、光バイパスの高速なシステム再構成が可能である。なお、光バイパスは2台以上の伝送ノードが連続的にバイパスすると光損失が大きくなり伝送不能になると仮定している。

3. ATM-LANシステム構成と信頼度評価

〈3.1〉信頼度評価モデル

前章で述べた3つのATM-LANシステム構成において、図2は、信頼度評価のシステムモデル、図3、4に汎用ATMスイッチ、ループ機構組み込み型専用ATMスイッチの伝送ノードの構成要素とその不稼働率を示す。

信頼度は障害発生時に任意の伝送ノード# iに接続された装置と中央のサーバーとの通信が継続できる割合、即ち

図2 信頼度評価システムモデル
Fig.2 Reliability evaluation model

図3 伝送ノードの構成と不稼働率(汎用ATMスイッチ)
Fig.3 Configuration of transmission node and unavailability (general ATM-switch on the market)

稼働率で評価する。このような、伝送ノードの構成において、次のような障害種別、および各要素の不稼働率を考える。なお、要素 k (k は、下記の添字 L, I, SW, NS, t に対応) の不稼働率 D_k 、稼働率 Q_k は次式で定義されるものである。

$$D_k = \text{平均修理時間} / (\text{平均故障間隔} + \text{平均修理時間}) \\ = 1 - Q_k \quad (1)$$

- (1) 障害 D_L, D_I : 光ファイバー伝送路の障害、障害要因としては伝送路の切断、コネクタ不良などである。
- (2) 障害 D_{SW}, D_{NS}, D_t : 汎用 ATM スイッチ、ループ機構組み込み型 ATM スイッチ、NIC 等における装置/ボード故障、供給電源断などの障害などである。

〈3.2〉 相対信頼度の定義

信頼度評価の尺度として、図2に示した評価モデル (2重化されたサーバ伝送ノードと N 台の伝送ノード) において、 i 番目の伝送ノードの不稼働率 $D_n(N, i)$ 、すなわちサーバからコントローラなどの接続装置が切り離される割合を用いた。但し、 n は前記した3種の ATM-LAN システム構成を示す。なお、以下の計算では $i = N/2$ に固定した。

更に各システム構成との相互比較を容易にするため、ループ機構組み込み型専用 ATM スイッチのシステムにおいて $N = 1$ の場合の不稼働率 D_B を基準として、次の相対信頼度を定義する。

$$R_n(N, i) = D_B / D_n(N, i) \quad (2)$$

なお各システム構成の不稼働率 $D_n(N, i)$ 導出の詳細な方法は、文献(8)を参照されたい。また、付録に下記(2)項のシステム構成について、不稼働率導出の概略過程を示す。

(1) 基準システムの稼働率

図2、図4において、 $N=1$ として下式を得る。

$$D_B = D_{NS}^2 + 4D_L^2 + D_{NS} \quad (3)$$

- (2) ループ機構組み込み型専用 ATM スイッチ(ループ構成)システム再構成制御として、ループバック、光バイパスを行うことから、下式を得る。

$$D_I(N, i) = D_{NS} + 4i(N-i)D_L^2 + D_{NS}^2 \quad (4)$$

(3) 汎用スイッチ利用 (一重系、ループ+スター構成)

本システム構成では、障害発生時には予備コネクションに切り換えることにより行うため、その不稼働率はループバックと同じとなり、下式を得る。

$$D_{2p}(N, i) = D_I + D_I + D_{SW} + (i-1)(N-i)D_{SW}^2 \\ + 4i(N-i)D_L^2 + (N-i)(4i-1)D_{SW}D_L \quad (5)$$

なお、 p は、ATM スイッチの装置接続のポート数を示し、ここでは、4と16ポートの場合を考える。(5)式は、 $p=1$ の場合を示しており、 $p=4$ では N を $[N/4]$ と、 i を $[N/4]/2$ と置き換えて計算する。 $[]$ は、少数点以下を切り捨て丸め操作を行う。

(4) 汎用 ATM スイッチ利用 (二重系、ループ+スター構成)

本システム構成では、二重化した ATM スイッチ、光ファイバー伝送路を正常系に切り換えることにより、通信を続行する。また、ATM スイッチと光ファイバー伝送路は、接続切り換えができ、単純な二重化ループより高信頼化した

図4 伝送ノードの構成と不稼働率(ループ機構組み込み型専用ATMスイッチ)

Fig.4 Configuration of transmission node and unavailability (dedicated ATM-switch with loop mechanism)

表2 システム・コスト算定基準
Table 2. calculation basis of system cost

項目	価格	備考
ネットワークインタフェースカード(NIC)	a	PCIバス、155Mbps 光ファイバー
小型ATMスイッチ	8 a	4ポート
小型ATMスイッチ(2重化)	12 a	SW部、電源2重化
大型ATMスイッチ	20 a	16ポート
大型ATMスイッチ(2重化)	30 a	SW部、電源2重化
(SW+NIC)一体化ボード	2 a ~ 3 a	155Mbps光ファイバー

価格はATM-LANが普及した段階での予想価格

ものとする。

$$D_{3p}(N, i) = D_I + D_I + ND_{SW}^2 + 2ND_L^2 \quad (6)$$

上式も(5)式と同様に $p=1$ の場合を示す。

〈3.3〉 システム・コスト算定方法と接続コスト

表2に、前節で述べた3つのループ型 ATM システムのコスト算定基準を示す。ループ機構組み込み型専用 ATM スイッチは、ATM スイッチ機能、NIC 機能、PCI バス・インタフェースなどを、例えば PCI サイズのボード1枚で構成した場合を想定した。ATM スイッチなどの価格は、かなり普及した段階での低価格が実現した場合を想定している。また、光ファイバーの敷設工事費用などは除外した。

伝送ノード関連のシステム・コストを $P_n(N)$ とすると、3種のシステム構成の価格は下記のように表わされる。なお、 n は3種の ATM-LAN のシステム構成を示す。

$$P_I(N) = 3a \times N \quad (7)$$

$$P_{24}(N) = 8a \times [N/4] + Na \quad (8)$$

$P_{2-16}(N), P_{3-4}(N), P_{3-16}(N)$ についても、(8)式と同様に求めることができる。なお、実際には(8)式で示したように、接続装置数 N と ATM スイッチ台数は関係なく、装置が疎に

図5 システム構成と相対信頼度

Fig.5 System configuration and relative reliability

図7 相対接続コスト

Fig.6 Relative connection cost

図6 システム構成と接続コスト (装置1台当たり)

Fig.6 System configuration and connection cost

配置されている場合には、これよりも ATM スイッチ台数が増え、システム価格が高くなる方向と考えられる。

ここで、前節で求めた相対信頼度 $R_n(N,i)$ を確保するための接続コストを下式のように定義する。

$$CP_n(N,i) = P_n(N) / R_n(N,i) / N \quad (9)$$

本 $CP_n(N,i)$ は、相対信頼度 $R_n(N,i)$ を得るための端末1台当たりの接続コストであり、小さい方が望ましい。また、各方式の $CP_n(N,i)$ 比較を容易にするため、下記の相対コストを定義する。

$$RP_n(N,i) = CP_n(N,i) / CP_1(N,i) \quad (10)$$

$RP_n(N,i)$ は、ループ機構組み込み型専用 ATM スイッチでループ構成したシステムを基準とした、上記相対信頼度を確保するための相対接続コストを表わしている。

〈3.4〉 計算結果とその検討

相対信頼度計算に用いる ATM スイッチ、ボードなどの不稼働率 D_k (k は、前記の添字 L, I, SW, NS, t に対応) は、オープンにされたデータがない。そこで、各伝送ノードを構成している LSI、光モジュールなどの部品点数とその故障率から概略の平均故障間隔 MTBF を求め、また平均修理時間 MTTR を 5 時間と仮定した。具体的には、 $D_L = D_I = 10^{-4}$ 、 $D_t = 5 \times 10^{-5}$ 、 $D_{NS} = 1 \times 10^{-4}$ 、 $D_{SW-4} = 1.5 \times 10^{-4}$ (4 ポート、一重系 ATM スイッチ)、 $D_{SW-16} = 3.5 \times 10^{-4}$ (16 ポート、一重系 ATM スイッチ) として、不稼働率の計算を行った。なお、ループ機構組み込み型 ATM スイッチは、PCI サイズのボード 1 枚で実現できるとしている。(7)

図 5 に接続端末台数 N と相対信頼度 $R_n(N,i) = D_B / D_n(N,i)$ を示す。図から明らかなように、接続装置数 N が少ないシステムにおいては、ループ機構組み込み型専用 ATM スイッチを使う方が、汎用 ATM スイッチ (一重系、二重系) を使うよりも高信頼度が得られることが分かる。産業分野の情報制御用 LAN では、接続装置数は 100~200 台のシステムが大多数であり、ループ機構組み込み型専用 ATM スイッチが十分有効であると言える。

図 6 は、前記の相対信頼度 $R_n(N,i)$ を得るための装置 1 台当たりの接続コストをしめす。システム・コスト $P_{2-4}(N)$ 、 $P_{2-16}(N)$ は、接続装置数 N が 4 ないし 16 毎に不連続に変化するが、図 6 のプロット数が少ないため、平均的な値を示している。接続コスト $CP_n(N,i)$ は、ループ機構組み込み

型専用 ATM スイッチが最も安価で、汎用 ATM スイッチ（二重系）、汎用 ATM スイッチ（一重系）の順であり、安価に高信頼度が得られることが分かる。従って、FDDI などのループ型システムで言われている、初期投資が少なく、かつ高い信頼度が得られると言うことが証明されたと言える。

図 7 の相対接続コスト $RP_i(N, i)$ は、図 6 の接続コストにおいて $CP_i(N, i)$ 、即ちループ機構組み込み型専用 ATM スイッチをベースとした場合の相対接続コストを示す。

4. まとめ

産業分野での情報制御システムにおいて、その通信ネットワークには大容量リアルタイム通信、画像・音声などのマルチメディア統合、オープン化、広域／構内シームレス化、低価格化が求められている。このような状況の中で、ATM-LAN の導入が検討されている。

本論文では、産業分野での制御情報システム、特に制御 LAN にループ型 ATM-LAN を導入する時のシステム構成について検討した。具体的には、汎用 ATM スイッチ利用のループ接続型 ATM-LAN とループ機構組み込み型専用スイッチ ATM-LAN のシステム構成について、障害発生時のシステム再構成制御とその信頼度評価について報告した。この結果、接続装置数が小さい領域ではループ機構組み込み型専用スイッチ ATM-LAN が信頼度も高く、かつこの信頼度を確保するための接続コストも安くできることを明らかにした。（平成 10 年 11 月 19 日受付、平成 11 年 2 月 24 日再受付）

文 献

- [1] 特集：変革期の新しいニーズにこたえる産業用情報制御システム：日立評論、77,7（平7-7）
- [2] 企業システムにATMを生かす：日経コミュニケーション、1995.8.21号
- [3] The ATM Forum：ATM USER-NETWORK INTERFACE(UNI) SPECIFICATION Ver.3.1('94)
- [4] 浜田ほか：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」：日立評論、69,11,pp.15-21（'87）
- [5] Y.Du,et al.：ATM local area networks using distributed switch architecture：IEEE GLOBECOM vol.1994,No. Vol 3,pp.1832-1838('94)
- [6] 鹿島ほか：プラント監視・制御用ATM-LANの実現方式：電子情報通信学会、1996年ソサイエティ大会 B-739
- [7] 高橋、大倉、浜田：監視制御用ループ型ATM-LANのシステム構成の検討：電気学会通信研究会資料CMN-97-29（平9）
- [8] 高橋、浜田、岡田：ステーションバイパスを考慮したループ再構成制御方式の信頼度評価、信学論(D),J71-D,12,pp.2622-2629(1988)

不稼働率 $D_i(N, i)$ の計算式導出

各システム構成の不稼働率は各構成要素の故障が独立かつランダムに発生すると仮定しているので、確率グラフの手法を使って計算することができる。具体的には、文献(8)にも示したように最小カットセット（故障すれば、入力と出力との間のすべての経路を断つような最小数のリンクの集合）を導入し、近似解を求める。ここでは、ループ機構組み込み型専用 ATM スイッチにおいて、ループバック、光バイパスを行う場合について示す。

図A・1 ノード*i*への経路
Fig.A・1 Connecting paths to *i*-th node

図A・1において、各構成要素の1重／2重故障までを対象とした場合、ノード #*i* に接続されたコントローラと2重化されたノードの制御サーバー間の通信が途絶する最小カットセットを以下ようになる。なお、ノード #*i* はループ構成でシビアサイドである $i = N/2$ とした。

- (1) ノード #*i* の障害（1重故障）と制御サーバーが接続された2重化ノードの障害（2重故障）
- (2) 右回りループ経路 A1 と左回りループ経路 A2 のそれぞれに光ファイバー伝送路障害が発生するとループバックによりシステム再構成を行う。このとき、例えば経路 A1（区間：サーバ・ノード～ST#1…～ノード #*i*）と経路 A2（区間：サーバ・ノード～ST#N…～ノード #*i*）において、それぞれ伝送路障害（2重故障）が発生すると、ノード #*i* がループから切り離される。この障害発生の場合数が $4i(N-i)$ となる。

なお、ノード #1～#N（#*i* は除く）の障害（2重故障）は、障害ノードが連続しない場合は光バイパス、連続する場合はループバックを行い、ノード #*i* とサーバ・ノード間の通信経路は確保でき、このため最小カットセットとならない。以上の結果から、(4)式のループ機構組み込み型専用 ATM スイッチ構成での不稼働率 $D_i(N, i)$ を得る。なお、汎用スイッチ利用のシステム構成についても、上記の考え方を適用して容易に導くことができる。

高橋 正弘 (正員) 昭42年東北大学工学部電気工学科

卒業、同年(株)日立製作所に入社。以来、日立研究所にて、遠方監視制御システム、制御用 LAN システム、通信会議システム、ナビゲーションシステムなどの研究・開発に従事。現在、同所技術主幹。電気学会。電子情報通信学会会員。工博。

大倉 敬規 (正員) 昭 63 年京都大学大学院工学研究

科修士課程終了。同年(株)日立製作所入社、日立研究所勤務。制御用 LAN システムの研究・開発に従事。電子情報通信学会会員。

浜田 卓志 (非会員) 昭 49 年電機大学工学部電気工学

科卒業。同年(株)日立製作所入社。日立研究所にて制御用 LAN の研究・開発に従事。平成 5 年から大みか工場にてネットワーク製品の開発に従事。