

# 車載コンピュータへの BSD の応用

杉本 信太<sup>†</sup>  
Shinta SUGIMOTO

植原 啓介<sup>†</sup>  
Keisuke UEHARA

三屋 光史朗<sup>††</sup>  
Koushirou MITSUYA

村井 純<sup>††</sup>  
Jun MURAI

<sup>†</sup>慶應義塾大学 政策・メディア研究科

<sup>††</sup>慶應義塾大学 環境情報学部

## 概要

インターネット接続を考慮した車載コンピュータのオペレーティングシステムには、インターネット接続および組み込み機器の観点から様々な要求が発生する。これらを満たすべく、車載コンピュータ用オペレーティングシステムの実行環境の設計、実装を行なった。BSD オペレーティングシステムは本来、組み込み用オペレーティングシステムではないが、インターネット自動車における要求事項を満たし得ると考え、これを車載ハードウェアへ移植し応用した。車載システムを用いた実証実験により、その実用性を確かめることができた。インターネット接続を前提として、かつリアルタイム性の要求が低い組み込み機器では、組み込み BSD の実用性が高いという結論が得られた。今後は車載システムにおけるオペレーティングシステムとして組み込み用途により適応した BSD の開発を行なっていく。

## 1 はじめに

無線通信技術の発達により移動体通信環境におけるインターネットの利用が活発化している。しかし、これらの多くは移動先での携帯電話を利用した一時的なインターネット接続である。継続的な移動が前提となる環境下でインターネット接続を行ないこれを利用することは難しい。

自動車は常に移動するオブジェクトであり、インターネットの接続性および通信を持続することは難しい。今やインターネットは社会で最も重要な情報インフラストラクチャであり、多くの貴重な情報を有している。必然的に、自動車内の人および自動車から生成される情報は、外部の情報系から隔離された状況に置かれている。そこで、自動車にインターネットの接続環境を整えることによって、自動車内でも外部とのデジタルコミュニケーションが可能になる。また車から得られた情報を多くの人々が共有することが可能となる。自動車が作り出す情報を社会全体で共有することによって、これまでにない様々なサービスの実現が可能になる。このように、自動車におけるインターネットの接続環境を整える

ことは、運転手のみでなく社会全体にとって有用である。

インターネット自動車システムの実現には、インターネットアーキテクチャの観点から、移動透過性や規模性の問題が生じる。また、ユーザの視点から、インターネット自動車に対して操作性や充実したサービスなどの要求事項が発生する。インターネット自動車システムの普及を実現するためには、システム全体でこれらを解決する必要がある。システムの構成要素は、車載ハードウェア、車載ソフトウェア（オペレーティングシステムおよびアプリケーション）、そしてインターネット上の各種サービスに大別される。

インターネット自動車システムにおける車載ハードウェアはインターネットの接続性を考慮した組み込み機器である。これを制御するオペレーティングシステムに対して、通常の組み込み機器とは異なる要求事項が発生する。また、インターネット自動車システムの実験的な位置付けを考慮して、規模性や移動透過性を検証する様々な実験を行なう必要がある。これらの要求事項を満たすべく、車載ソフト

ウェア環境を設計、実装する。

慶應義塾大学インターネット自動車研究会コンソーシアム、WIDEプロジェクトインターネット自動車分科会では、インターネットに接続した自動車を用いて移動体通信環境に関する研究を行なっている。同プロジェクトは、自動車における安定したインターネット接続環境の提供し、自動車の情報化を目的としている。そして、インターネット自動車を実現するための基盤技術の開発を行なっている。プロジェクトの最終的な目標は、社会にインターネット自動車を普及させ、自動車内外の情報の隔離を解決することである。インターネット自動車システムは、移動体通信環境における先進的なテストベッドとしての意味を持っている。

本稿では、オペレーティングシステムを中心とした、車載システムのソフトウェア環境の設計および実装について述べる。オペレーティングシステムとしてBSDを選択したが、その理由をはじめとして、組み込み機器への移植において考慮した点、およびその実用性について述べる。車載システムを用いた実証実験から得られた成果を元に、車載システムにおけるソフトウェア環境の評価を行なう。

## 2 車載ハードウェア

本章では、インターネット自動車システムにおけるハードウェアの構成について説明し、その特性について述べる。車載ハードウェアはどのようなことを考慮して設計、実装されているのかについて説明する。

インターネット自動車プロジェクトでは、これまで自動車の設置したラックマウント型のPCや、ラップトップコンピュータを利用してインターネット自動車の実験を行ってきた。しかし、自動車内でのコンピュータの利用環境は通常とは異なり、様々な障害が発生し実験が困難な状況であった。自動車内でのキーボード利用や、複数のシリアルインタフェースを同時利用することなどを考慮すると、実験段階においても車載専用のハードウェアが必要であることは明らかであった。以下に車載ハードウェアに対する要求事項をまとめた。

- 省スペースな設計
- 簡単な操作性
- 衝撃に強い構造

### ● 豊富なI/Oインタフェース

これらを受けて、インターネット自動車プロジェクトでは、ガイオ・テクノロジー株式会社に車載ハードウェアの実装を依頼している。実用に耐え得る車載システムのプロトタイプとして、現在車載専用ハードウェア（以後SIC2000）が利用可能である。SIC2000は、本体（図1参照）とコントローラの二つのコンピュータシステムから構成される。本体にはネットワークインタフェースの他PCMCIAスロット、イーサネット、自動車から取得可能なセンサ情報を収集するためのインタフェースなどが備わっている。コントローラは小型のコンピュータで、本体にユーザからの入力を与え、LEDによって簡単な文字表示を行なうための装置である。本体への電源は、自動車のバッテリーからメイン電源およびアクセサリ（以後ACC）の二つの系統に供給される。



図1 SIC2000 概観

SIC2000は車載専用のコンピュータであり、PCなどのコンピュータシステムとは異なる特徴を持っている。SIC2000に見られる特徴について述べる。表1に、本体のハードウェア構成を示した。

一つ目の特徴は、耐衝撃性を考慮して回転型記憶装置を一切搭載していない点である。通常PCなどでよく利用されるハードディスクのような衝撃に弱い記憶装置は搭載することができない。このため記憶装置はROMをベースとして構成されており、これがSIC2000の組み込み機器としての性格を強めている。

二つ目の特徴は、豊富なI/Oインタフェースを搭載している点である。これは、インターネットへの接続および各種センサ情報の取得のためである。

インターネット自動車にはセンサとしての重要な役割がある。PCMCIA スロットは、携帯電話や無線 LAN のようなネットワーク・インタフェースの利用が主であるが、この他に ATA カードなどの携帯型記憶装置のアダプタとして利用される。シリアルインタフェースは、主にセンサ情報の収集に用いられる。

三つ目の特徴は、入出力デバイスに関するものである。SIC2000 には、キーボードやディスプレイなどを接続するインタフェースがない。入力および出力はコントローラにおけるボタンおよび LED を通じて行なわれる。

四つ目の特徴は、電源に関するものである。SIC2000 は車載専用であり、必然的に不安定な電源環境を前提としなくてはならない。このため、ACC への電源供給が途絶えると、割り込みを発生させられる仕組みが備わっている。これによって、不慮の電源断でシステム全体の電源供給が途絶える前に、オペレーティングシステムは必要なシャットダウン処理を実行することができる。

表1 SIC2000 本体ハードウェア構成

項目	説明
CPU	VR4300
メインメモリ	DIMM(64MB)
IPL 格納装置	EPROM(512KB)
オペレーティングシステム格納装置	Flash ROM(8MB)
I/O バス	ISA バス
シリアルインタフェース	RS-232C(×4)、RS-422
ネットワークインタフェース	10BASE-T
拡張スロット	PCMCIA スロット(×4)

### 3 車載オペレーティングシステムに対する要求事項

本章では、インターネット自動車システムにおけるオペレーティングシステムに対する要求事項を明確にする。車載システムは、インターネットへの接

続を前提とした組み込み機器である。要求事項は、インターネットの接続における要求、および組み込み機器としての要求の二つに分けて述べる。

#### 3.1 インターネット接続性の観点から見た要求事項

インターネット自動車システムにおいて最も大切なことは様々なインターネットアプリケーションが動作することである。これは、単にインターネットとの接続性を意味しているのではない。アプリケーションによって、ネットワークに対する要求は異なる。インターネット自動車システムでは、補正情報を利用した精度の高い位置情報取得アプリケーションや、車のセンサ情報をインターネットに送信するものなど、様々なアプリケーションが動作する。

インターネット接続性の観点からは、常にこれが必要とするアプリケーションと、そうでないアプリケーションがある。例えば、インターネットを通じて得た補正情報を元にしたカーナビゲーションを動作させる場合、常にインターネットの接続性が必要となる。

移動透過性は多くのアプリケーションにとって重要な要素である。インターネット自動車では、携帯電話をはじめとして無線 LAN など複数の接続環境を想定しており、移動や接続環境の変化によって IP アドレスの変更が余儀なくされる場合がある。このような場合にアプリケーションの通信を継続するためには、Mobile IP??による解決方法などが考えられる。

アプリケーションの中には、帯域保証を必要とするものもある。VoIP によるコミュニケーションを行なう場合は、音質を一定のクオリティに保つために一定の帯域を確保する必要性が生じる。

これらをまとめると、車載コンピュータ用のオペレーティングシステムにはインターネットとの高い親和性が必要である。具体的には、安定した接続環境、移動透過性、帯域保証などを実現することが望まれる。

#### 3.2 組み込み機器としての要求事項

一つ目にコンパクトな設計が挙げられる。車載システムは、車中での利用を考慮すると省スペースかつ省電力であることが望まれる。物理的なサイズの他、コンピュータシステムの構成はコンパクトでな

ければいけない。PCなどと比較して、車載システムでは十分なサイズのROMやRAMを前提にすることはできない。必然的に車載ソフトウェアは、サイズが制限され、車載システムの記憶装置に収まる程度のものでなくてはならない。

二つ目にモジュール性が挙げられる。車載システムでは、新たなアプリケーションおよびデバイスを動作させる必要性が生じた場合、オペレーティングシステムはこれに柔軟に対応できなくてはならない。必要に応じて、オペレーティングシステムの機能を追加できるモジュール性が求められる。これは、車載ソフトウェアのコンパクト化にもつながる大切な要素である。

三つ目に、耐故障性および信頼性が挙げられる。車載システムでは、ハードウェアおよびソフトウェアは耐故障性を必要とされる。車載システムは、PCやワークステーションなどのコンピュータシステムよりも苛酷な状況下に置かれるためである。不慮の電源の遮断が発生した場合でも、故障してはならない。また、必要に応じてメンテナンスを容易に行なえる仕組みが必要である。オペレーティングシステムは、車載ハードウェアの電源ON/OFFに応じたすばやい再起動が望まれる。

## 4 オペレーティングシステムの検討

ここでは、インターネット自動車のオペレーティングシステムの候補としてITRON、Windows CE、Linux、BSDを取り上げ、それぞれの特徴を比較する。そして、我々がBSDを選択した理由について説明する。

### 4.1 ITRON

ITRON [1] は、各種組み込み機器を制御するためのリアルタイムオペレーティングシステムの仕様である。ITRONに準拠した組み込み用リアルタイムオペレーティングシステムは、家電を中心として多くの機器で利用されている。オープンな仕様を基本方針とし、様々なハードウェアベンダが協力してハードウェアに依存しない柔軟な仕様（弱い標準化）を目指している。

ITRONの仕様では、リアルタイムオペレーティングシステムに必要な機能をそれぞれ分離し、必要に応じてそれらを実装する方針を採っている。これ

を適応化と呼ぶが、適応化によってユーザはシステム（特にマイクロプロセッサのアーキテクチャ）に応じたオペレーティングシステムを開発することができる。

ITRONに準拠したオペレーティングシステムは、多くの組み込み機器で実績を挙げている。しかし、これらはインターネット接続性および様々なインターネットアプリケーションの動作環境として見ると不十分である。

### 4.2 Windows CE

マイクロソフト社が小型の情報機器に搭載するために開発した商用オペレーティングシステムで、PDAをはじめゲーム機やセットトップボックスなどで利用されている。小規模システム向けの商用オペレーティングシステムとしては、最も利用されているものの一つであり、GUIをはじめとしてアプリケーションの開発環境も豊富である。また、同社は組み込み用にWindows NTをカスタマイズし、通信機器を利用の対象としたWindows NT Embeddedを製品化している。

Windows CEの優れたGUIや、これに精通した多くのアプリケーションプログラムの存在は、商用化を考えると大きなメリットとなる。しかし、現段階におけるインターネット自動車システムは実験段階にあり、先進的なネットワークプロトコルの導入が必要不可欠である。そして、Windows CEは完全に商品としての位置付けであり、オープンソースでない上にライセンス料を支払う義務がある。このため、Windows CEは現段階でのインターネット自動車システムのオペレーティングシステムとしては不適切である。

### 4.3 Linux

LinuxはUNIXライクなオペレーティングシステムとしてPCを中心とした多くのプラットフォームで利用されている。最近ではLinuxを組み込み機器用に利用する試み [2] が多く、既に商用化されているもの [3] も多数ある。セットトップボックスや、DHCP、NATなどの機能を持ったホームルータ等のオペレーティングシステムに利用されているケースが多い。多くの組み込みLinuxでは、スケジューリングアルゴリズムを変更することにより、組み込み機器が必要とするリアルタイム性を持たせ

ている。ライセンスに関して Linux は GPL を採用しており、開発者はソースコードを公開する義務がある。

#### 4.4 BSD

BSD はインターネットの基盤技術を開発するテストベッドとして多くの環境で利用されている。また、BSD をベースとしてこれまで多くの先進的なネットワークプロトコルが実装されてきた。KAME プロジェクト [4] による IPv6 プロトコルスタックや、Mobile IP などの実装はその代表的な例である。実験的なシステムを構築する上で先進的なネットワークプロトコルが利用可能であることは、非常に重要な意味を持つ。インターネット自動車システムでは移動透過性の実現および規模性の克服を考慮すべきである。

さらに、BSD を含む POSIX に準拠したオペレーティングシステムでは、アプリケーション開発環境が安価で手軽に入手可能であるため、開発コストを大幅に抑えることができる。また、BSD は汎用なオペレーティングシステムであるため、これまでに開発された多くのデバイスドライバなどを利用することが可能である。

また、BSD ライセンスは至ってシンプルであり、開発者が背負う制約が少ない。BSD ライセンスでは、ソースの一部が商用利用された場合でも、これを公開する必要はない。他に良く知られたソフトウェアライセンスとして、GPL (GNU General Public License) がある。GPL では、BSD ライセンスとは異なりソースの公開を義務づけている。Linux はこの GPL をベースとしているため、ソースを公開する必要がある。

#### 4.5 まとめ

インターネットアプリケーションの動作環境としてオペレーティングシステムを評価した場合、BSD は最も有効な選択肢である。BSD は汎用性が高い上に、ネットワークとの親和性に優れている。現在、インターネット自動車システムは実験段階にあり、継続的な移動体通信環境下で様々な実験を行なう必要がある。また、我々はこれまで BSD 上でネットワークプロトコルの開発等を行ってきた経緯があり、これらを利用するためにも BSD の利用が望ましい。従って、インターネット自動車システム

の実験環境を構築する中でオペレーティングシステムとして BSD を選択した。

## 5 車載ソフトウェア環境の構築

本章では、この車載ハードウェアを制御するオペレーティングシステムを中心とした車載ソフトウェア環境の構築について述べる。最初に、起動プログラムおよびオペレーティングの実行環境について説明する。次に、BSD を SIC2000 用オペレーティングシステムとしてどのように適合化すべきか、その問題点および解決のアプローチについて述べる。

### 5.1 起動プログラムおよびオペレーティングシステムの実行環境

車載ソフトウェア環境の構築に当たり、最初に考えなくてはならない問題は、IPL およびオペレーティングシステムをどの記憶装置に格納し、いかなる手順でシステムを起動させるかということである。SIC2000 では、ハードウェアの仕様として電源投入時に EPROM 中のプログラムが実行される。そこで、SIC2000 に搭載された不揮発性の記憶装置の構成を表 2 にまとめた。

EPROM は 512kB と BSD カーネルの格納にはやや不十分なサイズである。また、EPROM はデータの書き換えに ROM ライタを必要とすることから、頻繁なデータ更新には向かない。一方、Flash ROM はプログラムを通じてデータの書き換えを簡単に行なうことが可能である。起動プログラムは基本的な機能が固まった後は、問題が発生しない限り更新の必要性がないため、EPROM に格納することが理想的である。一方、開発サイクルが短いことが予想されるオペレーティングシステムは、Flash ROM に格納する方が適切であると考えた。

表 2 不揮発性の記憶装置

項目	EPROM	Flash ROM
サイズ	512kB	8MB
更新方法	ROM ライタ	プログラム

次に、カーネルの実行方法に関する議論である。通常 PC の記憶装置は、十分なサイズのメインメモリと大規模なハードディスクから構成され、オペレーティングシステムはここに保存される。カーネ

ルは、ブートローダによってメインメモリにマッピングされた後に、実行が開始される。SIC2000では、このようなメモリマッピングの他にダイレクトエグゼキューションが可能である。すなわち、カーネルをFlash ROMから直接実行する方法である。ダイレクトエグゼキューションはカーネルのロードを省略できるため、起動の高速化が見込まれ、記憶装置の利用効率も上がる。SIC2000で使用されるFlash ROMのアクセス速度はおよそ70nsであるのに対して、DIMM(SDRAM)のアクセス速度は60nsである。アクセス速度ではDIMMにやや劣るものの、Flash ROMを用いたダイレクトエグゼキューションは、十分なメリットがあると思われる。

NetBSDのMIPSアーキテクチャ共通のカーネルのリンクファイルには、カーネルのテキスト領域をDIMMにマッピングするように記述されている。現在、SIC2000ではこのリンクファイルを利用しメモリマッピングを行なっているが、今後はダイレクトエグゼキューションを行なう予定である。

## 5.2 SIC2000へのBSDの応用における問題点

ここまで起動プログラムおよびBSDカーネルの実行環境について述べたが、次にBSDを取り巻く利用環境に着目し、BSDをSIC2000にどのように適合化すべきか考える。

SIC2000に適合化させるBSDとして具体的にはNetBSD<sup>†1</sup> [5]を選択した。その主な理由は、NetBSDが移植性の高いオペレーティングシステムであるためだ。これまでNetBSDは数多くのアーキテクチャへ移植されており、いくつかのMIPSアーキテクチャ<sup>†2</sup>をサポートしている。これらはSIC2000への移植作業での大きな助けとなった。

SIC2000におけるBSDの利用形態および環境は、PCやワークステーションとは本質的に異なっている。両者を比較して、その差異および生じる問題点を明らかにし、続いてそれらに対する解決のアプローチを述べる。問題点は、コマンド環境、ファイルシステム、ユーザ環境、そしてブートストラップの四つに分類して説明する。

<sup>†1</sup> NetBSD-current

<sup>†2</sup> Sony NEWS, NEC Mobile Gear, DECstation, DECsystem など

## コマンド実行環境

BSDは複数のユーザが対話型にコンピュータを利用する環境を想定して設計されたオペレーティングシステムである。ユーザはシェルを通じてコマンドの実行を行なうが、ディスプレイやキーボードといった入出力デバイスの一切ないSIC2000では、このようなコマンドの実行は不可能である。シリアルインタフェースを通じてターミナルを操作することは可能であるが実用的とは言えない。従って、BSDのコマンド群をシェルに代わって実行する必要がある。また、コマンドを必要に応じたタイミングで実行させる仕組みが必要である。

システムの終了は自動車のエンジンが停止によって発生する。通常BSDでは管理者がshutdownコマンドを実行することによって、シャットダウンが実行される。しかし、SIC2000では電源断に伴い、シャットダウン処理を自動的に行なう必要がある。この時、電源が完全に途絶える前に、シャットダウン処理が完了しなくてはならない。

また、オペレーティングシステムやアプリケーションプログラムは容易に更新可能であることが望ましい。通常のシステムでは、コマンドの実行によってアプリケーションの更新を簡単に行なうことができるが、SIC2000においても何らかの方法でFlash ROM内のデータを書き換える必要がある。

## ファイルシステム

次に、ファイルシステムに関する考慮点である。ファイルシステムはシステムの記憶装置の特性と密接に関係する。SIC2000の記憶装置はFlash ROM(8MB)をベースとした少量のものであり、これを有効活用する必要がある。また、ファイルシステムはシャットダウン時にディスクとメモリの同期を取る必要があり、繊細である。SIC2000は不安定な電源環境下にあるため、ファイルシステムはこれを考慮する必要がある。

## ユーザ環境

BSDを利用する場合、ユーザは必ずログインを行ないそれぞれのワーキングエリア内で作業を行なう。SIC2000におけるBSDの機能は、アプリケーションの動作およびハードウェアの制御が主であるため、ユーザとの対話的なインタラクションは必要でない。従って、ログイン機能はインターネット自

動車システムでは、必要でないと思われるが、それに伴う副作用がないかどうかを考慮すべきである。

BSD はマルチユーザシステムである。すなわち、一つのコンピュータを複数の人々が共有する環境を提供するオペレーティングシステムである。マルチユーザを管理する仕組みとして BSD は login 機能を通じてユーザを識別し、それぞれのユーザに異なる実行環境を与えている。SIC2000 ではこれらの機能は必要なのか。必要でないとする、副作用なしにその機能を取り除くことは可能なかどうかを考慮する必要がある。

### ブートストラップ

最後にオペレーティングシステムのブートストラップについて述べる。インターネット自動車システムでは、エンジンの始動と同時に SIC2000 に電源が投入される。BSD は通常の利用環境では起動に数十秒から 1 分程度の時間を必要とするが、自動車での利用を考慮した場合、瞬時にコンピュータが利用可能であることが望ましい。従って、BSD のブートストラップは可能な限り高速化する必要がある。

以上の問題点を表 3 にまとめた。

表 3 インターネット自動車における BSD の問題点

項目	説明
コマンド実行環境	<ul style="list-style-type: none"> <li>・シェルに代わるコマンド実行方法</li> <li>・電源断に応じたシャットダウンの自動化</li> <li>・ソフトウェアの更新</li> </ul>
ファイルシステム	<ul style="list-style-type: none"> <li>・不安定な電源への対応</li> <li>・少量の記憶装置の有効利用</li> </ul>
ユーザ環境	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ログイン</li> <li>・マルチユーザ</li> </ul>
ブートストラップ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高速化の必要性</li> </ul>

### 5.3 問題点に対するアプローチ

これまで、BSD を車載コンピュータとして利用する際の問題点について述べてきたが、それぞれに対する我々のアプローチについて述べる。また、

現在実現していないが、今後考えられる解決のアプローチについても述べる。

#### コマンド実行環境

シェルに代わるコマンド実行環境として、シェルスクリプトを利用している。BSD では起動時に /etc/rc をはじめとするシェルスクリプトが読み込まれ、その中でデーモンプロセスの実行が開始される。SIC2000 では、/etc/rc から以下のコマンドおよびデーモンプロセスが実行されるようになっている。

- ホスト名の設定
- ループバックデバイスの設定
- inetd の起動
- ステータスの表示
- car-agent, wgpd の起動

システムの起動と同様の理由から、SIC2000 ではシャットダウンも頻繁かつ予期せぬタイミングで発生する。BSD ではシャットダウンの際に、ファイルシステムのキャッシュとディスク内容の同期を取ったり、必要な処理をファイルシステムに対して施す。シャットダウンは通常、コマンドラインから管理者によって実行されるが、SIC2000 では電源 OFF によってはじめてシャットダウンが発生する。

現在、シャットダウンに特別な処理は行っていない。これは、ファイルシステムが全てメモリ上に構築されていることから影響が発生しないが、書き込み可能なファイルシステムを Flash ROM や ATA 互換のカード上に構築する場合は問題が発生する。SIC2000 では、ACC への電源供給が途絶えた場合に割り込みを発生させる仕組みがハードウェアで実装されている。これを利用して、シャットダウン処理を電源 OFF 後に実行することが可能となる。

オペレーティングシステムおよびアプリケーションは Flash ROM に格納されるが、開発段階ではこれらを頻繁に更新する必要性が生じる。そこで、EPROM 中に格納されるプログラムには IPL の他にソフトウェアの更新をはじめとする様々な機能を与えた。それらの機能は以下の通りである。

- Flash ROM の更新
- PCMCIA スロットの初期化
- メモリダンプ

これらは、シリアルインタフェースを通じて利用可能である。Flash ROM の更新は、ATA 互換のカードを利用して行なっている。すなわち、オペレーティングシステムおよびアプリケーションを格納した ATA カードから Flash ROM にその内容をコピーしている。利便性を考慮すると、コントローラ部のボタン操作によって一連の作業を行なうことが望ましいため、今後コントローラ部の開発を行なっていく予定である。

現在、デバイスドライバおよびカーネル機能の追加設定は必要に応じてカーネルコンフィギュレーションファイルを編集している。これは、通常の NetBSD の利用方法である。車載ハードウェアのデバイスの変更は頻繁に生じるとは考えられないが、現在の方法は実用性に問題がある。デバイスドライバのをモジュールとして動的に追加可能であることが望ましい。

#### ファイルシステム

SIC2000 における記憶装置は ROM をベースとした小規模なものであり、かつ電源の ON/OFF が頻繁に行なわれることから、ファイルシステムの設計は慎重に行なう必要がある。

現在、SIC2000 ではメモリファイルシステムを利用しており、電源 OFF 後はメモリ上のファイルシステムは消去されるため影響はない。すなわち、書き込み可能で、その内容が不揮発性記憶装置に保存されるというファイルシステムは、今のところ利用できない状況にある。複数台の SIC2000 を運用する際など、/etc 以下の設定ファイルは必要に応じて変更し、これを記憶しておく必要がある。書き込み可能なファイルシステムを実現するためには、前述のように ACC の割り込みを利用してシャットダウン処理を行なう必要がある。

また、少量の記憶装置を有効利用する必要性がある。特に、アプリケーションプログラムのサイズはすぐに Flash ROM のサイズ (8MB) を越えてしまう。複数のアプリケーションを一つのオブジェクトファイルに統合する<sup>†3</sup>ことによって問題を解決した。統合されたアプリケーションは、カーネルのデータ領域に格納し<sup>†4</sup>、後にメインメモリ上のファイルシステムに展開し、利用する。

†3 crunchgen コマンドを利用した

†4 mdsetimage コマンドを利用した

#### ユーザ環境

ログイン機能は起動時に init によって login プログラムが呼ばれることによって実現されている。インターネット自動車システムでは、ユーザを認証する必要性はないと思われる。

BSD ではシングルユーザとマルチユーザの二つのモードが存在し、init への引数でいずれかを指定することが可能である。インターネット自動車ではログイン機能と同様にマルチユーザモードで動作する必要性はない。しかしながら、マルチユーザシステムをシングルユーザシステムとして書き換えるコストは大きいと思われる。カーネルの動作モードをシングルユーザ化することによって、起動時間の短縮につながるのであれば、このような手段を取るべきである。

#### 5.4 ブートストラップ

インターネット自動車システムでは、電源の ON/OFF の切替えが頻繁に発生することが予想される。それに伴い、オペレーティングシステムの敏速なブートストラップおよびシャットダウンが必要となる。表 4 に BSD のブートストラップの流れを示した。ここで、SIC2000 において省略可能なもの及び処理の短縮化が望まれるものに※印を付けた。

表 4 ブートストラップの流れ

※ブートローダがカーネルをメモリにロード
CPU の初期化
コンソールの初期化
仮想記憶の初期化
プロセス管理機構の CPU 依存部分の初期化
カーネルアドレス空間のセットアップ
カーネルコンテキストの設定
カーネルが使用するデータの確保、初期化
※ I/O デバイスのコンフィギュレーション
ルートファイルシステムのマウント
※ init の始動
※ getty, login

起動の最終段階で init は /etc/ttys を参照した後、各ターミナルに tty を割り当て login を呼び出す。BSD ではターミナルを通じてユーザはシステムに login を行なう。しかし、前に述べたよ



うにインターネット自動車システムでは、ログイン機能は必要ないものと考えられる。

ブートストラップの過程では、CPU を中心としたハードウェアの初期化の他、BSD の基本的な機能の初期化を行なっている。インターネット自動車システムでは、ログインやマルチユーザモードなどの機能は省略し、処理を単純化することが望まれる。

## 6 インターネット自動車システム実証実験

本章では、1999 年度 SFC Open Research Forum<sup>†5</sup>にて行なわれたインターネット自動車システムの実証実験について述べる。実験では移動中の自動車上で実際に車載システムを利用し、様々なアプリケーションを動作させた。はじめに実験の目的について述べた後、実験環境および実験で得られた成果について述べる。

### 6.1 実験目的

本実験の目的は、インターネット自動車システムのプロトタイプとしての車載ハードウェアを実際に利用し、その実用性を確かめることである。車載ハードウェアにオペレーティングシステムを移植し、最初に行なった運用実験であり、車載システムの総合的な動作確認が主な実験内容である。

### 6.2 実験環境

インターネット自動車システムの実験環境について簡単に説明する。車載システムを搭載した乗用車を 3 台用意し、これらを主にキャンパス内で走行させた。そして、携帯電話および無線 LAN を通じた継続的なインターネット接続を試み、様々なアプリケーションを動作させた。

利用した主な実験機材は以下の通りである。

- 携帯電話
- 無線 LAN (IEEE802.11 準拠)
- SIC2000 (本体およびコントローラ)
- D/RTK-GPS モジュール

次に、実験に利用したソフトウェアは以下の通りである。

- iij-PPP

- wide-DHCP
- Mobile IP (Toshiba)
- MIB Socket、インタフェース切替機構
- wgpd, car-agent

上記のいずれも、BSD 系オペレーティングシステム上で開発され利用されているものであるが、今回 NetBSD 用に多少の移植作業を行なうことよって動作可能であった。wgpd は、インターネットから受信した D/RTK-GPS の補正情報を G-12,GG-22 モジュールに与え、これから正確な位置情報を取得するプログラムである。car-agent は、補正済みの位置情報を得て、これをインターネットに発信するためのアプリケーションである。car-agent はその他にも、車から収集されたセンサ情報を発信する機能を持っている。

ppp, wgpd や car-agent などのアプリケーションは、前に述べたようにカーネルのデータ領域に格納し、これをメモリファイルシステムとして利用した。ファイルシステム全体のサイズはおよそ 4.3MB であった。データ領域は 5.2MB ほど余分に領域を確保し、この部分にファイルシステムを格納した。表 5 にカーネルイメージの各領域のサイズを示した。ファイルシステムとカーネルを合計したファイルサイズはおよそ 6.9MB であった。

表 5 カーネルイメージのサイズ

テキスト領域	データ領域	BSS
1.1MB	5.2MB	0.12MB

### 6.3 実験の成果

実験において、多くのデバイスあるいはアプリケーションの利用を確認することができた。特に、移動透過性を伴ったインターネットの安定的な接続環境、Mobile IP およびインタフェース切替機構 [6] の単体での動作を確認することができた。

これは、オンボードのイーサネット、PCMCIA カードスロット、シリアルインタフェースなど、ほぼ全てのデバイスおよびそのドライバが正常に動作したことを意味している。オンボードのイーサネットは無線 LAN の利用に役立った。シリアルインタフェースは GPS の他は、主に開発・デバッグの用途に利用した。

†5 慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスにて開催

今回の実験では、車載システムの本格的な利用が可能になったことで、インターネット自動車の有用性の一部を実証することができた。しかし、実験の内容に関しては定性的な評価が中心で、定量的な評価は行なっていない。今後の課題として、オペレーティングシステムの起動時間や、アプリケーションを含めたシステムのサイズ等を定量的に評価する必要がある。

## 7 考察

本章では、インターネット自動車システムの実証実験を通じて得られた成果および運用経験を元に、車載オペレーティングシステムとしての BSD に関する考察を行なう。オペレーティングシステムおよびアプリケーションの開発コストおよび利用環境の実際について考察する。

### 7.1 開発コスト

実験的な要素が強いインターネット自動車システムでは、BSD を利用する大きなメリットの一つは開発コストが低いということである。オペレーティングシステム自体およびアプリケーションプログラムの開発環境は、通常の PC やワークステーション上の BSD で用意に準備することができる。基本的にはクロスコンパイラを用意するだけで、特に必要なハードウェアおよびソフトウェアはない。

今回、NetBSD の SIC2000 への移植作業には合計三人の開発者が二カ月程度を必要とした。NetBSD カーネルを SIC2000 上で起動させるまでに、合計するとおよそ 3000~3500 行のカーネルコードの開発を必要とした。表 6 に今回開発した主なコードの内訳とその行数を示した。これらは全て、機械依存部分のコードであり、非機械依存部分と明確に分離して開発を進めた。

表 6 SIC2000 機械依存部分のカーネルコード

項目	行数
CPU 制御	1500
I/O 制御	360
デバイスドライバ	1500
合計	3360

次に、アプリケーション開発者の視点から BSD

表 7 アプリケーション開発コストの比較

	開発環境	テスト環境	API の統一性
BSD	○	○	△
Linux	○	○	△
ITRON	△	×	○
WindowsCE	△	△	△

における開発コストについて、他のオペレーティングシステムと比較する。

BSD ではフリーの開発環境が利用可能である他に、開発過程に無駄が生じないというメリットがある。BSD は多くの PC やワークステーション上で利用されており、これらの上で開発、デバッグ、そしてテスト作業が可能である。最終的に動作の確認が済んだ後にクロスコンパイラを用いて、ターゲットのアーキテクチャのオブジェクトファイルを生成すれば良い。このように、開発、デバッグおよびテスト作業の環境が整うため、開発サイクルの短縮につながる。

また、BSD ではシステムコール、ライブラリなどの API が POSIX に準拠しており、同じくこれに準拠する他の UNIX システムで開発されたプログラムを簡単に動作させることが可能である。他のシステムとの API の統一性が保たれていることによって、プログラムの再利用および移植のコストが低減される。ITRON では開発環境やツールの不足が指摘される他、インタフェースの標準化を望む開発者が多いという調査報告 [7] もある。

これらの比較を BSD、Linux、ITRON、WindowsCE でおこなったものを表 7 に示した。

### 7.2 オペレーティングシステムの利用環境

車載システムではオペレーティングシステムの起動は敏速でなければならない。今のところ車載システムの起動には 15-20 秒程度の時間を必要とする。この時間の内訳は、カーネルのメモリマッピング (3 秒)、デバイスの初期化 (8 秒)、そして起動時のシェルスクリプトの実行 (8-9 秒) などである。この時間を短縮させるために考えられる解決策として、サスペンド機能を利用する方法と、カーネルのメモリマッピングを行わずダイレクトエグゼキューションすることによって、起動の高速化を図る方法がある。

現状のオペレーティングシステムのバージョンアップは、起動プログラムが ATA 互換カード中の新しい NetBSD カーネルを Flash ROM にコピーする方法を採っている。一連の動作に必要な時間は 1 分前後であるが、シリアルコンソールからのコマンド入力を必要としているため実用的とは言えない。操作の簡略化のために、現在ブートローダの作成を検討している。ブートローダにコントローラからのボタンの入力を与え、オペレーティングシステムのバージョンアップを選択可能な仕組みを作成する。

### 7.3 アプリケーションの利用環境

最初に既存のアプリケーションとの親和性について述べる。5 章で述べた通り、車載システムでは PPP によるインターネット接続の他、DHCP、Mobile IP、インタフェース切替などのアプリケーションを動作させることができたが、これらは他の BSD 系システム上で動作しているものをほぼそのままの形で利用可能であった。車載システムに特化したソフトウェアの仕様や、設計は特に必要ではなかった。このように、既存のアプリケーションとの親和性は高い。

アプリケーションのインストールについては、現状の仕組みは柔軟性に欠けている。アプリケーションはカーネルのデータ領域に格納されるため、双方のインストールを別々に行なうことができない。アプリケーションには、BSD で用意されている基本的なコマンド群と、車用アプリケーションの二つに分けられるが、前者は現状の仕組みで格納されていても支障は少ないと考えられる。後者については、インストールおよびアンインストールが容易であることが望ましい。すなわち、アプリケーションを統合せずに必要に応じたものを ATA 互換カード等のメディアに書き込み、利用可能にする必要がある。

### 7.4 他システムへの応用可能性

セットトップボックスや、ホームルータなどの情報機器は、インターネットと家電のネットワークを繋ぐはたらきを持つ。これらの情報機器では、TCP/IP をベースとした通信が主流となり、インターネットで利用されている様々なプロトコルおよびアプリケーションの利用が必要となる。例えばホームルータでは DNS をはじめ、DHCP、NAT

[8]そして HTTP [9]などが動作することが必要である。このようなシステムの内、高いリアルタイム性を要求しないものでは、BSD の利用価値は十分にあるものと思われる。

BSD を組み込み機器に利用する際の欠点としては、システムのサイズとリアルタイム性の二つが指摘できる。元来、大型のシステムを想定したタイムシェアリングシステムである BSD は、組み込み機器に必要でない機能を多く含んでいる。そして、組み込み機器ではソフトウェアの導入が非常に面倒であるため、オペレーティングシステムに必要な機能を柔軟に追加可能な仕組みが必要である。そのためには、カーネルの機能をなるべくモジュール化し、これらを動的に組み込み可能な機構が必要となる。

## 8 結論

インターネット自動車システムの実験的なプロトタイプとしての車載システムのソフトウェア環境を設計、実装した。具体的には、BSD オペレーティングシステムを移植し、組み込み機器である車載ハードウェアに適応させた。車載ハードウェアは通常 BSD を動作させる環境とは記憶装置を中心として異なっており、オペレーティングシステムの起動方法に工夫が必要であった。

PPP や DHCP、そして Mobile IP などのアプリケーションあるいはネットワークプロトコルを容易に導入することができた。これらを利用することにより、インターネット自動車システムに必要な安定的な接続性および移動透過性のサポートを実現された。

本来、BSD は組み込み機器で利用するオペレーティングシステムではないが、先進的なネットワークプロトコルやネットワークアプリケーションの動作が必要なシステムでは、応用価値が高いことが分かった。

今後、オペレーティングシステム開発は、BSD を組み込み用オペレーティングシステムとしての適応化させる方向で進めていく。具体的には、カーネル機能のモジュール化、車載用途に適したファイルシステムの構築である。

## 謝辞

SIC2000 のハードウェアの開発のみならず、ソフトウェアの開発においても多大な御協力を頂いたガイオ・テクノロジー株式会社の佐藤 光様、和光泰平様、金子 均様、そして速水 正人様に感謝致します。

本研究は、インターネット自動車コンソーシアムの皆様の協力の下に進めることができました。インターネット自動車コンソーシアムの皆様に感謝致します。

また、論文執筆にあたり様々なご意見や助言を頂いた WIDE プロジェクト rover ワーキンググループの皆様に感謝致します。

## 参考文献

[1] Ken Sakamura, et al.  $\mu$  itron 3.0: An Open and

Portable Real-time Operating System for Embedded Systems - Concept and Specification. *IEEE CS Press*, 1998.

- [2] Jerry Epplin. Linux as an Embedded Operating System. *Embedded System Programming*, 1997.
- [3] Lineo, Inc. The Embedded Linux Software Company. <http://www.lineo.com>.
- [4] Jun-ichiro Itoh. Overview of KAME project. *USENIX 1998 Annual conference*, 1998.
- [5] The NetBSD Project. <http://www.netbsd.org>.
- [6] 湧川 隆次, 植原啓介, 田村陽介, 徳田英幸. MIBSocket: 移動型計算機環境におけるネットワークエンティティの状態変化に対応する管理機構の設計と実装. 情報処理学会 SIGOS 研究会, 1999.
- [7] 組み込み機器におけるリアルタイム OS の利用動向に関するアンケート調査結果. <http://www.itron.gr.jp/survey99/result-j.html>.
- [8] P. Srisuresh and K. Egevang. Traditional IP Network Address Translator. *RFC*, 1998.
- [9] R. Fielding, UC Irvine, J. Gettys, J. Mogul, H. Frystyk, and T. Berners-Lee. Hypertext Transfer Protocol - HTTP/1.1. *RFC 2068*, 1997.