

# デジタルコンシューマ製品向け Linux への取組み

Application of Linux as Embedded Operating System for Digital Consumer Products

野末 浩志

■ NOZUE Hiroshi

熊谷 宏樹

■ KUMAGAI Hiroki

佐久間 毅

■ SAKUMA Takeshi

デジタルコンシューマ機器への高機能化や開発サイクル短縮の要求によって、組み込みオペレーティングシステム(OS)としてLinux<sup>(注1)</sup>が採用されることが多くなってきた。

東芝は、実際に機器に対して適応する場合には、標準Linuxに対してリアルタイム性の強化や、使用メモリ容量の削減などにより技術課題を解決してきた。更に、CE Linux Forum 活動を通じて、組み込みOSの課題について解決を図っている。

Many digital consumer products require rich functionality and a short development cycle. As a result, Linux is increasingly being applied as an embedded operating system.

Toshiba has resolved some of the technical problems of standard Linux, by such measures as enhancing its real-time functions and reducing its memory footprint. Moreover, through the activities of the CE Linux Forum, which has been established by electronics manufacturers and semiconductor companies from around the world, we are making efforts to resolve further issues related to this field.

## 1 まえがき

デジタルコンシューマ製品として多様な製品が登場するにしたいが、組み込みオペレーティングシステム(OS)としてLinuxを採用するものが増えてきた。

ここでは、組み込みOSとして用いられるLinuxの特長、Linuxを製品へ適用した事例、及びコンシューマ製品向けLinuxの技術的な課題について述べる。

## 2 コンシューマ製品へのLinux採用について

### 2.1 製品向けOS選定の課題

コンシューマ製品が高機能・高性能化したことにより、それを動かすソフトウェアは多機能となり、開発や保守をする側は高いノウハウが必要となった。一方で、製品の開発期間は可能な限り短縮することが要求される。製品開発に対するソフトウェア開発コストの割合の増大は顕著であり、そのコストをできるだけ軽減するOSプラットフォームを採用することが望まれる。

### 2.2 Linux採用のメリット

Linuxは、ヘルシンキ大学の学生であったLinus Torvaldsが個人で開発した小さなOSだった。1990年代には、オープンソース開発の動きに合わせて、多くの優秀な技術者が協力し合ってコードを強化していった。例えば、PCカードや、USB(Universal Serial Bus)、IEEE1394(米国電気電子技術者

協会規格1394)など新しいハードウェアのサポート、ファイルシステムの充実、マルチプロセッサ対応、IPv6(Internet Protocol version6)及びセキュリティ機能の統合などがある。その結果Linuxは、実用に耐えうるOSとして、一部のサーバコンピュータやパソコン(PC)で用いられるようになっている。

コンシューマ製品へLinuxを採用する観点からは、次のような特長があげられる。

- (1) 開発の容易さ Linuxはソースコードが公開されている。このためOSの基本部分を使用しつつ、更に開発機器に合わせて、細かい修正を加えることができる。したがって、OS全体のコード量に比べて、開発すべきコード量を大きく削減することが可能になる。なお、修正したコードは公開することが原則となる。
- (2) 適用範囲の広さ Linuxは多くの開発者に支持され、開発の容易さもあって多数のマイクロプロセッサに適用されている。また、プロセス管理など基本的なOSの機能に加え、ネットワークプロトコル、ファイルフォーマットなど多様な機能があらかじめ提供されている。
- (3) 機能拡張の早さ Linuxの開発の容易さは、新しい機能、例えばプロトコルなどがLinuxのなかに取り込まれる時間を短くする。また、新しい機能についての課題を関係する技術者が協力して解決していくことで、単に機能を実現するだけでなく、最適なコードが生成されることが期待される。
- (4) 安定性 Linuxは、多くの技術者によって問題点を発見し修正してきているため、安定性、堅牢(けんろう)性を持つようになったといえる。一方で、機能拡張の早

(注1) Linuxは、Linus Torvalds氏の米国及びその他の国における登録商標。

さは頻繁なバージョンアップを繰り返すことにつながっており、固定的なものとはなっていない。Linuxを採用する場合は、このような性質を十分考慮したうえで行うことが望ましい。

### 2.3 オープンソース ソフトウェアの考え方

このようなLinuxの特長は、Linuxのソースコードが公開され、多くの技術者に支持されているために生じる。これは、オープンソース ソフトウェア(OSS)という考え方に基づいている。

OSSでは、ソースコードを公開することで誰でもコード開発に参加できる可能性があり、前述のようなメリットが期待される。一般にOSSは、開発を進行させるコミュニティを形成する場合が多い。Linuxのように発達したコミュニティでは、開発の経緯はインターネットを通じて即時に伝達され、世界中の拠点での開発が進行している。

### 2.4 製品へのLinux適用動向

国内企業が開発した製品に採用されたLinuxの割合は約14%であり、第2位となっている<sup>(1)</sup>。Linuxは、既に組込み製品向けOSとして広く認知されているといえる。Linuxは、追加開発が少ない場合でも多い場合でも採用される割合がほとんど同じであり、適用される製品に合わせて幅広く柔軟に使用される特長がある。

## 3 コンシューマ製品へのLinux適用ポイント

### 3.1 Linux プラットホームへの移行

デジタルテレビ(TV)、映像録画再生機器、携帯電話などのデジタルコンシューマ製品では、ネットワーク機能のサポートやDLNA(Digital Living Network Alliance)対応などの最新テクノロジーへのタイムリーな追従や開発コストの軽減のため、従来の市販あるいは各社独自仕様のリアルタイムOS(RTOS)からLinuxへ移行していく動きがある。適用にあたっては、RTOSの特徴を考慮するだけでなく、既存の膨大なアプリケーション資産を流用できることが望まれる。これにより、現行プラットフォーム上でのアプリケーション開発と、Linuxを適用した新規開発プラットフォームの構築とを並行して実施することが可能となり、移行に対するコスト低減と期間短縮を図ることができる。

### 3.2 デジタルコンシューマ製品のハードウェア構成

Linuxの適用においては、RTOSを用いた従来のプラットフォームと同等の性能が求められ、特に、リアルタイム処理性能が課題とされる。ただしデジタルコンシューマ製品においては、アプリケーションプログラム及びOSはメインプロセッサ上で動作し、映像データのデコードやエンコードといったストリーム処理は、複数接続された専用のプロセッサが行う構成をとることが多い。この場合、メインプロセッサではスト

リーム処理を行うサブプロセッサの制御だけを行い、制御システムで要求されるようなハードリアルタイム性が要求されることは少なく、むしろ次のような処理性能が求められる。

- (1) 周辺デバイスの仕様上の応答要求性能
- (2) ユーザーインタフェースの応答性能

例えばホットプラグデバイスの場合、バスに接続したときに他の接続機器に対して情報を送信するまでの時間が決まっていることという要求がある。また、ユーザーインタフェースの応答性能は実際にユーザーが体感する処理速度であり、できるだけ速く動作することが求められる。

### 3.3 RTOS アプリケーションの特徴

従来のRTOS上のアプリケーションには次のような特徴がある。

- (1) デバイスドライバとユーザーインタフェースプログラムなどが同一のバイナリで作成されたり、デバイス制御用の処理とアプリケーションとが密接に実装されたりするなど、デバイスドライバとアプリケーションを明確に分離することが困難な場合がある。
- (2) アプリケーションが割り込み処理を行うという実装が可能である。
- (3) 物理アドレスによるメモリアクセスを行っており、例えばDMA(Direct Memory Access)などハードウェア制御を介したメモリ転送に使用するアドレスの指定では、メモリ空間を考慮した構造になっていないことが多い。
- (4) リアルタイム処理を行うためのタスク実行制御、同期機構やメモリ管理といった機能がシステムコールとして提供されており、これらを駆使して作られている。

RTOSアプリケーションをLinux上で動作させるにあたり、カーネルの保護の観点からアプリケーションをユーザー空間で動作させることが望ましいが、これらの特徴は、Linux適用の際に注意しなければならない点である。

### 3.4 Linux プラットホームの構成及び実装

既存アプリケーション資産の流用性はもとより、前節で挙げたデバイスドライバの実装方式や、アプリケーションの割り込み、RTOS固有API(Application Program Interface)への対応、仮想メモリ動作のサポートといった課題への対応を考慮して、RTOSアプリケーションを動作させるために構築したLinuxプラットフォームを図1に示す。各構成要素のモジュールについて以下に説明する。

- (1) API変換プログラム RTOSが提供していたシステムコールインタフェースを、ユーザー空間のLinuxライブラリ(glibc/Linux pthread)により実装したモジュールである。割り込み処理スレッドによる割り込み処理APIも提供する。また、アプリケーション内ではサブプロセッサ間との通信用の固定メモリが必要なため、後述のカーネル内のドライバであるRTOSサポートドライバ

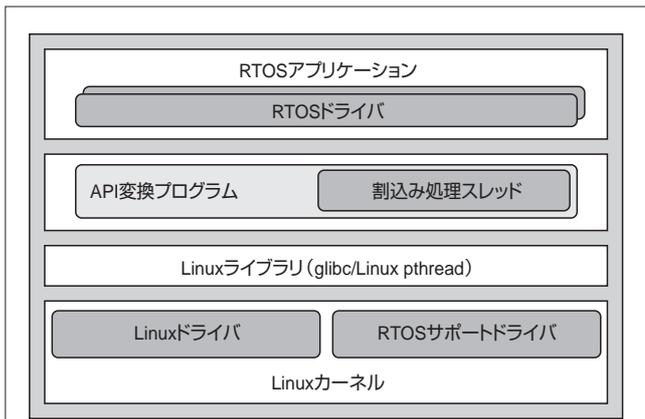


図1. Linuxプラットフォームの構成 — RTOSアプリケーションを動作させるために構築したLinuxプラットフォームを示す。

Configuration of Toshiba Linux platform

を使用することで、アプリケーションのメモリ空間に固定メモリ及びIO (Input/Output) 空間をメモリマップする。

- (2) 割り込み処理スレッド RTOSアプリケーションに含まれている割り込み処理に対応するための割り込み処理スレッドで、RTOSサポートドライバと連携して動作する。この割り込みスレッドは、リアルタイムスケジューリングポリシーの最高優先度スレッドとして動作し、カーネルに伝えられる割り込み通知を受けてスケジューリングされる。割り込みスレッドがディスパッチされると、割り込み要因に従って、事前にアプリケーションから登録された割り込みハンドラを呼び出す処理を行う。
- (3) RTOSサポートドライバ 前述のAPI変換プログラム及び割り込み処理スレッドを実装するために必要な、メモリマップインタフェースと割り込み処理インタフェースを提供する。
- (4) Linuxドライバ カーネル空間で動作するLinuxドライバで、既存プラットフォームでサポートしていない周辺デバイスをサポートする際に活用できるが、そのほか、もともとRTOSアプリケーションで動作していたデバイスドライバに対して、性能の観点から、Linuxドライバで機能させることにしたドライバも含まれる。ドライバの性能分析については次節で述べる。

なお、Linuxカーネルにはカーネルプリエンブション機能及びリアルタイムスケジューラが使用可能なCE Linuxを、標準ライブラリにはglibc/Linux pthreadを想定している。

### 3.5 性能分析及びチューニング

Linuxプラットフォームの構築を行ううえでは、周辺デバイスの仕様上の応答要求性能とユーザーインタフェースの応答性能の維持が重要になる。前述のプラットフォーム構成では、デバイスの処理をLinuxカーネル内のドライバで処理する方法

と、アプリケーション内に存在するドライバでそのまま実行する方法を用意しているが、どちらを選択するかは既存プラットフォームの性能分析により判断する必要がある。実際のコンシューマ機器への適用評価の結果から、割り込みの頻度及びアプリケーションとドライバの結合形態によって、以下のように実装することが有効であると考えられる。

- (1) 割り込み (低頻度) ユーザー空間のまま
- (2) 割り込み (高頻度) 結合形態に応じて以下を検討
  - (a) 疎結合 Linuxドライバ化 (カーネル空間)
  - (b) 密結合 割り込み処理方式の見直し (ポーリング方式や一部の処理のドライバ化)

なお、仮想メモリ使用によるTLB (Translation Lookaside Buffer) ミス、実行モード切替え、コンテキストスイッチなど、Linuxシステムが抱える根本的なオーバヘッドに関しては、アプリケーションをシステムへ、より適応させていく取組みも必要になる。

## 4 CE Linux Forumへの取組み

### 4.1 製品向けLinuxとCE Linux Forum

コンシューマ製品へLinuxを適用するためには、不足している機能や注意を要する点もある。そのなかには適用する製品が異なっても共通な部分がある。したがって、共通に使えるものは開発者間で広く共有することが、開発の期間を短縮し、コストを圧縮するうえで望ましい。

このような状況のなかで、関連企業が集まって形成したコミュニティの一つに、CE Linux Forum (CELF) がある。CE Linux Forumは、2003年7月に創設された非営利法人であり、Linuxをコンシューマエレクトロニクス製品へ適用するための知識や技術の開発を協力して行うことを目的としている。2005年7月現在で56社が参加しており、コンシューマエレクトロニクス、セミコンダクター、及びソフトウェアハウスの分野に属し、日本や、米国、韓国、アジア、ヨーロッパの各地域にわたっている。

### 4.2 CE Linux Forumの主な構成

CE Linux Forumの運営は、Appointed Memberと呼ばれる13社の代表による合議と投票によって行われている。東芝は創設時からAppointed Memberとして運営にかかわってきた。また、以下に述べる各開発グループにも参加している。

運営会議のもとで、技術的な統括を行っているのがArchitecture Group (AG)である。AGのもとには六つの技術ワーキンググループ (WG)と二つのプロファイル策定WGがある。これらグループ間の調整や、グループに含まれない技術課題、他のコミュニティとの情報交換などはAGが扱っている。

プロファイル策定WGは、コンシューマ機器の代表的な構

成を収集してとりまとめている。モバイルフォン プロファイル WG (MPPWG) は携帯電話に関して、また、デジタル TV プロファイル WG (DTPWG) はデジタル セットトップ ボックス 及びデジタル TV に関して、その構成とそれに必要な API を提案する作業を行っている。

### 4.3 CE Linux Forum の主な開発技術

技術 WG は、コンシューマ機器に必要な特徴的技術について以下のように分類されている。

- (1) 消費電力管理 WG (PMWG)    コンシューマ機器で消費される電力を管理して低く抑えることは、省エネルギーとなるだけでなく、バッテリー駆動の機器の動作時間を延ばすために重要な要素である。PMWG では、ハードウェアが持つ電源管理機能を使用し、システムアイドル状態での消費電力低減や、アプリケーションから呼ばれて電源管理を行う API を与える手段などを中心に開発を進めている。
- (2) ブート時間短縮 WG (BTWG)    一般的に OS が起動するには、様々なシステムチェックが行われるため時間がかかる。また、終了時や一時的な停止、復帰においても処理時間がかかる。BTWG では、起動処理の順序を工夫したり、不要な処理を削減したりするコードを開発し、その効果を評価する活動を進めている。
- (3) リアルタイム WG (RTWG)    Linux は、サーバコンピュータでの利用が進んでいたため、リアルタイム処理を行うための機能は十分ではなかった。RTWG では、リアルタイム処理を行うために必要な、カーネルプリエンブション機能や優先度付き割り込み機能などの機能を開発している。このうちのいくつかの機能は Linux 2.6 で取り入れられた。
- (4) Audio/Visual/Graphics 機能 WG (AVGWG)    コンシューマ機器の多様性は、それぞれの機器で使いやすいユーザーインターフェースを提供することを要求する。また通信の発達によって、様々な形式の音声、画像、及び動画データを扱える必要がある。AVGWG では、それらを実現するために必要な API の提供や、グラフィックス用ライブラリ、フレームバッファ、及びオーディオドライバなどの開発を行っている。
- (5) システムサイズ低減 WG (SZWG)    一般的にコンシューマ機器では、製品コストや容積の制限から、搭載されるメモリ容量は限られたものになる場合が多い。一方で高機能な OS は、多くのメモリ資源を要求する。SZWG では、Linux カーネルそのものや実行時のメモリ使用量について、できる限り低減する方法や削減効果を評価する手法についても検討を行っている。
- (6) セキュリティ WG (SECWG)    通信ネットワークの発達により、コンシューマ機器がネットワークへ接続される

場合も増えてきた。それとともに、機器の保持する情報や機器の動作への保護を頑強にすることが重要になってきている。SECWG では、機器自体の動作に対する信頼性の向上や、外部からの攻撃に対する保護など、セキュリティに関する技術の検討と開発を行っている。

この六つの分野以外の開発項目についても、開発したコードを差分 (パッチ) として公開することで技術交流を図る仕組みを提供している。

### 4.4 今後の展望

CE Linux Forum では、Linux をコンシューマ製品に組み込むために必要な様々な開発を行っており、これにより Linux が OS として進化を続け、更に普及していくという循環を企図している。

組込み OS としては、前記以外にも解決すべき課題がある。例えば、多様な機器に移植した場合、どのようにテスト・検証するか、機器の有用性を高めるためにサービスの質をどのように制御するか (QoS : Quality of Service) などである。それらの課題を解決するには、Linux 及び CE Linux Forum コミュニティで技術者が協力しながら、互いに切磋琢磨 (せっさたくま) し、個々人の技術を高めていくことが望まれる。

## 5 あとがき

ここでは、組込み OS として用いられる Linux の特長、Linux を製品へ適用した事例、及びコンシューマ製品向け Linux の技術的な課題について述べた。

今後もそれらの課題を解決し、高機能で高性能なデジタルコンシューマ製品に向けて、Linux 適用のメリットを更に引き出していく。

## 文 献

- (1) 経済産業省 商務情報政策局 情報政策ユニット 情報処理振興課. “Q5-3 製品に搭載している OS”. 2004 年度版 組込みソフトウェア実態調査報告書. 2004-06, p.106 - 108.



野末 浩志 NOZUE Hiroshi

ソフトウェア技術センター 技術開発第二担当参事。  
組込みオペレーティングシステムの開発に従事。日本ソフトウェア科学会、IEEE 会員。  
Software Engineering Center



熊谷 宏樹 KUMAGAI Hiroki

デジタルメディアネットワーク社 コアテクノロジーセンター  
エンベディッドシステムプラットフォーム開発部。組込み機器向けソフトウェアプラットフォームの開発に従事。  
Core Technology Center



佐久間 毅 SAKUMA Takeshi

デジタルメディアネットワーク社 コアテクノロジーセンター  
エンベディッドシステムプラットフォーム開発部グループ長。  
組込み機器向けソフトウェアプラットフォームの開発に従事。  
Core Technology Center