

15-A-19

デジタル制御電源製品開発に対するモデルベース開発の適用¹

1. 適用した技術や手法の概要

株式会社富士通研究所（以降、富士通研究所）では、データセンタ省エネルギー化の取り組みの一つとして、電源内の制御をマイコンに組み込まれたソフトウェアによって実現する「デジタル制御電源」の研究開発に取り組んでいる。

従来の製品開発での、

- ① 回路設計や制御系設計とシミュレーション
- ② 回路製作とプログラミング（並行実施）
- ③ 実機テスト

と3つに分かれていた開発プロセスでは、

- ・ 設計時のシミュレーションと実機動作の結果が異なる場合、その原因が回路（ハードウェア）にあるのか、制御ロジックにあるのか、あるいはコーディング時の人為ミスにあるのか、の切り分けが困難でそのためのデバッグ工数の増加が懸念される。
- ・ 実機テストでは異常ルートの信頼性の評価が難しく、潜在バグの危険性が懸念される。
- ・ 複雑な制御ロジックを使用した場合の原理的な限界性能がどこにあるかを追求する事ができない。

など、の課題があり、製品の高度化に伴う製品開発でのデバッグ工数の増加、信頼性の確保が困難、性能限界を追究できない、などの問題が深刻化することが予想された。

本編では、これらの課題に対応するため、モデルベース開発（MBD：Model Based Development）の手法をデジタル制御電源の研究開発に適用した富士通研究所の事例を紹介する。本事例で用いている主な MBD の手法は MILS：Model In the Loop Simulation、RCP：Rapid Control Prototyping、PCG：Production Code Generation（量産コード自動生成）である。なお、デジタル制御電源開発に RCP、PCG を適用する場合、ツールベンダが提供する標準的な環境では十分ではないことが明らかになったことから、これを解決するために必要な要素を独自開発した。

¹ 事例提供：株式会社富士通研究所 佐々木 智丈 氏、米澤 遊 氏、中島 善康 氏、金児 純司 氏

2. 適用した技術や手法の導入に踏み切った理由や経緯

2.1. 背景

近年、クラウドサービスのニーズ増大による ICT² システムの規模や稼動時間の拡大により、データセンタの消費電力が大幅に増加している。富士通研究所では、同社が掲げる「ICT イノベーション」領域の研究の一つとしてデータセンタの省エネルギー化に取り組んでおり、サーバやネットワークはもちろん、空調や給電などの研究も行っている。

データセンタの省エネルギー化のためにはセンタ全体を見通した給電の最適化が重要である。富士通研究所はサーバ等に対して必要な電力を供給する電源についても、電力変換効率（出力電力／入力電力）を向上させることはもちろん、データセンタの一部として、他の電源、あるいは他の機器との協調動作による省エネルギー化の実現を目指している。

電源分野では、電源内の制御をアナログ回路によって行う「アナログ制御電源」が主流であるが、近年、マイコンに組み込まれたソフトウェアによってこれを実現する「デジタル制御電源」（図 15-A-19-1）に注目が集まっている。電源の制御をデジタル制御にするメリットは、以下に示す通りである。

- ・ システムとの協調動作が可能となり、系の安定性が向上
- ・ 負荷条件に合わせた制御により電力変換効率が向上
- ・ ハードウェア部品点数の減少で、信頼性の向上および低コスト化が可能

富士通研究所は、データセンタでの高度な省エネルギー化に必要とされる上記のような機能を実現するためには電源のデジタル制御化が必須であると考え、サーバ用デジタル制御電源の研究開発をすすめてきた。

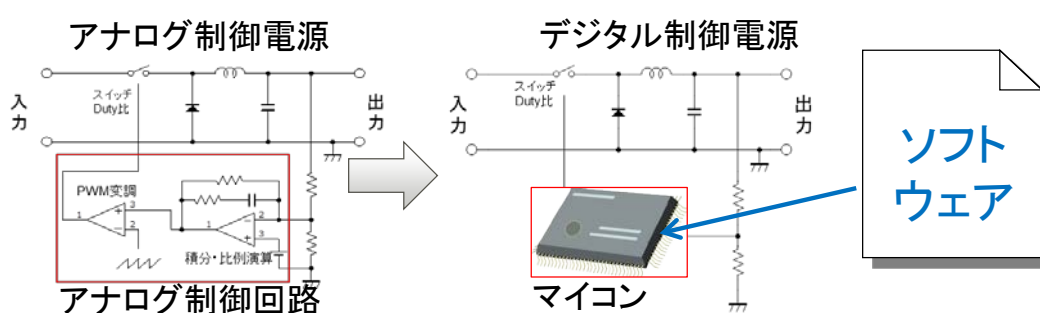


図 15-A-19-1 アナログ制御電源とデジタル制御電源

2.2. 従来の開発プロセスとその問題点

サーバ用デジタル制御電源に対する研究開発プロセスは、回路設計・制御系設計・簡易シミュレーションを行った後は、回路製作とプログラミングを並行して行い、量産用マイコンにソフトウェアを組み込んで実電源回路を動作させる実機テストを行っていた。

² Information and Communication Technology

しかし、この開発プロセスでは以下のような問題点があった。

問題点

- ① 設計時のシミュレーションと実機動作結果のギャップに現れる多くの問題の所在が制御対象の回路（ハードウェア）にあるのか、制御ロジックにあるのか、あるいはコーディング時の人為ミスにあるのか、の切り分けが困難である。この結果、実機テストで問題が起こるとデバッグの長期化と繰り返いを招いてしまう（図 15-A-19-2）。
- ② 実機テストでは異常ルートの実験性の評価が難しく、潜在バグの危険性が残る。
- ③ 制御ロジックを検証する前に特定のマイコンを選択してしまうと、マイコンの制約のため複雑な制御ロジックを使用した場合の原理的な性能限界がどこにあるかを追求する事ができない。

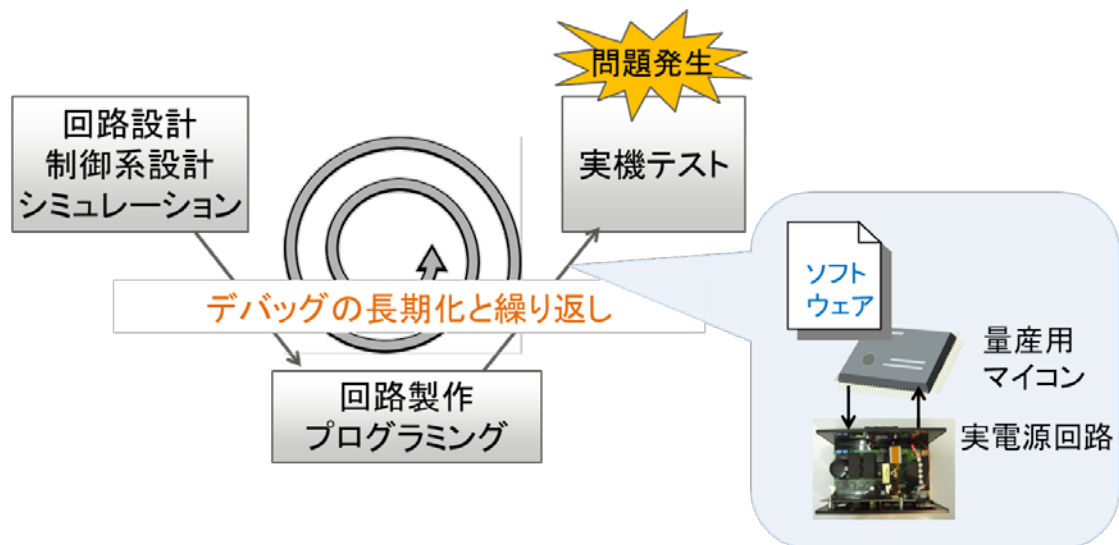


図 15-A-19-2 従来の開発プロセスとその問題点

したがって、従来の開発プロセスのまま電源の高度化を進めると、デバッグ工数が増加するとともに、信頼性の確保が困難になり、性能限界を追究できないなど、問題が深刻化することが予想された。

2.3. モデルベース開発（MBD）の適用

サーバを含む ICT 機器用のデジタル制御電源開発を推進するためには、開発効率と信頼性の高い開発プロセスの確立が必要である。これを実現するものとして、富士通研究所は自動車産業や航空機産業などで適用されているモデルベース開発に着目し、デジタル制御電源開発に適用することとした。

モデルベース開発は、制御ロジックの仕様を実行可能なグラフィカルモデルで表現し、計算機上の設計・シミュレーションから実機テストまで段階的に検証を行いながら開発を進める手法である。図 15-A-19-3 に富士通研究所が目指したデジタル制御電源用 MBD の姿を示す。

富士通研究所が目指したデジタル制御電源のモデルベース開発は、開発効率化、信頼性向上といった効果を発揮するために、「回路設計・制御系設計・MILS、RCP、PCG」の各ステップがスムーズにつながることを考慮し進めた。

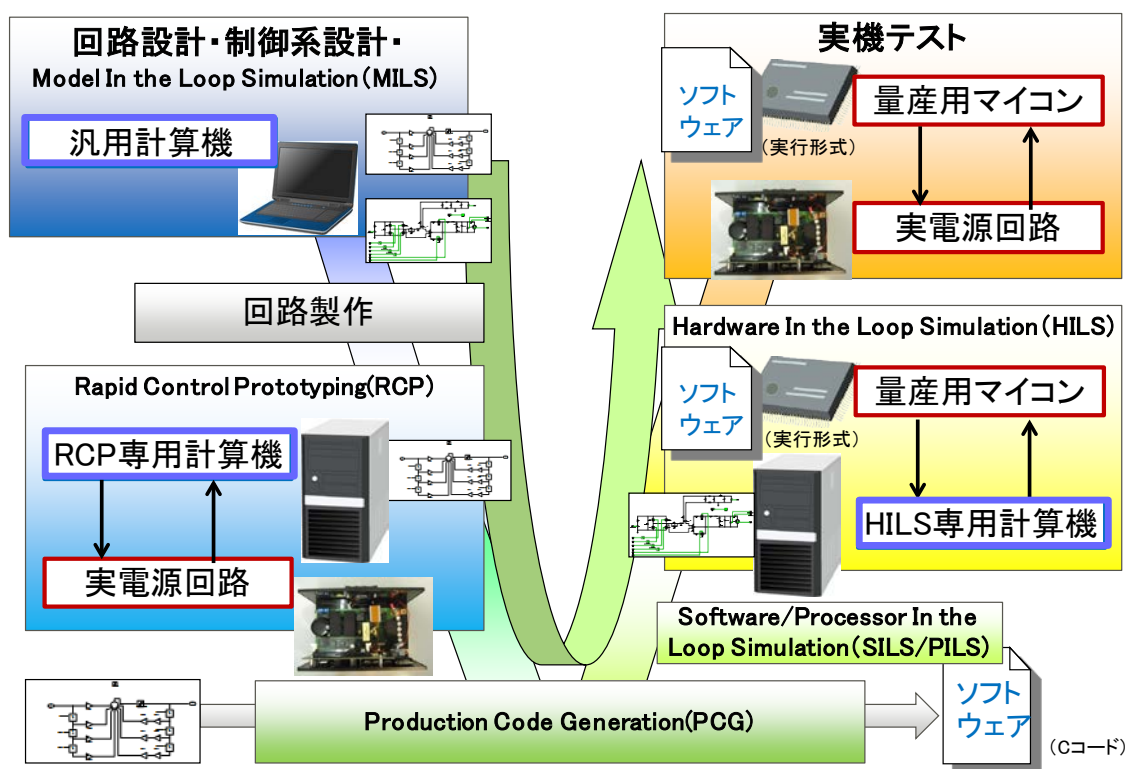


図 15-A-19-3 富士通研究所が目指すデジタル制御電源用 MBD の姿

以下、MILS、RCP、PCG について説明する。

(1) MILS : Model In the Loop Simulation

MILS は、汎用計算機上で制御ロジックを表すグラフィカルモデルと回路を表すグラフィカルモデルを組み合わせて閉ループ系の挙動を確認する工程である。

MILS を導入することで、回路設計や制御系設計の早い段階でシミュレーションを使用して検証することにより、早期に制御ロジックの問題検出や性能仕様の確認が実施でき、大きな手戻りを抑制する効果が見込める。

(2) RCP : Rapid Control Prototyping

RCP は、制御ロジックを表すグラフィカルモデルを忠実に実行する専用の高性能計算機を用い、MILS で検証済みの制御ロジックによって実際の回路を制御し、制御ロジックが実際の回路に対しても有効かどうか確認する工程である。

RCP を導入することで、マイコンへの組み込み作業が不要になるため、実際の回路に対する制御ロジックの検証までの時間の短縮が見込める。また、ここで問題が起こった場合、原因を回路のモデルと実際の回路のずれに限定することができる。このた

め、RCP で問題が起こった場合、

- 1) 回路の実装に問題がある場合、それを修正して再び RCP を行う。
- 2) 回路の実装に問題がなく、回路モデルに実物との重要なずれが存在する場合には、回路モデルの修正を行ったうえで制御ロジックの再設計と MILS を行い、再び RCP を行う。

というように、対処が明確となる。これにより、デバッグの効率化が見込める。

また、RCP の導入により実回路に対する制御ロジックの有効性が検証済みとなることで、後工程である PCG 以降において問題が発生した場合の被疑範囲も限定されることになり、PCG の効果もより高まる。

(3) PCG : Production Code Generation

PCG は、RCP によって検証された制御ロジックを表すグラフィカルモデルをもとに、量産製品で使用するマイコンに組み込むためのソフトウェア（コード）を自動生成する工程である。

PCG を導入することで、マイコンに組み込むコードを手で書く作業が代替され、人手によるコーディング工数の削減とソフトウェアの信頼性の向上が見込める。

以上のような効果を見込み、デジタル制御電源開発において MBD の各種手法を適用することとしたが、ICT 機器用電源に MBD の手法を導入することは容易では無く、次に示すような工夫を行った。

3. 導入のための事前準備や工夫

まず、事前準備としてデジタル制御電源のモデルベース開発のためのプラットフォームの選択を行った。プラットフォームとして MathWorks 社の MATLAB/Simulink を選択したが、これは、MATLAB/Simulink プロダクトファミリーがモデルベース開発の工程をほぼカバーし、サードパーティ製品も充実していることと、富士通研究所が従来の開発プロセスにおける制御系設計や（簡単な）シミュレーションにおいて MATLAB/Simulink プロダクトファミリーを使用してきたことによる。

プラットフォームの選択に続いて、富士通研究所では MathWorks 社や RCP 用ハードウェアのベンダと ICT 機器用デジタル制御電源へのモデルベース開発導入について情報交換を重ねた。この結果、ICT 機器用デジタル制御電源への MBD 導入には解決すべき問題や工夫するべき点が存在することが明らかになった。

ICT 機器用デジタル制御電源への MBD 導入に対する最も大きな問題は、市販の RCP 用専用計算機（RCP マシン）では ICT 機器用デジタル制御電源に必要な制御周波数とパルスの時間分解能で RCP を行う環境を構築できないことであった。ICT 機器用電源は、おおよそ 100kHz 以上の周波数で内部の半導体スイッチのオン・オフを行っている。ICT 機器用電源の開発で RCP を行おうとすると、当然 100kHz 以上の制御周波数に対応することが必要

である。また、半導体スイッチのオン・オフに使うパルスについてもナノ秒以下の時間分解能が必要とされる。これに対し、市販の RCP マシンで実現できる制御周波数は高々数十 kHz であり、パルスの分解能も不足していた。そのため、このままでは ICT 機器用電源に対する RCP を実現できないことが明らかとなった（図 15-A-19-4）。

また、PCG についても、従来の開発プロセスにおいて手作業で実装していたような高速な（実行時間の短い）コードを生成するためにはツールベンダが提供する標準的な環境では十分でないこともわかった。MILS の、環境自体は市販品でそろえることができるが、重要なのは RCP や PCG を意識したモデル構築を行うことだということが明らかになった。

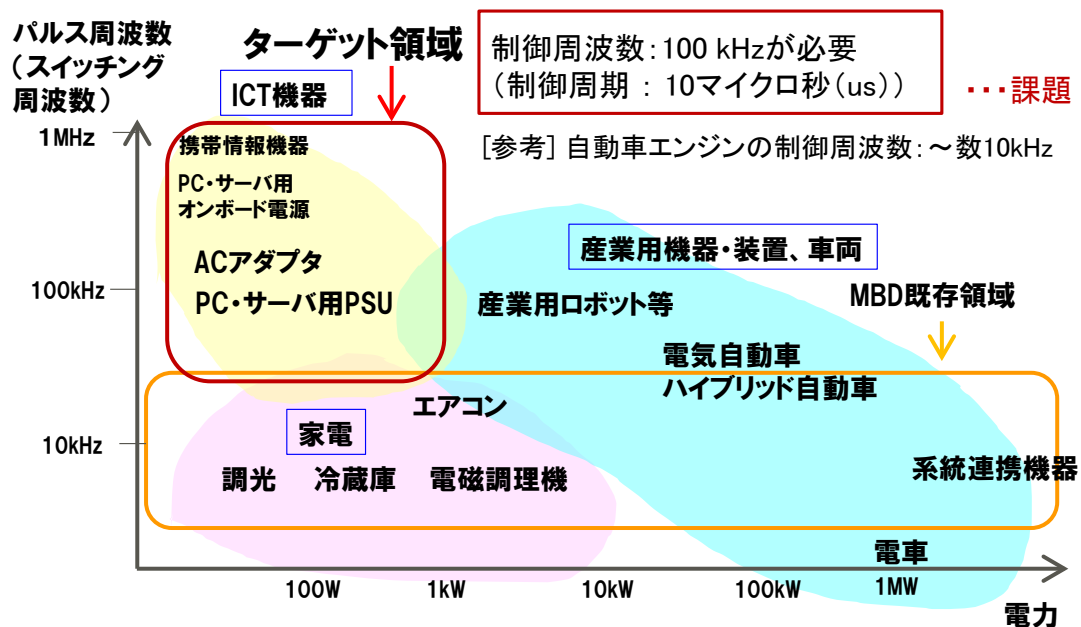


図 15-A-19-4 富士通研究所が目指す MBD の適用範囲と課題

このため、富士通研究所では、デジタル制御電源開発に RCP、PCG を適用するために必要な要素を独自開発することとし、MILS についても RCP や PCG を意識した工夫を行った。

富士通研究所におけるデジタル制御電源の研究開発は、テーマにもよるが、ハード担当、ソフト担当あわせて 2,3 人から 10 人程度のチームで行われている。今回、上記のモデルベース開発導入のための独自要素を開発するには、ハード、ソフトあわせて 10 人程度のチームで約 1 年の期間を要した。

以下、それらについて述べる。

3.1. RCP における独自要素の開発

上で述べたように、市販の RCP マシンでは ICT 機器用電源に必要な制御周波数、パルスの時間分解能を実現できなかった。このため、市販の RCP マシンの不足している性能を補い、高時間分解能のパルス幅変調制御信号を高速に生成することを可能とする IO ボードを

独自に開発することとした。この IO ボードは既存の RCP マシンと実電源回路の間に接続される (図 15-A-19-5)。これを使用することにより、ICT 機器用電源に必要な高速かつ高時間分解能のパルス幅変調制御 (PWM³制御) を実現する RCP 環境を世界で初めて構築した。

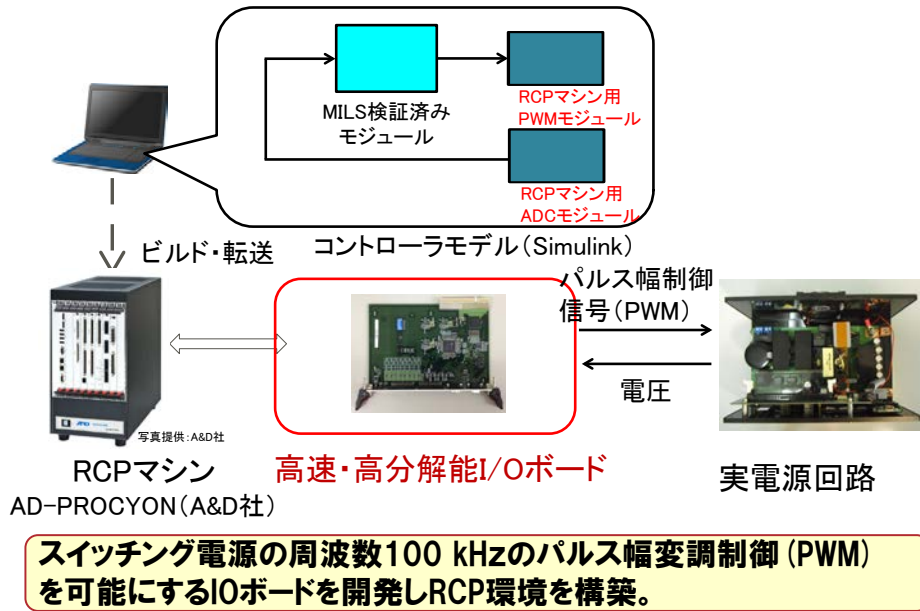


図 15-A-19-5 デジタル制御電源用の独自 RCP 環境の構成

図 15-A-19-6 は新規に構築したデジタル制御電源向け RCP システムを評価した結果である。パルス幅変調器と AD 変換の数を増やす程、処理に時間がかかるようになるが、富士通研究所が構築した RCP 環境では、4 チャンネルのパルス幅変調と 10 チャンネルの AD 変換を行っても制御周波数 100kHz が実現されている。また、パルスの時間分解能は 0.15 ns が実現されている。

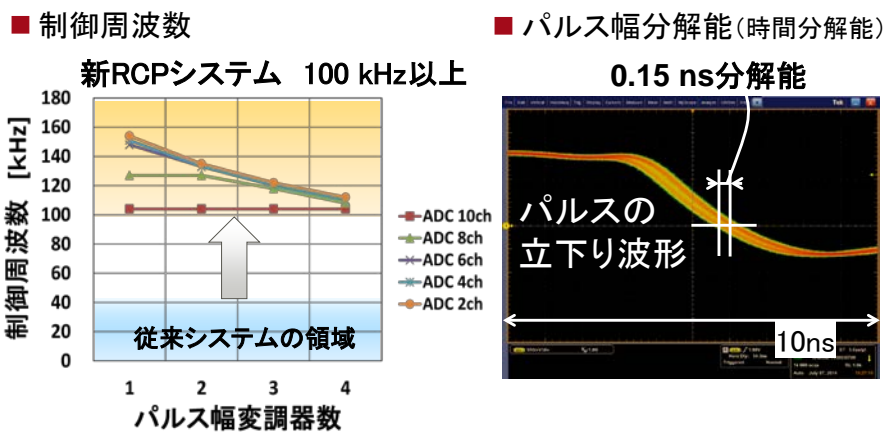


図 15-A-19-6 デジタル制御電源用の独自 RCP 環境の性能

³ Pulse Width Modulation

3.2. PCG における独自要素の開発

従来の開発プロセスにおいては手作業で実装していたような高速な（実行時間の短い）コードを自動生成するために、Simulink のカスタムブロックなどを開発した。たとえば、図 15-A-19-7 はアセンブリ言語ライブラリ（Texas Instruments 社 Digital Power Library）を自動コード生成の枠組みのなかで使用し、3Pole3Zero と呼ばれる制御器の計算を高速化するためのカスタムブロックを示している。

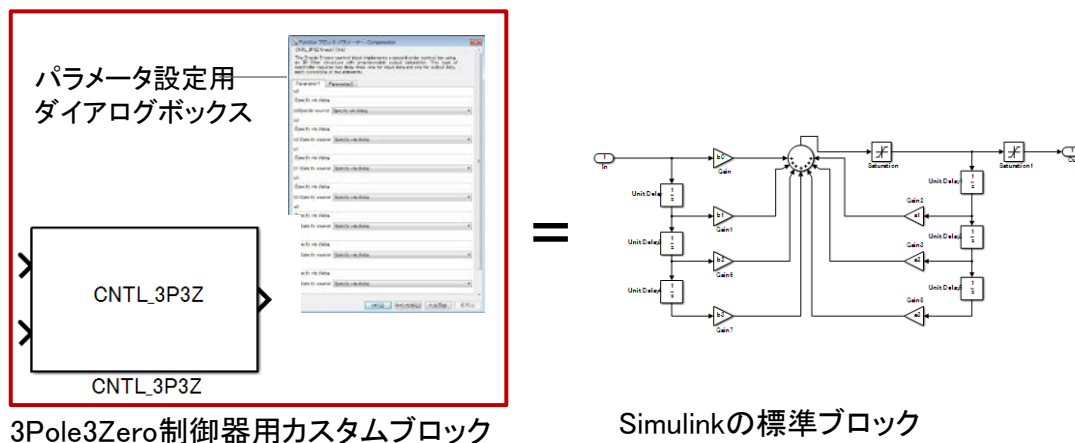


図 15-A-19-7 実行速度向上のためのカスタムブロック

表 15-A-19-1 に独自の実行速度向上手法の効果を示す。上記アセンブリ言語ライブラリの使用を含む独自の実行速度向上の手法により実行速度の向上を達成し、同じ機能を持つソフトウェアで比較して、独自手法を導入しない場合の 8.15 マイクロ秒から 6.95 マイクロ秒へ実行時間を短縮できた。すなわち、100kHz に対応する 10 マイクロ秒に対する余裕時間は 1.85 マイクロ秒から 3.05 マイクロ秒に増加したことになる。これにより、同じマイコンでも余裕のある実行が可能となった。

表 15-A-19-1 独自の実行速度向上手法の効果

	独自実行速度向上手法 無 (IQMathブロック、関数置換のみ)	独自実行速度向上手法 有
実行時間	486 CPUクロック	417 CPUクロック
	8.15 マイクロ秒※	6.95 マイクロ秒※
処理余裕 (10マイクロ秒* に対する余裕)	1.85 マイクロ秒※	3.05 マイクロ秒※

※ Texas Instruments F28035に組み込み、Code Composer Studioで実時間を測定
CPUクロックをF28035のクロック数60MHzを用いて換算

* 10マイクロ秒 ⇔ 100kHz

3.3. MILS における工夫

MILS のモデルは制御ロジック部分、マイコン入出力部分、制御対象部分と大きく 3 つにわけて構成している (図 15-A-19-8)。制御ロジック部分については、さらに内部で機能ごとのモジュール化を行っている。これは、MILS 用のモデルを RCP、PCG のためのモデルに変換する作業をスムーズに進められるように行っている工夫である。

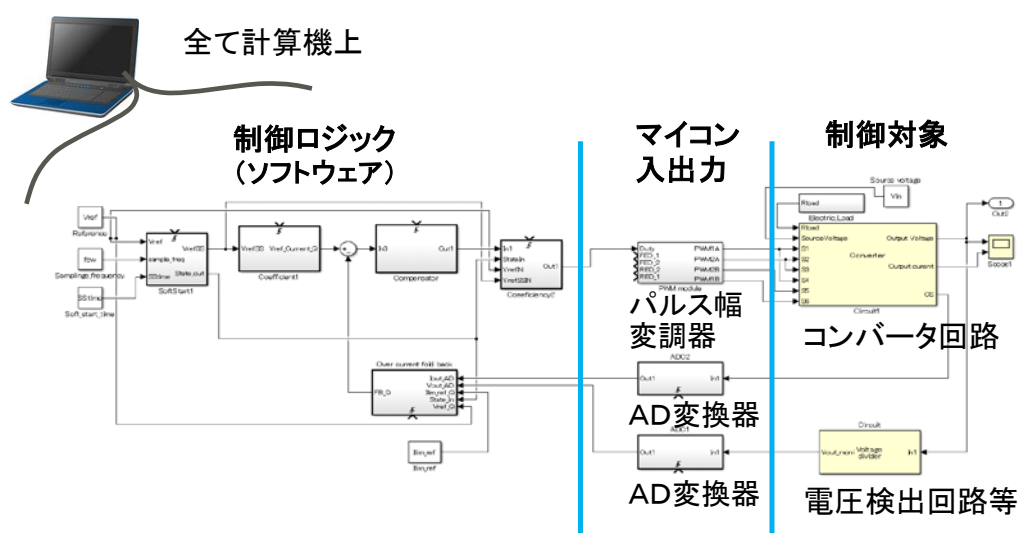


図 15-A-19-8 デジタル制御電源の MILS モデルの構成

以上の開発と工夫により、MILS、RCP、PCG を連携させてデジタル制御電源の開発に適用することが可能となった（図 15-A-19-9）。特に、最も難しい RCP が実現可能となったことがこの連携実現の鍵であった。

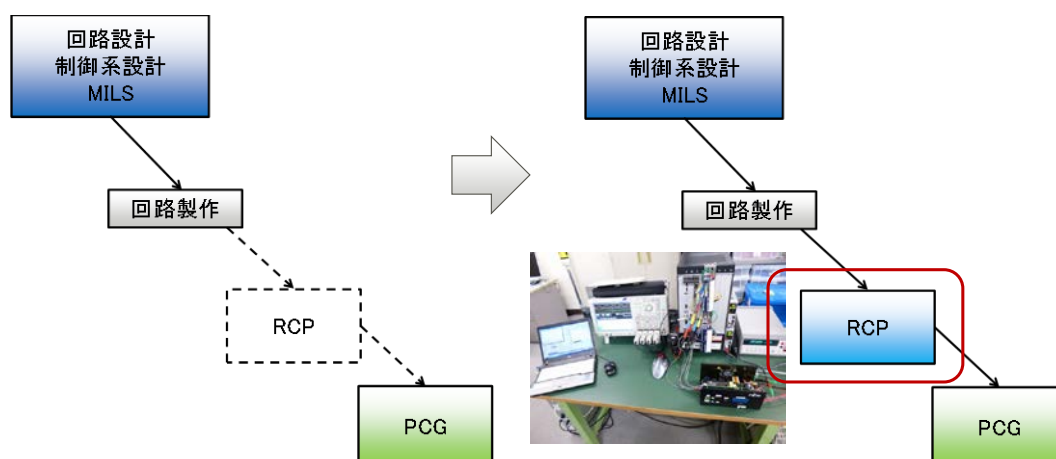
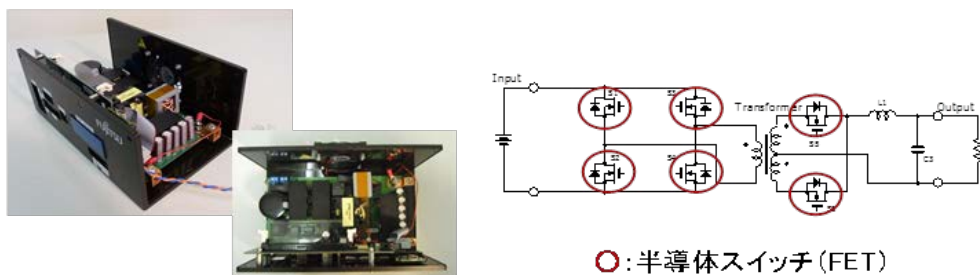


図 15-A-19-9 MILS、RCP、PCG の連携

4. 適用の効果測定とその結果

富士通研究所では、「3.導入のための事前準備や工夫」で述べた独自開発要素を使用して、500W フルブリッジコンバータ（図 15-A-19-10）に対し MILS、RCP、PCG、および実機テストを実行することで開発効率化の効果を確認した。



- 入力電圧: DC 400 V、出力電圧: DC 12 V
- PWM 4Ch (FET 6個)、ADC 2Ch (出力電圧、1次側電流)
- 制御周波数 100 kHz

※ Texas Instruments 社 TMDSHVPSFBKIT をベースに作成

図 15-A-19-10 500W フルブリッジコンバータ

4.1. MILS の効果

MILS を導入したことにより、実回路を動作させる前に制御ロジック（例：過電流保護ロジック）の問題点を発見し、性能仕様の確認など、改善することができた。実回路を動作させてから問題点が発見され、大きな手戻りが発生する従来の開発に比べ、デバッグに費やす時間が削減できたと考えられる。

4.2. RCP の効果

RCP を導入したことにより、MILS で使用したモデルをほぼそのまま使用して実回路で制御ロジックの検証を行うことができるようになった。これにより、MILS による検証完了から数十分後には実回路を動作させることができた。手作業でマイコンに組み込むプログラムを作成してからでないと実回路での検証ができなかった従来プロセスに比べて大幅に時間が短縮された。

加えて、グラフィカルモデルに忠実な制御が保証されているため、ここで問題が起こった場合の被疑範囲を回路モデルと実電源回路のギャップだけに限定することが可能となり、対処の仕方が 2.3 で述べたように明確になった。また、RCP の導入により実回路に対する制御ロジックの有効性が検証済みとなることで、後工程である PCG 以降において問題が発生した場合の被疑範囲も限定されることになる。今回は RCP において大きな問題は起こらなかったが、同社は PCG における生成コードの確認は効率化されたものと考えている。

4.3. PCG の効果

PCG を導入したことにより、マイコンに組み込むコードを手で書く作業を不要とすることができた。これにより、RCP による検討完了から 1 週間程度で実機テスト（マイコンに組み込まれたソフトウェアによる実回路動作試験）を行うことができた。これも、従来プロセスに比べて大幅な時間短縮となっている。

なお、RCP による検討完了から実機テストまでの時間は RCP 用のモデルから固定小数点演算や割り込み処理に対応した PCG 用のモデルへの変換を行う作業や、自動生成されたコードの確認などの作業に要したものである。コードの自動生成自体は数分で完了する。

この結果に基づいて、デジタル制御電源の製品開発に MBD を適用した場合の効果を工数ベースで試算したものを図 15-A-19-11 に示す。

左側の 10 人月以上という数字は、従来プロセスでデジタル電源開発を行った場合の典型的な工数である。500W フルブリッジコンバータを用いて確認された開発効率化の効果から、同じ開発を MBD によって行くと工数は 3 人月～4 人月程度に減少するものと見込んでいる。

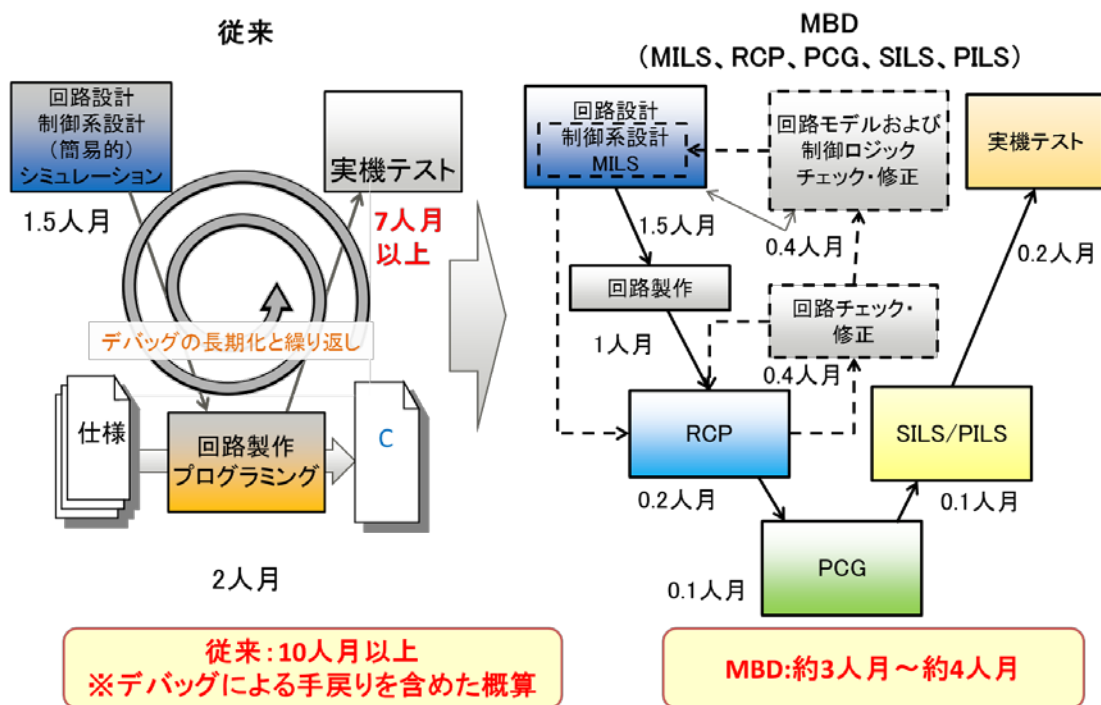


図 15-A-19-11 工数削減効果の見積もり

5. 導入後の改善活動と今後の課題

今回適用した手法の改善活動として、さらに高い制御周波数を必要とする電源へも RCP を適用可能とするための方式の検討を行っている。PCG については、PCG の枠組みの中で PMBus (Power Management Bus : デジタル電源制御・管理のための標準インタフェース) 通信などの機能も実現できるよう機能拡張を進めている。

また、今後の課題として、PCG 以降の検証工程の確立に取り組んでいる。

6. 結果と考察

(1) 品質について

品質についての本格的な評価はこれから実施するが、従来では手作業によりプログラミングしていた工程が自動コード生成に変更されているので、プログラミングミスに起因するバグ混入は防止できており、確実に品質は向上していると考えられる。

(2) 生産性について

「4.適用の効果測定とその結果」で述べたように、MILS、RCP、PCG それぞれで開発効率化の効果が確認された。デジタル制御電源の製品開発に適用した場合、必要な工数を約 3 分の 1 にできると見込んでいる。

(3) 検証への影響

マイコンに組み込むコードのプログラミングを排したことで、問題が発生した際に被疑範囲が限定しやすくなった。加えて、実機テストの結果を MILS の結果と比較することも検証の効率化に役立っている。

また、「5.導入後の改善活動と今後の課題」で述べたように、モデルベース開発における PCG 以降の検証手法の確立についても現在取り組んでいる。

7. 水平展開状況

富士通研究所は現在、富士通、富士通グループ会社、富士通関係会社のデジタル制御電源製品開発において今回独自開発した要素を使用したモデルベース開発を導入するべく展開活動を行っている。具体的な対象としては、ICT 機器用電源に加え、無線基地局用電源や車載電源をターゲットとしている。

これらの展開にあたっては、導入コストに見合う効果があることを実際の導入前に実感してもらうことや、導入決定後スムーズな導入を実現することが課題である。これらの課題の解決に向け、展開先にヒアリングを行いながらそれぞれの場合にあわせたモデルベース開発の効果をまとめて説明するとともに、導入の手順や準備についても個別に議論を進めている。

8. まとめ

デジタル制御電源の研究開発にモデルベース開発を適用可能とした富士通研究所の事例を紹介した。

デジタル制御電源の研究開発にモデルベース開発を適用するにあたっては、モデルベース開発での回路設計・制御系設計から実機テストまでの各開発プロセスを独自に構築する必要があり、中でも最も大きな問題は、市販品では ICT 機器用電源に必要な制御周波数 100 kHz 以上での RCP を実現できないことであった。また、従来の開発プロセスにおいて手作業で

実装していたような実行速度の速いコードを生成するためにはツールベンダが提供する標準的な環境では十分でなかった。

富士通研究所では、まず、I/O ボードを独自開発することで必要な制御周波数で RCP を実行できる環境を構築した。これにより、MILS、RCP、PCG を連携させてデジタル制御電源の開発に適用することが可能となり、開発の効率化が実現し、PCG については、カスタムブロックの作成などを独自に行い、自動生成されるコードの実行速度を向上させた。

現在、富士通研究所では、富士通、富士通グループ、富士通関係会社内のデジタル制御電源の製品開発へ独自開発した要素を含むモデルベース開発を展開する活動が行われている。この活動では、導入コストに見合う効果を実際に導入する前に実感してもらうことや、導入決定後スムーズな導入を実現することが課題となっている。これらの課題の解決に向け、展開先にヒアリングを行いながらそれぞれの場合にあわせたモデルベース開発の効果をまとめて説明するとともに、導入の手順や準備についても個別に議論を進めている。

参考文献

- [1] 佐々木 智丈、米澤遊：デジタル制御電源製品開発に向けたモデルベース開発環境構築、
MATLAB EXPO 2014 Japan、台場、2014 年 10 月

掲載されている会社名・製品名などは、各社の登録商標または商標です。

独立行政法人情報処理推進機構 技術本部 ソフトウェア高信頼化センター (IPA/SEC)