

# ハードウェア模擬環境を活用した 開発上流におけるソフトウェア品質向上

金井健太郎\* 日比野植也\*\*  
大河原 繁\* 原川雅哉\*\*  
吉村 学\*\* 庄 暁杰\*\*

Improvement of Software Quality in Upper Process of Development by Using Hardware Simulation

Kentaro Kanai, Shigeru Okawara, Manabu Yoshimura, Shinya Hibino, Masaya Harakawa, Gyoketsu So

## 要 旨

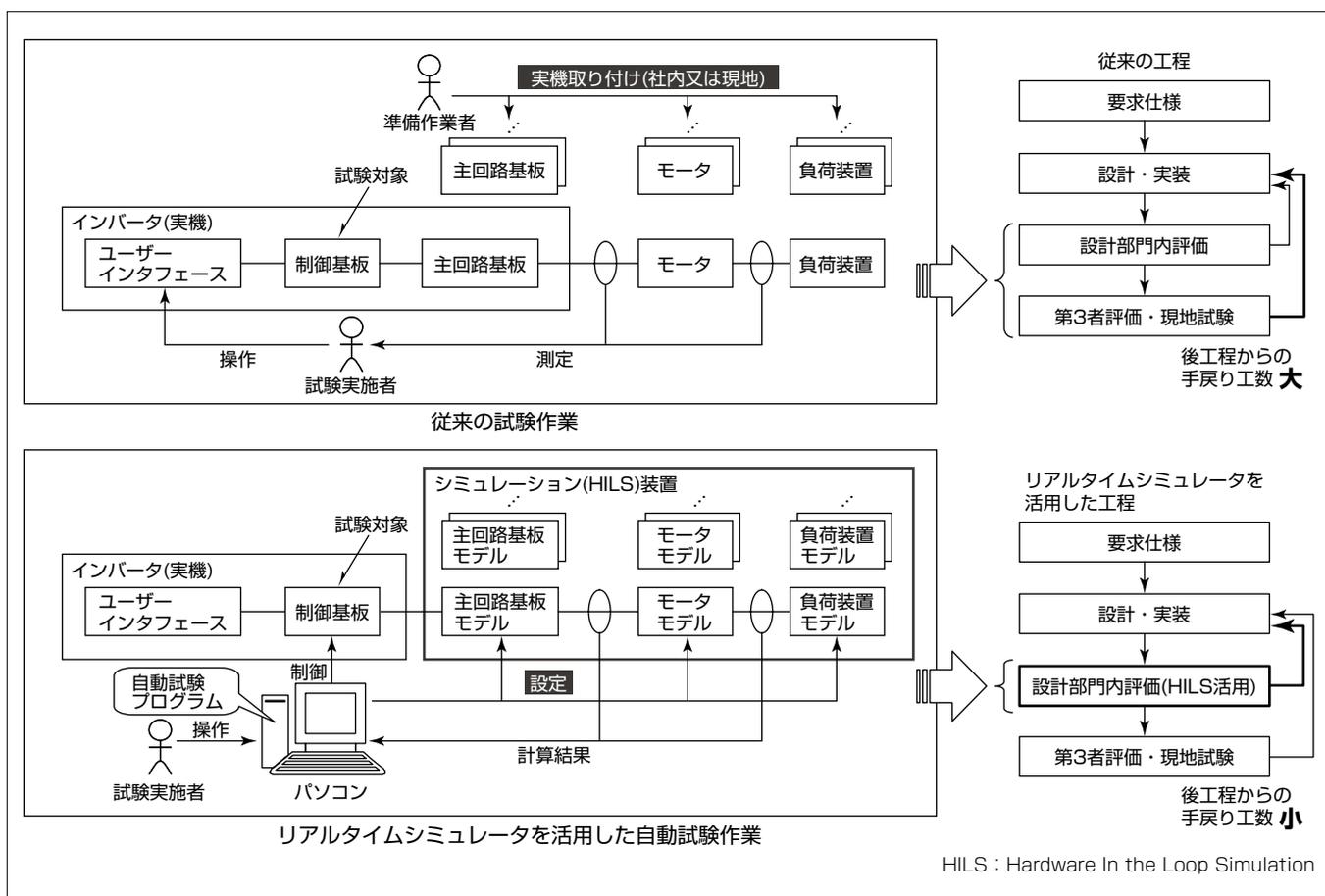
組込みソフトウェアの試験では、実時間で動作する対象物への制御を確認する必要があり、従来実機を用いた試験が主流であった。特に、インバータ制御ソフトウェアの機能評価試験では、汎用インバータの製品ラインアップ充実化によって、出力容量の異なる多数のモータを用意する必要がある。しかし入手や設置が困難なモータの場合、現地で試験せざるを得ず、開発上流の品質確保が課題であった。また、試験環境の準備、実機操作や試験結果の目視確認等、増加傾向の試験工数抑制が課題であった。

本稿では、対象物の実時間動作を模擬するリアルタイムシミュレータを活用し、次の(1)、(2)の取組みによって試験

環境準備作業と試験実施作業を効率化したことについて述べる。

- (1) モータ、負荷装置などの制御対象をリアルタイムシミュレータ上でモデル化することで実機準備を不要とし、実機置き換えによって発生する段取り時間を削減した。
- (2) モータやインバータの動作条件設定と試験実行によるインバータ出力結果の合否判定を自動化した。

さらに、実機の入手性によらず、多種多様な実機を想定した試験を前倒して実施可能であるため、開発上流におけるインバータ制御ソフトウェアの品質確保が可能となった。



## インバータの自動試験環境

従来のインバータ機能試験では、インバータに実機モータと負荷装置を取り付けて試験環境を準備し、試験実施者の手作業で試験を実施していた。今回の取り組みでは、インバータ主回路基板とモータと負荷装置をモデル化することで、リアルタイムシミュレータ上における動作を可能にした。さらに、ホストパソコンからインバータとリアルタイムシミュレータを制御することによって試験を自動的に実行できるようにした。

## 1. ま え が き

組み込みソフトウェアの試験では、実時間で動作する対象物への制御を確認する必要があり、従来実機を用いた試験が主流であった。特に、インバータ制御ソフトウェアの機能評価試験では、適用業種拡大に伴う汎用インバータの製品ラインアップの充実化(41種類→46種類)によって、出力容量の異なる多数のモータを試験環境として準備する作業に多くの時間を要していた。また、インバータが持つ機能の増加に伴い、インバータ設定など試験条件の手動変更やインバータ出力など試験結果の目視確認といった試験実施作業が増加しており、試験環境準備工数と試験実施工数を合わせた試験工数の抑制が課題であった。

本稿では、モータと負荷装置の特性を実時間で模擬するリアルタイムシミュレータを核とした自動試験環境による、試験環境の準備の容易化、試験条件の変更と試験結果データの合否判定の自動化の取組みについて述べ、開発上流で品質を確保するプロセスへ改善したことを述べる。

## 2. 課 題

### 2.1 試験環境準備工数の抑制

従来、インバータ制御ソフトウェアの機能評価試験では、評価試験装置の準備工数の抑制が課題であった。インバータには出力容量の異なる製品バリエーションが存在し、それぞれの出力容量に対して複数種類のモータを駆動することができる。このため、評価試験では数多くの組合せを確認する必要がある。また、様々な出力容量における試験に合わせて、インバータの主回路、インバータが駆動するモータ、及びモータに負荷を与える負荷装置を交換する必要がある。このため評価試験では、モータと負荷装置で構成する試験装置(図1)の準備に多くの手作業を必要とする。これらの要因から試験環境の段取りに多くの工数がかかっており、試験環境準備工数の抑制が課題であった。

### 2.2 試験実施工数の抑制

従来のインバータの機能評価試験では、インバータを操作し、結果を観測・測定する試験実施作業に多くの工数がかかっていた。試験中、試験作業者は、インバータの出力やデジタルオシロ波形表示を確認しながら、インバータの操作をしなければならず、長時間拘束された。また、試験の結果得られたデータを確認して、試験の合否判定を行う工数が多くかかっていた。この試験実施工数の抑制が課題であった。

## 3. 対 策

先に述べた2つの課題である試験環境準備工数の抑制と試験実施工数の抑制のための取組みを述べる。

### 3.1 仮想環境導入

ここでは、試験環境準備工数の抑制のための取組みについて述べる。試験環境の中には、インバータの出力容量に依存する部分(図1のインバータ内部の主回路基板、モータ、負荷装置)と依存しない部分(図1のインバータ内部の制御基板)が存在する。このため、インバータとモータと負荷装置をインバータの出力容量ごとに準備する必要がある。そこで、インバータの出力容量によらず共通な制御ソフトウェアを搭載した制御基板は実機を使用し、異なるインバータ主回路・モータ・負荷装置をHILSと呼ばれるシミュレーション技術を用いてモデル化した。このシミュレーションモデルを切り換えることで、インバータの出力容量を切り換えられる仮想的な試験環境を実現した。これによって、試験装置準備工数を抑制した。

#### 3.1.1 HILS技術

HILSとは、制御対象をリアルタイムシミュレータ上にモデル化し、制御ソフトウェアによって動作させることで試験対象の制御ソフトウェアを検査する技術である(図2)<sup>(1)</sup>。HILSは、実インバータや実モータなどの実機を準備する必要がなく駆動制御系開発には非常に有用な手法である。

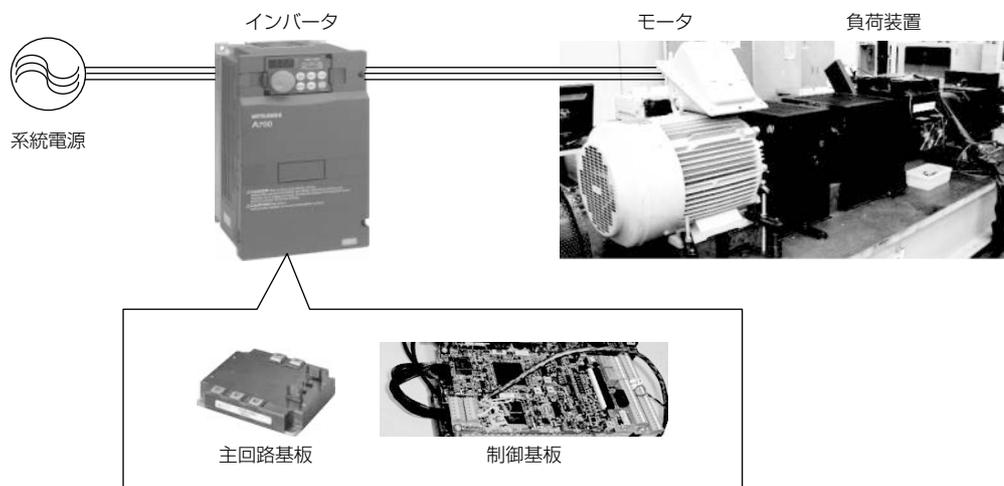


図1. 従来の試験装置の構成

### 3.1.2 HILS用検証モデル

この施策では、インバータ主回路・モータ・負荷装置をモデル化してリアルタイムシミュレータ上に実装し、インバータ制御基板と接続した(図3)<sup>(2)</sup>。インバータ主回路をシミュレーションモデルに組み込むことで、インバータの出力容量によらず共通なインバータ制御基板と出力容量によって異なるインバータ主回路を切り離すことを可能とした。これによって、出力容量の異なるインバータの試験をインバータ主回路モデルの切り換えによって可能とし、段取りを容易にした。

### 3.2 試験の自動化

ここでは、試験実施工数の抑制のための取組みについて述べる。インバータの機能評価試験では、試験実施者がインバータの操作、試験結果の確認のために多くの工数がかかっていた。そこで、3.1.2項のHILS用検証モデルの動作環境であるリアルタイムシミュレータを核とした自動試

験環境を構築した。自動試験環境の入力として、インバータの設定、負荷条件、試験の出力結果の期待値を記載した試験ケースを複数用意する。自動試験環境は、試験ケースを1ケースずつ読み込んで、ホストパソコンにプログラムした手順に従って、インバータ制御基板を制御し、実行の結果得られたデータを期待値と比較することを連続して実行する。これによって、従来人手で実施していた試験作業を自動化でき、試験実施工数を抑制した。

#### 3.2.1 自動試験環境の構成

自動試験環境は、インバータ制御基板、HILS装置、及びホストパソコンで構成する(図4)。

##### (1) インバータ制御基板

インバータ制御基板は、インバータに内蔵されたもので、試験対象であるインバータ制御ソフトウェアを搭載している。インバータ制御基板から、HILS装置にPWM(Pulse Width Modulation)信号を出力してインバータ主回路モデルを通じて、モデル化した仮想モータを回転させる。

##### (2) HILS装置

HILS装置は、3.1.2項のシミュレーションモデルの動作環境であるリアルタイムシミュレータである。

##### (3) ホストパソコン

ホストパソコンには、自動試験のプログラムを格納している。また、ホストパソコンは、試験ケースの入力、試験の期待値を保持する。

ホストパソコンからインバータ制御基板には、試験ケースに入力したインバータの設定値の設定や、運転指令を設定することができる。また、ホストパソコンはインバータ制御基板からインバータが出力している周波数、電流値などの制御数値やインバータのエラー状態を受信して、その結果に基づいてインバータ制御基板を制御する。

ホストパソコンからリアルタイムシミュレータには、試験ケースに記述したインバータ主回路モデルの容量、モータモデルの容量を設定することができる。さらに、モータ

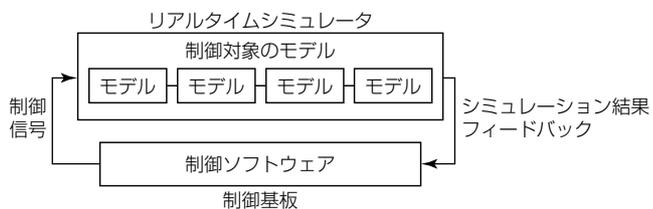


図2. HILSの構成

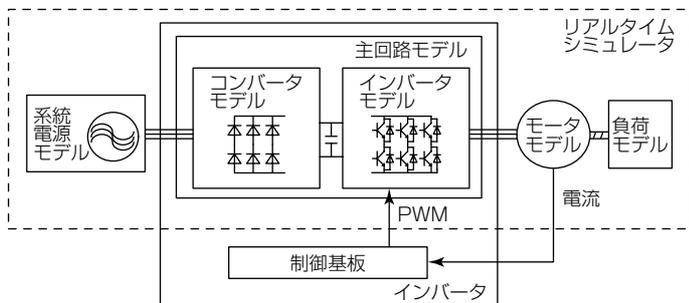


図3. HILS用検証モデル

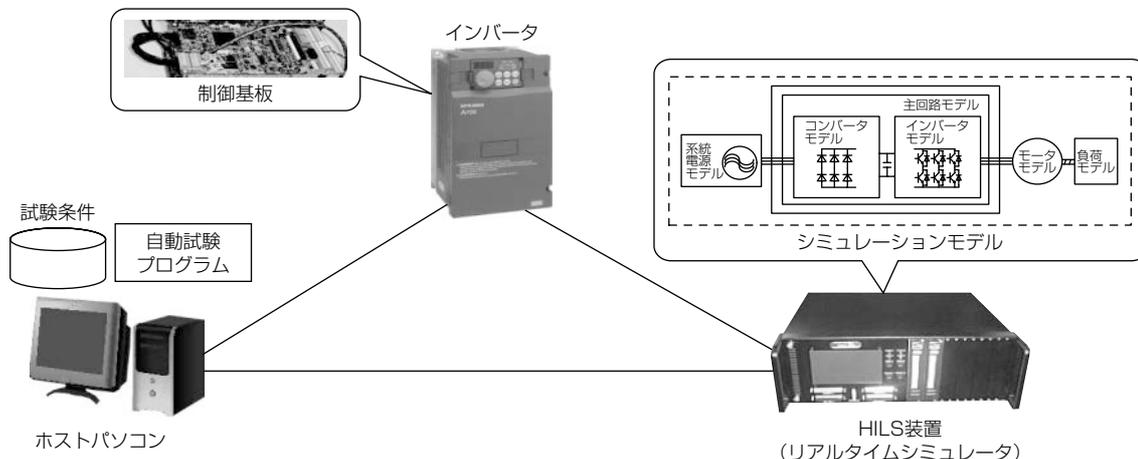


図4. 自動試験環境の構成

モデルの回転中に負荷を与えることができる。ホストパソコンは、リアルタイムシミュレータからモータモデルの回転数を受信して、その結果に基づいてインバータ制御基板を制御する。

3.2.2 自動試験環境の処理フロー

自動試験環境の処理フロー例を図5に示す。自動試験環境を起動すると次の(1)~(6)を自動的に実行する。

- (1) インバータ主回路やモータの容量，電源電圧などの試験環境，インバータの動作を決定するインバータ制御ソフトウェアのパラメータ，及び試験結果の期待値を記載した試験設定ファイルを読み込む。
- (2) (1)で読み込んだ試験設定ファイルに記述している出力容量のモデルをホストパソコンからリアルタイムシミュレータに設定する。また，電源電圧などの試験環境をリアルタイムシミュレータ上のモデルに設定する。
- (3) (1)で読み込んだインバータ制御ソフトウェアのパラメータをインバータに設定する。
- (4) 機能試験の種類に応じて，あらかじめプログラムしてあるインバータの操作手順や負荷モデルの操作手順に従い，ホストパソコンからインバータ制御基板に運転指令を送信する。機能試験の種類ごとの操作手順は，加減速試験と速度-トルク特性試験について述べる。

(a) 加減速試験

- ①インバータに運転指令を送る。
- ②(3)で設定してある運転周波数に加速するまでインバータの状態をモニタし，運転周波数に達するまでにかかる時間を測定する。

- ③インバータに停止指令を送る。
- ④インバータが停止するまでインバータの状態をモニタし，インバータが停止するまでにかかる時間を測定し，1試験ケースを終了する。

(b) 速度-トルク特性試験

- ①インバータに運転指令を送る。
- ②(3)で設定してある運転周波数に加速するまでインバータの状態をモニタする。
- ③定速となったところで，インバータが負荷に耐えられなくなりストール状態(過負荷などによってインバータがモータを正常に回転させることができなくなる状態)となるまで，徐々に負荷モデルの負荷を上げていく。
- ④ストール状態となったところで，負荷モデルの負荷をリセットし，インバータの制御基板のストール状態を解除して1試験ケースを終了する。

- (5) 1試験ケース終了後，リアルタイムシミュレータ上に記録してあるモータ速度や電流値といったデータをホストパソコンに出力する。

- (6) 試験の測定値や(5)で得たデータのグラフを出力して試験結果のレポートを作成する。図6は，速度-トルク特性試験の結果として得られた，速度と負荷トルクを二次元グラフに出力した試験結果レポートの例である。開発者がこのレポートを参照し，速度-トルクの特性の合否判定を行う。

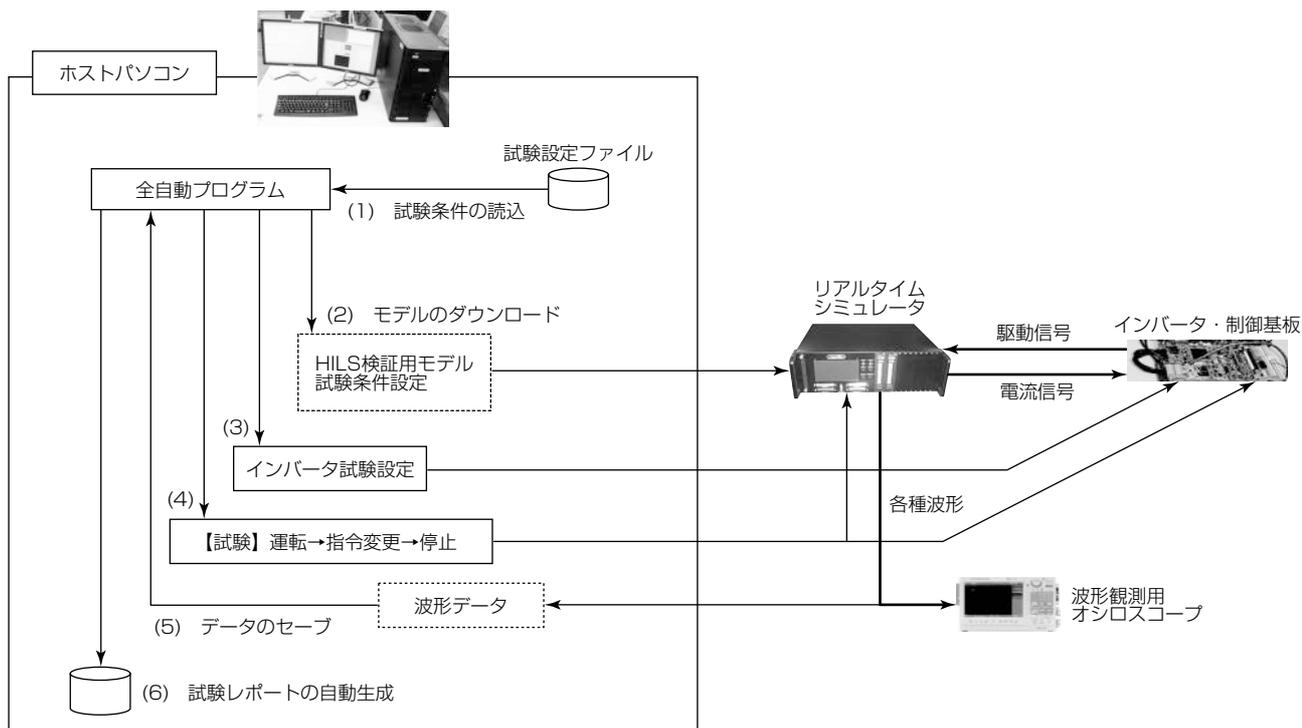


図5. 自動試験環境の処理フロー例

機台	FR-A820	容量	30.0K	ソフトウェア	8380*_v0.37
使用モータ	SF-JR-30K	定格回転速度	1,800r/min	制御方法	センサレスベクトル
キャリア周波数	2.0kHz	配線長	5m	オフラインオートチューニング	あり
ずり補正	なし	モータ定格トルク	159.17N・m	電源電圧	工場電源

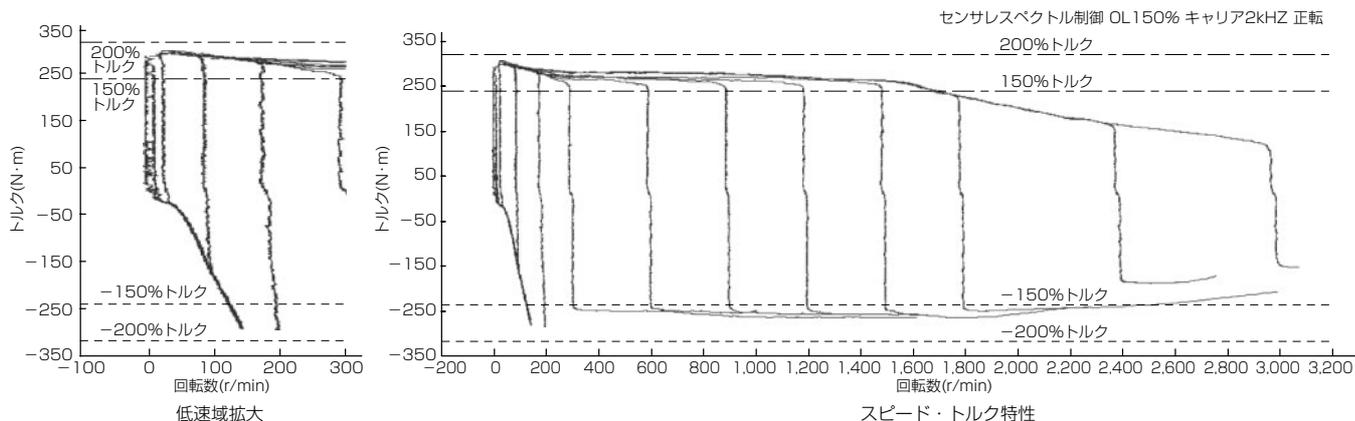


図6. 速度-トルクの二次元グラフ

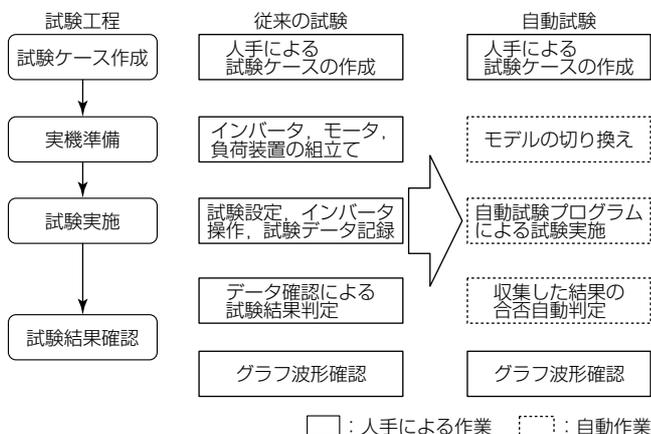


図7. 従来の試験との作業の比較

#### 4. 効果

##### 4.1 自動化による工数抑制

モータやインバータの切り換えをシミュレーションモデルの切り換えによって行えるようになったため、試験の準備工数を抑制可能となった。

また、従来人手で実施していた試験の設定・インバータ操作・試験の結果判定を自動化でき、グラフの取得を自動化した(図7)。その結果、試験実施工数を抑制可能となった。

##### 4.2 フロントローディング化による開発上流における品質確保

従来は、設計部門内で特殊なモータや超大容量モータの試験環境準備が困難であった。このため、設計部門内で網羅的に試験を実施することが困難であり、結果として後工程からの手戻りが発生していた。

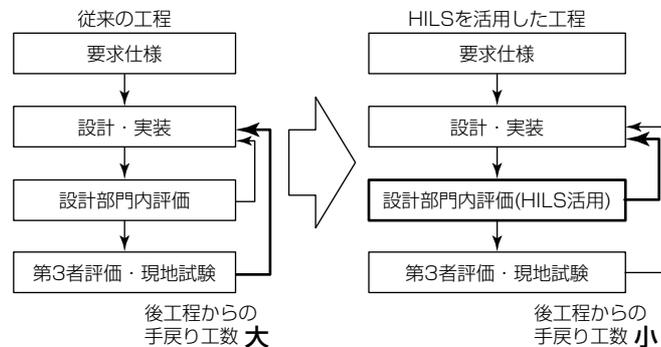


図8. 自動試験環境導入前後のプロセス

HILS装置を活用した試験では、特殊なモータや超大容量モータを仮想的に構築でき、設計部門内における評価が容易となったため、上流工程における品質確保が可能となった(図8)。

#### 5. むすび

リアルタイムシミュレータを活用したインバータにおける自動試験環境の取組みについて述べた。この取組みにおける技術は、インバータに限らず他の駆動制御機器にも適用可能である。今後は、他の駆動制御機器に適用していくことによって、ユーザーニーズにマッチした製品を迅速に市場提供していく。

#### 参考文献

- (1) Harakawa, M., et al.: Real-Time Simulation of a Complete PMSM Drive at 10 μs Time Step, IPEC Niigata 2005, S27 (2005)
- (2) 寺田 啓, ほか: 駆動制御機器の連成シミュレーション, 三菱電機技報, 79, No.11, 715~718 (2005)