

# 組込みシステム用 IP バージョン 6 対応 TCP/IP プロトコルスタック : TINET-1.2

(第 7 回 LSI IP アワード応募書類 特徴の説明書)

阿部 司            吉村 齋            稲川 清

苫小牧工業高等専門学校 情報工学科

## 1 TINET-1.2 の概要

現在インターネットで主に使用されている IP バージョン 4 (IPv4) は、アドレスの枯渇等の問題があるため、IP バージョン 6 (IPv6) の開発が進められており、実験段階を終えようとしている。今後は、IPv4 から IPv6 への移行が本格化することが予想され、組込みシステムにおいても、IPv6 への対応が必要となる。IPv4 のアドレスが 32 ビットに対して、IPv6 のアドレスは 4 倍の 128 ビットとアドレス空間を大幅に拡大したほか、IP ヘッダ長の固定化やアドレスの自動設定など、IPv4 の欠点を改良している。このため、これらの処理に伴いプロトコルスタックのメモリ必要量の増加が予想されるが、組込みシステムのメモリ容量には厳しい制約があるため<sup>[1]</sup>、その対応が必要である。

組込みシステム用の TCP/IP プロトコルスタックである TINET<sup>\*1</sup> は、昨年第 6 回 LSI IP デザインアワードの IP 賞<sup>[2]</sup> を受賞した時点で、リリース 1.1 (TINET-1.1) であり、IPv4 のみの対応であったが、リリース 1.2 (TINET-1.2) からは IPv6 にも対応した。メモリ必要量に関しては、TINET-1.2 で、ネットワーク層として IPv4 を組込んだ場合は、RAM のメモリ必要量が約 10K バイト、ROM のメモリ必要量が約 47K バイト、メモリ必要量の合計では、約 57K バイトである。これに対して、実装方法を工夫することで、IPv6 を組込んだ場合でも、RAM のメモリ必要量が約 11K バイト (5.8%増)、ROM のメモリ必要量が約 63K バイト (35.5%増)、メモリ必要量の合計では、約 74K バイト (30.1%増) と ROM のメモリ必要量の増加は大きいですが、より制約の厳しい RAM のメモリ必要量の増加を低く抑えることが出来た。

TINET は、幅広く誰でも自由に利用・変更・配布できるように、オープンソースで配布している。また、名古屋大学情報連携基盤センターで行われている名古屋大学組込みソフトウェア技術者人材養成プログラムの中級コースで、TINET が教材として使用されている。同様の研修は、福島県ハイテック

ラザ及び北海道立工業試験場でも実施されている。

## 2 TINET-1.2 の特徴

### 2.1 実装方法

IPv4 に関しては、FreeBSD のベースとなった BSD UNIX の TCP/IP プロトコルスタックに実装されている各種アルゴリズムは、長年のインターネットにおけるプロトコル開発の成果が反映され、枯れたソフトウェアとなっており、事実上、他のシステムの見本となっている。そのアルゴリズムは組込みシステムの TCP/IP プロトコルスタックのベースとしても最適であるが、動的割当て構造体とリスト構造を積極的に使用しており、メモリ容量やリアルタイム性の制約から、そのまま組込みシステムの TCP/IP プロトコルスタックに適用することは適当ではない。このため、われわれは、動的割当て構造体とリスト構造を使用しないように、BSD UNIX の TCP/IP プロトコルスタックを改良し、組込みシステム用 TCP/IP プロトコルスタック TINET-1.1 を実装した。

一方、IPv6 に関しては、KAME プロジェクトによる IPv6 ソフトウェアは、実装方法に関してフィールドで十分な検証がなされており、組込みシステムの IPv6 実装のベースとしても最適である。しかし、やはり動的割当て構造体とリスト構造を積極的に使用しており、BSD UNIX の TCP/IP プロトコルスタックと同様の問題がある。

また、TAHI プロジェクトにより、非 PC 系デジタル機器への適用に向けた IPv6 最小要求仕様の検討<sup>[3]</sup> が行われ、組込みシステムの IPv6 への対応方法として参考となる IPv6 最小ホスト仕様を規定している。

そこで、われわれは、TINET-1.1 をベースとして、BSD UNIX の TCP/IP プロトコルスタックを改良した同様の方法により、KAME プロジェクトによる IPv6 ソフトウェアを動的割当て構造体とリスト構造を使用しないように改良し、IPv6 最小ホスト仕様に適合する TCP/IP プロトコルスタック TINET-1.2 を実装した。

<sup>\*1</sup> 名前の由来は、Tomakomai の T に、インターネットの略称である INET を組合わせている。

## 2.2 IPv6 最小ホスト仕様の概要

IPv6 最小ホスト仕様では、IPv6 最小ホストを以下のように定義している。

- ルータでないホスト
- 拡張ヘッダの付いたデータグラムを送信しない
- ネットワークインタフェースを1つだけ持つ

また、IPv6 最小ホスト仕様の概要を以下に示す。

### (1) IPv6 基本仕様 (RFC2460)

拡張ヘッダの付いたデータグラムを送信しない。受信に関しては、RFC2460 に定められている最低限の処理を行う。特に、メモリ容量の制約から、断片化されたデータグラムの再構成処理は最も省きたい機能であるとしている。

### (2) IPv6 近隣探索 (RFC2461)

以下に示すルータ用の機能を省略できる。

- ルータ通知メッセージの送信
- ルータ要請メッセージの受信
- 向け直しメッセージの送信

### (3) IPv6 アドレス自動設定 (RFC2462)

IPv6 最小ホストであっても、ルータ用を除く近隣探索機能は必須なので、アドレス自動設定機能は原則として全て実装すべきである。

### (4) ICMPv6 (RFC2463)

ルータでしか使用しない機能は省略できる。

## 2.3 リアルタイム OS とネットワーク API

TINET が現在対応する組み込みシステム用リアルタイム OS は、TOPPERS プロジェクトで開発された JSP カーネルである。JSP カーネルは、 $\mu$ ITRON 4.0 仕様のスタンダードプロファイル<sup>[4]</sup> 準拠で、高い実行性能と小さいメモリ使用量を特徴とし、オープンソースで配布されている。

また、応用プログラムとのインタフェースとなる API には、ITRON TCP/IP API<sup>[5]</sup> を実装した。本仕様は、(社) トロン協会の Embedded TCP/IP 技術委員会により策定され、ITRON 専門委員会により 1998 年 5 月に認定された。しかし、本仕様の策定時には、IPv6 に関する仕様が完全にフィックスしていなかったため、IPv6 への適用方法は別途検討することになっており、2005 年 2 月より検討を開始する予定である。このため、われわれは、暫定的に ITRON TCP/IP (バージョン 6) API 仕様を規定し、この仕様に従って実装を行った。

## 2.4 対象とする組み込みシステムの規模

組み込みシステム用プロセッサの規模には幅があるが、あまりにリソース制約の厳しいプロセッサに、TCP/IP プロトコルスタックを実装することは現実的ではない。このため、TINET-1.2 は、以下に示す規模の組み込みシステムを対象としている。

- (1)  $\mu$ ITRON 4.0 仕様のスタンダードプロファイル準拠のリアルタイム OS が動作するプロセッサ及びシステム。

- (2) メモリ容量は、ROM が 128K バイト、RAM が 32K バイト程度で、メモリ管理ユニットなし。また、組み込みシステム用プロセッサの現状では、ROM 容量には比較的余裕があるが、RAM 容量はあまり余裕がなく、RAM 容量の制約への対応が重要である。
- (3) TCP/IP の各ヘッダは、32 ビット単位で処理すると効率が良いため、C 言語の int が 32 ビットで、レジスタと ALU も 32 ビットが望ましい。

## 3 動作環境と使用したツール

実装ターゲットに関して、プロセッサは、(株)ルネサステクノロジ製 H8/300H シリーズの H8/3069F である。H8/300H シリーズは、16 ビット CPU であるが、レジスタと ALU が 32 ビットである。ただし、内蔵 ROM 容量に余裕はあるが、内蔵 RAM 容量は H8/3069F でも 16K バイトと小容量のため、現在は外部 RAM を増設している。また、ネットワークインタフェースは NE2000 互換のイーサネットである。

TINET-1.2 自体の開発に関して、われわれの開発環境では、Windows 2000/XP 上で動作する cygwin と、クロス開発用ツールである GNU C コンパイラと GNU バイナリツール等を使用しているが、JSP カーネルと同じ開発環境であり、Linux 等の開発環境で開発を行うことも可能である。

## 4 開発の経緯

われわれは、2000 年 7 月より、研究・教育に使用する目的で組み込みシステム用の TCP/IP プロトコルスタックの研究・開発を開始した。その後、2002 年 8 月からは、「組み込みシステム・オープンプラットフォームの構築とその実用化開発」プロジェクトに参加するとともに、ITRON TCP/IP API 仕様に規定されている基本機能の全ての実装を開始した。その実装が完了した 2003 年 6 月に、TINET リリース 1.0 の公開を開始した。さらに、2004 年 2 月に、改良した TINET リリース 1.1 を公開し、2004 年 9 月には、IPv6 対応の TINET リリース 1.2 を公開しており、2004 年 12 月末までに、約 3,300 件ダウンロードされている。また、複数の企業が採用予定であり、「組み込みシステム・オープンプラットフォームの構築とその実用化開発」プロジェクトにおいても、4 企業、2 公設試で TINET を採用しており、その波及効果が期待されている。

## 5 TINET-1.2 の実装

### 5.1 ネットワーク階層構成

TINET-1.2 のネットワーク階層構成を図 1 に示す。上は応用プログラムインタフェース (API) から、下はイーサネット・デバイスドライバまでの太枠内が TINET-1.2 で実装した部分である。TINET は、機種依存性をできるだけ排除し、多様

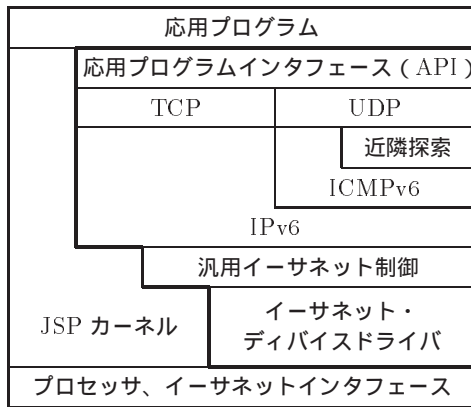


図1 TINET-1.2 (IPv6) のネットワーク階層構成

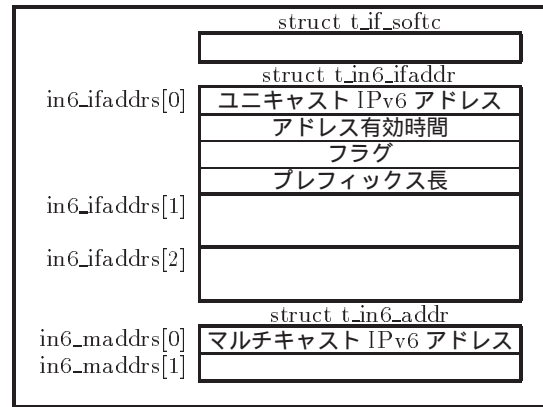


図2 ネットワークインタフェース構造体 (t\_ifnet)

な組み込みリアルタイム OS に対応するため、リアルタイム OS と応用プログラムの中間のミドルウェアとして位置付けており、TINET もリアルタイム OS の各種サービスを利用して動作している。

## 5.2 IPv6 最小ホスト仕様への対応

### (1) 拡張ヘッダ

拡張ヘッダ付きデータグラムを送信しない。受信に関しては、RFC2460 に規定された最低限の処理を行うが、メモリ必要量に影響しない範囲で、送信者に ICMP エラー通知を行っている。以下に各拡張ヘッダの処理方法を述べる。

- 中継点オプションと終点オプションは、パディング以外のオプションを全て未知オプションと見なし、オプションタイプの指示により後処理を行う。
- 経路制御ヘッダは無視する。
- 断片ヘッダ付き IP データグラムは全て破棄し、最後の断片ヘッダ付き IP データグラム受信時に、エラーを送信者に通知する。
- 認証ヘッダと暗号化ヘッダの付いた IP データグラムは破棄する。

### (2) 近隣探索

TINET-1.2 では、以下の機能を実装した。

- 近隣探索要請メッセージの送受信
- 近隣探索通知メッセージの送受信
- ルータ要請メッセージの送信
- ルータ通知メッセージの受信

### (3) アドレスの自動設定

TINET-1.2 では、以下の機能を実装した。

- リンクローカルアドレスの自動設定
- アドレスの重複検出
- ルータ要請メッセージの送信
- ルータ通知メッセージの受信

### (4) ICMPv6

TINET-1.2 では、ルータでしか使用しない機能と、ノード情報照会・応答機能及びマルチキャスト受信者照会・報告機能を省略した。

## 5.3 メモリ容量の制約への対応

### (1) RAM 必要量の抑制

ROM の制約に比べると RAM の制約が厳しいため、RAM が必要なアルゴリズムの使用は避け、ROM に割当てられるプログラムによる処理を優先した。以下に、例としてプレフィックスに関する実装方法を示す。

- 経路選択等では、IP アドレスのネットワーク部を取り出すために、プレフィックスマスクを用意しておく方法がある。しかし、IPv6 では 16 バイトのメモリが必要となるため、必要時にプレフィックス長からプレフィックスマスクを生成する方式とした。
- ネットワーク部の比較に関して、プレフィックスマスクで取り出したネットワーク部を比較する方法がある。この場合も、マスクしたアドレス 2 個分の 32 バイトのメモリが必要になるため、プレフィックス長だけアドレスを比較する関数を設けて、メモリを不要としている。

### (2) IPv6 アドレスの制限

割当て可能なアドレスを、リンクローカルアドレス、サイトローカルアドレス、グローバルアドレスの 3 個に限定し、静的に割当て、プレフィックスリストの管理も簡略化した。

### (3) 構造体の静的割当て

以下に示す構造体は、個数を限定し構造体配列で静的割当てしている。( ) 内は、個数と 1 エントリのバイト数で、個数が CFG となっている構造体は、コンパイル前のコンフィギュレーションで割当て数を決定する。

- 近隣アドレスキャッシュ (CFG, 36)
  - 重複アドレス検出情報 (1, 24)
  - デフォルトルータ (CFG, 28)
  - IP アドレス (3, 16)
  - マルチキャスト IP アドレス (2, 16)
  - マルチキャスト MAC アドレス (2, 6)
- 一例として、ネットワークインタフェース構造体 t\_ifnet を図 2 に示す。ネットワークイ

表1 IPv4とIPv6のメモリ必要量の比較

機能	RAM			ROM			計		
	IPv4 [バイト]	IPv6 [バイト]	増減率	IPv4 [バイト]	IPv6 [バイト]	増減率	IPv4 [バイト]	IPv6 [バイト]	増減率
TCP	2,100	2,160	2.9%	28,548	29,784	4.3%	30,648	31,944	4.2%
UDP	1,176	1,200	2.0%	4,706	4,798	2.0%	5,882	5,998	2.0%
近隣探索	-	554	-	-	11,690	-	-	12,244	-
ICMP	0	0	0.0%	1,266	1,822	43.9%	1,266	1,822	43.9%
IP	0	0	0.0%	946	3,232	241.6%	946	3,232	241.6%
ARP	178	-	-	2,494	-	-	2,672	-	-
TCP/IP 共通	60	48	-20.0%	2,168	4,604	112.4%	2,228	4,652	108.8%
汎用通信機能	1,156	1,156	0.0%	2,614	2,812	7.6%	3,770	3,968	5.3%
イーサネット	2,138	2,294	7.3%	3,490	3,994	14.4%	5,628	6,288	11.7%
バッファ管理	3,524	3,524	0.0%	268	268	0.0%	3,792	3,792	0.0%
通信機能計	10,332	10,936	5.8%	46,500	63,004	35.5%	56,832	73,940	30.1%
応用プログラム	6,792	6,898	1.6%	13,436	13,762	2.4%	20,228	20,660	2.1%
カーネル	5,398	5,420	0.4%	31,520	31,544	0.1%	36,918	36,964	0.1%
合計	22,522	23,254	3.3%	91,456	108,310	18.4%	113,978	131,564	15.4%

インタフェースは1個だけであるため、構造体 `t_ifnet` も1個だけ静的割当てしている。また、アドレスも、リンクローカルアドレス、サイトローカルアドレスおよびグローバルアドレスの3個に限定したため、構造体 `t_ifnet` 内に、配列 `in6_ifaddrs` として静的割当てした。これらにより、KAMEによるIPv6の実装では1Kバイトを超えるメモリを必要とする構造体 `t_ifnet` のメモリ必要量は144バイトとなり、大幅にメモリを節約した。

#### (4) デフォルトルータの制限

複数のルータからのルータ情報を受信可能であるが、個数はコンパイル前のコンフィギュレーションで決定し、超える場合は、有効時間を考慮してルータ情報を入れ替えている。

#### 5.4 IPv4とIPv6のメモリ必要量の比較

ネットワーク層として、IPv4とIPv6を選択した時のメモリ必要量の比較を表1に示す。ネットワークインタフェースはイーサネットで、応用プログラムとしては、TCP エコーサーバとクライアント、及びUDP エコーサーバとクライアントを実装した。以下に、IPv4に対するIPv6のメモリ必要量の増加を考察する。

##### (1) 全体的なメモリ必要量の増加

全体的には、RAMのメモリ必要量は732バイト増加し、増加率が3.3%であり、ROMのメモリ必要量は16,854バイト増加し、増加率が18.4%である。メモリ全体では、17,586バイト増加し、増加率が15.4%であるが、対象とする規模の組み込みシステムのメモリ容量の制約を満たしている。特に、RAMのメモリ必要量の増加を極めて低く抑えることができた。

##### (2) 近隣探索

ROM全体のメモリ必要量における増加量の合計は16,854バイトであり、近隣探索処理による増加が11,690バイト(増加合計の69.4%)

で、近隣探索処理におけるメモリ必要量の増加が大きい。また、RAMのメモリ必要量の増加も大きく、RAM全体のメモリ必要量における増加量の合計は732バイトであり、近隣探索処理による増加が、554バイト(増加合計の75.7%)になった。近隣探索は、IPv6の特徴的な機能であるが、ROMとRAMのいずれも、他の階層に比べて最もメモリ必要量が多い。

##### (3) ICMP

ROMの必要量の増加率は43.9%であるが、ルータでしか使用しないICMPv6の機能を省略したことにより、RAMのメモリ必要量の増加はなく、ROMのメモリ必要量の増加も556バイトで、増加を低く抑えることができた。

##### (4) TCP

ROMのメモリ必要量が増加しているが、これはIPv6において、アドレスの比較やコピーが単純な演算ではないことや、拡張ヘッダをスキップしてTCPヘッダを探索する処理等に起因するものである。

##### (5) IP

ROMのメモリ必要量の増加が241.6%と大きいのが、基本入出力部はそれほど増加はなく、拡張ヘッダの入出力処理による増加が大きい。IPに関するROMのメモリ必要量の55.8%を、この拡張ヘッダの入出力処理が占めている。

##### (6) TCP/IP 共通機能

TCP/IP共通機能も、ROMのメモリ必要量の増加が多い。これは、IPv6のアドレス管理や汎用アドレス操作関数による増加である。

##### (7) イーサネット

イーサネットでは、RAMのメモリ必要量の増加は156バイトで、増加合計の21.3%となった。これは、図2のネットワークインタフェース構造体 `t_ifnet` による増加である。また、IPv6で必須になったマルチキャストアドレスにより、ROMのメモリ必要量が増加した。



表2 IPv6のRAMのメモリ必要量

機能	固定部分	変動部分	計
TCP	32	2,128	2,160
UDP	0	1,200	1,200
近隣探索	138	416	554
ICMP	0	0	0
IP	0	0	0
TCP/IP 共通	48	0	48
汎用通信機能	132	1,024	1,156
バッファ管理	20	3,504	3,524
イーサネット	230	2064	2,294
通信機能計	600	10,336	10,936

単位はバイト

表3 TINET-1.2の実行性能

ネットワーク層	平均セグメント数	平均転送時間
IPv4	178.64	3.838
IPv6	194.65	4.178

時間単位は秒

表1のRAMのメモリ必要量は、表2に示すように、応用プログラムの構成やネットワーク負荷とは無関係な固定部分と、関係する変動部分からなる。表2の固定部分は、これ以上削減することは困難であるが、変動部分に比べて非常に小さい値であり、この程度であれば、対象とする規模の組込みシステムでは問題はないと考えている。変動部分には、TCP受付口、TCP通信端点、UDP通信端点、近隣探索キャッシュ、及びTINET内部で使用しているタスク用スタック等が含まれており、応用プログラムの構成やネットワーク負荷により、ターゲットの組込みシステムのRAM容量に適合するように調整し削減可能である。

### 5.5 実行性能

TINET-1.2は、少ないメモリ必要量で実装することを第一目的としているため、実行性能を指向した実装は行っていないが、参考としてTINET-1.2の実行性能を示す。TCPエコーサーバを実装した実装ターゲット(H8/3069F)を10BaseT環境で、クライアント(IBM PC/AT互換機、プロセッサ: Pentium III 1.13GHz、OS: FreeBSD 4.9)と接続し、実装ターゲットに対して、クライアントから76,000オクテットのデータを送信して、全てのデータのエコーバックが完了するまでの時間を、IPv4とIPv6のそれぞれで計測した。

結果を表3に示す。IPv6の平均転送時間は、IPv4に比べて0.34秒(8.9%)遅くなっている。これは、IPヘッダ長が20オクテットから、40オクテットに増加し、その分、1データグラム当りのペイロード長が短くなったことにより、平均セグメント数が9%増加していること、IP部と近隣探索部での処理量の増加が反映されていることが原因である。しかし、わずかな差であり、IPv4とほぼ変わらない性能となった。

また、ネットワーク環境が異なるが、FreeBSD 4.8上に実装した同様のTCPエコーサーバを、100Base-TX環境で同じクライアントと接続し、同様の計測を行った結果は1.961秒であった。従って、汎用計算機に比べても極端にTINET-1.2の実行性能が劣るわけではない。

## 6 今後の課題

### (1) 断片ヘッダの実装

IPv6最小ホスト仕様に対応するため、断片ヘッダの実装は行っていない。しかし、IPv6の相互接続性を保障するIPv6 Ready Logo Programでは、断片ヘッダの実装が必須であり、IPv6 Ready Logo取得のために、断片ヘッダの実装方法を検討中である。

### (2) RAMのメモリ必要量の削減

表1から、ネットワーク層がIPv4又はIPv6のいずれの場合も、応用プログラムを除いたRAMのメモリ必要量は、約16Kバイトである。今回実装ターゲットとしたH8/3069Fの内蔵RAMの容量は16Kバイトであり、以下に示す改良により、外部増設RAMを不要に出来る可能性がある。

- スタックサイズの最適化
- ネットワークバッファ長と個数の最適化
- クライアントにおけるTCP受付口の省略
- TCP受付口、TCP通信端点、UDP通信端点の動的な生成と削除
- ネットワークインタフェース構造体に設定するIPアドレス

謝辞 TINET-1.2の研究・開発は、「組込みシステム・オープンプラットフォームの構築とその実用化開発」の一テーマとして、経済産業省東北経済産業局様(委託先管理人: 財団法人みやぎ産業振興機構様)からの委託により実施しました。この場を借りて、各関係機関の皆様に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 高田広章: 組込みシステム開発技術の現状と展望, 情報処理学会論文誌, Vol. 42, pp. 930-938 (2001).
- [2] 阿部司, 吉村斎, 稲川清: オープンソースの組込みシステム用TCP/IPプロトコルスタック: TINET, 第6回LSI IPデザイン・アワード受賞論文(2004).
- [3] 岡部宣夫, 石山政浩, 井上淳, 箆島雅之, 坂根昌一, 左治木次郎, 野口敬, 宮田宏: 非PC系デジタル機器への適用に向けたIPv6最小要求仕様の検討, 情報処理, Vol. 42, pp. 920-925 (2001).
- [4] 坂村健(監修), 高田広章(編):  $\mu$ ITRON 4.0仕様4.01.00, トロン協会(2001).
- [5] 高田広章(編): ITRON TCP/IP API仕様1.00.01, トロン協会(1998).