

シノプシス TestMAX CustomFault

車載 SoC の機能安全およびテスト・カバレッジ解析に向けた
アナログ故障シミュレーションを再定義

著者

Anand Thiruvengadam

デザイン・グループ

プロダクト・マーケティング担当シニア・

マネージャー

はじめに

セーフティ・クリティカルなアプリケーションが成長を続ける中、車載 SoC の機能安全とテスト・カバレッジ解析にパラダイム・シフトが生じています。安全性、低欠陥率、長期信頼性に対する要求の高まりにより、車載 SoC 設計者は専門家の判断だけに頼るのではなく、体系的な故障シミュレーションを補完的に導入して解析の信頼性を高め、厳しい車載規格への適合を図る必要に迫られています。しかしこれまではシミュレータの性能と容量に限界があり、サブシステムおよびフルチップ・レベルの故障シミュレーションは現実的ではありませんでした。シノプシスの新しいシミュレータ TestMAX CustomFault™ は、業界をリードするシミュレーション・テクノロジーの CustomSim™ と FineSim® に AWRS (Adaptive Weighted Random Sampling) テクノロジーを組み合わせることで、アナログ故障シミュレーションの性能をかつてないレベルに引き上げ、サブシステムおよびフルチップ・レベルのアナログ故障シミュレーションを可能にします。このソリューションは、シノプシスが車載 SoC 業界のリーダーと協力して、この業界特有のニーズを満たすように開発されています。

アナログ故障シミュレーションが必要とされる理由

安全への要求が高まる中、車載 SoC にはより高い堅牢性（ロバストネス）と回復力（レジリエンス）が要求されています。このため、SoC を設計する際には故障発生時でも正常動作、低欠陥率、長期信頼性の目標を確実に達成する必要があります。こうしたパラダイム・シフトが要因となって、車載 SoC 設計者は、従来の検証フローを補完する形でアナログ故障シミュレーションを含む体系的な故障シミュレーションを導入し、新しい検証フローを構築することで、これらの厳しい要件を満たす必要に迫られています。

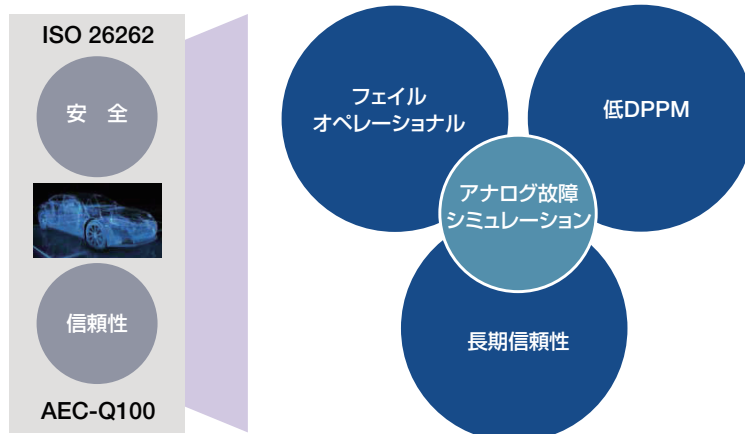


図1：アナログ故障シミュレーションが必要とされる理由

具体的に、アナログ故障シミュレーションの必要性は主に以下の3つの分野で高まっています。

- 車載 SoC の機能安全検証
- 製造テスト・カバレッジ解析
- シリコン不良解析

車載 SoC の機能安全検証

PwCが2018年に発表した調査結果によると、ヨーロッパでは2030年に自動運転車が走行距離ベースで全体の40%を占め、新車販売台数の55%が電気自動車になると予測されています^[1]。自動車に搭載されるセーフティ・クリティカルなASIL-CもしくはDに適したアプリケーションが急増する中、車載 SoC には故障発生時でも正常動作できるなどの非常に高い安全性が求められるようになっており、SoC 設計者は従来の安全検証フローの刷新を余儀なくされています。

これまで、SoC 設計者は専門家の判断、仮定、そしてターゲットを絞ったごく握りの故障シミュレーションに頼って機能安全を検証し、SPFM や LFM などの ISO メトリクスを報告していました。しかしこのようなアプローチでは ASIL-C/D アプリケーション特有の高度な検証要求を満たすことができません。そこで、SoC 設計者は専門家の判断を補完する形で体系的なアナログ故障シミュレーションを導入することによって、機能安全検証の信頼性を高めようとしています (図2)。

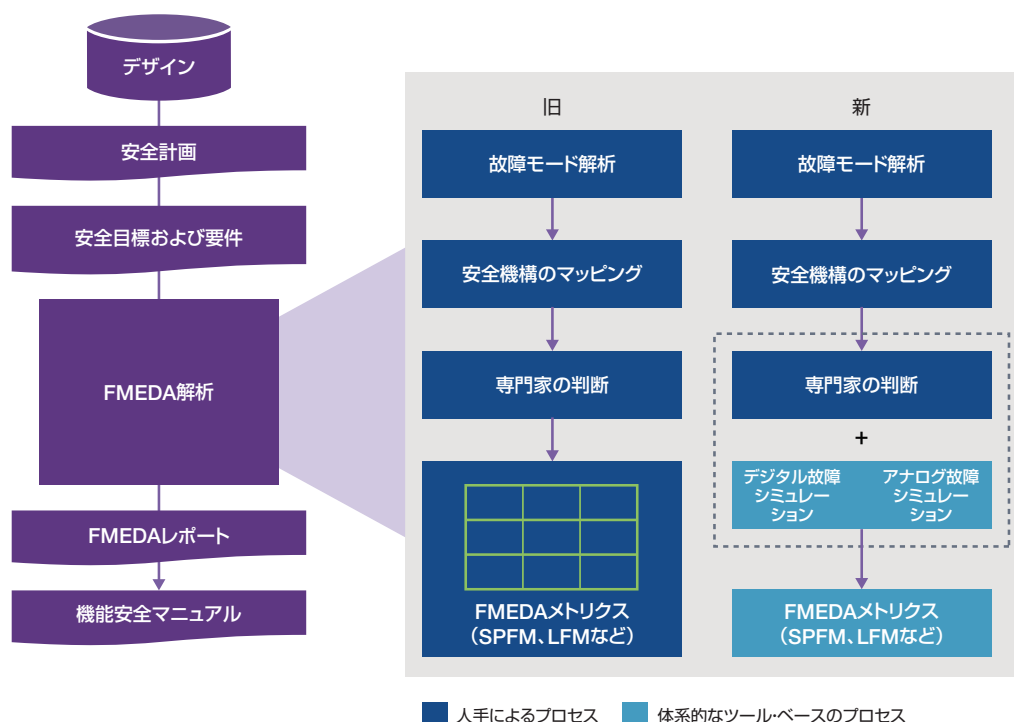


図2：アナログ故障シミュレーションを使用した機能安全検証

製造テスト・カバレッジ解析

これまで、SoC 設計者やDFTエンジニアはSoCの欠陥率を削減するために、ATPGやデジタル故障シミュレーションなどデジタル中心のアプローチを採用していました。しかしこうしたアプローチでは、スキャン対象に含まれないデジタルおよびアナログ・ドメインにカバレッジの穴が生じて欠陥が残ってしまうため、車載 SoC に求められる厳しい不良率の目標を達成することができません。2016年に発表されたITCのレポート^[2]によると、車載 SoC のテスト・エスケープ（テストで良品と判定された欠陥品）の約80%がアナログ・ドメインの欠陥によるものであり、アナログ回路が増える次世代の車載 SoC では、この割合は更に増大することが予想されています。

このため、既存のテスト・カバレッジ解析フローを補完する形でアナログ故障シミュレーションを導入することによってカバレッジの穴をふさぎ、SoCの欠陥率を抑えようとする設計者やDFTエンジニアが増えています (図3)。

1 『Five trends transforming the Automotive Industry』 PWC、2018年

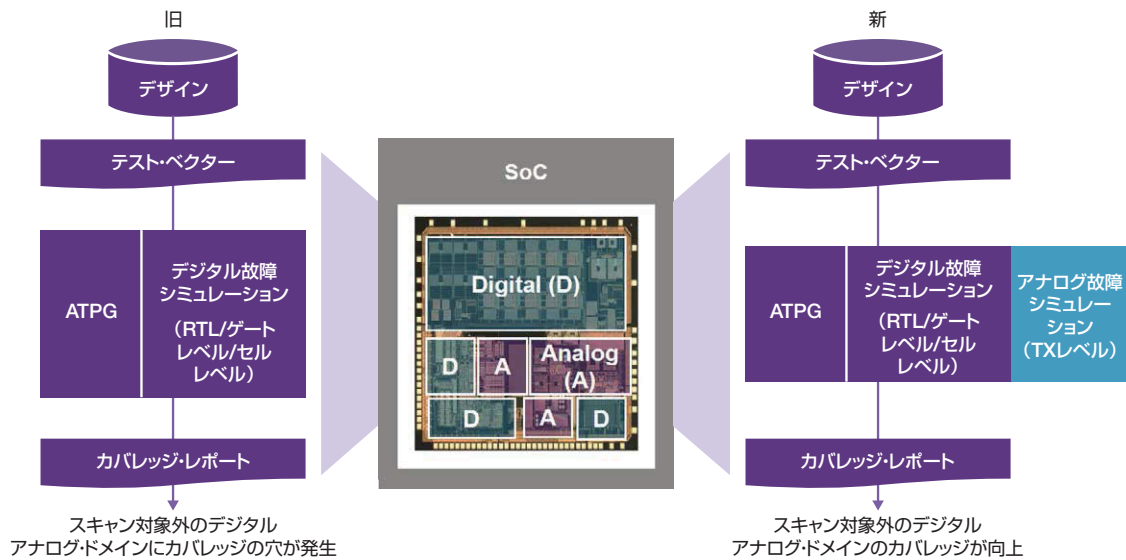


図3：アナログ故障シミュレーションによるテスト・カバレッジの改善

シリコン不良解析

従来のシリコン不良解析は時間とコストが大きな課題となっており、半導体メーカーはこのプロセスを最適化する革新的なアプローチの導入を迫られています。

こうしたアプローチの1つとして、限定的なシリコン不良解析とアナログ故障シミュレーションを組み合わせることによってシリコン不良の根本原因を解析するという方法があります（図4）。このアプローチでは、まずシリコン・デバッグ・データやシミュレーション・データ（回路の活性度など）、および専門家の判断に基づいて不良の候補領域を特定します。次に、これらの候補領域を対象にアナログ故障シミュレーションを実施し、このシミュレーション結果とシリコン・デバッグ・データの相関をとって不良デバイスを特定します。

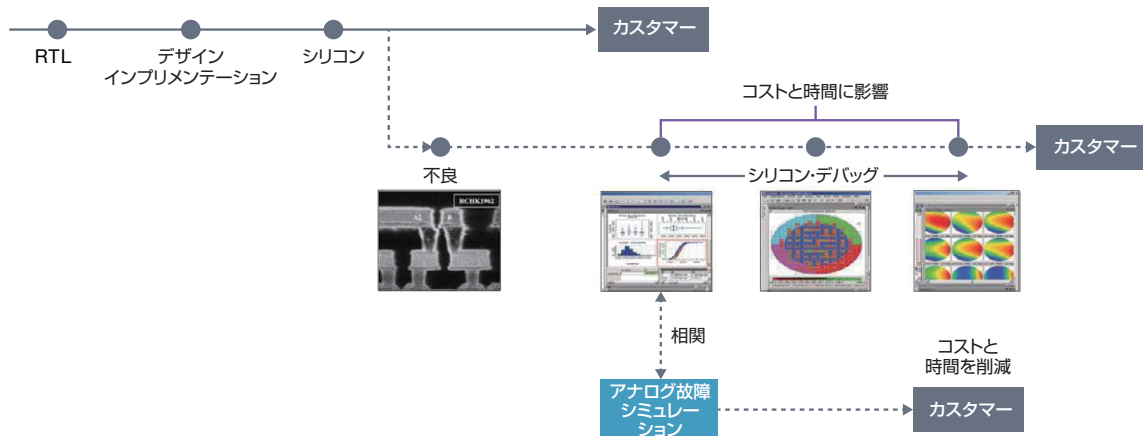


図4：アナログ故障シミュレーションを使用したシリコン不良の根本原因解析

アナログ故障シミュレーションに求められる主な条件

ASIL-C/Dなど最高水準の安全規格への適合を図るため、車載 SoC ベンダは商用のアナログ故障シミュレーション・ツールを導入するようになってきました。しかしこれまでのシミュレータではパフォーマンス、容量、スループットに限界があり、大規模な導入には至っていませんでした。スケジュールどおりに安全規格への適合を達成するには、サブシステム・レベルの故障シミュレーションを数週間以内に完了させる必要があります。また、ブロック・レベル、サブシステム・レベル、およびフルチップ・レベルの検証へと故障シミュレーションの規模を拡大していくには、柔軟な設定が可能な故障モデルや自動故障注入といった使い易さも重要な要素となります。更に、車載 SoC の機能安全検証やテスト・カバレッジ解析などのユース・ケースに特有の要件を満たすには、ISO メトリクスのレポートや複数テストベンチの格付けといった機能も欠かせません。

シノプシスのソリューション TestMAX CustomFault

TestMAX CustomFaultは、シノプシスが発表した最新の高性能アナログ故障シミュレータです。業界をリードするシミュレーション・テクノロジーのCustomSimとFineSimをベースに、高度に差別化された機能の数々を搭載したTestMAX CustomFaultは、卓越したパフォーマンス/容量/スループット、優れた使い易さ、高度な診断機能を実現しており（図5）、サブシステムおよびフルチップ・レベルの大規模な故障シミュレーションを低コストで実施できます。

<ul style="list-style-type: none">業界をリードするシミュレーション・テクノロジーVCSとの統合によるミックスドシグナル検証適応型サンプル抽出によりシミュレーション回数を1/10～1/1000に削減	<ul style="list-style-type: none">非介入型の故障注入GUI/バッチ・モードによるセットアップ故障モデル、重み、スコープを設定可能	<ul style="list-style-type: none">高度な故障解析ISOメトリクス・レポート用のデータポストプロセスを可能にする充実した故障データベース
パフォーマンス/スループット	使い易さ	診断

図5：TestMAX CustomFaultの利点

画期的なパフォーマンスとスループット

TestMAX CustomFaultは、業界をリードする2つのシミュレータCustomSimとFineSimを統合し、強力なフロントエンドを組み合わせたモジュラー型のアーキテクチャを採用しており、故障の特定から削減、シミュレーション、レポート生成までをかつてないスピードでシームレスに実行できます。これら2つのシミュレータを自由に選択できるため（図6）、過去に作成したシミュレータ固有の設定や最適化オプションを再利用できます。

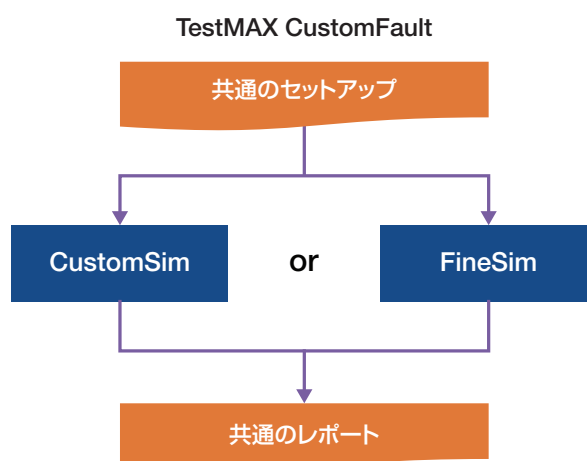


図6：業界をリードするシミュレーション・テクノロジー

TestMAX CustomFaultは、ビルトインまたはユーザー定義の故障重み（故障の確率）に基づいた無作為抽出を可能にする革新的なAWRS（Adaptive Weighted Random Sampling）テクノロジーも備えており、故障シミュレーションの回数を数桁削減できます（図7）。サブシステムおよびフルチップ・レベルでの故障シミュレーションの場合、デフォルトでは故障の全体集合に数百万もの潜在的故障が含まれることがあり、こうした故障シミュレーションを現実的な時間とコストで実行するにはAWRSテクノロジーが欠かせません。

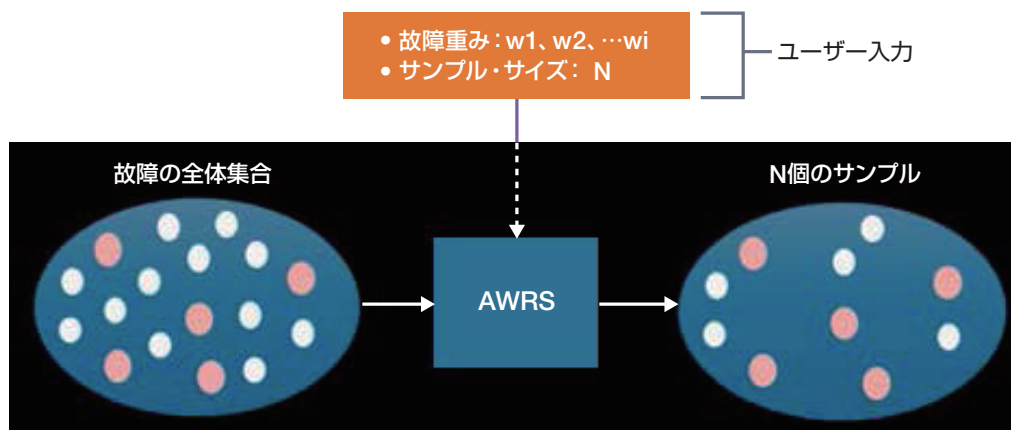


図7：AWRS（Adaptive Weighted Random Sampling）テクノロジー

TestMAX CustomFaultはシノプシスのVCS®シミュレータと統合されており、トランジスタ・レベルの故障がミックスドシグナル・サブシステムに与える影響を評価できます。最高速度のトランジスタ・レベル・シミュレータとデジタル・シミュレータを組み合わせることにより、業界最高クラスのパフォーマンスとスループットによるミックスドシグナル故障シミュレーションが可能となります。特定のブロックを選んで故障を注入したり、特定のブロックを故障注入から除外したりすることで、パフォーマンスとスループットは更に向上します。TestMAX CustomFaultは分散シミュレーションもサポートしており、強力なジョブ・スケジューリング機能や失敗したジョブのシームレスなリカバリ機能などを利用することで、大規模なデザインでも高いスループットが得られます。

優れた使い易さ

複数のテストベンチを使用して複数の大規模なデザインを評価するような大がかりな故障シミュレーションを実施しようとすると、使い易さも重要な要素となります。TestMAX CustomFaultはMOS、R、L、C、BJTの伝統的なショートおよびオープン・モデルに加え、過渡故障やパラメトリック故障などユーザー設定可能な故障モデルを幅広くサポートしており、故障モデリングが容易に行えます。また、TestMAX CustomFaultはユーザーが用意した「故障のない」ネットリストを入力するだけで故障の特定から削減、注入、並列シミュレーション、故障検出、レポート生成までのシミュレーション・フローをワンストップでシームレスに実行できます（図8）。各ステップは個別にユーザー設定が可能で、必要に応じてカスタム・フローを実行することもできます。

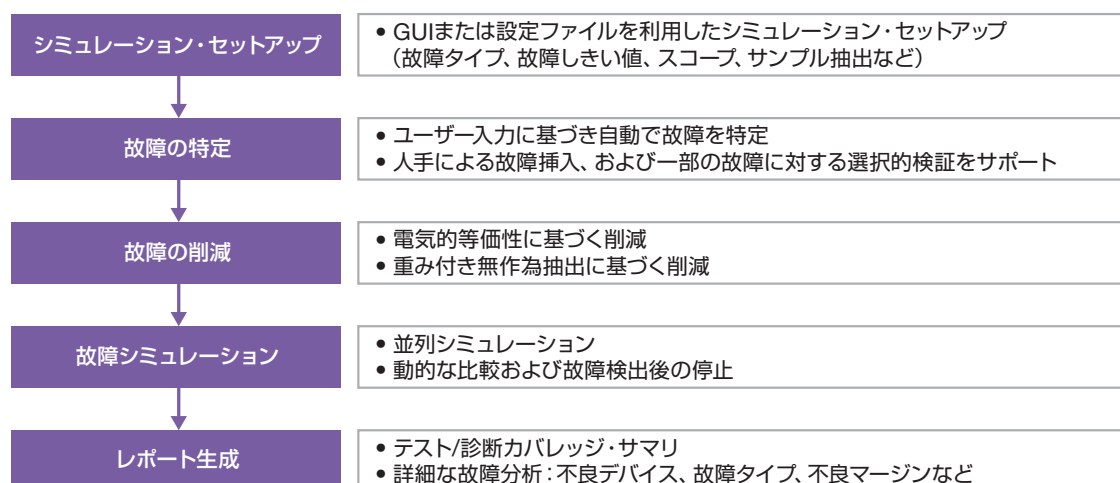


図8：故障シミュレーション・フロー

テストベンチが複数ある場合、マルチ・テストベンチ・フローを使用してこれらを手動または自動で効率的に格付けできます。このフローでは、デフォルトの故障全体集合またはユーザー定義による故障リスト（図9）のいずれかをユーザーが選択すると、すべてのシミュレーションのカバレッジ結果と故障解析結果が統合して出力されます。

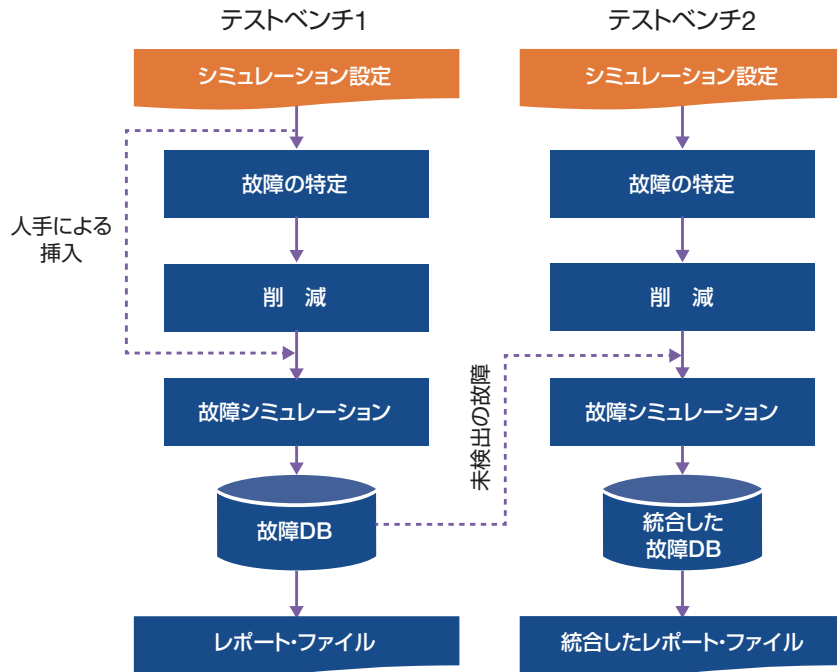


図9：マルチ・テストベンチ・フロー

多様なユーザー・ニーズに応えるため、TestMAX CustomFaultはGUIモードとバッチ・モードの両方をサポートしています。内蔵GUIはすべての機能にアクセスできるため、シミュレーションのセットアップから実行、デバッグまでを効率化でき、故障シミュレーションの規模を容易に拡張できます（図10）。

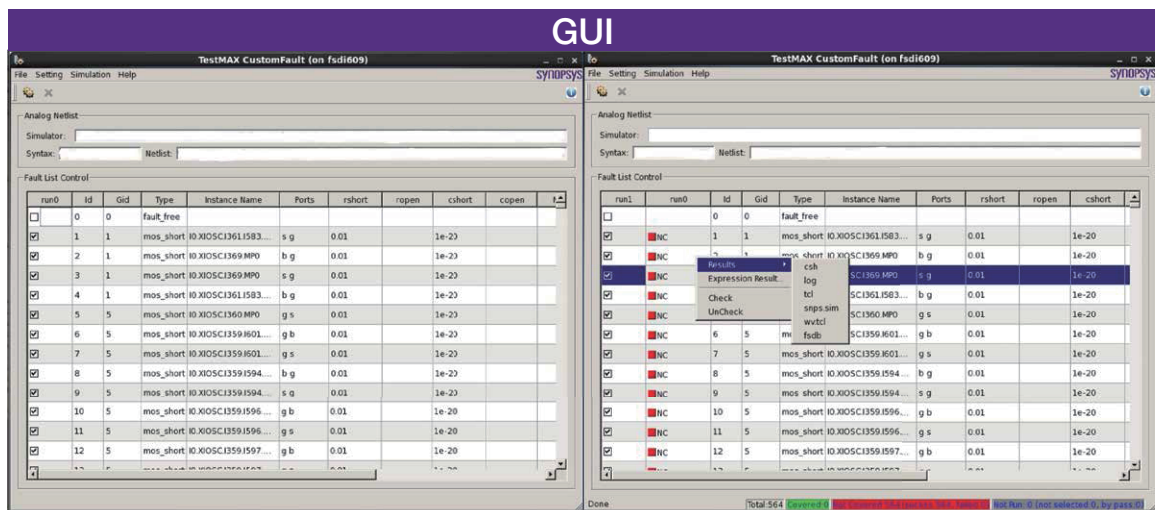


図10：すべての機能にアクセス可能な内蔵のGUI

バッチ・モードでは、直感的なコマンド・ファイル・インターフェイスを使用して故障シミュレーションを簡単に設定できます。また、故障重みはシンプルなユーザー定義の式を使用してさまざまなモデル/インスタンスのパラメータの関数として表現でき、これによってAWRSアルゴリズムのサンプル抽出効率が更に向上します（図11）。

```

////////// CUSTOM WEIGHT CODE GOES HERE //////////
double weight=1.0;

weight = 0.5 * w * 1 * 1e12;

return weight;
}

```

```

////////// CUSTOM WEIGHT CODE GOES HERE //////////
double weight=1.0;

weight = w * 1 * 1e12;

return weight;
}

```

図11：モデル/インスタンスのパラメータの関数式として指定可能な故障重み

高度な診断 / レポート機能

TestMAX CustomFaultは、車載 SoC の機能安全検証および製造テスト・カバレッジ解析のユース・ケースで必要とされる診断/レポート機能を備えています。たとえば、安全関連ハードウェアの主系および冗長系安全機構がどれだけ効果的に故障を軽減できるかを解析して、残余故障の診断カバレッジ (DCrf) (図 12) や潜在的故障の診断カバレッジ (DCmpf, l) などの ISO 26262 メトリクスを生成できます。次に、これらのメトリクスを使用して SPFM (Single Point Fault Metric：単一点故障検出率) と LFM (Latent Fault Metric：潜在的故障検出率) を計算すると、ISO 26262 への適合を検証できます。大規模な FMEDA (故障モード影響診断解析) の一環として、診断カバレッジのメトリクスをシノプシス VC Functional Safety Manager (VC FSM) に自動的にインポートし、複数のデザインに対して SPFM および LFM の結果を取り込むこともできます。

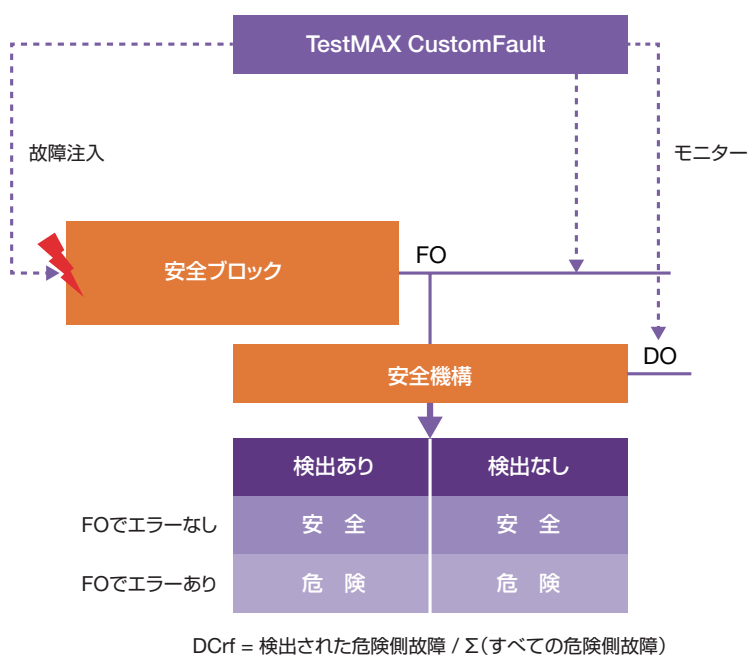


図12：残余故障 (RF) の診断カバレッジ (DCrf) 計算式

テスト・カバレッジ解析に TestMAX CustomFault を使用した場合、複数のテストベンチに対するテストベンチ別/故障別の解析を含め、統合したカバレッジ結果を得ることができます (図 13)。また、TestMAX CustomFault にはインクリメンタルなカバレッジ改善に基づいてテストベンチの順番を並べ替える機能があり、ユーザーは必要なカバレッジ目標を満たすようにテスト・シーケンスの評価、変更、並べ替えを簡単に実行できます (図 14)。

```

TestMAX CustomFault
Version P-2019.06-SP1-20190823 - Aug 23 2019 02:21:41 5763457

Tags      Sample-Size
DropOut   600
funcTestMax 600
funcTestMin 600

*DEFECT UNIVERSE SUMMARY
mos_mac_open      4311
mos_mac_short     4078

TOTAL            8389

*COVERAGE SUMMARY
Defects covered - unweighted (covered/simulated):

Type      DropOut      funcTestMax      funcTestMin

mos_mac_open      25/338      24/338      34/338
mos_mac_short     194/643     220/643     226/643
TOTAL            219/981     244/981     260/981

Defects covered - weighted (covered/simulated):

Type      DropOut      funcTestMax      funcTestMin

mos_mac_open      44.3269/516.224      75.2444/516.224      60.9/516.224
mos_mac_short     157.309/450.494      189.453/450.494      198.455/450.494
TOTAL            201.635/966.719      264.698/966.719      259.355/966.719

Weighted test coverage:

DropOut      20.86% (sample size: 600) (95% Confidence Interval: 20.86±2.18%)
funcTestMax   27.38% (sample size: 600) (95% Confidence Interval: 27.38±2.38%)
funcTestMin   26.83% (sample size: 600) (95% Confidence Interval: 26.83±2.37%)

TOTAL Coverage:
Sampled[*]    32.75% (sample size: 600) (95% Confidence Interval: 32.75±2.5%)

```

図13：統合したカバレッジ・レポートの例

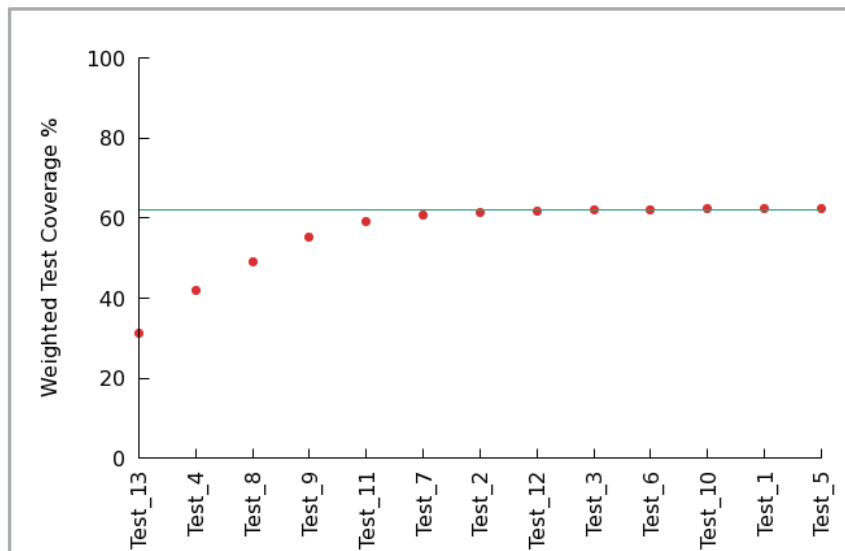


図14：インクリメンタルなカバレッジ改善に基づくテストベンチの並べ替え

まとめ

TestMAX CustomFaultは、サブシステムおよびフルチップ・レベルの故障シミュレーションを現実的なものとすることを最大の目的として開発された画期的なアナログ故障シミュレータ新製品です。業界をリードするシミュレーション・テクノロジーと高度に差別化された機能の数々を備えたTestMAX CustomFaultは、車載 SoC の機能安全とテスト・カバレッジ解析に向けたアナログ故障シミュレーションを再定義します。



日本シノプシス合同会社

〒158-0094 東京都世田谷区玉川2-21-1 ニ子玉川ライズ オフィス
 〒531-0072 大阪府大阪市北区豊崎3-19-3 ビアスタワー13F

TEL.03-6746-3500(代) FAX.03-6746-3535
 TEL.06-6359-8139(代) FAX.06-6359-8149