航空機全機試験の高信頼性・低コスト化を実現するデジタルツイン技術

Digital Twin Technology to Achieve High Reliability and Low Cost in Full Scale Test

森下 邦宏[*1] Kunihiro Morishita
荒巻 秀俊[*2] Hidetoshi Aramaki
利根川 大[*3] Masaru Tonegawa
田原 善行[*3] Yoshiyuki Tahara
村田 直史[*4] Tadashi Murata
望月 慶佑[*5] Keisuke Mochizuki

航空機の新規開発では，最終的に全機構造に対する静強度試験，疲労試験を実施して，強度性能を検証・保証する必要がある。疲労試験では百数十本の負荷装置を用い，複数のフライトパターンに対応する荷重負荷を数千～数万回繰り返し実施するが，供試体異常のみでなく，試験装置の異常により試験が停止した場合，開発リードタイムの遅延が発生する。本報では，試験装置の異常予兆を検知し，遅延を抑制するシステムとして，負荷装置にデジタルツイン技術を適用した事例を紹介する。これらのシステム適用により，より信頼性を高めた試験が可能となる。

1. はじめに

航空機開発においては，図1に示すビルディングブロックの概念に基づき，材料試験，要素試験，部分構造試験，全機試験を実施して，開発製品の強度性能を検証，保証する手順にて開発が遂行される。最後の試験となる全機試験では，制限荷重（Limit Load）の 1.5 倍の終局荷重（Ultimate Load）を負荷して健全性を確認する静強度試験，運航時を想定した複数のフライトパターンに対応する荷重負荷を数千～数万回繰り返し実施して疲労強度を確認する疲労試験が実施される。疲労試験は，長期に及ぶため，試験途中での供試体異常，装置異常による中断は，開発リードタイムに大きな影響を与えることになる。そこで，当社は，試験装置の内，荷重を負荷する百数十本に及ぶ負荷装置に対して，物理モデルを用いるデジタルツイン技術を適用することによって，負荷装置の内部異常予兆及びその箇所を事前に検知するシステムを構築し，適用を試みた。本報では，この適用結果を紹介するとともに，これ以外にも，供試体に取り付けられる荷重を負荷するための治具の異常予兆を検知するための無線計測システムを活用したモニタリングシステムについても紹介する。

*1 総合研究所 強度・構造研究部 室長 工博
*2 総合研究所 強度・構造研究部 主席研究員
*3 総合研究所 強度・構造研究部
*4 ICT ソリューション本部 CIS 部 グループ長
*5 ICT ソリューション本部 CIS 部

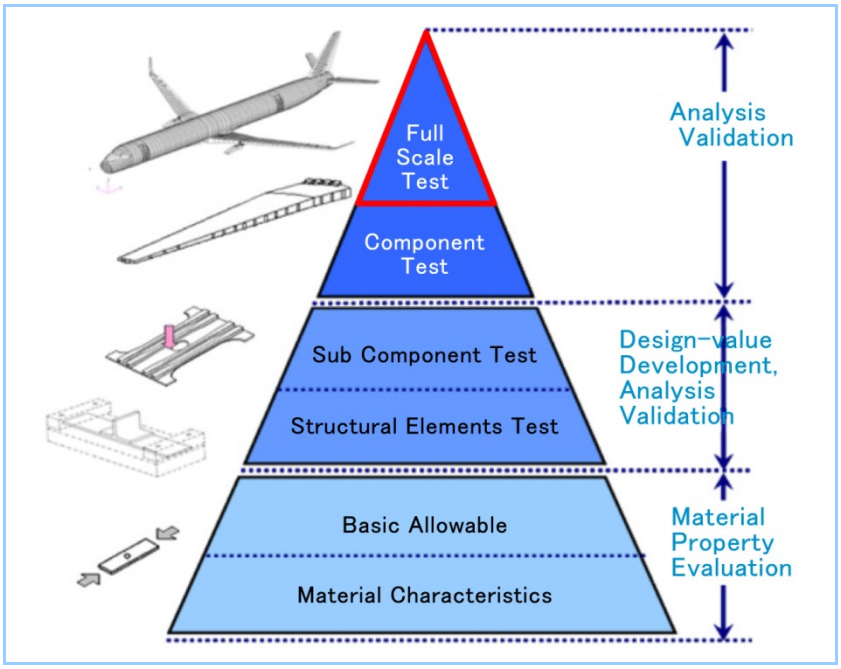

図1　航空機開発におけるビルディングブロック
最終の検証試験として全機試験が実施されることを示す。

2. デジタルツイン技術を活用した異常予兆検知システム

2.1　デジタルツインシステム概要

本報で適用性検討を行ったデジタルツインシステムは，図2に示すように全機試験で用いる百数十本の荷重負荷装置（アクチュエータ）をそれぞれ対象としたものである。個々のアクチュエータの数学モデル（非線形運動方程式）を用い，実物と同じ入力指令に対する実際の計測値（荷重，変位センサの計測データ）と，数学モデルを用いた推定値（荷重，変位）の誤差が小さくなるように，アクチュエータ数学モデルの内部状態を，逐次推定・更新していくシステムとなっている。内部状態としては，油圧アクチュエータのスプール弁の異常に相関が強い流量係数と，シリンダの焼き付きやシール劣化に相関が強い摩擦力を数学モデル内で推定している。これにより，経年変化等の原因で，徐々に変化するこれらの内部状態を表す数値を記録しておき，これが事前に設定した閾値の超過を監視することで，異常予兆を検知することが可能となる。なお，システム内の状態推定には，非線形関数を線形近似せず，非線形問題をそのまま解くことができること，オンライン計算に適していることなどから Unscented Kalman Filter を適用した。

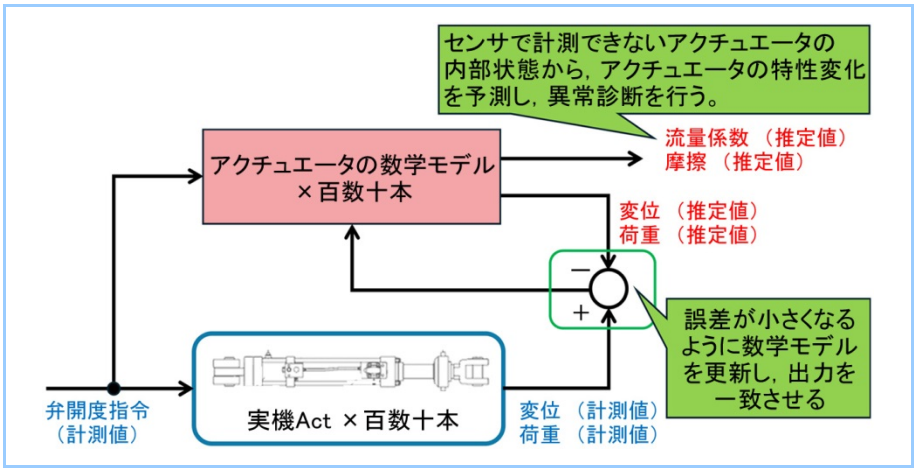

図2　デジタルツインシステムの概要
試験装置であるアクチュエータを対象にしたデジタルツインシステム内部でのデータ処理の流れを示す。

2.2 異常予兆検知システム構成

異常予兆検知システムの構成は図3に示す通りである。試験装置，制御装置，データ収集装置，サーバ，試験制御用 PC などで構成されている全機試験用のネットワーク内に，デジタルツインシステムを搭載した監視用の PC を追設し，試験終了後のデータを逐次，転送，処理することによって，各種数値の異常が発生していないか監視する構成としている。

監視モニタで表示可能な情報としては，図4に示すように機体に設置されている各アクチュエータの異常検知状況（通常：黄色，注意：桃色，警告：赤，等），負荷している荷重情報，シリンダストローク量，アクチュエータの数学モデルの内部状態の推定値の推移などを表示可能であり，視覚的に異常発生を検知しやすい構成としている。とりわけ，内部状態の推定値については，過去の試験データも取り込むことにより，経時的な変化の状況を確認することができるため，異常発生の傾向を把握することが可能となる。

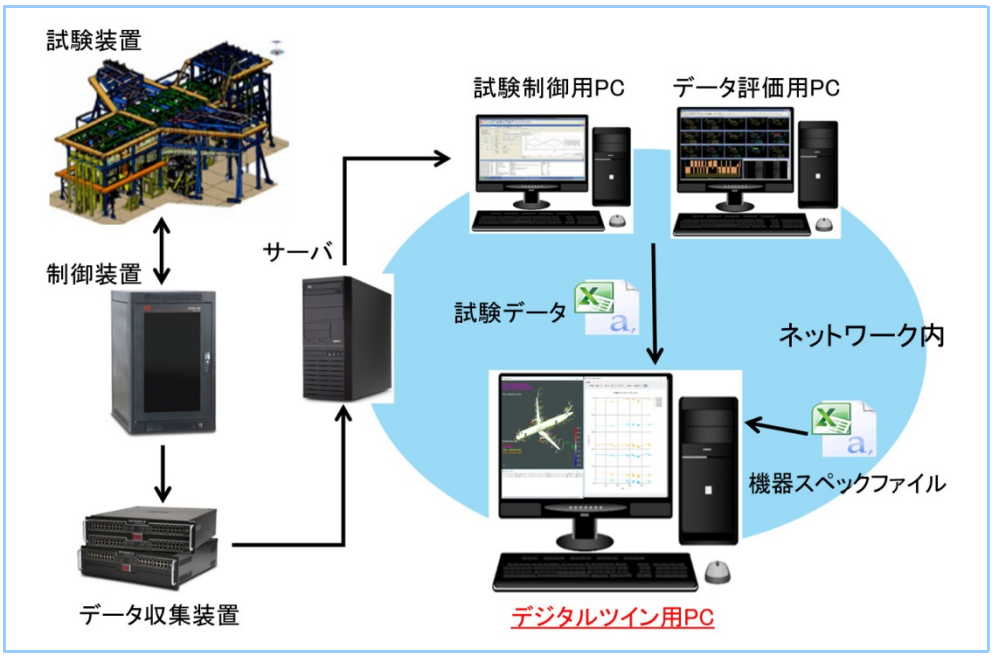

図3 異常予兆検知システム構成
全機試験の異常予兆検知システムにおけるデジタルツインシステムの位置づけおよびデータ処理の流れを示す。

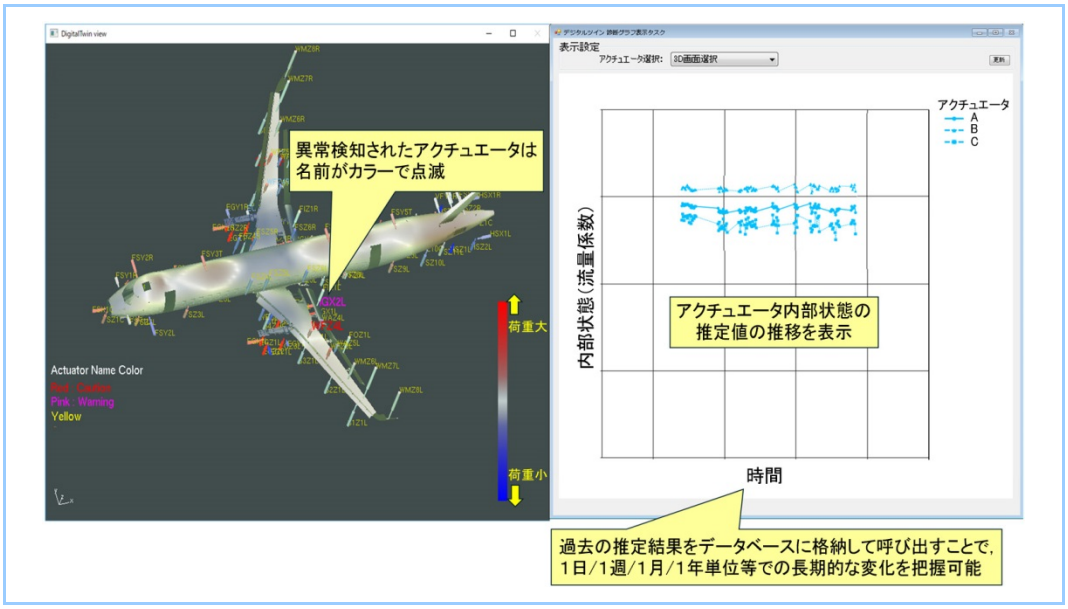

図4 デジタルツインシステムの画面表示例
実際のデジタルツインシステムでの異常があるアクチュエータの表示状況，内部状態のトレンドの表示例を示す。

2.3 異常検知状況の例

デジタルツインシステム導入後，本来のアクチュエータの内部状態の変化に伴う異常検知事象は発生しなかったが，図5に示すように，センサの一時的な故障（コネクタの緩み）に関しても本システムでは異常として判定されており，本デジタルツインシステムでは，経年的な変化でなくとも早期に異常を捉えられることが実証できた。

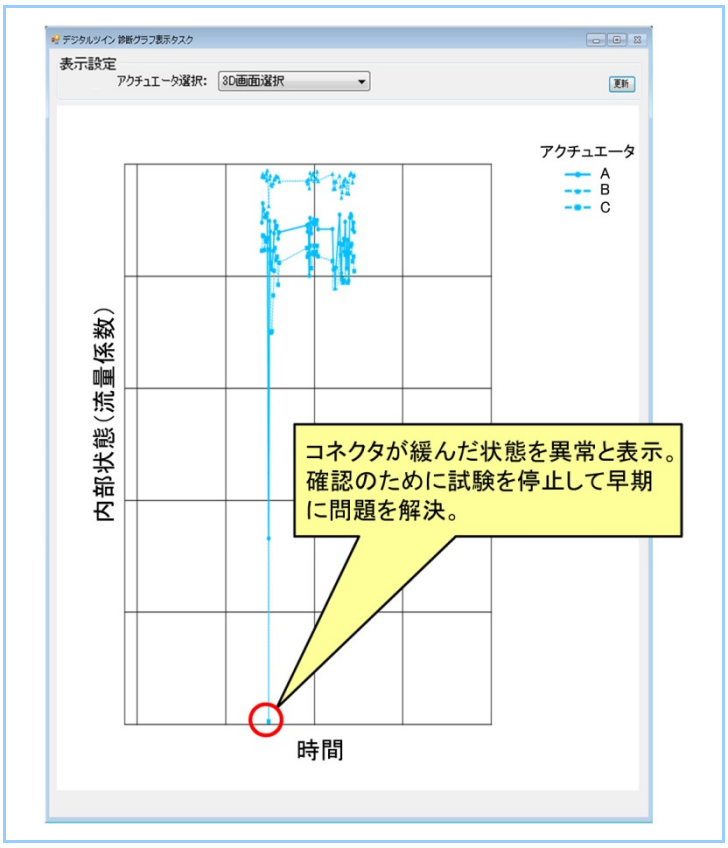

図5 異常検知状況の例
内部状態変化の異常でなく，コネクタ緩みによる異常等に対してもデジタルツインシステムが異常を検知した事例を示す。

3. 無線計測システムを活用したモニタリングシステム

3.1 無線計測システム概要

前述のデジタルツインシステムではアクチュエータの内部状態推定に基づく異常予兆検知を主たる目的とした。全機試験において荷重を負荷する場合には，図6に示すように，供試体に対して荷重を伝達させるための荷重負荷治具を取付け，それにアクチュエータを接合して負荷を行う。また，供試体に対しては直接ボルト結合できないため，ゴムパッドを接着接合し，取付け板，取付けボルトを介して荷重負荷治具と結合する方式となる。ここで説明するモニタリングシステムは，長期間の連続試験時に，接着部の劣化，ボルトの緩みなどの事象が発生する可能性があり，この異常予兆（変形量の変化）を検知することを目的としたシステムである。

荷重負荷治具全体の変形量はアクチュエータのストロークでモニタリングできるが，上記，接着部，ボルト結合部などの微小な変化に対する感度は鈍いため，ここでは図7に示すクリップゲージを活用してコンマ数ミリの微小な変化を検知できる構成とした。また，これはモニタリングが必要と考える箇所に適宜設置するため，図8に示す無線ロガーを用いた無線計測システムによりデータ取得，モニタリングを実施するシステムとして構築した。これにより，設置するたびに発生する，センサと計測装置間のケーブル接続作業を省略することが可能となり，早期にモニタリングを開始できる。

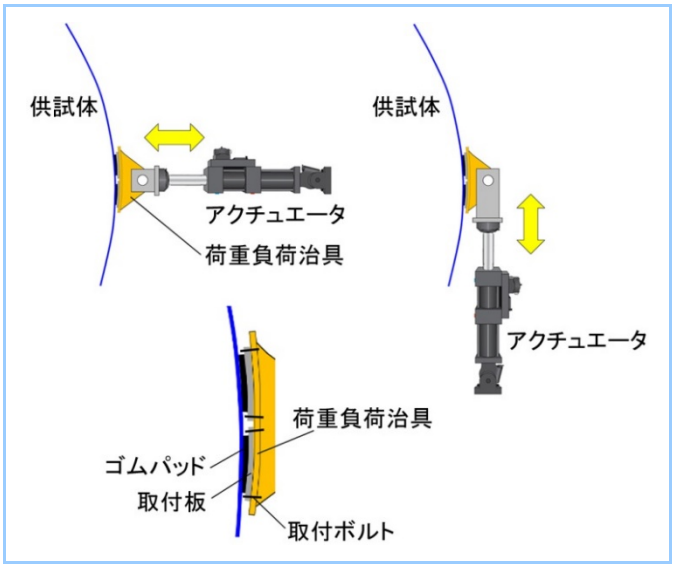

図6　供試体への荷重負荷構造概要
アクチュエータから荷重負荷治具，ゴムパッドなどを介して供試体に荷重伝達される仕組みを示す。

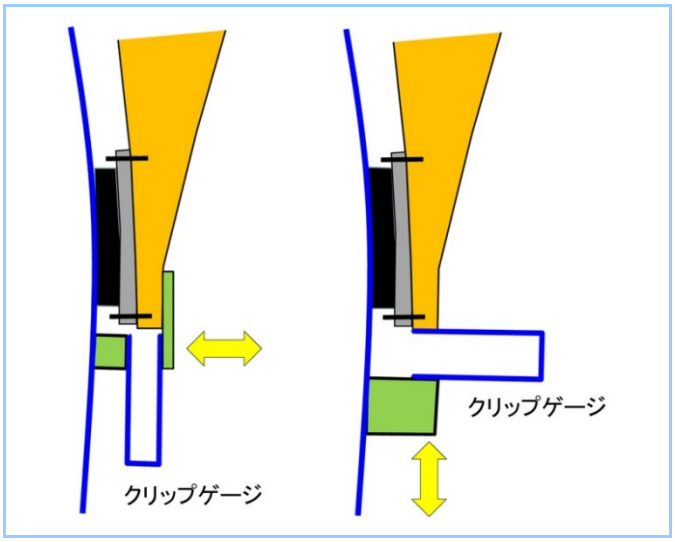

図7　クリップゲージの設置方法
各方向に対する微小変位を計測するためのクリップゲージの設置方法の例を示す。

図8　無線ロガーを用いたモニタリングシステムの構成
無線ロガー，中継局，受信機により構成されるモニタリングシステムのイメージを示す。

3.2　モニタリングシステムによる異常予兆検知方法

全機試験においては，複数のフライトパターンに対応する荷重負荷を数千～数万回繰り返し実施するが，頻度が高いフライトパターンの試験を対象にモニタリングを実施するものとした。ここでは，図9に示す変形量の変化率のモニタリングにより異常予兆を検知する方法を採用した。まず，試験開始初期の健全な状態に対して試験中の一連の変形量の変化から最大値，最小値の差分

(振幅)を算定し，これを基準値として設定する。その後，各N回目の試験時の振幅を算定し，基準値からの変化率を逐次，評価することで異常予兆検知を行う。この変化率に対して，異常と判断される閾値を設定しておくことにより，自動的にアラームを鳴らして異常予兆の検知が可能となる。

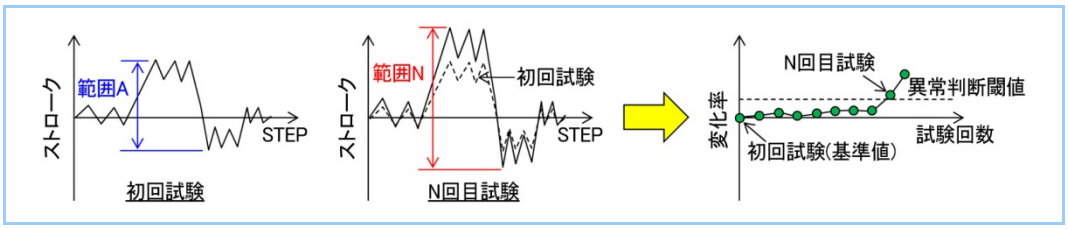

図9　変位の変動による異常予兆検知方法の概念図
繰返し実施される同一負荷パターンの試験結果を用いた変位振幅変化による異常予兆検知の考え方を示す。

3.3　異常検知状況の例

変形量のモニタリングシステム導入後，アクチュエータストローク，クリップゲージの変形量の変化に伴う異常検知事象は発生しなかった。参考として，導入前に，供試体と荷重負荷治具間の接着部，ボルト接合部に緩みを生じさせた際の異常予兆検知例を図 10 に示すが，本モニタリングシステムを用いることで，徐々に増加する接合部の緩みによって，変化率が微小に増加し，設定した異常判断の閾値を超えた試験結果に対して異常と判断して試験を停止させることが可能であることが実証できた。

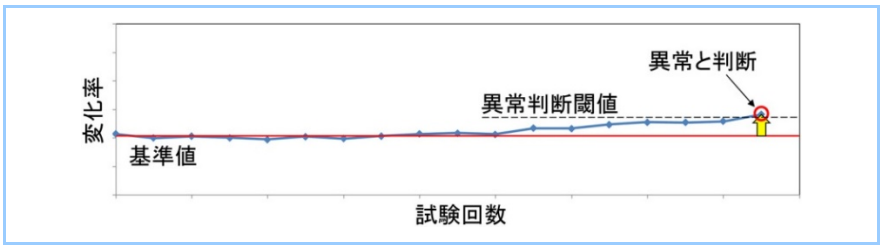

図 10　モニタリングシステムによる異常予兆検知事例
システム導入前に実施した，異常を与えた場合の検知精度の確認事例を示す。

4. 工程短縮効果試算

前述の異常予兆検知システムを実際の全機試験に導入後，大きな異常予兆は検知されなかったが，過去の事例を参照し，試験停止期間を推定した場合，本試験で対象とした試験期間内では，本システム導入により事前に異常予兆を検知できた場合，工程として 10%程度の短縮効果があることがわかった(図 11)。また，更に長期間の試験を継続した場合には，試験装置での異常発生確率も増加することが想定されるため，更に大きな効果を発揮することが期待できる。

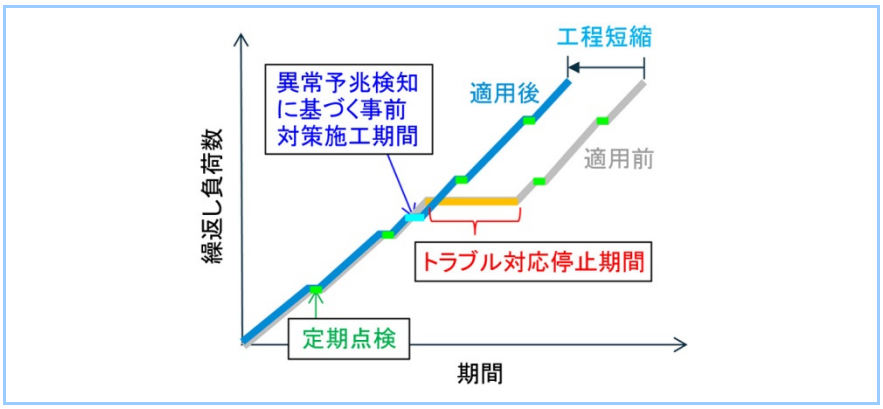

図 11　異常予兆検知システム適用による工程短縮効果
過去の事例を参考とした場合の本システム導入時の工程短縮効果のイメージを示す。本試験で対象とした試験期間内では 10%程度の工程短縮効果があることが確認できた。

5. まとめ

本報では，航空機開発時に実施される全機疲労試験を対象として，長期間継続される連続試験における試験装置に対して構築した異常予兆検知システム概要を紹介するとともに，これらのシステムの活用により，異常予兆検知が可能であることを実証した事例を紹介した。システムとしては，アクチュエータの内部状態の異常予兆を検知するデジタルツインシステム，荷重負荷治具の微小な変形量の変化の異常を捉える無線計測によるモニタリングシステムの2つを紹介した。デジタルツインシステムはアクチュエータ情報，荷重，ストロークの計測データを用いることで適用可能であり，無線計測によるモニタリングシステムはセンサの設置スペースがあれば，計測用の配線作業を必要とせず適用可能である。

なお，本試験においては，紹介したシステム以外にも，長期間の連続運転に対する予防措置として，油圧源情報のモニタリング，アクチュエータ油圧弁のモニタリングなど多岐にわたるモニタリングを適用し，安定した試験遂行に向けた取組みを行った。当社は，今後も，同様の試験へのシステム導入を推進し，高信頼性，低コスト化を更に進めるとともに，開発リードタイムの短縮に貢献できるよう，技術開発を継続していく所存である。