



図 1:従来の航空母艦と異なり、マキン・アイランドのような全通甲板型強襲揚陸艦にはカタパルト（航空機射出機）が搭載されていません。この揚陸艦は、ヘリコプター、垂直離着陸機や上陸用舟艇の発着基地の役割を果たします。

マキン・アイランドは、推進力としてガスタービンエンジンとモーターを併用した、米軍初の全通甲板型強襲揚陸艦です。この新しい推進システムにより、これまでこの艦級で使用されていた蒸気タービンエンジンを使用した推進システムと比較して、性能を損なうことなく燃費とメンテナンス費用が大幅に削減されます。艦艇建造メーカーの Northrop Grumman 社は、dSPACE システムを同艦に搭載してガスタービン推進システムの制御ソフトウェアのテストを行いました。

ガスタービンによる燃料節減

General Electric 社が 1990 年代後半に 35,000 馬力の高出力が得られる LM2500+ ガスタービンエンジンを発表したとき、米国海軍が新しい艦船にこの推進プラントを採用することは必然的な流れでした。なぜなら、ガスタービンには、以前から使用されていた蒸気タービンに勝る明確な利点があったからです。すなわち、ガスタービンの性能は均質で、

小型軽量でメンテナンスが簡単なだけでなく、起動が早く、操作人員も少なく済みます。このように、2009 年に就役した最新式の全通甲板型強襲揚陸艦であるマキン・アイランド（この名称は太平洋のマキン環礁に由来します）は、2 基の LM2500+ ガスタービンによって推進力を得ています。速度が 12 ノット（約 22 km/h）を下回ると、推進力が 2 基の 5,000 馬力のモーターに切り替わります。



マキン・アイランドは 2009 年に就役し、ガスタービンによって推進力を得る米軍初の全通甲板型強襲揚陸艦です。

ガスタービン艦の推進モデルのシミュレーション

Turbine on Board



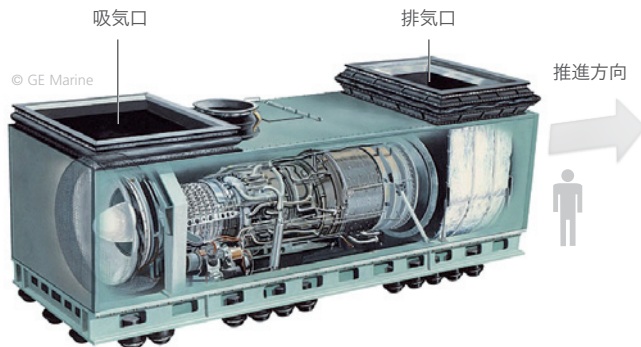


図2：マキン・アイランドには、General Electric 社製 LM2500+ 型ガスタービンが2基（合計70,000軸馬力）搭載されています。Woodward Governor 社の MicroNet™ ECU をテストするために、dSPACE システムが使用されました。

これにより、ガスタービンの稼動時間の最大25%、毎年約150万Lの燃料が削減されます。マキン・アイランドは、LM2500+ タービンを採用した米軍初の艦艇であるため、関連する制御ソフトウェアを全面的に修正して、テストを行う必要がありました。この作業では、電子制御ユニット (ECU) とガスタービン間のすべての信号トラフィックを含めた艦のシミュレーションが要求されました。このため、

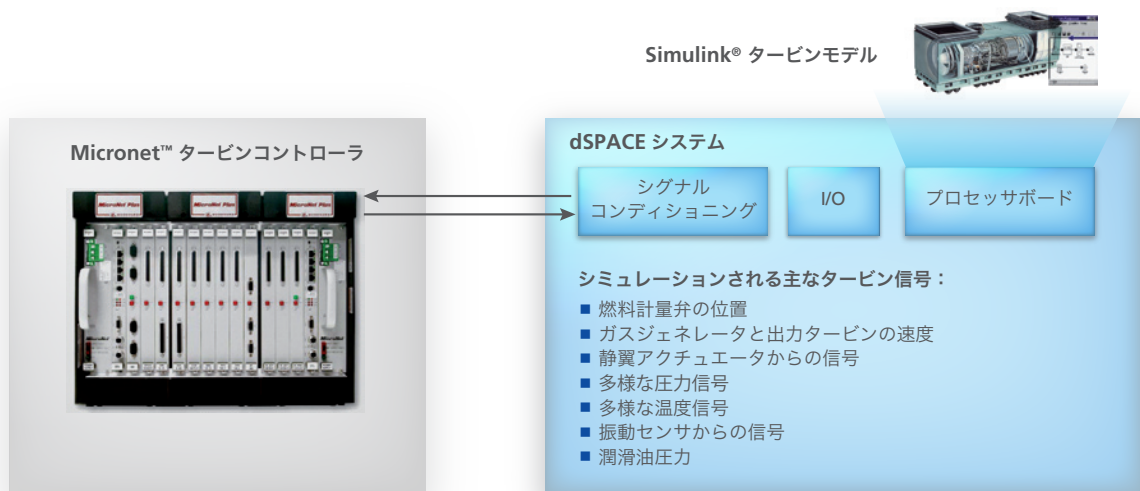
強力かつ極めて柔軟なシミュレーションベースのリアルタイムテストシステムが必要になりました。

信号トラフィックのシミュレーション

Northrop Grumman 社のエンジニア達は、タービンを実際に稼動させることなく、ECU のタービン危急停止および警報機能をテストするという相矛盾する課題に取り組みました。これが、米国海軍との

契約条件の一つだったからです。この ECU は他の艦級の ECU とまったく異なっているため、エンジンの保護機能を作動させる前に、通常のエンジン起動シーケンスを実際に監視する必要がありました。これを行う唯一の方法は、タービンの信号をシミュレーションして、タービンが実際に回転していると ECU に「思い込ませる」ことでした。タービン起動のシミュレーションは、このテストシステムにとって大きな課題となりました。なぜなら、起動シーケンスの間、ECU は、さまざまな時点で特定の値と変化率を持つ多数の信号（温度、圧力、速度など）がタービンから送信されると予想しているからです。これらのリターン信号が、予想される基準値に適合しない場合、ECU は直ちに起動シーケンスを中止します。「残念ながら、手作業による設定では ECU に稼動状態であると思い込ませることはできません」と Northrop Grumman 社のエンジニア James Turso 氏は説明しています。「そのため、私たちは ECU のタービンの危急停止と警報機能のテストを開始する前に、複雑な起動シーケンスをシミュレーションする必要がありました」

図3：MicroNet™ ECU をテストするために、dSPACE システムはタービンと ECU 間のすべての信号トラフィックをシミュレーションします。このタービンモデルは、MATLAB®/Simulink® で開発されました。



テストシステムの選択

ガスタービンのシミュレーションに対して、Northrop Grumman 社のエンジニア達は、下記の一連のすべての要件を満たす HIL (Hardware-in-the-Loop) シミュレータを仕様として挙げました。

- 5 ms 以下のモデルスループットタイムを持つリアルタイム機能 (タービンモデルは MATLAB®/Simulink® で開発)
- シグナルコンディショニング機能 (Woodward Governor 社の MicroNet™ ECU と信号を交換)
- 全シーケンスをソフトウェアで制御可能
- テスト用ハードウェアから艦艇の電気システムへの接続が簡単で柔軟性が高いこと。たとえば、ECU、ガスタービンや配線の改造が不要なこと。
- 業界で実績のあるフェイルセーフシステムを採用

上記の要件を確実に満たすために、Northrop Grumman 社は、dSPACE ツールチェーンのモジュール型ハードウェアおよびソフトウェアコンポーネントを採用することを決定しました。

dSPACE システムによるガスタービンのシミュレーション

ECU に対してガスタービンが本当に稼働しているように見せるために、dSPACE システムによって、広範囲の多様なガスタービンエンジンの信号 (圧力、温度、加速度、ガスジェネレータと出力タービンの速度、潤滑油圧力などの信号) をシミュレーションする必要がありました (図 3)。「しかし最大の課題は、LVDT の原理に基づいて作動する、燃料計量弁の位置フィードバック信号をシミュレーションすることでした」と James Turso 氏は述べています。LVDT (Linear Variable Differential Transformer: 差動変圧器) は、振幅が変動する高周波交流電圧信号を生成する誘導センサです。マキン・アイランドのガスタービンでは、信号の形状は燃料弁の流路開口面積に依存します。これは、起動シーケンス中、絶えず変化します (図 4)。「dSPACE HIL システムを使用すると、この複雑な信号のシミュレーションを完璧に

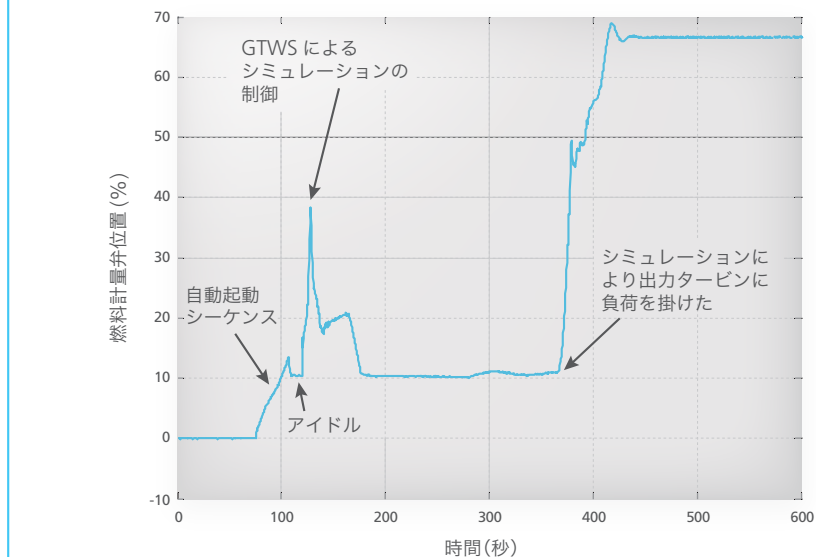


図 4: 推進システムの起動シーケンス中における燃料計量弁の挙動 (実際には、dSPACE システムからの位置フィードバック信号を ECU で処理)。これに対する LVDT のシミュレーションが、テストにおける最大の課題となりました。

「このプロジェクトは厳しい時間的制約があったにもかかわらず、dSPACE システムのおかげで、米国海軍のガスタービン ECU に対する厳しいテスト仕様を満たすことができました」

James A. Turso 氏, Northrop Grumman 社

行うことができます」と James Turso 氏は述べています。

すべてのテストが成功

Northrop Grumman 社のエンジニア達は、dSPACE HIL システムによるガスタービンシミュレーションを用いて、米国海軍から要求されたさまざまな ECU の安全および危急停止機能のテストを完了することができ、満足のいくテスト結果を得ることができました。dSPACE HIL システムは、これらのすべての作業でその高い柔軟性を証明しました。今後新しいエンジンの起動テストでも、再び使用されることになると考えられています。また船型はより複雑化してきており、このような HIL システムはコンポーネント変更時の制御系テストにおいても非常に有効であると考えられます。制御盤やスイッチ類を手作業で調整す

るだけでテストを実行できた時代は、まもなく終わりを告げようとしています。■

James A. Turso Ph.D., P.E

同氏は、米国 Northrop Grumman 社のフェローエンジニアです。

出典: 『Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air GT2010』
June 14-18, 2010, Glasgow, UK
GT2010-223050