

Linuxの信頼性・性能向上への取組みと社会インフラ機器への適用

Activities for Improvement of Reliability and Performance of Linux and Its Application to Social Infrastructure Systems

小林 良岳

■KOBAYASHI Yoshitake

社会インフラシステムを支える機器には、その特性上、高い信頼性、運用性、及び品質が求められる。

東芝は、社会インフラシステム向け組込み機器へのLinux^(注1)搭載を進めている。Linux適用を進めるうえで課題となる、意図しない電源断でもデータ損失が少ない安定した機能の提供、リアルタイム性保証による確実性の高い性能確保、及び長期運用に必要な互換性検証などについて技術開発に取り組んできた。これら技術開発の成果は、製品に適用するとともに、Linux Foundation (LF) やLinuxカーネルコミュニティにフィードバックすることでそれらの活動に貢献している。

Among the characteristics required by social infrastructure systems are high reliability, operability, and quality.

Toshiba is promoting application of the Linux to social infrastructure systems. We have realized various technologies to promote application of the Linux to social infrastructure systems, including technologies to ensure (1) reliable functionality that minimizes the loss of data even in the case of power supply interruption, (2) real-time performance through stabilization of response time, and (3) verification of compatibility necessary for long-term support. The Linux has been applied to social infrastructure systems such as automatic ticket gates through these technologies. The results of these technological developments are fed back through the Linux kernel community and the Linux Foundation.

1 まえがき

1991年に発表されたLinuxカーネル（以下、Linuxと呼ぶ）は、当初非常に機能が制限されたものであったが、多くの人によって改良が加えられ、今では高機能なOS（オペレーティングシステム）の一つとなっている。また、オープンなコミュニティで開発されたOSS（オープンソースソフトウェア）の代表例の一つである。Linuxは商用システムでは当初、主にエンタープライズ向けサーバシステムで採用されていたが、今ではデジタルテレビやスマートフォンなど組込み機器でも多く利用されている。

東芝は、コンシューマー向け組込み機器へのLinux搭載を目的として設立されたCE Linux Forum (CELF) に立上げ時から参加するなど、組込み機器へのLinux採用に向けた活動に積極的に貢献してきた。CELFは、2011年にLinuxの業界団体の中でも最大のLFと合流し、LFのワークグループの一つCEWGとして活動を継続している。CEWGは、主にコンシューマーエレクトロニクスに焦点を当てているものの、組込み機器に適用可能な省電力化や高速起動など多くの技術開発を行い、Linuxカーネルコミュニティにフィードバックしている。

一方、当社が扱う製品は、デジタルテレビなどの家電製品だけでなく、フラッシュメモリなどの半導体デバイス、更には交通機器などの社会インフラシステムまで多種多様であり、組

込みOSも広く用いられている。この中で、社会インフラシステム向け組込み機器（以下、社会インフラ機器と略記）にLinuxを適用する場合には、そのシステムの特性上、高い信頼性、運用性、及び品質が求められる。

ここでは、社会インフラ機器にLinuxを適用する際の課題について述べ、その解決に向けて当社が行った技術開発と実際の適用事例について述べる。

2 社会インフラ機器へのLinux適用上の課題

社会インフラ機器にLinuxを適用する場合、高信頼かつ高品質であることが求められる。ただし、この高信頼や高品質ということばは非常に曖昧であり、適用する製品によっても求められる特性は異なる。例えば、信頼性と言っても、ハードウェアだけで実現可能な高信頼化技術と、ソフトウェアによってハードウェアの特性を引き出すことで実現可能な高信頼化技術がある。ここで対象とする技術は後者である。

ソフトウェアを用いるシステムでは、信頼性や品質に関連して、主に次の三つの課題が存在する（図1）。

- (1) 安定性が高い機能の提供
- (2) リアルタイム性の確保
- (3) 長期運用が可能な体制と技術

Linux適用の際に、これらの課題の克服に向けて当社が行った技術開発について次章以降で述べる。

(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。

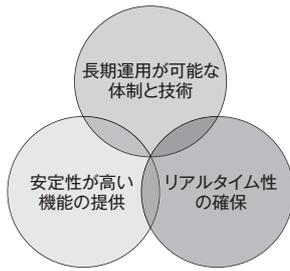


図1. 信頼性確保に必要な枠組み — 社会インフラ機器へのLinux適用には、三つの課題を克服する必要がある。

Overview of reliability support

3 課題解決に向けた取組み

3.1 安定性が高い機能の提供

Linuxは多くのサブシステムで構成されるだけでなく、各サブシステムの実装が複数提供されているため、これらの組合せ方によって安定性に差が生じる。社会インフラ機器にLinuxを適用する際には、これらサブシステムの組合せで安定して動作することを検証する必要がある。サブシステムの例としては、ハードウェアのメモリを管理し割り当てるメモリ管理システムや、ファイルを管理する機能を提供するファイルシステムなどがある。ここでは一例として、ファイルシステムにおいて、安定性が高い機能を提供するために必要な評価手法について述べる。

Linuxでは10種以上のファイルシステムが用意され、カーネル開発の過程で改変されているため、同じファイルシステムであってもカーネルバージョンの違いで挙動が変わる。ファイルシステムにおける安定性は、データ保持の信頼性（以下、データ信頼性と略記）である。システムが電源断や強制リセットなどによって突然停止してしまった場合でも、それまでにアプリケーションプログラムが書き込んだと判断したデータが正しく書き込まれていることを保証するものである。

データ信頼性を評価するためには、データ書き込み中にシステムが電源断などで不正終了する状況を想定して評価を行う必要がある。そこで、図2に示すような評価環境を構築して評価した。不具合発生時のファイル内容を全てチェックし、実際に書き込まれたデータが想定するものと一致するかどうかを確認するデータ整合性だけでなく、作成したファイルサイズが想定したものと同等であるかのサイズ整合性についても評価している。

実際に三つのカーネルバージョン上で、ファイルシステムの評価を複数回行い、平均を取った結果を図3に示す。この結果から、次の三つの知見が得られた。

- (1) 同じファイルシステムであっても、カーネルバージョンが違えばデータ信頼性の特性が異なる。
- (2) 新しいカーネルバージョンほどファイルシステムのデータ信頼性が高くなるとは限らない。

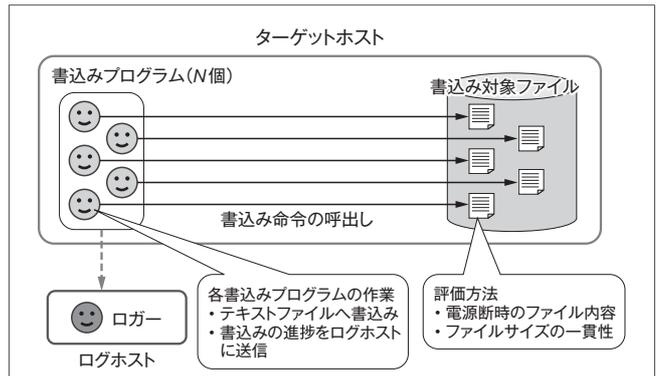


図2. ファイルシステム信頼性評価の概要 — ファイルシステムが不正終了した際のデータ信頼性を総合的に評価する。

Outline of data reliability verification

(3) EXT4-JOURNALとBTRFSは、他のファイルシステムに比べ書き込みデータ信頼性が比較的高い。

この中で(3)は、ファイルシステムの動作原理を理解していればデータ信頼性が高くなることは想像できる。しかし、Linuxの開発過程では様々な変更が行われるため、ある特定のカー

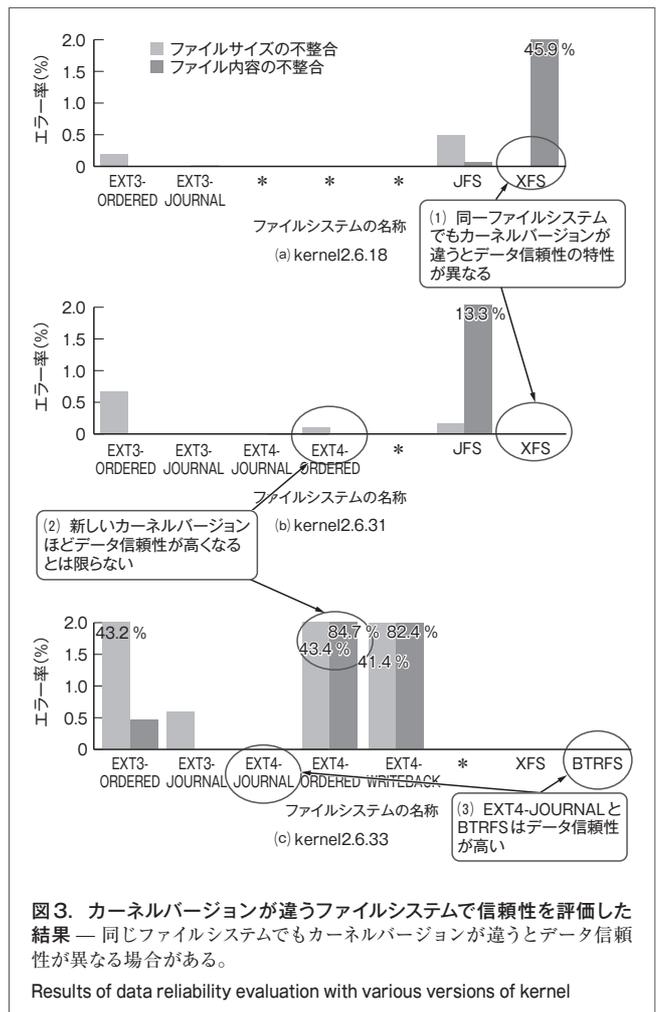


図3. カーネルバージョンが違うファイルシステムで信頼性を評価した結果 — 同じファイルシステムでもカーネルバージョンが違うとデータ信頼性が異なる場合がある。

Results of data reliability evaluation with various versions of kernel

ネルバージョンでは特性が変わってしまうことがある。例えば、図3(c)のファイルシステムでEXT3-ORDERDとEXT4-ORDERDのエラー率が大きく上がっているが、これは(b)から(c)のカーネルバージョン変更において、ファイルシステムの下層レイヤにあたるブロックデバイス層が大幅に書き換えられた過程で混入したバグが原因である。リリースされた時点では、ファイルシステムの入出力は正しく行われているように見えるため、データ信頼性の評価を行わないかぎり気づくことはできない。すなわち、テストを製品適用前に実施することで、データ信頼性の高い製品を提供することが可能になる。

今回は、ファイルシステムを例に述べたが、安定性の高い機能を提供するには、他のサブシステムに対しても機能と挙動に着目して評価を実施しなければならない。

3.2 リアルタイム性の確保

社会インフラ機器に求められる性能要件は、必要量の処理を決められた時間内で確実に処理できることである。そのため、機器全体としてのスループットを高めるより、リアルタイム性を高めることが求められる。もし、リアルタイム性が欠如すると、例えば自動改札機の扉の開閉が間に合わない可能性がある。

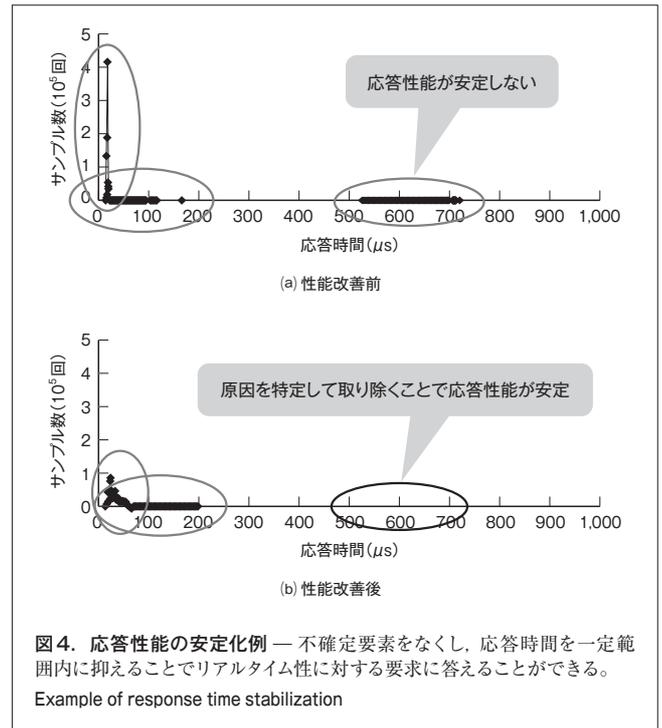
Linuxは開発当初から汎用的な使い方を想定して設計されてきたOSであったため、リアルタイム性の保証には弱い部分があった。例えば、カーネル内部の処理がCPU資源を確保しすぎてしまうことが原因で、優先度が高い処理の応答性に影響を及ぼす実装となっていた。そこで、開発者たちはリアルタイム性保証のための機能追加を行ってきたが、現在でもコミュニティレベルで公式のカーネルリリースに含めるための合意は形成されていない。カーネルのソースコードとは別に管理されている。

そこで当社は、カーネル内部のリアルタイム性の問題箇所を効率的に解析するための技術開発を行っている。例えば、カーネル内部の実行トレースを取得し、その結果から問題箇所の候補を抽出するための解析技術を開発した。この技術を応用することで、Linux単体の限界値に近いリアルタイム性を実現することが可能である。例えば、図4(a)では、標準のLinuxにリアルタイムパッチを組み合わせたが、600~700 μ s程度の割込み遅延がたびたび発生している。これを解析して適切に変更することで、(b)のように割込み応答を200 μ s以下に安定させることができる。

このような技術を適用し、更にシステム全体の設計を性能面から見直すことで、安定した性能を実現している。

3.3 長期運用に向けた体制と技術

Linuxは、コミュニティによって開発と保守が行われているが、保守期間は長くて2年程度と、社会インフラ機器で求められる製品出荷期間が10年、その後の保守が更に10年続くといった長期保守には不十分である。それ以上の保守期間を求

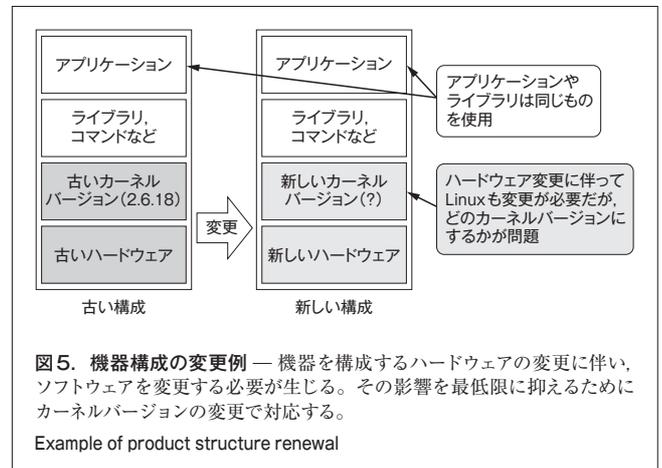


められるものも多いため、以下の二つが確実に提供される必要がある。

- (1) 製品供給期間を想定した長期技術サポート
- (2) ハードウェア変更に伴う移行支援

まず、(1)の技術サポートは、ソフトウェアの管理体制と運営体制が問題になる。当社では、Linux技術に対応できる部門を社内へ常設することで対応している。

しかし、運用面だけでは克服しきれない問題が(2)のハードウェア移行の問題である。ハードウェアは日進月歩で進化し、製品の出荷期間中であっても、まったく同じハードウェア構成の製品を提供し続けることが困難になる場合がある。機器構成の変更可能性を図5に示す。機器はハードウェアとソフトウェアの組合せによって提供され、ソフトウェアを更に細分化



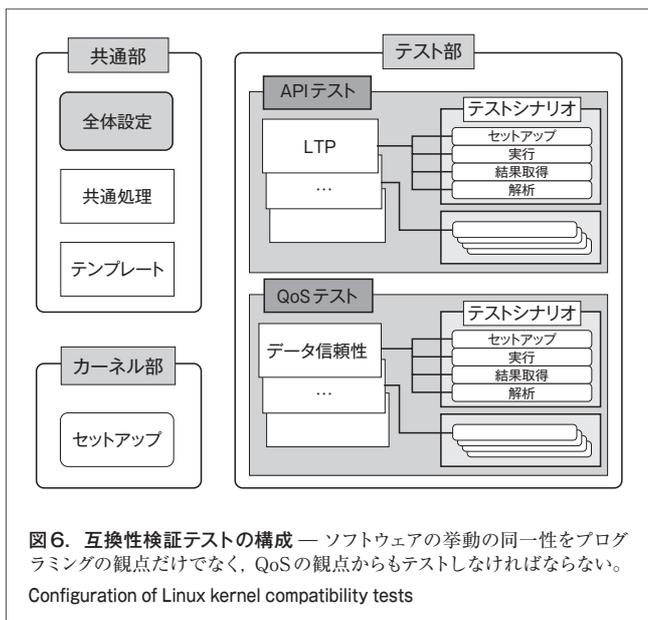


図6. 互換性検証テストの構成 — ソフトウェアの挙動の同一性をプログラミングの観点だけでなく、QoSの観点からもテストしなければならない。
Configuration of Linux kernel compatibility tests

すると、アプリケーション、ライブラリ、及びカーネルに分けられる。

もし、ハードウェアを変更する必要がある場合、アプリケーションやライブラリまで含めて変更すると保守性を大きく損ねるため、カーネルで差を吸収することが求められる。その際、どのカーネルバージョンを用いれば機能や性能、信頼性の面で必要な互換性が確保できるかを検証し、その影響を見極める必要がある。

このとき、プログラムが動作するという機能面だけの互換性検証では不十分であり、機器を構成するハードウェアとソフトウェア全体が確実に同じ動作をすることを確認できて初めて互換性を確保できたとと言える。その視点に立つと、アプリケーションが利用するカーネル機能が以前と同じ動作をすることだけでなく、同等の性能や信頼性（サービス品質：QoS）が確保できることを保証する必要がある。

そこで当社は、Linuxの互換性問題の影響を見極めるための互換性検証技術を開発している。図6に示すような互換性検証テストの環境を整備し、カーネル移行時に互換性検証テストを実施している。互換性検証テストでは、API (Application Programming Interface) テストとQoSテストの二つのカテゴリーのテストを行う。

まず、APIテストでは、アプリケーションとLinux間のインタフェースに関するテストを実施する。例えば、OSSのテストスイートのLinux Test Project (LTP) では一連のシステムコールテストを提供しているため、これを実施する。次に、QoSテストでは、APIテストで発見することができない性能面や、カーネルの各サブシステム機能の動作特性に関するQoS面のテストを行う。例えば、ファイルのデータ信頼性テストなどが該当する。

こうしたテストを製品の機能・性能要求に合わせて網羅的に実施することで、ハードウェア変更に伴う移行をサポートしている。

4 適用事例

当社では、社会インフラ機器へのLinux採用が増えている。特に、以前からLinux採用が行われてきたエンタープライズ向け製品への採用だけでなく、制御系の製品への採用が増えている。3.2節で取り上げた自動改札機もLinuxの搭載が完了している⁽¹⁾。更に、様々な当社の社会インフラ機器でLinuxが採用され始めている。

自動改札機へのLinux適用では、組込み機器特有の機能面での制約と、社会インフラ機器としての信頼性を両立させる必要があった。まず、組込み機器としての制約に対しては、起動時間や終了時間、メモリ使用量などのチューニングを行った。次に、信頼性確保のために、リアルタイム性の保証や、ファイルシステムのデータ信頼性の確保、ハードウェア異常検出などへの対応を行った。

5 あとがき

ここでは、社会インフラ機器へのLinux適用に向けた当社の取組みについて述べた。社会インフラシステムでは、必要な機能を満足するだけでなく、安定した性能と品質が要求される。これらを満足させるため、当社はLinux適用に必要な技術開発を積極的に行っている。また、Linuxはコミュニティで開発されていることから、開発成果をカーネルパッチという形でLinuxカーネルコミュニティに提供したり、LFのCEWGが開催する会議において積極的に発表したりすることでフィードバックしている。

今後も、これらの活動を通してLinuxとLinux採用システムの両面からの品質向上に取り組んでいく。

文献

- (1) 森田秀則 他. 信頼性と拡張性を備えた新型自動改札機 EG-5000. 東芝レビュー. 65, 10, 2010, p.45 - 49.



小林 良岳 KOBAYASHI Yoshitake, Ph.D.
ソフトウェア技術センター 先端ソフトウェア開発担当参事、博士 (工学)。オペレーティングシステムの研究・開発に従事。ACM, IEEE-CS, 情報処理学会, 電子情報通信学会会員。Corporate Software Engineering Center