

高速で高効率的な車載用モータ制御マイコン

Automotive Microcontrollers Providing High-Speed and High-Efficiency Motor Control

吉田 和義

佐藤 栄二

山崎 昭浩

■ YOSHIDA Kazuyoshi

■ SATO Eiji

■ YAMAZAKI Akihiro

自動車では、その基本機能である“走る”、“曲がる”、“止まる”ための要素技術として、モータ制御技術が極めて重要な位置を占めるようになってきた。これは、例えば、HEV（ハイブリッド電気自動車）や、PHEV（プラグインHEV）、EV（電気自動車）のドライブシステムや、EPS（電動パワーステアリング）、回生ブレーキ、電動ブレーキシステムなど、モータ制御技術が自動車の性能に直結するシステムが増えているためである。

東芝は、このような状況のなかで、車載用のモータ制御マイコンを開発した。このマイコンは、モータ制御技術としてVE（ベクトルエンジン）、RDC（Resolver to Digital Converter）、及びA-PMD（Advanced Programmable Motor Driver）の三つの効果的なハードウェア機能を搭載し、高速で効率の良いモータ制御を可能にしている。また、機能安全に対応するための機能を周辺IP（Intellectual Property：設計資産）にまで搭載し、機能安全に関する国際規格ISO 26262（国際標準化機構規格 26262）で規定されるASIL D（ASIL：Automotive Safety Integrity Level：自動車安全度水準）^(注1)を満たすシステムを構築できる。

Motor control technology has become a key technology for the basic functions of driving, turning, and braking in the automotive field due to the increasing use of systems in which motor control technology is directly linked to the performance of an automobile, such as the drive systems of hybrid electric vehicles (HEVs), plug-in HEVs (PHEVs), and electric vehicles (EVs) as well as automotive electric power steering (EPS), regenerative braking, and electric braking systems.

Toshiba has developed a lineup of automotive microcontrollers equipped with three effective hardware features—vector engine (VE), resolver-to-digital converter (RDC), and advanced programmable motor driver (A-PMD)—to provide high-speed and high-efficiency motor control. These microcontrollers also incorporate fault detection mechanisms to ensure functional safety, allowing users to construct motor control systems conforming with Automotive Safety Integrity Level D (ASIL D) specified in the ISO (International Organization for Standardization) 26262 standard.

1 まえがき

自動車は、内燃機関であるエンジンを主動力源として走行するシステムからモータを動力源として走行するシステムへと大きく変貌しつつある。課題はまだ多く残るものの、50年後の世界では、そのほとんどが電動車両と呼べる乗り物に替わっていると予測される。この背景としては、地球環境の保全や、エネルギー事情、交通事故の撲滅に向けた自動運転の導入など、社会的な要請による影響が考えられる。また、これらの要請への対応を促す法規制や、燃料の価格高騰、高齢化社会への適応などが、更に電動化を後押しすると予測できる。

モータ制御システムとしては、駆動系以外にも車両を制御するEPSや電動ブレーキが導入され、エネルギーを節約するための回生ブレーキもあたりまえになりつつある。このようにモータ制御システムは、自動車の基本機能である“走る”、“曲がる”、“止まる”ための重要な要素技術として位置づけられるようになった。

(注1) ISO 26262で規定されているASILはAからDまでの4段階があり、ASIL Dはもっとも厳しい安全度水準。

また、機能安全に対する新たな取組みとして、2011年11月にISO 26262が規格として制定され、信頼性向上による品質改善とは別に、システム設計面での安全確保に向けた施策が促進されている。この規格は、第2版の策定のため、現在も継続して議論が進行中で、より安全なシステムに向けた規格として制定される見込みである。

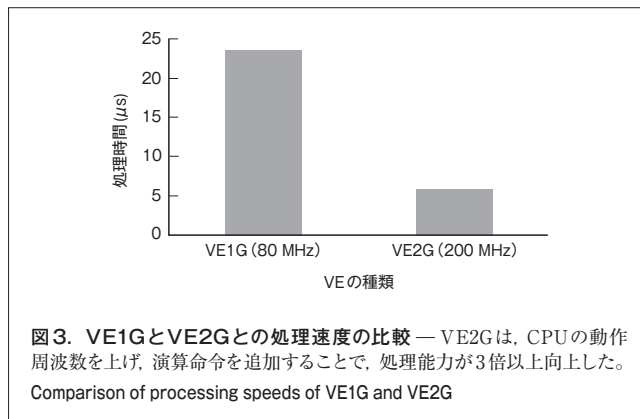
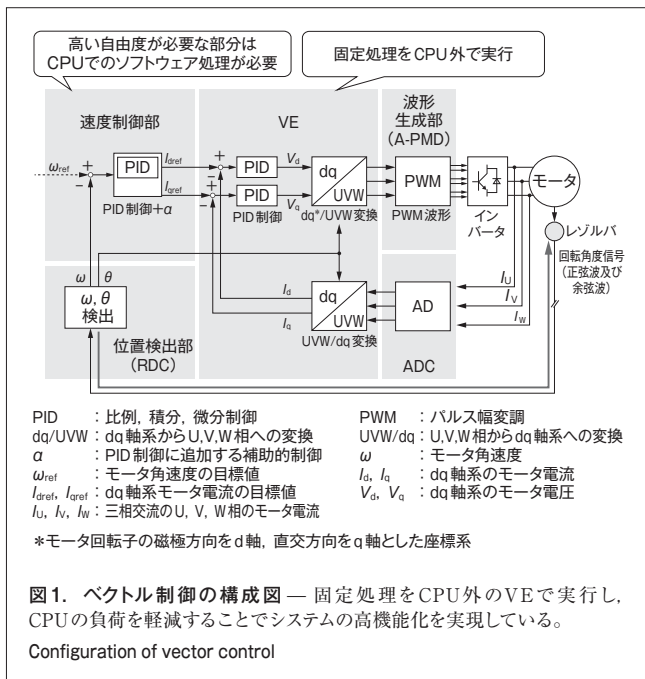
東芝は、このような状況を考慮しながら車載用モータ制御マイコンを開発している。ここでは、開発したマイコンに搭載した三つのモータ制御技術と、ASIL Dをターゲットとしたシステム開発をサポートする機能安全への取組みについて述べる。

2 車載用モータ制御マイコンに搭載された技術の特長

2.1 VEの制御技術の特長

HEVや、PHEV、EV用のインバータシステムは、低燃費化に向けて小型化及び高効率化が求められる。当社はこのニーズに応えるため、家電で培ったモータ制御技術をベースとして2000年初頭に開発されたVEを、車載用に進化させた。

VEは、に示すとおり、従来CPUで実行していたベクト



に 대응するため, 動作周波数の80 MHzから200 MHzへのアップと演算命令の追加で, 第二世代の3倍以上の処理速度を実現した(図3)。また, VEの起動トリガとして回転角度の一致やキャリア同期などを追加し, 後述のRDC及びPMDと連携させることで, キャリア周期ごとに必要な電流制御に関し, CPUに頼らない自立制御を前提とした構成を構築している。

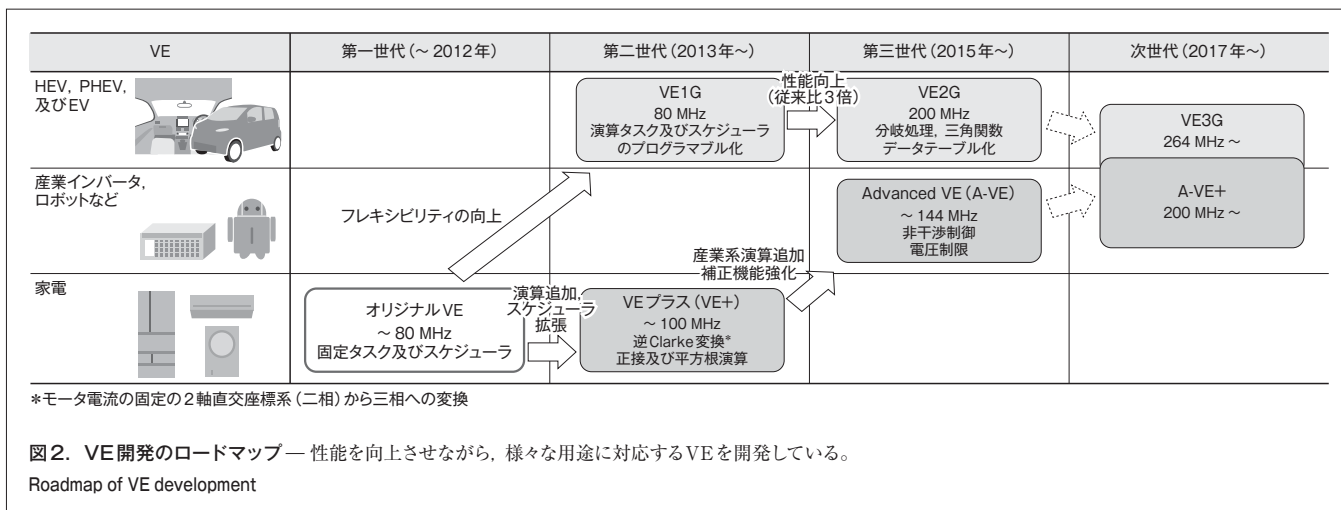
2.2 RDCの制御技術の特長

RDCは, モータや発電機の回転軸の回転位置を検出するレゾルバからの信号を, デジタルの回転角信号に変換する回路である。

このRDCは, 1相が励磁, 2相が出力のレゾルバ信号から, モータ回転角θを算出する。RDCの構成を図4に示す。入力部はΔΣ型ADC(アナログデジタル変換器)で構成されており, レゾルバからの信号は, ここでデジタル値に変換される。後段はデジタル回路で構成されているので, データの変換過程をモニタできたり, 内部データの補正を自動化できるなどのメリットがある。また, デジタル方式を生かした機能の一例として, ピークホルダ機能がある。包絡線のピーク値や励磁周期内のピーク値をホールドすることで, 振幅補正やオフセット補正ができる。また, この補正機能により, レゾルバ角度と

ル制御処理のうち, キャリア周期ごとに実行する必要があるような固定処理をCPUの代わりに担うためのハードウェアエンジンである。VEによりCPUの負荷が軽減し, 他のタスクを処理する余力が生じるため, システムの高機能化に適応できる。

VEのロードマップを図2に示す。第一世代である家電向けのVEでは, タスクやそのスケジューラは固定であった。これに対し, HEVやPHEV, EV用途では, 処理内容が各社各様である。そこで, 第二世代では, タスク及びスケジューラをプログラマブル化してフレキシビリティを向上させるとともに, 車載モータの制御で必要になる非干渉制御タスクや入出力ごとのSIN(正弦)及びCOS(余弦)演算タスクなどを準備し, 位相補償を自動化している。更に第三世代では, 将来のモータドライブ用パワー半導体に, 高速スイッチングが可能なSiC(炭化ケイ素)デバイスが用いられることを見越し, 高速制御の要求



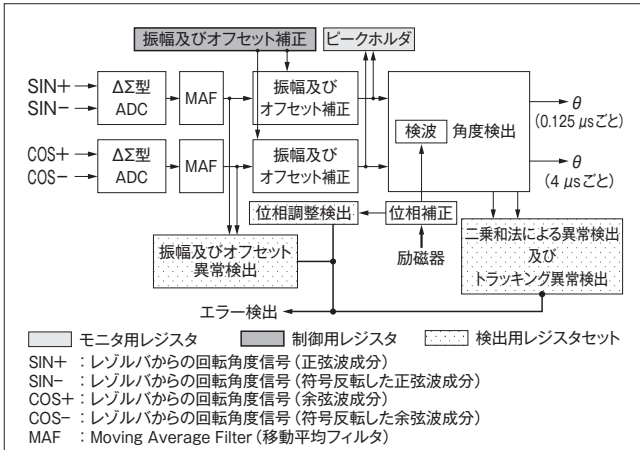


図4. RDCのブロック図 — 入力部はΔΣ型ADCで、その後段はデジタル回路で構成されるため、柔軟な角度変換ができる。

Block diagram of RDC

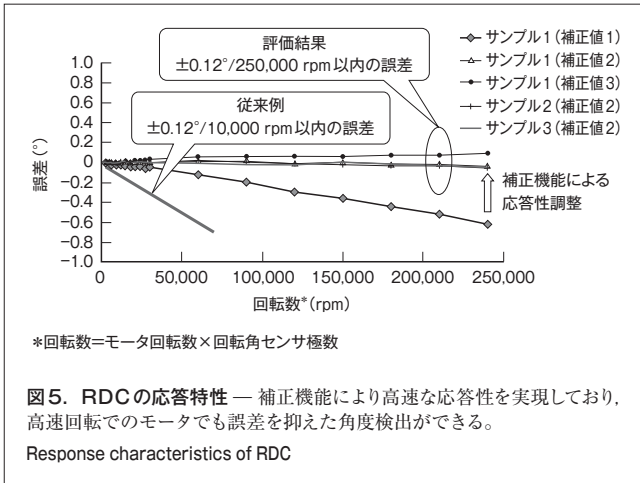


図5. RDCの応答特性 — 補正機能により高速な応答性を実現しており、高速回転でのモータでも誤差を抑えた角度検出ができる。

Response characteristics of RDC

して250,000 rpmを超える高速回転でも誤差を抑えた変換ができ、レゾルバ極数の増加にも柔軟に対応できる(図5)。

更に、このRDCは、今後のモータ高回転化に備え、励磁信号を使わないタイプの角度センサにも対応することが検証できている。また、モータやレゾルバの特性によるレゾルバ出力信号の歪み(ひずみ)に対する誤差補正も柔軟に取り入れられる仕組みを備えている。

2.3 A-PMDの制御技術の特長

HEVやPHEV, EV用のインバータシステムの小型化や高効率化のニーズに応えるため、VEと連携してモータを駆動する最新のモータ制御回路 A-PMD (Advanced-Programmable Motor Driver) を搭載している。

この機能ブロック図を図6に示す。A-PMDは、従来のモータ制御回路であるPMDに対し、新開発の同期PWM(パルス幅変調)とも呼ばれる1パルス制御回路を付加している⁽¹⁾。この制御は、インバータ出力をキャリアに同期した1パルスの方形波とすることで、一般に中速域で使われる過変調制御よりも電

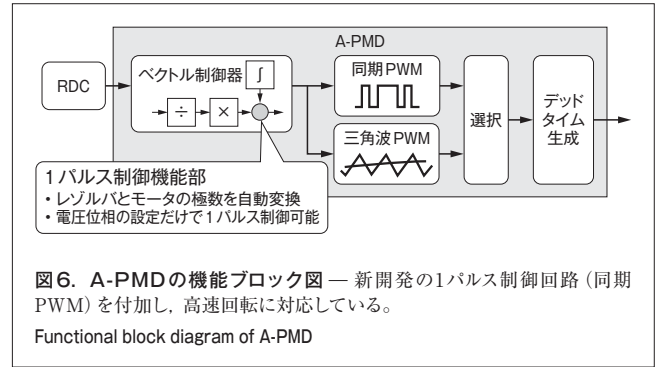


図6. A-PMDの機能ブロック図 — 新開発の1パルス制御回路(同期PWM)を付加し、高速回転に対応している。

Functional block diagram of A-PMD

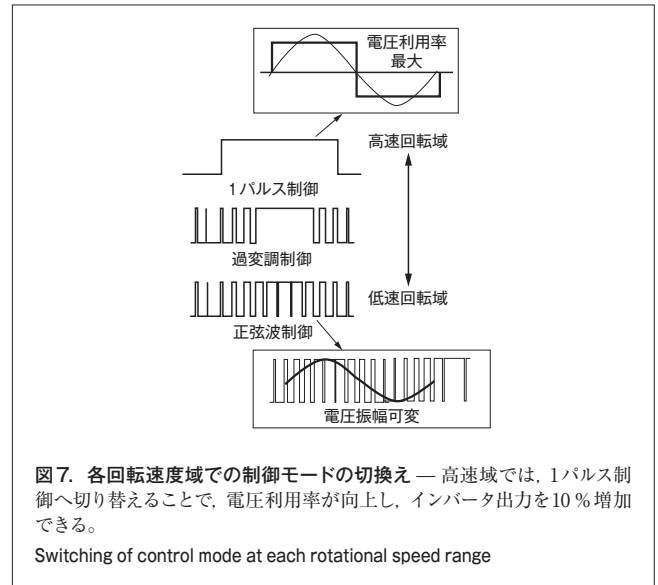


図7. 各回転速度域での制御モードの切換え — 高速域では、1パルス制御へ切り替えることで、電圧利用率が向上し、インバータ出力を10%増加できる。

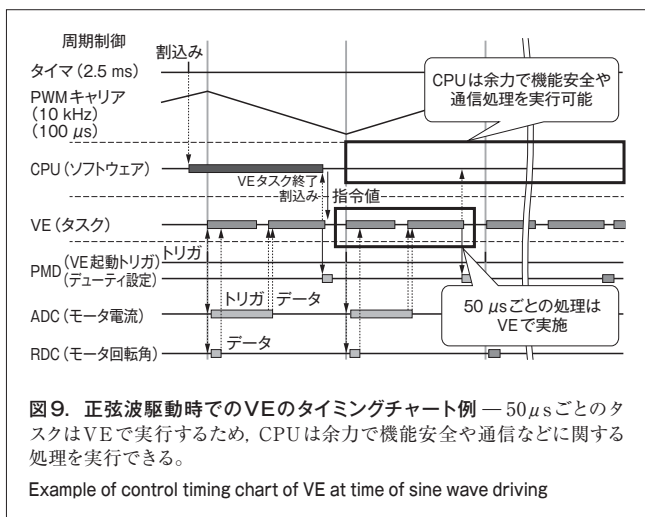
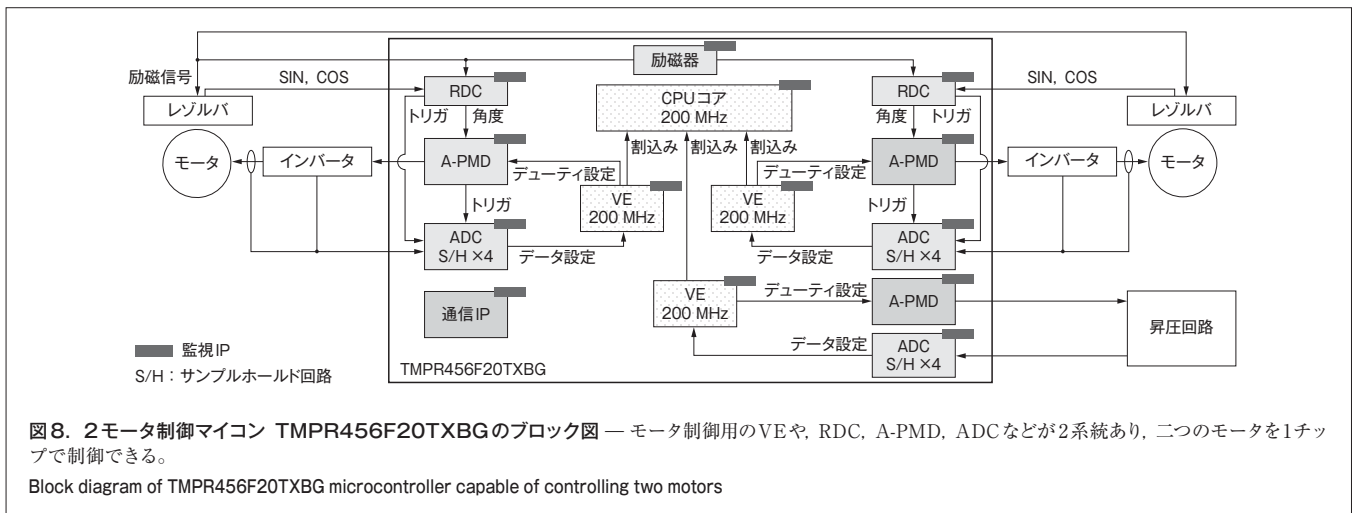
Switching of control mode at each rotational speed range

圧利用率を向上させており、高速回転域での出力を10%高める効果がある(図7)。この結果として、従来よりも10%低い定格のインバータで同等の出力が引き出せ、システムの小型化に貢献できる。

2.4 VE, RDC, A-PMD, 及びADCの連携

最新の製品である2モータ制御マイコンTMPR456F20TX-BGのブロック図を図8に示す。VE, RDC, A-PMD, 及びADCが連携して動作し、モータを制御する。この仕組みが2系統あり、二つのモータを低速域から高速域まで自立制御できる。センサレス制御にも対応するため、ADCには高周波電流を適正化する仕組みも備えている。また、昇圧制御用のVE, A-PMD, 及びADCも搭載されているので、高速な昇圧制御が実現できる。制御周期としては、将来のSiC化を見据え、30 kHzまでを想定している。

各機能の連携動作のタイミングチャートを図9に示す。キャリアに同期して取り込んだRDCからの角度情報及びADCで取得したモータ電流情報を直接VEへ受け渡し、制御周期内で電流制御の処理を実行する。そして、この結果として得られたデューティ値をPMDへ設定することで、CPUに頼らずに50 μsごとの処理ができる。したがって、CPUは数msおきの



VE 指令値を演算するだけでよいので、余力で機能安全や通信などの処理を実行できる。

3 機能安全への対応

1章で述べたように、2011年11月に車載用の機能安全規格 ISO 26262の第1版が発行された。機能安全とは、存在する不安全な状態を許容されるレベルまで引き下げることである。ISO 26262では、故障によって引き起こされる事象について、その危険度、発生頻度、及び発生時の制御性によりASIL AからASIL Dまでクラス分けされているが、どのクラスが要求されるかは、そのアプリケーションによって異なる。また、これは、システム全体に要求されるものであるが、車載用モータ制御マイコンとしては、最高位のASIL Dのシステムに使われることを前提として、マイコン単体でもASIL Dの必要要件を満たすように開発している。

監視機能としては、基幹部分であるCPU、メモリ、及びバスに加え、周辺のIPにもハードウェアでの監視機能を導入して

いる。また、これらからの故障発生情報を収集して故障発生時の処理を管理するfRNET^(注2)を搭載することで、故障発生時の処理を定めている(図10)。

故障注入シミュレーションでマイコン全体に故障注入を行い、ISO 26262のPart5で定義されているASIL Dに必要なハードウェアメトリックの一つである故障検出率についての検証を行っている。ASIL Dのシステムでは、システム全体に対して、単一箇所における故障検出率(SPF: Single Point Fault)が99%以上、潜在的な故障検出率(LF: Latent Fault)が90%以上であることを要求している。このシミュレーションで検証した結果を表1に示す。いずれの場合もマイコン単体での検出率は高い値を示しており、ASIL Dのシステムに使用できる能力を備えていることがわかる。

また、もう一つのハードウェアメトリックとして、残存不良率を算出したのが表2である。残存不良率でのASIL Dの要件は、10 FIT^(注3)以下である。これについてもシステム要件を満たす能力を十分に備えていることがわかる。

マイコンとしての故障解析や、その結果に基づいた搭載安全機能の決定、使用するうえで必要なシステムやソフトウェアへの要求事項などを、機能安全マニュアルとしてまとめており、その有効性は、故障注入シミュレーションで検証されている。ユーザーは、この機能安全マニュアルに記載された、検証の前提となるHWSR (Hardware Safety Requirement) 及びHSI (Hardware Software Interface) に従ってシステムを開発することで、シミュレーション結果の値をマイコンの値としてシステムの検証に活用できる。

また、マイコンの開発と並行して、故障診断用のソフトウェアライブラリの準備も進めている。ユーザーはマイコンのハード

(注2) イタリア Yogitech社が提供する故障診断回路。全てのアラームと故障情報を収集し、故障発生時の処理を管理する。

(注3) 故障率を表す単位。1 FITとは10万個のデバイスを1万時間動作させたとき、1個の故障が発生するレベルに相当。

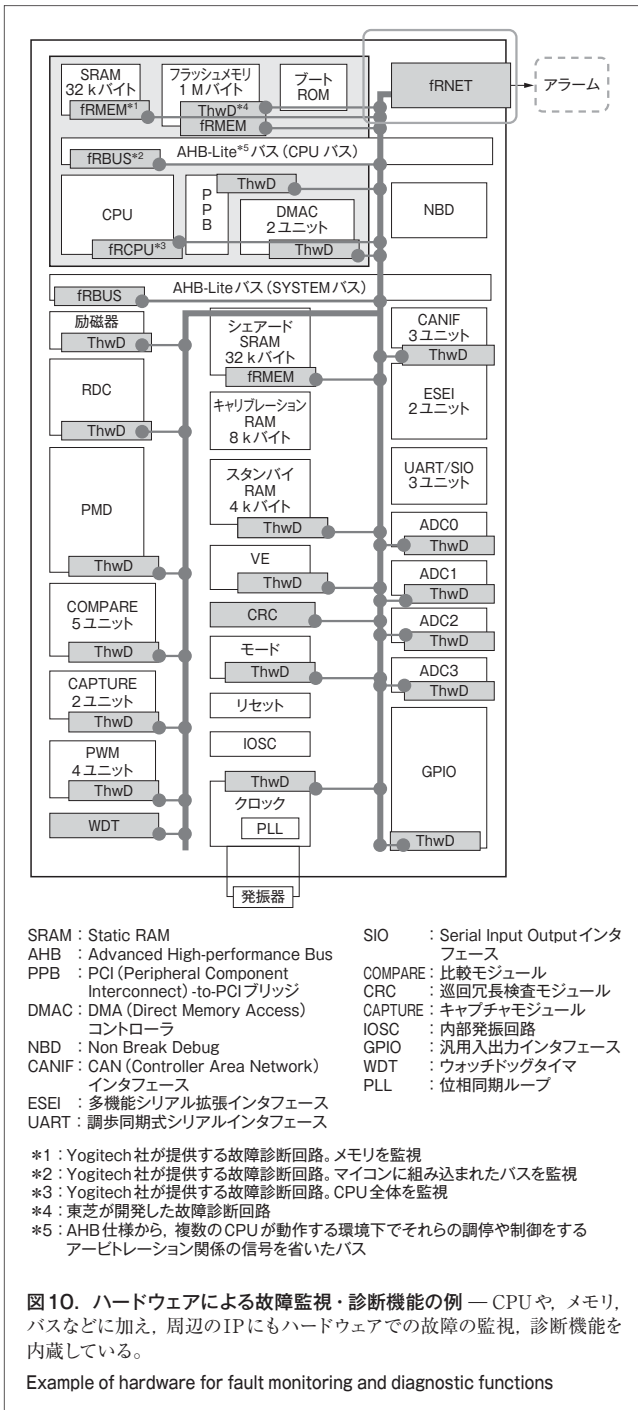


表1. 故障注入シミュレーションで求めた故障検出率の例
 Example of fault coverage calculated by fault injection simulation

形態	ASIL Dでの要件	TMPM35xx
SPF perm (%)	≥ 99	99.73
SPF trans (%)	≥ 99	99.86
LF (%)	≥ 90	99.95
LFpd (%)	≥ 90	94.88

perm : Permanent Fault (永久故障)
 trans : Transient Fault (一時故障)
 LFpd : LFのうち、監視回路に限ったカバレッジ

表2. 残存不良率の算出結果の例
 Example of calculated residual failure rates

形態	項目	TMPM35xx
ダイ	PMHF perm (FIT)	0.231
	PMHF trans (FIT)	1.333
パッケージ	PMHF perm (FIT)	0.140

PMHF: Probabilistic Metric for Random Hardware Failure (偶発的なハードウェアエラーの発生確率)

ウェアと、この故障診断ライブラリを用いてシステムを構築することで、機能安全に対する開発工数を大幅に低減できる。

今後、ISO 26262の第2版では、フェールセーフからフェールオペレーションへの対応が記載される予定であり、前述の機能安全への対応に加え、これらにも積極的に対応していく。

4 あとがき

自動車分野では、近い将来、交通事故を大幅に減らすため、自動運転の実現が期待されている。これの実現のためには、自律走行を目標とし、認識、判断、及び操作の切り口で、他分野の企業も巻き込んだ様々な技術革新が必要となる。

モータ制御システムの面では、シンプルな構成と柔軟かつ高性能で安全・安心な走行ができるように、4輪独立駆動が可能な自動車に向けた取組みが重要になると考えられる。当社は、このような社会の期待に応えるため、更なる進化を遂げた車載用モータ制御マイコンを開発し、自動車分野での技術革新に寄与していく。

文献

- 伊藤健司 他. 自動車の環境調和と安全・快適性を支える半導体技術. 東芝レビュー. 66, 2, 2011, p.29-33.



吉田 和義 YOSHIDA Kazuyoshi
 セミコンダクター&ストレージ社 ミックスドシグナルIC事業部 車載IC応用技術部参事。車載制御LSIのマーケティング及び企画業務に従事。
 Mixed Signal IC Div.



佐藤 栄二 SATO Eiji
 セミコンダクター&ストレージ社 ミックスドシグナルIC事業部 車載IC応用技術部参事。車載制御LSIのマーケティング及び企画業務に従事。
 Mixed Signal IC Div.



山崎 昭浩 YAMAZAKI Akihiro
 セミコンダクター&ストレージ社 ミックスドシグナルIC事業部 車載IC応用技術部参事。車載制御LSIのマーケティング及び企画業務に従事。
 Mixed Signal IC Div.